

발간등록번호

11-1543000-000652-01

하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용

Development of Wastewater Reclamation Systems for
Indirect Agricultural Reuse and Their Field Applications

서울대학교

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용” 과제의 보고서로 제출합니다.

2014 년 10 월 22 일

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 박 승 우

연 구 원 : 강 문 성

연 구 원 : 정 한 석

연 구 원 : 박 지 훈

연 구 원 : 송 정 헌

연 구 원 : 전 상 민

연 구 원 : 황 순 호

연 구 원 : 김 지 혜

연 구 원 : 이 윤 희

협동연구기관명 : 한국농어촌공사

협동연구책임자 : 김 해 도

협동연구기관명 : (주)블루비에스

협동연구책임자 : 홍 민

요 약 문

I. 제 목

하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용

II. 연구개발의 목적 및 필요성

대체수자원 확보 측면에서 하수처리수의 농업용수재이용에 대한 관심이 증가하고 있으며, 도시화에 따른 하수처리장의 증가와 농촌지역의 마을하수처리장의 증가는 하수처리장 방류수의 무계획적 농업용수 간접재이용을 야기하고 있다. 하수처리장 방류수의 농업용수로의 이용은 작물생육을 포함한 농업환경과 보건위생상의 악영향을 초래할 수 있는 것으로 보고됨에 따라 안전한 하수처리수의 농업용수 간접재이용을 위한 적절한 대책이 마련되어야 한다.

본 연구는 미처리하수 및 하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 환경영향을 조사 및 분석하고, 하수처리장 방류수를 농업용수로 안전하게 간접재이용하기 위한 저비용, 고효율 재처리시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에서의 주요한 연구개발 내용과 범위는 다음과 같다.

하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 관리방안을 마련하기 위하여 1) 하수처리수의 농업용수재이용 유형을 구분하고, 수질기준(안)을 정립하며, 2) 간접하수재이용에 따른 작물생육 및 환경영향 모니터링 및 대책을 제시하도록 한다. 또한, 안전하고 경제적인 하수재이용을 위하여, 3) 하수처리수의 농업용수 간접재이용 적정 수처리 공정을 개발하고, 제안된 수처리 공정을 바탕으로 4) 유형별 간접재이용시스템의 개발 및 현장적용을 통한 실용화 방안을 마련하도록 한다.

IV. 연구개발결과

1. 하수처리수의 농업용수재이용 유형구분

하수처리수의 농업용수재이용 유형을 하수처리장 방류수의 희석 여부와 정부차원의 계획 여부, 그리고 하수처리수준에 따라 7가지로 구분하고, 각 유형별 사례 및 특징을 고찰하였다. 제안된 하수재이용 유형은 안전하고 효과적인 하수재이용 정책을 실현하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 간접하수재이용수의 수질기준(시안) 제안

국내·외 하수처리수의 농업용수재이용 수질 규범, 지침, 그리고 기준을 고찰하고, 본 연구의 모니터링 및 모델링 결과를 바탕으로 우리나라 현실을 반영한 간접재이용수의 수질기준(시안)을 제안하였다. 수질기준(시안)은 비식용작물용수, 논 용수, 채소용수 등 3가지 농업용수 재이용 목적별 총대장균군수, 탁도, 생물화학적 산소요구량, 수소이온농도, 그리고 전기전도도 등의 수질항목에 대해 제안하였다.

3. 간접하수재이용에 따른 수질 및 토양환경 조사 분석

하수처리수의 농업용수 간접재이용과 미처리하수의 농경지 유입에 따른 수질 및 토양환경 영향을 파악하기 위하여 대비구인 용인 청정지구와 처리구인 오산 재이용지구, 병점 재이용지구, 그리고 미처리지구 (호련지구, 수화지구, 장전지구)를 선정하여 용인 청정지구의 수원이 되는 이동저수지와 병점, 오산 간접재이용지구의 수원이 되는 하수처리장 방류수, 황구지천 및 오산천 등 하천수 수질을 분석하였고, 각 지구별 시험포장의 논 담수와 유입수의 수질, 표층 및 심층별 토양 성분 등의 모니터링 결과를 비교 분석하였다.

4. 간접하수재이용에 따른 작물생육 및 논벼 성분 조사 분석

구축된 모니터링 시스템을 통해 미처리하수 및 하수처리수의 간접재이용에 따른 논벼의 생육, 수확량 그리고 논벼 성분에서의 영향을 파악하기 위하여 용인 청정지구와 병점 및 오산 재이용지구, 미처리지구에 시험포장을 선정하여 논벼 생육 모니터링을 실시하고, 각 지구별 논벼의 생육시기에 따른 초장 및 분얼수의 변화를 분석하였다. 또한, 쌀의 외관적 특성인 완전미도정수율과 미질 특성인 아밀로스 및 단백질 함량, 백미의 중금속 함량을 분석하였으며, 수량구성요소에 대하여 각 처리구별 유의성 검정을 실시하였다.

5. 간접하수재이용에 따른 인체 위해성 평가

본 연구에서 구축한 모니터링 시스템을 통해 수집한 *E. coli* 농도 자료를 바탕으로 Beta-poisson dose-response 모형을 이용하여 지구별 유입수와 논 담수 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 유입수에 대해서는 미처리지구, 간접재이용지구, 그리고 청정지구 순의 위해도를 나타냈고, 담수에 대해서는 간접재이용지구, 미처리지구, 그리고 청정지구 순의 위해도를 보였으며, 특히 유입수의 경우에는 미처리지구와 간접재이용지구에서 병원성 미생물에 의한 감염 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

6. 간접하수재이용에 따른 관개기 순별 관개수질 모의시스템 구축

하수처리수의 간접재이용에 따른 오산천의 관개수질을 모의하기 위한 SWAT-QUALKO2 연계 시스템을 구축하고, 하수처리장 방류구 하류에 위치하는 관개용수 취수지점에서의 관개기 순별 수질을 분석하였다. 순별 관개수질 모의 결과, 대장균의 경우 관개 기간 동안 농업용수에 대한 하수처리수 재이용 수질기준을 초과하는 것으로 나타남에 따라 보건 및 환경에 대한 면밀한 검토가 필요하며, 하수처리수를 안전하게 농업용수로 재이용하기 위한 재처리시스템의 적용이 요구되는 것으로 분석되었다.

7. 간접하수재이용에 따른 적정 질소시비 방법 제안

DSSAT 모형을 이용하여 간접하수재이용에 따른 적정 질소시비 모의시스템을 구축하고, 질소시비량 및 시비시기에 따른 논벼 수확량을 모의하였다. 관개용수의 수질에 따라 표준 질소시비량 대비 20~40% 저감된 질소시비량으로 일반논의 논벼 수확량을 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 환경과 수확량을 모두 고려한 기비-분얼비-수비의 최적 분시율은 20-30-50%로 모의되었다.

8. 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 경제성 분석

시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구성하고, Vensim 소프트웨어를 통해 저장-유량지도 모델링을 실시하였다. 구축한 경제성 평가모형을 바탕으로 하수재이용 시 발생하는 농가편익과 사회적 편익을 산정하고, 그에 따른 한계비용을 도출하였다.

9. 간접재이용시스템 최적 물처리 공정기술 개발

농촌지역으로 방류되는 하수처리장의 수질과 농업기반시설 현황 분석을 통해 간접재이용시스템의 유입수질 성상과 오염정도를 예측하고, 수처리공정 요소기술 분석을 통해 ASF 물처리시스템 (IWR I), 멀티사이클론 물처리시스템 (IWR II), 융복합 이동식 물처리시스템 (IWR III) 등 맞춤형 최적 공정기술을 개발하였다.

10. 간접재이용시스템 TEST-BED 설계 및 운영

극미세버블과 멀티사이클론 기술을 적용한 안전하고 경제적인 간접재이용시스템을 경기도 화성시 병점동에 위치한 한국농어촌공사 관할 병점양수장에 설치하여 TEST-BED를 운영하였다. TEST-BED 운영결과 SS는 74%, BOD는 58%, 탁도는 56%, 총대장균은 99% 이상의 처리효율을 나타냈으며, 응집제와 필터교체가 없는 구조를 감안할 때 상당히 우수한 성능을 나타냈다. 유입수 농도와 목표수질에 따라 후처리장치로 MF, UF 등을 연결하여 사용 시 그 활용 폭은 더욱 커질 것으로 기대된다.

11. 유형별 간접재이용시스템 개발

맞춤형 최적 공정기술을 바탕으로 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템, 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템, 그리고 이동식 간접재이용시스템 등 유형별 간접재이용시스템을 개발하였다. 소용량 간접재이용시스템은 SS 62%, BOD 42%, 탁도 39%, 그리고 총대장균 99%의 처리효율을 보였고, 중대용량 간접재이용시스템은 SS 75%, BOD 48%, 탁도 41%, 그리고 총대장균 99%의 처리효율을 보였으며, 이동식 간접재이용시스템은 SS 92%, BOD 78%, 녹조 99%, 총질소 41%, 총인 97%, 총대장균 97%의 처리효율을 나타냈다.

12. 실용화 목적의 현장적용 방안 분석

하수처리장 방류수의 농업기반시설에의 영향정도를 평가하기 위해 GIS를 활용한 하수재이용 관리지역을 선정하고, 현장시연회와 유관기관과의 협의를 통해 왕송저수지에 농업용 저수지 수질개선사업의 일환으로 간접재이용시스템을 적용하고자 한다. 또한, 한국농어촌공사의 성과공유과제를 통해 본 연구에서 개발된 이동식 간접재이용시스템의 현장적용과 기술 확산을 계획하고 있다.

V. 연구성과 및 성과활용 계획

1. 유형별 간접재이용시스템 개발

본 연구에서는 1) 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템과 2) 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템, 그리고 3) 이동식 간접재이용시스템을 개발하였다. 개발된 간접재이용시스템은 하수재이용 관리지역에의 적용은 물론, 농업용 저수지 수질개선 사업에의 활용을 추진 중에 있다. 또한, 기술개발과정에서 산출된 극미세버블 및 멀티사이클론 요소기술은 수처리공정 기술개선에 이바지할 것으로 기대된다.

2. 특허출원 및 등록

유형별 간접재이용시스템을 개발하는 과정에서 특허출원 4건, 특허등록 1건 등의 지식재산권을 획득하였다. 출원된 특허 중 미등록된 3건의 특허에 대해서는 2014년 말에 2건이 등록될 예정이며, 2015년에 추가적으로 1건을 등록하자고 한다.

3. 논문게재

본 연구를 통해 조사 및 분석한 내용을 바탕으로 국내학술지에 8편의 논문을 게재하였으며, 해외학술지(SCI)에 7편의 논문을 게재하였다. 또한, 하수처리장 방류수의 하천수 수질 영향 모니터링 결과와 작물생육 모니터링 결과, 그리고 토양 및 식물체 중금속 분석 결과 등을 정리하여 국내학술지에 3편의 논문을 추가적으로 게재할 예정이며, 간접하수재이용에 따른 수질 및 토양 환경에의 영향, 관행 관개용수 및 하수재이용수의 최적 대장균분포에 따른 인체위해성 평가, 하수처리장 방류수의 관개용수에의 영향, 그리고 하수재이용에 따른 유역수문에의 영향 등으로 해외학술지(SCI)에 4편의 논문을 추가적으로 게재할 예정이다.

4. 성과공유제

본 연구를 통해 개발된 이동식 간접재이용시스템은 한국농어촌공사의 성과공유제에 선정되었으며, 한국농어촌공사의 지원으로 농업용 저수지 수질개선사업은 물론, 기타 분야로의 기술확산을 계획하고 있다.

5. 실용화 및 기술확산 계획

본 연구에서 개발된 성과물을 현장시연회 등을 통해 지속적으로 홍보함으로써 기술 확산과 실용화를 도모할 계획에 있으며, 과제 종료 후 한 차례의 현장시연회를 개최한 바 있다. 특히, 왕송저수지 수질개선 사업에 본 연구에서 개발된 간접재이용시스템을 적용하는 방안이 성사단계에 있으며, 성과공유제를 통해 하수재이용 관리지역에 순차적으로 보급할 계획이다.

타연구에의 주요한 활용계획으로는 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템의 멀티 사이클론기술은 농업비점오염저감기술에의 적용을 통해서 비점오염저감시설에 설치될 수 있을 것으로 예상하고 있으며, 이동식 간접재이용시스템은 녹조제거를 위한 사업에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 과제의 연구기관인 서울대학교와 ㈜블루비에스는 농림수신식품기술기획평가원의 “기후변화에 대응한 원예단지의 농업용수를 위한 기수담수화 시스템의 상용화 기술 개발 및 적용”이라는 과제를 시작하는 단계에 있으며, 본 과제에서 개발된 간접재이용시스템의 주요한 수처리 공정 및 요소기술은 기수담수화시스템 개발에 기본 기술로 활용할 예정이다.

SUMMARY

I . Title of the Project

Development of Wastewater Reclamation Systems for Indirect Agriculture Reuse and Their Field Applications.

II . Objectives of the Project

Interest in wastewater reuse for agriculture is increasing in aspect of securing alternative water resources and increase in sewage treatment plant depending on urbanization and growth of sewage treatment plant in rural area cause unplanned indirect wastewater reuse of effluent for agriculture. According to the report that use of effluent for agriculture can lead to bad influence of agriculture environment including crop growth and sanitation. Proper safety measures to reuse wastewater indirectly for agriculture should be prepared.

This project investigates and analyzes environmental effects depending on indirect reuse of untreated and treated wastewater for agriculture and aims to develop low cost and high efficiency reprocessing system to reuse effluent safely for agriculture.

III . Contents of the Project

Main research development contents and ranges in this project are as in the following. To prepare management plan of indirect wastewater reuse for agriculture 1) classify type of reuse of treated wastewater for agriculture and found standard of water quality, 2) suggest crop growth, monitoring environmental effects, and alternative depending on indirect wastewater reuse. In addition, to reuse wastewater safely and economically, 3) develop reasonable water treatment process of indirect treated wastewater and based on proposed water treatment process, 4) come up with practical use method through development of wastewater reclamation systems and their field application

IV . Results of the Project

1. Classification of wastewater reuse for agriculture.

This project classified seven types of wastewater reuse for agriculture according to whether effluent is diluted, whether it is planned in aspect of government, and level of wastewater treatment and considered cases and their characteristics of each type. Suggested type of wastewater reuse can be utilized as baseline data to materialize safe and effective wastewater reuse policy.

2. Water quality standards of indirect wastewater reuse

This project considered water quality criteria, guidelines, and standards of domestic and foreign wastewater reuse for agriculture and proposes water quality standards (draft proposal) of indirect wastewater reuse reflecting national reality based on monitoring and modeling results of this project. The standards was proposed for each purpose of nonedible crop water, paddy water, and vegetable water and contained water quality items of total coliform count, turbidity, biochemical oxygen demand (BOD), hydrogen ion concentration, and electrical conductivity.

3. Investigation and analysis of water quality and soil environment

To understand the effects of indirect wastewater reuse on water quality and soil environment in paddy culture, monitoring system was established. Byoung-Gem and Osan were selected as treatment sites for indirect wastewater reuse while Yong-In was selected as control site which irrigates from agricultural reservoir. Horyeon, Suhwa, and Jangjeon districts were selected to investigate the effects of untreated wastewater irrigation.

4. Investigation and analysis of paddy rice growth and yield

To understand the effects of indirect wastewater reuse on growth, yield and ingredient of paddy rice through established monitoring system, experimental fields were selected in Yong-In, Byoung-Gem, and Osan districts. Crop height and tiller number were monitored during the growing season between 2012 and 2014. Head rice milling yield as external characteristic, Amylose, protein content, and heavy metal content of polished rice were also analyzed for each district.

5. Risk Assessment of indirect wastewater reuse

This project instigated microorganism risk assessment of extraneous water and paddy fresh water for each districts using Beta-poisson dose-response model based on *E. coli* concentration data collected by established monitoring system. Risk to extraneous water is showed in order of untreated wastewater irrigation district, indirect wastewater reuse district, and clean district and risk to fresh water is showed in order of indirect wastewater reuse district, untreated wastewater irrigation district, and clean district and there can be likelihood of pathogenic microorganism of infection in untreated wastewater irrigation and indirect wastewater reuse districts.

6. Simulation system for 10-day irrigation water quality

SWAT-QUALKO2 linkage system to simulate irrigation water quality was established. In case of *E. coli*, simulation result of sequential irrigation water quality exceeded water quality standards of wastewater reuse for agriculture throughout the irrigation period. Simulation result showed the scrutiny of health and environment is needed and application of reprocessing system is demanded to reuse safely wastewater as irrigation water.

7. Assessing nitrogen fertilizer practices for rice irrigated with wastewater

Simulation system of optimal nitrogen fertilizer practice for indirect wastewater reuse was established using DSSAT model, and paddy rice yield according to nitrogen fertilizer rates and timing was simulated. Proper nitrogen fertilizer rate was assessed as 20–50% reduced amount to the standard fertilizer rate. Adjusting the split nitrogen fertilizer application rate was demonstrated as being enough to satisfy the target rice yield and resulted in an additional 10–20 kg ha⁻¹ reduction in the amount of nitrogen fertilizer used. Optimal split application rate was evaluated as 20%, 30%, and 50% for basal, tillering, and panicle N fertilizer, respectively.

8. Economic analysis of wastewater reuse system for agriculture

Economic evaluation model of wastewater reuse system for agriculture was established. A system dynamics approach considering complexity and dynamics in the wastewater reuse systems was used for the economic analysis, which are related with social, environmental, and economic problems. Sensitivity and benefit cost analysis for wastewater reuse systems was conducted through the established economic assessment model. The result of sensitivity analysis showed that water resources development and installation cost were the most sensitive for total benefits and costs, respectively. The scenario-based test of the organized economic assessment model shows marginal cost ranges and enables decision-makers to decide reasonable cost for the wastewater reuse systems for agriculture.

9. Design of water treatment processes for indirect wastewater reuse

Expected inflow water quality properties and contamination level according to discharged treated wastewater quality was estimated. Optimal water treatment processes for indirect wastewater reuse was developed through the analysis of elemental technology of water treatment. ASF water treatment system (IWR 1), multi-cyclone water treatment system (IWR 2), and movable convergence water treatment system (IWR 3) was proposed as the optimal water treatment processes.

10. Test-bed design for indirect wastewater reuse systems

Safe and economical indirect reuse system applied with nano bubble and multi-cyclone technologies was established at Byeongjeom pumping station. The Test-bed using the established indirect reuse system was operated TEST-BED between 2013 and 2014. When it allows for structure without filter replacement, it showed excellent performance. When connecting MF, VF as after treatment device depending on inflow water concentration and target water quality and using them width of utilization is expected to become bigger.

11. Development of indirect wastewater reuse systems

Indirect wastewater reuse systems were developed such as a small-capacity indirect wastewater reuse system with the IWR 1 technique, a middle-large-capacity indirect wastewater reuse system with the IWR 2 technique, and a movable indirect wastewater reuse system with the IWR 3 technique. The small-capacity indirect reuse system showed treatment efficiency of 62%, 42%, 41%, and 99% for SS, BOD, turbidity, and total coliform, respectively. The middle-large-capacity indirect wastewater reuse system showed treatment efficiency of 75%, 48%, 41%, and 99% for SS, BOD, turbidity, and total coliform, respectively. The movable indirect wastewater reuse system showed treatment efficiency of 92%, 78%, 99%, 41%, 97%, and 97% for SS, BOD, algae, T-N, T-P, and total coliform, respectively.

12. Application strategy for indirect wastewater reuse systems

Management area of agricultural wastewater reuse was selected to evaluate the influence of effluent from wastewater treatment plant to agriculture infrastructure. The developed indirect wastewater reuse system will be applied to the Wangsong reservoir as a part of water improvement project through field demonstration and consultation with related organization. The movable indirect wastewater reuse system also plans field application and technology diffusion through benefit sharing mission of Korea Rural Community Corporation.

V. Project accomplishments and Application plan

1. Development of indirect wastewater reuse systems

1) A small-capacity indirect wastewater reuse system, 2) A middle-large capacity indirect wastewater reuse system, and 3) A movable indirect wastewater reuse system were developed in this project. Developed indirect reuse system is in progress of application to wastewater reuse management areas and utilization in water quality improvement project of agricultural reservoir. Elemental technologies of indirect wastewater reuse system such as nano-bubble and multi-cyclone elemental technology are expected to contribute to technology improvement of water treatment process.

2. Patent applications and registrations

Four case of patent applications and one case of patent registration were acquired in the process of developing indirect wastewater reuse system. Two cases in three cases of nonregistered patent will be registered at the end of 2014 and additionally one case will be registered in 2015 as well.

3. Publication of research papers

Nine research papers on domestic scientific journal and six researcher papers on international journals (SCI) based on researched and analyzed contents on this project. Additional three papers that are organizing result of effluent water quality influence monitoring, crop growth monitoring, and heavy metal analysis of soil and plant body on domestic scientific journal and additional four papers that are organizing influence on water quality and soil environment, health risk assessment according to optimal distribution of *E. coli* of water for irrigation practices and reused wastewater, influence of effluent on water for irrigation, and influence on basin hydrology depending on indirect wastewater reuse on international journals(SCI) will be submitted.

4. Benefit sharing

Movable indirect wastewater reuse system was selected to benefit sharing of Korea Rural Community Corporation and will be applied to water quality improvement project of agricultural reservoir and other related fields through Korea Rural Community Corporation support.

5. Plans for commercialization and technology diffusion

Commercialization and technology diffusion will be conducted by consistently publicizing developed achievement in this project through a field rehearsal and consultations with the agencies concerned. Especially, the measure of applying indirect wastewater reuse system, which is developed in this project, to the water quality improvement project of Wangsong reservoir is on stage of accomplishment and the system will be gradually propagated to management areas of agricultural wastewater reuse through the benefit sharing.

As for main application plan of other research, multi-cyclone technology, which belongs to middle-large capacity indirect wastewater reuse system, will be installed at nonpoint pollutants treatment facility by applying to agricultural nonpoint source pollution abatement technology and movable indirect wastewater reuse system is considered to be utilized for algal blooms removal project.

CONTENTS

Chapter 1. Project Overview	1
Section 1. Background	2
Section 2. Objectives and contents	5
Section 3. Promotion methods	8
Chapter 2. Current Technological Status	10
Section 1. Domestic status	10
Section 2. Foreign status	13
Section 3. Significance of this project to current technology	21
Chapter 3. Contents and Results of the Project	23
Section 1. Types and characteristics of agricultural wastewater reuse	23
Section 2. Water quality standards of indirect wastewater reuse for agriculture	34
Section 3. Experimental design and monitoring plan	64
Section 4. Effects of indirect wastewater reuse on water and soil environment	93
Section 5. Effects of indirect wastewater reuse on paddy rice growth and yield	288
Section 6. Risk assessment of indirect wastewater reuse	331
Section 7. Simulation of irrigation water quality of indirect wastewater reuse	361
Section 8. Nitrogen fertilizer practices for rice irrigated with wastewater	393
Section 9. Economic analysis of wastewater reuse systems for paddy irrigation	413
Section 10. Design of water treatment processes for indirect wastewater reuse	431
Section 11. Test-bed design for indirect wastewater reuse systems	510
Section 12. Development of indirect wastewater reuse systems	549
Section 13. Application strategy for indirect wastewater reuse systems	630
Chapter 4. Achievement of objectives and Contribution to Related Fields	652
Section 1. Focal points of evaluation	652
Section 2. Achievement of objectives	653
Section 3. Contribution to related fields	659
Chapter 5. Project Accomplishments and Application Plan	661
Section 1. Project accomplishments	661
Section 2. Application plan	672
Chapter 6. Collected International Science and Technology Information	675
Section 1. International conference	675
Section 2. International literature	676
References	685

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	1
제1절 연구의 배경과 필요성	2
1. 기술적 측면	2
2. 사회, 경제적 측면	4
3. 친환경 농업 측면	5
제2절 연구의 목적 및 내용	5
1. 연구목적	5
2. 연구내용	6
3. 연차별 연구개발 목표 및 내용	6
제3절 연구의 추진 방법 및 체계	8
1. 추진방법	8
2. 추진체계	8
제2장 국내외 기술개발 현황	10
제1절 국내 기술개발현황	10
1. 재이용 기술	10
2. 농업용수재이용 시스템	11
제2절 국외 기술개발현황	13
1. 하수재이용 현황	13
2. 하수재이용 기술현황	15
제3절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치	21

제3장 연구개발수행 내용 및 결과	23
제1절 하수처리수의 농업용수재이용 유형과 그 특징	23
1. 서론	23
2. 하수재이용 유형	23
3. 직접하수재이용의 유형별 사례 및 특징	26
4. 간접하수재이용의 유형별 사례 및 특징	28
5. 요약 및 결론	32
제2절 간접하수재이용수의 수질 지침, 규범 및 기준(안)	34
1. 서론	34
2. 재이용 수질 규범, 지침 및 기준	34
3. 재이용 수질기준의 고려사항	35
4. 농업용수 수질 조건	37
5. 하수재이용에 따른 보건위생 조건	43
6. 국외 하수처리수의 농업용수재이용 수질 규범, 지침, 그리고 기준	48
7. 간접재이용 수질규범(시안)	56
8. 요약 및 결론	62
제3절 시험지구의 실험설계와 모니터링 계획	64
1. 서론	64
2. 수질모니터링 시스템의 설계 및 통계적 분석 방법	64
3. 간접하수재이용 지구 실험설계	71
4. 미처리하수 관개지구 실험설계	75
5. 간접하수재이용 시스템 적용지구 실험설계	89
6. 모니터링 계획	91
7. 요약 및 결론	92
제4절 시험지구의 수질 및 토양환경 조사 분석	93
1. 서론	93
2. 시험지구 수질 조사 분석	93
3. 시험지구 토양환경 조사 분석	164
4. 하수재이용구역의 관개 하천 수질 모니터링	241
5. 간접하수재이용에 따른 논에서의 수질 및 토양환경 영향 분석	248
6. 미처리하수 관개에 따른 논에서의 수질 및 토양 특성 분석	264
7. 농업재이용 시스템 적용에 따른 논에서의 수질 영향 분석	278
8. 요약 및 결론	280

제5절 시험지구의 작물생육, 수확량 및 논벼 성분 조사 분석	288
1. 서론	288
2. 초장 및 분얼수	289
3. 수량구성요소	298
4. 논벼 성분 조사 분석	312
5. 간접하수재이용에 따른 논벼 생육영향 분석	325
6. 요약 및 결론	329
제6절 간접하수재이용에 따른 인체 위해성 평가	331
1. 서론	331
2. 하수에서의 대장균수 확률분포 특성 분석	332
3. 시험지구의 미생물 인체 위해성 평가	355
5. 요약 및 결론	358
제7절 간접하수재이용에 따른 관개기 순별 관개수질 모의	361
1. 서론	361
2. QUALKO2 모형	362
3. SWAT-QUALKO2 연계 시스템 구축	366
4. QUALKO2 모형의 자료 구축	367
5. 모형의 적용	372
6. 요약 및 결론	392
제8절 간접하수재이용에 따른 논에서의 적정 시비량 산정	393
1. 서론	393
2. 시험포장	393
3. DSSAT 모형	394
4. 논벼 생산량 모의	399
5. 적정 시비량 산정	404
6. 요약 및 결론	411
제9절 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 경제성 분석	413
1. 서론	413
2. 시스템 다이내믹스	414
3. 하수처리수 재이용 시나리오	417
4. 민감도 분석	418
5. 시스템 다이내믹스 모델링	418
6. 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형	422
7. 요약 및 결론	429

제10절	간접하수재이용 최적 물처리 공정기술 개발	431
1.	서론	431
2.	농업지역내 용수수질 기준 및 수요량	431
3.	간접재이용 시스템의 유입수 현황 및 예측	454
4.	맞춤형 최적 공정기술 개발	483
5.	요약 및 결론	509
제11절	하수처리수 간접재이용시스템 TEST-BED 설계	510
1.	서론	510
2.	TEST-BED 지역 개요	510
3.	간접재이용시스템 요소기술 설계	511
4.	간접재이용시스템 TEST-BED 설계 및 현장 적용	518
5.	극미세버블 및 전기촉매 기술을 이용한 물처리기술 설계	542
6.	요약 및 결론	548
제12절	유형별 하수처리수 간접재이용시스템 개발	549
1.	서론	549
2.	하천보 활용 소용량 간접재이용시스템	549
3.	양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템	573
4.	이동식 간접재이용시스템	605
5.	요약 및 결론	628
제13절	실용화 목적의 현장적용 방안 분석	630
1.	서론	630
2.	간접재이용 관리지역 선정	630
3.	현장적용방안(왕송저수지)	632
4.	현장시연회 개최	637
5.	성과공유과제 시행	641
6.	요약 및 결론	651

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 652

제1절 연구목표 및 평가착안점 652

- 1. 연구목표 652
- 2. 평가 착안점 652

제2절 연구개발목표 달성도 653

- 1. 하수재이용 유형구분 654
- 2. 간접재이용 수질기준(시안) 655
- 3. 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육 영향 조사 655
- 4. 간접재이용에 따른 영향평가를 위한 모델링 656
- 5. 간접재이용시스템 공정 설계 및 최적화 657
- 6. 간접재이용시스템 시제품 개발 및 운영 658
- 7. 간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원 658

제3절 관련분야에의 기여도 659

- 1. 관련분야 기술발전 기여도 659
- 2. 기술·경제·산업적 기대성과 660

제5장 연구개발 성과 및 성과활용 계획 661

제1절 연구개발 성과 661

- 1. 유형별 간접재이용시스템 개발 661
- 2. 특허출원 및 등록 665
- 3. 논문게재 666
- 4. 홍보실적 669
- 5. 성과공유과제 671

제2절 성과활용 계획 672

- 1. 기술확산 계획 672
- 2. 실용화 계획 673
- 3. 지식재산권 확보계획 673
- 4. 추가연구, 타연구에 활용 계획 674

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	675
제1절 국제학술대회	675
1. 2012년 CIGR	675
2. 2013년 ASABE	675
3. 2014년 ICID	675
제2절 해외문헌	676
1. 하수재이용 현황	676
2. 하수재이용 수질 지침 및 기준	677
3. 하수재이용에 따른 인체위해성	681
4. 하수재이용에 따른 작물생육 및 환경영향	682
참 고 문 헌	685

표 목 차

표 1.2.1	연차별 연구개발 목표 및 내용	7
표 2.1.1	국내 용도별 재처리 공정분류 사례 (환경부, 2011b)	11
표 2.1.2	국내 농업용 재처리 공법 적용현황 (환경부, 2009)	13
표 2.2.1	국가별 하수재이용 현황	14
표 3.1.1	하수처리수의 농업용수 재이용 유형분류	25
표 3.2.1	작물의 예민 정도에 따른 한계 염분농도	38
표 3.2.2	주요작물의 내염성 분류 (류순호, 2000)	38
표 3.2.3	관개용수 및 토양수분의 염도 수질 지침	39
표 3.2.4	작물의 관개용수 중 붕소허용기준	41
표 3.2.5	주요 미량 중금속 요소별 하수재이용 허용농도	42
표 3.2.6	하수처리수의 농업용수 재이용수의 미생물학적 규범 (WHO,1987)	45
표 3.2.7	US EPA 재이용 수질 지침	46
표 3.2.8	미국 주별 재이용수의 미생물학적 기준	47
표 3.2.9	농업용수 재이용 미생물학적 수질 규범	48
표 3.2.10	환경부 농업용수 재이용 미생물학적 수질 기준	48
표 3.2.11	관개용수에 대한 WHO 수질지침	49
표 3.2.12	하수재이용 권고지침(US EPA, 2012)	49
표 3.2.13	멕시코의 하수처리수의 농업용수재이용 및 토양성분 최대 허용 기준	50
표 3.2.14	이스라엘의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침	51
표 3.2.15	튀니지의 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준	52
표 3.2.16	키프로스의 농업용 재이용수의 수질규범 (adopted from Brissaud, 2008)	53
표 3.2.17	스페인 안달루시아 (Andalusia) 지역의 물재이용 수질지침	54
표 3.2.18	그리스의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침	55
표 3.2.19	프랑스 물 재이용 권고사항	56
표 3.2.20	하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준	57
표 3.2.21	간접하수재이용 수질규범(시안)	62
표 3.3.1	시험설계 규모별 최적관리기법에 따른 수질 조사 적용성	68
표 3.3.2	자료가 갖는 통계적 오차	70
표 3.3.3	수질샘플링 자료에 따른 귀무가설 및 통계적 검정방법	70
표 3.3.4	전국 시도별 하수 및 분뇨 발생량	75
표 3.3.5	분뇨발생유량 원단위 및 오수전환율	76
표 3.3.6	생활용수 추정방법	77
표 3.3.7	전국 시도별 하수처리구역외 하수발생량	78
표 3.3.8	경기도 시군구별 하수처리구역외 하수발생량	79
표 3.3.9	하수처리 및 미처리구역 면적과 시가화 면적	94
표 3.4.1	청정지구 및 간접재이용지구 시험포장 위치	94
표 3.4.2	용인 이동저수지 수질 모니터링 결과	95
표 3.4.3	수원시 환경사업소 방류수 수질	97
표 3.4.4	오산시 환경사업소 방류수 수질	97
표 3.4.5	수원환경사업소 하류 황구지천 평균 수질	102

표 3.4.6 수원환경사업소 하류 황구지천 모니터링 결과	103
표 3.4.7 오산환경사업소 하류 오산천 평균 수질	106
표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과	107
표 3.4.9 용인 청정지구 유입수 평균 수질 (2012년 평균)	124
표 3.4.10 용인 청정지구 유입수 평균 수질 (2013년 평균)	124
표 3.4.11 용인 청정지구 유입수 평균 수질 (2014년 평균)	124
표 3.4.12 용인 청정지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년)	124
표 3.4.13 용인 청정지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년)	124
표 3.4.14 용인 청정지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년)	125
표 3.4.15 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)	126
표 3.4.16 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)	126
표 3.4.17 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)	126
표 3.4.18 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년)	126
표 3.4.19 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년)	126
표 3.4.20 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년)	127
표 3.4.21 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)	128
표 3.4.22 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)	128
표 3.4.23 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)	128
표 3.4.24 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년)	128
표 3.4.25 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년)	128
표 3.4.26 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년)	129
표 3.4.27 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2012년 평균)	130
표 3.4.28 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2013년 평균)	130
표 3.4.29 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2014년 평균)	130
표 3.4.30 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2012년)	131
표 3.4.31 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2013년)	131
표 3.4.32 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2014년)	132
표 3.4.33 시험지구간 유입수 수질 모니터링 결과 비교 (2012년)	133
표 3.4.34 시험지구간 유입수 수질 모니터링 결과 비교 (2013년)	133
표 3.4.35 시험지구간 유입수 수질 모니터링 결과 비교 (2014년)	134
표 3.4.36 용인 청정지구 논 담수 평균 수질 (2012년 평균)	140
표 3.4.37 용인 청정지구 논 담수 평균 수질 (2013년 평균)	141
표 3.4.38 용인 청정지구 논 담수 평균 수질 (2014년 평균)	141
표 3.4.39 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년)	141
표 3.4.40 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년)	142
표 3.4.41 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년)	143
표 3.4.42 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)	145
표 3.4.43 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)	145
표 3.4.44 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)	145
표 3.4.45 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년)	146
표 3.4.46 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년)	147
표 3.4.47 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년)	148
표 3.4.48 병점재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)	150

표 3.4.49	병점제이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)	150
표 3.4.50	병점제이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)	150
표 3.4.51	병점 간접제이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년)	150
표 3.4.52	병점 간접제이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년)	152
표 3.4.53	병점 간접제이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년)	152
표 3.4.54	미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2012년 평균)	154
표 3.4.55	미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2013년 평균)	154
표 3.4.56	미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2014년 평균)	154
표 3.4.57	미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2012년)	154
표 3.4.58	미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2013년)	155
표 3.4.59	미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2014년)	156
표 3.4.60	시험지구간 논 담수 수질 모니터링 결과 비교 (2012년)	157
표 3.4.61	시험지구간 논 담수 수질 모니터링 결과 비교 (2013년)	157
표 3.4.62	시험지구간 논 담수 수질 모니터링 결과 비교 (2014년)	158
표 3.4.63	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03)	165
표 3.4.64	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.04.04)	166
표 3.4.65	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)	166
표 3.4.66	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20)	167
표 3.4.67	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08)	167
표 3.4.68	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)	168
표 3.4.69	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)	168
표 3.4.70	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)	169
표 3.4.71	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03.)	170
표 3.4.72	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.04.04)	171
표 3.4.73	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)	171
표 3.4.74	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20)	171
표 3.4.75	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08)	172
표 3.4.76	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)	173
표 3.4.77	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)	173
표 3.4.78	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)	173
표 3.4.79	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03)	175
표 3.4.80	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.04.04)	176
표 3.4.81	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)	176
표 3.4.82	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20)	177
표 3.4.83	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08)	177
표 3.4.84	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)	178
표 3.4.85	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)	178
표 3.4.86	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)	178
표 3.4.87	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.06.07.)	179
표 3.4.88	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04.)	179
표 3.4.89	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20.)	180
표 3.4.90	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08.)	180
표 3.4.91	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)	180

표 3.4.92	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)	181
표 3.4.93	미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)	181
표 3.4.94	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2011.11.03)	201
표 3.4.95	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.04.04)	202
표 3.4.96	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)	203
표 3.4.97	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.09.20)	204
표 3.4.98	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.11.08)	205
표 3.4.99	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.04.23)	206
표 3.4.100	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.10.07)	206
표 3.4.101	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2014.04.03)	207
표 3.4.102	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2011.11.03)	208
표 3.4.103	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.04.04)	209
표 3.4.104	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)	210
표 3.4.105	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.09.20)	211
표 3.4.106	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.11.08)	212
표 3.4.107	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.04.23)	213
표 3.4.108	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.10.07)	213
표 3.4.109	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2014.04.03)	214
표 3.4.110	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2011.11.03)	215
표 3.4.111	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.04.04)	216
표 3.4.112	시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)	217
표 3.4.113	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.09.20)	218
표 3.4.114	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.11.08)	219
표 3.4.115	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.04.23)	220
표 3.4.116	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.10.07)	220
표 3.4.117	시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2014.04.03)	221
표 3.4.118	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.04.04)	221
표 3.4.119	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.07.04)	222
표 3.4.120	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.09.20)	222
표 3.4.121	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.11.08)	223
표 3.4.122	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2013.04.23)	223
표 3.4.123	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2013.10.07)	224
표 3.4.124	시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2014.04.03)	224
표 3.4.125	오산천 수질 모니터링 결과	243
표 3.4.126	관개수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2012년)	249
표 3.4.127	관개수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2013년)	250
표 3.4.128	관개수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2014년)	250
표 3.4.129	논 담수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2012년)	253
표 3.4.130	논 담수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2013년)	254
표 3.4.131	논 담수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2014년)	254
표 3.4.132	논 토양 화학성분 함량 분석 결과 (2012년)	255
표 3.4.133	논 토양 화학성분 함량 분석 결과 (2013년)	256
표 3.4.134	논 토양 화학성분 함량 분석 결과 (2014년)	256

표 3.4.135	논 토양 중금속 함량 분석 결과 (mg kg ⁻¹) (2012년)	260
표 3.4.136	논 토양 중금속 함량 분석 결과 (mg kg ⁻¹) (2013년)	261
표 3.4.137	논 토양 중금속 함량 분석 결과 (mg kg ⁻¹) (2014년)	261
표 3.4.138	미처리지구와 용인지구에서의 관개수 및 논담수의 수질 통계특성	267
표 3.4.138	미처리지구와 용인지구에서의 관개수 및 논담수의 수질 통계특성 (계속)	268
표 3.4.139	선행연구에서의 수질기준	270
표 3.4.140	시험지구 논에서의 토양 화학 특성	275
표 3.4.141	병점 재이용지구 논 관개수 수질 항목별 통계분석 결과	278
표 3.4.142	병점 재이용지구 논 담수 수질 항목별 통계분석 결과	279
표 3.5.1	시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2012년)	293
표 3.5.2	시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2013년)	295
표 3.5.3	시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2014년)	297
표 3.5.4	시험지구 수량구성요소 (2011년)	300
표 3.5.5	시험지구 수량구성요소 (2012년)	301
표 3.5.6	시험지구 수량구성요소 (2013년)	303
표 3.5.7	시험지구 논벼 중 중금속 함량 분석결과 (2011년)	313
표 3.5.8	시험지구 논벼 중 중금속 함량 분석결과 (2012년)	313
표 3.5.9	시험지구 벼 부위별 중금속 축적양상 (2011년)	315
표 3.5.10	시험지구 벼 부위별 중금속 축적양상 (2012년)	316
표 3.5.11	시험지구 백미의 중금속 함량 (2011년)	321
표 3.5.12	시험지구 백미의 중금속 함량 (2012년)	322
표 3.5.13	시험지구 백미의 중금속 함량 (2013년)	322
표 3.5.14	시험지구 백미의 이화학적 특성 (2011년 ~ 2013년)	325
표 3.5.15	2011년 시험지구 수량구성요소 분산분석 결과	326
표 3.5.16	2012년 시험지구 수량구성요소 분산분석 결과	327
표 3.5.17	2013년 시험지구 수량구성요소 분산분석 결과	328
표 3.6.1	처리시설의 종류에 따른 분류	333
표 3.6.2	확률분포 분석을 위한 지역규모별 분류	334
표 3.6.3	처리시설의 용도별 대장균 기초 통계	335
표 3.6.4	처리용량에 따른 대장균 기초 통계	335
표 3.6.5	분석 대상 시설 전체 (81개소) 적합도 검정 결과	344
표 3.6.6	전국 주요 하수처리장 (10개소) 적합도 검정 결과	345
표 3.6.7	전라도지역 하수처리장 (20개소) 적합도 검정 결과	345
표 3.6.8	연구대상지구 하수처리장 (51개소) 적합도 검정 결과	345
표 3.6.9	Generalized Logistic 분포형 매개변수 추정 결과	348
표 3.6.10	2변수 Weibull 분포형 매개변수 추정 결과	349
표 3.6.11	전국 단위 Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과	349
표 3.6.12	도 단위 Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과	350
표 3.6.13	지역 단위 Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과	351
표 3.6.14	전국 단위 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과	352
표 3.6.15	도 단위 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과	353
표 3.6.16	지역 단위 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과	354
표 3.6.17	지구별 유입수 E. coli 확률분포 분석 결과	357

표 3.6.18 지구별 유입수 연간 위해성 분석 결과	357
표 3.6.19 지구별 담수 E. coli 확률분포 분석 결과	358
표 3.6.20 지구별 담수 연간 위해성 분석 결과	358
표 3.7.1 QUAL2E 모형과 QUALKO2 모형의 비교	363
표 3.7.2 QUALKO2 모형 소구간 (Element)의 유형	365
표 3.7.3 QUALKO2 모형의 입력자료	367
표 3.7.4 하천 구간별 수리적 특성	369
표 3.7.5 저수량 및 평수량 조건의 평균 수질 자료	372
표 3.7.6 QUALKO2 모형의 주요 매개변수의 보정 범위 및 최종 입력 값	373
표 3.7.7 QUALKO2 모형의 보정에 따른 통계변량	373
표 3.7.8 QUALKO2 모형의 검정에 따른 통계변량	375
표 3.8.1 시험포장 토양의 물리적 화학적 특징	396
표 3.8.2 2006년부터 2009년까지의 영농기간 월별 관개량	397
표 3.8.3 2006년부터 2009년까지의 시험포장의 영농활동 내역	399
표 3.8.4 추정벼 품종모수	400
표 3.8.5 보정기간 (2006~2007)의 관측치와 모의치 비교	401
표 3.8.6 검정기간 (2008~2009)의 관측치와 모의치 비교	403
표 3.8.7 관개용수로 사용되는 하수처리장 방류수의 수준구분	405
표 3.8.8 논벼 질소 표준시비량)	405
표 3.8.9 시비량에 따른 논벼 수확량 모의결과	407
표 3.8.10 시비시기에 따른 논벼 수확량 및 민감도 지수	409
표 3.8.11 질소 시비량과 분시율에 따른 논벼수확량	411
표 3.9.1 하수처리수 재이용시스템의 관개면적 시나리오	417
표 3.9.2 하수처리수 재이용시스템의 처리수준 시나리오	418
표 3.9.3 모형 변수 및 모형화 방법	425
표 3.9.4 시나리오 I4와 T5에 기초한 민감도 분석 결과	427
표 3.9.5 농업용수 재이용시스템 한계비용 평가 결과	428
표 3.9.6 농업용수 재이용시스템 최대 가능 설치비용	429
표 3.10.1 국내 이수목적의 농업용수 수질기준	433
표 3.10.2 관개용수 수질 가이드라인	435
표 3.10.3 관개 용수내 중금속 및 미량원소에 대한 최고권고치(RMC)	436
표 3.10.4 관개용수 수질문제를 평가하기 위한 일반적인 적용기준	436
표 3.10.5 일본의 농업용수 수질기준	437
표 3.10.6 중국의 관개용수 수질기준	438
표 3.10.7 캐나다 농업(관개)용수 수질 - 무기물	439
표 3.10.8 캐나다 농업(관개)용수 수질 - 유기물, 세균	439
표 3.10.9 시설재배에서 관개용수의 염도에 따른 분류 척도	440
표 3.10.10 내염성에 따른 작물 분류	441
표 3.10.11 작물 성장 특성에 따른 분류	441
표 3.10.12 국내외 농업용수 수질기준 비교	442
표 3.10.13 온실재배 작물에 따른 용수 내 원소의 한계치	445
표 3.10.14 양액재배 방법별 적정용수(원수) 기준(서울시립대)	446
표 3.10.15 유럽(네덜란드) 양액재배 적정용수 기준	447

표 3.10.16	일본 양액재배 적정용수 기준	447
표 3.10.17	일본 양액재배 용수 내 원소의 한계농도	447
표 3.10.18	용수공급 목표수질 설정	448
표 3.10.19	노지재배 물소모량	450
표 3.10.20	과채류 평균수요 용수량 산정	452
표 3.10.21	화훼류 평균 수요 용수량 산정	453
표 3.10.22	재배방식별 단위용수량 산정	454
표 3.10.23	방류수 수질기준(하수도법 시행규칙 제3조제1항)	456
표 3.10.24	권역별 하수처리수 재이용 현황	457
표 3.10.25	하수처리장 고도처리 공법별 현황	461
표 3.10.26	국내외 주요 국가별 하수의 유기물 및 영양염류 농도	463
표 3.10.27	농촌용수개발 사업의 종류	465
표 3.10.28	농업진흥지역 지정현황	466
표 3.10.29	농업진흥지역 지정	466
표 3.10.30	시도별 수리답 현황	467
표 3.10.31	농촌용수구역별 하수처리장 속성정보 작성현황	469
표 3.10.32	수계별 하수처리장 수질현황	471
표 3.10.33	용수구역별 농업기반시설 및 농경지 현황	474
표 3.10.34	수계별 하천 갈수량	476
표 3.10.35	수계별 하천 수질 현황	479
표 3.10.36	간접재이용 유입수 예측	481
표 3.10.37	각 분리막의 운영조건별 분류	490
표 3.10.38	ASF 특징	496
표 3.10.39	목표수질	499
표 3.10.40	다른 공정과의 비교	500
표 3.10.41	초고속 조류제거 기술의 기존 기술과의 비교	508
표 3.11.1	용수공급 목표수질	518
표 3.11.2	시스템 규격	519
표 3.11.3	시스템 사양 및 내용	519
표 3.11.4	원수 및 방류수 성상 분석	529
표 3.11.5	시스템 전력비	
표 3.11.6	시스템 소모품비	536
표 3.11.7	기존시스템과 유지관리 비교표	536
표 3.11.8	점검 항목	541
표 3.11.9	고정점검 및 대책	541
표 3.11.10	운전중 점검항목	542
표 3.11.11	조류의 물리·화학적 처리방법	544
표 3.12.1	하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 Pilot 규격	550
표 3.12.2	소용량 농업용수재이용시스템 TEST-BED 사양 및 내용	564
표 3.12.3	재처리수 수질 기준	570
표 3.12.4	원수 및 방류수 성상 분석	570
표 3.12.5	시스템 전력비	573
표 3.12.6	시스템 소모품비	573

표 3.12.7 중대용량 농업용수재이용시스템 Pilot 규격	574
표 3.12.8 기포 발생법 비교	584
표 3.12.9 중대용량 농업용수재이용시스템 Pilot 사양 및 내용	587
표 3.12.10 원수 및 방류수 성상 분석	593
표 3.12.11 시스템 전력비	597
표 3.12.12 시스템 소모품비	597
표 3.12.13 기존시스템과 유지관리 비교표	598
표 3.12.14 시스템 제어판넬 스위치 설명	601
표 3.12.15 DC Power 스위치 조작법	602
표 3.12.16 운전 전 점검 사항	603
표 3.12.17 운전 중 점검 사항	604
표 3.12.18 고장 점검 및 대책	604
표 3.12.19 이동식 재이용시스템 Pilot 규격	606
표 3.12.20 엔진펌프 사양	608
표 3.12.21 엔진발전기 사양	609
표 3.12.22 응집전자유도모듈 주요 메카니즘	610
표 3.12.23 사이클론타워 부상분리 타워 주요 메카니즘	611
표 3.12.24 기술의 특징	612
표 3.12.25 부상분리 타입 유시기술 비교표	613
표 3.12.26 기술별 특징 비교	614
표 3.12.27 이동식 재이용시스템 Pilot 사양 및 내용	616
표 3.12.28 이동식 시스템 데이터	622
표 3.12.29 시스템 연료비	626
표 3.12.30 시스템 약품비	626
표 3.12.31 시스템 폐기물처리비	626
표 3.13.1 유역별 재이용 관리지구 하수처리장 주변 농업기반시설	631
표 3.13.2 왕송저수지 현황	633
표 3.13.3 왕송저수지 수리·수문조사 결과	633
표 3.13.4 왕송저수지 유역 오염원 및 배출부하량	634
표 3.13.5 왕송저수지 '07~'11년 수질변화 추이	635
표 3.13.6 왕송저수지 퇴적물환경	635
표 3.13.7 왕송저수지 수질개선사업 기본계획	636
표 3.13.8 시연회 참석자 명단	637
표 3.13.9 시연회 프로그램	637
표 3.13.10 공정별 주요 설비 사양	645
표 3.13.11 공정별 주요 특징	646
표 3.13.12 주요 공법별 수처리 특징	649
표 3.13.13 주요 공법별 경제성, 환경성 및 성능 비교	649
표 4.1.1 평가의 착안점 및 기준	653
표 4.2.1 연구개발목표의 달성도	654
표 5.1.1 특허 출원 및 등록	666
표 5.1.2 학술논문게재 실적	667
표 5.1.3 학술회의 발표 실적	668

표 5.1.4	현장시연회 참석자	669
표 5.1.5	현장시연회 프로그램	669
표 5.1.6	기타 홍보활동 및 실적	671
표 6.2.1	전세계 미처리하수 및 하수처리수의 농업용수재이용 현황	676
표 6.2.2	그리스의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침	678
표 6.2.3	이스라엘의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침	679
표 6.2.4	튀니지의 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준	680
표 6.2.5	멕시코의 하수처리수의 농업용수재이용 및 토양성분 최대 허용 기준	681

그 립 목 차

그림 1.1.1	하수처리수의 농업용수 재이용과 수질기준체계 모식도	3
그림 1.1.2	제주 판포지구 하수재이용사업의 주요시설	5
그림 1.3.1	연구추진체계	9
그림 2.1.1	하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 표준공정 시스템	12
그림 2.2.1	세계 지역별 폐수처리공정 기술이용도	16
그림 2.2.2	스톡홀름 프레임워크	17
그림 2.2.3	하수처리수의 안전한 농업용수 재이용을 위한 최적 프레임워크	19
그림 2.2.4	하수재이용에 따른 위험을 감소시키기 위한 가이드라인	20
그림 2.2.5	복합적인 방어책 사용을 통한 건강 및 환경문제에 대한 위험성 저감의 예	20
그림 3.1.1	직접하수재이용 개념도	26
그림 3.1.2	제주대정지구의 재이용 처리수 저류조	27
그림 3.1.3	제주판포지구 재처리시스템과 저류조	28
그림 3.1.4	간접하수재이용 개념도	29
그림 3.1.5	청주하수처리장 방류구	30
그림 3.1.6	수원하수처리장 방류구 및 병점양수장 전경	31
그림 3.1.7	병점지구 재처리시스템 개요	32
그림 3.2.1	염도와 나트륨 흡착률에 따른 관개용수의 수질분류	40
그림 3.3.1	시험포장 모니터링 시스템 모식도	65
그림 3.3.2	자료분석단계	69
그림 3.3.3	간접하수재이용 모니터링지구의 개요	72
그림 3.3.4	간접하수재이용 대비 및 처리지구 위치도	72
그림 3.3.5	용인청정지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점	73
그림 3.3.6	오산재이용지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점	74
그림 3.3.7	하수처리구역 및 미처리구역도	81
그림 3.3.8	호련지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점	83
그림 3.3.9	수화지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점	84
그림 3.3.10	장전지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점	84
그림 3.3.11	호련지구 전경	85
그림 3.3.12	수화지구 전경	86
그림 3.3.13	장전지구 전경	86
그림 3.3.14	호련지구의 배수 흐름도	87
그림 3.3.15	수화지구의 배수 흐름도	88
그림 3.3.16	장전지구의 배수 흐름도	88
그림 3.3.17	간접하수재이용 처리시스템 적용지구의 위치도	89
그림 3.3.18	간접하수재이용 처리시스템 적용지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점	90
그림 3.4.1	용인 이동저수지 수질 모니터링 위치	95
그림 3.4.2	환경사업소 방류수 전경	96
그림 3.4.3	하천수 수질 모니터링 지점	98
그림 3.4.4	하천 전경	99
그림 3.4.5	황구지천 지점별 수질 모니터링	100
그림 3.4.6	오산천 지점별 수질 모니터링	101

그림 3.4.7 황구지천 수질 특성 (pH)	113
그림 3.4.8 황구지천 수질 특성 (EC)	113
그림 3.4.9 황구지천 수질 특성 (DO)	114
그림 3.4.10 황구지천 수질 특성 (TOC)	114
그림 3.4.11 황구지천 수질 특성 (BOD)	115
그림 3.4.12 황구지천 수질 특성 (COD)	115
그림 3.4.13 황구지천 수질 특성 (SS)	116
그림 3.4.14 황구지천 수질 특성 (T-N)	116
그림 3.4.15 황구지천 수질 특성 (T-P)	117
그림 3.4.16 황구지천 수질 특성 (Total Coliform)	117
그림 3.4.17 오산천 수질 특성 (pH)	118
그림 3.4.18 오산천 수질 특성 (EC)	118
그림 3.4.19 오산천 수질 특성 (DO)	119
그림 3.4.20 오산천 수질 특성 (TOC)	119
그림 3.4.21 오산천 수질 특성 (BOD)	120
그림 3.4.22 오산천 수질 특성 (COD)	120
그림 3.4.23 오산천 수질 특성 (SS)	121
그림 3.4.24 오산천 수질 특성 (T-N)	121
그림 3.4.25 오산천 수질 특성 (T-P)	122
그림 3.4.26 오산천 수질 특성 (Total Coliform)	122
그림 3.4.27 용인 청정지구 유입수 (YIID) 수질 모니터링	123
그림 3.4.28 오산 간접재이용지구 유입수 (OSID) 수질 모니터링	125
그림 3.4.29 병점 간접재이용지구 유입수 (OSID) 수질 모니터링	127
그림 3.4.30 미처리지구 지점별 유입수 수질 모니터링	129
그림 3.4.31 시험지구간 유입수 pH 분석 결과 비교	134
그림 3.4.32 시험지구간 유입수 EC 분석 결과 비교	135
그림 3.4.33 시험지구간 유입수 DO 분석 결과 비교	135
그림 3.4.34 시험지구간 유입수 TOC 분석 결과 비교	136
그림 3.4.35 시험지구간 유입수 BOD 분석 결과 비교	136
그림 3.4.36 시험지구간 유입수 COD 분석 결과 비교	137
그림 3.4.37 시험지구간 유입수 SS 분석 결과 비교	137
그림 3.4.38 시험지구간 유입수 T-N 분석 결과 비교	138
그림 3.4.39 시험지구간 유입수 T-P 분석 결과 비교	138
그림 3.4.40 시험지구간 유입수 총대장균수 분석 결과 비교	139
그림 3.4.41 용인 청정지구 지점별 논 (YIP) 담수 수질 모니터링	140
그림 3.4.42 오산 간접 재이용지구 지점별 논 (OSP) 담수 수질 모니터링	144
그림 3.4.43 병점 간접 재이용지구 지점별 논 (BJP) 담수 수질 모니터링	148
그림 3.4.44 미처리지구 지점별 논 담수 수질 모니터링	153
그림 3.4.45 시험지구간 논 담수 pH 분석 결과 비교	158
그림 3.4.46 시험지구간 논 담수 EC 분석 결과 비교	159
그림 3.4.47 시험지구간 논 담수 DO 분석 결과 비교	159
그림 3.4.48 시험지구간 논 담수 TOC 분석 결과 비교	160
그림 3.4.49 시험지구간 논 담수 BOD 분석 결과 비교	160

그림 3.4.50	시험지구간 논 담수 COD 분석 결과 비교	161
그림 3.4.51	시험지구간 논 담수 SS 분석 결과 비교	161
그림 3.4.52	시험지구간 논 담수 T-N 분석 결과 비교	162
그림 3.4.53	시험지구간 논 담수 T-P 분석 결과 비교	162
그림 3.4.54	시험지구간 논 담수 총대장균수 분석 결과 비교	163
그림 3.4.55	토양 모니터링	164
그림 3.4.56	용인청정지구 논 시험포장 전경	164
그림 3.4.57	오산재이용지구 논 시험포장 전경	169
그림 3.4.58	병점재이용지구 논 시험포장 전경	174
그림 3.4.59	토양 모니터링	178
그림 3.4.60	시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2012년)	181
그림 3.4.61	시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년)	184
그림 3.4.62	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.)	187
그림 3.4.63	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.)	190
그림 3.4.64	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.)	193
그림 3.4.65	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.)	195
그림 3.4.66	시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.)	198
그림 3.4.67	시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2012년)	225
그림 3.4.68	시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년)	227
그림 3.4.69	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.)	230
그림 3.4.70	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.)	232
그림 3.4.71	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.)	234
그림 3.4.72	시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.)	236
그림 3.4.73	시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.)	238
그림 3.4.74	OSS#02 지점의 농도지속곡선	244
그림 3.4.75	하수처리장 전후 (오산천2, OSS#01) 하천의 농도지속곡선	246
그림 3.4.76	지점별 수질 모니터링 결과 (평균값)	247
그림 3.4.77	용인청정지구 및 오산재이용지구의 화학성분 분석결과 (2012년)	257
그림 3.4.78	용인청정지구 및 오산재이용지구의 화학성분 분석결과 (2013년 ~ 2014년)	259
그림 3.4.79	용인청정지구 및 오산재이용지구의 중금속함량 분석결과 (2012년)	262
그림 3.4.80	용인청정지구 및 오산재이용지구의 중금속함량 분석결과 (2013년 ~ 2014년)	263
그림 3.4.81	각 지구별 관개수 및 논담수의 EC, T-N, 그리고 T-P 월 평균 농도 비교	271
그림 3.4.82	각 지구별 관개수 및 논담수의 대장균월 평균 농도 비교	272
그림 3.4.83	각 지구별 관개수 및 논담수의 Cu, Pb, Zn, 그리고 Al 월 평균 농도 비교	273
그림 3.4.84	처리구별 유기물, 영양물질, 그리고 중금속의 시기별 변화	277
그림 3.5.1	용인청정지구 지점별 (YIP) 작물생육 모니터링 전경	289
그림 3.5.2	병점재이용지구 지점별 (BJP) 작물생육 모니터링 전경	290
그림 3.5.3	오산재이용지구 지점별 (OSP) 작물생육 모니터링 전경	291
그림 3.5.4	미처리하수 지구 지점별 작물생육 모니터링 전경	292
그림 3.5.5	수량구성요소 측정 전경	299
그림 3.5.6	시험지구별 논벼 수량구성요소 (2011년)	306
그림 3.5.7	시험지구별 논벼 수량구성요소 (2012년)	308
그림 3.5.8	시험지구별 논벼 수량구성요소 (2013년)	310

그림 3.5.9 시험지구별 논벼 중금속함량 (2011년)	314
그림 3.5.10 시험지구별 논벼 중금속함량 (2012년)	314
그림 3.5.11 각 시험지구 논벼 중금속 축적양상 (2011년)	317
그림 3.5.12 각 시험지구 논벼 중금속 축적양상 (2012년)	319
그림 3.5.13 각 시험지구 백미 중금속 함량 (2011년)	323
그림 3.5.14 각 시험지구 백미 중금속 함량 (2012년)	323
그림 3.5.15 각 시험지구 백미 중금속 함량 (2013년)	324
그림 3.5.16 각 시험지구 백미의 이화학적 특성 (2011년 ~ 2013년)	325
그림 3.6.1 지역규모별 확률밀도함수 예	346
그림 3.6.2 지역규모별 누가확률분포곡선 예	347
그림 3.6.3 지구별 유입수 연간 위해성 분석 결과	357
그림 3.6.4 지구별 담수 연간 위해성 분석 결과	358
그림 3.7.1 QUALKO2 모형의 계산 요소	365
그림 3.7.2 SWAT-QUALKO2 연계 모식도	366
그림 3.7.3 대상 유역의 현황 및 수질·수문 측정	368
그림 3.7.4 하천 구간의 분할	369
그림 3.7.5 증분유입의 순별 수질	370
그림 3.7.6 점오염원의 순별 수질	371
그림 3.7.7 QULAKO2 모형의 보정에 따른 모의치와 실측치의 비교	374
그림 3.7.8 QULAKO2 모형의 검정에 따른 모의치와 실측치의 비교	375
그림 3.7.9 4월 하순의 하천 수질 모의 결과	376
그림 3.7.10 5월 상순의 하천 수질 모의 결과	377
그림 3.7.11 5월 중순의 하천 수질 모의 결과	378
그림 3.7.12 5월 하순의 하천 수질 모의 결과	379
그림 3.7.13 6월 상순의 하천 수질 모의 결과	380
그림 3.7.14 6월 중순의 하천 수질 모의 결과	381
그림 3.7.15 6월 하순의 하천 수질 모의 결과	382
그림 3.7.16 7월 상순의 하천 수질 모의 결과	383
그림 3.7.17 7월 중순의 하천 수질 모의 결과	384
그림 3.7.18 7월 하순의 하천 수질 모의 결과	385
그림 3.7.19 8월 상순의 하천 수질 모의 결과	386
그림 3.7.20 8월 중순의 하천 수질 모의 결과	387
그림 3.7.21 8월 하순의 하천 수질 모의 결과	388
그림 3.7.22 9월 상순의 하천 수질 모의 결과	389
그림 3.7.23 순별 관개수질의 모의 결과와 농업용수 재이용 수질기준의 비교	391
그림 3.8.1 시험포장의 위치와 실험설계	394
그림 3.8.2 DSSAT 모형의 개요	395
그림 3.8.3 영농기간 중 관개수의 T-N과 T-P 농도 (2006~2009)	398
그림 3.8.4 보정기간 (2006~2007)의 관측치와 모의치의 산포도	402
그림 3.8.5 검정기간 (2008~2009)의 관측치와 모의치의 산포도	404
그림 3.8.6 시비량에 따른 논벼 수확량 변화	406
그림 3.9.1 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 기본 인과지도	415
그림 3.9.2 시스템 다이내믹스 모델링 흐름도	416

그림 3.9.3 하수재이용시스템 인과지도	419
그림 3.9.4 하수재이용시스템 저장-유량 지도	421
그림 3.9.5 농업용수 재이용시스템 경제성 평가 모형의 기본구조	422
그림 3.9.6 순편익에 대한 모형의 모의 결과	424
그림 3.10.1 년도별 하수처리장 및 하수처리량 현황	460
그림 3.10.2 수계별, 농촌용수구역별 하수처리장 위치도	468
그림 3.10.3 수계별 하수처리장 현황도	470
그림 3.10.4 한강유역 농업기반시설	475
그림 3.10.5 하천수 간접재이용 용수공급 모식도	483
그림 3.10.6 간접재이용 처리공정 세분화	484
그림 3.10.7 자흡식 펌프	488
그림 3.10.8 STS방식 무교체 필터 단면도	489
그림 3.10.9 섬모상여재 전처리 시스템 공정도	489
그림 3.10.10 UF 멤브레인 구조	491
그림 3.10.11 NF 멤브레인 및 나노여과시설	492
그림 3.10.12 RO 멤브레인 및 베셀	492
그림 3.10.13 Dead-End 및 Cross flow 막여과 설치사례	493
그림 3.10.14 공급공정	495
그림 3.10.15 양수장적용 간접재이용시스템 모식도	497
그림 3.10.16 취입보 적용 간접재이용시스템 모식도	497
그림 3.10.17 ASF 공정처리 개요도	499
그림 3.10.18 사이클론 물처리 시스템 공정도	502
그림 3.10.19 전기분해 살균장치 원리	504
그림 3.10.20 물리적 전처리기술 및 분리기술의 조합	505
그림 3.10.21 초고속 조류제거 기술 개요도	506
그림 3.10.22 초고속 조류제거의 외부순환방식 및 침지방식	507
그림 3.10.23 시스템 단위공정 및 처리 순서	507
그림 3.11.1 병점양수장(TEST-BED 지구)	510
그림 3.11.2 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치의 구성도	514
그림 3.11.3 물처리 장치 내 2단계 제거수단에 포함된 사이클론 바디의 단면도	515
그림 3.11.4 물처리 장치 내 4단계 제거수단의 사이클론 조립도	516
그림 3.11.5 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치가 포함된 하수처리 공정도	516
그림 3.11.6 물처리 장치에 의하여 전처리된 원수의 처리효과	518
그림 3.11.7 농업용수 멀티 사이클론 단면도	522
그림 3.11.8 다단멀티사이클론 단면도	523
그림 3.11.9 시스템 전경	527
그림 3.11.10 유입수 및 처리수 채수	528
그림 3.11.11 슬러지 배출	528
그림 3.11.12 부유물질 6월 수질분석	530
그림 3.11.13 총대장균 6월 수질분석	530
그림 3.11.14 BOD 6월 수질분석	531
그림 3.11.15 탁도 6월 수질분석	531
그림 3.11.16 부유물질 7월 수질분석	532

그림 3.11.17 총대장군 7월 수질분석	532
그림 3.11.18 BOD 7월 수질분석	533
그림 3.11.19 탁도 7월 수질분석	533
그림 3.11.20 부유물질 8월 수질분석	534
그림 3.11.21 총대장군군 8월 수질분석	534
그림 3.11.22 BOD 8월 수질분석	535
그림 3.11.23 탁도 8월 수질분석	535
그림 3.11.24 농업용수 공급 시스템 FLOW SHEET	537
그림 3.11.25 부유물질 및 녹조 단계별 제거과정	545
그림 3.11.26 사이클론과 녹조제거모듈의 공정조합	546
그림 3.11.27 녹조 및 부유물 제거 시험기 공정도	546
그림 3.11.28 유기물 처리 시험기 적용	547
그림 3.11.29 파일럿 적용 시험결과	547
그림 3.12.1 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 단면도	550
그림 3.12.2 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 평면도	551
그림 3.12.3 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 공정도	551
그림 3.12.4 유입 전처리 펌프시스템	552
그림 3.12.5 원수 보조 저장조	553
그림 3.12.6 필터시스템	554
그림 3.12.7 배관형 나노버블 시스템	555
그림 3.12.8 기포의 종류	555
그림 3.12.9 기포의 압력 변화	556
그림 3.12.10 버블의 전기적 특성	556
그림 3.12.11 버블의 대전 특성	557
그림 3.12.12 UV 시스템	559
그림 3.12.13 처리수조 공급시스템	561
그림 3.12.14 나노버블시스템	565
그림 3.12.15 UV 시스템	566
그림 3.12.16 필터시스템	566
그림 3.12.17 시스템 제어반	567
그림 3.12.18 시스템 내부	567
그림 3.12.19 재이용시스템 하우징	568
그림 3.12.20 시스템 현장설치 내부	568
그림 3.12.21 시스템 현장설치 외부전경	569
그림 3.12.22 부유물질 수질분석 결과	571
그림 3.12.23 BOD 수질분석 결과	571
그림 3.12.24 탁도 수질분석 결과	572
그림 3.12.25 총대장군군 수질분석 결과	572
그림 3.12.26 시스템 레이아웃	575
그림 3.12.27 양수장을 이용한 중대용량 농업재이용 시스템 공정도	575
그림 3.12.28 일반적인 사이클론 모식도	576
그림 3.12.29 멀티 사이클론 단면도	580
그림 3.12.30 다단멀티사이클론 단면도	581

그림 3.12.31	마이크로 나노 버블의 특징	583
그림 3.12.32	기포발생펌프시스템 구조 비교	583
그림 3.12.33	전기분해 살균장치 원리	584
그림 3.12.34	농업재이용 멀티클론시스템 전경 (1)	589
그림 3.12.35	농업재이용 멀티클론시스템 전경 (2)	589
그림 3.12.36	농업 재이용 멀티클론 시스템 주요장치	590
그림 3.12.37	멀티사이클론	590
그림 3.12.38	전기분해시스템	590
그림 3.12.39	나노 제너레이터 펌프	591
그림 3.12.40	슬러지배출시스템	591
그림 3.12.41	제어반 (1)	592
그림 3.12.42	제어반 (2)	592
그림 3.12.43	시스템 현장 설치 전경	592
그림 3.12.44	유입수 및 처리수 채수	594
그림 3.12.45	슬러지 배출	594
그림 3.12.46	부유물질 수질분석 결과	595
그림 3.12.47	총대장균 균 수질분석 결과	595
그림 3.12.48	BOD 수질분석 결과	596
그림 3.12.49	탁도 수질분석 결과	596
그림 3.12.50	시스템 구성도	599
그림 3.12.51	시스템 제어판넬 모식도	600
그림 3.12.52	DC Power 조작법	602
그림 3.12.53	이동식 농업재이용시스템 Flowsheet	606
그림 3.12.54	이동식 농업재이용시스템 공정모식도	606
그림 3.12.55	이동식 차량 재이용시스템 도면	607
그림 3.12.56	응집전자유도모듈 모식도	610
그림 3.12.57	사이클론타워 부상분리 장치	610
그림 3.12.58	3단계 오염물질 제거 원리	611
그림 3.12.59	무정전 전원장치 (UPS)	617
그림 3.12.60	처리수조 및 부상분리타워	617
그림 3.12.61	엔진 펌프 및 엔진 발전기	617
그림 3.12.62	이동식 차량 제작내부	618
그림 3.12.63	이동식 차량 제작 외부전경	618
그림 3.12.64	이동식 모듈형 시스템 제작	619
그림 3.12.65	일체형타워모듈 제작 연못 실험데이터	619
그림 3.12.66	연못 적용 유입수 및 처리수	620
그림 3.12.67	농어촌연구원내 개수로 원수채수 현황	621
그림 3.12.68	하수처리장 방류수 실험 결과	622
그림 3.12.69	하수처리장 폭기조 실험 결과	622
그림 3.12.70	SS 분석 데이터	624
그림 3.12.71	Chl-a 분석 데이터	624
그림 3.12.72	T-N 분석 데이터	625
그림 3.12.73	T-P 분석 데이터	625

그림 3.13.1 농촌용수 간접재이용 관리지구	631
그림 3.13.2 왕송지구 농업용수 수질개선사업 계획평면도	632
그림 3.13.3 현장시연회 사진	638
그림 3.13.4 병점양수장 재이용시설	639
그림 3.13.5 반정양수장 수처리 시설	640
그림 3.13.6 간접재이용시스템 파일럿 모듈	640
그림 3.13.7 막세정시스템 모듈	641
그림 3.13.8 장기적 녹조제거 개발	642
그림 3.13.9 NET-H System 공정 구성도	643
그림 3.13.10 오염물질 제거 원리	643
그림 3.13.11 NET System 구성원리	644
그림 3.13.12 극미세버블과 촉매도돌 일체형 시스템	645
그림 3.13.13 연못녹조제거를 위한 실험사진	646
그림 3.13.14 연못 녹조제거 실험 결과	647
그림 3.13.15 하수처리장 호기조 실험 결과	647
그림 5.1.1 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 내부	662
그림 5.1.2 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 현장설치 외부전경	662
그림 5.1.3 중대용량 간접재이용시스템의 주요장치	663
그림 5.1.4 중대용량 간접재이용시스템의 현장설치 전경	664
그림 5.1.5 이동식 간접재이용시스템 공정모식도	665
그림 5.1.6 이동식 간접재이용시스템 외부전경	665
그림 5.1.7 현장시연회 사진	670
그림 5.2.1 왕송저수지의 녹조에 따른 수질오염	672
그림 5.2.2 왕송저수지 이동식 간접재이용시스템 시연회 전경	672

제1장 연구개발과제의 개요

우리나라의 농업용수 이용량은 연평균 약 159억 m^3 로서 전체 이용량의 62%에 달한다 (국토해양부, 2011). 이는 총 수자원 부존량 1,297억 m^3 에 대하여 12.3%이며, 가용수자원 753억 m^3 의 21.1%에 해당한다. 또한, 시설재배지 증가에 따른 농업용수의 계절적 수요 변화와 기후변화로 인한 극한 가뭄을 대비하기 위해서는 신규 농업용수 개발이 필요하다. 하지만, 신규 농업용수 개발은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 댐 개발과 관련한 환경문제 등으로 인해 어려운 것이 현실이다 (정한석 등, 2013). 따라서 신규 농업용수 개발을 대신할 수 있는 대체수자원 개발이 시급한 실정이다.

그동안 지속적인 환경기초시설의 확충 노력으로 전국 114개 중권역 중 좋은 물 (BOD 3 mg/L이하) 달성 비율은 2011년 기준 93개 중권역으로 약 82%에 달하는 것으로 보고되고 있다. 이는 매년 조금씩 대하천의 수질이 개선되고 있음을 나타낸다 (환경부, 2011a). 이에 반해 농업용수 수질은 크게 나아지고 있지 않다. 우리나라가 산업화를 달성한 이래, 물 사용량은 꾸준히 증가하여 온 반면, 하수처리장 등 환경기초시설 확충은 물 사용량의 증가에 맞추어 충분히 이루어지지 않고 있기 때문이다. 2011년 말 기준 하수도 보급률은 90.9%에 달하고 있으나, 주로 도시나 일정 규모 이상의 시군이 그 대상이며, 마을하수도 보급률은 이에 못 미치는 경우가 대부분이다 (환경부, 2012a). 결국 상류지역에 위치하는 소규모 마을로부터는 하수처리가 제대로 이루어지지 않고, 하천으로 흘러나오고 있으며, 이로 인하여 소하천의 수질이 악화된 사례가 많다 (농림수산식품부, 2012).

농업용 저수지 수질은 호소 수질환경기준을 초과하는 경우가 많다. 농림수산식품부 (2012)에 따르면, 전국 825개소 농업용 저수지 수질측정망 중 IV급수 이내를 만족하는 저수지가 711개소로서 86.2%로 나타났으며, 수질기준 초과 중소규모 저수지의 많은 곳이 상류에서 유입되는 미처리하수, 축산오폐수 등으로 인하여 부영양화 상태인 것으로 조사되었다. 왕송저수지와 같이 하수처리장 방류수가 저수지로 유입되어 심한 부영양화를 초래하는 사례도 있다. 농업용수원의 부영양화가 농업용수로 사용하는 데 지장을 주는 예는 보고된 바 없지만, 이러한 수질상태는 농업용수가 그만큼 오염되고 있음을 나타낸다고 할 수 있다.

환경부는 하수처리수의 재이용을 지속적으로 추진하고 있다. 하수재이용이란 하수처리장 방류수를 이용 목적에 맞게 재처리하여 이용하는 것을 말한다. 환경부 (2012a)에 따르면 2011년말 기준 시설용량 500 m^3 /일 이상의 505개 하수처리장의 총 시설용량은 25,228천 m^3 /일이며, 하수처리량은 70.7억 톤이다. 이 중 연간 하수처리수의 재이용량은 781,104천 m^3 으로 처리수 재이용률은 11.0%이다. 하수재이용 목적을 살펴보면 하수처리장 내에서 세척수, 청소수, 냉각수 등 장내 용수로서 4.0 억 톤을 재이용하고 있으며, 하천유지용수, 농업용수, 공업용수 등 장외 용수로서 3.8억 톤을 사용하고 있다. 하수처리수의 농업용수 재이용량은 연간 45백만 톤 정도이다.

2001부터 2011년까지 수자원프런티어사업단에서는 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 개발 및 적용에 대한 연구를 추진해왔다 (박승우, 2011). 이 연구에서는 수원시 환경사업소 방류수를 처리수준별로 관개용수로 공급하는 처리구와 지하수를 관개하는 대비구

로 구성된 시험포장을 난괴법으로 조성하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 영향을 장기간에 걸쳐 조사하였다. 조사결과 쌀 수확량이 18% 증수하였으며, 식미는 일반미와 동일하였고, 토양 중 중금속 집적 등은 미미한 것으로 나타났다. 그리고 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우, 총질소 기준 40~60% 정도의 수질개선효과를 기대할 수 있으며, 시비량은 50% 정도 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 과거 연구에서는 경기도 수원시 병점지구, 제주도 판포지구, 월정지구 등 8개 지구에서 하수처리수의 농업용수 재이용 사업의 타당성 조사 결과를 제시하였다 (박승우, 2007; 박승우, 2011).

하수처리장 방류수를 하류구간에서 농업용수로 취수해서 이용하는 경우가 많다. 원래 농업용수개발사업으로 설치된 저수지, 보, 양수장 등 농업수자원의 상류구간에 하수처리장이 설치되어 처리수가 유입되는 경우이다. 이러한 형태의 하수처리장 방류수이나 하천으로 흘러드는 미처리 하수가 회석되어 있는 상태에서 농업용수로 이용하는 것을 간접하수재이용 (indirect wastewater reuse)라고 한다.

WHO (1989)에서는 미처리하수의 농업용수로의 이용은 생활하수, 도시하수 등으로 제한하고 있으며, 공장 오폐수의 유입량이 거의 없는 조건으로, 작물의 종류, 관개방법 등에 따라서는 미생물학적 수질 규범 (water quality guideline)을 만족하도록 제안하고 있다. 이러한 수질규범에 비추어 간접하수재이용을 통한 작물재배의 안전성에 대한 국내의 조사, 연구 결과가 없다. 또한 농업용수로 안전하게 간접재이용하기 위한 수처리 공정 등도 개발되거나 적용된 사례가 없다.

본 연구는 하수처리장 방류수를 하류구간에서 농업용수로 안전하게 간접재이용하기 위한 수질기준을 정립하고, 이를 만족할 수 있는 저비용, 고효율 재처리 시스템 공정 개발 및 시작품 제작과 그 현장 적용을 통하여 간접재이용기술을 개발하는 것을 목표로 한다. 또한 간접하수재이용에 따른 논의 수질 및 토양의 이화학적 성질에 미치는 영향 등을 현장 조사하고, 인체 위해성을 진단하며, 문제점 분석과 해결 대책을 제시하도록 하고자 한다.

제1절 연구의 배경과 필요성

1. 기술적 측면

하수처리수의 재이용은 그 형태에 따라 직접재이용과 간접재이용으로 구분할 수 있다. 직접재이용 (direct wastewater reuse)은 통상 하수재이용이라고 하며, 하수처리장 방류수를 이용 목적에 맞도록 재처리하여 공급하는 방식이다. 재이용수의 이용 장소에 따라 장내 재이용과 장외 재이용으로 구분할 수 있는데, 장내 재이용은 하수처리장 내에서 세척수, 청소수, 냉각수 등으로 쓰는 것을 말한다. 장외 재이용은 하천유지용수, 농업용수, 그리고 공업용수 등으로 재처리 이용하는 것을 말한다 (박승우, 2011).

그림 1.1.1은 하수처리수의 농업용수 직접 및 간접재이용체계를 모식도로 나타낸 것이다. 또한 관련 수질 기준 및 규범(또는 지침) 등으로 방류수질기준, 하천수질기준 등을 표시하고 있다. 농업용수 수질은 법정 기준이 없으며, 수질지침 (water quality criteria)으로 제시되고 있다. 지침은 과학적, 기술적으로 타당한 수질상태를 말하며, 법적 기준 마련 이

전에 지켜야 할 내용을 뜻한다. 수질기준(water quality standards)은 법적 효력을 갖는 최소 수질을 말하며, 하수처리장의 방류수질은 수질기준을 충족해야하는 것을 말한다. 그 밖에도 관련 기관 등에서 수질규범 (water quality guideline)을 제안하기도 하는데, 기준 마련에 고려해야 할 사항을 포함하는 경우가 많다. 미국 EPA에서는 재이용 수질규범을 제시하고, 주 정부에서는 이러한 수질규범을 기초로 주의 정치적, 사회적 여건에 맞도록 수질기준을 고시하고 있다.

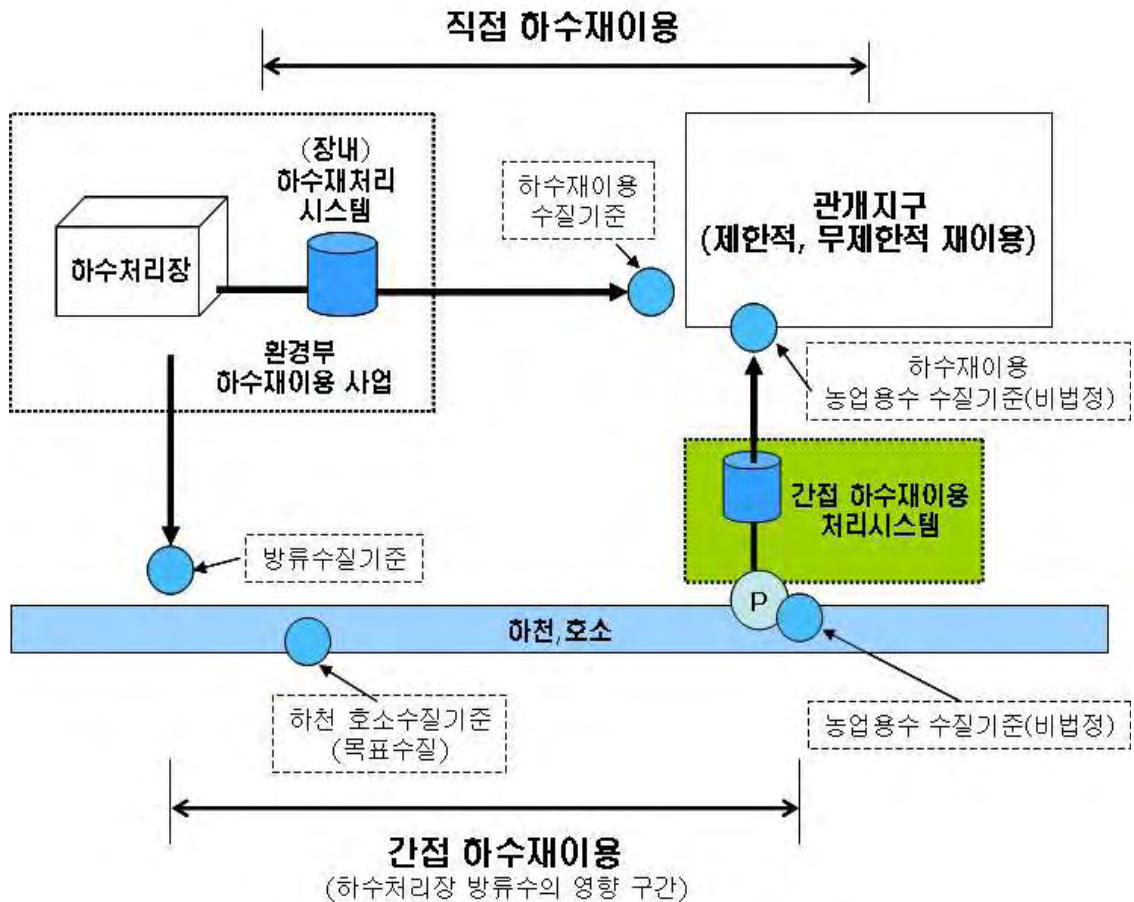


그림 1.1.1 하수처리수의 농업용수 재이용과 수질기준체계 모식도

간접재이용지구는 주로 하류구간에 농업용 수원공이 위치하여 취수 이용하는 경우이며, 미처리 마을하수, 축산오폐수 등이 상류로부터 유입되어 흘러들거나, 하수처리장 방류수가 유입되어 이용되는 형태가 대부분이다. 간접하수재이용에서는 농업용수 수질지침에 적합하지 못한 경우도 많은 데, 주로 높은 농도의 영양염류가 유입되는 경우이다.

박승우 (2011)는 전국 53개 하수처리장 주위의 수질 샘플링을 분석한 결과를 발표하였다. 하수처리장 방류수를 농지로 직접 이용하거나 하류에서 농업용수로 취수하여 이용하는 형태로 그 수질 분석결과는 농업용수로 취수해서 안전하게 이용하기에는 인체 건강위해성이 높은 상태로 나타난다고 보고하고 있다.

따라서 하수처리수와 미처리 하수를 하류 구간에서 농업용수로 간접재이용함에 따른

작물의 생육 및 환경영향을 조사 분석함과 동시에 안전성 확보를 위해서는 적절한 수질 지침을 마련하고, 이를 만족할 수 있는 수처리 공정기술의 개발이 필요하다.

2. 사회, 경제적 측면

농업용수 수요량의 대부분을 차지하는 논용수량의 경우, 전체 논 면적의 80% 가까이 관개용수를 공급하고 있다. 그러나 시설재배지나 밭작물의 경우 대부분 각 농가별 또는 수리계별로 지하수 개발에 의존하거나, 별도의 관개용수가 공급되지 않아 가뭄 피해를 겪는 사례가 많다.

신규 농업용수 개발은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 댐 개발과 관련한 환경 피해 등 부정적 시각 등으로 어려운 것이 현실이다. 반면에 가뭄대책용수 등 비상급수가 필요한 사례가 많으며, 이를 위한 대체수자원 개발이 시급한 현실이다. 대체수자원은 기존의 저수지, 하천수, 지하수 등의 수자원이 아닌 새로운 형태의 수자원을 말하며 하수처리수 재이용, 우수이용, 그리고 해수담수화 등을 말한다. 가뭄 시 비상용수로 이용가능한 수자원은 하수처리장 방류수이며, 따라서 대체수자원으로 간주하여 재이용을 위한 노력을 기울이고 있는 것이 세계적인 추세이다.

하수처리수는 농업용수로 직접 이용할 수는 없다. 하수처리장 방류수질은 BOD 6~10 mg/L, T-N 10~20 mg/L, T-P 5~10 mg/L 등으로 기존의 농업용수 수질 지침에 만족하지 못한다. 특히 대장균, 바이러스 등 병원성 미생물의 잔유로 인하여 엽채류, 과일류 등의 관개용수로의 이용을 제한하고 있다 (박승우, 2011). 또한 논물 중 병원성 미생물 농도가 높은 경우 인체에 위해할 수 있으므로, 안전한 하수재이용을 위해서는 재처리 시스템을 적용해야 한다.

기존의 하수재이용을 위한 재처리시스템은 공업용수 등의 목적으로 적용되고 있다. 이러한 처리공정의 용수 단가는 300~500 원/톤의 수준으로 농업용수로 적용하기에는 너무 비싼 경우가 많다. 또한 처리용량도 크지 않아 많은 수량을 필요로 하는 농업용수로는 적합하지 못하다. 결국 농업용수로 재이용하기 위해서는 수량 및 수질을 달성할 수 있는 저비용, 고효율 처리공정을 적용하는 것이 중요하다.

박승우 (2010)는 제주 관포지구 하수재이용사업에서 염도를 제거하기 위한 재처리시스템을 개발 및 적용하였다 (그림 1.1.2). 이때 처리비용은 시설비를 포함하여 용수 1톤당 160원내외의 지하수 채수비용 정도로 공급이 가능하도록 하고 있다. 이와 같이 농업용수 재이용에서는 비용문제가 제약조건으로 고려되어야 할 것이다.

이처럼 간접재이용기술의 개발에서 가장 중요한 조건은 재처리시스템의 설치비용과 처리에 소요되는 운영비용이다. 지하수 채수비용정도에서 작물 생육에 지장을 주지 않는 수질을 보장하고, 보건위생 위험을 최소화하는 처리공정이 필요하다.



그림 1.1.2 제주 판포지구 하수재이용사업의 주요시설

3. 친환경 농업 측면

적절하게 처리되지 않은 하수를 농업용수로 공급하는 데 따르는 보건위생적 문제는 WHO (1989)에서 제시한 주요한 과제이다. 미처리 하수의 재이용은 전염병의 확산과 감염, 기생충의 창궐 등의 원인이 되는 사례가 많으며, 하수처리장에서 소독처리를 한 방류수에서도 대장균 농도가 일정 수준 이상이면, 바이러스 등 질병 감염 위험성을 갖는 것으로 알려지고 있다.

깨끗하고 양질의 농업용수로 재배한 유기농산물은 그만큼 수요가 많고 안전성을 보장한다는 것이 일반인의 상식이 되고 있다. 하수재이용을 고려할 경우, 이러한 상품성을 만족하려면 안전성 보장을 전제로 하는 하수재이용이 이루어지는 것이 중요하다.

제2절 연구의 목적 및 내용

1. 연구목적

본 연구의 최종 개발 목표는 하수처리장 방류수를 농업용수로 안전하게 간접재이용하기 위한 저비용, 고효율 재처리 시스템 공정을 개발하고, 그 시작품을 제작하며, 현장 적용을 통하여 적용성을 평가함으로써 간접재이용기술개발과 실용화를 도모하는 데 있다. 또한 미처리 하수의 농경지 유입으로 나타나는 인체 위해성을 진단하고, 수질 및 토양의 이화학적 성질에 미치는 영향 등을 현장조사하고, 그 문제점을 해결하기 위한 대책을 마련하고자 한다.

2. 연구내용

- (1) 하수처리수의 간접재이용 유형구분 및 수질기준의 정립
 - ① 하수처리장 방류수 취수사례분석 및 유형 구분
 - ② 하수처리수의 농업용수 간접 재이용수질기준(안)의 제시

- (2) 간접하수재이용에 따른 작물생육 및 환경영향 모니터링 및 대책제시
 - ① 간접하수재이용 사례조사 및 유형별 현장 모니터링
 - ② 간접하수재이용에 따른 작물생육 영향
 - ③ 간접하수재이용에 따른 수질, 토양환경 영향평가
 - ④ 간접하수재이용의 문제점 분석 및 대책 제시

- (3) 하수처리수의 농업용수 간접재이용 유형별 적정 수처리 공정 개발
 - ① 농업용수 간접 하수재이용 유형별 적정 재처리 공정 개발
 - ② 수처리 효율 평가

- (4) 간접 재이용시스템의 현장 적용 및 작물생육 조사 분석
 - ① 간접 재이용시스템의 현장 적용 및 처리공정 효율 개선
 - ② 재이용에 따른 작물생육 및 수확량 조사
 - ③ 인체 위해성 평가

3. 연차별 연구개발 목표 및 내용

연차별 연구개발 목표 및 내용은 다음 표 1.2.1과 같다. 1차년도에는 간접재이용의 유형을 구분하고 적합한 수질기준을 검토하며, 간접재이용을 위한 처리공정을 개발하도록 한다. 2차년도에는 간접재이용에 따른 작물 생육 및 환경에의 영향을 평가하고, Test-Bed 설계 및 제작을 통해 간접재이용시스템의 적용성을 평가한다. 3차년도에는 간접재이용에 따른 지속적인 모니터링과 그 결과 분석을 통한 간접재이용 대책을 마련하고, 간접재이용시스템의 최적공정 설계를 통해 간접재이용시스템의 현장적용을 목표로 한다.

표 1.2.1 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	연구개발의 목표	연구개발의 내용
1차년도 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 하수처리수의 간접 재이용 유형구분 및 적적 수질기준 정립 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 하수처리장 방류수의 농업용수 취수이용 사례조사 ○ 간접 재이용 유형구분 및 수질기준 검토
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 사례조사 및 논에서의 수질, 토양 환경영향 조사 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 사례조사 <ul style="list-style-type: none"> -하수처리장별 방류수 이용 사례조사 -미처리 하수 이용 사례조사 ○ 간접재이용에 따른 환경영향조사 <ul style="list-style-type: none"> - 관개용수 및 논담수 수질조사 - 작물생육 영향 조사 - 재배 전후의 토양환경 영향조사
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 처리공정 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 사례별 관개용수 수질 조사 ○ 처리공정 개발
2차년도 (2012)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미처리 하수이용에 따른 작물생육 영향 조사 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용지구의 선정 <ul style="list-style-type: none"> - 대비구: 청정지구 - 처리구: 미처리하수이용지구 ○ 작물생육조사 및 비교 평가 수질, 토양환경 영향조사 모니터링/모델링
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 처리공정개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 처리공정개발 ○ 시작품 개발
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재처리수 관개에 따른 작물생육조사 및 인체 위해성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재처리수 관개지구의 작물생육조사 ○ 인체 위해성 평가
3차년도 (2013)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미처리 하수이용에 따른 작물생육 영향 평가 및 대책 수립 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용지구의 선정 <ul style="list-style-type: none"> - 대비구: 청정지구 - 처리구: 미처리하수이용지구 ○ 작물생육조사 및 비교 평가 ○ 간접재이용에 따른 수질, 토양환경 영향조사 모니터링/모델링 ○ 수치모델을 이용한 미처리 하수이용의 환경영향 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 사례지구의 환경성 평가 - 간접재이용지구의 환경성 평가 ○ 간접재이용에 따른 악영향 저감대책 수립
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재처리수의 작물생육시험 및 인체 위해성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재처리수 관개지구의 작물생육조사 ○ 인체 위해성 평가
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용 수처리시스템 현장 적용시험 및 결과분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용시스템의 현장 적용 ○ 재이용시스템의 처리효율 평가 ○ 재이용에 따른 작물생육 및 수확량 조사

제3절 연구의 추진 방법 및 체계

1. 추진방법

① 본 연구는 하수처리수의 농업용수 간접재이용을 위한 자료수집 및 사례조사, 현장조사, 작물생육 및 환경영향 모니터링과 모델링, 간접재이용에 따른 인체위해성 평가, 간접재이용시스템의 시작품 제작 및 적용성 평가 등으로 추진한다.

② 국내외 하수재이용 수질기준에 대한 자료조사와 전문가 그룹의 의견을 반영하여 간접재이용 수질기준 시안을 마련한다.

③ 하수처리수의 간접재이용 사례조사는 농업수자원 DB로부터 하수처리장 인근의 농경지 분포상황 자료를 수집하고 현장 조사를 통하여 취수이용 사례를 분류한다.

④ 하수처리장 하류구간의 농업용수원 자원조사 및 현장답사 등을 통하여 사례지구를 선정하고, 간접재이용 유형을 구분한다.

⑤ 간접재이용 대표지구를 선정하여 관행 관개지구와 하수처리수의 간접재이용에 따른 작물생육, 수질 및 토양에의 영향을 조사 분석한다.

⑥ 미처리 하수 유입사례를 조사 및 분석하며, 대표지구를 선정을 통하여 생육기간 중 수질 및 토양환경을 분석한다.

⑦ 간접재이용에서 적용가능한 수처리공정을 조사하고, 고효율 저비용 수처리시스템의 시작품을 제작하며 성능 평가를 통하여 간접재이용 수처리시스템의 설계 인자를 도출하고, 그 적용성을 평가한다.

⑧ 농림수산식품부와 협조를 통하여 간접재이용 사업지구를 발굴하고, 현장 적용이 가능하도록 조사설계를 실시하며, 사업 타당성 제시 및 시범사업을 계획한다.

2. 추진체계

본 연구는 서울대학교 (주관기관), 농어촌연구원 (협동기관), 블루비에스 (참여기업) 등 3개 연구기관 및 참여기업의 공동연구로 추진하고 있다 (그림 1.3.1). 연구의 최종목표는 간접재이용 기술개발 및 현장적용을 통한 안전하고 경제적인 농업수자원의 확보에 있다. 연구는 3개년으로 추진되며 각 연구기관 및 참여기업별 연차별 연구추진체계는 그림 1.3.1과 같다.

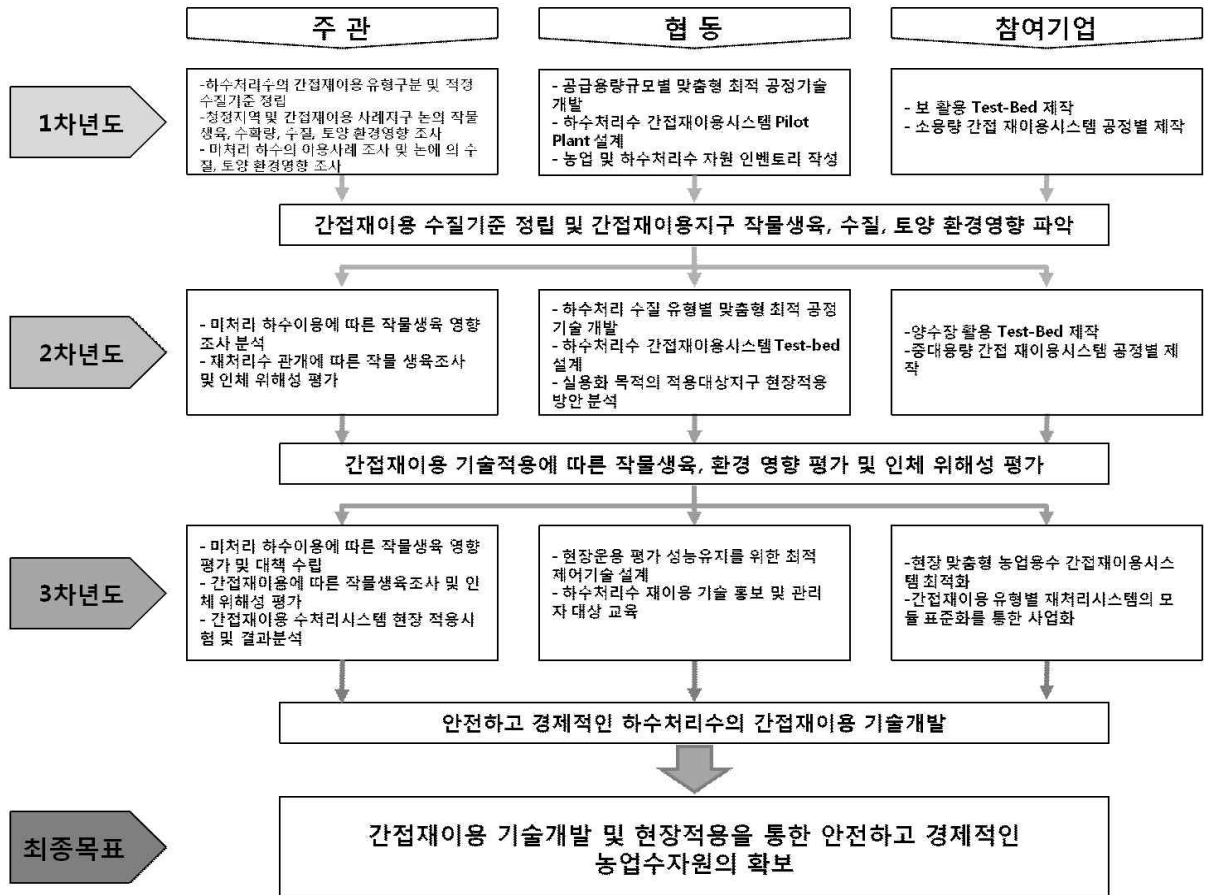


그림 1.3.1 연구추진체계

제2장 국내외 기술개발 현황

하수재이용은 수자원의 지속가능한 이용을 위한 방안으로 국내외에서 기술개발이 진행되고 있다. 2012년도 하수처리수 재이용량은 약 8.7억 톤 (재이용율 12.2%, 국내 연간 71.7억 톤의 하수처리량 대비)으로 2011년도 7.8억 톤 (재이용율 11.0%)에 비해 12% 증가하였으며, 2008년도 7.1억 톤 (재이용율 10.8%), 2010년도 7.4억 톤 (재이용율 10.9%)과 비교하여 재이용율이 꾸준히 증가하고 있다 (환경부, 2013a). 2012년 기준 하수처리수의 용도별 재이용 현황을 살펴보면, 재이용수의 50.1% (4.4억 톤)를 세척수, 청소수, 냉각수 등의 장내용수로 사용하였고, 49.9% (4.35억 톤)을 하천유지용수, 농업용수, 공업용수 등의 장외용수로 사용하였다. 이 중 농업용수의 재이용량은 2012년 기준 0.30억 톤으로 전체 재이용량의 3.4%에 해당하며 2011년 기준 0.12억 톤에 비해 2.5배 증가하였다. 정부는 2007년에 국가 물 수요관리 종합대책을 수립하여 2016년까지 고도처리 된 하수처리수 850백만 m³/일을 확대할 계획을 수립하였으며, 이를 위해 2006년~2010년 기간 중 하수처리수 재이용 시범사업을 확대 시행 (39개 처리장을 대상으로 1,039천 m³/일 재이용 추진) 하였으며, 2009년에 하수처리수 재이용 민간투자 사업을 추진하고, 2010년에 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률을 제정하였다 (환경부, 2011b). 이외에도 관계 전문연구기관이 하수처리수를 포함한 물의 재이용에 관한 연구·기술개발을 촉진하고 제도적 지원 방안을 마련하고 있다.

제1절 국내 기술개발현황

1. 재이용 기술

국내 하수처리수 재이용 기술은 프론티어 21 연구사업으로 2001년부터 진행된 하수처리수 재이용 기술 및 표준 공정개발 사업을 통해 높은 수질을 요하는 용도를 위한 재생수 생산에 있어서는 분리막 공정을 추가하여 중수도, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수 및 음용수 등의 용도에 적합한 표준공정을 갖추게 되었다. 국내에서 사용하고 있는 재이용 기술은 용도별로 구분하여 여러 공법을 적용하고 있으며, 표 2.1.1은 국내에서 적용하고 있는 용도별 재처리 공정분류 사례를 나타내고 있다.

표 2.1.1 국내 용도별 재처리 공정분류 사례 (환경부, 2011b)

구분	용도	처리방법
범용 재이용수	청소용수	모래여과
	도시조경용수	모래여과
	친수용수	모래여과/활성탄
	하천유지용수	모래여과, MF
	관개용수	모래여과, MF
인체 접촉 및 직접 영향 재이용수	인체 접촉 세척용수	MF/RO 생물반응조 내 침지막 설치/RO
	직접관개용수	MF/RO 이상
고도환경용수	습지용수	모래여과/활성탄 MF/RO 생물반응조 내 침지막 설치/RO
	지하수충진	모래여과/활성탄 MF/RO 생물반응조 내 침지막 설치/RO
	음용수자원보충	MF/RO 생물반응조 내 침지막 설치/RO
공업용수		위 처리공법 조합 모두 가능

하수재이용 처리기술은 재이용수를 사용하는 용도와 경제성에 따라 공정이 구분되어 개발되고 있다. 환경부에서는 하수처리수를 재이용 시 도시 재이용수, 조경용수, 친수용수, 하천유지용수, 농업용수, 습지용수, 지하수 충전, 공업용수 등 그 용도를 구분하고, 용도별 수질권고기준을 제시하고 있다. 일반적으로 이차 처리수는 간접식용 작물을 위해 제한된 농경관개와 식품 공업을 제외한 냉각수용에 사용하며, 삼차 처리는 무제한적 농경관개, 조경관개, 공업용수에 사용한다. 역삼투막과 고도산화처리기술은 생활용수와 초고순도의 물을 필요로 하는 공업용수에 사용한다 (환경부, 2011b).

국내 하수처리수의 농업용수 재이용 기술은 박승우 (2011)이 2001년부터 시작한 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 개발하였다. 하수처리수 농업용수 재이용 기술은 하수처리장 방류수를 적절한 방법으로 처리하여 농업용수에 활용할 수 있도록 실용화 하는데 목적이 있다. 이를 위해 농업용수 재이용 수질기준을 제안하고 이를 충족시키기 위해 농업용수재이용 시스템을 구축하여 시범지구에 적용한 다음 논벼 생육시험 및 환경영향평가를 수행하여 현장 적용성을 검토하였다.

2. 농업용수재이용 시스템

21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 1, 2, 3 단계 연구 (박승우, 2004; 박승우, 2007; 박승우, 2011)에서는 여과, 소독, 저류 등의 3가지 요소기술의 현장 적용평가 시험을 시행하여 농업용수에 적합한 표준공정 시스템을 구축하였다 (그림 2.1.1).

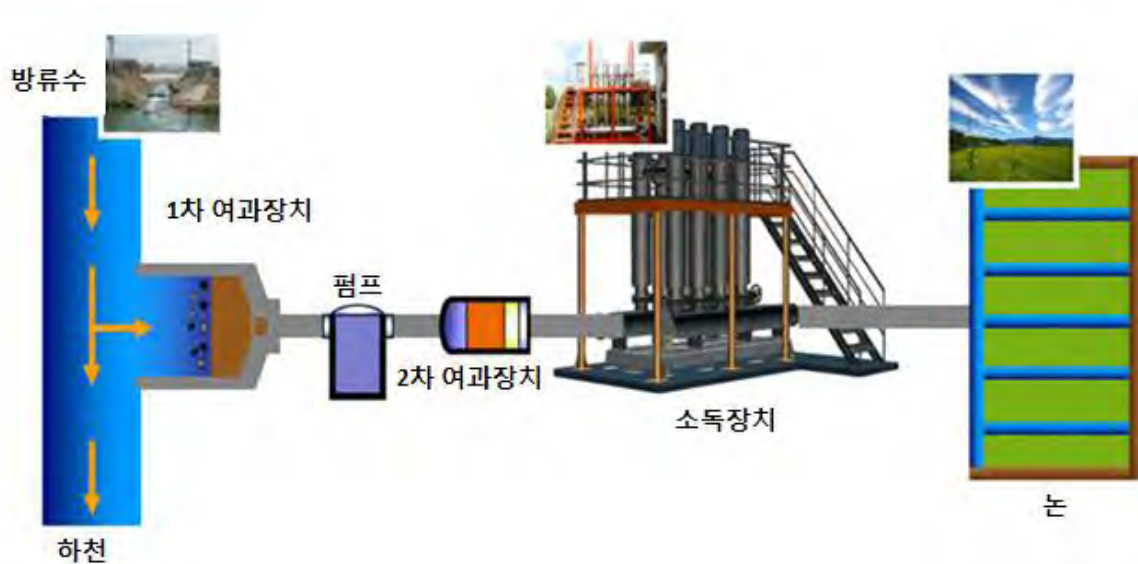


그림 2.1.1 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 표준공정 시스템

모래 여과법은 하수처리장의 2차 처리수 중 부유물질을 제거하고, 일부 영양염류의 제거에도 효과가 있을 뿐만 아니라, 충분한 정도는 아니나 여과 결과로 인한 소독효과도 나타났으며, UV소독법은 적정 조사량 이상을 적용할 경우, 대장균류(Total coliform, E. coli 등)의 소멸에 매우 효과가 높은 것으로 나타났다. 또한 저류법은 인공습지 형태의 수심조건에서 영양염류의 분해와 함께 대장균 감소 등의 작용을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 내용을 바탕으로 박승우 (2007)은 하수처리장 방류수 및 저수지, 하천수의 자외선 살균처리 시스템 및 이를 이용한 농업용수재이용 처리방법에 관한 기술을 개발하고 특허 등록을 완료하였다. 또한, 박승우 (2011)은 농업용수재이용의 현장실용화를 위해 경기도 수원 병점지구, 제주관포지구 등의 시범지구를 선정하여 현장에 개발된 표준공정 시스템을 응용 및 적용하였다.

과거 하수종말처리장으로부터 방류수의 농업용수의 재이용은 기존의 농업용수 수질기준을 충족하지 못하여 농업용수원으로 고려되지 않았으나, 위 연구 결과를 바탕으로 하수처리수의 농업용수원으로서의 수자원 확보에 크게 이바지 할 것으로 사료된다. 다만, 개발된 하수재이용시스템은 대개의 하수재이용 형태인 간접재이용에 범용적으로 사용하기에는 다소간의 한계가 있는 것으로 평가된다.

2009년 현재 전국에 적용된 하수처리수의 농업용수 재처리 공법의 현황을 정리하면 다음 표 2.1.2와 같다. 표에서와 같이 지금까지 적용된 대개의 농업용 재처리 공법은 제주관포 등을 제외하면 여과 등을 이용한 단순처리 공급 방식에 의존하고 있는 실정이다.

표 2.1.2 국내 농업용 재처리 공법 적용현황 (환경부, 2009)

지역	용도	하수처리공정	재이용공정	재이용설계방류수질
전남 강진	농업용수	SBR	처리수 단순공급	BOD 2mg/L; COD 5mg/L; SS 5.4mg/L
상주	하천유지, 농업용수	BSTS-II	처리수 단순공급	BOD 0.88mg/L; SS 2.4mg/L; TN 10.5mg/L; TP 1.25mg/L; 대장균군수 200
제주	농업용수	ECRs	탈염시설	-
천안, 성환	농업용수	-	약품투입/여과	BOD 20mg/L; SS 4mg/L; TN 10mg/L; TP 1mg/L
영암	농업용수	산화구법	여과	BOD 4 mg/L; SS 5mg/L; TN 10mg/L; TP 1mg/L

제2절 국외 기술개발현황

1. 하수재이용 현황

하수재이용을 하는 주요 국가 및 대륙은 미국, 일본, 싱가포르, 호주, 유럽 및 이스라엘, 중동 및 북아프리카 등이 있다. 표 2.2.1은 국가별 하수재이용 현황을 나타내고 있다.

일본의 경우 1979년 주로 도시업무용 화장실 세척용수로 재이용 시범사업이 실시되었으며, 1998년 사용된 재이용수는 연간 약 13만 m³ 수준으로 재이용수의 약 40%는 이중배관으로 수송되어 화장실 세척용수, 도시조경용수 등으로 사용되었다 (Ogoshi 등, 2001). 2005년 4월 하수처리수의 재이용 수질기준 등에 관한 매뉴얼을 공표하였고, 오사카시의 경우, '21세기 종합계획'을 수립하여 2013까지 재이용률 30%, 그리고 2030년까지 물 재이용률 100%를 목표로 하고 있다 (Radcliffe, 2004).

싱가포르의 경우, 가용 가능한 자연 수자원의 절대 부족으로 인하여 물소비량의 40% 정도를 인접국가인 말레이시아에서의 수입에 의존하고 있으며, 안정적인 물확보를 위하여 해수담수화 및 물 재이용에 투자를 지속적으로 늘리고 있다. NEWater는 양질의 수질을 얻기 위하여 기본적으로 dual-membrane (microfiltration과 reverse osmosis) 및 ultraviolet 공정을 사용하며 2011년까지 비음용수 용도로 24.5만 m³/일 공급을 목표로 하고 비음용수 용도 이외에 간접적 음용수로도 사용되고 있는데, 2003년 13,500 m³/일이 저수지 충전 용도로 사용되었고 (Asano 등, 2007), 간접적 음용수의 양은 2011년 4.5만 m³/일 공급을 목표로 점진적으로 늘릴 계획이다.

미국에서의 하수재이용은 관개용수로의 이용 및 간접적인 먹는 물 생산 등으로 다양한 목적으로 시행되고 있으며, WaterReuse Foundation이 전체 50개 주의 물 재이용수 관련 시설에 대한 조사를 실시하여 18개주에서 제출된 498개소의 데이터를 분석한 물 재이용 현황을 보면, 2006년도 기준으로 플로리다가 226.1만 m³/일 사용량을 보이고 전체적으로 374.33만 m³/일의 사용량을 보이고 있다. 물 재이용수의 주된 용도를 보면, 농업용수 및 관개용수로 가장 많이 쓰이고 있다.

표 2.2.1 국가별 하수재이용 현황

구분	재이용량 (백만톤/년)	재이용율 (%)	주요 용도 (%)				
			공업 용수	농업 용수	하천 및 습지 유지용 수	지하수 충진**	기타 도시환경 용수***
한 국	276* ('08년)	4.4*	5	10	77	-	8
일 본	196 ('05년)	1.5	10	6	33	-	51
싱가포르	138 ('10년)	30					
미국 플로리다	919 ('08년)	46	14	11	6	13	56
미국 캘리포니아	650 ('02년)	10	5	46	4	14	31
호 주1)	167 ('02년)	12	3	83	-	-	14
유럽	963 ('02년)	2.4	4	70	5	17	4
중동 및 북아프리카	약1,980	20~100					

* 장내 재이용수 제외

** 간접 음용수원 또는 해수침수 및 지하수위 하강 방지 목적

*** 기타 도시환경용수: 도시관개용수, 경관용수, 친수용수, 화장실용수, 도로 및 가로수 청소용수 등

주1) 용도 구분은 New South Wales 주의 경우임

호주 전체의 재이용수는 2001년 166백만 m³ (EU RTD project EVKI-CT-2002-00130, 2006)이며 2004 ~ 2005년 약 424 Ggaliters (Australian Bureau of statistics, 2004)로 증가하였으며 재이용수의 66%가 농업용수로 사용되었다.

유럽 국가는 절반 이상이 물 스트레스 국가에 속하고 있어 유럽국민의 약 70% 이상이 물부족 문제에 직면하고 있다 (OECD, 2003). 국가별 수자원 용도를 보면, 이스라엘 등 남유럽과 남동유럽의 경우 농업용수가 전체 물 사용의 약 45 ~ 85% 이상이다. 산업이 발전한 서유럽은 전력발전소/냉각수가, 북유럽은 공업용수가 전체 물사용량의 가장 큰 비율을 차지하는 반면 농업용수의 사용량은 매우 미비하다. 덴마크, 말타, 영국, 체코 등은 공공용수가 전체 물사용량의 45% ~ 70%이상을 차지하고 있다. 유럽의 재이용수는 963 백만 m³/year (AQUIREC project EVK1-CT-2002-00130, 2006)로 하수처리수의 약 2.4%가 재이용되었으며, 재이용수의 대부분이 농업용수 (70%)로 사용되었고, 지하수 충진용으

로 약 17%의 재이용수가 사용되었다. 2025년 유럽의 하수처리수의 재이용량은 기존 수자원의 1 ~ 1.5%를 대체할 것으로 전망되며 향후 스페인이 유럽국가 하수재이용률에 가장 큰 비중 (40%)을 차지할 것으로 전망된다.

중동 및 북아프리카 지역의 대부분 국가들은 제한적인 강수량, 가뭄, 도시집중화 및 인구증가 등으로 심각한 물부족 문제에 직면해 있으며 1950년 이래 1일당 재생 가능한 수자원량이 급속히 감소하고 있다. 급격한 인구증가로 재생 가능한 수자원량이 1000m³/capita/yr로 물기근 국가에 속하며 2050년에는 100m³/capita/yr에 이를 것으로 예측된다. 이 지역의 나라들은 대체 수자원으로 폐수처리수를 재이용하고 있으며 폐수 처리수의 재이용수는 주로 농업용 관개용수, 조경용수, 지하수 충전용수로 사용되고 있는 반면, 환경 유지용수, 산업용수, 화장실 세척용수로는 드물게 사용되고 있다.

2. 하수재이용 기술현황

하수재이용은 국외의 많은 국가에서 시행하고 있으며 전 세계 40여국에서 실용화되거나 연구 중에 있다 (Scott 등, 2011). 세계의 지역별 총 도시 하수재생설비는 약 3,000여 개 이상으로 확인되며 이중 일본 (1,800개 이상)이 가장 많은 설비를 보유하고 있다.

대륙별 하수재이용 기술현황을 살펴보면, 농업용 하수재이용이 큰 비중을 차지하고 있는 라틴 아메리카 지역은 80% 이상의 도시하수처리설비가 안정화지를 이용한 제한적 관개용수를 생산하며, 소독공정을 포함한 숙성조를 함께 적용할 경우에는 무제한적 관개용수로의 이용이 이루어지는 것으로 보고되고 있다. 칠레, 코스타리카와 멕시코 외에 증발산량이 많은 건조 또는 반건조 지역의 안정화지 부지 확보가 어려운 경우에는 안정화지를 대신하여 활성슬러지, 혐기성 여상 반응기(anaerobic filters)와 상향류 혐기성 슬러지층상 반응기(Up-flow Anaerobic Sludge Blanket) 등을 이용하는 것으로 보고되고 있다 (환경부, 2011b).

중동 및 지중해 지역에서는 50% 이상의 하수재생설비에서 이차 처리기술을 사용하며, 걸프지역 국가들은 식량작물 관개, 조경관개 또는 지하수 충진을 위해 고도하수처리기술 사용하기 시작하였고, 한외여과와 역삼투압 여과와 같은 분리막을 활용한 공정이 현재 쿠웨이트의 Sulaiyah에 위치한 하수처리플랜트에서 적용되어 무제한적 비식수용 재생수를 생산하고 있다. 소독 공정에 있어서는 염소소독이 주로 사용되어지나 쿠웨이트, 아랍에미리트와 튀니지에서는 현재 UV소독이 개발 중이며, 아랍에미리트의 아부다비와 사우디아라비아에서는 오존 처리를 통한 소독 공정이 이루어지고 있다 (환경부, 2011b).

유럽, 오세아니아와 북미 지역은 관개용수, 지하수 충전, 환경 및 친수용수 관련 도시용수 재이용을 위해서는 이차 처리 공정보다는 삼차 처리 공정을 적용하고 있으며, 스페인, 그리스, 이탈리아, 포르투갈, 키프로스, 이스라엘은 여과 및 분리막여과와 소독과정이 종래의 고도하수처리에 추가되어지는 경우가 최근의 추세이다. 유럽에서는 식수와 같은 수준의 수질을 생산하기 위해 다층개념 (multi-barrier concepts)¹⁾을 도입하여 사용하고 있다 (환경부, 2011b).

1) 다층개념은 식수 처리에서 적용 되는 원리로 병원체와 해로운 유기 및 무기 오염물질이 수처리시스템(the water system)으로 들어가는 것을 방지하기 위한 여러 장치를 제공하는 것으로 이는 여러 폐수처리 공정의 조합으로 나타나거나 환경적 버퍼(environmental buffer)의 형태로 나타난다 (Asano 등, 2007).

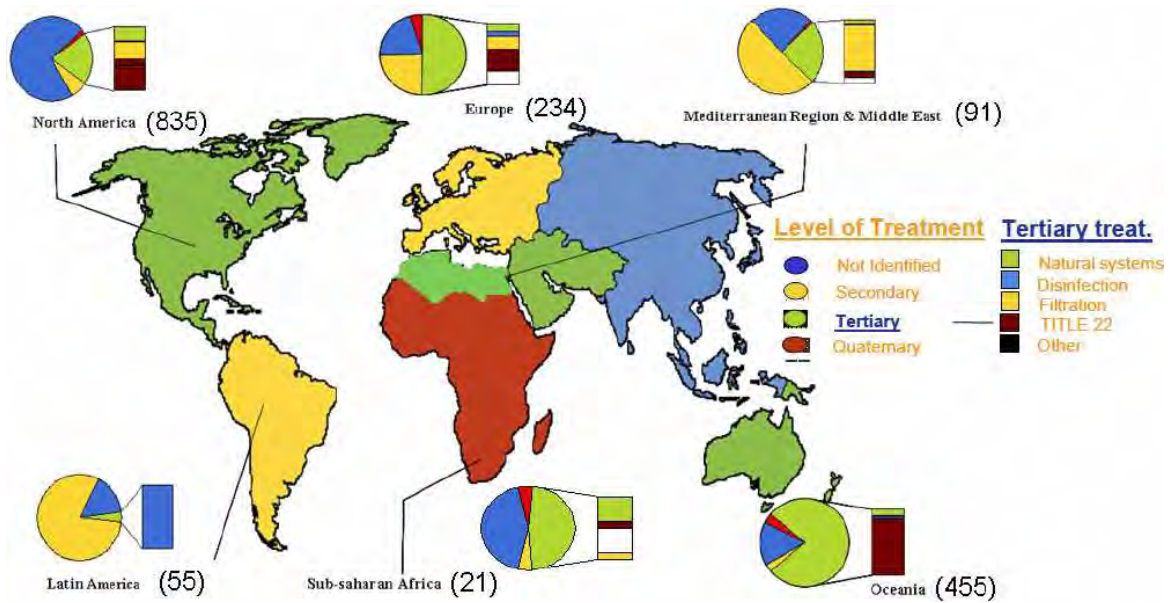


그림 2.2.1 세계 지역별 폐수처리공정 기술이용도 (Bixio 등, 2008)

하수재이용에 대한 기술 개발은 국가별로 수행될 뿐만 아니라 국제기구에서도 대체수 자원으로의 중요성을 인식하고 주요 연구 분야로 선정되어 진행되고 있다. 대부분의 기구에서 하수재이용을 농업용수 등으로 사용하는 가이드라인을 제시하고 인체위해성 및 경제성 평가 결과를 제시하고 있다.

WHO (2006)는 향후 50년 동안 전 세계 인구의 40%가 물 부족 문제에 직면할 것으로 예상하고 있으며, 한정된 청정수자원에 대한 농업지역과 도시지역의 갈등이 증가하여 하수의 농업용수 재이용에 대한 관심이 증가할 것으로 보고하고 있다. 최근 들어 하수는 중요한 대체 수자원으로써 인식이 개선되고 있으며, 환경적 지속가능성과 빈곤을 동시에 해결하기 위한 방안으로 제안되고 있다. WHO (2006)에서는 개발도상국 및 산업화가 진행되는 국가를 대상으로 하수를 농업용수로 재이용하기 위한 가이드라인을 제시하고 있다. 이 가이드라인은 그림 2.1과 같은 스톡홀름 프레임워크 (Stockholm Frameworks)에 기반을 두고 있다. 스톡홀름 프레임워크는 위험 평가 (risk assessment)와 위험 관리 (risk management)를 결합한 통합적 접근방식을 통해 하수의 농업용수 재이용에 의한 질병 확산을 사전에 관리하는 가이드라인을 제시하고 있다.

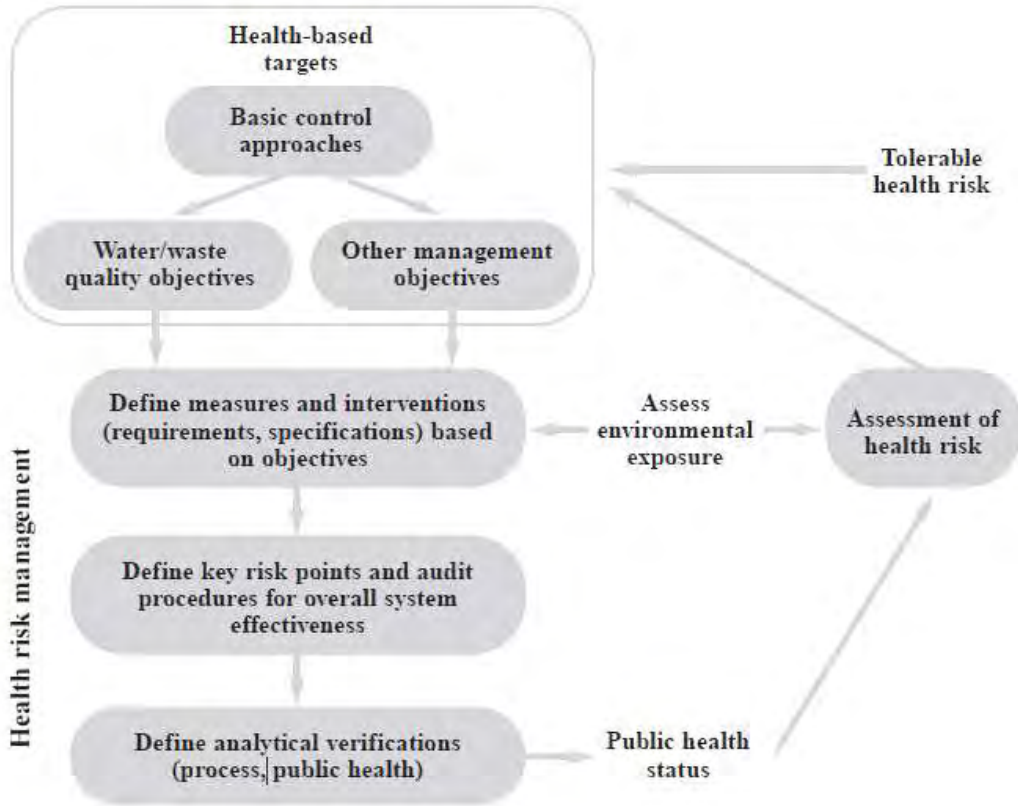


그림 2.2.2 스톡홀름 프레임워크

WHO (2006)에서는 하수재이용에 따른 인체위해성을 평가하기 위한 방법으로 미생물 및 화학 실험 분석 (microbial and chemical laboratory analysis), 유행병 연구 (epidemiological studies), 그리고 정량적 미생물 및 화학 분석 (quantitative microbial and chemical) 방법을 이용하였으며, 이를 통해 산출된 결과를 제시하고 있다. 유행병 연구결과, 적절히 처리되지 않은 하수의 경우의 창자기생충 (intestinal helminth)관련 질병이 가장 위험할 수 있을 것으로 보고 있으며, 정량적 미생물 위해성 평가 (quantitative microbial risk assessment, QMRA)를 통해 제한 및 비제한적 관개에 따른 로타바이러스 감염증 (rotavirus infection)이 다른 바이러스에 비해 위험도가 높은 것으로 보고하고 있다.

WHO (2006)는 하수재이용 과정에서 발생할 수 있는 인체 위험을 방지하기 위한 방법으로 소비자, 작업자, 그리고 지역주민으로 대상을 구분하여 제시하고 있다. 소비자의 인체 위험 방지 방법으로는 수처리, 제한적 관개, 관개 후 적절한 시간대기 (병원균이 사멸할 때 까지), 식료품점의 위생시설 설치, 건강 및 위생 관련 인식 개선, 세척 및 소독 등을 제시하고 있다. 농부와 같은 작업자를 대상으로는 보호 장비의 착용, 안전한 식수 이용, 건강 및 위생 관련 인식 개선 등을 제시하고 있다. 하수재이용 지역은 작업자 외에도 인근에서 활동하는 어린이 등이 위험에 노출될 있으며, 이들의 관개지역 및 수리시설물로의 접근을 제한하고, 주요 활동 지역에 대해서는 깨끗한 물을 사용할 것을 권장하고 있다.

WHO (2006)는 하수재이용 시스템이 새로운 지역에 적용될 경우 검정 (validation), 운영상 모니터링 (operational monitoring), 검증 (verification) 등의 절차로 모니터링을 수행할 것을 제안하고 있다. 검정은 재이용 시스템을 새로운 지역에 적용할 경우, 그 시스템이 목표를 충족시킬 수 있는지를 평가하기 위하여 수행된다. 운영상 모니터링은 영농기에 목표 항목을 주기적으로 측정하여 빠르게 대처하는 것을 목적으로 한다. 검증은 영농활동의 최종 결과물인 작물 등이 기준치를 충족시키는지 평가하기 위해 수행된다. 이들 과정을 종합하여 하수재이용에 따른 인체 안전성을 평가하기 위하여, 농업용수가 공개되기 시작하여 소비자가 작물을 접할 때까지의 모든 과정에 대한 위해성을 평가해야 한다고 제안하고 있다.

추가적으로 WHO (2006)은 하수를 재이용하는 지역의 사회·문화적, 환경적, 그리고 경제적 측면도 고려해야 한다고 보고하고 있다. 사회·문화적 측면으로, 해당 지역 거주자의 활동패턴은 질병의 확산과 중요한 연관을 가지기 때문에 고려가 되어야 하며, 거주자들의 하수재이용에 대한 인식 또한 고려사항이 될 수 있다. 환경적으로 하수의 농업용수 재이용은 비료 사용량을 줄일 수 있고, 농경지에서 흘러나가는 배출부하량을 저감하여 하류 하천의 수질을 개선시킬 수 있다. 하지만 하수를 무계획적으로 이용하거나, 미처리 상태로 농경지로 유입되는 지역의 경우 악영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 공업용수는 가정용수에 비해 유해성분을 더 많이 함유하고 있어 농업용수로 재이용하기에 더 위험하며, 작업자의 인체 위해도가 높을 수 있고, 생산되는 작물에 유해한 성분이 함유될 가능성이 있다. 따라서 이러한 지역의 경우 유해성분을 저감할 수 있는 적절한 시설을 설치해야 한다. 마지막으로 실행 가능한 적정 예산 범위에서 재이용 시스템이 설치되어야 한다고 보고하고 있다.

FAO (2012)에서는 FFS (Farmer Field Schools)에서 사용하기 위해 하수재이용에 관한 트레이닝 핸드북을 발간하였다. 핸드북에서는 하수재이용의 기본적인 개념과, 하수의 농업용수 재이용에 따른 인체위해성에 대하여 소개를 하고 있다. 또한 그림 2.2와 같이 하수의 농업용수 재이용에 의한 인체위험성을 감소시킬 수 있는 간단한 절차 등을 포함하고 있어, 하수재이용에 대한 인식이 부족한 국가에서 교육용 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 우리나라에서도 일반 국민들 및 농민들 사이에서 하수의 농업용수 재이용에 대한 인식이 부족한 상황으로, 이와 같은 핸드북이 발간된다면 하수재이용에 관한 소개 및 교육 자료로 용이하게 활용될 수 있을 것이다.

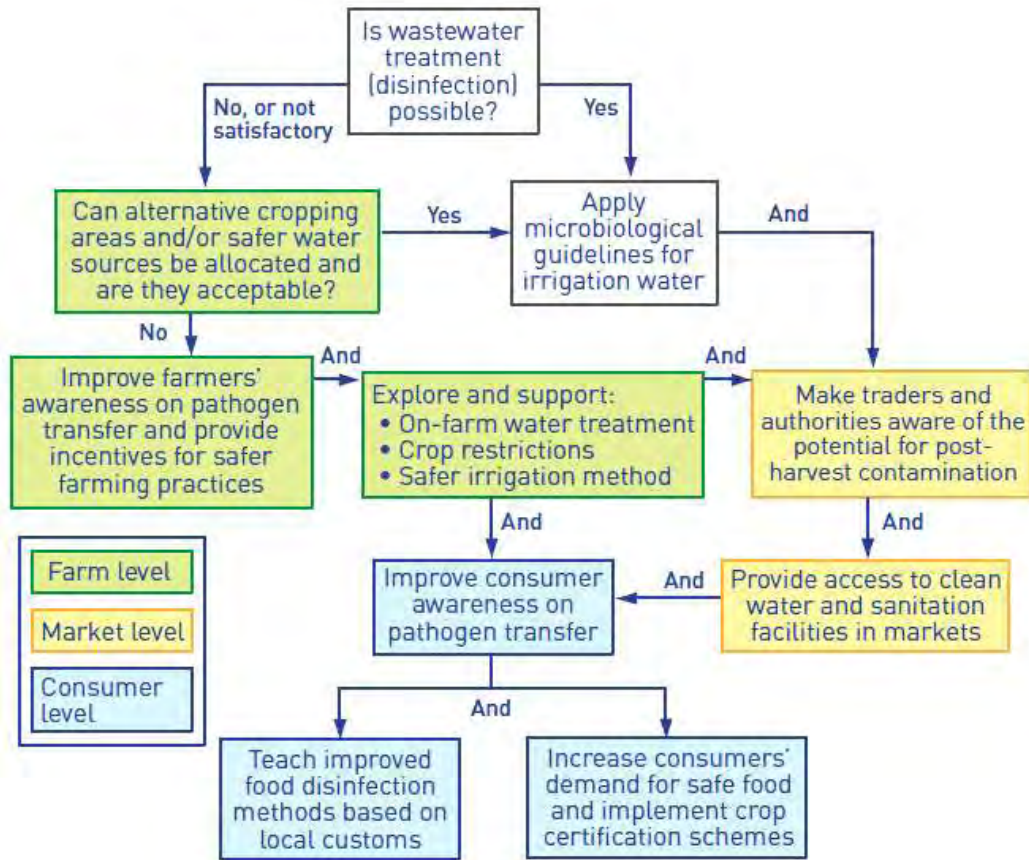


그림 2.2.3 하수처리수의 안전한 농업용수 재이용을 위한 최적 프레임워크

WHO (World Health Organization), UNEP (United Nations Environmental Programme), 그리고 FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations)에서는 하수재이용 시 적절한 건강 및 환경문제에 대한 가이드라인을 제시하고 있다. 하수를 재이용하는 것은 많은 위험성을 담고 있으며, 미처리 된 하수는 다양한 병원균 및 침전물을 함유하고 있으며 이는 사회 구성원들의 심각한 건강문제를 야기할 수 있다. 이를 해결하기 위한 해결책으로 가장 효율적인 방법으로 여러 가지의 방어책을 혼합하여 사용할 것을 제시하고 있다. 이와 관련하여 수처리, 살균처리, 생산품의 세척 등의 방법이 있으며 이들을 복합적으로 사용함으로써 건강 및 환경문제에 대한 위험성을 저감시킬 수 있다 (그림 2.2.4 ~ 그림 2.2.5).

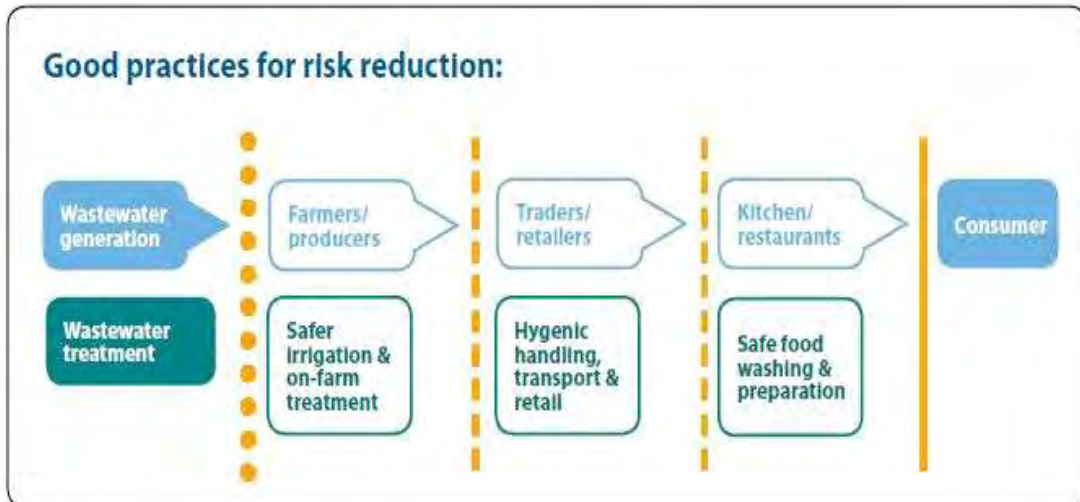


그림 2.2.4 하수재이용에 따른 위험을 감소시키기 위한 가이드라인

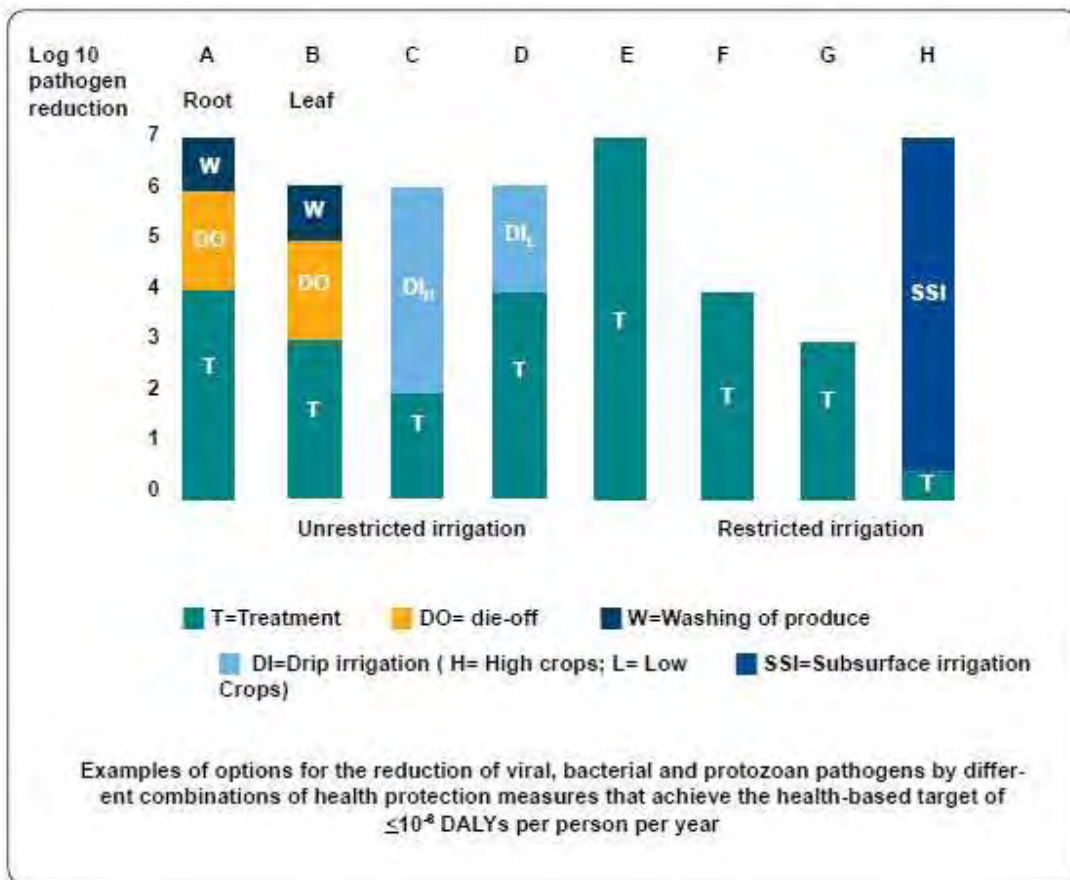


그림 2.2.5 복합적인 방어책 사용을 통한 건강 및 환경문제에 대한 위험성 저감의 예

제3절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

농업용수의 이용은 농업환경을 둘러싼 지역 및 국가 간 편차가 크게 존재하기 때문에 단선적인 비교가 어려운 것이 사실이다. 우리나라의 경우, 농업용수의 80% 정도를 논벼 관개용수로 사용되고 있으며, 이는 하수재이용이 활발히 이루어지고 있는 북·남미와 오세아니아, 그리고 지중해연안 국가들과 큰 차이를 보이는 특징이라 할 수 있다.

우리나라의 연간 물 사용량은 333억 m^3 이며, 그중 농업용수가 159억 m^3 으로 전체 물 사용량의 48%를 차지하고 있다 (국토해양부, 2011). 이는 하천유지용수를 제외한 물 사용량의 62%로 실제 수자원이용의 대부분을 차지한다. 도시화 및 생활수준의 향상으로 물 사용량이 지속적으로 증가할 것으로 예상되며 (이강희와 채창우, 2011), 수질악화로 인한 양질의 담수 수자원이 제한된 상황 (김성욱 등, 2011)은 물 사용량이 가장 많은 농업용수에 큰 도전이 되고 있다. 또한, 기후변화에 따른 극한가뭄과 시설재배지 증가와 같은 영농형태의 변화는 용수사용의 계절적 변동성이 큰 농업용수의 안정적인 확보를 어렵게 하고 있다. 이로 인하여 용수의 사용효율을 증가시키고, 안정적인 용수공급이 가능한 대체수자원의 확보가 농업용수를 포함한 수자원 이용의 주요한 사안이 되고 있다.

우리나라의 경우 일처리용량 500 m^3 이상의 전국 하수처리장 505개 중 63개의 하수처리장 방류수가 농업용수로 이용되고 있다 (환경부, 2012a). 도시화와 하천수질 개선을 위한 하수처리장의 증설은 도시와 도시인근의 영농활동에 대한 하수처리장 방류수의 직간접적인 재이용을 증가시키고 있으며, 마을하수처리장의 증가는 농촌지역에서 하수처리수의 무계획적 농업용수 이용을 야기하고 있다. 특히, 하수처리장 방류수 수질기준은 농업용수 및 하수처리수 재이용 수질권고기준을 크게 초과하며, 농업용수를 취수하는 하천구간에 대한 생활오수 및 하수처리장 방류수의 영향을 연구한 결과, 하천수질이 재이용 수질기준을 만족하지 못함에 따라 보건 및 환경에 대한 면밀한 검토가 필요한 것으로 보고되고 있다 (김동욱, 2009; 김지혜 등, 2012).

이와 같은 농업수자원을 둘러싼 환경변화에 대응하기 위하여 본 연구에서 개발된 하천보를 활용한 소용량 간접재이용시스템, 양수장을 활용한 중대용량 간접재이용시스템, 그리고 이동식 간접재이용시스템은 다양한 농업용수 이용 환경에서 적용될 수 있는 시스템으로 평가될 수 있다. 특히, 고효율의 재처리시스템 공정을 포함하고 있음에도 불구하고 유지관리비용이 매우 저렴한 경제적인 간접재이용시스템은 농업용수 이용의 특수성을 잘 반영할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 개발된 재이용시스템은 농업용저수지의 담수 수질악화와 하천 및 호소의 녹조제거에도 효과적인 것으로 나타남에 따라 타분야로의 파급효과도 기대할 수 있다. 또한, 기존의 막여과에 기초한 고도처리 주도의 물 재이용 산업에 나노버블 및 멀티사이클론과 같은 새로운 기술을 통한 시장 확대 및 경쟁력 강화에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 평가된다.

본 연구를 통해서 개발된 물리적인 시스템 이외에도 우리나라 현실을 반영한 간접재이용 수질기준(안)은 농업용수 수질기준 및 하수처리장 방류수 수질기준 등 하수처리수의 농업용수재이용과 관련한 수질기준에 중요한 참고자료로서의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 미처리하수 및 하수처리장 방류수의 간접재이용에 따른 논벼를 둘러싼

일련의 환경 모니터링 기술을 통해 확보한 다양한 모니터링 자료들은 우리나라의 하수재이용기술에의 기초자료를 제공함은 물론, 전세계적으로 참고할 수 있는 기초자료로서 지위를 차지하는 것으로 사료된다.

이와 같은 기술수준에도 불구하고, 개발된 기술을 확대 재생산하고, 광범위하게 보급하기 위해서는 해당기술의 홍보 및 교육활동이 매우 중요한 것으로 평가된다. 본 연구의 수행과정과 종료 후에도 지속적으로 유관기관과의 협조를 통해서 홍보 및 교육활동을 수행하고 있으나, 하수재이용에 대한 국민적인 인식수준이 낮고, 실용화를 위한 대규모 농경지에의 재이용 사례가 제한적이며, 재이용 경험이 거의 전무한 현실에 비추어 현장 기술자가 부족한 명백한 한계가 존재한다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해서는 재이용기술보급 및 현장지도업무를 활성화하기 위한 전문 T/F팀을 구성하고 재이용사업의 시작부터 정착에 이르기까지 단계별로 기술적 지원 및 물관리 요원 등의 교육훈련 등을 통한 기술정착과 유관분야로의 기술이전을 위한 지속적인 기술발전의 노력이 필요하다.

본 연구를 통해 개발된 하수처리수의 간접재이용 기술은 실용화를 통해 기후변화 및 농업용수 수요변동에 대응한 친환경 농업수자원 확보를 가능하게 하고, 하수재이용에 대한 산업기반 구축 및 국제 경쟁력 강화를 통해 물 재이용 산업의 새로운 성장 동력을 창출할 것으로 기대된다.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 하수처리수의 농업용수재이용 유형과 그 특징

1. 서론

전세계적으로 하수를 이용한 영농형태는 다양하고 광범위하게 이루어지고 있다. 전세계적으로 2,000만 ha이상의 농경지가 하수를 농업용수로 이용하고 있으며 (Hamilton 등, 2007), 전세계인구의 10% 이상이 하수를 이용하여 재배한 농산물을 소비하는 것으로 보고되고 있다 (WHO, 2006).

우리나라의 경우에도 일처리용량 500 m³이상의 전국 하수처리장 505개 중 63개의 하수처리장 방류수가 농업용수로 이용되고 있다 (환경부, 2012). 도시화와 하천수질 개선을 위한 하수처리장의 증설은 도시와 도시인근의 영농활동에 대한 하수처리장 방류수의 직간접적인 재이용을 증가시키고 있으며, 마을하수처리장의 증가는 농촌지역에서 하수처리수의 무계획적 이용을 야기하고 있다. 특히, 하수처리장 방류수 수질기준은 농업용수 및 하수처리수 재이용 수질권고기준을 만족하지 못함에 따라 보건 및 환경에 대한 면밀한 검토가 필요한 것으로 보고되고 있다 (김동욱, 2009; 김지혜 등, 2012).

이와 같은 상황에서 적절한 하수처리수의 농업용수 재이용을 위해서 하수처리수의 수준에 따른 시비방법 (Jeong 등, 2014)과 재처리시스템 및 재이용시스템 등이 소개되고 있으나, 최적의 하수재이용과 지속가능한 하수재이용 정책의 실현을 위해서는 하수 재이용 유형을 우선적으로 구분할 필요가 있다. 이를 통해 유형별 맞춤형 최적관리기법의 적용을 통해 목표한 하수재이용 정책을 달성할 수 있기 때문이다. 따라서 본 절에서는 우리나라 하수재이용 현실을 고려하여, 하수재이용의 유형을 구분하고, 유형별 사례를 살펴보고자 한다.

2. 하수재이용 유형

하수재이용의 형태는 전세계적으로 다양하게 존재할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 우리나라의 실정에 맞고, 수월한 정책적 관리를 위해서 재이용의 형태를 최소화하고자 직접 또는 간접재이용, 계획적 또는 무계획적 재이용, 그리고 하수의 처리수준 등의 세 가지 기준을 통해서 하수재이용 유형을 구분하였다.

하수처리수의 농업용수재이용은 크게 직접재이용과 간접재이용으로 구분할 수 있다 (Rutkowski 등, 2007). 직접재이용은 기존의 하수처리장 수처리 공정에 농업용수재이용을 위한 재처리 공정을 추가하여 하수처리장으로부터 재이용수를 공급받아 관개용수로 이용하는 것을 말하며, 간접재이용은 하천으로 유입된 하수처리장 방류수 및 미처리 하수를 하류 구간에서 취수하여 이용하는 방법을 의미한다 (박승우와 장태일,

2009). 직접재이용의 경우 관개용수 수질이 하수처리장 방류수질에 의해 결정되기 때문에 재이용시스템을 포함한 하수처리장의 수처리 공정 관리를 통해 관개용수 수질을 조절 및 예측할 수 있다. 하지만 간접재이용의 경우, 하수처리장 방류수 수질 외에도 하천의 유황조건이 관개용수 수질에 큰 영향을 미치기 때문에 이에 따른 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

하수재이용의 계획여부에 따라 계획적 재이용 (planned reuse)과 임의적 또는 무계획적 재이용 (unplanned reuse)으로 구분할 수 있다. 계획적 재이용은 하수처리장 방류수로 인하여 농업용수의 수량, 수질에 대한 영향과 이로 인한 작물 생육 및 인체 위해성 정도를 평가하고 대책을 마련한 후 계획적으로 취수하여 이용하는 것을 의미하며, 무계획적 재이용은 상류로부터 흘러드는 미처리하수 또는 하수처리수를 농업용수로 이용하는 형태를 말한다. 직접하수재이용은 대부분 계획적 재이용형태이며, 간접하수재이용은 계획적 또는 무계획적 재이용 형태로 나타난다. 또한, 하수재이용 계획의 주체는 정부와 농민 모두 될 수 있다. 농민은 하수재이용을 의도적으로 사용할 수 있는 의도성을 포함한 계획의 주체가 될 수 있다. 하지만 안전하고, 지속가능한 하수재이용을 위해서는 하수재이용의 의도 외에도 정책적으로 계획하고, 필요에 따라 안전한 시스템을 적용할 수 있어야 한다. 따라서 의도성을 포함한 계획의 주체뿐만 아니라 정책적 계획을 실현할 수 있는 정부만을 계획의 주체로 고려하였다.

농업용수로 이용하는 하수의 처리수준은 하수를 이용한 농업활동의 대상이 되는 농작물을 결정할 뿐만 아니라 필요한 수질기준과 추가적인 처리수준을 달리할 수 있기 때문에 하수재이용 유형을 구분함에 있어 주요한 기준이 된다. 농경지에 공급되는 하수는 처리수준에 따라 미처리하수, 하수처리수, 그리고 재처리수 등 세 가지로 분류할 수 있다. 미처리하수는 가정에서 처리되지 않은 상태로 농경지에 유입되는 하수를 의미하며, 하수처리수는 생활하수가 차집되어 하수처리장에서 처리된 상태의 하수를 의미한다. 또한, 재처리수는 하수처리수를 이용목적에 맞게 추가적인 처리과정을 거친 하수를 의미한다. 미처리하수는 농업용수 수질기준을 만족시키지 못하는 경우가 대부분이기 때문에 특별한 관리와 조치가 필요하며, 하수처리수 또한 농업용수 수질기준을 만족시키지 못하는 경우가 많아, 농업용수로 사용할 수 있는 작물에 제한이 따른다. 재처리수의 경우, 지역별 수자원현황과 농업용수의 이용실태에 따라서 사용할 수 있으며, 추가적인 처리과정을 필요로 하기 때문에 경제성 검토가 요구된다. 우리나라에서 이루어지고 있는 대개의 하수재이용 형태는 하수처리수를 농업용수로 사용하고 있으며, 필요에 따라 재처리수와 미처리수를 농업용수로 사용하는 경우도 있다.

표 3.1.1 하수처리수의 농업용수 재이용 유형분류

구분	직접(D)/간접(I)	계획(P)/무계획(U)	하수처리수준(I, II, III)	주요 특징	사례 지구	비고
DU-I	직접하수재이용	무계획적 이용	미처리하수 (I)	간이 정화조 처리 후 배수로 를 통하여 농지로 유입	농업기반시설이 미비한 농촌부락 주위의 농지 *거의 나타나지 않는 형태	
DP-II		계획적 이용	하수처리수 (II)	하수처리장 방류수를 저류지 및 도수시설을 이용하여 취수 및 농지로 직접 공급	제주대정, 강화, 부곡, 천안지구	
DP-III			재처리수 (III)	하수처리장 방류수를 농업용 수 재이용수질기준에 맞도록 재처리하여 농지로 직접 공급	제주관포, 제주월정지구	
IU-I	간접하수재이용	무계획적 이용	미처리수 (I)	미처리하수가 자연적으로 관 개수로나 하천 및 호소로 유 입되어 이용	하수보급이 안된 지역의 미처리하수 이용 형태	
IU-II			하수처리수 (II)	하수처리장 방류수가 하류 농 업용수 수원공으로 유입되어 이용	미호천 정봉, 오산지구 *대부분의 하수재이용 형태	
IP-II		계획적 이용	하수처리수 (II)	하수처리장 방류수를 하천 또 는 호수 유입 후 농업용수의 계획적 공급	부곡저수지	
IP-III			재처리수 (III)	희석된 하수처리장 방류수를 농업용수로 안전하게 재이용 하도록 재처리시설을 설치하 여 농업용수 공급	수원 병점지구	

3. 직접하수재이용의 유형별 사례 및 특징

직접하수재이용은 미처리하수나 하수처리장 방류수를 농업용수로 직접 이용하는 것으로 그림 3.1.1에서와 같이 1) 미처리하수를 직접 농업용수로 이용하는 경우 (DU-I), 2) 하수처리수 (하수처리장 방류수)를 농업용수로 이용하는 경우 (DP-II), 3) 재처리수를 농업용수로 이용하는 경우 (DP-III)로 유형을 구분할 수 있다. 하수처리수 및 재처리수를 농업용수로 이용하는 경우를 하수재이용사업으로 구분하며, 환경부에서 주관하여 시행하고 있다.

미처리하수는 WHO (1987)의 농업용수 재이용수질지침에서 제한적인 관개에 적용하도록 권고하고 있으며, 우리나라의 경우에는 계획적으로 미처리하수를 관개하는 사례가 없기 때문에 미처리하수를 직접 관개하는 경우에는 모두 무계획적 직접재이용 형태 (DU-I)로 분류하게 된다. DP-II는 농업기반시설을 시군에서 관리하는 지구에서 주로 나타나며, US EPA (2004)의 하수재이용 수질지침에서 제한적 관개용수로 권고하고 있다. DP-II 지구 중 논벼 관개용수로 쓰고 있는 지구에서는 재이용으로 인한 영농상의 문제는 보고된 바가 없으나, 시기별로는 영농 작업자의 건강 위험성이 나타날 가능성도 배제할 수 없는 것으로 분석되었다 (박승우, 2011). 따라서 무제한적 재이용을 위해서는 작물 생육에 지장이 없고, 보건위생적으로 안전성을 확보할 수 있는 DP-III을 제안하고 있다. 한국농어촌공사에서 관리하는 지구에서는 DP-III을 표준으로 채택하고 있으며, 이는 하수처리수를 안전하게 재이용하고자하는 노력에서 비롯된다.

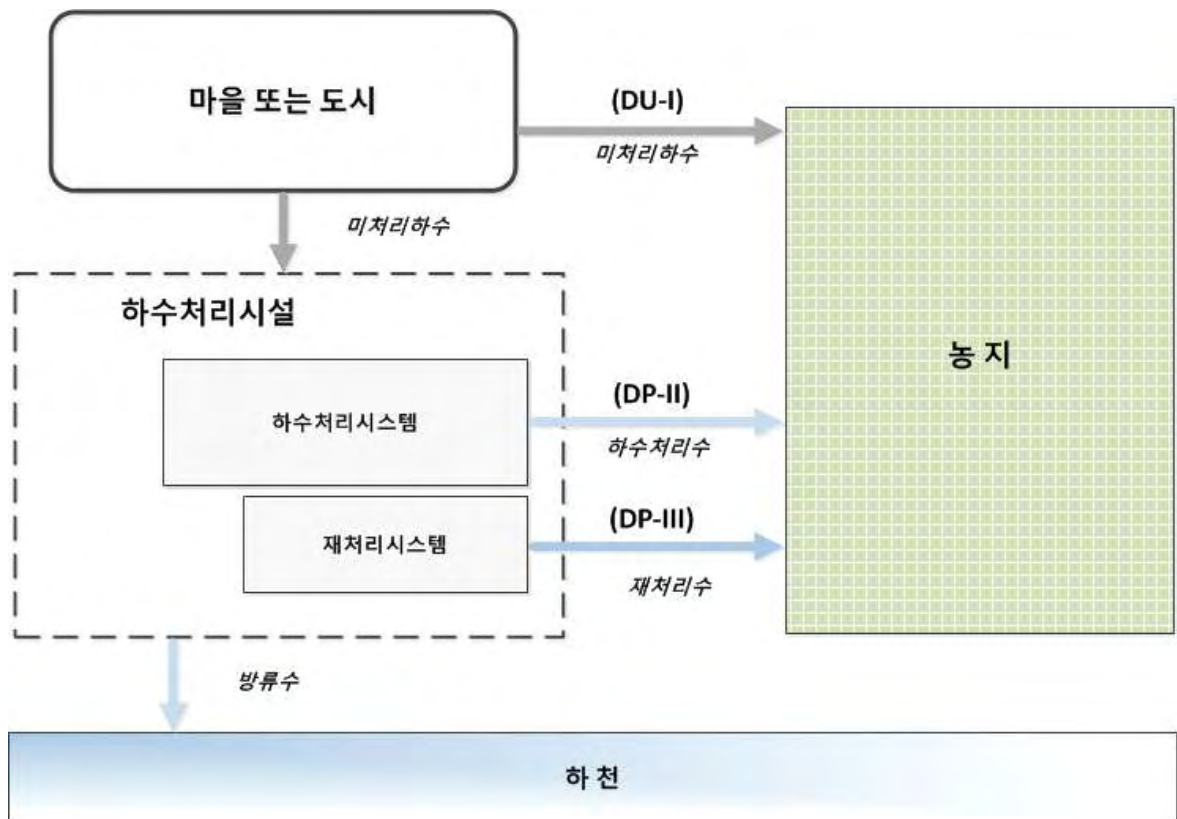


그림 3.1.1 직접하수재이용 개념도

3.1. 미처리하수의 무계획적 직접재이용 (DU- I)

우리나라에서 현재 계획적으로 미처리하수를 직접재이용하는 사례는 없다. 다만 농업기반시설이 미비하였던 과거에는 마을하수를 배수로를 통해 논으로 흘러 보내 관개용수를 보충하였던 관행이 있었으며, 자연적인 습지 형태의 소규모 저류지를 통하여 흘러가도록 하기도 하였다. 소위 문전옥답이라고도 불렸던 마을 앞 논은 수리시설 없이도 물 걱정이 없었을 뿐 아니라 마을하수 중에 함유된 비료성분을 이용할 수 있는 경우도 있었다. WHO (1987)는 미처리 하수를 농업용수로 이용하는 여러 사례를 제시하고 있으며, 이로 인하여 인체 보건 위험도를 관리할 수 있도록 수질지침을 제시하고 있다.

3.2. 처리수의 계획적 직접재이용 (DP-II)

대정하수처리장은 일처리용량 8,000 m³으로 주위 농경지에 물이 부족한 시기에 하수처리장 방류수를 이용할 수 있도록 재처리공정이 없는 저류조를 설치하여, 농민이 직접 하수처리수를 재이용하도록 하였다. 그러나 재이용수의 염도가 높아 채소작물의 농업용수로 사용할 수 없어 현재는 이용되지 않고 있다. 그림 3.1.2는 제주 대정하수처리장에 설치한 재이용수 저류조를 보여준다.



그림 3.1.2 제주대정지구의 재이용 처리수 저류조

3.3. 재처리수의 계획적 직접재이용 (DP-III)

판포지구는 제주시 한경면 판포리 일대의 농지에 농업용수를 공급하기 위하여 일처리용량 6,000 m³의 제주서부 판포하수처리장에 재처리시스템을 설치하고, 재처리수를 농업용수로 공급하는 지역이다.

판포하수처리장 방류수는 전기전도도가 980~1,450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 다른 지역보다 높은 값을 나타내며, 시기에 따라서는 2,000~3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도의 높은 농도를 나타낸다. 이는 해안선 가까이에 설치된 하수관거로 인해 염분이 높아지는 경우로 알려져 있다.

판포지구의 하수재이용을 위한 재처리시스템은 ECRS공정을 채택하고 있으며, 희석식과 UF여과기를 적용하고 있다. 재처리된 용수는 송수관로를 통해 저류조로 보내지고, 용수관로를 통해 포장으로 보내진다 (그림 3.1.3).



(a)

(b)

그림 3.1.3 제주판포지구 (a)재처리시스템과 (b)저류조

4. 간접하수재이용의 유형별 사례 및 특징

미처리하수가 농업용수 수원공으로 유입되거나, 기존의 농업용수 수원공 상류에 하수처리장이 설치됨에 따라 하수처리장 방류수가 농업용수 수원공으로 유입되어 농업용수로 이용되는 것을 간접재이용이라 한다. 하수처리수의 간접재이용 유형에는 그림 3.1.4와 같이 무계획적으로 미처리하수를 재이용하는 유형 (IU-I), 하수처리수를 무계획적으로 간접재이용하는 유형 (IU-II)과 계획적으로 재이용하는 유형 (IP-II), 그리고 하수처리수를 재처리시스템을 이용하여 재처리한 후, 간접재이용하는 유형 (IP-III)으로 구분할 수 있다.

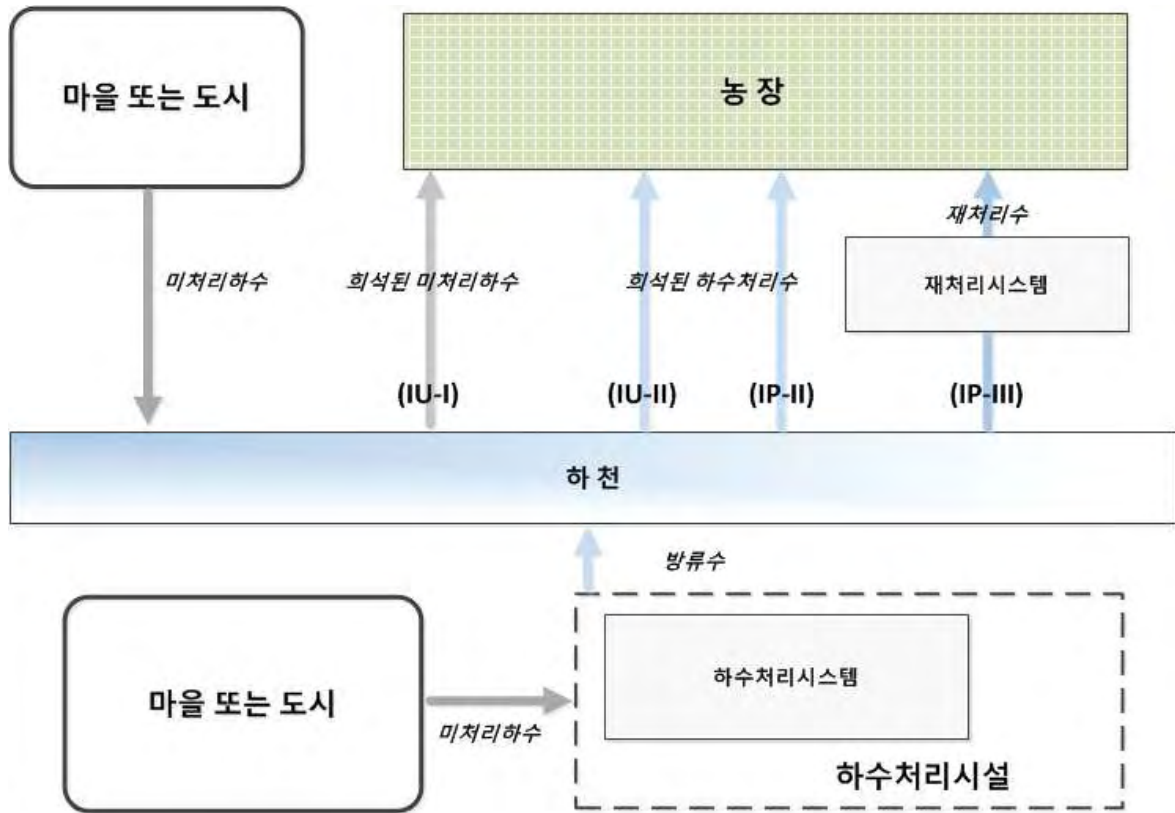


그림 3.1.4 간접하수재이용 개념도

4.1. 미처리하수의 무계획적 간접재이용 (IU- I)

미처리하수 중 일부는 농업용수로 쓰는 경우가 있으며, 무계획적 재이용 유형으로 분류할 수 있다. 미처리하수의 이용 유형을 세분하면 1)배수구로부터 농지로 흘러들어 농업용수로 쓰는 경우, 2)하천으로 흘러나가 취입보를 통하여 농업용수로 쓰는 경우, 3)미처리하수가 저수지로 모여 농업용수로 쓰는 경우 등으로 구분할 수 있다.

이와 같은 미처리하수의 간접재이용 형태는 농업기반시설이 갖춰지지 않은 경우에 나타나며 본 연구의 미처리지역과 같은 소규모 농지에서 볼 수 있다. 용수원이 없는 천수답의 경우 계곡에서 흘러드는 물과 마을 잡배수 등을 용수로 이용하게 되는데, 이러한 경우에 나타나는 자연적인 관개방식이다. 또한, 산재된 마을로부터 배수로를 통하여 마을하수가 유입되어 하류에 위치한 농업기반시설에서 취수되어 농업용수로 쓰이는 사례도 있다.

4.2. 하수처리수의 무계획적 간접재이용 (IU- II)

현재 우리나라에서 이루어지는 대부분의 하수재이용 형태가 하수처리수의 무계획적 간접재이용에 해당한다. 본 연구에서의 시험지구로 선정된 오산천 유역의 경우에도 오산하수처리장의 방류수가 하천수에 희석되어 무계획적으로 간접재이용되고 있는 경우에 해당한다.

또한, 충북 청주시에 위치한 청주하수처리장은 일처리용량이 280,000 m³이며 그림 3.1.5와 같이 미호천으로 방류되고 있다. 하수처리장 하류 1 km 이내에 정봉양수장이 위치하며, 최대양수량은 30 m³/s로서 160 ha 농경지에 농업용수를 공급하고 있다. 정봉양수장은 하수처리수로 인하여 양수장 흡입조 부분에 슬러지, 부유물 등이 유입되거나 퇴적되어 어려움이 있었다. 청주하수처리장의 고도처리시설이 설치된 이후 물관리에서 개선된 것으로 보고되고 있다.



그림 3.1.5 청주하수처리장 방류구

4.3. 하수처리수의 계획적 간접재이용 (IP-II)

하수처리수를 농업용수로 이용할 수 있는 가장 일반적인 경우가 하수처리장 방류수를 특별한 재처리없이 하천 및 농업용저수지 담수와 희석하여 농업용수로 재이용하는 하수처리수의 계획적 간접재이용 방법이다. 실제 2006년 전남강진의 5000 m³ 규모의 농업용수 재이용을 시작으로, 경북 상주, 충남 천안, 전남 영암 등 전국적으로 하수처리수의 계획적 간접재이용이 이루어지고 있는 실정이다.

하수처리장 방류수의 수질기준이 농업용수 수질기준 및 재이용 수질기준을 크게 초과하고 있으며, 하천수 및 호소수로 희석을 하는 경우에도 현재의 농업용수 수질기준은 대부분 만족시키지 못하는 것으로 보고되고 있다 (정한석, 2014). 앞서 언급한 바와 같이 논벼를 대상으로 한 하수처리수의 관개용수 공급은 아직까지 인체위해적인 부분에서 피해가 보고된 바 없으며, 농업용수 이용의 대부분을 차지하는 논관개용수로의 이용은 특별한 경우를 제외하고 하수처리수의 계획적 간접재이용이 가능한 것으로 판단된다. 하지만 다량의 영양물질로 인한 도복이 자주 발생하는 것으로 보고되고 있기 때문에 하수처리수를 간접재이용하는 관개지구의 경우에는 특별한 교육 및 홍보가 필

요할 것으로 판단된다. 또한, 기타 다른 용수로의 공급은 보다 엄격한 수질기준을 요구하기 때문에 재처리시스템을 추가한 농업용수 공급 공정이 필요하며, 하수처리수의 악취 등으로 인한 심미적 영향에 따른 농민의 요구가 있을 경우에도 추가적인 재처리 시스템이 필요할 것으로 권고된다.

4.4. 재처리수의 계획적 간접재이용 (IP-III)

수원 병점지구는 수원하수처리장 하류에 위치하며, 관개용수를 그림 3.1.6과 같이 하수처리장 방류구에서 취수하여 주변 논 40 ha에 농업용수를 공급하는 지구이다. 2005년부터 하수재처리시스템을 설치하여 스크린 여과 및 소독처리 후 농업용수로 쓰도록 하고 있다.



그림 3.1.6 수원하수처리장 방류구 및 병점양수장 전경

그림 3.1.7은 병점양수장지구 재처리시스템을 개략적으로 보여준다. 그림에서와 같이 하수처리장 방류구에서 하수처리수를 취수하기 전에 1차적으로 부유물질을 제거하게 되며, 양수 후에 또 다시 2차적으로 부유물질 제거과정을 거치게 된다. 최종적으로 소독처리시스템을 통해 안전한 농업용수를 논으로 공급한다.



그림 3.1.7 병점지구 재처리시스템 개요

5. 요약 및 결론

합리적이고 지속가능한 하수재이용 정책의 실현을 위해서는 지역적 특성을 반영한 하수재이용 유형의 구분과 이해가 선행되어야 한다. 본 절에서는 우리나라 현실에 맞는 하수재이용의 유형을 구분하고 각 사례에 대해 고찰하였다. 본 절의 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 하수재이용 유형을 직접 또는 간접재이용, 계획적 또는 무계획적 재이용, 그리고 하수의 처리수준 등의 세 가지 기준을 이용하여 총 7가지 유형으로 구분하였다.

② 직접하수재이용은 미처리하수나 하수처리장 방류수를 농업용수로 직접 이용하는 것으로 그림 3.1.1에서와 같이 1) 미처리하수를 직접 농업용수로 이용하는 경우 (DU-I), 2) 하수처리수 (하수처리장 방류수)를 농업용수로 이용하는 경우 (DP-II), 3) 재처리수를 농업용수로 이용하는 경우 (DP-III)로 유형을 구분할 수 있다.

③ DU-I 사례는 우리나라에서 찾기 어렵다. 다만 농업기반시설이 미비하였던 과거에는 마을하수를 배수로를 통해 논으로 흘러 보내 관개용수를 보충하였던 관행이 있었으며, 자연적인 습지 형태의 소규모 저류지를 통하여 흘러가도록 하기도 하였다. WHO (1987)는 미처리 하수를 농업용수로 이용하는 여러 사례를 제시하고 있으며, 이로 인하여 인체 보건 위험도를 관리할 수 있도록 수질지침을 제시하고 있다. DP-II의 대표적인 사례로 대정하수처리장을 이용한 경우가 있으며, 주위 농경지에 물이 부족한 시기에 하수처리장 방류수를 이용할 수 있도록 재처리공정이 없는 저류조를 설치하여, 농민이 직접 하수처리수를 재이용하도록 하였다. DP-III의 대표적인 사례로 판포지구가 있으며, 제주서부 판포하수처리장에 재처리시스템을 설치하고, 재처리수를 농업용수로 공급하고 있다.

④ 하수처리수의 간접재이용 유형에는 그림 3.1.4와 같이 무계획적으로 미처리하수를 재이용하는 유형 (IU-I), 하수처리수를 무계획적으로 간접재이용하는 유형 (IU-II)과 계획적으로 재이용하는 유형 (IP-II), 그리고 하수처리수를 재처리시스템을 이용하여 재처리한 후, 간접재이용하는 유형 (IP-III)으로 구분할 수 있다.

⑤ IU-I 형태는 농업기반시설이 갖춰지지 않은 경우에 나타나며 본 연구의 미처리 지역과 같은 소규모 농지에서 볼 수 있다. 용수원이 없는 천수답의 경우 계곡에서 흘러드는 물과 마을 잡배수 등을 용수로 이용하게 되는데, 이러한 경우에 나타나는 자연적인 관개방식이다. IU-II 형태는 현재 우리나라에서 이루어지는 대부분의 하수재이용 형태로서, 본 연구에서의 시험지구로 선정된 오산천 유역의 경우에도 오산하수처리장의 방류수가 하천수에 희석되어 무계획적으로 간접재이용되고 있는 경우에 해당한다. IP-II 형태는 하수처리수를 농업용수로 이용할 수 있는 가장 일반적인 간접재이용 방법이다. 실제 2006년 전남강진의 5000 규모의 농업용수 재이용을 시작으로, 경북 상주, 충남 천안, 전남 영암 등 전국적으로 하수처리수의 계획적 간접재이용이 이루어지고 있다. IP-III 형태는 간접재이용 유형의 하수처리수를 이용목적에 맞게 재처리하여 농업용수로 공급하는 것으로 향후 농업용수의 다양화와 양질의 농업용수 공급을 위해서 추천되는 재이용 방식이라 하겠다.

제2절 간접하수재이용수의 수질 지침, 규범 및 기준(안)

1. 서론

하수처리수의 재이용과 관련한 주요 고려 사항은 수량과 수질이다. 하수처리수량이 농업용수로 이용하기에 충분한 양이어야 하며, 만약 그 양이 충분하지 못하면 재이용을 고려할 수 없기 때문이다. 하수처리수량은 그 발생원과 유입수량의 안정성에 의하여 결정된다. 하수처리장으로 유입되는 하수 발생원에는 생활계의 오폐수, 축산 및 공장 폐수처리장으로부터 유입수 등이 있다.

하수처리수의 수질은 농업용수 재이용에서 우선적으로 고려해야 한다. 하수처리수의 방류 수질은 발생원의 종류, 원수의 수질, 오염원의 종류 등과 처리시설 및 운영에 의하여 좌우된다. 하수처리장에 따라 방류수질이 차이가 있으므로, 재이용에 적합한 수질조건 여부를 고려하는 것이 필요하다.

농업용수 재이용 수질기준에서는 작물 생육 및 수확량에 악영향을 미치는 않도록 하고, 토양 및 수질 환경에 대한 영향을 고려해야 하며, 인체에 위해성이 없도록 하는 수질 조건을 충족해야 한다. 그밖에도 경제성, 사회적 여건 등을 고려해야 한다. 농업용수 수질과 관련하여 미국농업학회에서 관개용수 수질을 고찰하였으며 (Wilcox와 Durum, 1967, 1967), 일본의 논벼 관개용수 수질규범 (Yamaoka, 2005) 등이 있다. 정하우 등 (2008)은 농업용수 수질규범에 대한 종합적인 고찰을 제시하였다. 환경부 (2009)는 하수처리수의 농업용수 재이용 수질기준을 제시하였다.

본 절에서는 하수처리수의 간접재이용 수질과 관련하여 농업용수 수질 지침, 규범 및 기준 등을 고찰하고, 간접하수재이용과 관련한 수질 지침을 개발하기 위한 조건 등에 대하여 논의하도록 한다. 이를 위해 지침, 규범, 기준 등에 대하여 논의하고, 농업용수 수질과 관련한 문헌 내용을 고찰하며, 하수재이용 중 농업용수 수질과 관련한 내용을 정리하도록 한다. 또한 간접재이용 수질기준의 설정과 관련하여 연구해야 할 내용 등을 살펴보고자 한다.

2. 재이용 수질 규범, 지침 및 기준

하수처리수의 농업용수 재이용 수질 기준은 여러 형태로 제시된다. 일반적으로 재이용과 관련한 수질은 규범 (criterion), 지침 (guideline), 기준 (standard) 등으로 구분된다. 규범은 과학적, 학술적으로 타당한 범위를 제시하는 것이다. 지침은 일반적으로 갖추어야 할 목표나 지도 기준을 말한다. 기준은 법적으로 충족해야 할 최저 수준을 뜻한다. 어떤 목적에 이용되는 수질이 적합한지 여부를 과학적으로 논의하여 정리하면 그 결과는 규범이라 한다. 지침은 규범을 바탕으로 적절히 관리해야 할 목표로서 제시하는 것을 말한다. 지침을 바탕으로 실제 규제대상으로 제시한 것이 기준이라고 할 수 있다.

농업용수 수질관련 규범의 예로는 관개용수의 수질규범(Criteria for irrigation water quality)이 있다 (Wilcox와 Durum, 1967). 이 규범은 농업용수로 안전하게 쓸 수 있는 과학적 기준을 제시한 것이다. 미국 환경청의 재이용 수질규범도 그 예이다. 박승우 (2005)

은 농업용수 재이용 수질규범을 제안하였다.

세계보건기구 (World Health Organization, WHO)에서는 오폐수를 안전하게 농업용수로 쓰기 위한 지침을 제안하였다. 호주에서는 운영위원회를 구성하여 하수 재활용의 국가적인 지침의 개발을 시도하였다 (Cunliffe 등, 2005).

수질기준은 법적으로 만족해야 할 최소한의 수질조건이다. 환경부 (2011b)의 농업용수 재이용수질기준이 그 예이다. 또한 하수처리장 및 폐수처리장 방류수질기준 등이 있다. 이러한 수질기준은 모든 오폐수 처리장의 방류수질이 그 기준을 만족해야 하는 것을 말한다.

3. 재이용 수질기준의 고려사항

3.1. 농업용 재이용수

Crook과 Surampalli (2005)는 하수재이용 수질기준의 수립에서 고려해야 할 사항으로 다음을 제시하였다.

가. 공중 건강 보호

하수재이용 기준과 지침은 원칙적으로 공중 건강 보호를 지향한다. 비식용용 재이용수에 적용할 경우, 지침에서는 일반적으로 미생물학적 문제와 환경적인 문제만을 제시하게 된다. 재이용수를 식용용수로 공급하는 문제에서는 병원성 미생물은 물론이고 화학적 성분과 관련한 건강 위험을 고려할 필요가 있다

나. 처리의 신뢰성

수처리의 신뢰성 보장은 분명하지만 때로는 간과하는 질적 관리수단이다.

다. 사용 장소 통제

재이용수질조건은 그 물이 사용되는 지역에서 실시되는 적절한 통제와 안전 사전 주의 조치 등을 기초로 한다. 재처리수질 및 사용형태에 따라 다양한 통제가 이루어지는데, 주의 표식, 별도의 색으로 구분된 관로와 장치, 울타리, 물이 허용된 사용 장소 내에 국한하는 조치, 다른 관로와 접합을 통제하는 수단, 기타 공중보건 보호수단 등이 필요하다.

라. 사용 필요조건

공업용수와 다른 목적의 용수에서는 건강상 고려사항과 관련이 없는 특정한 물리적, 화학적 수질조건이 필요하다. 물리적, 화학적 또는 미생물학적 수질은 사용자 혹은 특정한 용도로서 재처리수의 규제적인 허용여부를 제약할 수도 있다. 다만 규제 기관에서는 공중 건강 혹은 환경보전과 관련 없는 수질조건을 재이용 기준에 포함하는 예가 거의 없다.

마. 관개 효과

재이용수의 잠재적인 농업용수 재이용을 위해서는 개별적인 수질항목과 매개변수 등이

작물이나 여타 식생, 토양, 지하수 혹은 기타 수체에 미치는 영향을 평가해야한다. 이에 대한 여러 가지의 수질제약 조건 등의 지침이 있다. 그러나 사용자의 수질에 대한 우려 사항은 규제의 범위를 벗어나는 경우가 대부분이다.

바. 환경적인 고려사항

재이용수의 사용지역 및 흘러들어가는 수체와 그 주위의 동식물에 부정적인 영향을 미치지 않도록 해야한다.

사. 미관상 고려사항

도시의 관개수, 조경용수, 화장실 세척수 등과 같은 고도 수준의 비식용수의 경우는 투명도, 무색, 무취 등과 같은 외관상 식음수와 차이가 없어야한다. 레크리에이션용 저수지의 재이용수는 녹조 성장을 촉진하지 않아야한다.

아. 경제성

규제기관에서는 재처리수 생산자 및 사용자에게 부과되는 관련 비용을 고려하지만, 비용 효율적인 측면 때문에 수질기준은 안전성과 건강 또는 환경적 기준에서 저하하지 않도록 하고 있다. 규제권한을 갖는 주정부에서는 규제에서 제시하는 것과 동일한 효과를 나타내는 조건에서 수처리 방법의 대안을 허용하는 것이 보통이다.

자. 정치적 현실

재처리 및 재이용과 관련한 규제적인 의사결정은 공공 정책과 기술적, 경제적 타당성 등에 영향을 받게 된다.

3.2. 호주의 재이용수질기준 수립 운영위원회

Cunliffe 등(2005)은 호주의 하수재이용 관련 지침의 수립 운영위원회에서 고려하는 조건을 다음과 같이 제시하였다.

가. 위험 관리 및 통합(risk management and integration)

재처리 수원과 사용자에게 모두 적용할 수 있는 예방 (거래 폐기물 조절, 공업 및 농업 폐수의 관리), 처리 및 현장 조절 (제한적 이용, 접근통제), 감시체계 (audit system) 등을 포함한 위험관리체계를 개발한다. 또한, 기초시설, 특히, 제 3 관로, 이중 망상 조직 (dual reticulation system)과 관련한 지침을 개발하며 결과의 건강 및 환경위험 워킹그룹 (Health and Environmental Risks Working Groups)과 통합을 보장한다.

나. 건강 위험도 관리(managing health risks)

잠재적인 미생물 및 화학적 위험물을 제시하고 다양한 형태의 물 재이용 형태와 관련한 노출 경로와 양을 고려한 위험물에 대한 위험도에 기초한 지침을 개발한다. 위험도를 허용 가능한 수준 이하로 할 수 있는 조절대책(예방, 처리 및 현장조절 방법 등을 포함)과 조절대책 운영모니터링 절차 및 조절대책의 효과 검정방법을 제시한다. 또한, 세균의

직접 측정법, 대체 매개변수나 지표 미생물의 이용 등을 포함한 미생물 위해도의 잠재적 존재를 측정할 수 있는 적절한 모니터링 매개변수를 제시한다.

다. 환경에 대한 위험도 관리 (managing environmental risks)

재이용수에 포함된 잠재적인 환경 위험도를 제시하고, 다양한 형태의 재이용수와 관련된 물질의 경로, 부하량 및 생존을 고려한 환경적인 위험도에 기초한 지침을 개발한다. 위험도를 허용수준이하로 줄일 수 있는 예방, 처리, 현장조절 등을 포함한 조절대책 및 운영 모니터링 절차와 조절대책의 효과를 검증할 수 있는 방법을 제시한다. 또한, 오염물질의 직접 측정과 대체 매개변수의 사용을 포함한 적절한 위험물의 잠재적인 존재 여부를 측정할 수 있는 적절한 모니터링 매개변수를 제시한다.

이상으로부터 하수재이용을 위한 기준 수립에서는 1) 작물 생육에 적합성, 2) 보건 위생 안전성, 3) 환경위험 안전성, 4) 수처리 및 사용장소 제한 조건, 5) 사회적 경제적 여건 등을 고려해야 함을 알 수 있다.

4. 농업용수 수질 조건

농업용수로 적합한 수질의 조건은 1) 작물 생육에 지장을 주지 않도록 해야 하고, 2) 식물 생육과 관련한 독성이 없어야 하며, 3) 지속적으로 농업용수로 사용할 수 있어야 한다. 작물생육에 영향을 미치는 수질 항목 및 그 영향을 정리하면 다음과 같다.

4.1 염분

염분은 농업용수로서 적합한지를 결정하는 가장 중요한 수질 항목이다. 염분은 작물의 생육을 저해하거나, 말라 죽게 하는 요소이다. 염분의 농도, 즉 염도는 탄소물질이 산화물질, 붕소와 옥화물이 염소로 치환하고, 유기물질이 산화염으로 변환한 후 수질 샘플 중 총 용존고형물질 (total dissolved solids, TDS)의 농도나 전기전도도 (electric conductivity, EC)로 측정한다.

농업용수 중 염분에 따른 작물피해는 작물의 종류에 따라 다르다. 어떤 작물은 염도에 덜 예민하지만, 다른 작물은 매우 민감하게 반응한다. 일반적으로 작물의 염분에 대한 예민도에 따라 한계 TDS, EC 값은 표 3.2.1과 같다.

표 3.2.1 작물의 예민 정도에 따른 한계 염분농도

구분	TDS (mg/L)	EC (mmhos/cm)
작물피해가 거의 나타나지 않은 경우	<500	0.75
예민한 작물에는 피해가 나타날 수 있는 경우	500~1,000	0.75~1.50
많은 작물에서 피해가 나타날 수 있으므로, 관리에 주의를 해야 하는 경우	1,000~2,000	1.50~3.00
내염성 작물에만 토양성질을 고려하여 관리에 주의가 필요한 경우	2,000~5,000	3.00~7.50

한편, 작물별 염분에 대한 예민도 정도를 구분하면 표 3.2.2에서와 같다.

표 3.2.2 주요작물의 내염성 분류 (류순호, 2000)

내염정도	작물	생육제한 전기전도도 (dS/m)	1dS/m당 수량감소율 (%)	비고
강함	벼류, 다그라스, 귀리, 보리, 목화	6.9~11.4	5.0~10.8	
중간정도 강함	보리(사료용), 밀(사료), 톨페스큐, 사탕무, 수수, 벼밀, 콩	3.9~6.8	2.6~20.0	
중간정도 약함	벧치, 수단그라스, 알팔파, 옥수수(사료), 레드클로버, 오차드그라스, 땅콩, 옥수수, 보로콜리, 토마토, 오이, 시금치, 셀러리, 배추, 감자, 단옥수수, 고추, 상치, 무	1.2~2.8	6.2~14.0	
약함	양파, 당근, 완두(그린), 딸기, 꿀, 살구, 포도, 서양자두, 나무딸기	1.0~1.7	14.0~33.0	
적용기준 또는 제한 사항	① 작물의 염 장애는 해수침수지대, 고온건조지대 등에서 흔히 나타남. 재이용수를 시설재배지에 적용할 경우는 엄격한 전기전도도 허용치를 적용해야 하며, 전기전도도가 높은 재이용수의 장기간 관개는 토양오염이 예상됨.			

FAO (1976), Rowe와 Addel-Magid (1995)의 관개용수의 염도와 관련한 수질 기준은 표 3.2.3과 같다.

표 3.2.3 관개용수 및 토양수분의 염도 수질 지침

수질항목	단위	사용상의 제약 정도			비고
		없음	약간~중간정도	엄격함	
염도 (작물의 가용수분)					
EC or TDS	dS/m mg/L	<0.7 <450	0.7~3.0 450~2,000	>3.0 >2,000	
침투수 (수분의 토양 중 침투에 영향을 미치는 정도. EC, SAR를 이용하여 평가)					
SAR = 0~3, = 3~6, = 6~12, = 12~20, = 20~40,	EC = EC = EC= EC= EC=	>0.7 >1.2 >1.9 >2.9 >5.0	0.7~0.2 1.2~0.3 1.9~0.5 2.9~1.5 5.0~2.9	<0.2 <0.3 <0.5 <1.3 <2.9	

4.2. 치환성 양이온 (나트륨, 칼슘, 망간)

나트륨, 칼슘, 망간 등 치환성 양이온의 농도는 관개용수 수질에서 중요하다. 소금의 구성 성분인 나트륨은 점토 구조를 파괴하여 토양에 나쁜 영향을 미친다. 토양수의 나트륨 함량이 높으면 알칼리성 토양이 되어 투수성이 감소하며 배수불량을 나타내며, 토양 구조에 나쁜 영향을 미친다. 칼슘 성분이 주요 양이온 농도를 차지하면 토양은 입상구조를 갖게 되기 쉬우며 투수성이 좋아진다.

토양수의 나트륨 이온량의 상태를 나타내는 지표로서 나트륨 흡착비 (sodium adsorption ratio)를 적용하는데, SAR는 다음 값으로 표시된다.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (4.1)$$

여기서, 우변의 이온은 당량농도 (meq/L)이다.

그림 3.2.1 은 염도와 나트륨 흡착률에 따른 관개용수의 수질 분류를 나타낸다. 두 항목 모두 작물에 미치는 해가 낮은 것부터 매우 높은 것까지 4단계로 구분하고 있다.

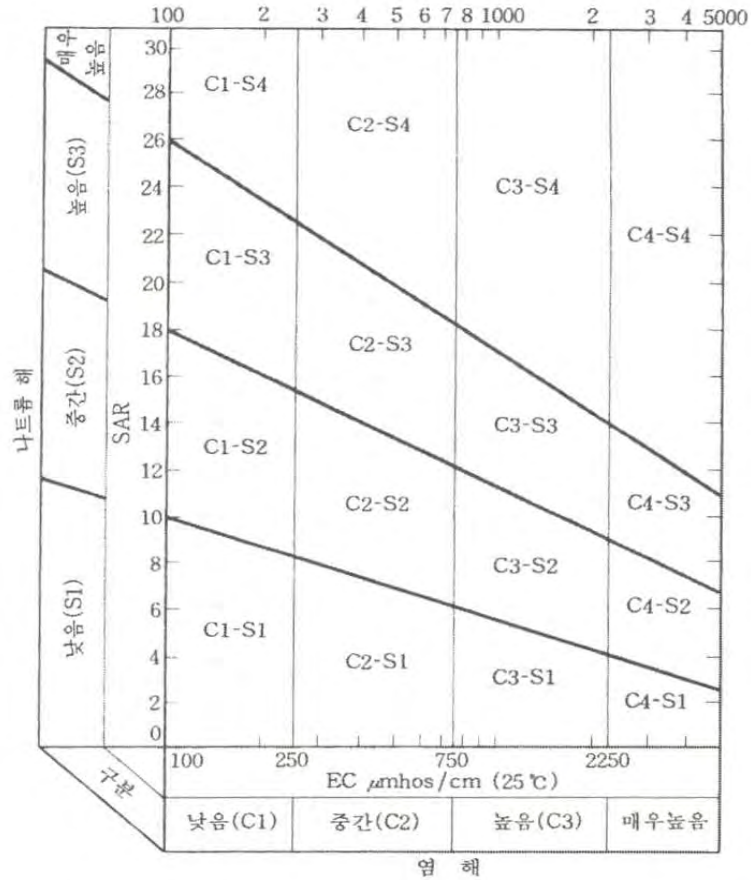


그림 3.2.1 염도와 나트륨 흡착률에 따른 관개용수의 수질분류

4.3. 영양염류

질소와 인은 작물 생육에 필수 영양물질로서 그 자체가 유해하지는 않다. 그러나 과도한 영양염류가 물속에 녹아 있을 경우는 수질오염을 초래한다. 특히 호소, 연안에서와 같은 대규모 수체에서는 부영양화를 초래하므로, 호소 수질기준 등에서는 질소와 인 성분량을 포함하고 있다.

과다한 질소 성분은 작물의 지나친 성장을 유발하여, 도복이 나타날 수 있다. 논벼의 농업용수 수질기준에 총질소 함량을 제한하는 것은 바로 이러한 이유이다 (일본농무성, 1970). 그러나 우리나라의 농업용수 수질기준에서는 총질소를 제한인자로 지정하고 있지 않다.

4.4. 붕소

농작물의 관개용수 수질에서 가장 최근의 문제는 붕소 성분량이다. 붕소는 가정에서 세탁용제 등에 높은 함량을 보이므로, 하수에 포함되어 농업용수로 이용될 수 있다. 붕소는 농작물의 생육이 필수적인 미량 요소이나, 과잉 상태가 되면 생육에 해를 미치는 것으로 알려지고 있다.

식물의 붕소에 대한 허용 농도 범위가 좁아 과잉 해가 나타나기 쉽다. 그 피해는 주로

지상부에 집적되어 생육장해가 나타난다. 작물의 종류에 따른 허용 붕소농도는 표 3.2.4에 서와 같다.

표 3.2.4 작물의 관개용수 중 붕소허용기준

구분	내성작물	보통정도 내성 작물	예민한 작물
붕소(B) (mg/L)	4.0	2.0	1.0
작물	아스파라가스, 야자수, 사탕무, 알팔파, 글라디올로스, 잡두, 양파, 양배추, 상치, 당근	해바라기, 감자, 목화, 토마토, 단팥, 홍당무, 올리브, 보리, 밀, 옥수수, 귀리, 호박, 고추, 고구마	피칸, 호우, 사과, 자두, 배, 포도, 체리, 복숭아, 알카도, 그레이프푸루즈
관개수중 붕소 허용농도 (mg/L)	2.0	1.0	0.3

4.5. 유해 중금속

수은, 카드뮴, 시안 등은 유해독성 중금속이다. 이들은 건강에 유해한 물질로 토양이나 물에 용해되어 있으면 인체에 유해한 결과를 초래한다. 이들 유해 독성 중금속은 수질환경기준에서 제한을 두며, 논벼의 농업용수 수질기준에서도 엄격한 제한을 하는 것이 보통이다.

4.6. 기타 미량 요소

농작물의 생육에는 미량 중금속 등이 필요하다. 그러나 하수 중에 포함된 중금속 성분 농도가 높으면, 작물에 해를 미칠 수 있다. 예를 들어 구리(copper)는 벼 잎의 백화현상을 일으킬 수 있으며, 뿌리 성장을 억제한다. 아연 (zinc)는 백화현상과 줄기의 부패, 뿌리 성장 억제 등의 부작용을 초래한다. 비소 (arsenic)는 줄기의 백화현상과 뿌리 썩음의 원인이 된다 (일본농무성, 1970).

표 3.2.5는 주요 미량 중금속 요소별 하수재이용 허용농도를 나타내고 있으며, 각 요소별 농작물 생육과 관련한 제약조건 등을 정리하고 있다.

표 3.2.5 주요 미량 중금속 요소별 하수재이용 허용농도

성분	장기이용 (mg/L)	단기이용 (mg/L)	비 고
알루미늄 (Aluminum)	5.0	20.0	산성 토양에서 생산성 저하를 유발할 수 있다. 하지만 pH 5.5 ~ 8.0 의 토양에서는 이온화를 촉발시키고 독성을 제거한다.
비소 (Arsenic)	0.10	2.0	식물의 종류에 따라 독성을 가지는 범위가 다르다. 수단그래스에 대해서는 12 mg/L 이상에서 독성을 가지고, 쌀에 대해서는 0.05 mg/L 이하에서도 유독하다.
베릴륨 (Beryllium)	0.10	0.5	식물의 종류에 따라 독성을 가지는 범위가 다르다. 케일(kale)에 대해서는 5 mg/L, 부쉬빈(bush bean)에 대해서는 0.5 mg/L 이상에서 유독하다.
붕소 (Boron)	0.75	2.0	식물성장의 필수요소이다. 배양액의 붕소 최적 함량은 약 0.1 mg/L ~ 0.5 mg/L 정도이다. 민감한 식물체에 대해서는 1 mg/L의 양으로도 독성을 가진다. 일반적으로 재이용수에 포함된 충분한 붕소는 흙의 불충분양을 보완한다. 대부분의 잔디는 2.0 mg/L ~ 10 mg/L 에서도 비교적 잘 견딘다.
카드뮴 (Cadmium)	0.01	0.05	콩, 비트(beet), 순무(turnip)에 대해서는 0.1 mg/L 이상에서 유독하다. 지속적인 제한이 필요하다.
크롬 (Chromium)	0.1	1.0	일반적으로 필수 성장요소로 인식되지 않는다. 식물체에 대해 가지는 독성에 대한 정보가 부족하기 때문에 지속적인 제한이 필요하다.
코발트 (Cobalt)	0.05	5.0	토마토에 대해 0.1 mg/L 이상에서 유독하다. 중성 및 알칼리 토양에서 활발하게 활동하지 않는다.
구리 (Copper)	0.2	5.0	몇몇 식물체에 대해 0.1 mg/L ~ 1.0 mg/L 이상에서 유독하다.
불소 (Fluoride)	1.0	15.0	중성 및 알칼리 토양에서 활동하지 않는다.
철 (Iron)	5.0	20.0	공기가 통하는 토양에서는 식물체에 대해 독성을 가지지 않는다. 하지만 토양의 산성화와 필수 인 및 몰리브덴의 손실을 유발할 수 있다.
납 (Lead)	5.0	10.0	높은 농도에서는 식물체 세포의 성장을 저해할 수 있다.
리튬 (Lithium)	2.5	2.5	대부분의 작물에 대해 5 mg/L 까지는 허용된다. 토양 내부에서 이동적이다. 감귤류 과일(citrus)에 대해서는 유독하다. - 0.075 mg/L 의 기준이 추천된다.
망간 (Manganese)	0.2	10.0	산성 토양에서 많은 작물에 대해 약 0.2 mg/L~2 mg/L (a few-tenths to a few mg/L) 이상에서 유독하다.

표 3.2.5 주요 미량 중금속 요소별 하수재이용 허용농도 (계속)

성분	장기이용 (mg/L)	단기이용 (mg/L)	비고
몰리브덴 (Molybdenum)	0.01	0.05	토양 및 물에서 일반적인 농도에서는 식물체에 대해 독성을 가지지 않는다. 몰리브덴의 농도가 높은 토양에서 성장한 사료는 가축에게 유독할 수 있다.
니켈 (Nickel)	0.2	2.0	몇몇의 식물체에 대해 0.5 mg/L~1.0 mg/L이상에서 유독하다.
셀레늄 (Selenium)	0.02	0.02	낮은 농도에서도 식물체에 대해 유독하며 낮은 농도의 셀레늄이 포함된 토양에서 성장한 사료도 가축에게 유독할 수 있다.
주석(Tin) 텅스텐 (Tungsten) 티타늄 (Titanium)	-	-	식물체에 의해 효과적으로 제거되지만 허용수준은 알려지지 않았다.
바나듐 (Vanadium)	0.1	1.0	여러 식물체에 대해 상대적으로 낮은 농도에서도 유독하다.
아연 (Zinc)	2.0	10.0	여러 식물체에 대해 각각 다른 범위의 농도에서 유독하다; pH 6 이상에서 독성이 감소되며 세립질 토양 및 유기질 토양에서도 독성이 감소된다.

5. 하수재이용에 따른 보건위생 조건

하수처리수의 농업용수 재이용에서 가장 중요한 고려사항은 인체에 대한 위해성이다. 미처리 오폐수, 분뇨 등을 농업에 이용하게 되면, 기생충 감염이나, 수인성 전염병 발생 등을 일으킬 수 있다. 인분뇨를 적절하게 처리하지 않고 발작물의 비료분으로 사용하게 되면, 기생충 감염 등의 직접적인 원인이 된다. 또한 적절하게 처리되고 관리되지 않은 하수재이용으로 인한 전염병 감염 사례 등도 널리 알려지고 있다 (WHO, 1989)

WHO에서는 농업용수로 하수처리수를 재이용하기 위한 전제조건으로 인체에 대한 안전성을 고려해야 한다고 하였다. 특히 생식 작물의 관개용수로는 하수의 생물학적 처리와 함께 소독처리를 필요로 하며, 대장균 잔유농도를 통제하는 것이 필요하다고 제안하였다.

박승우 (2005)는 하수 처리수의 농업용수 재이용 수질 지침을 제시하였다. 그 지침에서는 안전한 재활용을 위해서는 건강 위해성을 충분히 낮출 수 있도록 재처리 공정과 수질 기준을 제안하고 있다. 환경부 (2010)는 농업용수 재이용 수질기준에서 보건위생조건을 포함하였다.

다음에서는 인체 위해성과 관련한 하수 재이용 수질 규범, 지침, 기준 등을 살펴보도록 한다.

5.1. WHO 재이용 수질 규범

가. 하수재이용의 건강 위험

WHO (1987)은 하수처리수의 농업용수 재이용과 관련하여, 안전한 재이용을 위한 보건 위생조건을 제시하였다. WHO에서 허용하는 하수처리수는 가정 하수나 도시 오수로 제한하고 있으며, 과도한 양의 공장 오폐수가 포함되는 경우는 추천하지 않고 있다. 생활하수의 경우에도 적절한 수처리를 통하여 수질관리를 담보할 수 있는 경우에 위생조건을 전제하고 있다.

공중 건강 측면에서 하수 및 슬러지 재이용은 대변 배설물을 통한 기생충 알과 대장균, 병원성 박테리아, 바이러스 등의 감염 위험성을 갖는 것으로 보고되고 있다. 개발도상국에서 발병되는 질병 중 30여개 이상이 배설물과 관련이 있으며, 농업용수나 비료물질로 재이용하는 과정에서 나타나는 것으로 보고되고 있다.

그러나 모든 재이용이 실제 건강 위해도를 갖지는 않는다. WHO에서는 다음 조건에서 공중 보건상의 문제가 발생할 수 있다고 보고하고 있다.

- ① 전염을 일으키는 양의 병원성 병원균이 농지나 저류지로 흘러가거나, 병원균이 농지나 저류지에서 증식하여 전염성의 양에 이르게 될 때
- ② 전염을 일으키는 양이 인간에 도달하고,
- ③ 인체에 감염으로 나타나고,
- ④ 감염으로 질병이나 혹은 전염을 일으킬 때

등이다. 만약, ④가 나타나지 않으면, ①, ②, ③ 등은 단지 공중 보건에 잠재적인 위험성 (potential risk)이다. 또한 위의 4단계 중 어느 한 과정이 성립되지 않으면 잠재적 위험성은 실제적인 위해로 나타나지 않게 된다.

공중보건에 대한 위해도를 갖지 않도록 하수의 재이용을 설계하고 실행하는 것이 가능할 수 있다. 이를 위해서는 하수재이용과 관련한 전염병의 역학적 증거에 대한 이해가 전제되어야 한다. 이를 통하여 배설물 오수의 미생물학적 기준을 수립하고, 공중 건강의 적절한 보호가 가능하게 될 것이다.

나. 질병 역학적 증거

세계은행 (World Bank)의 보고 (Shuval 등, 1986)에 따르면 모든 하수의 농업용수 재이용과 관련한 질병 역학적 연구결과는 다음과 같다.

- ① 미처리 하수의 관개용수 이용은 작물 소비자와 영농자 등에게 유의한 수준의 과도한 장 선충 감염을 초래한다. 특히 맨발로 일하는 포장 작업자는 하수관개 지역에서 작업하지 않는 농부와 비교하여 편충에 대해 더욱 심각한 감염을 나타낸다.

② 적절하게 처리한 하수를 관개하는 경우는 영농자나 작물 소비자에서 과도한 내장 기생충 감염으로 나타나지 않는다.

③ 미처리 하수를 이용한 채소작물의 관개는 콜레라 및 장티푸스의 감염을 초래할 수 있다.

④ 미처리하수를 관개한 초지에 방목한 육우는 소 촌충의 감염을 초래할지도 모르나, 인체에 실제 위험하다는 증거는 거의 없다.

⑤ 미처리하수를 이용한 관개 지구에 인접한 곳에 거주하는 주민이 그 흙에 직접 접촉하거나 영농작업자와의 간접 접촉에 따른 건강에 부정적인 영향에 대한 증거는 거의 없다. 높은 수준의 개인적인 위생적 기준을 갖는 공동체에서는 양성의 바이러스성 소화기 질병의 증거는 나타나지 않았다. 다만 박테리아 감염의 예는 발생하였다.

⑥ 처리된 하수를 살수관개 용수로 사용할 경우 배설물 바이러스의 공기 중 전염을 촉발할 수 있으나, 대부분의 사람들은 피부 바이러스 질병에 대한 항체가 높아서 실제로 나타나는 경우는 흔하지 않을 수 있다.

이상의 결과로부터 미처리 하수를 농작물의 관개수로 이용할 경우 소화기 질병 및 박테리아로부터 건강 위험성은 실제로 매우 높으나, 바이러스에 의한 위험성은 낮거나 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 하수 처리는 공중 보건의 안전성 확보를 위한 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있다 (WHO, 1987).

다. WHO의 재이용수 미생물학적 기준

WHO(1987)은 공중 건강 및 위생적 안전성 확보를 위한 하수처리수의 농업용수 재이용수의 미생물학적 규범 (microbiological guidelines)을 표 3.2.6과 같이 제안하였다.

표 3.2.6 하수처리수의 농업용수 재이용수의 미생물학적 규범 (WHO,1987)

재이용 방법	내장 기생충란 (산술평균 수/L)	분원성 대장균 (100mL당 기하평균수)
제한적 관개 (수목, 공예작물, 사료작물, 제한적 과수, 초지 등의 관개)	1 이하	제한 없음
무제한적 관개 (식용작물, 운동장, 공원의 관개)	1 이하	1,000 이하

5.2. 미국 농업용수 재이용수 미생물학적 수질기준

미국의 재이용 수질기준 체계는 주 정부에서 제시하고 있다. 미국 EPA에서는 재이용 수질규범 (water quality guideline)을 제시하며, 주 정부에서는 수질 기준 (standard)을 고시하게 된다.

US EPA의 농업용수 재이용의 미생물학적 수질 지침은 표 3.2.7과 같다.

표 3.2.7 US EPA 재이용 수질 지침

이용 형태	처리공정	재처리 수질
도시용수, 생식작물 관개, 레크레이션용 저류지	2차 처리 여과 소독	pH: 6~9 BOD 10mg/L 이하 NTU 2 이하 분원성 대장균 ND/100ml 염소 잔유량 1mg/L 이하
제한적 접근지역 관개, 가공용 작물, 사료작물 관개, 경관용 저류지, 공사장용수, 공장 냉각수, 환경용수	2차 처리 소독	pH 6~9 BOD 30ng/L이하 TSS 30mg/L이하 분원성 대장균 200/100ml이하 염소잔유량 1mg/L이하
살포방식에 의한 비식용용 대수층의 지하수충전수	지역 적합성 이용에 좌우 1차처리(최소)	지역 적합성, 이용에 따라 결정
주입법에 의한 비식용용 대수층의 지하수충전수	지역 적합하도록 함, 2차처리 소독(최소)	지역에 적합하도록함 불포화대 침투 후 식음수 수질기준을 만족해야함
주입법에 의한 식음수 대수층의 지하수 충전	2차처리, 여과, 소독, 고도처리	pH 6.5~8.5 NTU 2이하 분원성 대장균 ND/100ml 염소잔유량 1mg/L이하 TOC 3mg/L이하 TOX 0.2mg/L이하 식음수 수질기준 만족

미국 주별 재이용수질기준 중 관개용수와 관련한 미생물 기준은 표 3.2.8에서와 같다.

표 3.2.8 미국 주별 재이용수의 미생물학적 기준

주	사료작물 관개용수		식용작물 관개용수		도시 관개용수	
	수질 제한	처리공정	수질 제한	처리공정	수질 제한	처리 공정
Arizona	■ 대장균 1000/100ml	■ 2차 처리	■ 대장균 ND/100ml	■ 2차처리 ■ 여과,소독	■ 대장균 ND/100ml	■ 2차 처리 ■ 여과,소독
California	N/S	■ 2차 처리	■ 총대장균 2.2/100ml	■ 2차처리 ■ 응집,여과, 소독	■ 총 대장균 2.2/100ml	■ 2차처리 ■ 응집, 여과,소독
Colorado	N/S	Not covered	N.C	N.C	■ E. coli 126/100ml	■ 2차 처리 ■ 여과,소독
Florida	■ 대장균 200 /100ml	■ 2차처리 ■ 소독	사용불가	사용불가	■ ND fecal coli/100ml	■ 2차처리 ■ 여과,소독
New Mexico	■ 200 fecal coli/100ml	N.S	사용불가	사용불가	■ 100 fecal coli/100ml	N.S
Utah	■ 200 fecal coli/100ml	■ 2차처리 ■ 소독	■ ND fecal coli/100ml	■ 2차 처리 ■ 여과,소독	■ ND fecal coli/100ml	■ 2차처리 ■ 여과,소독
Texas	■ 200 fecal coli/100ml	N.S	사용불가	사용불가	■ 20 fecal coli/100ml	N.S
Washington	■ 200 fecal coli/100ml	■ 2차처리 ■ 소독	■ 2.2 총대장균 /100ml	■ 2차처리 ■ 응집, 여과, 소독	■ 2.2 총대장균 /100ml	■ 2차처리, 응집, 여과, 소독

5.3. 수자원프런티어사업단의 재이용수 미생물학적 규범

박승우 (2005)은 하수처리수의 농업용수 재이용수의 미생물학적 규범으로 표 3.2.9를 제안하였다.

표 3.2.9 농업용수 재이용 미생물학적 수질 규범

수질항목	농업용수 이용형태		
	비식용 발작물	논용수	채소 용수
총대장균군수/100ml	100	2.2	N.D.

5.4. 환경부 재이용수의 미생물학적 기준

환경부는 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 미생물학적 수질기준을 표 3.2.10과 같이 제시하였다.

표 3.2.10 환경부 농업용수 재이용 미생물학적 수질 기준

수질항목	농업용수	
	직접식용	간접식용
총대장균군수/100ml	불검출	≤ 200

6. 국외 하수처리수의 농업용수재이용 수질 규범, 지침, 그리고 기준

미처리하수 또는 하수처리수를 농업용수로 안전하게 재이용하기 위한 수질 규범 또는 기준 등이 다양하게 제안된 바가 있다. 본 연구에서는 가장 많은 국가에서 참고 및 이용되고 있는 WHO와 미국의 수질기준을 포함하여, 하수처리수를 농업용수로 광범위하게 이용하고 있는 멕시코, 이스라엘, 튀니지, 키프로스, 스페인, 그리스, 그리고 프랑스의 재이용수 수질 규범 또는 기준에 대해 살펴보도록 한다.

6.1. WHO

WHO는 전세계적으로 하수처리수를 안전하게 농업용수로 재이용함에 있어 가장 기준이 되는 지침을 제공하고 있다. WHO의 경우 하수처리수를 사용한 영농활동이 인체에 해를 끼치지 않도록 하는 것에 초점을 두고 있기 때문에 주요한 대장균과 처리방법에 대한 지침을 제공한다 (표 3.2.11)

표 3.2.11 관개용수에 대한 WHO 수질지침

항목	A 그룹 요리하지 않고 먹는 곡물의 관개용수	B 그룹 시리얼 곡물, 산업용 곡물, 사료곡물, 목초지와 나무
장선충류 (수리학적평균 egg/L)	<1	<1
분원성 대장균군수/100 mL	<1,000	-
안정화지	반드시 해야 함	반드시 해야 함 8-10일의 체류시간

6.2. 미국

미국 EPA는 2012년에 새로운 물의 재이용 관련 수질지침을 제안하였으며, 관개용수와 관련한 재이용수 수질 권고지침은 다음 표와 같다. EPA는 2004년에도 물의 재이용 수질 지침을 제안한 바 있으며, 관개용수와 관련해서는 2012년에 수질지침이 변경되지 않았다. EPA의 권고지침 외에 각 주별로 개별적인 기준을 정하고 용도별 허가를 하고 있어 기준 및 농도 범위가 다양하다.

표 3.2.12 하수재이용 권고지침(US EPA, 2012)

구분	pH	BOD5 (mg/L)	탁도 (NTU)	TSS (mg/L)	분원성 대장균 (cfu/100ml)	잔류염소 (mg/L)
제한지역의 관개용수	6~9	≤30	-	≤30	≤200	1.0 이상
농업재이용수 -비상업용	6~9	≤10	≤2		불검출	1.0 이상
농업재이용수 -상업용*	6~9	≤30	-	≤30	≤200	1.0 이상
농업용수- 비식용농작물	6~9	≤30	-	≤30	≤200	1.0 이상

*상업용 작물의 의미는 농작물을 판매하기 이전에 병원균을 처리하기 위한 화학적 물리적인 처리공정을 거치는 것을 의미한다

6.3. 멕시코

멕시코의 하수재이용 수질기준은 일평균과 월평균에 대한 각각의 온도, 기름 물질, 부유 물질, 침강성 물질, SS, BOD₅, T-N, T-P, 분원성 대장균, 그리고 기생충 알 등의 수질기준을 제시하고 있으며, 기생충 알의 경우에는 제한적 관개와 무제한적 관개에 대한 별도의 기준을 두고 있다. 멕시코는 표 3.2.13외에도 US EPA (1992)에서 제시한 중금속 기준을 채택하여 하수재이용 수질기준으로 사용하고 있다.

표 3.2.13 멕시코의 하수처리수의 농업용수재이용 및 토양성분 최대 허용 기준 (adopted from Jimenez, 2005)

항목 (mg/L)	하천		저수지		토양	
	MM	DM	MM	DM	MM	DM
온도 (°C)	NA	NA	40	40	NA	NA
그리스(Grease), 기름	15	25	15	25	15	25
부유 물질	0	0	0	0	0	0
침강성 물질 (ml/l)	1	2	1	2	NA	NA
TSS	150	200	75	125	NA	NA
BOD ₅	150	200	75	150	NA	NA
T-N	40	60	40	60	NA	NA
T-P	20	30	20	30	NA	NA
분원성 대장균군수 (MPN/100 mL)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
기생충 알 (No./L) (restricted agriculture ^a)	5	5	5	5	5	5
기생충 알 (No./L) (unrestricted agriculture ^b)	1	1	1	1	1	1

DM: 일 평균, MM: 월 평균, NA: 해당사항 없음

a Unrestricted agriculture: 사료작물, 곡물류, 과일 및 야채 등을 대상으로 한 관개

b Restricted agriculture: 날것으로 먹는 채소를 제외한 작물을 대상으로 한 관개

6.4. 이스라엘

이스라엘의 관개용수를 대상으로한 하수재이용 수질지침은 BOD₅, SS, DO, 대장균군수, 그리고 잔류염소를 대상으로 한다. 이스라엘은 작물군을 4가지로 나누고, 무제한적 관개를 D그룹으로 분류하여 작물군별 적합한 수질기준을 달리하고 있다. 또한, 적합한 처리수준을 제안하고 있으며, 관개지역과 주거지역 및 포장도로와의 이격거리를 설정하고 있는 특징이 있다.

표 3.2.14 이스라엘의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침 (Adopted from Angelakis 등, 1999)

항목	작물군			
	A	B	C	D
	목화, 사탕무, 곡물류(벼·보리·밀 등), 건조한 사료용 작물(dry fodder seeds), 산림관개 등	청예 사료(Green fodder), 올리브, 땅콩, 감귤류, 바나나, 아몬드, 견과류 등	낙과류 ^b , 보존용 채소 (conserved vegetables), 요리하거나 껍질을 벗겨먹는 채소, 그린 벨트, 축구장, 골프장	무제한적 관개: 날것으로 먹는 채소, 공원, 잔디
수질 기준 (mg/L)				
BOD5 total	60 ^a	45 ^a	35	15
BOD5 dissolved	-	-	20	10
SS	50 ^a	40 ^a	30	15
DO	0.5	0.5	0.5	0.5
대장균군수 (/100ml)	-	-	250	12 (80%) 2.2 (50%)
잔류 염소	-	-	0.15	0.5
처리 수준				
모래 여과 혹은 동등한 수준의 처리	-	-	-	필요
염소 소독 (min) (최소 처리 시간)	-	-	60	120
이격 거리 (m)				
주거지역	300	250	-	-
포장도로	30	25	-	-

a: 최소 15일 이상의 안정화 기간을 가지는 연못에서의 관개는 다른 기준을 가짐

b: 수확 2주일 전 관개를 중단해야 함, 떨어진 과일은 수확 불가

6.5. 튀니지

튀니지는 하수처리수의 농업용수재이용에 대한 수질기준 등을 잘 정립한 대표적인 국가로서 1980년대 초반부터 하수재이용 정책을 국가적으로 추진하였으며, 1998년 현재 약 20,000 ha의 농경지를 재처리수로 관개하고 있다. 튀니지의 경우 pH, EC, COD, BOD5, SS, Cl, F, 그리고 As 등을 포함한 다수의 중금속을 하수재이용 수질기준의 대상으로 규정하고 있다. 하수처리수를 날것으로 먹을 수 있는 채소에 관개하는 것을 법적으로 금지

하고 있다.

튀니지는 다른 여러 국가들과 비슷하게 하수처리수의 농업용수재이용을 위한 모니터링 기준을 마련하고 있으며, 관개용수로 이용되는 하수처리수 뿐만 아니라 대상작물에 대해서도 실시하도록 규정하고 있다. 규정에 따르면 pH, EC, BOD₅ 등의 화학적, 생물학적 기준은 월 1회, 중금속 등의 미량요소는 연 2회, 그리고 총란(기생충 알)은 2주에 1회 등의 주기로 모니터링을 실시하도록 한다.

표 3.2.15 튀니지의 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준(standards) (Adopted from Angelakis 등, 1999)

항목 ^a	최대 허용 기준
pH	6.5±8.5
EC (μS/cm)	7,000
COD	90 ^{b,c}
BOD ₅	30 ^{b,c}
SS	30 ^c
Cl	2,000
F	3
Halogenated hydrocarbons	0.001
As	0.1
B	3
Cd	0.01
Co	0.1
Cr	0.1
Cu	0.5
Fe	5
Mn	0.5
Hg	0.001
Ni	0.2
Pb	1
Se	0.05
Zn	5
장 기생 선충류 (Intestinal nematodes, 리터당 알 개수의 평균)	<1

a 따로 제시되지 않은 경우 mg/L의 단위를 가짐

b 24시간 혼합 샘플

c 특별히 허가된 경우를 제외함

6.6. 키프로스

키프로스의 농업용 재이용수 수질규범에 따르면 날것으로 먹는 채소나 상업용 관상용 식물에는 사용이 금지되어 있으며, 익혀먹는 채소나 비제한적인 대중출입 장소 등의 재이용수 수질규범은 다음 표 3.2.16과 같다.

표 3.2.16 키프로스의 농업용 재이용수의 수질규범 (adopted from Brissaud, 2008)

항목	BOD ₅ (mg/L)	SS (mg/L)	분원성 대장균 (MPN/100ml)	처리공정
모든 농작물(*)	10(a)	10(a)	5(a) 15(a)	이차처리/고도처리/소독
익혀먹는 채소류(**)	10(a)	10(a)	50(a)	이차처리/고도처리/소독
대중출입이 제한되지 않는 amenity 지역	15(b)	15(b)	100(b)	이차처리/고도처리/소독
식용농작물	20(a)	30(a)	200(a)	2차처리/1주 이상 저장/소독 혹은 고도처리/소독
대중출입이 제한되는 amenity 지역	30(b)	45(b)	1000(b)	2차처리/1주 이상 저장/소독 혹은 고도처리/소독
	-	-	200(a) 1000(b)	안정화지 체류시간 30일 이상 혹은 2차처리/30일 이상 저장
가축사료 곡물	20(a) 30(b)	30(a) 45(b)	1000(a) 5000(b)	2차처리/1주 이상 저장/소독 혹은 고도처리/소독
	-	-	1000(a)	안정화지 체류시간 30일 이상 혹은 2차처리/30일 이상 저장
산업용 곡물	50(a) 70(b)	- -	3000(a) 10000(b)	2차처리/소독
	-	-	3000(a) 10000(b)	안정화지 체류시간 30일 이상 혹은 2차처리/30일 이상 저장

(a): 시료의 80%는 초과하지 않아야 함 (월 최소 5회 이상의 시료 채취)

(b): 최대 수치

(*): 잎채소, 구근식물, 낱것으로 먹는 농작물에는 허용되지 않음

(**): 감자, 토란, 홍당무

6.7. 스페인

물부족으로 인한 물 재이용 프로젝트를 실행하고 있는 스페인의 안달루시아 지역의 물 재이용 수질지침을 표 3.2.17과 같다. 표에서와 같이 수질기준이 되는 항목은 적으며, 주로 인체위해성과 관련된 분원성 대장균과 선충류에 대해서 제안하고 있다.

표 3.2.17 스페인 안달루시아 (Andalusia) 지역의 물재이용 수질지침 (adopted from Brissaud, 2008)

구분	분원성 대장균군수 /100ml	선충류 egg/L
날것으로 먹는 농작물(채소류) 관개용수	<1,000	<1
산업용 곡물, cereal 곡물, 사료곡물, 목초지와 나무, 익혀먹는 농작물	None	<1
제한된 구역의 관개용수	None	None

6.8. 그리스

그리스의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침은 대상작물, 관개방법, 그리고 대중의 접근성 등의 기준으로부터 제한적 관개 (restricted irrigation)와 무제한적 관개 (unrestricted irrigation)로 나누어 수질지침을 적용하도록 제안하고 있다. 제한적 관개는 비식용작물, 가공하여 소비되는 농산물, 또는 수확되는 부분이 땅과 직접적인 접촉이 없는 작물 (사료작물, 설탕 등의 공예작물, 초지 등)을 대상으로 한다. 또한, 제한적 관개는 스프링클러 관개방법을 허용하지 않으며, 관개지역에 대한 공공의 허가 없는 출입이 제한되는 형태를 의미한다. 무제한적 관개는 채소, 포도, 익히지 않고 소비되는 농산물 등의 모든 형태의 작물을 대상으로 하며, 모든 형태의 관개방법이 허용되고 관개지역에 대한 공공의 접근에 제한이 없는 경우를 의미한다.

그리스의 경우 합리적인 수질기준을 제안하기 위하여 하수처리장의 규모에 따라 차등적인 수질기준을 적용하고 있다. 예를 들어 2,000명 이하의 거주자를 대상으로 하는 작은 하수처리장의 경우, 제한적 관개에 대한 수질기준은 BOD₅와 SS가 표 3.2.18에서와 같이 25 mg/L와 35 mg/L를 초과할 수 있으며, E.coli의 수질기준도 200 EC/100ml보다 큰 1,000 EC/100ml로 제안하고 있다.

수질기준에 포함된 항목들에 대한 샘플링에 대한 지침 또한 하수처리장의 규모에 따라 차등적으로 적용하고 있다. BOD₅, SS, N, 그리고 P에 대한 샘플링 주기는 10,000명 미만의 하수처리장의 경우 첫해에 한해 12번의 샘플링을 실시하도록 하였고, 이듬해부터는 연 4회의 샘플링을 실시하도록 제안하고 있다. 10,000~20,000명을 대상으로 하는 하수처리장의 경우 해마다 12번의 샘플링을 실시하도록 규정하고 있으며, 50,000명 이상의 하수처리

장의 경우 연 24회를 기준으로 한다.

그리스의 하수재이용 수질지침의 특징은 다른 기타 선진국에서와 같이 특정한 수질기준값을 제시하기보다는 모든 수질샘플을 대상으로 확률적인 초과개념을 도입하고 있다는 점이다. 예를 들어 BOD₅의 무제한적인 관개의 경우, 모든 수질샘플 중 80%이하의 샘플에서 수질지침 이하의 농도를 보이면 적합한 재이용 수질을 나타내는 것으로 제안하고 있다.

표 3.2.18 그리스 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침 (adopted from Agrafioti and Diamadopoulos, 2012)

재이용분류	E.coli/100ml	BOD ₅ (mg/L)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	최소처리수준
제한적 관개	≤200 (median)	25	35	-	2차처리 ^a , 소독살균 ^b
무제한적 관개	≤5 for 80% of the samples, and ≤50 for 95% of the samples	≤10 for 80% of the samples	≤10 for 80% of the samples	≤2 (median)	2차처리 ^c , 3차처리 ^d , 소독살균

^a 2차처리에는 활성오니법, 살수여상법, 회전원판접촉법 등을 포함하며, BOD₅와 SS의 수질기준을 만족하기 위한 추가적인 시설을 설치할 수 있다. 또한, 총질소의 농도는 45 mg/L를 초과할 수 없으며, 저수지와 같은 저류공간에 장기간 저장되거나, 지하수 충전용 목적으로 사용되는 경우에는 총질소 농도가 15 mg/L를 초과해서는 안 된다. 하수처리장의 규모가 작을 경우 (less than 2,000 equivalent residents), BOD₅와 SS의 수질기준을 초과할 수 있으며, E.coli는 1,000 EC/100ml를 초과해서는 안 된다.

^b 소독살균은 염소처리, 오존처리, UV처리 등을 포함하여 E.coli 수질기준을 만족하기 위한 다른 처리기술을 적용할 수 있다.

^c a에서의 내용을 참고할 수 있으며, 추가적으로 관개 수혜지역이 질소에 취약한 경우 탈질장치를 추가하여, 암모니아성질소(N-NH₄)와 총질소(T-N) 농도가 각각 2 mg/L와 15mg/L를 초과해서는 안 된다.

^d 3차처리는 2차처리에서 응집 및 여과 시스템이 추가될 수 있다.

6.9. 프랑스

프랑스는 공식적인 재이용수 수질규제기준은 없으나 WHO 권고지침보다 엄격한 하수처리수 재이용수의 농업용수와 조경용수의 수질권고지침이 1991년 국립공중보건회의(CSHPF, the Conseil Supérieur d'Hygiene Publique de France)에 의해 A, B, C 등급으로 마련되었다. A 등급은 대중접촉으로 인해 발생 가능한 건강 위해도를 저감하기 위해 WHO 권고지침 보다 더 강화된 수질을 권고하여 날것으로 먹는 채소류의 관개용수가 허가되는 되나 관개용수가 농작물에 직접 접촉되지 않는 것을 권장하고 있으며 공공녹지 공간의 관개는 근거리 살수를 권고하고 있다. 또한 살수장치는 주택, 경기장, 레크리에이션

지역으로부터 100m이상 이격하여 설치하여야 한다. B등급의 하수 재이용수는 곡물, 가축 사료, 원예 살수용으로 사용되고 C등급의 하수 재이용수는 대중출입 제한지역에 적용된다. 2000년 CSHPF는 재이용수를 관개용으로 사용할 경우 이차처리의 의무화와 기존 3개의 수질등급을 4개의 등급으로 더욱 강화된 권고사항을 개정하였다 (환경부, 2011b).

표 3.2.19 프랑스 물 재이용 권고사항

적용 범위		폐수처리수 재이용 수질 권고 기준	
		1991년	2000년
A	날것으로 먹는 채소류, 과일류의 관개용수, 목초지 관개용수, 유실수, 공원, 체육시설, 골프장 등의 살수용수	nematode egg content <1/L, faecal coliform content <1000 cfu/100ml	E. coli content < 1,000 CFU/100ml No Salmonella, No Taenia egg
B	익혀먹는 채소류 및 과일류 관개용수, 원예식물, 시리얼, 사료곡물 살수용수	nematode egg content <1/L, no microbiological criterion	E. coli content < 1,000 CFU/100ml
C	살수를 제외한 원예식물, 시리얼, 사료곡물 관개용수	no microbiological criterion	E. coli content < 10,000 CFU/100ml
D	살수를 제외한 대중접촉이 제한된 산림 관개용수		no microbiological criterion

7. 간접재이용 수질규범(시안)

7.1. 우리나라 재처리수의 용도별 수질기준

환경부 (2014)는 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 제14조에 따른 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준을 표 3.2.20과 같이 제시하였다. 환경부의 재처리수 용도별 수질기준은 농업용수의 경우 직접재이용을 의미한다. 본 법의 시행령에 포함하고 있는 재처리수의 농업용수 수질기준은 2013년 6월 9일부터 시행되고 있다.

농업용수는 농작물 등의 재배에 공급되는 용수로 정의 하였고, 법에 따라 수질관리를 하는 때에는 다음 각 호의 구분에 따라 원수 및 재처리수에 대한 수질검사를 실시하여야 한다고 하였다. 수소이온농도(pH), 부유물질(SS), 탁도(NTU), 결합잔류염소, 냄새, 색도는 매일 검사를 실시하고, 생물화학적산소요구량(BOD), 총질소(T-N), 총인(T-P), 총대장균수는 매주 검사를 실시하고 염화물, 전기전도도, 그 밖에 중금속 등 미량유해물질 항목은 매 분기 검사를 실시하여야 한다고 하였다.

7.2. 간접재이용수 수질규범(시안)

간접 하수재이용수의 수질관리는 직접재이용과 비교하여 매우 어려운 것이 사실이다. 직접재이용은 취수원이 되는 하수처리장 내에 재처리시스템을 설치하여 공급하기 때문에 수질기준에 맞도록 관리할 수 있기 때문이다.

표 3.2.20 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준

구분	도시 재이용수	조경용수	친수용수	하천 유지용수	농업용수		습지용수	지하수 충전	공업용수	
					직접 식용	불검출				
총대장균군수 (개/100ml)	불검출	200 이하	불검출	1000 이하	직접 식용	불검출	200 이하		200 이하	
					간접 식용	200 이하				
결합잔류염소 (mg/L)	0.2 이상	-	0.1 이상	-	-		-		-	
탁도 (NTU)	2 이하	2 이하	2 이하	-	직접 식용	2 이하	-		10 이하	
					간접 식용	5 이하				
부유물질 (SS) (mg/L)	-	-	-	6 이하	-		6 이하	「먹는 물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」 별표 1에 따른 먹는 물의 수질기준을 준수할 것	-	
생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	5 이하	5 이하	3 이하	5 이하	8 이하		5 이하		6 이하	
냄새	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것		불쾌하지 않을 것		불쾌하지 않을 것	
색도 (도)	20 이하	-	10 이하	20 이하	-		-		-	
총질소 (T-N) (mg/L)	-	-	10 이하	10 이하	-		10 이하		-	
총인 (T-P) (mg/L)	-	-	0.5 이하	0.5 이하	-		0.5 이하		-	
수소이온농도 (pH)	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5		5.8~8.5		5.8~8.5	
염화물 (mgCl/L)	-	250 이하	-	-	-		250 이하		-	
전기전도도 (μs/cm)	-	-	-	-	직접 식용	700 이하	-			-
					간접 식용	2000 이하				

표 3.2.20 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준 (계속)

(단위: mg/L)

알루미늄 (Al)	비소 (As)	총붕소 (B-total)	카드뮴 (Cd)	6가크롬 (Cr+6)	코발트 (Co)	구리 (Cu)	납 (Pb)
5 이하	0.05 이하	0.75 이하	0.01 이하	0.05 이하	0.05 이하	0.2 이하	0.1 이하
리튬 (Li)	망간 (Mn)	수은 (Hg)	니켈 (Ni)	셀렌 (Se)	아연 (Zn)	시안 (CN)	폴리클로리네이 티드비페닐 (PCB)
2.5 이하	0.2 이하	0.001 이하	0.2 이하	0.02 이하	2 이하	불검출	불검출

비고

1. 농업용수 수질기준 중 직접 식용은 농산물을 조리하지 않고 날것으로 먹는 경우에 적용하고, 간접 식용은 농산물을 조리를 하거나 일정한 가공을 거쳐 먹는 경우에 적용하며, 농업용수의 경우에는 추가적으로 다음 항목에 대한 수질기준을 만족해야 한다.
2. 총대장균군수, 부유물질(SS), 생물화학적산소요구량(BOD), 색도, 총질소(T-N), 총인(T-P), 수도이온농도(pH), 염화물, 비소(As), 카드뮴(Cd), 6가크롬(Cr+6), 구리(Cu), 납(Pb), 망간(Mn), 수은(Hg), 니켈(Ni), 셀렌(Se), 아연(Zn), 시안(CN), 폴리클로리네이티드비페닐(PCB), 전기전도도 항목은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조 제1항제5호에 따른 수질오염물질 공정시험기준에 따라 검사해야 한다. 다만, 총대장균군수는 최적확수 시험법 또는 막여과 시험법으로 하고, 부유물질(SS)은 유리섬유 거름종이법으로 해야 한다.
3. 결합잔류염소, 탁도, 냄새, 알루미늄(Al), 총붕소(B-total), 코발트(Co), 리튬(Li) 항목은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제6호에 따른 먹는물 공정시험기준에 따라 검사해야 한다. 다만, 코발트(Co), 리튬(Li) 항목은 먹는물 공정시험기준의 금속류-유도결합플라σμα 원자 발광분광법에 준하되, 코발트(Co)는 측정과장 228.616, 정량한계 0.01mg/L, 리튬(Li)는 측정과장 670.784, 정량한계 0.50mg/L로 한다.
4. 공업용수 수질기준은 산업용수로 사용하는 경우에 적용하며, 다회순환냉각수, 공정수, 보일러용수 등은 수요처와 협의하여 수질을 정할 수 있다.
5. 하·폐수처리수 재처리수 수질기준은 하수처리수 재처리시설에서 최종 처리하여 송수하는 수질에 대하여 적용하며, 「하수도법 시행규칙」 별표 1에 따른 공공하수처리시설의 방류수수질기준이 재처리수의 기준보다 강할 경우에는 「하수도법 시행규칙」을 따른다.
6. 공공하수도관리청이 공익적 목적으로 공급하는 도시 재이용수, 하천유지용수, 조경용수, 친수용수, 농업용수에 대한 수질기준은 2013년 6월 9일부터 적용한다.

그러나 하수처리장 방류수가 하천, 호소에 방류되어 강수에 의한 하천수와 혼합 희석수를 농업용수로 간접적으로 이용할 때 직접하수재이용 수질보다 낮은 기준을 적용할 수는 없다. 따라서 적정 수준의 수처리를 통하여 미처리하수나 하수처리수로 인하여 나타날지 모르는 인체위해성을 낮추는 것이 중요할 것이다.

간접재이용에서 과도한 수처리를 고려해야 하면, 농업용수 관리비용의 증가로 이어질 수 있다. 경제성과 안전성 측면에서 적절한 균형을 이루는 일이 선행되어야 하며, 사회적, 정치적 여건에도 부응하는 수준에서 추진하는 것이 필요할 것이다.

다음에서는 간접재이용의 수질 관련 규범의 시안을 제안하도록 한다. 이 시안은 국외 하수처리수의 농업용수재이용 수질과 관련한 규범과 지침, 그리고 기준을 조사 분석하고, 실제 농업용 저수지를 관개용수로 사용하거나 하수처리수를 간접재이용하고 있는 시범지구 등에서 현장 조사를 통하여 제안하였다 (표 3.2.21).

가. 대장균

본 연구를 통한 논 관개용수 모니터링 결과와 인체위해성 분석결과로부터 현재의 직접 재이용을 대상으로 한 총대장균 수질기준 200 MPN/100ml는 다소 엄격하게 제안된 경향이 있다. 본 연구에서 청정지구로 선정된 이동저수지 관개지구인 용인지구는 관개용수 수질 모니터링 기간에 대하여 총대장균수가 평균 8,642 MPN/100ml로 분석되었으며, 수질기준의 초과확률은 43.3%를 넘는 것으로 나타났다. 또한, 무계획적 간접재이용이 이루어지고 있는 병점지구의 관개용수 수질은 모니터링 기간 동안 총대장균수의 평균은 7,929 MPN/100ml, 수질기준 초과확률은 69.6%로 나타났으며, 오산지구의 경우 총대장균수의 평균은 11,229 MPN/100ml, 수질기준 초과확률은 50.0%로 나타났다. 모든 지구에 대한 인체위해성 평가 결과는 허용가능한 수준으로 나타났다.

해외의 농업용수재이용 수질기준에서 나타나는 논벼와 같은 곡물을 대상으로 한 대장균관련 수질기준은 미국 캘리포니아주의 경우 가장 엄격한 총대장균수 2.2 cfu/100ml를 적용하고 있으며, 미국의 경우 분원성 대장균수 200 MPN/100ml를 지침으로 제안하고 있으며, 이스라엘은 벼에 대한 특별한 기준이 존재하지 않는 것으로 분석되었다. 키프로스는 식용농작물에 대한 수질규범으로 분원성 대장균수 200 MPN/100ml를 제안하고 있으며, 프랑스의 경우에는 관개방법에 따라 E.coli 1,000~10,000 cfu/100ml를 권고사항으로 하고 있다. 특히, 스페인 안달루시아지방의 경우 분원성 대장균수를 기준으로 채소류 관개용수의 경우에도 1,000 cfu/100ml 미만으로 권고하고 있으며, 멕시코의 경우에도 분원성 대장균수를 기준으로 1,000 MPN/100ml을 초과하지 않도록 하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 간접재이용수의 수질기준은 환경부의 수질기준을 초과할 수 없는 것으로 판단되며, 따라서 총대장균수 200 MPN/100ml을 대장균에 대한 수질규범(시안)으로 제안할 수 있다. 다만, 환경부의 수질기준을 고려하지 않는 경우에는 논벼 관개용수의 대장균에 관한 수질기준을 분원성 대장균 또는 E.coli에 대하여 설정할 수 있으며, 다른 국가의 수질기준과 본 연구의 위해성평가 결과를 참고할 때, 분원성 대장균수 200MPN/100ml 또는 E.coli 1,000 MPN/100ml으로 설정하는 것이 보다 현실적인 것으로 판단된다.

나. 탁도

미국 EPA는 관개용 하수재이용시 탁도에 대한 수질치침으로 비상업용만 2 NTU 이하일 것을 권고하고 있으며, 다른 관개용수 이용에 대한 수질지침은 없는 실정이다. 그리스의 경우에도 무제한적 관개에 대해서만 2 NTU 이하를 지침으로 제시하고 있다. 환경부는 직접식용의 경우 2 NTU 이하, 간접식용의 경우 5 NTU 이하의 기준을 마련하고 있다. 따라서 상대적으로 낮은 수질을 요구하는 논벼 관개용수의 경우 특별한 기준을 마련하지 않아도 무관할 것으로 보이며, 채소 등을 대상으로하는 관개용수의 경우에는 환경부 직접식용의 수질기준 2 NTU 이하를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

다. 부유물질

미국 EPA의 경우, 부유물질과 관련하여 탁도와 TSS로 제안하고 있으며, 탁도에 대한 제한이 있는 비상업용은 부유물질에 대한 제한은 따로 두고 있지 않으며, 상업용, 비식용

농작물 등 기타 다른 용도에 대해서는 총부유물질이 30 mg/L 이하일 것을 권고하고 있다. 이스라엘의 경우 가장 엄격한 무제한적 관개의 경우 15 mg/L 이하로 제한하고 있으며, 튀니지의 경우 30 mg/L 이하로 기준을 설정하고 있다. 키프로스는 식용농작물의 경우 30 mg/L 이하, 모든 농작물의 경우 10 mg/L 이하를 규범으로 제안하고 있다. 그리스의 경우 무제한적 관개 샘플의 80%이상이 10 mg/L 이하로 되는 것을 수질지침으로 제안하고 있다. 환경부는 탁도에 대하여 기준을 마련해 놓았으며, 부유물질에 대한 특별한 기준은 없다. 탁도에 대해 기준이 마련된다면 부유물질에 대한 특별한 기준은 필요하지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서의 모니터링 결과 청정지구인 용인지구는 평균 18 mg/L, 간접재이용지구인 병점지구는 평균 66 mg/L, 오산지구는 평균 57 mg/L로 나타났으며, 기존의 농업용수 수질 기준인 하천 100 mg/L 이하와 호소 15 mg/L 이하를 고려했을 때 큰 문제가 없는 것으로 판단되어 별도의 수질기준을 마련할 필요는 없는 것으로 사료된다.

라. 생물화학적 산소요구량, BOD

미국 EPA는 관개용 하수재이용시 BOD의 경우 비상업용의 경우가 가장 엄격한 수준으로 10 mg/L 이하로 권고하고 있으며, 이스라엘의 경우 가장 엄격한 수준인 무제한적 관개의 경우 10 mg/L 이하로 제한하고 있다. 키프로스는 모든 농작물에 대해서는 10 mg/L 이하, 식용농작물은 20 mg/L 이하를 수질규범으로 제안하고 있다. 그리스는 무제한적 관개의 경우 샘플의 80%이상이 10 mg/L 이하로 될 것을 수질지침으로 제안하고 있다. 환경부는 농업용수 수질기준을 참고하여 하수재이용시 8 mg/L 이하로 규정하고 있으며, 이는 다른 국가들의 상황을 고려했을 때에도 가장 엄격한 수준에 해당하는 것으로 우리나라의 수질관리 특성을 반영하여, 본 기준을 준용하면 충분할 것으로 판단된다.

마. 냄새

우리나라를 제외하고 냄새에 대한 특별한 기준을 마련한 국가는 문헌조사에서 나타나지 않으며, 환경부의 경우에는 “불쾌하지 않을 것”이라고 명시하고 있다. 이는 하수처리수를 특수 목적으로 이용하는 것에 대한 이해당사자의 입장을 고려한 것으로, 하수재이용에 대한 반감을 감소시킬 수 있다는 장점은 있으나, 모호한 기준에 따른 논란의 여지는 있는 것으로 판단된다.

바. 총질소

FAO에서 권고하는 관개용수 가이드라인을 검토해 본 결과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 30 mg/L 이하로 규정하고 있다. 그리스는 총질소농도 45 mg/L 미만으로 제안하고 있으며, 저수지와 같은 저류공간에 장기간 저장될 경우 15 mg/L 미만을 수질지침으로 하고 있다. 비슷한 영농환경을 보이는 대만의 경우 논벼 관개용수의 수질기준을 3.0 mg/L로 제안하고 있으며 (Chiou 등, 2008), 일본의 경우에도 미질 및 수확량을 고려한 수도용수 수질기준으로 1.0 mg/L 이하로 제안하고 있다 (김형중, 2011). 일본과 우리나라의 연구에서도 총질소농도가 5.0 mg/L이 넘으면 논벼의 생육과 수확량에 지장을 초래할 수 있는 것으로 나타났다 (농림부, 2004). 실제 본 연구에서는 하수처리수를 간접재이용하는 병점지구와 오산

지구의 경우, 관개용수를 많이 필요로 하는 5~6월의 총질소 농도가 10 mg/L 이상으로 나타나는 것으로 조사됨에 따라 재처리시스템을 활용하여 관개용수의 총질소 농도를 낮추거나 논에서의 적합한 시비활동이 필요한 것으로 판단된다.

다만, 수질기준에 있어서는 FAO의 권고기준 이하의 하수처리장 방류수 총질소 농도를 가지도록 국내하수처리장 방류수 수질기준이 마련되어 있고, 처리비용 및 하천·호소 수질 관리와의 관계에 대한 추가적인 고찰이 필요한 점을 고려하여 별도의 수질기준을 제한하기에는 선급할 수 있는 것으로 판단된다.

사. 총인

인(Phosphate)의 경우 FAO에 따르면 통상적으로 사용되는 농업(관개)용수에서 PO₄-P(인산염인)의 범위가 0~2.0 mg/L의 범위로 측정되었다고 밝히고 있으나, 수질 가이드라인으로 권고하는 항목에 없다. 하지만, 관개시스템에서 클로깅(clogging) 현상을 유발할 수 있는 박테리아나 조류의 성장에 원인물질이 될 수 있다고 하였다. 국내 하수처리수 방류수의 수질기준이 0.2~0.5 mg/L이기 때문에 따로 규제항목으로 추가할 필요는 없을 것으로 판단된다 (환경부, 2011c).

아. 수소이온농도

FAO에서는 농업(관개)용수의 pH를 6.5~8.4의 범위로 규제하고 이 범위에 속하지 않을 경우 농작물의 기형을 유발할 수 있다고 밝히고 있다. 미국 EPA는 하수재이용 권고 지침에서 관개용수와 관련한 모든 pH를 6.0~9.0로 권고하고 있으며, 튀니지의 경우 pH 6.6~8.5로 기준을 규정하고 있다. 환경부는 농업용수 재이용수의 pH를 5.8~8.5 범위로 기준을 제시하고 있으며, 하한의 범위가 다소간 낮은 경향은 있으나 용인할 수 있는 범위인 것으로 판단된다.

자. 전기전도도

하수처리수에는 다량의 염분이 포함되어 있기 때문에 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우에는 이에 염분에 대한 기준이 필요하다. EC(전기전도도)의 경우 FAO에서는 3,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이하로 규제하고, 튀니지의 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준은 최대허용 기준을 7,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 으로 제한하고 있다. 환경부는 직접식용의 경우 700 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 간접식용의 경우 2,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 더 강화되어 있으며, 표 3.2.1를 참고하여 논벼에 대해 하수처리수를 간접재이용할 때에도 무리가 없는 것으로 판단됨에 따라 환경부의 기준을 준용할 수 있을 것으로 사료된다.

차. 붕소

B(붕소)의 경우 FAO에서는 농작물의 민감성에 따라 농도를 제한하고 있으나 사용가능 범위를 0.5~3.0 mg/L으로 규정하고 있다. 국내 하수처리수의 농업용수재이용의 붕소기준은 0.75 mg/L로 규제되고 있고, 환경부 (2011c)의 수질분석 결과 농업용수 조사 대상지 18개소에서 모두 0.5 mg/L이하로 나타나 현행기준을 따르는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

카. 중금속 및 기타

Al(알루미늄), Cd(카드뮴), Co(코발트), Cu(구리), Li(리튬), Mn(망간), Ni(니켈), Se(셀레늄), 그리고 Zn(아연) 9개 항목은 FAO 농업(관개)용수 수질 가이드라인과 국내 하수처리수 농업용수 재이용수의 기준이 같기 때문에 현행 국내 기준을 유지하여도 적합할 것으로 판단된다.

Pb(납)과 As(비소), Cr(크롬)의 경우 FAO 권고 수질기준이 각각 5 mg/L, 0.1 mg/L로 국내 하수처리수 농업용수 재이용수 수질기준이 보다 엄격하게 규정되고 있으나, 인체에 치명적인 영향을 미치는 독성물질이기에 현행 국내 기준을 유지하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한, Hg(수은), CN(시안)과 PCB(폴리염화비페닐) 등은 유해독성 중금속으로 토양이나 물에 용해되어 있으면 인체에 유해한 결과를 초래할 수 있기 때문에 농업용수 현행 국내 기준을 유지하는 것이 바람직할 것이다.

표 3.2.21 간접하수재이용 수질규범(시안)

수질항목	농업용수 재이용 목적별		
	비식용작물(밭작물)용수	논 용수	채소용수
총대장균군수 (개/100ml)	200	200	불검출
탁도 (NTU)	-	-	≤ 2
생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	8	8	8
수소이온농도 (pH)	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5
전기전도도 (μ s/cm)	2,000	2,000	700

기타 중금속 및 붕소 등과 관련한 항목에 대해서는 환경부의 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준을 준용한다

8. 요약 및 결론

본 절에서는 하수처리수의 간접재이용 수질 지침, 규범 및 기준 등과 관련한 국내외 사례를 조사하고, 관련 수질 규범 시안을 제시하였다. 주요 내용 및 향후 연구계획은 다음과 같다.

① (수질 규범, 지침 및 기준) 하수재이용 수질은 규범, 지침, 기준 등으로 구분된다. 규범은 과학적으로 타당한 범위를 제시하는 것이며, 지침에서는 목표수질을 나타낸다. 수질 기준은 지침을 바탕으로 규제 내용을 제시하는 것이다.

② (수질기준의 고려사항) 농업용수재이용 수질 기준에서 고려되는 인자는 공중건강보호에 중점을 두며, 처리의 신뢰성, 사용 필요조건, 관개효과, 환경적 고려사항 등을 포함한다. 또한 경제성과 사회적, 정치적 현실을 고려해야 한다.

③ (농업용수 수질조건) 농업용수의 수질은 염분, 치환성 양이온, 영양염류, 유해 중금속, 기타 미량요소 등을 고려하여야 하며, 관련 문헌조사 결과를 제시하였다.

④ (보건위생 조건) 하수처리수의 농업용수재이용을 위한 가장 중요한 전제조건은 보건위생 안전성이다. 세계보건기구 (WHO)에서는 재이용에 따른 건강위험과 질병 역학적 증거를 바탕으로 병원성 미생물 잔류량을 엄격히 통제하는 것이 중요하다고 제시하였다. 미국 주정부에서는 공중건강보호를 위한 엄격한 재이용수 수질기준을 제시하여 규제하고 있으며, 그 사례를 정리하였다.

⑤ (직접하수재이용 수질기준) 박승우 (2005)은 농업용수재이용의 미생물학적 수질규범을 제안하였으며, 그 배경과 내용을 제시하였다.

⑥ (국외 하수처리수의 농업용수재이용 수질 규범, 지침, 그리고 기준) 가장 많은 국가에서 참고 및 이용되고 있는 WHO와 미국의 수질기준을 포함하여, 하수처리수를 농업용수로 광범위하게 이용하고 있는 멕시코, 이스라엘, 튀니지, 키프로스, 스페인, 그리스, 그리고 프랑스의 재이용수 수질 규범 또는 기준에 대해 조사하였다.

⑦ (간접재이용 수질규범시안) 본 연구에서는 간접재이용시스템 개발을 위한 수질규범을 제안하였다. 여기에서는 관개용수 목적별로 3개로 구분하고 총대장균군수, 탁도, 생물화학적 산소요구량, 수소이온농도, 그리고 전기전도도 등의 수질항목을 제시하였다.

제3절 시험지구의 실험설계와 모니터링 계획

1. 서론

미처리 하수 및 하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육에의 영향을 조사 분석하기 위해서는 시험 목적에 맞는 적절한 시험지구를 선정하여야 한다. 또한, 선정된 시험지구로부터 획득한 모니터링 자료를 이용하여 통계적인 유의성을 검정하기 위해서는 통계학적으로 타당한 실험설계를 수립하고 적합한 통계분석방법을 적용하는 것이 중요하다.

박승우 (2007, 2011)는 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 작물생육, 수질 및 토양환경, 그리고 생태환경에의 영향을 규명하기 위하여 수원시 환경사업소 인근 병점모니터링지구에 시험포장을 설치하고, 하수처리장 방류수를 처리수준별로 관개하는 처리구와 지하수를 관개하는 대비구를 난괴법을 적용하여 시험을 설계한 바 있다 (그림 3.3.1). 이와 같은 하수처리수의 직접재이용에 따른 영향을 조사 분석할 시에는 관개수의 수질을 제외한 모든 요소를 통제할 수 있기 때문에 기존의 농업통계학적 실험설계가 가능했다.

하지만 미처리 하수 및 간접재이용에 따른 영향을 일반적인 관행 관개에 따른 영향과 비교 조사 및 분석하기 위해서는 지리적 환경적 제한요인이 발생하게 된다. 작물의 생육에 영향을 미치는 영농활동과 토양환경, 그리고 기상조건 등을 통제할 수 없기 때문이다. 따라서 미처리 및 간접재이용 유형에 따른 영향을 규명하기 위해서는 앞서 언급한 한계를 고려한 시험 조건별 적합한 모니터링 체계와 실험설계가 이루어져야 한다.

본 절에서는 미처리 하수 및 하수처리수의 농업용수 간접재이용 유형별 수질 및 토양 환경 영향 및 작물생육을 비교 분석하기 위한 모니터링 및 실험설계를 검토하고자 한다.

2. 수질모니터링 시스템의 설계 및 통계적 분석 방법

2.1. 모니터링 시스템의 설계

USDA NRCS (2003)에서는 수질모니터링시스템의 설계에 대한 매뉴얼을 발표하였다. 수질관리를 위한 모니터링의 목적은 1) 장기간의 수질변화 추세를 분석하고, 2) 오염물질의 이송여부 및 이송 구간을 결정하며, 3) 한계지역을 선정하고, 4) 수질 관리 목표와 기준을 달성하는지 여부를 판정하며, 5) 수질보전대책의 효과를 측정하고, 6) 수질개선대책의 효과를 평가하며, 7) 오염물질의 배분과 8) 모델의 검정과 보정 및 연구의 수행 등을 들고 있다.

USDA NRCS의 모니터링의 통계적 실험계획방법으로 다음 8가지를 제시하였다. 즉 1) 개략조사(reconnaissance), 2) 포장시험방법(plot design), 3) 단일 유역에 대한 사전,

사후평가(single watershed before and after design), 4) 상, 하류 유역의 시험 (above-and-below watershed design), 5) 2개 유역 설계법(two watersheds design), 6) 대칭 유역설계법(paired watershed design, 7) 다중 유역설계법 (multiple watersheds design), 8) 정기 추세 수질측점 (trend stations method) 등 이다.

가. 포장 시험설계방법

농업실험설계에서는 난괴법 (Randomized Complete Block Design, RCB)을 적용한 포장시험방법을 주로 적용하는데, 포장조건의 차이에 따른 블록의 효과를 제거하기 위한 것이다. 박승우 (2011)의 하수재이용에 따른 작물생육 조사를 위한 포장 모니터링에서 그림 3.3.1과 같이 처리별로 4반복을 두는 방법을 적용하였다.

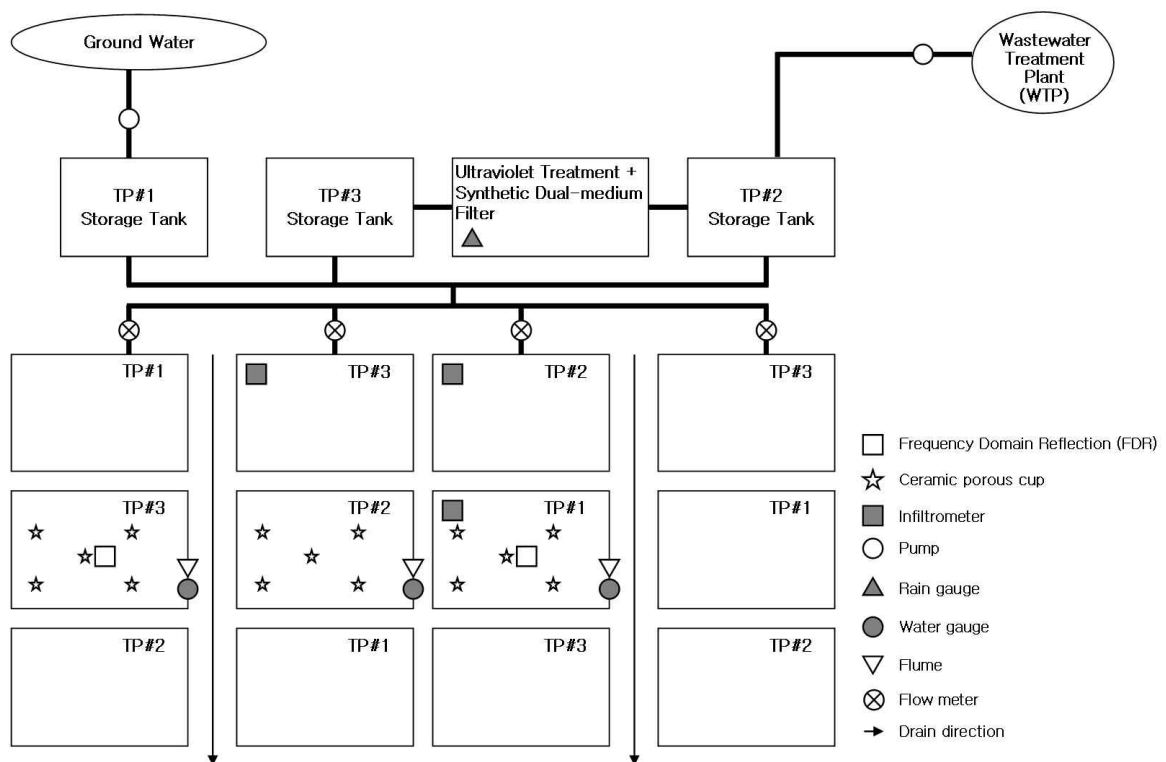


그림 3.3.1 시험포장 모니터링 시스템 모식도

위와 같은 난괴법을 이용한 농업실험설계는 포장단위의 실험계획에서 쓸 수 있다. 그런데 실제 유역 조건에서는 간접재이용 유형이 다르고, 다른 수질 조건을 갖는 용수를 이용하여 관개를 하게 되므로, 이 방법을 재현하는 데는 한계가 있다. 여러 가지 하수 재이용조건에 따른 수질 및 토양환경 모니터링과 이러한 조건에서 작물 생육과 수확량의 변화를 구명하기 위해서는 유역 시험설계방법을 채택하여야 한다.

나. 유역 시험설계방법

유역규모에서 하수재이용에 따른 수질 및 토양환경 영향을 평가하는 방법은 (1) 단일 유역법, (2) 상·하류 유역설계법, (3) 2개 유역설계법, (4) 대칭 유역법, (5) 3개 이상의 다중 유역법 등이 있다.

(1) 단일 유역설계

단일 유역설계법은 처리기법의 수질 개선 효과를 평가하는데 주로 이용되며, 시험유역에 대한 처리기법의 적용 전과 적용 후의 수질 모니터링 결과를 비교하는 기법이다. 시험유역에 대한 처리기법의 사전 적용 기간은 기준 자료 (baseline data)라 한다. 단일 유역설계는 하나의 시험유역만 필요로 하는 장점과 대부분의 유역에 적용가능한 장점이 있다. 처리기법의 적용 전과 적용 후의 수질 모니터링 결과를 비교하기 위한 통계방법은 주로 t 검정을 이용한다 (Snedecor와 Cochran, 1980).

(2) 상·하류 유역설계

상·하류 유역설계법은 처리기법 적용 지역의 상·하류 지점을 모니터링하는 설계법으로 지하수를 모니터링하거나 경사지와 비경사지를 비교하는 경우에 주로 이용된다. 상류 지점은 배후유역의 수질을 모니터링하고, 하류 지점은 처리기법 적용에 따른 수질을 모니터링한다. 상·하류 유역설계법은 일반적으로 상류와 하류의 기상조건이 동일하여 연도별 기상 변화의 영향을 덜 받는 장점이 있으나, 상류와 하류의 유역 특성이 다른 경우 처리기법에 따른 효과와 유역 특성에 따른 효과가 혼합되어 처리기법 적용에 따른 효과를 구분하기 어려운 단점이 있다.

(3) 2개 유역설계

2개 유역설계법은 하나는 처리기법을 적용하고, 다른 하나는 처리기법을 적용하지 않는 방식이다. 이를 통해 각각의 다른 대상유역에 대해 처리기법 적용 후 유역의 수질에 미치는 영향을 파악하기 위한 모니터링 방법이다. 2개 유역설계법은 시험유역 설계가 상대적으로 쉬우며, 시험 유역을 쉽게 바꿀 수 있는 장점이 있다. 통계적 접근방법으로는 대응표본 t-검정 또는 비모수검정을 주로 이용한다.

(4) 대칭 유역설계

대칭 유역설계법은 50년 이상 이용되어온 설계법으로 대상유역에 대한 처리기법 적용에 따른 수량과 수질을 분석하는 것이다. 기본적인 접근 방법은 두 개의 유역과 두 개의 연구기간을 구성하고, 두 개의 유역은 처리 유역과 대조 유역로 나누고, 두 개 기간은 각각 보정기간과 처리기간으로 구분한다. 보정기간 동안 두 개 유역은 동일한 처리와 동일 기간에 대한 수질 자료가 수집되어야 한다. 처리기간에는 처리 유역은 처리기법 적용에 따른 효과를 모니터링하고, 대조 유역은 기존 방식을 적용한다. 대칭 유역설계법은 기상의 영향에 덜 민감한 장점이 있지만, 장기간의 자료와 그에 따른 많은 비용을 필요로 하는 단점이 있다.

(5) 다중 유역설계

다중 유역설계(Multiple Watersheds Design, MWD)는 Clausen과 Brooks (1983), Striffler (1965) 등에서 소개되었다. 이 방법은 어떤 관심 지역에서 처리가 적용된 유역들을 선정하여 조사하는 방법에 쓰고 있다. 또한, 이 방법은 비교적 장기간에 걸친 모니터링을 통하여 처리 효과를 비교 분석하는 데 적용된다.

NRCS에서는 MWD 모니터링 계획의 예로서 어떤 주에 보전기법이 적용된 15개 유역(처리 유역)과 적용되지 않은 15개 유역(대비 유역)을 선정하고 동절기 퇴비 살포에 따른 수질 영향을 조사한 경우를 제시하였다. 각 유역의 유출수의 수질 샘플링을 통하여 퇴비살포에 따른 수질 영향을 분석하였다.

MWD의 장단점은 다음과 같다 (NRCS, 2003). 장점으로는 1) 조사결과를 그 지역에 적용할 수 있고, 2) 유역간의 차이에 따른 변이정도를 각 처리의 변량분석에 적용할 수 있는 점을 들 수 있다.

MWD의 단점으로는 1) 샘플링은 하천 유출이 있을 때만 가능하므로 간헐적인 유출을 갖는 하천에서는 적용할 수 없으며, 2) 오염 부하량 계산과 같이 수질보전대책에 필요한 자료는 MWD에서는 많은 수의 샘플과 장기간의 자료가 필요하게 된다. 그러나 확률해석방법을 쓰게 되면 샘플수를 크게 줄일 수 있다 (Richards, 1989).

다. 포장 및 유역 규모의 시험설계

NRCS (2003)에서는 측정, 시험구, 포장, 유역규모의 조사계획에서 고려해야 할 사항을 제시하고 있다. 측정 규모 (point scale)는 어떤 수질측점에 대하여 조사하는 방법이며, 시험구 규모 (plot scale)는 소규모 시험포장을 조성하여 조사하는 방법이다. 포장규모 (field scale)는 시험구보다는 큰 규모로서 단일 토양, 작물 조건을 갖는 실제 조건에 대한 조사에서 적용하는 방법이다. 이 방법은 시험구 규모보다 여러 가지 처리 효과를 평가하는데 더 적합한 설계 방법이다. 예를 들어 규모별 최적관리기법에 따른 수질영향을 조사하기 위하여 시험구, 포장, 유역규모 등의 적용 여부를 구분하면 표 3.3.1에서와 같다.

이상의 결과로부터 수질모니터링시스템의 계획은 포장규모 방식을 채택하면서, 유역설계법을 적용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

표 3.3.1 시험설계 규모별 최적관리기법에 따른 수질 조사 적용성

Practice	Plot	Field	Watershed
Vegetative/tillage practices			
Conservation cropping	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Conservation tillage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Contour farming		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cover crop	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Crop residue	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Crop rotation		<input type="checkbox"/>	
Filter strip	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mulching	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Hayland planting	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Riparian buffer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Stripcropping, contour		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Structural practices			
Grassed waterway		<input type="checkbox"/>	
Streambank protection			<input type="checkbox"/>
Terrace		<input type="checkbox"/>	
Management practices			
Animal waste mgmt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Irrigation mgmt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pasture/hayland mgmt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pesticide mgmt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Plant nutrient mgmt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Woodland mgmt		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.2. 수질모니터링시스템의 통계적 분석방법

포장 및 유역규모의 처리방법과 수질 모니터링 결과 등의 통계분석 방법에는 분석 목적과 실험설계, 자료 종류 및 기간 등에 따라 여러 가지 방법이 적용된다. NRCS (2003)는 자료 분석단계를 그림 3.3.2와 같이 제안하였는데, 이 방법이 수질모니터링 결과 분석에 범용적인 방법으로 알려져 있다.

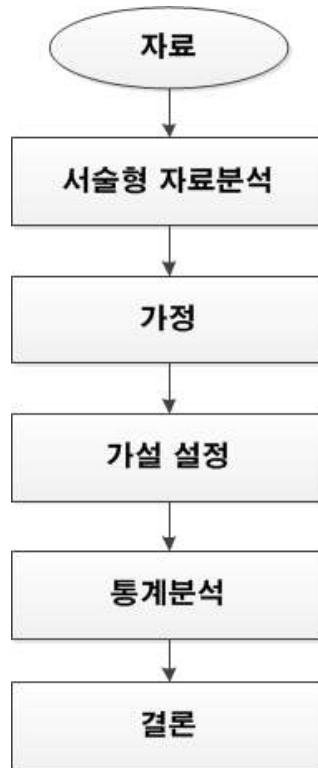


그림 3.3.2 자료분석단계 (NRCS, 2003)

그림 3.3.2에서와 같이 수질모니터링시스템의 통계분석은 1) 서술형 자료 분석 (exploratory data analysis, EDA)으로 자료의 내용에 대해 이해하고, 2) 통계해석을 위한 가정을 설정하고, 3) 통계적 가설을 정하고, 4) 통계분석을 실시하며, 5) 결론을 제시하는 것이다.

가. 수질자료의 통계적 가설

통계적 가설과 그 가설의 검정방법을 설정하는 일은 수질모니터링 조사연구를 위한 자료해석에서 기초적인 단계이다. 여기서 통계적 가설은 샘플의 통계치를 의미하는 것이 아니라 모집단의 매개변수와 관련한 판정을 하는 것이다. 즉 샘플의 통계적 특성으로부터 가설의 검정을 실시해야 하는 것이다. 가설의 검증 혹은 유의성 검증은 가설의 기각이나 수락 여부를 판정하는 것을 말한다.

통계적 가설은 귀무가설 (null hypothesis)과 대립가설(alternative hypothesis)로 구분한다. 귀무가설은 H_0 , 대립가설은 H_a 로 표시하는데, 그 예로 연도별 수질자료에 대하여 정리하면 다음과 같다.

H_0 : 평균 (year 1) = 평균 (year 2)

H_a : 평균 (year 1) \neq 평균 (year 2)

또는

H_a : 평균 (year 1) < 평균 (year 2)

등이다.

수질자료의 통계적 가설 검정에서 고려해야 할 사항은 자료가 갖는 오차 형식이다.

통계적 오차에서는 Type I과 Type II 오차로 구분한다. Type I 오차는 통계적 가설이 실제로는 사실이나 기각되는 경우에 나타나는 것이다. Type I 오차는 α 로 정의하고, 통계적 유의수준이라 하며, $1-\alpha$ 의 확률을 갖을 때, 귀무가설이 성립된다. 이 값이 작으므로 조사연구의 계획 단계부터 반드시 정의해야한다.

Type II 오차는 통계적 가설이 기각되어야 함에도 불구하고 수락되는 경우에 나타난다. Type II 오차는 β 로 정의하며, 귀무가설 기각의 확률이 $1-\beta$ 이다. 표 3.3.2는 귀무가설 검정에서 고려되어야할 Type I과 Type II 오차에 대하여 정의하고 있다.

표 3.3.2 자료가 갖는 통계적 오차

의사결정	귀무가설 진위	
	H ₀ 사실	H ₀ 거짓
H ₀ 채택	올바른 결정 확률 = $1-\alpha$ 신뢰수준	Type II 오차 확률 = β
H ₀ 기각	Type I 오차 확률 = α 의 유의수준	올바른 결정 확률 = $1-\beta$ 검정력

나. 수질자료의 귀무가설 검정 방법

수질자료의 귀무가설은 실험설계방법에 따라 정의된다. 수질자료의 가설은 샘플링 방법에 따라 1) 1점 샘플 (one-sample) 가설, 2) 2점 샘플(two-sample) 가설, 3) 2쌍 대비 샘플 (pair-sample) 가정, 4) 다량 샘플 (multiple-sample) 가정 등으로 구분된다 (NRCS, 2003). 각 수질샘플링 설계방법별로 귀무가설과 그 통계적 검정방법 등은 표 3.3.3에서와 같다.

표 3.3.3 수질샘플링 자료에 따른 귀무가설 및 통계적 검정방법

자료 종류	기각 지역	귀무가설	통계적 방법	비고
1점 샘플	단측 (one-tailed)	$\bar{x} > x_0$	t 검정법	
	양측 (two-tailed)	$\bar{x} > x_0$	t 검정법	
2점 샘플	단측	$\bar{x}_1 > \bar{x}_2$	t 검정법	
	양측	$\bar{x}_2 = \bar{x}_1$	t 검정법	
2쌍 샘플		$\sigma_1 - \sigma_2 = 0$	F 검정법	
	단측	$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \leq x_0$	t 검정법	
	양측	$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$	t 검정법	
		$\sigma_1 - \sigma_2 = 0$	F 검정법	
다량 샘플		$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x}_k$	F 검정법	
		$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_k$	Bartlett 검정법	

3. 간접하수재이용 지구 실험설계

3.1. 시험지구의 선정

간접하수재이용에 따른 환경 영향을 평가하기 위한 수질모니터링 시스템 설계기법을 선정하기 위하여 하수처리장의 유무, 지리적 특성, 연구사업의 경제적 여건 등을 고려하였다. 설계기법 중 단일 유역설계법은 처리기법의 적용 전과 적용 후의 모니터링 결과를 비교하는 기법으로, 기존 청정 관개지역을 연구자가 임의로 간접하수로 관개하기가 현실적으로 불가능하여 설계기법의 적용이 불가능한 것으로 나타났다. 또한, 상·하류 유역설계법과 대칭 유역설계법은 연구자가 하수처리장을 건설하는 것이 현실적으로 불가능하기 때문에 제외하였다. 다중 유역설계법은 적합하나, 3개 이상의 유역을 선정하여 모니터링하는 것은 본 연구 사업의 경제적 여건상 불가능한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 수질 모니터링 시스템 설계기법으로 2개 유역법을 선정하였다.

하수처리수의 간접재이용에 따른 수질, 토양환경 및 작물생육을 분석하기 위한 대비구는 하수처리수의 간접재이용에 따른 영향을 비교할 수 있으며, 일반적인 영농형태의 대표성을 가져야 한다. 처리구의 경우, 유역 내에 하수처리장, 하수처리장 방류구 하류 지점에 농업용수 수원공 및 논벼 재배지가 존재해야 한다.

본 연구를 위한 대비구로는 용인시에 위치한 이동저수지를 관개용수로 하는 용인 모니터링지구 (이하 용인청정지구, YI)를 선정하였다. 용인청정지구는 가장 일반적인 관개용수 공급원인 저수지를 포함하며, 이동저수지의 경우 상수원 보호구역으로 지정 관리되고 있기 때문에 대비구로서 적절한 것으로 사료된다. 처리구로는 오산시 환경사업소 하류지역에 위치한 오산 모니터링지구 (이하 오산재이용지구, OS)를 간접재이용지구로 선정하여 모니터링을 실시하였다. 오산 간접재이용지구는 하수처리장 방류수를 하천 하류구간에서 관개용수로 취수하여 이용하는 처리구이다. 그림 3.3.3은 간접하수재이용 모니터링 지구의 개요를 나타낸다.



그림 3.3.3 간접하수재이용 모니터링지구의 개요

그림 3.3.4는 간접하수재이용 대비 및 처리지구 위치도를 나타낸다. 용인청정지구의 경우 모니터링 포장 상류에 이동저수지가 존재하며, 오산 간접재이용지구는 상류에 하수처리장이 존재한다.



(a) 용인청정지구 (대비구) 위치도

그림 3.3.4 간접하수재이용 대비 및 처리지구 위치도



(b) 오산재이용지구 (처리구) 위치도

그림 3.3.4 간접하수재이용 대비 및 처리지구 위치도 (계속)

3.2. 시험포장 선정 및 조사계획

시험포장은 지구별로 다섯 포장을 선정하였다. 시험지구 내 선정된 시험포장에서 는 담수, 유입수, 토양환경, 그리고 작물생육 및 수확량 조사가 이루어졌다.

그림 3.3.5~3.3.6은 청정지구 및 간접재이용지구에 위치한 논 시험포장의 위성사진과 지적도를 보여주고 있다.

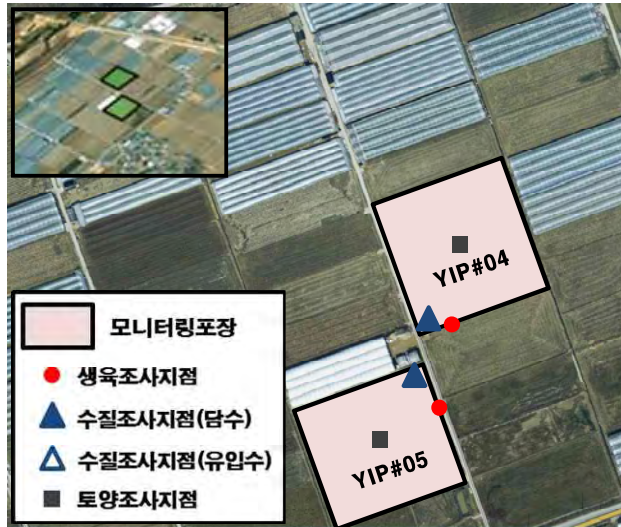


(a) 위성사진



(b) 지적도

그림 3.3.5 용인청정지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점



(a) 위성사진



(b) 지적도

그림 3.3.5 용인청정지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점 (계속)



(a) 위성사진

그림 3.3.6 오산재이용지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점



(b) 지적도

그림 3.3.6 오산재이용지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점 (계속)

4. 미처리하수 관개지구 실험설계

4.1. 미처리하수의 특징

가. 하수발생량

환경부 (2011a)에 따르면 시도별 하수처리구역 내외에서 발생하는 하수량은 표 3.3.4와 같다.

표 3.3.4 전국 시도별 하수 및 분뇨 발생량

(단위: 천 톤)

지역	하수발생량			분뇨발생량		
	계	하수처리 구역 내	하수처리구 역 외	계	수거식	수세식
전국	16,111	15,034	1,077	46	4	42
서울	4,478	4,478	0	11	0	11
부산	797	789	7	4	0	3
대구	732	717	15	3	0	3
인천	603	592	12	2	0	2
광주	366	359	7	1	0	1
대전	373	364	9	1	0	1
울산	253	241	12	1	0	1
경기도	3,631	3,366	265	10	1	10
강원도	426	357	69	1	0	1
충청북도	533	459	74	2	0	1
충청남도	601	484	117	1	0	1
전라북도	647	589	58	3	1	2
전라남도	536	438	98	2	0	1
경상북도	855	701	154	2	0	2
경상남도	1,105	943	162	3	0	2
제주도	176	158	18	1	0	1

자료 : 환경부(2011a) 하수도통계

일 평균 하수발생량은 16,111천 톤으로, 이 중 하수처리구역 내의 발생량은 15,034천 톤 (99.3%), 구역 외 발생량은 1,077천 톤 (6.7%)이다.

하수발생량의 시도별 분포는 서울이 4,478천 톤 (27.8%)으로 가장 많고, 그 다음이 경기도로서 3,631천 톤 (22.5%)이다. 부산 등 6개 광역시에서 발생하는 하수량은 총 3,123천 톤으로 경기도보다 약간 작은 양이다. 서울 및 6개 광역시에서 발생하는 총량은 7,601천 톤이며 (47.2%), 경기도를 제외한 8개도에서 발생하는 하수량은 전체 발생량의 30.3% 정도이다.

나. 하수발생 원단위

생활하수는 가정에서 발생하는 하수, 즉 가정하수이며, 상수 사용량으로부터 오수전환율을 적용하여 산정한다 (국립환경과학원, 2008). 상수사용량은 사용형태별로 구분하여 각 형태별, 지역별로 구분하여 원단위로서 정의된다. 하수발생량은 분뇨세정수와 잡배수사용량으로 구분하여 추정하기도 하는데, 분뇨세정수는 원단위법으로부터 정하고, 기타 잡배수는 상수 사용량에 오수 전환율 또는 계수를 곱하여 추정하는 방식이 보통이다 (엄명철, 2004).

미처리구역의 하수발생량에 대한 정확한 통계는 알려지지 않고 있다. 수계별 오염총량제 등에서는 계획단위별로 하수 발생량을 원단위법으로부터 추정하고 있다 (국립환경과학원, 2008). 따라서 본 연구에서는 원단위법을 적용하여 하수발생량을 산정하여 환경부 (2011a)자료와 비교하도록 하였다.

상수사용량으로부터 하수발생량의 산정방법은 국립환경과학원의 오염총량제 기술지침을 적용하도록 하였다. 즉 생활하수발생량은 상수도 사용유량에 오수전환율을 곱하여 산정한다. 분뇨발생량은 분뇨발생유량 원단위를 곱하여 산정하며, 잡배수발생유량은 잡배수 사용유량에 오수전환율을 곱하여 산정한다.

$$\text{분뇨발생유량} = \text{인구수} \times \text{분뇨발생유량원단위} \quad (3.2.1)$$

$$\text{잡배수발생유량} = \text{잡배수오수전환율} \times (\text{사용유량} - \text{분뇨발생유량}) \quad (3.2.2)$$

$$\text{오수발생유량} = \text{분뇨발생유량} + \text{잡배수발생유량} \quad (3.2.3)$$

분뇨발생유량 원단위 및 오수전환율은 표 3.3.5와 같다.

표 3.3.5 분뇨발생유량 원단위 및 오수전환율

구분	분뇨발생유량원단위 (톤/인/일)	잡배수오수전환율	비고
시가화	0.00115	0.88	
비시가화	0.00134	0.88	

자료 : 국립환경과학원 제2단계 수계오염총량관리기술지침 (2008)

국토해양부 (2011)의 수자원장기계획에서는 생활용수 추정을 상수도 급수지역과 미급수지역의 사용량과 지하수 이용량으로부터 추정하고 있다. 표 3.3.6에서와 같이 급수지역 사용량은 1인 1일 급수량 (2011년 292 L/인)과 급수보급율로부터 정하고, 미급수지역은 원단위 사용량인 215 L/인에 인구수를 곱하고, 급수보급율을 감안하여 구한다. 미급수 지역의 원단위값은 2001년 한국수자원공사에서 조사한 543개 마을상수도 실사용량 조사결과이다. 한편, 지하수 이용량은 실제 이용량을 적용하였다.

표 3.3.6 생활용수 추정방법

구분		2011년 계획
상수도 급수지역 수요량	장래인구	· 통계청 추정인구
	원단위 및 수요량	· 인구보정 수요량 (인구기준 차이보정) · 광역상수도, 수요처 직접공급량 고려
상수도 미급수지역 수요량		· 인구 × (1-계획급수보급률) × 215L
지하수 이용량		· 2007 실제이용량

자료 : 국토해양부 수자원장기종합계획 (2011)

국토해양부 (2011)에서는 2011년 급수보급률을 95.4%로 하고, 목표유수율은 광역상수도 등 수도정비기본계획을 반영하여 2007년의 81.1%에서 2020년 87.9%로 계획하였다. 또한 급수량 원단위는 2007년 기준 340 L/인을 적용하였다.

하수처리구역 외 하수발생량의 산정을 위한 상수도 사용량은 다음과 같은 방법으로 추정하였다.

① 행정단위별로 환경부 2011년 상수도 통계자료의 급수인구, 미급수인구를 기준으로 하여 하수처리구역 외 인구 중 급수인구, 미급수인구를 추정한다.

② 하수처리구역 외 인구는 우선적으로 미급수인구로 구분하되, 그 인구수가 미급수인구보다 작을 때는 미급수 인구로 한다.

③ 처리구역 외 인구가 미급수 인구보다 클 때는 미급수 인구를 초과하는 수를 급수인구로 한다.

④ 각각의 원단위를 적용하여 상수도 사용량을 계산하고, 그 값을 더하여 그 지역의 상수도 사용량으로 한다.

⑤ 지하수 사용량은 행정구역별 사용량을 하수처리구역외 인구의 구성비만큼으로 한다.

이상의 원단위법으로부터 농촌지역에 대한 하수발생량을 추정하여 환경부 (2011a)자료와 비교한 결과는 표 3.3.7에서와 같다.

본 연구에서 조사한 방법으로 산정한 하수처리구역외 하수발생량은 충청남도가 512,487 톤으로 가장 많고 그 다음이 경기도로 341,460 톤이다. 환경부 (2011a)에서 산정한 하수처리구역외 하수발생량은 경기도가 265,158 톤으로 가장 높고 경상남도가 161,555 톤으로 그 다음이다. 서울 및 6개 광역시에서 발생하는 하수처리구역외 하수발생량은 본 조사방법과 환경부 자료 모두 낮은 수준으로 나타났다.

본 연구 조사방법과 환경부 자료에서 하수처리구역외 하수발생량이 많이 나타난 경기도의 경우 시군구단위로 정리하였고 표 3.3.8에서와 같다.

표 3.3.7 전국 시도별 하수처리구역외 하수발생량

(단위: 톤)

지역명	하수처리구역외 하수발생량	
	본 연구 조사방법	환경부 (2011a)
서울특별시	-	-
부산광역시	8,445	7,498
대구광역시	13,417	14,998
인천광역시	14,007	11,613
광주광역시	7,523	6,712
대전광역시	11,887	9,136
울산광역시	22,575	12,366
경기도	341,460	265,158
강원도	128,902	68,735
충청북도	187,303	73,688
충청남도	512,487	117,130
전라북도	151,066	58,353
전라남도	269,404	97,997
경상북도	339,257	154,087
경상남도	190,814	161,555
제주도	44,323	18,200

비고 : 환경부 (2011a)은 환경부 하수도 통계 (2010) 자료임

표 3.3.8 경기도 시군구별 하수처리구역외 하수발생량

(단위 : 톤)

경기도	하수처리구역외 하수발생량	
	본 연구 조사방법	환경부 (2011a)
김포시	72,155	24,530
파주시	65,549	-
안성시	63,101	18,867
포천시	51,062	-
이천시	49,168	13,540
평택시	45,571	29,873
여주군	45,194	10,891
고양시	28,801	29,612
화성시	24,457	43,165
용인시	23,067	24,191
하남시	13,669	5,083
가평군	13,638	5,663
남양주시	11,986	8,490
양평군	11,735	3,964
광주시	11,064	7,411
시흥시	9,806	11,859
양주시	6,551	3,310
수원시	4,626	4,893
연천군	3,862	3,900
안산시	2,233	2,647
의정부시	1,966	2,849
성남시	1,519	1,778
광명시	1,192	917
동두천시	1,184	1,432
오산시	633	5,338
의왕시	456	342
과천시	253	264
부천시	236	182
군포시	215	167
구리시	3	-
안양시	-	-

비고 : 환경부 (2011a)은 환경부 하수도 통계 (2010) 자료임

본 연구 조사방법에 의하면 김포, 파주, 안성, 포천, 이천, 평택, 여주, 고양, 화성, 용인, 하남 순으로 하수처리구역외 하수발생량이 많이 나타났고, 환경부 자료에 의하면 화성, 평택, 고양, 김포, 용인, 안성, 이천, 시흥, 여주 순으로 많이 나타났다. 특히, 화성, 평택, 김포, 용인은 두 방법 모두 높게 나타나 이 지역에 위치한 농경지의 경우 미처리하수가 유입될 가능성이 높을 것으로 예상할 수 있다.

4.2. 시험지구의 선정

가. 시험지구 선정 기준

본 연구의 목적 달성을 위해서는 효과적인 모니터링이 가능하면서도 미처리하수 관계지구를 대표할 수 있는 지역을 선정하는 것이 중요하다. 이러한 기초에서 세 가지 기준을 설정하고 시험지구 선정 작업을 진행하였다.

첫째, 대표성이다. 연구 결과의 타당성 확보를 위해 미처리하수 관계지구를 대표할 수 있는 지역이어야 한다. 둘째, 현장 접근성이다. 현장 모니터링을 위해 접근이 용이해야 한다. 제한된 시간과 자원으로 수시적인 모니터링을 수행하기 위해 장시간의 이동시간이 요구되는 지역은 제외하였다. 셋째, 대비구와의 근접성이다. 본 연구의 대비구인 청정 지구와 합리적으로 비교·분석하기 위하여 비슷한 기후특성을 가지고 동일한 날에 모니터링을 할 수 있는 지역이어야 한다.

나. 미처리구역도 구축

하수도법 제2조 15항에 의하면 하수를 공공하수처리시설에 유입하여 처리할 수 있는 지역을 “하수처리구역”이라 한다. 하수처리구역의 지정범위는 지방자치단체에서 정하며 관계도면을 일반에게 공람하도록 되어 있다. 본 연구에서는 연구기관이 위치한 서울에서 인접하고 이동이 편한 화성, 수원, 오산, 용인, 평택의 하수도관리청을 방문하여 하수처리구역도를 획득하였다.

하수처리구역도에는 기존처리구역과 처리예정구역이 명시되어 있다. 본 연구에서는 기존 처리구역과 처리예정구역을 제외한 구역을 “미처리구역”이라 하였고, 이를 육안 판독을 통해 하수처리구역 및 미처리구역으로 구분하였다. 그림 3.3.7은 화성, 수원, 오산, 용인, 평택의 하수처리 및 미처리구역을 GIS에 도시하여 보여주고 있다. 수원, 오산은 도시화가 진행된 지역으로 많은 부분이 하수처리구역에 해당하는 것으로 나타났고 화성, 용인, 평택은 일부 도시 지역을 제외한 농촌지역 대부분이 미처리구역에 해당하는 것으로 나타났다.

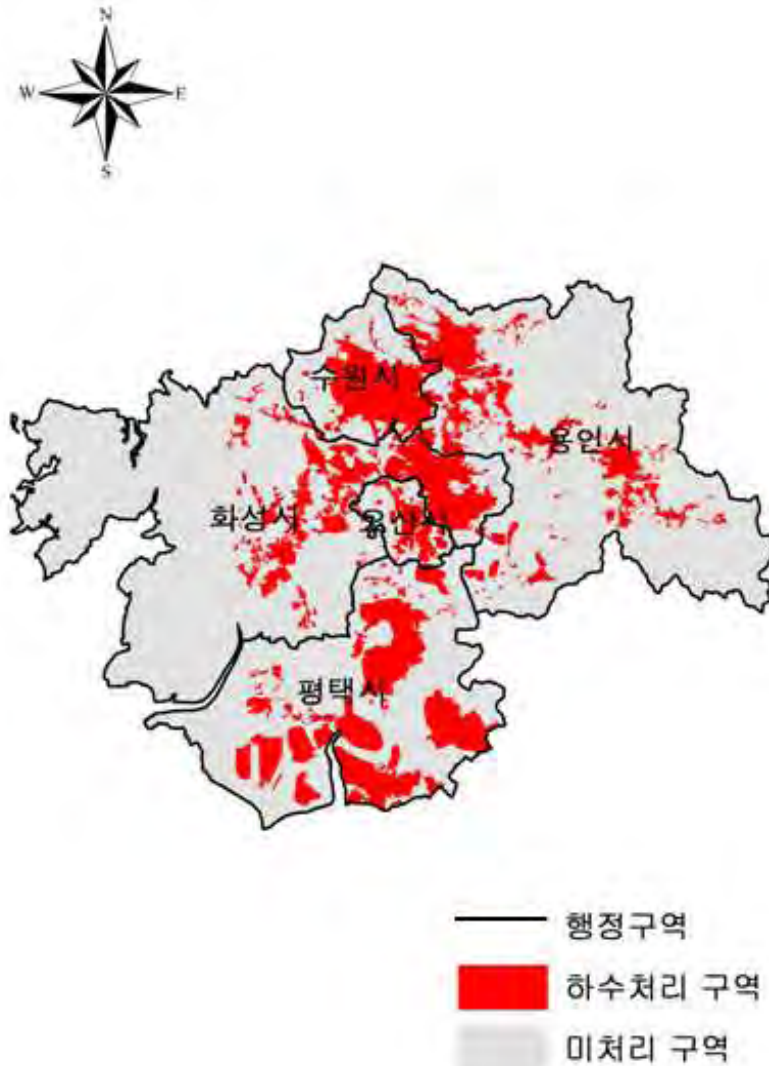


그림 3.3.7 하수처리구역 및 미처리구역도

다. 하수처리 및 미처리구역 면적

환경부 (2011a)이 보고한 하수도 통계에는 전국 시군구별 미처리구역과 하수구역의 면적이 명시되어 있다. 표 3.3.9는 화성, 오산, 용인, 평택의 미처리 및 하수처리구역 면적, 시가화 면적을 나타낸 것이다. 미처리구역 면적은 화성, 용인, 평택이 80% 이상으로 높게 나타났다. 하수처리구역 면적과 시가화지역의 면적은 비슷하게 나타나 하수처리구역이 시가화 지역에 대부분 밀집함을 확인할 수 있다. 따라서 화성, 용인, 평택의 하수처리구역 외에 위치한 마을에서 발생하는 생활하수는 미처리상태로 농경지로 유입될 가능성이 있는 것을 확인할 수 있다.

표 3.3.9 하수처리 및 미처리구역 면적과 시가화 면적 (화성, 오산, 용인, 평택)

(단위: km^2)

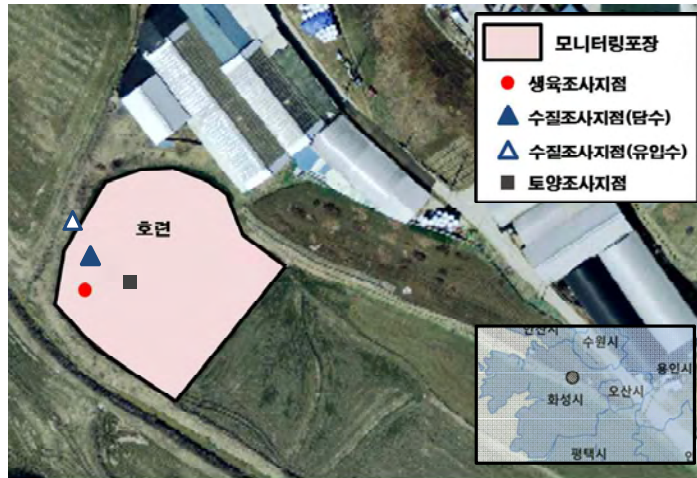
	하수처리구역	미처리구역	합계	시가화지역
화성시	80.82 (11.7%)	607.22 (88.3%)	688.04 (100.0%)	76.76 (11.1%)
용인시	109.36 (17.8%)	478.10 (82.2%)	581.46 (100.0%)	69.53 (11.7%)
오산시	24.87 (58.2%)	17.89 (41.8%)	42.76 (100.0%)	10.13 (29.8%)
평택시	79.80 (17.6%)	379.50 (82.4%)	459.30 (100.0%)	68.47 (15.1%)

자료 : 환경부 하수도 통계 (2011a), 환경부 토지피복분류 (2007)

4.3. 시험포장 선정 및 조사계획

미처리구역 면적 비율이 높은 화성, 용인, 평택 중 연구기관인 서울대학교에서 접근이 용이하고 청정지구와 가까운 화성시를 중심으로 예비조사를 실시하였다. 하수도 통계에 의하면 화성시 관할의 장안면, 남양동, 우정읍, 송산면, 팔탄면, 동탄면, 서신면, 봉담읍에서 전체 면적 대비 미처리구역 면적 비율이 85% 이상으로 높게 나타났으며, 기 구축된 미처리구역도를 통해 위 지역 중 산간지역에 위치한 마을들이 미처리구역에 대다수 포함됨을 확인할 수 있었다. 그 후 다음 위성지도 (local.daum.net)의 로드뷰 기능을 통해, 해당 산간지역 마을 중 축산농가 또는 마을주거지와 논이 인접하여 축산폐수 또는 생활하수가 미처리상태로 논으로 관개될 가능성이 있는 지역을 현장조사 대상지로 선정하였다.

그림 3.3.8 ~ 3.3.10은 미처리하수 관개지구에 위치한 호련, 수화, 장전지구의 논 포장 위성도와 지적도를 보여주고 있다.



(a) 위성도



(b) 지적도

그림 3.3.8 호련지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점

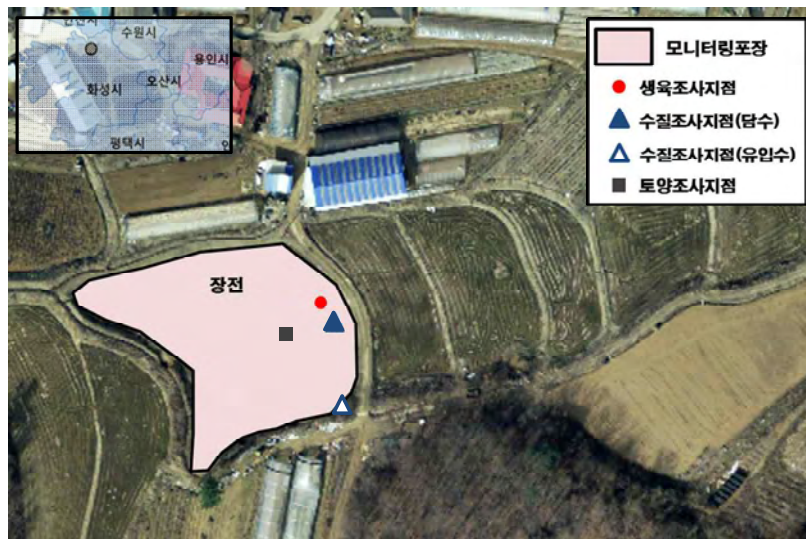


(a) 위성도



(b) 지적도

그림 3.3.9 수화지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점



(a) 위성도

그림 3.3.10 장전지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점



(b) 지적도

그림 3.3.10 장전지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점 (계속)

수질모니터링은 관개기가 시작되는 5월을 기점으로 하여 매주 1회 유입수와 논 담수를 모니터링 하였다. 모니터링 한 시료는 수질오염공정시험방법 (환경부, 2008)으로 분석하였다. 아래 그림 3.3.11 ~ 3.2.13은 미처리하수지구 전경을 보여주고 있다.



그림 3.3.11 호런지구 전경



그림 3.3.12 수화지구 전경



그림 3.3.13 장전지구 전경

가. 호련지구

첫 번째 시험포장 예정지인 호련지구는 경기도 화성시 봉담읍 상기리 208번지 (2,060 m²)에 위치하며 미처리구역에 포함되어 공공하수처리가 이루어지지 않는 지역이다. 주변이 산으로 둘러 싸여 있으며 남쪽으로는 기천저수지가 위치하며 동쪽으로는 수원여자대학교 해란캠퍼스가 위치한다. 마을은 주로 주거지, 논, 축산시설로 구성되어 있다. 마을의 용수로와 배수로는 구분되어 있지 않으며 가정에서 발생한 하수가 정화조를 거쳐 배수로로 흘러 들어가고 강우 시 축산농가에서 발생한 빗물 유출수가 배수로로 흘러들어가기도 한다. 배수로로 흘러들어난 물은 주로 하천으로 배수되어 다시 농경지로 희석 관개되는 경우가 많으나, 일부는 미처리 상태로 시험포장으로 흘러들어간다. 영농기의 관개는 하천수를 취수하여 이루어지며, 비교적 담수심을 낮게 유지하는 천수관개가 이루어진다. 그림 3.3.14는 호련지구의 배수 흐름도를 보여주고 있다.



그림 3.3.14 호련지구의 배수 흐름도 (자료 : Daum 지도)

나. 수화지구

두 번째 시험포장 예정지인 수화지구는 경기도 화성시 수화동 633번지 (537 m²)에 위치한다. 수화동은 화성시 남양동 관할에 속하며 남양동의 미처리 구역 비율은 88.2%로 대부분이 공공하수처리가 이루어지지 않는 지역이다. 주변이 산으로 둘러싸여 있으며 마을은 주거지, 논, 비닐하우스로 구성되어 있다. 마을의 용수로와 배수로는 구분되어 있지 않으며 배수로로 흘러들어난 물은 시험포장의 관개수로 이용된다. 그림 3.3.15는 수화지구의 배수 흐름도를 보여주고 있다.



그림 3.3.15 수화지구의 배수 흐름도 (자료 : Daum 지도)

다. 장전지구

세 번째 시험포장 예정지인 장전지구는 경기도 화성시 장전동 350 번지 (2,690 m²)에 위치하고 있다. 장전동은 화성시 남양동 관할에 속한다. 주변이 산으로 둘러싸여 있으며 마을은 주거지, 논, 축산시설, 비닐하우스 등으로 구성되어 있다. 마을의 용수로와 배수로는 구분되어 있지 않으며 배수로로 흘러들어간 물은 시험포장의 관개수로 이용된다. 그림 3.3.16은 장전지구의 배수 흐름도를 보여주고 있다.



그림 3.3.16 장전지구의 배수 흐름도 (자료 : Daum 지도)

5. 간접하수재이용 시스템 적용지구 실험설계

5.1. 시험지구의 선정

본 연구에서는 하수처리수의 농업용수 간접재이용 시스템 적용에 따른 환경영향을 평가하기 위한 수질 모니터링 시스템으로 단일 유역설계법을 선정하였으며, 타 설계법은 적용이 불가능한 것으로 나타났다. 단일유역법은 처리기법의 수질 개선 효과를 평가하기 위해 주로 이용되며, 처리 기법 적용 전과 적용 후의 수질 모니터링 결과를 비교하는 방법이다.

시험지구는 병점 모니터링 지구로 선정하였다. 병점 간접재이용지구는 하수처리장 방류수를 재처리하여 관개용수로 이용하는 처리구이며, 2012년 영농기에 대해 간접하수재이용 처리시스템 적용 전의 시험지구의 수질, 토양환경 및 작물생육 모니터링이 수행되어 단일 유역설계법의 적용이 가능하다. 간접하수재이용 처리시스템은 2013년 6월에 병점 간접재이용지구의 양수장에 설치되어 있어 관개용수가 처리공정을 거쳐 농경지에 공급되고 있다. 그림 3.3.17는 간접하수재이용 처리시스템 적용지구의 위치도를 보여주고 있다.

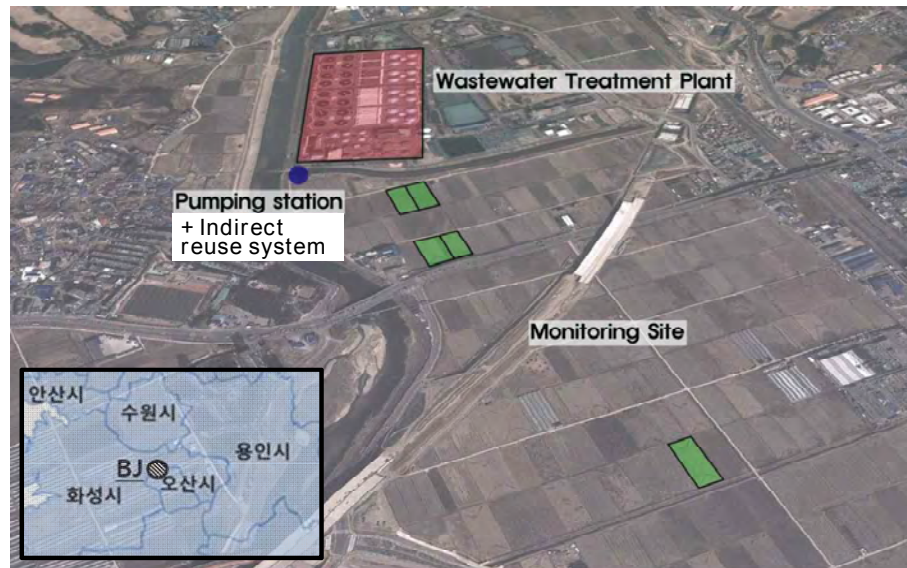
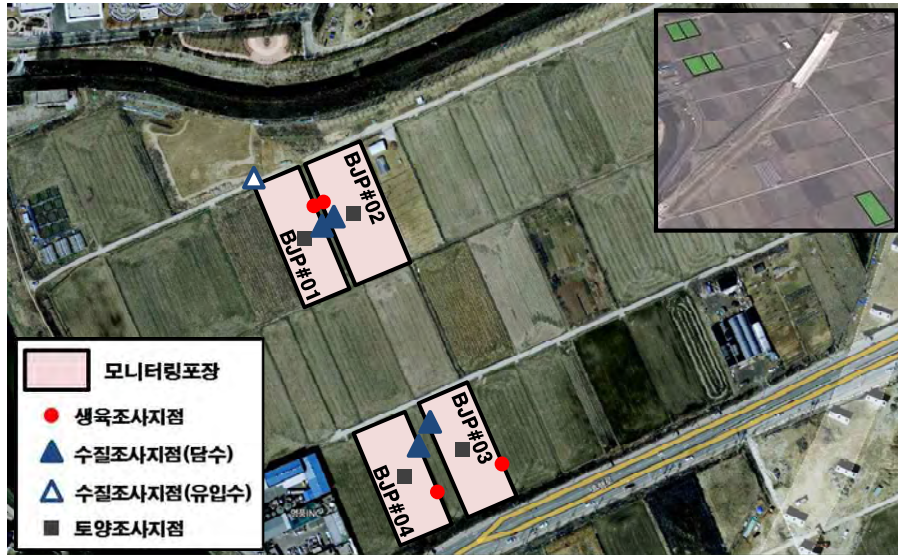


그림 3.3.17 간접하수재이용 처리시스템 적용지구의 위치도

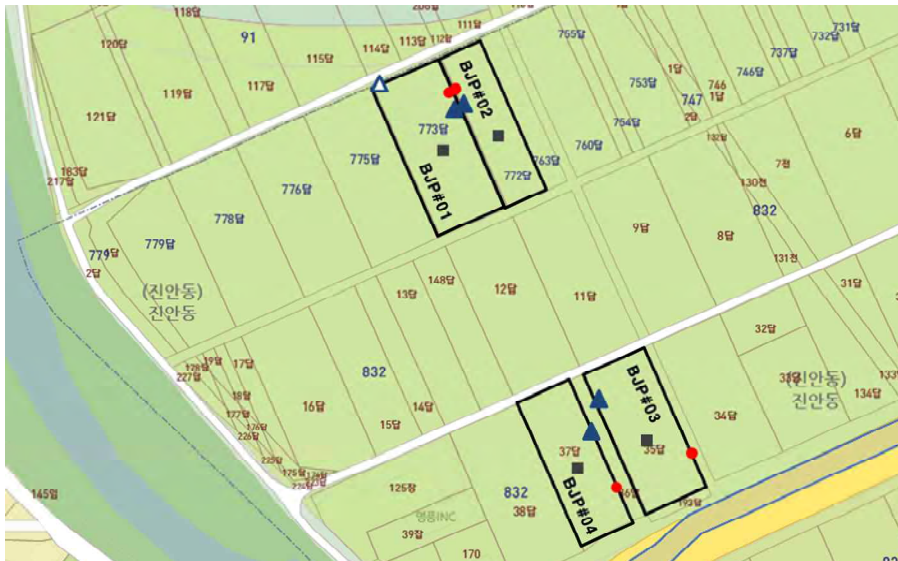
5.2. 시험포장 선정 및 조사계획

간접하수재이용 처리시스템 적용지구의 시험포장으로 다섯 포장을 선정하였다. 시험지구 내 선정된 시험포장에서 논담수, 유입수, 토양환경, 그리고 작물생육 및 수확량 조사가 이루어졌다.

그림 3.3.18은 간접하수재이용 처리시스템 적용지구 시험포장의 위성사진과 지적도를 보여주고 있다.



(a) 위성사진 (BJP#01~04)



(b) 지적도 (BJP#01~04)



(c) 위성사진 (BJP#05)

그림 3.3.18 간접하수재이용 처리시스템 적용지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점



(d) 지적도 (BJP#05)

그림 3.3.18 간접하수재이용 처리시스템 적용지구 논 시험포장 위치 및 모니터링 지점 (계속)

6. 모니터링 계획

6.1. 수질 및 토양 샘플링 및 분석계획

수질 샘플링은 논벼 이앙기부터 최종 낙수기까지 대상지구 내 선정된 시험포장을 대상으로 유입수와 담수에 대하여 주 1회 간격으로 모니터링을 계획하였다. 또한, 낙수기와 기상조건에 따라 논에 담수가 이루어지지 않을 경우에는 논담수의 샘플링 실시하지 않는 것으로 계획하였다. 채취한 모든 수질시료는 서울대학교 농업생명과학공동기기원(NICEM)에 위탁하여 수질오염공정시험방법 (환경부, 2008)에 따라 pH, EC, DO, TOC, BOD, COD, SS, 영양염류, 중금속, 총대장균수 등 총 37가지 수질항목에 대한 분석을 계획하였다.

토양시료는 대상지구의 모든 시험포장에 대하여 심층별 영양물질 및 중금속의 집적과 변화를 분석하기 위하여 2012년 한 해 동안 이앙 전 (4월), 영농기 (2회; 7월, 9월), 수확 후 (11월), 총 4회에 걸쳐 표층, 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm 토심별로 채토기를 이용하여 채취하는 것으로 계획하였다. 채취한 토양시료는 수질시료와 같이 서울대학교 농업생명과학공동기기원(NICEM)에 위탁하여 ASA (american society of agronomy)와 SSSA (soil science society of america)의 토양분석방법 (methods of soil analysis) (Chapman와 Pratt, 1961)을 준용하여 pH, EC, 영양염류, 중금속, 그리고 총대장균수 등 26가지 항목에 대한 분석을 계획하였다.

6.2. 작물생육 및 수확량 조사계획

간접재이용에 따른 벼의 작물생육과 수량구성요소 등을 조사하기 위하여 논벼 생육기간 동안 주 1회 생육조사를 실시하였으며, 수확 후 논벼의 수량구성요소, 쌀의 중금

속함량 및 이화학적 특성을 조사하기 위해 모든 시험포장에 대해 포장 당 3주 (2011), 5주 (2012)의 논벼를 샘플링하였다. 벼의 생육조사 항목으로는 초장, 분얼수 등이 있으며, 수량구성요소에는 개체당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중, 등숙률 등이 있다. 또한 백미분석을 통해 시험지구에서 재배된 쌀에 함유된 유해성 화학물질의 함유량을 조사하였으며, 쌀의 아밀로스 및 단백질 함량 등을 통해 이화학적 특성을 분석하였다. 본 연구에서 조사된 공시품종은 수원 지방에서 널리 재배되는 추청벼로 하였다.

7. 요약 및 결론

본 절에서는 하수처리수의 간접재이용에 따른 수질, 토양환경 및 작물생육영향 등의 현장 실험을 위한 실험설계와 모니터링 계획을 제시하도록 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

① (수질모니터링 시스템설계) 간접재이용과 관련한 수질모니터링 계획에는 포장시험, 유역시험 등으로 구분된다. 유역 시험설계방법으로 단일 유역법, 상·하류 설계법, 2개 유역법, 대칭 유역법, 다중 유역법을 조사하였으며, 각각의 특징과 설계방법을 검토하였다.

② (통계적 분석방법) 실험설계와 관련한 통계분석방법을 검토하였으며, 수질자료의 통계적 가설과 귀무가설의 검정방법, 분석방법 등으로 구분하여 제시하였다.

③ (시험지구 선정) 미처리 하수 및 간접재이용 모니터링을 위하여 대비구는 1개지구 5개 포장, 간접재이용지구는 1개 지구 5개 포장, 미처리하수지구는 3개 포장, 간접재이용 시스템 적용지구 1개 지구 5개 포장으로 하였다. 간접재이용지구는 2개 유역법을 적용하고, 간접재이용 시스템 적용지구는 단일 유역법을 적용한다. 각 대비구, 처리구 별로 시험지구를 선정하고 그 특징을 정리하였다.

④ (수질 및 토양 조사계획) 시험설계와 관련하여 수질 및 토양 조사계획을 수립, 제시하고 샘플링방법, 분석방법을 정리하였다.

⑤ (작물생육 및 수확량 조사계획) 간접재이용에 따른 대비구 및 처리구별 논벼 생육조사, 수확량 조사계획을 수립하였다.

제4절 시험지구의 수질 및 토양환경 조사 분석

1. 서론

하수처리수의 농업용수재이용에는 직접재이용과 간접재이용이 있으며, 각각의 이용 방법에 따른 논에서의 환경영향을 조사 분석할 필요가 있다. 하수처리수는 연중 일정한 수량을 가지기 때문에 극한기후 상황에서 가뭄용수로서 이용이 가능하며 (박승우, 2007; 장태일 등, 2012), 하수처리수 중의 다량의 비료성분은 수확량을 증가시키고 시비량을 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 (정한석 등, 2011; Pereira 등, 2011; Chavez 등, 2012).

하지만, 하수 중에 포함된 과도한 영양성분은 농작물의 생육에 영향을 준다. 논벼의 경우에는 도복피해의 우려가 있으며 (Setter 등, 1997; Chiou, 2008; Pereira 등, 2011), 하수 중의 나트륨 성분은 농지의 염도를 증가시켜 작물 수확량을 감소시킨다 (Tripler 등, 2012). 또한, 하수에 포함된 중금속은 토양에 집적되어 토양오염과 함께 작물을 통해 인체에도 유해한 영향을 줄 수 있다 (Sharma 등, 2007). 따라서 하수처리수를 농업용수로 이용하기 위해서는 안전한 농업수자원으로서의 환경적인 영향에 대한 검토가 반드시 이루어져야 한다.

하수재이용에 관한 연구는 여러 분야에 걸쳐 장기간 수행된 바 있으나, 대부분의 연구는 직접하수재이용에 따른 영향을 조사 분석한 것으로 광범위하게 이루어지고 있는 간접하수재이용에 따른 환경영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 절에서는 간접하수재이용에 따른 수질환경과 토양에서의 염분집적 및 유기물질 변화 등의 환경영향을 정량적으로 분석하기 위하여 시험지구를 선정하고, 선정된 시험지구 논에서의 간접하수재이용에 따른 수질 및 토양환경의 영향에 대해 조사 분석하고자 한다.

2. 시험지구 수질 조사 분석

수질 조사 분석은 용인청정지구의 수원이 되는 이동저수지와 병점, 오산재이용지구의 수원이 되는 하수처리장 방류수 및 하천수로 나누어 수질 특성을 비교 분석하였다. 이동저수지의 수질은 환경부에서 측정하는 결과 값을 사용하였고, 하수처리장 방류수 수질은 수원시 환경사업소와 오산시 환경사업소에서 제공하는 결과 값과 월 2회 실시한 수질 모니터링 측정값을 사용하였다. 황구지천과 오산천은 월 2회씩 실시한 수질 모니터링 측정값을 사용하였으며, 각각의 환경사업소로부터 하류방향으로 일정한 간격 (500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m)을 두어 하천수를 채취하여 분석하였다. 각각 지구의 논 담수 및 유입수는 1주에 한번 씩 모니터링을 실시하여 수질을 측정하였다. 수질분석항목은 농업용수 수질기준에서 제시하는 pH, BOD, COD, SS, DO, T-P, 총대장균수와 EC, T-N, TOC 등을 선정하였고, 모니터링 한 시료는 수질오염공정시험방법 (환경부, 2008)으로 분석하였으며, 매회 같은 장소에

서 모니터링을 실시하여 반복성을 보장하였다.

청정지구 및 간접재이용지구의 논 시험포장은 각각 5개씩 선정하여 모니터링을 실시하였다. 각 시험지구의 주소를 아래 표 3.4.1에 나타내었다. 수질샘플링의 위치는 제6장을 참조할 수 있다.

표 3.4.1 청정지구 및 간접재이용지구 시험포장 위치

지점		주소	면적
용인 청정지구	YIP#01	경기도 평택시 진위면 은산리 809-2	1,990 m ²
	YIP#02	경기도 평택시 진위면 은산리 911	2,936 m ²
	YIP#03	경기도 평택시 진위면 은산리 698	2,979 m ²
	YIP#04	경기도 용인시 처인구 남사면 진목리 427,428,429	8,482 m ²
	YIP#05	경기도 용인시 처인구 남사면 진목리 449,450,451	8,370 m ²
병점 재이용지구	BJP#01	경기도 화성시 진안동 773	2,975 m ²
	BJP#02	경기도 화성시 진안동 772, 763	2,602 m ²
	BJP#03	경기도 화성시 진안동 832-35	2,403 m ²
	BJP#04	경기도 화성시 진안동 832-37	2,184 m ²
	BJP#05	경기도 화성시 병점동 713	3,174 m ²
오산 재이용지구	OSP#01	경기도 오산시 두곡동 99-1,2	2,229 m ²
	OSP#02	경기도 오산시 두곡동 99	3,965 m ²
	OSP#03	경기도 오산시 탑동 237	2,403 m ²
	OSP#04	경기도 오산시 탑동 248, 248-1	3,219 m ²
	OSP#05	경기도 오산시 두곡동 80	4,402 m ²

* YIP: 용인청정지구 논 시험포장, BJP: 병점재이용지구 논 시험포장, OSP: 오산재이용지구 논 시험포장

2.1. 이동저수지, 하수처리장 방류수 및 하천수

가. 이동저수지

용인청정지구는 이동저수지를 관개원으로 사용한다. 아래 표 3.4.2에 환경부 물환경정보시스템에서 제공하는 이동저수지의 연 평균 수질 모니터링 결과를 제시하였다. COD, SS, DO, T-P 항목 살펴보면 호소 농업용수 수질기준 (COD ≤ 8 mg/L, SS ≤ 15 mg/L, DO ≥ 2.0 mg/L, T-P ≤ 0.10 mg/L)을 만족함을 알 수 있다.



그림 3.4.1 용인 이동저수지 수질 모니터링 위치

표 3.4.2 용인 이동저수지 수질 모니터링 결과 (2012, 2013, 2014년) (물환경정보시스템, 2014)

지점명	년	수온	DO	BOD	COD	SS	T-N	T-P
		℃	mg/L					
이동지2	2012	17.8	10.5	1.6	4.2	4.7	1.578	0.068
	2013	18.8	9.7	2.3	5.2	8.1	1.429	0.058
	2014	18.0	10.0	3.1	5.5	12.2	1.117	0.045

* 이동지2: 경기도 평택시 진위면 봉납리

나. 하수처리장 방류수

간접재이용지구의 수원시 환경사업소와 오산시 환경사업소의 방류수 수질 특성은 아래 표 3.4.3, 표 3.4.4와 같다. 영농기간 동안의 평균값으로 나타내었으며 pH, BOD, COD, SS, T-N, T-P, 총대장균수 항목을 기준으로 살펴보면 모두 공공하수처리시설의 방류수수질기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림 3.4.2는 수원시 환경사업소와 오산시 환경사업소의 방류수 전경을 보여주고 있다.



(a) 수원시 환경사업소 방류수 전경



(b) 오산시 환경사업소 방류수 전경

그림 3.4.2 환경사업소 방류수 전경

표 3.4.3 수원시 환경사업소 방류수 수질 (2012, 2013, 2014년)

구분		COD	SS	T-N	T-P
		mg/L			
2012	유입수	89.990	160.075	34.272	4.448
	제1처리장	6.602	2.971	9.042	0.492
	제2처리장	6.571	4.263	7.536	0.479
	법정기준치	40이하	10이하	20이하(60이하)	2이하(8이하)
2013	유입수	89.354	151.158	35.300	4.203
	제1처리장	9.721	4.090	8.207	0.562
	제2처리장	9.958	3.831	9.859	0.610
	법정기준치	40이하	10이하	20이하(60이하)	2이하(8이하)
2014	유입수	91.449	192.554	40.631	4.238
	제1처리장	12.068	4.370	10.343	0.993
	제2처리장	12.951	4.654	6.518	0.748
	법정기준치	40이하	10이하	20이하(60이하)	2이하(8이하)

*법정기준치: 공공하수처리시설의 방류수수질기준

*수원시 환경사업소의 제1처리장, 제2처리장 방류수는 모두 황구지천으로 유입됨

표 3.4.4 오산시 환경사업소 방류수 수질 (2012, 2013, 2014년)

구분		BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		mg/L					
2012	환경사업소 유입수	223.70	132.09	253.40	53.78	6.57	51,718
	환경사업소 방류수	2.90	7.99	3.89	8.58	0.70	290
	법정기준치	10이하	40이하	10이하	20이하	2이하	3,000이하
2013	환경사업소 유입수	199.82	109.48	235.78	50.41	6.48	62,450
	환경사업소 방류수	3.01	8.52	3.09	10.29	0.84	396
	법정기준치	10이하	40이하	10이하	20이하	2이하	3,000이하
2014	환경사업소 유입수	219.49	105.46	214.40	37.72	5.73	83,750
	환경사업소 방류수	4.16	8.78	4.76	8.26	0.91	519
	법정기준치	10이하	40이하	10이하	20이하	2이하	3,000이하

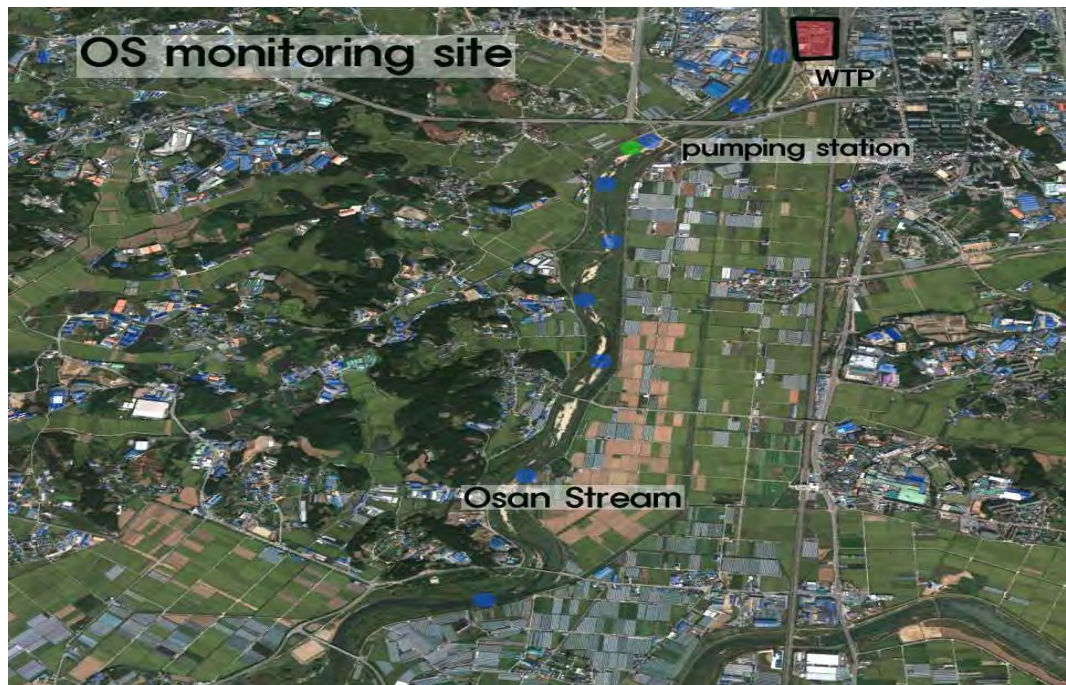
*법정기준치: 공공하수처리시설의 방류수수질기준

다. 하천수

황구지천과 오산천의 하천수 수질 모니터링은 2012년에 대하여 월 2회 실시하였다. 각각의 환경사업소로부터 하류방향으로 일정한 간격 (500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m)을 두어 하천수를 채취하였다. 아래 그림 3.4.3은 하천수 수질 모니터링지점을 도시한 것이며, 그림 3.4.4는 대상 모니터링지구의 하천 전경, 그림 3.4.5와 그림 3.4.6은 각 하천의 지점별 모니터링 장면을 보여주고 있다. 하천수 수질 모니터링은 매회 같은 장소에서 실시하여 샘플링의 반복성을 보장하였다. 모니터링 한 시료는 수질오염공정시험방법 (환경부, 2008)으로 분석하였다. 분석항목은 농업용수 수질기준에서 제시하는 pH, BOD, COD, SS, DO, T-P, 총대장균수와 EC, T-N, TOC를 선정하였다.



(a) 황구지천 수질 모니터링 지점



(b) 오산천 수질 모니터링 지점

그림 3.4.3 하천수 수질 모니터링 지점



(a) 황구지천 전경



(b) 오산천 전경

그림 3.4.4 하천 전경



(a) BJI



(b) BJS#01 (500 m)



(c) BJS#02 (1000 m)



(d) BJS#03 (1500 m)



(e) BJS#04 (2000 m)



(f) BJS#05 (2500 m)



(g) BJS#06 (3000 m)



(h) BJS#07 (4000 m)



(i) BJS#08 (5000 m)

* BJI: 병점 관개용수 취수지점, BJS: 황구지천

그림 3.4.5 황구지천 지점별 수질 모니터링



(a) OSW



(b) OSW2



(c) OSS#01 (500 m)



(d) OSS#02 (1000 m)



(e) OSS#03 (1500 m)



(f) OSS#04 (2000 m)



(g) OSS#05 (2500 m)



(h) OSS#06 (3000 m)



(i) OSS#07 (4000 m)



(j) OSS#08 (5000 m)

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

그림 3.4.6 오산천 지점별 수질 모니터링

표 3.4.5와 표 3.4.7에 각 하천의 수질 모니터링 결과를 평균값으로 나타내었다. pH는 황구지천의 경우 6.44 ~ 8.20, 오산천의 경우 6.22 ~ 8.50의 범위를 가지며 대체로 중성에 가까운 값을 보인다. 두 지역 모두 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족한다. 전기전도도는 황구지천의 경우 0.38 ~ 2.35 dS/m, 오산천의 경우 0.22 ~ 12.52 dS/m의 범위를 가진다. 윤춘경 등 (2000)에 의하면 우리나라에서는 EC는 0.75 dS/m 이하, FAO 기준으로는 0.70 dS/m 이하이면 양호한 것으로 판단한다. EC는 두 지역 모두 허용 기준보다 상당히 높은 것으로 측정되었다. BOD는 두 지역 모두 황구지천은 0.01 ~ 9.42 mg/L, 오산천은 0.08 ~ 9.79 mg/L 의 값을 가지며, 대체로 하천 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족한다. COD는 황구지천의 경우 1.5 ~ 39.08 mg/L, 오산천의 경우 0.68 ~ 22.92 mg/L 범위를 보이며 대체로 하천 농업용수 수질기준인 9 mg/L 이하를 만족하나, 특정지점 BJS#05, BJS#07, OWI, OSW, OSW2, OSS#01에서는 기준을 조금 초과하는 것으로 나타난다. 오산천의 경우는 하류부로 갈수록 COD 값이 소폭 감소하는 것으로 측정되었다. SS는 황구지천에서 평균 20 mg/L, 오산천에서 평균 16 mg/L 전후의 값을 보인다. T-P는 황구지천의 경우 0.130 ~ 3.566 mg/L, 오산천의 경우 0.083 ~ 3.506 mg/L의 범위를 보인다. 두 지역 모두 하천 농업용수 수질기준인 0.3 mg/L를 초과하는 것으로 측정되었다. 표 3.4.6과 표 3.4.8은 전체 모니터링 결과를 나타내고 있다.

표 3.4.5 수원환경사업소 하류 황구지천 평균 수질 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
BJI	7.17	0.91	9.35	5.71	1.54	5.72	20.92	7.23	0.88	185,857
BJS#01	7.14	0.93	9.43	5.73	1.62	5.68	20.01	7.47	0.83	167,116
BJS#02	7.14	0.93	9.31	5.77	1.61	5.68	19.95	7.50	0.83	167,109
BJS#03	7.14	0.93	9.31	5.80	1.61	5.68	19.94	7.51	0.83	1,667,104
BJS#04	7.14	0.93	9.30	5.83	1.62	5.70	19.86	7.57	0.83	167,109
BJS#05	7.14	0.93	9.30	5.86	1.61	5.70	19.84	7.58	0.83	167,112
BJS#06	7.14	0.93	9.30	5.88	1.61	5.72	19.78	7.62	0.83	167,109
BJS#07	7.14	0.93	9.18	5.91	1.62	5.72	19.77	7.66	0.83	167,112
BJS#08	7.15	0.93	9.04	5.93	1.61	5.71	19.71	7.69	0.83	167,117

* BJI: 병점 관개용수 취수지점, BJS: 황구지천

표 3.4.6 수원환경사업소 하류 황구지천 모니터링 결과

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJS#01	2012.02.15	6.54	1.17	25.05	5.36	4.27	6.48	18	8.53	0.633	1,850
BJS#02	2012.02.15	6.55	1.16	3.41	5.48	2.09	6.64	10	10.50	0.557	1,460
BJS#03	2012.02.15	6.62	1.13	5.84	4.11	1.65	3.52	24	4.80	0.402	410
BJS#04	2012.02.15	6.58	1.03	3.32	5.21	2.26	6.28	10	10.35	0.492	740
BJS#05	2012.02.15	6.72	1.07	3.58	5.21	2.93	5.36	17	7.59	0.481	630
BJS#06	2012.02.15	6.62	1.78	24.52	5.11	2.17	7.56	10	7.10	0.485	100
BJS#07	2012.02.15	6.54	1.15	27.34	4.89	4.03	7.94	16	7.80	0.458	410
BJS#08	2012.02.15	6.50	1.07	7.36	4.58	3.66	4.56	8	8.77	0.558	124
BJI	2012.03.05	6.71	1.01	2.03	5.64	1.88	6.86	11	1.35	0.618	397
BJS#01	2012.03.05	6.77	1.25	27.74	4.72	2.13	9.32	17	2.45	0.662	525
BJS#02	2012.03.05	6.75	1.22	25.13	4.44	1.45	12.38	48	3.01	1.541	4
BJS#03	2012.03.05	6.77	1.15	23.72	4.5	1.61	8.2	20	2.18	0.781	961
BJS#04	2012.03.05	6.62	1.16	20.62	4.51	2.13	10.76	13	3.82	0.533	602
BJS#05	2012.03.05	6.57	1.12	22.39	4.06	1.33	10.84	10	4.06	0.676	830
BJS#06	2012.03.05	6.85	1.1	25.05	5.04	1.73	10.52	20	4.82	1.184	154
BJS#07	2012.03.05	6.71	1.07	25.21	3.85	3.99	12.64	23	6.56	1.14	961
BJS#08	2012.03.05	7	0.66	6.79	4.58	1.03	5.96	17	0.81	0.368	99
BJI	2012.03.14	6.74	1.54	21.54	5.53	3.46	9.44	15	6.75	1.310	1,550
BJS#01	2012.03.14	6.75	1.629	22.11	6.88	2.9	10	18	7.26	1.211	29,100
BJS#02	2012.03.14	6.8	1.729	21.14	6.68	2.86	9.54	24	5.95	1.469	387
BJS#03	2012.03.14	6.78	1.708	20.78	7.03	3.14	11.38	35	5.65	0.917	326
BJS#04	2012.03.14	6.78	1.719	21.99	7.16	2.82	9.98	31	5.57	0.757	1,990
BJS#05	2012.03.14	6.8	1.672	22.07	7.04	3.22	10.54	28	7.29	1.167	5,380
BJS#06	2012.03.14	6.91	1.391	23.19	8.16	2.74	13.02	28	5.54	2.643	727
BJS#07	2012.03.14	7.02	1.282	20.78	9.06	3.79	11.98	38	8.88	2.499	387
BJS#08	2012.03.14	6.83	1.191	21.66	7.01	2.01	9.98	55	6.65	1.404	236
BJI	2012.04.04	6.76	0.88	6.01	5.14	0.68	5.48	31	1.1	0.395	3
BJS#01	2012.04.04	6.83	0.97	5.41	5.32	0.74	4.98	69	2.95	0.594	13
BJS#02	2012.04.04	6.84	0.93	6.3	5.01	0.93	5.14	27	1.29	0.42	308
BJS#03	2012.04.04	6.92	0.97	2.59	6.12	2.47	12.3	228	3.36	1.648	17
BJS#04	2012.04.04	6.84	0.96	4.89	5.56	0.75	5.16	26	3.01	0.589	125
BJS#05	2012.04.04	6.92	0.81	3.69	6.04	0.97	5.1	42	13.95	0.79	108
BJS#06	2012.04.04	6.91	0.81	3.17	6.06	0.79	5.3	32	6.92	0.804	108
BJS#07	2012.04.04	6.78	0.67	5.79	6.01	0.97	5.26	19	1.86	0.425	44
BJS#08	2012.04.04	6.78	0.67	5.79	6.01	0.97	5.26	19	1.86	0.425	52
BJI	2012.04.19	8.2	2.35	6.75	2.92	0.32	1.50	15	1.80	0.194	3,550
BJS#01	2012.04.19	7.22	1.112	2.58	5.41	1.09	6.5	32	5.96	0.877	30,760
BJS#02	2012.04.19	7.21	1.144	2.13	5.7	1.09	6.88	10	1.13	0.897	20,140
BJS#03	2012.04.19	7.44	1.298	3.42	5.52	0.79	5.92	6	7.18	0.744	4,350
BJS#04	2012.04.19	7.23	1.339	10.71	6.02	0.70	6.26	35	5.45	0.886	7,490
BJS#05	2012.04.19	7.16	1.391	2.07	5.32	1.42	6.4	13	8.2	0.691	5,910
BJS#06	2012.04.19	7.19	1.242	2.24	6.19	0.90	6.56	9	6.4	0.823	3,320
BJS#07	2012.04.19	7.19	1.125	12.32	6.16	1.22	6.48	12	9.63	1.154	8,820
BJS#08	2012.04.19	6.97	0.63	6.50	4.92	1.61	6.7	6	8.9	0.384	3,640
BJI	2012.05.03	6.55	0.75	6.59	14.6	0.85	5.12	8	11.29	0.933	727
BJS#01	2012.05.03	6.62	1.072	4.86	7.73	0.54	7.52	23	8.1	0.825	308
BJS#02	2012.05.03	6.94	1.169	6.72	11	0.62	7.08	13	8.39	0.728	179
BJS#03	2012.05.03	7.03	1.228	3.80	22	0.19	6.72	12	9.04	1.099	165
BJS#04	2012.05.03	6.93	1.063	3.10	14.9	0.42	8.78	24	7.58	1.616	1,986
BJS#05	2012.05.03	7.16	1.064	2.77	15	1.10	9.72	31	6.44	2.525	13,340

* BJI: 병점 관개용수 취수지점, BJS: 황구지천

표 3.4.6 수원환경사업소 하류 황구지천 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJS#06	2012.05.03	7.30	1.059	3.72	14.80	0.56	7.84	12	10.55	1.784	3,840
BJS#07	2012.05.03	7.10	1.153	4.79	15.20	0.50	6.52	8	11.71	1.413	3,270
BJS#08	2012.05.03	6.89	0.798	7.80	11.20	0.95	7.1	8	9.21	0.481	214
BJI	2012.05.16	6.84	0.80		14.00		8.32	12	8.69		27
BJS#01	2012.05.16	6.98	1.13	13.69	13.20	1.29	8.90	19	6.83	1.088	1
BJS#02	2012.05.16	7.06	0.87	12.62	15.60	1.88	8.00	17	8.99	0.826	4
BJS#03	2012.05.16	7.04	1.18	13.77	14.50	1.99	6.84	18	8.96	0.819	ND
BJS#04	2012.05.16	7.01	1.23	15.52	14.30	4.03	8.28	19	8.61	0.988	116
BJS#05	2012.05.16	7.21	1.24	12.13	15.40	1.15	6.00	23	6.80	1.029	740
BJS#06	2012.05.16	7.13	1.16	13.83	16.80	2.66	6.74	20	6.95	1.275	11
BJS#07	2012.05.16	6.95	1.15	9.10	31.90	8.78	20.20	52	19.90	2.725	43
BJS#08	2012.05.16	6.80	0.79	13.48	7.51	2.60	7.62	16	8.85	0.853	20
BJI	2012.05.29	7.20	0.635		11.26		5.24	13	8.2		100
BJS#01	2012.05.29	6.81	1.03	14.23	17.76	1.05	5.16	54	7.50	0.696	9
BJS#02	2012.05.29	6.84	1.10	12.91	11.63	1.23	7.14	14	7.80	0.574	461
BJS#03	2012.05.29	6.78	1.07	13.45	17.48	0.67	5.06	15	7.51	0.717	1,046
BJS#04	2012.05.29	7.30	0.96	14.26	18.79	2.74	6.72	29	7.52	1.087	411
BJS#05	2012.05.29	6.61	1.07	12.94	22.54	4.62	39.08	64	21.70	3.566	16,640
BJS#06	2012.05.29	6.62	0.84	14.09	18.59	1.23	9.10	17	8.50	1.148	25
BJS#07	2012.05.29	6.44	0.74	14.50	15.45	9.26	11.38	39	12.30	1.992	46,110
BJS#08	2012.05.29	7.34	0.69	13.77	13.67	1.80	12.10	12	9.78	0.774	ND
BJI	2012.06.21	6.62	0.82	6.60	3.71	1.70	7.40	34	7.20	0.858	1,414
BJS#01	2012.06.21	6.88	1.10	4.01	3.76	3.62	4.24	19	7.48	0.938	120,980
BJS#02	2012.06.21	6.97	1.13	6.08	3.83	0.43	4.38	14	8.56	0.974	120,980
BJS#03	2012.06.21	6.98	1.13	6.01	3.44	0.72	3.52	16	7.52	0.965	24
BJS#04	2012.06.21	6.98	1.22	6.30	4.12	1.99	11.12	8	8.56	1.203	241,960
BJS#05	2012.06.21	6.98	1.18	6.26	4.24	1.23	4.34	21	3.19	1.329	172
BJS#06	2012.06.21	7.00	1.22	5.30	4.64	2.16	5.40	21	8.82	1.236	32
BJS#07	2012.06.21	6.88	1.20	6.13	5.00	2.75	6.38	174	23.12	2.443	308
BJS#08	2012.06.21	6.77	0.52	7.22	2.99	0.16	4.20	12	8.12	0.238	291
BJI	2012.06.27	6.76	0.88	6.44	3.59	1.70	3.80	12	8.00	1.559	1,120
BJS#01	2012.06.27	7.04	1.19	3.28	3.63	3.10	3.92	12	7.41	1.843	77,010
BJS#02	2012.06.27	6.85	1.18	5.52	3.74	0.13	3.84	21	7.15	0.987	1,203
BJS#03	2012.06.27	6.98	1.13	6.07	4.12	0.87	3.94	12	7.69	0.979	23,590
BJS#04	2012.06.27	6.99	1.14	6.23	3.90	0.19	3.96	18	7.02	0.953	91
BJS#05	2012.06.27	7.09	1.13	6.04	3.72	0.87	5.52	8	7.16	0.894	1,733
BJS#06	2012.06.27	7.13	1.23	9.74	10.11	9.42	10.16	44	28.50	2.823	24,196,000
BJS#07	2012.06.27	7.00	1.23	11.06	7.04	4.78	6.90	15	27.40	1.607	687
BJS#08	2012.06.27	7.08	0.52	6.86	3.57	0.04	3.96	11	5.81	0.638	2,420
BJI	2012.07.12	7.30	0.47	7.07	1.76	0.77	3.36	25	7.16	1.835	43,520
BJS#01	2012.07.12	7.53	0.71	7.21	1.47	0.43	2.76	19	5.42	0.898	12,740
BJS#02	2012.07.12	7.54	0.67	7.45	2.70	0.40	3.38	11	7.42	0.849	8,130
BJS#03	2012.07.12	7.57	0.70	7.80	2.16	0.47	2.82	8	5.62	0.759	3,590
BJS#04	2012.07.12	7.40	0.68	8.07	2.40	0.71	3.58	18	6.90	1.058	750
BJS#05	2012.07.12	7.77	0.66	6.39	2.84	0.78	3.88	4	7.32	1.076	68,670
BJS#06	2012.07.12	7.45	0.71	6.99	2.44	1.72	3.48	5	7.16	0.925	19,350
BJS#07	2012.07.12	7.43	0.68	9.02	2.28	0.81	3.48	16	6.43	0.832	1,610
BJS#08	2012.07.12	7.72	0.42	7.95	1.36	0.47	3.44	5	3.98	0.926	30,760
BJI	2012.07.23	7.34	0.42	5.23	2.33	1.48	5.42	29	4.48	1.857	7,890
BJS#01	2012.07.23	7.29	0.58	6.32	1.92	1.58	4.34	38	4.53	1.148	850
BJS#02	2012.07.23	7.29	0.56	7.05	2.59	1.42	3.50	16	6.40	0.808	520

* BJI: 병점 관개용수 취수지점, BJS: 황구지천, ND: not detected

표 3.4.6 수원환경사업소 하류 황구지천 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJS#03	2012.07.23	7.29	0.58	7.44	2.72	1.96	3.32	11	3.38	0.712	4,040
BJS#04	2012.07.23	7.36	0.56	6.75	2.54	1.34	2.88	3	5.99	0.744	410
BJS#05	2012.07.23	7.35	0.57	7.10	2.74	2.47	3.38	15	5.88	0.857	200
BJS#06	2012.07.23	7.37	0.56	6.85	2.30	1.09	3.10	5	6.00	0.694	410
BJS#07	2012.07.23	7.39	0.53	7.38	1.96	1.64	3.66	52	5.25	0.561	8,550
BJS#08	2012.07.23	7.42	0.51	6.93	2.21	0.90	3.40	12	5.68	0.510	1,100
BJI	2012.08.10	7.81	0.64	7.29	2.47	1.10	3.32	11	11.56	1.078	71
BJS#01	2012.08.10	7.63	1.09	7.58	1.07	1.14	2.68	20	9.90	0.805	6
BJS#02	2012.08.10	7.20	1.11	7.80	0.69	1.02	2.78	5	9.57	0.605	7
BJS#03	2012.08.10	7.31	1.73	7.40	1.37	1.29	8.30	15	2.32	0.426	816
BJS#04	2012.08.10	7.38	1.33	7.53	0.54	0.20	2.72	4	8.44	0.592	1
BJS#05	2012.08.10	7.36	1.33	7.80	11.19	1.88	3.24	9	8.90	0.841	4,880
BJS#06	2012.08.10	7.34	1.11	8.35	1.73	1.52	3.40	11	10.12	0.206	1
BJS#07	2012.08.10	7.36	1.10	8.30	2.13	1.57	2.48	1	10.75	0.791	ND
BJS#08	2012.08.10	7.51	0.65	8.51	1.72	1.19	2.74	1	6.70	0.130	1,553
BJI	2012.08.21	7.77	0.42	5.84	1.66	3.85	4.38	5	4.62	2.217	67
BJS#01	2012.08.21	7.15	0.46	8.05	1.38	1.70	3.90	27	4.41	0.765	8,160
BJS#02	2012.08.21	7.24	0.46	7.77	1.58	1.36	2.82	12	5.10	0.604	21,430
BJS#03	2012.08.21	7.20	0.48	7.84	0.98	1.01	3.18	27	4.92	0.687	219
BJS#04	2012.08.21	7.17	0.50	7.65	1.57	0.70	2.80	23	5.12	0.707	3,680
BJS#05	2012.08.21	7.17	0.50	8.12	1.53	1.42	2.68	13	5.18	0.631	1,203
BJS#06	2012.08.21	7.49	0.49	8.67	1.85	1.62	2.96	26	4.96	0.572	2,720
BJS#07	2012.08.21	7.50	0.49	8.23	1.72	1.48	3.24	19	4.80	0.634	2,420
BJS#08	2012.08.21	7.48	0.46	8.48	1.69	1.13	2.20	15	4.30	0.515	6,050
BJI	2012.08.23	6.80	0.47	0.58	4.08	0.38	8.66	41	9.25	1.359	48,840
BJS#01	2012.08.23	6.73	0.38	7.06	1.79	3.44	3.70	23	5.07	0.410	77,010
BJS#02	2012.08.23	6.70	0.39	6.30	1.35	1.03	2.86	11	3.00	0.472	19,350
BJS#03	2012.08.23	6.72	0.41	7.15	0.94	0.74	2.96	9	4.81	0.440	12,960
BJS#04	2012.08.23	6.79	0.40	7.80	1.20	0.44	3.58	13	5.01	0.431	173,290
BJS#05	2012.08.23	6.78	0.40	6.81	0.81	0.81	3.72	31	4.93	0.466	1,733
BJS#06	2012.08.23	6.80	0.42	7.05	1.13	0.28	3.88	18	4.58	0.435	3,230
BJS#07	2012.08.23	6.85	0.42	7.09	1.12	0.01	4.20	31	5.28	0.488	16,640
BJS#08	2012.08.23	6.92	0.43	7.37	1.33	0.28	3.02	14	4.95	0.466	2,420
BJI	2012.08.31	7.61	0.39	9.05	0.20	1.18	3.36	7	5.35	0.851	2,419,600
BJS#01	2012.08.31	7.56	0.54	9.93	1.64	0.87	2.80	23	4.82	0.348	2,420
BJS#02	2012.08.31	7.60	0.52	9.15	1.26	0.95	2.66	16	5.37	0.322	41
BJS#03	2012.08.31	7.60	0.52	10.07	0.65	0.97	2.28	11	5.39	0.372	1,986
BJS#04	2012.08.31	7.60	0.50	10.60	0.25	0.72	2.46	10	6.02	0.350	5
BJS#05	2012.08.31	7.59	0.50	9.49	0.12	0.78	2.76	15	6.00	0.431	2
BJS#06	2012.08.31	7.59	0.50	9.72	2.37	0.89	2.70	26	5.05	0.337	99
BJS#07	2012.08.31	7.49	0.51	9.81	0.54	0.60	1.96	8	4.45	0.254	11
BJS#08	2012.08.31	7.49	0.50	9.93	2.54	0.87	2.28	15	3.66	0.206	34
BJI	2012.09.26	7.80	1.04	8.97	1.84	1.40	5.22	6	7.24	0.248	387
BJS#01	2012.09.26	7.82	0.88	8.27	2.71	0.94	3.22	8	7.40	0.255	1,414
BJS#02	2012.09.26	7.57	0.90	8.72	2.29	0.82	3.64	12	9.02	0.241	629
BJS#03	2012.09.26	7.56	0.91	8.63	2.71	0.85	4.42	8	7.35	0.938	16
BJS#04	2012.09.26	7.76	0.87	8.95	1.99	0.95	3.86	8	7.90	0.640	7
BJS#05	2012.09.26	7.63	0.87	8.99	1.85	0.70	2.48	14	6.65	0.500	461
BJS#06	2012.09.26	7.59	0.86	8.77	1.26	1.03	3.48	14	7.45	0.624	178
BJS#07	2012.09.26	7.46	0.86	9.09	0.51	1.11	3.94	16	7.84	0.509	39
BJS#08	2012.09.26	7.31	0.78	8.38	1.45	0.85	3.24	19	7.58	0.544	579

* BJI: 병점 관개용수 취수지점, BJS: 황구지천, ND: not detected

표 3.4.6 수원환경사업소 하류 황구지천 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
BJI	2012.10.25	7.67	0.65	8.75	6.32	1.14	2.90	5	12.70	0.436	99
BJS#01	2012.10.25	7.88	0.98	8.86	5.63	1.49	3.36	16	10.48	0.413	260
BJS#02	2012.10.25	7.66	1.03	8.90	6.15	1.15	2.66	8	9.89	0.333	178
BJS#03	2012.10.25	7.84	0.88	8.95	5.72	0.95	1.68	8	5.62	0.145	23
BJS#04	2012.10.25	7.59	1.02	9.37	5.47	0.87	1.66	10	9.59	0.358	45
BJS#05	2012.10.25	7.72	1.07	9.13	6.22	1.01	2.02	10	9.27	0.328	56
BJS#06	2012.10.25	7.92	1.04	8.19	5.74	1.77	3.24	28	9.06	0.307	9
BJS#07	2012.10.25	7.77	0.95	8.26	6.56	0.97	2.30	10	10.06	0.351	313
BJS#08	2012.10.25	7.56	0.93	8.43	5.64	1.07	2.40	13	9.50	0.349	436
BJI	2012.11.21	7.68	0.77	8.39	7.33	2.58	5.98	5	12.91	0.320	177
BJS#01	2012.11.21	7.24	1.10	8.52	6.346	2.01	5.04	5	11.38	0.322	411
BJS#02	2012.11.21	7.31	1.13	8.39	7.093	1.96	4.20	9	10.65	0.326	1080
BJS#03	2012.11.21	7.52	1.15	9.21	6.404	1.80	4.02	10	10.68	0.306	2420
BJS#04	2012.11.21	7.10	1.17	8.99	6.578	1.38	3.84	8	10.78	0.358	46
BJS#05	2012.11.21	7.47	1.24	8.93	6.613	2.42	5.08	12	9.77	0.325	47
BJS#06	2012.11.21	7.05	1.17	8.50	6.099	2.27	5.10	14	9.56	0.372	179
BJS#07	2012.11.21	6.95	1.09	8.44	6.815	2.50	5.58	12	11.02	0.487	105
BJS#08	2012.11.21	7.21	0.91	8.30	6.528	1.60	4.82	7	10.30	0.342	88
BJS#01	2012.12.13	6.65	1.15	3.87	9.365	1.81	5.50	11	13.87	0.357	961
BJS#02	2012.12.13	6.64	1.17	3.18	10.19	2.08	6.16	7	13.76	0.332	689
BJS#03	2012.12.13	6.64	1.17	4.16	11.22	2.17	6.30	8	13.61	0.369	649
BJS#04	2012.12.13	6.67	1.23	3.93	8.612	2.34	7.16	10	13.69	0.316	1210
BJS#05	2012.12.13	6.71	1.33	3.74	10.23	2.05	6.62	7	13.07	0.318	1210
BJS#06	2012.12.13	6.61	1.21	3.34	8.917	2.42	7.62	7	13.75	0.338	150
BJS#07	2012.12.13	7.07	1.12	4.04	9.774	2.75	7.72	8	14.50	0.337	649
BJS#08	2012.12.13	6.85	1.00	4.58	8.927	2.86	7.22	5	12.74	0.501	1203

* BJI: 병점 관개용수 취수지점, BJS: 황구지천

표 3.4.7 오산환경사업소 하류 오산천 평균 수질 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
OSI	6.96	1.22	12.92	8.85	2.78	10.02	14.65	6.97	0.85	6,789
OSW	7.11	1.03	10.45	6.50	1.98	7.26	17.54	7.06	0.78	8,537
OSW2	7.12	1.03	10.48	6.49	1.96	7.22	17.47	7.06	0.78	8,501
OSS#01	7.19	1.05	10.15	6.32	1.87	6.69	16.03	6.80	0.73	8,584
OSS#02	7.19	1.05	10.13	6.44	1.89	6.72	16.09	6.81	0.73	8,660
OSS#03	7.19	1.05	10.13	6.48	1.90	6.74	16.13	6.84	0.73	8,641
OSS#04	7.19	1.05	10.11	6.51	1.91	6.75	16.15	6.86	0.72	8,636
OSS#05	7.19	1.05	10.10	6.54	1.91	6.77	16.20	6.91	0.73	8,625
OSS#06	7.19	1.05	10.10	6.57	1.92	6.79	16.26	6.94	0.73	7,798
OSS#07	7.18	1.04	10.08	6.60	1.93	6.81	16.33	6.95	0.73	7,798
OSS#08	7.18	1.04	10.06	6.63	1.93	6.82	16.37	6.99	0.73	7,806

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#01	2011.11.23	7.48	1.18	8.64	7.10	0.43	3.54	2	4.51	0.936	240
OSS#02	2011.11.23	7.53	1.19	8.34	5.62	0.28	2.21	3	3.60	0.677	5,710
OSS#03	2011.11.23	7.44	1.81	8.97	6.16	0.52	2.03	3	4.00	0.431	1,210
OSS#04	2011.11.23	7.48	1.74	8.48	4.88	0.42	2.29	11	3.00	0.493	3,730
OSS#05	2011.11.23	7.43	1.75	7.60	4.37	0.71	2.12	3	3.10	0.424	173,000
OSS#06	2011.11.23	7.84	1.77	10.26	4.21	0.82	1.81	1	6.75	0.493	236
OSS#07	2011.11.23	7.60	1.92	8.68	4.32	0.42	1.82	11	2.00	0.377	2,420
OSS#08	2011.11.23	7.48	1.35	8.12	5.43	0.26	2.35	7	1.41	0.593	1,730
OSI	2012.02.03	6.84	1.67	2.63	10.60	2.51	11.38	18	0.95	0.479	112,000
OSW	2012.02.03	6.49	1.21	4.04	6.26	3.88	11.02	13	9.30	1.523	6,270
OSW2	2012.02.03	6.88	0.67	8.21	3.78	5.54	5.82	4	1.38	0.095	1,220
OSS#01	2012.02.03	6.49	1.21	4.04	6.26	3.88	11.02	13	9.30	1.523	6,270
OSS#02	2012.02.03	6.68	0.94	4.64	4.30	4.51	5.76	19	1.55	0.504	10,200
OSS#03	2012.02.03	7.13	1.58	4.97	7.52	4.91	6.34	19	7.03	0.418	34,500
OSS#04	2012.02.03	7.05	1.40	6.13	5.41	4.62	5.04	14	8.50	0.523	48,800
OSS#05	2012.02.03	6.68	1.30	6.34	4.57	6.08	6.60	13	0.59	0.434	10,500
OSS#06	2012.02.03	6.95	1.26	5.19	4.24	5.07	5.88	11	1.04	0.450	4,640
OSS#07	2012.02.03	7.01	1.29	6.00	4.02	5.89	6.10	11	0.77	0.474	3,790
OSS#08	2012.02.03	6.75	1.19	4.82	3.30	4.63	6.32	14	1.01	0.768	4,730
OSI	2012.02.15	6.36	0.98	27.74	7.04	9.79	13.72	19	8.85	0.302	4,570
OSW	2012.02.15	6.22	0.71	5.53	2.14	4.16	14.92	12	18.70	0.588	1,730
OSW2	2012.02.15	7.27	0.62	24.64	3.92	6.40	12.94	2	15.15	1.104	4,710
OSS#01	2012.02.15	6.22	0.71	5.53	2.14	4.16	14.92	12	18.70	0.588	1,730
OSS#02	2012.02.15	6.62	1.63	26.46	4.78	3.14	11.52	8	14.82	0.945	980
OSS#03	2012.02.15	6.80	1.29	25.09	6.72	6.28	14.40	25	10.18	0.406	2,130
OSS#04	2012.02.15	6.70	1.40	26.01	4.36	6.32	12.54	14	11.20	0.480	6,890
OSS#05	2012.02.15	6.90	1.36	24.68	3.88	5.56	11.64	13	11.18	0.516	3,310
OSS#06	2012.02.15	8.50	1.49	24.24	2.94	7.13	14.18	16	11.93	0.641	1,090
OSS#07	2012.02.15	6.55	1.51	26.01	4.20	9.54	11.62	13	11.84	0.636	410
OSS#08	2012.02.15	6.69	1.59	24.77	3.17	6.44	14.04	20	11.78	0.637	1,090
OSI	2012.03.05	6.97	1.17	4.46	6.12	3.15	13.38	16	3.31	0.378	88
OSW	2012.03.05	6.67	1.22	24.28	13.10	3.91	17.56	16	10.44	1.210	961
OSW2	2012.03.05	6.58	0.77	25.61	6.87	1.93	13.78	8	4.20	1.304	689
OSS#01	2012.03.05	6.67	1.22	24.28	13.10	3.91	17.56	16	10.44	1.210	961
OSS#02	2012.03.05	6.58	0.80	25.21	6.64	2.82	12.48	6	10.74	1.067	961
OSS#03	2012.03.05	6.89	1.14	3.13	5.79	2.95	12.74	21	4.71	0.432	77
OSS#04	2012.03.05	6.75	1.04	24.68	5.44	2.78	12.84	17	3.71	0.507	117
OSS#05	2012.03.05	6.83	1.03	24.12	5.22	2.01	11.58	16	7.05	0.553	17

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#06	2012.03.05	6.90	1.04	25.61	5.9	3.62	11.26	15	7.91	0.975	457
OSS#07	2012.03.05	6.90	1.06	25.57	5.24	2.38	12.84	23	4.47	0.641	155
OSS#08	2012.03.05	6.88	0.96	25.05	5.11	2.70	13.22	14	4.49	0.995	172
OSI	2012.03.14	6.94	0.99	23.28	12.00	2.62	13.92	12	6.48	1.923	1,410
OSW	2012.03.14	6.96	1.04	23.32	14.60	2.13	17.10	21	8.29	1.729	13,800
OSW2	2012.03.14	6.67	0.78	23.32	11.20	2.54	12.82	3	8.96	1.214	1,300
OSS#01	2012.03.14	6.96	1.04	23.32	14.6	2.13	17.1	21	8.29	1.729	13,800
OSS#02	2012.03.14	6.78	0.80	22.39	11.4	2.01	13.44	6	11.08	1.824	81,600
OSS#03	2012.03.14	6.93	0.97	21.83	12.3	1.73	13.8	12	6.67	1.626	27,600
OSS#04	2012.03.14	6.84	0.95	21.99	11.08	1.73	13.42	9	7.16	1.465	980
OSS#05	2012.03.14	6.91	0.95	23.32	11.9	2.66	13.86	10	5.92	1.545	548
OSS#06	2012.03.14	7.03	0.96	21.70	13.6	3.62	22.92	66	7.21	3.506	13,500
OSS#07	2012.03.14	7.06	0.97	21.30	12.3	2.05	13.5	13	8.61	1.645	1,990
OSS#08	2012.03.14	7.09	0.99	23.68	12.3	3.54	12.08	13	6.7	2.139	548
OSI	2012.04.04	7.03	0.84	4.05	9.22	1.29	9.66	32	5.30	0.719	3,410
OSW	2012.04.04	6.68	0.69	6.26	5.80	1.70	11.56	11	9.93	1.741	16
OSW2	2012.04.04	6.94	0.62	3.46	8.67	1.74	9.18	5	15.30	0.803	15
OSS#01	2012.04.04	6.68	0.69	6.26	5.8	1.70	11.56	11	9.93	1.741	16
OSS#02	2012.04.04	6.88	0.67	3.01	6.4	0.85	6.98	8	6.2	0.645	1
OSS#03	2012.04.04	6.97	0.80	5.06	7.42	1.10	7.38	22	4.82	0.477	261
OSS#04	2012.04.04	6.98	0.76	6.74	5.94	0.79	5.86	18	1.8	0.364	70
OSS#05	2012.04.04	6.98	0.74	6.34	5.54	0.63	5.6	10	1.96	0.358	68
OSS#06	2012.04.04	7.04	0.73	6.68	5.29	0.83	5.64	19	1.88	0.329	11
OSS#07	2012.04.04	7.03	0.73	6.83	5.74	0.28	2.96	19	1.53	0.325	7
OSS#08	2012.04.04	7.04	0.74	6.75	5.42	0.82	5.24	12	2.34	0.366	10
OSI	2012.04.19	7.37	1.31	4.01	7.58	1.11	6.70	8	6.55	0.479	77,010
OSW2	2012.04.19	7.68	0.64	10.87	8.10	1.23	6.28	3	9.47	0.721	11,370
OSS#01	2012.04.19	6.89	12.52	3.66	9.24	3.49	11.72	6	9.45	1.731	1,733
OSS#02	2012.04.19	7.83	0.82	12.56	7.56	1.66	6.34	7	1.64	0.632	1,986
OSS#03	2012.04.19	7.51	1.31	4.86	6.94	1.42	5.36	16	5.8	0.521	30,760
OSS#04	2012.04.19	7.5	1.47	4.19	6.92	1.40	5.74	15	7.02	0.623	2,650
OSS#05	2012.04.19	7.4	1.25	3.11	7	0.44	6.6	39	7.24	0.625	1,300
OSS#06	2012.04.19	7.45	1.41	4.11	6.86	0.78	5.82	15	7.36	0.522	1,300

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#07	2012.04.19	7.54	1.395	4.42	6.78	0.70	5.42	9	6.62	0.572	816
OSS#08	2012.04.19	7.52	1.362	2.67	32.1	0.58	6.48	8	6.15	0.415	160
OSI	2012.05.03	7.38	1.41	7.13	12.80	0.40	8.30	4	6.55	0.339	1,986
OSW	2012.05.03	6.95	0.96	6.26	16.00	0.87	9.20	8	6.22	1.723	1,986
OSW2	2012.05.03	6.55	0.59	6.70	8.11	0.71	13.02	3	15.82	1.212	687
OSS#01	2012.05.03	6.47	0.856	5.46	12.4	0.78	13.18	5	12.33	1.249	461
OSS#02	2012.05.03	7.38	1.408	7.13	12.8	0.40	8.3	4	6.55	0.339	1,986
OSS#03	2012.05.03	6.91	1.26	6.94	7.09	0.56	7.42	6	7.26	0.563	291
OSS#04	2012.05.03	6.87	1.246	7.61	11.5	0.68	7.7	6	6.97	0.565	130
OSS#05	2012.05.03	7.03	1.252	7.06	11	0.66	7.18	23	6.92	0.638	276
OSS#06	2012.05.03	7.21	1.26	6.62	11.2	0.63	4.66	8	6	0.460	5
OSS#07	2012.05.03	6.86	1.224	7.58	13	0.56	6.88	7	6.51	0.476	187
OSS#08	2012.05.03	7.28	0.816	7.91	9.32	0.68	3.48	11	4.98	0.325	1,733
OSI	2012.05.16	7.01	1.43		12.70		8.32	16	4.90		1
OSW	2012.05.16	6.89	1.05		9.62		9.64	12	1.50		ND
OSW2	2012.05.16	7.04	0.78		13.70		12.24	34	2.10		1
OSS#01	2012.05.16	6.90	1.10	14.12	13.00	3.17	9.98	15	8.35	0.979	ND
OSS#02	2012.05.16	7.01	1.43	14.71	12.70	3.03	8.32	16	4.90	0.325	1
OSS#03	2012.05.16	6.95	1.23	13.61	15.40	2.44	9.42	23	2.15	0.621	157
OSS#04	2012.05.16	6.95	1.08	14.66	12.40	3.30	7.86	26	6.20	0.644	1
OSS#05	2012.05.16	7.05	1.18	14.01	19.90	2.34	8.56	17	5.73	0.634	3
OSS#06	2012.05.16	6.98	1.17	14.44	12.40	2.82	7.16	34	5.50	0.526	249
OSS#07	2012.05.16	6.92	1.10	13.93	13.30	2.63	7.66	16	1.78	0.547	21
OSS#08	2012.05.16	6.96	1.14	13.96	13.50	2.63	9.96	32	6.51	0.730	ND
OSI	2012.05.29	7.35	1.61		13.36		4.48	13	6.62		613
OSW	2012.05.29	6.47	1.16		16.15		13.82	16	12.77		3
OSW2	2012.05.29	6.66	0.74		11.59		10.34	4	13.45		410
OSS#01	2012.05.29	6.75	1.12	13.66	14.54	1.10	6.28	32	1.25	1.705	5
OSS#02	2012.05.29	7.35	1.61	13.88	13.36	0.83	4.48	13	6.62	0.467	613
OSS#03	2012.05.29	7.10	1.47	13.34	16.13	1.77	6.42	11	7.69	0.753	9
OSS#04	2012.05.29	7.16	1.40	14.93	13.28	2.09	6.10	16	8.05	0.841	411
OSS#05	2012.05.29	7.06	1.41	14.09	13.07	1.50	7.56	19	7.62	0.923	ND
OSS#06	2012.05.29	6.85	1.41	14.20	9.888	0.99	6.76	17	5.70	0.779	1,414
OSS#07	2012.05.29	7.51	1.39	13.66	14.7	1.02	4.58	14	8.40	0.672	57

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천, ND: not detected

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#08	2012.05.29	7.46	1.46	14.15	13.55	1.58	5.30	18	7.43	0.723	210
OSW	2012.06.21	6.89	1.19	5.68	5.74	0.99	8.40	14	17.70	0.400	219
OSW2	2012.06.21	6.90	0.86	6.39	3.37	0.32	5.60	9	13.05	0.824	120980
OSS#01	2012.06.21	7.25	1.09	7.09	5.89	2.67	7.26	24	12.35	0.638	214
OSS#02	2012.06.21	6.78	1.49	5.70	7.44	4.55	7.06	45	7.41	0.570	326
OSS#03	2012.06.21	6.81	1.37	5.07	6.97	2.13	7.66	41	8.45	0.766	816
OSS#04	2012.06.21	6.80	1.18	5.45	8.23	4.75	18.34	60	15.30	1.425	57940
OSS#05	2012.06.21	6.98	1.37	5.36	9.38	1.53	9.12	44	8.30	1.531	100
OSS#06	2012.06.21	7.00	1.36	4.68	8.10	1.25	7.86	51	9.30	1.235	2420
OSS#07	2012.06.21	7.35	1.32	4.94	6.43	1.38	7.44	65	8.50	0.996	241960
OSS#08	2012.06.21	6.76	1.34	5.74	8.39	2.05	7.30	27	7.90	0.940	120980
OSW	2012.06.27	6.96	1.25	5.38	7.98	0.95	9.32	25	14.25	0.923	548
OSW2	2012.06.27	7.00	0.89	6.62	3.63	0.97	5.50	0	13.00	1.081	15000
OSS#01	2012.06.27	6.98	1.40	7.54	4.41	3.28	5.20	0	9.98	0.781	96
OSS#02	2012.06.27	7.13	1.67	5.60	5.48	4.46	5.86	24	7.75	0.725	1553
OSS#03	2012.06.27	7.11	1.52	5.14	5.22	2.35	4.28	21	7.91	0.872	2420
OSS#04	2012.06.27	6.97	1.55	5.58	5.82	2.83	5.18	28	9.10	0.828	2420
OSS#05	2012.06.27	6.95	1.53	5.09	5.90	1.45	6.06	37	8.10	0.948	1203
OSS#06	2012.06.27	7.29	1.57	5.05	5.53	1.70	4.90	15	8.29	0.732	2
OSS#07	2012.06.27	7.22	1.58	5.05	5.03	1.65	8.82	21	9.50	0.887	2420
OSS#08	2012.06.27	7.27	1.42	5.62	4.98	1.79	4.82	20	9.36	0.828	2420
OSW	2012.07.12	7.28	0.89	7.36	5.861	0.81	5.30	8	11.21	1.800	48840
OSW2	2012.07.12	7.13	0.68	7.50	4.852	0.27	4.86	4	13.75	1.054	120330
OSS#01	2012.07.12	7.24	0.77	6.74	4.444	0.20	4.56	33	10.39	1.118	22470
OSS#02	2012.07.12	7.61	0.92	6.58	3.182	0.48	4.24	9	4.07	0.600	15390
OSS#03	2012.07.12	7.62	0.78	7.65	2.375	0.72	3.48	14	3.91	0.458	29090
OSS#04	2012.07.12	7.59	0.73	7.57	2.585	0.23	2.38	21	4.19	0.417	11980
OSS#05	2012.07.12	7.61	0.76	8.79	1.7	2.17	2.54	21	3.60	0.350	30760
OSS#06	2012.07.12	7.56	0.64	9.36	2.727	0.32	2.36	17	3.48	0.435	13540
OSS#07	2012.07.12	7.60	0.52	8.27	1.702	0.64	1.62	17	2.90	0.239	18500
OSS#08	2012.07.12	7.56	0.65	7.33	1.982	0.66	2.66	15	4.68	0.426	4040
OSW	2012.07.23	7.21	0.24	8.27	2.63	1.58	3.14	7	4.20	0.146	2790
OSW2	2012.07.23	7.11	0.51	7.37	3.44	2.01	6.78	9	12.40	2.064	3890
OSS#01	2012.07.23	7.17	0.53	7.49	2.67	1.66	3.60	38	9.57	1.365	2940
OSS#02	2012.07.23	7.32	0.39	7.65	2.91	1.72	3.96	9	3.22	0.367	3640
OSS#03	2012.07.23	7.27	0.54	6.89	1.57	0.68	3.26	13	3.05	0.271	1210
OSS#04	2012.07.23	7.28	0.53	7.44	1.96	0.97	3.30	13	4.38	0.429	4410

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#05	2012.07.23	7.28	0.50	7.26	0.75	0.78	2.90	9	3.05	0.307	2,130
OSS#06	2012.07.23	7.24	0.52	7.99	2.02	1.26	3.00	22	3.50	0.312	980
OSS#07	2012.07.23	7.26	0.51	6.75	2.09	0.08	2.82	24	3.48	0.305	310
OSS#08	2012.07.23	7.29	0.41	7.96	1.66	1.64	3.72	21	2.33	0.277	2,130
OSW	2012.08.10	7.10	1.02	7.46	4.63	0.63	3.48	11	13.42	2.264	12
OSW2	2012.08.10	7.04	0.75	7.46	4.03	0.36	3.24	24	12.71	2.460	1
OSS#01	2012.08.10	7.09	0.81	7.58	3.97	0.50	2.90	7	10.75	2.024	6
OSS#02	2012.08.10	7.30	1.40	7.48	2.52	0.28	2.18	14	7.55	0.618	2,420
OSS#03	2012.08.10	7.39	1.34	8.24	2.50	1.02	1.84	20	7.58	0.703	25
OSS#04	2012.08.10	7.43	1.36	7.81	2.02	1.23	2.40	17	7.40	0.669	43
OSS#05	2012.08.10	7.44	1.32	8.12	2.60	0.79	2.24	9	7.52	0.728	115
OSS#06	2012.08.10	7.68	1.28	7.46	2.55	0.86	2.18	18	8.18	0.844	35
OSS#07	2012.08.10	7.64	1.16	7.77	2.58	0.54	2.40	7	7.47	0.733	105
OSS#08	2012.08.10	7.51	1.19	8.04	3.86	1.25	3.78	22	5.05	0.085	194
OSW	2012.08.21	7.06	0.62	7.79	2.65	1.48	3.52	7	7.41	1.505	1,600
OSW2	2012.08.21	7.48	0.57	7.87	2.57	0.78	3.18	4	11.20	1.756	210
OSS#01	2012.08.21	7.63	0.53	7.66	1.95	0.51	3.06	16	7.15	0.925	345
OSS#02	2012.08.21	7.43	0.39	8.35	1.72	1.01	2.96	24	2.80	0.189	32,550
OSS#03	2012.08.21	7.47	0.51	8.15	1.74	0.97	2.60	8	2.44	0.119	2,420
OSS#04	2012.08.21	7.48	0.50	8.00	1.31	0.91	2.34	22	3.15	0.193	195
OSS#05	2012.08.21	7.43	0.49	7.58	0.95	1.66	2.80	23	3.14	0.249	167
OSS#06	2012.08.21	7.54	0.50	7.89	1.11	0.59	2.34	16	3.13	0.257	921
OSS#07	2012.08.21	7.43	0.48	8.32	0.79	0.93	2.80	15	3.05	0.240	147
OSS#08	2012.08.21	7.38	0.40	7.22	1.19	0.34	3.72	32	2.72	0.210	210
OSW	2012.08.23	6.98	0.61	7.48	1.71	0.59	3.42	4	10.75	1.082	727
OSW2	2012.08.23	6.95	0.49	7.23	1.51	0.13	2.92	10	10.50	1.388	17,890
OSS#01	2012.08.23	7.06	0.51	7.36	0.60	0.34	3.64	3	8.20	0.921	130
OSS#02	2012.08.23	6.98	0.35	7.65	1.04	1.14	4.54	19	4.25	0.269	3,450
OSS#03	2012.08.23	7.05	0.50	7.77	0.10	1.38	3.08	12	4.12	0.187	816
OSS#04	2012.08.23	7.11	0.51	7.28	0.60	0.98	2.92	7	3.86	0.189	548
OSS#05	2012.08.23	7.17	0.47	7.49	0.47	0.40	2.74	6	3.92	0.192	1,986
OSS#06	2012.08.23	7.23	0.26	7.70	2.01	1.09	3.42	3	4.58	0.336	291
OSS#07	2012.08.23	7.19	0.45	8.00	1.15	0.90	3.04	12	3.75	0.178	687
OSS#08	2012.08.23	7.32	0.44	8.03	1.12	0.90	2.52	6	3.84	0.187	26,200
OSW	2012.08.31	7.45	0.54	10.48	1.83	0.90	10.62	27	8.82	1.122	326
OSW2	2012.08.31	7.48	0.52	9.17	1.72	0.64	5.08	20	11.44	1.534	ND
OSS#01	2012.08.31	7.55	0.44	8.54	1.02	2.03	5.78	100	6.56	0.625	20

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천, ND: not detected

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#02	2012.08.31	7.56	0.22	10.12	1.02	1.29	3.64	12	1.63	0.140	291
OSS#03	2012.08.31	7.64	0.38	10.32	0.24	1.23	2.82	3	3.25	0.119	91
OSS#04	2012.08.31	7.63	0.35	10.00	0.72	1.02	2.56	78	2.82	0.139	37
OSS#05	2012.08.31	7.74	0.38	10.04	0.63	1.07	3.48	41	2.67	0.083	3
OSS#06	2012.08.31	7.72	0.37	9.85	2.32	1.01	2.84	39	2.95	0.100	28
OSS#07	2012.08.31	7.75	0.36	9.72	2.38	1.10	2.40	43	2.90	0.093	28
OSS#08	2012.08.31	7.66	0.35	9.88	2.25	0.32	0.68	31	2.53	0.101	17
OSW	2012.09.26	7.69	0.62	8.63	4.18	1.13	4.88	4	10.76	0.656	42
OSW2	2012.09.26	7.73	0.70	8.74	4.19	1.72	5.08	1	9.70	1.439	1
OSS#01	2012.09.26	7.49	0.82	8.82	3.01	1.09	3.40	4	7.92	0.898	23
OSS#02	2012.09.26	7.66	0.81	8.36	3.00	0.87	2.76	4	3.58	0.112	310
OSS#03	2012.09.26	7.78	0.86	9.28	2.01	0.85	2.06	13	4.74	1.459	16
OSS#04	2012.09.26	7.81	0.83	9.41	1.58	0.58	1.72	4	4.61	0.879	7
OSS#05	2012.09.26	8.04	0.86	8.97	2.01	0.74	2.24	11	4.80	0.113	34
OSS#06	2012.09.26	7.96	0.79	9.25	1.91	0.74	2.18	8	4.46	0.274	88
OSS#07	2012.09.26	7.84	0.86	9.34	0.64	0.81	2.88	6	4.85	0.223	649
OSS#08	2012.09.26	7.98	0.56	9.32	0.23	1.06	3.46	10	1.88	0.303	2
OSS#01	2012.10.25	7.39	1.05	9.23	6.12	1.09	2.40	11	7.89	0.571	435
OSS#02	2012.10.25	7.73	1.13	9.23	7.52	1.62	3.14	11	4.58	0.186	378
OSS#03	2012.10.25	8.09	1.12	9.05	6.64	1.15	2.56	10	6.47	0.281	186
OSS#04	2012.10.25	8.06	1.12	9.28	6.27	1.02	2.28	18	6.81	0.328	105
OSS#05	2012.10.25	7.83	1.12	9.11	6.55	0.93	1.98	10	6.62	0.292	1220
OSS#06	2012.10.25	7.64	1.07	9.36	5.42	0.79	1.52	9	6.26	0.257	687
OSS#07	2012.10.25	7.99	1.10	9.02	6.67	0.93	1.88	12	6.63	0.240	214
OSS#08	2012.10.25	7.78	1.05	8.85	7.06	0.95	2.30	9	6.85	0.626	770
OSS#01	2012.11.21	6.76	1.07	8.43	3.836	2.85	5.94	11	8.19	0.494	238
OSS#02	2012.11.21	7.25	1.09	8.78	6.406	4.95	12.08	10	5.64	0.119	172
OSS#03	2012.11.21	7.37	1.14	8.97	8.1	2.89	5.56	9	6.74	0.249	60
OSS#04	2012.11.21	7.12	1.14	9.33	7.357	3.23	6.26	10	7.09	0.278	192
OSS#05	2012.11.21	7.18	1.14	9.10	7.493	2.23	5.74	15	7.20	0.301	435
OSS#06	2012.11.21	7.64	1.04	9.38	7.279	2.62	5.86	6	6.45	0.239	276
OSS#07	2012.11.21	7.73	1.10	8.86	6.577	1.85	4.38	6	6.14	0.165	687
OSS#08	2012.11.21	7.77	1.14	9.02	6.513	2.01	4.46	7	6.59	0.247	108
OSS#01	2012.12.13	6.95	1.12	5.33	11.43	2.36	8.64	9	11.22	0.731	1046
OSS#02	2012.12.13	7.29	1.49	4.66	32.72	3.50	10.12	15	6.06	0.316	16070
OSS#03	2012.12.13	7.35	1.39	6.86	14	2.32	6.66	11	9.14	0.490	1610
OSS#04	2012.12.13	7.18	1.37	6.39	12.95	1.97	5.68	8	9.23	0.352	276

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

표 3.4.8 오산환경사업소 하류 오산천 수질 모니터링 결과 (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSS#05	2012.12.13	6.96	1.39	6.38	11.61	2.17	6.72	20	12.23	0.634	1,413
OSS#06	2012.12.13	7.06	1.38	6.28	10.15	2.21	6.04	16	9.44	0.502	913
OSS#07	2012.12.13	7.24	1.34	6.51	10.35	1.84	5.20	16	9.83	0.405	316
OSS#08	2012.12.13	6.92	1.35	5.57	10.94	1.30	4.72	20	10.81	0.615	3,990

* OSI: 오산 관개용수 취수지점, OSW: 오산 하수처리수, OSS: 오산천

그림 3.4.7 ~ 그림 3.4.16은 수원(황구지천) 환경사업소 하류부 하천의 수질 특성을 날짜별로 도시한 것이다.

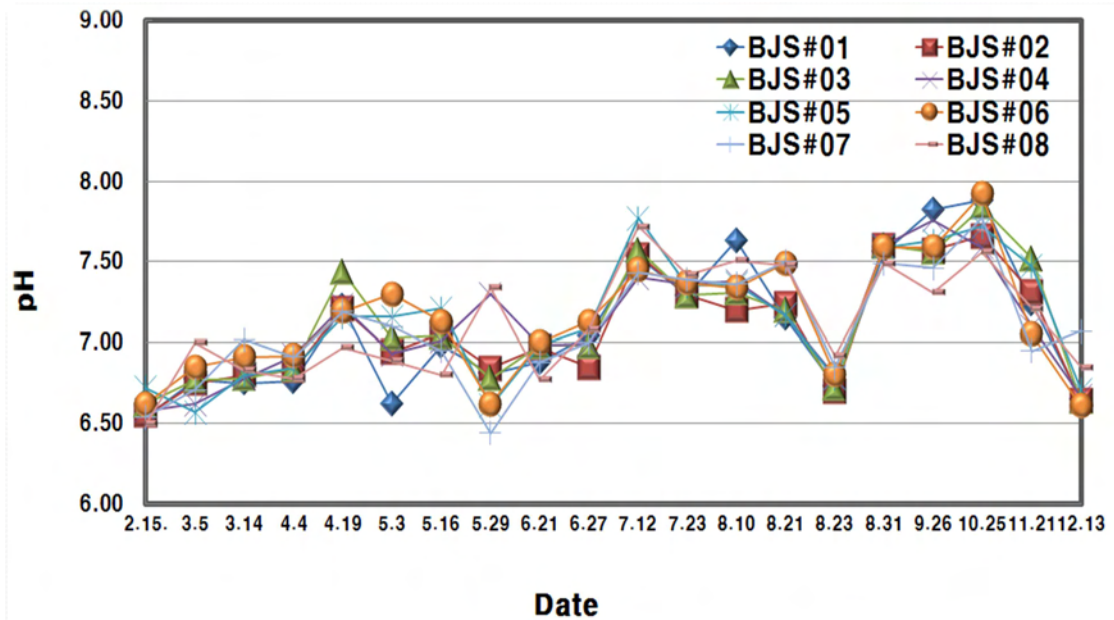


그림 3.4.7 황구지천 수질 특성 (pH)

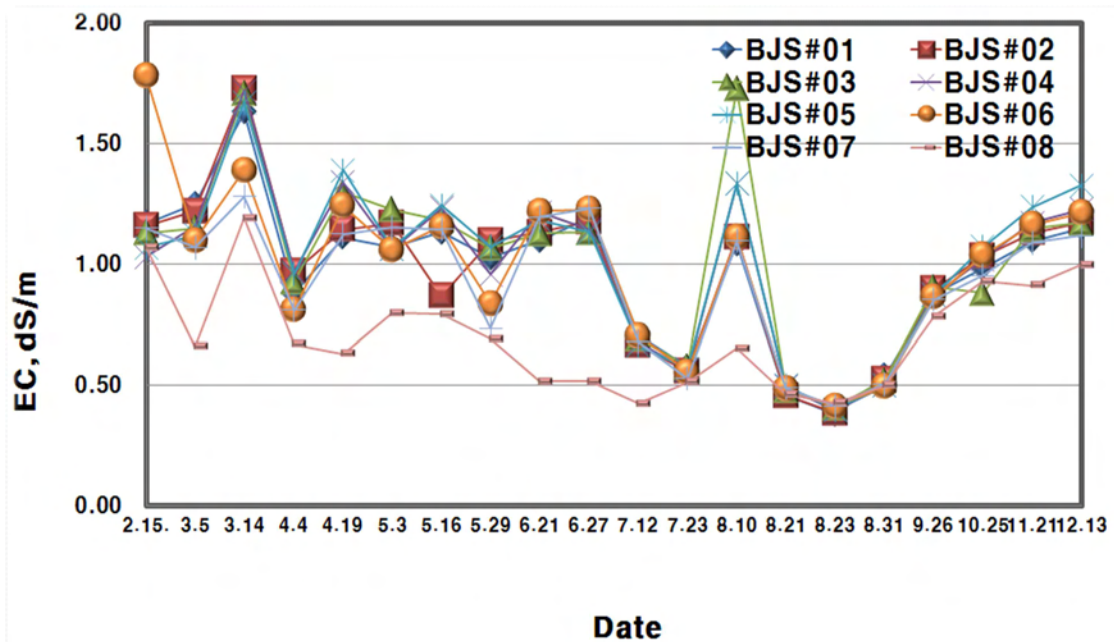


그림 3.4.8 황구지천 수질 특성 (EC)

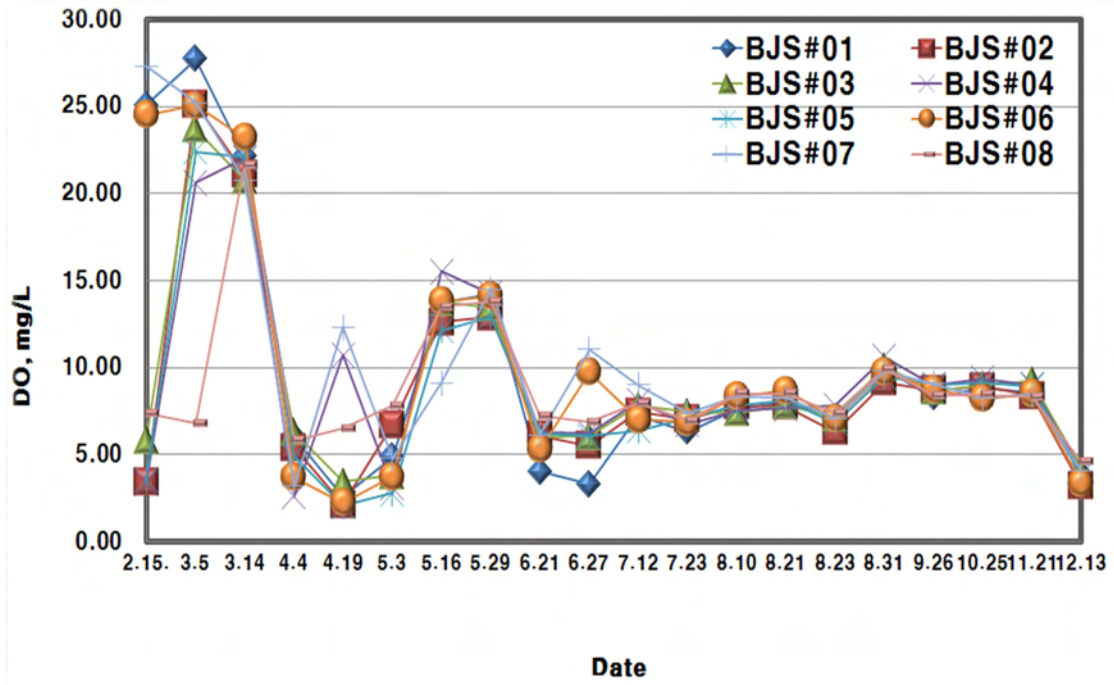


그림 3.4.9 황구지천 수질 특성 (DO)

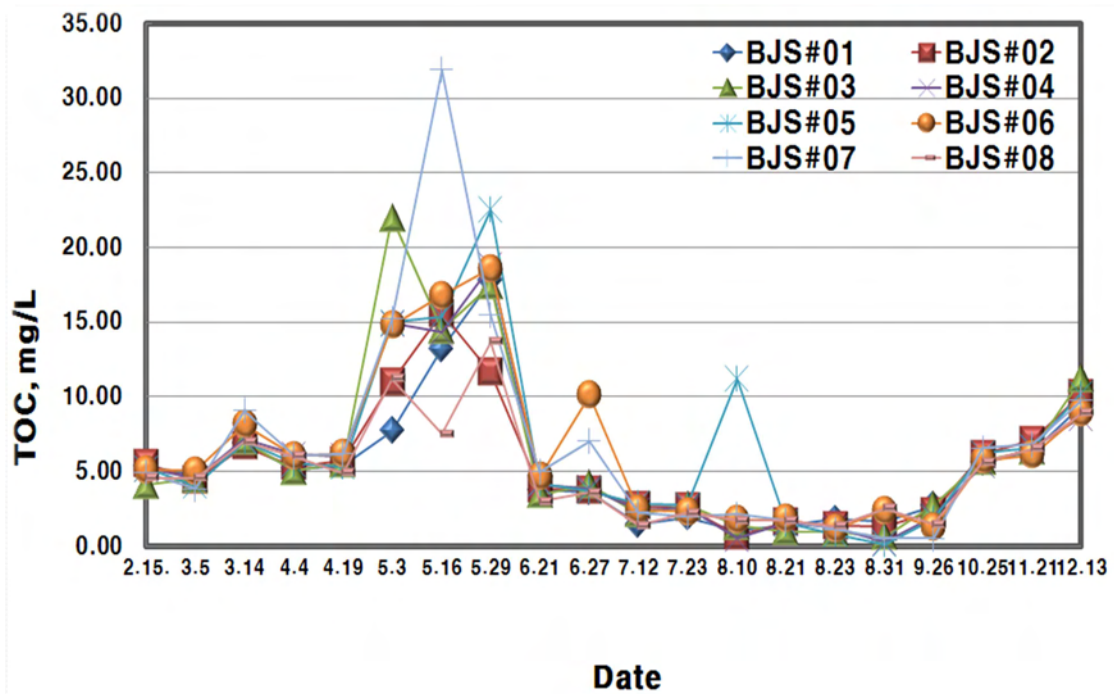


그림 3.4.10 황구지천 수질 특성 (TOC)

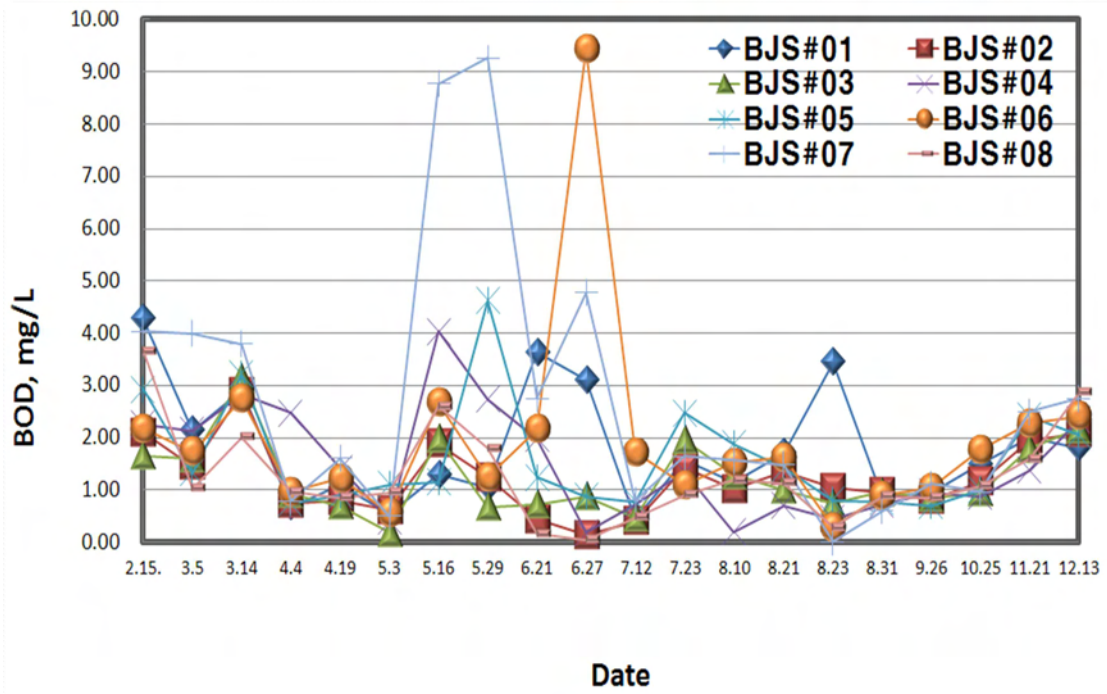


그림 3.4.11 황구지천 수질 특성 (BOD)

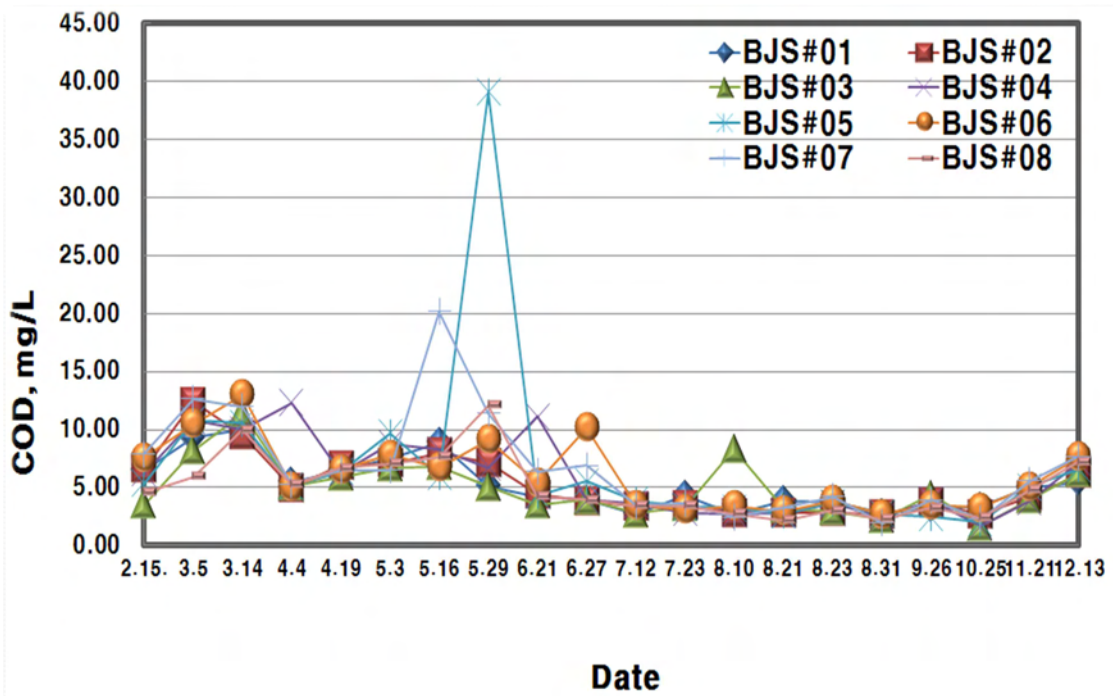


그림 3.4.12 황구지천 수질 특성 (COD)

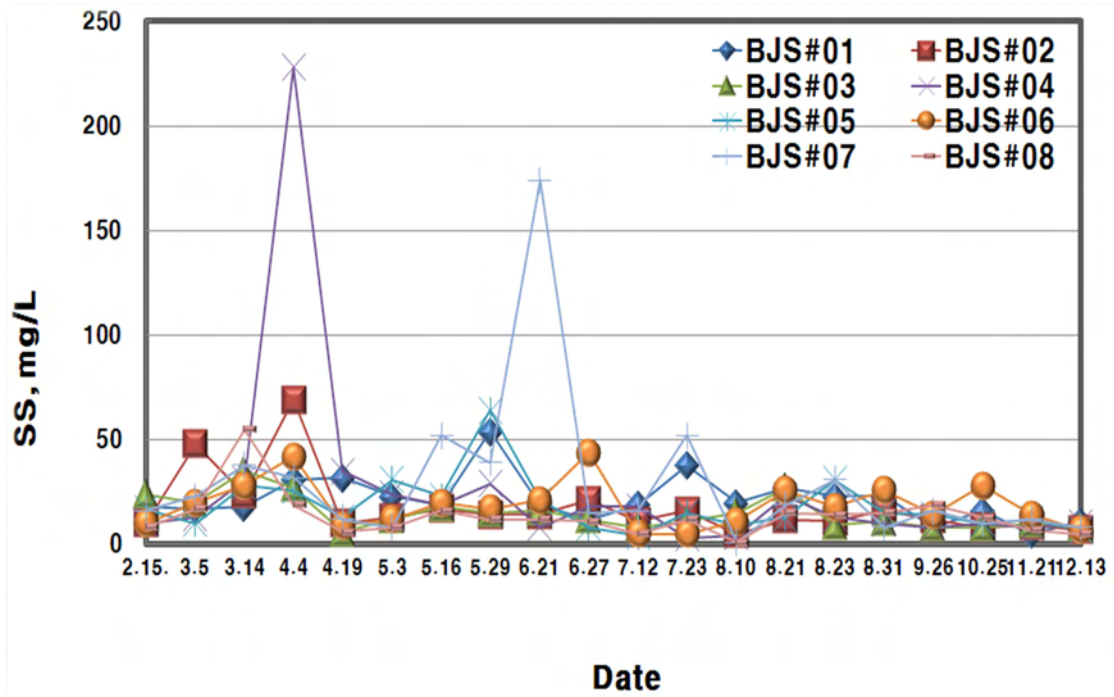


그림 3.4.13 황구지천 수질 특성 (SS)

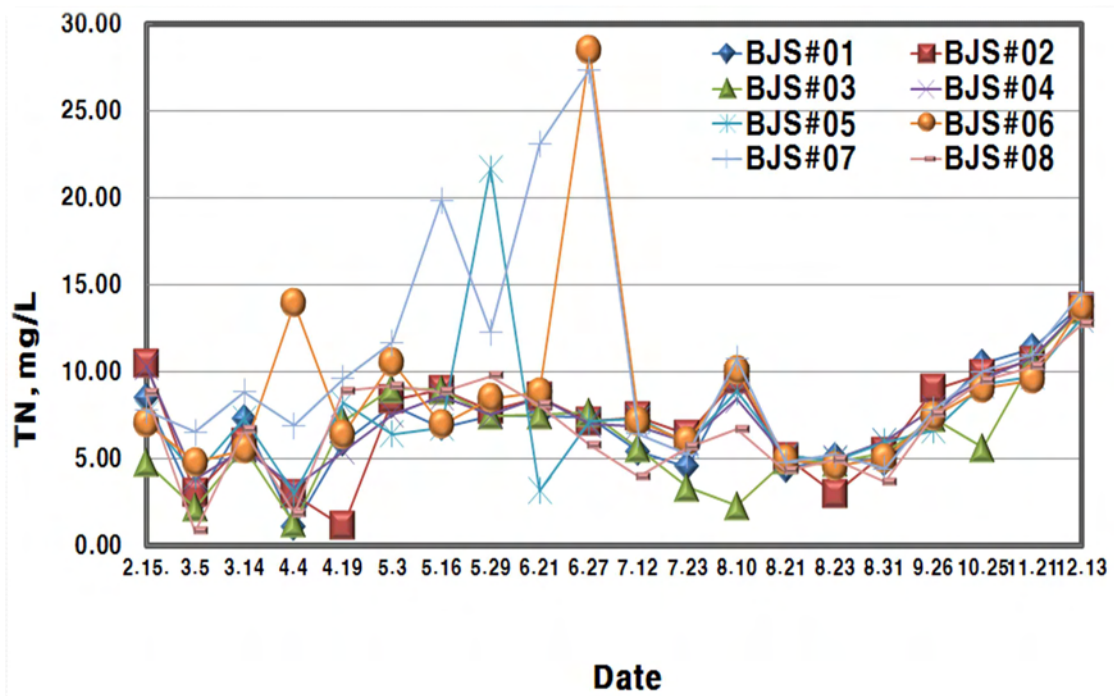


그림 3.4.14 황구지천 수질 특성 (T-N)

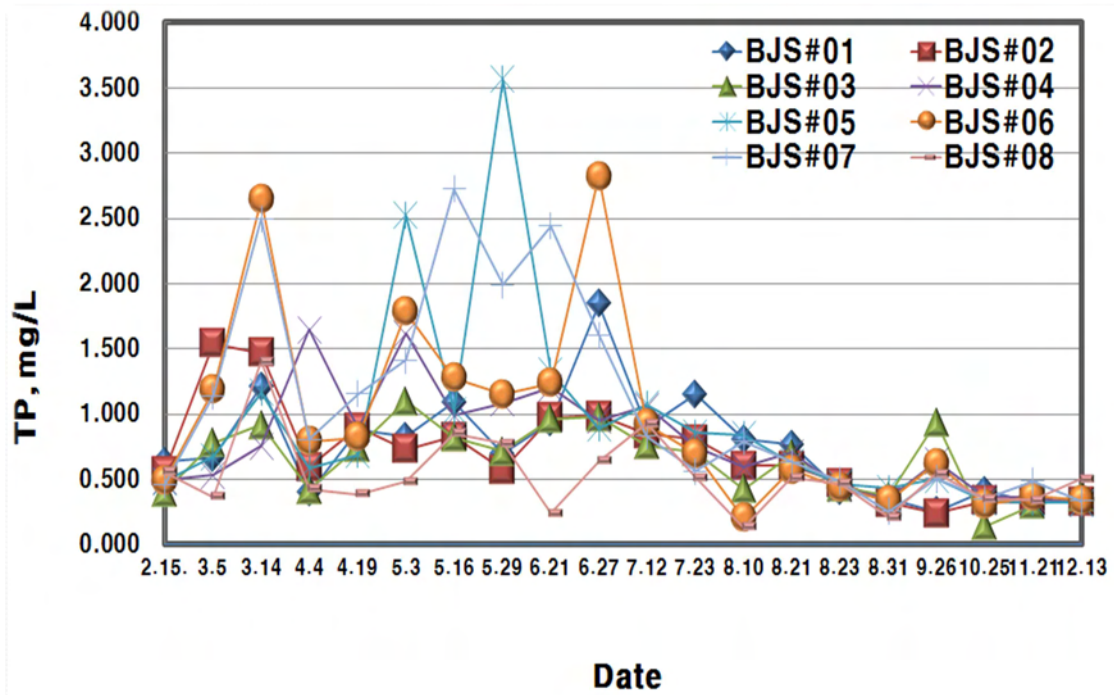


그림 3.4.15 황구지천 수질 특성 (T-P)

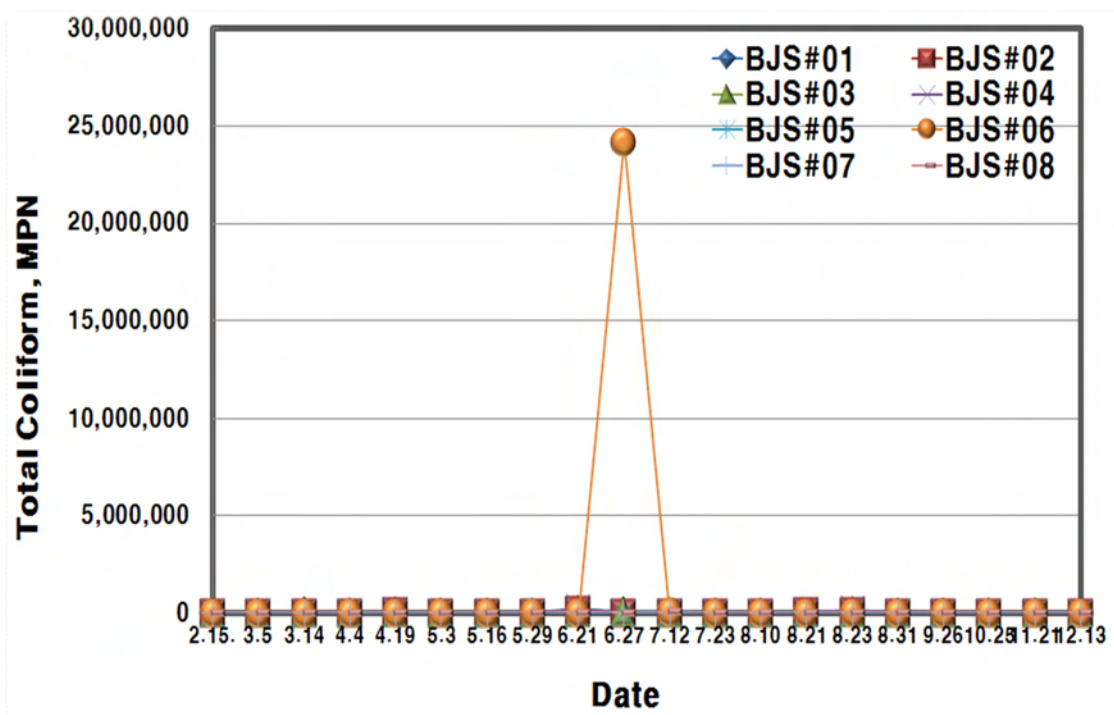


그림 3.4.16 황구지천 수질 특성 (Total Coliform)

그림 3.4.17 ~ 그림 3.4.26은 오산(오산천) 환경사업소 하류부 하천의 수질 특성을 날짜별로 도시하였다.

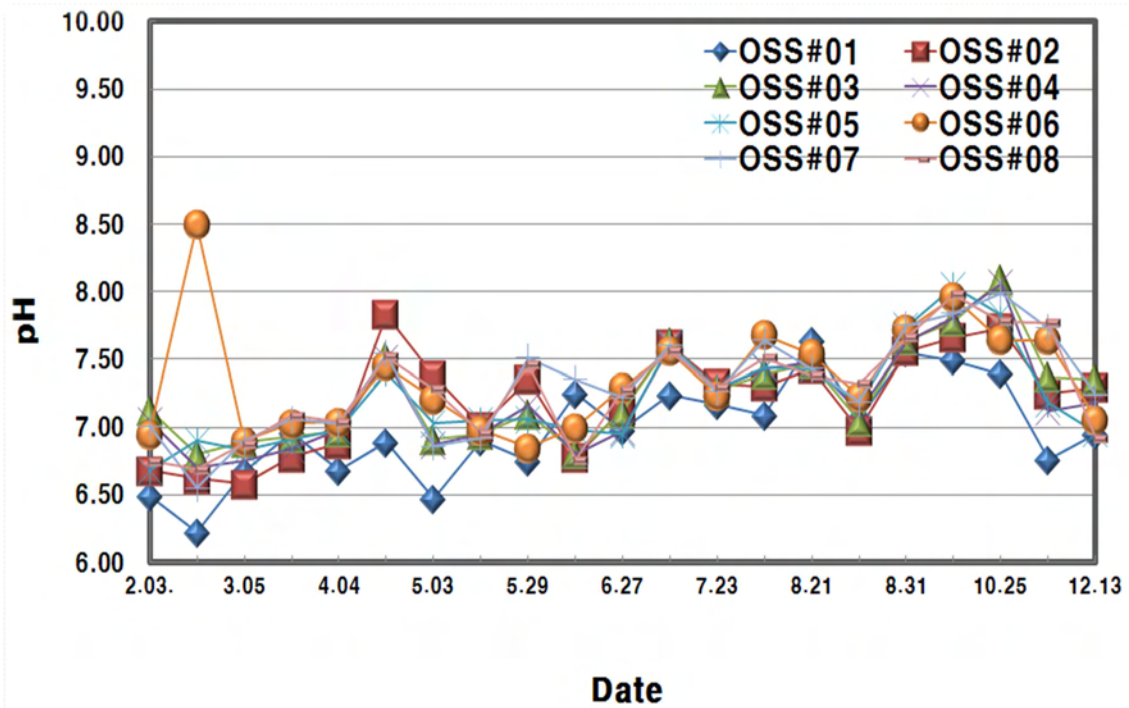


그림 3.4.17 오산천 수질 특성 (pH)

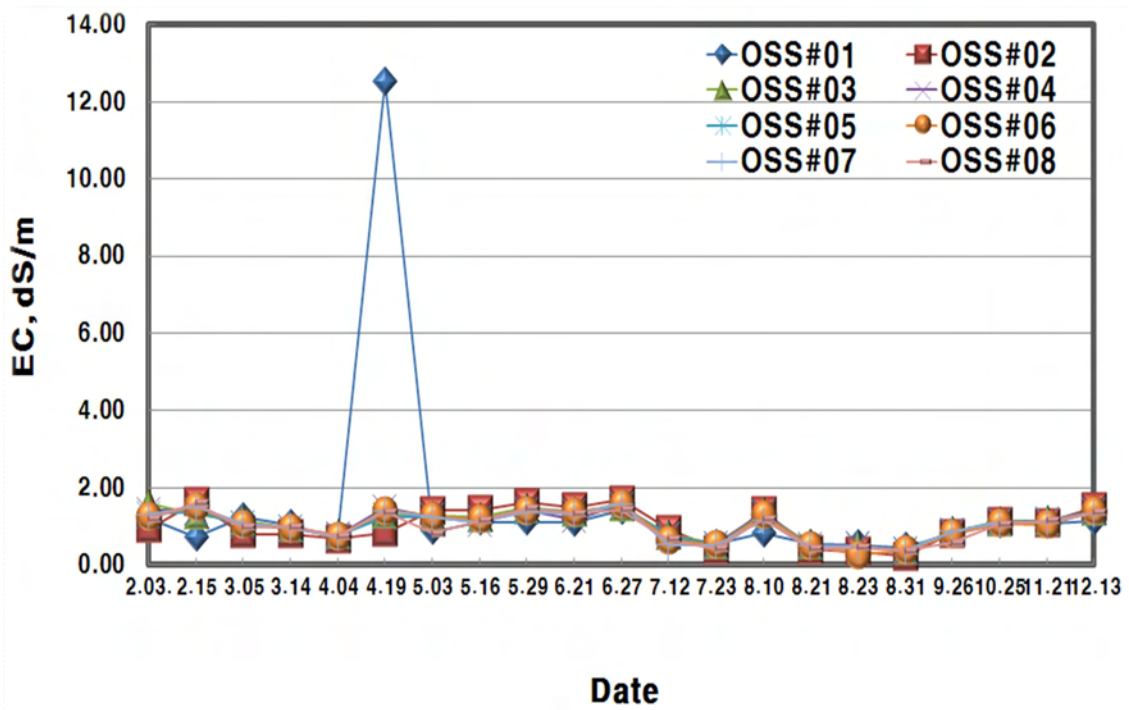


그림 3.4.18 오산천 수질 특성 (EC)

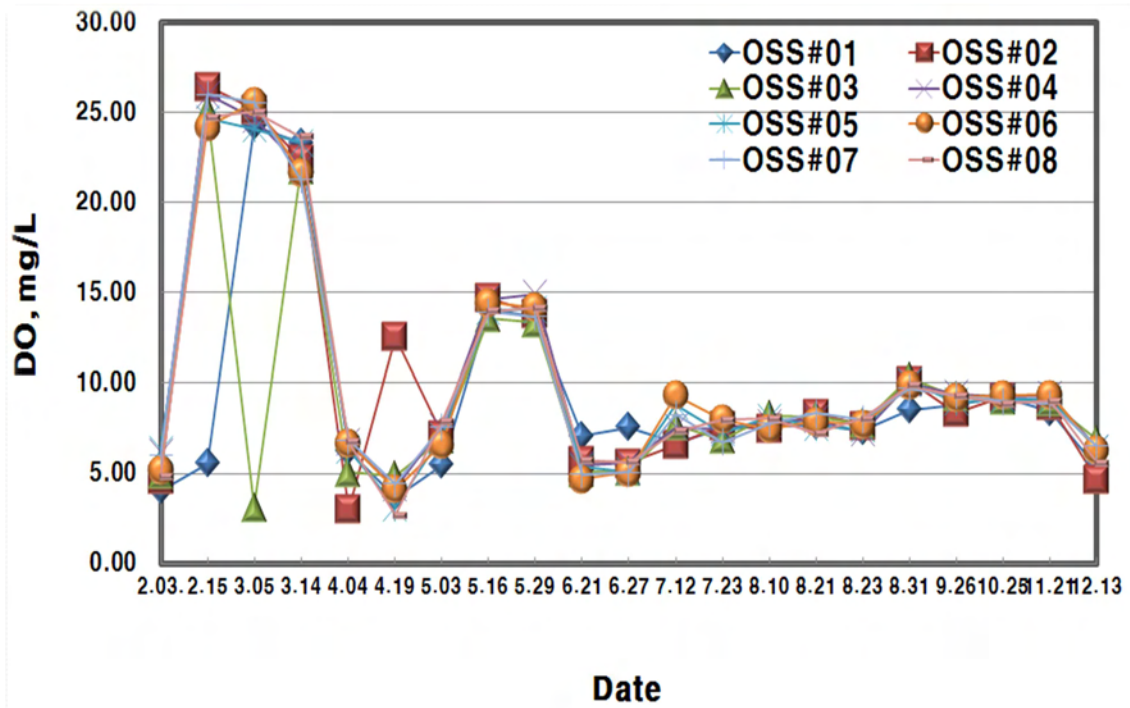


그림 3.4.19 오산천 수질 특성 (DO)

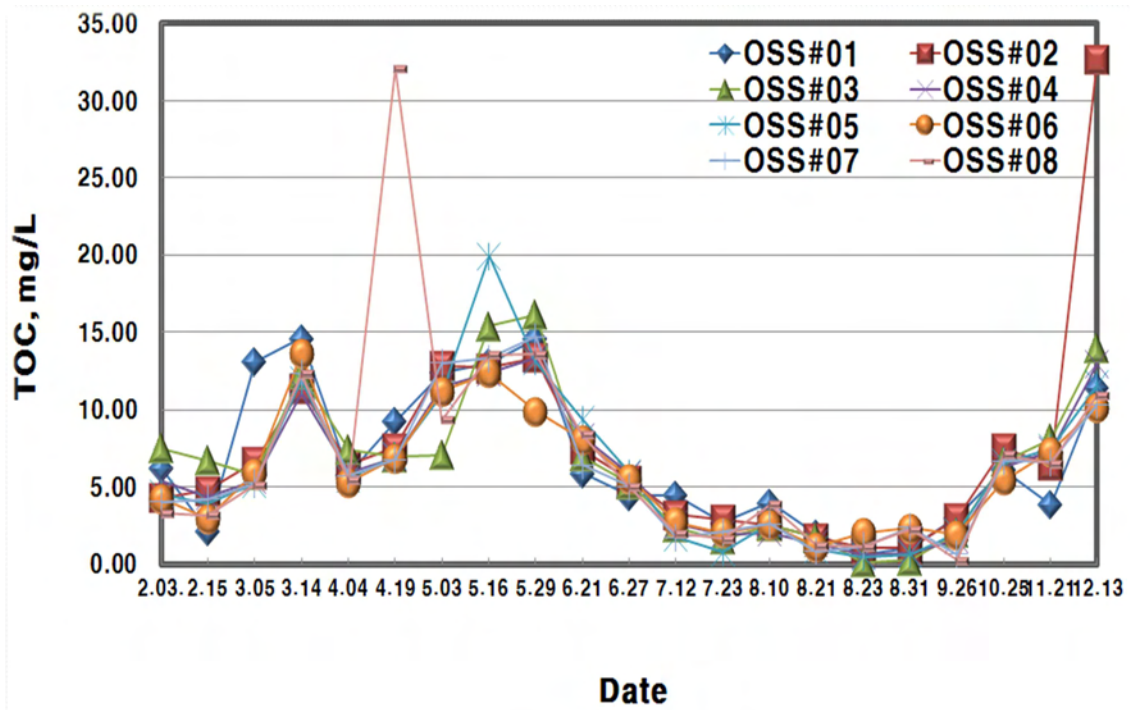


그림 3.4.20 오산천 수질 특성 (TOC)

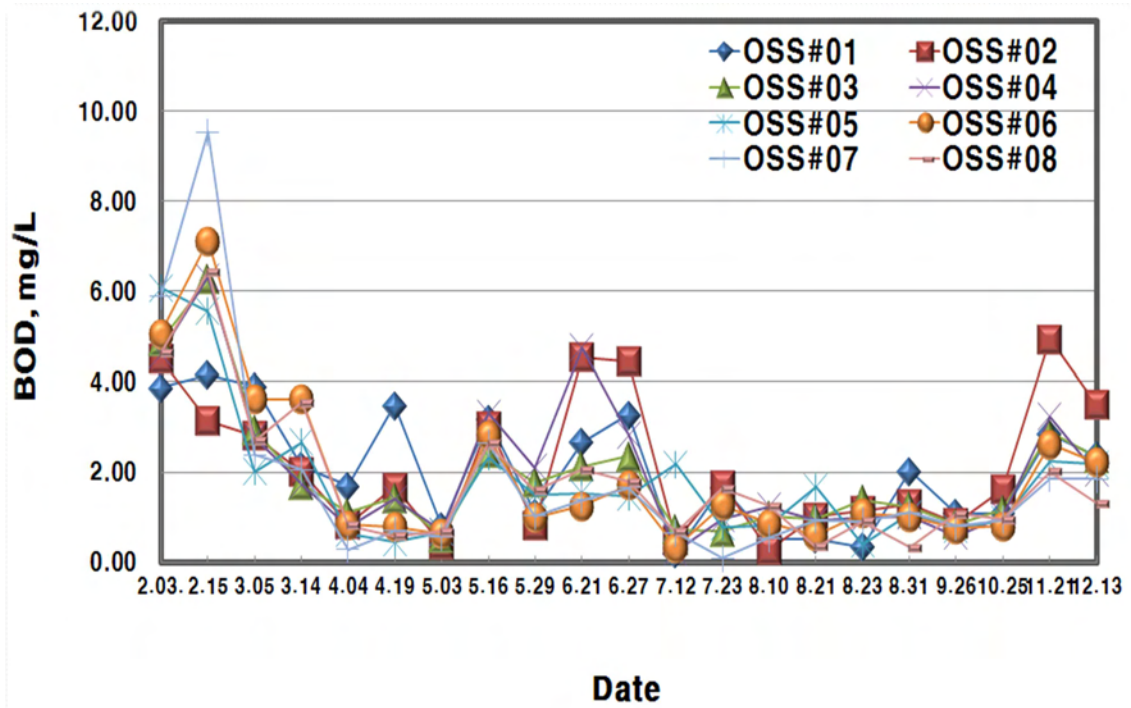


그림 3.4.21 오산천 수질 특성 (BOD)

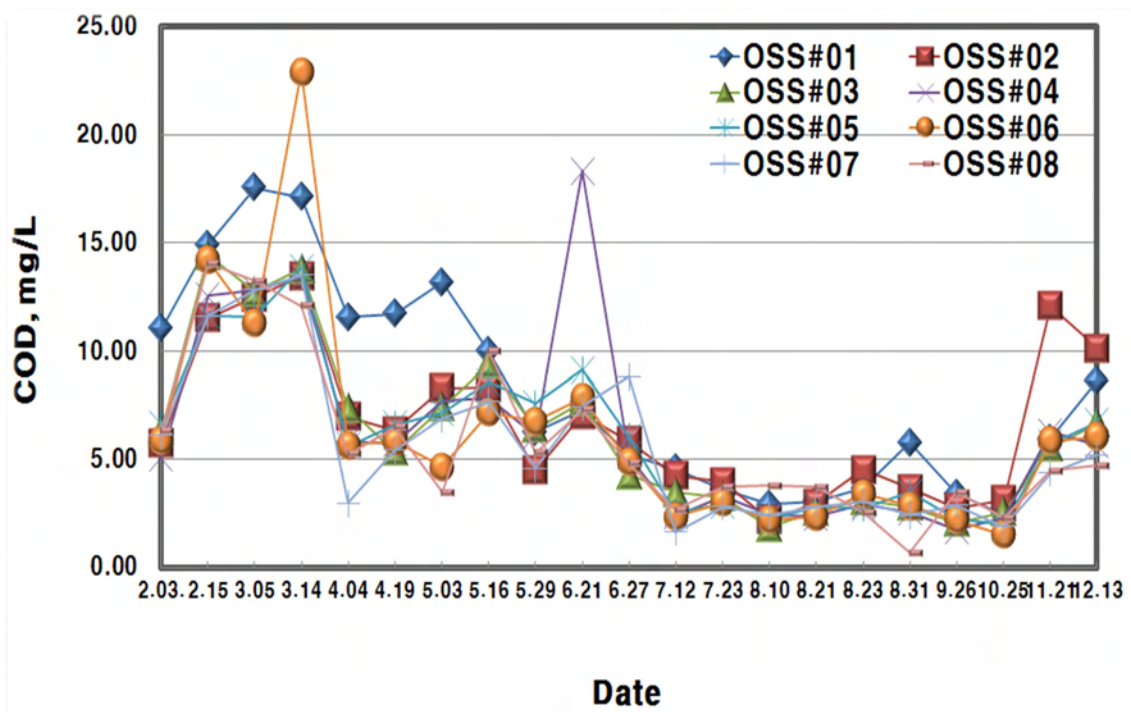


그림 3.4.22 오산천 수질 특성 (COD)

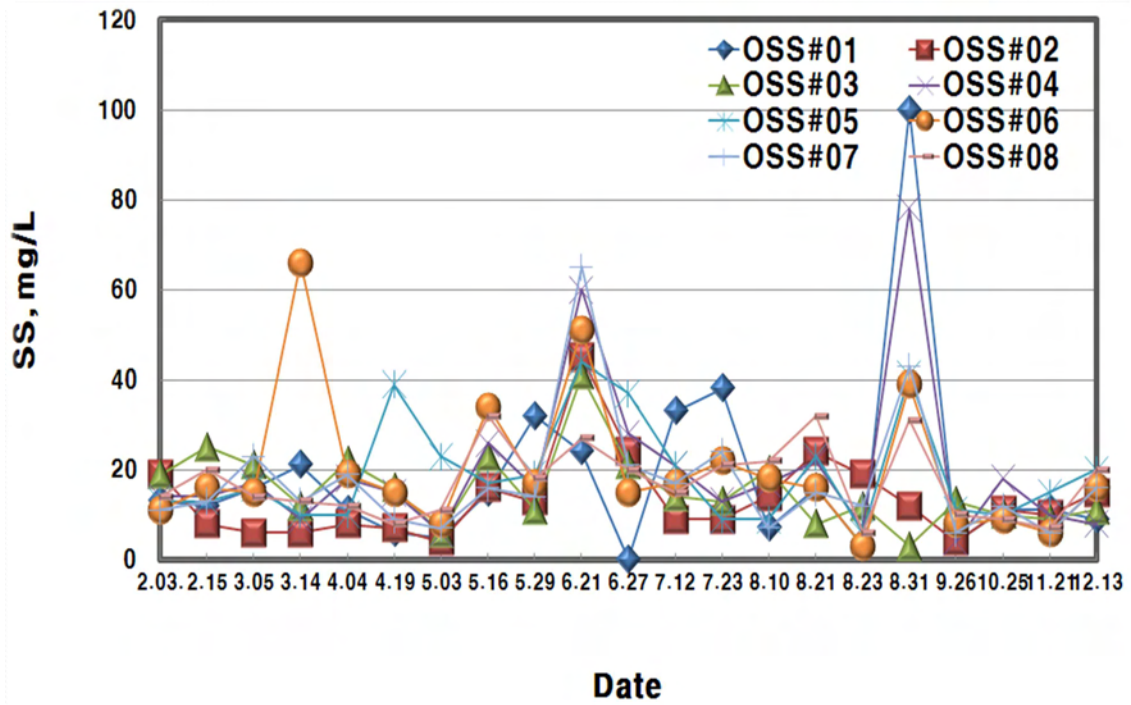


그림 3.4.23 오산천 수질 특성 (SS)

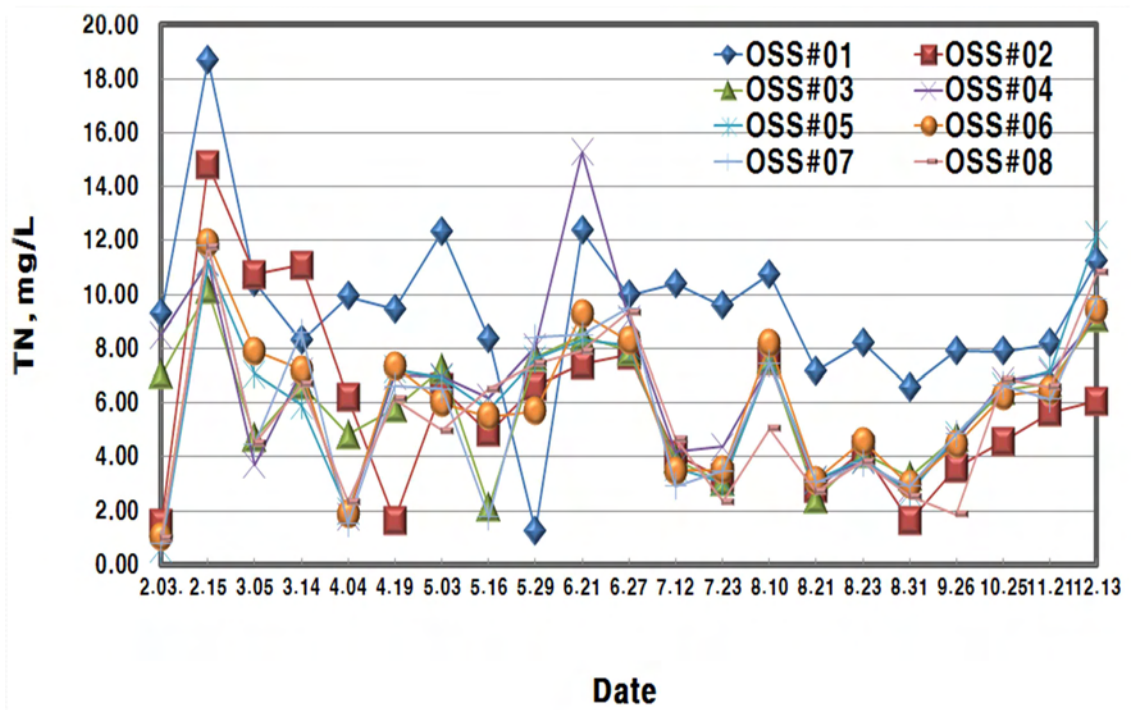


그림 3.4.24 오산천 수질 특성 (T-N)

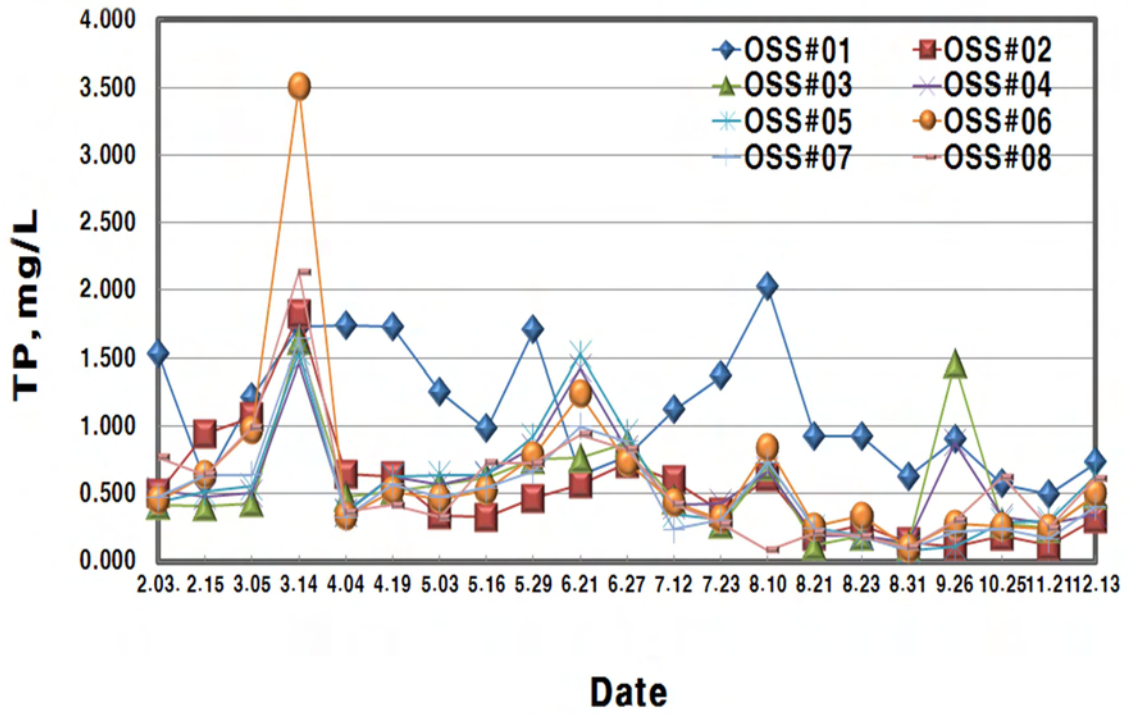


그림 3.4.25 오산천 수질 특성 (T-P)

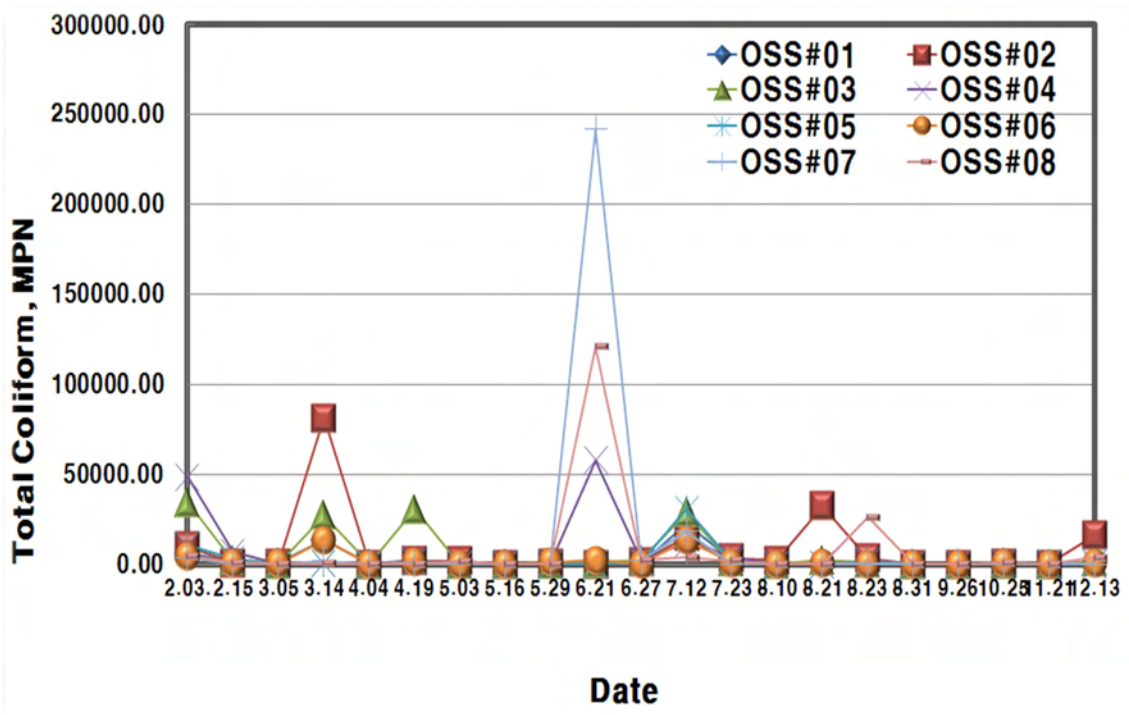


그림 3.4.26 오산천 수질 특성 (Total Coliform)

2.2. 관개수

관개수 수질 분석을 위해 용인 청정지구, 오산 간접재이용지구, 병점 간접재이용지구 및 미처리지구의 논으로 유입되는 유입수의 수질을 모니터링 하였다. 유입수 수질 모니터링은 1주에 한 번씩 실시하였으며, 샘플링된 시료는 수질오염공정시험방법 (환경부, 2008)으로 분석하였다. 분석항목은 농업용수 수질기준에서 제시하는 pH, BOD, COD, SS, DO, T-P, 총대장균수와 EC, T-N, TOC를 선정하였다. 유입수 모니터링은 매회 같은 장소에서 실시하여 샘플링의 반복성을 보장하였다.

가. 용인 청정지구

용인 청정지구의 유입수 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 농업용 용수로에서 실시하였으며, 그림 3.4.27은 샘플링 모습을 나타내고 있다.



그림 3.4.27 용인 청정지구 유입수 (YIID) 수질 모니터링

표 3.4.9 ~ 3.4.11에 2012년 ~ 2014년 용인 청정지구의 유입수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 유입수의 수질 분석 결과 값을 보면 pH는 2012년 7.50, 2013년 7.34, 2014년 7.51로 매년 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년 0.17, 2013년 0.18, 2013년 0.21 dS/m로 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 낮아 양호한 것으로 나타났고, COD또한 2012년 2.60, 2013년 3.16, 2014년 3.08 mg/L로 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하는 것으로 나타났다. SS는 2012년 19, 2013년 12, 2014년 22 mg/L로 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 0.91, 2013년 1.53, 2014년 1.03 mg/L로 나타났으며, 총대장균수는 2012년 15,669, 2013년 125, 2014년 3532 MPN으로 나타났다. 표 3.4.12 ~ 3.4.14는 2012 ~ 2014년 용인 청정지구의 유입수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.9 용인 청정지구 유입수 평균 수질 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
YIID	7.50	0.17	8.91	3.46	0.81	2.60	19	0.91	0.044	15,669

* YIID: 용인 청정지구 유입수

표 3.4.10 용인 청정지구 유입수 평균 수질 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
YIID	7.34	0.18	8.40	2.91	1.23	3.16	12	1.53	0.06	125

* YIID: 용인 청정지구 유입수

표 3.4.11 용인 청정지구 유입수 평균 수질 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
YIID	7.51	0.21	9.17	4.73	1.71	3.08	22	1.03	0.08	3532

* YIID: 용인 청정지구 유입수

표 3.4.12 용인 청정지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
YIID	2012.05.26	7.22	0.21	14.66	15.61	0.89	1.54	8	0.43	0.042	0
	2012.05.29	7.24	0.21	14.50	11.88	1.02	1.62	8	0.40	0.032	1
	2012.06.07	7.22	0.22	6.89	2.69	0.21	1.02	6	0.81	0.019	1
	2012.06.15	7.39	0.19	7.33	2.35	0.54	3.10	8	1.15	0.017	34
	2012.06.21	7.08	0.30	7.28	4.81	0.98	6.98	158	1.05	0.010	241,960
	2012.06.27	7.26	0.34	6.97	4.89	0.85	7.50	12	0.12	0.060	37
	2012.07.12	8.14	0.15	7.57	2.22	0.43	1.98	6	0.00	0.030	2,420
	2012.07.23	7.79	0.13	7.85	1.41	1.33	1.68	5	0.85	0.043	2,280
	2012.07.25	8.08	0.14	7.46	1.54	0.38	1.92	7	1.76	0.014	100
	2012.08.01	7.65	0.15	8.50	2.14	0.72	1.32	3	2.36	0.078	345
	2012.08.10	7.65	0.18	8.07	1.99	0.91	1.98	17	1.50	0.061	165
	2012.08.21	7.24	0.09	8.28	0.73	0.97	2.08	10	0.65	0.046	152
	2012.08.23	7.13	0.11	7.96	0.35	1.30	2.46	30	1.00	0.053	2,790
	2012.08.31	7.35	0.08	9.45	0.37	0.74	3.00	9	0.15	0.081	150
	2012.09.07	7.60	0.10	9.30	0.61	0.79	1.82	2	0.19	0.061	172
2012.09.20	7.93	0.13	10.46	1.72	0.90	1.62	10	1.29	0.058	105	

* YIID: 용인 청정지구 유입수

표 3.4.13 용인 청정지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
YIID	2013.06.03	7.84	0.22	10.83	3.15	1.10	2.20	10	1.37	0.03	15
	2013.06.10	7.88	0.21	10.44	3.03	2.36	7.96	26	1.36	0.05	2
	2013.06.17	7.29	0.21	10.95	3.81	0.39	1.44	14	0.94	0.03	31
	2013.06.25	7.43	0.27	6.47	5.41	1.09	3.16	20	2.00	0.03	435
	2013.08.08	7.03	0.14	7.85	2.03	1.13	2.94	6	1.98	0.10	540
	2013.08.14	7.22	0.15	6.03	2.13	1.29	3.28	8	2.02	0.04	1
	2013.08.21	7.07	0.15	7.34	2.13	1.09	2.90	8	1.74	0.03	3
	2013.08.28	7.16	0.15	7.76	2.21	1.07	2.38	6	1.17	0.03	84
2013.09.05	7.15	0.15	7.95	2.32	1.56	2.18	10	1.16	0.16	12	

* YIID: 용인 청정지구 유입수

표 3.4.14 용인 청정지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m		mg/L						MPN
YIID	2014.06.06	7.51	0.27	6.28	9.23	2.08	3.92	8	0.80	0.03	1300
	2014.06.17	7.82	0.24	6.95	4.16	1.50	2.78	83	1.05	0.05	770
	2014.07.02	7.55	0.25	8.98	5.06	1.88	3.66	8	0.79	0.04	1100
	2014.08.12	7.40	0.11	10.34	2.78	1.60	2.96	8	0.50	0.05	411
	2014.08.29	7.23	0.21	10.47	3.23	1.46	2.10	17	2.09	0.20	122
	2014.09.05	7.53	0.17	10.86	4.27	1.96	3.46	8	0.65	0.10	1120
	2014.09.12	7.54	0.22	10.31	4.42	1.48	2.66	25	1.32	0.09	19900

* YIID: 용인 청정지구 유입수

나. 오산 간접재이용지구

오산 간접재이용지구의 유입수 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 농업용 용수로에서 실시하였으며, 그림 3.4.28은 샘플링 모습을 나타내고 있다.



그림 3.4.28 오산 간접재이용지구 유입수 (OSID) 수질 모니터링

표 3.4.15 ~ 3.4.17에 2012년 ~ 2014년 오산 간접재이용지구의 유입수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 유입수의 수질 분석 결과 값을 보면 pH는 2012년 7.46, 2013년 7.80, 2014년 7.33으로 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년 1.01, 2013년 1.10, 2014년 0.91 dS/m로 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 높은 것으로 나타났고, COD는 2012년 6.21, 2013년 7.84로 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하는 것으로 나타났으나, 2014년은 8.30 mg/L로 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. SS는 2012년 61, 2013년 33, 2014년 78 mg/L로 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 3.46, 2013년 3.67, 2014년 4.49 mg/L로 나타났으며, 총대장균수는 2012년 17,752, 2013년 954, 2014년 10336 MPN으로 나타났다. 표 3.4.18 ~ 3.4.20은 2012 ~ 2014년 오산 간접재이용지구의 유입수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.15 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
OSID	7.46	1.01	11.69	5.26	2.16	6.21	61	3.46	1.509	17,752

* OSID: 오산재이용지구 유입수

표 3.4.16 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
OSID	7.80	1.10	7.64	6.55	2.50	7.84	33	3.67	0.31	954

* OSID: 오산재이용지구 유입수

표 3.4.17 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
OSID	7.33	0.91	6.72	8.57	4.33	8.30	78	4.49	0.49	10336

* OSID: 오산재이용지구 유입수

표 3.4.18 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
OSID	2012.05.23	7.03	1.64	12.08	15.56	4.43	3.88	125	5.05	0.221	33
	2012.05.26	6.98	1.67	12.16	9.34	2.68	3.42	15	6.81	0.437	93
	2012.06.07	7.19	1.79	6.98	5.24	0.83	3.48	12	5.29	0.338	13
	2012.06.15	6.75	1.69	6.93	6.08	0.78	5.58	23	6.36	0.512	75
	2012.06.21	7.27	1.51	7.02	13.40	2.56	10.96	42	5.86	0.903	387
	2012.06.27	7.01	1.69	56.38	5.80	13.56	23.80	417	11.65	18.470	241,960
	2012.07.04	7.14	0.86	7.73	4.46	0.11	4.68	29	0.04	0.167	13,540
	2012.07.12	7.75	0.46	7.28	4.45	0.54	4.36	7	0.27	0.191	6,500
	2012.07.25	7.84	0.38	6.94	4.84	0.77	6.60	54	1.22	0.108	310
	2012.08.01	7.68	0.76	7.84	1.54	0.91	4.44	3	1.66	0.183	1,300
	2012.08.10	7.76	1.43	8.17	1.17	0.87	1.74	14	1.60	0.264	31
	2012.08.21	7.47	0.35	7.58	1.44	0.70	3.50	18	0.62	0.156	75
	2012.08.23	7.08	0.19	8.58	1.41	1.33	3.88	18	0.90	0.201	225
	2012.08.31	7.94	0.28	10.39	1.57	1.06	5.42	75	0.38	0.275	6
2012.09.07	8.98	0.38	9.28	2.56	1.30	7.40	60	4.14	0.210	1,733	

* OSID: 오산재이용지구 유입수

표 3.4.19 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
OSID	2013.06.03	8.12	1.28	8.72	8.72	3.84	9.04	32	5.75	0.42	46
	2013.06.10	8.12	1.53	8.39	7.12	2.24	8.52	26	5.70	0.36	144
	2013.06.17	8.25	1.50	7.54	6.06	2.91	8.96	54	3.74	1.14	5600
	2013.06.25	7.23	1.02	7.06	6.23	2.16	4.28	14	1.65	0.16	2400
	2013.08.08	7.67	0.75	7.64	7.03	1.49	7.10	40	1.02	0.16	1
	2013.08.14	7.68	0.96	7.50	4.73	1.37	5.96	10	0.76	0.04	6
	2013.08.21	8.00	0.93						3.82	0.19	130
	2013.08.28	7.47	0.99	6.63	5.49	3.19	11.96	48	5.54	0.18	60
2013.09.05	7.64	0.92	7.62	7.03	2.79	6.92	36	5.07	0.12	200	

* OSID: 오산재이용지구 유입수

표 3.4.20 오산재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSID	2014.06.06	7.69	1.08	5.15	10.58	3.88	7.50	45	1.79	0.23	36
	2014.06.17	7.33	1.41	4.50	7.14	3.49	6.86	18	6.14	0.39	280
	2014.07.02	7.35	1.43	7.56	8.99	3.80	7.34	19	9.10	0.45	640
	2014.08.12	7.13	0.21	10.46	4.47	3.30	6.08	81	0.63	0.50	261
	2014.09.05	7.24	0.50	10.00	6.33	3.44	6.50	105	1.41	0.50	12000
	2014.09.12	7.26	0.84	2.68	13.89	8.09	15.50	201	7.86	0.86	48800

* OSID: 오산재이용지구 유입수

다. 병점 간접재이용지구

병점 간접재이용지구의 유입수 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 농업용 용수로에서 실시하였으며, 그림 3.4.29은 샘플링 모습을 나타내고 있다.



그림 3.4.29 병점 간접재이용지구 유입수 (OSID) 수질 모니터링

표 3.4.21 ~ 3.4.23에 2012년 ~ 2014년 병점 간접재이용지구의 유입수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 유입수의 수질 분석 결과 값을 보면 pH는 2012년 7.31, 2013년 7.26, 2014년 7.08로 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년 0.62, 2013년 0.75, 2014년 0.68 dS/m로 2013년에는 FAO 기준인 0.70 dS/m를 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 2012년과 2014년에는 기준보다 낮아 양호한 것으로 나타났다. COD는 2012년 6.55, 2013년 10.56, 2014년 6.94 mg/L로 2013년에는 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하지 못하는 것으로 나타났으나 2012년과 2014년에는 기준을 만족하는 것으로 나타났다. SS는 2012년 71, 2013년 77, 2014년 3018 mg/L로 2012년과 2013년에는 하천 농업용수 수질 기준인 100 mg/L 이하를 만족하는 것으로 나타났으나 2014년에는 기준을 초과하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 5.02, 2013년 12.20, 2014년 6.55 mg/L로 나타났으며, 총대장균수는 2012년 11,441, 2013년 2,448, 2014년 4,870 MPN으로 나타났다. 표 3.4.24 ~ 3.4.26은 2012년 ~ 2014년 병점 간접재이용지구의 유입수 수질 모니터링 결과를

샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.21 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
BJID	7.31	0.62	8.21	6.42	1.46	6.55	71	5.02	0.882	11,441

* BJID: 병점재이용지구 유입수

표 3.4.22 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
BJID	7.26	0.75	6.25	6.98	3.42	10.56	77	12.20	1.12	2448

* BJID: 병점재이용지구 유입수

표 3.4.23 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
		dS/m	mg/L							
BJID	7.08	0.68	4.83	8.04	3.66	6.94	3018	6.55	1.03	4870

* BJID: 병점재이용지구 유입수

표 3.4.24 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2012년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
BJID	2012.05.26	6.82	0.84	13.74	17.61	2.85	6.16	21	9.00	0.652	1
	2012.05.29	6.83	0.70	14.55	15.46	2.23	7.44	68	6.53	1.112	82
	2012.06.07	6.62	0.95	5.81	7.27	1.41	11.16	79	7.32	0.751	1,300
	2012.06.15	6.89	0.95	5.38	7.86	1.25	12.10	367	7.30	1.617	2,420
	2012.06.21	6.93	0.89	6.20	5.36	1.81	6.66	15	5.30	1.153	120,980
	2012.07.23	7.89	0.59	7.46	1.87	0.66	5.32	58	0.00	0.355	4,960
	2012.07.25	7.85	0.52	6.04	2.95	0.42	4.04	3	7.71	0.407	2,230
	2012.08.01	7.70	0.65	6.85	3.39	0.11	2.78	19	6.78	0.891	261
	2012.08.10	7.56	0.66	7.40	3.96	1.38	3.14	38	8.93	1.448	961
	2012.08.21	6.85	0.24	6.03	4.19	2.44	10.16	142	3.10	1.934	12,010
	2012.08.23	6.69	0.15	6.00	1.45	1.36	5.96	82	2.26	0.814	3,500
	2012.08.31	8.29	0.42	11.46	4.91	2.04	6.52	21	0.42	0.191	19
2012.09.07	8.16	0.48	9.80	7.24	0.98	3.76	6	0.63	0.145	15	

* BJID: 병점재이용지구 유입수

표 3.4.25 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2013년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
BJID	2013.06.03	8.21	0.92	9.36	6.28	2.83	8.16	2	17.72	0.74	921
	2013.06.10	7.83	0.82	3.40	10.42	10.1	29.24	274	17.68	2.28	6500
	2013.06.17	6.52	0.63	6.86	9.46	1.68	7.56	52	11.08	1.82	2400
	2013.06.25	6.73	0.76	3.72	7.19	2.54	8.64	42	7.17	0.94	2400
	2013.08.14	7.03	0.51	6.62	4.15	1.26	5.68	78	10.38	0.76	20
	2013.09.05	7.24	0.86	7.57	4.41	2.15	4.10	14	9.20	0.17	ND

* BJID: 병점재이용지구 유입수

표 3.4.26 병점재이용지구 유입수 수질 모니터링 결과 (2014년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJID	2014.06.06	7.23	0.69	0.55	7.34	3.70	6.58	37	4.36	0.44	200
	2014.06.17	7.20	0.66	5.85	7.63	2.99	5.78	6	5.49	0.86	410
	2014.07.02	6.82	0.69	8.08	9.14	4.27	8.46	9010	9.81	1.78	14000

* BJID: 병점재이용지구 유입수

라. 미처리지구

호련지구, 수화지구, 장전지구를 대상으로 미처리지구의 유입수 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 논 포장으로 유입되는 수로에서 실시하였다.



(a) 호련지구



(b) 수화지구



(c) 장전지구

그림 3.4.30 미처리지구 지점별 유입수 수질 모니터링

표 3.4.27 ~ 3.4.29에 2012년 ~ 2014년 미처리지구 (호련지구, 수화지구, 장전지구)의 유입수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 유입수의 수질 분석 결과 pH는 2012년에 호련지구 7.41, 수화지구 7.38, 장전지구 7.52로 나타났으며, 2013년은 각각 7.27, 7.32, 7.44, 2014년은 7.32, 7.11, 7.26으로 매년 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년에 호련지구 0.17 dS/m, 수화지구 0.32 dS/m, 장전지구 0.25 dS/m로 나타났으며, 2013년은 각각 0.15, 0.27, 0.26 dS/m로, 2014년은 0.21, 0.39, 0.37 dS/m로 매년 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 낮아 양호한 것으로 나타났다. COD는 2012년에 호련지구 8.14 mg/L, 수화지구

4.95 mg/L, 장전지구 3.38 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 2.45, 11.29, 10.77 mg/L로, 2014년은 6.02, 72.65, 22.85 mg/L로 나타나 2012년 호련지구, 2013 ~ 2014년 수화지구와 장전지구에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하지 않는 것으로 나타났다. SS는 2012년에 호련지구 494 mg/L, 수화지구 67 mg/L, 장전지구 56 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 25, 311, 188 mg/L로, 2014년은 26, 4155, 994 mg/L로 나타나 2012년 호련지구, 2013 ~ 2014년 수화지구와 장전지구에서 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하지 않는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 호련지구 2.02 mg/L, 수화지구 5.71 mg/L, 장전지구 4.27 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 1.33, 4.88, 8.22 mg/L로, 2014년은 1.98, 4.31, 9.72 mg/L로 나타났다. 총대장균수는 2012년 호련지구 12299 MPN, 수화지구 26460 MPN, 장전지구 988 MPN으로 나타났으며, 2013년 각각 72, 2533, 154 MPN으로, 2014년 7768, 4713, 13988 MPN으로 나타났다. 표 3.4.30 ~ 3.4.32은 미처리하수의 유입수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.27 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2012년 평균)

지점	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
		dS/m	mg/L									MPN
호련지구	7.41	0.17	7.71	2.52	1.16	8.14	494	2.04	0.061	2.02	9.75	12,299
수화지구	7.38	0.32	8.12	3.35	1.27	4.95	67	5.71	0.134	5.59	34.55	26,460
장전지구	7.52	0.25	8.69	3.18	0.87	3.38	56	4.27	0.129	3.67	28.59	988

표 3.4.28 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2013년 평균)

지점	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
		dS/m	mg/L									MPN
호련지구	7.27	0.15	7.45	1.27	1.28	2.45	25	1.33	0.04	1.29	8.19	72
수화지구	7.32	0.27	7.09	1.95	2.86	11.29	311	4.88	0.42	4.58	24.23	2533
장전지구	7.44	0.26	7.38	4.94	2.89	10.77	188	8.22	0.33	6.21	31.33	154

표 3.4.29 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2014년 평균)

지점	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
		dS/m	mg/L									MPN
호련지구	7.32	0.21	7.84	7.67	3.13	6.02	36	1.98	0.17	0.92	16.63	7768
수화지구	7.11	0.39	5.09	6.37	35.85	72.65	4155	4.31	2.22	7.47	34.28	4713
장전지구	7.26	0.37	4.65	13.23	10.84	22.85	994	9.72	2.03	1.78	34.26	13988

표 3.4.30 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2012년)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									MPN
호련지구	2012.05.03	7.31	0.15	8.24	9.78	0.50	2.48	30	1.67	0.060	1.67	9.01	3
	2012.07.04	7.20	0.21	7.13	0.81	0.26	1.72	17	1.36	0.031	1.35	12.09	72,700
	2012.07.23	7.65	0.14	6.00	2.07	1.89	37.52	2630	2.72	0.082	2.69	5.98	630
	2012.08.01	7.47	0.16	8.44	1.23	0.98	1.08	25	2.05	0.049	2.03	8.61	365
	2012.08.10	7.55	0.19	8.20	0.60	0.87	1.38	21	2.05	0.010	2.03	13.46	26
	2012.08.21	7.27	0.14	8.26	0.64	2.48	4.68	239	2.37	0.137	2.36	9.35	72
수화지구	2012.05.26	6.40	0.31	11.52	15.52	6.71	20.48	134	2.28	0.425	2.26	183.62	8
	2012.06.07	7.38	0.36	6.55	7.60	1.96	8.18	77	0.28	0.279	0.27	21.80	8,370
	2012.06.15	7.34	0.45	6.60	12.40	2.63	10.48	34	0.54	0.264	0.54	43.19	241,960
	2012.07.04	6.93	0.37	7.41	1.63	0.15	2.46	131	6.52	0.038	6.51	41.32	6,770
	2012.07.12	7.79	0.37	7.72	0.27	0.82	2.38	4	6.61	0.051	6.59	29.80	57,940
	2012.07.23	7.46	0.31	7.42	1.20	0.89	2.24	46	10.62	0.037	10.60	19.45	200
	2012.07.25	7.91	0.30	7.36	0.45	0.27	1.74	25	4.40	0.032	4.39	24.33	520
	2012.08.01	7.64	0.28	7.69	0.88	0.27	0.90	67	4.52	0.088	4.50	21.33	308
	2012.08.10	7.43	0.27	8.26	0.91	0.93	1.58	28	5.84	0.008	5.82	25.27	2,310
	2012.08.21	7.09	0.36	7.01	0.65	0.38	7.60	241	12.05	0.227	12.02	21.35	1,986
	2012.08.23	7.03	0.27	7.42	0.61	0.38	4.66	52	8.70	0.153	8.68	12.48	980
	2012.08.31	7.66	0.28	9.95	2.56	0.71	1.64	11	5.89	0.091	5.17	14.22	3
	2012.09.07	7.54	0.25	9.72	2.05	0.77	2.38	48	6.61	0.100	5.79	15.13	48,840
2012.09.20	7.73	0.25	9.13	0.14	0.97	2.54	46	5.14	0.077	5.14	10.39	244	
장전지구	2012.05.26	6.95	0.35	14.60	14.67	3.09	7.44	41	0.27	0.135	0.27	87.08	620
	2012.06.07	7.19	0.18	7.77	2.25	0.81	0.94	8	0.82	0.024	0.81	18.31	0
	2012.06.21	7.02	0.49	7.37	7.39	1.30	7.30	100	1.25	0.248	1.24	58.34	108
	2012.07.12	7.66	0.15	7.02	2.24	0.28	3.86	139	0.40	0.343	0.38	9.42	6,310
	2012.07.23	8.18	0.14	7.38	2.15	0.07	2.16	8	2.68	0.036	2.64	9.55	200
	2012.07.25	7.97	0.12	6.30	2.07	0.46	4.44	178	1.94	0.076	1.92	8.87	410
	2012.08.21	7.27	0.12	7.57	1.54	0.23	1.52	10	2.81	0.042	2.80	9.45	57
	2012.08.23	7.35	0.45	7.85	1.41	1.28	5.36	83	11.61	0.321	11.59	39.01	1,733
	2012.08.31	7.78	0.14	10.08	0.73	0.60	1.28	18	2.05	0.030	1.61	8.24	7
	2012.09.07	7.51	0.46	10.38	0.04	0.74	1.18	14	16.42	0.118	15.66	57.85	1,414
	2012.09.20	7.83	0.11	9.23	0.51	0.67	1.66	22	6.67	0.054	1.40	8.34	6

표 3.4.31 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2013년)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									MPN
호련지구	2013.08.14	7.26	0.14	8.28	1.21	1.10	3.02	44	1.65	0.04	1.57	7.69	84
	2013.08.28	7.20	0.16	7.05	1.42	1.49	2.38	8	1.14	0.05	1.07	8.55	ND
	2013.09.05	7.34	0.15	7.01	1.17	1.25	1.96	22	1.22	0.04	1.22	8.34	60
수화지구	2013.06.10	7.78	0.26	7.57	1.47	2.59	8.76	222	5.79	0.27	5.40	29.11	2800
	2013.08.14	7.20	0.34	6.90	3.28	2.52	12.64	236	4.20	0.30	3.85	22.36	2400
	2013.09.05	6.97	0.22	6.81	1.10	3.46	12.46	474	4.65	0.70	4.48	21.21	2400
장전지구	2013.06.10	8.21	0.27	8.04	11.74	6.64	25.76	536	3.57	0.82	1.20	32.85	1
	2013.08.14	7.04	0.36	6.79	1.38	1.26	4.06	8	16.96	0.14	13.84	46.03	340
	2013.08.28	7.06	0.16	7.30	1.70	0.75	2.50	20	4.14	0.04	3.60	15.09	120

표 3.4.32 미처리하수 관개지구 유입수 수질 분석 결과 (2014년)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									MPN
호련지구	2014.06.06	7.28	0.19	5.42	4.74	1.28	2.38	8	1.71	0.03	1.29	13.48	28000
	2014.06.17	7.68	0.24	5.33	20.32	8.05	15.92	46	2.10	0.42	0.11	22.33	58
	2014.07.02	7.12	0.26	9.91	3.27	1.28	2.40	23	1.21	0.06	0.14	22.89	2800
	2014.08.12	7.18	0.15	10.71	2.34	1.91	3.38	68	2.89	0.15	2.13	7.82	214
수화지구	2014.06.17	7.38	0.38	4.03	10.69	6.93	12.88	70	1.43	0.29	ND	34.61	370
	2014.07.02	6.97	0.43	ND	5.13	84.56	165.8	11104	2.46	4.35	ND	41.27	6900
	2014.08.12	6.99	0.36	6.16	3.28	16.07	39.28	1291	9.06	2.00	7.47	26.97	6870
장전지구	2014.06.06	7.44	0.33	2.99	12.70	5.88	10.78	25	6.72	0.21	0.39	32.90	39000
	2014.06.17	7.10	0.33	2.66	18.94	9.34	18.52	514	5.52	4.65	0.10	33.08	2300
	2014.07.02	7.42	0.66	4.04	16.72	19.73	37.96	2233	26.09	2.01	4.84	62.84	11000
	2014.08.12	7.09	0.15	8.93	4.55	8.39	24.12	1203	0.57	1.25	ND	8.22	3650

마. 시험지구간 비교 분석

표 3.4.33 ~ 3.4.35 및 그림 3.4.31 ~ 3.4.40은 2012 ~ 2014년의 시험지구별 논 담수 수질특성을 그래프로 비교하여 나타낸 것이다. 비교 항목은 pH, EC, DO, TOC, BOD, COD, SS, T-N, T-P, 총대장균수 등 10가지이며 월별 수질 분석 결과를 평균하여 비교하였다.

pH는 시험지구간 큰 차이를 보이지 않았으며, 2012년은 5월에서 9월로 갈수록 점진적으로 값이 증가하는 경향을, 2013, 2014년은 점진적으로 값이 감소하는 경향을 나타내었다. EC는 매년 오산 간접재이용지구에서 전반적으로 다른 지구에 비해 큰 값을 나타내었으며, 용인청정지구에서 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. TOC는 영농초기에 다른 시기에 비해 높은 값을 나타내었고, 2012년 9월 병점 재이용지구와 2014년 6월 미처리지구에서 비교적 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. SS는 매년 용인청정지구에서 가장 낮은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 2012년 7월과 2013년 6월, 9월 미처리지구에서, 2014년 7월 병점 재이용지구와 미처리지구에서 다른 시기에 비해 높은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 편차 또한 크게 나타났다. T-N은 매년 용인 청정지구에서 가장 낮은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 시기별, 지구별로 특별한 경향성은 나타나지 않았다. T-P는 매년 병점 재이용지구에서 전반적으로 높은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 2012년 6월 오산 재이용지구와 2014년 6월, 7월 미처리지구에서 비교적 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

표 3.4.33 시험지구간 유입수 수질 모니터링 결과 비교 (2012년)

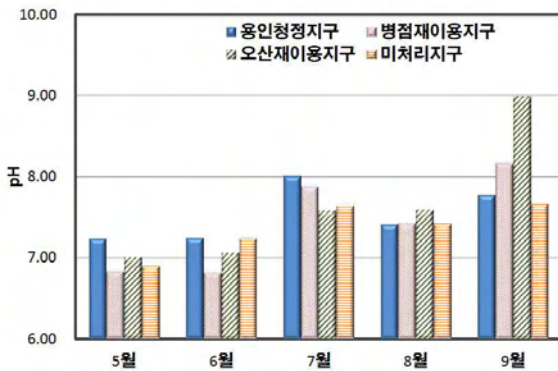
지점명	Month	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
용인 청정 지구	5월	7.23	0.21	14.58	13.75	0.95	1.58	8.00	0.42	0.04	1
	6월	7.24	0.26	7.11	3.69	0.64	4.65	46.00	0.78	0.03	60,508
	7월	8.00	0.14	7.63	1.72	0.71	1.86	6.00	1.31	0.03	1,600
	8월	7.40	0.12	8.45	1.12	0.93	2.17	13.80	1.13	0.06	720
	9월	7.77	0.12	9.88	1.16	0.85	1.72	6.00	0.74	0.06	139
병점 재이용 지구	5월	6.83	0.77	14.15	16.54	2.54	6.80	44.50	7.77	0.88	41
	6월	6.81	0.93	5.80	6.83	1.49	9.97	153.67	6.64	1.17	41,566
	7월	7.87	0.55	6.75	2.41	0.54	4.68	30.50	7.71	0.38	3,595
	8월	7.42	0.43	7.55	3.58	1.47	5.71	60.40	4.30	1.06	3,350
	9월	8.16	0.48	9.80	7.24	0.98	3.76	6.00	0.63	0.15	15
오산 재이용 지구	5월	7.01	1.66	12.12	12.45	3.56	3.65	70.00	5.93	0.33	63
	6월	7.06	1.67	19.33	7.63	4.43	10.96	123.50	7.29	5.06	60,609
	7월	7.58	0.57	7.32	4.58	0.47	5.21	30.00	0.51	0.16	6,783
	8월	7.59	0.60	8.51	1.43	0.97	3.80	25.60	1.03	0.22	327
	9월	8.98	0.38	9.28	2.56	1.30	7.40	60.00	4.14	0.21	1,733
미처리 지구	5월	6.89	0.27	11.45	13.32	3.43	10.13	68.33	1.41	0.21	211
	6월	7.23	0.37	7.07	7.41	1.67	6.73	54.75	0.72	0.20	62,610
	7월	7.64	0.24	7.08	1.43	0.56	6.50	353.11	4.14	0.08	16,187
	8월	7.41	0.24	8.25	1.07	0.83	2.88	72.27	5.45	0.10	713
	9월	7.65	0.27	9.61	0.69	0.79	1.94	32.50	8.71	0.09	12,626

표 3.4.34 시험지구간 유입수 수질 모니터링 결과 비교 (2013년)

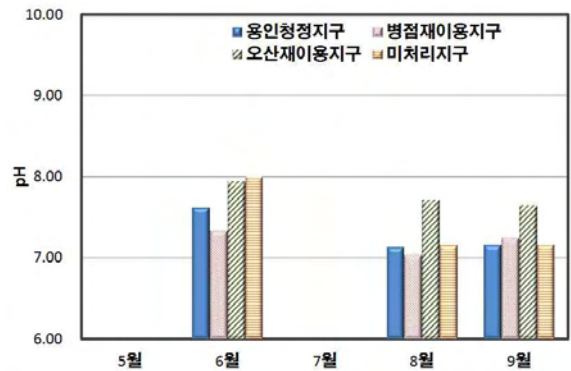
지점명	Month	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
용인 청정 지구	5월										
	6월	7.6	0.2	9.7	3.8	1.2	3.7	17.5	1.4	0.0	120
	7월										
	8월	7.1	0.1	7.2	2.1	1.1	2.9	7.0	1.7	0.1	157
	9월	7.2	0.2	7.9	2.3	1.6	2.2	10.0	1.2	0.2	12
병점 재이용 지구	5월										
	6월	7.3	0.8	5.8	8.3	4.3	13.4	92.5	13.4	1.4	3055
	7월										
	8월	7.0	0.5	6.6	4.2	1.3	5.7	78.0	10.4	0.8	20
	9월	7.2	0.9	7.6	4.4	2.1	4.1	14.0	9.2	0.2	ND
오산 재이용 지구	5월										
	6월	7.9	1.3	7.9	7.0	2.8	7.7	31.5	4.2	0.5	2047
	7월										
	8월	7.7	0.9	7.3	5.8	2.0	8.3	32.7	2.8	0.1	49
	9월	7.6	0.9	7.6	7.0	2.8	6.9	36.0	5.1	0.1	200
미처리 지구	5월										
	6월	8.0	0.3	7.8	6.6	4.6	17.3	379.0	4.7	0.5	1400
	7월										
	8월	7.2	0.2	7.3	1.8	1.4	4.9	63.2	5.6	0.1	736
	9월	7.2	0.2	6.9	1.1	2.4	7.2	248.0	2.9	0.4	1230

표 3.4.35 시험지구간 유입수 수질 모니터링 결과 비교 (2014년)

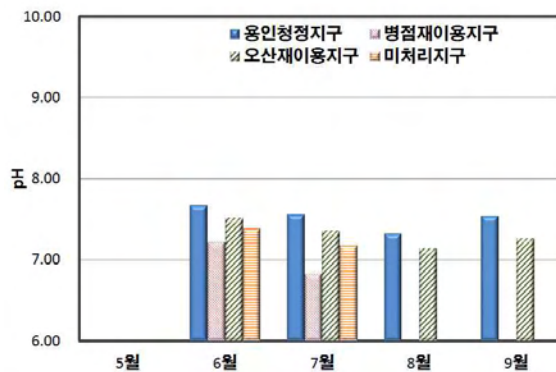
지점명	Month	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
용인 청정 지구	5월										
	6월	7.67	0.25	6.62	6.69	1.79	3.35	46	0.93	0.04	1035
	7월	7.55	0.25	8.98	5.06	1.88	3.66	8	0.79	0.04	1100
	8월	7.32	0.16	10.40	3.00	1.53	2.53	13	1.29	0.13	267
	9월	7.54	0.20	10.58	4.34	1.72	3.06	17	0.98	0.09	10510
병점 재이용 지구	5월										
	6월	7.22	0.68	3.20	7.48	3.35	6.18	22	4.92	0.65	305
	7월	6.82	0.69	8.08	9.14	4.27	8.46	9010	9.81	1.78	14000
	8월										
	9월										
오산 재이용 지구	5월										
	6월	7.51	1.25	4.83	8.86	3.68	7.18	32	3.97	0.31	158
	7월	7.35	1.43	7.56	8.99	3.80	7.34	19	9.10	0.45	640
	8월	7.13	0.21	10.46	4.47	3.30	6.08	81	0.63	0.50	261
	9월	7.25	0.67	6.34	10.11	5.77	11.00	153	4.63	0.68	30400
미처리 지구	5월										
	6월	7.38	0.29	4.09	13.48	6.30	12.10	133	3.49	1.12	13946
	7월	7.17	0.45	6.97	8.37	35.19	68.72	4453	9.92	2.14	6900
	8월										
	9월										



(a) 2012년

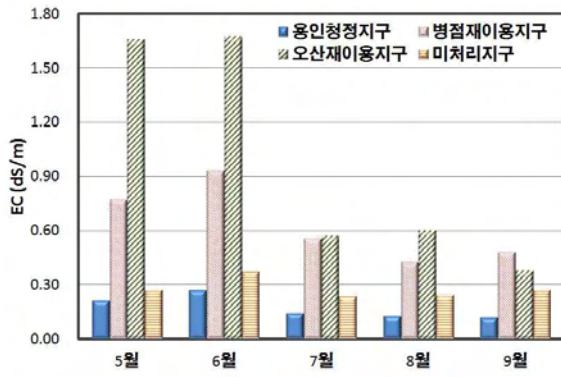


(b) 2013년

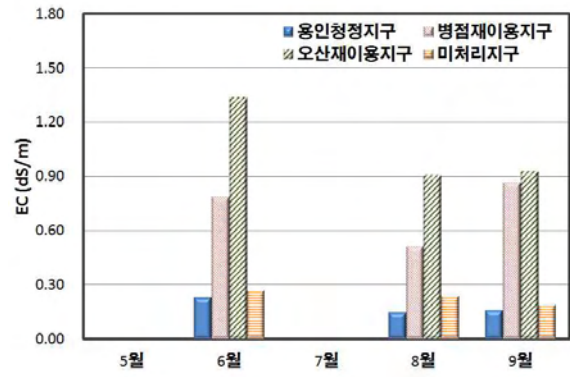


(c) 2014년

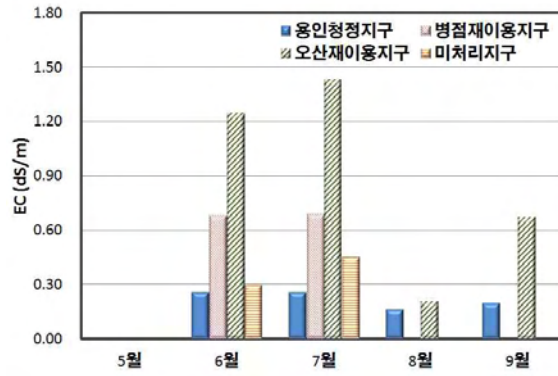
그림 3.4.31 시험지구간 유입수 pH 분석 결과 비교



(a) 2012년

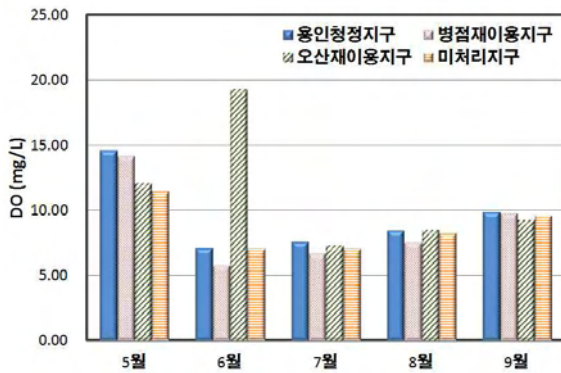


(b) 2013년

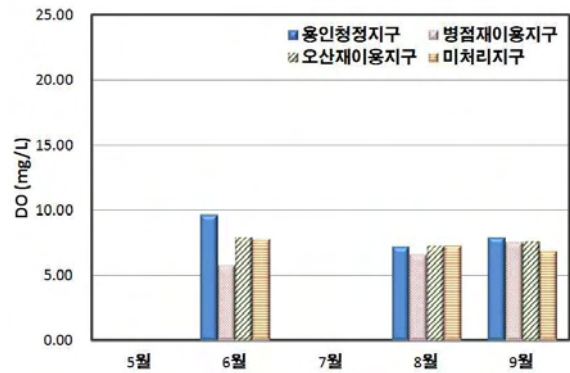


(c) 2014년

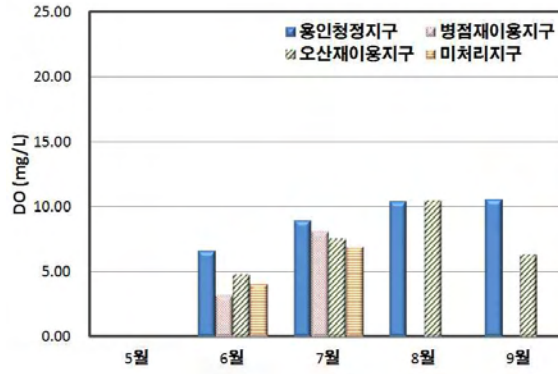
그림 3.4.32 시험지구간 유입수 EC 분석 결과 비교



(a) 2012년

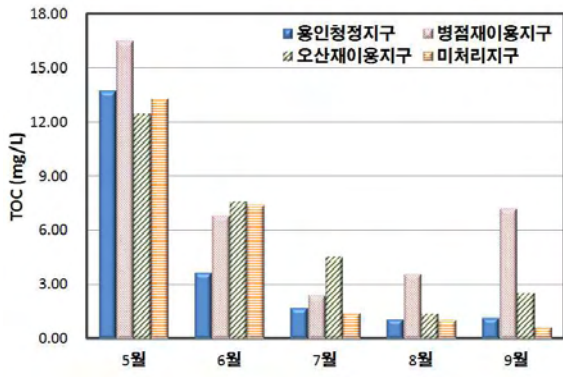


(b) 2013년

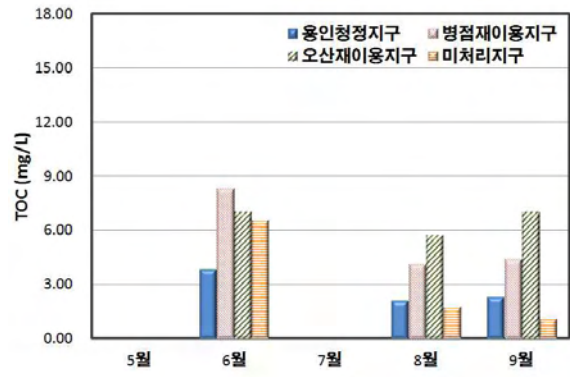


(c) 2014년

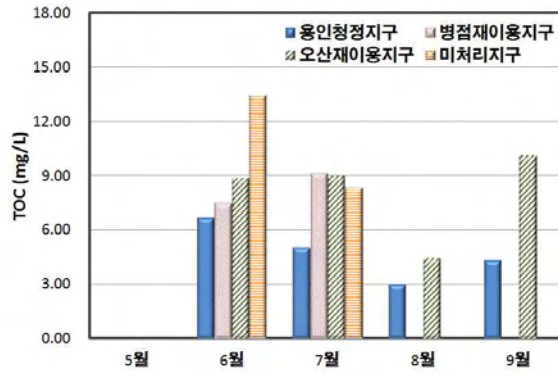
그림 3.4.33 시험지구간 유입수 DO 분석 결과 비교



(a) 2012년

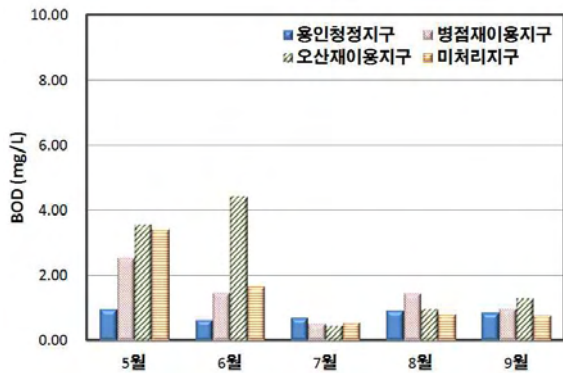


(b) 2013년

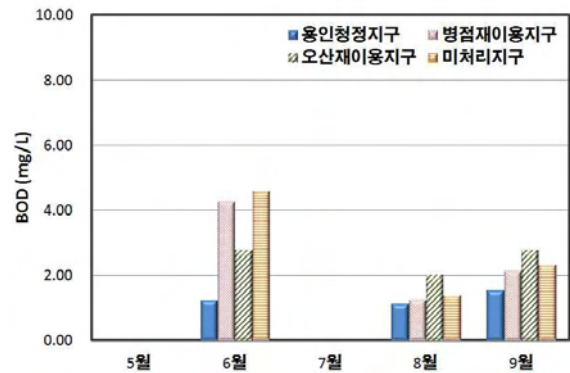


(c) 2014년

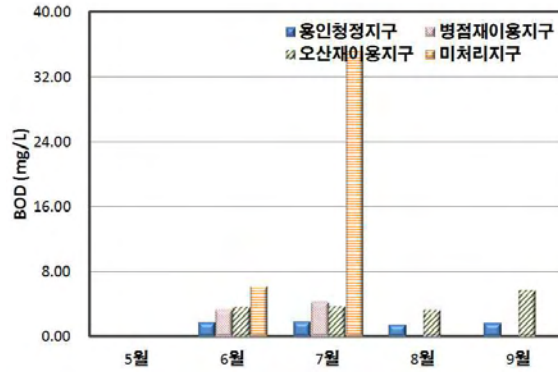
그림 3.4.34 시험지구간 유입수 TOC 분석 결과 비교



(a) 2012년

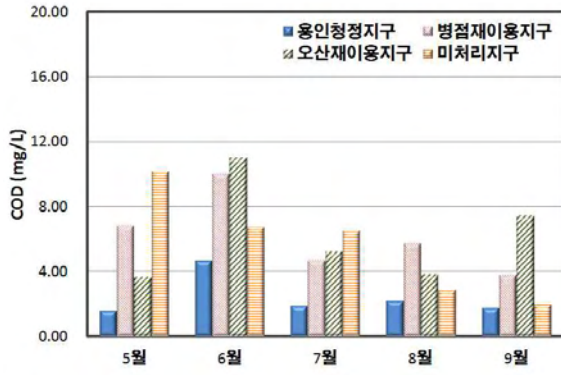


(b) 2013년

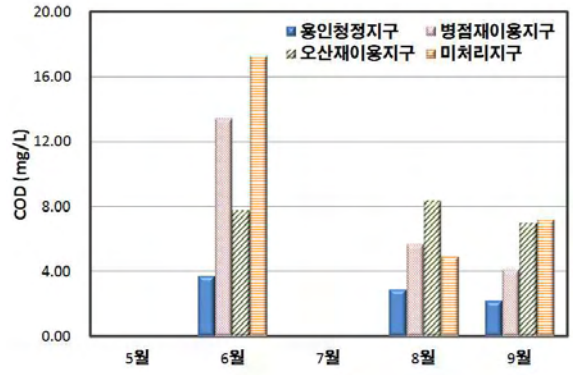


(c) 2014년

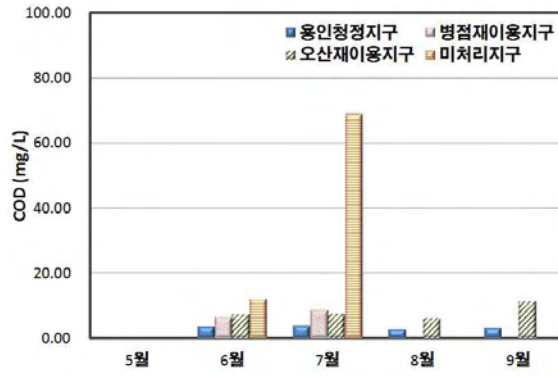
그림 3.4.35 시험지구간 유입수 BOD 분석 결과 비교



(a) 2012년

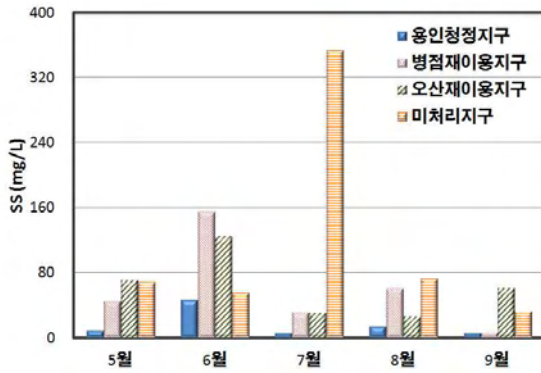


(b) 2013년

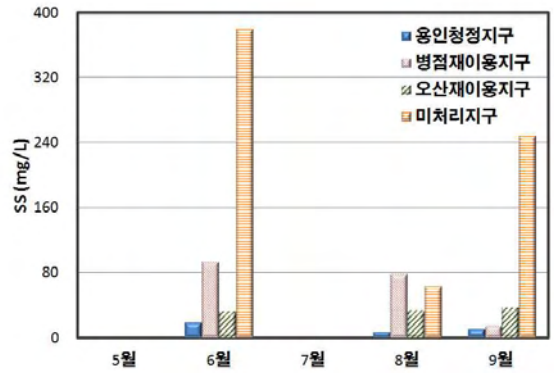


(c) 2014년

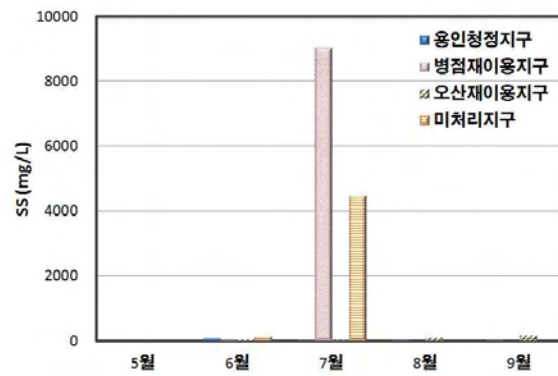
그림 3.4.36 시험지구간 유입수 COD 분석 결과 비교



(a) 2012년

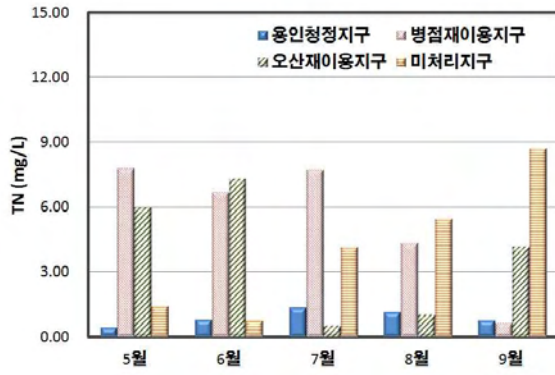


(b) 2013년

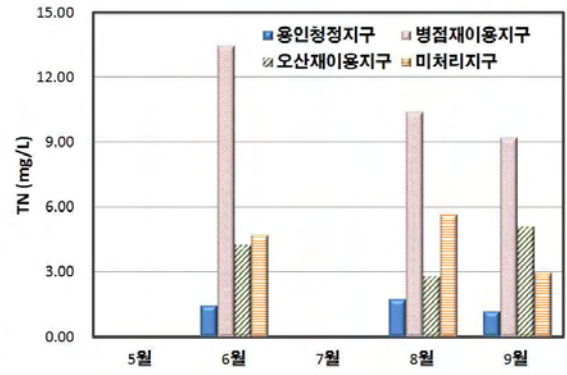


(c) 2014년

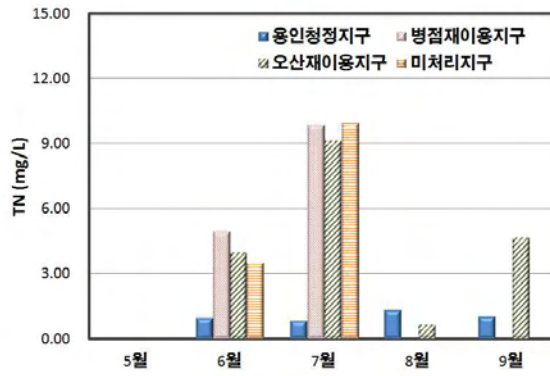
그림 3.4.37 시험지구간 유입수 SS 분석 결과 비교



(a) 2012년

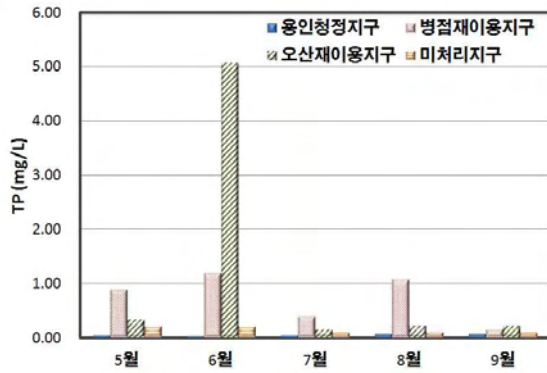


(b) 2013년

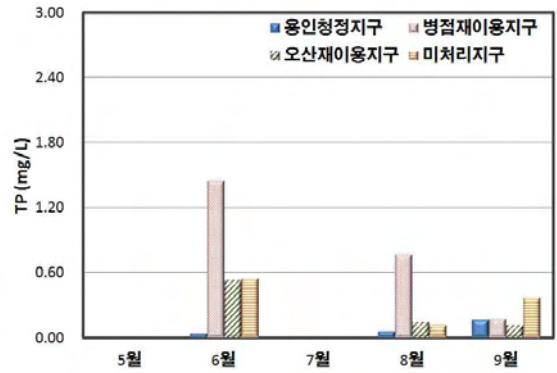


(c) 2014년

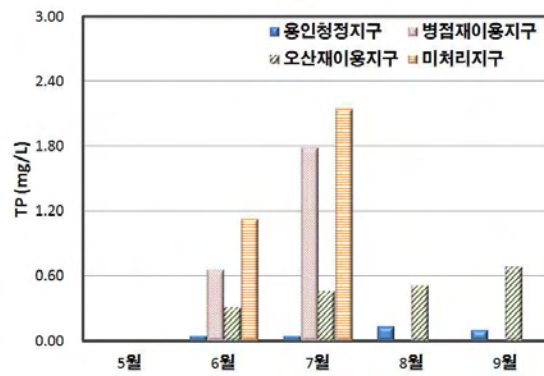
그림 3.4.38 시험지구간 유입수 T-N 분석 결과 비교



(a) 2012년



(b) 2013년



(c) 2014년

그림 3.4.39 시험지구간 유입수 T-P 분석 결과 비교

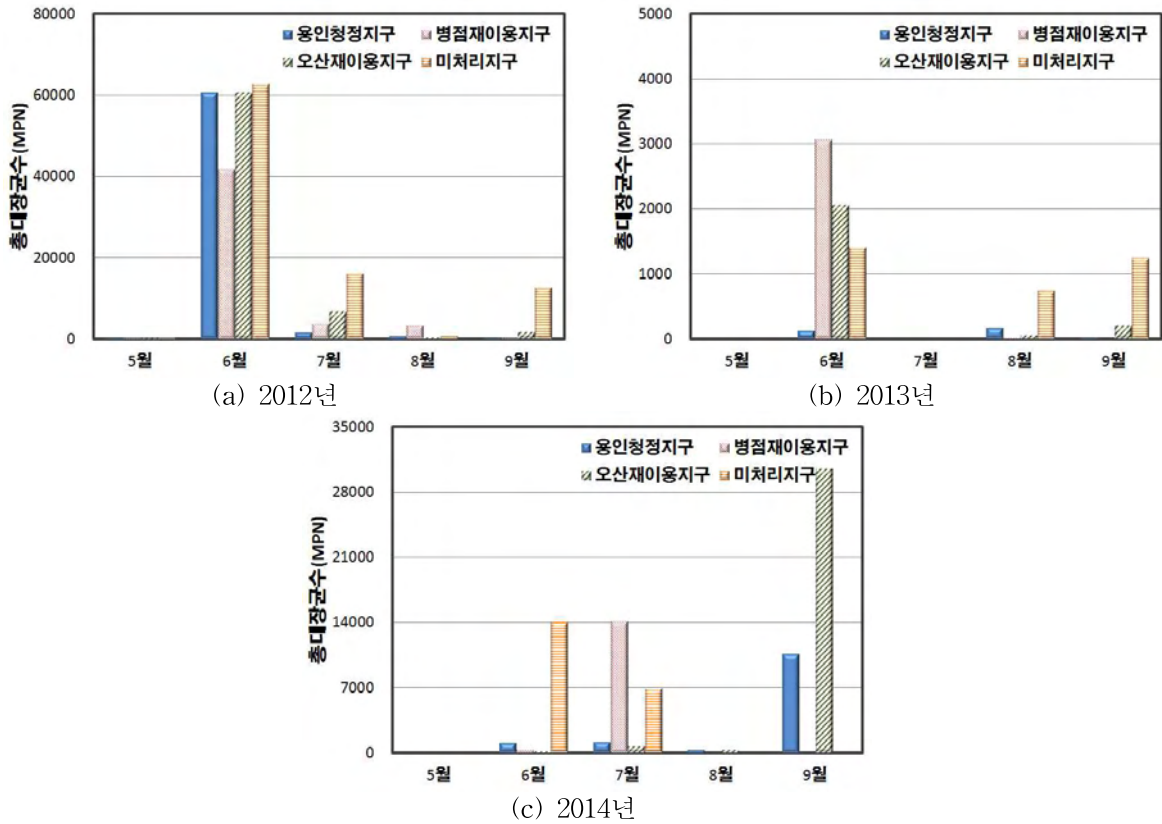


그림 3.4.40 시험지구간 유입수 총대장균수 분석 결과 비교

2.3. 논 담수

가. 용인 청정지구

용인 청정지구의 시험포장 5곳을 대상으로 논 담수 수질 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 각 포장의 일정 위치에서 실시하였으며, 그림 3.4.41은 샘플링 모습을 나타내고 있다.

표 3.4.36 ~ 3.4.38에 용인 청정지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 용인 청정지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년 6.77 ~ 7.34, 2013년 7.13 ~ 7.39, 2014년 7.08 ~ 7.39로 나타나 매년 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년 0.224 ~ 0.36 dS/m, 2013년 0.16 ~ 0.26 dS/m, 2014년 0.20 ~ 0.30 dS/m로 나타나 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 낮아 양호한 것으로 나타났다. COD는 2012년 6.87 ~ 20.99 mg/L, 2013년 7.01 ~ 41.60 mg/L, 2014년 5.14 ~ 8.01 mg/L로 나타나 2012 ~ 2013년의 YIP#02, 2014년의 YIP#02, 03을 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. SS는 2012년 175 ~ 370 mg/L, 2013년 43 ~ 1143 mg/L, 2014년 37 ~ 585 mg/L로 2013년 YIP#02, 2014년 YIP#03, 05를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 0.95 ~ 9.86 mg/L, 2013년 1.34 ~ 1.58 mg/L, 2014년 1.13 ~ 5.75로 나타났으며, 총대장균수는 2012년 2449 ~ 33867 MPN, 2013년 363 ~ 3210 MPN, 2014년 2178 ~ 12433 MPN으로 나타났다. TOC, BOD, COD, SS, T-N, T-P 등

대부분의 항목들이 매년 YIP#05에서 전반적으로 높게 측정되었다. 표 3.4.39 ~ 3.4.41은 용인 청정지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.



(a) YIP#01



(b) YIP#02



(c) YIP#03



(d) YIP#04



(e) YIP#05

그림 3.4.41 용인 청정지구 지점별 논 (YIP) 담수 수질 모니터링

표 3.4.36 용인 청정지구 논 담수 평균 수질 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
YIP#01	7.34	0.36	8.35	6.60	1.98	9.97	271	0.95	0.376	26,004
YIP#02	7.19	0.33	8.16	5.71	1.27	6.87	175	1.27	0.335	2,449
YIP#03	7.13	0.22	8.22	4.39	1.68	8.15	300	1.66	0.653	20,102
YIP#04	7.18	0.24	8.35	6.37	2.09	9.81	272	3.27	0.527	33,867
YIP#05	6.77	0.34	8.49	12.85	3.04	20.99	370	9.86	0.900	32,434

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.37 용인 청정지구 논 담수 평균 수질 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
YIP#01	7.39	0.22	7.44	5.11	2.91	9.59	197	1.34	0.18	363
YIP#02	7.30	0.16	7.99	4.87	3.30	7.01	43	1.49	0.15	872
YIP#03	7.13	0.18	7.69	4.50	2.26	11.45	372	1.51	0.16	496
YIP#04	7.15	0.18	7.81	4.99	2.85	10.05	252	1.58	0.38	746
YIP#05	7.15	0.26	7.00	12.51	6.37	41.60	1143	1.41	1.01	3210

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.38 용인 청정지구 논 담수 평균 수질 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
YIP#01	7.22	0.23	8.01	7.78	5.23	12.97	585	1.13	0.13	2178
YIP#02	7.08	0.20	7.91	7.01	4.09	7.85	100	1.53	0.22	4310
YIP#03	7.39	0.24	7.65	8.57	2.38	4.54	39	1.21	0.10	12433
YIP#04	7.19	0.22	7.70	6.38	4.48	8.49	134	1.39	0.28	5677
YIP#05	7.20	0.30	5.14	21.59	6.74	13.03	37	5.75	0.24	7667

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.39 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
YIP#01	2012.05.26	6.99	0.34	14.66	21.48	2.60	12.30	23	0.85	0.182	49
	2012.05.29	6.76	0.23	14.85	13.77	2.55	7.78	139	1.40	0.260	100
	2012.06.07	7.49	0.43	5.88	16.53	5.50	14.72	47	1.25	0.151	0
	2012.06.15	7.36	0.37	6.56	15.28	1.92	12.58	34	0.50	0.145	17,250
	2012.06.21	6.89	0.23	6.12	4.49	2.03	8.00	409	0.61	0.153	64
	2012.06.27	6.96	0.31	3.53	6.68	2.48	8.48	305	1.56	1.779	23,820
	2012.07.23	7.42	0.15	6.34	2.29	2.23	23.60	1188	0.23	0.911	14,390
	2012.08.01	7.71	1.43	8.07	2.66	0.52	2.42	7	1.13	0.030	225
	2012.08.10	7.64	0.26	8.34	4.98	1.25	4.22	20	1.90	0.139	10
	2012.08.21	7.10	0.89	7.05	1.14	1.40	8.34	233	1.05	0.169	2,880
	2012.08.23	6.84	0.10	7.62	0.63	1.22	3.92	84	0.89	0.053	29,090
	2012.08.31	7.86	0.10	9.21	1.05	0.67	12.66	81	0.45	0.495	275,500
YIP#02	2012.09.07	8.20	0.09	9.34	0.79	1.18	7.44	303	0.42	0.202	365
	2012.09.12	7.48	0.12	9.38	0.68	2.16	13.12	922	1.01	0.600	310
	2012.05.26	5.30	0.38	13.13	29.94	2.58	15.32	13	5.49	0.191	3
	2012.05.29	6.75	0.22	13.50	9.11	1.05	5.96	67	2.20	0.355	59
	2012.06.07	6.99	0.29	6.38	11.05	3.09	9.00	28	0.00	0.150	0
	2012.06.15	7.10	0.28	6.26	12.85	2.09	12.14	28	0.50	0.206	102
	2012.06.21	6.91	0.21	6.55	6.44	2.00	8.42	40	0.00	0.130	205
	2012.06.27	7.01	1.84	5.96	7.51	0.72	7.42	121	0.32	0.385	44
	2012.07.04	6.84	0.85	7.29	2.42	0.04	2.64	305	0.13	0.201	9,100
	2012.07.12	7.55	0.06	7.54	1.82	0.32	3.50	486	0.45	1.000	13,540
	2012.07.23	7.26	0.04	6.68	1.41	1.07	12.06	640	0.00	1.215	3,790
	2012.07.25	8.02	0.19	6.90	2.78	1.06	5.08	129	5.67	0.080	9,580
2012.08.01	7.68	0.17	7.58	1.28	0.35	5.84	509	2.09	0.094	326	
2012.08.10	7.87	0.17	7.72	3.20	1.09	3.86	176	1.40	0.291	488	
2012.08.21	7.13	0.59	7.36	2.39	1.41	8.00	193	0.85	0.372	345	
2012.08.23	6.80	0.09	7.65	0.16	1.56	4.18	50	1.35	0.147	2,420	
2012.08.31	7.65	0.06	9.36	1.74	1.29	5.08	11	0.30	0.260	16	
2012.09.07	8.33	0.07	8.98	1.50	1.01	5.32	100	0.35	0.315	1,553	
2012.09.20	6.96	0.06	9.84	1.40	0.81	3.02	86	0.47	0.302	69	

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.39 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년) (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
YIP#03	2012.05.26	6.31	0.22	11.25	20.58	2.85	10.64	90	2.69	0.409	36
	2012.05.29	6.33	0.26	12.38	15.97	3.09	21.08	695	1.68	2.066	42
	2012.06.07	7.03	0.24	6.91	2.74	0.21	1.72	93	0.92	0.262	2
	2012.06.15	6.86	0.19	7.32	4.56	0.89	7.66	61	1.58	0.337	200
	2012.06.21	6.91	0.20	7.10	5.59	1.79	8.18	21	0.65	0.241	241,960
	2012.07.23	7.19	0.07	4.83	2.40	2.01	5.40	324	0.41	1.811	5,560
	2012.07.25	8.06	0.15	3.96	1.13	2.91	15.72	1175	5.62	0.612	1,440
	2012.08.01	7.52	0.15	7.93	2.24	0.07	1.76	34	1.44	0.076	261
	2012.08.10	7.86	0.18	8.82	1.31	0.72	1.32	46	1.95	0.163	16
	2012.08.21	7.10	1.00	8.28	1.10	2.03	5.70	142	0.83	0.380	2,420
	2012.08.23	6.77	0.13	7.22	0.01	1.38	3.50	104	1.37	0.140	124
	2012.08.31	7.38	0.10	9.52	0.90	1.13	15.78	6	1.38	1.239	258
	2012.09.07	7.89	0.10	9.66	1.51	1.77	6.30	896	1.51	0.915	27,550
2012.09.20	6.54	0.13	9.95	1.36	2.64	9.38	517	1.22	0.494	1,553	
YIP#04	2012.05.26	5.69	0.69	13.58	23.83	9.50	32.16	1837	24.14	2.906	145
	2012.05.29	6.64	0.23	14.12	27.30	2.26	9.72	65	1.29	0.358	4
	2012.06.07	7.18	0.27	6.72	7.26	1.05	6.48	27	0.25	0.158	0
	2012.06.15	7.35	0.20	7.10	3.24	0.75	3.46	16	0.82	0.041	3
	2012.06.21	6.99	0.28	7.26	9.36	1.58	11.18	70	0.66	0.284	241,960
	2012.06.27	7.33	0.21	7.36	2.87	1.02	3.20	5	0.00	0.155	8
	2012.07.23	7.71	0.28	6.63	4.01	2.11	7.90	82	0.23	0.468	4,350
	2012.08.01	7.57	0.18	7.34	3.83	0.21	6.34	129	1.78	0.275	548
	2012.08.10	7.56	0.19	6.40	2.76	0.47	4.44	162	1.93	0.407	649
	2012.08.21	7.46	0.20	4.86	1.37	3.92	15.16	624	1.21	1.008	914
	2012.08.23	7.07	0.24	6.44	0.56	1.73	8.86	186	1.48	0.202	4,710
	2012.08.31	7.35	0.12	10.21	0.31	1.09	10.42	53	0.29	0.204	218,700
	2012.09.07	7.65	0.15	9.13	2.20	1.76	8.78	304	0.52	0.397	416
2012.09.20	7.02	0.13	9.73	0.33	1.85	9.18	243	7.89	0.516	1,733	
YIP#05	2012.05.26	6.14	0.34	13.77	42.73	8.19	25.92	470	4.75	1.040	411
	2012.05.29	4.71	0.42	13.72	21.29	1.96	17.52	238	5.84	0.563	3
	2012.06.07	7.14	0.34	6.21	6.68	1.15	8.08	51	1.20	0.274	310
	2012.06.15	7.58	0.55	6.56	13.04	1.92	10.54	34	57.40	0.171	100
	2012.06.21	6.99	0.32	6.07	9.11	1.41	10.86	115	3.82	0.348	241,960
	2012.08.10	7.45	0.17	5.69	2.19	2.78	3.82	488	1.55	1.015	649
	2012.08.21	6.97	0.34	5.53	3.85	4.98	63.20	1542	1.70	1.936	15,850
	2012.08.31	7.17	0.21	10.35	3.91	1.93	27.96	23	2.59	1.855	187

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.40 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
YIP#01	2013.06.10	7.93	0.23	9.23	3.79	4.47	12.92	196	2.01	0.34	365
	2013.06.17	7.17	0.35	9.10	10.51	2.74	9.92	34	1.53	0.10	2400
	2013.08.08	7.48	0.14	6.93	3.51	1.58	5.06	72	0.41	0.07	2
	2013.08.14	7.32	0.22	7.01	6.49	2.26	12.70	472	0.84	0.27	96
	2013.08.21	6.97	0.15	6.38	2.22	1.36	5.04	116	1.76	0.06	4
	2013.08.28	7.09	0.16	7.01	2.32	1.70	3.70	54	0.73	0.08	12
	2013.09.05	7.26	0.19	6.59	3.77	3.09	6.86	256	0.87	0.08	6
YIP#02	2013.06.10	7.81	0.25	7.68	10.93	6.07	19.68	84	1.72	0.51	219
	2013.06.17	7.16	0.23	9.26	8.12	1.69	6.60	42	0.95	0.09	15
	2013.08.08	7.39	0.10	7.99	2.26	5.91	3.82	36	0.19	0.04	2400
	2013.08.14	7.22	0.12	7.57	2.53	2.00	4.96	50	0.06	0.02	150
	2013.08.28	7.11	0.14	7.91	2.93	2.38	3.60	28	0.15	0.14	50
	2013.09.05	7.11	0.16	7.52	2.47	1.76	3.38	16	5.86	0.08	2400

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.40 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년) (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
YIP#03	2013.06.10	7.90	0.23	9.73	6.97	3.18	10.20	30	1.08	0.19	162
	2013.06.17	7.07	0.25	9.61	8.78	2.30	8.56	28	0.90	0.07	261
	2013.08.08	6.84	0.21	6.07	5.81	3.81	39.36	2152	1.80	0.30	520
	2013.08.14	6.80	0.15	6.47	2.53	2.42	11.50	340	3.71	0.20	1700
	2013.08.21	7.03	0.15	7.10	2.83	1.40	4.70	36	0.98	0.10	13
	2013.08.28	7.09	0.15	7.88	2.11	1.61	2.32	4	1.06	0.05	770
YIP#04	2013.09.05	7.18	0.15	6.98	2.45	1.11	3.52	16	1.06	0.18	46
	2013.06.10	8.00	0.25	10.04	7.29	3.99	9.80	20	1.20	0.15	10
	2013.06.17	6.98	0.26	7.68	11.64	3.95	12.16	48	2.23	0.37	2400
	2013.08.08	6.94	0.11	7.61	3.61	2.04	10.14	232	1.55	0.24	610
	2013.08.14	7.00	0.16	8.09	2.82	1.80	10.00	300	1.72	0.19	690
YIP#05	2013.08.28	6.91	0.16	6.87	2.35	2.24	5.62	192	1.57	0.30	20
	2013.09.05	7.05	0.16	6.56	2.24	3.06	12.60	722	1.22	1.03	ND
	2013.06.10	7.71	0.32	8.63	17.04	6.38	20.08	42	2.37	0.20	2420
	2013.06.17	7.20	0.31	8.60	16.66	3.72	13.72	86	1.62	0.15	7100
	2013.08.28	6.55	0.17	3.76	3.84	9.02	91.00	3302	0.25	2.68	110

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

표 3.4.41 용인 청정지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수 MPN
			dS/m	mg/L							
YIP#01	2014.06.06	7.19	0.24	4.32	22.70	2.05	4.06	101	0.58	0.07	3400
	2014.06.17	7.52	0.24	6.74	3.83	1.73	3.36	31	1.14	0.06	1600
	2014.07.02	7.23	0.27	9.61	6.33	2.08	4.16	12	1.06	0.08	0
	2014.08.12	6.88	0.20	8.03	6.20	7.62	20.76	771	1.27	0.03	727
	2014.08.29	7.33	0.21	10.19	3.56	3.22	5.92	156	1.52	0.14	920
	2014.09.05	6.92	0.21	6.93	7.27	17.88	49.10	2974	1.01	0.48	1730
YIP#02	2014.09.12	7.46	0.22	10.26	4.59	2.00	3.44	53	1.30	0.09	6870
	2014.06.06	6.83	0.25	2.47	4.10	7.65	15.30	100	4.28	0.37	10000
	2014.06.17	7.42	0.34	5.01	20.78	7.33	14.54	34	1.78	0.21	1900
	2014.07.02	7.12	0.23	8.95	8.10	2.26	4.44	12	0.92	0.06	400
	2014.08.12	6.66	0.05	9.23	3.20	1.76	3.06	26	0.45	0.15	1990
	2014.08.29	7.23	0.20	9.74	3.37	3.61	6.78	279	1.13	0.25	1120
YIP#03	2014.09.05	7.05	0.13	9.89	5.02	4.27	8.00	241	0.87	0.39	2760
	2014.09.12	7.23	0.22	10.08	4.48	1.74	2.80	7	1.28	0.10	12000
	2014.06.06	7.42	0.26	6.11	18.79	2.07	3.90	70	1.08	0.08	500
	2014.06.17	7.34	0.24	5.57	5.29	2.83	5.46	21	1.17	0.09	530
YIP#04	2014.07.02	7.41	0.25	8.79	5.38	2.39	4.60	22	1.01	0.13	2600
	2014.09.12	7.38	0.22	10.15	4.84	2.23	4.20	42	1.57	0.11	46100
	2014.06.06	7.11	0.27	2.30	6.29	7.41	13.76	61	3.02	0.37	8400
	2014.06.17	7.16	0.26	4.98	6.13	2.62	5.12	38	1.59	0.14	260
	2014.07.02	7.27	0.33	8.39	10.57	7.30	14.34	503	1.20	0.70	13000
YIP#05	2014.08.12	6.85	0.08	9.80	4.00	3.65	6.94	125	0.52	0.23	980
	2014.09.05	7.17	0.15	10.07	7.10	4.31	8.00	69	0.72	0.20	219
	2014.09.12	7.55	0.22	10.67	4.19	1.61	2.78	10	1.28	0.05	11200
	2014.06.06	7.18	0.26	5.58	6.33	3.72	7.38	27	1.29	0.13	12000
YIP#05	2014.06.17	7.20	0.24	2.24	39.39	10.07	19.00	36	12.09	0.35	8200
	2014.07.02	7.23	0.39	7.60	19.05	6.44	12.70	47	3.87	0.24	2800

* YIP: 용인 청정지구 논 시험포장

나. 오산 간접재이용지구

오산 간접재이용지구의 시험포장 5곳을 대상으로 논 담수 수질 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 각 포장의 일정 위치에서 실시하였으며, 그림 3.4.42는 샘플링 모습을 나타내고 있다.



(a) OSP#01



(b) OSP#02



(c) OSP#03



(d) OSP#04



(e) OSP#05

그림 3.4.42 오산 간접 재이용지구 지점별 논 (OSP) 담수 수질 모니터링

표 3.4.42 ~ 3.4.44에 오산 간접재이용지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 오산 간접재이용지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년 7.03 ~ 7.32, 2013년 7.40 ~ 7.78, 2014년 7.12 ~ 7.88로 나타나 매년 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년 1.01 ~ 1.20 dS/m, 2013년 0.89 ~ 1.33 dS/m, 2014년 0.81 ~ 1.22 dS/m로 나타나 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 높은 것으로 나타났다. COD는 2012년 9.32 ~ 18.15 mg/L, 2013년 11.09 ~ 30.61 mg/L, 2014년 7.64 ~ 13.65 mg/L로 나타나 2014년 OSP#05를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. SS는 2012년 257 ~ 545 mg/L, 2013년 77 ~ 693 mg/L, 2014년 60 ~ 238 mg/L로 2013년 OSP#04, 05, 2014년 OSP#01, 04를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 1.63 ~ 15.87 mg/L, 2013년 1.65 ~ 4.44 mg/L, 2014년 1.76 ~ 3.75로 나타났

으며, 총대장균수는 2012년 12,966 ~ 386,833 MPN, 2013년 272 ~ 902 MPN, 2014년 1984 ~ 33095 MPN으로 나타났다. 표 3.4.45 ~ 3.4.47은 오산 간접재이용지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.42 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
OSP#01	7.05	1.16	7.29	8.32	2.88	11.53	545	1.86	0.677	31,892
OSP#02	7.03	1.20	7.61	10.44	2.71	13.69	257	15.87	0.844	19,778
OSP#03	7.14	1.01	8.83	6.83	2.22	10.72	308	2.38	0.917	31,756
OSP#04	7.13	1.20	7.67	8.64	2.28	18.15	455	1.63	0.906	386,833
OSP#05	7.32	1.09	7.75	5.77	1.68	9.32	359	7.14	0.577	12,966

* OSP: 오산 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.43 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
OSP#01	7.40	1.06	7.31	9.79	3.70	15.17	165	1.99	0.30	902
OSP#02	7.48	1.11	5.76	12.22	5.29	26.03	442	2.80	0.60	699
OSP#03	7.46	1.00	5.80	13.26	5.66	30.61	693	2.54	0.42	826
OSP#04	7.66	0.89	6.78	11.43	3.65	13.74	77	4.44	0.37	272
OSP#05	7.78	1.33	8.58	9.10	3.05	11.09	79	1.65	0.23	467

* OSP: 오산 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.44 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
OSP#01	7.12	0.81	7.26	8.64	4.26	8.14	60	3.43	0.24	16819
OSP#02	7.25	0.97	6.85	8.88	4.98	9.48	101	3.75	0.38	8041
OSP#03	7.16	0.81	5.34	16.49	7.31	13.65	154	2.52	0.54	11437
OSP#04	7.88	0.90	6.90	14.37	6.12	11.81	87	1.76	0.26	33095
OSP#05	7.34	1.22	6.70	8.10	3.99	7.64	238	3.69	0.58	1984

* OSP: 오산 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.45 오산 간접제이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSP#01	2012.05.26	6.54	1.83	11.36	19.46	7.36	12.68	110	1.38	0.452	46
	2012.05.29	6.62	2.08	12.78	21.31	3.49	13.12	73	0.00	0.129	727
	2012.06.07	6.77	1.89	4.01	14.77	3.84	26.04	1554	2.10	0.122	32,550
	2012.06.15	6.74	1.73	3.74	11.55	3.57	15.66	2382	2.44	1.528	3,360
	2012.06.21	6.80	1.52	4.67	12.74	4.50	9.96	95	4.42	1.266	179
	2012.06.27	6.91	1.75	2.82	6.70	2.63	11.44	469	1.76	1.873	488
	2012.08.01	7.65	0.88	8.07	1.91	0.70	1.94	4	2.21	0.186	39
	2012.08.10	7.76	1.41	8.31	1.98	1.11	2.36	20	2.27	0.283	291
	2012.08.21	7.34	0.25	5.58	3.24	1.48	10.58	575	1.66	0.000	160
	2012.08.23	7.04	0.10	8.08	3.09	1.19	7.86	181	1.05	0.416	21
2012.08.31	7.00	0.31	10.07	1.87	1.42	8.56	1	0.82	0.419	41	
2012.09.07	7.44	0.21	8.00	1.18	3.32	18.10	1073	2.26	1.455	344,800	
OSP#02	2012.05.26	6.44	1.92	13.50	19.42	7.01	22.32	545	4.12	1.068	42
	2012.05.29	6.60	2.55	13.77	31.00	2.42	19.76	150	1.00	0.501	1,733
	2012.06.07	7.13	1.97	5.81	12.24	5.06	10.46	158	1.20	0.169	1
	2012.06.15	6.93	1.70	5.72	9.80	2.42	9.46	466	1.50	0.484	840
	2012.06.21	6.81	1.67	6.42	27.26	5.36	17.76	183	4.10	2.516	365
	2012.06.27	6.82	1.90	3.93	12.21	1.83	11.96	230	181.00	1.228	241,960
	2012.07.04	7.01	0.87	7.02	4.79	0.38	5.56	29	0.35	0.126	7,800
	2012.07.12	7.50	0.36	6.81	7.25	1.54	20.88	492	3.63	1.310	2,490
	2012.08.01	7.61	0.78	7.54	1.84	0.19	2.74	53	2.31	0.285	31
	2012.08.10	7.58	1.45	7.09	2.53	0.72	6.82	101	1.60	0.271	488
2012.08.21	7.21	0.19	7.92	2.80	1.62	3.80	4	1.77	0.120	816	
2012.08.23	6.78	0.14	4.86	1.79	3.88	9.42	884	1.51	1.499	517	
2012.08.31	6.92	0.12	8.52	2.80	2.85	37.00	52	2.16	1.392	26	
OSP#03	2012.05.23	6.73	1.65	14.63	11.14	3.38	9.20	3	7.10	0.448	613
	2012.05.26	5.96	2.14	13.69	24.29	2.74	12.04	150	9.90	0.305	3
	2012.05.29	7.31	1.76	13.80	15.69	2.82	8.20	51	1.82	0.207	0
	2012.06.07	7.08	2.35	6.79	13.83	2.07	9.76	65	0.65	0.223	100
	2012.06.15	6.80	1.69	7.37	7.48	2.28	10.34	452	3.20	2.023	7,540
	2012.06.21	6.89	1.62	7.03	14.17	5.13	13.90	64	2.28	1.078	1,220
	2012.07.04	7.10	0.84	7.26	6.37	1.29	7.48	154	1.18	0.382	38,730
	2012.07.23	7.24	0.31	7.28	2.62	2.34	27.32	1410	0.77	4.868	8,330
	2012.08.01	7.29	1.17	6.77	4.17	2.55	13.74	290	1.65	1.232	344,800
	2012.08.10	7.69	1.44	7.40	2.38	0.78	9.10	250	2.22	0.513	308
2012.08.21	7.28	0.36	7.23	1.25	1.46	10.48	289	1.62	0.000	291	
2012.08.23	6.86	0.13	6.34	1.54	1.58	6.12	491	1.52	0.722	2,420	
2012.08.31	7.02	0.14	7.79	1.62	1.54	4.90	19	0.22	0.186	29	
2012.09.07	7.59	0.20	8.89	1.31	2.72	13.60	500	1.41	0.911	26,130	
2012.09.12	7.52	0.21	9.52	0.57	1.49	8.48	509	1.46	0.521	77,000	
2012.09.20	7.87	0.17	9.46	0.92	1.29	6.88	231	1.05	1.060	579	
OSP#04	2012.05.26	7.19	1.93	13.40	21.96	2.98	14.56	294	1.25	0.491	179
	2012.05.29	5.67	2.28	13.74	26.37	4.46	23.16	227	0.62	0.290	187
	2012.06.07	7.32	1.83	6.19	7.21	1.54	9.34	358	1.94	0.477	9,140
	2012.06.15	7.15	1.67	6.56	9.51	2.43	10.12	287	0.82	0.312	9,880
	2012.06.21	6.89	1.54	6.24	9.85	2.54	19.00	220	4.49	2.224	276
	2012.07.04	6.95	1.25	6.94	9.98	1.11	19.84	742	0.55	0.690	7,490
	2012.07.23	7.77	0.47	3.28	4.25	3.06	27.24	2400	0.88	1.978	100
	2012.08.01	7.78	0.77	6.91	1.50	0.93	3.14	111	1.90	0.536	10
	2012.08.10	7.59	1.45	5.02	4.30	3.28	6.96	320	0.73	0.492	345
	2012.08.21	7.39	0.52	7.84	1.73	1.22	5.00	21	3.00	0.072	435
2012.08.23	6.88	0.21	6.26	1.85	2.98	7.58	466	1.62	0.582	2,950	
2012.08.31	7.00	0.44	9.64	5.15	0.85	71.80	13	1.81	2.724	4,611,000	

* OSP: 오산 간접제이용지구 논 시험포장

표 3.4.45 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년) (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSP#05	2012.05.26	6.90	1.85	12.32	17.46	2.15	8.72	229	1.99	0.445	219
	2012.05.29	7.42	1.52	13.05	15.93	2.09	8.14	79	52.02	0.297	980
	2012.06.07	6.98	1.71	5.52	6.02	0.85	6.26	190	5.93	0.705	48
	2012.06.15	7.23	1.70	6.11	8.15	0.63	6.82	121	0.05	0.118	1,810
	2012.06.21	7.83	2.00	5.79	14.88	4.30	30.64	39	28.40	0.262	980
	2012.06.27	7.09	1.88	6.86	6.33	2.63	7.68	110	0.55	0.602	727
	2012.07.04	7.29	0.70	7.03	2.24	0.58	4.28	83	0.16	0.116	155,310
	2012.07.23	7.76	0.28	7.60	0.79	2.52	6.04	687	0.11	1.750	15,150
	2012.08.01	7.69	0.81	7.52	1.90	0.31	2.60	59	1.55	0.245	10
	2012.08.10	7.39	1.41	5.50	1.41	1.10	3.60	112	1.55	1.112	2,420
	2012.08.21	7.35	0.73	8.34	0.89	1.58	4.40	73	0.90	0.120	613
	2012.08.23	6.92	0.15	6.71	1.01	0.97	4.16	841	1.45	0.349	113
	2012.08.31	7.15	0.21	8.77	0.73	0.12	17.38	55	1.21	0.098	1,414
2012.09.07	7.52	0.33	7.37	3.09	3.76	19.76	2352	4.11	1.858	1,733	

* OSP: 오산 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.46 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSP#01	2013.06.10	8.01	1.68	8.26	18.67	4.71	22.28	288	2.47	0.46	58
	2013.06.17	7.67	1.59	6.79	12.44	6.07	21.16	116	3.55	0.29	1000
	2013.08.08	6.78	0.09	7.13	3.52	2.35	11.52	232	0.87	0.30	2400
	2013.08.21	7.13	0.90	7.06	4.52	1.68	5.72	24	1.07	0.15	150
OSP#02	2013.06.10	8.00	1.53	7.85	14.46	4.58	19.92	358	1.47	0.64	96
	2013.06.17	7.73	1.71	4.11	18.24	7.33	26.76	46	4.85	0.68	2000
	2013.08.08	6.71	0.08	5.32	3.97	3.97	31.40	922	2.09	0.47	1
OSP#03	2013.06.10	7.84	1.77	6.44	21.70	6.31	25.48	106	3.26	0.60	66
	2013.06.17	8.25	1.78	7.23	20.77	7.10	23.64	16	2.94	0.21	2400
	2013.08.08	6.64	0.26	4.20	6.78	4.07	39.24	1430	1.96	0.38	ND
	2013.08.14	7.12	0.20	5.30	3.79	5.17	34.08	1220	2.01	0.50	13
OSP#04	2013.06.10	8.03	1.63	7.72	14.94	5.46	17.00	118	1.93	0.59	29
	2013.06.17	8.18	1.60	4.83	23.21	7.41	26.04	94	17.75	0.84	248
	2013.08.08	7.13	0.20	7.14	6.41	1.44	8.52	36	1.02	0.10	11
	2013.08.14	7.49	0.20	7.49	6.94	2.12	8.48	70	0.91	0.23	300
	2013.08.21	7.48	0.82	6.72	5.64	1.80	8.64	68	0.58	0.10	770
OSP#05	2013.06.10	8.07	1.69	10.44	12.00	2.87	11.44	42	1.18	0.10	276
	2013.06.17	8.03	1.53	8.50	8.17	4.17	12.80	56	1.66	0.42	205
	2013.08.21	7.25	0.78	6.79	7.13	2.09	9.02	138	2.12	0.17	920

* OSP: 오산 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.47 오산 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
OSP#01	2014.06.06	7.50	0.84	5.72	9.29	3.87	7.72	43	1.39	0.11	13000
	2014.06.17	7.72	1.48	7.54	7.96	3.13	6.14	21	5.58	0.11	13
	2014.07.02	7.06	1.37	3.45	17.70	8.13	15.26	22	8.83	0.54	69000
	2014.08.12	6.93	0.12	10.62	3.27	2.11	3.78	50	0.59	0.17	91
	2014.09.05	6.40	0.25	8.95	4.97	4.04	7.80	164	0.74	0.29	1990
OSP#02	2014.06.06	7.25	0.82	6.67	9.59	3.68	7.36	16	1.15	0.09	300
	2014.06.17	7.69	1.45	7.17	7.70	3.11	6.20	6	5.03	0.15	550
	2014.07.02	7.17	1.47	4.82	14.47	7.65	14.02	26	8.01	0.78	31000
	2014.08.12	6.90	0.13	8.75	3.77	5.48	10.32	355	0.79	0.51	313
OSP#03	2014.06.06	7.07	0.70	3.18	16.26	6.93	12.38	45	3.42	0.10	34000
	2014.06.17	7.45	1.56	2.56	29.65	9.91	18.74	100	3.52	0.87	270
	2014.08.12	6.97	0.17	10.27	3.57	5.10	9.84	317	0.62	0.64	40
OSP#04	2014.06.06	7.76	0.90	6.40	15.96	5.10	10.12	16	1.34	0.11	1000
	2014.06.17	7.61	1.47	4.20	19.90	8.38	15.82	75	2.75	0.40	98000
	2014.08.12	8.28	0.32	10.09	7.25	4.87	9.48	171	1.18	0.27	285
OSP#05	2014.06.06	7.32	1.28	5.89	7.15	2.95	5.86	36	5.74	0.38	5000
	2014.06.17	7.27	1.42	3.28	6.84	4.19	7.62	25	6.70	0.57	650
	2014.07.02	7.39	1.69	7.10	13.35	6.36	12.60	857	1.70	1.29	1600
	2014.08.12	6.40	0.25	8.95	4.97	4.04	7.80	164	0.74	0.29	1990

* OSP: 오산 간접재이용지구 논 시험포장

다. 병점 간접재이용지구

병점 간접재이용지구의 시험포장 5곳을 대상으로 논 담수 수질 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 각 포장의 일정 위치에서 실시하였으며, 그림 3.4.43은 샘플링 모습을 나타내고 있다.



(a) BJP#01



(b) BJP#02

그림 3.4.43 병점 간접 재이용지구 지점별 논 (BJP) 담수 수질 모니터링



(c) BJP#03



(d) BJP#04



(e) BJP#05

그림 3.4.43 병점 간접 재이용지구 지점별 논 (BJP) 담수 수질 모니터링 (계속)

표 3.4.48 ~ 3.4.50에 병점 간접재이용지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 병점 간접재이용지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년 6.84 ~ 7.26, 2013년 6.87 ~ 7.40, 2014년 7.19 ~ 7.44로 나타나 매년 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년 0.54 ~ 0.86 dS/m, 2013년 0.70 ~ 1.08 dS/m, 2014년 0.59 ~ 0.74 dS/m로 나타나 2012년 BJP#03, 04를 제외하고 모든 시험포장에서 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 높은 것으로 나타났다. COD는 2012년 7.70 ~ 17.14 mg/L, 2013년 22.64 ~ 31.13 mg/L, 2014년 8.10 ~ 63.36 mg/L로 나타나 2012년 BJP#03을 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. SS는 2012년 79 ~ 553 mg/L, 2013년 95 ~ 951 mg/L, 2014년 86 ~ 2396 mg/L로 2012년 BJP#03, 2013년 BJP#04를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 4.45 ~ 12.31 mg/L, 2013년 5.92 ~ 13.42 mg/L, 2014년 2.32 ~ 8.00로 나타났으며, 총대장균수는 2012년 112 ~ 127,697 MPN, 2013년 18 ~ 1,255 MPN, 2014년 3,213 ~ 19,150 MPN으로 나타났다. 표 3.4.51 ~ 3.4.53은 병점 간접재이용지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.48 병점재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
BJP#01	7.24	0.86	7.43	14.59	2.59	13.68	553	12.31	2.514	10,692
BJP#02	7.26	0.75	8.33	6.44	2.15	9.12	370	4.45	1.413	25,945
BJP#03	7.16	0.69	8.31	7.72	1.23	7.70	79	4.82	1.321	1,669
BJP#04	7.19	0.54	7.47	12.31	2.18	9.77	167	7.22	1.441	127,697
BJP#05	6.84	0.75	6.59	14.18	3.20	17.14	261	7.78	2.500	112

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.49 병점재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
BJP#01	7.25	0.80	4.19	9.27	5.27	23.00	244	13.42	1.54	1133
BJP#02	7.15	1.08	4.41	11.26	6.47	24.77	516	5.92	1.43	1255
BJP#03	7.06	0.76	6.00	13.21	6.53	25.72	559	8.75	1.70	615
BJP#04	7.40	0.77	6.56	16.22	5.64	22.64	95	6.21	0.43	18
BJP#05	6.87	0.70	3.66	7.80	7.47	31.13	951	8.78	1.86	1079

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.50 병점재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
		dS/m	mg/L							MPN
BJP#01	7.44	0.60	3.05	15.32	7.29	13.91	184	3.07	0.70	9700
BJP#02	7.23	0.68	1.80	14.51	8.05	14.72	270	2.32	2.30	19150
BJP#03	7.38	0.74	5.74	9.24	4.10	8.10	86	6.16	1.07	6023
BJP#04	7.26	0.59	4.17	17.26	7.46	14.71	351	2.63	1.26	3213
BJP#05	7.19	0.69	2.95	14.74	32.89	63.36	2396	8.00	5.63	9033

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.51 병점 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJP#01	2012.05.26	6.84	0.88	10.44	11.91	2.60	8.48	108	5.55	0.395	7,760
	2012.05.29	7.35	0.98	13.45	58.69	8.90	50.40	165	35.44	7.455	61,310
	2012.06.07	6.91	1.01	5.22	6.92	1.34	6.10	85	10.80	1.178	129
	2012.06.15	7.04	0.96	5.06	9.40	2.58	9.54	441	11.72	2.029	17
	2012.06.21	6.85	0.91	5.48	9.02	1.32	12.72	574	-	3.400	200
	2012.08.01	7.96	0.65	6.40	2.07	0.55	3.10	320	6.97	1.604	2,420
	2012.08.10	7.72	0.65	5.99	4.10	0.83	5.40	2180	3.36	1.535	3,010

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.51 병점 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2012년) (계속)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJP#02	2012.05.26	6.98	0.96	13.77	20.80	10.50	22.60	91	36.00	3.350	86
	2012.05.29	6.76	0.73	14.63	15.96	2.68	14.00	13	11.08	1.432	113
	2012.06.07	6.78	2.05	6.16	8.95	4.04	11.06	37	3.17	0.498	13
	2012.06.15	6.85	0.92	6.26	7.11	3.28	11.70	1194	1.89	1.782	2,420
	2012.06.21	6.86	2.04	6.20	6.40	1.84	11.02	577	0.88	1.259	120,980
	2012.06.27	6.85	2.02	4.60	7.42	0.54	7.48	257	0.40	1.601	241,930
	2012.07.12	7.39	0.23	8.03	5.16	1.62	5.36	1408	1.50	5.716	5,450
	2012.07.23	7.45	0.12	6.93	2.54	1.02	11.48	456	0.00	1.468	2,130
	2012.08.01	7.73	0.62	6.30	2.59	1.70	4.72	1131	1.45	1.468	387
	2012.08.10	7.59	0.80	7.52	5.49	0.77	6.28	52	1.88	0.840	3,840
	2012.08.21	7.41	0.26	7.76	5.21	1.19	9.14	59	1.89	0.579	10,360
	2012.08.23	7.09	0.13	7.99	2.77	0.90	5.46	52	0.91	0.374	488
	2012.08.31	7.80	0.16	9.09	2.58	0.11	6.52	5	1.58	0.338	101
	2012.09.07	8.52	0.09	10.12	1.63	1.02	5.08	102	3.35	0.157	727
2012.09.20	6.88	0.17	9.58	1.96	1.10	4.94	118	0.78	0.328	152	
BJP#03	2012.05.26	6.75	0.85	13.13	15.47	3.68	10.10	226	8.02	1.050	1
	2012.05.29	6.16	0.81	12.24	22.84	1.58	14.42	216	6.51	0.979	2,330
	2012.06.07	7.02	1.05	5.79	10.13	1.11	8.66	43	17.20	1.842	248
	2012.06.15	7.00	0.93	6.12	7.38	1.92	10.44	126	5.80	1.068	1,990
	2012.06.21	6.93	0.88	5.74	10.18	0.71	8.70	150	1.00	7.044	99
	2012.08.01	7.69	1.30	7.64	3.27	0.12	7.60	9	1.12	0.153	172
	2012.08.10	7.52	1.13	7.84	3.41	0.90	2.16	9	8.16	0.711	12
	2012.08.21	6.93	0.28	5.74	4.66	1.97	12.50	28	2.88	0.638	10,860
	2012.08.23	7.03	0.09	7.19	2.58	0.05	4.38	14	0.83	0.252	139
	2012.08.31	7.59	0.14	9.61	2.65	0.54	3.00	38	1.22	0.512	2,280
2012.09.07	8.14	0.10	10.32	2.40	0.90	2.74	12	0.30	0.280	228	
BJP#04	2012.05.26	6.83	0.96	11.97	29.82	6.90	24.00	244	21.18	3.414	198,630
	2012.05.29	7.16	1.04	6.07	55.59	3.09	9.20	333	33.68	5.753	1,046,200
	2012.06.07	6.86	0.94	6.07	7.43	0.68	5.84	142	5.50	0.538	310
	2012.06.15	6.93	0.97	6.08	12.56	1.76	15.26	35	1.96	0.624	20,460
	2012.06.21	6.92	0.92	6.28	10.41	2.62	18.24	414	6.67	0.946	602
	2012.07.23	7.28	0.08	6.85	2.36	1.45	9.60	482	0.18	1.608	3,310
	2012.08.10	7.50	0.65	4.91	4.22	4.05	6.70	20	6.81	1.866	2,720
	2012.08.21	7.22	0.15	7.33	4.58	0.85	6.62	14	0.93	0.405	2,590
	2012.08.23	6.96	0.06	7.61	3.59	0.48	5.00	22	1.05	0.225	1,733
	2012.08.31	7.53	0.08	8.97	2.44	1.09	2.76	28	0.80	0.201	-
2012.09.07	7.95	0.07	10.08	2.41	1.01	4.26	104	0.61	0.267	416	
BJP#05	2012.05.26	6.54	0.86	13.05	12.09	6.31	20.84	422	9.45	0.980	6
	2012.05.29	6.49	0.90	13.37	10.69	2.95	25.44	344	7.52	1.879	26
	2012.06.07	7.21	1.16	3.37	31.63	3.19	19.52	293	15.50	3.977	0
	2012.06.15	6.77	0.91	3.74	6.11	2.11	15.48	437	1.65	3.393	8
	2012.06.21	7.28	1.09	4.09	39.29	3.85	33.28	111	11.96	2.559	248
	2012.08.10	7.27	0.65	5.88	4.50	3.81	5.12	96	7.10	3.408	313
	2012.08.21	6.31	0.27	2.74	6.01	2.44	9.78	149	7.55	3.670	276
2012.08.23	6.84	0.16	6.51	3.13	0.91	7.66	232	1.52	0.136	18	

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.52 병점 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2013년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJP#01	2013.06.10	7.98	0.82	4.89	8.64	4.75	27.56	118	19.71	1.43	19
	2013.06.17	6.61	0.76	0.52	14.93	9.42	37.72	582	14.25	2.96	980
	2013.09.05	7.17	0.83	7.17	4.24	1.64	3.72	32	6.29	0.22	2400
BJP#02	2013.06.10	7.75	0.82	3.32	16.59	7.33	33.56	552	5.10	1.62	166
	2013.06.17	6.62	1.57	3.46	12.57	9.91	34.48	862	3.54	2.36	1900
	2013.09.05	7.09	0.86	6.44	4.62	2.17	6.28	134	9.11	0.30	1700
BJP#03	2013.06.10	7.64	0.86	ND	16.14	9.58	37.48	1004	9.05	2.63	1100
	2013.06.17	6.47	0.67	6.00	10.28	3.48	13.96	114	8.45	0.77	131
BJP#04	2013.06.10	8.00	0.86	6.36	18.18	5.85	25.28	78	7.10	0.46	16
	2013.06.17	6.79	0.68	6.77	14.26	5.44	20.00	112	5.32	0.40	20
BJP#05	2013.06.10	7.66	0.85	1.11	15.86	21.83	66.80	1140	9.71	2.04	2400
	2013.06.17	6.23	0.68	0.55	9.05	10.39	38.76	1386	17.61	3.60	1900
	2013.08.14	6.81	0.50	4.85	5.49	3.66	26.12	490	5.78	1.27	120
	2013.08.21	6.80	0.63	4.91	6.51	4.46	39.12	1482	1.12	1.21	42
	2013.08.28	6.98	0.67	6.15	4.29	1.52	3.70	348	11.47	1.52	13
	2013.09.05	6.76	0.87	4.39	5.59	2.94	12.28	858	7.00	1.53	2000

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

표 3.4.53 병점 간접재이용지구 논 담수 수질 모니터링 결과 (2014년)

지점명	Date	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
BJP#01	2014.06.06	7.05	0.51	2.08	18.41	8.54	16.72	319	4.10	0.73	17000
	2014.06.17	7.83	0.68	4.03	12.22	6.04	11.10	48	2.04	0.66	2400
BJP#02	2014.06.06	7.15	0.55	2.47	18.08	8.46	15.40	213	2.11	0.36	37000
	2014.06.17	7.31	0.81	1.13	10.94	7.65	14.04	327	2.53	4.24	1300
BJP#03	2014.06.06	7.12	0.86	3.06	9.57	4.03	7.94	103	4.78	0.74	16000
	2014.06.17	7.52	0.67	5.56	7.99	3.32	6.56	55	4.66	0.85	70
	2014.07.02	7.51	0.68	8.62	10.15	4.97	9.80	99	9.03	1.62	2000
BJP#04	2014.06.06	7.04	0.55	2.75	21.53	6.68	13.32	36	4.30	0.49	2200
	2014.06.17	7.21	0.59	3.49	16.26	7.01	13.98	204	1.79	1.83	540
	2014.07.02	7.52	0.64	6.26	13.99	8.70	16.82	813	1.81	1.46	6900
BJP#05	2014.06.06	6.87	0.72	4.59	7.18	7.49	13.42	231	3.44	3.62	15000
	2014.06.17	7.34	0.68	1.30	7.61	7.81	14.06	108	3.87	6.90	2500
	2014.07.02	7.35	0.69	ND	29.45	83.36	162.6	6848	16.69	6.36	9600

* BJP: 병점 간접재이용지구 논 시험포장

라. 미처리지구

미처리지구로 선정된 호련지구, 수화지구, 장전지구의 시험포장 각 1곳을 대상으로 논 담수 수질 모니터링을 실시하였다. 샘플링은 각 포장의 일정 위치에서 실시하였으며, 그림 3.4.44는 샘플링 모습을 나타내고 있다.



(a) 호련지구



(b) 수화지구



(c) 장전지구

그림 3.4.44 미처리지구 지점별 논 담수 수질 모니터링

표 3.4.54 ~ 3.4.56에 2012년 ~ 2014년 미처리지구 (호련지구, 수화지구, 장전지구)의 논 담수 수질 모니터링 결과를 수질 분석 항목별 평균값으로 나타내었다. 논 담수 수질 분석의 수질 분석 결과 pH는 2012년에 호련지구 7.37, 수화지구 7.31, 장전지구 7.39로 나타났으며, 2013년은 각각 6.94, 7.29, 7.16, 2014년은 7.20, 7.26, 7.57로 매년 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났다. EC는 2012년에 호련지구 0.20 dS/m, 수화지구 0.39 dS/m, 장전지구 0.25 dS/m로 나타났으며, 2013년은 각각 0.16, 0.23, 0.16 dS/m로, 2014년은 0.24, 0.33, 0.56 dS/m로 매년 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 낮아 양호한 것으로 나타났다. COD는 2012년에 호련지구 11.29 mg/L, 수화지구 10.00 mg/L, 장전지구 9.88 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 47.51, 4.65, 5.96 mg/L로, 2014년은 3.99, 10.11, 15.71 mg/L로 나타나 2013년 수화지구와 장전지구, 2014년 호련지구에서만 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하는 것으로 나타났다. SS는 2012년에 호련지구 334 mg/L, 수화지구 273 mg/L, 장전지구 477 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 1502, 81, 42 mg/L로, 2014년은 46, 242, 1447 mg/L로 나타나 2013년 수화지구와 장전지구, 2014년 호련지구에서만 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하는 것으로 나타났다. T-N은 2012년 호련지구 1.83 mg/L, 수화지구 4.33 mg/L, 장전지구 2.95 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 1.28, 3.04, 2.10 mg/L로, 2014년은 1.61, 0.97, 17.37 mg/L로 나타났다. 총대장균수는 2012년 호련지구 17,200 MPN, 수화지구 13,611 MPN, 장전지구 445 MPN으로 나타났으며, 2013년 각각 773, 2200, 2400 MPN으로, 2014년 5983, 1897, 7597 MPN으로 나타났다. 표 3.4.57 ~ 3.4.59는 미처리지구의 논 담수 수질 모니터링 결과를 샘플링 날짜별로 나타내고 있다.

표 3.4.54 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2012년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
		dS/m	mg/L									MPN
호련지구	7.37	0.20	7.90	6.14	2.11	11.29	334	1.83	0.348	1.68	32.35	17,200
수화지구	7.31	0.39	8.17	8.24	2.00	10.00	273	4.33	0.322	3.77	33.37	13,611
장전지구	7.39	0.25	8.81	9.89	1.39	9.88	477	2.95	0.312	2.67	35.65	445

표 3.4.55 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2013년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
		dS/m	mg/L									MPN
호련지구	6.94	0.16	5.85	2.06	6.76	47.51	1502	1.28	0.90	1.16	8.44	773
수화지구	7.29	0.23	7.05	1.55	1.58	4.65	81	3.04	0.07	3.00	21.15	2200
장전지구	7.16	0.16	7.33	2.15	2.09	6.96	42	2.10	0.05	1.97	13.45	2400

표 3.4.56 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2014년 평균)

지점명	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
		dS/m	mg/L									MPN
호련지구	7.20	0.24	6.61	2.64	2.04	3.99	46	1.61	0.14	1.05	18.92	5983
수화지구	7.26	0.33	5.33	7.11	5.10	10.11	242	0.97	0.57	0.43	36.37	1897
장전지구	7.57	0.56	2.51	16.84	8.21	15.71	1447	17.37	3.08	1.78	54.64	7597

표 3.4.57 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2012년)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									MPN
호련지구	2012.05.26	6.97	0.25	8.81	12.47	4.54	6.50	51	0.41	0.075	0.38	325.14	68,670
	2012.05.29	7.13	0.22	13.69	13.93	0.35	6.26	88	0.13	0.116	0.11	16.04	21,430
	2012.06.07	6.99	0.44	4.34	17.50	4.12	46.80	778	3.01	0.966	3.01	30.54	214
	2012.06.15	7.03	0.38	5.09	29.63	4.47	34.12	336	1.40	0.652	1.40	35.19	30
	2012.07.04	7.04	0.21	8.54	1.17	1.36	2.12	29	1.18	0.060	1.13	12.15	16,160
	2012.07.12	7.71	0.16	8.38	0.94	0.26	1.62	0	2.82	0.035	2.80	9.76	7,940
	2012.07.23	7.53	0.30	6.99	7.49	0.93	7.50	42	0.11	0.045	0.11	2.16	740
	2012.07.25	8.08	0.13	6.48	1.52	0.66	7.46	336	2.38	0.166	2.36	8.16	40
	2012.08.01	7.69	0.16	8.07	1.08	0.79	1.88	28	2.10	0.129	2.09	9.04	261
	2012.08.10	7.46	0.19	7.52	0.48	1.88	9.76	427	2.20	0.000	2.20	11.09	15
	2012.08.21	7.05	0.18	5.57	2.76	2.42	11.24	1432	1.50	1.464	1.48	4.52	102
	2012.08.23	7.10	0.10	8.04	1.06	1.14	1.98	30	3.25	0.127	3.24	6.82	249
	2012.08.31	7.65	0.11	8.60	0.91	3.74	12.66	615	2.71	0.708	2.25	4.82	727
2012.09.07	7.45	0.10	10.30	0.43	1.96	7.14	240	2.18	0.285	1.73	4.29	141,360	
2012.09.20	7.72	0.10	8.05	0.75	3.10	12.38	578	2.01	0.386	0.94	5.51	65	

표 3.4.57 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2012년) (계속)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									
수 화 지 구	2012.04.19	7.37	0.46	5.79	15.30	2.17	11.02	6	0.05	0.112	0.05	44.66	0
	2012.05.03	7.11	0.29	7.95	8.79	0.66	3.52	37	5.22	0.194	5.22	33.83	3
	2012.05.16	7.09	0.28	9.29	10.60	1.32	2.34	55	3.79	0.076	3.79	36.36	0
	2012.05.26	6.07	0.88	12.24	33.98	6.28	29.40	346	14.88	0.688	14.80	87.28	1
	2012.05.29	6.34	0.35	9.85	18.73	8.54	31.64	1080	3.66	0.726	3.66	49.69	0
	2012.06.07	7.05	0.38	5.42	21.70	3.95	26.48	188	1.24	0.531	1.24	46.07	122
	2012.06.15	6.98	0.52	6.07	19.16	1.48	17.08	528	1.86	0.995	1.83	83.58	435
	2012.07.04	6.82	0.70	8.62	10.32	2.38	10.52	283	2.36	0.323	1.08	60.48	2,920
	2012.07.12	7.75	0.39	7.15	1.14	0.28	3.50	313	7.00	0.621	6.97	31.35	57,940
	2012.07.23	7.85	0.37	6.98	1.65	0.95	3.98	59	10.23	0.075	10.21	17.72	100
	2012.07.25	7.84	0.33	6.87	2.07	0.81	8.08	203	0.00	0.114	0.00	19.61	225
	2012.08.01	7.77	0.34	7.61	1.44	0.32	2.06	14	0.60	0.032	0.60	25.43	248
	2012.08.10	7.76	0.36	8.23	0.20	1.09	3.72	7	1.17	0.006	1.15	22.95	866
	2012.08.21	7.12	0.39	7.07	1.85	1.11	8.00	125	8.75	0.206	8.73	15.52	2,420
	2012.08.23	7.09	0.34	7.36	1.35	1.05	7.34	109	4.75	0.159	4.72	10.13	4,710
	2012.08.31	7.68	0.27	10.66	4.54	1.83	7.30	177	0.89	0.207	0.40	7.02	2,420
	2012.09.07	7.48	0.25	8.90	0.52	1.73	8.12	1615	6.77	0.904	6.39	16.25	186,000
	2012.09.12	8.10	0.36	9.54	1.43	0.93	2.50	16	0.33	0.060	0.03	17.65	21
2012.09.20	7.68	0.26	9.57	1.77	1.09	3.42	23	8.70	0.097	0.76	8.42	178	
장 전 지 구	2012.04.19	7.12	0.15	7.76	1.07	0.43	1.62	5	5.19	0.027	5.17	10.71	649
	2012.05.03	7.20	0.35	8.28	14.40	0.42	4.68	15	3.28	0.091	3.28	32.50	980
	2012.05.16	7.10	0.21	13.42	10.10	0.97	1.20	17	3.30	0.087	3.28	16.81	0
	2012.05.26	7.07	0.39	14.74	30.29	2.95	8.12	9	0.27	0.141	0.27	109.58	326
	2012.05.29	7.12	0.32	13.58	22.49	1.74	15.28	216	1.37	0.651	1.35	37.47	0
	2012.06.15	7.09	0.15	7.09	0.84	0.58	1.16	162	6.22	0.545	6.19	10.97	1
	2012.06.15	6.89	0.91	7.37	64.19	5.50	51.44	94	3.48	0.478	1.45	217.06	10
	2012.06.21	7.19	0.36	7.07	5.33	1.33	4.86	22	3.67	0.186	3.60	53.45	0
	2012.07.23	8.14	0.13	4.20	1.44	1.15	33.64	4499	2.60	0.069	2.53	8.45	520
	2012.07.25	7.96	0.13	6.21	2.10	0.03	8.12	336	1.26	0.170	1.26	10.19	630
	2012.08.10	7.71	0.18	8.12	1.64	1.11	2.50	12	1.50	0.009	1.48	10.91	16
	2012.08.21	7.05	0.15	5.74	1.41	1.62	10.02	1390	2.66	1.526	2.64	10.65	2,420
	2012.08.23	7.31	0.11	7.88	1.10	0.79	2.08	7	3.48	0.037	3.46	7.25	613
	2012.08.31	7.56	0.16	10.42	0.70	0.67	1.38	77	2.89	0.082	2.30	10.99	59
2012.09.07	7.60	0.14	8.89	0.79	2.59	11.02	692	3.03	0.826	1.81	8.45	860	
2012.09.12	8.09	0.16	10.26	0.37	0.38	0.98	84	3.04	0.068	2.66	15.05	41	

표 3.4.58 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2013년)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									
호 련 지 구	2013.08.14	7.07	0.14	7.03	1.63	2.40	13.08	560	1.73	0.24	1.67	7.69	20
	2013.08.21	7.05	0.16	6.23	1.52	2.23	8.56	156	1.78	0.10	1.64	8.75	550
	2013.08.28	6.70	0.16	4.50	2.82	16.99	137.40	3034	0.48	1.77	0.37	8.39	120
	2013.09.05	6.95	0.17	5.64	2.25	5.42	31.00	2258	1.12	1.50	0.96	8.94	2400
수 화 지 구	2013.08.21	7.28	0.24	7.21	1.76	1.07	3.00	26	2.86	0.02	2.76	20.37	2400
	2013.09.05	7.29	0.23	6.90	1.35	2.08	6.30	136	3.22	0.13	3.24	21.94	2000
장 전 지 구	2013.08.21	7.16	0.16	7.33	2.15	2.09	6.96	42	2.10	0.05	1.97	13.45	2400

표 3.4.59 미처리하수 관개지구 논 담수 수질 분석 결과 (2014년)

지점	날짜	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	NO ₃ -N	Cl ⁻	총대장균수
			dS/m	mg/L									MPN
호련지구	2014.06.06	7.22	0.18	4.17	2.56	1.77	3.40	37	1.77	0.06	0.89	13.89	16000
	2014.06.17	7.28	0.29	5.91	2.37	2.24	4.46	56	1.80	0.25	1.58	26.64	1400
	2014.07.02	7.11	0.26	9.76	3.01	2.12	4.12	44	1.26	0.11	0.68	16.23	550
수화지구	2014.06.06	7.54	0.32	5.54	9.94	3.76	7.26	16	0.92	0.09	ND	31.01	1300
	2014.06.17	7.06	0.33	3.58	3.06	4.83	8.18	130	1.04	1.06	0.43	41.19	3700
	2014.07.02	7.18	0.34	6.86	8.32	6.70	14.9	579	0.94	0.57	ND	36.90	690
장진지구	2014.06.06	7.40	0.39	4.91	14.3	5.80	10.5	82	9.29	0.21	0.15	38.72	21000
	2014.06.17	7.89	0.70	0.60	22.5	8.86	17.1	86	27.98	0.85	ND	65.09	1100
	2014.07.02	7.41	0.59	2.00	13.7	9.99	19.5	4172	14.84	8.19	3.42	60.11	690

마. 시험지구간 비교분석

표 3.4.60 ~ 3.4.62 및 그림 3.4.45 ~ 3.4.54는 2012 ~ 2014년의 시험지구별 논 담수 수질특성을 그래프로 비교하여 나타낸 것이다. 비교 항목은 pH, EC, DO, TOC, BOD, COD, SS, T-N, T-P, 총대장균수 등 10가지이며 월별 수질 분석 결과를 평균하여 비교하였다.

pH는 시험지구간 큰 차이를 보이지 않았으며, 2012년은 5월에서 9월로 갈수록 점진적으로 값이 증가하는 경향을, 2013, 2014년은 점진적으로 값이 감소하는 경향으로 나타났다. EC는 오산 재이용지구와 병점 재이용지구에서 전반적으로 다른 지구에 비해 큰 값을 나타내었고, 특히 오산 재이용 지구는 매년 5월, 6월과 2014년 7월에 특히 높은 값을 기록하였다. TOC는 영농초기에 높은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 2012년 6월 미처리 지구에서 높은 값을 기록한 것을 제외하고는 지구별로 대체로 비슷한 경향을 나타내었다. SS의 경우 2012년, 2014년은 7월에 다른 시기에 비해 높은 값을 기록하는 것으로 나타났으나 지구별로는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 2013년과 2014년에는 병점 재이용지구와 미처리지구에서 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. T-N은 시험지구간 특별한 경향을 나타내지 않았으며, 2012년 5월과 2013년 병점 재이용지구와 2012년 6월 오산 재이용지구에서 비교적 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. T-P의 경우 매년 병점 간접재이용지구에서 전반적으로 높은 값을 기록했으며, 2014년 7월에 미처리지구에서도 다소 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

표 3.4.60 시험지구간 논 담수 수질 모니터링 결과 비교 (2012년)

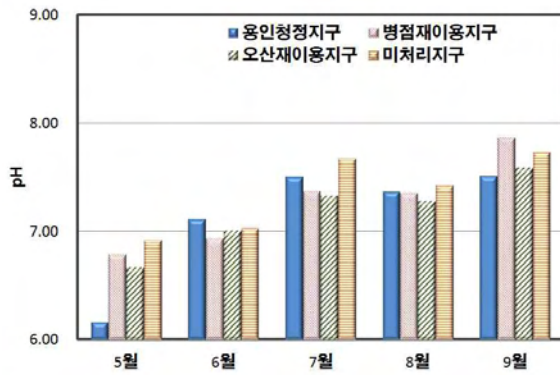
지점명	Month	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
용인 청정 지구	5월	6.16	0.33	13.50	22.60	3.66	15.84	363.70	5.03	0.83	85
	6월	7.12	0.37	6.44	8.07	1.76	8.45	83.61	4.80	0.30	51,199
	7월	7.51	0.22	6.27	2.28	1.47	9.49	541.13	1.82	0.79	7,719
	8월	7.37	0.31	7.76	1.89	1.44	9.86	213.16	1.34	0.48	24,199
	9월	7.51	0.11	9.50	1.22	1.65	7.82	421.38	1.67	0.47	4,194
병점 재이용 지구	5월	6.79	0.90	12.21	25.39	4.92	19.95	216.20	17.44	2.67	131,646
	6월	6.94	1.17	5.39	11.90	2.06	12.82	307.25	6.41	2.11	25,977
	7월	7.37	0.14	7.27	3.36	1.36	8.81	782.00	0.84	2.93	3,630
	8월	7.35	0.43	7.00	3.68	1.23	5.99	234.62	3.05	1.00	2,318
	9월	7.87	0.11	10.03	2.10	1.01	4.26	84.00	1.26	0.26	381
오산 재이용 지구	5월	6.67	1.96	13.28	20.37	3.72	13.81	173.73	8.12	0.42	473
	6월	7.01	1.78	5.64	11.37	2.98	13.14	413.50	13.71	0.96	17,304
	7월	7.33	0.63	6.65	4.79	1.60	14.83	749.63	0.95	1.40	29,425
	8월	7.29	0.62	7.36	2.21	1.46	10.48	211.40	1.61	0.60	198,783
	9월	7.59	0.23	8.65	1.41	2.52	13.36	933.00	2.06	1.16	90,048
미처리 지구	5월	6.92	0.35	11.19	17.58	2.78	10.89	191.40	3.63	0.28	15,235
	6월	7.03	0.45	6.06	22.62	3.06	25.99	301.14	2.98	0.62	135
	7월	7.67	0.29	7.04	2.98	0.88	8.65	610.00	3.33	0.17	8,721
	8월	7.43	0.22	7.92	1.47	1.40	5.85	317.86	2.75	0.36	1,080
	9월	7.73	0.20	9.36	0.87	1.68	6.51	464.00	3.72	0.38	46,932

표 3.4.61 시험지구간 논 담수 수질 모니터링 결과 비교 (2013년)

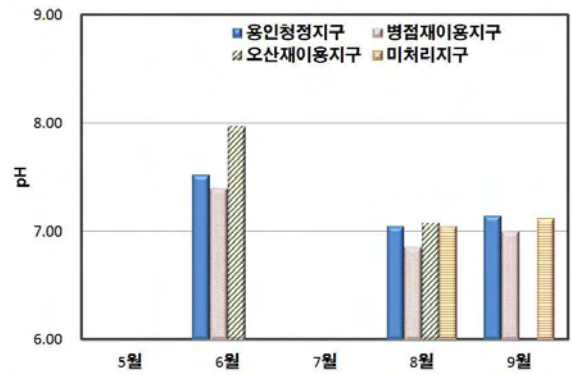
지점명	Month	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
용인 청정 지구	5월										
	6월	7.52	0.25	8.47	9.18	4.03	12.61	107.1	1.61	0.28	1031
	7월										
	8월	7.05	0.15	6.98	3.21	2.77	14.23	492.4	1.12	0.32	476
	9월	7.15	0.17	6.91	2.73	2.26	6.59	252.5	2.25	0.34	817
병점 재이용 지구	5월										
	6월	7.40	0.87	4.24	12.82	9.63	37.07	779.6	10.77	1.95	4195
	7월										
	8월	6.86	0.60	5.30	5.43	3.21	22.98	773.3	6.12	1.34	58
	9월	7.01	0.85	6.00	4.82	2.25	7.43	341.3	7.47	0.68	2033
오산 재이용 지구	5월										
	6월	7.97	1.53	7.01	15.20	5.51	19.87	144.8	3.60	0.51	452
	7월										
	8월	7.08	0.39	6.35	5.41	2.74	17.40	460.0	1.40	0.27	571
	9월										
미처리 지구	5월										
	6월										
	7월										
	8월	7.05	0.17	6.46	1.98	4.96	33.80	763.6	1.79	0.43	1098
	9월	7.12	0.20	6.27	1.80	3.75	18.65	1197.0	2.17	0.81	2200

표 3.4.62 시험지구간 논 담수 수질 모니터링 결과 비교 (2014년)

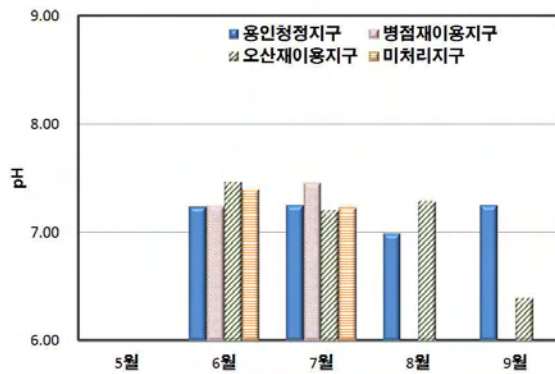
지점명	Month	pH	EC	DO	TOC	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균수
			dS/m	mg/L							MPN
용인 청정 지구	5월										
	6월	7.24	0.26	4.53	13.36	4.75	9.19	52	2.80	0.19	4679
	7월	7.25	0.30	8.67	9.89	4.09	8.05	119	1.61	0.24	3760
	8월	6.99	0.15	9.40	4.07	3.97	8.69	271	0.98	0.16	1147
	9월	7.25	0.19	9.72	5.35	4.86	11.19	485	1.15	0.20	11554
병점 재이용 지구	5월										
	6월	7.24	0.66	3.05	12.98	6.70	12.65	164	3.36	2.04	9401
	7월	7.46	0.67	7.44	17.86	32.34	63.07	2587	9.18	3.15	6167
	8월										
	9월										
오산 재이용 지구	5월										
	6월	7.46	1.19	5.26	13.03	5.12	9.80	38	3.66	0.29	15278
	7월	7.21	1.51	5.12	15.17	7.38	13.96	302	6.18	0.87	33867
	8월	7.29	0.25	10.05	4.58	4.00	7.58	185	0.76	0.34	283
	9월	6.40	0.25	8.95	4.97	4.04	7.80	164	0.74	0.29	1990
미처리 지구	5월										
	6월	7.40	0.37	4.12	9.12	4.54	8.48	68	7.13	0.42	7417
	7월	7.23	0.40	6.21	8.35	6.27	12.84	1598	5.68	2.96	643
	8월										
	9월										



(a) 2012년

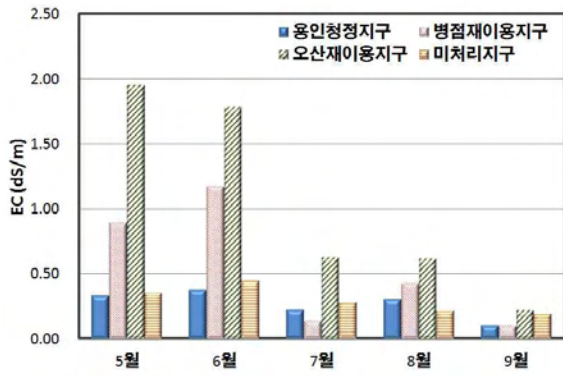


(b) 2013년

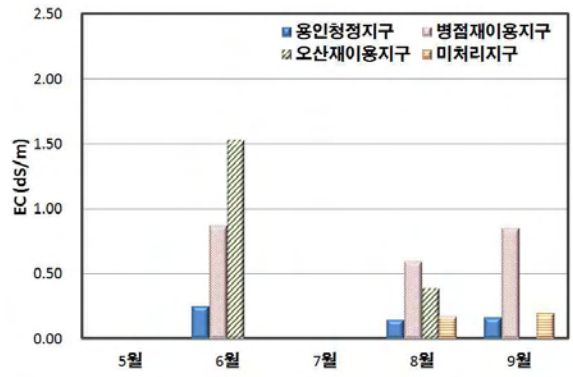


(c) 2014년

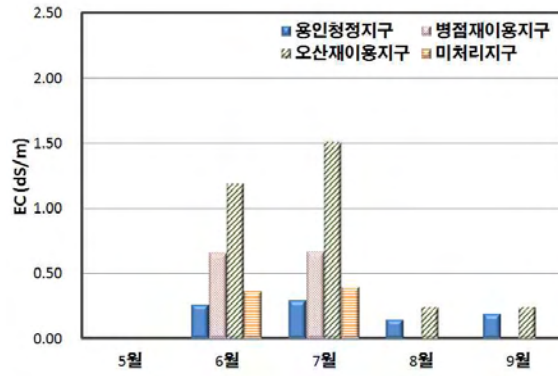
그림 3.4.45 시험지구간 논 담수 pH 분석 결과 비교



(a) 2012년

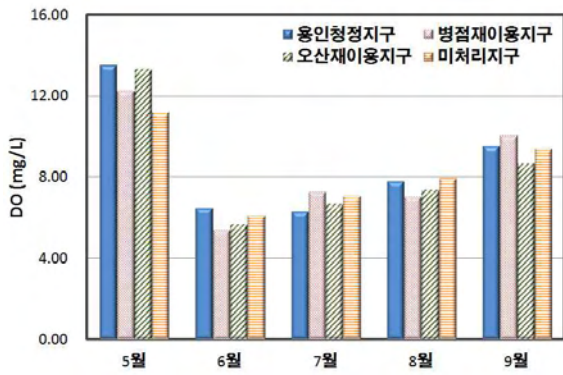


(b) 2013년

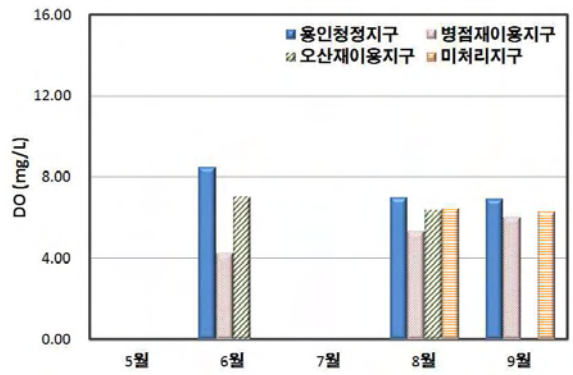


(c) 2014년

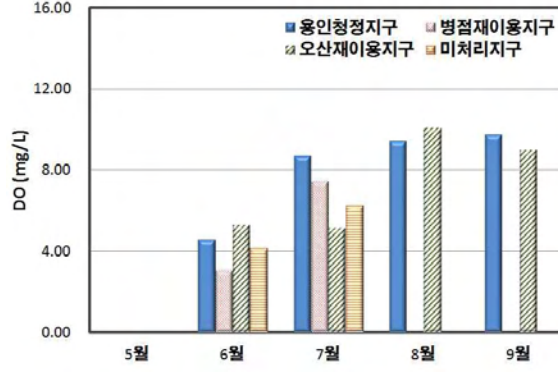
그림 3.4.46 시험지구간 논 담수 EC 분석 결과 비교



(a) 2012년

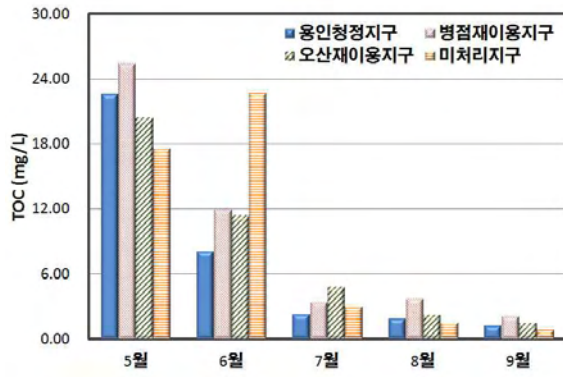


(b) 2013년

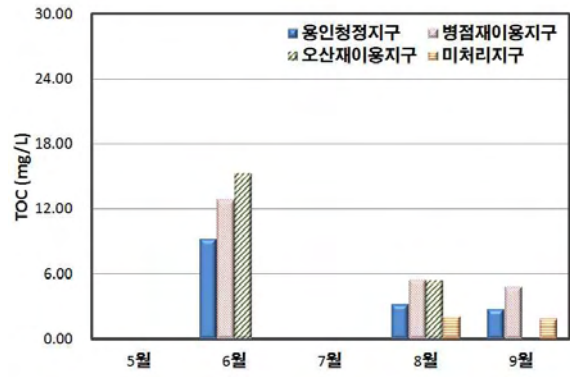


(c) 2014년

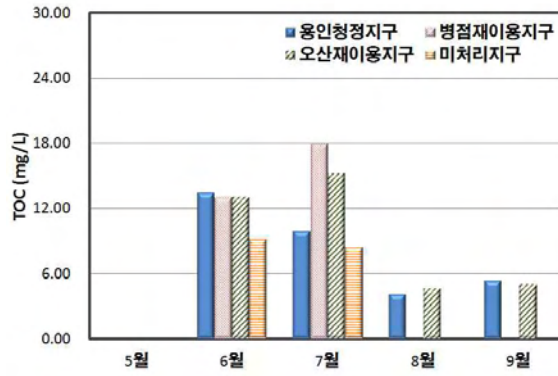
그림 3.4.47 시험지구간 논 담수 DO 분석 결과 비교



(a) 2012년

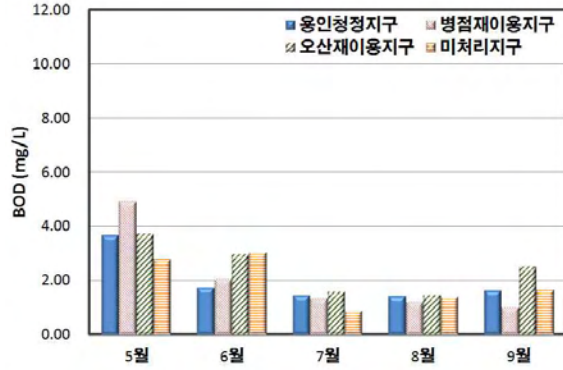


(b) 2013년

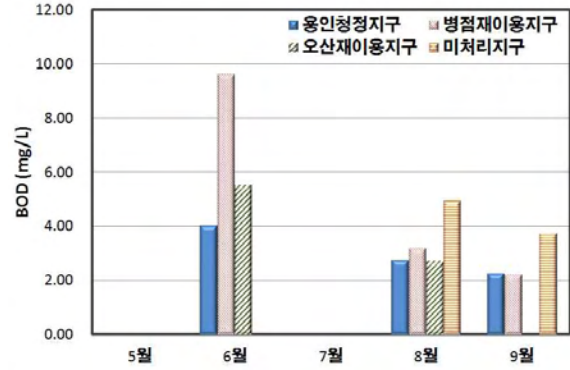


(c) 2014년

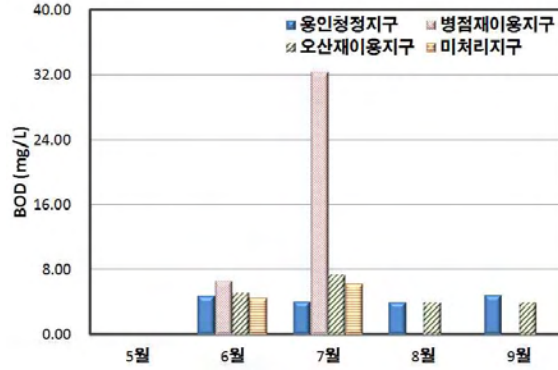
그림 3.4.8 시험지구간 논 담수 TOC 분석 결과 비교



(a) 2012년

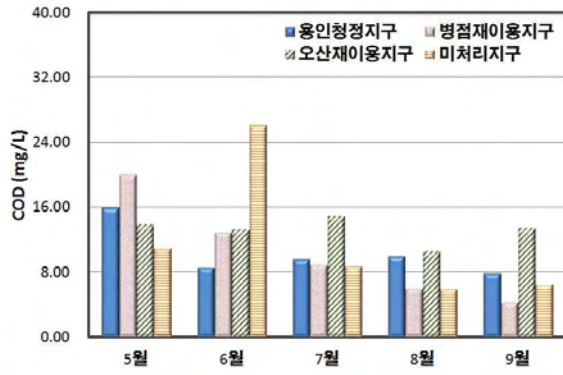


(b) 2013년

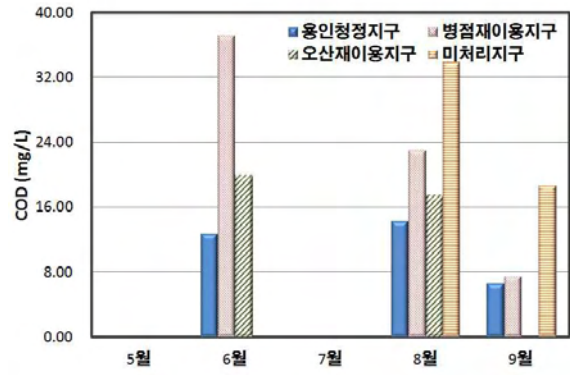


(c) 2014년

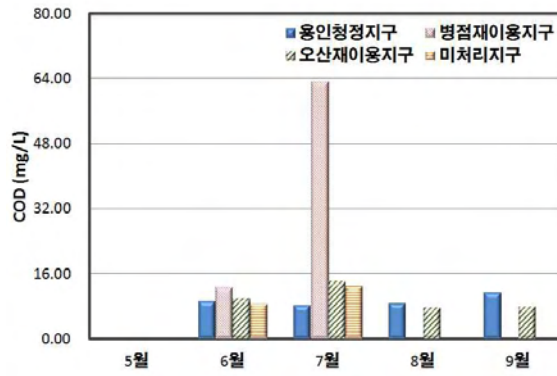
그림 3.4.9 시험지구간 논 담수 BOD 분석 결과 비교



(a) 2012년

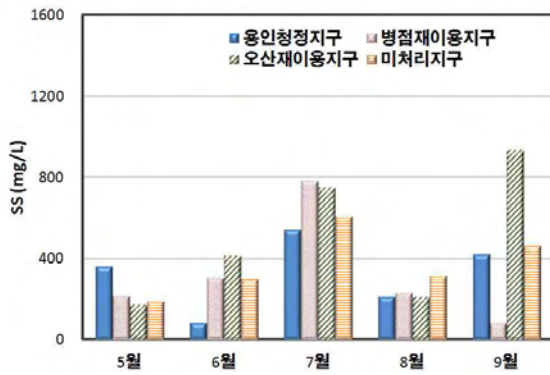


(b) 2013년

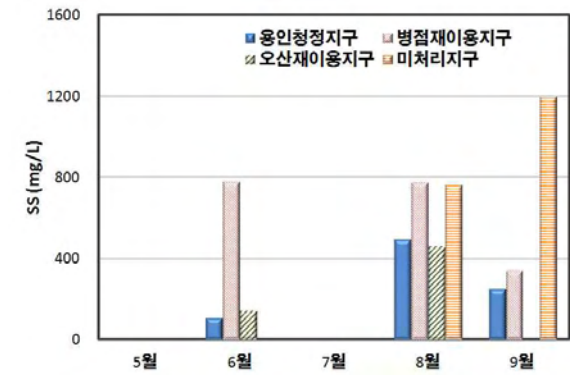


(c) 2014년

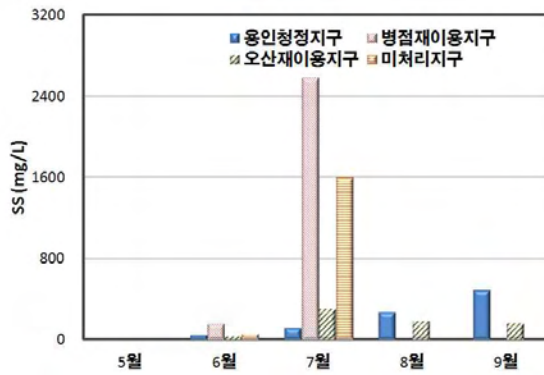
그림 3.4.50 시험지구간 논 담수 COD 분석 결과 비교



(a) 2012년

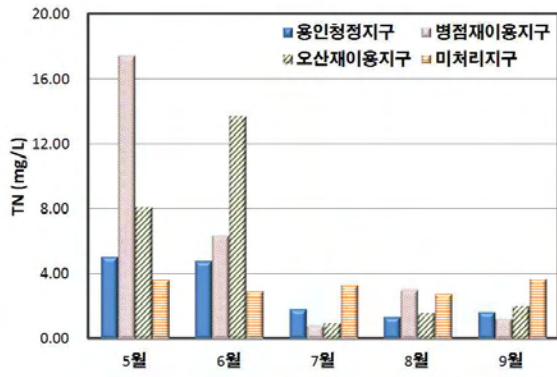


(b) 2013년

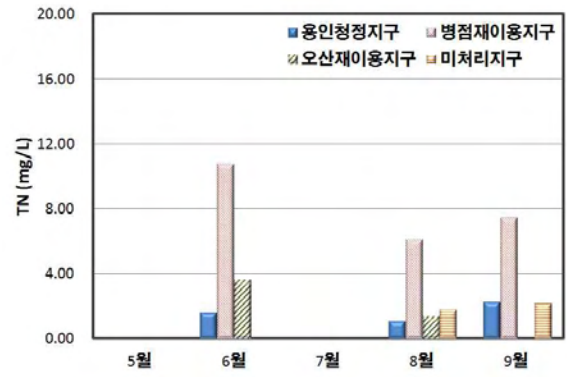


(c) 2014년

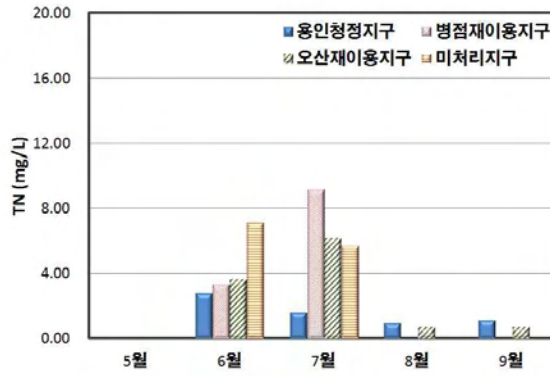
그림 3.4.51 시험지구간 논 담수 SS 분석 결과 비교



(a) 2012년

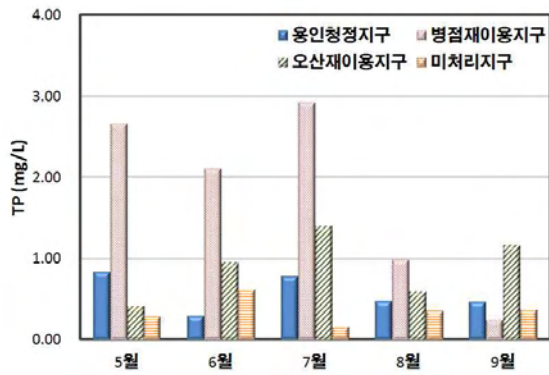


(b) 2013년

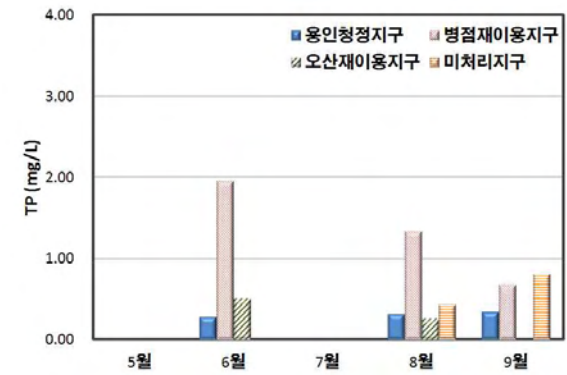


(c) 2014년

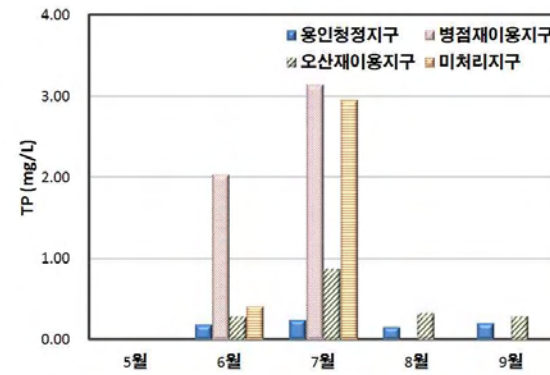
그림 3.4.52 시험지구간 논 담수 T-N 분석 결과 비교



(a) 2012년



(b) 2013년



(c) 2014년

그림 3.4.53 시험지구간 논 담수 T-P 분석 결과 비교

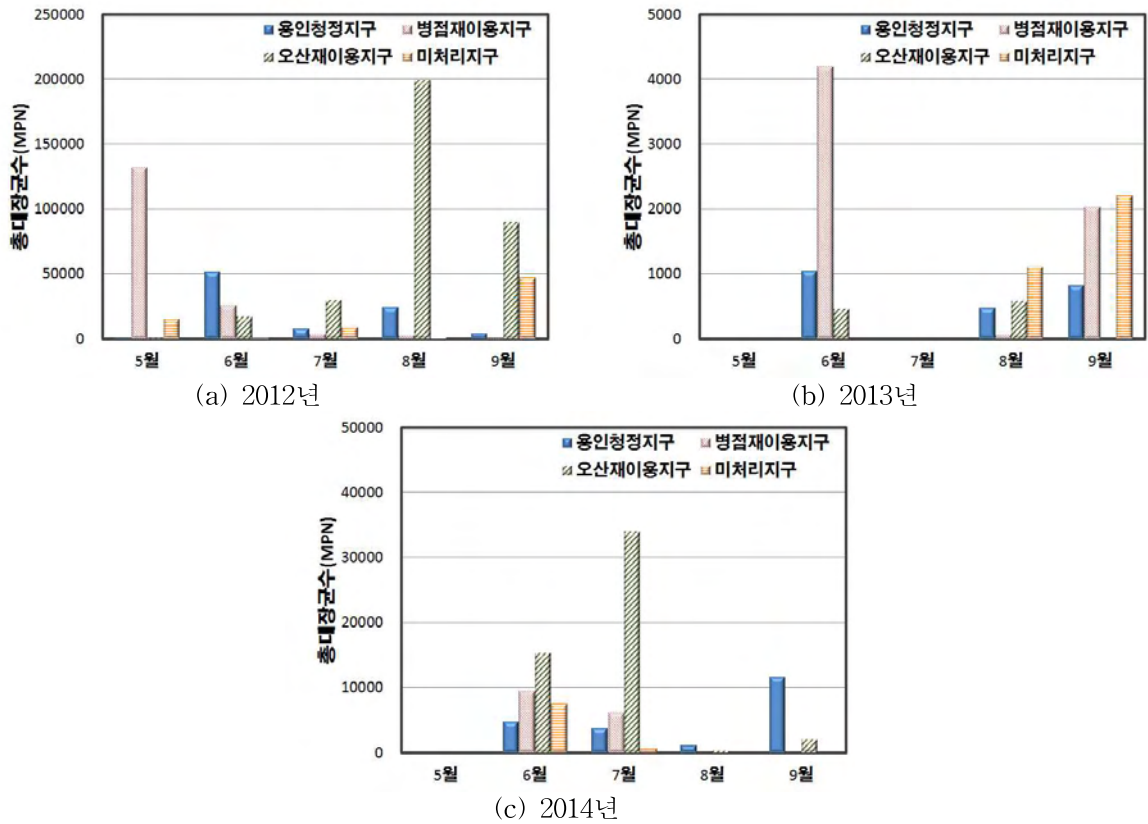


그림 3.454 시험지구간 논 담수 총대장균수 분석 결과 비교

3. 시험지구 토양환경 조사 분석

3.1. 논 토양 화학성분

토양환경 조사 분석은 용인청정지구 및 병점, 오산재이용지구의 시험포장별 논토양을 채취하여 실시하였다. 농업과학기술원(2000)에서 제시한 “토양 및 식물체분석법”에 따라 토양을 표층, 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm 심도별로 나누어 모든 시험포장에 대해 토양 샘플을 채취하였으며, 횟수는 2012년에 총 4회 (씨레질 전, 영농기 2회, 벼 수확 후 등), 2013년에 2회 (씨레질 전, 벼 수확 후), 2014년에 1회 (씨레질 전)를 실시하였다. 토양분석항목으로는 pH, EC, 영양염류, 중금속, 양이온 등을 선정하였고, 모니터링 한 시료는 토양 및 식물체분석법 (농업과학기술원, 2000)으로 분석하였으며, 매회 같은 장소에서 모니터링을 실시하여 반복성을 보장하였다. 시료의 분석은 서울대학교 농업과학공동기기센터 (NICEM)에 의뢰하였다.

청정지구 및 간접재이용지구의 논 시험포장의 위치는 수질 조사 분석에서와 같다.



그림 3.4.55 토양 모니터링

토양환경보전법에서 지정한 논토양의 채취심도인 0 ~ 15 cm에 가장 가까운 0 ~ 20 cm의 모니터링 평균값을 도출하였다. pH, EC, 영양염류의 분석결과는 처리구별로 비교하여 심도별로 나타내었고, 중금속함량은 토양환경보전법에 제시된 토양오염물질 중 8개 항목에 대하여 평균 내어 토양오염 우려기준 및 전국 논 오염도, 경기도 논 오염도의 평균값과 비교하였다.

가. 용인 청정지구

표 3.4.63은 2011년 11월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 용인 청정지구의 논 시험포장 심도별 EC, 총질소(T-N), 총인(T-P), NH₄-N, P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), NO₃-N는 20 cm에서 가장 높은 값을 보였다.



그림 3.4.56 용인청정지구 논 시험포장 전경

표 3.4.63 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					%
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	5.73	0.98	9,805	21.96	21.96	500.33	50.84	4.43
	YIP#01-20cm	6.13	0.94	9,365	19.60	21.96	560.33	59.20	4.61
	YIP#01-40cm	5.54	0.35	3,480	7.05	9.41	229.33	13.70	2.22
	YIP#01-60cm	5.81	0.19	1,885	ND	9.41	169.30	2.87	0.82
	YIP#01-80cm	5.97	0.20	1,970	ND	9.41	188.33	4.41	0.93
	YIP#02-0cm	4.90	0.78	7,785	15.68	21.12	582.67	39.87	3.50
	YIP#02-20cm	5.39	0.65	6,470	15.68	18.82	600.33	45.20	3.57
	YIP#02-40cm	5.38	0.80	8,025	15.68	19.60	632.67	46.12	3.73
	YIP#02-60cm	6.26	0.61	6,055	5.48	17.25	380.00	21.74	2.04
	YIP#02-80cm	6.24	0.55	5,530	1.56	13.33	274.80	6.34	1.76
	YIP#03-0cm	5.35	0.63	6,290	16.46	13.33	534.00	47.30	3.34
	YIP#03-20cm	6.61	0.50	4,975	6.27	16.46	389.67	21.26	2.40
	YIP#03-40cm	6.48	0.39	3,925	3.13	14.11	307.53	9.12	1.90
	YIP#03-60cm	5.95	0.36	3,570	ND	3.91	269.23	4.53	1.03
	YIP#03-80cm	5.96	0.30	3,010	ND	10.19	211.20	2.71	0.54
	YIP#04-0cm	5.48	0.46	4,610	12.54	16.46	635.67	88.79	3.25
	YIP#04-20cm	6.05	0.32	3,230	5.48	18.03	537.33	39.12	2.35
	YIP#04-40cm	6.09	0.30	3,030	2.35	19.60	357.33	38.92	1.32
	YIP#04-60cm	6.14	0.24	2,385	1.56	14.90	296.63	5.90	1.39
	YIP#04-80cm	6.22	0.11	1,110	ND	10.97	297.47	10.14	1.24
YIP#05-0cm	5.00	0.63	6,325	16.46	14.90	744.67	94.03	3.16	
YIP#05-20cm	5.67	0.59	5,935	18.03	17.25	777.00	91.24	3.10	
YIP#05-40cm	6.08	0.27	2,745	4.70	18.82	438.67	29.53	1.55	
YIP#05-60cm	6.04	0.31	3,145	2.35	14.90	287.03	10.91	1.03	
YIP#05-80cm	5.97	0.29	2,930	2.35	12.54	392.33	17.94	1.30	

* ND: not detected

표 3.4.64 ~ 표 3.4.67은 2012년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 용인 청정 지구의 논 시험포장 총질소(T-N), 총인(T-P), NH₄-N, P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), EC는 표층(0 cm), NO₃-N는 40 cm에서 가장 높은 값을 보였다.

표 3.4.64 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	5.07	0.746	2,389	14.749	12.104	478.600	63.45	4.40
	YIP#01-20cm	5.42	0.692	2,045	12.776	8.068	423.933	44.80	4.14
	YIP#01-40cm	4.95	0.750	1,647	13.449	8.741	256.267	22.21	2.97
	YIP#01-60cm	5.41	0.375	1,168	8.741	8.068	308.667	11.79	2.24
	YIP#01-80cm	5.74	0.225	853	2.014	9.413	259.933	8.87	1.51
	YIP#02-0cm	4.82	1.170	1,886	20.848	19.502	631.600	58.29	3.65
	YIP#02-20cm	5.17	0.818	1,682	20.175	10.086	594.933	61.91	2.61
	YIP#02-40cm	5.23	1.080	1,856	21.520	8.741	623.600	47.33	3.80
	YIP#02-60cm	6.10	0.724	1,122	14.798	8.744	434.600	28.18	1.26
	YIP#02-80cm	6.10	0.639	815	11.434	7.399	355.933	8.79	1.30
	YIP#03-0cm	5.54	0.824	1,983	28.250	10.089	619.933	73.94	4.42
	YIP#03-20cm	6.21	0.753	1,536	14.798	7.399	517.267	35.69	2.32
	YIP#03-40cm	6.27	0.647	1,157	10.762	9.417	327.900	12.42	2.36
	YIP#03-60cm	6.01	0.701	1,262	9.417	10.762	378.933	16.72	1.69
	YIP#03-80cm	5.76	0.628	1,170	8.744	8.071	402.267	29.38	2.54
	YIP#04-0cm	5.33	0.803	1,886	19.506	16.815	660.267	182.54	2.81
	YIP#04-20cm	5.37	0.663	1,883	14.798	12.107	699.600	195.72	4.17
	YIP#04-40cm	5.80	0.530	1,359	10.089	16.815	524.600	105.95	2.29
	YIP#04-60cm	6.09	0.431	1,157	8.744	11.434	396.600	80.82	2.50
	YIP#04-80cm	6.20	0.279	818	8.071	12.780	319.500	11.85	2.41
YIP#05-0cm	5.08	0.950	1,891	7.197	22.203	760.267	153.55	3.35	
YIP#05-20cm	5.42	0.876	1,711	31.613	24.221	761.267	122.31	2.65	
YIP#05-40cm	6.08	0.353	767	3.363	13.459	384.933	20.39	1.57	
YIP#05-60cm	5.95	0.397	794	ND	10.096	383.933	18.75	0.90	
YIP#05-80cm	6.18	0.208	697	ND	12.114	350.600	9.75	1.58	

* ND: not detected

표 3.4.65 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	6.42	0.43	1,699	34.32	1.38	205.23	14.78	3.00
	YIP#01-20cm	5.93	0.29	1,614	5.50	ND	432.33	25.30	3.17
	YIP#01-40cm	5.81	0.30	1,266	4.81	ND	210.70	14.76	2.42
	YIP#01-60cm	6.21	1.07	1,192	2.75	ND	236.23	16.88	2.55
	YIP#01-80cm	6.28	0.15	601	2.82	0.69	166.83	5.34	1.75
	YIP#02-0cm	6.38	0.24	1,425	28.83	21.75	745.33	59.70	3.21
	YIP#02-20cm	6.33	0.28	1,493	ND	ND	643.00	43.30	3.78
	YIP#02-40cm	6.07	0.25	535	ND	8.93	350.33	0.65	1.29
	YIP#02-60cm	6.02	0.27	508	0.01	5.50	439.00	1.20	1.91
	YIP#02-80cm	6.06	0.25	609	15.11	19.23	441.67	3.51	1.90
	YIP#03-0cm	6.24	0.38	1,057	42.56	1.38	537.67	17.09	1.51
	YIP#03-20cm	6.45	0.26	1,073	21.97	0.69	505.00	17.58	2.08
	YIP#03-40cm	6.85	0.33	725	9.62	2.07	316.36	7.46	2.27
	YIP#03-60cm	6.81	0.21	321	ND	2.12	251.56	1.88	1.83
	YIP#03-80cm	6.77	0.22	376	ND	ND	284.30	3.44	2.28
	YIP#04-0cm	6.75	0.48	1,741	28.83	ND	637.33	50.22	4.19
	YIP#04-20cm	6.85	0.37	1,293	3.44	ND	563.66	36.10	3.68
	YIP#04-40cm	6.88	0.27	1,115	ND	ND	610.33	28.84	4.11
	YIP#04-60cm	6.77	0.24	895	ND	ND	508.33	18.56	2.79
	YIP#04-80cm	6.76	0.18	ND	ND	ND	449.66	19.76	시료없음
YIP#05-0cm	6.31	0.60	1,955	63.15	ND	832.33	27.11	4.20	
YIP#05-20cm	6.29	0.57	1,839	10.30	ND	시료부족	20.79	3.20	
YIP#05-40cm	6.37	0.36	1,381	17.85	ND	632.99	19.20	3.72	
YIP#05-60cm	6.41	0.14	631	ND	ND	373.66	6.36	1.84	
YIP#05-80cm	6.74	0.18	574	ND	ND	434.66	1.08	1.77	

* ND: not detected

표 3.4.66 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	5.22	0.700	1,942	16.470	19.220	750.333	59.10	3.75
	YIP#01-20cm	5.90	0.544	1,878	15.100	16.470	737.333	39.48	3.53
	YIP#01-40cm	5.88	0.489	2,001	16.470	13.040	457.333	41.80	3.80
	YIP#01-60cm	5.24	0.766	1,772	17.850	9.610	329.867	40.97	3.69
	YIP#01-80cm	5.31	0.618	1,787	16.470	8.920	318.367	36.64	3.57
	YIP#02-0cm	5.25	0.557	1,750	15.790	7.550	423.667	124.09	3.23
	YIP#02-20cm	5.80	0.336	870	14.410	8.240	441.667	14.55	1.63
	YIP#02-40cm	5.95	0.240	660	13.730	6.180	281.767	9.61	1.28
	YIP#02-60cm	5.97	0.225	603	13.730	4.120	226.900	7.65	1.17
	YIP#02-80cm	5.95	0.216	581	11.670	1.370	272.867	9.21	1.03
	YIP#03-0cm	6.07	0.423	1,115	10.980	3.430	577.333	32.16	1.97
	YIP#03-20cm	5.82	0.446	1,358	10.300	ND	553.000	23.03	2.54
	YIP#03-40cm	6.03	0.324	1,175	9.610	ND	429.333	22.47	2.52
	YIP#03-60cm	6.37	0.231	545	7.550	ND	554.000	9.69	1.14
	YIP#03-80cm	6.40	0.197	537	6.180	ND	396.333	10.86	0.97
	YIP#04-0cm	6.99	0.541	2,122	6.200	ND	580.667	88.95	4.63
	YIP#04-20cm	7.56	0.542	1,723	4.800	ND	583.000	90.81	3.60
	YIP#04-40cm	7.78	0.462	1,503	4.120	ND	551.000	75.94	3.08
	YIP#04-60cm	7.91	0.339	1,019	4.120	ND	521.333	53.18	2.08
	YIP#04-80cm	7.79	0.389	951	4.120	0.040	526.000	67.02	1.94
YIP#05-0cm	6.28	0.352	1,853	4.110	ND	827.000	69.60	3.38	
YIP#05-20cm	6.07	0.312	1,856	4.130	ND	838.667	64.61	3.36	
YIP#05-40cm	6.16	0.465	1,043	7.550	ND	734.333	64.73	1.93	
YIP#05-60cm	6.44	0.289	754	4.800	ND	558.000	38.37	1.37	
YIP#05-80cm	6.46	0.269	607	4.800	ND	352.667	21.32	1.02	

* ND: not detected

표 3.4.67 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	5.68	0.679	1,955	ND	9.610	406.333		4.05
	YIP#01-20cm	5.78	0.554	2,003	ND	8.240	394.333		4.22
	YIP#01-40cm	6.27	0.155	625	ND	8.240	132.567		1.39
	YIP#01-60cm	6.35	0.129	454	ND	3.430	180.033		1.06
	YIP#01-80cm	6.46	0.112	390	ND	4.800	256.467		1.07
	YIP#02-0cm	5.97	0.257	1,357	ND	2.060	620.000		3.25
	YIP#02-20cm	6.79	0.245	850	ND	3.430	282.733		1.99
	YIP#02-40cm	6.68	0.306	475	ND	0.690	365.000		0.99
	YIP#02-60cm	6.89	0.273	354	ND	ND	302.500		0.80
	YIP#02-80cm	6.76	0.217	247	ND	15.790	275.933		0.56
	YIP#03-0cm	5.19	0.339	1,153	ND	10.300	530.333		2.66
	YIP#03-20cm	6.72	0.176	483	ND	6.870	340.333		1.24
	YIP#03-40cm	7.19	0.129	203	ND	6.180	240.233		0.65
	YIP#03-60cm	7.29	0.171	255	ND	6.870	253.433		0.72
	YIP#03-80cm	7.03	0.189	371	ND	5.490	227.833		0.94
	YIP#04-0cm	6.21	0.282	1,758	ND	4.810	648.000		3.59
	YIP#04-20cm	6.38	0.212	1,312	ND	6.870	487.000		2.88
	YIP#04-40cm	6.67	0.183	906	ND	4.120	386.333		1.74
	YIP#04-60cm	6.83	0.217	726	ND	12.360	281.433		1.57
	YIP#04-80cm	7.04	0.142	637	ND	7.550	270.633		1.47
YIP#05-0cm	5.94	0.474	1,772	ND	2.750	744.000		3.72	
YIP#05-20cm	6.19	0.319	1,407	ND	4.120	627.667		2.99	
YIP#05-40cm	6.76	0.233	1,053	ND	2.060	444.333		2.21	
YIP#05-60cm	6.92	0.160	752	ND	ND	309.733		1.72	
YIP#05-80cm	6.85	0.105	476	ND	ND	236.800		1.26	

* ND: not detected

표 3.4.68 ~ 표 3.4.69는 2013년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 0 ~ 20 cm의 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다.

표 3.4.68 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01	5.88	1.000	2,424	13.041	17.845	487.000		4.75
	YIP#02	4.84	0.596	1,581	8.236	19.904	660.667		2.99
	YIP#03	5.51	0.591	1,318	4.804	19.904	563.667		2.65
	YIP#04	5.29	0.620	1,914	10.981	17.845	652.333		3.79
	YIP#05	5.11	0.768	1,795	13.041	18.531	810.333		3.52

* ND: not detected

표 3.4.69 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01	5.88	0.555	1,870	15.100	ND	320.783	38.800	3.83
	YIP#02	5.10	0.653	1,570	17.159	ND	522.050	164.853	2.91
	YIP#03	4.73	0.699	1,760	20.590	ND	591.050	59.498	3.83
	YIP#04	6.16	1.145	2,090	19.904	1.373	508.717	127.909	4.47
	YIP#05	5.39	0.667	2,000	21.277	ND	706.383	107.167	3.65

* ND: not detected

표 3.4.70은 2014년 4월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 용인 청정지구의 논 시험포장 총질소(T-N), 총인(T-P), P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), EC는 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다. NH₄-N 및 NO₃-N의 경우는 대부분이 검출되지 않았다.

표 3.4.70 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	6.07	0.260	2,440	8.170	ND	428.128	60.44	4.91
	YIP#01-20cm	6.08	0.206	2,390	6.450	ND	471.225	57.77	4.78
	YIP#01-40cm	5.47	0.060	1,140	1.290	ND	218.853	15.21	1.88
	YIP#01-60cm	5.42	0.022	410	ND	ND	160.215	7.32	0.67
	YIP#01-80cm	5.51	0.020	370	ND	ND	186.748	6.56	0.53
	YIP#02-0cm	5.10	0.092	1,510	2.150	ND	636.208	129.13	2.72
	YIP#02-20cm	5.26	0.076	1,360	1.290	ND	592.164	76.32	2.59
	YIP#02-40cm	5.87	0.054	750	ND	ND	445.933	13.92	1.22
	YIP#02-60cm	5.66	0.044	470	ND	ND	398.272	9.27	0.55
	YIP#02-80cm	5.40	0.043	470	ND	ND	363.975	15.03	0.79
	YIP#03-0cm	4.97	0.079	1,320	ND	ND	588.290	52.19	2.51
	YIP#03-20cm	5.53	0.094	1,240	ND	0.860	580.238	46.63	2.51
	YIP#03-40cm	6.97	0.060	600	ND	ND	315.681	19.86	1.08
	YIP#03-60cm	5.67	0.044	420	ND	ND	258.048	9.11	0.77
	YIP#03-80cm	5.35	0.035	300	ND	ND	193.798	3.21	0.49
	YIP#04-0cm	6.00	0.146	1,990	ND	8.600	716.056	135.90	4.14
	YIP#04-20cm	6.09	0.143	1,900	1.290	3.440	717.476	138.11	3.85
	YIP#04-40cm	6.30	0.074	990	ND	1.290	499.666	67.32	1.92
	YIP#04-60cm	6.28	0.069	790	ND	ND	339.848	22.57	1.21
	YIP#04-80cm	6.34	0.047	670	ND	ND	345.647	11.15	1.26
YIP#05-0cm	5.25	0.151	1,860	10.800	6.450	793.916	130.26	3.33	
YIP#05-20cm	5.43	0.174	1,910	9.460	6.020	851.185	133.14	3.46	
YIP#05-40cm	5.53	0.175	1,920	8.170	6.880	808.252	139.83	3.50	
YIP#05-60cm	6.03	0.060	790	ND	1.720	391.695	39.96	1.34	
YIP#05-80cm	6.07	0.053	710	ND	ND	345.805	22.18	1.36	

* ND: not detected

나. 오산 간접재이용지구



그림 3.4.57 오산재이용지구 논 시험포장 전경

표 3.4.71은 2011년 11월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 오산재이용지구의 논 시험포장 심도별 EC, 총질소(T-N), NH₄-N, P₂O₅는 표층으로 갈수록 높

계 측정되었으며, pH는 60 cm, NO₃-N은 20 cm, 총인(T-P) 및 유기물함량은 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다.

표 3.4.71 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03.)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01-0cm	5.11	1.45	14,450	45.50	36.08	596.00	77.10	2.71
	OSP#01-20cm	6.27	0.54	5,445	30.59	33.73	494.33	39.44	1.69
	OSP#01-40cm	6.37	0.51	5,140	27.45	32.94	284.67	10.59	2.71
	OSP#01-60cm	6.18	0.51	5,110	25.89	29.02	345.67	4.83	1.16
	OSP#01-80cm	6.10	0.61	6,100	2.35	29.81	370.67	2.29	0.98
	OSP#02-0cm	5.10	1.24	12,350	39.22	39.22	503.00	81.51	3.01
	OSP#02-20cm	5.45	0.99	9,855	45.50	41.57	566.00	72.46	3.05
	OSP#02-40cm	5.82	0.72	7,205	36.08	36.08	398.67	40.36	2.10
	OSP#02-60cm	6.29	0.52	5,165	20.39	32.16	263.80	6.49	1.05
	OSP#02-80cm	6.24	0.58	5,820	28.24	29.02	368.67	5.08	1.52
	OSP#03-0cm	5.03	2.87	28,650	54.12	40.00	1,042.33	87.37	5.02
	OSP#03-20cm	5.92	1.80	18,000	37.65	43.93	1,031.67	99.37	4.73
	OSP#03-40cm	6.28	1.41	14,100	39.22	42.36	589.33	54.97	3.16
	OSP#03-60cm	6.45	1.22	12,150	17.26	27.45	387.67	3.51	2.10
	OSP#03-80cm	6.48	1.15	11,500	17.26	29.02	448.33	2.31	4.88
	OSP#04-0cm	5.44	2.52	25,200	21.96	27.45	637.67	59.84	1.85
OSP#04-20cm	6.76	1.12	11,150	40.79	31.38	323.63	6.00	2.09	
OSP#04-40cm	6.77	0.89	8,920	22.75	28.24	367.00	0.96	1.75	
OSP#04-60cm	6.59	0.75	7,535	14.90	28.24	396.00	2.81	1.05	
OSP#04-80cm	6.60	0.67	6,695	14.12	26.67	353.67	0.73	1.79	

표 3.4.71 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03.) (계속)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#05-0cm	5.53	0.80	8,035	28.24	30.59	818.33	16.97	1.86
	OSP#05-20cm	5.40	0.93	9,270	29.02	47.85	867.33	17.79	1.94
	OSP#05-40cm	5.68	1.27	12,700	32.16	36.08	762.33	22.52	2.02
	OSP#05-60cm	6.25	1.09	10,900	28.24	47.06	264.27	4.86	2.32
	OSP#05-80cm	5.78	1.06	10,600	25.10	28.24	375.33	1.57	1.77

표 3.4.72 ~ 표 3.4.75는 2012년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 오산재이용지구의 논 시험포장에서는 EC, 총질소(T-N), 총인(T-P), NH₄-N, P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 표층으로 갈수록 낮게 측정되었다.

표 3.4.72 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					%
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01-0cm	6.30	1.655	1,652	39.012	8.744	601.600	114.62	3.39
	OSP#01-20cm	6.31	0.773	1,168	11.434	15.470	406.267	44.97	2.26
	OSP#01-40cm	6.15	0.796	1,068	10.089	10.762	349.600	37.43	1.85
	OSP#01-60cm	6.24	0.765	1,055	9.417	15.470	286.800	21.73	1.62
	OSP#01-80cm	6.01	0.724	648	3.363	12.780	339.600	6.97	1.01
	OSP#02-0cm	6.12	0.748	1,951	17.488	11.434	603.267	78.51	4.09
	OSP#02-20cm	6.41	0.491	947	7.399	14.798	240.467	15.99	1.45
	OSP#02-40cm	6.59	0.505	686	2.690	10.089	449.267	5.80	1.20
	OSP#02-60cm	6.29	0.497	695	4.708	8.744	350.600	10.61	0.99
	OSP#02-80cm	6.31	0.473	702	0.674	8.071	329.967	9.60	1.26
	OSP#03-0cm	5.80	2.165	2,798	31.613	8.744	769.933	78.47	5.18
	OSP#03-20cm	6.51	0.981	2,604	18.883	8.071	716.267	87.15	4.45
	OSP#03-40cm	6.10	0.805	1,200	4.036	12.780	342.933	24.40	1.89
	OSP#03-60cm	5.72	1.010	1,001	4.708	12.107	321.600	8.22	1.76
	OSP#03-80cm	6.04	0.798	745	2.018	10.089	315.267	3.40	1.26
	OSP#04-0cm	6.51	1.465	2,903	36.994	10.089	691.600	99.70	5.21
	OSP#04-20cm	6.53	1.220	2,174	16.143	11.434	470.267	67.51	4.12
	OSP#04-40cm	6.76	1.085	1,162	5.381	12.107	290.167	1.13	1.70
	OSP#04-60cm	6.77	1.000	1,106	2.690	8.068	276.633	1.62	1.95
	OSP#04-80cm	6.61	0.725	772	2.018	9.413	257.200	2.04	1.37
OSP#05-0cm	6.54	0.803	1,178	33.631	10.086	887.600	28.93	1.81	
OSP#05-20cm	6.15	1.440	1,076	10.762	14.794	636.267	13.32	1.88	
OSP#05-40cm	6.37	0.798	2,037	9.417	13.449	258.833	10.49	3.59	
OSP#05-60cm	6.26	0.840	936	2.018	10.086	189.867	1.10	1.51	
OSP#05-80cm	6.14	0.876	858	3.363	8.741	276.800	0.68	1.18	

* ND: not detected

표 3.4.73 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					%
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01-0cm	5.80	4.07	1,326	170.21	6.18	584.00	31.64	2.42
	OSP#01-20cm	6.38	0.71	818	17.16	6.87	271.17	16.67	1.77
	OSP#01-40cm	6.31	0.64	533	4.12	8.24	206.83	5.44	1.38
	OSP#01-60cm	6.50	0.56	275	ND	0.69	205.67	2.67	0.94
	OSP#01-80cm	6.34	0.76	343	ND	0.65	203.30	1.43	1.06
	OSP#02-0cm	6.61	0.93	1,342	35.69	0.76	476.33	49.45	2.49
	OSP#02-20cm	6.22	0.73	832	17.85	0.64	434.33	16.86	1.70
	OSP#02-40cm	6.13	0.81	873	8.92	5.50	223.53	13.16	1.66
	OSP#02-60cm	6.10	0.48	697	2.75	5.30	190.07	7.84	1.31
	OSP#02-80cm	6.00	0.71	725	5.49	6.87	183.07	5.47	0.07
	OSP#03-0cm	6.46	1.82	2,874	84.42	6.12	693.67	28.15	4.85
	OSP#03-20cm	6.53	1.53	2,625	21.96	6.18	619.00	46.81	4.51
	OSP#03-40cm	6.56	1.14	1,790	8.24	6.35	410.33	12.89	3.18
	OSP#03-60cm	6.79	1.00	719	ND	6.43	360.00	1.17	1.37
	OSP#03-80cm	6.77	0.97	653	ND	6.21	201.30	0.38	1.36
	OSP#04-0cm	6.56	2.27	2,682	155.11	6.18	605.00	45.40	4.67
	OSP#04-20cm	6.80	0.96	1,790	19.22	6.31	426.00	31.53	3.10
	OSP#04-40cm	6.98	0.86	763	ND	6.02	287.53	8.09	1.35
	OSP#04-60cm	7.06	0.90	703	ND	228.83	250.20	0.28	1.33
	OSP#04-80cm	6.96	0.85	590	ND	10.99	355.33	0.54	1.49
OSP#05-0cm	6.43	0.93	733	2.06	8.93	739.00	6.06	1.35	
OSP#05-20cm	6.59	0.68	349	ND	10.30	656.33	9.08	0.33	
OSP#05-40cm	시료없음	시료없음	ND	시료없음	시료없음	662.33	46.33	시료없음	
OSP#05-60cm	6.21	1.30	1,472	ND	9.62	796.67	46.55	2.83	
OSP#05-80cm	6.62	0.78	1,513	2.75	2.75	425.33	11.59	2.75	

* ND: not detected

표 3.4.74 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					%
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01-0cm	6.51	0.267	1,201	0.690	17.850	416.000	35.40	2.34
	OSP#01-20cm	6.64	0.409	1,249	ND	21.960	482.333	44.02	1.86
	OSP#01-40cm	6.77	0.280	850	ND	22.650	294.633	9.25	1.39
	OSP#01-60cm	6.77	0.303	887	ND	21.960	267.533	9.23	1.33
	OSP#01-80cm	6.00	0.661	1,003	6.860	16.470	303.300	15.31	1.78
	OSP#02-0cm	5.06	1.110	1,498	6.180	14.410	548.333	35.06	2.44
	OSP#02-20cm	5.15	1.385	1,148	8.920	16.470	503.333	30.61	2.79
	OSP#02-40cm	6.21	0.606	603	4.800	13.730	285.133	7.90	1.14
	OSP#02-60cm	6.07	0.854	729	4.800	17.850	294.067	9.98	1.14
	OSP#02-80cm	7.16	2.175	1,701	293.760	44.610	534.333	64.29	2.12
	OSP#03-0cm	5.74	1.875	3,432	25.400	19.220	766.667	41.10	6.08
	OSP#03-20cm	6.38	0.895	2,552	9.610	15.100	635.333	41.09	3.76
	OSP#03-40cm	6.72	0.731	2,211	1.370	13.730	545.000	33.65	3.03
	OSP#03-60cm	6.74	1.025	1,743	ND	10.980	543.000	62.35	2.64
	OSP#03-80cm	6.80	0.910	1,241	ND	13.040	361.667	5.29	1.65
	OSP#04-0cm	6.54	0.752	2,453	ND	14.410	634.000	26.93	3.12
	OSP#04-20cm	6.66	0.840	2,226	ND	20.590	612.667	31.20	3.53
	OSP#04-40cm	6.77	0.863	1,868	ND	14.410	490.000	29.21	2.24
	OSP#04-60cm	6.94	0.988	976	ND	7.550	287.700	3.84	1.54
	OSP#04-80cm	7.10	0.950	666	2.750	8.920	226.867	0.80	1.10
OSP#05-0cm	6.26	0.950	1,054	2.060	6.860	591.333	2.77	1.43	
OSP#05-20cm	6.29	0.989	651	32.940	10.980	515.000	2.12	0.94	
OSP#05-40cm	5.76	1.090	534	ND	3.430	515.000	3.38	0.85	
OSP#05-60cm	5.50	1.160	1,207	ND	6.860	573.667	9.16	1.86	
OSP#05-80cm	5.73	1.330	1,820	6.860	6.860	602.333	13.41	2.47	

* ND: not detected

표 3.4.75 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					%
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01-0cm	6.43	0.597	1,336	8.240	33.630	511.000		2.53
	OSP#01-20cm	7.13	0.635	726	4.120	20.590	215.133		1.32
	OSP#01-40cm	6.99	0.561	594	ND	10.980	200.467		1.18
	OSP#01-60cm	6.64	0.544	497	ND	6.860	222.200		1.08
	OSP#01-80cm	6.41	0.610	486	ND	5.490	299.867		1.18
	OSP#02-0cm	5.56	0.826	1,483	ND	5.390	475.333		3.42
	OSP#02-20cm	6.58	0.524	916	ND	ND	264.500		1.99
	OSP#02-40cm	6.76	0.456	736	ND	ND	194.900		1.43
	OSP#02-60cm	6.74	0.557	642	ND	ND	227.233		1.20
	OSP#02-80cm	6.82	0.582	619	ND	ND	273.100		1.37
	OSP#03-0cm	6.70	0.756	629	ND	ND	228.267		1.23
	OSP#03-20cm	6.83	0.679	1,532	0.690	ND	431.333		2.84
	OSP#03-40cm	6.52	0.649	1,698	0.690	ND	375.667		3.22
	OSP#03-60cm			0		시료없음	시료없음		
	OSP#03-80cm	6.78	0.744	578	ND	ND	225.167		0.99
	OSP#04-0cm	5.83	1.500	2,257	10.300	ND	555.667		4.58
	OSP#04-20cm	7.05	0.904	1,745	9.610	ND	391.667		3.37
	OSP#04-40cm	7.42	0.818	557	6.180	ND	212.733		0.92
	OSP#04-60cm	7.40	0.884	645	4.120	ND	241.467		1.19
	OSP#04-80cm	7.36	0.766	367	2.750	ND	153.700		0.54
OSP#05-0cm	6.70	0.734	821	3.430	ND	648.333		1.57	
OSP#05-20cm	5.50	0.913	334	0.690	ND	478.333		0.48	
OSP#05-40cm	5.86	1.205	2,066	3.430	ND	666.000		4.09	
OSP#05-60cm	6.43	0.959	2,195	1.370	ND	430.333		3.84	
OSP#05-80cm	6.74	0.888	973	ND	ND	153.300		1.70	

* ND: not detected

표 3.4.76 ~ 표 3.4.77은 2013년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 0 ~ 20 cm 의 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다.

표 3.4.76 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01	4.85	1.09	1,485	11.668	44.612	559.000		2.50
	OSP#02	4.99	0.947	1,683	10.981	24.022	501.333		3.39
	OSP#03	5.08	2.155	2,891	23.336	19.904	731.667		5.14
	OSP#04	5.45	1.66	3,023	15.100	19.904	682.333		5.43
	OSP#05	5.70	1.6	1,115	8.922	21.277	739.667		2.29

* ND: not detected

표 3.4.77 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01	5.41	0.631	1,350	20.590	8.236	477.050	103.785	2.76
	OSP#02	4.95	0.690	1,940	30.199	8.922	417.383	79.797	3.80
	OSP#03	5.74	1.940	3,000	26.767	ND	754.383	109.379	5.18
	OSP#04	5.60	1.915	2,610	22.649	ND	668.717	77.513	5.37
	OSP#05	7.17	1.035	1,260	13.041	0.686	636.717	56.889	3.49

* ND: not detected

표 3.4.78은 2014년 4월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 오산 재이용지구의 논 시험포장 총질소(T-N), 총인(T-P), P₂O₅ 및 유기물함량은 포장마다의 차이는 있었지만 대체로 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), EC는 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다. NH₄-N 및 NO₃-N의 경우는 대부분이 검출되지 않았다.

표 3.4.78 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
오산 재이용 지구 (OSP)	OSP#01-0cm	5.20	0.301	1,300	11.600	3.440	332.563	65.382	2.80
	OSP#01-20cm	5.62	0.268	1,230	10.800	3.010	314.179	57.605	2.34
	OSP#01-40cm	6.40	0.130	560	ND	ND	202.086	17.131	0.89
	OSP#01-60cm	6.57	0.128	540	ND	ND	234.724	13.734	1.06
	OSP#01-80cm	6.66	0.115	650	ND	ND	305.280	12.19	1.34
	OSP#02-0cm	5.32	0.248	1,600	1.290	4.730	478.027	73.23	2.93
	OSP#02-20cm	5.86	0.183	1,650	ND	3.440	333.819	82.62	2.93
	OSP#02-40cm	6.30	0.100	650	ND	ND	161.083	9.86	1.13
	OSP#02-60cm	6.27	0.115	690	ND	ND	214.495	8.76	1.14
	OSP#02-80cm	6.03	0.118	640	ND	ND	258.867	9.26	1.49
	OSP#03-0cm	5.21	0.533	2,970	5.160	2.150	540.194	110.89	4.71
	OSP#03-20cm	5.88	0.480	2,920	4.730	ND	577.595	102.93	5.10
	OSP#03-40cm	5.99	0.252	1,940	1.290	ND	447.030	89.90	3.22
	OSP#03-60cm	6.19	0.163	750	ND	ND	207.960	3.57	1.18
	OSP#03-80cm	6.04	0.064	420	ND	ND	210.371	6.07	0.70
	OSP#04-0cm	5.16	0.415	2,790	3.010	ND	526.677	90.74	5.17
	OSP#04-20cm	5.53	0.345	2,850	5.160	ND	525.176	90.74	5.11
	OSP#04-40cm	6.75	0.144	650	ND	ND	234.173	8.98	1.17
	OSP#04-60cm	6.28	0.118	500	ND	ND	221.220	9.20	1.31
	OSP#04-80cm	6.32	0.141	340	ND	ND	212.383	2.25	0.28
OSP#05-0cm	5.94	0.259	1,210	1.720	0.860	576.823	34.58	2.28	
OSP#05-20cm	5.82	0.201	1,190	1.290	2.580	568.253	33.98	2.41	
OSP#05-40cm	5.90	0.239	1,060	0.430	1.290	633.941	30.19	2.08	
OSP#05-60cm	5.37	0.273	1,450	2.580	ND	567.402	46.00	2.82	
OSP#05-80cm	5.72	0.074	2,290	1.720	ND	530.628	48.80	3.79	

* ND: not detected

다. 병점 간접재이용지구



그림 3.4.58 병점재이용지구 논 시험포장 전경

표 3.4.79는 2011년 11월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 병점재이용지구의 논토양에서는 EC, 총질소(T-N), 총인(T-P) 및 P_2O_5 는 표층에 가까워질수록 증가하는 경향을 보였으며, pH는 40 cm, 유기물함량은 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다. 그러나 NH_4-N 의 경우는 결과 값이 부족하여 경향성을 판단하기는 어려웠다.

표 3.4.79 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2011.11.03)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병점 재이용 지구 (BJP)	BJP#01-0cm	5.16	0.73	7,270	12.54	19.60	686.33	98.03	1.95
	BJP#01-20cm	6.47	0.32	3,150	ND	16.46	336.00	25.42	0.84
	BJP#01-40cm	6.75	0.17	1,680	ND	10.97	177.27	6.44	0.34
	BJP#01-60cm	6.69	0.09	931	ND	11.76	172.27	4.96	0.40
	BJP#01-80cm	6.46	0.07	727	ND	11.76	195.60	3.23	0.23
	BJP#02-0cm	5.28	1.41	14,050	14.90	35.29	602.67	162.13	2.24
	BJP#02-20cm	5.46	0.99	9,915	10.19	26.66	551.67	76.53	2.01
	BJP#02-40cm	6.24	0.68	6,750	2.35	21.17	464.00	31.16	1.57
	BJP#02-60cm	6.28	0.68	6,795	ND	10.97	472.33	28.16	1.61
	BJP#02-80cm	6.32	0.61	6,085	ND	17.25	410.33	20.22	1.40
	BJP#03-0cm	5.60	0.86	8,595	9.41	17.25	633.00	116.58	2.75
	BJP#03-20cm	6.31	0.39	3,880	ND	12.54	536.33	28.04	1.72
	BJP#03-40cm	6.60	0.24	2,440	ND	12.54	492.33	27.17	1.18
	BJP#03-60cm	6.62	0.08	828	ND	10.19	305.90	7.99	0.53
	BJP#03-80cm	6.65	0.07	693	ND	12.54	261.57	5.08	0.15
	BJP#04-0cm	5.56	0.82	8,150	10.19	29.80	702.00	127.07	2.14
	BJP#04-20cm	5.97	0.55	5,460	7.05	18.82	664.67	84.73	2.12
	BJP#04-40cm	6.61	0.42	4,215	ND	15.68	438.33	27.25	1.45
	BJP#04-60cm	6.66	0.34	3,415	ND	29.02	378.00	17.37	1.40
	BJP#04-80cm	6.73	0.36	3,635	18.83	29.81	391.67	19.83	1.58
BJP#05-0cm	5.77	1.28	12,800	27.45	36.08	523.67	33.64	3.59	
BJP#05-20cm	6.59	1.09	10,850	20.39	32.16	463.00	30.84	3.14	
BJP#05-40cm	6.76	0.87	8,735	11.77	25.89	241.93	1.22	0.90	
BJP#05-60cm	6.23	0.94	9,445	ND	29.02	272.23	3.81	1.75	
BJP#05-80cm	6.12	0.85	8,515	28.24	28.24	316.20	4.20	1.69	

* ND: not detected

표 3.4.80 ~ 표 3.4.83은 2012년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다. 토양 분석 결과, 병점재이용지구의 논토양에서는 EC, 총질소(T-N), 총인(T-P), P₂O₅ 및 유기물함량은 표층(0 cm)에 가까울수록 증가하는 경향을 보였으며, pH는 60 cm, NO₃-N 및 NH₄-N은 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다.

표 3.4.80 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병점 재이용 지구 (BJP)	BJP#01-0cm	6.20	0.558	1,248	12.780	11.431	673.600	103.53	2.14
	BJP#01-20cm	6.43	0.560	1,152	9.417	12.104	649.267	68.24	1.82
	BJP#01-40cm	6.11	0.576	1,232	14.125	9.413	652.267	87.80	1.87
	BJP#01-60cm	6.58	0.195	371	2.018	12.104	218.367	4.65	0.23
	BJP#01-80cm	6.55	0.134	288	2.018	10.758	226.267	3.19	0.41
	BJP#02-0cm	6.31	0.699	1,520	14.798	12.104	675.933	188.05	3.18
	BJP#02-20cm	6.29	0.614	1,480	24.214	11.431	629.600	151.02	2.47
	BJP#02-40cm	6.45	0.497	880	5.381	12.104	489.600	20.20	1.43
	BJP#02-60cm	6.43	0.584	899	0.673	15.467	390.267	7.25	1.51
	BJP#02-80cm	6.34	0.490	737	ND	12.104	323.567	5.40	1.01
	BJP#03-0cm	5.90	0.868	1,577	15.470	17.485	831.600	130.43	3.33
	BJP#03-20cm	5.87	1.045	1,730	12.107	14.794	785.933	155.03	3.50
	BJP#03-40cm	6.35	0.546	853	6.054	13.449	500.933	42.57	1.44
	BJP#03-60cm	6.33	0.657	1,084	4.036	14.794	640.933	65.48	1.96
	BJP#03-80cm	6.30	0.420	985	21.520	13.449	572.933	52.99	1.87
	BJP#04-0cm	5.69	0.823	1,356	14.794	13.449	791.600	140.92	2.98
	BJP#04-20cm	5.97	0.789	1,353	19.502	15.467	937.600	154.88	2.67
	BJP#04-40cm	6.26	0.563	783	8.068	14.122	372.267	13.48	1.52
	BJP#04-60cm	6.15	0.529	842	8.741	12.776	389.933	17.13	1.34
	BJP#04-80cm	6.18	0.472	632	7.395	11.431	315.400	8.23	0.76
BJP#05-0cm	5.76	0.973	1,988	26.901	10.086	642.600	77.41	3.96	
BJP#05-20cm	6.39	0.625	1,547	16.812	13.449	416.933	24.62	3.36	
BJP#05-40cm	6.21	0.778	839	5.377	10.758	263.067	3.00	0.99	
BJP#05-60cm	5.91	0.648	613	4.032	10.758	222.200	5.00	1.13	
BJP#05-80cm	5.89	0.630	441	2.687	10.758	198.333	6.48	0.58	

* ND: not detected

표 3.4.81 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병점 재이용 지구 (BJP)	BJP#01-0cm	6.21	0.97	1,060	13.05	ND	830.67	49.95	1.29
	BJP#01-20cm	6.30	0.67	917	13.73	4.81	799.67	47.51	1.69
	BJP#01-40cm	6.53	0.48	596	0.01	1.38	546.00	22.01	0.68
	BJP#01-60cm	6.62	0.43	546	ND	ND	487.67	21.75	1.06
	BJP#01-80cm	6.60	0.45	533	ND	ND	398.00	10.22	4.00
	BJP#02-0cm	6.15	2.97	1,213	135.90	ND	738.67	50.35	2.72
	BJP#02-20cm	6.49	0.83	568	0.69	ND	451.33	10.57	1.41
	BJP#02-40cm	6.62	0.83	483	ND	ND	375.33	4.51	1.77
	BJP#02-60cm	6.67	0.67	549	ND	ND	358.67	4.78	0.94
	BJP#02-80cm	6.57	0.76	450	ND	ND	325.30	6.91	0.83
	BJP#03-0cm	6.60	1.39	1,370	9.62	14.42	680.67	42.93	3.08
	BJP#03-20cm	6.61	0.80	903	2.07	4.13	622.00	36.26	1.45
	BJP#03-40cm	6.77	0.62	747	ND	ND	408.00	1.95	0.91
	BJP#03-60cm	6.83	0.44	645	ND	ND	266.77	1.56	0.85
	BJP#03-80cm	6.67	0.41	609	ND	ND	248.77	1.26	1.48
	BJP#04-0cm	6.39	0.99	1,400	43.93	ND	695.67	48.06	2.13
	BJP#04-20cm	6.65	0.61	615	2.07	10.99	425.33	8.48	1.08
	BJP#04-40cm	6.54	0.57	ND	2.09	6.18	379.00	5.57	시료없음
	BJP#04-60cm	6.49	0.54	599	1.38	2.07	376.67	6.39	1.42
	BJP#04-80cm	6.67	0.48	393	ND	2.10	271.50	7.95	0.46
BJP#05-0cm	6.36	0.91	1,672	52.17	ND	805.67	34.06	3.19	
BJP#05-20cm	6.58	0.59	1,644	26.77	0.69	747.67	29.61	3.51	
BJP#05-40cm	6.49	0.75	1,650	13.73	1.38	289.10	21.90	4.17	
BJP#05-60cm	6.50	0.69	873	6.87	3.44	671.00	0.84	2.61	
BJP#05-80cm	6.62	0.54	623	0.69	2.75	365.33	0.13	1.57	

* ND: not detected

표 3.4.82 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병접 재이용 지구 (BJP)	BJP#01-0cm	6.52	0.470	1,230	2,060	2,750	785.667	54.07	1.86
	BJP#01-20cm	6.48	0.538	1,150	4,120	2,060	779.667	47.31	1.82
	BJP#01-40cm	6.48	0.599	852	3,430	ND	526.333	17.97	1.01
	BJP#01-60cm	6.60	0.493	756	4,120	ND	378.333	11.34	0.79
	BJP#01-80cm	6.61	0.477	596	3,430	ND	315.000	6.10	1.09
	BJP#02-0cm	5.94	1.265	1,476	6,860	ND	677.667	103.35	2.84
	BJP#02-20cm	6.16	1.145	1,557	6,180	ND	743.333	103.71	3.00
	BJP#02-40cm	6.19	1.600	1,602	5,490	ND	682.000	98.14	2.83
	BJP#02-60cm	6.77	1.425	1,314	6,860	ND	652.667	69.90	2.57
	BJP#02-80cm	6.55	1.170	1,375	8,240	ND	670.333	85.94	2.92
	BJP#03-0cm	6.21	0.691	1,732	7,550	2,750	673.000	96.47	3.36
	BJP#03-20cm	6.39	0.652	1,385	0,690	6,860	659.333	76.23	2.78
	BJP#03-40cm	6.74	0.697	1,183	0,680	ND	554.000	48.04	2.48
	BJP#03-60cm	7.04	0.623	848	ND	ND	445.333	41.38	1.67
	BJP#03-80cm	7.25	0.619	712	2,750	ND	374.333	34.83	1.53
	BJP#04-0cm	5.83	0.274	1,371	1,370	ND	621.333	116.85	2.57
	BJP#04-20cm	5.85	0.291	1,079	1,370	ND	536.333	73.37	2.04
	BJP#04-40cm	6.32	0.400	754	ND	ND	408.000	41.62	1.53
	BJP#04-60cm	6.34	0.452	712	0,690	ND	328.767	26.70	1.46
	BJP#04-80cm	6.54	0.178	553	1,370	ND	301.033	22.07	0.86
BJP#05-0cm	5.66	0.938	2,594	25,400	10,300	1032.667	173.42	4.69	
BJP#05-20cm	6.16	0.843	1,565	6,860	ND	602.333	66.52	3.24	
BJP#05-40cm	6.49	0.824	869	0,690	0,690	262.800	7.05	1.66	
BJP#05-60cm	6.17	0.884	880	6,180	ND	247.833	10.13	1.13	
BJP#05-80cm	5.96	0.675	365	6,180	ND	191.733	12.22	0.84	

* ND: not detected

표 3.4.83 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병접 재이용 지구 (BJP)	BJP#01-0cm	5.84	0.728	1,116	ND	ND	581.667		2.35
	BJP#01-20cm	6.93	0.427	723	ND	ND	383.667		1.25
	BJP#01-40cm	7.05	0.313	684	ND	ND	409.333		1.29
	BJP#01-60cm	6.95	0.385	652	ND	ND	398.000		1.18
	BJP#01-80cm	6.84	0.439	667	ND	ND	323.167		1.20
	BJP#02-0cm	5.77	0.951	999	1,370	ND	565.333		2.31
	BJP#02-20cm	6.85	0.644	1,075	1,370	ND	481.000		1.89
	BJP#02-40cm	7.06	0.578	728	ND	ND	313.167		1.24
	BJP#02-60cm	7.01	0.516	655	ND	ND	344.667		1.34
	BJP#02-80cm	6.72	0.686	641	ND	ND	319.500		1.16
	BJP#03-0cm	6.09	0.838	1,253	ND	ND	598.000		2.87
	BJP#03-20cm	6.84	0.625	859	ND	ND	374.667		1.87
	BJP#03-40cm	7.11	0.466	747	0,690	ND	265.267		1.70
	BJP#03-60cm	7.32	0.409	696	ND	ND	229.467		1.32
	BJP#03-80cm	7.43	0.357	419	ND	ND	195.733		1.13
	BJP#04-0cm	5.76	0.388	1,154	6,180	29,510	588.333		2.57
	BJP#04-20cm	6.48	0.348	774	ND	26,080	411.667		1.84
	BJP#04-40cm	7.41	0.237	541	ND	21,960	221.400		1.20
	BJP#04-60cm	7.45	0.236	371	ND	19,900	187.433		0.89
	BJP#04-80cm	7.25	0.168	257	ND	19,900	149.500		0.81
BJP#05-0cm	6.08	0.771	1,882	ND	18,530	495.333		4.01	
BJP#05-20cm	6.98	1.040	1,344	ND	17,850	285.600		2.98	
BJP#05-40cm	7.17	1.060	1,124	ND	16,470	232.600		2.57	
BJP#05-60cm	7.17	0.724	642	ND	13,040	195.000		1.33	
BJP#05-80cm	6.79	0.699	534	ND	10,980	171.900		1.40	

* ND: not detected

표 3.4.84 ~ 표 3.4.85는 2013년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 0 ~ 20 cm의 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다.

표 3.4.84 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병점 제이용 지구 (BJP)	BJP#01	5.17	1.055	1,384	12.354	21.277	638.000		2.79
	BJP#02	5.09	1.455	1,268	9.609	22.649	647.333		2.47
	BJP#03	5.27	0.926	1,493	9.609	24.022	693.333		2.88
	BJP#04	5.01	0.857	1,219	9.609	20.590	642.333		2.34
	BJP#05	5.50	1.305	2,254	15.786	17.845	782.333		4.44

* ND: not detected

표 3.4.85 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병점 제이용 지구 (BJP)	BJP#01	5.55	0.887	1,050	15.100	ND	625.050	102.249	2.67
	BJP#02	5.10	1.030	870	15.786	ND	566.383	129.862	2.44
	BJP#03	5.51	0.800	1,050	15.786	ND	609.050	105.520	2.85
	BJP#04	5.03	0.649	1,090	19.904	ND	568.717	127.344	2.79
	BJP#05	5.07	1.730	1,920	23.336	19.904	731.717	96.285	4.10

* ND: not detected

표 3.4.86은 2014년 4월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 0 ~ 20 cm의 토양을 취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과를 나타내고 있다.

표 3.4.86 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
병점 제이용 지구 (BJP)	BJP#01	5.31	0.172	1,300	4.730	6.880	695.387	152.99	2.19
	BJP#02	4.99	0.217	1,330	6.020	7.740	681.296	135.87	2.55
	BJP#03	5.60	0.247	1,470	5.590	4.300	675.281	124.51	2.62
	BJP#04	4.95	0.206	1,400	9.030	15.900	668.995	162.52	2.66
	BJP#05	5.43	0.378	2,210	11.200	23.700	751.590	124.23	4.25

* ND: not detected

라. 미처리 지구

미처리하수 유입에 따른 토양 환경 영향을 분석하기 위하여 시험지구의 논토양을 조사/분석하였다.



그림 3.4.59 토양 모니터링

토양환경보전법에서 지정한 논토양의 채취심도인 0 ~ 15 cm에 가장 가까운 0 ~ 20 cm의 모니터링 평균값을 도출하였다. pH, EC, 영양염류의 분석결과는 처리구별로 비교하여 심도별로 나타내었고, 중금속함량은 토양환경보전법에 제시된 토양오염물질 중 8개 항목에 대하여 평균 내어 토양오염 우려기준 및 전국 논 오염도, 경기도 논 오염도의 평균값과 비교하였다.

표 3.4.87 ~ 표 3.4.90은 2012년에 미처리지구인 호련, 수화, 장전지구의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 미처리지구인 호련, 수화 및 장전지구에 위치한 시험포장의 논 토양에서 검출된 pH는 표층(0 cm)에 가까워질수록 높은 값을 보였다. 또한, EC, NH₄-N, 총인(T-P) 및 P₂O₅는 0cm, 총질소(T-N) 및 유기물함량은 20 cm, NO₃-N은 40cm에서 가장 높은 값을 보였다.

표 3.4.87 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.06.07.)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련-0cm	5.25	0.899	0.196	19.51	8.07	1160.47	106.10	2.02
	호련-20cm	5.24	0.925	0.201	16.14	8.94	946.090	72.83	2.08
	호련-40cm	5.13	0.859	0.168	15.47	10.76	889.033	77.90	1.77
	호련-60cm	5.27	0.977	0.191	16.82	10.08	700.927	63.73	2.08
	호련-80cm	4.87	1.665	0.170	12.11	10.08	695.290	43.03	1.73
수화지구	수화-0cm	7.43	1.550	0.156	10.09	8.74	560.443	31.95	1.85
	수화-20cm	6.89	1.475	0.193	16.14	8.74	587.397	33.47	2.02
	수화-40cm	6.24	1.300	0.162	11.43	10.08	427.773	22.92	1.82
	수화-60cm	5.26	0.709	0.068	8.07	6.72	375.453	6.54	0.67
장전지구	장전-0cm	5.84	0.733	0.179	24.89	8.07	990.593	25.06	2.09
	장전-20cm	5.63	0.787	0.193	22.87	8.07	1008.34	23.63	1.88
	장전-40cm	5.97	0.935	0.189	26.91	8.84	940.693	24.76	1.90
	장전-60cm	6.11	0.877	0.184	27.58	9.41	869.407	20.03	1.63
	장전-80cm	6.16	0.884	0.192	27.58	8.07	967.530	24.04	1.82

* ND: not detected

표 3.4.88 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04.)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련-0cm	6.56	0.390	1557	67.270	ND	561.330	24.29	3.18
	호련-20cm	6.33	0.320	1702	39.820	ND	507.330	20.12	4.23
	호련-40cm	5.48	0.860	1123	4.810	ND	431.330	14.75	3.90
	호련-60cm	5.97	0.490	1142	4.130	ND	335.000	12.96	3.61
	호련-80cm	5.50	0.660	774	3.440	ND	391.330	15.50	3.39
수화지구	수화-0cm	6.94	0.98	1688	63.84	ND	1055.99	106.81	3.47
	수화-20cm	7	0.69	1774	58.35	ND	592.66	14.11	4.07
	수화-40cm	7	0.46	1238	12.36	ND	320.6	6.52	2.55
	수화-60cm	6.26	0.36	953	0.69	ND	240.56	5.71	2.93
장전지구	장전-0cm	5.75	0.76	1752	27.46	ND	803.99	3.41	3.89
	장전-20cm	5.77	0.52	1710	28.15	ND	804.99	2.84	3.17
	장전-40cm	5.39	0.38	1736	8.93	ND	569.99	3.23	3.34
	장전-60cm	5.16	0.32	시료없음	시료없음	시료없음	413.67	14.58	시료없음
	장전-80cm	5.47	0.16	692	ND	ND	298.9	3.52	1.88

* ND: not detected

표 3.4.89 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.09.20.)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련-0cm	6.08	0.222	896	1.370	ND	320.267	32.19	1.62
	호련-20cm	5.96	0.518	1423	4.800	ND	435.000	70.17	2.83
	호련-40cm	5.67	0.699	1705	7.550	ND	448.000	59.58	3.59
	호련-60cm	5.49	0.949	2185	10.980	ND	471.333	82.65	4.64
	호련-80cm	5.33	1.010	1161	ND	ND	465.667	41.30	2.88
수화지구	수화-0cm	6.58	0.494	2126	ND	ND	445	29.909	4.22
	수화-20cm	6.44	0.616	2093	ND	ND	403.667	24.594	4.45
	수화-40cm	6.63	0.571	2180	0.69	ND	275.533	26.308	4.46
	수화-60cm	6.64	0.527	1956	ND	ND	273.4	33.131	4.11
	수화-80cm	6.68	0.683	1999	ND	ND	591.667	29.597	4.62
장전지구	장전-0cm	6.72	0.363	1736	ND	ND	550.333	33.98	3.74
	장전-20cm	6.27	0.434	1856	1.37	ND	505	17.832	4.1
	장전-40cm	5.99	0.336	1710	1.37	ND	359	15.611	3.66
	장전-60cm	5.6	0.184	1433	2.75	ND	258.3	15.792	2.86
	장전-80cm	5.42	0.254	1201	2.75	ND	498.667	12.388	2.33

* ND: not detected

표 3.4.90 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.11.08.)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련-0cm	6.57	0.420	1555	ND	0.690	445.000		3.44
	호련-20cm	6.55	0.372	1794	ND	ND	516.333		4.05
	호련-40cm	6.45	0.538	1769	ND	ND	461.000		3.99
	호련-60cm	5.03	1.290	1046	ND	ND	383.667		2.67
	호련-80cm	5.28	0.774	1027	ND	ND	348.000		2.58
수화지구	수화-0cm	6.3	0.505	1938	ND	ND	478		4.69
	수화-20cm	6.53	0.439	1907	ND	ND	415.333		4.58
	수화-40cm	6.63	0.272	961	ND	ND	108.733		2.66
	수화-60cm	5.94	0.188	1073	ND	ND	133.333		2.55
	수화-80cm	5.62	0.154	951	ND	ND	139.6		2.67
장전지구	장전-0cm	5.86	0.496	1738	ND	ND	736.667		3.91
	장전-20cm	5.47	0.254	1573	ND	ND	502		3.29
	장전-40cm	5.52	0.21	1116	ND	ND	396.333		2.38
	장전-60cm	5.57	0.095	766	ND	ND	288.933		1.55
	장전-80cm	5.86	0.134	819	ND	ND	337.333		2.02

* ND: not detected

표 3.4.91 ~ 표 3.4.92는 2013년에 미처리지구인 호련, 수화, 장전지구의 시험포장에서 0 ~ 20 cm의 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 미처리지구인 호련, 수화 및 장전지구에 위치한 시험포장의 논 토양에서 검출된 pH는 수화지구에서 가장 높은 값을 보였다. 또한, EC, 총질소(T-N), 유기물함량은 수화지구, NH₄-N, 총인(T-P)은 장전지구에서 가장 높은 값을 보였다. NH₄-N 및 NO₃-N의 경우는 대부분이 검출되지 않았다.

표 3.4.91 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련	4.97	0.832	2106	29.513	17.159	576.000		4.59
수화지구	수화	5.65	0.988	2158	23.336	17.845	675.667		4.55
장전지구	장전	4.61	1.280	2108	54.221	16.472	925.667		4.38

* ND: not detected

표 3.4.92 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련	5.88	0.727	1600	25.395	ND	457.717	63.558	3.58
수화지구	수화	6.04	1.025	2110	20.590	ND	652.383	30.365	4.41
장전지구	장전	5.66	0.817	1950	32.944	ND	866.717	43.472	4.08

* ND: not detected

표 3.4.93은 2014년 4월 3일에 미처리지구인 호련, 수화, 장전지구의 시험포장에서 0 ~ 20 cm의 토양을 채취하여 pH, EC, 영양염류를 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 미처리지구인 호련, 수화 및 장전지구에 위치한 시험포장의 논 토양에서 검출된 pH는 수화지구에서 가장 높은 값을 보였다. 또한, EC, 총질소(T-N), 유기물함량은 수화지구, NH₄-N, 총인(T-P)은 장전지구에서 가장 높은 값을 보였다. NH₄-N 및 NO₃-N의 경우는 대부분이 검출되지 않았다.

표 3.4.93 미처리지구 토양 내 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	pH	EC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	P ₂ O ₅	OM
			dS/m	mg/kg					
호련지구	호련	5.37	0.142	2070	10.800	ND	581.278	66.22	4.04
수화지구	수화	5.78	0.158	2150	19.800	ND	682.757	66.31	4.31
장전지구	장전	5.07	0.165	2140	16.800	ND	999.399	20.72	4.37

* ND: not detected

마. 시험지구간 비교 분석

그림 3.4.60은 2012년도의 지구별 0 ~ 20 cm 심도를 평균하여 산정한 pH, EC 및 영양염류 함량을 심도별로 나타내고 있다. 2012년 04월 04일을 제외하고는 4개의 지구별로 도시하였다. pH는 전반적으로 일반적인 범위에 속하며 비슷한 경향을 보였고, EC는 오산재이용지구가 제일 높게 측정되었다. T-N은 병점재이용지구가 제일 낮았으며, 오산재이용지구는 높은 경향을 유지하였다. T-P은 병점재이용지구가 제일 높은 경향을 보이며 시간에 따라 일정한 값을 유지하였다.

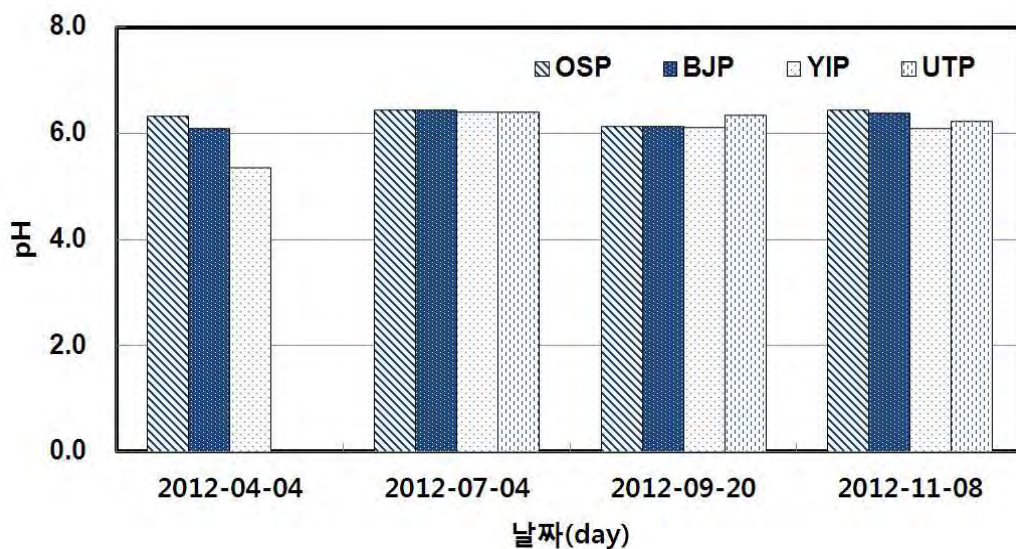


그림 3.4.60 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2012년)

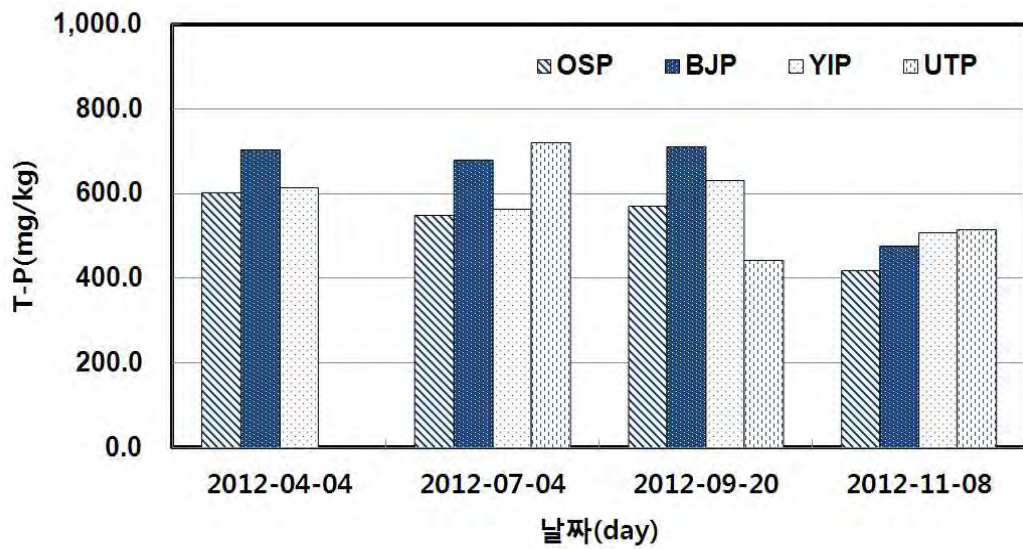
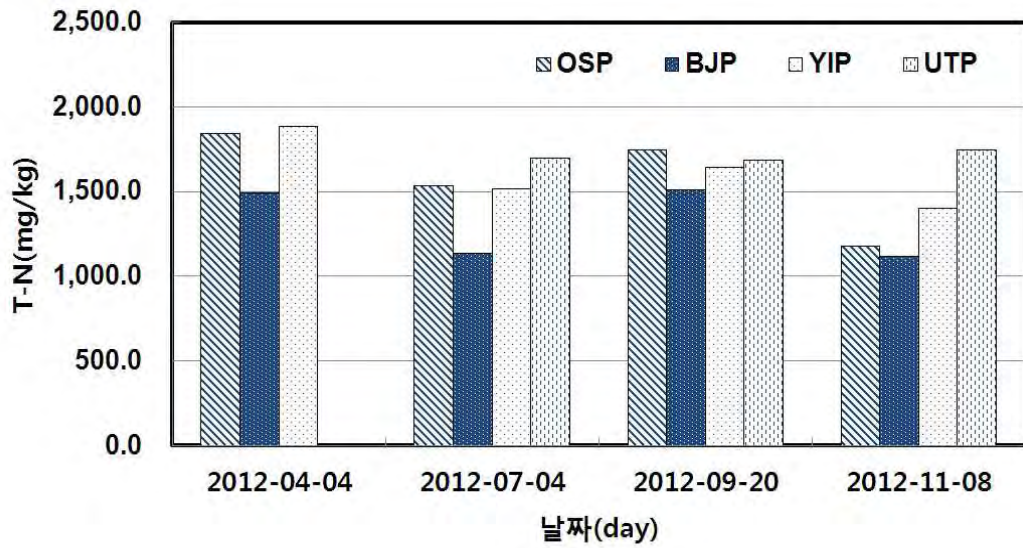
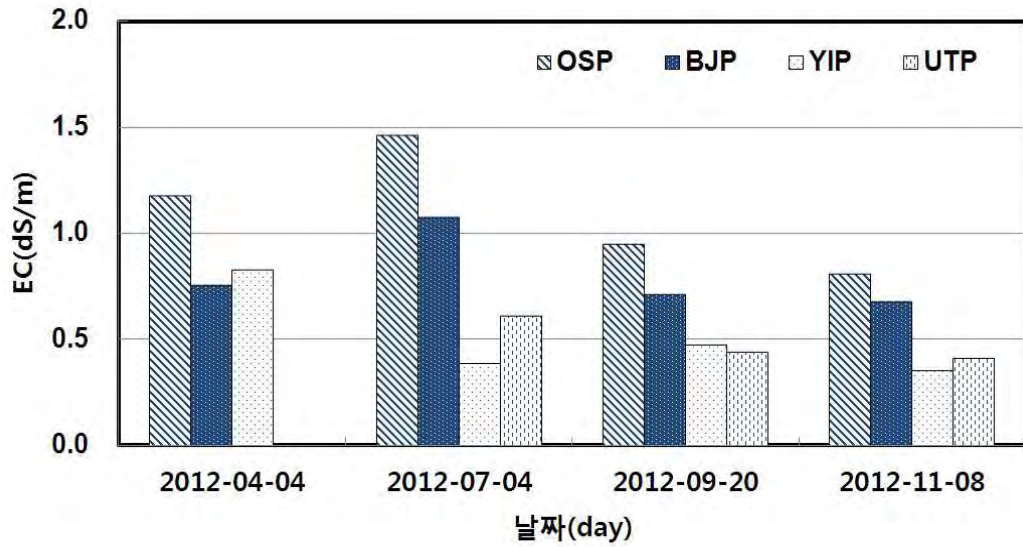


그림 3.4.60 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2012년) (계속)

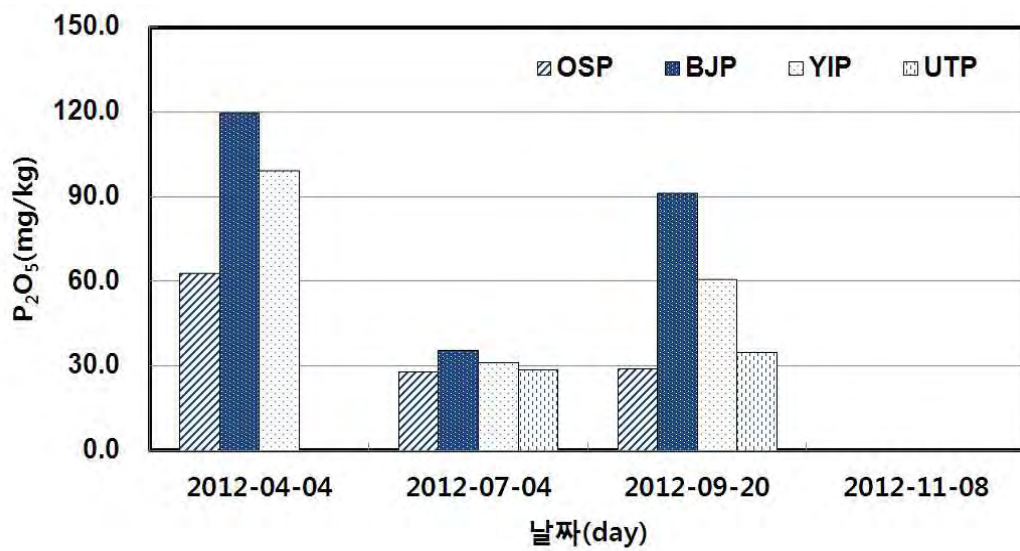
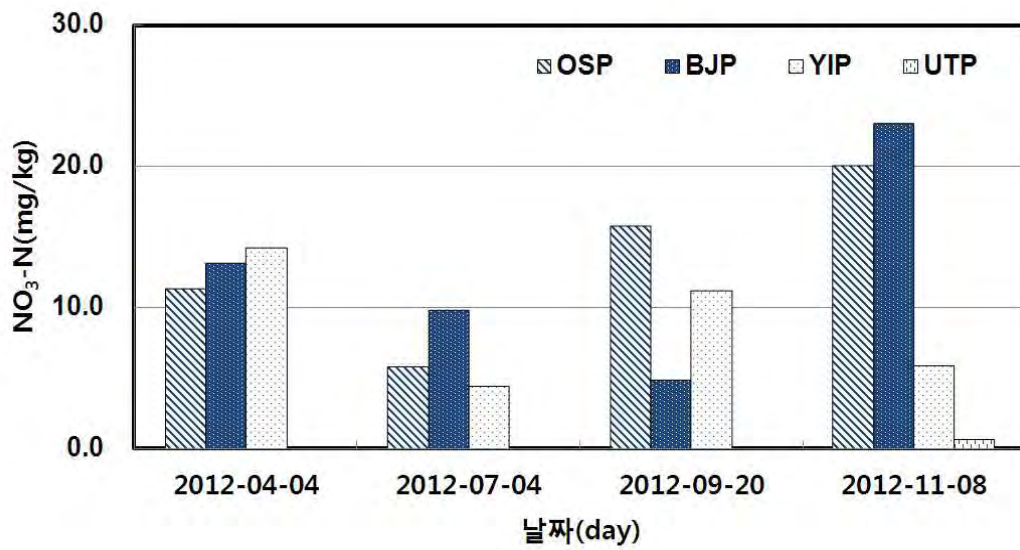
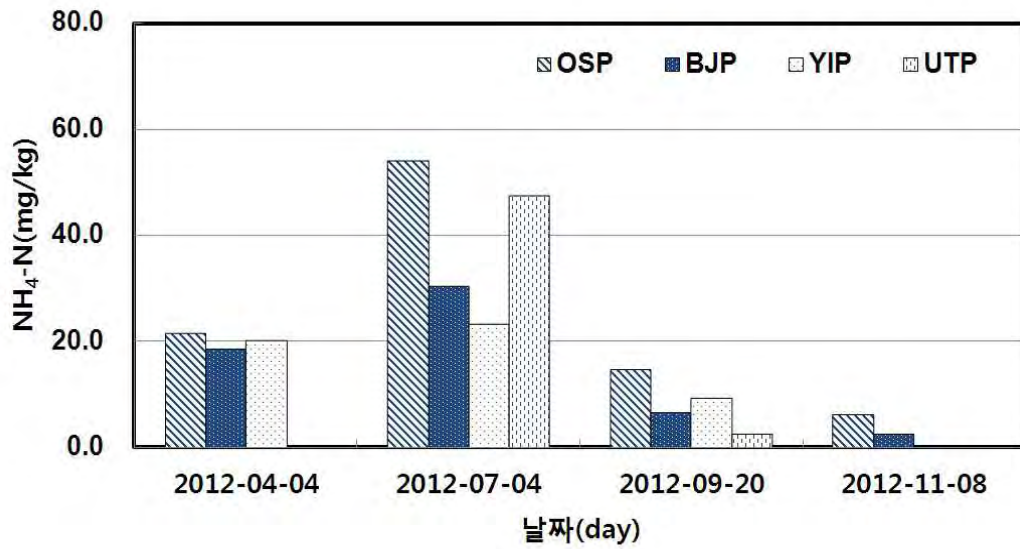


그림 3.4.60 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2012년) (계속)

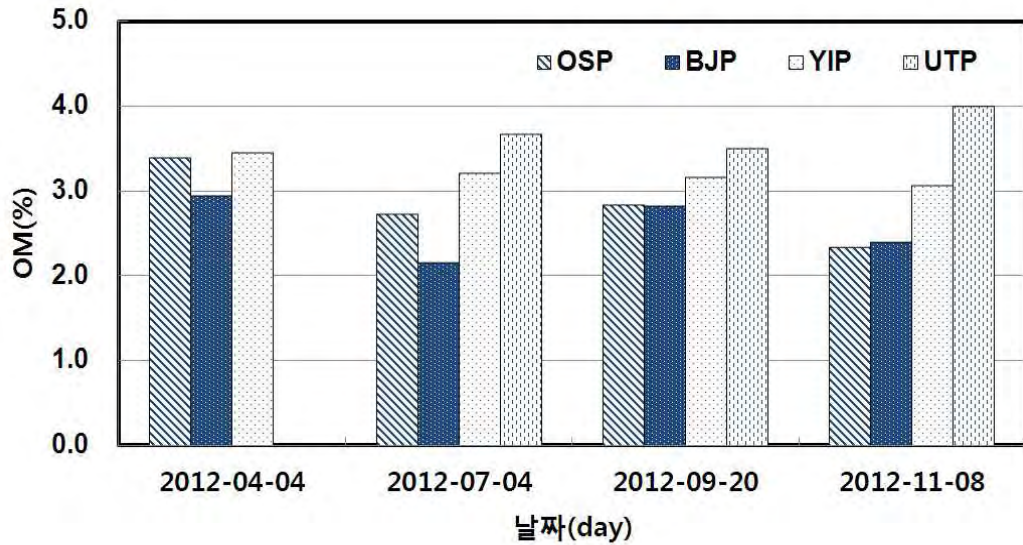


그림 3.4.60 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2012년) (계속)

그림 3.4.61은 2013년도 및 2014년 4월 3일의 지구별 0 ~ 20 cm 심도를 평균하여 산정한 pH, EC 및 영양염류 함량을 심도별로 나타내고 있다. NO₃-N 및 P₂O₅를 제외하고는 날짜에 따라 4개의 지구별로 도시하였다. pH는 전반적으로 일반적인 범위에 속하며 비슷한 경향을 보였고, EC는 오산재이용지구가 제일 높게 측정되었다. T-N은 병점재이용지구가 제일 낮았으며, 오산재이용지구 및 미처리지구에서 높은 경향을 유지하였다. T-P은 병점재이용지구 및 미처리지구가 제일 높은 경향을 보였다.

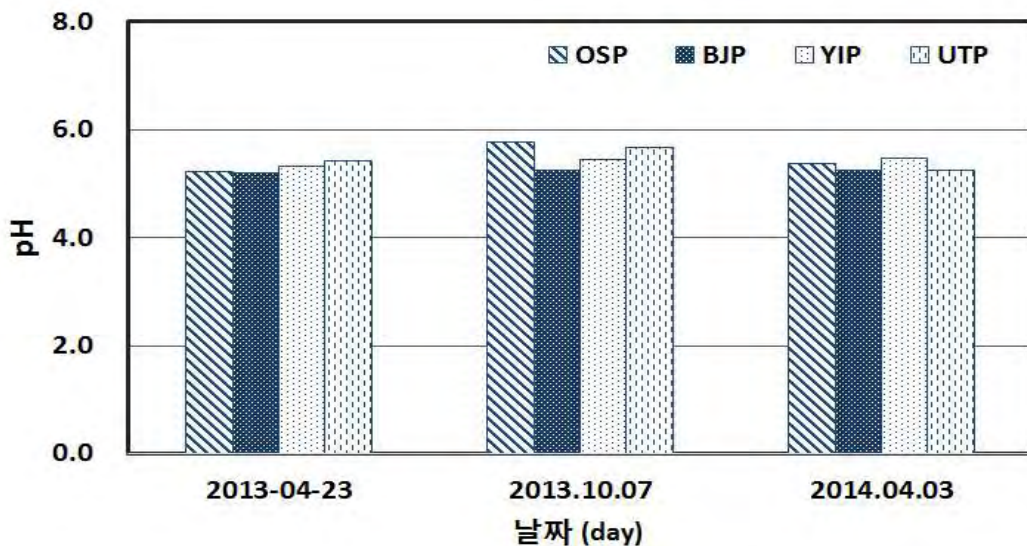


그림 3.4.61 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년)

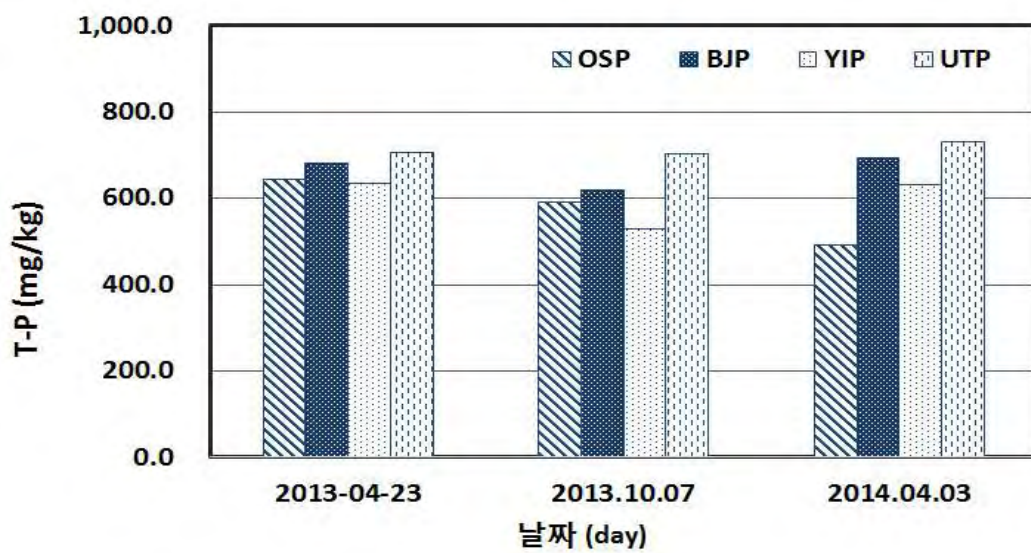
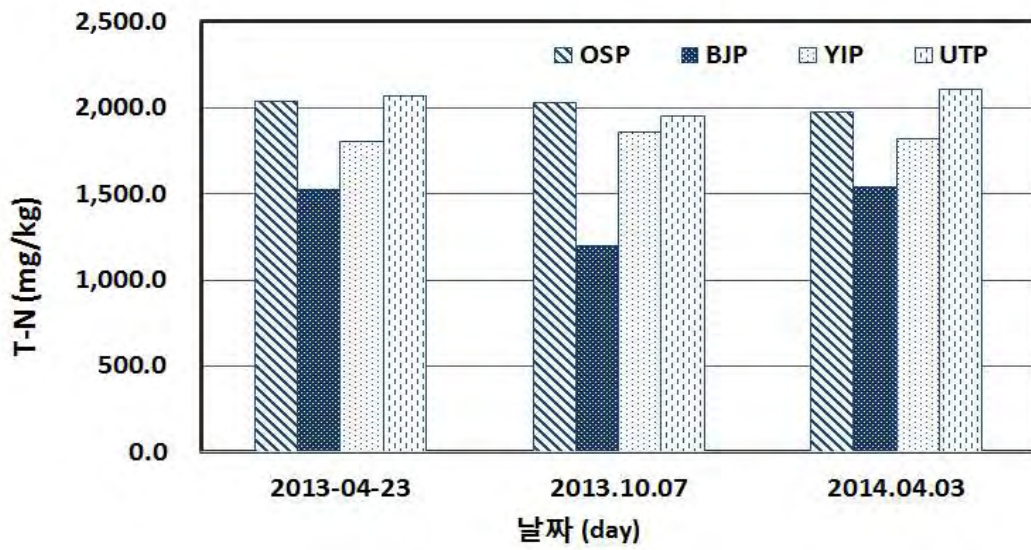
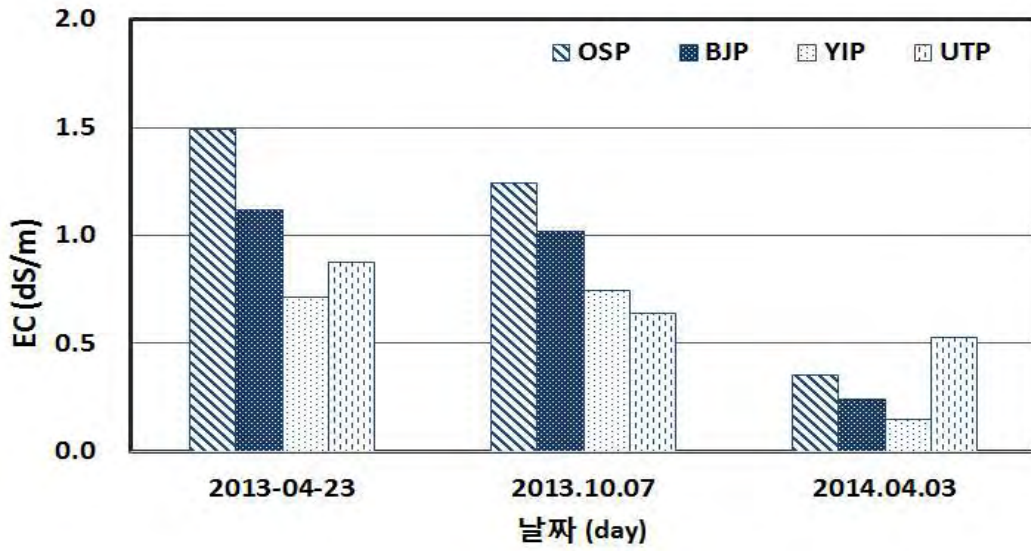


그림 3.461 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년) (계속)

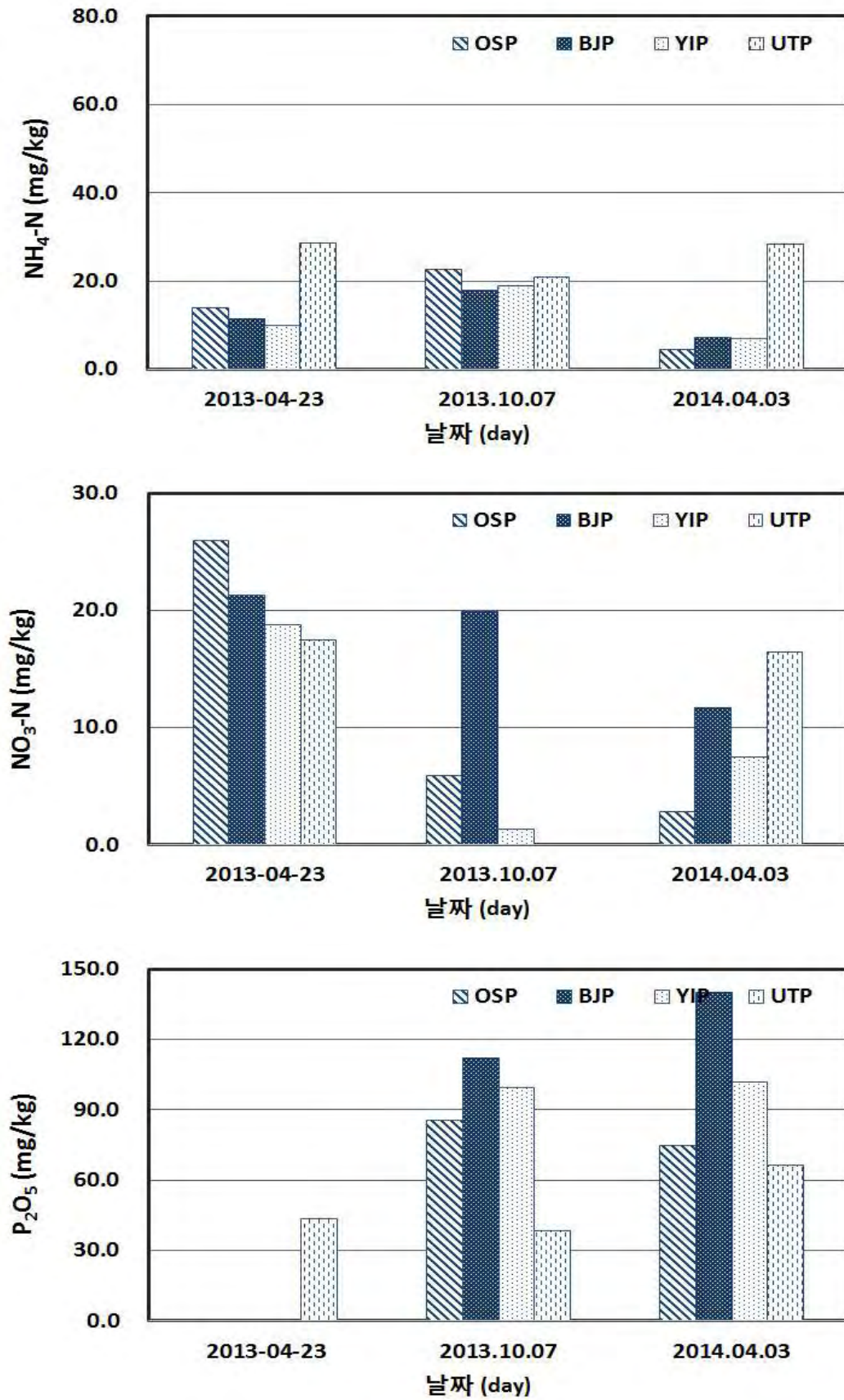


그림 3.461 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년) (계속)

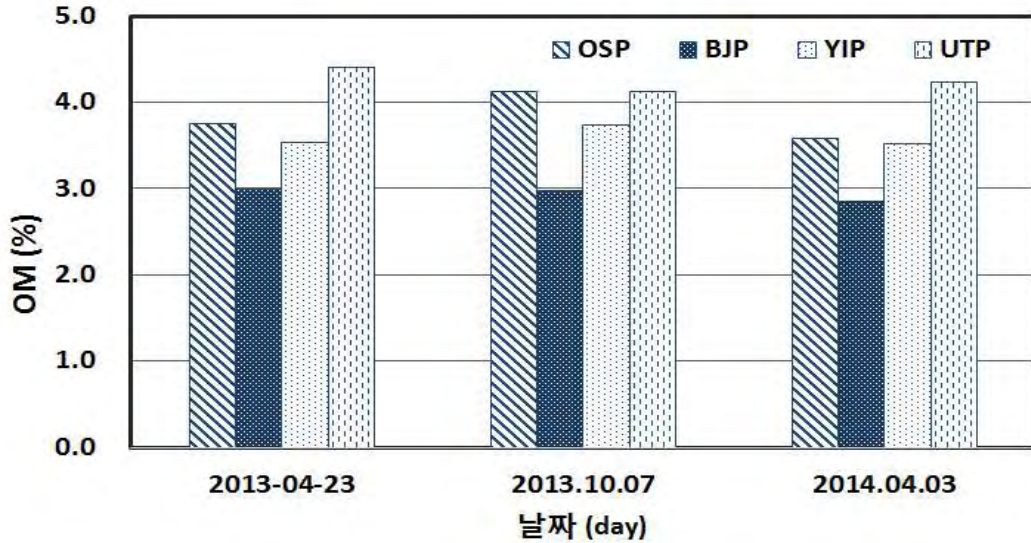


그림 3.4.61 시험지구별 논 토양 분석결과 (0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년) (계속)

그림 3.4.62 ~ 그림 3.4.65는 2012년도의 지구별 pH, EC 및 영양염류 함량을 심도별로 나타내고 있다. pH는 전반적으로 일반적인 범위에 속하며 병점제이용지구가 제일 높았고, EC는 오산제이용지구가 제일 높게 측정되었으며 심도가 깊어질수록 낮아지는 경향을 보였다. T-N은 병점제이용지구가 제일 낮았으며 용인청정지구와 오산제이용지구는 비슷한 변화경향을 보였다. T-P는 용인청정지구가 제일 낮았다.

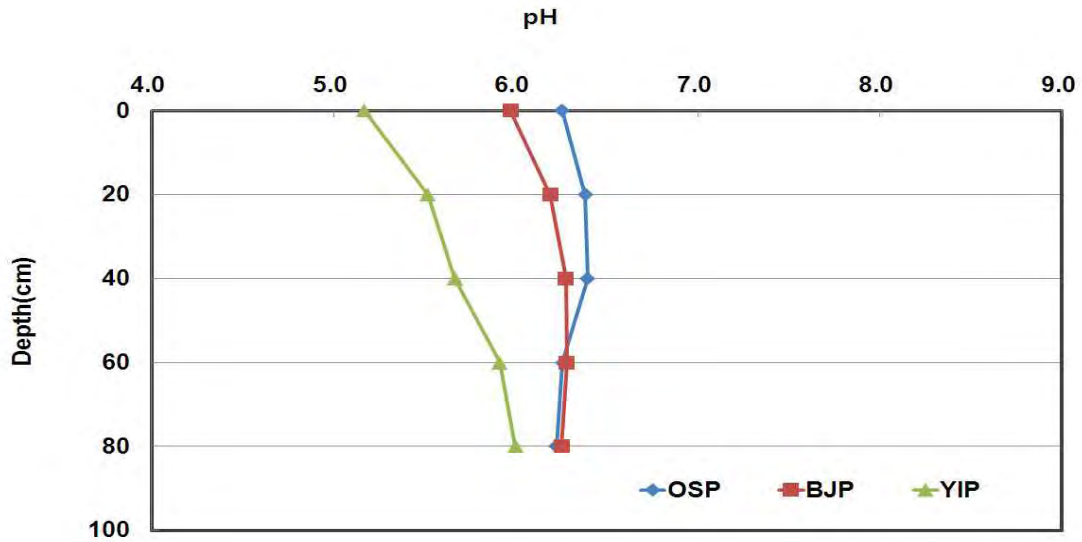


그림 3.4.62 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.)

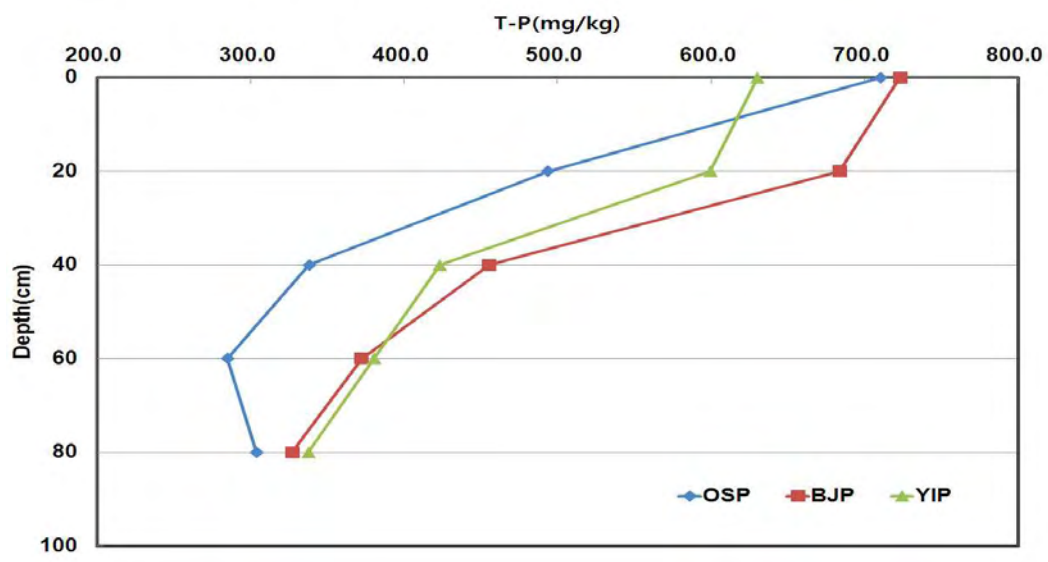
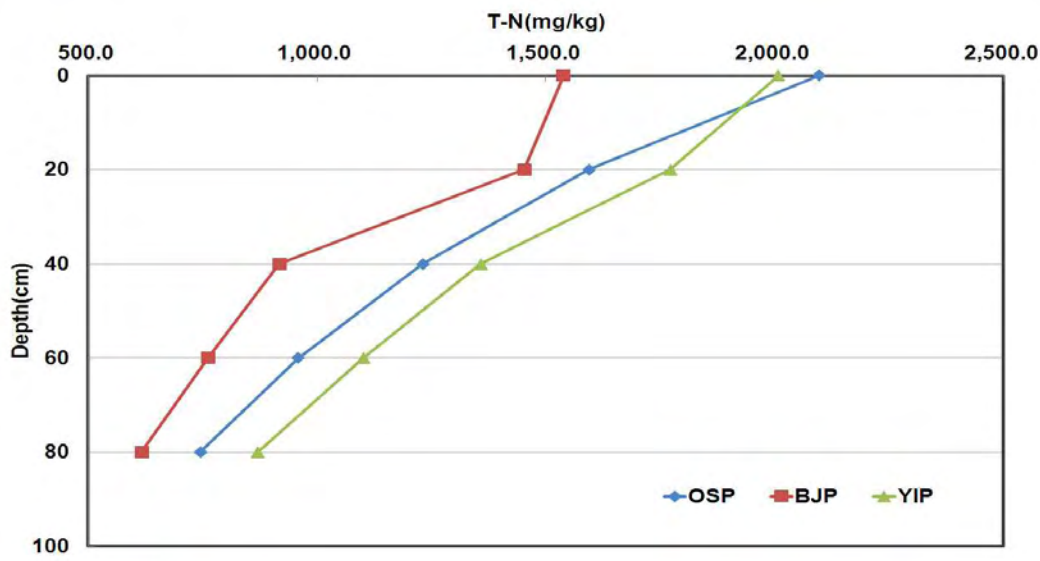
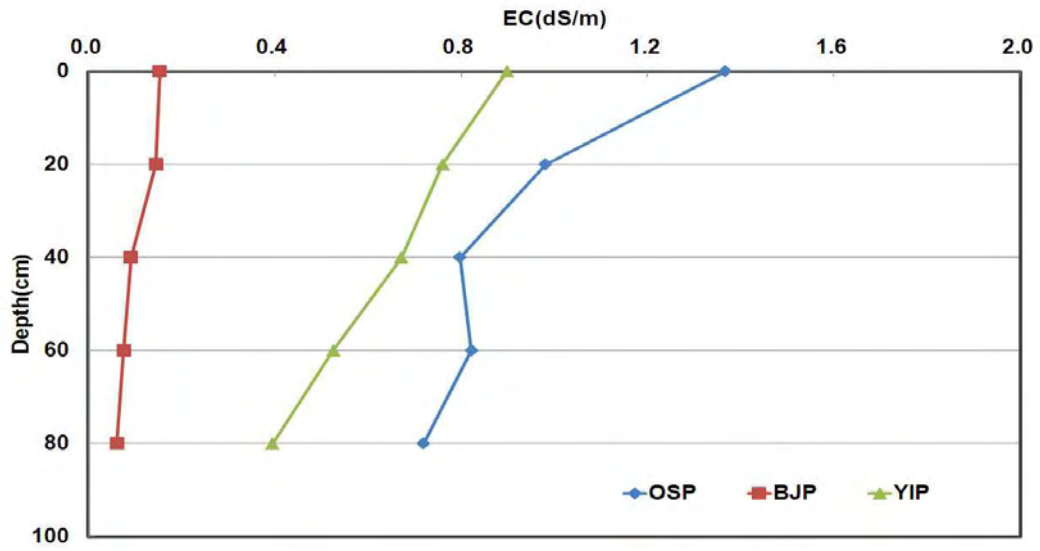


그림 3.4.62 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.) (계속)

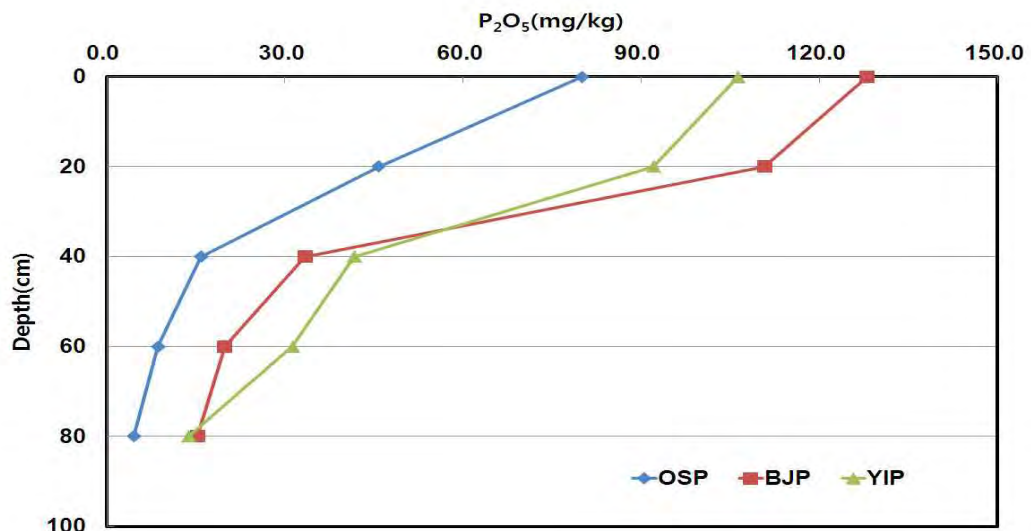
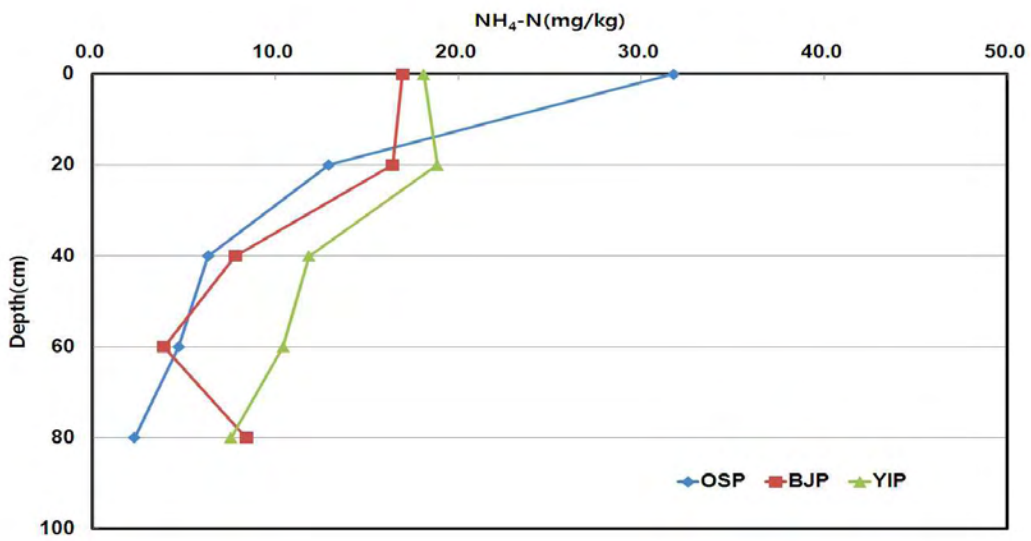
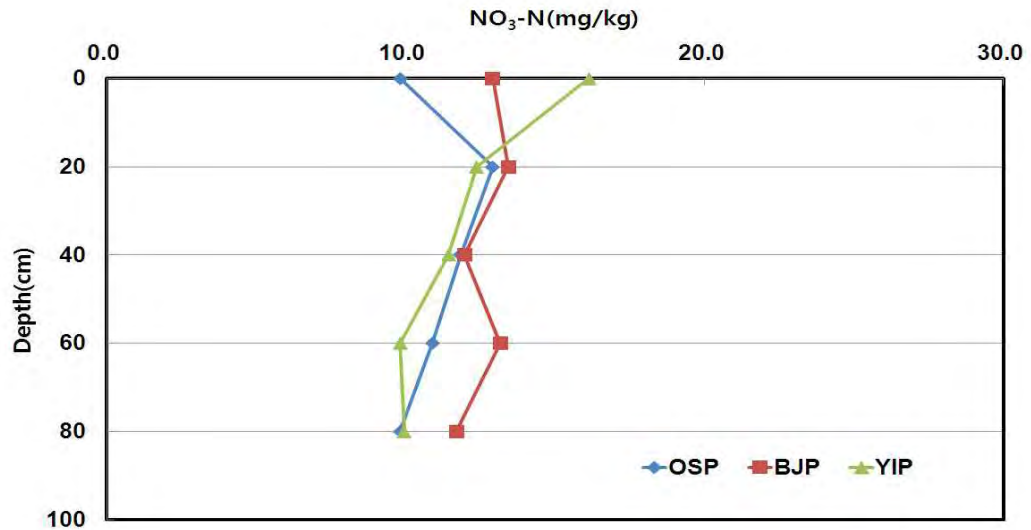


그림 3.4.62 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.) (계속)

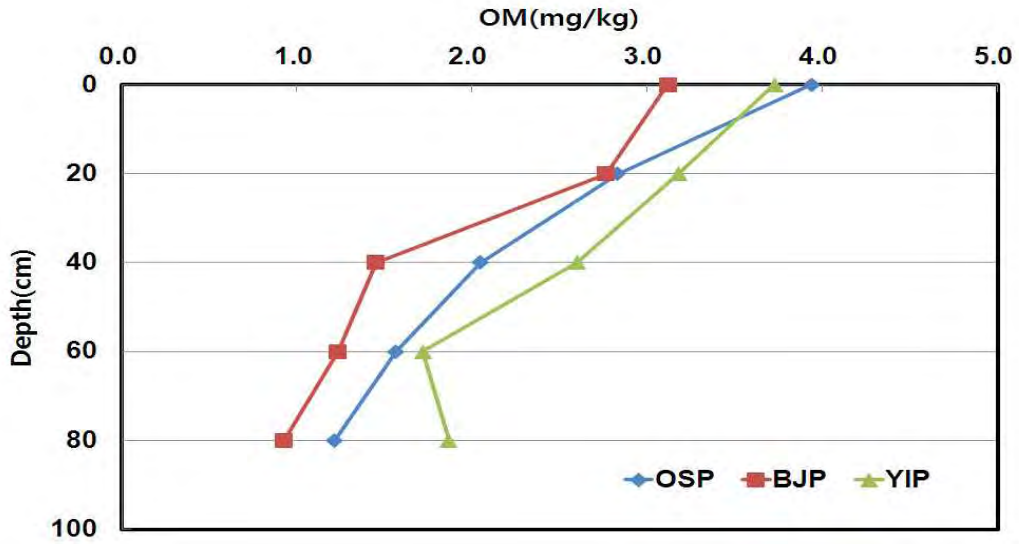


그림 3.4.62 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.) (계속)

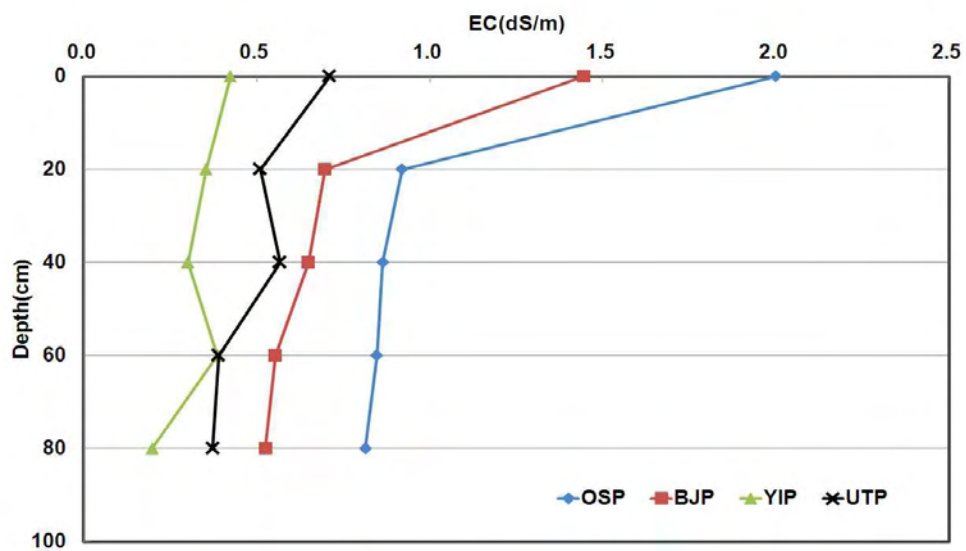
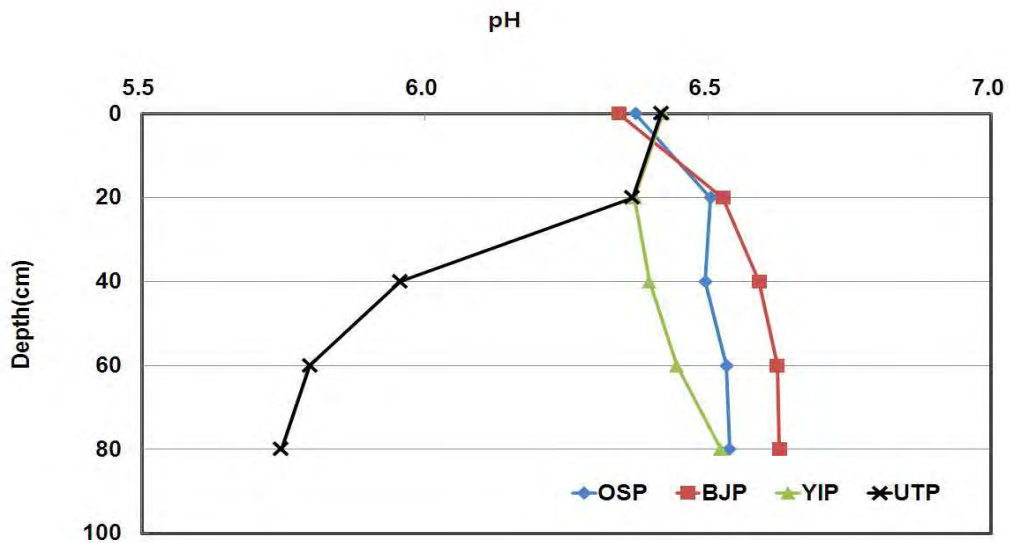


그림 3.4.63 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.)

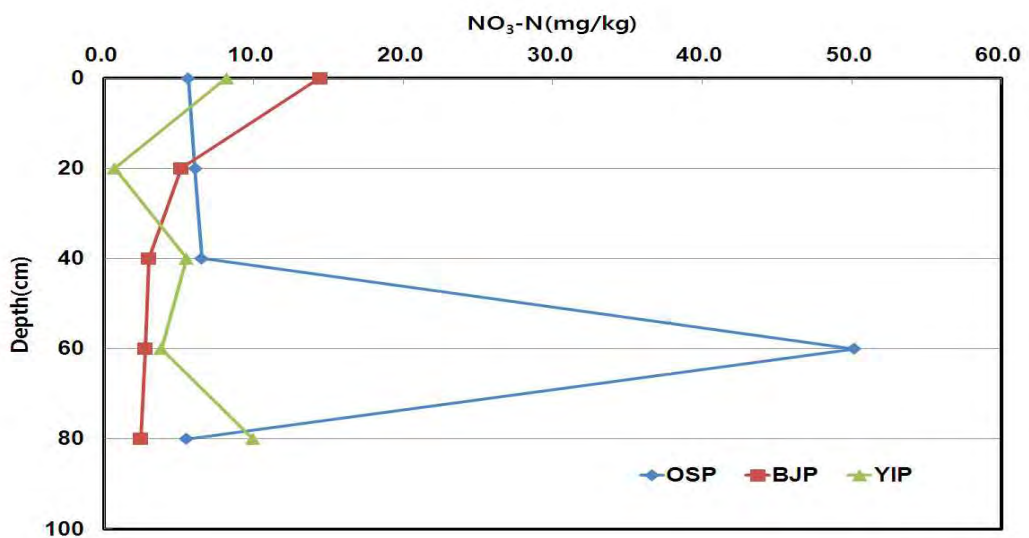
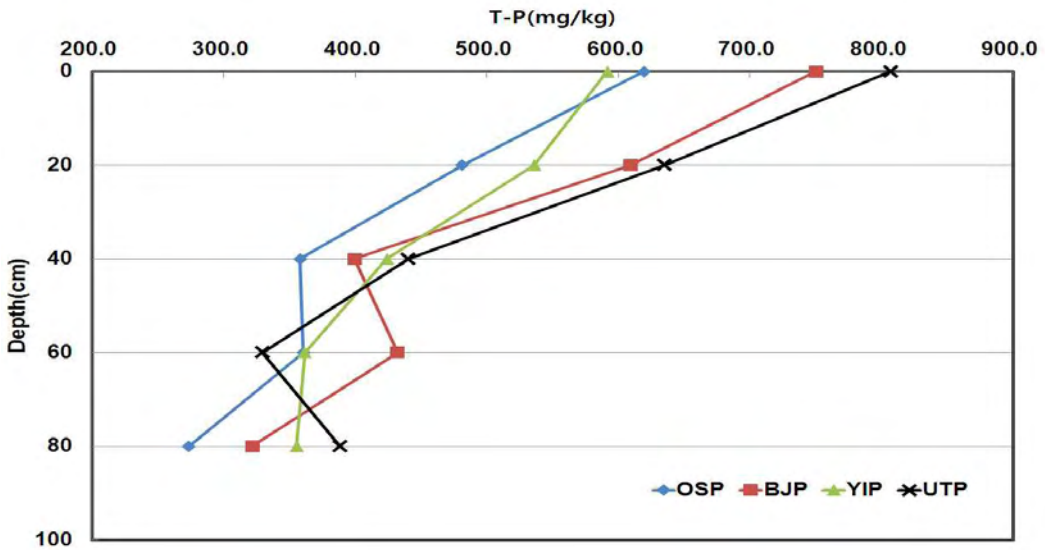
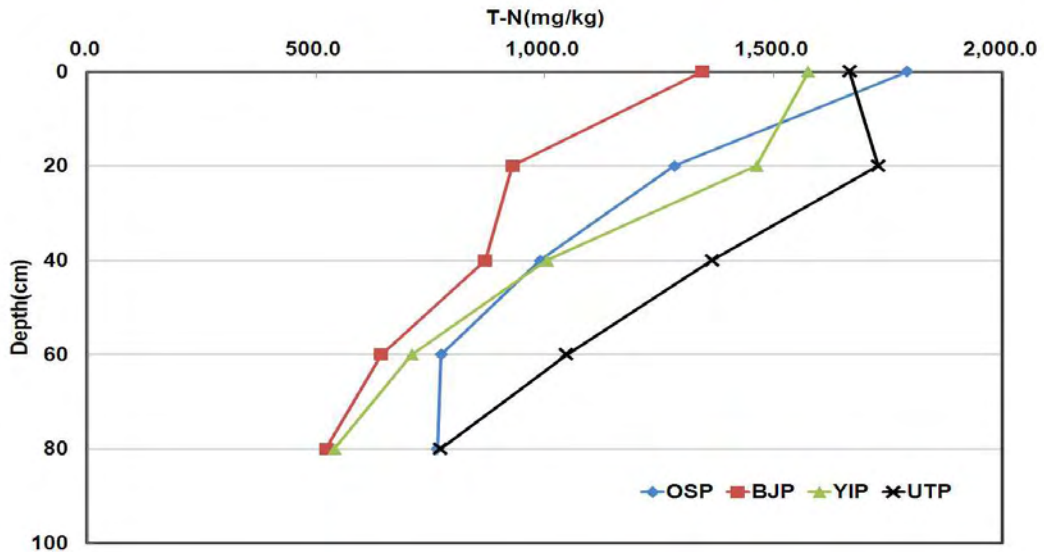


그림 3.4.63 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.) (계속)

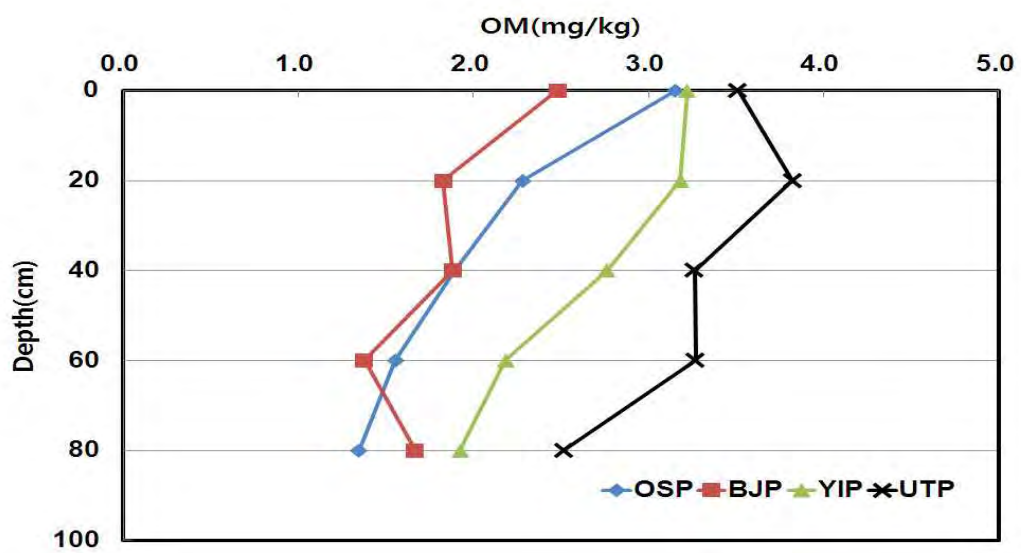
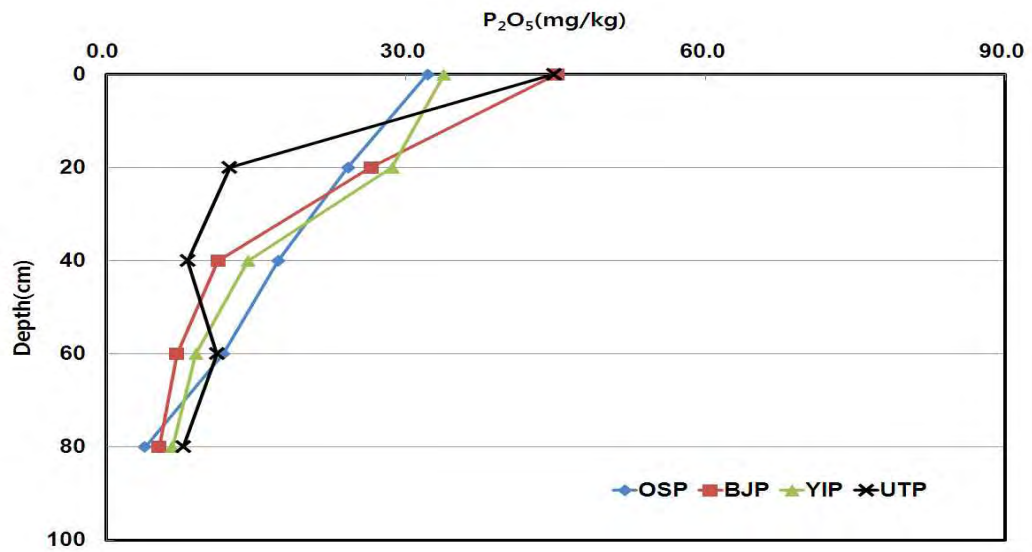
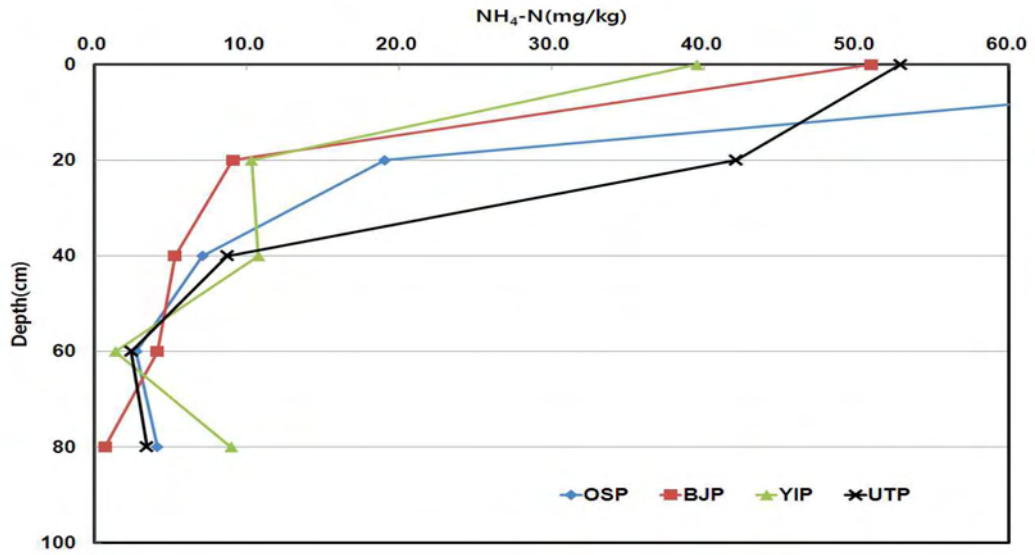


그림 3.4.63 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.) (계속)

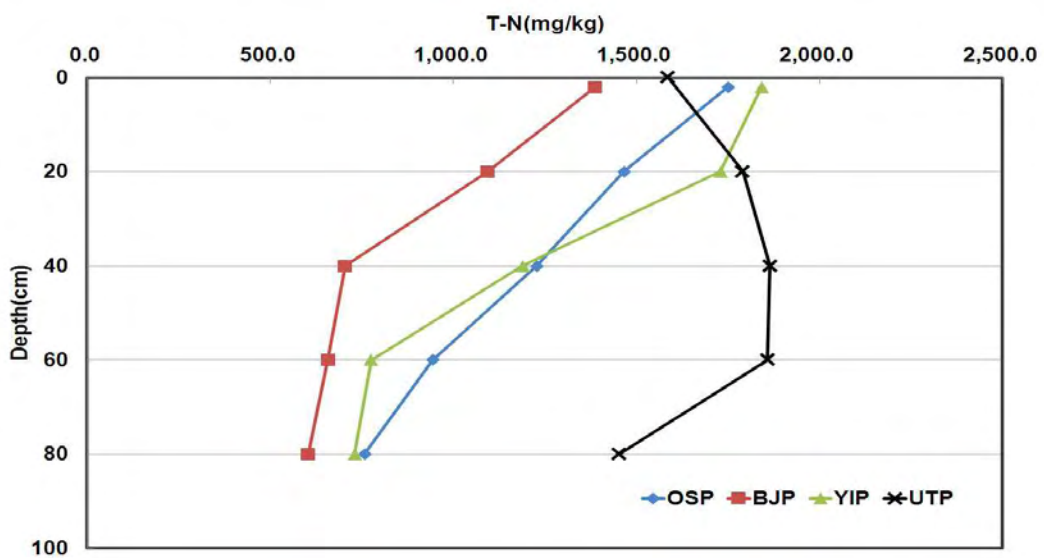
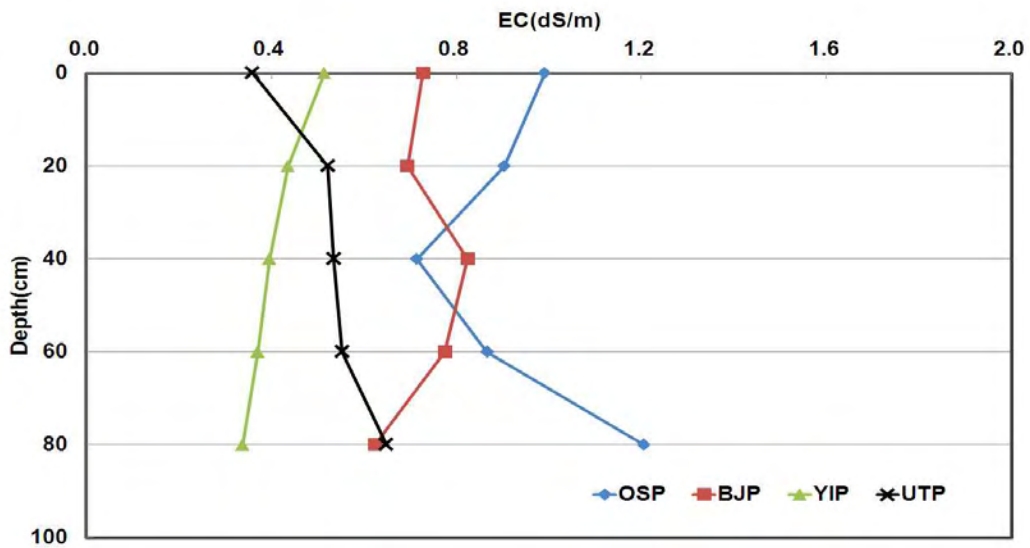
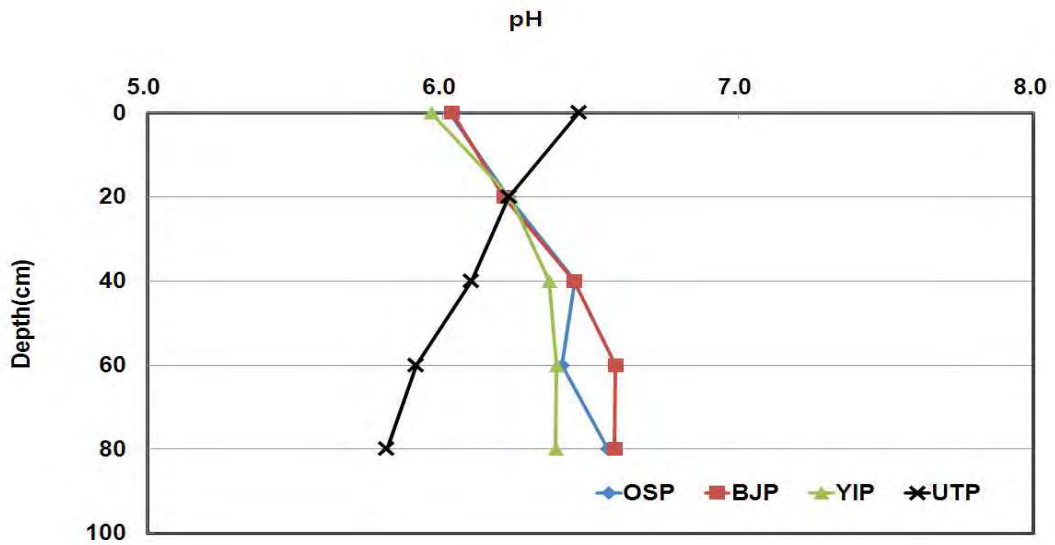


그림 3.464 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.)

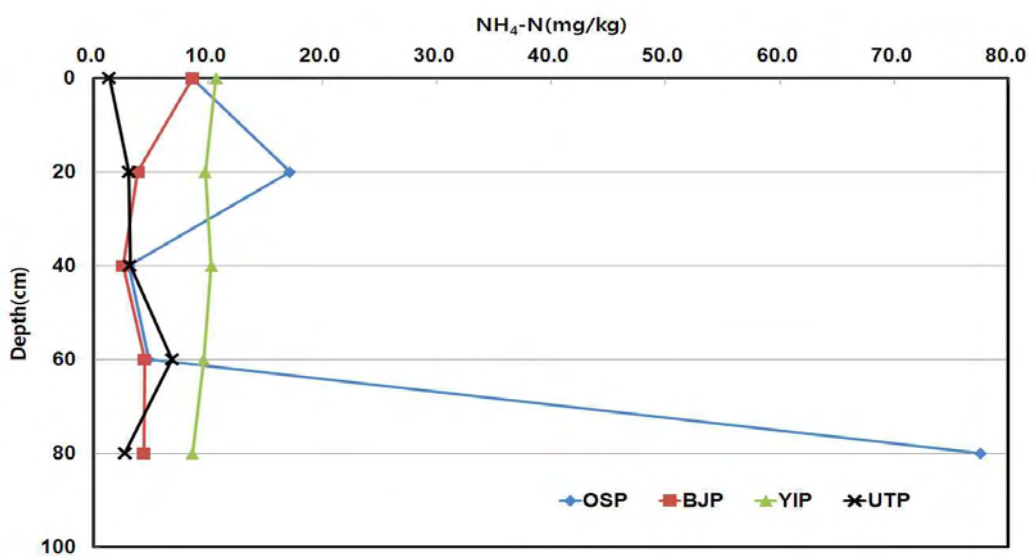
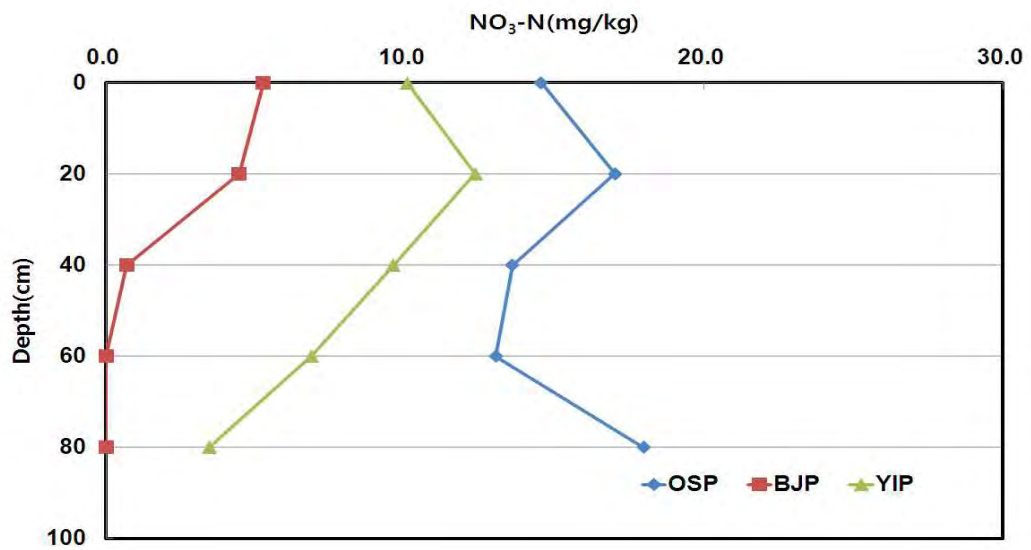
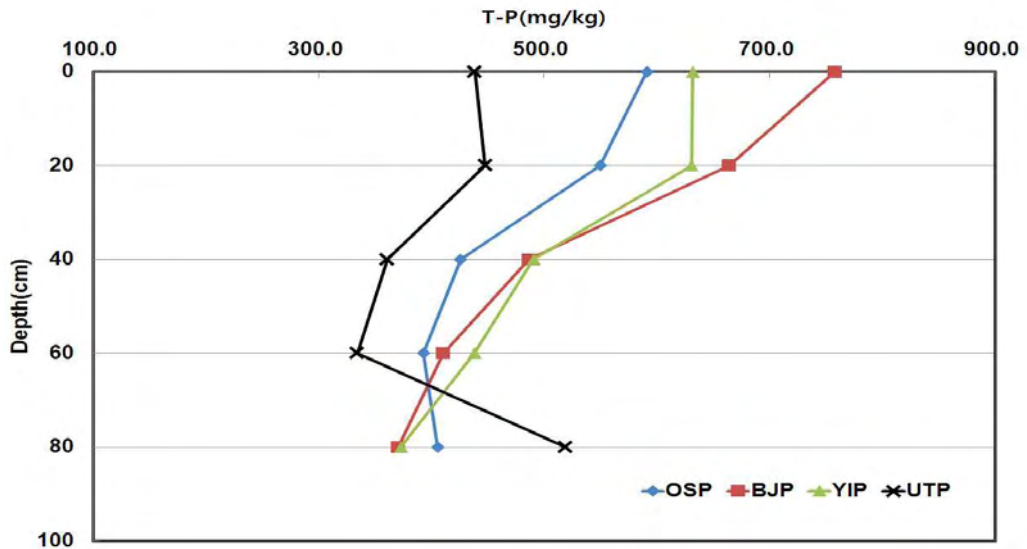


그림 3.4.64 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.) (계속)

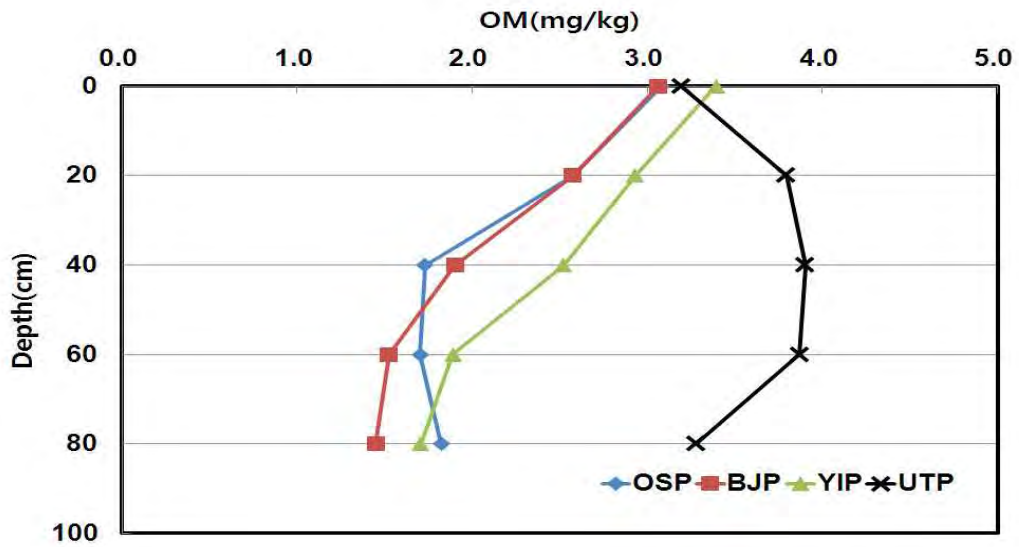
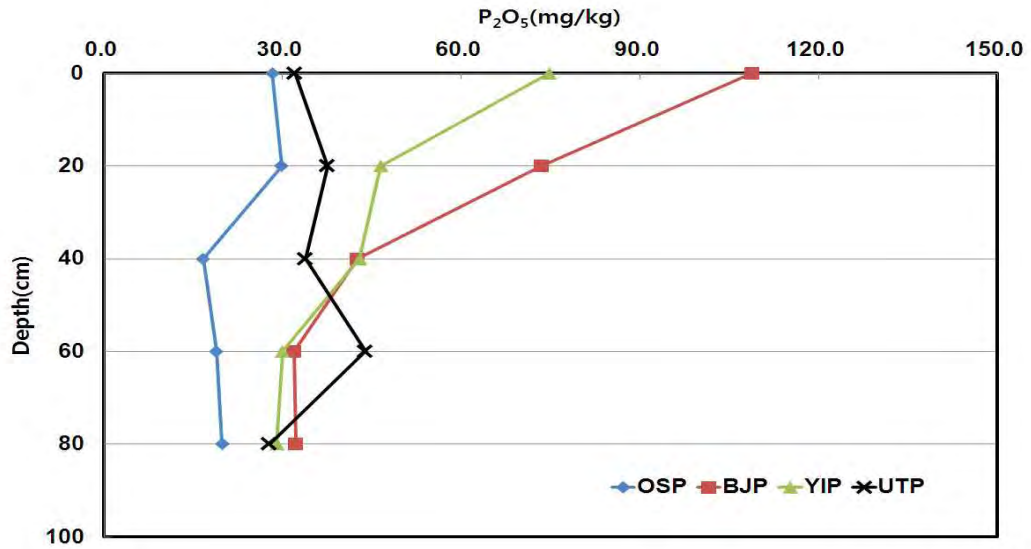


그림 3.4.64 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.) (계속)

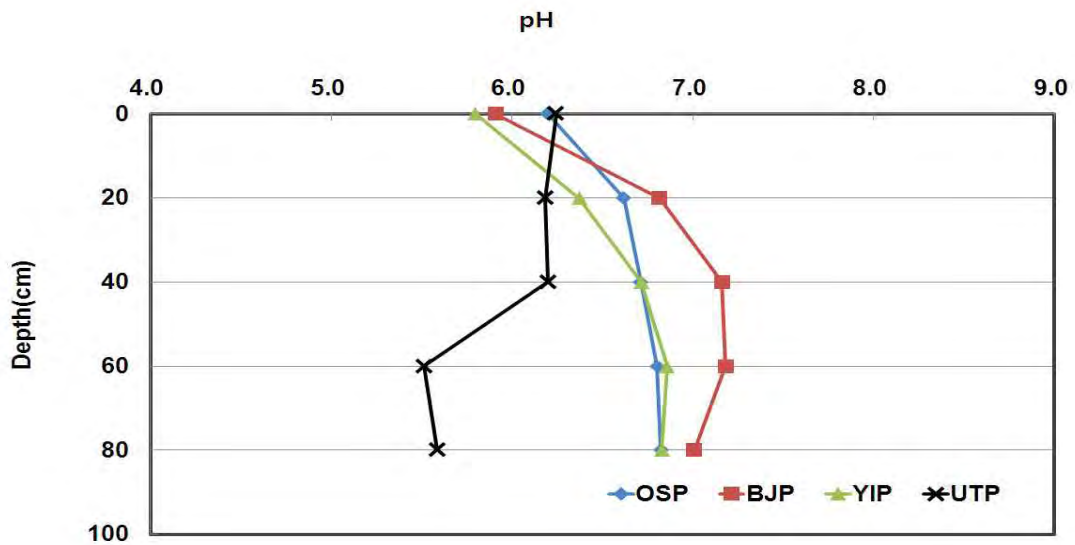


그림 3.4.65 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.)

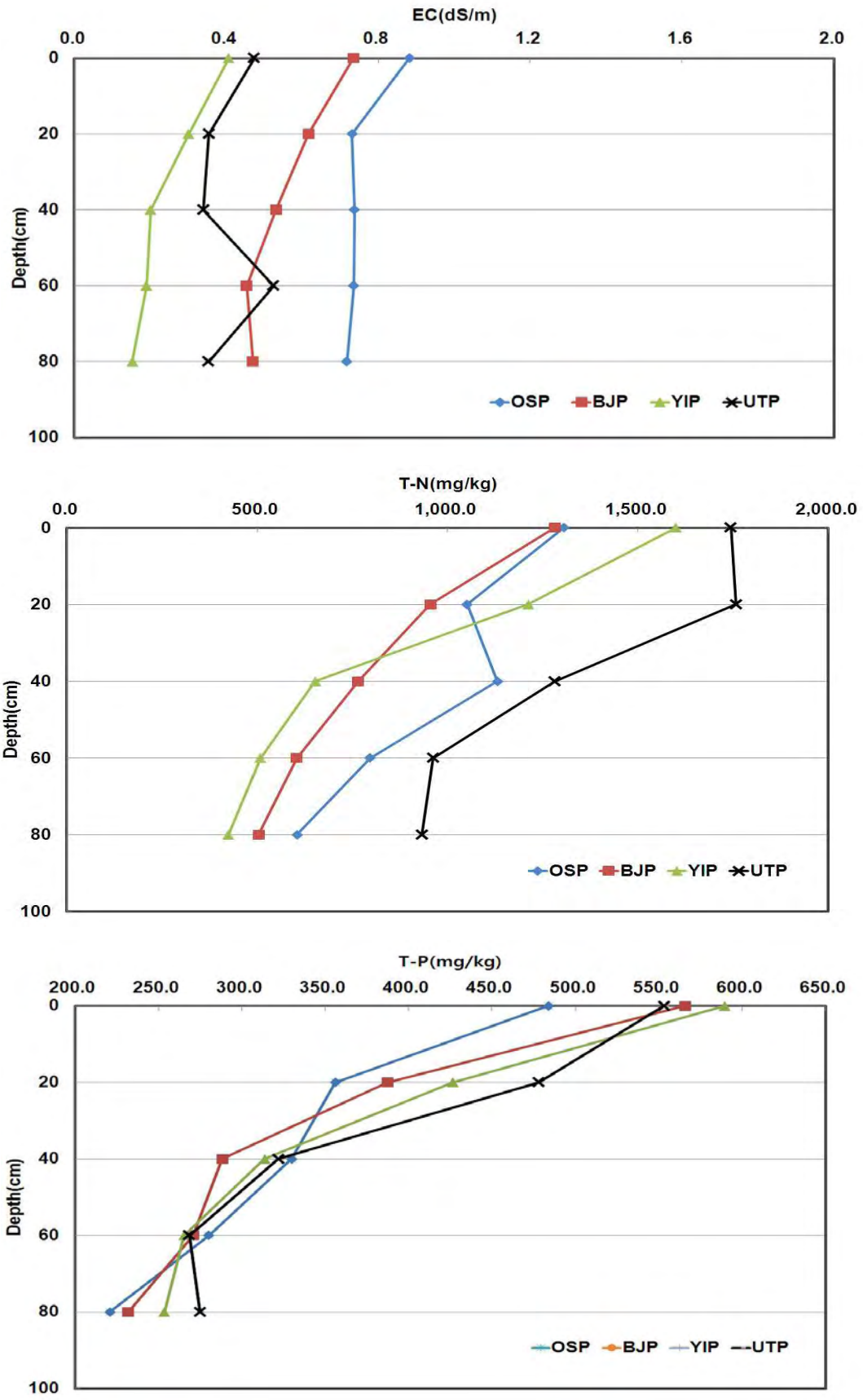


그림 3.4.65 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.) (계속)

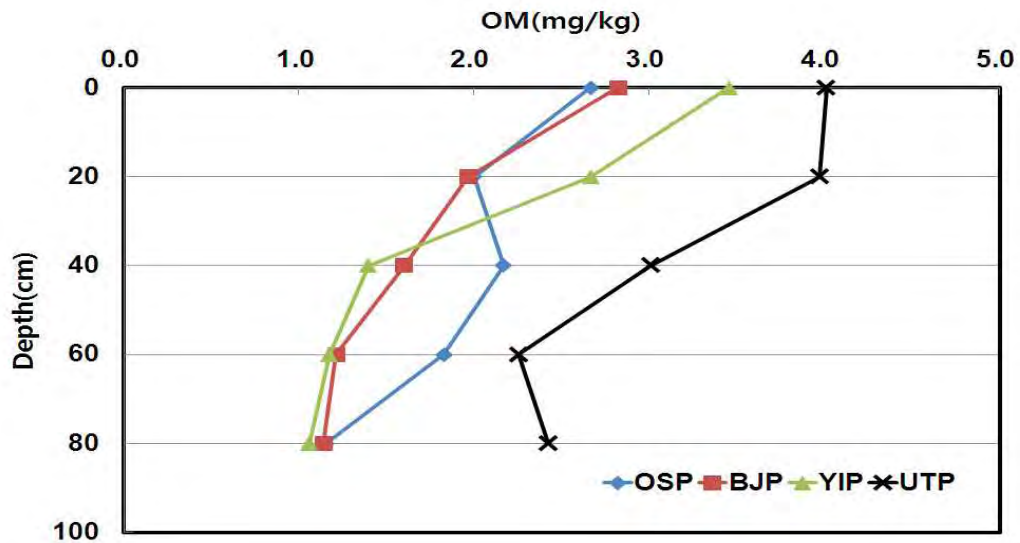
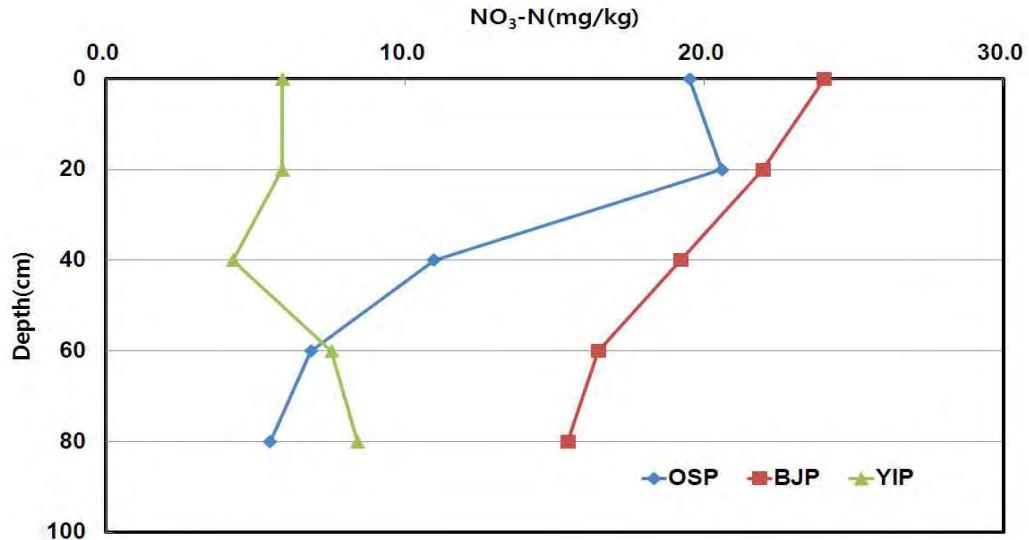


그림 3.4.65 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.) (계속)

그림 3.4.66은 2013년도 및 2014년 4월 3일의 지구별 pH, EC 및 영양염류 함량을 나타내고 있다. pH는 전반적으로 일반적인 범위에 속하며 오산재이용지구가 제일 높았고, EC는 오산재이용지구가 제일 높게 측정되었으며 심도가 깊어질수록 낮아지는 경향을 보였다. T-N은 오산재이용지구가 제일 높았다. T-P는 병점재이용지구가 제일 낮은 경향을 보여주었다.

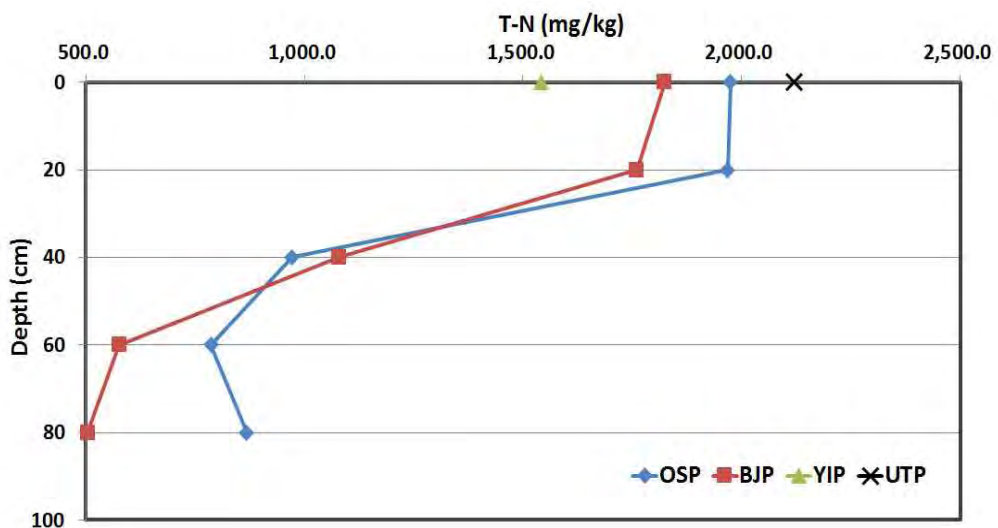
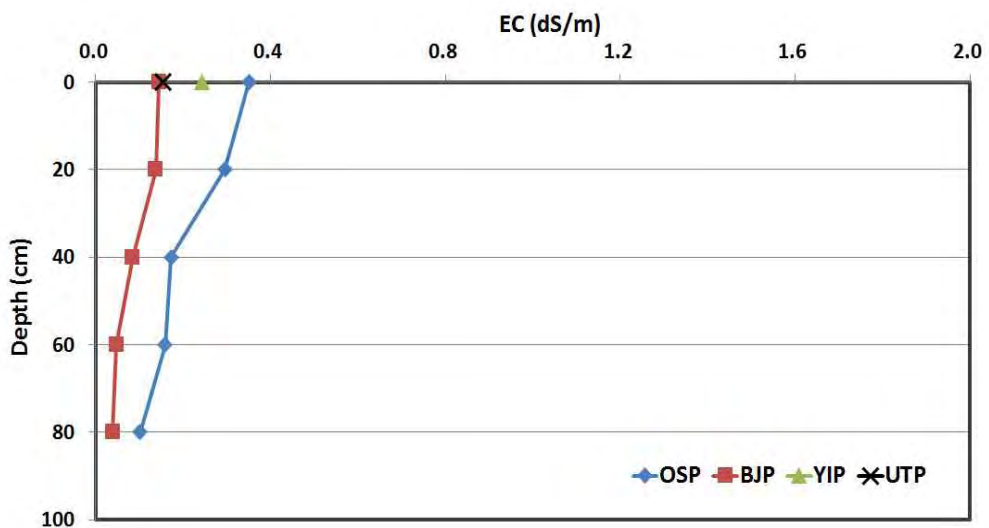
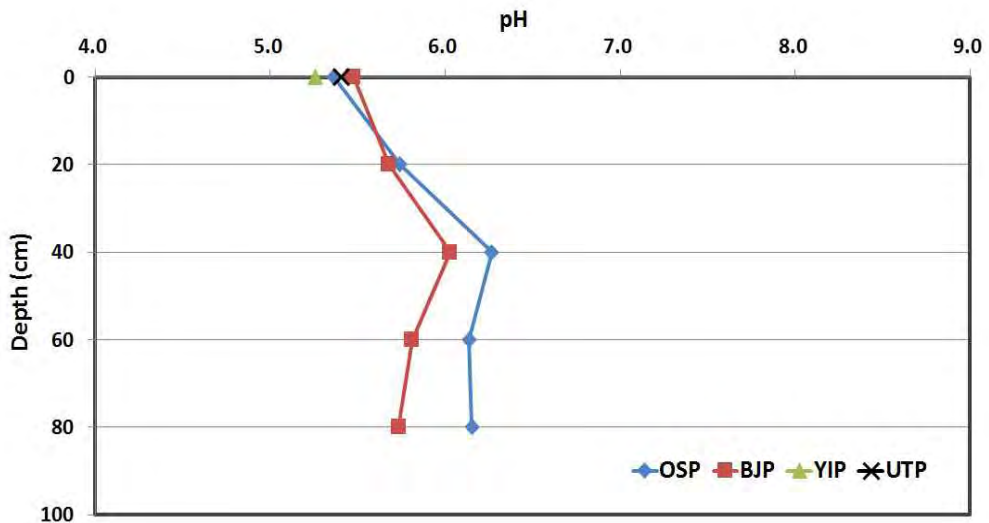


그림 3.4.66 시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.)

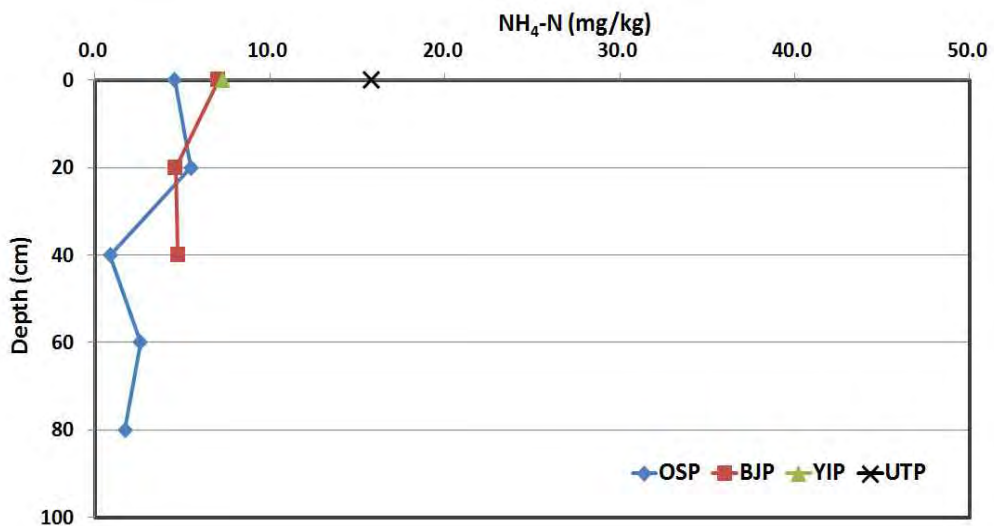
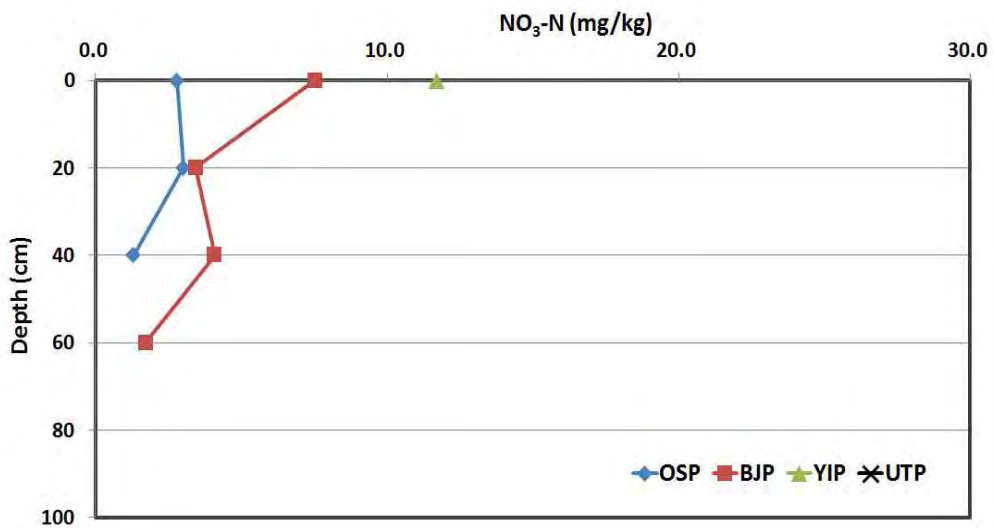
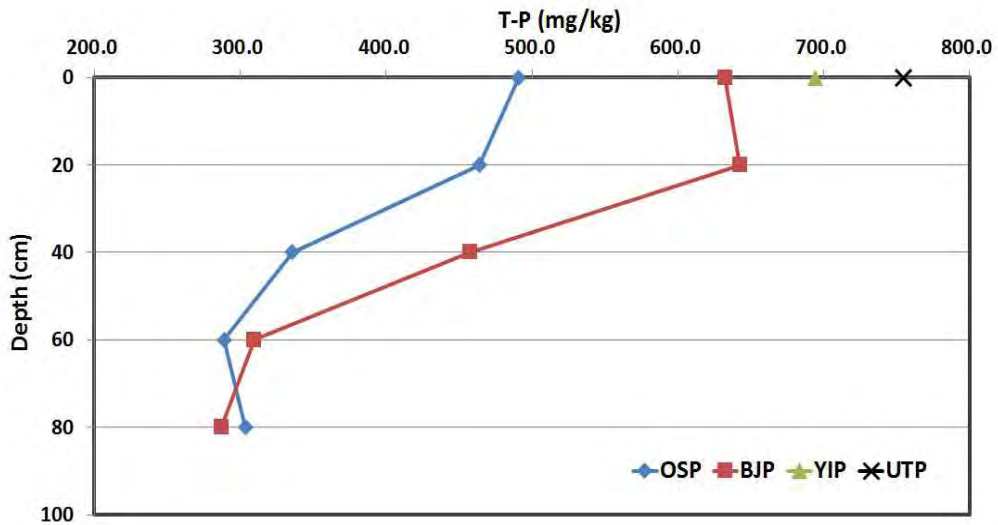


그림 3.4.66 시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.) (계속)

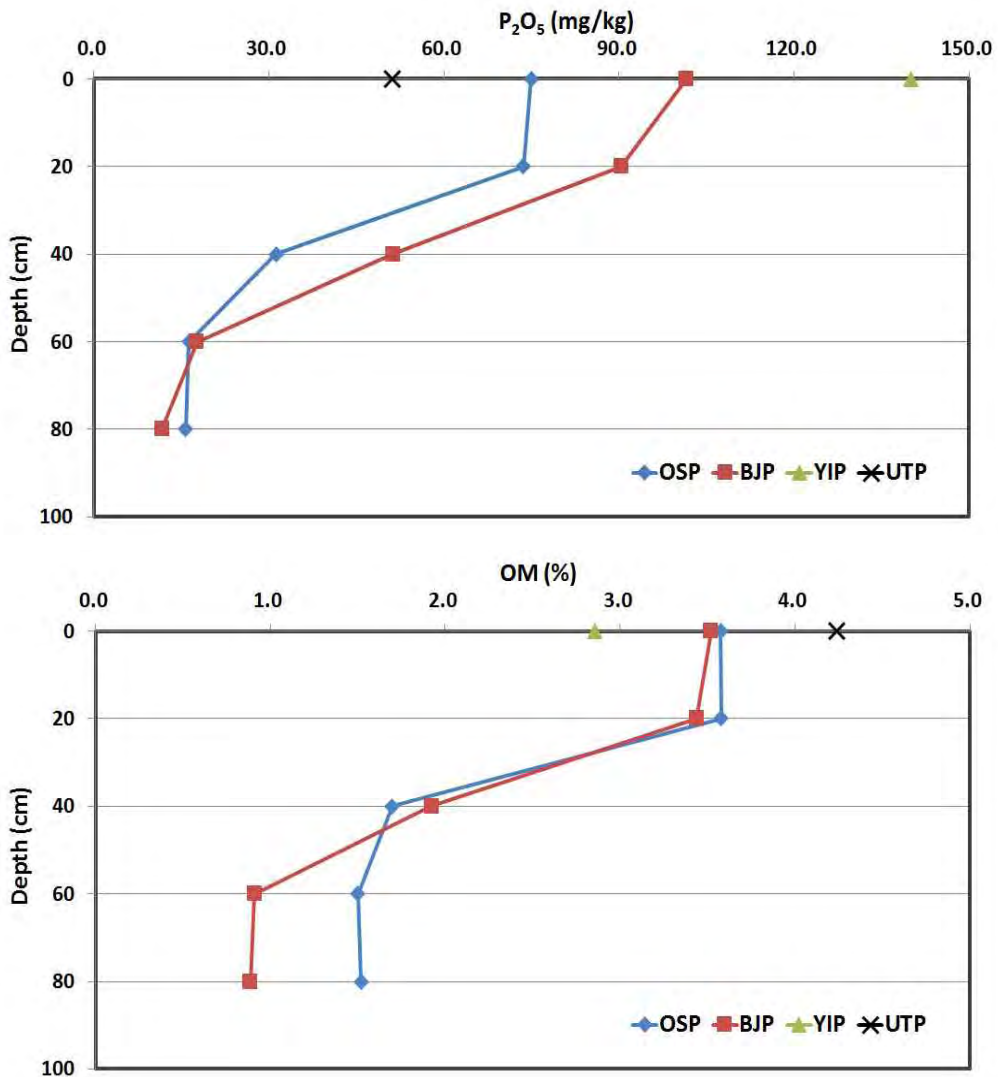


그림 3.4.66 시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.) (계속)

3.2. 논 토양 중금속 함량

가. 용인 청정지구

표 3.4.94는 2011년 11월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 용인청정지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았으며, 니켈과 비소를 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 논 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.94 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2011.11.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	14.37	36.73	17.77	0.40	6.77	14.80	ND	ND
	YIP#01-20cm	15.00	39.50	19.70	0.33	4.97	16.30	ND	ND
	YIP#01-40cm	12.00	39.53	15.60	0.30	5.80	14.97	ND	ND
	YIP#01-60cm	9.00	37.47	14.77	0.30	4.13	13.63	ND	ND
	YIP#01-80cm	8.40	40.47	13.97	0.30	4.93	13.27	ND	ND
	YIP#02-0cm	18.23	55.97	20.73	0.43	6.77	21.20	ND	ND
	YIP#02-20cm	19.43	56.27	19.90	0.50	7.43	21.47	ND	ND
	YIP#02-40cm	19.43	58.73	21.97	0.63	10.27	21.93	ND	ND
	YIP#02-60cm	19.43	60.47	21.80	0.43	11.10	22.37	ND	ND
	YIP#02-80cm	19.07	59.33	24.73	0.60	9.83	22.13	ND	ND
	YIP#03-0cm	20.17	63.70	21.93	0.37	6.63	22.17	ND	ND
	YIP#03-20cm	20.30	59.07	23.30	0.53	9.03	23.13	ND	ND
	YIP#03-40cm	19.50	57.23	20.97	0.57	10.77	23.07	ND	ND
	YIP#03-60cm	15.07	45.73	19.07	0.53	9.20	18.57	ND	ND
	YIP#03-80cm	12.37	37.77	21.27	0.40	7.17	16.73	ND	ND
	YIP#04-0cm	19.40	55.60	21.60	0.40	4.90	20.87	ND	ND
	YIP#04-20cm	18.70	53.67	20.23	0.43	9.93	19.40	ND	ND
	YIP#04-40cm	21.03	49.50	19.93	0.30	5.63	18.53	ND	ND
	YIP#04-60cm	16.33	54.03	18.30	0.70	10.67	20.50	ND	ND
	YIP#04-80cm	14.97	52.40	16.73	0.33	8.10	18.93	ND	ND
YIP#05-0cm	17.00	48.10	21.00	0.50	9.13	18.23	ND	ND	
YIP#05-20cm	18.73	52.47	18.10	0.40	12.27	20.10	ND	ND	
YIP#05-40cm	14.83	48.77	13.57	0.37	8.77	17.53	ND	ND	
YIP#05-60cm	14.47	53.77	14.43	0.40	8.10	18.70	ND	ND	
YIP#05-80cm	19.70	66.50	16.73	0.43	8.13	21.67	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.95 ~ 표 3.4.98은 2012년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 용인청정지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았으며, 니켈을 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 논 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.95 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
용인 청정 지구	YIP#01-0cm	12.93	49.37	18.80	0.63	5.30	15.73	0.04	ND
	YIP#01-20cm	11.70	41.90	18.70	0.60	7.20	16.07	0.04	ND
	YIP#01-40cm	11.63	46.73	18.80	0.63	4.77	16.50	0.04	ND
	YIP#01-60cm	16.00	49.87	21.30	0.83	6.27	17.53	0.02	ND
	YIP#01-80cm	9.37	39.90	13.77	0.50	3.90	15.37	0.01	ND
	YIP#02-0cm	18.30	64.27	23.43	0.77	9.23	24.10	0.04	ND
	YIP#02-20cm	18.77	63.43	22.20	0.70	6.57	21.20	0.03	ND
	YIP#02-40cm	18.70	67.07	22.33	0.93	7.00	22.87	0.05	ND
	YIP#02-60cm	17.73	105.10	22.13	0.93	11.27	23.57	0.04	ND
	YIP#02-80cm	18.63	56.03	21.60	0.90	9.47	21.77	0.06	ND
	YIP#03-0cm	20.57	71.80	22.80	0.90	6.70	24.00	0.04	ND
	YIP#03-20cm	19.63	66.87	23.70	0.93	9.97	24.13	0.04	ND
	YIP#03-40cm	19.47	63.00	24.67	0.90	6.80	23.97	0.01	ND
	YIP#03-60cm	20.17	63.57	22.50	0.87	8.27	23.70	0.02	ND
	YIP#03-80cm	18.00	64.63	22.60	0.93	9.57	21.87	0.01	ND
	YIP#04-0cm	17.30	60.30	19.23	0.67	4.70	21.87	0.03	ND
	YIP#04-20cm	18.50	63.10	21.97	0.73	5.70	22.60	0.04	ND
	YIP#04-40cm	16.87	57.23	20.97	0.70	6.20	20.43	0.04	ND
	YIP#04-60cm	15.53	54.77	19.80	0.47	6.10	18.83	0.03	ND
	YIP#04-80cm	13.70	57.07	20.10	0.90	5.80	20.37	0.00	ND
	YIP#05-0cm	15.53	53.97	20.20	0.87	9.97	21.03	0.03	ND
	YIP#05-20cm	16.27	54.10	19.50	0.90	8.93	21.00	0.03	ND
	YIP#05-40cm	15.60	54.70	17.97	0.67	7.33	20.07	ND	ND
	YIP#05-60cm	28.30	61.00	20.00	0.93	7.53	22.37	ND	ND
	YIP#05-80cm	12.80	48.57	15.73	0.83	6.70	18.23	ND	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.96 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	12.09	50.37	21.31	1.51	6.96	15.38	0.16	ND
	YIP#01-20cm	11.45	27.20	23.36	0.72	5.31	12.28	0.06	ND
	YIP#01-40cm	9.08	26.16	17.17	0.61	4.58	10.98	0.04	ND
	YIP#01-60cm	8.71	26.23	22.00	0.62	4.81	10.03	0.02	ND
	YIP#01-80cm	7.95	22.10	14.12	0.58	3.77	11.80	0.01	ND
	YIP#02-0cm	13.45	41.77	13.61	0.73	4.99	14.71	0.03	ND
	YIP#02-20cm	12.63	39.37	17.13	0.67	5.07	13.85	0.04	ND
	YIP#02-40cm	10.63	31.20	17.41	1.36	8.37	11.49	0.01	ND
	YIP#02-60cm	14.32	42.33	14.12	1.08	7.87	17.90	0.01	ND
	YIP#02-80cm	12.93	36.97	11.96	1.01	8.16	15.76	0.01	ND
	YIP#03-0cm	13.05	46.33	15.99	0.85	6.08	14.65	0.01	ND
	YIP#03-20cm	13.06	50.07	15.55	1.23	11.26	16.47	0.03	ND
	YIP#03-40cm	11.67	41.80	13.43	1.16	5.24	15.79	ND	ND
	YIP#03-60cm	8.94	32.69	11.29	1.01	5.52	13.06	ND	ND
	YIP#03-80cm	9.48	35.27	12.21	1.00	5.34	13.48	ND	ND
	YIP#04-0cm	14.17	59.23	15.05	1.08	4.23	16.88	0.08	ND
	YIP#04-20cm	13.65	50.50	14.91	1.11	5.36	17.53	0.07	ND
	YIP#04-40cm	16.27	54.93	16.39	1.33	7.09	21.11	0.09	ND
	YIP#04-60cm	16.80	51.60	15.96	1.36	6.61	20.79	0.12	ND
	YIP#04-80cm	14.13	48.20	14.56	1.19	5.79	18.20	0.07	ND
YIP#05-0cm	14.23	49.77	16.50	1.38	8.23	18.79	0.07	ND	
YIP#05-20cm	시료부족	시료부족	시료부족	시료부족	시료부족	시료부족	시료없음	ND	
YIP#05-40cm	12.40	45.77	14.59	1.25	7.05	16.73	0.08	ND	
YIP#05-60cm	10.93	42.47	12.50	1.33	5.84	15.62	0.02	ND	
YIP#05-80cm	15.34	56.23	16.00	1.95	8.89	22.41	0.01	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.97 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.09.20)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	11.92	43.00	15.07	0.28	30.46	14.37	0.03	ND
	YIP#01-20cm	11.91	43.57	15.10	0.29	29.01	14.77	0.03	ND
	YIP#01-40cm	11.47	41.77	13.56	0.25	23.67	14.49	0.03	ND
	YIP#01-60cm	9.80	39.17	11.90	0.23	17.50	13.40	0.03	ND
	YIP#01-80cm	9.40	39.20	11.99	0.28	22.69	13.61	ND	ND
	YIP#02-0cm	13.96	46.37	16.09	0.21	16.88	15.80	0.06	ND
	YIP#02-20cm	14.51	49.97	17.37	0.24	18.41	17.05	0.05	ND
	YIP#02-40cm	13.22	44.50	16.60	0.23	18.50	17.23	0.02	ND
	YIP#02-60cm	10.21	33.37	13.25	0.19	14.54	13.24	0.00	ND
	YIP#02-80cm	11.74	42.43	15.66	0.26	18.65	15.98	0.01	ND
	YIP#03-0cm	13.87	61.13	14.81	0.29	16.30	19.17	0.01	ND
	YIP#03-20cm	15.08	62.67	17.01	0.30	17.67	20.69	0.04	ND
	YIP#03-40cm	15.88	61.23	18.21	0.28	18.29	21.55	0.02	ND
	YIP#03-60cm	17.44	69.77	19.63	0.30	18.31	21.79	0.03	ND
	YIP#03-80cm	14.49	63.87	16.64	0.28	19.27	20.00	ND	ND
	YIP#04-0cm	17.41	65.50	32.14	0.38	19.71	16.63	0.03	ND
	YIP#04-20cm	17.00	68.60	31.89	0.41	19.07	16.73	0.04	ND
	YIP#04-40cm	16.83	61.93	31.75	0.37	16.55	15.98	0.04	ND
	YIP#04-60cm	15.61	57.10	30.28	0.37	17.16	15.19	0.03	ND
	YIP#04-80cm	16.66	60.57	31.81	0.41	18.13	15.66	0.02	ND
YIP#05-0cm	14.58	88.67	21.68	0.45	21.93	12.62	0.07	ND	
YIP#05-20cm	15.16	90.10	22.19	0.47	17.96	13.08	0.06	ND	
YIP#05-40cm	13.83	80.77	19.81	0.44	21.06	11.93	0.06	ND	
YIP#05-60cm	12.85	69.50	17.86	0.41	20.88	11.46	0.04	ND	
YIP#05-80cm	9.74	32.31	13.33	0.20	17.72	11.91	0.04	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.98 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.11.08)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	10.25	29.14	13.78	0.21	5.02	11.55	0.04	ND
	YIP#01-20cm	11.00	33.03	14.38	0.23	5.47	12.77	0.04	ND
	YIP#01-40cm	7.16	23.84	13.12	0.26	5.88	10.54	ND	ND
	YIP#01-60cm	7.04	26.56	12.95	0.21	5.86	11.38	ND	ND
	YIP#01-80cm	10.66	43.23	17.36	0.26	7.08	17.13	ND	ND
	YIP#02-0cm	11.31	44.90	14.02	0.22	5.86	14.44	0.02	ND
	YIP#02-20cm	11.41	39.70	14.48	0.26	8.28	14.21	ND	ND
	YIP#02-40cm	13.56	48.33	14.11	0.25	7.55	17.71	ND	ND
	YIP#02-60cm	12.24	45.30	12.11	0.22	7.19	16.39	ND	ND
	YIP#02-80cm	13.71	45.63	11.75	0.22	9.54	15.84	ND	ND
	YIP#03-0cm	13.52	52.40	16.04	0.29	7.23	17.67	ND	ND
	YIP#03-20cm	12.88	46.97	14.11	0.29	7.63	17.64	ND	ND
	YIP#03-40cm	11.47	39.70	12.12	0.22	6.43	14.95	ND	ND
	YIP#03-60cm	11.99	42.73	14.68	0.25	6.99	16.49	ND	ND
	YIP#03-80cm	12.67	42.93	15.68	0.23	7.89	16.94	ND	ND
	YIP#04-0cm	12.78	49.07	14.91	0.24	5.06	15.66	0.03	ND
	YIP#04-20cm	11.17	42.87	13.71	0.22	6.66	14.44	0.01	ND
	YIP#04-40cm	10.98	57.60	13.36	0.25	6.88	14.72	0.03	ND
	YIP#04-60cm	10.87	47.10	13.21	0.28	8.00	15.23	ND	ND
	YIP#04-80cm	11.43	39.67	12.18	0.30	9.38	13.28	ND	ND
YIP#05-0cm	11.74	41.63	15.81	0.28	8.93	14.51	0.02	ND	
YIP#05-20cm	10.79	40.67	14.20	0.26	6.99	14.42	0.02	ND	
YIP#05-40cm	11.15	40.33	13.27	0.23	6.71	14.24	0.04	ND	
YIP#05-60cm	10.91	42.33	13.90	0.23	7.26	15.14	ND	ND	
YIP#05-80cm	9.36	39.40	11.62	0.18	5.64	13.09	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.99 ~ 표 3.4.100은 2013년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 표층(0 cm)의 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 용인청정지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기

도 는 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 는 오염도보다는 높았으며, 니켈을 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 는 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.99 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr6+
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm		33.97	14.43	0.29				
	YIP#02-0cm		45.33	14.58	0.28				
	YIP#03-0cm		50.00	14.81	0.33				
	YIP#04-0cm		50.23	15.62	0.30				
	YIP#05-0cm		46.97	15.59	0.37				
경기도 는 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 는 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.100 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr6+
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	10.15	36.78	15.20	0.15	4.82	12.41	0.05	
	YIP#02-0cm	11.90	47.01	16.22	0.14	5.33	15.32	0.04	
	YIP#03-0cm	13.80	52.45	18.60	0.21	7.89	18.10	0.03	
	YIP#04-0cm	12.38	53.61	14.85	0.16	3.87	14.10	0.04	
	YIP#05-0cm	11.89	41.71	16.50	0.19	7.76	14.74	0.04	
경기도 는 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 는 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.101은 2014년 4월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 용인청정지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기도 는 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 는 오염도보다는 높았다. 수은(Hg)은 전국 는 오염도보다는 낮게 검출되었으나 경기도 는 오염도보다는 높았다. 니켈과 수은을 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 는 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은

샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.101 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr6+
		mg/kg							
용인 청정 지구 (YIP)	YIP#01-0cm	12.47	44.51	20.69	0.14	7.15	14.92	0.02	ND
	YIP#01-20cm	13.19	45.72	20.60	0.14	7.38	15.61	0.03	ND
	YIP#01-40cm	9.80	39.36	19.12	0.07	6.98	14.55	0.01	ND
	YIP#01-60cm	9.39	50.32	16.57	0.03	4.92	17.09	ND	ND
	YIP#01-80cm	11.22	56.03	18.42	0.04	4.96	19.47	ND	ND
	YIP#02-0cm	15.25	66.30	22.05	0.11	9.93	19.09	0.01	ND
	YIP#02-20cm	15.30	61.52	20.92	0.10	12.24	17.86	0.01	ND
	YIP#02-40cm	22.09	71.33	21.89	0.06	10.58	22.18	ND	ND
	YIP#02-60cm	17.72	70.52	20.99	0.04	10.70	22.89	ND	ND
	YIP#02-80cm	17.78	71.22	19.50	0.04	10.49	22.16	ND	ND
	YIP#03-0cm	15.55	67.82	19.63	0.13	9.35	17.67	0.03	ND
	YIP#03-20cm	16.96	70.20	21.40	0.13	10.77	19.73	ND	ND
	YIP#03-40cm	14.00	54.77	18.08	0.07	11.85	16.80	ND	ND
	YIP#03-60cm	12.07	45.21	17.60	0.05	9.29	14.51	ND	ND
	YIP#03-80cm	9.45	36.60	14.52	0.03	9.33	12.09	ND	ND
	YIP#04-0cm	19.52	69.93	18.12	0.23	5.72	20.72	0.03	ND
	YIP#04-20cm	18.70	67.43	17.82	0.24	6.26	20.03	0.03	ND
	YIP#04-40cm	18.70	64.41	18.91	0.25	7.32	20.77	0.03	ND
	YIP#04-60cm	16.45	60.65	18.20	0.31	9.77	20.04	0.00	ND
	YIP#04-80cm	15.45	61.38	17.36	0.25	8.87	20.65	ND	ND
YIP#05-0cm	17.02	59.37	18.12	0.41	9.59	19.33	0.02	ND	
YIP#05-20cm	18.42	62.99	18.54	0.45	10.21	20.22	0.02	ND	
YIP#05-40cm	17.21	62.17	18.61	0.45	10.54	20.53	0.02	ND	
YIP#05-60cm	15.56	56.50	16.06	0.24	7.74	18.48	0.18	ND	
YIP#05-80cm	16.99	64.06	17.86	0.25	8.22	21.54	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

나. 오산 간접재이용지구

표 3.4.102는 2011년 11월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 오산재이용지구의 논토양에서는 아연(Zn), 비소(As), 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도와 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으며, 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)은 전국 및 경기도 논 오염도에 비해 낮게 검출되었고 6가크롬(Cr⁶⁺)은 검출되지 않았다.

표 3.4.102 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2011.11.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm	19.27	78.20	17.77	0.57	5.43	20.97	ND	ND
	OSP#01-20cm	19.70	74.83	20.17	0.63	6.30	21.90	ND	ND
	OSP#01-40cm	17.67	65.60	21.53	0.60	6.57	21.93	ND	ND
	OSP#01-60cm	17.07	63.43	17.17	0.53	8.10	20.27	ND	ND
	OSP#01-80cm	16.53	72.83	19.10	0.67	10.27	27.27	ND	ND
	OSP#02-0cm	24.33	70.30	18.13	0.43	6.93	20.30	ND	ND
	OSP#02-20cm	21.83	82.33	21.93	0.47	8.57	23.20	ND	ND
	OSP#02-40cm	21.60	80.43	19.90	0.57	8.70	25.67	ND	ND
	OSP#02-60cm	16.73	66.57	18.70	0.50	7.37	18.57	ND	ND
	OSP#02-80cm	22.00	78.73	25.37	0.63	9.37	23.37	ND	ND
	OSP#03-0cm	29.47	87.83	29.27	0.73	8.43	21.33	ND	ND
	OSP#03-20cm	27.40	94.60	31.80	0.70	9.37	22.37	ND	ND
	OSP#03-40cm	22.67	80.10	28.47	0.60	7.27	21.40	ND	ND
	OSP#03-60cm	20.47	74.40	25.83	0.50	7.73	21.30	ND	ND
	OSP#03-80cm	20.60	85.60	23.00	0.63	8.53	22.03	ND	ND
	OSP#04-0cm	24.23	76.87	29.83	0.70	8.33	23.70	ND	ND
	OSP#04-20cm	20.77	72.97	26.33	0.70	8.53	23.37	ND	ND
	OSP#04-40cm	19.37	68.50	28.50	0.87	10.90	22.20	ND	ND
	OSP#04-60cm	16.23	57.17	24.43	0.53	8.73	19.80	ND	ND
	OSP#04-80cm	11.83	50.63	17.90	0.73	10.20	16.60	ND	ND
OSP#05-0cm	19.20	134.07	16.63	1.00	7.50	15.50	ND	ND	
OSP#05-20cm	20.70	137.80	17.70	1.17	7.50	16.50	ND	ND	
OSP#05-40cm	20.63	121.93	18.40	1.07	8.17	20.57	ND	ND	
OSP#05-60cm	21.70	78.37	26.17	0.73	10.43	24.00	ND	ND	
OSP#05-80cm	20.73	81.47	28.10	0.73	12.47	26.00	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.103 ~ 표 3.4.106은 2012년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 오산재이용지구의 논토양에서는 아연(Zn), 비소(As), 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도와 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으며, 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)은 전국 및 경기도 논 오염도에 비해 낮게 검출되었고 6가크롬(Cr⁶⁺)은 검출되지 않았다.

표 3.4.103 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
오산 제이용지구	OSP#01-0cm	18.40	80.93	21.73	1.07	5.63	23.30	0.03	ND
	OSP#01-20cm	16.10	70.13	20.83	1.10	6.30	22.50	0.06	ND
	OSP#01-40cm	15.90	70.60	19.73	1.07	5.60	22.20	0.03	ND
	OSP#01-60cm	14.60	62.70	19.47	1.10	4.93	21.37	0.02	ND
	OSP#01-80cm	14.17	63.67	23.67	1.43	7.67	24.23	0.02	ND
	OSP#02-0cm	35.00	100.67	33.77	1.10	4.47	26.57	0.05	ND
	OSP#02-20cm	13.53	62.37	20.47	1.10	7.23	20.90	ND	ND
	OSP#02-40cm	15.17	71.73	24.80	1.60	7.60	27.50	0.02	ND
	OSP#02-60cm	13.97	70.60	19.90	1.20	6.83	28.70	0.03	ND
	OSP#02-80cm	14.03	69.27	18.23	1.03	5.67	27.23	0.02	ND
	OSP#03-0cm	24.47	80.30	28.43	1.03	7.77	23.23	0.08	ND
	OSP#03-20cm	20.20	74.17	27.00	1.03	7.83	21.90	0.08	ND
	OSP#03-40cm	16.37	63.27	33.20	0.87	5.90	19.87	0.02	ND
	OSP#03-60cm	15.20	62.17	23.13	1.07	8.20	20.97	ND	ND
	OSP#03-80cm	22.33	62.77	20.93	1.00	7.40	24.10	0.02	ND
	OSP#04-0cm	33.00	77.17	28.27	1.10	6.03	22.10	0.07	ND
	OSP#04-20cm	19.27	69.03	24.87	0.97	6.27	21.00	0.06	ND
	OSP#04-40cm	15.70	63.07	23.37	1.17	8.13	20.60	0.02	ND
	OSP#04-60cm	15.10	62.60	26.20	1.10	8.93	20.97	0.02	ND
	OSP#04-80cm	10.97	54.97	20.00	1.00	6.13	19.53	0.02	ND
	OSP#05-0cm	16.50	114.40	18.53	1.37	5.70	15.17	ND	ND
	OSP#05-20cm	15.03	105.37	20.73	1.47	5.77	15.43	0.02	ND
	OSP#05-40cm	20.00	71.07	25.87	1.17	6.33	24.53	ND	ND
	OSP#05-60cm	16.30	64.47	24.40	1.07	7.63	22.63	ND	ND
OSP#05-80cm	27.73	66.13	23.60	1.17	6.27	21.50	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.104 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm	13.13	56.10	12.49	0.93	4.61	13.62	0.04	ND
	OSP#01-20cm	11.06	48.77	12.46	1.10	5.30	14.61	0.02	ND
	OSP#01-40cm	9.10	40.13	10.96	0.95	4.67	12.36	0.01	ND
	OSP#01-60cm	9.25	42.83	10.66	1.00	5.03	12.87	0.00	ND
	OSP#01-80cm	9.37	40.37	11.27	1.04	5.60	13.62	0.00	ND
	OSP#02-0cm	12.78	48.73	12.86	0.84	4.87	13.64	0.07	ND
	OSP#02-20cm	12.66	53.83	12.92	1.07	5.94	15.33	0.08	ND
	OSP#02-40cm	11.29	42.93	11.57	0.95	4.57	15.08	0.03	ND
	OSP#02-60cm	10.86	41.43	11.67	0.93	4.38	14.03	0.01	ND
	OSP#02-80cm	10.02	37.47	11.79	0.98	5.43	13.06	0.01	ND
	OSP#03-0cm	18.93	54.90	17.41	0.95	5.18	14.38	0.09	ND
	OSP#03-20cm	17.59	50.47	17.21	0.90	5.52	14.25	0.09	ND
	OSP#03-40cm	14.47	51.63	16.77	0.99	5.89	14.56	0.05	ND
	OSP#03-60cm	14.25	47.13	16.68	1.15	6.30	14.71	0.04	ND
	OSP#03-80cm	11.73	35.77	15.63	1.34	6.59	13.46	0.01	ND
	OSP#04-0cm	16.46	55.90	17.95	0.92	4.81	14.73	0.07	ND
	OSP#04-20cm	14.84	52.53	17.18	1.13	6.01	14.95	0.06	ND
	OSP#04-40cm	15.40	53.20	19.65	1.28	6.52	16.04	0.06	ND
	OSP#04-60cm	16.90	54.27	23.10	1.58	7.97	17.45	0.01	ND
	OSP#04-80cm	14.82	59.77	18.91	1.58	7.61	19.44	0.02	ND
OSP#05-0cm	21.19	116.00	16.25	2.21	5.22	16.47	0.01	ND	
OSP#05-20cm	23.96	103.03	19.53	2.01	5.31	24.19	0.01	ND	
OSP#05-40cm	17.55	74.37	16.86	1.34	5.67	16.43	0.02	ND	
OSP#05-60cm	21.14	90.60	27.69	1.59	6.36	19.00	0.04	ND	
OSP#05-80cm	18.33	70.60	19.17	1.42	6.80	19.08	0.03	ND	
경기도 논 오염도	24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13	
전국 논 오염도	21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20	
토양오염우려기준	50	300	100	1.5	6	40	4	4	

* ND: not detected

표 3.4.105 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.09.20)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm	10.75	56.67	14.94	0.29	47.97	13.50	0.03	ND
	OSP#01-20cm	12.33	60.47	15.49	0.33	44.13	15.39	0.09	ND
	OSP#01-40cm	11.15	58.30	15.39	0.34	36.90	16.70	0.02	ND
	OSP#01-60cm	11.01	57.17	14.81	0.35	30.48	15.77	0.02	ND
	OSP#01-80cm	11.32	57.33	15.92	0.32	29.65	15.86	0.02	ND
	OSP#02-0cm	15.45	73.53	16.58	0.33	23.75	16.27	0.03	ND
	OSP#02-20cm	15.15	69.43	16.81	0.42	24.56	17.47	0.03	ND
	OSP#02-40cm	10.85	59.07	17.28	0.39	28.58	17.15	0.01	ND
	OSP#02-60cm	10.80	58.03	16.00	0.35	24.47	16.48	ND	ND
	OSP#02-80cm	11.87	66.47	15.12	0.38	28.15	18.06	0.02	ND
	OSP#03-0cm	23.42	80.20	24.25	0.47	22.36	18.27	0.08	ND
	OSP#03-20cm	18.74	71.53	22.29	0.44	23.57	17.66	0.08	ND
	OSP#03-40cm	16.65	67.00	21.11	0.38	42.60	16.78	0.07	ND
	OSP#03-60cm	15.50	65.10	19.50	0.32	22.81	16.90	0.20	ND
	OSP#03-80cm	13.89	57.70	19.12	0.37	24.92	17.07	0.06	ND
	OSP#04-0cm	16.24	69.93	21.16	0.40	23.02	17.78	0.07	ND
	OSP#04-20cm	15.12	67.53	20.82	0.40	22.40	17.42	0.06	ND
	OSP#04-40cm	14.44	63.87	19.94	0.35	24.99	16.93	0.07	ND
	OSP#04-60cm	11.64	54.97	17.17	0.38	26.99	15.73	0.01	ND
	OSP#04-80cm	11.09	51.83	18.80	0.32	27.72	15.59	ND	ND
	OSP#05-0cm	13.87	105.27	15.98	0.62	21.18	13.62	0.01	ND
	OSP#05-20cm	12.93	101.87	14.89	0.57	24.23	12.32	0.01	ND
	OSP#05-40cm	12.83	103.93	15.28	0.59	26.74	12.28	ND	ND
	OSP#05-60cm	14.38	90.83	16.89	0.53	27.80	14.79	0.03	ND
	OSP#05-80cm	16.05	85.00	19.90	0.51	23.92	17.49	0.03	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.106 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.11.08)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm	13.41	64.30	15.92	0.38	5.65	16.74	0.02	ND
	OSP#01-20cm	9.78	50.17	13.74	0.30	5.22	13.78	ND	ND
	OSP#01-40cm	10.49	49.40	20.54	0.30	5.64	14.50	ND	ND
	OSP#01-60cm	9.64	49.33	14.19	0.35	6.14	15.50	ND	ND
	OSP#01-80cm	11.20	54.77	13.63	0.37	5.91	18.47	ND	ND
	OSP#02-0cm	13.32	61.13	16.09	0.35	5.47	16.60	0.06	ND
	OSP#02-20cm	11.28	53.10	15.54	0.33	5.60	16.59	ND	ND
	OSP#02-40cm	10.02	48.83	13.29	0.31	5.29	15.19	ND	ND
	OSP#02-60cm	10.42	53.73	14.63	0.35	6.37	15.79	ND	ND
	OSP#02-80cm	10.61	56.63	15.61	0.37	6.98	17.61	ND	ND
	OSP#03-0cm	11.07	49.70	15.93	0.35	7.22	14.88	ND	ND
	OSP#03-20cm	13.29	57.97	17.80	0.33	6.02	16.11	0.04	ND
	OSP#03-40cm	13.86	57.93	19.03	0.36	7.23	15.73	0.03	ND
	OSP#03-60cm	시료없음	시료없음	시료없음	시료없음	시료없음	시료없음	ND	ND
	OSP#03-80cm	10.97	50.67	15.94	0.36	7.32	16.36	ND	ND
	OSP#04-0cm	17.91	67.47	20.21	0.40	6.82	17.55	0.07	ND
	OSP#04-20cm	14.18	62.30	18.91	0.38	5.99	16.67	0.04	ND
	OSP#04-40cm	10.81	52.90	16.28	0.32	6.81	15.20	ND	ND
	OSP#04-60cm	11.34	49.93	17.09	0.33	7.33	15.69	ND	ND
	OSP#04-80cm	5.34	29.91	8.02	0.16	3.62	9.54	ND	ND
OSP#05-0cm	13.06	102.27	13.87	0.57	5.66	11.64	ND	ND	
OSP#05-20cm	10.89	87.90	15.21	0.48	6.31	10.65	ND	ND	
OSP#05-40cm	17.08	78.87	19.51	0.43	7.85	16.56	0.04	ND	
OSP#05-60cm	16.30	70.13	20.33	0.43	7.97	18.33	0.04	ND	
OSP#05-80cm	12.69	52.63	18.74	0.36	6.83	17.21	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.107 ~ 표 3.4.108은 2013년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 표층(0 cm)의 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 오산재이용지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 비소(As)와 수은(Hg)은 경기도 및 전국 논 오염도보다 높게 검출되었다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.107 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr6+
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm		63.13	15.99	0.36				
	OSP#02-0cm		61.63	16.25	0.37				
	OSP#03-0cm		64.90	21.27	0.42				
	OSP#04-0cm		67.10	21.69	0.42				
	OSP#05-0cm		107.40	14.03	0.62				
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.108 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr6+
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm	13.51	60.61	17.29	0.16	5.25	16.24	0.04	
	OSP#02-0cm	13.82	63.31	16.77	0.16	3.96	14.56	0.03	
	OSP#03-0cm	25.30	72.41	24.80	0.30	6.48	18.05	0.10	
	OSP#04-0cm	17.30	67.25	23.48	0.25	6.66	16.96	0.11	
	OSP#05-0cm	22.56	104.65	26.87	0.46	5.26	15.47	0.02	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.109는 2014년 4월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 오산재이용지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)과 납(Pb)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 아연(Zn)은 경기도 논 오염도 및 전국 논 오염도보다 높았다. 니켈과 수은을 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 논 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았으며, 수은(Hg)은 샘플 중 일부에서만 검출되었다.

표 3.4.109 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
오산 재이용 지구	OSP#01-0cm	19.18	88.06	23.05	0.15	6.19	20.19	0.01	ND
	OSP#01-20cm	16.34	80.83	21.78	0.12	5.88	19.36	0.01	ND
	OSP#01-40cm	11.67	65.87	19.81	0.09	5.68	18.21	ND	ND
	OSP#01-60cm	12.78	67.31	19.95	0.07	6.02	19.70	ND	ND
	OSP#01-80cm	14.55	72.06	20.41	0.07	5.70	22.55	ND	ND
	OSP#02-0cm	18.04	79.04	23.41	0.14	5.98	20.76	0.05	ND
	OSP#02-20cm	14.76	80.18	23.34	0.14	7.39	20.67	0.04	ND
	OSP#02-40cm	11.29	68.09	20.83	0.09	7.91	18.96	ND	ND
	OSP#02-60cm	12.02	74.23	23.60	0.09	8.74	21.38	ND	ND
	OSP#02-80cm	10.90	74.39	21.34	0.07	7.83	23.16	ND	ND
	OSP#03-0cm	20.00	84.75	31.28	0.19	8.18	20.88	0.08	ND
	OSP#03-20cm	20.61	86.67	31.44	0.20	8.60	21.13	0.08	ND
	OSP#03-40cm	16.40	81.07	29.04	0.13	8.49	20.33	0.10	ND
	OSP#03-60cm	13.08	69.66	27.07	0.08	9.22	20.20	ND	ND
	OSP#03-80cm	9.49	63.63	21.10	0.05	7.27	17.99	ND	ND
	OSP#04-0cm	19.03	89.95	32.49	0.20	8.63	21.15	0.06	ND
	OSP#04-20cm	17.52	87.44	31.62	0.19	8.54	20.73	0.05	ND
	OSP#04-40cm	10.90	71.47	26.01	0.09	9.13	18.99	ND	ND
	OSP#04-60cm	9.94	64.80	19.27	0.05	6.31	18.25	ND	ND
	OSP#04-80cm	11.05	65.97	19.94	0.05	8.63	20.62	ND	ND
OSP#05-0cm	13.31	138.13	22.57	0.29	7.25	15.27	0.01	ND	
OSP#05-20cm	12.88	133.11	22.88	0.27	7.44	15.33	ND	ND	
OSP#05-40cm	12.65	139.30	22.35	0.28	7.73	15.45	ND	ND	
OSP#05-60cm	14.90	114.66	24.16	0.21	8.74	17.34	0.01	ND	
OSP#05-80cm	19.46	99.68	30.52	0.18	10.78	20.81	0.04	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

다. 병점 간접재이용지구

표 3.4.110은 2011년 11월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 병점재이용지구의 논토양에서는 아연(Zn), 비소(As)는 경기도 논 오염도과 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으며, 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)은 전국 및 경기도 논 오염도에 비해 낮게 검출되었고 6가크롬(Cr⁶⁺)은 검출되지 않았다.

표 3.4.110 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2011.11.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
병점 재이용 지구	BJP#01-0cm	20.73	103.10	18.97	0.47	5.13	22.43	ND	ND
	BJP#01-20cm	13.03	59.63	11.93	0.40	4.87	18.03	ND	ND
	BJP#01-40cm	7.83	36.83	8.00	0.20	2.70	12.20	ND	ND
	BJP#01-60cm	7.50	37.87	6.67	0.27	2.90	11.93	ND	ND
	BJP#01-80cm	7.33	30.43	7.03	0.23	3.27	9.67	ND	ND
	BJP#02-0cm	18.87	100.47	18.80	0.40	4.00	22.03	ND	ND
	BJP#02-20cm	17.27	93.83	17.90	0.47	7.27	20.93	ND	ND
	BJP#02-40cm	18.83	87.10	18.90	0.53	5.17	23.53	ND	ND
	BJP#02-60cm	19.67	91.80	17.23	0.60	5.07	24.00	ND	ND
	BJP#02-80cm	18.80	88.97	15.50	0.53	6.83	23.43	ND	ND
	BJP#03-0cm	22.17	83.70	23.30	0.43	5.70	22.63	ND	ND
	BJP#03-20cm	17.27	72.27	18.50	0.60	6.57	22.30	ND	ND
	BJP#03-40cm	17.70	66.77	16.77	0.47	8.20	20.60	ND	ND
	BJP#03-60cm	10.53	43.87	9.73	0.27	6.07	13.47	ND	ND
	BJP#03-80cm	9.50	35.70	10.53	0.27	4.63	10.83	ND	ND
	BJP#04-0cm	21.47	84.17	20.37	0.50	4.70	22.03	ND	ND
	BJP#04-20cm	21.07	82.47	19.23	0.50	6.50	23.03	ND	ND
	BJP#04-40cm	18.10	84.17	16.97	0.60	7.07	22.67	ND	ND
	BJP#04-60cm	18.77	78.40	16.37	0.57	5.60	22.80	ND	ND
	BJP#04-80cm	18.87	85.13	15.23	0.47	4.80	23.00	ND	ND
BJP#05-0cm	24.67	93.00	35.00	0.57	10.03	22.20	ND	ND	
BJP#05-20cm	23.40	80.27	32.30	0.60	11.40	21.77	ND	ND	
BJP#05-40cm	18.07	54.40	18.23	0.67	8.40	18.73	ND	ND	
BJP#05-60cm	15.20	66.27	17.57	0.60	6.43	19.93	ND	ND	
BJP#05-80cm	17.77	81.23	20.07	0.53	8.27	22.60	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.111 ~ 표 3.4.114는 2012년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 병점재이용지구의 논토양에서는 아연(Zn), 비소(As), 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도와 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으며, 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)은 전국 및 경기도 논 오염도에 비해 낮게 검출되었고 6가크롬(Cr⁶⁺)은 검출되지 않았다.

표 3.4.111 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
병점 재이용 지구	BJP#01-0cm	18.90	97.17	20.87	0.77	6.70	23.90	0.05	ND
	BJP#01-20cm	16.73	91.90	21.90	0.93	6.30	21.80	0.04	ND
	BJP#01-40cm	19.13	96.37	40.10	0.87	5.27	21.87	0.04	ND
	BJP#01-60cm	8.77	47.27	10.83	0.50	2.47	14.10	ND	ND
	BJP#01-80cm	8.37	40.60	9.53	0.40	3.30	12.83	ND	ND
	BJP#02-0cm	18.00	103.20	20.47	0.60	4.00	22.30	0.08	ND
	BJP#02-20cm	17.70	101.93	20.67	0.67	2.33	21.93	0.06	ND
	BJP#02-40cm	17.93	78.80	23.00	0.87	6.73	23.87	0.02	ND
	BJP#02-60cm	15.93	74.90	17.70	0.77	6.07	23.40	0.01	ND
	BJP#02-80cm	16.90	75.37	17.57	0.90	3.47	24.27	0.00	ND
	BJP#03-0cm	22.30	106.90	29.40	0.87	6.73	28.93	0.09	ND
	BJP#03-20cm	21.97	103.30	25.93	0.90	6.10	28.43	0.09	ND
	BJP#03-40cm	17.17	75.93	19.00	0.83	6.23	23.20	0.03	ND
	BJP#03-60cm	18.07	91.90	22.30	1.03	6.17	25.50	0.05	ND
	BJP#03-80cm	17.70	85.70	21.27	0.97	6.27	25.17	0.04	ND
	BJP#04-0cm	18.50	86.67	22.30	0.80	4.70	24.60	0.07	ND
	BJP#04-20cm	32.17	95.20	23.70	0.90	5.60	25.10	0.07	ND
	BJP#04-40cm	14.07	76.20	18.60	0.87	5.37	22.57	ND	ND
	BJP#04-60cm	14.63	73.70	17.27	0.73	5.53	22.50	0.01	ND
	BJP#04-80cm	13.30	69.00	15.67	0.73	4.70	21.33	ND	ND
BJP#05-0cm	24.40	102.03	62.63	0.97	10.40	24.20	0.92	ND	
BJP#05-20cm	20.03	88.17	38.93	0.87	7.77	21.83	0.42	ND	
BJP#05-40cm	12.50	73.97	26.77	1.07	4.53	19.80	0.03	ND	
BJP#05-60cm	10.60	72.90	19.60	1.00	3.50	19.83	0.01	ND	
BJP#05-80cm	8.20	65.77	14.17	0.70	3.47	17.50	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.112 시험포장 토양 깊이별 pH, EC, 영양염류 분석결과 (2012.07.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
병점 재이용 지구	BJP#01-0cm	17.86	102.43	15.70	1.00	5.04	18.87	0.07	ND
	BJP#01-20cm	18.77	110.87	16.20	0.96	5.60	18.21	0.09	ND
	BJP#01-40cm	15.68	76.40	17.66	0.94	5.51	17.15	0.03	ND
	BJP#01-60cm	13.00	52.40	12.56	0.90	5.49	15.64	0.03	ND
	BJP#01-80cm	14.84	58.70	14.85	1.08	5.68	18.52	0.02	ND
	BJP#02-0cm	18.04	109.50	17.39	0.86	4.86	17.39	0.10	ND
	BJP#02-20cm	13.32	72.53	13.98	0.98	4.91	16.56	0.06	ND
	BJP#02-40cm	13.77	60.30	12.11	1.04	4.86	16.82	0.02	ND
	BJP#02-60cm	15.15	56.50	20.48	1.09	5.38	18.07	0.01	ND
	BJP#02-80cm	14.10	54.90	12.50	1.02	5.23	17.25	0.01	ND
	BJP#03-0cm	18.59	83.60	16.99	1.03	5.57	19.16	0.08	ND
	BJP#03-20cm	18.44	78.50	17.72	1.06	5.94	19.28	0.07	ND
	BJP#03-40cm	15.52	64.23	20.24	1.13	6.31	18.80	0.17	ND
	BJP#03-60cm	14.88	58.07	18.08	1.14	5.72	17.84	0.01	ND
	BJP#03-80cm	13.84	57.47	69.40	1.07	5.20	17.07	0.01	ND
	BJP#04-0cm	17.10	71.20	17.05	1.01	4.33	17.98	0.08	ND
	BJP#04-20cm	14.46	58.43	13.14	1.12	6.03	16.79	0.07	ND
	BJP#04-40cm	13.14	60.73	12.09	1.06	5.50	16.52	0.03	ND
	BJP#04-60cm	13.58	56.80	16.69	1.06	5.82	17.13	0.02	ND
	BJP#04-80cm	11.42	51.27	10.83	1.04	5.13	15.27	0.01	ND
BJP#05-0cm	38.00	139.20	89.33	1.28	7.18	19.18	4.53	ND	
BJP#05-20cm	38.37	139.90	85.47	1.35	7.40	18.82	3.97	ND	
BJP#05-40cm	9.71	27.48	17.99	0.65	5.21	11.25	0.03	ND	
BJP#05-60cm	34.70	123.17	108.80	1.37	7.57	18.82	4.40	ND	
BJP#05-80cm	17.30	65.20	38.87	1.23	7.07	15.62	1.05	ND	
경기도 논 오염도	24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13	
전국 논 오염도	21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20	
토양오염우려기준	50	300	100	1.5	6	40	4	4	

* ND: not detected

표 3.4.113 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.09.20)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
병접 재이용 지구	BJP#01-0cm	16.26	97.20	15.96	0.30	23.04	19.06	0.06	ND
	BJP#01-20cm	15.31	91.93	15.21	0.30	22.69	18.76	0.20	ND
	BJP#01-40cm	11.89	69.17	13.30	0.33	24.69	17.60	0.04	ND
	BJP#01-60cm	10.88	55.30	11.58	0.25	20.87	16.06	0.02	ND
	BJP#01-80cm	11.10	55.70	11.79	0.26	19.12	17.04	ND	ND
	BJP#02-0cm	14.25	85.50	15.35	0.28	21.15	18.08	0.06	ND
	BJP#02-20cm	14.40	90.50	15.55	0.27	19.67	18.64	0.07	ND
	BJP#02-40cm	14.72	90.47	16.00	0.30	18.69	18.82	0.08	ND
	BJP#02-60cm	14.34	91.83	15.95	0.30	20.06	18.89	0.09	ND
	BJP#02-80cm	14.65	90.70	15.85	0.28	20.20	19.21	0.07	ND
	BJP#03-0cm	15.33	82.07	18.25	0.32	18.44	19.80	0.08	ND
	BJP#03-20cm	15.98	83.87	18.38	0.35	21.21	21.21	0.10	ND
	BJP#03-40cm	15.22	76.30	16.99	0.31	18.73	19.82	0.10	ND
	BJP#03-60cm	13.08	65.27	14.80	0.29	19.57	18.93	0.05	ND
	BJP#03-80cm	11.76	61.03	13.36	0.27	16.27	17.71	0.04	ND
	BJP#04-0cm	13.63	68.97	15.93	0.28	17.77	19.01	0.07	ND
	BJP#04-20cm	12.44	62.50	14.27	0.28	16.80	18.00	0.06	ND
	BJP#04-40cm	12.35	55.97	13.91	0.28	17.87	17.25	0.03	ND
	BJP#04-60cm	10.68	53.20	12.33	0.26	18.07	16.64	0.02	ND
	BJP#04-80cm	9.96	51.77	11.27	0.25	19.81	16.23	ND	ND
	BJP#05-0cm	37.77	130.30	53.07	0.53	19.35	19.44	4.20	ND
	BJP#05-20cm	27.22	97.87	48.97	0.51	19.92	18.70	3.37	ND
	BJP#05-40cm	12.79	52.50	18.26	0.32	17.52	15.75	0.47	ND
	BJP#05-60cm	10.85	51.23	17.47	0.30	21.36	15.21	0.45	ND
	BJP#05-80cm	8.95	49.60	12.46	0.24	15.28	14.44	0.12	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.114 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2012.11.08)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
병점 재이용 지구	BJP#01-0cm	13.57	84.63	17.40	0.32	6.06	19.74	0.05	ND
	BJP#01-20cm	10.68	56.57	12.17	0.27	5.15	15.69	0.02	ND
	BJP#01-40cm	12.54	59.87	13.44	0.32	5.40	17.03	0.01	ND
	BJP#01-60cm	12.08	54.10	12.68	0.28	5.64	15.30	0.02	ND
	BJP#01-80cm	12.71	61.07	13.93	0.34	6.40	18.89	ND	ND
	BJP#02-0cm	12.58	82.60	13.94	0.25	4.31	16.77	0.07	ND
	BJP#02-20cm	11.89	77.97	13.90	0.30	6.07	17.33	0.07	ND
	BJP#02-40cm	11.06	53.83	12.18	0.26	7.16	15.98	ND	ND
	BJP#02-60cm	10.65	53.33	12.04	0.26	4.82	15.91	ND	ND
	BJP#02-80cm	11.26	60.60	12.06	0.27	5.13	17.47	ND	ND
	BJP#03-0cm	14.11	73.93	16.61	0.29	6.22	19.39	0.08	ND
	BJP#03-20cm	12.37	60.00	14.85	0.28	6.08	17.97	0.02	ND
	BJP#03-40cm	12.45	53.60	11.74	0.26	6.28	17.09	ND	ND
	BJP#03-60cm	9.45	48.50	10.42	0.24	5.42	15.29	ND	ND
	BJP#03-80cm	9.79	46.23	10.91	0.24	5.44	14.67	ND	ND
	BJP#04-0cm	12.40	62.90	15.20	0.28	5.59	17.39	0.06	ND
	BJP#04-20cm	10.66	54.97	13.27	0.28	6.19	16.14	0.03	ND
	BJP#04-40cm	8.52	46.17	9.86	0.25	4.39	14.54	ND	ND
	BJP#04-60cm	7.53	41.67	8.85	0.22	4.63	12.90	ND	ND
	BJP#04-80cm	6.31	32.64	7.36	0.15	3.64	10.17	ND	ND
BJP#05-0cm	16.24	73.07	26.94	0.31	6.39	15.21	1.58	ND	
BJP#05-20cm	12.15	52.07	17.77	0.27	6.22	13.98	0.74	ND	
BJP#05-40cm	11.55	45.93	15.61	0.26	6.38	13.35	0.44	ND	
BJP#05-60cm	9.09	43.23	14.08	0.30	6.64	13.89	0.11	ND	
BJP#05-80cm	8.52	50.00	12.37	0.27	4.93	15.32	ND	ND	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.115 ~ 표 3.4.116은 2013년에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 표층(0 cm)의 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 병점재이용지구의 4개(1번 ~ 4번)의 시험포장에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 아연(Zn)과 수은(Hg)은 경기도 논 오염도 및 전국 논 오염도보다 높

게 검출되었다. 6가크롬(Cr^{6+})은 샘플링 시 검출되지 않았다. 병점재이용지구의 5번 시험포장(2013년 10월 7일)에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb), 수은(Hg)이 경기도 논 오염도 및 전국 논 오염도보다 높게 검출되었다. 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 6가크롬(Cr^{6+})은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.115 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr^{6+}
		mg/kg							
병점재이용지구	BJP#01-0cm		86.00	16.58	0.33				
	BJP#02-0cm		85.07	14.71	0.32				
	BJP#03-0cm		80.73	19.52	0.38				
	BJP#04-0cm		67.23	16.69	0.36				
	BJP#05-0cm		111.93	48.90	0.53				
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.116 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr^{6+}
		mg/kg							
병점재이용지구	BJP#01-0cm	17.52	92.68	18.69	0.17	6.04	19.29	0.09	
	BJP#02-0cm	13.77	82.55	16.27	0.14	4.14	17.33	0.12	
	BJP#03-0cm	16.67	78.15	20.33	0.18	6.58	20.74	0.09	
	BJP#04-0cm	14.69	62.91	17.99	0.14	4.93	17.74	0.07	
	BJP#05-0cm	31.02	107.15	49.58	0.34	6.75	18.20	3.43	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.117은 2014년 4월 3일에 각 처리구별 5개의 시험포장에서 표층(0 cm)의 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 토양 분석 결과, 병점재이용지구에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 구리(Cu)와 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 아연(Zn)과 수은(Hg)은 경기도 논 오염도 및 전국 논 오염도보다 높게 검출되었다. 6가크롬(Cr^{6+})은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.117 시험포장 토양 깊이별 중금속함량 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
병접 재이용 지구	BJP#01-0cm	20.75	122.48	19.09	0.18	5.08	23.23	0.05	ND
	BJP#02-0cm	17.50	114.75	18.00	0.17	4.86	21.61	0.07	ND
	BJP#03-0cm	20.68	107.63	22.11	0.22	6.28	25.87	0.07	ND
	BJP#04-0cm	17.59	89.70	20.35	0.19	5.53	22.75	0.06	ND
	BJP#05-0cm	37.85	150.51	60.36	0.48	7.77	24.48	3.30	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

라. 미처리 지구

표 3.4.118 ~ 표 3.4.121은 2012년에 미처리지구인 호رن, 수화, 장전지구의 시험포장에서 심도별로 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 미처리지구인 호رن, 수화 및 장전지구 모두 카드뮴(Cd)을 제외한 다른 주요 중금속 함량이 경기도 및 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났으며, 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다. 각 지구의 논 토양에서 검출된 주요 중금속 중 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb)은 경기도 및 전국 논 오염도보다는 높았으나 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에는 미치지 않았으며, 비소(As)와 니켈(Ni)은 경기도 및 전국 논 오염도뿐만 아니라 토양오염우려기준도 초과하는 것으로 나타났다.

표 3.4.118 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.04.04)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호رن지구	호رن-0cm	27.98	79.54	28.42	0.14	9.23	20.71	1.87	ND
	호رن-20cm	32.26	94.21	30.95	0.13	6.79	25.11	2.08	ND
	호رن-40cm	27.25	80.61	28.24	0.12	7.52	23.67	2.62	ND
	호رن-60cm	27.70	76.47	20.56	0.13	13.63	27.18	1.72	ND
	호رن-80cm	22.25	76.72	24.85	0.12	6.57	26.53	1.45	ND
수화지구	수화-0cm	38.88	96.38	49.49	0.22	10.28	22.38	1.26	ND
	수화-20cm	22.82	86.00	46.84	0.20	10.59	22.09	1.63	ND
	수화-40cm	30.19	77.01	51.68	0.17	12.53	19.99	1.08	ND
	수화-60cm	25.55	65.13	52.49	0.04	14.99	39.47	0.80	ND
	수화-80cm	20.26	60.05	48.23	0.09	8.29	20.29	0.77	ND
장전지구	장전-0cm	22.55	108.65	31.77	0.19	12.59	16.69	1.34	ND
	장전-20cm	21.73	109.26	31.48	0.21	14.21	20.41	1.04	ND
	장전-40cm	21.51	110.81	30.92	0.22	13.27	17.08	1.38	ND
	장전-60cm	27.91	104.59	28.33	0.16	14.01	18.79	1.30	ND
	장전-80cm	22.20	110.21	29.14	0.17	13.89	19.22	1.31	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.119 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.07.04.)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호련지구	호련-0cm	17.91	66.80	18.23	1.26	4.14	22.95	0.05	ND
	호련-20cm	17.00	64.63	18.20	1.20	3.94	21.91	0.04	ND
	호련-40cm	18.62	67.70	18.73	1.44	6.63	25.41	0.03	ND
	호련-60cm	17.40	56.50	16.15	1.17	4.21	24.49	0.02	ND
	호련-80cm	17.56	65.53	16.81	1.38	5.34	24.17	ND	ND
수화지구	수화-0cm	18.66	64.47	35.03	1.51	7.07	17.49	0.07	ND
	수화-20cm	17.94	60.57	37.47	1.32	6.71	16.43	0.09	ND
	수화-40cm	16.01	46.37	28.98	1.37	7.82	14.60	0.02	ND
	수화-60cm	16.03	42.27	37.23	1.11	8.57	14.13	0.01	ND
	수화-80cm	13.41	62.27	17.32	1.49	8.33	12.46	0.15	ND
장전지구	장전-0cm	16.20	82.97	20.84	1.83	10.72	12.98	0.14	ND
	장전-20cm	16.44	82.60	21.84	2.10	11.51	13.56	0.14	ND
	장전-40cm	14.94	72.53	17.91	1.69	9.11	12.44	0.1	ND
	장전-60cm	13.23	49.57	14.60	1.20	10.84	11.01	0.1	ND
	장전-80cm	10.94	50.40	15.33	1.37	8.10	11.63	0.02	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.120 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.09.20.)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호련지구	호련-0cm	11.69	45.87	14.89	0.27	18.41	16.54	0.02	ND
	호련-20cm	13.05	52.20	15.57	0.27	17.83	19.93	ND	ND
	호련-40cm	13.59	53.83	15.78	0.28	20.65	20.60	ND	ND
	호련-60cm	14.00	55.70	16.07	0.28	18.22	20.94	ND	ND
	호련-80cm	13.20	53.50	16.14	0.29	19.16	16.85	0.01	ND
수화지구	수화-0cm	13.02	52.90	15.69	0.28	14.54	17.19	0.03	ND
	수화-20cm	13.00	51.53	16.39	0.28	15.39	17.73	0.02	ND
	수화-40cm	11.32	42.80	15.27	0.23	16.82	16.14	ND	ND
	수화-60cm	11.08	42.90	15.00	0.23	18.03	16.31	ND	ND
	수화-80cm	13.06	65.23	14.62	0.27	12.73	14.94	0.03	ND
장전지구	장전-0cm	12.70	54.73	14.62	0.25	11.57	15.87	0.04	ND
	장전-20cm	12.15	51.47	13.69	0.26	15.22	15.30	0.05	ND
	장전-40cm	10.75	46.63	12.22	0.22	13.68	14.89	0.04	ND
	장전-60cm	41.63	33.37	9.17	0.14	11.92	10.94	0.03	ND
	장전-80cm	12.52	64.47	17.29	0.35	17.94	11.87	0.03	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.121 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2012.11.08.)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호련지구	호련-0cm	15.54	54.77	15.31	0.24	4.11	20.83	ND	ND
	호련-20cm	19.19	59.27	17.69	0.25	5.19	20.76	0.01	ND
	호련-40cm	16.56	54.27	16.56	0.24	4.97	20.45	ND	ND
	호련-60cm	13.73	56.30	15.72	0.27	6.84	19.46	ND	ND
	호련-80cm	16.17	53.33	15.15	0.22	6.85	22.12	ND	ND
수화지구	수화-0cm	16.37	50.70	27.22	0.29	7.07	13.99	0.02	ND
	수화-20cm	15.24	48.70	27.51	0.28	7.83	13.72	0.03	ND
	수화-40cm	12.62	34.43	25.34	0.28	9.39	12.11	ND	ND
	수화-60cm	12.68	36.20	26.14	0.20	6.21	12.00	ND	ND
	수화-80cm	12.91	41.40	26.68	0.37	7.26	13.99	ND	ND
장전지구	장전-0cm	13.85	72.90	19.04	0.37	11.14	11.24	0.05	ND
	장전-20cm	12.84	64.50	17.41	0.36	9.38	11.30	0.04	ND
	장전-40cm	10.98	53.67	15.52	0.27	9.70	10.92	ND	ND
	장전-60cm	10.31	47.47	14.77	0.30	11.39	10.81	ND	ND
	장전-80cm	10.05	50.70	14.78	0.33	9.88	10.42	ND	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.122 ~ 표 3.4.123은 2013년에 미처리지구인 호련, 수화, 장전지구의 시험포장에서 표층(0 cm)의 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 미처리지구인 호련, 수화, 장전지구 모두 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양오염우려기준에는 미치지 않았다. 납(Pb)과 니켈(Ni)은 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으나 경기도 논 오염도보다는 낮았다. 수은(Hg)은 경기도 및 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났으며, 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.122 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2013.04.23)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호련지구	호련-0cm		61.83	18.05	0.36				
수화지구	수화-0cm		62.27	32.50	0.39				
장전지구	장전-0cm		86.17	21.77	0.54				
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.123 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2013.10.07)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호련지구	호련-0cm	17.87	64.31	19.90	0.20	4.95	21.06	0.03	
수화지구	수화-0cm	19.74	65.95	35.92	0.29	10.96	18.21	0.04	
장전지구	장전-0cm	17.33	89.55	25.69	0.30	12.89	14.12	0.08	
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

표 3.4.124는 2014년 4월 3일에 미처리지구인 호련, 수화, 장전지구의 시험포장에서 표층(0 cm)의 토양을 채취하여 중금속함량을 분석한 결과이다. 미처리지구인 호련, 수화 및 장전지구 모두 카드뮴(Cd)을 제외한 다른 주요 중금속 함량이 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났다. 아연(Zn)과 수은(Hg)은 경기도 및 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났다. 비소(As)는 경기도 및 전국 논 오염도뿐만 아니라 토양오염우려기준도 초과하는 것으로 나타났으며, 다른 주요 중금속 함량은 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 6가크롬(Cr⁶⁺)은 샘플링 시 검출되지 않았다.

표 3.4.124 시험지구 주요 토양오염물질 분석결과 (2014.04.03)

지구	구분	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Hg	Cr ⁶⁺
		mg/kg							
호련지구	호련-0cm	21.37	78.80	22.56	0.21	5.88	25.70	0.01	ND
수화지구	수화-0cm	23.94	81.07	40.87	0.46	10.11	21.19	0.02	ND
장전지구	장전-0cm	21.33	118.47	27.07	0.68	16.82	17.34	0.05	ND
경기도 논 오염도		24.16	79.78	36.78	2.31	4.96	25.84	0.00	0.13
전국 논 오염도		21.38	72.87	25.05	1.14	5.23	17.7	0.03	0.20
토양오염우려기준		50	300	100	1.5	6	40	4	4

* ND: not detected

마. 시험지구간 비교분석

그림 3.4.67은 2012년도의 지구별 0 ~ 20 cm 심도를 평균하여 산정한 중금속 함량을 나타내고 있다. 용인 청정지구, 간접재이용지구, 미처리지구 모두 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. Cd은 오산재이용지구에서 가장 높게 나왔고 시간이 지날수록 감소하는 경향을 보였다. Pb은 병점재이용지구에서 제일 높았으며 연중 일정한 함량을 유지하였다. Hg은 병점재이용지구를 제외하면 미미한 수준으로 측정되었다.

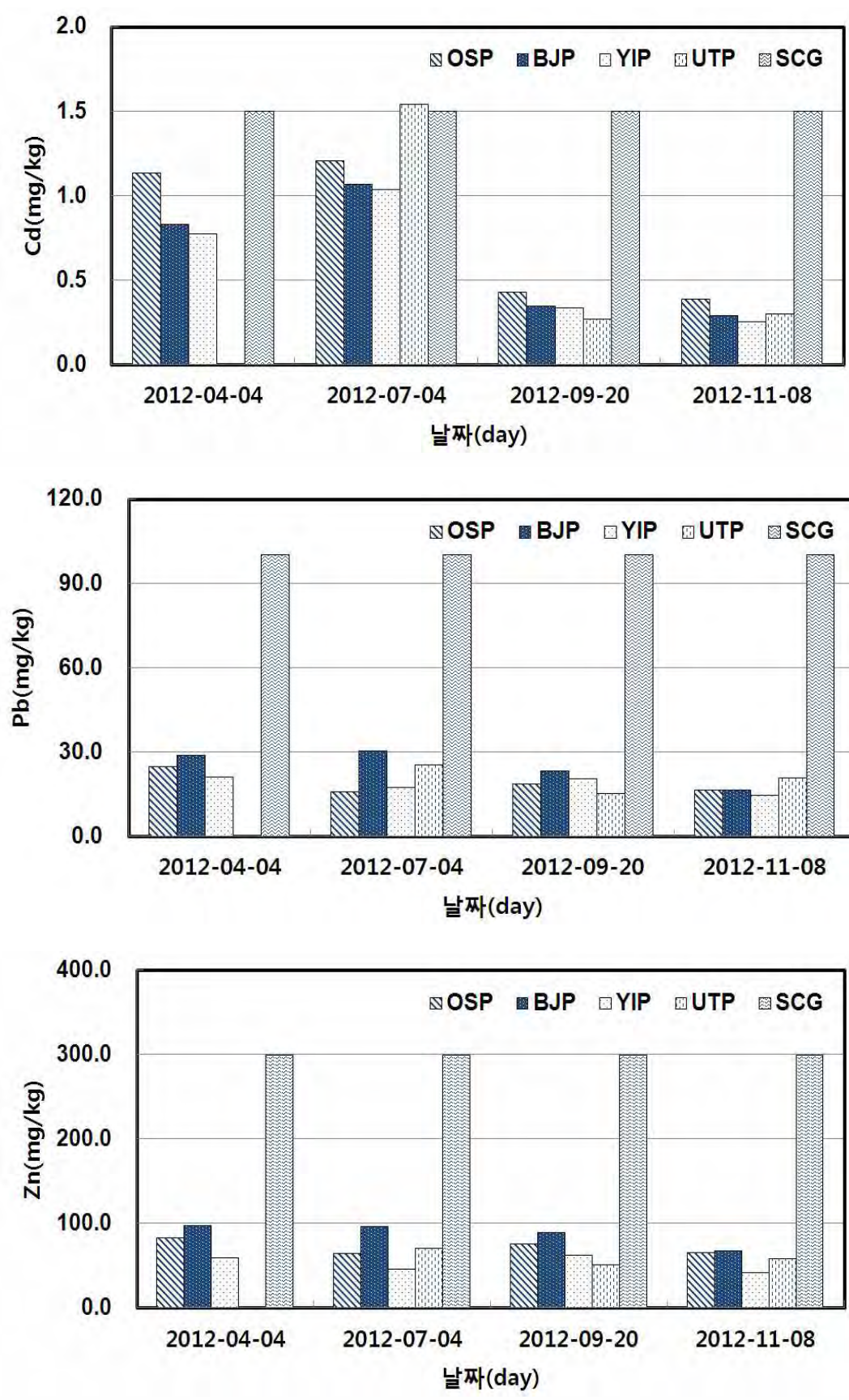


그림 3.4.67 시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2012년) (계속)

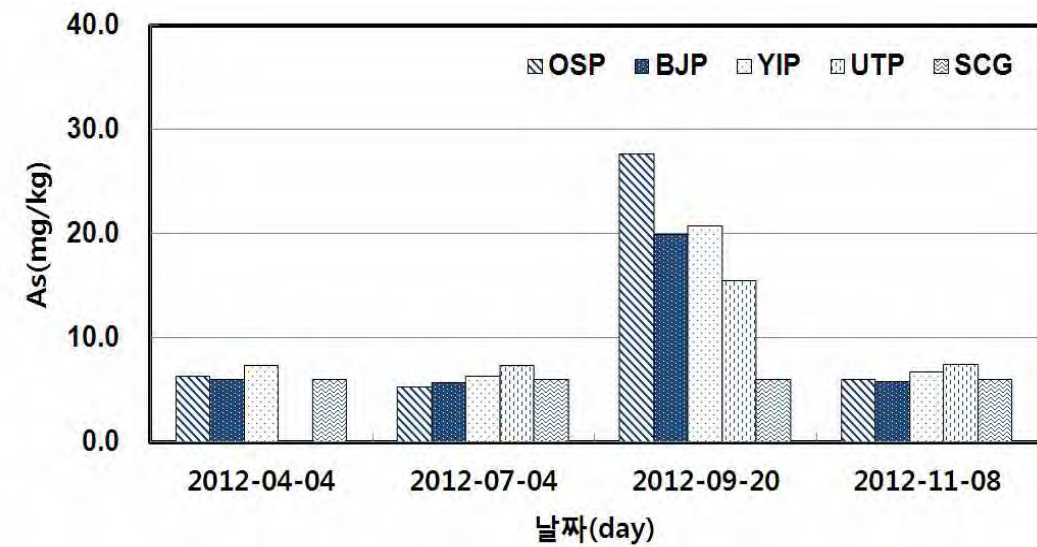
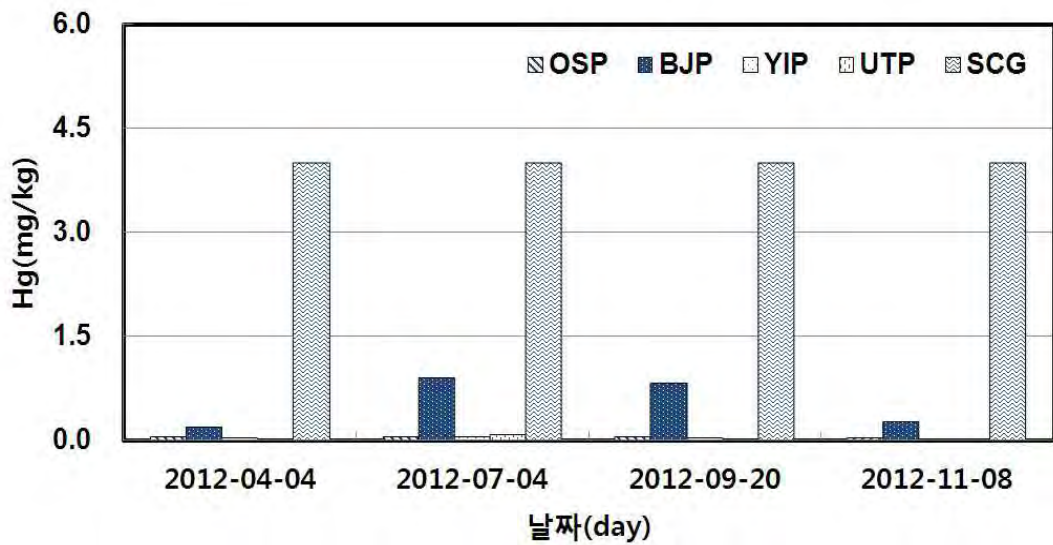
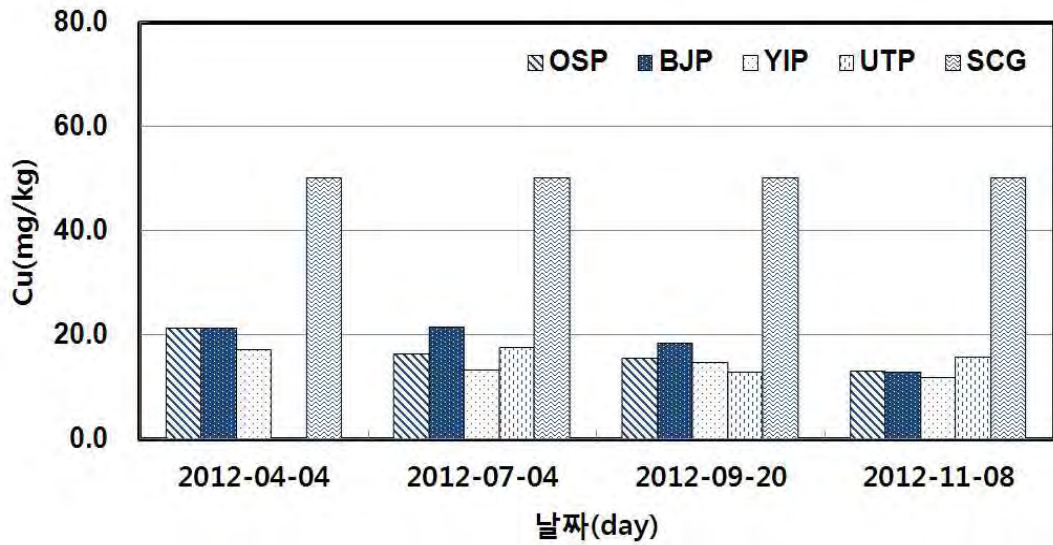


그림 3.4.67 시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2012년) (계속)

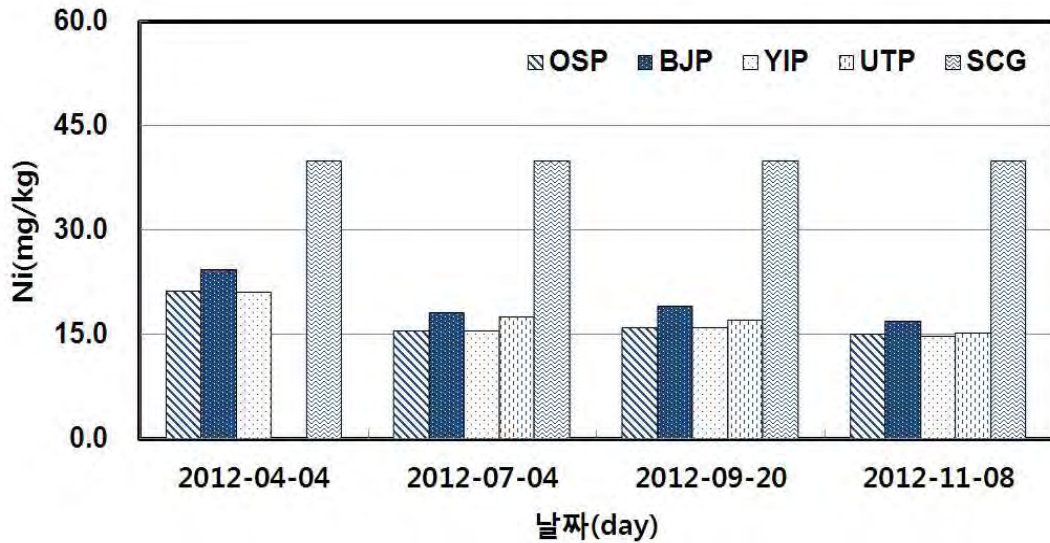


그림 3.4.67 시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2012년)

그림 3.4.68는 2013년도 및 2014년 4월 3일의 지구별 0 ~ 20 cm 심도를 평균하여 산정한 중금속 함량을 나타내고 있다. 용인 청정지구, 간접재이용지구, 미처리지구 모두 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. Cd은 용인재이용지구에서 가장 높게 나왔고 용인청정지구 및 간접재이용지구는 시간이 지날수록 감소하는 경향을 보였으며, 미처리지구는 일정한 함량을 유지하였다. Pb은 7월에 미처리지구에서 제일 높았으며 연중 일정한 함량을 유지하였다. Hg은 병점재이용지구를 제외하면 미미한 수준으로 측정되었다.

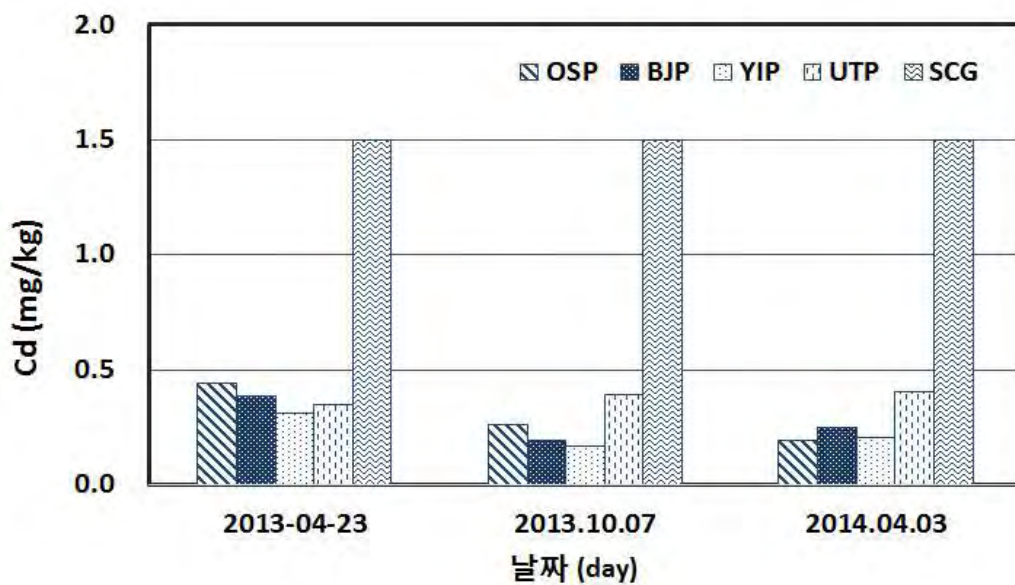


그림 3.4.68 시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년) (계속)

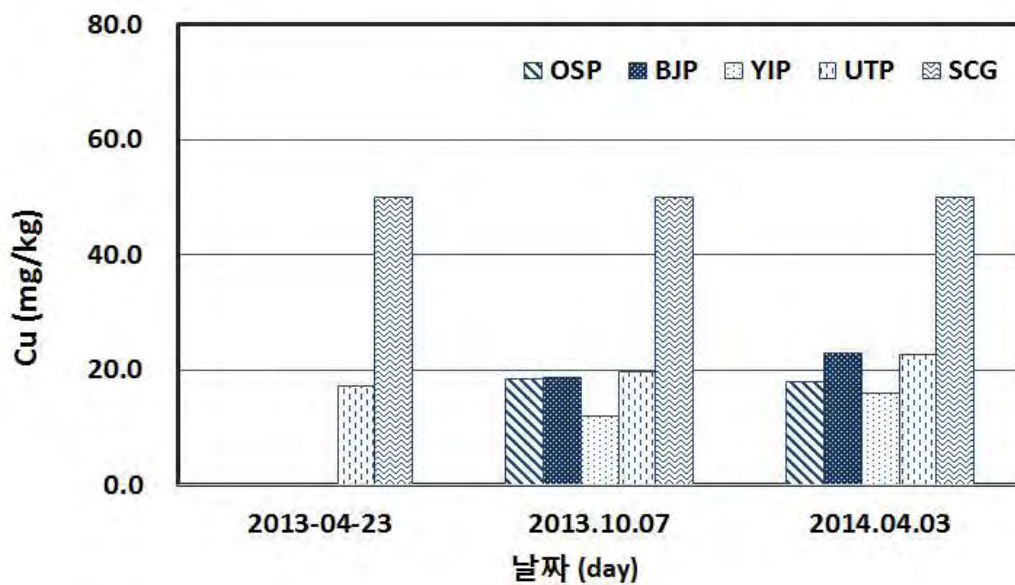
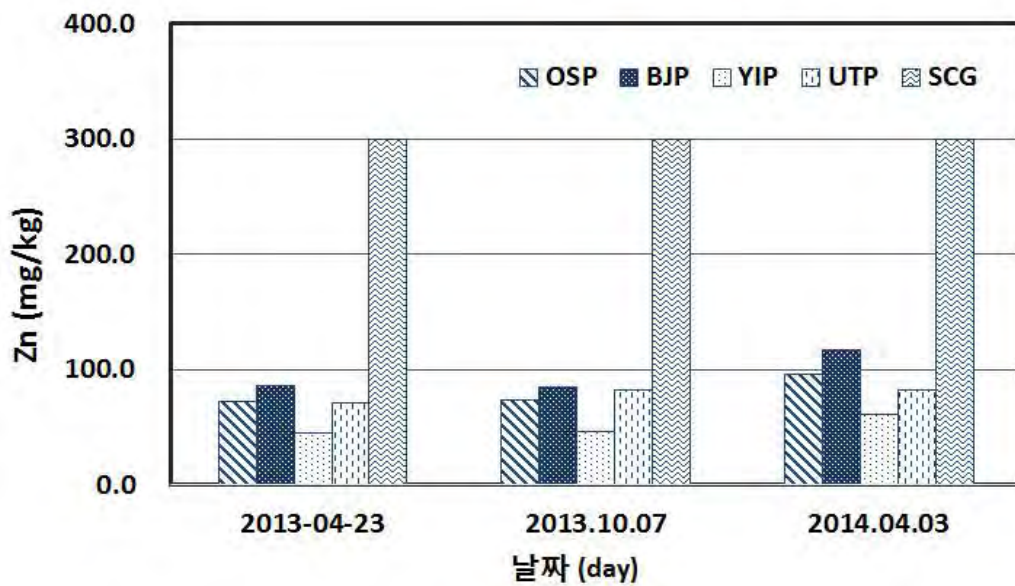
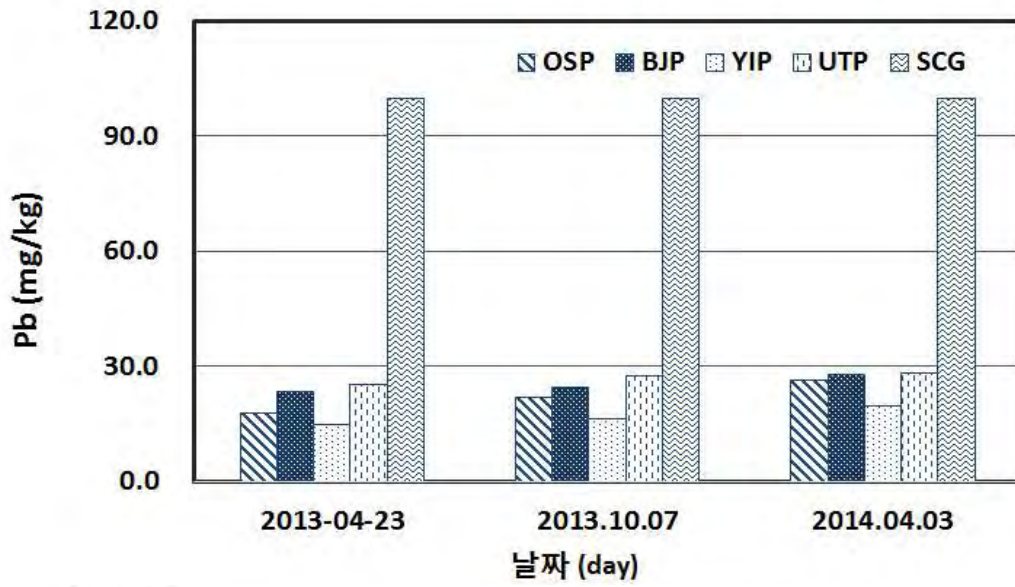


그림 3.4.68 시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년) (계속)

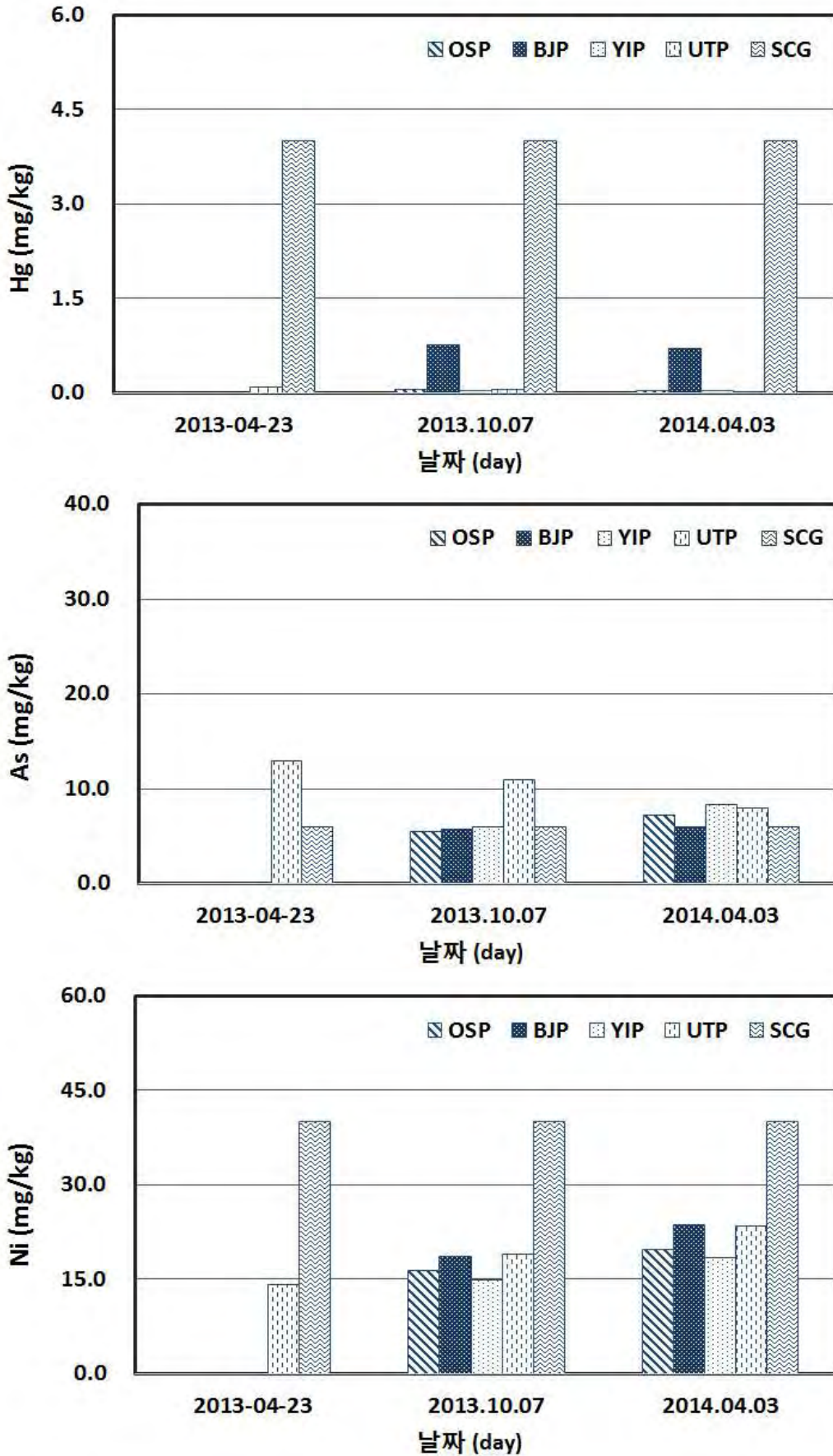


그림 3.4.68 시험지구별 논 토양 분석결과 (심도 0 ~ 20 cm) (2013년, 2014년)

그림 3.4.69 ~ 그림 3.4.72는 2012년도의 지구별 중금속 함량을 심도별로 나타내고 있다. 2012년 04월 04일은 제외하고는 4개의 지구별로 도시하였다. Cd은 오산재이용지구가 제일 높은 경향을 보였고, Zn은 병점재이용지구가 제일 높은 경향을 보였다.

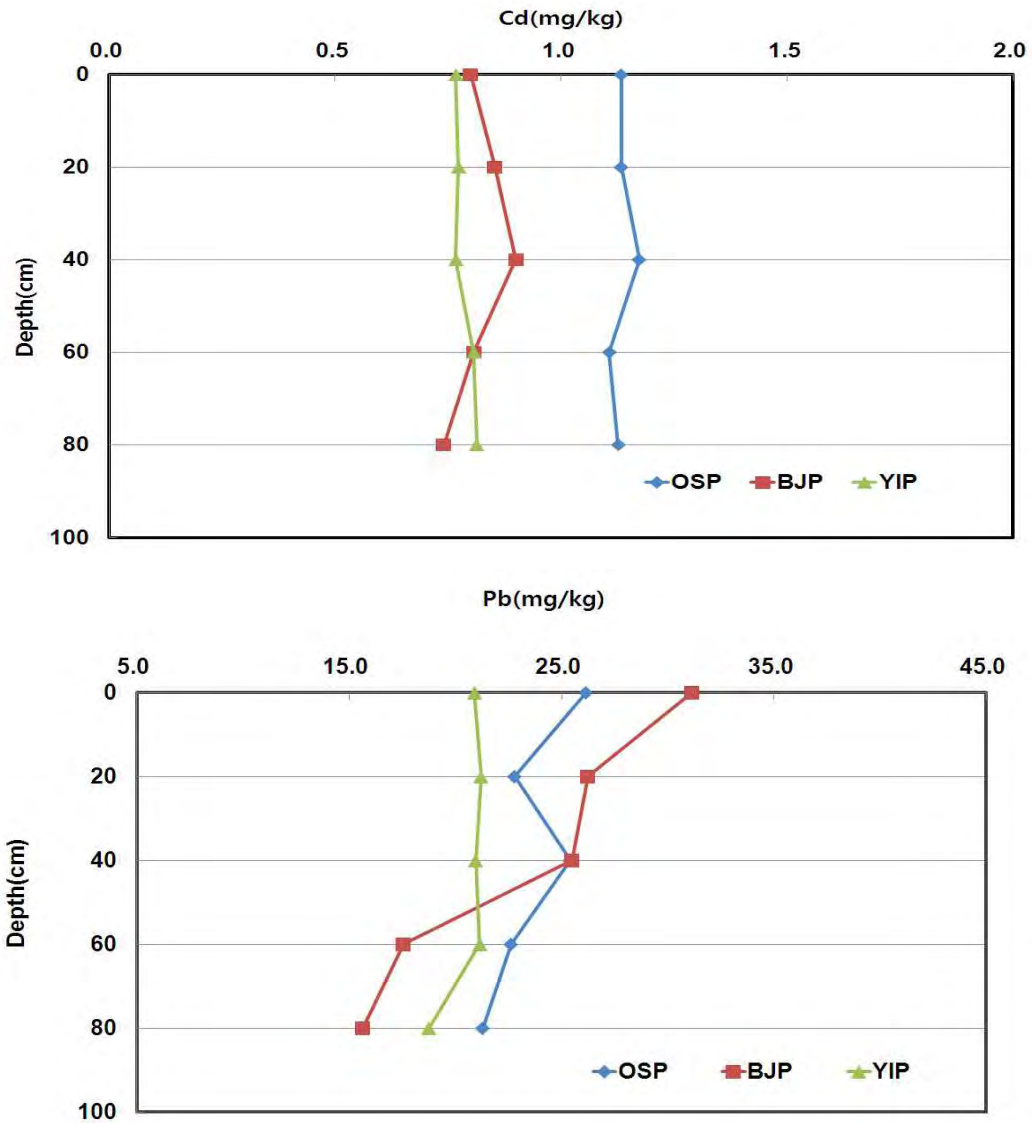


그림 3.4.69 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.) (계속)

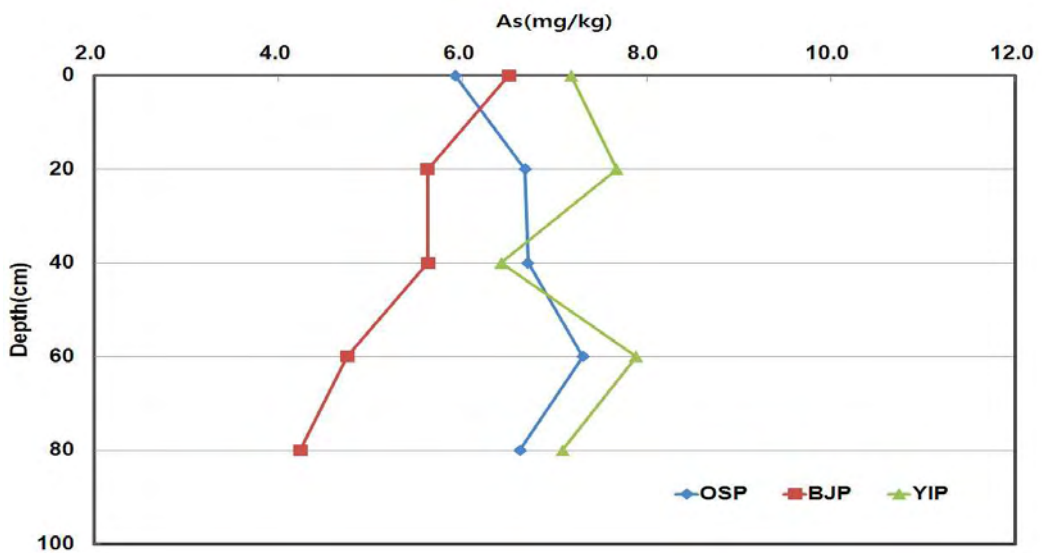
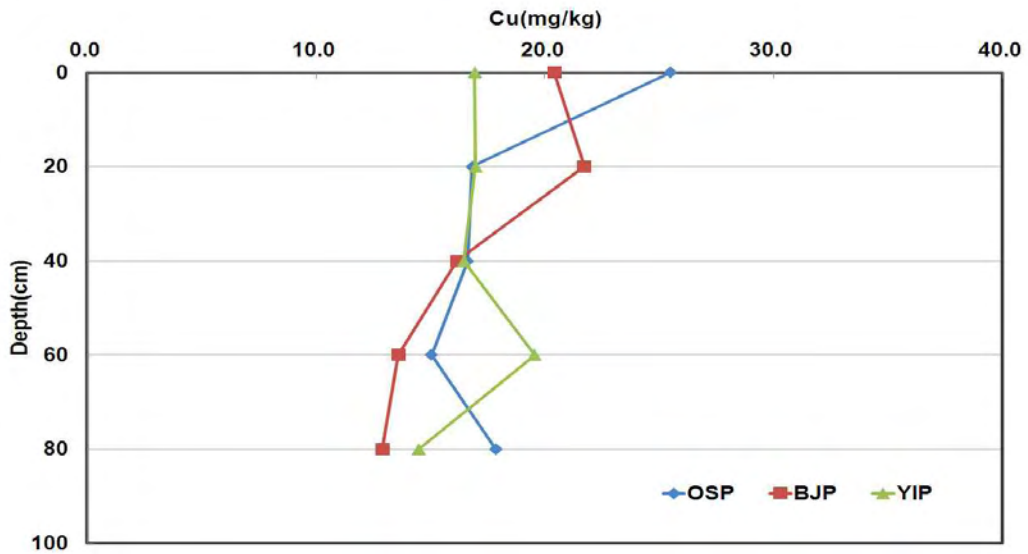
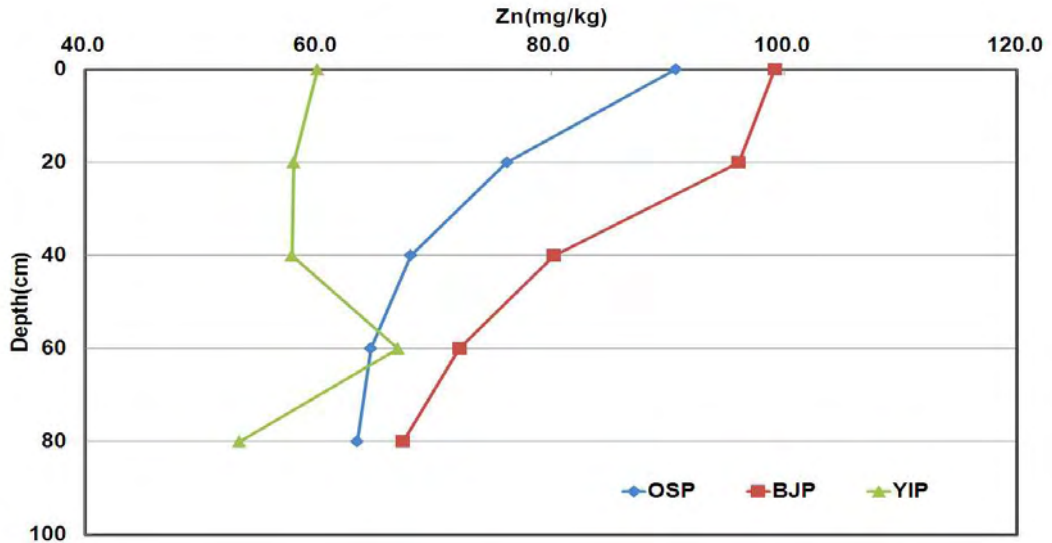


그림 3.4.69 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.) (계속)

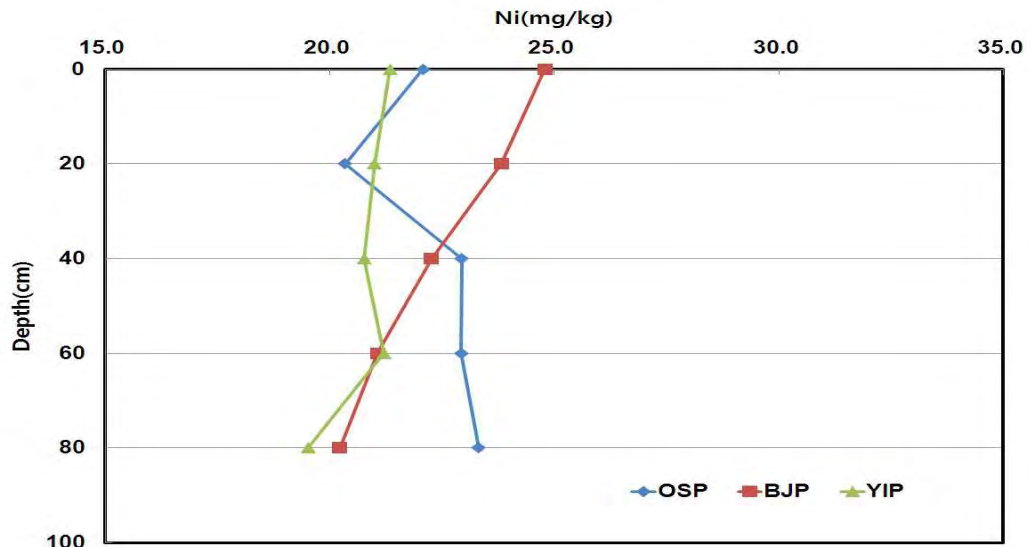


그림 3.4.69 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.04.04.)

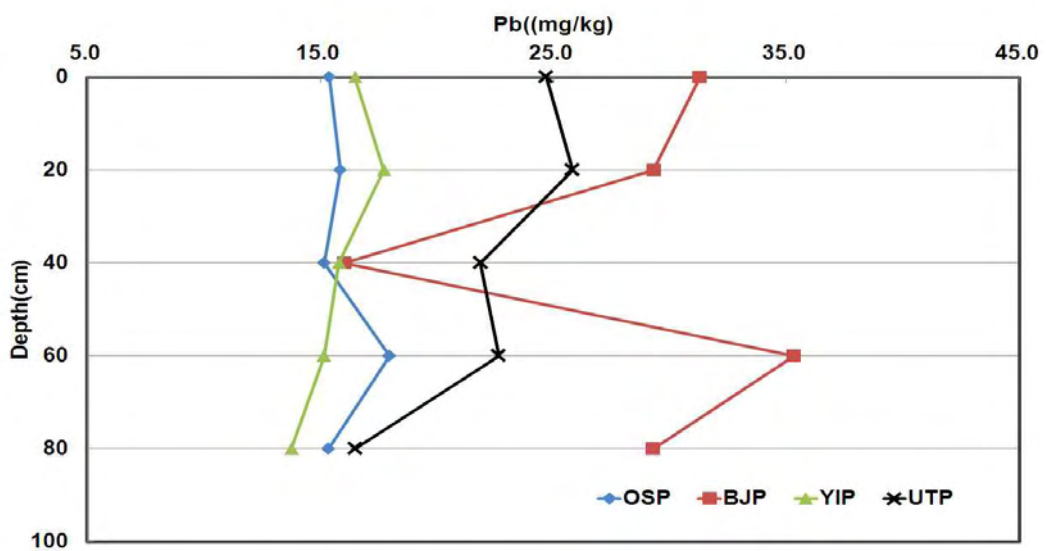
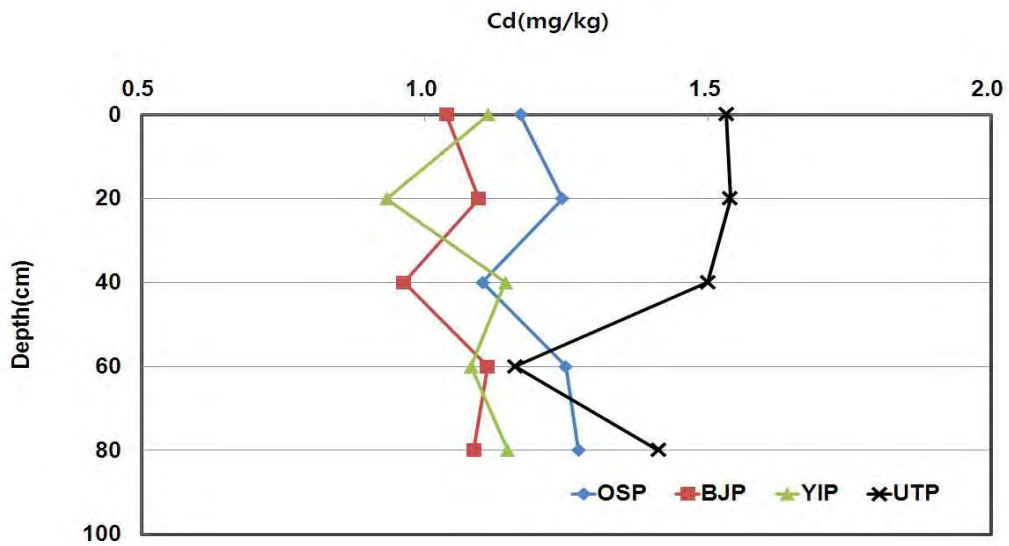


그림 3.4.70 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.) (계속)

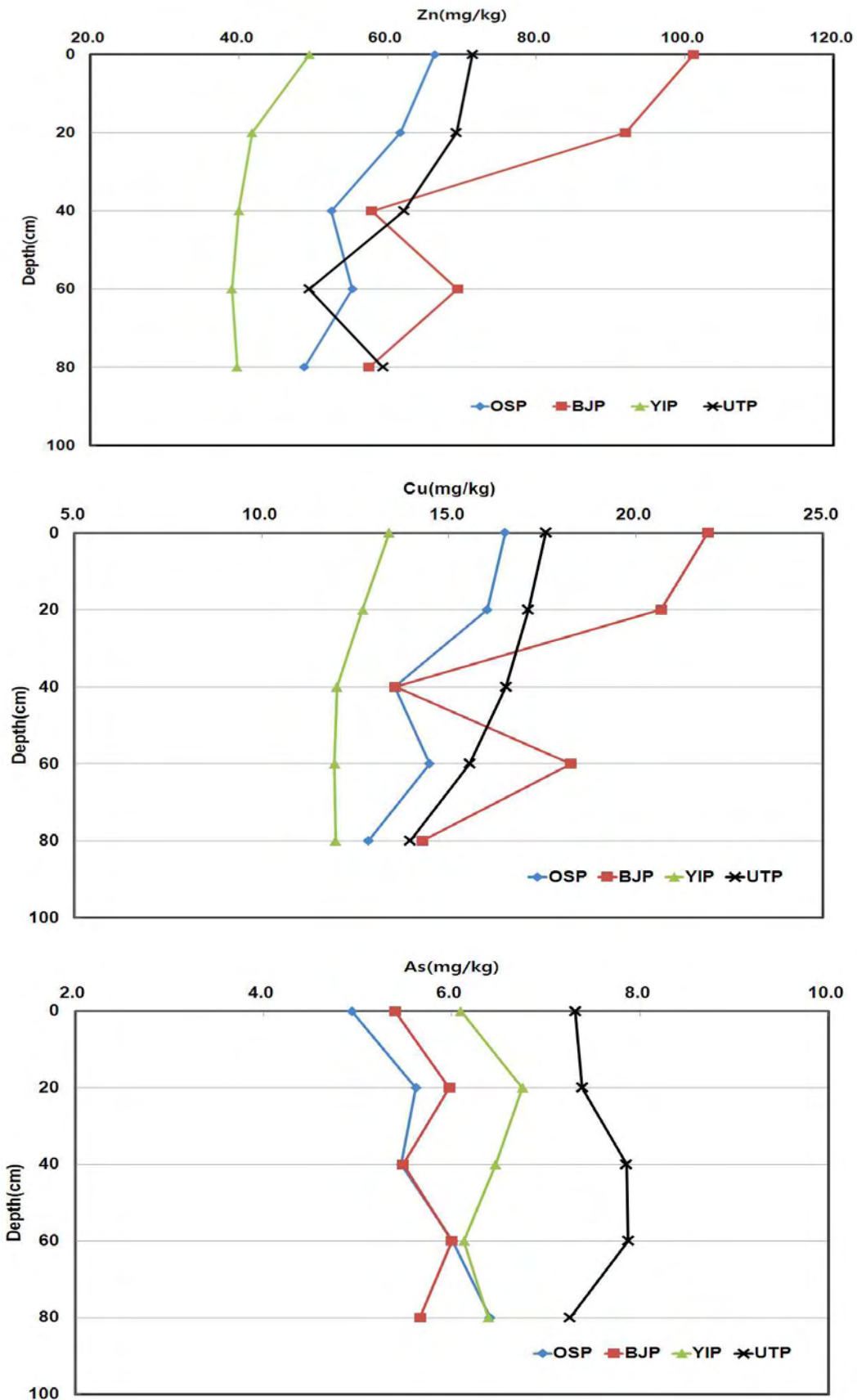


그림 3.4.70 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.) (계속)

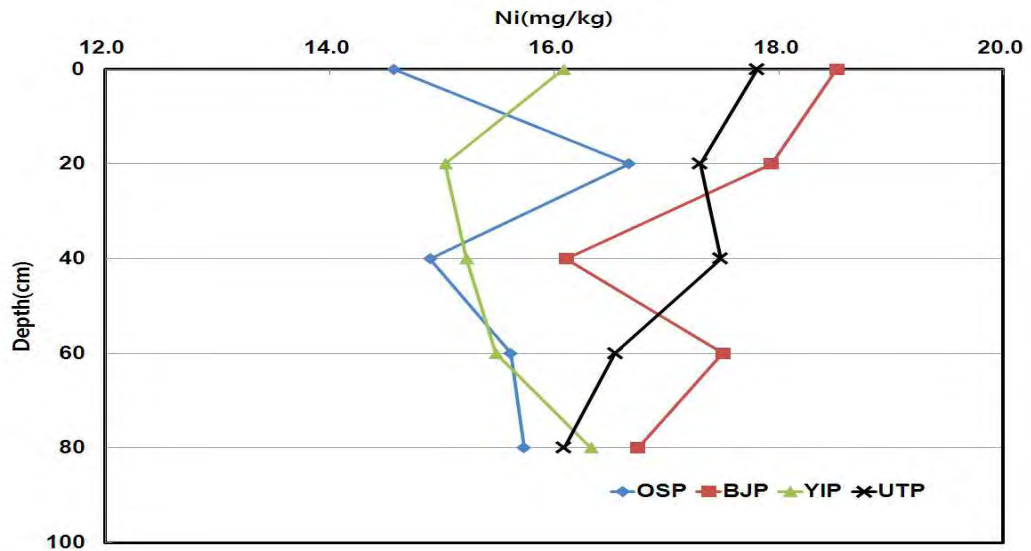


그림 3.4.70 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.07.04.) (계속)

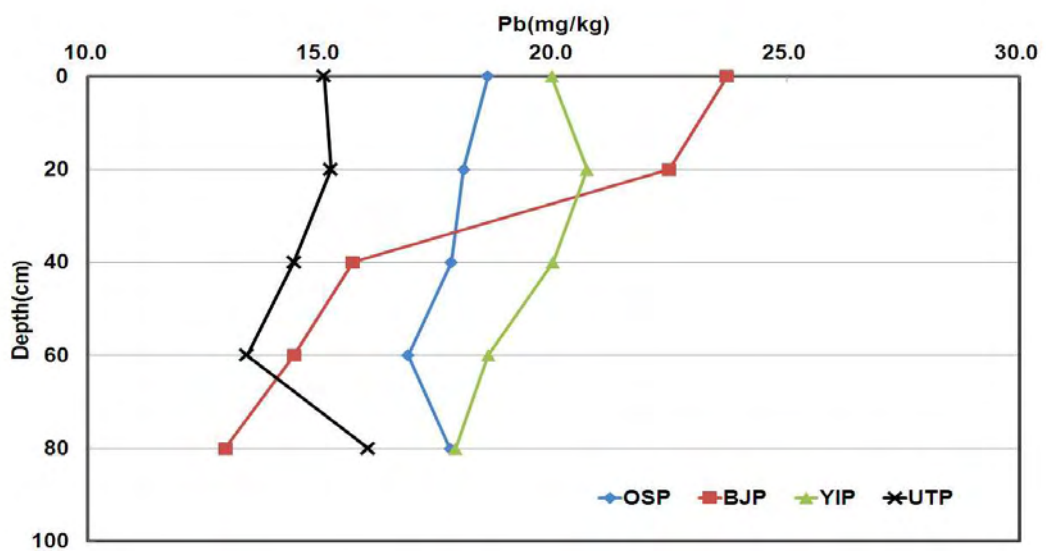
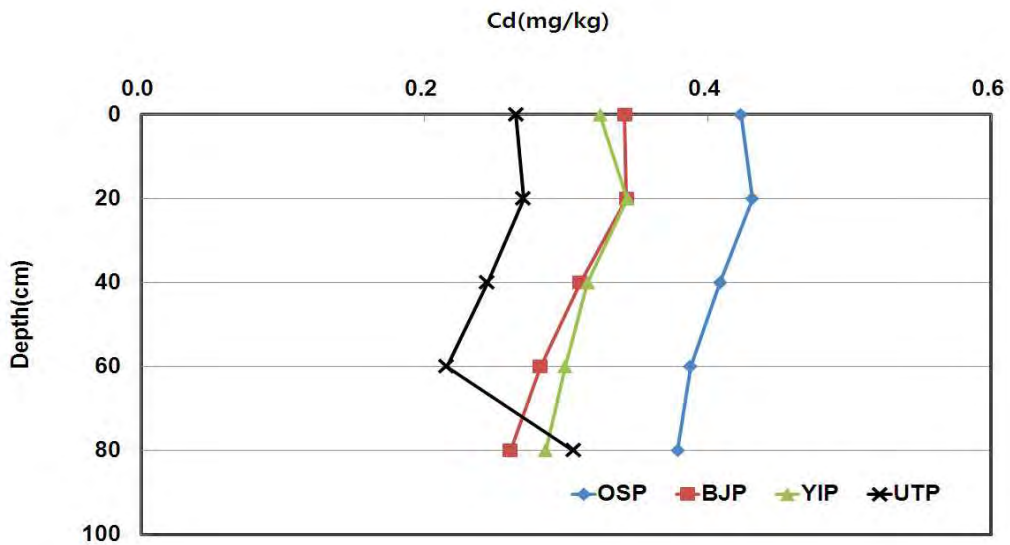


그림 3.4.71 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.) (계속)

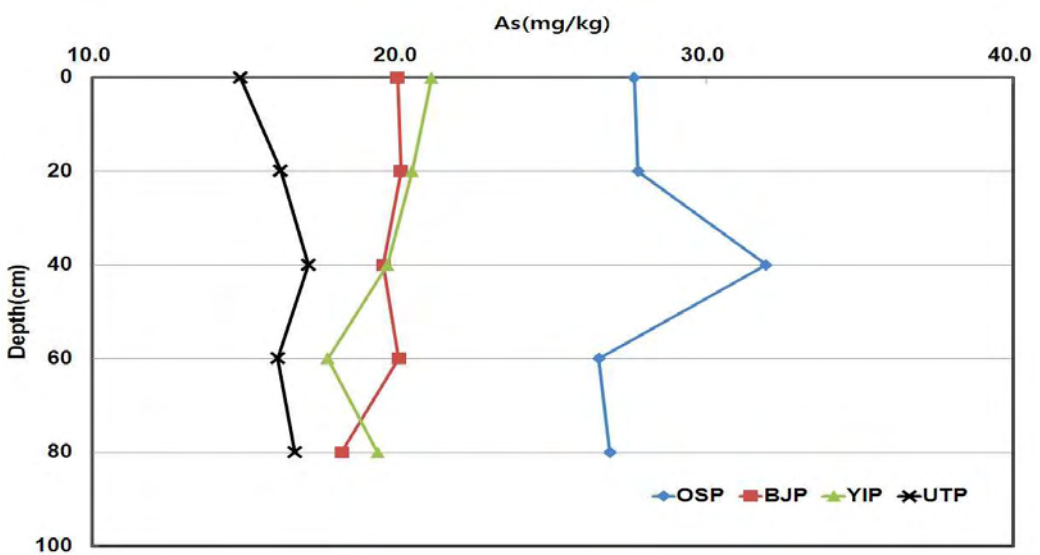
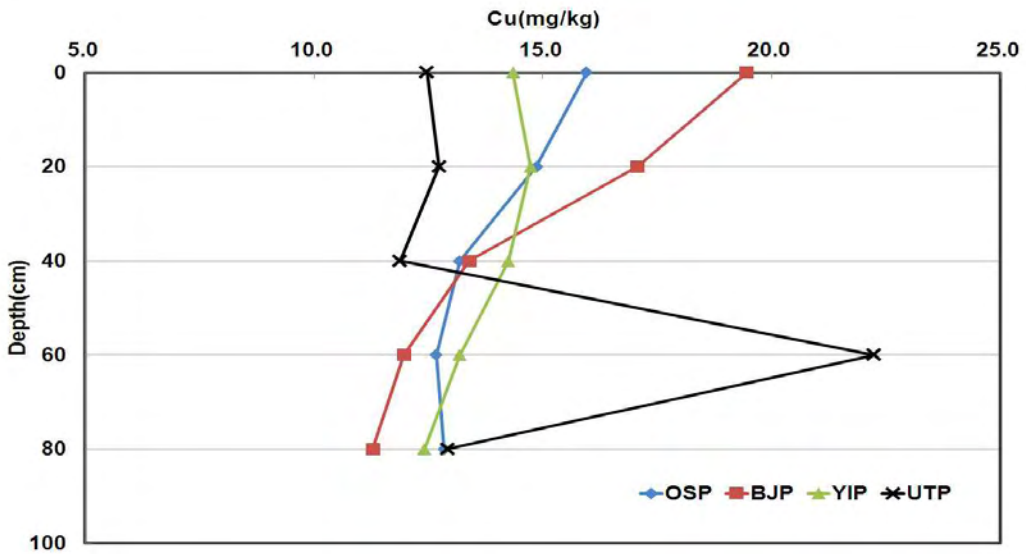
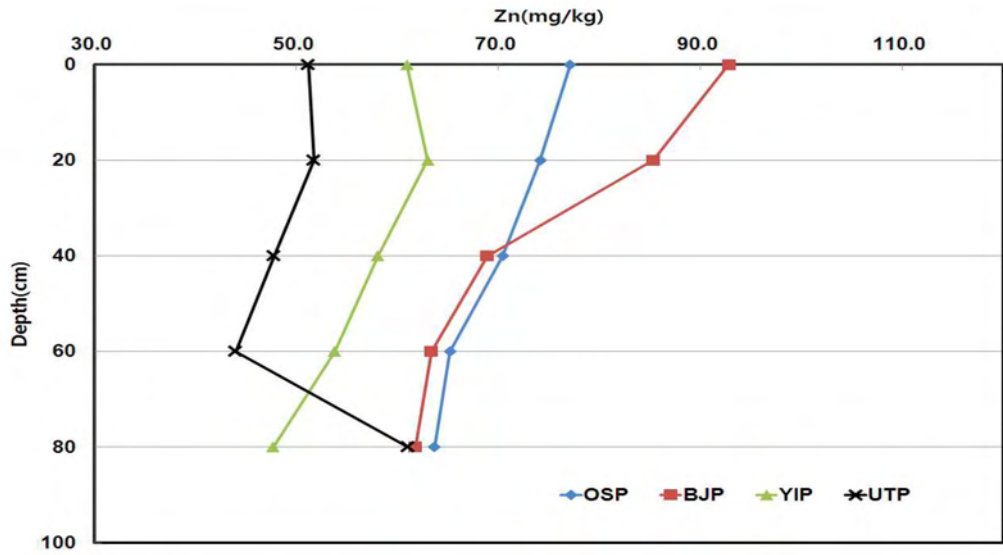


그림 3.4.71 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.) (계속)

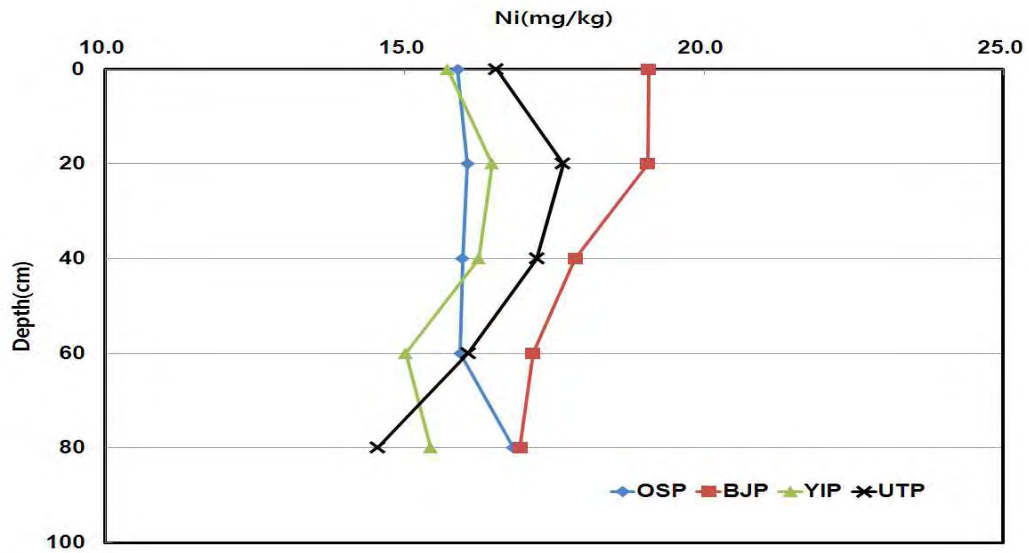


그림 3.4.71 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.09.20.)

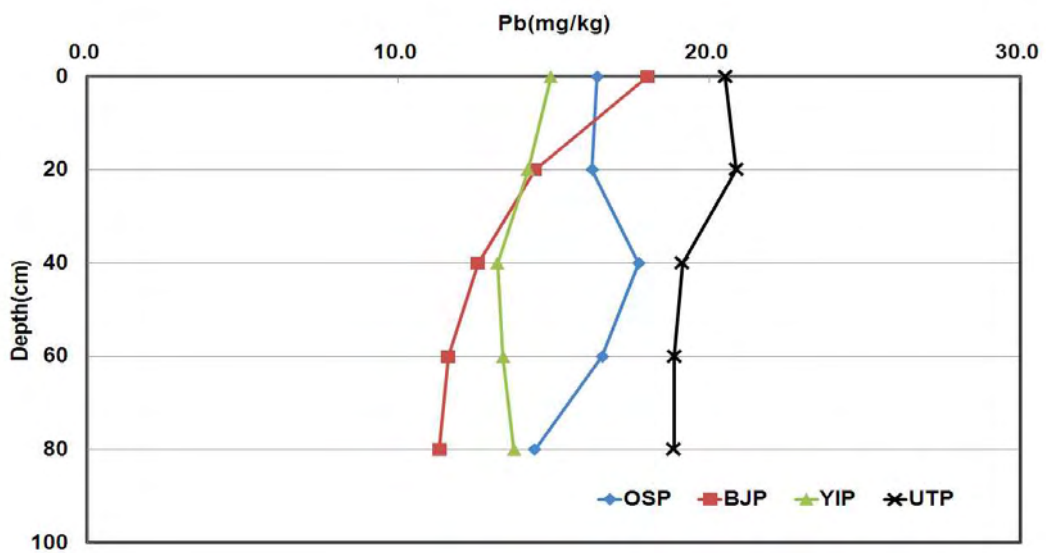
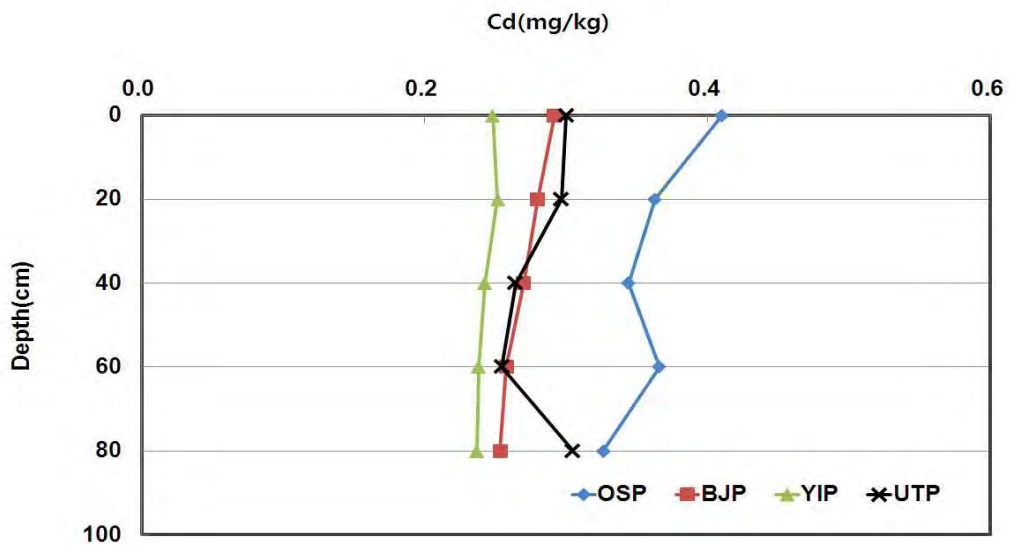


그림 3.4.72 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.) (계속)

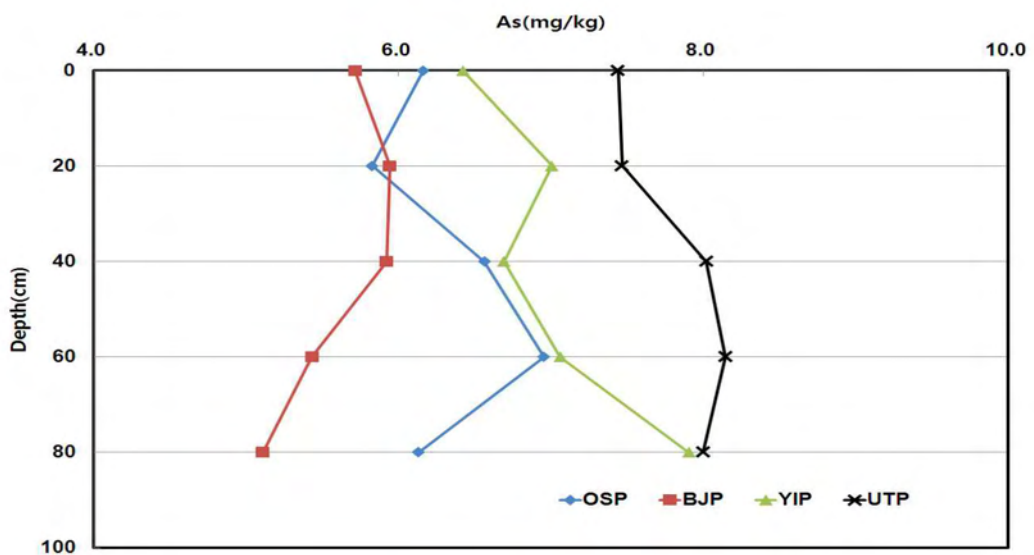
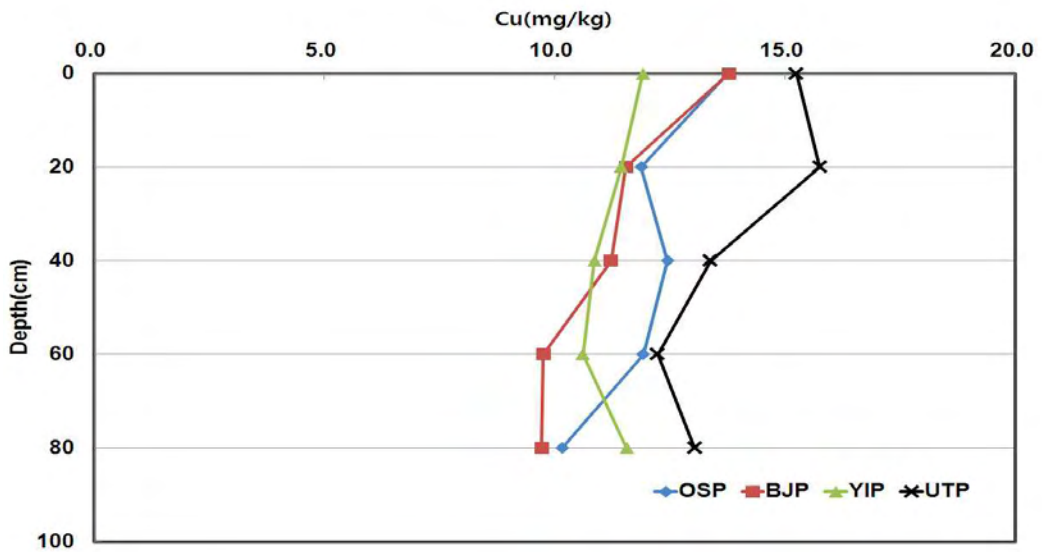
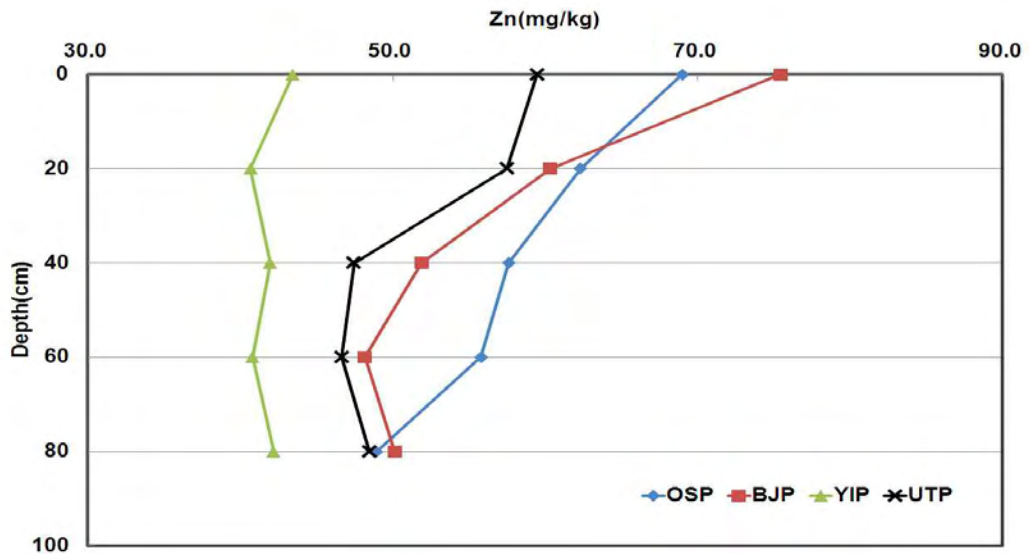


그림 3.4.72 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.) (계속)

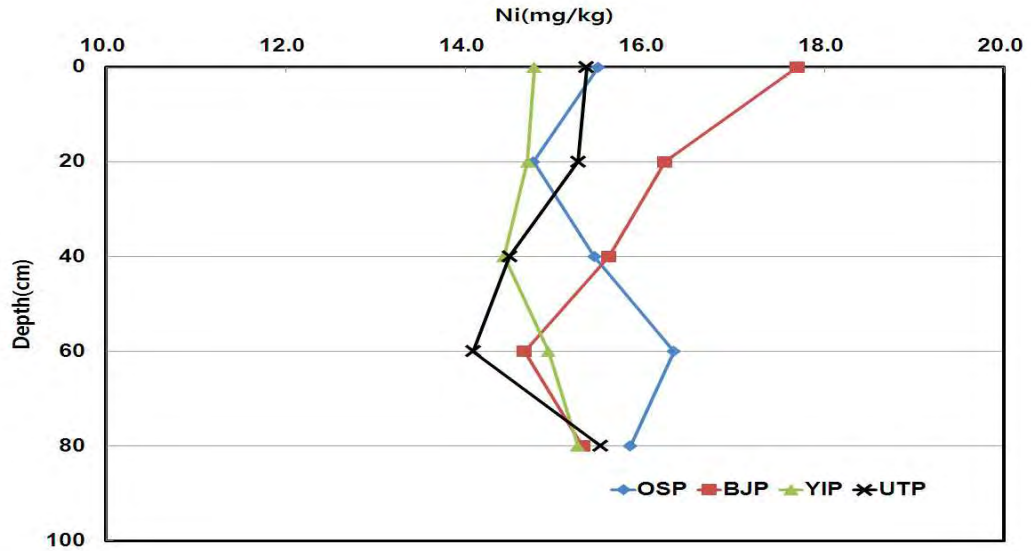


그림 3.4.72 시험지구별 논 토양 분석결과 (2012.11.08.) (계속)

그림 3.4.73은 2013년도 및 2014년 4월 3일의 지구별 중금속 함량을 심도별로 나타내고 있다. Cd은 오산재이용지구가 제일 낮은 경향을 보였고, Zn은 병점재이용지구가 제일 낮은 경향을 보였다.

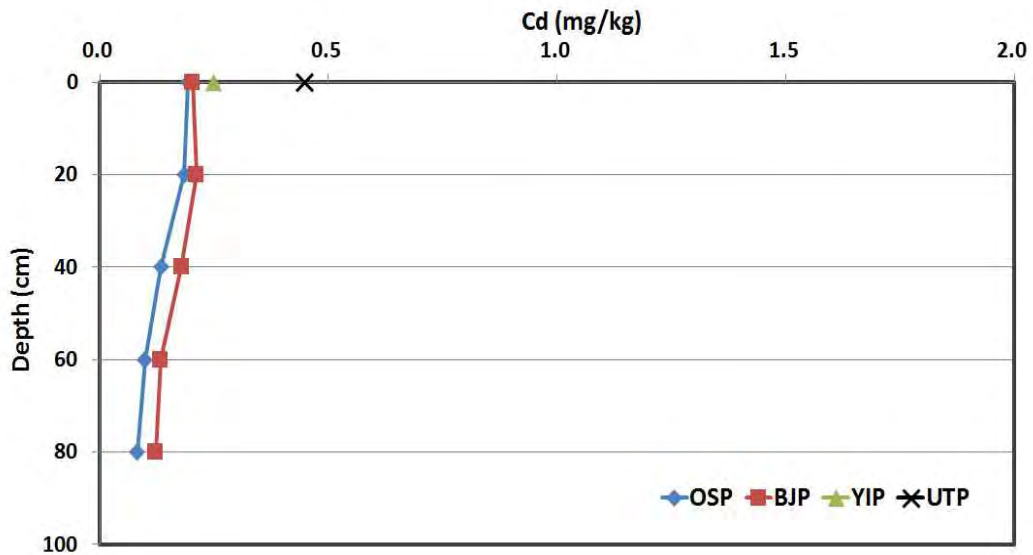


그림 3.4.73 시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.) (계속)

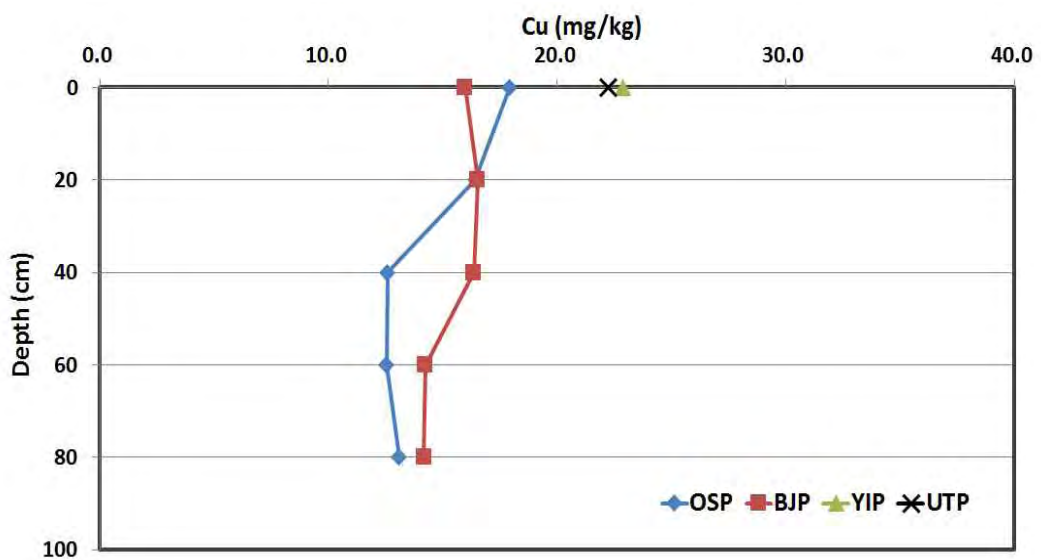
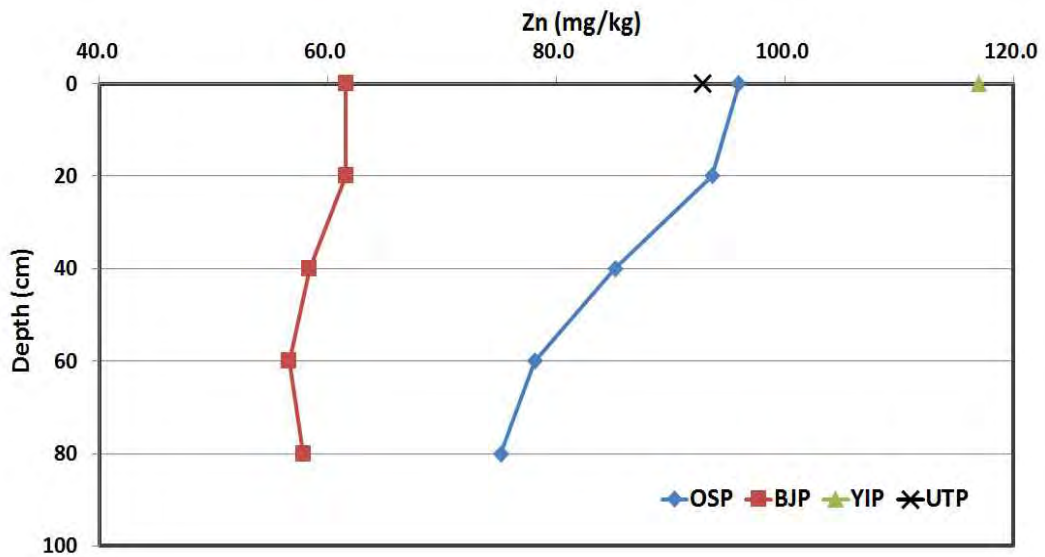
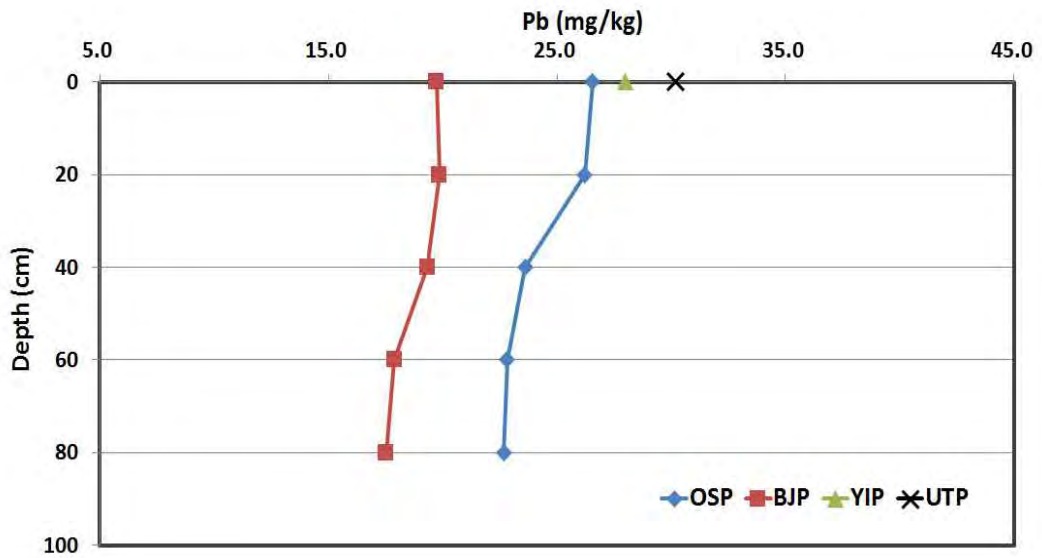


그림 3.4.73 시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03.) (계속)

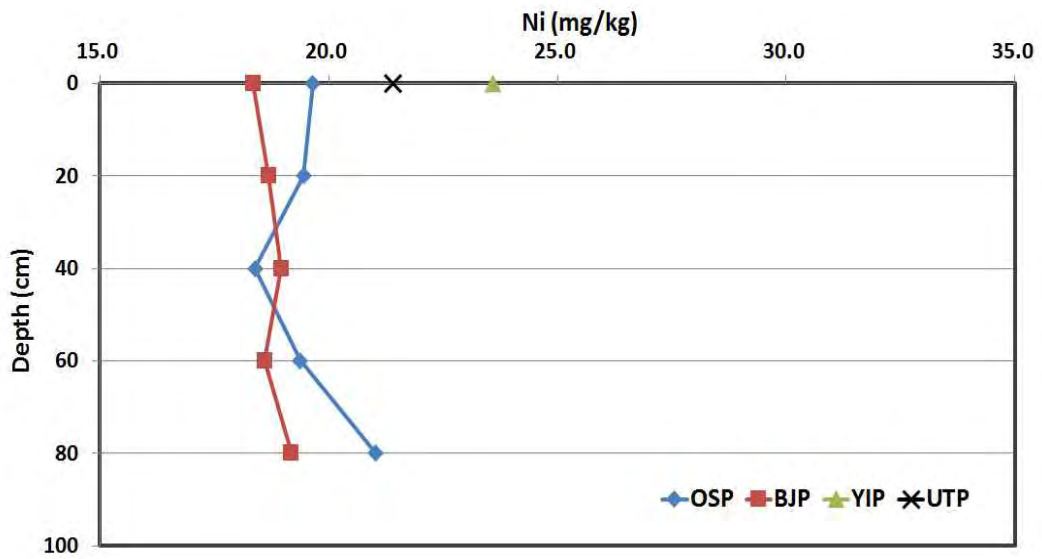
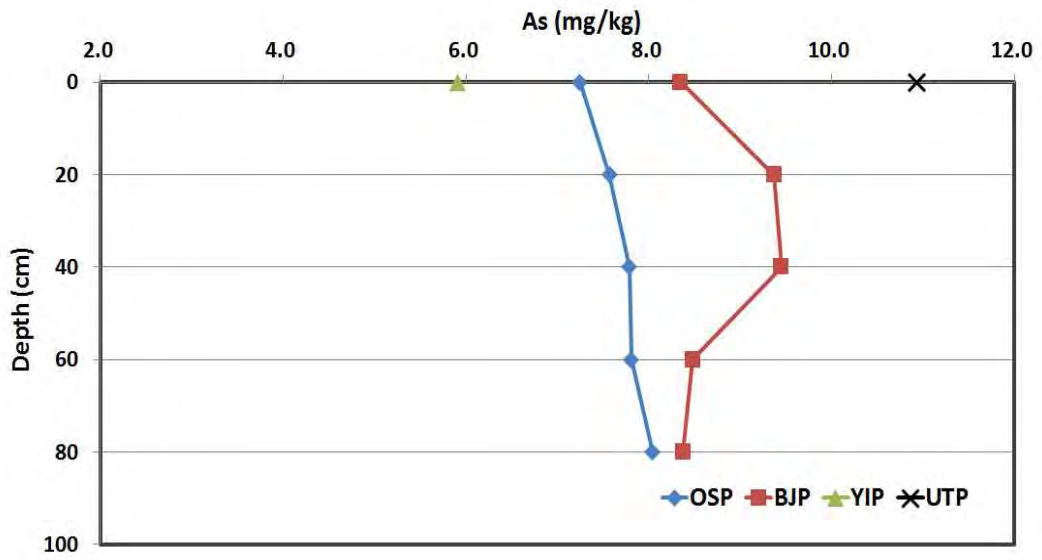


그림 3.4.73 시험지구별 논 토양 분석결과 (2014.04.03)

4. 하수재이용구역의 관개 하천 수질 모니터링

하수재이용 구역의 관개용수로 사용되는 하천의 수질 모니터링을 실시하고, 농업용수 수질기준 초과여부 분석, 농도지속곡선을 이용한 초과확률 분석 및 수질 모델링 결과와의 비교 등의 방법을 통해 하수재이용 구역 관개 하천의 수질 특성을 분석하였다. 오산천을 대상으로 2012년 2월부터 2013년 1월까지 1년간 월 1회 이상 수질 샘플링을 실시하였으며, 매회 같은 장소에서 실시하여 샘플링의 반복성을 보장하였다. 수질 분석을 위한 모니터링 지점은 오산시 환경사업소로부터 오산천의 하류방향으로 일정한 간격 (500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m)을 두고 8 지점을 선정하였으며, 각 지점은 상류에서 하류 방향으로 OSS#01 - OSS#08로 명명하였다.

환경부 (2013)에서는 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준을 발표하였으며, 농업용 재이용수의 수질기준 (간접 식용)을 제시하고 있다. 또한 환경정책기본법 제10조에 근거한 환경정책기본법시행령 제2조 (2012)에서는 하천수의 수질에 관하여 등급별 생활환경 기준을 제시하고 있다. 농업용수의 경우 생활환경 IV등급으로 분류하고 있으며, T-P값은 본 법령의 기준과 비교하였다. 한편, 농림부 (2004)에서는 논벼의 수확량과 미질 등을 고려하여 허용가능한 관개용수의 T-N 농도를 제안한 바 있다. 수질 모니터링을 통해 수집한 수질 자료는 지점별 평균값을 산정하여 하·폐수처리수 재처리수의 농업용수 재이용 수질기준, 환경정책기본법에서 제시하고 있는 수질기준 (T-P) 및 농림부의 T-N 제안값과 비교하여 초과여부를 분석하였다. 또한, 농도지속곡선 작성을 통해 지점별 연중 초과확률률을 산정하였으며, 김지혜 등 (2012)에 의해 수행된 오산천 구역의 수질 모델링 결과와 비교하여 대상지구의 수질 특성을 분석하였다.

4.1. 수질분석 결과

표 3.4.125는 16개 수질항목에 대하여 수질모니터링 지점별 평균값, 표준편차와 하·폐수처리수 재처리수의 농업용수 수질기준 (간접 식용, Standard)을 나타내고 있다. 먼저 지점별 경향성을 살펴보면, pH 는 OSS#01에서 최솟값을 나타내었고 이후 큰 변동을 보이지 않았다. DO 또한 OSS#01에서 최솟값을 나타내었고, OSS#03을 제외한 지점에서는 큰 변화를 보이지 않았다. BOD와 COD의 경우 하류쪽으로 갈수록 점차 감소하는 추세를 보였고, T-N과 T-P는 OSS#01에서 최댓값을 나타낸 후 OSS#02에서 하락하여 이후로 큰 변화를 보이지 않았다. SS, 총대장균군수 및 분원성대장균군수의 분석결과에서는 뚜렷한 경향성을 찾을 수 없었다. As, Cd, Cr⁶⁺, Hg, Cu, Zn 및 CN의 경우 대부분 검출되지 않거나 미량 검출되었으며, Pb의 경우 OSS#01과 OSS#04에서 2.5 mg/L이상의 큰 값을 1회씩 기록해 평균과 표준편차가 다른 지점에 비해 크게 나타났다. 하천의 수질은 하수처리장 방류수 이외에 지류 소하천 및 농업용 배수로의 유입, 생활계 및 산업계의 오염물질 유입 등에 영향을 받기 때문에, 본 연구의 수질 모니터링 결과를 바탕으로 하수처리장 하류 하천에서의 수질 경향성을 단정 짓기는 어

려울 것으로 사료된다.

수질기준 만족 여부를 살펴보면 pH 및 BOD는 평균값의 범위가 모든 지점에서 농업용 재이용수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다. T-N과 T-P의 경우 모든 지점에서 농림부 제안값 및 환경정책기본법의 수질기준을 초과하는 것으로 나타났다. 총대장균수는 모든지점에서 농업용 재이용수 수질기준을 크게 초과하는 것으로 나타났다. Cd, Cr⁶⁺, Hg, Zn 및 CN은 검출되지 않거나 미량 검출되어 모든 지점에서 수질기준을 만족하는 것으로 나타났고, As, Pb, Cu는 지점별로 수질기준을 초과하는 경우가 있는 것으로 나타났다.

표 3.4.125 오산천 수질 모니터링 결과

항목	평균±표준편차								Standard
	OSS#01	OSS#02	OSS#03	OSS#04	OSS#05	OSS#06	OSS#07	OSS#08	
pH	7.01±0.36	7.23±0.37	7.27±0.33	7.24±0.37	7.24±0.35	7.39±0.40	7.34±0.36	7.32±0.37	5.8-8.5
DO (mg/L)	9.05±5.14	10.23±6.26	9.08±5.10	10.28±5.96	10.07±5.92	10.22±5.87	10.16±5.96	10.07±6.11	-
BOD (mg/L)	1.98±1.24	2.11±1.49	1.90±1.36	2.00±1.54	1.78±1.42	1.90±1.65	1.76±2.04	1.76±1.46	≤8
COD (mg/L)	7.81±4.59	6.53±3.40	5.92±3.64	6.07±4.27	5.86±3.33	5.96±4.70	5.42±3.45	5.58±3.49	-
SS (mg/L)	17.39±20.19	13.00±8.95	14.91±8.25	19.52±16.59	19.00±11.39	19.30±14.91	17.00±12.85	16.65±7.90	-
T-N (mg/L)	9.41±3.25	5.86±3.21	6.04±2.38	6.55±3.06	6.06±2.98	6.20±2.79	5.74±3.14	5.61±3.14	≤4.7 ^a
T-P (mg/L)	1.08±0.46	0.52±0.37	0.55±0.37	0.57±0.34	0.56±0.38	0.63±0.67	0.50±0.34	0.56±0.42	≤0.3 ^b
Total coliform (MPN/100mL)	2,330±5,222	7,900±17,395	5,958±11,330	6,190±14,885	10,443±35,286	1,885±3,728	12,026±49,164	7,502±24,761	≤200
Fecal coliform (MPN/100mL)	77±145	110±256	117±196	5,327±24,657	5,339±24,656	223±499	5,295±24,664	155±506	-
As (mg/L)	0.02±0.08	0.02±0.07	0.02±0.07	0.02±0.06	0.01±0.06	0.01±0.05	0.01±0.05	0.01±0.05	≤0.05
Cd (mg/L)	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	≤0.01
Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	≤0.05
Pb (mg/L)	0.29±1.29	0.01±0.01	0.01±0.01	0.14±0.58	0.02±0.04	0.01±0.02	0.03±0.05	0.05±0.15	≤0.1
Hg (mg/L)	0.0000±0.00	0.0000±0.00	0.0000±0.00	0.0000±0.00	0.0000±0.00	0.0000±0.00	0.0000±0.00	0.0000±0.00	≤0.001
Cu (mg/L)	0.02±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01	0.02±0.01	≤0.2
Zn (mg/L)	0.03±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.04±0.05	0.03±0.02	0.03±0.02	0.03±0.06	0.02±0.01	≤2
CN (mg/L)	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	Not detected

* Standard: 하·폐수처리수 재처리수의 농업용수 수질기준 (간접 식용) (환경부, 2013)

* a: 하천수 생활환경 기준 IV등급 (총대장균군수는 3등급 적용) (환경정책기본법, 2012)

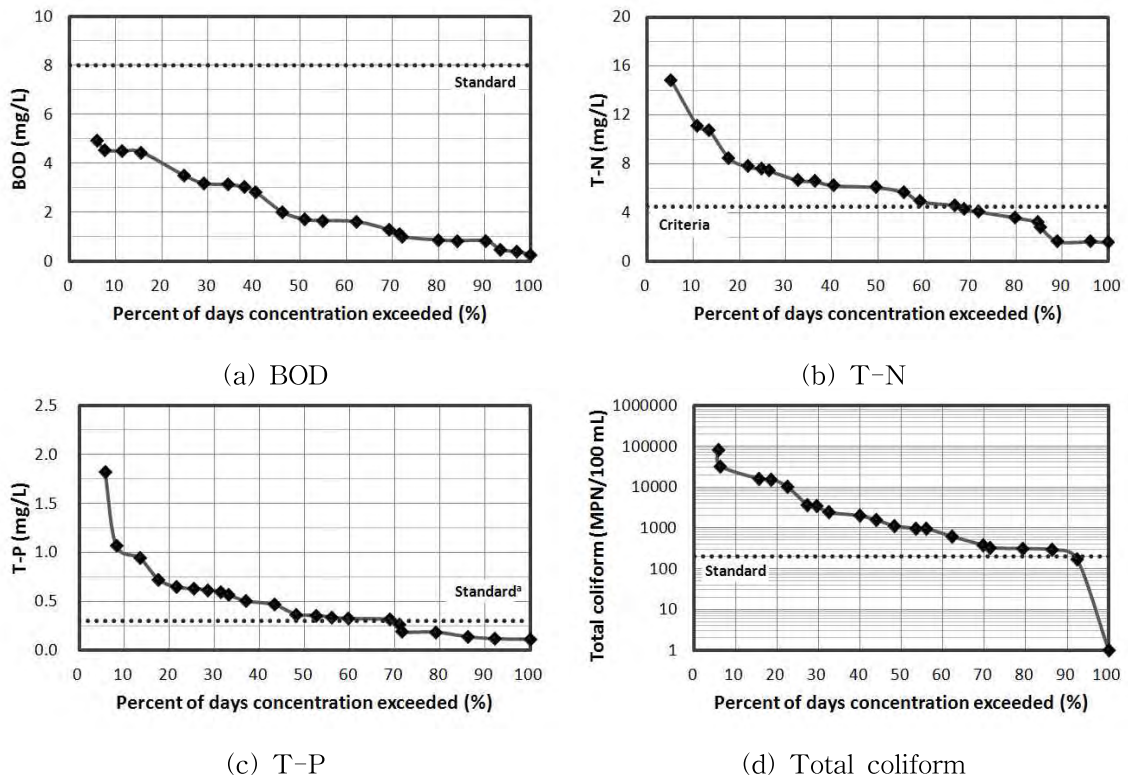
* b: 농업용수 수질오염이 비생육에 미치는 영향연구 (농림부, 2004)

4.2. 농도지속곡선 및 초과확률

하수처리수의 농업용 재이용에 관한 주요 관심사는 영양염류에 의한 작물생육의 영향과 비점오염부하량 증가, 병원성 미생물에 의한 인체위해성 등이 있다. 본 연구에서는 수질 모니터링 결과를 바탕으로 주요한 영양염류인 BOD, T-N, T-P와 인체위해성 분석의 지표로 사용될 수 있는 총대장균군수에 대하여 지점별 농도지속곡선을 작성하고, 초과확률 분석 및 수질기준과의 비교를 통해 간접재이용 유역인 오산천의 수질 특성을 분석하였다.

가. 농업용수 취수 지점 수질 분석

그림 3.4.74는 농업용수 취수 지점인 OSS#02 지점의 BOD, T-N, T-P 및 총대장균군수 농도지속곡선과 수질기준을 도시하고 있다. 수질자료는 2012년 2월에서 2013년 1월까지의 모니터링 결과를 이용하였다. BOD의 경우 연중 수질기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. T-N의 경우 약 68 %의 확률로 농림부 (2004)에서 제시한 기준을 초과하는 것으로 나타났으며, T-P 또한 수질기준에 대하여 약 70 %의 초과확률을 가지는 것으로 나타났다. 총대장균군수의 경우 수질기준에 대하여 약 92 %의 초과확률을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 주요 영양염류인 T-N, T-P의 농도와 병원성 미생물에 의한 인체위해성을 저감시키기 위한 추가적인 조치가 필요할 것으로 사료된다.



* Standard: 하·폐수처리수 재처리수의 농업용 수질기준 (간접 식용) (환경부, 2013)

* Standard⁴: 하천수 생활환경 기준 IV등급 (환경정책기본법, 2012)

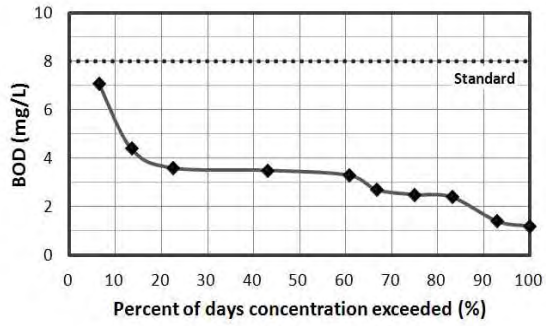
* Criteria: 농업용수 수질오염이 벼생육에 미치는 영향연구 (농림부, 2004)

그림 3.4.74 OSS#02 지점의 농도지속곡선

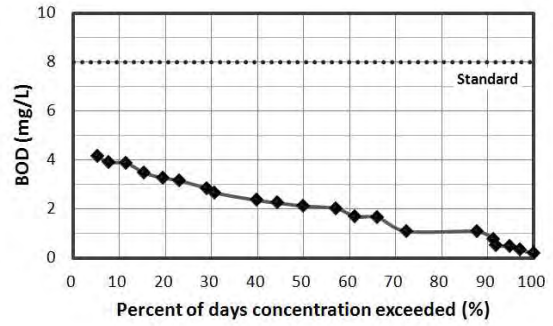
나. 하수처리장 방류수의 하천 수질 영향 분석

하수처리장 방류수가 관개 하천의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 오산시 환경사업소의 상·하류 지점의 농도지속곡선을 각각 작성하고, 수질기준 및 수질권고기준의 초과확률을 비교·분석하였다. 오산시 환경사업소의 상류 지점으로 경기도에서 정기적으로 수질측정을 하고 있는 오산천2 지점을 선정하였으며 환경부에서 운영하는 물환경정보시스템 홈페이지에서 자료를 수집하였다. 하류 지점은 모니터링 지점 중 오산시 환경사업소와 가장 가까운 OSS#01 지점을 선정하였다. 두 지점의 농도지속곡선 작성 결과는 그림 3.4.75와 같다.

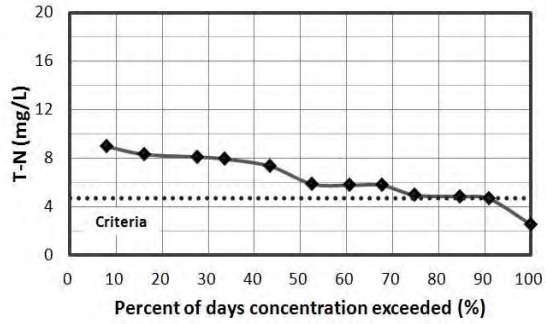
농도지속곡선 작성 결과를 살펴보면, BOD의 경우 두 지점에서 모두 수질기준 및 수질권고기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. T-N의 경우 농림부 (2004)에서 제시한 기준과 비교해 오산천2에서는 약 90 %, OSS#01에서는 약 95 %의 초과확률을 나타냈으며, 초과 크기 또한 OSS#01에서 더욱 큰 것으로 나타났다. T-P의 경우 수질기준과 비교하여 오산천2에서 초과확률이 약 5 %, OSS#01에서 100 %로 나타나, 하수처리장 방류수에 의해 T-P의 농도가 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 총대장균균수의 경우 수질기준의 초과확률이 오산천2에서 약 90 %, OSS#01에서 약 60 %로 나타나 OSS#01에서 초과확률이 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 하수처리장 방류수에 포함된 병원성 미생물을 제거하기 위한 소독약이 영향을 미쳤을 수 있을 것으로 사료된다.



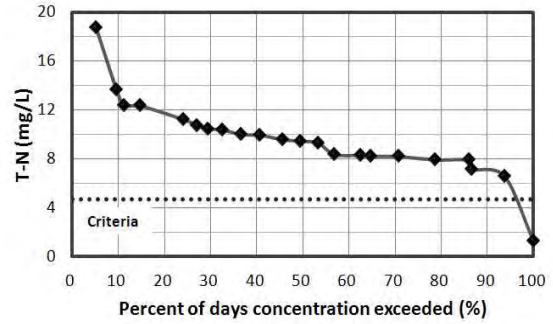
(a) BOD (오산천2)



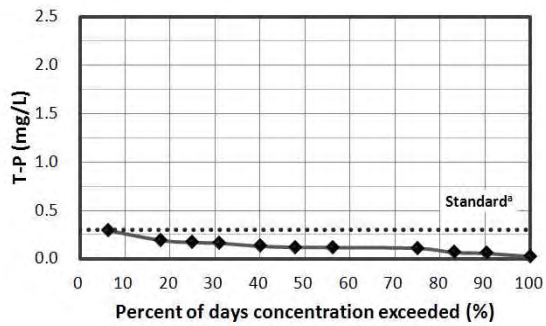
(b) BOD (OSS#01)



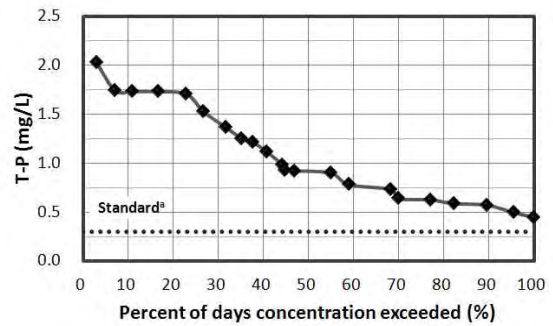
(c) T-N (오산천2)



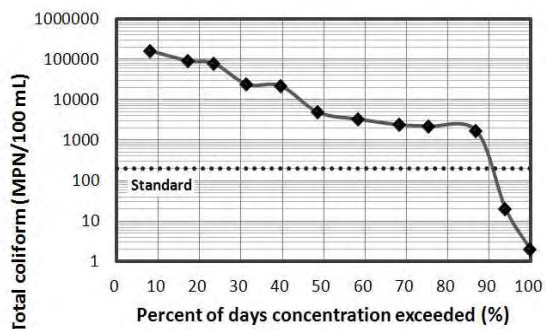
(d) T-N (OSS#01)



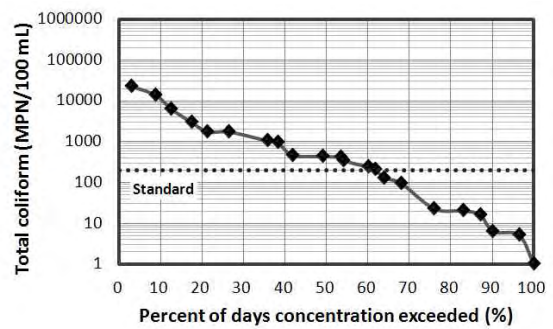
(e) T-P (오산천2)



(f) T-P (OSS#01)



(g) 총대장균군수 (오산천2)



(h) 총대장균군수 (OSS#01)

* Standard: 하·폐수처리수 재처리수의 농업용 수질기준 (간접 식용) (환경부, 2013)

* Standard^b: 하천수 생활환경 기준 IV등급 (환경정책기본법, 2012)

* Criteria: 농업용수 수질오염이 비생육에 미치는 영향연구 (농림부, 2004)

그림 3.4.75 하수처리장 전후 (오산천2, OSS#01) 하천의 농도지속곡선

4.3 오산천 수질모델링 결과와의 비교 및 분석

김지혜 등 (2012)은 하수처리수의 간접재이용에 따른 관개수질을 모의하기 위해, SWAT 모형과 QUALKO2 모형을 연계하여 오산천 유역을 대상으로 관개기 순별 수질을 모의하였다. 수질모델링 결과 하수처리장 방류수가 합류하는 지점에서 T-N, T-P, 대장균 등의 농도가 급격히 증가하고, 하수처리장 방류구로부터 최하류부까지 농도가 미미하게 감소하는 것으로 보고하였다.

그림 3.4.76은 지점별 T-N, T-P, 총대장균군수 모니터링 결과의 평균값을 도시하고 있다. T-N과 T-P의 경우 모델링 결과와 마찬가지로 하수처리장 방류수가 합류한 후 OSS#01에서 농도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 하류 방향으로 짧은 거리에서 농도가 다시 감소한 후 유지되는 것으로 나타나 하류부에서의 감소 경향은 모델링 결과와 상이한 것으로 판단된다. 총대장균군수의 경우 모델링 결과와는 반대로 하수처리수의 합류 후 OSS#01에서 농도가 감소하는 것으로 나타났으며 이후 하류부에서는 뚜렷한 증감 경향이 나타나지 않았다.

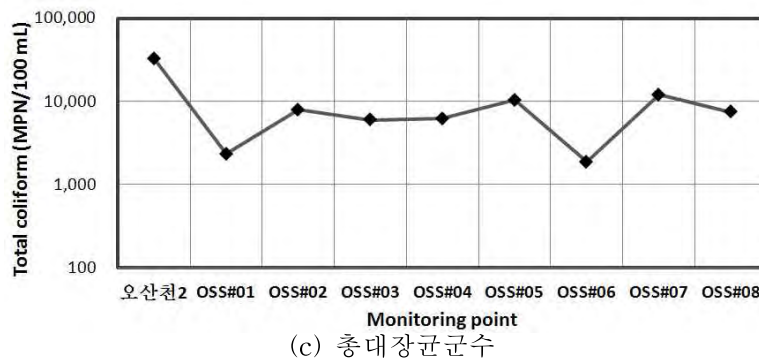
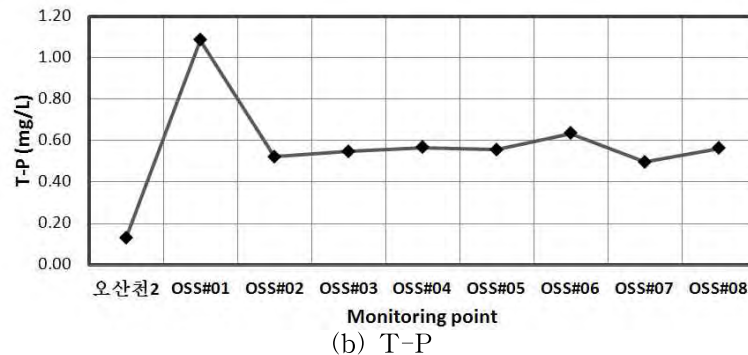
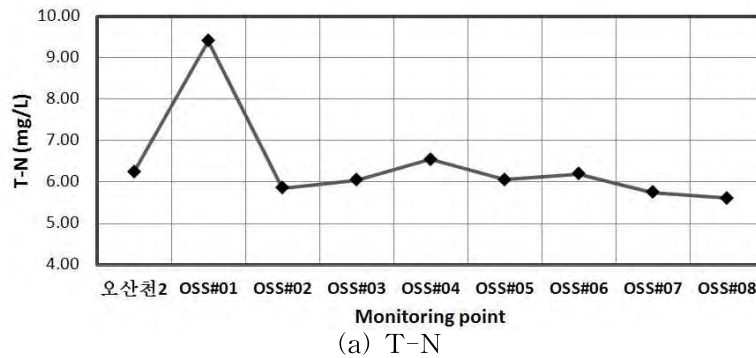


그림 3.4.76 지점별 수질 모니터링 결과 (평균값)

5. 간접하수재이용에 따른 논에서의 수질 및 토양환경 영향 분석

2012년 ~ 2014년 동안 용인청정지구, 오산재이용지구의 관개수, 논 담수 및 논 토양 모니터링 결과를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 정규성을 만족하는 경우에는 독립표본 t-검정 (independent sample t-test), 정규성을 만족하지 않는 경우에는 비모수 통계검정인 맨-휘트니 검증 (Mann-Whitney U test)을 통해 각 항목에 대한 통계적 유의성을 평가하였다.

5.1. 관개수질

표 3.4.126 ~ 표 3.4.128은 연도별로 용인청정지구와 오산재이용지구의 유입수 수질에 대한 통계적 결과를 수질 분석 항목별로 나타낸 것이다. 두 지구 모두 대부분의 수질항목에서 농업용수수질기준과 하수처리수의 농업용수 수질권고기준을 만족하는 것으로 나타났다. 각 시험지구의 유입수 수질의 통계분석에 있어서 pH 항목은 정규성을 만족하여 독립표본 t-검정을 실시하였으며, 그 외 수질항목은 정규성을 만족하지 않고 샘플의 수가 30개 미만으로 적어 맨-휘트니 검증을 실시하였다. 그 결과, 2012년에는 37가지 항목 중, EC, COD, SS, T-N, T-P, NO₃-N, PO₄-P, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, HCO₃, Ni 등 14가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 관개수 중 염분 함량을 대변하는 전기전도도 (EC) 및 치환성 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺)의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났으며, 하수처리장 방류수에 많이 함유된 것으로 알려진 영양염류 또한 유의한 차이를 보였다. 2013년에는 19가지 항목 중 pH, EC, TOC, BOD, COD, SS, T-N, T-P, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ 등 12가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 관개수 중 염분 함량을 대변하는 전기전도도 (EC), TOC, COD, Cl⁻ 치환성 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺)의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났으며, 하수처리장 방류수에 많이 함유된 것으로 알려진 영양염류 또한 유의한 차이를 보였다. 2014년에는 19가지 항목 중 EC, TOC, BOD, COD, SS, T-P, Cl⁻, Ca²⁺, Na⁺ 등 9가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 관개수 중 BOD, COD, T-P, 치환성 양이온 (Na⁺)의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났다.

표 3.4.126 관개수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2012년)

항목	평균 ± 표준편차		수질권고기준	통계분석	p-value
	용인청정지구	오산제이용지구			
pH	7.50 ± 0.34	7.49 ± 0.57	5.8~8.5	t ^a	0.955
EC ^{***} (dS m ⁻¹)	0.17 ± 0.07	0.96 ± 0.63	-	M ^b	0.000
DO (mg L ⁻¹)	8.91 ± 2.41	11.66 ± 12.96	-	M	0.637
TOC (mg L ⁻¹)	3.46 ± 4.28	4.52 ± 3.49	-	M	0.193
BOD (mg L ⁻¹)	0.81 ± 0.31	2.00 ± 3.40	≤8	M	0.313
COD ^{***} (mg L ⁻¹)	2.60 ± 1.89	6.38 ± 5.48	-	M	0.000
SS ^{**} (mg L ⁻¹)	18.69 ± 37.72	56.21 ± 106.05	-	M	0.005
T-N [*] (mg L ⁻¹)	0.86 ± 0.66	3.34 ± 3.44	-	M	0.047
T-P ^{***} (mg L ⁻¹)	0.04 ± 0.02	1.60 ± 4.86	-	M	0.000
NO ₃ -N [*] (mg L ⁻¹)	0.76 ± 0.69	2.87 ± 2.65	-	M	0.038
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.01	0.40 ± 1.47	-	M	0.257
PO ₄ -P ^{***} (mg L ⁻¹)	0.05 ± 0.11	0.33 ± 0.36	-	M	0.000
Cl ^{**} (mg L ⁻¹)	31.45 ± 54.83	92.85 ± 75.85	≤250	M	0.001
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	563.43 ± 1150.04	11714.28 ± 28005.96	-	M	0.013
Ca ^{2+***} (mg L ⁻¹)	13.63 ± 5.71	90.68 ± 65.82	-	M	0.000
Mg ^{2+***} (mg L ⁻¹)	3.62 ± 1.63	7.57 ± 3.76	-	M	0.000
Na ^{****} (mg L ⁻¹)	7.16 ± 4.98	67.83 ± 49.56	-	M	0.000
K ⁺ (mg L ⁻¹)	3.41 ± 1.12	7.46 ± 6.10	-	M	0.120
CN (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.01	Non-Detection	M	0.759
CO ₃ ²⁻ (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	12.00 ± 29.01	-	M	0.334
HCO ₃ ^{2-*} (mg L ⁻¹)	81.59 ± 35.42	109.36 ± 47.64	-	M	0.017
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	15669 ± 60352	19018 ± 64278	≤200	M	0.525
Fecal coliform (MPN 100mL ⁻¹)	7563 ± 30245	183 ± 644	-	M	0.580
E.Coli (MPN 100mL ⁻¹)	12.63 ± 49.97	45.78 ± 137.77	-	M	0.294
Al (mg L ⁻¹)	0.28 ± 0.16	3.24 ± 10.38	≤5	M	0.294
Cu (mg L ⁻¹)	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.12	≤0.2	M	0.400
Ni [*] (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	≤0.2	M	0.043
Zn (mg L ⁻¹)	0.02 ± 0.01	0.06 ± 0.13	≤2	M	0.110
As (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	≤0.05	M	0.822
Cd (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	≤0.01	M	1.000
Cr ⁶⁺ (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	≤0.05	M	1.000
Co (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	≤0.05	M	1.000
Pb (mg L ⁻¹)	0.02 ± 0.02	0.05 ± 0.10	≤0.1	M	0.473
Li (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.01	≤2.5	M	0.759
Mn (mg L ⁻¹)	0.16 ± 0.29	0.24 ± 0.32	≤0.2	M	0.154
Hg (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	≤0.001	M	1.000
Se (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	≤0.02	M	1.000

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test

Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

표 3.4.127 관개수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2013년)

항목	평균 ± 표준편차		수질권고기준	통계분석	p-value
	용인청정지구	오산제이용지구			
pH	7.34 ± 0.31	7.78 ± 0.37	5.8~8.5	t ^a	0.019*
EC (dS m ⁻¹)	0.18 ± 0.05	1.12 ± 0.28	-	M ^b	0.000***
DO (mg L ⁻¹)	8.40 ± 1.87	7.64 ± 0.67	-	t	0.277
TOC (mg L ⁻¹)	2.91 ± 1.12	6.55 ± 1.21	-	t	0.000***
BOD (mg L ⁻¹)	1.23 ± 0.52	2.50 ± 0.85	≤8	t	0.002**
COD (mg L ⁻¹)	3.16 ± 1.89	7.84 ± 2.32	-	M	0.001***
SS (mg L ⁻¹)	12.00 ± 6.86	32.50 ± 15.41	-	M	0.004**
T-N (mg L ⁻¹)	1.53 ± 0.41	3.65 ± 2.19	-	t	0.029*
T-P (mg L ⁻¹)	0.06 ± 0.05	0.32 ± 0.35	-	M	0.002**
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	1.19 ± 0.48	2.45 ± 1.74	-	t	0.083
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.01 ± 0.03	0.01 ± 0.01	-	M	1.000
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.03 ± 0.05	0.21 ± 0.22	-	t	0.055
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	14.00 ± 5.72	134.50 ± 21.97	≤250	M	0.000***
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	14.69 ± 2.87	101.82 ± 17.83	-	t	0.000***
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	3.85 ± 0.74	10.80 ± 2.55	-	t	0.000***
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	8.23 ± 1.97	73.23 ± 39.53	-	M	0.000***
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	125 ± 209	1057 ± 2009	≤200	M	0.277
Fecal coliform (MPN 100mL ⁻¹)	0 ± 0	10 ± 21	-	M	0.200
E.Coli (MPN 100mL ⁻¹)	0 ± 0	3 ± 7	-	M	0.200

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test
Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

표 3.4.128 관개수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2014년)

항목	평균 ± 표준편차		수질권고기준	통계분석	p-value
	용인청정지구	오산제이용지구			
pH	7.51 ± 0.18	7.33 ± 0.19	5.8~8.5	t ^a	0.110
EC (dS m ⁻¹)	0.21 ± 0.05	0.91 ± 0.49	-	t	0.017*
DO (mg L ⁻¹)	9.17 ± 1.85	6.72 ± 3.13	-	t	0.109
TOC (mg L ⁻¹)	4.73 ± 2.12	8.57 ± 3.36	-	t	0.030*
BOD (mg L ⁻¹)	1.71 ± 0.26	4.33 ± 1.86	≤8	M ^b	0.001***
COD (mg L ⁻¹)	3.08 ± 0.64	8.30 ± 3.57	-	M	0.001***
SS (mg L ⁻¹)	22.43 ± 27.50	78.17 ± 69.34	-	M	0.035*
T-N (mg L ⁻¹)	1.03 ± 0.54	4.49 ± 3.66	-	t	0.068
T-P (mg L ⁻¹)	0.08 ± 0.06	0.49 ± 0.21	-	t	0.000***
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.38 ± 0.43	0.64 ± 0.79	-	t	0.473
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.08 ± 0.11	1.97 ± 2.82	-	t	0.162
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.03 ± 0.07	0.11 ± 0.14	-	M	0.295
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	17.81 ± 7.78	111.39 ± 64.32	≤250	t	0.016*
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	17.35 ± 3.32	75.20 ± 41.10	-	t	0.018*
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	4.41 ± 1.04	7.56 ± 3.30	-	t	0.066
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	11.13 ± 3.96	71.67 ± 42.21	-	M	0.001***
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	3532 ± 7230	10336 ± 19416	≤200	M	0.628
Fecal coliform (MPN 100mL ⁻¹)	18 ± 37	346 ± 815	-	M	0.234
E.Coli (MPN 100mL ⁻¹)	7 ± 14	450 ± 1058	-	M	0.073

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test
Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

농업용수로 적합한지를 결정하는 중요한 수질 항목은 염분으로써 작물의 생육을 저해하거나 말라 죽게 하는 요소이다 (Grattan, 2002). 대비구인 용인청정지구의 경우 유입수의 평균 전기전도도가 0.30 dS m^{-1} 로 양호한 것으로 분석되었으나, 처리구인 오산재이용지구의 경우 Ayers와 Westcot (1985)가 제안하는 관개용수 수질 가이드라인 0.70 dS m^{-1} 를 초과하는 0.96 dS m^{-1} 으로 사용상 다소간의 제약이 있는 것으로 조사되었고, 정하우 등 (2006)에 따르면 염해수준이 높은 것으로 분류된다. 농업용수 중 염분에 따른 작물피해는 작물의 종류에 따라 다르며, 채소작물의 경우 조사된 전기전도도에서도 생육을 제한받을 수 있기 때문에 (Ryu, 2000), 시설재배지에 본 하수처리수를 재이용할 경우 특별한 주의가 필요하다.

나트륨, 칼슘, 마그네슘 등 치환성 양이온의 농도를 이용하여 염분에 의한 또 다른 피해인 나트륨 해를 판단할 수 있다. 나트륨 해는 나트륨 흡착률 (SAR, sodium adsorption ratio)을 이용하여 산정할 수 있으며, 용인청정지구와 오산재이용지구 각각 0.4과 1.8로 정하우 등 (2006)에 의해 모두 나트륨 해가 낮은 것으로 조사되었다.

주요한 영양염류인 T-N의 경우, 용인청정지구와 오산재이용지구에서 각각 0.86 mg L^{-1} 와 3.34 mg L^{-1} , T-P의 경우, 용인청정지구와 오산재이용지구가 각각 0.04 mg L^{-1} 와 1.60 mg L^{-1} 로 분석되어 처리구인 오산재이용지구가 대비구인 용인청정지구에 비해 크게 높은 것으로 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 영양염류의 경우 그 자체가 유해한 것은 아니나, Chiou (2008)에 따르면 하수처리수에는 일반적으로 작물의 생육에 필요 이상의 과다한 질소가 포함되어 있어 너무 과다한 질소는 벼의 지나친 성장을 유발하여 도복 등의 피해를 초래 (Setter 등, 1997)할 수 있다. 또한, 김상민 등 (2007)에 따르면 하수처리수를 관개용수로 사용할 경우 관행적인 관개용수 사용에서보다 수체에서 영양염류에 의한 오염부하가 10% 이상 증가하는 것으로 나타났기 때문에 하수재이용 시 시비활동에 각별한 관심이 요구된다.

농작물의 생육에는 미량 중금속 등이 필요하나 하수 중에 포함된 중금속 성분 농도가 높으면, 작물에 해를 미칠 수 있다. 구리(Cu)는 벼 잎, 아연(Zn)과 비소(As)는 줄기에서 백화현상과 뿌리 성장 억제 등의 부작용을 초래할 수 있다 (Asano 등, 2007). 수은(Pb), 카드뮴(Cd), 시안(CN) 등은 유해독성 중금속으로 토양이나 물에 용해되어 있으면 일정함량 이상에서 작물에 축적되어 농작물의 소비자에게 유해한 영향을 줄 수 있기 때문에 엄격하게 제한하는 것이 보통이다. 일반적으로 2차 처리 이상의 하수처리장 방류수에는 자연함량과 유사한 수준의 중금속을 포함하고 있기 때문에 일반적으로는 문제가 없는 것으로 보고되고 있다 (Ayers와 Westcot, 1985). 본 시험지구의 모니터링 결과, 대비구인 용인청정지구에서는 중금속이 검출되지 않거나 작물생육에 영향을 주지 않는 수준으로 조사되었다. 처리구인 오산재이용지구의 경우에도 대부분의 중금속이 MOE (2009)에서 제시한 권고기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었으나 망간(Mn)과 알루미늄(Al)의 경우 권고기준을 초과하는 것으로 분석되었다. Mn과 Al 모두, 권고기준을 초과할 경우 작물 생산성을 저하시키거나 작물에 유독하기 때문에 (Asano 등, 2007), 이에 대한 적절한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

하수처리수의 농업용수 재이용에서 다른 중요한 고려사항은 인체에 대한 위해성이

다. 미처리 오폐수, 분뇨 등을 농업에 이용하게 되면, 기생충 감염이나, 수인성 전염병 발생 등을 일으킬 수 있으며, 적절하게 처리되고 관리되지 않은 하수재이용으로 인한 전염병 감염 사례 또한 널리 알려지고 있다 (Mara와 Cairncross, 1989). 본 연구에서 총대장균 (Total coliform)의 경우 처리구와 대비구간 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았으나 두 지구 모두, 하수재이용 권고기준을 초과하는 것으로 분석되었으며, 이에 따라 적절한 처리와 사용의 제한이 필요한 것으로 판단된다. 특히, WHO (2006)에서는 하수를 생식작물의 관개용수로 사용하기 위해서는 하수의 생물학적 처리와 함께 소독처리를 필요로 하며, 대장균 잔류농도를 보다 철저히 통제하는 것이 필요하다고 제안하였다.

5.2. 논 담수

표 3.4.129 ~ 표 3.4.131은 연도별로 용인청정지구와 오산재이용지구의 담수 수질에 대한 통계적 결과를 수질 분석 항목별로 나타낸 것이다. 용인청정지구와 오산재이용지구 모두 대부분의 수질항목에서 관개수의 수질특성을 반영하는 것으로 나타났다. 통계 분석에는 모든 수질 항목이 충분히 큰 샘플수를 가지고 정규성을 만족하여 독립표본 t-검정을 실시하였다. 그 결과, 2012년에는 37가지 항목 중 EC, T-P, PO₄-P, Cl⁻, SO₄, Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Zn 등 11가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 항목 중 전기전도도 (EC)와 치환성 양이온 (Ca, Mg, Na)의 함량은 유의수준 0.001 이내로 나타났으며, 영양염류는 관개수에서보다 더 낮은 유의수준에서 차이를 보이거나 유의한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한, 논은 경작 시기 중 많은 기간을 담수상태로 유지하기 때문에 COD와 SS의 경우 관개수와 달리 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 2013년에는 19가지 항목 중 pH, EC, DO, TOC, BOD, COD, T-N, T-P, PO₄-P, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Fecal coliform 등 14가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 관개수에서와 같이 논 담수 중 전기전도도 (EC), TOC, COD, Cl⁻, 치환성 양이온 (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺)의 함량은 유의수준 0.001 이내로 나타났다. 2014년에는 19가지 항목 중 EC, T-P, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ 등 6가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 항목 중 전기전도도 (EC), Cl⁻, 치환성 양이온 (Ca²⁺, Na⁺)의 함량은 유의수준 0.001 이내로 나타났다.

표 3.4.129 논 담수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2012년)

항목	평균 ± 표준편차		통계 분석	p-value
	용인청정지구	오산재이용지구		
pH	7.15 ± 0.62	7.14 ± 0.42	ta	0.919
EC** (dS m ⁻¹)	0.30 ± 0.31	1.12 ± 0.74	t	0.000
DO (mg L ⁻¹)	8.29 ± 2.65	7.78 ± 2.72	t	0.274
TOC (mg L ⁻¹)	6.61 ± 8.38	7.85 ± 7.68	t	0.375
BOD (mg L ⁻¹)	1.89 ± 1.61	2.32 ± 1.54	t	0.117
COD (mg L ⁻¹)	10.09 ± 9.08	12.53 ± 10.50	t	0.154
SS (mg L ⁻¹)	264.85 ± 372.30	383.30 ± 541.09	t	0.143
T-N (mg L ⁻¹)	2.68 ± 7.50	5.74 ± 23.03	t	0.302
T-P* (mg L ⁻¹)	0.52 ± 0.58	0.79 ± 0.84	t	0.030
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	2.06 ± 5.28	2.03 ± 3.14	t	0.972
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.36 ± 2.48	0.92 ± 6.35	t	0.501
PO ₄ -P** (mg L ⁻¹)	0.09 ± 0.09	0.21 ± 0.30	t	0.002
Cl-*** (mg L ⁻¹)	32.86 ± 61.81	107.26 ± 90.18	t	0.000
SO ₄ -** (mg L ⁻¹)	1098.60 ± 4627.80	13034.59 ± 28674.76	t	0.001
Ca ²⁺ **** (mg L ⁻¹)	17.25 ± 8.34	100.03 ± 66.17	t	0.000
Mg ²⁺ **** (mg L ⁻¹)	5.78 ± 3.34	13.27 ± 9.02	t	0.000
Na+*** (mg L ⁻¹)	8.71 ± 6.17	84.27 ± 62.68	t	0.000
K+*** (mg L ⁻¹)	5.64 ± 3.61	11.06 ± 6.26	t	0.000
CN (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	t	0.466
CO ₃ ²⁻ (mg L ⁻¹)	0.54 ± 4.40	0.00 ± 0.00	t	0.321
HCO ₃ ²⁻ *** (mg L ⁻¹)	86.58 ± 47.48	125.33 ± 57.02	t	0.000
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	21205 ± 64273	90467 ± 569095	t	0.324
Fecal coliform (MPN 100mL ⁻¹)	5738 ± 25250	3994 ± 20898	t	0.665
E.Coli (MPN 100mL ⁻¹)	17.27 ± 67.24	7.73 ± 22.51	t	0.274
Al (mg L ⁻¹)	11.59 ± 19.14	15.24 ± 21.07	t	0.298
Cu (mg L ⁻¹)	0.02 ± 0.02	0.04 ± 0.04	t	0.055
Ni (mg L ⁻¹)	0.01 ± 0.02	0.02 ± 0.01	t	0.105
Zn* (mg L ⁻¹)	0.05 ± 0.06	0.08 ± 0.08	t	0.017
As (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.01	0.01 ± 0.01	t	0.245
Cd (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	t	-
Cr ⁶⁺ (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	t	-
Co (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	t	-
Pb (mg L ⁻¹)	0.03 ± 0.04	0.04 ± 0.04	t	0.593
Li (mg L ⁻¹)	0.01 ± 0.02	0.01 ± 0.01	t	0.868
Mn (mg L ⁻¹)	0.45 ± 0.78	0.69 ± 1.11	t	0.155
Hg (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	t	-
Se (mg L ⁻¹)	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	t	-

a Indicates independent samples t-Test

b t cannot be computed because the standard deviations of both groups are 0

Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

표 3.4.130 논 담수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2013년)

항목	평균 ± 표준편차		수질권고기준	통계분석	p-value
	용인청정지구	오산제이용지구			
pH	7.27 ± 0.36	7.64 ± 0.50	5.8~8.5	M ^b	0.003**
EC (dS m ⁻¹)	0.20 ± 0.06	1.11 ± 0.62	-	M	0.000***
DO (mg L ⁻¹)	7.63 ± 1.30	6.76 ± 1.46	-	t ^a	0.022*
TOC (mg L ⁻¹)	5.79 ± 4.01	11.53 ± 6.27	-	M	0.000***
BOD (mg L ⁻¹)	3.27 ± 1.84	4.47 ± 1.86	≤8	M	0.016*
COD (mg L ⁻¹)	12.62 ± 15.58	18.94 ± 8.78	-	M	0.000***
SS (mg L ⁻¹)	294.18 ± 652.53	263.00 ± 376.29	-	M	0.272
T-N (mg L ⁻¹)	1.47 ± 1.08	2.78 ± 3.36	-	M	0.008**
T-P (mg L ⁻¹)	0.30 ± 0.47	0.42 ± 0.23	-	M	0.002**
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.57 ± 0.75	0.51 ± 0.63	-	M	0.909
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.18 ± 0.28	1.01 ± 3.13	-	M	0.078
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.03 ± 0.03	0.06 ± 0.07	-	M	0.020*
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	16.53 ± 10.58	132.04 ± 87.83	≤250	M	0.000***
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	16.08 ± 5.05	71.27 ± 32.78	-	M	0.000***
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	4.52 ± 2.32	10.28 ± 4.59	-	M	0.000***
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	8.41 ± 3.29	87.54 ± 53.28	-	M	0.000***
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	737 ± 1412	473 ± 752	≤200	M	0.788
Fecal coliform (MPN 100mL ⁻¹)	1 ± 4	2 ± 3	-	M	0.026*
E.Coli (MPN 100mL ⁻¹)	0 ± 1	0 ± 1	-	M	0.080

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test
Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

표 3.4.131 논 담수의 수질 분석 항목별 통계분석 결과 (2014년)

항목	평균 ± 표준편차		수질권고기준	통계분석	p-value
	용인청정지구	오산제이용지구			
pH	7.20 ± 0.22	7.32 ± 0.41	5.8~8.5	t ^a	0.239
EC (dS m ⁻¹)	0.23 ± 0.07	0.94 ± 0.56	-	M ^b	0.000***
DO (mg L ⁻¹)	7.54 ± 2.68	6.69 ± 2.67	-	t	0.294
TOC (mg L ⁻¹)	8.92 ± 8.29	10.72 ± 6.87	-	M	0.121
BOD (mg L ⁻¹)	4.51 ± 3.60	5.13 ± 2.22	≤8	M	0.062
COD (mg L ⁻¹)	9.40 ± 9.49	9.76 ± 4.11	-	M	0.106
SS (mg L ⁻¹)	217.33 ± 576.48	125.21 ± 203.64	-	M	0.797
T-N (mg L ⁻¹)	1.81 ± 2.24	3.14 ± 2.71	-	M	0.106
T-P (mg L ⁻¹)	0.20 ± 0.16	0.39 ± 0.33	-	M	0.019*
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.18 ± 0.24	0.48 ± 0.82	-	M	0.990
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	0.34 ± 0.46	1.16 ± 2.18	-	M	0.532
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.02 ± 0.08	0.03 ± 0.06	-	M	0.499
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	24.40 ± 23.10	117.88 ± 78.15	≤250	M	0.000***
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	19.72 ± 6.95	72.44 ± 45.04	-	t	0.000***
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	4.84 ± 1.69	9.71 ± 6.54	-	M	0.003**
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	12.41 ± 5.22	81.78 ± 50.36	-	M	0.000***
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	5637 ± 9169	13568 ± 27067	≤200	M	0.360
Fecal coliform (MPN 100mL ⁻¹)	20 ± 40	849 ± 3221	-	M	0.917
E.Coli (MPN 100mL ⁻¹)	9 ± 22	1105 ± 4581	-	M	0.981

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test
Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

5.3. 논 토양 화학성분

논 토양환경의 상대적인 비교를 위해 토양환경보전법에서 지정한 논토양의 채취심도인 0 ~ 15 cm에 가까운 표토와 20 cm의 토양을 채취하여 그 평균값을 표 3.4.132 ~ 표 3.4.134에 제시하였다. 그 결과, 2012년에는 대비구인 용인청정지구와 처리구인 오산재이용지구는 모두 염기성 토양으로 EC는 용인청정지구가 0.59 dS m⁻¹, 오산재이용지구가 1.25 dS m⁻¹로 두 배 이상의 차이를 보였으며, T-N과 T-P는 용인청정지구와 오산재이용지구 각각 1,710 mg kg⁻¹, 1,684 mg kg⁻¹, 그리고 599 mg kg⁻¹, 603 mg kg⁻¹으로 유사하게 분석되었다. 2013년에는 대비구인 용인청정지구와 처리구인 오산재이용지구는 모두 염기성 토양으로 EC는 용인청정지구가 0.73 dS m⁻¹, 오산재이용지구가 1.37 dS m⁻¹로 1.8배 이상의 차이를 보였으며, T-N과 T-P는 용인청정지구와 오산재이용지구 각각 1,832 mg kg⁻¹, 2,036 mg kg⁻¹, 그리고 582 mg kg⁻¹, 617 mg kg⁻¹으로 유사하게 분석되었다. 2014년에는 대비구인 용인청정지구와 처리구인 오산재이용지구는 모두 염기성 토양으로 EC는 용인청정지구가 0.09 dS m⁻¹, 오산재이용지구가 0.22 dS m⁻¹로 2배 이상의 차이를 보였으며, T-N과 T-P는 용인청정지구와 오산재이용지구 각각 1,149 mg kg⁻¹, 1,314 mg kg⁻¹, 그리고 466 mg kg⁻¹, 377 mg kg⁻¹으로 유사하게 분석되었다. 또한, 2012년 ~ 2014년에 대하여 유기인산 (P₂O₅)과 유효규산 (SiO₂)의 경우에는 용인청정지구가 더 높게 나타났는데, 이는 관개수에서 더 많은 양의 영양물질이 논으로 유입되었음에도 불구하고 토양에서의 시비활동에 대한 영향으로 판단된다. 그 외의 치환성 양이온 (K, Ca, Mg, Na)은 오산재이용지구에서 더 높은 함량을 보였으며 특히, 생활하수에 함유된 염분의 영향으로 Na의 경우 두 배가 넘는 차이를 보였다. 총대장균은 2012년에는 대비구인 용인청정지구에 비하여 처리구인 오산재이용지구에서 두 배가 넘는 차이가 나타났고, 2013년과 2014년에는 유사하게 분석되었다.

표 3.4.132 논 토양 화학성분 함량 분석 결과 (2012년)

구분	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	T-N	T-P	P ₂ O ₅	SiO ₂	OM* (%)	K	Ca	Mg	Na	Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)
			(mg kg ⁻¹)					(cmol _c kg ⁻¹)				
오산재이용지구	6.12	1.25	1,684	603	44	86	2.9	0.27	4.7	1.4	0.44	536,804
용인청정지구	5.87	0.59	1,710	599	62	109	3.3	0.21	3.3	0.6	0.19	250,875

*OM indicates organic matter

표 3.4.133 논 토양 화학성분 함량 분석 결과 (2013년)

구분	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	T-N	T-P	P ₂ O ₅	SiO ₂	OM* (%)	K	Ca	Mg	Na	Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)
			(mg kg ⁻¹)					(cmol _c kg ⁻¹)				
오산 재이용지구	5.49	1.37	2,036	617	85	8	3.9	0.41	4.1	0.9	0.20	274,710
용인 청정지구	5.39	0.73	1,832	582	100	10	3.6	0.26	2.6	0.5	0.07	291,400

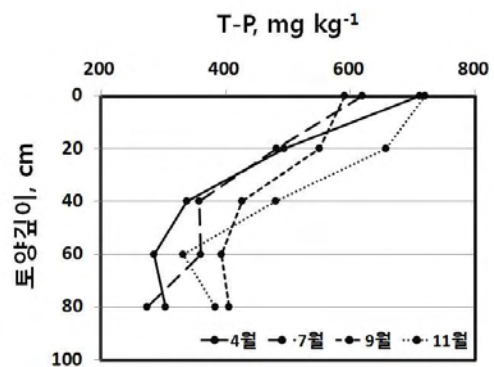
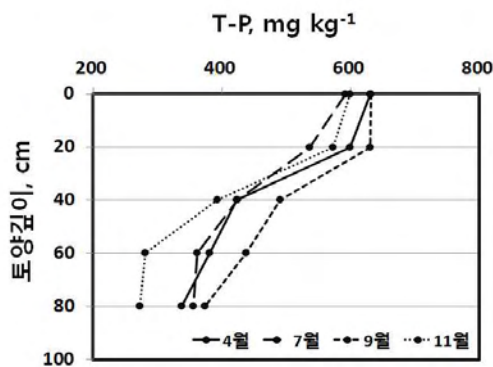
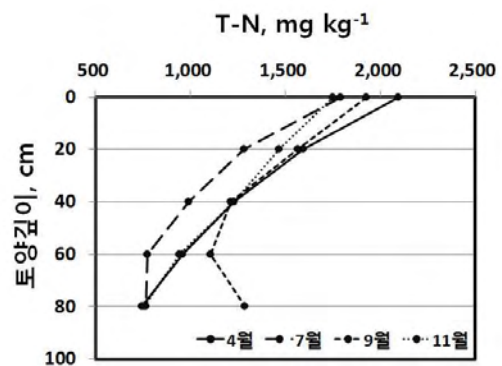
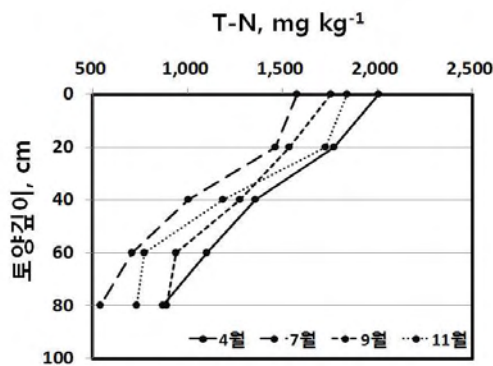
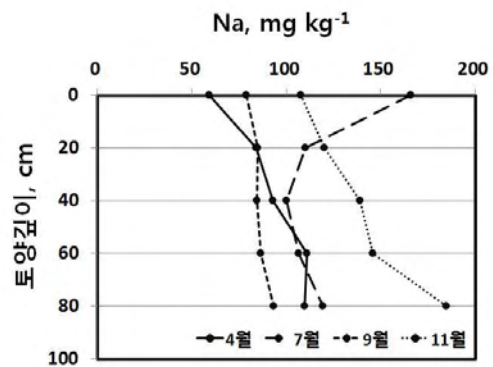
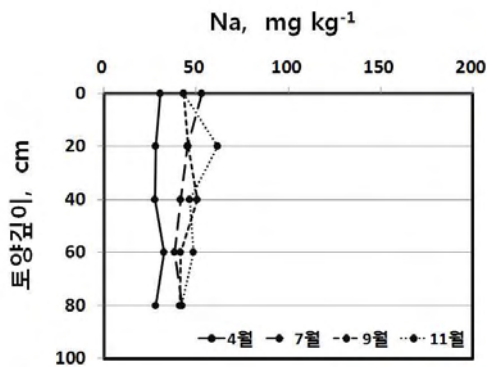
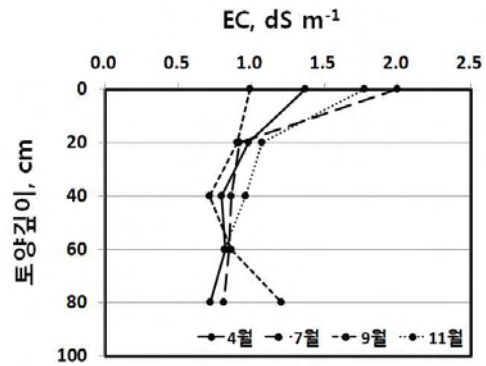
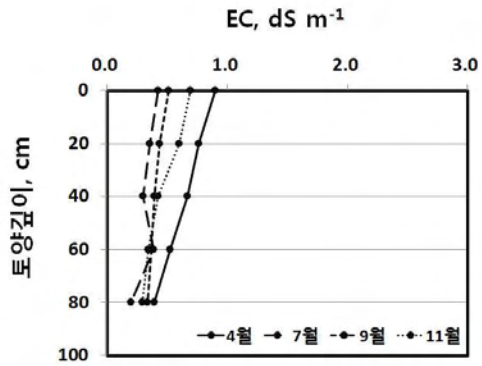
*OM indicates organic matter

표 3.4.134 논 토양 화학성분 함량 분석 결과 (2014년)

구분	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	T-N	T-P	P ₂ O ₅	SiO ₂	OM* (%)	K	Ca	Mg	Na	Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)
			(mg kg ⁻¹)					(cmol _c kg ⁻¹)				
오산 재이용지구	5.93	0.22	1,314	377	42	124	2.4	0.42	5.9	1.7	0.28	377,920
용인 청정지구	5.75	0.09	1,149	466	54	134	2.1	0.30	3.8	1.1	0.07	343,360

*OM indicates organic matter

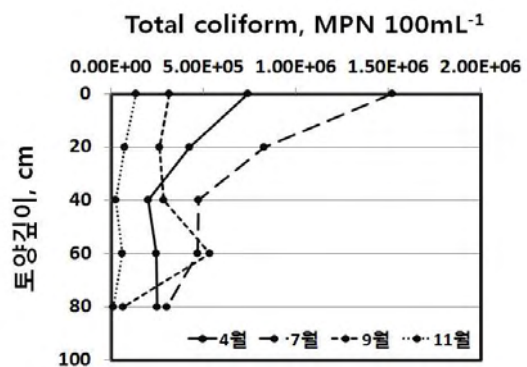
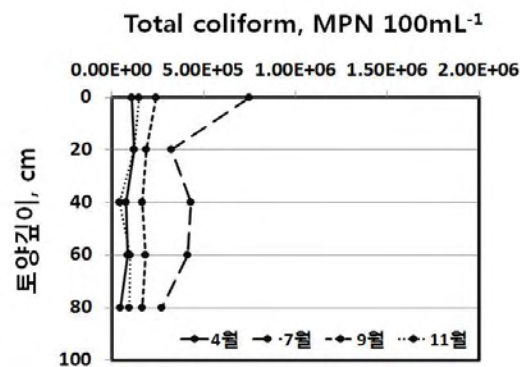
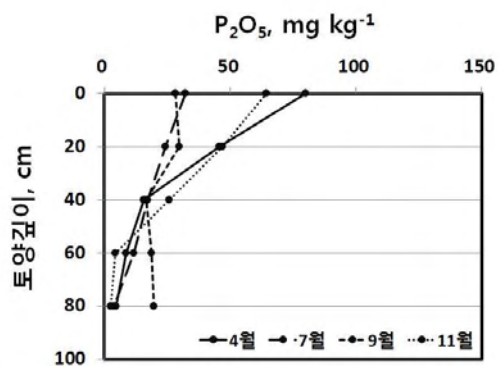
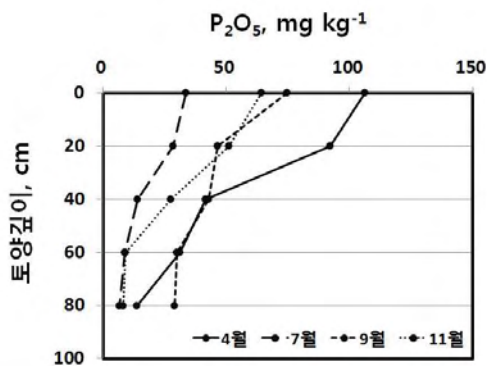
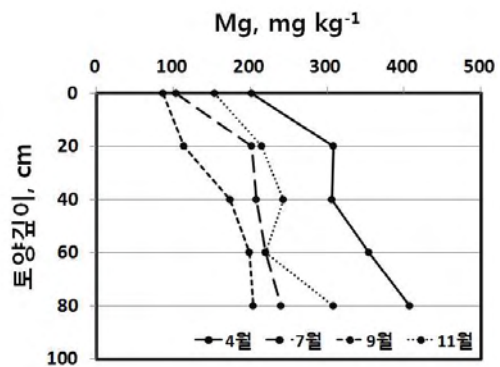
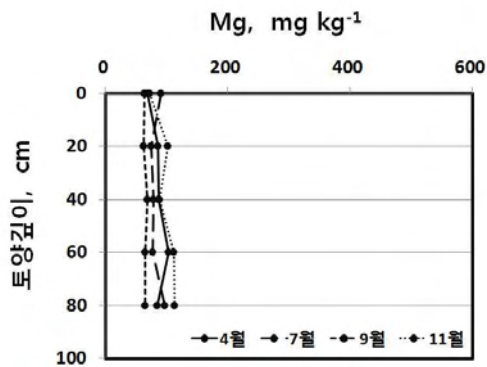
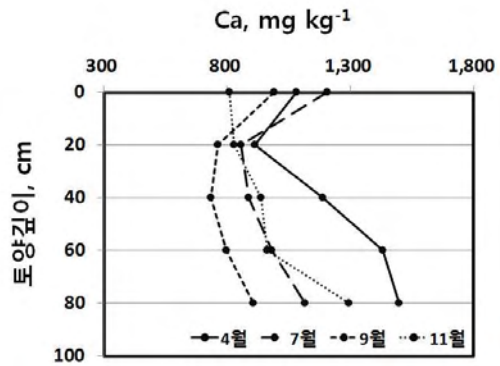
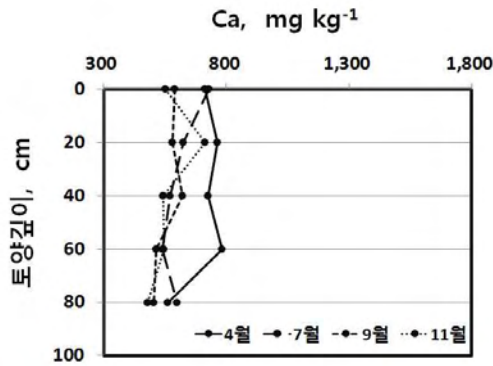
2012년에는 그림 3.4.77과 같이 시간 및 토심에 대한 논 토양 화학성분 변화는 시비 활동과 관련이 큰 T-N, T-P, P₂O₅의 경우 두 지구 모두 시간과 토심에 따른 변화의 양태가 비슷한 모습을 보였지만, 관개수 수질특성을 반영하는 EC, Ca, Mg, Na 및 총 대장균 등은 대비구인 용인청정지구에서 시간과 토심에 따른 변화가 작게 나타났고, 오산재이용지구에서는 시간과 토심에 따른 변화가 크게 나타났다.



(a) 용인청정지구

(b) 오산재이용지구

그림 3.4.77 용인청정지구 및 오산재이용지구의 화학성분 분석결과 (2012년)



(a) 용인청정지구

(b) 오산재이용지구

그림 3.4.77 용인청정지구 및 오산재이용지구의 화학성분 분석결과 (2012년) (계속)

2013년과 2014년에는 그림 3.4.78과 같이 pH는 유사한 정도를 나타내며 두 지구 모두에서 염기성 토양인 것으로 나타났다. 시비활동과 관련이 큰 T-N와 T-P의 경우 두

지구 모두 시간에 따른 변화의 양태가 비슷한 모습을 보였지만, 관개수 수질특성을 반영하는 EC, Ca, Na 및 총대장균 등은 대비구인 용인청정지구에서 시간에 따른 변화가 작게 나타났고, 오산재이용지구에서는 시간에 따른 변화가 크게 나타났다.

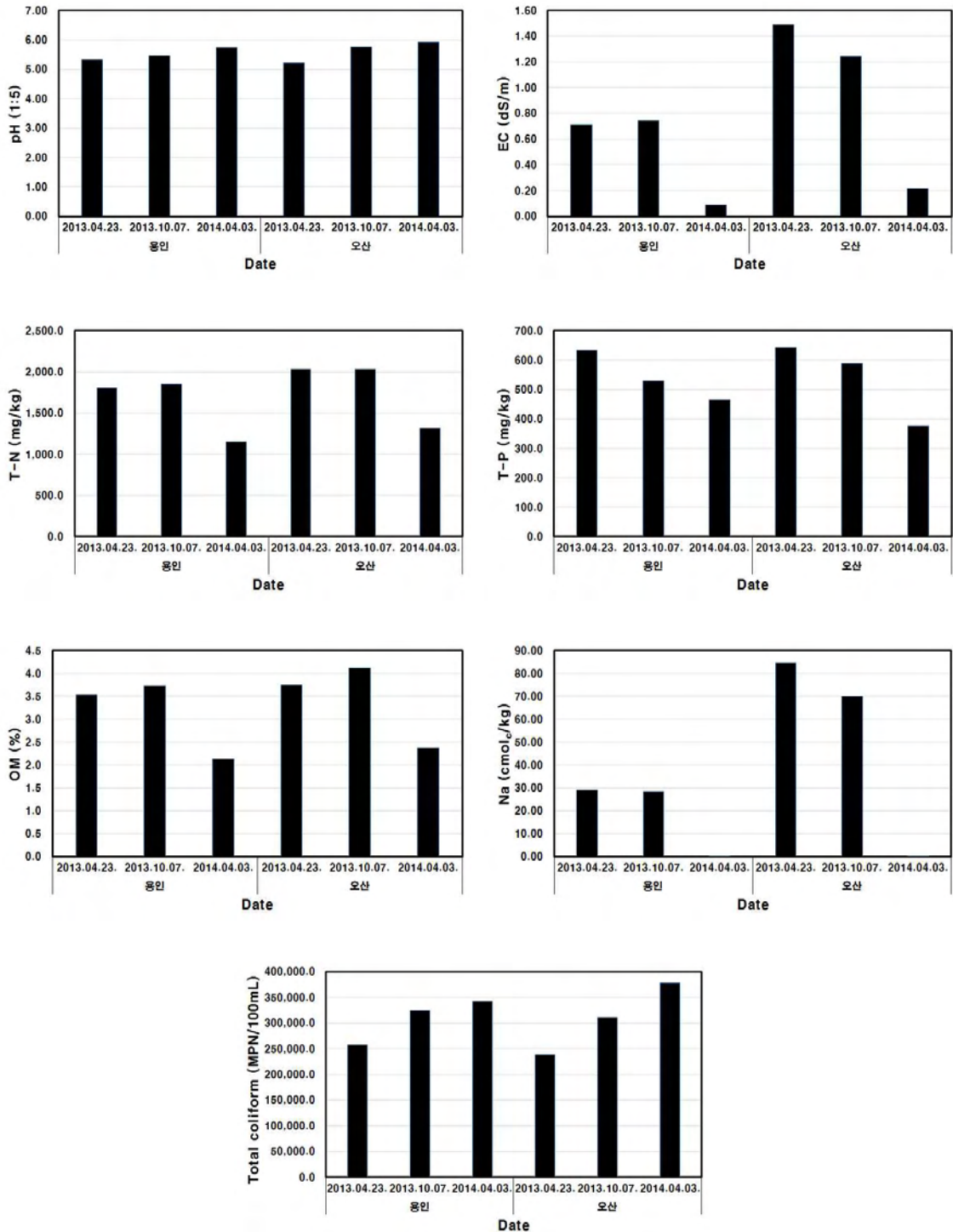


그림 3.4.78 용인청정지구 및 오산재이용지구의 화학성분 분석결과 (2013년 ~ 2014년)

5.4. 논 토양 중금속 함량

환경부에서 4년마다 실시하는 토양오염도조사와 비교하기 위하여 카드뮴 (Cd), 구리 (Cu), 비소 (As), 수은 (Hg), 납 (Pb), 크롬6가 (Cr⁶⁺), 아연 (Zn), 니켈 (Ni) 등 8가지 중금속에 대하여 표토와 20cm의 토양을 채취하여 그 평균값을 표 3.4.135 ~ 표 3.4.137에 제시하였다. 그 결과, 2012년에는 Cd과 Pb은 세계평균수준보다 낮은 오염도를 보였고, Cu, Hg, Zn의 경우 대비구인 용인청정지구는 세계평균수준보다 낮게 나타났으나 처리구인 오산재이용지구는 높은 것으로 분석되었다. 특히, As와 Ni은 두 지구 모두 세계평균수준을 크게 상회하는 것으로 조사되었는데, 관개수에서는 검출되지 않거나 매우 낮은 함량을 보이는 중금속 성분이 세계평균수준보다 높게 나타난 것은 지역적 토양특성에 기인한 것으로 판단된다. 두 지구 모두 모든 중금속 함량에 대하여 토양환경보전법의 토양오염우려기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. Cr⁶⁺는 검출되지 않았다. 2013년에는 Cd과 Pb은 세계평균수준보다 낮은 오염도를 보였고, Cu와 Zn의 경우 대비구인 용인청정지구는 세계평균수준보다 낮게 나타났으나 처리구인 오산재이용지구는 높은 것으로 분석되었다. Hg, As, Ni은 두 지구 모두 세계 평균수준을 상회하는 것으로 조사되었는데, 관개수에서는 검출되지 않거나 매우 낮은 함량을 보이는 중금속 성분이 세계평균수준보다 높게 나타난 것은 지역적 토양특성에 기인한 것으로 판단된다. 두 지구 모두 모든 중금속 함량에 대하여 토양환경보전법의 토양오염우려기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. Cr⁶⁺는 검출되지 않았다. 2014년에는 Cd과 Cu는 세계평균수준보다 낮은 오염도를 보였고, Pb, Hg, Zn의 경우 대비구인 용인청정지구는 세계평균수준보다 낮게 나타났으나 처리구인 오산재이용지구는 높은 것으로 분석되었다. 특히, As와 Ni은 두 지구 모두 세계평균수준을 상회하는 것으로 조사되었는데, 관개수에서는 검출되지 않거나 매우 낮은 함량을 보이는 중금속 성분이 세계평균수준보다 높게 나타난 것은 지역적 토양특성에 기인한 것으로 판단된다. 두 지구 모두 모든 중금속 함량에 대하여 토양환경보전법의 토양오염우려기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. Cr⁶⁺는 검출되지 않았다.

표 3.4.135 논 토양 중금속 함량 분석 결과 (mg kg⁻¹) (2012년)

구분	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni
오산재이용지구	0.869	18.876	11.746	0.036	20.341	ND	78.526	18.428
용인청정지구	0.639	15.668	10.598	0.035	19.732	ND	54.653	18.147
세계 평균 수준 ^a	1.146	16.657	5.297	0.035	22.013	0.263	62.486	13.335
토양 오염 우려 기준 ^b	4.000	150.000	25.000	4.000	200.000	5.000	300.000	100.000

^a National average level of heavy metal contents from paddy soil according to the soil pollution investigation of MOE (2012b)

^b Soil Environment Conservation Act of MOE (2009b) includes soil contamination warning standards

표 3.4.136 논 토양 중금속 함량 분석 결과 (mg kg⁻¹) (2013년)

구분	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni
오산재이용지구	0.352	18.497	5.523	0.059	19.843	ND	73.240	16.255
용인청정지구	0.241	12.025	5.936	0.037	15.641	ND	45.807	14.934
세계 평균 수준 ^a	1.146	16.657	5.297	0.035	22.013	0.263	62.486	13.335
토양 오염 우려 기준 ^b	4.000	150.000	25.000	4.000	200.000	5.000	300.000	100.000

^a National average level of heavy metal contents from paddy soil according to the soil pollution investigation of MOE (2012b)

^b Soil Environment Conservation Act of MOE (2009b) includes soil contamination warning standards

표 3.4.137 논 토양 중금속 함량 분석 결과 (mg kg⁻¹) (2014년)

구분	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni
오산재이용지구	0.139	14.510	7.691	0.045	24.371	ND	85.615	19.577
용인청정지구	0.170	15.450	8.807	0.032	18.862	ND	59.213	18.757
세계 평균 수준 ^a	1.146	16.657	5.297	0.035	22.013	0.263	62.486	13.335
토양 오염 우려 기준 ^b	4.000	150.000	25.000	4.000	200.000	5.000	300.000	100.000

^a National average level of heavy metal contents from paddy soil according to the soil pollution investigation of MOE (2012b)

^b Soil Environment Conservation Act of MOE (2009b) includes soil contamination warning standards

2012년에 대하여 미검출된 Cr⁶⁺을 제외한 7가지 중금속에 대하여 토심별 농도를 분석한 결과, Hg을 제외한 모든 중금속 항목에 대하여 처리구인 오산재이용지구의 중금속 함량이 높게 검출되었다. 또한, 그림 3.4.79와 같이 용인청정지구의 경우 모든 중금속에 대하여 토심이 깊어질수록 중금속 함량이 비슷하거나 낮게 검출되었으며, 오산재이용지구의 경우 표토에서 전국 논 오염도보다 높게 검출된 As와 Ni는 토심이 깊어질수록 함량 또한 높게 검출되는 경향을 보였다.

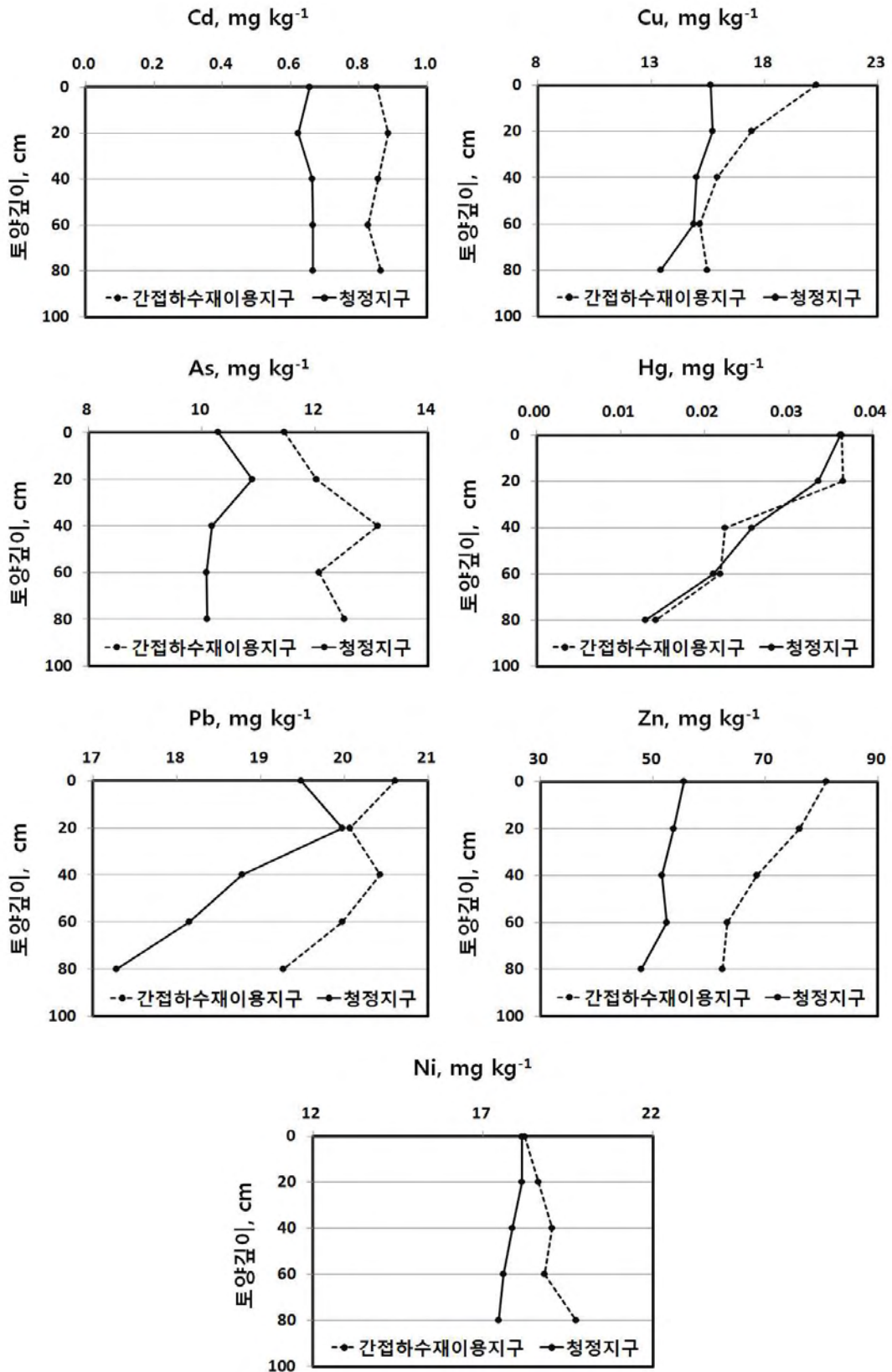


그림 3.4.79 용인청정지구 및 오산재이용지구의 중금속함량 분석결과 (2012년)

2013년과 2014년에 대하여 미출된 Cr^{6+} 을 제외한 7가지 중금속에 대하여 농도를 분석한 결과, As를 제외한 모든 중금속 항목에 대하여 처리구인 오산재이용지구의 중금속 함량이 높게 검출되었다.

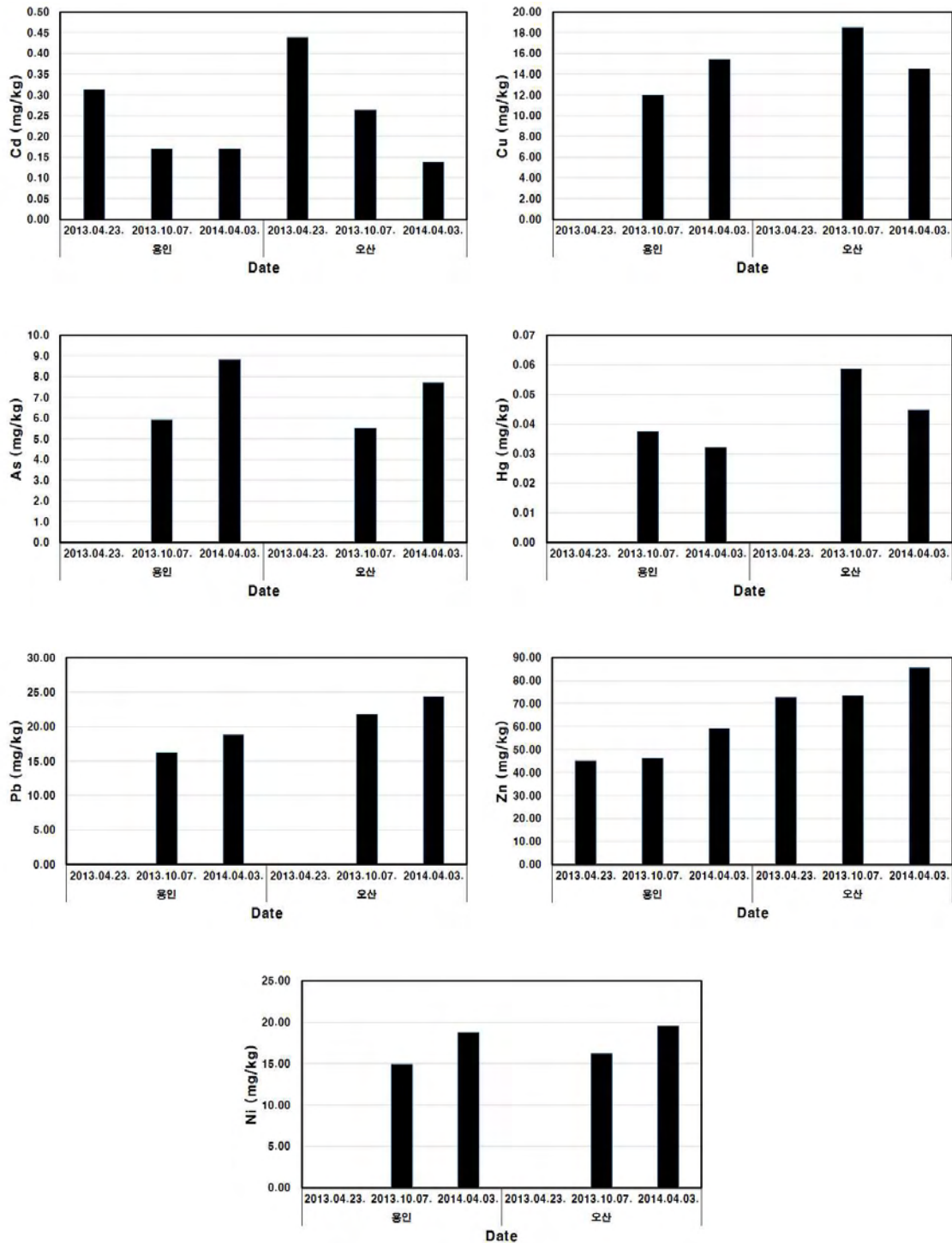


그림 3.4.80 용인청정지구 및 오산재이용지구의 중금속함량 분석결과 (2013년 ~ 2014년)

6. 미처리하수 관개에 따른 논에서의 수질 및 토양 특성 분석

미처리하수지구와 농업용저수지의 관개용수를 공급하는 대비구의 수질 및 토양 모니터링을 실시하고, 수집한 계측 자료를 이용한 통계학적 분석을 통해 미처리하수의 농경지 유입에 따른 논에서의 수질 및 토양 특성을 평가하였다.

미처리하수지구와 용인지구의 관개수와 담수를 2012~2013년의 영농기에 대해 주 1회 간격으로 동일한 날짜에 샘플링하였으며, 중간낙수기와 기상조건에 따라 담수가 이루어지지 않을 경우에는 시료를 채취하지 않았다. 토양시료는 대상지구의 모든 시험포장에 대하여 시간에 따른 영양물질 및 중금속의 집적 변화를 분석하기 위하여 지구별로 총 6회에 걸쳐 0~20 cm의 토심에 대해 채토기를 이용하여 채취하였다. 수질시료는 pH, EC (electronic conductivity), DO, TOC (total organic carbon), BOD₅, SS (suspended solid), 영양염류, 중금속, 대장균수 등 총 37가지 항목에 대하여 분석하였고, 토양시료는 pH, TOC, CEC (cation exchange capacity), T-N (total nitrogen), T-P (total phosphorous), Cd, Pb, Zn, Cu, 총대장균수 등 10가지 항목에 대하여 분석하였다.

미처리하수의 농경지 유입에 따른 논에서의 환경 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 처리구별 수질 및 토양 성분의 평균을 통계적 유의성 검정 방법을 이용하여 비교하였다. 두 지구간 평균 비교를 위한 유의성 검정 방법은 자료의 수가 30개 이상의 자료에 대해 독립표본 t-검정 (independent samples t-test)을, 30개 미만의 자료에 대해 비모수 통계검정인 맨-휘트니 검정 (Mann-Whitney U test)을 이용하였다 (NRCS, 2003). 또한, 통계적 유의수준은 p 값 0.05이하로 정하여 두 지구간 수질 및 토양 성분의 평균이 같다는 귀무가설에 대한 기각여부를 판단하였다. 모든 통계분석은 IBSS SPSS Statistics 21 (SPSS, Inc., 2012)를 이용하였다.

6.1. 수질 특성 분석

가. 평균농도 분석

표 3.4.138은 미처리하수지구와 대비구인 용인지구의 37개 수질 항목에 대한 관개수 및 담수 모니터링 결과와 통계 분석 결과를 보여주고 있다. pH는 관개수의 경우 두 모니터링 지구간 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 논담수의 경우 미처리하수지구에서 높게 나타났다 ($p < 0.05$). 하지만, 우리나라의 농업용수 pH 기준인 6.0~8.5를 벗어나지는 않았다.

EC는 관개수의 경우 미처리하수지구에서 0.33 ds/m로 용인지구의 0.18 ds/m와 비교하여 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으나 ($p < 0.01$), 담수의 경우에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 김진호 등 (2003)에 의하면 우리나라 논 관개용 지하수의 EC 평균농도는 0.286 ds/m으로 보고하고 있으며 미처리하수지구 관개수에서는 이보다 높은 것으로 나타났다.

치환성양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+})은 관개수의 경우 미처리하수지구가 용인지구에 비해 높게 나타났으며 ($p < 0.01$), 담수의 경우도 미처리하수지구에서 더 높은 값을 보였다

($p < 0.01$). Cl^- 또한 관개수에서 미처리하수지구가 용인지구에 비해 더 높은 값으로 나타났다 ($p < 0.05$). EC는 일반적으로 Na^+ 및 Cl^- 의 농도가 높으면 높은 값을 나타내는 것으로 보고되고 있으며 (Domeno 등, 2009), 본 연구에서 미처리하수지구 관개수가 높게 나타난 것은 비슷한 이유 때문으로 사료된다.

DO, BOD_5 , COD, 그리고 TOC는 관개수의 경우 미처리하수지구에서 용인지구에 비해 평균농도가 높게 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 분석되었다. COD의 경우 미처리하수지구에서 9.3 mg l^{-1} 로 하천수의 농업용수 이용기준 (환경정책기본법 시행령 제2조, 2012)인 8.0 mg l^{-1} 를 초과하는 것으로 나타났으나, 김복영 (1988)이 제시한 농작물 한계기준인 50.0 mg l^{-1} 에는 미치지 않았다. 또한 BOD_5 의 농업용수 기준은 8.0 mg l^{-1} 로 두 지구의 관개수 및 담수 평균 농도는 이를 초과하지 않았다.

SS, T-N, T-P, 그리고 NO_3-N 의 평균농도는 관개수의 경우 미처리하수지구에서 용인지구에 비해 높게 나타나고 통계적으로도 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.001$). 하지만, 논담수의 경우 미처리하수지구가 용인지구에 비해 SS, T-N, NO_3-N 의 평균 농도는 높게 나타나나, 통계적으로는 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다 ($p > 0.05$). 이는 해당 수질항목에 대해 용인지구의 경우 상대적으로 낮은 농도의 관개수 (SS: 16.6 mg/L , T-N: 1.1 mg/L , T-P: 0.05 mg/L , NO_3-N : 0.9 mg/L)가 유입되거나 시비 및 썩레질 등의 외부영향에 의해 담수 농도가 올라갔으며 (SS: 297.0 mg/L , T-N: 2.3 mg/L , T-P: 0.44 mg/L , NO_3-N : 1.6 mg/L), 미처리지구의 경우 상대적으로 고농도의 관개수 (SS: 733.0 mg/L , T-N: 14.0 mg/L , T-P: 2.76 mg/L , NO_3-N : 6.9 mg/L)가 유입되었으나 논외의 정화작용에 따라 담수 농도 (SS: 357.4 mg/L , T-N: 3.1 mg/L , T-P: 0.35 mg/L , NO_3-N : 2.5 mg/L)가 낮아졌기 때문으로 사료된다. 선행 연구결과에 따르면, 우리나라 일부 논에서 질소는 52~66%, 인은 27~65%의 정화율을 보이는 것으로 보고되고 있다 (Cho와 Choi, 2001; Yoon 등, 2006; Jang 등, 2012; Jang 등 2013). 하지만, 상대적으로 깨끗한 관개수를 공급받는 지구에서는 영농활동의 영향에 의해 담수 농도가 관개수 농도에 비해 T-N의 경우 약 2배, T-P의 경우 약 2~4배 정도 높게 나타날 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Song 등, 2013b).

총대장균 (Total Coliform, TC), 분원성대장균 (Fecal Coliform, FC), 그리고 E. coli에 대한 분석 결과, TC와 E. coli는 관개수의 경우 미처리하수지구와 용인지구간 유의한 차이를 보였으나 ($p < 0.05$), 논담수의 경우는 차이가 없는 것으로 나타났다. FC는 관개수와 논담수에 대한 두 지구간 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 관개수의 TC 평균농도는 미처리하수지구의 경우 $7.72 \times 10^5 \text{ MPN } 100/\text{mL}$, 용인지구의 경우 $1.05 \times 10^4 \text{ MPN } 100/\text{mL}$ 로 미처리하수지구에서 용인지구에 비해 크게 나타났으나, 두 지구 모두 하수재이용 권고기준인 $200 \text{ MPN } 100/\text{mL}$ 을 크게 초과하는 것으로 분석되었다 (환경부, 2009). 하지만, 인간이나 동물의 배설물을 통해 유출되는 것으로 알려진 FC (정광욱 등, 2004)는 미처리하수지구에서 관개수의 경우 $633 \text{ MPN } 100/\text{mL}$, 논담수의 경우 $14 \text{ MPN } 100/\text{mL}$ 으로 용인지구에 비해 낮게 나타났으며, WHO (1989)에서 제시한 기준인 $10^3 \sim 10^5 \text{ } 100/\text{mL}$ 를 만족하는 것으로 나타났다. 관개수와 논담수의 대장균

농도를 비교하면 미처리하수지구에서는 관개 후 담수에서 TC, FC, E. coli가 감소하는 것으로 나타났으나, 용인지구는 관개 후 담수에서 TC와 E. coli의 평균농도가 증가하는 것으로 나타났다. Jang 등 (2013)의 하수재이용지구와 관행 관개지구 대한 대장균 모니터링 비교 결과에 따르면 하수재이용지구에서는 관개수와 논담수의 TC, FC 평균 농도는 유사하게 나타나나 관행 관개지구에서는 논담수가 관개수에 비해 증가하는 것으로 보고하고 있다. 따라서, 논은 고농도의 관개수 유입에 대해, 영양물질의 경우 정화 작용을 통해 수질을 낮출 수 있으나, 대장균의 경우 다른 양상을 보일 수 있으며 작업시 위험 노출 등의 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

중금속 성분 중 Cu, Al, Pb, Zn, 그리고 Mn은 미처리하수지구 관개수에서 각각 0.05 mg/L, 8.58 mg/L, 0.03 mg/L, 0.22 mg/L, 0.28 mg/L으로 용인지구에 비해 높게 나타났으며 Al은 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다 ($p < 0.01$). 이 중 Cu, Al, 그리고 Mn은 환경부 (2009)에서 제안한 수질기준 ($\text{Cu} \leq 0.2 \text{ mg/L}$, $\text{Al} \leq 5 \text{ mg/L}$, $\text{Mn} \leq 0.2 \text{ mg/L}$)을 초과하는 것으로 나타났다. 관개수 중 중금속 성분 농도가 높으면 작물에 해를 미칠 수 있으며, Cu는 벼 잎의 백화현상을 일으키거나 뿌리 성장을 억제할 수 있고, Al과 Mn은 작물 생산성을 저하시키거나 작물에 유독할 수 있다 (Asano 등, 2007; 정한석 등, 2013). 기타 중금속 항목인 Ni, CN, As, Cd, Cr^{6+} , Co, Li, Hg, 그리고 Se 성분은 두 지구의 관개수 및 담수에서 검출되지 않거나 그 양이 미비한 것으로 나타났다.

표 3.4.138 미처리지구와 용인지구에서의 관개수 및 논담수의 수질 통계특성

항목	관개수 수질							논담수 수질						
	YID ^a (n ^b =24)			UWD ^c (n=43)			p 값	YID (n=102)			UWD (n=70)			p 값
	평균	최대	최소	평균	최대	최소		평균	최대	최소	평균	최대	최소	
pH	7.4	8.1	7.0	7.4	8.2	6.4	0.638	7.2	8.3	4.7	7.4	8.8	6.1	0.037
EC (ds/m)	0.18	0.34	0.08	0.33	2.11	0.11	0.002	0.26	1.84	0.04	0.27	0.91	0.10	0.705
DO (mg/L)	8.8	14.7	6.5	19.1	473.8	5.8	0.105	8.1	14.9	3.5	7.9	14.7	3.1	0.766
TOC (mg/L)	3.3	15.6	0.4	14.4	482.7	0.0	0.154	6.3	42.7	0.0	7.9	64.2	0.2	0.249
BOD ₅ (mg/L)	1.0	2.4	0.2	2.6	53.7	0.1	0.899	2.6	9.5	0.1	2.6	17.0	0.0	0.492
COD (mg/L)	2.8	8.0	1.0	9.3	108.2	0.9	0.067	87.7	1188.0	1.3	12.6	137.4	1.0	0.462
SS (mg/L)	16.6	158.0	2.0	733.0	25,242.0	4.0	0.000	297.0	3,302.0	4.0	357.4	4,499.0	0.0	0.358
T-N (mg/L)	1.1	2.4	ND ^d	14.0	266.1	0.3	0.000	2.3	57.4	ND	3.1	14.9	ND	0.321
T-P (mg/L)	0.05	0.16	0.01	2.76	66.80	0.01	0.001	0.44	2.91	0.02	0.35	1.77	ND	0.221
NO ₃ -N (mg/L)	0.9	2.4	ND	6.9	123.6	0.3	0.000	1.6	37.1	ND	2.5	14.8	ND	0.117
NH ₄ -N (mg/L)	0.0	0.1	ND	6.8	141.9	ND	0.613	0.3	20.2	ND	0.2	8.2	ND	0.739
PO ₄ -P (mg/L)	0.05	0.47	ND	0.54	10.20	ND	0.109	0.06	0.36	ND	0.10	1.61	ND	0.135
Cl ⁻ (mg/L)	25.9	203.1	3.4	29.4	183.6	6.0	0.053	24.9	336.1	0.1	30.3	325.1	2.2	0.686
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	563.4	3,539.5	1.9	448.0	4,258.6	0.2	0.405	1,123.4	37,295.6	0.9	356.4	5,795.0	2.2	0.313
Ca ²⁺ (mg/L)	14.0	27.9	3.9	27.5	174.8	7.5	0.001	16.7	40.1	2.8	24.4	70.6	8.3	0.000
Mg ²⁺ (mg/L)	3.7	8.8	1.7	7.4	51.2	2.0	0.008	5.3	18.3	1.1	7.2	21.6	1.5	0.005
Na ⁺ (mg/L)	7.6	17.4	1.6	15.7	101.0	3.9	0.006	8.5	21.3	0.8	12.6	55.8	3.7	0.000
K ⁺ (mg/L)	3.4	6.3	1.2	8.7	112.5	1.1	0.787	5.6	25.9	0.7	4.9	23.1	0.5	0.367
CN (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-e	0.00	0.04	ND	0.00	0.02	ND	0.205
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.4	12.0	ND	0.486	0.6	36.0	0.0	0.0	0.0	ND	0.380
HCO ₃ ²⁻ (mg/L)	81.6	189.1	42.7	95.7	262.3	36.6	0.330	86.3	268.4	18.3	106.9	225.7	30.5	0.000

표 3.4.138 미처리지구와 용인지구에서의 관개수 및 논담수의 수질 통계특성 (계속)

항목	관개수 수질							논담수 수질						
	YID (n=24)			UWD ^c (n=43)			p 값	YID (n=102)			UWD (n=70)			p 값
	평균	최대	최소	평균	최대	최소		평균	최대	최소	평균	최대	최소	
총대장균 (MPN 100/mL)	1.05E+04	2.42E+05	0.00E+00	7.72E+05	3.07E+07	ND	0.035	1.45E+04	2.76E+05	ND	8.00E+03	1.86E+05	ND	0.335
분변성 대장균 (MPN 100/mL)	5.04E+03	1.21E+05	ND	6.33E+02	1.87E+04	ND	0.771	3.85E+03	1.21E+05	ND	1.41E+01	5.48E+02	ND	0.123
E. coli (MPN 100/mL)	8.42E+00	2.00E+02	ND	1.07E+02	3.99E+03	ND	0.006	1.16E+01	4.10E+02	ND	8.80E+00	3.00E+02	ND	0.678
Al (mg/L)	0.28	0.51	0.01	8.58	232.10	0.03	0.009	11.88	86.09	0.10	5.79	50.48	0.02	0.056
Cu (mg/L)	0.01	0.06	ND	0.05	1.11	ND	0.818	0.03	0.07	0.01	0.02	0.07	ND	0.034
Ni (mg/L)	0.00	0.02	ND	0.01	0.26	ND	0.382	0.01	0.07	ND	0.01	0.07	0.00	0.038
Zn (mg/L)	0.02	0.05	ND	0.22	6.29	ND	0.226	0.05	0.39	ND	0.04	0.21	ND	0.369
As (mg/L)	0.00	0.01	ND	0.01	0.20	ND	0.467	0.00	0.03	ND	0.01	0.13	ND	0.220
Cd (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.385
Cr ⁶⁺ (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.385
Co (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.385
Pb (mg/L)	0.02	0.06	ND	0.03	0.44	ND	0.639	0.03	0.25	0.01	0.03	0.30	ND	0.615
Li (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.522	0.01	0.08	ND	0.00	0.04	ND	0.026
Mn (mg/L)	0.16	1.22	0.02	0.28	4.98	ND	0.082	0.46	5.73	ND	0.22	1.36	0.01	0.058
Hg (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-
Se (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-

a 용인지구

b 시료 수

c 미처리지구

d 검출되지 않음

e는 두 그룹의 표준편차가 0이라 유의성 분석을 수행할 수 없음

나. 시기별 농도 분석

본 연구에서는 미처리하수지구 및 용인지구에서의 시기별 수질 특성을 분석하기 위하여 그림 3.4.80 ~ 그림 3.4.82에서와 같이 월별 농도 변화를 도시하였다. 표 3.4.139와 그림 3.4.80 ~ 그림 3.4.82의 점선은 국내외 문헌에 의해 제시된 수질기준을 나타낸 것이다 (FAO, 1977; WHO, 1989; MOE, 2009).

EC는 USDA (1953)에 의하면 0.75 ds/m의 관개수는 대부분 작물재배에서 사용할 수 있는 것으로 보고되고 있으며, FAO (1977)에서는 평균농도가 0.70 ds/m 이하면 작물의 생산에 큰 영향이 없는 것으로 제시하고 있다 (김진호 등, 2003). 그림 3.4.80에서와 같이 영농초기인 5월과 6월에 미처리하수지구 관개수에서 EC의 월 평균농도가 0.48~0.70 ds/m로 비교적 높게 나타났으나 FAO 기준은 만족하는 것으로 나타났다. 하지만, 5월의 일부기간에서는 2.11 ds/m로 FAO 기준을 크게 초과하는 값이 나타나 영농초기에 주의가 필요할 것으로 사료된다.

관개수의 영양염류의 함량은 그림 3.4.80에서와 같이 미처리하수지구의 경우 5월에 T-N 31.3 mg/L, T-P 9.31 mg/L, 6월에 T-N 39.8 mg/L, T-P 9.81 mg/L로 영농초기에 높게 나타났다. 이충근 등 (2010)에 의하면 질소 과잉은 병해충 및 도복 발생 등으로 수량을 감소시킬 수 있으며 (Mills와 Jones, 1979), 완전미율이 뚜렷하게 감소하고 쌀 단백질함량이 유의하게 증가하여 미질을 저하시킬 수 있다 (강양순 등, 1997). Jeong 등 (2014)의 연구 결과에 따르면 영양물질의 함량이 높은 하수처리수를 관개하는 경우, 지하수관개 및 표준시비량으로 시비하는 경우에 비해 시비량을 20~50 % 줄여도 논벼의 수확량에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있다. 송정현 등 (2012)에 의하면 관개수 수질을 호소수 수질환경기준인 4등급을 초과하는 수준으로 관개하는 경우 배출부하량은 관행대비 T-N 9~65 %, T-P는 9~47 % 증가할 수 있으나, 수계 전체의 배출부하량에 저감에 있어 효과적인 것으로 보고하고 있다. 따라서, 영양물질의 농도가 높은 관개수를 이용하는 경우 표준시비량 보다 적은 양의 시비를 하는 것은 수확량 확보뿐만 아니라, 논에의 정화효과에 따른 수질이 개선된 물이 수역으로 들어가 하천수질을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다 (Yoon 등, 2003; Jang 등, 2010; 성충현 등, 2011).

논담수의 T-N 및 T-P 농도 변화는 미처리하수지구 및 용인지구에서 다른 양상으로 나타났다. 우리나라에서는 일반적으로 영양물질의 담수 농도는 썩레질에 의한 토양의 교란과 시비활동 등에 의해 영양물질의 농도가 영농초기에 높게 관측되고, 7~8월에는 강우에 의해 희석되어 농도가 낮아지는 것으로 보고되고 있다 (Yoon 등, 2003; 송정현 등, 2013b). 본 연구의 대비구인 용인지구에서는 이러한 일반적인 담수 농도 특성을 반영하여 T-N의 경우 6월에 최대 57.4 mg/L까지 관측되었고 7월부터는 월 평균 1.2~1.8 mg/L의 범위로 낮게 나타났다. 미처리하수지구의 월 평균 담수농도는 영농기 전체 걸쳐 비교적 고르게 나타났으며, T-N의 경우 2.6~3.4 mg/L, T-P의 경우 0.16~0.60 mg/L의 범위를 보였다. 이는 고농도의 영양물질이 함유된 관개수가 지속적으로 유입되었기 때문으로 사료된다.

그림 3.4.81은 미처리하수지구 및 용인지구에서의 TC, FC, 그리고 E. coli수의 월별 변화를 관개수와 논담수로 구분하여 보여주고 있다. 국내의 하수처리수 재이용 권고기

준에서는 하수처리수를 농업용수로 이용 시 TC에 대하여 200 MPN 100 ml⁻¹이하로 제시하고 있으며 (환경부, 2009), 본 연구에서의 미처리하수지구의 관개수 및 논담수는 영농기 전체에 걸쳐 기준을 초과하는 것으로 나타났고, 대비구인 용인지구도 일부 기간에서 관개수 및 논담수의 TC 농도가 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 정광욱 등 (2005) 에 따르면 TC에 대한 기준인 200 MPN 100 ml⁻¹이하는 일반 자연계에서 쉽게 접할 수 있는 수치이며, 위해성 평가 등을 통한 역학조사가 부족한 상태에서 제안되었기 때문에 현실적인 기준이라기에 무리가 있다고 하였다. 본 연구의 미처리하수지구에서의 관개수 TC농도는 영농초기에 10⁵~10⁸ MPN 100 ml⁻¹의 범위로 기준을 크게 벗어난 값을 보이고 있으며, Jang 등 (2013)에 의한 하수재이용 관개수 관측치 중 최댓값인 5.24×10⁶ MPN 100 ml⁻¹을 넘는 값이 나타나기도 하였다. 따라서, TC 기준에 대한 재평가가 필요함에도 불구하고 미처리하수지구의 5~6월 TC 농도는 상당히 높은 것으로 사료되며, 영농작업 시 각별한 주의가 필요하다. WHO (2006)에서는 생식작물의 관개용수로는 생물학적 처리와 함께 소독처리를 필요로 하며, 대장균 잔류농도를 보다 철저히 통제하는 것이 필요하다고 제안하고 있으며, 이한필 등 (2009)은 영농초기 관개 이후 최소 24시간 경과 후 작업에 임하는 것이 위험성이 낮다고 제안하고 있다. FC 농도는 미처리하수지구 관개수에서 5~6월에 다른 기간에 비해 높게 나타났으나 WHO (1989)에서 제시한 기준인 10³~10⁵ MPN 100 ml⁻¹의 범위를 초과하지는 않았다. E. coli 농도 또한 미처리하수지구 관개수에서 영농초기에 높게 나타났으나, Jang 등 (2013)의 관행 관개수의 관측 범위인 0~4,100과 유사하게 나타나 일반적인 수준으로 사료된다.

중금속 성분인 Cu와 Pb는 미처리하수지구 관개수에서 6월에 우리나라 하수재이용 수질기준 (환경부, 2009)을 초과하는 것으로 나타났으며, Zn은 6월 평균농도는 수질기준 이하이나 일부 값은 기준을 넘어서는 것으로 나타났다. Al은 5월과 6월에 수질기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 담수에서도 6월, 8월, 9월에 기준치 이상의 값을 나타내었다.

표 3.4.139 선행연구에서의 수질기준

항목	EC (ds/m)	분변성 대장균 (MPN 100 ml ⁻¹)	총 대장균 (MPN 100 ml ⁻¹)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Al (mg/L)
수질 기준	0.7	103~105	200	0.2	0.1	2.0	5.0
참고문헌	FAO (1977)	WHO (1989)	환경부 (2009)				

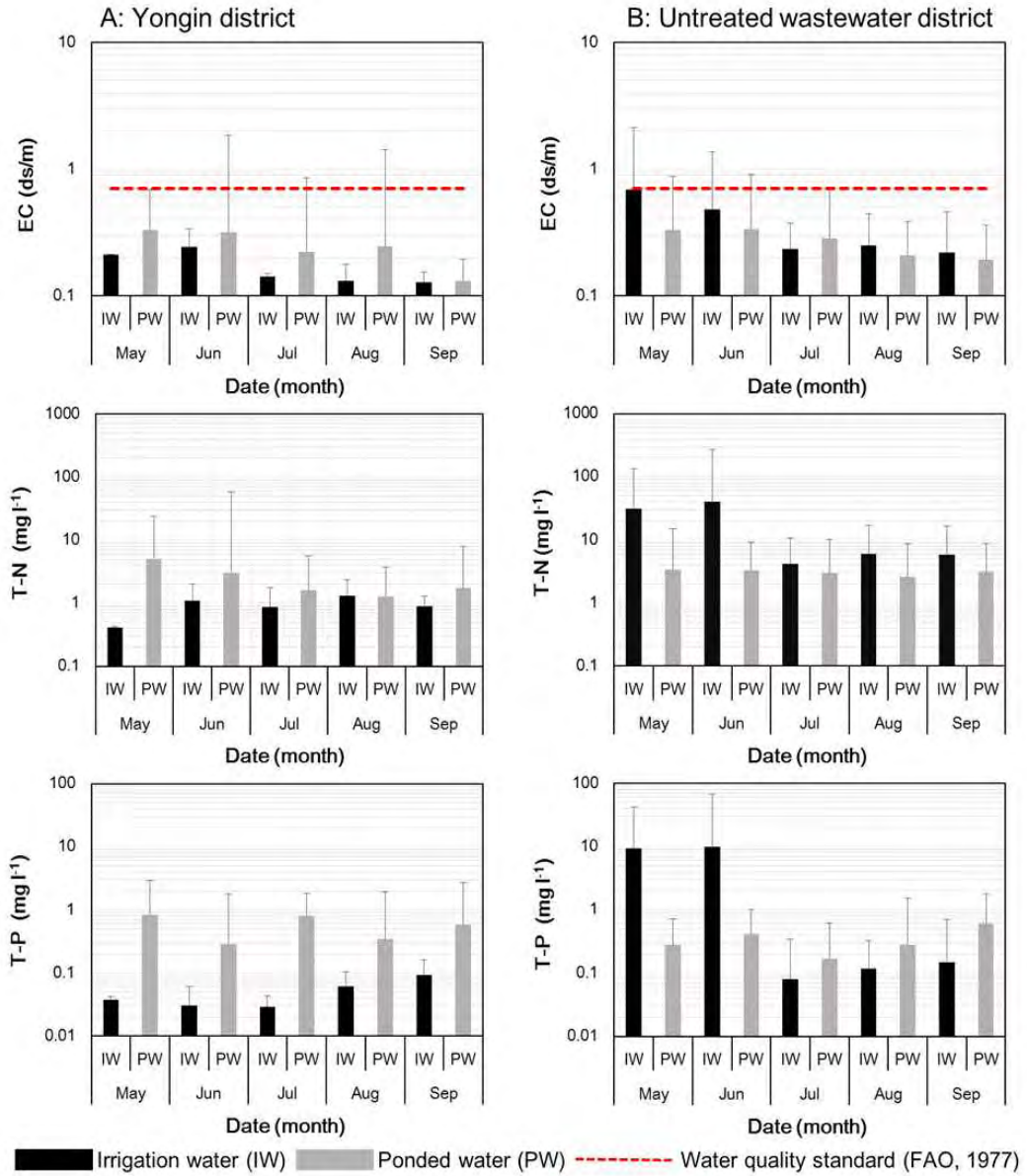


그림 3.4.81 각 지구별 관개수 및 논담수의 EC, T-N, 그리고 T-P 월 평균 농도 비교

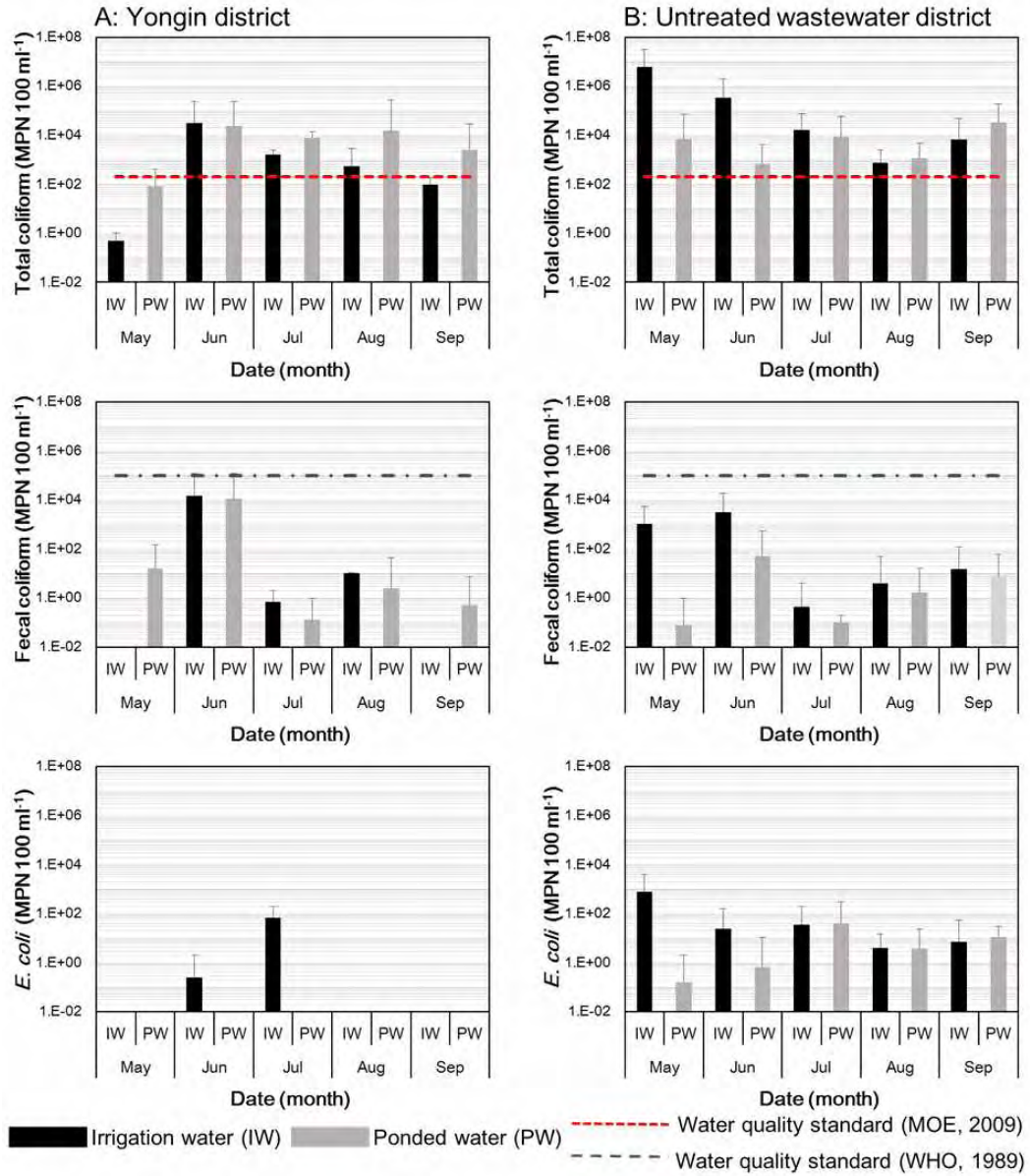


그림 3.4.82 각 지구별 관개수 및 논담수의 총 대장균 (TC), 분변성 대장균 (FC), 그리고 *E. coli* 월 평균 농도 비교

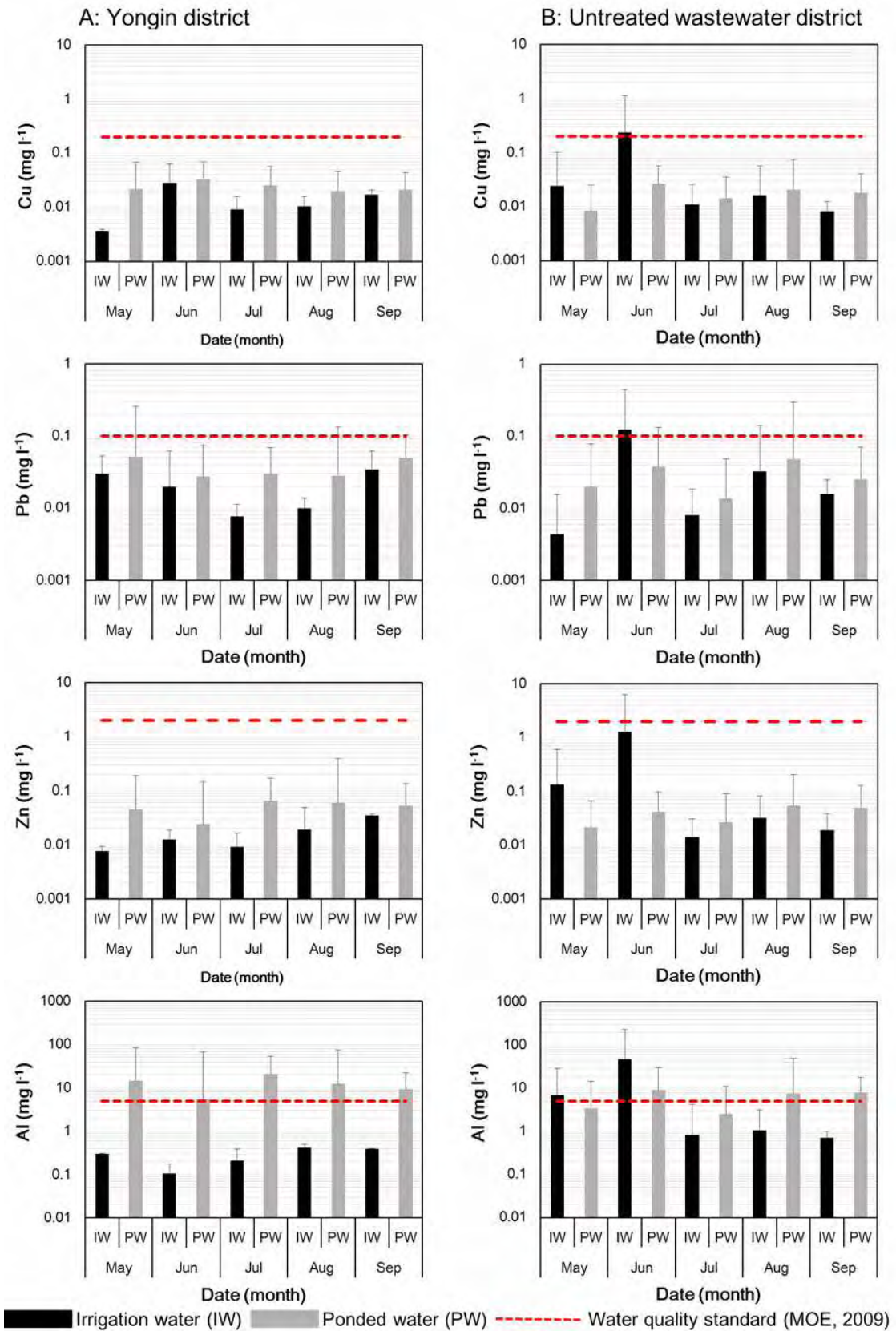


그림 3.4.83 각 지구별 관개수 및 논담수의 Cu, Pb, Zn, 그리고 Al 월 평균 농도 비교

6.2. 토양 특성 분석

가. 평균함량 분석

표 3.4.140은 용인지구와 미처리하수지구의 토양 화학특성 분석결과를 비교한 것이다. 분석결과, 모든 조사항목의 평균값은 미처리하수지구가 용인지구에 비해 높게 나타났다. pH, T-P, Cd, 그리고 총대장균수 항목은 두 지구간 유의한 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$). TOC는 미처리하수지구가 3.7%로 용인지구의 3.2%보다 높게 나타났다 ($p < 0.05$), 두 지구는 전국 평균값인 2.6%와 RDA (2010)에서 제시한 적정범위인 2.5~3.0%를 초과하는 것으로 나타났다. CEC는 미처리하수구와 용인지구에서 각각 $15.7 \text{ cmol kg}^{-1}$, $10.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ 으로 미처리하수구에서 더 높게 나타났다 ($p < 0.001$). CEC는 작물의 토양 중금속 흡수와 관계가 있으며, CEC가 증가하면 작물의 중금속 흡수속도가 줄어드는 것으로 보고되고 있다 (Haghir, 1974; Gupta 등, 2008). 중금속 성분 중 Pb, Zn, 그리고 Cu는 미처리하수지구와 용인지구에서 각각 24.9 mg kg^{-1} , 69.7 mg kg^{-1} , 17.9 mg kg^{-1} , 그리고 18.3 mg kg^{-1} , 50.3 mg kg^{-1} , 14.8 mg kg^{-1} 으로 미처리하수지구에서 더 높게 나타났다 ($p < 0.05$), 토양환경보전법의 토양환경오염우려기준을 초과하지는 않았다. Cd, Pb, Zn, 그리고 Cu 성분에 대한 관개수 농도와 토양함량을 비교하면, 미처리하수지구 관개수에서 영농초기에 비교적 높게 나타난 Pb, Zn, 그리고 Cu 성분은 토양함량의 경우에서도 전국 평균을 상회하여 나타났으며, 관개수에서 검출되지 않았던 Cd는 토양함량의 경우 미처리하수지구에서 전국평균보다 낮게 나타났다. 이를 통해, 미처리하수지구의 토양에서 높게 나타나는 중금속 함량은 관개수 농도와 개연성이 있을 것으로 사료된다 (Jung과 Thornton, 1997). 하지만, 관개수에서 검출되지 않거나 매우 낮은 함량을 보이는 중금속 성분이 토양의 지역적 특성에 따라 전국 논 오염도를 초과하는 경우도 보고되고 있어 (Jeong 등, 2013), 장기간 모니터링을 통한 평가가 필요할 것이다.

표 3.4.140 시험지구 논에서의 토양 화학 특성

항목 (단위)		pH (1:5)	TOC (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	T-N (mg kg ⁻¹)	T-P (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	총대장균 (MPN 100 ml ⁻¹)
YID ^a	평균	5.9	3.2	10.6	1646.8	555.5	0.49	18.3	50.3	14.8	2.22E+05
	최대	7.6	4.8	15.6	2453.0	838.7	1.23	31.9	90.1	20.3	6.15E+05
	최소	4.7	1.6	6.7	708.0	287.8	0.14	13.4	27.2	10.1	1.28E+04
UWD ^b	평균	5.9	3.7	15.7	1874.1	632.1	0.50	24.9	69.7	17.9	2.40E+05
	최대	7.0	4.6	20.2	2158.0	1008.3	2.10	46.8	109.3	32.3	1.14E+06
	최소	4.6	1.9	14.2	1423.0	403.7	0.13	13.7	48.7	12.2	5.21E+04
p 값		0.590	0.048	0.002	0.017	0.324	0.222	0.007	0.000	0.034	0.685
전국 평균		5.9 ^c	2.6 ^c				0.87 ^d	22.9 ^d	67.4 ^d	17.7 ^d	
토양오염기준 ^e							4.0	200.0	300.0	150.0	

a 용인지구
b 미치리지구
c 강성수 등 (2012)에 의해 보고됨
d 환경부 (2013)에 의해 보고됨
e 는 토양환경보전법에 의해 시행되고 있음

나. 시기별 함량 분석

그림 3.4.83은 미처리하수지구 및 용인지구에서의 TOC, T-N, T-P, Cd, Pb, Zn, 그리고 Cu 항목에 대한 시기별 토양함량 변화를 보여주고 있으며, 실선 및 점선은 각각 미처리하수지구와 용인지구의 시기별 추세선을 나타낸 것이다. 용인지구에서는 TOC의 경우 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났고 ($r = 0.914$, $p < 0.05$), Pb의 경우 점차 감소하는 것으로 나타났다 ($r = -0.802$, $p < 0.05$). 미처리하수지구에서는 모든 분석 항목에 대해 추세선상으로 특별한 경향이 나타나지 않았다. 하지만, 관개수에서 높은 농도로 나타났었던 Pb, Zn, 그리고 Cu 항목의 토양함량은 2012년 6월에 가장 높게 나타난 이후 9월까지 점차 감소하였으며, 2012년 11월에 다소 상승하는 경향이 나타났다. Jung과 Thornton (1997)의 광산 부근 논에서의 Cd, Pb, Zn, 그리고 Cu 모니터링 결과에 의하면, 이양 후 30일의 관개수 농도가 이양 후 80일에 비해 높게 나타나며, 토양은 이양 후 30일과 150일의 함량이 80일의 함량에 비해 높게 나타나는 것으로 보고하고 있다. 더불어 Jung과 Thornton (1977)은 이양 후 30일의 토양함량이 높게 나타난 원인은 이 시기의 관개수 농도가 유의하게 높게 나타난 것과 연관이 있을 것이라고 고찰하고 있으며, 본 연구에서도 영농초기의 상대적으로 높게 나타난 Pb, Zn, 그리고 Cu 관개수 농도가 같은 시기의 토양함량에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

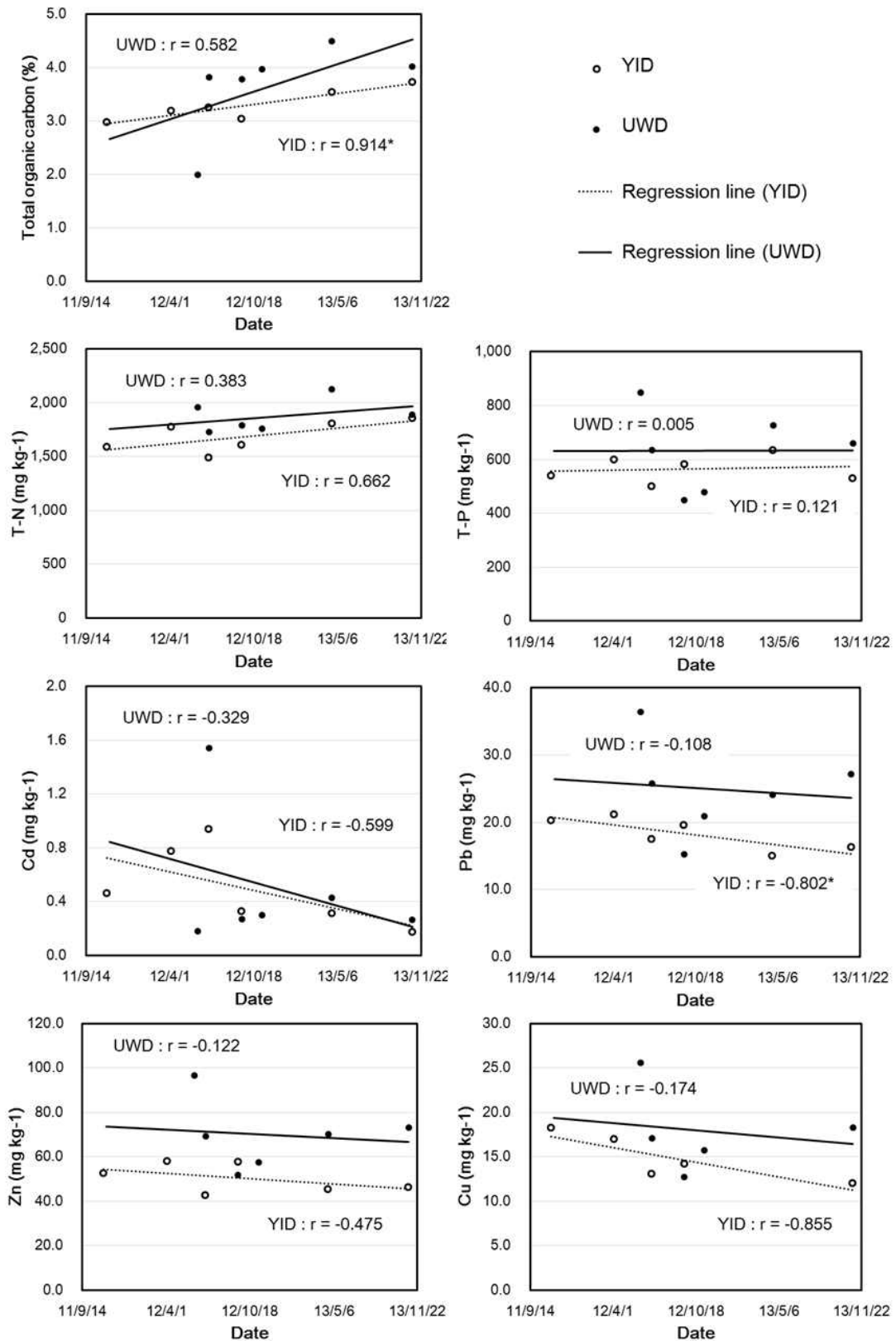


그림 3.4.84 처리구별 유기물, 영양물질, 그리고 중금속의 시기별 변화. UWD와 YID는 각각 미처리지구와 용인지구를 의미함.

7. 농업재이용 시스템 적용에 따른 논에서의 수질 영향 분석

본 절에서는 하수처리수의 간접재이용을 위해 개발한 농업재이용 시스템을 적용하여 논에서 얻은 수질 모니터링 결과를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 농업재이용 시스템은 수원시 환경사업소에 설치하였으며 2013년 운전을 수행하였다. 통계분석을 위해 필요한 자료는 농업재이용 시스템을 적용하기 전인 2012년과 적용 후인 2013년, 2014년의 병점 간접재이용지구내에 위치하는 논 포장의 관개수 및 담수를 모니터링 한 결과를 사용하였다. 담수 수질 항목이 정규성을 만족하는 경우에는 독립표본 t-검정 (independent sample t-test), 정규성을 만족하지 않는 경우에는 비모수 통계검정인 맨-휘트니 검증 (Mann-Whitney U test)을 통해 각 항목에 대한 통계적 유의성을 평가하였다.

7.1. 관개수질

표 3.4.141은 병점 재이용지구의 농업재이용 시스템 적용 전후에 대한 통계적 결과를 수질 분석 항목별로 나타낸 것이다. 각 기간의 관개수 수질의 통계분석을 수행함에 있어 pH, EC, DO, TOC, BOD, T-N, T-P, PO₄-P, Cl⁻, Ca²⁺, Na⁺ 항목은 정규성을 만족하여 독립표본 t-검정을 실시하였으며, 그 외 수질항목은 정규성을 만족하지 않고 샘플의 수가 30개 미만으로 적어 맨-휘트니 검증을 실시하였다. 분석 결과, 16개 항목 중 TOC, BOD, PO₄-P의 3개 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 총대장균수 함량은 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으나, 시스템 설치 전에 비해 현저히 감소함을 알 수 있다.

표 3.4.141 병점 재이용지구 논 관개수 수질 항목별 통계분석 결과

항목	평균 ± 표준편차		통계 분석	p-value
	시스템 적용 전	시스템 적용 후		
pH	7.32±0.57	7.18±0.53	t ^a	0.630
EC (dS m ⁻¹)	0.76±0.21	0.73±0.13	t	0.703
DO (mg L ⁻¹)	6.80±0.99	5.78±2.75	t	0.327
TOC (mg L ⁻¹)	3.69±2.41	7.34±2.16	t	0.007**
BOD (mg L ⁻¹)	0.81±0.68	3.50±2.64	t	0.020*
COD (mg L ⁻¹)	5.09±3.51	9.36±7.61	M ^b	0.055
SS (mg L ⁻¹)	75.71±129.66	1057.22±2983.45	M	0.758
T-N (mg L ⁻¹)	7.20±1.08	10.32±4.74	t	0.088
T-P (mg L ⁻¹)	0.87±0.56	1.09±0.71	t	0.513
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	7.17±1.08	3.61±3.65	M	0.071
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	1.25±0.84	0.39±0.42	t	0.018*
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	95.24±40.33	95.74±13.25	t	0.976
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	45.46±16.93	36.66±7.07	t	0.235
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	9.29±7.86	5.34±0.95	M	0.536
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	58.90±25.02	65.77±11.45	t	0.519
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	19800±44682	2983±4620	M	0.210

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test

Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

7.2. 논 담수

표 3.4.142는 병점 재이용지구의 농업재이용 시스템 적용 전후에 대한 통계적 결과를 수질 분석 항목별로 나타낸 것이다. 각 기간의 담수 수질의 통계분석을 수행함에 있어 pH 항목은 정규성을 만족하여 독립표본 t-검정을 실시하였으며, 그 외 수질항목은 정규성을 만족하지 않아 맨-휘트니 검증을 실시하였다. 분석 결과, 16개 항목 중 EC, DO, BOD, COD, NO₃-N, PO₄-P, Ca²⁺의 7개 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 양이온 중 Mg²⁺, Na⁺은 유의한 차이를 나타내지 않는 것으로 분석되었다. 특히, 담수 수질 항목 중 DO, BOD, COD, NO₃-N, PO₄-P, Ca²⁺의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났다.

표 3.4.142 병점 재이용지구 논 담수 수질 항목별 통계분석 결과

항목	평균 ± 표준편차		통계 분석	p-value
	시스템 적용 전	시스템 적용 후		
pH	7.07±0.39	7.28±0.49	t ^a	0.053
EC (dS m ⁻¹)	0.93±0.43	0.77±0.26	M ^b	0.008**
DO (mg L ⁻¹)	7.90±3.22	4.07±2.30	M	0.000***
TOC (mg L ⁻¹)	12.65±13.67	11.42±4.70	M	0.099
BOD (mg L ⁻¹)	2.70±2.34	7.32±5.76	M	0.000***
COD (mg L ⁻¹)	12.38±9.64	24.26±19.12	M	0.000***
SS (mg L ⁻¹)	343.89±463.75	533.15±527.70	M	0.082
T-N (mg L ⁻¹)	8.41±9.58	7.48±5.50	M	0.504
T-P (mg L ⁻¹)	2.07±1.85	1.78±1.61	M	0.504
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	7.47±8.32	1.43±2.62	M	0.000***
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.96±0.86	0.38±0.62	M	0.000***
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	97.38±68.43	110.16±32.47	M	0.387
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	55.94±30.84	38.32±12.69	M	0.000***
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	8.89±5.73	8.98±4.55	M	0.917
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	84.38±43.69	74.53±19.21	M	0.092
Total coliform (MPN 100mL ⁻¹)	49485±182622	5215±11104	M	0.878

^a Indicates independent samples t-Test

^b Indicates independent samples Mann-Whitney U Test

Significantly different at *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

8. 요약 및 결론

본 절에서는 하수처리수의 농업용수 간접재이용과 미처리하수의 농경지 유입에 따른 수질 및 토양환경 영향을 파악하기 위하여 3장에서 선정된 용인청정지구, 오산 간접재이용지구, 병점 간접재이용지구, 그리고 미처리지구 (호련지구, 수화지구, 장전지구)의 수질 및 토양 모니터링을 실시하였다. 그리고 용인 청정지구의 수원이 되는 이동저수지와 병점, 오산 간접재이용지구의 수원이 되는 하수처리장 방류수, 황구지천 및 오산천 등 하천수 수질을 분석하였고, 각 지구별 시험포장의 논 담수와 유입수의 수질, 토양성분 등 모니터링 결과 값을 비교 분석하였다. 본 절에서 다룬 주요 결과는 다음과 같다.

① 용인청정지구와 간접재이용 지구의 수원이 되는 이동저수지와 수원시, 오산시 환경사업소 방류수 수질은 각각 호소 농업용수 수질기준과 공공하수처리시설의 방류수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

② 황구지천과 오산천의 수질 결과를 지점별 평균값으로 나타내었다. pH는 황구지천의 경우 6.44 ~ 8.20, 오산천의 경우 6.22 ~ 8.50의 범위를 가지며 대체로 중성에 가까운 값을 보인다. 두 지역 모두 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족한다. EC는 황구지천의 경우 0.38 ~ 2.35 dS/m, 오산천의 경우 0.22 ~ 12.52 dS/m의 범위를 가진다. SS는 황구지천에서 평균 20 mg/L, 오산천에서 평균 16 mg/L 전후의 값을 보이며, 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족한다. T-P는 황구지천의 경우 0.130 ~ 3.566 mg/L, 오산천의 경우 0.083 ~ 3.506 mg/L의 범위를 보이며, 두 지역 모두 하천 농업용수 수질기준인 0.3 mg/L를 초과하는 것으로 측정되었다.

③ 용인 청정지구의 유입수 수질 분석 결과 pH는 2012년 7.50, 2013년 7.34, 2014년 7.51로 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하였고, EC는 2012년 0.17, 2013년 0.18, 2014년 0.21 dS/m로 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 낮아 양호한 것으로 나타났다. COD는 2012년 2.60, 2013년 3.16, 2014년 3.08 mg/L로, SS는 2012년 19, 2013년 12, 2014년 22 mg/L로 각 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L, 100mg/L 이하를 만족하였다.

④ 오산 간접재이용지구의 유입수 수질 분석 결과 pH는 2012년 7.46, 2013년 7.80, 2014년 7.33로 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하였고, EC는 2012년 1.01, 2013년 1.10, 2014년 0.91 dS/m로 FAO 기준인 0.70 dS/m을 초과하는 것으로 나타났다. COD는 2012년 6.21, 2013년 7.84로 2014년에 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, SS는 2012년 61, 2013년 33, 2014년 78 mg/L로 호소 농업용수 수질기준인 100mg/L 이하를 만족하였다.

⑤ 병점 간접재이용지구의 유입수 수질 분석 결과 pH는 2012년 7.31, 2013년 7.26,

2014년 7.08로 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하였고, EC는 2012년 0.62, 2013년 0.75, 2014년 0.68 dS/m로 2013년에 FAO 기준인 0.70 dS/m를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. COD는 2012년 6.55, 2013년 10.56, 2014년 6.94 mg/L로 2013년에 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, SS는 2012년 71, 2013년 77, 2014년 3018 mg/L로 2014년에 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

⑥ 미처리지구의 유입수 수질 분석 결과 pH는 2012년에 호련지구 7.41, 수화지구 7.38, 장전지구 7.52로 나타났으며, 2013년은 각각 7.27, 7.32, 7.44, 2014년은 7.32, 7.11, 7.26로 매년 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하였고, EC는 2012년에 호련지구 0.17 dS/m, 수화지구 0.32 dS/m, 장전지구 0.25 dS/m로 나타났으며, 2013년은 각각 0.15, 0.27, 0.26 dS/m로, 2014년은 0.21, 0.39, 0.37 dS/m로 매년 FAO 기준인 0.70 dS/m보다 낮은 것으로 나타났다. COD는 2012년에 호련지구 8.14 mg/L, 수화지구 4.95 mg/L, 장전지구 3.38 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 2.45, 11.29, 10.77 mg/L로, 2014년은 6.02, 72.65, 22.85 mg/L로 2012년 호련지구, 2013 ~ 2014년 수화지구와 장전지구에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L보다 높은 것으로 나타났다. SS는 2012년에 호련지구 494 mg/L, 수화지구 67 mg/L, 장전지구 56 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 25, 311, 188 mg/L로, 2014년은 26, 4155, 994 mg/L로 2012년 호련지구, 2013 ~ 2014년 수화지구와 장전지구에서 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하지 않는 것으로 나타났다.

⑦ 용인 청정지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년 6.77 ~ 7.34, 2013년 7.13 ~ 7.39, 2014년 7.08 ~ 7.39로 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났으며, EC는 2012년 0.224 ~ 0.36 dS/m, 2013년 0.16 ~ 0.26 dS/m, 2014년 0.20 ~ 0.30 dS/m로 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 낮아 양호한 것으로 나타났다. COD는 2012년 6.87 ~ 20.99 mg/L, 2013년 7.01 ~ 41.60 mg/L, 2014년 5.14 ~ 8.01 mg/L로 2012 ~ 2014년 YIP#02, 2014년 YIP#03을 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 초과하였다. SS는 2012년 175 ~ 370 mg/L, 2013년 43 ~ 1143 mg/L, 2014년 37 ~ 585 mg/L로 2013년 YIP#02, 2014년 YIP#03, 05을 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L를 초과하였다.

⑧ 오산 간접재이용지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년 7.03 ~ 7.32, 2013년 7.40 ~ 7.78, 2014년 7.12 ~ 7.88로 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났으며, EC는 2012년 1.01 ~ 1.20 dS/m, 2013년 0.89 ~ 1.33 dS/m, 2014년 0.81 ~ 1.22 dS/m로 모든 포장에서 FAO 기준인 0.70 dS/m 보다 높은 값을 나타내었다. COD는 2012년 9.32 ~ 18.15 mg/L, 2013년 11.09 ~ 30.61 mg/L, 2014년 7.64 ~ 13.65 mg/L로 2014년 OSP#05를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 초과하였다. SS는 2012년 257 ~ 545

mg/L, 2013년 77 ~ 693 mg/L, 2014년 60 ~ 238 mg/L로 2013년 OSP#04, 05, 2014년 OSP#01, 04를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L를 초과하였다.

⑨ 병점 간접재이용지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년 6.84 ~ 7.26, 2013년 6.87 ~ 7.40, 2014년 7.19 ~ 7.44로 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하는 것으로 나타났으며, EC는 2012년 0.54 ~ 0.86 dS/m, 2013년 0.70 ~ 1.08 dS/m, 2014년 0.59 ~ 0.74 dS/m로 2012년 BJP#03, 04를 제외한 모든 시험포장에서 FAO 기준인 0.70d S/m 보다 높은 값을 나타내었다. COD는 2012년 7.70 ~ 17.14 mg/L, 2013년 22.64 ~ 31.13 mg/L, 2014년 8.10 ~ 63.36 mg/L로 2012년 BJP#03을 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 초과하였다. SS는 2012년 79 ~ 553 mg/L, 2013년 95 ~ 951 mg/L, 2014년 86 ~ 2396 mg/L로 2012년 BJP#03, 2013년 BJP#04를 제외한 모든 시험포장에서 호소 농업용수 수질기준인 100 mg/L를 초과하였다.

⑩ 미처리지구의 논 담수 수질 분석 결과 pH는 2012년에 호련지구 7.37, 수화지구 7.31, 장전지구 7.39로 나타났으며, 2013년은 각각 6.94, 7.29, 7.16, 2014년은 7.20, 7.26, 7.57로 매년 하천 농업용수 수질기준인 6.0 ~ 8.5를 만족하였고, EC는 2012년에 호련지구 0.20 dS/m, 수화지구 0.39 dS/m, 장전지구 0.25 dS/m로 나타났으며, 2013년은 각각 0.16, 0.23, 0.16 dS/m로, 2014년은 0.24, 0.33, 0.56 dS/m로 매년 FAO 기준인 0.70 dS/m보다 낮은 것으로 나타났다. COD는 2012년에 호련지구 11.29 mg/L, 수화지구 10.00 mg/L, 장전지구 9.88 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 47.51, 4.65, 5.96 mg/L로, 2014년은 3.99, 10.11, 15.71 mg/L로 2013년 수화지구와 장전지구, 2014년 호련지구에서만 호소 농업용수 수질기준인 8 mg/L를 만족하였다. SS는 2012년에 호련지구 334 mg/L, 수화지구 273 mg/L, 장전지구 477 mg/L로 나타났으며, 2013년은 각각 1502, 81, 42 mg/L로, 2014년은 46, 242, 1447 mg/L로 2013년 수화지구와 장전지구, 2014년 호련지구에서만 하천 농업용수 수질기준인 100 mg/L 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

⑪ 용인 청정지구의 2012년 논 토양 화학성분 분석 결과, 총질소(T-N), 총인(T-P), NH₄-N, P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), EC와 NH₄-N은 표층(0 cm), NO₃-N는 40 cm에서 가장 높은 값을 보였다. 2014의 경우, 총질소(T-N), 총인(T-P), P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), EC는 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다. NH₄-N 및 NO₃-N의 경우는 대부분이 검출되지 않았다.

⑫ 오산 간접재이용지구의 2012년 논 토양 화학성분 분석 결과, EC, 총질소(T-N), 총인(T-P), NH₄-N, P₂O₅ 및 유기물함량은 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 표층으로 갈수록 낮게 측정되었다. 2014년의 경우, 총질소(T-N), 총인(T-P), P₂O₅ 및

유기물함량은 포장마다의 차이는 있었지만 대체로 표층으로 갈수록 높게 측정되었으며, pH는 심층(80 cm), EC는 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우는 대부분이 검출되지 않았다.

⑬ 병점 간접재이용지구의 2012년 논 토양 화학성분 분석 결과, EC, 총질소(T-N), 총인(T-P), P_2O_5 및 유기물함량은 표층(0 cm)에 가까울수록 증가하는 경향을 보였으며, pH는 60 cm, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 표층(0 cm)에서 가장 높은 값을 보였다.

⑭ 미처리지구의 2012년 논 토양 화학성분 분석 결과, 호련, 수화 및 장전지구에 위치한 시험포장의 논 토양에서 검출된 pH는 표층(0 cm)에 가까워질수록 높은 값을 보였다. 또한, EC, $\text{NH}_4\text{-N}$, 총인(T-P) 및 P_2O_5 는 0cm, 총질소(T-N) 및 유기물함량은 20 cm, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 40cm에서 가장 높은 값을 보였다.

⑮ 용인 청정지구의 2012년, 2013년, 2014년 논 토양 중금속 함량 분석 결과, 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 토양오염물질 함량 분석 결과 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았으며, 니켈을 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 논 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr^{6+})은 샘플링 시 검출되지 않았다.

⑯ 오산 간접재이용지구의 2012년 논 토양 중금속 함량 분석 결과, 아연(Zn), 비소(As), 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도와 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으며, 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)은 전국 및 경기도 논 오염도에 비해 낮게 검출되었고 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았다. 2013년의 경우, 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 비소(As)와 수은(Hg)은 경기도 및 전국 논 오염도보다 높게 검출되었다. 2014년의 경우, 니켈(Ni)과 납(Pb)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 아연(Zn)은 경기도 논 오염도 및 전국 논 오염도보다 높았다. 니켈과 수은을 제외한 다른 토양오염물질은 경기도 및 전국 논 오염도보다 낮게 검출되었다. 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았으며, 수은(Hg)은 일부에서만 검출되었다.

⑰ 병점 간접재이용지구의 2012년 논 토양 중금속 함량 분석 결과, 아연(Zn), 비소(As), 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도와 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으며, 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)은 전국 및 경기도 논 오염도에 비해 낮게 검출되었고 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았다. 2013년의 경우, 4개(1번 ~ 4번)의 시험포장에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 아연(Zn)과 수은(Hg)은 경기도 논 오염도 및 전국

는 오염도보다 높게 검출되었다. 병점재이용지구의 5번 시험포장(2013년 10월 7일)에서는 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 6가크롬(Cr^{6+})은 샘플링 시 검출되지 않았다. 2014년의 경우, 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 구리(Cu)와 니켈(Ni)은 경기도 논 오염도보다는 낮게 검출되었으나 전국 논 오염도보다는 높았다. 아연(Zn)과 수은(Hg)은 경기도 논 오염도 및 전국 논 오염도보다 높게 검출되었다. 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았다.

⑱ 미처리지구의 2012년 논 토양 중금속 함량 분석 결과, 호련, 수화 및 장전지구 모두 카드뮴(Cd)을 제외한 다른 주요 중금속 함량이 경기도 및 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났으며, 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았다. 주요 중금속 중 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb)은 경기도 및 전국 논 오염도보다는 높았으나 토양환경보전법에 제시된 토양오염우려기준에는 미치지 않았으며, 비소(As)와 니켈(Ni)은 경기도 및 전국 논 오염도뿐만 아니라 토양오염우려기준도 초과하는 것으로 나타났다. 2013년의 경우, 비소(As)를 제외한 다른 주요 중금속 함량이 토양오염우려기준에는 미치지 않았다. 납(Pb)과 니켈(Ni)은 전국 논 오염도보다는 높게 검출되었으나 경기도 논 오염도보다는 낮았다. 수은(Hg)은 경기도 및 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났으며, 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았다. 2014년의 경우, 카드뮴(Cd)을 제외한 다른 주요 중금속 함량이 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났다. 아연(Zn)과 수은(Hg)은 경기도 및 전국 논 오염도를 초과하는 것으로 나타났다. 비소(As)는 경기도 및 전국 논 오염도뿐만 아니라 토양오염우려기준도 초과하는 것으로 나타났으며, 다른 주요 중금속 함량은 토양오염우려기준에 미치지 않는 것으로 나타났다. 6가크롬(Cr^{6+})은 검출되지 않았다.

⑲ 하수재이용 구역의 관개용수로 사용되는 하천의 수질 모니터링을 실시하고, 농업용수 수질기준 초과여부 분석, 농도지속곡선을 이용한 초과확률 분석 및 수질 모델링 결과와의 비교 등의 방법을 통해 하수재이용 구역 관개하천의 수질 특성을 분석하였다. 오산천을 대상으로 2012년 2월부터 2013년 1월까지 1년간 월 1회 이상 수질 샘플링을 실시한 결과 COD, T-P, As, Pb, Cu 등의 항목에서 농업용수 및 농업용 하수재이용 수질기준을 초과하는 것으로 나타났다. 총대장균군수에 대하여 지점별 농도지속곡선을 작성하고, 초과확률 분석 및 수질기준과의 비교를 통해 간접재이용 구역인 오산천의 수질 특성을 분석한 결과 수질기준에 대하여 약 25 %, 수질권고기준에 대하여 약 92 %의 초과확률을 가지는 것으로 나타났다. 오산시 환경사업소의 상·하류 농도지속곡선 작성 결과를 살펴보면, BOD의 경우 두 지점에서 모두 수질기준 및 수질권고기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. SWAT 모형과 QUALKO2 모형을 연계하여 오산천 유역을 대상으로 관개기 순별 수질을 모델링 결과 하수처리장 방류수가 합류하는 지점에서 T-N, T-P, 대장균 등의 농도가 급격히 증가하고, 하수처리장 방류구로부터 최하류부까지 농도가 미미하게 감소하는 것으로 나타났다.

㉔ 관개수 모니터링 결과를 이용하여 통계분석을 실시한 결과, 2012년의 경우 37가지 항목 중, EC, COD, SS, T-N, T-P, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, HCO_3 , Ni 등 14가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 관개수 중 염분 함량을 대변하는 전기전도도 (EC) 및 치환성 양이온 (Ca, Mg, Na)의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났으며, 하수처리장 방류수에 많이 함유된 것으로 알려진 영양염류 또한 유의한 차이를 보였다. 2013년에는 19가지 항목 중 pH, EC, TOC, BOD, COD, SS, T-N, T-P, Cl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 등 12가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 관개수 중 염분 함량을 대변하는 전기전도도 (EC), TOC, COD, Cl, 치환성 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+)의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났으며, 하수처리장 방류수에 많이 함유된 것으로 알려진 영양염류 또한 유의한 차이를 보였다. 2014년에는 19가지 항목 중 EC, TOC, BOD, COD, SS, T-P, Cl, Ca^{2+} , Na^+ 등 9가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 관개수 중 BOD, COD, T-P, 치환성 양이온 (Na^+)의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났다.

㉕ 논 담수 모니터링 결과를 이용하여 통계분석을 실시한 결과, 2012년의 경우 37가지 항목 중, EC, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Zn 등 11가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 관개수에서와 같이 논담수 중 전기전도도 (EC)와 치환성 양이온 (Ca, Mg, Na)의 함량은 유의수준 0.001 이내로 나타났으며, 영양염류는 관개수에서보다 더 낮은 유의수준에서 차이를 보이거나 유의한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한, 논은 경작시기 중 많은 기간을 담수상태로 유지하기 때문에 COD와 SS의 경우 관개수와 달리 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 2013년에는 19가지 항목 중 pH, EC, DO, TOC, BOD, COD, T-N, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, Cl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fecal coliform 등 14가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 관개수에서와 같이 논담수 중 전기전도도 (EC), TOC, COD, Cl, 치환성 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+)의 함량은 유의수준 0.001 이내로 나타났다. 2014년에는 19가지 항목 중 EC, T-P, Cl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 등 6가지 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 항목 중 전기전도도 (EC), Cl, 치환성 양이온 (Ca^{2+} , Na^+)의 함량은 유의수준 0.001 이내로 나타났다.

㉖ 각 시험지구의 논 토양 화학성분 비교 결과, 2012년의 경우 청정지구와 간접하수재이용지구 모두 염기성 토양으로 EC는 청정지구가 0.59 dS m^{-1} , 간접하수재이용지구가 1.25 dS m^{-1} 로 두 배 이상의 차이를 보였으며, T-N과 T-P는 각각 $1,710 \text{ mg kg}^{-1}$, $1,684 \text{ mg kg}^{-1}$, 599 mg kg^{-1} , 603 mg kg^{-1} 으로 유사하게 분석되었다. 유기인산 (P_2O_5)과 유효규산 (SiO_2)의 경우에는 청정지구가 더 높게 나타났으며, 치환성 양이온 (K, Ca, Mg, Na)은 간접하수재이용지구에서 더 높은 함량을 보였다. 총대장균수 또한 청정지구에 비하여 간접하수재이용지구에서 두 배가 넘는 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 2013년의 경우 대비구인 용인청정지구와 처리구인 오산재이용지구는 모두 염

기성 토양으로 EC는 용인청정지구가 0.73 dS m^{-1} , 오산재이용지구가 1.37 dS m^{-1} 로 1.8배 이상의 차이를 보였으며, T-N과 T-P는 용인청정지구와 오산재이용지구 각각 $1,832 \text{ mg kg}^{-1}$, $2,036 \text{ mg kg}^{-1}$, 그리고 582 mg kg^{-1} , 617 mg kg^{-1} 으로 유사하게 분석되었다. 2014년의 경우 대비구인 용인청정지구와 처리구인 오산재이용지구는 모두 염기성 토양으로 EC는 용인청정지구가 0.09 dS m^{-1} , 오산재이용지구가 0.22 dS m^{-1} 로 2배 이상의 차이를 보였으며, T-N과 T-P는 용인청정지구와 오산재이용지구 각각 $1,149 \text{ mg kg}^{-1}$, $1,314 \text{ mg kg}^{-1}$, 그리고 466 mg kg^{-1} , 377 mg kg^{-1} 으로 유사하게 분석되었다.

㉓ 각 시험지구의 논 토양 중금속 함량 비교 결과, 2012년의 경우 Cd, Pb, 및 Cr^{6+} 는 전국 논 오염도보다 낮은 오염도를 보였고, Cu, Hg, Zn의 경우 청정지구는 전국 논 오염도보다 낮게 나타났으나 간접하수재이용지구는 높은 것으로 분석되었다. As와 Ni은 두 지구 모두 전국 논 오염도를 크게 상회하는 것으로 조사되었으나, 모든 중금속 함량에 대하여 토양환경보전법의 토양오염우려기준은 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 2013년의 경우 Cd과 Pb은 세계평균수준보다 낮은 오염도를 보였고, Cu와 Zn의 경우 대비구인 용인청정지구는 세계평균수준보다 낮게 나타났으나 처리구인 오산재이용지구는 높은 것으로 분석되었다. Hg, As, Ni은 두 지구 모두 세계 평균수준을 상회하는 것으로 조사되었는데, 관개수에서는 검출되지 않거나 매우 낮은 함량을 보이는 중금속 성분이 세계평균수준보다 높게 나타난 것은 지역적 토양특성에 기인한 것으로 판단된다. 두 지구 모두 모든 중금속 함량에 대하여 토양환경보전법의 토양오염우려기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. Cr^{6+} 는 검출되지 않았다. 2014년의 경우 Cd과 Cu는 세계평균수준보다 낮은 오염도를 보였고, Pb, Hg, Zn의 경우 대비구인 용인청정지구는 세계평균수준보다 낮게 나타났으나 처리구인 오산재이용지구는 높은 것으로 분석되었다. 특히, As와 Ni은 두 지구 모두 세계평균수준을 상회하는 것으로 조사되었는데, 관개수에서는 검출되지 않거나 매우 낮은 함량을 보이는 중금속 성분이 세계평균수준보다 높게 나타난 것은 지역적 토양특성에 기인한 것으로 판단된다. 두 지구 모두 모든 중금속 함량에 대하여 토양환경보전법의 토양오염우려기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다. Cr^{6+} 는 검출되지 않았다.

㉔ 미처리하수지구와 대비구인 용인지구의 37개 수질 항목에 대한 관개수 및 담수 모니터링 결과, pH는 관개수의 경우 두 모니터링 지구간 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 논담수의 경우 미처리하수지구에서 높게 나타났다 ($p < 0.05$). 하지만, 우리나라의 농업용수 pH 기준인 6.0~8.5를 벗어나지는 않았다. EC는 관개수의 경우 미처리하수지구에서 0.33 ds/m 로 용인지구의 0.18 ds/m 와 비교하여 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으나 ($p < 0.01$), 담수의 경우에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 치환성양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+})은 관개수의 경우 미처리하수지구가 용인지구에 비해 높게 나타났으며 ($p < 0.01$), 담수의 경우도 미처리하수지구에서 더 높은 값을 보였다 ($p < 0.01$). SS, T-N, T-P, 그리고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 평균농도는 관개수의 경우 미처리하수지구에서 용인지구에 비해 높게 나타나고 통계적으로도 유의한 차이가 있는 것으로 나타

났다 ($p < 0.001$). 중금속 항목인 Ni, CN, As, Cd, Cr⁶⁺, Co, Li, Hg, 그리고 Se 성분은 두 지구의 관개수 및 담수에서 검출되지 않거나 그 양이 미비한 것으로 나타났다. 중금속 성분인 Cu와 Pb는 미처리하수지구 관개수에서 6월에 우리나라 하수재이용 수질 기준 (환경부, 2009)을 초과하는 것으로 나타났으며, Zn은 6월 평균농도는 수질기준 이하이나 일부 값은 기준을 넘어서는 것으로 나타났다. Al은 5월과 6월에 수질기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 담수에서도 6월, 8월, 9월에 기준치 이상의 값을 나타내었다.

㉕ 용인지구와 미처리하수지구의 토양 화학특성 분석한 결과, 모든 조사항목의 평균 값은 미처리하수지구가 용인지구에 비해 높게 나타났으나, pH, T-P, Cd, 그리고 총대장균수 항목은 두 지구간 유의한 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$). TOC는 미처리하수지구가 3.7%로 용인지구의 3.2%보다 높게 나타났으나 ($p < 0.05$), 두 지구는 전국 평균값인 2.6%와 RDA (2010)에서 제시한 적정범위인 2.5~3.0%를 초과하는 것으로 나타났다. CEC는 미처리하수구와 용인지구에서 각각 15.7 cmol kg⁻¹, 10.6 cmol kg⁻¹으로 미처리하수구에서 더 높게 나타났다 ($p < 0.001$). 중금속 성분 중 Pb, Zn, 그리고 Cu는 미처리하수지구와 용인지구에서 각각 24.9 mg kg⁻¹, 69.7 mg kg⁻¹, 17.9 mg kg⁻¹, 그리고 18.3 mg kg⁻¹, 50.3 mg kg⁻¹, 14.8 mg kg⁻¹으로 미처리하수지구에서 더 높게 나타났으나 ($p < 0.05$), 토양환경보전법의 토양환경오염우려기준을 초과하지는 않았다.

㉖ 하수처리수의 간접재이용을 위해 개발한 농업재이용 시스템을 적용하여 논에서 얻은 수질 모니터링 결과를 이용하여 통계분석을 실시한 결과, 관개수질 항목 중 TOC, BOD, PO₄-P의 3개 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 총대장균수 함량은 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으나, 시스템 설치 전에 비해 현저히 감소함을 알 수 있다. 논 담수 수질 항목 중 EC, DO, BOD, COD, NO₃-N, PO₄-P, Ca²⁺의 7개 항목에 대하여 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 양이온 중 Mg²⁺, Na⁺은 유의한 차이를 나타내지 않는 것으로 분석되었다. 특히, 담수 수질 항목 중 DO, BOD, COD, NO₃-N, PO₄-P, Ca²⁺의 함량이 유의수준 0.001 이내로 나타났다.

㉗ 본 절에서 이루어진 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경 조사 분석 결과는 하수의 간접재이용이 수질 및 토양환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 기초 자료로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

제5절 시험지구의 작물생육, 수확량 및 논벼 성분 조사 분석

1. 서론

지속가능한 농업을 위해서는 생산성과 환경성을 모두 고려하여야 하며, 이는 앞으로의 농업에 있어 가장 큰 도전이 될 것이다 (Foley 등, 2011). 이와 같은 상황에서 하수처리수를 농업용수로 재이용하는 것은 농업생산성과 환경성을 모두 고려할 수 있는 주요한 대안으로 주목 받고 있다 (Hamilton 등, 2007; 장태일 등, 2010; 정한석 등, 2013).

하수처리수를 농업용수로 재이용하는 방법에는 직접하수재이용과 간접하수재이용이 있다. 직접하수재이용 (direct wastewater reuse)은 적절한 관개시스템을 통해 하수처리장에서 처리된 생활하수를 농경지로 직접 공급하여 재이용하는 형태로서 (Rutkowski 등, 2007), 간접하수재이용 (indirect wastewater reuse)은 농업용 저수지 혹은 저류지 등에서 하수처리장에서 처리한 생활하수를 희석하여 관개용수로 사용하거나, 하천으로 방류된 하수처리장 방류수를 희석하여 농업용수로 사용하는 형태이다. 대부분의 하수재이용이 이와 같은 간접하수재이용에 해당한다 (Blumenthal 등, 2000).

하수처리수는 연중 일정한 수량을 가지므로 극한기후 상황에서도 가뭄용수로써 이용이 가능하며 (박승우, 2007; 장태일 등, 2012), 하수처리수 중의 다량의 비료성분은 수확량을 증가시키고 시비량을 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 (정한석 등, 2011; Pereira 등, 2011; Chavez 등, 2012). 또한, 하수처리수를 관개용수로 사용함으로써 농경지에서 추가적으로 수질정화 작용이 일어나고, 이는 하천수질개선에 일조한다 (정한석 등, 2013). 이와 같이 하수재이용에는 여러 장점이 있지만, 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우에는 관개수의 수질에 따라 논벼 생육영향에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Mara와 Cairncross, 1989; Peasey 등, 2000; 박승우, 2011). 특히, 하수 중에 포함된 과다한 영양성분은 농작물의 생육에 부정적인 영향을 초래할 수 있으며, 논벼의 경우에는 도복피해의 우려가 있는 것으로 알려져 있다 (Setter 등, 1997; Chiou, 2008; Pereira 등, 2011). 또한, 하수 중의 나트륨 성분은 농지의 염도를 증가시켜 작물 수확량을 감소시킬 수 있다 (Tripler 등, 2012). 따라서 하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위해서는 안전한 농업수자원으로서의 작물생육에의 영향을 검토하여야 한다.

논벼 생육은 기상, 관개량, 수질 특성 등 여러 인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 종합적인 연구가 필요하며, 관개수의 수질과 관련하여 장기적이고 정량적인 연구가 이루어져야 한다 (농업기반공사, 2004). 정기용 (2011)은 직접재이용에 따른 논벼 생육영향을 과학적으로 규명하고 정량화한 바 있으나 아직까지 간접재이용에 따른 논벼의 생육영향을 지속적으로 모니터링하고 이를 통계적으로 분석하여 과학적으로 정량화한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 절에서는 간접재이용에 따른 논벼 생육에 대한 벼의 작물생육과 수량구성요소 등을 조사하기 위하여 논벼 생육기간 동안 용인청정지구 및 간접재이용지구인 병점과 오산에 위치한 각 5개의 포장에 대하여 대표작물을 선정하고 주 1회 생육조사를 실시하

였으며, 수확 (2011년) 후 논벼의 수량구성요소와 식물체 및 백미의 중금속함량과 이화학적 특성 등을 조사하였다. 벼의 생육조사 항목으로는 초장, 분얼수 등이 있으며, 수량구성요소에는 개체당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중, 등숙률 등이 있다 (정기웅, 2011). 본 연구에서 조사된 공시품종은 수원 지방에서 널리 재배되는 추청벼로 선정하였다.

2. 초장 및 분얼수

용인청정지구, 간접재이용지구, 미처리지구의 생육특성을 분석하기 위하여 각 시험포장별로 대표작물을 선정하여 초장 (Crop height), 분얼수 (Tiller number)를 모내기 이후부터 추수까지 1주에 1회씩 조사하였다. 초장은 작물의 길이를 측정하는 것으로 생육정도를 가장 쉽게 알아볼 수 있는 지표이며, 분얼수는 다수확과 작물의 튼튼한 생육의 중요한 요소로 보통 최대분얼기까지 증가하며, 그 이후에는 분얼수가 감소한다 (정기웅, 2011). 그림 3.5.1 ~ 그림 3.5.4는 각 지구에 위치한 5개의 논 시험포장에서 작물 생육 모니터링을 실시한 모습이다.



(a) YIP#01



(b) YIP#02



(c) YIP#03



(d) YIP#04



(e) YIP#05

그림 3.5.1 용인청정지구 지점별 (YIP) 작물생육 모니터링 전경



(a) BJP#01



(b) BJP#02



(c) BJP#03



(d) BJP#04



(e) BJP#05

그림 3.5.2 병점제이용지구 지점별 (BJP) 작물생육 모니터링 전경



(a) OSP#01



(b) OSP#02



(c) OSP#03



(d) OSP#04



(e) OSP#05

그림 3.5.3 오산재이용지구 지점별 (OSP) 작물생육 모니터링 전경



(a) 호련지구



(b) 수화지구



(c) 장전지구

그림 3.5.4 미처리하수 지구 지점별 작물생육 모니터링 전경

표 3.5.1 ~ 표 3.5.3은 연도별 생육기간 동안 관개용수 처리수준에 따른 지점별 초장 및 분얼수의 변화를 보여주고 있다. 2012년의 경우, 초장은 세 지구 모두 시간이 지남에 따라 증가하고 있으며, 등숙기에 해당하는 9월 이후로는 큰 변화가 나타나지 않았다. 처음에는 병점재이용지구의 초장이 가장 높게 나타났으나, 9월 이후에는 병점재이용지구의 초장이 가장 낮게 나타났으며 오산재이용지구의 초장이 가장 높게 나타났다. 분얼수는 시간이 지남에 따라 증가하다가 7월 초에 최댓값을 나타내며 이후에 점점 감소하여 9월경부터는 큰 변화를 보이지 않았다. 병점재이용지구에서 분얼수가 가장 높게 나타났으며, 용인청정지구에서 가장 낮게 나타났다. 2013년의 경우, 초장은 세 지구 모두 시간이 지남에 따라 증가하고 있으며, 등숙기에 해당하는 9월 이후로는 큰 변화가 나타나지 않았다. 처음에는 병점재이용지구의 초장이 가장 높게 나타났으나, 9월 이후에는 병점재이용지구의 초장이 가장 낮게 나타났으며 오산재이용지구의 초장이 가장 높게 나타났다. 분얼수는 시간이 지남에 따라 증가하다가 7월 초 (병점재이용지구) 또는 7월 중순 (용인청정지구, 오산재이용지구)에 최댓값을 나타내며 이후에 점점 감소하여 9월경부터는 큰 변화를 보이지 않았다. 오산재이용지구에서 분얼수가 가장 높게 나타났으며, 용인청정지구에서 가장 낮게 나타났다.

표 3.5.1 시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2012년)

날 짜 (월/일)	YIP #01		YIP #02		YIP #03		YIP #04		YIP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/15	48	32.0	26	32.4	26	31.5	30	28.0	15	20.5
06/21	60	37.0	32	33.0	43	30.5	39	31.5	24	27.0
06/27	63	41.5	39	40.0	45	32.0	40	38.0	26	31.0
07/04	68	48.5	45	52.5	53	45.5	42	48.5	32	46.0
07/12	72	57.3	55	67.2	54	57.0	57	62.8	34	62.5
07/20	72	72.0	61	72.5	60	67.0	57	71.5	37	67.0
07/25	51	66.0	67	73.0	64	71.0	71	75.0	38	68.5
08/01	39	74.0	84	80.0	39	77.0	64	82.0	38	73.0
08/10	37	86.0	79	93.0	30	93.0	47	88.0	29	78.5
08/16	44	93.0	97	105.5	31	96.5	43	96.9	35	89.0
08/23	35	100.0	68	110.5	28	103.0	43	110.0	27	99.0
08/31	31	98.0	56	111.0	24	103.0	38	109.0	26	101.0
09/06	33	99.0	52	110.5	26	103.0	40	109.0	20	93.0
09/12	30	98.0	52	101.0	26	103.0	34	110.0	25	99.0
09/20	32	99.0	55	110.0	23	101.0	31	106.0	24	98.5
09/26	29	97.0	51	110.0	21	101.0	37	107.0	25	95.0
날 짜 (월/일)	BJP #01		BJP #02		BJP #03		BJP #04		BJP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/15	20	33.6	16	37.0	39	33.9	18	40.4	17	26.4
06/21	40	35.0	24	36.0	51	39.0	34	41.0	34	27.0
06/27	58	41.5	35	49.0	64	43.0	45	45.5	36	33.5
07/04	68	56.5	43	62.0	71	58.5	55	61.5	44	48.0
07/12	70	67.5	57	69.5	84	64.0	64	66.0	64	50.2
07/20	71	75.0	59	79.0	86	71.5	70	79.8	64	66.0
07/25	45	78.0	43	80.0	64	71.0	38	81.0	60	65.5
08/01	51	77.0	36	89.5	51	77.0	38	82.5	44	71.0
08/10	41	79.0	36	94.0	48	90.0	36	84.0	42	77.0
08/16	46	79.0	43	110.0	48	89.0	34	90.0	42	83.0
08/23	37	90.0	30	110.0	47	103.0	33	102.0	41	90.0
08/31	37	95.0	28	111.0	45	101.0	31	101.0	39	91.0
09/06	36	99.0	25	111.0	45	93.0	31	101.0	38	91.0
09/12	35	98.0	27	112.0	45	102.0	29	99.0	34	90.0
09/20	37	95.0	27	110.5	46	103.0	29	102.0	39	91.5
09/26	35	90.5	26	112.0	41	102.0	30	102.0	36	92.0

표 3.5.1 시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2012년) (계속)

날 짜 (월/일)	OSP #01		OSP #02		OSP #03		OSP #04		OSP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/15	20	29.2	10	24.4	25	32.4	45	33.7	20	28.5
06/21	24	35.5	14	30.0	36	35.0	47	35.5	39	42.0
06/27	39	37.0	24	36.0	48	37.0	53	37.3	45	46.5
07/04	52	45.0	34	41.0	56	46.0	61	49.5	56	55.5
07/12	59	54.5	39	48.5	60	60.5	73	62.8	72	64.5
07/20	67	71.6	47	60.5	63	66.0	79	69.0	72	73.0
07/25	32	75.3	32	69.0	50	67.0	62	73.0	61	78.0
08/01	38	84.5	36	72.0	44	74.0	82	85.5	50	79.0
08/10	45	91.3	39	83.5	37	84.0	84	91.8	39	93.0
08/16	28	92.0	38	93.0	39	94.0	75	99.0	42	101.0
08/23	24	106.0	37	108.5	33	101.0	67	100.5	35	106.0
08/31	26	105.0	41	107.0	35	99.0	61	108.0	36	108.0
09/06	26	102.0	35	107.0	32	99.0	63	105.0	36	105.0
09/12	24	102.0	30	108.0	29	101.0	61	109.0	37	107.0
09/20	24	105.0	32	105.5	31	99.0	56	110.0	38	105.0
09/26	24	103.5	32	104.0	25	98.0	51	110.0	38	106.0
날 짜 (월/일)	호련		수화		장진					
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)				
06/15	17	29.5	24	33.4	19	28.5				
06/21	22	29.0	33	39.5	33	31.0				
06/27	33	32.0	36	43.0	38	36.0				
07/04	36	46.0	39	49.0	39	40.0				
07/12	42	59.0	40	63.0	52	47.5				
07/20	44	69.0	50	74.0	52	58.0				
07/25	45	76.0	39	82.0	47	63.0				
08/01	44	84.0	48	89.5	44	71.0				
08/10	41	92.0	32	90.0	30	83.5				
08/16	39	85.5	28	89.0	28	97.0				
08/23	31	106.0	23	96.0	31	112.5				
08/31	31	117.0	21	104.0	26	112.0				
09/06	27	115.0	21	102.0	28	112.0				
09/12	24	114.0	18	104.0	27	113.0				
09/20	24	114.5	19	105.0	30	110.5				
09/26	21	114.0	19	102.0	28	111.0				

표 3.5.2 시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2013년)

날 짜 (월/일)	YIP #01		YIP #02		YIP #03		YIP #04		YIP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/03	7	19.0	8	21.0	3	27.0	5	15.0	7	15.0
06/10	9	18.5	9	22.5	12	29.0	11	21.0	9	17.0
06/17	11	26.0	10	27.0	26	29.3	15	32.0	13	26.3
06/24	22	30.0	17	38.0	28	34.5	37	36.0	17	33.0
07/01	36	36.5	28	39.5	36	41.0	37	45.0		
07/08	38	50.0	24	54.0	25	52.0	32	56.5	30	71.0
07/15	42	62.0	32	74.0	30	65.0	43	68.0	33	89.0
07/29	38	73.4	37	81.0	27	77.6	38	77.0		
08/08	35	89.0	47	82.0	23	89.0	37	81.0	21	87.5
08/14	28	94.5	45	87.5	17	92.0	25	82.0	13	87.5
08/21	25	101.0	44	104.5	18	98.0	25	88.5	13	89.0
08/28	22	107.0	39	110.0	13	98.0	19	99.0	11	89.0
09/05	23	107.5	43	107.0	15	99.0	24	99.0	20	112.0
09/09	19	107.0	35	104.0	13	97.0	18	99.0	19	103.0
날 짜 (월/일)	BJP #01		BJP #02		BJP #03		BJP #04		BJP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/03	7	16.5	8	18.5	5	25.0	9	21.0	5	17.0
06/10	9	30.5	15	25.0	17	26.0	7	26.0	6	32.0
06/17	19	33.5	21	30.5	17	29.8	15	35.0	9	35.5
06/24	34	41.0	28	41.0	39	37.0	23	38.5	18	41.0
07/01	62	48.5	70	47.0	42	49.0	48	38.5	38	44.0
07/08	51	59.0	49	60.0	47	58.0	38	53.0	34	62.0
07/15	58	79.9	55	86.0	50	75.0	42	86.0	41	81.0
07/29	43	84.0	48	92.7	42	84.0	39	88.3	45	87.0
08/08	27	86.0	41	92.5	41	79.0			34	93.0
08/14	42	86.0	36	93.5	32	82.5	31	104.0	34	103.5
08/21	34	102.0	38	95.0	35	95.0	20	105.0	27	115.5
08/28	26	104.0	31	108.0	25	96.0	17	109.0	28	118.0
09/05	29	103.0	38	109.0	31	95.0	19	118.0	27	117.0
09/09	27	103.0	33	107.0	25	95.0	15	119.0	28	120.0

표 3.5.2 시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2013년) (계속)

날 짜 (월/일)	OSP #01		OSP #02		OSP #03		OSP #04		OSP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/03	6	18.0	8	17.0	5	25.0	8	22.5	12	17.0
06/10	13	25.0	11	22.0	12	26.0	21	27.0	17	23.0
06/17	21	31.5	14	29.0	23	31.5	34	39.4	24	33.0
06/24	28	40.0	21	41.0	40	42.0	63	50.0	37	45.0
07/01	35	42.0	27	42.5	41	45.0	66	53.4	52	54.0
07/08	36	52.5	33	49.0	43	56.0	76	66.0	55	68.0
07/15	37	70.0	34	66.0	46	78.5	77	82.5	57	84.0
07/29	34	81.6	32	81.0	34	82.0	69	95.7	43	95.9
08/08	28	86.5	29	82.0	33	89.0	57	92.0	34	98.0
08/14	32	96.0	24	87.5	26	86.0	66	100.5	41	104.5
08/21	27	103.5	24	98.0	28	97.0	54	114.0	37	110.0
08/28	20	103.0	21	100.0	28	98.0	48	114.0	28	112.0
09/05	22	103.0	23	100.0	27	97.0	50	112.0	37	107.0
09/09	20	103.0	23	100.0	26	96.0	38	118.0	28	107.0
날 짜 (월/일)	호련		수화		장전					
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)				
06/03	6	14.5	10	19.0	7	14.0				
06/10	6	20.0	15	24.0	15	23.0				
06/17	7	24.0	29	30.0	19	31.0				
06/24	17	33.0	31	42.0	29	42.0				
07/01	25	37.5	40	50.0	50	52.5				
07/08	27	49.5	39	59.5	42	71.0				
07/15	31	75.0	47	80.0	59	91.0				
07/29	27	77.0	40	86.5	55	100.8				
08/08	23	80.0	26	91.7	33	100.0				
08/14	18	83.0	26	81.2						
08/21	18	92.0	22	106.0	30	116.0				
08/28	15	96.0	18	105.0	24	117.0				
09/05	17	95.0	18	106.5	25	117.5				
09/09	15	96.5	18	101.0	22	116.0				

표 3.5.3 시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2014년)

날 짜 (월/일)	YIP #01		YIP #02		YIP #03		YIP #04		YIP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/03	13	18.0	17	22.5	12	26.0	12	23.0		
06/17	14	21.5	37	29.0	19	44.0	22	31.5	10	20.5
06/24	21	57.5	46	39.0	25	51.3	34	43.1	17	25.7
07/01	23	63.0	48	42.5	27	64.0	37	51.0	23	32.5
07/08	24	64.0	50	51.0	30	73.0	45	64.0	41	38.0
07/16	34	64.0	41	67.0	23	72.0	40	63.5	35	58.0
07/29	35	68.0	46	77.0	32	77.0	44	77.0	53	75.0
08/07	34	87.0	39	94.0	22	90.5	31	79.5	37	84.0
08/12	30	62.7	40	101.1	27	94.5	32	87.5	38	87.0
08/19	13	98.5	27	111.0	14	100.5	21	96.5	23	106.0
09/05	12	98.0	28	114.0	12	100.0	22	97.0	32	107.0
09/12	11	98.0	25	111.5	12	100.2	25	94.8	34	102.5
날 짜 (월/일)	BJP #01		BJP #02		BJP #03		BJP #04		BJP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/03	5	31.0	10	30.0	15	29.0	12	24.5	8	22.0
06/17	11	31.0	13	33.0	21	38.0	16	30.0	11	31.0
06/24	30	42.5	18	43.5	43	46.8	29	34.0	22	39.5
07/01	42	49.7	46	51.5	61	58.9	41	46.5	33	49.0
07/08	45	61.0	48	69.0	63	71.0	46	73.0	51	63.0
07/16	34	68.0	46	80.5	60	75.0	36	68.0	53	72.5
07/29	51	74.5	65	94.0	54	84.0	59	82.0	76	87.0
08/07	28	81.5	35	98.5	30	89.0	31	91.0	41	99.0
08/12	27	86.5	36	111.0	40	92.0	33	93.7	53	103.0
08/19	22	96.0	34	120.0	23	98.0	29	96.0	42	122.5
09/05	24	98.0	32	119.0	27	99.9	29	106.0	38	122.0
09/12										

표 3.5.3 시험지구 논벼 초장 및 분얼수 (2014년) (계속)

날 짜 (월/일)	OSP #01		OSP #02		OSP #03		OSP #04		OSP #05	
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)
06/03	5	28.5	6	18.0	5	19.0	14	25.0	6	18.0
06/17	13	33.0	9	25.5	18	30.0	21	32.5	13	27.0
06/24	33	37.7	22	29.3	30	36.5	35	39.5	18	38.6
07/01	35	46.5	23	37.6	43	43.0	56	46.8	36	45.5
07/08	36	50.0	35	63.0	45	51.0	57	55.0	42	57.0
07/16	49	74.0	41	66.5	45	60.0	64	69.5	61	70.5
07/29	62	86.0	47	72.5	64	79.5	72	88.0	74	88.0
08/07	29	93.0	30	83.5	45	88.0	41	91.0	43	91.0
08/12	33	94.3	34	82.0	44	91.0	49	98.0	39	99.5
08/19	31	115.0	25	96.5	32	102.0	41	114.5	38	104.5
09/05	30	110.0	23	97.0	32	105.0	43	112.0	35	106.0
09/12	30	110.0	24	95.1	30	101.6	38	108.8	36	106.5
날 짜 (월/일)	호련		수화		장전					
	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)	분얼수 (ea)	초장 (cm)				
06/03	5	21.0	22	28.0	15	28.0				
06/17	11	31.5	29	39.2	19	32.0				
06/24	15	34.0	58	51.0	24	41.3				
07/01	23	42.0	68	58.9	28	56.0				
07/08	24	54.0	70	73.0	29	66.0				
07/16	29	65.5	63	79.0	40	75.0				
07/29	47	77.0	65	97.0	43	85.0				
08/07	26	92.0	54	93.0	20	93.0				
08/12	24	95.9	48	95.5	22	95.4				
08/19	24	115.0	43	115.0	19	108.0				
09/05	23	113.0	41	105.0	16	107.5				
09/12										

3. 수량구성요소

논벼 생육시험에서는 수량구성요소인 개체당 이삭수 (panicle number per bundle; PNB), 이삭당 영화수 (mean of spikelet number per panicle, MS), 천립중 (thousand grain weight, TW), 등숙률 (percentage of ripened grains, PG), 간장 (clum length, CL) 그리고 수장 (panicle length, PL)을 조사하였고, 현미의 이화학적 성분을 분석하였다. 여기서 개체당 이삭수는 단위 개체당 이삭의 총 개수, 이삭당 영화수는 각 개체에서 열린 이삭의 낱알 개수, 등숙률은 총 낱알의 개수에 관한 비중이 1.06 이상의 낱알의 개수를 측정하여 낱알의 등숙정도를 %로 나타낸 것이며, 천립중은 낱알 1,000개를 임의로 추출하여 등숙정도를 무게로 나타낸 것을 의미한다. 간장과 수장은 식물체의 길이를 나타낸다 (정기웅, 2011).

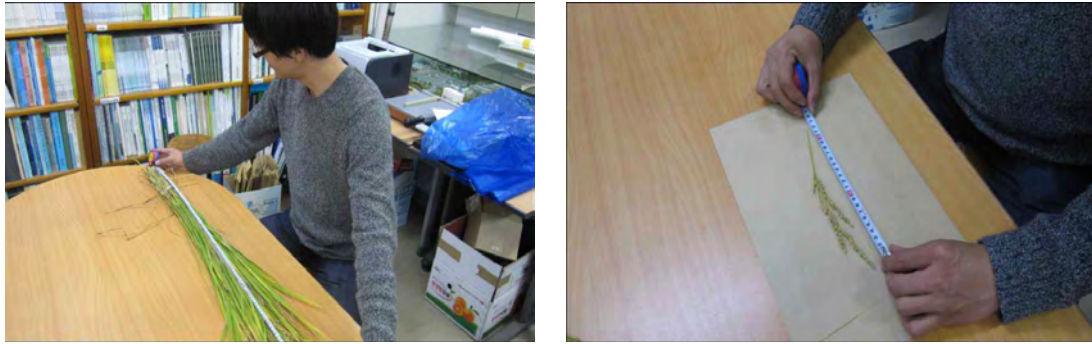


그림 3.5.5 수량구성요소 측정 전경

표 3.5.4 ~ 표 3.5.6은 2011년 11월 3일, 2012년, 2013년에 각 처리구별 논 시험포장에서 벼를 각 3주씩 수확한 후 개체당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중, 등숙률, 간장, 수장을 측정된 값을 나타내고 있다. 벼의 수량구성요소는 농업과학기술 연구조사 분석기준에 준하여 실시하였다. 간장과 수장은 경기도 추청벼의 평균값과 비교하였으며, 다른 수량구성요소는 경기도 추청벼의 평균값 외에도 농촌진흥청 (2011)에서 제시한 전국평균 벼의 생육상황 조사결과와 비교하였다.

2012년에 간접재이용지구인 병점 및 오산에서 채취한 벼는 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었으며, 용인청정지구에서 채취한 벼는 등숙률과 간장을 제외한 개체당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중이 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었다. 미처리하수 관개지구인 호련에서 채취한 벼는 등숙률과 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었고, 수화에서 채취한 벼는 등숙률, 간장, 수장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었으며, 장전에서 채취한 벼는 등숙률과 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었다.

2013년에 간접재이용지구인 병점에서 채취한 벼는 등숙률과 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었고, 간접재이용지구인 오산에서 채취한 벼는 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었으며, 용인청정지구에서 채취한 벼는 간장을 제외한 개체당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중, 등숙률이 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었다. 미처리하수 관개지구인 호련에서 채취한 벼는 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었고, 수화에서 채취한 벼는 수장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었으며, 장전에서 채취한 벼는 등숙률과 간장을 제외한 수량구성요소가 전국 및 경기 추청벼의 평균값보다 높게 측정되었다.

각 처리구별 수량구성요소의 측정값은 평균하여 그림 3.5.6 ~ 그림 3.5.8에 나타내었다.

표 3.5.4 시험지구 수량구성요소 (2011년)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
용인 청정지구	YIP#01-01	30	78	21.83	90.03	80.0	18.0
	YIP#01-02	38	106	22.22	91.76		
	YIP#01-03	24	78	20.44	86.01		
	YIP#02-01	32	90	22.03	90.44	94.0	20.0
	YIP#02-02	24	106	22.30	93.48		
	YIP#02-03	21	71	20.39	88.83		
	YIP#03-01	18	114	22.81	91.46	91	18
	YIP#03-02	19	94	22.89	89.79		
	YIP#03-03	14	100	21.59	89.94		
	YIP#04-01	28	82	20.54	88.06	76.0	18.0
	YIP#04-02	21	112	20.66	87.93		
	YIP#04-03	25	75	21.15	80.40		
	YIP#05-01	19	107	19.31	78.39	86.0	20.0
	YIP#05-02	22	109	20.97	88.26		
	YIP#05-03	22	115	20.96	83.49		
병점 재이용지구	BJP#01-01	37	107	22.63	94.03	86.5	18.0
	BJP#01-02	25	87	22.48	93.78		
	BJP#01-03	25	83	22.50	96.48		
	BJP#02-01	27	124	21.19	89.64	97.0	20.0
	BJP#02-02	14	115	21.23	82.04		
	BJP#02-03	20	140	21.46	87.93		
	BJP#03-01	19	51	21.82	91.36	78.0	17.5
	BJP#03-02	24	77	21.71	92.46		
	BJP#03-03	34	112	22.46	95.43		
	BJP#04-01	16	68	23.89	94.68	82.0	20.0
	BJP#04-02	18	85	24.00	94.15		
	BJP#04-03	30	93	22.71	96.37		
	BJP#05-01	12	106	24.22	83.73	82.5	20.0
	BJP#05-02	22	94	22.53	93.97		
	BJP#05-03	39	94	23.33	93.61		
오산 재이용지구	OSP#01-01	23	107	22.63	91.05	84.0	20.0
	OSP#01-02	28	123	22.67	92.85		
	OSP#01-03	25	100	21.84	90.38		
	OSP#02-01	30	78	18.82	79.71	79.0	22.0
	OSP#02-02	31	92	21.32	89.41		
	OSP#02-03	45	92	19.68	80.77		
	OSP#03-01	30	67	20.42	78.29	92.5	17.5
	OSP#03-02	40	104	19.37	76.53		
	OSP#03-03	31	88	18.97	73.60		
	OSP#04-01	28	94	23.09	92.64	65.0	19.0
	OSP#04-02	19	116	23.04	80.17		
	OSP#04-03	22	90	22.67	90.71		
	OSP#05-01	26	123	21.65	86.39	83.0	17.5
	OSP#05-02	26	114	20.19	89.36		
	OSP#05-03	25	128	19.80	80.57		
경기 추청벼 평균		17.4	79.2	24.7	88.3	84.9	19.5
전국 벼 평균		19.2	83.1	17.3	88.5	-	-

표 3.5.5 시험지구 수량구성요소 (2012년)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
용인 청정지구	YIP#01-01	14	67	23.63	38.8	74.8	16.3
	YIP#01-02	22	89	24.89	62.3	70.1	18.4
	YIP#01-03	26	72	22.58	44.1	60.8	25.2
	YIP#01-04	26	157	21.72	41.35	63.5	28.5
	YIP#01-05	25	96	22.25	66.23	71.2	19.7
	YIP#02-01	27	71	21.31	60.4	70.5	16.4
	YIP#02-02	31	106	21.59	56.9	72	18.3
	YIP#02-03	53	113	19.82	47.9	84.3	19.6
	YIP#02-04	39	79	18.32	37.43	66.6	19
	YIP#02-05	30	114	21.34	49.78	78.1	17.4
	YIP#03-01	25	142	21.13	55.8	77.5	18.5
	YIP#03-02	29	98	23.48	69.3	89	17.4
	YIP#03-03	30	71	21.60	61.3	79.8	16.5
	YIP#03-04	24	146	23.53	58.72	70.7	21.5
	YIP#03-05	19	114	20.05	64.17	83.7	16
	YIP#04-01	28	116	22.18	71.1	78.8	20.3
	YIP#04-02	24	118	22.75	70.1	81	19.6
	YIP#04-03	30	93	19.02	78.1	81.6	19.4
	YIP#04-04	25	125	20.51	75.21	85.6	18.8
	YIP#04-05	34	73	21.83	73.06	90.4	15.2
	YIP#05-01	26	71	22.17	77.0	80.7	15.3
	YIP#05-02	12	50	24.71	84.0	74.1	16.2
	YIP#05-03	21	67	22.92	83.1	78.3	14.8
	YIP#05-04	23	74	22.85	80.70	71.5	26
	YIP#05-05	22	69	22.72	78.02	81.6	18
병점 제이용지구	BJP#01-01	36	71	20.61	71.2	77	17
	BJP#01-02	38	80	22.23	77.8	87	18
	BJP#01-03	26	82	20.37	64.6	86.1	17.9
	BJP#01-04	27	112	21.94	81.23	81	19
	BJP#01-05	36	78	21.53	84.39	84	17.5
	BJP#02-01	28	84	21.15	74.9	89.3	17.7
	BJP#02-02	26	132	21.16	91.2	96.4	19.4
	BJP#02-03	29	68	21.32	93.3	86.5	17
	BJP#02-04	27	115	21.27	68.13	93.5	21.5
	BJP#02-05	14	130	23.01	80.44	90	21
	BJP#03-01	46	51	22.56	85.9	87.4	15.5
	BJP#03-02	18	92	22.20	92.0	83.6	17.9
	BJP#03-03	28	80	22.67	89.8	82.5	17.5
	BJP#03-04	31	87	22.27	90.55	85	17.5
	BJP#03-05	28	78	19.01	78.71	83.4	17.5
	BJP#04-01	29	81	23.24	86.5	84.1	16.6
	BJP#04-02	41	96	22.29	86.2	80.7	20

표 3.5.5 시험지구 수량구성요소 (2012년) (계속)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
병접 재이용지구	BJP#04-03	24	90	23.23	80.2	75.6	20.8
	BJP#04-04	37	81	21.59	84.24	81	17.5
	BJP#04-05	25	78	23.13	90.38	75.6	19.7
	BJP#05-01	37	57	23.11	88.8	76.8	14.6
	BJP#05-02	41	97	24.89	89.9	64.5	21
	BJP#05-03	34	90	22.69	90.7	69.5	12.6
	BJP#05-04	33	74	23.32	90.51	68.4	16.7
	BJP#05-05	20	84	22.67	89.57	75.2	16.6
오산 재이용지구	OSP#01-01	23	87	23.39	68.5	84	19.7
	OSP#01-02	36	100	23.81	89.6	98.3	19.7
	OSP#01-03	42	91	24.27	82.9	97	18
	OSP#01-04	19	102	23.69	87.81	94	21
	OSP#01-05	40	89	22.62	75.68	92.7	19.8
	OSP#02-01	32	116	22.67	87.9	83	20.1
	OSP#02-02	28	96	23.50	83.4	78.6	21.4
	OSP#02-03	27	115	21.93	90.1	76.5	19.5
	OSP#02-04	30	94	21.97	92.50	85.9	17.7
	OSP#02-05	31	95	22.53	87.47	85.3	17.1
	OSP#03-01	32	91	19.04	60.3	79	21
	OSP#03-02	32	116	21.75	78.7	75.3	21.5
	OSP#03-03	33	101	23.40	91.2	86.6	18.9
	OSP#03-04	27	102	19.95	76.88	80	20.7
	OSP#03-05	18	91	18.62	69.04	71.3	21
	OSP#04-01	57	111	21.81	80.3	86.5	18.7
	OSP#04-02	57	107	21.73	85.7	79.2	22.1
	OSP#04-03	24	89	21.74	92.2	78.9	25.6
	OSP#04-04	43	80	22.54	86.51	66.1	20.4
	OSP#04-05	41	122	21.18	89.31	77.7	21.3
	OSP#05-01	35	104	23.36	84.4	83.5	20.3
	OSP#05-02	37	127	22.84	88.5	81.7	21.3
	OSP#05-03	12	68	24.41	96.3	84	17.4
	OSP#05-04	23	105	23.52	90.21	79	21
	OSP#05-05	19	73	21.08	77.80	83	17.9
경기 충청비 평균		18.0	81.0	21.3	90.1	87	18
전국 비 평균		19.2	83.1	17.3	88.5	-	-

표 3.5.5 시험지구 수량구성요소 (2012년) (계속)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
호련지구	호련#01-01	21	157	24.31	18.1	96.4	20.8
	호련#01-02	17	140	25.29	9.0	93.0	20.4
	호련#01-03	26	98	23.18	18.6	71.0	20.0
수화지구	수화#01-01	19	90	24.55	90.3	87.3	16.6
	수화#01-02	27	119	22.96	80.0	81.7	17.8
	수화#01-03	29	102	22.61	83.2	82.0	17.0
장전지구	장전#01-01	27	99	23.92	78.2	76.7	20.7
	장전#01-02	23	88	22.15	78.4	78.2	19.3
	장전#01-03	23	95	23.81	85.8	90.1	18.6
경기 추청벼 평균		17.4	79.2	24.7	88.3	84.9	19.5
전국 벼 평균		19.2	83.1	17.3	88.5	-	-

표 3.5.6 시험지구 수량구성요소 (2013년)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
용인 청정지구	YIP#01-01	23	73	23.20	95.53	78.5	15.5
	YIP#01-02	27	165	19.28	91.25	59.4	17.9
	YIP#01-03	19	92	23.54	95.32	74.8	18.2
	YIP#01-04	20	98	24.39	95.50	75.5	18.8
	YIP#01-05	20	96	24.45	94.08	74.0	16.5
	YIP#02-01	40	131	22.88	91.83	83.0	20.6
	YIP#02-02	15	90	22.23	94.38	82.5	19.0
	YIP#02-03	21	108	20.86	93.80	90.0	19.0
	YIP#02-04	16	117	23.16	85.43	78.7	19.3
	YIP#02-05	26	75	21.37	95.10	77.8	16.2
	YIP#03-01	13	148	25.22	91.49	67.4	21.9
	YIP#03-02	14	165	25.63	91.64	71.0	24.0
	YIP#03-03	10	204	24.76	90.56	73.5	20.5
	YIP#03-04	13	151	25.54	90.84	70.3	19.7
	YIP#03-05	20	217	23.00	92.12	72.0	23.0
	YIP#04-01	24	81	24.31	95.58	73.0	19.5
	YIP#04-02	21	73	23.02	95.42	75.4	16.1
	YIP#04-03	12	86	23.93	92.07	64.0	17.0
	YIP#04-04	22	68	23.14	94.74	77.2	16.7
	YIP#04-05	18	66	21.92	85.21	65.0	15.0
	YIP#05-01	19	76	21.02	93.10	94.1	16.5
	YIP#05-02	29	77	20.98	91.87	87.5	17.0
	YIP#05-03	17	95	21.52	94.36	89.5	18.5
	YIP#05-04	21	69	21.51	91.13	94.5	14.5
	YIP#05-05	15	62	20.63	93.06	80.8	15.9
경기 추청벼 평균		17.4	79.2	24.7	88.3	84.9	19.5
전국 벼 평균		19.2	83.1	17.3	88.5	-	-

표 3.5.6 시험지구 수량구성요소 (2013년) (계속)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
병점 재이용지구	BJP#01-01	27	87	22.65	93.35	83.5	19.5
	BJP#01-02	13	122	22.63	86.26	74.5	21.0
	BJP#01-03	31	100	21.91	92.14	88.0	19.0
	BJP#01-04	25	116	22.99	91.15	85.0	20.5
	BJP#01-05	17	100	20.38	92.09	78.0	20.0
	BJP#02-01	36	88	21.23	93.82	84.5	16.5
	BJP#02-02	28	134	23.55	94.37	88.1	20.0
	BJP#02-03	32	107	22.76	95.59	89.8	15.9
	BJP#02-04	34	130	23.90	96.58	82.0	24.0
	BJP#02-05	37	111	23.38	95.71	92.6	19.4
	BJP#03-01	31	65	22.43	92.06	73.7	14.8
	BJP#03-02	33	78	23.72	96.35	74.2	18.2
	BJP#03-03	24	84	23.64	93.12	75.9	18.4
	BJP#03-04	17	106	25.51	90.44	69.3	20.6
	BJP#03-05	23	100	23.03	90.90	71.1	21.3
	BJP#04-01	18	133	21.33	88.08	77.0	22.0
	BJP#04-02	19	110	20.80	88.75	88.6	21.3
	BJP#04-03	24	116	20.23	77.19	91.5	19.0
	BJP#04-04	23	121	22.61	95.94	87.5	20.6
	BJP#04-05	23	117	19.71	76.88	83.3	19.8
	BJP#05-01	26	117	20.39	64.75	80.5	22.4
	BJP#05-02	32	150	20.51	70.66	90.7	20.2
	BJP#05-03	26	163	20.36	67.18	96.1	22.9
	BJP#05-04	36	174	19.13	71.94	85.0	24.0
	BJP#05-05	31	169	21.29	79.42	92.2	22.1
경기 충청벼 평균		17.4	79.2	24.7	88.3	84.9	19.5
전국 벼 평균		19.2	83.1	17.3	88.5	-	-

표 3.5.6 시험지구 수량구성요소 (2013년) (계속)

지구	지점	개체당 이삭수 (ea)	이삭당 영화수 (ea)	천립중 (g)	등숙률 (%)	간장 (cm)	수장 (cm)
오산 제이용지구	OSP#01-01	22	77	23.66	90.31	77.8	18.1
	OSP#01-02	23	89	24.51	94.74	78.9	18.4
	OSP#01-03	25	82	24.11	94.73	79.5	17.6
	OSP#01-04	21	96	24.35	92.19	79.8	17.8
	OSP#01-05	25	71	24.61	93.89	76.5	18.4
	OSP#02-01	25	89	23.33	93.36	77.5	18.7
	OSP#02-02	22	126	23.97	92.94	78.6	21.0
	OSP#02-03	31	67	23.92	94.26	84.2	17.2
	OSP#02-04	29	104	24.43	94.21	79.4	19.1
	OSP#02-05	22	109	23.92	92.46	83.2	16.9
	OSP#03-01	26	95	20.46	95.87	73.8	19.4
	OSP#03-02	30	97	22.83	95.44	77.7	19.9
	OSP#03-03	16	111	23.72	94.53	76.3	17.6
	OSP#03-04	26	96	23.30	94.14	75.9	19.1
	OSP#03-05	25	94	23.07	92.87	75.3	17.7
	OSP#04-01	45	91	23.37	95.72	92.0	18.0
	OSP#04-02	43	129	24.12	95.08	91.1	20.9
	OSP#04-03	44	87	23.76	94.15	90.0	18.0
	OSP#04-04	29	93	22.38	94.60	93.5	17.5
	OSP#04-05	29	79	23.16	93.84	85.5	16.5
	OSP#05-01	34	88	20.10	77.36	80.5	20.5
	OSP#05-02	44	71	21.19	80.44	90.0	17.0
	OSP#05-03	38	78	22.09	88.88	89.1	17.0
	OSP#05-04	26	95	22.32	76.65	83.0	18.0
	OSP#05-05	38	74	21.08	83.68	85.3	16.2
호련지구	호련#01-01	16	73	23.12	96.08	77.8	16.2
	호련#01-02	20	113	22.65	91.85	77.5	20.5
	호련#01-03	24	101	22.22	94.57	85.5	29.0
	호련#01-04	14	77	21.80	87.96	78.5	17.5
	호련#01-05	19	110	21.00	92.97	78.3	19.9
수화지구	수화#01-01	19	76	23.66	96.78	85.0	15.3
	수화#01-02	19	103	23.46	96.69	96.0	18.0
	수화#01-03	11	92	23.65	96.75	95.0	18.2
	수화#01-04	26	80	23.39	96.68	89.0	17.4
	수화#01-05	19	104	23.52	96.20	85.4	18.6
장전지구	장전#01-01	25	83	24.56	94.23	84.8	18.8
	장전#01-02	22	80	22.80	86.84	84.7	19.1
	장전#01-03	29	74	22.68	86.03	86.0	19.0
	장전#01-04	27	113	22.46	86.27	82.9	18.1
	장전#01-05	33	140	23.38	87.69	87.4	22.0
경기 추정벼 평균		17.4	79.2	24.7	88.3	84.9	19.5
전국 벼 평균		19.2	83.1	17.3	88.5	-	-

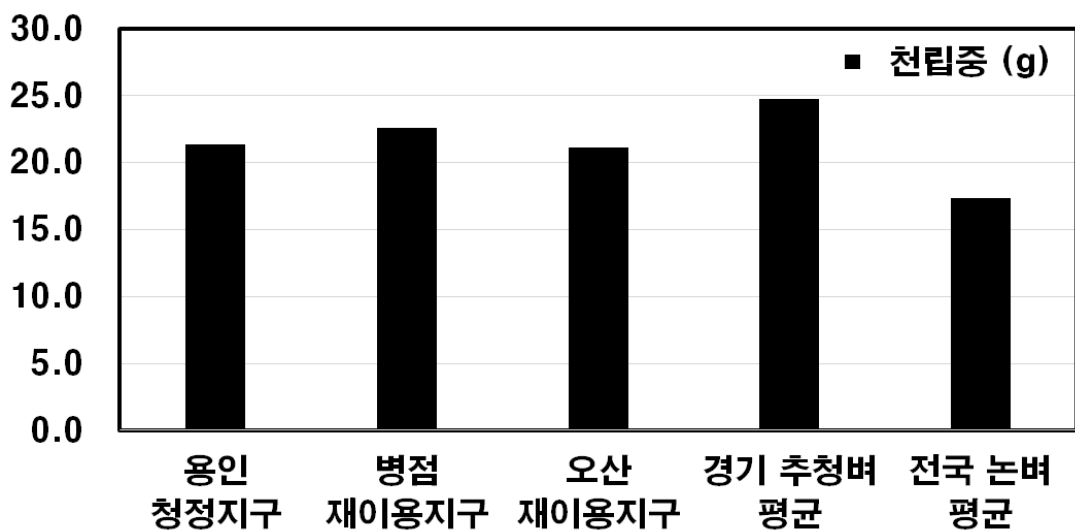
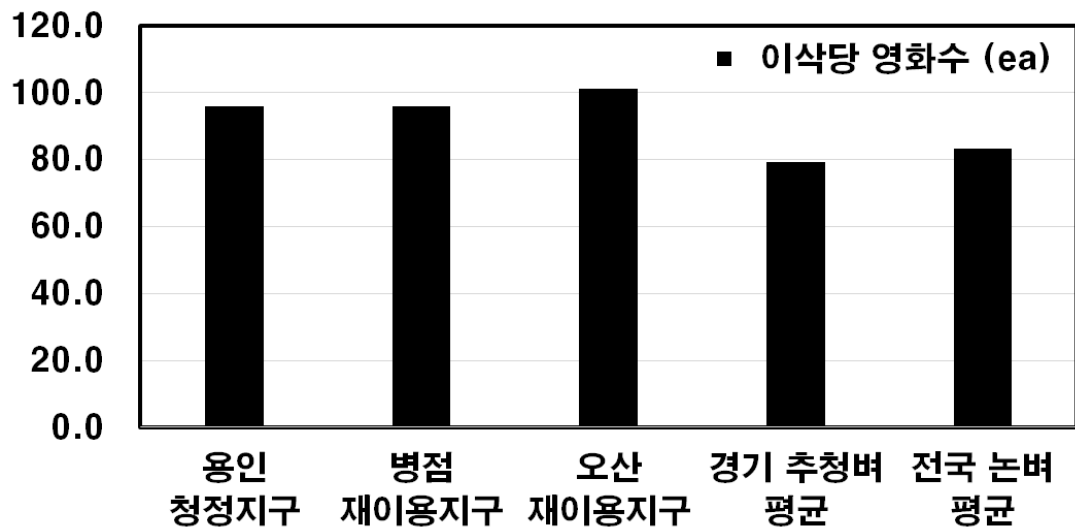
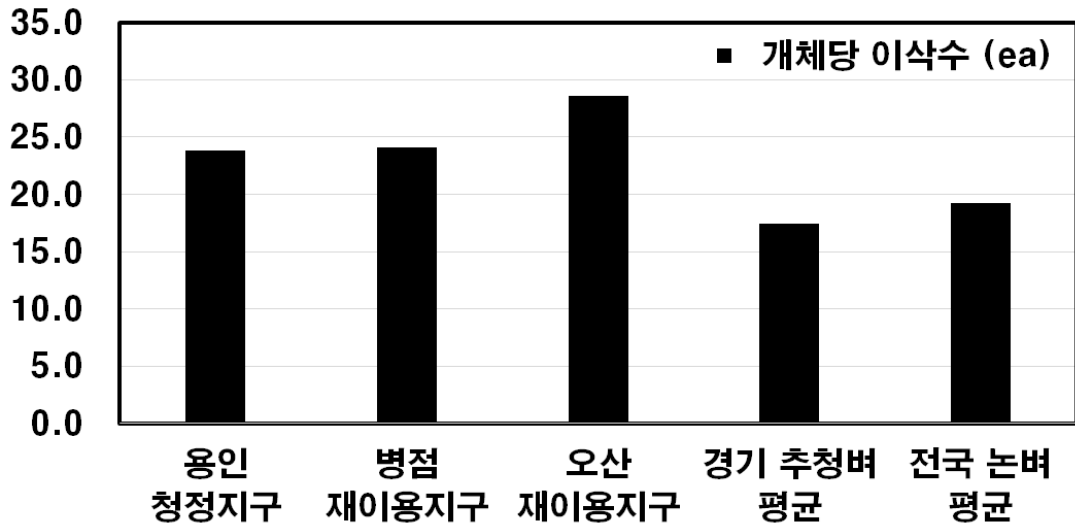


그림 3.5.6 시험지구별 논벼 수량구성요소 (2011년)

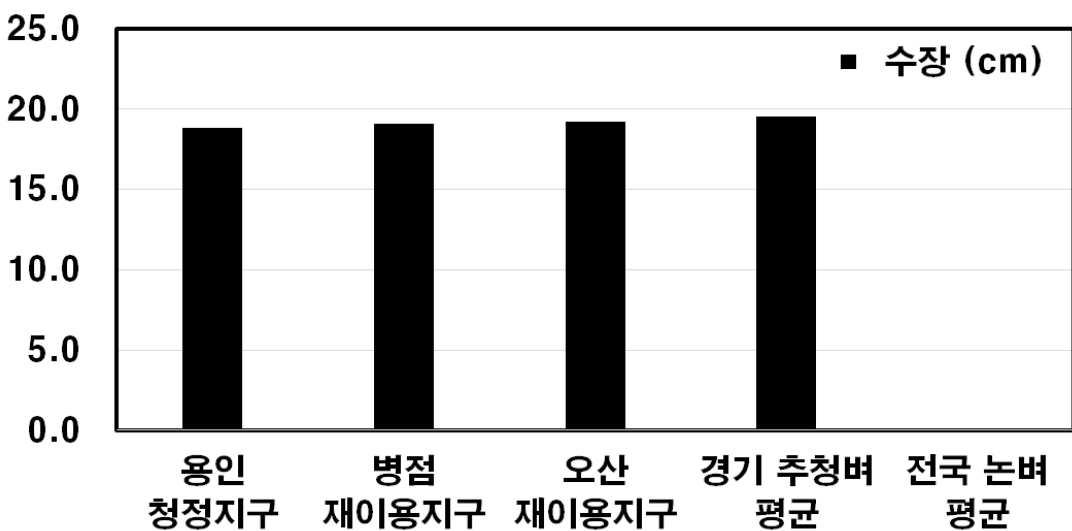
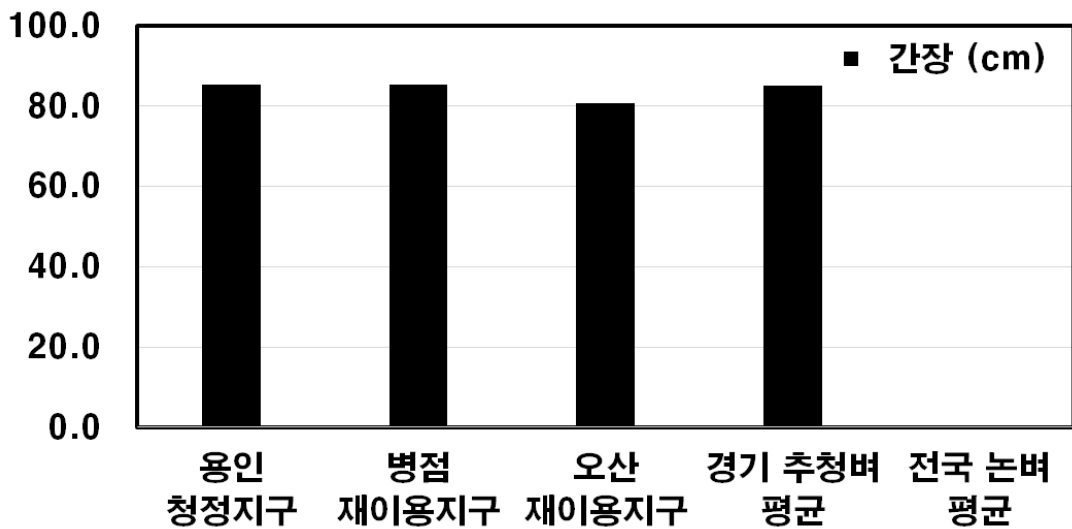
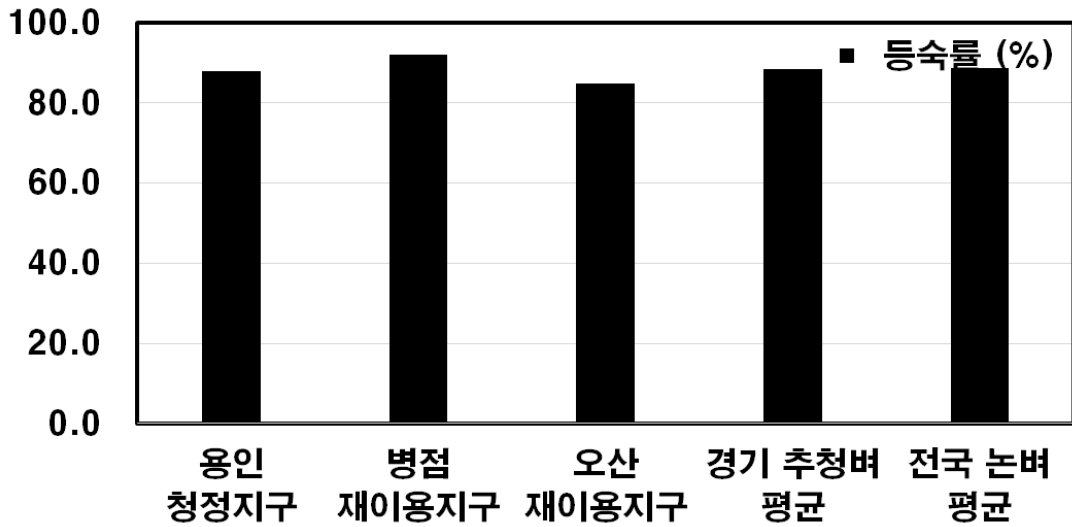


그림 3.5.6 시험지구별 논벼 수량구성요소 (2011년) (계속)

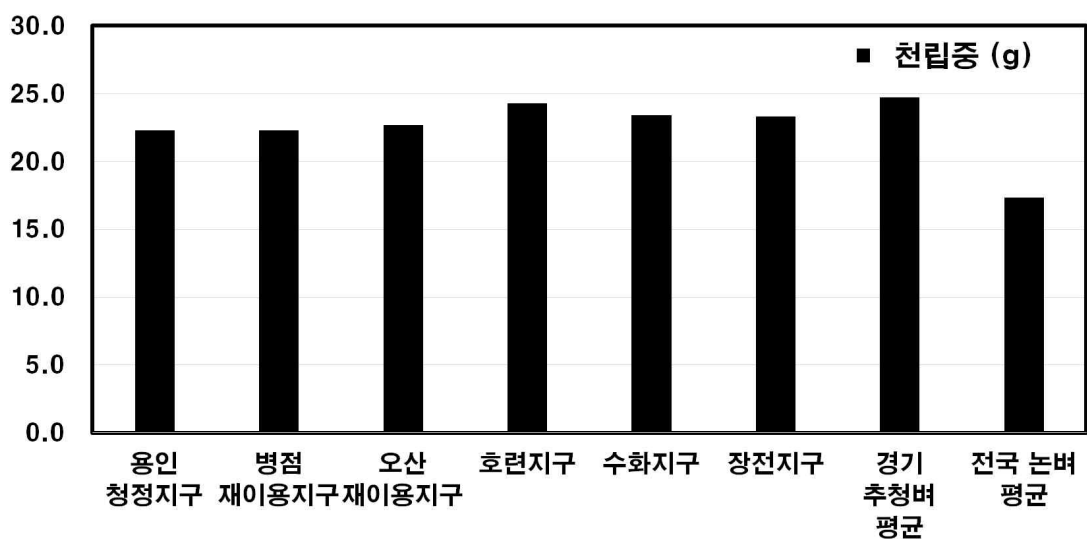
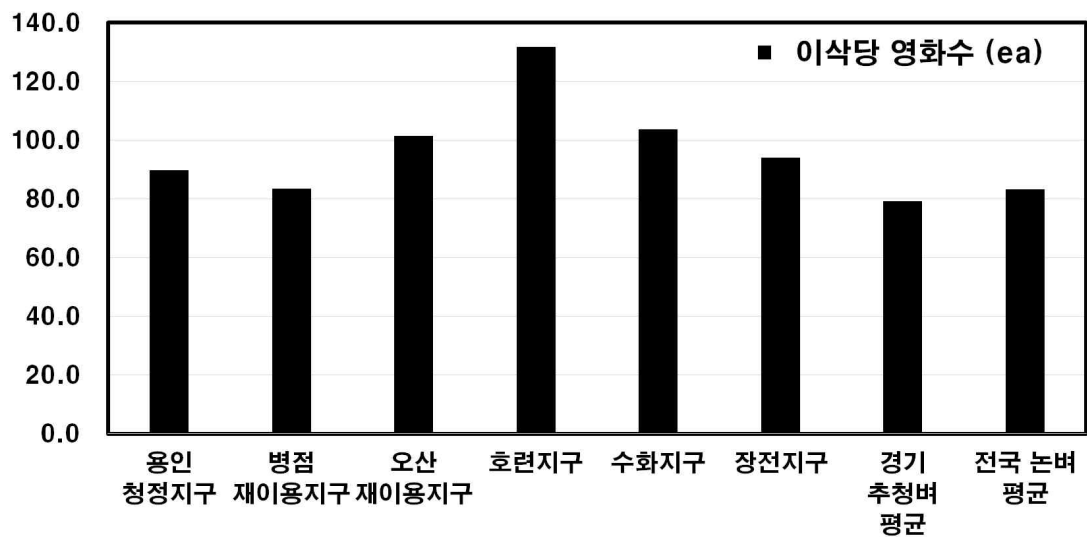
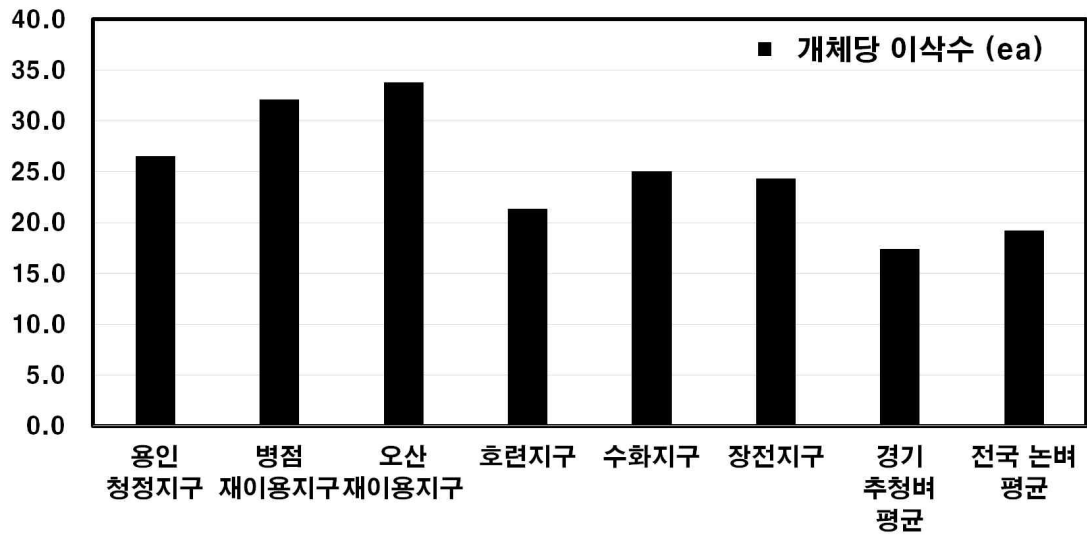


그림 3.5.7 시험지구별 논벼 수량구성요소 (2012년)

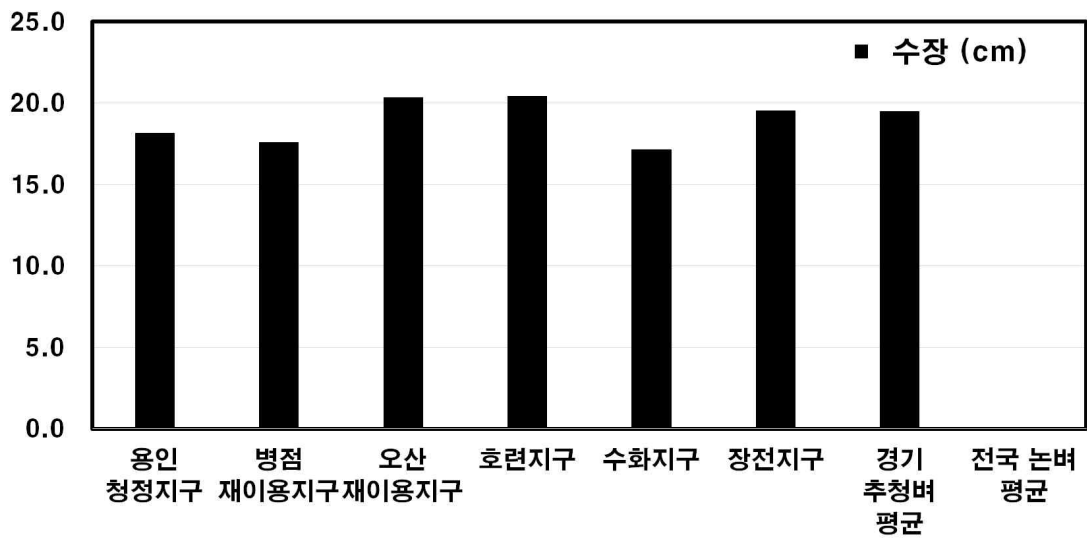
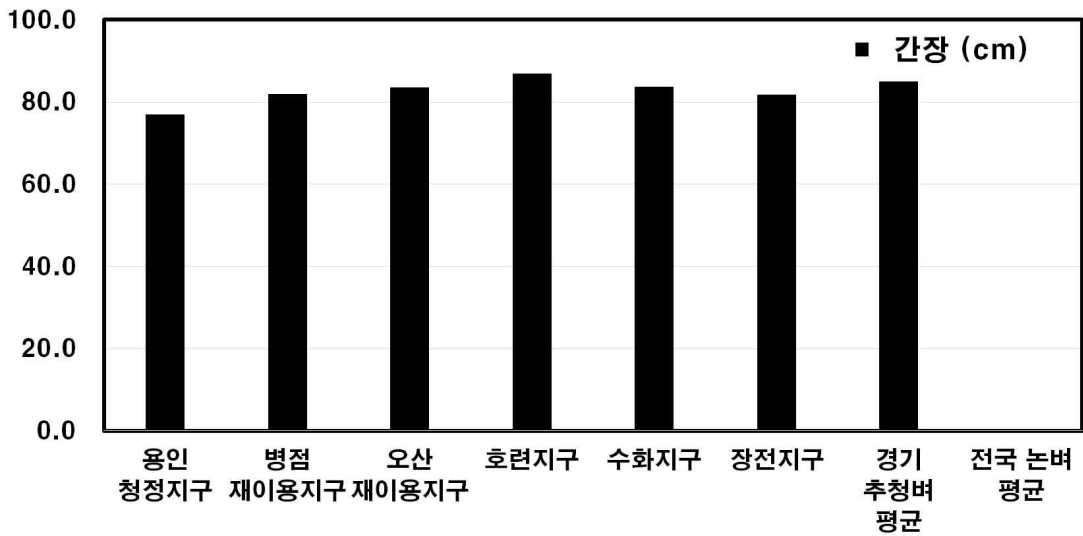
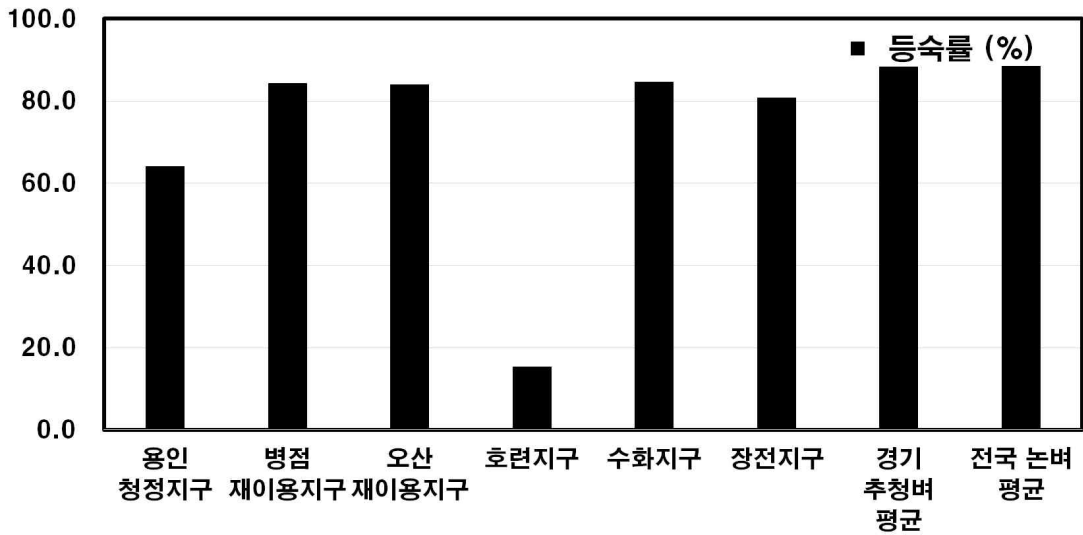


그림 3.5.7 시험지구별 논벼 수량구성요소 (2012년) (계속)

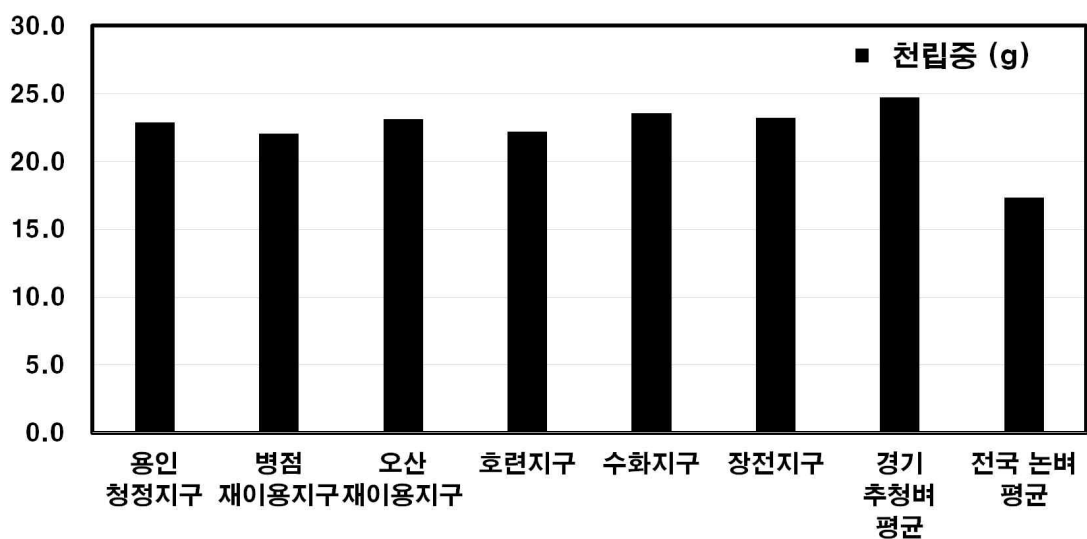
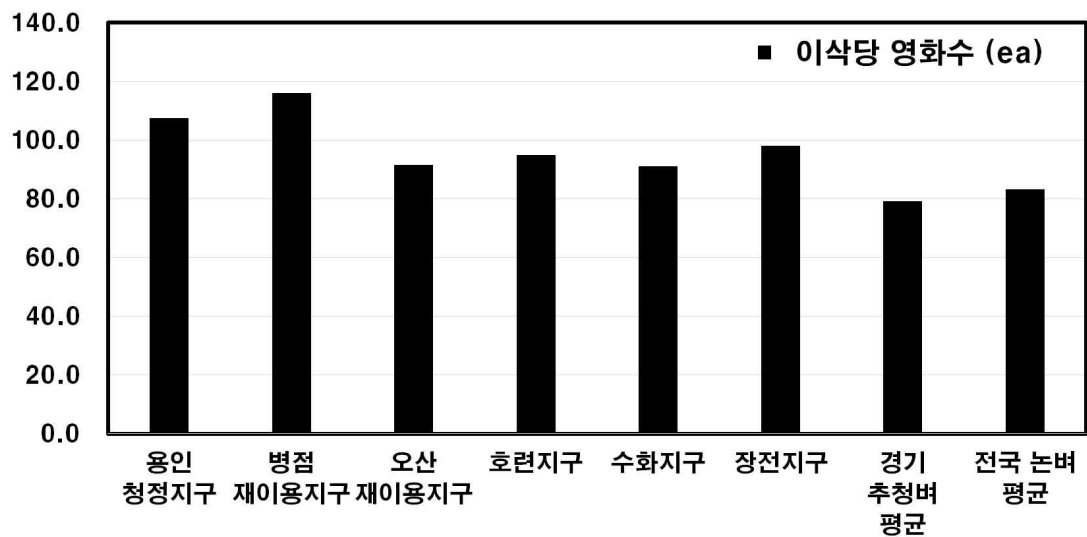
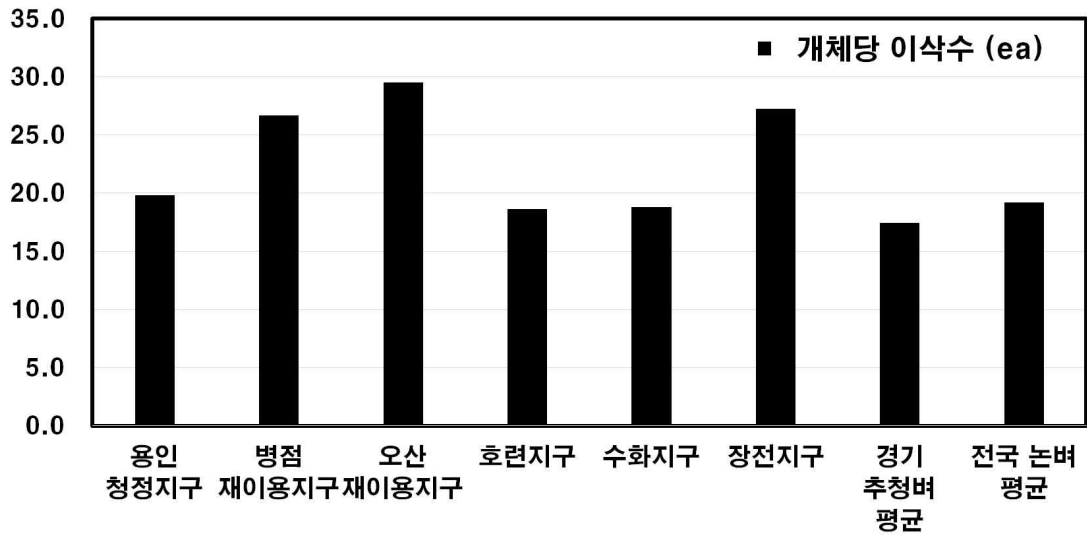


그림 3.5.8 시험지구별 논벼 수량구성요소 (2013년)

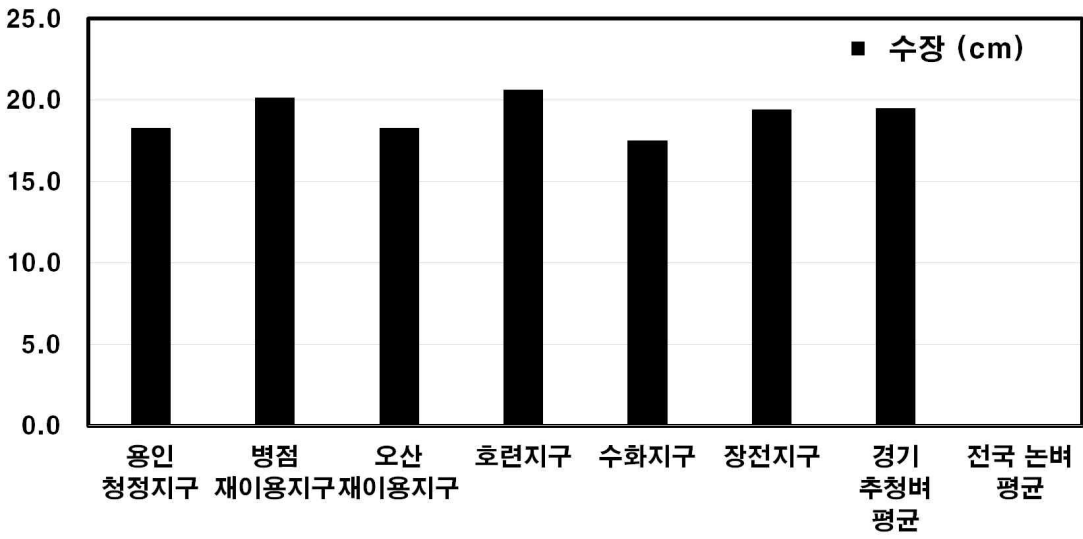
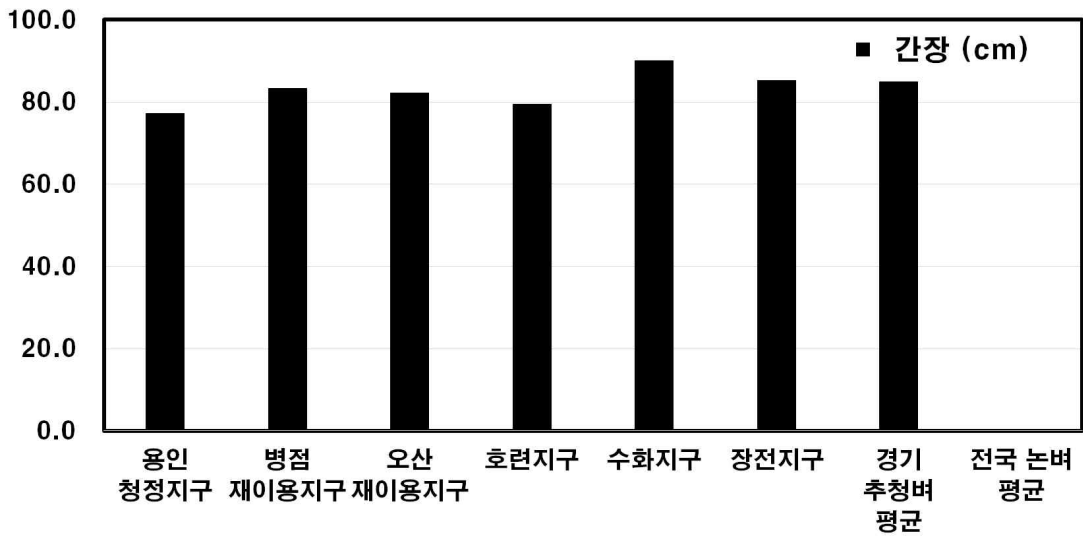
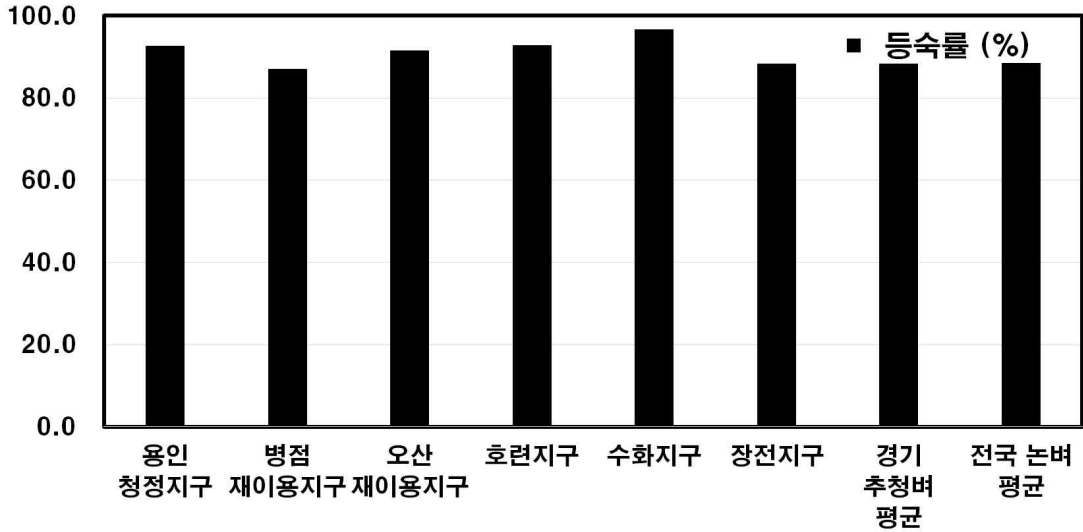


그림 3.5.8 시험지구별 논벼 수량구성요소 (2013년) (계속)

4. 논벼 성분 조사 분석

4.1. 식물체 중금속 함량

처리구별로 수확 전 논벼의 농업용수 이용에 따른 식물체의 중금속 집적을 추적하기 위하여 용인청정지구 및 간접재이용지구인 병점과 오산에 위치한 각 5개의 논 시험포장에서 논벼를 5주씩 채취하였다. 농업과학기술원 (2000)에서 제시한 “토양 및 식물체 분석법”에 준하여 중금속 오염토양에서 가장 많이 발견되는 중금속 중인 카드뮴 (Cd), 납 (Pb), 아연 (Zn) 등을 지점별로 평균 및 벼 부위별 (상-중-하)로 나누어 분석하였다.

표 3.5.7는 2011년도에 각 처리구에서 지점별로 채취한 벼의 중금속 함량을 평균 내어 나타내고 있다. 용인청정지구의 시험포장에서 채취한 벼의 주요 중금속 함량을 분석한 결과, 수은 (Hg)은 검출되지 않았으며 카드뮴 (Cd)은 일반 농경지 오염도 (농촌진흥청, 2008) 보다는 높게 측정되었으나, 농촌진흥청 기준대안에는 미치지 않았다. 구리 (Cu)와 비소 (As)는 일반 농경지 오염도뿐만 아니라 농촌진흥청 기준대안도 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 간접재이용지구인 병점 및 오산에서 채취한 벼의 주요 중금속 함량을 각각 평균 내어 분석한 결과, 두 지구 모두 수은 (Hg)을 제외한 중금속의 측정값이 일반농경지 오염도 및 농촌진흥청 기준대안을 초과하였다. 그림 3.5.8은 각 처리구에서 지점별로 채취한 벼의 중금속 함량을 나타낸 것이다.

표 3.5.8은 2012년도에 각 처리구에서 지점별로 채취한 벼의 중금속 함량을 평균 내어 나타내고 있다. 용인청정지구의 시험포장에서 채취한 벼의 주요 중금속 함량을 분석한 결과, 수은 (Hg)은 검출되지 않았으며 카드뮴 (Cd)은 평균적으로 일반 농경지 오염도 (농촌진흥청, 2008) 보다는 높게 측정되었으나, 농촌진흥청 기준대안에는 미치지 않았다. 구리 (Cu)와 비소 (As)는 일반 농경지 오염도와 농촌진흥청 기준대안을 모두 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 간접재이용지구인 병점 및 오산에서 채취한 벼의 주요 중금속 함량을 각각 평균 내어 분석한 결과, 두 지구 모두 수은 (Hg)을 제외한 중금속의 측정값이 일반농경지 오염도 및 농촌진흥청 기준대안을 초과하였다. 미처리지구에서 채취한 벼의 주요 중금속 함량을 각각 평균 내어 분석하면, 카드뮴 (Cd)을 제외한 중금속의 측정값이 일반농경지 오염도 및 농촌진흥청 기준대안을 초과하였다. 그림 3.5.9 ~ 그림 3.5.10 는 각 처리구에서 지점별로 채취한 벼의 중금속 함량을 나타낸 것이다.

표 3.5.7 시험지구 논벼 중 중금속 함량 분석결과 (2011년)

지구	지점	Cu	As	Cd	Zn	Pb
		(mg/kg)				
용인청정지구 (YIP)	YIP#01	2.40	2.48	0.03	ND	2.09
	YIP#02	2.02	3.64	0.05	ND	1.92
	YIP#03	2.35	3.15	0.08	0.01	1.60
	YIP#04	4.68	1.38	0.08	ND	2.22
	YIP#05	5.13	3.35	0.18	0.01	1.97
병점 재이용지구 (BJP)	BJP#01	7.40	1.96	0.38	0.00	3.38
	BJP#02	2.68	0.74	0.09	0.02	1.47
	BJP#03	4.64	0.81	0.14	ND	2.56
	BJP#04	6.91	2.38	0.25	ND	4.45
	BJP#05	13.33	2.13	0.99	0.02	4.27
오산 재이용지구 (OSP)	OSP#01	3.09	1.17	0.37	ND	2.81
	OSP#02	3.84	0.78	0.53	0.00	3.21
	OSP#03	3.63	0.81	0.45	ND	3.71
	OSP#04	3.76	0.40	0.26	ND	6.43
	OSP#05	3.39	0.30	0.66	ND	1.98
일반 농경지		2.79	0.07	0.03	0.02	0.35
농촌진흥청 기준대안 (곡류)		0.21	0.19	0.15	-	0.15

(ND*: not detected)

표 3.5.8 시험지구 논벼 중 중금속 함량 분석결과 (2012년)

지구	지점	Cu	As	Cd	Zn	Pb
		(mg/kg)				
용인청정지구 (YIP)	YIP#01	6.42	2.17	0.06	26.30	0.91
	YIP#02	9.74	2.71	0.12	29.09	2.87
	YIP#03	8.06	3.06	0.02	22.57	0.97
	YIP#04	5.91	1.35	0.04	21.38	1.50
	YIP#05	6.09	0.85	0.19	21.67	0.79
병점 재이용지구 (BJP)	BJP#01	3.10	0.66	0.13	44.47	1.17
	BJP#02	1.94	1.82	0.09	29.66	1.41
	BJP#03	3.54	1.39	0.10	38.98	2.07
	BJP#04	2.15	0.49	0.20	44.80	1.56
	BJP#05	4.70	2.41	0.36	60.57	5.65
오산 재이용지구 (OSP)	OSP#01	0.28	0.24	0.11	62.87	1.51
	OSP#02	0.49	0.40	0.21	41.98	1.43
	OSP#03	0.45	0.82	0.07	27.13	4.41
	OSP#04	0.21	0.70	0.18	30.28	0.71
	OSP#05	0.05	0.02	0.18	27.51	0.99
미처리지구	호련지구	8.72	2.66	0.00	16.98	0.81
	수화지구	10.97	2.36	0.02	19.80	0.44
	장전지구	10.41	3.43	0.03	22.08	1.45
일반 농경지		2.79	0.07	0.03	0.02	0.35
농촌진흥청 기준대안 (곡류)		0.21	0.19	0.15	-	0.15

(ND*: not detected)

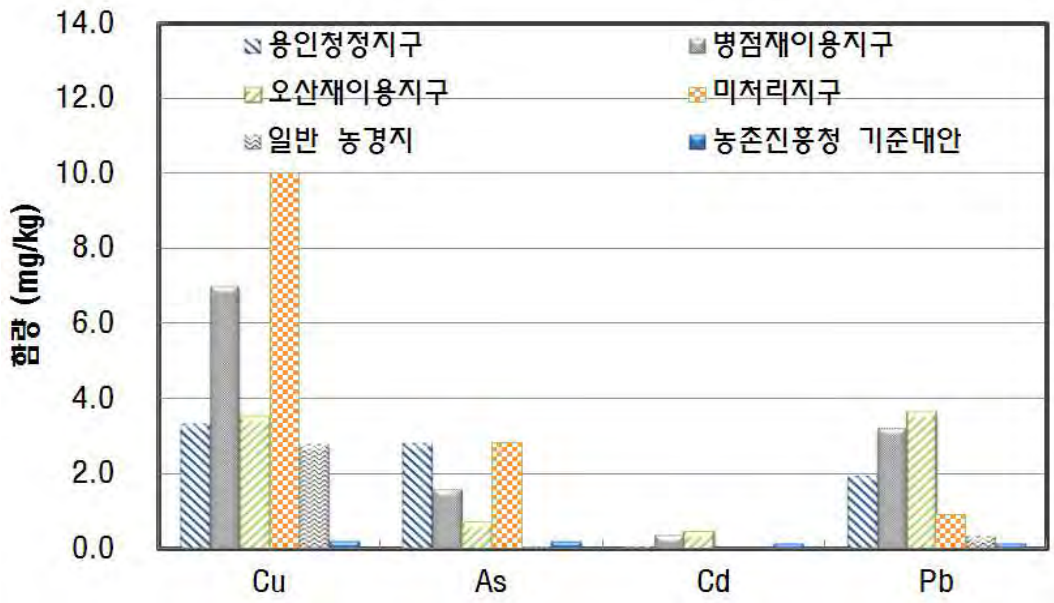


그림 3.5.9 시험지구별 논벼 중금속함량 (2011년)

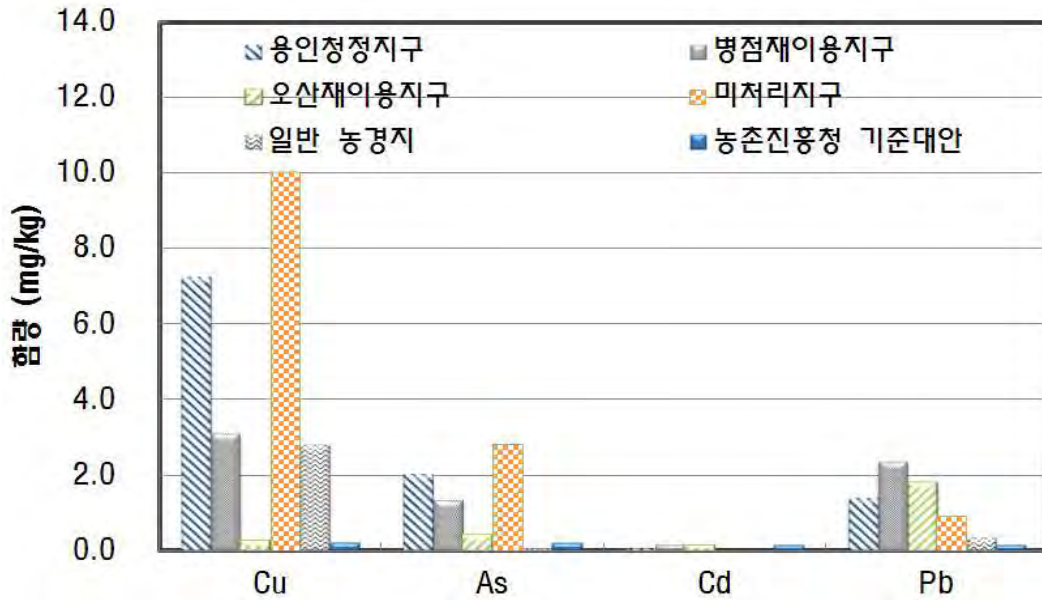


그림 3.5.10 시험지구별 논벼 중금속함량 (2012년)

표 3.5.9과 표 3.5.10은 용인청정지구, 오산재이용지구, 병점재이용지구, 미처리지구의 각 처리구별 시험포장에서 각 5주씩 채취한 벼의 부위별 중금속함량 분석결과를 나타내고 있다. 토양 내 중금속의 식물체 내 흡수이행 양상을 살펴보기 위하여 식물체 부위를 “상-중-하”로 나누어 분석하였다. 벼의 부위별 구리 (Cu), 비소 (As), 카드뮴 (Cd), 수은 (Hg) 및 납 (Pb)의 함량을 살펴보면 용인청정지구 및 간접재이용지구에서 채취한 벼 모두 뿌리에서는 카드뮴의 축적량이 높았으며, 벼에 흡수이행 된 다른 중금속의 대부분은 벼짚에 높게 분포하였다. 수은의 경우 극소량이거나 혹은 검출되지 않

은 지점이 많아 따로 도식화하지 않았다. 그림 3.5.11 ~ 그림 3.5.12은 각 처리구별 시험포장에서 각 5주씩 채취한 벼의 부위별 중금속함량 분석결과를 나타내고 있다.

표 3.5.9 시험지구 벼 부위별 중금속 축적양상 (2011년)

지구	지점	부위	Cu	As	Cd	Zn	Pb
			(mg/kg)				
용인 청정지구 (YIP)	YIP#01	상	3.42	2.70	0.03	ND	2.66
		중	1.83	2.95	0.02	ND	1.82
		하	1.95	1.80	0.03	ND	1.81
	YIP#02	상	2.08	4.05	0.04	ND	2.65
		중	1.86	3.41	0.04	ND	1.55
		하	2.11	3.47	0.07	ND	1.57
	YIP#03	상	2.10	3.04	0.05	ND	1.40
		중	2.42	2.86	0.06	0.01	1.31
		하	2.54	3.55	0.12	0.00	2.10
	YIP#04	상	4.60	0.89	0.06	ND	2.69
		중	4.73	1.54	0.08	ND	1.82
		하	4.71	1.71	0.10	ND	2.17
	YIP#05	상	5.32	3.60	0.25	ND	2.35
		중	5.26	2.58	0.16	ND	1.70
		하	4.83	3.88	0.12	0.01	1.85
병점 재이용지구 (BJP)	BJP#01	상	5.10	2.40	0.18	0.00	4.37
		중	3.96	2.11	0.27	ND	3.63
		하	13.15	1.38	0.70	ND	2.14
	BJP#02	상	2.85	0.76	0.04	ND	1.32
		중	2.24	0.60	0.12	ND	1.51
		하	2.96	0.85	0.13	0.02	1.58
	BJP#03	상	4.49	0.93	0.06	ND	2.56
		중	4.59	0.89	0.12	ND	3.01
		하	4.84	0.63	0.24	ND	2.12
	BJP#04	상	9.32	2.85	0.21	ND	4.81
		중	5.53	2.64	0.16	ND	4.05
		하	5.86	1.64	0.39	ND	4.51
	BJP#05	상	7.20	1.90	0.31	ND	3.71
		중	25.06	3.06	1.98	0.01	4.75
		하	7.73	1.44	0.68	0.03	4.34
오산 재이용지구 (OSP)	OSP#01	상	3.17	1.54	0.17	ND	4.15
		중	3.09	1.07	0.41	ND	2.25
		하	3.02	0.88	0.54	ND	2.03
	OSP#02	상	3.37	0.67	0.24	ND	3.29
		중	3.48	1.15	0.71	0.00	2.37
		하	4.68	0.50	0.65	0.00	3.96
	OSP#03	상	3.58	1.20	0.24	ND	2.95
		중	2.83	0.64	0.47	ND	2.91
		하	4.46	0.58	0.64	ND	5.27
	OSP#04	상	3.79	0.67	0.08	ND	13.15
		중	3.08	0.29	0.28	ND	2.80
		하	4.41	0.24	0.43	ND	3.34
	OSP#05	상	3.15	0.42	0.44	ND	2.23
		중	3.32	0.18	0.83	ND	2.07
		하	3.70	ND	0.72	ND	1.65

(ND*: not detected)

표 3.5.10 시험지구 벼 부위별 중금속 축적양상 (2012년)

지구	지점	부위	Cu	As	Cd	Zn	Pb
			(mg/kg)				
용인 청정지구 (YIP)	YIP#01	상	7.17	3.23	0.06	19.75	2.00
		중	5.75	1.49	0.02	30.17	0.36
		하	6.34	1.79	0.09	28.98	0.37
	YIP#02	상	5.20	3.21	0.04	24.21	6.65
		중	9.28	2.13	0.12	30.29	1.00
		하	14.75	2.78	0.20	32.77	0.97
	YIP#03	상	0.08	3.39	0.00	15.63	0.72
		중	9.33	2.68	0.01	26.29	0.99
		하	14.78	3.11	0.04	25.78	1.18
	YIP#04	상	3.08	1.49	0.01	17.51	3.06
		중	8.37	1.31	0.03	21.60	1.29
		하	6.28	1.24	0.07	25.05	0.15
	YIP#05	상	3.01	0.89	0.07	16.86	1.13
		중	6.99	0.77	0.25	24.83	0.89
		하	8.27	0.90	0.25	23.33	0.35
병점 재이용지구 (BJP)	BJP#01	상	0.39	0.26	0.06	24.29	1.07
		중	1.78	0.50	0.12	43.95	1.30
		하	7.14	1.23	0.21	65.18	1.12
	BJP#02	상	0.01	0.85	0.04	18.45	1.86
		중	2.14	1.28	0.09	34.64	1.59
		하	3.69	3.32	0.13	35.90	0.78
	BJP#03	상	0.49	0.84	0.04	19.33	2.21
		중	5.66	1.06	0.11	51.15	1.58
		하	4.47	2.29	0.16	46.46	2.41
	BJP#04	상	0.18	0.28	0.06	21.75	1.61
		중	5.46	0.50	0.20	51.19	1.43
		하	0.80	0.69	0.32	61.46	1.64
	BJP#05	상	3.38	1.08	0.21	39.60	3.86
		중	5.09	5.22	0.34	66.68	2.77
		하	5.64	0.94	0.54	75.43	10.32
오산 재이용지구 (OSP)	OSP#01	상	0.32	0.25	0.05	47.47	1.63
		중	0.00	0.12	0.08	61.00	2.08
		하	0.52	0.35	0.21	80.14	0.83
	OSP#02	상	0.18	0.57	0.11	32.31	1.61
		중	0.26	0.11	0.19	44.80	1.74
		하	1.05	0.52	0.34	48.83	0.94
	OSP#03	상	0.34	1.45	0.04	24.08	1.74
		중	0.66	0.18	0.05	24.19	1.47
		하	0.36	0.83	0.12	33.13	10.03
	OSP#04	상	0.19	1.13	0.08	22.85	1.04
		중	0.00	0.41	0.19	31.41	0.45
		하	0.43	0.56	0.27	36.59	0.66
	OSP#05	상	0.15	0.00	0.10	20.18	1.30
		중	0.00	0.06	0.19	33.30	0.42
		하	0.00	0.00	0.25	29.04	1.26

표 3.5.10 시험지구 벼 부위별 중금속 축적양상 (2012년) (계속)

지구	지점	부위	Cu	As	Cd	Zn	Pb
			(mg/kg)				
호련지구	호련#01	상	8.66	2.88	0.00	13.11	1.26
		중	10.45	2.53	0.00	18.13	0.28
		하	7.06	2.57	0.01	19.69	0.88
수화지구	수화#02	상	10.84	3.23	0.00	17.42	0.73
		중	16.91	1.80	0.01	21.38	0.30
		하	5.16	2.05	0.04	20.60	0.29
장전지구	장전#03	상	9.28	3.47	0.01	17.79	1.30
		중	14.36	2.65	0.01	19.97	0.82
		하	7.60	4.18	0.05	28.48	2.22

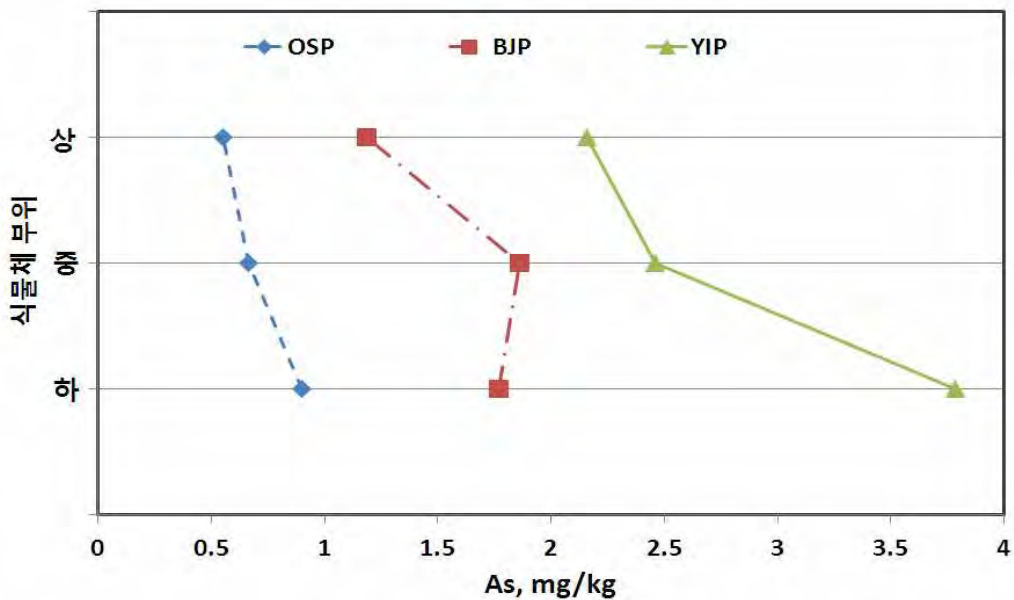
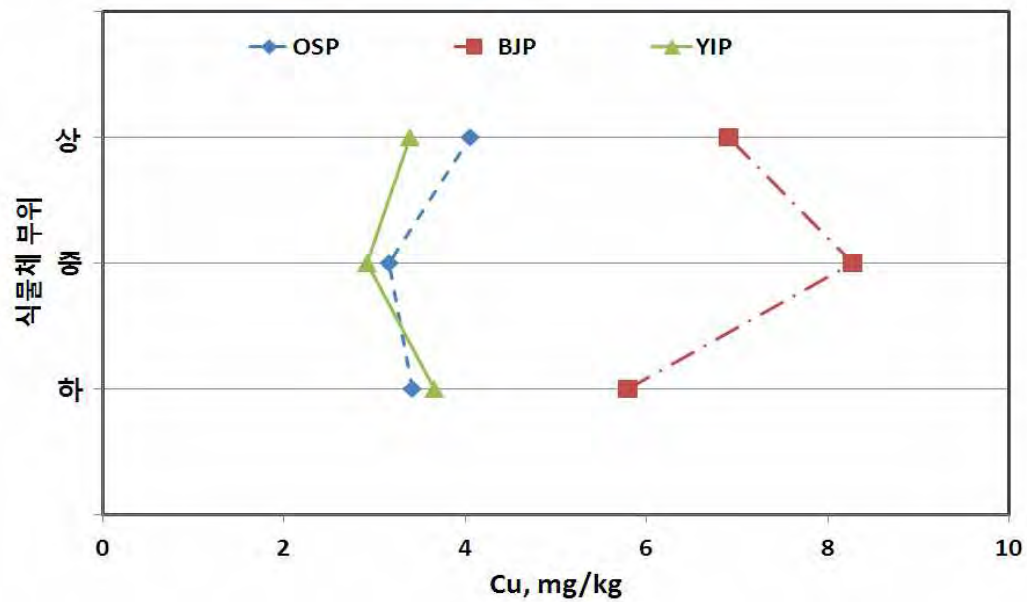


그림 3.5.11 각 시험지구 논벼 중금속 축적양상 (2011년)

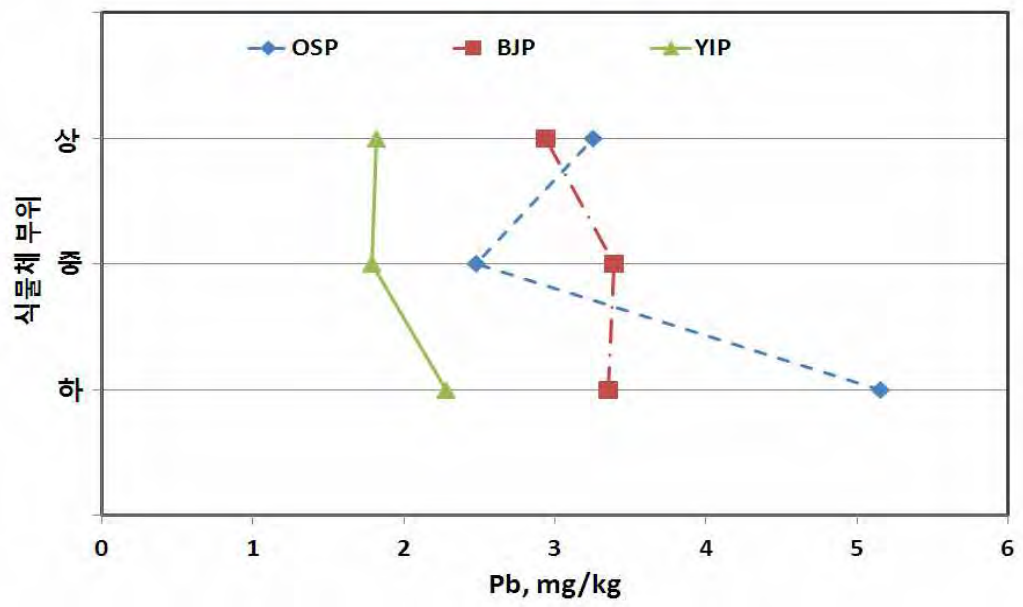
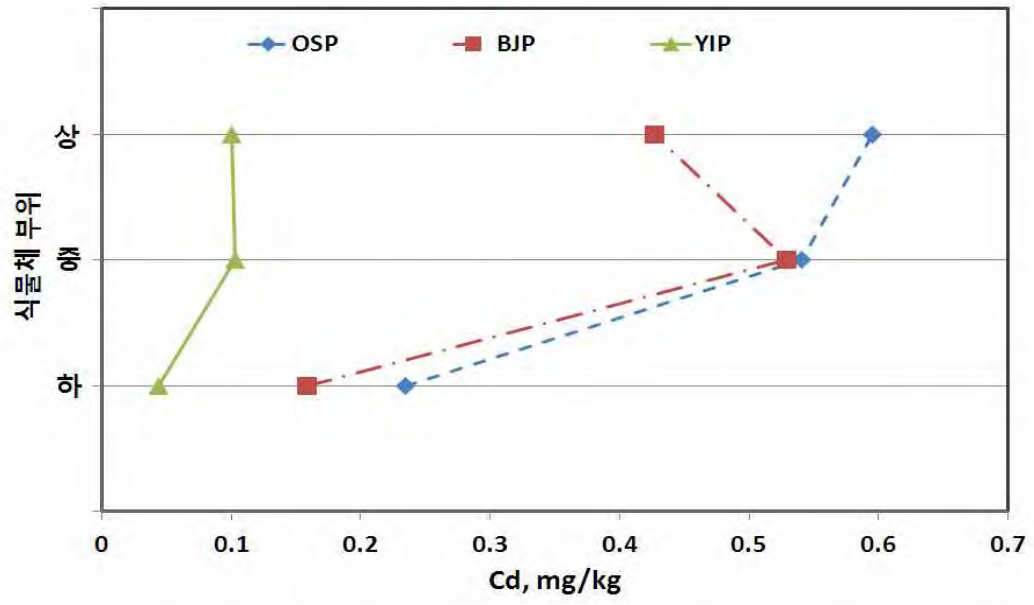


그림 3.5.11 각 시험지구 논벼 중금속 축적양상 (2011년) (계속)

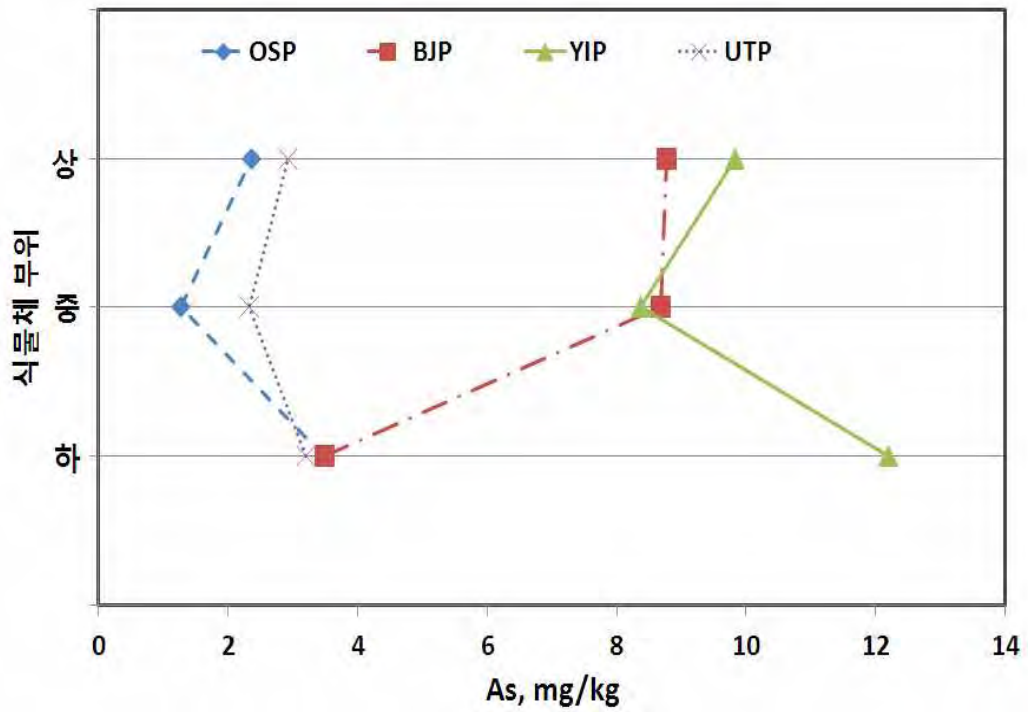
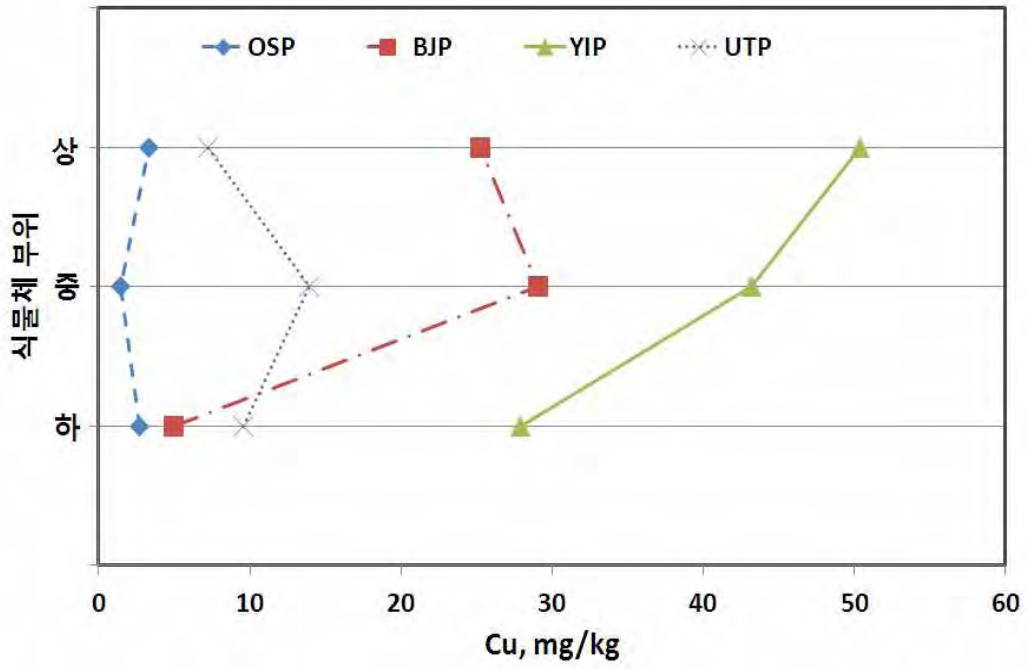


그림 3.5.12 각 시험지구 논벼 중금속 축적양상 (2012년)

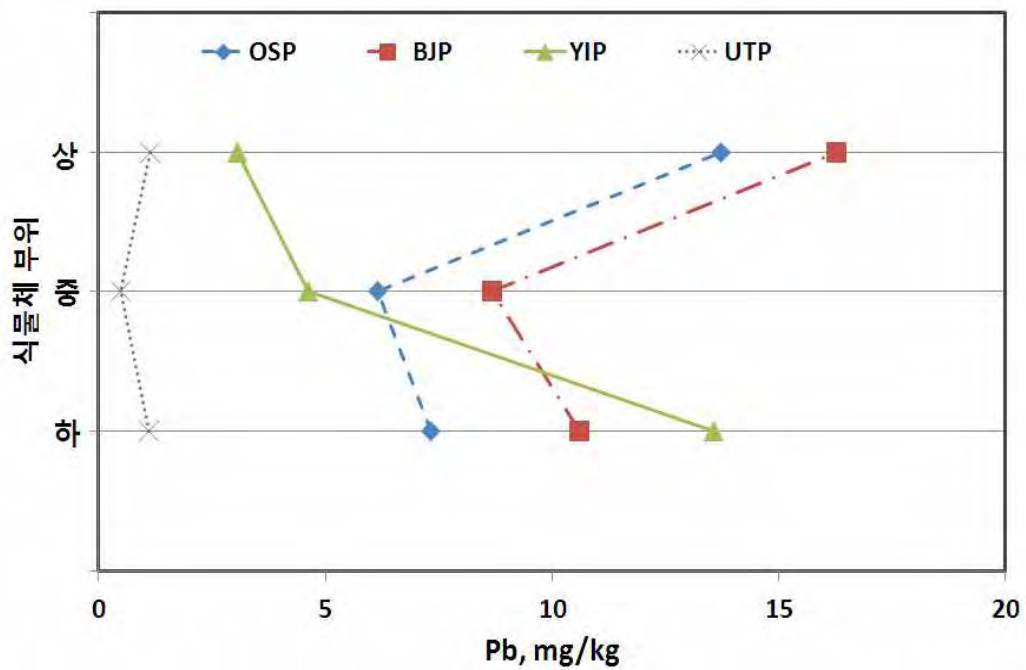
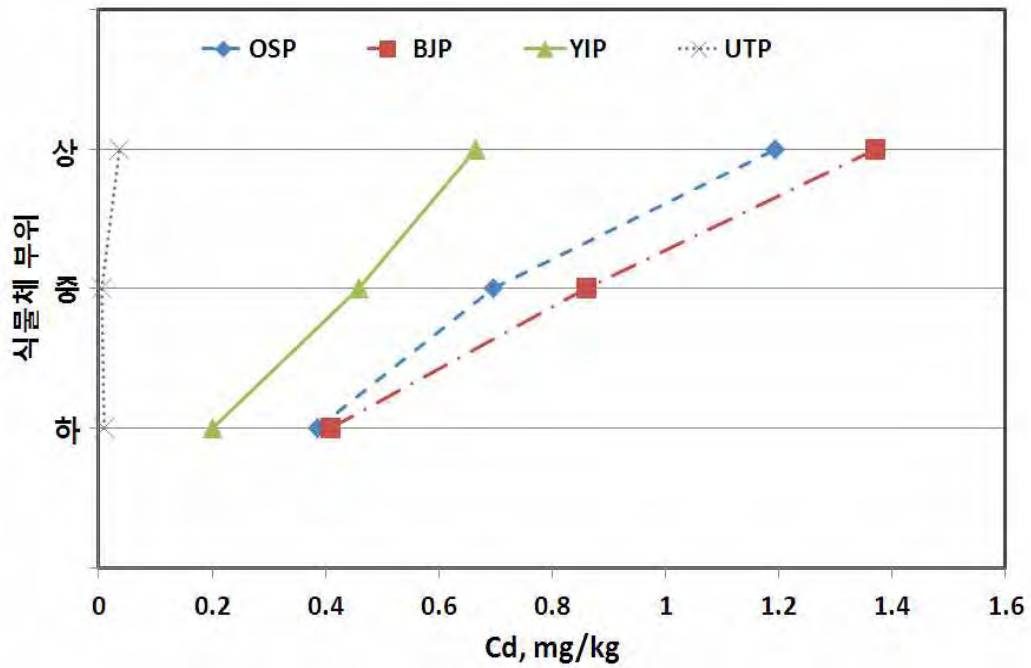


그림 3.5.12 각 시험지구 논벼 중금속 축적양상 (2012년) (계속)

4.2. 백미 중금속 함량

쌀에 함유된 유해성 화학물질의 자연함유량을 조사하기 위하여 처리구별로 재배된 벼를 수확 후 도정하여 분석하였다. 표 3.5.11은 2011년 백미시료에 대한 구리(Cu), As(비소), Cd(카드뮴), Zn(아연), Pb(납)의 자연함유량의 분석결과를 나타내며, 비소와 카드뮴은 검출되지 않았다. 표 3.5.12는 2012년 백미시료에 대한 구리(Cu), As(비소),

Cd(카드뮴), Zn(아연), Pb(납)의 자연함유량의 분석결과를 나타내며, 비소와 납은 검출되지 않았다. 표 3.5.13은 2013년 백미시료에 대한 구리(Cu), As(비소), Cd(카드뮴), Zn(아연), Pb(납)의 자연함유량 분석결과를 나타내며, 비소와 카드뮴은 검출되지 않았다. 검출된 다른 중금속의 분석결과는 일반농경지 백미의 중금속 함량 (농촌진흥청, 2008) 및 우리나라 식품위생법상 잔류허용기준과 비교하여 나타내었다. 비소의 기준값은 중국의 잔류허용기준을 참고하였다.

청정지구에서 재배된 쌀의 백미분석결과 검출된 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb)이 일반농경지 및 식품위생법 잔류허용기준을 초과하는 것으로 나타났다. 간접재이용지구 병점에서 재배된 쌀은 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb) 모두 일반농경지 및 식품위생법상 잔류허용기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 오산에서 재배된 쌀의 백미에서는 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb)이 일반농경지에 비해서는 낮게 측정되었으나, 식품위생법상 잔류허용기준은 대부분 초과하였다. 미처리지구에서 재배된 쌀은 아연(Zn)이 일반농경지 및 식품위생법상 잔류허용기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 비소와 카드뮴은 검출되지 않았다.

표 3.5.11 시험지구 백미의 중금속 함량 (2011년)

지구	지점	Cu	As	Cd	Zn	Pb
		(mg/kg)				
용인청정지구 (YIP)	YIP#01	2.89	ND	ND	18.80	3.54
	YIP#02	1.89	ND	ND	15.29	1.14
	YIP#03	1.43	ND	ND	13.81	0.77
	YIP#04	2.27	ND	ND	12.97	0.69
	YIP#05	2.07	ND	ND	13.75	0.84
병점재이용지구 (BJP)	BJP#01	4.09	ND	ND	16.40	1.20
	BJP#02	2.97	ND	ND	14.71	1.84
	BJP#03	3.17	ND	ND	16.49	2.49
	BJP#04	2.69	ND	ND	15.87	1.04
	BJP#05	3.08	ND	ND	16.94	0.95
오산재이용지구 (OSP)	OSP#01	0.85	ND	ND	12.80	0.57
	OSP#02	1.35	ND	ND	12.47	1.07
	OSP#03	2.21	ND	ND	14.18	1.20
	OSP#04	2.68	ND	ND	14.42	2.35
	OSP#05	2.69	ND	ND	12.36	1.00
일반농경지		1.64	11.36	0.276	0.058	0.026
식품위생법 잔류허용기준		1.0	5.0	0.2	0.15	0.2

(ND*: not detected)

표 3.5.12 시험지구 백미의 중금속 함량 (2012년)

지구	지점	Cu	As	Cd	Zn	Pb
		(mg/kg)				
용인청정지구 (YIP)	YIP	1.16	ND	0.014	14.990	ND
병점재이용지구 (BJP)	BJP	3.16	ND	0.032	19.494	ND
오산재이용지구 (OSP)	OSP	2.15	ND	0.020	19.310	ND
미처리지구 (호련지구)		1.39	ND	ND	14.580	ND
일반농경지		1.64	11.36	0.276	0.058	0.026
식품위생법 잔류허용기준		1.0	5.0	0.2	0.15	0.2

(ND*: not detected)

표 3.5.13 시험지구 백미의 중금속 함량 (2013년)

지구	지점	Cu	As	Cd	Zn	Pb
		(mg/kg)				
용인청정지구 (YIP)	YIP	1.15	ND	ND	20.03	10.42
병점재이용지구 (BJP)	BJP	2.24	ND	ND	20.10	3.56
오산재이용지구 (OSP)	OSP	2.25	ND	ND	23.03	2.47
미처리지구 (호련지구)		0.19	ND	ND	16.61	0.27
미처리지구 (수화지구)		0.73	ND	ND	16.85	ND
미처리지구 (장전지구)		1.71	ND	ND	21.82	2.53
일반농경지		1.64	11.36	0.276	0.058	0.026
식품위생법 잔류허용기준		1.0	5.0	0.2	0.15	0.2

(ND*: not detected)

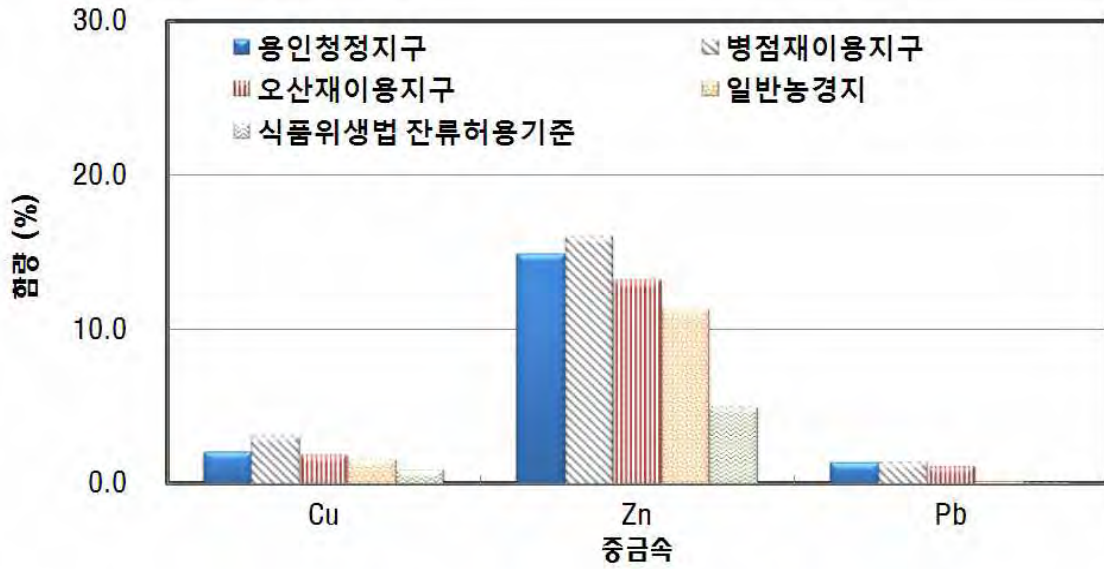


그림 3.5.13 각 시험지구 백미 중금속 함량 (2011년)

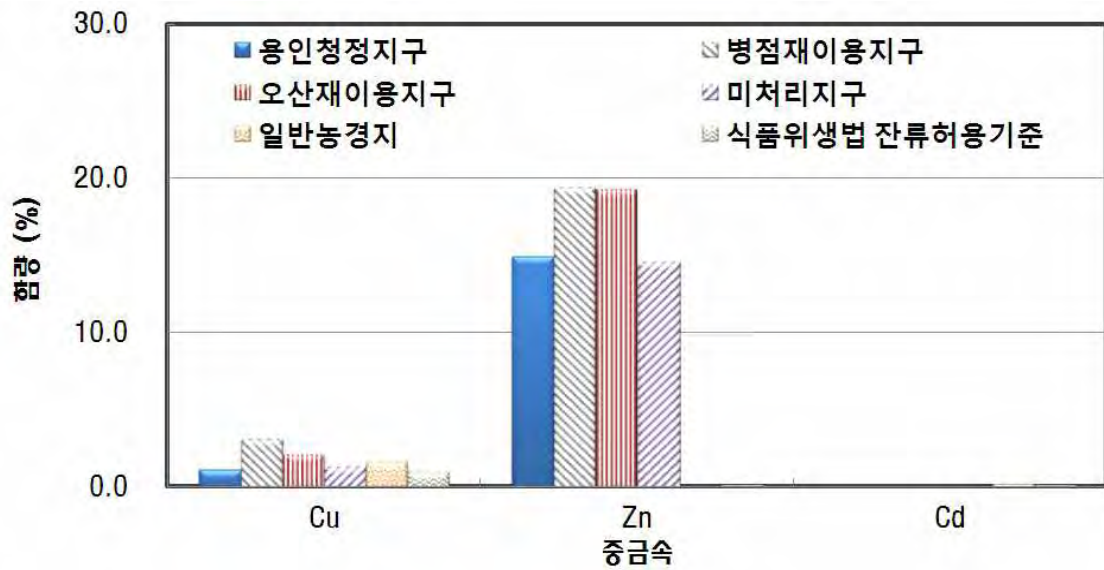


그림 3.5.14 각 시험지구 백미 중금속 함량 (2012년)

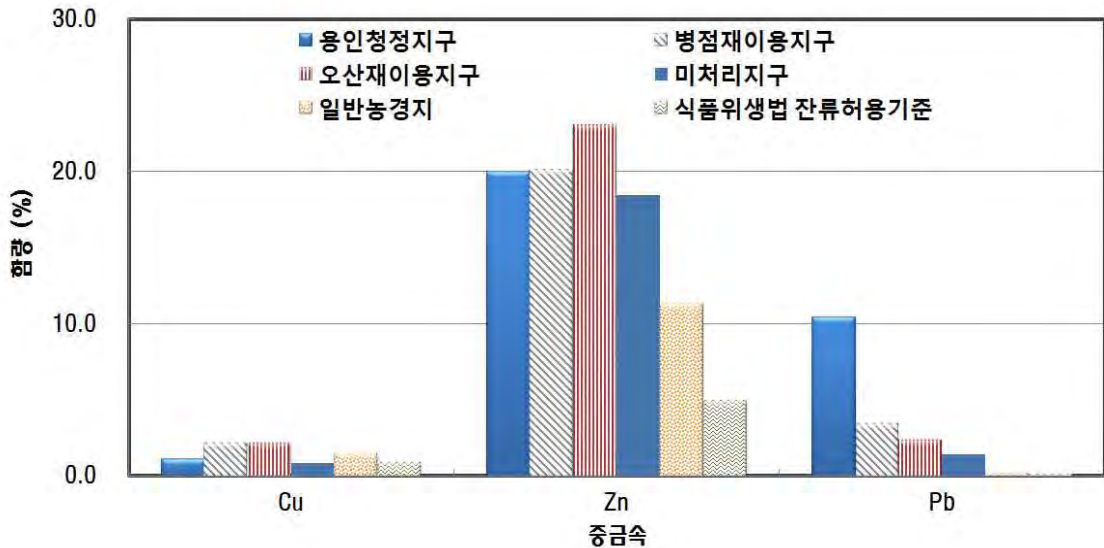


그림 3.5.15 각 시험지구 백미 중금속 함량 (2013년)

4.3. 식미 및 품위

이화학적 특성은 아밀로스 및 단백질 함량, 호화온도, Mg/K비 등으로 나뉘는데, 본 연구에서는 아밀로스 함량, 단백질 함량, 수분 함량 및 완전미도정수율로 비교하였다. 쌀의 탄수화물은 주로 녹말형태로 축적되어 있고 전분은 주로 아밀로스와 아밀로펙틴이라는 다당류로 구성되어 있으며, 아밀로스 함량이 낮은 쪽의 쌀이 밥에 찰기가 많고 부드러운 경향을 나타낸다 (농촌진흥청, 2008). 일반미의 경우, 아밀로스 함량은 17 ~ 20%범위에 속한다. 단백질 함량은 밥을 지었을 때 찰기와 구수한 향, 투명도, 밥을 지운 후 굳어지는 속도 등에 영향을 미치는 요소로 단백질의 함량이 높은 쌀은 물의 흡수를 저해하고 밥맛을 저해시킨다. 국내 일반미의 경우 7 ~ 8%, 국내 최고급 브랜드 쌀은 5 ~ 6%의 단백질이 함유되어 있다. 쌀의 수분함량이 높으면 미생물 번식이 쉽고 효소 작용이 활발하여 품질변화가 일어나기 쉽다. 좋은 쌀의 수분함량은 15% 내외로 적당히 건조되어 있어야 한다. 일반적으로 벼를 쌀로 만드는 것을 도정이라 하며, 완전미 도정수율은 도정된 백미 중에서 분상질미, 설미, 쇠미, 불완전미 등을 제외한 완전한 쌀알의 수율값을 나타낸다 (농촌진흥청, 2008).

본 연구에서는 청정지구 및 간접재이용지구에서 재배된 2011년, 2012년 수확한 백미의 아밀로스, 단백질, 수분함량 및 완전미도정수율을 국립식량과학원, 경기도농업기술원에 의뢰하여 분석하였으며, 이 결과를 경기 추청벼의 평균값과 비교하여 나타내었다.

2011년도의 용인청정지구에서 재배된 백미의 아밀로스 함량, 단백질, 수분, 완전미도정수율은 경기 추청벼 평균값보다 낮았다. 간접재이용지구인 병점 및 오산의 시험포장에서 재배된 백미 역시 아밀로스 함량, 단백질, 수분, 완전미도정수율이 경기 추청벼 평균값보다 낮았다. 특히, 수분함량 분석결과 경기 추청벼 평균값에 비해 2배 이상 낮은 값을 보이는데, 이는 벼 수확 후 상온에 수일동안 보관하고 있어 추후 수분함량 측

정 시 시료가 건조 상태였을 것이라 판단된다.

2012년도의 수확한 백미는 용인청정지구, 병점재이용지구, 오산재이용지구 모두 아밀로스가 17 ~ 18%에 속하며 일반미의 범위를 나타낸다. 단백질은 경기 충청벼 평균값에 비해 작게 산정되었다. 미처리지구의 아밀로스 함량은 경기 충청벼와 거의 비슷하게 측정되었고 단백질은 보다 작게 산정되었다.

표 3.5.14 시험지구 백미의 이화학적 특성 (2011년 ~ 2013년)

지점	2011년		2012년		2013년	
	아밀로스	단백질	아밀로스	단백질	아밀로스	단백질
	(%)					
용인청정지구	14.2	6.9	17.9	6.7	17.2	6.3
병점재이용지구	14.3	6.5	17.4	5.4	17.1	7.2
오산재이용지구	14.0	6.6	17.8	6.9	17.6	6.0
미처리지구			18.3	6.6	18.4	6.3
경기 충청벼	18.5	7.9	18.5	7.9	18.5	7.9

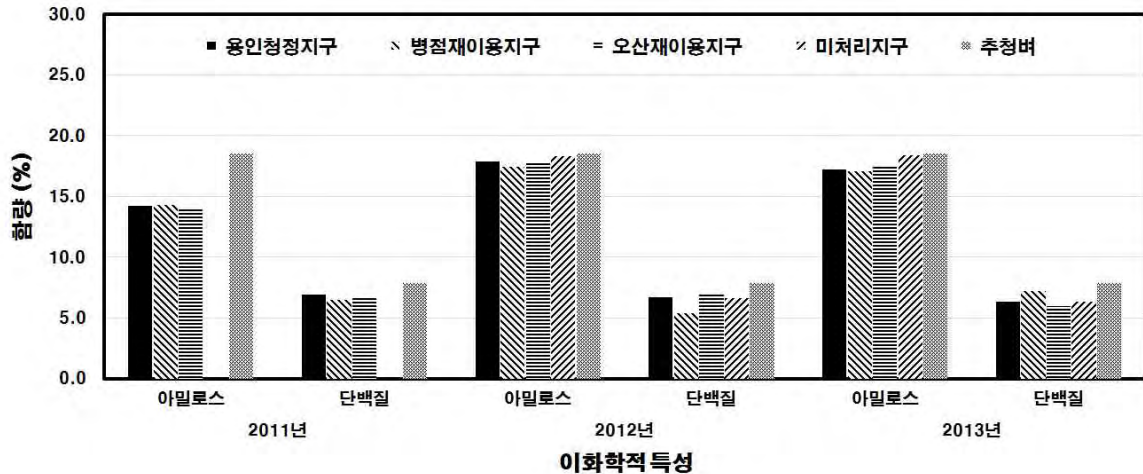


그림 3.5.16 각 시험지구 백미의 이화학적 특성 (2011년 ~ 2013년)

5. 간접하수재이용에 따른 논벼 생육영향 분석

용인청정지구와 병점 및 오산재이용지구 세 집단 간 수량구성요소의 평균차가 통계적으로 유의한가를 검정하기 위하여 IBM SPSS Statistics 20 (SPSS, Inc., 2011)을 이용하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다. 각 처리구가 정규성과 등분산성을 만족할 경우 모수적 방법인 일원 분산분석 (One-way analysis of variance)을 실시하며, 둘 중 어느 하나라도 만족하지 못할 경우 비모수적 방법인 로버스트 분석 (Kruskal-wallis)을 실시하였다. 분산분석 결과 귀무가설이 기각되었을 경우 다중비교 (Multiple comparison) 혹은 사후 검정 (Post-Hoc test)을 실시하였다. 본 연구에서는 일원 분산분석을 실시 후 엄격한 사후 검정 방법으로 알려진 Turkey HSD (Honestly significant difference) 검정법을 이용하였다. (Turkey, 1953) 또한, 비모수적 방법인 로버스트 분석 실시 후에는 2개의 처리구 모두 정규성을 만족할 경우 독립표

본 t-검정을 실시하였고, 그렇지 못할 경우 맨-휘트니 검정 (Independent samples t-test)를 통해 통계적 유의성을 평가하였다. 표 3.5.13과 표 3.5.14는 각각 2011년과 2012년 용인청정지구, 병점재이용지구, 오산재이용지구의 수량구성요소 분산분석 결과를 나타내고 있다.

2011년도는 수량구성요소 중에서 개체당 이삭수와 이삭당 영화수가 처리구인 오산재이용지구에서 가장 높게 나타났다. 간장은 오산재이용지구에서 가장 작은 값을 나타냈으며 수장은 처리구인 용인청정지구에서 가장 작은 값을 보였으나 시험지구별 유의한 차이를 보이지는 않았다 ($p > 0.05$). 천립중 ($p < 0.05$)과 등숙률 ($p < 0.01$)은 유의한 차이가 있는 것으로 나타나 사후검정을 실시하였다. 그 결과, 천립중과 등숙률 모두 처리구인 병점재이용지구에서 각각 22.54g과 91.98%로 용인청정지구와 오산재이용지구보다 유의하게 높은 값을 보였다.

표 3.5.15 2011년 시험지구 수량구성요소 분산분석 결과

수량 구성요소	기본통계량 (평균 ± 표준편차)			분산 분석 검정법	분산 분석 결과	사후검정 결과
	YIP	BJP	OSP			
개체당 이삭수 (ea)	23.80 ± 6.120	24.13 ± 8.149	28.60 ± 6.663	One Way	0.126	-
이삭당 영화수 (ea)	95.80 ± 15.576	95.73 ± 22.544	101.07 ± 17.572	One Way	0.674	-
천립중 (g)	21.34 ± 0.261	22.544 ± 0.252	21.08 ± 0.400	Kruskal -Wallis	0.017	YIP-BJP : 0.003 ^b YIP-OSP : 0.588 ^b BJP-OSP : 0.005 ^b
등숙률 (%)	87.88 ± 1.087	91.977 ± 1.127	84.83 ± 1.681	Kruskal -Wallis	0.001	YIP-BJP : 0.005 ^c YIP-OSP : 0.140 ^b BJP-OSP : 0.000 ^c
간장 (cm)	85.40 ± 7.470	85.20 ± 7.251	80.70 ± 10.060	One Way	0.615	-
수장 (cm)	18.80 ± 1.095	19.10 ± 1.245	19.20 ± 1.891	Kruskal -Wallis	0.965	-

a : Turkey HSD Test를 통한 사후검정 결과

b : Independent Samples t Test를 통한 사후검정 결과

c : Mann-Whitney U Test를 통한 사후검정 결과

2012년도 분석결과를 보면 개체당 이삭수는 용인청정지구에서 가장 작은 값을 보였으며 이삭당 영화수는 병점재이용지구에서 가장 작은 값을 나타냈다. 천립중은 미처리 지구에서 가장 높은 값을 보였지만 시험지구별 유의한 차이를 보이지는 않았다

($p>0.05$). 등숙률 ($p<0.001$), 간장 ($p<0.05$) 그리고 수장 ($p<0.05$)은 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 사후검정 결과 등숙률과 간장은 각각 63.40%와 76.65cm로 용인청정지구에서 유의하게 작은 값을 보였다. 수장은 오산재이용지구에서 20.12cm의 값을 나타내서 용인청정지구 (18.89cm)와 병점재이용지구 (17.92cm)에 비해 유의하게 높은 값을 보였다.

표 3.5.16 2012년 시험지구 수량구성요소 분산분석 결과

수량 구성요소	기본통계량 (평균 ± 표준편차)				분산 분석 검정법	분산 분석 결과	사후검정 결과
	YIP	BJP	OSP	UTP			
개체당 이삭수 (ea)	26.60 ± 7.921	30.36 ± 7.582	31.92 ± 10.988	28.98 ± 4.035	One Way	0.034	YIP-BJP : 0.415 ^a YIP-OSP : 0.135 ^a BJP-OSP : 0.918 ^a BJP-UTP : 0.184 ^a OSP-UTP : 0.067 ^a YIP-UTP : 0.799 ^a
이삭당 영화수 (ea)	95.64 ± 5.692	86.72 ± 3.861	98.88 ± 2.893	95.46 ± 24.051	Kruskal -Wallis	0.023	YIP-BJP : 0.534 ^c YIP-OSP : 0.409 ^c BJP-OSP : 0.015 ^b BJP-UTP : 0.002 ^c OSP-UTP : 0.442 ^c YIP-UTP : 0.175 ^c
천립중 (g)	21.40 ± 1.490	21.67 ± 1.161	21.72 ± 1.408	21.82 ± 1.0039	One Way	0.000	YIP-BJP : 0.885 ^a YIP-OSP : 0.831 ^a BJP-OSP : 0.999 ^a BJP-UTP : 0.002 ^a OSP-UTP : 0.002 ^a YIP-UTP : 0.000 ^a
등숙률 (%)	63.40 ± 2.832	84.04 ± 1.574	83.73 ± 1.721	75.25 ± 34.0258	Kruskal -Wallis	0.000	YIP-BJP : 0.000 ^b YIP-OSP : 0.000 ^b BJP-OSP : 0.894 ^b BJP-UTP : 0.022 ^c OSP-UTP : 0.045 ^c YIP-UTP : 0.298 ^c
간장 (cm)	76.65 ± 7.537	81.76 ± 7.638	82.68 ± 7.442	80.76 ± 8.2769	One Way	0.016	YIP-BJP : 0.090 ^a YIP-OSP : 0.032 ^a BJP-OSP : 0.974 ^a BJP-UTP : 0.868 ^a OSP-UTP : 0.968 ^a YIP-UTP : 0.068 ^a
수장 (cm)	18.89 ± 3.397	17.92 ± 2.079	20.12 ± 1.825	18.93 ± 1.6022	Kruskal -Wallis	0.003	YIP-BJP : 0.655 ^c YIP-OSP : 0.008 ^c BJP-OSP : 0.000 ^b BJP-UTP : 0.160 ^b OSP-UTP : 0.120 ^b YIP-UTP : 0.316 ^c

a : Turkey HSD Test를 통한 사후검정 결과

b : Independent Samples t Test를 통한 사후검정 결과

c : Mann-Whitney U Test를 통한 사후검정 결과

2013년도 분석결과를 보면 개체당 이삭수는 용인청정지구에서 가장 작은 값을 보이며 시험지구별 유의한 차이 ($p < 0.001$)를 보였으며, 이삭당 영화수도 오산재이용지구에서 가장 작은 값을 나타내며 유의한 차이 ($p < 0.01$)를 나타냈다. 천립중은 오산재이용지구에서 가장 높은 값을 나타내며 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 보였다. 등숙률은 용인재이용지구에서 가장 높은 값을 나타냈으나 시험지구별 유의한 차이를 보이지는 않았다 ($p > 0.05$). 간장 ($p < 0.05$)과 수장 ($p < 0.05$)은 시험지구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 사후검정 결과 간장은 용인청정지구에서 77.18cm로 유의하게 작은 값을 보였으며, 수장은 병점재이용지구에서 20.14cm로 유의하게 높은 값을 보였다.

표 3.5.17 2013년 시험지구 수량구성요소 분산분석 결과

수량 구성요소	기본통계량 (평균 ± 표준편차)				분산 분석 검정법	분산 분석 결과	사후검정 결과
	YIP	BJP	OSP	UTP			
개체당 이삭수 (ea)	19.80 ± 6.377	26.64 ± 6.632	29.52 ± 8.150	21.53 ± 4.373	Kruskal -Wallis	0.000	YIP-BJP : 0.001 ^b YIP-OSP : 0.000 ^c BJP-OSP : 0.425 ^c BJP-UTP : 0.019 ^b OSP-UTP : 0.003 ^c YIP-UTP : 0.397 ^b
이삭당 영화수 (ea)	107.32 ± 43.957	115.92 ± 27.473	91.52 ± 15.777	94.60 ± 15.235	Kruskal -Wallis	0.010	YIP-BJP : 0.076 ^c YIP-OSP : 0.684 ^c BJP-OSP : 0.000 ^b BJP-UTP : 0.012 ^b OSP-UTP : 0.587 ^b YIP-UTP : 0.956 ^c
천립중 (g)	22.86 ± 1.693	22.00 ± 1.576	23.11 ± 1.274	22.96 ± 0.9094	One Way	0.054	-
등숙률 (%)	92.62 ± 2.765	86.99 ± 9.900	91.45 ± 5.650	92.61 ± 2.9269	Kruskal -Wallis	0.162	-
간장 (cm)	77.18 ± 9.100	83.30 ± 7.420	82.18 ± 5.891	84.90 ± 6.9301	Kruskal -Wallis	0.010	YIP-BJP : 0.012 ^b YIP-OSP : 0.016 ^c BJP-OSP : 0.567 ^c BJP-UTP : 0.472 ^b OSP-UTP : 0.162 ^c YIP-UTP : 0.005 ^b
수장 (cm)	18.27 ± 2.450	20.14 ± 2.274	18.26 ± 1.304	19.2 ± 3.8176	Kruskal -Wallis	0.003	YIP-BJP : 0.008 ^b YIP-OSP : 0.983 ^b BJP-OSP : 0.001 ^b BJP-UTP : 0.028 ^c OSP-UTP : 0.349 ^c YIP-UTP : 0.439 ^c

a : Turkey HSD Test를 통한 사후검정 결과

b : Independent Samples t Test를 통한 사후검정 결과

c : Mann-Whitney U Test를 통한 사후검정 결과

6. 요약 및 결론

본 절에서는 하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 논벼의 생육, 수확량 그리고 논벼의 생육영향을 파악하기 위하여 용인청정지구와 병점 및 오산재이용지구, 미처리 지구에 시험포장을 선정하여 논벼 생육 모니터링을 실시하고, 각 지구별 논벼의 생육 시기에 따른 초장 및 분얼수의 변화를 분석하였다. 또한, 쌀의 외관적 특성인 완전미 도정수율과 미질 특성인 아밀로스 및 단백질의 함량, 백미의 중금속 함량을 분석하였으며, 수량구성요소에 대하여 각 처리구별 유의성 검정을 실시하였다. 본 절에서 다룬 주요 결과는 다음과 같다.

① 처리구별 초장 (crop height), 분얼수 (tiller number)를 시기별로 모니터링 한 결과, 생육초기에는 처리구에 관계없이 불규칙한 경향을 나타내지만, 상대적으로 이동저수지를 관개용수로 이용한 용인청정지구보다 하수처리수를 재이용하여 농업용수로 사용한 간접재이용지구의 초장 및 분얼수가 다소 높게 나타났으며, 간접재이용지구인 병점과 오산의 경우 큰 차이는 보이지 않았다. 각 미처리지구의 초장 (crop height), 분얼수 (tiller number)를 시기별로 모니터링 한 결과, 호련, 수화 및 장전지구 모두 큰 차이를 보이지 않았다.

② 중금속의 식물체 내 흡수이행 양상을 살펴보기 위하여 벼 부위별로 구리(Cu), 비소(As), 카드뮴(Cd), 수은(Hg) 및 납(Pb)의 함량을 분석한 결과, 용인청정지구 및 간접재이용지구에서 채취한 벼 모두 뿌리에서는 카드뮴의 축적량이 높았으며, 카드뮴을 제외한 벼에 흡수이행 된 다른 중금속의 대부분은 벼짚에 높게 분포하였다. 미처리지구에서도 카드뮴, 아연의 축적량이 뿌리에서 높았으며, 납은 벼짚에 높게 분포하였다.

③ 용인청정지구, 간접재이용지구, 미처리지구에서 재배된 쌀의 백미분석결과, 검출된 구리, 아연, 납 등 대부분이 식품위생법상 잔류허용기준을 초과하는 것으로 나타났다.

④ 미질의 영향을 파악하기 위하여 각 처리구별 재배된 쌀의 아밀로스, 단백질 및 수분함량과 완전미도정수율을 분석한 결과, 미처리지구에서 재배된 쌀의 아밀로스 단백질이 다른 지구에 비해 높은 값을 나타냈으며, 병점재이용지구, 오산재이용지구는 비슷한 경향을 보였다. 모든 지구에서 경기 추청벼보다는 낮은 값을 보였다.

⑤ 각 처리구별 수량구성요소에 대한 유의성 검정결과를 보면, 2011년도는 수량구성요소 중에서 개채당 이삭수와 이삭당 영화수가 처리구인 오산재이용지구에서 가장 높게 나타났다. 간장은 오산재이용지구에서 가장 작은 값을 나타냈으며 수장은 처리구인 용인청정지구에서 가장 작은 값을 보였으나 시험지구별 유의한 차이를 보이지는 않았다 ($p>0.05$). 천립중 ($p<0.05$)과 등숙률 ($p<0.01$)은 유의한 차이가 있는 것으로 나타나 사후검정을 실시하였다. 그 결과, 천립중과 등숙률 모두 처리구인 병점재이용지구에서

각각 22.54g과 91.98%로 용인청정지구와 오산재이용지구보다 유의하게 높은 값을 보였다. 2012년도 분석결과를 보면 개체당 이삭수는 용인청정지구에서 가장 작은 값을 보였으며 이삭당 영화수는 병점재이용지구에서 가장 작은 값을 나타냈다. 천립중은 미처리지구에서 가장 높은 값을 보였지만 시험지구별 유의한 차이를 보이지는 않았다 ($p>0.05$). 등숙률 ($p<0.001$), 간장 ($p<0.05$) 그리고 수장 ($p<0.05$)은 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 사후검정 결과 등숙률과 간장은 각각 63.40%와 76.65cm로 용인청정지구에서 유의하게 작은 값을 보였다. 수장은 오산재이용지구에서 20.12cm의 값을 나타내서 용인청정지구 (18.89cm)와 병점재이용지구 (17.92cm)에 비해 유의하게 높은 값을 보였다. 2013년도 분석결과를 보면 개체당 이삭수는 용인청정지구에서 가장 작은 값을 보이며 시험지구별 유의한 차이 ($p<0.001$)를 보였으며, 이삭당 영화수도 오산재이용지구에서 가장 작은 값을 나타내며 유의한 차이 ($p<0.01$)를 나타냈다. 천립중은 오산재이용지구에서 가장 높은 값을 나타내며 유의한 차이 ($p<0.05$)를 보였다. 등숙률은 용인재이용지구에서 가장 높은 값을 나타냈으나 시험지구별 유의한 차이를 보이지는 않았다 ($p>0.05$). 간장 ($p<0.05$)과 수장 ($p<0.05$)은 시험지구별 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 사후검정 결과 간장은 용인청정지구에서 77.18cm로 유의하게 작은 값을 보였으며, 수장은 병점재이용지구에서 20.14cm로 유의하게 높은 값을 보였다.

⑥ 논벼 생육에 대한 하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 영향을 분석하고 각 지구별로 수량구성요소의 차이를 비교하였으나, 생육과 관련한 여러 항목들에 대해서는 보다 장기적인 관점에서의 분석 및 고찰이 필요하다.

⑦ 논벼 생육기간동안의 지속적인 모니터링을 통해 수집된 각 지구별 수량구성요소 및 수확량의 상관성 분석, 각 지구별 백미의 이화학적 특성, 식물체 및 백미의 중금속 함량 비교 등 논벼의 생육영향을 통계적으로 분석하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 생육영향을 과학적으로 규명하고 정량화하였다.

제6절 간접하수재이용에 따른 인체 위해성 평가

1. 서론

전체 수자원에서 농업용수가 차지하는 비중은 전세계적으로 약 70 %이고 (FAO, 2004), 우리나라도 수자원장기계획 농업용수가 차지하는 비중이 47 %이상이다 (건설교통부, 2006). 이에 따라 연중 안정적으로 배출되는 하수처리수의 재이용은 대체수자원의 개발효과를 가져올 수 있어 우리나라는 물론 전세계적으로도 관심이 증대되고 있다.

하수는 다양한 오염물질을 포함하고 있고, 적절한 처리 공정을 거치면 상대적으로 양호한 수질의 처리수를 얻을 수 있으며, 일반적으로 농업용 관개용수로 적합하다. 다만 하수처리수의 안전한 농업용수 재이용을 위해서는 이용 목적에 맞게 잠재적 위해요인을 평가하고 예방하는 노력이 필요하다. 병원성 미생물은 하수처리수에 잔존할 수 있는 오염물질의 하나로 인체에 유입될 경우 각종 질병을 유발할 수 있어 이에 대한 위해성 평가가 하수처리수의 재이용에 선행되어야 한다. 하수처리수를 농업용수로 이용했을 경우에도 잔존 병원성 미생물은 인체에 위해요소로 작용할 수 있어, 하수처리수의 농업용 재이용에 따른 정확한 위해성 평가가 요구된다.

하수처리수의 농업용 재이용에 따른 위해성 평가에 관한 연구로 정광욱 등 (2005a, 2005b)은 하수처리수를 관개했을 경우 발생할 수 있는 위험에 대해 조사하기 위해 시험구를 설치하고 하천수와 호소수, biofilter 유출수, pond 처리수, UV소독수를 논 관개용수로 이용하여 총대장균군, 분원성 대장균군, E. coli 등 지표미생물의 농도 변화를 조사한 후, E. coli 농도를 바탕으로 Monte-Carlo simulation을 통해 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 윤춘경 등 (2006)은 벼 실험포트에서 분석한 E. Coli 농도를 바탕으로 Monte-Carlo simulation을 적용하여 하수처리수를 관개용수로 재이용 할 경우 발생할 수 있는 질병에 대한 위해성을 평가하였으며, 하수를 pond저류나 UV소독 등을 통해 대장균농도를 일정수준 이하로 낮춘다면 미생물 위해성이 크게 감소할 것으로 보고하였다.

미생물 위해성 평가를 시행한 선행연구를 살펴보면 대부분 Monte-Carlo simulation을 이용하였으며, 그 과정에서 자료를 정규분포로 가정해 난수를 발생시켰다. 하지만 일반적으로 Monte-Carlo simulation 적용 시 연구대상 자료가 나타내는 확률분포를 선정하고 이에 맞게 난수를 발생시킨다 (김대식 등, 2008). 하수의 대장균수 자료는 정규분포와는 다른 분포를 나타낼 것으로 예상되며, 실제 하수의 대장균수가 나타내는 확률분포를 이용해 난수를 발생시킨다면 위해성 평가 결과는 달라질 수 있을 것이다. 현재 하수의 대장균수 자료가 어떤 분포형을 나타내는 지에 대한 연구는 부족한 실정이며, 따라서 실제 하수의 대장균수 확률분포를 분석해 적정분포형을 선정하고 통계적 특성을 파악할 필요성이 있다. 그리고 분석 결과를 미생물 위해성 평가 과정에 적용한다면 더욱 타당한 위해성 평가 결과를 도출할 수 있을 것이다.

따라서 본 절에서는 하수에서의 대장균수 확률분포 특성을 분석하기 위해 전국 환경기

초시설의 유입수 대장균수 자료를 취득하고, 통계분석을 통해 환경기초시설의 유형별 기초 통계자료를 구축하며, 각 처리시설에 대해 여러 확률분포형의 매개변수 추정 및 적합도 검정을 실시하여 하수에서 대장균수 자료의 적정 확률분포형을 선정하고자 한다. 또한 실제 간접하수재이용 구역의 모니터링 자료를 기반으로 인체 위해성 평가를 실시하여 간접하수재이용에 따른 인체 위해성을 평가하고자 한다.

2. 하수에서의 대장균수 확률분포 특성 분석

2.1. 자료의 수집 및 분류

본 연구에서는 하수의 미생물 확률분포 특성을 분석하기 위해 2010년 환경부에서 전국 환경기초시설을 대상으로 측정한 유입수 일별수질자료를 수집하였고, 그중 총 대장균수 자료를 이용하였다.

가. 용도별 분류

하수의 종류에 따른 대장균수 자료의 특성을 비교 및 분석하기 위해 환경기초시설을 용도별로 분류하였다. 환경기초시설은 지역별로 명칭을 상이하게 사용하고 있기 때문에 표 3.6.1과 같이 처리목적에 따라 크게 하수종말 처리시설, 마을하수도 처리시설, 분뇨 처리시설, 축산폐수 처리시설 4가지로 분류 하였으며, 이 분류를 기준으로 기초 통계분석을 실시하였다. 수집한 자료 중 하수종말 처리시설이 182,601 개소로 가장 많았으며, 마을하수도 처리시설은 56,978 개소, 분뇨 처리시설은 9,514 개소, 축산폐수 처리시설은 7,479 개소로 나타났다.

표 3.6.1 처리시설의 종류에 따른 분류

처리시설 종류	처리시설 내용
하수종말 처리시설	하수종말처리장, 하수종말처리시설, 하수처리장, 하수도처리시설, 공공하수도, 공공하수처리시설, 공공하수처리장, 오수처리시설, 오수처리장, 폐수종말처리장, 폐수처리시설, 폐수공공처리장, 폐수종말처리시설, 오폐수처리장, 환경사업소, 수질복원센터, 처리장, 물재생센터, 수질개선사업소, 맑은물관리센터
마을하수도 처리시설	마을하수도, 마을하수처리장, 마을하수처리시설, 마을하수도처리시설, 마을하수도시설, 마을오수처리시설, 마을오수처리장, 마을2하수처리시설, 소규모하수도
분뇨 처리시설	분뇨처리장, 분뇨처리시설, 분뇨병합처리장, 분뇨종말처리장, 분뇨(2차)처리시설, 시설관리공단(분뇨), 위생환경사업소, 위생처리장, 환경위생시설, 위생환경처리시설, 위생처리장, 정화조처리장
축산폐수 처리시설	축산폐수공공처리장, 축산폐수공공처리시설, 축뇨처리장

나. 처리용량에 따른 분류

하수, 분뇨 또는 축산폐수 처리시설의 처리용량에 따른 대장균수 자료의 특성을 비교 및 분석하기 위해 환경기초시설을 처리 용량을 기준으로 분류하여 대장균 자료의 기초통계를 분석하였다. 처리용량 즉, 일 처리유량을 기준으로 500 톤/일 이하, 500 ~ 5,000 톤/일, 5,000 ~ 50,000 톤/일, 50,000 톤/일 이상의 4개 구간으로 구분하였다.

다. 지역규모별 분류

적정 확률분포 모형 분석을 위해 세 가지 다른 지역 규모로 자료를 분류하였다. 크게 전국단위의 주요 하수처리장을 대상으로 하는 전국단위, 논 경작지가 가장 넓게 분포하는 전라도를 대상으로 하는 도 단위, 그리고 경기남서부 지역의 지자체를 대상으로 하는 지역단위의 세 단위로 구분하였다. 또한 대상시설 모두를 대상으로 총괄 분석도 실시하였다.

전국단위는 하수종말 처리시설 하수의 전반적인 대장균 확률분포를 분석하기 위해 전국 주요 광역시도 하수종말 처리시설 중 임의로 10개소를 선정하였다. 도 단위는 우리나라에서 논농사가 가장 광범위하게 이루어지는 전라도 지역을 대상으로 하였으며, 하수종말 및 마을하수도 처리시설 등 20개소를 선정하였다. 그리고 지역단위는 본 연구에서 모니터링을 진행 중인 연구와 연계하여 추후 위해성 평가에 활용할 수 있도록 경기도 남서부 지역을 대상지역으로 선정하였다. 대상 처리시설은 경기도 화성시, 평택시, 용인시, 오산시 일대 소재의 하수종말 및 마을하수도 처리시설을 포함하고 있다.

표 3.6.2는 각 공간 규모 단위별 대상으로 하는 하수처리 시설의 개소수를 보여주고 있으며, 전국적으로 하수종말 처리시설, 마을하수도 시설 등 총 81개 시설을 대상으로

분석하였다. 전국 단위는 주요 시·도를 대상으로 10개 처리시설을, 전라도 지역은 하수 및 마을하수도 시설 20개소를, 지역단위는 화성 12개소, 평택 15개소, 용인 22개소, 오산 2개소로 총 51개소를 대상으로 선정하였다.

표 3.6.2 확률분포 분석을 위한 지역규모별 분류

처리시설 종류		분석 대상 처리시설명
전국 단위 (주요 시·도 하수종말 처리시설, 총 10개소)		서울 강서, 인천 강화, 대전 유성, 대구 달서, 광주 광산, 경기 가평, 강원 강릉, 충북 충주, 전남 목포, 경북 포항 (10개소)
도 단위 (전라도, 총 20개소)	하수처리장	광양, 전주, 익산, 군산, 정읍, 남원, 김제, 순천, 목포, 나주 (10개소)
	마을 하수처리장	고창 해리칠곡, 심원사등, 완주 용암, 지동, 영암 양장, 연소, 화순 효산, 구례 구만, 지하, 무안 도대 (10개소)
지역단위 (경기도 남서부, 총 51개소)	하수처리장	화성시 발안, 화성마도, 장안, 홍법, 원안, 궁평, 노하, 덕천, 남양, 봉담, 조암, 향남 평택시 어연한산, 현곡, 장당, 통북, 팽성, 포승, 현덕, 용인시 용인, 남사, 송진, 천리, 모현, 기흥, 구갈, 고매, 영덕, 수지, 상현, 용일동부, 백암, 추계, 사천, 오산시 오산1, 오산2 (36개소)
	마을 하수처리장	평택시 고덕문화, 사리, 장등, 당현, 내천수월, 신리별말, 덕북백석, 노양, 용인시 주북리, 대대리, 사천, 포곡성밀, 지내사은, 용인분뇨, 원삼 (15 개소)

2.2. 기초통계분석

처리시설의 용도별·용량별로 유입수 대장균수 자료의 기초통계분석을 실시하였다. Microsoft Office Excel (Version2010)을 이용하여 하수종말 처리시설, 마을하수도 처리시설, 분뇨 처리시설, 축산폐수 처리시설 4가지 분류에 대하여 각각 최댓값, 최솟값, 중간값, 평균값, 표준편차 등의 통계치를 산정하였으며, 그 특성을 비교·분석하였다.

가. 용도별 기초통계분석 결과

처리시설 종류별로 대장균 자료의 기초 통계를 정리하면 표 3.6.3과 같다. 총 대장균수의 평균값은 축산폐수처리시설에서 476,706 MPN/mL으로 가장 큰 값을 보였고, 마을하수도에서 62,741 MPN/mL으로 가장 작은 값을 나타내었다. 반면에 중간값은 분뇨 처리시설에서 152,300 MPN/mL으로 가장 컸고, 마을하수도에서 30,200 MPN/mL으로 가장 작게 나타났다. 표 3.6.3에서 확인할 수 있듯이 축산폐수 처리시설의 경우 최댓값이 다른 처리시설에 비해 2배 이상 큰 값을 가지며, 1,000,000 MPN/mL 이상의 높은 값을 가지는 자료가 다수 존재해 평균값이 높게 나타난 것으로 보인다. 표준편차 또한 다른 처리시설에 비해 6배 이상 크게 나타나 자료간의 편차가 큰 것으로 분석되었다. 마을하수도 처리시설은 최댓값, 중간값, 평균값 모두 가장 작은 값을 나타내 다른 처

리시설에 비해 대장균수가 적은 것으로 분석되었으며, 표준편차 또한 가장 작은 값을 나타내었다.

표 3.6.3 처리시설의 용도별 대장균 기초 통계 (총대장균균수, MPN/mL)

구분	최댓값	최솟값	Median	Mean	표준편차
하수종말 처리시설	35,415,000	1	58,000	96,577	381,822
마을하수도 처리시설	2,900,000	1	30,200	62,741	105,605
분뇨 처리시설	35,000,000	23	152,300	214,915	599,913
축산폐수 처리시설	77,000,000	600	80,000	476,706	3,903,807

나. 용량별 기초통계분석 결과

하수 또는 분뇨 처리시설의 종류를 처리 용량 기준으로 분류하여 대장균의 기초통계를 분석한 결과, 총대장균균수의 평균값은 일 유량 50,000 톤/일 이상 구간에서 152,269 MPN으로 가장 큰 값을 나타내었고, 500 ~ 5,000 톤/일 구간에서 83,502 MPN으로 가장 작은 값을 나타내었다. 최댓값은 일 유량 500 톤/일 이하 구간에서 77,000,000 MPN으로 가장 큰 값을 나타내었고, 5,000 ~ 50,000 톤/일 구간에서 4,100,000 MPN으로 가장 작은 값을 나타내었다. 중간값을 보면 전체적으로 시설 용량이 커질수록 대장균의 숫자도 증가함으로 알 수 있다. 평균값은 일부 튀는 값에 영향을 크게 받는 경향이 있고, 소규모 시설에서 표준편차에서도 알 수 있듯이 일부 큰 값의 영향을 받은 것으로 추정된다. 표 3.6.4는 분석 결과를 나타내고 있다.

표 3.6.4 처리용량에 따른 대장균 기초 통계 (총대장균균수, MPN)

유량 (m ³ /일)	최댓값	최솟값	Median	Mean	표준편차
500 이하	77,000,000	0.5	44,000	111,417	1,040,525
500 ~ 5,000	35,000,000	25	50,000	83,502	215,425
5,000 ~ 50,000	4,100,000	1.475	64,000	91,634	89,845
50,000 이상	35,415,000	40	75,000	152,269	934,074

2.3. 확률분포분석

가. 분석 방법

(1) 통계 프로그램 선정

FARD2006 (Frequency Analysis of Rainfall Data Program 2006)은 국립방재연구원 에서 제공하는 통계분석 프로그램으로 다양한 종류의 자료에 적용이 가능하도록 개발 되었다. FARD2006은 다양한 확률 분포형에 대한 매개변수의 추정과 적합도 검정 기능을 제공하고 있으며 비교적 사용이 용이하여 확률분포 분석에 널리 이용되고 있다 (NDM, 2006). 따라서 본 연구에서는 FARD2006을 이용하여 지역규모별로 분류된 환 경기초시설 유입수 대장균수 자료의 확률분포 분석을 실시하였다.

(2) 확률분포 모형

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 분포모형인 Normal 분포형 (NOR), Gamma 분포형 (GAM2, GAM3), Generalized Extreme Value 분포형 (GEV), Gumbel 분포형 (GUM), Log-Gumbel 분포형 (LGU2, LGU3), Log-Normal 분포형 (LN2, LN3), Log-Person Type-III 분포형 (LP3), Weibull 분포형 (WBU2, WBU3), Generalized Logistic 분포형 (GLO), Generalized Pareto 분포형 (GPA), Wakeby 분포 형 (WBK4, WBK5) 등 총 16개의 확률 분포형을 이용하였다. 각 분포형을 대상으로 확률가중모멘트법을 적용해 매개변수 추정을 실시하였으며, 적합도 검정을 통해 적정 확률분포형을 선정하였다. 각 분포모형의 이론적 배경은 아래와 같다.

(가) Normal 분포형 (NOR)

Normal 분포의 확률밀도함수는 식 (3.6.1)과 같이 정의된다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}^2\right], \quad -\infty < x < \infty \quad (3.6.1)$$

여기서, μ 는 위치매개변수로 평균을 의미하며 σ 는 축척매개변수로 표준편차이다. 식 (3.6.1)을 도시하면 종모양으로서 x 가 $-\infty$ 로 감소하거나 ∞ 로 증가하게 되면 $f(x)$ 는 0 으로 접근하게 된다 (국토해양부, 2008)

(나) Gamma 분포형 (GAM2, GAM3)

Gamma 분포는 수문학에서 가장 널리 사용되는 분포형이며, 대부분의 수문변량들은 왜곡된 분포를 가지므로 Gamma 분포는 년최대홍수량 및 갈수량 등의 생기확률분포 를 표시하는데 사용되어 왔으며 (이순혁 등, 1997), 강우량의 분포를 나타내기 위해서 도 많이 사용된다 (Wilks, 1997). Gamma 분포는 2변수분포 혹은 3변수분포로 나눌 수 있다.

2변수 Gamma 분포의 확률밀도함수는 아래 식 (3.6.2)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (3.6.2)$$

여기서, $\alpha > 0$ 일 때 $0 \leq x < \infty$ 이며, $\alpha < 0$ 일 때, $-\infty < x \leq 0$ 이다. α 와 β 는 각각 분포의 축척 및 형상을 결정하는 매개변수이며, $\Gamma(\beta)$ 는 Gamma 함수이다. 2변수 Gamma 분포의 누가확률분포함수는 식 (3.6.2)을 적분하여 얻어지며, $\alpha > 0$ 일 때 식 (3.6.3)와 같다

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) dx \quad (3.6.3)$$

3변수 Gamma 분포의 확률밀도함수는 아래 식 (3.6.4)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right) \quad (3.6.4)$$

여기서, $\alpha > 0$ 일 때 $x_0 \leq x < \infty$ 이며, $\alpha < 0$ 일 때, $-\infty < x \leq x_0$ 이다. α 와 β 는 각각 분포의 축척 및 형상을 결정하는 매개변수이며, x_0 는 위치매개변수로 0이 아닌 값을 가진다. $\Gamma(\beta)$ 는 Gamma 함수이다. 3변수 Gamma 분포의 누가확률분포함수는 식 (3.6.4)을 적분하여 얻어지며, $\alpha > 0$ 일 때 식 (3.6.5)와 같다.

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right) dx \quad (3.6.5)$$

(다) Generalized Extreme Value 분포형 (GEV)

Generalized Extreme Value 분포 (일반화된 극치분포)는 홍수나 가뭄 같은 사상의 빈도해석에 많이 사용되는 분포함수로서 형상 매개변수 β 에 따라 3가지 형태로 구분될 수 있는데 (국토해양부, 2008), 확률밀도함수와 누가확률분포함수는 식 (3.6.6), (3.6.7) 과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \beta \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{\beta}-1} \exp\left[-\left\{1 - \beta \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right\}^{\frac{1}{\beta}}\right] \quad (3.6.6)$$

$$F(x) = \exp\left[-\left\{1 - \beta \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right\}^{\frac{1}{\beta}}\right] \quad (3.6.7)$$

여기서, α 는 축척매개변수, β 는 형상매개변수, x_0 는 위치매개변수이다.

(라) Gumbel 분포형 (GUM)

Gumbel 분포는 극치 수문현상의 적용에 널리 사용되고있는 분포형으로 GEV-1 분포로도 불린다. Gumbel 분포의 확률밀도함수와 누가확률분포함수는 아래 식 (3.6.8), (3.6.9) 과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right], \quad -\infty < x < \infty \quad (3.6.8)$$

$$F(x) = \exp \left[\exp \left\{ -\frac{x-x_0}{\alpha} \right\} \right] \quad (3.6.9)$$

여기서, $\alpha > 0$ 은 축척매개변수, x_0 는 위치매개변수이다. 또한 Gumbel 분포의 왜곡도 계수 (coefficient of skewness)는 1.1396으로 고정된 상수값을 갖는다 (건설교통부, 2000).

(마) Log-Gumbel 분포형 (LGU2, LGU3)

GEV 분포에서 $\beta < 0$ 인 경우 Log-Gumbel 분포 또는 Type-II 극치분포라고 부른다. 3변수 Log-Gumbel 분포의 확률밀도함수 및 누가확률분포함수는 아래 식 (3.6.10), (3.6.11)과 같다 (Heo et al, 1996).

$$f(x) = \frac{\beta}{(x-x_0)} \left(\frac{\theta-x_0}{x-x_0} \right)^\beta \exp \left[-\left(\frac{\theta-x_0}{x-x_0} \right)^\beta \right] \quad (3.6.10)$$

$$F(x) = \exp \left[-\left(\frac{\theta-x_0}{x-x_0} \right)^\beta \right] \quad (3.6.11)$$

여기서, $\theta > x_0$, $\beta > 0$, $x_0 < x < \infty$ 의 조건을 만족해야 하며, $x_0 = 0$ 이면 2변수 Log-Gumbel 분포가 된다 (건설교통부, 2000)

(바) Log-Normal 분포형 (LN2, LN3)

기존의 수문자료 해석에 널리 사용되고 있는 3개의 매개변수를 갖는 Log-Normal 분포의 확률밀도함수는 아래 식 (3.6.12)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2} \pi (x-x_0) \sigma_y} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right\}^2 \right], \quad x_0 < x < \infty \quad (3.6.12)$$

여기서, $Y = \ln(X-x_0)$ 이고, μ_y 와 σ_y 는 확률변량 Y 의 평균 및 표준편차로 각각 축척

매개변수 및 형상매개변수이며, x_0 는 위치매개변수이다 (Crow et al, 1988). 따라서 Y 는 2개의 매개변수를 갖는 정규분포가 된다. 식 (3.6.12)에서 위치매개변수 $x_0 = 0$ 이면 2변수 Log-Normal 분포가 된다 (건설교통부, 2000).

(사) Log-Person Type-III 분포형 (LP3)

Log-Person Type-III 분포형은 홍수자료의 해석에 널리 이용되고 있는 분포형으로 확률밀도함수는 아래 식 (3.6.13)와 같다 (Bobee, 1975).

$$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)x} \left[\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} \exp \left[-\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha} \right] \quad (3.6.13)$$

여기서, α 는 축척매개변수, β 는 형상매개변수, 그리고 y_0 는 위치매개변수이고 $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이다. Log-Person Type-III 분포는 축척매개변수 α 가 양수이면 하한경계값을 갖고 양으로 왜곡된 분포가 되며, 음수이면 상한경계값을 갖고 형상매개변수와 축척매개변수의 값에 따라 양 또는 음으로 왜곡된 분포가 된다. 또한 Log-Person Type-III 분포는 3변수 Gamma 분포와 Log-Normal 분포와 상관관계가 있다. 즉, 확률변량 $Y = \ln(X)$ 라고 하면 Y 는 3개의 매개변수 α, β, x_0 을 갖는 Gamma 분포가 되며, 확률변량 Y 의 왜곡도계수가 0 이면 X 는 Log-Normal 분포이고 Y 는 정규분포가 된다 (건설교통부, 2000).

(아) Weibull 분포형 (WBU2, WBU3)

Weibull 분포형은 실제 생물의 생존분석 (survival analysis), 고장해석 (failure analysis), 풍속분포분석, 극한강우분석 등에 많이 이용되는 확률분포형으로, Frechet에 의해 1927년에 처음 발견되었고, 1951년 Waloddi Weibull에 의해 발전된 후 Weibull 분포형으로 명명되었다. 3개의 변수를 갖는 Weibull 분포의 확률밀도함수와 누가확률 분포함수는 아래 식 (3.6.14), (3.6.15)와 같다 (Johnson et al, 1970).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{x - x_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} \exp \left[-\left\{ \frac{x - x_0}{\alpha} \right\}^\beta \right], \quad x_0 \leq x < \infty \quad (3.6.14)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left\{ \frac{x - x_0}{\alpha} \right\}^\beta \right] \quad (3.6.15)$$

여기서, $\alpha > 0$ 은 축척매개변수, $\beta > 0$ 은 형상매개변수, x_0 는 위치매개변수이며, 3변수 Weibull 분포는 $\beta = 1$ 이면 지수분포가 된다. 또한, $x_0 = 0$ 인 경우 2변수 Weibull 분포가 된다 (건설교통부, 2000).

(자) Generalized Logistic 분포형 (GLO)

Generalized Logistic 분포형은 최근 지역빈도해석에서 사용이 증가되고 있는 확률분포형으로 기존의 GEV 분포보다도 확률밀도함수의 오른쪽 꼬리부분이 두꺼운 형태를 가지고 있는 특징이 있다 (신홍준 등, 2010). 이 분포의 확률밀도함수와 누가확률분포함수는 식 (3.6.16), (3.6.17)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta}{\alpha}(x - x_0) \right]^{\left(\frac{1}{\beta-1}\right)} \left[1 + \left\{ 1 - \frac{\beta}{\alpha}(x - x_0) \right\}^{\frac{1}{\beta}} \right]^{-2} \quad (3.6.16)$$

$$F(x) = \left[1 + \left\{ 1 - \frac{\beta}{\alpha}(x - x_0) \right\}^{\frac{1}{\beta}} \right]^{-1} \quad (3.6.17)$$

여기서, α 는 축척매개변수, β 는 형상매개변수, x_0 는 위치매개변수이며 $x_0 + \frac{\beta}{\alpha} \leq x < \infty$ 일 때 $\beta < 0$ 이고, $-\infty < x \leq \beta + \frac{\alpha}{\beta}$ 일 때 $\beta > 0$ 이다 (신홍준 등, 2005).

(차) Generalized Pareto 분포형 (GPA)

Generalized Pareto 분포형은 Wakeby 분포의 특별한 경우에 해당하는 분포로 확률밀도함수는 아래 식 (3.6.18)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[a - \frac{\beta}{\alpha}(x - x_0) \right]^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (3.6.18)$$

여기서, α 는 축척매개변수, β 는 형상매개변수, x_0 는 위치매개변수이며, $\beta \leq 0$ 이면 $x_0 \leq x < \infty$ 이고, $\beta > 0$ 이면 $x_0 < x \leq x_0 + \frac{\alpha}{\beta}$ 이다. $\beta = 0$ 인 경우 exponential 분포가 되고, $\beta = 1$ 인 경우에는 $[x_0, x_0 + \alpha]$ 에서 균등분포가 된다 (국토해양부, 2008).

(카) Wakeby 분포형 (WBK4, WBK5)

Wakeby 분포는 식 (3.6.19)과 같은 역함수형태로 정의되며, F 는 누가분포함수이고, a, b, c, d, m 은 Wakeby 분포의 매개변수이다.

$$x = m + a[1 - (1 - F)^b] - c[1 - (1 - F)^{-d}] \quad (3.6.19)$$

위치매개변수 $m = 0$ 이면 4개의 매개변수를 갖는 Wakeby 분포이고, $m \neq 0$ 이면 5개의 매개변수를 갖는 Wakeby 분포가 된다 (국토해양부, 2008).

(3) 적합도 검정

확률분포형의 적합도 검정은 각 확률분포형의 확률밀도함수의 이론값과 자료군의 계급구간별 빈도를 계산하여¹ 작성한 상대도수분포도를 정량적으로 비교하여 이루어진다. 적합도를 검정하는 방법으로는 Chi-Square (χ^2) 방법, Kolmogorov-Smirnov (K-S) 방법, Cramer Von Mises (CVM) 방법, Probability Plot Correlation Coefficient (PPCC) 방법의 4가지가 일반적으로 널리 이용되고 있다.

(가) Chi-Square (χ^2) 방법

Chi-Square (χ^2) 검정은 자료값을 크기에 따라 m 개의 계급구간으로 나누고 이론값과 자료값의 절대도수를 비교하는 방법으로 Chi-Square (χ^2) 검정의 통계량 q 의 식은 식 (3.6.20)과 같다.

$$q = \sum_{j=1}^m \frac{(n_j - e_j)^2}{e_j} \quad (3.6.20)$$

여기서, n_j 는 관측자료의 j 번째 구간의 표본 관측도수, $e_j = np_j$ 는 확률분포의 j 번째 구간의 이론도수이며, m 은 계급구간의 수이다. p_j 는 구간내 특정 기각치를 만족하는 모의변수확률로 유의수준 α 에 대해 귀무가설이 $q > K$ 로 기각된다고 하면 $P[q > K; q \sim \chi^2(k-1)] \approx \alpha$ 로 정의되며, 여기서 $K = \chi^2(k-1)$ 이며, 각 계급구간을 나누는 후 결정된다. 일반적으로 계급구간은 등간격으로 하는데 관측예상수는 5 이상이어야 하며, Sturges(1926)식에 의하여 계급수를 결정한다. 계산된 통계량 x^2 가 식 (3.6.21)의 관계를 가지면 가정된 분포는 유의수준 α 로 적합성이 인정되며, 그렇지 못하면 기각된다.

$$x^2 < x_{1-\alpha, v}^2 \quad (3.6.21)$$

여기서, $x_{1-\alpha, v}^2$ 는 자유도가 $v (= m - 1)$ 일 때 유의수준 α 로 가정한 분포의 적합성을 인정하는 x^2 의 한계치이다 (건설교통부, 2000).

(나) Kolmogorov-Smirnov (K-S) 방법

Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정은 표본자료의 누가분포함수와 가정된 이론확률분포의 누가분포함수를 비교하여 양자의 최대편차로 정의되며, 그 표본의 크기와 유의수준에 따라 결정되는 한계편차보다 적어야 적합성이 인정된다.

$$q = \text{Max} \left| \hat{F}_r(x) - F_0(x) \right| \quad (3.6.22)$$

여기서, $\hat{F}_r(x)$ 는 $F(x)$ 의 경험적 이론확률분포의 누가분포함수이며, $F_0(x)$ 는 표본자료

의 누가분포함수로 다음과 같이 정의된다.

$$F_0(x) = \frac{m}{n} \quad (3.6.23)$$

여기서, q 는 $\hat{F}_r(x)$ 와 $F_0(x)$ 차의 최댓값으로 정의되며 n 의 크기에 따라 좌우되는 확률변수로서 주어진 유의수준 α 로서 적합성을 검정하고자 할 때 q 를 식 (3.6.24)로 정의되는 한계치 q^α 와 비교하게 된다.

$$P[q \leq q^\alpha] = 1 - \alpha \quad (3.6.24)$$

여기서, 유의수준 $\alpha = P[q > c|H_0] \doteq 1 - e^{-2nc^2}$ 으로 정의되는데 최대편차 q 가 한계치 q^α 보다 작으면 가정된 분포는 유의수준 α 로서 그 적합성이 인정된다. 여기서 $H_0 : F(x) \equiv F_0(x)$, $H_1 : F(x) \neq F_0(x)$ 로 H_0 가 참이면 q 는 0에 근접하게 되고 H_1 이 참이면 $F(x) - F_0(x)$ 에 근접하게 된다. 특히, 가설 H_0 가 인정되려면 $q > \sqrt{-\frac{1}{2n} \ln \frac{\alpha}{2}}$ 이어야 한다 (건설교통부, 2000).

(다) Cramer von Mises (CVM) 방법

Cramer von Mises (CVM) 검정은 표준자료 X_1, X_2, \dots, X_N 가 누가분포함수 $F_x(x; \hat{\theta})$ 으로 정의된 확률분포형을 모집단으로 갖는다는 가정을 검정하는데 사용된다. 여기서 $\hat{\theta}$ 는 표본자료의 크기가 N 인 자료에서 추정된 매개변수 집합이다. 검정통계량 W 는 다음과 같이 계산된다 (Thompeon, 1966)

$$W = \frac{1}{12N} + \sum_{i=1}^N \left[F_x(x_i; \hat{\theta}) - \frac{2i-1}{2N} \right]^2 \quad (3.6.25)$$

여기서, $F_x(x; \hat{\theta})$ 는 크기순으로 배열된 $X_i = x_i$ 의 위치에서 계산된 누가분포함수이다. 다음 조건식을 만족한다면, 적용한 분포형을 유의수준 α 에서 기각할 수 없다.

$$W \leq W_{1-\alpha}(N) \quad (3.6.26)$$

여기서, $W_{1-\alpha}(N)$ 는 N 과 α 의 함수이다. 하지만 표본자료가 충분히 커서 $N \geq \frac{20}{\sqrt{\alpha}}$ 인 경우, 통계량 $W_{1-\alpha}(N)$ 은 α 의 함수가 된다 (Anderson et al, 1952; 건설교통부, 2000).

(라) Probability Plot Correlation Coefficient (PPCC) 방법

Probability Plot Correlation Coefficient (PPCC) 검정은 Filliben(1975)에 의해 처음으로 제안되었다.

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}} \quad (3.6.27)$$

여기서, $M_i = \Phi^{-1}(m_i)$ 이고, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 는 각 확률분포형의 누가분포함수의 역함수이다. 또한, m_i 는 누가분포함수의 중간값 (median)이며, Filliben은 다음 식 (3.6.28)으로 제안하였다.

$$\begin{aligned} m_i &= 1 - (0.5)^{\frac{1}{N}}, i = 1 \\ m_i &= \frac{(i - 0.3175)}{(N + 0.365)}, i = 2, \dots, N - 1 \\ m_i &= (0.5)^{\frac{1}{N}}, i = N \end{aligned} \quad (3.6.28)$$

표본자료가 가정한 확률분포형이라는 가설은 다음 조건일 경우에 만족한다 (건설교통부, 2000).

$$\rho_c > r_\alpha(N) \quad (3.6.29)$$

이들 방법 중에 PPCC 검정방법은 기각능력이 뛰어나고 적용방법이 비교적 간단한 것으로 알려져 있다 (김용철 등, 2012). 따라서 본 연구에서는 PPCC 검정 방법을 이용해 유의수준 5%에 대하여 적합도 검정을 실시하였다.

적합도 검정은 16가지 확률분포형에 대하여 총 81개의 연구대상 처리시설을 대상으로 각각 실시하였고, 확률분포형 별로 적합도 검정을 통과하는 시설의 개수를 조사하였다. 이를 바탕으로 대상시설 전체, 전국단위, 도단위, 지역단위에 대하여 가장 많은 시설에서 적합도 검정을 통과한 확률분포형을 적정 확률분포형으로 각각 선정하였으며, 추후 위해성 평가에 적용하기 위해 선정된 확률분포형에 대해 추정된 매개변수를 정리 및 분석하였다.

나. 분석 결과

(1) 적합도 검정 결과

전국 주요 하수처리장, 전라도, 경기도 남서부 지역 소재 시설 등 총 81개소를 대상으로 PPCC 검정 방법을 이용해 확률분포형을 검정한 결과를 요약하면 표 3.6.5와 같

다. 총 72개 시설에서 Generalized Logistic 분포모형 (GLO)이, 63개 시설에서 2변수 Weibull 분포모형 (WBU2)이 적합도 검정을 만족하는 것으로 나타나 하수에서 대장균 수 분포를 가장 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 다음으로 43개 시설에서 3변수 Weibull 분포모형 (WBU3)이, 42개 시설에서 Generalized Extreme Value 분포형 (GEV)이 적합도 검정을 만족하는 것으로 나타났다.

GLO 분포형은 일반적으로 강수량의 지점 및 지역빈도해석에 많이 적용되는 분포형이며 (신흥준 등, 2008) WBU2 분포는 주로 제품의 수명 추정 등에 쓰이는 분포형으로, 본 연구에서 두 분포형이 하수의 대장균수 분포 또한 잘 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 두 분포형은 추후 하수처리수의 재이용에 따른 위해성 분석에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

표 3.6.5 분석 대상 시설 전체 (81개소) 적합도 검정 결과

확률분포형	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2
적합 하수처리장 수	10	12	3	42	16	7	5	10
확률분포형	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
적합하수처리장 수	5	0	63	42	72	0	0	0

표 3.6.6 ~ 표 3.6.8은 전국 주요 하수처리장, 전라도, 경기도 남서부 지역에 대한 각각의 적합도 검정 결과를 나타내고 있다. 전국 주요 하수처리장 10개소 중 9개소에서 GLO 분포형을 만족하였고, 7개소에서 WBU2 분포형을 만족하는 것으로 나타났다. 전라도 지역은 20개소 중 14개소에서 GLO 분포형을 만족하였고, 15개소에서 WBU2 분포형을 만족하였다. 마지막으로 경기도 남서부 지역 화성시, 평택시, 용인시, 오산시에 있는 하수처리장에서는 총 51개소 중 49개소에서 GLO 분포형을, 41개소에서 WBU2 분포형을 만족하는 것으로 분석되었다.

3가지로 분류한 연구대상지역에서 모두 GLO 분포형 또는 WBU2 분포형을 만족하는 하수처리시설이 가장 많이 존재하는 것으로 나타났으며, GEV 분포형 또는 WBU3 분포형이 각각 세 번째 혹은 네 번째로 적합한 것으로 나타났다. 따라서 하수에 존재하는 대장균수 자료의 확률분포 특성은 처리시설별 또는 지역별로 크게 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.

표 3.6.6 전국 주요 하수처리장 (10개소) 적합도 검정 결과

확률분포형	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2
적합 하수처리장 수	0	1	1	6	0	0	2	0
확률분포형	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
적합 하수처리장 수	0	0	7	6	9	0	0	0

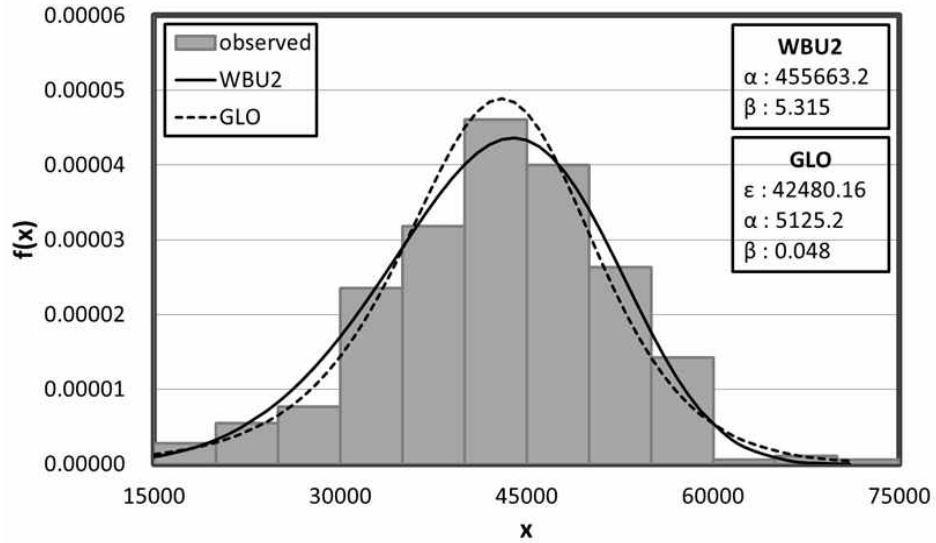
표 3.6.7 전라도지역 하수처리장 (20개소) 적합도 검정 결과

확률분포형	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2
적합 하수처리장 수	2	3	2	10	5	2	1	2
확률분포형	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
적합 하수처리장 수	1	0	15	12	14	0	0	0

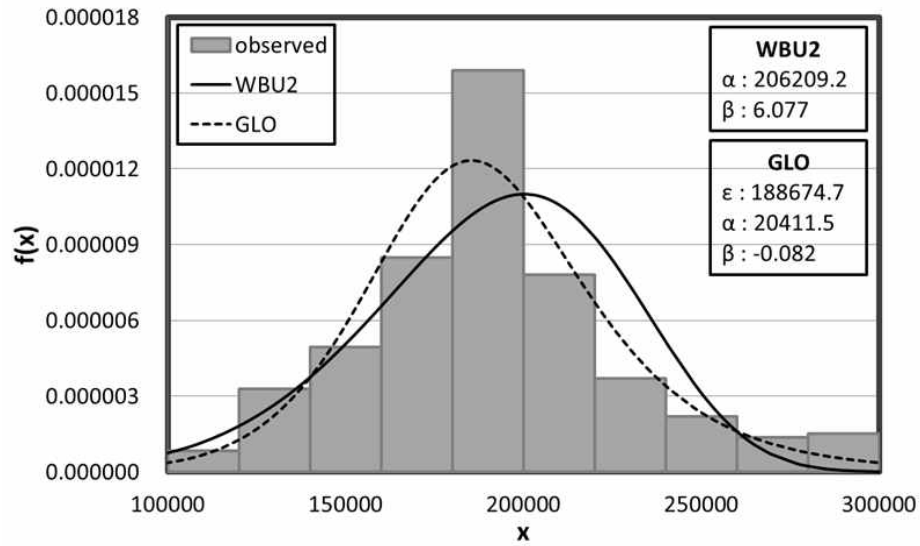
표 3.6.8 연구대상지구 하수처리장 (51개소) 적합도 검정 결과

확률분포형	NOR	GAM2	GAM3	GEV	GUM	LGU2	LGU3	LN2
적합 하수처리장 수	8	8	0	26	11	5	2	8
확률분포형	LN3	LP3	WBU2	WBU3	GLO	GPA	WBK4	WBK5
적합 하수처리장 수	4	0	41	24	49	0	0	0

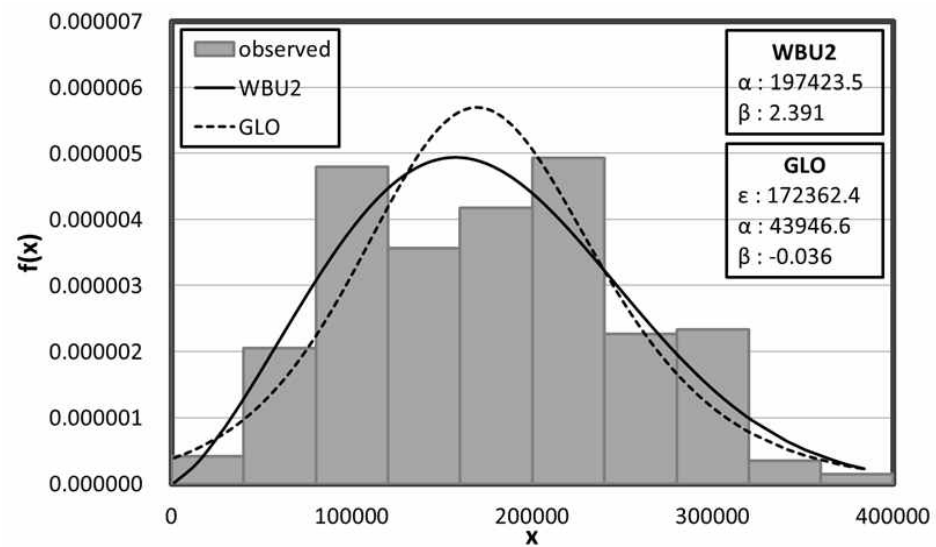
그림 3.6.1 ~ 그림 3.6.2은 분석대상 시설 분류별로 대표적인 예를 각 1개소 선정하여 도수분포표, 확률밀도함수, 누가확률분포곡선 등을 보여주고 있다. 전국 하수처리장의 예로 광주 제2하수처리장, 전라도 하수처리장의 예로 군산하수종말처리장, 경기도 남서부 지역의 예로 송전공공하수리장을 선택하였고, 도수분포표 및 Generalized Logistic 분포형과 2변수 Weibull 분포에 대한 확률밀도함수와 누가확률분포곡선을 각각 도시하였다. Fig. 2에서 GLO 및 WBU2 분포형의 확률밀도함수가 관측값과 유사한 형태를 그리고 있으며, GLO 분포형이 WBU2 분포형에 비해 극치를 잘 반영하는 것을 확인할 수 있다. Fig.3의 누가확률분포곡선 또한 관측값과 유사한 경향을 보여주고 있다.



(a) 광주 제2하수종말처리장 (전국 단위)

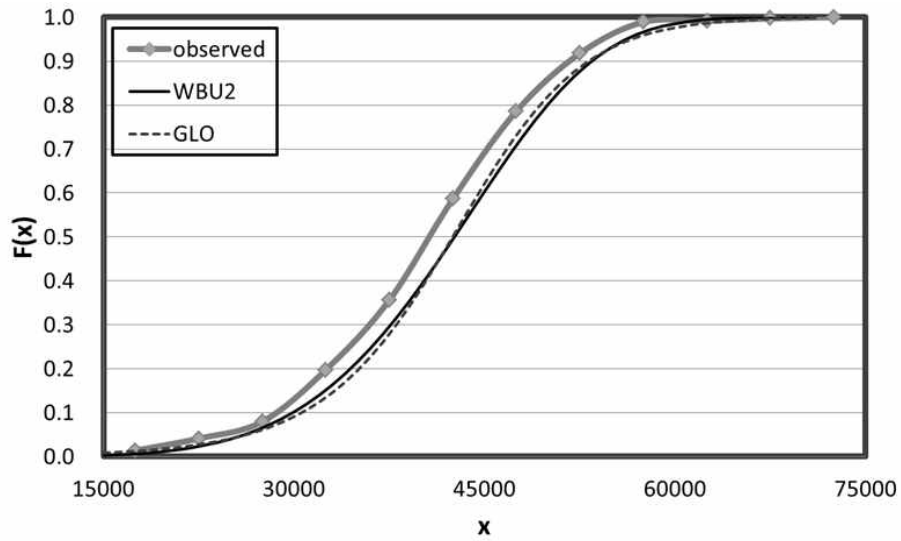


(b) 군산하수종말처리장 (도 단위)

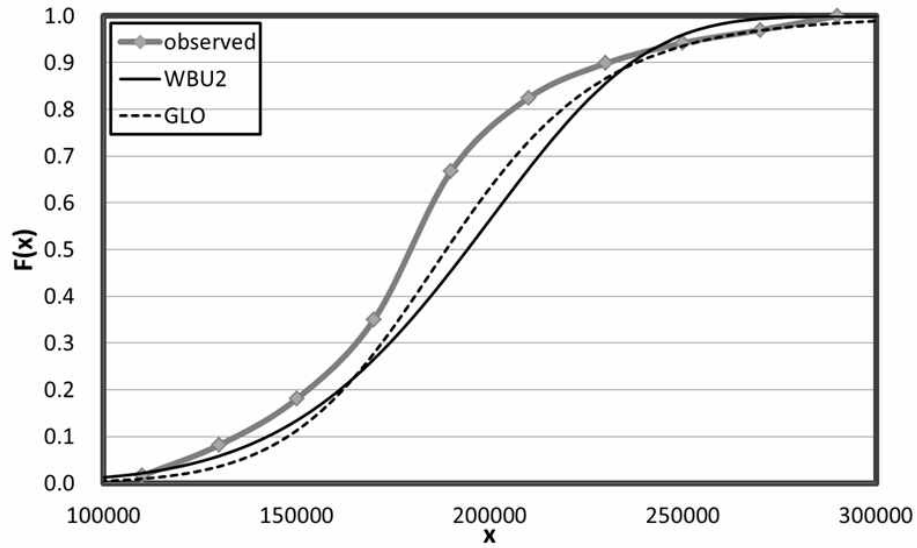


(c) 송전공공하수종말처리장 (지역 단위)

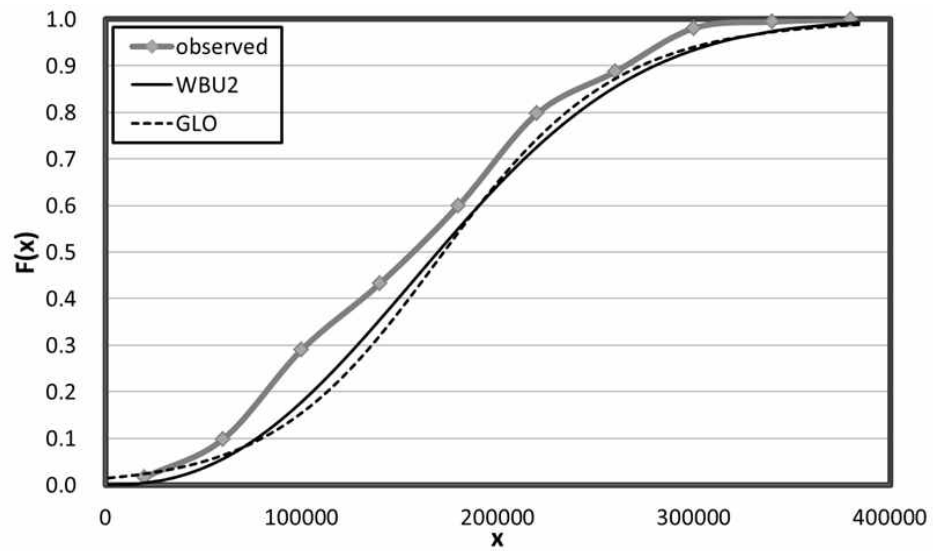
그림 3.6.1 지역규모별 확률밀도함수 예



(a) 광주 제2하수종말처리장 (전국 단위)



(b) 군산하수종말처리장 (도 단위)



(c) 송전공공하수종말처리장 (지역 단위)

그림 3.6.2 지역규모별 누가확률분포곡선 예

(2) 매개변수 추정 결과

향후 위해성 평가에 적용하기 위해 확률가중모멘트법을 이용하여 각 처리시설에 대한 Generalized Logistic 분포형과 2변수 Weibull 분포형의 매개변수 추정을 수행하였다. Generalized Logistic 분포형 (GLO)의 위치매개변수 (ϵ)는 244 ~ 268,584 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었고, 평균 97,652, 표준편차 66,970로 나타났다. 축척매개변수 (α)는 67 ~ 85,614 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었고, 평균 18,325, 표준편차 16,715로 나타났다. 형상매개변수 (β)는 -0.656 ~ 0.378 의 범위의 값을 보였고, 평균값이 -0.109, 표준편차는 0.189 의 값으로 산정되었다. 이를 요약하여 정리하면 표 3.6.9와 같다.

표 3.6.9 Generalized Logistic 분포형 매개변수 추정 결과

구분		최댓값	최솟값	Median	Mean	표준편차
전체 (81개소)	위치매개변수 (ϵ)	268584.2	244.1	79731.6	97652.8	66970.1
	축척매개변수 (α)	85614.6	67.4	10473.6	18325.0	16715.5
	형상매개변수 (β)	0.378	-0.656	-0.112	-0.109	0.189
전국 주요 하수처리장 (10개소)	위치매개변수 (ϵ)	257425.3	31449.5	121810.9	118692.3	70324.0
	축척매개변수 (α)	85614.6	1248.7	21448.8	29576.8	26315.6
	형상매개변수 (β)	0.048	-0.396	-0.142	-0.132	0.134
전라도 (20개소)	위치매개변수 (ϵ)	268584.2	2487.1	58430.0	86304.3	82208.6
	축척매개변수 (α)	49621.7	290.6	9518.9	15269.5	13836.3
	형상매개변수 (β)	0.378	-0.656	-0.095	-0.105	0.257
연구대상 지구 (51개소)	위치매개변수 (ϵ)	262669.9	244.1	97977.8	58015.7	83384.4
	축척매개변수 (α)	51290.1	67.4	17317.0	14261.9	10169.1
	형상매개변수 (β)	0.217	-0.485	-0.106	0.164	-0.112

ϵ : 위치매개변수, α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

2변수 Weibull 분포형 (WBU2)의 축척매개변수 (α)는 301 - 316,389 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었고, 평균 111,004, 표준편차 74,696으로 나타났다. 형상매개변수 (β)는 0.912 - 17.881 의 범위의 값을 보였고, 평균값이 4.91, 표준편차는 3.49 의 값으로 산정되었다. 표 3.6.10은 2변수 Weibull 분포형의 매개변수 추정 결과를 나타내고 있다.

표 3.6.10 2변수 Weibull 분포형 매개변수 추정 결과

구분		최댓값	최솟값	Median	Mean	표준편차
전체 (81개소)	축척매개변수 (α)	316388.6	300.9	87550.3	111003.6	74695.9
	형상매개변수 (β)	17.881	0.912	3.683	4.905	3.487
전국 주요 하수처리장 (10개소)	축척매개변수 (α)	316388.6	35434.3	143579.7	138091.0	84314.3
	형상매개변수 (β)	17.881	0.912	3.870	4.964	4.700
전라도 (20개소)	축척매개변수 (α)	278131.3	2636.7	66191.7	97016.1	87864.2
	형상매개변수 (β)	8.753	1.226	2.808	3.836	2.278
연구대상 지구 (51개소)	축척매개변수 (α)	308609.7	300.9	93552.9	111177.6	64957.7
	형상매개변수 (β)	15.202	0.957	4.817	5.312	3.511

α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

아래 표 3.6.11 ~ 표 3.6.13은 전국 단위, 도 단위, 지역 단위의 각 처리시설 별 Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과를 나타내고 있다.

표 3.6.11 전국 단위 (전국 주요 하수처리장) Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과

처리시설명	ϵ	α	β	처리시설명	ϵ	α	β
서남물재생센터	144169.6	24949.7	-0.132	가평 하수종말처리장	181470.4	18674.2	0.047
강화 하수종말처리장	99452.1	60564.3	-0.253	강릉 하수종말처리장	70513.7	24223.5	-0.151
대전 하수종말처리장	144622.9	52333.6	-0.237	충주 하수종말처리장	42128.7	1248.7	-0.396
대구서부 하수종말처리장	257425.3	85614.6	-0.164	목포남해 하수종말처리장	173210.6	18043.3	-0.002
광주제2 하수종말처리장	42480.2	5125.2	0.048	포항 하수종말처리장	31449.5	4990.7	-0.084

ϵ : 위치매개변수, α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

표 3.6.12 도 단위 (전라도지역) Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과

처리시설명	ε	α	β	처리시설명	ε	α	β
광양중앙 하수종말처리장	15463.0	3403.2	-0.656	해리칠곡마을 하수도	61873.8	9308.3	0.018
전주 하수종말처리장	92072.5	37483.8	-0.214	심원사등마을 하수도	55456.9	9729.5	-0.169
익산 하수종말처리장	30933.4	9064.9	-0.24	용암마을 하수도시설	61403.1	13961.4	-0.107
군산 하수종말처리장	188674.7	20411.4	-0.082	지동마을하수도	45410.4	11220.5	-0.128
정읍 하수종말처리장	170773.2	15669.7	0.033	양장마을하수도	14980.9	1136.8	0.021
남원 하수종말처리장	32957.4	6492.0	-0.351	연소마을하수도	14856.4	1184.8	-0.034
김제 하수종말처리장	72875.4	9034.6	0.165	효산마을하수도	211996.5	49621.7	-0.361
순천 하수종말처리장	268584.2	24766.2	0.334	구만마을 하수처리시설	19743.1	8552.4	-0.428
목포북항 하수종말처리장	101433.5	25231.8	0.045	지하마을하수도	2487.1	290.6	0.119
나주 하수종말처리장	14840.3	5374.7	-0.452	도대마을하수도	249269.7	43451.0	0.378

ε : 위치매개변수, α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

표 3.6.13 지역 단위 (경기도 남서부) Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과

처리시설명	ε	α	β	처리시설명	ε	α	β
발안산업단지 폐수종말처리장	49015.5	3570.6	0.05	원삼소규모공공 하수처리시설	156001.4	32682.3	0.034
화성마도 폐수종말처리장	36226.6	3877.7	0.203	주북리마을 하수도	45208.1	9478.7	-0.261
장안첨단 폐수종말처리장	50722.2	5871.1	-0.212	대대리마을 하수도	19766.9	5623.8	-0.112
홍법공공 하수처리시설	175819.1	9522.3	0.039	사전소규모 공공하수도	36814.2	20291.5	-0.446
원안공공 하수처리시설	192992.3	15672.1	0.217	포곡성밀마을 하수도	38098.5	17595.1	-0.407
궁평공공 하수처리시설	154285.6	15953.2	-0.14	지내사은마을 하수도	48631.9	25286.4	-0.431
노하공공 하수처리시설	167839.4	9474.1	0.02	용인 하수종말처리장	7701.0	493.3	0.113
덕천공공 하수처리시설	170540.3	14528.3	0.085	남사공공 하수종말처리장	168078.4	41054.0	0.027
남양 하수종말처리장	88913.4	10156.7	-0.126	송전공공 하수종말처리장	172362.4	43946.6	-0.036
봉담 하수종말처리장	11100.2	10169.1	0.098	천리공공 하수종말처리장	188762.9	37367.9	-0.009
조암 하수종말처리장	78544.4	10473.6	-0.099	모현 하수종말처리장	37498.7	19736.5	-0.246
향남 하수종말처리장	108217.6	9162.8	-0.019	용인분노(2차) 처리시설	262669.9	48670.8	-0.175
어연한산 산업단지 폐수종말처리장	29399.7	2152.8	-0.197	현곡산업단지 폐수종말처리장	41068.0	7394.0	-0.14
기흥 하수종말처리장	244.1	67.4	-0.193	구갈 하수종말처리장	119341.5	24143.2	-0.351
고덕문화마을 하수도	61637.1	8767.2	-0.12	고매공공 하수종말처리장	155314.3	44869.5	-0.056
평택사리마을 하수도	77554.8	7533.4	-0.485	영덕공공 하수종말처리장	172011.7	38865.3	-0.195

ε : 위치매개변수, α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

표 3.6.13 지역 단위 (경기도 남서부) Generalized Logistic 분포의 매개변수 추정 결과 (계속)

처리시설명	ε	α	β	처리시설명	ε	α	β
평택장동마을 하수도	77486.4	7182.0	-0.218	수지공공 하수종말처리장	157190.7	39546.3	-0.091
평택당현마을 하수도	83384.4	8454.1	-0.177	상현공공 하수종말처리장	109481.3	34455.6	-0.117
내천수월암마을 하수도	80431.1	7570.7	-0.106	용인동부공공 하수처리장	141336.1	27934.1	-0.011
신리별말마을 하수도	77114.7	6487.9	-0.04	백암공공 하수처리장	154789.6	31952.9	-0.011
덕목백석마을 하수도	32013.3	2866.4	0.100	추계공공 하수처리장	144210.1	30627.0	-0.121
평택노양마을 하수도	99788.7	27883.2	-0.255	현덕공공 하수처리시설	63197.8	2701.1	0.139
장당 하수종말처리장	75564.9	6516.8	-0.064	서천공공 하수종말처리장	32312.0	16999.7	-0.283
오산 하수종말처리장 (유입구1)	79731.6	4063.2	0.153	오산 하수종말처리장 (유입구2)	99650.4	11886.5	-0.218
팽성 하수종말처리장	46152.2	2623.8	-0.026	통북 하수종말처리장	111401.1	7674.1	-0.206
포승공단 하수종말처리장	109248.0	51290.1	-0.280				

ε : 위치매개변수, α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

아래 표 3.6.14 ~ 표 3.6.16은 전국 단위, 도 단위, 지역 단위의 각 처리시설 별 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과를 나타내고 있다.

표 3.6.14 전국 단위 (전국 주요 하수처리장) 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과

처리시설명	α	β	처리시설명	α	β
서남물재생센터	165921.0	3.68	가평하수종말처리장	193520.9	6.31
강화하수종말처리장	121238.4	0.91	강릉하수종말처리장	86114.2	1.74
대전하수종말처리장	185938.3	1.64	충주하수종말처리장	44419.3	17.88
대구서부하수종말처리장	316388.6	1.81	목포남해하수종말처리장	186271.9	6.30
광주제2하수종말처리장	45663.2	5.32	포항하수종말처리장	35434.3	4.06

α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

표 3.6.15 도 단위 (전라도지역) 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과

처리시설명	α	β	처리시설명	α	β
광양중앙하수종말처리장	24952.6	1.58	해리칠곡마을하수도	67741.0	4.23
전주하수종말처리장	116824.3	1.44	심원사등마을하수도	64642.5	3.60
익산하수종말처리장	39236.1	2.05	용암마을하수도시설	71792.7	2.75
군산하수종말처리장	206209.2	6.08	지동마을하수도	53895.0	2.51
정읍하수종말처리장	181437.4	7.15	양장마을하수도	15799.2	8.75
남원하수종말처리장	41865.2	2.86	연소마을하수도	15812.6	8.36
김제하수종말처리장	76787.8	4.80	효산마을하수도	278131.3	2.39
순천하수종말처리장	274052.3	5.50	구만마을하수처리시설	29215.6	1.23
목포북향하수종말처리장	112332.8	2.36	지하마을하수도	2636.7	5.31
나주하수종말처리장	22025.6	1.42	도대마을하수도	244932.7	2.34

α : 축척매개변수, β : 형상매개변수

표 3.6.16 지역 단위 (경기도 남서부) 2변수 Weibull 분포의 매개변수 추정 결과

처리시설명	α	β	처리시설명	α	β
발안산업단지폐수종말처리장	51429.8	9.07	원삼소규모공공하수처리시설	172861.6	2.90
화성마도폐수종말처리장	37780.4	5.46	주북리마을하수도	55660.4	2.88
장안침단폐수종말처리장	57313.6	5.44	대대리마을하수도	23505.5	2.15
홍법공공하수처리시설	182629.1	12.37	사전소규모공공하수도	54920.6	0.96
원안공공하수처리시설	199563.6	7.30	포곡성밀마을하수도	55523.7	1.17
궁평공공하수처리시설	169911.2	6.30	지내사은마을하수도	72030.8	1.02
노하공공하수처리시설	174878.4	11.90	용인하수종말처리장	7993.3	10.12
덕천공공하수처리시설	179379.1	7.59	남사공공하수종말처리장	187475.4	2.44
남양하수종말처리장	98440.1	5.70	송전공공하수종말처리장	197423.5	2.39
봉담하수종말처리장	117005.7	6.99	천리공공하수종말처리장	211542.8	3.15
조암하수종말처리장	87550.3	4.87	모현하수종말처리장	47440.5	1.08
향남하수종말처리장	115324.0	7.85	용인분뇨(2차)처리시설	308609.7	3.39
어연한산산업단지폐수종말처리장	31857.7	8.74	현곡산업단지폐수종말처리장	47557.9	3.53
기흥하수종말처리장	300.9	2.21	구갈하수종말처리장	152245.4	2.79
고덕문화마을하수도	69443.6	4.54	고매공공하수종말처리장	180048.0	2.09
평택사리마을하수도	93552.9	4.82	영덕공공하수종말처리장	207956.2	2.74
평택장등마을하수도	85879.7	6.80	수지공공하수종말처리장	183998.5	2.46
평택당현마을하수도	92363.0	6.34	상현공공하수종말처리장	131028.5	1.92
내천수월암마을하수도	87415.1	7.00	용인동부공공하수처리장	158473.2	3.16
신리별말마을하수도	82380.0	7.91	백암공공하수처리장	173969.7	3.01
덕목백석마을하수도	33678.0	7.15	추계공공하수처리장	168516.0	2.96
평택노양마을하수도	126943.2	2.14	현덕공공하수처리시설	64764.6	15.20
장당하수종말처리장	81124.7	7.70	서천공공하수종말처리장	42214.9	1.08
오산하수종말처리장 (유입구1)	81967.1	12.56	오산하수종말처리장 (유입구2)	113129.2	5.25
평성하수종말처리장	48301.2	11.86	통북하수종말처리장	120376.0	9.25
포승공단하수종말처리장	144378.4	1.22			

α : 축적매개변수, β : 형상매개변수

3. 시험지구의 미생물 인체 위해성 평가

오산간접재이용지구, 용인청정지구 및 미처리지구에서 2012년에서 2014년까지 모니터링을 수행하여 수집한 *E. coli* 농도자료를 바탕으로 Beta-poisson dose-response 모형을 이용하여 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 위해성 평가는 지구별 유입수와 노출수로 나누어서 수행하였다. 유입수 미생물 자료의 경우 시비 등의 영농활동에 의한 영향을 받지 않으므로, 간접재이용·저수지 관개·미처리 하수 관개에 따른 인체 위해성을 비교·분석하기에 적절할 것으로 사료된다. 담수의 경우 영농활동 및 미생물의 증식 등으로 인해 유입수와는 다른 미생물 분포특성을 가질 것으로 사료되며, 각 지구의 위해성 평가 결과를 바탕으로 실제 농민들의 병원성 미생물에 의한 감염 가능성을 분석하였다.

3.1 위해성 평가 방법

가. 기본 이론 (Hass 등, 1999; Stine 등, 2005)

미생물 섭취에 의한 연간 위해성은 아래 식 (3.6.30)으로 결정할 수 있다.

$$P_A = 1 - (1 - P_i)^D \quad (3.6.30)$$

여기서 P_A 는 연간 위해성, P_i 는 일별 위해성, D 는 연간 노출일수이다. 일별 위해성 P_i 의 경우 Beta-poisson dose-response 모형을 이용하여 계산할 수 있으며, 아래 식 (3.6.31)으로 표현된다.

$$P_i(d) = 1 - \left[1 + (d/N_{50})(2^{1/\alpha} - 1) \right]^{-\alpha} \quad (3.6.31)$$

여기서 P_i 는 일별 위해성, d 는 미생물의 농도, N_{50} 은 섭취한 사람의 50%가 감염될 수 있는 농도, α 는 용량-반응 계수이다. 본 연구에서는 지구별 유입수 및 담수의 *E. coli* 자료를 통계분석하여 적정 확률분포형을 선정하고 매개변수를 추정하였다. 이를 바탕으로 50%, 90% 및 99% 확률값을 각각 도출하여 *E. coli* 농도로 사용하였으며, 도출된 값에 몇몇 가정을 통해 섭취되는 미생물의 농도 d 를 산정하였다. N_{50} 과 α 는 Powell 등 (2000)이 제시한 190,000 MPN/100mL 및 0.221을 사용하였다.

나. 평가 시나리오

영농활동에 의한 병원성 미생물의 인체 위해성 평가를 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 먼저, Asano 등 (1992)은 골프장에서 골퍼가 골프공이나 의복을 통해 접촉하는 과정에서 하루 동안 섭취할 수 있는 병원성 미생물의 양을 0.001 L라고 가정한 바 있으며, 본 연구에서 농민이 영농활동으로 하루 동안 의복이나 손으로 전달될 수 있는 병원성 미생물의 양도 비슷할 것으로 판단하여 0.001 L로 가정하였다. 그리고 이중 실

제 농민에 의해 섭취될 수 있는 양은 약 1 %로 가정하였다. 또한 농민이 영농활동을 통해 논물에 노출되는 기간은 30일로 가정하였으며 (정광욱 등, 2005), 흙을 통해 섭취될 가능성은 배제하였다. 유입수는 담수와 달리 농민이 직접 접촉하는 경우는 드물지만, 친수활동 등을 통해 인간이 위험에 노출될 수 있다는 가정 하에 담수와 같은 시나리오로 위해성 분석을 실시하였다.

3.2 위해성 평가 결과

지구별 유입수 및 담수의 *E. coli* 자료를 통계분석하여 걱정 확률분포형을 선정하고 매개변수를 추정하였다. 이를 바탕으로 50 %, 90 % 및 99 % 확률값을 각각 도출하여 *E. coli* 농도로 사용하였으며, 도출된 값에 위에서 제시한 시나리오를 적용해 섭취되는 미생물의 농도 d 를 산정하였다. 그리고 식 (3.6.30) 및 식 (3.6.31)을 이용해 지구별 유입수 및 담수의 연간 인체 위해성을 계산하였다.

일반적으로 연간 위해성이 10^{-4} 을 초과할 경우 병원성 미생물에 의해 감염될 가능성이 높은 것으로 보고있으며 (Haas 등, 1993; Stine 등, 2005; Rhee 등, 2011), USEPA (1992)에서는 위해도 값이 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 은 자연계에 노출될 경우 질병의 이동이 가능하여 질병을 일으킬 가능성이 있는 것으로 보고 있다.

가. 유입수 인체 위해성 평가 결과

유입수 *E. coli* 자료의 확률분포 분석 결과 오산간접재이용지구 및 미처리지구의 경우 Pareto 2 분포형이 걱정 확률분포형으로 선정되었으며, 용인청정지구의 경우 General Pareto 분포형이 선정되었다. 각 분포형을 적용해 지구별 50 %, 90 % 및 99 % 확률값을 각각 도출한 결과는 표 3.6.17과 같다.

표 3.6.18과 그림 3.6.3은 지구별 유입수의 연간 인체 위해성 분석 결과를 나타내고 있다. 평균 (50 % percentile)에서는 모든 지구에서 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 의 범위에 들어가는 것으로 나타나 질병의 이동이 가능한 수준으로 나타났다. 지구별로 비교해보면 오산간접재이용지구가 가장 큰 값을, 용인청정지구가 가장 작은 값을 나타냈다. 90 % percentile에서도 평균과 마찬가지로 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, 지구간의 비교에서는 미처리지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다. 99 % percentile에서는 오산간접재이용지구와 미처리지구에서 10^{-4} 을 초과하는 것으로 나타났으며, 미처리지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다.

표 3.6.17 지구별 유입수 *E. coli* 확률분포 분석 결과

유입수	지구	Percentile			확률분포형
		50 %	90 %	99 %	
<i>E. coli</i> (MPN/100mL)	용인	0	5	51	Gen. Pareto
	오산	6	143	7,681	Pareto 2
	미처리	3	315	234,210	Pareto 2

표 3.6.18 지구별 유입수 연간 위해성 분석 결과

유입수	지구	Percentile		
		50 %	90 %	99 %
<i>E. coli</i>	용인	2.62×10^{-8}	3.61×10^{-7}	3.94×10^{-6}
	오산	4.89×10^{-7}	1.10×10^{-5}	5.90×10^{-4}
	미처리	2.06×10^{-7}	2.42×10^{-5}	1.78×10^{-2}

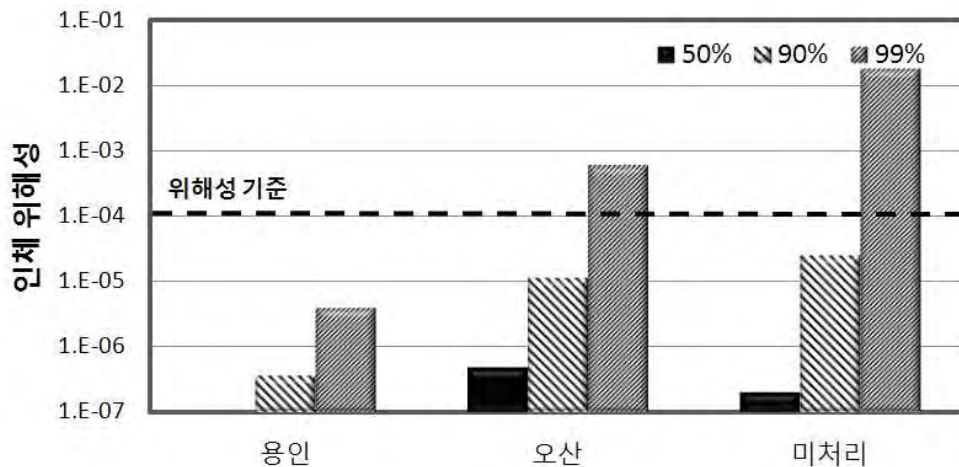


그림 3.6.3 지구별 유입수 연간 위해성 분석 결과

나. 논 담수 인체 위해성 평가 결과

담수 *E. coli* 자료의 확률분포 분석 결과 GEV 분포형이 적정 확률분포형으로 선정되었다. GEV 분포형을 적용해 지구별 50 %, 90 % 및 99 % 확률값을 각각 도출한 결과는 표 3.6.19과 같다.

표 3.6.20은 지구별 담수의 연간 인체 위해성 분석 결과를 나타내고 있다. 평균 (50 % percentile)에서는 모든 지구에서 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 의 범위에 들어가는 것으로 나타나 질병의 이동이 가능한 수준으로 나타났다. 지구별로 비교해보면 미처리지구가 가장 큰 값을, 용인청정지구가 가장 작은 값을 나타냈다. 90 % percentile에서도 평균과 마찬가지로 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, 지구간의 비교에서는 오산간접재이용지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다. 99 % percentile에서도 모든 지구에서 10^{-4} 을 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 오산간접재이용지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다.

표 3.6.19 지구별 담수 *E. coli* 확률분포 분석 결과

담수	지구	Percentile			확률분포형
		50 %	90 %	99 %	
<i>E. coli</i> (MPN/100mL)	용인	1	15	126	GEV
	오산	3	34	369	
	미처리	3	24	171	

표 3.6.20 지구별 담수 연간 위해성 분석 결과

담수	지구	Percentile		
		50 %	90 %	99 %
<i>E. coli</i>	용인	1.14×10^{-7}	1.14×10^{-6}	9.71×10^{-6}
	오산	2.23×10^{-7}	2.58×10^{-6}	2.83×10^{-5}
	미처리	2.34×10^{-7}	1.87×10^{-6}	1.31×10^{-5}

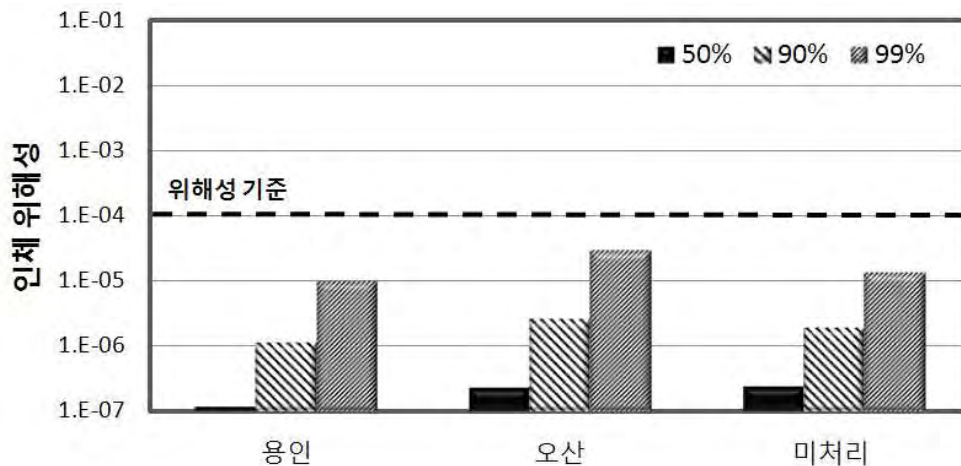


그림 3.6.4 지구별 담수 연간 위해성 분석 결과

5. 요약 및 결론

본 절에서는 전국 하수 및 분뇨 처리장의 하수로부터 측정된 일별 대장균수 자료를 이용하여 기본 통계치를 계산하고, 적합도 검정 및 매개변수 추정을 통해 적합한 확률 분포모형을 결정하였다. 기초통계분석은 4가지의 용도별 (하수종말 처리시설, 마을하수도 처리시설, 분뇨 처리시설, 축산폐수 처리시설)로 수행하였으며, 확률분포모형 결정은 3단계의 공간 규모 (전국, 도단위, 시군단위)로 수행하였다. 또한 오산간접재이용지구, 용인청정지구 및 미처리지구에서 2012년에서 2014년까지 모니터링을 수행하여 수집한 *E. coli* 농도자료를 바탕으로 Beta-poisson dose-response 모형을 이용하여 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 위해성 평가는 지구별 유입수와 논 담수로 나누어서 수행하였다.

① 하수처리장의 용도에 따른 대장균 통계를 살펴보면, 대장균의 최대치는 축산폐수 처리시설에서 나타난 반면, 전반적으로 분뇨처리시설의 하수에 대장균수 (중간값 기준)가 높게 나타났다. 소규모 마을하수도 처리시설의 경우 하수종말 처리시설 등 다시 시설에 비해 대장균수가 적은 것으로 분석되었다.

② 하수의 대장균 분포는 전반적으로 극치값을 반영할 수 있는 확률분포형 모형이 적합한 것으로 나타났다. 유의수준 5%의 PPCC검정 방법을 이용하여 전국, 도, 지역단위 총 81개 하수처리 시설의 하수 대장균 분포를 분석한 결과 Generalized Logistic 분포모형 (GLO, 72개 시설에서 만족)과 2변수 Weibull 분포모형 (WBU2, 63개 시설에서 만족)이 하수 대장균 분포에 가장 적합한 모형으로 분석되었다.

③ GLO 및 WBU2의 두 분포모형에 대해 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정한 결과, GLO 분포형의 매개변수 평균값은 위치매개변수(ϵ)의 경우 97,653, 축척매개변수(α)는 18,325, 형상매개변수(β)는 -0.109로 산정되었고, WBU2 분포형의 경우 축척매개변수(α)의 평균값이 111,004, 형상매개변수(β)가 4.91로 산정되었다.

④ 유입수 *E. coli* 자료의 확률분포 분석 결과 오산간접재이용지구 및 미처리지구의 경우 Pareto 2 분포형이 적정 확률분포형으로 선정되었으며, 용인청정지구의 경우 General Pareto 분포형이 선정되었다. 담수 *E. coli* 자료의 확률분포 분석 결과 GEV 분포형이 적정 확률분포형으로 선정되었다.

⑤ 유입수의 연간 인체 위해성을 분석한 결과, 평균 (50 % percentile)에서는 모든 지구에서 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 의 범위에 들어가는 것으로 나타나 질병의 이동이 가능한 수준으로 나타났다. 지구별로 비교해보면 오산간접재이용지구가 가장 큰 값을, 용인청정지구가 가장 작은 값을 나타냈다. 90 % percentile에서도 평균과 마찬가지로 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, 지구간의 비교에서는 미처리지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다. 99 % percentile에서는 오산간접재이용지구와 미처리지구에서 10^{-4} 을 초과하는 것으로 나타났으며, 미처리지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다.

⑥ 담수의 연간 인체 위해성을 분석한 결과, 평균 (50 % percentile)에서는 모든 지구에서 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 의 범위에 들어가는 것으로 나타나 질병의 이동이 가능한 수준으로 나타났다. 지구별로 비교해보면 미처리지구가 가장 큰 값을, 용인청정지구가 가장 작은 값을 나타냈다. 90 % percentile에서도 평균과 마찬가지로 위해도가 10^{-4} 을 초과하지 않았으며, 지구간의 비교에서는 오산간접재이용지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다. 99 % percentile에서도 모든 지구에서 10^{-4} 을 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 오산간접재이용지구가 가장 높은 위해성을 가지는 것으로 나타났다.

본 절에서 결정된 하수의 병원균 지표미생물인 대장균의 확률분포모형과 그에 따른 모형의 매개변수 값은 하수의 농업용수재이용에 따른 미생물의 정량적 위해성평가를 위한 기초자료로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 병원성 미생물에 의한 인체 위해성을 분석한 결과, 용인청정지구가 가장 낮은 위해성을 가지는 것으로 분석되었으며, USEPA에서 제시한 기준으로 모든 지구에서 질병의 이동이 가능한 수준으로 나타났다.

제7절 간접하수재이용에 따른 관개기 순별 관개수질 모의

1. 서론

우리나라는 계절적 또는 지역적으로 수자원의 편중이 심하여 물의 이용에 어려움이 많다. 용수의 수요 역시 계속해서 증가하는 추세로, 2020년에는 생활·공업·농업용수의 수급에 있어 3.8~5.0 억 m^3 의 물이 부족할 것으로 전망된다. (국토해양부, 2011). 농업용수는 생활·공업·농업용수 수요량 중 62%의 큰 비중을 차지하고 있으며 (국토해양부, 2011), 가뭄의 발생 빈도 및 심도가 점차 증가하는 추세를 보이는 상황에서 (이주현 등, 2012) 농업용수의 부족으로 인한 문제는 점차 심화될 것으로 예상된다.

하수 재이용은 오염 부하량의 저감을 통한 하천 수질의 개선이 가능하고, 하수처리수의 연중 발생량이 일정하므로 물 수급의 지역적 불균형을 완화할 수 있다는 장점을 지니기 때문에 가장 현실적인 대체 수자원으로 주목되고 있다 (환경부, 2009). 2010년을 기준으로 하수처리수의 재이용량은 743 백만 m^3 에 달하며, 이 중 33 백만 m^3 이 농업용수로 재이용되고 있다 (환경부, 2011a).

하수처리수의 농업용수 재이용은 기존의 수처리 공정에 재처리 공정을 추가하여 하수처리수를 관개용수로 이용하는 직접재이용과, 하천으로 유입된 하수처리장 방류수 또는 미처리 하수를 하류 구간에서 취수하여 이용하는 간접재이용으로 구분된다 (박승우와 장태일, 2009). 직접재이용의 경우, 관개용수의 수질은 하수처리장 방류수의 수질에만 영향을 받으며, 이에 대한 재처리 시스템과 재이용 수질 기준에 대한 연구는 장기간 진행된 바 있다 (박승우, 2004, 2007, 2011). 반면에 간접재이용의 경우, 하수처리장 방류수가 하천에서 희석되기 때문에 하천의 유량이나 관개용수 취수지점의 위치에 따라서도 관개수질이 영향을 받게 된다. 특히, 하수처리장 방류수의 수질 기준은 농업용수 수질 기준 및 하수재이용 수질권고기준 (환경부, 2009)을 초과하고 있는 실정이다. 따라서 하수처리수를 농업용수로 간접재이용할 경우, 하수처리수가 관개용수 수질에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 평가할 필요가 있다.

그동안 하수처리수의 재이용에 따른 농업용수 수질에 관한 연구는 지속적으로 이루어졌으나, 대부분의 연구가 시험 논 포장의 유입수와 배출수를 대상으로 하고 있다. 하수처리수를 농업용수로 재이용하는 논에 대해, 강문성 등 (2004)은 수질 및 미생물의 특성을 평가하기 위하여 관개 유입수와 담수 수질을 분석하였고, 성충현 등 (2011)은 포장 단위 모형을 이용하여 관개 수질 및 시비량의 변화에 따른 오염 부하량을 모의하였다. McAvoy 등 (2003)이 하천 수질 모형을 이용하여 미처리하수가 유입되는 하천에 대한 위해성 평가를 실시한 바 있으나, 하수처리장 방류수에 따른 취수지점에서의 수질을 분석한 연구 사례는 미비한 실정이다.

하천 수질의 추정에 주로 이용되는 QUAL2E 모형 (Enhanced stream water quality model)은 1985년에 미국 EPA (US Environmental Protection Agency)에서 개발된 1차원 정상 상태의 하천 수질 모형으로, 계산능력이 우수하고 사용이 간편하여 전 세계적으로 널리 적용되고 있다. 그러나 QUAL2E 모형은 조류의 생산 및 사멸에 따른 유

기물의 증가를 고려하지 못하여 정제수역이 많은 우리나라 하천의 특성을 제대로 반영하지 못한다 (국립환경과학원, 2005). 국립환경과학원에서는 이러한 QUAL2E 모형의 한계점을 보완하여 QUALKO2 모형을 개발하였다 (국립환경과학원, 2007). QUALKO2 모형은 유재정 등 (2011)의 연구에서 밀양강 유역에 적용되었으며, 안성천과 임진강의 물환경관리계획 (한강유역환경청, 2009a, 2009b)에도 적용된 바 있다.

QUAL2E 모형은 주로 정상 상태에서 모의되기 때문에 비점오염원이나 수문 사상과 같은 동적 요소를 반영하기 어려운 한계가 있으며 (Migliaccio 등., 2007), QUALKO2 모형 역시 동일한 한계를 지닌다. 이를 극복하고자 정상 상태의 하천 수질 모형과 유역 모형을 연계하는 시도가 이루어졌다. Migliaccio 등. (2007)과 최현구 등 (2011)이 각각 QUAL2E 모형과 QUALKO 모형을 복합토지이용에서의 비점오염 부하량 모의에 적합한 SWAT (Soil and water assessment tool)모형과 연계하여 하천 수질을 예측하는 연구를 수행한 바 있다.

본 절에서는 SWAT 모형을 이용하여 소유역별 하천 유입 유량 및 비점오염 부하량을 해석하고, QUALKO2 모형과 연계하여 하수처리수가 유입되는 하천에서의 구간별 수질을 모의함으로써, 하수처리수의 간접재이용에 따른 관개수질을 분석하고자 한다.

2. QUALKO2 모형

2.1. 모형의 개요

QUALKO2 모형은 2007년에 국립환경과학원에서 개발된 모형으로, 1985년에 미국 EPA에서 개발된 QUAL2E 모형을 기본으로 한다. QUAL2E 모형은 이송-확산 방정식에 의한 1차원 하천 수질 모형이다. BOD, DO, 조류, 질소, 인, 대장균 등 15 개 수질 인자에 대한 모의가 가능하다. 하천 구간을 대구간 (Reach)과 소구간 (Element)으로 구분하며, 대구간 내에서는 수리적 특성과 반응 계수가 동일한 것으로 가정한다.

QUAL2E 모형은 사용이 간편하여 국내외에서 널리 사용되고 있으나, 조류와 유기물의 영향이 큰 국내 하천의 적용에는 한계가 있다. 이러한 점을 보완하여 1999년에 국립환경과학원에서 QUALKO 모형을 개발하였으며, QUALKO2 모형은 QUALKO 모형을 일부 수정한 모형이다. QUALKO2 모형은 조류의 사멸과 호흡을 고려하고 생물성 및 비생물성 유기물을 구분하여 조류와 유기물의 영향을 보다 상세하게 모의할 수 있다. 기존의 QUAL2E 모의 항목에 COD, TOC 등이 추가되었고, 실험실에서 측정하는 Bottle BOD를 입력할 수 있도록 개선되었다. 표 3.7.1은 QUAL2E 모형과 QUALKO2 모형의 구조상의 차이점을 나타낸다.

표 3.7.1 QUAL2E 모형과 QUALKO2 모형의 비교 (한강유역환경청, 2009a, b)

구분	QUAL2E	QUALKO2
모의방식	정상상태 (Steady-state)	정상상태 (Steady-state)
확산계수 산정	Elder (1959) 식	Elder (1959), Fisher (1975) 식
생물성/비생물성 질소, 인	분리 안됨	분리
조류의 사멸/호흡	분리 안됨	분리
조류 생산에 따른 수중 유기물 증가	포함 안됨	포함
Bottle BOD	포함 안됨	포함
COD	모의 안됨	조건적 적용
탈질화 반응	모의 안됨	적용

2.2. 모형의 구성요소

가. 지배방정식

QUALKO2 모형은 QUAL2E 모형의 방정식을 기본으로 하되, 조류의 사멸/호흡 및 생물성/비생물성 유기물을 추가적으로 고려한다.

(1) 기본 방정식

QUALKO2 모형을 구성하는 기본방정식은 1차원 이송-확산 물질 이동 방정식이다.

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(AE \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial(AUC)}{\partial x} dx + V \frac{dC}{dt} + s \quad (3.7.1)$$

V : 체적, A : 단면적, U : 평균유속, C : 오염물질 농도

E : 종확산계수, s : 오염물질의 외부적인 생성/소멸

(2) 수질 모의

각 수질 항목별 반응식은 다음과 같다.

(가) DO

$$\frac{dO}{dt} = K_2(O_s - O) - K_1L - \frac{K_4}{H} + (\alpha_3\mu - \alpha_4\rho)A - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \quad (3.7.2)$$

(나) BOD

$$\frac{dL}{dt} = -K_1L - K_3L + (1-\gamma)\alpha_4\rho\mu A - \alpha_3\beta_5N_3 \quad (3.7.3)$$

(다) 조류

$$\frac{dA}{dt} = \mu A - \rho A - \frac{\sigma_1}{H}A \quad (3.7.4)$$

(라) 질소

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3N_4 - \beta_1N_1 + \frac{\sigma_3}{H} - F\alpha_1\mu A - \alpha_1(1-R)\rho A \quad (3.7.5)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \beta_1N_1 - \beta_2N_2 \quad (3.7.6)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2N_2 - (1-F)\alpha_1\mu A - \beta_5N_3 \quad (3.7.7)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \alpha_1R\rho A - \beta_3N_4 - \sigma_4N_4 \quad (3.7.8)$$

$$N_5 = N_4 + \alpha_1A \quad (3.7.9)$$

(마) 인

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_2R\rho A - \beta_4P_1 - \sigma_5P_1 \quad (3.7.10)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4P_1 + \frac{\sigma_2}{H} - \alpha_2\mu A + \alpha_2(1-R)\mu\rho A \quad (3.7.11)$$

L : BOD농도, O : DO농도, O_s : DO포화농도

K_1 : BOD탈산소계수, K_2 : 재포기계수, K_3 : BOD침전계수, K_4 : 하상산소요구량

A : 조류농도, γ : 조류의 야간호흡 기여율, μ : 조류 비성장률, ρ : 조류 호흡률

N_1 : 암모니아질소농도, N_2 : 아질산성질소농도, N_3 : 질산성질소농도

N_4 : 유기질소농도, N_5 : 생물성 유기질소

P_1 : 유기인농도, P_2 : 용존성인농도,

R : 사멸조류 중 비생물성 질소, F : 조류의 질소 섭취량

β_1 : 암모니아질소 산화율, β_2 : 아질산성 질소 산화율, β_3 : 유기질소의 가수분해율

β_4 : 유기인의 사멸률, β_5 : 탈질화율

α_1 : 조류의 질소 함유량, α_2 : 조류의 인 함유량, α_3 : 조류 성장시 산소소모량

α_4 : 조류 호흡시 산소 소모량, α_5 : 암모니아질소 산화시 산소 소모량
 α_6 : 아질산성질소 산화시 산소 소모량
 σ_1 : 조류 침전율, σ_2 : 용존인 저질 용출율, σ_3 : 암모니아질소 저질 용출율
 σ_4 : 유기질소 침전율, σ_5 : 유기인 침전율

나. 계산 요소

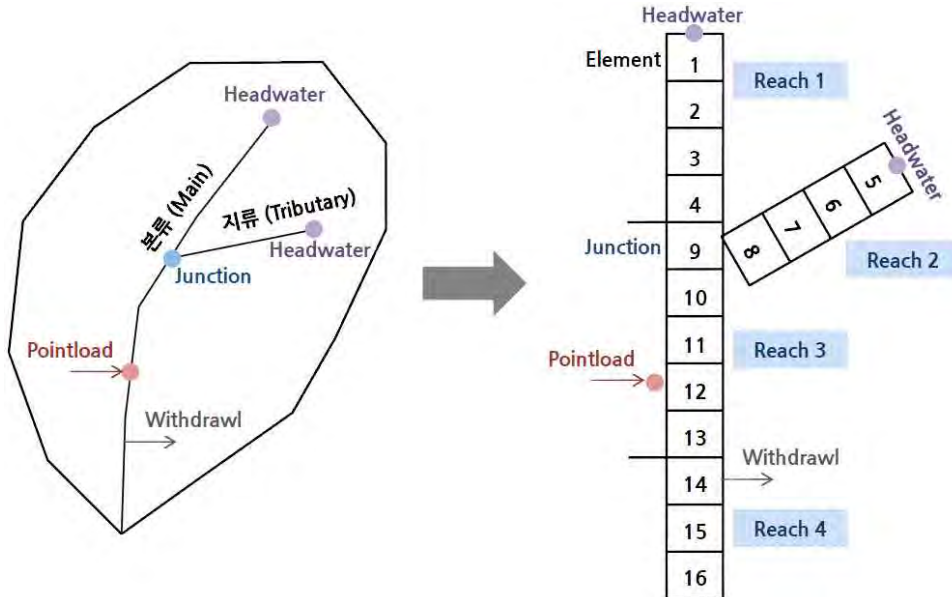


그림 3.7.1 QUALKO2 모형의 계산 요소

QUALKO2 모형에서 하천 구간은 대구간 (Reach)과 소구간 (Element)으로 구분된다. 그림 3.7.1과 같이 상류에서부터 하류 방향으로 대구간과 소구간의 번호가 매겨진다. 전체 구간은 완전 혼합형 반응조가 계속적으로 이어져 있는 형태이다.

대구간 (Reach)은 하천의 수리적 특성 및 반응계수가 동일한 구간이다. 소구간 (Element)은 계산이 이루어지는 단위로 각각의 길이가 일정하며, 표 3.7.2와 같이 7개 유형으로 나뉜다.

표 3.7.2 QUALKO2 모형 소구간 (Element)의 유형

기호	소구간 유형	
1	수원 (Headwater element)	본류나 지류의 최상류에 위치한 소구간
2	표준 (Standard element)	일반적인 소구간
3	합류점 상단 (Element just upstream from a junction)	지류와 합류되는 지점 바로 위의 본류 소구간
4	합류점 (Junction element)	지류와 합류되는 지점의 본류 소구간
5	최하류점 (Last element stream)	하천의 최하류에 위치한 소구간
6	점오염원 유입 (Point source element)	점오염원이 유입되는 본류 소구간
7	취수 (Withdrawal element)	취수가 이루어지는 본류 소구간

3. SWAT-QUALKO2 연계 시스템 구축

그림 3.7.2는 SWAT-QUALKO2 연계 시스템의 모식도로서, 각 모형의 검·보정 및 모의 과정과 두 모형 간의 연계 과정을 보여주고 있다. QUALKO2 모형의 경우, 2011년의 일별 유량 중 저수량 및 평수량 조건에 해당하는 날에 대해 각각 보정과 검정을 한 후, 4월 하순부터 9월 상순에 이르는 논 관개 기간에 대해 순별로 관개수질을 모의하였다.

모형의 연계는 크게 두 가지 부분으로 구성하였다. 첫째, QUALKO2 모형은 모든 입력 자료에 대해서 하나의 유량과 수질 값만 입력되기 때문에, 입력 자료 구성 시 일정한 유량을 기준으로 한다. SWAT 모형으로 산정된 관개용수 취수시점의 저수량, 평수량, 순별 평균 유량 등을 QUALKO2 모형의 기준 유량으로 사용하였다. 둘째, QUALKO2 모형의 입력 자료 중에서 증분유입은 점오염원이나 지류 하천에서 고려되지 못한 추가적인 유입으로, 비점오염원 성격의 유입을 의미한다. 앞 장에서 SWAT 모형으로 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량 자료를 모의하여 QUALKO2 모형의 대구간별 증분 유입 자료로 입력하였다.

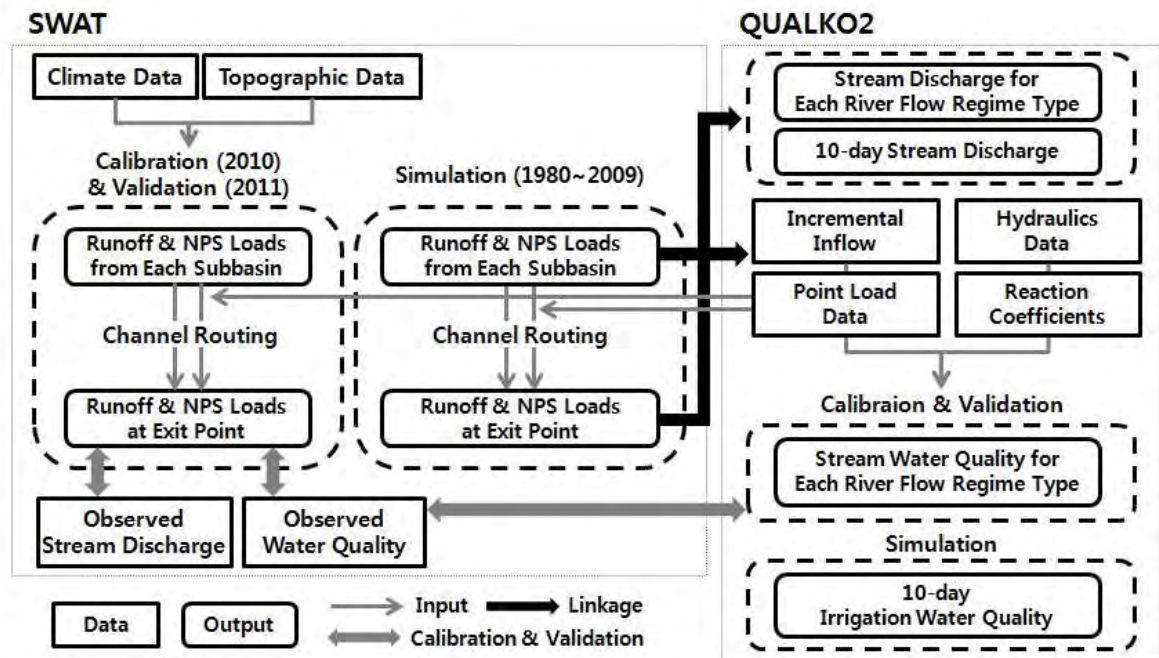


그림 3.7.2 SWAT-QUALKO2 연계 모식도

4. QUALKO2 모형의 자료 구축

QUALKO2 모형에 입력되는 자료는 표 3.7.3과 같다. 그림 3.7.3의 오산천 유역에 대해 각 입력 자료와 검·보정에 필요한 수질 자료를 구축하였다.

표 3.7.3 QUALKO2 모형의 입력자료

자료명	유형	입력내용
Title Data	표제	<ul style="list-style-type: none"> • 모형 구동을 위한 기본 정보 • 모의 대상 수질 인자 설정
Data Type 1	제어	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간, 소구간, 합류점, 점오염원 등의 수 • 모의 하천의 물리적/기상학적 조건
Data Type 2	대구간	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간 번호, 이름, 길이
Data Type 4	소구간	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간별 소구간의 개수 및 소구간 유형
Data Type 5	수리적 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간별 수리/수문학적 특성
Data Type 9	합류점	<ul style="list-style-type: none"> • 하천 합류점에서의 소구간 구성
Data Type 1A, 1B	계수1	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간별 계수 (조류, 질소, 인)
Data Type 6, 6A, 6B	계수2	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간별 계수 (BOD, 조류, 클로로필a, 암모니아질소, 질산성 질소, 아질산성질소, 대장균, 용존인, 유기질소, 유기인)
Data Type 7, 7A	초기조건	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간별 초기조건 • 수온, 수질
Data Type 8, 8A	증분유입	<ul style="list-style-type: none"> • 대구간별 비점오염원 및 지하수 유입 • 유량, 수온, 수질
Data Type 10, 10A	수원	<ul style="list-style-type: none"> • 상류 수원 • 유량, 수온, 수질
Data Type 11, 11A	점오염원/취수	<ul style="list-style-type: none"> • 점오염원 또는 지류 하천 • 취수 • 유량, 수온, 수질
Data Type 3	희석유량	<ul style="list-style-type: none"> • 희석수의 사용 등으로 인한 유량 증가시 필요한 자료
Data Type 12	댐 재포기	<ul style="list-style-type: none"> • 구간 중 댐이 있을 경우 댐 재포기 관련 자료
Data Type 13, 13A	하천경계조건	<ul style="list-style-type: none"> • 하천 경계 조건

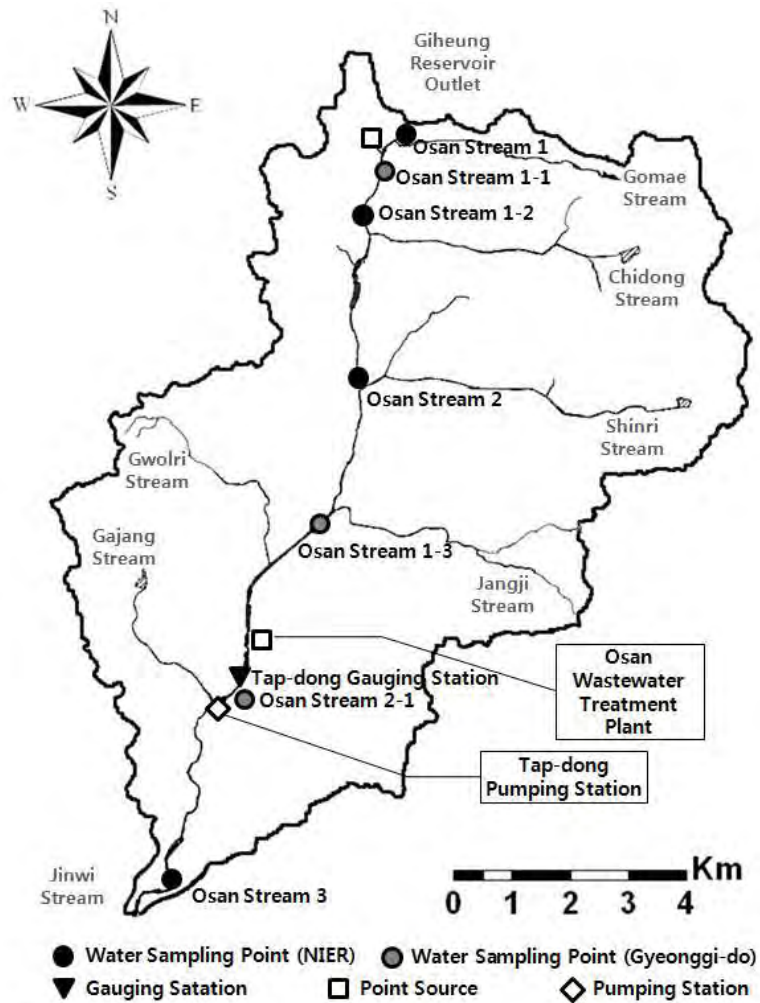


그림 3.7.3 대상 유역의 현황 및 수질·수문 측정

4.1. 하천 구간 분할

오산천의 QUALKO2 모형 모의 구간은 기흥 저수지 방류구에서부터 진위천 합류부까지의 16.49 km 구간으로, 이를 5 개 대구간 및 83 개 소구간으로 분할하였다 (그림 3.7.4). 대구간은 오산천수질개선종합대책 (경기보건환경연구원, 2008), 안성천 하천정비 기본계획 (건설교통부, 2002), 안성천 중권역 물환경관리계획 (한강유역환경청, 2009a) 등의 보고서를 참고하여 구분하였다. 소구간은 하천 구간에 따른 수질 변화를 상세하게 파악하기 위하여 200 m 간격으로 분할하였다.

그림 3.7.3에 나타나 있듯이, 오산천의 모의 구간에는 6 개의 지류 하천이 유입된다. 본 과업에서는 SWAT 모형에서 모의되는 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량에 이미 지류 하천에 의한 유입이 고려되었다고 보고, 하천 구간 분할에서 지류 하천을 고려하지 않았다.

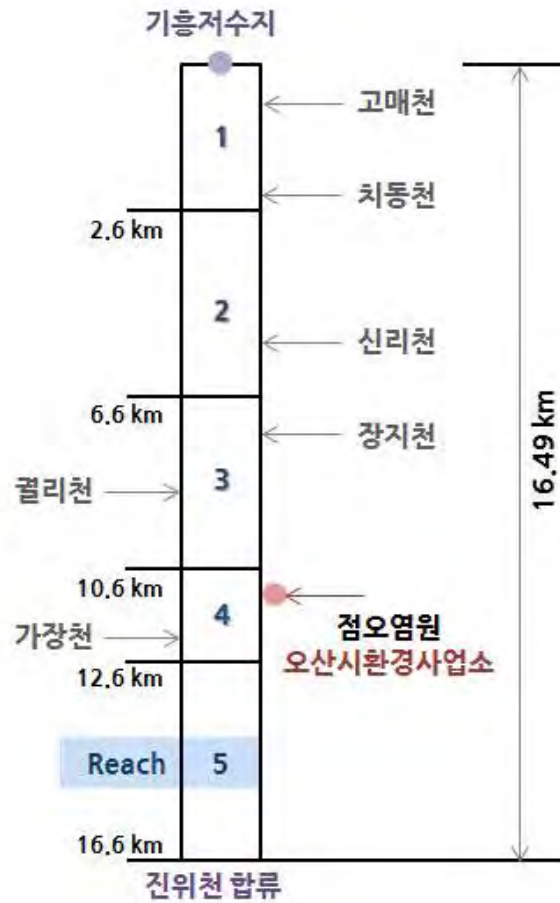


그림 3.7.4 하천 구간의 분할

4.2. 입력 자료

가. 수리적 특성

수리적 특성은 대구간 별로 일정하다고 가정하며, 각 대구간에 적용된 수리적 특성 계수는 표 3.7.4와 같다.

표 3.7.4 하천 구간별 수리적 특성

대구간	확산상수	속도계수, a	속도지수, b	깊이계수, c	수심지수, d	조도계수
1	60	0.578	0.263	0.246	0.422	0.025
2	60	0.578	0.263	0.246	0.422	0.025
3	60	0.434	0.348	0.39	0.363	0.025
4	60	0.434	0.348	0.39	0.363	0.025
5	60	0.434	0.348	0.39	0.363	0.025

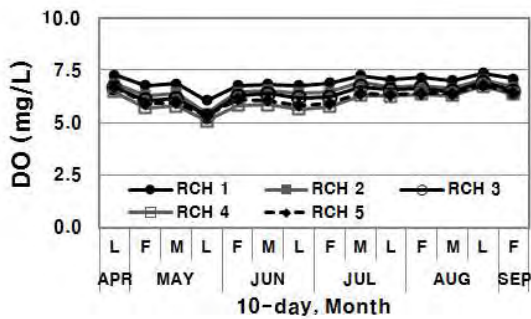
$$V = aQ^b, H = cQ^d \quad (V: \text{유속 (m/s)}, Q: \text{유량 (cms)}, H: \text{수심 (m)})$$

나. 반응계수

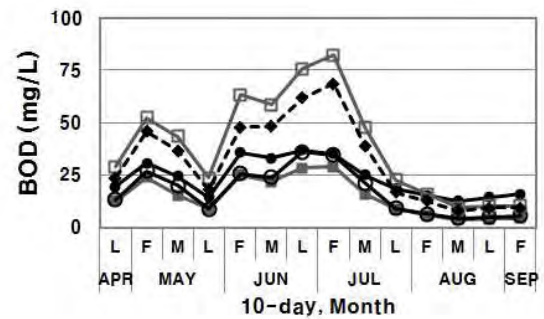
QUALKO2 모형에서 반응계수는 대구간 별로 일정하다고 가정한다. BOD 분해율, 질소 및 인의 분해율/침전율, 조류의 성장률/호흡률/침전율, 대장균 감쇠율 등의 반응계수가 입력된다. 반응계수는 QUAL2E 매뉴얼 (US EPA, 1995)에서 제시하는 보정 범위 내에서 단순시행착오법으로 결정하였다 (표 3.7.6).

다. 증분유입

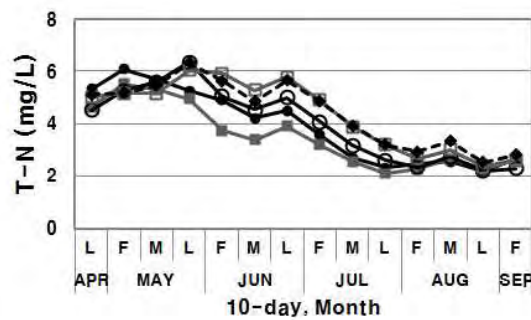
SWAT 모형에서 모의된 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량을 5개 대구간에 대한 증분유입 자료로 입력하였다. 모형의 검·보정을 위해 2011년 중 저수량 및 평수량에 해당하는 날을 오차 범위 1% 내에서 선정한 후, 해당일의 유출량 및 비점오염 부하량 값을 평균하여 증분유입 자료를 구축하였다. 순별 관개수질의 모의에는 1980년부터 2009년까지 30년 동안의 유출량 및 비점오염 부하량 자료를 4월 하순부터 9월 상순까지 총 14 개 순별로 평균하여 자료를 구축하였다 (그림 3.7.5).



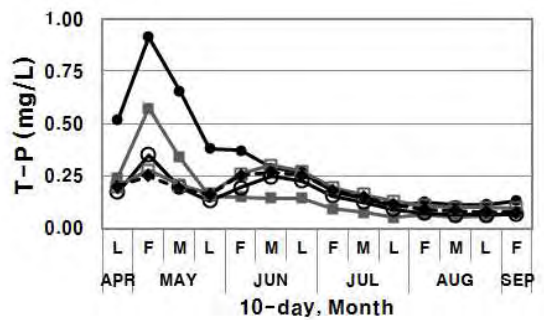
(a) DO (Dissolved oxygen)



(b) BOD (Biochemical oxygen demand)



(c) T-N (Total nitrogen)



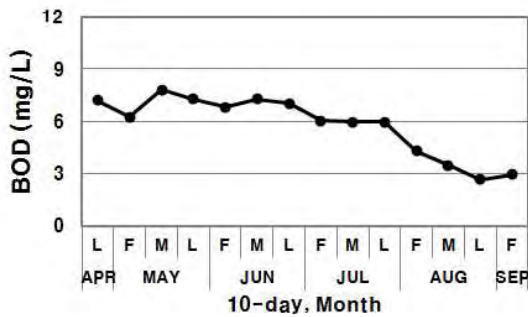
(d) T-P (Total phosphorus)

그림 3.7.5 증분유입의 순별 수질

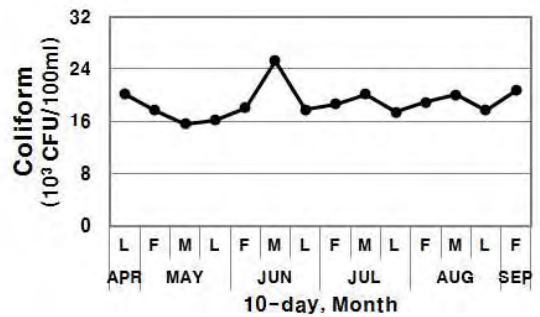
마. 점오염원

점오염원은 오산시 환경수도사업소의 일별 방류 유량 및 수질 자료를 이용하였다. 검·보정 시에는 증분유입과 동일하게 2011년 중 저수량 및 평수량 해당하는 날의 자료를 평균하였다. 순별 모의 시에는 방류수의 자료 기간이 30년 (1980년~2009년)에

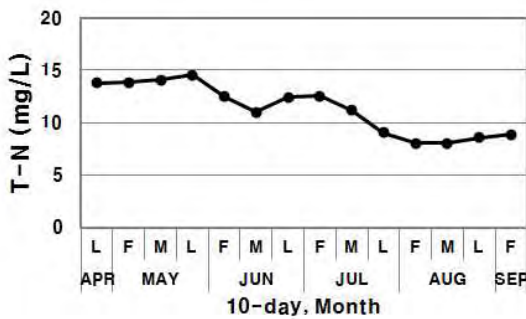
미치지 못하며, 하수처리 용량이 2009년 말에 현재 수준에 이르렀으므로 2010년~2011년 자료를 14 개 순별로 평균하여 자료를 구축하였다 (그림 3.7.6).



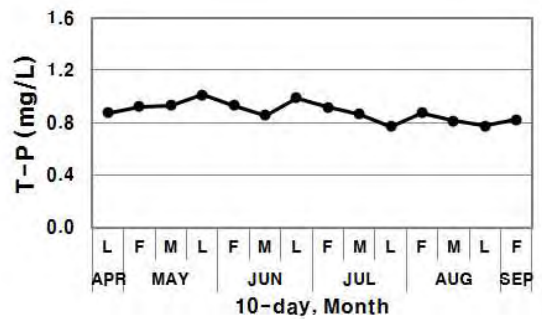
(a) BOD



(b) Coliform



(c) T-N



(d) T-P

그림 3.7.6 점오염원의 순별 수질

바. 수질 자료

모의 구간 내의 수질 관측 지점은 2012년 현재 총 7 개가 있다 (그림 3.7.3). 오산천 1, 오산천 1-2, 오산천 2, 오산천 3 등 4 개 지점은 국립환경과학원의 관측 지점이며, 오산천 1-1, 오산천 1-3, 오산천 2-1 등 3 개 지점은 경기도의 관측 지점으로 최근에 새로 추가되어 자료의 수가 거의 없다.

수질 자료는 오산천 1, 오산천 1-2, 오산천 2, 오산천3 등 4 개 지점의 2011년도 자료를 사용하였다. 수질 자료는 한 달에 한 번씩 측정되므로 저수량 및 평수량 조건에 대한 값을 결정하는 데에 어려움이 있다. 본 절에서는 SWAT 모형의 유량 모의 결과를 통해 2011년의 수질 측정일에 해당하는 유량을 확인하고, 그 중 저수량 및 평수량 조건으로 분류할 수 있는 날을 오차 범위 3% 내에서 선정하였다. 선정한 날의 수질 자료를 각각 평균하여 저수량 및 평수량 조건에서의 수질 자료를 구축하였다 (표 3.7.5). 보정 시에는 4 개 수질 측정점 모두 저수량 조건에 해당하는 자료가 있었으나, 검정 시에는 오산천 1 지점에 평수량 조건의 자료가 없는 관계로 3 개의 점만을 이용하였다.

표 3.7.5 저수량 및 평수량 조건의 평균 수질 자료

수질 측정 지점		DO	BOD	Coliform	T-N	T-P
		mg/L	mg/L	CFU/100ml	mg/L	mg/L
보정 (저수량 조건)	1	10.60	3.60	297	4.13	0.08
	1-2	11.20	3.42	6,825	6.94	0.19
	2	10.90	3.17	6,413	5.78	0.14
	3	9.57	8.22	43,207	8.84	0.57
검정 (평수량 조건)	1-2	10.67	4.10	17,333	5.42	0.14
	2	10.77	3.77	12,900	4.59	0.11
	3	11.13	7.20	8,067	8.19	0.50

5. 모형의 적용

5.1. 모형의 보정

QUALKO2 모형의 보정은 저수량 조건의 수질 자료를 이용하여 단순시행착오법으로 이루어졌다. 모형의 검·보정을 평가하는 통계적 변량으로는 결정계수 (coefficient of determination, R²), 신뢰성 지수 (reliability index, RI), 효율지수 (efficiency index, EI)를 이용하였다 (식 3.7.12~14). R²는 모형의 추정 오차를 평가하는 지수로, 0.0~0.1의 범위를 가지며 1.0에 가까울수록 모의치의 실측치의 경향을 잘 반영한다 (강, 2002). RI는 모형의 신뢰성을 평가하는 지수로, 1.0에 가까울수록 모의치와 실측치가 일치함을 나타낸다 (Leggett and Williams, 1981). EI는 모형의 효율을 평가하는 지수로 모의치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 0.0과 1.0 사이이면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있고, 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다 (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$EI = (ST - SE) / ST \quad (3.7.12a)$$

$$ST = \sum_{i=1}^n (M - Q_i)^2, \quad SE = \sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2 \quad (3.7.12b, c)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (Q_i - M)(P_i - L) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - M)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - L)^2} \quad (3.7.13)$$

$$RI = \exp \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{Q_i}{P_i} \right)^2} \quad (3.7.14)$$

P_i: 모의치, Q_i: 실측치, n: 자료의 총 개수, N: 모의치의 평균값, M: 실측치의 평균값

표 3.7.6은 주요 매개변수의 보정 범위 및 최종 입력 값을 나타낸다.

표 3.7.6 QUALKO2 모형의 주요 매개변수의 보정 범위 및 최종 입력 값

매개변수		단위	보정 범위	입력 값
K1	BOD 분해율 계수	1/day	0.02~3.40	0.02~0.20
K3	침전에 의한 BOD 제거율	1/day	-0.36~0.36	-0.25~0.00
K5	대장균류의 감쇠계수	1/day	0.05~4.0	0.05
$\beta 1$	NH ₃ 산화율	1/day	0.1~1.0	0.1
$\beta 2$	NO ₂ 산화율	1/day	0.2~2.0	1.0
$\beta 3$	org-N 가수분해율	1/day	0.02~0.40	0.05
$\beta 4$	org-P 감쇠율	1/day	0.01~0.70	0.25
$\sigma 2$	dis-P 하상용출율	mg(P)/ft ² day	variable	0
$\sigma 3$	NH ₃ 하상용출율	mg(O)/ft ² day	variable	0
$\sigma 4$	Org-N 침전율	1/day	0.001~0.100	0.010
$\sigma 5$	Org-P 침전율	1/day	0.001~0.100	0.010

표 3.7.7은 QULAKO2 모형의 보정에 대한 통계적인 변량을 보여주고 있다. DO의 경우 R² 값이 0.50으로 다소 낮은 편이며, EI 값이 -4.84로 음의 값을 가져 모의치가 실측치를 잘 반영하지 못하는 것으로 분석되었다. 모형의 보정에 따른 모의치와 실측치를 그림 3.7.7에 도시하였다.

표 3.7.7 QUALKO2 모형의 보정에 따른 DO, BOD, T-N, T-P, 대장균 항목의 통계변량

통계 변량	DO	BOD	T-N	T-P	Coliform
R ²	0.50	0.99	0.77	0.97	0.97
RI	1.07	1.10	1.07	1.14	1.19
EI	-4.84	0.60	0.60	0.88	0.90

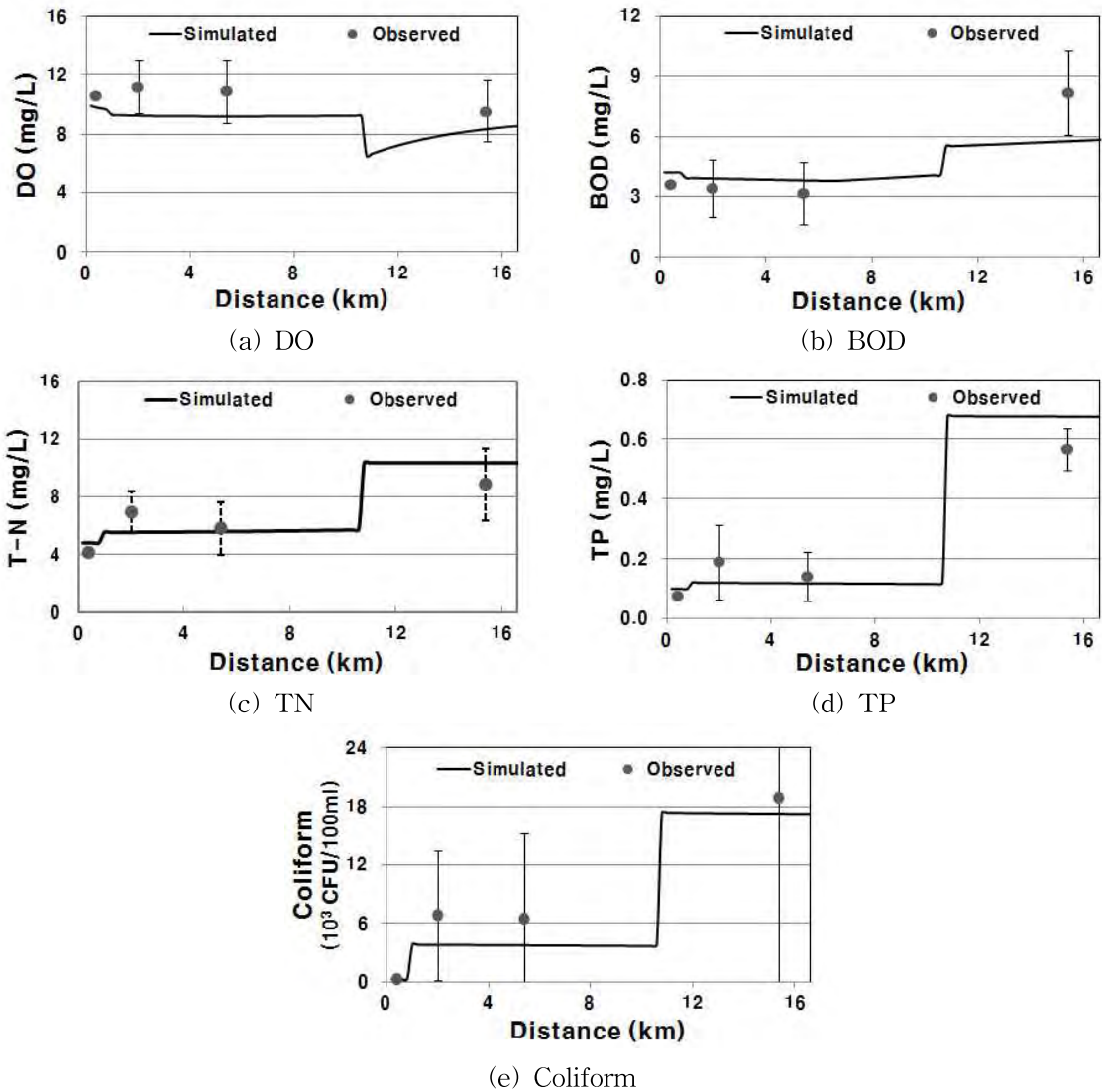


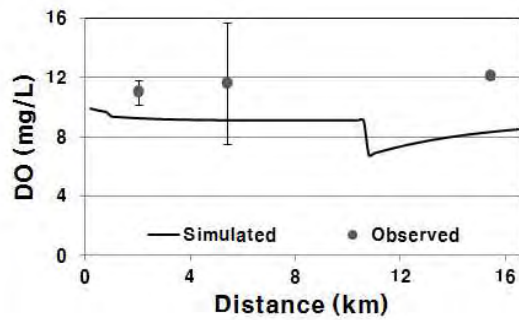
그림 3.7.7 QULAKO2 모형의 보정에 따른 모의치와 실측치의 비교

5.2. 모형의 검증

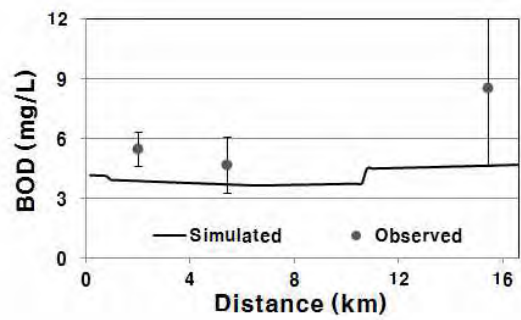
QUALKO2 모형의 검증은 평수량 조건에서 이루어졌으며, 표 3.7.8은 모형의 검증에 대한 통계적인 변량을 보여주고 있다. R2는 모든 수질 항목에 대해 0.73~1.00의 범위로 나타났으나, 대장균의 RI 값이 1.92로 거의 2에 가까우며 DO, BOD, 대장균의 EI 값이 음의 값으로 나타나 모의치가 실측치를 잘 반영하지 못하는 것으로 분석되었다. 그림 3.7.8은 모형의 검증에 따른 모의치와 실측치를 도시한 것이다.

표 3.7.8 QUALKO2 모형의 검정에 따른 DO, BOD, T-N, T-P, 대장균 항목의 통계변량

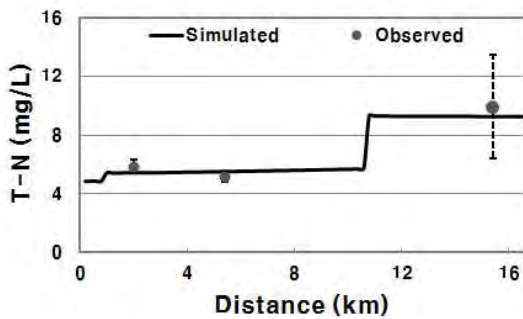
통계 변량	DO	BOD	T-N	T-P	Coliform
R ²	0.84	1.00	0.98	0.99	0.73
RI	1.13	1.20	1.03	1.16	1.92
EI	-35.03	-1.25	0.95	0.92	-3.39



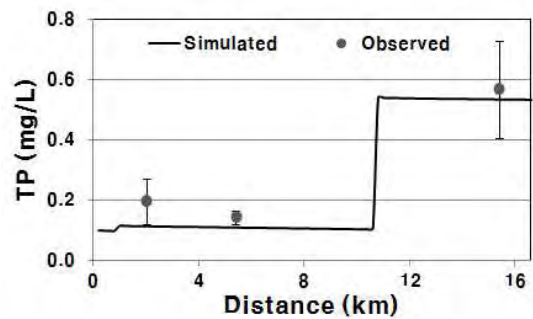
(a) DO



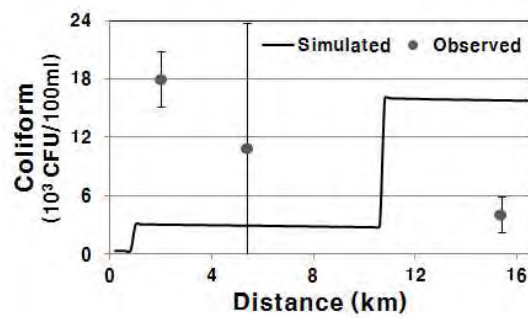
(b) BOD



(c) TN



(d) TP



(e) Coliform

그림 3.7.8 QULAKO2 모형의 검정에 따른 모의치와 실측치의 비교

5.3. 순별 하천 수질 모의

가. 4월 하순의 하천 수질 모의

그림 3.7.9는 4월 하순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 상류로부터 10 km 지점에 있는 오산시환경사업소의 방류수로 인해, T-N, T-P, 대장균 등의 농도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 방류구로부터 최하류부까지 농도의 감소 폭이 미미한 것으로 보아, 관개용수 취수지점의 수질이 하수처리장 방류 수질에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

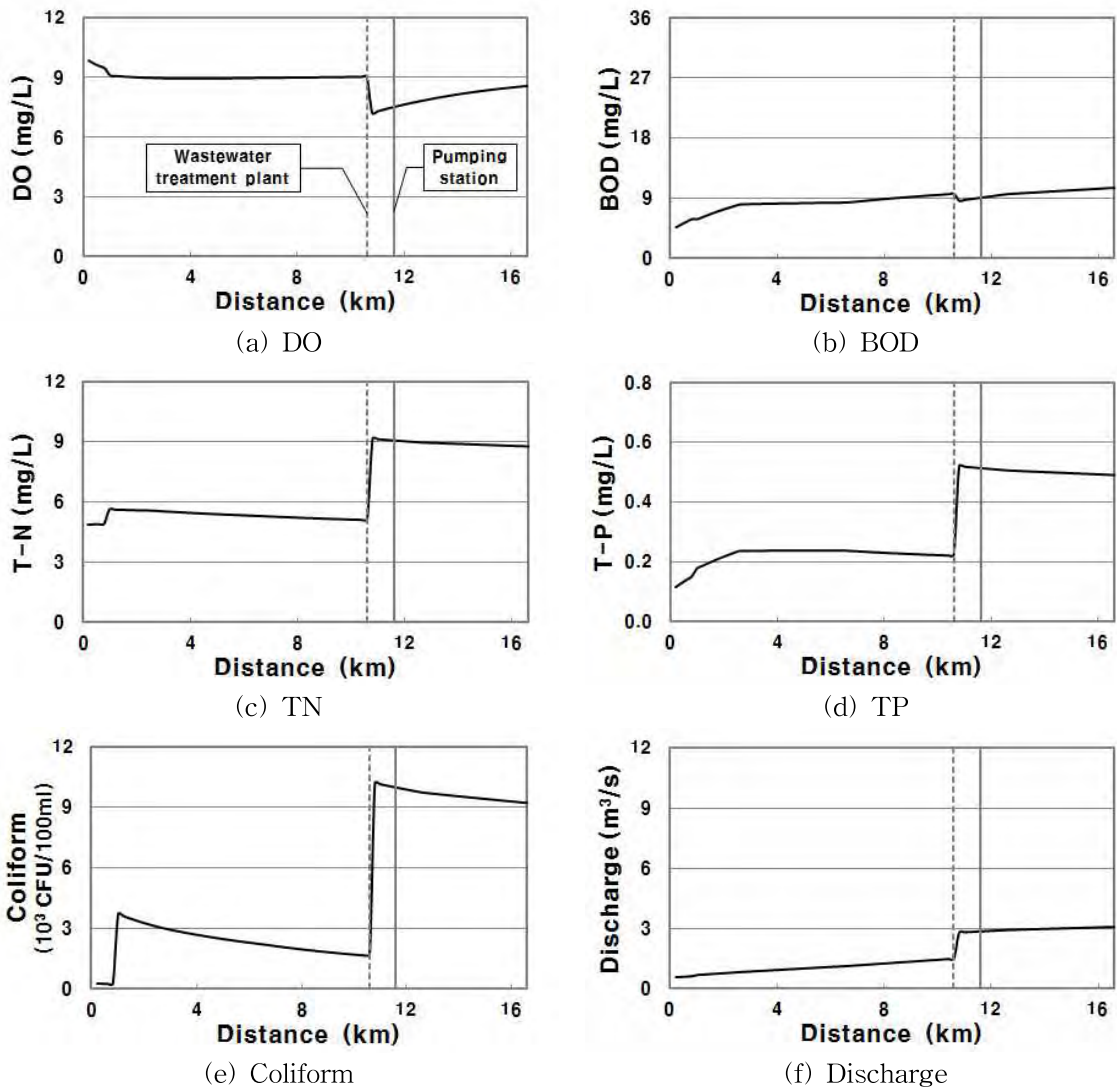


그림 3.7.9 4월 하순의 하천 수질 모의 결과

나. 5월 상순의 하천 수질 모의

그림 3.7.10은 5월 상순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 모의된 수질항목의 전반적인 변화양상은 4월 하순과 비슷하게 나타났으나, BOD와 T-P의 농도가 크게 증가하였다. 또한, 대장균 농도역시 증가하는 것을 확인할 수 있다.

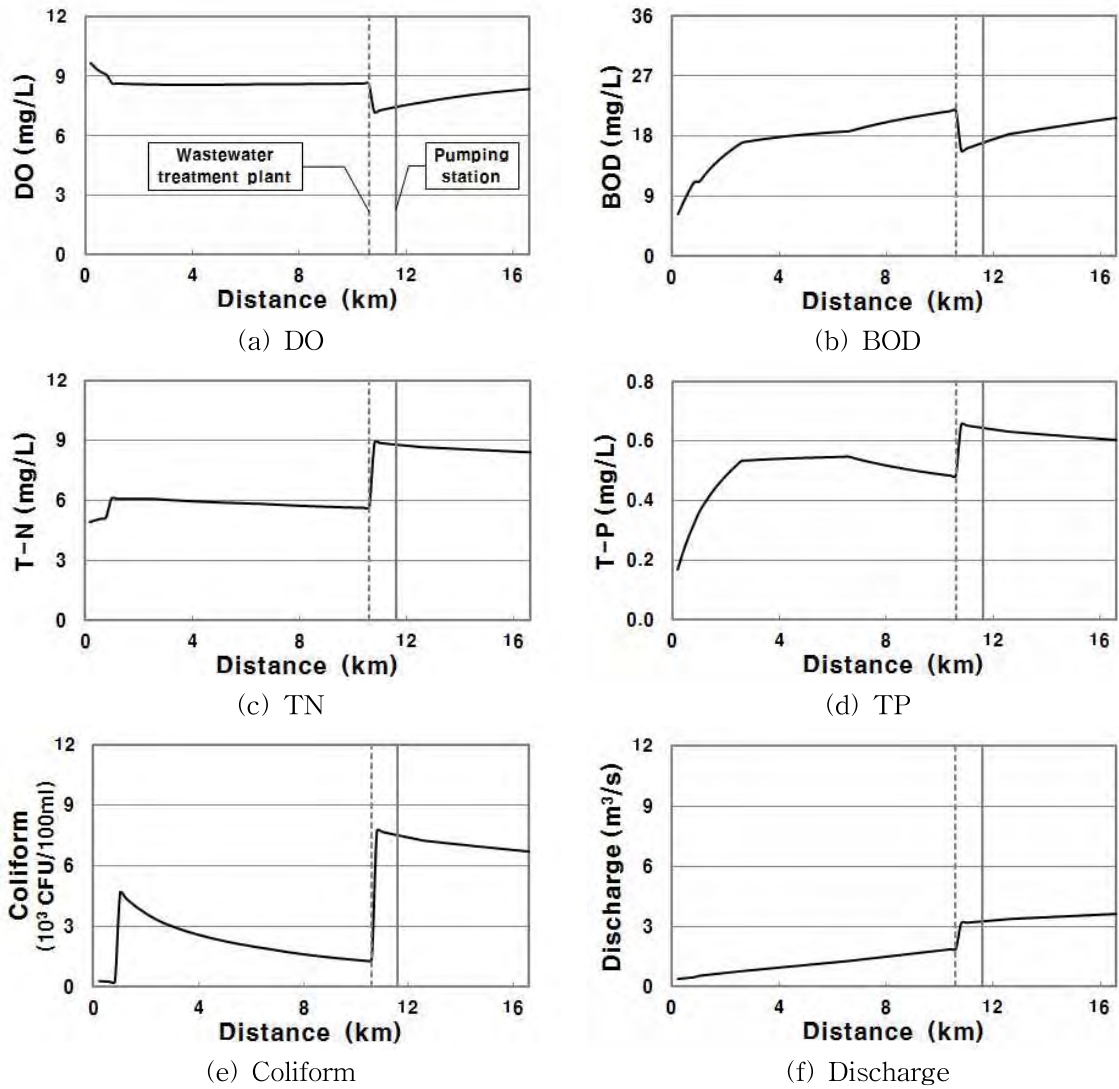


그림 3.7.10 5월 상순의 하천 수질 모의 결과

다. 5월 중순의 하천 수질 모의

그림 3.7.11은 5월 중순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 모의된 수질항목은 전반적으로 5월 상순과 비슷한 변화양상을 보인다.

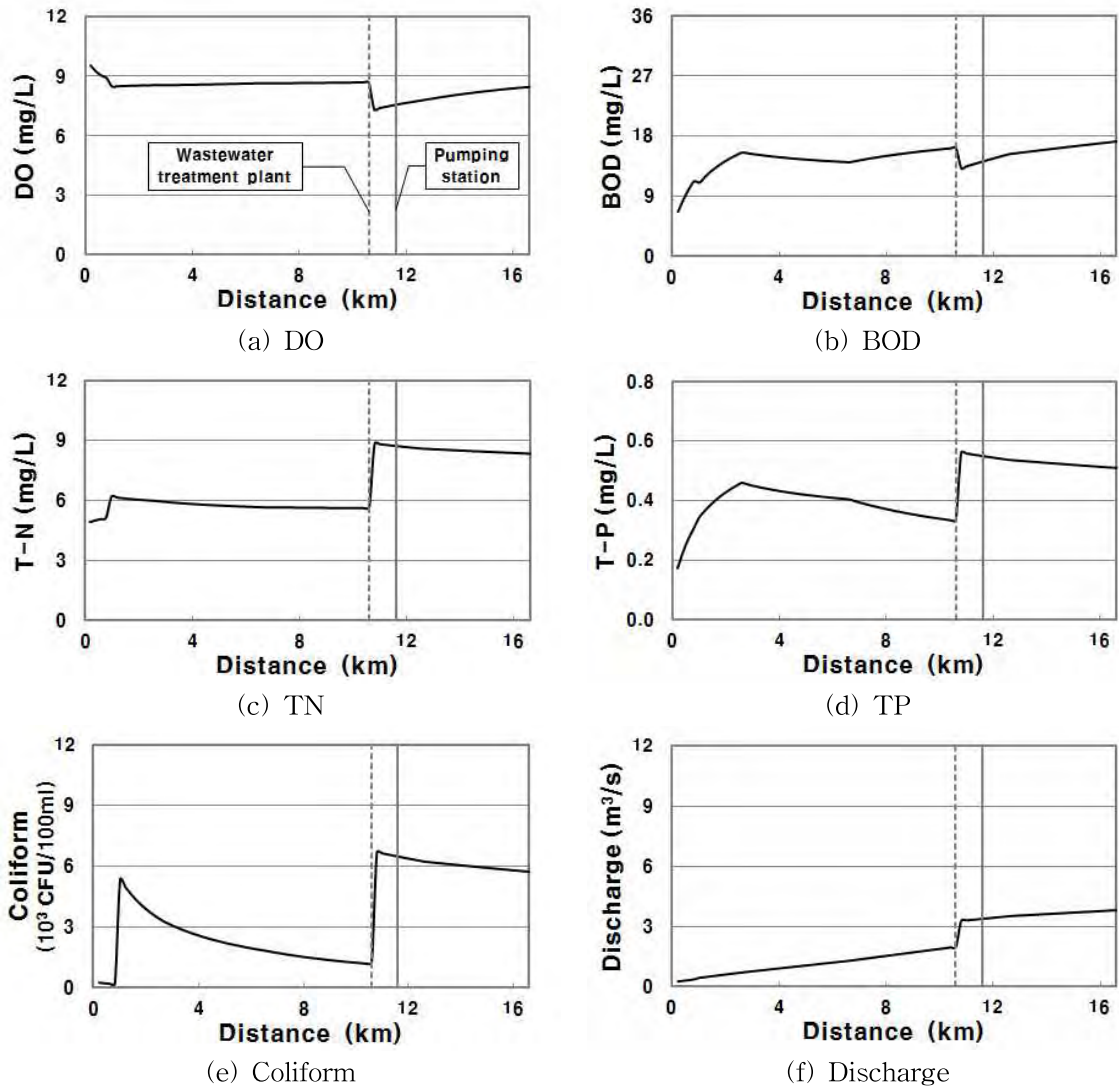


그림 3.7.11 5월 중순의 하천 수질 모의 결과

라. 5월 하순의 하천 수질 모의

그림 3.7.12는 5월 하순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 모의된 수질항목 결과는 5월 중순과 비슷한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 다만, BOD값이 다시 큰 폭으로 떨어진 것을 확인할 수 있다.

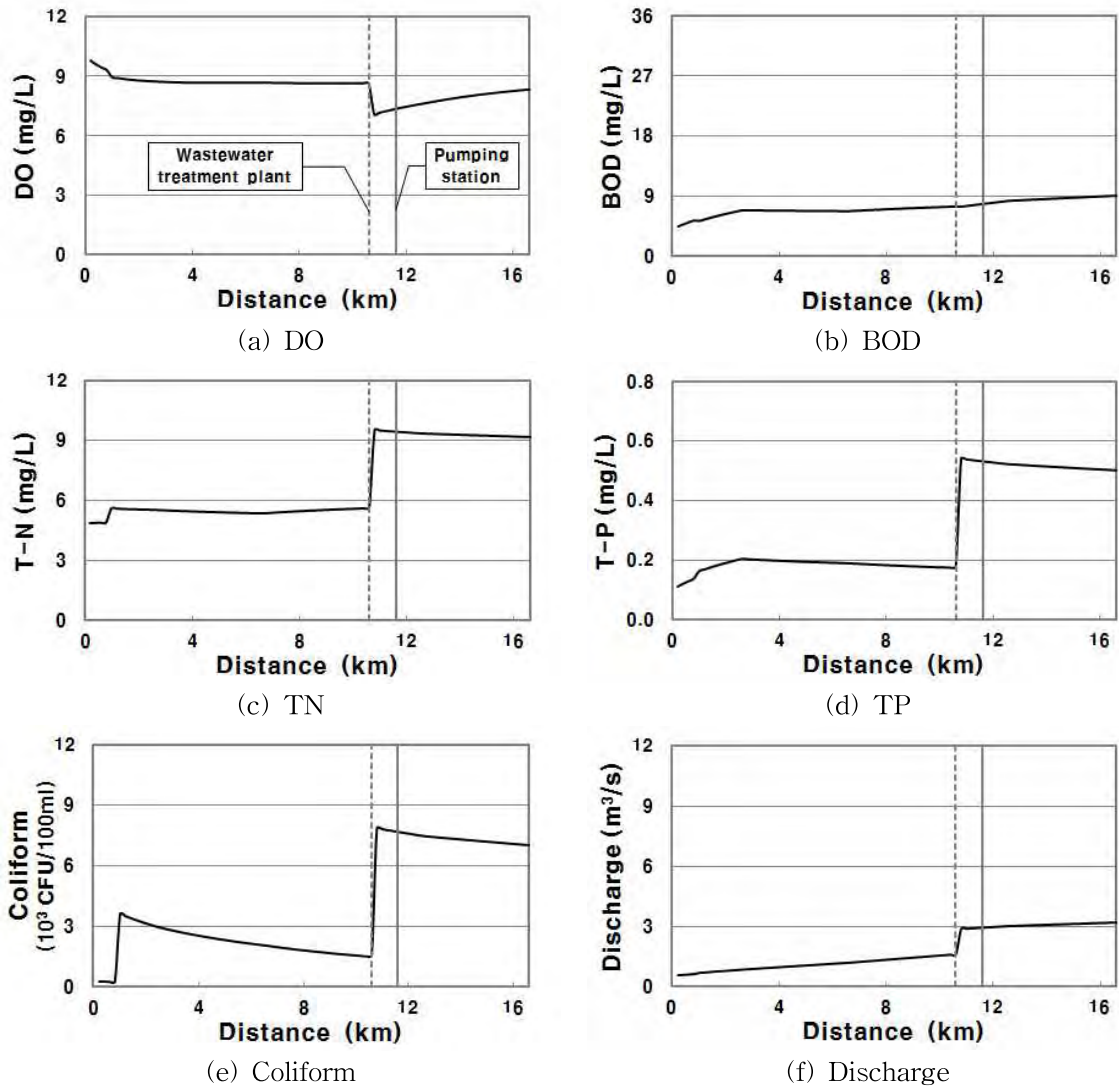


그림 3.7.12 5월 하순의 하천 수질 모의 결과

마. 6월 상순의 하천 수질 모의

그림 3.7.13은 6월 상순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 전반적으로 5월 하순과 비슷한 변화양상을 보이며, 떨어졌던 BOD값이 다시 큰 폭으로 상승하는 것을 확인할 수 있다.

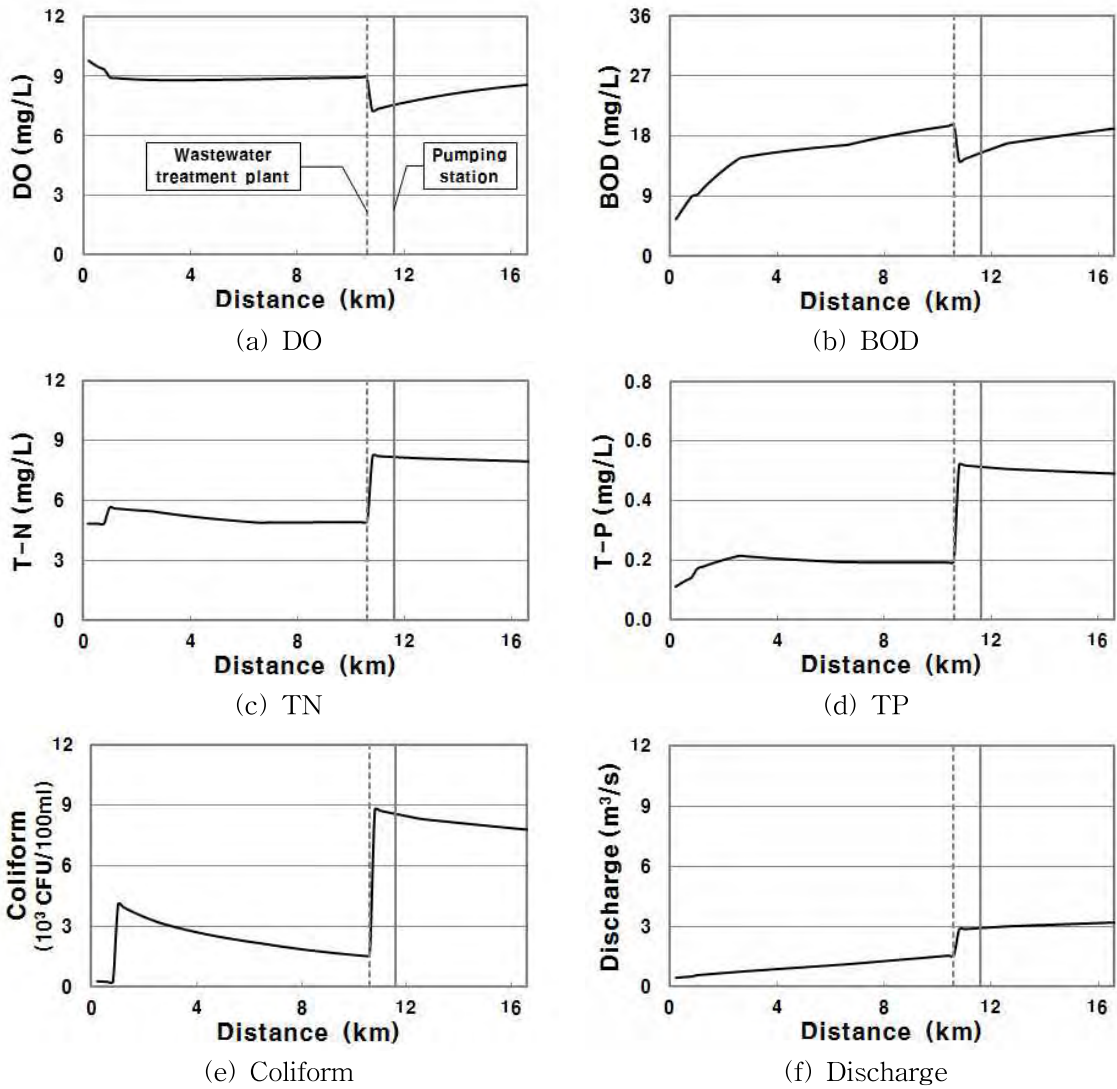


그림 3.7.13 6월 상순의 하천 수질 모의 결과

바. 6월 중순의 하천 수질 모의

그림 3.7.14는 6월 중순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다.

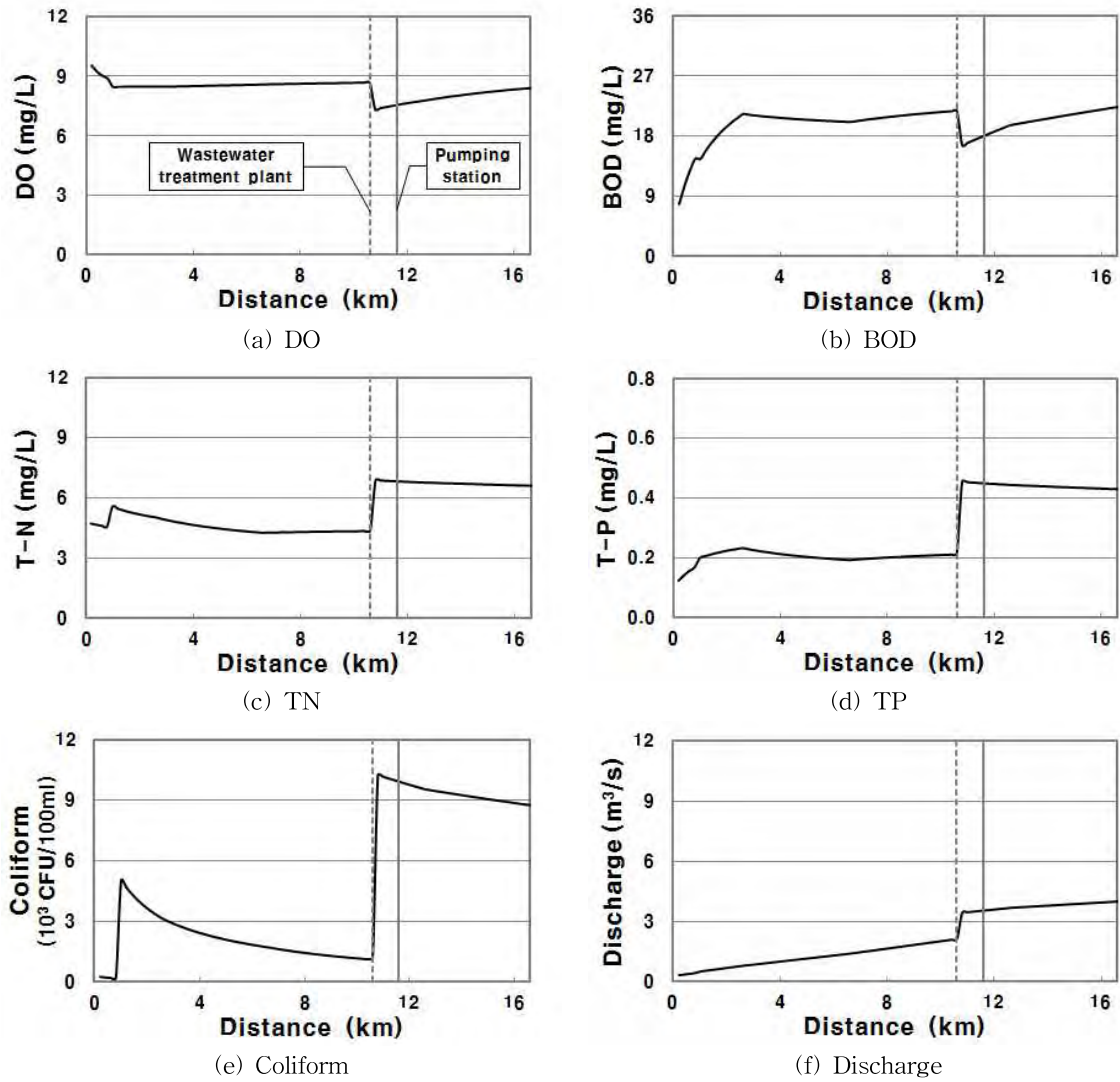


그림 3.7.14 6월 중순의 하천 수질 모의 결과

사. 6월 하순의 하천 수질 모의

그림 3.7.15는 6월 하순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 이전 기간에 비하여 대장균의 농도는 다소 감소하였으나, BOD의 농도는 두 배 가량 증가하였다.

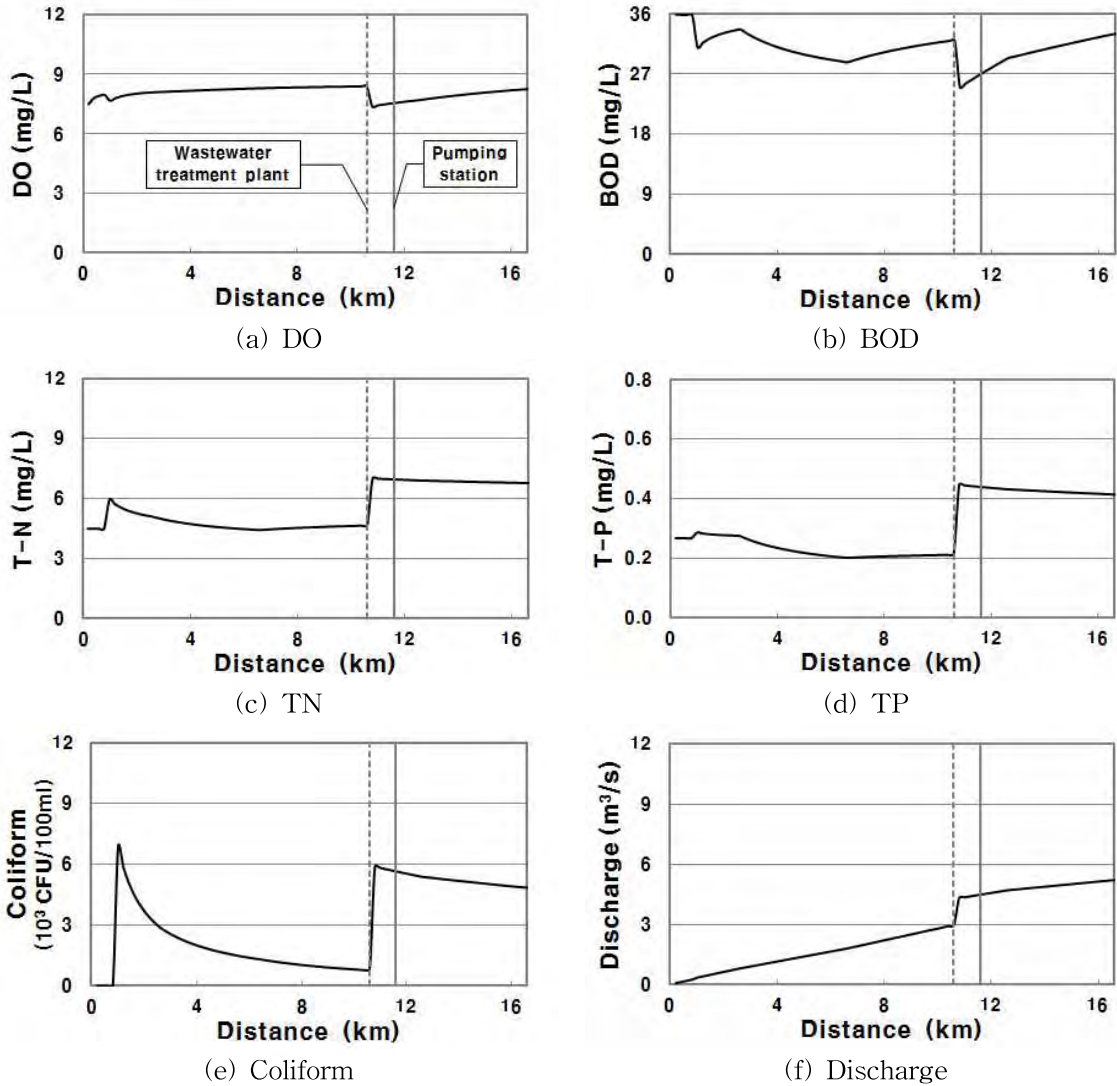


그림 3.7.15 6월 하순의 하천 수질 모의 결과

아. 7월 상순의 하천 수질 모의

그림 3.7.16은 7월 상순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 6월 하순과 마찬가지로 BOD의 농도가 높은 편이다.

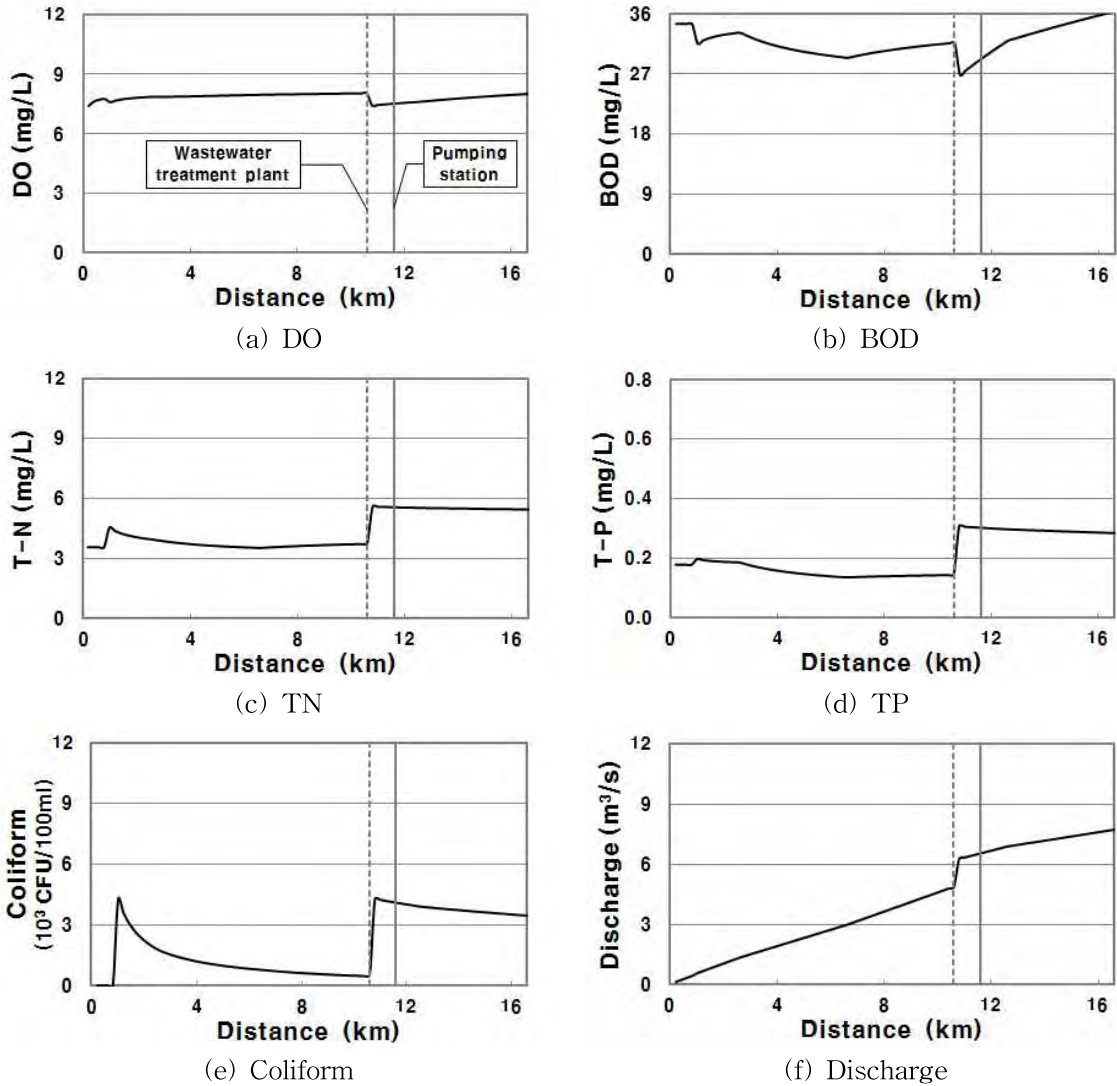


그림 3.7.16 7월 상순의 하천 수질 모의 결과

자. 7월 중순의 하천 수질 모의

그림 3.7.17은 7월 중순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 하천 유량이 크게 증가하면서 6월에 비해 T-N, T-P, 대장균 등의 농도가 50% 가량 감소하였다.

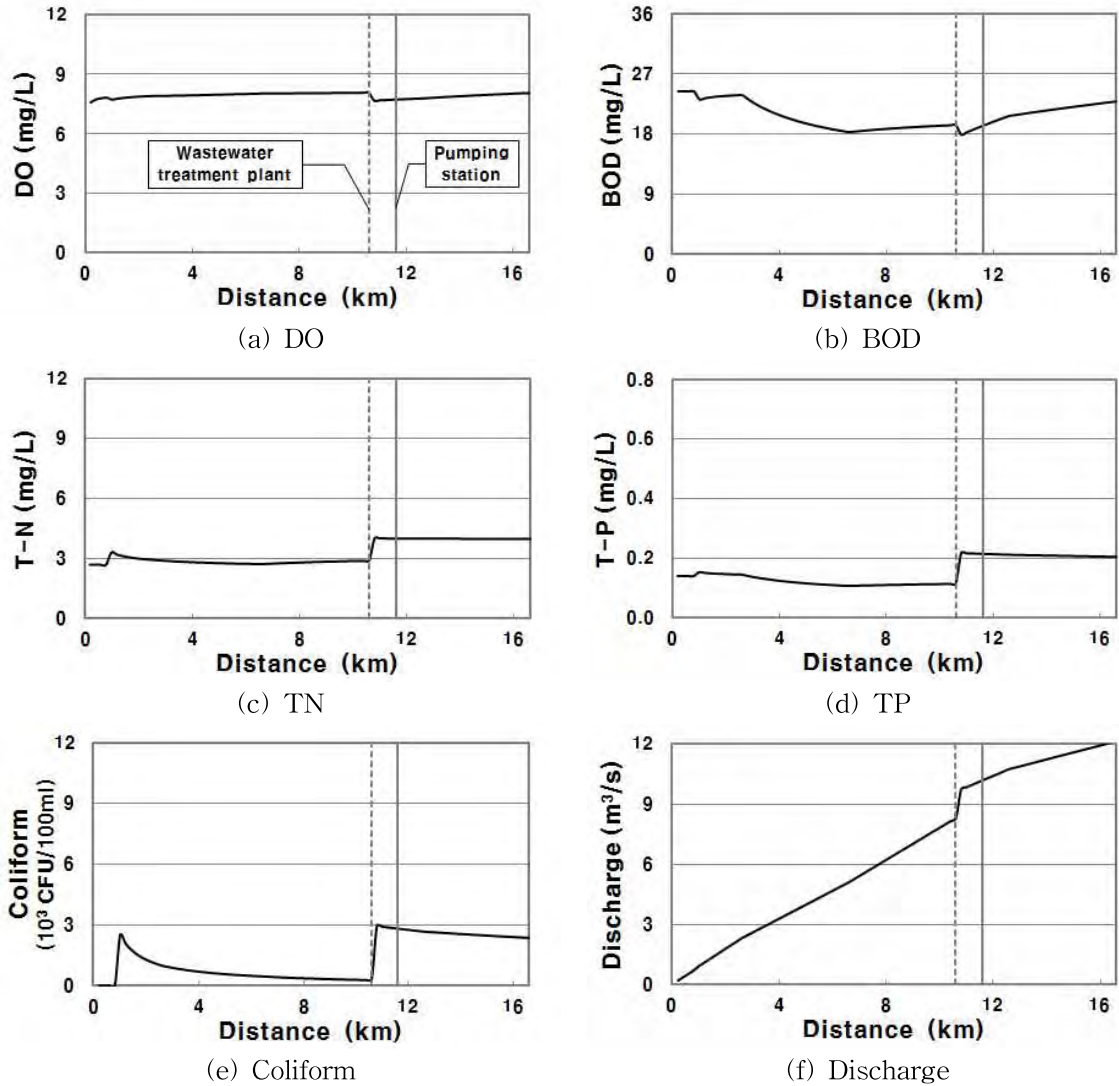


그림 3.7.17 7월 중순의 하천 수질 모의 결과

차. 7월 하순의 하천 수질 모의

그림 3.7.18은 7월 하순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 7월 중순과 마찬가지로 하천 유량이 크며 T-N, T-P, 대장균의 농도가 낮은 편이다.

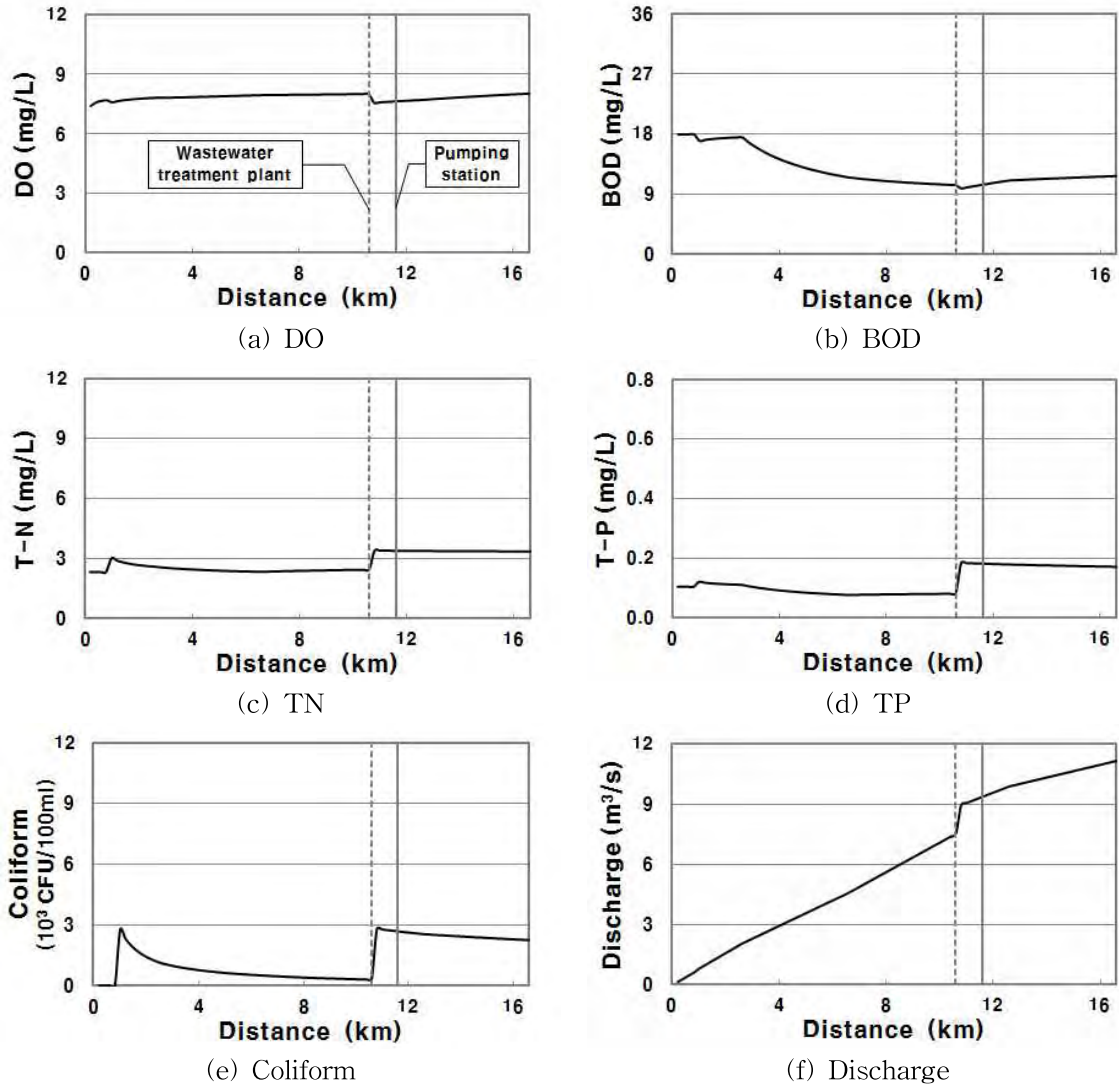


그림 3.7.18 7월 하순의 하천 수질 모의 결과

카. 8월 상순의 하천 수질 모의

그림 3.7.19는 8월 상순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다. 전반적으로 7월 하순의 하천 수질 모의 결과와 비슷한 양상을 나타낸다.

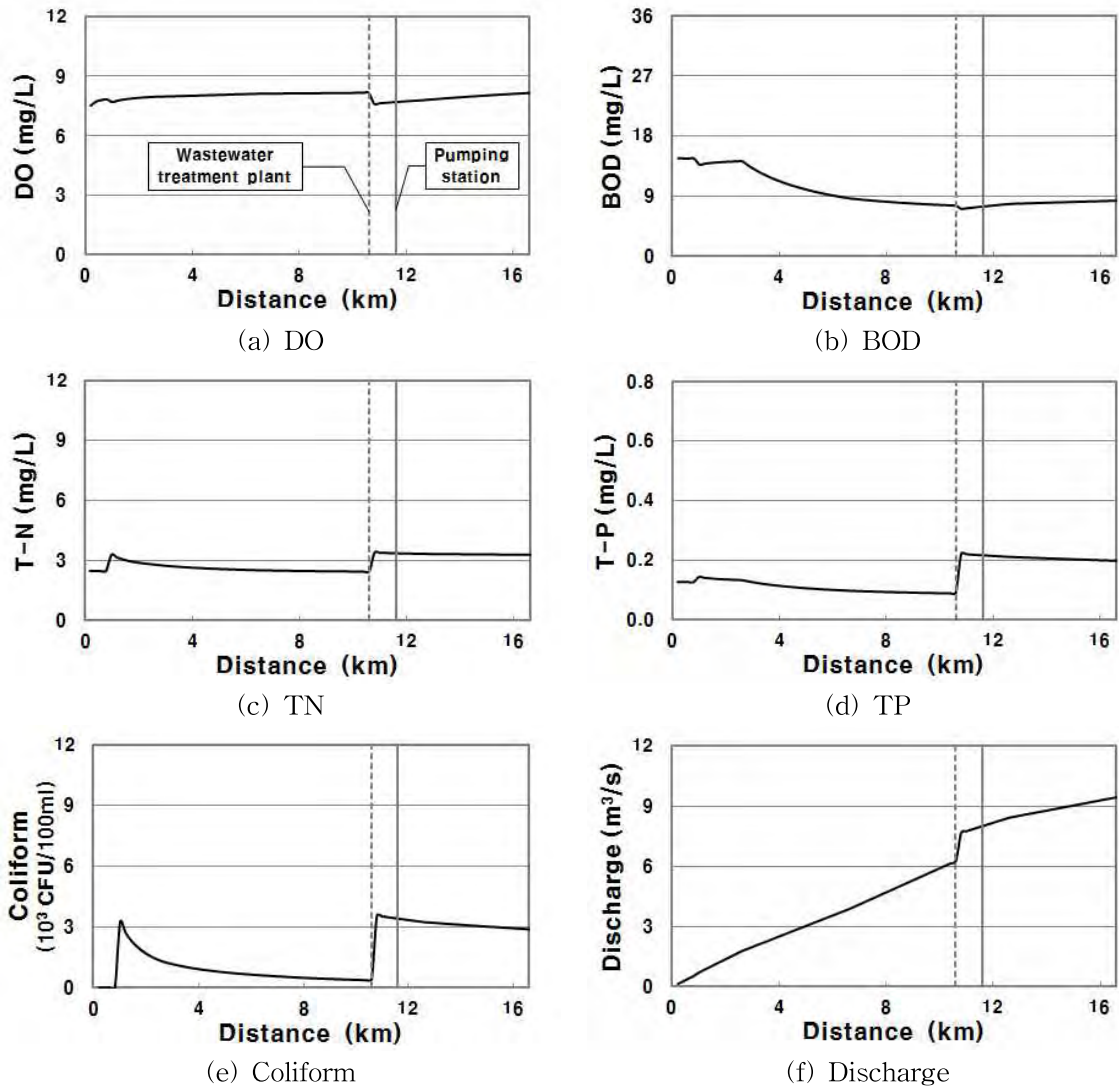


그림 3.7.19 8월 상순의 하천 수질 모의 결과

타. 8월 중순의 하천 수질 모의

그림 3.7.20은 8월 중순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다.

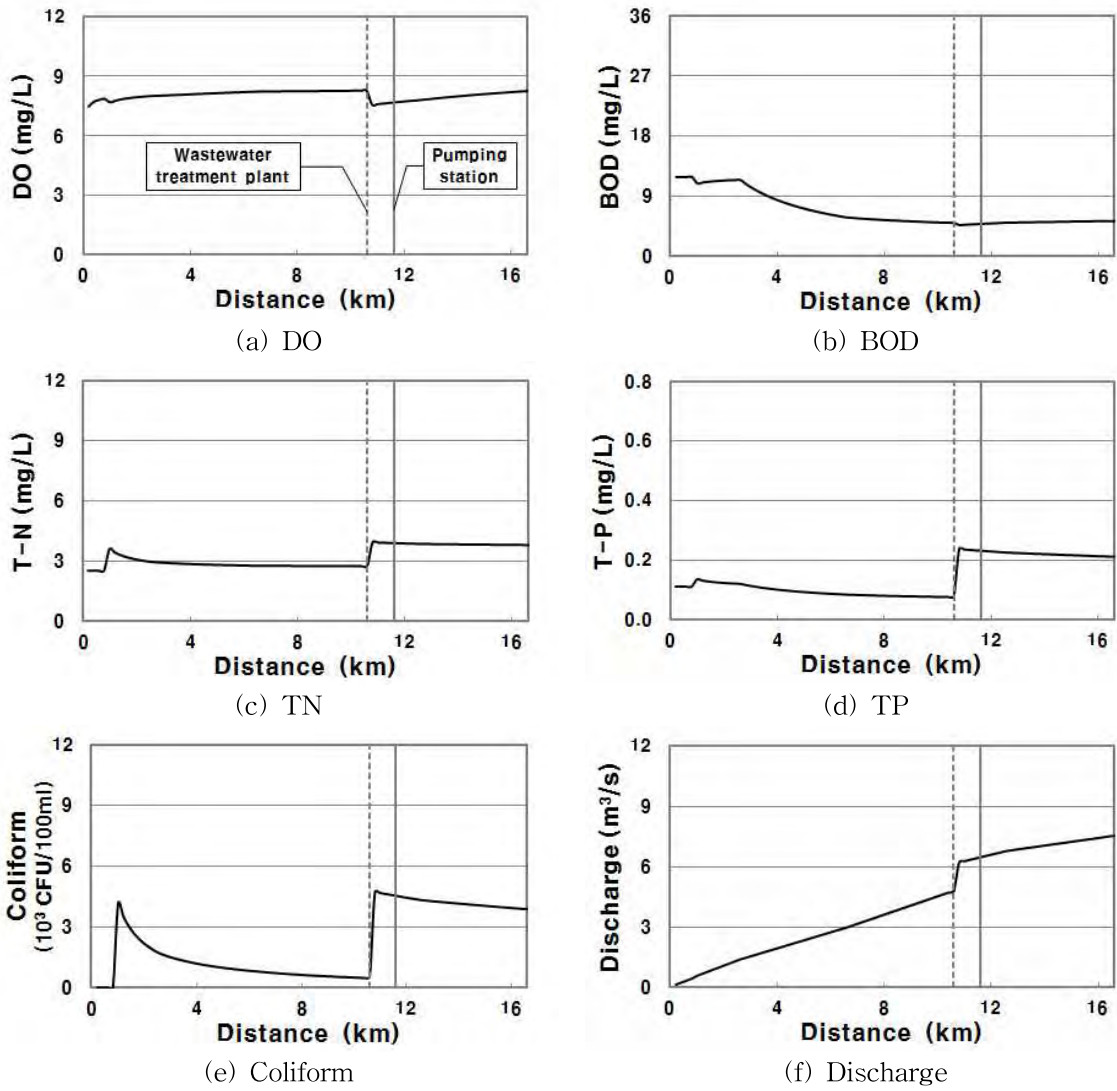


그림 3.7.20 8월 중순의 하천 수질 모의 결과

파. 8월 하순의 하천 수질 모의

그림 3.7.21은 8월 하순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다.

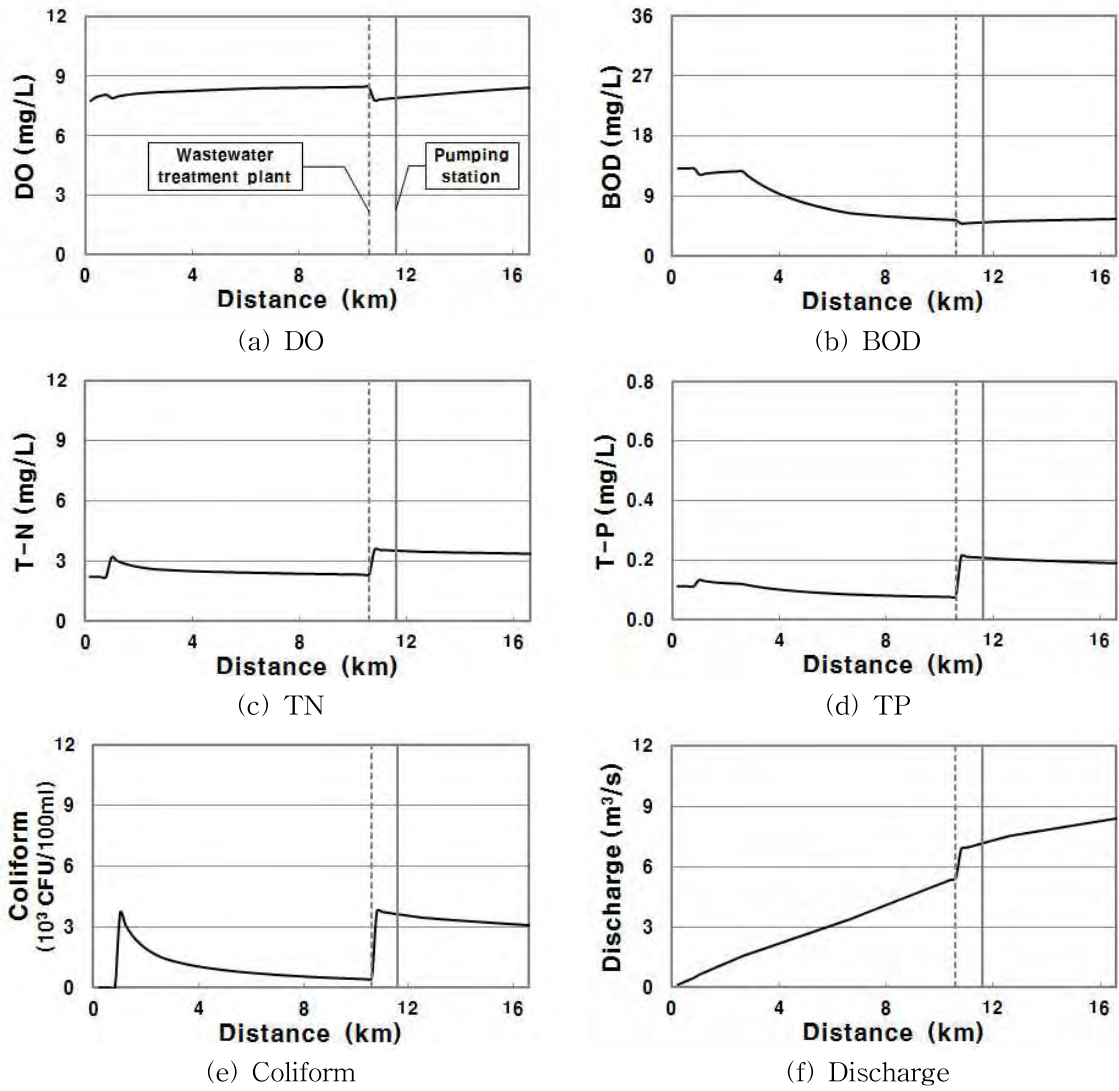


그림 3.7.21 8월 하순의 하천 수질 모의 결과

하. 9월 상순의 하천 수질 모의

그림 3.7.22는 9월 상순의 하천 수질 모의 결과를 나타낸다.

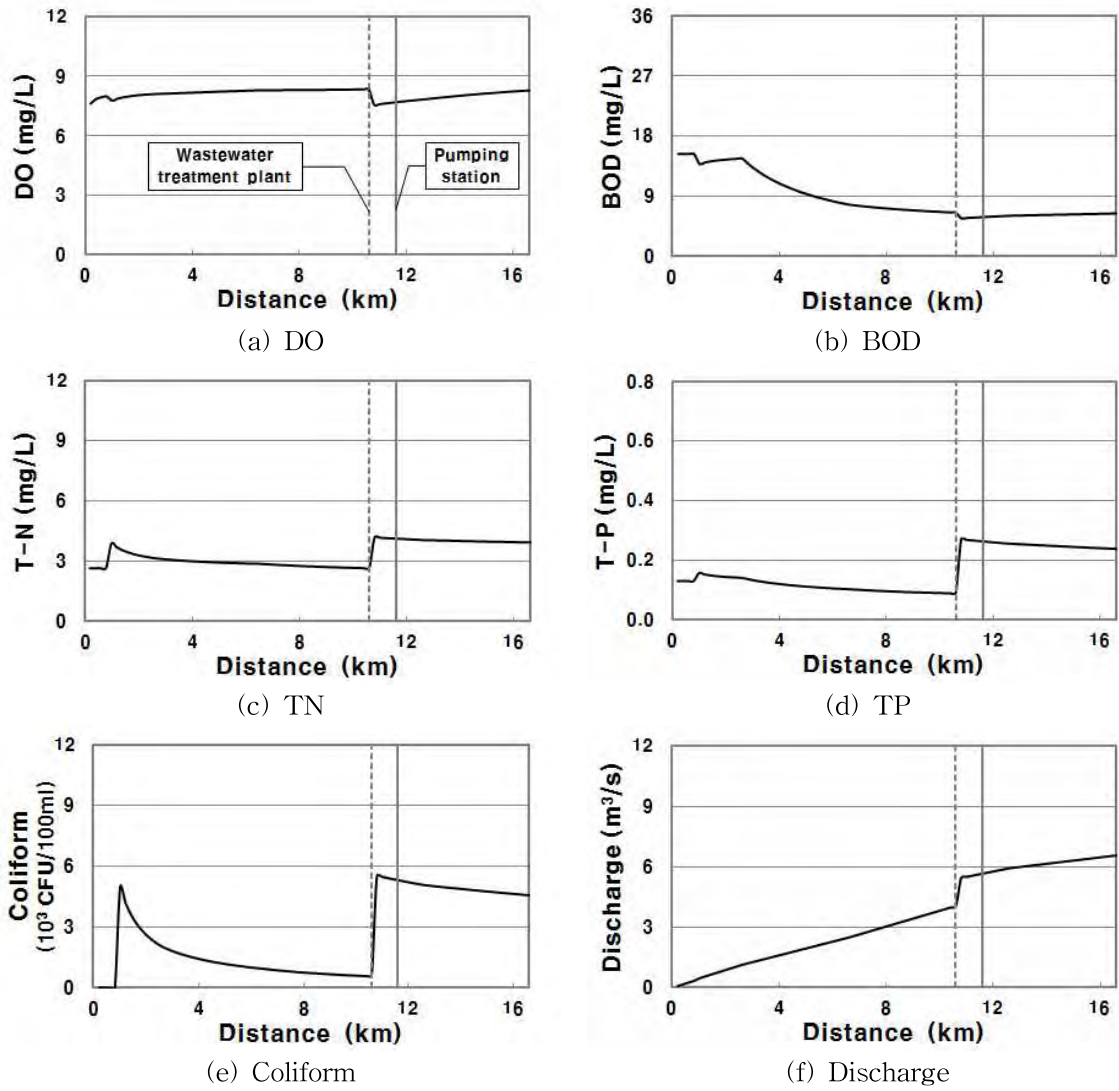
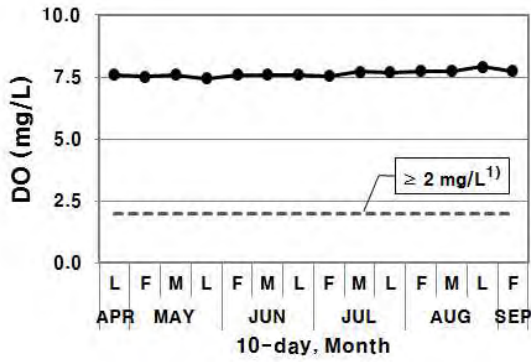


그림 3.7.22 9월 상순의 하천 수질 모의 결과

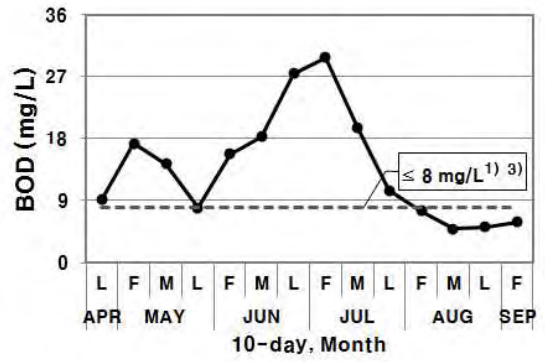
거. 순별 관개수질의 비교

그림 3.7.23은 관개용수 취수지점의 수질을 순별로 도시한 것이다. DO는 거의 변화를 보이지 않으나, BOD, T-N, T-P, 대장균의 농도는 순에 따라 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 전반적으로 4월~7월 상순에 BOD, T-N, T-P, 대장균의 농도가 높고 8월로 접어들면서 감소하고 있으며, 이는 7월~9월에 하천 유량이 크게 증가하면서 농도가 감소하였기 때문으로 추정된다.

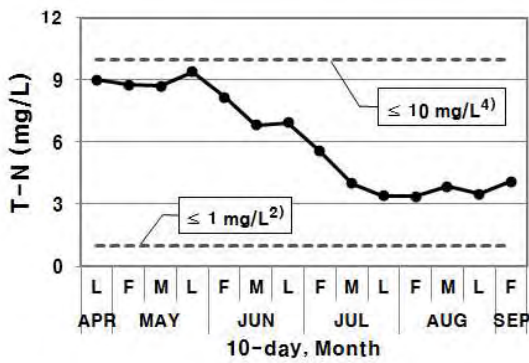
농업용수의 수질 기준은 하천 및 호소에 대한 4등급 수질 기준을 따르며 (환경정책기본법 시행령, 2012), 이를 그림 3.7.23의 관개수질 모의 결과와 비교하였다. DO는 항상 2 mg/L 이상을 유지하므로 하천에 대한 4등급 기준을 만족하는 반면, BOD의 경우 4월~7월의 기간에 8 mg/L를 초과하여 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. T-N과 T-P의 경우 하천에 대한 기준이 없는 관계로 호소의 4등급 기준 또는 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준 (환경부, 2009)과 비교하였다. 그 결과, 관개기간 내내 호소수의 기준은 만족하지 못하지만, 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준은 전반적으로 만족하는 것으로 나타났다. 대장균의 경우 관개기간 내내 농업용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준 (환경부, 2009)인 200 CFU/100ml를 상회하여 보건 및 환경에 대한 보다 면밀한 검토가 요구된다.



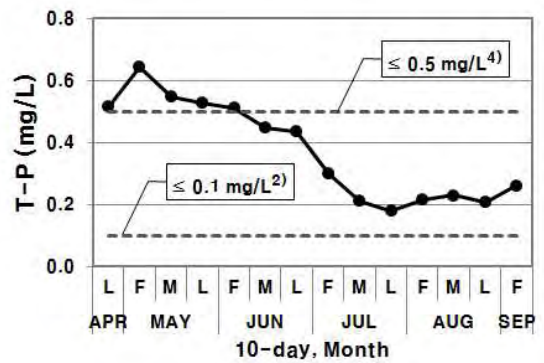
(a) DO



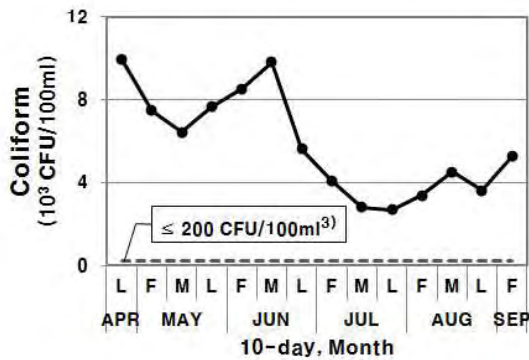
(b) BOD



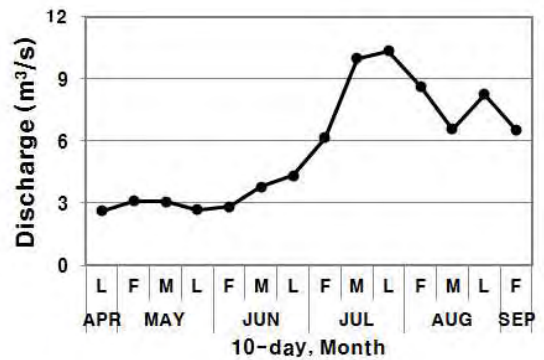
(c) T-N



(d) T-P



(e) Coliform



(f) Discharge (Fig. 6)

1), 2) 하천 및 호소수에 대한 4등급 수질 기준 (환경정책기본법 시행령, 2012)

3), 4) 농업용수 (간접 식용) 및 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준 (환경부, 2009)

그림 3.7.23 순별 관개수질의 모의 결과와 농업용수 및 하수처리수 재이용 수질기준의 비교

6. 요약 및 결론

본 절에서는 하수처리수의 간접재이용에 따른 오산천의 관개 수질을 모의하기 위하여, SWAT-QUALKO2 연계 시스템을 이용하여 하수처리장 방류구 하류에 위치하는 관개용수 취수지점에서의 관개기 순별 수질을 분석하였다. 본 절의 결과를 요약하면 다음과 같다.

① SWAT 모형을 통해 모의된 오산천 유역의 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량과 관개용수 취수지점의 유량을 QUALKO2 모형의 증분유입 자료와 기준유량으로 적용하여 SWAT-QUALKO2 연계 시스템을 구축하였다.

② QUALKO2 모형의 검·보정은 단순시행착오법으로 이루어졌다. 실측 자료의 부족으로 인해 검·보정이 일부분 미흡한 것으로 나타났으며, 추가적인 모니터링을 통해 보완이 필요할 것으로 사료된다.

③ 순별 관개수질의 모의 결과, BOD, T-N, T-P, 대장균의 농도는 7월~9월에 비해 4월~6월에 높은 것으로 나타났다. BOD의 경우 4월~7월에 농업용수 수질 기준 및 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준을 초과하며, 대장균의 경우 관개 기간 내내 농업용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준을 초과하는 것으로 나타나, 보건 및 환경에 대한 면밀한 검토가 필요하며 하수처리수를 안전하게 농업용수로 재이용하기 위한 재처리 시스템의 적용이 요구되는 것으로 나타났다.

제8절 간접하수재이용에 따른 논에서의 적정 시비량 산정

1. 서론

하수처리수의 경우 고농도의 질소와 인 등의 비료성분을 함유하고 있어 농경지에 비료성분을 공급할 수 있는 장점이 있다. 하수처리수에 함유된 비료성분은 농경지에 유입되어 작물의 생육 등에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 농경지에서의 작물생육과 영양물질의 거동을 모의할 수 있는 작물생육모형을 이용하게 되면 장기간의 모니터링을 위한 시간과 노력을 효율적으로 이용할 수 있다.

작물생육모형은 작물의 광합성 같은 주요생리작용을 정량적으로 연구하기 위해 40여 년 전부터 소개되기 시작하였다. 다양한 환경조건 하에서의 생장 및 발육의 종합적인 모의가 가능한 정도로 발전하였으며, 최근에는 주요 식량작물에 대해 실용수준의 모형들이 선보이고 있다 (Sinclair와 Seligman, 1996; 조정숙과 윤진일, 1999). 미국에서 개발되어 IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer)사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)의 경우, 주요 식량작물의 생장 및 발육모의는 물론, 일련의 영농활동에 따른 영양물질의 거동도 파악할 수 있다 (Jones 등, 2003).

지금까지 DSSAT을 이용하여 여러 지역에서 식량작물의 생산량 및 토양환경 변화 등에 관한 연구가 다양하게 이루어져 왔다. 대표적으로 Liu 등 (2011)은 캐나다에서의 옥수수과 콩의 생산량 예측에 DSSAT의 적용성을 평가하고, 배수형태에 따른 지표하 질산태 질소의 손실을 모의하였으며, Martin 등 (2011)은 브라질에서의 사탕수수 매개 변수를 추정하여 생산량을 모의함과 동시에 관개 시와 비관개 시 토양수분함량의 변화를 예측하였고, Sun 등 (2009)은 중국에서의 기후변화 시나리오에 따른 감자의 수확량 변화를 모의하였다. 국내의 경우에는 심교문 등 (2010)이 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측 등에 적용한 바 있다.

본 절에서는 DSSAT (CERES-Rice 모형)을 이용하여 하수처리수의 농업용수재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 대한 적용성을 평가하고, 시비량 변화에 따른 논벼 수확량을 모의하여 간접재이용에 따른 적정 시비량을 산정하고자 한다.

2. 시험포장

하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의를 위한 시험포장은 경기도 화성시 진안동에 위치한 수원시 환경사업소 하수처리장 인근에 조성하여 2003년부터 2010년까지 8년간 운영되었다. 농림부의 지원으로 2006년에 재이용 시설이 설치된 수원시 환경사업소의 하수처리용량은 52 만 m^3 /일이며, 하수재이용량은 8 천 m^3 /일이다. 시험구는 관개수의 처리수준에 따라 지하수를 관개하는 대조구 (TR#1)와 하수처리장 방류수를 직접 이용하는 처리구 (TR#2), 하수처리장 방류수를 에코칩필터를 이용하여 여과처리한 후, UV소독과정을 거치는 처리구 (TR#3)로 구성하였다. 하수처리수의 관

개수 이용에 따른 시험구의 배치는 이원분류방식인 난괴법 (Randomized complete block design)을 적용하였다. 난괴법은 각 집구마다 모든 처리가 배치되는 것으로서 집구간 차이는 커지지만 집구 내에서는 차이가 균일하게 되어 집구간 변이가 실험오차에 영향을 끼치지 않도록 하는 시험배치법이다 (채영암 등, 1991). 시험구의 크기는 5m × 5m이며, 관개수의 처리수준별로 4반복하여 총 12개의 시험구를 조성하였다. 그림 3.8.1은 시험포장의 위치와 시험구의 설계를 보여주고 있다.

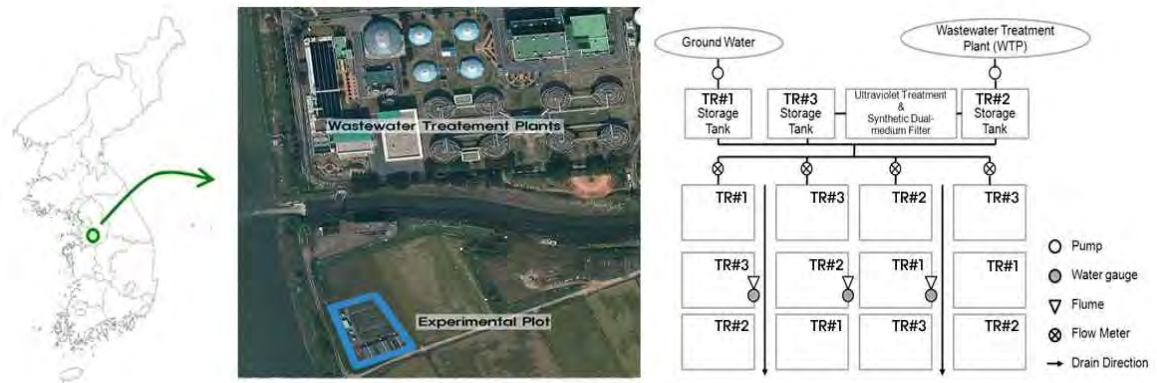


그림 3.8.1 시험포장의 위치와 실험설계

3. DSSAT 모형

품종, 토양, 기상, 재배방식 등을 결합한 수확응용 모형인 DSSAT은 1982년 미국 IBSNAT 프로젝트에 의해 개발이 시작되었다. 토양수분모형과 토양 C/N모형 등을 이용한 다수의 작물생육모형을 포함한 DSSAT 모형은 작물생육 관리를 위한 의사결정 지원시스템으로 벼, 옥수수, 콩 등을 포함한 20가지 이상의 작물생육 추정에 이용된다. 본 연구에서는 CERES기반의 토양모형과 최신의 토양수분모형을 통해서 CERES-Rice 작물생육모형을 이용하여 논벼 수확량을 모의하였다. 그림 3.8.2는 DSSAT 모형의 개요를 보여주고 있다.

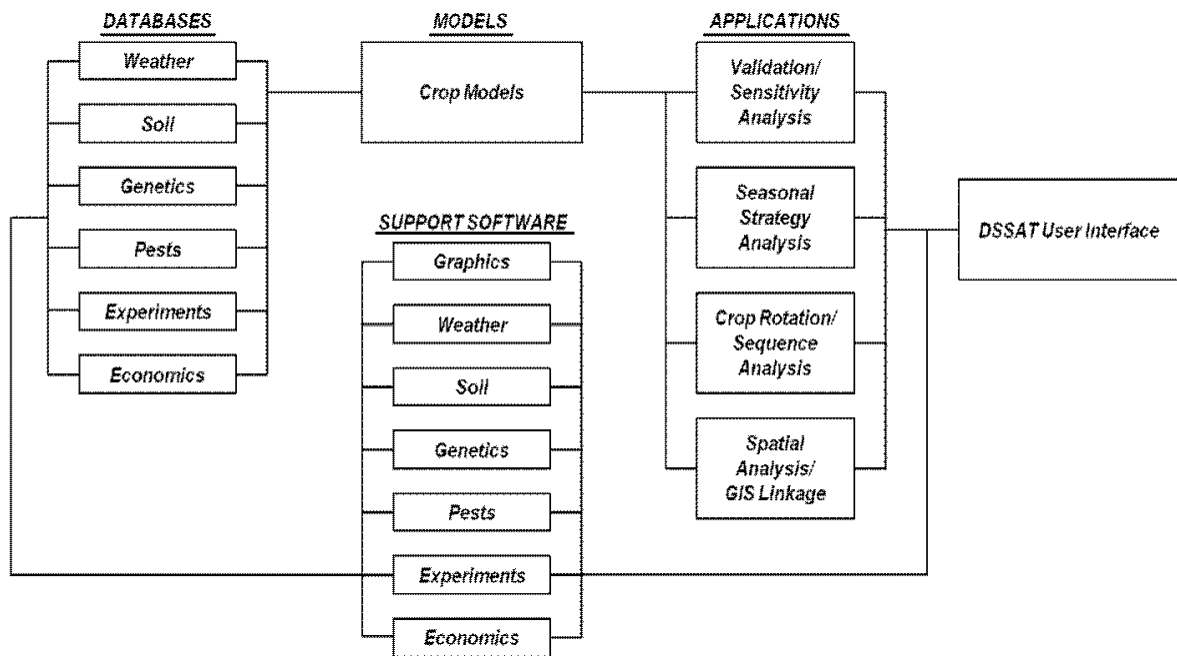


그림 3.8.2 DSSAT 모형의 개요 (Jones 등, 2003)

3.1. 모형입력자료

DSSAT 모형의 입력자료로는 기상, 토양, 관개량, 영농관리, 작물품종 등이 필요하다.

가. 기상

본 연구의 기상자료는 시험포장으로부터 약 7.3km 떨어진 수원기상관측소 일별 기상자료를 이용하였으며, 2006년부터 2009년까지 총 4개년 동안의 일별 기상자료를 수집하였다. 수집한 항목은 최고/최저기온, 평균풍속, 상대습도, 강수량, 태양복사량 자료이다. 수집한 기상자료는 DSSAT의 기상자료 입력 프로그램 (WeatherMan)에 의해 모형 입력자료로 구축하였다. 작물생육기간인 5월 중순부터 10월 초순까지의 월평균기온과 강수량은 2006년의 경우 22.1℃, 1032.4mm, 2007년의 경우 21.4℃, 995.0mm, 2008년의 경우 22.0℃, 1098.8mm, 2009년의 경우 21.6℃, 1204.5mm이었다.

나. 토양

본 연구의 토양자료는 한국토양정보시스템 토양지도와 시험포장 현장실측자료를 이용하였다. 한국토양정보시스템의 토양자료에는 토양통, 각 토층별 입경분포 및 수분장력 등을 포함하는 토양의 물리적 특성과 각 토층별 pH, 유기물 함량 및 염기치환용량 등을 포함하는 화학적 특성들이 있다. 아래의 표 3.8.1은 시험포장 현장에서 실측한 토양의 물리적, 화학적 특성을 보여주고 있다.

표 3.8.1 시험포장 토양의 물리적 화학적 특징 (장태일, 2009)

특성	단위	TR#1	TR#2	TR#3
Sand	%	48.7	48.7	48.7
Silt		32.3	35.3	30.8
Clay		19.0	16.0	20.5
Texture class	-	Loam	Loam	Loam
Organic matter	%	1.74	2.11	1.82
pH (1:5)	-	5.55	5.52	5.53
CEC	cmol+ kg ⁻¹	13.09	12.11	13.29
EC	μS/m	0.473	0.319	0.524
TN	mg kg ⁻¹	850.0	930.0	950.0
TP		528.2	557.7	358.3
Ca		758.5	853.8	745.2
K		40.9	44.5	49.5

이 외에도 2006년부터 2009년까지 이양 전, 논벼생육기, 수확 후 등 연 3~4회에 걸쳐 시험포장의 토양시료를 채취한 후, 서울대학교 농업과학공동기기센터 (National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에서 EC, 유기물함량, pH, TN, TP, NO₃-N, NH₄-N 등을 포함하여 16여 가지 항목에 대해 토양 및 식물체분석법 (NAAS, 2000)에 따라 시료분석을 실시하였다. NICEM에서 분석한 토양자료를 바탕으로 DSSAT모형의 초기 토양입력자료 (Initial Condition-Profile)를 결정하였다.

다. 관개량

관개량은 씨레질 후부터 1주~2주 간격으로 시험구마다 설치되어있는 유량계를 통해서 실측하였다. 표 3.8.2는 각 년도별 관개량을 보여주고 있다. 2006년과 2007년이 다른 해에 비해 관개량이 보다 많은 것을 확인할 수 있으며, 특히 2006년에는 8월의 관개량이 약 290mm 정도의 큰 값을 보이고 있다. 이는 당월의 강우량이 66.4mm로 다른 년도의 강우량 (약 200~300mm)에 비해 적어 상대적으로 관개를 많이 하였기 때문이다.

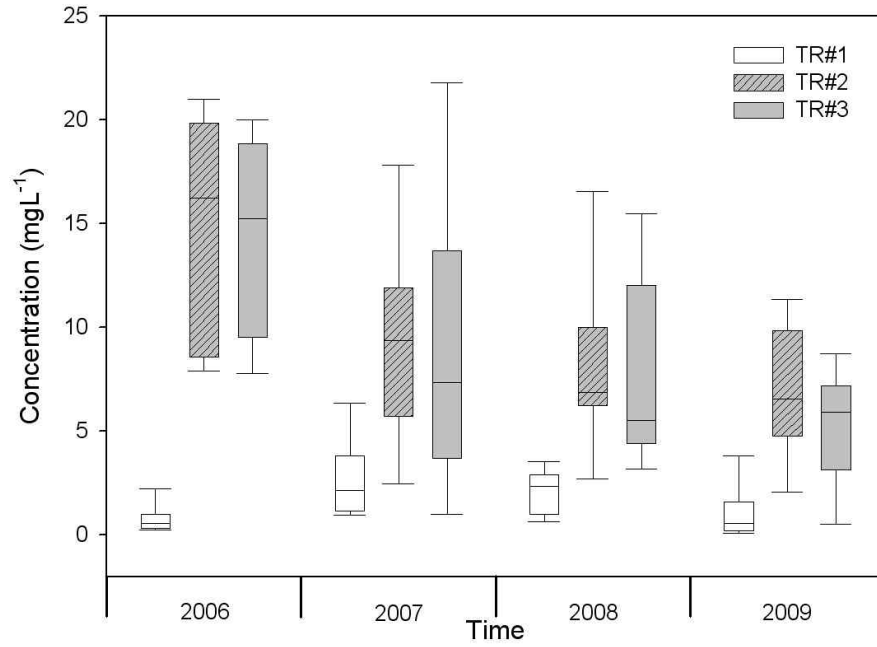
표 3.8.2 2006년부터 2009년까지의 영농기간 월별 관개량
(mm)

(단위:

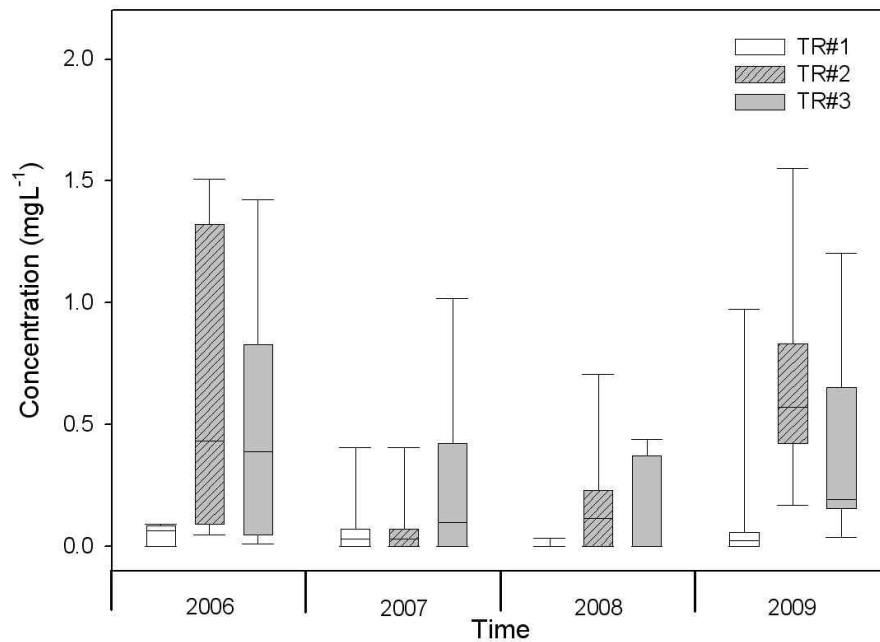
년도	처리구	5월	6월	7월	8월	9월	10월	총계
2006	TR#1	68.9	185.9	0.0	298.8	315.0	0.0	868.6
	TR#2	15.9	196.1	50.1	310.4	326.0	0.0	898.5
	TR#3	42.9	202.8	0.0	281.2	330.7	28.0	885.6
2007	TR#1	158.5	163.7	171.8	175.1	127.2	0.0	796.4
	TR#2	117.2	291.8	144.2	218.4	116.2	0.0	887.8
	TR#3	141.7	250.2	124.8	188.1	109.2	0.0	814.1
2008	TR#1	43.8	10.48	119.0	146.8	199.3	0.0	613.7
	TR#2	39.2	145.6	133.8	123.3	224.9	0.0	666.9
	TR#3	41.2	133.8	67.4	185.8	195.0	0.0	623.2
2009	TR#1	77.9	192.0	51.6	184.8	96.7	0.0	603.0
	TR#2	63.2	154.3	71.9	300.5	104.3	0.0	694.2
	TR#3	111.5	212.9	94.0	119.3	78.1	0.0	615.8

라. 관개수질

시험포장의 수질 모니터링을 위해 이양 후부터 9월 말까지 1주~2주 간격으로 관개용수의 수질 시료를 채취하여 NICEM에서 pH, SS, TN, TP, NO₃-N, NH₄-N 등을 포함하여 20여 가지 항목에 대해 수질오염공정시험방법 (환경부, 2000)에 따라 시료분석을 실시하였다. 그림 3.8.3은 2006년~2009년까지 논벼생육기간 동안의 관개용수의 TN과 TP 수질분석결과를 보여주고 있다. T-N과 T-P농도는 지하수 유입관개수에서 현저히 낮게 나타났고, 하수처리수와 재이용수 관개수의 수질은 서로 유사한 경향을 보였다.



(a) T-N



(b) T-P

그림 3.8.3 영농기간 중 관개수의 T-N과 T-P 농도 (2006~2009)

마. 영농관리

논벼 생육시험을 위한 공시품종은 수원 지방에서 널리 재배되는 추청벼로 하였으며, 중부지방에 대한 표준영농법에 따라서 재식거리를 30cm × 30cm로 1주 3본씩 손이앙을 실시하였고, 재배 및 물 관리 방법 역시 작물시험장의 표준영농법을 적용하였다. 시험포장 지역의 관행 시비량은 관개수의 특성상 영양물질이 충분하여 타 지역에 비

하여 적다. 이를 바탕으로 대상지구의 경우, 기비 시에만 요소 (N 5.5 kg/10a), 용과린 (P₂O₅ 4.5 kg/10a), 염화加里 (K₂O 4.0 kg/10a)를 시비하였고 분얼비 및 수비는 적용하지 않았다. 이앙시기는 5월 중순부터 시작하고, 추수는 10월 중순에 이루어졌다.

표 3.8.3 2006년부터 2009년까지의 시험포장의 영농활동 내역

년도	품종	씨레질 및 기비	모내기	추수	시비량 (kg ha ⁻¹)		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2006	추청벼*	May 21	May 25	October 17	55	45	40
2007	추청벼	May 14	May 17	October 24	55	45	40
2008	추청벼	May 17	May 19	October 21	55	45	40
2009	추청벼	May 16	May 20	October 20	55	45	40

**Oryza sativa* L. ssp. japonica cv. Chuchengbyeo

바. 벼 품종모수

CERES-Rice를 어떤 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 실제 재배되고 있는 품종의 성장 및 발육 관련 유전적 특성을 모형에 반영시켜야 한다. 즉 벼의 발육 및 성장의 주요특성을 몇 개의 모수로 표현하고 각 품종별로 서로 다른 값을 부여하는 것이다. 따라서 생육모의의 성공을 위해서는 각 품종의 모수값을 정확하게 추정하는 일이 전제되어야 한다 (김영호 등, 2002).

DSSAT 모형의 CERES-Rice 작물생육모형에 필요한 품종모수는 논벼의 발육단계를 나타내는 P1, P20, P2R, P5가 있으며, 논벼의 수량생산잠재력을 결정하는 G1, G2, G3, G4가 있다. 여기서 P1은 기본영양성장기간, P20는 최적일장, P2R은 지연율, P5는 등숙기간, G1은 건물중당 최대립수, G2는 최대립중, G3는 IR64대비 상대분얼능력, G4는 온도반응성을 각각 나타낸다 (Singh 등, 1992).

4. 논벼 생산량 모의

4.1. 모형의 평가

모형의 평가는 시험포장에서 관측한 논벼 수확량을 토대로 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)와 정규화된 평균제곱근오차 (normalized Root Mean Square Error, nRMSE) (Loague and Green, 1991), 그리고 일치도 (Index of agreement, *d*) (Willmott 등, 1985) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. 정규화된 평균제곱근오차는 다음 식 (3.8.1)과 같다.

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2} \times \frac{100}{M} \quad (3.8.1)$$

여기서, P_i 와 Q_i 는 각각 모의치와 실측치를 의미하며, n 은 자료쌍의 총 개수, M 은 실측치의 평균값을 의미한다. $nRMSE$ 는 모의치와 실측치의 차를 %로 표현하며, 그 값이 10% 미만일 경우 모형의 적용성이 탁월한 것으로, 10% 이상 20% 미만일 경우 좋은 것으로, 20% 이상 30% 미만일 경우 평범한 것으로, 30% 이상일 경우 좋지 않은 모형으로 각각 고려된다 (Jamieson 등, 1991).

일치도 (d)는 0과 1사이의 값을 갖게 되며 다음 식 (3.8.2)와 같다. 일치도가 1에 가까울수록 모형이 적합한 것으로 평가된다.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i'| + |O_i'|)^2} \right] \quad (3.8.2)$$

여기서, P_i 와 O_i 는 각각 모의치와 실측치를 의미하며, n 은 자료쌍의 총 개수, $|P_i'| = P_i' - M$, $|O_i'| = O_i' - M$ 으로 M 은 모의치의 평균값을 의미한다.

4.2. 벼 품종모수의 보정

벼 품종모수를 보정하기 위해 2006년부터 2007년까지 시험포장에서 실측된 논벼 수확량 자료를 이용하였다. 품종모수 추정의 초기값은 기존의 연구결과 (김영호 등, 2002; 심교문 등, 2010)를 바탕으로 단순시행착오법을 이용하여 보정하였다. 매개변수의 보정에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차, 정규화된 평균제곱근오차, 일치도 (d) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. 표 3.8.4는 CERES-Rice 모형의 추정벼 품종모수에 대한 기존 연구결과와 보정된 품종모수를 보여주고 있다.

표 3.8.4 추정벼 품종모수

구분	P1	P2O	P2R	P5	G1	G2	G3	G4
Shim 등 (2010)	390.0	12.0	20.0	520.0	55.0	0.025	0.61	1.00
Kim 등 (2002)	200.0	11.5	105.0	465.0	65.0	0.026	0.60	1.00
보정 값	220.0	11.5	105.0	520.0	68.0	0.026	0.60	1.00

표 3.8.5는 수확량 모의 결과와 그에 대한 통계적인 변량을 나타내고 있다. 단순시행 착오법으로 보정된 품종모수를 이용한 모형의 보정 결과를 평가한 결과 RMSE는 145~789kg ha⁻¹, nRMSE는 3.0~13.3%, 일치도 (*d*)는 0.90~0.95의 범위로 모의된 수확량이 실측치를 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 그림 3.8.4는 수확량에 대한 모형의 보정 결과를 일대일로 보여주고 있다.

표 3.8.5 보정기간 (2006~2007)의 관측치와 모의치 비교

연도	시험구	생산량 (kg ha ⁻¹)		RMSE (kg ha ⁻¹)	nRMSE (%)	d
		관측치	모의치			
2006	TR#1-1	4,536	4,624	145	3.0	0.95
	TR#1-2	5,396	5,136			
	TR#1-3	4,844	4,756			
	TR#1-4	4,400	4,361			
	TR#2-1	7,048	6,565	335	5.4	
	TR#2-2	5,672	5,607			
	TR#2-3	5,332	5,610			
	TR#2-4	6,700	7,065			
	TR#3-1	5,580	5,235	322	5.8	
	TR#3-2	5,952	5,625			
	TR#3-3	5,880	6,022			
	TR#3-4	5,264	5,946			
2007	TR#1-1	4,404	4,285	378	8.6	0.90
	TR#1-2	3,940	4,369			
	TR#1-3	4,368	4,250			
	TR#1-4	4,936	4,337			
	TR#2-1	6,832	6,152	477	7.3	
	TR#2-2	6,368	6,129			
	TR#2-3	6,492	6,107			
	TR#2-4	6,444	5,951			
	TR#3-1	6,900	6,199	789	13.3	
	TR#3-2	6,076	5,333			
	TR#3-3	4,300	5,300			
	TR#3-4	6,500	5,828			

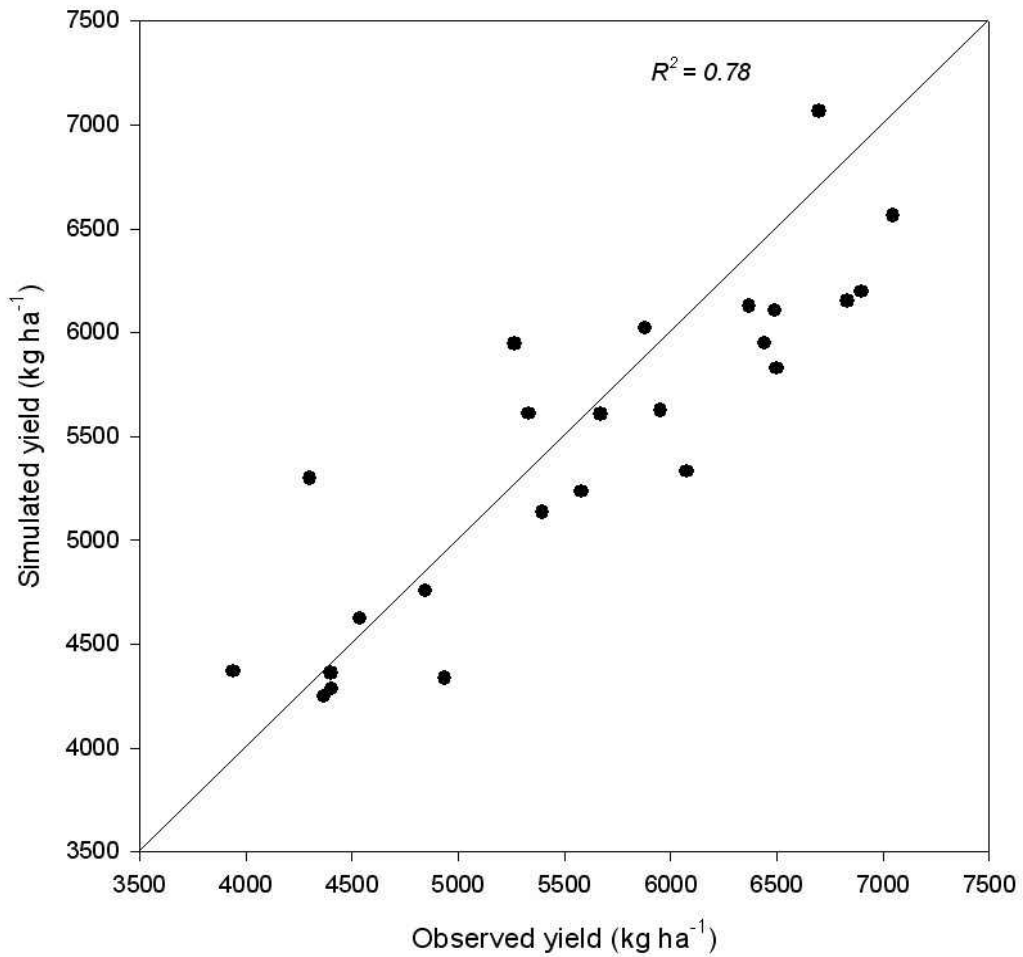


그림 3.8.4 보정기간 (2006~2007)의 관측치와 모의치의 산포도

4.3. 모형의 검정

DSSAT 모형의 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의의 적용성을 평가하기 위해 2008년부터 2009년까지 시험포장에서 실측된 논벼 수확량 자료를 이용하여 보정된 품종모수를 통해 수확량을 모의하였다. 모형의 검정에 대한 평가는 보정에 대한 평가 방법과 동일하게 RMSE, nRMSE, 일치도 (*d*) 등의 통계적인 변량을 사용하였다. 표 3.8.6은 모의한 수확량과 모형의 검정에 대한 통계적인 변량을 보여주고 있다. 모형의 검정 결과 RMSE는 91~538kg ha⁻¹, nRMSE는 2.0~10.4%, 일치도 (*d*)는 0.94~0.98의 범위로 모의된 수확량이 실측치를 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 그림 3.8.5는 수확량에 대한 모형의 검정 결과를 일대일로 보여주고 있다.

표 3.8.6 검정기간 (2008~2009)의 관측치와 모의치 비교

연도	시험구	생산량 (kg ha ⁻¹)		RMSE (kg ha ⁻¹)	nRMSE (%)	d
		관측치	모의치			
2008	TR#1-1	5,020	4,461	290	6.8	0.98
	TR#1-2	4,052	4,035			
	TR#1-3	3,640	3,504			
	TR#1-4	4,268	4,198			
	TR#2-1	7,296	6,791	315	5.6	
	TR#2-2	4,672	4,477			
	TR#2-3	5,024	4,988			
	TR#2-4	5,612	5,294			
	TR#3-1	4,332	4,291	91	2.0	
	TR#3-2	4,712	4,744			
	TR#3-3	4,656	4,687			
	TR#3-4	4,592	4,421			
2009	TR#1-1	4,624	4,819	538	10.4	0.94
	TR#1-2	5,980	5,402			
	TR#1-3	5,168	4,395			
	TR#1-4	4,892	4,461			
	TR#2-1	6,712	6,248	286	4.4	
	TR#2-2	6,044	5,860			
	TR#2-3	6,596	6,340			
	TR#2-4	6,884	6,774			
	TR#3-1	-	4,957	129	2.4	
	TR#3-2	6,068	5,845			
	TR#3-3	4,672	4,678			
	TR#3-4	5,540	5,535			

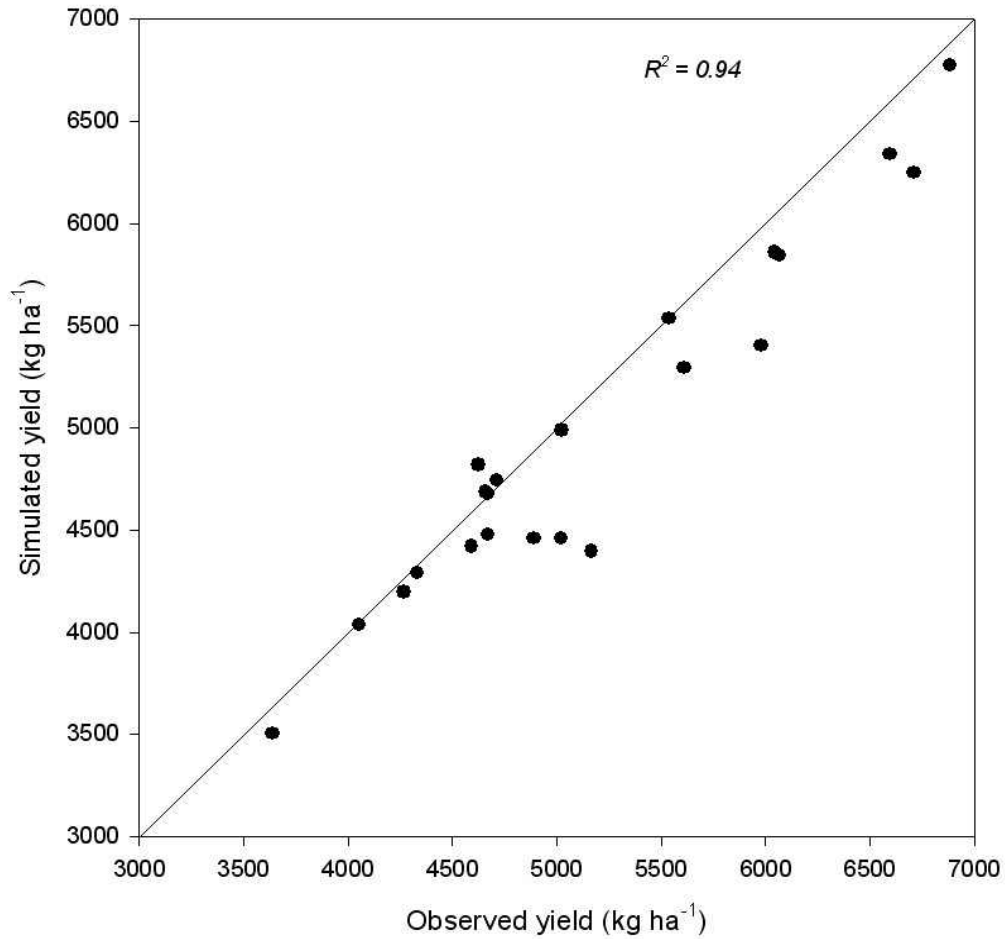


그림 3.8.5 검정기간 (2008~2009)의 관측치와 모의치의 산포도

5. 적정 시비량 산정

환경부 (2012a)에 따르면, 일처리용량 500톤 이상의 전국 하수처리장 505개소 가운데 63개의 하수처리장 방류수가 농업용수로 이용되고 있다. 또한 농업기반공사 (2004)는 논벼 생육과 미질에 큰 영향을 미치는 관개수의 최대허용 질소농도를 4.7 mg/L로 제안한 바 있다. 따라서 63개의 하수처리장 방류수 중 연평균 방류수 질소농도가 4.7 mg/L이하인 6개소를 제외하고 다음 표 3.8.7과 같이 하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 적정 시비량을 산정하기 위해 관개용수로 사용되는 하수처리장 방류수를 3가지 수준으로 구분하였다.

표 3.8.7 관개용수로 사용되는 하수처리장 방류수의 수준구분

수준	구분	개소 수	비율 (%)	모형에 적용된 T-N농도
1	5 mg/L~10 mg/L	25	43.8	8.0 mg/L
2	10 mg/L~15 mg/L	29	50.9	12.5 mg/L
3	15 mg/L~20 mg/L	3	5.3	17.5 mg/L

5.1. 간접하수재이용에 따른 적정 시비량 모의

농촌진흥청 (2007)은 농업생산성과 환경성 모두를 고려한 새로운 논벼 표준시비량을 표 3.8.8과 같이 제안한 바 있다. 적정 시비량을 산정하기 위하여 목표 생산량 5,000 kg/ha의 표준 질소 시비량 대비 10%씩 저감된 시비량을 적용하여 앞서 구분한 3가지 수준을 대상으로 논벼 생산량을 모의하였다.

표 3.8.8 논벼 질소 표준시비량 (단위: kg ha⁻¹)

질소 총량	기비	분얼비	수비	목표 생산량
110	55 (50)*	22 (20)	33 (30)	5,000
90	50 (56)	20 (22)	20 (22)	4,800
70	35 (50)	21 (30)	14 (20)	4,600

*괄호안의 숫자는 분시비율을 나타냄

기비만을 시비한 시험포장과 비교하여 표준시비량을 시비한 TR#01의 논벼 수확량은 45~57% 증가하였고, TR#03의 경우 28~45% 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 모의결과는 질소시비량이 많을수록 수확량이 증가한다는 기존의 연구결과 (Salton 등, 2003; 농업기반공사, 2004)를 잘 반영하는 것으로 표준시비량이 기비만을 시비한 시험포장에 비하여 월등한 농업생산성을 나타냄을 의미한다. 표준시비 조건과 비교한 무시비 조건의 논벼 수확량의 경우 TR#03과 관개용수 3가지 수준에서는 50~60%로 나타났지만, TR#01은 30%에 그치는 것으로 모의되었다. 이는 하수처리수를 논벼 관개용수로 관개할 경우, 최소한의 수확량을 확보할 수 있는 것을 의미한다. 하지만, 모든 경우에서 시비량을 70%이상 저감하는 시점에서 논벼 수확량이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다 (그림 3.8.6).

관개용수 수준에 대하여 표준시비량을 적용한 TR#01의 논벼수확량과 비교하였을

때, 평균적인 시비량 저감량은 20, 30, 그리고 50%인 것으로 나타났다. 모형의 검보정 기간 동안 TR#01의 논벼 수확량 모의치가 과소 모의되는 경향이 있고, TR#03은 과대 모의되는 경향이 있는 것을 감안할 때 (표 3.8.9), 간접재이용에 따른 적정 시비량은 관개용수 수준에 따라서 표준 시비량 대비 각각 20, 30, 그리고 40% 저감된 양으로 판단된다.

경제적인 시비량을 초과한 시비량은 농가소득을 줄일 뿐만 아니라 논으로부터 유출된 오염부하를 받아들이는 수체의 수질오염에 큰 영향을 준다. 이는 질소 시비량이 증가할수록 질소회수율이 급격히 떨어지기 때문이다 (권영립 등, 2006). 게다가 질소 시비량이 증가하면 미질이 나빠지는 경향이 있는 것으로 보고되고 있다 (Perez 등, 1996; 농업기반공사, 2004). 이와 같은 이유로 질소함량이 높은 하수처리장 방류수를 논벼 관개용수로 이용하기 위해서는 미질과 환경적인 영향을 고려하여 표준 시비량보다 적은 양의 질소시비가 이루어져야 한다.

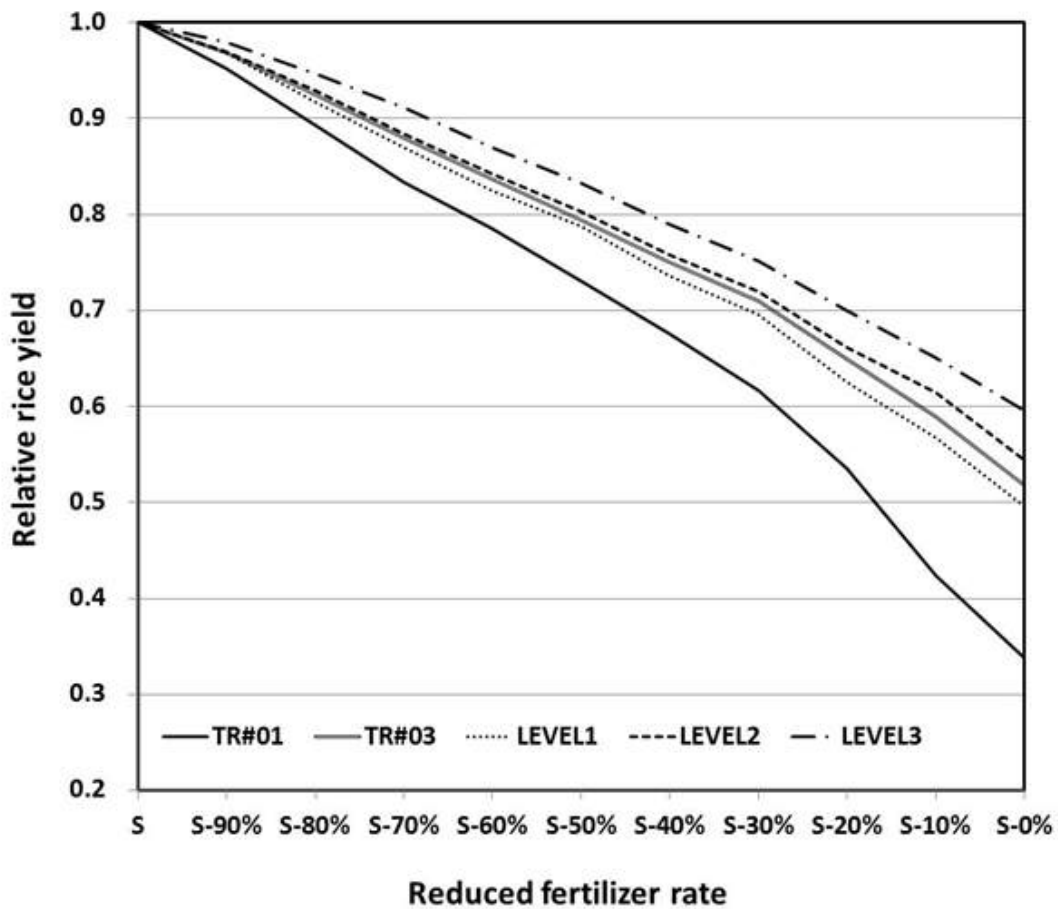


그림 3.8.6 시비량에 따른 논벼 수확량 변화

표 3.8.9 시비량에 따른 논벼 수확량 모의결과

Classification	Obs. ^a	Sim-E ^b	Sim-S ^c	S-90% ^d	S-80%	S-70%	S-60%	S-50%	S-40%	S-30%	S-20%	S-10%	S-0%	
2006	TR#01	4,794	4,587	6,691	6,327	5,982	5,761	5,573	5,353	5,108	4,783	4,347	3,807	3,395
	TR#03	5,669	5,709	7,475	7,244	6,991	6,702	6,488	6,177	5,872	5,535	5,235	4,883	4,414
	LEVEL1			7,047	6,804	6,430	6,115	5,872	5,641	5,262	4,938	4,483	4,003	3,543
	LEVEL2			7,461	7,202	6,880	6,581	6,355	6,047	5,671	5,372	4,942	4,515	4,038
	LEVEL3			7,725	7,564	7,305	7,044	6,778	6,479	6,160	5,811	5,424	5,034	4,648
2007	TR#01	4,412	4,184	6,538	6,196	5,803	5,348	4,988	4,576	4,194	3,783	2,880	1,870	1,113
	TR#03	5,625	5,844	7,478	7,312	6,998	6,665	6,326	5,995	5,695	5,467	4,983	4,563	4,013
	LEVEL1			7,194	6,930	6,513	6,146	5,821	5,492	5,066	4,817	4,366	3,878	3,276
	LEVEL2			7,387	7,153	6,810	6,443	6,120	5,783	5,409	5,158	4,682	4,280	3,713
	LEVEL3			7,544	7,364	7,057	6,760	6,415	6,094	5,749	5,513	5,042	4,649	4,140
2008	TR#01	4,245	3,876	6,066	5,849	5,549	5,113	4,824	4,409	4,068	3,716	3,298	2,604	2,253
	TR#03	4,573	4,695	6,786	6,610	6,330	6,030	5,753	5,468	5,123	4,787	4,346	3,781	3,291
	LEVEL1			6,979	6,820	6,560	6,266	5,966	5,722	5,418	5,038	4,389	4,098	3,552
	LEVEL2			7,221	7,091	6,885	6,610	6,315	6,078	5,757	5,458	5,060	4,618	4,097
	LEVEL3			7,411	7,309	7,142	6,908	6,629	6,382	6,069	5,774	5,418	4,992	4,563
2009	TR#01	5,166	4,966	7,210	6,849	6,335	5,873	5,436	5,032	4,537	4,072	3,670	2,932	2,206
	TR#03	5,427	5,232	7,515	7,169	6,719	6,338	5,898	5,579	5,245	4,971	4,432	3,996	3,435
	LEVEL1			7,860	7,592	7,158	6,770	6,337	6,030	5,644	5,416	4,943	4,518	4,062
	LEVEL2			8,354	8,048	7,697	7,271	6,846	6,525	6,206	5,906	5,427	5,286	4,705
	LEVEL3			5,695	8,499	8,175	7,867	7,466	7,147	6,787	6,472	6,089	5,731	5,338
Ave rage	TR#01	4,654	4,403	6,626	6,305	5,917	5,524	5,205	4,843	4,477	4,089	3,549	2,803	2,242
	TR#03	5,324	5,370	7,314	7,084	6,760	6,434	6,116	5,805	5,484	5,190	4,749	4,306	3,788
	LEVEL1			7,270	7,037	6,665	6,324	5,999	5,721	5,348	5,052	4,545	4,124	3,608
	LEVEL2			7,606	7,374	7,068	6,726	6,409	6,108	5,761	5,474	5,028	4,675	4,138
	LEVEL3			7,094	7,684	7,420	7,145	6,822	6,526	6,191	5,893	5,493	5,102	4,672

a: 기비만을 적용한 시험포장의 논벼 수확량 관측치

b: 기비만을 적용한 시험포장의 논벼 수확량 모의치

c: 표준시비를 적용한 시험포장의 논벼 수확량 모의치

d: 목표 수확량 5000 kg/ha의 표준 질소시비량의 90%를 적용한 관개용수 수준별 논벼 수확량 모의치

5.2. 간접하수재이용에 따른 시비활동 평가

질소시비 시기에 대한 영향을 파악하기 위하여 기비, 분얼비, 수비에 대한 논벼 수확량의 민감도를 분석하였다. 민감도 분석은 민감도 지수 (sensitivity index, SI)를 사용하여 실시하였다. 민감도 지수는 다음 식 (3.8.3)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$SI = \frac{D_{+10kg} - D_{-10kg}}{D_{RF}} \quad (3.8.3)$$

여기서, D_{RF} , D_{+10kg} , 그리고 D_{-10kg} 는 각각 저감된 질소시비량과 저감된 질소 시비량 대비 질소시비량 10kg 증감에 따른 논벼 수확량을 의미한다.

논벼 수확량에 대한 기비, 분얼비, 수비의 질소시비량 민감도는 각각 0.029~0.077, 0.065~0.147, 그리고 0.070~0.157의 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 민감도 지수의 평균값은 각각 0.051, 0.100, 그리고 0.122로 분석되었다. 또한 관개수질 수준1과 40% 저감한 시비량이 질소시비량 저감에 따른 논벼 수확량의 영향이 가장 크게 나타났으며, 관개수질 수준3과 20% 저감한 시비량이 질소시비량 저감에 따른 영향이 가장 작게 나타났다. 모든 경우에 있어서, 질소시비의 시기에 따른 논벼 수확량의 영향은 수비, 분얼비, 기비의 순으로 큰 것으로 분석되었다 (표 3.8.10).

위의 결과로부터 논벼 수확량에 있어서 질소시비를 적게 할수록 시비활동에 따른 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구를 통해서 하수처리장 방류수를 논벼 관개용수로 사용하는 경우에 있어서, 시비량을 저감하기 위해서는 총 시비량 중 기비의 비중을 줄이는 것이 더 효과적이며, 수확량을 늘리기 위해서는 수비의 비중을 늘리는 것이 효과적인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 김민호 등 (2006)의 우수형성기에 시비량을 늘리는 것이 논벼 수확량을 증가시킨다는 연구결과와 상응하는 것으로 나타났다.

표 3.8.10 시비시기에 따른 논벼 수확량 및 민감도 지수

LEVEL			Rice yields						Sensitivity index			
			Base yield	B ^a -10 kg	B+10 kg	T ^b -10 kg	T+10 kg	P ^c -10 kg	P+10 kg	B	T	P
2006	LEVEL1	S-80%	6430	6261	6542	6122	6718	6085	7029	0.044	0.093	0.147
		S-70%	6115	5973	6261	5762	6411	5818	6733	0.047	0.106	0.150
		S-60%	5872	5712	6108	5506	6242	5518	6376	0.068	0.125	0.146
	LEVEL2	S-80%	6880	6728	6999	6560	7137	6517	7403	0.039	0.084	0.129
		S-70%	6581	6393	6756	6242	6887	6219	7109	0.055	0.098	0.135
		S-60%	6355	6166	6487	6029	6696	5912	6826	0.051	0.105	0.144
	LEVEL3	S-80%	7305	7180	7404	7039	7516	6910	7623	0.031	0.065	0.098
		S-70%	7044	6899	7169	6707	7294	6661	7447	0.038	0.083	0.112
		S-60%	6778	6447	6917	6471	7074	6349	7213	0.069	0.090	0.127
2007	LEVEL1	S-80%	6513	6302	6673	6146	6817	6077	6993	0.057	0.103	0.141
		S-70%	6146	5935	6348	5764	6522	5778	6741	0.067	0.124	0.157
		S-60%	5821	5577	6028	5407	6203	5601	6354	0.077	0.137	0.129
	LEVEL2	S-80%	6810	6620	6964	6468	7074	6355	7208	0.050	0.089	0.125
		S-70%	6443	6226	6624	6073	6761	6072	6967	0.062	0.107	0.139
		S-60%	6120	5888	6314	5740	6474	5883	6670	0.070	0.120	0.129
	LEVEL3	S-80%	7057	6898	7198	6771	7311	6659	7372	0.043	0.076	0.101
		S-70%	6760	6550	6926	6401	7065	6372	7165	0.056	0.098	0.117
		S-60%	6415	6183	6629	6045	6775	6153	6892	0.070	0.114	0.115
2008	LEVEL1	S-80%	6560	6427	6994	6626	7155	6472	7039	0.032	0.077	0.082
		S-70%	6266	6103	6379	5969	6546	5839	6630	0.044	0.092	0.126
		S-60%	5966	5809	6096	5656	6244	5539	6431	0.048	0.099	0.150
	LEVEL2	S-80%	6885	6775	6994	6626	7155	6472	7039	0.032	0.077	0.082
		S-70%	6610	6467	6720	6330	6883	6225	6891	0.038	0.084	0.101
		S-60%	6315	6173	6467	6035	6606	5928	6723	0.046	0.091	0.126
	LEVEL3	S-80%	7142	7035	7241	6906	7367	6761	7264	0.029	0.065	0.070
		S-70%	6908	6758	7006	6636	7160	6488	7116	0.036	0.076	0.091
		S-60%	6629	6467	6740	6332	6891	6239	6980	0.041	0.084	0.112
2009	LEVEL1	S-80%	7158	6909	7314	6746	7580	6651	7730	0.057	0.117	0.151
		S-70%	6770	6523	6946	6297	7198	6407	7433	0.063	0.133	0.152
		S-60%	6337	6149	6565	5852	6785	6214	6927	0.066	0.147	0.117
	LEVEL2	S-80%	7697	7473	7847	7284	8025	7177	8127	0.049	0.096	0.123
		S-70%	7271	7044	7448	6838	7694	6928	7834	0.056	0.118	0.125
		S-60%	6846	6651	7070	6370	7290	6571	7454	0.063	0.134	0.129
	LEVEL3	S-80%	8175	7992	8355	7829	8517	7741	8489	0.045	0.084	0.092
		S-70%	7867	7653	8027	7444	8235	7418	8246	0.048	0.101	0.105
		S-60%	7466	7270	7681	7003	7871	7131	7962	0.055	0.116	0.111

a: 기비를 의미함

b: 분얼비를 의미함

c: 수비를 의미함

5.3. 질소시비 분시율에 따른 논벼 수확량

표 3.8.11은 각기 다른 6 가지의 분시율의 저감된 질소시비량에 대한 논벼 수확량을 모의한 결과이다. 본 모의결과는 기비보다 분얼비와 수비에 대한 민감도가 더 높게 분석된 질소시비에 대한 민감도 분석결과를 잘 나타낸다. 질소시비량을 최소화하고, 표준시비량과 표준분시율을 적용하여 지하수 관개를 통해 얻은 목표 논벼 수확량을 만족시키는 분시율은 기비-분얼비-수비에 대하여 20-30-50%로 분석되었다. 본 분시율은 하수재이용시 최적 질소시비를 위한 분시율로 제안될 수 있을 것이다.

또한, 조정된 분시율은 추가적인 질소시비량 저감효과를 기대할 수 있다. 조정된 분시율을 적용할 경우, LEVEL 1은 70 kg ha^{-1} , LEVEL 2는 60 kg ha^{-1} , 그리고 LEVEL 3은 50 kg ha^{-1} 정도의 질소시비량으로 목표논벼 수확량을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다. 하수재이용 상황에서 질소시비량에 따른 논벼 수확량을 모의한 앞선 결과와 비교하여, LEVEL 1은 20 kg, LEVEL 2는 15 kg, 그리고 LEVEL 3은 10 kg 정도의 추가적인 질소시비량 저감이 가능한 것을 의미한다. 이는 관개수의 총질소 농도가 증가할수록 질소시비에 대한 논벼 수확량의 민감도가 감소하는 모의결과를 반영한 것이기도 하다.

표 3.8.11 질소 시비량과 분시율에 따른 논벼수확량 (unit: kg ha⁻¹)

Classification	질소시비량 (kg ha ⁻¹)	분시율 (%)					
		Standard (50:20:30)	40:20:40	30:30:40	30:20:50	20:40:40	20:30:50
GW ^a	표준 (110)	6,626	6,748	6,918	6,692	6,975	6,810
LEVEL 1	90	6,738	7,014	7,140	7,004	7,244	7,131
	80	6,431	6,739	6,861	6,838	6,946	6,866
	70	6,115	6,358	6,460	6,595	6,542	6,685
	60	5,830	5,977	6,057	6,193	6,140	6,275
	50	5,527	5,609	5,688	5,736	5,757	5,802
LEVEL 2	90	7,129	7,331	7,457	7,258	7,547	7,377
	80	6,829	7,082	7,197	7,113	7,289	7,171
	70	6,521	6,766	6,854	6,924	6,936	7,021
	60	6,222	6,390	6,477	6,599	6,565	6,677
	50	5,945	6,054	6,123	6,176	6,178	6,235
LEVEL 3	90	7,479	7,587	7,695	7,511	7,779	7,623
	80	7,222	7,399	7,502	7,390	7,579	7,430
	70	6,944	7,132	7,224	7,209	7,306	7,300
	60	6,638	6,816	6,888	6,962	6,967	7,035
	50	6,363	6,464	6,527	6,597	6,591	6,654

^a 지하수 관개론

적정시비량을 초과하는 질소시비는 농가소득을 감소시킬 뿐만 아니라 수질오염을 야기하는 주요한 원인이 된다 (Carpenter et al., 1998). Kim et al. (2008)에 따르면 하수처리수를 관개하는 논에서 질소시비량을 10, 30, 50% 저감할 경우, 논에서의 총질소 발생부하량이 각각 8.8, 16.6, 그리고 24.4% 저감되는 것으로 나타났다. 따라서 하수처리수를 관개용수로 사용할 경우, 질소시비량을 저감할 수 있음은 물론 수환경을 개선하는 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 절에서는 경기도 화성시 진안동에 위치한 시험포장에서 2006년부터 2009년까지 모니터링한 논벼 수확량, 관개량, 관개수질, 토양성분 등을 이용하여 DSSAT 모형의 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 대한 적용성을 평가하고, 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 시비량 저감효과를 평가하였다. 본 절의 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 경기도 화성시 진안동에 위치한 시험포장에서 2006년부터 2009년까지 논벼 수확량, 관개량, 관개수질, 토양성분 등을 모니터링하여 DSSAT 모형의 입력자료로 구축하였으며, 기존의 선행연구를 바탕으로 DSSAT 패키지의 CERES-Rice 작물생육모형의 품종모수를 단순시행착오법을 통해 추정하였다.

② 자료기간 동안 관측한 논벼 수확량을 이용하여 품종모수를 보정하였고, DSSAT 모형을 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 적용한 결과 실측치를 잘 반영하여, 그 적용성이 있는 것으로 평가되었다.

③ 본 모형을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 적정 시비량을 산정한 결과 관개용수의 수질에 따라 표준 질소시비량 대비 20~40% 저감된 질소시비량으로 일반논의 논벼 수확량을 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

④ 기비, 분얼비, 수비의 질소시비량에 대한 논벼 수확량의 민감도 분석 결과, 수비, 분얼비, 그리고 기비의 순으로 논벼 수확량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 질소 시비량을 최소화하고, 목표 논벼 수확량을 만족시키는 분시율은 기비-분얼비-수비에 대하여 20-30-50%로 모의되었다. 이와 같은 연구결과로부터 하수처리수를 논벼 관개용수로 간접재이용할 경우에 기비의 비율을 저감하여 총 시비량을 절감함으로써 수환경 개선을 기대할 수 있으며, 수비의 비율을 증대하여 논벼 수확량을 증가 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

제9절 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 경제성 분석

1. 서론

신규 농업용수 개발은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 댐 개발과 관련한 환경문제 등으로 인해 어려운 것이 현실이다. 하지만, 시설재배지 증가에 따른 용수의 계절적 수요 변화와 기후변화로 인한 극한 가뭄 (김상단 등, 2011)을 대비하기 위해서는 대체수자원 개발이 시급하다. 지난 2012년 봄 가뭄 당시, 충청남도는 천안하수처리장을 포함하여 11개 하수처리장에서 하루 2만 9천 m^3 의 하수처리수를 572 ha의 농경지에 공급한 바 있다. 하수처리장 방류수는 연중 일정한 수량을 보이며, 다량의 영양물질을 함유하고 있기 때문에 (박승우, 2007) 가뭄 시 비상용수를 포함하여 주요한 농업용수 대체수자원으로 주목받고 있다.

하수처리장 방류수가 농업용수로 이용되는 상황에서 김해도 등 (2009)에 따르면, 일처리용량 500 m^3 이상의 전국 270여개 하수처리장 중 132개소가 직간접적으로 농업용수에 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 하지만 하수처리장 방류수 수질기준은 농업용수 수질 기준을 초과하는 경우가 있으며, 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우, 환경 및 보건위생적 측면에서 부정적인 영향을 초래할 수 있음이 보고되고 있다 (Mara와 Cairncross, 1989; Peasey 등, 2000; Jang 등, 2010). 따라서 하수처리수를 농업용수로 이용하기 위해서는 이용목적에 맞는 재처리가 필요하다.

농업용수는 생활 및 공업용수에 비해 그 수요량이 많고, 상대적으로 낮은 기대수질을 가짐 (Yang과 Abbaspour, 2007)에 따라, 하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위해서는 경제적으로 합리적인 재처리시스템이 필요하다. 기존의 하수재이용을 위한 재처리시스템은 공업용수 등의 목적으로 적용되고 있으며, 이러한 처리공정의 용수 단가는 농업용수로 적용하기에는 너무 비싼 경우가 많다. 박승우 (2011)는 제주 판포지구 하수재이용사업에서 염도를 제거하기 위한 재처리시스템을 개발 및 적용하였으며, 이때 처리비용은 시설비를 포함하여 용수 1 m^3 당 160원 내외로 공급이 가능하도록 하였다. 이와 같이 재처리시스템의 경제성이 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 광범위한 실용화에 있어서 제한요인이 되고 있다.

하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 인체위해성 (Asano 등, 1992; Ayres 등, 1992; Petterson, 2001; Forslund 등, 2010), 작물생육 및 수확량 (Pereira 등, 2011; Cirelli 등, 2012), 토양 및 수질에의 영향 (Stevens 등, 2003; Kang 등, 2007; Jang 등, 2012) 등을 포함한 생태 및 환경영향뿐만 아니라 하수재이용을 위한 수처리시스템 (Liberti 등, 2000; Jimenez, 2005)과 재이용 수질기준 (Mara와 Cairncross, 1989; Blumenthal 등, 2000; WHO, 2006) 및 적지선정 (Vasiloglou 등, 2009) 등의 다양한 연구들이 진행되어 왔지만 경제적인 처리비용에 관한 연구는 부족한 실정이다. Haruby (1997; 1998)는 이스라엘에서의 하수 처리수준과 재이용 위치에 따른 하수처리수의 농업용수 재이용에 대한 국가차원의 경제성 분석을 실시한 바 있으며, Chu 등 (2004)과 Yang과 Abbaspour (2007)는 선형계획법을 이용하여 중국에서의 하수재이용 잠재성을

평가한 바 있다. 이들 연구는 하수재이용에 따른 비용과 편익에 관한 분석과 평가를 수행하고, 기술적, 경제적 제한조건 하에서 잠재 하수재이용량을 산출한 것으로서 수처리시스템의 경제성에 대한 논의는 부족하다. 또한, 수처리 및 재이용시스템의 실제 적용은 지역별 수자원 이용 및 농업 환경의 특수성을 고려하여야 하기 때문에 우리나라의 상황에 맞는 적절한 평가가 이루어져야 할 것이다.

농업용수 재이용시스템의 경제성 분석은 앞서 연구된 내용에서와 같이 생태 및 환경 영향뿐만 아니라 사회적, 기술적, 경제적 측면과 관련한 복잡성을 내포하고 있기 때문에 다각적으로 현상을 파악하고 분석할 필요가 있다. 이를 위해서 다음에 소개될 시스템 다이내믹스를 활용하였다. 시스템 다이내믹스 접근방법은 사회·경제·환경적 (socioeconomic environmental) 시스템의 비선형 거동을 이해하고 분석하는 효과적인 방법이다 (Khan 등, 2009). Nasiri 등 (2012)은 시스템 다이내믹스를 인구, 경제성장, 그리고 기후변화 등을 고려한 시나리오에 따른 도시에서의 하수재이용계획에 적용한 바 있으며, Ryu 등 (2012)은 지속가능한 수자원계획과 관리를 위한 모델링 도구로 시스템 다이내믹스를 적용하였다.

본 절에서는 우리나라 농업용수 수요의 80% (국토해양부, 2011)를 차지하는 논용수량을 대상으로 시스템 다이내믹스를 이용한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구축하였다. 구축한 모형을 바탕으로 재처리시스템의 경제성에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고, 관개면적과 처리수준에 따른 합리적인 재처리시스템 비용을 산정하고자 한다.

2. 시스템 다이내믹스

시스템 다이내믹스 (system dynamics)는 Forrester 등의 산업공학자들에 의해 체계화된 시스템 분석기법으로 1961년에 소개되었다 (Forrester, 1961). 이는 복잡한 현상을 동태적이고 순환적인 인과관계의 시각 (dynamic feedback perspective)으로 이해하고 설명하거나, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모델을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변해 나가는지를 실험해 보는 방법론이자 프레임 (framework)이라고 할 수 있다 (정석환과 주영중, 2005). 따라서 시스템 다이내믹스는 일회적인 사건, 모형 변수의 정확한 측정과 변수의 추정값을 구하기보다는 목표 변수가 시간의 흐름에 따라 어떤 동태적인 변화를 보이는데 관심을 둔다 (Meadows, 1980).

단선적 사고는 어떠한 문제를 일으키는 요인들을 나열하고, 그 요인들에 대한 가중치를 정하는 사고방식으로 (Richmond, 1993) 인과관계가 단일 방향으로만 흐르고, 서로 독립적인 독립변수들이 종속변수에만 영향을 미친다고 가정한다 (김도훈, 2001). 그러나 현실에서의 인과관계는 쌍방향으로 흐르면서 서로에게 피드백을 제공하는 동태성을 띠고 있다. 현대사회는 수행 기능의 복잡성과 그것을 구성하는 하위요소들의 상호 연관성 혹은 의존성을 가지므로, 단선적 사고에서 최적해를 구하는 원리는 비현실적인 경우가 자주 발생한다. 더군다나 이와 같은 성격은 더욱 심화되어 가고 있기 때문에 문제 해결을 위해서는 피드백구조를 이해하면서 문제의 원인을 시스템 내부에서

찾으려는 노력이 필수적이다 (정석환과 주영종, 2005). 따라서 전체를 이해하면서 부분의 역할을 강조하고, 부분간의 상호연관성 및 의존성을 강조하는 사고 틀을 갖는 것이 중요하며 (정영호, 2012), 이를 위해 시스템 다이내믹스 접근방법이 필요한 것이다.

시스템 다이내믹스는 피드백 구조와 함께 인과지도 (causal loop diagram)를 이용하여 문제를 해결하는 접근방법이다 (Qi 등, 2009). 인과지도란 여러 개의 인과관계를 서로 연결시켜 놓은 도식으로, 시스템 전체를 한눈에 조망하도록 허용하는 생각의 지도이다. 인과지도를 이용하여 우리는 수많은 인과관계가 어떻게 결합되어 시스템 전체를 형성하는지 이해할 수 있으며, 복잡다기한 시스템의 거동이 어떠한 과정을 거쳐 생성되는지 파악할 수 있다 (김동환, 2004). 일반적으로 인과지도는 3가지 요소로 구성된다 (Hall 등, 1994). 첫째, 화살표를 사용하여 변수와 변수 간의 인과관계의 방향을 표시한다. 화살표의 기점이 영향을 주는 변수이며, 화살표의 종점이 영향을 받는 변수이다. 둘째, 화살표와 함께 (+)와 (-)기호를 사용하여 인과관계 방향을 표시한다. 화살표 방향표시 부분의 (+)기호는 두 요소가 같은 방향으로 변화하는 것을 뜻하고, (-)기호는 두 요소의 변화방향이 다르다는 것을 의미한다. 셋째, 여러 개의 인과관계들이 하나의 폐쇄된 환류를 형성할 때, 이를 피드백 루프 (feedback loop)라고 한다 (Weick, 1979). (+)기호들과 짝수의 (-)기호들로 구성된 피드백 루프를 양의 피드백 (positive feedback) 루프, 또는 강화 피드백 (reinforcing feedback) 루프라고 한다. 이처럼 상승 작용을 일으키는 피드백 루프와 반대로 시스템을 일정한 목표치로 이동시키는 안정적인 작용을 일으키는 피드백이 음의 피드백 (negative feedback) 루프이다. 음의 피드백 루프는 홀수 개의 (-)기호를 가지며, 목표지향형 피드백 (goal seeking feedback) 또는 안정화 피드백 (balancing feedback) 루프라고도 한다 (정영호, 2012). 그림 3.9.1은 본 연구에서 사용된 하수재이용 시스템의 피드백 구조이다. 하수재이용 시스템은 재이용량 (water reuse quantity), 하수재이용시스템 비용 (wastewater reuse cost), 관개면적 (Irrigated area)이라는 세가지 주요 요인으로 구성된다. 이 시스템은 재이용량 → 재이용시스템 비용 → 재이용량으로 이어지는 음의 피드백 루프와 재이용량 → 관개면적 → 재이용량으로 이어지는 양의 피드백 루프로 구성된다.

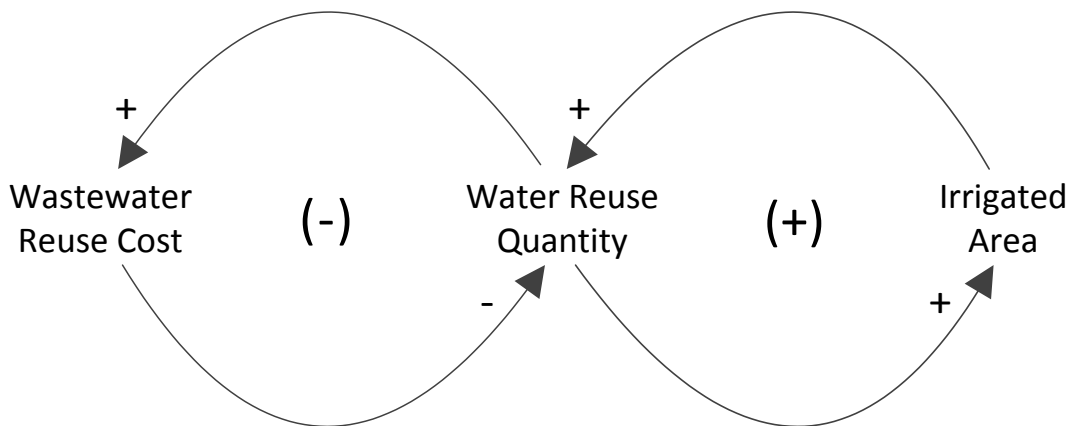


그림 3.9.1 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 기본 인과지도

시스템 다이내믹스를 이용한 모델링 과정은 해결하고자 하는 문제를 정의하고, 문제가 되는 시스템의 경계를 확정하는 과정인 문제의 인식에서 시작한다. 문제를 인식한 후에는 문제를 야기시키는 여러 원인들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 피드백 시각에서 고찰하고 인과지도를 작성하는 개념화단계를 거치게 된다. 개념화를 바탕으로 컴퓨터 모형을 구축하고, 모형에 대한 시뮬레이션을 통해 모형의 행태를 분석한다. 작성된 모형에서 보여지는 주요 변수들의 행태를 중심으로 모형의 타당성을 평가하며 (Barlas, 2002), 모형의 타당성이 입증되면 적절한 시나리오를 통해서 시스템의 가상적 거동을 모의함으로써 목표 변수가 시스템의 조건에 따라 어떤 동태적 변화를 보이지를 확인 할 수 있다. 그림 3.9.2는 시스템 다이내믹스를 이용한 모델링 과정의 흐름도이다.

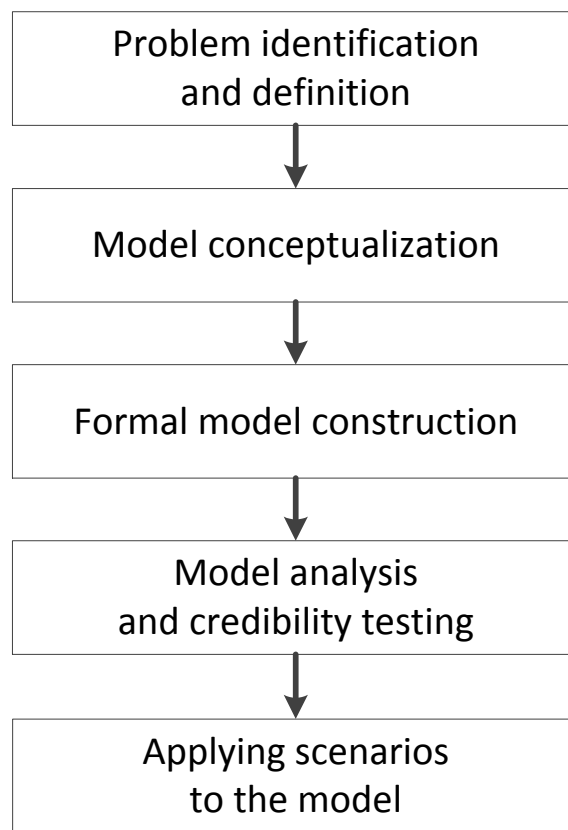


그림 3.9.2 시스템 다이내믹스 모델링 흐름도

본 연구에서는 시스템 다이내믹스 모형을 분석하기 위해 Vensim PLE (Eberlein, 2007)를 이용하였다. Vensim은 VENTANA사에서 개발한 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 프로그램으로서 시스템 다이내믹스의 그래픽 기능이 강화된 소프트웨어이다. 이러한 소프트웨어는 컴퓨터를 응용하여 복잡한 사회현상이 어떻게 행동하는지를 분석하고 예측하는 기술로서 가상현실에서 실제 현상과 같은 실험을 행함으로써 과학적 의사결정을 할 수 있도록 지원하는 프로그램이다 (이중훈 등, 2007).

3. 하수처리수 재이용 시나리오

하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위한 재이용시스템의 비용에 큰 영향을 주는 것은 재처리용량과 수처리시스템의 처리수준이다. 재이용시스템의 처리용량은 관개면적에 따른 필요수량에 의해 결정되며, 재이용시스템이 적용되는 지역에 따라 하수처리장 방류수 수질기준이 다르기 때문에 관개면적과 처리수준, 두 가지 요인에 대해서 시나리오를 구축하였다.

3.1. 관개면적

하수처리장 방류수의 재처리시스템의 처리용량은 관개논에서의 재이용량과 같다. 재이용량은 재처리수를 관개하는 관개면적에 의해서 계산될 수 있으며, 본 연구에서는 수혜면적 10 ha, 20 ha, 30 ha, 40 ha, 그리고 50 ha를 기준으로 재처리용량을 산정하여 표 3.9.1과 같이 시나리오를 구성하였다.

표 3.9.1 하수처리수 재이용시스템의 관개면적 시나리오

시나리오	관개면적 (ha)	재이용량 ($10^2 \text{ m}^3/\text{year}$)	처리용량 (m^3/day)
I1	10	727	1,728
I2	20	1,454	3,456
I3	30	2,181	5,184
I4	40	2,908	6,912
I5	50	3,635	8,640

시나리오에 따른 재이용량은 연평균 관개량을 727 mm (임상준 등, 2000)로 가정하여 결정하였으며, 시스템의 처리용량은 단위용수량을 $0.002 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{ha}$ 로 가정하여 결정하였다.

3.2. 처리수준

재이용량과 함께 하수처리장 방류수의 수질은 재이용시스템의 비용에 주요한 영향을 미친다. 본 연구를 위해 구축한 시나리오에서의 처리수준은 표 3.9.2에서와 같이 1일 하수처리용량 500 m^3 이상의 공공하수처리시설의 방류수 수질기준을 말한다. 하수처리장 방류수 수질기준 중 수질오염총량 관리 대상물질인 BOD와 T-P 항목을 재이용시스템의 경제성 평가에 사용하였는데, 이는 BOD 항목은 처리수준에 따라 농업용수 수질기준 및 재이용 수질기준 8 mg/L 를 만족하지 못하여 추가적인 처리비용을 발생시키며, T-P 항목의 경우 하수처리수를 농업용수로 재이용함으로써 수체로의 T-P부하량을 줄여주는 편익을 발생시키기 때문이다. 또한, 하수처리장 방류수의 수질은 방류

수 수질기준과 같은 것으로 가정하였다.

표 3.9.2 하수처리수 재이용시스템의 처리수준 시나리오

시나리오	지역	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)
T1	I	≤ 5	≤ 0.2
T2	II	≤ 5	≤ 0.3
T3	III	≤ 10	≤ 0.5
T4	IV	≤ 10	≤ 2.0

4. 민감도 분석

민감도 분석이란 임의의 입력변수의 변화에 따른 결과의 변화량과의 관계를 말하는 것으로 본 연구에서는 민감도 지수 (sensitivity index, SI)를 사용하여 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 지수를 이용한 민감도 분석방법은 예측모형의 입력변수들을 동일한 비율로 변화를 주어 민감도 지수를 산정하고, 이를 서로 비교함으로써 입력변수의 결과치에의 영향정도를 평가하고자 할때 사용한다 (Hoffman and Gardner, 1983).

구축한 경제성 평가 모형의 입력변수에 대한 민감도 분석은 각 입력변수를 일정 비율 ($\pm 50\%$)로 변화시켜 모의된 결과치를 바탕으로 다음 식 (3.9.1)을 이용하여 나타낼 수 있다 (홍원석, 1993).

$$SI = \frac{D_{+50\%} - D_{-50\%}}{D_{std}} \quad (3.9.1)$$

여기서, $D_{+50\%}$ 와 $D_{-50\%}$, 그리고 D_{std} 는 각각 입력변수의 기준치에 대한 50% 증감에 따른 결과치와 입력변수의 기준치에 따른 결과치를 의미한다.

5. 시스템 다이내믹스 모델링

5.1. 인과지도

인과지도 모델링은 시스템의 동태적 변화의 원인이 되는 피드백 루프의 존재를 나타낼 수 있으며, 모형의 전체적인 인과순환 구조를 파악할 수 있게 해주기 때문에 (정석환과 주영중, 2005) 시스템 다이내믹스를 통한 문제해결에 있어서 가장 중요한 과정이다. 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 경제적인 수처리시스템의 비용을 산정하고, 재이용 시스템 전반의 동태성을 분석하고자 그림 3.9.3과 같이 인과지도를 구축하였다.

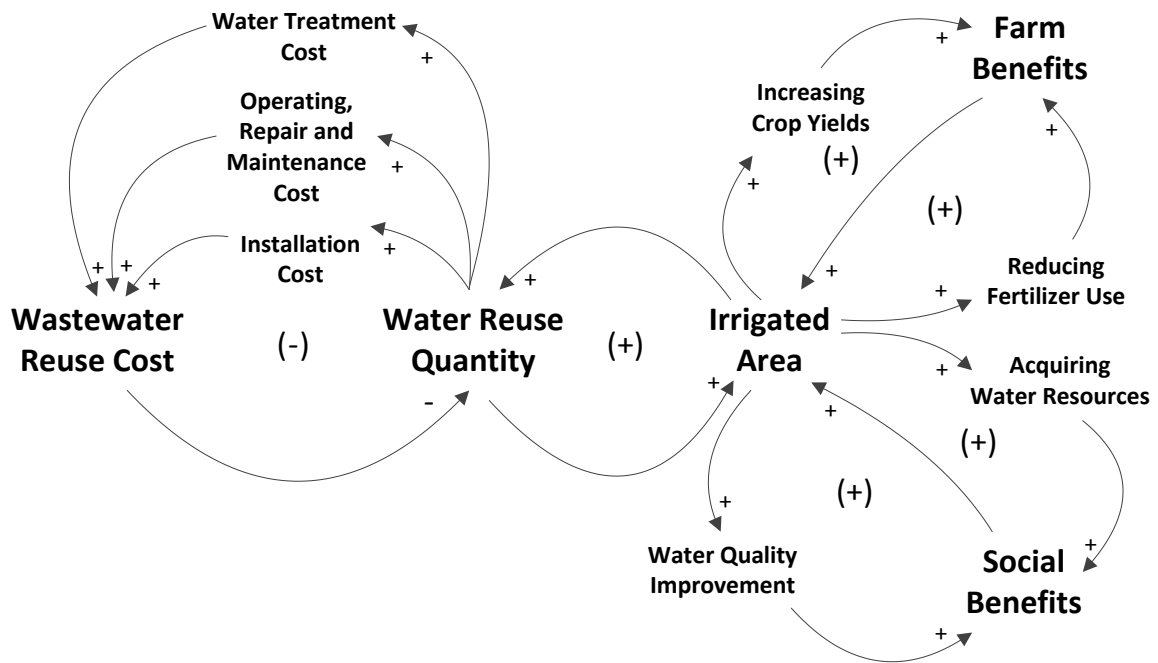


그림 3.9.3 하수재이용시스템 인과지도

본 연구에서 구축한 인과지도는 앞서 살펴 본 바와 같이 크게 재이용시스템의 비용과 재이용량으로 구성되는 음의 피드백 루프와 관개면적과 재이용량으로 구성되는 양의 피드백 루프가 두 축을 이룬다. 재이용시스템 비용은 설치 (Installation) 및 유지관리 (Operation, Repair and Maintenance), 그리고 수처리 (Water Treatment) 비용으로 나눌 수 있으며, 이들은 재이용량이 많아질수록 증가하며, 재이용시스템의 비용을 증가시키는 순환적 피드백 구조를 가지는 동태적 상호작용으로 설명될 수 있다. 또한, 관개면적은 농가편익 (Farm Benefits) 및 사회적 편익 (Social Benefits)과 각각 양의 피드백 루프를 형성하며, 농가편익과 사회적 편익이 증가할수록 관개면적이 늘어나고, 이는 재이용량을 증가시키는 결과를 가져온다. 관개면적의 증가는 수확량증가 (Increasing Crop Yields)와 시비량저감효과 (Reducing Fertilizer Use)를 통해 농가편익에 기여함과 동시에, 수자원확보 (Acquiring Water Resources)와 수질개선효과 (Water Quality Improvement)를 통해 사회적 편익을 증가시키며 이들은 모두 관개면적을 증가시키는 양의 피드백 루프를 형성하게 된다 (박승우, 2007; 2011).

이렇게 작성된 인과지도는 수처리시스템의 합리적인 비용산정을 가능하게 하며, 시스템 구성요소의 변화에 따른 재이용시스템 비용에의 영향을 동태적으로 파악할 수 있는 프레임を提供한다.

5.2. 저장-유량 지도

인과지도는 저장 (stock)과 유량 (flow)의 변수를 가지는 저장-유량 지도 (stock-flow diagram)로 나타낼 수 있다. 피드백 체계의 관점에서 문제를 인식하는 사

고방식은 컴퓨터의 도움을 받을 때 더욱 정확하게 현상을 파악할 수 있다. 인간의 두뇌능력으로는 한두 가지의 피드백 인과관계를 이해하거나 시스템의 전개양상을 추론할 수 있지만, 3가지 이상의 피드백 인과관계가 형성되어 있는 시스템에 대해서는 그 동태적 변화를 추론하기란 거의 불가능하다. 따라서 작성된 인과지도를 컴퓨터 상에서 모의할 수 있도록 구체화된 시뮬레이션 모형으로 전환시켜야 하는데 이를 저장-유량 지도라고 부른다 (정영호, 2012). 저장변수는 시스템 안에서 축적되는 변수로 특정 시점에서 시스템의 상태를 나타내며, 유량변수는 시스템 안을 흘러 다니는 변수로 시스템의 활동을 반영한다 (Vlachos 등, 2007). 본 시스템에서는 순이익 (Net Benefit), 농가편익, 사회적 편익, 수처리비용, 그리고 유지관리비용 등이 저장변수이며, 수자원 확보 효과, 증수효과, 시비량저감효과, 하천수질개선효과 등이 유량변수가 된다. 또한, 저장과 유량변수 외에도 저장과 유량의 활동이나 상태에 대한 지표로서 저장과 유량의 계산을 쉽게하기 위한 보조변수 (auxiliary variable)가 있으며, 본 연구에서는 수자원개발비용단가 (Water Resources Development Cost), 연평균 수확량 (Average Rice Yields), 구매가격 (Purchasing Price), 비료가격 (Fertilizer Price), 증수율 (Increasing Rate), 관개수 회기율 (Return Flow Rate) 등이 사용되었다. 다음 그림 3.9.4는 Vensim을 이용하여 재이용시스템의 비용을 산정하기 위해 모형화한 저장-유량 지도이다.

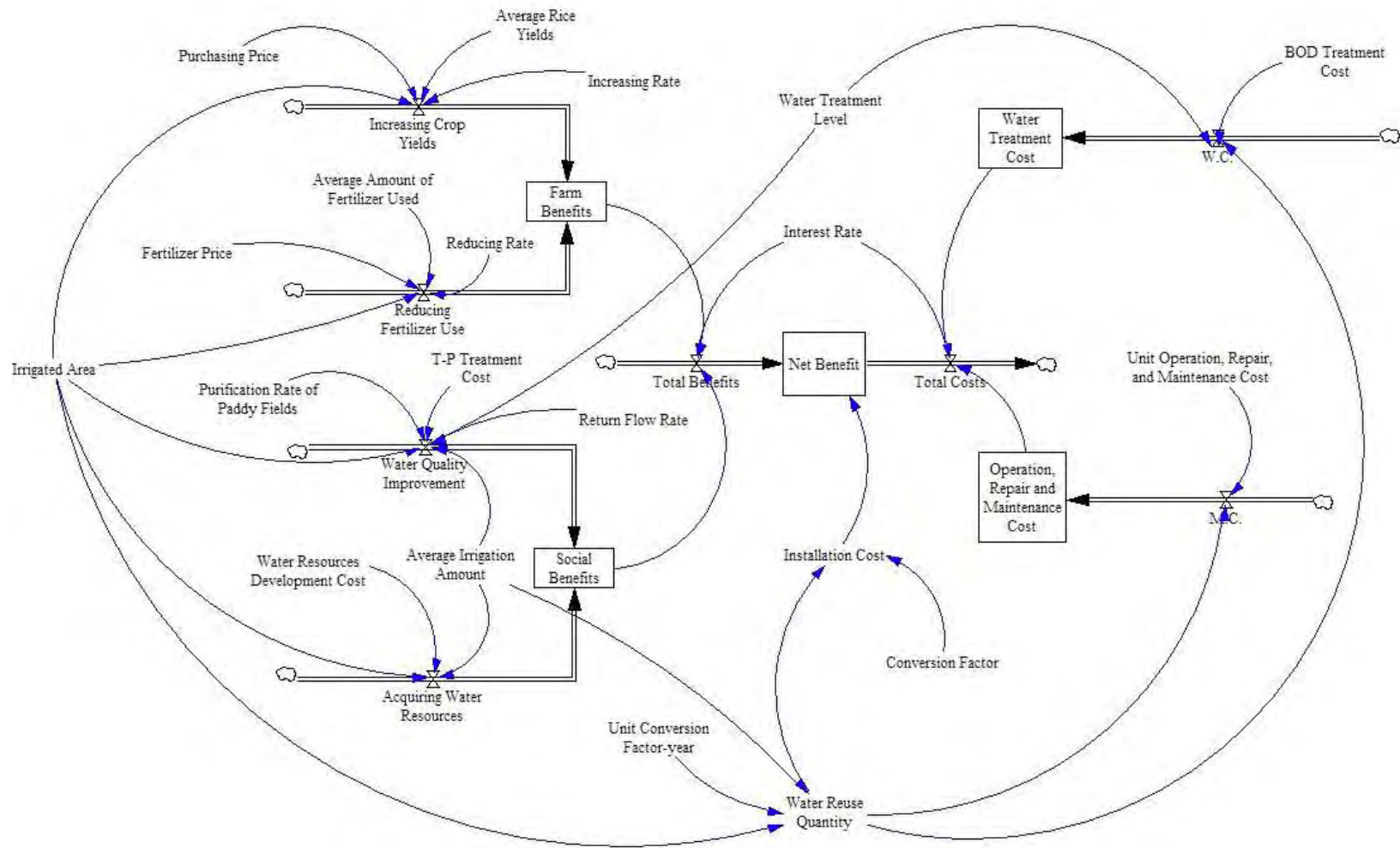


그림 3.9.4 하수재이용시스템 저장-유량 지도

6. 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형

6.1. 기본가정

농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구축하기 위해 경제성 분석의 기초 요소인 할인율, 내용연수, 그리고 유지관리비용에 관하여 다음과 같이 가정하였다. 수자원사업에 대한 경제성분석은 분석기간 동안 편익과 비용을 산정하여 합산하여야 하나 각기 다른 기간마다 다른 크기로 발생하는 비용과 편익을 명목가치 그대로 비교하기 어려우므로 이것을 모두 현재가치로 바꾸어 주어야 한다 (김길호 등, 2007). 따라서 돈의 시간적 가치를 반영하여 미래가를 현재가치로 환산하는 할인율 (interest rate)은 ‘예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구’ (한국개발연구원, 2008)의 5.5%를 적용하였다. 하수처리장의 건설 및 유지관리 비용을 산정하기 위해서는 시설물이 효과를 발휘할 수 있는 기간을 결정하여야 하며, 일반적으로 경제성 분석에서는 시설물의 경제적 측면이 중요하므로 투자시설물의 내용연수 (lifetime)를 기준으로 사업분석 기간을 결정해야 한다. 하수처리장의 내용연수는 하수처리장의 운영 및 기술의 한계로 일반적으로 20년으로 산정한다 (조은희, 2012). 또한, 하수처리장의 유지관리비는 내용연수 동안 매년 반복적으로 발생하는 인건비, 전력비, 약품비, 슬러지처리비, 개보수비 등과 비반복적으로 발생하는 개보수비에 따른 비용 등으로 구성되며, 농업용수재이용시스템과 같은 공사기간이 짧은 공사계획의 경우에는 완공 후부터 발생하는 것으로 가정하였다.

6.2. 모형변수

Vensim을 이용하여 시스템 다이내믹스를 통한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구현하기 위해서는 각 변수들과 모형변수들의 상관관계를 합리적인 수식과 값을 사용하여 수식화하여야 한다. 본 연구에서 구축한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형의 기본 모형은 다음 그림과 같다.

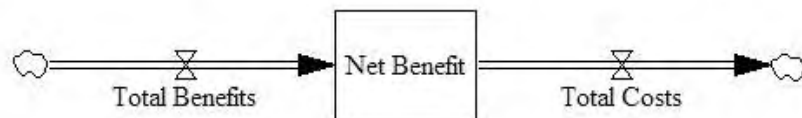


그림 3.9.5 농업용수 재이용시스템 경제성 평가 모형의 기본구조

이 기본 모형에 대한 수식을 나타내면 다음 식 (3.9.2)와 같다. 즉, 시간에 따른 순편익의 변화는 총편익과 총비용의 차이로 표현할 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = B - C \quad (3.9.2)$$

여기서, N 은 순편익 (Net Benefit), B 는 총편익 (Total Benefits), C 는 총비용 (Total Costs), 그리고 t 는 시간을 의미한다. 차분형식의 위 식은 다음의 적분형태로 Vensim에 적용할 수 있으며, N_0 는 순편익의 초기값을 나타낸다.

$$N(t) = N_0 + \int_0^t (B - C)dt \quad (3.9.3)$$

총편익은 농가편익 (Farm benefits)과 사회적 편익 (Social benefits)의 합으로 나타낼 수 있다. 하수처리수를 농업용수로 재이용하게 되면 농가는 증수효과 (Increasing Crop Yields)와 시비량저감효과 (Reducing Fertilizer Use)를 얻을 수 있다. 증수효과는 하수에 다량으로 포함되어 있는 영양물질에 기인한 바가 크기 때문에 시비량저감효과와 중복되는 경향이 있다. 따라서 농가편익 산정 시, 수확량증가에 따른 편익과 시비량저감에 따른 편익 중 더 큰 값을 농가편익으로 산정하였다. 사회적 편익은 수질개선효과 (Water Quality Improvement)와 수자원확보효과 (Acquiring Water Resources)로 구성하였다. 수질개선효과는 논에서의 수질개선효과를 정량화한 것으로, 하수처리수를 농업용수로 재이용함에 따라 논 포장에서 하수가 다시 처리되어 하천으로의 오염부하가 줄어드는 것을 수익화한 것이다. 수질오염총량관리를 위해 환경부에서 제시한 총인에 대한 단위처리비용을 기준으로 논에서의 총인삭감량을 편익으로 산정하였다. 수자원확보효과의 경우, 수자원을 개발하거나 활용함에 있어 그 기능을 다른 기술적 방식으로 대체할 때 소요되는 비용을 대상 수자원의 가치로 평가하는 대체비용법 (replacement cost approach) (여규동 등, 2009)을 이용하여 하수재이용시 확보할 수 있는 수자원량을 편익으로 산정하였다. 이를 위해 다목적댐 용수개발단가에 대한 문헌조사를 실시하였고, 1 m³당 300원의 용수단가를 적용하였다.

총비용은 유지관리비용과 설치비용, 그리고 추가적인 수처리비용의 합으로 나타낼 수 있다. 최종수와 김형복 (2003) 그리고 조은희 (2012)는 하수통계연보등의 자료를 바탕으로 시설처리용량과 설치비용 및 유지관리비용과의 관계를 수식화한 바있다. 하지만, 농업용수 재이용시스템의 경우, 기존의 하수처리장에 추가적인 시설을 설치하거나 소규모의 단순한 수처리시스템을 가진 독립된 처리장으로 운영할 수 있기 때문에 기존의 연구에 의한 하수처리장 설치비용과 유지관리비용을 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 실제로 농업용수 재이용시스템이 설치된 제주 판포와 월정하수처리장의 경우 기존의 하수처리장보다 저렴한 수준의 설치비용과 유지관리비용이 소요되는 것으로 나타났다 (박승우, 2011). 본 연구에서는 아직까지 농업용수 재이용시스템이 설치된 하수처리장이 매우 적기 때문에 총편익을 먼저 산정하여 이에 따른 한계비용 (marginal cost)을 도출하였다. 또한, 추가적인 수처리비용은 처리수준에 따라 농업용수 수질기준에 부합하지 않는 경우, BOD에 대해 추가적으로 수처리를 하는 것으로 가정하고, BOD 1 kg당 3,952 원의 처리비용을 고려하였다 (환경부, 2012). 본 연구를 위해 구축

한 경제성 평가모형에 사용한 모형변수에 대한 설명은 표 3.9.3과 같다.

6.3. 모형검정

모형을 적용하기에 앞서 구축된 모형의 적용성을 평가해야 한다. 시스템 다이내믹스 모델링의 경우 구축된 모형을 변수조작을 통해서 실측자료와 비교를 통해 모형을 검정하거나 실측자료가 없는 경우에는 목표변수의 변화양상을 통해 모형을 검정할 수 있다 (Stave, 2003). 본 연구에서는 실측자료가 존재하지 않기 때문에 입력변수의 변화에 따른 순편익의 예상 거동을 통해서 모형의 적용성을 검정할 수 있다. 다음 그림 3.9.6은 시간에 따른 순편익의 변화양상을 보여주고 있다. 초기 설치비용으로 인해 초기에는 음의 순편익을 보이지만 시간이 지남에 따라 농가편익과 사회적 편익의 영향으로 순편익이 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 시스템 다이내믹스 모델링 목표변수의 일반적 거동 중 하나로 (Ford, 2009), 할인율을 고려하여 구축한 모형의 목표변수가 기대하는 변화양상을 잘 나타냄을 의미한다.

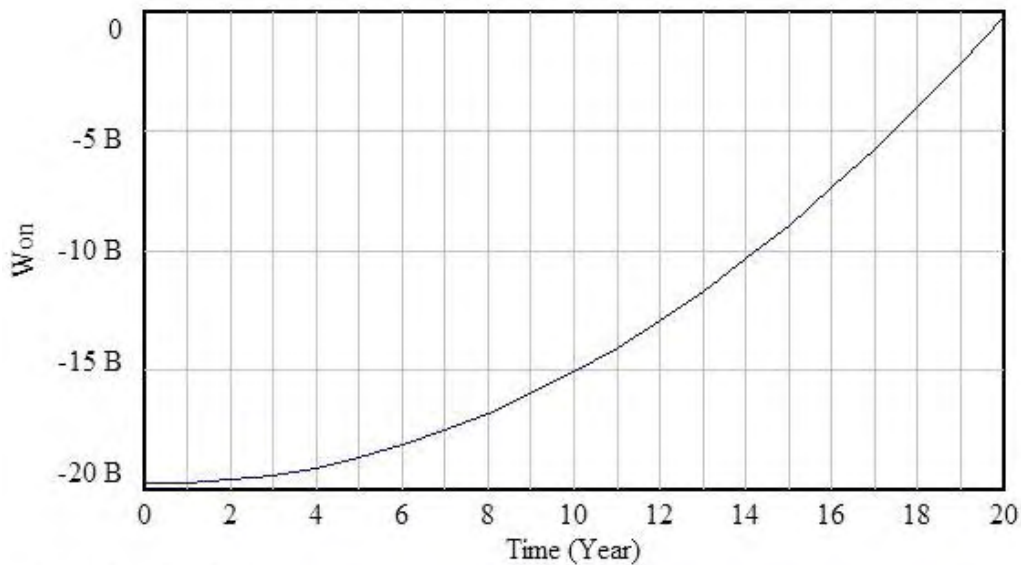


그림 3.9.6 순편익에 대한 모형의 모의 결과

표 3.9.3 모형 변수 및 모형화 방법

변수		변수설명	모형화 방법	단위	참고문헌
Stock variables	Net Benefit	하수재이용시스템 사용에 따른 순편익	$[Total\ Benefits] - [Total\ Costs]$	원	
	Farm Benefits	하수재이용시스템 사용에 따른 농가편익	$MAX([Increasing\ Crop\ Yields], [Reducing\ Fertilizer\ Use])$	원	Park (2011)
	Social Benefits	하수재이용시스템 사용에 따른 사회적 편익	$[Acquiring\ Water\ Resources] + [Water\ Quality\ Improvement]$	원	Park (2011)
	Water Treatment Cost	BOD 농업용수 수질기준을 만족하기 위한 추가적인 수처리에서 발생하는 비용	$[BOD\ Treatment\ Cost] \times [Water\ Treatment\ Level] \times [Water\ Reuse\ Quantity]$	원	ME (2012)
	Operation, Repair and Maintenance Cost	하수재이용시스템의 유지관리 비용	$[Unit\ Operation,\ Repair\ and\ Maintenance\ Cost] \times [Water\ Reuse\ Quantity]$	원	ME (2012) Park (2011)
Flow variables	Increasing Crop Yields	하수재이용시스템 사용에 따른 수확량증가로 인한 편익	$[Purchasing\ Price] \times [Average\ Rice\ Yields] \times [Increasing\ Rate] \times [Irrigated\ Area]$	원/년	Park (2011)
	Reducing Fertilizer Use	하수재이용시스템 사용에 따른 시비량저감으로 인한 편익	$[Fertilizer\ Price] \times [Average\ Amount\ of\ Fertilizer\ Used] \times [Reducing\ Rate] \times [Irrigated\ Area]$	원/년	Park (2011)
	Water Quality Improvement	하수재이용시스템 사용에 따른 수질개선효과로 인한 편익	$[Purification\ Rate\ of\ Paddy\ Fields] \times [T-P\ Treatment\ Cost] \times [Return\ Flow\ Rate] \times [Irrigated\ Area] \times [Average\ Irrigated\ Amount] \times [Water\ Treatment\ Level]$	원/년	Park (2011) MLTM (2011) ME (2012)
	Acquiring Water Resources	하수재이용시스템 사용에 따른 수자원확보로 인한 편익	$[Water\ Resources\ Development\ Cost] \times [Average\ Irrigated\ Amount] \times [Irrigated\ Area]$	원/년	Park (2011)

표 3.9.3 모형 변수 및 모형화 방법 (계속)

변수	변수설명	모형화 방법	단위	참고문헌	
Auxiliary variables	Irrigated Area	재처리수를 관개하는 관개논의 면적	Scenarios	ha	
	Water Treatment Level	하수처리장 방류수의 방류수질기준	Scenarios	무차원	
	Water Reuse Quantity	하수처리수의 농업용수 재이용량	[Irrigated Area] × [Average Irrigated Amount]	ton	
	Purchasing Price	논벼 정부 구매가격	1,300	원/kg	KOSIS (2012)
	Average Rice Yields	논벼 생산량	6,500	kg/ha	KOSIS (2012)
	Increasing Rate	하수재이용시스템 사용에 따른 수확량 증가율	0.18	무차원	Park (2011)
	Fertilizer Price	비료 가격	750	원/kg	
	Average Amount of Fertilizer Used	논에서의 평균비료 사용량	110	kg/ha	Jang (2009)
	Reducing Rate	하수재이용시스템 사용에 따른 시비량 저감율	0.5	무차원	Jeong 등 (2011)
	Purification Rate of Paddy Fields	논에서의 정화율	0.7	무차원	Park (2011)
	T-P Treatment Cost	T-P 농업용수 수질기준을 만족하기 위한 추가적인 처리비용	41,161	won/ton	ME (2012)
	Return Flow Rate	관개수 회귀율	0.35	무차원	MLTM (2011)
	Average Irrigation Amount	평균 관개량	7,270	톤/ha·년	Im 등 (2000)
	Water Resources Development Cost	대체비용법에 따른 수자원개발비용	300	원/톤	
	BOD Treatment Cost	BOD 농업용수 수질기준을 만족하기 위한 추가적인 처리비용	3,952	원/톤	ME (2012)
	Unit Operation, Repair and Maintenance Cost	하수재이용시스템 사용에 따른 단위 유지관리비용	80	원/톤	
	Interest Rate	하수재이용시스템 내용연수 동안의 할인율	0.055	무차원	KDI (2008)
Unit Conversion Factor-year	단위변환 계수	1	년		

6.4. 민감도 분석

재처리시스템의 경제성에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고자 서로 독립적인 관계를 가지는 입력변수인, 구매가격, 수확량, T-P 처리비용, 수자원개발비용단가, BOD 처리비용, 유지관리비용, 그리고 설치비용 등에 대하여 식 (3.9.1)을 사용하여 민감도 지수를 산정하였다. 구매가격과 평균조곡생산량 입력변수의 기준치는 통계청에서 제공하는 자료를 바탕으로 지난 20년간 (1991~2010)의 평균값인 1300 원/kg, 6500 kg/ha를 각각 기준 구매가격과 기준 평균조곡생산량으로 사용하였다. 수자원개발비용단가는 최근에 건설된 댐의 개발비용 300 원/ton을 기준단가로 사용하였으며, T-P와 BOD의 기준 처리단가는 2011년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과에서 제시하는 처리비용인 41,161 원/ton, 3,952 원/ton을 각각 사용하였다. 유지관리비용은 판포하수처리장에 설치된 재이용시스템의 유지관리비용인 80 원/ton을 기준 유지관리비용단가로 사용하였으며 설치비용은 최대설치비용이 순편익을 0으로 만드는 값을 사용함으로써 간접적으로 시스템 전체의 순편익에 대한 민감도를 고려할 수 있게 하였다. 민감도 분석 시, 편익부분은 총편익에 대하여, 비용부분은 총비용에 대하여 각각 민감도를 분석하였다. I4와 T5 시나리오를 기준으로 한 민감도 분석결과는 다음 표 3.9.4와 같다.

표 3.9.4 시나리오 I4와 T5에 기초한 민감도 분석 결과

매개변수		단위	기준값	민감도지수
편익	구매가격	원/kg	1,300	0.400
	평균 벼 생산량	kg/ha	6,500	0.300
	T-P 처리비용	원/ton	41,161	0.027
	수자원 개발 비용	원/ton	300	0.573
비용	BOD 처리비용	원/ton	3,952	0.015
	유지관리비용	원/ton	80	0.153
	설치비용	백만원	1,990	0.832

민감도 분석결과, 하수처리수를 농업용수로 재이용함에 있어서 재이용 시스템의 총편익에는 수자원개발비용단가가 가장 큰 영향을 미치며, 반면 T-P 처리비용은 다른 변수에 비해 상대적으로 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 총비용에 대해서는 재이용시스템 설치비용이 BOD 처리비용 및 유지관리비용에 비해 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

6.5. 시나리오 적용 결과

할인율 5.5%와 내용연수 20년을 고려하여 시나리오에 따른 농가편익과 사회적 편익 등을 산정한 결과 및 이에 따른 한계비용은 다음 표 3.9.5와 같다.

표 3.9.5 농업용수 재이용시스템 한계비용 평가 결과 (백만원)

시나리오	농가편익			사회적 편익			한계비용
	증수효과	시비량 저감효과	소계	수질 개선효과	수자원 확보효과	소계	
T1과 I1	192	5	192	1	275	276	468
T1과 I2	384	10	384	3	550	553	937
T1과 I3	576	16	576	4	825	829	1,405
T1과 I4	768	21	768	5	1,100	1,105	1,873
T1과 I5	960	26	960	6	1,375	1,381	2,341
T2와 I1	192	5	192	2	275	277	469
T2와 I2	384	10	384	4	550	554	938
T2와 I3	576	16	576	6	825	831	1,407
T2와 I4	768	21	768	8	1,100	1,108	1,876
T2와 I5	960	26	960	10	1,375	1,385	2,345
T3와 I1	192	5	192	3	275	278	470
T3와 I2	384	10	384	6	550	556	940
T3와 I3	576	16	576	10	825	835	1,411
T3와 I4	768	21	768	13	1,100	1,113	1,881
T3와 I5	960	26	960	16	1,375	1,391	2,351
T4와 I1	192	5	192	13	275	288	480
T4와 I2	384	10	384	26	550	576	960
T4와 I3	576	16	576	39	825	864	1,440
T4와 I4	768	21	768	52	1,100	1,152	1,920
T4와 I5	960	26	960	65	1,375	1,440	2,400

농가편익의 경우 증수효과가 항상 시비량저감효과보다 크며 관계면적에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 사회적 편익에서는 수자원확보효과가 수질개선효과보다 큰 효과를 나타냈으며, 총편익에서는 농가편익보다 사회적 편익이 더 큰 비중을 차지

하는 것으로 나타났다. 총편익에 따른 한계비용은 처리수준보다 관개면적에 더 큰 영향을 받으며, 관개면적이 커질수록 한계비용이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

민감도 분석결과 재이용시스템에 가장 큰 영향을 미치는 설치비용에 대해 관개면적 시나리오별 최대설치비용을 산정하면 다음 표 3.9.6과 같다. 설치비용을 제외한 나머지 변수들은 민감도 분석의 기준치를 사용하였다.

표 3.9.6 농업용수 재이용시스템 최대 가능 설치비용 (백만원)

시나리오	최대 가능 설치비용 (A)	설치비용 (B) (Cho, 2012)	B에 대한 A의 비율
I1	399	4,953	0.09
I2	799	7,404	0.11
I3	1,198	9,790	0.12
I4	1,597	11,936	0.13
I5	1,996	13,920	0.14

하수처리수의 농업용수 재이용시스템의 최대 설치비용은 시나리오에 따라 약 4 억원에서 20억원의 범위를 나타내며, 수혜면적이 10 ha 증가할수록 4억원 정도의 추가적인 설치비용이 발생하는 것으로 분석되었다. 조은희 (2012)에 의해서 산출된 바 있는 처리용량과 설치비용의 관계식으로부터 산정되는 일반 공공하수처리장의 설치비용과 비교해 보면, 농업용수 재이용시스템의 설치비용이 일반 공공하수처리장 설치비용의 10분의 1수준인 것으로 나타났다.

7. 요약 및 결론

본 절에서는 논용수량을 대상으로 사회적, 경제적, 환경적 측면과 관련한 복잡성을 내포하고 있는 하수처리수의 농업용수 재이용시스템의 경제성을 분석하기 위해 시스템 다이내믹스 기법을 이용하였다. 농업용수 재이용시스템의 경제성을 분석하고자 관개면적과 처리수준에 따른 다양한 시나리오를 구축하고 Vensim을 이용하여 경제성 평가모형을 구성하였다. 본 절의 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 시스템 다이내믹스를 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용시스템을 평가하기 위한 인과지도를 구축하고, 이를 바탕으로 Vensim을 이용하여 저장-유량 지도를 작성하였다.

② 시스템 다이내믹스 모델링을 통해 모형변수를 정의하고, 모형변수 간의 상관관계를 수식화함으로써 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구축하였다. 또한 경제성 평가모형의 민감도를 분석하기 위하여 민감도 지수를 산정하여 민감도를 분석하였

다. 분석결과, 총편익에 대해서는 수자원개발비용단가가, 총비용에 대해서는 설치비용이 가장 큰 민감도를 가지는 것으로 나타났다.

③ 구축한 모형을 바탕으로 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우 발생하는 농가편익과 사회적 편익을 산정하였고, 그에 따른 한계비용을 도출하였다. 농가편익의 경우 증수효과가 시비량저감효과보다 크며 관계면적에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 사회적 편익에서는 수자원확보효과가 수질개선효과보다 큰 효과를 나타냈으며, 총편익에서는 농가편익보다 사회적 편익이 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 총편익에 따른 한계비용은 처리수준보다 관계면적에 더 큰 영향을 받으며, 관계면적이 커질수록 한계비용이 크게 증가하는 것으로 나타났다

제10절 간접하수재이용 최적 물처리 공정기술 개발

1. 서론

도시와 농촌의 하수처리시설이 급증함에 따라 하수처리장 방류수의 농업용수 및 농촌 환경에의 영향이 크게 증가하고 있다. 특히, 하수처리수를 농업용수로 공급함에 따른 인체 및 환경에의 위해성이 보고되고 있으며, 하수처리장 방류수 및 미처리하수의 하천으로의 유입은 이수측면에서의 용수수질 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

도시 수변공간과 농촌의 농경지를 대상으로 한 하수처리장 방류수의 영향을 최소화하고, 하수처리수의 장점을 극대화하기 위해서는 농업수자원과 농경지를 대상으로 한 간접재이용시스템을 구축하여야 한다. 안전하고 경제적인 하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템을 개발하기 위해서는 물처리 효율을 담보할 수 있으며, 경제적으로 합리적인 물처리 공정기술이 선행되어야 한다.

본 절에서는 하수처리 수질 유형별 맞춤형 처리공정을 개발하기 위하여 농업지역내 농업용수 목표수질을 선정하고, 정확한 농업용수의 요구수량을 산정하였다. 또한, 간접재이용시스템의 적용을 위하여 농촌지역으로 방류되고 있는 하수처리장의 수질 등을 포함한 현황과 농업기반시설의 현황을 분석하여, 하수처리 유형별 맞춤형 처리공정을 제안하였다.

2. 농업지역내 용수수질 기준 및 수요량

2.1. 농업용수 수질기준

가. 국내 농업용수 수질기준

현재 우리나라의 농업용수 수질기준은 별도로 제정되어 있지 않고 환경정책기본법 제10조에 근거한 환경정책기본법시행령 제2조에 공공수역(하천, 호소, 지하수)별로 나누어 설정되어 있으며, 하천, 호소의 경우 생활환경항목 IV등급에, 지하수의 경우 먹는물관리법과 수도법에 근거한 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙의 지하수수질기준에서 농업용수 수질기준을 제시하고 있다.

농업용수 수질기준이 관개용수로서의 이수목적보다는 수원 관리를 목적으로 설정된 행정적인 지침 성격이 강한 기준으로 항목도 극히 일부 항목으로 구성되어 있고 다른 나라 기준과 비교하였을 때, 상대적으로 엄격하게 규정되어 있다. 현재 하천에는 11개 항목, 호소에는 총인과 총질소까지 포함하여 13개 항목, 지하수에는 14개 항목이 농업용수 기준으로 설정되어 있다.

그러나 우리나라 농업용수 수질기준은 독립적으로 제정된 것이 아니고 수질환경기준의 등급 내에 포함된 형태로 제시되어 있기 때문에 실제로 국내 농업형태에 적합한 이수목적의 수질기준으로서는 적합하지 않으며, 이로 인해 문제가 발생하고 있는 실정이다. 그리고 호소수 농업용수 기준에만 총인, 총질소 항목이 포함된 것은 이 기준이

관개목적보다는 호소수 관리를 목적으로 하기 때문이다. 현재 농가에서 유입되는 질소, 인 비료량은 호수 내 질소, 인 함량보다 극소량이므로 기준을 초과하는 용수가 공급되어도 문제가 되지 않는다. 따라서 일본은 총인을 농업용수 수질기준에 포함하지 않았다.

그리고 지하수에서는 총질소 항목 대신 질산태질소 항목을 설정하고 있는데 이것은 오염물질이 지하수로 유입되는 과정에서 직접적으로 질산태질소가 유입되거나 암모니아태 질소가 질산화과정을 거쳐 지하수를 오염시키기 때문이다. 또한 휘발성 유기화합물(VOCs)은 지표수에서 휘발되지만, 지하에서는 휘발이 억제되어 장기간 오염물질로 작용하기 때문에 농작물에 피해를 줄 수 있다. 그래서 수계로 유입 가능한 페놀, TCE, TeCE 등의 휘발성 유기화합물들은 지하수 수질 항목에서만 설정되어 있다. 호소에 대한 농업용수 수질기준에서 SS의 경우 다른 수원과 비교하였을 때, 15 mg/ℓ로 강화되어 있다.

표 3.10.1 국내 이수목적의 농업용수 수질기준

(Unit: mg/ℓ)

항목	하천	호소	지하수
pH	6.0~8.5	6.0~8.5	6.0~8.5
BOD ¹	8	-	-
COD ²	-	8	8
SS ³	100	15	-
DO ⁴	≥2	≥2	-
T-N*	-	1.0	-
T-P*	-	0.1	-
NO3-N	-	-	20
Cl	-	-	250
Cd	0.01	0.01	0.01
As	0.05	0.05	0.05
Pb	0.1	0.1	0.1
Cr+6	0.05	0.05	0.05
Hg	N.D.	N.D.	N.D.
CN	N.D.	N.D.	N.D.
유기인	N.D.	N.D.	N.D.
Phenol	-	-	0.005
ABS ⁵	0.5	0.5	-
PCB ⁶	N.D.	N.D.	N.D.
TCE ⁷	-	-	0.03
TeCE	-	-	0.01

¹BOD(biochemical oxygen demand), ²COD(chemical oxygen demand),

³SS(suspended soild), ⁴DO(dissolved oxygen),

⁵ABS(alkyl benzene sufonate), ⁶PCB(poly chlorinated biphenyls),

⁷TCE(trichloroethane)

*총인/총질소에 따라 7 이하는 총인, 16 이상은 총질소를 적용하지 않음

나. 해외 농업용수 수질기준

(1) FAO (Food and Agriculture Organization)

FAO에서는 미국서부지역의 농업자료를 근간으로 하여 관개용수에 대한 농업용수 수질 관련 지침을 제시하고 있으며, 다음과 같이 두 가지로 구분될 수 있다.

- i) 작물생육에 미치는 영향의 정도에 따른 가이드라인
- ii) 일반적으로 관개용수의 수질 악화로 유발되는 문제들에 대해 개략적으로 적용할 수 있는 가이드라인

관개용수 수질에 대한 이 두 가지 가이드라인은 범용적이며 개략적인 특성을 가지고 있어서 각 나라의 수질 및 토양 특성, 재배작물, 기후, 영농방법 및 용수관리 등 기타 요인들을 감안하여 적용하여야 한다. 또한 FAO 지침에서는 용수사용에 있어서 발생할 수 있는 문제점과 제한사항에 대해 설명하고 있으며, 용수사용 중 특정한 조건이나 사용자의 관리능력 등도 용수사용에 영향을 미친다고 하였다.

항목으로는 관개용수의 염도, 토양 침투율 및 물리성에 관련된 SAR(Sodium Adsorption Ratio), 식물의 양분 측면에서 중요한 N, P, K 등의 다량원소와 Na, Cl, B 및 미량원소들의 독성한계 등이 있으며, 작물 및 토양에 대한 영향의 정도를 등급을 구분하여 제시하고 있다.

염도가 작물의 수분 흡수에 미치는 영향을 나타낸 것이며, TDS(Total Dissolved Solids)는 물에 녹아있는 가용성 물질의 총량을 표시한 것으로 총용존고형물이라고 한다. EC_w가 0.7 dS m⁻¹ 이하, TDS가 450 mg L⁻¹ 이하에서는 작물에 영향을 주지 않는 수준임을 나타낸다.

이외에도 농업용수의 토양 침투율에 관한 지표로 보여주는 것으로서, SAR값에 따라 5가지로 분류하고 EC_w의 값을 구분하여 작물에 미치는 영향을 나타낸 것이다. SAR 값에서 물의 염농도가 증가하면 침투율도 증가하게 되므로 EC_w와 함께 고려하면 잠재적인 관개상의 문제점을 예측할 수 있다.

또한 FAO에서는 Na, Cl, B 등 특수독성이온이 지표관개와 스프링클러 등의 관개방법별로 작물에 미치는 영향을 제시하였다. 특수 독성이온은 예민한 작물에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

작물의 생육을 고려한 관개용수내 중금속 및 미량원소 최고 권고치를 나타내고 있다. 또한 수질내 pH 및 NO₃-N이 작물에 미치는 영향을 나타내고 있다.

표 3.10.2 관개용수 수질 가이드라인

Potential irrigation problem		Unit	Effects on crops		
			None	Slight ~ moderate	Severe
Salinity ¹⁾	EC _w or	dS/m	<0.7	0.7 - 3.0	>3.0
	TDS	mg/L	<450	450 - 2000	>2000
Infiltration ²⁾	SAR = 0-3	EC _w =	>0.7	0.7 - 0.2	<0.2
	= 3-6		>1.2	1.2 - 0.3	<0.3
	= 6-12		>1.9	1.9 - 0.5	<0.5
	= 12-20		>2.9	2.9 - 1.3	<1.3
	= 20-40		>5.0	5.0 - 2.0	<2.9
Specific ion toxicity					
Sodium(Na) ³⁾					
Surface irrigation		SAR	<3 (69)	3 - 9 (69 - 207)	>9 (207)
Sprinkler irrigation		me/L (mg/L)	<3 (69)	>3 (69)	
Chloride(Cl) ³⁾					
Surface irrigation		me/L (mg/L)	<4 (142)	4 - 10 (142 - 355)	>10 (355)
Sprinkler irrigation		me/L (mg/L)	<3 (10 ⁶)	>3 (10 ⁶)	
Boron(B)					
		mg/L	<0.7	0.7 - 3.0	>3.0
Miscellaneous effects					
Nitrogen(NO ₃ -N) ⁴⁾					
		me/L	<5	5 - 30	>30
Bicarbonate(HCO ₃) (overhead sprinkler only)					
		me/L	<1.5	1.5 - 8.5	>8.5
pH		Normal Range 6.5 - 8.4			

Note) ¹⁾ EC_w means electrical conductivity, a measure of the water salinity, reported in deciSiemens per meter at 25°C (dS/m) or in units milimhos per centimetre (mmho/cm). Both are equivalent. TDS means total dissolved solids, reported in milligrams per liter (mg/L).

²⁾ SAR means sodium adsorption ratio. SAR is sometimes reported by the symbol RNa. At a given SAR, infiltration rate increased as water salinity increases. Evaluate the potential infiltration problem by SAR as modified by EC_w.

³⁾ For surface irrigation, most tree crops and woody plants are sensitive to sodium and chloride; use the values shown. Most annual crops are not sensitive. For chloride tolerance of selected fruit crops. With overhead sprinkler and low humidity (<30%), sodium and chloride may be absorbed through the leaves of sensitive crops.

⁴⁾ NO₃-N means nitrate nitrogen reported in terms of elemental nitrogen (NH₄-N and Organic-N should be included when wastewater is being tested).

표 3.10.3 관개 용수내 중금속 및 미량원소에 대한 최고권고치(RMC)

(Unit: mg/ℓ)

Element	RMC	Element	RMC
Al	5.0	Mn	0.20
As	0.10	Mo	0.01
Be	0.10	Ni	0.20
Cd	0.01	Pd	5.0
Co	0.05	Se	0.02
Cr	0.10	Sn	-
Cu	0.20	Ti	-
F	1.0	W	-
Fe	5.0	V	0.10
Li	2.5	Zn	2.0

표 3.10.4 관개용수 수질문제를 평가하기 위한 일반적인 적용기준

Item	ECw	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Unit	dS/m	(mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)	me/ℓ (mg/ℓ)
Range	0-3	0-2,000	0-20 (0-400)	0-5 (0-60)	0-40 (0-920)	0-0.1 (0-30)	0-10 (0-610)	0-30 (0-1055)	0-20 (0-960)
Item	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ -P	K ⁺	B	pH	SAR		
Unit	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	-	-		
Range	0-10	0-5	0-2	0-2	0-2	6.5-8.5	0-15		

(2) 일본 농업용수 수질기준

일본은 OECD 국가 중에서 쌀 생산량이 가장 많은 국가로서 수자원의 약 71% 정도를 농업용수로 사용하고 있다. 일본의 농업용수 수질기준은 이원화된 체제로 공공수역에 대한 수질관리 목표인 수질환경기준과 수도작을 대상으로 하는 관개용수 수질기준으로 분리되어 있다.

표 3.10.5 일본의 농업용수 수질기준

(Unit: mg/ℓ)

항목	하천	호소
pH	6.0~7.5	6.0~8.5
BOD	8	8
SS	100	15
DO	≥5	≥5

Cd: 0.01mg/ℓ, As: 0.01mg/ℓ, CN: N.D., T-Hg: 0.0005mg/ℓ, Alkyl mercury: N.D., Pb: 0.01mg/ℓ, Cr6+: 0.05mg/ℓ, PCB: N.D., Dichloromethane: 0.02mg/ℓ, Carbon tetrachloride: 0.002mg/ℓ,

1,2-Dichloroethane: 0.004mg/ℓ, 1,1-Dichloroethylene: 0.02mg/ℓ,

cis-1,2-Dichloroethylene: 0.004mg/ℓ, 1,1,1-Trichloroethane: 1mg/ℓ,

1,1,2-Trichloroethane: 0.006mg/ℓ, TCE: 0.03mg/ℓ, TeCE: 0.01mg/ℓ,

1,3-Trichloropropane: 0.002mg/ℓ, Thiran: 0.006mg/ℓ, Simazine: 0.003mg/ℓ,

Thibencarb: 0.02mg/ℓ, Benzene: 0.01mg/ℓ, Se: 0.01mg/ℓ

일본의 수질환경기준은 우리나라와 유사하며, 하천과 호소에 대하여 생활환경 보전에 대한 항목과 사람의 건강보호에 관한 항목으로 구분되어 있다. 하천은 이용목적에 따라서 6개 등급(AA, A, B, C, D, E)으로 구분되어 있으며, 호소수(저수량 천만톤 이상의 인공저수지 포함)의 경우도 이용목적에 따라서 4개 등급(AA, A, B, C)으로 구분되어 있다. 일본의 수질환경기준 항목은 pH, BOD, SS, DO, Coliform 등 생활환경 항목 5개와 사람의 건강보호 항목 9개, 유기염소화합물 항목 9개, 농약류 4개, 기타 2개 등 총 29개 항목으로 규정되어 있다. 특히 유해화학물질에 대한 기준이 매우 강화되어 있는 것이 특징이다.

(3) 중국 농업용수 수질기준

중국의 경우는 농업용수 수질기준을 기타 수질기준과는 별도의 독립적인 기준으로 제시하고 있다. 관개용수에 대한 수질기준은 1992년에 환경보호국에 의해 제정되었으며, 가장 큰 특징은 벼, 밭작물, 채소작물 등의 작물의 종류에 따라서 구체적인 기준이 설정되어 있다는 점이다. 기준은 1~3급으로 나누어져 있으며, 항목은 BOD, COD, 킬달질소, SS, LAS, CN화합물, 휘발성 페놀 등의 유기물질과 대장균, 회충알 등 미생물 항목 12개, 인, 염류, 황, 염소, 중금속류, 불소, 붕소 등의 무기물질 16개로 총 28개 항목으로 설정되어 있다.

표 3.10.6 중국의 관개용수 수질기준

(Unit: mg/ℓ)

구 분	수질항목	벼	밭작물	채소류
유기물질	BOD	80	150	80
	COD	200	300	150
	Kjeldahl-N	12	30	30
	SS	150	200	100
	LAS	5.0	8	5.0
	Cyanide	0.5	0.5	0.5
	Volatile phenol	1.0	1.0	1.0
	Phenol	2.5	2.5	2.5
	Trichloroacetaldehyde	1.0	0.5	0.5
	Coliform(MPN/100ml)	1000	100	1000
	Roundworm egg(eggs/ℓ)	2.0	2.0	2.0
무기물질	P	5.0	10	10
	수온(℃)	35	35	35
	pH	5.5~8.5	5.5~8.5	5.5~8.5
	Salt	1,000(non saline-alkaline area), 2,000(saline-alkaline area)		
	Chloride	250	250	250
	Sulfide	1.0	1.0	1.0
	Hg	0.001	0.001	0.001
	Cd	0.005	0.005	0.005
	As	0.05	0.1	0.05
	Cr	0.1	0.1	0.1
	Pb	0.1	0.1	0.1
	Cu	1.0	1.0	1.0
	Zn	2.0	2.0	2.0
	Se	0.02	0.02	0.02
F	2.0(high fluorine area), 3.0(other area)			
B	1.0(crops sensitive to boron), 2.0(crops with tolerance to boron), 3.0(crops with high tolerance to boron)			

(4) 캐나다 농업용수 수질기준

캐나다의 농업용수 관련 수질기준은 Canadian Water Quality Guidelines (CWQG)에서 관개용수에 대해 무기물, 유기물, 미생물, 세균에 대하여 자세히 언급하고 있다.

표 3.10.7 캐나다 농업(관개)용수 수질 - 무기물

(Unit : mg/L)

Parameter	Guideline	Parameter	Guideline
Aluminum	5.0	Lead	5.0
Arsenic	0.1	Lithium	2.5
Beryllium	0.1	Manganese	0.2
Boron	0.5-6.0	Molybdenum	0.01-0.05
Cadmium	0.01	Nickel	0.2
Chloride	100-700	Selenium	0.02-0.05
Chromium(III)	0.049	Sulphate	
Chromium(IV)	0.080	TDS	500-3500
Cobalt	0.05	Uranium	0.01
Copper	0.2-1.0	Vanadium	0.1
Fluoride	1.0	Zinc	1.0-5.0
Iron	0.2		

*Source : CCME, 1999, CCME, 2005

표 3.10.8 캐나다 농업(관개)용수 수질 - 유기물, 세균

(Unit : µg/L)

Parameter	Guideline	Parameter	Guideline
Aldicab	54.9	Diclofap-methyl	0.18
Atrazine	10	Dinoseb	16
Bromacil	0.2	Linuron	0.071
Bromoxynil	0.33	MCPA	0.025
Chlorothalonil	5.8	Metolachlor	28
Coliforms, fecal	100/100ml	Metribuzin	0.5
Coliforms, total	1000/100ml	Simazine	0.5
Cyanazine	0.5	Tebuthiuron	0.27
Dicamba	0.006		

*Source : CCME, 1999, CCME, 2005

(5) 네덜란드 농업용수 수질기준

네덜란드와 같은 간척지에서 염도가 높게 나타나는 시설 재배에서 EC, Na, Cl 등의 항목에 대하여 관개용수의 수질을 구분하기 위한 척도(criteria)를 나타낸 것이다. ‘Criteria’는 기준치를 설정하기 위한 기본 조건으로 과학적 검토가 필요한 판정기준을 의미한다. 총 염도 수준에 따라서 4개의 유형으로 나누었고 다시 각 유형을 3종류로 세분화하였다. 먼저 EC에 따라 구분하였고, 다음으로 Na 및 Cl의 농도를 고려하였다. 각 유형에서 Na와 Cl의 농도분포가 비슷한 수준임을 확인할 수 있다. 또한 각각의 재배환경에 대한 부가적인 설명과 그 환경에 적합한 식물에 대한 특성 및 실제로 재배 가능한 작물과 화훼류를 추천하였다.

표 3.10.9 시설재배에서 관개용수의 염도에 따른 분류 척도(criteria)

Class	Total salinity level		
	EC (dS m ⁻¹)	Na (mg L ⁻¹)	Cl (mg L ⁻¹)
1.1	<0.5	<4.6	<7.1
1.2	<0.5	4.6 - 11.5	7.1 - 17.8
1.3	<0.5	11.5 - 23	17.8 - 35.5
2.1	<0.5	<23	<35.5
2.2	<0.5	23 - 46	35.5 - 71
2.3	<0.5	48.3 - 80.5	74.6 - 124.3
3.1	0.5 - 1.0	<34.5	<53.3
3.2	0.5 - 1.0	34.5 - 69	53.3 - 106.5
3.3	0.5 - 1.0	69 - 103.5	106.5 - 159.8
4.1	1.0 - 1.5	<34.5	<53.3
4.2	1.0 - 1.5	34.5 - 69	53.3 - 106.5
4.3	1.0 - 1.5	69 - 103.5	106.5 - 159.8

표 3.10.10 내염성에 따른 작물 분류

	Salinity class		
	Salt sensitive	Moderate sensitive	Tolerant
Crop	Beans Strawberry	Cucumber Sweet pepper Eggplant Melon Lettuce	Tomato Spinach Endive Radish Lambs lettuce
Flowers	Anthurium Cymbidium	Gerbera Hippeastrum Alstroemeria Rose Anemone Tulip Chrysanthemum Bouvardia	Carnation Euphorbia fulgens Gypsophila Freesia

표 3.10.11 작물 성장 특성에 따른 분류

	1	2	3	4
Sub class	Soilless culture with reuse of drainage water	Soilless culture with free of drainage, drainage fraction<0.2	Soilless culture with free of drainage, drainage fraction>0.2 Soil grown crops	Soil grown crops
1	Suitable for all crops	Suitable for all crops	Suitable for all crops	Suitable for all crops
2	Suitable for crops with moderate sensitive for salinity	Suitable for crops with moderate sensitive for salinity	Suitable for crops with moderate sensitive for salinity	Suitable for crops with moderate sensitive for salinity, Not for trickle irrigation
3	Suitable for salt tolerant crops on condition of a high NA uptake capacity	Suitable for salt tolerant crops	Suitable for salt tolerant crops For soil grown crops, not for trickle irrigation	Suitable for salt tolerant crops For soil grown crops, not for trickle irrigation

국내외의 농업용수 수질기준에 대해 비교 정리하면 다음 표 3.10.12와 같다.

표 3.10.12 국내의 농업용수 수질기준 비교

항목	국내		FAO(권고기준)		일본	중국		캐나다	네덜란드
	호소	지하수	지표 관개	스프링 쿨러 관개	호소수	밭작물	채소류		
pH	6.0-8.5	6.0-8.6	6.5-8.5		6.5-8.5	5.5-8.5	5.5-8.5		
BOD	-	-			5	150	80		
COD	8	8			-	300	150		
SS	15	-			15	200	100		
DO	≥2	-			5				
T-N	1	-							
T-P	0.1	-							
NO ₃ -N	-	20	0-10						
Cl	-	250	0-1,065					100-700	53.3 53.3-106.5 106.5-159.8
			<142 142-355 >355	<106 >106					
Cd	0.01	0.01			0.01	0.005	0.005	0.0051	
As	0.05	0.05			0.01	0.05	0.05	0.1	
Pb	0.1	0.1			0.01	0.1	0.1	0.2	
Cr ⁶⁺	0.05	0.05			0.05	0.1	0.1	0.0049	
Hg	ND	ND				0.001	0.001		
Cn	ND	ND			ND				
유기인	ND	ND							
페놀	-	0.005				2.5	2.5		
ABS	0.5	-							
PCB	ND	-							
TCE	-	0.03			0.03				
TeCE	-	0.01			0.01				
EC			0-3						<0.5(시설재 배) 0.5-1.0 1.0-1.5
			< 0.7 0.7-3.0 >3.0						

표 3.10.12 국내의 농업용수 수질기준 비교 (계속)

항목	국내		FAO(권고기준)		일본	중국		캐나다	네덜란드
	호소	지하수	지표 관개	스프링 클러 관개	호소수	밭작물	채소류		
TDS			0-2,000					500-3,500	
Ca ²⁺			0-20						
Mg ²⁺			0-60						
Na ⁺			0-920						34.5 34.5-69 69-103.5
			<69 69-207 207-920	<69 >69					
CO ₃ ²⁻			0-30						
HCO ₃ ⁻			0-610						
SO ₄ ²⁻			0-960						
NH ₄ ⁺ -N			0-5						
PO ₄ -P			0-2						
K ⁺			0-2						
B			0-2			2	2	0.5-6	
			<0.7 0.7-3.0 >3.0						
SAR			0-15						
Cu						1	1	0.2-1	
Zn						2	2	1-5	
Se						0.02	0.02	0.02-0.05	
Al								5	
Be								0.1	
Mn								0.2	
Fe								5	
F								1	
Mo								0.01-0.05	
Ni								0.2	
U								0.01	
V								0.1	
Co								0.05	
Li								2.5	

다. 시설 원예단지 양액재배 용수 수질

(1) 양액재배 용수조건

양액재배 용수로는 일반적으로 지하수를 이용하는 예가 가장 많고, 필요 시 하천수와 빗물을 이용하기도 한다. 용수의 수질에 관한 기준은 아직 확립되어 있지 않으나 시설원예의 용수에 적합한 기준은 다음과 같다.

- 관수파이프를 막을 위험이 있는 이물질이나 조류 등을 함유하지 않아야 한다.
- 병해의 원인이 없어야 한다. 즉, 하천이나 수로의 상류부에서 병해를 일으킨 잔재물이 침하되지 않아야 한다.
- 중금속 및 염소이온 등의 유해성분을 함유하지 않아야 한다.

(2) 원수의 수질

용수는 양액재배를 하기 전에 모든 원소에 대하여 조사를 하여야 한다. 용수에 포함된 각 이온의 양을 알면 염류장해나 비료의 절감효과도 얻을 수 있다. 일반적으로 용수에 철분이 많으면 Mn, P이 결핍되기 쉽고 Mn이 많으면 Fe이 결핍되기 쉽다. 또한 Na, Cl, SO₄가 과다하게 함유되어 있으면 K, Ca, Mg 등의 흡수를 저해한다. 용수에 수은, 납, 카드뮴, 크롬, 비소 등의 중금속이 있으면 식물의 생육뿐만 아니라 인체에 해를 끼치게 된다.

우리나라의 시설재배 단지에는 대부분 지하수가 풍부하다. 지하수는 겨울에는 13~15 °C, 여름에는 16~18 °C가 보통이고 깊은 지하수에는 수온의 변동이 없다.

수경재배에서는 음료수에 가까운 것이 필요하며 한편, 천층 지하수인 BOD가 높은 우물에는 뿌리를 해치는 병원균이 혼재하고 있어 그 피해를 받을 수 있다. 또한 Fe²⁺가 많으면 Mn 결핍, P 결핍이 생기기 쉽고 Mn²⁺이 많으면 철 결핍이 생기기 쉽다.

그리고 Ca과 Mg을 포함하고 있는 지하수는 대부분의 경우 단물처럼 식물 재배에 쓸 수 있는데, Ca과 Mg은 필수 영양소이고 보통 경수에 포함되어 있는 정도의 양은 배양액에서 필요한 양보다 훨씬 적기 때문이다. 경수에 녹아 있는 Ca나 Mg은 탄산염이나 황산염의 형태로 존재하는 것이 보통이다. 황산이온이 필수 원소인데 반해 탄산이온은 그렇지 않으나, 저농도의 탄산은 식물에 해를 끼치지 않으며 pH 완충작용도 갖기 때문에 50 ppm(0.8 mol HCO₃)정도까지는 허용된다. 그러나 탄산이온의 농도가 높으면 pH가 높아져서 탄산염이나 인산염과 같이 불용화 되는 이온이 생긴다. 특히 석회암이나 백운석의 지층에 있는 지하수는 탄산칼슘이나 탄산마그네슘을 많이 함유하고 있어 주의해야 한다. 이러한 경우 미량 원소가 침전되어 생육장해를 일으키는 일이 있으므로, 용수 중 칼슘 함량을 조사하여 많은 경우에는 칼슘의 공급량을 줄여야 한다.

그리고 중금속도 미량요소 필요량의 범위에서 판단되지만 Hg, Cd, Pb, Cr 등은 인체에도 해롭기 때문에 신중하게 검토해야 한다. 또한 Na과 Cl는 식물체에는 필요가 없으며, 오히려 농도가 높으면 작물에 나쁜 영향을 끼친다. NaCl의 측정치가 10 me/l (580 mg/l, Na 230 mg/l, Cl 350 mg/l) 이상에서는 많은 작물(토마토, 수박, 피망은 20 mEq L⁻¹까지 견딘다)이 과잉피해를 입는다. 우물물의 NaCl이 1 me/l 라 해도 1개월 재배하게 되면 10 me/l 이상이 잔류 집적하기 때문에 한 달에 1회 정도 전액을 교

체할 필요가 있다.

바닷물이 포함된 지하수에서는 Mg의 피해도 나타나는데, 생육 단계에 따라 피해의 차이는 있으나 염소는 10 me/l, 마그네슘은 8 me/l 이상이면 과잉증이 나타난다. 순환식 양액재배에서는 용수를 계속 공급하기 때문에 이들 물질이 급속히 농축되기 쉽다. 이들이 고농도로 존재하면 배양액의 삼투압이 상승하여 뿌리의 흡수 능력이 저하되고 생육 장애가 일어난다.

염분이 과다하면, 토마토는 Ca의 흡수가 저해되어 배꼽썩음병이 발생하기 쉽고, 딸기는 배양액의 EC가 낮아야 하므로 이들의 피해를 많이 받는다. Na이 80mg/l 이상인 용수를 사용하면 K결핍이 발생한다.

(3) 국내 및 국외 양액재배 용수 기준

양액재배에 이용하는 원수로는 ① 하천수, ② 지하수, ③ 수돗물, ④ 빗물 등이 있고, 병원균과 점토성분을 함유하지 않은 것을 원칙으로 하여 배양액을 조성하고 농도를 조성하는 것이 필요하다. 용수 중 무기성분 농도는 순수한 물이 이상적이지만 가능한 농도가 낮은 것이 좋으며, 무기이온의 허용농도는 재배대상 작물이나 양액재배 방법(재배방식, 배양액 교환 빈도)에 따라 사용할 수 있는 폭의 차이가 있다.

국내에서 제시된 기준으로는 국내 지하수를 중심으로 양액재배용 수질 기준에 관해서 양액재배 방법(순수수경재배, 고품배지경)과 사용가능비료에 따라 서울시립대학교(1995)에서는 다음 표와 같이 구분하였으며, 이 기준은 pH, EC, Ca, Mg, Na, Cl, Fe, Mn, Zn, B, SO₄, HCO₃ 등의 항목으로 설정되어 있다.

표 3.10.13 온실재배 작물에 따른 용수 내 원소의 한계치

항목	단위	식물의 내염성			
		매우 약함	약함	중간	강함
전기전도도	dS/m	0.4	0.8	1.0	1.5
삼투압	bar	0.15	0.30	0.40	0.60
총염류량		250	500	750	1,000
염소	Cl mg/l	50	100	200	300
황	SO ₄ mg/l	100	200	250	300
나트륨	Na mg/l	50	100	150	150
경도	CaO mg/l	56	112	196	308
칼슘	CaO mg/l	28	84	140	252
철	Fe mg/l			1	
붕소	B mg/l			0.5	

표 3.10.14 양액재배 방법별 적정용수(원수) 기준(서울시립대)

항목	단위	순수수경재배		고형배지경		
		A	B	A	B	C
pH	-	5.5~7.5	5.0~8.0	6.0~7.5	5.0~8.0	5.0~8.0
EC	dS/m	<0.3	<0.5	<0.2	<0.5	<0.5
Ca	mg/l	<20	<60	<20	<40	<80
Mg	mg/l	<10	<20	<5	<15	<30
Na	mg/l	<20	<30	<10	<30	<60
Cl	mg/l	<15	<30	<15	<30	<50
SO ₄	mg/l	<20	<40	<20	<40	<60
HCO ₃	mg/l 1	<50	<100	<50	<100	<200
Fe	mg/l	<0.5	<1.0	<0.03	<0.5	<1
Mn	mg/l	<0.2	<0.6	<0.2	<0.6	<1
Zn	mg/l	<0.2	<0.5	<0.15	<0.5	<1
B	mg/l	<0.05	<0.1	<0.05	<0.1	<0.7

A: 시판되는 수경재배용 비료를 이용하는 경우

B: 단비로 배양액 원액을 조성하는 경우

C: 단비로 원액을 조성하여 작물재배는 가능하지만 양이온과 미량원소가 배지경 베드 내에 집적되므로 재배 중에 수시로 씻어내야 함

표 3.10.15 유럽(네덜란드) 양액재배 적정용수 기준

항목	단위	수경	배지경
EC	dS/m	0.5	0.5
Na	mM/ℓ (mg/ℓ)	<1.5 (34.5)	<0.5 (11.5)
Cl	mM/ℓ (mg/ℓ)	<1.5 (53.3)	<1.5 (53.3)
Ca	mM/ℓ (mg/ℓ)	<2.0 (80)	<2.0 (80)
Mg	mM/ℓ (mg/ℓ)	<0.5 (12.1)	<0.5 (12.1)
SO ₄	mM/ℓ (mg/ℓ)	<0.5 (16.1)	<0.5 (16.1)
HCO ₃	mM/ℓ	<4.0	<4.0
Fe	μM/ℓ (mg/ℓ)	10~20 (0.56~1.12)	<0.5 (0.03)
B	μM/ℓ (mg/ℓ)	<25 (2.7)	<25 (2.7)
Zn	μM/ℓ (mg/ℓ)	<5 (0.3)	<5 (0.3)
Mn	μM/ℓ (mg/ℓ)	<10 (0.55)	<10 (0.55)
Cu	μM/ℓ (mg/ℓ)	<1 (0.06)	<1 (0.06)
F	μM/ℓ	<25	<25

표 3.10.16 일본 양액재배 적정용수 기준

원소	단위	기준
pH	-	5~8
EC	dS/m	<0.3
N	mg/ℓ	0
Ca	mg/ℓ	<40
Mg	mg/ℓ	<20
Cl	mg/ℓ	<60

표 3.10.17 일본 양액재배 용수 내 원소의 한계농도

성분	NO ₃ -N (mg/ℓ)	P (mg/ℓ)	K (mg/ℓ)	Ca (mg/ℓ)	Mg (mg/ℓ)	Na (mg/ℓ)	Cl (mg/ℓ)	Fe (mg/ℓ)
한계 농도	60	300	80	80	40	80	200	10

라. 농업용수 목표수질 선정

농업용수 수질은 4급수의 수준이상으로 공급해야 하는 것으로 “환경정책기본법”에 정의되어 있으며, 4급수의 의미는 수질등급상의 “약간나쁨”이며 그 의미는 “상당량의 오염물질로 인하여 용존산소가 소모되는 생태계로 농업용수로 사용하거나, 여과, 침전, 활성탄 투입, 살균 등 고도의 정수처리 후 공업용수로 사용할 수 있음”으로 정의하고 있기 때문에 노지재배의 경우는 4급 정도로 공급해도 무방하나 시설재배를 대상으로 할 때는 수질등급상 “보통(3급수)” 수준의 용수를 공급하는 것이 유지관리 측면과 고품질의 농산물 재배기반지역이라는 역할에 대한 측면을 고려할 때 필요한 수준이다.

환경기준상에서의 농업용수수질기준에는 염도에 대한 특별한 규제는 없지만, 지하수 수질기준상에는 염소이온으로 250 mg/L이하로 규정되어 있는데 간척지 원예수질기준이 정비된 네덜란드의 경우 EC 기준으로 500 µS/cm으로 규정되어 있으며 단위환산시 국내의 지하수수질기준상의 염소이온농도기준과 거의 비슷하다.

또한, 유지관리측면과 안정적인수질관리 측면에서 용수에 포함되어 있는 부유물질(SS)을 사전에 제거할 수 있는 공급계획 수립이 요구되고 있는 상황이다.

한편, DO와 COD의 경우는 시설재배용수의 경우로 구분하여 목표수질을 설정하였고, T-N과 T-P의 경우는 환경보존측면에서는 오염물질이지만 시설재배용수측면에서는 영양염류이기 때문에 기존 4급수의 수준으로 목표수질을 설정하였다.

표 3.10.18 용수공급 목표수질 설정

종 류	pH	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS(mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	염소이온 (mg/L)
목표수질 (시설)	6.0-8.5	2.0이상 (5.0이상)	8.0 (5.0)	9.0 (5.0)	100이하 (25)	- (CONTROL)*	0.3 (CONTROL)	250

비고 : () : 시설재배용 목표수질(3급수 기준)

* 시설재배용수 T-N, T-P의 경우 작물별 적정 비료공급을 위해 성분함유량 정보가 필요함

2.2. 농업용수 필요수량

정확한 농업용수의 요구수량을 산정하기 위하여, 실측된 강우자료를 이용한 수문분석이 선행되어야 하나, 강우현상은 기상 및 지형적인 자연요소에 따라 시시각각 변화하기 때문에 이를 일반화된 값 또는 수식 하나로 정확하게 예측하거나 파악하기는 매우 곤란하다. 따라서, 대상지역에 대한 수문학적 분석을 실시하기 위하여 대상지역과 가장 인접하고 유사한 기후특성을 갖는 기상관측소 및 유량관측소를 선정하여 관측자료에 대한 수문학적 해석을 수행하여야 한다.

본 보고서에서는 간접재이용 최적공정기술 개발에 초점을 맞춰 새만금지역에서 분석된 농업용수량 원단위 값을 통해 정성적인 분석을 실시하였으며, 추후 실질적인 사업을 수행 시, 사업지구와 가장 인접한 기상관측소 및 유량관측소의 관측자료를 이용한 수문분석을 통해 정량적인 필요수량 산정이 요구된다.

가. 논용수 필요수량산정

논 단위용수량은 향후 영농방식 변화를 고려하여 담수직파재배를 적용하였고, 10년 빈도 한발시에든 원활한 용수공급이 가능하도록 하였다. 새만금지구는 기상관측소의 Thiessen Network상 군산관측소와 부안관측소의 지배구역에 속하지만 군산관측소를 적용하는 것이 이수측면에서는 유리하므로 군산관측소를 적용하였다. 구체적인 논용수 필요수량 산정은 새만금 사업단 분석결과 자료를 이용하였다.

나. 발용수(노지재배) 필요수량산정

새만금에서는 아직 재배되어야 할 작물이 정해지지 않고 내륙에서도 노지재배로 재배되는 품목이 많고 파종시기에 따라 다른 용수 공급이 필요하며 재배시에 공급되는 용수 공급방법에 따라서도 차이가 많이 나게 된다.

따라서 농진청에서 만든 ‘작물 물관리 지침 프로그램’을 이용하여 새만금의 토성과 유사한 미사질양토와 사양토로 나누어 1ha에 대한 필요 용수량(물소모량)과 관개방법별 효율에 따른 실제 용수량을 계산하였다.

표 3.10.19 노지재배 물소모량 (부안지역-미사질양토-1ha기준)

(단위: m³)

작물	파종 시기	물 소모량	분수		스프링클러		점적	
			(0-20cm)	(0-40cm)	(0-20cm)	(0-40cm)	(0-20cm)	(0-40cm)
고추(반축성)	3/10	7,768.0	11,769.7	9,359.0	9,832.9	8,728.1	10,357.3	8,091.7
고추(조숙)	5/1	6,299.5	9,544.7	7,589.8	7,974.1	7,078.1	8,399.3	6,562.0
토마토(노지)	5/10	4,316.6	6,540.3	5,200.7	5,464.1	4,850.1	5,755.5	4,496.5
토마토(하우스)	2/5	3,293.2	4,989.7	3,967.7	4,168.6	3,700.2	4,390.9	3,430.4
방울토마토	11/20	3,281.5	4,972.0	3,953.6	4,153.8	3,687.1	4,375.3	3,418.2
오이(노지)	5/15	1,585.4	2,402.1	1,910.1	2,006.8	1,781.3	2,113.9	1,651.5
참외(반축성)	2/25	2,036.3	3,085.3	2,453.4	2,577.6	2,288.0	2,715.1	2,121.1
참외(노지)	5/25	2,038.4	3,088.5	2,455.9	2,580.3	2,290.3	2,717.9	2,123.3
오이(반축성)	2/20	2,556.5	3,873.5	3,080.1	3,236.1	2,872.5	3,408.7	2,663.0
오이(축성)	11/25	2,488.8	3,770.9	2,998.6	3,150.4	2,796.4	3,318.4	2,592.5
봄배추	4/10	281.7	426.8	339.4	356.6	316.5	375.6	293.4
가을배추	9/5	206.5	312.8	248.8	261.4	232.0	275.3	215.1
시설배추	2/15	250.2	379.1	301.4	316.7	281.1	333.6	260.6
봄상추	3/20	232.0	351.5	279.5	293.6	260.6	309.3	241.6
겨울상추	11/20	149.1	226.0	179.7	188.8	167.6	198.8	155.3
고구마(단작)	5/10	481.9	730.1	580.6	610.0	541.4	642.5	501.9
고구마(후작)	6/10	390.7	592.0	470.7	494.6	439.0	520.9	407.0
봄무우	3/20	294.1	445.5	354.3	372.2	330.4	392.1	306.3
가을무우	9/1	194.0	293.9	233.7	245.5	217.9	258.6	202.1
시설무우	1/10	225.3	341.3	271.4	285.2	253.1	300.4	234.7
시설무우	2/10	259.3	392.8	312.4	328.2	291.3	345.7	270.1
시금치(멸칭)	4/15	174.1	263.8	209.8	220.4	195.6	232.1	181.4
시금치(멸칭)	9/15	139.4	211.3	168.0	176.5	156.7	185.9	145.2
수박(조숙)	4/20	242.8	367.9	292.6	307.4	272.8	323.8	252.9
수박(보통)	5/20	225.7	342.0	272.0	285.7	253.6	301.0	235.1
수박(하우스)	8/20	253.1	383.4	304.9	320.3	284.3	337.4	263.6
보리	11/1	431.6	654.0	520.0	546.4	485.0	575.5	449.6
밀	11/1	330.0	499.9	397.5	417.7	370.7	439.9	343.7
콩(1모작)	5/15	483.3	732.3	582.3	611.8	543.0	644.4	503.4
팥콩	3/10	388.0	587.9	467.5	491.2	436.0	517.3	404.2
팥콩	4/20	266.4	403.7	321.0	337.2	299.3	355.2	277.5
옥수수		528.4	800.6	636.6	668.8	593.7	704.5	550.4
감자	3/25	267.3	405.1	322.1	338.4	300.4	356.5	278.5
감자	8/15	167.8	254.3	202.2	212.4	188.6	223.7	174.8
콩(후작)	6/5	393.7	596.6	474.4	498.4	442.4	525.0	410.1
포도(보통)	3/25	497.0	753.1	598.8	629.2	558.5	662.7	517.7
사과	3/25	382.6	579.8	461.0	484.4	429.9	510.2	398.6
배(중생종)	3/25	459.4	696.0	553.5	581.5	516.1	612.5	478.5
복숭아(노지)	3/25	324.7	491.9	391.2	411.0	364.8	432.9	338.2

다. 발용수(양액재배) 필요수량산정

재배작물별 공급 용수량은 작물이 흡수하여 방출하는 증발산량 및 작물이 사용하지 않고 버려지는 양으로 나눌 수 있다. 작물이 흡수하여 방출하는 증발산량은 생육단계와 같은 내재적 요인 및 환경과 같은 외부적 요인에 의해 변화함. 재배작물별 증발산량의 최대치는 생육활력과 환경에 따라서 매우 다양하므로 조사된 최대치 중에서 가장 높은 값을 사용하는 것이 설계에 바람직하다. 단위면적당 증발산량은 재배방법에 의해 다르다. 장기재배는 단기재배와 비교하여 많이 요구되며, 밀식재배에서도 많이 필요하다. 작물이 사용하지 않고 버려지는 양은 생산방법에 따라 달라질 수 있음. 관수방법에 따라, 생산시스템에 따라서도 매우 달라지며, 통상 최대치의 30%를 적용하는 것이 안전하다.

용수량은 재배작물별로 증발산량의 최대치가 발생하는 시기가 유통 등의 여건 변화에 따라 달라지므로 연중 최대값을 사용해야 한다. 기존의 연구자료 및 현장조사를 통해 얻어진 자료 중에서 비교적 용수 사용량이 많고 수출 가능성이 높은 파프리카 재배에 필요한 용수량을 평균하여 검토하였다. 현장조사는 김제 인근에서 재배되고 있는 파프리카 농가에서 조사된 용수 사용량을 기준으로 13,420-23,090 ton/ha (평균 17,487 ton/ha)로 산정하였으며 자료 조사에서는 파프리카 등의 과채류는 고온기에 60-75 ton/ha, 저온기에 30-40 ton/ha가 필요한 것으로 제시되어 있으며 고온기를 5-9월로 보고 저온기는 10-4월로 나누어 계산할 경우 연간 필요 용수량은 15,810-199,955 ton/ha (평균 18,058 ton/ha)로 계산이 되었다.

현장 조사 및 자료조사를 통한 최대용수량 산정에 있어서 매우 유사한 값을 나타내었으나, 원예단지 용수공급계획을 수립하는데 있어서 계절별, 작물별, 생육기별 요구되는 총 용수량을 최대 필요 용수량으로 염두해 두고 용수공급계획을 수립하여야 할 것이다. 또한 작물에 의한 수분 손실은 대부분이 증산에 의한다. 작물이 흡수하는 수분량의 90% 이상이 증산으로 소비되고 나머지 10% 정도의 수분이 체내에 남아 작물의 무게를 증대시킨다. 이렇게 증산으로 소비되는 수분량이 많기 때문에 작물의 필요 관수량은 증산과 연계시켜 계산하여야 하며, 증산과 관련된 가장 중요한 요인은 태양 방사 에너지이며 이 값을 근거로 필요 관수량을 계산해야 한다. 또한 특정 작물이 가지는 엽면적은 증산량에 큰 영향을 미치기 때문에 고려대상이 되어야 할 것이다. 기존의 연구자료를 토대로 용수량을 산정할 경우 품종별, 물리적 환경 요인별로 오차가 발생할 수 있으나, 용수량을 산정할 수 있는 근거 자료로 활용할 수 있다.

(1) 과채류 (파프리카, 토마토, 오이) 최대 공급 용수량 산출

작물의 증산량과 태양광에너지의 관계에 따른 용수량 산정법을 이용하여 최대 필요 용수량은 다음과 같은 계산으로 산출할 수 있다(시설환경조절과 파프리카 재배기술 p65).

$$\bigcirc \text{일일 최대 필요용수량} = \text{m}^2\text{당 일일 최대광량} \times a \text{ ml/J/cm}^2$$

여기서 a값은 각 작물의 태양방사에너지 J당 최대 급수량으로 파프리카의 경우 3.5

가 되며 토마토나 오이의 경우 4 정도 된다. 이는 엽면적 특성에 따른 값으로 파프리카 보다 토마토나 오이가 엽면적이 넓고 엽면 큐티클 층의 차이에 의해서 통상 증산량이 더 많기 때문이다. 또한 여름철 일일 최대 광량은 약 2500 J/cm² 정도가 되므로 파프리카의 일일 최대 필요 용수량은 88 ton/ha가 되며, 토마토나 오이의 경우 100 ton/ha의 용수가 필요하다. 새만금 지역의 첨단 원예시설단지의 과채류 재배 지역의 용수량 계획은 재배작물의 종류, 재배 면적 등을 고려하여 일일 최대 필요용수량을 88-100 ton/ha 값에서 결정해야 할 것이다.

○ 최대 필요 용수량 = m² 당 식물의 일일 중 최대 흡수량 × 배액율 × 재배면적

파프리카의 일일 최대 흡수량은 약 6-7 L/m²가 되므로, 최대 흡수량이 계산되며, 배액율을 30%로 계산하게 되면 최대 필요 용수량은 78-91 ton/ha가 된다.

과채류 재배를 위한 일일 최대 필요 용수량은 위의 2가지 방법으로 산출된 값의 공통부분인 90 ton/ha로 선정하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

(2) 과채류 (파프리카, 토마토, 오이) 평균 공급 용수량 산출

다음 표는 ‘태안 시설원예단지 조성을 위한 기본계획’ 한국생물환경조절학회 연구기관의 보고 (2009. 6)를 기초하여 고온기 최대 용수량값을 이용하고, 저온기 용수량 값은 새만금 지역 용수활용방안 연구를 기초하여 저온기 (10-4월)와 고온기 (5-9월)의 비율을 참고하였다.

표 3.10.20 과채류 평균수요 용수량 산정

작물	최대 관수량 (L/주/day)	재식밀도 (주/ha)	고온기최대용수량 (ton/ha/day)	저온기용수량 (ton/ha/day)	평균용수량 (ton/ha/day)
토마토	4	24,000	96	57.6	76.8
파프리카	3	30,000	105	63	84
고추	4	33,000	132	66	99
가지	4	9,000	40.5	20.3	30.4
오이	4	30,000	120	60	90
딸기	0.35	90,000	32	19.2	25.6
멜론	2	27,000	54	32.4	43.2
수박	4	4,000	16	9.6	12.8

*과채류 저온기 용수량은 고온기 최대용수량의 50-60%

평균 용수량은 고온기 최대 용수량과 저온기 용수량의 평균값을 사용하였다. 그러나 고온기와 저온기의 기간이 다른 점 때문에 평균값을 이용하는 것보다 계절별 가중치

를 두어 정확한 연중 평균 용수량 산정을 해야 한다.

- 토마토 $[(96 \times 5) + (57.6 \times 7)] / 12 = 73.6 \text{ ton/ha/day}$
- 파프리카 $[(105 \times 5) + (63 \times 7)] / 12 = 80.5 \text{ ton/ha/day}$

과채류의 평균 일 용수량(8개 작물의 평균)은 57.73 ton/ha/일의 값을 나타낸다. 그러나 새만금 첨단유리온실에서 대상으로 하는 작물로는 토마토와 파프리카가 주를 이루고 있는 만큼 두 작물의 가중치를 고려한 연중 평균 용수량의 평균인 77 ton/ha/일의 값을 이용하여 설계에 반영하여야 할 것이다.

(3) 화훼류 (장미, 국화) 최대 공급용수량 산출

화훼류는 과채류와 비교하여 단위 면적당 필요용수량이 적은 것이 일반적이다. 농촌진흥청의 원클릭 농업종합기술정보에 따르면 장미의 경우 재식 밀도는 5-7 주/m²이며 전라남도 농업기술원의 보고(2001-2002, 장미 순환식양액재배시 적정 급액시점 및 급액량)에 따르면 증산량이 가장 많은 5월을 기준으로 하여 최대 급액량은 800-900 ml/day가 요구 된다고 보고 하였다.

이러한 생육 자료를 근거로 일일 최대 용수량 추정값은 56-63 ton/ha (70,000주/ha)가 된다. 국화의 경우 한국국화연구회(<http://hakki.com.ne.kr/>) 자료에 따르면 국화의 재식 밀도는 30-33 주/m² (무적심재배시)이며 서울대연구결과(2000, 한국원예과학기술지 18, 172p)에 의하면 7~10월에서 재배시 주당 일 평균 급액량이 200 ml/day로 추천 된 바 있다.

이러한 기초 자료를 토대로 계산하면 일일 최대 용수량은 60-66 ton/ha이 된다. 이러한 값들은 1차년도에서 제시한 대략적인 값과 큰 차이가 없다. 화훼류 재배를 위한 일일 최대 필요 용수량은 장미와 국화를 통합하여 65 ton/ha로 선정하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

(4) 화훼류 (장미, 국화) 연평균 공급용수량 산출

표 3.10.21에 나타난 고온기와 저온기의 가중치를 고려한 화훼류 4개 작물의 연평균 일 용수량은 19.8 ton/ha/day 의 값을 나타낸다.

표 3.10.21 화훼류 평균 수요 용수량 산정

작물	최대 관수량 (L/주/day)	재식밀도 (주/ha)	고온기최대용수량 (ton/ha/day)	저온기용수량 (ton/ha/day)	평균용수량 (ton/ha/day)
장미	0.5	60,000	30	15	22.5
국화	0.1	400,000	40	20	30
나리	0.1	240,000	24	14.4	19.2
난류	0.05	300,000	15	9	12

*화훼류 저온기 용수량은 고온기 최대용수량의 50-55%

라. 농업지역 최대 필요 공급용수량 산정

농업지역의 필요 공급용수량 설계를 위해서는 대상 작물별 재배면적이 정해져야 할 것이다. 또한 용수공급이 갈수기 또는 고온기에 부족하게 되어 작물 생육에 영향을 줄 경우 1년의 재배농사가 실패로 돌아갈 수 있기 때문에 시설원예 단지의 공급용수량은 최대치를 기준으로 설계해야한다. 그러한 조건을 감안하여 다음과 같이 일최대 필요수량을 산정하였다.

표 3.10.22 재배방식별 단위용수량 산정

구 분	분석조건	일최대 필요수량 (m ³ /ha)	단위용수량 (m ³ /sec/ha)
논-담수직파	관측소 : 부안 분석기간 : 1973~2009 수로손실 : 10% 침투량 : 9.1mm	282.5	0.003540
밭-노지재배	관측소 : 부안 분석기간 : 1973~2009 관개효율 : 75% TRAM : 40mm	78.4	0.0009079
밭-시설재배	자료수집(토마토, 파프리카 평균)	100.5	0.001163

3. 간접재이용 시스템의 유입수 현황 및 예측

농어촌 지역에 영향을 미치는 하수처리수를 안전하게 재이용하기 위한 간접재이용시스템을 개발하기 위해 농촌지역으로 방류되고 있는 하수처리수의 수질을 포함한 현황과 농업기반시설의 현황을 분석하였고, 더불어 하수처리수가 농업기반시설에 어떻게 영향을 주고 있는 지를 분석하기 위해 하수처리장 방류구와 하천하류에 위치한 농업기반시설의 위치정보를 이용하여 하수처리수 영향지구를 분석하였다.

3.1. 하수처리장 현황 분석

우리나라에서 물의 이용과 관련된 문제는 총괄적인 수량의 부족이기 보다는 과도한 담수자원을 사용함으로써 발생하는 수계의 생태적 스트레스와 지역적으로 물의 편중이 심하다는 것이다. 특히 2008년도 가을 가뭄시 일부 농촌지역의 저수지의 저수율이 10% 미만으로 떨어지는 등 지역별로 물부족으로 인한 고통을 경험하였다. 또한 농촌지역의 산업화·도시화 비율이 점차 높아져 가면서 지역별 물 수요는 계속 증가되고 있기 때문에 물이 부족한 농촌지역은 물부족 현상이 더욱 가중될 것으로 예상된다. 따라서 기존의 한정된 수자원에 대한 의존도를 줄이고 지속적으로 증가되는 물 수요를 대처하기 위한 방안으로 하수재이용이 관심을 끄는 대안이 되었다.

국가적차원에서 하수재이용은 고도처리 기술 발전에 따라 수질이 양호한 방류수를 친환경 대체수자원으로 개발하는 등 고도물처리 산업을 활성화 하고자 ‘물 재이용 촉진법’을 추진하여 가뭄 등 물 부족에 대처하고 새로운 물 시장 창출 기대하고 있으며 이를 위해서 각 부처에서 재이용관 관련된 사업을 추진하고 있다. 특히 환경부에서는 사용 용도별 ‘하수처리수 재이용 수질권고기준’을 마련하였으며, 하수도법을 개정(2006)하여 신규 하수처리장에 하수처리수 재이용을 의무화하였다. 그리고 2007년도에 수립한 「국가하수도종합계획」을 수립하여 하수처리수 재이용 비율을 6.9% (2005)에서 18% (2015년)로 추진하면서 본격적인 하수처리수 재이용이 본격화 되었다.

하수처리수 재이용사업은 2006년도에 12개 처리장을 시작으로 2008년도에 농업용수 재이용목적의 제주 판포지구를 포함한 5개 지구를 선정하여 추진하고 있으며 재이용사업을 희망하는 지방자치단체를 대상으로 지구를 선정한다. 현재까지 농업용수 공급을 목표로 사업이 진행된 곳은 전남 강진과 제주 판포지구가 있으며 농림수산식품부에서도 깨끗한 농업용수 공급을 목표로 2006년도에 농업수리시설 개보수사업에 하수처리수를 농업용수로 공급하고 있는 경기도내 양수장에 8천m³/day 규모의 농업용수 재이용시스템을 설치하여 현재 운영중에 있다. 특히 2008년도 가을에 전국적인 가뭄이 발생하면서 지방자치단체에서 대체수자원으로 하수처리수를 주목하였고, 일부 지자체에서는 이미 신규 재이용사업 추진을 목표로 ‘하수처리수의 농업용수 재이용 타당성 분석’을 추진하는 등 적극적으로 사업을 추진하고 있다.

하수처리수 재이용은 물순환 건전성 확보, 지역적 물부족 해소, 환경개선과 같은 환경·사회·경제적 효과가 있는 반면에 하수처리수의 안전성에 대한 위험도 있다. 따라서 농업용 목적으로 하수처리수를 재이용하기 위해서는 우선 하수처리장에서 방류수 수질상태가 재이용조건에 맞는지 확인해야 하고 엄격한 수질관리를 통해 처리수의 안전성을 확보 등 재이용 목적에 맞는 사업표준화가 필요한 시점이다.

하수처리수 방류수질기준의 의미는 하수처리수가 상류로부터 유하된 물과 희석되어 하천의 자정작용으로 인해 하천수질에 부담을 주지 않는 정도로 해석하는 것이 일반적인 개념이다. 그리고 인구의 증가와 상류지역의 개발로 하수처리장이 필요한 지역이 계속 발생하고 있다.

행정구역내 거주하는인구를 기준으로 공공하수종말처리시설, 폐수종말처리시설 및 마을하수도를 통해 처리되는 하수처리구역 내 처리인구로 나누어 산정한 하수도 보급률은 ‘04년 81.4%에서, ‘05년 83%로 증가하였고 전국에 가동중인 하수처리장은 469개 하수처리장이 가동 중에 있다(환경부, 2009).

우리나라에서는 1996년부터 총인(T-P)과 총질소(T-N)의 방류수 수질기준을 수질환경보전법에 명시하여 규제하기 시작하였으며, 2005년 9월에 방류수수질기준 개정으로 2008년부터 BOD 및 SS 10 mg/L, T-N 20 mg/L, T-P 2 mg/L로 전국적으로 강화되었으며, 2012년 1월 1일부터 적용되는 방류수 수질 기준은 다음과 같다.

표 3.10.23 방류수 수질기준(하수도법 시행규칙 제3조제1항)

구분		BOD (mg/ℓ)	COD (mg/ℓ)	SS (mg/ℓ)	T-N (mg/ℓ)	T-P (mg/ℓ)	대장균수 (개/ℓ)	생태독성 (TU)
1일 하수처리 용량 500m ³ 이상	I 지역	5이하	20이하	10이하	20이하	0.2이하	1,000 이하	1이하
	II 지역	5이하	20이하	10이하	20이하	0.3이하	3,000 이하	
	III 지역	10이하	40이하	10이하	20이하	0.5이하		
	IV 지역	10이하	40이하	10이하	20이하	2이하		
1일 하수처리용량 500미만 50m ³ 이상		10이하	40이하	10이하	20이하	2이하		
1일 하수처리용량 50m ³ 미만		10이하	40이하	10이하	40이하	4이하		

1. 공공하수처리시설의 페놀류 등 오염물질의 방류수 수질기준은 해당 시설에서 처리할 수 있는 오염물질항목에 한하여 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙」 별표 13 제2호 나목 페놀류 등 수질오염물질 표 중 특례지역에 적용되는 배출허용기준 이내에서 그 처리시설의 설치사업 시행자의 요청에 따라 환경부장관이 정하여 고시한다.
2. 1일 하수처리 용량이 500m³ 미만인 공공하수처리시설의 겨울철(12월 1일부터 3월 31일까지)의 총 질소와 총 인의 방류수수질기준은 2014년 12월 31일까지 60mg/L 이하와 8mg/L 이하를 각각 적용한다.
3. 다음 각 지역에 설치된 공공하수처리시설의 방류수수질기준은 총대장균 군수를 1,000개/ml 이하로 적용한다.
4. 영 제4조 제3호에 따른 수변구역에 설치된 공공하수처리시설에 대하여는 1일 하수처리용량 50m³ 이상인 방류수수질기준을 적용한다.

가. 하수처리량 현황

2010년(하수도 통계)을 기준으로 470개소의 하수처리장이 운영중에 있으며 실제 하수처리장에서 방류되는 수량은 약 18,752 천톤/일(시설용량: 25,006천톤/일)로서 연간 68억 톤의 하수처리수가 수계로 방류되고 있다. 하수처리수의 재이용수량은 장내재이용수가 연간 395 백만톤, 장외재이용수는 345 백만톤으로 장외재이용수보다는 장내 용도로 주로 재이용하고 있다.

표 3.10.24 권역별 하수처리수 재이용 현황

권역구분	시설용량 (천톤/일)	하수처리량 (천톤/일)	하수처리수재이용수 현황(천톤/년)	
			장내재이용수	장외재이용수
한강서울	6,581.2	296.6	65,707	37,625
한강고양	2,706.7	167.3	46,601	19,567
강릉남대천	166.8	21.8	5,347	1,735
남한강상류	19.3	2.2	364	64
삼척오십천	32.1	9.1	676	11
섬강	137.8	39.0	3,458	262
소양강	12.3	1.7	111	1,132
안동댐	30.0	31.0	0	32
양양남대천	63.1	12.7	2,439	54
의암댐	155.9	38.2	2,751	6
춘천댐	2.6	1.1	815	-
평창강	2.5	0.8	83	71
한탄강	204.2	20.3	3,268	464
홍천강	11.0	10.0	220	-
경안천	176.8	12.8	2,668	87
남한강하류	57.6	2.7	921	1,281
시화호	639.7	47.9	7,899	1,115
안성천	934.6	42.0	13,011	27,957
의암댐	12.8	7.0	134	-
임진강상류	21.0	12.6	1,108	840
의암댐	19.6	2.8	487	334
청평댐	61.4	5.9	1,812	1,323
팔당댐	1.9	0.6	22	-
한강서해	1,009.6	62.8	22,100	36,935
가화천	131.7	13.7	6,115	632
거제도	41.0	7.4	385	421
낙동강남해	641.7	81.8	7,932	1,505
낙동강하구언	407.5	38.3	9,860	1,013
낙동밀양	101.0	5.6	2,115	2,256
낙동창녕	6.0	4.9	115	101
남강	169.3	20.9	1,244	13,984
남강댐	9.8	4.8	376	481
남해도	6.8	2.4	593	-
섬진강하류	8.0	3.3	166	1,135
합천댐	19.5	12.3	410	5,166
황강	5.0	5.2	225	421
감천	89.0	35.1	1,920	2,284
금호강	75.0	19.2	2,259	-
낙동구미	0.5	0.4	24	-
낙동왜관	507.2	59.9	21,229	15,567

표 3.10.24 권역별 하수처리수 재이용 현황 (계속)

권역구분	시설용량 (천톤/일)	하수처리량 (천톤/일)	하수처리수재이용수 현황(천톤/년)	
			장내재이용수	장외재이용수
내성천	47.5	23.7	1,151	311
대중천	31.8	3.2	296	508
밀양강	9.1	3.4	600	-
병성천	26.0	20.0	795	976
안동땀하류	57.0	26.3	933	312
영강	40.0	10.8	1,048	-
영덕오십천	25.8	5.8	280	779
왕피천	16.9	3.9	1,131	2,295
위천	12.3	3.5	791	146
임하댐	0.6	0.5	7	-
태화강	8.0	2.7	54	-
형산강	362.8	77.5	3,653	2
회천	6.0	4.3	176	159
영산강상류	608.7	135.4	2,027	10,792
영산강중류	142.5	54.1	2,459	97
금호강	1,342.0	157.0	34,529	70,553
낙동고령	543.0	189.0	10,884	94
갑천	931.6	115.8	3,850	1
수영강	1,987.0	156.7	29,414	29,574
회야강	432.0	119.8	5,562	1,703
태화강	60.0	24.1	626	1,019
대중천	100.0	91.0	1,567	-
고막원천	1.3	0.5	11	15
보성강	2.6	0.9	62	-
섬진강하류	10.5	2.0	312	-
섬진강서남해	14.0	1.6	176	329
섬진곡성	4.5	3.3	73	-
수어천	164.5	25.8	3,314	3,975
순창	3.3	1.4	124	-
신안군	0.6	0.2	1	-
영암방조제	66.1	8.9	1,318	878
영암천	5.5	4.7	225	417
와탄천	158.1	11.1	3,033	8,148
완도	5.0	2.8	14	-
이사천	141.5	18.2	967	1,366
주암댐	8.2	0.9	241	1,202
지석천	28.0	7.0	158	-
황룡강	13.0	4.9	67	-
진도	5.3	1.5	304	-
금강서해	49.1	4.6	375	1,130
금강하구언	12.1	3.3	709	749
논산천	29.0	5.5	786	-

표 3.10.24 권역별 하수처리수 재이용 현황 (계속)

권역구분	시설용량 (천톤/일)	하수처리량 (천톤/일)	하수처리수재이용수 현황(천톤/년)	
			장내재이용수	장외재이용수
남강댐	1.8	0.9	4	-
동진강	96.8	10.0	755	786
만경강	773.0	45.1	4,215	2
무주남대천	3.0	1.1	75	131
새만금	0.7	0.5	8	-
섬진강댐	3.4	2.1	84	-
오수천	1.7	1.0	35	-
요천	50.0	40.0	389	-
용담댐	8.8	1.3	238	508
주진천	20.5	3.3	305	797
직소천	1.5	1.0	36	26
금강공주	59.2	7.9	1,828	4,773
미호천	350.2	30.0	4,159	4,582
대호방조제	42.1	6.5	332	670
부남방조제	60.3	5.9	1,099	6,062
삼교천	319.7	24.2	22,179	9,869
영동천	20.0	10.0	433	461
달천	108.7	11.1	1,682	797
대청댐	20.4	4.3	158	-
보청천	6.5	3.5	325	282
충주댐	81.0	19.5	2,398	2,464
충주댐하류	2.7	0.6	3	-
평창강	1.2	1.2	52	76
제주동해	18.0	3.0	107	14
제주서해	14.0	5.3	46	210
제주남해	20.0	14.0	90	9
제주북해	130.0	52.4	3,537	-

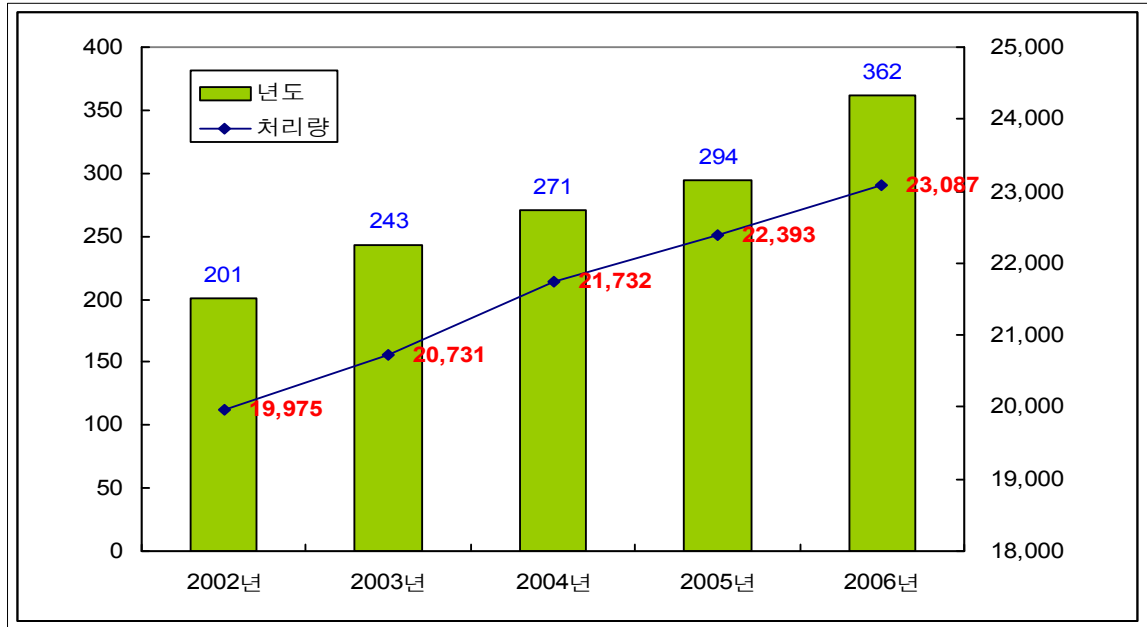


그림 3.10.1 년도별 하수처리장 및 하수처리량 현황

하수처리수는 2000년대 이후 매년 5~7%씩 하수처리수는 늘어나고 있으며 하수처리장 건설시 유역단위의 하천수량 또는 수질관리 측면보다는 인구밀집도와 오염원 발생정도, 시군경계 및 건설비용에 좌우되다 보니 농업용 목적의 수리시설 주변에 하수처리장이 위치한 경우가 발생하고 있다.

나. 고도처리 현황

고도처리란, 활성슬러지법을 통한 종래의 2차 처리로 얻을 수 있는 처리수보다 고도의 정화된 처리수를 얻기 위해 필요한 처리법 전체를 의미하는 용어로 사용되고 있다. 종래에는 2차 처리 후에 주로 부가되는 모든 물리화학적 처리프로세스를 3차 처리로 총칭하였으나, 2차 처리인 생물학적 처리프로세스의 개선 뿐만 아니라, 고도의 처리수를 얻는 기술이 일반화되고 있어, 종래의 3차 처리법에 이들 2차 처리 개선법을 부가해 새로운 고도처리라고 하는 범주가 탄생되었다.

고도처리는 재래식 2차 처리 후 남아 있는 부유물질(SS)과 용존물질 제거에 필요한 추가 처리로 정의된다. 이러한 물질들은 유기물, 부유물질 또는 칼슘(Ca), 포타슘(K), 황산염(SO₄²⁻), 질산염(NO₃³⁻), 인산염(PO₄³⁻)과 같은 단순한 무기이온들이나, 끊임없이 그 종류와 수량이 증가되고 있는 지극히 복잡한 합성유기물들을 포함한다. 근래에는 이러한 물질들이 환경에 미치는 영향에 관하여 조금씩 알려지고 있다. 잠재적 독성물질에 대한 연구가 이들의 환경에 대한 영향과 이들 물질을 재래식 및 고도처리공법으로 어떻게 제거할 수 있는지 알아내기 위하여 계속되고 있다. 이러한 새로운 요구를 만족시키기 위하여 다수의 기존 2차 처리시설들이 개량될 것이며, 나아가 새로운 고도처리 시설이 건설될 것이다.

질소와 인은 처리된 폐수 배출 시 고려하여야 할 주요 영양염류이다. 질소와 인을 포함한 유출수 호수와 저수지의 부영양화를 가속시킬 수 있다. 즉, 질소와 인은 알은

하천에서 조류(Algae)와 수생식물(Water plant) 성장을 촉진시킬 수 있고, 조류와 수생식물의 존재는 수자원의 이용을 저해하게 된다. 처리된 유출수 내에 질소 농도가 높은 경우 수자원의 용존산소(DO/dissolved oxygen)를 고갈시키고, 수중생물에 독성(Toxicity)을 유발하고 염소소독의 효율에 영향을 끼치며, 공공보건상의 위해(Hazard)를 야기하고, 하수 재사용(Reuse)시 여부를 결정하는데 부정적 영향을 나타낼 수 있다.

고도처리 기술은 크게 물리·화학적 처리와 생물학적 처리, 다단계 처리로 대별할 수 있다. 물리·화학적 처리에서는 응집·침전, 분리, 흡착, 이온교환, 산화 등이 있다. 생물학적 처리에는 호기적 처리, 혐기적 처리, 호기적 처리와 혐기적 처리의 조합, 동물·식물에 의한 처리, 미생물에 의한 처리 등이 있다. 다단계 처리는 물리화학적, 생물학적 처리단계의 다양한 단위공정으로 이루어진 수처리 기술이다.

질소와 인을 제거하기 위한 여러 가지 방법 중에서 생물학적 제거가 가장 선호되고 있다. 이는 ①잠재적 처리 효율이 높고, ②공정의 안정성과 신뢰도가 높고, ③공정운전이 비교적 쉽고, ④토지 소요 면적이 작고, ⑤비용이 적당하기 때문이다. 또한 여러 가지 생물학적 공정들이 질소와 인의 혼합제거를 위하여 개발되고 있다. 이중 다수는 특허화 되었으며, 또한 활성슬러지 공정의 형태를 활용하지만 질소와 인의 제거를 위하여 혐기성(anaerobic), anoxic 그리고 호기성(aerobic) 지역이나 반응조를 혼합사용하고 있다. 가장 기본적인 인과 질소의 혼합제거에 사용되는 공정들은 A2O공정, 5단계 Badenpho공정, UCT공정, VIP공정과 연속회분식 반응조(SBR)가 있다.

고도처리시설현황은 전국 하수처리장중 111개소에 설치되어 있으며 계속적으로 설치를 확대하고 있다. 고도처리공법은 현재 가장 많이 사용하고 있는 공법인 A2O계열이 45%로 가장 많았으며 그 다음으로 SBR 공법이 36.9%로 많이 보급되고 있다.

표 3.10.25 하수처리장 고도처리 공법별 현황

처리공법	계	A2O계열	SBR계열	MEDIA	특수미생물	산화구
개소	111	50	41	9	4	7
비율	100(%)	45.0	36.9	8.1	3.6	6.3

하수처리수가 농촌용수에 영향을 미치는 지역중 고도처리시설이 설치된 지역은 31개소이며 특히 강화도내에 위치한 강화하수처리장의 경우는 인근 농지로 공급할 수 있는 관로가 매설되어 있으며 공급받고 있는 농경지의 경우는 우수농산물 인증을 취득하기 위해 매년 수질시험을 실시한다.

한편 UV소독조가 설치되어 있다고 하더라도 이는 하수처리수 방류수 수질기준에 의거한 시설이므로 재이용 수질기준에 적합한 용량으로는 볼 수 없으므로 이러한 지역의 경우 하수처리수의 유해성여부를 잘 고려하여 사용해야 한다.

다. 하수수질 현황

국내 일일하수발생량은 1980년에 6~7 백만톤이었으며 현재 일일하수발생량이 두배 이상으로 증가 하는데에 약 12년이 경과하였으나 세배로 증가하는데 소요되는 기간은 단지 4년으로 하수발생량의 증가 추세는 매우 급격하였다.

생활하수는 탄수화물, 유지, 단백질 등이 포함되어 있는 유기질이 대부분이며, 수질오염 중에서 가장 많은 부분을 차지하고 있어 인구가 밀집된 대도시 주변 수역의 수질을 악화시키고 있는 요인이 되고 있으며, 생활하수 중 가장 심각한 문제의 하나는 합성세제의 남용이다. 합성세제의 사용증가는 자연생태계의 파괴로 연결되는데, 강물 위에 떠 있는 세제거품은 햇빛을 차단하기 때문에 수중생활의 광합성을 막고, 산소공급량을 떨어뜨려 하천의 자정능력을 크게 저하시키며, 특히 세제성분 중 인산염에 의한 부영양화를 유발하는 등 수질오염을 가중시키게 된다.

2011년 기준 전국 하수도보급률은 90.9%로 총인구 51,716,745명중 47,033,614에게 보급되어 있으나, 고도처리 인구보급률은 58.2%로 아직 부족한 실정이다.

재래식 하수처리방법의 경우 2차처리 공정으로서 BOD성분의 유기물 및 고형물의 제거효과는 달성하였지만, 부영양화 현상의 주요 원인물질인 질소, 인 등의 영양염류의 제거에는 큰 효과를 나타내지 못하였다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 질소·인 제거를 위한 각종 기술들을 도입하였으나, 현재까지 선진국 및 국내 하수처리장에서 사용하거나 연구 중에 있는 생물학적 질소·인 제거공정은 무산소, 혐기성, 호기성의 단위반응조들이 조합을 이루고 단위반응조들 사이에서 혼합액을 순환시켜서 유기물 및 영양염류의 제거를 도모하는 다단 완전혼합·내부순환형 생물학적 영양염류 제거 하수처리시스템이 대부분이다. 일반적으로 다단 완전혼합·내부순환형 생물학적 영양염류 제거시스템은 저농도 유기성하수에서는 무산소 조건에서의 탈질 및 혐기 조건에서의 인 방출이 미비하기 쉬워 전체 시스템의 질소·인 제거효율이 만족스럽지 못한 경향이 있다.

생물학적 질소·인 제거를 위한 중요인자인 C/N비 및 C/P비도 선진국 하수비에 비하여 낮은 상황이어서, 기존의 내부순환포함 완전혼합형 생물학적 영양염류 제거 시스템으로는 선진외국에 비해 저하된 처리효율을 나타낼 수밖에 없다. 국내 분류식관거 하수의 BOD농도는 약 147mg/L로 합류식관거 하수의 BOD농도보다는 여전히 낮아 합류식관거 하수의 약 2배이지만 미국 및 유럽 하수의 0.6 및 0.7배로 낮은 경향을 보이고 있기 때문에 여전히 영양염류 제거면에서 불리하다. 특히 대부분의 국내 중소규모 하수처리시설의 경우, 유입수 부하변동이 매우 심하기 때문에 완전혼합형 생물학적 영양염류 제거 시스템을 적용하기에는 무리가 따른다고 볼 수 있다.

다음은 국내외 주요 국가별 하수의 유기물 및 영양염류 농도를 요약한 것이다. 이러한 하수관거시스템과 하수성상의 차이점들로 인하여 외국의 탈질·탈인 공정을 국내 하수에 바로 적용하기에는 큰 무리가 따를 수밖에 없으며, 우리나라 실정에 적합한 국내 탈질·탈인 기술의 개발은 국내 수질환경 개선을 위해서도 절실히 필요하다.

표 3.10.26 국내외 주요 국가별 하수의 유기물 및 영양염류 농도

항 목		유입하수				
		BOD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	BOD/T-N	BOD/T-P
한국	분류식	147	37	5.2	4.0	28
	합류식	75	29	3.7	2.6	20
일 본		150	30	5	5	30
미 국		220	40	8	5.5	27.5
유 럽		250	48	12	5.2	20.8

3.2. 농업기반시설 현황 분석

농업측면에서의 하수처리수는 이미 농촌지역 곳곳에서 사용중이다. 조사결과 농업용으로 직접 또는 간접적으로 이용하는 등 농업 및 농업기반시설에 영향을 주고 있는 하수처리장은 100개소 이상으로 이제는 적극적으로 하수재이용을 추진해야 하는 상황에 직면해 있다. 특히 대체수자원으로서 농업용 목적의 하수재이용은 최근 신재생에너지 사업과 함께 탄소배출을 저감하는 녹색성장 기술로 발전하고 있으며, 실질적인 농가의 소득을 증대하기 위한 방안으로 이용되고 있다. 따라서 전국적으로 확산되고 있는 하수처리수 농업용수 재이용 사업을 안전하고 효과적으로 추진하기 위해서는 현재까지 개발된 재이용요소 기술과 함께 추가적으로 실제 농업에 공급하기 위한 표준화된 현장기술이 필요하다.

농업용 목적의 하수재이용 조건은 수요자가 사용할 때 무색·무취여야하고 보건상 위험성을 줄이는 것이 중요하다. 따라서 세균성 미생물학의 특징과 종류, 질병 전염 기작을 이해하고 그 처리수준을 결정한 후 적절한 소독방법을 선택하는 것이 무엇보다 중요하다. 그리고 농업용수 재이용수질기준에 적합해야하고 작물재배실험 및 수질, 토양, 생태환경 영향뿐만 아니라 공중보건위생 위험도 등 종합적이고 체계적인 연구결과를 바탕으로 적용해야하는 어려움이 있다.

더욱이 농촌지역의 도시화, 산업화에 따라 비점원오염지역의 수질이 계속 악화되고 있는 실정이고 개인적으로 농사를 짓거나 특용작물을 재배하고 있는 지역은 양질의 관개용수를 찾기가 매우 힘든 상황으로 농경지내외에 확대되고 있는 화훼 및 특용작물단지에는 현재 적절한 수원공의 확보가 어렵기 때문에 장소와 품종에 심한 제약을 받고 있다. 또한 이를 해결하는데 있어서 기존의 정수처리방법은 비용이 상당히 많이 소요되기 등 경쟁력이 떨어지고 있으므로 농산품의 단가를 최소로 하면서 고품질의 친환경 농산물 생산이 가능한 농업용목적의 하수재이용시스템이 필요한 실정이다.

지금까지 농촌용수개발은 주곡 자급기반 확충을 위해 대·중규모개발, 대단위농업종합개발, 소규모개발, 지표수 보강개발, 서남해안간척개발 등을 통하여 논 용수 위주의 개발에 치중하여 왔다. 그러나 최근에는 쌀 생산 과잉에 의한 재고 증가가 누적되고 있고 이와 아울러

러 국제적으로 DDA 협상, FTA 추진 등 대외 여건변화에 따라 국제 농산물 시장개방 폭이 크게 증대될 것으로 예상된다. 이에 따라 국내의 쌀값이 크게 하락할 경우 쌀 생산의 포기 로 휴경지가 증가하게 되고 한번 훼손된 농지는 다시 농지로 전환되기가 거의 불가능 한 점을 감안 할 때 향후 쌀 생산정책은 식량안보를 위한 자급기반은 유지하면서 수급과 가격안정을 감안한 적정생산을 유도하는 방향으로 추진될 전망이다.

그리고 수리시설을 양적 확대개발 위주로 추진하여 2009년 기준 총 수원공수는 13,176개소, 수혜면적은 530 천ha, 용배수로는 97,690 km이며, 용수개발을 단위시설 또는 단위사업별 추진으로 기존 수자원을 지역간 용수수급 불균형 해소 등 효율적으로 활용할 수 있는 이용체계가 미흡하고 시설단위별로 급수관리를 할 수밖에 없어 유역 또는 수계단위의 체계적인 급수관리가 지난한 실정이다.

용수이용 실태를 보면 지금까지는 논 용수위주로 이용되어 왔으나 최근 식생활 패턴 변화에 의한 밭작물 수요증가로 밭 용수 공급요구가 확대되고 있고 농촌지역의 생활환경 개선이 요구됨에 따라 생활용수, 공업용수, 환경용수 등 농업 외의 타목적 용수 수요가 증가하고 있으며, 논 용수의 경우 단위당 생산량 증가에 의한 용수량 증가 및 기계화영농, 직파재배 등 영농방식 변화로 인한 용수 사용량이 증가하고 있어 농촌용수 증가에 적극적인 대책이 필요한 때이다.

또한 농촌지역의 수자원도 용수개발의 유무, 용수확보량 등에 따라 지역별 또는 유역별로 편중되어 있고 부존량의 분포도 큰 편차를 보이고 있어 지역에 따라 가뭄상습지가 상존하는 등 아직도 용수부족으로 영농에 어려움을 겪고있는 지역이 많다.

따라서 이러한 용수수급 불균형을 해소하고 향후 물 부족 사태에 대비하기 위해 농촌용수이용합리화 계획의 용수구역별로 수계단위 또는 유역단위별로 용수수급상황 검토를 통하여 부족수량을 체계적으로 개발하고 기 개발된 용수의 효율적인 이용·배분 및 관리체계를 구축할 수 있는 시스템이 필요하며 기존용수원의 리모델링 사업과 함께 대체수자원의 개발이 필수적이다.

가. 농촌용수 개발사업현황

그동안 농촌용수개발은 논 용수 위주의 지구별 단일목적으로 추진됨에 따라 밭 용수 등 타 목적 용수로의 전환이 어렵고 수계별로 각 시설간 공급체계가 달라 수자원을 효율적으로 활용할 수 있는 이용체계가 미흡하였으며, 또한 소규모 수리시설의 양적 확대개발 위주로 추진하여 수리답은 '02년 현재 880천ha로 전국 논면적 대비 77%로 비교적 높은 편이나 한밭빈도 10년 이상의 수리안전답은 434천ha로 38%에 불과한 실정으로 아직도 이상기후 등 자연재해에 대비한 안전 영농기반 조성에는 미흡한 편이다.

우리나라 농촌용수 개발사업의 종류는 대·중규모 개발사업, 소규모 개발사업, 지표수보강개발사업, 대단위농업개발사업, 서남해안 간척개발사업, 한밭대비용수개발사업, 밭기반정비사업, 농촌농업 생활용수개발사업 등 8가지로 대표된다. 표 3.10.27은 현재 국내에서 시행하고 있는 농촌용수 개발 사업의 종류 및 사업범위로서 지금까지 농촌용수 개발사업이 많이 진척되었으나 지구별 또는 단위사업별로 개발이 이루어짐에 따라 수리시설별 용수공급체계간의 연계가 없으며, 소규모 위주의 용수개발이 주로 시행되어

지역단위(대단위) 용수공급 계획이 부재하고 농업진흥지역 위주의 사업이 아니라 급수면적확대 위주의 개발사업으로 인해 실제 용수가 지역별로 편중되는 현상이 발생하여 많은 노력에도 불구하고 여전히 용수가 부족한 지역이 발생하고 있다.

표 3.10.27 농촌용수개발 사업의 종류

사업명	사업목적	사업범위
대·중규모 개발사업	수혜면적 50ha이상의 가뭄상습지역에 수리시설을 설치하여 농촌용수를 확보·공급	<ul style="list-style-type: none"> · 대규모 : 수혜면적 3,000ha이상 · 중규모 : 수혜면적 50 ~ 3,000ha미만 · 가뭄상습지역 특별대책지구
소 규모 개발사업	수혜면적 50ha미만의 가뭄상습지역에 수리시설을 설치하여 농촌용수를 확보·공급	<ul style="list-style-type: none"> · 저수지, 양수장, 용수로 등을 설치하여 농촌용수확보·공급 · 사업범위 : 수혜면적 50ha미만
지표수보강 개발사업	기존수리시설에 의한 수리답 중 농업용수가 부족한 지역에 시설을 확장·보강 또는 재개발	<ul style="list-style-type: none"> · 저수지 더쌓기, 양수장 규모확장, 재개발 및 용수재이용 시설 등을 설치하여 부족수량 확보·공급
대단위 농업 개발사업	대규모 하천수계를 중심으로 용수개발, 경지정리, 배수개선, 간척 등의 각종 농업생산기반 정비	<ul style="list-style-type: none"> · 15지구(162천ha) 완공 · 7지구(121천ha)시행중
서남해안 간척 개발사업	서남해안에 산재되어 있는 간석지와 유희토지를 우량농지로 개발	<ul style="list-style-type: none"> · 근해의 간석지에 방조제를 축조 및 농경지 조성 및 수자원 확보
한발대비용수개발사업	매년 반복되는 가뭄발생지역의 당면 영농을 위한 긴급용수대책	<ul style="list-style-type: none"> · 하천굴착, 간이용수원개발, 양수급수에 따른 유희대 및 전기료 지원
밭기반 정비사업	개발여건이 양호한 채소류 주산단지 및 집단화된 밭을 대상으로 용수개발, 농로개설 등 생산기반구축	<ul style="list-style-type: none"> · 용수원개발 및 이용시설 설치 · 경작로 정비 · 밭 경지정리
농촌농업생활용수 개발사업	상수도 공급이 어려운 전국 면지역 농촌자연 마을에 암반관정을 개발	<ul style="list-style-type: none"> · 암반관정개발 및 저수조, 송·급수관로 등 이용시설 설치

※ 자료 : 농촌용수 공급체계 재편계획(2003, 농림부)

나. 농지이용현황

우리나라 토지이용현황은 전 국토면적 9,959천ha중 임야가 6,412천ha로 64.4%를 차지하고 있고 농경지 면적은 1,862천ha로 18.7%, 대지 등 기타면적이 1,685천ha로 16.9%를 차지하고 있다. 시도별 경지면적 현황을 보면 전라남도가 경지면적 329천ha로 전국 경지면적 1,862천ha 대비 17.7%를 차지하고 있고, 서울특별시 및 6대 광역시가 82천ha로 약 4.4%를 점유하고 있다. 이 중에서 논은 전라남도가 221천ha로 전국 논면적 1,138천ha 대비 19.4%를 차지하고 있고, 밭은 경상북도가 136천ha로 전국 밭면적 724천ha 대비 18.8%를 차지하고 있다.

농지는 보전하여야 할 것과 비농업목적으로 이용하여야 할 것을 구분하여 보다 이용을 효율화하기 위해 1990년도에 「농어촌발전특별조치법」을 제정하여 농업진흥지역 제도를 도입하였다. 농업진흥지역은 농업의 토대 및 항구적인 농업생산기지의 건설, 농지자원의 효율적 이용과 보전, 농업의 생산성 향상을 위해 집단화된 우량농지를 대상으로 지정하였으며, 1994년 제정된 「농지법」에 계승되어 오늘에 이르고 있다.

농업진흥지역 지정현황은 2008년말 기준 1,033천ha로 1992년 최초 지정시(10,008천ha) 대비 25천ha(2.5%)가 증가하였으며, 이중 진흥구역이 925천ha이고 보호구역이 108천ha이다. 이를 지목별로 구분하면 논이 716천ha, 밭이 90천ha, 과수원 및 기타가 144천ha이다. 농업진흥지역 지정현황 및 지목별 농업진흥지역 현황은 다음과 같다.

표 3.10.28 농업진흥지역 지정현황 (면적단위 : 천ha)

지 정 면 적			농 지 면 적					비농지 면 적
계	진흥구역	보호구역	소계	답	전	과수	기 타	
1,033	925	108	950	716	90	9	135	83

표 3.10.29 농업진흥지역 지정(2008.12.31 기준) (면적단위 : ha)

도 별	전체 농지 (A)	지 정 면 적			대 비(%) (B/A)
		계(B)	진흥구역	보호구역	
합 계	1,758,795	1,033,494.4	925,492.1	108,002.3	58.7
경 기	187,851	114,406.3	108,835.6	5,570.7	60.9
강 원	113,101	49,594.6	47,515.6	2,079.0	43.8
충 북	121,865	57,658.3	50,716.0	6,942.3	47.3
충 남	241,857	175,570.2	156,240.1	19,330.1	72.6
전 북	208,521	141,340.6	126,430.2	14,910.4	67.8
전 남	311,081	224,301.2	193,124.9	31,176.3	72.1
경 북	280,568	153,314.4	135,418.0	17,896.4	54.6
경 남	166,674	96,500.6	87,796.3	8,704.3	57.9
체 주	56,693	-	-	-	-
특·광역시	70,584	20,808.2	19,415.4	1,392.8	29.5

다. 수리답 현황

2008년말 기준 총 수리답 면적은 831,553.2 ha로서 빈도별로 살펴보면 평년은 200,370.0ha(19.2%), 3년빈도는 73,527.5ha(7.0%), 5년빈도는 39,387.2ha(3.8%), 7년 빈도는 22,037.0ha(2.1%), 10년 이상은 496,231.5ha(47.4%)를 차지하고 있다. 시도별 수리답 현황은 다음과 같다.

표 3.10.30 시도별 수리답 현황

(단위 : ha)

구 분	면 적 (ha)	수 리 상 태 별					
		수 리 답				수리불안전답	
		계	한국 농어촌공사	시·군	비율(%)	면 적	비율(%)
계	1,045,991	831,553	530,008	301,545	79.5	214,438	20.5
서울	544	203	203	-	37.2	341	62.8
부산	5,147	5,073	4,503	570	98.6	74	1.4
대구	5,778	5,496	3,808	1,688	95.1	282	4.9
인천	15,401	9,726	7,856	1,868	63.1	5,675	36.9
광주	8,310	8,162	4,979	3,183	98.2	148	1.8
대전	2,214	1,882	477	1,405	85.0	332	15.0
울산	7,802	7,380	3,440	3,940	94.6	422	4.4
경기	105,936	73,747	52,156	21,591	69.6	32,189	29.4
강원	45,583	36,363	15,682	20,681	79.8	9,220	20.2
충북	54,871	45,009	29,748	15,261	82.0	9,862	18.0
충남	176,107	137,043	95,176	41,867	77.8	39,064	22.2
전북	156,208	126,313	96,332	29,981	80.9	29,895	19.1
전남	205,738	152,111	95,079	57,032	73.9	53,627	26.1
경북	146,486	127,206	66,597	60,609	86.8	19,280	13.2
경남	109,782	95,807	53,948	41,859	87.3	13,975	12.7
제주	84	32	22	10	38.5	52	61.5

* 자료 : 농업생산기반정비사업통계연보 (2008, 농림부, 한국농촌공사)

3.3. 농업기반시설에 영향을 미치는 하수처리장 분석

가. 하수처리장 수량데이터

상기 설명한 농촌용수구역을 기준으로 하여 하수처리장과 관련된 데이터를 공간자료와 속성자료로 구분하여 GIS 자료로 구축하였다. 기존에 하수처리수를 사용하고 있는 지역을 관리하고 하수처리장 주변 농경지에 용수를 공급하기 위해서는 농촌용수구역별 농촌용수수요량의 정확한 산정뿐만 아니라 하수처리수를 공급할 수 있는 수리시설물과의 거리와 이를 통해 공급할 수 있는 수해면적 및 용수간선의 정보가 수집되어야 한다.

한강수계에 포함되어 있는 하수처리장은 77개로서 9,240천톤/day의 처리수를 한강수계에 방류하고 있고, 하수처리장이 포함된 농촌용수구역은 36개소로 나타났다. 낙동강의 경우 51개의 하수처리장에서 3,080천톤/day의 처리수를 낙동강수계에 방류하고 있으며, 하수처리장이 포함된 농촌용수구역은 39개로 분류되었다. 이렇게 수집된 수계별 하수처리장의 농촌용수구역별 분류를 통해 용수구역별 용수량에 대해 한발씩 각 용수구역별 대체수자원 확보로 간주할 수 있다. 왜냐하면 농촌용수구역은 2003년도 농촌용수재편계획을 통해서 수계를 기준으로 작성되었으므로 실제 용수수급 계획시 각 용수구역내로 방류되는 하수처리수를 구역내 하수처리장과 인접한 수리시설물을 이용하여 구역내 수해지역에 공급되는 계획을 수립해야 할 것이다.

전국하수처리장의 수계별 하수처리장의 시설용량과 처리방법 등 하수처리장의 도형정보와 속성정보를 구축하기 위해 ESRI shape 파일로 작성하여 수계별, 농촌용수구역별 하수처리장의 공간정보를 구축하였고 이를 바탕으로 각 하수처리장별로 주소, 시설용량, 처리방법, 방류수역 등 일반적인정보와 하수처리장별 대상 용수구역명 등 속성정보를 작성하였다.

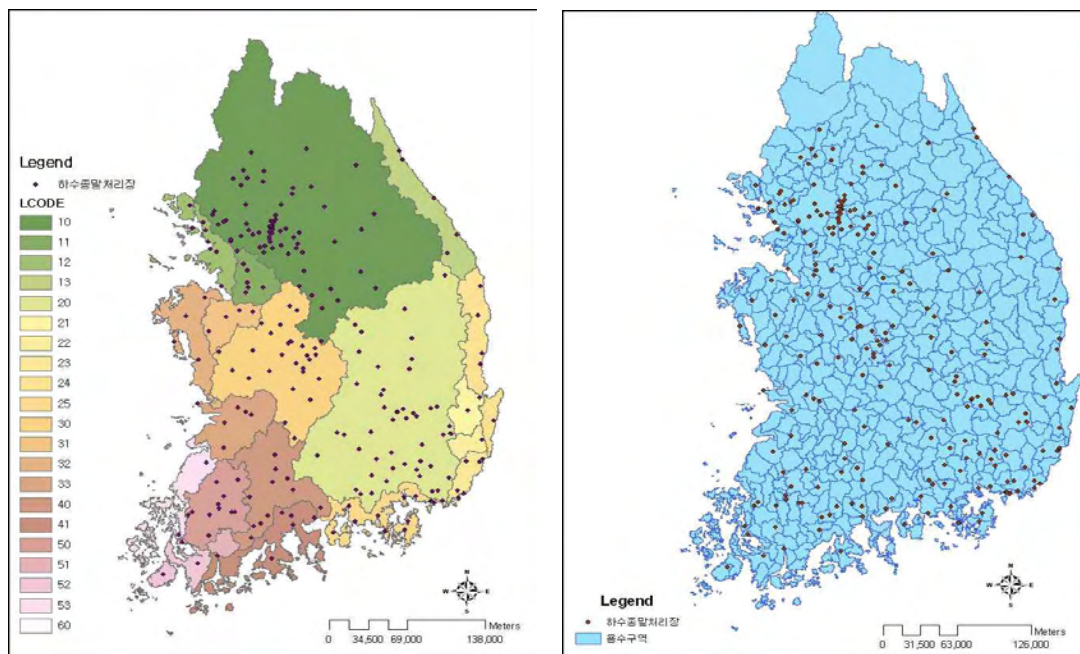


그림 3.10.2 수계별, 농촌용수구역별 하수처리장 위치도

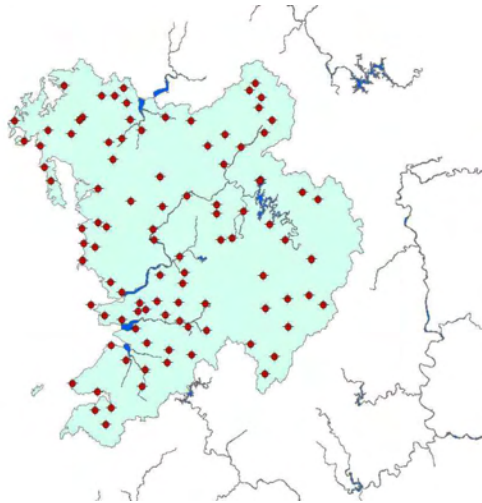
표 3.10.31 농촌용수구역별 하수처리장 속성정보 작성현황

명칭	시설용량	처리방법	주 소	방류지	권역	수계	용수 구역
둔내	1.5	접촉산화법	강원 횡성군 둔내면 우용리 377-14		한강수계	남한강권역	횡둔
단양	5.0	장기포기	충북 단양군 단양읍 상진리 234-1	충주댐	한강수계	남한강권역	단대
제천	70.0	표준활성	충북 제천시 천남동 50	장평천	한강수계	남한강권역	제천
내속	4.0	KIDEA SBR	충북 보은군 내속리면 중판리 55-4일원	달천	한강수계	팔당호권역	보미
수안보	14.0	회전원판	충북 충주시 상모면 수회리 산32	석문천	한강수계	팔당호권역	중상
괴산	4.0	산화구	충북 괴산군 괴산읍 대덕리 14	동진천	한강수계	팔당호권역	괴칠
음성	7.0	표준활성	충북 음성군 음성읍 평곡리 45	달천	한강수계	팔당호권역	괴소

각 유역별 하수처리장 현황도는 다음과 같다.



a) 한강유역(10) 하수처리장 현황도



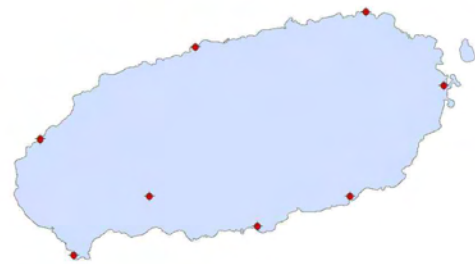
b) 금강유역 하수처리장 현황도



c) 영산강유역 하수처리장 현황도



d) 낙동강유역 하수처리장 현황도



e) 제주 하수처리장 현황도

그림 3.10.3 수계별 하수처리장 현황도

나. 수계별 하수처리장 수질데이터

수계별로 분류한 하수처리수의 수질현황을 분석하여 수계별 수질비교를 통해 실제 하수처리수를 농촌용수로 이용하기위해 방류되는 하수처리수중 농촌용수 재이용을 위한 재처리기술이 필요한 수량을 판단하기 위해서이다. 재이용 정보 관리시스템 상에 하수처리수의 수질을 관리함으로서 농촌용수로 재이용을 위한 재처리기술의 현장 적용시 유형별 적정 처리용량 결정에 필요한 기초자료를 제공하는데 목적이 있다.

환경부(2010)에서 작성한 하수처리장의 수질분석 결과를 속성정보로 구축하였고, 수계별 수질(농도)을 일처리량으로 가중평균하여 유역별 수질현황(농도)속성정보를 구축하였다.

표 3.10.32 수계별 하수처리장 수질현황

(단위 : mg/L)

권역구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균군
한강서울	4.3	8.4	3.2	9.949	0.707	227
한강고양	3.6	9.9	3.0	11.079	0.724	300
강릉남대천	5.2	10.7	4.9	13.841	0.979	654
남한강상류	2.0	6.5	2.0	6.779	0.544	31
삼척오십천	3.8	6.3	2.3	9.157	1.212	151
섬강	5.2	10.0	5.4	10.481	0.740	185
소양강	4.3	7.9	4.1	7.000	0.766	155
안동댐	3.1	3.6	3.9	6.554	0.277	75
양양남대천	3.5	10.9	3.2	11.969	1.062	78
의암댐	3.1	7.5	3.4	6.739	0.821	79
춘천댐	4.6	8.2	4.4	9.649	1.025	30
평창강	3.1	6.9	2.8	6.768	0.340	32
한탄강	3.3	8.8	2.7	9.893	0.665	46
홍천강	5.2	13.9	4.3	14.468	0.368	490
경안천	2.2	6.8	1.9	8.570	0.483	79
남한강하류	3.9	9.1	4.2	10.046	0.881	194
시화호	4.9	10.9	4.4	9.574	0.566	1283
안성천	3.2	8.9	2.7	8.250	0.656	191
의암댐	4.4	9.8	3.9	12.020	0.866	180
임진강상류	4.5	7.3	3.4	7.171	0.635	337
의암댐	3.1	8.0	2.5	9.371	0.756	127
청평댐	3.4	8.0	3.1	9.547	0.668	30
팔당댐	1.9	5.8	1.0	7.863	1.004	47
한강서해	4.9	10.7	4.7	10.737	0.711	327
가화천	2.9	6.9	2.5	10.250	0.919	197
거제도	4.9	8.9	3.5	11.150	0.913	318
낙동강남해	3.7	11.1	3.3	8.897	0.824	484
낙동강하구연	2.1	7.8	2.8	8.835	0.720	62
낙동밀양	2.1	6.8	2.2	8.039	0.757	51
낙동창녕	2.8	5.6	2.7	6.362	0.735	329

표 3.10.32 수계별 하수처리장 수질현황 (계속)

(단위 : mg/L)

권역구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균군
남강	2.7	9.4	3.6	10.460	0.834	81
남강댐	1.3	6.0	1.5	8.622	0.954	131
남해도	3.6	7.8	4.4	6.002	1.291	390
섬진강하류	4.3	7.0	6.1	7.454	1.021	34
합천댐	2.6	5.9	4.3	7.640	0.781	166
황강	2.0	6.6	1.3	8.468	0.463	30
감천	4.6	12.5	1.9	12.349	1.415	127
금호강	2.9	8.1	2.7	12.042	1.089	213
낙동구미	3.1	8.9	2.9	11.277	0.944	30
낙동왜관	2.3	8.6	2.5	6.705	0.652	109
내성천	4.1	9.5	4.1	11.637	1.059	169
대중천	2.1	8.3	1.9	8.565	0.440	10
밀양강	4.1	9.2	3.8	10.040	0.838	79
병성천	1.8	6.8	1.4	7.342	0.733	3
안동댐하류	4.9	8.6	4.0	10.779	0.560	95
영강	1.8	7.3	2.6	5.736	0.895	24
영덕오십천	2.9	9.1	2.6	10.919	1.005	47
왕피천	2.3	6.2	2.0	7.724	0.698	24
위천	1.4	6.3	1.4	6.953	0.601	38
임하댐	4.9	9.0	5.3	6.420	0.969	13
태화강	3.6	11.6	2.7	8.836	0.312	19
형산강	3.3	7.5	2.5	6.945	0.563	46
회천	2.0	7.6	3.5	8.085	0.936	31
영산강상류	3.2	8.8	3.1	10.582	1.041	265
영산강중류	2.9	9.4	2.9	12.971	1.017	183
금호강	1.7	8.2	1.7	8.030	0.763	467
낙동고령	1.7	16.2	2.5	9.067	0.571	475
갑천	3.7	9.3	3.2	8.060	0.724	333
수영강	3.8	9.4	3.2	11.571	0.766	228
회야강	4.0	13.0	3.1	10.745	0.555	860
태화강	2.0	6.7	1.8	8.113	0.754	4
대중천	5.3	10.7	3.6	8.584	0.482	429
고막원천	4.8	4.5	7.7	6.358	1.363	37
보성강	3.8	6.7	3.3	10.487	1.236	67
섬진강하류	2.2	6.7	2.3	8.423	0.902	80
섬진강서남해	3.0	8.8	4.4	9.865	1.072	152
섬진곡성	2.0	3.0	1.6	10.072	0.880	65
수어천	3.3	8.9	2.8	8.651	0.752	67
순창	3.2	9.2	3.1	8.229	0.974	17
신안군	4.6	12.0	4.0	12.647	1.242	107

표 3.10.32 수계별 하수처리장 수질현황 (계속)

(단위 : mg/L)

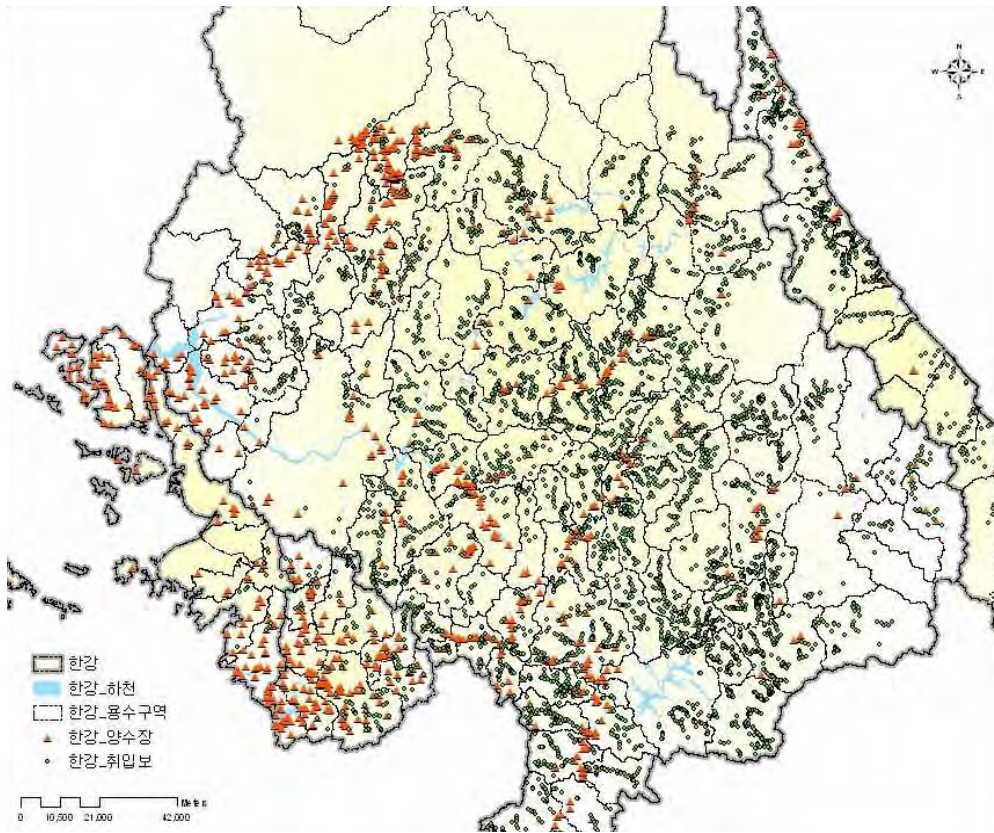
권역구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균군
영암방조제	2.5	10.1	5.1	8.540	1.183	198
영암천	4.5	6.3	1.8	7.061	0.731	53
와탄천	4.4	10.4	4.5	11.563	0.967	488
완도	5.1	10.0	4.8	11.813	0.836	193
이사천	3.8	7.9	3.8	10.730	1.033	104
주암댐	2.8	6.8	3.2	8.831	0.906	51
지석천	4.3	7.7	4.5	11.055	1.076	195
황룡강	3.5	8.3	2.3	5.756	0.448	291
진도	2.4	7.8	3.7	10.172	1.139	49
금강서해	3.7	7.8	3.5	9.506	0.938	139
금강하구언	5.4	8.6	5.8	9.476	0.830	145
논산천	6.7	12.7	7.5	13.734	1.607	515
남강댐	2.6	6.5	2.5	6.214	1.159	49
동진강	3.6	9.0	3.1	8.093	0.739	35
만경강	3.4	9.0	3.0	8.385	0.842	104
무주남대천	2.7	6.1	2.3	5.932	0.843	6
새만금	4.0	9.3	3.8	10.900	0.640	56
섬진강댐	1.4	6.4	1.3	5.989	0.840	30
오수천	2.5	10.2	2.8	12.084	1.177	30
요천	5.0	8.9	3.9	10.365	1.088	165
용담댐	2.2	5.9	2.2	5.510	0.744	2
주진천	3.0	9.0	2.9	8.580	0.777	30
직소천	2.5	5.1	1.8	3.467	0.740	30
금강공주	3.0	7.1	2.3	9.090	0.459	262
미호천	3.7	8.9	3.6	9.360	0.642	349
대호방조제	3.4	8.5	3.3	9.917	0.797	84
부남방조제	3.8	6.8	2.8	11.346	0.974	95
삼교천	3.5	8.1	3.0	10.327	0.869	165
영동천	3.7	7.1	1.9	8.565	0.634	57
달천	3.3	6.7	3.2	8.408	0.700	42
대청댐	3.0	7.7	4.0	9.385	0.708	72
보청천	1.5	5.8	2.5	6.191	0.800	1
충주댐	4.4	7.9	2.1	7.738	0.970	171
충주댐하류	2.8	5.1	1.3	7.337	0.442	30
평창강	1.6	6.7	1.5	7.458	0.845	30
제주동해	3.3	8.4	3.8	10.576	1.344	129
제주서해	4.5	6.0	4.0	8.636	0.950	101
제주남해	6.1	11.6	6.2	12.308	0.575	41
제주북해	7.2	12.5	5.8	9.998	0.615	152

다. 구역별 농업기반시설 자료

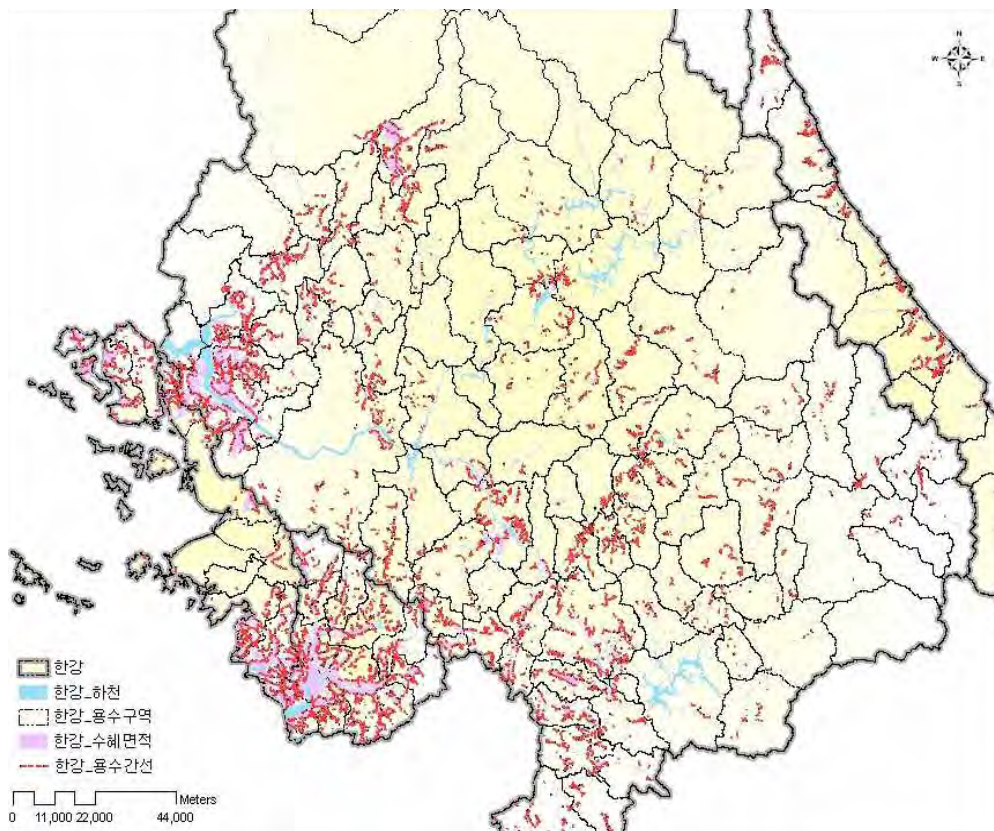
용수구역별 농업기반시설의 주요내용은 용수구역별 하천정보, 수리시설(저수지, 취입보, 양수장), 용수간선, 수혜면적 등이며, 용수구역별 자료구축내용은 용수구역별 수계정보와 구역면적, 그리고 수리시설물과 논면적, 밭면적을 GIS 자료로부터 추출하여 농촌용수구역 506개별 농업기반시설 데이터를 구축하였다.

표 3.10.33 용수구역별 농업기반시설 및 농경지 현황

ID	용수 구역	구역면적 (ha)	대권역	중권역	하천명	저수지 (개소)	양수장 (개소)	취입보 (개소)	논면적 (ha)	밭면적 (ha)
1	평진	45,178	한강	남한강상류	오대천	1	1	67	128.7	1656.8
2	정도	42,619	한강	남한강상류	골지천	1	2	9	151.0	1342.9
3	정입	25,541	한강	남한강상류	골지천	1	1	24	195.6	745.4
4	삼하	29,178	한강	남한강상류	골지천	0	5	15	109.7	333.0
5	정신	56,740	한강	남한강상류	한강	0	1	13	154.0	2408.3
6	정동	22,131	한강	남한강상류	어천	0	0	13	60.5	384.1
7	정남	23,359	한강	남한강상류	지장천	0	0	3	8.0	240.0
8	평용	26,717	한강	평창강	속사천	2	0	101	123.1	997.7
9	평대	22,155	한강	평창강	평창강	0	0	59	221.7	929.1
10	평방	39,929	한강	평창강	평창강	2	11	89	791.2	1731.4
11	횡둔	30,549	한강	평창강	주천강	7	1	75	810.6	1499.0
12	영주	30,186	한강	평창강	주천강	4	2	86	566.0	1125.4
13	영송	15,984	한강	평창강	평창강	9	1	115	437.6	1321.5
14	영북	11,856	한강	평창강	평창강	0	1	31	135.9	551.2
15	영상	49,526	한강	충주댐	옥동천	0	0	67	474.5	1345.7
16	단가	38,575	한강	충주댐	한강	3	4	135	391.3	1922.6
17	단적	11,653	한강	충주댐	매포천	8	0	62	466.4	798.0
18	단대	36,441	한강	충주댐	한강	3	0	141	318.4	1242.9
19	제산	62,012	한강	충주댐	한강	15	5	138	1151.7	3228.3
20	제천1	11,458	한강	충주댐	장평천	15	1	49	814.7	907.7
21	원신	15,378	한강	충주댐	제천천	3	0	62	499.9	717.8
22	제봉	23,341	한강	충주댐	제천천	9	0	79	862.6	1228.8
23	보미	47,963	한강	달천	달천	43	26	128	2272.2	2153.1
24	괴청	19,723	한강	달천	달천	4	3	19	570.7	741.0
25	괴장	18,236	한강	달천	쌍천	11	3	40	683.4	736.7
26	괴칠	21,018	한강	달천	달천	24	10	55	3186.2	2333.0
27	괴소	14,320	한강	달천	음성천	27	15	51	1504.5	1394.1
28	중신	15,059	한강	달천	요도천	29	9	79	1965.9	1169.3
29	충주1	3,983	한강	달천	충주천	6	2	7	464.6	846.8
30	중상	21,148	한강	달천	달천	6	15	42	1078.2	1200.4
31	원양	52,442	한강	충주댐하류	한강	58	36	178	3780.1	3146.6
32	횡청	28,371	한강	섬강	계천	7	9	75	809.7	694.0
33	홍공	15,538	한강	섬강	금계천	10	6	54	785.4	445.4



a) 한강유역 수리시설 현황도



b) 한강유역 수혜면적 및 용수간선

그림 3.10.4 한강유역 농업기반시설

3.4. 간접재이용 유입수 예측

하수처리수가 유입되는 하천을 수계별로 분류하여 하천의 평균 농도 및 갈수량을 분석하여, 기 분석된 수계별 하수처리장 방류수의 농도 및 유량이 하천에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이는 방류되는 하수처리수중 농촌용수 재이용을 위한 재처리기술이 필요한 수량 및 적합한 재처리기술을 선정하기 위해서이다.

가. 수계별 하천 유량 조사

하천기본계획에서 발췌하여 하천의 갈수량을 산정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

표 3.10.34 수계별 하천 갈수량

권역구분	하천기본계획사업명	하천등급	수립년도	수립기관	수립구간 길이 (km)	갈수량 (m ³ /sec)
한강서울	한강하천정비기본계획(보완)(팔당댐~하구)	국가	2002년	건교부	91.64	211.7
강릉남대천	강릉남대천하천정비기본계획	지방1	1992년	강원도	16.00	0.88
삼척오십천	삼척오십천하천정비기본계획	지방1	1992년	강원도	30.00	1.35
섬강	북한강수계하천정비기본계획(보완)(북한강외3개하천)	국가	2002년	건교부	19.57	3.409
소양강	북한강수계하천정비기본계획(보완)(북한강외3개하천)	국가	2002년	건교부	11.25	14.96
양양남대천	양양남대천하천기본계획(변경)보고서	지방2	2011년	국토해양부	16.60	2.009
평창강	평창강하천정비기본계획	지방1	1986년	강원도	47.30	1.63
한탄강	한탄강수계하천정비기본계획	지방1	1998년	경기도	56.75	5.78
홍천강	홍천강 등 6개 하천기본계획 및 하천시설관리대상	지방1	2010년	국토해양부	5.42	6.65
경안천	경안천권역 하천기본계획 및 하천시설관리대상작성	국가	2011년	국토해양부	22.50	0.929
남한강하류	한강하천기본계획(보완)(팔당댐~충주댐 구간)	국가	2011년	국토해양부	114.50	41.29
시화호	안산시(안산천,신길천) 하천기본계획(변경)보고서	지방2	2008년	국토해양부	10.35	0.15
안성천	안성천수계하천정비기본계획(변경)(안성천외3개하천)	국가	2002년	건교부	37.30	0.021
임진강	임진강 하천기본계획(변경)	국가	2011년	국토해양부	84.50	24
청평댐	북한강 하천기본계획(변경)	국가	2010년	국토해양부	158.82	53.33
팔당댐	한강하천기본계획(보완)(팔당댐~충주댐 구간)	국가	2011년	국토해양부	114.50	97.27
가화천	가화천하천정비기본계획	국가	1996년	건교부	10.40	0.06
낙동강하구언	낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	167.20	80.38

표 3.10.34 수계별 하천 갈수량 (계속)

권역구분	하천기본계획사업명	하천등급	수립년도	수립기관	수립구간 길이 (km)	갈수량 (m ³ /sec)
남강	낙동강하천정비기본계획(보완)(밀양강-남강합류부)	국가	1992년	건교부	78.75	2.9
섬진강하류	섬진강수계 하천정비기본계획(보완)(섬진강요천..	국가	2003년	국토해양부	173.30	11.2
황강	황강하천정비기본계획(변경)	지방2	1996년	건교부	4.40	1.15
감천	감천 하천기본계획(보완)	국가	2010년	국토해양부	39.00	0.47
금호강	금호강하천정비기본계획(보완)	국가	1997년	건교부	69.30	0.6
낙동구미	낙동강수계 하천기본계획(변경)(낙동강 국가하천..	국가	2009년	국토해양부	232.00	29.63
낙동왜관	낙동강수계 하천기본계획(변경)(낙동강 국가하천..	국가	2009년	국토해양부	232.00	39.96
내성천	내성천하천정비기본계획(변경)	지방1	2001년	건교부	26.00	1.35
대중천	대중천하천정비기본계획	지방2	1997년	경상북도	11.00	0.47
밀양강	낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	167.20	8.7
병성천	병성천 하천기본계획(변경)	지방2	2011년	경상북도	30.00	0.23
안동댐하류	낙동강수계 하천기본계획(변경)(낙동강 국가하천..	국가	2009년	국토해양부	232.00	30.99
영강	영강하천정비기본계획	지방2	2004년	경상북도	17.40	0.234
영덕오십천	오십천하천정비기본계획	지방2	1996년	경상북도	17.00	1.3
왕피천	왕피천하천정비기본계획	지방2	1994년	경상북도	19.00	0.26
위천	위천하천정비기본계획	지방2	1997년	경상북도	29.00	0.424
태화강	태화강하천정비기본계획	국가	1987년	건교부	11.00	0.484
형산강	형산강외2개하천하천정비기본계획	지방2	2002년	울산광역시	5.40	0.057
회천	회천하천정비기본계획	지방1	1989년	경상북도	24.50	1.21
영산강상류	영산강 하천기본계획(변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	111.68	4.48
영산강하류	영산강 하천기본계획(변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	111.68	7.53
낙동고령	낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	167.20	51.76
갑천	금강수계 하천기본계획(금강,미호천,갑천,유등천)	국가	2011년	국토해양부	33.53	2.28
수영강	수영강하천정비기본계획	지방2	2003년	부산광역시	19.20	0.07

표 3.10.34 수계별 하천 갈수량 (계속)

권역구분	하천기본계획사업명	하천등급	수립년도	수립기관	수립구간 길이 (km)	갈수량 (m ³ /sec)
회야강	회야강외 2개소 하천정비기본계획	지방2	2006년	울산광역시	6.60	0.5
고막원천	영산강 하천기본계획 (변경) 보고서	국가	2009년	건교부	22.33	0.47
보성강	삼진강수계 하천정비기본계획 (보완)(삼진강,요천...	국가	2003년	국토해양부	173.30	3
수어천	수어천,성두천,옹동천하천정비기본계획	지방2	2003년	광양시	23.25	0.101
영암천	영암천외2개하천하천정비기본계획	지방2	1992년	전라남도	15.00	0.1911
와탄천	와탄천외2개하천하천정비기본계획	지방2	1991년	전라남도	26.00	1.423
이사천	황전천외2개하천하천정비기본계획	지방2	1991년	전라남도	16.30	0.356
지석천	영산강 하천기본계획 (변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	111.68	1.43
황룡강	영산강 하천기본계획 (변경) 보고서	국가	2009년	국토해양부	111.68	1.23
금강하구언	금강수계 하천기본계획 (금강,미호천,갑천,유등천)	국가	2011년	국토해양부	33.53	47.75
논산천	논산천 하천기본계획용역	지방1	2011년	논산시	11.63	0.29
동진강	동진강,만경강 하천정비기본계획(보완)	국가	1993년	건교부	19.20	0.45
만경강	동진강,만경강 하천정비기본계획(보완)	국가	1993년	건교부	19.20	1.76
무주남대천	남대천하천정비기본계획	지방1	2001년	전라북도	12.20	1.419
오수천	오수천 하천기본계획	지방2	2010년	경상남도	1.33	0.0135
요천	삼진강수계 하천정비기본계획 (보완)(삼진강,요천...	국가	2003년	국토해양부	173.30	1.1
용담댐	금강수계 하천기본계획 (금강,미호천,갑천,유등천)	국가	2011년	국토해양부	33.53	2.87
주진천	주진천하천정비기본계획	지방2	1989년	전라북도	27.00	0.285
직소천	직소천하천정비기본계획	지방2	2007년	전라북도	3.28	0.51
금강공주	금강수계 하천기본계획 (금강,미호천,갑천,유등천)	국가	2011년	국토해양부	33.53	34.74
미호천	금강수계 하천기본계획 (금강,미호천,갑천,유등천)	국가	2011년	국토해양부	33.53	9.14
삼교천	삼교천하천정비기본계획(보완)	국가	1994년	건교부	31.60	0.26
달천	달천 하천기본계획(보완) 및 하천시설관리대장작성	국가	2010년	건교부	16.00	3.28
보청천	보청천하천정비기본계획	지방1	1989년	충청북도	27.00	1.25
충주댐	한강하천기본계획(보완) (필담댐~충주댐 구간)	국가	2011년	건교부	114.50	13.58

나. 수계별 하천 수질 조사

환경부에서 제공하는 2007년부터 2012년까지의 월별 하천수질 자료를 기초로 하천의 평균 수질 농도를 분석하였다.

표 3.10.35 수계별 하천 수질 현황

(단위 : mg/L)

권역구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균군
한강서울	4.20	7.51	111.70	5.60	0.33	81050.85
강릉남대천	0.88	2.25	5.96	2.87	0.03	6372.35
삼척오십천	0.49	1.68	1.88	2.03	0.02	379.82
섬강	1.61	4.56	11.92	3.56	0.14	5116.64
소양강	0.44	2.70	4.46	1.55	0.02	215.48
양양남대천	0.52	1.87	2.55	1.41	0.02	2387.71
평창강	0.81	2.83	15.45	3.03	0.04	793.12
한탄강	4.04	7.52	14.76	5.57	0.13	28104.79
홍천강	0.90	3.03	5.16	2.76	0.02	525.63
경안천	2.75	6.10	13.34	3.72	0.09	21346.33
남한강하류	1.29	3.92	10.90	2.20	0.04	1142.73
안성천	5.66	9.65	27.34	5.47	0.27	64259.38
임진강	1.72	5.89	102.94	2.85	0.11	13016.78
청평댐	1.05	3.56	9.26	1.69	0.03	-
팔당댐	1.19	3.80	8.37	2.12	0.04	1001.78
낙동강하구언	2.05	6.32	24.19	2.75	0.11	-
남강	1.97	4.66	12.26	2.34	0.11	2681.74
섬진강하류	1.11	3.23	19.82	1.22	0.04	1993.30
황강	0.68	3.24	15.21	1.61	0.04	425.29
감천	1.14	4.17	10.05	4.06	0.16	962.74
금호강	3.44	8.79	15.00	6.94	0.52	1981.59
낙동구미	1.05	4.06	15.33	2.37	0.04	220.60
낙동왜관	1.69	5.09	21.78	2.84	0.09	1477.70
내성천	0.97	2.93	16.33	4.19	0.12	789.03
대중천	0.65	1.79	2.03	1.98	0.03	422.30
밀양강	2.24	4.75	10.72	2.74	0.11	706.00
병성천	1.53	4.64	12.84	3.39	0.16	995.16
안동댐하류	0.88	4.24	6.81	1.73	0.03	409.99
영강	1.47	3.55	8.19	2.13	0.05	816.93
영덕오십천	0.69	2.08	1.66	2.55	0.02	148.26
왕피천	0.55	2.03	1.81	0.90	0.02	151.23
위천	1.42	4.97	16.64	2.63	0.05	410.32
태화강	2.22	5.00	7.57	2.20	0.08	8620.60
형산강	2.41	4.14	14.35	2.45	0.10	1544.74
회천	1.07	3.55	9.49	1.93	0.04	187.18
영산강상류	3.78	7.02	29.40	4.38	0.19	12609.59
영산강하류	1.99	6.05	12.70	3.46	0.11	5082.08

표 3.10.35 수계별 하천 수질 현황 (계속)

(단위 : mg/L)

권역구분	BOD	COD	SS	T-N	T-P	총대장균군
낙동고령	2.59	6.79	22.20	4.02	0.18	1353.84
갑천	5.40	10.15	15.43	11.38	0.48	63557.12
수영강	2.60	5.72	20.26	5.89	0.50	5734.26
회야강	3.03	6.74	11.37	2.26	0.10	530.38
고막원천	3.46	7.16	27.06	2.97	0.10	6366.23
보성강	1.19	3.32	6.29	0.89	0.03	3445.32
수어천	1.25	3.51	36.08	1.22	0.05	16143.70
영암천	2.54	6.61	40.06	3.19	0.15	13012.19
와탄천	5.10	9.06	55.39	5.04	0.32	13961.29
이사천	0.85	2.70	5.31	1.51	0.03	5169.93
지석천	2.65	5.67	13.93	3.55	0.14	12392.18
황룡강	2.50	5.55	11.26	1.79	0.06	12539.27
금강하구언	2.83	7.29	20.06	3.98	0.12	-
논산천	3.83	7.49	22.01	5.45	0.20	18555.29
동진강	3.08	7.54	28.44	4.33	0.18	10538.58
만경강	5.72	11.98	23.67	6.24	0.43	49122.47
무주남대천	1.07	2.95	3.53	2.33	0.04	983.74
오수천	1.54	4.40	10.89	1.83	0.05	1891.49
요천	1.78	4.70	8.36	2.77	0.13	1635.88
용담댐	0.81	3.56	3.16	1.68	0.02	-
주진천	2.96	7.27	37.42	3.46	0.14	2169.84
직소천	0.81	2.02	0.99	1.69	0.01	13.49
금강공주	2.96	7.04	20.58	3.92	0.15	1024.42
미호천	3.28	6.99	14.86	4.93	0.18	9818.49
삼교천	3.53	8.29	25.73	5.21	0.21	2865.39
달천	1.65	4.07	8.02	2.79	0.07	9334.34
보청천	0.94	3.50	13.50	1.65	0.04	1259.60
충주댐	0.59	2.28	4.08	2.49	0.03	228.89

다. 간접재이용 대상 하천의 수질 및 유량 예측

자료조사를 통한 하천의 유량 및 수질데이터와 하수처리장 방류수량과 방류수질을 유량가중평균법에 의해 하수처리장 방류수 유입 후 하천의 유량 및 수질을 예측하도록 하였으며, 이는 간접재이용 시스템 유입수를 예측함으로써 최적화된 간접재이용시스템의 공정기술을 개발하도록 한다.

간접재이용 시스템의 유입수를 예측한 결과 전체 69개 수계중 19개소가 목표수질인 4급수 수준에 미치지 못하였으며, 55%이상인 37개소의 수계가 시설재배용 목표수질인 3급수 기준에 미치지 못하는 것으로 분석되었다.

표 3.10.36 간접재이용 유입수 예측

(단위 : mg/L)

권역구분	유량 (m ³ /sec)	BOD	COD	SS	T-N	T-P
한강서울	213.05	4.20	7.51	111.01	5.624	0.334
강릉남대천	0.96	1.25	2.98	5.86	3.812	0.108
삼척오십천	1.43	0.68	1.95	1.91	2.449	0.086
섬강	3.75	1.94	5.05	11.32	4.189	0.191
소양강	14.98	0.45	2.70	4.46	1.556	0.020
양양남대천	2.08	0.62	2.17	2.57	1.768	0.052
평창강	1.64	0.81	2.85	15.39	3.042	0.039
한탄강	5.91	4.02	7.55	14.49	5.671	0.142
홍천강	6.76	0.97	3.21	5.14	2.946	0.027
경안천	0.99	2.71	6.15	12.61	4.035	0.116
남한강하류	41.29	1.29	3.92	10.90	2.196	0.041
안성천	0.09	3.75	9.07	8.17	7.632	0.569
임진강	24.11	1.74	5.89	102.48	2.871	0.109
청평댐	53.34	1.05	3.56	9.26	1.696	0.025
팔당댐	97.28	1.19	3.80	8.37	2.121	0.041
낙동강하구언	80.51	2.05	6.32	24.15	2.756	0.113
남강	3.10	2.02	4.97	11.70	2.873	0.154
섬진강하류	11.23	1.11	3.24	19.78	1.242	0.040
황강	1.20	0.74	3.39	14.59	1.912	0.060
감천	0.82	2.60	7.70	6.60	7.570	0.691
금호강	0.75	3.33	8.65	12.53	7.965	0.633
낙동구미	29.63	1.05	4.06	15.33	2.370	0.040
낙동왜관	39.98	1.69	5.09	21.77	2.839	0.090
내성천	1.59	1.44	3.91	14.50	5.308	0.264
대중천	0.50	0.73	2.15	2.02	2.345	0.050
밀양강	8.72	2.25	4.76	10.71	2.755	0.116
병성천	0.44	1.66	5.66	7.43	5.257	0.431
안동댐하류	31.26	0.92	4.28	6.78	1.811	0.032
영강	0.33	1.56	4.61	6.61	3.149	0.285

표 3.10.36 간접재이용 유입수 예측 (계속)

(단위 : mg/L)

권역구분	유량 (m ³ /sec)	BOD	COD	SS	T-N	T-P
영덕오십천	1.36	0.79	2.38	1.70	2.906	0.058
왕피천	0.27	0.61	2.17	1.81	1.139	0.040
위천	0.44	1.42	5.02	16.10	2.779	0.069
태화강	0.51	2.30	5.38	7.29	2.580	0.096
형산강	0.84	3.24	7.27	3.31	6.639	0.532
회천	1.25	1.11	3.69	9.28	2.148	0.075
영산강상류	5.98	3.63	7.47	22.79	5.938	0.402
영산강하류	8.08	2.05	6.27	12.03	4.105	0.167
낙동고령	53.60	2.56	7.12	21.52	4.198	0.196
갑천	3.50	4.81	9.86	11.17	10.221	0.565
수영강	0.95	3.71	9.13	4.46	11.153	0.746
회야강	1.71	3.72	11.17	5.52	8.264	0.421
고막원천	0.48	3.47	7.13	26.84	3.013	0.115
보성강	3.01	1.20	3.33	6.28	0.914	0.033
수어천	0.29	2.60	7.05	14.21	6.102	0.512
영암천	0.24	2.93	6.55	32.48	3.957	0.261
와탄천	1.46	5.09	9.09	54.26	5.188	0.338
이사천	0.54	1.84	4.45	4.81	4.606	0.368
지석천	1.51	2.73	5.77	13.45	3.933	0.188
황룡강	1.28	2.55	5.67	10.88	1.954	0.078
금강하구연	47.77	2.83	7.29	20.05	3.980	0.116
논산천	0.33	4.16	8.10	20.30	6.424	0.370
동진강	0.54	3.17	7.79	24.15	4.967	0.271
만경강	2.15	5.30	11.44	19.93	6.629	0.500
무주남대천	1.43	1.08	2.97	3.52	2.354	0.044
오수천	0.02	1.96	6.93	7.36	6.308	0.543
요천	1.55	2.72	5.92	7.07	4.979	0.407
용담댐	2.88	0.81	3.57	3.15	1.692	0.021
주진천	0.31	2.96	7.43	34.28	3.924	0.202
직소천	0.52	0.84	2.08	1.01	1.730	0.024
금강공주	34.77	2.96	7.04	20.56	3.927	0.152
미호천	9.36	3.29	7.04	14.60	5.037	0.188
삽교천	0.42	3.52	8.22	17.22	7.126	0.458
달천	3.36	1.68	4.13	7.92	2.916	0.088
보청천	1.28	0.95	3.55	13.24	1.760	0.061
충주댐	13.73	0.64	2.35	4.05	2.547	0.036

비고 : 목표수질인 3급수 또는 4급수를 초과하는 값에 대해 음영 처리

4. 맞춤형 최적 공정기술 개발

4.1. 개발방향

간접재이용시스템은 하수처리수 하천 또는 저수지에 방류가 되는 경우 간접하수처리수를 농업용 목적 등에 재이용하기 위해 개발한 물처리 시스템이다. 대표적인 경우는 그림 3.10.5와 같이 하수처리장에서 방류수가 하천수와 합쳐서 유하되는 경우로서 하수처리장 방류구 보다 하류에 위치하면서 농경지로 농업용수를 공급하는 경우이다.

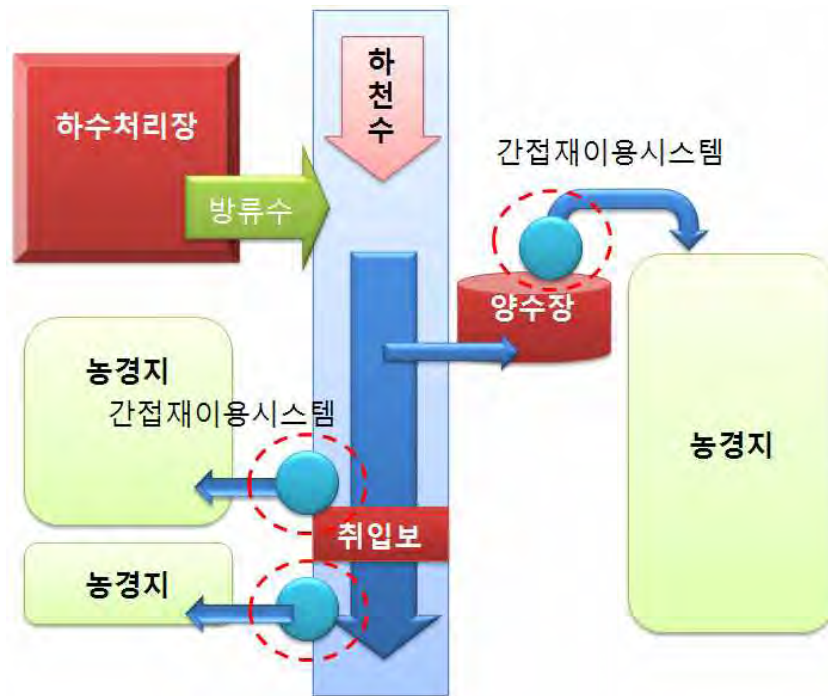


그림 3.10.5 하천수 간접재이용 용수공급 모식도

본 연구에서의 개발방향은 기존의 농업기반시설과의 연동을 통한 물처리 시스템의 기술을 개발하는 데 있다. 농업기반시설과의 연동처리시스템 구성이 비용측면 및 유지관리측면에서 유리하기 때문이다. 일반적으로 하천에서 농업용수로 공급하기 위한 농업기반시설은 양수장과 취입보로서 간접재이용시스템은 기존의 농업기반시설에 적용할 수 있도록 개발하였다. 또한 가장 많은 농업용수를 공급·관리하는 농업용저수지 등 수역에 대해서는 수역내 처리방법을 비롯하여 수역의 안정적 관리를 위한 저수지 유입수 물처리 시스템을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 물처리시스템 기술은 수요자를 고려하여 최대한 유지관리성(경제성 및 편리성)을 높이는 데 있다. 물리적 처리기술인 필터의 접근에 있어서 유지관리성을 높이기 위해 수년마다 교체해야하는 유기계 분리막의 사용을 지양하고 전기와 원심력 그리고 극미세버블 등 교체가 필요 없는 물리·화학적 물처리 방식을 이용하여 개발하였다.

농촌지역에서 발생하는 다양한 수질오염은 형태와 부하량이 지역 및 장소에 따라 매우 변동성이 매우 크고 유기물질의 종류 또한 매우 다양하기 때문에 기존의 정수처리공정에서 사용되는 정밀한 필터나 이온성 물질까지 처리할 수 있는 수준이 높은 유기계 분리막을 그대로 사용할 수는 없다. 따라서 처리가 필요한 용수의 수질유형별 맞춤형 최적의 공정기술을 개발하는 것이 필요하며, 이를 위해 다음과 같이 처리공정을 세분화하고 각 처리공정별로 유입수의 부하조건 및 처리수의 이용조건에 따라 각 공정별 다양한 공법의 물처리 기술을 도입하고 연구가 더 필요한 공정에 대해서는 추가로 요소기술을 개발하였다.

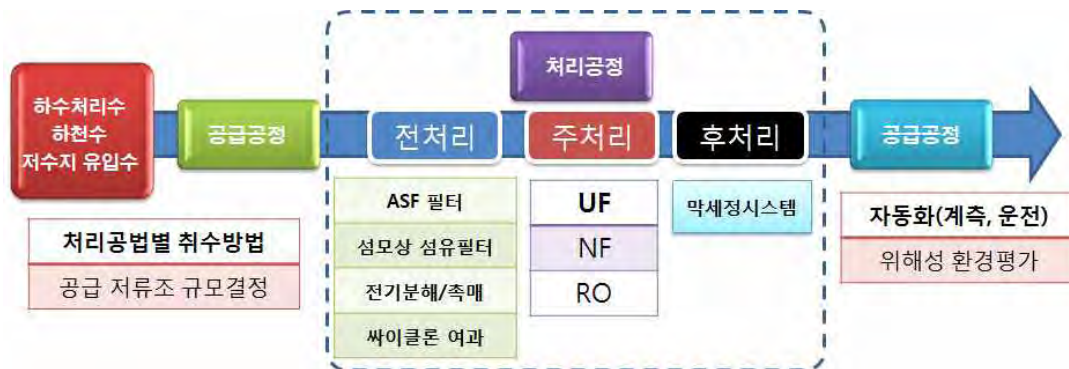


그림 3.10.6 간접재이용 처리공정 세분화

기존의 농업기반시설에서 설치하는 간접재이용시스템은 직접재이용 시스템에 비해 운영효과 및 유지관리 측면에서 상당한 효과가 있다. 직접재이용의 경우 하수재이용을 위해 필요한 시설은 크게 유입공정, 처리공정, 공급공정 등으로 분류할 수 있다. 유입공정의 경우는 기존의 하수처리장 방류수에서 펌프 등을 이용해 처리공정까지 방류수를 이송하는 공정으로서 기존에 설치되어 있는 펌프 등을 이용하지 못하기 때문에 신규로 가압시설을 설치해야 함으로서 설치비 상승뿐만 아니라 에너지 투입도 상당히 증가된다. 또한 공급공정의 경우도 마찬가지로 기존의 관개시설이 없기 때문에 신규로 가압시설부터 공급수로 등 설치비용과 에너지투입이 많아지게 된다. 특히 직접재이용의 경우는 탄력적 공급을 하기 위해서 저류조 공간도 필요하다. 하지만 간접재이용시스템의 경우는 유입공정과 공급공정에 필요한 가압시설이나 수로를 추가로 건설하지 않아도 되기 때문에 훨씬 경제적이고 에너지 투입량도 상당히 줄일 수 있다. 더욱이 양수장에 간접재이용시스템을 설치할 경우 기존 양수장에 유수지가 있기 때문에 추가적인 저류조도 필요치 않다. 한편, 방류구 하천 하류에 위치하고 있는 농경지 중 양수장이나 취입보를 이용하지 않고 간이 펌프 등을 이용해서 취수하여 농업용수로 이용하는 경우에는 불가피하게 유입공정과 공급공정이 추가적으로 필요하다.

4.2. 간접재이용시스템 요소기술 분석

가. 물처리 기술 목표 분석

생활하수의 농업용수 재이용은 농산물 생육에 직접 영향을 줄뿐만 아니라 주변의 수질·생태·토양·환경 및 영농인의 보건에도 영향을 주기 때문에 장기적인 관찰과 검증작업이 필요하다. 또한 하수처리수를 적절히 처리하지 않고 공급시 바이러스에 의해 작물생육 및 작업자에 영향을 미치며, 유해물질의 축적 등 보건환경측면에서 문제가 발생하여 사용자의 강한 저항이 예상된다. 특히 생활하수를 검증이 안 된 재처리장치를 통해 장기간 공급시 단기적으로는 바이러스에 의해 작물생육과 영농인의 건강에 부정적 영향을 미치며, 장기간 공급시 환경호르몬, 유해물질의 축적 등 보건환경측면에서 심각한 역효과 발생가능성 높다. 따라서 안전한 농업용수 재이용기술의 보급을 위해서는 장기간의 현장시험을 수행하여 재배기술, 보건, 환경 및 위해성 등을 검증 노력이 필요하며 지역별로 하수처리수의 성상 및 처리수준이 상이하기 때문에 일반적인 수처리 기술 적용은 곤란하고 특화된 하수재이용 시스템 적용기술이 필요하다.

용천수등 수질이 양호한 지하수 등은 간단한 여과조작이나 염소소독만으로도 급수가 가능할 수 있으나 수질오염의 심화 등으로 저분자 휴민질이나 농약 등의 용해성 유기물은 기존에 사용되고 있는 응집침전, 모래여과법 등으로는 제거가 어려워 졌다. 하천수를 취수하는 대부분의 대도시 정수장에서는 용해성 물질의 제거를 위해 오존산화, 생물처리, 활성탄 등의 고도처리가 필요하게 되었으며 최근에는 이들 고도처리공정과 의 조합 또는 단독의 공정으로 고도처리 효과를 달성할 수 있는 막여과 공정이 도입되었다. 특히 무기이온의 제거를 위해서는 이온교환처리, NF와 RO 막처리 등의 탈염 처리가 필요하다. 따라서 제거대상 물질에 따라 선택적 투과성을 갖는 분리막의 특성을 이용한 공정의 선택이 가능하며 이중 정밀여과(MF), 한외여과(UF)막 공정은 체거름을 통해 원수 내의 입자성 물질 제거를 목적으로 설계되고 있다. 각각의 막은 막의 종류를 결정하는 다양한 기공 크기를 갖고 있어 용존 유기물질 및 무기질 성분은 고도의 전처리과정을 수반하지 않는 MF와 UF에 의해서는 제거되지 않는다. 그러나 맛, 냄새물질흡착을 위한 분말활성탄이나 용존유기물을 형성하기 위한 응집제와 철 망간의 제거를 위한 산화제 등의 공정을 첨가하거나 조합하면 MF나 UF 공정을 통해서도 제거가 가능하다. 따라서 제거대상 물질과 여과 형태에 따라 전처리 공정을 고려해야 한다.

(1) 입자성 물질 제거

탁도 성분인 탁질은 점토성물질, 철, 망간 등 용해성 물질이 산화되어 석출되거나 플랑크톤, 조류 미생물 혹은 유기성 물질 등으로 입경은 0.1~수백 μm 이다. 이에 비해 수처리공정에 사용되는 막의 세공직경은 0.01~0.3 μm 의 범위에 있으므로 대부분의 탁질을 제거할 수 있으며, MF막이나 UF막의 세공 직경은 탁도의 원인 입자 직경 이하이므로 탁질 뿐만 아니라 병원균이나 바이러스 등도 거의 완전하게 제거가 가능하며 이 점은 원수의 탁도가 변동해서 여과수 탁도는 낮은 수준(0.1 이하)으로 제공할 수 있다.

입자 (Particle Counting)는 MF/UF막에 의한 입자 제거의 효율성 측정에 있어서 탁

도보다 훨씬 민감한 것으로 MF/UF막의 입자제거율은 응집제 주입 여부와 관계없이 2에서 5사이에 위치하는데 이는 ml당 5,000개 이상의 높은 유입 입자계수를 갖는 연구에서 검증된 바 있다. 유입수 농도가 낮을 때 로그제거율이 광범위하게 나타나는 원인은 낮은 입자농도의 여과수에서의 측정 정밀도와 관련이 있으며 탁도와 마찬가지로 역세척 공정시 발생하는 기포와 여과수 내 기타 다른 부산물은 인위적으로 보고된 로그 제거율을 낮추는 결과를 초래한다. 따라서 병원성 미생물의 제거율은 직접적으로 측정되거나 대신 할 수 있는 신중한 측정방법이 필요하다.

(2) 미생물 제어

MF와 UF막은 특정 막 물질에 의해 바뀌는 기공 크기에 따라 체거름 효과로서 물에서 입자를 걸러낸다. 시제품으로 이용이 가능한 분리막 시스템의 기공크기는 일반적으로 $0.3\mu\text{m}$ 이하이므로 탁도와 미생물은 기본적으로 완벽하게 제거된다. 다만 막 오염층이 미생물 및 입자 이동에 대해 2차 장벽으로서 기능을 하므로 제거특성을 개선시킨다는 보고가 있다.

지아디아 시스트의 크기는 길이 $9\sim 12\mu\text{m}$, 폭 $7\sim 10\mu\text{m}$ 의 계란형으로 염소에 대해 강한 저항성이 있으며, 크립토스포리디움 오시스트의 크기는 $4\sim 6\mu\text{m}$ 정도로 역시 염소에 강한 내성이 있어 응집침전, 모래여과 처리 후 소독처리를 한 물이라도 발생가능하다. 이와 같은 병원성 원충류의 감염을 방지하려면 시스트나 오시스트를 확실히 제거하는 것이 필요하며 그러기 위해서는 체거름에 의해 확실하게 제거해 낼 수 있는 막여과법이 가장 신뢰도가 높다.

(3) 바이러스 제어

바이러스는 복제에 의해서 증식하는 감염인자로 미생물 중에서 제일 작다. 바이러스의 단위는 각각의 시험법에서 검출되는 기본량의 단위로 단층으로 깔려진 숙주세포 위에 검수를 첨가하였을 때 바이러스가 존재하면 세포가 바이러스에 의해 침범되어 구멍이 뚫린 것 같이 되는데 이것을 Plaque라고 한다. 이 수로 바이러스 농도를 정량하고 PFU라고 하는 단위로 나타내게 된다. 수계로 전염되는 장 관계 바이러스는 자연계에서 저항성이 강하고 수중에서도 비교적 장기간 생존하며, 1 PFU/1,000L이면 감염을 일으킬 확률이 10^{-1} , 사망률이 10^{-3} 으로 평가되고 있고, 바이러스의 입경은 $20\sim 300\text{nm}$ 로 정제수 등에 첨가한 바이러스는 활성슬러지 처리로 80%, 응집침전으로 90% 모래여과로 50%, 활성탄 처리로 97%가 제거될 수 있으며 UF막이나 NF막에서는 $6\sim 7\text{log}$ 로 제거된다.

(4) 색도 성분 제어

색도는 물의 색의 정도를 나타내는 것으로 색이 있는 물은 수도물의 쾌적한 사용을 방해하고, 또한 물의 맑음 정도의 지표가 된다. 천연수 중의 색도는 주로 휴민질에 유래한 유허색 또는 황갈색을 나타내면 일반적으로 색도는 휴민질, 철(적갈색)이나, 망간(흑색, 갈색, 담홍색, 담록색)등의 금속 혹은 공장폐수에 기인한다. 휴민질은 휴민산, 히마토멜라닌산, 풀빅산, 휴민의 네종류로 대별되면 분자량 수천이상 수만의 갈색의 물

질, 히마토멜라닌산은 분자량 700~1000 정도로 담갈색, 폴빅산은 분자량 수백의 황갈색 물질이다. 금속이온 등과 결합, 흡착하여 회합하거나 콜로이드 상으로 환경수중에서 다양한 형태를 나타내고 있어 MF막에서도 일부 제거되는 경우도 있다. 분자량 2000을 중심으로 분포가 되어 있어 NF막 혹은 RO막으로 효과적으로 제거할 수 있으며, NF막이나 RO막으로 제거하면 소독부산물 등에 관한 문제도 해소된다.

(5) 유기물 제어

수도수질기준에서는 과망간산칼륨 (KMnO₄)소비량을 유기물로써 10 mg/L로 정해놓고 있는데 과망간산칼륨 소비량은 일정조건하에서 산화되는 유기물과 무기물의 양을 나타내는 것으로 수질오염을 판단하는데 있어 중요한 총괄적 지표이다. MF막이나 UF막에 의한 여과에서는 과망간산칼륨 소비량을 저감시킬 수는 없지만 전처리로서 응집침전 처리를 하면 통상의 응집침전처리와 같이 저감시킬 수 있으며, NF막 처리에서는 상당한 정도 저감시킬 수 있다는 것이 실증실험에서 확인되었다.

(6) 무기물 제어

MF와 UF에 의한 유기물질제거와 마찬가지로 무기물제거는 입자상태에서의 성분비율과 관련된다. 이것은 응집제, 산화제 또는 이온교환수지에 의해 강화될 수 있으며 몇몇 연구들은 막의 높은 수준으로 대전되었을 때 전자기적 반발력에 의해 무기성분들이 제거될 수 있음을 보여주었으나 이것은 막 표면을 중성화할 수 있는 자연 발생 이온을 가지고 있지 않은 실험실 조제수의 가장 큰 범위에서만 일어나는 현상으로 MF 및 UF막의 경우 응집제, 산화제, 이온교환수지의 조합 공정의 적용 여부에 따라 무기성분 제거가 제한적일 수 있다.

나. 공정시스템 요소기술 분석

(1) 유입공정

방류수를 유입수로 하는 재이용시스템은 하수처리장 방류조에서 가압시설과 함께 전처리 공정까지를 의미한다. 가압시설로는 자흡식 펌프로서 처리공정 및 공급공정까지의 연속 운전이 필요하므로 유량정보 및 수질정보에 의한 자동운전이 가능하도록 구성해야 한다.



a) 육상펌프



b) 수중펌프

그림 3.10.7 자흡식 펌프

가장 핵심적인 부분이 고압펌프와 막을 지지하는 압력용기 및 분리막 모듈이며 핵심 역할을 담당함. 고농도의 TDS와 유기물질을 분리하기 위해서 전처리 과정이 분리막의 수명과 경제성을 결정하는 중요한 역할을 한다. 전처리부분은 막성능을 장기간 유지하기 위하여 막에 영향을 주는 물질 및 투과율을 감소시키는 오염원을 제거하는 것이 주목적이며 막의 화학적 분해, 스케일, 기계적 열화 및 투과율 감소 등의 문제를 해결하여야 한다. 특히 폐수처리 및 재활용에 분리막공정을 응용시에는 적용폐수에 대한 전처리가 필수적이며 원수의 SDI(Silt Density Index), pH, 탁도 및 오염원등을 사전에 분석하여 분리막 공정에 적절한 수준의 전처리공정을 개발하여야만 경제적인 장점을 얻을 수 있다. 일반적으로 사용되는 전처리 기법은 화학적 전처리 및 물리적 전처리로 크게 나눌 수 있으며 화학적 전처리로는 pH 조정과 응집제 투여를 통한 침전제거 또는 이온의 용해도 상승유도, 스케일을 억제하거나 제거하기 위한 약품투여, 생물학적인 오염을 사전에 제거할 수 있는 처리 및 탈염소제(dechlorination agent) 첨가등이 있다. 물리적인 전처리로는 일반적으로 막에 부착되어 투과율을 감소시키는 SS(suspended solids)물질을 제거하기 위한 공정이 큰 부분을 차지하며 모래여과나 카트리지 필터등을 주로 사용하며 원수의 온도를 적절한 수준으로 맞추어 주는 것도 분리막의 수명을 길게 할 수 있는 방법이다 또한 원수에 함유되어 있는 유분이나 막표면에 부착이 용이하여 투과율을 감소시키는 막 코팅 물질 등은 사전에 적절히 처리하여야 한다.

(2) 전처리용도 STS 필터

STS필터는 STS316 메탈의 미세여과망을 이용하여 제거하는 구조이며 스트레나에 안착 인장된 여과망의 미세 틈으로 통과되면서 SS가 여과되는 방식으로 여과망이 반영구적인 여과망이어서 전력소비만 운영비용으로 고려하면 된다. STS필터는 버티컬형으로 설치되며 1단 여과입경(25 μm), 2단 여과입경(10 μm), 3단 여과입경(5 μm)을 이룬 3단 여과 방식으로 단계별로 부유물질을 제거하여 1단 여과 SS 6 mg/ℓ 2단 여과 SS 3 mg/ℓ 3단 여과 SS 1 mg/ℓ의 처리수질을 얻을 수 있다. 세척은 상부에 감속장치가

부착 되어 자동세척방식으로 여과되며 여과공정 중 멈추지 않고 여과 역세가 가능하여 여과운전과 역세가 동시 수행된다.

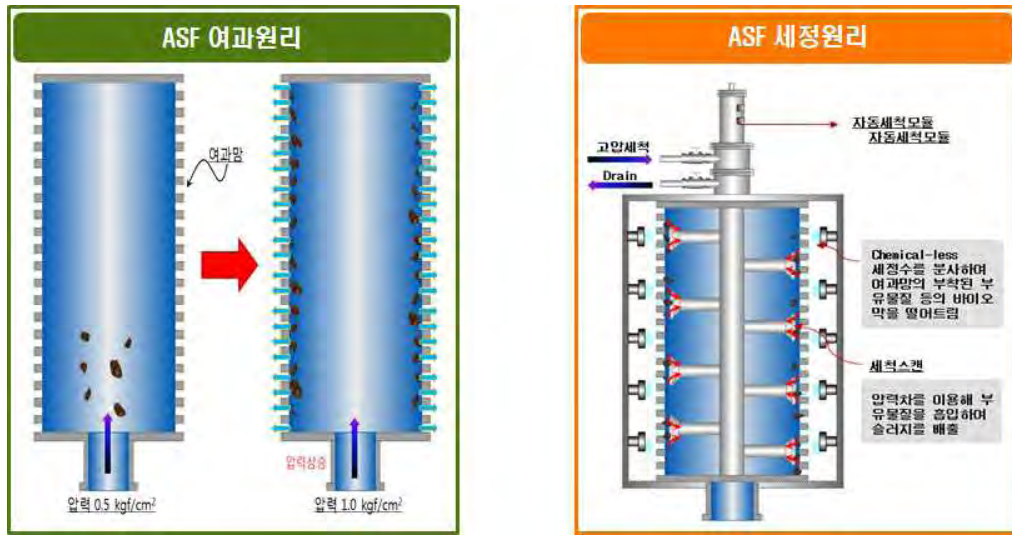


그림 3.10.8 STS방식 무교체 필터 단면도

(3) 섬모상 전처리 필터

섬모상 여과장치는 여과가 진행됨에 따라 여재에 부착되는 이물질이 여재에 누적되어 여재의 성능을 저하시키기 때문에 여재를 통한 여과가 점차 어렵게 된다. 이와 같은 여재의 세척은 필수적이지만 고밀도의 여재를 사용하는 여과장치는 역세척에 불리하고 역세척이 효과적인 여재는 고밀도의 여재가 되기 어렵다는 문제점 발생한다. 섬모상 여재는 고정상 로프형 형태로 고리, 고정실, 내심부분으로 구성되고 8방향의 방사형을 이루는 형상으로 비표면적이 상대적으로 크다. 재질은 폴리프로필렌 다섬사와 폴리에틸렌 로프사가 사용되며, 섬모상 여재의 직경은 50mm이고 표면적은 1.0m²/g 이상이다. 섬모상여재를 선형으로 탑재하여 여과시에는 압축하여 여재층의 밀도를 높여 입자상오염물질의 제거효율을 높였으며, 역세시에는 여재를 다시 이완하여 공극을 최대한 확보함으로써 역세효과를 극대화 할 수 있다.

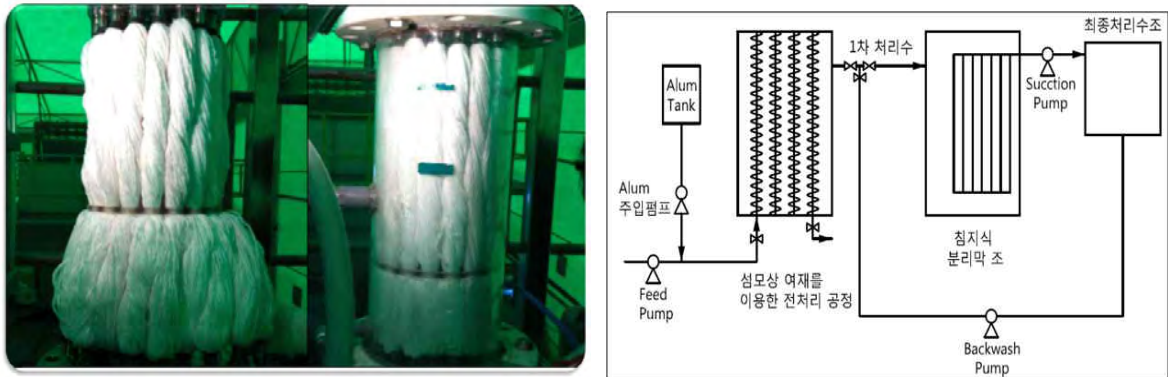


그림 3.10.9 섬모상여재 전처리 시스템 공정도

여재인 섬유사 다발을 여과기 내부에 설치하여 압축기구로 압축하여 공극을 작게 한 후 유입수를 통과시켜 여과하는 여과공정, 설정압력에 도달하게 되면 압축된 여재(섬유사 다발)를 이완시켜 공극을 크게 하여 고압의 에어분사와 역세구동판을 상하로 구동시킴으로 섬유여재의 여재 다발사이사이 뿐만 아니라 부분부분 빠짐없이 세척하도록 하는 역세공정, 여과공정과 역세공정이 반복적으로 이루어진 반연속식 여과하는 기술이다.

(4) 분리막 공정

유입수 오염정도가 심한 경우에는 가장 효과적인 유기막을 이용한 수처리방법으로 구분은 정밀여과, 한외여과 나노여과, 역삼투여과, 전기투석 등으로 구분하고 있으며 공경의 크기 및 흡착, 막표면에서의 용해 및 확산 등의 분리원리로 처리한다.

표 3.10.37 각 분리막의 운영조건별 분류

구분	분리입경, 분자량	조작압력(kg/cm ²)
정밀여과막 (MF; Microfiltration)	분리입경 (0.4~0.01 μ m)	흡인방식 : 0.6정도 이상
		가압방식 : 2정도 이상
한외여과막 (UF; Ultrafiltration),	분자량 (1,000~300,000)	흡인방식 : 0.6정도 이상
		가압방식 : 3정도 이상
나노여과막 (NF; Nanofiltration),	분자량 (최대 수백)	2~15
역삼투막 (Reverse Osmosis)	분자량 (수십)	해수담수화 50~70
		염수탈염 4~40

(가) 정밀여과막 (MF : Microfiltration Membrane)

정밀여과법에 이용되며 부유물질이나 원충, 세균, 바이러스 등을 체가름 원리에 따라 입자의 크기로 분리를 목적으로 수처리에 이용된다.

- 공경 : 0.01 μ m 이상
- 여과성능 : 0.5m³/m²·일 이상
- 탁도제거 : 0.05NTU 이하
- 여과작용 : 용질입자의 크기와 분리막의 공극에 의한 체걸음 작용
- 제거 대상 물질 : 부유물질, 콜로이드, 세균, 현탁질, 조류, 박테리아 등
- 분리 능력 표시 : 공칭분획경(Pore Size)
- MF은 크게 Depth 및 Membrane Type으로 구분하여 Depth Type은 마이크로필터, Membrane Type은 Membrane을 사용하기 때문에 분리막 교체가 필요함
- MF막의 특성은 다른 분리막에 비해 높은 투과플럭스를 가지는 반면 수처리 수준은 가장 낮음
- 또한 공경이 비교적 크기 때문에 하수처리수 같이 콜로이드성분을 갖고 있는 유입수의 경우 내부 폐색을 일으킬 가능성이 높음

(나) 한외여과막 (UF : Ultrafiltration Membrane)

- 공경 : $0.01 \sim 0.001 \mu\text{m}$
- 여과성능 : $0.5 \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 이상
- 탁도제거성능 : 0.05NTU 이하
- 여과작용 : 체걸음 작용
- 제거 대상 : 분자량 5,000~30만 정도의 세균, 콜로이드, 단백질, 고분자 유기물 등
- 분리 능력 표시 : 분획분자량(MWCO), 즉 분리해낼 수 있는 분자량의 크기로 나타냄
- 조작압력 : $2 \sim 5 \text{kg}/\text{cm}^2$ 정도
- 특성 : 세척을 통하여 여러번 사용 가능하고, 비대칭성 구조로 선택분리기능 가진 표면 활성층 및 다공성의 지지층으로 구성
- PoreSize보다 큰물질은 Fiter에 걸려서, Pore Size보 작아서 통과한 물질은 확산 작용에 의해 제거



그림 3.10.10 UF 멤브레인 구조

(다) 나노여과막 (NF : Nanofiltration Membrane)

정밀여과법에 이용되며 이온이나 저분자량(유기물, 농약, 맛/냄새물질, 합성세제, 칼슘이온, 마그네슘이온, 황산이온, 등) 물질을 제거하는 목적으로 사용

- 공경 : $0.005 \sim 0.001 \mu\text{m}$
- 여과성능 : $0.05 \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 이상
- 여과작용 : 체거름 작용과 확산 작용, 즉 삼투현상을 응용
- 제거대상 : 분자량 5,000~30만 정도의 세균, 콜로이드, 단백질, 고분자 유기물 등
- 분리 능력 표시 : 분획 분자량(MWCO)
- 조작압력 : $5 \sim 40 \text{kg}/\text{cm}^2$ 정도
- 특성 : 분획분자량은 RO막과 UF막의 중간적 특성이고 유기물에 대해서는 분자량 200~500정도의 분획분자량을 가지며 주로 2가 이온이나 저분자 물질이 분리대상임
- 생활용수 수처리 목적으로 사용되고, 현재 기술 수준은 조작압력이 높아 경제성이 문제됨

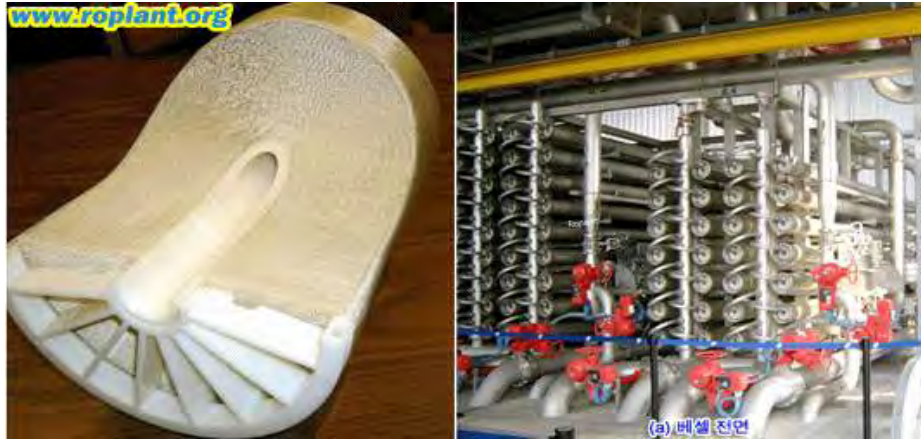


그림 3.10.11 NF 멤브레인 및 나노여과시설

(라) 역삼투여과막 (RO : Reverse Osmosis)

이온물질 제거를 목적으로 RO 고압펌프를 사용하는 해수담수화용 공정과 RO 저압 펌프를 사용하는 금속이온제거 및 기수의 담수화 공정으로 사용됨

- 공경 : 0.001~0.0001 μ m
- 여과성능 : 0.01m³/m²·일 이상
- 여과작용 : 체거름 작용과 확산 작용, 즉 삼투현상을 응용
- 염화나트륨제거율 : 93% 미만
- 제거 대상물질 : 금속이온, 염소이온, 해수중의 염분 등
- 분리 능력 표시 : 분획 분자량(MWCO)
- 조작압력 : 50~75kg/cm² 정도
- 특성 : 이온 상태의 물질을 처리 목적으로 주로 염분제거 및 금속류 제거에 이용

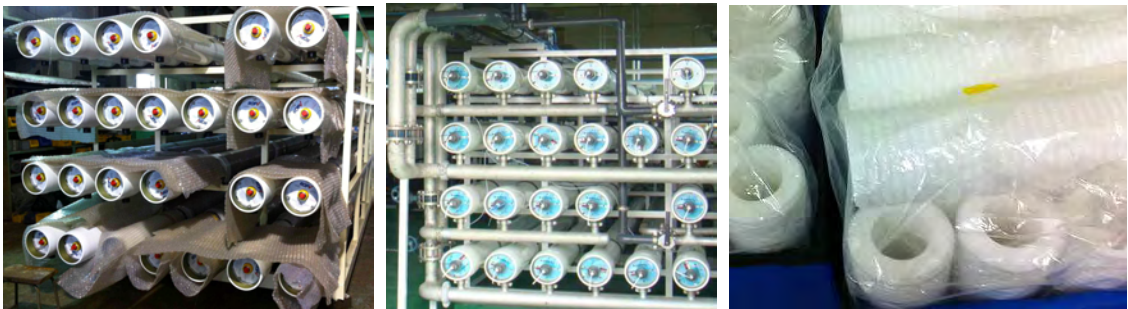


그림 3.10.12 RO 멤브레인 및 베셀

(마) 막분리 공정의 여과 방식

여과막 공정에서 운전방식은 유입원수 대부분을 여과하는 전량여과방식(Dead-End Filtration Method)과 막표면에 투과되는 방향과 직각 방향으로 유속을 주어 여과하는 십자흐름여과방식(Cross flow Filtration Method)으로 구분한다.

① 전량여과방식; Dead-End Filtration Method

- 막면에 대해 직각흐름을 만들어 종래의 모래여과와 같이 막 공급수의 전량을 여과 하는 방식으로 정기적인 세정 필요함

- 공급 원수 전량을 여과시켜 펌프 용량 작고 에너지 효율 양호
- 공급 원수 전량을 여과시켜 막 오염이 빨라 간헐 운전에 적합
- 적기 세정이 이뤄지지 않을 경우 통상 세정으로 회복 불가능 함

② 십자흐름여과방식; Cross flow Filtration Method

- Cross flow 여과방식은 막면에 대해 평행한 흐름으로 원수를 공급하여 막 공급수 중의 현탁물질이나 콜로이드가 막면에 퇴적하는 현상을 억제하면서 여과하는 방식
- 막 표면에 축적되는 불순물 양을 제한 할 수 있어 높은 투과 Flux 유지 가능
- 막면 유속에 의해 여과저항 일정하게 유지할 수 있어 연속 운전에 적합하다.
- 막면 유속 유지 위한 순환량 많아 펌프 용량 커지고 효율 낮아짐



그림 3.10.13 Dead-End 및 Cross flow 막여과 설치사례

(바) 분리막 적용시 문제점

분리막의 장기 운전을 위해서는 과도한 전처리가 필요하다.(설비비, 운전비용 상승) 또한 중공사막이나 평막 막분리 공정에서 오염으로 인해 막의 투과성이 감소하여 이를 회복하기 위한 빈번한 역세척, 공기세정, 펌프의 유속 증가 등으로 설비비 및 운전 비용이 추가 된다. 또한 빈번한 화학세정으로 막성능 저하, 비용발생 및 환경오염 발생 등의 문제가 심각하다. 그리고 운전조건이 까다로우며 자주 발생하는 상황으로서, 여과 압력 상승, 공기세정으로 인한 충격, 화학세정 및 역세척으로 인한 막의 파손, 특히 중공사막의 절단, 평막의 찢어짐 현상 발생할 수 있다. 회수율(Recovery rate)을 높이면 막의 투과성이 급격히 감소하고, 슬러지나 고형분이막을 폐색 시키며, 심지어는 파손도 일어나므로 90%이상의 회수가 어렵다. 연속공정에서 정제 농축을 위해서는 압력과 투과량, 회수율을 일정하게 유지하기 위해 대부분 막분리 공정에서, 한가지 종류의 Pore size를 가지는 UF/MF 막이나, 한가지 형태의 모듈 형태(Module configuration)로 전체 분리, 정제, 농축 공정을 처리함으로써, 막분리 공정의 전체를 필요이상의 비용으로 컨트롤 하거나, UF/MF가 보통 최종 공정인 RO(역삼투)막 공정의 전처리 임에도 불구하고, 또 UF/MF막 의 전처리를 위한 추가적인 과도한 전처리가 포함되기도 한다. 막의 수명을 연장시키기 위해서 설치된 전체 막분리 공정에 대해서 화학 세정이나, 역세척, 약품주입, 공기세정 등으로 과도한 운전비용이 발생할 수 있다.

(5) 후처리 시스템

(가) 막수명 연장을 위한 막오염 방지

분리막은 폐수를 적은 에너지를 이용하여 선별적으로 분리할 수 있으나 막의 성능을 저하시키는 분리막 오염이 막분리 공정의 보급을 늦추고 있는 실정이다. 분리막 오염 현상은 하수에 함유된 부유물질이나 분리막 표면에 쉽게 흡착되는 성질을 가진 물질들이 막표면과 공경에 축적되어 유체의 흐름을 방해하여 투과율을 감소 시킨다. 일반적으로 막분리공정에서 큰 문제점중 하나는 투과율의 감소로 원인은 크게 두가지로 나타낼 수 있으며 첫째는 막의 오염으로 인한 투과율의 감소 및 막의 특성변화로 분리능이 저해되는 경우이며, 다른 하나는 농도 분극 현상(concentration polarization)으로 용액이 막을 통과시 막표면에서의 용질의 농도증가로 인한 유효압력의 감소때문에 나타나는 투과율의 감소현상이다. 분리막공정에서 압력을 가하면 용질은 분리막에 통과하지 못하고 체류하지만 용매는 분리막을 자유롭게 통과함. 즉 분리막을 경계로 고농도의 용질이 용액중에 체류하며 투과수흐름에는 상대적으로 낮은 농도의 용질층이 존재한다. 용질이 막표면에 계속적으로 농축되면 막표면에 고농도의 용질층에 의한 삼투압 증가로 투과율은 감소한다. 더불어 막의 선택성과 용매투과율에 영향을 받는다. 결국 투과유효압력을 감소시켜 투과율의 감소를 야기 시키기 때문에 농도분극현상을 방지하는 여러 방법을 적용, 투과율의 감소를 최소화시켜야 한다.

(나) 맞춤형 재이용시 필요한 후처리 기술

후처리공정은 투과수의 수질에 의해 좌우되며 분리막의 종류에 따른 투과수의 질과 쓰이는 용도에 따라 후처리수준이 결정된다. RO 계열의 막으로 하폐수를 처리시 일반적인 재활용부분에 초점을 두면 투과수자체는 양호한 수질을 나타내지만 간혹 냄새가 있거나 pH 등이 높거나 낮아서 원하는 수준으로 조정할 필요 있다. 담수나 해수를 음용수로 재이용할 때에는 더욱 세심한 후처리가 필요하며 고순도의 공장용수로 사용할 경우에는 탈기공정 후 이온교환법과 같은 효과적인 후처리공정의 결합이 필요하다.

(다) 분리막 오염의 종류 및 정의

- Fouling : 막자체의 변질이 아닌 외부적인 요인에 의해 생기는 막성능 저하로 그 원인에 따라 세척에 의해 성능이 회복됨
- 부착층
 - Cake 층 : 공급원액중의 현탁물질이 막표면에 축적되어 형성하는 층.
 - Gel 층 : 농축에 의한 용해성 고분자등이 막면에 형성하는 비유동성 층.
 - Scale 층 : 농축에 의한 난용해성 물질이 용해도를 초과해 막표면에 석출되는 층
- 흡착층 : 공급원액에 함유되어 있는 흡착성 물질이 막표면에 흡착되어 형성하는 층
- 눈막힘 :
 - 고체 : 막의 다공성부에 흡착, 석출등에 의한 밀폐
 - 기체 : 소수성막의 다공성부가 기체로 치환(건조)
 - 유로밀폐 : 모듈의 원액유로 및 투과수유로가 고형물에 밀폐되 액이 흐르지 않는 것

(6) 공급공정

간접재이용시스템의 공급공정은 처리공정을 거쳐 곧바로 대상농경지에 공급하는 방법과 저류조를 이용하여 공급하는 방법으로 구별할 수 있으며, 논농업 지역에 공급할 경우는 직접공급방식으로 구성해야 하고, 밭농업 지역에 공급할 경우에는 반드시 유량을 조절할 수 있는 저류조가 필요하다.



그림 3.10.14 공급공정(저류조)

4.3. 맞춤형 최적 공정기술 개발

가. ASF 물처리시스템 (IWR 1)

공정은 유입펌프시스템, AF, ASF, MF, RO, Chemical-Less 세정시스템, 용수공급펌프 시스템으로 구성되며, 하수 방류수 부하변동에 대응할 수 있는 전처리시스템과 약품소모량 및 약품 폐수량 저감을 위한 Chemical-Less 세정 시스템과 또 RO막을 이용하여 이온물질을 제거하는 원리이다. 시스템운영 방식을 자동 운전 방식으로 관리자가 손쉽게 운영할 수 있으며 또한 하수처리장의 방류수의 농도를 모니터링 하여 농도에 따라 공정을 적용하므로 시스템의 운용효율을 높일 수가 있어 안전한 재이용 수질 향상을 도모하는 기술이다.

전처리 공정의 유지관리를 최소화하기 위해서 ASF 막 공정을 1단-3단 1SET으로 구성하여 처리대상 물질이나 원수의 수질에 따라 80%에서 최대 97 %까지 여과수를 회수하고, 본 공정에서는 낮은 감압 조건에서 운전함으로써 장기적으로 안정된 투과속도를 얻을 수 있고 기존의 UF 막 공정에서 3~6 개월에 한번 화학 세정 및 약품 역세정을 하는데 반해서 Chemical-Less 세정시스템공정을 이용한 MF은 RO 전처리 필터인 ASF와 RO에 역세 및 세정시 약품 30~50% 저감 및 1년에 1회 수준으로 화학세정의 빈도를 낮출 수 있으며, ASF 막의 수명도 반영구적으로 가능하다.

ASF필터는 STS316 메탈의 미세여과망을 이용하여 제거하는 구조이며 스트레나에 안착 인장된 여과망의 미세 틈으로 통과되면서 SS가 여과되는 방식으로 여과망이 반영구적인 여과망이어서 전력소비만 운영비용으로 고려하면 된다. ASF필터는 버티컬형

으로 설치되며 1단 여과입경(25 μ m), 2단 여과입경(10 μ m), 3단 여과입경(5 μ m)을 이룬 3단 여과 방식으로 단계별로 부유물질을 제거하여 1단 여과 SS 6mg/ℓ 2단 여과 SS 3mg/ℓ 3단 여과 SS 1mg/ℓ의 처리수질을 얻을 수 있다. 세척은 상부에 감속장치가 부착되어 자동세척방식으로 여과되며 여과공정 중 멈추지 않고 여과 역세가 가능하여 여과 운전과 역세가 동시 수행된다. 세척운전은 차압과 시간에 의한 자동운전으로 이루어지며 Chemical-Less 세정시스템의 이용으로 필터세척 효율을 높여 ASF 운전 부하를 낮춘다.

표 3.10.38 ASF 특징

구 분	주요특징
· 우수한 처리 수질 확보	· SS 농도 제거효율 95% 이상
· 공간과 유틸리티 간단	· 모래여과 대비 부피 1/5, 무게 1/10 간편함
· 여재 수명 길고, 여재교환 간편	· STS316 스테레스 사용, 수명 10년 이상 · 교체가 간편하며, 원수 수질변화에 대한 탁월한 적응
· 무인 자동, 운전 기능	· 설정 차 압력에 따른 세척 및 유량 변화에 전자동으로 운전. 세척과 여과 공정 동시 작동
· 공간 활용 우수	· 좁은 공간 활용 가능

(1) 양수장 적용 간접재이용시스템

기존 양수장에 양수장과 연동하여 적용할 수 있는 간접재이용시스템을 개발하였다. 기존의 농업용수 공급목적의 양수장에 연계하여 적용한 간접재이용시스템 공정은 그림 3.10.15와 같이 양수장의 공급펌프를 연계 이용하여 유입공정을 구성하고 처리공정에서는 ASF여과 및 살균 소독 공정으로 구성하였다. 양수장 적용 간접재이용시스템에서 중요한 사항은 기존의 양수를 위한 펌프의 압력을 최대한 이용해야 한다는 것이다. 간접재이용시스템 처리공정에 포함되어 있는 필터모듈은 양수장의 압력을 최대한 이용하여 가압식 필터 사양을 제작하여 목표수질에 접근할 수 있도록 필터의 공경 조정이 필요하다.



그림 3.10.15 양수장적용 간접재이용시스템 모식도

(2) 취입보 적용 간접재이용시스템

기존 취입보에 적용할 수 있는 간접재이용시스템의 모식도를 제작하였다.

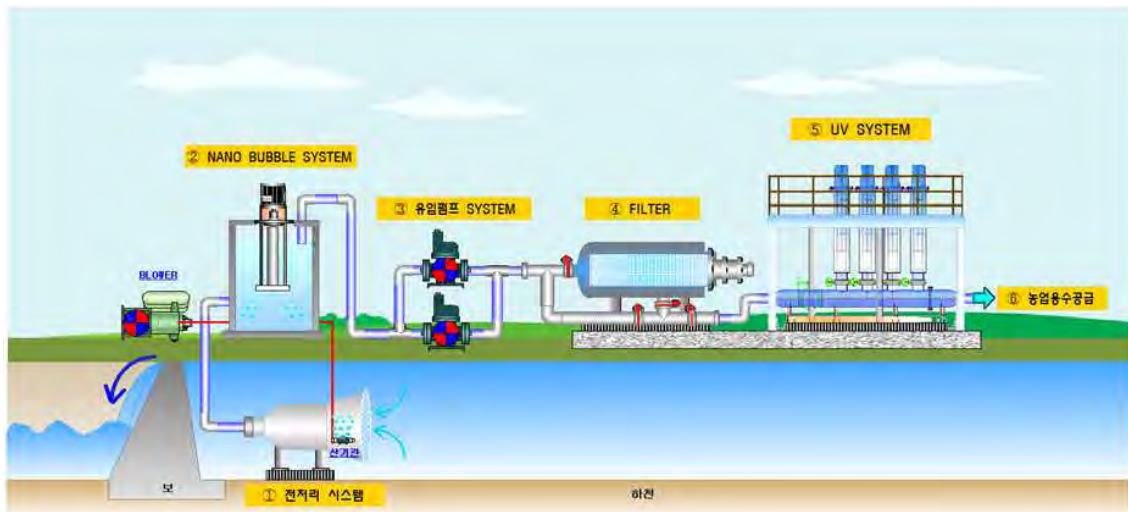


그림 3.10.16 취입보 적용 간접재이용시스템 모식도

기존의 농업용수 공급목적의 취입보에 연계하여 적용한 간접재이용시스템 공정은 그림 3.10.16과 같이 취입보가 양수장의 유수지와 같은 역할을 한다. 다만 다른 점은 양수장의 유수지는 별도 관리가 되기 때문에 비교적 전처리시스템이 불필요하나 취입보 적용 간접재이용시스템에는 하천수에 포함된 부유물질이 공경이 큰 것들도 유입되기 때문에 전처리 모듈이 필요하다. 취입보에는 가압시설이 없고 내리흐림식 관개를 하기 때문에 시스템상에는 처리공정을 위하여 필터 앞단에 가압시설이 필요하다. 그리고 필터 및 소독을 위한 자외선 처리공정은 양수장적용 간접재이용시스템과 사양은 같다.

(3) 유기계 분리막과의 연동 공정 개발

부가가치가 높은 시설원에 및 축산에 필요한 용수의 경우는 기존의 농업용수 수질보다 깨끗한 용수가 필요하고, 비농업용지에서도 생활·공업·정원용수·레크레이션 등 다양한 용수수요처가 예상되기 때문에 수요처별로 적절한 용수의 공급방안 마련을 준비해야 하며, 지금까지 기술이 개발된 물리적 처리기술은 UF, RO 등 유기계역의 분리막인 정밀필터가 가장 효과가 좋다. 다만 농업용수목적 같이 사용기간이 일정하지 않는 반면에 한번 사용 시 대용량을 공급해야하는 특징을 갖고 있는 용수의 물처리는 기존의 정수처리기술인 분리막 기술을 그대로 사용하기는 유지관리측면에서 매우 비경제적이고 효율이 떨어진다. 더욱이 간척지의 농업용수를 대상으로 하는 경우 염분을 제거하는 공정필터인 RO(역삼투막) 필터가 가장 효율과 안전성이 높는데 반에 전처리용 필터로 UF(울트라필터)를 통상 사용하는데 농업용수의 경제적 타당성에 비추어 볼 때 그 경제성대비 효과가 매우 떨어진다. 이에 RO 전처리용도의 필터로 ASF 필터가 UF필터를 대체할 경우 매우 우수한 기술로 그 수요도 매우 커질 것으로 판단되는바 ASF필터를 이용한 분리막 전처리 기술을 개발하게 되었다.

(가) 기존 UF/MF(정밀여과, 한외여과) 막분리 공정에서의 문제점

막의 장기 운전을 위해서는 과도한 전처리가 필요하기 때문에 설비비, 운전비용 등이 증가하게 된다. 중공사막이나 평막 막분리 공정에서 오염으로 인해 막의 투과성이 감소하여 이를 회복하기 위한 빈번한 역세척, 공기세정, 펌프의 유속 증가 등으로 설비비 및 운전 비용이 추가 된다. 또한 빈번한 화학세정으로 막성능 저하, 비용발생 및 환경오염 발생 등의 문제가 심각하다. 운전조건이 까다로우며, 자주 발생하는 상황으로서, 여과 압력 상승, 공기세정으로 인한충격, 화학세정 및 역세척으로 인한 막의 파손, 특히 중공사막의 절단, 평막의 찢어짐 현상 발생한다. 또한, 회수율(Recovery rate)을 높이면 막의 투과성이 급격히 감소하고, 슬러지나 고형분이막을 폐색 시키며, 심지어는 파손도 일어나므로 90%이상의 회수가 어렵다. 연속공정에서 정제 농축을 위해서는 압력과 투과량, 회수율을 일정하게 유지하기 위해서 자동밸브와 계측기 등 많은 설비비용이 추가된다. 막분리 공정에서, 한가지 종류의 Pore size를 가지는 UF/MF 막이나, 한가지 형태의 모듈 형태(Module configuration)로 전체 분리, 정제, 농축 공정을 처리함으로써, 막분리 공정의 전체를 필요이상의 비용으로 컨트롤 하거나, UF/MF가 보통 최종 공정인 RO(역삼투)막 공정의 전처리 임에도 불구하고, 또 UF/MF막의 전처리를 위한 추가적인 과도한 전처리가 포함된다. 막의 수명을 연장시키기 위해서 설치된 전체 막분리 공정에 대해서 화학 세정이나, 역세척, 약품주입, 공기세정 등으로 과도한 운전비용이 발생하게 된다.

(나) ASF 전처리 기술목표

전처리를 최소화하기 위해서 ASF 막 공정을 1단-3단 1SET으로 구성하여 처리대상 물질이나 원수의 수질에 따라 80%에서 최대 97 %까지 여과수를 회수하고, 본 공정에서는 낮은 감압 조건에서 운전함으로써 장기적으로 안정된 투과속도를 얻고자 한다.

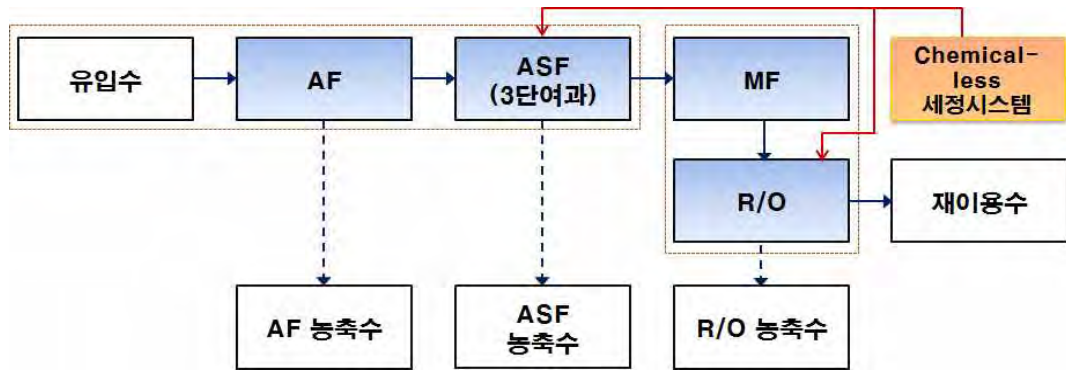


그림 3.10.17 ASF 공정처리 개요도

ASF 전처리 시스템은 컴팩한 장치로 기존 공사 대비 설치용 절감뿐만 아니라 추가 펌프 필요 없이 유입펌프의 압력을 이용한 시스템으로 에너지 저감을 목표로 하고 다른 시스템에 비해 적은 설치부지로 제작이 가능하다.

표 3.10.39 목표수질

구 분	유입수		처리수		처리효율
	농도	단위	농도	단위	
BOD	5.1	mg/ℓ	0.03	mg/ℓ	99.4%
Cl	580.1	mg/ℓ	11.6	mg/ℓ	98.0%
TDS	1,600	mg/ℓ	16.0	mg/ℓ	99.0%
탁도	3.04	MTU	0.02	MTU	99.3%
대장균군수	2,068	MPN/100mL	21	MPN/100mL	99.0%
Li	130.7	mg/ℓ	2.1	mg/ℓ	98.4%

표 3.10.40 다른 공정과의 비교

구분	ASF + RO 시스템	침지식UF + RO	압력식UF + RO
장점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 막수명이 길고 시스템 구성이 간단하여 공정 자동화가 용이하다 ○ 운전과 세척을 동시에 이루어진다. ○ 원수의 수질변화에도 처리수 수질은 거의 일정하다. ○ 자동운전으로 유지관리가 용이하며 운영인력 최소화가 가능하다. ○ 부지면적 축소로 통한 잉여부지 활용 가능 ○ 국내기술 개발된 제품이고 설비가 간단하다. ○ Chemical-less 시스템으로 회수율 향상을 통한 시설비 및 운영비 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 막수명이 길고 시스템 구성이 간단하여 공정자동화가 용이하다 ○ 전처리 공정이 불필요하다. ○ 일반적으로 고농도 및 고점도 용액처리가 가능하여 하·폐수처리에 적용한다. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미관 양호하여 이미지 개선 효과 크다. ○ 모듈 형태 제품별로 유사하여 시스템 제작이 용이하다. ○ 침지식에 비해 Flux 크다. ○ 대형화가 용이하며 공정자동화가 용이하다 ○ 세척이 용이하다
단점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전처리가 필요하다. ○ 고농도 폐수 적용 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 세정주기가 비교적 길다 ○ 가압식에 비해 Flux 낮다. ○ 수중 설치로 미관 개선 효과 낮다. ○ 설치를 위한 넓은 부지 필요하다. (설치공간면적 W19,200×D 23,000 ×H10,180) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 막의 장기 운전을 위해서는 과도한 전처리가 필요하다.(설비비, 운전비용 상승) ○ 막오염으로 인한 빈번한 역세척, 공기세정, 펌프의 유속 증가 등으로 설비비 및 운전비용이 추가된다. ○ 빈번한 화학세정으로 막성능 저하, 비용발생 및 환경오염 발생 등의 문제가 심각함 ○ 운전조건이 까다로움. ○ 고농도 폐수 적용 어려움

나. 멀티사이클론 물처리시스템 (IWR II)

농업용수로서 수질측면의 부적합한 수질을 대상으로 건전한 재이용을 위해 원심력을 이용한 사이클론 물처리 기술을 이용한 공정을 개발하였다. 본 물 처리시스템은 방류수뿐만 아니라 하천의 농업용수 취수지역 등에 다양하게 응용할 수 있으며 전기비만 소요되고 별도의 필터교체는 없는 구조이기 때문에 유기막 계열의 멤브레인 필터에 비해 유지비용이 저렴하고 유지관리성도 매우 뛰어날 것으로 예상된다.

농업용수 공급을 위한 양수장과 연동된 물처리 장치개발을 위해 원수를 흡입하는 유입 펌프 시스템→사이클론 시스템→극미세버블 시스템→전해조 시스템→용수 공급의 공정을 거쳐 처리 및 공급이 이루어지도록 물처리시스템을 구성하였다. 사이클론 시스템의 사이클론 직경은 10mm~2.5m 범위이고, 대부분의 고형물의 절단입경(d50)은 2 ~ 250 μ m, 유량(용량)은 0.1~7200 m³/h 범위이다. 운전압력 강하는 0.34 ~ 6 bar 이고, 더 작은 사이클론에서 대개 고압으로 운전된다. 여러 사이클론 시험을 통해 얻어진 크기와 설계, 운전 조건, 그리고 분리되는 고형물 농도는 부피비가 45~50%을 초과하지 않는다. 원심력의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는 직렬 또는 병렬로 연결한 다단 사이클론을 사용하는 것이 때때로 가장 좋은 방법이다. 정화공정에서 병렬연결은 효율이 더 좋은, 직경이 더 작은 사이클론으로 하여금 높은 유량을 처리하기 위해 사용가능하게 한다. 반면에 직렬연결은 정화 시에 총 회수율을 향상시키기 위해 또는 더 농축된 하부유출과 더 깨끗한 상부유출을 동시에 만들기 위해 또는 고형물을 세척하기 위해 또는 분류를 더 정확하게 하기 위해 사용된다.

본 연구에서는 다단구조로 설계하였으며 극미세버블발생장치와 전기분해살균장치와 연동으로 미세부유물 제거 및 소독기능을 추가하게 되었다. 사이클론 1단계 제거 공정에서는 비중이 1보다 높은 고형물질은 조 하부의 드레인으로 배출되며, 극미세버블에 흡착된 부유물질과 비중이 낮은 물질은 월류조에 일정시간 체류한 다음 2단계로 월류조 상부 월류관을 통해 처리수를 유입시키는 구조로 6개 이상의 사이클론으로 개발하였다. 3단계는 1개의 사이클론이 원심분리가 되는 구조로 개발하였다.

(1) 극미세버블 융합 사이클론 공정기술 개발

하수처리장의 방류수 재이용의 막 전처리용 여과기를 대체 멀티나노사이클론을 활용해서 부유물질을 제거, UF 필터의 부하를 주리고 기존 전처리 필터 디스크 필터, 섬유 필터, 마이크로 필터 등을 대체할 수 있다.

극미세버블이 (버블 10%이상) 함유된 유입수를 다단멀티클론에 유입해서 비중이 물보다 높은 입자성 물질과 비중이 물보다 낮은 입자성물질을 사이클론 원심력 및 극미세버블의 부상 원리로 다중 입자성물질을 분리하는 시스템으로 본 시스템은 다단형 사이클론과 멀티 사이클론으로 구성하여 부유물질을 제거하는 전처리 시스템으로 하수처리장의 처리수 SS농도가 갑자기 높을 때 재이용 시스템의 필터에 부하량을 줄이기 위한 전처리 시스템이다.

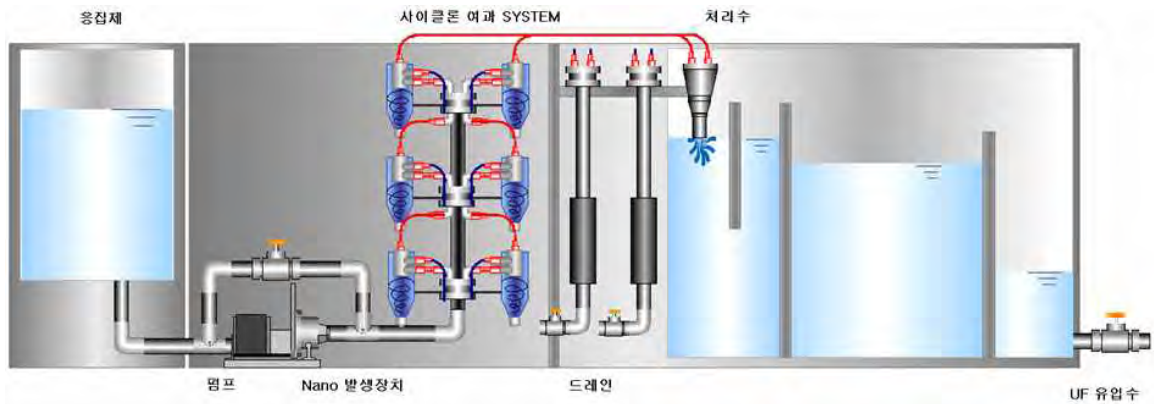


그림 3.10.18 사이클론 물처리 시스템 공정도

(2) 구조 및 재질

멀티 다단사이클론으로 1단계 제거 공정에서 비중이 1보다 높은 고형물질은 하부의 드레인으로 배출되며, 극미세버블에 흡착된 부유물질과 비중이 낮은 물질은 월류조에 일정시간 체류한 다음 2단계 제거 수단으로 상기 월류조 상부의 측면에 위치한 월류관을 통해 처리수를 유입시키는 구조로 6개 이상의 사이클론이 장착되어 있으며, 3단계 제거수단은 1개의 사이클론이 원심분리가 되는 구조로 개발하였다.

- 1단 사이클론 (D:267mm) 1개 : 마이크로버블+유입수내의 모래등 굵은 입자제거
- 2단 사이클론 (D:61mm) 6개: 중간입자제거+ 거품 및 가벼운 비중의 이물질 제거
- 3단 사이클론 (D:22mm) 20개: 미립자 제거

외관은 원통형 구조로 분해 조립 등이 용이하도록 하였으며, 주요 구성은 멀티 사이클론 유니트와 나노제너레이터 MODULE 본체로 구성되어 있고 분배 및 조립 설치를 고려하였다. 본체는 펌프모터와 베이스 프레임으로 구성되어 있으며 원수 이송펌프는 제어반에 연결되어 제어반의 조작에 의하여 구동하며, 마지막 단계의 사이클론은 바디의 중앙에 처리수가 유입되도록 관통형으로 제작되며 벽면 내측에 10~20개 이상의 사이클론이 일정한 간격으로 장착되었다. 3단계 제거수단에서 유입된 처리수는 최종단계 제거수단의 사이클론 하부로 유입되다가 사이클론 바디에 이르러서는 사이클론 상부에 의하여 흐름이 막히면서 더 이상 상승하지 못하고, 사이클론 바디의 둘레에 장착된 사이클론으로 월류되어 사이클론 내부로 들어가게 하는 구조로 개발하였다.

(3) 물처리 운전

운전은 원수공급펌프에 의해 유입되며, 균일하게 사이클론 바디를 통과 후 상부 처리수 유출구로 유출시키는 구조이다. 각 단계에 형성된 드레인이 개방된 상태에서 원수유입펌프를 통해서 원수를 공급하며 또한 극미세버블 10~30%가 혼입되도록 하는 구조로 개발하였다. 멀티 다단 사이클론은 수직으로 설치되는 구조로 유입 이송펌프의 유속과 압력으로 부유물질을 제거하는 구조로 운전된다. 모든 운전은 TIMER와 유량계에 의하여 자동운전과 병행하여 수동운전이 이루어질 수 있도록 판넬구성을 구상하

였다. 운전은 24시간 연속운전이 가능하고, 문제 발생 시 알람기능 추가하며 비정상적인 운전에 대비 BY-PASS관을 별도로 구성하였다. 자동/수동 운전이 가능하도록 PUMP, AIR VALVE, 자동 VALVE등에 ON, OFF 스위치를 설치하였다.

(4) 미세마이크로 나노 제너레이터 시스템

마이크로 버블이란 일반적으로 눈으로 확인할 수 있는 기포가 2 mm 미만인데 반하여, 직경이 50 μm 미만으로 1 μs 의 짧은 주기로 결합, 분열, 파열의 연쇄반응을 발생하는 우유빛의 미세한 기포로서, 수중에서 압력에 의하여 축소되어 다양한 에너지를 발생시키며 소멸하는 특징이 있는데, 빠르게 수면으로 상승하여 파열되는 일반 버블에 비해 상승속도가 느리고, 수 분 또는 수 시간 동안 유지되며, 극미세버블은 직경이 5 μm 미만으로 수중의 상, 중, 하층에 분산 용해되는 특징이 있다. 수개월 동안 존재할 수 있다.

극미세버블은 물에 녹아 있는 기체의 용해도는 압력이 증가함에 따라 증가한다는 헨리(Henry)의 법칙을 이용하여, 10~30초 동안 4.2~6.3 kg/cm^2 의 높은 압력을 가하다가 대기압 상태로의 갑작스런 압력 감소에 의하여 발생시킬수 이 있으며, 40 KHz의 초음파와 140 db의 높은 음압 및 순간적으로 4000 내지 6000도의 고열이 발생하는 특징이 있다.

따라서, 1단계 사이클론은 극미세버블 발생기와 원수가 혼합되는 장치와 연결되어 있는 것을 특징으로 물보다 비중이 높은 입자성 물질을 제거하고, 이를 통과한 처리수는 바로 월류조로 유입되어 수집되며, 극미세버블이 혼입된 처리수의 상층액은 월류조 상부에 위치한 월류관을 통해 2단계 사이클론으로 유출된다.

(5) 전기분해 살균장치

전기분해 살균장치는 전기분해조, Cabon Module, 카본세정장치로 구성되어 있다. 전기분해살균장치에 투입된 카본 표면에 직류전류를 통하게 하여 계속적으로 카본에 전기 화학적 용해작용을 하며 양극의 카본 표면에서 (+)전하와, (-)전하 전류의 흐르게 함에 따라 유입수에 함유되어 있는 대장균 및 일반세균을 살균소독과 미생물 억제한다. 전기분해 살균장치의 원리는 염소, 오존 살균시스템과는 달리 자연 상태의 물을 첨가물 없이 단순 전기분해만으로 직접 균을 사멸하는 시스템으로 전기장의 형성으로 인하여 발생된 전자에 의한 사멸, 발생하는 라디칼에 의한 사멸, 촉매 전극 자체의 산화력에 의한 사멸 등 총체적으로 균을 사멸하는 유기적인 시스템이다.

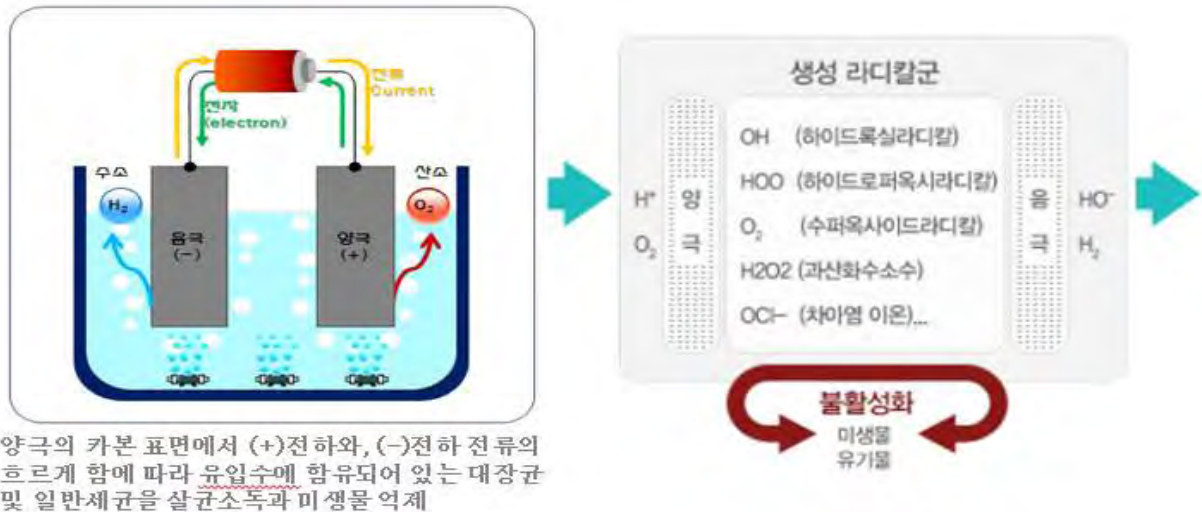


그림 3.10.19 전기분해 살균장치 원리

Cabon Module은 유수와 수직으로 설치되어지고 카본은 물에 완전히 잠기도록 길이를 확보하여야 한다. 모듈의 상부에는 여유 공간을 확보하여 카본필터의 교체를 원활히 할 수 있어야 한다. 카본 모듈과 전기 연결은 절연 구조를 가지고 있으며 카본 모듈과 교체가 쉬운 분리형으로 구성되어 있어야 한다. 카본모듈은 전기분해 및 흡착의 성능을 가진 큰 PLATE 모양으로 전기분해조에서 카본과 반응하여 수중의 대장균 및 미생물을 제거한다. 카본모듈의 벌크 밀도는 1.85, 경도 60, 탄력성 1,200으로 제작되어 대장균 및 미생물을 제거에 있어 전극효율을 극대화시킬수 있어야 한다. 전기분해조에는 Flog-Flow를 형성시키기 위한 흐름 안정장치(정류판)와 수위 제어용 월류 웨어가 설치되어야 하고, 카본 전기 모듈은 반응조 상부에 STS 판에 고정 장치에 매달려 있으며 반응조에 수직으로 연결되고 완전히 밀봉되어야 한다. 외적인 충격에 의해 카본 등의 설비가 파손이 되지 않도록 충분한 강도를 갖고 있어야 하며, 카본 전기 모듈은 일정한 배열로 반응조 벽면에 볼트를 이용하여 조립되어야 한다. 카본 모듈은 대장균 및 미생물 제거가 우수한 모델을 적용하여야 하며 유수의 길이 방향으로 방류수의 흐름에 수직으로 배치되면서 좌우 균일한 간격의 배열로 구성되어야 한다. 전력공급 판넬은 팬으로 냉각되며 외형은 STS 304재질로 구성하였다.

(6) 막여과 시스템과 전처리시스템 의 융·복합

필터를 사용하지 않는 물처리 기술을 전처리하여 염분제거 공정인 분리막시스템의 조합을 통해 설치비 및 유지관리 저감을 위해 저에너지 및 저비용의 시스템 공정을 고려할 수 있다. 막여과 시스템과 전처리시스템의 융복합을 통해 다중 멀티사이클론을 활용한 부유물질 및 COD 저감용 수처리 공정 (Multi-level Water Treatment Process for Reducing Suspended Solids and COD Using Multicyclone System)을 하나의 공정으로 조합하였다. TEST-BED 설계에서는 1차년도에 개발한 극미세버블과 사이클론 기술을 적용함으로써 침강성이 강한 고형물을 포함하는 폐수처리뿐만 아니라, 부유성이 높은 미세 입자 제거효율이 높으며, 또한 전처리 효율의 증가로 UF 막의 처리 및

운영 효율이 증가하는 효과가 매우 탁월하다. 따라서 하수처리수와 하천수가 섞이는 지역같이 다양한 크기의 부유물을 함유한 경우 경제적으로 제거 효과를 높일 수 있는 장점이 있다.

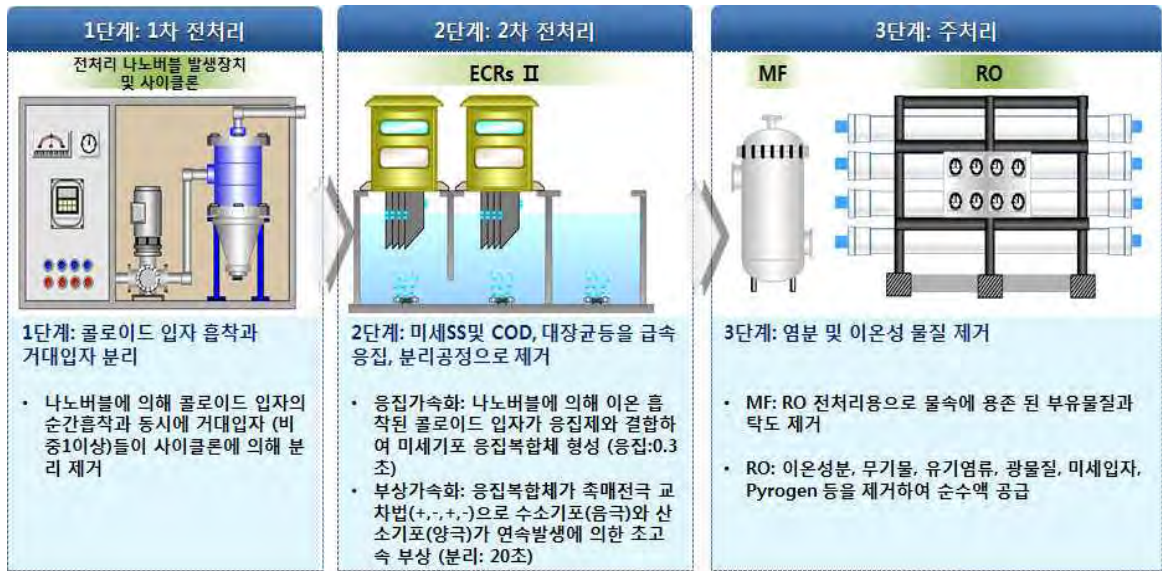
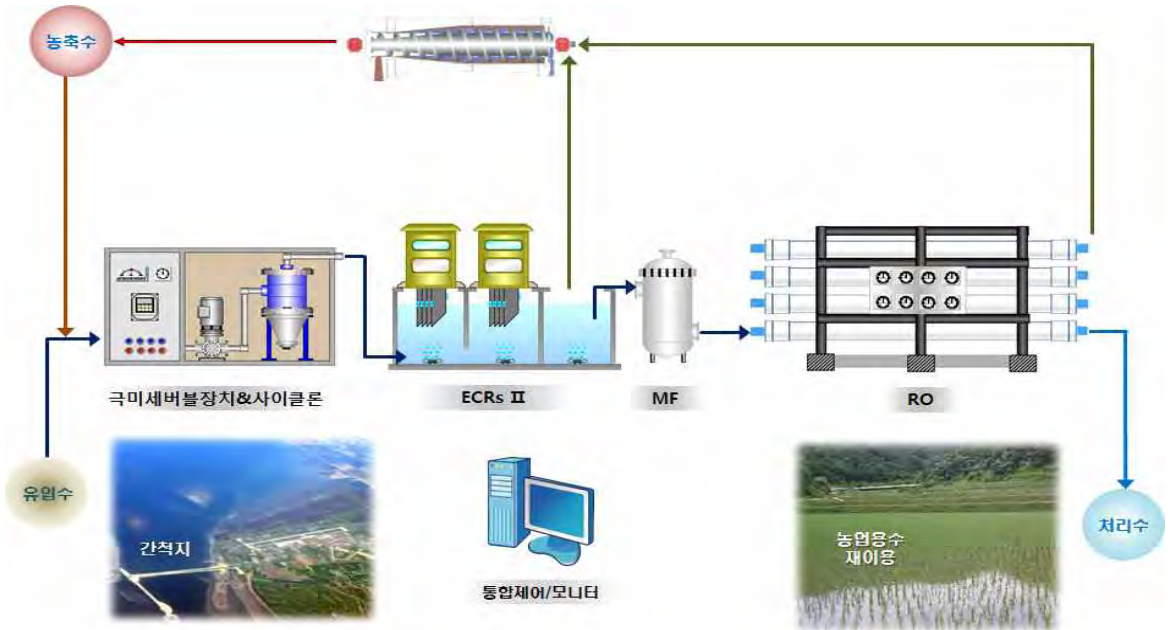


그림 3.10.20 물리적 전처리기술 및 분리기술의 조합

UF 막 처리에 대한 전처리 단계에서 원수에 극미세버블을 가하고, 4단계의 사이클론 처리 장치인 극미세 멀티 사이클론을 이용하여 폐수를 처리한 결과, 부유물질의 제거 효율이 매우 높고, COD 저감 효과가 있으며 이에 의한 UF 막 세정주기 및 생산수 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

다. 융복합 이동식 물처리시스템 (IWR III)

수온이 상승하는 여름철부터 가을철까지 저수지, 호수, 어장, 연안 또는 흐르는 물까지도 녹조와 적조가 발생하고 있다. 이러한 녹조와 적조의 과다한 발생은 호수 또는 바다 양식장의 물고기는 물론 수생식물까지도 사멸시켜 생태환경 파괴는 물론 심한 악취까지 유발시킨다. 녹조현상은 부영양화된 호수나 유속이 느린 하천에서 부유성의 조류가 대량 증식하여 수면에 집적하게 되고 물의 색을 짙은 녹색으로 변화시킴으로써 발생되며 여러 종류의 조류 중 남조류가 독소와 악취를 발생시켜 수생식물에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이러한 남조류의 독소는 인체 및 가축에의 영향, 생태계 파괴로 인한 생태학적인 문제부터 산소결핍으로 인한 물고기 및 각종 수중생물 폐사 등의 문제를 야기한다. 적조현상은 식물성 플랑크톤이 대량으로 증식하여 바닷물의 색깔이 붉게 변하는 현상을 말하는 것인데, 적조를 일으키는 생물은 편모조류나 규조류가 대부분이지만 유글레나 또는 원생동물로 분류되는 섬모충류가 원인이 되는 경우도 종종 있는 것으로 알려져 있다. 최근 우리나라에서도 적조현상이 남해연안과 서해, 동해 남부연안에 걸쳐 널리 나타나고 있다. 적조원인 생물도 규조류 중심에서 편모조류 중심으로 옮겨가고 있으며, 적조 발생의 농도도 점점 고밀도화 되어 가고 있는 추세로 이로 인하여 적조의 피해도 해마다 증가하고 있다. 이러한 녹조 및 적조 현상은 광역화, 독성화, 장기화의 특성을 띠며 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 기술개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 물속에서 이미 발생한 조류 제거기술 및 조류 발생의 원인이 되는 유기물의 제거방안에 대해 본 연구에서 개발한 요소기술인 극미세버블 발생기술과 사이클론 기술 그리고 전기축매를 융·복합하여 농업용수 관리목적의 물처리기술을 개발하였다.

물리·화학적 방법으로 수역에서 이미 발생한 조류의 제거와 조류발생의 원인이 되는 유기물의 제거방법을 개발위해 조류 등 유기물의 반응시간을 20초 ~ 1분 목표로 유수의 온도 및 pH 등 조건과는 무관하게 조류를 제거 할 수 있으며, 조류제거와 함께 유수에 함유되어 있는 유기물도 함께 제거할 수 있도록 개발하였다.

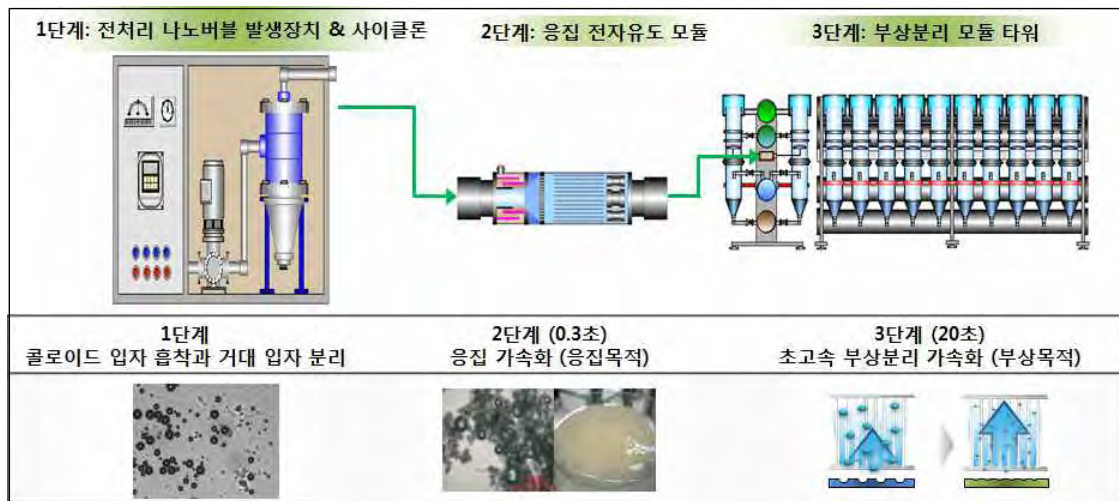


그림 3.10.21 초고속 조류제거 기술 개요도

기본 처리공정은 저수지 하천 등 수역에서 외부로 가압하여 처리하고 다시 수역으로 처리수를 공급하는 외부순환방식과 수역에 처리장치를 장착하여 처리하는 침지방식으로 구분하여 현장조건에 따라 적용할 수 있도록 구성하였다.

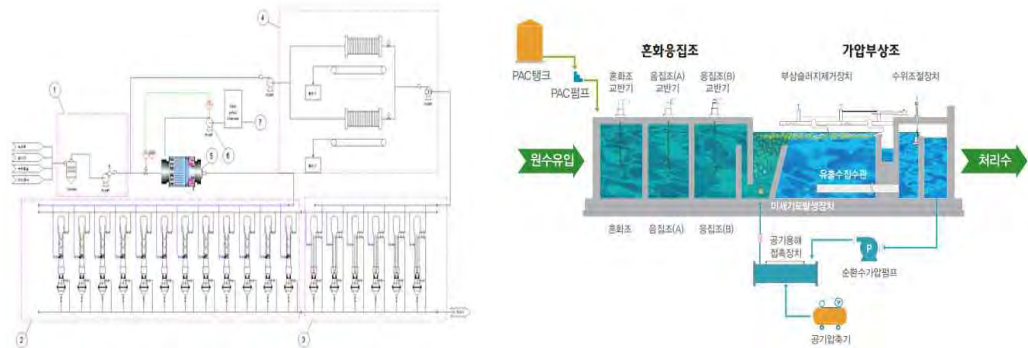


그림 3.10.22 초고속 조류제거의 외부순환방식(좌) 및 침지방식(우)

그림 3.10.22(좌)의 경우는 외부순환방식으로서 1단계에서는 극미세버블과 원심력 기술을 접목하여 클로이드성 입자 흡착과 함께 물보다 비중이 높은 부유물을 사이클론 모듈에서 원심력의 원리로 제거한다. 2단계에서는 유입수에 함유되어 있는 전기축매기 기술을 통해 조류를 응집 시키고 유기물을 분해한다. 3단계에서는 매니폴드(manifold) 형태의 타워에서 조류를 실시간으로 부상시켜 상단배출구로 제거하고 하부배관으로 처리수를 다시 유수로 공급하는 형태이다.

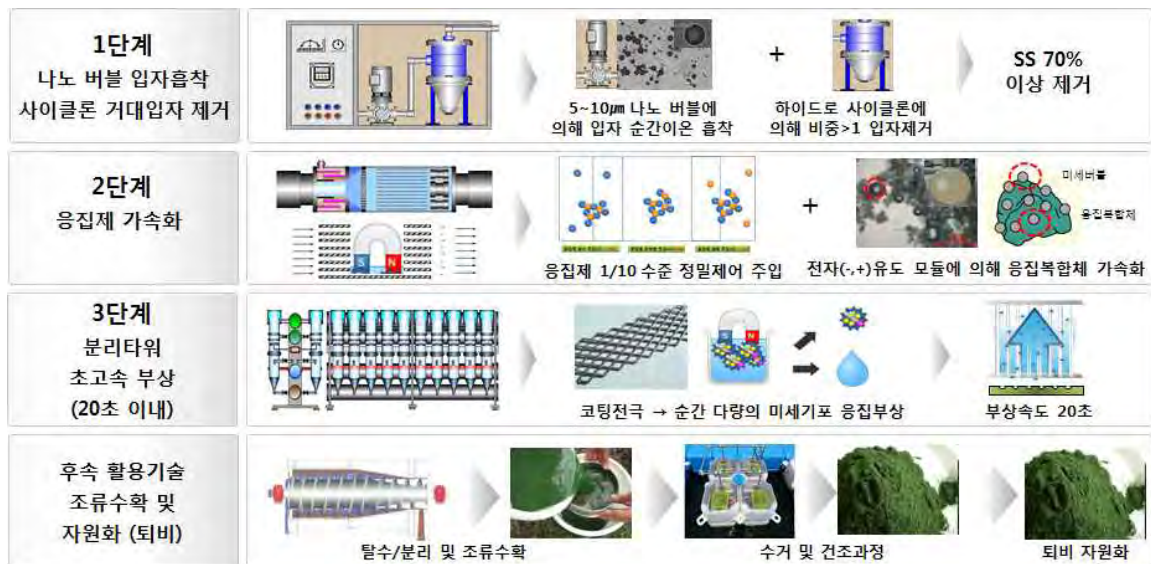


그림 3.10.23 시스템 단위공정 및 처리 순서

특히 그림 3.10.23에서와 같이 분리한 조류 바이오디젤 등으로 다시 활용할 수 있는 방안도 연구 중에 있다. 초고속 조류제거 기술은 조류처리기술의 구분으로 분류하면 가압부상방식(DAF)의 일종으로 구분할 수 있는데 처리과정과 방법적인 면에서는

비슷하지만 실제 요소기술의 원리는 다르다. 개발기술의 수준을 비교할 수 있도록 가압부상방법과 항목별로 비교하였다.

표 3.10.41 초고속 조류제거 기술의 기존 기술과의 비교

항목	초고속 조류제거 방법	가압부상방법
부상조 크기	부상조가 필요 없음	전자부상처리 대비 30~50% 큰 부상조가 필요
소요 바닥 면적	소요 면적이 필요 없음	가압펌프, 컴프레서, 용기탱크와 그에 따른 배선, 배관 또는 부상조의 대형화로 20~30% 커짐
부상가스 발생방식과 제어	고속 전자응집 중 부산물 버블생성가능 수질의 오탁정도에 따라 발생량조절가능. 콜로이달 에어 크기는 약100nm~10 μ m.	가압펌프와 컴프레서에 의해 용존 공기를 얻기 때문에 수질의 오탁량에 적합한 제어는 곤란함. 가동개시에 시간을 필요로 한다. 콜로이달 에어 크기는 50~100 μ m.
유지가동 비용	저전압 및 유지비용이 중저가이며, 부유물질 2,000mg/l 이하 처리 가능함	고압펌프 등 많은 동력이 필요하며, 소음이 심함. 유지비용이 고가이며, 40℃ 이상이 일반적으로 처리 불가능함
Scum 함수율	96~94%	98~97%
탈수 약품(폴리머)	필요 없음	필요함
보수 점검	스컴 제거 장치가 별도로 필요치 않음 유지관리가 매우 간단함	가동부분이 많아 시간을 필요함
부가적 효과	탈색, BOD/COD 제거, 살균	거의 없음.

5. 요약 및 결론

본 절에서는 하수처리 수질 유형별 맞춤형 처리공정을 개발하기 위하여 농업지역내 농업용수 목표수질을 선정하고, 정확한 농업용수의 요구수량을 산정하였다. 또한, 간접재이용시스템의 적용을 위하여 농촌지역으로 방류되고 있는 하수처리장의 수질 등을 포함한 현황과 농업기반시설의 현황을 분석하여, 하수처리 유형별 맞춤형 처리공정을 제안하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 간접재이용시스템 목표수질은 하수재이용수질기준과 농업용수수질기준을 고려하여 DO와 COD는 시설재배용수의 경우를 구분하여 기존 3급수 수준의 목표수질을 설정하였고, T-N과 T-P의 경우는 환경보존측면에서는 오염물질이지만 시설재배용수측면에서는 영양염류이기 때문에 기존 4급수의 수준으로 목표수질을 설정하였다.
- ② 자료조사를 통한 하천의 유량 및 수질데이터와 하수처리장 방류수량과 방류수질을 유량가중평균법에 의해 하수처리장 방류수 유입 후 하천의 유량 및 수질을 예측하도록 하였으며, 이는 간접재이용 시스템 유입수를 예측함으로써 최적화된 간접재이용시스템의 공정기술을 개발하였다.
- ③ 간접재이용 시스템의 유입수를 예측한 결과 전체 69개 수계중 19개소가 목표수질인 4급수 수준에 미치지 못하였으며, 55%이상인 37개소의 수계가 시설재배용 목표수질인 3급수 기준에 미치지 못하는 것으로 분석되었다.
- ④ 간접재이용시스템 유입수질의 성상과 오염정도에 따라 직접재이용에 준하는 수처리공정이 필요한 경우에 적용가능한 간접하수재이용 시스템 공정을 분석하였고, 오염도가 심한 간접재이용시스템은 처리공정(전처리, 주처리, 후처리 공정)으로 유입되고 이와 같은 과정을 거친 재이용수는 수요자에게 펌프를 통해 이송된다.
- ⑤ 맞춤형 간접재이용시스템 공정을 개발하기 위하여 물처리 공정 요소기술에 대해 분석하였으며, 본 연구에서는 ASF 물처리시스템 (IWR I), 멀티사이클론 물처리시스템 (IWR II), 그리고 융복합 이동식 물처리시스템 (IWR III) 공정을 개발하였다.

제11절 하수처리수 간접재이용시스템 TEST-BED 설계

1. 서론

하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위한 안전한 수처리 기술과 용수공급자 측면의 경제적 유지관리기술을 적용한 간접재이용시스템을 설계하였다. 설계된 간접재이용시스템은 농업용수 수질기준을 만족하도록 하수처리장 방류수를 재처리하며, 상대적으로 저렴한 설치비용과 경제적 유지관리비 소요를 목표로 한다. 본 연구의 TEST-BED 지역은 하수처리장 및 도심하천에 영향을 받는 기반시설 (양수장)로서 간접재이용시스템을 설치하여 하수처리수를 이용하고 있는 농경지에 관개용수를 공급하고자 한다.

2. TEST-BED 지역 개요

간접재이용시스템 TEST-BED 지역은 경기도 화성시 병집에 위치한 한국농어촌공사 관할 병집양수장이다. 본 양수장은 수원하수처리장 방류수를 주요 수원공으로 하고 있다.



그림 3.11.1 병집양수장(TEST-BED 지구)

TEST-BED의 목적은 본 연구에서 개발하고자 하는 간접재이용 파일럿 시스템에 대한 실제 용수공급을 통해 제품의 성능을 검증하기 위함으로, 안정적으로 수요자 기대를 충족할 경우 친환경 농업용수 제공에 대한 대 국민 인식의 전환을 기대할 수 있다.

3. 간접재이용시스템 요소기술 설계

3.1. 공정개발

본 연구에서의 TEST-BED 적용을 위한 설계기술은 다중멀티사이클론을 활용한 부유물질 및 COD 저감용 물처리 공정 (Multi-level Water Treatment Process for Reducing Suspended Solids and COD Using Multicyclone System)으로서, 하나 이상의 사이클론이 장착된 4 단계의 제거수단을 구비하고, 고형물질 및 부유물질이 포함된 원수가 장치의 하부에서 유입되어 최종 처리수가 상부로 방출되는 물처리 원리이다.

TEST-BED 설계에서는 1차년도에 개발한 극미세버블과 사이클론 기술을 적용함으로써 침강성이 강한 고형물을 포함하는 폐수처리뿐만 아니라, 부유성이 높은 미세 입자 제거효율이 높으며, 응집제와 같은 화학약품 사용이 없어 2차 수질오염의 문제가 없고, 또한 전처리 효율의 증가로 UF 막의 처리 및 운영 효율이 매우 탁월하다. 따라서 하수처리수와 하천수가 섞이는 지역같이 다양한 크기의 부유물을 함유한 경우 경제적으로 제거 효과를 높일 수 있는 장점이 있다.

3.2. 배경기술

하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위한 전처리공정으로 사용되는 방법으로는 가압부상 및 디스크 필터, 섬유여과 필터 등이 있으며, 다른 장치와 비교하여 그 구조가 간단하기 때문에, 다양한 분야에서 적용되고 있다. 가압부상분리법은 물리적으로 전처리를 거친 폐수를 pH 조정 및 응집제 투입을 통하여 미세한 현탁물질과 콜로이드 상의 부유물질을 가압부상조에서 제거한 후 3차 생물학적으로 처리하는 방법으로, 폐수의 현탁성 부유물의 비중이 1 정도이거나, 용존 불순물 중에서 유기물이 많은 경우, 예를 들어 식품, 농수산물 가공폐수, 도장폐수, 폐유 및 유지함유 폐수, 제지폐수, 생물학적 처리의 전처리에 이 방법을 적용한다.

부상분리법은 헨리(Henry)의 법칙에 의하여 물에 녹아 있는 기체의 용해도는 압력이 증가함에 따라 증가하므로, 시스템으로 유압되는 처리수에 10~30초 동안 4.2~6.3 kg/cm²의 높은 압력을 가하다가, 대기압 상태의 부상조로 유입시키면서, 갑작스런 압력 감소에 의하여 평균 입경 50~70 μ m 혹은 그 이하의 미세 기포가 발생되도록 하고, 이 기포에 부유 물질 또는 콜로이드 입자들과 결합하여 부상하는 원리를 이용한다.

일반적으로 부상분리는 이젝터(Ejector) 및 컴프레서(Compressor)를 사용해 공기가 배출되어 작은 기포가 형성되고, 이 때 기포가 상승하면서 입자를 흡착하여 표면에 떠오르게 한 다음, 스킴머(Skimmer)로 건어내어 분리한다. 응집 침전법과 비교할 때, 침전속도보다 부상속도가 빠르기 때문에, 단위 시간당 처리량이 많다는 특징이 있다.

그러나 가압부상분리 시스템 구조가 급속 혼합조, 완속 혼합조, 부상조, 미세기포발생장치 등의 복잡한 공정을 통한 처리 방식을 필요로 하기 때문에, 부대 장치 구성이 다소 많고, 운전 시 RPM, pH, 온도, 체류 시간 등을 포함하는 가동 조건이 다소 까다롭다는 문제가 있고, 또한 침강성이 강한 폐수의 처리는 적합하지 않다는 것이 큰 단

점이다. 또한, 응집제와 같은 약품 사용에 따른 하류 생태계 오염의 원인이 되고 있다.

가압부상분리법 다음으로 많이 사용되고 있는 디스크 필터 및 섬유여과장치 (섬유디스크 필터)는 오염물질을 포함하는 원수가 막 부재를 통과하면서 오염물질은 막 부재에 점착되고, 막 부재의 반대편으로 여과된 투과수가 배출되는 구조이므로, 여과 공정이 진행되면서 필연적으로 막 부재에 침착된 오염물질의 양이 증가하기 때문에, 막 부재를 통과시키기 위한 원수의 필요 압력이 증가하게 된다.

또한, 디스크 필터 및 섬유여과장치 주기적으로 막 부재에 점착된 오염물질을 제거하는 막 세정작업이 수행되어야 하고, 이러한 막 세정작업은 주로 여과된 투과수를 막 부재에 역류시켜 오염물질을 털어내는 물리적 세정작업과 세정액을 막 부재에 접촉시킴으로써 오염물질을 제거하는 화학적 세정작업으로 구분할 수 있다. 종래의 전처리 여과장치는 주기적으로 물리적 세정작업을 수행하고, 필요할 경우에만 여과장치의 가동을 중단시키고, 화학세정액에 막 부재를 침지시키거나, 세정액을 반복적으로 막 부재에 통과시키는 방법으로 세정작업을 진행하고 있다. 따라서, 이 과정에서 사용되는 응집제 (약품), 세정제, 섬유 여재 등에 의하여 원수의 오염에 대한 2차 오염원 발생을 야기하며, 시스템에 들어가는 소모품은 하수 재이용시 UF 또는 RO 막의 처리효율을 저하시키고, 부하량을 증가시키는 문제가 있다.

상기 종래 기술의 문제점을 해결하고자 UF 막 처리에 대한 전처리 단계에서 원수에 극미세버블을 가하고, 4단계의 사이클론 처리 장치가 구비된 나노 멀티 사이클론을 이용하여 폐수를 처리한 결과, 부유물질의 제거 효율이 매우 높고, COD 저감효과가 있으며, 이에 의한 UF 막 세정주기 및 생산수 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

3.3. 요소기술 설계

하수처리수 재이용 시 전처리 방법으로 보편적으로 사용되고 있는 가압부상분리법 및 섬유디스크 필터에 의한 처리방법은 가압 부상에 의한 부유물질 처리가 어렵고, 응집제, 세정제와 같은 화학약품을 사용해야하기 때문에, 2차 수질오염을 야기하며, 또한 UF 또는 RO 막의 처리효율을 저하시키고, 부하량을 증가시키는 문제가 있다.

요소기술은 상기의 문제를 해결하기 위해 극미세버블과 다단계 사이클론 처리수단기술이 채용된 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치를 제작하였으며, UF 막 처리에 대한 전처리 단계에서 원수에 수미버블을 가하고, 4단계의 사이클론 처리 장치가 구비된 나노 멀티 사이클론을 구동시킨 결과, 부유물질의 제거 효율이 매우 높고, 이에 의한 UF 막 세정주기 및 생산수 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하고 TEST-BED 시스템 요소기술로 설계하였다.

요소기술 설계 부분은 (a) 사이클론이 장착된 1단계 제거모듈 (b) 복수 개의 사이클론 및 두 개의 드레인을 구비하고 거품과 침강성 입자를 분리하는 2단계 제거모듈 (c) 사이클론이 장착된 3단계 제거모듈 및 (d) 복수 개의 사이클론이 장착되고 미립자성 물질을 분리하는 4단계 제거수단을 설계하였다.

(a) 극미세버블이 10% 내지 30% 혼입된 원수를 1단계 제거수단의 사이클론을 통과시켜 비중이 1보다 높은 고형물질을 제거하고, 처리수는 2단계 제거수단으로 이동시키는 1단계 제거공정

(b) 상기 이송된 처리수를 월류조 상부의 배관을 통해 2단계 제거수단의 사이클론을 통과시켜, 극미세버블에 포집된 부유물질 및 거품은 상부 드레인으로 배출시키고, 침강하는 고형물질은 하부로 배출시키며, 처리수는 사이클론 상부의 배관을 통해 3단계 제거수단으로 배출하는 2단계 제거공정

(c) 이송된 처리수를 3단계 제거수단에 장착된 사이클론을 통과시키면서, 하부 드레인으로 침강물질을 배출시키고, 원심력에 의해 처리수는 상승하면서 체류하도록 하여 입자성 물질을 제거하는 3단계 제거공정

(d) 상기 3단계 제거공정에서 처리된 처리수를 사이클론을 통과시켜, 침강물질을 하부측면 드레인으로 배출시키고, 최종 처리수를 상부로 방출시키는 미립자 제거용 4단계 제거공정을 거치는 것을 특징으로 함

물처리 방법의 원리는 물보다 비중이 높은 입자성 물질과 물보다 비중이 낮은 입자성 물질을 사이클론 원심력과 극미세버블의 부상원리로 장치의 하부에서 유입되어 최종 처리수가 상부로 방출되도록 하여 분리 제거하는 것을 특징으로 한다. 처리되는 원수는 1단계 제거수단으로 유입되기 전에 10% 내지 30%의 농도로 극미세버블이 혼입된 것을 특징으로 한다. 마이크로 버블이란 일반적으로 눈으로 확인할 수 있는 기포가 2 mm 미만인데 반하여, 직경이 50 μm 미만으로 1 μs 의 짧은 주기로 결합, 분열, 파열의 연쇄반응을 발생하는 우유빛의 미세한 기포로서, 수중에서 압력에 의하여 축소되어 다양한 에너지를 발생시키며 소멸하는 특징이 있는데, 빠르게 수면으로 상승하여 파열되는 일반 버블에 비해 상승속도가 느리고, 수 분 또는 수 시간 동안 유지되며, 극미세버블은 직경이 5 μm 미만으로 수중의 상, 중, 하층에 분산 용해되는 특징이 있다. 극미세버블은 물에 녹아 있는 기체의 용해도는 압력이 증가함에 따라 증가한다는 헨리(Henry)의 법칙을 이용하여, 10~30초 동안 4.2~6.3 kg/cm^3 의 높은 압력을 가하다가 대기압 상태로의 갑작스런 압력 감소에 의하여 발생시킬 수 이 있으며, 40 KHz의 초음파와 140 db의 높은 음압 및 순간적으로 4000 내지 6000도의 고열이 발생하는 특징이 있다. '고형물질'은 원수에 용해되지 않은 '고형물질'은 '부유물질', '침강성 입자', '입자성 물질' 및 '미립자'와 혼용될 수 있고, 비중이 1보다 크거나 또는 작더라도 원심분리에 의하여 침강되는 물질을 포함하며 이에 한정된 것은 아니다.

1단계 제거수단은 1개의 사이클론이 장착되어 있으며, 극미세버블 발생기와 원수가 혼합되는 장치와 연결되고, 1단계 제거공정에서 비중이 1보다 높은 고형물질은 월류조 하부의 드레인으로 배출되고, 극미세버블에 흡착된 부유물질과 비중이 1보다 낮은 물질이 포함된 처리수는 월류조에 일정시간 체류한 다음, 2단계 제거수단으로 유입되도록 설계하였다.

여기서 1단계 제거공정에서 비중이 1보다 높은 고형물질은 월류조 하부의 드레인으로 배출되고, 극미세버블에 흡착된 부유물질과 비중이 1보다 낮은 물질이 포함된 처리수는 월류조에 일정시간 체류한 다음, 2단계 제거수단으로 유입되도록 설계하였다.

월류조는 1단계 제거수단의 사이클론의 반대편에 위치하며, 월류조 하부에 있는 드레인을 통하여 모래 등과 같이 비중이 물보다 큰 고형물질을 시키며, 상기 2단계 제거수단으로는 상기 월류조 상부의 측면에 위치한 월류관을 통해 처리수를 유입시키는 것으로 설계하였다.

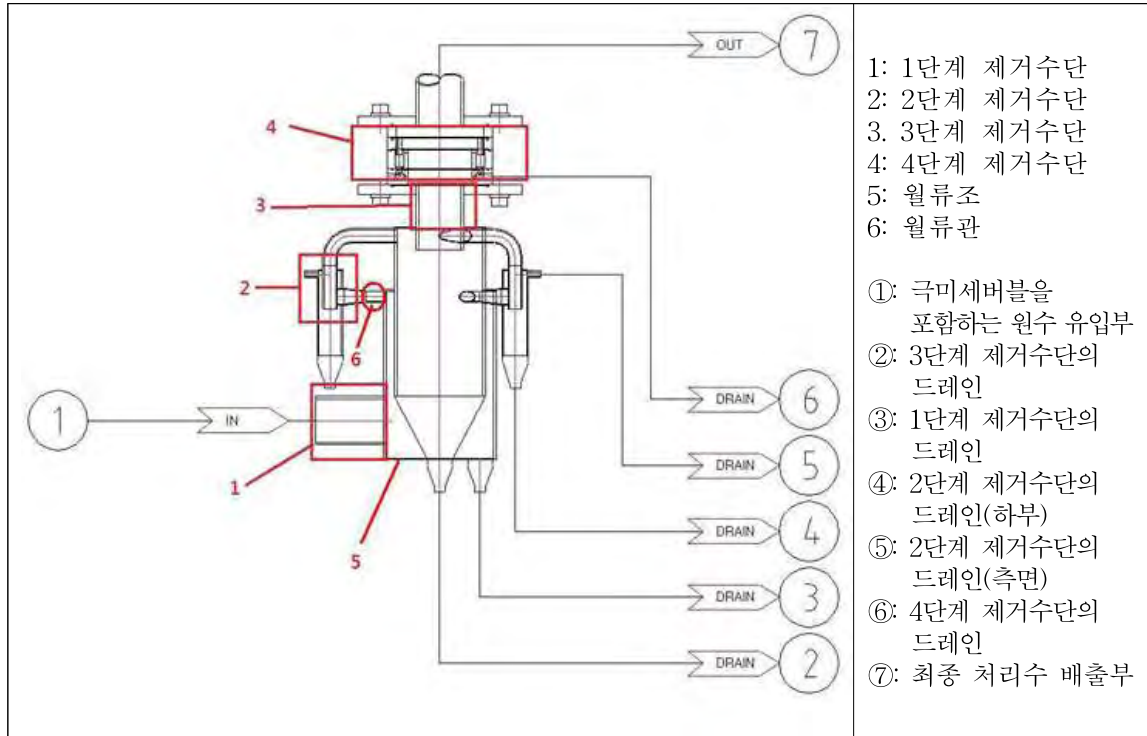
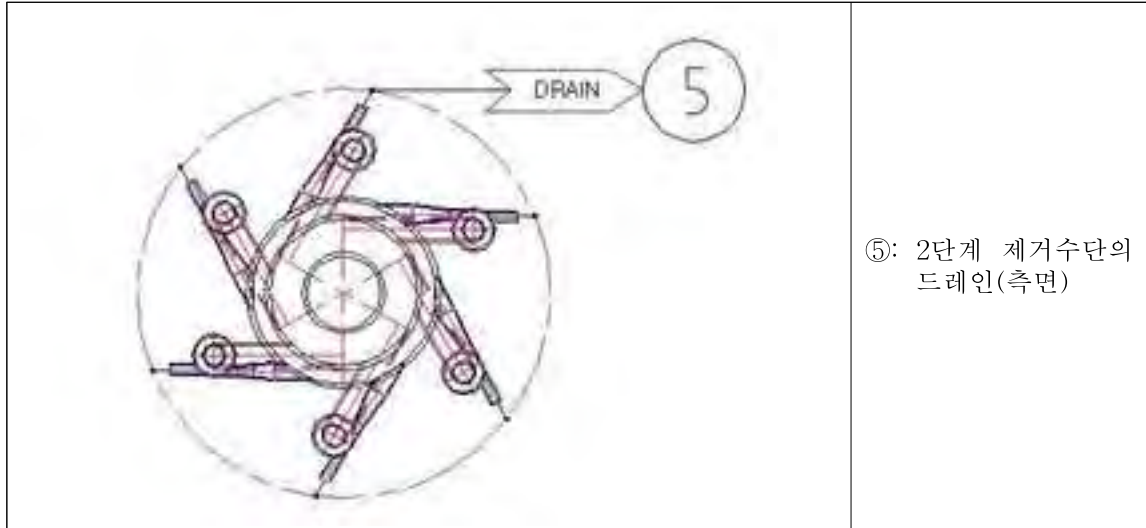


그림 3.11.2 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치의 구성도

2단계 제거수단은 6개 이상의 사이클론이 장착되어 있으며, 상기 사이클론은 상기 월류관과 연결된 배관의 둘레에 일정 간격으로 장착되어 상기 배관 내의 유입수를 처리하는 것으로 설계하였다. 2단계 제거수단의 하부와 상기 월류관이 연결되어, 극미세버블이 함유된 처리수가 2단계 제거수단의 6개의 사이클론으로 각각 유입되어 원심분리되면, 상기 2단계 제거수단의 상부에 형성된 드레인을 통해 물보다 비중이 낮은 물질과 거품이 제거되며, 상기 물질보다 비중이 높은 부유물질은 하부에 형성된 드레인으로 배출되고, 처리수는 원심력에 의하여 상승하면서 3단계 처리수단으로 이동되도록 설계하였다. 2단계 제거수단은 상기 월류조 외벽의 상부에 하나 이상 장착되는 것을 특징으로 하며, 바람직하게는 둘 이상일 수 있다. 왜냐하면 원수와 처리수가 지속적으로 공급되는 한 연속적으로 진행하기 위함이다.

3단계 제거수단은 1개의 사이클론이 장착되어 원심분리가 이루어지며, 부유물질이 제거된 처리수는 상승하여 4단계 제거수단으로 바로 유입되고, 미립자를 포함하는 이물질은 하부로 침강하여 드레인으로 배출되도록 설계하였다. 3단계 제거수단에 포함된

드레인은 월류조 내부를 관통하여 월류조 하부까지 이어져 외부로 통하는 구조로 형성되어 있다. 따라서, 월류조는 처리수가 체류하는 공간과 3단계 제거수단의 드레인이 형성하는 공간으로 구성된 이중구조의 특징이 있다.



⑤: 2단계 제거수단의 드레인(측면)

그림 3.11.3 물처리 장치 내 2단계 제거수단에 포함된 사이클론 바디의 단면도

4단계 제거수단에 장착된 사이클론은 (a) 스페이스, (b) 사이클론 상부, (c) 사이클론 바디, 및 (d) 사이클론 하부의 4단으로 구성된 것을 특징으로 한다. 4단계 제거수단의 사이클론은 상기 사이클론 바디의 중앙에 처리수가 유입되도록 관통형으로 형성되며, 벽면 내측에 20개 이상의 사이클론이 일정간격으로 장착되도록 설계하였다. 특히 각 사이클론은 사이클론 하부 둘레에 형성된 드레인과 맞도록 장착되도록 설계하였다. 3단계 제거수단에서 유입된 처리수는 4단계 제거수단의 사이클론 하부로 유입되다가 사이클론 바디에 이르러서는 사이클론 상부에 의하여 흐름이 막히면서 더 이상 상승하지 못하고, 사이클론 바디의 둘레에 장착된 사이클론으로 월류되어 사이클론 내부로 들어가게 되며, 이 때 미립자성 이물질은 하부의 드레인으로 배출되고, 최종 처리수는 상승하여 사이클론 상승부에 형성된 배관을 통해 스페이스로 이동하여 최종 배출되도록 설계하였다.

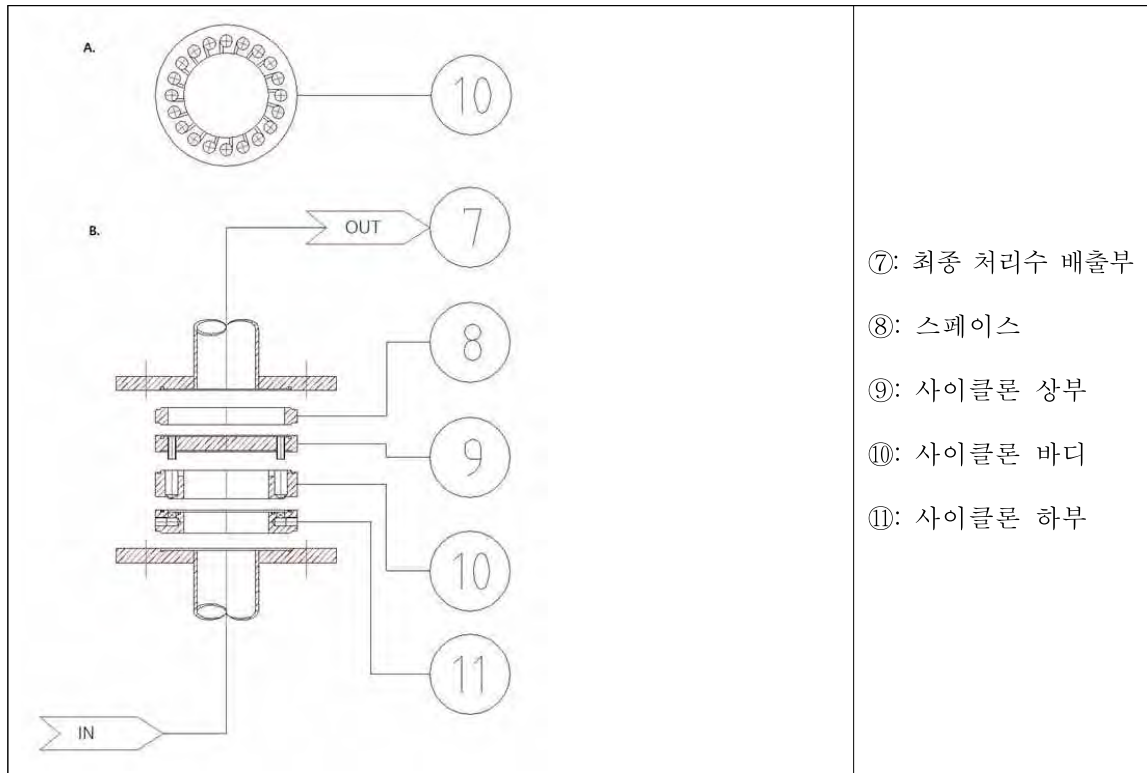


그림 3.11.4 물처리 장치 내 4단계 제거수단의 사이클론 조립도
(A:사이클론 바디의 단면도; B: 4단계 제거수단의 측면도)

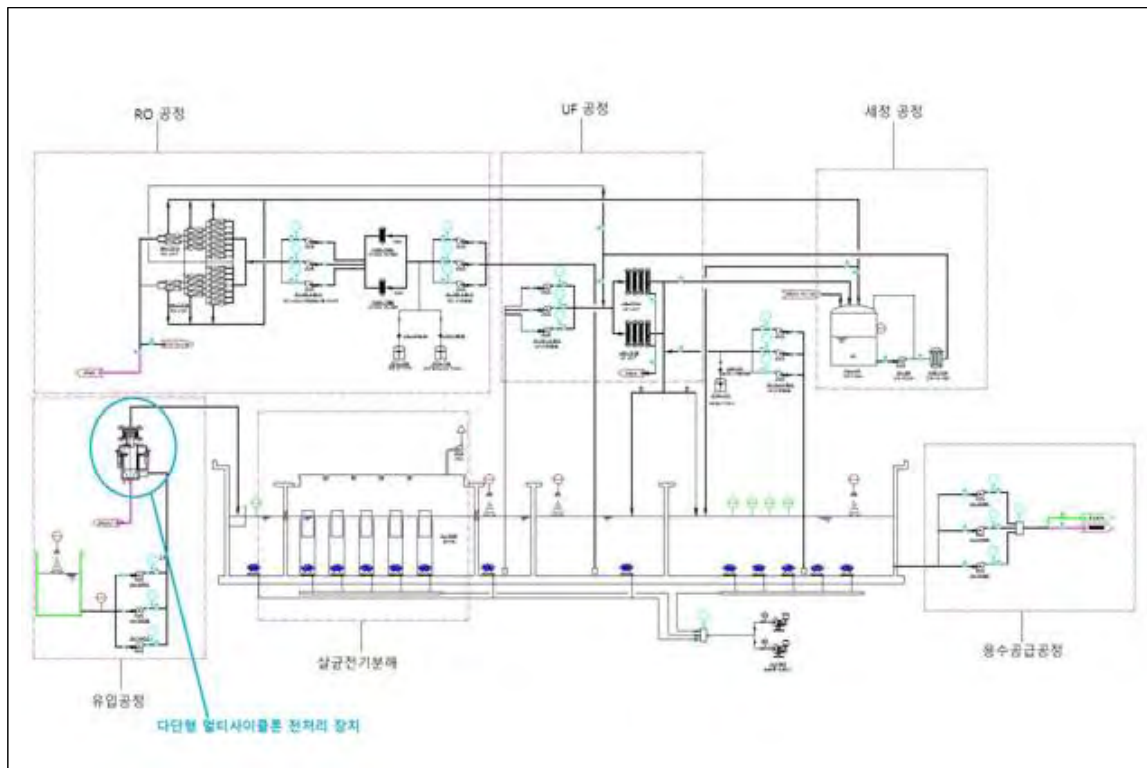


그림 3.11.5 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치가 포함된 하수처리 공정도

3.4. 물처리 목표 및 기대효과

간접재이용시스템은 하나 이상의 사이클론이 장착된 4단계의 제거수단을 구비하는 다중 멀티사이클론이 장착된 물처리 장치를 이용하여 부유물질 및 COD 저감을 목표로 하고 있다. 간접하수재이용시스템은 하수처리장 방류수뿐만 아니라 하천의 농업용수 취수지역 등 다양하게 응용할 수 있으며 유기막계열의 멤브레인 필터에 비해 저렴하고 유지관리성이 매우 뛰어나 것으로 판단된다. 특히, 본 기술은 극미세버블과 사이클론 기술을 채용하였기 때문에, 침강성이 강한 고형물을 포함하는 폐수처리뿐만 아니라, 부유성이 높은 미세 입자 제거효율이 높으며, 응집제와 같은 화학약품 사용이 없어 2차 수질오염의 문제가 없고, 또한 전처리 효율의 증가로 UF 막의 처리 및 운영 효율이 증가하는 효과가 있다.

3.5. 장치의 동작

간접재이용시스템의 각 단계에 형성된 드레인이 개방된 상태에서 원수유입펌프를 통해서 원수를 공급하는데, 이 때 극미세버블 10~30%가 혼입되도록 하고, 물처리 장치에 원수가 유입되도록 한다. 원수가 유입되면서, 각 단계의 사이클론이 작동하게 되고, 원심력과 월류에 의하여 처리수가 상승하여 4단계까지 도달하게 된다. SS 농도 30 ppm의 흙탕물에 대해 10% 내지 30% 마이크로버블 혼입되도록 하여 1 kg/cm²의 압력으로 장치에 유입시켰을 경우, 1단계 제어수단으로 처리되면, 월류조의 드레인을 통해 모래와 같은 굵은 입자를 포함하는 배출수가 전체 유입량의 1% 배출되게 된다. 월류조에 체류하던 1차 처리수는 월류관을 통해 2단계 제거수단으로 유입되고, 사이클론 6개로 흡입되면서 원심력에 의하여 처리수는 상승하며, 비중이 낮은 부유물과 거품은 상부의 드레인으로 제거되고, 비중이 높은 부유물은 하부의 드레인으로 배출된다. 상기 2단계 제어수단에는 다른 장치와 다르게 2개의 드레인이 존재하며 전체 유입량의 2%가 배출된다. 3단계 제거수단으로 2차 처리수가 유입되면서 체류하면서, 1개의 사이클론에 의하여 입자성 물질이 측면에 형성된 드레인을 통해 배출하고, 3차 처리수는 4단계 제거수단으로 바로 유입된 처리수는 20개의 사이클론을 통과하면서 미립자는 사이클론 하부의 드레인으로 처리수는 상승하면서 최종적으로 배출되게 된다.

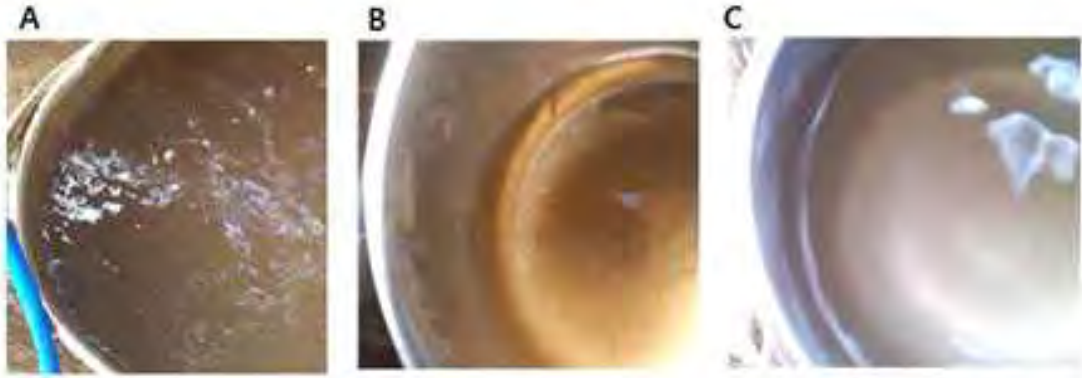


그림 3.11.6 물처리 장치에 의하여 전처리된 원수의 처리효과

파일럿 실험결과 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치의 처리효율은 초기 유입수에 대하여 드레인수가 약 4.5%로 측정되어 95.5%의 처리효율이 있으며, 초기 유입수의 SS 농도가 30 ppm이었으나, 최종 처리수의 SS 농도는 7 ppm으로 처리효율이 상당히 높은 것으로 측정되었다 (그림 3.11.6).

4. 간접재이용시스템 TEST-BED 설계 및 현장 적용

4.1. 농업용수 공급 시스템 목표 수질

표 3.11.1 용수공급 목표수질

종 류	pH	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS(mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	염소이온 (mg/L)
목표수질 (시설)	5.6-8.5	2.0이상 (5.0이상)	8.0 (5.0)	9.0 (5.0)	100이하 (25)	- (CONTROL)*	- (CONTROL)	250

비고 : () : 목표수질 (4급수 기준)

* 시설재배용수 T-N, T-P의 경우 작물별 적정 비료공급을 위해 성분함유량 정보가 필요함

농업용수 수질은 4급수의 수준이상으로 공급해야 하는 것으로 “환경정책기본법”에 정의되어 있으며, 4급수의 의미는 수질등급상의 “약간나쁨”이며 그 의미는 “상당량의 오염물질로 인하여 용존산소가 소모되는 생태계로 농업용수로 사용하거나, 여과, 침전, 활성탄 투입, 살균 등 고도의 정수처리 후 농업용수로 사용할 수 있음”으로 정의하고 있기 때문에 노지재배의 경우는 4급 정도로 공급해도 무방하나 시설재배를 대상으로 할 때는 수질등급상 “보통(3급수)” 수준의 용수를 공급하는 것이 저류지를 이용하는 공급방법을 기본으로 할때 유지관리 측면과 고품질의 농산물 재배기반지역이라는 역할에 대한 측면을 고려할 때 필요한 수준이다.

농민이 직접사용하고 있는 영농용수의 부유물질 및 탁도, 대장균 (Total coliform),

분원성 대장균 (fecal coliform, escherichia coli)은 미생물적 측면에서 수질오염의 평가 기준이 되는 지표생물로서 미생물에 의한 오염으로부터 안정성 확보가 필요하며 이를 위해 영농편의 용수공급시스템 개발이 필요하다. 현재 농촌용수 이용량 중 35%정도가 회귀용수로서 상류지역에서 한번 사용한 용수를 하류에서 재이용하고 있는 방식으로 이용하고 있으나 농민이 비료나 농약이 묻은 신체를 세정하거나 농기구를 세척함으로써 오염원이 그대로 배수로를 통해 하천으로 방류되고 있으며 이를 하류에서 재이용함으로써 친환경농업생산기반에 저해요소로 작용하고 있다. 농어촌연구원조사결과(2008) 전국 271개 하수처리장 중 127개소의 하수처리수가 주변 농촌용수에 직·간접적으로 영향을 주고 있는 것으로 조사되었으며 전국물관리요원 등의 여론조사결과에 따르면 농촌지역에서 농촌용수 수질개선과 환경개선이 시급하다는 인식이 증가하고 있다.

4.2. TEST-BED 농업용수 간접재이용시스템 설계

가. 농업재이용 시스템 규격

표 3.11.2는 규격 및 사양을 간략히 서술하였으며, 세부 장치의 구성 및 기능은 표 3.11.3과 같이 기술하였다. 양수장 옆 보를 이용한 중용량 농업재이용시스템의 처리 공정을 표현한 것으로 원수를 흡입하여 유입 펌프 시스템→멀티사이클론 시스템→극미세버블 시스템→전해조 시스템→용수 공급의 공정을 거쳐 처리 및 공급이 이루어지도록 구성하였다.

표 3.11.2 시스템 규격

품 명	단위	수량	형식	규격
간접재이용시스템	LOT	1	동력	L1,300 × W1,100 × H 1,820

표 3.11.3 시스템 사양 및 내용

시스템 명	사양 및 내용
유입 시스템	- 유입 펌프 3HP
멀티사이클론 시스템	- STS304, 미립 부유물질 제거
극미세 버블 시스템	- 토출구경 : (D) = 50mmφ , 재이용수 DO 증가
전해조 시스템	- 전기분해 카본모듈 × 2ea
공급	- 처리수 공급

나. 공정별 시스템 설명

멀티 사이클론 시스템의 구성은 유입펌프시스템, 멀티사이클론 시스템, 극미세버블시스템, 전해조 시스템, 용수 공급시스템으로 구성되었으며, 각 공정의 상세 내용은 다음

과 같다.

○ 유입 펌프 시스템

유입펌프를 통해서 원수를 공급하는데, 이 때 극미세버블 10~30%가 혼입되도록 하고, 멀티사이클론 장치에 원수가 유입되도록 한다.

형 식 : 입형다단 펌프

용 량 : 36 m³/h

양 정 : 30 m

수 량 : 1 대

운전방법 : 자동운전 및 수동스위치 조작운전

전 동 기 : 380 V, 60 Hz, 3 HP, 2.2 kW

다. 멀티사이클론 시스템

Hydrocyclone의 전형적인 크기와 적용범위개개의 사이클론 직경은 10mm~2.5m 범위이고, 대부분의 고형물의 절단입경(d50)은 2~250 μ m, 유량(용량)은 0.1~7200 m³/h 범위이다. Aadm Zanker는 hydrocyclone이 0.004~0.6mm의 입자를 분리할 수 있다고 했다. 공업적으로 가장 중요한 각종 입자들의 크기는 약 1000~0.1 μ m 사이에 있는 입자의 크기이다. 운전 압력 강하는 0.34~6 bar 이고, 큰 hydrocyclone보다는 더 작은 hydrocyclone에서 대개 고압으로 운전된다. 여러 Hydrocyclone을 통해 얻어진, 사이클론의 크기와 설계, 운전 조건, 그리고 분리되는 고형물의 특성에 의존하는, 하부 고형물 농도는 거의 부피비 45~50%을 초과하지 않는다. Hydrocyclone의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는 직렬(in series) 또는 병렬(in parallel)로 연결한 다단 사이클론을 사용하는 것이 때때로 가장 좋은 방법이 된다. 정화공정에서 예를 들면, 병렬연결은 효율이 더 좋은, 직경이 더 작은 사이클론으로 하여금 높은 유량을 처리하기 위해 사용가능하게 한다. 반면에 직렬연결은 정화 시에 총 회수율을 향상시키거나 더 농축된 하부유출과 더 깨끗한 상부유출을 동시에 만들기 위해 사용한다. 또한, 직렬연결은 고형물을 세척하거나 분류를 더 정확하게 하기 위해 사용하기도 한다.

(1) 구조 및 재질

① 멀티 다단 사이클론으로 1단계 제거 공정에서 비중이 1보다 높은 고형물질은 조하부의 드레인으로 배출되며, 극미세버블에 흡착된 부유물질과 비중이 낮은 물질은 월류조에 일정시간 체류한 다음 2단계 제거 수단으로 상기 월류조 상부의 측면에 위치한 월류관을 통해 처리수를 유입시키는 구조로 6개 이상의 사이클론이 장착되어 있으며, 3단계 제거수단은 1개의 사이클론이 원심분리가 되는 구조로 제작되었다.

② 원통형 구조로 분해 조립 등이 용이하도록 한다.

③ 멀티 사이클론 유니트와 나노제너레이터 MODULE 본체로 구성되어 있고 분배 및 조립 설치가 가능하도록 한다.

④ 본체는 펌프모터와 베이스 프레임으로 구성되어 있으며 원수 이송펌프는 제어반에 연결되어 제어반의 조작에 의하여 구동되도록 한다.

- ⑤ 사이클론은 스페이스 사이클론 상부, 사이클론바디, 및 사이클론 하부의 4단 구성으로 제작되어야 한다.
- ⑥ 최종단계 제거수단의 사이클론은 바디의 중앙에 처리수가 유입되도록 관통형으로 제작되며 벽면 내측에 10~20개이상의 사이클론이 일정한 가격으로 장착되어야한다.
- ⑦ 3단계 제거 수단에서 유입된 처리수는 최종단계 제거수단의 사이클론 하부로 유입되다가 사이클론 바디에 이르러서는 사이클론 상부에 의하여 흐름이 막히면서 더 이상 상승하지 못하고, 사이클론 바디의 둘레에 장착된 사이클론으로 월류되어 사이클론 내부로 들어가게 하는 구조이다.
- ⑧ 운전은 원수공급펌프에 의해 유입되며, 균일하게 사이클론 바디를 통과 후 상부 처리수 유출구로 유출시키는 구조이다.
- ⑨ 각 단계에 형성된 트레이가 개방된 상태에서 원수유입펌프를 통해서 원수를 공급하며 또한 극미세버블 10~30%가 혼입되도록 하는 구조로 제작되어야한다.
- ⑩ 멀티 다단 사이클론은 수직으로 설치되는 구조로 유입 이송펌프의 유속과 압력으로 부유물질을 제거하는 구조로 제작되어야 한다.
- ⑪ 설치되는 부분인 본체, 사이클론 모듈, 이송배관은 내구성을 가진 재질로 제작되어야 한다.
- ⑫ 멀티다단사이클론에 부착된 모든 배관과 VALVE, 유량계는 시스템에 적절한 요소로 한다.
- ⑬ 멀티 다단 사이클론의 재질은 내약품성, 내 미생물침식성을 갖는 소재의 재질로 제작한다.
- ⑭ 사이클론 모듈의 세척은 운전 전·후 모듈 내부를 깨끗하게 크린닝되어 사이클론 운전 시 부유물질이 제거될 수 있는 구조로 제작되어야 한다.
- ⑮ 모든 운전은 TIMER와 유량계에 의하여 자동운전과 병행하여 수동운전이 이루어질 수 있도록 판넬을 구성하여야 한다.
- ⑯ 운전은 24시간 연속운전이 되어야 하며, 문제 발생 시 알람기능으로 경보 및 BY-PASS 운전되도록 설계되어야한다.
- ⑰ 자동 / 수동 운전이 가능하도록 PUMP, AIR VALVE, 자동 VALVE등에 ON, OFF 스위치를 설치한다.

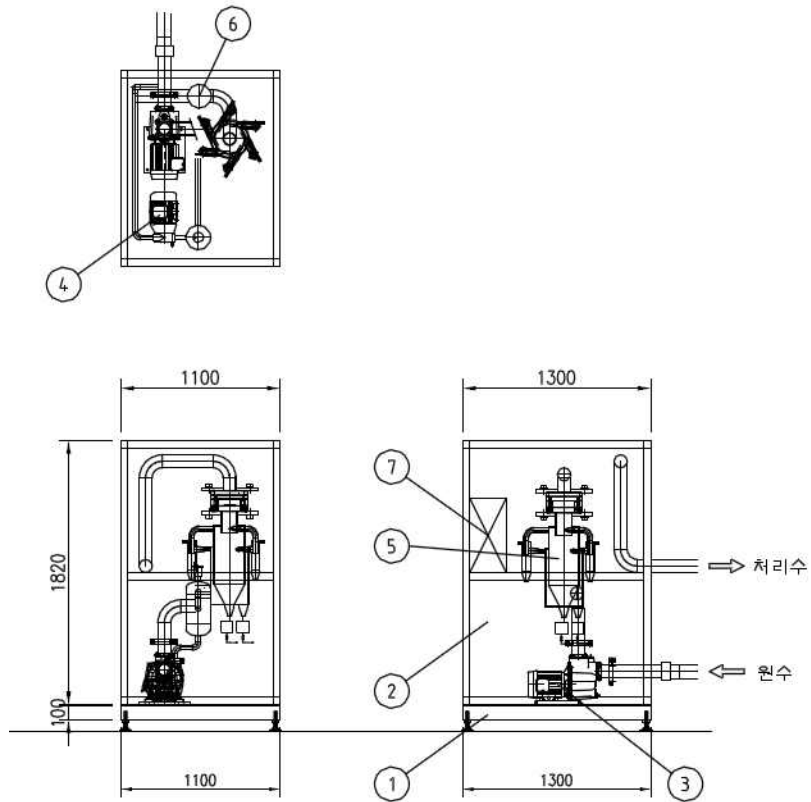


그림 3.11.7 농업용수 멀티 사이클론 단면도

- | | |
|-------------|------------|
| ① 본체 및 내부장치 | STS304 |
| ② 배관 | STS304 |
| ③ 이송 펌프 | STS304 |
| ④ 멀티크론 재질 | STS304 |
| ⑤ Valve | Auto Valve |
| ⑥ 제어 판넬 | STS304 |

(2) 설계조건

- ① 처리용량(Q) = 1,000 m³/일
- ② 여과기 가동시간 = 20 hr/일
- ③ 부유물질 유입조건
유입수 SS = 20 mg/ℓ 이내, 처리수 SS = 5 mg/ℓ 이하
- ④ 가동조건 : 20 HR 연속운전이며 LEVEL "H"에서 ON, LEVEL "L"에서 OFF

(

3) 멀티사이클론 특징

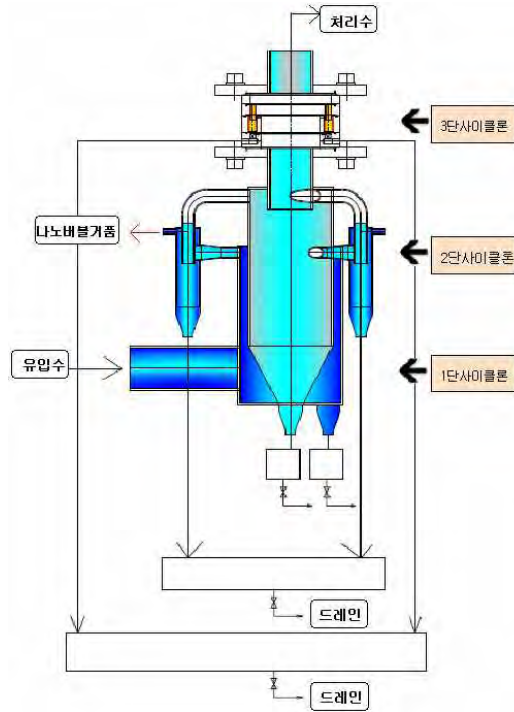


그림 3.11.8 다단멀티사이클론 단면도

다단사이클론의 구성

- 1단 사이클론 (D:267mm) 1개 : 마이크로버블+유입수내의 모래 등 굵은 입자제거
- 2단 사이클론 (D:61mm)6개: 중간입자 제거+거품 및 가벼운 비중의 이물질 제거
- 3단 사이클론 (D:22mm)20개: 미립자 제거
- 입경이 작은 먼지는 원통경이 작을수록 제어용이

■ MNC-SYSTEM은 버티컬형으로 설치되며 유속과 압력을 이용하여 단계별 Particle 제거하는 구조임

- 처리수는 빠른 유속과 멀티클론 입경으로 부유물질 (SS)이 여과됨
- 침전된 SS는 1일 4~10회 세척 후 배출됨
- 세척은 일정한 압력 상승 및 타이머에 의한 멀티클론 자동 세척 방식 도입
- 전처리에 필요한 요소에 사용함으로써 안정적인 처리수질 확보
- 응집제와 함께 개별 시스템으로 사용 시 인제거에 매우 효과 적임

(4) 극미세버블 제너레이터 시스템

극미세버블은 물에 녹아 있는 기체의 용해도는 압력이 증가함에 따라 증가한다는 헨리(Henry)의 법칙을 이용하여, 10~30초 동안 4.2~6.3 kg/cm²의 높은 압력을 가하다가 대기압 상태로의 갑작스런 압력 감소에 의하여 발생시킬수 이 있으며, 40 KHz의 초음파와 140 db의 높은 음압 및 순간적으로 4000 내지6000도의 고열이 발생하는 특징이 있다.

따라서, 1단계 사이클론은 극미세버블 발생기와 원수가 혼합되는 장치와 연결되어 있는 것을 특징으로 물보다 비중이 높은 입자성 물질을 제거하고, 이를 통과한 처리수는 바로 월류조로 유입되어 수집되며, 극미세버블이 혼입된 처리수의 상층액은 월류조 상부에 위치한 월류관을 통해 2단계 사이클론으로 유출된다.

(5) 전기분해 살균장치

Cabon Module은 유수와 수직으로 설치되어지고 카본은 물에 완전히 잠기도록 길이를 확보하여야 한다. 모듈의 상부에는 여유 공간을 확보하여 카본필터의 교체를 원활히 할 수 있어야 한다. 카본 모듈과 전기 연결은 절연 구조를 가지고 있으며 카본 모듈과 교체가 쉬운 분리형으로 구성되어 있어야 한다. 카본모듈은 전기분해 및 흡착의 성능을 가진 큰 PLATE 모양으로 전기분해조에서 카본과 반응하여 수중의 대장균 및 미생물을 제거한다. 카본모듈의 벌크 밀도는 1.85, 경도 60, 탄력성 1,200으로 제작되어 대장균 및 미생물을 제거에 있어 전극효율을 극대화시킬수 있어야 한다. 전기분해조에는 Flog-Flow를 형성시키기 위한 흐름 안정장치(정류판)와 수위 제어용 월류 웨어가 설치되어야 하고, 카본 전기 모듈은 반응조 상부에 STS 판에 고정 장치에 매달려 있으며 반응조에 수직으로 연결되고 완전히 밀봉되어야 한다. 외적인 충격에 의해 카본 등의 설비가 파손이 되지 않도록 충분한 강도를 갖고 있어야 하며, 카본 전기 모듈은 일정한 배열로 반응조 벽면에 볼트를 이용하여 조립되어야 한다. 카본 모듈은 대장균 및 미생물 제거가 우수한 모델을 적용하여야 하며 유수의 길이 방향으로 방류수의 흐름에 수직으로 배치되면서 좌우 균일한 간격의 배열로 구성되어야 한다. 전력공급 판넬은 팬으로 냉각되며 외형은 STS 304재질로 제작되어야 한다.

○ 설계조건

- V 전압 : 0~24 V
- A 전류 : 0~5 A
- 단자재질: Carbon
- 단자크기: 100×400×10T
- 유효면적: 1200 cm²

(6) 제어반

제어반 시스템은 K.S (KOREA INDUSTRIAL STANDARD), JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD), ANSI (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE), NEMA (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURE ASSOCIATION)의 규격을 적용하였다. 제어반은 각 공정을 자동화하여 수동 조작 및 자동 운전이 가능하도록 조절할 수 있다.

가) 인버터 (INVERTER)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : SV-iG5A

- 형식 : PID제어내장

나) 차단기 (MCCB)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : ABS TYPE
- 형식 : 표준형

다) 과전류계전기 (OVERLOAD REALY)

- 제조사 : LS산전
- 보호기능 : 과전류, 결상

라) 전자접촉기 (CONTACTOR)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : GMC-9 외
- 형식 : 표준형

마) 선택스위치 (SELECTOR SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 취부 외경 : 25 \emptyset
- 정격전압 : AC 600 V

바) 비상 누름 버튼 스위치 (EMERGENCY SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 형식 : LOCK TYPE
- 취부외경 : \emptyset 25

사) 조광형 누름 버튼 스위치 (PUSH BUTTON SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 형식 : LED LAMP TYPE
- 취부외경 : \emptyset 25,
- 색상 표시 : 운전(RED), 정지(GREEN), 고장(YELLOW)

아) 부저 (BUZZER)

- 제조사 : KACON
- 형식 : 매입형
- 취부외경 : 25 \emptyset

자) 지시계기류 (VOLT METER, AMPERE METER)

- 제조사 : 대붕전기

- 형식 : 광각형 (110×110) & (80×80)
- 눈금 : (전압계 : FULL SCALE - 600 V)

차) 변류기 (CT)

- 제조사 : 대봉전기
- 정격 2차전압 및 정격부담 : 5A, 5VA
- 오차계급 : 3.0급

카) 타이머 (TIMER)

- 제조사 : 오토닉스
- 동작시간편차 : $\pm 0.5\%$ 이하 (최대설정시간에 대하여)
- 설정오차 : $\pm 5\%$ 이하 (최대설정시간에 대하여)

타) 전력용 피뢰기 (POWER SURGE PROTECTOR)

- 제조사 : 현대파워시스템
- 모델 : HD-AP-N(AC 220 V)

파) DC POWER SUPPLY (S.M.P.S)

- 제조사 : 유니온전자
- 모델 : UP-Serialize
- 형식 : 입력-AC 220 V, 출력-DC 24 V

하) 노이즈 필터 (NOISE FILTER)

- 제조사 : 유니온전자
- 모델 : UF10SBS
- 형식 : 1-Phase, 10 A, 250 V

4.3. 간접재이용시스템 현장적용

농업용수 간접재이용 멀티클론시스템을 모니터링지구인 병점재이용지구에 현장 설치하여 운전하였다. 현장에 설치된 재이용시스템의 전경을 보여주고 있다.



그림 3.11.9 시스템 전경

다단형 멀티사이클론으로 각 단계별로 거동하는 부유물질 제거를 거치게 된다. 먼저, 장치의 각 단계에 형성된 드레인이 개방된 상태에서 유입펌프를 통해서 원수를 공급하는데, 이 때 극미세버블 5vol% 내지 20vol%가 혼입되도록 하고, 사이클론 장치에 원수가 유입되도록 한다. 원수가 유입되면서, 각 단계의 사이클론이 작동하게 되고, 원심력과 월류에 의하여 처리수가 상승하여 4단계까지 도달하게 된다. SS 농도 32 ppm의 침전수에 대해 5vol% 내지 20vol%의 극미세버블이 혼입된 유입수를 1 kg/cm²의 압력으로 장치에 유입시켰을 경우, 1단계 사이클론에서 처리되면, 월류조의 드레인을 통해 모래와 같은 굵은 입자를 포함하는 배출수가 전체 유입량의 1vol% 배출되게 된다. 월류조에 체류하던 1차 처리수는 월류관을 통해 2단계 사이클론으로 유입되고, 각 사이클론에 흡입되면서 원심력에 의하여 처리수는 상승하며, 비중이 낮은 부유물과 거품은 상부의 드레인으로 제거되고, 비중이 높은 부유물은 하부의 드레인으로 배출된다. 2단계 사이클론에는 다른 장치와 다르게 2개의 드레인이 존재하며 전체 유입량의 2vol%가 배출된다. 3단계 사이클론으로 2차 처리수가 유입되어 체류하면서, 1개의 사이클론에 의하여 입자성 물질이 하면에 형성된 드레인을 통해 배출하고, 3차 처리수는 4단계 제거수단으로 바로 유입되며 유입된 처리수는 20개의 사이클론을 통과하면서 미립자는 사이클론 하부의 드레인으로 배출되고, 처리수는 상승하면서 상부로 배출되

게 된다. 이후 전기분해 살균장치를 거쳐 최종적으로 농업용수로 공급되게 된다. 다단형 멀티 사이클론 물처리 장치의 처리효율은 초기 유입수에 대하여 드레인의 양이 약 5%로 측정되어 95%의 처리효율이 있으며, 초기 유입수의 SS 농도가 32 ppm이었으나, 최종 처리수의 SS 농도는 9.5 ppm으로 처리효율이 상당히 높은 것으로 측정되었다. 그림 3.11.10은 재이용시스템을 현장에 설치하여 시범운영한 후의 유입수와 처리수의 육안비교를 위한 샘플링 사진을 보여주고 있다.



그림 3.11.10 유입수 및 처리수 채수



그림 3.11.11 슬러지 배출

본 시스템 원수 및 처리수 정상 분석 결과를 아래 표와 같이 정리하였다.

표 3.11.4 원수 및 방류수 정상 분석

측정일	SS		총대장균 군		BOD		탁도	
	원수	처리수	원수	처리수	원수	처리수	원수	처리수
2013.06.20	17.3	4.6	1530.0	<30	7.4	4.9	6.7	2.9
2013.06.21	14.9	3.9	1570.0	<30	10.2	3.4	3.0	1.5
2013.06.24	17.8	5.4	1590.0	<30	9.8	5.6	3.0	1.9
2013.06.25	22.6	5.4	1348.0	<30	12.1	4.3	5.6	2.4
2013.06.26	24.0	4.0	1200.0	<30	13.6	5.0	5.4	2.0
2013.06.27	17.3	6.2	1255.0	<30	11.4	4.1	4.7	1.5
2013.06.28	14.5	3.7	1390.0	<30	7.5	2.6	3.4	1.9
2013.07.01	10.7	4.3	998.0	<30	8.5	2.4	5.6	2.7
2013.07.02	14.3	3.4	879.0	<30	8.8	4.5	4.8	2.4
2013.07.03	15.5	4.5	1100.0	<30	6.1	3.1	2.9	1.7
2013.07.04	20.4	5.8	2140.0	<30	7.5	3.6	3.6	1.7
2013.07.05	17.9	5.4	1950.0	<30	6.6	2.8	5.9	2.0
2013.07.08	19.4	6.3	1242.0	<30	5.4	3.6	5.4	2.4
2013.07.09	13.6	4.9	1380.0	<30	9.9	4.9	4.4	2.6
2013.07.10	8.9	3.7	1302.0	<30	10.6	5.2	3.2	2.0
2013.07.11	12.6	5.6	798.0	<30	15.7	3.7	3.3	1.4
2013.07.12	7.9	3.9	895.0	<30	7.9	2.6	3.7	1.6
2013.07.15	19.7	3.9	1730.0	<30	7.6	2.8	4.6	2.3
2013.07.16	27.6	6.8	1530.0	<30	8.7	3.0	5.2	2.0
2013.07.17	21.6	5.9	1485.0	<30	8.4	3.6	5.3	3.0
2013.07.18	19.4	6.0	1692.0	<30	8.6	3.1	4.1	1.2
2013.07.23	17.0	4.2	1102.0	<30	6.9	2.9	3.6	1.0
2013.07.24	11.3	3.4	1360.0	<30	5.8	1.8	2.9	1.2
2013.07.25	13.6	4.2	963.0	<30	7.4	2.6	3.4	0.9
2013.07.26	19.5	6.4	1327.0	<30	10.6	4.6	5.4	1.4
2013.08.05	15.2	5.7	1100.0	<30	8.2	4.3	3.9	2.4
2013.08.06	13.3	5.5	1160.0	<30	8.5	5.1	3.4	2.2
2013.08.07	15.6	5.2	940.0	<30	10.2	6.9	2.5	2.1
2013.08.08	13.3	4.3	970.0	<30	6.1	3.3	3.8	1.9
2013.08.09	15.8	4.4	1100.0	<30	8.2	4.7	3.5	1.4
2013.08.12	13.0	5.2	1120.0	<30	7.1	2.9	2.7	2.1
2013.08.13	9.4	3.5	985.0	<30	6.0	3.1	2.3	2.2
2013.08.14	13.0	4.7	1004.0	<30	6.9	1.9	2.7	1.0

원수와 처리수의 SS와 총대장균수, BOD, 탁도에 관한 6월 분석결과를 아래의 그림 3.11.12~그림3.11.15에서와 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 SS 약 74%, BOD 58%, 탁도 56%, 총대장균수는 거의 다 처리되는 것을 확인할 수 있다.

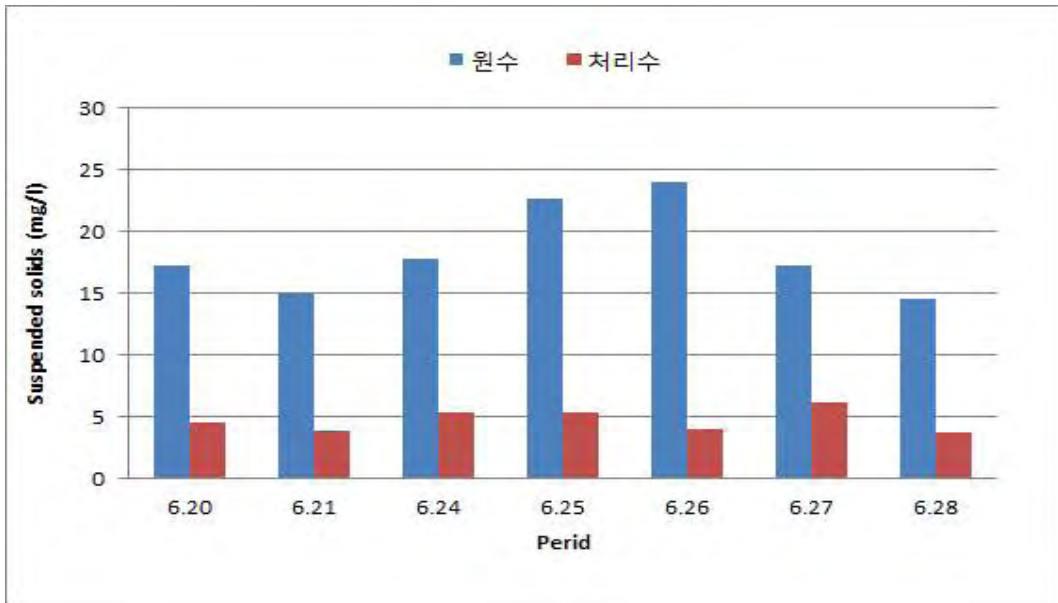


그림 3.11.12 부유물질 6월 수질분석

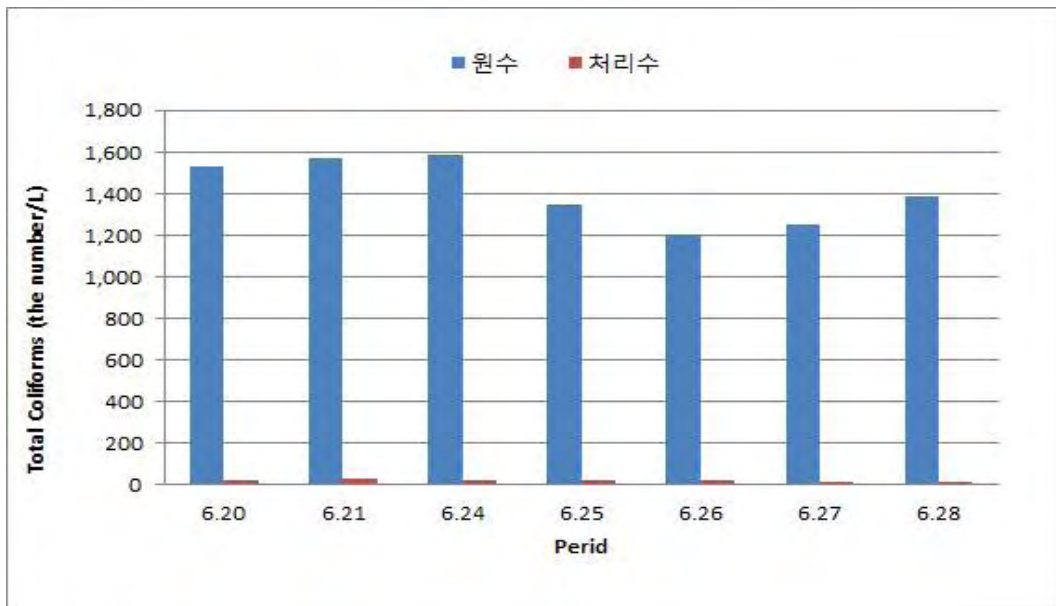


그림 3.11.13 총대장균 6월 수질분석

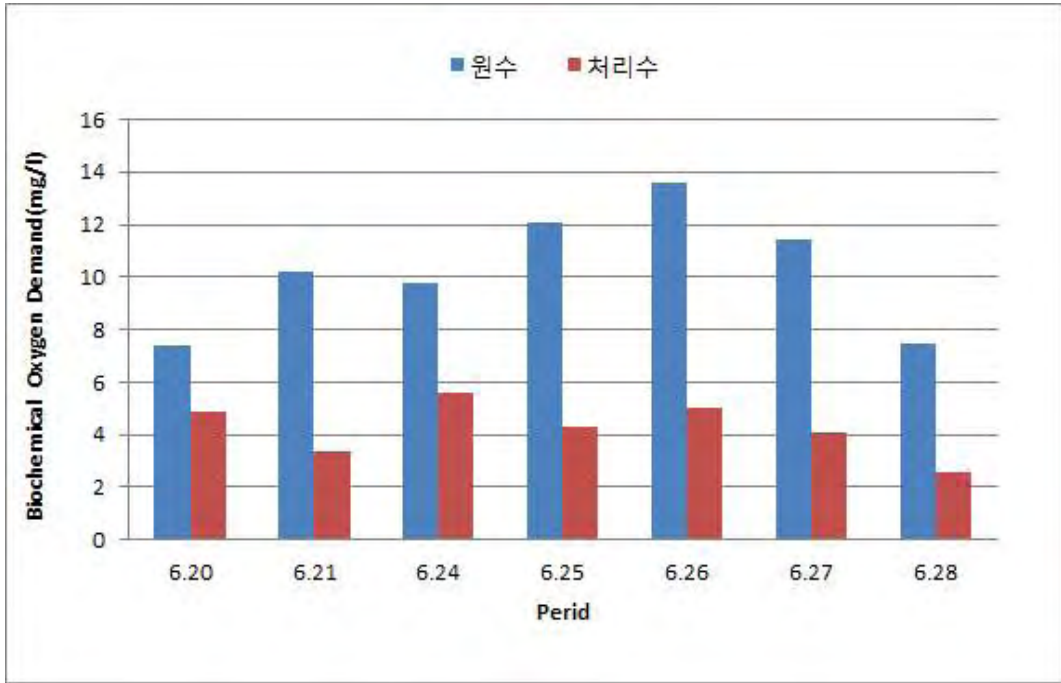


그림 3.11.14 BOD 6월 수질분석

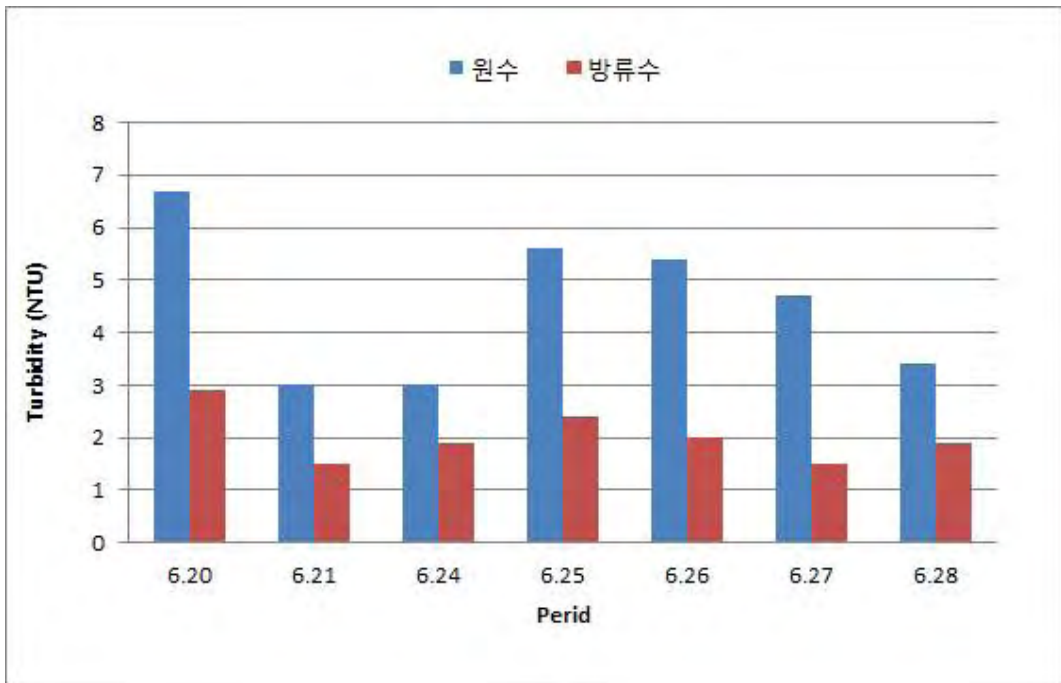


그림 3.11.15 탁도 6월 수질분석

원수와 처리수의 SS와 총대장균수, BOD, 탁도에 관한 7월 분석결과를 아래의 그림 3.11.16~그림 3.11.19에서와 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 SS 약 70%, BOD 64%, 탁도 58%, 총대장균수는 거의 다 처리되는 것을 확인할 수 있다.

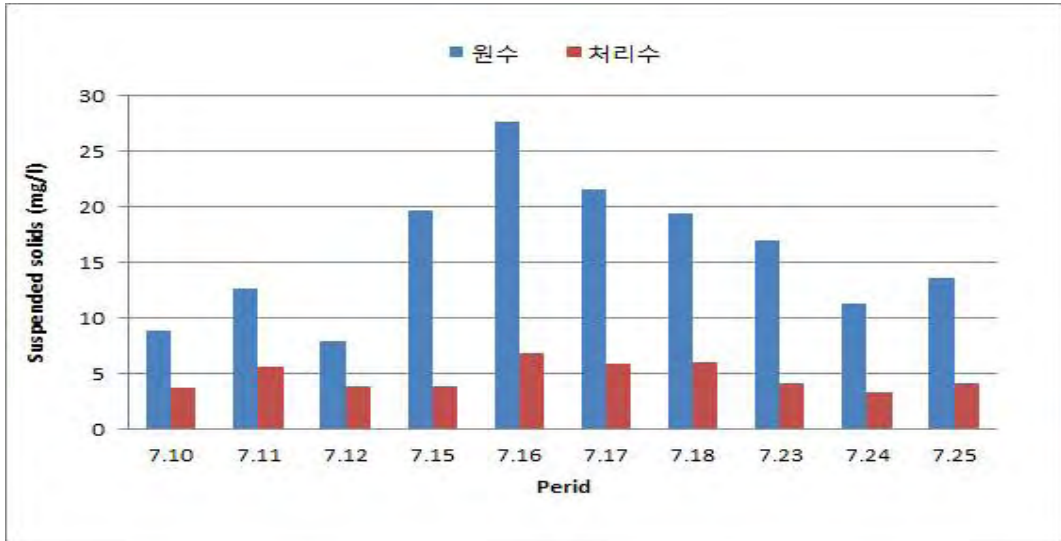


그림 3.11.16 부유물질 7월 수질분석



그림 3.11.17 총대장균 7월 수질분석

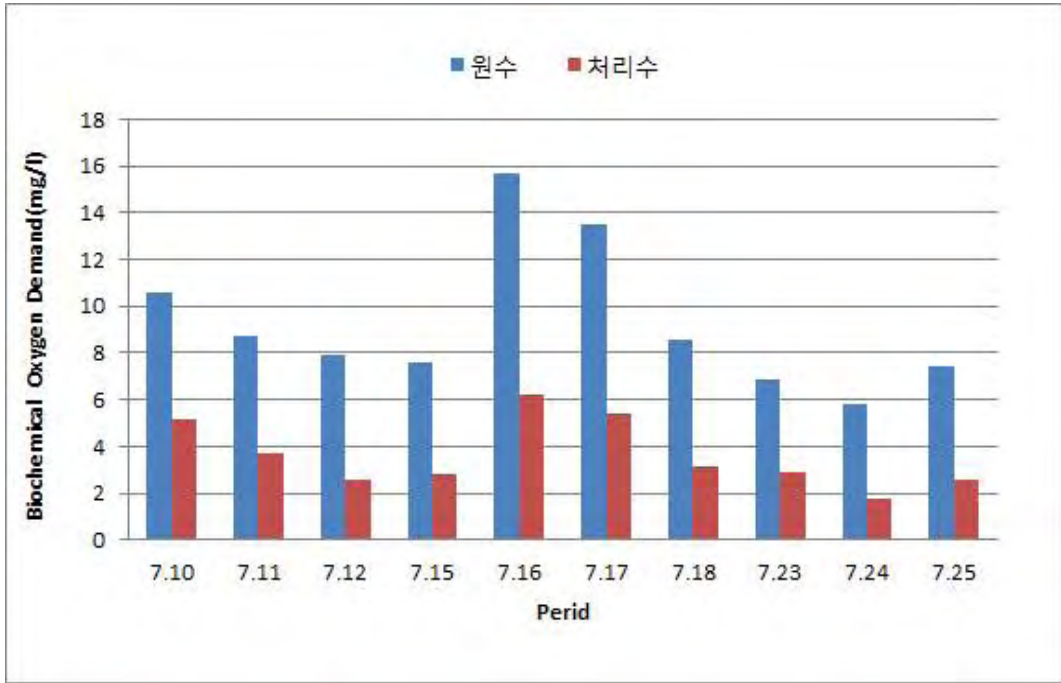


그림 3.11.18 BOD 7월 수질분석

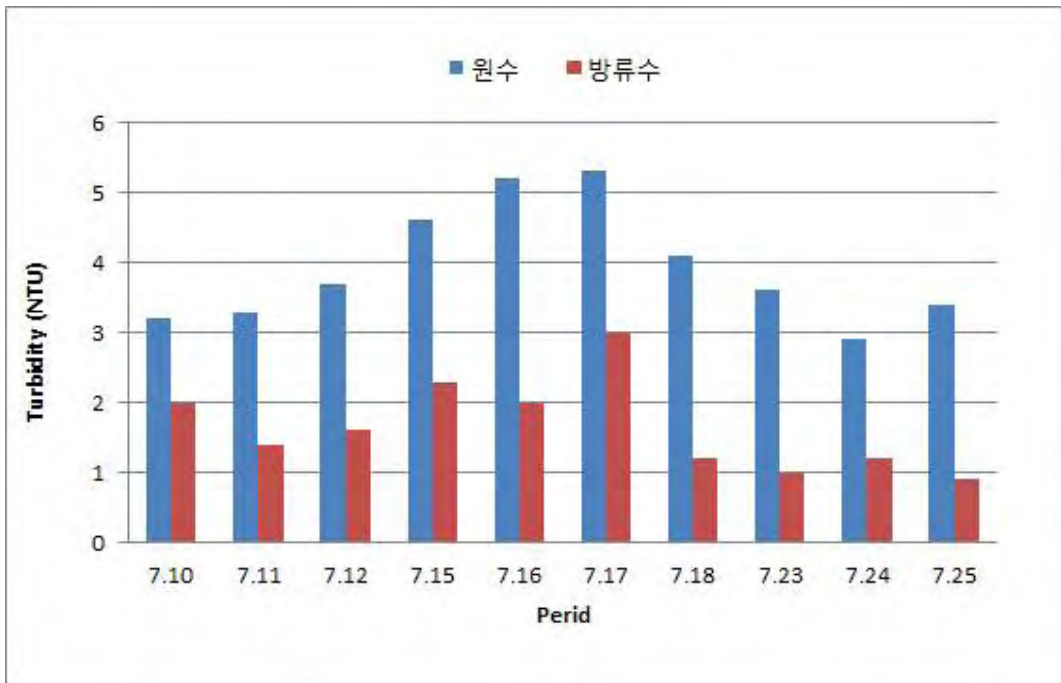


그림 3.11.19 탁도 7월 수질분석

원수와 처리수의 SS와 총대장균수, BOD, 탁도에 관한 8월 분석결과를 아래의 그림 3.11.20~그림 3.11.23에서와 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 SS 약 65%, BOD 47%, 탁도 38%, 총대장균수는 거의 다 처리되는 것을 확인할 수 있다.

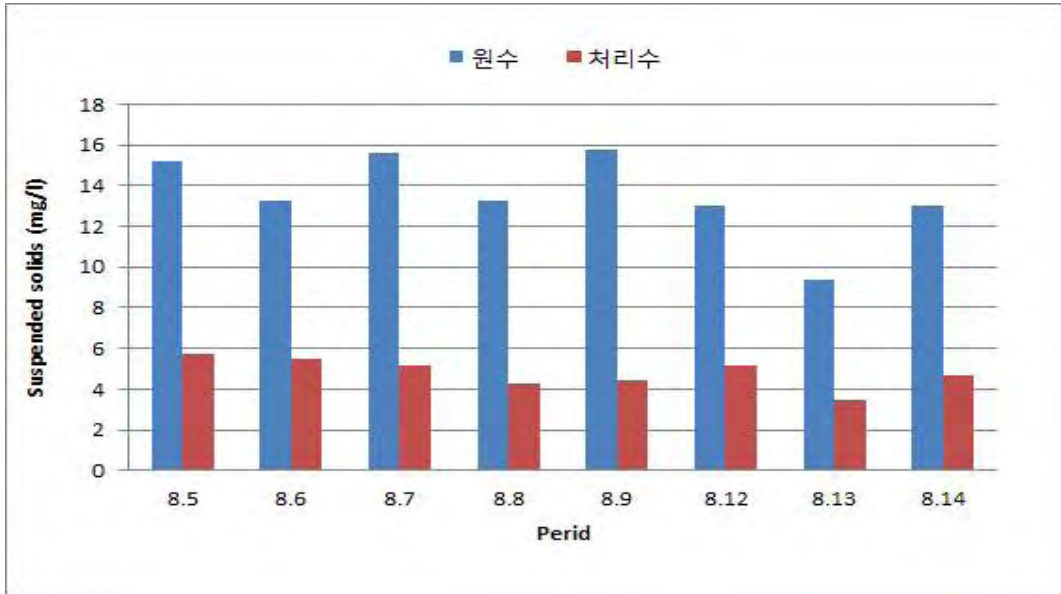


그림 3.11.20 부유물질 8월 수질분석

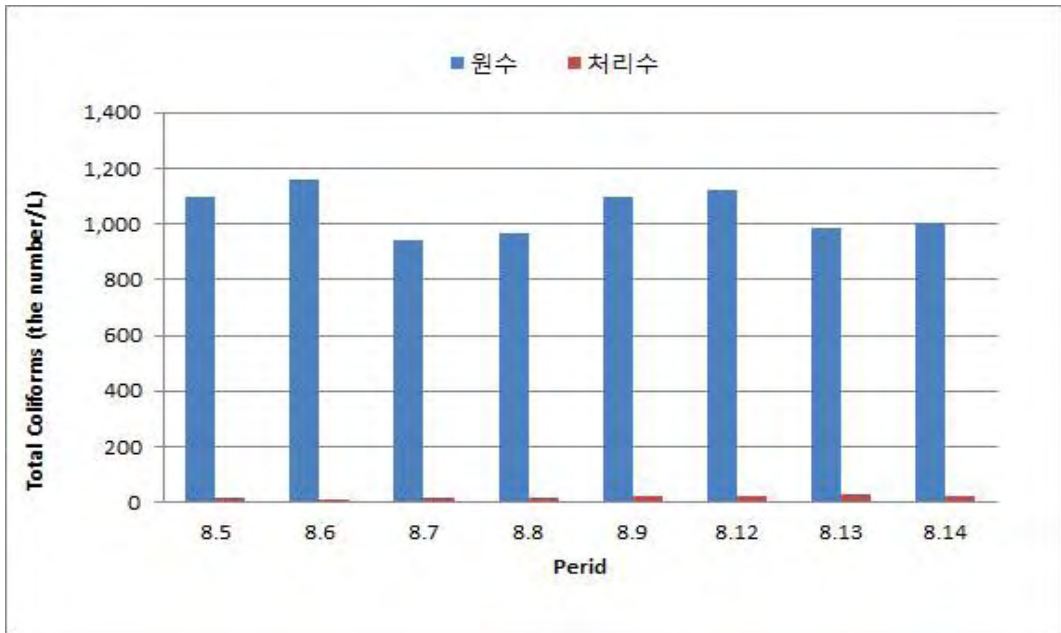


그림 3.11.21 총대장균군 8월 수질분석

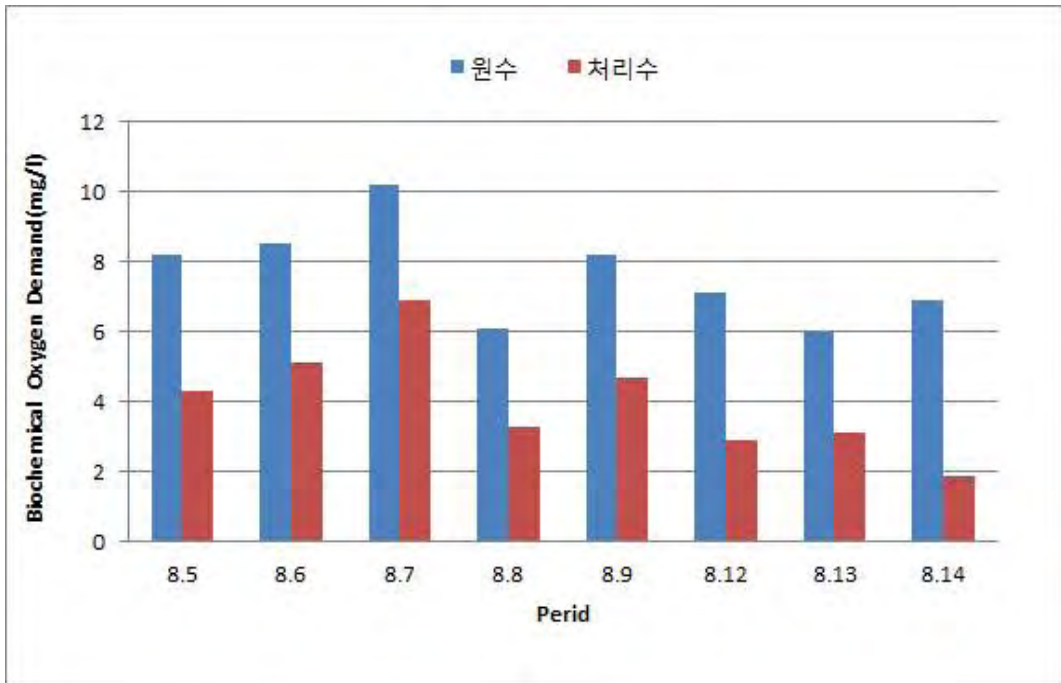


그림 3.11.22 BOD 8월 수질분석

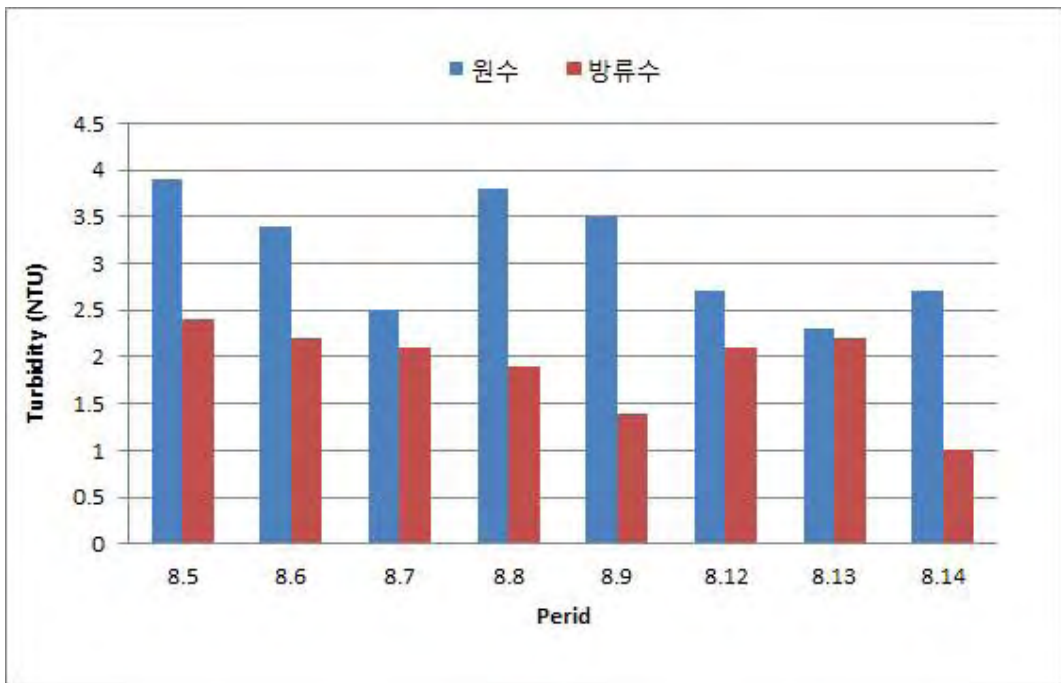


그림 3.11.23 탁도 8월 수질분석

4.4. 시스템 유지관리

시스템 유지관리 비용과 관련된 사항을 표 3.11.5~표 3.11.7에 정리하였다.

표 3.11.5 시스템 전력비

(단위 : 천원)

기기 명칭	대수 (예비)	소요동력 (kW)	동력부하 (kW)	운전 시간 (hrs)	사용전력 (kWh)	부하율	단 가 (원/kWh)	전력비 (천원/년)	비고
원수펌프	1	0.75	0.75	24	18	0.75	38.4	189	
유입공급펌프	1	2.2	2.2	24	52.8	0.75	38.4	555	
극미세버블시 스템	1	2.2	2.2	24	52.8	0.75	38.4	555	
전해조시스템	1	0.3	0.3	24	7.2	0.75	38.4	76	
총 계	4	5.45	5.45	24	130.8	0.75	38.4	1,375	

※농사용 전력(을) 38.4원

표 3.11.6 시스템 소모품비

(단위 : 천원)

구 분	수 량	단 가	연간 금액	비 고
사이클론 모듈	1LOT	5,000	1,000	보증수명 60개월
카본모듈	2E/A	150	30	보증수명 120개월
계			1,030	

표 3.11.7 기존시스템과 유지관리 비교표

항목	극미세-멀티사이클론 시스템(1,000톤/일)	기존 필터 (1,000톤/일)
원리 및 특징	<ul style="list-style-type: none"> • 마이크로 극미세버블(버블10%이상) 함유된 유입수를 다단멀티클론에 유입해서 다중입자성물질을 분리하며 전기분해 및 극미세의 이용으로 콜로이드성물질 제거 및 살균하여 물처리 효율을 극대화 시키는 전천후처리 공정 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> • 과다 부유물질에 대한 전처리 시스템으로 다양한 여재의 활용으로 부유물질을 제거
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 별도 여재사용이 필요 없음 • 유입펌프의 압력을 활용하여 간단한 구조 및 에너지저감 • 운전공정이 간단하여 쉽게 조작가능 • 다단멀티클론으로 처리효율을 높임 • 설치 비용 및 별도의 소모품이 없어 운전비용이 저렴 • 구조가 간단, 설치공간이 적게 듦 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 여과입도(5μm~1000μ)로 용도에 대한 적응력이 용이함. • 운전감시가 용이함.
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 일정한 압력 유속이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 중 여과성능 저하 및 막힘 현상 • 바이오막 형성, 역세척이 필요함
시설비	<ul style="list-style-type: none"> • 기계,전기시설: 100,000천원 	<ul style="list-style-type: none"> • 기계,전기시설: 170,000천원
년간 유지 관리비	<ul style="list-style-type: none"> • 전력비: 1,375천원 • 소모품비: 1,030천원 (보증수명 5년) • 연간유기관리비 합계: 2,405천원 	<ul style="list-style-type: none"> • 전력비: 1,892천원 • 소모품비: 1,975천원 (보증수명 2년) • 연간유기관리비 합계: 3,867천원
감각 상가비	<ul style="list-style-type: none"> • 100,000천원\times(1-0.1)/10년=9,000천원 (잔존율 10%, 내구연한 기계10년) 	<ul style="list-style-type: none"> • 170,000천원\times(1-0.1)/10년=15,300천원 (잔존율 10%, 내구연한 기계10년)

4.5. 시스템 운전매뉴얼

가. 시스템 구성

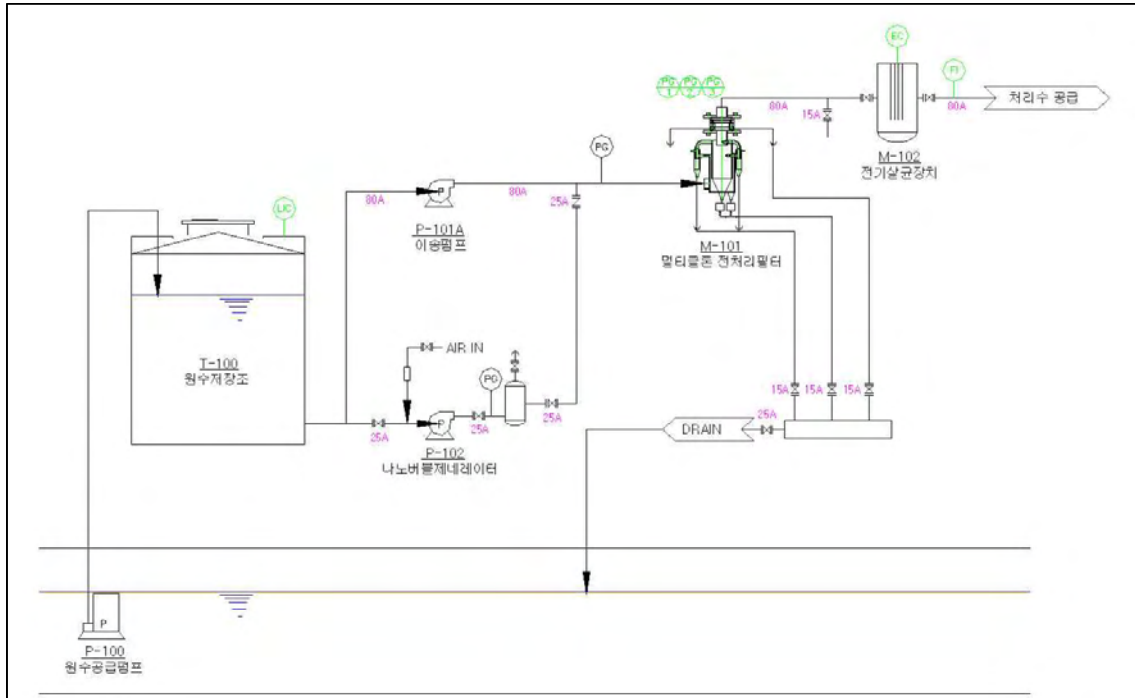


그림 3.11.24 농업용수 공급 시스템 FLOW SHEET

- 원수공급 펌프
 - 하천수를 원수저장조로 공급하며, 자동운전시 원수저장조의 수위에 따라 자동운전
 - 수동운전중 원수저장조의 수위가 만수위일 경우 동작하지 않음.
- 원수저장조
 - 원수공급펌프로부터 공급된 원수를 저장합니다. 탱크 상부에 설치된 수위계에 신호에 따라 저수위일 경우 원수공급펌프가 동작하고 만수위가 되면 정지함.
- 원수이송펌프
 - 원수저장조의 원수를 멀티클론으로 공급합니다. 원수저장조의 수위가 저수위가 되면 운전정지 되며, 저장조의 수위가 만수위가 되면 자동운전.
- 극미세버블제네레이터
 - 멀티클론으로 공급되는 원수에 미세 극미세버블을 생산하여 공급.
 - 원수이송펌프와 같이 연동되어 동작.
- 멀티클론 필터
 - 원수이송펌프로부터 공급된 원수의 이물질을 제거
 - 1단 멀티클론에서 모래알갱이와 같이 큰입자의 이물질을 하부드레인을 통해 제거하며, 극미세버블제네레이터로부터 공급된 극미세버블에 의해 비중이 낮은 입자들은 부상되어 2단 멀티클론의 상부 드레인을 통해 배출됩니다. 1단, 2단

멀티클론을 통과된 처리수는 3단 멀티클론을 통과하며 마이크론단위의 이물질이 제거

○ 전기살균 장치

- 멀티클론에서 처리된 처리수는 전기살균장치를 거치며 살균되어 농가에 공급
- 전기살균본체와 전기살균장치에 DC전원을 공급하는 파워서플라이로 구성

나. 시스템 제어

○ Control Plane



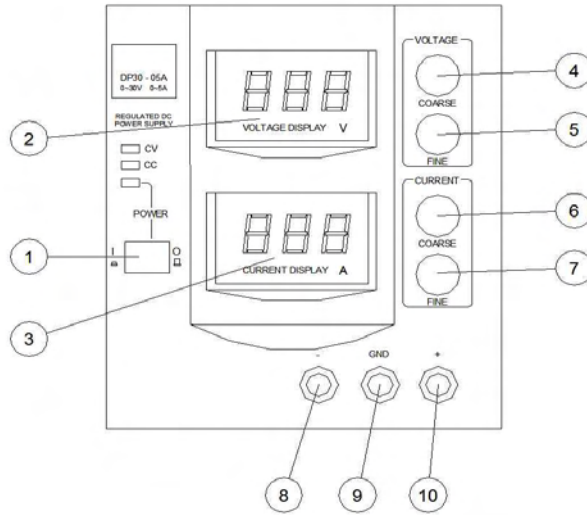
○ 시스템 제어판넬 스위치 설명

	<p>OFF - 시스템 정지 MAU - 시스템 수동운전 AUTO - 시스템 자동운전 시스템 가동 스위치입니다. AUTO 선택시 타이머에 설정된 시간에 따라 자동운전됩니다.</p>
	<p>수동 운전시 원수공급펌프 가동 스위치입니다.</p>
	<p>수동 운전시 극미세버블 제네레이터 가동 스위치입니다.</p>
	<p>수동 운전시 전기살균장치 가동 스위치입니다.</p>
	<p>부저 작동시 부저정지 스위치입니다.</p>
	<p>시스템 이상시 부저음을 발생합니다.</p>

○ 시스템 운전

- 본 시스템은 기본적으로 자동모드에서 운전됨.
- 제어판넬의 운전모드 선택 스위치를 AUTO로 선택하면 원수공급펌프, 원수이송펌프, 극미세버블 제네레이터, 전기살균장치가 순차적으로 자동운전 됨.
- 수동모드 선택은 시스템 점검 시에만 사용.

○ 전기살균장치 조작법



1	전원 스위치입니다.
2	현재 공급 전압을 표시합니다.
3	현재 부하 전류를 표시합니다.
4	공급전압을 조정합니다. 시계 방향으로 돌리면 공급전압 값이 상승합니다 0~30V 공급합니다.
5	공급전압을 미세 조정시 사용합니다.
6	전류값을 조정합니다, 시계 방향으로 돌리면 전류값이 상승합니다. 0~5A 설정이 가능합니다.
7	전류값을 미세 조정시 사용합니다.
8	DC - 전원 공급 단자입니다.
9	DC + 전원 공급 단자입니다.
10	DC 접지 단자입니다.

* 전압 전류 설정방법

- 먼저 전류 조정 볼륨은 최고값으로 설정하고, 공급 전압 값을 조정하여 현재 전류 값이 4A가 넘지 않도록 조정.
- 기본 설정 값은 전압 12V (전류값은 3A 정도가 표시.)
- 전류값은 수중 부하물질의 양에 따라 다르게 표시될 수 있음.

4.6. 시스템 유지관리 지침서

가. 운전전 점검사항

장비의 초기 운전에 앞서 아래의 점검항목별 점검이 이루어져야하며 확인되지 않은 상태에서 무리하게 운전이 시행될 경우 기계의 파손과 안전사고의 우려가 있으므로 점검을 요한다.

표 3.11.8 점검 항목

순위	점검 항목	점검 및 확인 방법	비고
①	사용전압의 확인	명판이나 전기회로도상의 전압과 일치여부 확인	
②	주위의 장애물 유무 확인	신설 또는 보수작업이후 킴목 또는 버팀목 등이 완전히 제거되었는지의 여부 확인	
③	볼트의 느슨함이나 격자판의 설치상태	설비의 제작시 볼트류의 느슨함이나 격자판의 설치상태 확인	
④	전원공급 상태 확인	전원이 ON 되었을 때 전원이 원활히 공급 되는지 여부	

나. 운전 중 점검 사항

기계의 동작 및 전원공급 상태를 정기적으로 점검하여 이상소음과 진동, 발열 등이 있을 경우는 기계의 가동을 즉시 중단하고 점검하여 기계의 수명이 제대로 발휘할 수 있도록 한다.

표 3.11.9 고정점검 및 대책

NO	주요 항목	고장 원인	대 책
①	이상소음 및 진동발생	부품의 마모, 파손, 기타 원인	소음발생부위 점검 및 보수
②	펌프 과부하 발생 및 TRIP발생	임펠러의 고장 모터 전기적 고장	펌프 관련 고장은 펌프 전문 A/S 센터에 의뢰
③	멀티사이클론 차압 발생	멀티사이클론 필터 막힘	멀티사이클론 교체
④	멀티사이클론 유량 감소 및 입구압 증가	원수내 이물질 과다 멀티사이클론 오염	처리수조 수질확인 이물질 과다 일 경우 처리수조 드레인작업실시
⑤	카본 플레이트 전원공급 불량	전원공급 단자대의 마모, 배선 단락	이상 원인을 파악하여 교체 및 수리

표 3.11.10 운전중 점검항목

기 기 번호	품 명	점 검 항 목	일 상 점 검	정 기 점 검	비고
P-101A	유입공급 펌프	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
		② 전류치의 확인	○		제어반
		③ 실부의 누수 유무 확인	○		
		④ 토출량 확인	○		
		⑤ 오링의 교환			분해 점검시
P-102	극미세버블 제너레이터	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
		② 토출량 확인	○		
M-101	멀티사이 클론필터	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
M-102	전해조 시스템	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
		② 정상작동여부, 전동기의 과부하, 벨트의 장력등을 점검		○	
T-100	원수 저장조	① 저류조 내부 수질 상태 확인 바닥에 침전물질이 다량일 경우 드레인 하여 제거		○	
	배관	① 누수 및 파손 유무 확인		○	
	제어반	① 각종 스위치 작동상태 확인	○		

5. 극미세버블 및 전기촉매 기술을 이용한 물처리기술 설계

5.1. 개요

미세버블을 이용해 녹조를 부상시키는 기술이 최근에 많이 부각되고 있는데 미세버블이 수온을 저온으로 유지시키고 녹조를 부상·저감시키면서도 저층에 산소를 공급하기 때문이다. 미세버블 기술을 이용한 방법으로 지하수와 버블을 함께 이용하여 녹조 예방 및 수질정화에 이용되는데 버블 크기와 지속성 여부가 조류제거 효과에 큰 영향을 주고 있으며 버블의 수질정화 용도가 단순한 용존산소(DO)의 증가에만 국한되어 있다. 또한 현탁물질이 상층부로 잘 뜨지 못하는 점과 미세부유물질에 의한 버블발생 노즐의 막힘 등의 문제와 함께 버블이 수역 상층부로 쉽게 도출되어 수역 하층부 수질정화 기능을 기대할 수 없는 점도 지적되었다. 이 같은 단점을 보완하고자 한 일부 기술에서는 지열의 열교환과 극미세크기의 버블을 이용하여 일정 수역 내 용수의 수면 온도를 일정하게 유지시키면서 용존산소를 증대시키는 물리적 처리 방식의 정화처리부를 구성하기도 하였다. 하지만 극미세버블크기의 버블 공급설비가 땅에 매립되어야 함에 따라 초기 설비 건설비용의 과다와 설치 후 이동이 자유롭지 않은 문제도 발생하였다.

조류제거의 새로운 기술로는 전위차법을 이용한 조류 제거장치가 있다. 양전하를 제공하는 무기염과 고분자로 개질화된 자성분말체를 조류가 발생된 수역 또는 폐수에 주입하여 혼합(shaking)하면, 음전하를 띠고 있는 녹조 및 부유물질은 전위차법에 의하여 양전하를 띠고 있는 자성분말체 표면에 흡착되고, 수중에 이온상태로 존재하는 인산염은 무기염과 반응하여 부유물질인 불용성의 인산염이 형성되며, 여기에 영구자석이나 전자석을 통해 자력을 공급하여 수중에 발생된 녹조, 부유물질 및 인산염을 고속 제거하는 방법이다. 하지만 본 방법은 지속적인 자성분말체를 공급해야하며, 또한 처리 후 존재할 수 있는 자성분말체로 인한 물의 오염의 가능성이 있으며, 반응조를 처리하는 물 안에서 운영해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 농업용저수지 등 농업용수 관리목적의 물처리기술을 개발을 위해 극미세버블 및 전기촉매 기술을 이용하여 녹조 및 부유물 제거 시험기를 제작하여 농촌연구원에 위치한 연못을 대상으로 현장실험을 실시하였다.

5.2. 국내 조류 제어 기술 동향

지금까지 물리·화학적 조류제거 기술을 살펴보았듯이 조류제어를 위한 다양한 연구와 실증화 적용이 시행되고 있으나, 실질적인 상용화 및 적용사례는 거의 없다. 또한 적용한 사례가 종합적이기보다는 단편적으로 개별 기술을 적용한 사례가 대부분이며 성공적인 적용사례는 거의 없는 실정이다.

조류를 제거하는 해외기술 동향은 물리·화학적인 방법을 이용하여 조류를 신속하게 응집시켜 부상시키거나 침전시키는 기술에 초점을 맞추어 기술을 개발하고 있다. 세계 최고의 환경회사로 알려져 있는 프랑스의 Veolia사에서는 침적방식의 고액분리기술을

개발하였는데 기존 처리시간보다 제거접촉시간을 20분으로 단축시켰다. 유수의 환경기업인 프랑스의 SUEZ에서는 AquDAF 라는 기술을 통해 빠른 부상분리기술을 개발하였고 처리시간을 10분이내로 더욱 단축시켰다.

현재 유수의 환경기업에서 개발한 조류제거기술에서 볼 수 있듯이 기술의 개발방향은 조류가 응집되어 반응하는데 걸리는 시간을 최대한 단축하려고 한다는데 있다. 왜냐하면 조류의 반응시간의 최소화의 의미는 조류의 실시간 처리가 가능하고 대용량 처리가 가능함을 의미하기 때문이다. 실제 국내에 시범 적용된 여러 기술들이 각기 특성이 있고 성능이 좋음에도 불구하고 성공적인 기술이 되지 못한 이유는 경제적 측면에서의 대용량 규모의 조류처리를 위해서는 처리가 과다한 시설이 요구되었기 때문이다. 따라서 현 시점에서 조류제거 기술로서 요구되는 기술은 우선 조류의 반응시간이 최소화 되어야 하고 유수의 조건(pH, 온도, 유기물, 염도)에 무관하게 처리되어야 하며, 향후 조류의 발생을 억제할 수 있도록 유기물의 제거가 동반되어야 한다.

다음 표 3.11.11은 조류제거 기술 중 물리·화학적 복합처리 방식 중 최근 이용되는 기술의 장·단점을 정리하였다.

표 3.11.11 조류의 물리·화학적 처리방법

구분	장점	단점
용존공기부상법 (Dissolved Air Flotation, DAF)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 응집공정에 의한 입자성 조류의 제거 어려움을 극복하기 위한 방법 - Anabaena(>90% 이상) - Microcystin(>95% 이상) - 2-MIB(2*92%), Geosmin (5*98%) ○ 컴팩트화 하여 처리장의 부지 ○ 완전자동화 공정 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 조류 유입에 따른 응집제 변경 필요 ○ 응집 효과 증가를 위한 pH 최적화 필요 ○ 응집·침전 효율의 증가를 위한 전산화 공정 적용 필요 ○ 에너지 비용 문제가 동반 ○ 조류의 우점종에 따라 제거 효율이 70~100%로 큰 편차
여과방법 (Membrane Filtration)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 조류는 여과작용(Interception 혹은 Impaction)에 의해 쉽게 제거 ○ 여과지 역세 주기가 매우 짧아짐 ○ 상층에 안트라사이트를 사용한 다층 여과 수행시 효과적으로 제거 가능 ○ ANABAENA와 MICROCYSTIS의 사이즈는 분리막에 의해 완벽하게 제거가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 필터의 운전시간이 짧아지는 문제점 야기 (여과지 폐색(Head loss)) ○ 주기적인 역세척 등 유지관리 문제 ○ 반드시 전처리 기술이 요구 ○ 분리막 파울링 문제 ○ 조류 발생이 빈번한 지역에서 분리막을 사용하는 경우, DAF 등 전처리 필요
오존처리	<ul style="list-style-type: none"> ○ 오존처리 공정에서는 Hydroxyl radical을 이용하여 Geosmin과 MIB 제거가 가능 ○ 조류 유발 독성물질인 Microcystin-LR은 자연수에서 1-2 ppm의 오존 주입 농도에서 완전히 분해 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Geosmin과 2-MIB의 완벽한 제거가 힘든 ○ 별도의 PSA 장치 및 부대시설 필요 ○ 배오존 처리 등 유지관리 문제
활성탄방법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 활성탄은 Geosmin 및 2-MIB 제거 ○ Hepatotoxins (Microcystins) 제거에 미량의 분말활성탄은 효과가 작으나, 오존 + 활성 탄은 완벽한 제거가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주기적인 세척 등 유지관리 번거로움 ○ 전처리 기술과 병행요구

5.3. 녹조 및 부유물 제거 시험기 설계 및 제작

가. 부유물질 및 녹조제거 실내실험

시험기 제작 전에 먼저 실내실험으로 부유물 및 녹조를 제거하는 시험을 거쳤다. 우선 시험할 내용은 전기극판을 이용하여 용수에 함유되어 있는 녹조 등 부유물을 제거할 수 있는지의 여부와 함께 유기물인 TN, TP도 제거되는지 여부를 확인하였다.

- 원수 : 경기도 일월저수지 용수 채수



- 버블발생장치 및 전기촉매



- 단계별 시험결과



그림 3.11.25 부유물질(상) 및 녹조(하) 단계별 제거과정

실내시험결과 그림과 같이 단계별로 물에 함유되어 있는 녹조류가 응집되어 부상되었다. 하지만 당초 예상보다 녹조의 응집되는 반응시간이 조금 느려서 여러번 반복과 응집제의 농도 및 종류별로 반복 시험하여 최적의 농도를 찾았다.

또한 물속에 발생한 녹조의 제거는 부유물 등 유기물의 제거가 동반되는 것이 가장 효과적으로 분석되어 물속에 함유되어 있는 부유물의 제거가 가능한 사이클론 장치를 연동하는 공정을 구성하였다.

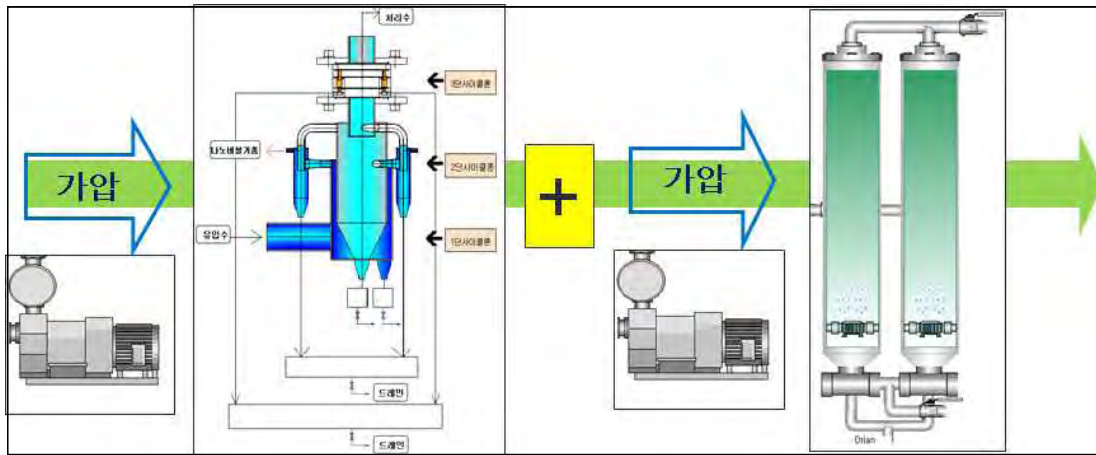


그림 3.11.26 사이클론과 녹조제거모듈의 공정조합

나. 시험기 제작

실제 현장에 적용하기 위해서는 현장 파일럿 시험이 필수이며 이를 위하여 여러번의 실패를 반복한 끝에 다음 그림과 같은 형태의 공정을 고안하게 되었다. 시험기의 구성내용은 극미세버블 발생장치와 라인믹스 그리고 타워형 분리 공정을 구분하고 있다. 시험기 규모는 100m³ 규모로서 극미세버블 발생장치(펌프)를 이용하여 유입수를 가압하여 라인믹스에서 응집제가 유입수와 섞이고 타워형 분리모듈에서 유기화합물과 물이 분리되어 모듈의 상단으로 유기화합물이 농축도록 하고 모듈의 하단에서 용수를 다시 수역으로 보내는 외부순환방식이다.

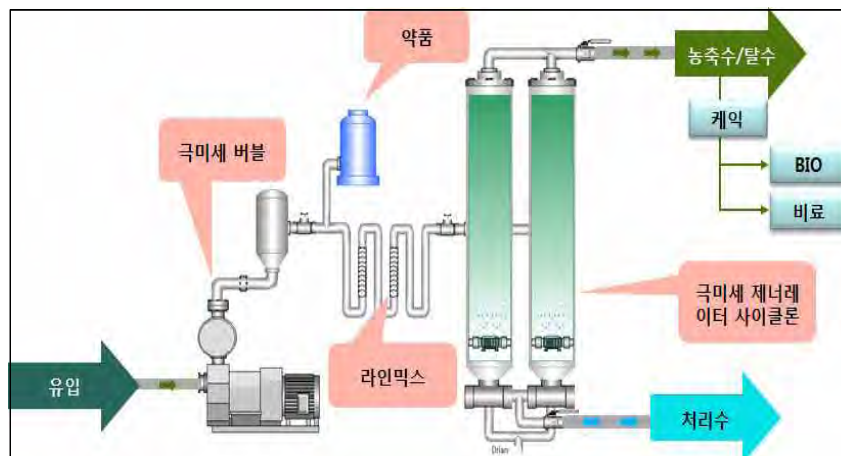


그림 3.11.27 녹조 및 부유물 제거 시험기 공정도

다. 파일럿 적용시험

농어촌연구원에 위치한 연못에서 외부순환식 시험기를 제작하여 적용하였다. 규모는 100m³ 규모로서 시험기 장치의 구조는 극미세버블장치와 초고속응집장치 및 타워형 분리모듈로 제작하여 적용하였다.

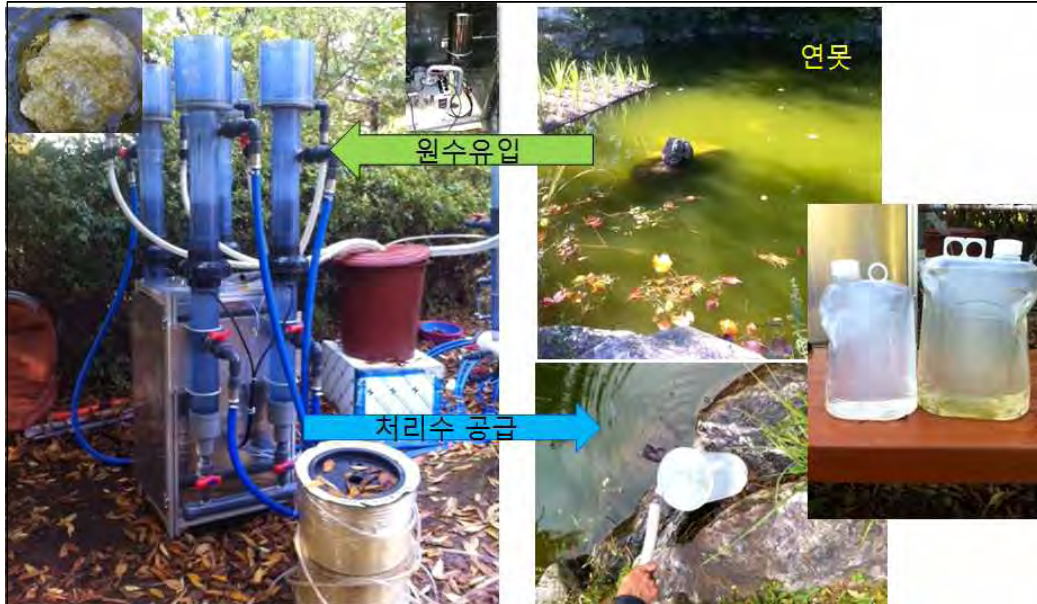


그림 3.11.28 유기물 처리 시험기 적용

시험결과 약품 및 전기비용은 톤당 30원 정도로 분석되었고 조류의 응집반응시간은 10초 이내로 분석되었다. 특히 고형물의 물질은 99% 이상 회수되었는데 중요한 사항은 미세한 조류까지도 응집이 되는 특징을 알 수 있었다.

수질시험결과 Chl-a (콜로로필)는 196.2 mg/m³(유입수)에서 0.041 mg/m³ (처리수)로 거의 제거가 되었고 TP는 99%(0.426 →0.004) TN 은 93%(23.9 →1.69) 가 제거되는 등 수질시험결과로 볼 때 이미 발생한 조류의 제거뿐만 아니라 TN, TP 등 유기물의 제거도 동시에 이뤄지기 때문에 조류발생의 저감에도 본 기술이 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

항목	유입	유출	처리효율
BOD(mg/L)	31	0.20이하	99.4%
COD(mg/L)	90	6.00이하	93.3%
SS(mg/L)	247	0.20이하	99.9%
T-N(mg/L)	23.9	1.690이하	93.3%
T-P(mg/L)	0.426	0.0040이하	99.1%
Chl-a	196.2	0.041	100%
대장균(개/mL)	<30	불검출	100%



그림 3.11.29 파일럿 적용 시험결과

6. 요약 및 결론

본 절에서는 TEST-BED에 적용하기 위한 안전하고 경제적인 간접재이용시스템을 설계하고 현장에 적용 및 실험하였다. 개발된 간접재이용시스템은 농업용수 수질기준에 충족할 수 있도록 하수처리장 방류수를 재처리하며, 상대적으로 저렴한 설치비와 경제적인 유지관리비를 필요로 한다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- ① TEST-BED 설계에서는 본 연구에서 개발한 극미세머블과 사이클론 기술을 적용함으로써 침강성이 강한 고형물을 포함하는 폐수처리뿐만 아니라, 부유성이 높은 미세 입자 제거효율이 높으며, 응집제와 같은 화학약품의 사용 없어 2차 수질 오염의 문제가 없다. 따라서 하수처리수와 하천수가 섞이는 지역같이 다양한 크기의 부유물을 함유한 경우 경제적으로 제거 효과를 높일 수 있는 장점이 있다.
- ② 병점 양수장의 TEST-BED 운영결과 원수와 처리수의 SS는 74%, BOD 58%, 탁도 56% 등 처리효율을 나타냈으며, 응집제와 필터교체가 없는 구조를 감안할 때 상당히 효과가 좋은 것으로 판단되며 유입수의 농도 정도 및 목표수질에 따라 후처리장치로 MF, UF 등을 연결하여 사용 시 그 활용 폭은 더욱 커질 것으로 판단된다.
- ③ 수역에서 이미 발생한 조류 제거기술 및 조류 발생의 원인이 되는 유기물의 제거 방안에 대해 국·내외 기술 사례와 더불어 초고속으로 조류 및 유기물을 제거하는 물리, 화학적 용·복합 처리기술을 개발하였다. 효과적이고 대용량의 조류제거를 하기 위한 선결조건은 조류의 응집반응시간을 최소화 할 수 있는 기술과 더불어 유수의 조건(pH, 온도, 유기물, 염도)에 무관하게 처리되어야 하며, 향후 조류의 발생을 억제할 수 있도록 유기물(TN, TP)의 제거도 동반되어야 한다는 것이다.
- ④ 개발한 기술을 이용해 저수지 및 도심지 배수로 말단 등 국지적으로 또는 단기적으로 조류저감이 필요한 경우를 고려하여 조류발생 지역에 신속한 접근이 가능하고 실시간 제거를 목적으로 차량용으로 시스템을 제작하여 운용할 수 있다. 또한 농촌지역에는 많은 규모의 마을하수처리장 등이 위치해 있는데 다양한 이유 등으로 적절히 처리가 되지 않고 있는 지역이 상당수 있다. 특히 수질등급이 좋지 않은 농업용저수지의 주요 오염원이 생활계로부터 발생하는 만큼 건전한 수질을 유지하기 위해서는 유기물을 효과적으로 제어 또는 저감해야하며 개발한 기술을 이용하여 충분히 목표에 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

제12절 유형별 하수처리수 간접재이용시스템 개발

1. 서론

신규 농업용수의 개발은 많은 시간과 비용이 소요될 뿐만 아니라, 환경적인 측면에서 큰 도전을 받고 있다. 또한, 기후변화로 인한 극한 가뭄과 시설재배지 증가에 따른 농업용수의 계절적 수요변화를 대비할 필요가 있다. 이와 같은 상황에서 하수재이용이 대체수자원으로 주목받고 있으며, 이미 전국적으로 하수처리장 방류수를 농업용수로 계획적 또는 비계획적으로 이용되고 있다.

하수처리수의 농업용수재이용에 따른 인체 및 환경에 대한 부작용이 보고되고 있으며, 이에 따라 하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위해서는 안전한 재이용시스템이 필요하다. 특히, 농업용수의 경우 생활 및 공업용수에 비해 그 수요량이 많고, 상대적으로 낮은 기대수질을 가짐에 따라, 하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위해서는 경제적으로 합리적인 재처리시스템이 필요하다.

따라서 본 절에서는 앞서 개발된 하수처리수의 농업용수 간접재이용을 위한 최적 물처리 공정기술을 바탕으로, 하천보를 활용한 소용량 간접재이용시스템과 양수장을 활용한 중대용량 간접재이용시스템, 그리고 이동식 간접재이용시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템의 성능과 특징에 대해 살펴보고자 한다.

2. 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템

농민이 직접사용하고 있는 농업용수의 부유물질 및 탁도, Total coliform, fecal coliform, E. coli는 미생물적 측면에서 수질오염의 평가기준이 되는 지표생물로서 미생물에 의한 오염으로부터 안정성 확보가 필요하며 이를 위해 영농편의 용수공급시스템 개발이 필요하다. 현재 농촌용수 이용량 중 35% 정도가 회귀용수로서 상류지역에서 한번 사용한 용수를 하류에서 재이용하고 있는 방식으로 이용하고 있으나 농민이 비료나 농약이 묻은 신체를 세정하거나 농기구를 세척함으로써 오염원이 그대로 배수를 통해 하천으로 방류되고 있으며 이를 하류에서 재이용함으로써 친환경농업생산기반에 저해요소로 작용하고 있다. 농어촌연구원조사결과 (2008) 전국 271개 하수처리장 중 127개소의 하수처리수가 주변 농촌용수에 직·간접적으로 영향을 주고 있는 것으로 조사되었으며 전국물관리요원 등의 여론조사결과에 따르면 농촌지역에서 농촌용수 수질개선과 환경개선이 시급하다는 인식이 증가하고 있다.

이에 본 시스템은 제1협동 기관인 한국농어촌공사 농어촌연구원의 공정기술 개발 및 설계를 바탕으로 제작하였다. 제작 기간은 2011년 12월부터 2012년 1월까지 약 2개월이 소요되었으며, 제1협동의 조사 및 분석을 통하여 선정된 지역에 설치하여 운전을 수행하였다.

하천보를 이용한 소용량 농업재이용 시스템은 부유물질 제거 및 살균소독 시스템으로 구성되며, 농업용수로 이용하기 위해 하천에 회석된 하수처리장 처리수를 정화하여

농업용수로 공급하는 시스템이다. 본 시스템의 처리용량은 600 m³/일이며 원리는 하천수를 취수하여 미세 스크린 여과망을 통과시켜 1차 부유물질을 제거하고 나노버블 제너레이터를 거쳐 미세버블을 발생시키며, UV 살균장치에서 살균 처리된 깨끗한 물을 농가에 공급하는 시스템이다. 농업재이용 시스템의 시험 운전은 2012년 5월부터 6월 초에 걸쳐 수행하였으며, 일 운전 20 시간 동안 운전을 수행하였다.

2.1. 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 규격 및 설계

표 3.12.1은 pilot의 규격을 간략히 서술하였으며, 그림 3.12.1~그림 3.12.3은 하우스를 포함한 설계 도면과 하천 보에 설치할 경우 처리 공정을 표현한 것으로 원수를 흡입하여 유입 전처리 시스템(유입 펌프 시스템)→필터 시스템→나노버블 시스템→UV 시스템→용수공급의 공정을 거쳐 처리 및 공급이 이루어지도록 구성되었다.

표 3.12.1 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 Pilot 규격

품 명	단위	수량	형식	규격
소용량 농업재이용시스템	LOT	1	동력	L4,200×W1,700×H2,211

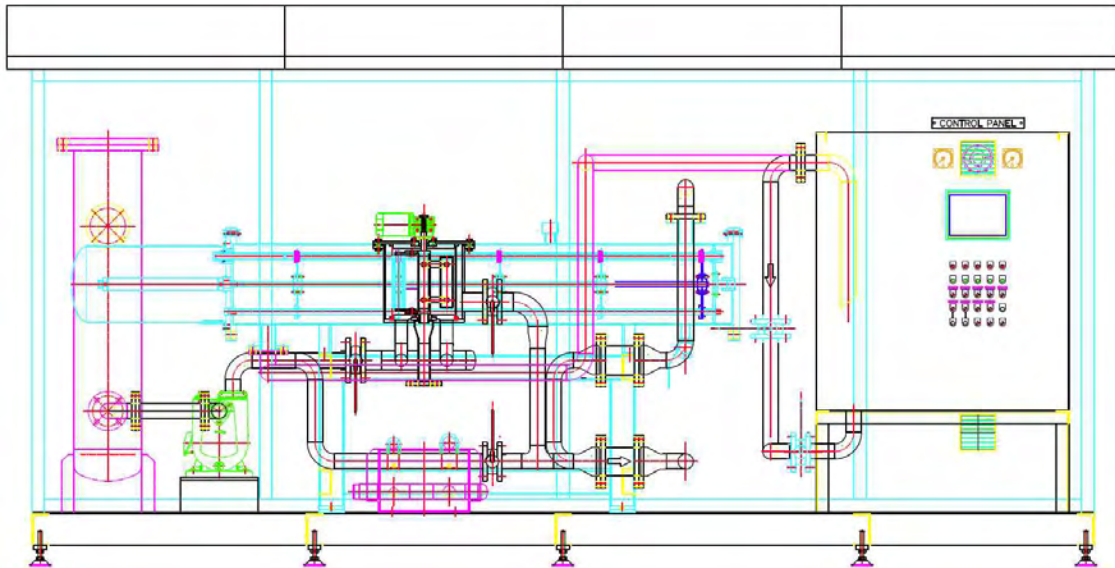


그림 3.12.1 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 단면도

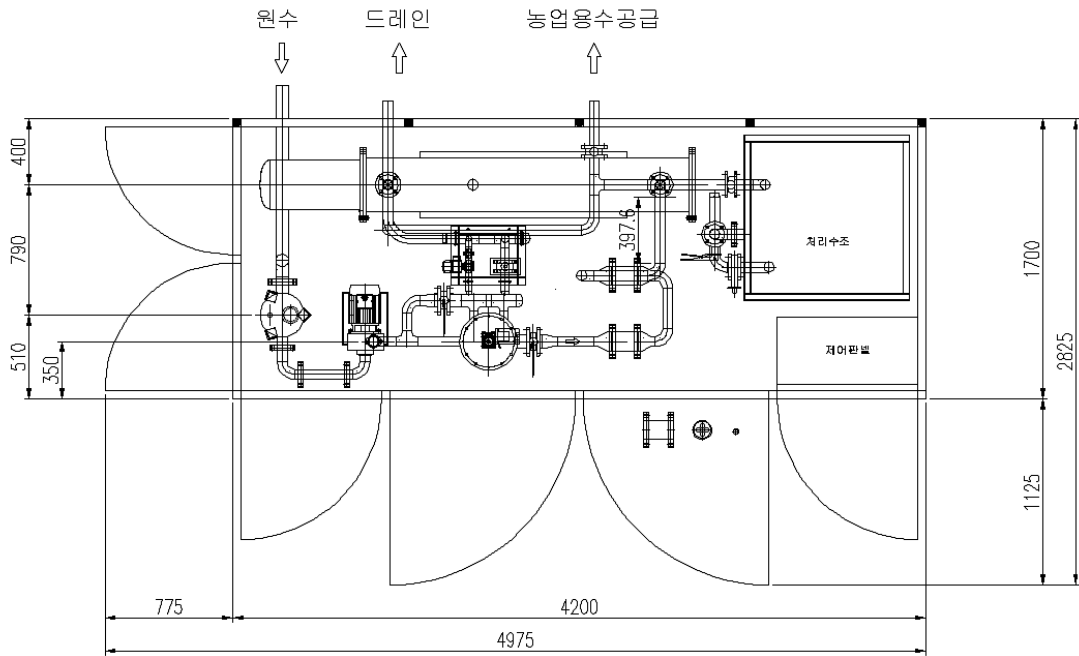


그림 3.12.2 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 평면도

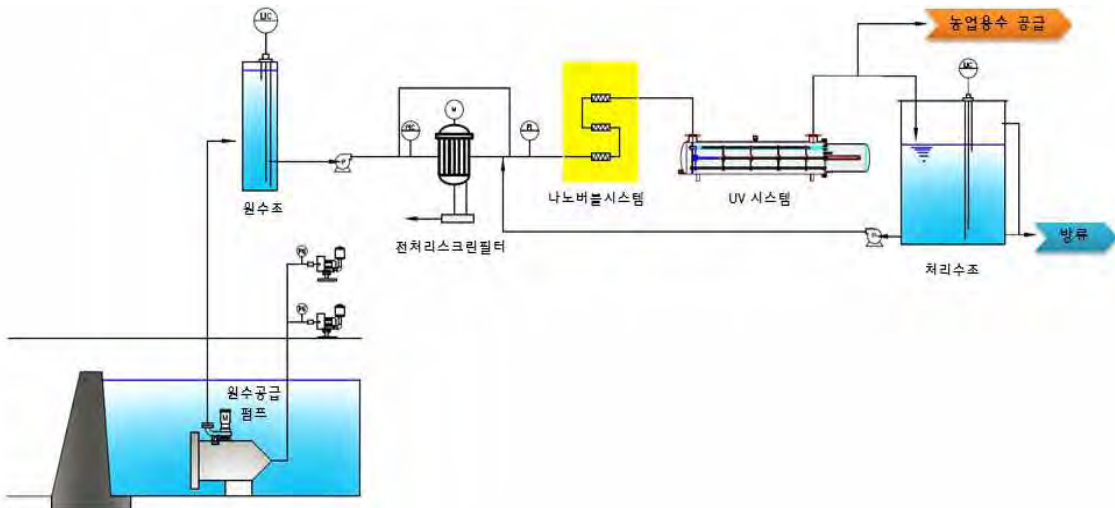


그림 3.12.3 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 공정도

2.2. 공정별 제작

가. 유입전처리 및 펌프시스템

유입 전처리 시스템은 보의 중간에 설치되어 1차 부유물질의 유입량을 최소화 시키는 기능을 하며, 송풍기를 통하여 스크린 필터의 세척이 이루어지도록 구성하였다. 하천수중에 설치되는 원수 흡입장치는 취수구 입구에 에어 노즐을 설치하여 송풍기에서 공급되는 에어를 분사하여 부유물질이 흡입되는 것을 방지한다. 송풍기는 2대를 설치하여 교대로 운전하도록 구성하였으며, 원수 펌프시스템의 원수 공급 펌프(1대)를 통하여 필터시스템으로 원수를 공급하도록 설계되었다.

설치된 원수 공급펌프는 자흡식 펌프로써 용량은 30 m³/h 로 원수 보조 저장조 수위에 따라서 자동운전 및 수동 스위치를 이용하여 조작한다. 원수 흡입 장치 장치는 유입 원수를 취수 시 사용하며 이물질 흡입을 방지하는 기능을 하며, 송풍 노즐 시스템이 설치되어 흡입 시 이물질 유입을 방지 할 수 있도록 제작되었다. 교반용 송풍기는 원수 유입 펌프에 연결하여 설치되며, 원수 흡입장치 에어노즐에 공기를 주입하기 위하여 장착하였다. 송풍기는 링 블로워 타입으로 자동 및 수동 운전이 가능한 모델을 선정하여 적용하였다.

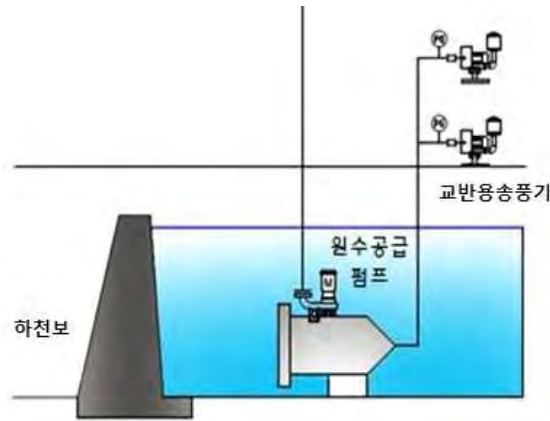


그림 3.12.4 유입 전처리 펌프시스템

(1) 원수 이송 펌프 용량

- 30 m³/hr 지표수 압송 (3마력 펌프)

(2) 설계조건

- 처리용량(Q) = 600 m³/일
- 여과기 가동시간 = 20 hr/일
- 부유물질 유입조건= 유입수 SS: 20 mg/l 이내, 처리수 SS: 5 mg/l 이하
- 가동조건 : 20 HR 연속운전이며 LEVEL "H"에서 ON, LEVEL "L"에서 OFF

나. 필터시스템

필터 시스템은 유입 전처리 시스템에서 1차로 부유물질이 제거된 하천수를 2차로 제거하는 기능을 하며, 후단에 나노버블에 의해 만들어진 나노수를 통하여 세척이 이루어지도록 구성하였다.

필터 시스템의 장치 구성은 원수 이송펌프, 원수 유입밸브, 전처리 자동 역세 필터로 구성되며, 미립성의 입자를 제거하게 된다. 각 장치의 기능을 살펴보면, 원수 이송 펌프는 자흡식 펌프로 유입 원수를 전처리 필터로 공급하기 위해 설치되었으며, 용량은 30 m³/h 으로 원수 보조 저장조 수위에 따라서 자동 운전 및 수동 조작이 가능하도록 설치되었다. 원수 유입 밸브는 원수의 유입을 제어하기 위하여 전처리 필터 공급 배관에 설치되었으며, 제어반을 통하여 자동제어 운전 및 수동 운전이 가능하도록 설치되었다. 필터 자동세척은 내부주축에 설치된 두 개의 브러시가 감속 모터 구동에 의해

스크린 여과망 표면을 회전하며 세척이 이루어지게 된다. 또한, 원수 이송펌프 후단에 전처리 자동 필터를 장착하였으며, 이는 유입 원수 중의 미립자성 이물질을 제거하기 위하여 설치되었다. 필터는 지름 20 μm 의 스크린 필터를 적용하였으며, 입구 압력 및 시간 설정에 따라 자동 역세 운전이 되도록 설계되었다. 또한, 배관은 내약품성, 내 미생물, 내침식성 가지는 소재를 적용하였다.

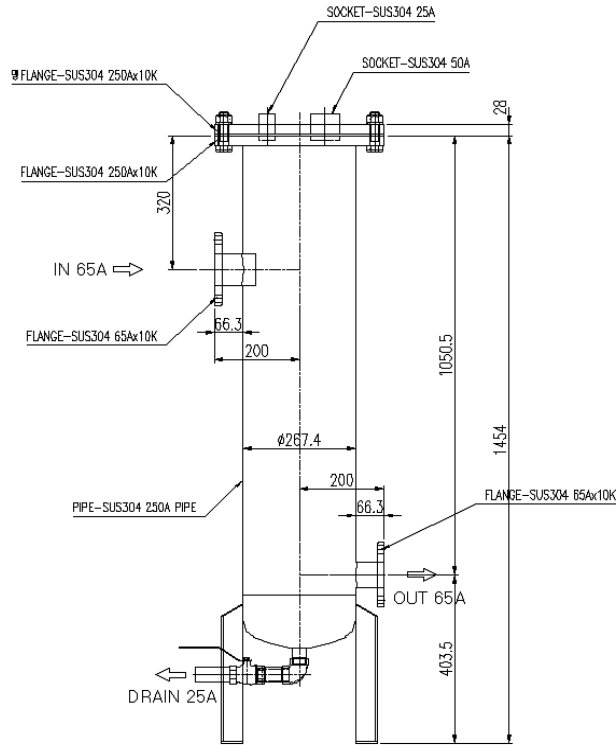


그림 3.12.5 원수 보조 저장조

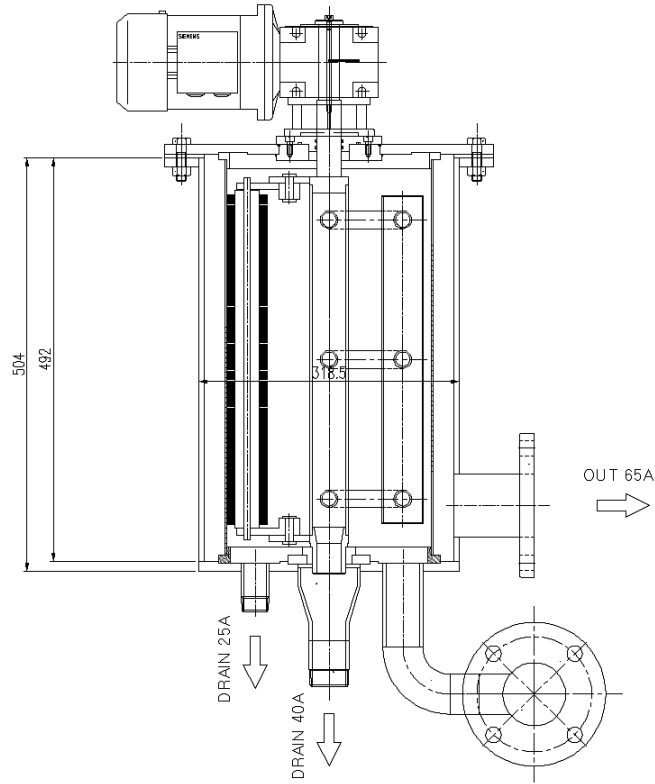


그림 3.12.6 필터시스템

(1) 설계조건

- 처리용량(Q) = 600 m³/hr
- 여과기 가동시간 = 20 hr/일
- 부유물질 유입조건 -처리수 SS = 10 mg/l 이하

(2) Technical Data

- 처리용량(Q) = 25 m³/hr -> 600 m³/일
- inlet/outlet diameter -> 65 mm
- (D) = 200 mmφ × 1,220 mm
- maximum pressure ->12 atm
- max flow rate ->25 TON/hr/1EA
- Housing diameter -> 200 mm
- Length of filter element ->261 mm
- General filtration area -> 953 cm²
- Filtration volume -> 1225 cm³

다. 나노버블시스템

나노버블시스템은 나노버블 제너레이터 및 배관으로 구성되며, 원수 이송 펌프 토출구 후단에 설치되어 유입 원수에 공기를 공급하여 미세 버블을 발생시키기 위하여 적용되었다. 발생된 나노 버블은 전처리 시스템의 처리수와 나노 버블이 혼합되어 나노수를 생성하며, 재이용수의 DO 증가 및 전처리 시스템의 필터 세척수로 이용된다.

직경이 불과 0.5미크론의 기포는 1 마이크로초의 짧은 시간에 압축, 파괴의 연쇄 반응을 반복하게 된다. 이는 초미세 기포가 가지는 자기가압 효과에 의한 것이며, 자기가압 효과는 구형의 계면을 가지는 기포 내부에서 표면장력이 기체를 압축하는 힘으로 인해 발생하게 된다.

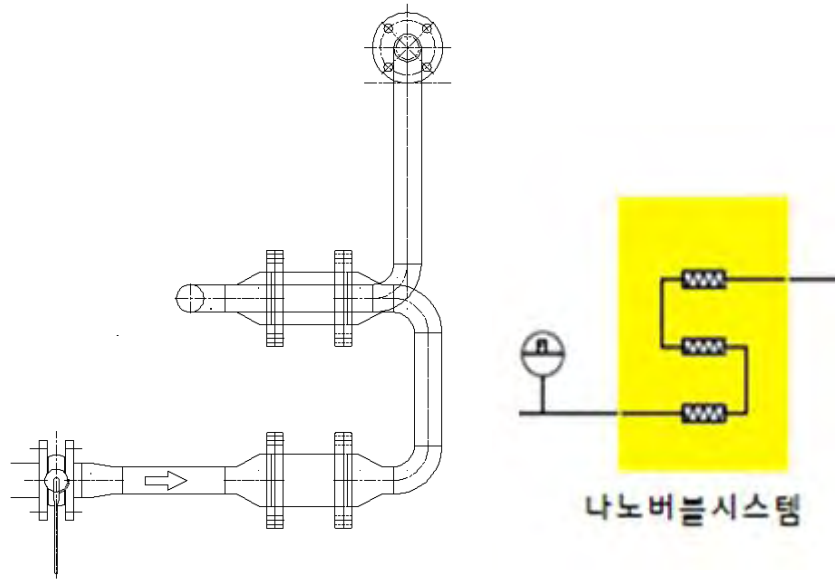


그림 3.12.7 배관형 나노버블 시스템

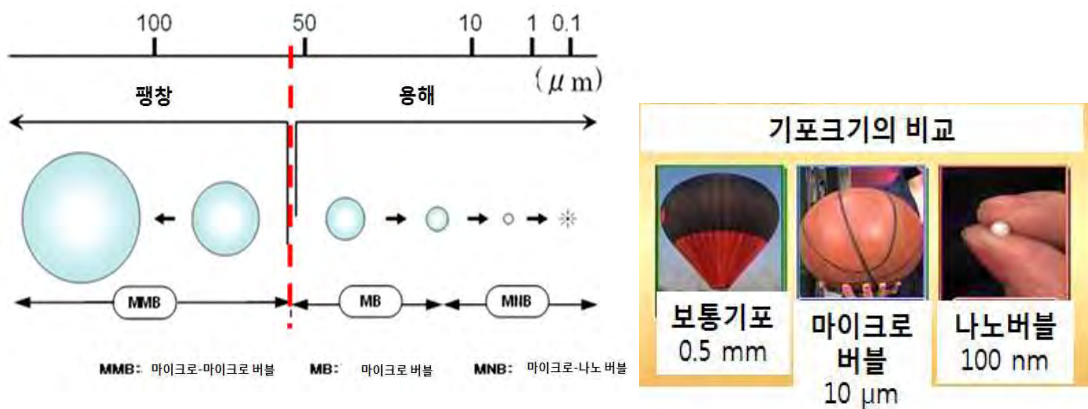


그림 3.12.8 기포의 종류

버블 내부 압력의 증가

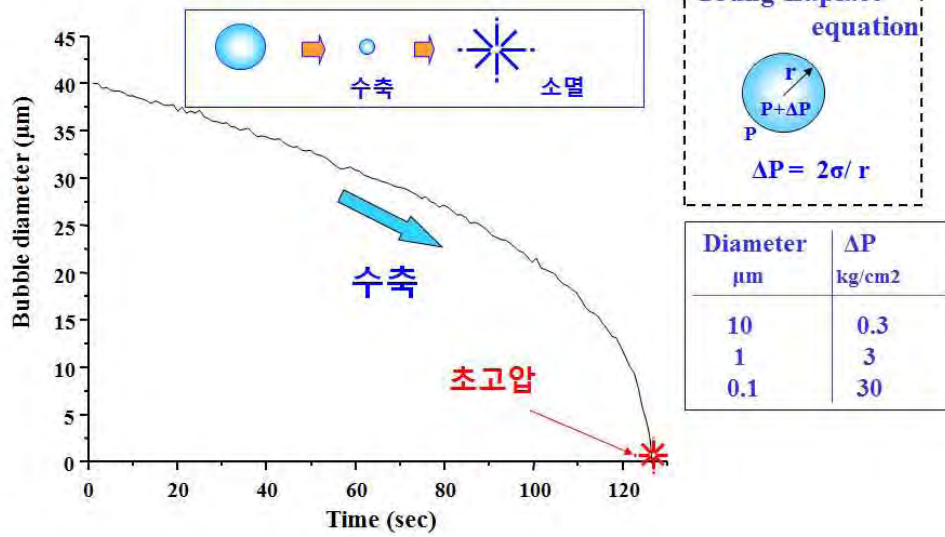
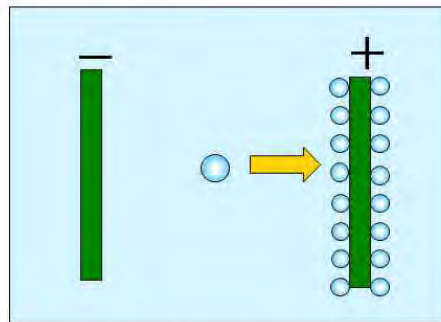


그림 3.12.9 기포의 압력 변화

이에 초미세 기포는 결합, 파열, 분열 운동을 일으키고 그 과정에서 물속에 초음파를 발생시킨다. 초음파를 발생 시킨 초미세 기포는 물속으로 이동 후, 수면에서 공기 중에 방출된다. 방출된 기포군은 물 밖으로 방출될 때 무수히 많은 물방울을 수면에 발생시키며, 기포 군에 의해 미세한 물방울 장을 만들어 공기 중에서 분열, 결합 운동을 일으켜 레너드 효과(물방울이 분열할 경우 전기적 성격을 띠게 되는 현상)에 의해 수면 위의 공기를 마이너스로 이온화 한다.

버블표면의 대전 특성



Smoluchowski's equation

$$\zeta = \eta\mu / \epsilon$$

μ : the mobility ($m^2s^{-1}V^{-1}$)

ϵ : the dielectric constant ($JV^{-2}cm^{-1}$)

η : the viscosity of water ($gcm^{-1}s^{-1}$)

전기적 이중층 형성

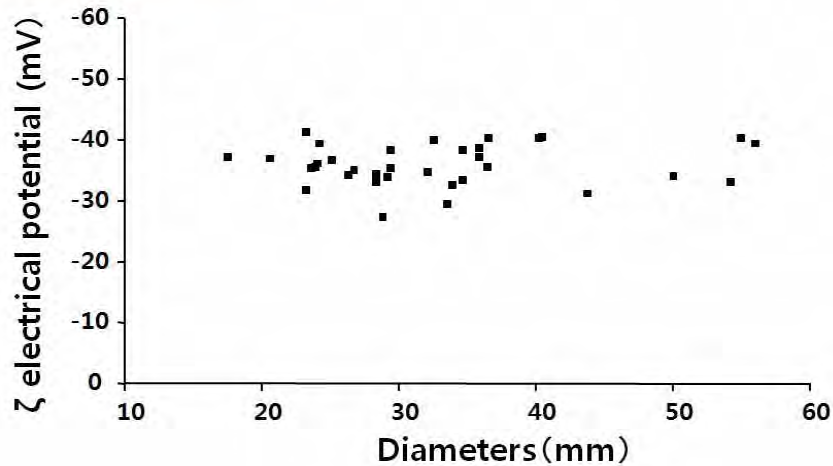
Surface charge

MB

Counter-ion distribution

그림 3.12.10 버블의 전기적 특성

버블표면의 대전 특성



버블표면의 대전 특성

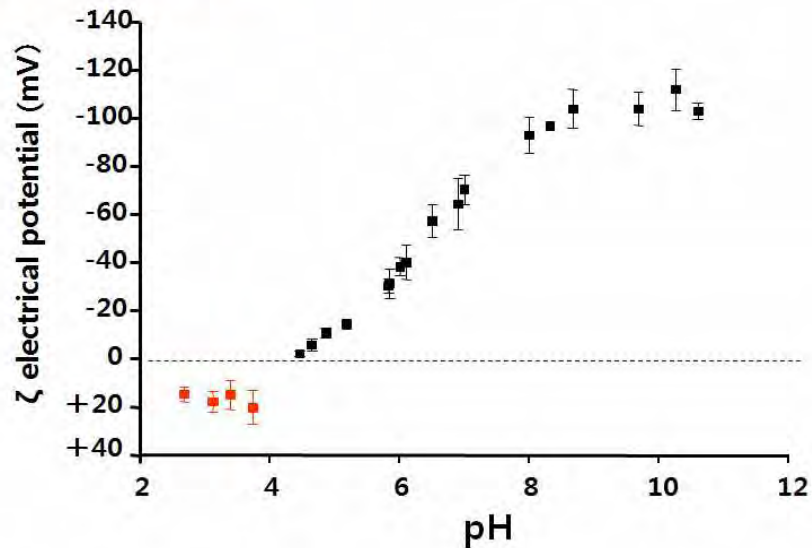


그림 3.12.11 버블의 대전 특성

마이크로-나노 버블 기술의 원리는 라디칼 발생 확인을 위한 스캐빈저 실험과 전자스핀공명법으로 확인하였으며 (Takahashi, 2007), 마이크로 나노 버블 발생 시 하이드록시 라디칼을 발생시킨다. 본 기술의 특징은 미세 기포를 다량 발생하여, 표면적 증가에 따른 가상부상 효과를 극대화하고 가스 용해시간의 증가에 따른 가스이용 효율을 증대에 이용하는 OH 라디칼*의 농도변화, 수질 환경 개선(부유 물질 제거, 산소 공급 등)에 적용 할 수 있다. 이에 제작한 시작품에 적용된 나노제너레이터는 원수 이송 펌프 운전에 따라서 자동 운전 및 수동 조작이 가능하도록 적용하였다.

* OH Radical (OH라디칼: 수산화기)이란, 거의 모든 오염물질의 살균, 소독에 관여하며 화학적으로 분해하고 제거할 수 있는 가장 강력한 효과를 발휘하면서 인체에는 무해한 천연물질이다.

(1) 본 체

- DISINFECTION CAP. : 600 m³/일
- BODY SIZE : 924 L × W230
- 토출유수량 : 30 L/min
- 기체흡입량 : 10 L/min
- 전 력 : 400 W(AC220 V, 3상)

(2) 설계 및 구조

- ① 본 설비는 유수와 수직으로 설치되어지고 버블 발생시스템이 완전히 물에 잠기도록 설계되어야 하며, 여유 공간이 있어야 사후 관리시 시스템 교체할 수 있다.
- ② 나노 버블 시스템은 기체와 액체를 기계적으로 혼합시켜 연속적으로 생성한다.
- ③ 기액의 혼합에는 펌프 동력 사용되며 유체역학적인 작용이나, 과포화에 의한 재나노버블화를 이용해서 나노버블을 발생시킨다.
- ④ 각 설비의 연결부에 사용되는 결합부품은 뒤틀림이 없는 반영구적으로 사용가능한 재료를 사용한다.

라. UV시스템

UV 살균 시스템은 BODY, UV LAMP, 안정기, 석영관, 석영관 자동세척장치로 구성되었다. Body는 STS (스테인레스) 304 이상의 제품으로 충분한 강도를 가져야 하고, 램프의 유지관리 및 교체가 용이한 구조로 개별적인 분리조립이 용이하도록 제작되었다. UV-Lamp는 저압램프로 석영관으로 보호되고 완벽하게 방수되어야 하며, Lamp 교환이 용이하고 UV에 내구성이 있는 커넥터(전선접속)를 사용하였다. 세척 장치는 UV-소독 램프의 자외선 조사량을 유지하기 위한 방법으로 이물질바이오막이 형성되기 전에 방지 및 억제를 하기 위한 시스템이다. UV-램프의 효율적인 UV-조사를 위하여 UV-램프의 보호 석영관의 표면을 에어 유니트 방식으로 와이퍼에 의해 자동 세척된다. UV 시스템은 전처리 필터 후단에 설치되며, 원수 살균 및 소독하기 위하여 적용하였다. 사용된 UV 자외선램프는 아크 전류에 의해 열을 받아 작동되는 수은-인듐이 사용되었으며, 저압의 원리로 제작되어 방류수 흐름에 수평으로 하여 균일한 간격으로 배열하여 설치되었다. UV 램프의 파장은 253.7 nm , 최소 9,000시간 이상의 수명을 갖는 제품을 적용하였다. 또한, 자외선 투과율이 90% 이상인 것으로 원형관 타입으로 실리콘 캡으로 작은 충격에도 파손 되지 않도록 적용하였다.

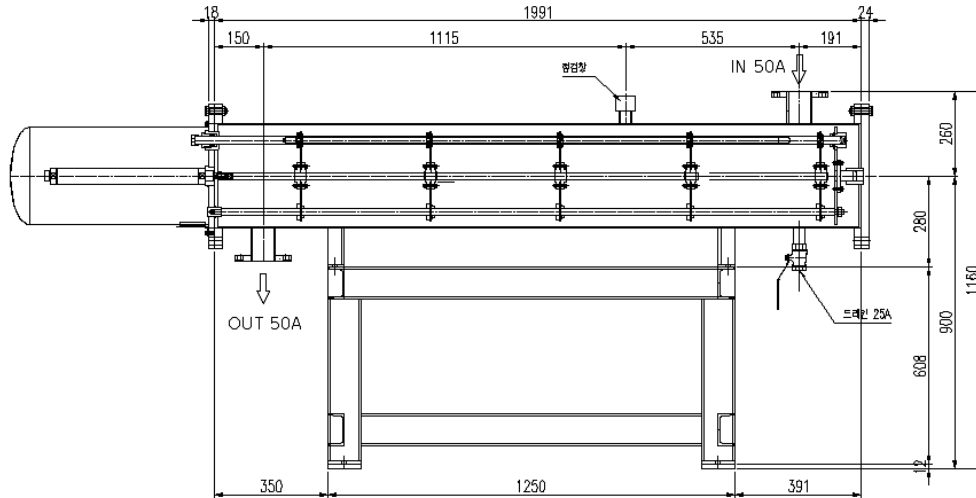


그림 3.12.12 UV 시스템

(1) 설계조건

- 처리용량(Q) = 600 m³/hr
- UV 조사량 = 일반 대장균 90%이상 사멸

(2) 램프사양

- 종류 : TUV(philips)
- 소비전력 : 145 W
- 유효길이 : 1,470 mm
- UV-C출력: 48 W
- 석영관 투과율 : 90%

(3) 흡수계수 산출

$$E = E_0 e^{-ax}$$

E : 투과깊이 x에서의 강도

E₀: 입사강도

a : 흡수계수

x : 투과거리, 위 식에서 흡수계수는 아래와 같다.

$$a = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) / -x$$

(4) T-10램프의 초기 자외선 강도 산출

$$I_0 = S/A$$

S : 자외선 출력량

A : 자외선이 투과되는 면적

$$I_0 = 48 \times 0.9 \times 0.8 \times 10^6 / (2.45 \times \pi \times 147.0) = 30,561 \mu W / cm^2$$

(5) UV평균강도 산출

$$I_{ave} = I_0 [(1 - e^{-ax})/ax]$$

: 평균 자외선 강도

: 초기 자외선 강도

$$I_{ave} = 30,561 [(1 - e^{-(0.31 \times 5.5)}) / (0.31 \times 5.5)] = 14,666 \mu W/cm^2$$

(6) UV조사량 산출

· 조사량(Dose) = 평균강도 × 반응조내 체류시간

$$\cdot \text{조사량(Dose)} = 14,666 \mu W/cm^2 \times 14.36 \text{sec} = 210,554 \mu W \text{sec}/cm^2$$

(7) 반응조 유효 산정

$$\begin{aligned} \cdot \text{반응조 용량} &= \text{반응조크기} \times \text{램프 길이} = 30 \times 30 \times 0.785 \times 147 \\ &= 103,856 \text{cm}^3 \end{aligned}$$

$$\cdot \text{슬리브 용량} = \text{슬리브 면적} \times \text{램프 길이} = 2.452 \times \pi \times 147 \times 6 = 4,158 \text{cm}^3$$

$$\cdot \text{순 반응조 용량} = \text{반응조 용량} - \text{슬리브 용량} = 103,856 - 4,158 = 99,697 \text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{반응시간} &= \text{순반응조 용량} \div \text{유입 유량} = 99,697 \div (0.006 \times 1,000,000) \\ &= 14.36 \text{sec} \end{aligned}$$

(8) 수리계산

$$\cdot Q = 600 \text{m}^3/\text{day} \div 1 \text{관로} = 600 \text{m}^3/\text{day} = 0.007 \text{m}^3/\text{sec}$$

$$\begin{aligned} \cdot V &= 0.007 \text{m}^3/\text{sec} / [(0.30 \times 0.30 \times 0.785) - (0.02452 \times 3.14 \times 0.25 \times 6)] \\ &= 0.1 \text{m}/\text{sec} \end{aligned}$$

(9) 대장균 잔존율 및 램프 수량 산정

$$\text{대장균 잔존율} = \text{Log } N1/NO = \text{Log}((N-Np)/NO) = \text{Log}(100/50,000) = -2.6$$

$$N1 = \text{입자와 결합하지 않는 대장균수} = N - Np = 175$$

$$NO = \text{인입대장균수}$$

$$N = \text{자외선살균 후 유출대장균수 (MPN/100ml)}$$

$$Np = \text{입자와 결합하여 생존하는 대장균수} = CSSm = 0.25 \times (10)^2 = 25$$

$$NL = \frac{Vp}{(Q/Wn) \times W} = 417 \text{l}/\text{min} / (1.5 \text{l}/\text{min}/\text{Watt} \times 48 \text{W}) = 6 \text{개}$$

여기서 NL = 소요 램프 개수

$$Vp = \text{분당 유량} \quad \text{-----}(417 \text{l}/\text{min})$$

$$Q/Wn = \text{적용자외선부하} \quad \text{-----}(1.5 \text{l}/\text{min}/\text{Watt})$$

$$W = \text{램프당 자외선 출력} \quad \text{---}(48 \text{Watt})$$

마. 처리수조 및 공급시스템

처리수조는 UV 시스템 후단에 설치되었으며, 처리수의 저장 및 공급하는 역할을 한다. 처리 수조의 용량은 1m³ 으로 상부에는 오버플로우 배관을 설치하였으며, 하부에는 드레인 배관을 설치하였으며, 제어반 설정에 따라 자동 및 수동 조작이 가능하도록 하였다.

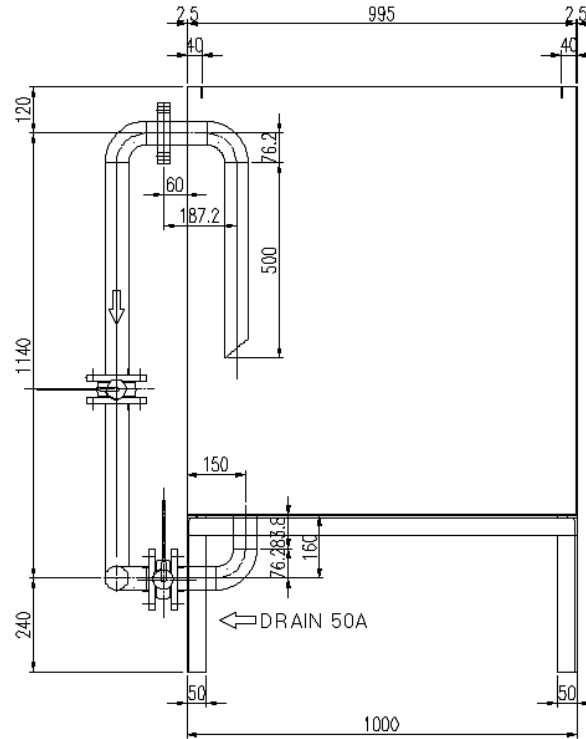


그림 3.12.13 처리수조 공급시스템

바. 제어반 구성

전기 공사를 포함하는 제어반 시스템은 K.S. (KOREA INDUSTRIAL STANDARD), J.I.S. (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD), A.N.S.I. (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE), N.E.M.A. (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURE ASSOCIATION)의 규격을 적용하였다. 제어반은 각 공정을 자동화하여 수동 조작 및 자동 운전이 가능하도록 조절할 수 있으며, 시스템의 이상 유무를 확인 할 수 있는 Display 모드가 지원되도록 적용하였다. 디스플레이 패널은 터치 모드가 가능하도록 하였으며, CIMON Tool을 이용하여 프로그램이 제작되었으며, RS-232, RS-485와 같은 통신 장치를 장착하여 PC와 호환이 가능하도록 하였다. 장치에 적용된 상세 사양은 다음과 같다.

(1) 터치판넬 (TOUCH PANEL)

- 제조사 : CIMON
- 통신 : RS-232, RS-485

(2) PLC (PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : GM-Serise
- 통신 : RS-232,RS-485

(3) 인버터 (INVERTER)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : SV-iG5A
- 형식 : PID제어내장

(4) 차단기 (MCCB)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : ABS TYPE
- 형식 : 표준형

(5) 과전류계전기 (OVERLOAD REALY)

- 제조사 : LS산전
- 보호기능 : 과전류, 결상

(6) 전자접촉기 (CONTACTOR)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : GMC-9 외
- 형식 : 표준형

(7) 선택스위치 (SELECTOR SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 취부 외경 : 25 ϕ
- 정격전압 : AC 600V

(8) 비상 누름 버튼 스위치 (EMERGENCY SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 형식 : LOCK TYPE
- 취부외경 : ϕ 25

(9) 조광형 누름 버튼 스위치 (PUSH BUTTON SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 형식 : LED LAMP TYPE
- 취부외경 : Ø25
- 색상 표시 : 운전(RED), 정지(GREEN), 고장(YELLOW)

(10) 부저 (BUZZER)

- 제조사 : KACON
- 형식 : 매입형
- 취부외경 : 25 Ø

(11) 지시계기류 (VOLT METER, AMPERE METER)

- 제조사 : 대봉전기
- 형식 : 광각형 (110 x 110) & (80 × 80)
- 눈금 : (전압계 : FULL SCALE - 600V)

(12) 변류기 (CT)

- 제조사 : 대봉전기
- 정격 2차전압 및 정격부담 : 5A, 5VA
- 오차계급 : 3.0급

(13) 타이머 (TIMER)

- 제조사 : 오토닉스
- 동작시간편차 : ±0.5% 이하 (최대설정시간에 대하여)
- 설정오차 : ±5% 이하 (최대설정시간에 대하여)

(14) 전력용 피뢰기 (POWER SURGE PROTECTOR)

- 제조사 : 현대파워시스템
- 모델 : HD-AP-N(AC 220V)

(15) DC POWER SUPPLY (S.M.P.S)

- 제조사 : 유니온전자
- 모델 : UP-Serise
- 형식 : 입력-AC 220V, 출력-DC 24V

(16) 노이즈 필터 (NOISE FILTER)

- 제조사 : 유니온전자
- 모델 : UF10SBS
- 형식 : 1-Phase, 10A, 250V

2.3. 시스템 사양 결정

현장 용도에 맞는 소용량 농업용수 재이용시스템 (600 m³/일) 설계 및 제작을 위한 시작품의 시스템 구성과 사양 및 내용을 표 3.12.2로 나타내었다.

표 3.12.2 소용량 농업용수재이용시스템 TEST-BED 사양 및 내용

시스템 품명	사양 및 내용
유입 전처리 시스템	- 송풍기(링 블로워 타입) 0.4Kw × 2대 - 펌프 40m ³ /hr×30mH, 2.2Kw× 1대
원수이송펌프	- 3HP - 30m ³ /hr×27mH, 2.2Kw
필터 시스템	- 자동 역세 필터(디스크 필터) - 25m ³ /hr, 0.4Kw - 미립자성 이물질 제거
나노 버블 시스템	- 라인 믹스 Type - 재이용수 DO 증가 - 토출구경 : (D) = 50mmφ
UV 시스템	-자외선 살균 모듈 -자외선램프 :145watt × 6ea.Lamp
처리 수조	처리수 공급 - Size 1100×1000×1100H - 용량 1m ³ - 3kg/cm ² 압력이송

2.4. 기술권 인증

가. 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 특허

(1) 특허출원

- 특허명 : 농업용수 공급장치를 이용한 하천 및 하수처리장 방류수의 농업용수 재이용 방법 (Method for Reusing The Agricultural Water of Wastewater Effluent and Water of River Using The Agricultural Water Apparatus)
- 등록번호 : 10-1206477호
- 출원인 : 한국농촌공사, (주)블루비에스, 서울대학교산학협력단
- 등록일 : 2012. 11. 23

(2) 발명 상세 설명:

본 발명은 농업용수 공급장치를 이용한 하천 및 하수처리장 방류수의 농업용수 재이용 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 하천 및 하수처리장의 방류수 중에 함유된 미생물 및 부유물질을 효율적으로 제거하며 막의 교체가 필요 없는 오토 스크린 필터부와 처리수의 용존산소량을 증가시키며 세척수로 사용할 수 있는 나노수를 발생시키는 나노 버블제너레이터부를 구비하는 농업용수 공급장치를 이용하여 하천 및 하수처리장 방류수를 농업용수로 재이용하는 방법에 관한 것이다.

2.5. 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 제작 및 성능실험

가. 시제품 제작 및 현장설치

시스템의 각 구성품을 그림 3.12.14~그림 3.12.17로 나타내었으며, 그림 3.12.20~그림 3.12.21은 시스템의 현장 설치 전경을 나타내고 있다.



그림 3.12.14 나노버블시스템

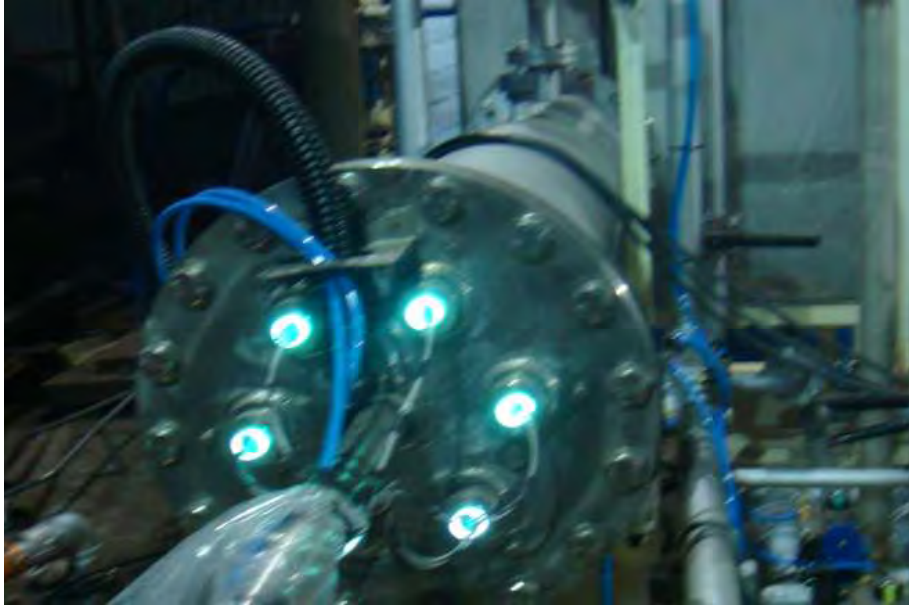


그림 3.12.15 UV 시스템

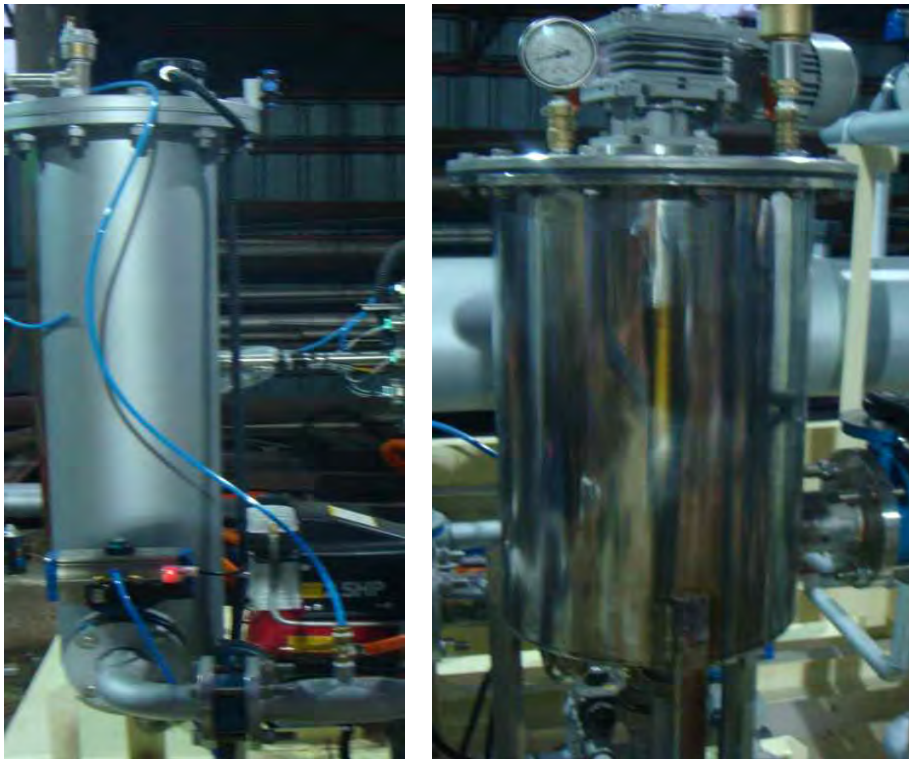


그림 3.12.16 필터시스템



그림 3.12.17 시스템 제어반

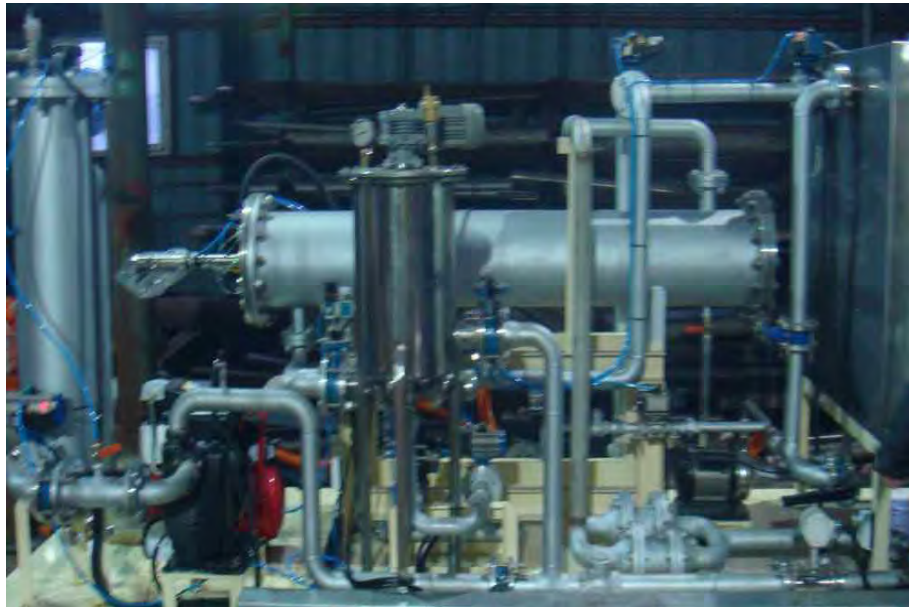


그림 3.12.18 시스템 내부



그림 3.12.19 재이용시스템 하우징



그림 3.12.20 시스템 현장설치 내부



그림 3.12.21 시스템 현장설치 외부전경

나. 시작품 시험 및 검사

대상 지역은 제1협동 기관인 “농어촌 연구원”의 조사 분석을 통하여 선정된 지역에서 실시하였으며, 수행기간은 2012년 5월부터 6월 초까지 약 1개월에 걸쳐 시험 운영을 수행하였다. 대상지역은 도심지역으로부터 유출되는 비점원 오염원으로 인해 강우기인 여름철에 SS가 비교적 높다. 특히 대장균수는 평균 2,753마리로 검출되는 것으로 보아 업체류를 키우는 시설원예지역으로 공급하는데 수처리가 필요한 것으로 판단된다. 대상지역의 영농환경은 개별 농가가 여럿이 모여 단지를 이루고 있으며, 각자 보유하고 있는 양수기를 이용하여 개별 하우스에 공급하고 있어 수질관리 뿐만 아니라 수량의 관리가 어려운 실정이다.

본 지역의 시설재배단지는 20,000 m² 이상으로서 하천과 가까운 하우스는 양수기를 이용해 직접 취수하고 있으며, 비교적 하천과 먼 농가는 천층 지표수를 관정으로 취수하는데 대략 6m 내외에서 취수하고 있다. 본 지역의 토질상황은 양토여서 사질토지역에 비해 수질정화능력이 떨어진다. 따라서 관정을 이용해 취수하는 농가 역시 청정농산물 생산을 위해서 수질관리가 필요할 것으로 보인다. 대부분의 관정을 이용하고 있는 농가는 소규모 필터를 양수기에 달아 이물질 제거하고 있는데 이는 수질정화 능력보다는 공급관 보호를 위해 사용되고 있었다.

또한 대상지점의 대략적인 수질오염현황을 사전에 파악하기 위하여 대상지점 근처의 환경부 자료를 수집하였다. 표 3.12.4는 2012년 Pilot Plant 수질측정값을 나타내며, 그림 3.12.22~그림 3.12.25는 측정된 수질 항목 중 BOD, SS, 총대장균군의 양상을 각각 나타낸다. 표 3.12.4에서 볼 수 있듯이 대상지점의 SS는 비교적 양호하고 BOD 항목을 기준으로 볼 때 하천수 수질등급에서 2급수 정도를 나타내고 있었다. 그러나 이 지점

은 대장균군의 수만은 의외로 많았는데, 이는 대상지점 하류부에 위치한 돈사의 영향 때문인 것으로 판단된다. 그림 3.12.22의 BOD 는 연중 4차, 5차에 가장 높은 값을 나타내었으며 8차, 9차, 10차에 연평균보다 낮은 값을 기록하였다. 그림 3.12.22에서 나타낸 SS는 매회별 차이를 많이 보였으며, 특히 강수가 발생한 날에 가장 높은 값을 나타내었다. 그림 3.12.24의 총대장균군의 경우는 4차 을 제외하고는 대체적으로 비슷한 오염정도를 나타내었다. 현재 시험 운전을 통하여 표 3.12.3과 같이 재처리수 수질 기준에 적합하도록 각 공정별 조건을 조정하여 최적화를 수행하였다.

표 3.12.3 재처리수 수질 기준

구분	생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L)	화학적 산소요구량 (COD) (mg/L)	부유물질 (SS) (mg/L)	총질소 (T-N) (mg/L)	총인 (T-P) (mg/L)	총대장균군수 (개/100ml)
농업용수	8 이하	40 이하	-	-	-	불검출/200 이하
하천유지용수	5 이하	40 이하	-	10 이하	0.5 이하	1,000 이하

표 3.12.4 원수 및 방류수 성상 분석

년/월	BOD		SS		총대장균군		탁도	
	원수	방류수	원수	방류수	원수	방류수	원수	방류수
2012.05.16	3.3	2.4	10.3	6.1	920	0.8	2.5	2.4
2012.05.17	3.5	1.9	12.6	10.4	540	1.0	1.8	1.2
2012.05.18	2.1	1.5	6.5	5.8	5,400	2.0	2.7	1.4
2012.05.21	6.8	3.8	99.2	26.0	480,000	5.0	4.2	2.7
2012.05.22	7.9	1.8	51.8	15.0	13,000	8.0	14.2	5.0
2012.05.23	4.2	2.6	6.5	4.5	30,000	3.0	2.9	1.4
2012.05.24	4.0	2.8	11.8	7.8	2,900	0.0	6.2	4.9
2012.05.30	3.8	2.5	3.9	3.0	270	2.0	4.1	3.3
2012.05.31	5.6	3.8	7.6	5.6	14,000	4.0	5.1	3.6
2012.06.01	7.4	5.1	36	10.4	1,700	0.0	23.1	15.2

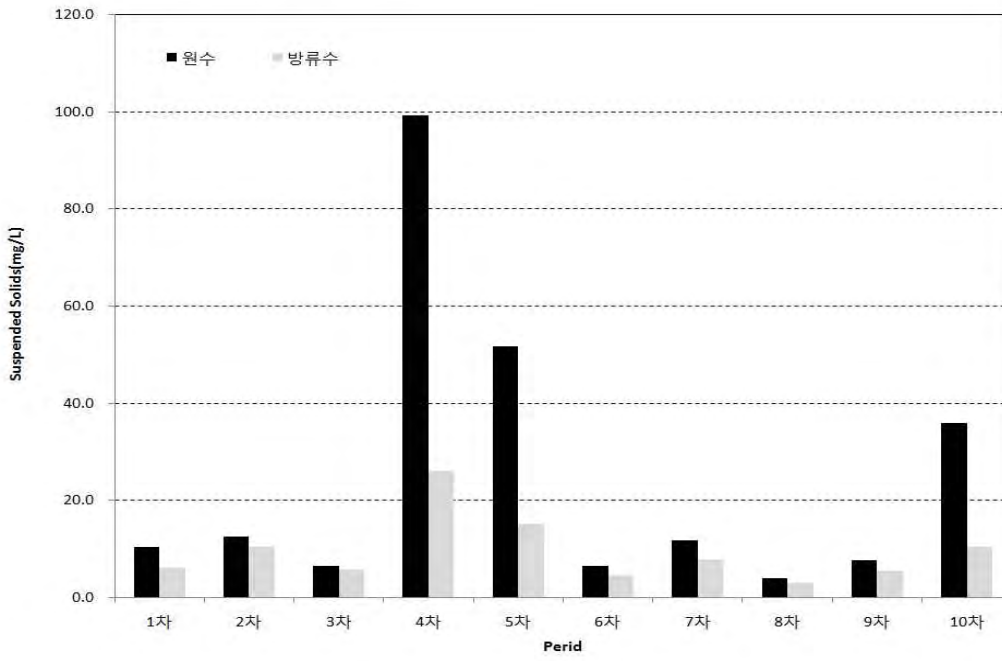


그림 3.12.22 부유물질 수질분석 결과

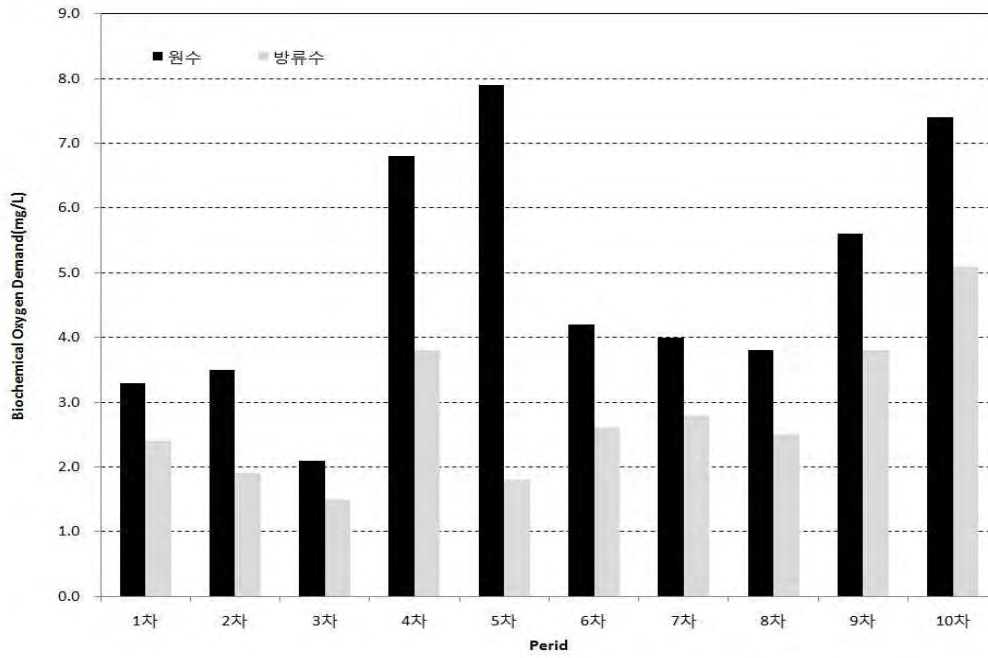


그림 3.12.23 BOD 수질분석 결과

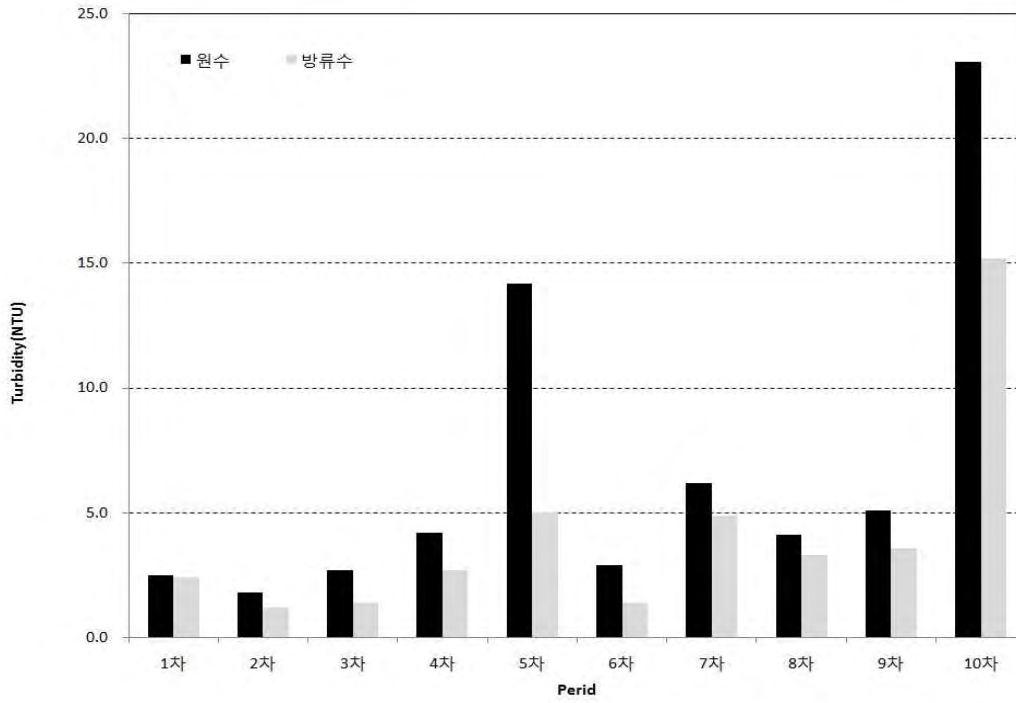


그림 3.12.24 탁도 수질분석 결과

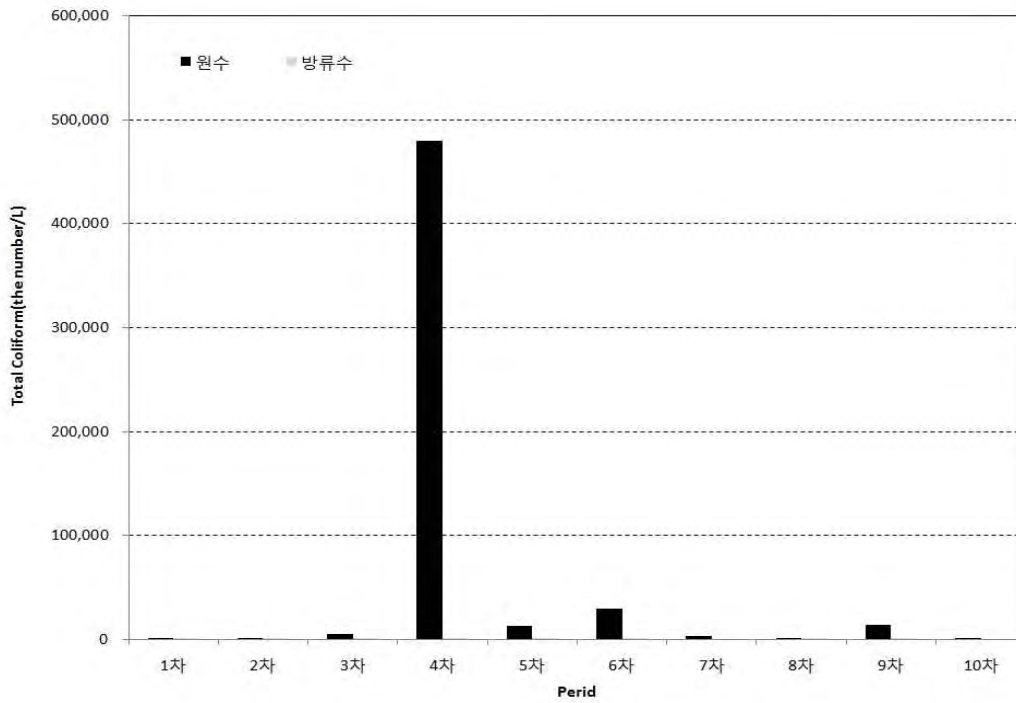


그림 3.12.25 총대장균군 수질분석 결과

2.6. 하천보 활용 소용량 간접시스템 유지관리

아래의 표 3.12.5는 하천보를 이용한 소용량 농업재이용 시스템의 유지관리비를 나타내었다. 일일 운전 전력비는 4,994원/일 (20시간 가동 시)이며 소모품비로는 UV 램프 교체비용이 있으며 연간 UV램프 교체 비용은 780,000원이다. 이를 바탕으로 시스템 전체 월간 유지관리비(24일 가동 시)로 다시 산출하면 184,856원이 나오는 걸 볼 수 있다.

표 3.12.5 시스템 전력비

(단위 : 원)

기기 명칭	대수 (예비)	소요 동력 (kW)	동력 부하 (kW)	운전 시간 (hrs)	사용 전력 (kWh)	부하율	단 가 (원/kWh)	전력비 (원/일)
원수공급펌프	1	2.2	2.2	20	44	0.75	38.4	1,267
이송펌프	1	2.2	2.2	20	44	0.75	38.4	1,267
송풍기	2	0.4	0.8	20	16	0.75	38.4	461
전처리스크린 필터	1	0.4	0.4	20	8	0.75	38.4	230
에어컴프레샤	1	2.2	2.2	20	44	0.75	38.4	1,267
UV시스템	6	0.145	0.87	20	17.4	0.75	38.4	501
총 계	12	7.545	8.67	20	173.4	0.75	38.4	4,994

※농사용 전력 38.4원/kWh

표 3.12.6 시스템 소모품비

(단위 : 원)

구 분	수 량	단 가	년간 금액	비 고
UV램프	6E/A	130,000	780,000	램프수명 12개월
계			780,000	

3. 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템

우리나라에서는 극히 제한된 범위의 하수 재이용기술이 활용되고 있다. 국토교통부는 1992년경 우리나라 하수재이용과 관련하여 수질기준을 제시하였다. 여기서는 수세식 변기 세척수, 살수용수, 조경용수 등의 수질기준을 포함한다. 그 밖에도 하수처리수의 농업용수나 하천유지용수로의 활용을 위한 시도가 이루어지고 있다.

이와 같이 하수의 재이용은 기술적, 경제적, 환경적 측면에서 농업용수 또는 하천유지용수 등의 목적으로 활용가능성이 높음에도 불구하고, 농업용수와 하천유지용수로의 활용을 위한 기반기술의 부족으로 인하여 실현되지 못하고 있는 현실이다.

생활하수의 농업용수 재활용에서는 중수도 시스템과 같은 고 비용시설과 고 운영비용으로는 경제성에 문제가 있을 수 있다. 현재 농업용수 이용료는 원칙적으로 국가의 부담이며, 원수사용비용은 고려되지 않고 있다. 따라서 지나친 고비용 재활용시스템의 현장적용은 농업용수의 이용시기의 제약, 비용문제 등이 우선적으로 고려되어야 할 것이다.

이에 본 시스템은 하수처리수 간접재이용의 방법으로 하천의 물을 이용하기 위해 양수하여 관개하는 시설인 양수장의 펌프를 활용하여 중대용량의 농업재이용시스템을 공급하고자 한다. 본 시스템은 부유 물질제거 및 살균소독 시스템으로 구성되며, 농업용수로 이용함과 하천이나 하수처리장 처리수를 정화하여 농업용수로 이용하는 시스템이다. 본 시스템은 하천수를 취수하여 멀티클론과 나노제너레이터 혼합 시스템으로 부유물질을 제거하고 전기 전해장치에서 살균 처리된 깨끗한 물을 농가에 공급하는 시스템이다. 주요 기술인 멀티사이클론은 디스크 필터 및 섬유여과 필터 등 다른 장치에 비하여 그 구조가 간단하고 유지관리가 쉬어 다양한 분야에 적용 할 수 있을 것으로 보인다.

본 시스템은 제1협동 기관인 “한국농어촌 공사 농어촌 연구원”으로 공정 기술 및 설계를 바탕으로 제작하였다. 제작 기간은 2013년 01월부터 2013년 3월까지 약 3개월이 소요되었으며, 제1협동의 조사 및 분석을 통하여 수원외 병점양수장에 설치하여 운전을 수행하였으며 농업재이용 시스템의 시험 운전은 2013년 05월부터 06월 초에 걸쳐 수행하였으며, 일 운전 20시간동안 운전을 수행하였다.

3.1. 양수장 활요중대용량 농업재이용시스템 규격 및 설계

표 3.12.7은 중대용량 농업용수재이용시스템 Pilot 규격을 간략히 서술하였으며, 그림 3.12.26, 그림 3.12.27은 양수장을 이용한 중대용량 농업재이용 시스템 처리공정으로 표현한 것으로 원수를 흡입하여 유입 펌프 시스템→멀티사이클론 시스템→나노버블 시스템→전해조 시스템→용수 공급의 공정을 거쳐 처리 및 공급이 이루어지도록 구성되었다.

표 3.12.7 중대용량 농업용수재이용시스템 Pilot 규격

품 명	단위	수량	형식	규격
중대용량 농업재이용시스템	LOT	1	동력	L1,300×W1,100×H1,820

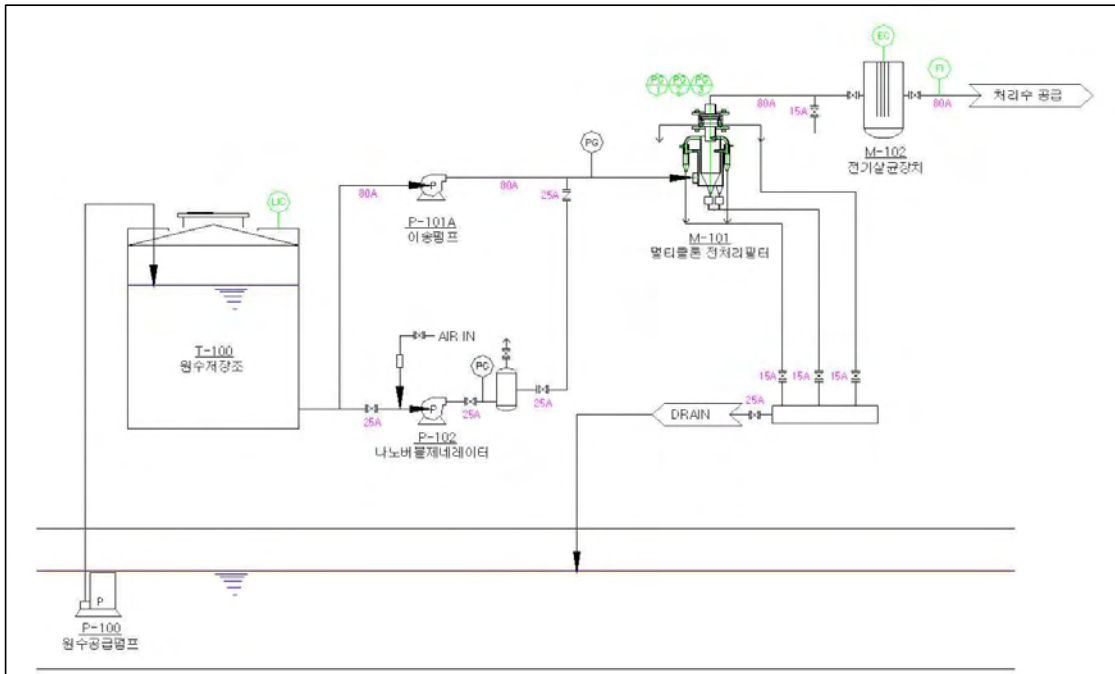


그림 3.12.26 시스템 레이아웃

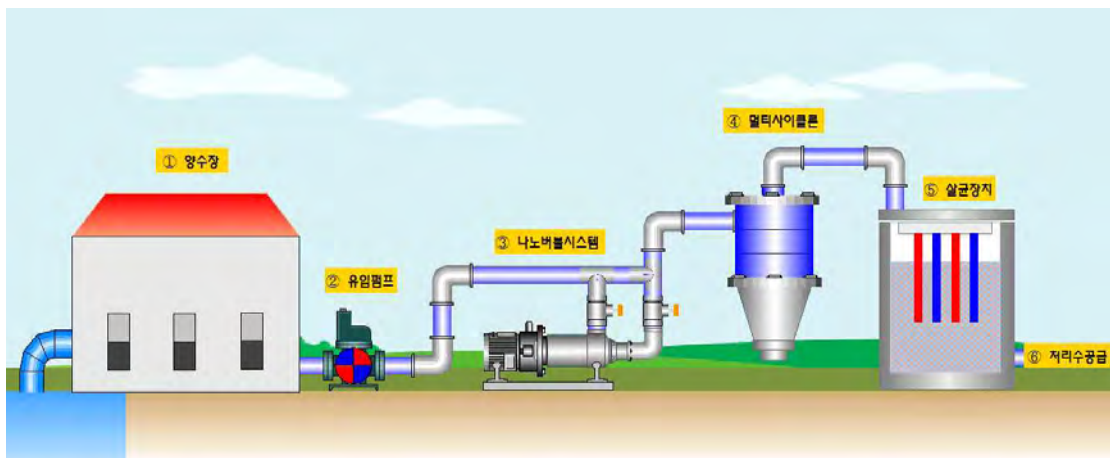


그림 3.12.27 양수장을 이용한 중대용량 농업제이용 시스템 공정도

3.2. 공정별 제작

멀티 사이클론 시스템의 구성은 유입펌프시스템, 멀티사이클론 시스템, 나노 버블시스템, 전해조 시스템, 용수 공급 시스템으로 구성되었으며, 각 공정의 상세 내용은 다음과 같다.

가. 유입 펌프 시스템

유입펌프를 통해서 원수를 공급하는데, 이 때 마이크로나노버블 10~30%가 혼입되도록 하고, 멀티사이클론 장치에 원수가 유입되도록 한다.

- 형 식 : 입형다단 펌프

- 용 량 : 36 m³/h
- 양 정 : 30 m
- 수 량 : 1 대
- 운전방법 : 자동운전 및 수동스위치 조작운전
- 전 동 기 : 380 V, 60 Hz, 3 HP, 2.2 kW

나. 멀티사이클론 시스템

(1) 사이클론의 개요

사이클론은 기술적으로 다양한 현장에 넓게 이용하고 있다. 예를 들자면 gas cleaning, burning, spraying, atomizing, powder classification 등에 이용한다. 사이클론은 고-액분리에 또한 이용된다. 사이클론은 액상을 처리하기 위해 특별히 고안되었는데 이를 수력학적 사이클론이나 하이드로사이클론이라 명명한다. 사이클론의 기본적인 분리 원리는 원심력 침전이다. 즉, 부유입자들은 유체로부터 그 입자들을 분리시키게 하는 원심가속도의 영향을 받는다. 원심분리기와 다른 점은 사이클론에는 움직이는 부분이 없고, 유체 자체의 힘에 의해서 필요한 선회운동(vortex motion)이 이루어진다.

그림 3.12.28은 전형적인 Hydro cyclones의 설계 단면도를 나타낸다. Hydro cyclones은 원추부에 실린더가 결합된 형태로 되어있다. 유체속에 있는 부유입자는 실린더 상단에 위치한 유입구를 통하여 접선방향으로 유입된다. 접선방향유입으로 인해 강력한 소용돌이 움직임이 사이클론내부에서 일어난다. 미세입자를 포함한 유체의 일부는 중앙상부에 고정되어 있는 실린더관을 통하여 배출되게 되고, 실린더 내부로 약간의 거리를 두게 된다. 여기서 이 배출관을 overflow pipe 또는 vortex finder 라 부른다. 잔존하는 액상이나 굵은입자는 원추부 아래쪽에 위치한 원형개방부를 통하여 제거되는데, 이 부분을 underflow orifice (하부 유출구)라 부른다

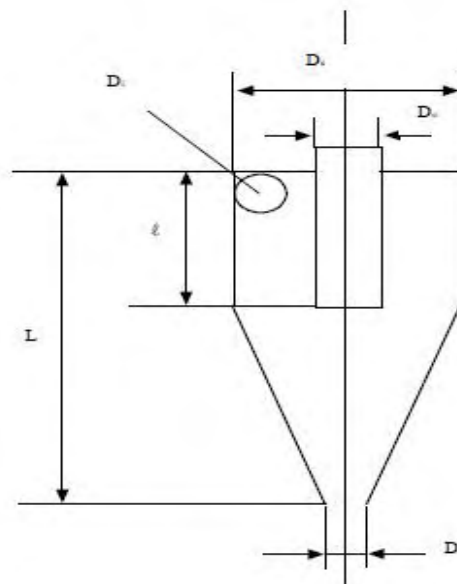


그림 3.12.28 일반적인 사이클론 모식도

(2) Hydrocyclone의 전형적인 크기와 적용범위

개개의 사이클론 직경은 10mm~2.5m 범위이고, 대부분의 고형물의 절단입경(d50)은 2 ~ 250 μ m, 유량(용량)은 0.1~7200 m³/h 범위이다. 공업적으로 가장 중요한 각종 입자들의 크기는 약 1000~0.1 μ m 사이에 있는 입자의 크기이다. 운전 압력 강하는 0.34 ~ 6bar 이고, 큰 hydrocyclone보다는 더 작은 hydrocyclone에서 대개 고압으로 운전된다. 여러 Hydrocyclone을 통해 얻어진, 사이클론의 크기와 설계, 운전 조건, 그리고 분리되는 고형물의 특성에 의존하는, 하부 고형물 농도는 거의 부피비 45~50%을 초과하지 않는다.

Hydrocyclone의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는 직렬 또는 병렬로 연결한 다단 사이클론을 사용하는 것이 때때로 가장 좋은 방법이 된다. 정화공정에서 예를 들면, 병렬연결은 효율이 더 좋은, 직경이 더 작은 사이클론으로 하여금 높은 유량을 처리하기 위해 사용가능하게 한다. 반면에 직렬연결은 정화 시에 총 회수율을 향상시키기 위해 또는 더 농축된 하부유출과 더 깨끗한 상부유출을 동시에 만들기 위해 또는 고형물을 세척하기 위해 또는 분류 또는 소팅을 더 정확하게 하기 위해 사용된다.

(3) 장점과 단점

Hydrocyclone의 상대적인 장점은 다음과 같다. 첫째, Hydrocyclone은 응용분야에서 액체를 정화하기 위해, 슬러리를 농축하기 위해, 고형물을 분류하기 위해, 고형물을 세척하기 위해, 2가지 혼합되지 않는 액체를 분리하기 위해, 액체로부터 탈가스 시키기 위해, 또는 밀도나 형태에 따라 고형물을 소트(sort)하기 위해 사용될 수 있다는 점에서 매우 다목적으로 사용된다. 둘째, Hydrocyclone은 구입, 설치, 운전이 싸고 간단하며, 유지와 부대장비를 거의 필요로 하지 않는다. 셋째, Hydrocyclone은 다른 분리장치보다 상대적으로 크기가 작으므로, 예를 들면, 중력 침전조이상의 조절 속도라는 점에서 장점을 주는 공간절약 및 낮은 체류시간으로 운전이 가능하다. 넷째, 전단력은 어떠한 고형물 덩어리도 파괴할 수 있기 때문에, 흐름내의 높은 전단력이 존재하는 것은 고형물 분류에 있어서 장점이 되고, thixotropic과 Bingham 플라스틱 슬러리의 처리에서도 또한 그러하다 Hydro cyclone의 단점은 다음과 같다. 첫째, 일단 사이클론이 설치되고 운전되면, 유량과 유입수 농도에 사이클론의 분리 운전이 강하게 의존하고 있기 때문에 낮은 강하비(turn-down ratios)를 나타내므로, 어느 정도 고정적이다. 즉, 유입 유량과 고형물 농도의 불안정에 일반적으로 민감하기 때문에, 사이클론은 또한 고정적이다. 둘째, sharpness of cut , 운전 절단 입경범위, 탈수 운전 또는 정화 동력이라는 관점에서 분리 운전 시 한계가 존재한다. 즉, 이러한 특징 중 몇 가지는 다단 배열을 통해 향상될 수도 있지만, 추가적인 동력 및 투자비용이 필요하다. 셋째, 마모, 마찰에 민감하다. 하지만, 마찰의 영향을 감소시키기 위한 단계들을 취할 수도 있다. 넷째, 중력 농축조의 경우에서와 같이 응집은 분리를 강화시키기 위해 사용될 수 없으므로(대부분의 플록이 전단력을 견디지 못하는 것과 같이), 전단력의 존재는 때때로 단점으로 작용한다.

(4) Hydrocyclone의 적용범주

Hydrocyclone을 이용하고 있는 곳은 광산, 상하수도처리, 공업용수, 폐수처리, 펄프 등의 공업에서 분리, 농축, 정화 등 미립 고체를 회수하는데 많이 이용되고 있다. 최근에는 고-액 분리 이외에 액-액 분리나 기-액분리에도 이용하고 있다. 또 사이클론을 변형한 형태로 사이클론 내부로 공기를 불어넣어 부상분리와 사이클론을 접목한 ASH (Air Sparged Hydrocyclone)나, 사이클론의 모양을 특수하게 제작하여 사용하는 사례가 나오고 있다. 산업에서 Hydrocyclone의 적용분야들은 부유성 매질인 액체와의 크게 8가지 범주의 2상 분리로 나뉜다. ① 액체 정화, ② 슬러리 농축, ③ 고형물 세척, ④ 입자 크기에 따른 고형물 분류, ⑤ 밀도 또는 입자 모양에 따른 고형물 분류, ⑥ 입자 크기 측정 (off-line 또는 on-line), ⑦ 액체로부터 가스추출, ⑧ 두가지 혼합하지 않는 액체의 분리

위에 열거된 각각의 적용분야는 특정한 필요조건과 목표를 가지고 있고, 그러한 적용분야로 인해 각각의 경우에 대해서 사이클론을 최적화시키기 위해 사이클론의 설계와 운전에서 변화가 요구된다. 원칙적으로 모든 Hydrocyclone은 상간의 밀도 차에 기초하여 액체(연속상)로부터 분산상의 입자들(고형물, 작은 물방울, 가스 방울)을 분리하고, 그러한 분리는 입자의 크기(또는 시스템이 균질하지 않다면 입자의 밀도)에 매우 의존적이다.

(5) 농업용수재이용 멀티사이클론 제작

본 시스템은 원수가 유입되면서, 각 단계의 사이클론이 작동하게 되고, 원심력과 월류에 의하여 처리수가 상승하여 단계별로 입자성 물질을 제거하도록 구성되었다. 1단계 사이클론은 사이클론 바디에 해당하는 월류조와 월류조 하부 측면에 드레인과 상부에 위치한 월류관으로 구성되어 있으며 마이크로 나노버블 제너레이터와 원수가 혼합되는 장치와 연결되어 있는 것이 특징이다. 1단계 사이클론은 모래 등과 같이 비중이 물보다 큰 입자를 제거하며 하부에 드레인으로 사이클론에 의한 원심분리로 침강된 부유물질을 배출시키며 상부로는 처리수의 상층액을 월류관을 통해 2단계 사이클론으로 배출된다.

2단계 6개의 사이클론이 장착되었으며 각 사이클론은 1단 사이클론의 월류관과 연결되며 월류조의 둘레에 일정 간격으로 장착되어있다. 마이크로 나노버블이 함유된 1차 처리수가 2차 각 사이클론으로 유입되어 원심분리되면, 측면에 형성된 드레인을 통해 물보다 비중이 낮은 물질과 거품이 제거되며, 이보다 비중이 높은 물질은 하부에 형성된 드레인으로 침강되어 제거되고, 처리수는 원심력에 의하여 상승하면서 3단계 사이클론으로 배출된다.

3단계 사이클론은 1개로 구성되어 원심분리가 이루어지며, 부유물질이 제거된 처리수는 상승하여 4단계 사이클론으로 바로 유입되고, 미립자를 포함하는 이물질은 하부로 침강하여 드레인으로 배출하게 된다. 3단계 사이클론의 드레인은 월류조 내부를 관통하여 월류조 하부까지 이어져 외부로 통하는 구조로 형성되어 있다. 따라서, 월류조는 처리수가 체류하는 공간과 3단계 사이클론의 드레인이 형성하는 공간으로 구성된 이중구조의 특징이 있다.

4단계 사이클론은 스페이스, 사이클론 상부, 사이클론 바디 및 사이클론 하부의 4단으로 구성되어 있으며 4단계 사이클론은 사이클론 바디의 중앙에 처리수가 유입되도록 관통형으로 형성되며, 벽면 내측에 20개의 사이클론이 일정간격으로 장착되어 있으며, 특히 각 사이클론 하부 둘레에 형성된 드레인과 맞도록 장착되어 있다.

3단계 사이클론에서 유입된 처리수는 4단계 사이클론 하부로 유입되다가 사이클론 바디에 이르러서는 사이클론 상부에 의하여 흐름이 막히면서 더 이상 상승하지 못하고, 사이클론 바디의 둘레에 장착된 사이클론으로 월류되어 사이클론 내부로 들어가게 되며, 이 때 미립자성 이물질은 하부의 드레인으로 배출되고, 4단계 처리수는 상승하여 사이클론 상층부에 형성된 배관을 통해 스페이스로 이동하여 배출된다.

(가) 구조

① 멀티 다단 사이클론으로 1단계 제거 공정에서 비중이 1보다 높은 고형물질은 조하부의 드레인으로 배출되며, 마이크로나노버블에 흡착된 부유물질과 비중이 낮은 물질은 월류조에 일정시간 체류한 다음 2단계 제거 수단으로 상기 월류조 상부의 측면에 위치한 월류관을 통해 처리수를 유입시키는 구조로 6개 이상의 사이클론이 장착되어 있으며, 3단계 제거수단은 1개의 사이클론이 원심분리가 되는 구조로 제작되었다.

② 원통형 구조로 분해 조립 등이 용이하도록 한다.

③ 멀티 사이클론 유니트와 나노제너레이터 MODULE 본체로 구성되어 있고 분배 및 조립 설치가 가능하도록 한다.

④ 본체는 펌프모터와 베이스 프레임으로 구성되어 있으며 원수 이송펌프는 제어반에 연결되어 제어반의 조작에 의하여 구동되도록 한다.

⑤ 사이클론은 스페이스 사이클론 상부, 사이클론바디, 및 사이클론 하부의 4단 구성으로 제작되어야 한다.

⑥ 최종단계 제거수단의 사이클론은 바디의 중앙에 처리수가 유입되도록 관통형으로 제작되며 벽면 내측에 10~20개이상의 사이클론이 일정한 가격으로 장착되어야 한다.

⑦ 3단계 제거 수단에서 유입된 처리수는 최종단계 제거수단의 사이클론 하부로 유입되다가 사이클론 바디에 이르러서는 사이클론 상부에 의하여 흐름이 막히면서 더 이상 상승하지 못하고, 사이클론 바디의 둘레에 장착된 사이클론으로 월류되어 사이클론 내부로 들어가게 하는 구조이다.

⑧ 운전은 원수공급펌프에 의해 유입되며, 균일하게 사이클론 바디를 통과 후 상부 처리수 유출구로 유출시키는 구조이다.

⑨ 각 단계에 형성된 드레인이 개방된 상태에서 원수유입펌프를 통해서 원수를 공급하며 또한 나노버블 10~30%가 혼입되도록 하는 구조로 제작되어야 한다.

⑩ 멀티 다단 사이클론은 수직으로 설치되는 구조로 유입 이송펌프의 유속과 압력으로 부유물질을 제거하는 구조로 제작되어야 한다.

⑪ 설치되는 부분인 본체, 사이클론 모듈, 이송배관은 내구성을 가진 재질로 제작되어야 한다.

⑫ 멀티다단사이클론에 부착된 모든 배관과 VALVE, 유량계는 시스템에 적절한 요소로 한다.

⑬ 멀티 다단 사이클론의 재질은 내약품성, 내 미생물침식성을 갖는 소재의 재질로 제작한다.

⑭ 사이클론 모듈의 세척은 운전 전·후 모듈 내부를 깨끗하게 크린닝되어 사이클론 운전 시 부유물질이 제거될 수 있는 구조로 제작되어야 한다.

⑮ 모든 운전은 TIMER와 유량계에 의하여 자동운전과 병행하여 수동운전이 이루어질 수 있도록 판넬을 구성하여야 한다.

⑯ 운전은 24시간 연속운전이 되어야 하며, 문제 발생 시 알람기능으로 경보 및 BY-PASS 운전되도록 설계되어야 한다.

⑰ 자동 / 수동 운전이 가능하도록 PUMP, AIR VALVE, 자동 VALVE등에 ON, OFF 스위치를 설치한다.

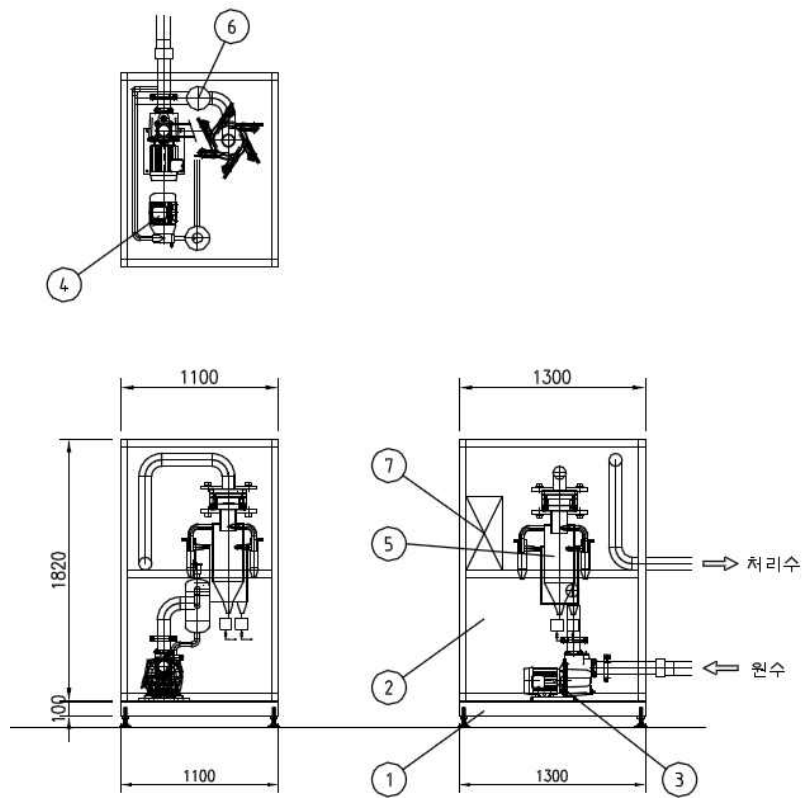


그림 3.12.29 멀티 사이클론 단면도

(나) 재 질

- | | |
|-------------|------------|
| ① 본체 및 내부장치 | STS304 |
| ② 배관 | STS304 |
| ③ 이송 펌프 | STS304 |
| ④ 멀티크론 재질 | STS304 |
| ⑤ Valve | Auto Valve |
| ⑥ 제어 판넬 | STS304 |

(다) 설계조건

- ① 처리용량(Q) = 1,000 m³/일
- ② 여과기 가동시간 = 20 hr/일
- ③ 부유물질 유입조건
유입수 SS = 20 mg/l 이내, 처리수 SS = 5 mg/l 이하
- ④ 가동조건 : 20 HR 연속운전이며 LEVEL "H"에서 ON, LEVEL "L"에서 OFF

(라) 멀티사이클론 특징

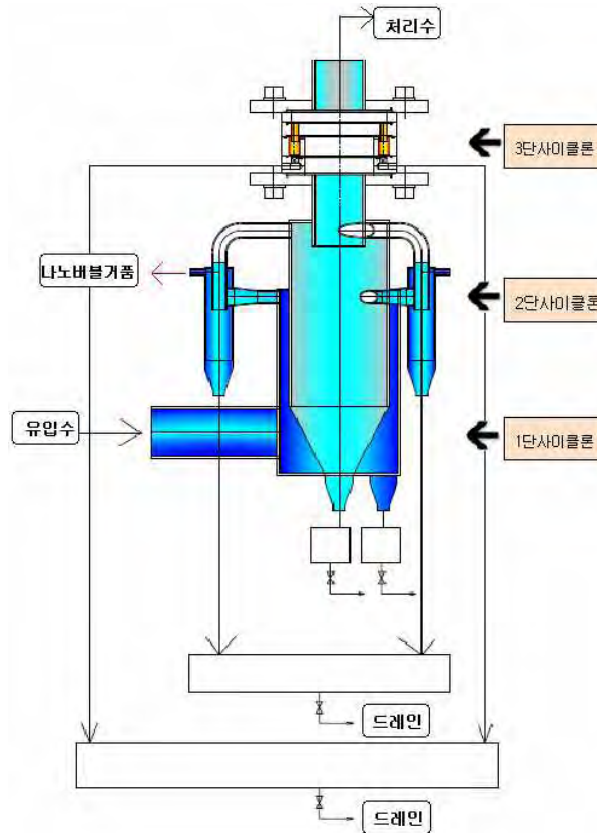


그림 3.12.30 다단멀티사이클론 단면도

다단사이클론의 구성

- 1단 사이클론 (D:267mm) 1개 : 마이크로버블+ 유입수내의 모래등 굵은 입자제거
- 2단 사이클론 (D:61mm)6개: 중간입자제거+ 거품 및 가벼운 비중의 이물질 제거
- 3단 사이클론 (D:22mm)20개: 미립자 제거

→ 입경이 작은 먼지는 원통경이 작을수록 제어 용이

① 특징

- MNC-SYSTEM은 버티컬형으로 설치되며 유속과 압력을 이용하여 단계별 Particle 제거하는 구조
- 처리수는 빠른 유속과 멀티클론 입경으로 부유물질 (SS)이 여과된다.
- 침전된 SS는 1일 4~10회 세척 후 배출된다.

- 세척은 일정한 압력 상승 및 타이머에 의한 멀티클론 자동 세척 방식 도입
- 전처리에 필요한 요소에 사용함으로써 안정적인 처리수질 확보 가능에 따른 후 처리
- 부하량 저감효과 및 응집제와 함께 개별 시스템으로 사용시 인 제거에 매우 효과적이다.

② 멀티클론의 적용분야

- 하수 및 오수 폐수의 전처리 및 부유물질 제거
- 지하수 정수장 생수업체 음용수 생산설비
- 고도처리 및 막 분리 전처리설비
- 수영장 헹집 등의 청정유지 재순환 설비
- 발전소, 제철소등의 냉각·순환수
- 농업용수 여과 시스템
- 기타 공업용수 전처리 시스템

철강 및 산업폐수 산 (불산, 황산 기타) 처리 재활용 시스템

농업용 나노 멀티사이클론 시스템은 농업용수 공급 목적으로 하천의 용수를 원수로 사용하는데 물 성상의 대부분이 모래 또는 뽕 같은 비중이 있는 입자성 물질로 농업용수 최종처리수 공급을 목적으로 하므로 제거 입자 사이즈는 $1.1 * 2\text{mm}$ 이다

다. 나노버블펌프시스템

유입수는 1단계 사이클론으로 유입되기 전에 10% 내지 30%의 농도로 마이크로나노 버블이 혼입된 것을 특징으로 한다. 따라서 1단계 사이클론은 마이크로나노버블 발생기와 원수가 혼합되는 장치와 연결되어 있는 것을 특징으로 물보다 비중이 높은 입자성 물질을 제거하고, 이를 통과한 처리수는 바로 월류조로 유입되어 수집되며, 마이크로나노버블이 혼입된 처리수의 상층액은 월류조 상부에 위치한 월류관을 통해 2단계 사이클론으로 유출된다.

마이크로 버블이란 일반적으로 눈으로 확인할 수 있는 기포가 2 mm 미만인데 반하여, 직경이 $50 \mu\text{m}$ 미만으로 $1 \mu\text{s}$ 의 짧은 주기로 결합, 분열, 파열의 연쇄반응을 발생하는 우유빛의 미세한 기포로서, 수중에서 압력에 의하여 축소되어 다양한 에너지를 발생시키며 소멸하는 특징이 있는데, 빠르게 수면으로 상승하여 파열되는 일반 버블에 비해 상승속도가 느리고, 수 분 또는 수 시간 동안 유지되며, 나노 버블은 직경이 $5 \mu\text{m}$ 미만으로 수중의 상, 중, 하층에 분산 용해되는 특징이 있다. 수개월 동안 존재할 수 있다.

마이크로나노버블은 물에 녹아 있는 기체의 용해도는 압력이 증가함에 따라 증가한다는 헨리(Henry)의 법칙을 이용하여, 10~30초 동안 $4.2 \sim 6.3 \text{ kg/cm}^2$ 의 높은 압력을 가하다가 대기압 상태로의 갑작스런 압력 감소에 의하여 발생시킬수 이 있으며, 40 KHz의 초음파와 140 db의 높은 음압 및 순간적으로 4000 내지 6000도의 고열이 발생하는 특징이 있다.



그림 3.12.31 마이크로 나노 버블의 특징

(1) 설계조건

- 용 량 : 2.4 m³/h
- 양 정 : 100 m
- 수 량 : 1 대
- 운전방법 : 자동운전 및 수동스위치 조작운전
- 전 동 기 : 380V, 60Hz, 3HP, 2.2 kW

(2) 나노버블펌프시스템 특징

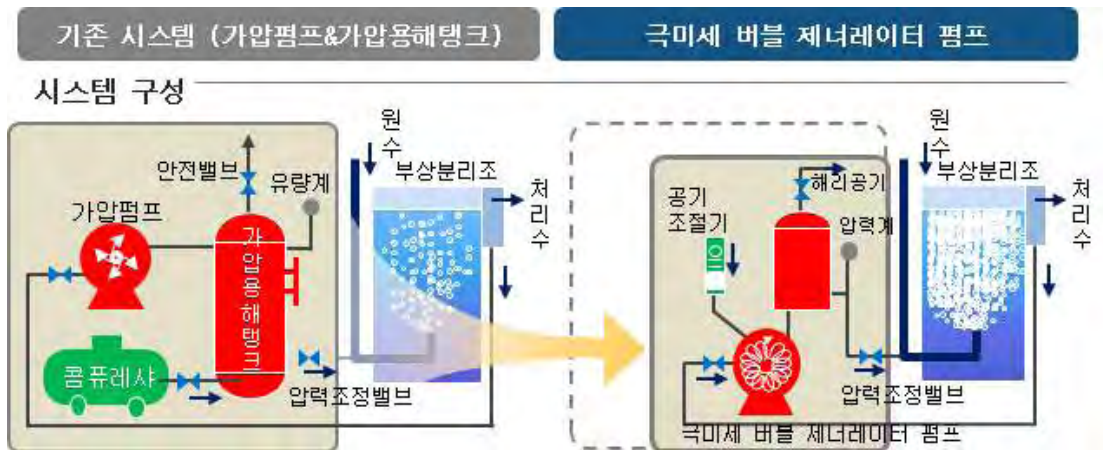


그림 3.12.32 기포발생펌프시스템 구조 비교

- 외부공기 유입장치 없이 자동 흡입에 의한 극미세 기포 발생장치
- 기존 동력 펌프 대체 및 보조사용으로 배관 스케일 방지 효과
- 1~60m³/hr의 용량 별 모델 보유
- 콤프레샤, 이젝터, 고정믹서, 대용량의 가압탱크가 필요 없음
- 콤팩트 한 구성으로 설치면적이 적음
- 시스템 운전이 단순하며 유지 보수가 용이
- 미세기포 크기: 10~20마이크론

표 3.12.8 기포 발생법 비교

	기존 기포발생 방법	극미세 기포발생 방법
구조	-컴프레샤,고정믹서,이젝타및대형가압용해 탱크 -탱크내에서 가스용해하는데 3~5분 소요	- 3가지 역할 (가스혼입, 믹싱, 혼합) - 잉여공기를 위한 소형 탱크
산소 용해 방식	-공기구역과시간을이용하여가압탱크내부에서가스를용해시킴	- 가압효과의 믹싱 효과가 있는 터빈펌프를 사용하여 펌프 내부에서 가스를 용해시킴
운전및 유지보수	-운전시작과 정지시에 공기와 물의 압력을 조정하는 어려운 작업 필요 -가압탱크 내부의 공기를 고정해야 하며 기포발생까지 시간이 걸림	-최초 설치 후 저렴한 유지보수 비용 -가동 후 즉시 양질의 미세기포들이 발생
설치 면적	- 대형 탱크와 많은 구성요소로 설치공간이 큼	-규모가 작고 구성품이 적음 비교적 가볍고 적은 설치 공간
소음	-공기를 콤프레샤로 가압 투입해야 하므로 소음이 큼	-콤프레샤를 사용하지 않는 자동공기 흡입으로 소음이 적음
유지비용	-모터, 콤프레샤 전력 소모	-모터 전력만 소모

라. 전기분해 살균장치

전기분해 살균장치는 전기분해조, Cabon Module, 카본세정장치로 구성되어 있다. 전기분해살균장치에 투입된 카본 표면에 직류전류를 통하게 하여 계속적으로 카본에 전기 화학적 용해작용을 하며 양극의 카본 표면에서 (+)전하와, (-)전하 전류의 흐르게 함에 따라 유입수에 함유되어 있는 대장균 및 일반세균을 살균소독과 미생물 억제한다. 전기분해 살균장치의 원리는 염소, 오존 살균시스템과는 달리 자연 상태의 물을 첨가물 없이 단순 전기분해만으로 직접 균을 사멸하는 시스템으로 전기장의 형성으로 인하여 발생된 전자에 의한 사멸, 발생되는 라디칼에 의한 사멸, 촉매 전극 자체의 산화력에 의한 사멸 등 총체적으로 균을 사멸하는 유기적인 시스템이다.

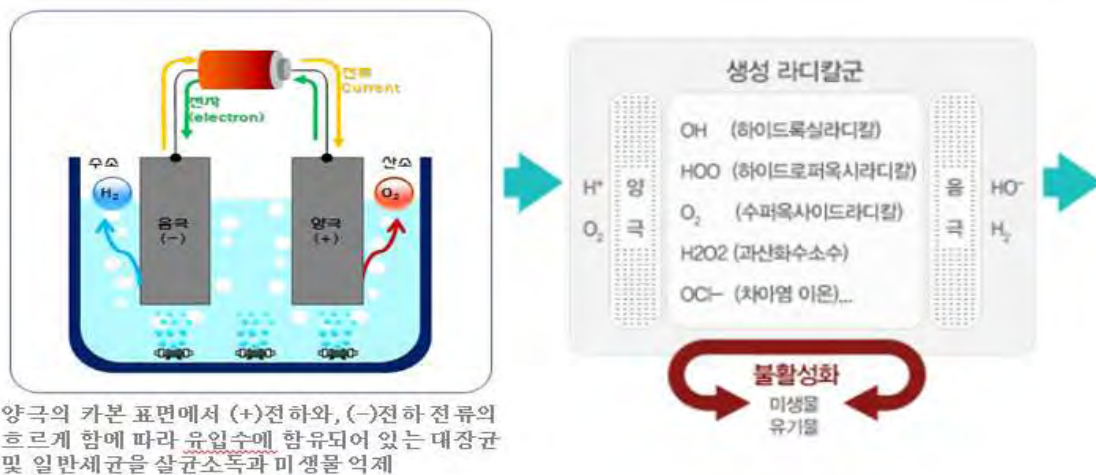


그림 3.12.33 전기분해 살균장치 원리

Cabon Module은 유수와 수직으로 설치되어지고 카본은 물에 완전히 잠기도록 길이를 확보하여야 한다. 모듈의 상부에는 여유 공간을 확보하여 카본필터의 교체를 원활히 할 수 있어야 한다. 카본 모듈과 전기 연결은 절연 구조를 가지고 있으며 카본 모듈과 교체가 쉬운 분리형으로 구성되어 있어야 한다. 카본모듈은 전기분해 및 흡착의 성능을 가진 큰 PLATE 모양으로 전기분해조에서 카본과 반응하여 수중의 대장균 및 미생물을 제거한다. 카본모듈의 벌크 밀도는 1.85, 경도 60, 탄력성 1,200으로 제작되어 대장균 및 미생물을 제거에 있어 전극효율을 극대화시킬수 있어야 한다. 전기분해조에는 Flog-Flow를 형성시키기 위한 흐름 안정장치(정류판)와 수위 제어용 월류 웨어가 설치되어야 하고, 카본 전기 모듈은 반응조 상부에 STS 판에 고정 장치에 매달려 있으며 반응조에 수직으로 연결되고 완전히 밀봉되어야 한다. 외적인 충격에 의해 카본 등의 설비가 파손이 되지 않도록 충분한 강도를 갖고 있어야 하며, 카본 전기 모듈은 일정한 배열로 반응조 벽면에 볼트를 이용하여 조립되어야 한다. 카본 모듈은 대장균 및 미생물 제거가 우수한 모델을 적용하여야 하며 유수의 길이 방향으로 방류수의 흐름에 수직으로 배치되면서 좌우 균일한 간격의 배열로 구성되어야 한다. 전력공급 판넬은 팬으로 냉각되며 외형은 STS 304재질로 제작되어야 한다.

(1) 설계조건

- V 전압 : 0~24V
- A 전류 : 0~5A
- 단자재질: Carbon
- 단자크기: 100*400*10T
- 유효면적: 1200cm²

마. 제어반

전기 공사를 포함하는 제어반 시스템은 K.S. (KOREA INDUSTRIAL STANDARD), J.I.S. (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD), A.N.S.I. (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE), N.E.M.A. (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURE ASSOCIATION)의 규격을 적용하였다. 제어반은 각 공정을 자동화하여 수동 조작 및 자동 운전이 가능하도록 조절할 수 있다.

(1) 인버터 (INVERTER)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : SV-iG5A
- 형식 : PID제어내장

(2) 차단기 (MCCB)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : ABS TYPE
- 형식 : 표준형

(3) 과전류계전기 (OVERLOAD REALY)

- 제조사 : LS산전
- 보호기능 : 과전류, 결상

(4) 전자접촉기 (CONTACTOR)

- 제조사 : LS산전
- 모델명 : GMC-9 외
- 형식 : 표준형

(5) 선택스위치 (SELECTOR SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 취부 외경 : 25 ϕ
- 정격전압 : AC 600V

(6) 비상 누름 버튼 스위치 (EMERGENCY SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 형식 : LOCK TYPE
- 취부외경 : $\phi 25$

(7) 조광형 누름 버튼 스위치 (PUSH BUTTON SWITCH)

- 제조사 : KACON
- 형식 : LED LAMP TYPE
- 취부외경 : $\phi 25$,
- 색상 표시 : 운전(RED), 정지(GREEN), 고장(YELLOW)

(8) 부저 (BUZZER)

- 제조사 : KACON
- 형식 : 매입형
- 취부외경 : 25 ϕ

(9) 지시계기류 (VOLT METER, AMPERE METER)

- 제조사 : 대봉전기
- 형식 : 광각형 (110 x 110) & (80 x 80)
- 눈금 : (전압계 : FULL SCALE - 600V)

(10) 변류기 (CT)

- 제조사 : 대봉전기
- 정격 2차전압 및 정격부담 : 5A, 5VA
- 오차계급 : 3.0급

(11) 타이머 (TIMER)

- 제조사 : 오토닉스
- 동작시간편차 : ±0.5% 이하 (최대설정시간에 대하여)
- 설정오차 : ±5% 이하 (최대설정시간에 대하여)

(12) 전력용 피뢰기 (POWER SURGE PROTECTOR)

- 제조사 : 현대파워시스템
- 모델 : HD-AP-N(AC 220V)

(13) DC POWER SUPPLY (S.M.P.S)

- 제조사 : 유니온전자
- 모델 : UP-Serise
- 형식 : 입력-AC 220V, 출력-DC 24V

(14) 노이즈 필터 (NOISE FILTER)

- 제조사 : 유니온전자
- 모델 : UF10SBS
- 형식 : 1-Phase, 10A, 250V

3.3. 시스템 사양 결정

양수장을 활용한 중대용량 농업용수 재이용시스템(1,000m³/일) 설계 및 제작을 위한 시작품의 시스템 구성과 사양 및 내용을 표 3.12.9로 나타내었다.

표 3.12.9 중대용량 농업용수재이용시스템 Pilot 사양 및 내용

시스템 품명	사양 및 내용
유입 시스템	- 유입 펌프 3HP 36TON/Hr
멀티사이클론 시스템	- 36TON, STS304, 미립 부유물질 제거
나노 버블 시스템	- 나노펌프제너레이터 - 토출구경 : (D) = 50mmφ , 재이용수 DO 증가
전해조 시스템	- 전기분해 카본모듈 x 2ea
공급	- 처리수 공급

3.4. 기술권 인증

가. 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템 관련 특허 (1)

(1) 특허출원

- 특허명 : 다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급방법 (Method of Obtaining Agricultural Water by Multistage Multicyclone System)
- 출원번호 : 10-2013-0075588
- 출원인 : 한국농촌공사, (주)블루비에스, 서울대산학협력단
- 출원일 : 2013. 06. 28

(2) 발명 상세 설명:

본 발명은 다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 멀티사이클론을 이용한 4단계의 이물질 제거수단을 구비하고, 부유물질이 포함된 하수가 장치의 하부에서 유입되어 처리수가 상부로 방출되며, 이 처리수를 살균하여 공급하는 다중 멀티사이클론 장치에 의한 농업용수 공급방법에 관한 것이다.

나. 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템 관련 특허 (2)

(1) 특허출원

- 특허명 : 다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급장치 (Apparatus for Producing Agricultural Water using Multistage Multicyclone System)
- 출원번호 : 10-2013-0075589
- 출원인 : 한국농촌공사, (주)블루비에스, 서울대산학협력단
- 출원일 : 2013. 06. 28

(2) 발명 상세 설명:

본 발명은 다단형 멀티사이클론을 이용한 농업용수 공급장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 하나 이상의 사이클론이 장착된 4단계의 제거수단을 구비하고, 부유물질이 포함된 하수가 장치의 하부에 유입되어 최종처리수가 상부로 방출되며, 이 처리수를 살균하여 공급하는 다단형 멀티 사이클론을 이용한 농업용수 공급장치에 관한 것이다.

3.5. 중대용량 농업재이용시스템 제작 및 성능실험

가. 시제품 제작 및 현장설치

하수처리수의 간접재이용을 위하여 개발한 농업 재이용 멀티클론 시스템의 전경은 그림 3.12.34~3.12.35와 같다.



그림 3.12.34 농업재이용 멀티클론시스템 전경
(1)



그림 3.12.35 농업재이용 멀티클론시스템 전경
(2)

그림 3.12.36은 농업 재이용 멀티클론 시스템의 주요장치인 멀티사이클론, 전기분해, 그리고 나노펌프의 배치를 보여주고 있다. 또한, 그림 3.12.37~3.12.39, 그리고 3.10.40은 멀티사이클론, 전기분해, 나노펌프, 그리고 슬러지배출시스템 각각의 자세한 전경을 보여주고 있다. 특히 그림 3.12.41, 10.42는 지난 하수재이용 실무자 공청회에서 제기된 재이용시스템의 사용자 편의를 고려한 제어반의 설계로 본 농업 재이용 멀티클론 시스템의 큰 장점 중 하나이다.



그림 3.12.36 농업 재이용 멀티클론 시스템 주요장치



그림 3.12.37 멀티사이클론



그림 3.12.38 전기분해시스템



그림 3.12.39 나노 제너레이터 펌프



그림 3.12.40 슬러지 배출시스템



그림 3.12.41 제어반 (1)



그림 3.12.42 제어반 (2)

기 개발된 농업 재이용 멀티클론 시스템을 본 연구과제의 모니터링지구인 병점재이용지구에 현장 설치하여 Pilot를 구성하였다. 그림 3.12.43은 현장에 설치된 재이용시스템의 전경을 보여주고 있다.



그림 3.12.43 시스템 현장 설치 전경

나. 시작품 시험 및 검사

다단형 멀티 사이클론으로 각 단계별로 거동하는 부유물질 제거처리를 거치게 된다.

먼저, 장치의 각 단계에 형성된 드레인이 개방된 상태에서 유입펌프를 통해서 원수를 공급하는데, 이 때 나노버블 5vol% 내지 20vol%가 혼입되도록 하고, 사이클론 장치에 원수가 유입되도록 한다. 원수가 유입되면서, 각 단계의 사이클론이 작동하게 되고, 원심력과 월류에 의하여 처리수가 상승하여 4단계까지 도달하게 된다.

SS 농도 32 ppm 의 침전수에 대해 5vol% 내지 20vol%의 나노버블이 혼입된 유입수를 1 kg/cm²의 압력으로 장치에 유입시켰을 경우, 1단계 사이클론에서 처리되면, 월류조의 드레인을 통해 모래와 같은 굵은 입자를 포함하는 배출수가 전체 유입량의 1vol% 배출되게 된다.

월류조에 체류하던 1차 처리수는 월류관을 통해 2단계 사이클론으로 유입되고, 각 사이클론에 흡입되면서 원심력에 의하여 처리수는 상승하며, 비중이 낮은 부유물과 거품은 상부의 드레인으로 제거되고, 비중이 높은 부유물은 하부의 드레인으로 배출된다. 2단계 사이클론에는 다른 장치와 다르게 2개의 드레인이 존재하며 전체 유입량의 2vol%가 배출된다.

3단계 사이클론으로 2차 처리수가 유입되어 체류하면서, 1개의 사이클론에 의하여 입자성 물질이 하면에 형성된 드레인을 통해 배출하고, 3차 처리수는 4단계 제거수단으로 바로 유입되며 유입된 처리수는 20개의 사이클론을 통과하면서 미립자는 사이클론 하부의 드레인으로 배출되고, 처리수는 상승하면서 상부로 배출되게 된다. 이후 전기분해 살균장치를 거쳐 최종적으로 농업용수로 공급되게 된다.

다단형 멀티 사이클론 수처리 장치의 처리효율은 초기 유입수에 대하여 드레인의 양이 약 5%로 측정되어 95%의 처리효율이 있으며, 초기 유입수의 SS 농도가 32 ppm이었으나, 최종 처리수의 SS 농도는 9.5 ppm으로 처리효율이 상당히 높은 것으로 측정되었다. 본 시스템 효율 분석 결과를 아래 표 3.12.10와 같이 정리하였다.

표 3.12.10 원수 및 방류수 성상 분석

측정일	SS		총대장균 군		BOD		탁도	
	원수	처리수	원수	처리수	원수	처리수	원수	처리수
2013.05.20	14.2	5.6	1,120	<30	8.5	4.9	4.3	2.5
2013.05.21	12.3	5.1	1,360	<30	8.7	5.2	3.7	2.1
2013.05.22	14.6	5.7	740	<30	10.8	6.9	2.8	2.0
2013.05.23	11.3	4.7	870	<30	6.7	3.7	3.8	1.8
2013.05.24	10.8	4.9	1,400	<30	7.2	4.2	3.4	1.5
2013.05.27	13.0	5.3	1,320	<30	7.4	2.8	2.8	2.0
2013.05.28	8.4	3.4	975	<30	5.9	3.3	2.7	2.1
2013.05.29	11.7	4.7	978	<30	8.1	2.5	5.7	2.6
2013.05.30	10.3	3.7	889	<30	8.2	4.0	4.9	2.3
2013.05.31	10.5	4.1	1,200	<30	6.5	3.6	2.7	1.8

그림 3.12.44와 3.10.45는 재이용시스템을 현장에 설치하여 시범운행한 후의 유입수와 처리수의 육안비교를 위한 샘플링 사진을 보여주고 있다.

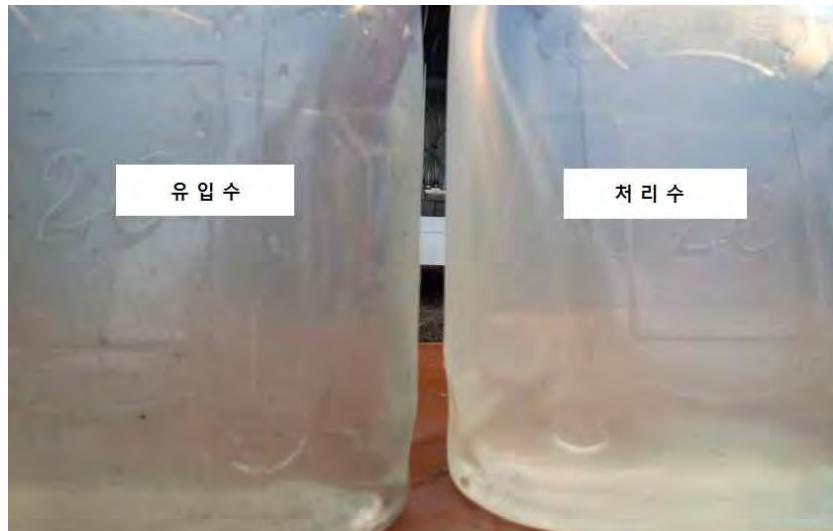


그림 3.12.44 유입수 및 처리수 채수



그림 3.12.45 슬러지 배출

원수와 처리수의 SS와 총대장균수 BOD, 탁도에 관한 시스템 처리효율 분석한 결과를 아래의 그림 3.12.46~10.49 에서와 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 SS 약 75%, BOD 약 48%, 탁도 41%, 총대장균수는 거의 다 처리되는 것을 확인할 수 있다.

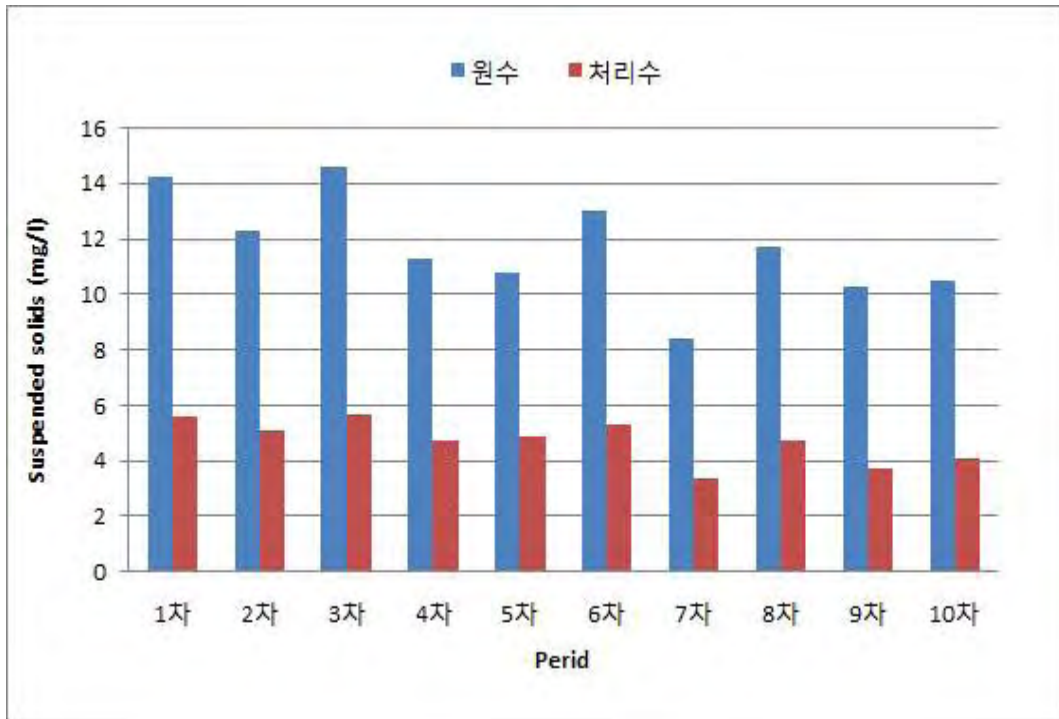


그림 3.12.46 부유물질 수질분석 결과

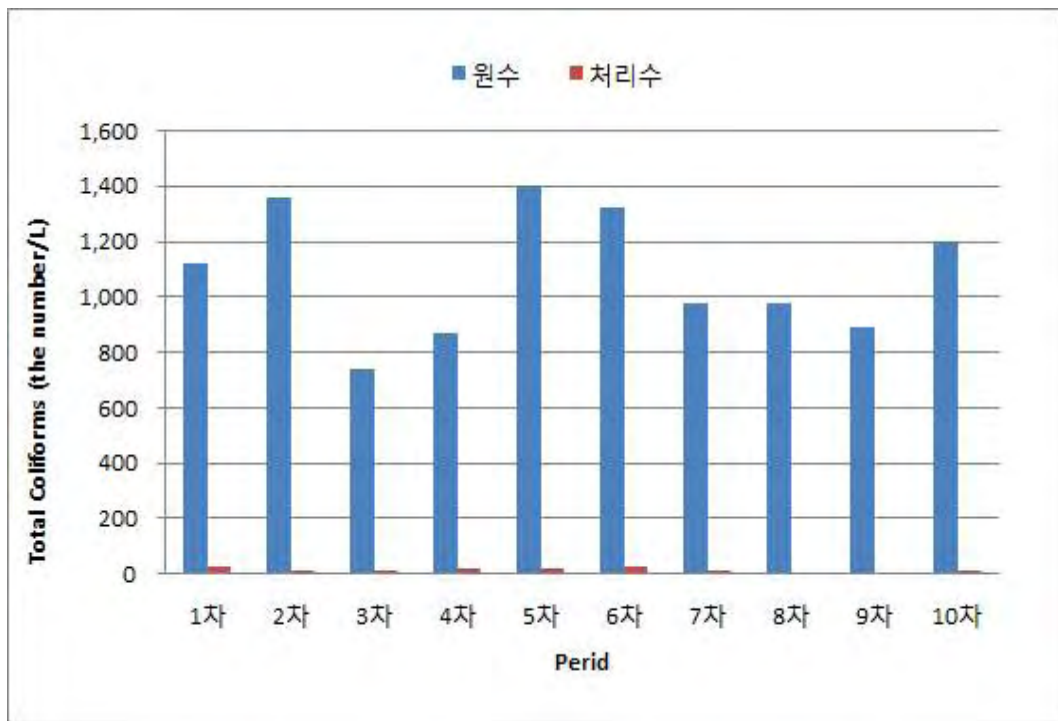


그림 3.12.47 총대장균 군 수질분석 결과

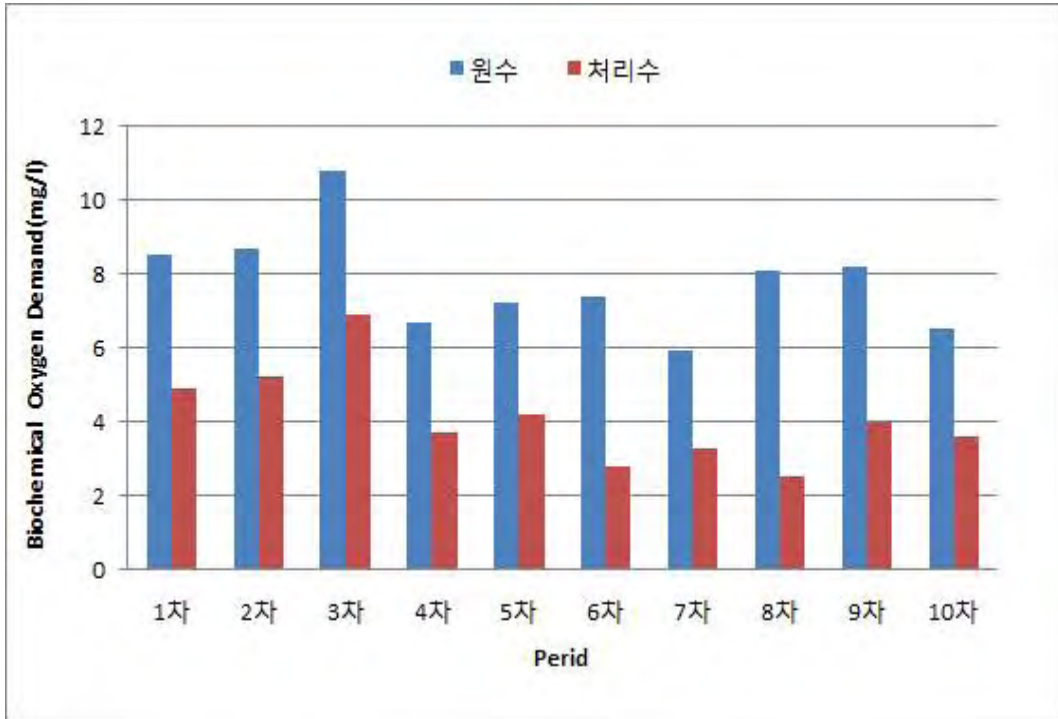


그림 3.12.48 BOD 수질분석 결과

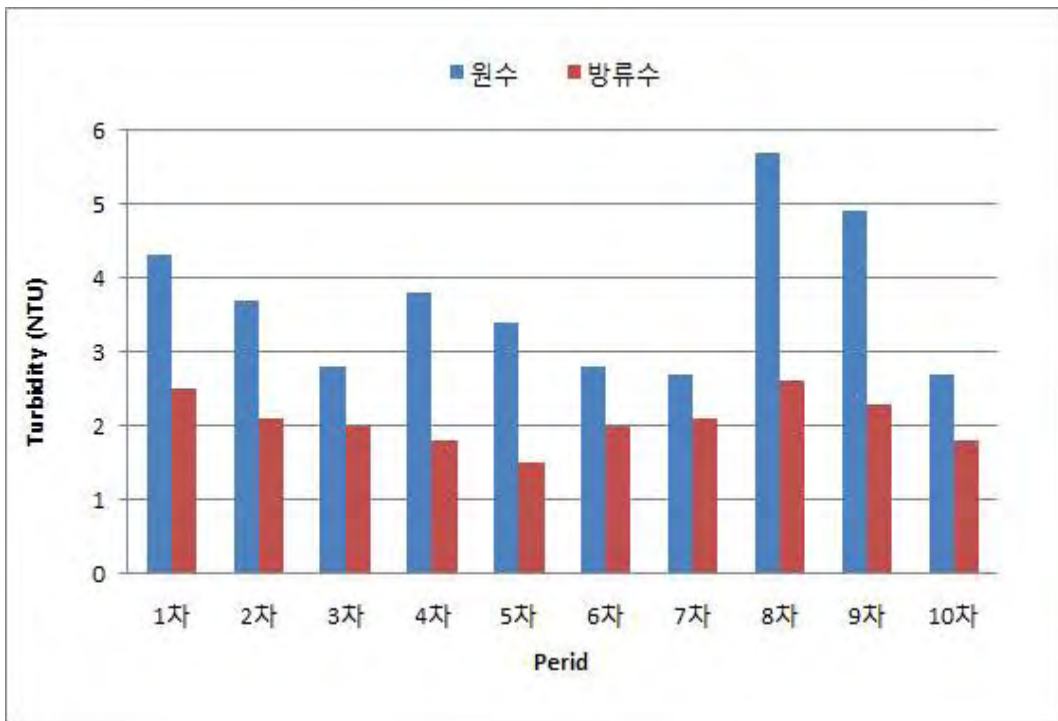


그림 3.12.49 탁도 수질분석 결과

2차년도에 개발된 시스템은 별도의 여재를 사용하지 않기 때문에 유지관리비용을 획기적으로 줄일 수 있으며, 조작이 간편하여 간단한 교육만으로도 농번기에 손쉬운 이용이 가능할 것으로 판단된다.

3.6. 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템 유지관리

가. 시스템 유지관리비

아래의 표 3.12.11는 양수장을 활용한 중대용량 농업재이용 시스템의 유지관리비를 나타내었다. 일일 운전 전력비는 3,139 원/일 (20시간 가동 시)이며 소모품비로는 사이클론모듈 및 카본모듈 교체비용이 있으며 연간 교체 비용은 1,030,000원 이다. 이를 바탕으로 시스템 전체 월간 유지관리비 (24일 가동 시)로 다시 산출하면 161,174원이 나오는 걸 볼 수 있다.

표 3.12.11 시스템 전력비

(단위 : 원)

기기 명칭	대수 (예비)	소요 동력 (kW)	동력 부하 (kW)	운전 시간 (hrs)	사용 전력 (kWh)	부하율	단 가 (원/kWh)	전력비 (원/일)
원수펌프	1	0.75	0.75	20	15	0.75	38.4	432
유입공급펌프	1	2.2	2.2	20	44	0.75	38.4	1,267
나노버블 시스템	1	2.2	2.2	20	44	0.75	38.4	1,267
전해조시스템	1	0.3	0.3	20	6	0.75	38.4	173
총 계	4	5.45	5.45	20	109	0.75	38.4	3,139

※농사용 전력(을) 38.4원/kWh

표 3.12.12 시스템 소모품비

(단위 : 원)

구 분	수 량	단 가	년간 금액	비 고
사이클론 모듈	1LOT	5,000	1,000,000	보증수명 60개월
카본모듈	2E/A	150	30,000	보증수명 120개월
계			1,030,000	

표 3.12.13은 이번년도 시작품인 중대용량 농업재이용 시스템과 같은 용량의 농업용수 이용에 적용 가능한 필터시스템의 특징 및 장·단점을 비교하였으며, 표에서 보듯이 시설비 및 연간 유지관리비 등 중대용량 농업재이용 시스템이 더 저렴함을 확인할 수 있었다.

표 3.12.13 기존시스템과 유지관리 비교표

항목	나노-멀티사이클론 시스템(1,000톤/일)	기존 필터 (1,000톤/일)
원리 및 특징	<ul style="list-style-type: none"> • 마이크로 나노버블(버블10%이상) 함유된 유입수를 다단멀티클론에 유입해서 다중입자성물질을 분리하며 전기분해 및 나노의 이용으로 콜로이드성물질 제거 및 살균하여 수처리 효율을 극대화 시키는 전천후처리 공정 시스템 	<ul style="list-style-type: none"> • 과다 부유물질에 대한 전처리 시스템으로 다양한 여재의 활용으로 부유물질을 제거
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 별도 여재사용이 필요 없음 • 유입펌프의 압력을 활용하여 간단한 구조 및 에너지저감 • 운전공정이 간단하여 쉽게 조작가능 • 다단멀티클론으로 처리효율을 높임 • 설치 비용 및 별도의 소모품이 없어 운전비용이 저렴 • 구조가 간단, 설치공간이 적게 듬 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 여과입도(5μm~1000μ)로 용도에 대한 적응력이 용이함. • 운전감시가 용이함.
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 일정한 압력 유속이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 중 여과성능 저하 및 막힘 현상 • 바이오막 형성, 역세척이 필요함
시설비	<ul style="list-style-type: none"> • 기계,전기시설: 100,000천원 	<ul style="list-style-type: none"> • 기계,전기시설: 170,000천원
년간 유지 관리비	<ul style="list-style-type: none"> • 전력비: 1,375천원 • 소모품비: 1,030천원 (보증수명 5년) • 연간유기관리비 합계: 2,405천원 	<ul style="list-style-type: none"> • 전력비: 1,892천원 • 소모품비: 1,975천원 (보증수명 2년) • 연간유기관리비 합계: 3,867천원
감각 상가비	<ul style="list-style-type: none"> • 100,000천원\times(1-0.1)/10년=9,000천원(잔존율 10%, 내구연한 기계10년) 	<ul style="list-style-type: none"> • 170,000천원\times(1-0.1)/10년)=15,300천원(잔존율 10%, 내구연한 기계10년)

나. 시스템 운전매뉴얼

(1) 시스템 구성

(가) 원수공급 펌프

- 하천수를 원수저장조로 공급하며, 자동운전 시 원수저장조의 수위에 따라 자동 운전
- 수동운전중 원수저장조의 수위가 만수위일 경우 동작하지 않음.

(나) 원수저장조

- 원수공급펌프로부터 공급된 원수를 저장합니다. 탱크 상부에 설치된 수위계에 신호에 따라 저수위일 경우 원수공급펌프가 동작하고 만수위가 되면 정지함.

(다) 원수이송펌프

- 원수저장조의 원수를 멀티클론으로 공급합니다. 원수저장조의 수위가 저수위가 되면 운전정지 되며, 저장조의 수위가 만수위가 되면 자동운전.

(라) 나노버블제네레이터

- 멀티클론으로 공급되는 원수에 미세 나노버블을 생산하여 공급.
- 원수이송펌프와 같이 연동되어 동작.

(마) 멀티클론 필터

- 원수이송펌프로부터 공급된 원수의 이물질을 제거
- 1단 멀티클론에서 모래알갱이와 같이 큰입자의 이물질을 하부드레인을 통해 제거하며, 나노버블제네레이터로부터 공급된 미세나노버블에 의해 비중이 낮은 입자들은 부상되어 2단 멀티클론의 상부 드레인을 통해 배출됩니다. 1단, 2단 멀티클론을 통과된 처리수는 3단 멀티클론을 통과하며 마이크론단위의 이물질이 제거

(바) 전기살균 장치

- 멀티클론에서 처리된 처리수는 전기살균장치를 거치며 살균되어 농가에 공급
- 전기살균본체와 전기살균장치에 DC전원을 공급하는 파워서플라이로 구성

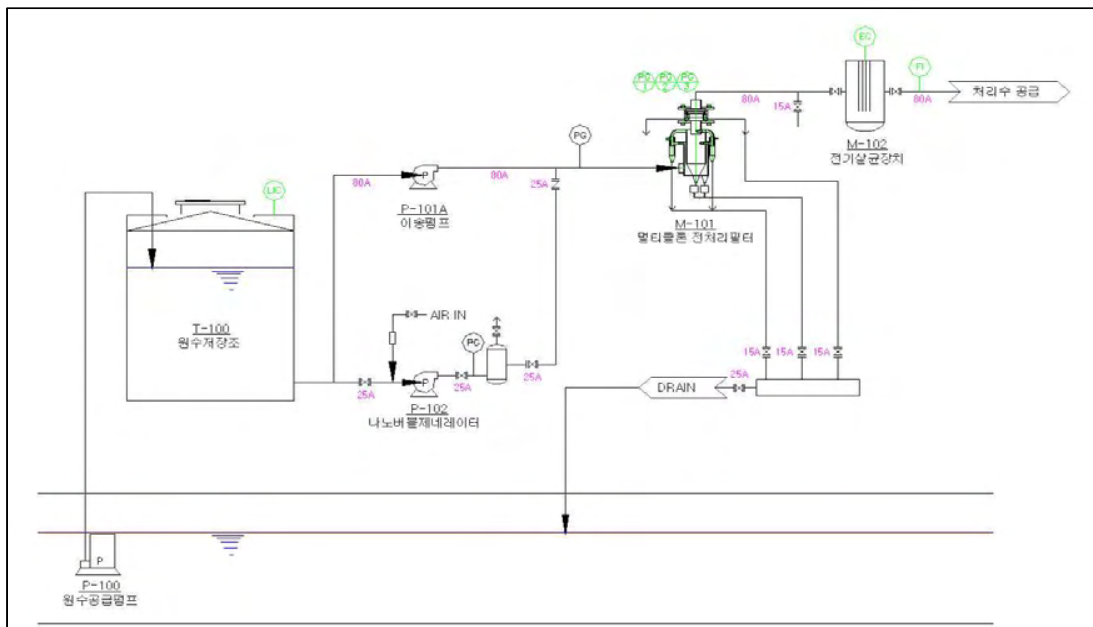


그림 3.12.50 시스템 구성도

(2) 시스템 운전
(가) 시스템 제어판넬



그림 3.12.51 시스템 제어판넬 모식도

(나) 시스템 제어판넬 스위치 설명

표 3.12.14 시스템 제어판넬 스위치 설명

	<p>OFF - 시스템 정지 MAU - 시스템 수동운전 AUTO - 시스템 자동운전 시스템 가동 스위치입니다. AUTO 선택시 타이머에 설정된 시간에 따라 자동운전됩니다.</p>
	<p>수동 운전시 원수공급펌프 가동 스위치입니다.</p>
	<p>수동 운전시 나노버블 제네레이터 가동 스위치입니다.</p>
	<p>수동 운전시 전기살균장치 가동 스위치입니다.</p>
	<p>부저 작동시 부저정지 스위치입니다.</p>
	<p>시스템 이상시 부저음을 발생합니다.</p>

(다) 시스템 운전

- 본 시스템은 기본적으로 자동모드에서 운전됨.
- 제어판넬의 운전모드 선택 스위치를 AUTO로 선택하면 원수공급펌프, 원수이송 펌프, 나노버블 제네레이터, 전기살균장치가 순차적으로 자동운전 됨.
- 수동모드 선택은 시스템 점검 시에만 사용.

(라) 전기살균장치 조작법

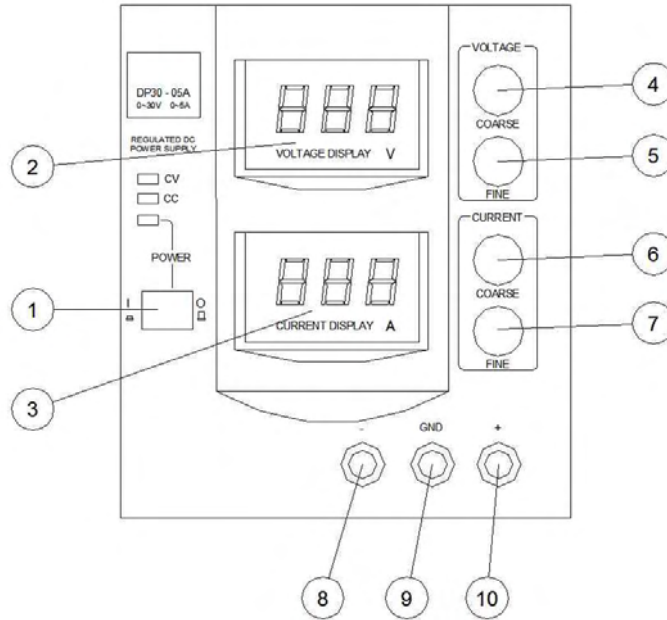


그림 3.12.52 DC Power 조작법

표 3.12.15 DC Power 스위치 조작법

1	전원 스위치입니다.
2	현재 공급 전압을 표시합니다.
3	현재 부하 전류를 표시합니다.
4	공급전압을 조정합니다. 시계 방향으로 돌리면 공급전압 값이 상승합니다. 0~30V 공급합니다.
5	공급전압을 미세 조정시 사용합니다.
6	전류값을 조정합니다, 시계 방향으로 돌리면 전류값이 상승합니다. 0~5A 설정이 가능합니다.
7	전류값을 미세 조정시 사용합니다.
8	DC - 전원 공급 단자입니다.
9	DC + 전원 공급 단자입니다.
10	DC 접지 단자입니다.

* 전압 전류 설정방법

- 먼저 전류 조정 볼륨은 최고값으로 설정하고, 공급 전압 값을 조정하여 현재 전류 값이 4A가 넘지 않도록 조정.
- 기본 설정 값은 전압 12V (전류값은 3A 정도가 표시.)
- 전류값은 수중 부하물질의 양에 따라 다르게 표시될수 있음.

다. 시스템 유지관리지침

(1) 운전 전 점검 사항

(가) 개요

장비의 초기 운전에 앞서 아래의 점검항목별 점검이 이루어져야하며 확인되지 않은 상태에서 무리하게 운전이 시행될 경우 기계의 파손과 안전사고의 우려가 있으므로 점검을 요한다.

표 3.12.16 운전 전 점검 사항

순위	점검 항목	점검 및 확인 방법	비 고
①	사용전압의 확인	명판이나 전기회로도상의 전압과 일치여부 확인	
②	주위의 장애물 유무 확인	신설 또는 보수작업이후 킴목 또는 버팀목 등이 완전히 제거되었는지의 여부 확인	
③	볼트의 느슨함이나 격자판의 설치상태	설비의 제작시 볼트류의 느슨함이나 격자판의 설치상태 확인	
④	전원공급 상태 확인	전원이 ON 되었을 때 전원이 원활히 공급 되는지 여부	

(2) 운전 중 점검 사항

(가) 개요

기계의 동작 및 전원공급 상태를 정기적으로 점검하여 이상소음과 진동, 발열 등이 있을 경우는 기계의 가동을 즉시 중단하고 점검하여 기계의 수명이 제대로 발휘할 수 있도록 한다.

표 3.12.17 운전 중 점검 사항

기 기 번호	품 명	점 검 항 목	일 상 점 검	정 기 점 검	비고
P-101 A	유입공급 펌프	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
		② 전류치의 확인	○		제어반
		③ 실부의 누수 유무 확인	○		
		④ 토출량 확인	○		
		⑤ 오링의 교환			분해 점검시
P-102	나노버블 제너레이터	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
		② 토출량 확인	○		
M-101	멀티사이클론필터	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
M-102	전해조 시스템	① 이상 소음· 이상 진동· 이상 고온의 유무 확인	○		
		② 정상작동여부, 전동기의 과부하, 벨트의 장력등을 점검		○	
T-100	원수 저장조	① 저류조 내부 수질 상태 확인 바닥에 침전물질이 다량일 경우 드레인 하여 제거		○	
	배관	① 누수 및 파손 유무 확인		○	
	제어반	① 각종 스위치 작동상태 확인	○		

표 3.12.18 고장 점검 및 대책

NO	주요 항목	고장 원인	대 책
①	이상소음 및 진동발생	부품의 마모, 파손, 기타 원인	소음발생부위 점검 및 보수
②	펌프 과부하 발생 및 TRIP발생	임펠러의 고장 모터 전기적 고장	펌프 관련 고장은 펌프 전문 A/S 센터에 의뢰
③	멀티사이클론 차압 발생	멀티사이클론 필터 막힘	멀티사이클론 교체
④	멀티사이클론 유량 감소 및 입구압 증가	원수내 이물질 과다 멀티사이클론 오염	처리수조 수질확인 이물질 과다 일 경우 처리수조 드레인작업실시
⑤	카본 플레이트 전원공급 불량	전원공급 단자대의 마모, 배선 단락	이상 원인을 파악하여 교체 및 수리

4. 이동식 간접재이용시스템

국내에는 약 2만3000여개 정도의 간이급수 시설이 있으며 대부분 1980년대 이전에 설치된 낙후된 시설이다. 이들 급수시설은 여과 등 정수과정 없이 원수를 이용자에게 바로 공급하고 있어 시설 개보수가 필요하다. 이에 본 기술은 이동식 간접 농업용수 재이용 시스템으로 낙후된 급수시설 및 농업용수 공급을 효율적으로 대체할 수 있으며 농업환경 현장 여건에 따라 수질오염이 심각하여 수질개선이 요구 지역 및 용수가 부족한 지역에 실시간 처리하여 청정 농업용수를 공급 할 수 있는 시스템을 제공하고 자 한다.

또한 최근 전국 또는 지역적으로 인구집중 산업발달 및 도시화와 함께 유역에서 오염물질이 증가하여 이들이 상당 기간 누적됨에 따라 하천 및 저수지의 부영양화 현상이 심각해져 왔다. 하천과 저수지의 부영양화 현상은 인위적인 영향이 크게 작용하여 대하천을 중심으로 상수원의 수질은 날로 악화되고 있는 실정에 있다. 이로 인해 최근에는 저수지 내에서 조류가 대량으로 증식하여 녹조현상이 빈번하게 발생하고 있어 농업용수로의 이용이 더욱 어려워지고 있다.

이에 본 시스템은 오염도가 높은 지역에 빠른 대처로 오염물을 제거할 수 있으며, 자력으로 이동 가능한 부유물제거 장치를 개발하고자 예의 노력한 결과, 미세버블과 전기적 응집을 이용하는 장치를 구비하는 이동식부유물제거 장치를 착안하였고, 이를 이용한 결과 부유물 및 기타 오염물질을 초고속으로 제거할 수 있으며, 타지역으로 이동도 용이하다는 장점이 있다.

이동식 차량 재이용 시스템은 극미세버블과 촉매모듈의 전기적 응집을 이용하여 하수방류수 및 하천에 존재하는 오염물질을 단시간에 제거하여 가시적인 효과를 바로 확인할 수 있으며, 생태계에 영향을 주지 않는 친환경적인 재이용시스템으로 부유물질 뿐만 아니라 용존유기물 및 녹조 등을 제거하여 깨끗한 물을 농가에 공급하는 시스템이다.

이동식 간접재이용시스템의 시험 운전은 2013년 09월부터 소규모 이동식 모듈형 시스템을 제작하여 사전 실험했으며 한국농어촌공사 농어촌연구원의 차량제공으로 내부 시스템을 제작하여 14년 5월부터 시운전을 수행하였다.

4.1. 이동식 간접재이용시스템 규격 및 설계

표 3.12.19는 이동식 재이용시스템 Pilot 규격을 간략히 서술하였으며, 그림 3.12.53과 10.54는 이동식 재이용 시스템 처리공정으로 표현한 것으로 1차 극미세버블장치, 응집 전자유도장치, 급부상 분리타워로 구성되었으며 컴팩한 패키지형 시스템으로 극미세버블과 전자모듈로 수초 이내에 응집, 분리 부상하여 부유물, COD 등을 효율적으로 제거 할 수 있는 최적화 기술이다.

표 3.12.19 이동식 재이용시스템 Pilot 규격

품 명	단위	수량	형식	규격	비고
이동식 재이용시스템	LOT	1	동력	1.4톤 트럭 L3,050×W1,788 ×H1,455	

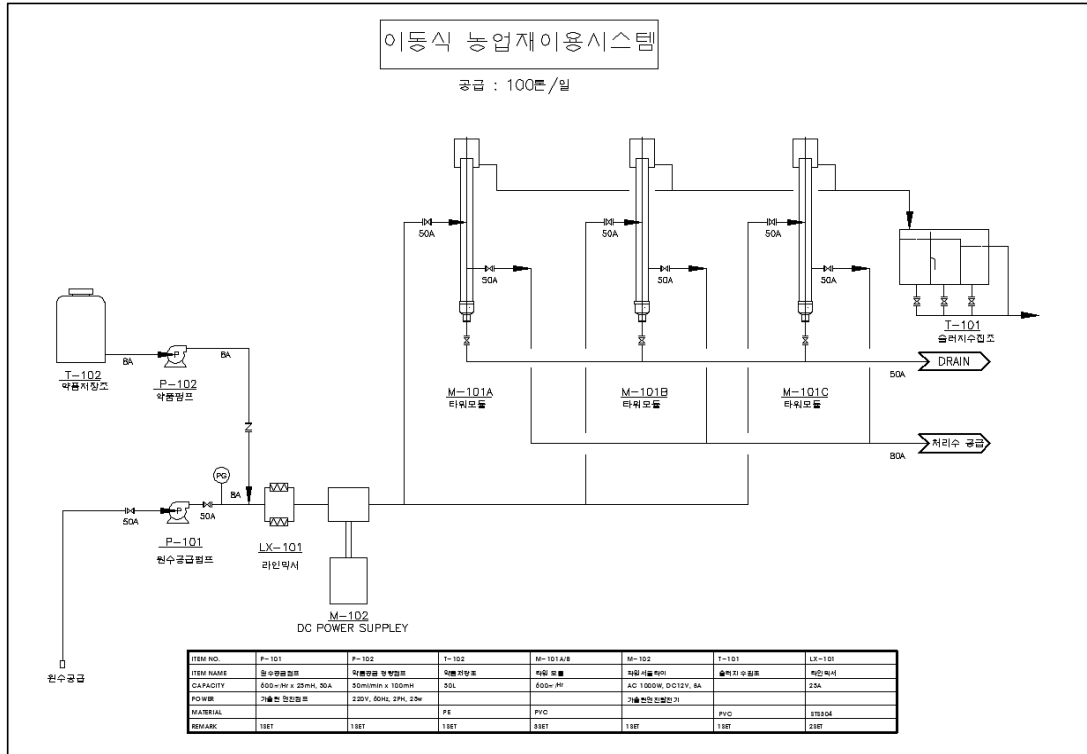


그림 3.12.53 이동식 농업재이용시스템 Flowsheet

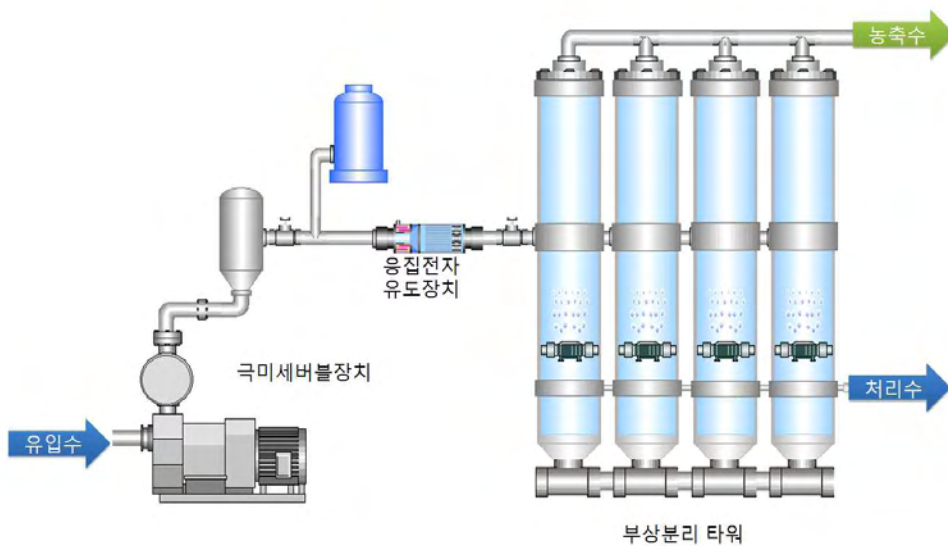


그림 3.12.54 이동식 농업재이용시스템 공정모식도

본 시스템은 한국농어촌공사 농어촌연구원 차량을 대여하여 장착하였으며 그림 3.12.55는 이동식 차량 재이용시스템의 도면을 나타내었다.

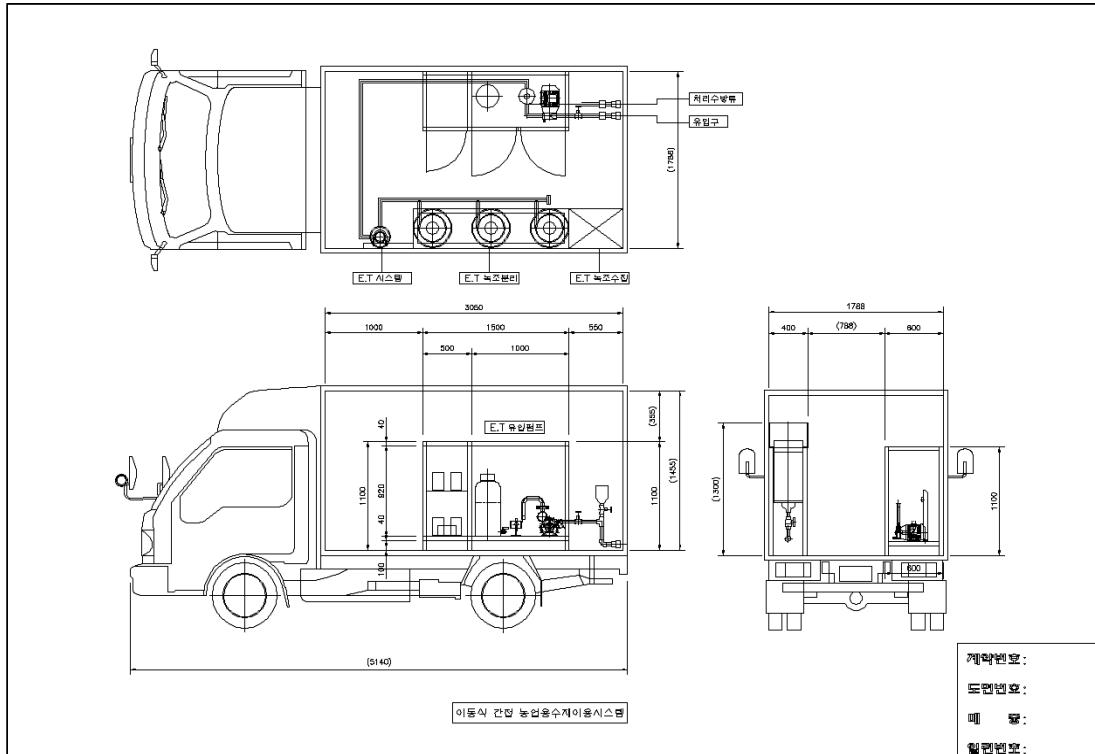


그림 3.12.55 이동식 차량 재이용시스템 도면

4.2. 공정별 제작

이동식 차량 내부의 재이용시스템 구성은 원수공급펌프시스템, 약품공급시스템, 엔진 발전기, ET시스템, 슬러지 저장조로 구성되었으며, 각 공정의 상세 내용은 다음과 같다.

가. 원수공급펌프 시스템

엔진펌프를 이용하여 원수를 공급 하며 펌프 재원은 아래 표 3.12.20와 같다.

- 수 량 : 1 대 (예비1대)

표 3.12.20 엔진펌프 사양

사 양		WB20XT
펌프	흡입/토출구경	약 50mm(2인치)
	총양정	32m
	흡입양정	8m
	최대토출량	600리터/분
	셀프프라이밍시간(5m기준)	110초
	길이	455mm
	폭	365mm
	높이	420mm
	건조중량	21kg
	방진고무 장착	없음
	호스밴드/스트레이너	있음
	모델	GX120T1
엔진	타입	4행정,OHV,단기통 가솔린엔진
	배기량	118cc
	최대출력	2.9kw(4.0PS)/3.600rpm
	오일경고	없음
	연료탱크용량	2.5리터

나. 약품공급정량펌프

엔진발전기를 통해 가동되며 정량의 응집제(PAC 20ppm)를 공급하는 시스템 이다.

- 형 식 : 약품공급정량펌프
- 용 량 : 50ml/min
- 양 정 : 100 m
- 수 량 : 1 대
- 운전방법 : 자동운전 및 수동스위치 조작운전
- 전 동 기 : 220V, 60Hz, 2HP, 25w

다. 미세버블라인믹스

나노버블 제너레이터 라인믹스 타입으로 구성되며, 응집단계로 공급되는 원수에 극 미세 버블을 생산하여 공급한다. 또한 시작품에 적용된 나노 제너레이터는 원수 이송 펌프 운전 에 따라서 자동 운전 및 수동 조작이 가능하도록 적용하였다.

- DISINFECTION CAP. : 600m³/일
- 수 량 : 1 대

라. 엔진발전기

본 엔진발전기는 약품공급펌프 및 ET시스템 내 전극에 안정된 DC전원을 필요로 하는 전원용으로 사용하는 전원장치이며 사양은 아래 표 3.12.21와 같다.

· 수 량 : 1 대

표 3.12.21 엔진발전기 사양

사 양		EU20i
발전동체	타입	인버터/단상
	AC출력전압	220V
	주파수	60Hz
	AC최대출력	2.0KVA
	AC정격출력	1.6KVA
	DC출력	12V-8A
	소음(dB(A)/7m)	59
엔진	모델	GX100:단기통/4행정공냉식
	배기량	98cc
	엔진최대출력	2.55PS(3.47KW/5,000rpm)
	시동방식	수동
	엔진오일용량	0.6L
	오일경고장치	있음
규격	크기 (L*W*H)	510*290*425(mm)
	건조중량	21kg
	연료탱크용량	4.1L
	연료사용시간	4시간

마. ET시스템 (응집부상분리 타워)

극미세버블과 응집제가 혼합된 유입수가 ET모듈에서 전기적으로 처리하여 응집 및 부유물을 유발시키고 미세버블 함유 부유물과 처리수를 분리하여 처리하는 시스템 이다. 타워 가동 시 상부 슬러지는 Overflow로 슬러지 저장조로 이동, 하부 처리수는 재이용수로 공급된다.

- 용 량 : 180m³/hr
- Size : Ø400×1300
- 수 량 : 3 SET

(1) 기술원리

유입된 오염물질을 1초내에 응집하여 20초 이내에 부상 분리하는 초고속 제거 기술이다. 일반 부상기술은 pH-온도를 조절하여 급속/완속 응집을 하여 부상제거하는 기술로 응집시간이 30분 이상 되기 때문에 체류조가 필수이며, 큰 용량일수록 큰 체류조 및 에너지가 많이 소모된다. 본 기술은 응집전자유도 모듈이 pH-온도에 관계없이 1초

이내에 오염물질을 응집하는 원리를 시스템에 핵심기술 엔진으로 개발하였다. 정수장, 호소, 하천, 하수처리장 및 항만 등의 미생물 및 조류와 영양염류를 동시에 제거하는 기술이며, 시스템구성은 1단계 유입 2단계 전자응집유도모듈 3단계 분리 타워로 구성된 Compact 패키지형 공정이다. 각 단계별 공정의 모식도 및 주요 메카니즘을 그림 3.12.56과 10.63과 표 3.12.22, 3.10.23로 나타내었다.

(가) 응집전자유도모듈

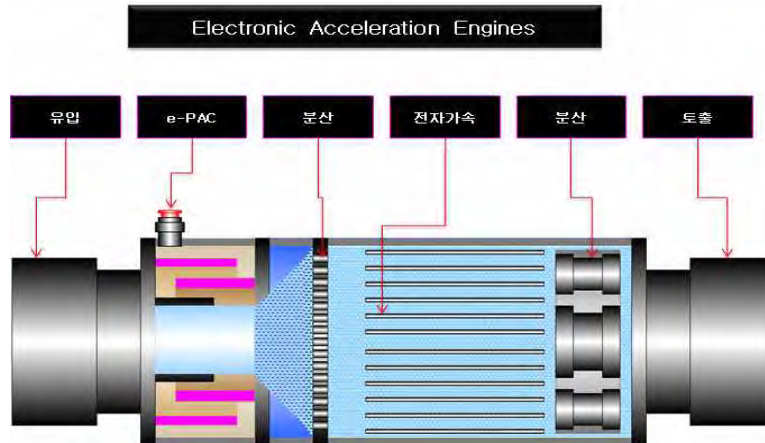


그림 3.12.56 응집전자유도모듈 모식도

표 3.12.22 응집전자유도모듈 주요 메카니즘

제거기술	주요 메카니즘
응집가속화 (응집유도 복합체 형성단계)	전 단계에 나노버블에 의해 이온 흡착된 콜로이드 입자가 응집제와 결합하여 미세기포 응집 복합체 형성

(나) 부상분리 타워

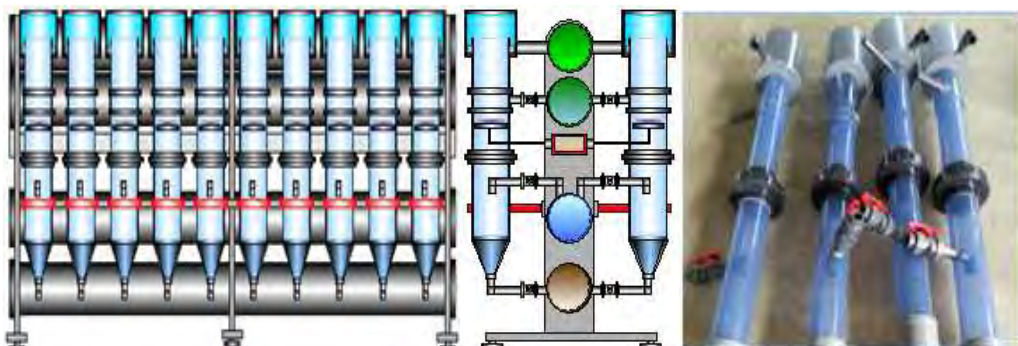


그림 3.12.57 사이클론타워 부상분리 장치

표 3.12.23 사이클론타워 부상분리 타워 주요 메카니즘

제거기술	주요 메카니즘
부상 가속화 (고속 전자배열 정렬 및 초고속 부상분리 제거단계)	(Step 1) 초고속전자유도 모듈 기반 순간전자 배열 정렬 : 초고속전자유도 모듈로부터 발생된 전자 (+, -) 배열 정렬에 의한 전자응집 극대화 (Step 2) 사이클론 초고속 부상분리 : 부상 초밀입 버블 유도하여 20초 이내에 조류를 부상분리 (99%) (Step 3) 하부 상등액 중 용존유기물질 제거: Step 2으로 응집유도 부상분리 제거되는 동안 하부에 잔존된 용존유기물질의 부분 산화 분해

(2) 주요장치 및 운전방식

본 시스템의 단계별 운전방식으로 1단계 미세버블을 이용한 부유물질을 흡착하는 전처리, 2단계로 전자응집유도모듈을 이용하여 초고속으로 응집, 마지막 3단계로 오염물질을 급부상으로 진행되며 그림 3.12.58로 도시하였다.



그림 3.12.58 3단계 오염물질 제거 원리

(3) 기술의 특징

표 3.12.24는 이동식 재이용시스템의 기술적용을 위한 항목별 조건과 각 조건에 부합하는 본 기술의 장점 및 특징을 나타내었다.

표 3.12.24 기술의 특징

특징	항목	내용	장점 및 특징
1	오염물질 제거 장치 타입	기존의 침지형태의 침전방식 혹은 부상방식 타입에서 탈피한 연속반응 유도가능한 일체형 외부압송 분리형 모듈 타입	공정 유체의 연속적 반응 2차 오염물질 발생 없음 설치 및 해체가 매우 간단 Compact 패키지형태
2	유입부하 변동에 능동적 대처	강력하고 우수한 처리 능력에 의해 유입부하 변동 대체가 매우 우수 여름철 고탁수 및 높은 농도 조류 유입에도 능동적 대체 가능	초급속전자유도모듈의 전류량자동조절에 의해 능동적 부하대응
3	처리효율	단계별 제거기작에 의한 유기물질, 부유물질, 및 조류 등을 선택적 및 복합적으로 동시다발 처리로 매우 높은 제거효율 확보	부유물질 99% 이상 조류제거 99% 이상 TN 40% 이상 COD 80% 이상 TP 95% 이상 금속이온 60% 이상 맛, 냄새 완벽제거
4	처리속도	기존의 부상분리 방식(오존버블 부상분리, DAF 부상분리) 대비 매우 빠른 처리속도 확보	유입부하에 따라 최소 10초~20초 부상분리 완료
5	외부영향	pH, 온도, 중급속 유입 등 다양한 외부요인에 영향을 받지 않음	기존 오존 반응, 초음파, 플라즈마 반응과 달리 외부영향 없음
6	유지관리비	저전압, 저동력 및 저약품 운전에 의한 운전비용 최소화 불용성 특수전극 코팅 사용으로 전자모듈 수명이 길고 교체가 간단	유입부하 변동에 따라 자동조절에 의한 운전비용 최소화 DAF, 오존, 플라즈마 공법은 고압에 의한 에너지 소모가 큼
7	부지면적	긴 처리시간을 요구하는 탱크 타입의 침지형 및 분리형 대비 1/3 수준	고집적화된 콤팩트형 장치 고밀도 단시간 처리
8	2차오염 발생	공정 처리과정 및 최종 처리 후 2차 오염발생 최소화	부상한 고형물은 재분산이 거의 없어 재활용 가능

(4) 부상분리 타입 유사기술의 비교

이동식 재이용 시스템의 기본 원리는 부상분리에서 나왔으며 현재 부상분리로 많은 분야에 활용되는 DAF공법과 본 기술을 아래 표 3.12.25로 나타내어 비교 하였다.

표 3.12.25 부상분리 타입 유사기술 비교표

항목	초고속 전자유도모듈 분리타워	가압부상(DAF)
부상조 크기	부상조가 필요 없음	전자부상처리 대비 30~50% 큰 부상조가 필요
소요 바닥 면적	소요 면적이 필요없음	가압펌프, 컴프레셔, 용기탱크와 그에 따른 배선, 배관 또는 부상조의 대형화로 20~30% 커짐
부상가스 발생방식과 제어	고속 전자응집중 부산물 버블생성가능 수질의 오탁정도에 따라 발생량조절가능. 콜로이달 에어 크기는 약100nm~10 μ m.	가압펌프와 컴프레셔에 의해 용존 공기를 얻기 때문에 수질의 오탁량에 적합한 제어는 곤란함. 가동개시에 시간을 필요로 한다. 콜로이달 에어 크기는 50~100 μ m.
유지가동 비용	저전압 및 유지비용이 중저가이며, 부유물질 2,000mg/l 이하 처리 가능함	고압펌프 등 많은 동력이 필요하며, 소음이 심함. 유지비용이 고가이며, 40℃이상이 일반적으로 처리 불가능함
Scum 함수율	96~94%	98~97%
탈수 약품(폴리머)	필요 없음	필요 함
보수 점검	스킴 제거 장치가 별도로 필요치 않음 유지관리가 매우 간단함	가동부분이 많아 시간을 필요함
부가적 효과	탈색, BOD/COD 제거, 살균	거의 없음.

(5) 기술별 특징 비교

표 3.12.26은 유사 처리공법에 대한 기술현황과 본 기술과 비교한 수처리 항목 및 특징 등을 기술하였다.

표 3.12.26 기술별 특징 비교

항목	내용	수 처리 항목			
		SS	조류	TN	TP
초음파를 이용한 기술	초음파처리로 세포분열 억제 및 내장파괴 및 성장 억제하는 기술	×	○	×	×
		처리 불가	보통	처리 불가	처리 불가
가압부상 분리 기술	마이크로버블과 응집제를 이용하여 녹조를 분리하는 기술	○	○	×	○
		보통	보통	처리 불가	
용존 오존 부상기술	오존가스+ 용존 공기부상을 이용하여 제거하는 기술로 고액분리 능력이 우수하며 또한 인 제거 탁월하다	○	○	×	○
		보통	보통	처리 불가	
막 분리 기술	UF 분리막을 이용하여 고액분리 능력이 우수하다	○	○	×	×
		우수	우수	처리 불가	처리 불가
초고속전자유도 분리타위기술	초고속전자유도 기술을 이용하여 수초간에 조류응집분리 능력이 우수하며 또한 녹조 뿐 아니라 질소/인 제거탁월하다.	○	○	○	○
		우수	우수		

바. 슬러지저장조

앞단에서 넘어오는 슬러지는 재부상하므로 상부 농축슬러지는 수집처리하며 하부 분리액은 앞단으로 리사이클 시킨다.

- 용 량 : 1톤
- 크 기 : W500×D400×500H
- 수 량 : 1식

표 3.12.26 기술별 특징 비교 (계속)

항목	① 초고속전자유도 부상분리(URF)	② 용존공기부상법(DAF)	③ 용존오존 부상법(DOF)	④ 초고속 침전법(URS)	⑤ 초음파 처리(UT)	⑥ 플라즈마 처리(PT)	⑦ 가압필터여과
원리	극미세버블 연계 초고속 전자유도 부상분리	미세버블 연계 부상분리	오존버블 연계 부상분리	경사판 및 기계적 혼합 응집침전	수중진동	플라즈마 활성화 유도	다층여과
운전방식	외압 일체형 부상	침지식 부상	침지식 부상	침지식 침전	침지식 침전	침지식 침전	외압 다층여과
타입	싸이클론 모듈	탱크식	탱크식	탱크식	탱크식	탱크식	모듈
제거 대상물질	부유물질 99% 조류 99% 용존유기탄소 60%	부유물질 90% 조류 90% 용존유기탄소 20%	부유물질 90% 조류 90% 용존유기탄소 40%	부유물질 95% 조류 95% 용존유기탄소 20%	부유물질 95% 조류 99% 용존유기탄소 40%	부유물질 95% 조류 99% 용존유기탄소 40%	부유물질 90% 조류 90% 용존유기탄소 20%
처리속도	20초 이내	8~15분	5~10분	15분	수일	수일	수분
처리능력	다항목 ↑	일반항목 ↑	일반항목 ↑	일반항목 ↑	일반항목 ↑	일반항목 ↑	일반항목 ↑
응집제	소량 (침전법 1/10)	보통	소량	보통	없음	없음	전처리 응집
에너지	낮음	높음	높음	높음	보통	높음	높음
고형물	99% 이상	90%	95%	90%	-	-	95%
유지비	낮음	높음	높음	높음	보통	높음	높음
설치면적	부상법 1/2 수준 침전법 1/3 수준	보통	보통	보통	-	-	-
재분산 (2차오염)	없음 (고형물 매우 안정)	있음 (고형물 부분 불안정)	있음 (고형물 부분 불안정)	있음 (고형물 부분 불안정)	있음 (고형물 불안정)	있음 (고형물 불안정)	-

비고

부상법 ① 초고속 부상분리: Ultra rate Flotation (URF), ② 용존공기부상법: Dissolved Air Flotation (DAF), ③ 용존오존부상법: Dissolved Ozone Flotation (DOF)

기타 ④ 초고속 침전법(Ultra rate sedimentation:URS) ⑤초음파 처리법: Ultrasonic treatment (UT) ⑥플라즈마 처리법: Plasma treatment (PT) ⑦가압필터여과법

4.3. 시스템 사양 결정

이동식 재이용시스템(300m³/일) 설계 및 제작을 위한시작품의 시스템 구성과 사양 및 내용을 표 3.12.27로 나타내었다.

표 3.12.27 이동식 재이용시스템 Pilot 사양 및 내용

시스템 품명	사양 및 내용
유입 시스템	- 엔진펌프 600L/min × 25mh, 4HP
나노 버블 시스템	- 나노제너레이터 라인믹스 - 토출구경 : (D) = 25mmφ , 재이용수 DO 증가
약품공급펌프	- 약품 공급 정량펌프:50ml/min×100mh, 1EA - 약품저장조: 50L×1SET
ET시스템	- Capacity: 180m ³ /Hr (PVC) - 전자유도모듈 1식 - 수 량: 3SET
엔진 발전기	- 정격 AC출력 1.6KVA, 최대 AC출력 2.0KVA - AC 1000w, DC 12V, 8A

4.4. 기술권 인증

가. 이동식 간접재용시스템 관련 특허

(1) 특허출원

- 특허명 : 이동식 부유물 제거 장치 및 방법 (Movable Apparatus and Method for Removing Floating Matter)
- 출원번호 : 10-2014-0120226
- 출원인 : (주)블루비에스
- 출원일 : 2014. 09. 11

(2) 발명 상세 설명

○ 기술분야

본 발명은 미세버블과 전기적 응집을 이용하는 이동식 부유물 제거 장치 및 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 부유물 함유 유입수의 고형물을 1차적으로 제거하는 고형물 제거장치, 미세버블발생장치, 미세버블혼합장치 및 처리모듈을 구비한 이동식 부유물 제거장치 및 이를 이용한 부유물 제거방법에 관한 것이다.

4.5. 이동식 간접 농업재이용시스템 제작 및 성능실험

가. 시작품 제작 및 현장설치

이동식 차량 재이용 시스템 내부의 전경은 그림 3.12.59 ~그림 3.12.63과 같다.



그림 3.12.59 무정전 전원장치 (UPS)



그림 3.12.60 처리수조 및 부상분리타워



그림 3.12.61 엔진 펌프 및 엔진 발전기



그림 3.12.62 이동식 차량 제작내부



그림 3.12.63 이동식 차량 제작 외부전경

나. 시제품 시험 및 검사

(1) 연못(100톤/일 규모) 녹조 제거 실험

대상 지역은 한국농어촌연구원 내 연못이며, 현장 연못은 녹조발생이 심하며 SS가 비교적 높아 수질관리가 어려워 과거 1차 식물이용, 2차 응집제 및 황토살포, 3차 인공폭기 4차 조류 제거선 5차 천적생물기술을 각각 적용 효과에 대한 연구를 진행하였으나 효과가 미흡하였다.

2013년 9월 한국농어촌연구원 연못 녹조제거를 위해 이동식시스템으로 극미세버블과 촉매모듈 일체형을 자체 제작하여 본 기술의 사전 실험 및 운전하였으며 기존 적용 연구와 동일한 조건에서 진행하였다.



그림 3.12.64 이동식 모듈형 시스템 제작

항목	유입수질	처리수질	처리효율
BOD(mg/L)	31	0.20이하	99.4%
COD(mg/L)	90	6.00이하	93.3%
SS(mg/L)	247	0.20이하	99.9%
T-N(mg/L)	23.9	1.690이하	93.3%
T-P(mg/L)	0.426	0.0040이하	99.1%
Chl-a	196.2	0.041	100%
대장균(개/mL)	<30	불검출	100%



그림 3.12.65 일체형타워모듈 제작 연못 실험데이터

본 실험에서는 처리모듈(50L)짜리 4개를 병렬로 연결하여, 전기적 응집 및 부양을 촉진하였고, 이 실시예를 통해 실험 결과 유입수 수질 BOD 31, COD 90, SS 247, T-N 23.9, T-P0.426, Chl-a 196.2, 대장균 <30 이며 이동식 모듈형 시스템으로 운전 후 처리수는 BOD 0.2, COD 6.0, SS 0.2, T-N 1.69, T-P 0.004, Chl-a 0.041, 대장균 불검출로 처리효율이 평균 95%을 확인 하였다. 본 실험에서 유입수의 처리모듈에서의 체류시간(RT)는 약 22초로, 이는 기존 연구에서 오염물질을 제거하기 위한 침강에 필요한 시간 (179초~1800초) 보다 빠른 시간임을 확인 하였다.



그림 3.12.66 연못 적용 유입수 및 처리수

(2) 조류 제거 실험 결과

본 실험은 한국농어촌공사 농어촌연구원(경기도 안산시)내 주변 생태 공원에서 유입되는 개수로에서 이동식 차량 시스템을 가동하였다. 본 실험에서는 응집제로 PAC며, 25 ppm으로 희석하여 사용하였다. 미세버블혼합장치 (30 L)에서는 800 rpm으로 응집제와 원수를 교반하였고, 공급된 전압과 전류는 각각 30V, 5A였으며, 원수의 체류시간은 약 5초였다. 또한 4개의 처리모듈 (50 L, 12.5 L)를 사용하여 실험을 진행하였다. 각 처리모듈에 전압과 전류는 30 V, 5 A (50 L)과 8 V, 5 A (12.5 L)로 공급하였고, 원수의 체류시간은 약 22초였다. 본 실험 진행 전, 개수로 에서 샘플을 채취한 것과 부유물 제거용 이동식 부유물 제거장치를 가동하고, 처리된 물을 샘플을 채취하여 분석하였으며, 여러 날에 걸쳐 실험하면서 이동식 부유물 제거장치의 성능을 확인하였다 (표 3.12.28).



그림 3.12.67 농어촌연구원내 개수로 원수채수 현황

(3) 기타 수질별 실험 결과

경기도 평택 하수처리장의 방류수 및 폭기조에 유출수를 채수하여 이동식 모듈형 패키지 시스템으로 처리하여 아래의 결과를 얻었으며 녹조 뿐만 아니라 기타 오염물질 및 대장균의 높은 제거효율을 검증하였다.

항목	유입수질	처리수질(주)	처리효율	항목	유입수질	처리수질(주)	처리효율
BOD(mg/L)	13.8	1.80이하	86%	BOD(mg/L)	8.4	2.40이하	71.4%
COD(mg/L)	12.0	5.00이하	58%	COD(mg/L)	10.7	6.20이하	42.1%
SS(mg/L)	13.2	2.70이하	79.5%	SS(mg/L)	18.8	0.40이하	97.9%
T-N(mg/L)	20.9	13.90이하	33.5%	T-N(mg/L)	19.3	10.80이하	44%
T-P(mg/L)	1.05	0.040이하	96.1%	T-P(mg/L)	2.21	0.0260이하	98.8%
대장균(개/mL)	376	<30	92%	대장균(개/mL)	2,640	<30	98.9%

그림 3.12.68 하수처리장 방류수 실험 결과 그림 3.12.69 하수처리장 폭기조 실험 결과

표 3.12.28 이동식 시스템 데이터

DATE	SS			chl-a		
	유입수	처리수	제거효율	유입수	처리수	제거효율
14/5/7	20.2	1.9	91%	174	1.30	99%
14/5/8	18.9	1.5	92%	196	0.95	100%
14/5/9	16.6	1.3	92%	186	1.72	99%
14/5/12	24.2	1.8	93%	167	1.21	99%
14/5/13	12.9	0.8	94%	222	1.69	99%
14/5/14	14.2	1.1	92%	174	0.44	100%
14/5/15	19.6	1.5	92%	269	0.80	100%
14/5/16	20.4	1.6	92%	185	0.94	99%
14/5/19	22.5	1.9	92%	209	0.49	100%
14/5/20	23.7	1.5	94%	166	0.43	100%
14/5/21	16.0	1.0	94%	270	0.52	100%
14/5/22	17.3	0.8	95%	187	1.40	99%
14/5/23	13.4	1.1	92%	242	2.18	99%
14/5/26	19.6	1.6	92%	305	2.26	99%
14/5/27	23.1	2.3	90%	260	1.08	100%
14/5/28	18.5	1.7	91%	131	1.21	99%
14/5/29	18.7	1.3	93%	267	1.59	99%
14/5/30	14.6	0.9	94%	138	0.47	100%
14/6/2	18.5	1.7	91%	301	2.80	99%
14/6/3	14.1	1.2	91%	216	1.44	99%
14/6/4	12.0	1.0	92%	186	1.46	99%
14/6/5	14.4	1.0	93%	231	0.35	100%
14/6/9	19.7	0.9	95%	215	0.57	100%
14/6/10	22.2	1.7	92%	199	0.56	100%
14/6/11	10.3	0.6	94%	128	0.36	100%
14/6/12	14.5	1.4	90%	284	1.05	100%
14/6/13	23.7	2.2	91%	247	1.58	99%
14/6/16	14.1	1.0	93%	244	1.33	99%
14/6/17	24.7	2.0	92%	311	2.86	99%
14/6/18	21.5	1.2	94%	195	0.44	100%

표 3.12.28 이동식 시스템 데이터 (계속)

DATE	TN			TP		
	유입수	처리수	제거효율	유입수	처리수	제거효율
14/5/7	11.13	6.45	42%	0.935	0.026	97%
14/5/8	11.84	6.95	41%	1.009	0.035	96%
14/5/9	8.71	5.33	39%	1.292	0.047	96%
14/5/12	12.06	6.73	44%	1.829	0.039	98%
14/5/13	9.29	5.42	42%	1.302	0.026	98%
14/5/14	13.88	7.96	43%	1.510	0.043	97%
14/5/15	11.59	7.14	38%	1.250	0.044	96%
14/5/16	13.79	8.53	38%	1.840	0.048	97%
14/5/19	11.92	7.23	39%	1.969	0.054	97%
14/5/20	11.41	6.71	41%	1.374	0.047	97%
14/5/21	11.42	6.92	39%	1.874	0.069	96%
14/5/22	12.32	7.47	39%	1.700	0.049	97%
14/5/23	13.52	8.11	40%	1.051	0.024	98%
14/5/26	10.15	5.80	43%	1.472	0.036	98%
14/5/27	12.44	6.91	44%	1.798	0.059	97%
14/5/28	12.48	7.36	41%	1.055	0.022	98%
14/5/29	10.06	5.61	44%	0.958	0.021	98%
14/5/30	10.82	6.30	42%	0.922	0.028	97%
14/6/2	13.47	7.87	42%	1.448	0.043	97%
14/6/3	14.84	9.12	39%	1.643	0.058	96%
14/6/4	9.48	5.71	40%	1.215	0.037	97%
14/6/5	14.55	9.01	38%	1.124	0.041	96%
14/6/9	12.36	7.57	39%	1.559	0.053	97%
14/6/10	14.29	8.44	41%	1.041	0.038	96%
14/6/11	14.52	8.27	43%	1.736	0.035	98%
14/6/12	11.51	6.52	43%	1.457	0.039	97%
14/6/13	7.60	4.23	44%	1.116	0.038	97%
14/6/16	9.66	5.85	39%	1.234	0.030	98%
14/6/17	11.87	6.85	42%	1.161	0.041	96%
14/6/18	7.59	4.35	43%	1.527	0.044	97%

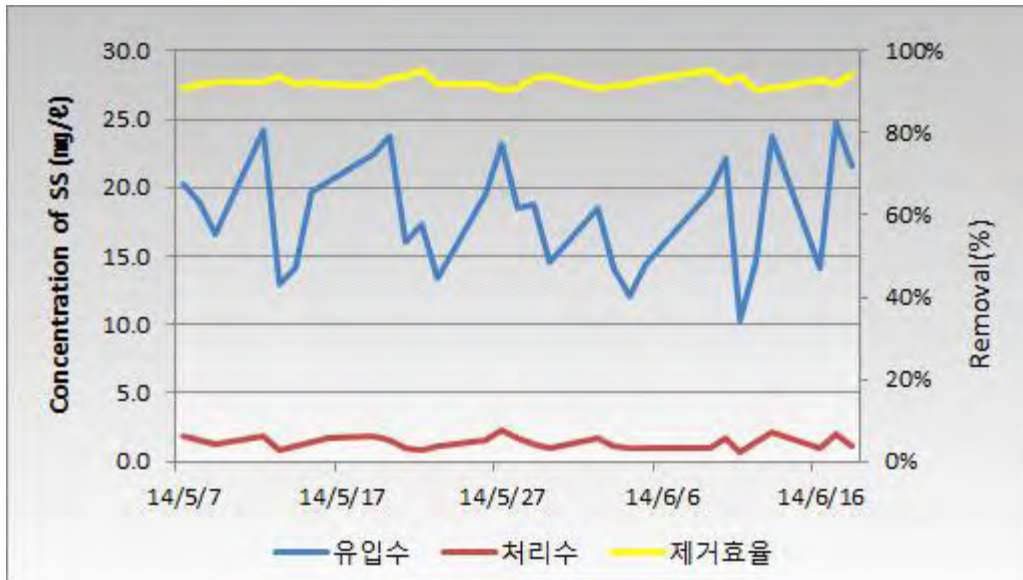


그림 3.12.70 SS 분석 데이터

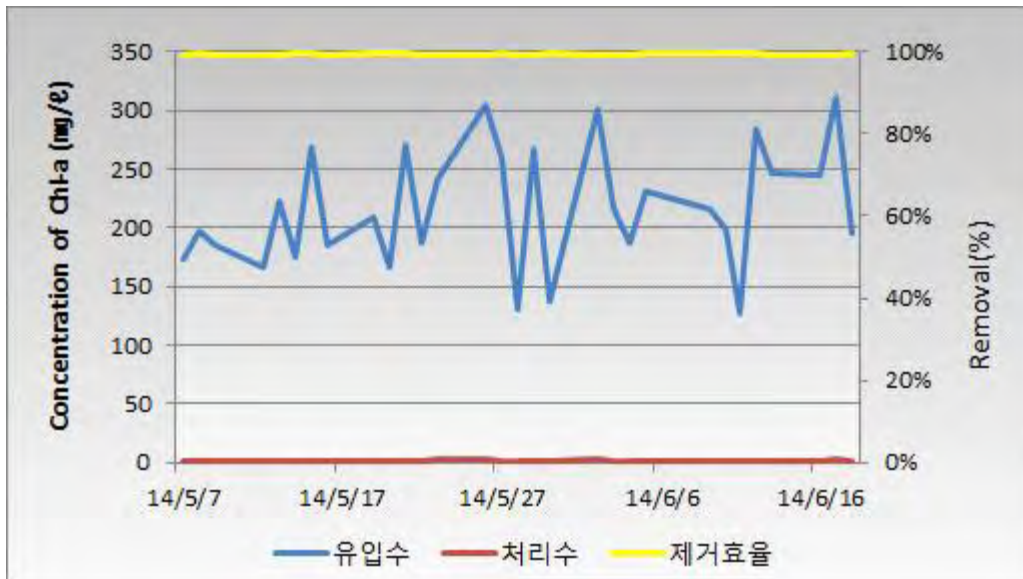


그림 3.12.71 Chl-a 분석 데이터

본 실험의 결과 조류의 간접지표인 엽록소-a(Chl-a, Chlorophyll-a)의 평균제거율이 99%였으며, SS(부유물질) 제거율은 평균 92%으로 높은 제거효율을 보였으며, 이를 통해 상기 이동식 부유물 제거장치의 오염물 제거 효과를 확인 하였다.

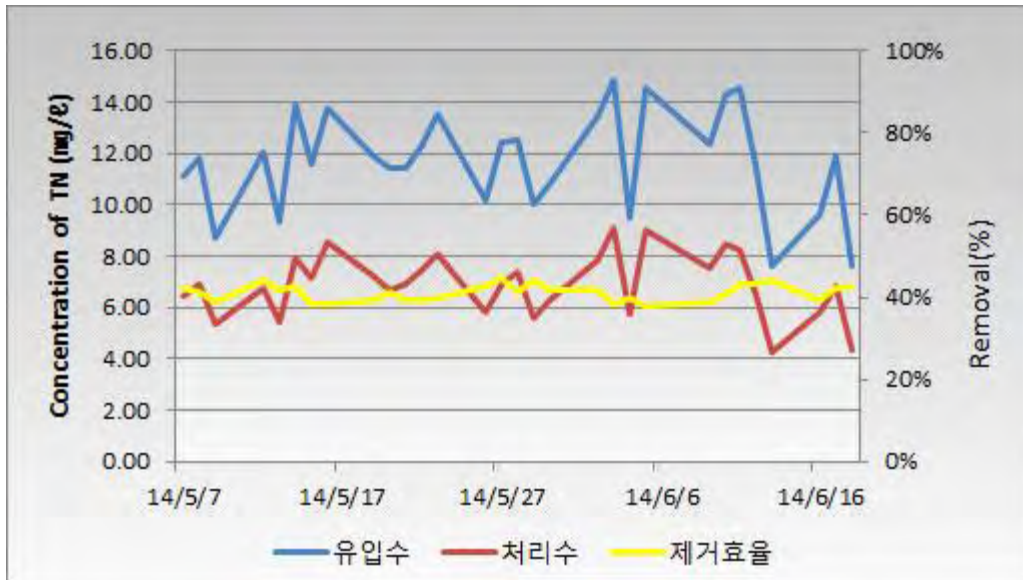


그림 3.12.72 T-N 분석 데이터

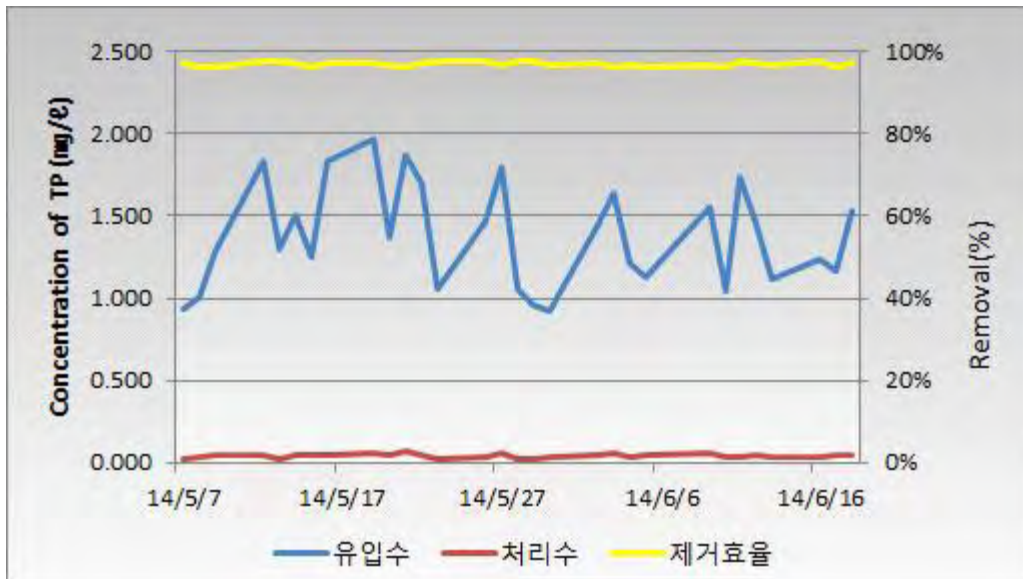


그림 3.12.73 T-P 분석 데이터

본 실험의 결과 T-N과 T-P의 평균제거율은 각각 약 41%와 97%으로 기존 질소, 인 제거공법 보다 높은 처리효율을 나타냈으며 앞으로 질소, 인 처리효율 개선 및 고도처리 공법에 본 기술의 적용함으로써 기술 활용도 및 처리수의 효율증가 효과를 기대할 수 있다.

4.6. 이동식 간접재이용시스템 유지관리

가. 시스템 유지관리비

이동식 재이용 시스템의 운영비용으로 시스템 연료비는 일일 9,500원, 약품비 일일45원, 폐기물처리비용으로 일일 3,000원으로 하루 10hr 가동 시 전체 유지관리비는 35,345원으로 계산되었으며 자세한 계산식은 표 3.12.29~3.10.31로 나타내었다.

표 3.12.29 시스템 연료비 (10hr 가동 시)

	항목	사용량 (L/일)	휘발유 단가(원/L)	금액 (원/일)
연료비	엔진펌프	7	1,900	13,300
	엔진발전기	10	1,900	19,000
합계		17		32,300

표 3.12.30 시스템 약품비 (PAC 25ppm, 50ml/min주입, 10hr 가동 시)

	항목	사용량 (kg/일)	단가(원/kg)	금액 (원/일)
약품비	PAC	0.75	200	150
합계				45

∴ 약품사용량: $25\text{mg/L} \times 50\text{mL/min} \times 60\text{min/hr} \times 10\text{hr} \times 10^{-6} = 0.75\text{Kg}$

표 3.12.31 시스템 폐기물처리비 (10hr 가동 시)

	항목	발생량 (톤/일)	처리단가(원/kg)	금액 (원/일)
폐기물처리비	슬러지	0.03	100,000	3,000
합계				3,000

∴ 최종 슬러지량 평균 30kg/day

나. 시스템 운전매뉴얼

(1) 운전방법

(가) 원수펌프 가동

엔진펌프의 연료 및 엔진오일 점검 및 호스연결을 하고 펌프 상부 캡을 열어 마중물을 넣어주며, 리코일을 당겨 시동을 걸어주면 원수가 공급 된다.

(나) 엔진 발전기 가동

엔진발전기의 연료 및 엔진오일 점검 후 리코일을 당겨 시동을 걸어준다.

리코일을 당겨 시동을 걸어주면 약품공급펌프 및 DC 파워서플라이 전원이 공급 된다.

(다) 약품 공급

약품탱크에 약품을 공급한다.

약품공급펌프의 플러그를 엔진발전기 AC 콘센트에 연결한다.

약품펌프가 작동되며 약품이 공급되어지는지 확인한다.

(라) 촉매 전원연결

촉매 탱크의 상부 단자선을 엔진 발전기 DC 콘센트에 연결한다.

(마) 정상 작동하는지 확인한다.

(2) 운전 중 점검사항

- 엔진 펌프의 연속 가동 시간은 1시간30분 정도이며, 시동 정지 후 연료를 재급유 하고 가동한다.
- 엔진발전기의 연료도 확인하여 부족하면 재급유 후 가동한다
- 약품공급 펌프의 가동여부 및 약품 공급여부 점검
- 원수펌프의 운전 압력은 2 kg/cm², 에어공급 유량계는 3L/MIN
- 적정 압력 및 유량이 되도록 밸브로 조정한다.
- 약품 탱크 약품량 확인

5. 요약 및 결론

본 절에서는 제안된 맞춤형 간접재이용시스템 물처리 공정을 바탕으로 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템, 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템, 그리고 이동식 간접재이용시스템 등 유형별 간접재이용시스템을 개발하고, 현장적용을 통한 실험을 수행하였다. 본 절의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 하천보를 활용한 소용량 간접재이용시스템을 수원하수처리장에 위치한 하천보를 활용하여 설치 및 운영하여 시스템효율 및 경제적 타당성에 대하여 분석하였다. 소용량 간접재이용시스템의 주요 공정은 수중에 침지형으로 설치되고 원수를 장치내로 유입시켜 미생물 및 부유물질을 제거하는 유입 전처리부와 원수의 미세부유물질을 제거하는 오토스크린 필터부, 필터 하단에 장착되어 극미세 버블을 생성시켜 오토스크린 필터 내부로 나노버블 세척수를 공급하는 나노버블 제너레이터 그리고 자외선으로 살균 소독하여 처리된 처리수로 시스템으로 구성된다.

② 하천보를 활용한 소용량 간접재이용시스템을 제작하여 현장에 적용한 결과, SS 처리효율은 약 62%, BOD 처리 효율은 42%, 탁도 처리 효율은 39%, 총 대장균군 처리 효율은 약 99% 로 나타났으며, 방류수의 분석결과 용존 산소량(DO)의 수치도 원수 대비 약 20% 증가한 것으로 나타났다.

③ 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템은 정채되어 있는 하천수나 호소수의 부유물질을 포함하는 슬러지 등 바닥에 침전물이 쌓이지 않도록 연속적 리사이클 운전이 가능함으로 놓여준 양수장 펌프 앞단에 장착 되어 기존 펌프 에너지를 활용할 수 있다. 기존의 소용량 간접재이용시스템에서처럼 여재 (유기계) 섬유 필터 교환 없이도 사용이 원활하며, 특히 현장 운전시 관리자가 운전이 어려움 없이 ON/OFF만으로 개발된 시스템을 사용 할 수 있도록 운전 시스템을 단순화하였다.

④ 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템은 방류수뿐만 아니라 하천의 농업용수 취수지역 등에 다양하게 응용할 수 있으며 전기비만 소요되고 별도의 필터교체는 없는 구조이기 때문에 유기막 계열의 멤브레인 필터에 비해 유지비용이 저렴하고 유지관리성도 매우 뛰어날 것으로 예상된다. 또한, 극미세버블과 사이클론 기술을 채용하였기 때문에, 침강성이 강한 고형물을 포함하는 폐수처리뿐만 아니라, 부유성이 높은 미세 입자 제거효율이 높으며, 응집제와 같은 화학약품 사용이 없어 2차 수질오염의 문제가 없는 것 또한 농업용 목적의 물 처리장치로 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

⑤ 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템을 제작하여 적용한 결과, SS 약 75%, BOD 약 48%, 탁도 41%, 총대장균수는 99%이상의 처리효율을 보이는 것으로 나타났다.

⑥ 이동식 간접재이용시스템은 pH, 온도에 영향 없이 유입된 오염물질을 1초 내에 응집하여 20초 이내에 부상 분리하는 초고속 시스템으로 초고속 전자유도모듈 및 분리타워로 구성되어 실시간 외부 순환형 가압부상시스템으로 차량 이동식으로 구성되어 있으며 별도의 교반응집 침전시설 부대시설이 필요치 않고 연속적으로 처리하므로 전체공정의 공사비 및 체류시간을 감소시켜 단기적이고 집중적인 부유물질 제거가 가능하다

⑦ 이동식 간접재이용시스템은 부유물질 제거뿐만 아니라 수질을 평가하는 항목 중 용존성 유기물질, COD, T-N, T-P, Chl-a, 탁도 및 투명도 등을 제거함으로써 단시간 내에 충분한 수질개선 효과를 볼 수 있으며, 현장 실험 결과, SS 처리효율은 약 92%, 녹조 처리효율 약 99%, 총질소 처리효율 약 41%, 총인 처리효율 약 97%, 총대장균군 수 처리효율 약 95%로 나타났다.

⑧ 이동식 간접재이용시스템은 농업용수가 부족한 농어촌 지역에 신속한 대처가 가능함에 따라 지역민의 수요에 맞는 농업용수 공급은 물론, 지역 주민에게 쾌적한 수변 생태공간을 제공하고, 도시인근 오염지역 또는 하수처리장 등 생활오수를 법정 기준에 맞게 재처리할 수 있기 때문에 다양한 용도로도 사용할 수 있다.

제13절 실용화 목적의 현장적용 방안 분석

1. 서론

하수처리수를 농촌용수로 이용하는 지역은 다음 2가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫째는 기존에 취수하던 농촌용수 취수지점 상류지역에 하수처리장이 새롭게 건설되면서 차집관거로 인해 하천으로 방류되는 수량이 모자란 경우이고, 둘째는 하수처리장을 신설하면서 시설내에 농촌용수 공급 펌프를 구비하여 주변 농민의 요청에 의해 공급하는 경우이다. 이러한 지역은 주로 시군에서 농촌용수를 관할하는 지역에서 사용하는 것이 특징이 있다. 그 이유는 한국농촌공사에서 관할지역의 경우는 농촌용수개발을 통해 수원공을 건설하여 수혜지역에 용수를 무상으로 공급하고 있으나 시군관할지역의 경우는 수리계가 스스로 관개용수사용에 대한 유지관리비용을 지출해야하고 전문 인력이 아니기 때문에 유지관리가 용이하지 않을 뿐만 아니라 관리비용 또한 소요되기 때문에 무상으로 이용할 수 있고 안정적인 용수를 공급받을 수 있는 하수처리수를 이용한다. 이처럼 주변상황으로 인해 하수처리수를 농촌용수로 이용할 수밖에 없는 지역이 발생하고 있고 앞으로도 하수처리장이 계속 증설되고 있는 한 기존의 농업수리시설물에 대한 하수처리수의 영향이 더욱 커질 것으로 판단되므로 하수처리장 주변의 농업기반시설에 대한 지속적인 관리가 필요하다.

본 절에서는 기존의 농업기반시설에 영향을 주고 있는 하수처리수를 안전하게 농업용 목적으로 재이용하기 위해서 하수처리장으로부터 일정한 거리에 인접하거나 하수처리수 방류지점 하류에 위치한 농업기반시설의 하수처리수에 대한 영향정도를 평가하기 위해 GIS 기법을 이용하여 재이용 관리지역을 선정하였다. 또한, 유관기관과의 협의를 통해 현장적용방안을 마련하였다.

2. 간접재이용 관리지역 선정

하수처리수가 간접적으로 농촌용수로 사용되는 지역은 도상 검토 및 현장조사결과로 여러 지역에서 농촌용수로 사용중에 있는 것으로 조사되었다. 또한 직접적인 취수방법은 아니더라도 하수처리장 주변에 지하수를 농촌용수로 사용하고 있는 지역의 경우는 하수처리수에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 따라서 하수처리장이 인근에 위치한 농업기반시설을 이용한 깨끗한 농산물 생산과 친환경적인 영농환경을 제공하기 위해서는 하수처리수에 영향을 받고 있는 지역을 관리할 필요성이 있다.

농업기반시설(저수지, 취입보, 양수장)에 직접 또는 간접으로 영향을 주고 있는 하수처리장을 관리하기 위한 목적으로 GIS 기법을 이용하여 농업기반시설로부터 일정거리 이내이면서 상류에 위치한 하수처리장을 추출하여 농촌용수 재이용 지구로 선정하였다. 이렇게 선정한 관리지구에 대해서는 향후에 등급화를 통해 등급별 하수재처리기술을 설계하고 영향이 심각한 지구에 대해서 하수재처리기술을 적용하고자 한다.

추출방법은 우선 1차 선정방법으로 GIS분석기법 중 한가지인 버퍼(Buffer)기능을 이

용하였다. 1차선정의 기준은 하수처리장을 기준으로 반경 500m, 1000m, 1500m, 2000m, 3000m, 5000m 내에 위치한 주요 농업기반시설의 유무로서 총 469개소의 하수처리장에 대한 공간 분석을 실시하였다.

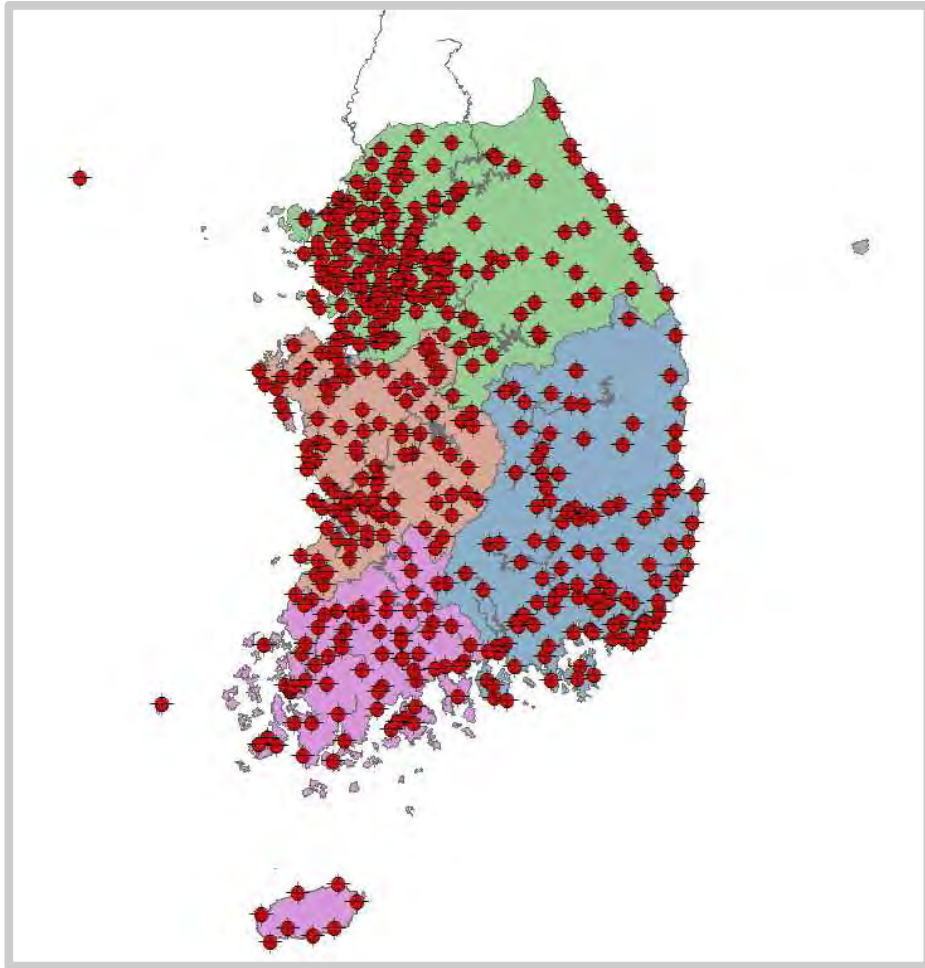


그림 3.13.1 농촌용수 간접재이용 관리지구

표 3.13.1 유역별 재이용 관리지구 하수처리장 주변 농업기반시설

유역명	하수처리장 개소	거리기준 농업기반시설 개소					
		500m	1000m	1500m	2000m	3000m	5000m
한강	182	79	216	405	676	1260	2670
낙동강	114	58	220	496	843	1757	4159
금강	98	57	179	361	623	1242	2971
영산강	67	36	125	283	488	1044	2513
제주	8	0	0	0	0	1	1
합계	469	230	740	1,545	2,630	5,303	12,313

3. 현장적용방안

3.1. 사업명: 왕송지구 농업용수 수질개선사업 기본조사

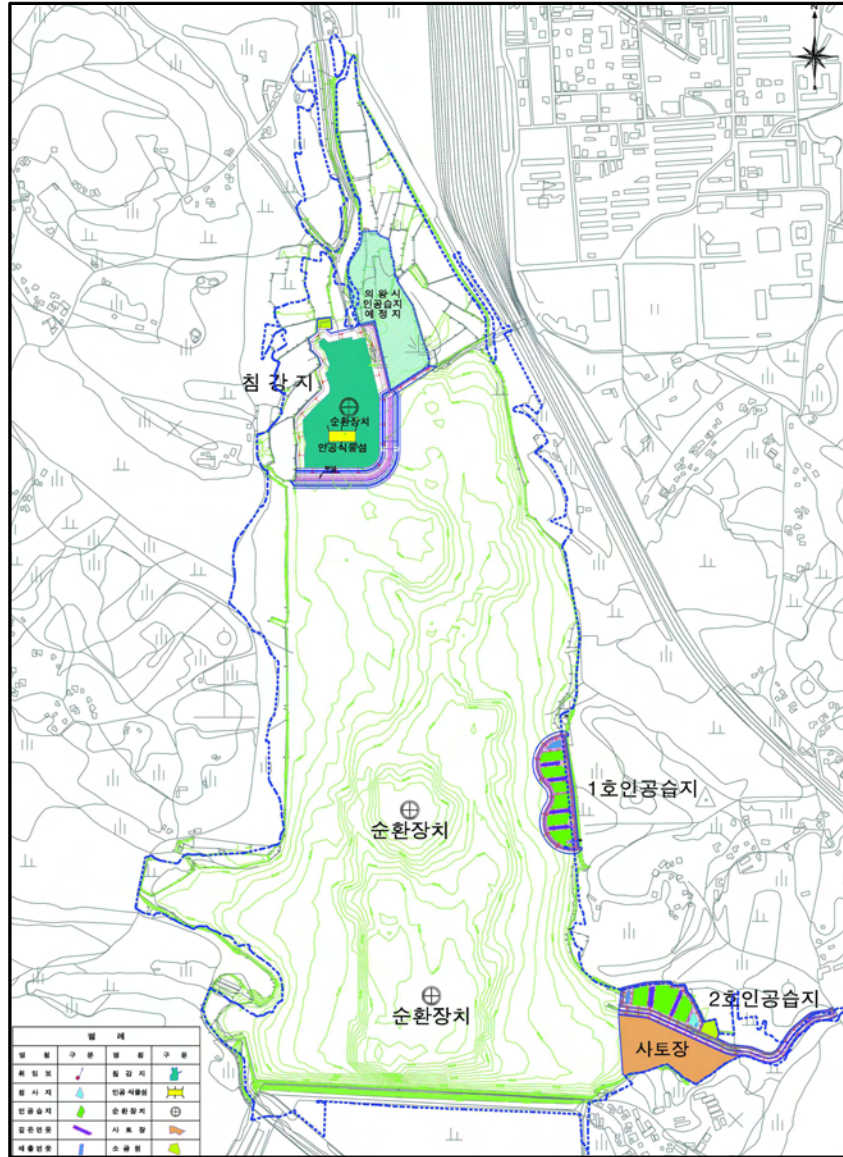


그림 3.13.2 왕송지구 농업용수 수질개선사업 계획평면도

3.2. 사업목적

사업의 목적은 수질기준을 초과한 농업용 호소의 수질을 개선하여 환경정책기본법 시행령 호소 생활환경기준 IV등급(농업용수)에 적합한 수질을 유지시키는데 있다. 수질기준을 만족하면 양질의 농업용수 공급을 통해 안정적 농산물생산 기반구축 및 안전한 농식품 공급으로 국민건강을 보호하고, 환경친화적 수질개선을 통한 건전한 농업 농촌환경 구축과 지속가능한 농업기반의 조성이 가능해질 것이다.

3.3. 추진방향

저수지 내부나 유입부에 인공습지, 침강지, 인공식물섬, 물순환장치 등 수질정화시설을 계획하여 농업용수원의 수질을 개선시키고, 사업의 효과를 높일 수 있도록 전문가 자문, 국내외 사례조사, 신공법 평가 등을 통해 적용 가능한 부분을 최대한 반영한다.

또한 환경친화적인 수환경을 조성하여 시민휴식공간을 제공하고 사업홍보효과를 제고할 수 있도록 사업계획을 수립하고, 기본조사는 수질, 생태, 토양, 퇴적물조사 및 수질예측모형 구축, 수질개선대책 기본구상 및 기본설계 등을 추진한다. 수질개선대책은 상류대책과 호내대책을 병행하는 것으로 계획한다.

3.4. 기본조사 내용

가. 왕송저수지 현황

왕송저수지는 경기도 의왕시 월암동 일원에 위치하며, 왕송저수지 유역은 의왕시 삼동, 월암동, 이동, 초평동, 군포시 부곡동, 수원시 권선구 입북동 일부로 3개시 6개동에 해당되며, 유입하천은 금천천, 신촌천, 월암천, 창말천 등이 있다. 왕송저수지에 관한 현황은 표 3.13.2와 같다.

표 3.13.2 왕송저수지 현황

조성년도	유역면적	만수면적	수혜면적	총저수량	제당높이	제당연장
1948년	1,555 ha	83.6 ha	540 ha	2,079천톤	8.2 m	640 m

나. 수리·수문조사 결과

표 3.13.3은 왕송저수지 유역의 수리·수문조사 결과를 소유역별로 나타낸다.

표 3.13.3 왕송저수지 수리·수문조사 결과

유역번호	유역면적 (ha)	총유출량 (mm/년)	유출율 (%)	유입량 (천m ³ /년)	첨두홍수량 (m ³ /s)	토양피복형수 (CNIII)	홍수도달시간 (hr)
1	666.0	894.7	66.2	5,958.6	99.1	91	0.84
2	191.3	739.4	54.7	1,414.4	28.7	91	0.86
3	112.1	796.3	59.0	892.6	19.0	91	0.42
4	80.5	798.9	59.2	643.1	13.6	91	0.35
5	163.2	801.9	59.4	1,308.7	24.4	90	0.70
6	62.4	818.7	60.6	510.9	12.0	92	0.18
7	195.9	879.4	65.1	1,722.8	33.5	92	0.53
저수지	83.6						
계	1,555.0	5,729.3	60.6	12,451.1			

다. 오염원 및 배출부하량

유역 내 총 거주인구는 28,297명으로 이중 하수처리인구는 23,761명으로 84.0%에 해당하며, 미처리인구는 16.0%인 4,536명으로 조사되었다. 유역 내 사육되는 가축은 한우 159두, 젓소 45두, 돼지 800두, 말 24두, 사슴 35두이며, 분은 모두 퇴비화처리 (한우, 젓소, 돼지, 말, 사슴)가 되고 뇨 14.5 m³/일 (돼지, 젓소)는 의왕축산폐수공공처리장으로 이송 처리되고 있다. 산업체 중 폐수가 개별처리 후 하천에 직접 방류되는 업체는 1개소 (5 m³/일)에 불과하며, 그 외는 하수처리장에 유입 또는 위탁처리 되고 있다. 부곡하수처리장 방류수 1,911m³/일이 금천천을 유하하여, 왕송맑은물처리장 방류수 12,627 m³/일이 직접 저수지로 유입되는 것으로 조사되었다.

토지이용 현황을 살펴보면, 전체 유역에서 논이 12.1%, 밭이 20.2%, 임야가 31.5%, 대지가 31.4%, 기타가 4.8%를 차지하고 있다. 전체 유역에서 소유역1이 45.3%, 소유역7이 13.3%로 대부분을 차지하고 있으며, 특히 소유역7은 도시화가 진행되어 대지의 비율이 58.9%로 매우 높은 것으로 조사되었다.

표 3.13.4 왕송저수지 유역 오염원 및 배출부하량

구 분		배출부하량(kg/day)			비고
		BOD	T-N	T-P	
합 계		654.5	349.1	22.4	
생활계	인구	434.0	139.1	11.9	주오염원
	부곡하수처리장 방류수	3.5	15.1	0.2	
	왕송맑은물처리장 방류수	17.1	127.5	2.3	
축산계	가축	14.9	16.1	1.5	
산업계	배출시설	0.4	0.3	0.0	
토지계	비점오염	184.6	51.0	6.5	

라. 수질조사 결과

유입하천의 BOD는 0.4~7.7 mg/L, 하천 생활환경기준 매우 좋음(I a 등급)~약간나쁨(IV등급)으로 나타났으며, COD는 3.0~10.2 mg/L, 하천 생활환경기준 좋음(I b 등급)~나쁨(V 등급)이었다. T-N은 2.357~6.088 mg/L로 최소값 대비 최대값이 2.6배로 시기별 변화는 크지 않았으며, T-P는 0.069~0.232 mg/L, 하천 생활환경기준 약간좋음(II 등급)~약간나쁨(IV등급)으로 나타났다.

하수처리장 방류수의 BOD는 0.9~2.2 mg/L, 하천 생활환경기준 매우좋음(I a 등급)~약간좋음(II 등급), COD 3.6~7.0 mg/L, 하천 생활환경기준 좋음(I b 등급)~보통(III 등급)이었으며, T-N은 6.027~12.055 mg/L로 호소 생활환경기준 IV등급(농업용수)의 6배~12배로 매우 높게 방류되어 저수지로 유입되고 있다. T-P는 0.071~0.259 mg/L, 하천 생활환경기준 약간좋음(II 등급)~약간나쁨(IV등급)으로 나타났다. 방류수의 유기

오염물질은 호소 생활환경기준 IV등급(농업용수)을 만족하지만 호소 부영양화 현상을 유발하는 영양염류는 기준을 2배 이상 초과하여 저수지로 유입되는 것으로 나타났다.

왕송저수지의 '11년 농업용수 수질측정망조사 및 본 기본조사 결과(8회, 3월~11월) 저수지 상류, 중류, 하류 3지점 평균 COD 7.0~10.3 mg/L, 호소 생활환경기준 약간나뽀(IV등급)~매우나뽀(VI등급)이었다. 3지점 평균 T-N은 1.032~10.882 mg/L, 호소 생활환경기준 나뽀(V등급)~매우나뽀(VI등급)이며, T-P는 0.080~0.175 mg/L, 호소 생활환경기준 약간나뽀(IV등급)~매우나뽀(VI등급)이었다. 호소 부영양화 현상을 유발하는 영양염류는 전체 평균 N/P 비가 32로 총인이 제한인자로 작용하여 총질소는 수질 기준을 적용하지 않는다.

농식품부 수질측정망 및 본 기본조사 전체 평균 COD는 8.7 mg/L, T-P는 0.132 mg/L로 호소 생활환경기준 V등급(나뽀)으로 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하는 수질로 하수처리장, 하수관거 정비 등의 상류대책과 인공습지, 침강지 등의 호내대책과 같은 수질개선대책 필요한 것으로 판단된다.

표 3.13.5 왕송저수지 '07~'11년 수질변화 추이(농식품부 농업용수 수질측정망 조사결과)

년 도	'07	'08	'09	'10	'11	평균	수질등급
COD(mg/L)	16.3	9.7	9.1	9.7	7.9	10.5	VI등급
T-N(mg/L)	4.419	2.567	3.963	4.273	4.726	3.990	
T-P(mg/L)	0.189	0.080	0.074	0.066	0.133	0.108	

참고: 수질기준(IV등급)-COD 8.0mg/L, T-N 1.0mg/L, T-P 0.1mg/L

마. 퇴적물환경

표 3.13.6은 왕송저수지 퇴적물환경을 저수지 상류·중류·하류 등 지점별로 주요항목에 대해 보여준다.

표 3.13.6 왕송저수지 퇴적물환경

지점명	평 균	저수지 상류	저수지 중류	저수지 하류
유기물(%)	3.82	3.59	4.07	3.79
총질소(mg/kg)	1,948.8	1,476.8	2,247.3	2,122.6
총인(mg/kg)	1,363.3	1,089.9	1,371.3	1,628.6
강열감량(%)	6.6	5.6	7.5	6.7

바. 수질개선사업 기본계획

표 3.13.7은 왕송저수지 수질개선사업의 기본계획을 상류와 호내로 구분하여 보여준다.

표 3.13.7 왕송저수지 수질개선사업 기본계획

구분	대안	시설	규모	비고
<input type="checkbox"/> 상류대책(의왕시·군포시 추진)				
1	하수처리	왕송맑은물 처리장 (축산폐수공공 처리시설 연계)	운영중('99년, 시설용량 : 15,000m ³ /일) ▪ T-P 고도하수처리시설 추가('07 준공) ▪ 하수처리수 재이용(공사중, '11.12 준공, 도로청소용수 170m ³ /일, 하천유지용수 5,000m ³ /일)	의왕시 운영중
2	하수처리	부곡하수 처리장	운영중('10년, 시설용량 : 4,500m ³ /일)	군포시 운영중
3	하수처리	하수관거 정비	유역외 위치한 안양하수처리장 이송 처리 ▪ 당동2주택사업 내 8,307인 처리 ▪ 공사중('12.6 준공)	군포시 공사중
4	방류수 T-N 고도처리	왕송맑은물 처리장	처리장 방류수 T-N 10mg/L 이하 처리 ▪ 계획('12년 공사 예정)	의왕시 계획
5	비점오염 저감시설	인공습지	소유역1 금천천 유입부 2.1ha(순수면적) ▪ 사업기간 : '11~'13 ▪ 사업비 : 2,134백만원(실시설계 중)	의왕시 계획
		저류조	소유역7 삼동 비점 처리용 600m ³ /d ▪ 계획('13년 준공 예정)	의왕시 계획
6	하수처리	하수관거 정비	소유역7 삼동 일대 합류식 하수관거 → 분류식 하수관거 ▪ 계획('20년 준공 예정, 구역·단계별 공사)	의왕시 계획
<input type="checkbox"/> 호내대책				
1	평시 및 강우 유출수 처리	제2호 인공습지	소유역5 월암천 유입부 ▪ 면적 : 17,564m ²	비점오염 물질 처리
2	왕송맑은물처리 장 방류수 등 처리	제1호 인공습지	하수처리장 방류수 및 소유역6 일부 강우유출수 처리 ▪ 면적 : 13,575m ²	영양염류 처리
3	강우유출수 처리	침강지	소유역1 및 2 처리용 침강지 1개소 ▪ 침강지 유형 : 보조댐형 ▪ 면적 : 45,810m ² (평균수심 3.0m) ※ 인공식물섬 설치 : 1,000m ² - 침강지 녹조발생억제, 경관 개선 등	비점오염 물질 처리
4	물순환	물순환장치	침강지내 1기, 제당 앞 1기, 호심 1기 설치	저층수 파괴 및 녹조방지

4. 현장시연회 개최

4.1. 개요

본 연구에서 개발된 간접재이용시스템의 현장적용을 위해서 현장유지관리 직원을 포함하여 30여 명을 대상으로 2012년 10월 29일 TEST-BED 현장시연회를 개최하였다. 시연내용은 간접재이용시스템에 대한 유입원수와 처리수의 비교 시연 및 수질분석 결과, 그리고 막세정시스템에 대한 기존세정 적용 분리막과 막세정을 적용한 분리막을 서로 비교하였다 (그림 3.13.3).

표 3.13.8 시연회 참석자 명단

부서명	인원	참석자	비고
계	30		
화성수원지사	20	본부 유지관리팀 및 지사 유지관리직원 등 20명	
농어촌연구원	4	수자원연구팀장 등 4인	
과제연구진	6	서울대학교, (주)블루인바이로먼트엔텍 등 5인	

표 3.13.9 시연회 프로그램

소요시간(60')		내용	비고
15:00	05'	인사말(농어촌개발연구소장)	진행: 김해도 박사
15:05	05'	연구시설 개요 소개	김해도
15:10	10'	간접재이용시스템 공정 소개 및 시연	서울대학교 (정한석 연구원)
15:20	10'	막세정 시스템 공정 소개 및 시연	블루엔텍 (홍민 대표)
15:30	30'	유지관리직원 질문 및 답변	

4.2. 시연회 결과

시연회를 통해 도출할 수 있었던 결과는 병점양수장과 같이 관할 시설 중 용수 수질이 걱정하지 않은 지역이 많은데, 유지관리가 불편할 경우 아무리 좋은 시설을 설치하더라도 외면 받을 수 있다는 사실이다. 이러한 현장애로사항을 모두 고려하여 현장시연회에서 평가받은 연구시설을 적극 활용하여 농어촌공사의 각 지역 저수지를 관리하는 지사의 업무에 도움이 될 수 있는 방향으로 추진되어야 한다.



그림 3.13.3 현장시연회 사진

4.3. 화성·수원지사 관할 시설중 연구원 제안 시설 현황

가. 병점 양수장 재이용 시설 설치

- 설치년도 : 2006. 7
- 재 원 : 수리시설개보수사업비(동방지구)
- 사업주체 : 화성·수원지사(발주)
- 설치내용 : 농업용수 소독시설(자외선), 8,000m³/일 규모
- 연 구 원 : 프론티어 연구를 통한 개발기술 실용화(서울대)

- 현재상태 : 동절기 잔류용수량 결빙에 따른 자외선램프 및 밸브 동파
- 향후계획 : 지사 개보수사업비로 수리 예정(설치업체 견적서 제공)



그림 3.13.4 병점양수장 재이용시설

나. 반정양수장 농업용수 수처리 시스템

- 설치년도 : 2010년
- 재 원 : 광고택지개발사업비(원천저수지 →신규양수장 수원공 변경)
- 사업주체 : 화성·수원지사(설계 : 경기도본부)
- 설치내용 : 농업용수 수처리장치, 70,000m³/일 규모
- 연구원 : 농기평 연구(FDA 시스템)를 통한 개발기술 실용화
- 현재상태 : 부분가동
 - 70,000m³/일 규모에 맞추어 설치된 펌프별로 수처리장치 설치(3대)
 - 실제 운영은 20,000m³/일 미만으로 펌프를 한 대만 구동
 - 3대의 수처리 장치를 모두 이용하기 위해서는 추가배관작업 필요
- 향후계획 : 지사 개보수사업비로 수리 예정(설치업체 견적서 제공)



그림 3.13.5 반정양수장 수처리 시설

다. 현장 설치 내용

- 하수처리수 간접재이용시스템 파일럿 모듈
 - 기술목표 : 농업용수 수질기준이내 공급 및 고품질 농업용수 생산
 - 적용기술 : 물리적 수처리를 통한 유해물질 저감(BOD, 탁도, 대장균)
 - 적용대상 : 농업용수로 사용하기 부적절한 용수를 취수하는 농업기반시설
 - ※ 하수처리수, 도심지 관통하천에 위치한 농업기반시설(양수장, 취입보)
 - 현장설치 : 60m³/일 규모의 파일럿 장치
 - 주 안 점 : 유지관리비용 및 노력 저감을 위한 필터 무교체(STS 재질)

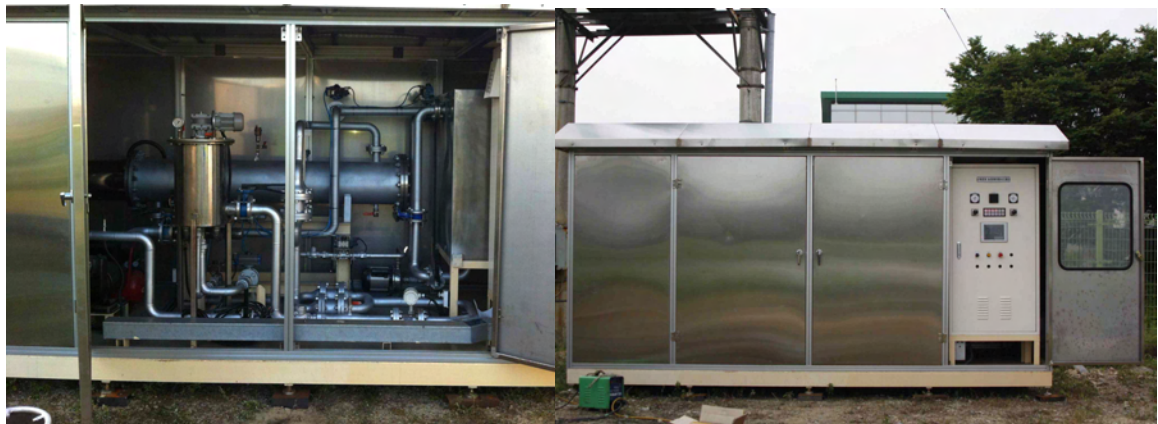


그림 3.13.6 간접재이용시스템 파일럿 모듈

- 경제적 유지관리를 위한 막세정시스템 모듈
 - 기술목표 : 수처리 목적의 분리막 적용시 경제적, 관리적 편의 증대
 - ※ 기존 세정액 소요 대비 50% 저감 및 분리막 교체주기 증대
 - 적용기술 : 나노버블 주입에 따른 분리막 세정력 증대(물리적 세정효율 증대)
 - 적용대상 : 수처리 목적으로 이용되는 모든 분리막 CIP 공정 대체
 - 현장설치 : 같은 유입수 조건 전제 기존세정방법 대비 막세정모듈 성능시험
 - 주 안 점 : 분리막은 약품에 의한 세정공정(CIP)이 반드시 필요함



그림 3.13.7 막세정시스템 모듈

5. 성과공유과제 시행

5.1. 개요

성과공유제란 중소기업이 원가절감 등 중소기업·한국농어촌공사 간에 합의한 공동 목표를 달성할 수 있도록 한국농어촌공사가 지원하고 그 성과를 중소기업과 한국농어촌공사가 공유하는 계약모델을 말한다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 토대로 성과공유과제에 차량이동식 녹조제거 시스템과 극미세 가압부상 시스템의 두 건에 대해 성과공유 공모를 실시하였으며, 그 중 가압부상 시스템에 대해 중소기업과 한국농어촌공사가 계약을 맺어 운영 중에 있다.

5.2. 저수지 수질 정화를 위한 극미세 가압분리 부상 시스템 연구

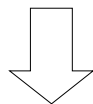
가. 개발 내용

- 장기적 대책 추진
- 조류의 생태적 특성을 고려한 저감 방안 도출 및 적용
- 부영양화의 원인이 되는 영양염류 중 특히 인과 질소의 유입을 제한하여 호소 이 자정능력에 의해 수질을 양호한 상태로 유지할 수 있도록 함
- 녹조발생에 현황에 따른 모니터링 기반 상황별 최적기술 적용
- 하천, 저수지, 호수수에 특성에 따른 복합적 녹조제거기술 적용



그림 3.13.8 장기적 녹조제거 개발

- 저수지로 유입되는 오염물질을 사전에 저감 하여 후단 저수지 수질 환경 개선
- 습지의 수질정화 능력으로 일부 유기물을 저감한 후 NET-H 시스템과 병행 처리하여 조류제어의 효율성을 높임
- 오염물질 (녹조, 부유물질, T-N, T-P, BOD, TOC) 저감을 위한 최적화 기술
- 기존 시스템 공정 대비 에너지 소비 효율을 극대화 Hybrid 공정 적용
- 특히 짧은 운전(반응) 시간으로 처리 능력 극대화



NET-H SYSTEM

- 극미세버블과 촉매모듈의 전기적 응집을 이용한 가압부상법으로 수중에 존재하는 조류 및 질소, 인, 부유물질 등을 제거
- 기존의 조류 제거장치보다 빠른 속도로 조류를 응집 및 부유시켜 제거
- 조류를 빠르게 제거할 수 있고, 처리시간을 절약할 수 있으며 대용량의 조류제거에 효과적
- 유입수에 많은 녹조가 발생하는 경우 효과적으로 대응이 가능
- 급속교반조, 완속교반조 없는 컴팩트한 공정으로 오염물을 처리하므로 전체공정의 공사비 및 체류시간을 감소

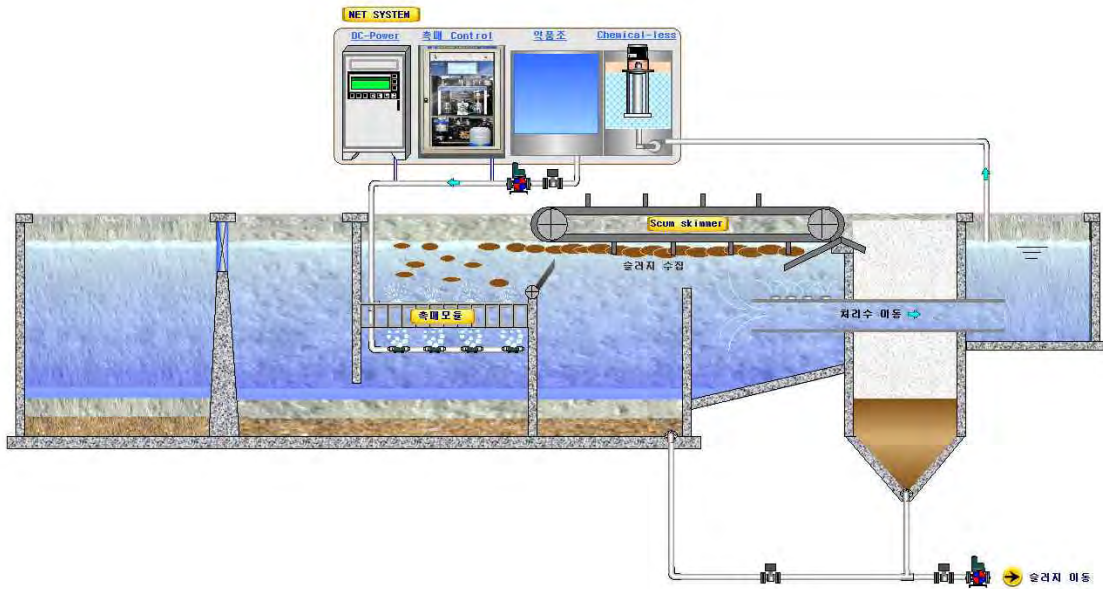


그림 3.13.9 NET-H System 공정 구성도

나. 신청기술의 원리

(1) 극미세 버블과 촉매모듈 분리 작용에 의한 녹조 제거 특성

가압부상법으로 극미세버블(10-50 μm 의 미세기포)를 응집제와 함께 수체내 가압, 분사시킨 후 촉매모듈 장치로 활성 가압수 안에 포함된 오염물질에 강한 전압을 주어 전기장을 통해 제타 변위를 변화시켜 오염물질을 초고속으로 응집시켜 플록화 되도록 시켜 오염물의 부상과 유기물 산화 및 살균효과를 동시에 유도하여 수계에서 조류와 영양염류를 제거한다.

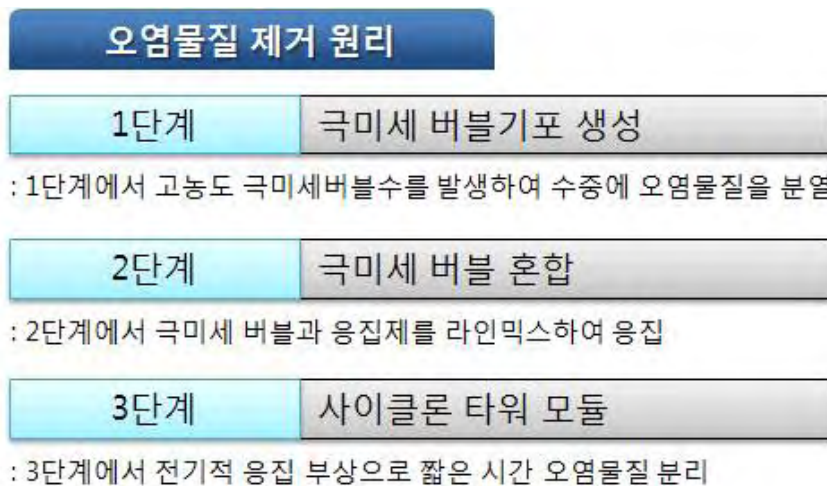


그림 3.13.10 오염물질 제거 원리



그림 3.13.11 NET System 구성원리

본 기술은 조류 뿐만아니라 SS, TN, TP, BOD, COD 저감 효과가 탁월하다. 모듈형 이동식 녹조 제거장치 ET 공법으로 원천기술은 전기이온 농업재이용시스템 공법(ECRS)에서 나왔으며, 국내 응집 기술 및 장비들에 의해 여러 시범사업이 이루어지면서 이 기술에 대한 연구가 본격화 되었다.

초기에는 단순히 전기에 의한 응집 제조로 전기분해 의한 버블 공기가 용출되면서 생성되는 기포에 의한 수중 오염물질 제거기술 이었지만, 지금은 다양한 방법으로 다양한 미세기포를 생성하는 기술들이 꾸준히 개발되어 초기설비들보다 크기가 작아지면서 효율은 커지는 기술발전을 이루고 있다.

(2) 초미세 기포의 특색

① 같은 양의 기체를 용해시켰을 경우에 개수가 많다.

개수가 많다는 것은 부유물질에 접촉하는 기회가 많게 되는 것이다. 따라서 토양입자가 부유하고 있는 오염이나 플랑크톤 등의 고체를 보충하는 효과가 크다. 또 부상할 때에 수면 가까이에서 부상간섭을 발생시키므로 수중 체류시간을 길게 한다. 공기에 의한 실례에서는 오수중의 초미세기포를 수 시간 유지할 수 있다. 그 결과 적당한 온도가 유지되면 호기성 박테리아 등의 생물이 대단히 활발하게 활동하여 오염된 수중의 유기물을 흡수하여 분해에 이르게 된다.

② 물과 기체와의 접촉 면적이 크다

물에 기체가 용해하는 경우의 조건 중에서 접촉 면적이 클 것이 최대의 조건이다. 이 때문에 초미세기포에서의 용해가 대단히 크고 산소공급량이 커진다.

③ 부유속도가 늦다.

수중에서 입자의 침강 및 부상은 STOKES의 법칙에 따라 입자가 작은 것 일수록 그 속도는 늦게 된다. 그로 인해 수중 체류시간이 길어지게 되므로 기체의 용해량도 많아지게 된다. 또, 물의 흐름이 있는 경우에는 초미세기포는 보다 먼 거리까지 도달하므로 넓은 면적을 지원할 수 있게 된다.

다. 신청기술의 특징

(1) 초고속 조류 제거장치를 이용한 조류 제거 실험

2013년 9월 한국농어촌연구원 연못 녹조제거를 위한 실험 및 운전을 하였다.

극미세버블과 촉매 모듈 일체형



그림 3.13.12 극미세버블과 촉매도들 일체형 시스템

공정별 주요 설비 사양과 특징은 다음 표 3.13.10~표 3.13.11과 같다.

표 3.13.10 공정별 주요 설비 사양

장 치 명	규 격	대수	재질	비고
유입 극미세 버블 1장치	3마력	1	STS304	
약품(PAC) 장치	20L	1	PE/정량펌프	
극미세 버블 2장치	STS304	1	STS304	
촉매 모듈 장치	200A 스키드	2		
DC Power Supply	220V DC(0~30A)1~40V	2		
탈수 장치		1		

표 3.13.11 공정별 주요 특징

구 분	특 징	비 고
유입 극미세 버블 1장치	고농도 극미 세버블수를 대량 발생시키는 장치	
약품(PAC) 장치	저약품 방식의 약품장치(10ppm) 운전	
극미세 버블 2장치	무동력 극미세버블로 혼합 및 운반 역할	
촉매모듈 장치	전기모듈로 수 초안에 녹조를 분리하는 역할	
처리수	깨끗한 물 생산 (재이용수로 가능-->SS 0.5mg/l)	
탈수 장치	필터프레스를 이용한 탈수 및 케익->BIO,비료 사용	

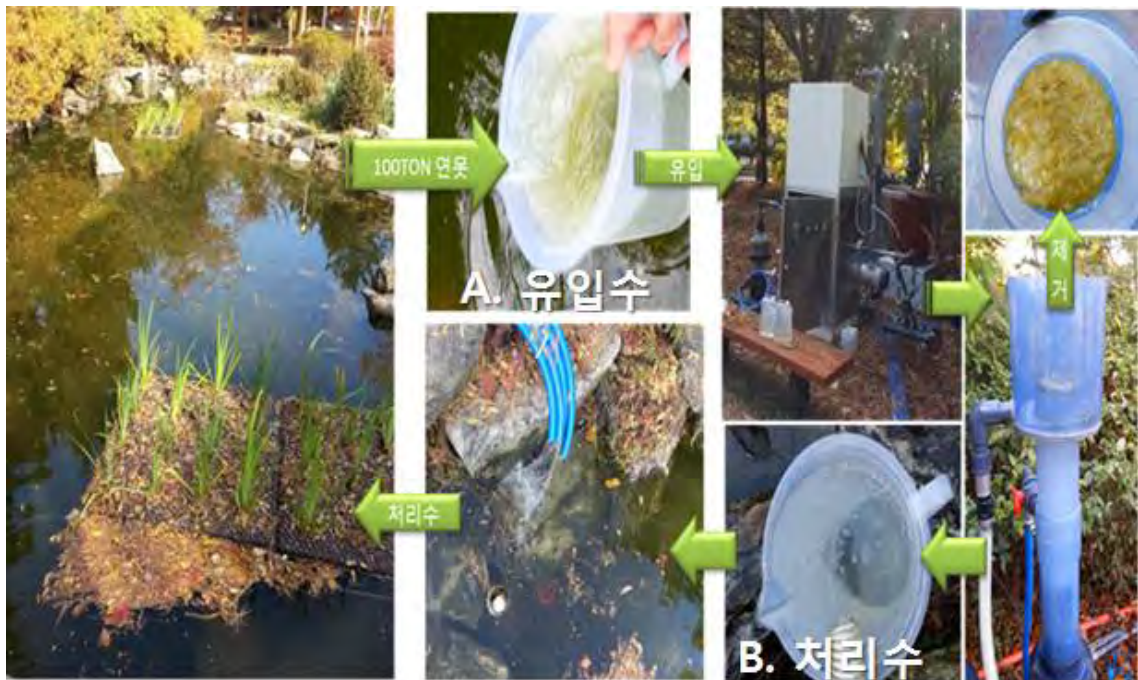


그림 3.13.13 연못녹조제거를 위한 실험사진

항목	유입수질	처리수질 ^{주)}	처리효율
BOD(mg/L)	31	0.20이하	99.4%
COD(mg/L)	90	6.00이하	93.3%
SS(mg/L)	247	0.20이하	99.9%
T-N(mg/L)	23.9	1.690이하	93.3%
T-P(mg/L)	0.426	0.0040이하	99.1%
Chl-a	196.2	0.041	100%
대장균(개/mL)	<30	불검출	100%

그림 3.13.14 연못 녹조제거 실험 결과

실험 결과 유입수 수질 BOD 31, COD 90, SS 247, T-N 23.9, T-P 0.426, Chl-a 196.2, 대장균 <30, 멀티사이클론 타워 모듈형 녹조 시스템으로 운전 후 처리수는 BOD 0.2, COD 6.0, SS 0.2, T-N 1.69, T-P 0.004, Chl-a 0.041, 대장균 불검출로 처리 효율이 평균 95%의 측정되었다. 위 그림6의 A(조류 함유 원수), B(처리수)를 육안으로 비교하였을 때에도 조류가 제거되었음을 확인할 수 있었다.

(2) 하수처리장 호기조 실험

항목	유입수질	처리수질 ^{주)}	처리효율
BOD(mg/L)	8.4	2.40이하	71.4%
COD(mg/L)	10.7	6.20이하	42.1%
SS(mg/L)	18.8	0.40이하	97.9%
T-N(mg/L)	19.3	10.80이하	44%
T-P(mg/L)	2.21	0.0260이하	98.8%
대장균(개/mL)	2,640	<30	98.9%

그림 3.13.15 하수처리장 호기조 실험 결과

평택하수처리장의 호기조에서 샘플을 채취하여 타워 모듈형 녹조제거 시스템으로 오염물질을 처리한 결과 유입수 수질 BOD 8.4, COD 10.7, SS 18.8, T-N 19.3, T-P 2.21, 대장균 2,640, 멀티 사이클론 타워 모듈형 녹조 시스템으로 운전 후 처리수는 BOD 2.4, COD 6.2, SS 0.4, T-N 10.8, T-P 0.026, 대장균 <30로 측정되었다. 특히 TP, SS값이 현저히 낮아짐을 확인할 수 있다.

(3) 신청기술의 특징

● 기술의 우수성

- 짧은 접촉시간과 주변 환경 (온도, pH)영향을 받지 않는다.
- 컨테이너 타워 모듈형으로 중, 소용량 경우 패키지 맞춤형 시스템으로 적용에 용이
- 수처리 전기시스템 R&D연구 검증 및 현장 적용으로 제주 농업용수 공급을 통해 기술 신뢰성 구축
- 녹조 제거뿐 아니라 하수방류수, 정수장 용수 정화 시스템 적용가능하다.

● 경제적 시스템

- 기존 수질정화 공법보다 처리비용이 저렴하다
- 필요시 연속적, 신속하게 시스템을 운영하여 유지 관리가 용이하다

● 높은 처리효율 및 친환경성

- 오염물의 처리시간이 빠르고 직접 가시적인 효과를 확인할 수 있다
- 처리효율이 매우 높고 자정 능력 향상, 생태계 복원 등의 부수적인 효과가 많음

● 유지관리 편의성

- 처리 용량에 대한 확장성이 우수함
- System이 간단하고 소형화되어 처리 구역으로의 이동이 수월하다

● 우수한 적용성 및 신규성

- 응용성이 뛰어나 기존 기술과 병합하여 사용할 수 있다
- 다양한 Package 상품 개발이 가능하다
- 적용분야가 넓어 차후 연관기술 개발이 가능하다
- 음용수, 중수, 재이용수 필터 대응으로 사용이 가능하다

라. 신청기술의 차별성

다음 표 3.13.12는 주요 공법별 수처리의 특징을 보여주고 있다. 또한, 표 3.13.13은 주요 공법별 경제성과 환경성, 그리고 처리성능 등을 비교하여 보여주고 있다.

표 3.13.12 주요 공법별 수처리 특징

공 법 명	특 징	수 처리 항목			
		SS	조류	TN	TP
초음파를 이용한 기술	초음파처리로 세포분열 억제 및 내낭과괴 및 성장 억제하는 기술	×	○	×	×
		처리 불가	보통	처리 불가	처리 불가
가압부상 분리 기술	마이크로버블과 응집제를 이용하여 녹조를 분리하는 기술	○	○	×	○
		보통	보통	처리 불가	
용존 오존 부상기술	오존가스+ 용존 공기부상을 이용하여 제거하는 기술로 고액분리 능력이 우수하며 또한 인 제거 탁월하다	○	○	×	○
		보통	보통	처리 불가	
막 분리 기술	UF 분리막을 이용하여 고액분리 능력이 우수하다	○	○	×	×
		우수	우수	처리 불가	처리 불가
극미세 촉매 가압부상 기술	극미세 버블과 촉매모듈을 이용하여 수초간에 분리제거 하는 능력이 우수하며 또한 녹조 뿐 아니라 질소/인 제거탁월하다.	○	○	○	○
		우수	우수		

표 3.13.13 주요 공법별 경제성, 환경성 및 성능 비교

구분	가격경쟁력	친환경성	정화성능	실시간 처리성능	총 합
극미세 촉매 가압부상 기술	높음	보통	높음	높음	매우 높음
부상 분리공법	높음	보통	높음	낮음	약간 높음
식 물 이 용	보통	높음	보통	낮음	약간 높음
인 공 폭 기	보통	약간 높음	보통	낮음	보통
천적생물 기술	보통	약간 높음	보통	낮음	보통
응집제 및 황토 살포	약간 높음	낮음	낮음	보통	보통
조류 제거선	낮음	보통	보통	낮음	낮음
준 설	낮음	낮음	약간 낮음	낮음	낮음

5.3. 과제 의 기대 효과 및 활용 방안

가. 기대 효과

(1) 기술적 측면

- 극미세버블 촉매분리 모듈(E.T)을 이용한 녹조 제거 시스템으로 기존 처리효율 보다 극대화 하여 처리수 (부유물질 및 녹조) 잔류량을 0.08ppm 이하로 제거 하므로 에너지 효율에서 녹조 제거율이 매우 우수하다. 또한 막분리(MF,UF) 수처리장치를 대체 할 수 있는 기술이다.
- 처리능력에 있어 (유입/처리수) 실시간 처리 맞춤형 기술 개발 필요
 - 물리/ 화학 복합 처리 공정 기술 메카니즘 구축
 - 이동식 사이클론 타워 모듈 시스템 인자 및 평가 구축
- 환경유지용수 확보, 수질정화, 서식처 조성 등 친환경 시스템 및 구조물 적용·설계할 수 있는 융합관리기술 확보 필요

(2) 경제 · 산업적 측면

- 국내 녹조 정화 사업은 수자원공사 상수도 녹조 및 부유물질 제거를 위한 황토, 약품 및 침전 물 회수 비용은 연간 1조 규모로 추정되며, 개발과 보전이 조화를 이루는 지속가능한 개발 개념의 도입으로 부유물질 및 녹조 제거 사업 시장 규모는 매년 확대되고 있음
- 이동식 모듈 일체형 녹조시스템 실용화 기술보유 및 용수 부족한 농어촌 지역에 신속처리 하므로 민원해결
- 이동식 녹조 제거 시스템은 녹조 뿐 아니라 도시인근 오염지역 또는 하수처리장, 마을 하수처리장 등 생활오수를 법정 기준에 맞게 재처리하여 재이용수 공급으로 적용이 가능
- 공사 신규 수익창출 및 新성장동력 확보차원에서 도시 및 농어촌지역 정화사업에 적극적인 참여 필요

(3) 사회·문화적 측면

- 기후 변화에 따른 수질환경 변화에 맑고 깨끗한 물 공급은 인류 삶의 질 향상
- 자연환경보전(정화)사업의 적극적인 참여를 통해 친환경기업으로서 공사 이미지 향상에 기여

나. 활용 방안

- 저수지, 도시 수로의 녹조 및 부유물질 정화기술을 활용으로 우리 공사 자산과 연계한 차별화된 정화 사업을 추진하여 공사 신규 수익창출에 기여
- 자연환경지킴에 대한 적극적인 관심과 정부 지원을 통해 자연생태 정화시장의 지속적인 성장이 예상됨
- 친환경생산기반 조성사업 등 농어촌정비사업의 패러다임 전환에 적극 대처 가능
- 국제 표준 이동식 정화 모델을 개발 및 적용으로 해외수출 가능

6. 요약 및 결론

본 절에서는 기존의 농업기반시설에 영향을 주고 있는 하수처리수를 안전하게 농업용 목적으로 재이용하기 위해서 하수처리장으로부터 일정한 거리에 인접하거나 하수처리수 방류지점 하류에 위치한 농업기반시설의 하수처리수에 대한 영향정도를 평가하기 위해 GIS 기법을 이용하여 재이용 관리지역을 선정하였으며, 현장적용방법에 대하여 논의하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 농어촌 지역에 영향을 미치는 하수처리수 수량 및 관개지구를 파악하기 위해 버퍼를 이용하여 하수처리장 방류수가 양수장 취입보 등 농업기반시설에 영향을 미치는 지역을 분석하였다. 그 결과 조사대상 유역 중, 한강과 낙동강 유역에서 하수처리장 방류수의 영향을 받는 농업기반시설이 상대적으로 많은 것으로 조사되었으며, 특히 하수처리장 방류구에서 1.5 km 하류에 위치한 농업기반시설이 1,500 곳이 넘는 것으로 조사되었다.

② 간접재이용시스템을 현장에 적용하는 유력한 방안으로 왕송저수지 농업용수 수질 개선사업이 검토되었다. 본 사업은 수질기준을 초과한 농업용 호소의 수질을 개선하여 환경정책기본법 시행령 호소 생활환경기준 IV등급(농업용수)에 적합한 수질을 유지시키는 것을 목적으로 하고 있으며, 이를 위해 본 연구에서 개발된 간접재이용시스템이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

③ 본 연구에서 개발된 간접재이용시스템의 현장적용을 위해서 현장유지관리 직원을 포함하여 30여 명을 대상으로 현장시연회를 개최하였다. 현장시연회는 간접재이용시스템에 대한 유입원수와 처리수의 수질 비교 및 수질 분석 결과, 그리고 막세정시스템에 대한 기존세정 적용 분리막과 막세정을 적용한 분리막의 비교 등을 포함하였다.

④ 본 연구에서 개발된 이동식 간접재이용시스템의 주요한 공정인 가압부상 시스템에 대해 중소기업과 한국농어촌공사가 계약을 맺어 성과공유제를 운영 중에 있다. 성과공유제를 통해서 중소기업·한국농어촌공사 간에 합의한 공동목표를 달성할 수 있도록 한국농어촌공사가 지원하고 그 성과를 중소기업과 한국농어촌공사가 공유할 수 있도록 추진할 예정이다.

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

하수처리수를 농업용수로 간접적으로 재이용하는 경우에 대하여 인체와 환경에의 영향을 최소화하고, 작물생육에 지장을 초래하지 않는 범위에서 안전하고 경제적인 재이용시스템을 개발 및 적용하는 것이 본 연구의 최종적인 목표이다. 3년 동안의 연구기간 동안 본 연구과제에서 목표했던 세부연구 과제들의 목적달성 정도를 평가하기 위해서는 본 연구과제의 세부 연구목표를 정량화하고 이를 평가하기 위한 주요사항에 대한 논의가 필요하다. 또한, 본 연구과제로부터 도출된 결과물이 관련분야에의 현재와 미래의 기여도를 파악으로써 본 연구과제의 결과를 정성적으로 평가할 수 있다. 따라서 본 장에서는 연구목표와 평가착안점, 그리고 관련분야에의 기술발전 및 사회·경제적 기여도를 정리하도록 한다.

제1절 연구목표 및 평가착안점

1. 연구목표

본 연구는 하수처리장 방류수를 농업용수로 안전하게 간접재이용하기 위한 저비용, 고효율 재처리 시스템 공정을 개발하고, 그 시작품을 제작하며, 현장 적용을 통하여 적용성을 평가함으로써 간접재이용 기술개발과 실용화를 목표로 한다. 또한, 미처리 하수의 농경지 유입으로 나타나는 인체 위해성을 진단하고, 수질 및 토양의 이화학적 성질에 미치는 영향 등을 현장조사하며, 그 문제점을 해결하기 위한 대책을 마련하고자 한다.

이와 같은 연구목표는 (1) 하수처리수의 간접 재이용 유형 구분 및 적정 수질기준(안)의 정립, (2) 청정지역의 작물생육과 수질, 토양환경 모니터링, (3) 미처리 하수의 농경지 유입에 따른 작물생육과 환경영향 모니터링, (4) 간접 재이용 사례지구의 선정과 작물 생육, 수질, 토양 환경 영향 및 인체 위해성 평가, (5) 간접 재이용을 위한 저비용, 고효율 수처리 공정 및 현장적용 방안개발, 그리고 (6) 간접 재이용시스템의 현장적용 및 결과 조사 분석 등을 통해서 달성할 수 있다.

2. 평가 착안점

본 연구의 평가를 위한 연구개발계획서 상의 착안점은 다음 표 4.1과 같다. 최종평가에서는 간접재이용을 위한 유형구분 및 수질기준의 적정성, 미처리 하수이용지구 및 재이용시스템적용지구 현장조사 결과의 적정성, 간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원의 적정성, 그리고 간접재이용 시제품 현장운영과 공정개선의 실용성 및 적정성 등이 주요한 평가기준이 된다.

표 4.1.1 평가의 착안점 및 기준

구분	평가의 착안점 및 기준	
	착안사항	가중치
1차년도 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용지구의 유형별 분류의 적정성 ○ 간접재이용을 위한 수질기준(안)의 적정성 ○ 현장조사 결과의 적정성 ○ 간접재이용 Test-bed 설계의 적정성 ○ 간접재이용 Test-bed 제작의 적정성 	10 30 20 20 20
2차년도 (2012)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미처리 하수이용지역 선정의 적정성 ○ 미처리 하수이용지구 및 재이용시스템적용지구 현장조사 결과의 적정성 ○ 간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원의 적정성 ○ 간접재이용 시제품 제작의 실용성 및 적정성 	20 30 20 30
3차년도 (2013)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미처리 하수이용지구 및 재이용시스템적용지구 현장조사 결과의 적정성 ○ 간접하수재이용에 따른 인체 위해성 평가의 적정성 ○ 간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원의 적정성 ○ 간접재이용 시제품 현장운영과 공정개선의 실용성 및 적정성 	30 20 20 30
최종평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 간접재이용을 위한 유형구분 및 수질기준의 적정성 ○ 미처리 하수이용지구 및 재이용시스템적용지구 현장조사 결과의 적정성 ○ 간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원의 적정성 ○ 간접재이용 시제품 현장운영과 공정개선의 실용성 및 적정성 	20 30 20 30

제2절 연구개발목표 달성도

본 연구결과를 통한 연구목표의 달성도를 도식적으로 요약하면 다음 표 4.2와 같다. 세부연구목표별 연구과제 목표 달성도는 자체적으로 평가했을 때 높은 것으로 나타났다. 다만, 간접재이용 수질기준의 제정을 위해서는 공청회와 관련부처와의 협의 등이 필요한 것으로 판단되며, 개발된 간접재이용시스템의 현장적용이 충분히 이루어지지 않았기 때문에 이와 관련한 운영 및 기술지원 등에 추가적인 노력이 필요할 것으로 사료된다.

표 4.2.1 연구개발목표의 달성도

세부연구목표	달성도 (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
하수재이용 유형구분										
간접재이용 수질기준(안)										
수질 및 토양환경, 그리고 작물생육 영향 조사										
간접재이용 영향평가 모델링										
간접재이용시스템 공정 설계 및 최적화										
간접재이용시스템 시제품 제작 및 운영										
간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원										

1. 하수재이용 유형구분

본 연구에서 유형구분은 정책을 실현하는 기관의 수월성을 위하여 최대한 유형을 간소화하고자 하였으며, 대상작물 및 관개방식 등을 포함하는 농경지의 영농조건은 간접재이용 유형구분 기준에서 제외하였다. 하수재이용과 관련한 현재의 연구수준에서 체계화되지 않았던 하수재이용의 유형을 본 연구를 통해서 우리나라 현실에 맞게 보다 명확히 구분하는 성과를 달성하였다.

2. 간접재이용 수질기준(시안)

하수처리수 재이용수의 법적규정은 2011년 6월에 제정·공포된 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 제14조 관련 별첨2에서 하·폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준을 정하고 있으며, 2013년 6월 9일부터 적용되고 있다. 따라서 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우에는 위의 법을 기본적으로 준용하여야 한다. 다만, 본 연구의 문헌조사 및 모니터링과 모델링 결과로부터 나온 간접재이용 수질기준(시안)은 기술적인 부분에서 고려할 수 있는 규범(criterion)으로서의 역할을 할 수 있을 것으로 기대되며, 당초 연구목표로 했던 간접재이용을 위한 수질기준(안)을 마련하는 것으로는 다소 부족한 것으로 평가할 수 있다.

3. 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육 영향 조사

미처리하수와 간접재이용에 따른 환경영향과 논벼 생육에의 조사 및 분석을 다음과 같이 진행하였다. 본 연구의 모니터링 결과는 미처리하수 및 간접재이용, 그리고 간접재이용시스템 적용에 따른 영향을 분석할 수 있는 기초자료로서 역할을 할 것으로 기대된다.

3.1. 모니터링 설계

본 연구 수행을 위해서 하수처리수를 간접재이용하는 대상지구와 미처리하수를 논 관개용수로 사용하는 대상지구를 선정하였다. 또한, 우리나라 논 관개용수의 대부분을 차지하는 저수지 관개지역을 대조구로 선정하여 미처리하수 및 간접재이용 지구를 처리구로 하여 비교 분석하였다. 논 관개용수를 제외한 기타 조건을 최대한 통제하기 위하여 각각의 처리구와 대비구를 인접한 지역으로 선정하고자 하였다.

3.2. 수질환경 조사

수질환경 조사는 크게 하수처리장 방류수의 영향정도를 분석하기 위한 간접재이용지구의 주하천구간에 대한 수질조사와 처리구와 대비구의 관개용수인 유입수의 수질조사, 그리고 각 처리구와 대비구의 담수 수질조사로 나누어 실시하였다.

하수처리장 방류수의 영향정도를 분석하기 위한 하수처리장 방류수 하류구간에 대한 수질모니터링은 1차년도에 이루어졌으며, 500m~1,000m 간격으로 월 1~2회 실시하였다. 처리구와 대비구의 유입수 및 담수의 수질조사는 관개기간 1~2주 간격으로 실시하였으며, 장우시와 낙수기에는 샘플링을 생략하였다.

3.3. 토양환경 조사

토양환경 조사는 크게 심도별 토양샘플링과 기초 토양샘플링으로 구분할 수 있으며, 1차년도의 경우 총 4회에 걸쳐 5개의 심도에 대해서 토심별로 채취 및 분석하였으며, 2차

년도와 3차년도의 경우 환경부의 토양오염도조사와 같은 심도에 대하여 토양을 채취하여 처리구별 차이가 발생하는 항목에 대하여 분석하였다.

3.4. 작물생육 조사

작물생육 조사는 논벼생육 시기에 모든 처리구와 대조구를 대상으로 주 1회 초장 및 분얼수를 조사하였으며, 매년 수확 후 수량구성요소 및 미질에 대해 분석하였다.

4. 간접재이용에 따른 영향평가를 위한 모델링

본 연구에서는 모니터링을 통한 연구에 추가적으로 현실적 여건이 허용되지 않는 부분에 대해서는 모델링을 통한 연구를 수행하였다. 특히, 수질모니터링 결과를 바탕으로 미처리하수, 간접재이용, 그리고 관행 관개용수의 위해성평가를 위한 최적분포를 설계하고, 인체위해성 평가를 실시하였다. 또한, 하수처리장 방류수의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 수문·수질모형을 이용하여 관개수질을 모의하였으며, 작물생육모형을 이용하여 하수 재이용 수준에 따른 적정 질소시비량을 산정하였다. 그리고 경제적으로 합리적인 수준의 재이용시스템을 마련하기 위하여 경제성 분석을 실시하였다. 이와 같은 모델링 연구는 하수처리수를 농업용수로 안전하고 합리적으로 이용할 수 있는 기초자료로서 역할을 할 것으로 기대된다.

4.1. 인체위해성 평가

인체위해성 평가를 위해서 전국 하수 및 분뇨 처리장의 하수로부터 측정한 일별 대장균수 자료를 이용하여 기본 통계치를 계산하고, 적합도 검정 및 매개변수 추정을 통해 적합한 확률분포모형을 결정하였다. 또한, 본 연구를 통해 구축한 수질자료를 바탕으로 미처리하수, 간접재이용, 그리고 관행 저수지 관개용수에 대한 하수의 병원균 지표미생물인 대장균의 확률분포모형과 그에 따른 모형의 매개변수 값을 구축하여 미생물의 정량적 위해성평가를 실시하였다. 이상의 결과는 미처리하수 및 간접재이용에 따른 적합한 대장균 수질기준의 제안을 위한 주요한 연구결과로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4.2. 관개수질 모의

SWAT 모형을 통해 모의된 간접재이용 구역의 소유역별 유출량 및 비점오염 부하량과 관개용수 취수지점의 유량을 QUALKO2 모형의 증분유입 자료와 기준유량으로 적용하여 SWAT-QUALKO2 연계 시스템을 구축하였다. 구축한 연계시스템을 이용하여 주요한 수질기준 항목에 대해 보의한 결과 BOD의 경우 4월~7월에 농업용수 수질 기준 및 친수용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준을 초과하며, 대장균의 경우 관개 기간 내내 농업용수에 대한 하수처리수 재이용 수질권고기준을 초과하는 것으로 나타나, 보건 및 환경에 대한 면밀한 검토가 필요하며 하수처리수를 안전하게 농업용수로 재이용하기 위한

재처리 시스템의 적용이 요구되는 것으로 나타났다.

4.3. 적정 질소시비량 모의

대표적인 작물생육모형인 DSSAT 모형을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의에 대한 적용성을 평가하고, 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 시비량 저감효과를 평가하였다. 하수처리수를 논벼 관개용수로 간접재이용할 경우에 기비의 비율을 저감하여 총 시비량을 절감함으로써 수환경 개선을 기대할 수 있으며, 수비의 비율을 증대하여 논벼 수확량을 증가 시킬 수 있는 것으로 모의되었다. 이상의 결과는 하수재이용의 수준에 따라 적합한 질소시비량을 결정하기위한 주요한 연구결과로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4.4. 재이용시스템 경제성 분석

하수처리수의 농업용수 재이용시스템의 경제성을 분석하기위해 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 경제성 평가모형을 구성하여 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우 발생하는 농가편익과 사회적 편익을 산정하였고, 그에 따른 한계비용을 도출하였다. 농가편익의 경우 증수효과가 시비량저감효과보다 크며, 사회적 편익에서는 수자원확보효과가 수질 개선효과보다 큰 효과를 나타냈고, 총편익에서는 농가편익보다 사회적 편익이 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 총편익에 따른 한계비용은 처리수준보다 관개면적에 더 큰 영향을 받으며, 관개면적이 커질수록 한계비용이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 하수처리수의 농업용수 재이용시스템의 최대 설치비용은 시나리오에 따라 약 4 억원에서 20억 원의 범위를 나타내며, 수혜면적이 10 ha 증가할수록 4억원 정도의 추가적인 한계설치비용이 발생하는 것으로 분석되었다. 이상의 연구결과는 재이용시스템을 현장에 적용함에 있어 주요한 참고 연구결과로 활용될 수 있을 것으로 평가된다.

5. 간접재이용시스템 공정 설계 및 최적화

최적의 간접재이용시스템을 개발하기 위하여 농업지역내 농업용수 목표수질을 선정하고, 정확한 농업용수의 요구수량을 산정하였다. 또한, 간접재이용시스템의 적용을 위하여 농촌지역으로 방류되고 있는 하수처리장의 수질 현황과 농업기반시설 현황을 분석하였다. 분석된 현황자료를 바탕으로 간접재이용시스템에 적용가능한 요소기술 분석하여, 맞춤형 최적 공정기술로서 STS 물처리시스템과 사이클론 물처리시스템 등의 처리공정을 개발하였다. 특히, 본 연구 수행과정에서 농업용 저수지 등 농업용수 관리목적의 물처리시스템을 추가적으로 제안하였다. 이상의 연구결과로부터 간접재이용을 위한 최적의 요소기술과 공정을 획득할 수 있었으며, 이를 기반으로 간접재이용시스템 시작품을 제작하였다.

6. 간접재이용시스템 시제품 개발 및 운영

획득한 최적의 요소기술과 공정을 바탕으로 병점양수장을 대상으로한 시제품을 제작하였다. 제작된 간접재이용시스템 시제품은 농업용수 수질기준을 만족하도록 하수처리장 방류수를 재처리하며, 상대적으로 저렴한 설치비용과 경제적 유지관리비 소요를 목표로 한다. 시제품 운영지역은 하수처리장 및 도심하천에 영향을 받는 기반시설(양수장)으로서 간접재이용시스템을 일처리용량 1,000m³ 규모로 설치하고 실제 하수처리수를 이용하고 있는 농업지역에 용수를 공급하도록 하였다. 시제품의 운영결과 SS는 74%, BOD 58% 등의 처리효율을 나타냈으며, 응집제와 필터교체가 없는 구조를 감안할 때 상당히 효과가 좋은 것으로 판단되어 유입수의 농도 정도 및 목표수질에 따라 후처리장치로 MF, UF 등을 연결하여 사용 시 그 활용 폭은 더욱 커질 것으로 판단된다. 다만, 연구개발비용의 제한으로 실제 영농기간 동안 광범위한 영농지역을 대상으로 장기간에 걸친 운영 및 분석은 수행하지 못한 한계가 있다.

7. 간접재이용 현장실용화지구 발굴 및 기술지원

기존의 농업기반시설에 영향을 주고 있는 하수처리수를 안전하게 농업용 목적으로 재이용하기 위해서 하수처리장으로부터 일정한 거리에 인접하거나 하수처리수 방류지점 하류에 위치한 농업기반시설의 하수처리수에 대한 영향정도를 평가하기 위해 GIS 기법을 이용하여 재이용 관리지역을 선정하였다. 또한, 간접재이용시스템의 시제품 시연회를 통해서 개발된 시스템을 현장 지사에 소개하고, 한국농어촌공사 차원에서의 성과공유제 시행을 통해서 확보한 기술의 현장 보급 및 기술지원을 위한 활동을 지속적으로 수행할 계획이다. 다만, 연구수행시간의 제한으로 아직 현장에 적용한 사례는 없으며, 현재 의왕저수지를 대상으로 개발된 시스템의 적용이 성사단계에 있는 것으로 평가된다.

제3절 관련분야에 의 기여도

1. 관련분야 기술발전 기여도

1.1. 간접재이용 유형구분 및 수질기준

전세계적으로 하수재이용과 관련하여 정책 및 최적관리기법을 적용하기 위한 하수재이용 유형구분은 명확하기 진행된 바 없다. 본 연구를 통해 이루어지 하수재이용 유형구분은 향후 관련 연구에 있어서 합리적인 관리방안을 마련하기위한 중요한 참고자료가 될 것으로 기대된다. 농업용수와 관련한 수질기준의 경우 지역적 특수성으로 인해 일반화하기 어려운 특징이 있다. 다만, 적합한 수준의 항목별 수질기준을 제안하기 위한 절차는 수자원 환경 및 대상작물 등을 포함하는 지역적 특수성을 감안하더라도 참고할 수 있는 사항이 될 것이다.

1.2. 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육 영향 분석

하수처리수의 농업용수재이용에 따른 환경영향과 관련한 보고는 전세계적으로 다양하게 존재한다. 하지만 기존의 연구들은 우리나라의 농업적 상황과 다른 발작물 또는 조정수 위주의 연구결과가 주를 이루었으며, 논벼와 관련한 연구들은 대개가 직접재이용에 따른 실험적 연구결과가 보고되고 있다. 본 연구는 하수재이용 중에서 간접재이용에 중점을 둔 것으로, 미처리하수의 관개지구에 대한 다년간의 모니터링 결과를 포함한 논벼와 관련한 하수재이용의 영향을 체계적으로 조사 및 분석한 중요한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

1.3. 간접재이용시스템 개발

하수재이용과 관련하여 국내외 기술개발 현황에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 얻은 연구결과물은 굉장히 독창적이라 할 수 있으며, 전국적인 실용화가 가능하게 되면 그 파급효과 역시 클 것으로 판단된다. 다만, 본격적인 실용화를 위해서는 광범위한 시범지구 등의 현장적용을 통한 추가적인 모니터링 기간이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 전지구적 차원에서는 수자원이 부족한 상황에서 농업용수의 우선순위는 국가별로 차이가 날 수 있으며, 주요한 대상작물 또한 상이하기 때문에 범용적인 적용을 위해서는 보다 다양한 측면에서의 추가적인 연구는 필요할 것으로 판단된다.

1.4. 관련분야에 의 파급효과

본 연구를 통해 개발한 간접재이용시스템은 이동식 차량을 통한 접근방법도 가능하며, 효과적인 영향물질 제거를 위해 개발한 각종 공정과 장치는 녹조제거에 탁월한 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이처럼 본 연구에서 개발된 간접재이용시스템은 하수처리수의

농업용수 재이용을 위한 경제적인 재이용시스템일 뿐만 아니라 최근 국가적 문제로 나타나고 있는 녹조현상을 완화하기 위한 대안적 기술로 평가할 수 있으며, 나아가 수처리 분야의 새로운 시도로 받아들여지고 있다.

2. 기술·경제·산업적 기대성과

2.1. 기술적 측면

본 연구의 가장 큰 기술적 연구성과는 경제적이고 편리한 하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 기술을 확보한 것에 있다. 도시지역의 하수처리장과 농촌지역의 마을하수처리장은 앞으로도 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, 이와 같은 상황은 무계획적인 하수처리수의 간접재이용을 증가시킬 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 확보한 간접재이용시스템 기술은 앞으로 그 쓰임이 더 커질 것으로 판단된다.

또한, 확보한 간접재이용기술을 이용하여 우리나라 농업용수 사용의 많은 부분을 차지하고 있는 농업용수 간접재이용의 안정성 제고할 수 있으며, 하수처리수를 농업용수로 간접재이용할 경우에 나타날 수 있는 질소과다에 의한 도복을 사전에 방지하기 위하여 간접재이용 관개용수의 질소농도 수준별 최적 질소시비기술을 본 연구를 통해 확보하였다. 이와 같은 간접재이용기술은 가뭄과 같은 특수한 상황에서의 하수처리장 방류수의 안전한 농업용수 이용을 가능하게 함으로써 타용도로의 양질의 대체수자원 확보를 가능하게 하는 효과가 있다.

2.2. 경제·산업적 측면

기후변화 및 농업환경 변화에 대응한 안정적인 농업용수 확보를 통해서 연간 1억 5천만 m^3 의 대체수자원 확보가 가능할 것으로 예상되며, 이를 대체비용법을 이용한 수자원 개발비용으로 환산하면 연간 약 7백억 원의 경제적인 효과가 있는 것으로 분석된다. 또한, 간접재이용시스템의 적용은 농업용수로 공급하는 과정에서 하천수의 수질개선과 수처리비용도 절감할 수 있는 것으로 평가되고 있으며, 농가의 비료사용량을 저감시키는 등의 간접적인 경제적 효과를 고려할 경우 간접재이용시스템을 이용한 사업화로 인한 효과는 더 크게 산정될 수 있을 것이다. 이와 같은 간접재이용을 통한 농업용수의 공급은 총가용수자원의 이용측면에서 양질의 수자원의 생활용수 및 공업용수 등의 타목적으로 이용할 수 있는 수자원 이용여력의 증가를 의미한다.

한편 본 연구를 통해서 개발된 간접재이용시스템의 기술이전을 통한 재이용 기술의 확대는 하수처리장 방류수를 이용한 영농활동뿐만 아니라 공업용수, 조경용수 등의 하수재이용기술을 필요로 한 기타 사업 분야로의 확대도 도모할 수 있는 것으로 평가된다. 특히, 최근 사회적으로 많은 문제를 야기하고 있는 녹조현상을 완화하는 것에 본 연구에서 개발된 시스템을 적용한 결과 우수한 녹조제거 성능을 보임에 따라 연구목적 외 분야에의 적용도 충분히 가능할 것으로 판단된다.

제5장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

본 연구의 추진체계와 내용은 간접하수재이용의 유형을 구분하고, 간접하수재이용을 위한 수질기준을 마련하며, 미처리 하수 및 간접하수재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육에의 영향을 모니터링하고, 맞춤형 최적 간접하수재이용 처리공정 및 시스템의 개발과 실용화 등으로 구성된다.

1차년도에서는 간접하수재이용의 유형을 구분하고, 간접하수재이용을 위한 수질기준(시안)을 마련한 바 있다. 또한, 간접하수재이용에 따른 환경영향을 조사 분석하고자 모니터링체계를 구축하고, 간접하수재이용시스템 pilot plant 설계를 통한 시제품 제작 및 운용 등을 실시하였다.

2차년도에서는 미처리 하수 및 간접하수재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육에의 영향을 조사 분석하고자 1차년도에서 구축한 모니터링체계를 바탕으로 지속적인 모니터링을 실시하였으며, 획득한 모니터링 자료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 또한, 간접하수재이용에 따른 환경 및 인체영향 등을 평가하기 위한 모델링체계를 구축하고, 하수재이용에 따른 적정시비량 산정과 경제성 평가 모델링을 실시하였다. 이와 함께 1차년도에서 개발한 pilot plant를 보완하여 TEST-BED를 제작하였으며, 이를 현장에 적용하였다.

3차년도에서는 1차년도에 마련한 모니터링시스템을 이용하여 지속적인 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육에의 영향을 조사 분석하였으며, 분석된 결과로부터 미처리하수 및 간접재이용에 따른 환경영향을 평가하였다. 또한, 1차년도에서 제안된 수질기준(시안)을 모니터링 및 모델링 결과를 통해 재검토하고, 간접하수재이용 유형별 적합한 재이용시스템의 최적공정을 확정하였다.

본 장에서는 위와 같은 3년간의 연구개발 결과에 따른 연구개발 성과를 정량적으로 산출하고, 본 연구과제로부터 산출된 결과물을 활용한 구체적인 성과활용 계획을 제시하고자 한다.

제1절 연구개발 성과

1. 유형별 간접재이용시스템 개발

1.1. 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템

하천보를 이용한 소용량 간접재이용시스템은 부유 물질제거 및 살균소독 시스템으로 구성되며, 하천이나 하수처리장 처리수를 정화하여 농업용수로 이용하는 시스템이다. 소용량 간접재이용시스템은 일처리용량이 최대 600 m³으로 하천에서 취수한 하수처리장 방류수를 미세 스크린 여과망을 통과시켜 1차 부유물질을 제거하고 나노버블 제너레이터를 이용한 추가처리 과정과 UV 살균장치에서의 살균 처리과정 등을 통해 최종

처리된 재처리수를 농경지에 공급하는 시스템이다. 그림 5.1.1과 5.1.2는 개발된 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템의 내부와 설치전경을 보여준다.

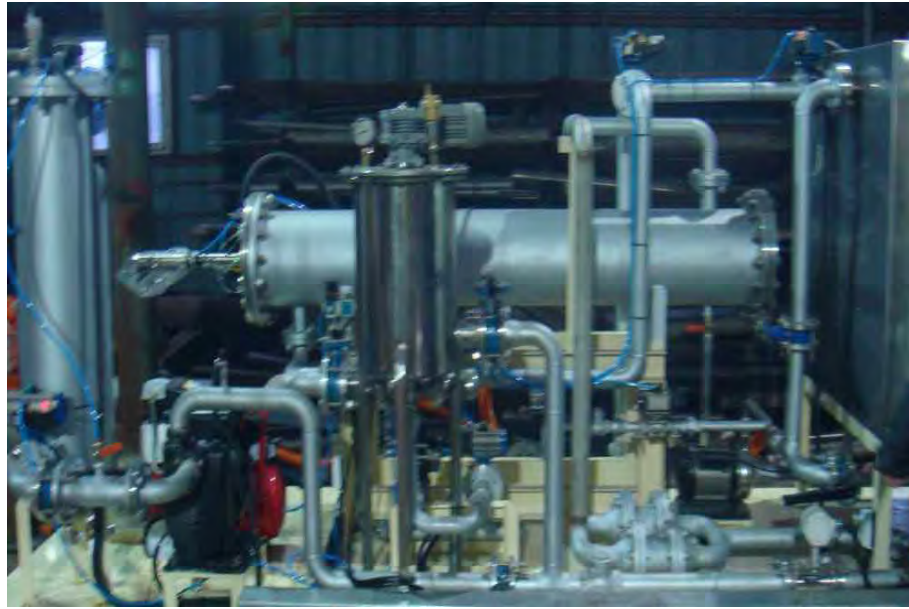


그림 5.1.1 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 내부



그림 5.1.2 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템 현장설치 외부전경

1.2. 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템

양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템은 일처리용량이 최소 1,000 m³으로 유입펌프시스템, 멀티사이클론시스템, 나노버블시스템, 전해조시스템 등으로 구성되며, 멀티사이클론과 나노제너레이터 혼합시스템으로 부유물질을 제거하고 전기전해장치에서 살균처리된 깨끗한 물을 농가에 공급하는 시스템이다. 특히, 중대용량 간접재이용시스템은 2차년도 초의 실무자 공청회를 통해서 제기된 재이용시스템의 사용자 편의성을 고려하여 제어반 등을 설계하였다. 그림 5.1.3은 양수장 활용 간접재이용시스템의 주요장치인 멀티사이클론, 전기분해, 그리고 나노펌프의 배치를 보여주고 있으며, 그림 5.1.4는 개발된 시스템의 현장 설치 전경을 보여준다.



그림 5.1.3 중대용량 간접재이용시스템의 주요장치



그림 5.1.4 중대용량 간접재이용시스템의 현장설치 전경

1.3. 이동식 간접재이용시스템

이동식 간접재이용시스템은 하천 및 호소의 수질 오염도가 높은 지역에 빠르게 대처하기 위하여 미세버블과 전기적 응집을 이용하는 장치를 구비하는 이동식 부유물 제거 장치를 적용하여 부유물 및 기타 오염물질을 초고속으로 제거할 수 있으며, 수요가 발생하는 지역으로 이동할 수 있는 큰 장점을 내제하고 있다. 이동식 간접재이용시스템은 극미세버블과 촉매모듈의 전기적 응집을 이용하여 하수방류수 및 하천에 존재하는 오염물질을 단시간에 제거하여 가시적인 효과를 바로 확인할 수 있으며 생태계에 영향을 주지 않는 친환경적인 재이용시스템으로 부유물질 뿐만 아니라 용존유기물 및 녹조 등을 제거하여 깨끗한 농업용수를 농가에 공급하는 시스템이다. 그림 5.1.5는 이동식 간접재이용시스템의 공정모식도를 보여주는 것이며, 그림 5.1.6은 이와 같은 시스템을 탑재한 차량으로 이동식 간접재이용시스템의 외부전경을 보여준다.

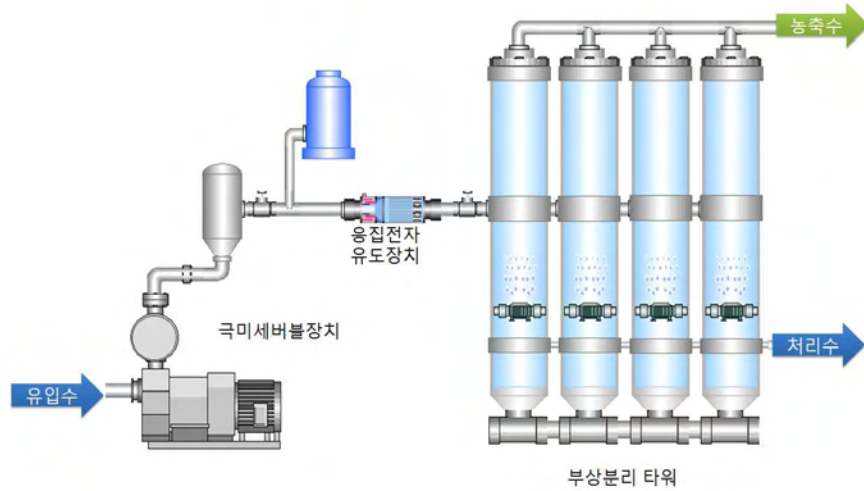


그림 5.1.5 이동식 간접제이용시스템 공정모식도



그림 5.1.6 이동식 간접제이용시스템 외부전경

2. 특허출원 및 등록

유형별 간접제이용시스템을 개발하는 과정에서 다수의 특허가 발생하였다. 하천보 활용 소용량 간접제이용시스템을 개발하는 과정에서 “농업용수 공급장치를 이용한 하천 및 하수처리장 방류수의 농업용수 재이용 방법 (등록번호: 제10-1206477호)”이 출원 및 등록되었으며, 양수장 활용 증대용량 간접제이용시스템을 개발하는 과정에서는 “다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급방법 (출원번호: 10-2013-0075588)”과 “다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급장치 (출원번호: 10-2013-0075589)”의

특허를 출원하였으며, 2014년말에 등록될 것으로 기대하고 있다. 또한, 이동식 간접재 이용시스템을 개발하는 과정에서 “이동식 부유물 제거 장치 및 방법 (출원번호: 10-2014-0120226)”의 특허를 출원하였으며, 2015년 하반기에 등록될 것으로 예상하고 있다 (표 5.1.1).

표 5.1.1 특허 출원 및 등록

일련번호	발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	비고
1	농업용수 공급장치를 이용한 하천 및 하수처리장 방류수의 농업용수 재이용 방법	제10-1206477호	2012.11.23.	주식회사 블루비에스, 한국농어촌공사, 서울대학교산학협력단	출원 및 등록
2	다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급방법	10-2013-0075588	2013.06.28.	주식회사 블루비에스, 한국농어촌공사, 서울대학교산학협력단	출원
3	다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급장치	10-2013-0075589	2013.06.28.	주식회사 블루비에스, 한국농어촌공사, 서울대학교산학협력단	출원
4	이동식 부유물 제거 장치 및 방법	10-2014-0120226	2014.09.11.	주식회사 블루비에스	출원

3. 논문게재

미처리하수 및 하수처리수의 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경, 그리고 작물생육 등의 영향을 장기간 모니터링한 결과를 분석 및 논의한 연구성과와 간접재이용과 관련한 모델링을 통한 연구성과를 다수의 논문으로 게재하였으며, 여러 학술발표회에서 연구성과를 발표하였다. 2014년 10월 현재를 기점으로 국내학술지에 게재 및 게재확정된 논문은 8편 (등재지 7편, 비등재지 1편)이며, SCI색인의 국제학술지에 게재 및 게재확정된 논문은 7편으로, 연구기간 3년간 총 15편의 논문을 게재하는 성과를 거두었다 (표 5.1.2). 또한, CIGR와 ASABE 등의 국제학술대회를 포함하여, 총 13회의 학술발표 실적을 기록하였으며, 특히 한국농공학회와 한국수자원학회에서는 연구의 우수성을 인정받아 우수발표상을 수상하였다 (표 5.1.3).

표 5.1.2 학술논문게제 실적

일련 번호	제목	저자	학술지 명칭	게제 연월	권	호	SCI 구분
1	Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture	T. I. Jang; H. K. Kim; C. H. Seong; E. J. Lee; S. W. Park	Agricultural Water Management	2012.02	104		SCI
2	하수처리수의 재이용에 따른 SWAP 모형과 물관리반응지수를 이용한 논에서의 토양염분 평가	장태일; 황세운; 정한석; 강문성; 박승우	한국농공학회 논문집	2012.03.	54	2	KCI
3	Assessing irrigation water capacity of land use change in a data-scarce watershed of Korea	Taeil Jang; Hakkwan Kim; Sangmin Kim; Chounghyun Seong; Seungwoo Park	Journal of Irrigation and Drainage Engineering	2012.05.01	137	5	SCI
4	SWAT-QUALKO2 연계 모형을 이용한 관개기 순별 관개수질 모의	김지혜; 정한석, 송인홍, 강문성, 박승우	한국농공학회 논문집	2012.11	54	6	KCI
5	Assessing environmental impacts of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields using bioindicator	Taeil Jang, Myungpyo Jung, Eunjung Lee, Seungwoo Park, Joonho Lee, Hanseok Jeong	Irrigation Science	2013.02	(온라인)		SCI
6	시스템 다이내믹스를 이용한 농업용수 재이용시스템 경제성 분석	정한석, 서교, 장태일, 성충현, 김학관, 박승우	한국농공학회 논문집	2013.03	55	2	KCI
7	간접하수재이용에 따른 논에서의 수질 및 토양환경 영향 분석	정한석, 박지훈, 성충현, 장태일, 강문성, 박승우	한국농공학회 논문집	2013.05	55	3	KCI
8	하수에서의 대장균수 확률분포 특성 분석	전상민, 송인홍, 정한석, 강문성, 박승우	한국농공학회 논문집	2013.05	55	3	KCI
9	GIS-based lake sediment budget estimation taking into consideration land use change in an urbanizing catchment area	S. M. Kim;T. I. Jang; M. S. Kang; S. J. Im; S. W. Park	Environmental Earth Science	2013.07	(온라인)		SCI
10	SWAT 모형을 이용한 하수처리장 방류수의 관개용수 유황 영향 분석	정한석;김학관;성충현; 장태일;박승우	Journal of Agriculture & Life Sciences	2013.09.	44	1	비등 제지
11	Assessment of growth and yield components of rice irrigated with reclaimed wastewater	Jung, K.; Jang, T.;Jeong, H.;Park, S.;	Agricultural water management	2014.05	138		SCI
12	Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater	Jeong, H.;Jang, T.;Seong, C.;Park, S.;	Agricultural water management	2014.07	141		SCI
13	Impact of domestic wastewater irrigation on heavy metal contamination in soil and vegetables	H.K. Kim;T.I. Jang; S.M. Kim; S.W. Park	Environmental Earth Science	2014.08.	(온라인)		SCI
14	미처리하수지구 논에서의 수질 및 토양 특성 분석	송정현, 정한석, 박지훈, 송인홍, 강문성, 박승우	한국농공학회 논문집	2014.11.	(게재확정)		KCI
15	시스템 다이내믹스를 이용한 하수재이용 구역의 일유출량 모의	정한석, 성충현, 박승우	한국농공학회 논문집	2014.11.	(게재확정)		KCI

표 5.1.3 학술회의 발표 실적

일련 번호	제목	저자	학술회의 명칭	발표 연월	발표 장소
1	하수처리수의 농업용수 간접재이용에 관한 연구	정한석, 성충현, 장태일, 박승우	한국수자원학회 학술발표회	2012.05	정선 강원랜드
2	하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 환경영향	박지훈, 정한석, 강문성, 박승우	한국수자원학회 학술발표회	2012.05	정선 강원랜드
3	인공신경망 기법을 이용한 결빙기 수위 보정	정한석, 김학관, 강문성, 박승우	한국수자원학회 학술발표회	2012.05	정선 강원랜드
4	Indirect reuse of reclaimed wastewater for agriculture in Korea	Hanseok Jeong, Taeil Jang, Choung H. Seong, Seung W, Park	International conference of agricultural engineering	2012.07	발렌시아
5	하수처리수의 간접재이용에 따른 관개용수 수질영향 모의	정한석, 김학관, 성충현, 장태일, 박승우	한국농공학회 학술발표회	2012.09.	천안 상록리조 트
6	미처리하수 관계에 따른 환경영향 평가를 위한 모니터링 적지 선정	송정현, 정한석, 강문성, 박승우	한국농공학회 학술발표회	2012.09.	천안 상록리조 트
7	하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 관개기 순별 관개수질 모의	김지혜, 정한석, 강문성, 박승우	한국농공학회 학술발표회	2012.09.	천안 상록리조 트
8	하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 환경영향	박지훈, 정한석, 강문성, 박승우	한국농공학회 학술발표회	2012.09.	천안 상록리조 트
9	하수처리수의 농업용수 간접재이용에 따른 수질 및 토양환경 영향 분석	정한석, 박지훈, 성충현, 장태일, 강문성, 박승우	한국수자원학회 학술발표회	2013.05	광주 호남대학 교
10	A study on the economic analysis of wastewater reclamation and reuse systems for agriculture using a system dynamics approach	Hanseok Jeong, Kyo suh, Hakkwan Kim, Seungwoo Park, Haedo Kim, Chounghyun Seong, Taeil Jang	2013 ASABE Annual meeting	2013.07	켄사스
11	농업수자원 이용의 지속가능성 평가를 위한 프레임워크	정한석, 박승우, Jan Adamowski	한국농공학회 학술발표회	2013.09.	청주 라마다플 라자
12	하수처리수의 농업용수재이용에 따른 사회-수문시스템 모델링	정한석, 박승우	한국수자원학회 학술발표회	2014.05	부산 부경대학 교
13	Classification of wastewater reuse for agriculture in Korea	Hanseok Jeong, Chounghyun Seong, Taeil Jang, Seungwoo Park	22nd ICID Congress	2014.09	광주 김대중컨 벤션센터

4. 홍보실적

연구과제를 수행하는 중에 한 차례의 현장시연회를 개최하였으며, 다수의 기타 홍보 기회를 가질 수 있었다.

4.1. 현장시연회 개최

현장유지관리 직원들의 의견을 수렴하고, 본 연구진이 개발한 소용량 간접재이용시스템의 홍보를 위해서 2차년도 시작 시점에 현장시연회를 개최하였다 (그림 5.1.7). 시연내용은 소용량 간접재이용시스템에 대한 유입원수와 처리수의 비교 시연 및 수질분석결과, 막세정시스템에 대한 기존세정 적용 분리막과 막세정을 적용한 분리막 등의 성능비교가 주된 내용이었다.

- 일시 및 장소 : 2012. 10.29 (월), 15:00 병점1양수장
- 참석자 : 30명

다음 표 5.1.4와 5.1.5는 현장시연회에 참석했던 연구진 및 현장실무자들의 정보와 현장시연회 프로그램에 대한 내용을 보여주고 있다.

표 5.1.4 현장시연회 참석자

부서명	인원	참석자	비고
계	30		
화성수원지사	20	본부 유지관리팀 및 지사 유지관리직원 등 20명	
농어촌연구원	4	수자원연구팀장 등 4인	
과제연구진	6	서울대학교, (주)블루인바이로먼트엔텍 등 5인	

표 5.1.5 현장시연회 프로그램

소요시간(60분)		내용	비고
15:00	5분	인사말(농어촌개발연구소장)	진행: 김해도 박사
15:05	5분	연구시설 개요 소개	김해도
15:10	10분	간접재이용시스템 공정 소개 및 시연	서울대학교 (정한석 연구원)
15:20	10분	막세정 시스템 공정 소개 및 시연	블루엔텍(홍민 대표)
15:30	30분	유지관리직원 질문 및 답변	



그림 5.1.7 현장시연회 사진

시연회에 참석한 많은 현장실무자들은 개발된 소용량 간접재이용시스템에 대해 높은 관심을 나타냈다. 특히, 기존의 수처리시스템과 비교하여 유지관리비용을 획기적으로 줄일 수 있는 막여과시스템과 높은 처리효율에 대한 관심이 큰 것으로 조사되었다. 다만, 현장에서 사용되어야 하는 한계가 있기 때문에 사용자인 농민과 현장실무자의 이용이 편리한 제어반의 필요 등에 대한 요구가 많이 있었다. 현장시연회를 통한 현장에 로사항은 실제 2차년도 과제수행 시 새로운 간접재이용시스템 개발과정에 적극적으로 반영되는 성과를 가져왔다.

4.2. 기타 홍보활동 및 성과

앞서 언급한 학술대회에서 연구성과를 발표하는 기회외에도 학술기사와 인터넷 매체를 통해서 개발된 간접재이용시스템과 연구과제에 대한 소개를 할 수 있는 기회를 가졌다 (표 5.1.6). 1차년도와 2차년도에는 학술대회에서 논문발표상을 수상함으로써 연구과제의 홍보효과를 극대화 할 수 있었으며, 2차년도에는 추가적으로 인터넷 매체를 통한 간접재이용기술을 소개할 수 있는 기회가 있었다. 3차년도에는 학술지를 통해서 본 연구과제를 홍보할 수 있었다.

표 5.1.6 기타 홍보활동 및 실적

일련 번호	홍보유형	매체명/수상명칭	제목 및 공적내용	해당연월	비고
1	학술지 학술기사	한국농공학회지	사회수문학 의 발전방향	2014.08.01.	학술지홍보
2	인터넷신문	AVING	블루비에스 의 막여과 전처리 시스템	2013.06.05.	언론홍보
3	우수발표 논문상	2012년 한국수자원학회 우수발표논문상	하수처리수 의 농업용수 간접재이용 에 관한 연구	2012.05.18.	수상
4	우수발표상	2012년 한국농공학회 우수발표상	하수처리수 의 농업용수 간접재이용 에 따른 관개용수 수질영향 모의	2012.09.19.	수상

5. 성과공유제

성과공유제란 중소기업이 원가절감 등 중소기업·한국농어촌공사 간에 합의한 공동 목표를 달성할 수 있도록 한국농어촌공사가 지원하고 그 성과를 중소기업과 한국농어촌공사가 공유하는 계약모델을 말한다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 토대로 성과공유과제에 차량이동식 녹조제거 시스템과 극미세 가압부상 시스템의 두 건에 대해 성과공유 공모를 실시하였으며, 그 중 가압부상 시스템에 대해 중소기업과 한국농어촌공사가 계약을 맺어 운영 중에 있다.

한국농어촌공사와 참여기업인 (주)블루비에스의 본 연구결과로부터 산출된 이동식 간접재이용시스템의 성과공유제에 대한 자세한 사항은 3장의 13절 실용화 목적의 현장 적용 방안 분석에서 기술하였다.

제2절 성과활용 계획

1. 기술확산 계획

본 연구에서 개발한 간접재이용시스템의 기술확산을 위해서는 적절한 홍보와 교육이 병행되어야 한다. 이를 위해 한국농어촌공사를 중심으로 개발된 시스템의 홍보를 적극적으로 수행해 가고 있다. 특히, 전술한 성과공유제 시행을 바탕으로 개발된 기술의 타분야로의 확대 적용도 기대되고 있다.

과제종료 후, 2014년 9월 30일 왕송저수지에서 해당지자체 공무원 등을 대상으로 시연회를 개최한 바 있다. 간접재이용시스템 현장 시연회에서는 이동식 간접재이용시스템을 이용하여 왕송저수지에 발생한 녹조 및 부유물 등을 실시간으로 처리하는 과정을 시연하였다. 그림 5.2.1과 그림 5.2.2는 왕송저수지의 녹조에 따른 수질오염과 시연회의 관경을 보여주고 있다.



그림 5.2.1 왕송저수지의 녹조에 따른 수질오염



그림 5.2.2 왕송저수지 이동식 간접재이용시스템 시연회 전경

의왕시청의 녹색환경과 과장 등 관련기관 관계자들은 녹조의 실시간 처리과정에 상당한 관심을 보였으며, 2015년 왕송저수지에 실규모급의 간접재이용시스템을 도입할 것을 검토하고, 개발관련 자료를 제출 요청한 상태에 있다.

2. 실용화 계획

현재 개발된 간접재이용시스템은 전국적으로 농업용수가 부족한 지역을 중심으로 현장에 적용될 수 있을 것으로 평가된다. 도시화와 마을하수처리장의 영향으로 하수 및 하수처리수의 집중화 현상이 심해짐에 따라 안전하고 경제적인 농업용수로의 이용을 가능하게 하는 본 시스템의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 사료된다. 특히, 시설재배지의 증가 등과 같은 농업용수 수요의 계절적 변동성이 큰 지역에서는 추가적인 처리시스템을 이용하여 제한적으로 원예작물의 관개용수 공급에도 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 최근 농업용저수지의 담수 수질에의 문제점이 자주 노출되고 있으며, 이에 따라 저수지 수질을 개선하는 것이 농업용수 공급 및 저수지 주변 생활환경개선 등과 관련하여 주요한 사안이 되고 있다. 본 연구에서 개발한 간접재이용시스템은 하천을 기반으로 한 하천보와 양수장에서의 적용을 평가한 바 있으며, 이동식 간접재이용시스템의 경우 농업용저수지에의 적용이 충분히 가능한 것으로 분석된 바 있다. 따라서 본 연구과제로부터 개발된 재이용시스템을 이용하여 안전하고 경제적인 농업용수는 물론, 농업용저수지 담수 수질 개선을 도모할 수 있을 것으로 평가된다. 이와 관련하여 앞서 3장의 13절 실용화 목적의 현장적용 방안 분석에서 경기도 의왕시에 위치한 왕송저수지를 대상으로 한 왕송지구 농업용수 수질개선사업에의 적용에 대해 전술한 바 있다. 왕송지구를 시작으로 농업용저수지의 담수 수질이 악화된 타지역 저수지를 대상으로 전국적으로 확대해 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

3. 지식재산권 확보계획

3.1. 특허

2차년도 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템을 개발하는 과정에서 출원한“다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급방법 (출원번호: 10-2013-0075588)”과“다단형 멀티사이클론을 활용한 농업용수 공급장치 (출원번호: 10-2013-0075589)” 등의 특허가 2014년 말에 등록될 것으로 기대하고 있으며, 3차년도 이동식 간접재이용시스템을 개발에서 출원한“이동식 부유물 제거 장치 및 방법 (출원번호: 10-2014-0120226)”의 특허는 2015년 하반기에 등록될 것으로 예상하고 있다

3.2. 논문

하수처리장 방류수의 하천수 수질 영향 모니터링 결과, 작물생육 모니터링 결과, 토양 및 식물체 중금속 분석 결과 등을 정리하여 국내학술지 논문 3편을 추가적으로 게재할 예정이며, 간접하수재이용에 따른 수질 및 토양환경에의 영향, 관행 관개용수 및 하수재이용수의 최적 대장균분포에 따른 인체위해성 평가, 하수처리장 방류수의 관개용수에의 영향, 그리고 하수재이용에 따른 유역수문에의 영향 등으로 SCI 색인 해외학

술지 4편을 추가적으로 게재할 것으로 예상하고 있다.

4. 추가연구, 타연구에 활용 계획

4.1. 수처리공정 및 비점오염저감기술에의 적용

본 연구과정에서 개발된 하천보 활용 소용량 간접재이용시스템의 나노버블기술은 막여과 세정기술에의 적용을 통해 기존의 막여과 과정의 막세척에 있어 획기적인 전환점을 제시할 것으로 기대된다. 또한, 양수장 활용 중대용량 간접재이용시스템의 멀티사이클론기술은 여과 수처리공정 기술의 개선에 활용될 수 있으며, 농업비점오염저감 기술에의 적용을 통해서 비점오염저감시설에 설치될 수 있을 것으로 기대된다.

4.2. 녹조제거 기술

성과공유제에서와 같이 본 연구에서 개발된 이동식 간접재이용시스템은 녹조제거에 탁월한 효과가 있는 것으로 분석되었으며, 이동식이라는 중요한 특징도 가지고 있기 때문에 녹조제거를 위한 사업에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 시험운영과정에서 발생하는 추가적인 보완사항 등을 개선해 나감으로써 기술의 완성도를 높일 필요가 있다.

4.3. 기수담수화 기술

현재 본 과제의 연구기관인 서울대학교와 (주)블루비에스는 농림수신식품기술기획평가원의 “기후변화에 대응한 원예단지의 농업용수를 위한 기수담수화 시스템의 상용화 기술 개발 및 적용”이라는 과제를 시작하는 단계에 있다. 본 과제에서 개발된 하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템의 주요한 수처리 공정 및 모듈은 기수를 이용한 영농활동을 위한 최적화 기수담수화 시스템 개발에 기본 기술로서 활용될 예정이다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

연구과정에서 해외의 과학기술정보를 수집하는 것은 중요한 연구방법인 동시에 효과적인 연구수행을 위해서 꼭 필요한 과정이다. 본 연구에 있어서는 특히, 하수재이용의 국제적인 현황을 파악하고, 하수재이용과 관련한 수질기준을 마련하기 위한 국가별 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준과 하수재이용에 따른 환경영향을 모니터링한 연구결과들은 간접재이용시스템을 개발하고 적용함에 있어 중요한 참고자료가 된다. 따라서 본 장에서는 연구개발과정에서 국제학술대회와 해외과학기술관련 문헌들을 통해 수집한 정보를 정리하고자 한다.

제1절 국제학술대회

본 연구를 수행하는 기간 동안 국외출장을 통해서 2012년은 CIGR, 2013년은 ASABE, 그리고 2014년은 ICID에 참가하여 하수재이용과 관련된 연구동향을 파악하고자 하였다.

1. 2012년 CIGR (International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering)

2012년 CIGR은 유럽농공학회와 함께 스페인 발렌시아에서 7월 8일에서 12일까지 5일간 진행되었다. 본 연구와 관련하여 2012년 CIGR에서 수집한 주요한 해외과학기술정보는 스페인에서 이루어지는 재이용현황에 정보였으며, 물이 부족한 스페인의 경우 농업용수의 상당부분으로 하수재이용을 통해 해결하고자 노력하고 있었다. 스페인의 경우 우리나라와 달리 쌀과 같은 곡류보다는 올리브나무나 관상용 식물에 주로 하수처리수를 관개용수로 공급하고 있었으며, 이와 관련된 정책을 실현하기 위한 기초연구가 진행 중에 있다.

2. 2013년 ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)

2013년 ASABE는 미저리주 캔사스시티에서 7월 21일부터 24일까지 4일간 진행되었다. CIGR이 유럽을 중심으로 한 농공학과 관련된 학문적 정보의 장이라면, ASABE는 아메리카 대륙을 중심으로 한 농공학 관련 학문동향을 파악할 수 있는 창구역할을 수행한다. 특히, 2013년 ASABE의 경우, 하수재이용과 관련된 연구에서 한 축을 담당하는 브라질 등을 포함하는 남미 국가의 다양한 작물에 대한 하수재이용 연구동향을 파악할 수 있었다.

3. 2014년 ICID (International Commission on Irrigation and Drainage)

ICID 제65차 총회는 우리나라 광주에서 9월 14일부터 20일까지 7일간 진행되었다. 하수재이용이 앞으로의 전세계적 관개계획에서 주요한 이슈로 역할을 할 수 있을 것으로

논의되었으며, 관개배수와 관련한 주요 이슈로 선정되어 세계 각국에서 참가한 전문가들의 토론이 이루어졌다. 본 ICID 총회를 통해서 모래 등을 이용한 여과장치를 포함하는 비교적 단순한 재처리시스템이 하수재이용을 위해서 시험적으로 적용되고 있는 연구사례를 확인할 수 있었다.

제2절 해외문헌

본 연구를 수행하는 과정에서 수집한 주요한 연구결과를 하수재이용 현황, 수질기준, 인체위해성, 그리고 작물생육 및 환경영향 등의 분야로 다음과 같이 정리하였다.

1. 하수재이용 현황

Hamilton et al. (2007)에 따르면 전세계적으로 2,000 천만 ha의 농경지가 하수를 관개하고 있으며, 1990년대 초까지는 전세계 인구의 10%이상이 하수를 관개한 농작물을 소비하는 것으로 조사되었다. Sato et al. (2013)의 연구결과를 포함하여 지역별로 하수관개면적과 관개량 등을 정리하면 다음 표와 같이 나타낼 수 있다.

표 6.2.1 전세계 미처리하수 및 하수처리수의 농업용수재이용 현황 (modified from Hamilton et al., 2007)

Country (region/city)	Land area irrigated wastewater (ha)	Volume of wastewater used for irrigation (million m ³ /yr)	Effluent reclaimed and used for irrigation (%)
Australia	20,000	156	4.5
China	>1,330,000		
France	>3,000		
Chana(Kumasi)	11,900		
India	>73,000		
Iran		70	
Israel			>60
Italy	>4,000		
Portugal	135,000		
Cyprus	38,200		
Japan		20	
Jordan		74	
Kenya	2,200		
Kuwait	4,470		
UAE	16,950		
Syria	49,000		
Mexico	>350,000		
Morocco	8,000		
Oman			~45
Pakistan	32,500		
Peru(Lima)	>5,000		
S. Africa(Johannesburg)	22,000		
Spain (Victoria)	9,500		
Tunisia	20,000		
USA (California)		548-730	
USA (Florida)		803	
Vietnam	9,000		

Rutkowski et al. (2007)의 하수처리수의 농업용수재이용 연구에서는 Chanduvi의 연구 결과를 이용하여 가용한 자료를 바탕으로 전세계 75개 도시에서 약 350,000 ha가 하수를 직접재이용하고 있으며, 17개 도시의 550,000 ha의 농경지에 하수가 간접재이용 되고 있는 것으로 보고하고 있다. 또한, 같은 연구에서 남미에서만 500,000 ha 이상의 농경지가 하수를 이용하여 영농활동이 이루어지는 것으로 보고하고 있다.

Pedrero et al. (2010)은 스페인과 그리스의 하수재이용 현황과 관련된 연구에서 스페인과 그리스의 수자원 및 하수처리수의 농업용수 재이용에 대한 자료를 수집 및 분석한 바 있다. 스페인의 경우 2012년까지 하수처리수의 농업용수 재이용량이 연간 약 11억톤에 이를 것으로 예상하고 있으며, 특히 발렌시아와 무르시아 지방, 그리고 도서지방에서의 재이용량이 전체 재이용량의 80% 정도를 차지하는 것으로 보고하였다. 또한, 빈번한 가뭄피해에 노출된 그리스의 경우에는 전체 하수처리량 중 83%가 물이 부족한 지역에서 발생하고 있으며, 이에 따라 적극적으로 하수재이용 정책을 추진하기 위한 시작단계에 있는 것으로 분석하고 있다.

2. 하수재이용 수질 지침 및 기준

Agrafioti and Diamadopoulos (2012)는 그리스 그레타섬에서의 재이용 추진전략을 소개하는 연구에서 다음과 표 6.2와 같은 2011년에 제안된 그리스의 하수처리수의 농업용수 재이용과 관련한 수질지침을 보여주고 있다. 본 수질지침은 BOD₅, SS, *E.coli*를 대상으로 한다.

그리스의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침은 대상작물, 관개방법, 그리고 대중의 접근성 등의 기준으로부터 제한적 관개 (restricted irrigation)와 무제한적 관개 (unrestricted irrigation)로 나누어 수질지침을 적용하도록 제안하고 있다. 제한적 관개는 비식용작물, 가공하여 소비되는 농산물, 또는 수확되는 부분이 땅과 직접적인 접촉이 없는 작물 (사료작물, 설탕 등의 공예작물, 초지 등)을 대상으로 한다. 또한, 제한적 관개는 스프링클러 관개방법을 허용하지 않으며, 관개지역에 대한 공공의 허가 없는 출입이 제한되는 형태를 의미한다. 무제한적 관개는 채소, 포도, 익히지 않고 소비되는 농산물 등의 모든 형태의 작물을 대상으로 하며, 모든 형태의 관개방법이 허용되고 관개지역에 대한 공공의 접근에 제한이 없는 경우를 의미한다.

그리스의 경우 합리적인 수질기준을 제안하기 위하여 하수처리장의 규모에 따라 차등적인 수질기준을 적용하고 있다. 예를 들어 2,000명 이하의 거주자를 대상으로 하는 작은 하수처리장의 경우, 제한적 관개에 대한 수질기준은 BOD₅와 SS가 표 6.2에서와 같이 25 mg/l와 35 mg/l를 초과할 수 있으며, *E.coli*의 수질기준도 200 EC/100ml보다 큰 1,000 EC/100ml로 제안하고 있다.

수질기준에 포함된 항목들에 대한 샘플링에 대한 지침 또한 하수처리장의 규모에 따라 차등적으로 적용하고 있다. BOD₅, SS, N, 그리고 P에 대한 샘플링 주기는 10,000명 미만의 하수처리장의 경우 첫째에 한해 12번의 샘플링을 실시하도록 하였고, 이듬해부터는 연 4회의 샘플링을 실시하도록 제안하고 있다. 10,000~20,000명을 대상으로 하는 하수처리장의 경우 해마다 12번의 샘플링을 실시하도록 규정하고 있으며, 50,000명 이상의 하수처리

장의 경우 연 24회를 기준으로 한다.

그리스의 하수재이용 수질지침의 특징은 다른 기타 선진국에서와 같이 특정한 수질기준값을 제시하기보다는 모든 수질샘플을 대상으로 확률적인 초과개념을 도입하고 있다는 점이다. 예를 들어 BOD₅의 무제한적인 관개의 경우, 모든 수질샘플 중 80%이하의 샘플에서 수질지침 이하의 농도를 보이면 적합한 재이용 수질을 나타내는 것으로 제안하고 있다.

표 6.2.2 그리스의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침(Criteria) (adopted from Agrafioti and Diamadopoulou, 2012)

재이용분류	E.coli/100ml	BOD ₅ (mg/l)	SS (mg/l)	Turbidity (NTU)	최소처리수준
제한적 관개	≤200 (median)	25	35	-	2차처리 ^a , 소독살균 ^b
무제한적 관개	≤5 for 80% of the samples, and ≤50 for 95% of the samples	≤10 for 80% of the samples	≤10 for 80% of the samples	≤2(median)	2차처리 ^c , 3차처리 ^d , 소독살균

^a 2차처리에는 활성오니법, 살수여상법, 회전원판접촉법 등을 포함하며, BOD₅와 SS의 수질기준을 만족하기 위한 추가적인 시설을 설치할 수 있다. 또한, 총질소의 농도는 45 mg/l를 초과할 수 없으며, 저수지와 같은 저류공간에 장기간 저장되거나, 지하수 충전용 목적으로 사용되는 경우에는 총질소 농도가 15 mg/l를 초과해서는 안 된다. 하수처리장의 규모가 작을 경우 (less than 2,000 equivalent residents), BOD₅와 SS의 수질기준을 초과할 수 있으며, E.coli는 1,000 EC/100ml를 초과해서는 안 된다.

^b 소독살균은 염소처리, 오존처리, UV처리 등을 포함하여 E.coli 수질기준을 만족하기 위한 다른 처리기술을 적용할 수 있다.

^c a에서의 내용을 참고할 수 있으며, 추가적으로 관개 수혜지역이 질소에 취약한 경우 탈질장치를 추가하여, 암모니아성질소(N-NH₄)와 총질소(T-N) 농도가 각각 2 mg/l와 15mg/l를 초과해서는 안 된다.

^d 3차처리는 2차처리에서 응집 및 여과 시스템이 추가될 수 있다.

Angelakis et al. (1999)는 지중해 연안의 국가들을 대상으로 한 하수재이용 현황에 대한 연구에서 하수재이용이 가장 활발하게 이루어지고 있는 이스라엘의 수질지침에 대해 정리한 바 있다 (표 6.3). 이스라엘의 수질지침은 BOD₅, SS, DO, 대장균군수, 그리고 잔류염소를 대상으로 한다.

이스라엘의 수질지침은 작물군을 4가지로 나누고, 무제한적 관개를 D그룹으로 분류하여 작물군별 적합한 수질기준을 달리하고 있다. 또한, 그리스의 경우와 마찬가지로 적합한 처리수준을 제안하고 있으며, 관개지역과 주거지역 및 포장도로와의 이격거리를 설정하고 있는 특징이 있다.

표 6.2.3 이스라엘의 하수처리수의 농업용수재이용 수질지침(Criteria) (Adopted from Angelakis et al., 1999)

항목	작물군			
	A	B	C	D
	목화, 사탕무, 곡물류(벼·보리·밀 등), 건조한 사료용 작물(dry fodder seeds), 산림관개 등	청예 사료(Green fodder), 올리브, 땅콩, 감귤류, 바나나, 아몬드, 견과류 등	낙과류 ^b , 보존용 채소 (conserved vegetables), 요리하거나 껍질을 벗겨먹는 채소, 그린 벨트, 축구장, 골프장	무제한적 관개: 날것으로 먹는 채소, 공원, 잔디

수질 기준 (mg/l)				
BOD ₅ total	60 ^a	45 ^a	35	15
BOD ₅ dissolved	-	-	20	10
SS	50 ^a	40 ^a	30	15
DO	0.5	0.5	0.5	0.5
대장균군수 (/100mL)	-	-	250	12 (80%) 2.2 (50%)
잔류 염소	-	-	0.15	0.5

처리 수준				
모래 여과 혹은 동등한 수준의 처리	-	-	-	필요
염소 소독 (min) (최소 처리 시간)	-	-	60	120

이격 거리 (m)				
주거지역	300	250	-	-
포장도로	30	25	-	-

a: 최소 15일 이상의 안정화 기간을 가지는 연못에서의 관개는 다른 기준을 가짐

b: 수확 2주일 전 관개를 중단해야 함, 떨어진 과일은 수확 불가

Angelakis et al. (1999)는 이스라엘의 수질지침과 함께 튀니지의 수질기준 또한 같은 연구에서 소개하고 있다 (표 6.4). 튀니지의 경우 pH, EC, COD, BOD₅, SS, Cl, F, 그리고 As 등을 포함한 다수의 중금속을 하수재이용 수질기준의 대상으로 규정하고 있다.

튀니지는 하수처리수의 농업용수재이용에 대한 수질기준 등을 잘 정립한 대표적인 국가로서 1980년대 초반부터 하수재이용 정책을 국가적으로 추진하였으며, 1998년 현재 약 20,000 ha의 농경지를 재처리수로 관개하고 있다.

튀니지에서 1989년부터 하수처리수를 관개용수로 이용하기 위해서는 법적 재이용 수질

기준을 만족시키는 조건에서 농림부의 승인이 필요하다. 또한, 오랜 기간의 하수재이용 정책을 수립하고, 발전시키는 과정에서 하수처리수를 날것으로 먹을 수 있는 채소에 관개하는 것을 법적으로 금지하고 있다.

튀니지는 다른 여러 국가들과 비슷하게 하수처리수의 농업용수재이용을 위한 모니터링 기준을 마련하고 있으며, 관개용수로 이용되는 하수처리수 뿐만 아니라 대상작물에 대해서도 실시하도록 규정하고 있다. 규정에 따르면 pH, EC, BOD₅ 등의 화학적, 생물학적 기준은 월 1회, 중금속 등의 미량요소는 연 2회, 그리고 총란(기생충 알)은 2주에 1회 등의 주기로 모니터링을 실시하도록 한다.

표 6.2.4 튀니지의 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준(standards) (Adopted from Angelakis et al., 1999)

항목 ^a	최대 허용 기준
pH	6.5±8.5
EC (µS/cm)	7,000
COD	90 ^{b,c}
BOD ₅	30 ^{b,c}
SS	30 ^c
Cl	2,000
F	3
Halogenated hydrocarbons	0.001
As	0.1
B	3
Cd	0.01
Co	0.1
Cr	0.1
Cu	0.5
Fe	5
Mn	0.5
Hg	0.001
Ni	0.2
Pb	1
Se	0.05
Zn	5
장 기생 선충류 (Intestinal nematodes, 리터당 알 개수의 평균)	<1

a 따로 제시되지 않은 경우 mg/L의 단위를 가짐

b 24시간 혼합 샘플

c 특별히 허가된 경우를 제외함

Jimenez (2005)는 멕시코의 하수처리수의 농업용수재이용 수질기준을 소개한 바 있다 (표 6.5). 멕시코의 하수재이용 수질기준은 일평균과 월평균에 대한 각각의 온도, 기름 물질, 부유 물질, 침강성 물질, SS, BOD₅, T-N, T-P, 분변성 대장균, 그리고 기생충 알 등

의 수질기준을 제시하고 있으며, 기생충 알의 경우에는 제한적 관개와 무제한적 관개에 대한 별도의 기준을 두고 있다.

멕시코는 표 6.5외에도 US EPA (1992)에서 제시한 중금속 기준을 채택하여 하수재이용 수질기준으로 사용하고 있다.

표 6.2.5 멕시코의 하수처리수의 농업용수재이용 및 토양성분 최대 허용 기준 (standards) (adopted from Jimenez, 2005)

항목 (mg/L)	하천		저수지		토양	
	MM	DM	MM	DM	MM	DM
온도 (°C)	NA	NA	40	40	NA	NA
그리스(Grease), 기름	15	25	15	25	15	25
부유 물질	0	0	0	0	0	0
침강성 물질 (ml/l)	1	2	1	2	NA	NA
TSS	150	200	75	125	NA	NA
BOD5	150	200	75	150	NA	NA
T-N	40	60	40	60	NA	NA
T-P	20	30	20	30	NA	NA
분병성 대장균군수 (MPN/100 mL)	103	103	103	103	103	103
기생충 알 (No./L) (restricted agriculture ^a)	5	5	5	5	5	5
기생충 알 (No./L) (unrestricted agriculture ^b)	1	1	1	1	1	1

DM: 일 평균, MM: 월 평균, NA: 해당사항 없음

a Unrestricted agriculture: 사료작물, 곡물류, 과일 및 야채 등을 대상으로 한 관개

b Restricted agriculture: 날것으로 먹는 채소를 제외한 작물을 대상으로 한 관개

3. 하수재이용에 따른 인체위해성

Chary et al. (2008)은 인도에서 하수를 관개한 농경지의 토양과 채소 등을 대상으로 한 중금속 위해성을 위해도 지수 등으로 평가한 바 있다. 그 결과 납 (Pb), 아연 (Cr), 크롬 (Cr), 그리고 니켈 (Ni) 등이 기준치를 초과하는 것으로 분석되었으며, 시금치 등에서는 아연과 크롬 그리고 납 등이 특히 높은 위해도를 나타내는 것으로 보고하였다.

Khan et al. (2008)은 중국에서의 하수를 관개하여 재배한 농산물의 섭취에 따른 중금속 위해도를 평가한 연구를 수행하였으며, 그 결과 상당한 양의 중금속이 하수관개에 의해 집적되는 것으로 나타났다. 또한, 하수관개에 의해 중금속이 집적된 토양에서 재배된 식물의 경우에는 중국의 기준과 WHO기준을 상회하는 정도의 식물체에서의 중금속 집적이 발생하는 것으로 조사되었으나, 이를 섭취함에 따른 인체위해도는 유해한 수준은 아닌 것으로 보고되었다.

Li et al. (2009)는 중국에서 폐수를 관개하여 농산물을 재배하는 지역을 대상으로 중금속 위험도를 평가하는 연구를 수행하였으며, 그 결과 카드뮴 (Cd)의 토양에의 집적이 중국과 WHO의 기준을 초과하였으며, 카드뮴에 대해서 식물체의 집적이 위험수준을 넘는 것으로 나타남에 따라 폐수를 관개하는 영농활동은 인체에 심각한 영향을 미칠 수 있음으로 금지되어야 할 것을 권고하고 있다.

Srinivasan and Reddy (2009)는 인도에서 미처리 하수와 부분적으로 처리된 하수를 이용하는 마을을 대상으로 한 병적 불건전 상태 분석을 실시한 바 있으며, 그 결과 하수를 이용하는 영농활동에 따른 병적 불건전 상태의 위험성이 어린이와 남성보다는 여성 어른에 훨씬 더 크게 나타날 수 있는 것으로 평가되었으며, 무계획적 미처리하수의 관개용수 이용을 제한하기 위한 규제와 적합한 재이용을 위한 방안이 필요함을 역설한 바 있다.

Forslund et al. (2010)은 이탈리아에서 표면하 점적 관개를 통한 감자재배에 대한 하수 재이용의 인체위해성을 평가한 연구에서 하수처리수 관개수와 하수처리수를 관개한 감자에서 E.coli가 부분적으로 검출되기는 하였으나, 하수처리수 표면하 점적 관개를 통한 감자재배가 인체 위험도를 높이지는 않는 것으로 평가하였다.

Singh et al. (2010)은 인도에서 하수를 관개한 지역의 채소와 곡물, 그리고 우유에 대한 중금속 위험성을 평가하였으며, 그 결과 청정지역보다 하수관개지역에서의 채소, 곡물, 그리고 우유의 중금속 농도가 수 배 더 높게 나타났다. 특히, 채소와 곡물의 크롬 (Cd), 납 (Pb), 그리고 니켈 (Ni)의 중금속 농도는 인도와 WHO, 그리고 FAO의 기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 우유의 경우에는 허용가능한 수준으로 분석되었다. 쌀과 밀의 경우 채소보다는 낮은 수준의 중금속 농도를 보였으나 인간의 식생활을 고려할 경우 보다 큰 관심이 필요한 것으로 판단되었다. 본 연구를 통해서 하수를 농업용수로 이용할 경우, 농산물의 중금속 집적에 따른 인체위해성의 주요한 관심이 필요한 것으로 보고되었다.

4. 하수재이용에 따른 작물생육 및 환경영향

Mohammad와 Mazahreh (2003)은 요르단에서 2차 처리한 하수처리수를 이용한 사료작물 재배실험을 통해서 장기간의 하수처리수 관개는 토양의 비옥도를 높여주며, 중금속 중에서는 철(Fe)과 망간(Mn)의 축적을 발생시킬 수 있고, 아연(Zn)과 구리(Cu)의 집적에는 영향을 미치지 않는 것으로 조사하였다. 다만, 하수처리수는 토양의 염도를 높일 수 있기 때문에 추가적인 재처리과정이 필요함을 언급한 바 있다.

Stevens et al. (2003)은 호주에서 30여 년간 하수처리수를 관개한 지역의 토양분석을 통해서 장기간의 하수재이용이 토양에서의 염도증가를 초래할 수 있으며, 이에 따른 작물의 수확량에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 조사 분석하였다. 다만, 지속가능한 하수재이용을 위해서는 영분을 완화한 하수처리수를 농업용수로 이용할 것을 권고하고 있다.

Chiou (2008)은 대만에서 하수처리수를 논관개용수로 재이용할 경우, 중금속 중에서는 비소(As)의 농토양에의 농축이 발생할 가능성이 있다고 보고했으며, 무시비 시 논관개용수에 적합한 20 mgL⁻¹ 농도의 하수처리장 방류수에 대한 희석비율 또한 제시하였다.

Li et al. (2009)는 중국에서 미처리하수, 하수처리장 방류수, 폐수 등을 논관개용수로 이용할 경우에 대한 실험적 연구를 통해서 미처리하수와 폐수를 이용한 논벼재배는 수확

량을 증가시킬 뿐만 아니라 특히, 적절한 시비활동을 포함하는 미처리하수를 이용한 논벼 재배는 논에서의 질소처리를 통한 수처리 효과를 극대화할 수 있는 것으로 보고하였다.

Palese et al. (2009)는 이탈리아에서 하수처리수의 올리브나무에의 관개에 따른 토양과 올리브과수의 미생물학적 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 하수처리수를 관개할 경우에도 천수상태의 올리브나무 및 올리브열매 등과 비교하였을 때 살모넬라 등을 포함한 미생물 등이 검출되지 않는 것으로 나타남에 따라 적절히 재처리된 하수를 올리브나무 관개를 위한 관개용수로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다.

Xu et al. (2010)은 미국에서 3년, 8년, 그리고 20년간 재처리수를 관개한 농경지 토양을 대상으로 토양특성을 비교분석한 연구에서, pH는 장기간 재처리수를 관개한 논일수록 깊은 심도까지 유의한 차이를 나타내는 정도에서 낮아지는 것으로 분석되었으며, 염도의 경우에도 재처리수를 관개하지 않은 농경지 토양과 비교하여 재처리수를 관개한 모든 농경지 토양이 크게 나타났다. 또한, 얇은 토층에서는 총질소와 유기물질함량이 재처리수를 관개한 경우가 더 높게 나타남에 따라 재처리수 관개가 토양의 비옥도향상에 도움을 줄 수 있음을 보고한 바 있다. 다만, 장기간의 재처리수 관개는 토양에의 중금속 집적을 초래할 수 있는 가능성이 있음을 경고하고 있다.

Banon et al. (2011)은 스페인에서 하수처리수와 하수처리수를 희석한 재이용수를 관개한 관상용 식물에 대한 생육과 생리적 시각적 품질에 대한 비교연구에서, 하수처리수를 관개한 관상용 식물의 생육장애와 시각적 품질 저하는 미미한 수준이었으며, 하수처리수를 희석하여 관개용수로 사용하더라도 관상용 작물의 시각적 품질저하를 크게 완화시키지는 않는 것으로 보고하였다.

Pereira et al. (2011a)은 브라질에서 재처리수의 관개 비중에 따른 토양의 이화학적 특성 및 식물 양분예의 영향을 조사 분석하였다. 재처리수를 관개할 경우 토양의 산성도를 감소시키고, 재처리수 내 납 (Pb), 카드뮴 (Cd), 크롬 (Cr), 그리고 알루미늄 (Al) 등의 중금속은 OH⁻에 의해서 제한될 수 있는 것으로 분석되었다. 하지만 재처리수의 비중이 작물의 증발산량을 초과할 경우에는 식물 양분의 불균형을 초래할 수 있으며, 토양에의 황 (S) 축적과 식물에의 인산 (P)과 K(칼륨) 결핍을 초래할 수 있는 것으로 보고되었다.

Pereira et al. (2011b)는 미국에서의 재처리수를 이용한 감귤재배에 대한 11년간의 장기간 모니터링을 통해서 하수처리수의 감귤 영양예의 영향을 분석한 바 있다. 그 결과 하수처리수를 감귤 관개용수로 이용할 경우 감귤의 다량 영양소 (P, Ca, K) 증가에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 하수처리수의 붕소 (B)와 구리 (Cu) 성분의 과다는 감귤의 미량 영양소의 불균형과 토양환경예의 부적효과를 초래할 수도 있다고 판단하였다.

Cirelli et al. (2012)는 이탈리아에서 하수처리수를 가지와 토마토에 점적 관개함에 따른 영향을 평가한 연구에서, 하수처리수를 토마토에 관개할 경우 약 20%의 수확량 증가와 함께 상품성이 큰 토마토를 더 많이 생산할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 가지의 경우에는 수확량 증가에도 불구하고, 극히 적은 시료에서 분변성 대장균이 발견되었다고 보고하였다. 본 연구를 통해서 Cirelli et al.은 제한된 상황에서 하수처리수를 대체농업용수로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다.

Singh et al. (2012)는 인도에서 생활하수를 이용한 밀, 녹두, 그리고 클로버 등의 재배를 통해서 생활하수를 이용한 영농활동이 토양과 수확량 등에 미치는 영향을 분석하였으

며, 그 결과, 토양의 비옥도와 작물의 수확량은 증가하였으며, 단기적인 측면에서 부정적인 영향은 없는 것으로 나타났으나, 토양의 염도는 다소간 증가하는 것으로 분석되었다.

Zema et al. (2012)는 이탈리아에서 하수를 에너지작물에 관개함에 따른 에너지작물의 바이오매스양과 농경지 토성 등에의 영향을 평가한 바 있다. 그 결과, 하수 관개는 에너지작물의 바이오매스양을 크게 증가시켰으며, 농경지 물리적 이화학적 토양특성에의 부정적인 변화는 관찰되지 않는 것으로 보고하였다. 또한, 본 연구 결과로부터 하수를 에너지작물에 관개하는 것이 환경적, 그리고 경제적으로 유용한 하수처리 방법이 될 수 있을 것으로 제안하였다.

참 고 문 헌

1. 강문성, 2002. 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모델을 이용한 오염총량모의 시스템 개발. 서울대학교 박사 학위 논문.
2. 강문성, 박승우, 김상민, 성충현, 2004. 하수처리수의 재이용을 위한 벼 재배시험. 한국농공학회지, 46(1): 75-86.
3. 강성수, 노안성, 최승출, 김영상, 김현주, 최문태, 안병구, 김현우, 김희권, 박준홍, 이영한, 양상호, 류중수, 장용선, 김명숙, 손연규, 이창훈, 하상건, 이덕배, 김유학, 2012. 우리나라 논토양의 화학성 현황과 변동. 한국토양비료학회지 45(6): 968-972.
4. 강양순, 이종훈, 김정일, 이재생, 1997. 규산 시용이 미입의 품질에 미치는 영향. 한국작물학회지 42(6): 800-804.
5. 건설교통부, 2000. 수자원 관리기법 개발연구조사. 제1권, 한국 확률강우량도 작성.
6. 건설교통부, 2002. 안성천 수계 하천정비기본계획 (변경).
7. 경기보건환경연구원, 2008. 오산천 수질개선 종합계획.
8. 국립환경과학원, 2005. 오염총량관리를 위한 하천수질모델의 개발(2).
9. 국립환경과학원, 2007. QUALKO2 모형 설명서.
10. 국립환경과학원, 2008. 제2단계 수계오염 총량관리기술지침.
11. 국토해양부, 2008. 지역강우빈도해석프로그램: FFC1-RFA (Ver. 2007) 사용자 설명서.
12. 국토해양부, 2011. 수자원장기종합개발계획.
13. 권영립, 조승현, 이덕렬, 최동철. 이승엽, 2006. 질소 시비량 및 진단 수비 사용이 벼의 생육, 수량 및 미질에 미치는 영향. 생명자원과학연구 28: 66-76.
14. 김길호, 이충성, 이진희, 심명필, 2007. 경제성분석에 의한 소수력 개발의 최적규모 결정 방안. 한국수자원학회논문집 40(12): 995-1005.
15. 김대식, 구승모, 남상운, 2008. 농촌 그린빌리지 조성을 위한 일별 잠재적 태양광발전량의 적정확률분포형 추정 : 서산지역을 중심으로. 한국농공학회논문집 50(6): 33-47
16. 김도훈, 2001. 시스템 다이내믹스, 서울: 대영문화사.
17. 김동욱, 2009. 생활하수 유입수역에서의 총대장균군 부하 예측모델개발에 관한 연구. 금오공과대학교 박사학위논문.
18. 김동환, 2004. 시스템 사고, 시스템으로 생각하기, 서울: 선학사.
19. 김민호, 부금동, 이변우, 2006. 벼 유수분화기 생장 및 질소영양상태에 따른 수량의 수비질소 반응. 한국작물학회지 51(7): 571-583.
20. 김복영, 1988. 수질오염과 농업. 한국환경농학회지 7(2): 153-169.

21. 김상단, 이아연, 이재운, 김태웅, 2011. 개념적인 토양수분 모의모형을 이용한 미래 극한 가뭄사상의 시공간적 해석. 한국방재학회논문집 11(6): 349-356.
22. 김성욱, 이진혁, 김인수, 함세영, 김상현, 김부근, 2011. 부산 동부 연안 해저용출수 부존 평가 1: 육상 전기비저항 탐사. 지질학회지 47(6), 683-693.
23. 김영호, 김희동, 한상욱, 최재연, 구자민, 정유란, 김재영, 윤진일, 2002. 공간정보와 생육모의에 의한 남한 벼 품종의 북한 서부지대 적응성 예측, 한국농림기상학회지 4(4): 224-236.
24. 김용철, 조용식, 2012. 확률도시 상관계수 검정을 활용한 임원항 지진해일 위험지역 분석. 한국방재학회논문집 12(2): 271-277.
25. 김지혜, 정한석, 강문성, 송인홍, 박승우, 2012. SWAT-QUALKO2 연계 모형을 이용한 관개기 순별 관개수질 모의. 한국농공학회논문집 54: 53-63.
26. 김진호, 조광래, 임수정, 이경자, 경기천, 엄미정, 김희권, 김찬용, 이영한, 이신찬, 윤순강, 2003. 우리나라 논 관개용 지하수 수질 특성. 한국환경농학회지 22(4): 241-245.
27. 김해도, 이광야, 이용직, 2009. 하수처리수의 농업용수 재이용사업 현황과 전망. 한국수자원학회논문집 42(9): 36-43.
28. 김형중, 2011. 일본의 농업용수 현황과 수질관리. 농어촌과 환경 113: 102-111.
29. 농림부, 2003, 농림업 주요통계
30. 농림부, 농업기반공사, 2003, 농촌용수공급체계재편계획 종합보고서
31. 농림부, 한국농촌공사, 2003, 농업생산기반정비사업통계연보
32. 농림부, 2004, 농업용수 수질오염이 벼생육에 미치는 영향연구
33. 농림수산식품부, 2010, 새만금지역 용수활용방안연구
34. 농림수산식품부, 2011, 왕송지구 농업용수 수질개선사업 기본조사보고서
35. 농림수산식품부, 2012. 2011 농업용수 수질측정망조사 보고서.
36. 농업과학기술원, 2000. 토양 및 식물체분석법.
37. 농업기반공사, 2004. 농업용수 수질오염이 벼 생육에 미치는 영향연구.
38. 농촌진흥청, 2007. 작물별 시비처방 기준.
39. 농촌진흥청, 2008. 농산물 중 유해물질 위해성 평가 연구
40. 농촌진흥청, 2011. '11년 벼 생육상황 및 추석용 햅쌀 공급가능량 분석.
41. 류순호, 2000. 토양사전. 서울대학교출판부.
42. 박승우, 2004. 대체용수 활용 기반기술 개발 (4-5-1). 서울대학교.
43. 박승우, 2005, 재이용수질지침에 관한 국제심포지움 자료집(별책-재이용수질기준제안). 서울대학교.
44. 박승우, 2007. 하수처리수의 농업용수재이용시스템 개발.
45. 박승우, 2010. 하수처리수의 농업용수재이용시스템 통합기술적용.
46. 박승우, 2011. 하수처리수의 농업용수재이용시스템 통합기술적용.
47. 박승우, 장태일, 2009. 안전한 하수재처리수의 농업용수 이용기술. 하천과 문화 5(3): 102-106.

48. 법무부, 2012. 환경정책기본법 제10조, 환경정책기본법시행령 제2조.
49. 성충현, 김성재, 김성민, 김상민, 2011. 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 포장단위 수질영향 분석. 한국농공학회지, 53(4): 59-65.
50. 송정현, 강문성, 송인홍, 장정렬, 2012. 영농방법에 따른 논에서의 배출부하량 모의. 한국환경농학회지 31(4): 318-327.
51. 송정현, 강문성, 송인홍, 황순호, 박지훈, 안지현, 2013a. 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발. 한국농공학회논문집 55(3): 63-73.
52. 송정현, 강문성, 송인홍, 황순호, 박지훈, 전상민, 김계웅, 장정렬, 2013b. 저수지 관개 광역 논외의 영양물질 수지 분석. 한국농공학회논문집 55(6): 167-175.
53. 신흥준, 남우성, 정영훈, 허준행, 2008. Generalized Logistic 분포형을 이용한 지역빈도해석의 불확실성 추정. 대한토목학회논문집 28(6): 734-729
54. 신흥준, 성경민, 정영훈, 허준행, 2010. GLO 분포에 대한 Modified Anderson-Darling 검정 통계량 유도. 제36회 대한토목학회 정기 학술대회.
55. 신흥준, 허준행, 2005. Generalized Logistic 분포형의 Quantile에 대한 신뢰구간 연구. 2005년도 대한토목학회 정기 학술대회.
56. 심교문, 노기안, 소규호, 김건엽, 정현철, 이덕배, 2010. 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측. 한국기후변화학회지 1(2): 121-131.
57. 엄명철, 2004. 하구담수호 유역의 시공간적 오염물질 배출구조 해석. 서울대학교 박사학위논문.
58. 여규동, 이충성, 김길호, 심명필, 2009. 대체비용법을 이용한 하천 수질개선편익 산정. 한국수자원학회논문집 42(4): 343-353.
59. 유재정, 윤영삼, 신석호, 권헌각, 윤종수, 전영인, 강두기, 갈병석, 2011. 밀양강 중권역 오염부하 전망 및 삭감 시나리오별 하류 수질예측. 한국환경과학회지, 20(5): 589-598.
60. 윤춘경, 한정운, 정광욱, 장재호, 2006. 하수처리수의 관개용수 재이용을 위한 미생물 위해성 평가. 한국농공학회논문집 48(2): 77-87
61. 이순혁, 박명근, 정연수, 맹승진, 류경식, 1997. Gamma 및 Generalized Gamma 분포 모형에 의한 적정 설계홍수량의 유도 (I) -Gamma 분포 모형을 중심으로 -. 한국농공학회 전원과자원 39(3): 83-95.
62. 이강희, 채창우, 2011. 국내 공동주택의 물사용량과 비용 추계모델 작성. 대한건축학회연합논문집 13(3): 165-172.
63. 이용범. 1996. 원수수질 분석, 처방 및 배양액 관리기술. 서울시립대학교.
64. 이용범, 남윤일, 최경이, 노미영, 조명환, 김태영, 유인호. 2006. 순환식 수경재배용 장미 배양액 조성. 서울시립대학교.
65. 이주현, 서지원, 김창주, 2012. 가뭄지수를 활용한 가뭄의 경향성, 주기성 및 발생빈도 분석. 한국수자원학회논문집, 45(1): 75-89.
66. 이중훈, 권혁일, 김연식, 이만형, 2007. 비선호시설 입지갈등에 대한 인과지도 작성과 정책 대안. 한국 시스템 다이내믹스 연구 8(1): 151-171.

67. 이충근, 김준환, 최민규, 광강수, 신진철, 2010. 표준 질소시비량이 감소된 조건에서 쌀 품질 향상과 노력절감을 위한 질소 시비방법. 한국작물학회지 55(1): 70-75.
68. 이한필, 윤춘경, 정광욱, 손장원, 2009. 하수의 농업적 재이용에 따른 논 담수 내 미생물 위해성 평가. 한국물환경학회지 25(1): 69-75.
69. 임상준, 강민구, 박승우, 박창언, 2000. 한강수계 관개용 저수지의 공급량 조사. 한국농공학회논문집 42(6): 37-44.
70. 장태일, 2009. 하수처리수의 농업용수재이용에 따른 논에서의 환경영향 분석. 서울대학교 박사학위논문.
71. 정광욱, 안윤주, 장재호, 전지홍, 윤춘경, 2005. 하수처리수를 관개한 후 벼재배 시험구에 대한 미생물 위해성 평가. 한국하천호수학회지 38(2): 225-236.
72. 정광욱, 윤춘경, 전지홍, 함종화, 2004. 하수처리수 관개후 벼재배 시험구에서 지표미생물 거동 분석. 한국하천호수학회지 37(1): 112-121.
73. 정기웅, 2011. 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 생육영향 통계분석. 서울대학교 석사학위논문.
74. 정석환, 주영중, 2005. 시스템다이내믹스 방법론을 이용한 정책과급효과분석 : 성매매특별법을 중심으로 39(1): 219-236.
75. 정영호, 2012. 다매체·다채널 시대의 미디어 다양성에 대한 시스템 다이내믹스 모형의 적용 및 검증, 서울대학교 박사학위논문, 서울대학교.
76. 정하우, 김선주, 김진수, 노재경, 박기욱, 손재권, 유광식, 이근후, 이남호, 정상옥, 최중대, 최진용, 1999. 관개배수공학. 동명사.
77. 정한석, 박지훈, 성충현, 장태일, 강문성, 박승우, 2013. 간접하수재이용에 따른 논에서의 수질 및 토양환경 영향 분석. 한국농공학회논문집 55(3): 91-104.
78. 정한석, 서교, 장태일, 성충현, 김학관, 박승우, 2013. 시스템 다이내믹스를 이용한 농업용수 재이용시스템 경제성 분석. 한국농공학회논문집 55(3): 9-20.
79. 정한석, 성충현, 장태일, 정기웅, 강문성, 박승우, 2011. 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의. 한국농공학회논문집 53(4): 67-74.
80. 조경숙, 윤진일, 1999. 일기상자료에 의한 읍면별 벼 작황진단 및 쌀 생산량 예측, 한국농림기상학회지 1(1): 12-19.
81. 조은희, 2012. 대체비용법을 이용한 댐중고 사업에 따른 수질개선편익 산정, 인하대학교 석사학위논문, 인하대학교.
82. 채영암, 구자욱, 서학수, 이영만, 1991. 기초생물통계학, 서울: 향문사.
83. 최종수, 김형복, 2003. 하수처리시설 건설 및 유지관리비용 산출방안. 대한환경공학회지 25(1): 33-37.
84. 최현구, 김동일, 김지은, 한건연, 2011. 유역모형과 하천수질모형의 연계를 통한 비점오염원 영향분석. 환경영향평가 20(1): 25-36.
85. 한강유역환경청, 2009a. 안성천 중권역 물환경관리계획.

86. 한강유역환경청, 2009b, 임진강 상하류 물환경관리계획.
87. 한국개발연구원 (KDI), 2008. 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구.
88. 한국생물환경조절학회, 2009, 태안 시설원예단지 조성을 위한 기본계획.
89. 홍원석, 1993. WASP4 모형의 민감도 해석에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문, 서울대학교.
90. 환경부, 2000. 수질오염공정시험방법.
91. 환경부, 2007. 하수재이용 가이드북.
92. 환경부, 2008. 수질오염공정시험방법.
93. 환경부, 2009. 하수처리수 재이용 가이드북 (개정).
94. 환경부, 2010. 먹는물의 미생물(일반세균) 수질기준 개선에 관한 연구.
95. 환경부, 2011a. 2010 하수도 통계.
96. 환경부, 2011b. 물 재이용 기본계획 수립을 위한 연구.
97. 환경부, 2011c. 하수처리수 재이용 법정 수질기준의 합리적인 적용방안 마련을 위한 연구.
98. 환경부, 2012a. 2011 하수도 통계.
99. 환경부, 2012b. 2011년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과.
100. 환경부, 2013a. 2012 하수도 통계.
101. 환경부, 2013b. 2012년도 토양측정망 및 토양오염 실태조사결과.
102. 환경부, 2014. 환경정책기본법 시행령, 제 23967호 (2012. 07. 20).
103. Agrafioti, E., E. Diamadopoulos, 2012. A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete. *Agricultural Water Management* 105: 57-64.
104. Anderson, T. W., D. A. Darling, 1952. Asymptotic theory of certain 'goodness of fit' criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics* 23: 193-212.
105. Angelakis, A. N., M. H. F. Marecos Do Monte, L. Bontoux, T. Asano, 1999. The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. *Water Research* 33(10): 2201-2217.
106. Asano, T., F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, G. Tchobanoglous, 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies and Applications*, first ed. McGraw-Hill, New York.
107. Asano, T., L. Y. C. Leong, M. G. Rigby, R. H. Sakaji, 1992. Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data. *Water Science and Technology* 26(7-8): 1513-1524.
108. Ayers, R. S., D. W. Westcot, 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, revised 1, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

109. Ayni, F. E., S. Cherif, A. Jrad, M. Trabelsi-Ayadi, 2011. Impact of treated wastewater reuse on agriculture and aquifer recharge in a Coastal Area: Korba case study. *Water Resources Management* 25: 2251 - 2265.
110. Ayres, R. M., R. Stott, D. L. Lee, D. D. Mara, S. A. Silva, 1992. Contamination of lettuces with nematode eggs by spray irrigation with treated and untreated wastewater. *Water Science and Technology* 26(7-8): 1615-1623.
111. Banon, S., J. Miralles, J. Ochoa, J. A. Franco, M. J. Sanchez-Blanco, 2011. Effects of diluted and undiluted treated wastewater on the growth, physiological aspects and visual quality of potted lantana and polygala plants. *Scientia Horticulturae* 129: 869-876.
112. Barlas Y., 2002. System dynamics: systemic feedback modeling for policy analysis. In *Knowledge for Sustainable Development—An Insight into the Encyclopedia of Life Support Systems*, 1131-1175. Oxford, UK: UNESCO Publishing.
113. Beddington, J., M. Asaduzzaman, M. Clark, A. Fernandez, M. Guillou, M. Jahn, L. Erda, T. Mamo, N. Van Bo, C. A. Nobre, R. Scholes, R. Sharma, J. Wakhungu, 2012. *Achieving Food Security in the Face of Climate Change: Final Report from the Commission on Sustainable Agriculture and Climate Change*. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), Copenhagen, Denmark.
114. Blumenthal, U. J., A. Peasy, G. Ruiz-Palacios, D. D. Mara, 2000. Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence. WELL Study, Task no 68, Part 1. London, UK: WELL Resource Centre.
115. Bixio, D., C. Thoeve, T. Wintgens, A. Ravazzini, V. Miska, M. Mustuon, H. Chikurel, A. Aharoni, D. Joksimovic, T. Melin, 2008. Water reclamation and reuse: implementation and management issues. *Desalination* 218: 13-23.
116. Brissaud, F., 2008. Criteria for water recycling and reuse in the Mediterranean countries. *Desalination* 218: 24-33.
117. Carpenter, S. R., N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Shrpley, V. H. Smith, 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* 8(3): 559-568.
118. CCME. 2003. *Canadian Environmental Quality Guidelines for the Protection of Agricultural Water Uses*. Canadian Council of Ministers of the Environment.

119. Chapman, P. D., P. F. Pratt, 1961. *Methods of analysis for soils, plants and water*. University of California: Division of Agricultural Sciences, CA.
120. Chary, N. S., C. T. Kamala, D. S. S. Raj, 2008. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 69: 513-524.
121. Chavez, A., K. Rodas, B. Prado, R. Thompson, B. Jimenez, 2012. An evaluation of the effects of changing wastewater irrigation regime for the production of alfalfa (*Medicago sativa*). *Agricultural Water Management* 113: 76-84.
122. Chiou, R.J., 2008. Risk assessment and loading capacity of reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment* 142: 255 - 262.
123. Cho, J. Y., J. K. Choi, 2001. Nitrogen and phosphorus losses from a broad paddy field in Central Korea. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32(15&16): 2395-2410.
124. Chu, J. Y., J. N. Chen, C. Wang P. Fu, 2004. Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management. *Water Research*. 38: 2746 - 2756.
125. Cirelli G. L., S. Consoli, F. Licciardello, R. Aiello, F. Giuffrida, C. Leonardo, 2012. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management* 104: 163 - 170.
126. Clausen, J. C., K. N. Brooks, 1983. Quality of runoff from Minnesota peatlands: II. A method for assessing mining impacts. *Water Resour. Bull.* 19(5): 769-772.
127. Crook, J., R. Y. Surampalli, 2005. Water reuse criteria in the united states. *Water Supply* 5(3-4): 1-7.
128. Crow, E. L., K. Shimizu, 1988. *Lognormal Distributions: Theory and Applications*. Statistics: textbook and monographs 88: 387.
129. Cunliffe, D. A., D. Bursill, T. Hooy, 2005. Developing national guidelines on water recycling in Integrated concepts in water recycling. Khan, S. J., M. H. Mustan, A. I. Schafer, editors. University of Wollongong printing services. Australia. 164-168.
130. Domeno, I., N. Irigoyen, J. Muro, 2009. Evolution of organic matter and drainages in wood fibre and coconut fibre substrates. *Scientia Horticulturae* 122: 269-274.
131. Eberlein, R., 2007. *Vensim User's Guide (version 5)*. Harvard, MA.: Ventana Systems.

132. FAO, 1976. Water quality for agriculture.
133. FAO, 1977. Water quality for agriculture, 174. FAO/UN29 Rev. 1. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
134. FAO. 1994. Water Quality for Agriculture. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
135. FAO, 2004. Economic valuation of water resources in agriculture – From the sectoral to a functional perspective of natural resource management
136. FAO, 2012. On-farm practices for the safe use of wastewater in urban and peri-urban horticulture.
137. Foley, J. A., N. Ramankutty, K. A. Brauman, E. S. Cassidy, J. S. Gerber, M. Johnston, N. D. Mueller, C. O'Connell, D. K. Ray, P. C. West, C. Balzer, E. M. Bennett, S. R. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polasky, J. Rockström, J. Sheehan, S. Siebert, G. D. Tilman, D. P. M. Zaks, 2011. Solutions for a cultivated planet, *Nature* 478: 337 - 342.
138. Ford, A., 2009. *Modeling the Environment*. Washington, DC: Island Press.
139. Forrester, J. W., 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge: The MIT Press.
140. Forslund, A., J. H. J. Ensink, A. Battilani, I. Kljujev, S. Gola, V. Raicevic, Z. Jovanovic, R. Stikic, L. Sandei, T. Fletcher, A. Dalsgaard, 2010. Faecal contamination and hygiene aspect associated with the use of treated wastewater and canal water for irrigation of potatoes. *Agricultural Water Management* 98: 440 - 450.
141. Forum for Agricultural Research in Africa (FARA), 2006. *Framework for African Agricultural Productivity*. Accra, Ghana.
142. Grattan, S. R., 2002. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. *California Agriculture* 56(6): 189-195.
143. Gupta, S., S. Nayek, R. N. Saha, S. Satpati, 2008. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil, and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory. *Environmental Geology* 55: 731-739.
144. Hagher, F., 1974. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature. *Journal of Environmental Quality* 3(2): 180-183.
145. Hall, R. I., P. W. Aitchison, W. L. Kocay, 1994. Causal policy maps of managers: Formal methods for elicitation and analysis. *Systems Dynamics Review* 10(4): 337-360.

146. Hamilton, A.J., F. Stagnitti, X. Xiong, S. L. Kreidil, K. K. Benke, P. Maher, 2007. Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose Zone Journal* 6: 823 - 840.
147. Haruvy, N., 1998. Wastewater reuse—regional and economic considerations. *Resources, Conservation and Recycling* 23: 57 - 66.
148. Haruvy, N., 1997. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 66: 113 - 119.
149. Hass, C. N., J. B. Rose, C. P. Gerba. 1999. Quantitative microbial risk assessment. John Wiley & Sons, Inc. New York.
150. Hoffman, E. O., R. H. Gardner, 1983. Evaluation of Uncertainties in Environmental Radiological Assessment Models, In *Radiological Assessments: a Textbook on Environmental Dose Assessment*, ed. Till, J.E. and H.R. Meyer, 11-55. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
151. Horrigan, L., R. S., Lawrence, P. Walker, 2002. How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental Health Perspectives* 110: 445-456.
152. Heo, J. H., J. D. Salas, 1996. Estimation of Quantiles and Confidence Intervals for the Log-Gumbel Distribution. *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 10: 187-207.
153. Jamieson, P. D., J. R. Porter, D. R. Wilson, 1991. A test of the computer simulation model ARCHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27: 337-350.
154. Jang T. I., H. K. Kim, C. H. Seong, E. J. Lee, S. W. Park, 2012. Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management* 104: 235 - 243.
155. Jang, T. I., M. P. Jung, E. J. Lee, S. W. Park, J. H. Lee, H. S. Jeong, 2013. Assessing environmental impacts of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields using bioindicator. *Irrigation Science* 31: 1225-1236.
156. Jang, T. I., M. P. Jung, E. J. Lee, S. W. Park, J. H. Lee, H. S. Jeong, 2013. Bioindicator evaluation of environmental impacts of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields. *Irrigation Science*: DOI: 10.1007/s00271-013-0401-5.
157. Jang, T. I., S. B. Lee, C. H. Sung, H. P. Lee, S. W. Park, 2010. Safe application of reclaimed water reuse for agriculture in Korea. *Paddy Water Environment* 8: 227 - 233.

158. Jeong, H. S., T. I. Jang, C. H. Seong, S. W. Park, 2014. Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater. *Agricultural Water Management* 141: 1-9.
159. Jimenez, B., 2005. Treatment technology and standards for agricultural wastewater reuse: a case study in Mexico. *Irrigation and Drainage* 54 (Suppl. 1): S22 - S33.
160. Johnson, N. L., S. Kotz, 1970. *Distributions in Statistics. Continuous Univariate Distributions-2*, New York: Wiley.
161. Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkense, U. Singh, A. J. Gijsman, J. T. Ritchie, 2003. The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.
162. Jung, J. W., 2008. Development of universal nutrient load equation for paddy fields. Ph. D. diss., Chonnam National University, Korea.
163. Jung, M. C., I. Thornton, 1997. Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea. *The Science of the Total Environment* 198: 105-121.
164. Kang M. S., S. M. Kim, S. W. Park, J. J. Lee, K. H. Yoo, 2007. Assessment of reclaimed wastewater irrigation impacts on water quality, soil, and rice cultivation in paddy fields. *Journal of Environmental Science and Health part A* 42: 439 - 445.
165. Khan S., L. Yufeng, A. Ahmad, 2009. Analysing complex behavior of hydrological systems through a system dynamics approach. *Environmental Modelling & Software* 24(12): 1363-1372.
166. Khan, S., Q. Cao, Y. M., Zheng, Y. Z., Huang, Y. G., Zhu, 2008. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution* 152: 686-692.
167. Kim, S. M., S. J. Im, S. W. Park, J. J. Lee, B. L. Benham, T. I. Jang, 2008. Assessment of wastewater reuse effects on nutrient loads from paddy field using field-scale water quality model. *Environ. Model. Assess.* 13, 305-311.
168. Kim, S. M., S. W. Park, J. J. Lee, B. L. Benham, and H. K. Kim, 2007. Modeling and assessing the impact of reclaimed wastewater irrigation on the nutrient load from an agricultural watershed containing rice paddy fields. *Journal of Environmental Science and Health* 42: 305 - 315.
169. Korean Statistical Information Service (KOSIS), Agricultural census data. <http://kosis.kr>. Accessed 15th Dec. 2012.
170. Leggett, R. W. L. R. Williams, 1981. A reliability index for models. *Ecological Modelling*, 13(1981): 303-312.

171. Liberti, L., M. Notarnicola, A. Lopez, 2000. Advanced Treatment for Municipal Wastewater Reuse in Agriculture. III - Ozone Disinfection. *Ozone Science & Engineering* 22(2): 151-166.
172. Li, P, X. Wang, G. Allinson, X. Li, X. Xiong, 2009. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang China. *Journal of Hazardous Materials* 161: 516-521.
173. Li, S., H. Li, X. Liang, Y. Chen, Z. Cao, Z. Xu, 2009. Rural wastewater irrigation and nitrogen removal by the paddy wetland system in the Tai Lake region of China. *Journal of Soil and Sediment* 9: 433-442.
174. Liu, H. L., J. Y. Yang, C. S. Tan, C. F. Drury, W. D. Reynolds, T. Q. Zhang, Y. L. Bai, J. Jin, P. He, G. Hoogenboom, 2011. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model, *Agricultural Water Management* 98: 1105-1111.
175. Loague, K., R. E. Green, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application, *Journal of Contaminant Hydrology* 7: 51-73.
176. Mara, D., S. Cairncross, 1989. *Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture*. Geneva: World Health Organization.
177. Marin, F. R., J. W. Jones, F. Royce, C. Suguitani, J. L. Donzeli, W. J. P. Filho, D. S. P. Nassif, 2011. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane, *agronomy journal*, Vol. 103 No. 2: 304-315
178. Massart, D. L., H. Y. Vander, 2004. Visual Presentation of Data by Means of Box Plots, *LCGC, Eur.*, 17(11) 586-591.
179. McAvoy, D. C., P. Masscheleyn, C. Peng, S. W. Morrall, A. B. Casilla, J. M. U. Lim, E. G. Gregorio, 2003. Risk assessment approach for untreated wastewater using the QUAL2E water quality model. *Chemosphere*, 52(2003): 55-66.
180. Meadows, D. H., 1980. The unavoidable a priori. In *Elements of the System Dynamics Method*, ed. J. Randers, 23-57. Cambridge, MA: The MIT Press.
181. Mendoza-Espinosa, L. G., A. Cabello-Pasini, V. Macias-Carranza, W. Daessle-Heuser, 2008. The effect of reclaimed wastewater on the quality and growth of grapevines, *Water Science and Technology* 57(9): 1445-1450.
182. Migliaccio, K. W., I. Chaubey, B. E. Haggard, 2007. Evaluation of landscape and instream modeling to predict watershed nutrient yields. *Environmental Modelling & Software*, 22(2007): 987-999.

183. Mohammad, M. J., N. Mazahreh, 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 34: 1281 - 1294.
184. Mills, H. A., J. B. Jones, 1979. Nutrient deficiencies and toxicities in plants: nitrogen. *Journal of Plant Nutrition* 1(2): 101-122.
185. Nash, J. E., J. V. Sutcliffe (1970), River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282 - 290.
186. Nasiri F., T. Savage, R. Wang, N. Barawid, J. B. Zimmerman, 2012. A system dynamics approach for urban water reuse planning: a case study from the great lakes region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*: 1 - 17.
187. Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2003. National water quality handbook, 4/1-4/13. Washington, D. C., USA: Natural Resources Conservation Service.
188. NRCS, 2003. National water quality handbook.
189. Ogoshi, M. Y. Suzuki, T. Asano, 2001. Water reuse in Japan. *Water Science and Technology* 43(10): 17-23.
190. Palese, A. M., V. Pasquale, G. Celano, G. Figliuolo, S. Masi, C. Xiloyannis, 2009. Irrigation of olive groves in Southern Italy with treated municipal wastewater: effects on microbiological quality of soil and fruits. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129: 43-51.
191. Peasey A. U., D. Blumenthal, D. Mara, G. Ruiz-Palacios, 2000. A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: a Latin American perspective. Task No: 68 Part II. London, UK: WELL study.
192. Pedrero, F., I. Kalavrouziotis, J. J. Alarcon, P. Koukoulkis, T. Asano, 2010. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture-Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management* 97: 1233-1241.
193. Pereira, B. F. F., Z. L. He, P. J. Stoffella, A. J. Melfi, 2011. Reclaimed wastewater: Effects on citrus nutrition. *Agricultural Water Management* 98: 1828 - 1833.
194. Petterson, S. R., N. Ashbolt, A. Sharma, 2001. Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: a screening-level risk assessment. *Water Environment Research* 72: 667 - 672.
195. Powell, M. R., E. Ebel, W. Schlosser, M. Walderhaug, J. Kause. 2000. Dose-response envelope for *Escherichia coli* O157:H7. *Quant. Microbiol.* 2: 141-163.

196. Qi, J., L. Li, H. Ai 2009. A systems dynamics approach to competitive strategy in mobile telecommunication industry. *Systems Research and Behavioral Science* 26(2): 155-168.
197. Radcliffe, J. 2004. *Water recycling in Australia*. Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, Parkville, Melbourne.
198. Rhee, H. P., C. G. Yoon, Y. K. Son, J. H. Jang. 2011. Quantitative risk assessment for reclaimed wastewater irrigation on paddy rice field in Korea. *Paddy Water Environ.* 9: 183-191.
199. Richards, R. P., 1989. Determination of sampling frequency for pollutant load estimation using flow information only. In *Proc. Symp., Design of water quality information systems*. R.C. Ward, J.C. Loftis, and G.B. McBride (Eds.) CO Water Resour. Res. Inst. Inf. Ser. No. 61, Fort Collins, CO.
200. Richmond, B., 1993. Systems thinking: critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System Dynamics Review* 9(2): 113-133.
201. Rowe, D. R., I. M. Abdel-Magid, 1995. *Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse*. CRC Press, Inc., New York: 550.
202. Rural Development Administration (RDA), 2007. Recommended rate of fertilizer application, Rural Development Administration.
203. Rutkowski, T., L. Raschid-Sally, S. Buechler, 2007. Wastewater irrigation in the developing world—Two case studies from the Kathmandu Valley in Nepal. *Agricultural Water Management* 88: 83-91.
204. Ryu J. H., B. Contor, G. Johnson, R. Allen, J. Tracy, 2012. System dynamics to sustainable water resources management in the eastern snake plain aquifer under water supply uncertainty. *Journal of the American Water Resources Association* 48(6): 1-17.
205. Ryu, S. H., 2000. *Soil Dictionary*. Seoul National University Press, Seoul.
206. Sato, T., M. Qadir, S. Yamamoto, T. Endo, A. Zahoor, 2013. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management* 130: 1-13.
207. Scott, C.A., A. Browning-Aiken, K. J. Ormerod, R. G. Varady, C. D. Mogollon, C. Tessmer, 2011. *Guidance on Links between Water Reclamation and Reuse and Regional Growth*, WateReuse Research Foundation Report 06-016-1, WateReuse Research Foundation, Arlington Virginia.
208. Scheffe H., 1953, A method of for judging all contrasts in the analysis of variance, *Euphytica*, 1: 112-122.

209. Setter, T. L., E. V. Laureles, A. M. Mazaredo, 1997. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis. *Field Crops Research* 49: 95 - 106.
210. Sharma, R. K., M. Agrawal, F. Marshall, 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 66(2): 258 - 266.
211. Shuval, H. I., A. Adin, B. Fattal, E. Rawitz, P. Yekutieli, 1986. Wastewater irrigation in developing countries: health effects and technical solutions. Washington, D.C. World Bank Technical Paper No. 51.
212. Sinclair, T. R. Seligman, N. G., 1996. Crop modeling: from infancy to maturity, *Agronomy Journal* 88: 698-704.
213. Singh, A., R. K. Sharma, M. Agrawal, F. M. Marshall, 2010. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. *Food and Chemical Toxicology* 48: 611-619.
214. Singh, P. K., P. B. Deshbhratar, D. S. Ramteke, 2012. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural Water Management* 103: 100-104.
215. Singh, U., J. T. Ritchie, D. C. Godwin, 1992. A User's Guide to CERES-Rice. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, USA.
216. Snedecor, G. W., W. G. Cochran, 1980. Statistical methods. 7th Ed. IA State Univ. Press, Ames, IA.
217. SPSS, Inc., 2011. SPSS: Version 20.0 for windows. Chicago: SPSS, Inc.
218. Srinivasan, J. T., V. R. Reddy, 2009. Impact of irrigation water quality on human health: A case study in India. *Ecological Economics* 68: 2800-2807.
219. Stave, K. A., 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management* 67: 303 - 313.
220. Stevens, D. P., M. J. McLaughlin, M. Smart, 2003. Effects of long-term irrigation with reclaimed water on soils of the northern Adelaide plains, SA. *Australian Journal of Soil Research* 41: 933 - 948.
221. Stine, W. S., I. Song, C. Y. Choi, and C. P. Gerba. 2005. Application of microbial risk assessment to the development of standards for enteric pathogens in water used to irrigate fresh produce. *Journal of Food Protection*. 5: 913-918.
222. Striffler, W. D., 1965. The selection of experimental watersheds and methods in disturbed forest areas. *I.A.S.H. Symp. of Budapest* 66: 464-473.

223. Sun, F., Lin, E., Li, J., Xiong, W., 2009. Study on Adaptation Measures of Potato Production by Using DSSAT Crop Model, Chinese journal of agrometeorology 29(2): 127-133.
224. Takahashi, 2007. 마이크로버블·나노 버블의 최신기술.
225. Thompson, R., 1966. Bias of the one-sample Cramer-von Mises test. Journal of the American Statistical Association.
226. Tripler, E., U. Shani, Y. Mualem, A. Ben-Gal, 2011. Long-term growth, water consumption and yield of date palm as a function of salinity. Agricultural Water Management 99: 128 - 134.
227. Turkey, J. W., 1953. The Problem of Multiple Comparisons, Ditto, Princeton University.
228. United States Department of Agriculture (USDA), 1953. Saline and alkaline soils, 160. USDA HB 60. Washington, D. C., USA: United States Department of Agriculture.
229. US EPA. 1992. Manual, Guidelines for water reuse. USEPA/625/R-92/004. US Agency international development.
230. US EPA, 1995. QUAL2E windows interface user's guide.
231. US EPA, 2004, Guidelines for Water Reuse, United States Environmental Protection Agency, EPA 645-R-04-108, Washington, D.C.
232. Vasiloglou V., F. Lokkas, G. Gravanis, 2009. New tool for wastewater treatment units location. Desalination 248: 1039 - 1048
233. Vlachos, D., P. Georgiadis, E. Iakovou, 2007. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. Computers & Operations Research 34: 367 - 394.
234. Weick, K. E., 1979. The social psychology of organizing. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
235. WHO, 1973. Reuse of effluents: Methods of wastewater treatment and health safeguards. Technical report series No. 517, Geneva, World Health Organization (1987) Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning and Practice, Eastern Mediterranean Regional Office, Alexandria.
236. WHO, 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture, 39-40. World Health Organization Technical Report Series 778. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
237. WHO, 2006. Guidelines for the safe use of wastewaters, excreta and greywater. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

238. Wilcox L. V., W. H. Durum, 1967. Quality of irrigation water. In: Hagan RM, Haise HR, Edminister TM (eds) Irrigation of agricultural land, agronomy monograph No. 11. American Society of Agronomy, Madison: 104–122.
239. Willmott, Cort J., Steven G. Ackleson, Robert E. Davis, Johannes J. Feddema, Katherine M. Klink, David R. Legates, James O'donnell, Clinton M. Rowe, 1985. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. C5: 8995-9005.
240. Xu, J., L. Wu, A. C. Chang, Y. Zhang, 2010. Impact of long term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment. Journal of Hazardous Materials 183: 780-786.
241. Yamaoka, 2005. 재이용수질지침에 관한 국제심포지움 자료집(별책-재이용수질 기준제안). 서울대학교.
242. Yang H., K. C. Abbaspour, 2007. Analysis of wastewater reuse potential in Beijing. Desalination 212: 238 - 50.
243. Yoon, C. G., Ham, J. H., Jeon, J. H., 2003. Mass balance analysis in Korean paddy rice culture. Paddy and Water Environ. 1(2): 99 - 106.
244. Yoon, K. S., J. Y. Cho, J. K. Choi, J. G. Son, 2006. Water management and N, P losses from paddy field in southern Korea. Journal of the American Water Resources Association 42(5): 1205-1206.
245. Zema, D. A., G. Bombino, S. Andiloro, S. M. Zimbone, 2012. Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. Agricultural Water Management 115: 55-65.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 하수처리수의 농업용수 간접재이용 시스템 개발과 적용 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.