

발간등록번호

11-1543000-001118-01

<http://rri.ekr.or.kr>

# 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용(II)

---

Convergence technologies development and  
application for agricultural water treatment(II)

---

2015. 12



농림축산식품부



한국농어촌공사



# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용”과제의 2차년도 보고서로 제출합니다.

2015년 12월 31일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사  
농어촌연구원

연구책임자 : 최 선 화

연구 원 : 이 태 호

김 해 도

이 진 경

예 한 희

유 선 아

공동연구기관명 : 충북대학교

연구책임자 : 정 세 웅

연구 원 : 전 향 배

박 형 석

장 진

TIANDONGJIE

협동연구기관명 : 수생태복원(주)

연구책임자 : 김 홍 섭

연구 원 : 서 성 일



# 요 약 문

## 1. 연구과제명 : 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리기술 개발 및 적용(2차년도)

## 2. 연구기간 : 2015. 1 ~ 2015. 12. (5년 중 2년차)

## 3. 연구개요

### 3.1 연구배경 및 필요성

- 전국에는 약 17,500여개의 농업용 저수지가 있으며, 전체 물이용량의 48%를 농업용수로 사용하고 있으나 최근 농어촌지역의 도농복합형태 개발 및 관광지, 유원지화로 오염원이 증가하는 추세로 농업용수 수질이 지속적으로 악화되고 있음
- 국민들의 먹거리에 대한 관심증가로 안전농산물, 친환경농산물 생산을 위한 양질의 농업용수에 대한 요구 증가 및 농업·농촌의 어메니티 중시, 관광 산업화 등으로 농어촌 지역에 위치하고 있는 농업용 저수지에 대한 역할이 증대되고 있으며, 농업용수에 대한 다목적 활용을 위한 수요도 지속적으로 증가하고 있는 추세임
- 저수지의 수질오염은 유입수의 특별한 처리 없이 호 내로 유입되고 있어 부유물질, 유기물, 영양물질 등 오염물질의 종류가 다양하게 존재하며, 설치된 지 오래된 저수지 퇴적층에서 재 용출되는 영양염류 등은 호소 부영양화를 촉진하는 요인이 되고 있음
- 특히, 늦봄~초가을에 외기온도 상승 및 저수율 저하와 함께 부영양화 증가, 녹조 대량발생 등으로 수질오염도가 급상승하고 있으며, 이로 인해 물고기 폐사, 악취발생 등으로 민원이 발생되고 있음
- 농업용수 수질개선 연구는 그동안 주로 유입수의 질소, 인 등을 저감하기 위한 인공습지와 같은 자연정화공법이 대부분이었음. 최근에는 호소와 하천의 녹조 및 수질오염문제를 해결하기 위해 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되고 있으나 대부분 처리규모의 한계, 유지관리의 어려움, 경제성, 생태·환경적 영향 등의 문제점 때문에 실용화에 어려움이 있음

- 농업용수는 농어촌지역의 농업용수 공급이 목적이므로 설치비가 저렴하고 유지관리가 용이하여야 하며, 농업용 호소의 특성상 대규모의 많은 수량을 처리해야 하므로 저비용, 고효율의 융복합 수처리 기술 개발이 필요한 실정임

### 3.2 연구목적

- 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 특성에 맞는 저비용 고효율의 융복합 수처리 기술을 개발하여 농업용 저수지의 부영양화 및 수질오염을 사전에 방지하고 양질의 농업용수를 확보하고자 함

### 3.3 연구범위 및 내용

#### 1) 융복합 수처리시스템 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링

- 융복합 수처리 기술 현장적용실험 대상 저수지 선정
- 현장적용지구 정기 및 연속 기상, 수질 등 모니터링
- 현장적용지구 수처리시설 설치 전·후 현장 모니터링
  - 대상 저수지 호내 및 유입하천 수질조사
  - 대상 저수지의 퇴적물 오염도 조사
  - 대상 저수지의 퇴적물 오염물질 용출량 산정

#### 2) 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

- 생태융합형 접촉산화시스템 Test-Bed 구축 및 운영
  - 생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식)
  - 고속복합응집장치, 마이크로 버블 포기장치
- 수질정화효율 등 성능평가 및 기술 보완
  - 생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식)
  - 마이크로 버블 포기장치

#### 3) 현장적용지구의 3차원 수리-수질모형 구축 및 적용

- 저수지 지형측량 및 입력자료 구축
- 강우-유출모형(HEC-HMS)을 이용한 유입량, 유출량 산정
- 대상저수지 물수지 분석 재현
- 수처리시스템 설치에 따른 저수지 수질개선효과 분석
- 수처리시스템의 수리학적 영향 반경 분석

#### 4) 호소 수질정화시스템 기술개발 및 시제품 제작

- 무인항법 이동식 호소 수질정화시스템 기술 구상 및 개발
  - GPS기반 무인항법 프로그램, 오염물질 처리시스템 등
- 단위공정별 시제품 제작 및 성능평가
  - 무인항법 프로그램 개발, 오염물질 처리시스템 제작 등
- 호소 수질정화시스템 현장적용방안 도출

#### 5) 수처리시스템의 수생태계 영향 평가

- 융복합 수처리시스템의 요소기술별 특성 분석
- 요소기술별 수생태계 영향 문헌조사
- 현장 모니터링 결과를 이용한 수생태계 영향 평가

### 4. 주요 연구결과

#### 4.1 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리 기술 개발

- 본 연구에서는 저수지의 수리·수문학적 변화(강수량, 저수량 등)에 영향을 받지 않고, 유기물, N, P에 대한 처리효율이 높고, 수질효과를 장기간 지속할 수 있으며, 현장의 부지활용성, 시공가능성, 경관성, 유지관리 용이성, 경제성 등을 고려하여 국내 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 특성에 적합한 융복합 수처리 기술을 개발하였음
- 융복합 수처리기술은 호소 유입수와 호내 수역을 대상으로 하였으며, 유입수 수처리의 목표는 호 내로 유입하는 SS, 유기물, 질소, 인의 저감에 있으며, 호소는 DO 공급, 오염물질 제거로 수환경 개선 및 내부 부하 저감으로 부영양화 사전 예방 및 호소 수질개선을 목표로 하였음
- 호 유입부의 SS, 유기물, N, P 부하량 저감을 위한 요소기술은 고속 응집 및 여과, 생물막 여재(유기물 제거)와 식물정화(질소, 인 제거) 기능을 유기적으로 조합하는 물리적, 화학적, 생물학적 융복합 처리공정으로 구상하였음. 처리공정은 유입 및 전처리, 고속복합응집장치, 생태융합형 접촉산화조, 침전조, 흡착여과조, 방류조 순으로 구성되었으며, 고속복합응집장치는 유입수의 성상 및 현장여건에 따라 선택적으로 운영할 수 있도록 설계하였음
- 호소수 정화목적으로 개발된 수질정화장치의 기본 개념은 원하는 위치에서, 원하는 시간 동안 무인 체류하며 수질을 정화하고, 집안 도크

에서 충전, 유지관리, 악천 후 피항 등이 가능하도록 한 이동식 수질 정화선으로, 기술의 구성요소는 GPS를 이용한 무인항법 프로그램, 오염물질 처리를 위한 초고속 고액분리시스템, 호소에 DO를 공급하기 위한 마이크로버블 장치, SS농도 자동 센서, 자동수질측정장치 등을 주요 장치로 하고 있는 컴팩트한 선박일체형 형태로 개발 중에 있음

#### 4.2 융복합 수처리시스템 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링

- 융복합 수처리기술의 현장적용실험을 위한 대상지구로 국내 농업용 저수지의 물리적 특성과 수질오염 특성을 대표할 수 있고, 농업용수 수질개선사업지구가 아니면서 지리적으로 접근이 용이한 경기도 시흥시에 위치한 매화저수지를 현장적용실험 대상지구로 선정하여 정기적으로 호소 수질 및 퇴적물 오염도 조사, 퇴적물의 용출실험, 유입하천 수질조사 등을 실시하였음
- 매화저수지 수심은 1.5~3.0m이고, 표층수의 COD는 10.6~19.2mg/L(평균 16.5mg/L), 심층수는 10.8~19.3mg/L(평균 16.4mg/L)로 나타났고, 표층수의 TN과 TP는 각각 1.064~2.467mg/L(평균 1.764mg/L), 0.070~0.183mg/L(평균 0.137mg/L)이고, 심층수의 TN과 TP는 각각 1.317~2.625mg/L(평균 2.099mg/L), 0.099~0.226mg/L(평균 0.169mg/L)로 조사 시기에 상관없이 수질오염도가 높았으며, 표층수에 비해 심층수에서 TN, TP 오염도가 더 높은 것으로 나타남
- 매화저수지 주 유입하천은 2개소가 있으며, 평상시 평균유량은 유입-1은 472.2m<sup>3</sup>/일이고, 유입-2는 982.3m<sup>3</sup>/일로 유입-2가 유입-1에 비해 유량이 풍부하였음. 유입-1과 유입-2의 평균 COD, TN, TP는 각각 7.1mg/L, 6.975mg/L, 0.528mg/L와 6.1mg/L, 7.344mg/L, 0.509mg/L로 TN, TP의 오염도가 높았으며, 유입-1에 비해 유입-2에서 더 높게 나타남
- 연구대상지구인 매화저수지 퇴적물의 강열감량 오염도는 USEPA 기준의 “오염도 심함”에 속하고 있으며, TN 함량은 1,821.1~3,906.0mg/kg(평균 2,622.5mg/kg), TP 함량은 1,049.5~1,811.3mg/kg(평균 1,271.2mg/kg)으로 한강 및 팔당호 준설기준을 초과하고 있음
- 퇴적물 용출량 실험결과, COD, TN, TP 모두 호기상태보다 혐기상태에서 용출이 활발히 일어났으며, 혐기성 조건에서의 매화지 퇴적물 내 COD, TN, TP 용출속도는 각각 56.7~204.6mg/m<sup>3</sup>·d, 6.1~30.4mg/



$m^2 \cdot d$ ,  $-4.6 \sim 3.7 mg/m^2 \cdot d$ 로 나타났음. 여름철 무강우 기간에는 바닥층 DO 농도가  $0.2 \sim 0.3 mg/L$ 로 거의 무산소 상태를 보이고 있으며, 저층 DO 농도의 장기 고갈현상은 퇴적물로부터 중금속 및 영양염류의 용출에 따른 내부 부하 증가의 원인이 되므로 저층의 산소공급 등 수환경 개선을 위한 적절한 대책이 요구됨

#### 4.3 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

- 생태융합형 접촉산화시스템은 식생과 미생물 미디어, 마이크로버블을 융복합한 기술로서, 고농도의 유기물, SS, TN, TP 처리를 목적으로 하고 있음. 처리공정은 유입수 → 에어미스트 → 고속복합응집장치 → 융복합 산화조(3조) → 침전조 → 방류로 되어 있으며, 마이크로버블과 고속복합응집장치는 유입수 성상과 현장 여건에 따라 선택적으로 조합하여 운영할 수 있도록 하였음
- 생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험을 위하여 매화저수지(경기 시흥시 도창동)에 수로식과 부유식의 Test bed를 2015년 8월말에 구축하였고(처리용량  $1,000 m^3/day$ ), 시험운전을 거친 후 설계인자별 수질정화효율 등 성능평가를 실시하고 있으며, 현장 운영에서 도출된 문제점에 대해 지속적인 기술보완을 하고 있음
- 접촉산화수로식 수질정화효과는 가동 초기에는 미디어에 미생물 부착을 저조로 정화효율이 뚜렷하지 않았으나 운영시간의 흐름과 함께 미디어의 미생물 충전율이 높아짐에 따라 최대 처리효율이 SS 69.6%, Chl-a 89.3%, TP 89%까지 높아졌음. 본 연구에서 처음으로 수중에 적용하고 있는 접촉산화부도 시스템도 가동 초기에는 정상 가동이 어려웠고, 시간의 경과에 따라 처리효율이 조금씩 증가되고 있으며, 처리효율 향상을 위해 지속적으로 기술보완을 하고 있음
- 접촉산화시스템(부유식)과 마이크로버블의 수리적 영향반경 조사를 위해 로다민 추적실험을 한 결과, 수질개선장치의 제트류에 의한 직접적인 영향 반경은 약 70m 정도이며, 이류 및 확산에 의한 물리적인 영향 반경은 100~120m로 조사되었음. 마이크로버블 포기장치에 의한 제트류에 의한 직접적인 영향 반경은 약 40m 정도이며, 이류-확산에 의한 물리적인 영향 반경은 80~120m로 판단됨

#### 4.4 매화저수지 3차원 수리-수질 모형 구축 및 적용

- 융복합 수처리시스템의 현장 설치에 따른 저수지 수질개선효과 및 융복합 수처리시스템의 수리학적 영향 반경 등을 조사하기 위하여 매화저수지를 대상으로 3차원 수리-수질 모형을 구축하였음. 매화저수지 유입량, 유출량 자료의 부족으로 강우-유출 해석 수문모형인 HEC-HMS를 활용하여 물수지를 해석하였음
- 매화저수지에 구축된 3차원 수리-수질 모델을 이용하여 매화저수지에 설치된 생태융합형 접촉산화시스템 부유식의 물 순환 제트류의 영향 반경을 수치 모의한 결과, 로다민 염료 추적자 시험 및 경험식을 이용한 영향반경 해석 결과와 유사한 결과로 나타났음
- 적용된 3차원 수리-수질모형은 매화저수지와 같이 수심이 얕은 수체에서 수운의 약한 성층현상을 재현하는데 한계가 있었으며, 이는 수질향목의 수직분포 해석에 있어서도 영향을 미치는 것으로 판단됨
- 유입부하량과 매개변수의 불확실성을 고려하여 다양한 조건에서 수질모의를 실시하고 실측자료와 비교하였으나, 강우시 및 비강우시 경계 조건 자료와 모델을 보정할 수 있는 호 내 실측자료의 부족으로 3차년도에 추가적인 조사와 모델 검정이 필요할 것으로 판단됨

#### 4.5 융복합 수처리시스템의 수생태 영향 평가

- 본 연구에서 개발된 융복합 수처리기술의 각 요소기술인 물리적 기술(DO 공급용 Air-Mist), 화학적 기술(복합응집장치), 생물학적 기술(미생물 접촉재, 탈착식 식생모듈)은 수생태계에 미치는 영향이 거의 없는 자연 친화적인 기술로 구성되었음
- 생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험 대상지구인 매화저수지에 대한 현장 pH 모니터링을 실시하여 AI 독성에 대한 평가를 실시하였고, 그 결과 매화저수지의 pH는 6.4~8.8의 값을 나타내어 AI에 대한 독성은 발생되지 않을 것으로 판단됨
- 생태융합형 접촉산화시스템은 수생태계에 미치는 영향이 없는 자연친화적인 기술로 유지관리가 용이하고, 설치비용 등 제반비용이 경제적인 기술이라고 판단되며, 무인항법 이동식 호소 수질정화선 역시 수생태계에 이해요소가 없는 농업용 저수지 수질개선을 위해 적용성이 높은 기술이라고 판단됨. 3년차에도 기술완성도를 높이기 위해 지속적인 현장적용실험을 통한 현장 검증이 필요하다고 판단됨

## 5. 기대효과 및 실용화방안

### 5.1 기술적 측면

- 농업용수 대상 수처리기술 개발로 공사 관리 저수지의 수질개선효과
  - ▣ 2014년 농업용수 수질기준 초과시설 : 759개소(3,362개소의 22.6%)
- 개발된 수처리 기술의 실규모 현장적용실험으로 연구결과에 대한 신뢰도 제고 및 사업효과 분석으로 수질개선사업의 적용 타당성 확보
- 개발된 수처리 기술의 특허등록 및 환경 신기술 인증 취득으로 공사의 수처리 기술력에 대한 대외적인 신뢰도 제고로 국내 및 해외 사업화 진출 기반 마련

### 5.2 경제·산업적 측면

- 세계 물 산업은 향후 10년간 2배 이상으로 확대(2015년 1,598조원)되어 세계 경제의 한 축을 이룰 것으로 전망되고 있으며, 국내에서도 농업용수의 사용량은 약 48%로 수요량이 가장 많은 분야이며, 최근에는 농업용수에서 농어촌용수로 다목적화 되고 있으며, 그 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다
- 본 연구개발 성과는 오염된 농업용수 저수지의 수질개선을 위해 적용될 수 있으며, 또한 최근 사회적 문제가 되고 있는 4대강 녹조문제 해결에도 적용될 수 있을 것으로 기대됨
- 양질의 농업용수 공급이 가능함에 따라 고품질 수익형 농작물 재배시스템 구축이 가능해지고, 이로 인한 고부가가치 수익형 농작물 생산에 따른 농촌지역의 고소득 창출 및 지역 발전에 기여할 것임
- 깨끗한 농업용수를 사용해 생산된 농산물에 대한 대국민 안전의식 제고 및 우리 농산물의 국제시장에서의 경쟁력 확보도 기대됨
- 농업용 저수지의 수질개선효과는 안전 및 친환경농산물 생산뿐만 아니라 농어촌지역의 어메니티 증가 등으로 인한 농업농촌 관광활성화 등 농어촌지역에 미치는 직·간접적인 효과는 상당할 것으로 예상됨

# Summary

1. Title : Convergence technologies development and application for agricultural water treatment(Ⅱ)

2. Period : 2015. 1. ~ 2015. 12.(2nd of five year)

## 3. Necessity and Objectives

### 3.1 Necessity

- There are about 17,500 of agricultural reservoirs distributed across the country. Most of the agricultural reservoirs are showing a serious eutrophic state and high level of organic contamination, and some of them have frequent algal bloom and offensive odor problems preventing from sustainable water use, recreation activities, and supply of irrigation water.
- In particular, 44.7% of the old agricultural reservoirs that was constructed before 1945 has exceeded the water quality criteria (COD 8.0 mg/L) for irrigational water.
- Although korean government has started water quality improvement programs for the agricultural reservoirs since 2007, it takes a long time to show the effect them because most of the projects are focused on natural purification facilities such as artificial wetlands and retention ponds, which are not suitable measures for a prompt treatment against algal bloom events.
- Recently, to cope with the algal bloom events, various physical, chemical, and biological techniques have been developed, but there are still a great deal of limitations between the techniques and the real worlds because of limited spatial scales of treatment, operations and maintenance issues, capital costs, and sometimes ecological impact.

### 3.2 Objectives

- To develop a cost-effective convergence water treatment technologies for preventing eutrophication and water pollution of the agricultural reservoirs and securing technical capacity for in-time treatment of algal bloom events.
- To secure and supply of high quality of irrigation water.

### 3.3 Scopes and Contents

- 1) Selection of field applications test site and monitoring of water quality and sediments in the study reservoirs
  - Survey and analysis water quality of the lake and inflow river
  - Element composition and particle size analysis in the sediments
  - Level of organic contamination in the sediments
  - Nutrient release rates from the sediments
  - Assessing the effect of water treatment devices on the sediments
- 2) Monitoring of weather and water environment in the study reservoirs
  - Continuous monitoring of local weather
  - Continuous monitoring of water temperatures in vertical direction and bottom DO
  - Assessing temporal variations of temperature structure and bottom DO environment
- 3) Assessing the effectiveness of the water treatment systems
  - Tracer(Rhodamine) experiments: Design and Preparing
  - Tracer experiments to assess the effective range of micro-bubble jets at the Juksan Reservoir
  - Tracer experiments to assess the effective range of jet flow from the convergence water treatment system
- 4) Setup and applications of a 3D hydrodynamic and water quality model
  - To topographical survey of Maewha reservoir and construction of input data

- Estimation of inflow using a precipitation and runoff model (HEC-HMS)
  - Calibration of water budget and water quality
  - Application of the model to assess the effective mixing zone of jet flow discharged from the hybrid water treatment system
- 5) Assessing the potential impact of the water treatment systems on aquatic ecosystem
- Characterizing individual technology of the hybrid water treatment system
  - Literature survey on the potential impact of the individual technology on ecosystem
  - Assessing the ecological impact using the field monitoring data

## 4. Research Results

### 4.1 Development and design of cost-effective convergence water treatment systems

- 1) Basic considerations to water treatment system
  - Capital costs
  - Easy operations and maintenance
  - Removal efficiency of COD, SS, TN, TP
  - Applicability in the agricultural reservoir
  - Potential for negative impacts
- 2) Development of a convergence water treatment system
  - The eco-convergence type aerated string contacted oxidation system including physiochemical and biological treatment processes is designed for the reduction of pollutant loading into reservoir. The system includes a combined coagulation and filtration device, string type media with aeration system for biological removal of organic pollutants, and phyto-remediation process using aquatic plants.
  - An integrated movable water purification system is suggested for water quality purification and control of algal bloom in the reservoir. The system consists of micro-bubble generators, high

speed solid-liquid separator, automatic SS concentration sensor, and automatic water quality measuring equipment.

## **4.2 Selection of an experiment reservoir and monitoring of the water quality and sediment contamination**

- 1) Selection of an experiment reservoir
  - Maehwa reservoir located in Kyunggi-do is selected as a test bed reservoir for this study after reviewing 3 reservoirs of Maehwa, Buddle, and Gwarim in the Kyunggi-do.
- 2) Monitoring of weather and water environment in the study reservoirs
  - Although the average water depth is about below 3.0m, a weak thermal stratification and a strong DO stratification were observed in Maehwa Reservoir.
  - A dynamic DO variation was observed in the bottom of the reservoir, and very low DO concentrations with average of 0.448 mg/L were persisted during the non rainfall period in summer. The DO level was intermittently recovered during several events of atmospheric temperature drop and rainfall.
  - The low DO concentrations in the bottom of the reservoir resulted from the amount of SOD is greater than the amount of aeration from atmosphere during summer period.
  - The persistent depletion of DO in the bottom of the reservoir can increase the amount of nutrients and heavy metals released from the sediments, a proper countermeasure for supply DO is required to maintain aerobic condition in the bottom of the lake.
- 3) Water quality survey of the reservoir and the inflow rivers
  - The water depth of the Maehwa reservoir is 1.5~3.0m. The COD, TN, and TP concentration range of surface water are appeared as 10.6~19.2mg/L(average 16.5mg/L), 1.064~2.467mg/L(average 1.764mg/L), and 0.076~0.183mg/L(average 0.137mg/L) and the those of deep water as 10.8~19.3mg/L(average 16.4mg/L), 1.317~2.625mg/L(average 2.099mg/L) and 0.099~0.226mg/L(average

0.169mg/L), respectively. The water pollution level is high regardless of the monitoring period, and it is higher in the deep water.

- Main inflow rivers of the Maewha reservoir are the two rivers. The average flow rate of the Inflow-1 and Inflow-2 each are 472.2m<sup>3</sup>/d and 982.3m<sup>3</sup>/d. COD, TN and TP of the Inflow-1 and Inflow-2 respectively showed 5.4mg/L, 5.161mg/L, 0.284mg/L and 5.0 mg/L, 6.467mg/L, 0.340mg/L. Therefore, water pollution of the Inflow-2 appear to be higher than the Inflow-1.

#### 4) Contamination investigation of sediments in the study reservoirs

- The release rates of nutrients from sediments were much greater under anaerobic condition than under aerobic condition, which implies that it is important to maintain aerobic conditions in the bottom water near the sediment to reduce internal nutrient loading.
- As the ignition losses of majority sediment samples were higher than 10%, the organic contamination of sediments in the reservoirs is significant. A long-term depletion of DO in the bottom of the reservoir can incur a significant internal nutrient loading.
- In Maewha Reservoir, the changes of sediments contamination level, sediment oxygen demand(SOD), and nutrient release rate before and after operations of the converged water treatment system showed different according to the items and sampling locations. The complicated results might be come from seasonal and environmental factors as well as the convergence water treatment system.
- It is recommended to measure the oxidation and reduction potential(ORP) at the upper 15cm of bottom sediment to assess the effectiveness of the convergence water treatment system on the oxidation and reduction environment of the sediments.



### **4.3 Assessing the effectiveness of water treatment systems**

- The real-scale plants of eco-convergence type aerated string contacted oxidation systems made two types(channel type and floating type) were constructed in Maewha reservoir for field application test and water purification efficiency evaluation.
- In initial stage of operation, water purification of water treatment systems isn't evident because microorganisms did not enough attach to the media. Water purification efficiency of the convergence water treatment systems(channel type) increased up to SS 69.6%, Chl-a 89.3% and TP 89%.
- The eco-convergence type aerated string contacted oxidation systems made floating type have been applying in under water at the first time. Water purification isn't evident in initial stage of operation but has been stabilizing over a period of time.
- In Maewha Reservoir, the effective range of jet flow discharged from the eco-convergence type aerated string contacted oxidation system(floating type) was about 70m, and after then the jet plume moved up to 100m to 120m through the advection and diffusion processes of ambient water.
- In Juksan Reservoir, the effective range of jet flow discharged by microbubble generator was about 40m, and after then the jet plume moved up to 80m to 120m through the advection and diffusion processes of ambient water.

### **4.4 Setup and applications of a 3D hydrodynamic and water quality model**

- For the construction of 3D model, bathymetry data made with topographic survey data and inflow data were estimated using HEC-HMS with observed precipitation data. However, the lack of boundary condition data including pollutant loading during rainfall events caused a severe difficulty in model calibration.
- The 3D model was applied to simulate the transport and mixing

processes of jet flow discharged from the eco-convergence type aerated string contacted oxidation system, and the results were agreed well with the results obtained with the Rohdamine tracer study and with empirical equations.

- In the shallow reservoir, however, the performance of the 3D model showed a significant limitation in representing the thermal and DO stratifications because of unrealistic turbulent vertical mixing, which also affected on the accuracy of water quality simulations.
- For water quality simulations, although the uncertainty of inflow loading and model parameters were considered, the 3D model results showed considerable biases from the observed values because of the lack of boundary conditions and calibration data.

#### **4.5 Assessing the potential impact the convergence water treatment systems on aquatic ecosystem**

- The convergence water treatment system integrates physical, chemical, and biological technologies. Physical technologies include air-mist(micro-bubbles) and jet flow for horizontal mixing, chemical technology includes a combined coagulation device, and biological technologies include oxidation processes with string contacted media and floating media, and aquatic plants for phytoremediation.
- Supersaturation of water with gases such as  $N_2$  and  $O_2$  was reported as a potential problem that might lead to gas bubble disease(GBD) in fish, but it is not likely to happen in the study reservoir because the DO level is low and the water depth is very low( $H < 5m$ ).
- According to the results of literature review and water environment monitoring, the individual technology adopted to the convergence water treatment system does not have possible negative impacts on the aquatic ecosystem.

## **5. Expectation and utilization of the results**

### **5.1 Expectation**

- The results can be used to develop policy by government for the water quality restoration projects of agricultural reservoirs, and to provide an effective alternative to make maximize the benefit of the investment.
- This research will provide a useful guidance to make decision on the possibility in the increase of water quality criteria of the agricultural reservoirs to be used for other purposes.
- The suggested convergence water treatment system, through optimized design, can overcome the limitations of individual physical, chemical, and biological water treatment techniques that developed for the implement of reservoir water quality.

### **5.2 Utilization plan**

- The convergence water treatment system will be applied to the agricultural reservoirs that require urgent restoration treatment to confirm the benefits of the new technique; low cost, high efficiency, easy operation and less maintenance.
- The system can be used as a core component of the best management practice for the water quality improvement in the agricultural reservoirs.
- The convergence system is transformative and can be applied to many other agricultural reservoirs and four rivers to deal with recent algal bloom issues.

# 목 차

<b>제1장 서론</b> .....	1
제1절 연구배경 및 목적 .....	3
1. 연구배경 및 필요성 .....	3
2. 연구목적 .....	4
제2절 연구내용 및 추진체계 .....	5
1. 연도별 연구개발 목표 .....	5
2. 연구범위 및 세부내용 .....	5
3. 연구 추진체계 .....	7
제3절 기대효과 및 활용방안 .....	8
1. 기술적 측면 .....	8
2. 경제·산업적 측면 .....	8
<b>제2장 농업용수의 융복합 수처리기술 개발</b> .....	9
제1절 융복합 수처리 요소기술 개발 .....	11
1. 기술개발 방향 및 고려사항 .....	11
2. 대상수역별 수처리 요소기술 개발 .....	12
제2절 대상수역별 융복합 수처리기술 설계 .....	14
1. 유입부 대책 기술구성과 설계인자 .....	14
2. 호내 수질정화기술 구성과 설계인자 .....	22
제3절 융복합 수처리기술 이론적 배경 .....	32
1. 생태융합형 접촉산화시스템 .....	32
2. 마이크로버블 포기 시스템 .....	47
3. 초고속 응집부상 고액분리시스템 .....	54
<b>제3장 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링</b> .....	57
제1절 현장적용지구 선정 .....	59
1. 현장적용실험 대상지구 선정 조건 .....	59
2. 연구대상지구 선정 .....	60
3. 현장적용지구 현황 .....	61

제2절 매화저수지 및 유입하천 수질조사 .....	65
1. 수질조사 위치 및 방법 .....	65
2. 매화저수지 수질조사 결과 .....	69
3. 유입하천 수질현황 및 오염부하량 .....	85
4. 매화저수지 연속 모니터링 결과 .....	94
제3절 저수지 퇴적물 오염도 및 용출량 산정 .....	97
1. 퇴적물 정의 및 수질영향 .....	97
2. 퇴적물 오염도 조사 .....	99
3. 퇴적물의 오염물질 용출량 산정 .....	124
<b>제4장 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가 .....</b>	<b>133</b>
제1절 접촉산화시스템 Test Bed 구축 및 성능평가 .....	135
1. 생태융합형 접촉산화시스템 Test Bed 구축 .....	135
2. 접촉산화시스템 수질정화효율 평가 .....	151
3. 접촉산화시스템 유효 영향반경 평가 .....	157
제2절 마이크로버블 현장적용 및 성능평가 .....	163
1. 현장적용지구 및 실험개요 .....	163
2. 마이크로버블 유효 영향반경 평가 .....	169
3. 마이크로버블 수환경 개선효과 .....	175
<b>제5장 매화저수지 3차원 수리-수질 모형구축 및 적용 .....</b>	<b>183</b>
제1절 매화저수지 수리-수질 모델 구축 .....	185
1. ELCOM-CAEDYM 개요 .....	185
2. 입력 자료의 구성 .....	185
3. 모델 보정 .....	191
제2절 3차원 수리-수질 모델 적용 .....	196
1. 매화저수지 융복합 수처리장치 영향반경 평가 .....	196
2. 수처리시스템 수질개선효과 평가 .....	199
<b>제6장 융복합 수처리시스템의 수생태 영향 평가 .....</b>	<b>205</b>
제1절 요소기술별 수생태계 영향 분석 .....	207
1. 물리적 처리기술 .....	207

2. 화학적 처리기술 .....	208
3. 생물학적 처리기술 .....	210
제2절 현장조사 결과에 의한 수생태 영향 평가 .....	211
1. pH 모니터링에 의한 수생태계 영향 평가 .....	211
제7장 요약 및 결론 .....	213
참고문헌 .....	219

## 표 차례

(표 2.1-1) 농업용 저수지 융복합 수처리시스템 요소기술 구성 .....	13
(표 2.2-1) 인공위성항법 기술개발 내용 .....	27
(표 2.2-2) 항목별 진행공정 내용 .....	27
(표 2.2-3) 기존 가압부상과 초고속 고액 분리부상 공정 비교 .....	31
(표 2.3-1) 접촉여재 형태에 따른 특성 비교 .....	42
(표 2.3-2) 나선형 섬유상 접촉여재 특징 .....	42
(표 2.3-3) 접촉여재 재질에 따른 특성 비교 .....	43
(표 2.3-4) 마이크로 버블의 특성과 효과 .....	48
(표 2.3-5) 마이크로버블 발생 방식 분류 및 특징 .....	51
(표 2.3-6) 마이크로/나포기포 발생 관련 기술개발 현황 .....	53
(표 3.1-1) 현장적용실험 대상 후보지구의 시설제원 .....	61
(표 3.1-2) 매화저수지 유역의 오염부하량 .....	64
(표 3.2-1) 매화저수지 및 유입하천 수질조사 일자 .....	66
(표 3.2-2) 저수지 연속모니터링 개요 .....	67
(표 3.2-3) 매화저수지의 연도별 수질현황 .....	70
(표 3.2-4) 매화저수지 중금속 등 오염현황 .....	84
(표 3.2-5) 매화저수지 및 유입하천 수질현황 .....	87
(표 3.2-6) 유입하천의 중금속 등 오염현황 .....	93
(표 3.3-1) 저수지별 퇴적물 조사일자 및 지점 .....	100
(표 3.3-2) 퇴적물 분석방법 및 분석에 이용된 기기 .....	101
(표 3.3-3) 퇴적물의 입경크기에 대한 분류 .....	102
(표 3.3-4) 입경크기 분류에 따른 토성 .....	102
(표 3.3-5) USEPA 퇴적물 평가 기준(CODsed) .....	106
(표 3.3-6) 1차 입도분포 분석결과 .....	109
(표 3.3-7) 2차 입도분포 분석결과 .....	111
(표 3.3-8) 3차 입도분포 분석결과 .....	113
(표 3.3-9) 1, 2, 3차 입도분포 및 토성 분석결과 .....	114
(표 3.3-10) 매화저수지 퇴적물의 강열감량 .....	115
(표 3.3-11) USEPA 퇴적물 평가기준(강열감량) .....	115

(표 3.3-12) 원소분석 1·2·3차 결과 종합 .....	120
(표 3.3-13) 퇴적물 오염도 조사(CODsed) .....	120
(표 3.3-14) USEPA 퇴적물 평가기준(CODsed) .....	121
(표 3.3-15) 퇴적물 SOD 분석결과 .....	121
(표 3.3-16) 매화저수지 위치별 퇴적물 중금속 .....	123
(표 3.3-17) 호소 퇴적물 항목별 오염평가기준 .....	123
(표 3.3-18) 퇴적물 오염물질 용출속도 .....	131
(표 4.1-1) 생태융합형 집축산화수로 시설제원 .....	145
(표 4.1-2) 생태융합형 집축산화부도 시설제원 .....	150
(표 4.1-3) 매화저수지 경과시간에 따른 구간 분리 .....	159
(표 4.2-1) 대산저수지 시설현황 .....	164
(표 4.2-2) 기흥저수지 시설현황 .....	166
(표 4.2-3) 죽산저수지 시설현황 .....	167
(표 4.2-4) 죽산저수지 실험 조건 .....	169
(표 4.2-5) 죽산저수지 경과시간에 따른 구간 분리 .....	173
(표 4.2-6) 대산저수지 수질조사 결과 .....	175
(표 4.2-7) 마이크로버블 포기 중 영향권과 비 영향권의 수질 .....	176
(표 4.2-8) 기흥저수지 퇴적물 입도분포 변화 .....	178
(표 4.2-9) 기흥저수지 퇴적물의 원소분석 및 강열감량 분석결과 .....	178
(표 4.2-10) 기흥저수지 퇴적물의 오염도 조사결과 .....	179
(표 4.2-11) 기흥저수지의 퇴적 오염물질 용출속도 .....	179
(표 4.2-12) 죽산저수지 마이크로버블 가동 전후 DO 농도 .....	180
(표 5.1-1) 매화지 분류 수질 입력 값 .....	190
(표 5.1-2) 매화지 좌안 지류 수질 입력 값 .....	190
(표 5.1-3) 모의값 및 실측값 상관관계분석(DO, Chl-a) .....	192
(표 5.1-4) 모의값 및 실측값 상관관계분석(T-P, PO <sub>4</sub> -P) .....	193
(표 5.1-5) 모의값 및 실측값 상관관계분석(T-N, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N) .....	195
(표 5.2-1) 시나리오별 ST2 지점 DO, Chl-a, TOC 수질개선효율 분석 .....	201
(표 5.2-2) 시나리오별 ST2 지점 TP, PO <sub>4</sub> -P, SS 수질개선효율 분석 .....	201
(표 5.2-3) 시나리오별 ST2 지점 TN, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N 수질개선효율 분석 .....	203
(표 6.1-1) Alum 영향 관련 문헌 검토 .....	209
(표 6.1-2) 요소기술별 특징 및 기술 검토 .....	210



## 그 립 차 례

<그림 2.1-1> 농업용수 융복합 수처리기술 개발 방향 .....	11
<그림 2.1-2> 농업용저수지 수질개선 종합 MAP(안) .....	13
<그림 2.2-1> 농업용저수지 유입부 수처리시스템 공정 .....	15
<그림 2.2-2> 농업용수 수질개선을 위한 유입부 수처리공정 개요도 .....	16
<그림 2.2-3> 생태융합형 접촉산화수로 모식도 .....	17
<그림 2.2-4> 생태융합형 접촉산화시스템 처리공정도 .....	18
<그림 2.2-5> Air-mist 장치 .....	20
<그림 2.2-6> 생태융합 접촉수로 단위 모식도 .....	20
<그림 2.2-7> 생태융합형 접촉산화시스템 식생매트 구성도 .....	21
<그림 2.2-8> 접촉산화시스템 식생 매디아 모듈 구성도 .....	21
<그림 2.2-9> 생태융합형 접촉산화수로 하부 수중 예시 .....	21
<그림 2.2-10> 생태융합 접촉산화부도 상부, 하부 모식도 .....	23
<그림 2.2-11> 생태융합 접촉산화부도 측면도 .....	23
<그림 2.2-12> 생태융합 접촉산화부도 측면 모식도 .....	23
<그림 2.2-13> 무인항법 이동식 수질정화시스템 모식도 .....	24
<그림 2.2-14> 무인항법 이동식 수질정화선 구성요소 .....	25
<그림 2.2-15> 무인항법 이동식 수질정화선 개념도 .....	25
<그림 2.2-16> 공동기술개발 협약체결식 관련 사진 .....	26
<그림 2.2-17> 전체 모듈 및 기능도 .....	28
<그림 2.2-18> MCU Controller 및 장치제어 .....	28
<그림 2.2-19> 초고속 부유물 고액분리시스템 기술 원리 .....	29
<그림 2.2-20> 초고속 ZT 제너레이터 .....	30
<그림 2.2-21> 부상분리 타워 .....	30
<그림 2.2-22> 부상스킴 수집조 .....	31
<그림 2.3-1> 하천 자정작용 원리 및 미생물 접촉재의 발상 .....	32
<그림 2.3-2> 미생물 매디아를 이용한 오염물질 제거 모식도 .....	34
<그림 2.3-3> 시간에 따른 미생물 부착량의 변화 .....	36
<그림 2.3-4> 경과시간별 미생물 부착 모습 .....	36
<그림 2.3-5> 생물막내의 기질농도 측단면곡선을 나타내는 모형 .....	38

<그림 2.3-6> 나선형 섬유상 접촉여재 .....	43
<그림 2.3-7> 접촉산화조의 체류시간에 따른 정화효율 .....	44
<그림 2.3-8> 접촉산화조의 접촉여재 충전량에 따른 정화효율 .....	45
<그림 2.3-9> 접촉산화조의 DO 농도에 따른 정화효율 .....	45
<그림 2.3-10> 유입수 BOD 농도에 따른 부착미생물량 .....	45
<그림 2.3-11> 끈상 접촉산화공법 수질정화율(경안천, 안양천) .....	46
<그림 2.3-12> 끈상 접촉산화공법 수질정화율(남양천) .....	46
<그림 2.3-13> 마이크로 버블과 일반 버블의 차이 개요도 .....	47
<그림 2.3-14> 가압용해식 발생장치 구성 .....	49
<그림 2.3-15> 가압용해방식 마이크로버블 발생 모습 .....	49
<그림 2.3-16> 기액 2상류 선회형 방식 개념도 .....	50
<그림 2.3-17> 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생상태 .....	50
<그림 2.3-18> 마이크로 버블을 이용한 수질개선 모식도 .....	52
<그림 2.3-19> 제타전위에 따른 응집력 안전성 .....	55
<그림 3.1-1> 현장적용실험 대상 후보지구 저수지의 위성사진 .....	60
<그림 3.1-2> 매화저수지 전경 .....	61
<그림 3.1-3> 매화저수지 유역의 행정구역 위치도 .....	62
<그림 3.1-4> 매화저수지 유입하천 전경 .....	63
<그림 3.2-1> 매화저수지 및 유입하천 수질조사 위치도 .....	65
<그림 3.2-2> 매화저수지 정밀조사 위치도 .....	66
<그림 3.2-3> 매화저수지 연속모니터링 장치 설치 전경 .....	68
<그림 3.2-4> 매화저수지 연속모니터링 장치 설치 위치 .....	68
<그림 3.2-5> 매화저수지 연도별 수질추이 .....	69
<그림 3.2-6> 매화저수지 정밀 수질조사 위치도 .....	72
<그림 3.2-7> 매화저수지 호 내 위치에 따른 수온 .....	72
<그림 3.2-8> 매화저수지 호 내 위치에 따른 EC .....	73
<그림 3.2-9> 매화저수지 호 내 위치에 따른 pH .....	73
<그림 3.2-10> 매화저수지 호 내 위치에 따른 DO .....	74
<그림 3.2-11> 매화저수지 호 내 위치에 따른 COD .....	74
<그림 3.2-12> 매화저수지 호 내 위치에 따른 TN .....	75
<그림 3.2-13> 매화저수지 호 내 위치에 따른 TP .....	75
<그림 3.2-14> 매화저수지 수층에 따른 수질현황(수온, pH, EC) .....	78

<그림 3.2-15> 매화저수지 수층에 따른 수질현황(DO, COD, Chl-a) .....	79
<그림 3.2-16> 매화저수지 수층에 따른 수질현황(SS, TN, TP) .....	80
<그림 3.2-17> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH .....	82
<그림 3.2-17> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH(계속) .....	83
<그림 3.2-18> 유입하천 수질현황(수온, pH, EC) .....	88
<그림 3.2-19> 유입하천 수질현황(DO, COD, Chl-a) .....	89
<그림 3.2-20> 유입하천 수질현황(SS, TP, PO <sub>4</sub> -P) .....	90
<그림 3.2-21> 유입하천 수질현황(TN, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N) .....	91
<그림 3.2-22> 매화저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도 .....	92
<그림 3.2-23> 매화저수지 기상 연속모니터링 결과 .....	94
<그림 3.2-24> 매화저수지 수온 및 수질 연속모니터링 결과 .....	96
<그림 3.3-1> 퇴적물 형성 과정 및 수체 내에서의 변화 과정 .....	98
<그림 3.3-2> DO 변화에 따른 수체-퇴적물 물질교환 .....	98
<그림 3.3-3> 매화저수지 퇴적물 용출실험 조사지점 .....	99
<그림 3.3-4> 퇴적물 채취 장비 및 채취 모습 .....	101
<그림 3.3-5> 입경크기 분류에 따른 토성 .....	103
<그림 3.3-6> 퇴적물 산소 소모량(SOD) 측정 장치 .....	107
<그림 3.3-7> 입도분석 결과(매화 제방, 1차 전처리 전) .....	108
<그림 3.3-8> 입도분석 결과(매화 제방, 1차 전처리 후) .....	108
<그림 3.3-9> 입도분석 결과(매화 좌대, 1차 전처리 전) .....	109
<그림 3.3-10> 입도분석 결과(매화 좌대, 1차 전처리 후) .....	109
<그림 3.3-11> 지점별 입도 함유량(1차) .....	109
<그림 3.3-12> 입도분석 결과(매화 제방, 2차 전처리 전) .....	110
<그림 3.3-13> 입도분석 결과(매화 제방, 2차 전처리 후) .....	110
<그림 3.3-14> 입도분석 결과(매화 좌대, 2차 전처리 전) .....	110
<그림 3.3-15> 입도분석 결과(매화 좌대, 2차 전처리 후) .....	111
<그림 3.3-16> 지점별 입도 함유량(2차) .....	111
<그림 3.3-17> 입도분석 결과(매화 제방, 3차 전처리 전) .....	112
<그림 3.3-18> 입도분석 결과(매화 제방, 3차 전처리 후) .....	112
<그림 3.3-19> 입도분석 결과(매화 좌대, 3차 전처리 전) .....	112
<그림 3.3-20> 입도분석 결과(매화 좌대, 3차 전처리 후) .....	113
<그림 3.3-21> 지점별 입도 함유량(3차) .....	113

<그림 3.3-22> 매화 제방 1차(감량율 11.0%) .....	116
<그림 3.3-23> 매화 제방 2차(감량율 12.1%) .....	116
<그림 3.3-24> 매화 제방 3차(감량율 12.1%) .....	116
<그림 3.3-25> 매화 좌대 1차(감량율 15.0%) .....	117
<그림 3.3-26> 매화 좌대 2차(감량율 19.0%) .....	117
<그림 3.3-27> 매화 좌대 3차(감량율 11.6%) .....	117
<그림 3.3-28> 매화저수지 퇴적물의 pH .....	119
<그림 3.3-29> 매화저수지 퇴적물의 TN .....	119
<그림 3.3-30> 매화저수지 퇴적물의 TP .....	119
<그림 3.3-31> 퇴적물 용출실험 장치 모식도 .....	124
<그림 3.3-32> 퇴적물 용출실험 장치 .....	125
<그림 3.3-33> 시간에 따른 COD 농도 변화 .....	128
<그림 3.3-34> 시간에 따른 암모니아성 질소 농도의 변화 .....	128
<그림 3.3-35> 시간에 따른 TN 농도의 변화 .....	129
<그림 3.3-36> 시간에 따른 TP 농도의 변화 .....	129
<그림 4.1-1> 수처리시스템 현장적용실험 Test Bed 구축 경위 .....	135
<그림 4.1-2> 접촉산화수로 및 접촉산화부도 설치 위치 .....	136
<그림 4.1-3> 생태융합형 접촉산화수로 처리 공정도 .....	137
<그림 4.1-4> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(1) .....	138
<그림 4.1-5> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(2) .....	138
<그림 4.1-6> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(3) .....	139
<그림 4.1-7> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(4) .....	139
<그림 4.1-8> 접촉산화수로 몸체(BODY) 제작 공정 .....	140
<그림 4.1-9> 접촉산화수로 미디어 모듈 제작 공정 .....	141
<그림 4.1-10> 접촉산화수로 식생매트 제작 공정 .....	141
<그림 4.1-11> 접촉산화수로 배관류 제작 공정 .....	142
<그림 4.1-12> 접촉산화수로 설치 기초공사 .....	142
<그림 4.1-13> 접촉산화수로 설치 기초공사 및 제품 진수 .....	143
<그림 4.1-14> 전기 판넬 설치 공사 .....	144
<그림 4.1-15> 접촉산화수로 입체도 및 설치 전경 .....	145
<그림 4.1-16> 생태융합형 접촉산화부도 제작 설계도(1) .....	146
<그림 4.1-17> 생태융합형 접촉산화부도 제작 설계도(2) .....	147

<그림 4.1-18> 접촉산화부도 몸체(BODY) 제작 공정 .....	148
<그림 4.1-19> 접촉산화부도 배관류 제작 공정 .....	148
<그림 4.1-20> 접촉산화부도 제품 운반 및 설치 전경 .....	149
<그림 4.1-21> 접촉산화부도 입체도 및 설치 전경 .....	150
<그림 4.1-22> Air-mist 초기 가동 모습 .....	151
<그림 4.1-23> 접촉산화수로 최초 가동 7일 후 유입수 및 유출수 .....	152
<그림 4.1-24> 접촉산화수로 유입수, 유출수 수질(수온, pH, DO, EC) .....	153
<그림 4.1-25> 접촉산화수로 유입수, 유출수 수질(COD, SS, Chl-a, TN) .....	153
<그림 4.1-26> 처리수 배출을 위한 수중펌프 설치 .....	154
<그림 4.1-27> 접촉산화수로 유입수, 유출수 수질(수온, pH, DO, EC) .....	156
<그림 4.1-28> 접촉산화수로 유입수, 유출수 수질(COD, SS, Chl-a, TN) .....	156
<그림 4.1-29> 매화저수지 수질개선장치 위치 및 가이드라인 개념도 .....	157
<그림 4.1-30> 매화지 추적실험조사 전경 .....	158
<그림 4.1-31> 매화저수지 추적 실험기간 동안 풍향 및 풍속 .....	158
<그림 4.1-32> 매화저수지 Rhodamine 주입 후 경과시간별 수면 변화 .....	160
<그림 4.1-33> 구간별로 거리에 따른 수심별 Rhodamine 농도 .....	161
<그림 4.1-34> 수심 0.5m에서 거리에 따른 Rhodamine 농도 변화 .....	161
<그림 4.1-35> 구간별로 거리에 따른 수심별 수온 .....	162
<그림 4.1-36> 구간별로 거리에 따른 수심별 DO 농도 .....	162
<그림 4.2-1> 대산저수지 전경 .....	163
<그림 4.2-2> 대산저수지 마이크로버블 현장적용실험 위치 .....	164
<그림 4.2-3> 대산저수지 마이크로버블 설치 및 버블 전경 .....	164
<그림 4.2-4> 기흥저수지 유역 소권역도 및 저수지 위성사진 .....	165
<그림 4.2-5> 기흥저수지 마이크로버블 설치 및 버블 확산 전경 .....	166
<그림 4.2-6> 죽산저수지 수질현황 .....	167
<그림 4.2-7> 죽산저수지 행정소재지 및 저수지 전경 .....	167
<그림 4.2-8> Air-mist 21 시스템 및 버블장치 설치 위치 .....	168
<그림 4.2-9> Air-mist 21 시스템 설치 전경 .....	168
<그림 4.2-10> 죽산 저수지 추적실험 전경 .....	170
<그림 4.2-11> 죽산저수지 풍향 및 풍속 .....	170
<그림 4.2-12> 죽산저수지 Rhodamine 주입 후 경과시간별 수면 변화 .....	172
<그림 4.2-13> 구간별 거리에 따른 수심별 Rhodamine 농도 .....	173

<그림 4.2-14> 수심 2m에서 거리에 따른 Rhodamine 농도변화 .....	173
<그림 4.2-15> 구간별 거리에 따른 수심별 수온 .....	174
<그림 4.2-16> 구간별 거리에 따른 수심별 DO 농도 .....	174
<그림 4.2-17> 마이크로버블 포기장치 설치 전후 수질농도 .....	175
<그림 4.2-18> 마이크로버블 포기 중 영향권과 비 영향권의 수질 비교 ..	176
<그림 4.2-19> 마이크로버블에 의한 수질 비교(수온, pH, EC, DO) .....	177
<그림 4.2-20> 죽산저수지 DO 측정 지점 .....	180
<그림 4.2-21> 죽산저수지 마이크로버블 가동 전후 DO 농도 .....	181
<그림 4.2-22> 죽산저수지 마이크로버블 가동 전후 DO 농도 .....	181
<그림 5.1-1> 매화저수지 수심측량자료 및 ELCOM 모형 격자구성 .....	186
<그림 5.1-2> 매화지 실측 및 모의 수위-저수용량 비교 .....	186
<그림 5.1-3> 모형 입력 기상 data(2013) .....	187
<그림 5.1-4> 모형 입력 기상 data(2015) .....	188
<그림 5.1-5> 매화저수지 실측 수위 및 모의 수위 비교 .....	189
<그림 5.1-6> 매화저수지 실측 수온 및 모의 수온 비교 .....	191
<그림 5.1-7> 모의값 및 실측값 시계열 비교(DO, Chl-a) .....	193
<그림 5.1-8> 모의값 및 실측값 시계열 비교(T-P, PO <sub>4</sub> -P) .....	194
<그림 5.1-9> 모의값 및 실측값 시계열 비교(T-N, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N) .....	195
<그림 5.2-1> Jet 이론 개념도 .....	196
<그림 5.2-2> Jet 추적자 모의 .....	197
<그림 5.2-3> Jet 추적자 모의(계속) .....	198
<그림 5.2-4> 시나리오별 ST2지점 DO, Chl-a, TOC 시계열 변화 .....	200
<그림 5.2-5> 시나리오별 ST2지점 T-N, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N 시계열 변화 ..	202
<그림 6.1-1> pH의 상관관계에 따른 알루미늄 형태의 분포 .....	208
<그림 6.1-2> pH 6 유지를 위한 황산알루미늄 투입량 .....	209
<그림 6.2-1> 현장 pH 모니터링 결과 .....	211

# 제1장 서론

---







## 제1장 서론

### 제1절 연구배경 및 목적

#### 1. 연구배경 및 필요성

국내에는 17,478개소(하구 담수호 11개소 포함)의 농업용 저수지가 전국에 분포하고 있으며, 전체 물이용량의 48%를 농업용수로 사용하고 있다(2013농업생산기반통계연보). 최근 농어촌지역의 도농복합형태 개발 및 관광지, 유원지화로 농업용수의 오염원이 증가하는 추세로 농업용수 수질이 지속적으로 악화되고 있다. 2013년도 농업용수 수질측정망 조사결과에 의하면 조사대상 825개소 중 17.8%에 해당하는 147개소가 농업용수 수질기준(COD 8mg/L이하)을 초과하고 있다. 특히, 늦봄에서 초가을까지 외기온도 상승 및 저수율 저하와 함께 부영양화 증가, 녹조 대량 발생 등으로 수질 오염도가 급상승하고 있으며, 이로 인해 호 내 물고기 폐사, 악취발생 등으로 민원이 발생되고 있다. 2013년도 조사결과 여름철(7~9월) 수질기준 초과율(COD 기준)은 26.8%로 연평균 17.8%보다 9%이상 증가하고 있다.

농업용 저수지의 수질오염은 유역 내 미처리 생활오수 및 축산폐수 등 점오염원뿐만 아니라 야적된 축분, 농경지 등에서 유출되는 비점오염원이 처리없이 호 내로 유입되고 있어 부유물질, 유기물, 영양물질 등 오염물질의 종류가 다양하게 존재한다. 또한, 설치된 지 오래된 저수지는 퇴적층에서 인 등의 오염물질이 재 용출되고 있으며, 이러한 오염물질의 재 용출은 호 소 부영양화를 촉진하는 중요한 원인으로 작용하고 있다.

최근 국민들의 웰빙과 먹거리에 대한 관심증가로 안전농산물, 친환경 농산물 생산을 위한 양질의 농업용수를 요구하고 있으며, 농업·농촌의 어메니티 중시, 관광산업화 등의 정책으로 농어촌 지역에 위치하고 있는 농업용 저수지에 대한 역할이 증대되고 있으며, 농업용수에 대한 수요도 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 수질오염도가 높은 물을 관개용수로 사용하는 경우에는 생산물의 수확량과 품질에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 논 의 생태계 및 농민들의 농작업 환경에도 영향을 미치고 있다. 또한, 오염된 물의 사용은 친환경농산물 인증자격 취득에 제한 요인이 되고 있어 농민들의 불만과 민원이 제기되고 있다.

농업용수를 대상으로 한 수질개선기술 개발은 그동안 주로 유입수의 질소, 인 등의 영양염류를 저감하는 인공습지 및 저류지와 같은 자연정화공법이 대부분이었다. 이러한 공법은 유입수를 대상으로 하기 때문에 호소의 수질 개선 효과가 나타나기까지는 장기간이 소요되며, 녹조 등 기상과 수리·수문 상황에 따라 발생하는 수질오염사고(녹조 대량발생, DO 부족으로 어류집 단폐사 등)에 신속하게 대처할 수 없다. 최근에 와서는 호 내의 용존산소 농도를 증가시켜 유기물을 제거하는 수중폭기장치 및 물순환장치, 그리고 녹조 제거를 주 대상으로 하는 가압부상공법 및 수초제거선 등과 같은 물리화학적 기술 등이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 처리규모의 한계, 유지관리의 어려움, 경제성, 생태·환경적 영향 등의 문제점 때문에 대부분 하천 정체수역이나 소규모 호소에 적용되어 왔으며, 범용적 실용화에 어려움이 있다.

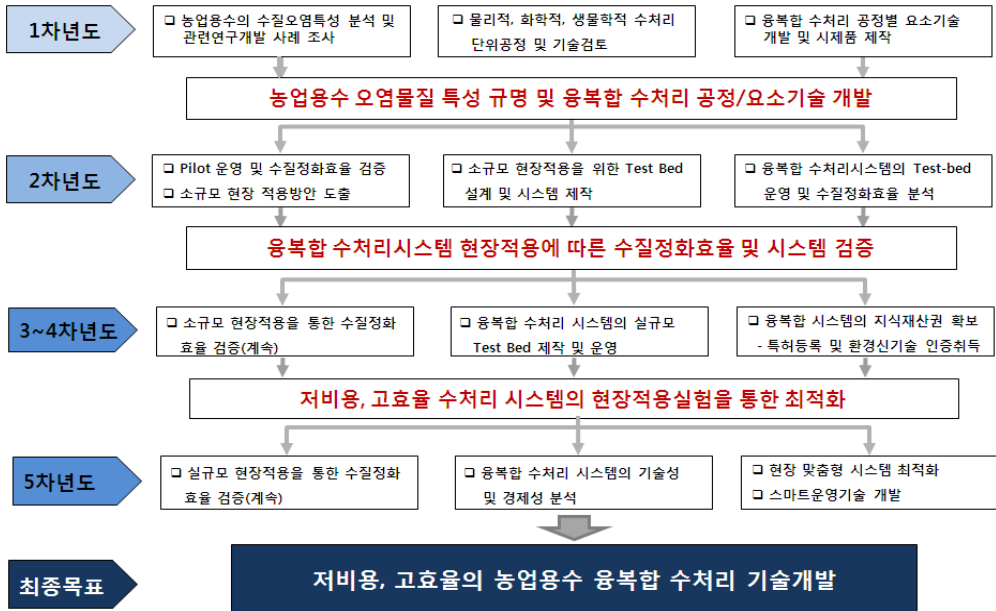
농업용수는 농어촌지역의 농업용수 공급이 목적이므로 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용 호소의 특성상 대규모의 많은 수량을 처리해야 하므로 수생태적으로 안전한 저비용, 고효율의 수처리 기술 및 시스템 개발이 필요한 실정이다.

## 2. 연구목적

본 연구에서는 기존에 개발된 수처리 공정 및 기술들을 검토하여 농업용 저수지 물리적 특성 및 수질오염특성에 맞는 저비용 고효율의 융복합 수처리 기술을 개발하여 농업용 저수지의 부영양화 및 수질오염을 사전에 방지하고 양질의 농업용수를 확보·공급하고자 한다.

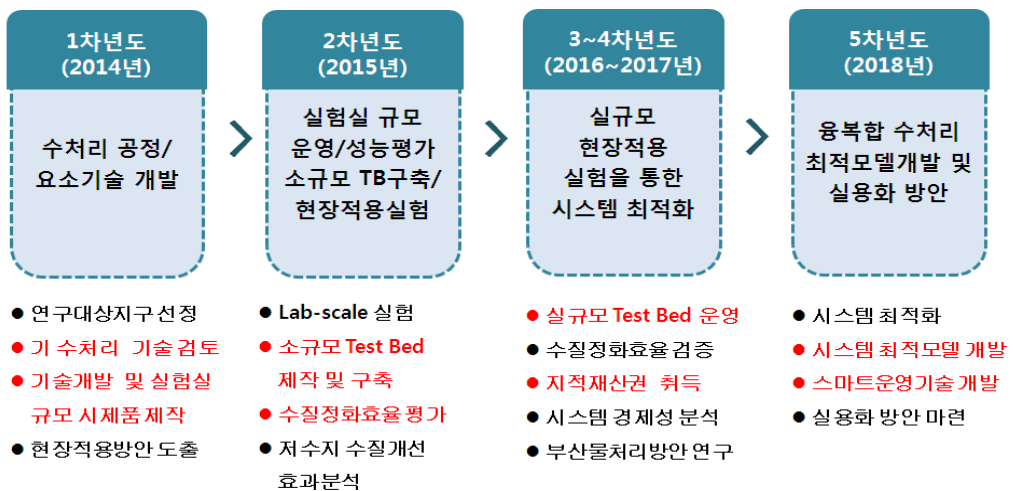
## 제2절 연구내용 및 추진체계

## 1. 연도별 연구개발 목표



## 2. 연구범위 및 세부내용

## 가. 연도별 연구범위



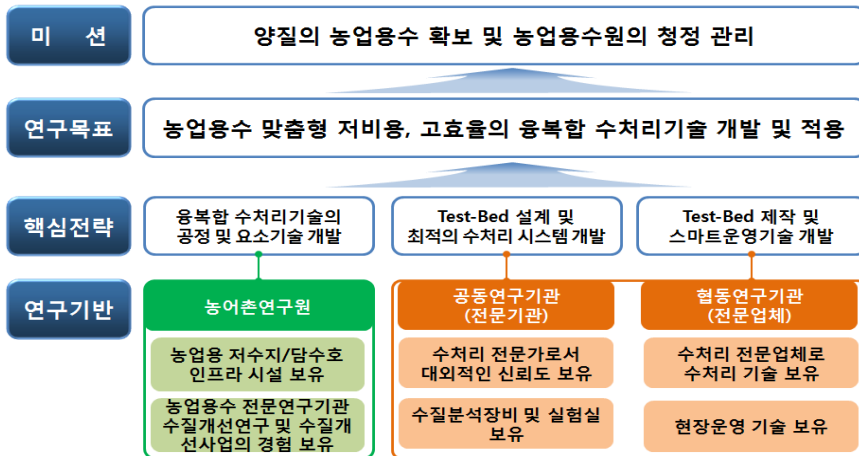
나. 2015년도 연구내용

연구내용	세부 내용
<p>융복합 수처리시스템 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수처리 기술 현장적용 대상 저수지 선정</li> <li>○ 현장적용지구 환경조건 연속 모니터링</li> <li>○ 수처리시설 설치 전·후 현장 모니터링                         <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 대상지구의 호 내 및 유입하천 수질조사</li> <li>▪ 대상지구의 퇴적물 오염도 조사</li> <li>▪ 대상지구의 퇴적물 오염물질 용출량 산정</li> </ul> </li> </ul>
<p>융복합 수처리시스템 현장적용 Test-Bed 구축 및 성능평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 접촉산화시스템 Test-Bed 구축 및 운영                         <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식)</li> <li>▪ 고속복합응집장치</li> <li>▪ 마이크로 버블 포기장치</li> </ul> </li> <li>○ 수질정화효율 등 성능평가 및 기술 보완                         <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식)</li> <li>▪ 마이크로 버블 포기장치</li> </ul> </li> </ul>
<p>현장적용지구의 3차원 수리- 수질모형 구축 및 적용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 저수지 지형측량 및 입력자료 구축</li> <li>○ 강우-유출모형(HEC-HMS)을 이용한 유입 량 및 유출량 산정</li> <li>○ 대상저수지 물수지 분석 재현</li> <li>○ 수처리시스템 설치에 따른 저수지 수질 개선효과 분석</li> <li>○ 수처리시스템의 수리학적 영향 반경 실험</li> </ul>
<p>호소 수질정화시스템 기술개발 및 시제품 제작</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 무인항법 이동식 호소 수질정화기술 구상</li> <li>○ 무인항법 이동식 수질정화시스템 개발·설계                         <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 무인항법 프로그램 개발</li> <li>▪ 오염물질 처리시스템 개발 등</li> </ul> </li> <li>○ 단위공정별 시제품 제작 및 성능평가                         <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 무인항법 프로그램 적용</li> <li>▪ 오염물질 처리시스템 제작 등</li> </ul> </li> <li>○ 호소 수질정화시스템 현장적용방안 도출</li> </ul>
<p>융복합 수처리시스템의 수생태계 영향 평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리시스템 요소기술별 특성분석</li> <li>○ 요소기술별 수생태계 영향 문헌조사</li> <li>○ 현장모니터링 결과를 이용한 수생태계 영향 평가</li> </ul>

### 3. 연구 추진체계

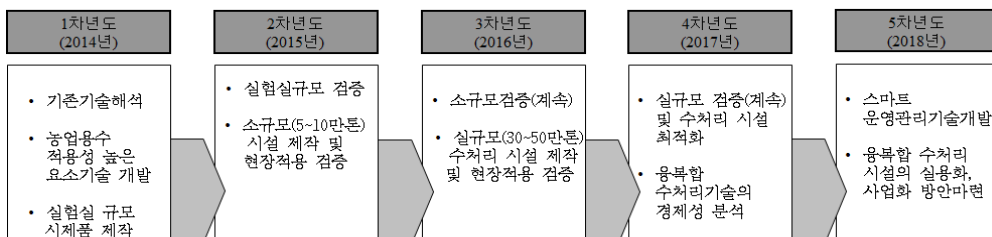
#### 가. 추진전략 및 방법

- 산·학·연 협동 및 공동연구로 연구의 효율성 제고 및 연구결과의 극대화
  - 수처리 전문업체와 협동연구로 연구 사업비의 효율적 비용집행
  - 수처리 전문기관과의 공동연구로 연구결과 대외적인 신뢰도 제고 및 정부기관의 신기술인증 자격취득 기반마련
- 수처리 장치의 실규모 현장적용 실험을 통한 최적모델 개발
  - 현장적용실험을 통한 최적시스템 개발로 현장 적용성 제고
- 대외 수처리 전문가들의 자문회의 등을 통해 개발된 수처리 기술의 지속적 검증
  - 수처리 전문가들의 자문회의 등을 통한 지속적인 기술 검증
  - 수처리 대내외 전문가 초청 세미나 등을 통한 대외 기술력 흡수



<그림 1.2-1> 효율적 연구수행을 위한 추진전략

#### 나. 연도별 단계적 추진체계



## 제3절 기대효과 및 활용방안

### 1. 기술적 측면

- 농업용수 적용 수처리기술 개발로 공사 관리 저수지의 수질개선효과
  - ▣ 2014년 농업용수 수질기준 초과시설 759개소(3,362개소의 22.6%)
- 개발된 수처리 기술의 실규모 현장적용실험으로 연구결과에 대한 신뢰도 제고 및 사업효과 분석으로 수질개선사업의 적용 타당성 확보
- 개발된 수처리 기술의 지적재산권 취득으로 공사의 수처리 기술력에 대한 대외적인 신뢰도 확보로 국내 및 해외 사업화 진출 기반 마련

### 2. 경제·산업적 측면

- 세계 물 산업은 향후 10년간 2배 이상으로 확대(2015년 1,598조원)되어 세계 경제의 한 축을 이룰 것으로 전망되고 있으며, 국내에서도 농업용수의 사용량은 약 48%로 수요량이 가장 많은 분야이며, 최근에는 농업용수에서 농어촌용수로 다목적화 되고 있으며, 그 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다
- 본 연구개발 성과는 오염된 농업용수 저수지의 수질개선을 위해 적용될 수 있으며, 또한 최근 사회적 문제가 되고 있는 4대강 녹조문제 해결에도 적용될 수 있을 것으로 기대됨
- 양질의 농업용수 공급이 가능함에 따라 고품질 수익형 농작물 재배시스템 구축이 가능해지고, 이로 인한 고부가가치 수익형 농작물 생산에 따른 농촌지역의 고소득 창출 및 지역 발전에 기여할 것임
- 깨끗한 농업용수를 사용해 생산된 농산물에 대한 대국민 안전의식 제고 및 우리 농산물의 국제시장에서의 경쟁력 확보도 기대됨
- 농업용 저수지의 수질개선효과는 안전 및 친환경농산물 생산뿐만 아니라 농어촌지역의 어메니티 증가 등으로 인한 농업농촌 관광활성화 등 농어촌지역에 미치는 직·간접적인 효과는 상당할 것으로 예상됨

## 제2장 농업용수 융복합 수처리기술 개발

1절 융복합 수처리 요소기술 개발

2절 대상수역별 융복합 수처리기술 설계

3절 융복합 수처리기술 이론적 배경





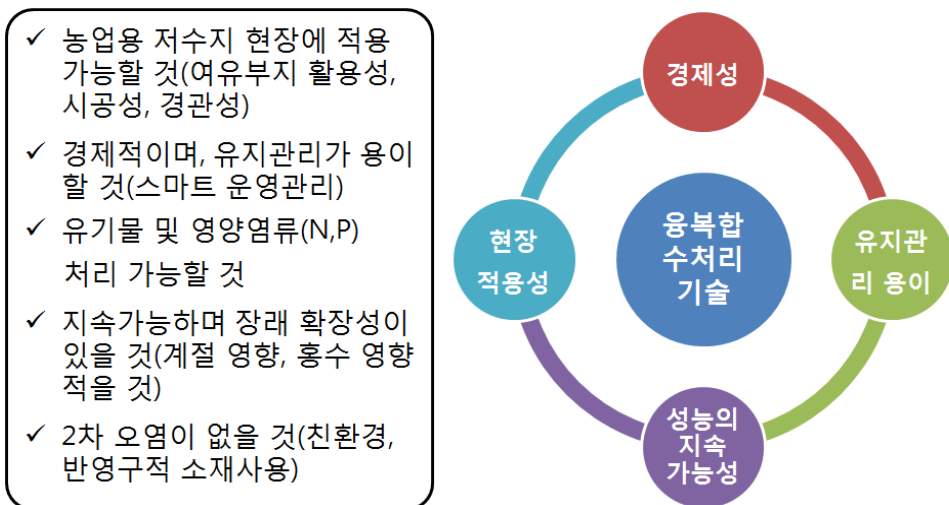
## 제2장 농업용수 융복합 수처리기술 개발

### 제1절 융복합 수처리 요소기술 개발

#### 1. 기술개발 방향 및 고려사항

본 연구에서는 국내·외에서 개발되어 적용되고 있는 물리적, 화학적, 생물학적 수질정화 기술들을 단위 공정별로 검토하여 농업용 저수지에 적용 가능한 처리공정과 요소기술을 개발하였다. 농업용 저수지를 대상으로 하는 융복합 수처리 기술의 개발방향은 <그림 2.1-1>과 같이 설정하였다.

농업용 저수지 수질개선을 목적으로 하는 융복합 수처리 기술의 고려사항은 시공성, 경관성, 여유부지 활용성, 유지관리 용이성, 경제성 등 현장적용성이 가장 중요하며, 수질개선효과가 계절적 영향과 저수량 등에 영향을 받지 않고 꾸준히 지속될 수 있는 지속성이 있어야 한다. 또한, 농업용 저수지의 수질관리 지표와 수질특성을 고려하여 수처리 대상 항목은 고형물질, 유기물, 영양물질, 조류를 포함하며, 각 항목별 물질순환, 수처리 기작과 효율을 고려하여 요소기술을 설계해야 한다. 또한 농업용수 수처리 시설은 친환경적, 반영구적 소재를 사용함으로써 수생태계에 영향을 주지 않는 즉, 2차 오염이 없는 기술이 개발되어야 한다.



<그림 2.1-1> 농업용수 융복합 수처리기술 개발 방향

## 2. 대상수역별 수처리 요소기술의 구성

농업용 저수지의 수질오염 영향 요인을 규명하기 위하여 1차 년도에 수질에 영향을 미치는 물리적 인자 및 수질 항목 등 20개의 변수를 대상으로 다변량 통계분석기법인 주성분 분석과 요인분석을 실시하였다. 분석결과 농업용 저수지의 수질오염의 주요 요인으로는 오염물질 유입량, 유출량 등을 결정하는 저수지 유역환경특성과 강우 시 축분 등 비점오염원에 의해 외부 유역에서 들어오는 입자성 오염물질에 의한 영향, 저수지 수리·수문학적 조건으로 인한 내부생산성(조류 발생 등)에 의한 영향으로 평가되었다(농림축산식품부 등, 2014). 따라서 농업용 저수지의 수질개선을 위해서는 초기 강우시 입자성 오염물질 제거 등을 포함한 유입수 대책과 호 내 대책으로 구분하여 수역별 수질특성에 맞는 수처리 기술이 개발되어야 한다.

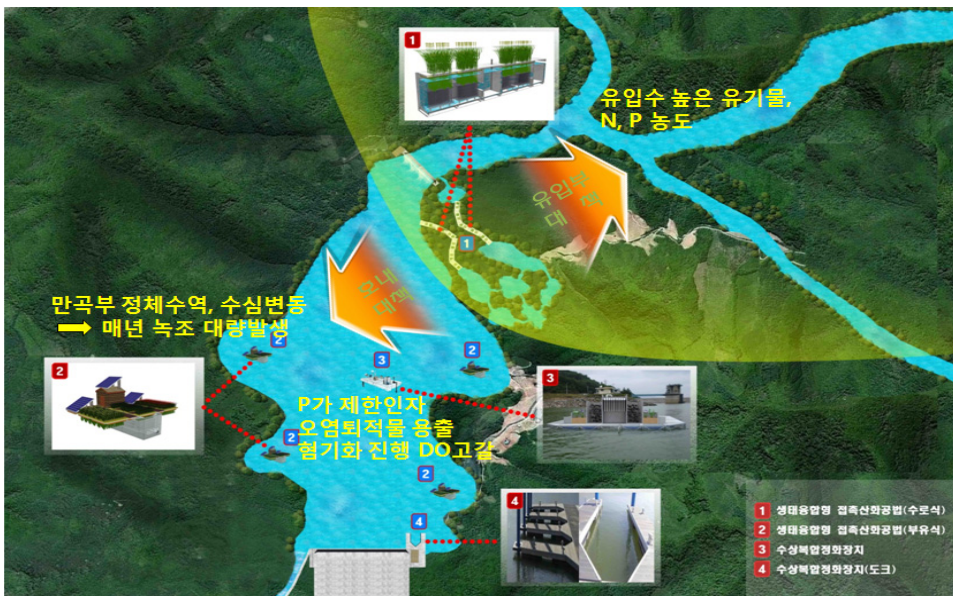
본 연구에서는 기존 물리적, 화학적, 생물학적 요소기술들을 검토하여 농업용 저수지의 유입부와 호 내에 적용성이 높은 요소기술들을 추출하여 (표 2.1-1)에 정리하였다. 유입수의 처리기술은 유역 내에서 들어오는 미처리 생활오수 및 축산농가에 의한 축분 등에 의해 고형물, 유기물, N, P의 농도가 높으므로 이들에 대한 처리효율이 높고, 유지관리 및 경관성을 고려하여 침강, 여과, 응집, 부착생물막, 식물정화기술을 추출하여 고속응집 및 여과 장치(SS제거)와 생물막여재(유기물 제거)와 식물정화(질소, 인 제거) 기능을 조합하는 물리적, 화학적, 생물학적 융복합처리 공정으로 구상하였다. 고속복합응집장치는 초기 강우 시 비점오염물질을 처리하는 시설로서, 유입수 성상과 환경여건에 따라 탄력적으로 운영하는 시설로 계획하였다.

호 내 만곡부 지역은 수리학적 영향이 적어 정체수역을 이루며, 수질오염도가 심해 외기온도가 상승하면 녹조발생 등으로 악취 등이 발생하는 수역이다. 이러한 수역은 녹조가 발생되지 않도록 산소 공급 등 수환경 개선 및 N, P 등 오염물질을 제거시키는 공정과 기술을 조합하였다. 호 내 수질개선을 위해서는 호 내 내부생산성을 최대한 억제하고 유입된 용존성 오염물질 등을 처리하는 대책기술이 필요하다. 따라서 호 내 산소공급으로 수 환경을 개선하고, 호소 1차 생산성의 제어인자인 P 저감 및 호소 경관성을 향상시키기 위하여 마이크로버블에 의한 산소 포기, 응집부상에 의한 오염물질 제거 등의 요소기술을 포함하는 GPS 무인항법 이동식 수상 복합정화시스템 개발을 구상하였다.

따라서 호소 유입수의 고농도 유기물, N, P을 처리하기 위해서 유입부 대책으로 생태융합형 접촉산화수로를, 상시 정체수역으로 연중 수심변동이 심하고 특히 여름철 녹조가 대량으로 발생 되고 있는 호소 만곡부를 대상으로 생태융합형 접촉산화부도를, 일정한 수심이 있고 DO 부족으로 퇴적 오염물질에 의한 내부생산성이 높아 수질오염이 심한 저수지를 대상으로 무인항법 이동식 수질정화시스템을 개발하였다. 농업용수 수질개선을 위한 종합대책 MAP(안)은 <그림 2.1-2>와 같다.

(표 2.1-1) 농업용 저수지 융복합 수처리시스템 요소기술 구성

구 분	유입수 적용	만곡부 적용	호 내 적용	비 고
처리목표	유기물, N, P 저감	유기물, N, P 저감	수환경 개선 N, P 제거	
물리적 기술	침강, 여과	침강, 여과	마이크로 버블	SS 제거 DO 공급
화학적 기술	응집	응집	전기응집 등	N, P 제거
생물학적 기술	부착생물막, 식물정화	부착생물막, 식물정화	부착생물막, 식물정화	유기물 제거



<그림 2.1-2> 농업용저수지 수질개선 종합 MAP(안)

## 제2절 대상수역별 융복합 수처리기술 설계

### 1. 유입부 대책 기술구성과 설계인자

#### 가. 수처리 공정

유입부 수처리 대책의 목표는 호 내로 유입하는 고형물, 유기물, 질소, 인의 저감 및 제거에 있다. 유입수 수질개선을 위한 생태융합형 접촉산화시스템(수로식)의 주요 공정은 유입 및 전처리, 고속복합응집장치(체류시간 1~10분 내외), 생태융합형 접촉산화조(식물 및 미생물접촉재를 융합한 식생메디아조), 침전조, 흡착여과조(재폭기조), 방류조로 구성된다. 고속복합응집장치는 평상시 TP 처리 또는 초기 강우시 우수의 SS 등 비점오염물질 처리를 주목적으로 하고 있으며, 유입수 성상과 현장 여건에 따라 선택적으로 조합하여 적용할 수 있도록 설계하였으며, 공정은 <그림 2.2-1>과 같다.

유입 및 전처리 장치는 하천수 유입을 위한 펌프시설, 그리고 유입수 내에 포함된 토사 및 이물질을 제거하기 위한 스크린 및 침사시설을 포함한다. 고속복합응집장치는 SS와 TP 제거를 목표로 하며, 약품혼화장치(인라인 믹서), 응집 및 부상촉진장치(Air-mist 등), 부상 플록 분리를 위한 와류 발생, 플록 배출을 위한 감속기 일체형 내통 회전, 응집제 자동투여를 위한 폴리머 자동용해장치, 응집처리수 최종 여과 필터층 등을 선택적으로 구성한다. 유동상 접촉산화조는 공정중 부착미생물(MLSS) 양을 증대시키기 위하여 비표면적이 큰 유동상 접촉재를 충전함과 동시에 경사판을 구성하여 유입 SS 플록 해체 및 침전효율 향상을 유도한다. 식생메디아조는 수생식물과 로프형 섬유상 미생물 접촉재를 이용한 유기물, N, P 저감을 주목적으로 하며, 상부에 수생식물을 식재하는 탈착식 매트를 설치하여 경관을 창출하고 동절기 식생 유지관리를 용이하게 하였다. 상부 수생식물은 현장 여건을 감안하여 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. 미생물 접촉재는 생물막에 의한 유기물 분해와 흡착 및 여과 기능을 포함한다. 본 연구에서 개발된 생태융합형 접촉산화시스템에서는 산소 용해율이 높은 마이크로 버블 또는 순산소 포기장치를 미생물 메디아조에 조합하여 접촉재에서 슬러지 탈리 및 슬러지 침전 방지를 도모하였다. 흡착여과조는 역세가 용이한 상향류 방식의 세라믹이나 펄라이트 여재 또는

로프형 섬유상 미생물접촉재가 충전된 후처리 공정으로서, 산화 분해된 잔류 유기물을 최종 처리함과 동시에 공정중에서 소모된 최종 처리수의 DO를 다시 증가시켜 방류대상 저수지에 산소를 공급하는 2차 효과를 도모하기 위한 재포기를 목적으로 한다.



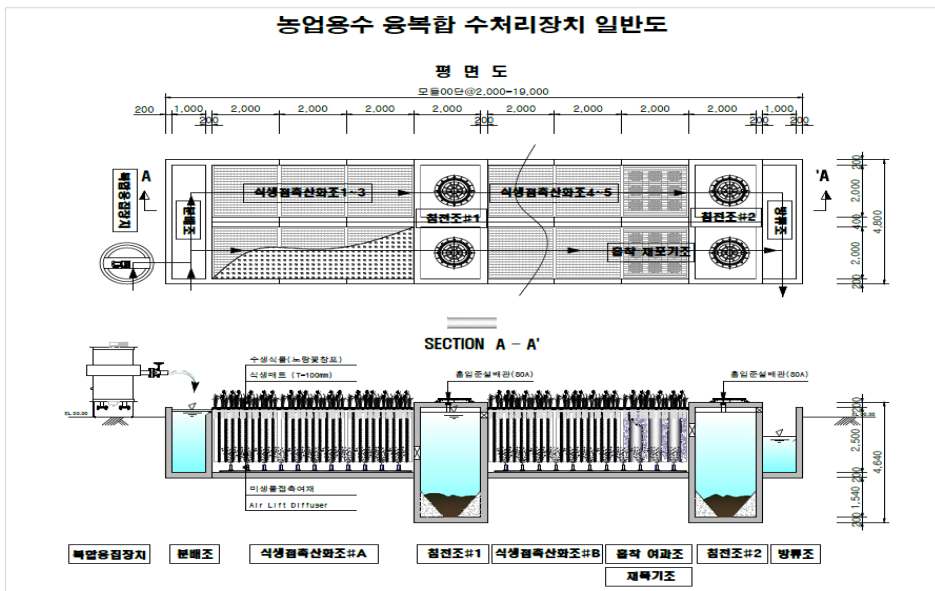
<그림 2.2-1> 농업용저수지 유입부 수처리시스템 공정

#### 나. 공정별 주요 기능

유입부 대책 수처리 시스템의 공정별 주요 기능은 다음과 같다.

- 유입 및 전처리 : 토사 및 이물질 제거(스크린 및 침사시설)
- 복합응집장치 : SS 및 TP 제거
  - 약품 혼화장치(인라인 믹서)
  - 응집 및 부상촉진장치(Air-mist 등)
  - Voltex 원리를 이용한 부상 Floc 분리
  - 감속기 일체형 내통 회전으로 와류 가속
  - 폴리머 자동용해장치로 응집제 투여
  - 응집처리수 최종 여과 방류(필터층)
  - 유입성상/현장여건 따른 선택적 운영
- 분배조 : 유량조정 및 균등분배
- 유동상 접촉산화조
  - 유동상접촉재와 경사판으로 구성  
(MLSS 증대, 유입 SS Floc 해체 및 침전효율을 향상유도)
  - 유입성상 및 현장여건에 따른 선택적 운영
- 식생메디아조 : 수생식물 및 미생물접촉재를 이용한 유기물 저감

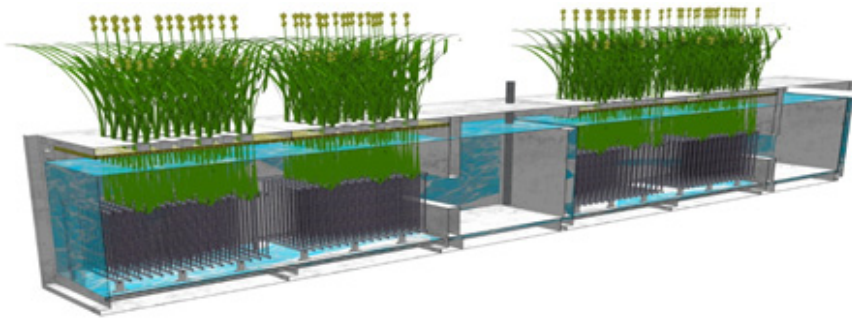
- 상부 수생식물 식재(식재매트 탈착식-현장여건에 따른 선택 적용)
- 하부 모듈형 미생물접촉재 거치(Rope형 섬유상)
- 수생식물에 의한 N, P 제거 및 상부 경관성 제고
- Air-mist 또는 순산소를 이용한 포기에 의한 유기물 산화
- 미생물접촉재에 의한 미생물 분해, 흡착 및 여과
- Air Lift 방식의 Diffuser 공기 공급에 의한 교반  
(슬러지 침전 방지, 산소용해율 증대, Air-mist 교반)
- 침전조 : 접촉산화조로부터 이송된 슬러지 침강, 농축 및 제거
- 흡착 여과조 : 산화 분해된 잔류 유기물의 흡착, 여과, 방류수 재포기
  - 미생물접촉재가 충전된 Draft Tube를 이용한 선회류형 간접 포기
  - 간접포기방식으로 전단력에 의한 미생물막 탈리 방지
  - 현장 여건에 따라, 역세가 용이한 상향류 방식의 세라믹 또는 펄라이트 직접여과 시스템 적용
  - 미처리 SS 및 탈리 미생물 침강효율 증대
  - 방류수 용존산소 공급 증대(재포기)
- 방류조 : 재포기 처리수의 저수지 방류



<그림 2.2-2> 농업용수 수질개선을 위한 유입부 수처리공정 개요도

#### 다. 수처리 시스템의 특징 및 장점

농업용수 수질개선을 위한 유입수 대상 수처리 시스템의 특징 및 장점은 다음과 같다. 첫째, 전처리시설, 복합응집장치, 생태융합형 미디어조, 흡착여과조, 방류조를 일체형 콤팩트한 구조물로 지상 또는 지하에 시공함으로써 부지 활용성을 높일 수 있다. 둘째, 유입수 성상에 따라 복합응집장치를 선택적으로 사용할 수 있다(기존 수질개선사업으로 인공습지가 설치된 지구에서는 제외). 셋째, 생태융합형 접촉산화조의 지상부에 식생을 적용하여 농어촌지역에 어울리는 친환경적 경관을 창출할 수 있다. 넷째, 식생 등 자연재료와 응집제 등 인공재료의 유기적인 결합으로 수질정화 효과를 극대화할 수 있다. 다섯째, 미생물 미디어는 교체가 필요 없는 반영구적인 재료이므로 유지관리비용이 적게 든다. 여섯째, 수처리 시설에 ICT를 융합한 스마트 운영관리기술 개발로 무인 원격관리가 가능한 등 유지관리가 용이하다. 기존 수질개선사업에 널리 이용되던 인공습지, 침강지에 비하여 토지이용도가 집약적이며, 유기물에 대한 처리효율이 높다.



<그림 2.2-3> 생태융합형 접촉산화수로 모식도

#### 라. 생태융합형 접촉산화공법의 세부기술

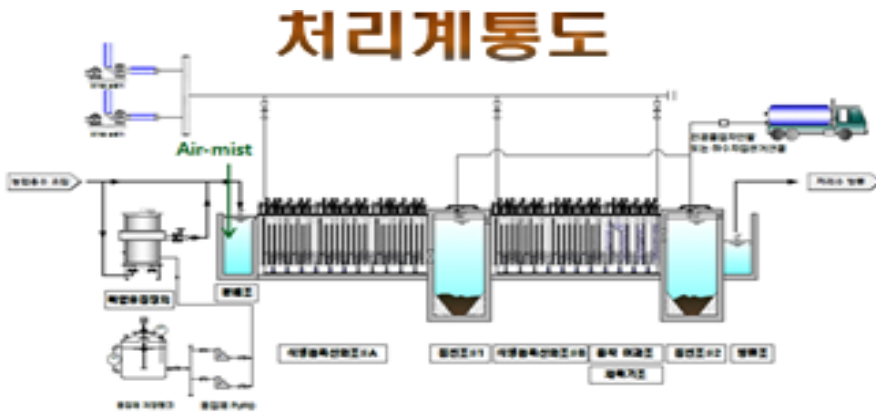
생태융합형 미디어 공법은 노랑꽃창포, 갈대, 달뿌리풀 등 다년생 정수식물과 고효율 미생물 접촉재를 하나의 반응조 내에서 동시에 사용하는 생물학적 수처리방법으로서, 기존의 식물을 이용한 인공습지 등의 자연형 처리공법과 접촉산화공법의 장점을 결합한 융복합 기술이다.

기존의 인공습지는 식물 및 토양의 흡착분해 기능만을 이용함에 따라 처리효율에 한계가 있고, 특히 동절기에는 식물고사로 인해 효율이 오히려 저하되거나 오염물질이 수중으로 재 용출되는 문제가 있다. 또한 홍수

시 토사 퇴적에 의한 유지관리문제가 대두되거나 모기 등 해충의 서식처화되는 문제가 있다. 또한, 비자연형 수처리 공법으로는 스크린, 와류형시설, 여과형시설 등의 물리적 처리방법과 약품을 이용한 화학적 처리방법 및 미생물 접촉재를 이용한 생물학적 처리방법 등이 있으나, 물리적 처리방법은 처리효율이 상대적으로 낮고 동력비가 많이 소요되며, 특히 여과형시설은 여재 폐색에 의한 유지관리 효율저하의 문제가 크다. 화학적 처리방법은 약품 사용에 따른 유지관리비 증가, 처리수내 약품 잔량에 의한 2차 오염 문제가 대두될 수 있으며, 생물학적 처리방법은 미생물 생육에 필요한 용존산소, 수온 등에 민감하고 체류시간이 길어 부지면적이 크게 소요되는 단점이 있다. 특히 이러한 공법들은 농업용 저수지의 지리적 여건상 유지관리 인력이 상주하기 어려워 적용하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 수생식물과 미생물 접촉재를 동시에 활용하여 기존 각각의 공법의 장점만이 결합된 처리효율이 높고 유지관리가 쉬운 융복합 기술로 개발하고자 하였다.

(1) 장치 구성

본 장치는 로프형 섬유접촉재, 유동상접촉재, 경사판, Draft Tube(내통), 여과모듈, 탈착식 식생수로(노랑꽃창포 등 식물포함), Air-mist(마이크로버블 또는 순산소 발생 및 용해장치), 봉형 산기관(Draft Diffuser), 후처리용 여과재(세라믹 또는 펄라이트 등) 등으로 구성되어 있다.



<그림 2.2-4> 생태융합형 접촉산화시스템 처리 공정도



## (2) 공법의 기본원리

유입수 대책으로 개발된 본 공법은 물리적 공정인 여과 및 흡착, 산소포기기술과 화학적 공정인 응집부상, 생물학적 공정인 식생 및 부착미생물 미디어 등으로 구성되어 있다. 물리적 공정은 고형물 및 유기물의 여과 및 흡착에 의한 오염물질 제거와 마이크로 버블에 의한 오염물질 산화분해이며, 식생미디어는 식생(노란꽃창포 등 다년생식물)과 미생물 접촉재(미디어)를 이용한 생물학적인 수처리 방법으로서, 미디어 부착미생물에 의한 BOD, SS 제거 및 식물뿌리에 의한 TN, TP 등 영양염류를 제거하는 공법이다. 부착미생물막 공법의 정화 원리는 자연에서 하상 돌 표면에 부착되어 있는 미생물에 의해 오염물질이 분해되는 것을 이용한 원리로, 인공적으로 미생물막과 미생물 최적의 생존환경 조건을 조성하여 오염물질 분해를 유도하는 시설이다.

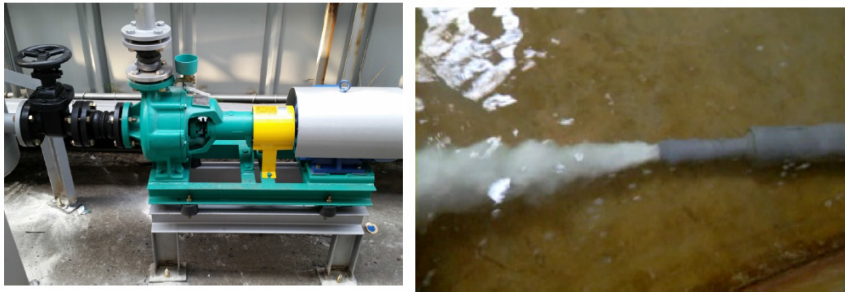
## (3) 개발목표 및 설계인자

- 체류시간 : 0.5~1.5시간
- BOD용적부하 :  $0.6\text{kg}\cdot\text{BOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$
- Media 충전률 :  $200\text{m}/\text{m}^3$  이내
- 유효수심 : 2m 이하
- 적정 DO 농도 :  $4\text{mg}/\text{L}$  이상
- Media 교체율 : 1회/10년 이상
- 식생 예초율 : 1회/1년

## (4) 생태융복합 접촉산화공법 특징(기존 기술과의 차별성)

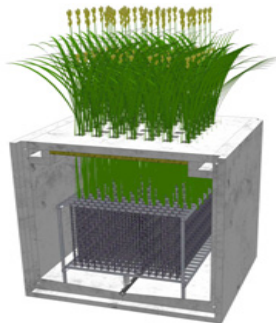
일반적인 부착미생물막 공법에서는 미생물 접촉산화방식에 있어 미생물에게 필요한 공기를 공급할 때, 단순히 수직으로 거치된 접촉재 하부에서 디스크 산기관 등을 이용해 직접 포기를 하므로 전단력에 의해 미생물막이 탈리될 수 있으며, 특히 일반 산기관은 필요 산소 용해율 유지를 위하여 유효수심이 최소한 4m 정도는 되어야 하므로 구조물의 깊이 등 처리시설 규모가 매우 크고, 공기 공급시설 동력도 크게 소요되어 경제성이 현저히 떨어진다. 본 연구에서 개발된 장치에서는 일반 디스크형 산기관 대신 Air-mist 또는 순산소를 이용한 포기방식을 적용하였다. <그림 2.2-5>와 같이  $30\mu\text{m}$  이하 크기의 마이크로버블의 Air-mist를 도입하여

동력비 및 산기관 설치비용을 절감하였다. 또한, Air-mist는 부력이 작아 분당 3mm정도의 저속으로 부상하므로 물 표면에서 탈기하지 않고 수중에서 완전 소멸되어 산소 용해율을 극대화할 수 있으며, 음전하인 버블이 양전하의 유기성 오염물질을 쉽게 흡착 및 분해할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 Air-mist는 현장 여건에 따라 선택적으로 순산소 공급 및 용해 시스템으로 대체 적용할 수 있다. 순산소는 콤팩트한 설비를 이용하여 주변 공기에서 순산소만을 추출해내는 발생장치(제너레이터)와 처리대상 유입수의 일부에 혼합시켜 수중 용존산소 농도를 향상시키는 용해장치로 구성되며, 적은 동력비로 산소 포화농도 이상의 DO 향상을 기대할 수 있다.

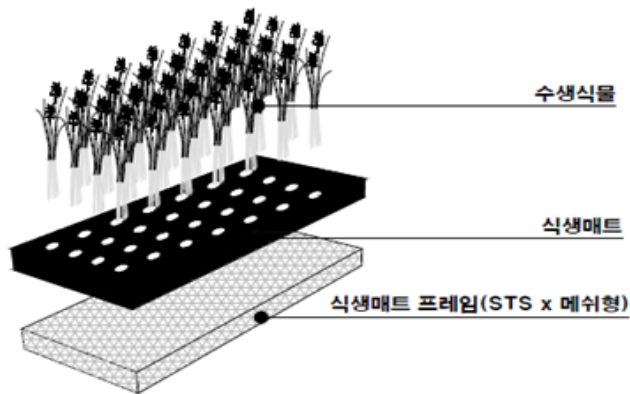


<그림 2.2-5> Air-mist 장치

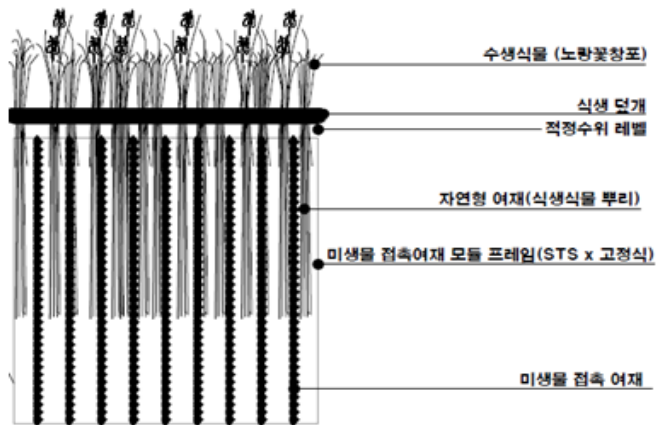
<그림 2.2-6>는 접촉수로의 단위 모식도이다. 처리시설 상부는 <그림 2.2-7>와 같이 식생매트에 다년생 수생식물을 식재함으로써 농업용 저수지의 자연성과 경관성을 향상시키고, 탈부착식 식재매트 구성으로 홍수시 토사 퇴적 등에 의한 유지관리 문제점 및 동절기 식생관리 문제점 등을 해결하고자 하였다. 처리시설 하부에는 나선형 섬유상 미생물 접촉매디아를 충전시킨 수처리 장치와 상부 식생 뿌리에 의해 오염물질이 제거된다.



<그림 2.2-6> 생태융합 접촉수로 단위 모식도



<그림 2.2-7> 생태융합형 접촉산화시스템 식생매트 구성도



<그림 2.2-8> 접촉산화시스템 식생 미디어 모듈 구성도



<그림 2.2-9> 생태융합형 접촉산화수로 하부 수중 예시(미생물접촉재+식물뿌리)

## 2. 호내 수질정화기술 구성과 설계인자

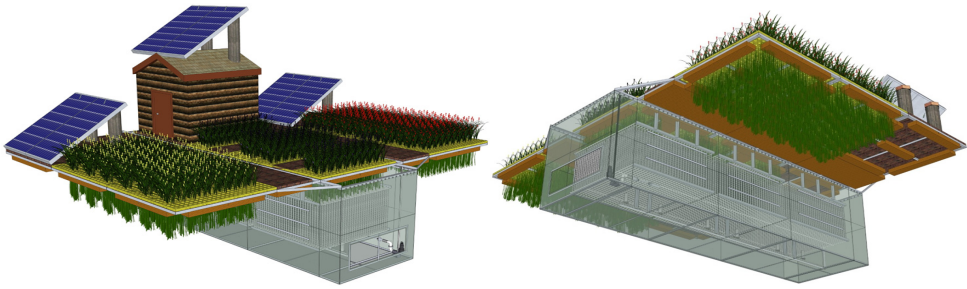
### 가. 만곡부 대책기술(생태융합형 접촉산화부도)

저수지 수변에 위치하고 있는 만곡부는 수리적 영향을 적게 받는 지역으로 보통 정체수역으로 수심이 매우 낮고 수질오염도가 심해 외기온도가 상승하면 녹조발생 등으로 수질오염이 심한 지역이다. 이처럼 호소 내 녹조 대 발생 구역인 정체수역 수면위에 부유하면서 호소의 수 환경을 개선시키고, 이로 인해 녹조 대발생과 호소의 부영양화를 사전에 방지할 수 있는 대책기술로 생태융합형 접촉산화부도를 개발하였다.

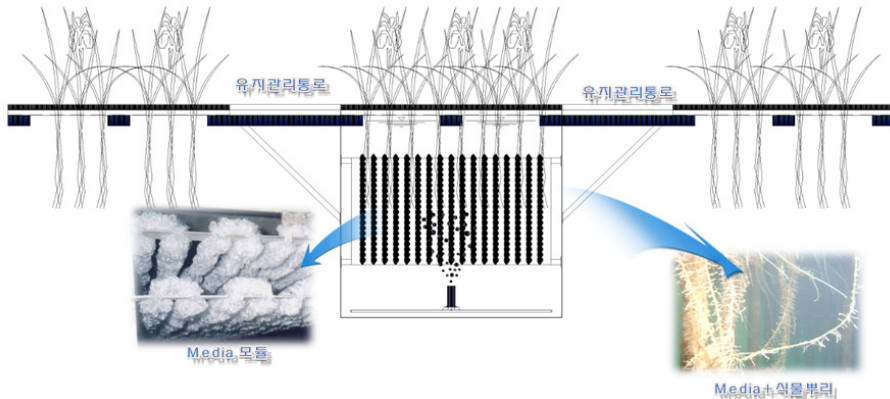
생태융합 접촉산화부도는 <그림 2.2-10>과 같이 생태융합형 접촉산화수로를 수중에 부유할 수 있도록 만든 접촉수로의 변형된 시스템으로 식물정화 및 생태적 기능을 가진 수면 위 인공식물섬과 부체 하부 수중에 미생물 접촉산화방식에 의한 생물학적 수질정화시설을 접목한 수질정화시스템이다. 본 시스템은 수생식물을 심기 위한 식재 패널, 식재 패널을 설치하기 위한 메인 프레임, 메인 프레임의 하부에 설치되는 부력체, 메인 프레임 하부에 정화 공간을 형성하는 장막, 장막의 바닥에 설치되는 웨이트 프레임, 프레임의 하부로부터 상기 장막 내부에 설치되는 접촉 큐브, 웨이트 프레임에 설치되는 산기 수단, 메인 프레임의 후방에 설치되는 배수 수단으로 구성되어 있다.

본 시스템의 정화원리는 수생식물의 뿌리에 의해 인(P)을 제거하고 부체 하부에 부착된 미생물 접촉체에 의해 BOD, COD 등 유기물을 제거하는 원리로 생태융합 접촉산화수로를 응용한 기술이다. 또한 수로 유입부에 마이크로버블을 인위적으로 불어 넣어 처리조 내를 항상 호기성 상태를 유지시킬 수 있게 하였고, 처리수와 함께 용존산소가 수체에 확산되어 호소 수환경이 개선될 수 있도록 설계하였다. 생물학적 정화가 이루어지는 부분의 양측에 설치되는 식재 패널 하부에서는 수생식물의 뿌리에 의한 인(P)의 처리뿐만 아니라 동식물상 플랑크톤이 증식하기 좋은 환경을 제공하고, 물고기의 은신처나 산란처를 제공하는 기능도 갖는다. 식재 패널의 수생식물의 생장은 하천이나 호수 등의 수면을 은폐하기 때문에 햇빛을 차단하여 물 속에서의 녹조 발생을 억제할 수 있는 기능도 제공한다. 본 시스템의 최대 장점은 하부 수질정화장치의 프레임을 하천이나 호수 등의 수위 변동에 따라 높이가 가변적으로 조절되도록 함으로서 수량

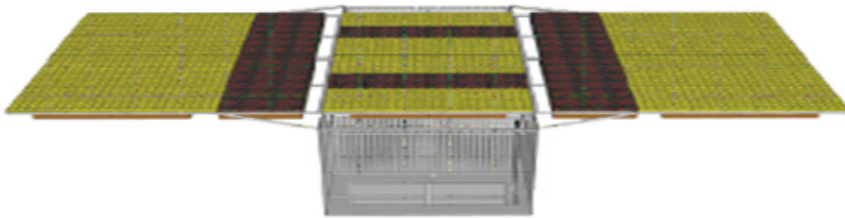
감소에 의해 수생식물이 물 위로 드러나 고사하는 것을 방지하였고, 부채하부의 수질정화장치가 하부의 바닥에 접촉하여 파손되는 것을 방지하였다. 또한 수류에 의한 저항을 최대한 줄여 빠른 수류에 의한 망실이나 파손을 방지할 수 있도록 하였다.



<그림 2.2-10> 생태융합 접촉산화부도 상부(왼쪽), 하부(오른쪽) 모식도



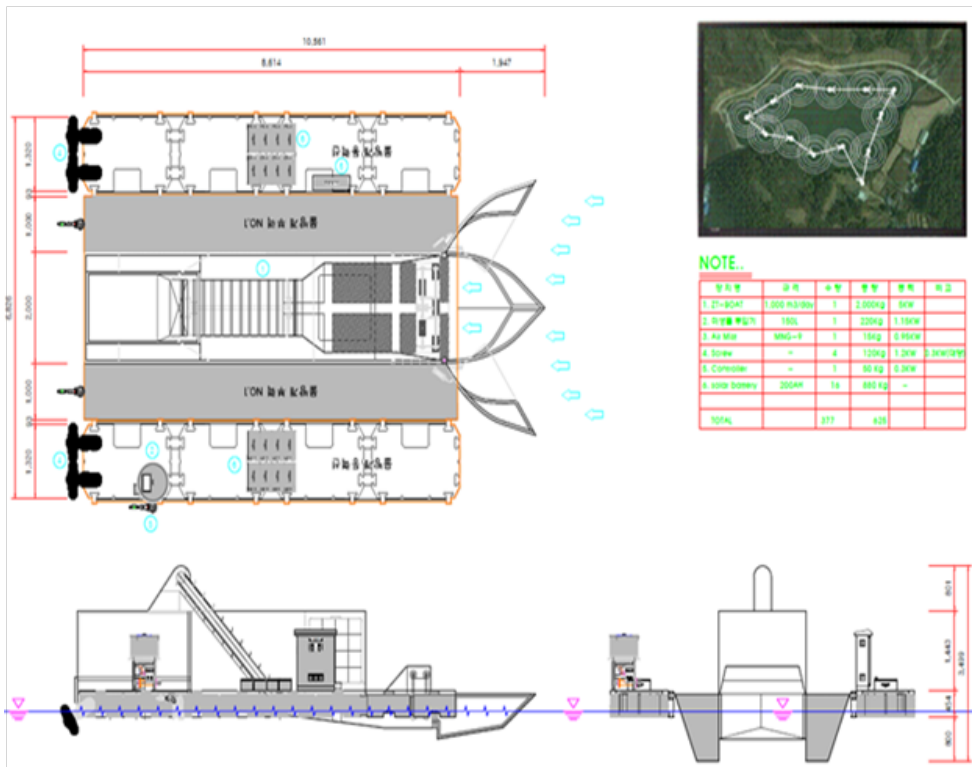
<그림 2.2-11> 생태융합 접촉산화부도 측면도



<그림 2.2-12> 생태융합 접촉산화부도 측면 모식도

나. 호소수 대책(무인항법 이동식 수질정화시스템)

호 내 수질개선을 도모하고 수 환경을 개선하여 조류 증식을 억제하기 위하여 무인항법 이동식 수상복합정화장치를 구상하였고, 모식도는 <그림 2.2-13>와 같다. 본 수처리 시스템의 기본 개념은 원하는 위치에서, 원하는 시간 동안 무인 체류하며 수질을 정화하고, 접안 도크에서 충전/유지 관리 및 악천후 대피 등이 가능하도록 한 이동식 정화선이다. 즉, 수처리 장치를 탑재하고 지정된 경로에 따라 지정된 시간에 맞추어 이동하면서 오염물질 등을 제거하는 저수지 수질개선 시스템이다. 본 기술의 구성요소는 GPS를 이용한 무인항법 프로그램, 오염물질 처리를 위한 초고속 고액분리시스템, 호소에 DO를 공급하기 위한 마이크로버블 장치, 자동수질 측정장치, SS농도 자동 센서, 장애물 감시 센서 등을 주요 장치로 하고 있으며, 이동이 용이한 선박일체형 형태로 되어 있다. 무인항법 이동식 수질정화시스템 세부적인 구성요소는 <그림 2.2-14>와 같다.



<그림 2.2-13> 무인항법 이동식 수질정화시스템 모식도



<그림 2.2-14> 무인항법 이동식 수질정화선 구성요소

무인항법 이동식 수질정화시스템의 사용동력은 태양광과 수변충전(전기 또는 태양광) 등을 검토하고 있으며, 수질정화시스템의 운영방식은 주간에는 호소 내를 이동하면서 수질정화를 하고, 야간에는 시스템 보호 및 동력 충전을 위해 수변 도크에 접안하여 배터리 충전 및 피항 등을 하는 주·야간 별도의 운영방식을 계획하고 있다. 무인항법 이동식 수질정화선 및 접안도크의 기본 개념 예시는 <그림 2.2-15>과 같다.



<그림 2.2-15> 무인항법 이동식 수질정화선 개념도

무인항법 이동식 수질정화시스템의 오염물질 처리기술 및 부력체, 자동 제어부문에 대한 원천기술을 융복합하여 시너지 효과를 배가시키기 위하여 각 부문의 전문업체와 공동기술개발을 위한 MOU를 체결하였다. 참여 기업체는 무인항법 프로그램과 부력체, 자연동력 등의 기술을 보유하고 있는 (주)그린솔루션, 전기촉매응집을 이용한 고액분리 오염물질 처리기술을 보유하고 있는 (주)블루비에스, SS 농도 센서, 마이크로 버블 등의 원천기술을 보유하고 있는 수생태복원(주) 등이 참여하였다. MOU 체결식은 2015년 5월 20일에 체결되었으며, 관련 사진은 <그림 2.2-16>과 같다.



<그림 2.2-16> 공동기술개발을 위한 협약체결식 관련 사진

#### (1) GPS를 이용한 무인항법 프로그램

GPS(Global Positioning System)란 인공위성을 이용하여 지구 전역에 대한 위치를 정확히 측정하여 전송해주는 시스템을 말한다. GPS는 미국 방성에서 개발한 위성을 이용한 무선허법 시스템으로서, GPS를 이용하여 정확한 위치, 속도, 시간 등의 계산이 가능함으로서 다양한 분야에서 응용되고 있다. GPS의 위치정보는 GPS 수신기를 이용하여 3개 이상의 위성으로부터 정확한 시간과 거리를 측정하여 삼각 방법에 의하여 현 위치를 정확히 계산하는 방법을 사용하며, 요즘은 3개의 위성으로부터 거리와 시간 정보를 얻고 1개 위성으로 오차를 수정하는 방법을 널리 쓰고 있다. GPS 항법 프로그램이란 사전에 입력된 프로그램에 따라 무인으로 자동 운전이 가능하도록 만든 프로그램이다. GPS 무인항법 프로그램은 공동기술개발 MOU 체결에 따라 (주)그린솔루션에서 개발하고 있다.

GPS를 이용한 무인항법 프로그램과 관련된 기술개발 항목과 내용은 (표 2.2-1)과 같고, (표 2.2-2)는 항목별 현재 진행공정 내용이다. <그림



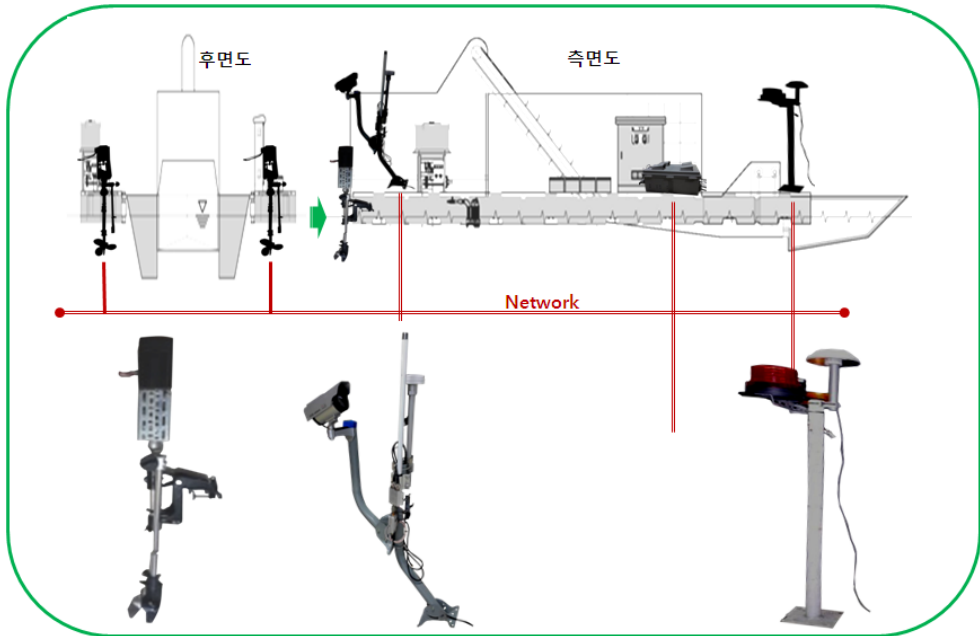
2.2-17>은 전체 모듈 및 기능도이고, <그림 2.2-18>은 MCU Controller 및 장치제어 시스템이다.

(표 2.2-1) 인공위성항법 기술개발 내용

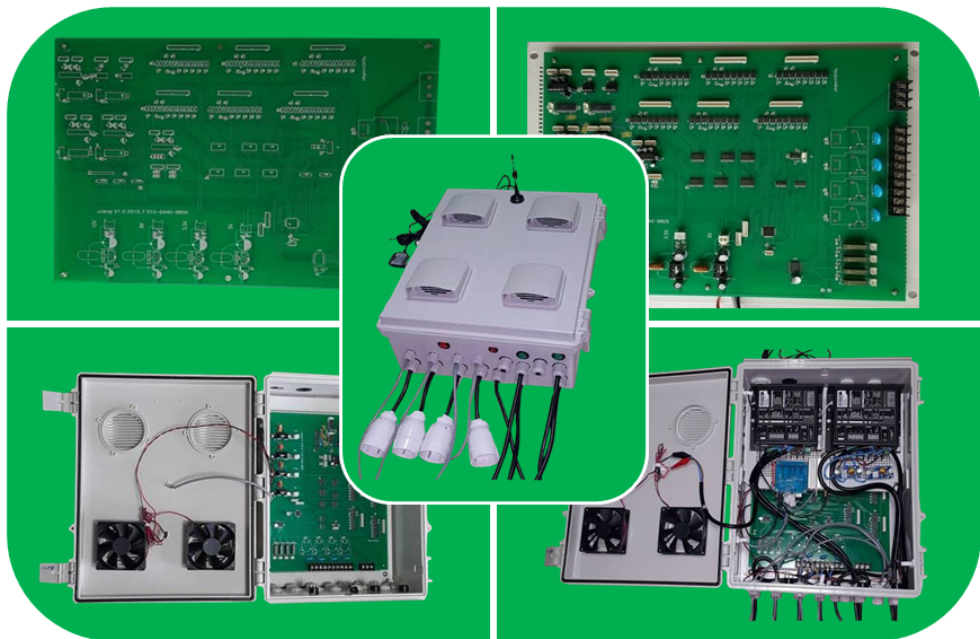
구 분	주요 항목
항법 컨트롤러	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가변속도 제어모듈</li> <li>○ 좌, 우 조향 조타 제어모듈</li> <li>○ GPS 통신 모듈</li> <li>○ 서버와 무선통신 모듈</li> <li>○ 수질정화기 등 가동, 정지 제어모듈</li> <li>○ 장애물감지 우회 모듈</li> <li>○ 녹조감지 모듈</li> <li>○ 수질상태 등 각종 계기판</li> </ul>
GPS무인항법 장치(Controller Unit) 소프트웨어 구성도	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Map 및 GPS</li> <li>○ 속도 및 장치</li> <li>○ 통신 및 제어</li> </ul>

(표 2.2-2) 항목별 진행공정 내용

항 목	내 용	진행 상태
MCU Controller 및 장치제어	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. MCU, DGPS Data 분석 슬래드 → 현재위치와 목적지 분석</li> <li>2. 주변장치 제어 → AC220V*4 Port, DC12V*4 Port, SPI, TCP/IP 외부장치 입출력 → TTL*4 Port, RS-232/485/422*6 Port, wifi</li> <li>3. Mortor Controller Driver 제어 → CAN, 485 / DC3상</li> <li>4. LED 경광등(황.적)*2, 경고 및 기동 경적*2 제어</li> </ol>	H/W 의 PCB제작완료 MCU 펌웨어 프로그램 90%이상 완료
2*스크류 모터엔진	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. BLDC Mortor → 750W, DC24V 3상, 3,000RPM 역정회전 가능</li> <li>2. 18*18*6Cm 스크류, 엔진 보트고정핀 브라켓, 워기어 원축, 동력전달 조인트</li> <li>3. (12V, 100A)*2*4 = 총 DC400A, 24V 동력용 배터리 및 충전기</li> </ol>	제작완료
DGPS항법 및 계측	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 선수, 제1GPS → 항로방향(방위각), 항법 분석 및 제어용</li> <li>2. 선미, 제3GPS → 속도, 현위치, 목적지 분석 및 제어용</li> </ol>	제작 및 통신 완료
통신	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Local용 TTL, CAN, 485, 232통신 → GPS, 모터엔진 출력제어</li> <li>2. Remort용 UHF, 2.4GHz, 5GHz 쌍방 → 수신 : Web 경로 Page → 발신 : 현재위치, 경로, 방위각, 속도, 고도, 수질, 장치상태</li> <li>3. 다목적 수질센서, 전방장애물감지용 레이더, 풍향/강수계</li> </ol>	제작완료  미완료
Web 항로 기능 (www.jjang2.co.kr)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 작업을 위한 이동 노선그리기 및 작업시간 타임스케줄설정</li> <li>2. 노선초기화 기능</li> <li>3. 노선항법 이동경로 로그 및 장치상태 보기 기능</li> <li>4. 노선로그초기화 기능</li> </ol>	Web Page개발 90%완료 나머지 10%는 테스트 시 기능 보완예정
보트 및 접안도크	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 보트제작</li> <li>2. 접안도크 설비</li> <li>3. 슬라발전 설비</li> </ol>	미완료



<그림 2.2-17> 전체 모듈 및 기능도



<그림 2.2-18> MCU Controller 및 장치 제어

## (2) 초고속 고액분리시스템

## (가) 기술 원리

초고속 고액분리시스템은 호소수 정화를 목적으로 기술 개발된 무인항법 이동식 수질정화시스템의 오염물질 처리를 위한 주 요소기술이다. 이 기술은 SS, TP, COD를 ZT(제타전위 제너레이터) 이용하여 급속 응집 및 부상시켜 제거하는 방법이다. 기술원리는 크게 3단계로 구분되며, 1단계는 마이크로버블을 이용한 거대 입자성 물질을 형성하는 단계이고, 2단계는 제타전위 제너레이터를 이용하여 극미세버블에 의해 이온 흡착된 콜로이드입자가 응집제와 결합하여 극미세기포 응집복합체로 결합하는 단계이고, 3단계는 초고속으로 부상 분리시켜 제거하는 기술이다.

기존 응집분리기술은 응집을 위해 완속/급속 체류조가 필요하며, 따라서 초기 부지면적이 커지므로 비효율적이며, 느린 처리 속도로 인해 많은 물량을 처리하기 어려운 단점이 있다. 초고속 고액분리시스템은 초고속 제타전위 제너레이터 모듈기술이 장착된 시스템으로, 장치 내부는 벤츄리 구조로 액체의 용해효율을 높일 수 있는 형태로 되어 있으며, 유입된 액체가 관을 통과하면서 고액이 분리된다. 이때 관 내부에 천연응집제를 유입수 조건에 따라 일정량 투입되면서 제타전위 제너레이터 모듈로 혼합·유입되어 빠른 속도의 응집과 분리가 일어나는 기술로 대용량의 물을처리할 수 있는 특징이 있다.



<그림 2.2-19> 초고속 부유물 고액분리시스템 기술 원리

(나) 기술 구성

① 초고속 응집/부상분리 공정

초고속 ZT 제너레이터 공정은 전자유도촉매, 천연응집제장치, 기체용해 탱크 구성되어 있다. 전자 유도 촉매는 D46×0.5T , 탱크 사이즈는 D216 × 500H로 체류시간은 20초이며, 부대시설로 천연응집제 정량펌프, 약품 저장탱크가 설치되어 있다.



<그림 2.2-20> 초고속 ZT 제너레이터

② 초고속 부상분리 타워

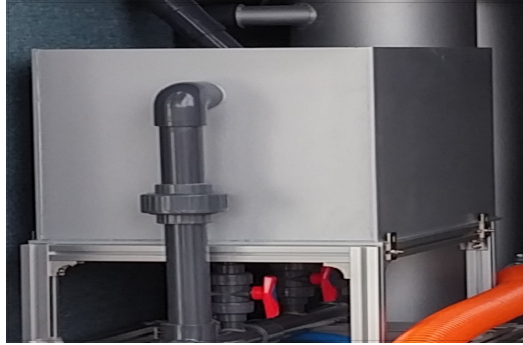
초고속 부상분리 타워 (D300×1,300H)의 체류시간은 20초이고, 유입수 대비 스크 반응은 10~30%이며, 별도의 스크 제거를 위한 스키머가 필요 없다.



<그림 2.2-21> 부상분리 타워

## ③ 부상스킴 수집조

부상스킴 수집조는 500(L)×700(W)×500(H) 크기로 부유물질, Chl-a 부상 스킴을 1단계, 2단계로 처리될 수 있게 설치되어 있다.



<그림 2.2-22> 부상스킴 수집조

(표 2.2-3) 기존 가압부상과 초고속 고액 분리부상 공정 비교

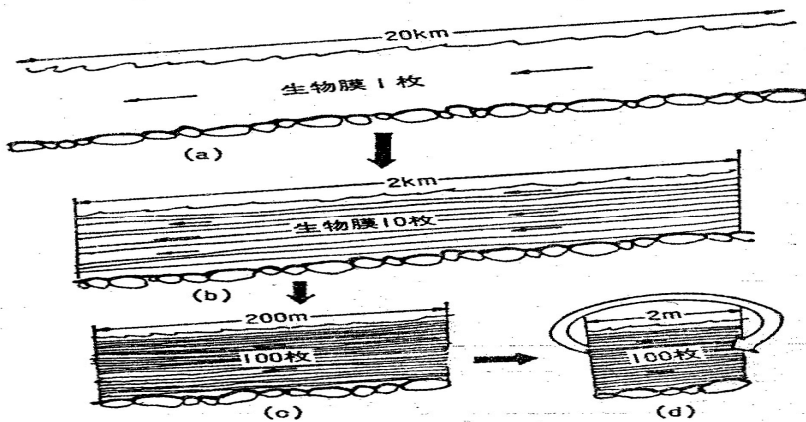
항목	초고속 ZT 제너레이터 부상분리	용존공기부상법 (DAF)	용존오존부상법 (DOF)
원리	극미세버블 연계 초고속 ZT 제너레이터 부상분리	미세버블 연계 부상분리	오존버블 연계 부상분리
운전방식	외압 일체형 부상	침지식 부상	침지식 부상
타입	타워 모듈식	탱크식	탱크식
제거 대상물질	부유물질 99% 조류 99% 용존유기탄소 60%	부유물질 60% 조류 60% 용존유기탄소 10%	부유물질 70% 조류 60% 용존유기탄소 20%
처리속도	30초 이내	15분	10분
처리능력	다항목 ↑	일반항목 ↑	일반항목 ↑
응집제	소량 (침전법 1/10)	보통	소량
에너지	낮음	높음	높음
고형물	99% 이상	90%	95%
유지비	낮음	높음	높음
설치면적	부상법 1/2 수준 침전법 1/3 수준	보통	보통
재분산 (2차오염)	없음 (고형물 매우 안정)	있음 (고형물 부분 불안정)	있음 (고형물 부분 불안정)
조류 재이용 (디젤)	가능	일부 가능 (탈수시 응집제 투입)	일부 가능 (탈수시 응집제 투입)

### 제3절 융복합 수처리기술의 이론적 배경

#### 1. 생태융합형 접촉산화시스템

##### 가. 기술 원리 및 장점

생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식)은 오염물질이 하천을 흐르면서 미생물에 의해 자연적으로 정화되는 원리를 이용한 기술로서, 미생물 양이 최대로 번식할 수 있도록 고농도 부착미생물의 생존에 적합한 환경조건을 인위적으로 조성해주는 생물반응기 형태를 말한다. 일반 하천에서 암모니아성 질소의 농도가 90% 이상 산화되기 위해서는 약 20km의 거리를 흘러가야만 한다면 하상에 형성된 미생물막의 양과 동일한 미생물을 보유한 미생물 접촉여재 10매를 설치한다면 유하거리 2km에 동일한 효과를 얻게 된다. 마찬가지로 100매의 미생물 접촉여재를 설치한다면 200m의 유하거리로 20km의 정화효과를 얻을 수 있다(김학용, 2000). 하천 자정작용 원리 및 미생물 접촉여재의 발상 개념도는 <그림 2.3-1>과 같다.

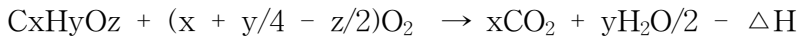


자료) 김학용(2000)

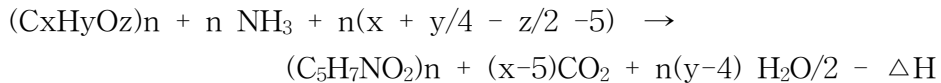
<그림 2.3-1> 하천 자정작용 원리 및 미생물 접촉여재의 발상

이 기술은 식생(달뿌리풀 등 수생식물)과 미생물접촉재(메디아)를 이용한 생물학적인 수처리 방법으로서, 메디아에 부착된 미생물에 의해 BOD, SS 제거 및 식물뿌리에 의한 T-N, T-P 등 영양염류 제거를 목적으로 하고 있다. 미생물 접촉여재를 이용한 오염물질 정화원리는 <그림 2.3-2>

와 같이 미생물의 산화분해이다. 이 과정에 관여하는 미생물로는 박테리아, 곰팡이, 원생동물, 후생고등동물이 있으며, 이러한 미생물 접촉공법의 정화 원리는 다음과 같은 세 가지 과정으로 요약할 수 있다(배준삼, 2005). 첫째, 미생물의 생물학적 산화작용에 의하여 유입되는 유기물이 최종 산물인 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 분해되는 과정이다. 이 분해 과정에서 큰 분자의 유기물이 저분자 물질로 변환되거나 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 변화될 때 생성되는 에너지는 미생물이 성장하고 활동하는데 필요한 에너지로 이용된다. 또한 새로운 세포를 합성하거나 새로운 미생물로 증식하는데 필요한 에너지로도 활용된다. 이 과정은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.



둘째, 하폐수 처리에 관여하는 미생물의 증식과 새로운 세포 합성과정은 하수내의 오염물질이 제거되는 과정이다. 이 과정에서 생성된 미생물 세포는 잉여슬러지로 침전, 농축되어 처리계 밖으로 배출되며, 슬러지 처리과정을 거쳐서 최종 처리된다. 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.



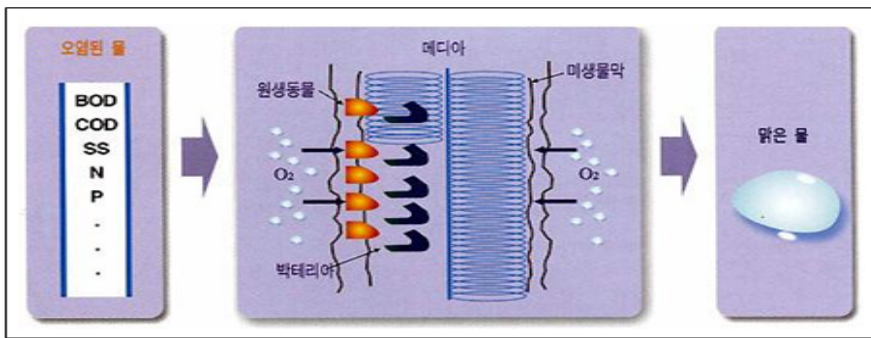
셋째, 유입수 중의 생물학적 분해 가능한 유기물의 농도가 낮아서 미생물의 성장활동이 장애를 받을 때 미생물 체내의 유기물을 분해하여 생존하는 자기산화 과정이다. 이 과정은 일반적인 활성슬러지 처리방법에서 BOD, COD 상승의 원인이 되기도 하지만 끈상 미생물 접촉재를 이용한 접촉산화법에서는 접촉재에 부착된 미생물들이 적절히 자체 산화되면서 자연적인 균형을 유지하게 된다. 이 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.



끈상 미생물 접촉공법의 원리는 위와 같으며, 공법의 특징은 넓은 표면적과 큰 공극률로 인해 다량의 미생물을 보유할 수 있다. 또한 접촉여재의 간격을 일정하게 유지할 수 있어 폐색에 의한 부패현상과 처리효율 저하를 방지할 수 있고, 시설규모에 비해 처리효율이 높다는 장점이 있다.

접촉여재 충전정화법은 미생물에 의한 유기물의 산화작용 이외에도 무

기성 SS 성분이 접촉여재에 충돌하여 하부로 침전되는 부수적인 정화기작을 가지고 있다. 끈상 접촉여재를 일정한 간격으로 조밀하게 설치하게 되면 접촉여재 사이를 통과하게 되는 하천수 내의 고형물은 접촉여재에 의해 단락의 방지 및 정류효과에 의해 접촉여재가 충전되지 않는 경우에 비해 효율적으로 중력 침강하게 된다. 또한 끈상 접촉여재의 관성력에 의해 직접 충돌하여 침강하기도 한다. 그리고 접촉여재 부분의 복잡한 유속 분포에 의해 고형물은 충돌 또는 응집 침강하게 되어 효율적인 고액분리가 이루어진다(김학용, 2000).



자료) 이상호(2000)

<그림 2.3-2> 미생물 미디어를 이용한 오염물질 제거 모식도

#### 나. 생물막 미생물 종류

미디어의 부착생물상의 특징은 활성슬러지와 비슷하지만, 미디어에 부착하는 미생물의 종류가 훨씬 많으며, 종류는 세균 및 균류, 조류, 원생동물, 미소후생동물 등이 있다. 세균류에서는 *Zoogloea ramigera*, *Sphaerotilus natans*, *Beggiatoa alba* 등은 다량으로 존재하며 현미경에 의해 확인할 수 있다. 균류는 활성슬러지와 다르게 생식하며 영양 및 생식장소에 대해서 세균과 경쟁관계에 있으며, 균류가 우세하면 생물막이 비대하고 여상의 폐쇄 및 악취가 발생하므로 생물막법에서는 세균이 우점하는 것이 좋다. 조류는 일광이 비치는 막 표면에 극히 한정된 공간에서 출현하므로 접촉산화시스템을 지하화 하는 경우에는 발견되지 않는다. 원생동물은 생물막에서 다량으로 출현하는 미생물로서, 활성슬러지보다 종류가 풍부하며, 섬모충류가 종류에 있어서는 50%이상, 개체수에 있어서는 60% 이상을 점유하고 있으며, 30분 침전시킨 생물막 슬러지 1ml당 섬모



충류가 100,000개체 정도 존재하는 것으로 보고되고 있다(中島, 1959; 동화기술, 1995; 김학용, 2000).

#### 다. 미생물막의 특성

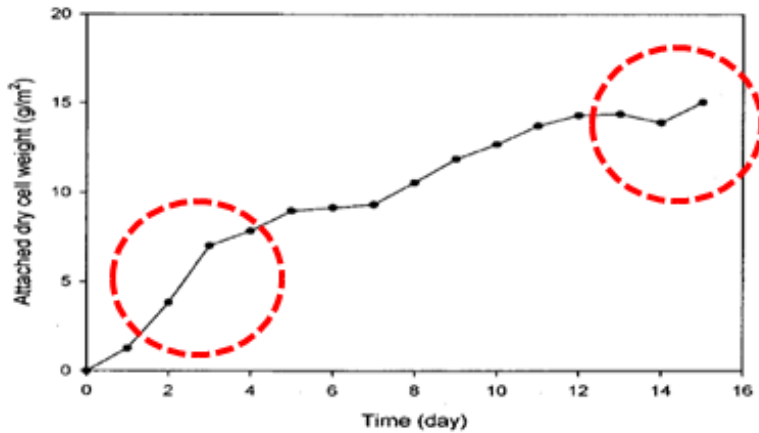
##### (1) 미생물학적 특성

미생물막의 미생물학적 특성을 정리하면 다음과 같다(동화기술, 1995). 첫째, 정화에 관여하는 미생물종의 다양성이 높다. 활성슬러지법에서는 비증식속도가 낮은 생물(비증식속도 0.3~0.5/d 이하)은 유출되어 슬러지 중에 서식하는 일이 없지만, 생물막법에서는 폐수의 처리시간에 무관하게 비증식속도가 매우 작은 생물도 존재할 가능성이 있기 때문에 활성슬러지법에 비교하여 생물종 다양성이 증가하고, 먹이사슬이 복잡하게 되어 안정한 생태계를 형성하므로 환경조건의 변동이나 쇼크로드(shock load)에 대응할 수 있다. 둘째, 생물막의 각 단계에 있어서 우점종이 다르다는 것이다. 생물막법을 다단계로 하는 경우, 정화의 정도에 대한 각 단계에서 우점종으로 출현하는 미생물의 종류는 각기 다르기 때문에 각 단계의 수질에 가장 우점종인 생물막이 형성되게 되므로 매우 합리적인 처리법이라 할 수 있다. 셋째, 먹이사슬이 길다. 생물막에서는 활성슬러지법과 비교하여 동물성 성분이 점유하는 비율이 높고 미소후생동물의 현존량이 현저하게 크므로 생물막에서는 세균을 포식하는 생물보다도 더욱 고차원의 영양수준 생물이 생식할 수 있는 점에서 활성슬러지 보다도 먹이사슬이 길다. 고차원의 영양수준 생물이 많아지면 에너지로서 소실되는 비율이 커지므로 슬러지의 발생량은 적어지게 된다. 넷째, 질화세균 및 탈질세균이 잘 증식한다. 암모니아 산화세균 및 아질산 산화세균의 비증식속도는 상당히 작아서 유통류 정도이므로 통상의 활성슬러지법에서는 씻겨나가기 쉽다. 생물막법에서는 폐수의 체류시간에 관계없이 미생물이 증식할 수 있으므로 질화세균과 같은 비증식속도가 작은 세균도 안정되게 증식할 수 있다. 특히 유기물농도가 낮은 폐수에서 생성된 질화세균이 우점종으로 증식한다(동화기술, 1995).

##### (2) 미생물의 부착능력

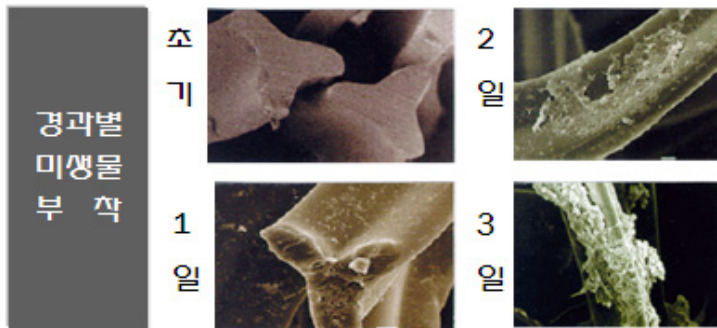
김관수 등(2006)의 “나선형 끈상 미디어의 시간에 따른 바실러스 미생물 부착량 변화에 관한 연구”에 의하면 Nutrient Broth를 CODcr 300mg/L

로 제조하여 실시한 실험에서 끈상 나선형 미디어의 바실러스 부착량은 <그림 2.3-3>과 같이 나타났다. 반응 개시 후 2일에서 3일 사이에 가장 빠른 속도로 부착되었고, 15일에 가장 많은 양의 미생물이 부착되었다. <그림 2.3-4>는 경과시간별로 미생물 부착되는 모습을 나타낸 것이다.



자료) 김관수 등(2006)

<그림 2.3-3> 시간에 따른 미생물 부착량의 변화



<그림 2.3-4> 경과시간별 미생물 부착 모습

### (3) 수처리 특성

생물막에 의한 수처리의 일반적 특성은 다음과 같은 것들이 있다. 수질, 수량의 변동에 강하다, 저온에서의 제거효율이 높다, 고액분리가 잘 된다, 저 농도의 하폐수를 처리할 수 있다, 부산물로 발생하는 슬러지 발생량이 적다라는 특성을 가지고 있다(고광백, 1997).

라. 생물막의 기질 제거 메카니즘

생물막과 기질을 호기성 상태에서 접촉시킬 때 일어나는 반응현상을 정리하면 다음과 같다(정용, 1984; Rittmann. B.E. *et al*, 1984; 김학용 2000).

(1) 물질의 이동과 대사반응

생물막 표면과 용액사이에는 정체상태의 얇은 수막이 있고, 용액으로부터 이 수막표면으로의 기질 Flux와 농도 차이를 관련시키기 위하여 비례상수로서 물질전달계수를 도입한다. 물질전달계수는 생물막 표면에서의 수리학적 특성 그리고 용액과 기질의 물리, 화학적 성질에 의해 결정된다. 액체와 접하고 있는 생물막 내외의 기질농도 측단면도를 나타낸 것이 <그림 2.3-5>이다. 생물막 표면으로 전달된 기질은 깊이에 따라 농도경사에 의해 생물막내부로 확산되어 분해되는데, 이때 기질농도는 S로부터 S<sub>s</sub>로 감소된다. Williamson과 McCarty에 의하면 수막은 효과적 교반으로 제거될 수 있는 층과 그렇지 않은 고정층이 있는데, 고정층은 해면구조와 같은 생물막표면과 접하고 있다고 한다. 그의 실험에서 계산된 고정층 수막의 두께는 56μm이다. 그러나 일반적으로 수막은 하나의 층으로 간주되며, 그것을 통과하는 질량이동은 다음과 같은 Fick의 제1법칙에 의하여 표현된다.

$$\frac{\delta M}{\delta t} = Nf = -DA \frac{\delta S}{\delta Z} = \frac{S - S_s}{Lt}$$

M = 기질의 질량, M

t = 경과시간, T

Nf = Z방향의 기질 Flux, MT<sup>-1</sup>

D = 분자확산계수, L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>

A = 생물막의 표면적, L<sup>2</sup>

S = 용액의 기질농도, ML<sup>-3</sup>

S<sub>s</sub> = 생물막표면의 기질농도, ML<sup>-3</sup>

Lt = 수막두께, L

위의 분자확산계수 D와 수막깊이 Lt을 질량이동 속도계수 Kt와 관련시키면,

$$Kt = D/Lt$$

$$Kt = \text{질량이동속도계수, } LT^{-1}$$

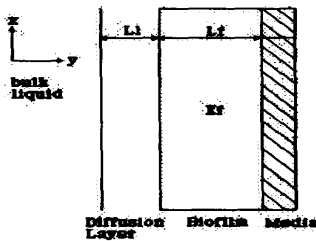
따라서 질량의 표면이동속도  $N_s$ 는,

$$N_s = N_f/A = -K(S-S_s)$$

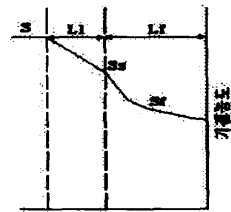
$$N_s = \text{생물막표면으로의 기질 Flux, } ML^{-2}T^{-1}$$

수막을 통과한 질량은 생물막 표면으로부터 내부로 확산해 들어감에 따라 저항으로 인하여 <그림 2.3-5>의  $S_f$  곡선과 같은 하향농도경사를 나타낸다. 기질의 농도가 영이 될 때까지 확산해 들어갈 수 있는 생물막 두께 또는 기질제거기능을 발휘할 수 있는 막두께의 한계인 유효두께를  $L_c$ 라고 할 때, 생물막 두께는 다음과 같이 세 유형으로 구분된다.

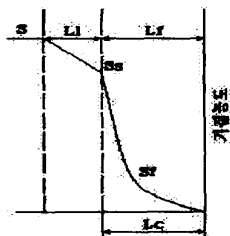
- 1) 얇은 막 :  $L_f < L_c$
- 2) 두꺼운 막 :  $L_f = L_c$
- 3) 너무 두꺼운 막 :  $L_f > L_c$



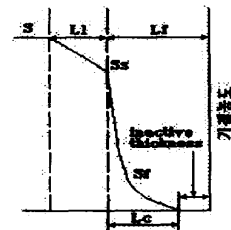
(1) 생물막의 개념



(2) 얇은 막 :  $L_f < L_c$



(3) 두꺼운 막 :  $L_f = L_c$



(4) 너무 두꺼운 막 :  $L_f > L_c$

<그림 2.3-5> 생물막내의 기질농도 측단면곡선을 나타내는 모형

생물막속에서의 물질대사에 의한 기질제거 속도는 Monod식에 따르며, 그 반응식은 다음과 같다.

$$\left[ \frac{\partial Sf}{\partial t} \right]_{\text{reac}} = - \frac{K_{\text{max}} \cdot X_f Sf}{K_s + Sf}$$

$S_f$  = 생물막내의 기질농도,  $ML^{-3}$

$K_{\text{max}}$  = 기질제거속도 최대치,  $T^{-1}$

$X_f$  = 생물막내의 세포농도,  $ML^{-3}$

$K_s$  = 기질의 반포화농도,  $ML^{-3}$

reac = 반응

한편, 생물막속에서 확산에 의한 기질의 이동속도는 Fick의 제 2법칙에 따른다. 즉,

$$\left[ \frac{\partial Sf}{\partial t} \right]_{\text{diff}} = - D_f \frac{d^2 Sf}{d Z^2}$$

$D_f$  = 생물막속에서의 기질의 분자확산계수,  $L^2 T^{-1}$

$Z$  = 기질침투방향의 길이,  $L$

diff = 확산

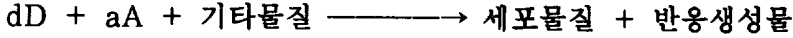
정상적인 기질농도 측단면곡선 ( $\partial Sf / \partial t = 0$ )을 가정하고, Monod식과 Fick의 제 2법칙을 합하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D_f \frac{d^2 Sf}{d Z^2} = - \frac{k_{\text{max}} \cdot X_f Sf}{K_s + Sf}$$

Williamson과 McCarty가 몇 가지의 가정 하에 근사치방법으로 해석한 결과는 다음과 같다.

$S_s$ 와 $K$ 와의 비교	미분방정식	생물막표면의 플럭스	생물막내의 기질농도
$S_s \approx K_s$	$\frac{d^2 Sf}{d Z^2} = - \frac{k_{\text{max}} \cdot X_f Sf}{D_f (K_s + Sf)}$	분명한 답이 없음	분명한 답이 없음
$S_s \gg K_s$	$\frac{d^2 Sf}{d Z^2} = - \frac{k_{\text{max}} \cdot X_f}{D_f}$	$N_s = A_f K_{\text{max}} X_f L_f$	$S_f = S_s - \frac{k_{\text{max}} X_f}{D_f} (L_c Z - Z^2/2)$
$S_s \ll K_s$	$\frac{d^2 Sf}{d Z^2} = - \frac{k_{\text{max}} \cdot X_f Sf}{D_f \cdot K_s}$	$N_s = A_f S_s \left[ \frac{D_f \cdot k_{\text{max}} \cdot X_f}{K_s} \right]^{1/2}$	$S_f = S_s \frac{\cosh \left[ \frac{(k_{\text{max}} X_f / D_f K_s)^{1/2} (L_c - Z)}{\cosh \left[ \frac{(k_{\text{max}} X_f / D_f K_s)^{1/2} L_c \right]} \right]}{\cosh \left[ \frac{(k_{\text{max}} X_f / D_f K_s)^{1/2} L_c \right]}$

호기성 상태에서 기질의 제거는 세균에 의한 전자공여체(유기물질, D)의 산화와 전자 수용체(산소, A)의 환원에 의한다. 즉,



위 반응은 물질(D와 A)의 대사속도와 확산속도의 영향을 받는다. 그런데 한 물질의 확산부족은 세균의 대사속도 또는 생물막의 고유반응속도를 제한하게 된다. 역으로 내부의 낮은 대사속도는 외부로부터의 확산속도를 제한하게 된다.

Williamson과 McCarty에 따르면 다음의 식이 부등식이 성립될 경우에는 산소의 확산이동이 제한조건이 되며, 그렇지 않을 경우에는 유기물질의 확산이동이 제한조건이 된다.

$$S_a < \frac{aDf, D(MW)_A}{dDf, A(MW)_D} \cdot S_D$$

$S_a$  = 전자수용체의 용액농도,  $ML^{-3}$

$Df$  = 생물막속에서의 기질의 분자확산계수,  $L^2T^{-1}$

$S_D$  = 전자공여체의 용액농도,  $ML^{-3}$

$a$  = 전자수용체의 화학양론적 몰수

$d$  = 전자공여체의 화학양론적 몰수

$A, D$  = 전자수용체와 전자공여체

$MW$  = 분자량,  $M$

또한, 다음의 식이 부등식이 성립될 경우에는 산소의 대사반응이 제한조건이 되며, 그렇지 않을 경우 유기물질의 대사반응이 제한조건이 된다.

$$S_a < \frac{K_{s, A}}{K_{s, D}} \cdot S_D$$

$K_{s, A}, K_{s, D}$  = A와 D의 반포화농도,  $ML^{-3}$

### 마. 접촉여재의 조건 및 종류

#### (1) 접촉여재의 조건

접촉산화공법에 의한 오염물질 제거효율은 접촉여재의 성능에 의해 크게 좌우되며, 본 시설에 적합한 접촉여재의 조건은 다음과 같은 것들이 있다. 생물막의 부착성이 좋아야 한다. 비표면적이 커야 한다. 공극률이 커야 한다. 통수저항이 적어야 한다. 화학적, 생물학적으로 안정하여 변성이 없고, 기계적 강도도 충분하여 좌굴, 파괴, 마모를 받지 않고 장기간 사용할 수 있어야 한다. 부유물의 흡착성이 높아야 한다. 유해물이 용출되지 않아야 한다. 물과 비중차이가 적어 수중 구조물과 조하부에 큰 하중이 생기지 않아야 한다. 입경과 간극이 균일하고 조 내에 균일한 유속이 생기기 쉬워야 한다. 값이 싸고 공급이 가능해야 한다. 수송과 시공이 용이 해야 한다(건설기술연구원, 1991; 배준삼, 2005).

#### (2) 접촉여재 재질 조건

미생물 접촉재의 재질은 다음과 같은 조건에 부합하여야 한다. 첫째, 부착되는 미생물은 재질 조건에 영향을 받으므로 미생물이 부착되기 쉬운 재질이여야 한다. 둘째, 미생물의 양은 재질의 표면에 비례하므로 표면적이 넓어야 한다. 셋째, 폐색현상에 의한 미생물 탈리가 없어야 하므로 최대한의 공극률을 유지해야 한다. 넷째, 접촉재는 액체, 기체의 흐름을 방해하지 말아야 한다. 다섯째, 유동상의 경우 부서지는 현상과 배관을 막는 현상이 없어야 하고, 고정상일 경우, 처짐 현상이나 끊어지는 현상이 없어야 한다(배준삼, 2005)

#### (3) 접촉여재 종류별 특성

일반적인 수처리에 주로 사용되는 접촉 인공여재는 섬유상끈상, 플라스틱, 매트, 페타이어, 콘크리트 등이 있으며, 접촉여재의 형태에 따른 특성 비교를 한 결과는 (표 2.3-1)과 같다. 섬유형 끈상은 생물막 부착성과 부유물 포집성이 우수하고 비표면적이 크고, 입경과 간극이 균일한 여재로 본 연구에서 개발된 접촉산화시스템에 이용되는 미생물 여재이다. 매트는 생물막 부착성과 부유물 포집성이 우수하고 비표면적이 큰 장점이 있으나 공극률이 작은 단점이 있다. 관상 플라스틱과 원형 플라스틱은 생물막 부착성과 부유물 포집성이 불량하고, 특히 원형 플라스틱은 비표면적과 통

수저항이 작고, 입경과 간극도 불균일한 단점을 가지고 있다(일본하수도 협회, 1990). (표 2.3-2)는 나선형 섬유상 접촉여재와 일반 여재와의 특성을 비교한 내용이다. 나선형 섬유상 여재의 가장 큰 장점은 비표면적이 큰 나일론 여재(1.4m<sup>2</sup>/m)는 공극 폐색이 없으므로 여재 교체가 불필요하고, 별도의 역세척 및 슬러지 탈리 시설이 필요하지 않다. 이러한 이유로 국내에서도 섬유형 끈상을 이용한 미생물 매디아가 접촉산화공법에 주로 사용되었고, 본 연구에서도 이용되었다.

(표 2.3-1) 접촉여재 형태에 따른 특성 비교

구분	섬유형 끈상	메트	관상 플라스틱	원형 플라스틱
생물막 부착성	양호	양호	불량	불량
비표면적	대	대	중	소
공극률	중	소	대	대
통수저항	중	대	대	소
부유물 포집성	대	대	중	소
입경과 간극	균일	균일	균일	불균일

자료) (사)일본하수도협회(1990), 배준삼(2005)

(표 2.3-2) 나선형 섬유상 접촉여재 특징

접촉재	특성
로프형 섬유상 접촉여재	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 비표면적이 큰 나일론 여재(1.4m<sup>2</sup>/m)는 공극 폐색이 없어 여재 교체가 필요하지 않음</li> <li>▪ 별도의 역세척 또는 슬러지 탈리 시설이 필요하지 않음</li> <li>▪ 나일론사 미생물 부착능이 타 소재에 비해 월등함</li> <li>▪ 표면적 최대, 처리수질 우수, 충격부하 강함</li> <li>▪ 초기 미생물 부착능 우수, 정상화에 걸리는 시간 짧음</li> <li>▪ 공극률 최대화하여 혐기성화 방지, 미생물 탈리 방지</li> <li>▪ 사용연한 반영구적(햇빛 차단 전제)</li> </ul>
일반여재	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 시간 경과에 따라 무기성 SS에 의한 공극폐색이 진행되어 악취발생, 통수량, 처리용량 저하</li> <li>▪ 홍수시 토사 유입으로 인한 공극폐색 가능성 높음</li> <li>▪ 폐색공극 해소를 위한 역세시설 필요</li> <li>▪ 주기적인 여재 교체 필요(역세에 의한 폐색 해소율 관건)</li> <li>▪ 자갈, 쇄석, 목탄, 대나무, 플라스틱 등</li> </ul>

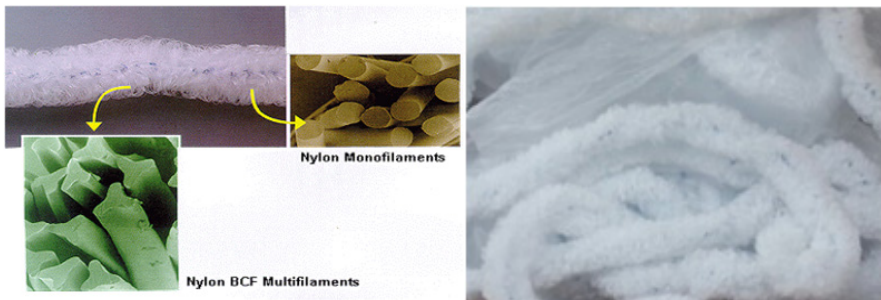


미생물 접착여재에 사용된 재질에 따른 특성은 (표 2.3-3)과 같다. 끈상 접착여재의 재질(polypropylene, Polyethylene, Nylon, Polyurethane, Polyvinylolene chloride)에 따라 물리적 특성(인장강도, 신율, 신장탄성율, 비중)과 화학적 특성(열에 의한 연화점, 내후성, 산과 알칼리에 대한 강도, 일반 용제에 대한 영향), 미생물 부착성 등에 대한 비교에서 나일론이 가장 우수한 재질로 조사되었다. 본 연구에서도 미생물막 형성부분인 고리에는 900데니아 42합사 BCF나일론 다섬사와 600데니아 4합사 나일론 모노사를 사용하였고, 접착재가 끊어지지 않도록 지지하는 역할을 하는 내심에는 4mm 폴리프로필렌 로프사를 이용하였다.

(표 2.3-3) 접착여재 재질에 따른 특성 비교

구 분		PP	PE	Nylon	Polyurethane	PVDC
물리적 특성	인장강도(g/D)	4.5~7.4	5.0~9.0	6.4~10.0	0.6~1.2	1.5~2.6
	신율(%)	25~60	8~35	16~25	450~800	18~33
	신장탄성율(%)	90~100	85~97	98~100	95~99	98~100
	비중	0.91	0.94	1.14	1.0~1.3	1.70
화학적 특성	열에 의한 연화점	140~160°C	100~110°C	170°C	-	145~165°C
	내후성	강도저하 없음	강도저하 없음	강도 약간 저하	강도 약간 저하	강도 저하 없음
	산의 영향	강도저하 없음	강도저하 없음	강도저하 없음	강도저하 없음	강도저하 없음
	알칼리 영향	강도저하 없음	강도저하 없음	강도저하 없음	강도저하 없음	강도저하 없음
	일반용제	불용해	불용해	불용해	불용해	가장 안정적
미생물 부착성		하	하	상	상	중

자료) 중소기업청(2005)



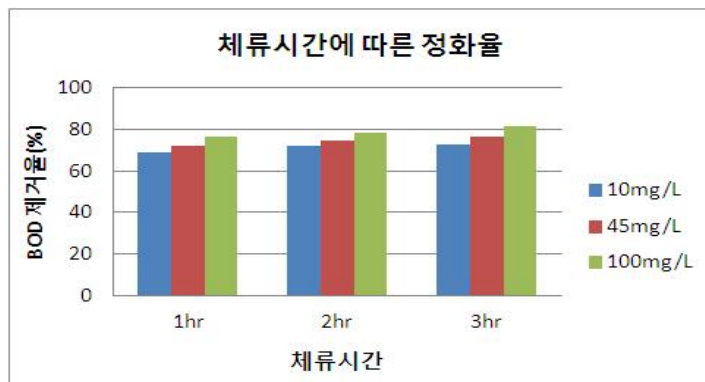
<그림 2.3-6> 나선형 섬유상 접착여재

바. 접촉산화조 설계인자에 따른 정화효율

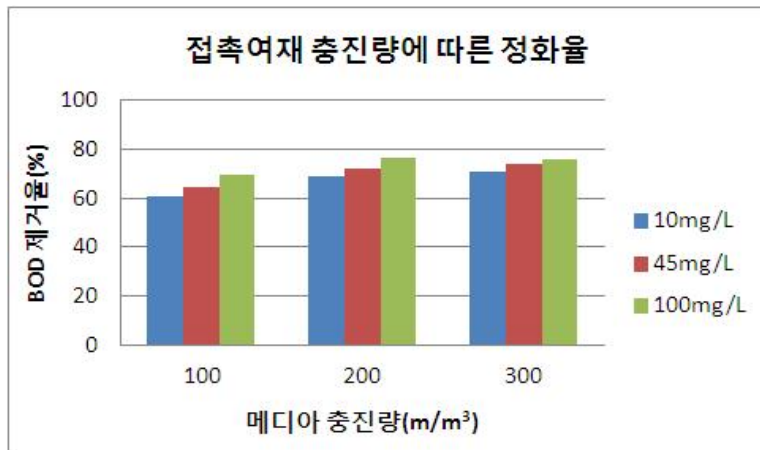
김학용(2000)에 의한 모형실내실험에 의한 접촉산화조의 수질정화효율을 살펴보면 그 결과는 <그림 2.3-7>~<그림 2.3-9>과 같다. 실험을 위해 유입수는 안양천 하천수를 이용하였고, 처리조의 처리용량은 4L, 유입수 BOD 농도는 10mg/L, 45mg/L, 100mg/L의 조건으로 나누어 운전하였다.

체류시간에 따른 수질 정화율에서는 BOD 농도 10mg/L, 45mg/L, 100mg/L 3개의 조건 모두 체류시간 1시간, 2시간, 3시간 운전에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 접촉여재 충전량에 따른 정화효율은 충전량 200m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>과 300m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>에서 거의 차이가 없었으며, DO 농도에 따라서는 DO 4.0mg/L 이상에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과를 바탕으로 적정 운전조건으로는 DO 4mg/L이상, 여재충진량 200m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 체류시간 1시간 이상으로 운전했을 때 가장 효율적인 조건으로 판단된다.

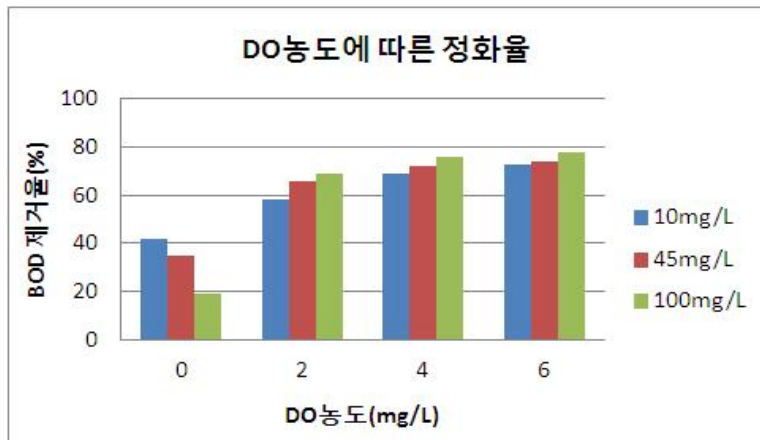
<그림 2.3-10>은 유입수 BOD 농도에 따른 부착미생물량과 잉여슬러지 발생량에 대해서 실험한 결과이다. 실험실에서 체류시간 1시간, 접촉여재 충전량 200m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 용존산소 4mg/L이상인 조건을 만들어 유입수 BOD 농도에 따른 부착미생물량의 변화를 측정하고, 유입수 BOD 농도가 증가할수록 부착미생물량도 수직적으로 증가하였다. 잉여슬러지량은 모형실험시설을 1개월간 가동한 후 끈상 접촉여재를 걷어내고 조 내에 남아있던 슬러지 양을 측정하였으며, 그 결과 유입 BOD 농도가 10mg/L일 때보다 100mg/L일 때 12배 정도 더 많이 나타났다. 유입수 BOD 농도가 낮고, DO 농도가 4mg/L이상을 일정하게 유지할 때 잉여슬러지의 발생이 거의 없는 것으로 나타났다.



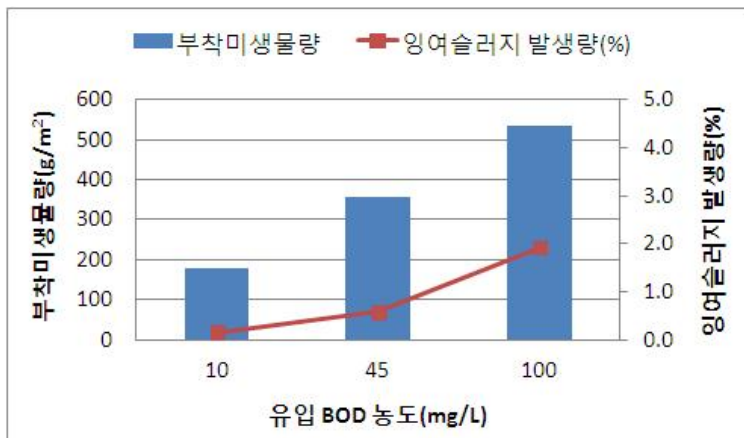
<그림 2.3-7> 접촉산화조의 체류시간에 따른 정화효율



<그림 2.3-8> 접촉산화조의 접촉여재 충전량에 따른 정화효율



<그림 2.3-9> 접촉산화조의 DO 농도에 따른 정화효율



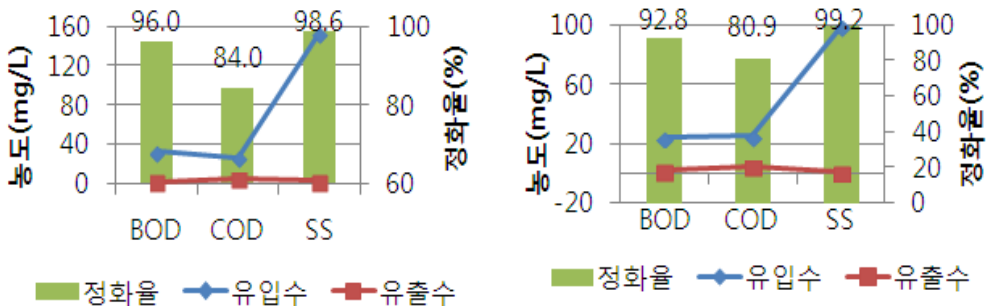
<그림 2.3-10> BOD 농도에 따른 부착미생물량 및 잉여슬러지 발생량

사. 국내 적용사례

국내에서 접촉산화공법의 일종인 나선형 침유상 접촉산화공법을 적용한 사례는 경안천(2000년), 산본천(2001년), 안양천(2003년, 2005년), 남양천(2010년) 등 2000년대 들어 추진된 오염하천정화사업에 많이 적용되었다. 2000년도에 경안천 수질오염정화사업으로 설치된 시설의 수질정화효율을 보면 <그림 2.3-11>과 같이 BOD 91.7%, SS 79.2%로 유기물과 무기성 SS에 대한 처리효율이 매우 높은 것으로 나타났다. 남양천 적용시에도 BOD 92.8~96%, COD 80.9~84%, SS 98.6~99.2%로 유기물과 SS에서 매우 높은 정화율을 보이고 있다. 반면에 TN의 처리율은 23.3~63%, TP의 처리율은 55.6%로 유기물과 SS에 비해 낮은 정화효율로 나타났다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 상부에 식생을 도입하여 TN, TP의 처리효율을 최대 80%까지 높이고자 하였다.



<그림 2.3-11> 끈상 접촉산화공법 수질정화율(경안천, 안양천)



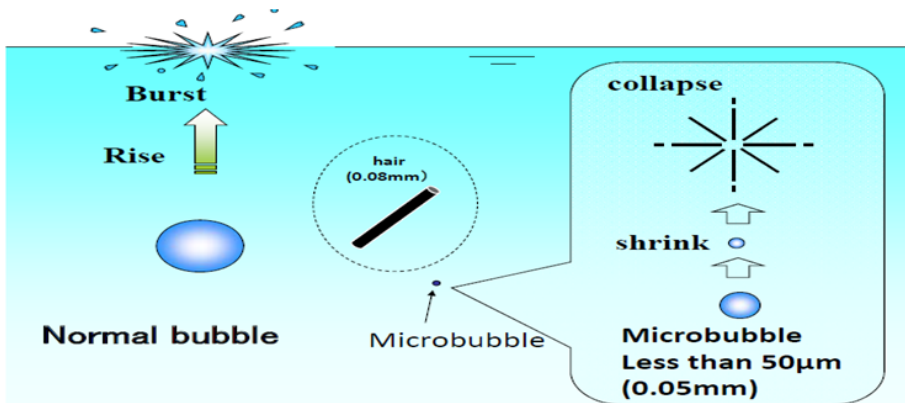
<그림 2.3-12> 끈상 접촉산화공법 수질정화율(남양천)

## 2. 마이크로버블 포기 시스템

### 가. 마이크로 버블의 정의

마이크로 버블은 통상적으로 기포 직경이  $50\mu\text{m}$  이하의 기포를 지칭하며, 인간의 머리카락 굵기의 1/2 정도의 직경이다. 이러한 미세기포에 대한 연구는 1900년대에 일본을 중심으로 발생기술에 대한 연구가 진행되었으며, 2000년대에 들어 다양한 분야에 적용하는 연구가 진행되고 있다(홍원석 등, 2000)

일본에서는 기포의 직경에 따라 마이크로 버블, 마이크로 나노버블, 나노버블로 분류하고 있다. 기포의 직경이  $10\sim 200\mu\text{m}$ 로서, 특히  $50\mu\text{m}$  이하의 미세한 기포를 마이크로 버블로 분류하고, 기포의 직경이  $0.5\sim 10\mu\text{m}$ 의 기포는 마이크로 나노버블,  $0.5\mu\text{m}$  이하의 미세한 기포는 나노버블로 분류하고 있다(차환수, 2013). <그림 2.3-13>은 마이크로 버블과 일반 버블의 차이에 대한 개요를 나타낸 그림이다. 일반 기포는 수중에서 급속으로 상승하지만 마이크로 버블은 부력이 적어 1분에 약 3mm 정도 상승하여 장기간 수중에 체류하고, 점차 축소되어 소멸될 때 완전 용해가 된다.



<그림 2.3-13> 마이크로 버블과 일반 버블의 차이 개요도

### 나. 마이크로 버블 특성 및 효과

마이크로버블은 통상의 기포에 없는 성질을 지니고 있는데, 마이크로 버블은 부력이 작아서 천천히 물속을 떠도는 것처럼 떠오른다. 이것은 거품이 작으면 작을수록 부력에 대한 저항 효과가 커지기 때문에 일어나는

현상으로서 거품이 천천히 떠오른다는 것은 그 만큼 오래 물속에 머물러 있다는 뜻이다. 물속에 머물러 있는 동안 마이크로버블 속의 기체는 주위의 물에 점점 녹아 들어가게 되는데 기포가 작을수록 기포 속 공기의 부피에 대한 표면적의 비율이 커진다. 이와 같이 같은 양의 기체를 물에 녹이려면 기포 하나하나의 부피가 작고 표면적의 합계가 큰 마이크로버블의 효율이 좋은 셈이다. 이와 같이 마이크로버블은 직경이 50 μm 이하의 매우 미세한 기포로서, 수중에서 부유하는 과정에서 나노 사이즈까지 자연적으로 수축해 최종적으로는 내부의 기체를 완전 용해시켜 소멸하는 특징을 가지고 있다(차환수, 2013)

(표 2.3-4) 마이크로 버블의 특성과 효과

특 성	효 과	응용분야
크기가 작다.	- 기체용해 속도가 빠름	-오존, 산소, 질소 등의 가스 용해
단위면적당 표면적이 크다.	- 기체용해 효율이 높음 - 완전히 용해	
부력이 작아 장시간 액체 속에 머물 수 있다(1분에 3mm상승).	- 물속 장시간 체류	
대전(帶電) 효과가 있다.	- 정전기적으로 물체를 끌어 당김	- 가압부상분리작용 - 흡착작용
자기가압(自己加壓) 효과가 있다.	- 기포의 내부압력에 의해 에너지 발생 - 프리-라디칼이 생성	- 살균 세정효과 - 산화작용(화학물질 분해능력 우수) - 수질개선 및 정화기술

자료) 차환수(2013)

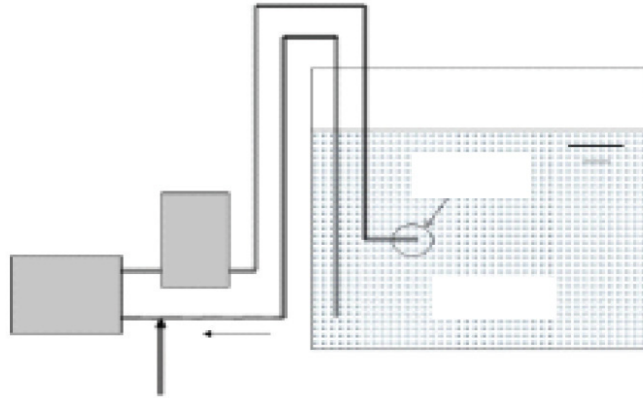
#### 다. 마이크로버블 발생 원리 및 방식

##### (1) 가압용해방식

산소 등 기체가 수중에 용해하는 경우 베르누이법칙  $PV=P'V'$ 에 따라 압력에 비례하여 기체의 용해량도 증가한다. 가압용해방식은 이런 특성을 이용한 것으로 고압으로 충분한 양의 기체를 수중에 용해시킨 후 감압하여 용해한 기체의 과포화 조건을 만든다. 과잉 용해한 기체는 불안정한 상태가 되고 과포화 기체 분자는 물로부터 탈기하려는 경향이 있으며, 그 결과 마이크로버블 형태의 미세기포가 발생하는 원리를 이용한 방식이다.

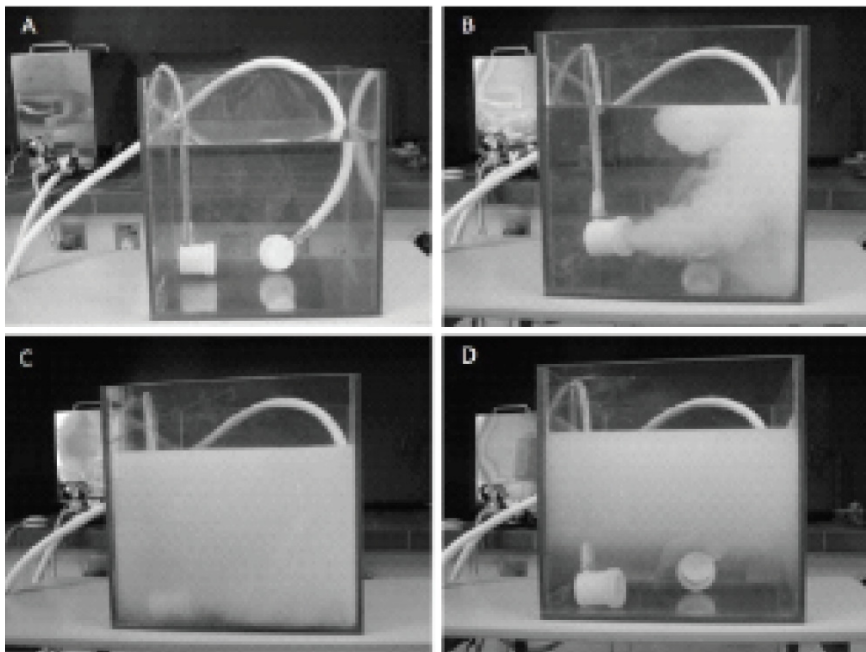
가압용해방식은 일본 회사에서 개발된 기술로, 마이크로 버블 발생량은 약 1분에 10L 정도(1.5kW 동력사용 적용)에 해당하고, 고밀도 마이크로 버

블 발생이 가능하다는 장점과 동력 소모가 크다는 단점을 가지고 있다. <그림 2.3-14>는 가압용해식 마이크로버블 발생장치 구성도를 나타낸 것이고, <그림 2.3-15>은 아크릴 수조관에서 가압용해식 방법으로 마이크로버블이 발생하는 모습을 촬영한 사진이다(김종범, 2013).



자료) 김종범(2013)

<그림 2.3-14> 가압용해식 발생장치 구성

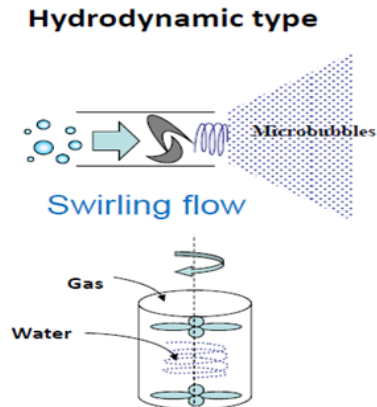


자료) 김종범(2013)

<그림 2.3-15> 가압용해방식 마이크로버블 발생 모습

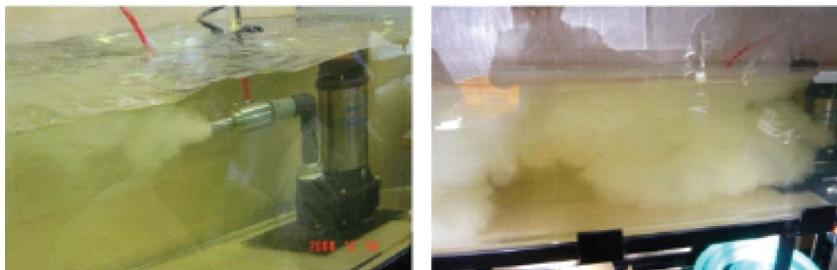
(2) 기액 2상류 선회형 마이크로버블 발생 방식

기액 2상류 선회형 마이크로버블 발생 방식은 액체에 소용돌이를 발생시켜 기압 차이로 기체를 흡입하며 소용돌이가 붕괴될 때 방출된 기포가 미세화하는 방식이다. 기액 2상류 선회형 마이크로버블 발생 방식은 크게 2가지 방식이 있는데, 한 가지는 선회형 마이크로버블 중 배관의 출구에 날개를 장착하여 선회류를 발생시키는 방식의 개념도로 액체는 기포를 포함하고 와류가 붕괴될 때 마이크로버블이 발생하는 방식이고, 또 하나의 방식은 샤프트에 프로펠러를 장착하여 유체를 관내에서 회전시켜 와류를 발생시키는 방법이다. 기액 2상류 선회형 마이크로버블 발생 방식은 일본 (유)바이클린 회사에서 개발한 기술로서, 장점으로서는 1분에 100L 정도의 대량의 마이크로 버블이 발생되며, 펌프에 이물질 막힘 현상이 없고, 동력 소모가 적다는 특징이 있으며, 대용량의 수처리에 적용할 수 있다.



\* 자료) Masayoshi Takahashi, AIST(Japan)

<그림 2.3-16> 기액 2상류 선회형 방식 개념도



<그림 2.3-17> 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생상태



## (3) 가압선회방식

가압선회방식은 기액 2상류 선회형 마이크로버블 발생 방식에 가압방식을 추가한 방식으로 한국에서 개발된 기술이다. 기액 2상류 선회형 마이크로버블 발생 방식은 대량의 마이크로 버블을 발생시키는 장점이 있으나 가압용해식 방식과 같이 공기 포화도 이상으로 용존산소량(DO)을 높이는 데 한계가 있다. 이를 보완, 개선하기 위하여 2상류 선회형 마이크로버블 발생 장치와 고밀도로 용존산소량을 높일 수 있는 가압방식을 병행 처리하는 방법이다. (표 2.3-5)는 마이크로버블 발생방식에 따른 분류 및 방식별 특징을 정리한 내용이다.

(표 2.3-5) 마이크로버블 발생 방식 분류 및 특징

항 목	가압용해식	2상류 선회방식	가압 선회방식	비 고
제작사	일본 스킵키트	일본 (유)바이클린	한국 오투엔	
마이크로버블 생성방식	가압식	선회식 (기체 전단 포함)	가압 선회식 (기체 전단 포함)	
적용펌프	고압펌프 혹은 다단펌프	일반펌프 (수중펌프, 순환펌프)	일반펌프 (수중펌프, 순환펌프)	펌프의 압력이 높으면 유량이 적어짐
마이크로버블 발생량	10리터/분	100리터/분	100리터/분	동력 1.5kw를 적용 기준
특 징	고밀도 마이크로버블 발생, 동력소모가 큼	마이크로버블 발생량이 많음. 이물질 막힘 없음. 동력소모가 적음	가압용해방식과 2상류 선회방식 장점 포함	
적용분야	유량이 적고 고농도 마이크로버블 발생이 필요한 경우(연구소, 욕조 및 세척 세정 장치)	대용량 수처리(담, 저수지, 해양, 양식장 등)와 이물질이 많은 환경에서 적용	좌측 두 개 방식의 적용 분야 활용 가능	

자료) 김중범(2013)

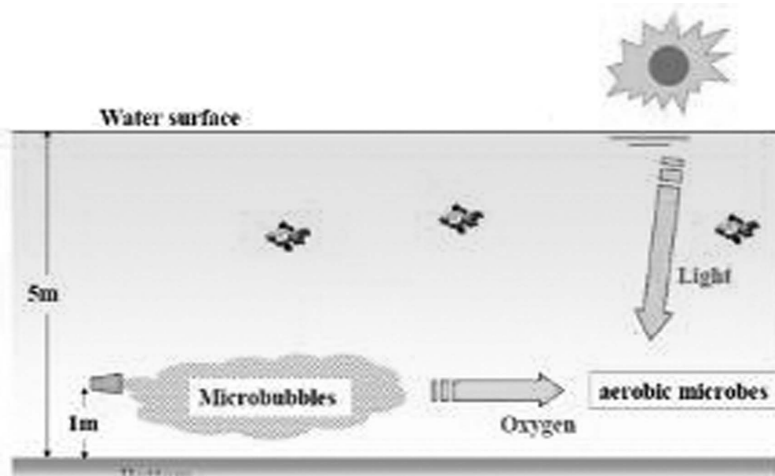
## 라. 마이크로버블 기술개발 및 적용사례

마이크로 버블 적용기술은 소형 발생기술은 샤워기, 세척기 등에 사용되고, 대형 발생기술은 주로 대형 댐, 저수지 등 정체성 수역인 호소의 수질개선을 위해 적용되고 있다.

마이크로버블의 국내외 기술개발 현황을 살펴보면 국외의 경우 일본에서 이루어졌으며, 주로 대학교와 민간 기업체 중심으로 중·소형급 미세기포 발생기술에 대한 연구 및 제품개발 중심으로 진행되었다. 2005년 통

계자료에 의하면 21개 대학에서 관련 연구를 수행하고 있으며, '93~'99년까지 80건, 2000~2005년까지 134건의 관련 특허가 일본에서 출원되어 있는 상태이다. 국내의 경우, 환경부, 중소기업청 지원으로 일부 대학 및 업체에서 중소형의 기포발생장치 모듈 및 장치를 개발하였으며, 부유물질처리를 위한 부상처리공정과 연계하여 주로 이용하고 있다(표 2.3-6).

마이크로 버블 기술은 하천이나 호소에 충분한 산소를 공급하여 넓은 하저, 호저 수역에도 산소 공급이 가능해져 바닥층을 호기성 분해수역으로 개선시켜 생태계를 복원시킬 수 있는 자연친화적 정화기술이다. 이러한 미세기포를 하천이나 호소 수역에 적용하는 기술은 크게 이동형과 고정형으로 분류되며, 수질개선 모식도는 <그림 2.3-18>과 같다(홍원석 등, 2010). 대규모 하천이나 호소를 대상으로 마이크로버블에 의한 용존산소 공급에 관한 국내 적용사례는 매우 미미하며, 규모가 아주 작은 연못이나 양식장 등에서는 적용 사례가 다수 있다. 대규모 하천이나 호소의 수질개선을 위해서는 부상처리공정과 연계하여 조류제거를 위해 다수 적용된 사례가 있다. 미세기포를 이용한 조류 제거시스템은 발생된 녹조 및 적조에 초미세기포를 부착시켜 수면 위로 부상시켜 제거하는 방식이다. 마이크로버블을 이용한 산소 공급만으로 호소 수환경 및 수질개선을 목적으로 적용된 사례는 2015년도에 충남 아산시에 위치하고 있는 죽산저수지에 처음으로 설치 및 적용되었다.



자료) 홍원석 등(2010)

<그림 2.3-18> 마이크로 버블을 이용한 수질개선 모식도

(표 2.3-6) 마이크로/나포기포 발생 관련 기술개발현황

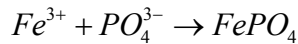
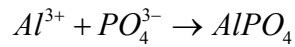
연구수행/ 기술보유 기관	연구개발의 내용
한국기계연구원	- 소형마이크로버블을 이용한 친환경 기술 - 마이크로기포/오존이용 도금폐수처리기술 - 오존/마이크로기포를 이용한 의료용 살균시스템 개발 - 호소정화장치 개발
대경이엔비, 서울시립대	- 산소용해수와 미생물제제를 이용한 호소 및 폐쇄구역의 자정력 - 복원기술
네가트론	- 유체의 마이크로 버블 산소용해장치 개발 및 응용 - 중소형 마이크로 버블 발생기술 보유
미시간기술	- 용존오존부상공정 개발 - 오존을 마이크로 버블 발생기술에 적용
경남환경(주)	- 구형플라스틱여재와 초미세기포를 이용한 하천수질 정화공정 - 유기물산화조와 침전산화조로 된 하천수질 정화공정
영남대학교	- 가축 액상분뇨의 고효율 고액분리기 개발 - 마이크로버블과 부직포 여과막 결합공정 개발
서울대학교	- 맞춤형 초미세 기포 발생장치를 이용한 부상분리 기술 개발 - 용존공기부상법 적용을 위한 기포발생장치 개발 - 저비용-저에너지 기포발생장치 개발
한국식품연구원	- 마이크로버블을 이용한 채소류 위해요소제어 연구 - 소형 마이크로버블을 이용한 세척기술개발
(주)씨엔에스, 조아스텍, 씨엔아이, 드림	- 상수도 직결용 마이크로버블 샤워기 개발 - 소형마이크로버블을 이용한 친환경샤워기
東京大學大學院	- 마이크로버블을 이용한 빈산소수괴의 해소 - 동경만을 중심으로 정체수역에 대한 실험
熊本大學大學院	- 저전력 마이크로버블 발생장치 개발 및 응용 - 농업용, 양식장용 저전력 발생장치 개발
(株)AURA Tech	- 1998년부터 개발, 2001년부터 판매 개시 - 20 $\mu$ m 이상의 기포 발생기술/에어젯트방식이 주요 기술 - 호소, 해양, 양식업, 농업분야, 하/폐수 처리장치에 사용
三洋設備産業(株)	- 1995년부터 마이크로 기포수 제조시스템 완성, 2001년 실용화 성공, 2004년부터 일본 판매시작 - 20 $\mu$ m 기포 발생기술/가압용해 - 하/폐수 처리 등 수질정화와 미용건강사업 분야
和泉電氣(株)	- 1998년부터 GALF 기포수 제조시스템 판매 - 20 $\mu$ m 기포 발생기술/가압용해 방식, 하/폐수 처리장치에 사용
(株)富喜製作所	- 1993년부터 마이크로 기포수 제조시스템 완성 - 2005년 개량형 기포 발생기술/선회방식 - 하/폐수 처리장치에 사용
(株)多自然테크노	- 식량생산개선을 위한 농업분야와 양식분야에 적용
東洋電氣(株)	- 2000년 초에 양식장용으로 개발 - 하/폐수 처리장치에 사용
Aeration Industries international Inc. (미국)	- air-jet 방식의 대용량 산소공급장치. - 대용량의 산소공급가능하며, 기포의 입자크기는 수백 미크론 2mm 정도임.

자료) 홍원석 등(2010), 미세기포를 이용한 수질개선대책

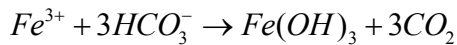
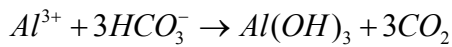
### 3. 초고속 응집/부상 고액분리시스템

#### 가. 응집에 의한 인 제거

오염물질의 응집처리는 원수에 응집제를 첨가하여 수중의 인을 불용성 화합물로 만들어 제거하는 방법이다. 응집에 의한 인 제거를 실시하는 경우, 응집제로서는 일반적으로 금속염이 많이 이용된다. 금속염 응집제로서는 황산반토[Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 18H<sub>2</sub>O], 폴리염화알루미늄(PAC)[(AlCl<sub>3</sub>)<sub>n</sub>], 알루미늄 산소다[NaAlO<sub>3</sub>], 염화제2철[FeCl<sub>3</sub>], 황산제1철[FeSO<sub>4</sub>], 황산제2철[Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] 등이 있는데, 주로 황산반토(Alum), 염화제2철 및 PAC, 미네랄 응집제가 주로 이용되고 있다. 처리하고자 하는 대상수에 알루미늄염이나 철염 등의 금속염을 첨가하면, 수중의 올트린산 및 축합인산은 금속염과 반응하여 다음과 같이 난용성 염을 생성한다.



또한, 금속염은 수중의 중탄산염과 반응하여 수산화알루미늄 및 수산화철의 플럭을 형성한다. 인은 이것에 의해서도 흡착제거 된다.

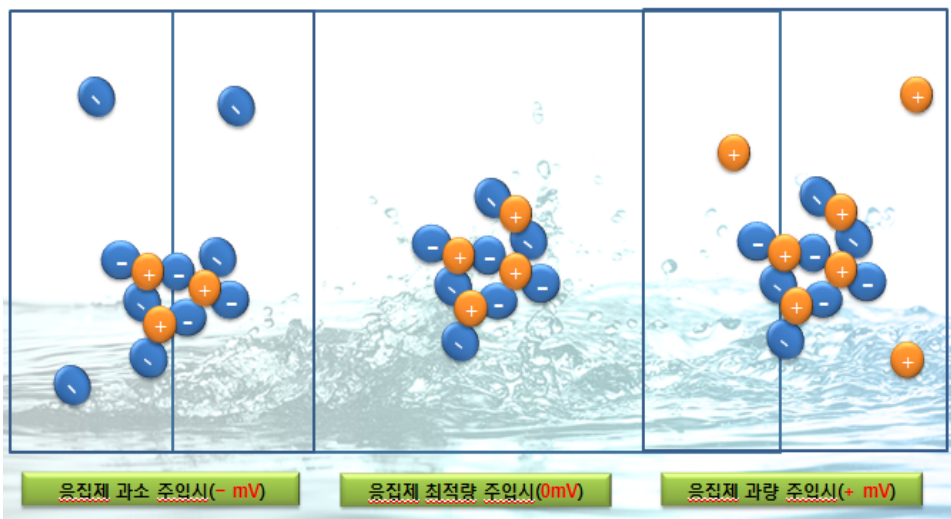


금속염은 종류에 따라 최적 응집 pH가 다르며, 알루미늄염의 경우는 pH 6 전후, 철염의 경우는 pH 5 전후이다. 인산염을 형성하기 위한 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와 Al, Fe의 몰비는 이론적으로는 1이지만, 위와 같이 수산화물도 형성되어 Al, Fe가 소비되므로 몰비를 1보다 크게 하지 않으면 인 제거율은 향상되지 않는다. 응집처리에 있어서 가장 중요한 인자는 응집제의 주입율이다. 지금까지 황산반토를 이용한 인 제거는 대부분 유량에 비례해 주입하는 방식을 많이 채택하고 있다. 황산반토의 정량 주입방식도 생각할 수 있지만 어떤 방식이든 Al/P 몰 비를 3 정도로 설정하면 원수중의 인 농도의 높고 낮음에 상관없이 안정된 처리가 이루어진다.

## 나. 초고속 부상에 의한 고액분리

초고속 부상법은 수중의 고형물 입자를 수면에 부상시켜 제거하는 방법으로서 분리기술의 단위조작임과 동시에 현탁 입자의 선별·분리, 용질의 분별에 응용되는 중요한 단위조작의 하나이다. 부상하는 현탁 입자에 버블을 붙일 수 있으면, 기체는 밀도가 현저하게 작기 때문에 일반적으로 입자의 부상속도를 현저하게 빠르게 할 수 있다. 이 방법은 일반적으로 현탁입자의 농축에 있어 침강법 보다 분리속도를 크게 하고, 농축도를 크게 할 수 있는 경우가 많다.

초고속 부상법에서 중요한 것은 제타전위를 제로에 가까이 적용하는 것이 어렵다. 따라서 현탁액 중에 다수의 극미세버블을 발생시키면, 그것이 (+, -)입자에 부착하고 버블 자체의 부력에 의하여 상승한다. 미세버블과 입자간의 접촉부착의 메커니즘은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째는, 플럭 내부에 미세 버블을 포함하는 것으로 큰 플럭일수록 이 경향이 강하다. 두 번째는, 입자에 버블 부착이다. 초고속 부상법의 특징은 첫째, ZT 제너레이터에 의하여 부상속도를 크게 함으로써 설비를 작게 할 수 있고, 둘째 자연 상태에서 침강과 부상의 경계에 있는 물질을 분리하고, 셋째 위의 두 항의 효과를 올리기 위한 플럭의 최대화, 그리고 넷째 분리효과를 높이기 위한 천연응집제의 주입량을 조절할 수 있다.



<그림 2.3-19> 제타전위에 따른 응집력 안전성



## 제3장 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링

1절 현장적용실험 지구 선정

2절 매화저수지 및 유입하천 수질조사

3절 저수지 퇴적물 오염도 및 용출량 산정





## 제3장 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링

### 제1절 현장적용실험 지구 선정

#### 1. 대상지구 선정 조건

본 연구에서 개발된 융복합 수처리 시스템의 현장적용실험을 위한 대상 지구를 선정하기 위해서는 국내 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염특성을 대표할 수 있는 저수지가 선정되어야 한다. 2014년 1차년도 연구에서 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질특성을 분석하였다. 물리적 특성으로는 유효저수량이 50천 $m^3$ 이하의 저수지가 전체의 82.4%이고, 1960년 이전에 설치되어 준공 경과년수가 50년 이상된 저수지가 전체의 약 69%를 차지한다. 또한, 유효수심 3m 이하인 저수지가 77.1%이고, 유역배율(유역면적/만수면적) 5이상이 전체의 97.4%를 차지하고 있다. 이러한 물리적 인자들은 저수지의 수질에 유의한 수준으로 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

저수지의 수질오염 특성으로는 유역 내 축산폐수 및 생활오수에 의한 점오염원의 영향으로 유입수 뿐만 아니라 호소수에서도 유기물 및 질소, 인 등의 오염도가 높다. 특히 하절기 기온상승 및 강수, 녹조 대발생 등으로 저수지 수질오염은 더욱 심각해지고, 이로 인해 호 내 DO 부족 등으로 어류 폐사 등 수생태계까지 악영향을 미치고 있다. 농업용 저수지의 수질오염유형에서 수질이 오염된 저수지는 대부분 물리적 인자에 의한 내부적 원인과 유역 내 오염원 유입에 의한 외부적 원인에 의해 수질오염이 발생하는 복합원인형에 해당하고 있다. 농업용수 수질기준이 초과된 저수지의 주요오염원은 유역내 축산폐수 및 생활하수 등 점오염원에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었다(MAF and KARICO, 2013).

따라서 본 연구를 통해 개발된 융복합 수처리 기술의 현장적용실험을 하기 위해서는 다음과 같은 조건에 부합되는 저수지가 선정되어야 한다. 첫째, 호소 수질오염도가 5등급 이상인 저수지, 둘째, 수질오염유형이 복합원인형(COD>8mg/L, 수심<5m)에 해당하는 저수지, 셋째, 유기물농도 및 N, P 농도가 높은 저수지, 넷째, 1960년 이전에 설치된 저수지, 다섯째, 유효저수량 50만톤 이하이며, 유효수심이 3m 이하인 저수지, 여섯째, 지리적으로

로 접근이 용이하고 토목구조물 설치가 가능한 저수지, 일곱째, 농업용수 수질개선사업 시행지구가 아니고 사업 계획에 반영되어 있지 않은 저수지를 대상으로 하였다.

## 2. 연구대상지구 선정

연구 1차 년도에 개발된 융복합 수처리기술의 현장적용실험을 위한 대상 지구를 선정하기 위해서 국내 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염특성에 가장 적합한 후보지구 3개 저수지를 선정하여 현장조사 및 유역현황조사를 실시하였다.

연구대상지구 후보지구로 선정조건에 부합하면서 지리적으로 가까운 경기도 관내 농업용 저수지를 대상으로 검토한 결과, 과림저수지(경기 시흥시 과림동), 매화저수지(경기 시흥시 도창동), 버들저수지(경기 화성시 장안면 석포리)의 3개소가 대상지구 조건에 가장 부합하였다. 이들 저수지는 모두 준공된 지 50년 이상된 저수지이며, 수심이 3m 내외로 매우 낮아 퇴적물로부터의 오염물질 용출 영향을 쉽게 받을 수 있는 저수지들로서 수질오염도가 매우 높은 저수지이다. 또한 유효저수량이 모두 30만톤 내외로 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지 중 소규모 저수지에 해당하며, 유역 내에 농경지, 임야 등 비점오염원과 생활계, 축산계 등 점오염원이 존재하는 국내 농업용 저수지의 일반적인 특성을 가진 지구로 판단되었다. 후보지구를 대상으로 유역환경조사, 호소 수질조사, 퇴적물 조사, 유입하천 조사, 유입 오염부하량 조사 등 정밀조사를 실시하였고, 그 결과 및 유역상황을 종합적으로 고려하여 시흥시 도창동에 위치하고 있는 매화저수지를 최종 대상지로 선정하였다.



<그림 3.1-1> 현장적용실험 대상 후보지구 저수지의 위성사진

### 3. 현장적용실험 대상지구 현황

#### 가. 저수지 시설제원

융복합 수처리 시스템의 현장적용실험을 실시하기 위한 대상 지구로 선정된 매화저수지는 1941년도에 설치된 농업용저수지로 경기도 시흥시 도창동에 위치하고 있는 소규모 인공 호소이다. 유역면적은 260ha에 해당하며, 만수면적은 15.5ha, 수혜면적은 52.4ha, 유효저수량은 227천 $m^3$ 이며, 유효 수심은 1.46m로 수심이 아주 낮은 접시형태의 저수지이다. 현재 유료 낚시터로 목적 외로 사용 중에 있다.

(표 3.1-1) 현장적용실험 대상 후보지구의 시설제원

저수지명	유역면적 (ha)	만수면적 (ha)	수혜면적 (ha)	유효저수량 (천 $m^3$ )	유효수심 (m)	준공년도
매화지	260	15.5	52.4	227.0	1.46	1941



<그림 3.1-2> 매화저수지 전경

나. 매화저수지 유역개황 및 오염원 현황

융복합 수처리 시스템의 현장적용실험 대상 저수지로 선정된 매화저수지의 유역 개황 및 오염원 조사를 실시하였다. 매화저수지의 유역은 행정구역상 경기도 시흥시 도창동과 금이동에 속하며, 금이동 지역 전체면적의 42.7%와 도창동 지역 면적의 23.4%를 차지하고 있다. <그림 3.1-3>은 매화저수지 유역 경계선을 위성사진 위에 그린 것으로, 노란색 실선은 도창동과 금이동 행정구역을 구분하는 경계선이고, 녹색 실선은 매화저수지 유역을 나타내는 경계선이다.

매화저수지는 시흥시 북동쪽에 위치하고 있으며, 유역은 대부분 지역이 산림과 구릉지역으로 이루어져 있고, 인근에는 주민 약 40만명이 살고 있는 시흥시와 근접하고 있다. 지리적으로 시흥시 중심가와 접해 있어 주택가, 음식점, 소규모 산업시설, 농경지, 축산농가 등이 다양하게 위치해 있는 도시와 농촌의 복합형태를 보이고 있다. 특히 매화저수지는 서울 인근에 위치한 유료 낚시터로 지리적 여건으로 주말에 많은 낚시객들이 찾고 있다. 저수지 상류 유역에는 42번 국도와 100번 서울외곽순환고속도로가 지나고 있으며, 물왕저수지 유역과 경계를 이루고 있다.



<그림 3.1-3> 매화저수지 유역의 행정구역 위치도

#### 다. 매화저수지 유입하천 현황

매화저수지의 주요 유입하천은 2개소인데, 유입하천-1(매화-1) 지점은 금이동 유역에서 들어오는 하천이고, 유입하천-2(매화-2) 지점은 도창동 일부와 금이동 유역에서 들어오는 하천이다. 유입하천-1(매화-1)은 저수지 상류유역 우안 쪽에서 유입되며, 유입하천-1은 해발 205m 운흥산에서 발원하여 금이동을 걸쳐 유입되는 하폭과 유량이 아주 작은 소하천이다. 매화동쪽에서 들어오는 유입하천-2는 상류유역 봉재산 계곡에서 발원하여 유하하는 소하천이다.

유입하천-1의 평상시 유출 유속은  $0.003\sim 0.006\text{m}^3/\text{s}$ (평균  $0.005\text{m}^3/\text{s}$ )이고, 유입하천-2의 평상시 유출 유속은  $0.005\sim 0.020\text{m}^3/\text{s}$ (평균  $0.011\text{m}^3/\text{s}$ )으로, 유입하천-1에 비해 유입하천-2의 유출속도가 2배 이상으로 높은 것으로 조사되었다. <그림 3.1-4>는 매화저수지로 유입되는 유입하천-1과 유입하천-2의 전경 사진이다.



<그림 3.1-4> 매화저수지 유입하천 전경

라. 매화저수지 유역의 오염부하량

매화저수지 유역에 대한 오염원 자료는 환경부에서 제공하는 오염원 자료를 이용하여 오염부하량을 산출하였으며, 그 결과를 (표 3.1-2)에 나타내었다. 환경부에서 제공하는 오염원 자료는 행정구역인 동 단위로 정리되어 있으므로 해당 동 중 유역에 포함되는 면적비율로 환산하여 오염원과 오염부하량을 산출하였다. 유역에서 배출되는 오염부하량은 항목별로 BOD 80.1kg/일, TN 46.8kg/일, TP 4.80kg/일로 산출되었다. BOD 오염부하량은 생활계가 55.4%를 차지하여 가장 큰 오염원으로 나타났으며, 다음으로 토지계 오염이 38.3%를 차지하였다. 그 외 축산계 및 산업계에 의한 오염은 각각 5.7%, 0.7%를 차지하여 비율이 높지 않았다. TN과 TP에서도 역시 생활계가 60% 이상으로 가장 큰 오염원으로 산출되었고, 다음으로 토지계, 축산계, 산업계 순으로 나타나고 있다. 따라서 매화저수지 유역 내에서 가장 큰 오염원은 생활계에 의한 것으로 축산계 및 산업계에 의한 배출은 거의 없는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 오염물질 배출부하량 산정을 단순히 행정 통계상 자료에 의한 오염원 자료에 매화지 유역에 포함되는 면적비율을 곱하여 계산하였는데, 대규모 아파트단지 및 논이 매화저수지 유역 밖에 위치하고 있어 매화지 유역의 오염원으로 편입하기에는 상당한 오차가 있다고 판단된다.

(표 3.1-2) 매화저수지 유역의 오염부하량

구분	배출유량 (m <sup>3</sup> /일)	오염부하량(kg/일)		
		BOD	TN	TP
생활계	416.3 (4.1)	44.4 (55.4)	29.9 (64.0)	3.17 (66.1)
축산계	1.6 (0.0)	4.5 (5.7)	2.8 (5.9)	0.35 (7.3)
산업계	14.4 (0.1)	0.5 (0.7)	0.0 (0.1)	0.03 (0.6)
토지계	9,798.4 (95.8)	30.6 (38.3)	14.0 (30.0)	1.25 (25.9)
총계	10,230.7 (100.0)	80.1 (100.0)	46.8 (100.0)	4.80 (100.0)

주) 환경부 행정구역별 오염원 자료 참고, ( )는 비율

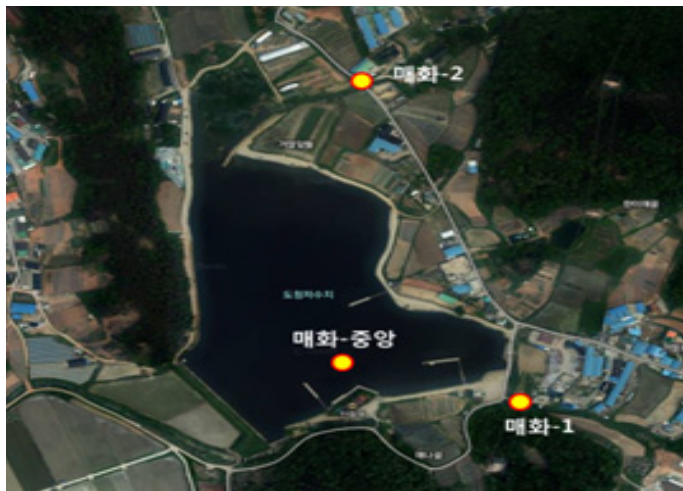
## 제2절 매화저수지 및 유입하천 수질조사

### 1. 수질조사 위치 및 방법

#### 가. 정기 수질조사

##### (1) 수질조사 위치 선정

융복합 수처리시스템의 현장적용실험 지구로 선정된 매화저수지와 유입하천에 대한 수질특성을 파악하기 위해서 4월부터 12월까지 수질조사를 실시하였다. 저수지에 대한 수질조사는 4월부터 12월까지 매월 1회씩 조사를 실시하였고, 저수지 표층과 심층의 대표지점을 선정하여 채수하였다. 저수지 수질조사지점은 융복합 수처리시스템을 설치할 지점의 범위 내에서 수질조사를 실시하였으며, 위치는 <그림 3.2-1>과 같다. 공동연구기관인 충북대학교에서는 융복합 수처리시스템 설치에 의한 저수지 수질개선효과 등을 3차원 수리-수질 모델을 통해 산출하기 위하여 저수지 수질에 대한 정밀조사를 위해 <그림 3.2-2>와 같이 4지점을 선정하여 수질조사를 실시하였다. 매화저수지 유입하천에 대해서는 저수지 조사와 동일하게 매월 1회씩 조사를 실시하였으며, 조사지점은 저수지로 유입되기 직전의 지점을 선정하였다. 조사기간 중 유량이 거의 없어 흐름이 없는 하천에 대해서는 수질조사를 실시하지 않았다. 강우 시 조사를 실시하였으나 강우량이 매우 작아 강우에 의한 영향이 나타나지 않는 조사에 대해서는 비강우시 조사로 분류하였다. 매화저수지와 유입하천의 조사일자는 (표 3.2-1)과 같다.



<그림 3.2-1> 매화저수지 및 유입하천 수질조사 위치도



<그림 3.2-2> 매화저수지 정밀 수질조사 위치도

(표 3.2-1) 매화저수지 및 유입하천 수질조사 일자

조사수역	조사 일자	조사기관
저수지	4/24, 5/14, 6/5, 7/3, 9/4, 9/22, 10/27, 11/5, 12/8	농어촌연구원
	5/20, 6/5, 6/10, 6/30, 7/14, 8/4, 8/27, 9/21, 10/27	충북대학교
유입하천	4/24, 5/14,	농어촌연구원

(2) 수질조사 항목 및 방법

조사분석 항목은 현장에서 다항목 수질측정장비(YSI)를 이용하여 수온, EC, DO, pH, ORP, 수심, 투명도, 유속을 측정하였으며, 각 지점에 대해 3L의 물을 채수한 후 폴리에틸렌 시료통에 채워 분석실로 가져와 분석을 실시하였다. 분석항목으로는 COD, SS, Chl-a, T-N, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, T-P, PO<sub>4</sub>, Cl<sup>-</sup>, 그리고 중금속 Cu, Pb, Cd 및 As, Hg 등을 분석하였다. COD, T-N, T-P, SS 등 기타항목은 수질오염공정시험법(환경부, 2007)과 Standard Method(APHA, 1998)에 준하여 조사 및 분석을 실시하였다.



## 나. 연속모니터링

대부분의 저수지는 강우 시 호소 내로 유입하는 비점오염원과 오랫동안 침전되어 누적된 퇴적물의 내부부하가 주요 수질오염원으로 작용하고 있기 때문에 수질모니터링 횟수가 제한적인 정기적인 수질조사는 저수지의 내부부하 측정을 위한 환경조건 변화 파악에 한계가 있다. 특히, 노후화된 저수지에서는 내부부하의 기여도가 상당히 큰 것으로 조사되고 있어, 저수지의 수질특성을 제대로 파악하기 위해서는 지속적이고 연속적인 현장 모니터링 자료가 필요하다.

본 연구에서는 저수지 호저 퇴적물의 오염물질 용출량 산정시 신뢰도 향상과 저수지 수환경의 동적변화 규명을 위해 연구대상 저수지의 기상, 수온, 수질 등을 연속적으로 측정하기 위해 <그림 3.2-3>와 같이 ST2 지점에 기상 및 수질 등의 연속 측정장비를 설치하였다. 운영기간은 2015년 5월 20일부터 9월 12일까지 총 118일간 연속적으로 운영하였으며, 기상과 수온, 그리고 기본 수질항목에 대한 연속 모니터링을 수행하였다.

기상은 Davis WS-Pro2\_plus를 활용하여 기온, 습도, 대기압, 풍향, 풍속 등의 항목을 10분 간격으로 측정하였으며, 수온은 HOBO Water Temp Pro onset(USA)을 바닥층에서 수면 상부 방향 0.5m, 1.0m, 1.5m 수층에 설치하여 10분 간격으로 연속적으로 측정하였다. 수질은 다항목 수질측정장치인 YSI6920을 저수지 바닥층으로부터 0.2m 상부에 고정식으로 설치하여 30분 간격으로 수온(℃), DO(mg/L), 전기전도도( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), pH 항목에 대해서 연속적으로 측정하였다. 연속모니터링 장비 모델명 및 측정항목, 측정간격 등에 대한 내용은 (표 3.2-2)에 정리하였다.

(표 3.2-2) 저수지 연속모니터링 개요

구분	장비 모델명	측정항목	측정간격
기상	Davis WS-Pro2_Plus	기온, 습도, 대기압, 풍향, 풍속	10분
수온	HOBO Water Temp Pro onset (USA)	수온	10분
수질	YSI 6920	수온, DO, pH, 전기전도도	30분



<그림 3.2-3> 매화저수지 연속 모니터링장치 설치 전경



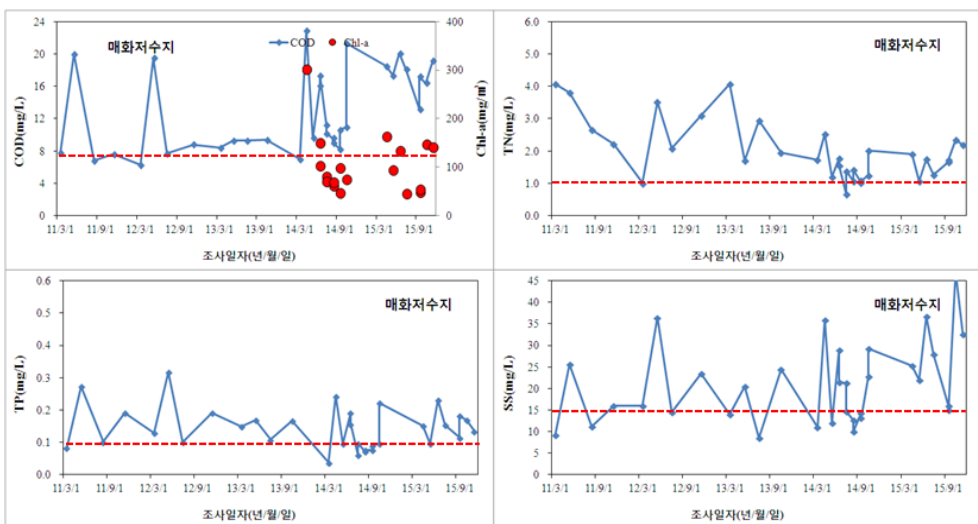
<그림 3.2-4> 매화저수지 연속 모니터링장치 설치 위치

## 2. 매화저수지 수질조사 결과

### 가. 매화저수지 연도별 수질추이

매화저수지의 연도별 수질오염 추이를 파악하기 위하여 한국농어촌공사에서 매년 시행하고 있는 전수조사 결과와 2014년도와 2015년도 본 연구에서 조사한 자료를 분석하였다. 전수조사는 분기별로 연 4회 조사를 하고 있으며, 조사항목으로는 pH, COD, T-N, T-P, SS 등 5개 항목을 대상으로 하며, 호소 수질을 대표할 수 있는 1개의 지점을 선정하여 채수 및 현장조사를 하고 있다. 2011년부터 2015년까지 최근 조사결과에 대한 COD, SS, TN, TP 항목에 대해서 분석하였다.

매화저수지의 연도별 수질현황은 (표 3.2-3) 및 <그림 3.2-5>와 같다. COD의 경우 2011년과 2012년 5월에 20 mg/L로 매우 높은 오염도를 나타내었고, 2015년 이후에도 평균 16.5mg/L, 최대 20mg/L에 가까운 매우 높은 농도를 보이고 있다. TN은 2011년, 2012년에 비해 2014년 이후에 다소 감소하는 추이를 보이고 있으나 농업용수 수질기준은 초과하고 있다. TP 농도는 TN과 같은 경향으로 2014년 이후에 다소 감소하는 추이를 보이고 있으나 농업용수 수질기준은 초과하고 있다. SS는 상대적으로 최근에 들어서 더욱 증가하고 있는 경향을 보이고 있으며, 이는 COD 농도가 최근 들어 더욱 증가하는 추이와 같은 결과를 보이고 있다.



<그림 3.2-5> 매화저수지 연도별 수질추이

(표 3.2-3) 매화저수지의 연도별 수질현황

구 분			pH	COD	TN	TP	SS
매화지	2011	Max	9.2	20.0	4.071	0.274	25.6
		Min	7.9	6.8	2.222	0.083	9.2
		Ave.	8.7	10.5	3.190	0.162	15.5
	2012	Max	8.3	19.5	3.516	0.317	36.5
		Min	7.3	6.3	1.008	0.101	14.5
		Ave.	7.8	10.5	2.424	0.185	22.6
	2013	Max	7.9	9.4	4.068	0.169	24.5
		Min	7.3	8.4	1.708	0.109	8.5
		Ave.	7.6	9.1	2.666	0.148	16.8
	2014	Max	8.3	9.6	1.736	0.097	18.3
		Min	7.4	6.8	1.127	0.038	11.0
		Ave.	7.8	7.8	1.411	0.064	14.0
	2015	Max	9.0	19.2	2.467	0.183	47.0
		Min	7.1	10.6	1.064	0.070	12.5
		Ave.	7.8	16.5	1.764	0.137	25.2

나. 매화저수지 호 내 위치별 수질특성

매화저수지는 만수면적이 약 15ha이며, 두 개의 주요 유입하천이 각각 저수지의 양쪽 끝으로 유입되며, 저수지 모양이 다소 V자 모양을 띠기 때문에 호 내 위치에 따른 수질 차이를 나타낼 수 있어 4개 지점(제방 ST1, 저수지 우안 유입부 ST2, 저수지 중앙 ST3, 저수지 좌안 유입부 ST4)을 선정하여 수질조사를 실시하였다. 매화저수지 제방과 중앙부의 평균 수심은 2.4m이고, 저수지 왼쪽 유입부의 수심은 평균 1.2m, 오른쪽 유입부 지점은 평균 2.1m으로 호소 전체적으로 수심이 아주 작은 2m 내외의 수심을 가진 저류지형 저수지이다. 조사는 5월 중순부터 10월까지 총 9회 실시하였으며, 수온, pH, EC, DO에 대한 현장조사와 함께 채수하여 COD, SS, TN, TP, Chl-a 항목에 대한 실험실 분석을 실시하였다. 그 결과는 <그림 3.2-7>~<그림 3.2-13>에 나타내었다.

총 9회의 현장조사결과 지점별 평균수심은 ST1 1.8m, ST2 1.7m, ST3 1.2m, ST4 0.8m로 2015년에는 예년에 비해 강수량의 부족으로 전체적으로 수심이 더 낮아진 것으로 조사되었다. 모니터링기간 동안 상하층간의 수온차이는 평균 1.3℃, 최대 3.6℃의 차이를 보였다. 특히, 수표면에서 수

생식물인 마름이 대량 발생하는 시기인 초여름(7월초)에 상하층간 가장 큰 수온 차이를 보였으며, 대기 기온이 떨어지는 10월 말에는 상하층간의 수온 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

pH는 6.4~8.8의 값을 나타냈으며, 무 강우기간(6/10~7/15) 동안 하층의 pH가 대체적으로 상층보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 표층 조류의 광합성의 영향으로 판단된다.

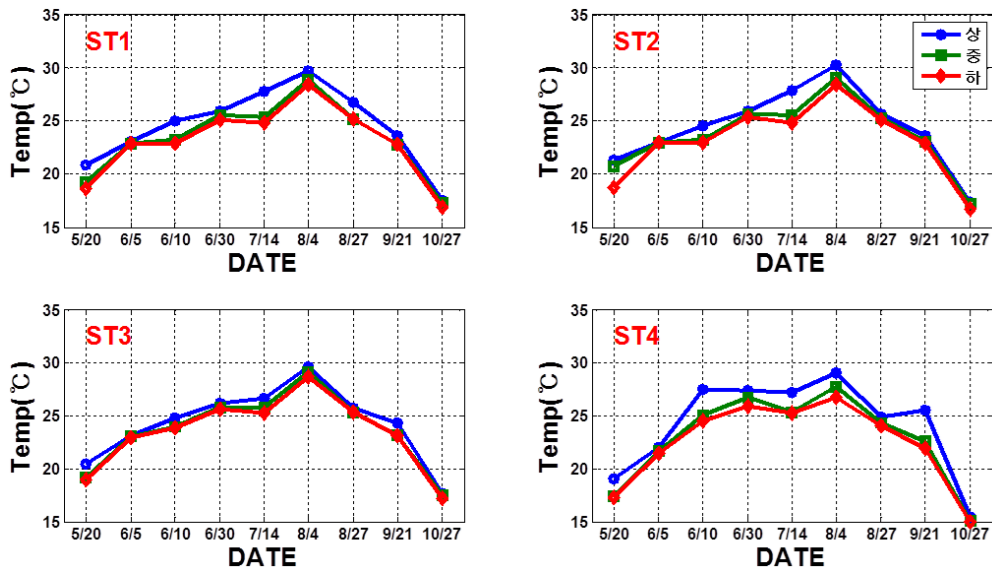
무강우 기간 동안(6/10~7/15) 상·하층간의 DO 농도는 큰 차이를 보였으며, 이는 대기로부터의 산소 포기보다 퇴적물 산소요구량(1.62~3.66mg/m<sup>2</sup>·d)이 크기 때문인 것으로 판단된다. 무강우 기간 동안 각 지점별(ST1~ST4) 하층의 평균 DO는 3.0mg/L, 2.6mg/L, 3.5mg/L, 6.8mg/L로 유입하천-2 유입 직후 지점인 ST4 지점을 제외하고 4.0mg/L 이내의 낮은 DO농도를 보였다. 강우기간 이후(8/4~10/27) 모니터링 결과, 상·하층간 DO농도의 차이는 거의 발생하지 않았으며, 이는 강우 및 기온강하의 영향으로 상하층간 물질교류가 활발하게 발생한 것으로 해석할 수 있다. 저수지 좌안 유입부인 ST4를 제외한 나머지 지점에서 전기전도도(EC)는 무강우 기간 동안 평균 418 $\mu$ s/cm의 값을 보였으며, 이후 강우의 영향으로 개선되어 평균 353 $\mu$ s/cm의 값을 나타냈다.

매화저수지 정기모니터링 수질 항목인, CODmn, T-N, T-P, 탁도 측정 결과를 요약하면 다음과 같다. 각 모니터링 지점별(ST1~ST4) 평균 COD 농도는 5.7mg/L, 4.8mg/L, 4.1mg/L, 8.3mg/L로 나타났으며, 저수지 좌안 유입부에 인접한 ST4 지점에서 가장 높은 값을 보였다. 이러한 결과는 농어촌연구원의 2015년도 조사한 결과(표층수 10.6~19.2mg/L(평균 16.5mg/L), 심층수 10.8~19.3mg/L(평균 16.4mg/L))와 편차가 있는 것으로 나타났으며, 이러한 자료의 오차는 조사 및 분석기관 다른 점, 조사시기가 다른 점 등 다양한 원인이 있을 것으로 예측되어 추후 정밀조사를 실시할 계획이다. 각 지점별 T-N 농도는 1.9mg/L, 2.0mg/L, 2.1mg/L, 2.1mg/L으로 지점별로 유사한 값을 보였으며, T-P농도는 0.16mg/L, 0.21mg/L, 0.23mg/L, 0.19mg/L로 나타났다. ST4를 제외한 측정지점에서 TP 항목의 농도는 강우이전 기간이 이후보다 높은 값을 나타냈으며, 이는 저수지 내부 부하의 영향으로 사료된다. 저수지 4개 지점의 평균 TN 농도와 TP 농도는 각각 3.3mg/L과 0.198mg/L로 농업용수 수질기준인 TN 1.0mg/L이하 및 TP 0.1mg/L 이하를 초과한 부영양화 상태를 보이고 있으며, 수온과 광량 조건이

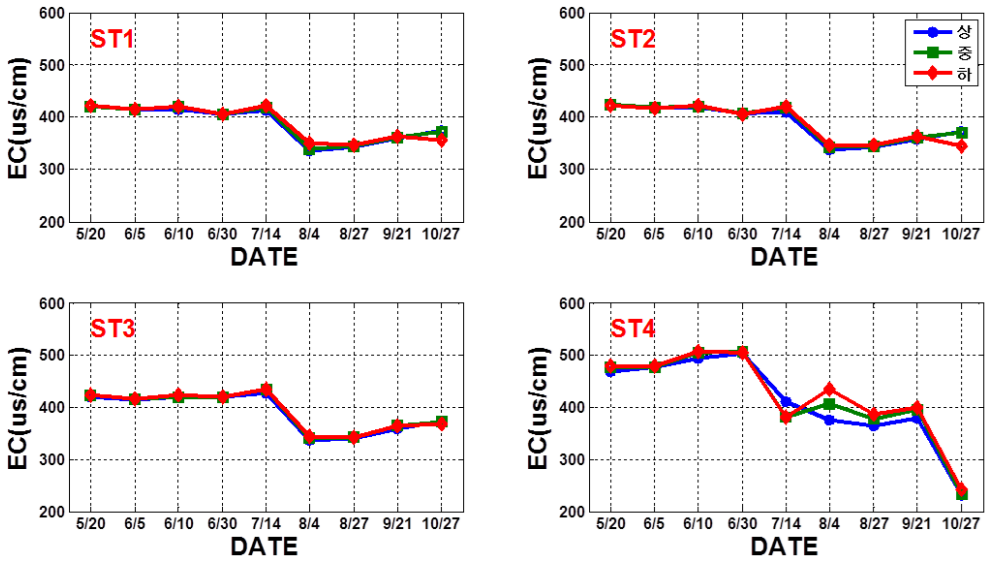
충족될 경우 조류가 대량 발생할 수 있는 수질상태에 있으므로 저수지 수질개선을 위한 대책이 필요한 실정이다.



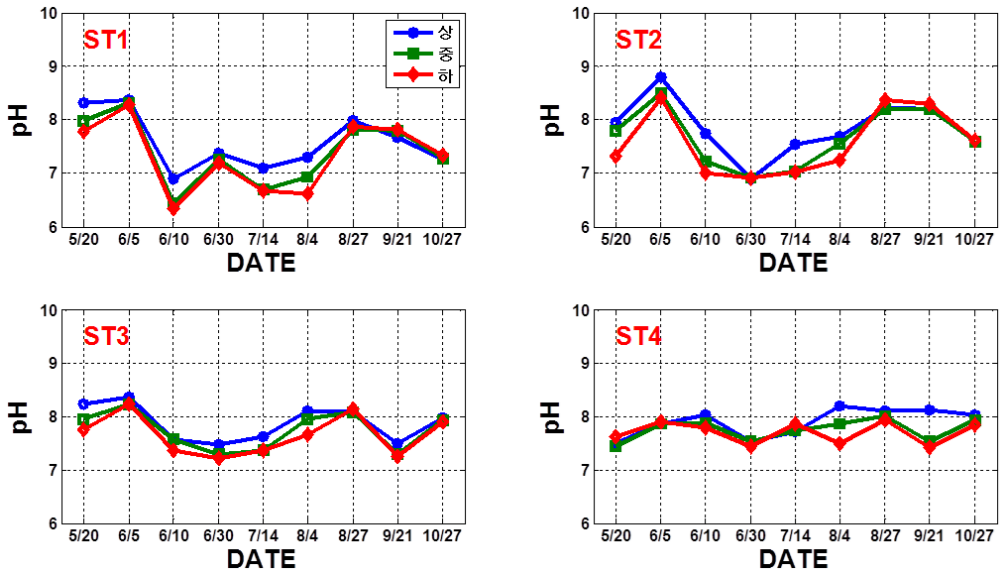
<그림 3.2-6> 매화저수지 정밀 수질조사 위치도



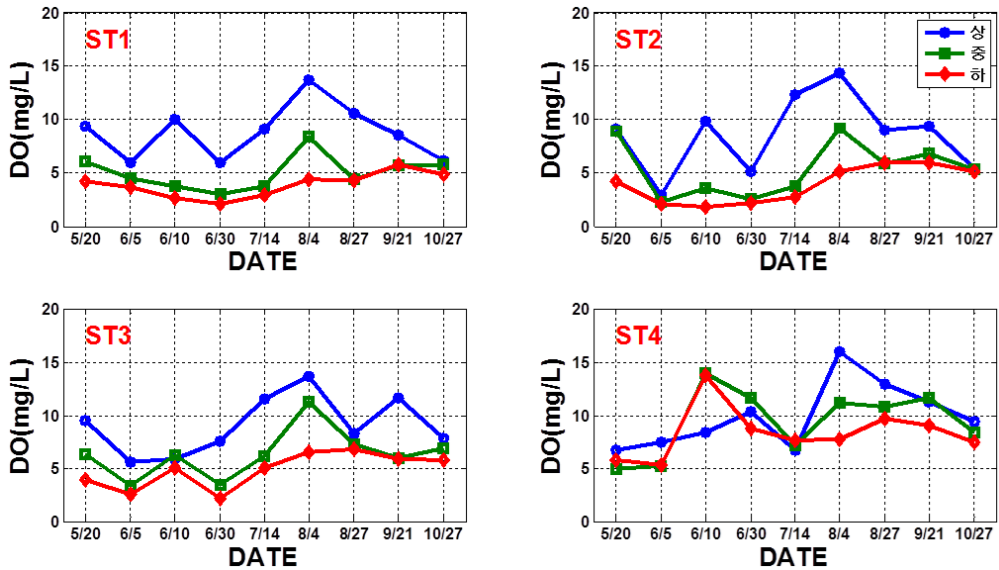
<그림 3.2-7> 매화저수지 호내 위치에 따른 수온



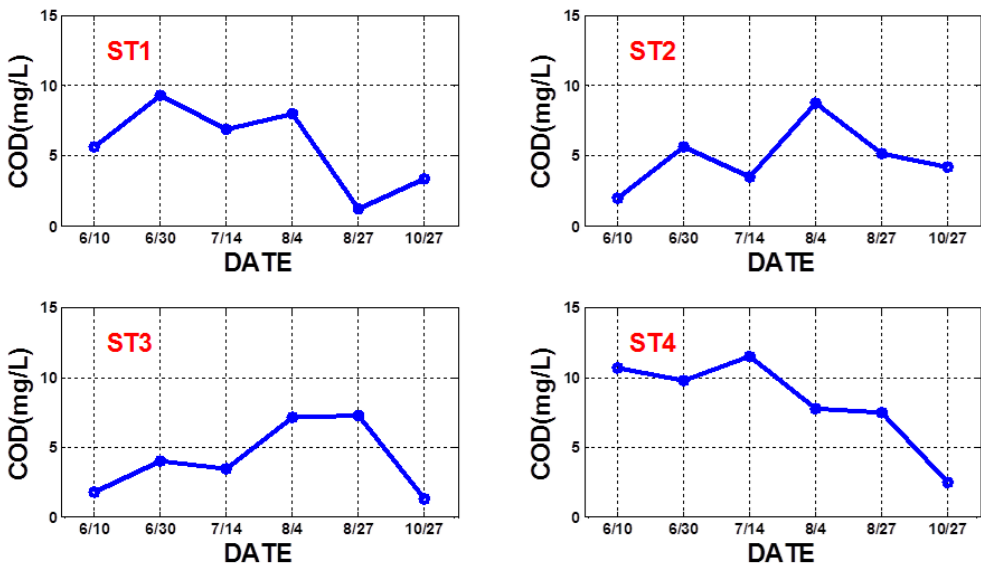
<그림 3.2-8> 매화저수지 호내 위치에 따른 EC



<그림 3.2-9> 매화저수지 호내 위치에 따른 pH

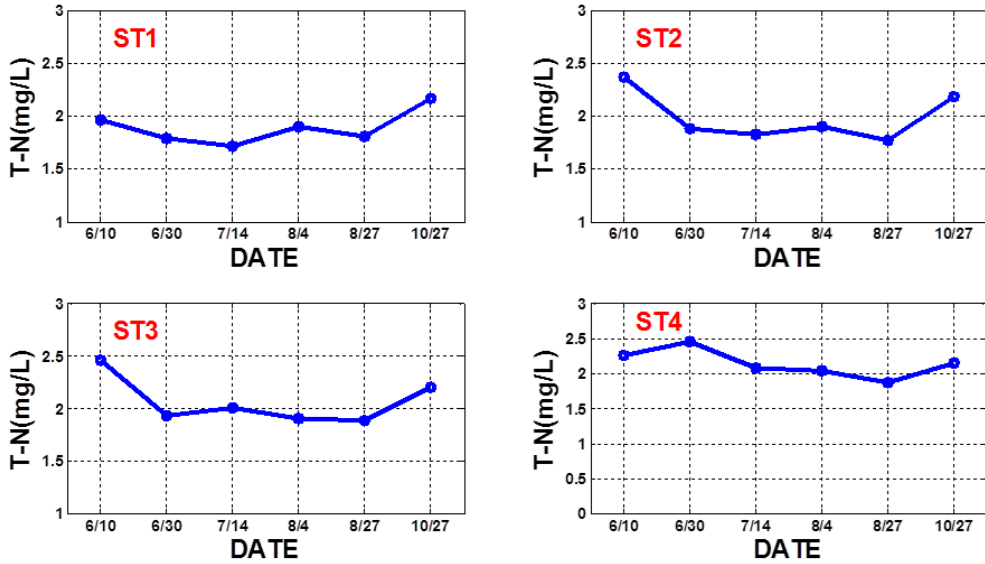


<그림 3.2-10> 매화저수지 호내 위치에 따른 DO

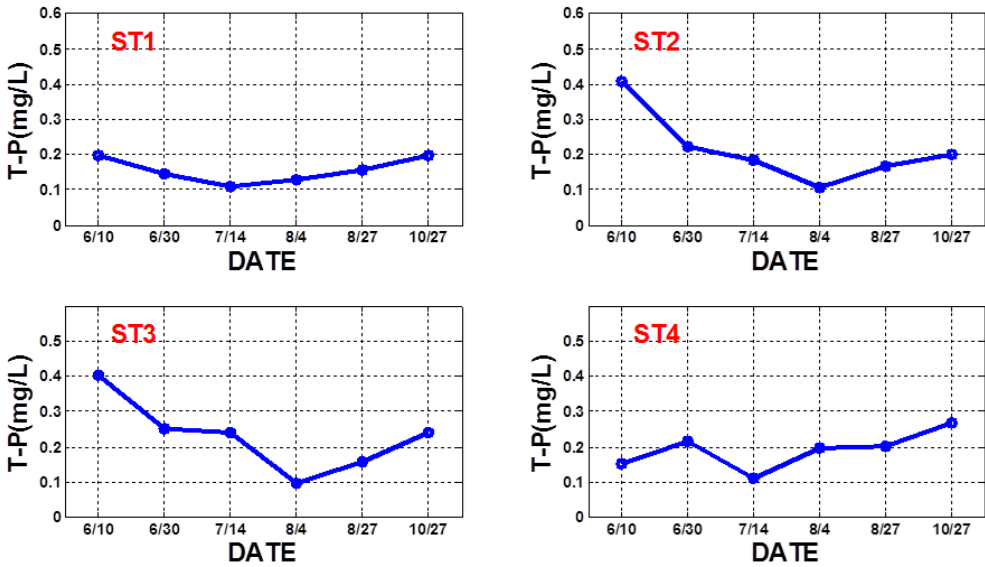


<그림 3.2-11> 매화저수지 호내 위치에 따른 COD





<그림 3.2-12> 매화저수지 호내 위치에 따른 TN



<그림 3.2-13> 매화저수지 호내 위치에 따른 TP

#### 다. 매화저수지 수층에 따른 수질

매화저수지의 수층에 따른 수질현황을 분석하기 위하여 표층수와 심층수를 현장조사와 함께 실험실 분석을 실시하였다. 조사 위치는 ST2 지점에 해당하며, 이 지점은 생태융합형 접촉산화시스템(부유식)의 현장적용 실험을 위해 시설을 설치한 인접 지점이다. 표층수는 수면~0.5m에서 채취하였고, 심층수는 저수율에 따른 수심변화에 관계없이 저수지 퇴적층 상부 0.5m 지점에서 채수하였다.

<그림 3.2-14>~<그림 3.2-16>은 매화저수지 표층과 심층의 수질조사 결과를 나타낸 그래프이다. 수온은 표층수와 심층수에서 거의 차이가 없었으며, 수온 차이가 평균 1.5℃, 최대 3.4℃의 차이를 보였다. 이러한 결과는 인근 지역에서 현장 연속모니터링 장치를 이용해 연속 측정했던 수온 측정결과(평균 1.4℃, 최대 5.0℃) 및 공동연구기관 충북대학교에서 조사한 정밀조사 결과(평균 1.3℃, 최대 3.6℃)와 거의 유사하였다. EC는 표층수에서 357.0~932.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (평균 511.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), 심층수에서 308.0~437.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (평균 394.3 $\mu\text{s}/\text{cm}$ )로 특히 하절기에 표층수에 비해 심층수에서 매우 낮은 값을 보였으며, 이는 심수층의 DO가 0.1mg/L의 무산소에 가까울 정도로 감소한 영향으로 판단된다.

pH는 표층에서 6.7~9.0(평균 7.8), 심층에서 7.1~9.0(평균 7.1)로 수층에 따른 차이가 거의 없었다. DO는 표층수에서 2.4~12.4mg/L(평균 6.8mg/L), 심층수에서 0.1~9.6mg/L(평균 4.2mg/L)으로, 표층과 심층의 차이가 평균 2.6mg/L, 최대 8.0mg/L의 차이를 보였다. 5~6월과 9~10월에 전도현상에 의해 차이가 거의 없었으며, 하절기(7~9월)에 최대의 차이를 보였다. 12월 조사에서는 표층보다 심수층에서 오히려 DO 농도가 높게 측정되었으며, 이러한 원인이 10월 말부터 정상 가동된 생태융합형 접촉산화시스템에 부속되어 있는 마이크로 버블의 심수층 산소 포기에 의한 영향인지, 계절적 요인에 의한 작용인지 현재로서는 판단하기가 어려우며, 향후에 지속적인 조사가 요구된다.

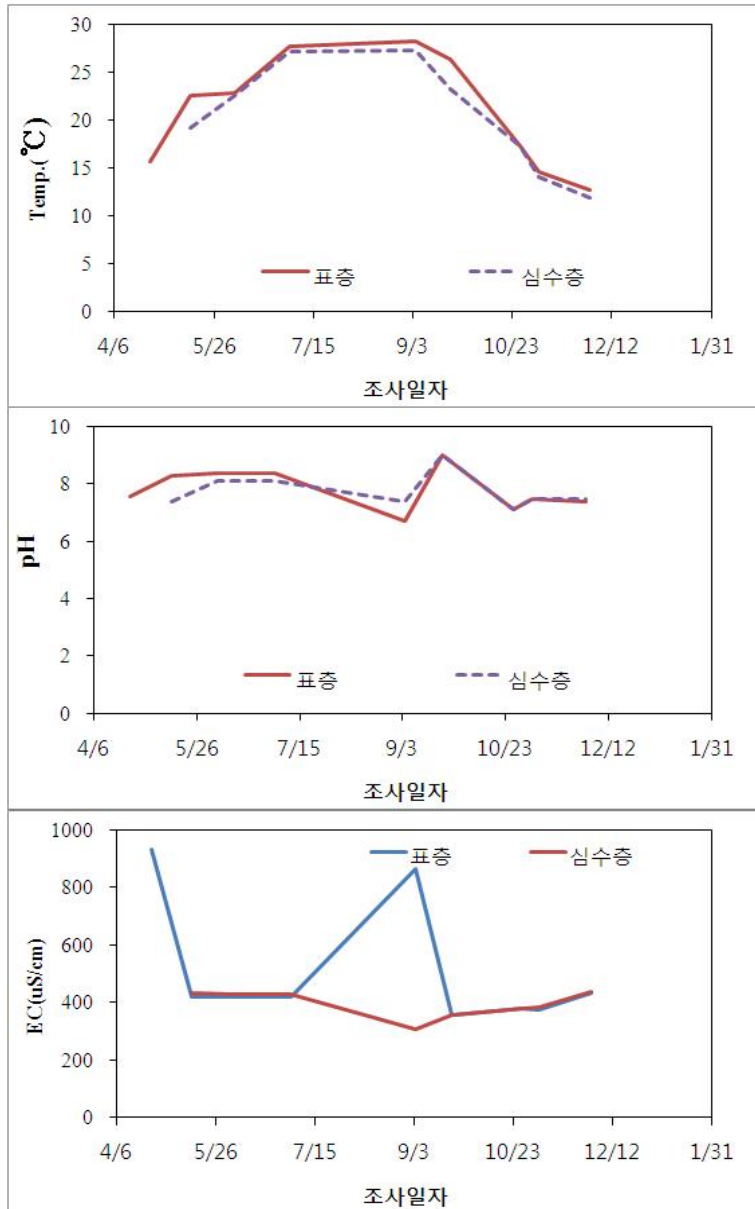
부유물질인 SS는 표층수에서 12.5~47.0mg/L(평균 25.2mg/L), 심층수에서 15.5~61.0mg/L(평균 40.1mg/L)으로 6~8월에는 심층수에서 표층수보다 매우 높게 나타났다. 이러한 원인은 같은 시기에 심층의 DO가 거의 혐기 수준으로 감소하였고, 이에 따라 퇴적층에서 오염물질 용출이 활발하게 진행되고 있었고, 이로 인한 영향으로 판단된다. 유기물 지표인 COD는

표층수에서 10.6~19.2mg/L(평균 16.5mg/L), 심층수에서 10.8~19.3mg/L(평균 16.4mg/L)으로 거의 유사한 수질농도를 보였다.

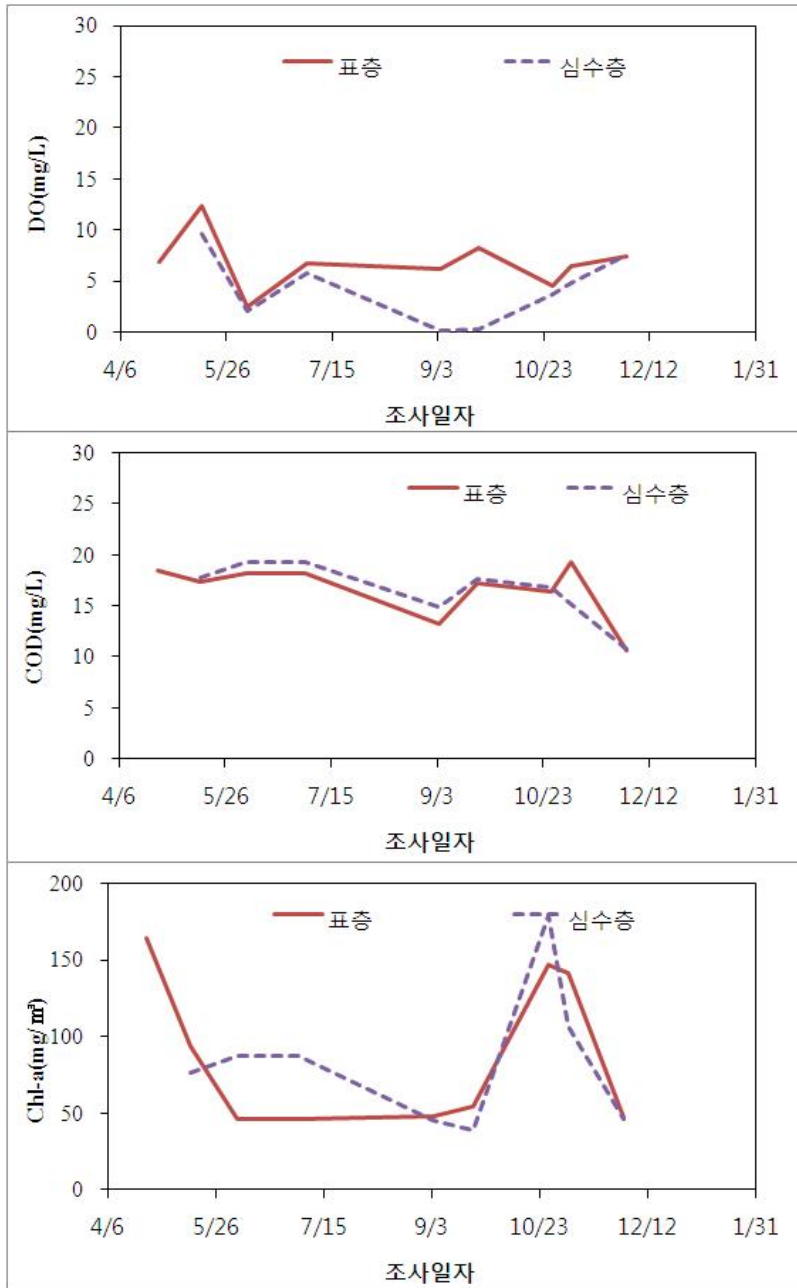
식물성 플랑크톤의 지표인 Chl-a는 표층수에서 45.8~163.9mg/m<sup>3</sup>(평균 87.5mg/m<sup>3</sup>), 심층수에서 38.5~178.5mg/m<sup>3</sup>(평균 83.4mg/m<sup>3</sup>)으로 표층수에서 심층수보다 약간 높게 나타났고, 10월 중순경에 다른 조사 시기에 비해 농도가 매우 높았으며, 이러한 원인은 강우 이후 높은 외기온도로 인해 플랑크톤이 대량 번식한 영향으로 판단된다. Chl-a 농도는 전체적으로 작년에 비해 크게 감소한 것으로 나타났는데, 이러한 원인은 금년에는 봄철~가을철에 외기 온도가 녹조 발생을 가져올 수 있는 일정수준 이상의 온도로 높게 올라간 일수가 작년에 비해 훨씬 작았기 때문으로 판단된다.

TN은 표층수에서 1.064~2.467mg/L(평균 1.764mg/L), 심층수에서 1.317~2.625mg/L(평균 2.099mg/L)으로 모든 시기에 심수층에서 표층보다 높게 나타났으며, 수층간의 차이가 평균 0.335mg/L, 최대 0.601mg/L로 나타났다. TP는 표층수에서 0.076~0.183mg/L(평균 0.137mg/L), 심층수에서 0.099~0.226mg/L(평균 0.169mg/L)으로 모든 시기에 심층에서 표층보다 높게 나타났으며, 이러한 결과는 TN과 유사하였다.

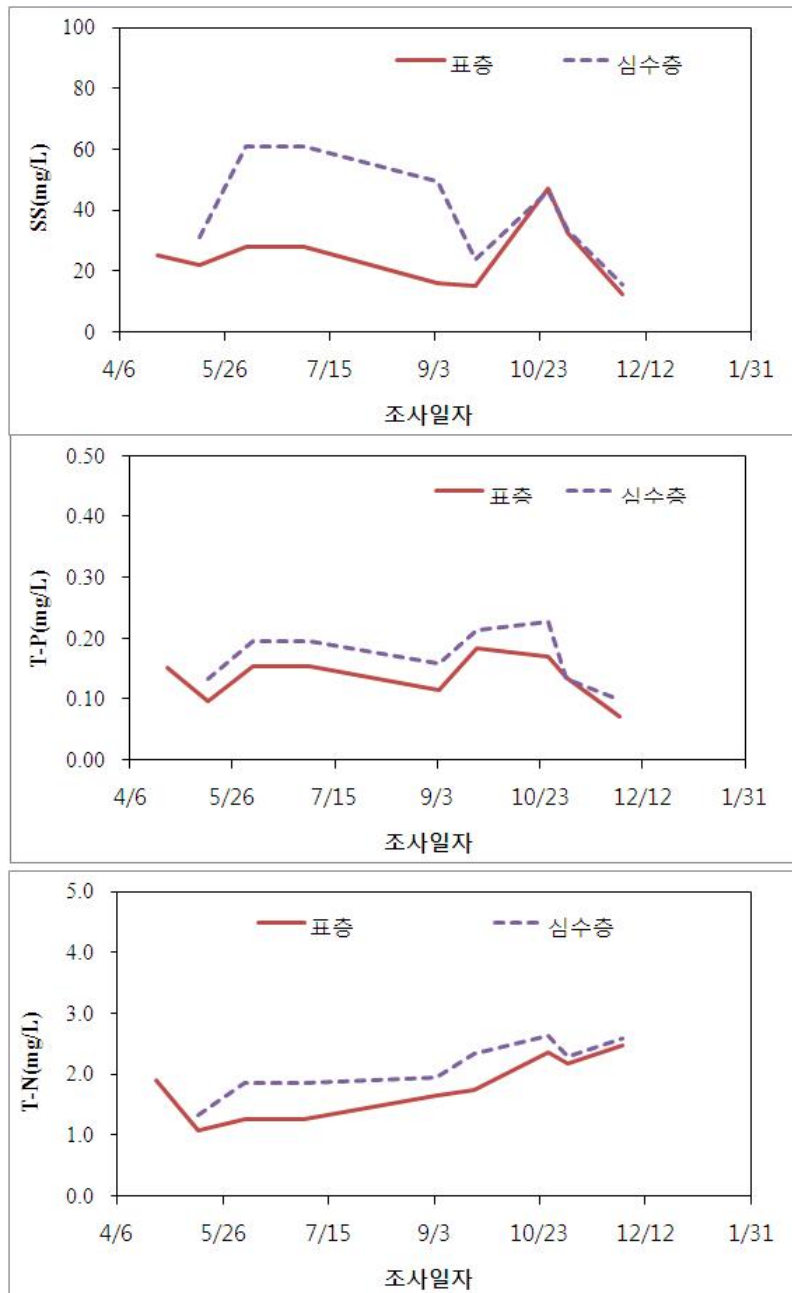
매화저수지 수층(표층, 심층)에 따른 수질조사 결과, SS, TN, TP 모두 표층보다 심수층에서 오염도가 높게 나타났으며, 이러한 결과로부터 호저 퇴적층에서 오염물질의 용출이 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있다. 매화저수지는 1941년도에 설치된 저수지로 준공된 지 70년 이상 된 아주 노후화된 저수지이다. 오염물질의 오랜 퇴적으로 인해 퇴적층의 두께가 상당할 것으로 추측되며, 퇴적물에 대한 관리 없이는 저수지의 수질개선이 어려울 것으로 판단된다. 또한, 매화저수지는 전체적으로 수심이 2m 내외인 저류지 형태의 저수지로서 저수지 호소면적 2/3이상에 마름이 피어 있는 저수지이다. 매화저수지 전체적인 수질은 가을철을 되면서 저수지 내에 피어있는 마름이 분해되면서 일시적으로 COD, TP, Chl-a 농도가 높게 올라가는 현상과 강우기를 지나면서 SS가 증가하는 경향을 나타내기도 했지만 대체적으로 연중 편차가 심하지 않는 균질한 수질을 보여주고 있다. 또한, 전체적으로 수심이 작은 저수지로 사계절에 걸쳐 성층현상이 뚜렷하지 않을 것으로 판단된다.



<그림 3.2-14> 매화저수지 수층에 따른 수질현황(수온, pH, EC)



<그림 3.2-15> 매화저수지 수층에 따른 수질현황(DO, COD, Chl-a)



<그림 3.2-16> 매화저수지 수층에 따른 수질현황(SS, TP, TN)

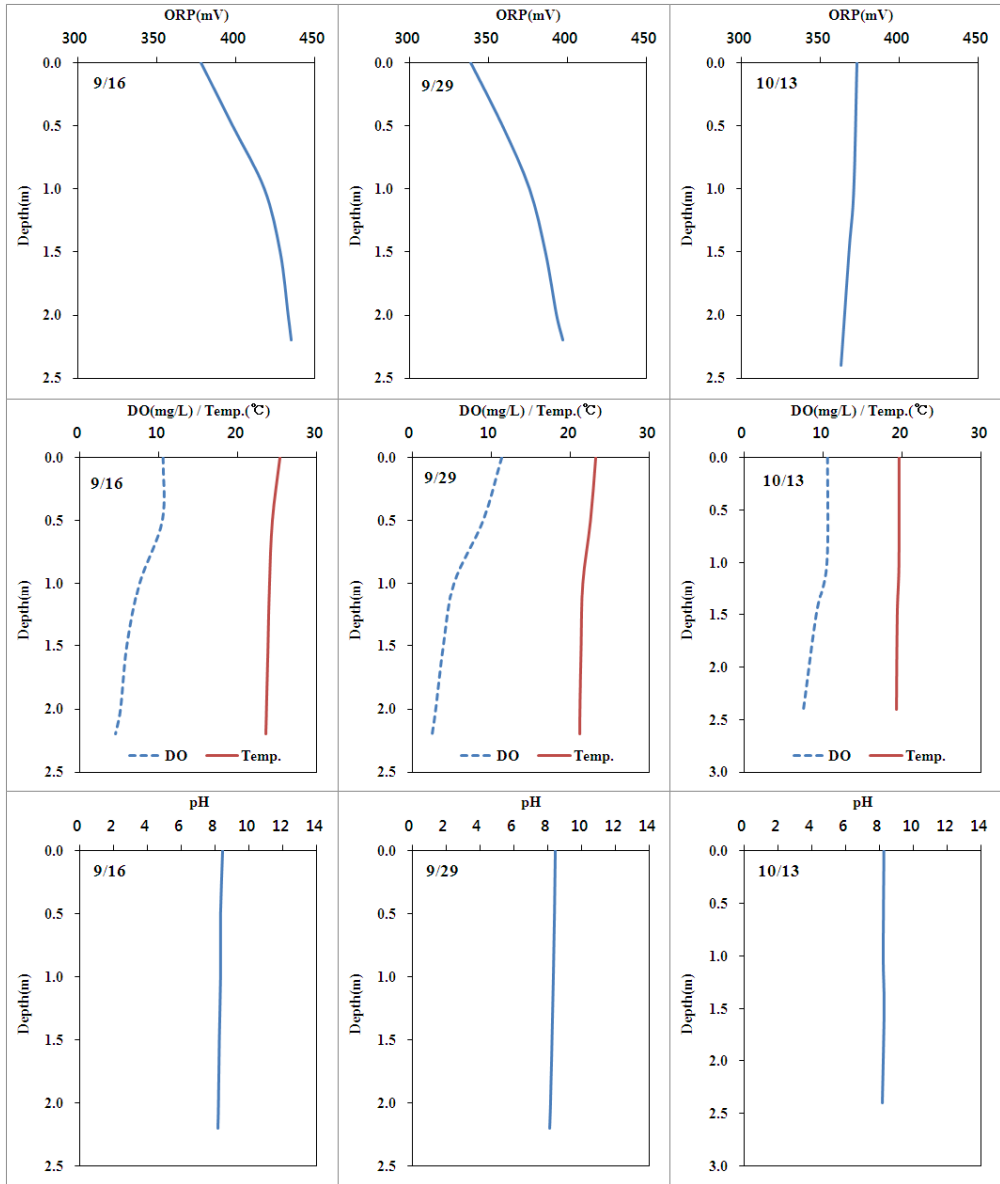
라. 저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH

수심이 낮은 저수지에서는 심층 퇴적물로부터 오염물질이 용출되어 저수지 수질에 크게 영향을 미치는데, 퇴적층의 오염물질 용출률은 수중의 환원상태에서 크게 일어나며, 보통 산화환원전위를 측정함으로써 쉽게 알 수 있다. 산화환원전위(ORP ; Oxidation Reduction Potential)란 수중에서의 산화력과 환원력의 강도를 나타내는 척도이며, 단위는 mV를 사용한다. ORP는 수중 pH에 따라 값이 변하므로 pH 7에서 측정하는 것이 일반적이다. ORP가 높은 환경은 전자수용체가 많고 전자는 부족하여 전자를 받아들이는 경향이 강한 산화상태를 말하며, 이러한 환경은 DO가 높고 유기물이 적은 상태로 빈영양상태에서 발생한다. 반대로 ORP가 낮은 환경에서는 유기물, 환원기체 등의 전자를 주는 경향이 강한데, 부영양호 성층기 심층에서 ORP가 낮게 나타난다. DO가 낮은 혐기성상태에서 ORP 값의 범위에 따라 오염물질의 환원반응이 순서적으로 발생하는데 400에서 300 mV에서 질산은 아질산으로, 아질산은 다시 암모니아로 환원되며, 300에서 100mV에서는 3가 철이 2가 철로 환원되며, 황산이온이 황화이온으로 환원된다.

본 연구에서 ORP의 측정은 수심에 따라 50cm 간격으로 측정하였으며, 심층부에서는 퇴적층으로부터 10cm 상부까지 측정하였다. ORP와 함께 수온, DO, pH를 함께 측정하여 비교하였다. 9월 16일, 9월 29일, 10월 13일 조사에서는 수심에 따른 pH는 전혀 변화가 없었고, ORP는 수심 1m 지점부터 약간 상승하는 경향을, DO와 수온은 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 여름성층현상의 일부가 남아 있었던 것으로 판단된다. 10월 23일 조사에서는 수심에 따라 수온과 pH는 변화가 없었지만 ORP는 0.5m 지점부터 크게 증가하는 경향을 보였고, DO는 0.5m 지점부터 감소하기 시작하여 1m 지점에서는 크게 감소하였다. 이 시기에는 ORP가 표층과 심층에서 차이가 비교적 크게 나타났는데, 산소농도가 크게 낮아진 심층부에서 오히려 ORP가 더 높게 측정되어 추가적인 조사가 필요할 것으로 보인다. 11월 11일 조사에서는 ORP가 심층으로 갈수록 약간 증가하는 경향이었고, 수온, pH, DO는 수심에 따라 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

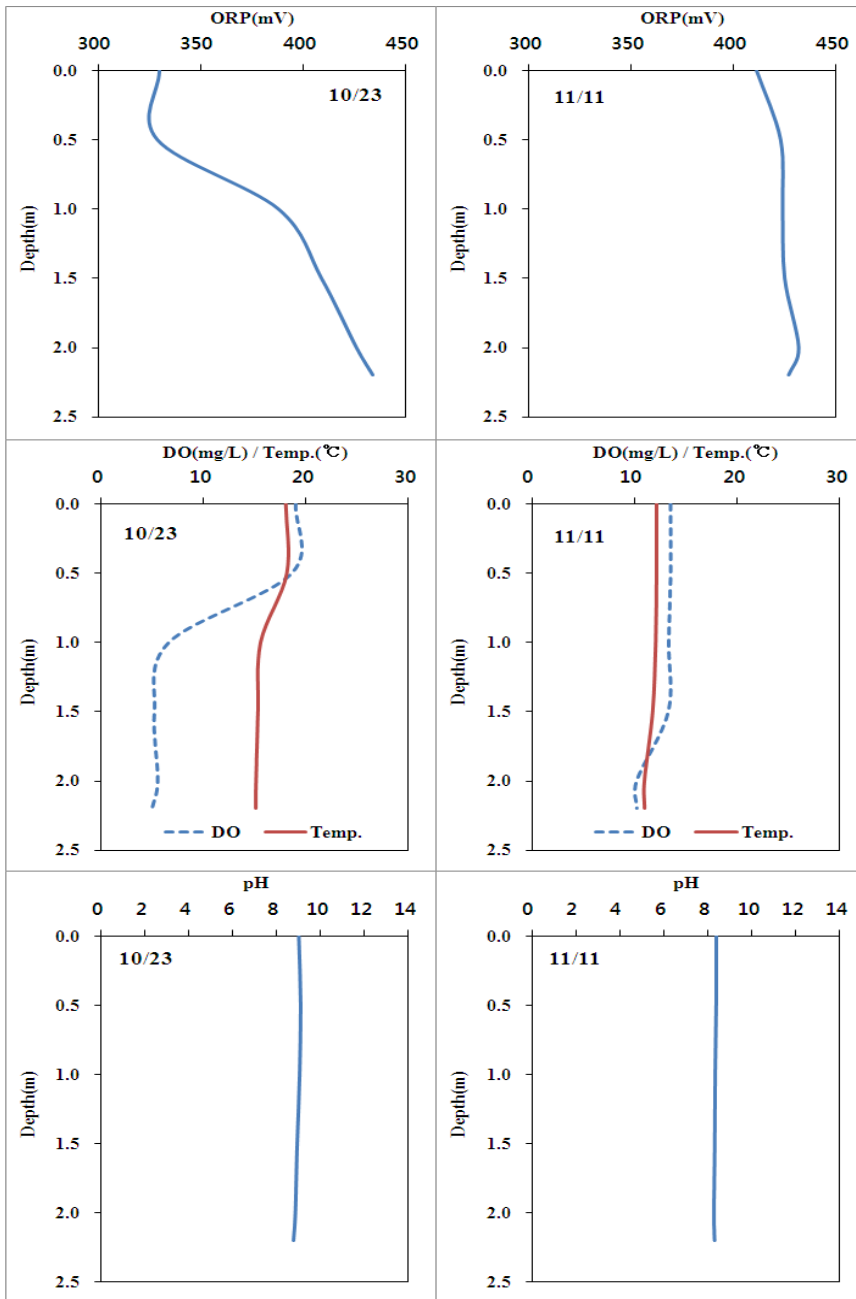
조사 시기가 여름 성층기를 지나 가을부터 시작되어 수심에 따른 뚜렷한 차이가 없는지, 아니면 저수지의 수심이 너무 낮아 계절에 상관없이 성층현상이 없는 저수지인지를 판단하기 위해서는 향후 사계절에 걸친

정밀조사가 필요하겠다. 이러한 ORP 측정을 통해 퇴적물로부터의 오염 물질 용출 가능성을 판단하는 좋은 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 3.2-17> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH





<그림 3.2-17> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH(계속)

마. 매화저수지의 중금속 등

매화저수지 호소수의 중금속 등 미량금속물질의 오염도를 조사하기 위하여 표층수 및 심층수에 대해 분석결과는 (표 3.2-4)와 같다. Cl<sup>-</sup> 농도는 매화 표층수에서 51.0~68.3mg/L, 심층수에서 37.3~57.3mg/L로 심층수에 비해 표층수에서 다소 높게 나타났고, Cu는 모든 지점에서 유사하게 불검출~0.005mg/L 이하로 나타났다.

As는 미국 환경청(US EPA)에서 발암물질 A 등급으로 분류하였고, Cd, Pb는 발암물질 B등급으로 분류하였다(US EPA, 1999). 이러한 중금속들은 독성을 가지고 있는 난분해성 물질로서, 먹이사슬에 의한 축적으로 수생태계에 영향을 줄 수 심각한 오염물질로 알려져 있다. As는 모든 지점에서 불검출로 분석되었고, Pb는 표층수 및 심층수에서 모든 조사 시기에 불검출~0.003mg/L 이하로 나타나 호소 수질환경기준을 만족하였다. 그 밖의 Cd, Hg는 모든 지점에서 모두 불검출로 나타나 현행 환경법의 호소 수질환경기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 매화저수지에서는 중금속 등의 독성물질에 의한 오염은 없는 것으로 나타났다.

(표 3.2-4) 매화저수지의 중금속 등 오염현황

구분	조사일	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)
매화 표층	5/14	63.3	0.002	불검출	불검출	불검출	불검출
	7/3	51.0	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	9/3	56.0	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	9/22	67.3	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	10/27	68.3	0.005	0.003	불검출	불검출	불검출
	11/5	54.4	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
매화 심층	5/14	52.5	0.002	불검출	불검출	불검출	불검출
	7/3	57.3	0.003	0.002	불검출	불검출	불검출
	9/3	40.3	0.005	0.003	불검출	불검출	불검출
	9/22	45.4	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	10/27	37.3	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	11/5	43.8	0.005	0.003	불검출	불검출	불검출
수질환경기준				0.05 이하	0.005 이하	0.05 이하	불검출

### 3. 유입하천 수질현황 및 오염부하량

#### 가. 유입하천 수질현황

매화저수지의 주요 유입하천은 2개소인데, 유입하천-1(매화-1) 지점은 금이동 유역에서 들어오는 하천이고, 유입하천-2(매화-2) 지점은 도창동 일부와 금이동 유역에서 들어오는 하천이다. 이들 하천 2개소에 대한 수질조사 결과는 (표 3.2-5) 및 <그림 3.2-18>~<그림 3.2-21>와 같다.

현장 측정항목인 수온, pH, EC, DO에 대한 조사결과, 4월부터 12월까지 조사기간 동안 수온은 유입하천-1에서는 12.9~23.4℃, 유입하천-2에서는 13.5~24.6℃로 나타나 두 하천 간에 수온의 차이는 거의 없었고, 두 지점 모두 저수지 표층이나 심층에 비해서는 다소 낮았다. pH는 유입하천 두 지점 모두 평균 7.6으로 같았으나 저수지 7.8에 비해서는 다소 낮게 조사되었다. EC는 유입하천-1에서는 389~633.0 $\mu$ s/cm(평균 508.0 $\mu$ s/cm)으로 나타났고, 유입하천-2에서는 246.0~641.0 $\mu$ s/cm(평균 531.4 $\mu$ s/cm)로 측정되어 두 하천 간에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. DO는 유입하천-1에서는 3.0~14.6mg/L(평균 6.4mg/L)으로 나타났고, 유입하천-2 지점에서는 3.8~14.7mg/L(평균 7.3mg/L)을 나타나 유입하천-1 보다 유입하천-2 지점에서 DO가 다소 높게 나타났다.

유입하천-1 지점의 COD는 6.0~10.2mg/L의 범위로 평균 7.1mg/L를 나타냈고, 유입하천-2 지점의 COD는 4.4~9.6mg/L의 범위로 평균 6.1mg/L로 나타났다. 유입하천-1 지점이 유입하천-2 지점에 비해 대부분의 시기에 더 높은 농도로 나타났고, 저수지 표층수의 평균 COD 16.5mg/L 및 심층수 평균 COD 16.4mg/L에 비해서는 매우 낮은 농도를 보였다. 저수지 내의 높은 COD 농도는 강우 시에 유입되거나 저수지 내부에서 생성된 유기물에 의한 영향으로 판단되는데, 매화지 전체 수면의 2/3에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 수생식물인 마름으로부터 배출되는 유기물에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

유입하천의 SS는 유입하천-1, 2에서 각각 평균 5.8mg/L과 11.1mg/L로 나타났는데, 대부분의 시기에 유입하천-1, 유입하천-2 지점에서 거의 비슷한 SS 농도를 보였으나 10월 27일 조사에서 유입하천-1에서는 8.5mg/L를 보인 반면에 유입하천-2 지점에서 53.0mg/L로 매우 높은 농도를 보였다. 이는 유입하천-2 지점의 인근 상류유역에서 도로공사가 진행되어

여기에서 발생된 토사 등의 유출에 의한 영향으로 판단된다. 유입하천 두 지점 모두 저수지 표층수의 평균치 25.2mg/L 및 심층수 평균치 40.1mg/L와 비교해서는 매우 낮은 농도를 보였다. 저수지의 SS는 연중 높은 값을 나타내고 있어 강우에 유입된 토사에 영향을 받기보다는 내부적인 원인에 의해 오염도가 증가하는 것을 알 수 있다. 매화저수지는 유효낙시터로 이용되는 저수지이므로 이로 인한 영향도 있다고 판단되며, 또한 수심이 2m 이하인 호소로 심한 바람 및 강우 등 기상에 의한 심층과 표층의 교란에 의한 영향도 크다고 판단된다.

유입하천의 Chl-a 농도는 유입하천-1에서 평균 4.1mg/m<sup>3</sup>, 유입하천-2에서 평균 4.0mg/m<sup>3</sup>로 대부분의 시기에 거의 비슷한 농도를 보였으나 6월 5일 조사에서 유입하천-1 3.8mg/m<sup>3</sup>에 비해 유입하천-2에서 16.3mg/m<sup>3</sup>로 유입하천-1에 비해 5배 정도 높은 농도로 나타났다. 유입하천-2 지점은 저수지에 유입되기 직전의 지점으로 저수지 유입부에 조성되어 있는 인공습지와 인근에 위치한 지역이다. 이 수역은 인공습지가 조성되어 있어 물의 흐름이 거의 없는 정체수역으로 유입하천-2 지점은 이 정체수역의 영향으로 흐름이 거의 없는 지역으로 외기 온도가 상승하면 녹조 등이 대량 발생하는 지역이기도 하다. 그러나 유입하천의 Chl-a 농도는 매화저수지 표층 87.5mg/m<sup>3</sup> 및 심층 83.4mg/m<sup>3</sup>에 비해 매우 낮은 농도로 나타났다.

유입하천의 TP 농도는 유입-1은 0.278~0.694mg/L(평균 0.528mg/L)이고, 유입-2는 0.233~1.111mg/L(평균 0.509mg/L)로 여름철 강우기를 제외하고는 유입-1이 유입-2보다 높은 농도를 보였다. 유입하천 TP 농도는 저수지의 0.070~0.183mg/L(평균 0.137mg/L)보다 매우 높은 농도로 유입되고 있음을 알 수 있다. 인산염(PO<sub>4</sub>-P)은 유입-1에서 0.136~0.555mg/L(평균 0.368mg/L)으로 나타났고, 유입-2 지점에서는 0.148~0.455mg/L(평균 0.330mg/L)로 대부분의 시기에 유입하천-1에서 높게 나타나 TP농도와 유사한 결과를 보였다.

영양염류인 TN 농도는 유입하천-1에서 5.736~8,080mg/L의 범위로 평균농도는 6.975mg/L로 나타났고, 유입하천-2 지점에서는 4.134~10.005mg/L로 평균농도는 7.344mg/L로 나타나 대부분의 시기에 유입하천-2 지점이 유입하천-1에 비해 다소 높은 농도를 나타내었다. 또한 TP 결과와 마찬가지로 저수지의 TN 농도(평균 1.764mg/L)에 비해서 매우 높은 농도로 유입되고 있는 것을 알 수 있다. 저수지 호 내의 TN, TP의 오염도를 감

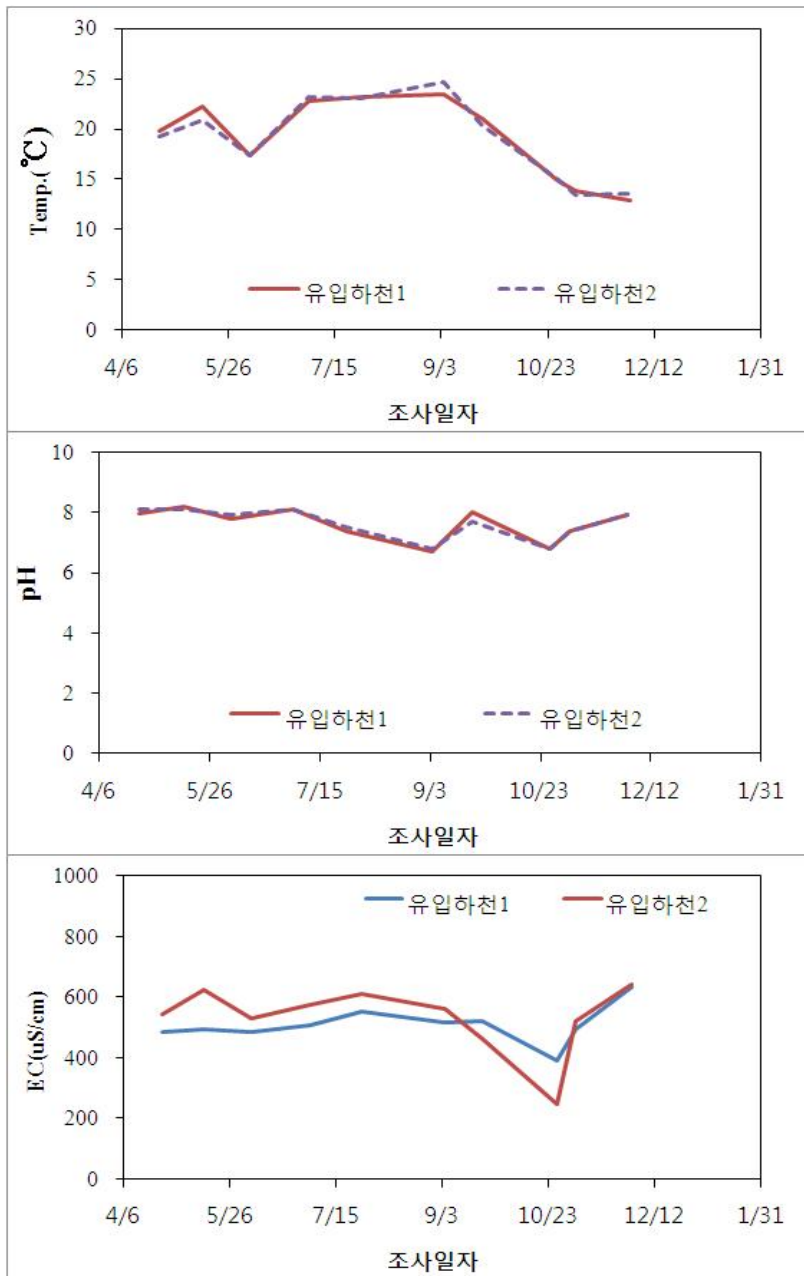
소시킴기 위해서는 유입되는 TN, TP 오염부하량을 저감시키는 것이 매우 중요하다고 할 수 있겠다.

유입하천의 NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N의 농도는 유입-1에서 각각 0.117~0.410mg/L(평균 0.242mg/L), 1.075~4.085mg/L(평균 2.900mg/L), 0.076~4.805mg/L(평균 3.045mg/L)으로 나타났고, 유입-2 지점에서는 0.005~0.370mg/L(평균 0.157mg/L), 3.111~7.846mg/L(평균 5.383mg/L), 0.159~2.546mg/L(평균 0.727mg/L)으로 나타나 유입하천-2에 비해 유입하천-1에서 NO<sub>3</sub>-N 농도가 더 높았고, NO<sub>2</sub>-N 및 NH<sub>4</sub>-N는 유입하천-2에서 더 높게 나타났다. 또한, 유입하천-1과 유입하천-2 지점에서 각각 NO<sub>3</sub>-N > NO<sub>2</sub>-N > NH<sub>4</sub>-N 순으로 검출되어 단백질 등의 유기물질 분해가 거의 끝나는 시기에 있는 것을 알 수 있었고, 이러한 결과로부터 TP, TN 등의 오염원이 저수지의 유입하천 상류에서부터 배출되어 유입되고 있음을 알 수 있다.

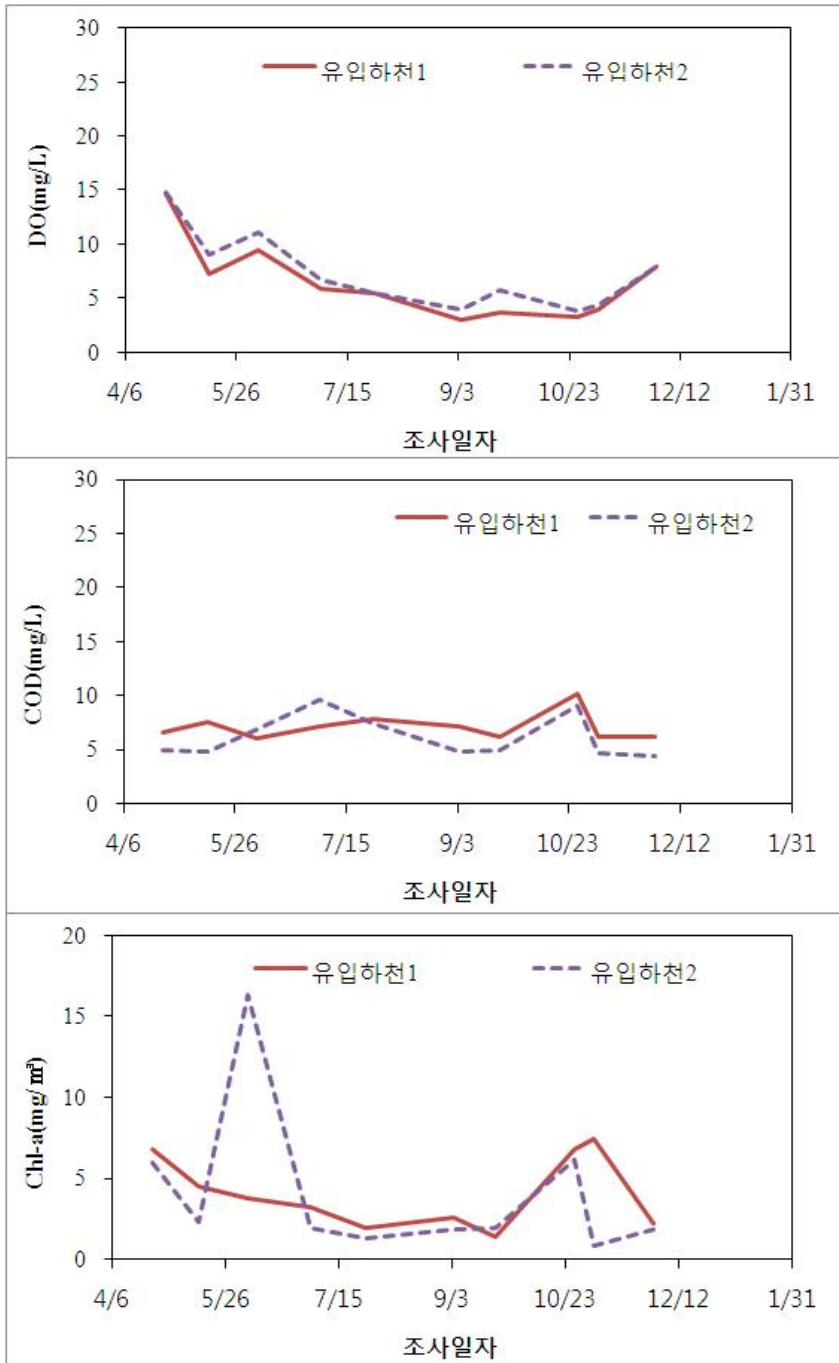
(표 3.2-5) 매화저수지 및 유입하천 수질현황

구 분	수온 (°C)	EC ( $\mu$ s/cm)	DO (mg/L)	pH	COD (mg/L)	SS (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	TN (mg/L)	TP (mg/L)	
유입 1	최대	23.4	633.0	14.6	8.2	10.2	13.7	7.5	8.080	0.694
	최소	12.9	389.0	3.0	6.7	6.0	3.3	1.3	5.736	0.278
	평균	19.1	508.0	6.4	7.6	7.1	5.8	4.1	6.975	0.528
	S.D	4.1	61.0	3.6	0.5	1.3	3.1	2.2	0.805	0.142
유입 2	최대	24.6	641.0	14.7	8.1	9.6	53.0	16.3	10.005	1.111
	최소	13.5	246.0	3.8	6.8	4.4	2.2	0.8	4.134	0.233
	평균	19.1	531.4	7.3	7.6	6.1	11.1	4.0	7.344	0.509
	S.D	4.1	113.5	3.5	0.5	1.9	15.1	4.7	1.906	0.234
표층	최대	28.2	932.0	12.4	9.0	19.2	47.0	163.9	2.467	0.183
	최소	12.6	357.0	2.4	6.7	10.6	12.5	45.8	1.064	0.070
	평균	20.8	511.0	6.8	7.8	16.5	25.2	87.5	1.764	0.137
	S.D	5.9	221.8	2.7	0.7	2.8	10.6	50.0	0.504	0.037
심층	최대	27.2	437.0	9.6	9.0	19.3	61.0	178.5	2.625	0.226
	최소	11.8	308.0	0.1	7.1	10.8	15.5	38.5	1.317	0.099
	평균	20.3	394.3	4.2	7.8	16.4	40.1	83.4	2.099	0.169
	S.D	5.7	46.5	3.4	0.6	2.8	16.8	45.5	0.440	0.045

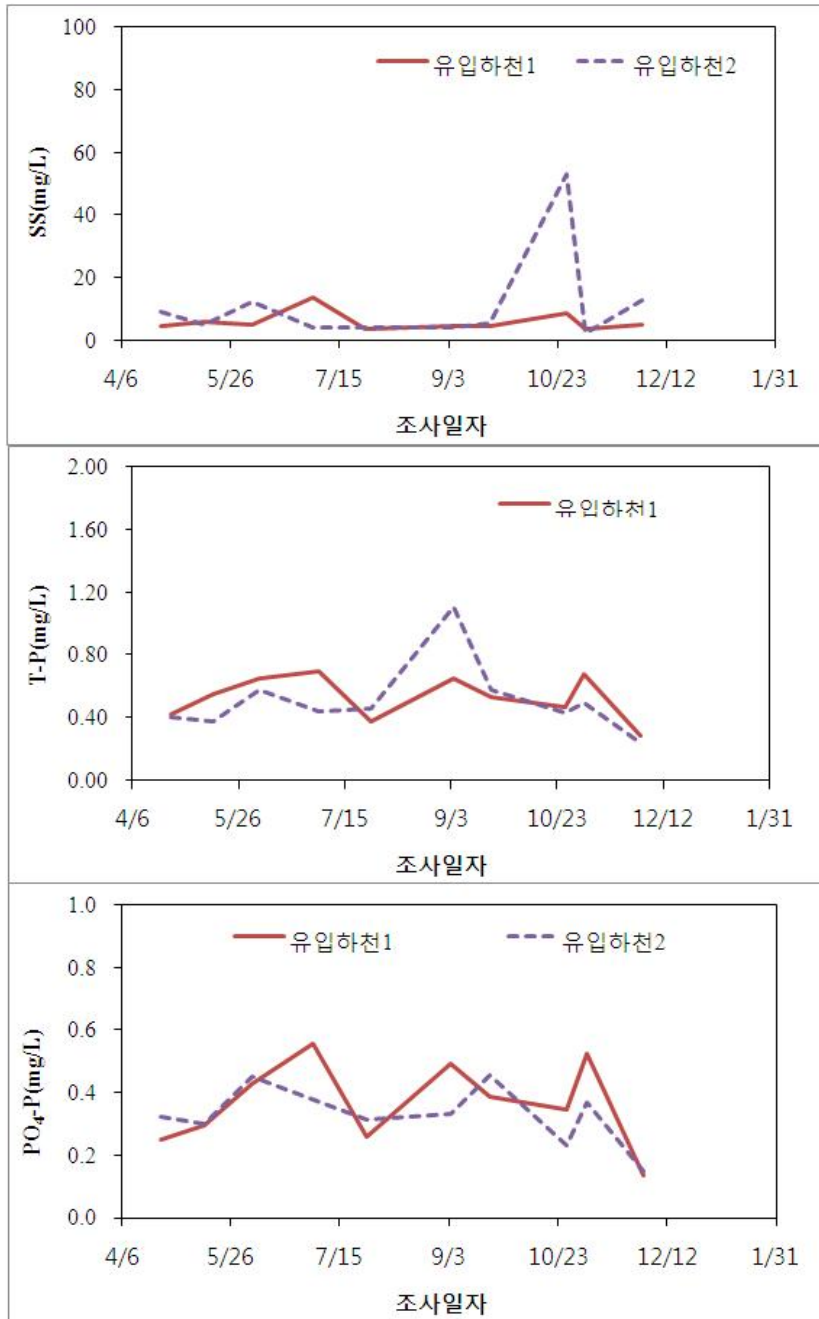
주) S.D : Standard Deviation



<그림 3.2-18> 유입하천 수질현황(수온, pH, EC)

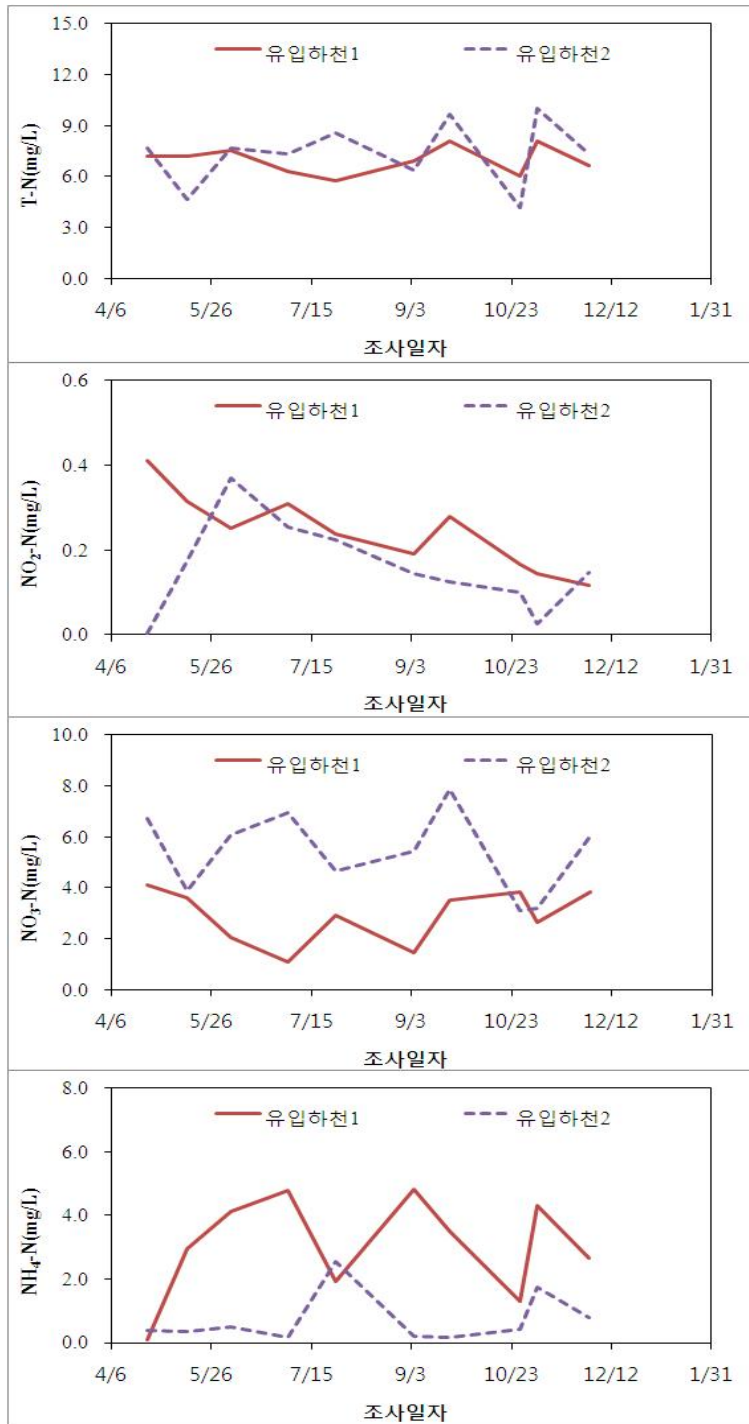


<그림 3.2-19> 유입하천 수질현황(DO, COD, Chl-a)



<그림 3.2-20> 유입하천 수질현황(SS, TP, PO<sub>4</sub>-P)



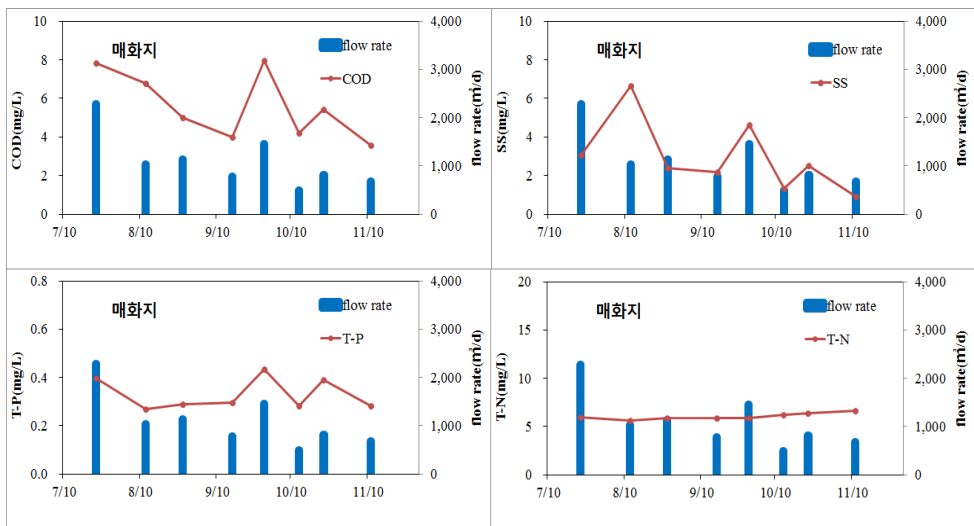


<그림 3.2-21> 유입하천 수질현황(TN, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)

나. 유입하천 유량 및 오염부하량

매화저수지 유입하천 2개소에 대한 유속조사를 실시하여 유량을 산출했으며, 유량은 2개 하천의 유량을 합산하였다. 오염부하량은 각각의 하천별 평균 수질농도에 각 하천의 평균유량을 고려하여 산출한 유량가중평균 수질농도에 합산한 유량을 곱하여 산출하였다. 유입하천-1의 평상시 유출 유속은 0.003~0.006 m<sup>3</sup>/s(평균 0.005m<sup>3</sup>/s)이고, 유입하천-2의 평상시 유출 유속은 0.005~0.020 m<sup>3</sup>/s(평균 0.011m<sup>3</sup>/s)으로 조사되었다. 유입하천-1에 비해 유입하천-2의 유출속도가 2배 이상으로 높았다.

<그림 3.2-22>는 유입하천 유량과 COD, SS, TN, TP의 유량가중평균 농도를 나타낸 그래프이다. COD, SS, TP 농도는 유량과 비슷한 경향을 보이고 있으며, TN은 유량에 관계없이 연중 일정한 농도를 유지하였다. 매화저수지 유입하천의 평상시 평균 유량은 676.5 m<sup>3</sup>/일로 연중 편차가 거의 없었고, 유입하천-1, 유입하천-2의 유량가중 평균수질은 COD 5.6mg/L, SS 3.0mg/L, TN 6.04 mg/L, TP 0.329 mg/L로 나타났다. 따라서 매화저수지 유입하천 2개소에서 평상시에 유입되는 평균 오염부하량은 COD 6.0 kg/일, SS 3.2 kg/일, TN 6.53 kg/일, TP 0.356 kg/일로 산출되었다. 유역에서는 유입되는 오염물질은 유기물계보다 질소계의 오염부하량이 높았으며, 이에 따라 유역 내 질소계 오염원에 대한 관리가 요구된다.



<그림 3.2-22> 매화저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도

다. 유입하천 중금속 등의 오염도

매화저수지 유입하천에서의 중금속 등 미량금속물질의 오염도를 조사한 결과는 (표 3.2-6)과 같다. 자연계에 염화나트륨, 염화칼륨, 염화칼슘으로 널리 분포하고 있는  $Cl^-$ 는 보통 생활오수, 축산분뇨, 화학공장폐수, 도로 제설작업 등에서 유해한다.  $Cl^-$ 농도는 유입하천-1 지점에서 1차에 41.4~45.4mg/L, 2차 조사에서는 55.6~86.4mg/L로 나타나 1차에 비해 2차 조사에서 다소 높게 나타났다. Cu는 모든 지점에서 유사하게 불검출~0.004mg/L 이하로 나타났다.

미국 환경청(USEPA)에 의해 발암물질 A등급으로 분류된 As는 유입하천-1, 유입하천-2 모두 모든 조사 시기에 불검출로 나타났고, 발암물질 B등급으로 분류된 Pb도 모두 불검출로 분석되었다. 발암물질 B등급으로 분류된 Cd는 불검출~0.004mg/L 이하로 수질환경기준(0.005mg/L 이하)을 만족하였다. 그 밖의 Hg는 유입하천-1 지점과 유입하천-2 지점 모두 불검출로 나타나 현행 환경법의 호소 수질환경기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 매화저수지에 유입되는 유입하천에서는 중금속 등에 의한 오염은 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 상류 유역에 소규모로 산재하고 있는 산업체에 의한 중금속 등의 영향은 없는 것으로 판단된다.

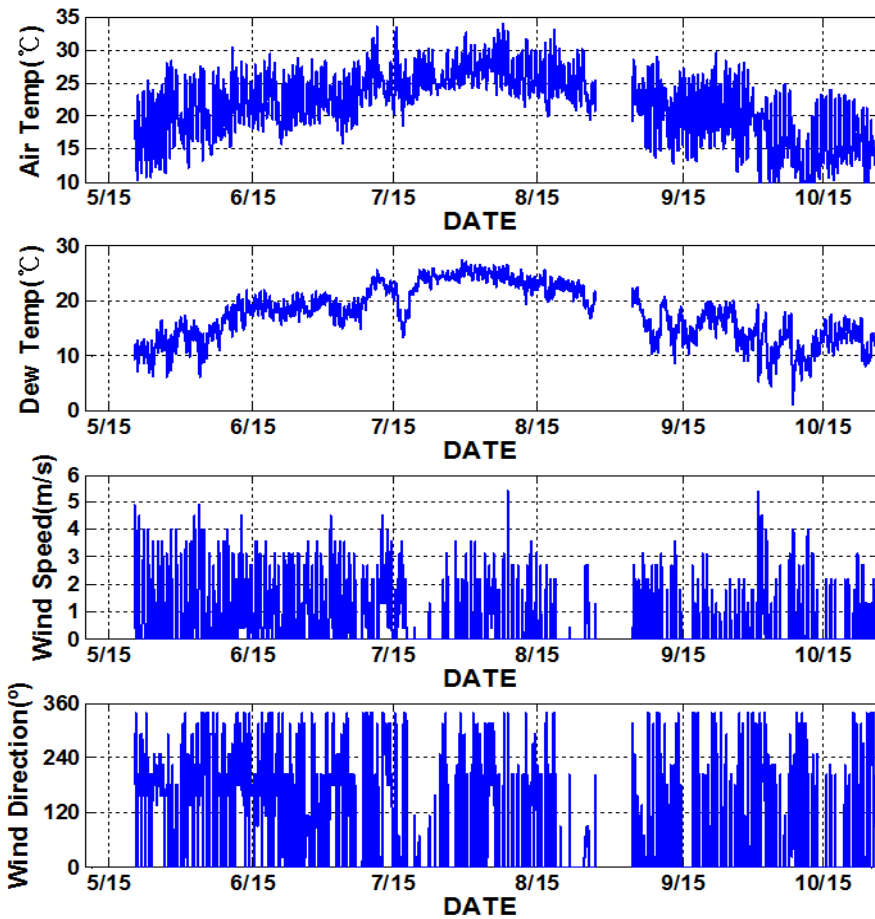
(표 3.2-6) 유입하천의 중금속 등 오염현황

조사 지점	조사 일자	$Cl^-$ (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)
하천1	4/24	44.5	0.004	불검출	불검출	불검출	불검출
	5/14	43.6	불검출	불검출	0.004	불검출	불검출
	6/5	41.4	0.002	불검출	불검출	불검출	불검출
	7/3	45.4	0.002	불검출	불검출	불검출	불검출
하천2	4/24	67.3	0.003	불검출	불검출	불검출	불검출
	5/14	86.4	불검출	불검출	0.003	불검출	불검출
	6/5	55.6	0.003	불검출	불검출	불검출	불검출
	7/3	68.3	0.003	불검출	불검출	불검출	불검출
수질환경기준			0.05 이하	0.005 이하	0.05 이하	불검출	

#### 4. 매화저수지 연속 모니터링 결과

##### 가. 기상

매화저수지 기상에 대한 연속모니터링 결과를 <그림 3.2-23>에 나타내었다. 기상 자료는 2015년 5월 20일부터 10월 27일까지 ST2 지점의 저수지 수면으로부터 상부 2m 지점에서 측정하였으며, 3차원 수리-수질 모델 구축의 경계조건으로 활용하였다. 실측기간 동안 평균 풍속은 0.7m/s이고, 풍향은 주로 북서풍이 불었으며, 이는 저수지가 서해바다 인근에 위치한 지리적 영향으로 판단된다.



<그림 3.2-23> 매화저수지 기상 연속 모니터링 결과

#### 나. 수온 및 수질

매화저수지에서 연속측정 장비를 이용하여 측정한 수온(°C), DO(mg/L), 전기전도도( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )의 전체기간 연속모니터링 결과를 <그림 3.2-24(a)>에 나타내었으며, 무 강우기 3일 동안(6월16일~6월19일)의 기온, 수온, DO의 주기적 변화를 <그림 3.2-24(b)>에 나타내었다.

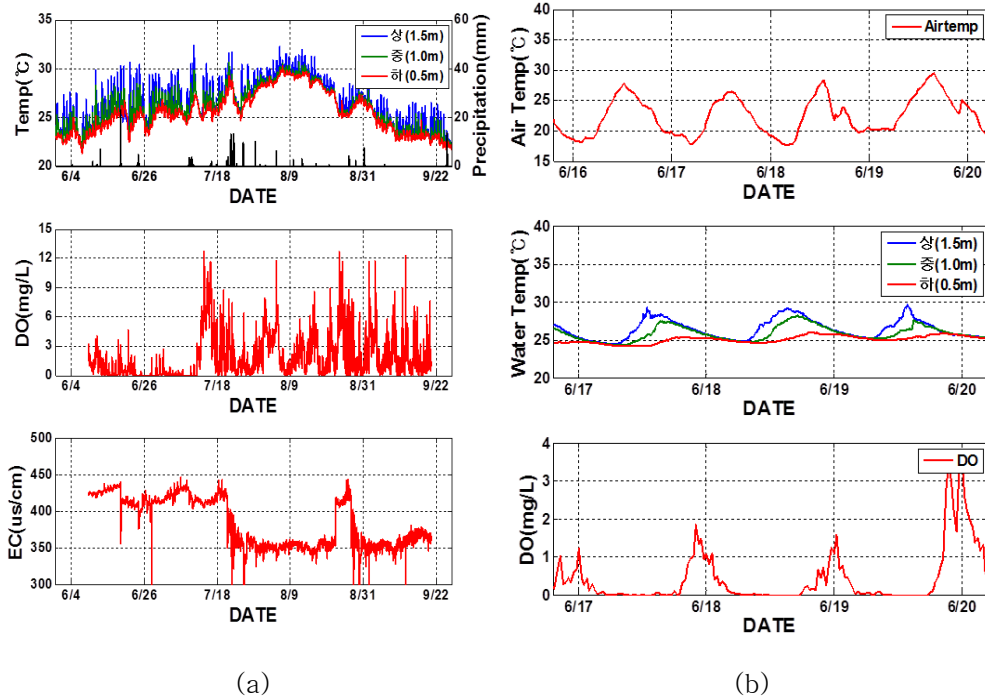
저수지 수심에 따른 표층을 상(바닥층에서 1.5m 상부 지점), 중(바닥층에서 1.0m 상부 지점), 하(바닥층에서 0.5m 상부지점)로 구분하여 각 표층별로 수온을 연속모니터링 결과, 일주기로 수온성층 형성과 대류혼합이 반복되었으며, 상층과 하층간의 수온 차이가 평균 1.4°C, 최대 5.0°C의 차이를 보였다. 또한 강우가 발생한 이후에는 일시적으로 저수지 상·하층간 수온차이가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 강우가 저수지 전체 물질 순환에 영향을 미친 것으로 판단된다.

저수지 내 DO 농도의 동적변화는 크게 나타났으며, 여름철 무강우 기간 동안 저수지 바닥층의 평균 DO 농도는 0.448mg/L로 DO가 고갈된 상태가 지속되었다. 기온 강하 및 강수가 발생할 때 대류에 의한 수직혼합에 의해 간헐적으로 회복되었으나 다시 고갈되는 현상을 보였다. 전기전도도(EC)는 강우 이후 하층 DO가 회복되면서 개선되는 것으로 나타났으며, 이는 저수지 바닥 층의 영양염류 용출이 감소했음을 의미한다.

무 강우기간 3일(6월 16일~6월 19일) 동안의 실측자료를 보면 대기 기온 변화와 같은 형태로 표층 및 중층 수온이 상승하였으나, 하층부의 수온변화는 거의 없어 상층의 열이 하층으로 전달되지 않고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 표층수와 심층수에 수온 성층이 존재하는 것을 알 수 있으며, 표층수와 심층수의 혼합이 없음을 의미한다.

수심별 표층 상, 중, 하에 대한 DO 연속 모니터링 결과에서는 낮 동안 바닥층에서 DO가 고갈 되었다가 상·하층간 수온 차이가 감소하는 일몰 이후에 DO가 일부 회복되는 것으로 나타났다. 이는 낮에 수온성층 형성과 함께 표층에서 바닥층으로의 DO 공급이 제한되며, 일몰 이후 대류 혼합에 의해 표층 DO가 저수지 저층으로 일시 공급된 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터 일주기로 상·하층간의 수직 혼합이 발생하며, 하층의 DO가 고갈되는 동안 용출된 영양염류는 혼합이 발생하는 시점에 상층부로 전달될 수 있음을 의미한다. 상류부로 전달된 TP 등은 식물성 플랑크톤의 영양원으로 작용해 플랑크톤의 과다 증식을 초래해 결국 내부 생

산성을 높이고, 호소 수질 오염도를 높이는 결과를 가져올 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 수체 저층과 퇴적물 표층의 호기성 상태를 유지하는 것이 매우 중요하며, 저수지의 수질개선 목표 달성을 위해서는 유입수의 오염물질 저감 뿐만 아니라 퇴적 오염물질의 용출 억제 등 퇴적층 관리가 매우 중요한 인자로 판단된다.



<그림 3.2-24> 매화저수지 수온 및 수질 연속 모니터링 결과

### 제3절 저수지 퇴적물 오염도 및 용출량 산정

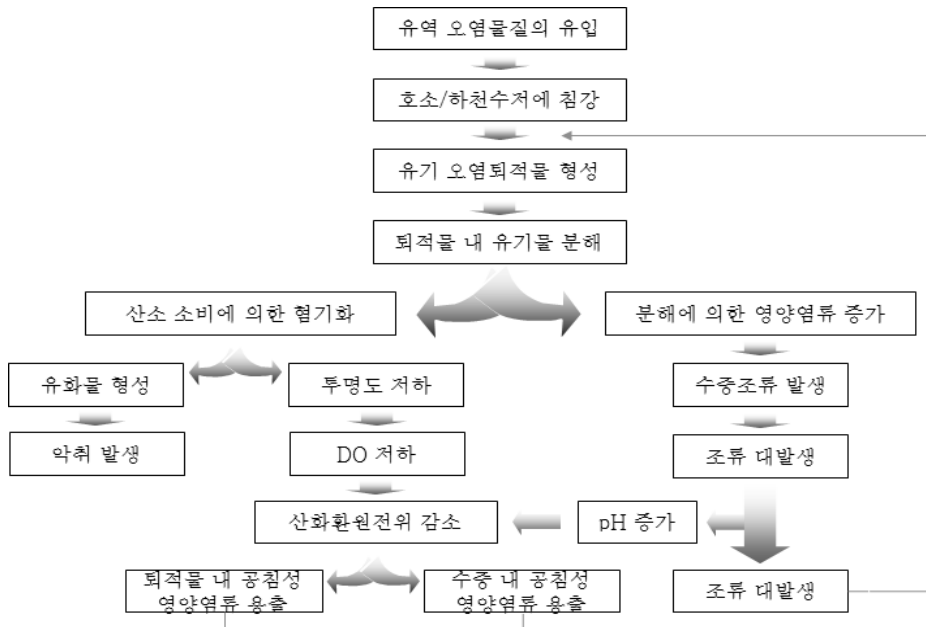
#### 1. 퇴적물 정의 및 수질 영향

퇴적물(堆積物)은 사전적 의미로 많이 쌓인 물건 또는 지리학·지학·지명에서 쓰이는 뜻으로 암석의 파편이나 생물의 유해가 강물·빙하·바람·강우등의 작용으로 운반되어 지표에 쌓인 물건을 뜻한다(국립국어연구원, 1990). 유승훈(2010)에 의하면 수질이 시간적으로 짧은 조사 시점의 수역 환경을 시사하고 있는 반면에 수저 퇴적물은 수역의 오랜 기간의 특성과 내역을 말해준다고 하여 수저 퇴적물은 장기간에 걸친 수질의 이력서라고도 하였다. 즉, 퇴적물내의 오염물질의 깊이, 방향의 축적은 어느 기간 동안의 수역의 오염상황을 반영하기 때문에 그 분석 기법에 따라서는 수환경의 오염의 역사를 추적할 수 있다.

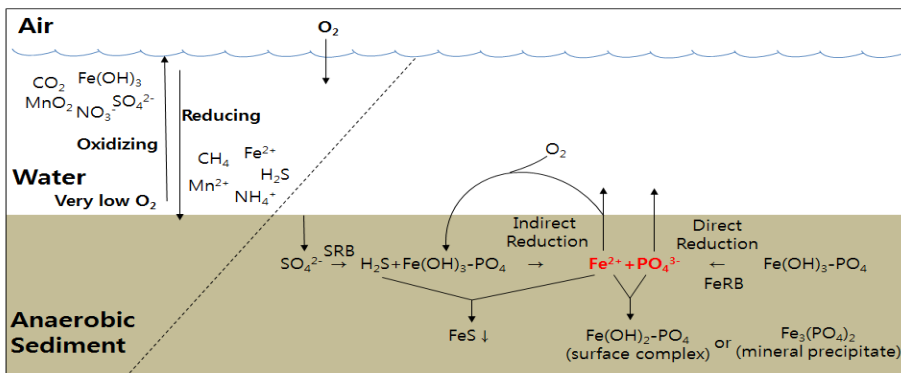
수질을 오염시키는 많은 물질은 입자상태의 물질에 흡착되어 수체의 바닥에 퇴적되었다가 수층의 환경변화나 퇴적물 내의 물리·화학적 변화에 따라 다시 수층으로 이동하기 때문에 유입된 오염물질을 개선한 후에도 수질개선이 쉽게 나타나지 않는다(신유나, 2006). 점오염원과 비점오염원을 통해 유입되는 외부 오염물질과 내부 생성 유기물(조류나 식물의 사체)은 유속이 완만한 하천이나 호소 저층에 퇴적하며, 저층에 토착 생활하는 고등 유기체의 호흡과 박테리아에 의해 이루어지는 2가 이온 철이나 망간, 황화물과 같은 기질의 산화환원 반응, 지화학적 반응을 통해 수층의 산소가 소비된다고 보고되어 있다(김도희, 2002).

생산된 유기물은 광합성에 반대되는 호흡과 분해과정을 통하여 박테리아나 동물과 같은 종속영양 생물(Heterotrophic Organism)의 에너지원으로 사용된다. 이 과정에서 산소는 소모되고 이산화탄소는 방출된다. 즉, 이산화탄소와 물은 정방향의 광합성반응에서 유기물을 합성하고 산소를 생성하는데 사용되고, 반대로 역방향의 호흡과 분해반응에서 유기물은 분해되고 산소는 소모된다(유승훈, 2010). 퇴적물에 포함된 유기물은 미생물에 의해 산소를 소모하면서 분해되며 만일 이 과정에서 수층(水層)의 혼합이 이루어지지 않아 지속적인 산소 공급이 중단된다면 유기물이 다량 포함된 퇴적물 주위의 산소는 고갈되고 따라서 퇴적물 내의 저서는 메탄, 황화수소 등의 유독성 가스를 생성하는데 이는 저서생물의 생존에 치명적

인 악영향을 미치게 된다. 또한 침전된 유기물이 분해되어 무산소 환경이 되면 질소, 인 등에 의해 표층으로 재공급되어 식물성플랑크톤의 성장을 촉진시키고 결국 새로운 유기물을 형성한다. 이러한 수중 유기물의 증가는 곧 수질의 저하를 의미한다(이창희 등, 1998; 이창희 등, 2000). 그리고 하천의 퇴적물은 물 흐름과 하천의 지형적인 형상 등에 따라 부상하여 하천표층수의 BOD 증가의 원인으로 작용하기도 한다. <그림 3.3-1>에 퇴적물 형성과정 및 수체 내에서의 변화 과정을 도식화했다.



<그림 3.3-1> 퇴적물 형성 과정 및 수체 내에서의 변화 과정



<그림 3.3-2> DO 변화에 따른 수체-퇴적물 물질교환

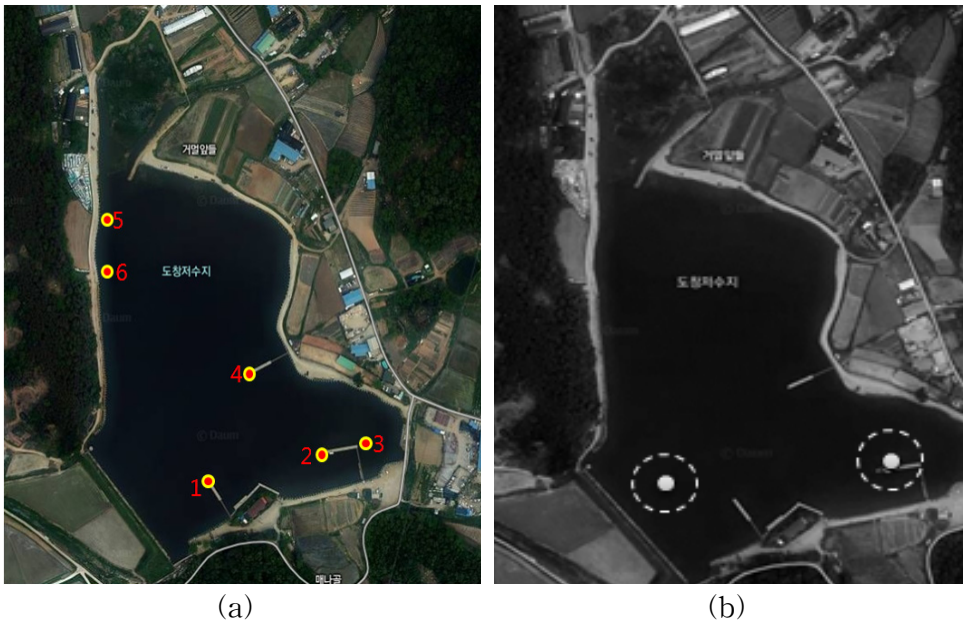


## 2. 퇴적물 이화학적 특성 및 오염도 조사

### 가. 퇴적물 조사 및 실험방법

#### (1) 조사지점

연구대상지구인 매화저수지는 수체모양이 접시모양을 띤 호소로 평균수심이 2~3m 정도로 매우 낮아 퇴적물로부터 용출되는 오염물질에 의해 저수지 수질이 크게 영향을 받을 수 있는 환경조건의 저수지이다. 매화저수지 퇴적물의 이화학적 특성 및 중금속 오염도를 조사하기 위하여 농촌연구원에서 <그림 3.3-3(a)>과 같이 저수지 6지점을 선정하여 퇴적물에 대한 조사를 실시하였다. 공동연구기관인 충북대학교에서는 퇴적물 오염도(CODsed, SOD, 강열감량 등) 조사 및 퇴적물 오염물질 용출 특성을 파악하고, 저수지 호 내의 융복합 수처리시스템 설치 전·후의 퇴적물 오염도 변화 및 오염물질 용출특성 변화를 조사하기 위하여 <그림 3.3-3(b)>와 같이 호 내 제방 앞과 낚시터 좌대 앞 2지점에서 퇴적물 조사를 실시하였다. 조사기관별 매화저수지 퇴적물 조사 및 시료 채취일자는 (표 3.3-1)와 같다.



<그림 3.3-3> 매화저수지 퇴적물 용출실험 조사지점

(표 3.3-1) 저수지별 퇴적물 조사일자 및 지점 수

조사기관	채취일자	조사지점	비 고
농어촌연구원	2015.04.28	6지점	수처리장치 설치 전
	2015.05.19	6지점	수처리장치 설치 전
	2015.12.07	6지점	수처리장치 설치 후
충북대학교	2015.06.10	2지점	수처리장치 설치 전
	2015.08.05	2지점	수처리장치 설치 전
	2015.11.06	2지점	수처리장치 설치 후

(2) 분석항목 및 실험방법

퇴적물의 이화학적 특성 및 오염도를 알아보기 위하여 퇴적물 채취 장비를 이용하여 시료를 채취하였고, 즉시 분석실로 운반하여 퇴적물의 입도분포, 이화학적 항목, 중금속, 원소분석, 강열감량, 오염물질 용출량(COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, TP)을 각각 분석하였다. 분석방법은 토양오염공정시험법 및 폐기물공정시험법에 준하여 분석하였으며, 분석방법 및 이에 따른 분석기기는 (표 3.3-2)에 제시하였다.

(가) pH, EC, TN, TP

pH 측정은 직접측정법을 이용하였으며, 퇴적물과 물의 비율을 1:5로 하여 현탁액을 만들어 pH meter(Thermo Orion model 420A+)로 측정하였다. 전기전도도(Electric Conductivity, EC)도 직접측정법을 이용하였으며, 퇴적물과 물의 비율을 1:5로 희석하여 현탁액을 만들어 거기에 EC meter를 꽂아 직접 측정하였다. 퇴적물 내의 총질소(Total Nitrogen, TN) 실험은 수질오염공정시험법상의 알칼리성 자외선 흡광광도법으로 실험하였다. 퇴적물의 일정 양을 취하여 거기에 알칼리성 과황산칼륨을 넣고 120℃에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화한 후 산성상태에서 자외선 흡광을 측정하여 질소를 정량하였다. 퇴적물의 TP는 아스코르빈산법으로 측정하였다. 퇴적물의 일정 양을 취하여 과염소산을 주입한 뒤 Sand Batch에서 가열하여 퇴적물의 인을 가용성 인으로 전환하고, 분해액을 자외선 흡광광도계를 이용하여 흡광도를 측정하여 총인을 정량하였다.

(표 3.3-2) 퇴적물 분석방법 및 분석에 이용된 기기

분석항목	분석방법	분석기기
pH	직접측정법	pH meter
강열감량 (Ignition Loss, IL))	무게차감법	Thermogravimetric analyzer, TGA
원소분석 (Elementary Analysis, EA)	C,H,N,S 분석기	Elemental Analyzer
총질소(Total Nitrogen, TN)	과황산칼륨분해법	UV
총인(Total Phosphorus, TP)	아스코르빈산법	UV
인산염(Phosphate, $PO_4^{3-}$ -P)	아스코르빈산법	UV
전기전도도 (Electric Conductivity, EC)	직접측정법	EC meter
입도분포 (Particle Size Distribution, PSD)	직접측정법	PSA(Cilas-1064)



(a) 퇴적물 채취 장비



(b) 퇴적물 채취 모습

&lt;그림 3.3-4&gt; 퇴적물 채취 장비 및 채취 모습

## (나) 입도분석

퇴적물 입도분석은 토양 시료에 존재하는 무기 입자( $<2\text{mm}$ )의 크기 분포를 측정하는 실험으로 토성(Soil Texture)을 알아보는데 그 목적이 있다. 입도분석의 특징은 토양입단을 화학적, 물리적인 방법에 의해 파괴, 분산시켜 sieving과 sedimentation을 통해 크기에 따라 입자를 분리시키는데 있다. 토양 입자는 바위(0.25m)에서 submicron clay( $<1\mu\text{m}$ )까지 광범위하게 존재하는데, 일반적으로 토양 입자는  $2,000\mu\text{m}$ 이하의 주요한 세 가지 군(sand, silt, clay)으로 나누어진다. (표 3.3-3)은 퇴적물의 입경 크기에 따른 분류를 나타낸 것으로, 보통 자갈, 굵은 모래, 가는 모래, 실트, 점토로 분류되며, 퇴적물은 일반적으로 모래, 실트, 점토로 구성되어 있다.

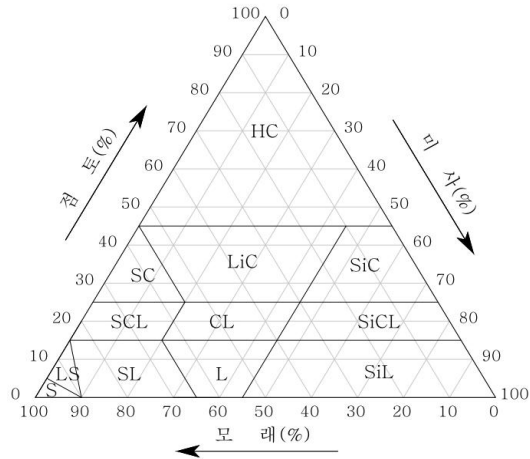
퇴적물 및 토양의 입도분석은 풍건시료를 과산화수소에 의해 유기물을 분해시킨 후, 분산제인 5% HMP를 가한 뒤 시료 중 sand를 wet sieving으로 fractionation 한다. 남은 시료를 1L 실린더로 옮기고 1분간 end-over-end로 흔든 후 방치한 뒤, 일정 시간 후 25ml 피펫으로 10cm 깊이에서 clay를 채취하고 무게를 잰다. 본 연구에서는 퇴적물 입경크기 분류에 따른 토성(soil texture)은 (표 3.3-4) 및 <그림 3.3-5>에 나타난 분류법을 이용하였다.

(표 3.3-3) 퇴적물의 입경크기에 대한 분류

구 분	입 경	비 고
자갈(Gravel)	> 2 mm	토성에 관여하지 않음
굵은 모래(Coarse sand)	2~0.2mm	토성에 기여도가 낮고, 공극율, 통기성, 배수 작용에 관여
가는 모래(Fine sand)	0.2~0.02mm	
실트(Silt)	0.02~0.002mm	모래와 점토의 중간적 성질
점토(Clay)	<0.002mm	토성에 가장 크게 기여함

(표 3.3-4) 입경크기 분류에 따른 토성

점토함량	토성	기호	점토(%)	실트(%)	모래(%)
15% 이하	사토	S	0~15	0~15	85~100
	양질사토	LS	0~15	0~15	85~95
	사양토	SL	0~15	0~35	65~85
	양토	L	0~15	20~45	40~65
	실트질양토	SiL	0~15	45~100	0~55
15~25%	사질식양토	SCL	15~25	0~20	55~85
	식양토	CL	15~25	20~45	30~65
	실트질식양토	SiCL	15~25	45~85	0~40
25~45%	사질식토	SC	25~45	0~20	55~75
	경식토	LiC	25~45	0~45	10~55
	실트질식토	SiC	25~45	45~75	0~30
45% 이상	중식토	HC	45~100	0~55	0~55



<그림 3.3-5> 퇴적물 입경크기 분류에 따른 토성

#### (다) 강열감량

강열감량은 퇴적물을 고온으로 가열한 후 그 무게 차이를 통해 퇴적물 중 유기물량을 측정하는 방법으로 유기물질 중 가장 많은 양을 차지하며 비교적 그 측정이 쉬운 탄소를 이용하는 것이 간편하면서도 정밀한 값을 얻을 수 있다. 습시료 약 100g을 완전히 건조시킨 후 건조된 시료를 막자사발을 사용하여 곱게 분마한다. 이 때 분마된 시료는 230 메쉬(0.063 mm) 크기의 체를 모두 통과하여야 한다. 전처리 된 시료 약 50g을 취해 전기로를 이용하여 550℃의 온도로 2시간 동안 강열한 후 그 무게 차이를 백분율로 나타낸 값이 강열감량이다. 즉 다음 식과 같다(강주현, 2010; 해양수산부, 2007).

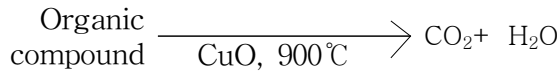
$$\text{강열감량(\%)} = (\text{가열전 시료무게} - \text{가열후 시료무게}) / \text{가열전 시료무게} \times 100$$

#### (라) 원소분석

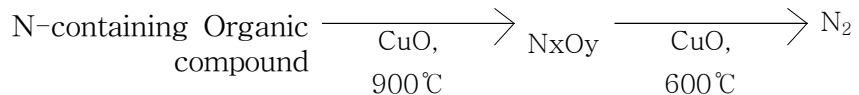
원소분석은 정확한 양의 시료를 O<sub>2</sub> 존재 하에서 1,000℃ 이상 고온에서 연소시켜 시료 구성원소(C, H, N, S 및 O)를 이온화한 후 oxidation reactor에서 H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>로 산화시킨 후 이를 다시 reduction reactor에서 NO, NO<sub>2</sub>는 N<sub>2</sub>로, SO<sub>3</sub>는 SO<sub>2</sub>로 환원시키고 CO는 CO<sub>2</sub>로 다시 산화시킨다. O의 측정치는 산소가 없는 상태에서 열분해(pyrolysis) 과정을 거친 후 최종적으로 생성된 CO<sub>2</sub>의 양을 측정하고 기타의 생성 기체는 흡수트랩(absorption trap)으로 분리한다. 이러한 과정

을 거쳐 최종적으로 생성된 가스 상태의 미지샘플을 carrier gas(He)하에서 GC column으로 각각 분리하여 열전도도차에 의해 열전도도형 검출기(thermal conductivity detector, TCD)에서 감지되고, 다시 각각의 함량을 계산하게 된다. 이러한 원리는 미지 샘플의 유기화합물은 대부분 C, H, N, S, O로 구성되어 있으며, 각 원소를 분석하는 원리는 다음식과 같다.

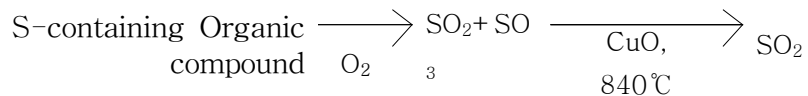
(탄소 및 수소 분석)



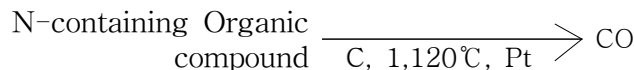
(질소 분석)



(황 분석)



(산소 분석)



원소 분석기의 전체적인 분석과정은 시료 도입장치, 산화, 전환, 분리 및 검출의 순차적인 단계로 진행된다. 시료 도입과정에서는 시료의 무게를  $\mu\text{m}$ 까지 정확히 측정하여야 하며, 무게가 측정된 시료는 오염 및 손실 없이 연소 장치로 투입되어야 한다. 시료 용기로는 주로 주석 성분의 tin foil을 사용하여 두께는 0.01mm가 적당하다. 보통 시료 투입은 일관성과 재현성을 위하여 자동 시료 처리기를 장착하며 시료는 중력에 의하여 반응관으로 떨어지게 된다. 산화과정은 시료내의 유기화합물을 완전히 연소·산화시켜 혼합기체상태로 변화시키는 역할을 한다. 시료는 산소와 헬륨의 혼합기체(50:50)와 함께 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 로 예열된 석영관의 상부에서 주석 성분의 tin foil로 짰 분석용 샘플을 산화 반응과 함께 국부적으로 1,800 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승 순간 연소하여 산화된 혼합기체가 된다. 불완전 산화를 막기 위하여 과량의 산소로 응집된 oxidation catalyst를 통과 시킨다. 전환과정은 이동

기체와 함께 산화된 혼합 기체들이 GC column으로 들어가기 전에 분석이 용이한 상태로 전환시켜 주는 역할을 한다.

Cu로 충전된 영역에서는 상기 질소 분석식과 같이  $N_xO_y$ 와  $SO_3$ 을 분석에 용이한  $N_2$ 와  $SO_2$ 로 전환시켜 주는 역할을 한다. 분리 및 검출단계에서는 보통  $60^\circ C$ 로 예열된 GC로 혼합기체들이 통과하며  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  및  $SO_2$  상태로 분리된다. 분리된 기체들은 열전도 검출기에 의하여 전기신호로 정량적으로 변환되며, 원소분석기와 연결된 컴퓨터 모니터에 연속적인 크로마토그램을 얻을 수 있다.

본 실험에 사용된 기기는 Thermo사의 Flash EA 2000 원소분석기로 탄소 측정범위 0.01~100%, sample size 15~20  $\mu g$ , 좌우 컬럼 최고설정 온도  $850^\circ C$ , 오븐 범위  $65^\circ C$  및 detection limit는 0.01%이다.

#### (마) CODsed

CODsed는 과망간산칼륨법(CODMn법)과 중크롬산칼륨법(CODCr법) 두 가지로 구분되어 있는데 본 연구에서는 중크롬산칼륨법을 적용하여 실험하였다. 중크롬산칼륨법은 미국 EPA에서 적용되고 있는 Plumb(1981)에 의해 정립된 CODsed 측정방법을 일부 변형하여 사용하였는데, 이는 중크롬산칼륨으로 유기물을 산화시킨 후, 이때 생성된 푸른색의  $Cr^{3+}$ 을 0.1M 황산제일철암모늄(FAS) 표준용액을 이용하여 붉은색으로 변할 때까지 적정하여 CODsed 농도를 산출하는 방법이다. 실험방법에 대해 정리하면, 125ml 삼각플라스크에 적당량의 습시료를 0.001g 단위까지 정확히 측정하여 주입하고 증류수를 더해 시료와 더한 무게가 10g이 되도록 한다. 이때, 바탕시료는 시료를 제외하고 증류수만 주입하여 실험한다. 6ml의 분해용액(단위 L 당 10.216g 중크롬산칼륨+ 167ml 진한황산 + 33.3g 황산수은)과 14ml 황산용액(5.5g 황산은/1kg 진한황산)을 주입하고, 주입한 즉시 뚜껑을 닫아 밀봉 후 완전히 섞이도록 교반한다. 삼각플라스크를  $150^\circ C$ 로 예열된 건조기에서 약 2시간 동안 반응시킨 다음, 0.1M FAS 표준용액으로 적정하며, 이 때 지시약은 페로인 용액을 사용한다.

화학적 산소요구량은 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$COD_{sed}(COD_{Cr}, mgO_2/kg-dry) = (A - B) \times \frac{8000}{M} \times N \div \left(1 - \frac{W(\%)}{100}\right)$$

여기서, A= 바탕시료 적정시 0.1M FAS 표준용액 소요량(ml)  
 B= 시료 적정시 0.1M FAS 표준용액 소요량(ml)  
 M= 시료의 무게(g)  
 W= 함수율(%)  
 N= FAS 표준용액의 몰농도인 0.1M  
 8,000= 산소당량(me/eq)

국내에는 현재 CODsed에 대한 환경기준이 정립되지 않아 미국 환경보호청(USEPA) 평가 기준에 근거하여 본 연구결과를 비교하였다. (표 3.3-5)는 USEPA의 퇴적물 평가 기준을 정리한 것이다.

(표 3.3-5) USEPA 퇴적물 평가 기준(CODsed)

구분	USEPA sediment quality standards		
CODsed (mg/kg-dry)	non polluted	moderately polluted	heavily polluted
	< 40,000	40,000~80,000	> 80,000

(바) Sediment Oxygen Demand(SOD)

본 연구에서는 <그림 3.3-6>과 같은 장치를 이용하여 실험실 방법으로 SOD를 측정하였다. Grab sampler를 이용하여 채취한 퇴적물을 아크릴 재질의 용기(높이 330mm, 직경 130mm)에 층이 손상되지 않도록 약 5cm를 담아 공기와 접촉이 없도록 밀폐하여 실험실로 운반한 후, 4℃에 보관하여 2주 이내에 사용하였다. SOD 측정에 이용되는 퇴적물에 각 지점의 현장 하층수를 질화작용 저해제인 2-chloro-6-(trichloro-methyl) pyridine을 methanol에 용해시켜 chamber내 최종 농도가 0.01g/L이 되도록 튜브를 이용하여 교란이 일어나지 않게 첨가하여 퇴적물의 탄소성 산소요구량을 측정하였다(강양미 등, 2000). 기포가 생기지 않도록 챔버에 심층수를 가득 채운 후 교반장치(Mixing propeller: 60rpm), DOMeter(YSI 5000 DOMeter), 기록계가 연결된 cap을 덮어 20℃에서 배양하여 DO 변화가 없을 때까지 15분 간격으로 계속 측정하였다. SOD 계산 및 보정은 시간 경과에 따른 용존산소 소비량에 주입한 현장수의 부피(L)를 곱하고 반응조의 단면적(m<sup>2</sup>)을 나누어 다음과 같이 산출하였다(국립환경연구원, 2003).



$$SOD(mg/m^2 \cdot d) = O_c \times V/A/T$$

여기서,  $O_c$  :  $O_2$  소비량(mg/L)  
 $V$  : water volume(L)  
 $A$  : water-sediment interface area( $m^2$ )  
 $T$  : 시간(day)

온도차에 의한 SOD의 보정은 다음 식으로 계산하였다(Truax et al. 1995).

$$SOD(t_1) = SOD(t_2) \times 1.065^{(t_1 - t_2)}$$

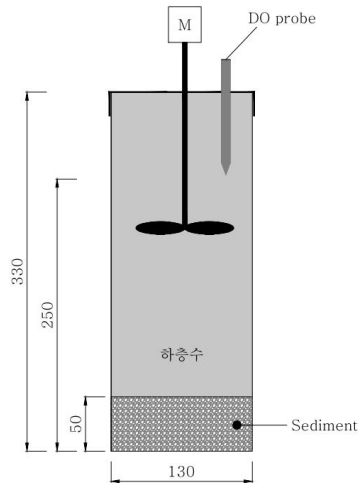
여기서,  $t_1$  : 배양시의 온도  
 $t_2$  : 20°C로 표준화 시킨 온도

SOD 측정시 총 소비되는 DO는 저질에 의한 산소 소비 외에 수층 자체의 산소 소비 값을 포함하므로, 순수한 SOD를 측정하기 위해 수층에 의한 DO 소비를 다음과 같이 보정하였다.

chamber 내에서 소모된 총산소량(mg/L) = DO 변화량 × 하층수 부피(L)

수중유기물에 의해 소모된 산소량(mg/L) = BOD5(mg/L)/5 × 하층수 부피(L) × 시간(day)

저질에 의해 소모된 산소량(mg/L) = ① - ②



<그림 3.3-6> 퇴적물 산소요구량(SOD) 측정 장치

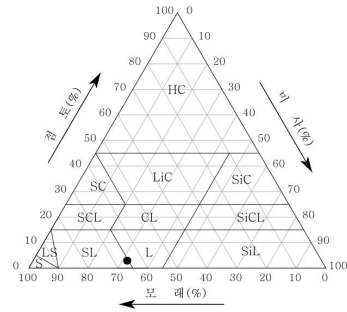
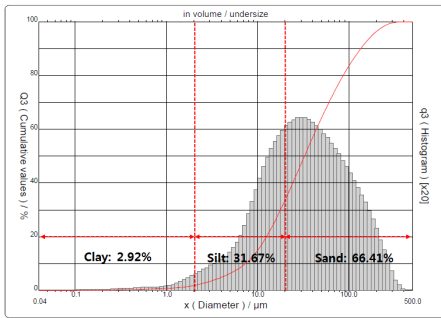
나. 퇴적물의 이화학적 특성

(1) 입도분석 결과

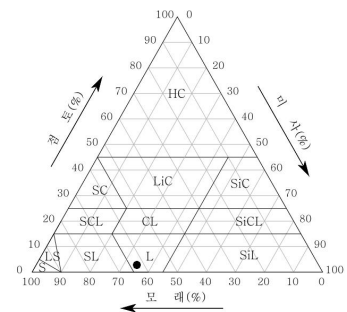
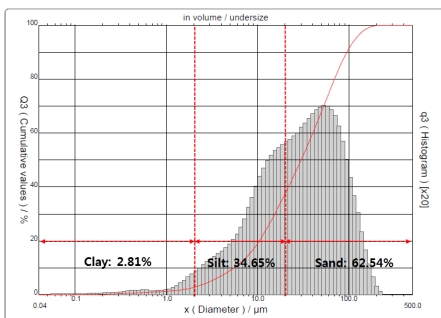
매화저수지의 제방 앞과 유입부 지점인 좌대 앞 2지점에서 조사한 퇴적물의 입도분석 결과를 입경크기 분류에 따른 토성별로 나타내었다. 본 연구에서 퇴적물 입도분석을 위한 전처리는 Ultrasounds를 이용하여 60초 동안 진행하였다.

(가) 1차 조사결과

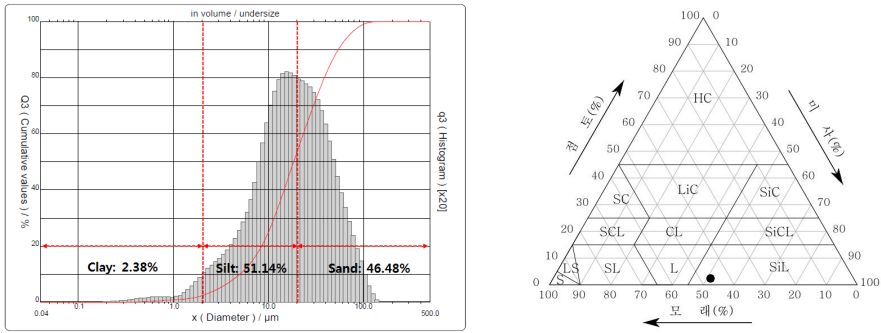
1차에 조사한 입도분포 결과를 지점별로 <그림 3.3-7>~<그림 3.3-10>에 나타내었고, 입도조사 결과에 기초해 토성을 분류한 결과는 (표 3.3-6)에 정리하였다. <그림 3.3-11>은 1차 조사결과 지점별 입도함유량을 그래프로 나타낸 것이다.



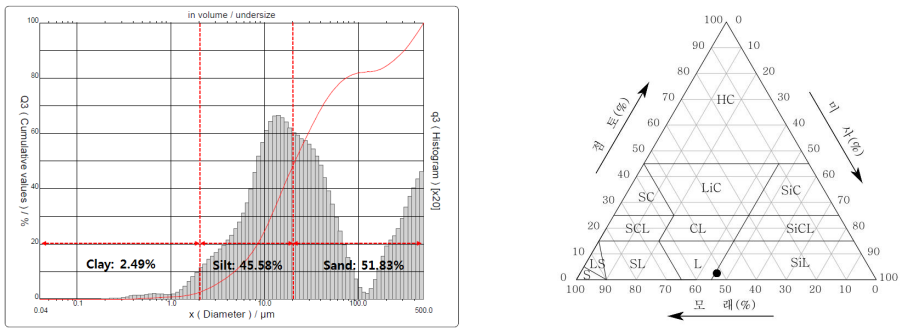
<그림 3.3-7> 매화 제방(전처리 전)



<그림 3.3-8> 매화 제방(전처리 후)



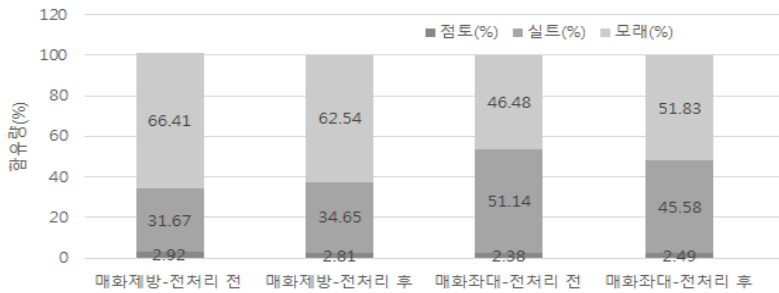
<그림 3.3-9> 매화 좌대(전처리 전)



<그림 3.3-10> 매화 좌대(전처리 후)

(표 3.3-6) 1차 입도분포 분석결과

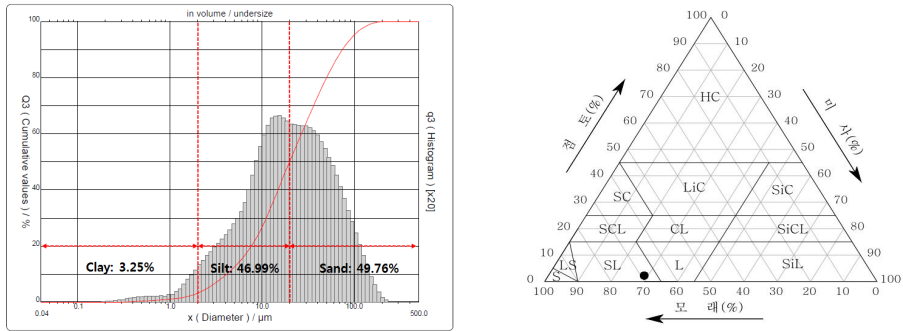
위 치		점토(%)	실트(%)	모래(%)	기호
매화 제방	전처리 전	2.92	31.67	66.41	SL
	전처리 후	2.81	34.65	62.54	L
매화 좌대	전처리 전	2.38	51.14	46.48	SiL
	전처리 후	2.49	45.58	51.83	SiL



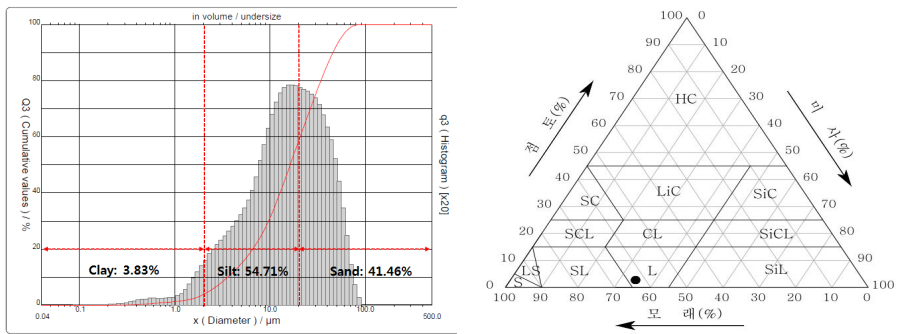
<그림 3.3-11> 지점별 입도 함유량(1차)

(나) 2차 조사결과

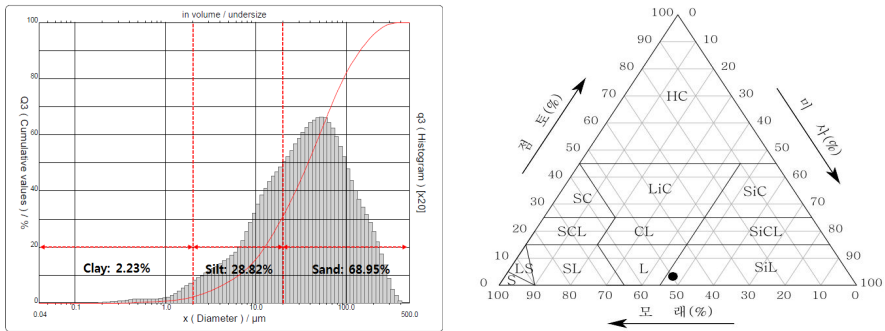
2차에 조사한 입도분포 결과 및 토성을 지점별로 <그림 3.3-12>~<그림 3.3-15>에 나타내었다.



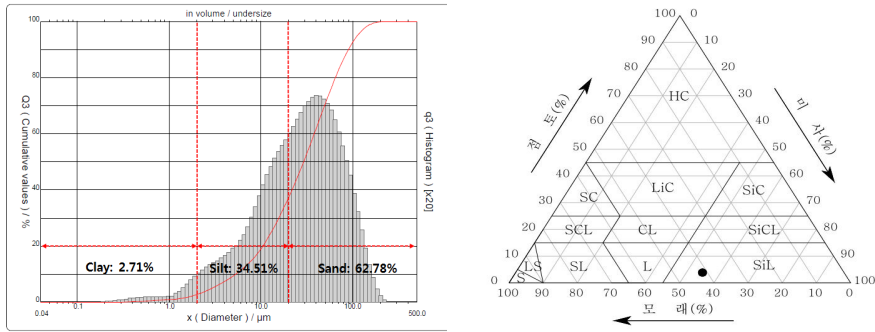
<그림 3.3-12> 매화 제방(전처리 전)



<그림 3.3-13> 매화 제방(전처리 후)



<그림 3.3-14> 매화 좌대(전처리 전)

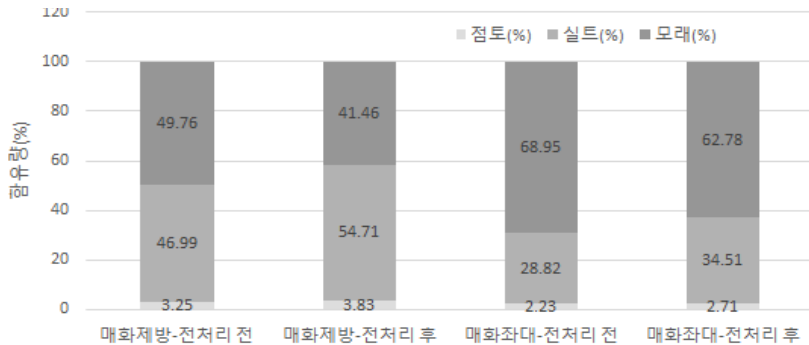


<그림 3.3-15> 매화 좌대(전처리 후)

2차 입도분포 결과에 기초해 지점별로 입경크기 분류에 따른 토성을 (표 3.3-7)에 정리하였다. 매화 제방지점은 전처리 전에는 SL, 전처리 후에는 토성이 Loam으로 나타났고, 좌대 지점은 모두 SiL으로 조사되었다.

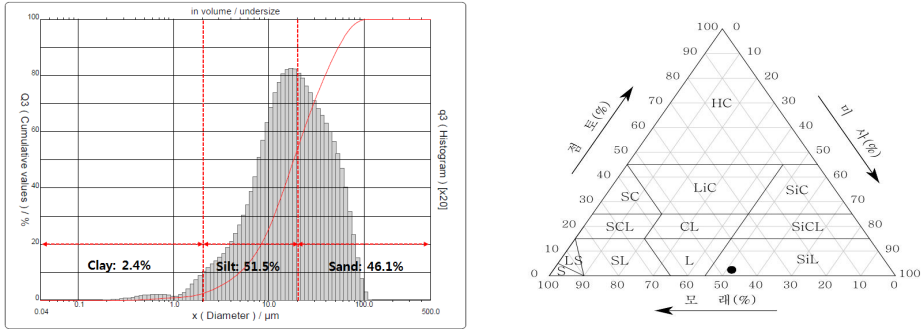
(표 3.3-7) 2차 입도분포 분석결과

구분		점토(%)	실트(%)	모래(%)	기호
매화 제방	전처리 전	3.25	46.99	49.76	SL
	전처리 후	3.83	54.71	41.46	L
매화 좌대	전처리 전	2.23	28.82	68.95	SiL
	전처리 후	2.71	34.51	62.78	SiL

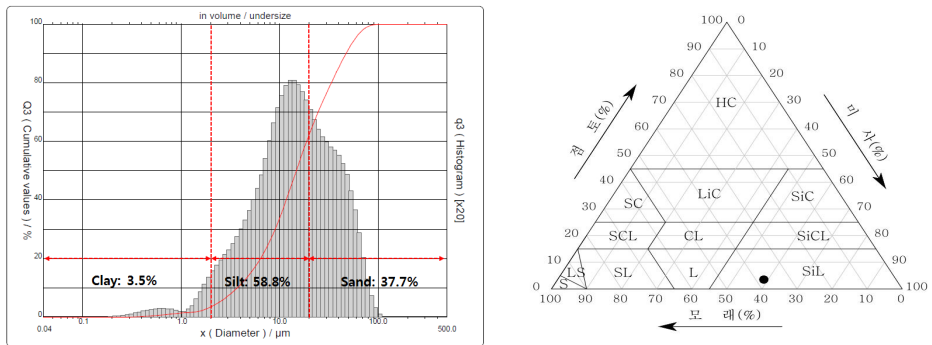


<그림 3.3-16> 지점별 입도 함유량(2차)

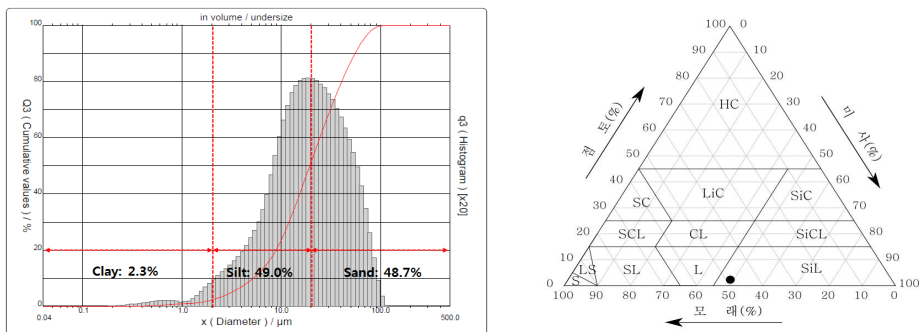
(다) 3차 조사결과



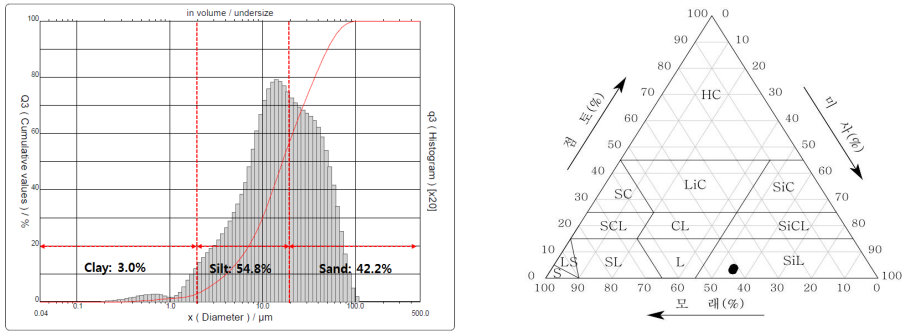
<그림 3.3-17> 매화 제방(전처리 전)



<그림 3.3-18> 매화 제방(전처리 후)



<그림 3.3-19> 매화 좌대(전처리 전)

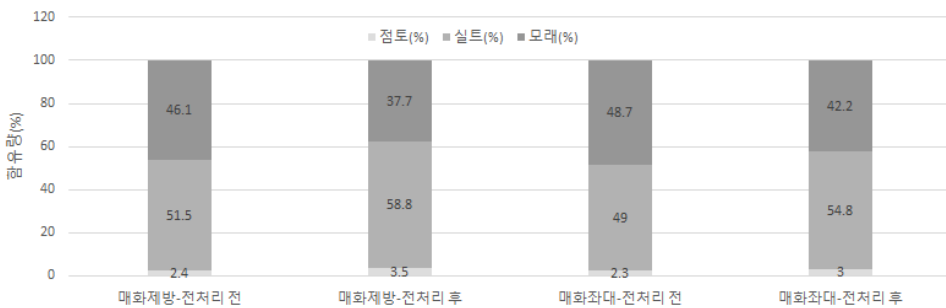


<그림 3.3-20> 매화 좌대(전처리 후)

3차 입도분포 결과에 기초해 지점별로 입경크기 분류에 따른 토성을 (표 3.3-8)에 정리하였다. 전처리 상관없이 모든 지점에서 토성이 SiL으로 조사되었다.

(표 3.3-8) 3차 입도분포 분석결과

구 분		점토(%)	실트(%)	모래(%)	기 호
매화 제방	전처리 전	2.4	51.5	46.1	SiL
	전처리 후	3.5	58.8	37.7	SiL
매화 좌대	전처리 전	2.3	49.0	48.7	SiL
	전처리 후	3.0	54.8	42.2	SiL



<그림 3.3-21> 지점별 입도 함유량(3차)

1·2·3차의 입도분포 결과를 (표 3.3-9)에 정리하였다. 일반적으로 미세입자일수록 보다 많은 오염물질이 분포되어 있다고 알려져 있으며, 매화의 경우 수처리장치 가동 후가 가동전과 큰 차이를 보이지 않고 있는데, 이는 수계 내 환경적인 요인이 작용한 결과라 판단된다. 보다 정확한 분석을 위해서는 지속적으로 관찰할 필요성이 있다.

(표 3.3-9) 1, 2, 3차 입도분포 및 토성 분석결과

위 치		1차	2차	3차	비교(1차년도)
매화 제방	전처리 전	SL	SL	SiL	SiL
	전처리 후	L	L	SiL	SiL
매화 좌대	전처리 전	SiL	SiL	SiL	SL
	전처리 후	SiL	SiL	SiL	L

(2) 강열감량 결과

매화저수지 퇴적물의 강열감량 분석 결과를 (표 3.3-10) 및 <그림 3.3-22>~<그림 3.3-27>에 정리하였다. 공동연구기관인 충북대학교에서 조사한 매화 제방과 매화 좌대 지점은 작년도 채취시점과 금년도의 채취시점에 차이가 있어 직접적인 비교는 어려울 것으로 판단된다. 매화 제방에서는 11.0~12.1%로 나타났고, 매화 좌대에서는 11.6~19.0%로 제방에 비해 높게 나타났다. 이러한 결과는 (표 3.3-11)의 미국 환경보호청(USEPA) 퇴적물 환경기준과 비교해 보면, 매화저수지는 2014년도와 2015년도 모두 강열감량기준 오염도는 “heavily polluted”로 나타났다. 또한 국내 국립환경연구원의 예규 「호소 퇴적물의 항목별 오염평가 기준」에 의해서도 “심각하게 명백한 오염”상태로 조사되었다.

농어촌연구원에서 조사한 지점(매화 1~매화 6지점)에 대한 강열감량 결과는 1차와 2차 조사차수로 나누어 정리하였다. 12월 7일에 조사한 3차 자료는 분석실에서 분석 중에 있으므로 본 보고서에서는 검토하지 못했다. 1차 조사에서는 모든 지점에서 9.4~10.6%로 나타났고, 2차 조사에서는 8.4~10.0%로 1차와 거의 비슷한 결과를 보였다. 이러한 값들은 호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 575호)인 13%에 비교해서는 다소 낮았지만, 미국 환경보호청(USEPA)의 퇴적물 환경기준과 비교했을 때는 1차, 2차 모두 모든 지점에서 “heavily polluted”로 나타났다. 이러한 결과로부터 매화저수지는 위치에 상관없이 전체적으로 퇴적물의 유기물질



오염도가 높다는 것을 알 수 있다.

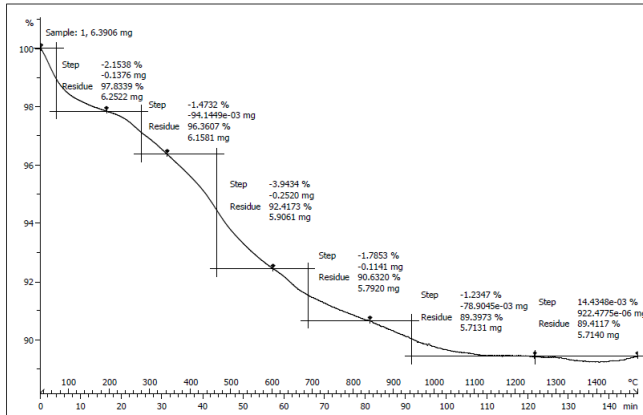
융복합 수처리장치 설치 전·후를 비교해보면, 매화 제방의 경우에는 1차보다 강열감량이 1.1% 증가하였지만, 매화 좌대에서는 설치 전에 비해 3.4% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 매화 제방 지점은 수처리장치가 설치되어 있는 위치로부터 거리상 조금 떨어져 있는 지역으로 수처리시스템 배출수에 의해 수체에 수리학적으로 영향을 받을 수 있는 범위 내 수역이 아니다. 반면에 좌대지점은 융복합 수처리장치(수로식과 부유식)를 설치한 위치와 인접한 지역으로 융복합 수처리시스템 배출수에 의해 수리학적으로 영향을 받을 수 있는 수역이다. 따라서 이러한 결과는 수처리 장치에 의한 영향으로 판단된다.

(표 3.3-10) 매화저수지 퇴적물의 강열감량

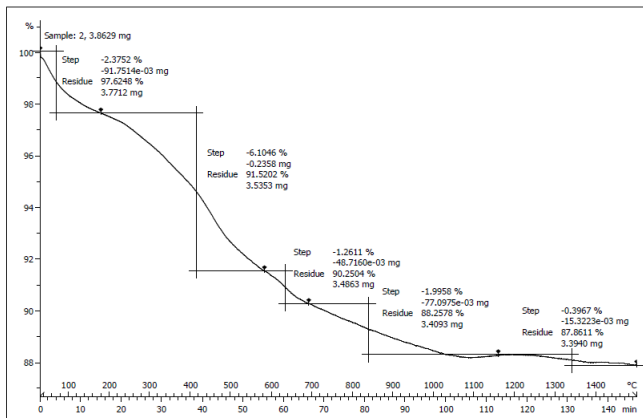
지점	2014		2015			비고
	1차(9/2)	2차(10/29)	1차(6/4)	2차(8/5)	3차(11/6)	
매화제방	10.4%	7.5%	11.0%	12.1%	12.1%	
매화좌대	13.3%	8.5%	15.0%	19.0%	11.6%	
매화1	-	-	9.6%	10.0%	-	
매화2	-	-	9.6%	9.5%	-	
매화3	-	-	9.4%	9.6%	-	
매화4	-	-	9.8%	8.4%	-	
매화5	-	-	9.4%	9.3%	-	
매화6	-	-	10.6%	9.0%	-	

(표 3.3-11) USEPA 퇴적물 평가기준(강열감량)

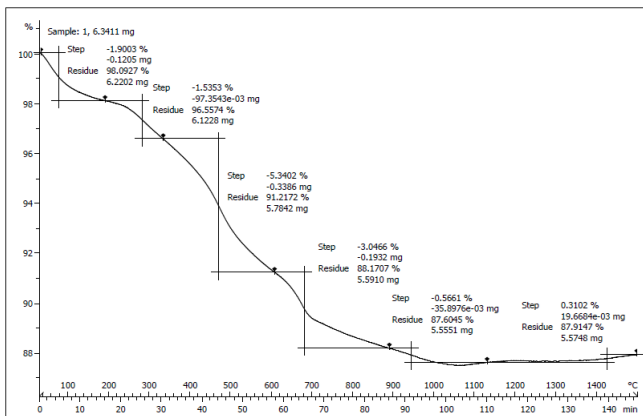
구분	Sediment quality standards		
강열감량 (%)	non polluted	moderately polluted	heavily polluted
	< 5	5~8	> 8



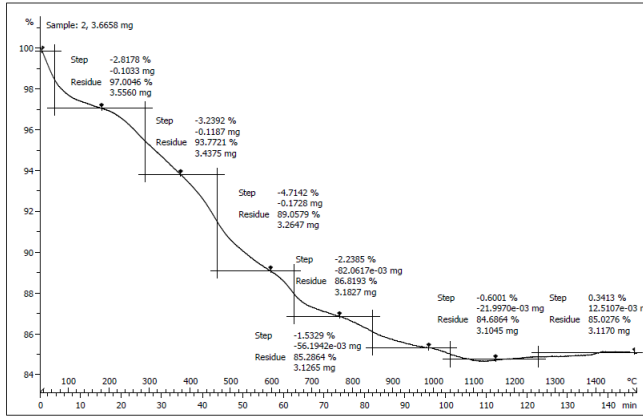
<그림 3.3-22> 매화 제방 1차(감량율 11.0%)



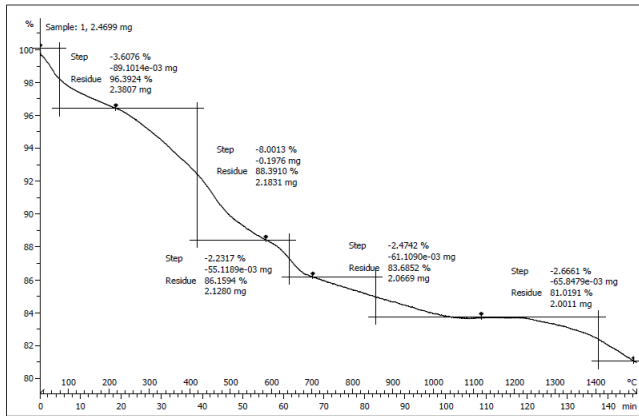
<그림 3.3-23> 매화 제방 2차(감량율 12.1%)



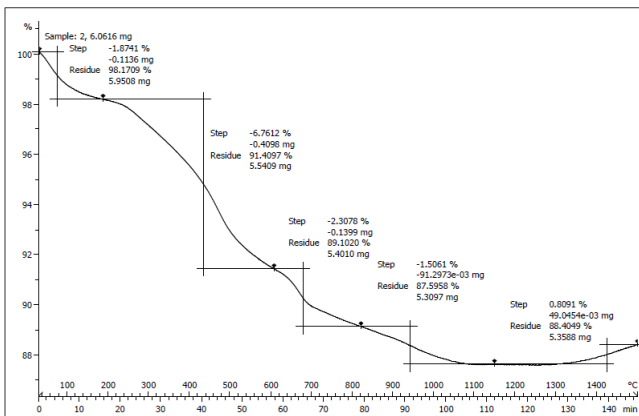
<그림 3.3-24> 매화 제방 3차(감량율 12.1%)



<그림 3.3-25> 매화 좌대 1차(감량을 15.0%)



<그림 3.3-26> 매화 좌대 2차(감량을 19.0%)



<그림 3.3-27> 매화 좌대 3차(감량을 11.6%)

## (3) pH, TN, TP

매화저수지 지점별 퇴적물의 pH, TN, TP 농도에 대한 분석결과는 <그림 3.3-28>~<그림 3.3-30>과 같다. 12월 7일에 조사했던 3차 시료는 분석실에서 분석 중에 있으므로 본 보고서에서는 3차 조사 결과를 고찰하지 못했다. 퇴적물의 pH는 1차 조사에서는 8.0~8.4의 분포를 보이고 있으며, 2차 조사에서는 7.5~8.1으로 1차에 비해 전반적으로 다소 낮았으며, 특히 매화1 지점이 pH 7.5로 다른 지점에 비해 다소 낮게 나타났다.

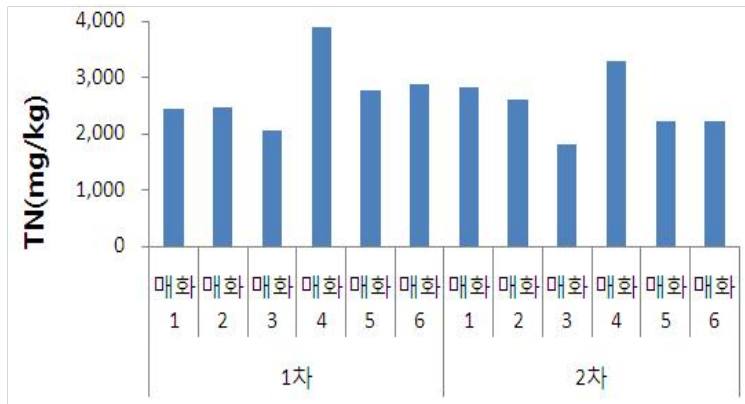
퇴적물 내 TN 농도는 지점별로 각각 매화1 지점 2,442.3~2,815.1mg/kg, 매화 2지점 2,463.8~2,605.2mg/kg, 매화3 지점 1,821.1~2,043.8mg/kg, 매화 4지점 3,291.5~3,906.0mg/kg, 매화5 지점 2,213.2~2,766.2mg/kg, 매화 6 지점 2,222.1~2,883.8mg/kg으로 조사되었고, 매화4 지점에서 가장 높았고, 매화 3지점에서 가장 낮은 농도로 분석되었다. 이러한 결과는 국립환경연구원의 “호소 퇴적물 오염평가 기준”의 IV등급(5,600mg/kg 초과, 심각하고 명백한 오염상태)과 비교해서는 훨씬 낮은 농도였고, 팔당호, 한강 하류, 대청호 퇴적물 제거 기준인 800mg/kg이상, 2,000mg/kg이상, 3,000mg/kg 이상과 비교했을 때, 모든 지점에서 팔당호, 한강의 퇴적물 제거기준 이내에 포함되며, 특히 매화 4지점은 비교적 기준이 높은 대청호 퇴적물 제거기준에도 포함되는 것으로 나타났다.

퇴적물 내 TP 농도는 각 지점별로 매화1 지점은 1,327.9~1,345.6mg/kg, 매화 2지점은 1,217.3~1,287.2mg/kg, 매화3 지점은 1,341.6~1,346.2mg/kg, 매화 4지점은 1,186.7~1,811.3mg/kg, 매화5 지점은 1,049.5~1,218.2mg/kg, 매화 6지점은 1,104.7~1,240.3mg/kg으로 조사되었으며, 1차 조사에서는 TN과 동일한 결과를 보여 매화4 지점이 가장 높게 검출되었다. 퇴적물 내 TP 농도는 국립환경연구원의 “호소 퇴적물 오염평가 기준”의 IV등급(1,600mg/kg 초과, 심각하고 명백한 오염상태)에 비해서는 모든 지점에서 다소 낮았으나, 팔당호, 한강 하류, 대청호 퇴적물 제거 기준인 1,100mg/kg 이상, 1,000mg/kg이상, 1,500mg/kg 이상과 비교했을 때, 모든 지점에서 한강, 팔당호 퇴적물 제거기준 내에 포함되는 것으로 조사되었다.

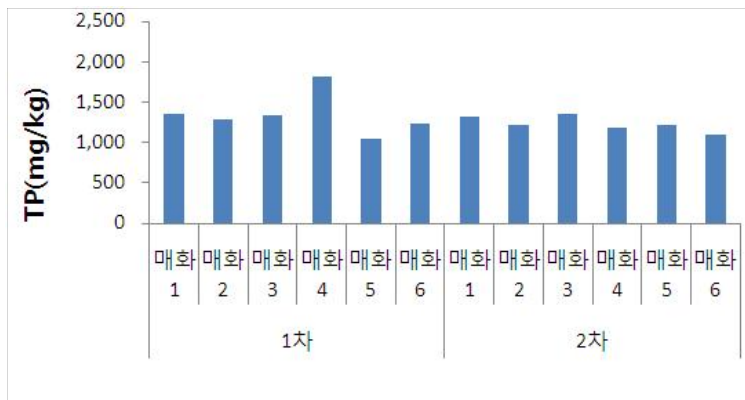
TN, TP 농도가 높은 매화 4지점은 제방과 마주 보고 있는 반대편 수변 인접지역으로, 이 지역은 저수지로 유입되는 유입수의 수리적인 영향을 가장 받지 않는 수역이다. 이러한 이유로 저수지에 유입된 오염물질이 하류로 유출되지 못하고 장기간 퇴적된 결과로 인한 영향으로 판단된다.



<그림 3.3-28> 매화저수지 퇴적물의 pH



<그림 3.3-29> 매화저수지 퇴적물의 TN 농도



<그림 3.3-30> 매화저수지 퇴적물의 TP 농도

다. 퇴적물의 오염도 조사결과

(1) 원소분석 결과

매화저수지 퇴적물에 대한 원소분석을 실시하여 그 결과를 (표 3.3-12)에 정리하였다. 매화 제방의 경우 수처리장치 적용 전(1차)과 후(3차) 전체적인 원소 조성이 N 0.09%, C 0.48%, H 0.28%, O 0.69% 증가하였고, S의 조성만 0.03%감소하였다. 매화 좌대의 경우 적용 전(1차)과 후(3차) 전체적인 원소조성이 N 0.1%, C 0.16%, S 0.17%, O 3.27% 감소하였고, H의 조성만 0.01% 증가하는 것으로 나타났다.

(표 3.3-12) 원소분석 1·2·3차 결과 종합

구 분		Nitrogen (%)	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Sulphur (%)	Oxygen (%)
매화 제방	1차	0.41	2.63	0.78	0.03	7.49
	2차	0.44	2.82	0.94	ND	7.12
	3차	0.50	3.11	1.06	ND	8.18
매화 좌대	1차	0.61	3.35	1.04	0.17	10.15
	2차	0.52	3.39	1.11	ND	8.59
	3차	0.51	3.19	1.05	ND	6.88

(2) CODsed

본 연구 대상인 저수지내 퇴적물의 CODsed를 측정하였다. 국내에서는 CODsed에 대한 환경기준이 정립되어 있지 않아 본 연구결과를 미국 환경보호청(USEPA)의 오염도 평가기준과 비교하였다. 매화 좌대 지점은 USEPA 평가기준으로 “non polluted” 상태로 나타났고 매화 제방의 경우가 “moderately polluted”로 나타났다. 또한, 수처리장치 설치 전·후의 비교에서는 매화제방에서는 설치전보다 설치 후 CODsed 농도가 더 증가하였는데, 수처리장치가 설치되어 있는 매화 좌대 지점에서는 설치전보다 설치 후 CODsed 농도가 크게 감소한 것으로 분석되었다.

(표 3.3-13) 퇴적물 오염도 조사(CODsed)

구분	매화 제방			매화 좌대		
	1차	2차	3차	1차	2차	3차
CODsed (mg/kg-dry)	57,276	61,007	60,407	33,613	31,839	28,796

(표 3.3-14) USEPA 퇴적물 평가 기준(CODsed)

구분	USEPA sediment quality standards		
CODsed (mg/kg-dry)	non polluted	moderately polluted	heavily polluted
	< 40,000	40,000~80,000	> 80,000

(3) SOD(Sediment Oxidation Demand)

SOD 분석결과 매화 제방에서 3.11~3.66g-O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d, 매화 좌대지점에서 1.31~1.73g-O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d로 매화 제방에서 높게 나타났다. 매화 제방의 경우 SOD 농도가 수처리장치 설치 후에 더 증가하였고, 매화 좌대의 경우 0.42 g-O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d 감소함을 확인하였다. 이러한 결과는 CODsed 분석결과와 유사한 결과로서 계절 및 환경적인 요인이 의한 작용인지, 수처리장치 설치에 의한 작용인지에 대한 정확한 분석을 위해서는 지속적인 관찰이 필요할 것으로 판단된다. SOD 분석결과를 국·내외 자료와 비교하여 (표 3.3-15)에 정리하였다. 국내 대형 상수원 댐인 팔당호나 충주호에 비해서는 매화저수지 퇴적물의 SOD 농도가 2배 이상 높은 것으로 조사되었다.

(표 3.3-15) 퇴적물 SOD 분석결과

Site	SOD(g-O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·d)	Reference	
Cayuga Lake, NY	0.3~1.0	Newbold &Liggett, 1974	
Lake Sammamish, WA	1	Bella, 1970	
Lake Lyndon B. Johnson, TX	1.7~5.8	Schnoor &Fruh, 1970	
Saginaw River, MI	0.1~5.3	Chiaro &Bruke, 1980	
팔당호	0.7	Shin, 2006	
충주호	0.8	Shin, 2006	
매화 제방	1차	3.11	This study
	2차	3.66	
	3차	3.47	
매화 좌대	1차	1.73	
	2차	1.62	
	3차	1.31	

## (4) 중금속 등

매화저수지 퇴적물 내 중금속 및 Hg, CN 등을 분석한 결과는 (표 3.3-16)과 같다. 퇴적물 내 비소는 1차 조사에서는 7.60~9.63mg/kg로 매화 1, 3, 5 지점과 매화 4, 6지점에서 비슷한 값으로 검출되었다. 2차 조사에서는 6.17~8.77mg/kg로 매화 3지점을 제외한 나머지 지점에서는 거의 비슷한 농도로 검출되었다. 카드뮴은 모든 저수지에서 1.20~1.80mg/kg으로 거의 같은 함량을 보였으며, 구리는 매화4 지점의 42.37~51.40mg/kg으로 다른 지점에 비해 다소 낮은 농도로 검출되었다. 니켈도 구리와 같은 결과로 다른 지점 28.37~33.67mg/kg에 비해 매화 4지점에서 24.97~27.03mg/kg으로 가장 낮게 검출되었다. 납은 1차 조사에서는 52.47~58.93mg/kg으로 모든 지점에서 거의 비슷한 값으로 검출되었고, 2차 조사에서는 49.17~65.70mg/kg으로 매화4 지점에서 가장 낮았고, 매화 5지점에서 높게 검출되었다. 아연은 1차에서는 163.60~218.77mg/kg로 조사되었고, 2차에서는 145.07~229.30mg/kg으로 검출되었으며, 1, 2차 모두 매화 4지점에서 다른 지점에 비해 낮게 검출되었다. 수은은 1차에서 불검출~0.074mg/kg으로 매화 1, 2, 3, 6지점에서 검출되었고, 2차에서는 불검출~0.045mg/kg으로 매화 2, 3, 4지점에서 검출되었다. 6가크롬과 시안은 1차, 2차 조사의 모든 지점에서 불검출 되었다.

국립환경연구원에서는 오염된 퇴적물을 선별하여 준설과 같은 정화 조치의 필요성이 있는지 판단하는 기준으로 “하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준”을 예규로 지정하여 운영하고 있는데 최근 항목을 세분화하고 평가등급을 4개로 구분하여 개정하였다(국립환경과학원 예규 제2015-687호, 2015년 11월 16일). 개정된 “하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준”은 (표 3.3-17)과 같으며, 항목별로 비교해 보면 다음과 같다. 구리는 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음(I 등급)인 60 mg/kg이하에 만족하거나 조금 상회하고 있고, 납, 비소, 수은, 아연, 6가크롬 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음(I 등급)보다 훨씬 낮은 함량을 보이고 있어 중금속 및 금속류에 의한 오염은 없는 것으로 나타났다.



(표 3.3-16) 매화저수지 위치별 퇴적물의 중금속 등 농도

구분	지점	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr <sup>+6</sup> (mg/kg)	CN (mg/kg)
1차	매화 1	7.60	1.63	65.63	31.53	54.03	195.9	0.061	불검출	불검출
	매화 2	8.23	1.67	59.87	33.67	52.53	188.8	0.067	불검출	불검출
	매화 3	7.97	1.60	82.20	31.60	52.47	217.0	0.074	불검출	불검출
	매화 4	9.63	1.53	51.40	27.03	53.20	163.6	불검출	불검출	불검출
	매화 5	7.77	1.60	68.60	28.37	52.57	218.7	불검출	불검출	불검출
	매화 6	9.07	1.80	71.10	31.03	58.93	218.6	0.055	불검출	불검출
2차	매화 1	8.50	1.63	70.60	31.33	55.23	203.0	불검출	불검출	불검출
	매화 2	8.67	1.70	57.00	29.47	53.27	184.1	0.060	불검출	불검출
	매화 3	6.17	1.33	86.30	30.83	53.80	215.1	0.046	불검출	불검출
	매화 4	8.63	1.20	42.37	24.97	49.17	145.0	0.055	불검출	불검출
	매화 5	8.77	1.60	69.50	31.07	65.70	216.0	불검출	불검출	불검출
	매화 6	8.33	1.50	65.07	28.47	52.63	229.3	불검출	불검출	불검출

(표 3.3-17) 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준

항 목		I	II	III	IV
유기물 및 영양염류*	완전연소 가능량(%)				13 초과
	TN(mg/kg)				5,600 초과
	TP(mg/kg)				1,600 초과
금속류**	구리(mg/kg)	60 이하	228 이하	1,890 이하	1,890 초과
	납(mg/kg)	65 이하	154 이하	459 이하	459 초과
	니켈(mg/kg)	53 이하	87.5 이하	330 이하	330 초과
	비소(mg/kg)	29 이하	44.7 이하	92.1 이하	92.1 초과
	수은(mg/kg)	0.1 이하	0.67 이하	2.14 이하	2.14 초과
	아연(mg/kg)	363 이하	1,170 이하	13,000 이하	13,000 초과
	카드뮴(mg/kg)	0.6 이하	1.87 이하	6.09 이하	6.09 초과
크롬(mg/kg)	112 이하	224 이하	991 이하	991 초과	

비고) 등급별 퇴적물의 오염상태

\*유기물 및 영양염류(IV등급) : 심각하고 명백한 오염

\*\*금속류 ( I 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음

( II 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있음

( III 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높음

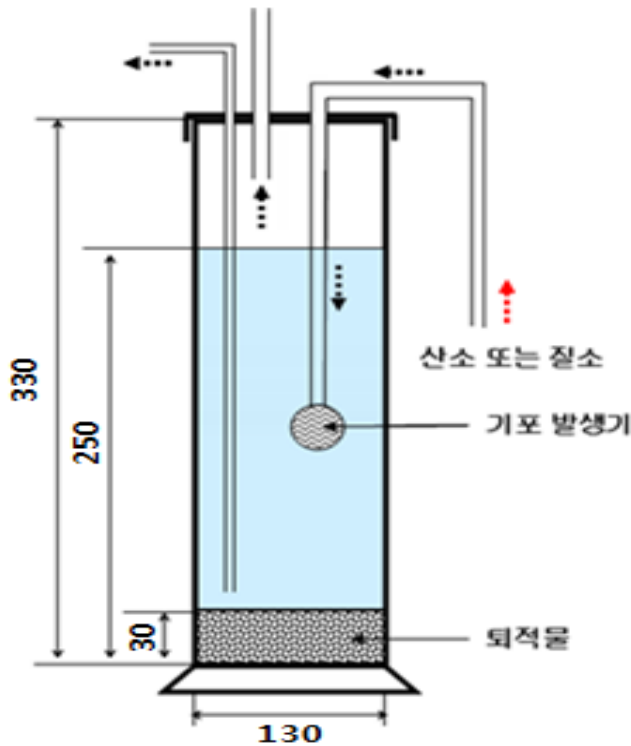
( IV 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 매우 높음

자료) 국립환경과학원 누리집(www.nier.go.kr)

### 3. 퇴적물의 오염물질 용출량 산정

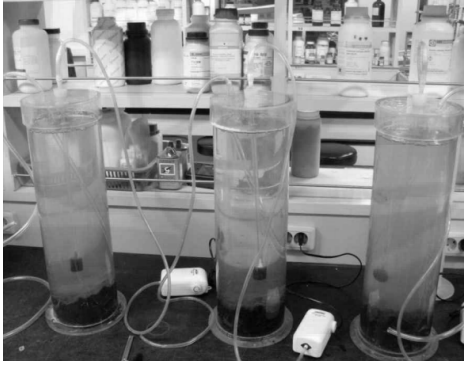
#### 가. 퇴적물 조사 및 실험방법

퇴적물로부터의 영양염류 용출율을 분석해서 퇴적층으로부터 유래하는 내부오염의 가능성을 예측하기 위하여 호내 퇴적물을 대상으로 용출시험을 실시하였다. 실험은 실험실 내에 <그림 3.3-31>과 같이 아크릴 재질로 용출실험 장치를 설치하였다. 용출실험장치는 선행연구 사례들을 참고하여 퇴적물 높이를 30mm, 수면 높이를 250mm로 하여 평균 20일 이상의 연속 운전을 수행하였다. 용출시험은 아크릴 재질 반응조에 대상 퇴적물을 넣은 후, 물을 채우고 호기조건과 혐기조건을 유지하여 수행하였다. 호기조건과 혐기조건은 밀폐한 반응조에 산소(공기)와 질소가스를 지속적으로 공급함으로써 유지하였으며, 알루미늄호일로 전체 반응조를 감싸 빛을 차단하여 광합성에 의한 산소 조건 변화를 방지하였다<그림 3.3-32>.



<그림 3.3-31> 퇴적물 용출실험 장치 모식도

실험에 사용한 상등수는 현장의 조건을 반영하기 위하여 현장에서 채수한 물을 사용하였다. 용출실험 장치에 대상 퇴적물을 넣고, 상등수를 채우는 과정에서 물리적인 충격에 의해 영양염류가 용출되는 것을 최소화하기 위하여 반응조의 벽면을 따라 천천히 물을 채웠다.



(a)호기 장치



(b)혐기장치

&lt;그림 3.3-32&gt; 퇴적물 용출실험 장치

반응조 설치 후 2~4일 간격으로 약 평균 20일이상 연속 운전을 수행하며, 수질공정시험법에 준하여 COD<sub>Cr</sub>, T-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, T-P, pH 등을 측정하였다.

퇴적물로부터 영양염류의 용출속도는 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$\text{용출속도}(mg/m^2 \cdot d) = \frac{(C_t - C_0) \times V}{T \times A}$$

여기서, C<sub>t</sub> : t시간 경과 후 농도(mg/L)

C<sub>0</sub> : 초기 농도(mg/L)

V : 반응조 액상 부피(L)

T : 용출시간(day)

(주) 반응조 내 액상 부피(V) 계산 시에는 50ml/1회 씩 채수하였으므로 샘플 채취시 마다 -50ml 삭감함

### 나. 퇴적물의 용출특성

매화저수지의 퇴적물로부터 오염물질 용출특성을 파악하였다. 호소의 바닥층에 퇴적된 퇴적물에 포함된 영양염류는 용출을 통하여 수체로 재부유되어 내부부하를 가중시킬 우려가 있다. 퇴적물 내에 존재한 영양염류의 용출은 수온, pH, 용존산소, 유속 등과 같은 물리화학적 환경요인과 저서 미생물 등의 생물학적 요인에 의해 영향을 받는다(Kairesalo, T. et al., 1995). 즉, 퇴적물은 저서의 환경여건 변화에 따라 호수의 수질을 악화시킬 수 있고, 호소 부영양화의 진행은 질소와 인의 농도에 크게 영향을 받고 있기 때문에 퇴적물에서 용출되는 영양염의 양과 농도를 분석하는 것은 호소의 수질관리 측면에서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 내재적 오염물질이 수질에 미칠 수 있는 영향을 예측하고, 융복합 수처리시스템 현장적용으로 시스템 설치 전·후 퇴적물 오염물질 용출특성 변화 등을 관찰하기 위하여 퇴적물 용출실험을 실시하였다.

#### (1) 오염물질 농도변화

호기조건과 혐기조건에서 시간에 따른 COD, 암모니아성질소, TN, TP 에 따른 농도변화는 <그림 3.3-33>~<그림 3.3-36>과 같다. 퇴적물 내의 COD는 전체적으로 혐기조건 보다 호기조건에서 농도가 더 낮다는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 COD 농도가 감소하는 경향을 보이고 있으나, 후반부에 몇몇 조건에서 농도가 증가하는 현상이 관찰되었다. 일부 부영양호의 경우 수체로부터 침전된 유기물이 물리적 교란에 의해 재부유하는 것은 보고되어 있으나, 퇴적물에 존재하는 유기물이 교란되지 않은 환경에서 퇴적물로부터 수체로 용출된다는 것은 보고된 바가 없다(조영철, 정세웅, 2007). 따라서 용출실험 후반에 수체에서 관찰된 높은 COD농도는 퇴적물로부터 용출된 것이 아니라, 수체 중에 있는 미생물의 성장과정에서 외부로 배출된 용존유기물(DOC : Dissolved organic carbon)이거나 미생물 Biomass에 의한 입자성 유기물(POC : Particulated organic carbon)에 의한 영향으로 판단된다.

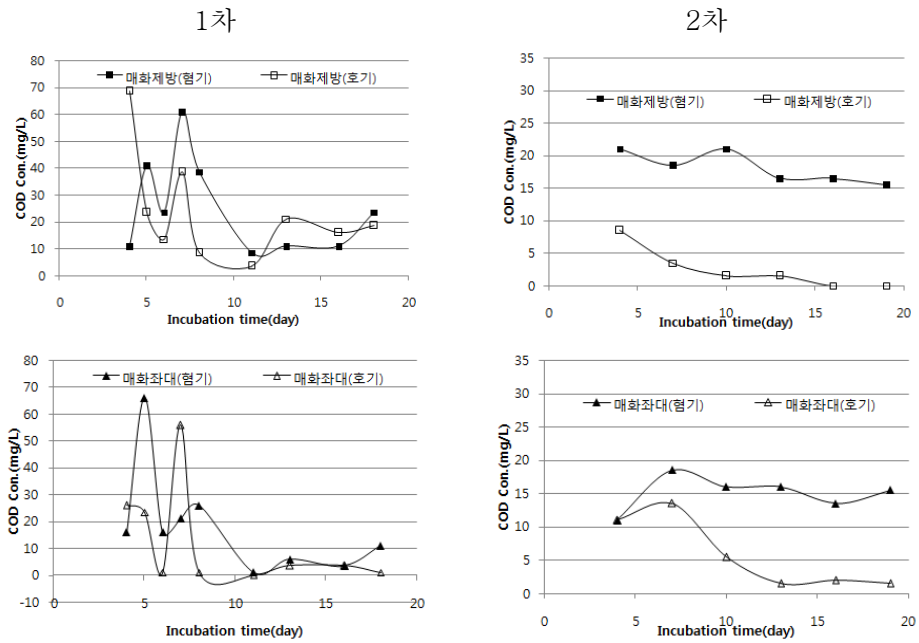
질소화합물은 그 대부분이 입자성 유기질소에 의해 좌우되거나 용출에 의해 수층으로 이동되는 질소는 수용성으로서 보통 암모니아 질소가 대부분이라고 밝혀져 있다(김도희, 2002). 암모니아성 질소는 호기조에 비해 혐기조에서 농도가 높으며, 오랜 시간 잔류하는 현상이 관찰되었다. 이러한

현상은 혐기 조건에 비해 호기 조건에서 암모니아성 질소의 고갈 속도가 빠르기 때문에 일어난 현상으로 여겨지며, 이는 암모늄 산화세균에 의해 일어나는 질산화(Nitrification)의 결과로 보여진다. 또한, 혐기환경에서 암모니아성 질소의 농도가 증가하는 것은 수체 중 미생물의 생장이 저하되어 암모니아성 질소의 소비율이 감소하면서 수체에 농축되거나, 수체에 있는 유기질소가 분해되는 과정(Ammonification)에 의해 일어날 수 있다. 이번 실험에서 혐기조건에서 일어난 암모니아성 질소의 증가원인에 대해 추가적으로 해석해 볼 필요성이 있다.

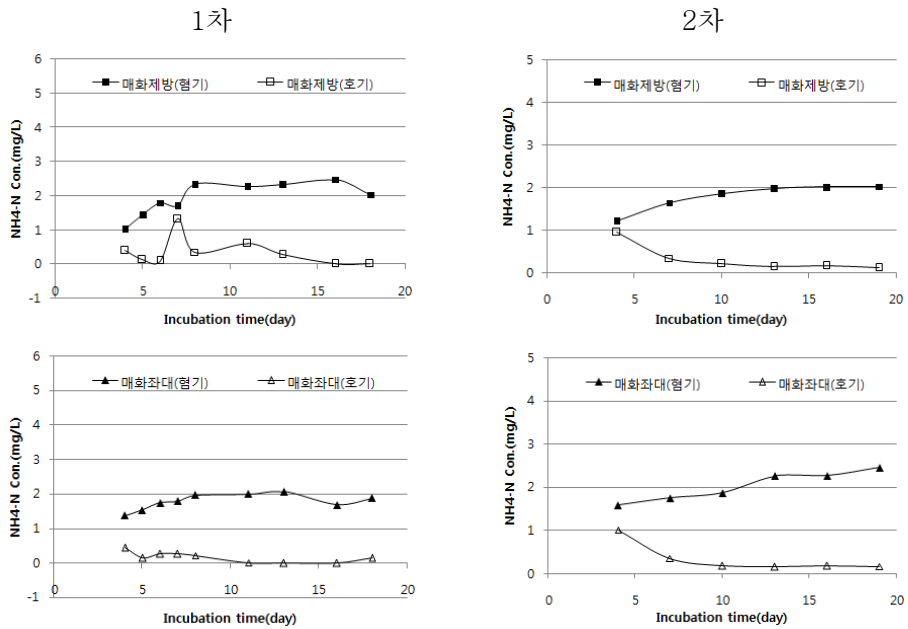
TN은 1, 2차 실험결과 모두 호기조건에서는 점차 농도가 감소하는 경향을 보였고 혐기조건에서는 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 호기 조건의 경우 질소가 미생물의 대사 작용에 의해 소비되거나 퇴적물에 흡착되었기 때문이며, 혐기조건의 경우 암모니아성 질소의 지속적인 용출에 의해 TN이 증가한 것으로 판단된다.

퇴적물 중의 인은 주로 무기성 인 형태로 존재하며, 혐기와 호기 조건에 따른 산화-환원 조건이 용출에 미치는 영향이 큰 것으로 연구보고되고 있다(김도희, 2002). 퇴적물 내 유기인보다 무기인이 더 많은 이유는 유기물에 붙어 있는 형태의 인보다 철이나, 알루미늄 등과 같은 무기물에 붙어있는 무기형태의 인(Al-P 및 Fe-P)이 더 많다는 것을 의미한다. 이러한 형태의 인은 호소 환경의 pH 변화에 의하여 용출될 가능성이 충분히 있으므로 호소의 pH 변화에 유의할 필요가 있다고 판단된다.

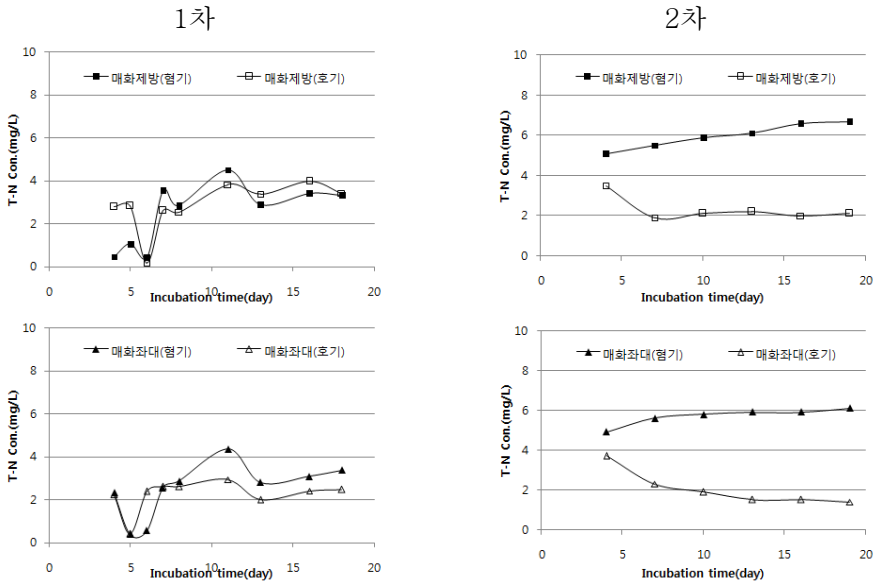
본 연구에서도 혐기와 호기조건에 따라 인의 용출 특성에 차이가 나타났는데, 호기조건의 경우 시간이 지날수록 농도가 감소하는 반면, 혐기조건에서는 지속적으로 농도가 증가하는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 인이 호기조건하에서는 철이나 망간 등과 함께 퇴적물 내에 흡착 및 침전되는 반면, 혐기조건하에서는 환원반응이 일어나 수층으로 재 용출이 일어났기 때문으로 판단된다.



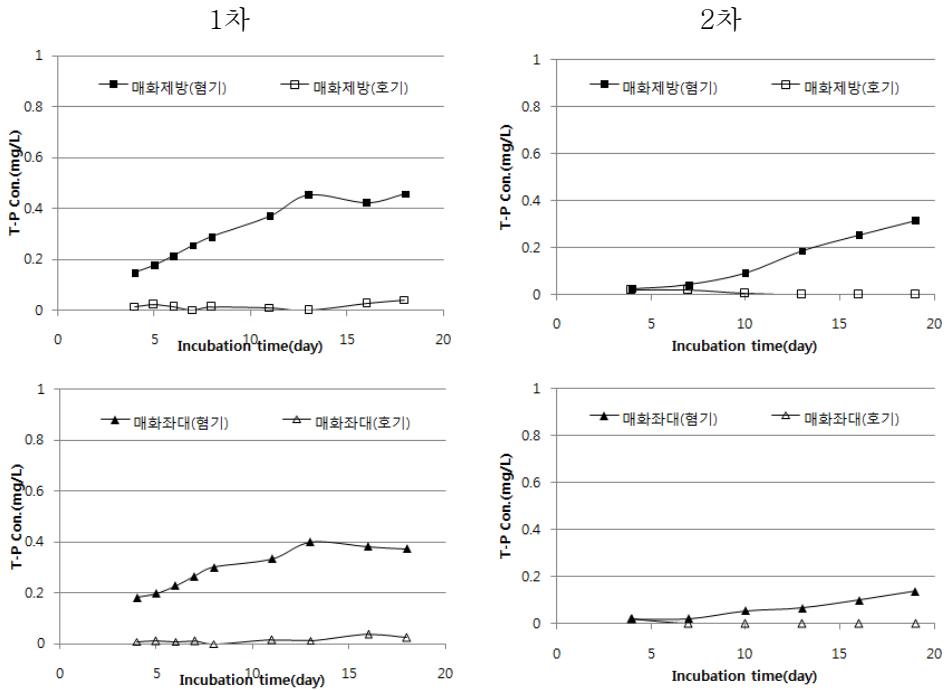
<그림 3.3-33> 시간에 따른 COD 농도 변화



<그림 3.3-34> 시간에 따른 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도의 변화



<그림 3.3-35> 시간에 따른 TN 농도의 변화



<그림 3.3-36> 시간에 따른 TP 농도의 변화

## (2) 오염물질 용출속도

매화저수지 퇴적물 내 오염물질 용출속도를 (표 3.3-18)에 나타내었다. 1차년도와 2차년도의 채취시기 및 장소가 일치하지 않아 정확한 비교에 어려움은 있으나, 비슷한 시기와 장소를 대상으로 2차년도 결과와 비교해 보았다. COD의 경우, 1차년도 호기조건에서  $58.3 \sim 76.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서는  $118.1 \sim 139.9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도를 보였고, 2차년도 호기조건에서  $-52.5 \sim 73.3 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $56.7 \sim 204.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도로 나타나 1·2차년 모두 호기조건보다 혐기조건에서 높은 농도로 용출되고 있는 것으로 나타났다. 2차년도 실험에서는 호기조건에서 COD 농도가 오히려 감소하고 있는 결과를 보여주고 있으며, 이러한 결과는 호기조건에서 미생물에 의한 유기물 분해가 일어나고 있음을 알 수 있다.  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 의 경우는 1차년도 실험에서는 호기조건에서  $-8.6 \sim -2.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $-4.9 \sim 36.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도를 보였으며, 2차년도 실험에서는 호기조건에서  $-4.8 \sim -3.0 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $3.2 \sim 20.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도를 나타내었다. 이러한 결과로부터  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  또한 호기조건 보다 혐기조건에서 용출이 일어나고 있음을 알 수 있고, 호기조건에서는 오히려 퇴적층에 침전되고 있는 것을 알 수 있다. TN의 1차년도 실험결과에서는 호기조건에서  $-19.7 \sim 19.2 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $10.3 \sim 34.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 로 나타났고, 2차년도 조사에서는 호기조건에서  $-51.9 \sim -11.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $6.1 \sim 30.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 로 나타나 호기조건에서는 용출이 거의 없고 혐기조건에서 용출이 많이 일어나고 있음을 알 수 있다. 퇴적물 내 TP 용출실험에서도 1·2차년도 실험결과, 호기조건에서는  $-3.2 \sim 0.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서는  $-4.6 \sim 3.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 으로 나타나 COD,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , TN의 결과와 마찬가지로 혐기조건에서 용출이 일어나는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 인의 경우 혐기조건에서는 인이 용출량이 매우 적거나 거의 용출이 일어나지 않으며, 호기조건에서는 많은 양의 인이 용출되는 것으로 알려져 있다는 결과와 일치하였다(조영철, 2007).

퇴적물의 용출실험을 종합해보면, 혐기조건에서 총질소 및 총인의 용출이 확인되었으며, COD의 감소 속도도 호기조건에서 더 높은 결과가 나왔다. 이는 호소 바닥 퇴적물 층에 적정한 호기 환경조건이 유지된다면 퇴적물로부터 용출되는 영양염류의 양이 감소될 것으로 판단되며, 이러한 결과는 궁극적으로 호소 수질개선에 많은 기여를 할 것으로 판단된다.



(표 3.3-18) 퇴적물 오염물질 용출속도( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )

구 분			기흥지	매화 제방	매화 좌대	
COD	2014	1차	협기	-	118.1	139.9
			호기	-	70.0	74.3
		2차	협기	-	135.2	134.8
			호기	-	58.3	76.6
	2015	1차	협기	56.7	204.6	56.7
			호기	-49.2	73.3	-55.8
		2차	협기	83.8	117.9	105.4
			호기	-52.5	-50.0	-52.5
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	2014	1차	협기	-	27.5	36.6
			호기	-	-8.6	-2.1
		2차	협기	-	-4.9	25.4
			호기	-	-4.7	-8.6
	2015	1차	협기	16.4	9.1	3.2
			호기	-3.2	-4.8	-4.5
		2차	협기	23.8	18.4	20.7
			호기	-3.1	-3.0	-4.4
TN	2014	1차	협기	-	10.3	18.4
			호기	-	-18.7	-9.1
		2차	협기	-	29.0	34.7
			호기	-	-19.7	19.2
	2015	1차	협기	35.1	30.4	7.7
			호기	0.9	-12.1	-11.5
		2차	협기	7.7	10.1	6.1
			호기	-41.8	-44.8	-51.9
TP	2014	1차	협기	-	2.3	2.0
			호기	-	-1.2	-1.2
		2차	협기	-	-0.6	2.6
			호기	-	-3.2	-0.4
	2015	1차	협기	0.8	3.1	1.8
			호기	-0.2	0.1	0.1
		2차	협기	3.1	-4.6	3.7
			호기	-0.5	-0.1	-0.1



## 제4장 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가



1절 접촉산화시스템 Test Bed 구축 및 성능평가

2절 마이크로버블 현장적용 및 성능평가





## 제4장 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

### 제1절 접촉산화시스템 Test Bed 구축 및 성능평가

#### 1. 생태융합형 접촉산화시스템 Test Bed 구축

##### 가. 추진경위

1차년도(2014년)에 개발된 유입수 및 호내 만곡부 대책기술인 생태융합형 접촉산화시스템 수로식과 부유식의 현장적용실험을 위해 매화저수지에 1일 처리용량 1,000m<sup>3</sup>/d의 규모의 데모 플랜트를 각각 설치하였다. 수처리시스템의 현장적용 Test bed 구축 경위는 <그림 4.1-1>과 같다. 2015년 4월 관계기관 협의 완료 및 5월 10일 설계를 완료하였고, 5월~6월에 필요한 자재를 일부 구매하였으며, 6월 말부터 7월 말까지 저수지 기초공사 및 시스템 제작을 완료하였다. 수처리시설 공사완료 후 전기관련 공사 및 자동운전 계기판 등에 대한 공사를 완료하고 9월과 10월 약 2개월에 걸쳐 시운전과 부속 시설 등에 대해서 보완하였다. 생태융합형 접촉산화부도는 호소 수체에 처음으로 적용하는 경우이므로 현장적용실험을 하면서 도출된 문제점에 대해서 지속적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

- 2015.03.20 : 2차년도 연구 시행(농림축산식품부)
- 2015.04.10 : 매화저수지 임대사업자, 경기본부, 수원화성지사, 시흥시 등 관계기관 협의
- 2015.05.10 : 생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식 설계 완료)
- 2015.05.15 : Test-Bed 구축에 필요한 물품 및 자재류 구매 요청
- 2015.06.29 : 자재(철재류 및 미디어) 납품 완료
- 2015.06.30~7.30 : 저수지 기초공사 및 시스템 제작 완료
- 2015.07.16~8.15 : 한전 전기사용신청 및 전기공사 완료
- 2015.08.17~8.21 : 자동운전 계기판 제작 및 현장 공사 완료
- 2015.08.24~10.31 : 시운전 및 시설 보완
- 2015.11.01~ : 정상가동 및 문제점 보완

<그림 4.1-1> 수처리시스템 현장적용실험 Test Bed 구축 경위

나. 생태융합형 접촉산화수로

(1) 설치 위치

농업용 저수지 유입수의 유기물, SS, TN, TP 등의 처리를 목적으로 개발된 생태융합형 접촉산화시스템 수로식(이하 생태융합형 접촉산화수로)의 실규모 현장적용실험을 하기 위한 Test Bed를 경기도 시흥시 도창동에 위치하고 있는 매화저수지 수변에 2015년 8월 하순에 구축 완료하였다. 생태융합형 접촉산화수로는 토지 활용성, 전기시설 이용편리성, 대형차량 접근의 용이성 등 현장 여건을 고려하여 설치 위치를 선정하였다.

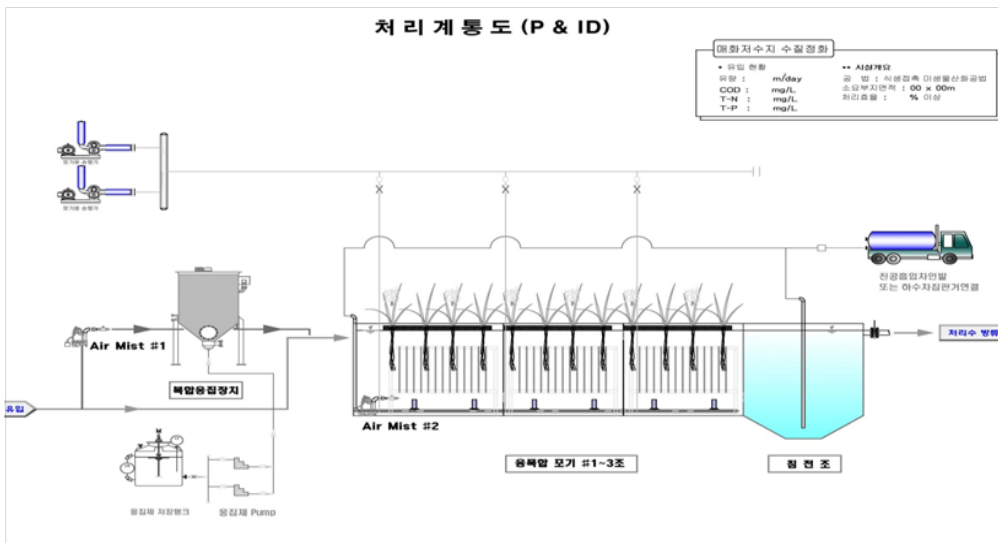
호소 만곡부 수환경 개선 및 부영양화 방지를 목적으로 설치되는 생태융합형 접촉산화시스템 부유식(이하 생태융합형 접촉산화부도)은 수로식 설치 지점에서 약 300m 정도 떨어진 수역에 설치하였다. 매화저수지는 현재 낚시터로 운영되고 있어 임대 사업자 및 관리 지사(수원화성지사)와 협의하여 설치 위치 등을 선정하였다. 생태융합형 접촉산화수로 및 접촉산화부도의 설치 위치는 <그림 4.1-2>와 같다.



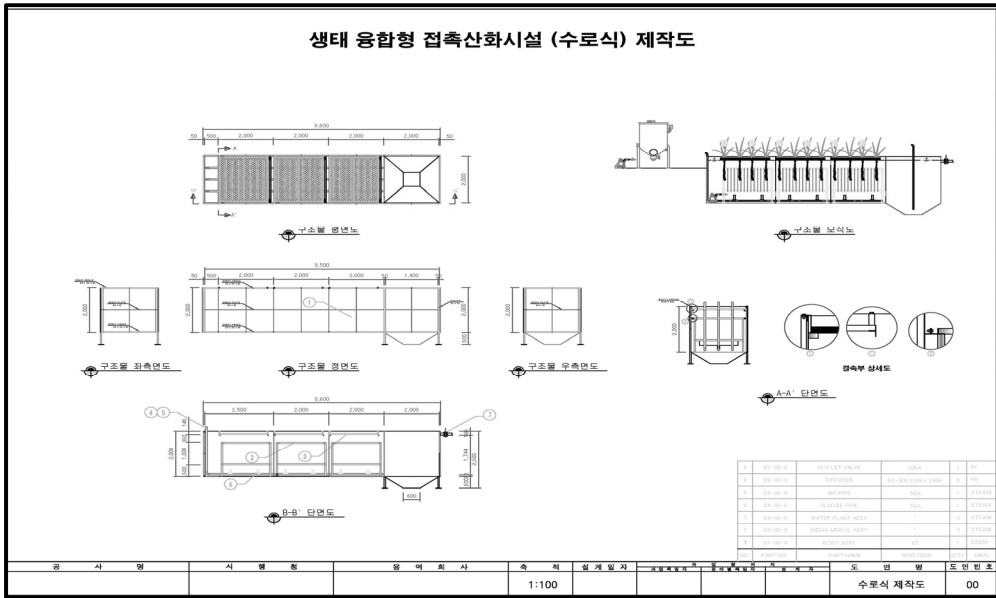
<그림 4.1-2> 접촉산화수로 및 접촉산화부도 설치 위치

## (2) 공정구성 및 기능

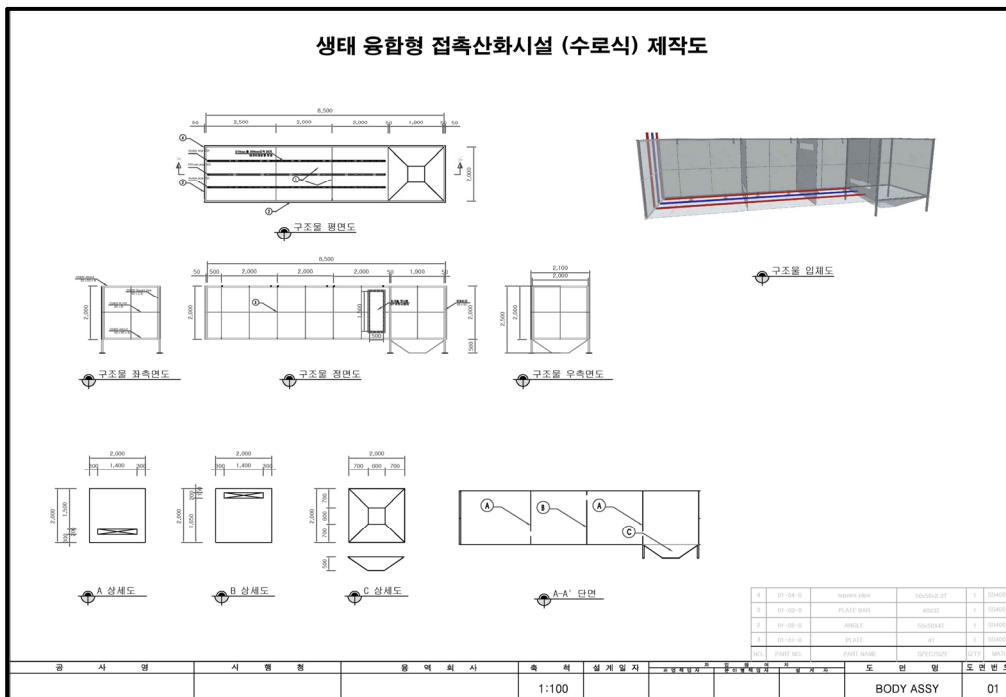
농업용 저수지 유입수 대책인 생태융합형 접촉산화수로의 처리 공정은 <그림 4.1-3>와 같이 유입수 → 에어미스트 → 고속복합응집장치 → 융복합 산화조(3조) → 침전조 → 방류로 매우 단순하게 구성하였다. 에어미스트(마이크로 버블)와 고속복합응집장치는 유입수 성상과 현장 여건에 따라 선택적으로 조합하여 운영할 수 있도록 구성하였다. 에어미스트 공정은 입자크기가  $30\mu\text{m}$  이하 크기의 마이크로 버블을 포기하는 장치이며, 복합응집장치 전단의 에어미스트는 응집된 입자의 부력을 가볍게 해주는 기능을 하며, 미생물 매디아 앞단에 설치된 에어미스트는 매디아 조에 산소를 불어넣어 주어 DO농도를  $4.0\text{mg/L}$  이상의 호기성 상태를 유지시켜 주는 역할을 한다. 융복합 산화조(3조로 구성) 중 미생물 매디아조는 매디아에 부착된 미생물에 의해서 유기물질을 분해하여 제거하는 기능을 하며, 상부 식생은 뿌리에 의해 영양염류를 흡수하여 제거하는 역할을 한다. 마지막 공정에 설치된 침전조는 접촉산화조로부터 이송된 슬러지를 침강시켜 농축하는 역할을 하며, 또한 최종 처리수의 유량조정 역할도 한다. 침강지에 농축된 슬러지는 매우 소량일 것으로 추정되지만, 본 연구에서는 발생된 슬러지 처분에 대해서도 하수처리장과 연계하는 방안 등 다각적인 방법에 대해서 추후 검토 할 계획이다.



<그림 4.1-3> 생태융합형 접촉산화수로 처리 공정도

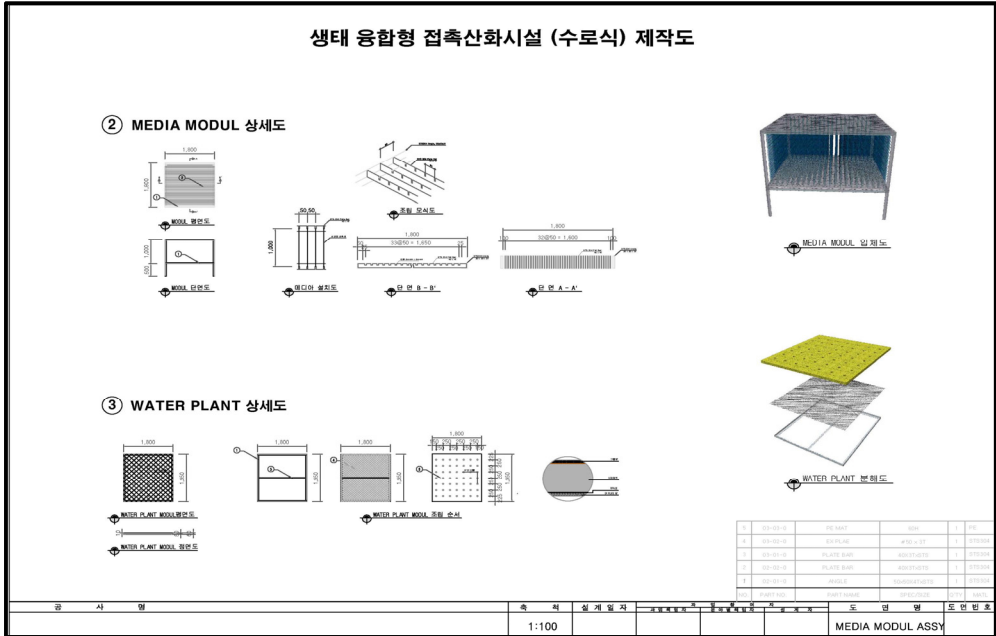


<그림 4.1-4> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(1)

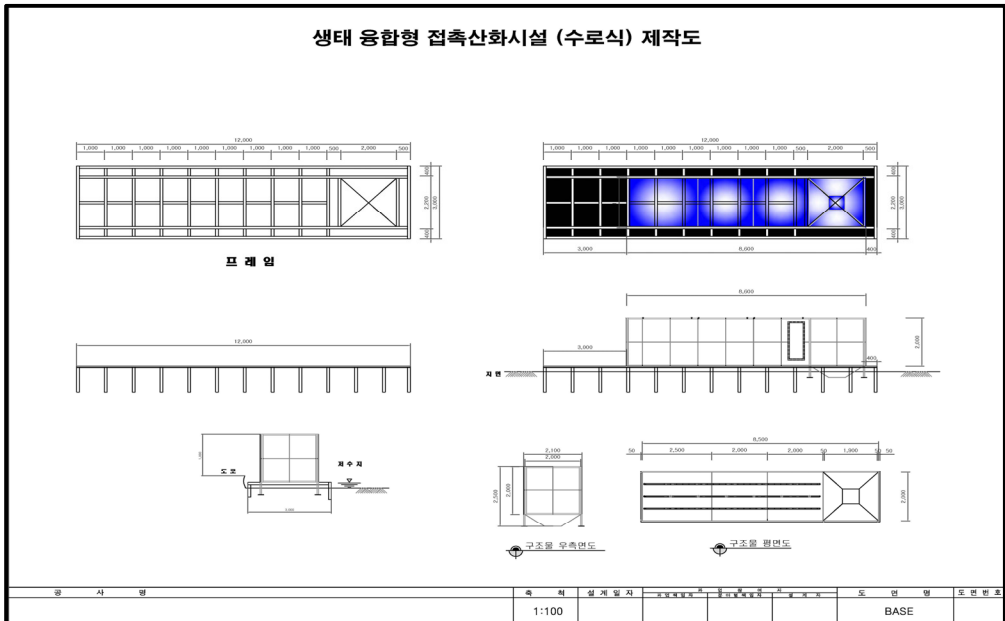


<그림 4.1-5> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(2)





<그림 4.1-6> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(3)



<그림 4.1-7> 생태융합형 접촉산화수로 제작 설계도(4)

(3) 생태융합형 접촉산화수로 제작

생태융합형 접촉산화수로 제작에는 약 30일 정도 소요되었으며, 제작 공정은 크게 보면 몸체(BODY)(1조) 제작, 미생물 모듈(3조) 제작, 식생매트 제작, 산기배관 및 슬러지 배출 배관 제작 등으로 구분된다. 제작이 완료된 제품을 현장으로 운반하여 기초공사가 완료된 지점에 설치하였다.

(가) 몸체(BODY) 제작

생태융합형 접촉산화수로 외관의 전체 규격은 2.0m(W)x 8.6m(L) x 2.0m(H)이며, 재질은 SS 400 x 4T 철판을 사용하였고, 도장은 에폭시 페인트 계열로 3회 도포를 실시하였다.



<그림 4.1-8> 접촉산화수로 몸체(BODY) 제작 공정

(나) 미디어 모듈 공정

접촉산화조의 구성요소인 미디어 모듈 전체 규격은 1.8m(W)x1.8m(L) x1.5m(H) x 3EA이며, 미디어 사용량은 1,200m x 3EA = 3,600m가 사용되었다. BODY의 재질은 앵글 STS 50m x 50m x 5T를 사용하였고, 결속부 재질은 평철 STS 40m x 4T를 사용하였다. 접촉산화수로 미디어 모듈 제작 공정은 <그림 4.1-9>에 나타내었다.



<그림 4.1-9> 접촉산화수로 미디어 모듈 제작 공정

(다) 식생매트 공정

용복합 산화조의 상부쪽에 해당하는 식생매트 규격은 1.95m(W) x 1.8m(L) x 3EA이고, BODY의 재질은 앵글 STS 50m x 50m x 5T이고, 발판부는 EX망 x 3T x STS, 식생매트는 PE으로 제작되었다.



<그림 4.1-10> 접촉산화수로 식생매트 제작 공정

(라) 산기관 및 슬러지 배출 배관 공정

산기배관과 슬러지 배관의 관경은 50A이며, 산기관(400ℓ/min) x 6EA (각조당 2개 부착)과 슬러지 배관(유공관 형식 하부 타공)를 설치하였다. 배관에 사용된 재질은 STS x 50A이다.



<그림 4.1-11> 접촉산화수로 배관류 제작 공정

(4) 생태융합형 접촉산화수로 설치

매화저수지 수변에 생태융합형 접촉산화수로 설치를 위하여 바닥 터파기, 파일그라우팅, 기초파일 박기, 잡석다짐, 레미콘 타설 등 기초공사를 실시하였고, 제작된 제품을 그 위에 설치하였다.



<그림 4.1-12> 생태융합형 접촉산화수로 설치 기초공사



<그림 4.1-13> 접촉산화수로 설치 기초공사 및 제품 진수

(5) 전기시설 및 전기 판넬 설치

융복합 수처리 시설 운영에 필요한 동력사용을 위하여 인근 전봇대에서 전기를 인입하였으며, 생태융합형 접촉산화수로와 접촉산화부도 각각 개별 운전이 가능하도록 조작 판넬을 설치하였다. 수로식의 경우 유입수 BOD가 20mg/L 이하이고, 처리용량이 1,000m<sup>3</sup>/일, 일 24시간 가동을 가정하였을 때 운전에 사용되는 동력은 일평균 4.8kW 이다. 부유식의 경우에도 수로식과 같이 유입수 BOD가 20mg/L 이하이고, 처리용량이 1,000m<sup>3</sup>/일, 일 24시간 가동을 가정하였을 때 운전에 사용되는 동력은 일평균 4.8kW가 소요되는 것으로 나타났다. 수처리시설 운영을 위한 전기사용 조작 판넬은 <그림 4.1-14>와 같이 설치하였다.



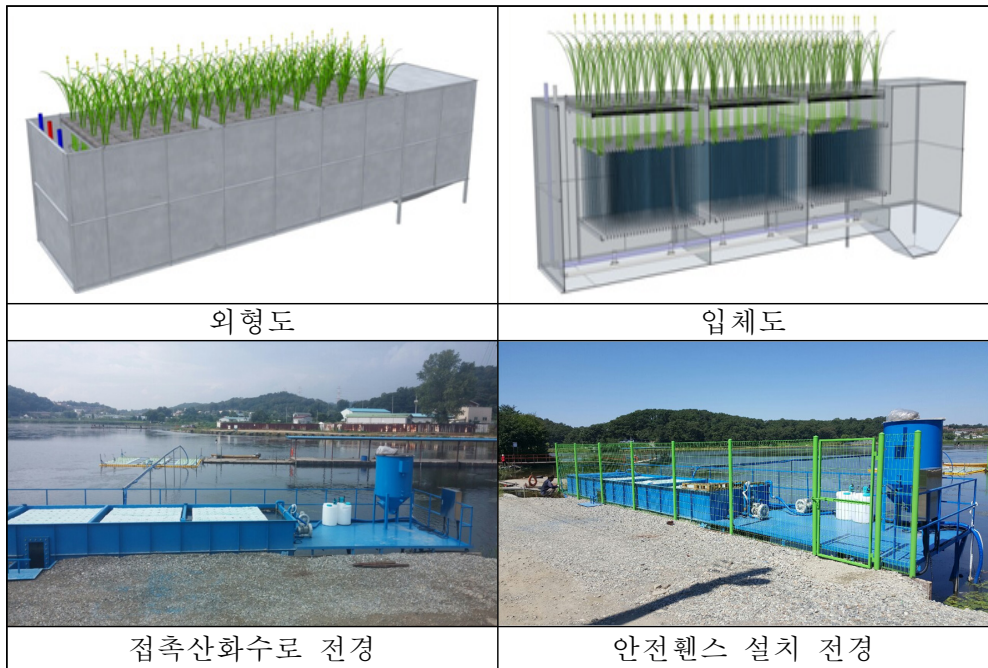
<그림 4.1-14> 전기 판넬 설치 공사

(6) 생태융합형 접촉산화수로 시설제원

생태융합형 접촉산화수로의 시설제원은 (표 4.1-1)과 같고, 외형도 및 입체도 이미지, 설치전경은 <그림 4.1-15>과 같다.

(표 4.1-1) 생태융합형 접촉산화수로 시설제원

구분	규격 및 사양	비고
형식	철재프레임	상부 : 식생 하부 : 미생물 여재
규격	2.0m(W)x8.6m(L)x2.0m(H)	융복합산화조 3조 침전조 1조
처리용량	360m <sup>3</sup> ~ 1,200m <sup>3</sup> /day	유입농도, 체류시간고려 30min ~ 90min
처리효율	BOD 70%, SS 80%, TP 60% 이상	유입BOD 20mg/L이하 유입 SS 100mg/L이하
용적(m <sup>3</sup> )	2.0m(W)x6.0m(L)x2.0m(H)(24m <sup>3</sup> )	침전조 8m <sup>3</sup> 제외
구성	1) 식생면적 : 12m <sup>2</sup> 2) 미생물모듈: 여재 1,200m x 3Set 3) 산기관 : 400 ℓ /min x 6EA 4) Air Mist : 950Wx 25LPM x 1SET 5) 링브로워 : 2.2kWx1.8m <sup>3</sup> /min x1set	

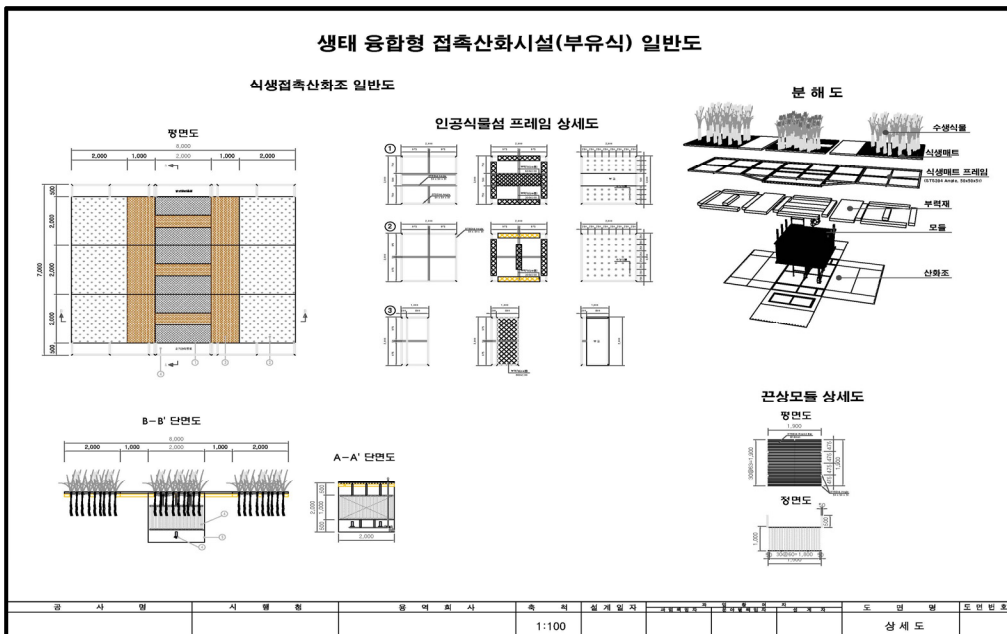


<그림 4.1-15> 접촉산화수로 입체도 및 설치 전경

다. 생태융합형 접촉산화부도

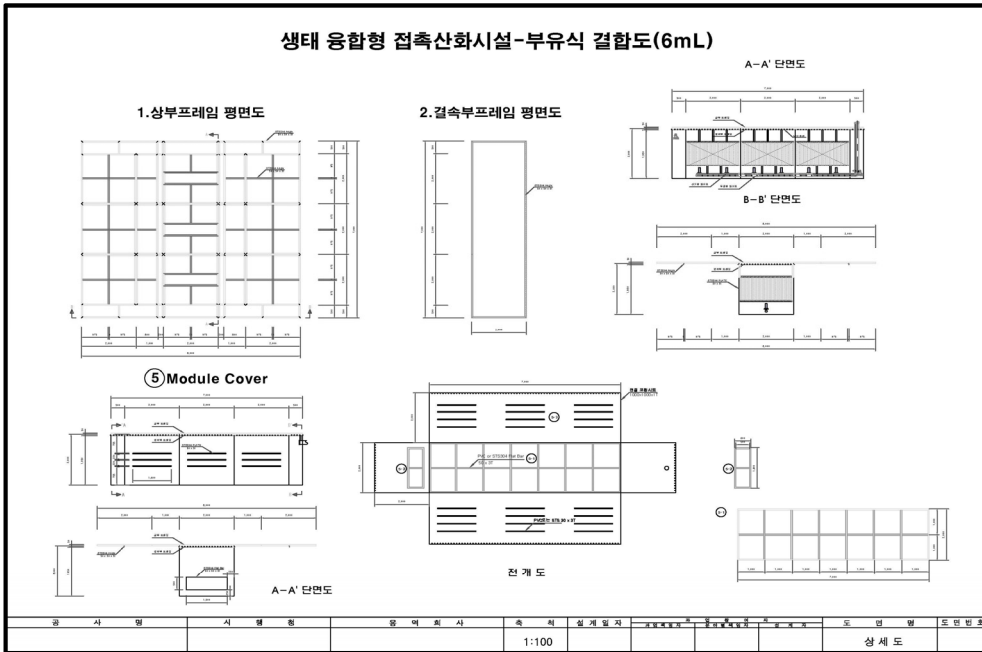
(1) 공정구성 및 기능

농업용 저수지 만곡부 대책인 생태융합형 접촉산화부도는 수면 상부의 식생부와 수면 하부의 수처리 시설로 구성되어 있다. 하부의 수처리 공정은 유입수 → 에어미스트 → 융복합 산화조(3조) → 방류로 구성되었고, 수면 상부는 <그림 4.1-16>과 같이 탈부착식 식생매트가 3조로 구성되어 있다. 생태융합형 접촉산화부도는 접촉산화수로를 호소 수체에 적용할 수 있도록 수정 보완된 시설이다. 에어미스트는 마이크로버블 포기장치로 융복합 산화조에 DO 공급 및 유지를 목적으로 하고 있으며, 처리수의 원활한 방류를 돕기 위하여 수평류 펌프를 방류구 부분에 설치하였다. 융복합 산화조(3조로 구성)는 수로식에서 서술한 바와 같은 구조와 기능으로 미생물 매디아조는 매디아에 부착된 미생물에 의해서 유기물질을 분해 제거하는 기능을 하며, 수면 상부의 식생은 뿌리에 의해 수중 영양염류를 흡수하여 제거하는 역할을 담당한다.



<그림 4.1-16> 생태융합형 접촉산화부도 제작 설계도(1)





<그림 4.1-17> 생태융합형 접촉산화부도 제작 설계도(2)

## (2) 생태융합형 접촉산화부도 제작

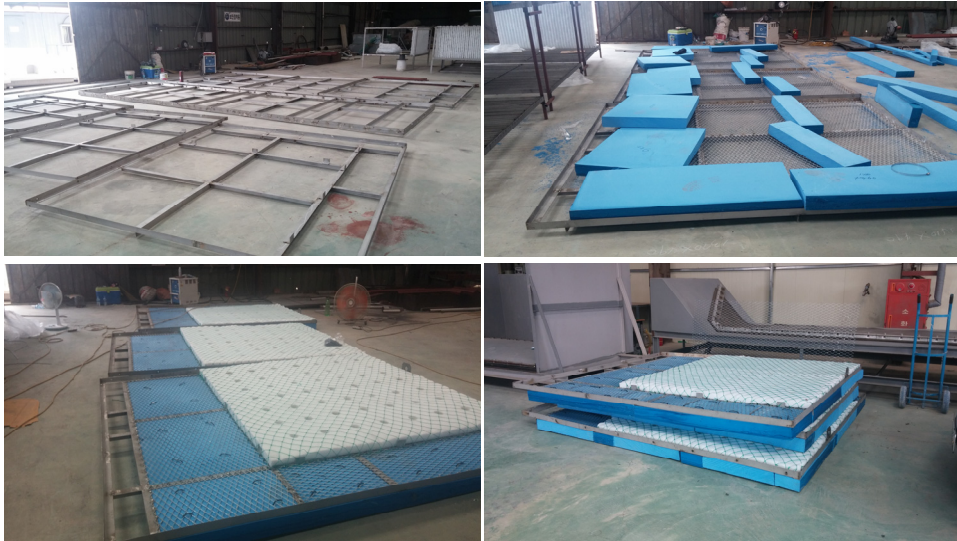
생태융합형 접촉산화부도는 수로식 제작과 함께 약 30일 정도가 소요되었으며, 제작공정은 크게 몸체(BODY)(1조) 제작, 미생물 모듈(3조) 제작, 식생매트 제작, 산기배관 및 슬러지 배출 배관 제작 등으로 구분된다. 제작이 완료된 제품을 현장으로 운반 및 진수하여 설치를 완료하였다.

### (가) 몸체(BODY) 제작

생태융합형 접촉산화부도 외관의 전체 규격은 8.0m(W)x7.0m(L)x2.0m(H)이며, STS 골격 프레임의 하부는 부력재, 상부는 식생매트로 구성되어 있다. 골격 재질은 앵글 STS 50m x 50m x 5T이다.

### (나) 미디어 모듈 공정

미디어 모듈 전체 규격은 1.8m(W)x1.8m(L)x1.5m(H)x3EA이며, 미디어 결속량은 1,200mx3EA = 3,600m가 사용되었다. 모듈 재질은 BODY는 앵글 STS 50m x 50m x 5T, 결속부는 평철 STS 40x4T이다. 제작과정은 수로식과 동일한 과정을 거쳐 제작되었다.



<그림 4.1-18> 접촉산화부도 몸체(BODY) 제작 공정

(다) 배관류 제작 공정

산기배관과 슬러지 배관의 관경은 50A이며, 산기관(400 ℓ/min) x 6EA (각조당 2개 부착)과 슬러지 배관(유공관 형식의 하부 타공)를 설치하였다. 배관재질은 STSx50A이고, Air Mist 펌프는 950Wx25LPMx1set, 모델은 MNG-9를 사용하였다.



<그림 4.1-19> 접촉산화부도 배관류 제작 공정

(3) 생태융합형 접촉산화부도 설치

생태융합형 접촉산화부도는 접촉산화수로가 설치된 지점인 매화저수지 수변에서 약 300m 정도 떨어진 수중에 설치하였으며, 공기 공급장치인 브로워와 시설 운전을 위한 계기판은 수로식 워크웨이에 설치하였다. 설치된 생태융합형 접촉산화부도 전경은 <그림 4.1-20>과 같다.



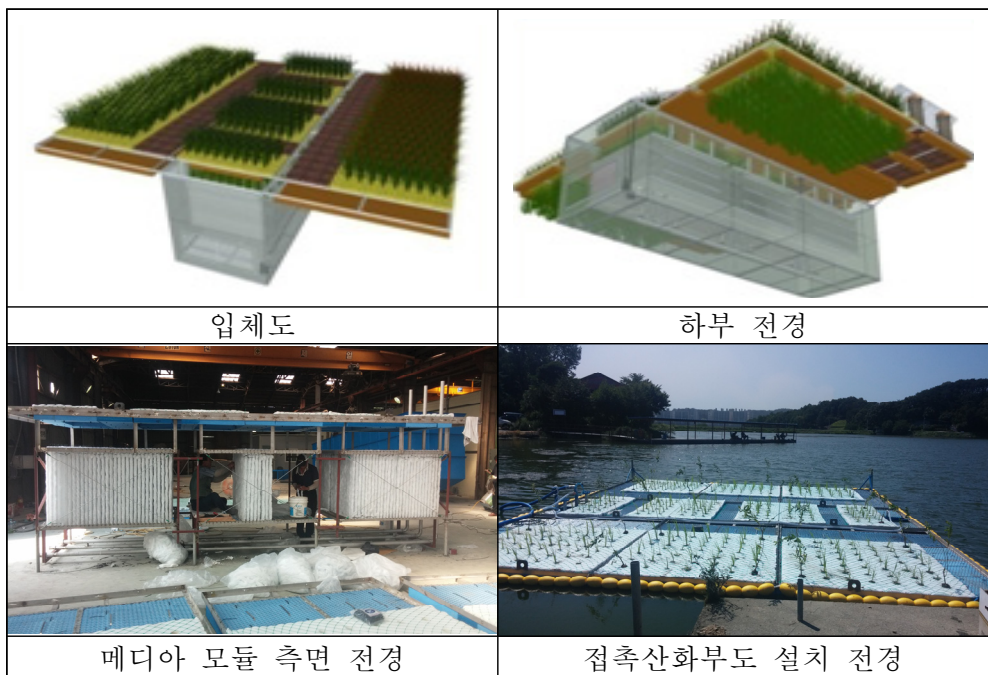
<그림 4.1-20> 접촉산화부도 제품 운반 및 설치 전경

(4) 생태융합형 접촉산화부도 시설제원

생태융합형 접촉산화부도의 시설제원은 (표 4.1-2)와 같고, 입체도 및 하부전경, 접촉산화부도 설치전경은 <그림 4.1-21>과 같다.

(표 4.1-2) 생태융합형 접촉산화부도 시설제원

구분	규격 및 사양	비고
형식	철재프레임	상부 : 식생 하부 : 미생물 여재
규격	8.0m(W)x7.0m(L)x2.0m(H)	
처리용량	450m <sup>3</sup> ~ 1,300m <sup>3</sup> /day	유입농도, 체류시간고려 30min ~ 90min
처리효율	BOD 70%, SS 80%, TP 60% 이상	유입BOD 20mg/L이하 유입 SS 100mg/L이하
용적(m <sup>3</sup> )	2.0m(W)x7.0m(L)x2.0m(H)(28m <sup>3</sup> )	장막형(융합산화조)
구성	1) 식생면적 : 36m <sup>2</sup> 2) 미생물모듈: 여재 1,200m x 3Set 3) 산기관 : 400 ℓ /min x 6EA 4) Air Mist : 950Wx 25LPM x 1SET 5) 링브로워 : 2.2kWx1.8m <sup>3</sup> /minx1set	



<그림 4.1-21> 접촉산화부도 입체도 및 설치 전경

## 2. 접촉산화시스템 수질정화효율 평가

### 가. 생태융합형 접촉산화수로

#### (1) 접촉산화수로 시험가동

유입수 대책인 접촉산화수로시스템의 에어미스트, 미생물 매디아조, 식생부 등 단위 요소기술별 각각의 성능평가를 위해 식생매트에 식생을 부착하지 않고 나머지 부분은 8월말에 설치를 완료하였다. 먼저, 생태융합형 접촉산화시스템에 산기관 대신에 도입된 에어미스트의 공기공급 효율 성능을 평가하기 위해 9월의 한 달 동안 에어미스트의 시험가동을 실시하였다. <그림 4.1-22>는 에어미스트에 의한 산소공급 초기 모습이다. 최초 가동 20분 후 흰색거품이 발생하였고, 거품 발생의 원인은 수처리조 도색용 도료의 성분에 의한 영향으로 추측되며, 가동 7일 후에는 <그림 4.1-22> 하단에서 보는 바와 같이 거품이 사라지고 정상 운영되는 모습을 보였다. 미생물 매디아조의 DO를 측정한 결과, 가동 초기에는 3.2~3.4 mg/L의 농도를 보였으나 9월 15일 조사에서는 4.1~4.4mg/L, 지속 정상 가동 후에는 7.0mg/L 내외까지 상승하는 것으로 나타났다.



<그림 4.1-22> Air-mist 초기 가동 모습

## (2) 접촉산화조 유입수 및 유출수 수질농도

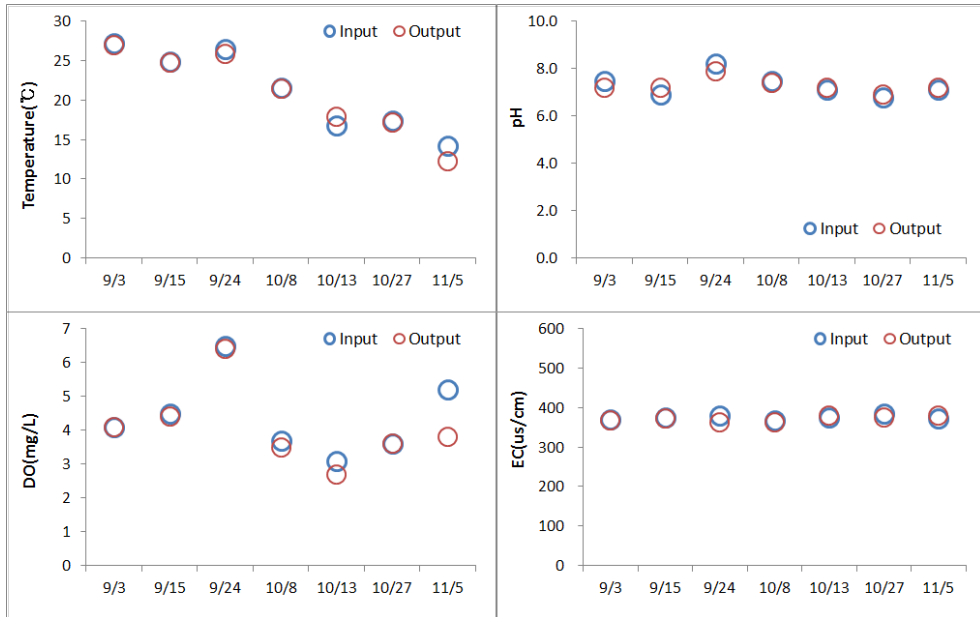
금년에는 1차년도에 개발된 융복합 수처리시스템을 저수지에 설치해서 시험가동을 하면서 발생하는 문제점을 확인하고, 확인된 문제점에 대해서 수정 및 보완을 하는 일에 중점을 두었고, 세부 설계인자별 수질정화효율 평가 등에 대해서는 3차년도 현장적용실험을 통해 도출할 계획이다. 접촉산화수로 시스템의 설치가 완료된 이후 9월 초순부터 12월까지 유입수 및 유출수에 대한 수질조사를 지속적으로 실시하였다. <그림 4.1-23>은 최초 가동 7일 후에 유입수와 유출수를 채수하여 비교한 것이다. <그림 4.1-24>~<그림 4.1-25>는 미생물 미디어조에 유입되는 유입수와 미디어조를 통과한 후 배출되는 유출수에 대한 수질을 조사한 결과이다.

현장조사항목인 수온은 유입수 14.2~27.2℃, 유출수 12.3~27.0℃이고, pH는 유입수 6.8~8.2, 유출수 6.9~7.9로 측정되었고. EC는 유입수 371~384 $\mu$ s/cm, 유출수 362~381 $\mu$ s/cm로 수온, pH, EC 모두 유입수와 유출수간에 차이가 거의 없었다. DO는 유입수에서 3.1~6.5mg/L, 유출수에서 2.7~6.4mg/L로 유입수와 유출수간 차이가 없었으며, 에어미스트의 정상 가동시에는 우리가 목표로 했던 4.0mg/L 이상은 유지되는 것으로 나타났다.

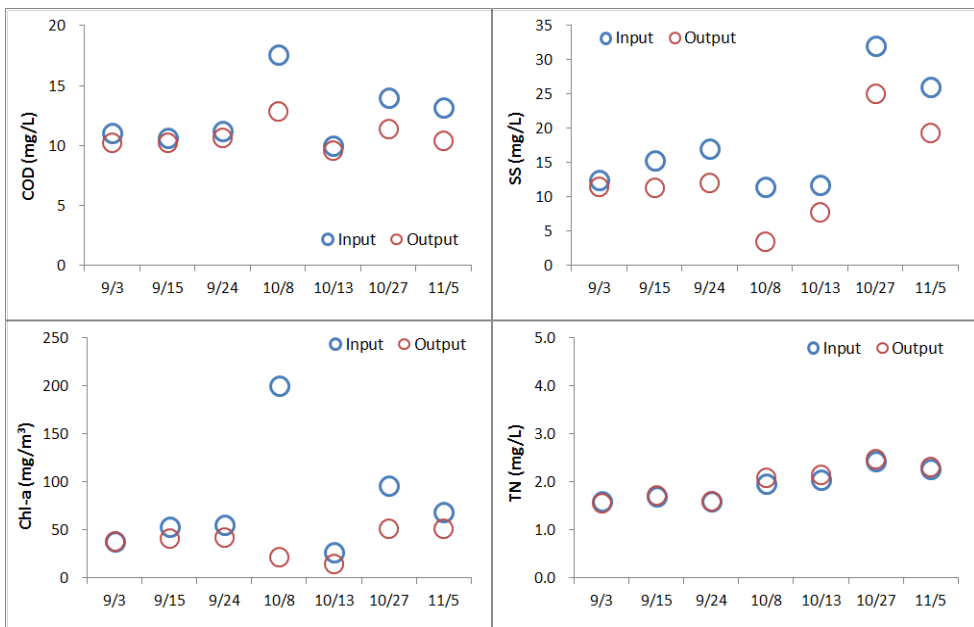
COD, SS, Chl-a, TP 등은 수처리시스템 초기 가동시에는 미디어에 미생물 부착율 저조로 유입수와 유출수의 농도가 거의 비슷하였으나 운영시간의 경과와 함께 미디어의 미생물 부착율이 높아짐에 따라 최대 처리효율이 SS 69.6%, Chl-a 89.3%, TP 89%까지 도달하였다. 유기물에 대한 처리효율 등은 에어미스트 막힘 현상으로 목표치에는 미달되었지만 SS, Chl-a, TP 처리효율은 계획했던 목표치를 달성할 수 있었다. 3차년에는 요소기술별, 세부 설계인자별로 수질정화효율을 도출할 계획이다.



<그림 4.1-23> 접촉산화수로 최초 가동 7일 후 유입수 및 유출수



<그림 4.1-24> 접촉산화수로 유입수, 유출수 수질(수온, pH, DO, EC)



<그림 4.1-25> 접촉산화수로 유입수, 유출수 수질(COD, SS, Chl-a, TN)

나. 생태융합형 접촉산화부도

(1) 시험가동 및 시설보완

호소 만족부 대책으로 개발된 생태융합형 접촉산화부도를 8월말에 설치 완료하고 9월~10월에 걸쳐 시험가동을 하였다. 생태융합형 접촉산화부도는 접촉산화수로를 응용해 호소 수체에서 수처리가 가능하도록 개발된 시설이다. 본 연구에서 처음 시도되는 만큼 정상운영까지 많은 시간이 소요될 것으로 생각되며, 충분한 현장적용실험을 걸쳐 호소 만족부 수환경 개선 및 수질개선에 적용될 수 있는 최적의 모델을 개발할 계획이다.

생태융합형 접촉산화부도의 초기 시험운전 중 하부의 수처리 장치에 의해 처리된 처리수가 당초 계획했던 것처럼 원활하게 배출되지 않아 배출구에 250 LPM 수중펌프 3대를 추가적으로 새로 설치하였다. <그림 4.1-26>은 처리수의 원활한 배출을 위해 새로 설치한 수중 펌프 3대의 배출구 모습이다. 또한 수중에 위치하고 있는 에어미스트도 초기 가동 직후에 마름 등 수생식물 등에 의해 막힘 현상 등이 발견되어 에어미스트 보호를 위해 보호망을 씌워 문제점을 해결하였다. 에어미스트는 보호망을 씌운 후에는 막힘 현상이 없었고, 처리수의 원활한 배출을 위해 새로 설치한 수중 펌프도 정상 가동되어 11월 이후부터는 생태융합형 접촉산화부도 장치가 정상 운영 중에 있다.



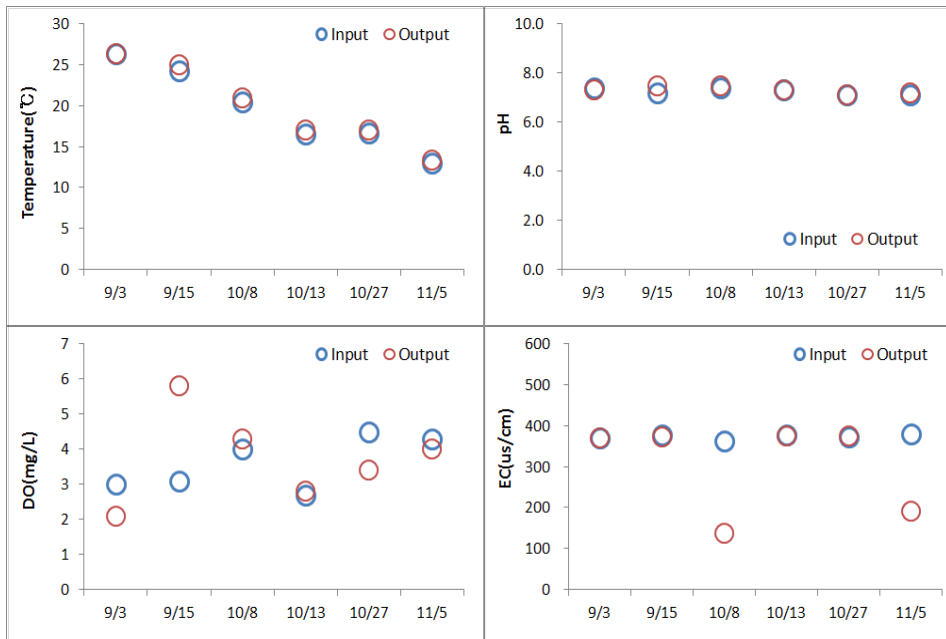
<그림 4.1-26> 처리수 배출을 위한 수중펌프 설치



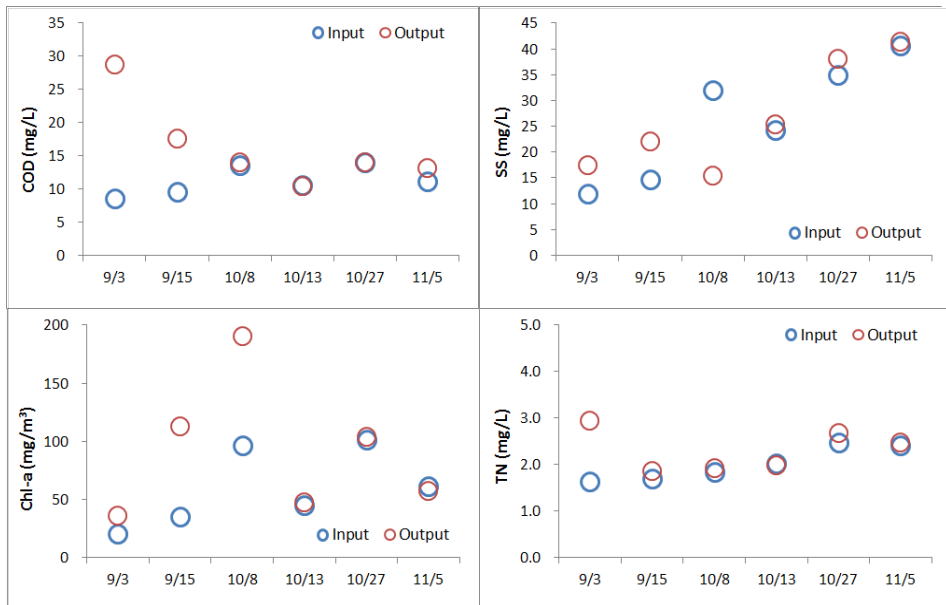
## (2) 유입수 및 유출수 수질농도

농업용 저수지 만곡부 수질개선을 위해 개발된 융복합 접촉산화부도는 수중에 설치된 시설물이라 시험운전 중 문제점이 발생했고, 확인된 문제점에 대해서 해결 및 시설 보완을 하는 일에 금년에는 중점을 두었다. 단위 요소기술별로 세부 설계인자에 따른 수질정화효율 평가 등에 대해서는 3차 년도의 현장적용실험을 통해 도출할 계획이다. 접촉산화부도 시스템을 저수지에 설치한 이후부터 지속적으로 유입수 및 유출수에 대한 수질 조사를 실시하고 있다. <그림 4.1-27>~<그림 4.1-28>는 생태융합형 접촉산화부도에 유입되는 유입수와 수중에 있는 수처리 미생물 매디아조를 통과한 후의 배출 수역에서 수질을 조사한 결과이다. 접촉산화부도는 넓은 수역(open 공간)에 설치된 시설이라서 수처리 장치에 의한 수질정화효율을 명확하게 정량화해서 나타내기에는 무리가 있다. 따라서 수처리 장치로 유입되는 지점의 수역과 배출되는 지점의 수역에서 각각 수질을 조사하여 그 결과를 비교하였다.

현장조사항목인 수온은 유입수 13.0~26.4℃, 유출수 13.4~26.4℃이고, pH는 유입수 7.1~7.4, 유출수 7.1~7.5로 측정되어 수온 및 pH는 유입수역과 유출 수역에 차이가 거의 없었다. EC는 유입수 362~381 $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 유출수 137~376 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 10월 8일과 11월 5일 조사에서는 유입수에 비해 유출수에서 EC가 크게 감소하였다. DO는 유입수에서 2.7~4.5mg/L, 유출수에서 2.1~5.8mg/L로 에어미스트가 설치되어 있는 유입 수역에서 배출 수역보다 비교적 높은 농도로 나타났다. COD는 유입수에서 8.6~14.0mg/L, 유출수에서 10.4~28.8mg/L로 유입수 수역에 비해 배출수역에서 훨씬 높은 농도로 나타났는데, 이는 수처리 장치에 의한 분해 효과보다 에어미스트에 의한 산소 포기로 유입부에서 유기물 분해가 활발히 일어나고 있는 반면에 배출 수역에서는 낮은 DO로 유기물 분해가 감소하고 있음을 알 수 있다. SS는 유입부에서 12.0~40.7mg/L, 유출수에서 17.5~41.3mg/L로 유출수역에서 오히려 더 높게 나타났다. Chl-a는 유입수에서 20.2~101.3mg/m<sup>3</sup>이고, 유출수는 35.8~190.3mg/m<sup>3</sup>으로 COD 및 SS와 같은 결과를 보였다. TN은 유입수에서 1.636~2.482mg/L, 유출수에서 1.867~2.937mg/L이고, TP는 유입수에서 0.101~0.180mg/L, 유출수에서 0.096~0.714mg/L로 나타났다. TN, TP도 배출 수역에서 수질농도가 더 높았으며, 이는 수처리장치보다 에어미스트에 의한 산소포기가 더 많은 영향을 준 것으로 판단된다.



<그림 4.1-27> 접촉산화부도 유입수, 유출수 수질(수온, pH, DO, EC)



<그림 4.1-28> 접촉산화부도 유입수, 유출수 수질(COD, SS, Chl-a, TN)

### 3. 접촉산화시스템 유효 영향반경 평가

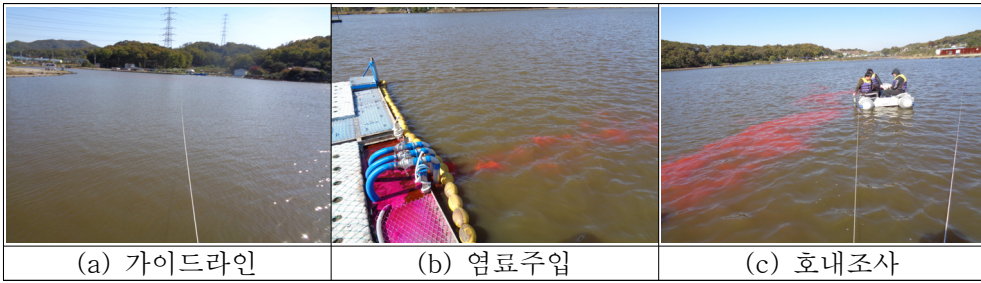
#### 가. 로다민 추적실험 설계

매화저수지에서 현장적용실험을 하고 있는 생태융합형 접촉산화부도의 수리학적 유효 영향반경을 파악하고자 Rhodamine 용액을 주입하여 추적 실험을 시행하였다. Rhodamine 용액은 생물에 무해한 성분으로 생물체 염색에 주로 사용되고 있는 염료이며, Rhodamine 추적실험은 수중에서 주입된 용액의 확산범위 등을 실험하기 위하여 주로 이용되고 있는 방법이다. 부유식 수처리장치를 기점으로 수평방향 10m 간격으로 총 160m의 가이드라인을 설치하였으며, Rhodamine 주입량은 저수지 체적인 243,000 m<sup>3</sup>을 고려하여 0.232kg으로 산정하였다. 염료는 호소수와 희석하여 수질 개선장치 방류부에 직접 주입하였다. 매화저수지의 부유식 수질 개선장치의 설치위치 및 가이드라인 개념도는 <그림 4.1-29>와 같고, Rhodamine 추적실험 전경은 <그림 4.1-30>와 같다.

호내 주입된 염료의 추적은 10m 간격으로 각 지점별로 수심을 측정 한 후, 수심 0.5m, 2m지점에서 Rhodamine 센서를 부착한 수질 다항목측정장치인 YSI6600를 이용하여 측정하였다. 그 밖의 수온, DO, 전기전도도 등의 항목도 동시에 측정하였고, 동시에 기상장치(Davis WS-Pro2\_Plus)를 설치하여 풍향 및 풍속을 측정해 결과 해석에 활용하였다.



<그림 4.1-29> 매화저수지 로다민 추적실험 가이드라인



(a) 가이드라인

(b) 염료주입

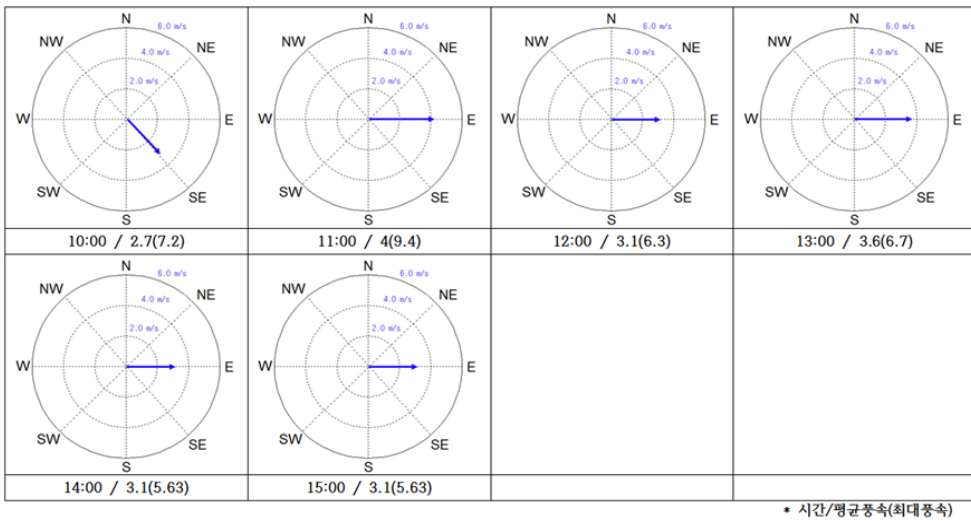
(c) 호내조사

<그림 4.1-30> 매화지 추적실험조사 전경

나. 추적실험 결과

(1) 풍향 및 풍속

로다민 추적실험을 하는 동안 풍향 및 풍속은 <그림 4.1-31>에 나타내었다. 바람은 주소 서쪽에서 동쪽 방향으로 불었으며, 평균 풍속은 2.7~4m/s로 나타났다.



<그림 4.1-31> 매화저수지 추적 실험기간 동안 풍향 및 풍속

## (2) Rhodamine 농도

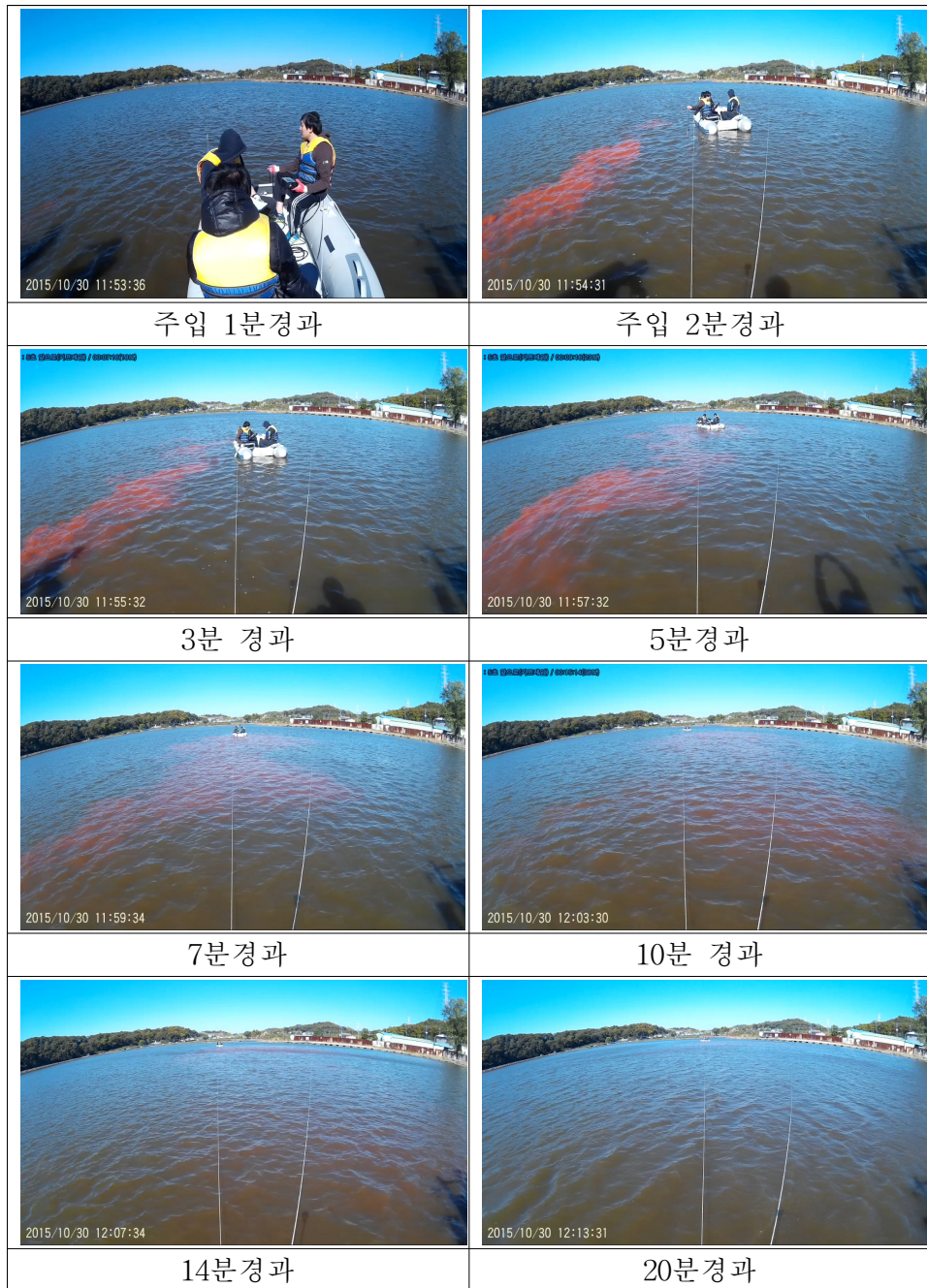
염료 주입 후 경과시간에 따라 (표 4.1-3)과 같이 4개 구간으로 분리하여 실험결과를 해석하였으며, 경과시간에 따른 측정구간 내 Rhodamine 농도의 수면 변화를 <그림 4.1-32>에 나타냈고, 시간경과에 따른 측정구간 내 거리에 따른 Rhodamine 농도는 <그림 4.2-33>에 나타내었다.

Rhodamine 용액을 주입하기 전 매화저수지의 배경농도는 물 속 형광물질의 영향으로  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{g/L}$ 로 나타났다. 로다민 용액을 주입하자 물 속 염료는 부유식 수처리장치의 제트류 영향으로 추진방향으로부터 부채꼴 형태로 퍼져나가는 것을 볼 수 있었다. Rhodamine 주입 후 첫 번째 측정(T1구간)에서 주입된 용액은 수질개선 장치 제트류의 영향으로 70m 거리까지 이동하였으며, 수심 0.5m에서  $11.4 \mu\text{g/L}$ , 2m에서  $2.4 \mu\text{g/L}$ 의 농도를 보였다. 두 번째 측정(T2)구간에서 최대 100m 지점까지, 세 번째 측정(T3)구간에서는 최대 120m지점에서까지 Rhodamine 농도가 계측되었으며, 네 번째 측정(T4)구간에서는 Rhodamine 농도가 거의 계측되지 않았다.

T1, T2, T3, T4 조사기간 동안 종방향의 Rhodamine 농도 분포를 종합하여 유추해보면, 부유식 수처리 장치의 제트류는 20분 후 50~70m 까지 이동하였으며(평균 이동속도 약 7cm/sec), 대부분의 제트류 운동량은 이 지점에서 소멸되는 것으로 판단된다. 이후 Rhodamine을 포함한 수괴(Plume)는 후방에서 계속 유입되는 제트류의 영향으로 인한 이류(Advection)와 주변 수체와의 농도 차이에 따른 확산(Diffusion)의 효과로 약 1시간 후 100~120m 지점까지 평균 이동속도 3cm/sec으로 이동하였다. 그 이후 시간부터 Rhodamine을 포함한 수괴(Plume)는 3차원 확산을 통해 희석되었으며, T4 조사구간에서는 배경농도에 거의 근사하였다. 따라서, 매화저수지 부유식 수처리 장치의 물리적 영향범위는 약 100~120m로 판단되며, 120m 이후에는 바람과 물 흐름에 의한 난류 확산의 영향으로 염료가 유동하는 것으로 판단된다.

(표 4.1-3) 매화저수지 경과시간에 따른 구간 분리

시간구간	경과 시간	시간구간	경과 시간
T1	2분~20분	T2	25분~45분
T3	1시간~1시간 30분	T4	2시간 이후

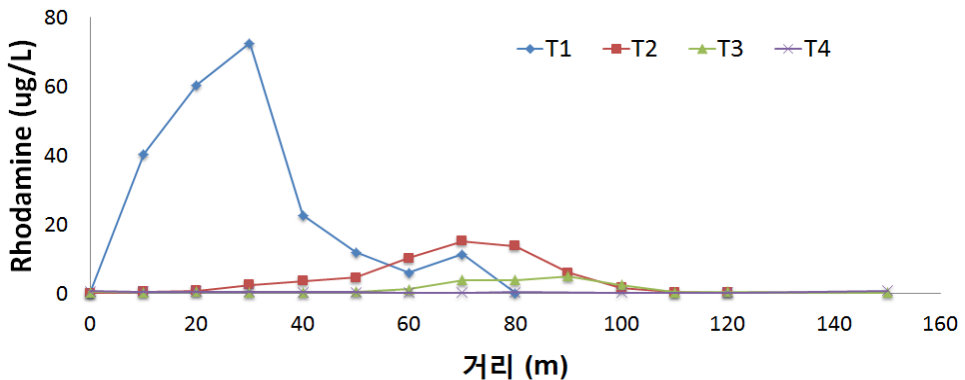


<그림 4.1-32> 매화저수지 Rhodamine 주입 후 경과시간별 수면 변화

구분	거리별 Rhodamine(ug/L) 농도														
	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
T1	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80					
	0.5	0.2	40.4	60.4	72.4	22.7	12	6	11.4	0.1					
	2	0.2	0.3	53.1	75.7	11.1	10.2	13.7	2.4	0.2					
T2	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
	0.5		0.6	0.9	2.5	3.7	4.7	10.2	15.2	13.8	6.1	1.7	0.4	0.3	
	2		0.7	0.6	1.4	2	0.9	3.1	4.2	14.5	11.4	14	1.1	0.3	
T3	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	1.3	3.9	4	5.1	2.6	0.4	0.6	0.3
	2	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.6	0.2	2.1	3	0	4.6	5.1	0.8	0.2
T4	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	150		
	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.8		
	2	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4		

<그림 4.1-33> 구간별로 거리에 따른 수심별 Rhodamine 농도

Rhodamine 용액 주입 후 수심 0.5m에서 거리에 따른 Rhodamine 농도를 측정 한 결과는 <그림 4.1-34>와 같다. T1 구간(주입 후 20분 경과)에서는 마이크로 버블 제트류의 영향으로 약 50~70m까지 이동(속도 7cm/sec) 후 소멸되는 것을 볼 수 있고, T2(25분~45분 경과 후), T3 구간(1시간~1시간 20분 경과 후)에서는 이류에 의해 평균 3cm/s 속도로 약 100~120m 거리까지 이동하다가 소멸되는 것을 볼 수 있다. 용액 주입 후 2시간 후인 T4 구간에서는 Rhodamine 용액이 배경농도와 비슷하여 완전 희석되어 소멸되는 것으로 나타났다.



<그림 4.1-34> 수심 0.5m에서 거리에 따른 구간별 Rhodamine 농도 변화

(3) 수온

경과시간에 따른 측정구간 내의 수온(℃) 변화를 <그림 4.1-35>에 나타내었다. 조사결과 상층과 하층간의 수온 차이는 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 조사시기가 10월말이었고, 대기 기온 강하와 바람에 의한 난류로 인해 저수지 표층과 하층의 수직혼합이 활발하게 일어났기 때문으로 판단된다.

구분	거리별 수온(℃)												
	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80			
T1	0.5	14.4	14.4	14	14.5	14.4	14.5	14.5	14.4	14.5			
	2	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4			
T4	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	150
	0.5	14.8	14.8	14.8	14.8	14.6	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.9
	2	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.8	14.8	14.8	14.7	14.8	14.8

<그림 4.1-35> 구간별로 거리에 따른 수심별 수온

(4) DO 농도

경과시간에 따른 측정구간 내의 DO 농도 변화를 <그림 4.1-36>에 나타내었다. DO는 전 구간에서 9.0mg/L 이상의 높은 농도를 나타냈으며, 수온 조사 결과와 동일하게 상층과 하층간의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 계절적 요인 및 바람에 의한 영향으로 판단된다.

구분	거리별 DO(mg/L) 농도												
	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80			
T1	0.5	9.62	9.3	9.6	9.4	9.4	9.5	9.53	9.84	10.4			
	2	8.8	9.25	9.53	9.4	9.45	9.64	9.45	10.2	10.4			
T4	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	150
	0.5	10.7	10	10.5	10.7	11	10.7	10.8	10.6	10.8	10.5	11	11.3
	2	10.2	10	10.6	10.7	10.9	10.8	10.8	10.7	10.8	10.6	11	11.3

<그림 4.1-36> 구간별로 거리에 따른 수심별 DO 농도



## 제2절 마이크로버블 현장적용 및 성능평가

### 1. 현장적용지구 및 실험개요

생태융합형 접촉산화시스템(수로식, 부유식) 및 무인항법 이동식 수질정화시스템 등에 도입된 마이크로 버블 포기장치의 현장적용실험을 통해 수질정화효율 및 수환경개선 효과 등을 검증하고자 하였다. 인천광역시 강화군에 소재하고 있는 대산저수지, 경기도 용인시에 소재하고 있는 기흥저수지에 시험용 플랜트를 설치하여 수환경 개선효과 및 포기장치의 수리학적 유효 영향반경 등을 측정하였다. 또한 실규모로 설치되어 있는 충남 아산시에 소재하고 있는 죽산저수지에서 유효 영향반경 측정실험과 수환경개선 효과 등을 조사하였다.

#### 가. 대산저수지

##### (1) 대산저수지 일반현황

대산저수지는 1980년도에 인천광역시 강화군 송해면 송퇴리에 설치된 저수지이다. 저수지의 간접유역은 강화읍(대산리), 송해면(송퇴리, 솔정리, 하도리, 상도리, 신당리), 하점면(부근리) 등 3개 읍·면 7개리에 해당하는 넓은 유역을 가지고 있다. 간접 유역면적은 1,888 ha로 넓은 유역을 보이지만 직접 배수구역은 42.0ha로 자연유량이 매우 적고, 주변에 큰 하천이나 강이 없어 인근 농경배수로에서 물을 양수하여 사용하는 양수 저수지로서, 농업용수 수질기준을 초과하는 오염된 저수지이다.



<그림 4.2-1> 대산저수지 전경

(표 4.2-1) 대산저수지 시설현황

총저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	유역면적(ha) (직접유역)	유효수심 (m)	수혜면적 (ha)	설치년도
1,271.0	28.9	1,880.0 (42.0)	4.4	288.9	1980년

(2) 실험설계 내용

마이크로 버블 포기장치는 수심이 깊은 대산저수지 제방 인근지점에 설치하여 2015년 4월 22일부터 5월 6일까지 2주간 운영하였다. 대산저수지는 양수저수지로 관개기에 대량의 물을 일시에 사용하므로 관개기 이후에는 저수율이 매우 낮아 수심이 확보되지 않아 마이크로버블 포기장치를 운영할 수가 없어 철수하였다. 버블 발생기는 총 4대를 1set로 구성하여 수면아래 1m 지점에 고정식으로 설치하였다. 총 공기흡입량은 320LPM이며, 사용동력은 2.5kW를 사용하였다.



<그림 4.2-2> 대산저수지 마이크로버블 현장적용실험 위치



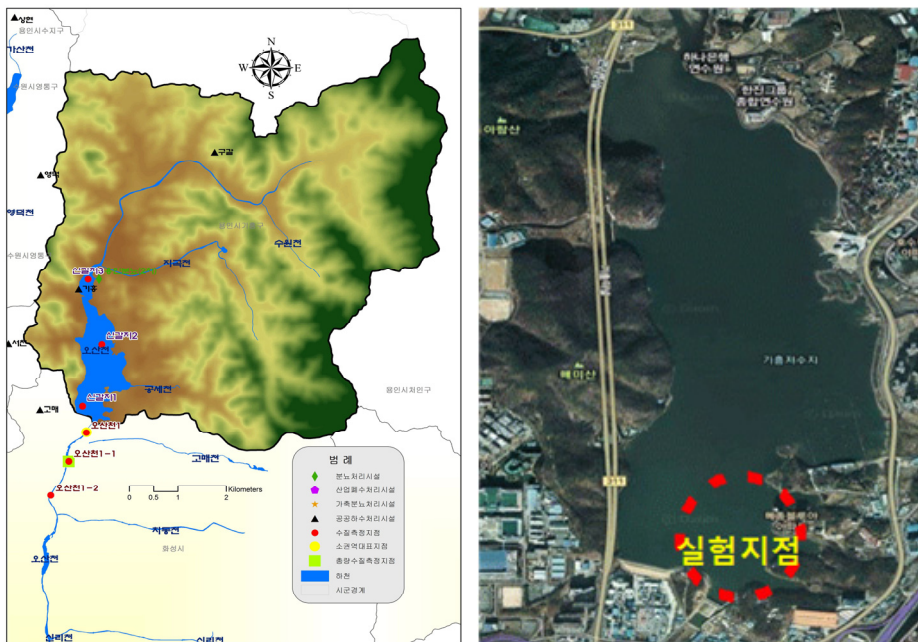
<그림 4.2-3> 대산저수지 마이크로버블 설치 및 버블 전경

## 나. 기흥저수지

### (1) 기흥저수지 일반현황

기흥 저수지는 농업용수 공급 및 홍수 조절의 목적으로 1964년에 준공하였으며, 행정구역상 용인시 기흥구 고매동, 하갈동, 공세동에 위치하고 있다. 유역 내에 용인시의 총 11개 동을 포함하고 있으며, 총 유역면적 5,300 ha, 유효저수량 11,630천 $m^3$ , 만수면적 231ha, 평균수심은 5m인 대규모 저수지이며, 시설제원은 (표 4.2-2)와 같다.

호 내에 3개의 호소 수질측정망 지점(신갈지1, 신갈지2, 신갈지3)이 위치하고 있으며, 2013년 수질측정결과 BOD, COD, T-N, T-P 항목의 호소 수질환경기준 등급은 III~V로 호 내 수질오염도가 높은 것으로 조사되었다(한강유역환경청, 2014). 유역 대부분의 지역이 도시화가 진행되어 주요 오염원인 생활계가 증가하고 있는 실정이며, 호내 조류문제로 인한 민원이 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 2014년 환경부에서 국내 1호 중점관리 저수지로 지정되면서, 정부와 지자체의 호 내 수질개선을 위한 노력이 집중되고 있는 저수지이다(농림축산식품부, 2014).



<그림 4.2-4> 기흥저수지 유역 소권역도(좌) 및 저수지 위성사진(우)

기흥저수지 수질현황은 연 4회 수질조사 결과 COD 평균이 21.5mg/L로 농업용수 수질환경기준 IV등급을 초과하고 있으며, 환경부의 '14년 중점관리 저수지로 지정되어 있다. 상류유역 기흥구 일원의 생활하수를 처리하는 기흥, 구갈, 고매 하수종말처리장이 가동 중에 있으나 영양물질이 농업용수 수질기준이상으로 방류되고 있어 하절기 부영양화가 빈번하게 발생되는 상황이다. 저수지 관할 지자체인 용인시와 우리 공사에서 기흥저수지 수질개선을 위해 기흥하수종말처리장 방류구 우회, 녹조방지 사업, 하수관거정비, 유입하천 환경개선사업, 하수종말처리장 고도처리 증설사업, 기흥저수지 수질개선사업 등을 추진하고 있다.

(표 4.2-2) 기흥저수지 시설현황

총저수량 (천m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	유역면적 (ha)	유효수심 (m)	수해면적 (ha)	설치년도
11,630.0	231.2	5,300	5.3	956.5	1964년

(2) 실험설계 내용

마이크로 버블 포기장치는 상시적으로 녹조가 발생하는 만곡부 지점을 대상으로 하였으며, 2015년 6월 16일에 설치하여 9월까지 운영하였다. 버블 발생기는 총 3대를 1set로 구성하여 수면 아래 1m 지점에 고정식으로 설치하였다. 총 공기흡입량은 380LPM이며, 사용동력은 12.2kW를 사용하였다. 기흥저수지에서는 마이크로 버블 포기장치 설치 전과 후의 수질농도를 비교하였으며, 로다민 용액을 이용하여 마이크로 버블 포기장치의 수리학적 유효 영향반경을 측정하였다.



<그림 4.2-5> 기흥저수지 마이크로버블 설치 및 버블 확산 전경

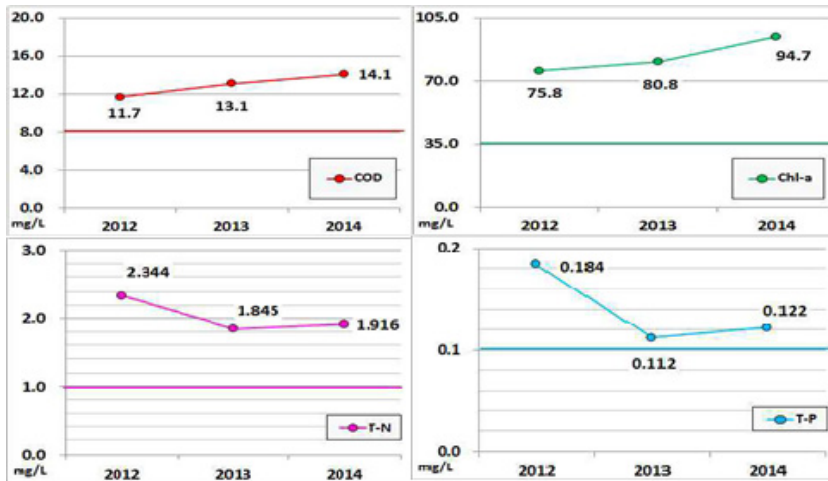
다. 죽산저수지

(1) 죽산저수지 일반현황

죽산저수지는 1942년도에 충청남도 아산시 선장면 죽산리에 설치된 농업용 저수지로서, 현재 목적외 임대낚시터로 사용되고 있다. 죽산저수지의 유역은 완만한 구릉지로 논과 밭이 위치하고 있으며, 학성계곡에서 발원한 소하천이 저수지 상류 우측에서 유입되고 있다.

(표 4.2-3) 죽산저수지 시설현황

총저수량 (천 m <sup>3</sup> )	만수면적 (ha)	유역면적 (ha)	유효수심 (m)	수해면적 (ha)	설치년도
621.3	23.8	143.0	2.6	128.0	1942년



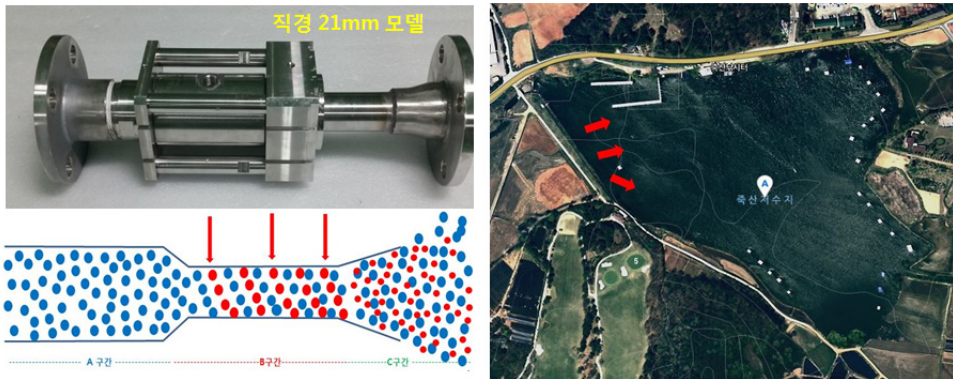
<그림 4.2-6> 죽산저수지 수질현황



<그림 4.2-7> 죽산저수지 위치도 및 저수지 전경

(2) 실험설계 내용

마이크로 버블 포기장치는 수심이 약 4m 정도 되는 저수지 제방 앞쪽에 100m 간격으로 3지점에 2015년 9월 16일에 설치하여 현재까지 운영되고 있다. 버블 발생기는 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생장치(Air-mist 21 시스템)로 총 3지점에 각 1set(1set에 3기로 구성)씩 구성하여 저수지 바닥에서 상부 수면 쪽으로 1m 떨어진 지점에 고정식으로 설치하였다. 총 공기흡입량은 380LPM이며, 사용동력은 12.2kW를 사용하였다. 죽산저수지에서는 마이크로 버블 포기장치 설치 전과 후의 저수지 내 DO 농도를 비교하였으며, 로다민 용액을 이용하여 마이크로 버블 포기장치의 수리학적 유효 영향반경을 측정하였다.



<그림 4.2-8> Air-mist 21 시스템 및 버블장치 설치 위치



<그림 4.2-9> Air-mist 21 시스템 설치 전경

## 2. 마이크로버블 유효 영향반경 평가

### 가. 죽산저수지

#### (1) 실험내용

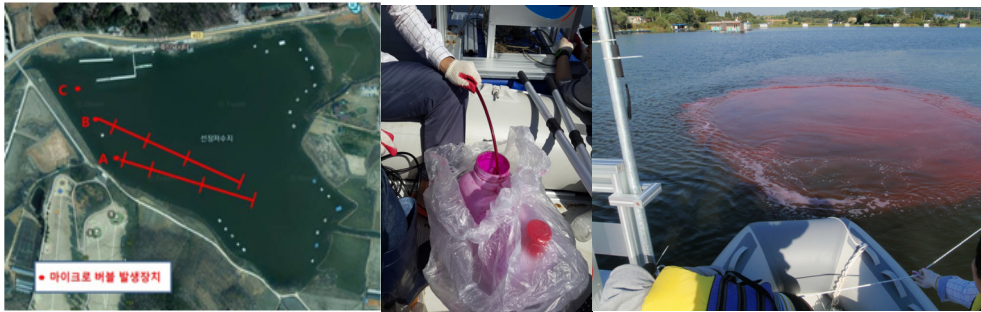
죽산저수지 마이크로버블 발생장치의 영향반경평가는 2회에 걸쳐 실험을 진행하였으며, 실험 조건은 (표 4.2-4)와 같다. 죽산저수지는 3set의 마이크로버블 발생장치가 <그림 4.2-9>와 같이 가동 중에 있으며, 1차 실험은 저수지 좌안에 위치한 마이크로발생장치 A를 대상으로 하였다. 장치의 마이크로버블 제트류 수평방향 10m간격으로 총 160m의 가이드라인을 <그림 4.2-10(a)>와 같이 설치하였으며, Rhodamine 용액의 주입량은 저수지 체적인 621,300m<sup>3</sup>을 적용하여 0.464kg을 산정하였다. 로다민 염료는 호소수와 희석하여 마이크로버블 발생 장치의 공기 흡입구에 직접 주입하였으며, 주입 전경은 <그림 4.2-10(b)>와 같다.

1차 실험 중 죽산 저수지 낚시터 관리인 배가 측정구간 내에서 운항을 하여, 주입염료가 실험구간 밖으로 확산되었다. 이로 인해 영향 범위의 해석과 판단이 어려워 추가 실험을 진행하였다.

Rhodamine 추적 2차 실험은 마이크로버블 발생장치 B를 대상으로 하였으며, 제트류에 수평방향으로 1차 실험과 동일하게 가이드라인을 설치하였다. 저수지 체적을 고려하여 Rhodamine 0.5kg을 호소수와 희석하여 마이크로버블 발생장치의 공기 흡입구에 직접 주입하였다. Rhodamine 용액을 주입한 후 가이드라인에 따라 거리간격 10m마다 각 지점별로 수심을 측정한 후, 그 지점의 수심 1m, 2m, 3m 수층에서 각각 Rhodamine 센서를 부착한 다항목 수질측정 장치인 YSI6600를 이용하여 Rhodamine 농도, 수온, DO, EC 등을 측정하였다. 또한, 실험을 수행하는 동안 기상장치(Davis WS-Pro2\_Plus)를 설치하여 풍향 및 풍속을 측정했고, 그 기상 자료를 로다민 실험결과 해석에 활용하였다.

(표 4.2-4) 죽산저수지 실험 조건

구분	실험 기간	Rhodamine 주입량
1차	2015년 10월 5일(월) 11:20~14:40	0.464kg
2차	2015년 10월 5일(월) 15:50~17:30	0.5kg



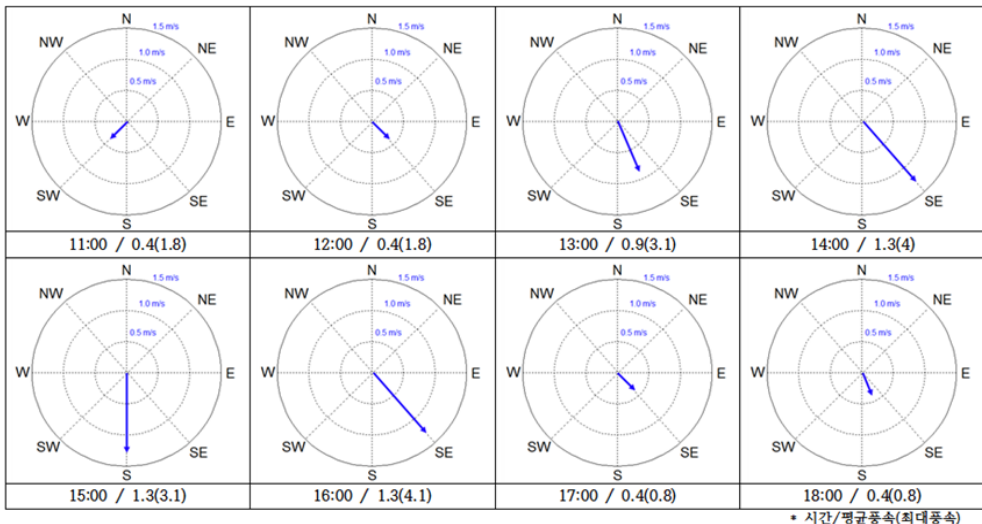
(a) 가이드라인 설치 (b) Rhodamine 주입 (C) Rhodamine용액 확산

<그림 4.2-10> 죽산 저수지 추적실험 전경

(2) 실험 결과

(가) 풍향 및 풍속

로다민 실험하는 동안 측정된 풍향 및 풍속은 <그림 4.2-11>와 같다. 바람의 방향은 주로 저수지 좌안에서 우안으로 불었으며, 평균 풍속은 1.3m/s 이내로 크지 않았다.



<그림 4.2-11> 죽산저수지 풍향 및 풍속



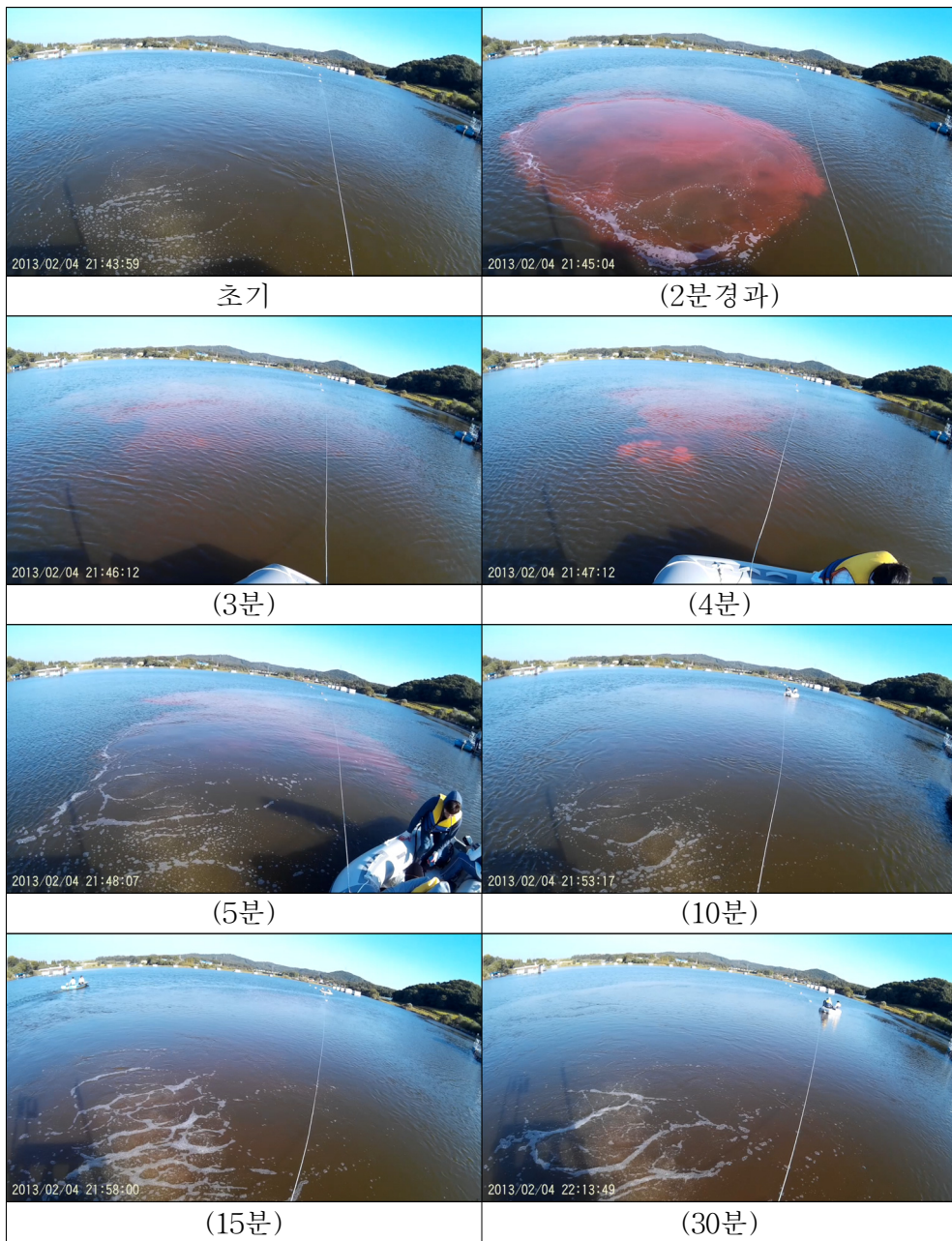
## (나) Rhodamine 농도

염료 주입 후 경과시간에 따라 (표 4.2-5)와 같이 3개 구간으로 분리 하여 실험 결과를 해석하였으며, 시간경과별 실험구간의 수면변화를 <그림 4.2-12>에, 측정구간별 경과시간 및 거리에 따른 Rhodamine 농도변화를 <그림 4.2-13>에 나타내었다.

Rhodamine 용액을 주입하기 전 죽산저수지의 배경농도는 물 속 형광물질의 영향으로  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{g/L}$ 로 나타났다. Rhodamine 용액 주입 후 첫 번째 측정(T1구간)에서 주입된 용액은 마이크로버블 제트류의 영향으로 20~40 m 거리까지 이동하였으며, 2번째 측정(T2 구간)에서는 거리 50~120m의 수심 2m 지점에서 배경농도 이상인  $3.1 \sim 12 \mu\text{g/L}$ 의 Rhodamine 농도를 보였다. 특히 거리 80m, 수심 2m에서 Rhodamine 농도가  $12 \mu\text{g/L}$ 로 T2구간에서는 가장 높은 농도를 나타냈다. 약 15~20분 후, 거리 40m부근에서 Rhodamine의 농도( $0.7 \mu\text{g/L}$ )는 마이크로버블 발생장치 인근의 농도( $6.2 \mu\text{g/L}$ ) 보다 낮았으며, 이는 제트류의 Backwater 현상에 의한 것으로 판단된다. 실제 촬영영상을 분석해본 결과, Rhodamine 주입 15분경과 후에 마이크로버블 발생장치 주변에서 염료가 하층으로부터 올라오는 것이 확인되었다. 3번째 측정(T3) 구간에서 거리 80~100m 구간에서만 미세하게 Rhodamine 농도가 계측되었다.

<그림 4.2-14>는 수심 2m에서 시간구간별 거리에 따른 농도변화를 그래프로 나타내었다. T1, T2, T3 조사기간 동안 종 방향의 Rhodamine 농도분포를 종합하여 유추해보면, 마이크로버블 제트류는 15분 후 30~40m 까지 이동하였으며(평균 이동속도 약  $5 \text{cm/sec}$ ), 대부분의 제트류 운동량은 이 지점에서 소멸되는 것으로 판단된다. 이후 후방에서 계속 유입되는 제트류의 영향으로 이류(Advection)와 주변 수체와의 농도 차이에 따른 확산(Diffusion)의 효과로 약 1시간 후 80~100m 지점까지 이동(평균 이동속도  $2 \sim 3 \text{cm/sec}$ )하는 것을 알 수 있었다.

그 이후 시간부터 Rhodamine을 포함한 수괴(Plume)는 3차원 확산을 통해 희석되었으며, T3 조사구간에서는 배경농도에 가까워졌다. 따라서, 마이크로버블 제트류의 물리적 영향범위는 약 80~120 m로 판단되며, 120 m 이후에는 바람과 물 흐름에 의한 난류 확산의 영향으로 염료가 유동하는 것으로 판단된다.



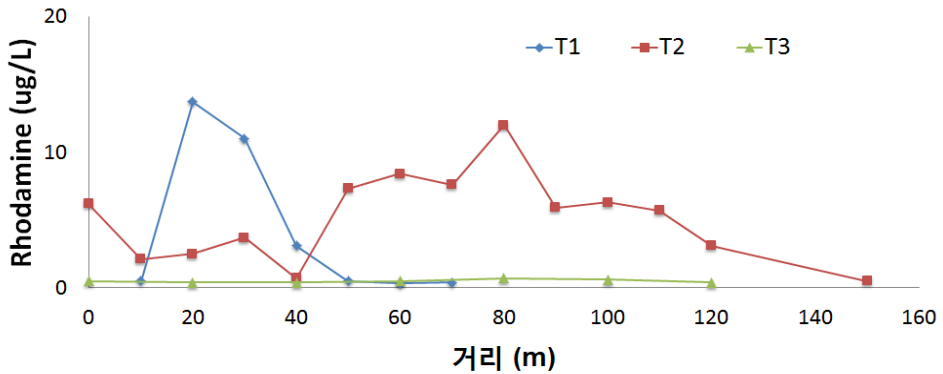
<그림 4.2-12> 죽산저수지 Rhodamine 주입 후 경과시간별 수면 변화

(표 4.2-5) 죽산저수지 경과시간에 따른 구간 분리

시간구간	경과 시간	시간구간	경과 시간
T1	5분~15분	T2	20분~1시간
T3	1시간 20분 이후		

구분	거리별 Rhodamine 농도														
	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70						
T1	1		0.5	30.5	11.7	14	0.6	0.4	0.4						
	2		0.5	13.7	11	3.1	0.5	0.3	0.4						
	3			10.2		1	0.4	0.3	0.3						
T2	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
	1	1.5	4.2	4.4	1.2	1.4	2.1	2.5	3.3	2	2.3	0.7	1	1.4	
	2	6.2	2.1	2.5	3.7	0.7	7.3	8.4	7.6	12	5.9	6.3	5.7	3.1	0.5
T3	수심(m)	0	20	40	60	80	100	120							
	1	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.7	0.5							
	2	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.4							

<그림 4.2-13> 측정구간 거리에 따른 수심별 Rhodamine 농도



<그림 4.2-14> 수심 2m에서 거리에 따른 Rhodamine 농도변화

(다) 수온

Rhodamine 용액 주입 후 경과시간에 따른 측정구간 내의 수온(°C)변화를 <그림 4.2-15>에 나타내었다. 저수지 내에서 표층과 하층의 수온차이는 약 0.5°C의 수온차이를 보였다. 1·2차 조사결과 모두 T1 구간은 10~40m 거리에서, T2 구간은 0~20m 거리에서 표층과 하층의 수온 차이가 없는 것으로 조사되었다. 이는 마이크로버블 발생장치의 영향에 따른 수직 혼합 효과로 예상되며, 장치에 의한 직접적인 혼합범위는 20~40 m라고 판단된다.

구분	거리별 수온														
	수심	0	10	20	30	40	50	60	70						
T1	1		19.5	19.46	19.3	19.3	20.25	20.25	19.9						
	2		19.5	19.4	19.3	19.5	19.5	19.5	19.5						
	3			19.3		19.4	19.4	19.4	19.4						
T2	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
	1	19.5	19.4	19.4	20.1	20.2	20	20	19.9	20	19.9	19.9	20.06	19.5	19.7
	2	19.4	19.4	19.4	19.7	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.7	19.5
	3	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.4	19.4	19.5	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5

<그림 4.2-15> 구간별 거리에 따른 수심별 수온

(라) DO 농도

Rhodamine 용액 주입 후 경과시간에 따른 측정구간 내의 DO 농도변화를 <그림 4.2-16>에 나타내었다. 저수지 초기 DO 농도는 상층 13.1mg/L, 하층 9.15mg/L로 높았으며, 추적실험 기간 동안 저수지 DO농도는 7.3~13.1mg/L의 범위로 상층과 하층이 차이를 보였다. 마이크로버블 발생장치 인근인 10~40m 지점의 표층에서 오히려 낮은 DO 농도를 보였으며, 이는 마이크로버블 발생장치의 혼합효과로 하층과 상층의 물이 혼합되면서 나타난 결과로 판단된다.

구분	거리별 DO 농도														
	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70						
T1	1		8.42	7.85	7.42	9.33	10.87	12	9.24						
	2		7.6	7.21	7.17	7.76	7.23	7.75	7.17						
	3			7.09		7.37	7.11	6.86	6.6						
T2	수심(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
	1	8.23	7.76	7.7	11	12.3	10.3	11.4	9.86	11	10.47	11.26	12.6	11.7	
	2	7.7	7.67	7.84	9.44	9.42	7.95	8.87	7.8	8.44	7.71	8.66	9.1	10.7	8.8
	3	7.7	7.53	7.9	7.92	8.12	7.69	7.62	7.3	7.8	7.64	7.94	8.2	8.8	
	바닥 상부 10cm		7.41	7.93	7.92	7.28	7.32	7.4	7.41						
T3	수심(m)	0	20	40	60	80	100	120							
	1	9.04	9.13	12	11.4	13.1	10.4	10.4							
	2	8.6	9.17	10.1	10.1	9.9	9.9	11.07							

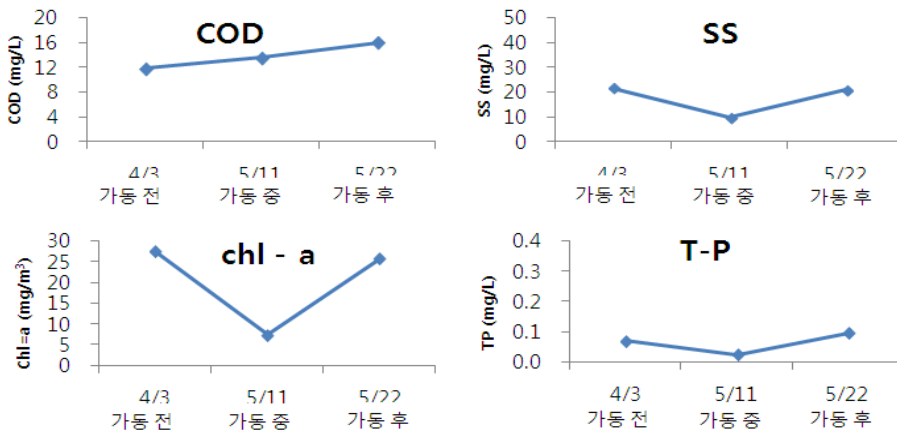
<그림 4.2-16> 구간별 거리에 따른 수심별 DO 농도

### 3. 마이크로버블 수환경개선 효과

#### 가. 대산저수지

##### (1) 마이크로버블 포기장치 설치 전후 수질비교

마이크로버블 포기에 의한 저수지 수질개선효과를 살펴보기 위하여 포기장치 가동 전(4월 3일), 가동 중(5월 11일), 가동 후(5월 22일)에 동일지점(제방 앞 표층수)에서 수질조사를 각각 실시하였으며, 그 결과는 <그림 4.2-17> 및 (표 4.2-6)과 같다. SS농도는 가동 전과 가동 후에 비해 가동 중에는 2배 이상 농도가 감소하는 것을 볼 수 있었고, Chl-a 및 TP 농도는 포기장치 가동 중에 농도가 3배 이상 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 COD 및 TN 농도는 가동 중에도 가동 전·후와 비슷한 농도를 보이고 있으며, 이는 외기온도의 상승과 대산저수지는 양수저수지로 농경지의 N 계열의 기비 사용에 의해 높은 TN 농도의 유출수가 대산저수지로 양수된 원인으로 판단된다.



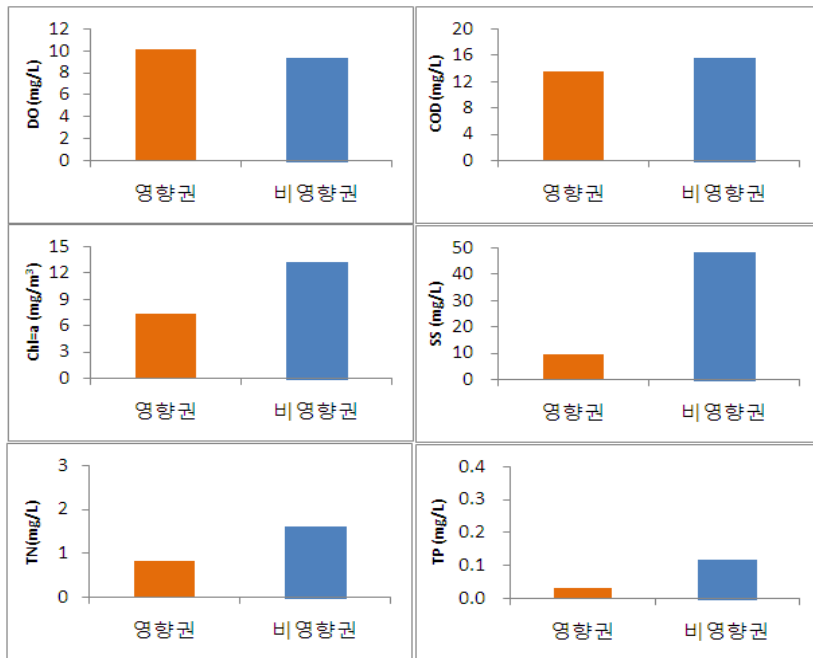
<그림 4.2-17> 대산저수지 마이크로버블 포기장치 설치 전후 수질농도

(표 4.2-6) 대산저수지 수질조사 결과

조사일자	DO	COD	SS	chl-a	TN	TP
4/3	10.8	11.8	21.5	27.5	0.903	0.069
5/11	10.1	13.6	9.7	7.4	1.476	0.024
5/22	7.8	16.0	21.0	25.7	1.186	0.096

(2) 버블장치 가동 중 영향권, 비 영향권 수질 비교

마이크로버블 포기장치 가동 중에 마이크로 버블 유효 영향권에 있는 지역과 비 영향권에 있는 수질농도를 비교하기 위하여 5월 11일 영향권과 비 영향권의 표층에서 수질조사를 각각 실시하였으며, 그 결과는 <그림 4.2-18> 및 (표 4.2-7)와 같다. DO는 영향권에서 비 영향권에 비해 0.7 mg/L 정도 높았으며, COD 농도는 2.0mg/L 더 낮았고, SS 농도는 약 5배 정도 낮은 농도를 나타내었다. Chl-a 및 TN 농도도 약 2배정도 낮았고, TP는 3.5배정도 낮은 농도로 나타나 영향권에서 비 영향권보다 이화학적 측면에서 수질이 개선되는 것을 볼 수 있었다. 이번 조사 결과는 죽산저수지 조사결과와 유사한 결과로서, 마이크로버블에 의한 산소포기는 수환경 개선 효과가 있는 것으로 판단된다.



<그림 4.2-18> 마이크로버블 포기 중 영향권과 비 영향권의 수질 비교

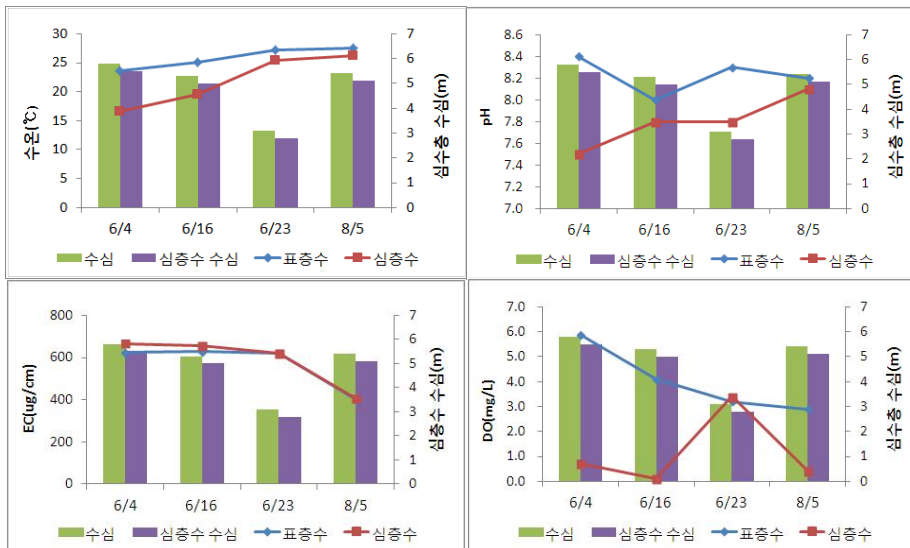
(표 4.2-7) 마이크로버블 포기 중 영향권과 비 영향권의 수질

구분	DO	COD	SS	chl-a	TN	TP
영향권	10.1	13.6	9.7	7.4	0.832	0.032
비영향권	9.4	15.6	48.3	13.2	1.603	0.117

## 나. 기흥저수지

## (1) 마이크로버블 포기 전·후 수질비교

마이크로버블 포기에 의한 수환경 개선효과를 비교하기 위하여 기흥저수지의 마이크로 버블 유효 영향권에 있는 표층수와 심층수에서 6월 4일, 6월 16일, 6월 28일, 8월 5일에 4회에 걸쳐 동일지점에서 각각 수질조사를 실시하였다. 표층수와 심층수의 수온, pH, EC, DO를 비교한 결과는 <그림 4.2-19>와 같다. 수심은 보통 5m 이상을 보였으나 6월 23일에는 여수토 공사 및 관개수 공급, 강수량 부족으로 인해 3m 내외로 저수량이 급속히 감소하였고, 수온은 마이크로 버블 포기 전에는 표층수와 심층수의 차이가 약 5℃~7℃로 크게 있었으나 포기장치 가동 후에는 차이가 2℃ 이내의 소폭으로 감소하였다. pH는 표층수가 심층수에 비해 크게 높았으며, EC는 표층수와 심층수에서 거의 비슷한 수치를 나타내고 있으며, 가동 전에 비해 가동 후에 표층수와 심층수에서 모두 크게 감소하였다. DO는 가동 전에는 표층수에서 4.1~5.9mg/L 농도를 보였고, 심층수에서는 0.1~0.7mg/L의 거의 무산소 상태를 보였는데, 가동 중에는 심층수에서도 DO가 표층수와 거의 유사한 3.4mg/L까지 증가하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 가동이 중단된 8월 5일에는 심층수의 DO가 0.4mg/L까지 다시 감소하는 것으로 나타났다.



<그림 4.2-19> 마이크로버블에 의한 수질 비교(수온, pH, EC, DO)

(2) 퇴적물 오염도 개선효과

마이크로버블 포기에 의한 호소 내 퇴적물 오염도 개선효과를 비교하기 위하여 기흥저수지의 마이크로버블 유효 영향권에 있는 퇴적층에서 6월 4일(포기장치 가동 전)과 8월 5일(포기장치 가동 후)에 동일지점에서 채니기를 이용하여 퇴적물 시료를 채취하였다. (표 4.2-8)는 퇴적물의 입도분포 변화를 나타낸 결과로서, 마이크로버블 포기 전에 비해 포기 후에는 점토와 미사의 함량이 감소하였고, 상대적으로 모래의 함량이 증가하였다. 이러한 결과는 마이크로버블에 의한 영향보다는 8월 5일 직전에 내린 강우에 의해 상류의 모래가 하류까지 흘러내려온 원인으로 판단된다.

(표 4.2-9)는 퇴적물 구성원소를 비교한 결과로서, 구성 원소 N, C, H, O은 마이크로버블에 의한 산소 포기 전에 비해 산소 포기 후에 감소하였고, S는 불검출되어 퇴적물이 환원상태가 아님을 나타내었다. 강열감량에 대한 분석결과에서는 포기 전 13.8%에 비해 포기 후에는 11.7%로 감소하는 것으로 나타났고, 미국환경보호청(USEPA)의 퇴적물 환경기준과 비교했을 때 모두 “heavily polluted”로 나타났다.

(표 4.2-10)은 퇴적물의 CODsed 및 SOD를 분석한 결과이다, CODsed 및 SOD 모두 마이크로버블 포기 전에 비해 포기 후에 용출속도가 더 증가하는 결과를 보였는데, 이는 마이크로 버블에 의해 퇴적층에 영향을 받은 것일 수도 있고, 계절 및 환경적인 요인이 작용할 수도 있으므로 추후 지속적인 조사와 관찰이 필요할 것으로 사료된다.

(표 4.2-8) 기흥저수지 퇴적물 입도분포 변화

조사일자	입도분포(%)					
	Clay( $\leq 2\mu\text{m}$ )		Silt( $2\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ )		Sand( $20\mu\text{m}>$ )	
	0s	60s	0s	60s	0s	60s
1차(6/4)	2.21	3.50	34.74	48.10	63.05	48.40
2차(8/5)	1.42	2.48	11.31	20.84	87.27	76.68

(표 4.2-9) 기흥저수지 퇴적물의 원소분석 및 강열감량 분석결과

구분	Nitrogen (%)	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Sulphur (%)	Oxygen (%)	강열감량 (%)
1차(6/4)	0.47	2.26	0.92	0.04	9.82	13.8
2차(8/5)	0.31	1.47	0.59	ND	4.83	11.7



(표 4.2-10) 기흥저수지 퇴적물의 오염도 조사결과

구 분	CODsed (mg/kg-dry)	SOD (g-O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·d)
1차(6/4)	29,822	1.97
2차(8/5)	32,667	2.12

## (3) 퇴적물 오염물질 용출속도 비교

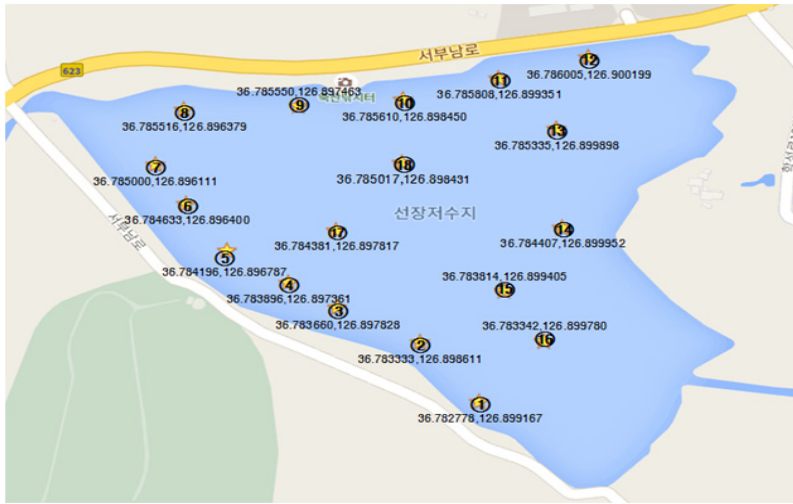
기흥저수지에서 마이크로버블 포기 전과 포기 후의 퇴적물 오염물질 용출속도를 분석한 결과는 (표 4.2-11)과 같다. COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, TP 모두 호기성 상태보다 혐기성 상태일 때 용출속도가 높았으며, 호기성 상태일 때는 오히려 오염물질이 퇴적층으로 침전되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 수계 내 적절한 호기조건을 유지할 시 퇴적물로부터 용출되는 영양염류의 양이 감소되어 수생태환경의 개선이 가능할 것으로 판단된다. 마이크로버블 포기 전과 포기 후의 오염물질 용출속도를 살펴보면, COD의 용출속도는 혐기성 상태일 때 56.7mg/m<sup>2</sup>·d에서 포기 후 83.8mg/m<sup>2</sup>·d로 증가하였고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N도 16.4mg/m<sup>2</sup>·d에서 포기 후 23.8mg/m<sup>2</sup>·d로 증가하였다. 반면에 TN은 포기 전 35.1mg/m<sup>2</sup>·d에 비해 포기 후 7.7mg/m<sup>2</sup>·d로 5배 이상 감소하는 것으로 나타났다. TP도 COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 유사한 결과로 포기 전에 비해 포기 후에 4배 이상 증가하는 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 마이크로 버블 포기 후 바닥 층의 DO 증가 등 수환경이 개선되는 결과와 상반된 결과로서, 바닥층의 DO 증가는 호기성 상태임을 의미하는 것이고, 이는 퇴적층에서 오염물질 용출량이 감소하는 결과를 가져와야 한다. 본 연구에서는 1회성 조사이고, 2차 조사 시에는 폭우 등 바닥층의 교란을 가져올 만한 환경요인도 함께 존재했으므로 향후 지속적인 조사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

(표 4.2-11) 기흥저수지의 퇴적 오염물질 용출속도(mg/m<sup>2</sup>·d)

구 분		COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP
1차 (6/4)	혐기	56.7	16.4	35.1	0.8
	호기	-49.2	-3.2	0.9	-0.2
2차 (8/5)	혐기	83.8	23.8	7.7	3.1
	호기	-52.5	-3.1	-41.8	-0.5

다. 죽산저수지

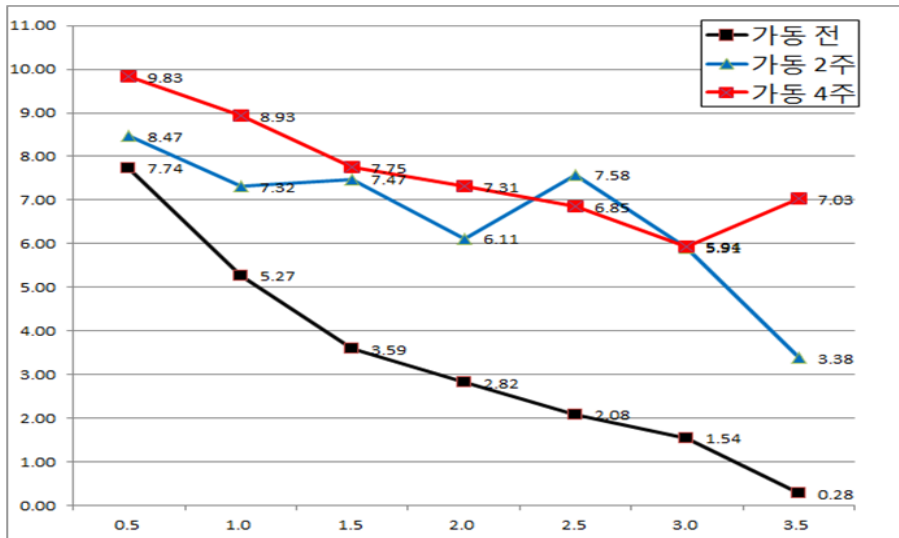
저수지 실규모로 마이크로버블 포기장치가 설치되어 있는 죽산저수지를 대상으로 수환경 개선효과를 측정하기 위하여 저수지 전체적으로 18개 지점을 선정하여 DO 농도를 수심 50cm 간격으로 측정하였다. DO 측정지점은 <그림 4.2-20>과 같고, 18개 측정지점에 대한 평균 DO농도는 <그림 4.2-21> 및 <그림 4.2-22>와 같다. 가동 전에는 DO 평균농도가 표층에서는 약 7.7mg/L에서 수심에 따라 거의 수직적으로 감소하여 바닥층에서는 약 0.2mg/L로 거의 무산소 상태를 보이고 있었다. 마이크로 버블 가동 2주 후에는 <그림 4.2-21>과 같이 수심 3m까지의 모든 수층에서 DO 농도가 약 6.0mg/L 이상을 보였고, 바닥층에서는 DO 약 3.4mg/L의 농도를 나타내었다. 가동 3주 후에도 2주 후와 비슷한 수치를 보이고 있었으나 가동 4주가 지나면서부터는 호소 바닥층(수심 3.5m)에서도 DO 농도가 7.0 mg/L 이상의 높은 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.



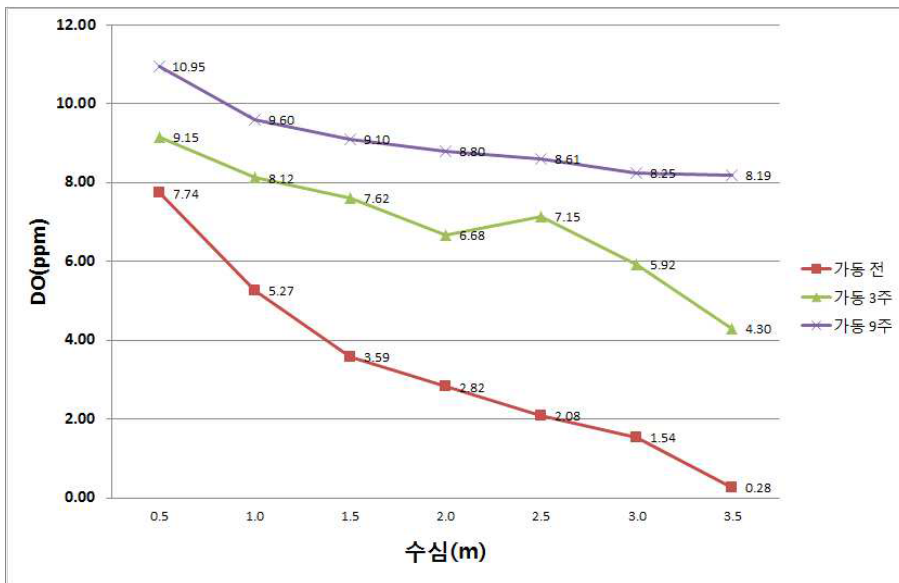
<그림 4.2-20> 죽산저수지 DO 측정 지점

(표 4.2-12) 죽산저수지 마이크로버블 가동 전·후 DO 농도

측정시기	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m
가동 전	7.74	5.27	3.59	2.82	2.08	1.54	0.28
가동 3주 후	9.15	8.12	7.62	6.68	7.15	5.92	4.30
가동 5주 후	10.9	9.60	9.10	8.80	8.61	8.25	8.19



<그림 4.2-21> 죽산저수지 마이크로버블 가동 전·후 DO 농도



<그림 4.2-22> 죽산저수지 마이크로버블 가동 전·후 DO 농도



## 제5장 매화저수지 3차원 수리-수질 모형 구축 및 적용



1절 매화저수지 수리-수질 모델 구축

2절 매화저수지 수리-수질 모델 적용





## 제5장 매화저수지 3차원 수리-수질모형 구축 및 적용

### 제1절 매화저수지 수리-수질 모델 구축

#### 1. ELCOM-CAEDYM 개요

매화저수지에서의 수리-수질-생태 연동해석을 위해 3차원 모델 ELCOM-CAEDYM을 구축하였다. ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 범용 3차원 수리동력학 모델로서, 수질-생태계 해석 모델인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 연결되어 수리-수질-생태계의 동적 모의가 가능하며, 남조류의 부력조절 기능을 모의할 수 있는 장점이 있다. 특히 조류 종을 3가지로 구분하여 시간적 천이 특성을 해석할 수 있다.

ELCOM의 지배방정식은 운동량 방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송·확산 방정식이 포함되며, Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 사용한다. 기본적으로 유체의 특성에 대해서는 Boussinesq 가정과 수직방향의 운동량 방정식은 정수압(Hydrostatic pressure) 이론을 사용하지만, 비정수압(Non-hydrostatic)이 중요한 경우(예, 수면경사에 따른 동수압 작용, 내부파 영향 등)에는 non-hydrostatic code 옵션을 사용하여 수직방향의 운동량 방정식을 포함할 수 있다. CAEDYM은 C, N, P, Si의 다양한 순환과정, DO 순환, 입자 크기별 6개까지의 무기 부유물질(SS), 그리고 다양한 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류 등의 생태모의가 가능한 모델이다.

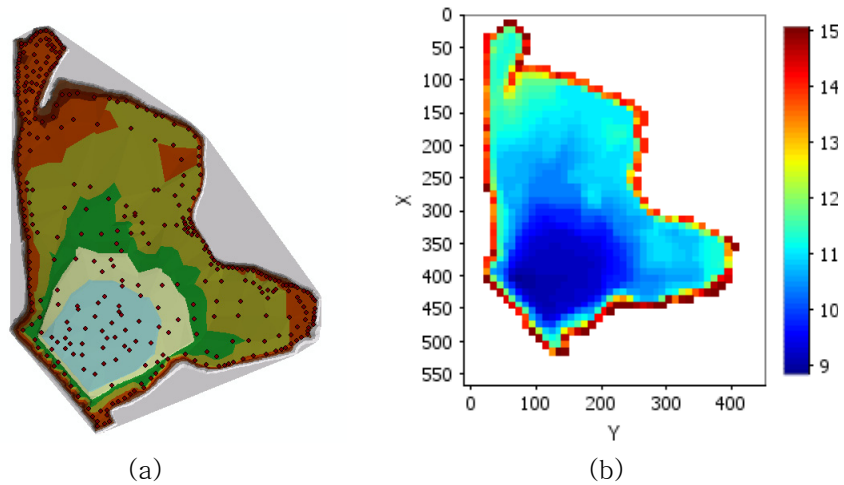
#### 2. 입력자료의 구성

ELCOM-CAEDYM 모델의 주요 입력 자료는 유량과 수질 경계조건, 기상자료, 초기조건, 저수지 지형자료, 그리고 수리와 수질해석을 위한 각종 매개변수 등이다.

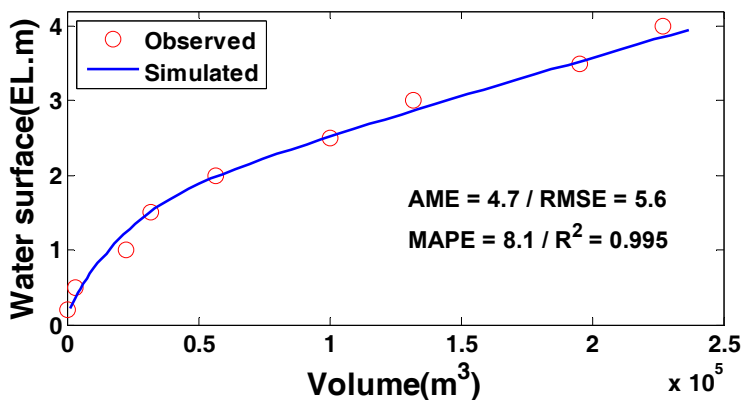
##### 가. 지형자료 구축

모형의 지형자료 구축을 위해서 매화저수지를 대상으로 저수지 내 113

개의 좌표 및 수심측량을 <그림 5.1-1(a)>와 같이 실시하였으며, 환경부 GIS 자료를 기반으로 저수지 외곽의 자료를 추출하였다. 수집된 데이터를 기반으로 모형의 지형자료를 구성하였으며, 지형 격자는 수평방향 10m×10m, 수직방향 0.2m 간격, 총 38,748개의 셀로 구성하여 <그림 5.1-1(b)>에 나타내었다. 구축된 지형자료의 신뢰도를 평가하기 위하여 농어촌공사에서 실측한 1941년 자료와 수위-저수용량 관계를 비교하여 <그림 5.1-2>에 나타내었다. 신뢰성 평가결과, AME, RMSE는 각각  $4.7 \times 10^3 \text{m}^3$ ,  $5.6 \times 10^3 \text{m}^3$ 로 나타났으며, 상관계수는 0.995로 매우 높아 모형의 수치격자는 실제 지형을 적절히 잘 반영하는 것으로 판단된다.



<그림 5.1-1> 매화저수지 수심측량자료(a) 및 ELCOM 모형 격자구성(b)

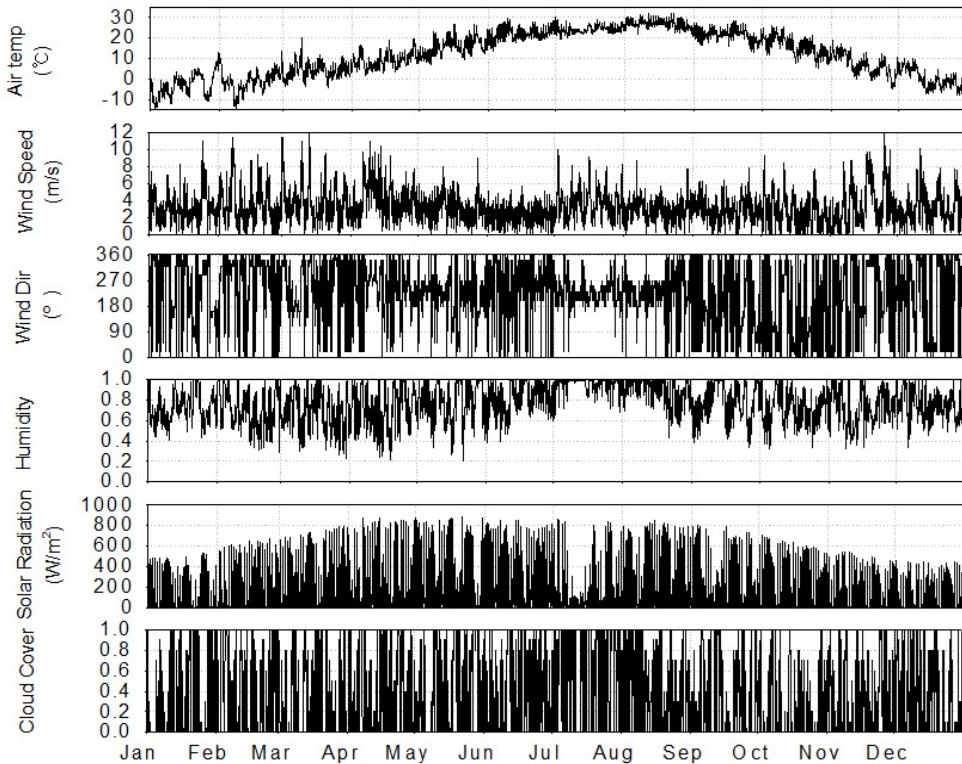


<그림 5.1-2> 매화지 실측 및 모의 수위-저수용량 비교

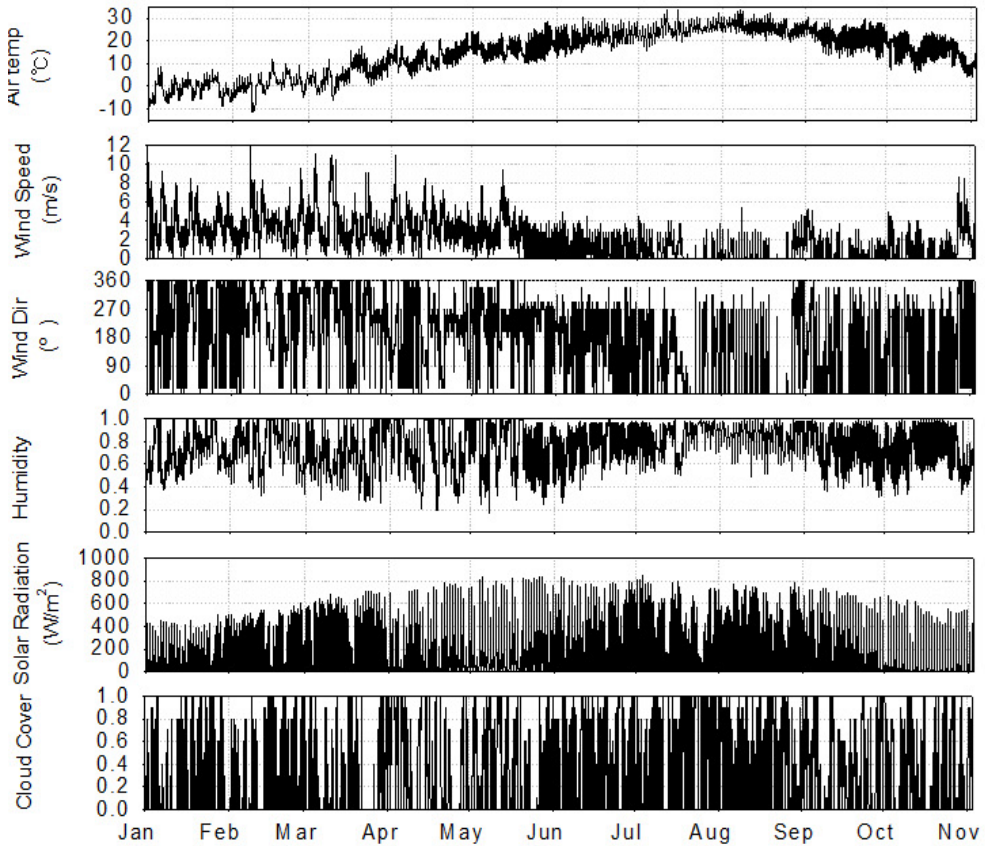


나. 기상 자료

ELCOM-CAEDYM 모형의 기상 경계조건은 기온, 풍속, 풍향, 상대습도, 일사량, 기압, 운도를 포함한다. 기상자료는 매화저수지로부터 20km 떨어진 인천기상대의 기상자료와 현장 조사자료를 활용하여, 2015년 5월 20일부터 10월 27일까지의 기온, 풍속, 풍향, 상대습도, 기압은 현장조사 자료를 사용하였고, 그 외 자료는 인천 기상대의 자료를 활용하였다. 모형 구축에 사용한 기상자료 중 2013년 데이터는 <그림 5.1-3>에 나타내었고, 2015년 데이터는 <그림 5.1-4>에 나타내었다.



<그림 5.1-3> 모형 입력 기상 data(2013)

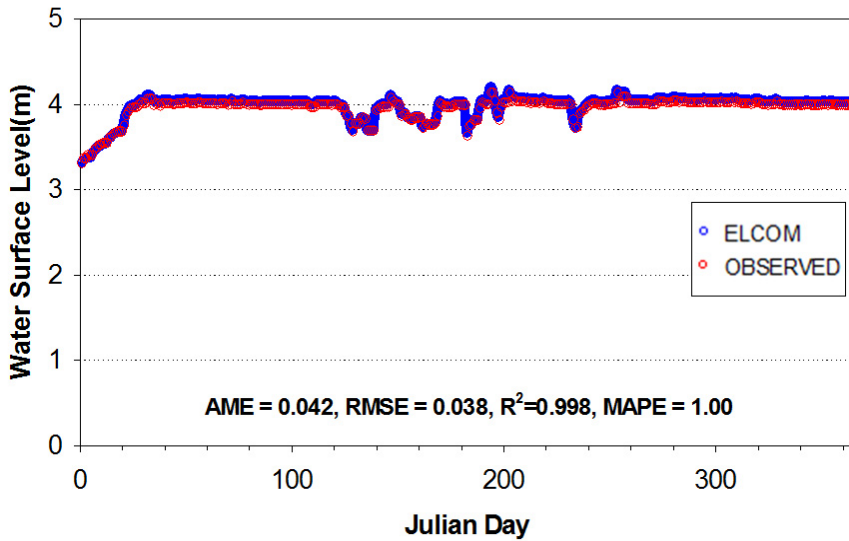


<그림 5.1-4> 모형 입력 기상 data(2015)

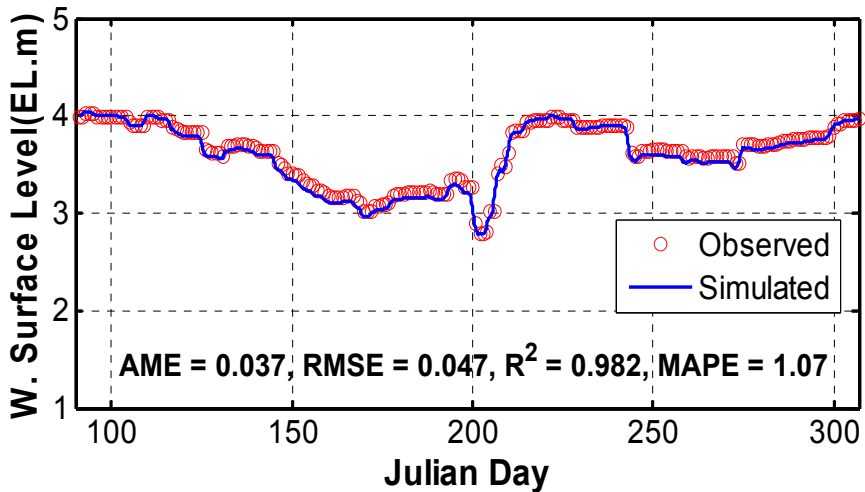
다. 물수지 분석

매화저수지 같이 설치된 지 아주 오래된 농업용저수지는 실측자료가 적으며, 모형의 물수지 해석에서 기본이 되는 유입량 및 유출량 DATA가 전무한 실정이다. 따라서, 모형의 구축을 위해 상당부분 가정이 필요하다. 본 연구에서는 강우-유출 해석 모형인 HEC-HMS를 활용하여, 매화지 유역면적과 인천기상대 강우데이터를 기반으로 저수지 유입량을 산정하였고, 유입량 자료와 일별 저수지 저수용량 자료를 기반으로 물수지 분석을 통해 유출량을 산정하였다. 2013년 1월부터 12월, 2015년도 5월부터 10월까지 2개의 수문사상을 대상으로 물수지를 재현하였으며, 그 결과는 <그림 5.1-5>에 나타내었다. 모의값과 실측값에 대한 신뢰성 평가는 통계 지표인 AME, RMSE, MAPE,  $R^2$ 를 적용하여 평가하였다. 2013년에 대해

AME 0.042m, RMSE 0.038m, MAPE 1% 및  $R^2$  0.998로 나타났고, 2015년에 대해 AME 0.037m, RMSE 0.047m, MAPE 1.07% 및  $R^2$  0.983으로 나타났다. 지형측량자료의 처리과정과 유입유량 산정의 불확실성 때문에 약간의 오차가 발생하였으나, 수치모형의 지형자료는 실제 저수지의 지형과 물수지를 적절히 반영하는 것으로 평가된다.



(a) 2013년도



(b) 2015년도

<그림 5.1-5> 매화저수지 실측 수위 및 모의 수위 비교

라. 유입 경계조건 구성

유입 수온은 기온과 이슬점 온도의 함수(식 4-1)로 산정하였다.

$$WT_{IB} = 0.32T_{air} + 0.34T_{Dew} + 7.59 \quad (\text{식 4-1})$$

유입 수질 경계조건은 농어촌연구원에서 4/24, 5/14, 6/5, 7/3, 7/27, 9/4, 9/22, 10/27에 조사한 COD, DO, TN, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P, Chl-a, SS 항목별 측정값을 입력하였으며, (표 5.1-1) 및 (표 5.1-2)와 같다.

(표 5.1-1) 매화지 본류 수질 입력 값

Date	COD (mg/L)	DO (mg/L)	T-N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	SS (mg/L)
4/24	5.00	14.73	7.69	6.71	0.40	0.40	0.33	5.92	9.00
5/14	4.80	9.00	4.64	3.87	0.34	0.38	0.30	2.30	5.00
6/5	6.80	11.13	7.68	6.06	0.49	0.58	0.45	16.32	12.00
7/3	9.60	6.72	7.36	6.95	0.16	0.44	0.38	1.91	4.00
7/27	7.42	5.47	8.57	4.64	2.55	0.46	0.32	1.25	4.00
9/4	4.80	4.00	6.37	5.45	0.20	1.11	0.33	1.87	4.00
9/22	5.00	5.70	9.65	7.85	0.16	0.57	0.46	1.95	5.20
10/27	9.00	3.80	4.13	3.11	0.44	0.43	0.23	6.18	53.00

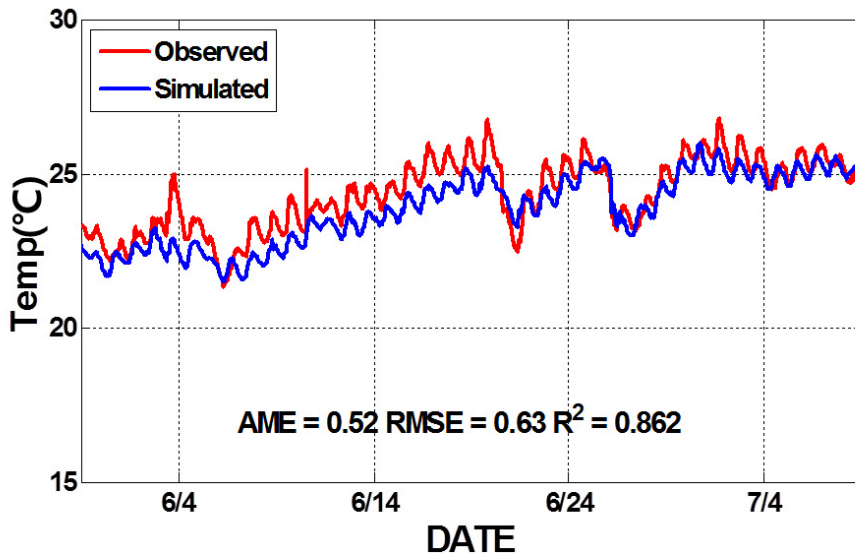
(표 5.1-2) 매화지 좌안 지류 수질 입력 값

Date	COD (mg/L)	DO (mg/L)	T-N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	SS (mg/L)
4/24	6.60	14.61	7.16	4.09	0.08	0.42	0.25	6.82	4.50
5/14	7.60	7.20	7.22	3.62	2.94	0.55	0.29	4.50	6.00
6/5	6.00	9.43	7.55	2.03	4.14	0.65	0.43	3.76	5.00
7/3	7.20	5.87	6.31	1.08	4.79	0.69	0.56	3.24	13.67
7/27	7.82	5.47	5.74	2.92	1.93	0.38	0.26	1.93	3.33
9/4	7.20	3.00	6.94	1.45	4.81	0.65	0.49	2.54	4.33
9/22	6.20	3.60	8.07	3.50	3.51	0.53	0.39	1.34	4.40
10/27	10.20	3.20	6.03	3.84	1.30	0.46	0.35	6.80	8.50

### 3. 모델 보정

#### 가. 수온 보정

2015년 5월 30일~7월 10일까지 ST2지점 표층의 연속측정 자료와 모의 결과를 비교하여 <그림 5.1-6>에 나타내었다. 수온의 보정은 모의 수온과 실측 수온의 오차인 AME(Absolute Mean Error)와 RMSE(Root Mean Square Error)의 값이 최소가 되도록 시행착오법으로 수행하였다. 오차는 AME 0.52, RMSE 0.63,  $R^2$  0.862로 나타났으며, 6월 21일 강우 이전에 모의값이 과소평가 되었고, 이후 적절한 재현성을 보였다.



<그림 5.1-6> 매화저수지 실측 수온 및 모의 수온 비교

#### 나. 수질 보정

매화저수지 ST2 지점의 DO, Chl-a, T-P, PO<sub>4</sub>-P, T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 항목에 대해서 실측값과 모의결과를 비교하여 <그림 5.1-7>~<그림 5.1-9>에 나타내었다. 현장조사 결과 비강우시는 유입수의 흐름이 거의 없고 정체되어 있어 경계조건 수질농도가 높게 부하 되었다고 판단하여 P계열과 N계열의 경계조건 수질항목에 대해 실측값을 20%, 50%, 100%로 하여 입력 자료의 불확실성 해석을 수행하였다.

(1) DO, Chl-a

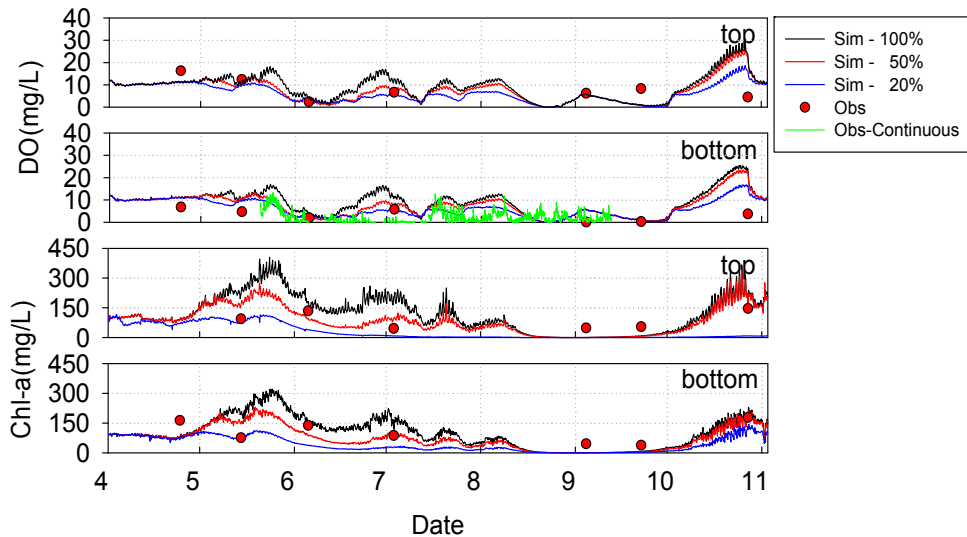
DO와 Chl-a에 대한 모의결과와 실측값의 시계열 비교를 <그림 5.1-7>에 나타내었으며, 신뢰도를 평가하기 위해 통계 지표인 AME, RMSE 및 R<sup>2</sup>를 적용하여 (표 5.1-3)에 나타내었다.

유입부하 삭감율에 대해 DO는 큰 변화는 보이지 않았으며 상층과 하층의 DO는 약간의 차이는 보였으나 차이는 크지 않았다. 이는 수온 성층과 마찬가지로 바람에 의한 난류혼합이 크게 작용하여 발생된 결과로 판단된다. 하층의 30분 간격으로 측정된 DO 연속 모니터링 결과와 모의결과를 비교하였을 때, 모의결과는 실측값의 추세를 매우 잘 반영하였다. 5월 중순이후 기온이 상승하면서 퇴적층의 유기물 분해가 활발하여 DO 농도는 급격히 떨어졌으며, 모의 DO 농도는 실측값의 이러한 시계열 변동특성을 적절히 재현하였다. 반면, 강우시 DO 농도가 다시 회복되는 기간에 모의값은 실측값을 과소평가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 강우시 유입수의 DO 농도 상승효과를 경계조건에 포함하지 않은 것이 원인으로 판단된다. 따라서 모의결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 강우시 유입부하 특성을 고려할 필요가 있으며, 다양한 강우사상에 대한 수질측정 자료가 수집되어야 한다.

Chl-a는 규조류, 녹조류, 남조류 3가지 중에 대해 모의를 실시하고 총 Chl-a로 출력한 결과를 실측값과 비교한 것이다. Chl-a 모의 결과는 6월 까지 실측자료의 추세를 반영하였으나, 7월 이후 조류가 거의 발생되지 않았고 가을에 다시 상승하는 조류농도를 전혀 반영하지 못하고 있다. 이러한 결과는 3가지 조류 중에 대한 매개변수의 보정이 제대로 수행되지 않은 것이 원인이며, 추가적인 보정을 통해 오차를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

(표 5.1-3) 모의값 및 실측값 상관관계분석(DO, Chl-a)

		Top			Bottom		
		100%	50%	20%	100%	50%	20%
DO (mg/L)	RMSE	8.42	7.62	5.77	8.65	7.84	5.74
	AME	5.93	4.97	4.28	6.24	5.29	4.15
	R <sup>2</sup>	0.23	0.26	0.36	0.22	0.21	0.35
Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	RMSE	89.62	48.56	50.27	62.85	52.05	65.76
	AME	77.93	46.66	41.71	51.29	44.83	57.09
	R <sup>2</sup>	0.56	0.66	0.82	0.82	0.85	0.90



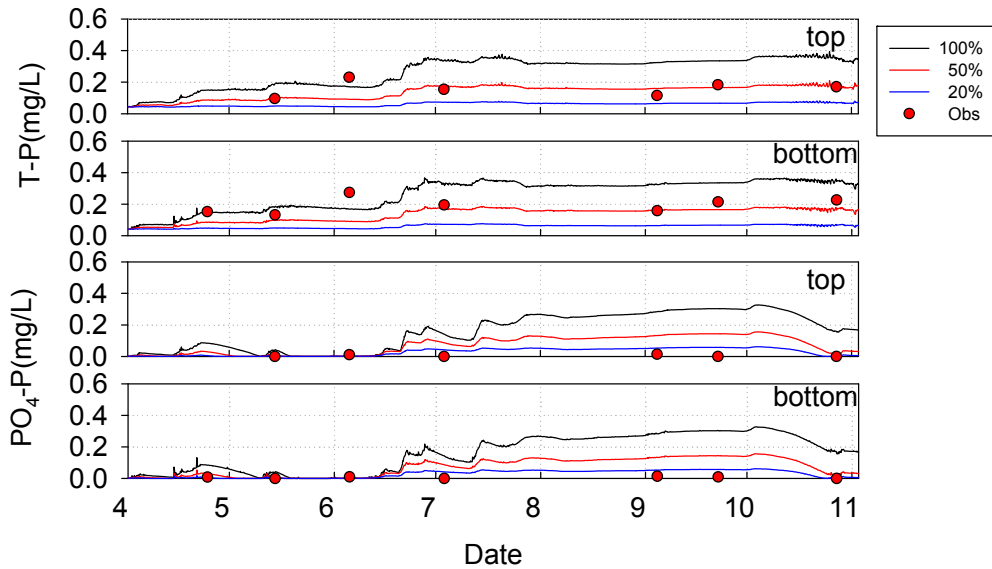
<그림 5.1-7> 모의값 및 실측값 시계열 비교(DO, Chl-a)

(2) T-P, PO<sub>4</sub>-P

T-P과 PO<sub>4</sub>-P에 대한 모의결과와 실측값의 시계열 비교를 <그림 5.1-8>에 나타내었으며, 신뢰도를 평가하기 위해 통계 지표인 AME, RMSE 및 R<sup>2</sup>를 적용하여 (표 5.1-4)에 나타내었다. T-P와 PO<sub>4</sub>-P 농도 모의 결과 유입 부하량에 민감하게 반응하였으며, 삭감량에 비례하여 농도가 감소하였다. T-P 농도는 표층과 하층간 큰 차이를 보이지 않았으며 유입부하량을 50% 삭감한 경우, 실측값과 가장 유사한 것으로 보인다. 그러나 PO<sub>4</sub>-P 농도는 7월 이후 모의값이 실측값을 과대평가하였다. 이는 Chl-a 농도 예측결과의 오차와 관련이 있으며, 조류농도에 대한 보정이 충분히 이루어진다면 오차가 감소할 것으로 예상된다.

(표 5.1-4) 모의값 및 실측값 상관관계분석(T-P, PO<sub>4</sub>-P)

		Top			Bottom		
		100%	50%	20%	100%	50%	20%
T-P (mg/L)	RMSE	0.15	0.06	0.11	0.11	0.08	0.14
	AME	0.14	0.04	0.10	0.10	0.06	0.13
	R <sup>2</sup>	0.95	0.94	0.86	0.73	0.75	0.75
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	RMSE	0.19	0.08	0.03	0.17	0.08	0.03
	AME	0.15	0.06	0.03	0.14	0.06	0.02
	R <sup>2</sup>	0.76	0.79	0.77	0.63	0.72	0.77

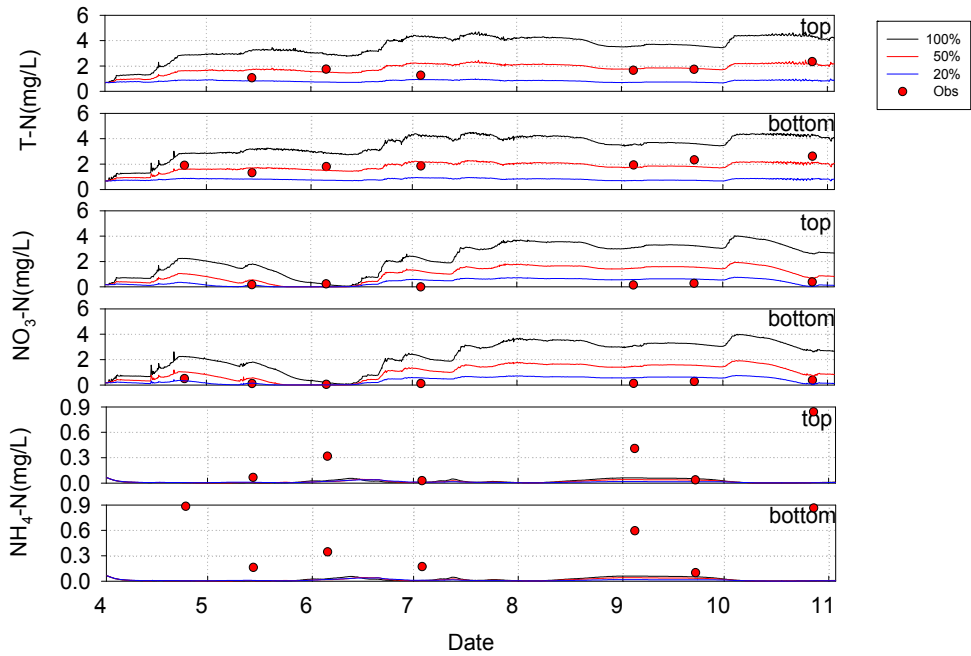


<그림 5.1-8> 모의값 및 실측값 시계열 비교(T-P, PO<sub>4</sub>-P)

(3) T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N

T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N에 대한 모의결과와 실측값의 시계열 비교를 <그림 5.1-9>에 나타내었으며, 신뢰도를 평가하기 위해 통계 지표인 AME, RMSE, R<sup>2</sup>를 적용하여 (표 5.1-5)에 나타내었다. T-N 농도 모의 결과도 유입 부하량에 민감하게 반응하였으며, 삭감량에 비례하여 농도가 감소하였다. 표층과 하층간 큰 차이를 보이지 않았으며 유입부하량을 50% 삭감한 경우, 실측값과 가장 유사한 것으로 보인다. 그러나, T-N 농도의 구성 성분 중 NO<sub>3</sub>-N과 NH<sub>4</sub>-N의 비율은 모의값과 실측값이 큰 차이를 보였다. 모의결과에서는 T-N농도의 대부분이 NO<sub>3</sub>-N으로 나타나고 NH<sub>4</sub>-N의 농도가 낮게 나타났으나, 실측값에서는 NO<sub>3</sub>-N보다 NH<sub>4</sub>-N의 농도가 높은 경우가 다수 있었다. 국내 저수지에서는 NH<sub>4</sub>-N보다 NO<sub>3</sub>-N에서 높게 나타나는 경우가 많으므로 3차년도에는 실험오차 및 모델의 신뢰성 등에 대해서 검증할 필요성이 있을 것으로 판단된다.





<그림 5.1-9> 모의값 및 실측값 시계열 비교(T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)

(표 5.1-5) 모의값 및 실측값 상관관계 분석(T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)

구 분		Top			Bottom		
		100%	50%	20%	100%	50%	20%
T-N (mg/L)	RMSE	2.10	0.49	0.95	1.60	0.39	1.24
	AME	2.02	0.38	0.85	1.54	0.36	1.17
	R <sup>2</sup>	0.65	0.43	0.26	0.52	0.34	0.11
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	RMSE	2.24	0.93	0.36	2.18	0.87	0.31
	AME	2.01	0.80	0.32	1.99	0.73	0.26
	R <sup>2</sup>	0.09	0.19	0.62	0.38	0.40	0.44
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	RMSE	0.39	0.39	0.40	0.53	0.53	0.54
	AME	0.26	0.26	0.27	0.42	0.43	0.43
	R <sup>2</sup>	0.47	0.47	0.81	0.56	0.55	0.68

## 제2절 매화저수지 수리-수질 모델 적용

### 1. 융복합 수처리장치 영향반경 평가

가. 부유식 수처리장치 Jet 영향반경 평가

(1) Jet 이론

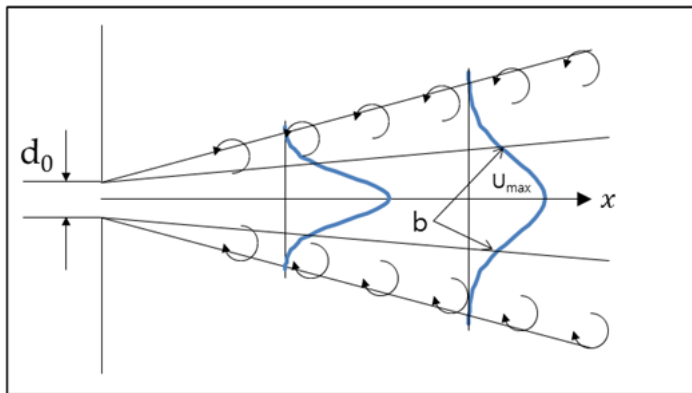
Jet는 좁은 구멍에서 액체나 기체 등이 고속으로 분출되는 상태를 말한다. 운동량(MV)에 의해 흐름을 발생시키며, 운동에너지는 주변의 유체와 혼합과 난류에 의해 손실되나 운동량은 보존된다<그림 5.2-1>. Jet의 이동거리는 분사노즐의 직경( $d_0$ )과 유속( $U_0$ )으로 계산되며 (식 4-2)와 같으며, 이동거리에 따른 염료의 농도( $c$ ) 계산은 (식 4-3)과 같다.

$$\frac{u_{\max}}{u_0} = 6.2 \frac{D_0}{x} \quad (\text{식 4-2})$$

$$\frac{c_{\max}}{c_0} = 5.6 \frac{D_0}{x} \quad (\text{식 4-3})$$

일반적으로 Jet의 분산 범위( $b$ )는 중심선 이동거리에 약 10% 비례하며, (식 4-4)와 같다.

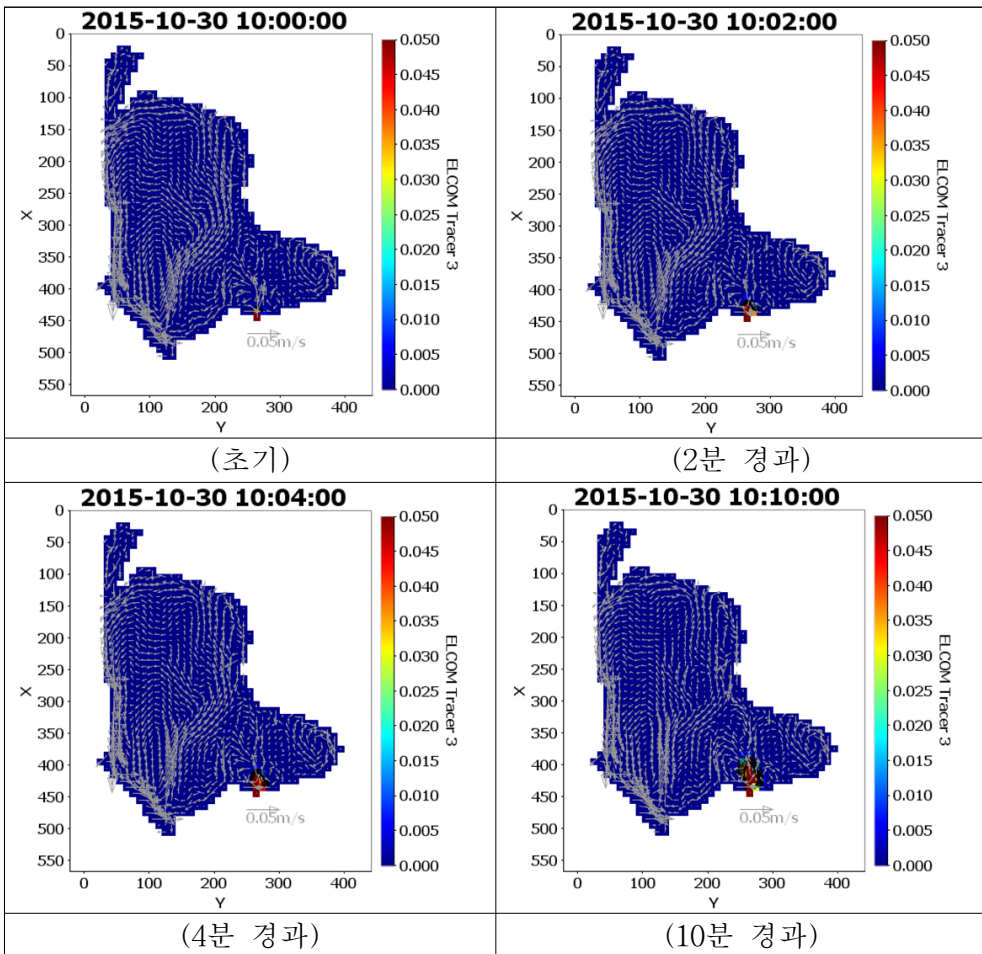
$$b = 0.107x \quad (\text{식 4-4})$$



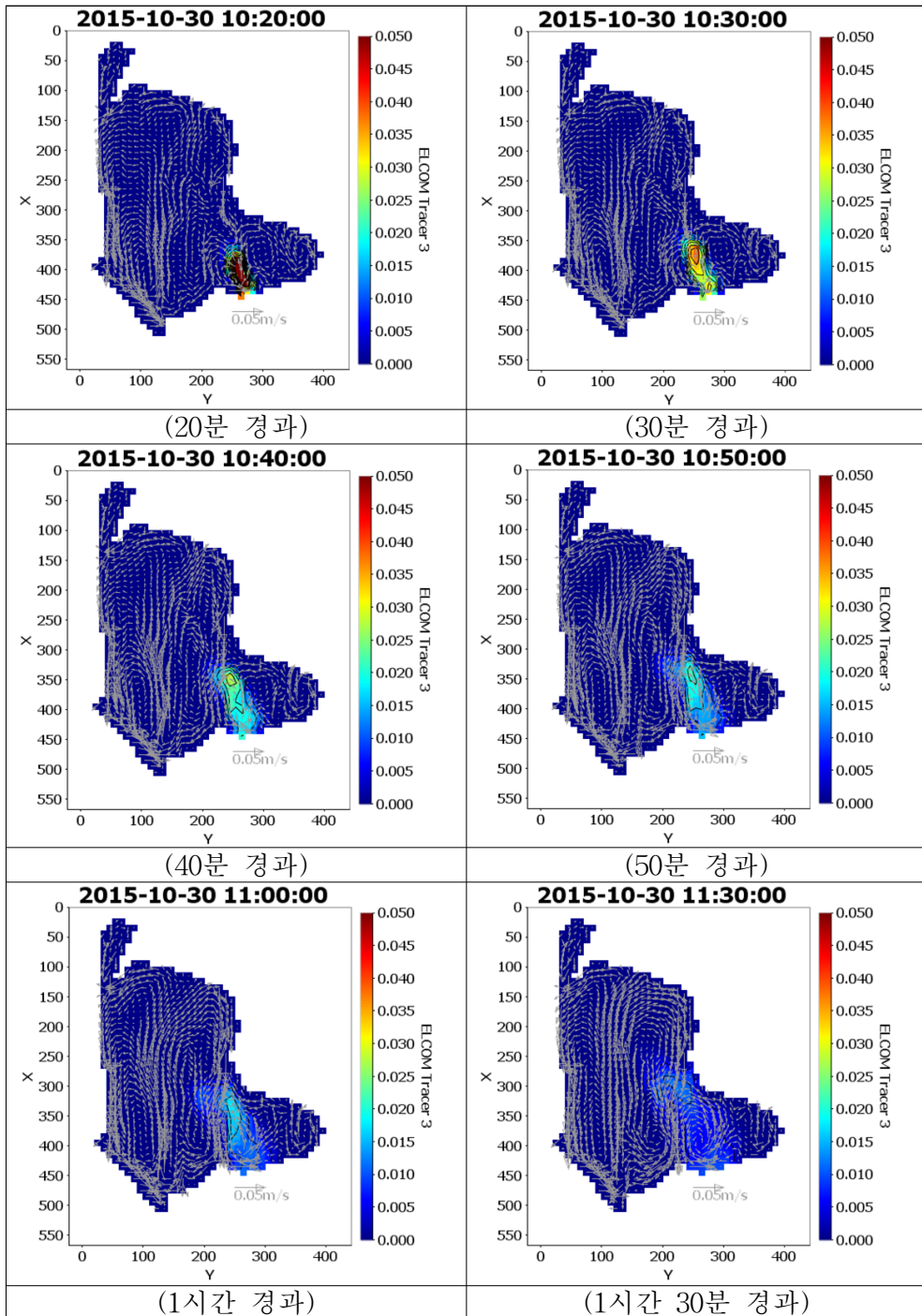
<그림 5.2-1> Jet 이론 개념도

(2) Jet 추적자 모의

ELCOM모형에 부유식 수질개선장치 Jet를 적용하여 모의한 결과를 <그림 5.2-2>~<그림 5.2-3>에 나타내었다. 분석결과 장치로부터 50m 이동한 시점에 평균 0.7cm/s의 유속을 보였으며, 100m 이동한 시점에 평균 0.3cm/s의 유속을 보여 로다민 염료 추적자 시험 및 경험식을 이용한 영향반경 해석 결과와 유사한 결과를 보였다.



<그림 5.2-2> Jet 추적자 모의



<그림 5.2-3> Jet 추적자 모의(계속)

## 2. 수처리시스템 수질개선효과 평가

### 가. 시나리오 구성

매화저수지의 융복합 수질정화시스템은 수로식과 부유식 각 1기가 2015년 8월 20일부터 운영 중에 있다. 유입수 대비 유출수의 수질개선 효과를 파악하기 위해 현재 7회 정도의 실험이 이루어졌으나, 아직 수질개선 효과를 평가할 수 있는 정도의 자료는 부족한 실정이다. 따라서 이번 모의에서는 수질정화시스템의 수질개선 효과를 평가하기 위해 예상되는 항목별 수처리 효율을 가정하여 시나리오를 구성하였다.

수질개선효과 모의는 2015년 4월 1일부터 2015년 11월 3일까지 수행하였다. 시나리오 Sim\_0은 수질정화시스템을 운영하지 않은 상태를 반영하여 수행하였으며, 시나리오 Sim\_1는 8월 19일까지는 Sim\_0의 입력자료와 같은 데이터를 사용하였으며, 8월 20일 이후에는 탄소 계열에 대해 80%, 입자상 물질에 대해 90%, 인 계열에 대해 60%, 질소 계열에 대해 20%의 수처리 효율을 적용한 입력자료를 구성하여 모의하였다.

Sim\_1은 수처리장치의 가동일자인 8월 20일부터 모의하였으며, Sim\_2는 모의 전 기간에 대해 적용한 것으로 가정하였다. 모의는 DO, Chl-a, TOC, T-P, PO<sub>4</sub>-P, SS, T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 항목에 대하여 수행하였다. DO의 경우는 아래 식을 사용하여 평가하였다.

$$\begin{aligned} & \text{(수처리 장치 효율, \%)} \\ & = \frac{\text{(수처리 장치 적용 후)} - \text{(수처리 장치 적용 전)}}{\text{(수처리 장치 적용 전)}} \times 100 \end{aligned}$$

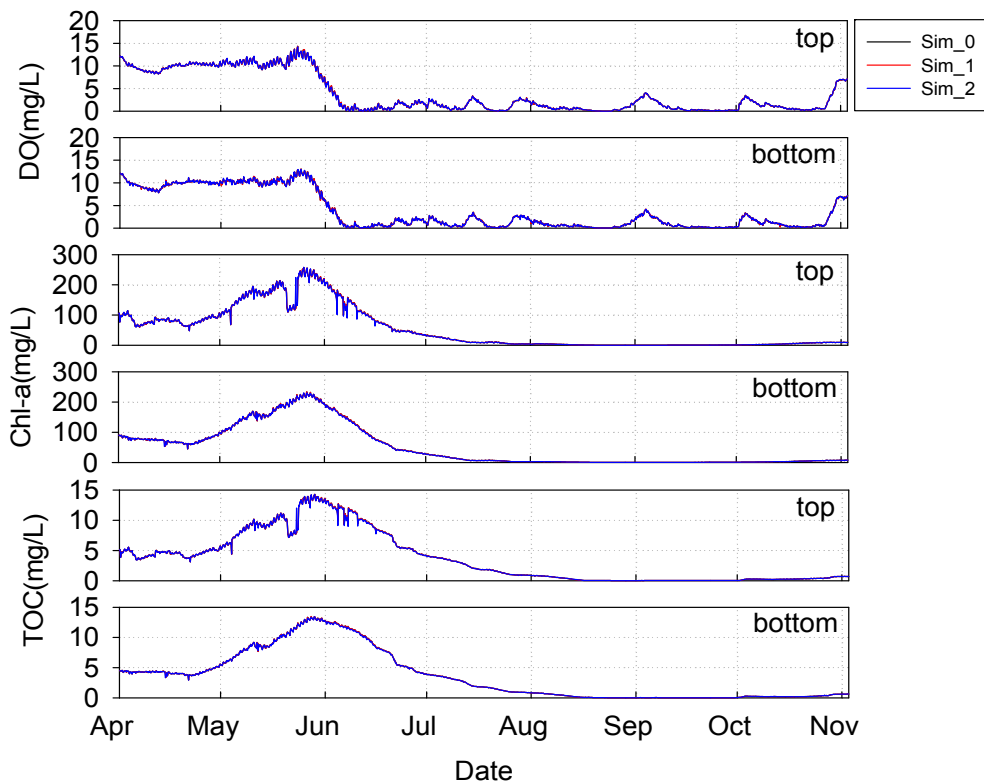
DO를 제외한 다른 항목의 수질개선 효과는 아래 식을 사용하여 평가하였다.

$$\begin{aligned} & \text{(수처리 장치 효율, \%)} \\ & = \frac{\text{(수처리 장치 적용 전)} - \text{(수처리 장치 적용 후)}}{\text{(수처리 장치 적용 전)}} \times 100 \end{aligned}$$

나. 수질개선 효과

(1) DO, Chl-a, TOC

DO, Chl-a, TOC에 대한 모의결과를 비교하기 위해 <그림 5.2-4>에 나타내었으며, 처리효율을 분석하여 (표 5.2-1)에 나타내었다. 모의기간동안 Sim\_1과 Sim\_2 시나리오 모두 DO 및 Chl-a 항목에 대해서 수질 개선 효과를 보였으나 개선효율은 1% 내외로 미미하였으며, TOC 항목에 대해서는 수질개선 효과가 없는 것으로 나타났다. Sim\_2 시나리오의 경우 개별 개선 효율을 보면 DO 항목의 경우 상층에서 최대 8.0%, 바닥층에서 최대 10.8%를 나타냈으며, Chl-a항목에 대해서 표층 5.9%의 개선 효율을 보였다. 매화지에 설치된 부유식 및 수로식 수질개선장치의 총용량은 2,000m<sup>3</sup>/d로 매화지 저수용량의 약 0.9%에 해당하여, 저수용량 대비 수질 개선장치의 처리용량이 작아 수질개선효율이 미미한 것으로 판단된다.



<그림 5.2-4> 시나리오별 ST2지점 DO, Chl-a, TOC 시계열 변화

(표 5.2-1) 시나리오별 ST2 지점 DO, Chl-a, TOC 수질개선효율 분석

구 분		Sim_1		Sim_2	
		Top	Bottom	Top	Bottom
DO	Average	0.1%	0.0%	-0.4%	-0.4%
	Maximum	5.4%	10.0%	8.0%	10.3%
	Minimum	-4.9%	-15.6%	-23.4%	-13.3%
Chl-a	Average	0.1%	0.2%	1.2%	1.1%
	Maximum	2.9%	6.8%	5.9%	5.5%
	Minimum	-2.8%	-3.5%	-11.2%	-2.4%
TOC	Average	-0.6%	-0.7%	-1.0%	-1.2%
	Maximum	2.5%	7.7%	2.4%	4.3%
	Minimum	-13.1%	-19.7%	-28.7%	-28.5%

(2) T-P, PO<sub>4</sub>-P, SS

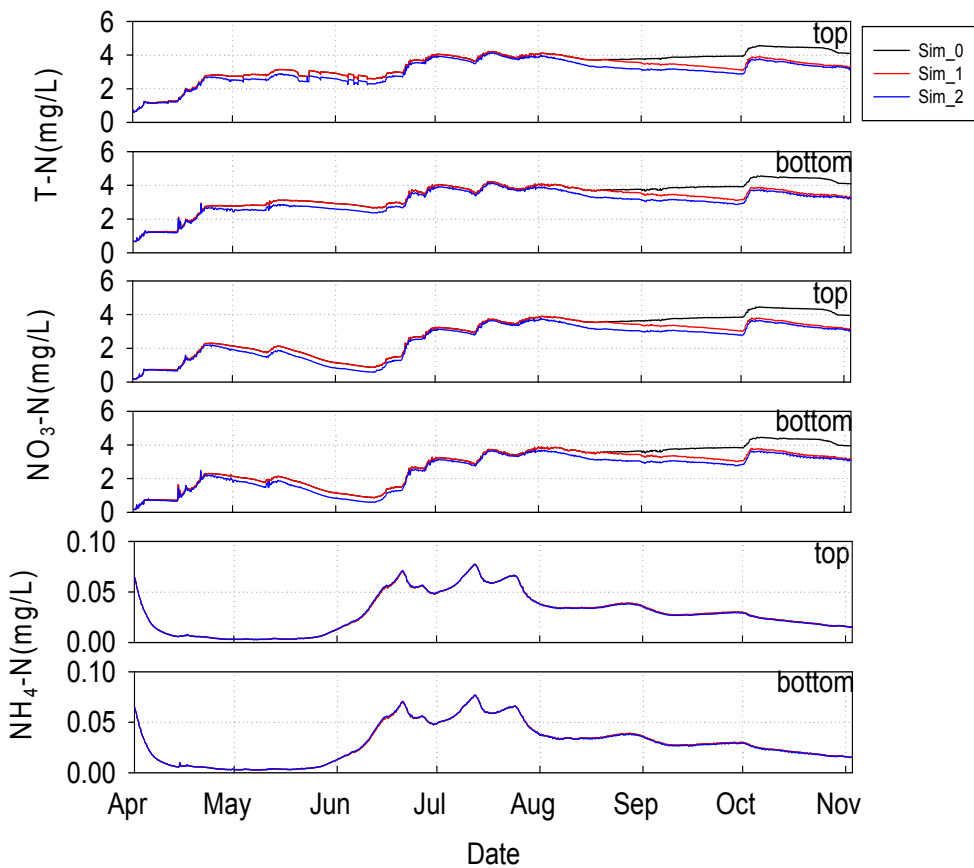
T-P, PO<sub>4</sub>-P, SS에 대한 모의결과를 비교하기 위해 <그림 5.2-5>에 나타내었으며, 처리효율을 분석하여 (표 5.2-2)에 나타내었다. 모의 결과 T-P, PO<sub>4</sub>-P, SS 항목에 대해서 개선되는 것으로 모의되었으며, T-P 항목의 경우 표층과 바닥층 모두 평균 5.0%의 개선효율을 보였으며, PO<sub>4</sub>-P 항목은 표층 6.2%, 바닥층 5.8%의 개선효율을 보였다. 반면, SS항목은 수질개선 효과가 미미하였다.

(표 5.2-2) 시나리오별 ST2 지점 T-P, PO<sub>4</sub>-P, SS 수질개선효율 분석

구 분		Sim_1		Sim_2	
		Top	Bottom	Top	Bottom
T-P	Average	2.5%	2.5%	5.0%	5.0%
	Maximum	11.7%	11.5%	13.5%	13.5%
	Minimum	0.0%	0.0%	-2.1%	-9.3%
PO <sub>4</sub> -P	Average	2.6%	2.6%	6.2%	5.8%
	Maximum	12.0%	11.7%	42.4%	42.7%
	Minimum	0.0%	0.0%	-33.5%	-27.2%
SS	Average	0.2%	0.2%	0.7%	0.7%
	Maximum	3.8%	4.6%	6.1%	8.3%
	Minimum	-4.4%	-3.2%	-6.7%	-4.2%

(3) T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N

T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N에 대한 모의결과를 비교하기 위해 <그림 5.2-5>에 나타내었으며, 처리 효율을 분석하여 (표 5.2-3)에 나타내었다. 모의 결과 T-N, NO<sub>3</sub>-N항목에 대해서 개선되는 것으로 모의되었으며, T-N항목의 경우 평균 11.2%의 개선효율을 보였고, NO<sub>3</sub>-N항목에 대해서는 평균 14%의 개선효율을 보였다. NH<sub>4</sub>-N 항목은 거의 개선되지 않는 것으로 모의되었다.



<그림 5.2-5> 시나리오별 ST2지점 T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 시계열 변화



(표 5.2-3) 시나리오별 ST2 지점 T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 수질개선효율 분석

구 분		Sim_1		Sim_2	
		Top	Bottom	Top	Bottom
TN	Average	4.9%	4.9%	11.2%	11.2%
	Maximum	22.9%	22.3%	26.9%	27.0%
	Minimum	0.0%	0.0%	-1.8%	-4.1%
NO <sub>3</sub> -N	Average	5.1%	5.1%	14.0%	14.0%
	Maximum	23.5%	22.9%	32.7%	32.4%
	Minimum	0.0%	0.0%	-1.6%	-5.6%
NH <sub>4</sub> -N	Average	0.0%	0.0%	0.7%	0.7%
	Maximum	0.5%	0.4%	2.7%	2.9%
	Minimum	-0.5%	-0.4%	-3.7%	-3.9%



## 제6장 융복합 수처리시스템의 수생태 영향평가



1절 요소기술별 수생태계 영향분석

2절 현장조사결과에 의한 수생태계 영향평가





## 제6장 융복합 수처리시스템의 수생태 영향평가

### 제1절 요소기술별 수생태계 영향분석

#### 1. 물리적 처리기술

##### 가. Air-Mist(마이크로버블)

최근 마이크로버블 기술을 다양한 물리적 장치와 결합하여 하천과 호소 수질을 정화하는데 적용하는 기술 개발이 활발하다. 일반적으로 2.0~3.5 kgf/cm<sup>2</sup> (또는 약 200~350kPa) 압력조건(일반적 DAF 공정에서는 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 적용)에서 마이크로버블 발생 장치를 통해 직경 10~30 $\mu$ m 크기의 고농도의 마이크로버블이 생성된다. 수중에 노출된 마이크로버블은 내부 기체가 주변 물에 의해 용해되면서 점차 크기가 작아지며 결국 사라지게 된다(Takahashi et al., 2003).

마이크로버블의 장점은 넓은 비표면적, 늦은 상승 속도, 그리고 라디칼 생성에 의한 산화작용이 있으며, 이는 수처리 공정 측면에서 오염물질의 흡착 및 부상, 산화에 유용하게 활용될 수 있는 특성이다. 반면 마이크로버블을 이용한 수중 DO 공급은 일반적인 공기 방울(mm 크기)보다 비효율적인 것으로 보고되고 있다(Kyoto, 2012). 또한, 오염된 물에서 마이크로버블의 내부 기체는 버블의 표면이 오염물질에 의해 덮여 있어 물속으로 용해되기 어렵다. 현재 매화지에서 부유식 수처리장치 전단에 설치되어 시험 가동중에 있으며, 호내로 공급된 마이크로버블은 분사후 2분여간 수중에 머무르며 DO 공급의 역할을 한다. 수중에서 DO를 최대 15mg/L까지 상승시키는 작용을 하며, 수생태계에 영향은 거의 없는 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 공기 또는 순산소를 이용한 저수지 저층 산소공급 장치는 가스 과포화시 어류에 가스기포 질병(Gas Bubble Disease)을 유발할 가능성(Fast et al., 1975)이 있지만, 저층의 가스 과포화는 매우 드문 현상이며 저수지의 최고 수심구간에 국한하여 발생(Kortmann et al. 1994)하는 것으로 보고되고 있다. 금번 기흥저수지와 죽산저수지에서 마이크로버블 장치를 장기간 운영한 상태에서 로다민 추적자 실험을 한 결과, 수중의 DO 농도는 적정한 수준이었으며 가스 과포화에 의한 GBD 발생 우려는 없는 것으로 판단된다.

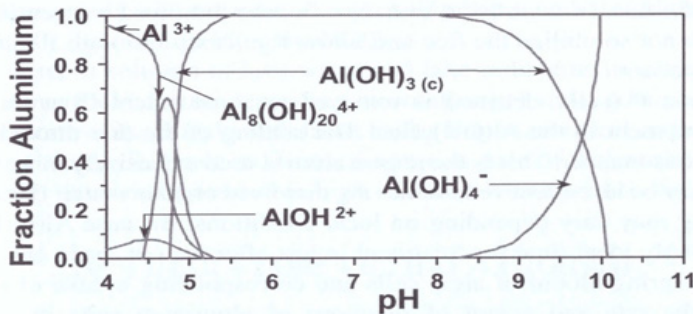
나. 물순환 Jet류

인공물순환 기술의 일종이며, 저수지의 물을 수평방향으로 순환시켜 정체된 저수지에서 흐름을 증가시키고, 저수지내 성층 파괴 및 용존산소공급을 통해서 수질을 개선시키는 목적으로 적용되고 있다. 매화저수지에 적용된 물순환 Jet류는 부유식 수처리시스템의 처리수를 수평 분사하는 장치이며, 저수지 내 물 순환을 유도한다. 물 순환 Jet 장치의 노즐 직경은 5cm이며, 초기분사 속도가 2m/s 정도에 해당하고 수체에 분사된 직후 유속은 수 cm/s로 급속히 감소하여 수생태계에 미치는 영향은 우려되지 않는다. 하지만 수심이 얇은 지역에서는 퇴적물의 재부상, 물의 투명도 저하, 동물성플랑크톤의 습식 제한 등의 영향이 나타날 수 있으므로 운영에 주의가 요구된다.

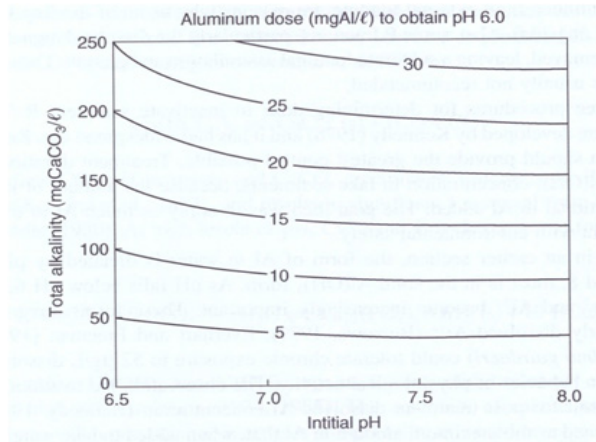
2. 화학적 처리기술

가. 복합응집장치(인불활성화)

Alum, iron hydroxide, calcium hydroxide 등을 호소 내에 첨가하여 조류의 증식에 성장 제한 인자인 인 성분을 제거함으로써 조류의 증식을 억제하는 방법으로, 호소 바닥이 인성분의 주요 공급원일 때 효과가 있다. 매화저수지에서는 유입수 수처리 장치에 복합응집장치를 적용하고 있으며, 필요시 Alum 등의 응집제를 사용하여 화학적 응집·침전 작용으로 수질 개선효과를 극대화할 예정이다. 알루미늄은 과다 사용시 잔류하는 알루미늄에 의해 인체의 뇌신경 장애를 유발할 수 있다. 또한 수중의 pH 범위가 4.5~5.5이고 알칼리도가 35mg-CaCO<sub>3</sub> 이하에서는 독성을 유발하여 생태계에 악영향을 미칠 가능성이 있어, 운영시 pH 및 알칼리도 항목에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.



<그림 6.1-1> pH의 상관관계에 따른 알루미늄 형태의 분포



<그림 6.1-2> 초기 알칼리도와 pH에 따라 pH 6 유지를 위한 황산알루미늄 농도 주입량(mg Al/L)>

(표 6.1-1) Alum 영향 관련 문헌 검토

참고문헌	저자	연도
Restoration and Mangement of Lakes and Reservoirs (Third Edition)	Cooke et al	2004
Combating Eutrophication: An Ecosystem Scale Analysis of Aluminum Sulfate (Alum) Effectiveness among lakes, with comparison to Alum and Biomanipulation Dual Treatment	Chista M. Webber	2014
Effects of Aluminum Toxicity and Low pH on the Early Development of Isoetes Echinospora	Martina et al	2009
Lake pH and aluminum concentration consequences for developmental stability of the water strider Rheumatobates rileyi	Drover et al	1999
Control of Lake Phosphorus with Aluminum Sulfate	Kennedy and Cooke	1982
Aquatic aluminum chemistry, Toxicology, and environmental Prevalence	Burrows	1977

나. 전기화학적 응집

전기화학적 응집장치는 전극판에서 이온이 용출되어 오염물질과 응집·흡착된 후 전기분해로 발생하는 수소와 염소가스에 의해 부상되거나 침전되어 분리하는 방식이다(이재영 등, 2011). 온도 및 pH의 영향이 없고, 약품이 필요하지 않으며, 생물학적 처리에 비해 부지면적당 처리용량이 크다. 또한, 운전이 간단하고 전압과 전류 등의 변화로 제어가 용이하여 자동화 설비 구축이 쉬운 장점이 있다(김동석, 2009). 일정 전류이하로 운영 시에 수생태계에 영향이 극히 적다.

### 3. 생물학적 처리기술

#### 가. 유동상 접촉산화법

미생물 접촉재는 생물막에 의한 유기물 분해와 흡착 및 여과 기능을 통해 오염수를 정화한다. 미생물의 자정작용 원리(접촉산화법)를 이용하며, 호기성 처리는 BOD제거에 큰 효과가 있다. 유입부 수로식 수처리장치에서는 상향류 흐름의 유동상 접촉제와 경사판으로 구성되어 있으며, 유입 SS 플록 해체 및 침전효율 향상을 유도하는 역할을 한다. 수생태계 영향성은 극히 적은 것으로 알려져 있다.

#### 나. 탈착식 식생 모듈

식물을 이용하여 수질을 개선하는 연구는 다양하게 진행되었으며, 중소 규모 수체에 적용한 사례가 다수 있다. 수생식물은 수중의 영양염류를 제거하고 조류의 포식자인 동물성 플랑크톤의 서식 공간을 제공하여 성장을 촉진시키는 역할을 한다. 유입부 수로식 수처리장치에서는 식생과 매디아를 결합한 식생 매디아조가 설치되어 있으며, 수생식물과 섬유상 미생물 접촉제를 적용하여 유기물을 저감하는 것을 목적으로 한다. 어류의 산란 및 서식처를 제공하는 이점이 있는 반면, 식생에 대한 유지관리가 미흡시 식물 고사에 따른 2차 오염이 발생할 가능성이 있다.

(표 6.1-2) 요소기술별 특징 및 기술 검토

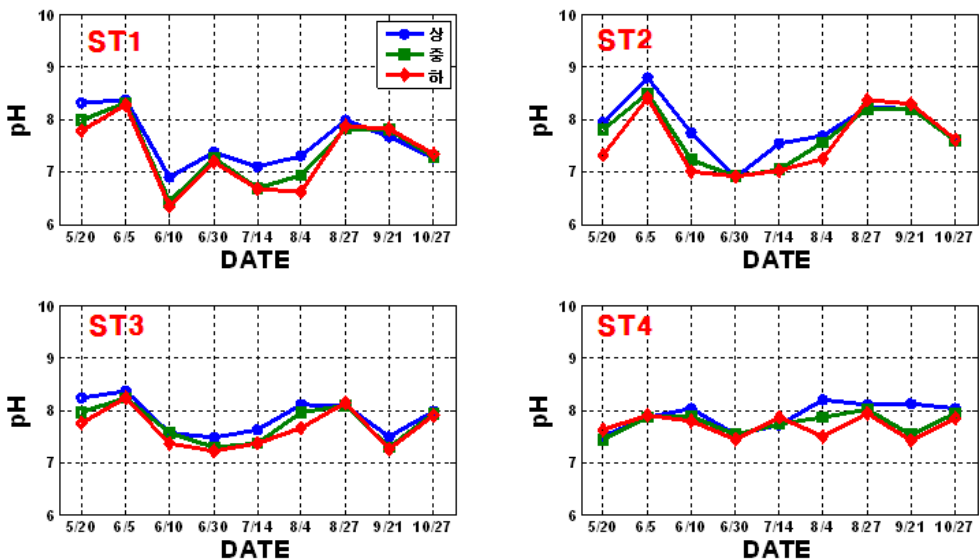
구분	특징	기술 검토
물리적 기술	Air-Mist (마이크로버블) <ul style="list-style-type: none"> <li>직경 10~30 <math>\mu\text{m}</math>의 마이크로 버블을 생성</li> <li>접촉산화조 DO 공급, 호내 DO 공급</li> <li>오염물질 흡착, 부상 처리 작용 (산화작용 없음)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DO 최고농도가 15 mg/L 정도로 상승</li> <li>수생태계 영향은 없음</li> </ul>
	물순환 Jet류 <ul style="list-style-type: none"> <li>부유식 수처리시스템 처리 수 수평방향 분사</li> <li>저수지 내 물 순환 유도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>노즐분사 속도가 2m/s 정도</li> <li>수생태계 영향 없음</li> </ul>
화학적 기술	복합응집장치 (인불활성화) <ul style="list-style-type: none"> <li>Alum 등 응집제 사용 화학적 응집, 침전</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>과다사용시, 잔류하는 알루미늄에 의해 인체의 뇌신경 장애 발생</li> <li>pH 4.5~5.5, Ca &lt; 0.8 mg/L에서 독성 발생, 생태계 악영향 가능</li> </ul>
	전기화학적 응집 <ul style="list-style-type: none"> <li>전극판에서 이온이 용출되어 오염물질과 응집·흡착된 후 전기분해로 발생하는 수소와 염소가스에 의해 부상되거나 침전되어 분리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수생태계 영향이 극히 적음</li> </ul>
생물 화학적 기술	미생물 접촉재 유동상 접촉재 <ul style="list-style-type: none"> <li>미생물의 자정작용 원리를 이용(접촉산화법)</li> <li>호기성 처리는 BOD제거의 큰 효과가 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수생태계 영향 극히 적음</li> </ul>
	탈착식 식생모듈 <ul style="list-style-type: none"> <li>수생관속식물을 이용하여 수체의 영양염 제거 및 산소공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>관리 미흡시 식물 고사에 따른 2차 오염 발생가능</li> <li>어류 산란 및 서식처 제공</li> </ul>



## 제2절 현장조사결과에 의한 수생태계 영향평가

## 1. pH 모니터링에 의한 수생태계 영향 평가

생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험 대상지구인 매화저수지에 대한 현장 pH 모니터링을 실시하여 AI 독성에 대한 평가를 실시하였다. <그림 6.2-1>은 현장에서 pH에 대한 모니터링 결과이며, 모니터링 기간 동안 pH 6.4~8.8의 값을 나타내어, AI에 대한 독성은 없을 것으로 판단된다. 무 강우기간(6/10~7/15)동안 하층의 pH가 대체적으로 상층보다 낮은 것으로 나타났으며, 이는 표층이 조류의 광합성으로 인한 영향으로 판단된다. 수생태계에 미치는 영향을 제대로 파악하기 위해서는 어류, 무척추동물, 수생식물 등에 대한 현장 정밀조사가 이루어져야 하나 본 연구에서 개발된 융복합 수처리 기술은 생태융합형 접촉산화부도를 제외하고는 호소 수상 또는 유입수 수변 등 오프라인에서 이루어지는 시설이므로 이러한 시설들에 의해서 수생태계에 직접적으로 미치는 영향은 없을 것으로 판단된다.



<그림 6.2-1> 현장 pH 모니터링 결과



## ● ● ● 제7장 요약 및 결론

---





## 제7장 요약 및 결론

### 7.1 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리 기술 개발

- 본 연구에서는 저수지의 수리·수문학적 변화(강수량, 저수량 등)에 영향을 받지 않고, 유기물, N, P에 대한 처리효율이 높고, 수질효과를 장기간 지속할 수 있으며, 현장의 부지활용성, 시공가능성, 경관성, 유지관리 용이성, 경제성 등을 고려하여 국내 농업용 저수지의 물리적 및 수질오염 특성에 적합한 융복합 수처리 기술을 개발하였음
- 융복합 수처리기술은 호소 유입수와 호내 수역을 대상으로 하였으며, 유입수 수처리의 목표는 호 내로 유입하는 SS, 유기물, 질소, 인의 저감에 있으며, 호소는 DO 공급, 오염물질 제거로 수환경 개선 및 내부 부하 저감으로 부영양화 사전 예방 및 호소 수질개선을 목표로 하였음
- 호 유입부의 SS, 유기물, N, P 부하량 저감을 위한 요소기술은 고속 응집 및 여과, 생물막 여재(유기물 제거)와 식물정화(질소, 인 제거) 기능을 유기적으로 조합하는 물리적, 화학적, 생물학적 융복합 처리공정으로 구상하였음. 처리공정은 유입 및 전처리, 고속복합응집장치, 생태융합형 접촉산화조, 침전조, 흡착여과조, 방류조 순으로 구성되었으며, 고속복합응집장치는 유입수의 성상 및 현장여건에 따라 선택적으로 운영할 수 있도록 설계하였음
- 호소수 정화목적으로 개발된 수질정화장치의 기본 개념은 원하는 위치에서, 원하는 시간 동안 무인 체류하며 수질을 정화하고, 집안 도크에서 충전, 유지관리, 악천 후 피항 등이 가능하도록 한 이동식 수질정화선임. 기술의 구성요소는 GPS를 이용한 무인항법 프로그램, 오염물질 처리를 위한 초고속 고액분리시스템, 호소에 DO를 공급하기 위한 마이크로버블 장치, SS농도 자동 센서, 장애물 감시 센서 등을 주요 장치로 하고 있으며, 이동이 용이한 선박일체형 형태로 기술개발 중에 있으며, 3차 년도에 현장적용실험을 계획하고 있음

### 7.2 융복합 수처리시스템 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링

- 본 연구에서 개발된 융복합 수처리기술의 현장적용실험을 위한 대상 지구로 국내 농업용 저수지의 물리적 조건과 수질오염 특성을 대표할 수 있고, 농업용수 수질개선사업지구가 아니면서 지리적으로 접근이

- 용이한 경기도 시흥시에 위치한 매화저수지를 현장적용실험 대상지구로 선정하여 정기적으로 호소 수질 및 퇴적물 오염도 조사, 호소 퇴적 오염물의 용출실험, 유입하천 수질조사 등을 실시하였음
- 매화저수지 수심은 1.5~3.0m이고, 표층수의 COD는 10.6~19.2mg/L(평균 16.5mg/L), 심층수는 10.8~19.3mg/L(평균 16.4mg/L)로 나타났고, 표층수의 TN과 TP는 각각 1.064~2.467mg/L(평균 1.764mg/L), 0.070~0.183mg/L(평균 0.137mg/L)이고, 심층수의 TN과 TP는 각각 1.317~2.625mg/L(평균 2.099mg/L), 0.099~0.226mg/L(평균 0.169mg/L)으로 조사 시기에 상관없이 수질오염도가 높았으며, 표층수에 비해 심수층에서 TN, TP 오염도가 더 높은 것으로 나타남
  - 매화저수지 주 유입하천은 2개소가 있으며, 평상시 평균유량은 유입-1은 472.2m<sup>3</sup>/일이고, 유입-2는 982.3m<sup>3</sup>/일로 유입-2가 유입-1에 비해 유량이 풍부한 하천임. 유입-1과 유입-2의 평균 COD, TN, TP는 각각 7.1mg/L, 6.975mg/L, 0.528mg/L와 6.1mg/L, 7.344mg/L, 0.509mg/L로 유입-1에 비해 유입-2의 TN, TP 오염도가 더 높은 것으로 나타남
  - 연구대상지구인 매화저수지 퇴적물의 강열감량 오염도는 USEPA 기준의 “오염도 심함”에 속하고 있으며, TN 함량은 1,821.1~3,906.0mg/kg(평균 2,622.5mg/kg), TP 함량은 1,049.5~1,811.3mg/kg(평균 1,271.2mg/kg)으로 한강 및 팔당호 준설기준을 초과하고 있음
  - 퇴적물 용출량 실험결과, COD, TN, TP 모두 호기상태보다 혐기상태에서 용출이 활발히 일어났으며, 혐기성 조건에서의 매화지 퇴적물 내 COD, TN, TP 용출속도는 각각 56.7~204.6mg/m<sup>2</sup>·d, 6.1~30.4mg/m<sup>2</sup>·d, -4.6~3.7mg/m<sup>2</sup>·d로 나타났음. 여름철 무강우 기간에는 바닥층 DO 농도가 0.2~0.3mg/L로 거의 무산소 상태를 보이고 있으며, 저층 DO 농도의 장기 고갈현상은 퇴적물로부터 중금속 및 영양염류의 용출에 따른 내부 부하 증가의 원인이 되므로 저층의 산소공급 등 수환경 개선을 위한 적절한 대책이 요구됨

### 7.3 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

- 생태융합형 접촉산화시스템은 식생과 미생물 매디아, 마이크로버블을 융복합한 기술로서, 고농도의 유기물, SS, TN, TP 처리를 목적으로 하고 있음. 처리공정은 유입수 → 에어미스트 → 고속복합용집장치

- 융복합 산화조(3조) → 침전조 → 방류로 되어 있으며, 마이크로버블과 고속복합응집장치는 유입수 성상과 현장 여건에 따라 선택적으로 조합하여 운영할 수 있도록 하였음
- 생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험을 위하여 매화저수지(경기 시흥시 도창동)에 수로식과 부유식의 Test Bed를 2015년 8월에 구축하였고(처리용량 1,000m<sup>3</sup>/day), 시험운전을 거친 후 설계인자별 수질정화효율 등 성능평가를 실시하고 있으며, 현장 운영에서 도출된 문제점에 대해 지속적인 기술보완을 하고 있음
  - 접촉산화수로식 수질정화효과는 가동 초기에는 미디어에 미생물 부착을 저조로 정화효율이 뚜렷하지 않았으나 운영시간의 흐름과 함께 미디어의 미생물 증진율이 높아짐에 따라 최대 처리효율이 SS 69.6%, Chl-a 89.3%, TP 89%까지 높아졌음. 본 연구에서 처음으로 수역에 적용하고 있는 접촉산화부도 시스템도 가동 초기에는 정상 가동이 어려웠고, 시간의 경과에 따라 처리효율이 조금씩 증가되고 있으며, 처리효율 향상을 위해 지속적으로 기술보완을 하고 있음
  - 접촉산화시스템(부유식)과 마이크로버블의 수리적 영향반경 조사를 위해 로다민 추적실험을 한 결과, 수질개선장치의 제트류에 의한 직접적인 영향 반경은 약 70m 정도이며, 이류 및 확산에 의한 물리적인 영향 반경은 100~120m로 조사되었음. 마이크로버블 포기장치에 의한 제트류에 의한 직접적인 영향 반경은 약 40m 정도이며, 이류-확산에 의한 물리적인 영향 반경은 80~120m로 판단됨

#### 7.4 매화저수지 3차원 수리-수질 모형 구축 및 적용

- 융복합 수처리시스템의 현장 설치에 따른 저수지 수질개선효과 및 융복합 수처리시스템의 수리학적 영향 반경 등을 조사하기 위하여 매화저수지를 대상으로 3차원 수리-수질 모형을 구축하였음. 매화저수지 유입량, 유출량 자료의 부족으로 강우-유출 해석 수문모형인 HEC-HMS를 활용하여 물수지를 해석하였음
- 매화저수지에 구축된 3차원 수리-수질 모델을 이용하여 매화저수지에 설치된 생태융합형 접촉산화시스템 부유식의 물 순환 제트류의 영향 반경을 수치 모의한 결과, 로다민 염료 추적자 시험 및 경험식을 이용한 영향반경 해석 결과와 유사한 결과로 나타났음

- 적용된 3차원 수리수질모델은 매화저수지와 같이 수심이 얇은 수체에서 수온의 약한 성층현상을 재현하는데 한계가 있었으며, 이는 수질 항목의 수직분포 해석에 있어서도 영향을 미치는 것으로 판단됨
- 유입부하량과 매개변수의 불확실성을 고려하여 다양한 조건에서 수질 모의를 실시하고 실측자료와 비교하였으나, 강우시 및 비강우시 경계 조건 자료와 모델을 보정할 수 있는 호 내 실측자료의 부족으로 3차년도에 추가적인 조사와 모델 검정이 필요할 것으로 판단됨

### 7.5 융복합 수처리시스템의 수생태 영향 평가

- 본 연구에서 개발된 융복합 수처리기술의 각 요소기술인 물리적 기술(DO 공급용 Air-Mist), 화학적 기술(복합응집장치), 생물학적 기술(미생물 접촉재, 탈부착식 식생모듈)은 수생태계에 미치는 영향이 거의 없는 자연 친화적인 기술로 구성 되어있음
- 생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험 대상지구인 매화저수지에 대한 현장 pH 모니터링을 실시하여 AI 독성에 대한 평가를 실시하였고, 그 결과 매화저수지의 pH는 6.4~8.8의 값을 나타내어 AI에 대한 독성은 발생되지 않을 것으로 판단됨
- 생태융합형 접촉산화시스템은 수생태계에 미치는 영향이 없는 자연친화적인 기술로 유지관리가 용이하고, 설치비용 등 제반비용이 경제적인 기술이라고 판단되며, 무인항법 이동식 호소 수질정화선 역시 수생태계에 이해요소가 없는 농업용 저수지 수질개선을 위해 현장 적용성이 높은 기술이라고 판단됨. 3년차에도 기술완성도를 높이기 위해 지속적인 현장적용실험을 통한 현장 검증이 필요하다고 판단됨



## 참 고 문 헌





## 참고문헌

- 강경수, 2004, 간접포기형 침적 생물막여과 시스템에 의한 오폐수용 고도  
정화장치개발, 제주지역 환경기술개발센터
- 건설기술연구원, 1995, 하천수질 정화기술 개발연구, 건설기술연구원
- 강성중, 2010, 유기물 및 질소 제거를 위한 나선형 생물막 파일럿 공정의  
성능 평가와 특성 연구, 한국외국어대학교 대학원 석사학위논문
- 강양미, 송홍규, 팔당호 수변부 퇴적물이 수층의 산소소모에 미치는 영향,  
한국육수학회지, 33(1), pp23-30(2000)
- 강주현, 2010, 고성만 표층퇴적물의 지화학적 특성과 중금속 오염에 관한  
연구, 경상대학교 대학원 석사학위논문
- 고광백, 1997, 폐수처리공학, 동화기술
- 구본우, 2010, 담수호의 수질개선을 위한 물순환시스템 가동시 미생물 집  
축여재 적용에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문
- 국립환경연구원, 2003, 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 최종  
보고서, 국립환경연구원
- 김종범, 김가람, 2013, 마이크로버블을 응용한 수질환경개선, 어항어장,  
4(3), p.30-36
- 김가람, 2013, 마이크로버블에 의한 수질정화-국내 적용 사례-, 어항어  
장 4(3), p.37-42
- 김도희, 2002, 영양염 용출 측정에 관한 고찰, 한국환경과학회지, 11(12),  
p.1333-1337
- 김동석, 박영식, 2009, 전기응집 공정을 이용한 Rhodamine B의 제거, 대  
한환경공학회지, 31(12), p.1081~1088
- 김태철, 1998, 접촉산화수로공법에 의한 수질개선연구, 환경연구 16  
('98.12), p.1-10
- 김판수, 손한형, 이상호, 박성순, 2006, 나선형 끈상 미디어의 시간에 따른  
바실러스 미생물 부착량 변화에 관한 연구, 한국환경과학회 가을학술  
발표회, 15(2), p.357-361
- 김학용, 2000, 끈상 접촉여재를 이용한 하천정화 방안, 아주대학교 산업  
대학원 환경공학과 석사학위논문
- 김해진, 야마모토 타카시, 2013, 마이크로 버블에 의한 수질정화-해외적

- 용사례-, 어항어장, 103호(4-3), p.43-48
- 김남천, 이태수, 1995, 생물학적 폐수처리, 동화기술
- 김현열, 1991, 생물접촉산화법에 의한 오타원수의 처리특성에 관한 연구, 일본 동북대학 박사학위논문
- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2014, 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술개발 및 적용(I) 연구보고서
- 류희구, 2015, 가압부상장치와 생물막 복합공정을 이용한 장치형 하천정화 시스템에 관한 연구, 경기대학교 일반대학원 환경에너지시스템공학과 석사학위논문
- 박재로, 임현만, 우효섭, 2001, 하천정화를 위한 상향류식 접촉산화공법의 운전특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 17(5), p.557-564
- 박종웅, 1988, 호기성침지형 생물막공법의 처리효율에 미치는 영향인자, 서울시립대학교 대학원 박사학위논문
- 배준삼, 2006, 끈상 미생물접촉재와 수초근을 이용한 하수의 고도처리 효율에 관한 연구, 상명대학교 대학원 석사학위논문
- 배준삼, 이상호, 2006, 하수의 최종 유출수 수질개선을 위한 침전조 모형실험에 적용한 끈상 미생물접촉재와 미나리의 고도처리효율에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지, 7(3), p.440-447
- (사)일본하수도협회, 1990, 일본의 하수도, (사)일본하수도협회
- 신유나, 2006, 팔당호와 충주호의 SOD변화, 국립환경과학원 한강물환경연구소
- 안광호, 고광백, 김이태, 김광수, 2012, 호기성 생물막을 이용한 HRT 변화에 따른 오염물질 제거, 한국환경과학회지, 21(12), p.1495-1501
- 안영희, 2002, 끈상접촉산화공법의 처리효율에 관한 연구, 서울시립대학교 도시과학대학원 환경공학 석사학위논문
- 유승훈, 2010, 경안천 서하보 퇴적물이 수질에 미치는 영향분석, 명지대학교 대학원 석사학위논문
- 이재영, 이재광, 엄성현, 이혜진, 2011, 전기화학공학 기술(수처리 공정), 공업화학 학회지, 22(3), p.235-242
- 이준호, 박갑성, 우한준, 2012, 원소 분석기를 이용한 혐도 퇴적물의 총탄소 및 총유기탄소 특성, 자원환경지질, 45(6), p.673-684
- 이육주, 2003, 자생 수생식물에 의한 수질정화효과, 상명대학교 대학원 환

- 경자원학과 석사학위논문
- 이상호, 2000, Bio-contactor를 이용한 하천수 정화에 관한 연구, 상명대학교 산업과학연구소
- 이창희, 김은정, 1998, 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국환경정책평가연구원
- 이창희, 유혜진, 2000, 수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구, 한국환경정책평가연구원
- 정 용, 1984, 현수미생물접촉법(HBC)에 의한 오수처리효과에 관한 연구, 연세대학교, 환경공해연구소
- 조영철, 정세웅, 2007, 남양호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성 분석, 대한환경공학회지, 29(12), p.1345-1352
- 중소기업청, 2005, 인공근이 부착된 수초섬에 의한 하수종말처리장 종침하수의 고도처리방법, 중소기업청
- 차환수, 2011, 마이크로 버블 기술의 현황과 전망, 식품기술지 22(3), p.544-552
- 최승희, 1987, 미생물막을 이용한 반응조내의 기질제거와 부착 미생물량에 관한 수학적 모델, 한국과학기술원 석사학위논문
- 타카하시 타다시호, 2011, 일본산업기술연구원
- 한국농어촌공사, 2015, 한국농어촌공사 농업기반시설관리 웹사이트 <http://rims.ekr.or.kr/>
- 홍원석, 신완호, 송동근, 오종민, 2010, 미세기포를 이용한 수질개선대책, 한국방재학회지, 10(1), p.92-99
- 해양수산부, 2007, 해양환경공정시험법
- 환경부, 2011, 부유메디아 생물막 공법을 이용한 난분해성 산업폐수의 고도처리 기술개발, 환경부
- 황환국, 1998, 오염된 소하천의 고효율 정화방법, 건설기술연구원 건설기술정보, 171('98.2), p.27-31
- Atlas copco. 1980. Communications Dept., Wilrijk, Belgium
- Fast, A.W., V.A. Dorr and R.J. Rosen. 1975, A submerged hypolimnion aerator. Water Resour. Res.(11) p.287-293
- Kortmann, R.W., G.W. Knoecklein and C.H. Bonnell. 1994. Aeration of stratified lakes(Theory and practice), Lake and Reservoir

- Manage. 8, p.99-120
- Kairesalo, T., 1995, Fractional composition, adsorption and release of sediment phosphorus in the Kis-Balaton Reservoir, water Res., 28(3), pp. 717~726
- Rittmann, B. E. and Brunner, C.W., 1984, The nonsteady state biofilm process for advanced organics removal, WPCF, 56(7), p.874-880
- Steinberg, C. and K. Arzet., 1984, Impact of hypolimnetic aeration on abiotic and biotic conditions in a small kettle lake, Environ. Tech. Lett. 5, p. 151-162
- Truax, D.D., A. Shindala and H. Sartain., 1995, Comparison of two sediment oxygen demand measurement techniques, J. Environ. Eng., 121, p.619-624
- US EPA, 1999, Integrated risk information system(IRIS), National Center for Environmental Assessment

## 참 여 연 구 원

목 차	소 속	참여자
1장 서론	농어촌연구원 농공연구실	최선화
2장 농업용저수지 용복합 수처리 기술 개발	농어촌연구원 농공연구실 수생태복원(주)	최선화 김해도 협동연구기관
3장 현장적용지구 선정 및 현장 모니터링	농어촌연구원 농공연구실 충북대학교	최선화 이진경 예한회 공동연구기관
4장 용복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가	농어촌연구원 농공연구실 충북대학교 수생태복원(주)	이태호 예한회 공동연구기관 협동연구기관
5장 매화저수지 3차원 수리-수질모형 구축 및 적용	농어촌연구원 농공연구실 한경대학교	최선화 공동연구기관
6장 용복합 수처리시스템의 수생태 영향 평가	농어촌연구원 농공연구실 한경대학교	이태호 공동연구기관
8장 요약 및 결론	농어촌연구원 농공연구실	최선화





## 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

### ■ 발 행 처

연구과제명 : 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용(Ⅱ)

발 행 일	2015. 12
발 행 인	이 용 직
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 870 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055

- 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다.  
단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.