

최      중  
연구보고서

농업용 수로의 친환경적 수질정화재료 및 시공기법 개발

Development of material and construction method of  
water treatment for agricultural channel

연 구 기 관  
(주)자연과환경

농림수산식품부

# 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용 수로의 친환경적 수질정화 재료 및 시공기법 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008 년 4 월 24일

주관연구기관명 : (주)자연과환경

총괄연구책임자 : 권 태 영

세부연구책임자 : 권 태 영

연 구 원 :

안 민 우 양 창 환

양 영 철 은 재 기

경 민 수 강 수 만

협동연구기관명 : 건국대학교

협동연구책임자 : 김 선 주

연 구 원 :

양 용 석 지 용 근

이 주 용 강 승 목

박 기 춘

협동연구기관명 : 한국농촌공사

협동연구책임자 : 김 형 중

연 구 원 :

김 회 수 최 준 혁

배 요 섭 이 진 열



# 요 약 문

## I. 제 목 : 농업용 수로의 친환경적 수질정화재료 및 시공기법 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구의 목적은 농촌유역의 수질을 개선하고 질 높은 농업용수의 확보를 위하여 농업용 수로에 적용 가능한 친환경적 수질정화 재료를 조사하고, 이를 이용한 농수로 수질정화 기술 및 생태적인 서식처와 생태통로를 제공하는 농수로 제품을 개발하는데 있다. 더불어 농지에서 배출되는 오염물질의 저감하기 위해 많은 부지면적이 소요되는 기존의 인공습지를 개선하여 효율이 높은 고효율 인공습지 공법을 개발하고자 한다. 농촌유역의 수질정화와 생태계를 고려한 친환경적인 개선을 본연구의 기술적, 경제·산업적, 사회·문화적 측면의 세분화된 필요성은 다음과 같다.

### 1. 기술적 측면

- 가. 농촌지역 수질개선에 있어서 농업 용·배수로를 적극 활용한 수질개선기술을 개발·도입하는 것이 효율적이다.
- 나. 농촌유역의 비점오염원에 의한 수질오염 방지를 위한 우리나라 강우특성에 적합한 수질개선공법 개발이 필요하다.
- 다. 유지관리가 간편한 수질개선 기술인 인공습지는 긍정적 대안이나 많은 부지가 필요하며 식물의 유지관리 어려움이 있기 때문에 상대적으로 규모가 작은 고효율의 인공습지 조성 기법 개발이 필요하다.

### 2. 경제·산업적 측면

- 가. 오염총량제 실시로 비점오염물질 배출이 많은 농경지를 포함하는 농촌지역에 적합한 저비용 수질개선공법의 개발 및 보급이 시급하다.
- 나. 우수농산물관리제도 (GAP)도입으로 농업용수의 수질이 농촌소득과 직결되므로 농업용수가 수질기준치를 만족하도록 관리하기 위한 기술개발이 필요하다.

### 3. 사회·문화적 측면

- 가. 농촌의 환경친화적 수변공간 조성과 어메니티 향상을 위한 수량의 확보, 수질정화가



필요하며, 친환경적 정비시 수질정화 공법의 도입이 필요하다.

- 나. 용·배수로 총연장의 약 32%를 차지하는 콘크리트 수로는 수질정화 기능이 미흡하고, 어류의 이동 및 피난이 어려우므로 친환경적 정비기법 개발 및 보급 필요하다.
- 다. 우리나라의 농업용수량은 전체 수자원의 51%를 차지하고 있어, 농경지 유입과 유출에 따른 오염부하량이 증가할 것으로 판단된다. 또한, 수질오염부하에서 비점오염원이 차지하는 비중이 '98년도에 282톤/일에서 '20년도에는 381톤/일로 급속히 증가될 것으로 예상되므로 수질개선을 위한 관리 시급하다.
- 라. 도시·도로·농경지 등의 지표면에 축적된 오염물질이 강우 시 빗물과 함께 하천으로 유입되는 비점오염은 전체 수계 부하의 22~37% 정도 차지하므로 특히, 초기강우의 수질개선에 대한 필요성 증대되고 있다.
- 마. 4대강수계 비점오염물질 배출부하 중 농경지가 11.4%를 차지하고 있어 4대강 수질관리를 위해서는 농업유역 배출수의 수질관리가 대단히 중요하다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

#### 1. 1단계(기초연구) 개발내용 및 개발범위

- 수질정화 재료에 관련된 국내·외 자료의 수집 및 문헌조사
  - 미국, 일본, 유럽 등의 선형기술 및 재료조사
  - 국내·외 재활용 자원을 이용한 사례조사
  - 농업용수로 오염현황 및 정비기법 조사
  
- 모형실험을 통한 수질정화재료의 수질정화효율성 분석
  - 재료의 영양염류 흡수효율 분석
  - 모형 유입수 및 유출수의 수질조사
  - 조사항목 : 수온, pH, DO, EC, SS, BOD, COD, T-N, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, T-P, PO<sub>4</sub>-P 등
  - 재료의 입경, 투수성, 영양염류 함유량, 양이온치환용량, pH 등의 물리화학적 분석
  - 흡수로용 수질정화시설 설치대상지구의 수질변화특성 조사·분석
  - 콘크리트 라이닝 개거수로용 수질정화시설 설치대상지구의 수질변화특성 조사·분석
  
- 영양물질 흡착능력이 우수한 수질정화 재료 개발
  - 미생물 부착생장이 용이한 비표면적이 크고 공극이 많은 재료의 탐색
  - 영양물질 흡착능력이 우수한 재료의 발굴
  - 암석 및 광물자원 탐색을 통한 수질정화 재료 조사
  - 산업부산물 및 재활용자원을 통한 수질정화재료 개발

- 재료의 혼합 및 가공을 통한 수질정화재료 개발
- 고효율 인공습지용 식재기반형 접촉여재 개발
  - 식물생장에 필요한 지지기반 제공, 미생물의 부착생장, 영양물질의 흡착 및 이온교환의 기능을 동시에 만족하는 재료의 개발
  - 입도와 효율의 상관성을 고려한 최적화비 도출
  - 부지면적 최소화를 위한 고효율 인공습지 흐름방식 선정
- 오염하천 및 농지배수 정화를 위한 고효율 인공습지 시험정화시설 시공
  - 시험시설 설치를 위한 대상지선정
  - 고효율 인공습지 시험연구시설의 설계 및 시공

## 2. 2단계(응용연구 및 시제품제작) 개발내용 및 개발범위

- 수질정화 재료에 관한 성형화 및 제품화 시험
  - 다양한 형태의 성형화 시험 및 수질정화체 형태 제작
  - 성형화를 위한 다양한 결합재 조사 및 시험
  - 시공이 용이한 부자재 조사 및 적용
- 수질정화 제품을 적용한 농업용 수로 시험시공
  - 모형실험 결과를 바탕으로 한 시제품의 제작
  - 시험시공을 위한 측량 및 조사
  - 시험시공을 위한 설계도면 및 시방서 작성
  - 시제품 설치 및 시공
- 고효율 인공습지 시험정화 시설의 운전 및 모니터링
  - 강수량 변화에 따른 운전 대책
  - 기온 변화에 따른 인공습지의 운전 적용성
  - 에너지 소비량 평가
- 수질정화 제품의 효율성 평가/분석을 위한 실내 모형실험
  - 수질정화체 부피, 형태, 배열에 따른 수치해석 모의(FLOW-3D모델을 이용)
  - 실내모형 실험을 통한 수치해석 검증 및 보정
  - 최적화된 수질정화체 설치요령 구축

## 2. 3단계(사업화) 개발내용 및 개발범위

- 사업화에 필요한 충분한 수질정화효율 평가 및 자료 확보
  - 농수로의 시기별 수질변화특성 조사분석  
수온, pH, DO, EC, SS, BOD, COD, T-N, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, T-P, PO<sub>4</sub>-P 등
  - 농수로용 수질정화시설 유출입수의 수질조사
  - 인공습지 유입수 및 유출수의 수질조사
  - 인공습지 시스템의 질소, 인 등의 영양염류 제거 효율조사
  
- 평가에 의한 제품 및 시공기법 보완 및 개선
  - 수질정화수로관, 환경생태보호수로관, 고효율 인공습지의 효율적 시공 방법 검토
  - 균일한 제품 제작을 위한 제작 공정 방법 확립
  - 개선방안 및 보완점 제시
  
- 유지관리 지침, 시방서 등의 사업화 준비
  - 유지관리 지침 조사
  - 시방서 및 기준 마련
  - 특허 및 실용신안 취득

## IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

### 1. 농수로 적용을 위한 수질정화 재료 및 성형화 제품 개발

#### 1) 식물생육이 가능한 수질정화 재료 개발

본 연구에서는 친환경적 농수로와 농업용수 수질개선을 위한 고효율 인공습지에 적용하기 위하여 수질정화 역할과 식재기반재의 역할을 동시에 만족시켜서 효율을 향상시키고 부지사용을 최소화 할 수 있는 재료를 조사하고 수질정화 모형실험을 진행하였다.

흡착실험 모형장치에 의한 시간에 따른 여재별 흡착효율 실험결과를 바탕으로 우수한 여재를 선택하여 추가적인 정밀한 실험을 향후에 실시할 예정이다. 식물과 미생물의 활동을 포함한 실험을 통하여 자연정화에 적합한 고효율 여재를 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 정량적인 실험을 통하여 향후 실용화시 설계인자를 도출하여 경제성 검토와 함께 병행한다면 질소, 인과 같은 영양물질 처리에 적합한 여재를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2) 농수로 적용을 위한 수질정화 재료에 관한 성형화 제품 개발

본 연구에서 조사된 식물생육이 가능한 수질정화 재료들은 대부분 다공질의 입상 재료들로서 비중이 가벼우며, 다공질의 특성을 나타낸다. 이들은 고효율 인공습지의 기반재료로서 충분히 수질정화에 효과를 나타낼 수 있으나 그대로 농수로 적용하기에는 강우에 의한 유실 등으로 인하여 농수로의 현장적용에는 어려움이 많다. 농수로에서 수리학적 안정성을 유지하면서 수질정화 효과를 목적으로 하는 성형화 된 수질정화체를 개발하고자 한다. 수질정화체를 성형화하기 위해서는 추가적인 배합재료에 관한 연구와 안정된 강도를 발현할 수 있는 기술들이 함께 개발되어야 하므로 다양한 산업부산물 및 고화재료들에 관하여 실험을 진행하였다. 본 연구를 통하여 개발된 여재의 유기물함량은 0.14%였고, 수질정화체의 유기물함량은 0.20%로서 모두 낮은 값을 나타냈기 때문에 수질정화재료로서 이용하기에 유리한 것으로 판단된다.

## 3) 수질정화체의 적용성 평가

수질 효율 조사는 2007년 7월부터 11월 사이에 총 10회, 수질정화체를 설치한 배수로 구간의 상류부, 중류부, 하류부에서 실시하였다. 시험기간 중 유량은 2,592~13,248 m<sup>3</sup>/d, 평균 8,064 m<sup>3</sup>/d이었으며, 수질정화효과를 분석하였다.

수질정화체를 부설한 배수로에서 유기물과 영양염류의 정화효율은 낮지만, 수질정화체를 짧은 구간에 부분적으로 부설한 점을 감안 한다면 긍정적인 결과인 것으로 판단되며 부설면적을 넓히면 농경배수의 수질정화에 많은 효과가 있을 것으로 기대된다. 또한 나이론 망에 수질정화체를 담아 배수로의 중간 중간에 부설하는 간단한 방법으로 설치가 가능하고, 제거도 가능하므로 시공 면에서도 대단히 효율적이기 때문에 수질정화체를 이용한 배수로 수질 개선방법으로 적용성이 매우 것으로 판단된다.

## 2. 친환경 수질정화 수로관 및 시공기법 개발

### 1) 수질정화 수로관 제품

수질정화수로관은 수로관의 기본기능인 이수와 치수 기능뿐만 아니라 수질정화부와 식재부, 어류와 양서류를 고려한 공간과 갈수기의 물을 저류하여 어류의 피난처를 제공할 수 있는 저류부를 가진 다기능의 수로관으로써 일반 수로관과의 연결 시공이 가능하다. 수질정화수로관은 크게 용배수로겸용, 용수로용, 배수로용으로 구분해서 개발하였다.

## 2) 환경생태보호수로관 제품

환경생태보호수로관은 일반수로관과 등선로가 있는 생태수로관의 결합된 형태의 수로관으로써 갈수기에 30cm 정도의 물을 저류할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 기존 등선로의 단점인 경사기울기를 33도로 완만하게 하였으며, 등선로 폭을 15cm로 개선한 제품을 개발하였다.

## 3) 수질정화수로관 및 환경생태보호형수로관 현장 시험시공

대상유역은 아산시 배수로와 익산시 용·배수로에 설치하여 생태계 모니터링을 실시하였다. 생태계 모니터링의 목적은 시험수로인 수질정화수로관 구간과 환경생태보호형수로관 구간의 생물 상황을 조사·분석하여 친환경적 수로정비사업을 위한 생물 모니터링 기법을 확립하는데 있다. 뱀과 개구리, 어류의 수로내 이동과 탈출경로를 모니터링 함으로써 친환경적 수로정비 시 양서류 및 소동물의 탈출로(등선로)설치 기준정립에 필요한 기초자료를 도출하였다.

## 3. 농업용수 수질 개선을 위한 고효율 인공습지 개발

본 연구에서는 자연정화방법 중 농촌지역에서 발생하는 비점오염물질을 처리하기 위한 지하흐름형 인공습지 특히 질소, 인과 같은 영양염류를 제거할 수 있는 지하흐름형 인공습지를 개발하고자 한다. 인공습지는 충남 아산시 영인면 성내리에 위치하고 있는 성내저수지를 선정하였다. 유입경로가 단순하고 시설물 설치에 용이하며 오염하천의 주 오염원이 연구목적과 일치하며 현장에 적용하기 유리하여 상류의 하천 유입부 홍만수면 부지에 인공습지를 설치하였다. 농경배수 및 농촌지역 비점오염물질의 효과적인 처리를 위한 방안으로서 계단형 상하흐름 인공습지를 도입하고, 여기에 혼합여재를 충전 하고 정화효율을 분석한 결과 SS가 83.2%, BOD가 81.7%, COD가 43.6%, TN이 62.1%, TP가 21.1% 제거되었다. 계단형 상하흐름 인공습지는 호기성과 혐기성이 확보되고, 여재와의 접촉 유하거리도 긴 특징을 갖고 있어 정화시설로 도입하면 좋은 효과가 있을 것으로 기대된다. 인공습지의 경우 현장타설 콘크리트로 할 수도 있으나 시공의 효율성을 높이기 위하여 패키지 형을 개발하는 것도 좋을 것으로 판단된다.

# SUMMARY

## I . Subject

Development of material and construction method of water treatment for agricultural channel

## II . Objectives and Significance of the Study

Purpose of this research is developing channel product that offer water quality improvement to rural area, ecological refuge to Agricultural channel and treatment of agricultural nonpoint source pollution. And develop material to improve efficiency of constructed wetland that have the flow type system using space effectively.

The objectives of this research can be divided into three parts : technical aspects, economic aspects, and social and cultural aspects. Each of them is as follows.

### 1. Technical aspects

- It is efficient that develop and introduces a water improvement technology that utilize actively agriculture irrigation and drainage channel for water quality in rural area.
- Need water improvement technical development that consider rainfall impact for water pollution prevention by nonpoint pollution source of rural basin of attraction.
- constructed wetland that maintenance is a simple water improvement technology is positive . However, need a lot of site spaces and high maintenance of plant harvesting. So, need new constructed wetland system that space utilization and efficiency are high.

### 2. Economic aspects

- Nonpoint pollution source discharge are pressing development and diffusion of suitable low cost water improvement method of construction in rural area including a lot of farm land by enforcement of TMDL system.
- Need technical development to manage to satisfy that agricultural water does water criteria because quality of agricultural water is connected directly with farm village

income to GAP introduction.

### 3. Social and cultural aspects

- Need security of quantity for environment-friendly space furtherance and amenity elevation, quality of water purge of farm village, and need union of quality of water specie method of construction in environment friendly construction.
- Agricultural concrete channel that dominate about 32% of overflow total length is insufficient quality of water specie function, and transfer and evacuation of fishes are difficult. Therefore, need environment-friendly construction technical development and diffusion.
- Agriculture irrigation requirement of our country is judged that pollution loading by farm land inflow and outward flow increases because dominate 51% of whole water resources.

Also, because is expected that is increased rapidly to 381ton/day scale to 2020 years in 282ton/day that weight that nonpoint pollution source occupies under water pollution department gouges 1998 years administration for water improvement urgent

- When pollutant accumulated on ground surface of city, road, farm land etc. the pollutant that is flowed in rivers run-off occupies about 22 ~ 37% of whole pollutional load. Therefore specially, necessity about water improvement of initial rain is enlarged.
- Among the nonpoint pollution source subordinate amount, a sheep exhausted in farm land dominates 11.4%.

Therefore, pollutant government official come forward in succession in farm land for quality of water elevation is very important.

## III. Contents and Scopes of the Study

The objectives of this research are to improve a water quality using the development technology and improving function of water quality in the irrigation-drainage system. The detailed contents and scopes of the research are as follows.

1. Investigation of domestic and outside the country data connected with quality of water specie materials.

- This research irradiates and chooses quality of water specie materials that suitability

is high to remove pollutant for agricultural channel and constructed wetland.

2. Assessment of Pollutant removal rate using the scale model test

- This research uses scale model test of sand and analyze pollutant removal efficiency of selected various materials and optimize.
- Hydraulics stability assessment of developed materials.

3. Site suitability research of a developed technology and product

- Site application study of agricultural channel product that is quality of water species function and ecological function.
- Developed constructed wetland system application and research of pilot scale for water quality improvement in rural area.

4. Long-term spot monitoring and research for quality improvement

- This research is developed product and to do monitoring and improve product and a technology whether a technology is no problem in spot application done thing.
- Whether developed product is helping to living things of Amphibia, fishes, reptile etc. does monitoring.
- Evaluate whether is removing pollutant exhausted in farm land harmoniously.

## IV. Results and Recommendations

The research compared and analyzed water depth and the distribution of the velocity of moving fluid through the numerical interpretation based on the changes in the arrangement of a water purification system. And then, it examined the characteristics of three-dimensional flow of a waterway. Through the test of an irrigation model, it installed a water purification system on a waterway in question and researched the irrigation stability of the waterway. It used FLOW-3D, a 3D flood control model, and constructed a minute lattice to examine the local flow in the waterway. It measured the velocity of moving fluid and the water level for FLOW-3D, irrigation model test, and monitoring of the waterway respectively, and analyzed the flow characteristics based on various conditions. It is judged that the research results will become basic data for preparing a standardized analysis system that judges the stability of streams and waterways to which a natural stream construction method is applied. And further, they will have important meanings in formulating the standards and the application of natural stream maintenance and waterways.



A mixed media was developed with absorption test to develop high efficient contact media that can be applied to the natural purification facilities, and the mixed contact media has shown high absorption to  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ , which was able to use for water purification media of natural purification facilities like constructed wetlands system. Model test of mixed contact media on water purification ability has shown that 71.8% of BOD, 47.9% of TSS, 41.1% of TN and 73.1% of TP were removed showing high removing efficiency of BOD and TP, but low on TSS and TN. This result was simply from test of water quality change at not moving condition, which the purification effect did not work fully and when polluted water flows through media like in constructed wetland system, the removing efficiency of TSS and TN can be increased.

Water quality purification materials were made by using contact media and pH, EC, CEC, organic matter content, available phosphorus, TN and TP of mixed contact media were 7.6, 0.26 dS/m, 20.05 meq/100g, 0.14%, 13.65 mg/kg, 338.28, mg/kg and 599.88 mg/kg; the water quality purification materials have 1.2, 2.06 dS/m, 37.65 meq/100g, 0.20%, 0.50mg/kg, 155.23mg/kg and 342.41 mg/kg, which shows that it can be used as water purification material.

A stair-type up and down flow constructed wetland system was introduced as a water quality purification system for agricultural water and non-point pollution source in farming regions efficiently and added mixed contact media here and analyzed the purification efficiency rate, it has shown that 83.2% of SS, 81.7% of BOD, 43.6% of COD, 62.1% of TN and 21.1% of TP were removed. As the stair-type up and down flow constructed wetland system has features of secured aerobic condition and anaerobic condition, and has long contact flow distance with media, it can be expected to have great effect as being used as a purification facility. For constructed wetland systems, it can be constructed with cast-in-site concrete, but it would be better to develop a package type to increase the efficiency of construction.

40.3% of SS, 0.7% of COD, 8.9% of TN and 11.6% of TP were removed at the water quality purification material installed drainage canal. Even though the removal ratio was low, but this was because of installation of water quality purification material at only partial places, thus, if it was to be installed at entire drainage canal, it would have high efficiency. The BOD did not get lowered, but this was because the influent was very low concentration of 3.1 mg/L and also, the effluent were all below 3.2 mg/L, which is greatly lower than the 8.0 mg/L of water quality standard for agricultural water, there should be no problem of reusing it as agricultural water. If the water quality purification materials are installed separately, it might be washed out during the rain, thus, if they are installed in net bags like installed in this study, it can increase

the stability. Therefore, it doesn't necessarily be fixed with concrete structures, but to install with net bags, it can increase the efficiency of construction.

A water purifying drainage flume with the structure of able to install water quality purification materials on the bottom of it to have water purifying functions was developed. Although, 39.6% of SS, 10.4% of COD and 13.0% of TP were removed at water purifying drainage flume, BOD and TN were not removed. For BOD, when the water was not purified, it all satisfied the water quality standards for agricultural water. As water purifying drainage flume was built with assembling method, it can increase the construction efficiency than the cast-in-site concrete.

For water quality purification material or water purifying drainage flume installed in drainage canals, nitrification is established because the water body is aerobic condition, but the TN removal ratio was low because there are no spaces for denitrification. If a portion of drainage canal are dredged deeply to adjust the anaerobic condition, it would denitrify. Also, these deep areas can be used as the resting areas and shelters for aquatic creatures, which would be helpful for ecosystem preservation. Also, the water quality purification materials can simply be installed with nylon net bags to between drainage canals and can remove easily, it has very high construction efficiency, which has very high application of being used as a water quality improving method using water quality purification material and water purifying drainage flume.

## CONTENTS

<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	<b>27</b>
Section 1. Objectives of Research .....	27
Section 2. Necessity of Research .....	27
Section 3. Scopes of Research .....	29
Section 4. Period and Research contents .....	30
Section 5. Research Organization .....	31
<b>Chapter 2. Status of Technical development in domestic &amp; another countries</b> .....	<b>33</b>
Section 1. R&D of Agricultural Canal for Environment friendly construction .....	33
Section 2. Constructed wetlands for Water purification .....	34
<b>Chapter 3. Results and Discussion</b> .....	<b>59</b>
Section 1. Development of water purification materials and blocks for Agricultural canals and streams .....	59
Section 2. Development of Canal Block for Rural environment and Ecosystem .....	176
Section 3. Development of Efficient constructed wetland for Rural Basin. ....	28
<b>Chapter 4. Attainment of the goal and Contribution in related field</b> .....	<b>271</b>
Section 1. Attainment of Research Plan .....	271
Section 2. Effect Contribution in related field .....	274
<b>Chapter 5. Plan of utilization for the research result</b> .....	<b>277</b>
<b>Chapter 6. Reference</b> .....	<b>281</b>

# 목 차

<b>제 1 장</b>	<b>연구개발과제의 개요</b> .....	<b>27</b>
제 1 절	연구개발의 목적 .....	27
제 2 절	연구개발의 필요성 .....	27
제 3 절	연구개발의 내용 및 범위 .....	29
제 4 절	기술개발 추진 체계 .....	30
제 5 절	연구원 편성표 .....	31
<b>제 2 장</b>	<b>국내외 기술개발 현황</b> .....	<b>33</b>
제 1 절	농업용 수로의 친환경 공법 현황 .....	33
제 2 절	수질정화를 위한 친환경 인공습지 공법의 현황 .....	51
<b>제 3 장</b>	<b>연구개발수행 내용 및 결과</b> .....	<b>59</b>
제 1 절	농수로 적용을 위한 수질정화 재료 및 성형화 제품 개발 .....	59
제 2 절	친환경 수질정화 수로관 및 시공기법 개발 .....	176
제 3 절	고효율 인공습지 개발 .....	218
<b>제 4 장</b>	<b>목표달성도 및 관련분야에의 기여도</b> .....	<b>271</b>
제 1 절	연구개발목표의 달성도 .....	271
제 2 절	관련분야의 기술발전 기여도 .....	274
<b>제 5 장</b>	<b>연구개발결과의 활용계획</b> .....	<b>278</b>
<b>제 6 장</b>	<b>참고문헌</b> .....	<b>282</b>

# 표차례

<표 2.1.1> 식생 기반재를 이용한 공법의 재료 .....	34
<표 2.1.1> 식생 기반재를 이용한 공법의 재료(계속) .....	35
<표 2.1.2> 목재를 이용한 공법의 부재료 .....	36
<표 2.1.3> 목재를 이용한 공법 .....	36
<표 2.1.4> 다공성 이용한 블록 .....	37
<표 2.1.5> 바구니를 이용한 공법 .....	38
<표 2.2.1> 수처리분야에 있어서 인공습지를 이용한 최초의 연구들 .....	51
<표 3.1.1> 황토의 특성 .....	61
<표 3.1.2> 황토의 화학성분 .....	62
<표 3.1.3> 선별재료들의 XRF에 의한 화학조성 분석 .....	63
<표 3.1.4> 시간에 따른 여재별 $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ 이온의 흡착특성 결과 .....	65
<표 3.1.5> 고로슬래그 시멘트의 물리 성능(KS L 5210) .....	78
<표 3.1.6> 고로슬래그 시멘트의 화학성분(KS L 5210) .....	78
<표 3.1.7> 고로슬래그의 물리 화학적 성질 .....	78
<표 3.1.8> 황토 분말의 물리 화학적 성질 .....	79
<표 3.1.9> 소석회 분말의 물리 화학적 성질 .....	79
<표 3.1.10> 무수석고 분말의 물리 화학적 성질 .....	80
<표 3.1.11> 메타카올린 분말의 물리 화학적 성질 .....	80
<표 3.1.12> 폐유리 분말의 물리 화학적 성질 .....	81
<표 3.1.13> 수질정화체 배합표 .....	82
<표 3.1.14> 실험 결과 .....	84
<표 3.1.15> 수정배합과 압축강도 .....	84
<표 3.1.16> A-1 현장배합률 .....	85
<표 3.1.17> 여재 및 수질정화체의 화학적 성질 .....	88
<표 3.1.18> 수질정화체 부피변화에 따른 수로 내 유속 변화 .....	105
<표 3.1.19> 수질정화체 부피변화에 따른 수로 내 수심 변화 .....	106
<표 3.1.20> 수질정화체 형태에 따른 유속 변화 .....	113
<표 3.1.21> 수질정화체 형태에 따른 수심 변화 .....	114
<표 3.1.22> 수질정화체 배치에 따른 유속 변화 .....	125
<표 3.1.23> 수질정화체 배치에 따른 수로 내 수심 변화 .....	126
<표 3.1.24> 시험수로 제원 .....	127
<표 3.1.25> 수리모형시험 개수로의 제원 .....	129
<표 3.1.26> 최대유속(수리모형시험, 기본수로) .....	131

<표 3.1.27> 최대수심(수리모형시험, 기본수로) .....	131
<표 3.1.28> 최대유속(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 5cm) .....	132
<표 3.1.29> 최대수심(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 5cm) .....	132
<표 3.1.30> 최대유속(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 7cm) .....	132
<표 3.1.31> 최대수심(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 7cm) .....	133
<표 3.1.32> 최대유속(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 10cm) .....	133
<표 3.1.33> 최대수심(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 10cm) .....	133
<표 3.1.34> 수질정화체 모형의 부피변화에 따른 유속 변화 .....	134
<표 3.1.35> 수질정화체 모형의 부피 변화에 따른 수심 변화 .....	134
<표 3.1.36> 최대유속(수리모형시험, 원기둥, 반지름 2.8cm) .....	135
<표 3.1.37> 최대수심(수리모형시험, 원기둥, 반지름 2.8cm) .....	135
<표 3.1.38> 최대유속(수리모형시험, 원기둥, 반지름 4.0cm) .....	136
<표 3.1.39> 최대수심(수리모형시험, 원기둥, 반지름 4.0cm) .....	136
<표 3.1.40> 최대유속(수리모형시험, 원기둥, 반지름 5.6cm) .....	137
<표 3.1.41> 최대수심(수리모형시험, 원기둥, 반지름 5.6cm) .....	137
<표 3.1.42> 최대유속(수리모형시험, 반구, 반지름 3.9cm) .....	137
<표 3.1.43> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 3.9cm) .....	138
<표 3.1.44> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 5.5cm) .....	138
<표 3.1.45> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 5.5cm) .....	139
<표 3.1.46> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 7.5cm) .....	139
<표 3.1.47> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 7.5cm) .....	139
<표 3.1.48> 수질정화체 모형의 형태에 따른 유속 변화 .....	140
<표 3.1.49> 수질정화체 모형의 형태에 따른 수심 변화 .....	141
<표 3.1.50> 최대유속(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 1m) .....	142
<표 3.1.51> 최대수심(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 1m) .....	142
<표 3.1.52> 최대유속(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 2m) .....	143
<표 3.1.53> 최대수심(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 2m) .....	143
<표 3.1.54> 최대유속(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 3m) .....	143
<표 3.1.55> 최대수심(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 3m) .....	144
<표 3.1.56> 최대유속(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 1m) .....	145
<표 3.1.57> 최대수심(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 1m) .....	146
<표 3.1.58> 최대유속(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 2m) .....	146
<표 3.1.59> 최대수심(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 2m) .....	146
<표 3.1.60> 최대유속(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 3m) .....	147
<표 3.1.61> 최대수심(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 3m) .....	147
<표 3.1.62> 최대유속(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 1m) .....	148

<표 3.1.63> 최대수심(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 1m) .....	148
<표 3.1.64> 최대유속(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 2m) .....	149
<표 3.1.65> 최대수심(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 2m) .....	149
<표 3.1.66> 최대유속(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 3m) .....	150
<표 3.1.67> 최대수심(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 3m) .....	150
<표 3.1.68> 수질정화체 모형의 배치에 따른 유속 변화 .....	150
<표 3.1.69> 수질정화체 모형의 배치에 따른 수심 변화 .....	151
<표 3.1.70> 각 경우에 따른 수리모형시험장치에서의 수질변화 .....	153
<표 3.1.71> 조도계수 변화에 따른 사면부 유속과 소류력 .....	157
<표 3.1.72> 수질정화체 설치방법에 따른 실측값과 모의 값의 비교 .....	158
<표 3.1.73> 설치별 사면부 최대유속과 소류력 .....	158
<표 3.1.74> 수질정화체 설치에 따른 유속 비교 .....	159
<표 3.1.75> 허용유속 기준 비교 값 .....	160
<표 3.1.76> 허용유속 기준 비교 값 .....	160
<표 3.1.77> 2007년 7월 홍수량에 대한 모의 .....	161
<표 3.1.78> 수질정화체 부설 배수로의 수온, pH, EC, DO .....	162
<표 3.1.79> 수질정화체 부설 배수로의 SS, COD, BOD .....	166
<표 3.1.80> 수질정화체 부설 배수로의 TN, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N .....	170
<표 3.1.81> 수질정화체 부설 배수로의 TP, PO <sub>4</sub> -P .....	173
<표 3.2.1> 소일 콘크리트블록 배합표 .....	178
<표 3.2.2> 초기강도(0 사이클) 압축강도 측정 결과 .....	183
<표 3.2.3> 흡수율 측정 결과 .....	184
<표 3.2.4> pH값 측정 결과 .....	184
<표 3.2.5> 30사이클 후 압축강도 측정 결과 .....	186
<표 3.2.6> 60 사이클 후 압축강도 측정 결과 .....	187
<표 3.2.7> 90 사이클 후 압축강도 측정 결과 .....	188
<표 3.2.8> 수질정화수로관 부설 배수로의 수온, pH, EC, DO .....	206
<표 3.2.9> 수질정화수로관 부설 배수로의 SS, COD, BOD .....	209
<표 3.2.10> 수질정화수로관 부설 배수로의 TN, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N .....	212
<표 3.2.11> 수질정화수로관 부설 배수로의 TP, PO <sub>4</sub> -P .....	216
<표 3.3.1> 농지배수의 수질특성 .....	218
<표 3.3.2> SFS습지에 이용되는 대표적인 여재의 특징 .....	224
<표 3.3.3> SFS습지 구성요소의 열전달율 .....	228
<표 3.3.4> 캘리포니아주 Santee의 식재구와 무식재구 여재습지의 처리성능 비교 .....	234
<표 3.3.5> 습지에 출현한 식물에 의해 공급된 최대산소량 .....	238
<표 3.3.6> 수질측정 항목 및 분석방법 .....	249

<표 3.3.7> 인공습지 유입수 및 유출수의 수온, pH, EC, DO .....	251
<표 3.3.8> 인공습지 유입수 및 유출수의 SS, BOD, COD .....	256
<표 3.3.9> 인공습지 유입수 및 유출수의 TN, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N .....	261
<표 3.3.10> 인공습지 유입수 및 유출수의 TP, PO <sub>4</sub> -P .....	267



## 그림차례

<그림 2.1.1> 토찌기현 니시기누가와 지구의 환경배려 시공사례 .....	39
<그림 2.1.2> 간선 배수로 활용사례 (사진과 도면) .....	40
<그림 2.1.3> 어도 , 낙차공의 활용사례 (사진과 도면) .....	41
<그림 2.1.4> 간선용수로의 활용사례 (사진과 도면) .....	42
<그림 2.1.5> 미꾸라지 이동용 수로, 어도의 활용사례 (사진과 도면) .....	43
<그림 2.1.6> 여울과 사주를 만들어 적용한 사례 (사진과 도면) .....	43
<그림 2.1.7> 생태이동통로 (A,B) .....	44
<그림 2.1.8> 수로 덮개 .....	44
<그림 2.1.9> 어류와 양서류의 네트워크구조에 적당한 공법 예 .....	45
<그림 2.1.10> V형 용수로의 설치 .....	46
<그림 2.1.11> 급류 낙차공의 설치 장면과 도면 .....	46
<그림 2.1.12> 여주 구양지구 용수로 .....	47
<그림 2.1.13> 여주 용은지구 생태이동 통로 .....	47
<그림 2.1.14> 생태이동을 위한 수로복개 사례 .....	48
<그림 2.1.15> 효지지구 생태이동통로 .....	48
<그림 2.1.16> 수로바닥에 저류홈 및 탈출로에 식생이 활착한 모습 .....	49
<그림 2.1.17> 현장타설로 시공한 생태이동통로 .....	49
<그림 2.2.1> 인공습지의 분류 및 종류 .....	53
<그림 2.2.2> 자유수면흐름형 인공습지 하수처리시스템 .....	54
<그림 2.2.3> 지하흐름형 인공습지의 흐름방식에 따른 적용방법 .....	55
<그림 3.1.1> 식물에 의한 자연정화 원리 개념도 .....	59
<그림 3.1.2> 수질정화 재료의 칼럼 흡착실험 .....	63
<그림 3.1.3> 시간에 따른 여재별 $\text{NH}_4^+$ 흡착농도 변화 .....	64
<그림 3.1.4> 시간에 따른 여재별 $\text{PO}_4^{3-}$ 흡착농도 변화 .....	67
<그림 3.1.5> 시간에 따른 여재별 $\text{NO}_3^-$ 흡착농도 변화 .....	68
<그림 3.1.6> 혼합 1의 이온별 흡착율 .....	68
<그림 3.1.7> 혼합 2의 이온별 흡착율 .....	69
<그림 3.1.8> HWA의 이온별 흡착율 .....	70
<그림 3.1.9> 제올라이트의 이온별 흡착율 .....	70
<그림 3.1.10> HDB의 이온별 흡착율 .....	71
<그림 3.1.11> NOGS의 이온별 흡착율 .....	71
<그림 3.1.12> NOGM의 이온별 흡착율 .....	72
<그림 3.1.13> HUG의 이온별 흡착율 .....	72

<그림 3.1.14> 수질정화모형실험 .....	74
<그림 3.1.15> 모형실험에서 BOD농도 변화 .....	74
<그림 3.1.16> 모형실험에서 CODcr농도 변화 .....	74
<그림3.1.17> 모형실험에서 TSS농도 변화 .....	75
<그림3.1.18> 모형실험에서 TN농도 변화 .....	76
<그림3.1.19> 모형실험에서 TP농도 변화 .....	76
<그림 3.1.20> 수질정화체 시편과 제원도 .....	83
<그림 3.1.21> 여재 및 수질정화체 .....	86
<그림 3.1.22> FAVOR 방법의 개념도 .....	92
<그림 3.1.23> FVM의 개념도 .....	93
<그림 3.1.24> Free Surface and Not a Free Surface .....	94
<그림 3.1.25> VOF의 개념도 .....	94
<그림 3.1.26> 솔리드 모델링과 FLOW-3D 지형자료 .....	99
<그림 3.1.27> 유속분포(수치해석, 기본수로) .....	100
<그림 3.1.28> 수심분포(수치해석, 기본수로) .....	100
<그림 3.1.29> 유속분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 50cm) .....	102
<그림 3.1.30> 수심분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 50cm) .....	102
<그림 3.1.31> 유속분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 70cm) .....	103
<그림 3.1.32> 수심분포(수치해석, 정육면체 한 변길이 70cm) .....	103
<그림 3.1.33> 유속분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 100cm) .....	104
<그림 3.1.34> 수심분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 100cm) .....	105
<그림 3.1.35> 유속분포(수치해석, 원기둥, 반지름 28cm) .....	107
<그림 3.1.36> 수심분포(수치해석, 원기둥, 반지름 28cm) .....	107
<그림 3.1.37> 유속분포(수치해석, 원기둥, 반지름 40cm) .....	108
<그림 3.1.38> 수심분포(수치해석, 원기둥, 반지름 40cm) .....	108
<그림 3.1.39> 유속분포(수치해석, 원기둥, 반지름 56cm) .....	109
<그림 3.1.40> 수심분포(수치해석, 원기둥, 반지름 56cm) .....	109
<그림 3.1.41> 유속분포(수치해석, 반구, 반지름 39cm) .....	110
<그림 3.1.42> 수심분포(수치해석, 반구, 반지름 39cm) .....	111
<그림 3.1.43> 유속분포(수치해석, 반구, 반지름 55cm) .....	111
<그림 3.1.44> 수심분포(수치해석, 반구, 반지름 55cm) .....	112
<그림 3.1.45> 유속분포(수치해석, 반구, 반지름 75cm) .....	113
<그림 3.1.46> 수심분포(수치해석, 반구, 반지름 75cm) .....	113
<그림 3.1.47> 유속분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 10m) .....	115
<그림 3.1.48> 수심분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 10m) .....	116
<그림 3.1.49> 유속분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 20m) .....	116

<그림 3.1.50> 수심분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 20m) .....	117
<그림 3.1.51> 유속분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 30m) .....	117
<그림 3.1.52> 수심분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 30m) .....	118
<그림 3.1.53> 유속분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 10m) .....	119
<그림 3.1.54> 수심분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 10m) .....	119
<그림 3.1.55> 유속분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 20m) .....	120
<그림 3.1.56> 수심분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 20m) .....	120
<그림 3.1.57> 유속분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 30m) .....	121
<그림 3.1.58> 수심분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 30m) .....	121
<그림 3.1.59> 유속분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 10m) .....	122
<그림 3.1.60> 수심분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 10m) .....	123
<그림 3.1.61> 유속분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 20m) .....	123
<그림 3.1.62> 수심분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 20m) .....	124
<그림 3.1.63> 유속분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 30m) .....	124
<그림 3.1.64> 수심분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 30m) .....	125
<그림 3.1.65> 시험수로 제원 .....	127
<그림 3.1.66> 수리모형시험 개수로의 입면도 및 측면도 .....	129
<그림 3.1.67> 수리모형시험 개수로 .....	130
<그림 3.1.68> 유속측정(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 5cm) .....	130
<그림 3.1.69> 수리모형시험(일렬형 배치, 간격 1m) .....	141
<그림 3.1.70> 수리모형시험(복합형 배치, 간격 1m) .....	145
<그림 3.1.71> 수리모형시험(측면형 배치, 간격 1m) .....	148
<그림 3.1.72> 수질정화체가 설치된 수리모형시험장치의 수질변화 .....	152
<그림 3.1.73> 대상지구 .....	154
<그림 3.1.74> 대상지구 현장의 수질정화체 배치도 .....	155
<그림 3.1.75> 수질정화체의 농수로 적용 모습 .....	156
<그림 3.1.76> 농수로 측면 일렬형 배치 모습 .....	156
<그림 3.1.77> 농수로 측면 복합형 배치 모습 .....	156
<그림 3.1.78> 수질정화체 부설 배수로의 수온 변화 .....	162
<그림 3.1.79> 수질정화체 부설 배수로의 pH 변화 .....	163
<그림 3.1.80> 수질정화체 부설 배수로의 EC 변화 .....	165
<그림 3.1.81> 수질정화체 부설 배수로의 DO 변화 .....	165
<그림 3.1.82> 수질정화체 부설 배수로의 SS 변화 .....	167
<그림 3.1.83> 수질정화체 부설 배수로의 COD 변화 .....	168
<그림 3.1.84> 수질정화체 부설 배수로의 BOD 변화 .....	169
<그림 3.1.85> 수질정화체 부설 배수로의 TN 변화 .....	171

<그림 3.1.86> 수질정화체 부설 배수로의 NH <sub>4</sub> -N 변화 .....	171
<그림 3.1.87> 수질정화체 부설 배수로의 NO <sub>2</sub> -N 변화 .....	172
<그림 3.1.88> 수질정화체 부설 배수로의 NO <sub>3</sub> -N 변화 .....	172
<그림 3.1.89> 수질정화체 부설 배수로의 TP 변화 .....	174
<그림 3.1.90> 수질정화체 부설 배수로의 PO <sub>4</sub> -P 변화 .....	175
<그림 3.2.1> 압축강도 시편과 동결융해 시편 .....	179
<그림 3.2.2> 흡수율과 pH측정 시편 .....	179
<그림 3.2.3> 압축강도 시험 .....	180
<그림 3.2.4> pH 시편, 측정장면과 측정기 .....	181
<그림 3.2.5> 동결융해 시험 .....	182
<그림 3.2.6> pH값의 시간에 따른 변화 .....	185
<그림 3.2.7> 동결융해 사이클에 따른 압축강도 변화 .....	188
<그림 3.2.8> 용배수로 겸용 수질정화수로관의 일반형, 경관형 제품 모식도 .....	191
<그림 3.2.9> 수질정화수로관의 일반형, 경관형 제품 결합 설치 가상도 .....	192
<그림 3.2.10> 용수로용 수질정화수로관 제품 모식도 .....	192
<그림 3.2.11> 배수로용 수질정화수로관 제품 모식도 .....	193
<그림 3.2.12> 환경생태수로관 제품의 도면 및 시제품 .....	193
<그림 3.2.13> 수질정화 식재포트 제품 및 수로내 적용 이미지 .....	194
<그림 3.2.14> 시험 대상지역 유역도 및 대상 수로 .....	195
<그림 3.2.15> 시험수로의 단면검토 .....	196
<그림 3.2.16> 시험수로의 토공 및 기초 타설 .....	197
<그림 3.2.17> 수질정화수로관 본체 설치 .....	197
<그림 3.2.18> 옆판 및 밑판 설치 .....	197
<그림 3.2.19> 수질정화체 설치 및 식재부 식재 .....	198
<그림 3.2.20> 환경생태보호형수로관 시공 .....	198
<그림 3.2.21> 수질정화 수로관 제품의 시험시공 현장 모습 .....	200
<그림 3.2.22> 수질정화 수로관 제품 시험시공 현장의 시기별 변화 모습 .....	202
<그림 3.2.23> 환경생태수로관의 저류부에서 관찰된 양서류와 파충류 .....	203
<그림 3.2.24> 환경생태수로관 적용 현장의 시기별 모습 .....	204
<그림 3.2.25> 환경생태수로관의 어류의 피난처 기능 비교 모습 .....	205
<그림 3.2.26> 수질정화수로관 부설 배수로의 수온 변화 .....	206
<그림 3.2.27> 수질정화수로관 부설 배수로의 pH 변화 .....	207
<그림 3.2.28> 수질정화수로관 부설 배수로의 EC 변화 .....	208
<그림 3.2.29> 수질정화수로관 부설 배수로의 DO 변화 .....	208
<그림 3.2.30> 수질정화수로관 부설 배수로의 SS 변화 .....	210
<그림 3.2.31> 수질정화수로관 부설 배수로의 COD 변화 .....	210

<그림 3.2.32> 수질정화수로관 부설 배수로의 BOD 변화 .....	211
<그림 3.2.33> 수질정화수로관 부설 배수로의 TN 변화 .....	212
<그림 3.2.34> 수질정화수로관 부설 배수로의 NH <sub>4</sub> -N 변화 .....	213
<그림 3.2.35> 수질정화수로관 부설 배수로의 NO <sub>2</sub> -N 변화 .....	214
<그림 3.2.36> 수질정화수로관 부설 배수로의 NO <sub>3</sub> -N 변화 .....	215
<그림 3.2.37> 수질정화수로관 부설 배수로의 TP 변화 .....	216
<그림 3.2.38> 수질정화수로관 부설 배수로의 PO <sub>4</sub> -P 변화 .....	217
<그림 3.3.1> 유기물부하에 대한 BOD제거율 .....	232
<그림 3.3.2> SFS습지에서 처리능력의 예측치와 실측치 .....	233
<그림 3.3.3> 습지에 의한 SS제거율과 수량부하의 관계 .....	235
<그림 3.3.4> 기존의 지하흐름형 인공습지 개요도 .....	243
<그림 3.3.5> 인공습지의 시스템 분석 .....	245
<그림 3.3.6> 수조와 물의 상호작용 .....	246
<그림 3.3.7> 계단형 상하흐름 인공습지 모식도 .....	247
<그림 3.3.8> 고효율 인공습지 시험연구시설 설치지역 및 위치 .....	247
<그림 3.3.9> 계단형 상하흐름 인공습지 실험시설 개요도 및 전경 .....	248
<그림 3.3.10> 인공습지 유입수 및 유출수의 수온 .....	252
<그림 3.3.11> 인공습지 유입수 및 유출수의 pH .....	252
<그림 3.3.12> 인공습지 유입수 및 유출수의 EC .....	254
<그림 3.3.13> 인공습지 유입수 및 유출수의 DO .....	254
<그림 3.3.14> 인공습지 유입수 및 유출수의 SS .....	257
<그림 3.3.15> 인공습지 유입수 및 유출수의 BOD .....	258
<그림 3.3.16> 인공습지 유입수 및 유출수의 COD .....	259
<그림 3.3.17> 인공습지 유입수 및 유출수의 TN .....	262
<그림 3.3.18> 인공습지 유입수 및 유출수의 NH <sub>4</sub> -N .....	263
<그림 3.3.19> 인공습지 유입수 및 유출수의 NO <sub>2</sub> -N .....	264
<그림 3.3.20> 인공습지 유입수 및 유출수의 NO <sub>3</sub> -N .....	265
<그림 3.3.21> 인공습지 유입수 및 유출수의 TP .....	267
<그림 3.3.22> 인공습지 유입수 및 유출수의 PO <sub>4</sub> -P .....	268





## 제 1 장 연구개발과제의 개요

### 제 1 절 연구개발의 목적

본 연구에서는 농촌유역의 수질개선과 농업용수 수질관리를 위한 농업용 수로에 적용 가능한 친환경적 수질정화 재료를 조사하고, 이를 이용한 농수로 수질정화 기술 및 생태적인 서식처와 생태통로 역할을 할 수 있는 제품을 개발하고, 농지에서 배출되는 오염물질의 저감효율이 뛰어난 고효율 자연정화공법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 환경공학적인 기술 외에도 수리수문학, 생태공학, 모니터링 및 효율성분석 등의 종합적인 접근방법을 통하여 농촌유역의 수질정화와 생태계를 고려한 친환경적인 개선을 목적으로 한다.

### 제 2 절 연구개발의 필요성

농업분야에 있어서 수자원 관리는 과거 생산 기반 조성을 목적으로 용수, 배수 등을 관리해왔다. 하지만 현재에 있어서 농업용수의 관리는 종합적인 관리가 요구되고 있다. 특히 근래에는 이상기후 현상으로 가뭄일수가 증가하고 반면에 잦은 국지성 강우가 발생하여 제방이 유실되는 등의 문제가 야기되고 있는 실정이다. 그러므로 수자원의 효율적인 확보와 관리가 중요하며, 농업용수의 수자원의 관리도 예외는 아니다. 농업용수 관리는 양적인 측면의 중요성과 더불어 질적인 측면이 강조되고 있는데, 농업분야에서도 국제경쟁력을 확보해야 하는 경제상황을 고려한 우수농산물을 생산하기 위해서는 질 높은 농업용수의 확보와 관리는 매우 중요하다. 그러므로 본 연구개발은 다음과 같은 다양한 측면에서 필요성을 갖는다.

#### 1. 기술적 측면

- 가. 농촌지역 수질개선에 있어서 농업 용·배수로를 적극 활용한 수질개선기술을 개발·도입하는 것이 효율적이다.
- 나. 농촌유역의 비점오염원에 의한 수질오염 방지를 위한 우리나라 강우특성에 적합한 수질개선공법 개발 필요하다.
- 다. 유지관리가 간편한 수질개선 기술인 인공습지는 긍정적 대안이나 많은 부지가 필요하며



식물의 유지관리 어려움이 있기 때문에 상대적으로 규모가 작은 고효율의 인공습지 조성 기법 개발이 필요하다.

## 2. 경제·산업적 측면

- 가. 오염총량제 실시로 비점오염물질 배출이 많은 농경지를 포함하는 농촌지역에 적합한 저비용 수질개선공법의 개발 및 보급 시급하다.
- 나. 우수농산물관리제도 (GAP)도입으로 농업용수의 수질이 농촌소득과 직결되므로 농업용수가 수질기준치를 만족하도록 관리하기 위한 기술개발필요하다.

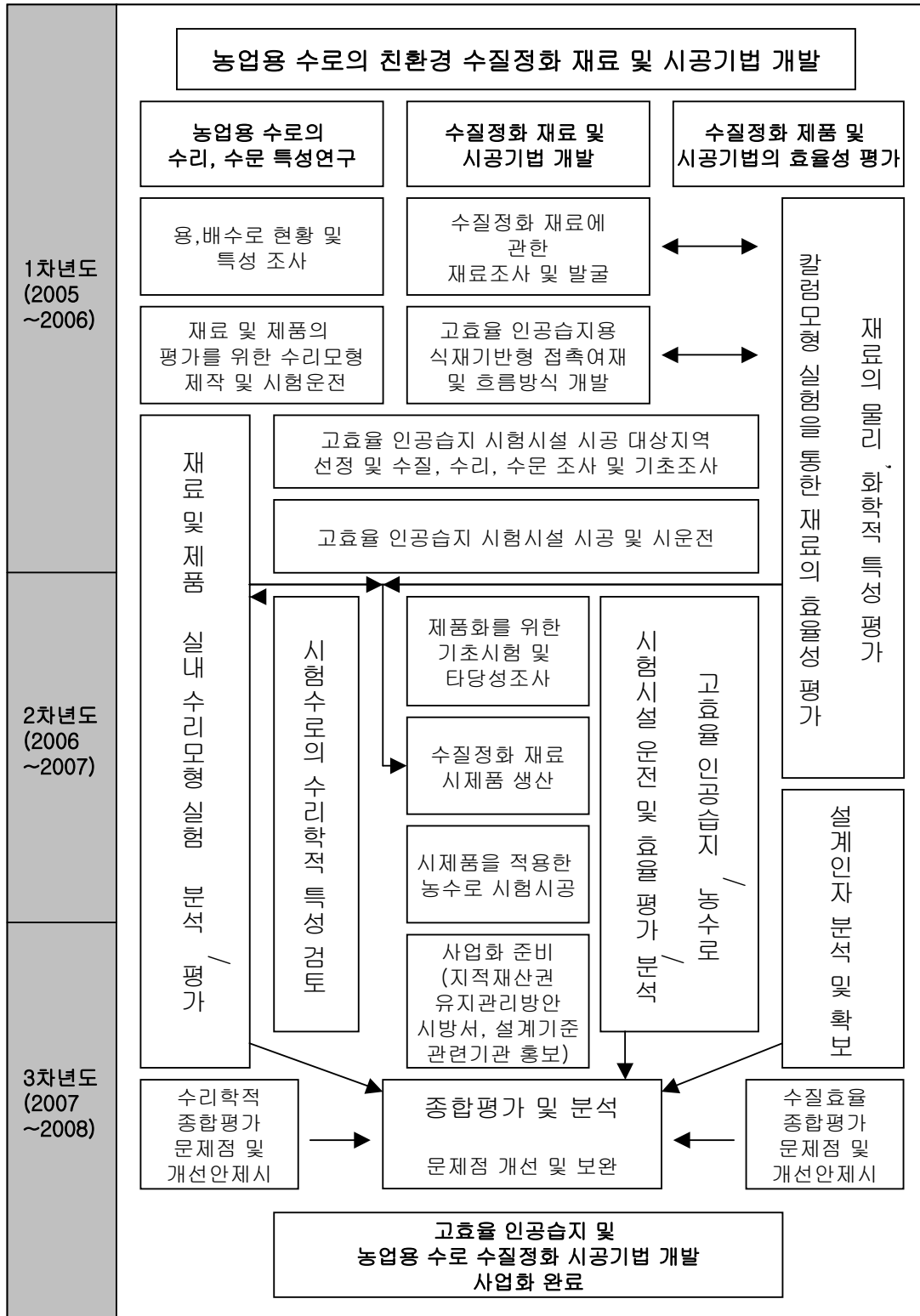
## 3. 사회·문화적 측면

- 가. 농촌의 환경친화적 수변공간 조성과 어메니티 향상을 위한 수량의 확보, 수질정화가 필요하며, 친환경적 정비시 수질정화 공법의 도입이 필요하다.
- 나. 용배수로 총연장의 약 32%를 차지하는 콘크리트 수로는 수질정화 기능이 미흡하고, 어류의 이동 및 피난이 어려우므로 친환경적 정비기법 개발 및 보급 필요하다.
- 다. 우리나라의 농업용수량은 전체 수자원의 51%를 차지하고 있어, 농경지 유입과 유출에 따른 오염부하량이 증가할 것으로 판단된다. 또한, 수질오염부하에서 비점오염원이 차지하는 비중이 '98년도에 282톤/일에서 '20년도에는381톤/일로 급속히 증가될 것으로 예상되므로 수질개선을 위한 관리 시급하다.
- 라. 도시·도로·농경지 등의 지표면에 축적된 오염물질이 강우 시 빗물과 함께 하천으로 유입되는 비점오염은 전체 수계 부하의 22~37% 정도 차지하므로 특히, 초기강우의 수질 개선에 대한 필요성 증대되고 있다.
- 마 4대강수계 비점오염물질 배출부하 중 농경지가 11.4%를 차지하고 있어 4대강 수질관리를 위해서는 농업유역 배출수의 수질관리가 대단히 중요하다.

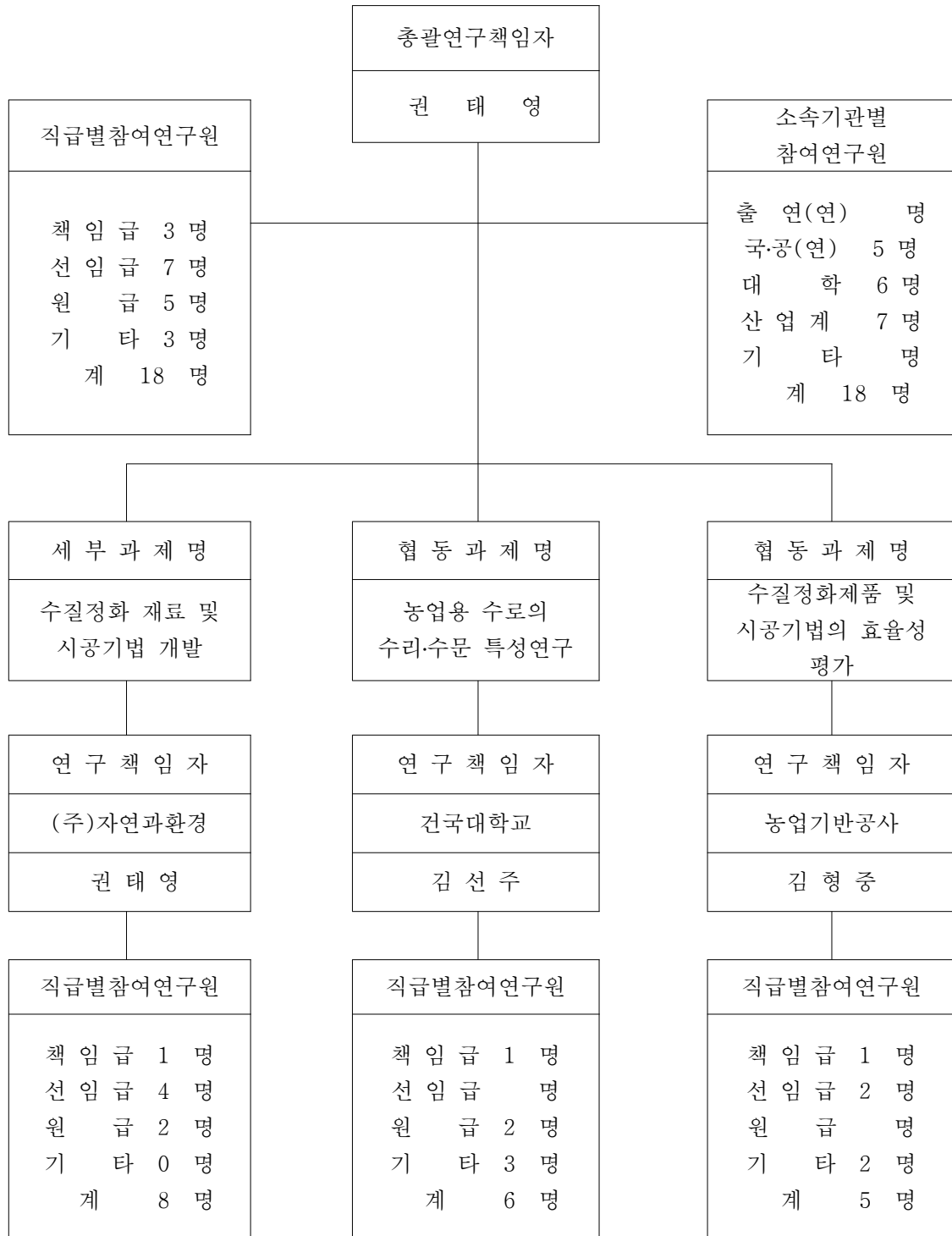
### 제 3 절 연구개발의 내용 및 범위

구 분	주요 개발내용 및 범위
<p>1단계 (기초연구) (2005~2006)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수질정화 재료에 관련된 국내·외 자료의 수집 및 문헌조사</li> <li>○ 모형실험을 통한 수질정화재료의 수질정화효율성 분석</li> <li>○ 영양물질 흡착능력이 우수한 수질정화 재료 개발</li> <li>○ 경제적인 수질정화 재료의 조사 및 개발</li> <li>○ 고효율 인공습지용 식재기반형 접촉여재 개발</li> <li>○ 오염하천 및 농지배수 정화를 위한 고효율 인공습지 시험정화시설 시공</li> </ul>
<p>2단계 (응용연구 및 시제품제작) (2006~2007)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고효율 인공습지 시험정화 시설의 운전 및 모니터링</li> <li>○ 수질정화 재료에 관한 성형화 적용시험</li> <li>○ 재료의 성형화 및 제품화에 관한 타당성 조사</li> <li>○ 수질정화 재료를 이용한 성형화 및 시제품 생산</li> <li>○ 수질정화 제품을 적용한 농업용 수로 시험시공</li> </ul>
<p>3단계 (사업화) (2007~2008)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 사업화에 필요한 충분한 수질정화효율 평가 및 자료 확보</li> <li>○ 평가에 의한 제품 및 시공기법 보완 및 개선</li> <li>○ 사업화를 위한 지적재산권 및 기술인증 출원</li> <li>○ 수질정화 제품의 경제성 평가</li> <li>○ 유지관리 지침, 시방서 등의 사업화 준비</li> <li>○ 전문학술지 및 학회 등의 성과홍보</li> </ul>

## 제 4 절 기술개발 추진 체계



## 제 5 절 연구원 편성표





## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 농업용 수로의 친환경 공법 현황

과거의 수로정비 공법은 수로의 치수기능만을 고려하여 제방 비탈면의 경사에 맞추어 블록쌓기, 블록쌓기 등 견고한 콘크리트 재료를 이용하여 시공하는 경우를 많이 볼 수 있었지만, 최근에는 치수목적은 달성하면서 생태계와 경관을 동시에 고려하는 친환경적 공법으로 시공하는 사례를 많이 볼 수 있다.

선진국의 경우 70년대부터 이러한 자연형 하천정비에 많은 연구가 있어 왔으며, ‘근자연형 하천공법’이라는 이름으로 실용화되고 있다. 독일의 농촌지역에서 많이 시도하는 ‘자연화하는 하천공법’은 직선형의 하천 진로를 사행으로 바꾸는 것 외에 자연에 가까운 생태·형태학상의 구조라는 개념을 추가한 것이다. 이러한 독일 외에도 미국, 스위스, 일본 등의 나라에서는 농촌지역의 물 순환, 생태계 등 유역환경의 회복·보전기술통진을 주요시책으로 하고 친환경 공법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

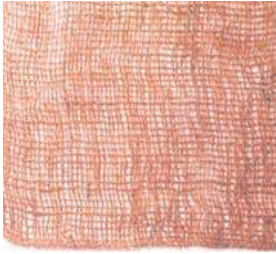


우리나라의 경우는 수로 정비에 있어서 친환경적 개념이 도입되기 시작한 것은 1990년 중반이며, 대부분의 경우 종합적인 정비가 아니라 시범구간을 정하거나 혹은 새로운 친환경 공법을 특정구간에 적용하는 정도의 수준이다.

친환경 수로정비 공법은 수로 및 유역의 특성, 기능 및 설치목적, 생태계, 경제성, 시공성 등을 고려하여 계획·시공되어야 하며, 선진국과 같은 수준을 확립하기 위해서는 친환경 공법에 필요한 재료의 특성을 충분히 파악 할 필요가 있다. 친환경 공법에 사용되는 재료의 종류별 특성은 <표 2.1.1>~<표 2.1.5>에 나타내었다.

<표 2.1.1> 식생 기반재를 이용한 공법의 재료


형 태	종 류	특 징
롤 형		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자연형 호안 정비는 수변경계부의 종다양성을 증가</li> <li>- 식물의 활착력이 좋아져 식생 안정</li> <li>- 주변과 어울리는 경관 형성.</li> <li>- 자연소재를 사용하여 2차오염이 없다.</li> <li>- 미생물보유량이 커서 오염정화능력이 높다.</li> </ul>
	정화용 Coir Roll	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호안 유수의 충격흡수, 사면보호 및 식물뿌리 고정</li> <li>- 공극에 의한 유수의 여과 및 정수</li> <li>- 저수호안 적용시 사면 보호 및 수변식물의 조기녹화</li> </ul>
	야자섬유두루마리	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호안 유수의 충격흡수, 사면보호 및 식물뿌리 고정</li> <li>- 공극에 의한 유수의 여과 및 정수</li> <li>- 저수호안 적용시 사면 보호 및 수변식물의 조기녹화</li> <li>- 롤상부 식재 적용 용이</li> <li>- pot로 재배된 수생식물(갈대등)을 구멍에 삽입하여 사용</li> </ul>
포트Coir Roll		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호안 유수의 충격흡수, 사면보호 및 식물뿌리 고정</li> <li>- 공극에 의한 유수의 여과 및 정수</li> <li>- 저수호안 적용시 사면 보호 및 수변식물의 조기녹화</li> <li>- 롤과 식물이 일체화함으로써 활착률 증대</li> </ul>	
식생롤		

<표 2.1.1> 식생 기반재를 이용한 공법의 재료(계속)

형 태	종 류	특 징
네트형	 <p>जूट नेट(황마망)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 하천 주변의 식물을 위해 식생지지대로 사용 (코이어네트보다 기능강화)</li> <li>- 호안블럭 설치시 토사유출방지를 위해 설치</li> <li>- 수질정화를 위한 필터기능</li> <li>- 합성섬유 부직포 대응</li> </ul>
	 <p>코이어네트(코코넛섬유망)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 범면보호 및 녹화자재</li> <li>- 토사의 세굴 및 유실방지</li> <li>- 안정성이 크게 요구되는 가파른 절개지(범면) 공사에 사용</li> <li>- 사면유실 위험이 있는 하천주변(식생지지대) 공사에 사용</li> <li>- 일반 합성섬유네트 보다 인장강도가 월등히 높음</li> </ul>
	 <p>갈대매트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 하천변 조기 녹화</li> <li>- 호안의 침식 및 세굴방지</li> <li>- 귀화식물의 침입억제</li> </ul>



<표 2.1.2> 목재를 이용한 공법의 부재료

형 태	종 류	특 징
혼 합 재 료		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저수지 주변을 자연학습장 등으로 활용시 데크, 전망대 관찰로, 산책로 등을 나무로 지지 할 때 사용</li> <li>- 수변경계용으로 사용하여 호안의 침식을 보호</li> <li>- 환경친화적인 방부처리로 목재의 수명연장</li> </ul>
	방부목	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 토사를 고정시켜 호안 사면의 붕괴를 방지한다.</li> <li>- 나무의 증발산으로 호안의 함수량을 감소시킨다.</li> <li>- 뿌리의 성장으로 호안을 보강한다.</li> <li>- 호안 부의 조도를 증가시켜 호안 부의 유속을 저하시킨다.</li> <li>- 유속의 지하로 유사의 퇴적을 유도한다.</li> </ul>
	버드나무 생말뚝	

<표 2.1.3> 목재를 이용한 공법

공법	공법 사례	특 징
목재계 공법		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 급경사면에 적용 가능하다.</li> <li>- 유수에 의한 침식 및 세굴 방지로 수층부 사면안정에 효과적이다.</li> <li>- 돌 틈 사이로 물이 통과하면서 접촉산화작용을 함으로써 수질정화, 여과 효과가 뛰어나다.</li> <li>- 방틀 내의 공극은 어류의 서식처를 제공한다.</li> </ul>
	나무방틀과 식생혼용 공법	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시공이 간편하다.</li> <li>- 급경사면에 적용 가능하다.</li> <li>- 돌 틈에 토사가 퇴적되면서 자연적으로 초본류가 자라서 수려한 수변공간을 창출한다.</li> <li>- 시공이 간편하며, 부분보수가 가능하다.</li> <li>- 사석의 공극은 어류의 서식처를 제공한다.</li> </ul>
	삼각방틀과 사석혼용 공법	

<표 2.1.4> 다공성 이용한 블록

공 법	재료에 따른 종류	특 징
블록계 공법		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전체적인 사면에 식생의 도입 가능</li> <li>- 공극의 크기가 작아 도입식생에 한계가 있음</li> <li>- 식생이 정착되지 않았을 때 건조에 대한 피해가 큼</li> <li>- 식생의 정착과 배수기능 확보로 사면의 안정성 확보</li> </ul>
	다공성 식생블록	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전체적인 사면에 식생의 도입 가능</li> <li>- 공극의 크기를 키워 도입식생의 폭을 넓힘</li> <li>- 공극 사이의 충전율을 높여 건조피해를 감소</li> <li>- 식생의 정착과 배수기능 확보로 사면의 안정성 확보</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 물고기와 수서생물의 서식공간 확보</li> <li>- 전체의 일체화를 통한 안정성 확보</li> <li>- 배수성의 확보로 사면의 안정성 확보</li> </ul>
다공성 어소블록	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 뿌리가 큰 목본류의 도입 가능</li> <li>- 전체의 일체화를 통한 안정성 확보</li> <li>- 배수성의 확보로 사면의 안정성 확보</li> </ul>	
다공성 옹벽블록		

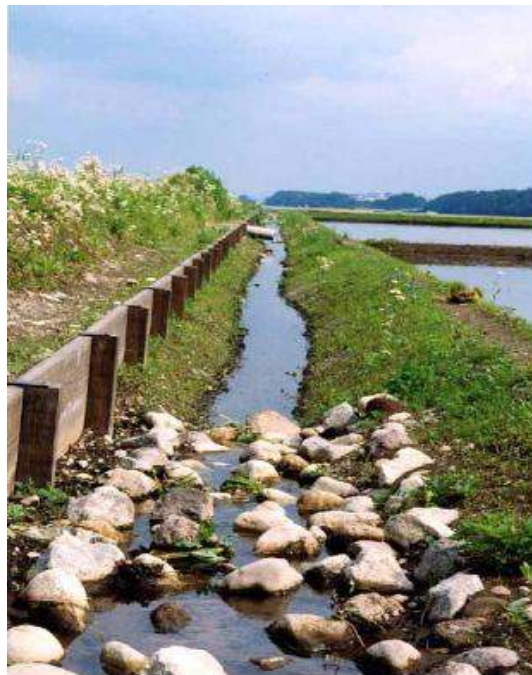
<표 2.1.5> 바구니를 이용한 공법

공 법	재료에 따른 분류	특 징
바구니 공법		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수리적인 안정성이 우수</li> <li>- 다공성 재료로 생태계적인 측면에서도 콘크리트 호안보다 유리</li> <li>- 하천선형의 변화가 심하고 호안경사가 1 : 1 정도로 비교적 급한 곳에 적용</li> <li>- 침하나 세굴에 강하며 굴요성이 있음</li> </ul>
	사각틀 돌망태	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호안 유수의 충격흡수, 사면보호 및 식물뿌리 고정</li> <li>- 공극에 의한 유수의 여과 및 정수</li> <li>- 저수호안 적용 시 사면 보호 및 수변식물의 조기 녹화</li> <li>- charcoal에 의한 수질정화효과</li> </ul>
	식생틀(charcoal 롤)	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 블럭 간 조립이 Key로 연결되어 구조적으로 안정함</li> <li>- 수로에 인접하여 석축 및 옹벽 대응 가능</li> <li>- 하폭과 고수부 폭이 좁은 상류역에 적합하며 제방 사면의 침식방지 효과가 뛰어남</li> <li>- 블럭의 기단부는 어소블럭기능, 상단부는 반딧불이 및 수서곤충의 서식공간으로 활용</li> </ul>
	콘크리트 바구니 블록	

## 1. 국외사례

### 가. 니시기누가와(西鬼怒川) 지구

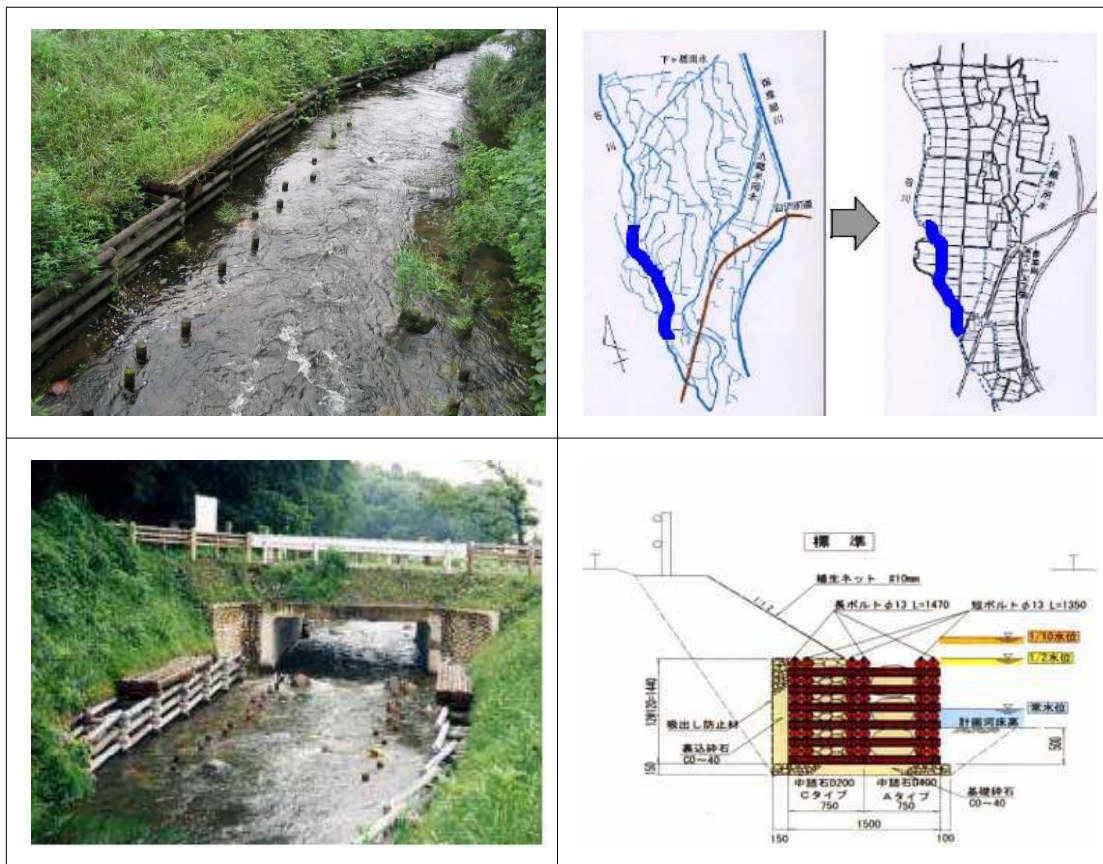
토치기현(栃木縣)에 있어서도 환경에 대한 배려의 실시와 함께 농업 농촌정비사업에 맞추어 지역주민과의 연대와 협동에 의해 환경배려 사업을 실시하고 있다. 그 중 대표적으로 수로와 용·배수로에 다양한 생태계 배려 공법을 채용하고 있는 지구이다. 토치기현(栃木縣)가와찌마찌(河内町)에 위치한 니시기누가와 지구는 포장정비사업에 지역의 자연환경을 유지하고 싶다는 지역의 강한 의지가 표명되었으며, 여기에 현영 농촌 자연환경 정비사업을 도입하고 학식경험자로 부터의 어드바이스 그룹과 지역주민에 의한 워킹그룹 그리고 행정기관이 하나가 되어 사업을 추진하게 되었다. 먼저 생태계보전수로와 농촌공원, 그라운드워크활동 센터 등의 정비를 실시하였다. 현재는 "NPO법인 그라운드워크 니시기누가와"가 중심이 되어 시설의 유지관리를 실시하고 있다. "논의 학교"를 주체하면서 농업체험과 자연관찰회를 실시하는 등 현뿐 아니라 일본을 대표하는 환경보전지구가 되었다.



<그림 2.1.1> 토치기현 니시기누가와 지구의 환경배려 시공사례  
(배수로와 논을 잇는 공간의 생태계 네트워크 구성: 수로 형태의 다양화 낙차공 등이 도입됨)

1) 간선 배수로 활용사례

다양한 생태계 배려공법의 일환으로, 지역에 서식하는 동식물을 위한 생태네트워크를 구성하였으며 직선화 수로정비를 실시하였다. 어류가 빠른 유속에 설 수 있는 공간을 확보하여 주었으며, 서식할 수 있는 환경과 그늘을 제공하고 있다. 포장정비 사업에 의해 간선배수로가 직선화됨에 따라 여울과 소 등이 크게 변화되어, 이것을 시정하고 생태계에 부하를 줄이기 위해 하천바닥 정비와 소를 만들기 위한 작은 섬 등을 배치하였다.

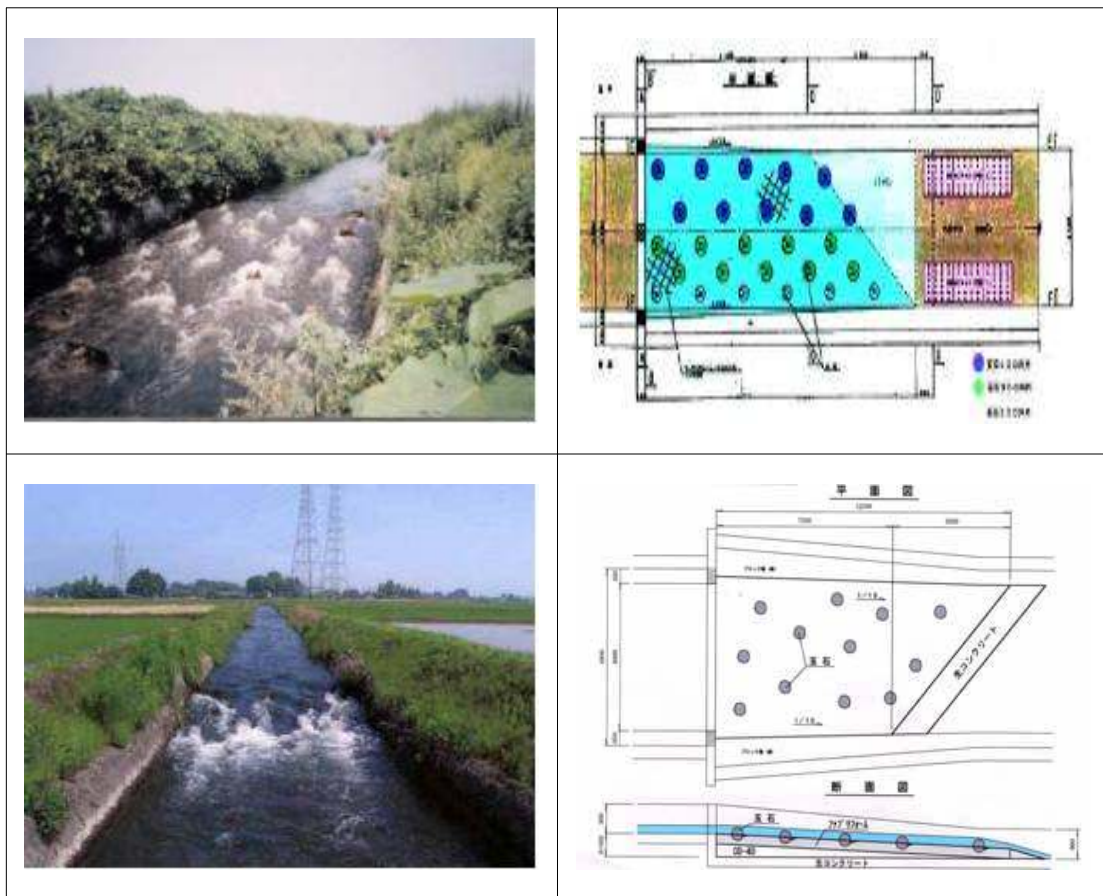


<그림 2.1.2> 간선 배수로 활용사례 (사진과 도면)



2) 어도 , 낙차공의 활용사례

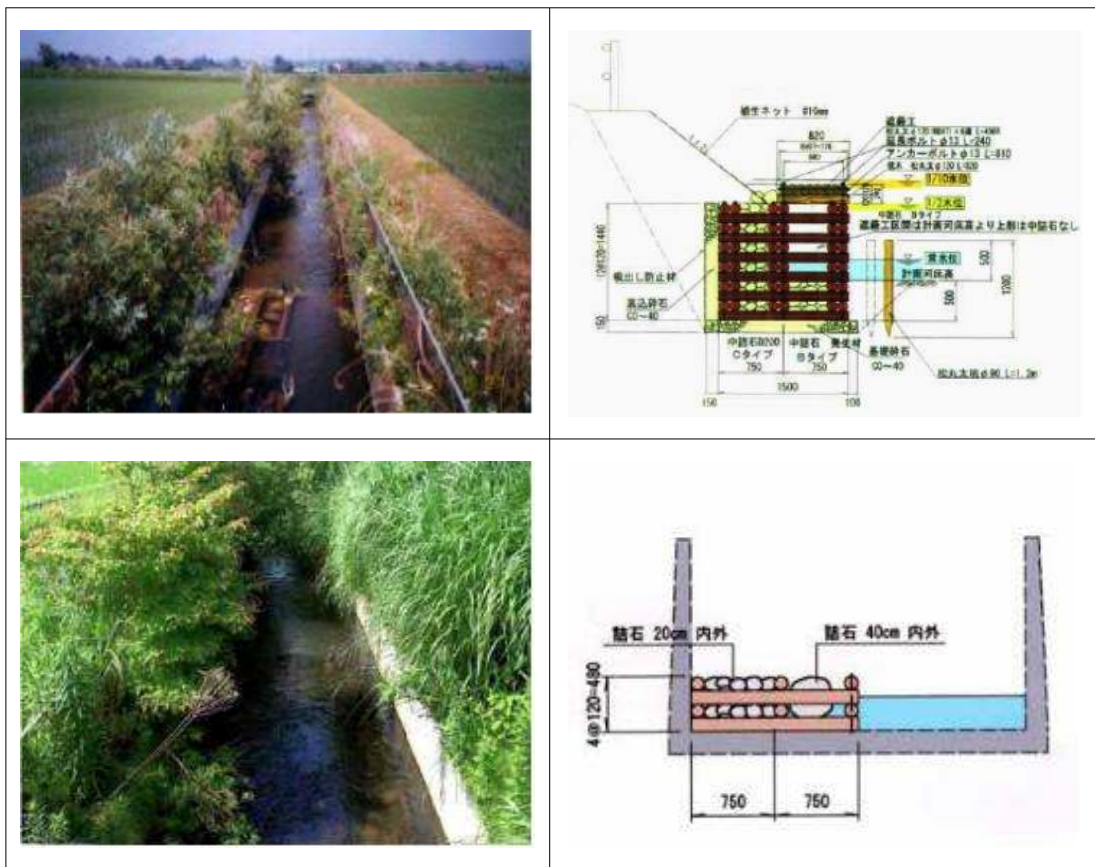
수로의 단면차를 활용하여 낙차공을 조성하고 다양한 흐름을 확보하고 있다. 이러한 다양한 흐름의 확보로 인하여 어류의 상·하류간 이동성이 크게 증가하였다. 양안 구배에 변화를 주고 어류가 쉴 수 있는 휴식 공간을 만들었다. 포장정비 사업으로 설치한 낙차공은 어류의 삭상이 곤란하게 되어 경사형 낙차공으로 수정하여 만들어져 있다.



<그림 2.1.3> 어도 , 낙차공의 활용사례 (사진과 도면)

### 3) 간선용수로의 활용사례

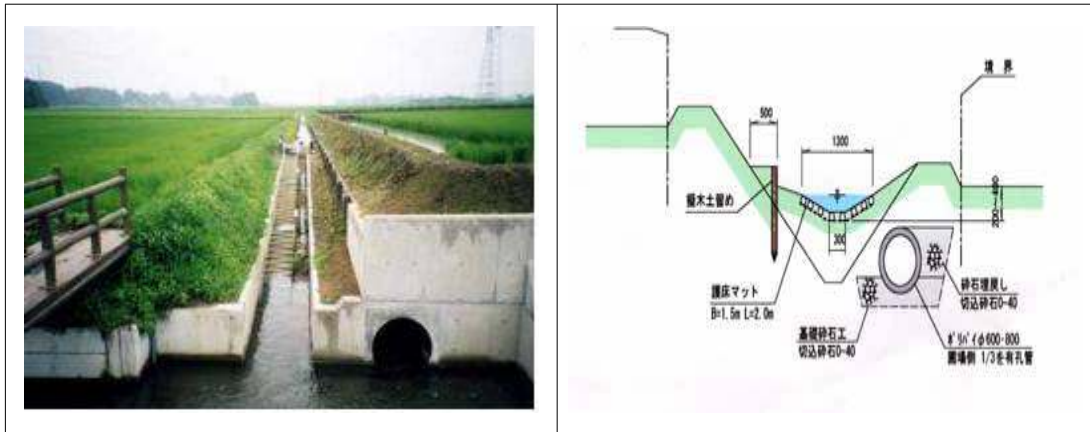
간선용수로로부터 1급 하천으로 이어지는 수로에 어류의 삭상 등을 배려하여 유속을 억제할 수 있는 그늘과 쉼 수 있는 장소를 만들어 제공하였다. 여름철 수변의 온도상승을 방지하고 바람 등의 영향을 줄이기 위해 나무를 심어 그늘을 제공하여 온도변화에 대한 배려를 적극 검토하였다.



<그림 2.1.4> 간선용수로의 활용사례 (사진과 도면)

#### 4) 미꾸라지 이동용 수로 활용사례

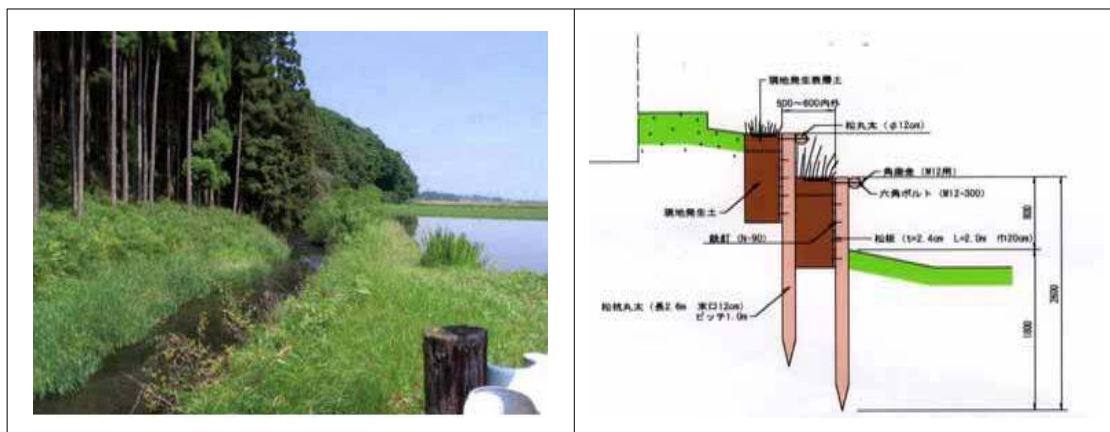
논과 지선 배수로와의 네트워크 형성을 목적으로 이곳에 서식하는 물고기의 보전과 복원을 위해 마련한 수로이다. 수로와 논과의 단차를 적게 하기 위하여 흙 수로를 설치하였으며, 간선 배수로로부터의 소상을 고려하여 어도를 만들어 이동이 가능하도록 하였다.



<그림 2.1.5> 미꾸라지 이동용 수로, 어도의 활용사례 (사진과 도면)

#### 5) 여울과 사주를 만들어 적용한 사례

현재의 하상의 보전과 복원을 위해 간선수로에 여울과 사주를 만들어 다양한 하상을 창조하였으며, 덮개구조에 의한 도복목과 하반목을 설치하여 현재의 하상보전에 배려하였다. 그리고 나무와 돌을 이용하여 이곳에 사는 어류 등이 자연스럽게 활동할 수 있는 조건을 만들어 제공하고 있다.



<그림 2.1.6> 여울과 사주를 만들어 적용한 사례 (사진과 도면)



## 6) 생태계 보전형 논 정비사업

다음 사진은 실험적으로 시공한 개구리 탈출 장소이다. 잘못해서 수로에 빠진 개구리가 수로에서 나올 수 있도록 수로를 개조한 실험적으로 시공한 사례이다. 현재 우리나라에도 생태이동통로를 설치하고 있는 추세이지만 이곳의 사례는 성격이 다르다. 개수로 중에 생태이동통로를 설치한 것이 아니라 대부분 복개된 수로에 갇힌 양서류의 탈출을 위해 시공한 사례이다. 관찰결과 이러한 시설은 그다지 효과가 없는 걸로 보고되었다. 일본 토종 개구리(성체)의 탈출율은 A타입은 38%, B타입은 9%에 그쳤다. 개구리의 종류에 따라서 탈출율이 다르며 유량이 증가함으로써 탈출율이 저하되는 것과 유체(幼體)의 탈출율이 저하되는 것을 확인하였다.



<그림 2.1.7> 생태이동통로 (A,B)

## 7) 수로에 추락방지용 덮개설치

양서류 및 소동물의 이용경로를 확보하기 위해서 U자형 수로에 덮개를 설치



<그림 2.1.8> 수로 덮개

#### 나. 고가이가와(小貝川) 지구

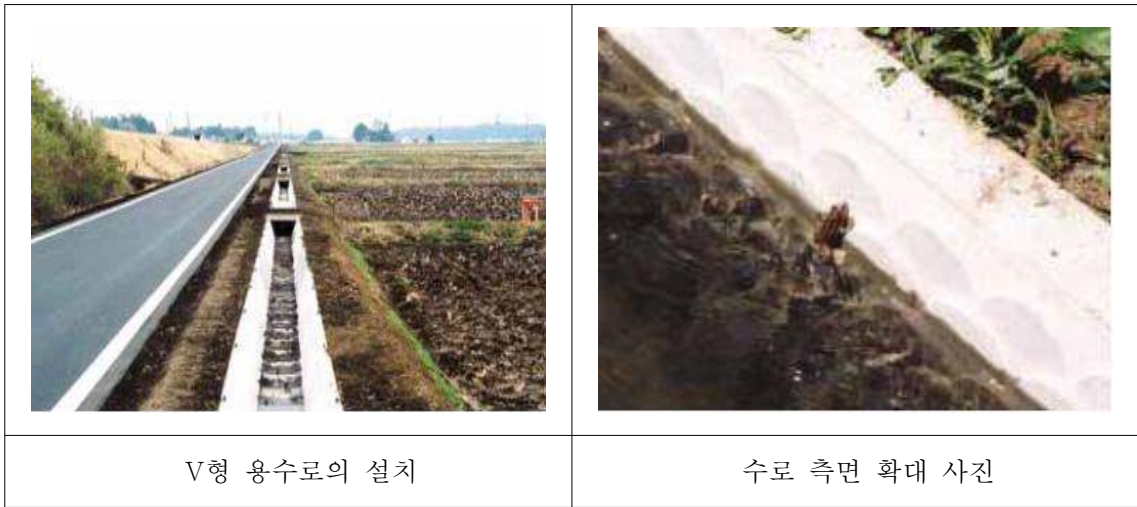
이찌가이마찌(市貝町)의 고가이가와연안 I지구(현영 경영체육성 기반정비사업)는 학식경험자와 전문가가 함께 하는 “생태계보전 검토위원회”를 설치하여 계획단계에서부터 환경배려에 대한 지역주민의 합의형성이 시도되어 지구 내에 서식하는 어류와 양서류의 네트워크구조에 적당한 공법을 검토하여 실시에 반영하였다. 관계 토지개량구가 중심이 되어 지역주민과 교류할 수 있는 생태계보전에 관한 워크숍을 개최하고 생물의 이동, 관찰회 등 다양한 활동을 전개하고 있다. 지역환경 및 지역자원의 중요함을 깨닫게 하는 의식향상 프로그램 등을 통해서 사업의 필요성 등을 이야기 하고 설명하는 기회를 통해 주민의 적극적인 참여를 유도하고 있다. 또한, 수로에 서식하는 어류를 생각하여 수로의 굴곡부(수조부)에 삭상해운 어류의 휴게소를 설치하였다. 휴식공간의 확보에는 현장공사에서 나온 U자형수로를 유용하게 이용하였으며, 수로내로 떨어진 개구리나 뱀 등을 구제하기 위해 수로 분기부(수조)에 있어서 현장 발생재인 벌채목을 오름판으로 하였다.



<그림 2.1.9> 어류와 양서류의 네트워크구조에 적당한 공법 예

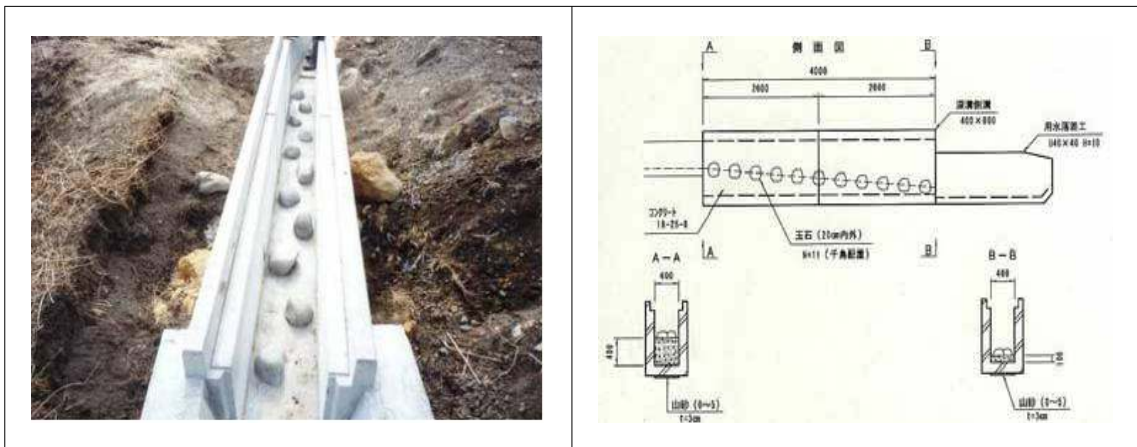
#### 다. 마끼가와(卷川) 지구

토치기현(栃木縣) 마끼가와(卷川)의 농경지 지대에 현영 토지개량 종합정비사업을 실시하고 농업용수의 도입과 기반정비를 계기로 생태계를 배려하는 공법을 채용하였다. 항상 물이 흐르는 용수로에 환경배려를 위한 중점을 두어 개구리가 용수로로부터 탈출할 수 있도록 용수로 일부를 거친면 경사수로를 설치하였다. 수로측면의 경사는 30°로 하고 벽면에는 개구리가 미끄러지지 않게 요철을 두어 이동에 불편이 없게 하였다. 또한 수로바닥에는 변화를 주어 유속변화를 주어 개구리가 측면을 쉽게 잡을 수 있게 하였다.



<그림 2.1.10> V형 용수로의 설치

토치기현 (栃木縣) 마키가와(巻川)의 농경지 지대에 현영 토지개량 종합정비사업을 실시하고 낙차가 큰 지점에 급류낙차공을 설치하여 수로에 서식하는 미꾸라지를 환경배려 대상으로 하여 논 유입부에 미꾸라지가 소상할 수 있도록 하였다. 수로에 미꾸라지 등이 어려움 없이 기어 올라올 수 있도록 돌을 일정한 간격으로 배치하고, 수류의 흐름에 폭기를 만들어 다양한 흐름을 형성하고 주변의 환경과 어울릴 수 있도록 배려하였다.



<그림 2.1.11> 급류 낙차공의 설치 장면과 도면

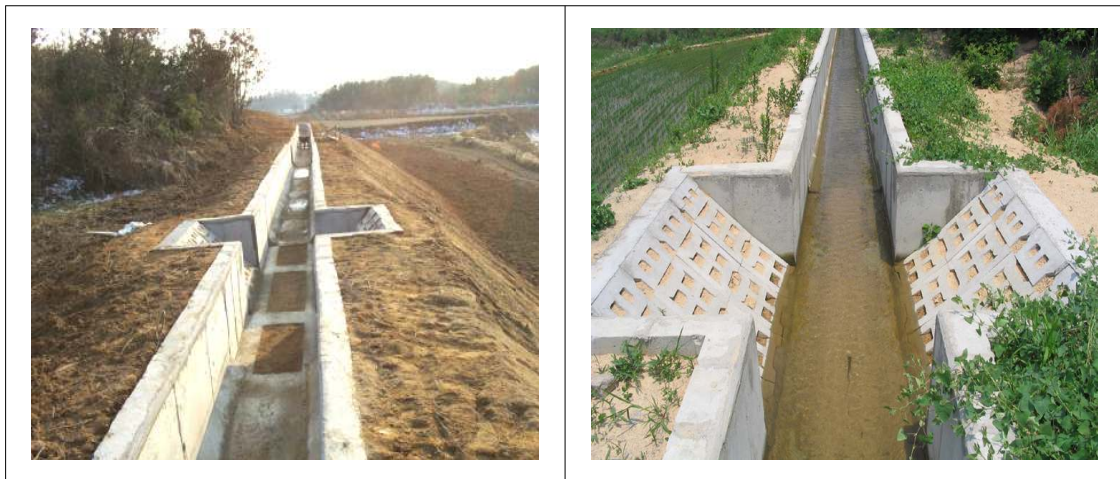


## 2. 국내사례

### 가. 여주 용수로

대부분의 콘크리트 구조의 용수로는 측벽이 수직으로 수로 내에 갇힌 양서류와 소동물은 탈출이 불가능하게 되고, 비 급수 시 또는 동절기에는 고사(枯死)하거나 동사(凍死)하게 된다. 여주 구양지구는 용수손실과 효율적 유지관리를 위한 용수로 구조물화 개보수사업 지구로 개보수시 용수로 내로 들어온 개구리, 뱀과 같은 양서류와 너구리, 오소리 등의 소동물이 용수로에서 탈출 할 수 있는 다양한 형태의 탈출로를 설치하였다.

탈출로 바닥이 매끈하게 된 경우에는 마찰력이 없어 뱀 및 개구리가 탈출로를 찾아도 쉽게 오르지 못하는 경우가 있다. 이를 해결하기 위하여 시공된 구양지구의 탈출로 바닥은 흙이 있는 블록제품으로 시공함으로써 주위의 식생이 자연스럽게 활착토록 하였으며 이는 양서류 및 소동물들의 탈출을 용이하게 하였다.



<그림 2.1.12> 여주 구양지구 용수로



<그림 2.1.13> 여주 용은지구 생태이동 통로

<그림 2.1.13>은 용수로 한쪽에 등선로를 설치한 것으로 양쪽에 설치한 구양지구보다 공사비가 적고 용지도 적게 차지한다. 그러나 이 구간은 산지를 통과하는 용수로 구간으로서 주변 부지의 확보가 비교적 용이한 구간이다. 이 구간은 소동물의 이동이 빈번하여 필요시 <그림 2.1.14>와 같이 수로위를 복개하여 소동물의 서식처간 이동을 쉽게 할 수 있는 방법을 병행할 경우 더욱더 효과적일 것이라 판단된다.



<그림 2.1.14> 생태이동을 위한 수로복개 사례

<그림 2.1.15>는 용수로 한쪽부분에 PVC파이프를 이용하여 탈출로를 설치한 사례이다. 파이프를 이용한 탈출로는 주변 부지를 적게 차지하는 장점이 있으며 양서류 및 파충류가 탈출여부에 대해서는 지속적인 모니터링이 요구된다.



<그림 2.1.15> 효지지구 생태이동통로



#### 나. 충북 용수로

생태계 보호 및 어소겸용 수로관은 용수로에 벤치플룸(수로관)이 U자형으로 벽체가 수직으로 되어 있어 개구리, 뱀, 도롱뇽 등의 양서류, 파충류뿐만 아니라 오소리, 너구리, 족제비 등의 작은 동물이 빠지게 되면 밖으로 탈출하지 못하는 문제점을 해결하기 위하여 수로관 외벽에 탈출통로가 있는 수로관이다. 또한 이 생태수로관 바닥에 저류홈을 설치하여 비급수기 일정기간동안 수로에 물이 없는 기간에 양서류 등의 수명을 연장시켜 주며 퇴적 토사로 인해 식생이 자랄 수 있는 공간을 제공하고 수로 밖으로의 탈출을 용이하게 한다. <그림 2.1.16>은 충북 괴산 조천지구 경지정리 사업으로 설치된 수로관 전경이다.



<그림 2.1.16> 수로바닥에 저류홈 및 탈출로에 식생이 활착한 모습



<그림 2.1.17> 현장타설로 시공한 생태이동통로

<그림 2.1.17>는 충북 청원 비룡지구의 생태 탈출로 전경으로 용수로에 현장타설로 양서류 및 소동물의 이동통로를 조성하였다. 탈출로 바닥은 매끈하게 시공되었으며 탈출로가 수로에 분리되어 있다. 이와 같은 유형의 등선로는 농도의 일부를 침범하여 농기계 및 차량통행에 있어서 방해가 될 수 있어 시공시 차들의 통행이 있는 도로 반대쪽으로 설치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

## 제 2 절 수질정화를 위한 친환경 인공습지 공법의 현황

자연습지는 자연스럽게 조성되어 생물들이 서식하고 하천의 자정작용을 하는데 반해, 인공습지는 이미 훼손된 하천 등의 공간에 필요에 의해 생물서식처와 정화기능을 하도록 인위적으로 조성한 공간을 말한다. 그러나 근래에 들어 인공습지는 자연적인 하수처리기법의 하나로써 인정하는 추세에 있어 시설의 설치·기능향상을 위한 각종 연구가 활발히 이루어지고 있다.

### 1. 인공습지에 의한 수처리 기술의 시작과 발전

인공습지에 의한 하수처리기술은 1954년 독일 Max Plank 연구소의 Seidel이 식물에 의한 자정능력을 과학적으로 평가하고 인공습지를 수질개선에 이용하면서 시작되었다(Seidel, 1955; Kickuth, 1977). 1960년대에는 미국 NASA에서 부유식물 처리시스템(Floating plant treatment system)과 토양·정수식물 여과처리시스템을 연구하였다(Wolverton, McDonald, 1975)(Reddy, DeBusk, 1987). 1970년대와 1980년대를 거치면서 하수처리뿐만 아니라 다양한 분야의 수질개선을 위해 세계 곳곳에서 많은 연구와 함께 실용화 시설들이 설치되었고, 수십 년째 운영 중인 곳도 다수 있다. 인공습지를 이용하여 오염원을 정화하기 위한 최초의 연구들을 아래 <표 2.2.1>에 정리하였다(Moshiri, 1993).

<표 2.2.1> 수처리분야에 있어서 인공습지를 이용한 최초의 연구들

year	Research field & Events	Researcher
1956	•livestock wastewaters - E	Seidel
1975	•petroleum refinery wastewaters - O	Litchfield
1978	•textile mill wastewaters - O	Kickuth
1978	•acid mine drainage - E	Huntsman
1979	•fish rearing pond discharge - O	Hammer & Rogers
1982	•acid mine drainage - O	Pesavento
1982	•reduction of lake eutrophication - E	Reddy
1982	•urban stormwater runoff - O	Silverman
1983	•pulp/ paper mill wastewaters - E	Wolverton
1985	•seafood processing wastewaters - E	Guida & Kugelman
1988	•compost leachate - O	Pauly
1989	•sugar beet processing plant wastewaters	Anderson
1989	•reduction of lake eutrophication - O	Szilagyi

※주 : E-Experimental, O-Operational, (Moshiri, G. A., 1993)



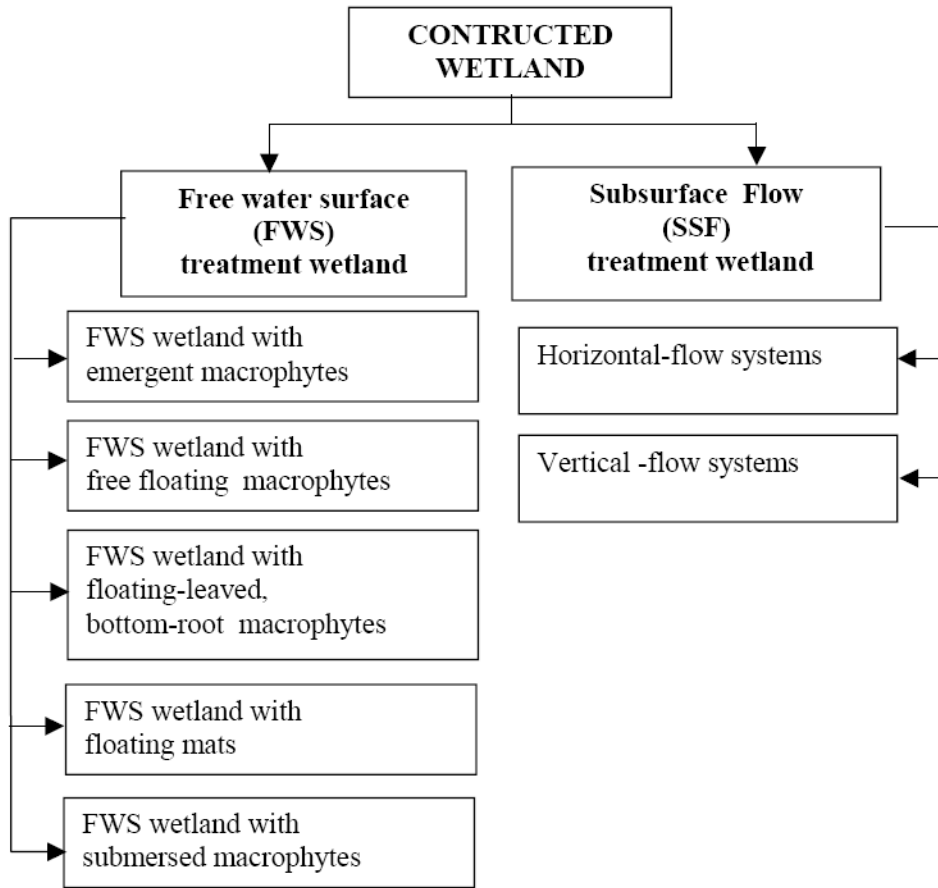
미국에서는 현재 연구용을 비롯하여 1,000여개소의 인공습지가 운영되고 있으며(Reed et al., 1995), 이들 습지 데이터베이스 자료를 이용하여 습지의 오염물질 저감능력 규명을 위한 관련인자들에 대한 연구가 진행되고 있다(Kadlec & Knight, 1996; Knight et al., 1993).

이상과 같은 인공습지 연구의 발전은 지속적으로 이루어지고 있으며, 소규모 하수처리를 위한 인공습지 기술은 개별적인 가구나 소규모마을에 하수관거를 설치하지 않아도 되고, 스스로 설치하거나 값싼 재료들을 사용하여 초기투자 비용을 낮출 수 있고, 보건상 안전성이 확보될 뿐만 아니라 경관과 친수공간의 가치를 가질 수 있어 자연친화적이라는 측면에서 관심을 받고 있다(Kadlec & Knight, 1996; Mitsch & Gosselink, 2000). 그리고 심미적으로 좋은 처리시스템이므로 처리수의 재이용이 가능하고, 낮은 비용과 적은 유지관리로도 하수처리가 가능하기 때문에 개발도상국과 도시계획이 제대로 이루어지기 힘든 지역의 하수처리를 위한 해결책으로도 연구되고 있다(Kadlec, 1995; Ayaz & Akça, 2001).

## 2. 인공습지의 형태 및 적용 식물에 관한 연구

인공습지는 <그림 2.2.1>과 같이 자유수면흐름형(FWS)와 지하흐름형(SSF)로 구분할 수 있다. 자유수면흐름형 인공습지는 미국 등 북미에서 많이 이용하며, 지하흐름형 인공습지는 유럽에서 많이 이용하고 있다(Reed et al., 1995).

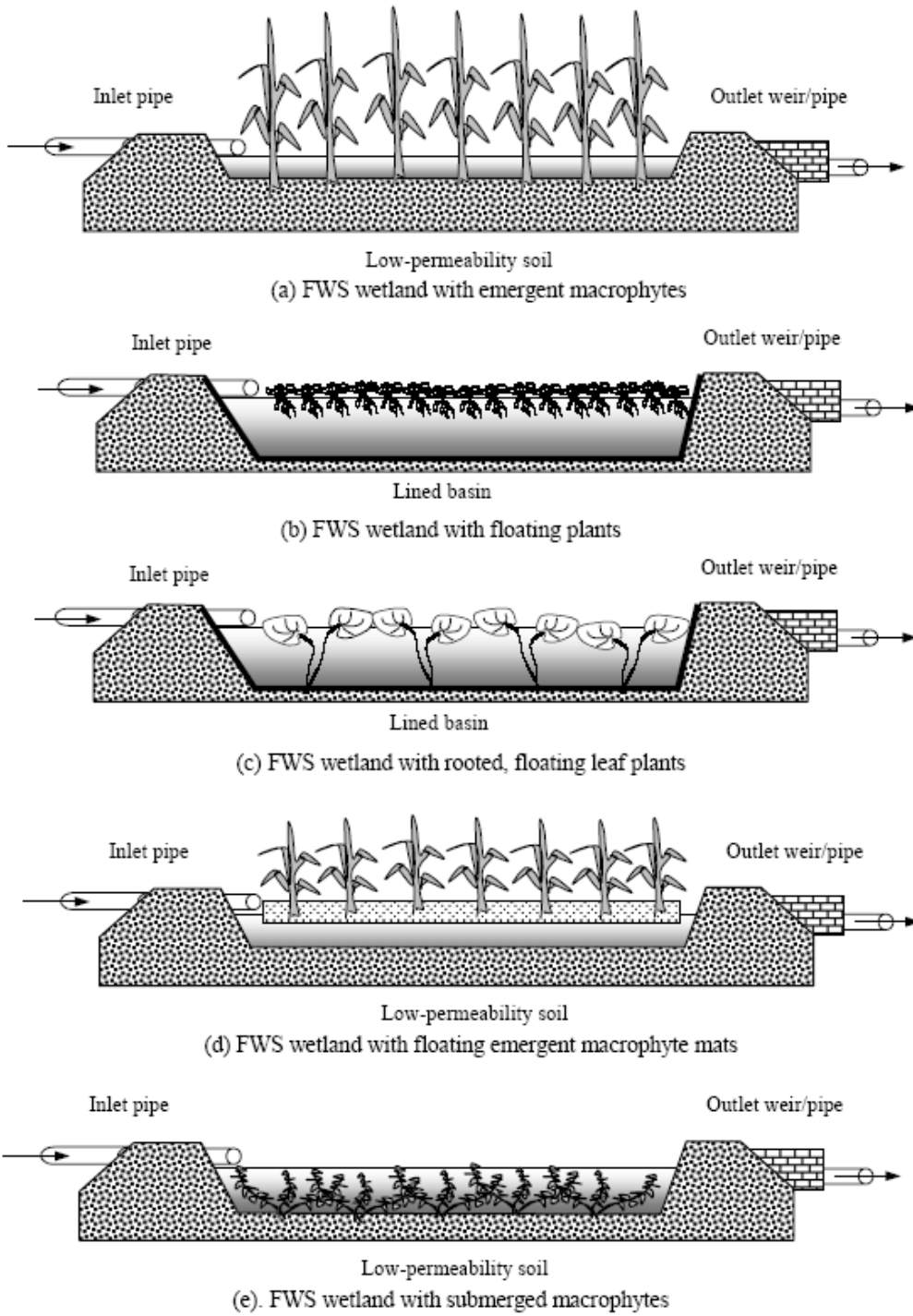
자유수면흐름형 인공습지는 자연습지와 가장 가까운 형태로서, 대부분의 물질분해 과정은 물에 잠긴 줄기와 물 사이에 형성된 생물막에서 일어난다. 북미에서 운영 중인 자유수면흐름형 인공습지의 평균적인 제거효율은 BOD<sub>5</sub> 74%, SS 70%, T-N 53%, T-P 57% 정도이다(Kadlec & Knight, 1996).



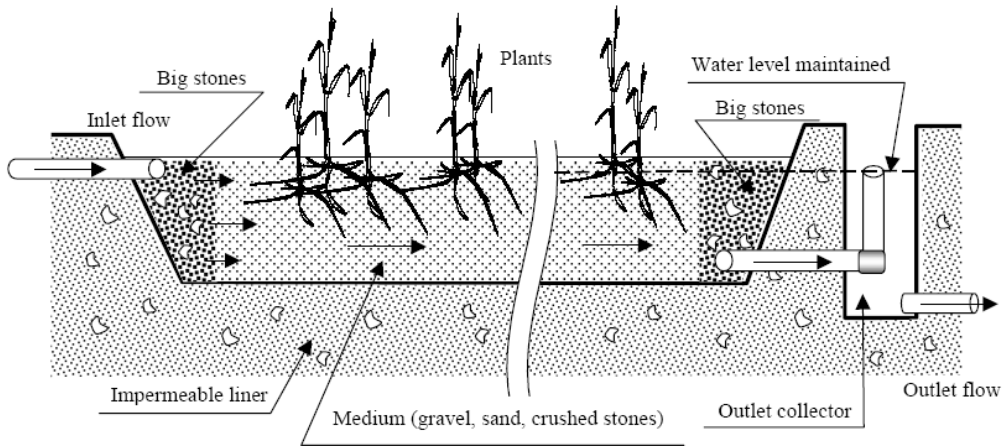
<그림 2.2.1> 인공습지의 분류 및 종류

수생식물이란 보통 수초라고 하는 것으로 일반적으로 관속이 있는 고등식물로 수중에 생육하는 식물들을 말한다.

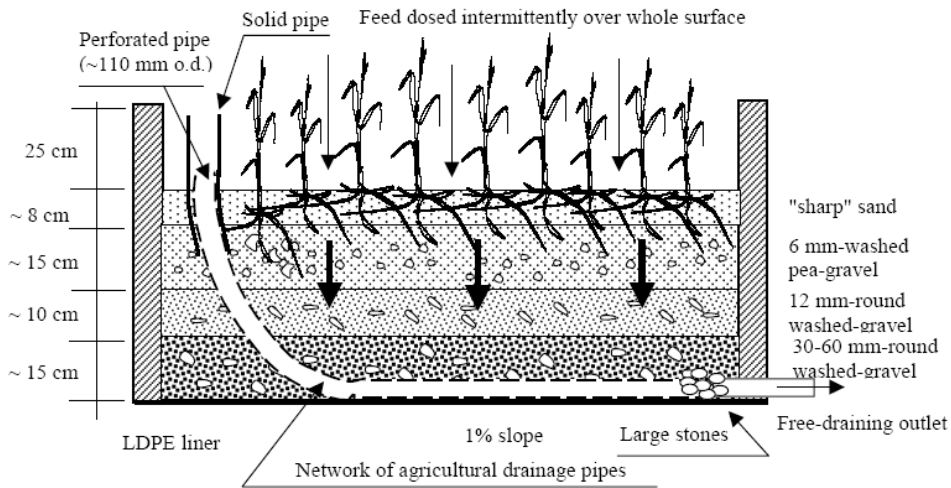
<그림 2.2.1>, <그림 2.2.2>에 정리한 바와 같이 수생식물은 수중에서의 생활습성에 따라 고착성 수생식물(rooted aquatic plant)과 부수성 수생식물(free floating aquatic plant)로 나눌 수 있고, 고착성 수생식물은 다시 부엽식물(floating leaved plant), 정수 또는 추수식물(emergent plant), 침수식물(submerged plant)로 세분된다.



<그림 2.2.2> 자유수면흐름형 인공습지 하수처리시스템



(a) Longitudinal section of a constructed wetland with horizontal SSF (Vymazal, 1997, modified)



(b) Typical arrangement of a vertical reed bed system (Cooper, 1996, modified)

<그림 2.2.3> 지하흐름형 인공습지의 흐름방식에 따른 적용방법

수생식물에 의한 오염물질 제거작용은 식물에 의한 직접적인 흡수보다는 수생식물체 중에서 물에 잠겨 있는 부분의 표면과 토양 속 뿌리 주변에 부착한 미생물군집에 의한 분해작용이 중요하다. 따라서 인공습지에서 식물의 직접적인 오염물질 흡수 능력은 미흡하지만, 오염물질 제거작용을 증진시키는 매개체로서 여러 가지 면에서 아주 중요한 역할을 하는 것으로 평가된다(Reed et al., 1995; Kadlec & Knight, 1996; Mitsch & Gosselink, 2000).

인공습지에서는 주로 정수식물을 많이 이용하고 있는데, 가장 많이 사용하는 정수식물로는 갈대(reed, *Phragmites communis*), 부들(cattails, *Typha* sp.), 갈풀(rushes, *Juncus* sp.) 매자기(bulrush, *Scirpus* sp.), 사초(Sedge, *Carex* sp.) 미나리(*Oenanthe javanica*), 줄(*Zizania latifolia*) 등이 있으며 이들의 오염물질 제거능력이 우수한 것으로 알려져 있다. (안윤주, 1993; Reed et al, 1995; 남귀숙, 2003).

특히, 갈대 등의 정수식물은 부엽식물이 가지는 오염물질 제거효과 뿐만 아니라 질산화와 탈질화를 동시에 일으키는 환경을 만들어 뿌리 주위의 토양에 있는 질소제거를 촉진하는 것으로 알려져 있다(Brix & Schierup, 1990; Kadlec & Knight, 1996; Mitsch & Gosselink, 2000; USEPA, 1999). 수생식물의 종류에 따라서 오염물질 제거능력에 차이가 있는데, Gersberg 등(1986)의 연구에 의하면, 고랭이와 갈대가 애기부들 보다는 오염물질 제거능력이 높았다. Bachand와 Horne(1999)은 애기부들, 고랭이, 두 식물의 혼합식생습지에서 질산성질소(nitrate,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 제거실험을 수행한 결과, 혼합식생습지에서 가장 큰 제거효과가 있어 탈질화를 위해서는 혼합식생습지가 유리하다고 하였다.

Fraser 등(2004)의 연구에서도 식재를 하지 않은 대조구보다 식생습지에서의 제거효과가 높고 식생종류에 따라 N과 P의 제거효과에 차이가 있었으며 혼합식생습지의 제거효과가 높았다. 하지만, HRT가 충분한 조건에서는 수생식물 종류에 따른 제거효과는 큰 차이 없는 것으로 보고된 바 있다(Sumrall et al., 1994).

인공습지에 관한 연구 초반에는 식생이 아주 밀집되어야 식물을 통한 산소전달로 호기성 상태가 되어 수질정화에 효과적이라는 오해가 있었다. 하지만, 실제로 식생이 밀집된 습지는 혐기성 상태가 되어 주로 탈질화와 같은 기작이 지배적일 수 있다. 수생식물이 대기 중의 산소를 뿌리를 통해 전달하는 능력을 과대평가할 수 있는데, 실제로는 식물근권에 산소 전달량은 식물 뿌리의 호흡에 필요한 양만큼 전달되기 때문에 수중의 산소전달은 뿌리호흡 필요량의 약 1% 정도로 아주 미미하다(USEPA, 1999).

春木和久(2001)은 하천이나 저수지에서 채집한 갈대와 애기부들을 재료로 하여 배양시 갈대와 애기부들의 종자로부터 callus(유합조직)를 형성하여 질소인 흡수량이 많은 식물체를 재생시켰다.

근래에는 배양 시 돌연변이 유발이나 유전자변형 실험을 추진하여 종래의 개체에 비해 질소인 흡수량이 많은 개체나 내염성이 강한 개체를 육성하기 위한 연구들이 이루어지고 있다.

### 3. 수질개선용 인공습지의 국내 연구 현황

국내에서 대형수생식물을 이용한 수처리에 관한 연구는 1980년대부터 시작되었으며, 주로 중남미 원산의 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)이 활용되어 왔다. 부레옥잠을 이용한 수처리 연구는 생장요인, 유기물, 영양염류, 중금속 제거 등에 관한 연구(변종영 등, 1985; 이규승 등, 1985; 이종식, 1986; 수자원공사, 1993; 김규식 등, 1988; 김복영 등, 1991), 증식인자 연구(공동수 등, 1996), 중금속에 의한 생장 및 제거효율 영향(정재욱 등, 1994), 분뇨의 질소·인 제거(정수일 등, 1995), 축산폐수처리(이병현 등, 1992; 이남희 1993), 부레옥잠 처리장에서 조류성장 영향(이병현 등, 1992), 군부대의 생활하수처리(백룡부대, 1994) 등이 수행되었다.

부레옥잠 이외의 식물에 대한 연구는 소형 장치실험으로서 생이가래(*Salvinia natans*)에 의한 하수 내 질소, 인 제거(안윤주, 공동수, 1995), 미나리에 의한 영양염류 제거(수자원공사, 1993; 안창우, 1994)와 카드뮴과 납의 제거(이병설 등, 1995), 인공습지에서 애기부들, 꽃창포, 미나리에 의한 하수처리(공동수 등, 1996)가 수행된 바 있으며 현재 갈대에 의한 군부대의 생활하수처리(강원대학교, 1997)가 연구되고 있으나 다양한 수종의 평가는 물론 현장적용 규모의 연구가 빈약한 상태이다.

자연정화방법을 이용한 소규모 오폐수처리 시스템을 개발하고자 했던 연구는 윤춘경(1996), 김형중(1997), 정동양(1999) 등에 의해 수행되었으며 고속산화지와 인공습지를 결합하여 하수처리수의 3차 처리에 활용하고자 연구하였다(김영철, 2003).

이상과 같이 자연정화시설의 정화효율을 높이기 위한 다양한 연구가 실시되고 있으나, 우리나라에서는 인공습지와 인공식물섬 위주로 도입되고 있다. 그러나 이들 시설은 지역에 따라서는 적용에 제한을 받기 때문에 보다 다양한 자연정화공법을 개발할 필요가 있다. 이들 자연정화시설의 효율을 높이기 위해서는 선진 외국에서와 같이 고효율여재 개발, 질소, 인의 흡수율을 높이기 위한 유전자 변형, 다양한 유용식물을 이용한 수질정화방법의 도입을 통한 수익증대 방안 등 다양한 방면으로 연구를 발전시켜 쾌적하고 풍요로운 자원 순환형 사회를 구축해나가야 할 것이다.



## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 농수로 적용을 위한 수질정화 재료 및 성형화 제품 개발

#### 1. 식물생육이 가능한 수질정화 재료 개발

##### 가. 자연정화에 유용한 수질정화 재료의 조건

수질정화에 효율이 좋은 여재는 적용대상에 따라 다양하게 적용할 수 있으며 처리 공정에 따라 선호될 수 있는 여재의 조건은 다르다. 하지만 공통적으로 미생물의 왕성한 생육이 처리효율에 큰 영향을 주므로 비표면적이 커서 미생물의 부착 및 생육이 용이하고 부유물질을 여과하거나 흡착하여 미생물에 의하여 처리 될 수 있어야 한다. 현재 여재로 사용하는 재료로써는 광물질, 플라스틱, 섬유질 등 그 종류 및 수가 방대하다. 하지만 식물의 흡수와 토양 미생물에 의한 정화 원리에 입각한 자연정화에 필요한 기반재료들은 식물의 생육이 전제되어야 하기 때문에 폭넓게 고려되지 못하였다.

자연정화에 유용한 수질정화 재료의 조건은 첫째 식물의 뿌리를 지탱하고 식물의 생육을 활발히 할 수 있는 식재기반의 역할을 해야 한다. 둘째 오염된 물을 여과나 흡착을 통하여 분해할 수 있는 물리화학적 특성을 갖고 있어야 한다. 셋째 미생물의 부착이나 활성화에 용이한 공간을 제공하여야 한다. 이러한 조건을 동시에 만족시켜야 하므로 일반적인 생물학적 처리공법에 사용되는 여재의 조건과는 차별되어진다. 현재까지 자연정화에 사용되어진 여재는 모래, 자갈, 쇄석, 토양 등으로 매우 제한적이었다. 또한 이들의 특성상 효율성이 떨어져 많은 부지를 사용하여야 했다.

<그림 3.1.1> 식물에 의한 자연정화 원리 개념도



본 연구에서는 친환경적 농수로와 농업용수 수질개선을 위한 고효율 인공습지에 적용하기 위하여 수질정화 역할과 식재기반재의 역할을 동시에 만족시켜서 효율을 향상시키고 부지사용을 최소화 할 수 있는 재료를 조사하고 실험을 진행하였다.

효율 높은 식재기반형 여재의 개념은 재배용 배양토의 조건과 많은 부분에서 공통점이 있는데 좋은 배양토란 보수력(保水力)이 좋아 물을 잘 흡수해야 되는 반면 배수성(排水性)과 통기성(通氣性)이 좋아 쉽게 건조해야 한다. 쉽게 부서지면 좋지 않고 그렇다고 지나치게 단단하거나 모가 난 것도 좋지 않다. 산도(酸度)는 pH 5.5~6.0정도 되는 것이 좋다. 한 종류의 배양토는 이러한 점을 모두 충족시킬 수 없으므로 주로 혼합토를 사용한다. 이러한 인공 배양토는 자체에는 영양물질이 극히 적으며 다공질이며, 비표면적이 커서 접촉면적이 상대적으로 많아 오수정화에 활용할 때 미생물의 부착이 우수하여 접촉에 의한 여과와 침전과정에 의하여 오수를 정화하며, 또한 다양한 흡착능력이 있어서 질소와 인 등의 영양물질을 흡착하여 서서히 식물에 의하여 흡수 될 수 있도록 유도하고, 흡착된 영양물질을 부착미생물에 의하여 분해하는 역할을 할 수 있다.

#### 나. 자연정화에 적용 가능한 수질정화 재료의 검토

##### 1) 활성탄

활성탄(Activated Carbon)은 야자각, 목재류, 갈탄, 무연탄, 유연탄 등의 탄소질을 원료로 제조되는 미세세공이 잘 발달된 무정형 탄소의 집합체로서, 활성화 과정을 통해 분자 크기 정도의 미세세공이 형성되어 큰 내부표면적을 갖는 흡착제이다. 활성탄은 1 g당 1000 m<sup>2</sup> 이상의 큰 내부 표면적을 갖으며 이 내부표면에 존재하는 탄소원자의 관능기가 주위의 액체 또는 기체에 인력을 가하여 피흡착질의 분자를 흡착하는 성질이 있다. 활성탄만의 사용은 식물의 생육에 좋은 식재기반이 될 수 없으나 소량을 사용한다면 토양의 물리성 개선에 도움이 된다. 또한 다른 배양토 재료들과 적당히 혼합하여 사용할 때에는 식물에도 건전한 역할을 하며 자연정화에 의한 오수처리에 좋은 흡착재료로 사용되므로 처리효율을 높이는데 기여할 수 있다.

##### 2) 제올라이트

제올라이트는 환경정화용 소재로서 장점이 많으며 수질정화에 또한 효과가 크다고 알려져 있다. 특히 양이온 교환능력(CEC)이 뛰어나서 많은 연구가 되었다. 하지만 자연정화에 있어서 제올라이트 재료만의 적용 시에는 식물생육에 저해가 될 수 있다. 하지만 제올라이트를 적당량을 혼합한다면 영양물질을 흡착하여 서서히 식물이 이용할 수 있는 환경을 제공한다. 그러므로 식물의 식재기반을 위한 인공토양이나 배양토 등에는 오래전부터 제올라이트를 다른 재료들과 혼합하여 활용하고 있다. 자연정화에 의한 수질정화에도 수질정화의 효율을 높

이고 또한 식물의 건전한 생육을 동시에 만족하므로 모래, 자갈, 토양 등으로 극히 제한적으로 사용되고 있는 자연정화용 식재기반 여재에 활용한다면 소기의 효과를 거둘 수 있다.

### 3) 화산석

화산활동에 의하여 형성되는 암석 중 고온, 고압에서 가스가 팽창되면서 다공질의 경량성 암석이 형성되는데 이를 총칭하여 화산석이라 불린다. 화산석은 배수성이 좋으며 무수한 다공질속에 수분을 보유하고 있어서 보수성 또한 뛰어나다. 일반적으로 배수성이 좋으면 보수성이 떨어지고 보수성이 좋으면 배수가 불량해지는데 반해 화산석은 다공질의 특성을 가져서 두 가지 요소를 동시에 만족한다. 또한 통기성이 뛰어나 식물 생육이 적당하고 미세한 다수의 공극은 미생물의 서식처를 제공하여 산성화를 방지하는 효과가 있으며, 경량형 인공 토양으로 옥상녹화용, 양액배지용 및 난재배용 등으로 활용성이 뛰어나다. 가공에 따라 0.5mm 이하(미분), 2~3mm, 5~6mm, 10~15mm, 15~25mm 등의 다양한 입도가 있다. 화산석을 활용하여 대기오염물질을 정화하기 위하여 담체로 적용한 바이오필터에 관한 연구가 진행되었으며, 일부 폐수처리를 위한 적용을 검토한바 있으나 종류가 많고 아직까지 범용적으로 다양하게 적용되거나 많은 연구 자료가 축적돼 있지 못하다.

### 4) 황토

황토는 1차 점토(primary clay)인 kaolin류의 표층이 산화, 풍화되어 형성된 것으로서, 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)성분이 많아 붉은 색을 띠며, 4면체와 8면체가 1:1로 형성되어 2층구조를 이룬다. 황토의 특성을 나열하면, 다음 <표 3.1.1>과 같으며, 황토의 화학성분은 <표 3.1.2>과 같다.

<표 3.1.1> 황토의 특성

구 분 \ 종 류		1차 점토 (primary clay, Kaolin)		2차 점토 (secondary clay, Clay)
		Kaolin	Hwangto	Clay
성 인		암석의 풍화	암석의 풍화	암석풍화물의 퇴적
주산지		산	Kaolin의 표층(전)	하천 (담)
구 조		1:1 구조 (2층구조)	1:1 구조 (2층구조)	1:2 구조 (3층구조)
주성분	SiO <sub>2</sub>	40~50 %	35~45 %	60~70 %
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30~40 %	25~35 %	10~20 %
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 % 이하	5~10 %	3 % 이하
입자크기		조립	조립	미립

<표 3.1.2> 황토의 화학성분

성분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ig.loss
황토(%)	40.0	32.9	7.79	0.39	1.54	0.76	1.73	13.7

일반적으로 황토는 세립분으로 이루어져 있어서 자연정화에 활용 시에는 적당한 입도로의 가공처리를 거쳐야 한다. 입도 형성을 위하여 황토를 다른 석회나 다른 점토광물을 첨가하여 몰타르화하여 성형하거나 이를 1,000℃ 이상에서 고온살균처리하면 인공배양토를 만들 수 있으며, 이러한 소성황토는 통기성과 흡수성, 보수성이 양호하고 다공질(多孔質)이며 약산성(pH 5.6)이라 배양토로는 매우 좋은 조건을 가질 수 있다.

다. 선별 재료들의 흡착효율 실험

본 연구에서는 농수로의 자연정화와 인공습지에 적용할 수 있는 고효율 수질정화재료를 개발하기 위하여 자료조사결과를 바탕으로 오염물질 흡착효율이 높은 재료를 선정하고, 흡착능력을 알아보기 위하여 칼럼실험을 실시하였는데, 실험조건은 다음과 같다.

1) 실험조건

- 가) 모형규격 : 아크릴 재질의 지름 11 cm × 높이 90 cm (약 8.5 L)
- 나) 여재충진 : 높이 80 cm까지 여재 충전
- 다) 공급유량 : C사의(Max. 10 ml) 정량펌프로 공급( 6 ml/min)
- 라) 체류시간 : 약 11.1 시간
- 마) 실험시간 : 재료별 100시간
- 바) 공급농도 : NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 각각 50 mg/L 농도로 제조



<그림 3.1.2> 수질정화 재료의 칼럼 흡착실험

2) 충전 재료

가) 혼합 1 (CHA : 제올라이트 : HWA = 10 : 20 : 70 )

나) 혼합 2 (CHA : 제올라이트 : HWA = 25 : 25 : 50 )

다) HWA : 직경 2~3 mm

라) 제올라이트 : 직경 2~3 mm

마) HDB : 직경 2~3 mm

바) NOGS : 직경 2~3 mm

사) NOGM : 직경 3~7 mm

아) HUG : 직경 7~15 mm

<표 3.1.3> 선별재료들의 XRF에 의한 화학조성 분석

성분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ig.loss
HWA(%)	64.68	15.43	4.92	4.46	2.40	1.83	4.09	0.59	0.11	0.19	1.08
제올라이트	61.76	11.14	6.73	2.62	0.93	0.84	0.53	0.67	0.07	0.44	14.05
NOGS, NOGM	53.14	26.61	3.16	3.10	0.38	0.93	1.75	0.34	0.09	0.11	10.53

3) 칼럼 흡착실험 결과

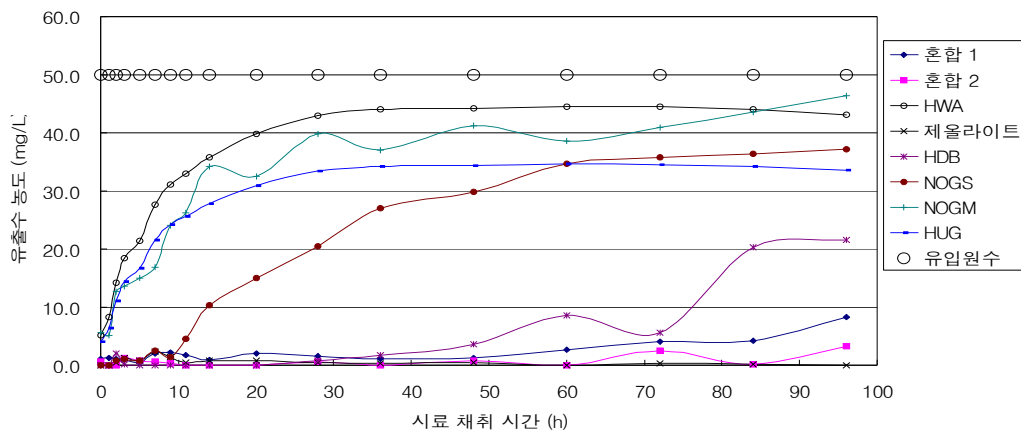
본 실험에서는 <그림 3.1.2>와 같은 실험모형에 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 양이온과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 음이온 용

액을 각각 50 mg/L의 농도로 제조한 후 저장수조에 채웠다. 모형에 각각의 시험 여재를 충전한 후 정량펌프를 이용하여 하부에서 상부로 실험용액을 공급하여 통과한 여액을 시간별로 채취하였다. 시료는 Dionex사의 DX-100 이온크로마토그래피로 분석하였으며 전체적인 실험결과를 <표 3.1.4>에 나타내었다.

흡착에 관한 이론 및 모형 식에는 Langmuir isotherm, BET isotherm, Freundlich isotherm, LRC equation, Ideal solution theory 등 여러 가지가 있으나 일반적으로 Langmuir isotherm, Freundlich isotherm이 널리 쓰인다. 흡착제에 흡착물질이 빠르게 흡착되지만 평형흡착량에 도달하기 위해서는 상당한 시간이 필요하다. 그래서 본 실험에서는 여재별 흡착실험의 기초적인 흡착특성 및 흡착여부를 판명하기 위하여 실시되었으므로 Breakthrough curve까지의 도달과정을 고려하지 않고 체류시간이 지난 후 약 100시간을 기준으로 하여 여재별 흡착특성을 실험하였다.

가) 시간에 따른 여재별 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 양이온 흡착실험 결과

흡착실험 모형장치에 각각의 여재를 충전한 후 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 양이온을 50 mg/L로 제조하여 정량펌프로 6 ml/min의 양으로 공급하고 각각의 계획 시간에 채수한 후 결과를 분석하여 <그림 3.1.3>에 나타내었다.



<그림 3.1.3> 시간에 따른 여재별 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 흡착농도 변화

<표 3.1.4> 시간에 따른 여재별  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  이온의 흡착특성 결과

(단위 : mg/L ND: 불검출)

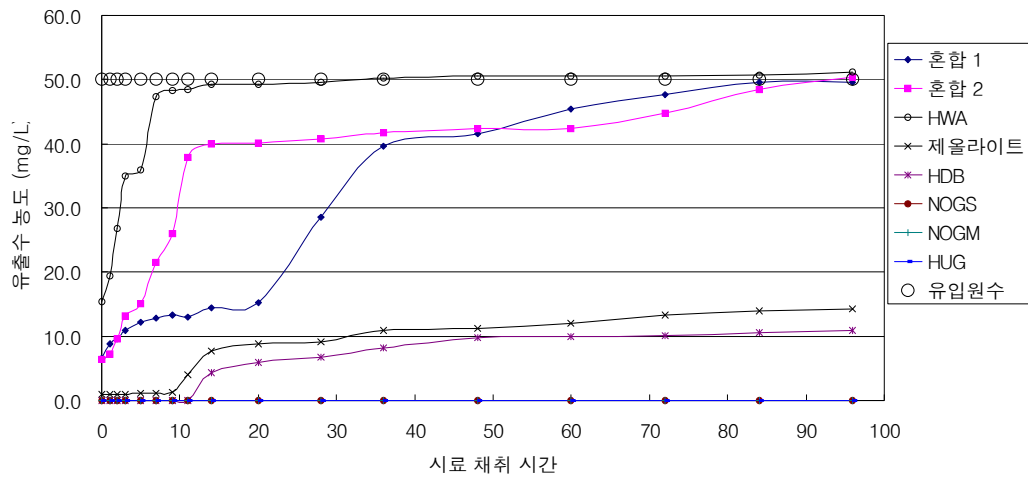
여재종류 시료채취시간 이온	혼합 1			혼합 2			HWA			제올라이트			유입수 농도
	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	
체류시간 경과 후	1.1	16.4	6.5	0.7	14.5	6.4	5.2	32.2	15.3	ND	13.8	1.0	50.0
1 시간 경과 후	1.2	18.7	8.9	ND	16.1	7.2	8.3	34.1	19.4	0.1	14.0	1.0	50.0
2 시간 경과 후	1.1	19.9	9.6	ND	21.3	9.7	14.2	37.3	26.8	0.5	14.6	1.0	50.0
3 시간 경과 후	0.9	21.6	10.9	1.3	26.9	13.1	18.4	39.9	35.0	1.3	15.4	0.9	50.0
5 시간 경과 후	0.5	23.1	12.1	0.7	29.7	15.2	21.4	39.9	35.9	0.7	18.4	1.1	50.0
7 시간 경과 후	2.0	23.7	12.8	0.7	34.6	21.4	27.7	42.7	47.2	2.3	27.5	1.2	50.0
9 시간 경과 후	2.2	24.5	13.4	0.3	36.7	26.0	31.1	46.2	48.2	1.3	32.3	1.2	50.0
11 시간 경과 후	1.7	23.4	13.0	ND	40.2	37.9	33.0	47.8	48.4	0.4	42.4	4.0	50.0
14 시간 경과 후	1.0	25.3	14.4	ND	42.1	39.9	35.8	47.0	49.2	0.7	45.5	7.8	50.0
20 시간 경과 후	2.0	26.2	15.3	ND	42.9	40.1	39.8	46.0	49.3	0.8	45.7	8.8	50.0
28 시간 경과 후	1.5	29.2	28.6	0.6	43.3	40.7	42.9	46.2	49.5	0.5	44.7	9.1	50.0
36 시간 경과 후	1.1	36.0	39.7	ND	44.6	41.7	44.0	46.6	50.2	0.4	44.8	11.0	50.0
48 시간 경과 후	1.3	38.0	41.6	0.8	44.2	42.3	44.2	46.7	50.5	0.5	45.2	11.2	50.0
60 시간 경과 후	2.7	40.9	45.3	ND	44.9	42.4	44.5	47.2	50.5	ND	45.7	12.1	50.0
72 시간 경과 후	4.0	42.3	47.7	2.6	44.9	44.8	44.5	47.6	50.5	0.4	46.0	13.3	50.0
84 시간 경과 후	4.2	43.2	49.5	0.1	44.6	48.4	44.0	47.9	50.7	0.2	46.1	14.0	50.0
96 시간 경과 후	8.3	43.0	49.6	3.3	46.0	50.3	43.2	48.1	51.2	ND	47.8	14.2	50.0
여재종류 시료채취시간 이온	HDB			NOGS			NOGM			HUG			유입수 농도
	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	
체류시간 경과 후	ND	25.8	ND	ND	16.6	ND	5.6	19.0	ND	4.0	22.3	ND	50.0
1 시간 경과 후	ND	27.2	ND	0.1	22.6	ND	5.2	21.6	ND	6.4	22.1	ND	50.0
2 시간 경과 후	2.0	33.6	ND	0.7	23.4	ND	12.6	16.4	ND	11.0	22.0	ND	50.0
3 시간 경과 후	0.2	36.7	ND	1.1	24.1	ND	13.5	23.4	ND	14.3	23.1	ND	50.0
5 시간 경과 후	ND	38.9	ND	0.8	25.3	ND	14.9	23.4	ND	16.7	23.8	ND	50.0
7 시간 경과 후	ND	41.6	ND	2.4	26.1	ND	16.9	24.2	ND	21.5	24.0	ND	50.0
9 시간 경과 후	ND	42.4	ND	1.4	26.1	ND	24.0	24.4	ND	24.2	24.5	ND	50.0
11 시간 경과 후	ND	43.3	ND	4.5	26.8	ND	26.3	25.0	ND	25.6	33.4	ND	50.0
14 시간 경과 후	ND	45.6	4.3	10.4	28.1	ND	34.2	26.1	ND	27.9	34.5	ND	50.0
20 시간 경과 후	ND	46.6	5.9	15.1	29.1	ND	32.5	27.8	ND	31.0	35.5	ND	50.0
28 시간 경과 후	0.8	47.4	6.8	20.5	39.6	ND	39.9	36.4	ND	33.4	41.6	ND	50.0
36 시간 경과 후	1.7	47.0	8.2	27.0	39.3	ND	37.0	39.0	ND	34.2	40.3	ND	50.0
48 시간 경과 후	3.6	47.1	9.8	29.9	41.8	ND	41.3	39.8	ND	34.4	42.4	ND	50.0
60 시간 경과 후	8.6	46.6	10.0	34.6	43.4	ND	38.6	43.3	ND	34.6	43.5	ND	50.0
72 시간 경과 후	5.7	47.4	10.1	35.8	43.9	ND	40.9	43.7	ND	34.6	43.8	ND	50.0
84 시간 경과 후	20.3	46.6	10.5	36.5	45.1	ND	43.7	44.6	ND	34.2	44.8	ND	50.0
96 시간 경과 후	21.6	47.4	11.0	37.1	44.9	ND	46.4	44.8	ND	33.6	45.0	ND	50.0

결과를 보면 제올라이트의 경우는 실험기간 동안 유출수에서 소량인 1 mg/L 미만이 일부 검출이 되었으나, 대부분 마지막까지 검출이 안되어서  $\text{NH}_4^+$  이온에서 강한 흡착특성을 나타내었다. 이는 실험기간 내내  $\text{NH}_4^+$ 를 약 1,728 mg 이상을 흡착한 것이다. 또한 96시간까지 유출농도의 변화가 거의 없는 점을 고려해 볼 때 더욱 장시간동안 많은 양을 흡착할 수 있을 것으로 판단된다. 혼합 1과 혼합 2의 경우 제올라이트를 20%, 25% 혼합한 특성 때문인지 비교적 우수한 흡착특성을 보였으며 혼합 2가 혼합 1보다 시간과 유출농도를 볼 때 우수함을 나타냈다. 이 결과를 토대로 제올라이트의  $\text{NH}_4^+$  이온의 흡착특성을 산술적으로 유추해 본다면 96시간에서 혼합 1이 보였던 유출농도에 이르는 시간은 50 mg/L의 농도와 6 ml/L 유량조건에서 약 900시간 후에 유출수의  $\text{NH}_4^+$ 이 서서히 증가될 것으로 보인다. HDB는 10시간 이후부터 유출수의  $\text{NH}_4^+$  농도가 증가하기 시작하여 70시간 이후부터는 약 35 mg/L에서 실험완료 시간까지 서서히 증가하며 유지되었다. HUG, NOGS, NOGM의 경우는 초기부터 흡착 농도가 증가하여 40시간 이후부터 약 15 mg/L의  $\text{NH}_4^+$  이온을 흡착하면서 유지되었다. 전체적으로 흡착이 우수한 여재별로 살펴보면 제올라이트 > 혼합 2 > 혼합 1 > HDB > HUG > NOGS > HWA > NOGM 순이었다.

#### 나) 시간에 따른 여재별 $\text{PO}_4^{3-}$ 음이온 흡착실험 결과

$\text{PO}_4^{3-}$ 의 실험에서는 NOGS, NOGM, HUG의 경우 실험완료 시간까지 유출수에서  $\text{PO}_4^{3-}$ 가 검출되지 않아서 100%의 흡착율을 보였다. 이들 여재가  $\text{PO}_4^{3-}$ 의 흡착용량이 대단히 크다는 것을 보여주는 것이며, 결과를 볼 때 이들 여재는 T-P의 제거율이 상당히 높을 것이라고 판단된다. 일본에서 있었던 선행연구에서 NOGS, NOGM이 인의 저감에 좋은 결과를 보인 것과 동일한 결과를 보였다. 일반적으로 중성조건에서는 칼슘이 불용성의  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 을, 산성 조건에서는 알루미늄, 철이 불용성의  $\text{AlPO}_4$ ,  $\text{FePO}_4$ 를 형성하여 인산은 불용화(不溶化) 된다고 알려져 있으며, NOGS, NOGM의 경우 입도만 틀린 같은 물질이므로 <표 3.1.3>의 결과에서 보듯이  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 높게 나타났다. HDB의 경우는 10시간 이후부터 서서히 유출수의  $\text{PO}_4^{3-}$  농도가 증가하여 10 mg/L를 유지하면서 흡착되었다. 또한 제올라이트는 HDB와 약간의 농도 차이를 나타내면서 비슷한 경향을 보였다.

그 외의 혼합 1, 혼합 2, HWA 여재에서는 초기부터 유출수의  $\text{PO}_4^{3-}$ 가 증가하여 시간별로 차이는 있으나 실험완료시간 안에 모두 초기 유입농도 50 mg/L의  $\text{PO}_4^{3-}$  농도가 검출되었다.  $\text{PO}_4^{3-}$ 의 흡착율이 좋은 여재별로 나열해보면 NOGS, NOGM, HUG > HDB > 제올라이트 > 혼합 1 > 혼합 2 > HWA 순이었다.

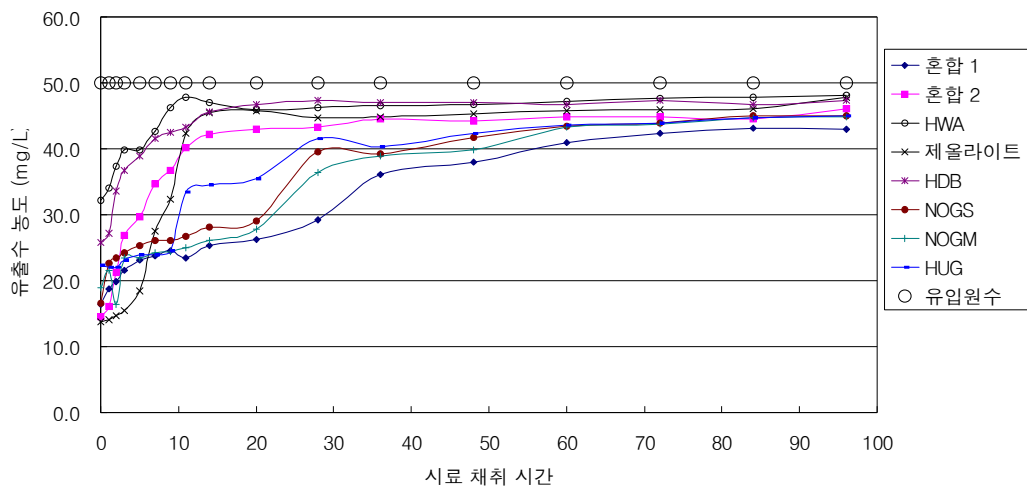


<그림 3.1.4> 시간에 따른 여재별 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 흡착농도 변화

다) 시간에 따른 여재별 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>음이온 흡착실험 결과

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우는 모든 여재가 정도의 차이는 있으나 비슷한 결과를 나타냈는데, 모든 여재가 초기부터 완전한 흡착을 보이지는 못했으며 10시간까지는 어느 정도의 흡착을 보이다가 20-40시간 사이에 급격히 감소하였다. 40시간 이후부터 서서히 감소하며 10 mg/L 내에서 유입농도인 50 mg/L에 근접한 농도를 보였다. 결과로 유추해 볼 때 여재 표면에 음전하와 그 주변에 양이온들이 존재하지만 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 전하특성상 견고한 결합이 이루어지기 힘들며 이러한 이유로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우 토양층에서도 잘 흡착되지 않은 채 지하수층까지 도달하여 지하수 오염의 대표적인 오염원이 된다고 알려져 있다. 하지만 본 실험은 여재의 물리화학적인 흡착만을 고려한 것으로써 식물이 식재되고 미생물의 활발한 서식과 또한 공기의 공급조건에 따라 탈질이나 식물에 의한 흡수 등으로 제거 기작이 생길 수 있다.

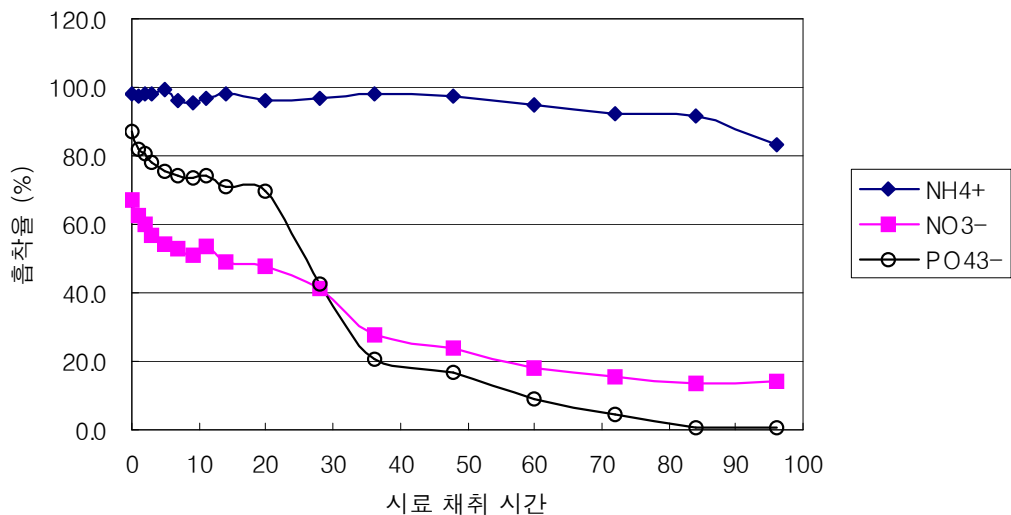




<그림 3.1.5> 시간에 따른 여재별 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 흡착농도 변화

라) 혼합 1의 이온별 흡착율

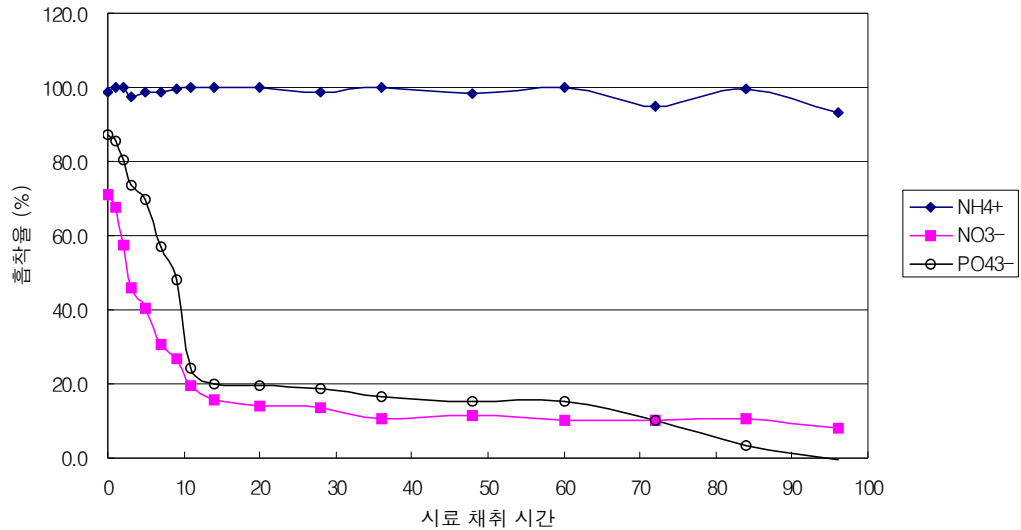
혼합 1 여재의 이온별 흡착율을 <그림 3.1.6>에서 살펴보면 대부분 90% 이상의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 흡착율을 보였으나 80시간 후부터 흡착율이 서서히 감소하는 경향을 보였으나 완료시간까지 80% 이상의 처리율을 나타내었다. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우 초기에는 90%, 70%의 흡착율을 보였으나 20시간 이후에 급격히 감소하여 20% 미만으로 감소되었다.



<그림 3.1.6> 혼합 1의 이온별 흡착율

마) 혼합 2의 이온별 흡착율

혼합 2의 결과도 혼합 1과 비슷한 경향을 나타냈는데  $\text{NH}_4^+$ 의 경우는 흡착율이 혼합 1과 비교해 볼 때 우수한 흡착율을 보였으나  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ 의 경우는 오히려 흡착율이 더욱 낮았다.



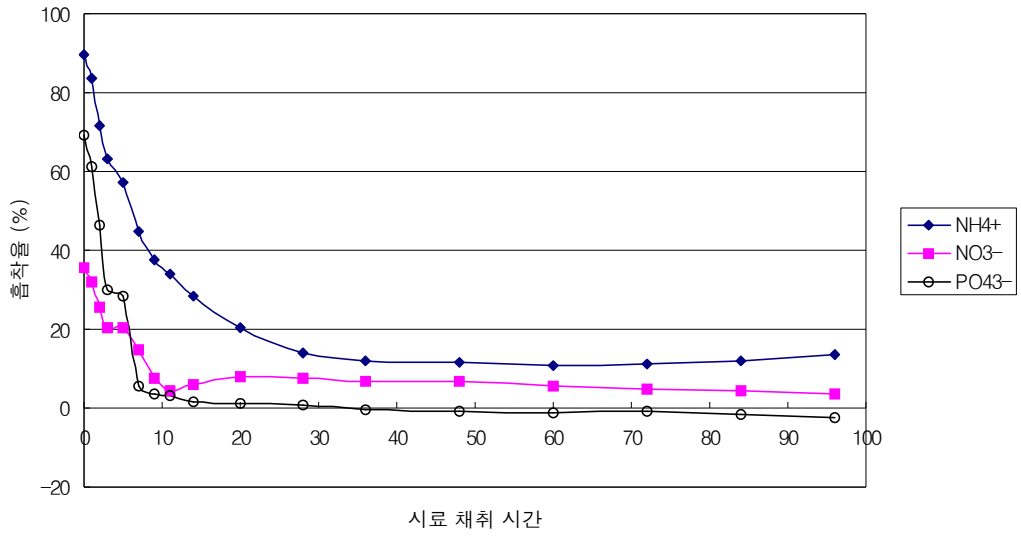
<그림 3.1.7> 혼합 2의 이온별 흡착율

바) HWA의 이온별 흡착율

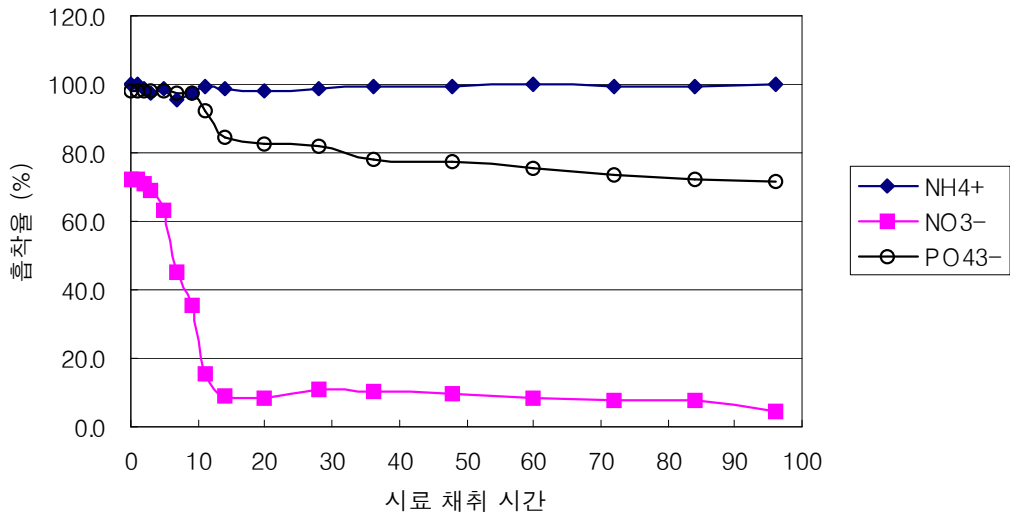
HWA에서는 모든 이온 등에서 기대했던 것만큼의 좋은 결과를 보이지 않았다. HWA는 물리화학적인 흡착관점만을 고려한다면 초기에만 어느 정도 효과가 있었으나 비교적 짧은 시간 안에 흡착율이 현저히 감소하였다. 하지만 HWA는 매우 미세한 다공질 구조를 가지고 있으므로 미생물의 생육에는 많은 이점이 있을 것으로 기대되므로 식물과 미생물이 형성된 형태의 실험조건에서는 다른 결과를 보일 수도 있을 것이라 사료된다.

사) 제올라이트(ZET)의 이온별 흡착율

제올라이트의 이온별 흡착율을 살펴보면 실험기간 내내 거의 100%의 흡착율을 보였으며 향후 장시간 실험과 더욱 정밀하고 다양한 흡착이론식에 의한 실험을 한다면 정확한 흡착능력을 규명할 수 있을 것으로 판단되며 본 실험 결과로 볼 때도 식재기반형 수질정화 여재에 도입되면 충분히 큰 효과를 보일 것으로 생각된다.  $\text{PO}_4^{3-}$ 에 있어서도 평균 80% 정도의 흡착율을 보이고 있으므로 질소와 인등의 영양물질의 동시제거에 좋은 재료가 될 것으로 기대된다.



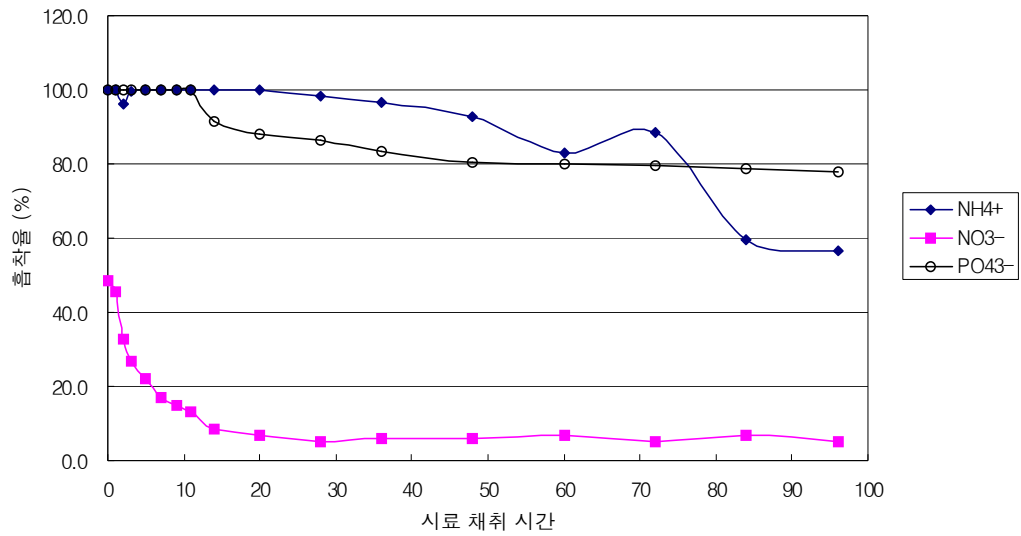
<그림 3.1.8> HWA의 이온별 흡착율



<그림 3.1.9> 제올라이트의 이온별 흡착율

아) HDB의 이온별 흡착율

HDB는 황토가 주재료인 가공 인공토양으로  $\text{NH}_4^+$ 는 평균 약 80%,  $\text{PO}_4^{3-}$ 도 약 80% 이상의 비교적 높은 흡착율을 보였으나  $\text{NO}_3^-$ 의 경우에는 다른 여재들과 유사하게 낮은 흡착율을 나타냈다. 황토는 식물에도 생육환경에 좋은 영향을 주므로 향후 추가적인 연구와 경제적인 가공방법을 개발한다면 좋은 여재가 될 수 있을 것으로 기대된다.

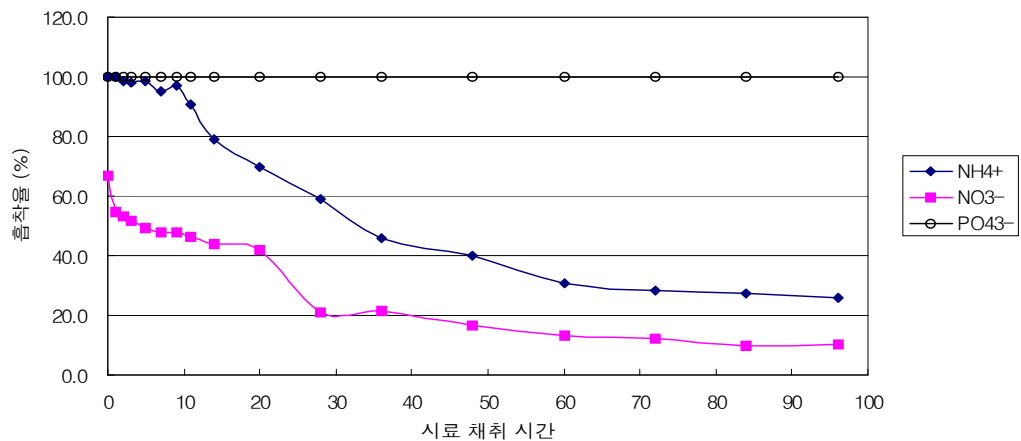


<그림 3.1.10> HDB의 이온별 흡착율

자) NOGS의 이온별 흡착율

NOGS의 흡착율 결과를 살펴보면 실험완료시간까지 계속 100%의  $PO_4^{3-}$  흡착율을 보였다. NOGS의 경우 외국의 선행연구에서도 높은 흡착제거율을 보이는 것으로 알려져 있고 본 실험에서도 증명되었다. 향후 Breakthrough curve까지의 도달실험을 통하여 더욱 정밀한 인 흡착율의 추가 실험을 하여 흡착능력의 정량화를 통하여 실용화시 설계인자를 도출할 예정이다.  $PO_4^{3-}$ ,  $NO_3^-$ 의 경우는 서서히 직선적으로 흡착율의 감소를 보였다.

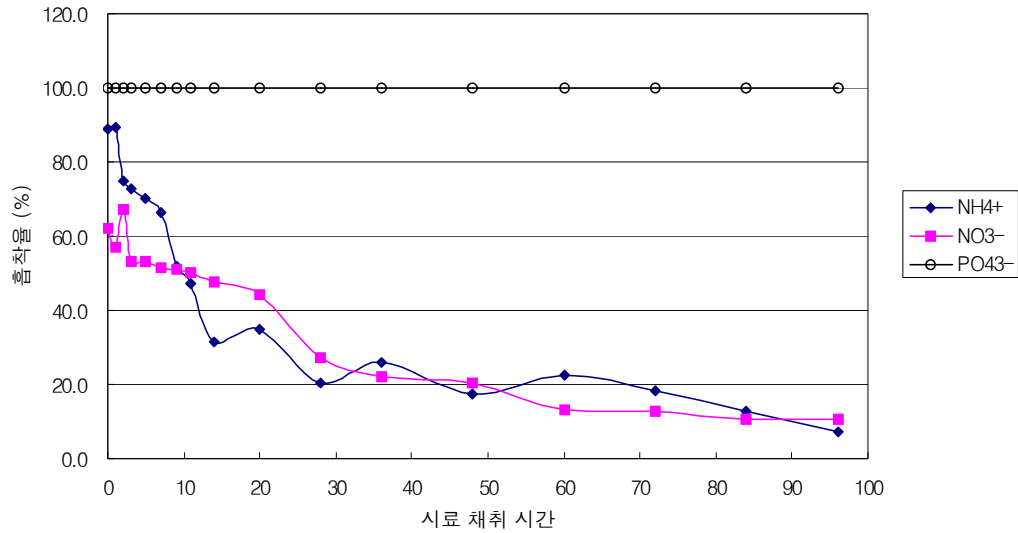
NOGS의 이온별 흡착율



<그림 3.1.11> NOGS의 이온별 흡착율

차) NOGM의 이온별 흡착율

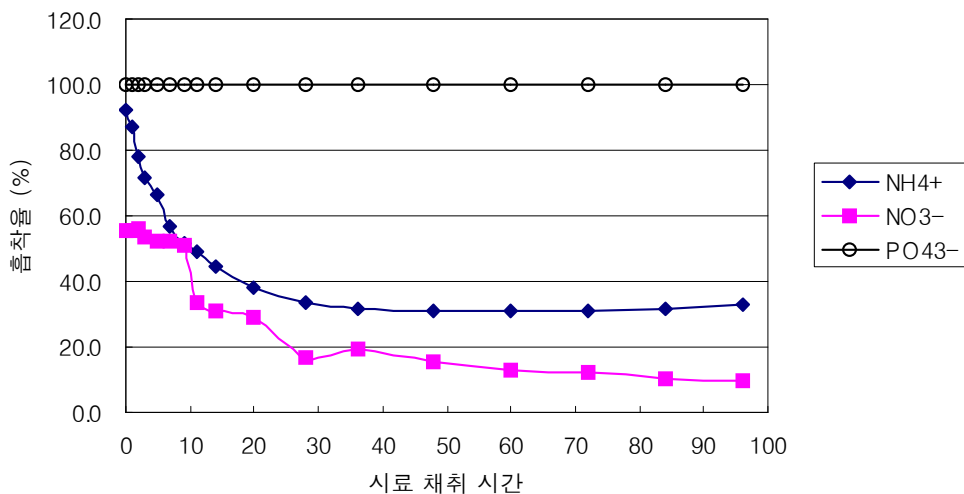
NOGM의 경우는 NOGS와 같은 재료이나 NOGS는 직경이 2-3 mm인 반면에 NOGM은 5-7 mm로 굵은 입도를 가진 것으로 NOGS와 유사한 결과를 보였으며, 단 입도가 작은 NOGS에 비하여  $PO_4^{3-}$ ,  $NO_3^-$ 의 경우에서 더욱 급격한 흡착율의 감소를 보였다.



<그림 3.1.12> NOGM의 이온별 흡착율

카) HUG의 이온별 흡착율

HUG의 경우 NOGS, NOGM과 유사한 결과를 보였고 향후의 추가적인 연구를 통하여 NOGS, NOGM과의 차이가 없다면 경제적으로 NOGS, NOGM보다 유리한 조건을 가지고 있을 것으로 판단된다.



<그림 3.1.13> HUG의 이온별 흡착율

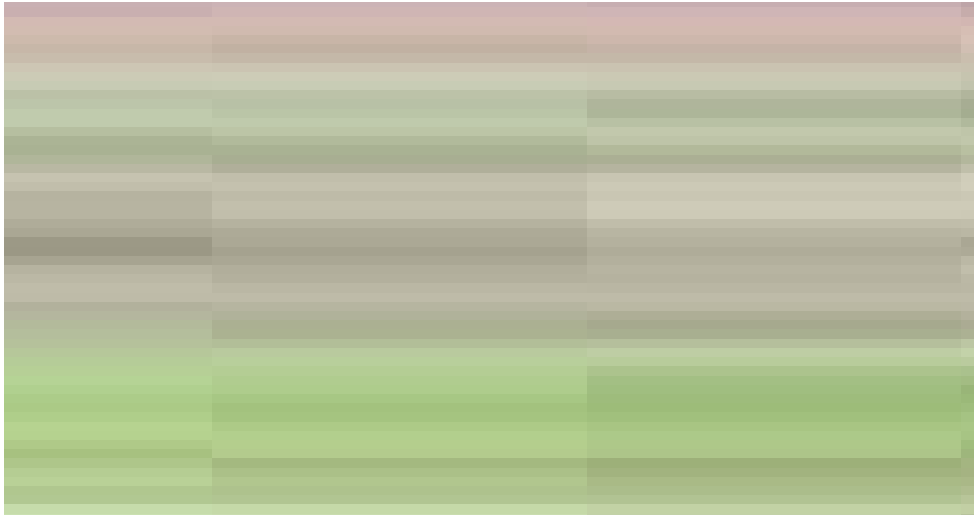
이상과 같은 흡착실험 모형장치에 의한 시간에 따른 여재별 흡착효율 실험결과를 바탕으로 우수한 여재를 선택하여 추가적인 정밀한 실험을 향후에 실시할 예정이다. 식물과 미생물의 활동을 포함한 실험을 통하여 자연정화에 적합한 고효율 여재를 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 정량적인 실험을 통하여 향후 실용화시 설계인자를 도출하여 경제성 검토와 함께 병행한다면 질소, 인과 같은 영양물질 처리에 적합한 여재를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 라. 수질정화 모형실험

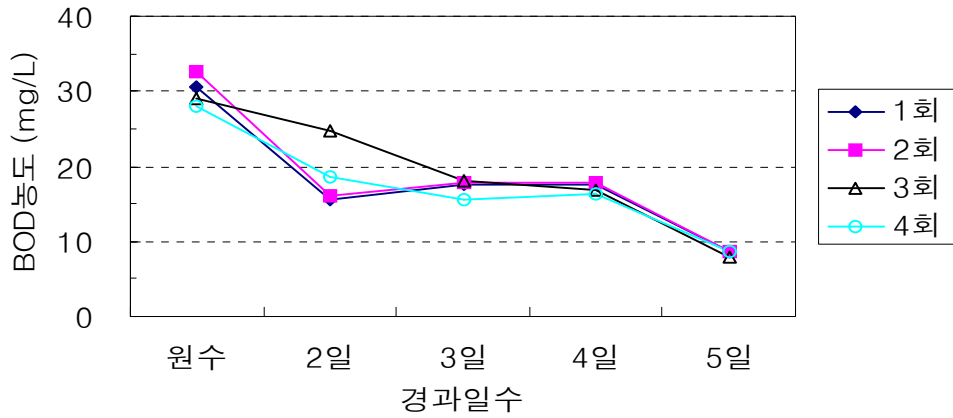
앞에서 개발한 혼합여재의 수질정화특성을 알아보기 위하여 <그림 3.1.14>와 같은 모형(길이 127 × 폭 41 × 높이 40)을 만들었다. 모형에 혼합여재를 채우고 오수를 모형의 25cm 높이로 채운 후 2일, 3일, 4일, 5일 후에 수질을 조사하였다. 본 모형실험에서는 여재 자체의 수질정화효율을 알아보기 위하여 오수를 흘러보내지 않고 모형수조에 오수를 채운 정지 상태에서 일정시간 경과 후에 수질을 조사하였다. 총 4회 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

BOD의 경우 <그림 3.1.15>과 같이 시간이 경과됨에 따라서 지속적으로 BOD 농도가 감소되는 것으로 나타났다. 처음 유입시켰을 때의 농도는 28.0~32.5 mg/L였는데, 2일 후에는 3회째를 빼고는 모두 급속히 감소되어 15.6~18.8 mg/L로 낮아졌다. 3일 이후에는 평균 17.2 mg/L로서 모두 비슷한 농도를 나타냈고, 4일 후에는 3일 후와 큰 차이 없이 평균 17.1 mg/L을 나타냈다. 그러나 5일 후에는 다시 크게 낮아져 8.0~8.8 mg/L, 평균 8.5 mg/L로 모두 비슷한 농도를 나타냈다. 5일간의 총 BOD정화효율은 71.8%를 나타냈다. 본 모형실험은 여재에 미생물이 충분히 부착·성장하지 못했고, 오수를 정지 상태로 놓아 둔 상태에서 조사를 하였기 때문에 여과작용이 충분히 일어나지 않는 상태인 점을 감안한다면 높은 정화효율인 것으로 판단된다.

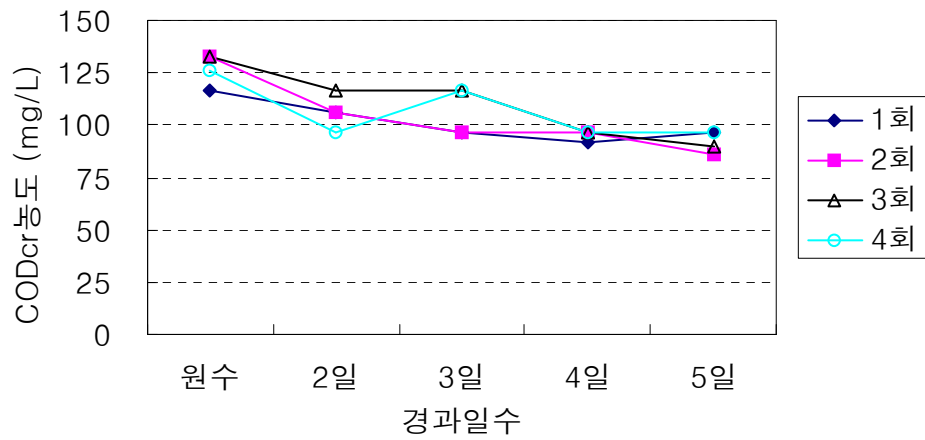
COD<sub>cr</sub>의 경우는 <그림 3.1.16>과 같이 1, 2, 3, 4회 모두 서서히 감소되는 경향을 보였다. 처음 유입시켰을 때의 농도는 평균 116.5~132.7 mg/L였는데, 2일 후에는 평균 106.3 mg/L로 낮아져 16.3%의 제거율을 보였다. 3일 후에는 2일 째와 차이가 없이 평균 106.3 mg/L을 나타냈고, 4일 후에는 95.2 mg/L을 나타내 25.1%의 제거율을 보였다. 5일 후에는 86.1~96.2 mg/L로 낮아져 평균 27.5%의 제거율을 보였다.



<그림 3.1.14> 수질정화모형실험

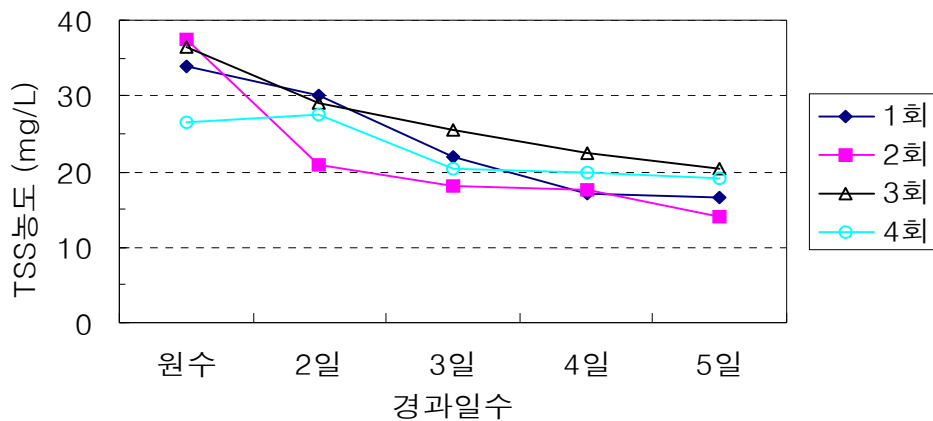


<그림 3.1.15> 모형실험에서 BOD농도 변화



<그림 3.1.16> 모형실험에서 CODcr농도 변화

TSS의 경우는 <그림3.1.17>과 같이 시간이 지남에 따라 지속적으로 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 원수의 농도는 26.5~37.3 mg/L, 평균 33.6 mg/L였는데, 2일 후에는 평균 26.9 mg/L로서 19.9% 정도가 제거되었다. 그 후에도 지속적으로 낮아져 3일 후에는 35.9%, 4일 후에는 42.6%가 제거되었고, 5일 후에는 47.9%가 제거되어 평균 17.5 mg/L로 낮아졌다. TSS의 경우 5일간의 제거율이 50% 이하로 낮게 나타났는데, 이는 인공습지 접촉여재의 가장 큰 역할 중의 하나인 여과기능이 작용하지 않았기 때문이다. 즉, 물이 흐르는 경우는 여재의 여과기능에 의해 부유물질이 잘 제거되지만, 본 기초실험에서는 여재자체의 정화효율을 살펴보기 위하여 오수가 정지 상태에서 실험을 실시하였기 때문에 여과기능이 충분히 작용하지 않아 부유물질의 제거효율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

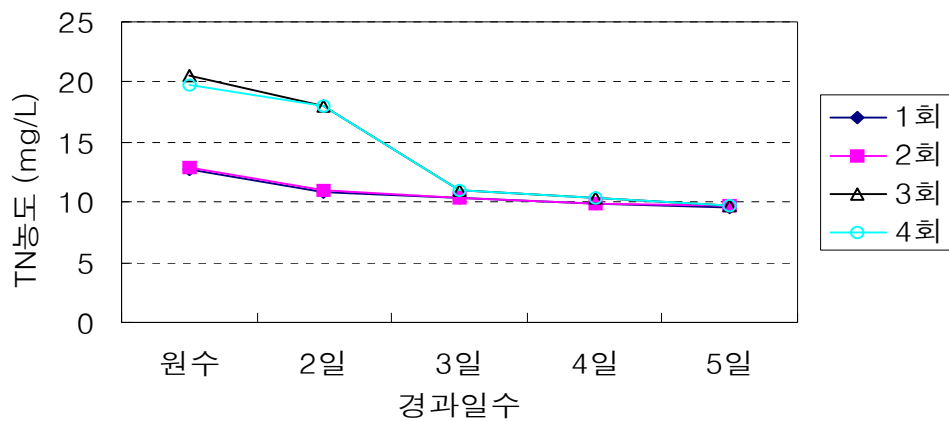


<그림3.1.17> 모형실험에서 TSS농도 변화

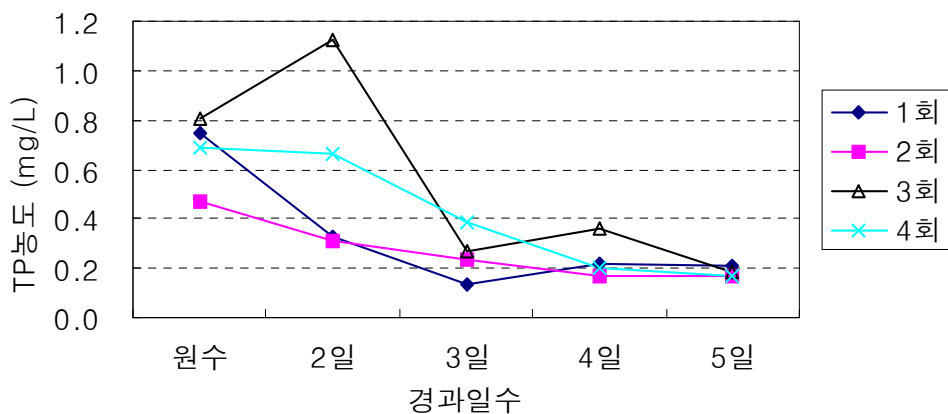
TN의 경우는 <그림3.1.18>와 같이 3일까지는 급속히 농도가 낮아지고 그 이후에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 1, 2회째 유입수 농도는 평균 12.80 mg/L였는데, 3일 후 10.40 mg/L로 낮아지고 그 이후에는 큰 변화가 없었다. 2, 3회째의 경우도 평균 20.12 mg/L의 유입수가 3일 후에 10.99 mg/L로 급속히 낮아진 이후에는 큰 변화가 없었다. 따라서 5일 후의 농도는 평균 9.7 mg/L을 나타냄으로서 41.1%만이 제거되는데 그쳤다. 이와 같이 총질소의 제거율이 낮은 것은 첫째로 여재에 미생물이 충분히 부착·성장하지 못한 상태이고, 둘째로 본 혼합여재는  $\text{NH}_4^+$ 의 흡착효율이 높아 오수 중에 있던 암모니아성질소가 초기에 흡착되었다. 그러나 오수가 정지 상태이고 포기를 해주지 않았기 때문에 호기성상태가 확보되지 않아 유기성질소가 암모니아성질소로 충분히 질산화되지 않았기 때문으로 판단된다. 셋째로 여과작용이 발휘되지 않아 부유물질에 부착되어 있던 질소성분이 제거되지 않았고, 넷째로 여재표면에 식물을 식재하지 않아 식물에 의한 질소성분의 흡수·제거가 없었기 때문인 것으로 판단된다. 이상과 같은 내용들을 반영하여 정화시설을 설치한다면 질소의 제거율도 높일 수 있을 것으로 판단된다.



TP는 <그림3.1.19>과 같이 TN의 경우와 마찬가지로 3일까지는 급속히 농도가 낮아지고, 그 이후에는 거의 변화가 없었다. 유입수의 농도는 0.47~0.81 mg/L, 평균 0.70 mg/L였는데, 2일 후에는 3회째를 제외하고는 0.31~0.66 mg/L로 낮아졌다. 3일 후에는 더욱 낮아져 0.14~0.38 mg/L, 평균 0.26 mg/L로 낮아져 62.3%가 제거되었다. 그 후에는 변화가 크지 않았으나 조금씩 농도가 감소되어 5일 후에는 평균 73.1%가 제거된 0.18 mg/L로 낮아졌다. 이와 같이 TP는 비교적 제거효율이 높았는데, 이는 흡착실험에서 살펴본 바와 같이 혼합여재의  $PO_4^{3-}$  흡착효율이 높기 때문이다. 따라서 본 실험에 이용된 혼합여재는 우리나라 농업용수원의 대부분을 차지하는 저수지의 부영양화 제한 인자인 인의 제거에 효과가 있을 것으로 판단된다.



<그림3.1.18> 모형실험에서 TN농도 변화



<그림3.1.19> 모형실험에서 TP농도 변화

이상과 같이 본 혼합여재는 BOD와 TP제거효율은 높은 반면 TSS와 TN의 제거효율은

낮은 것으로 나타났다. 이는 본 기초실험에서는 오수가 정지 상태에서의 수질변화 상태를 조사한 결과이기 때문에 여과작용이 충분히 발휘되지 못했기 때문이다. 지하흐름형 인공습지의 경우 여재를 통과하면서 많은 부유물질이 여과-제거되는 것은 많은 문헌에서 제시되고 있다. 따라서 본 혼합여재를 수질개선용 지하흐름 인공습지의 여재로 사용하면 오수가 계속 흘러가는 상태를 유지하게 되므로 여과작용이 발휘되어 부유물질 제거효율이 높아질 것으로 판단된다.

## 2. 농수로 적용을 위한 수질정화 재료에 관한 성형화 제품 개발

### 가. 재료에 대한 성형화 적용 시험

#### 1) 실험 개요

본 연구에서 조사된 식물생육이 가능한 수질정화 재료들은 대부분 다공질의 입상 재료들로서 비중이 가벼우며, 다공질의 특성을 나타낸다. 이들은 고효율 인공습지의 기반재료로서 충분히 수질정화에 효과를 나타낼 수 있으나 그대로 농수로 적용하기에는 강우에 의한 유실 등으로 인하여 농수로의 현장적용에는 어려움이 많다. 그리고 고효율 인공습지를 위해서는 균일된 입도 형태로 재료들을 가공하는 과정에서 많은 분말 부산물이 발생하고 이는 수질정화 효율 면에서는 동일한 효과가 예상되기는 하나 농수로 적용을 위한 안정된 성형화가 필요하고 부산물 자원의 활용을 통하여 경제적인 상호보완적 이용측면에서 본 성형화 연구가 필요하다. 본 연구에서는 농수로에서 수리학적 안정성을 유지하면서 수질정화 효과를 목적으로 하는 성형화 된 수질정화체를 개발하고자 한다. 수질정화체를 성형화하기 위해서는 추가적인 배합재료에 관한 연구와 안정된 강도를 발현할 수 있는 기술들이 함께 개발되어야 하므로 다양한 산업부산물 및 고화재료들에 관하여 실험을 진행하였다,

#### 2) 성형화를 위한 배합재료

##### 가) 고로슬래그 시멘트(Blast Furnace Slag Cement)

본 연구에 사용된 고로슬래그 시멘트는 한국산업규격 KS L 5210에 따라 고로슬래그 혼합량을 중량기준 24%~65%로 규정된 것이다. 슬래그 시멘트의 등급은 특급과 1급으로 구분하고 있으며 이에 대한 큰 차이는 압축강도로 차등화 하고 있다. <표 3.1.5>는 고로슬래그 시멘트의 물리적 성능(KSL 5210)을 나타내고 있으며, <표 3.1.6>은 고로슬래그 시멘트의 화학성분(KSL 5210)을 나타내고 있다.

<표 3.1.5> 고로슬래그 시멘트의 물리 성능(KS L 5210)

항 목		특 급	1급
분말도( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	비표면적 각각	2600이상	2600이상
	평균	2800이상	2800이상
압축강도( $\text{Kgf}/\text{cm}^2$ )	3일	130이상	100이상
	7일	200이상	160이상
	28일	250이상	250이상
수화열( $\text{Cal}/\text{g}$ )	7일	70이하	70이하
	28일	80이하	80이하
모르타르의 공기함유량(%)		12이하	-

<표 3.1.6> 고로슬래그 시멘트의 화학성분(KS L 5210)

화학성분	특 급	1 급
무수황산( $\text{SO}_3$ )%	3.0이하	4.5이하
강열함량%	3.0이하	3.0이하
황분(S)%	2.0이하	-

나) 고로슬래그(Blast Furnace Slag)

본 연구에 사용된 고로슬래그는 충북 청원소재 S사에서 생산되는 고로슬래그 미분말을 사용하였다. <표 3.1.7>에 그 물리화학적 성질을 나타내었다.

<표 3.1.7> 고로슬래그의 물리 화학적 성질

구분	물리적 성질		화학적 성질					석고첨가 유무
	비중	비표면적 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	MgO (%)	$\text{SO}_3$ (%)	강열감량 (%)	염화물이온	염기도	
성신	2.91	4481	4.73	0.08	0.02	0.002	1.83	무

다) 소성 황토(Loess Clay)

황토는 중국에서 생산된 고온 소성하여 활성화 시킨 황토 미분말( $1000^\circ\text{C}$  이상)을 사용 하였으며, <표 3.1.8>에 그 물리화학적 성질을 나타내었다.

<표 3.1.8> 황토 분말의 물리 화학적 성질

특성 구분	입도(%)				화학적 성분(%)					비중
	체를 통과하는 것의 무게 백분율				SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	강열감량	
	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.08mm						
고온소성 (외국)	100	100	99	88	61.4	6.62	15.1	6.42	2.9	2.72

라) 소석회(Hydrated lime)

소석회를 자극제로 사용하는 목적은 고로슬래그의 수화반응에 필요한 강알칼리성을 부여 하는데 있다. 소석회는 생석회의 수화·소화에 의하여 생성되는 결정체로써 온도의 변화에 따라 형성되는 결정도는 서로 다른 형태를 나타낸다.



고온에서 소성할 경우 결정핵의 생성량이 많고 또한 빠른 속도로 결정체를 형성하므로 입자직경의 감소에 의한 밀도는 줄어들고 기공율과 비표면적이 증가하기 때문에 고로슬래그에 대한 자극작용은 우수하게 된다. 순도가 높은 것은 72~74%의 CaO와 23~24%의 물이 포함되어 있으며 순도가 낮은 것은 40~48%이 CaO와 25~34%의 MgO, 15~27%의 물이 포함되어 있다. 소석회는 온도상승에 따라 용해도는 감소하지만 높은 pH값을 유지하는 특성이 있으므로 고로슬래그의 자극제로 사용할 경우에 소량 첨가하여도 수분과의 접촉에서 생성되는 산성피막을 빠른 속도로 파괴할 수 있으므로 수화반응의 가속화에 따른 초기압축강도는 훨씬 증가된다.

소석회는 국내 강원 영월의 H사에서 생산되는 입도가 다른 두 종류의 소석회 미분말을 사용하였으며 <표 3.1.9>에 그 물리화학적 특성을 나타내었다.

<표 3.1.9> 소석회 분말의 물리 화학적 성질

구분	입도	비중	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO(%)	MgO(%)
1	200mesh통과율=90%	2.70	0.54	70.04	0.97
2	325mesh통과율=97%	2.70	1.10	71.63	1.79

마) 무수석고(Unhydrated Gypsum)

석고는 결합수에 따라 이수, 반수, 무수로 분류할 수 있다. 천연석고는 일반적으로 이수석고로 존재하며 무수석고는 이수석고 혹은 반수석고를 소성하여 제조할 수 있지만 소성온도, 시간, 및 속도의 변화에 따라 응결성상이 서로 다른 형태의 결정체를 생성한다. 따라서 이들이 고로슬래그에 대한 자극작용은 서로 다른 경향을 나타내지만 공통적으로 고로슬래그의 입자표면에 흡착하여 용출된 산화알루미늄 이온과 수화 반응하여 에트링가이트를 생성하는 특징이 있기 때문에 초기강도 발현에서 중요한 역할을 발휘한다. 석고의 자극작용은 용출량에 의하여 결정되므로 시간경과에 따른 용출속도를 파악할 필요가 있다. 초기 반수석고의  $SO_4^{2-}$  이온 용출속도는 이수석고의 2배 이상이고 이수석고는 시간의 경과에 따라 증가하지만 온도에 따른 요해도가 일정하기 때문에 그 이상 용출되지 않으며 가용성 무수석고의 용출속도는 반수석고의 4/5정도로 알려져 있다. 무수석고는 국내 전남 광양소재 C사에서 생산되는 두 종류의 무수석고 미분말을 사용하였으며 <표 3.1.10>에 그 물리화학적 특성을 나타내었다.

<표 3.1.10> 무수석고 분말의 물리 화학적 성질

구분	물리적 성질			화학적 성질				
	비중	비표면적 ( $cm^2/g$ )	입도	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaSO <sub>4</sub> (%)	강열감량 (%)
1	2.93	4550	200mesh 통과율=100%	0.80	40.54	56.79	96.57	0.95
2	2.93	4910	325mesh 통과율=92.7%	0.80	40.54	56.79	96.57	0.95

바) 메타카올린(Meta-Kaolin)

시멘트-콘크리트에 적용할 수 있는 메타카올린(meta-kaolin)은 카올린을 특수 처리하여 제조된 것으로 대부분 할로이사이트(halloysite)로 구성되어 있고, 서부 경남지역의 풍화잔류형 광산에 많이 분포하고 있는 재료를 사용하였다. 주성분은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 이루어져 있다. <표 3.1.11>에 물리화학적 특성을 나타내었다.

<표 3.1.11> 메타카올린 분말의 물리 화학적 성질

성분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	Blaine ( $cm^2/g$ )
함유량 (%)	56	37	2.4	0.3	2.4	0.2	0.9	12,000

사) 혼화제(admixture)

혼화제는 국내 충남 아산소재 A사에서 생산되는 비중 1.20, pH 8.75의 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였다.

아) 폐유리

본 연구에서 사용된 폐유리는 유리병과 유리제품으로 광범위하게 사용되고 있는 Soda-Lime 계열의 폐유리로서 잔골재 크기인 5mm의 크기로 Roll-mill을 이용하여 파분쇄하였으며 화학성분 결과는 <표 3.1.12>와 같으며 SiO<sub>2</sub>가 71±1(%)으로 가장 많고 그 다음으로 Na<sub>2</sub>O(13.10%)와 CaO(8.91%) 성분이 많이 함유된 것으로 나타났다.

<표 3.1.12> 폐유리 분말의 물리 화학적 성질

성분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
함유량 (%)	71±1	1.47	0.07	8.91	4.04	0.24	13.10	0.83

3) 배합비 및 시편성형제작

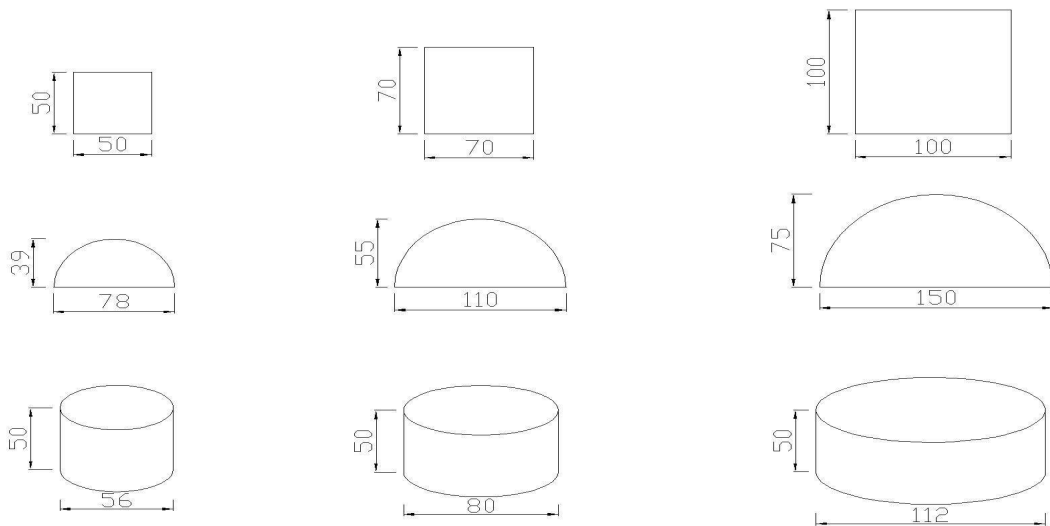
배합은 각 재료의 첨가량에 따른 최적의 배합을 도출하기 위해 고로슬래그 시멘트, 황토, 고성능 감수제, 메타카올린, 소석회, 무수석고의 양을 전체 바인더 비율에 맞추어 배합을 도출하였다. 고성능 감수제(유동화제)는 1%의 양으로 고정하였고 소석회, 무수석고, 메타카올린을 변수로 정하여 서로의 반응성이 어떻게 혼입 되었을 때 최적의 성능을 보이는지 살펴 보기 위하여 배합을 도출하였다. 여기서의 결과에 따라 메타카올린의 효과와 소석회와 고로슬래그 시멘트 사이의 반응성이 그 양에 따라서 어떻게 반응을 하는지 판단할 수 있을 것이다. 또한 골재는 식재기반형 여재 부산물을 사용하였으며 골재 공극률에 맞추어 바인더의 양을 조절하고 3~5mm의 골재 크기를 사용하였다. 공극률은 20~25%로 일정하게 배합률을 조절하였으며, <표 3.1.13>에 수질정화체 배합표를 나타내었다.

수질정화체 제작에 있어 건비빔을 하여 바로 팬형 믹서기에 골재를 넣고 분말 재료들을 따로 넣어서 바로 믹싱을 하였다. 그 다음 물, 고성능감수제와 함께 2~3분간 비빔을 실시하였다. 이때 물량은 페이스트의 플로우 값을 200±10mm가 되게 조정하였으며 각 배합의 Case마다 물량은 조금 차이가 있었다. 비빔 후 아크릴 몰드를 사용하여 바이브레이터로 일정시간 다져주었으며 마무리는 최대한 끝면이 평평하도록 수질정화체를 제작하였다. 수질정화체는 수리모형 실험을 위해 총 3가지로 정육각형, 반구형, 원기둥형으로 크기에 변수를 두어 제작하였다. 최적배합비를 도출하기 위한 압축강도 실험 시편은 정육각형 5cm×5cm×5cm의 큐빅시편으로 제작을 하였다. 양생은 증기양생(40~60℃)을 실시하고 각각의 시험을 행하

기 전까지 소정의 건기양생(20℃)을 실시하였다. <그림 3.1.20>은 수질정화체 시편모습과 제 원도를 보여주고 있다.

<표 3.1.13> 수질정화체 배합표

배합	고로슬래그 시멘트 (45~50%)	황토 (30%)	물	고성능 감수제 (1%)	여재 부산물	폐유리 분말	무수 석고	메타 카올린	고로 슬래그	소석회
1	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	0	0	77.5
2	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	0	0	91	0
3	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	0	18.2	72.8	0
4	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	0	27.3	63.7	0
5	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	0	77.5	0
6	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	15.5	62	0
7	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	23.25	54.25	0
8	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	0	77.5
9	144.9	101	87.6	3.4	1534	42.5	6.75	6.75	0	77.5
10	104.6	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	39.08	0	77.5
11	95.8	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	58.62	0	77.5
12	104.6	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	39.08	77.5	0
13	95.8	101	87.6	3.4	1534	42.5	13.5	58.62	77.5	0
14	104.6	101	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	39.08	77.5
15	95.8	101	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	58.62	77.5



<그림 3.1.20> 수질정화체 시편과 제원도

#### 4) 실험결과

압축강도 시험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의해 정육각형 시편으로만 각각 실시하였으며 실험결과는 <표 3.1.14>와 같다. 압축강도는 시편 3개의 평균값을 사용하였다.



<표 3.1.14> 실험 결과

배합	고로슬래그 시멘트 (40~45%)	황토 (35%)	물	고성능 감수제 (1%)	여재 부산물	폐유리 분말	소석 회	무수 석고	메타 카올린	고로 슬래그	압축강도 kgf/cm <sup>2</sup>
1	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	13.5	0	0	12.8
2	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	0	0	91	24.5
3	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	0	18.2	72.8	20.3
4	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	0	27.3	63.7	22.4
5	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	0	77.5	15.4
6	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	15.5	62	14.7
7	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	23.25	54.25	16.5
8	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	0	13.5	0	15.8
9	144.9	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	6.75	6.75	0	10.5
10	104.6	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	13.5	39.08	0	16.4
11	95.8	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	13.5	58.62	0	15.9
12	104.6	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	39.08	77.5	12.6
13	95.8	116	87.6	3.4	1534	42.5	0	13.5	58.62	77.5	13.2
14	104.6	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	0	13.5	39.08	9.7
15	95.8	116	87.6	3.4	1534	42.5	77.5	0	13.5	58.62	7.5

실험 결과 소석회와 무수석고가 배합되지 않은 배합 2,3,4가 가장 높은 압축강도를 보였으며, 나머지 배합들은 20kgf/cm<sup>2</sup> 미만으로 수질정화체로서 최소한의 강도를 확보하지 못하였다. 따라서 2,3,4배합을 바탕으로 메타카올린과 굴폐각을 변수로 하여 추가 실험을 실시하였다. 추가 실험에서는 압축강도와 pH값을 측정하였으며 pH 측정은 일반수돗물을 중화시켜 24시간 후 측정하였다. 수정배합과 압축강도, pH는 다음 <표 3.1.15>과 같다.

<표 3.1.15> 수정배합과 압축강도

배합	고로슬래그 시멘트 (45%)	황토 (35%)	물	고성능 감수제 (1%)	여재 부산물	고로 슬래그	굴폐각	메타 카올린	압축강도 kgf/cm <sup>2</sup>	pH 24시간
A-1	144.9	116	87.6	3.4	1534	91	0	0	22.4	9~9.5
A-2	144.9	116	87.6	3.4	1534	0	91	0	14.4	8.5~9
A-3	144.9	116	87.6	3.4	1534	0	0	91	25.6	11~12
A-4	144.9	116	87.6	3.4	1534	45.5	45.5	0	15.7	9~9.5
A-5	144.9	116	87.6	3.4	1534	0	45.5	45.5	20.9	11~12
A-6	144.9	116	87.6	3.4	1534	45.5	0	45.5	22.6	11~12
A-7	144.9	116	87.6	3.4	1534	30.3	30.3	30.3	15.9	10.5~11

수정배합 압축강도와 pH 측정결과 압축강도 20kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 만족하면서 pH값이 낮은 배합은 A-1으로 수질정화체로서 최적의 배합을 도출하였다. 메타카올린을 배합하면 강도는 향상 되지만 pH값은 높게 나타났다. 이는 카올린 성분이 pH값에 영향을 준다고 사료되며 굴폐각의 경우 pH값은 높게 나타나지 않았지만 강도발현에 있어 최소한의 강도도 확보하지 못하였다. 따라서 배합 A-1이 강도를 확보하면서 pH값을 만족하는 배합이라고 판단된다. <표 3.1.16>은 A-1 최종배합의 바인더 배합률을 현장배합으로 변환한 표이다.

<표 3.1.16> A-1 현장배합률

공극률(%)	결합재 총량(kg)	BSC (고로슬래그 시멘트)	BS (고로슬래그 )	소성황토	고성능 감수제	물	골재 (여재부산물 )
25	0.185	0.083	0.052	0.05	0.002	0.038	0.461
배합률	100%	44%	20%	35%	1%	-	-

최적으로 도출된 A-1 현장배합은 결합재(고로슬래그 시멘트, 고로슬래그, 소성황토) 총량을 100% 하였으며, 여재부산물과 물의 양은 공극률을 25%로 일정하게 유지시킬 수 있도록 계산된 값이다. 현장배합률은 현장에서 편리하도록 계산된 값으로 현장 여건의 온도에 따라 물의 양이 조금씩 다를 수 있다.

##### 5) 결론

가) 메타카올린계 성분인 산화칼슘과 산화규소의 시멘트성분 함량이 많음에 따라 PH의 값이 높게 나타났으며, 소석회와 무수석회와의 고화반응은 잘 일어났지만 고로슬래그와의 고화반응은 잘 일어나지 않아 강도에도 큰 영향을 주지 못하였다고 판단된다. 따라서 메타카올린계인 MK(메타카올린)는 수질정화체로서 최소한의 강도는 확보하였지만, pH값이 높게 나타나 부적당하다고 사료된다.

나) Recycle 재료인 폐유리와 굴폐각 자연재료를 여러배합으로 실험해본 결과 전체 바인더량의 20%인 굴폐각량이 수질정화체의 형태를 유지할 수는 있었지만 압축강도 20kgf/cm<sup>2</sup> 미만으로 수질정화체의 최소강도를 확보하지 못하였다. 이는 굴폐각의 주성분인 석회질계 성분이 고로슬래그와 메타카올린과의 고화반응을 전혀 하지 못하였다고 판단된다. 따라서 낮은 pH값은 환경적인 측면에서 만족된다고 판단되나, 가장 중요한 강도가 현저히 떨어지므로 수질정화체로서 부적합하다고 판단된다.

다) 수질정화체의 강도 문제를 해결하기 위해 Recycle 재료인 고로슬래그 시멘트와 소성

황토를 여러 배합으로 실험해본 결과 35%의 황토량이 PH값을 9~9.5이하로 떨어 뜨렸으며, 최소한의 고로슬래그 시멘트를 배합하여 강도문제를 해결할 수 있었다. 압축강도 20~25kgf/cm<sup>2</sup> 정도가 수질정화체로서 적당하다고 판단하며 경제적인 측면에서도 적합하다고 판단된다.

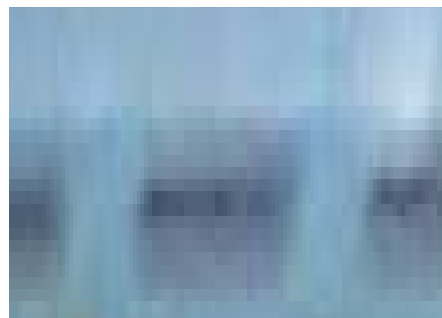
나. 수질정화체의 물리·화학적 특성

1차년도인 2005년에 흡착 및 모형실험을 통하여 오염물질의 흡착효율이 높은 접촉여재를 개발하고, 이 접촉여재를 이용하여 용수로의 수질정화를 위한 수질정화체를 만들었다<그림 3.1.21>. 고효율 접촉여재와 수질정화체의 수질정화재료로서의 이용 가능성을 알아보기 위하여 물리·화학적 특성을 분석하였다.

여재의 물리·화학적 특성은 pH(1:5), 전기전도도(EC 1:5), 양이온치환용량(CEC), 총질소(Kjeldahl 법), 총인(HClO<sub>4</sub> 분해법), 유효인산 함량(Bray NO.1법), 유기물 함량(Walkley & Black법) 등을 측정하였다.



<고효율 접촉여재>



<수질정화체>

<그림 3.1.21> 여재 및 수질정화체

pH는 <표 3.1.17>과 같이 고효율 접촉여재가 7.6으로서 중성을 나타낸 반면 수질정화체는 11.2로서 알칼리성을 나타냈다. 이는 수질정화체를 만드는 과정에서 여재들 간의 결합을 위해 사용한 바인더에 pH가 높은 시멘트 성분 등이 들어있기 때문이다.

전기전도도 (EC)는 습지 식물 및 미생물을 이용한 처리 프로세스로 유입된 오수의 거동에 영향을 미치는데, 4 dS/m 이하인 경우가 식물 및 미생물의 성장매체로서 적합한 것으로 알려져 있다. 여재의 EC는 0.26 dS/m이고, 수질정화체의 EC는 2.06 dS/m로서 4 dS/m보다 낮게 나타났다. 따라서 여재 및 수질정화체는 미생물이 부착 성장하여 생물막을 형성하고 오염물질을 분해할 수 있는 성장매체로 이용 할 수 있기 때문에 수질정화재료로 사용 가능한 것으로 판단된다.

양이온치환용량 (CEC)은 양이온을 붙잡을 수 있는 능력을 나타내는데 CEC가 높으면 오수 중의 양이온을 많이 흡착할 수 있기 때문에 오수정화효율이 높아질 수 있다. 수질정화재료로 사용하기 위한 적정 CEC 기준을 판별하기는 어렵지만 수질정화를 위한 인공습지의 여재로서 사용되기 위해서는 CEC가 15 meq/100g 이상의 값을 가지는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다. 본 연구를 통하여 개발된 여재 및 수질정화체의 CEC는 각각 20.05, 37.65 meq/100g이므로 양이온치환용량에 의한 오수정화를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

수질정화를 위한 접착여재 또는 수질정화체는 일반적으로 유기물, 영양염류 등의 함유량이 낮은 것이 좋다. 본 연구를 통하여 개발된 여재의 유기물함량은 0.14%였고, 수질정화체의 유기물함량은 0.20%로서 모두 낮은 값을 나타냈기 때문에 수질정화재료로서 이용하기에 유리한 것으로 판단된다. 유효인산은 여재가 13.65 mg/kg이었는데, 수질정화체는 0.50mg/kg으로 낮아 수질정화재료 측면에서 볼 때 화학성이 개선된 것으로 볼 수 있다. 총질소(TN)와 총인(TP)의 경우도 여재가 각각 338.28, 599.88 mg/kg에서 수질정화체는 155.23, 342.41 mg/kg로 낮아진 것으로 보아 수질정화체를 만드는 과정에서 수질정화를 위한 재료 측면에서의 화학성이 개선된 것으로 볼 수 있다.

<표 3.1.17> 여재 및 수질정화체의 화학적 성질

구분	pH	전 기 전도도 (dS/m)	양이온 치환용량 (meq/100g)	유기물 (%)	유효인산 (ppm)	TN (mg/kg)
접촉여재	7.6	0.26	20.05	0.14	13.65	338.28
수질정화체	11.2	2.06	37.65	0.20	0.50	155.23
구분	TP (ppm)	강열감량 (%)	Ca <sup>++</sup> (meq/100g)	Mg <sup>++</sup> (meq/100g)	K <sup>+</sup> (meq/100g)	Na <sup>+</sup> (meq/100g)
접촉여재	599.88	3.3	12.4	1.9	1.6	0.6
수질정화체	342.41	8.8	57.3	1.8	11.4	4.6

강열감량은 여재가 3.3%였는데 수질정화체는 8.8%로 증가되었다. 강열감량이 증가된 것은 수질정화체를 만드는 과정에서 Ca<sup>++</sup>이 증가되었기 때문이며 Ca<sup>++</sup>은 알카리성 조건에서 인산과 불용성염을 형성하기 때문에 인산제거효과를 기대할 수 있다.

기타 Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> 등은 여재가 각각 12.4 meq/100g, 1.9 meq/100g, 1.6 meq/100g, 0.6 meq/100g이었고, 수질정화체는 각각 57.3 meq/100g, 1.8 meq/100g, 11.4 meq/100g, 4.6 meq/100g를 나타냈다.

이상의 화학성 분석을 통해 고효율 접촉여재 및 수질정화체가 수질정화물질로서 이용 가능한 것으로 판단된다.

### 3. 수질정화체의 적용성 평가

#### 가. 수리학적 안전성 평가

##### 1) FLOW-3D를 이용한 수리적 안정성 해석

###### 가) 하천흐름의 수치모의 개념과 기법

###### (1) 하천 수치모의의 개념

모형(Model)이란 실제 자연 현상을 이상화(Idealization), 또는 개념화(Conceptualization)시켜 표현한 것이라 할 수 있다. 모형에는 실제 흐름보다 작은 축적으로 물리적으로 만든 물리모형(Physical Model)과 실제 흐름을 이상화, 또는 단순화시켜 수학적으로 표현한 수식을 수치적으로 해석하는 수치 모형(Numerical Model) 등이 있다. 두 모형의 장단점은 여러 가지이지만, 아직까지 물리 모형은 신뢰도가 상대적으로 높고 수치 모형은 경계조건과 모형변수의 변화에 대해 상대적으로 유연하다는 것이다.

하천 수치모형의 개발은 해석하고자 하는 흐름 현상에 대한 지배 방정식을 구성하는 것으로부터 시작된다. 하천 흐름의 지배 방정식은 주로 편미분 방정식으로 주어진다. 지배방정식은 컴퓨터의 연산에 적합하게 차분식(Difference Equation) 또는 유한요소식(Finite Element Equation)과 같은 이산화식(Discretized Equation)으로 다시 표현해야 한다. 다음 단계는 이산화방정식을 적절한 프로그램 언어로 코딩(Coding)하여 컴퓨터 기종에 알맞은 기계어로 변환하는 것이다. 즉 하천 수치모형이란 실제 흐름을 일련의 수치집합으로 표현하는 것이라고 할 수 있다.(건기연, 1995).

대부분의 수치 모형은 계산 영역내의 유한한 개수의 위치(격자점)에서 종속 변수 값을 기본적인 미지수로 취급하며, 이들 미지수에 관한 연립 방정식을 구성하여 해를 구한다. 격자점에서의 종속변수 값에 관심을 가진다는 것은 미분방정식의 정확해에 포함된 연속해(continuous Solution)에 관한 관심을 이산화된 위치에서 종속변수 값에 대한 것으로 대체시킨다는 것이다. 이와 같은 방법으로 미분 방정식으로부터 구해진 방정식을 이산화 방정식(Discretized Equation)이라 한다. 이산화 방정식 유도 절차에서 격자점간의 종속 변수 분포에 대한 약간의 가정이 도입될 수도 있다. 이러한 이산화 방정식은 격자점 집합에서의 종속 변수 값을 연결시켜 주는 대수식이 되며, 미분 방정식과 동일한 의미를 갖는다(건기연, 1995). 미분방정식에 상응하는 이산화 방정식은 여러 가지 방법으로 유도될 수도 있으며, 그 대표적인 방법은 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 유한체적법(FVM) 등이 있다(건기연, 1995).

###### (2) 하천 수치모의의 기법

하천 수치모의의 대표적인 방법으로는 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 유한체적법(FVM) 등이 있으며, 각각의 수치모의 기법의 특성에 대하여 아래와 같이 정리하였다.

(가) 유한 차분법(Finite Difference Method, FDM)

Taylor 급수에 의한 방법은 유한 차분식 유도에 가장 일반적으로 이용되는 방법으로 고차 항이 생략된 Taylor급수를 사용하여 미분 방정식의 미분계수를 근사 시키는 방법이다. 이 방법에 의한 이산화 방정식 유도는 비교적 직선적이며 유연성이 적기 때문에 미분 방정식의 각 항의 물리적 의미를 명확히 설명하지 못하는 단점이 있다.

유한 차분법은 적용이 용이하기 때문에 일차원 흐름 모형과 단일 목적의 이차원 흐름 모형 개발에 자주 이용되나, 불규칙 형상의 경계를 처리하는데 어려움이 많기 때문에 범용 이차원 하천흐름 모형의 개발에서는 선호되지 않는 경향이 있다.

(나) 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)

유한 요소법은 크게 가중잔차법(weighted residual method)과 변분법(variational method)으로 나눌 수 있다. 미분방정식을 푸는 또 하나의 유력한 방법인 가중 잔차법은 근사식과 정확해의 잔차에 가중 함수를 도입하여 근사식의 계수를 결정하는 방법이다. 가중 함수를 선택하는 방법에 따라 다양한 방법이 있다. Galerkin 가중 잔차법은 이 방법의 대표적인 예이다.

유한 요소법에서는 삼각형 및 사각형이 복합된 비정형화된 격자망의 채택이 자유롭다. 이러한 특징은 불규칙한 경계형상을 갖는 흐름해석에 적합하기 때문에 범용 수치 흐름 모형은 이 방법을 선호하는 경향이 있다. 그러나 유체 흐름 해석에서 가장중요하다고 할 수 있는 '상류이송(upwind)' 특성을 아직까지는 제대로 표현할 수 없어 문제가 있다. 이러한 문제점으로 인한 오차를 줄이기 위하여 매우 조밀한 격자망을 이용해야 하며 이에 따라 대용량의 컴퓨터가 필수적이다.

(다) 유한 체적법(Finite Volume Method, FVM)

유한체적법은 적분형 유한 차분법으로 생각할 수 있으며, 또한 앞에서 언급한 가중잔차법의 특수한 방법으로 생각할 수도 있다. 수학적 기교에 기초를 두기보다는 물리적 사고에 기초를 두어 미분 방정식 각 항의 물리적 의미를 직접적으로 표현하는데 주안점을 둔다.

계산 대상 영역을 서로 중복되지 않게 몇 개의 검사체적(control volume)으로 분할하고 미분방정식을 각 제어 체적에 걸쳐 적분한다. 이때 요구되는 적분을 수행하기 위하여 격자점 사이에 종속 변수 변수화를 표시하는 부분 분포 함수가 사용된다. 그 결과가 모든 격자점에서의 종속 변수값을 포함하는 이산화 방정식이 된다. 이 방법은 미분 방정식이 미소 제어 체적에 관한 보존(conservation) 원리를 나타내는 것과 마찬가지로 이 방법으로 구해진 이산화방정식은 유한한 제어 체적에 관한 종속 변수의 보존원리를 나타낸다.

유한체적 공식화에서 가장 두드러진 특징은 그 결과로 얻어진 해가 질량, 운동량, 에너지

와 같은 양들의 완전한 보존이 제어 체적과 전체 계산 영역에서 엄격하게 만족됨을 의미한다. 이러한 특징은 격자점의 많고 작음에 관계없이 성립하며, 비록 성긴 격자에서의 해도 완전한 적분적인 평형을 보여준다.

나) 3차원 적용 수치모형

(1) FLOW-3D 모형

FLOW-3D는 유체와 가스의 거동을 다루는 모형으로서 열전달, 응결, 표면장력, 공동(空洞) 현상 등과 같은 물리적인 현상을 해석할 수 있다. 이모형은 질량방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식을 이용해서 이런 현상들을 해석하는 프로그램이기 때문에 대부분의 흐름현상에 적용이 가능한 범용해석 프로그램이므로 하천의 홍수위 계산에 있어서도 적용이 가능하다. 하지만, 본모형의 경우 적용이 어렵고 또한, 토목분야의 경우 관수로의 흐름과 같은 비교적 미시적인 흐름을 해석하는데 주로 이용되고 있어 하천홍수위의 흐름에 적용한 예는 드물다.

(가) 지배방정식

모형에 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이며, 식(1)~(4)로 각각 표현된다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서,  $V_F$ 는 유체의 요소체적,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u, v, w$ 는 각 방향 유속이며  $A_x A_y A_z$ 는 각 방향 요소면적이다. 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 아래 식과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_y \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서,  $G_{sms}$  체적력이고  $f_{sms}$  점성력을 나타낸다. 그리고 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid)함수,  $F(x, y, z, t)$ 로 표현된다.

(나) 수치해석기법

3차원 수치모형 FLOW-3D는 유한차분방식에 직육면체의 요소로 일반형상을 정의할 수



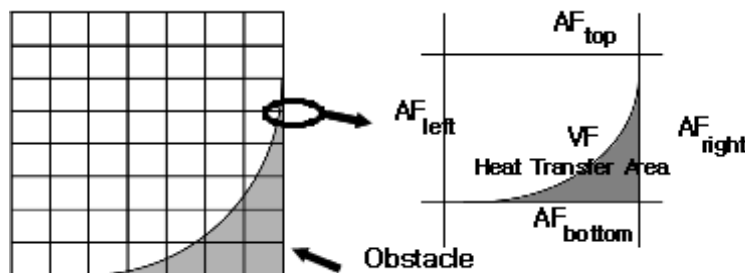
있는 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) 방법을 도입한 유한체적법(FVM)을 사용하고 있다. 또한 제트, 비산 등과 같은 복잡한 자유표면 운동 해석을 위하여 VOF(Volume of Fluid)기법(Hirt and Nichols, 1981)을 이용한다. 일반적인 해석단계로는 해석영역을 작은 격자로 나누는 것으로 시작하여 각 격자에 대해 주어진 조건에 따른 속도, 압력 등의 인자를 계산하게 된다. 압력항은 SOR(Successive Over Relaxation) 방법이나 SADI(Special Alternating Direction line Implicit) 방법을 사용하여 계산한다. 계산과정은 위의 식(2)~(4)를 사용하여 유속과 압력을 구하고, 자유표면 흐름인 경우에는 VOF함수식을 사용하여 유체표면의 위치를 계산하게 된다.

① FAVOR 방법

FAVOR(Fractional Area Volume/Obstacle Representation Method) 방법의 개념도는 다음 <그림 3.1.22>와 같으며 이 방법은 직육면체 요소내에서 일반 형상을 기술하는 것으로서, 직육면체 요소의 각 면을 통한 유체의 출입이 전체 또는 일부가 통제될 수 있다고 정의하는 것이다. 이로써 하나의 직육면체 요소에 유동물질이 차지한 부피 및 이 매체가 통과하는 면적을 정의할 수 있으며, 이 요소 내 통과면적에 대한 질량, 에너지 및 운동량 플럭스(Flux) 식을 유한체적 적분하여 물체주위의 유동을 기술할 수 있다. BFC(Boundary Fitted Coordinate) 좌표변환을 하지 않는 FDM 사용 시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자로 인한 결과의 정확도 저하를 해결할 수 있다. 하나의 격자 셀 요소는 FLOW-3D에 내장되어 있는 Messing Tool에 의하여 쉽게 정의 되어질 수 있으며, 각각의 격자에 포함 되어지는 유동물질과 고체사이의 유한체적 적분한 FAVOR함수는 다음식 (5)과 같이 표현되어진다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{V_f} \frac{\partial C}{\partial t} + u A_x \frac{\partial C}{\partial x} + v A_y \frac{\partial C}{\partial y} + w A_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$



<그림 3.1.22> FAVOR 방법의 개념도

하나의 셀 요소는 셀 표면의 미소면적(AF : Area fractions at cell faces)과 각 셀의 미

소체적 (VF : Volume fraction for each cell), 그리고 열이나 유체, 공기 등이 이동할 수 있는 영역인 (Heat Transfer Area)로 나누어진다.

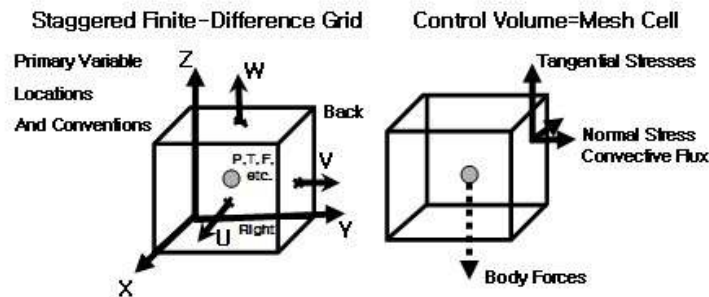
$$VF = \frac{\text{open volume}}{\text{volum of cell}} \quad (6)$$

$$AF = \frac{\text{open area}}{\text{cell edge area}} \quad (7)$$

여기서, VF는 하나의 셀 면적에 대한 공극이 차지하는 면적을 의미하며, AF는 x, y, z 방향 각각의 셀 경계면에 대한 공극이 차지하는 면적을 의미한다.

### ② FVM(Finite Volume Method) in FLOW-3D

연속체로 정의된 방정식을 컴퓨터로 해석하기 위해서는 이산화가 필요하며 이산화하는 방식은 크게 FEM과 FDM으로 나눌 수 있으며, FEM방식에서 가중 함수를 1로 하면 그림과 같이 FVM방식이 된다. FLOW-3D는 FAVOR를 도입한 FVM 형식을 취하고 있다. 일반적으로 해석 영역을 작은 직육면체 요소로 나눈 후, 이 요소단위로 계산이 이루어지게 되는데 속도와 응력은 각 요소의 주어진 압력에서 시간에 따른 양해적 방법으로 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 포아송식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 검정해주고 그 후에 자유표면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용하고 있다. 다음 <그림 3.1.23>은 FLOW-3D에서 사용되는 일반적인 FVM의 개념도를 나타내었다.

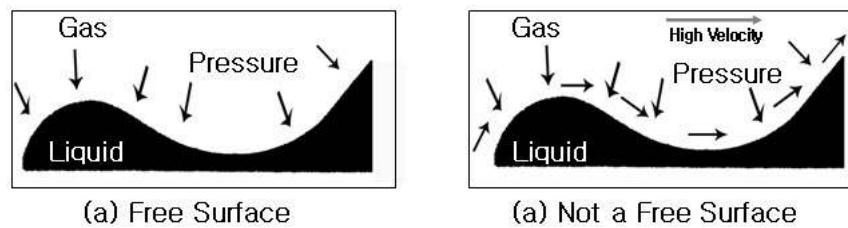


<그림 3.1.23> FVM의 개념도

### ③ VOF(volume of Fluid) 방법

비산 및 쇄과 같은 복잡한 자유표면 운동의 기술은 움직이는 요소를 사용하는 라그랑지 방법보다 오일러 요소를 사용하는 VOF 방법을 이용하여 보다 간단히 이루어 질 수 있다. FLOW-3D에 사용되고 있는 VOF 방법은 다른 공용되고 있는 VOF 방법과는 달리 정확한

압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 또한 유한차분 시 경계면의 번짐을 방지하기 위해 특별수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유표면으로 가정함)사이의 운동을 기술할 수 있는 방법이다. 여기서 자유표면이란 유체(Liquid)나 공기(Gas)의 경계면을 의미하며, 공기는 오직 유체에 법선방향(normal force or pressure)의 힘이나 압력으로만 작용한다. 또한 유체와의 경계면의 공기의 이동 속도가 매우 빠를 경우에는 공기에 의한 유체의 전단력(shear forces)이 작용할 수 있기 때문에 적용시에 사용자의 주의를 요해야 한다. 다음 <그림 3.1.24>는 자유표면과 자유표면이 아닐 때의 그림을 비교하였다.



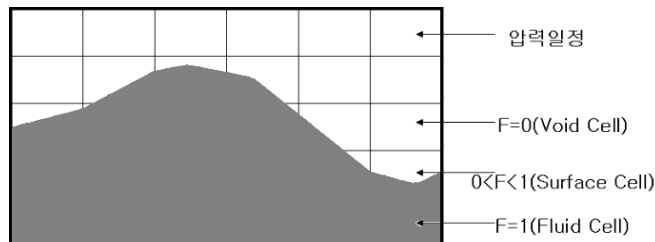
<그림 3.1.24> Free Surface and Not a Free Surface

일반적으로 유체와 공기의 밀도를 비교하였을 때 약 1000:1의 비율을 가지며, FLOW-3D에서는 공기의 점성(viscosity)이나 압력(pressure), 마찰력(Frictional forces) 등은 유체에 비하여 무시할 정도로 작다 라고 가정한다. 다음 식 (8)은 자유표면 해석을 위한 격자내 단위 체적당 유체의 체적을 나타내어주는 일반적인 VOF함수를 나타내었으며, <그림 3.1.25>는 VOF의 개념도 이다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(Fu) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw) \right\} = FDIF + FSOR \quad (8)$$

여기서, FDIF : Diffusion of Fluid Fraction

FSOR : Fluid Source/Sink



<그림 3.1.25> VOF의 개념도

(다) 난류 해석모형

Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해서는 가장 기본적인 벽경계, 입구경계, 출구경계 및 대칭경계에 대한 조건을 알아야 한다. 특히, 난류유동을 고려하기 위해서는 대표적인 난류해석 모형을 선택하여 벽경계조건을 적용해 주어야 한다. FLOW-3D에서 사용되는 대표적인 난류모형으로는 Prandtl의 혼합거리 모델(Mixing-length Model), 1-방정식 모델(Open-equation Model),  $k-\epsilon$  모델, RNG(Renormalized Group Theory) 모델, LES(Large Eddy Simulation) 모델을 적용하였으며, 각 난류해석 모형의 지배방정식은 다음과 같다.

①  $k-\epsilon$  모델

3차원 비압축성 유체의 난류경계층에 대한 Reynolds 방정식은 Reynolds 응력  $\overline{\rho u'v'}$ 에 대한 식을 구해야만 해를 구할 수 있다. 이러한 완결문제를 해결하기 위하여 난류 와점성 모델(turbulent eddy viscosity model)에서는 분자점성과 유사하게 난류 점성계수  $\mu_t$ 를 도입하는 것을 Boussinesq가 제안하였다. 이에 대하여 Prandtl은 1920년대에 기체분자운동론의 mean free path와의 유추에서 난류의 특성길이  $l$ 에 관한 혼합거리이론(mixing length theory)을 제시하였으며, 난류의 운동에너지(turbulent kinematic energy)  $k$ 로부터 난류점성계수 ( $\mu_t$ )를 다음과 같이 정의 하였으며, 이를 Prandtl-Kolmogoroff의 난류점성공식이라 한다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} l \quad (9)$$

$k-\epsilon$  난류 모형은 Prandtl의 혼합 길이에 기본을 두고 있으며,

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

$$-\overline{\rho u'_i \Phi} = \Gamma_\Phi \mu_t \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial x_i} \quad (10)$$

와 같이 Reynolds 응력과 난류 스칼라플럭스의 관계를 가정한다. 난류의 수직응력성분  $2/3 k \delta_{ij}$ 는 압력으로 처리된다. 특성길이  $l$ 을 난류운동에너지의 소산률(dissipation rate)  $\epsilon$ 을 이용하여,

$$l \sim \frac{k^{3/4}}{\epsilon} \quad (11)$$

로 두면, 식 (9)는,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

가 된다. 결과적으로  $k$ 와  $\epsilon$ 을 수송방정식으로부터 풀면 위식으로부터 난류의 모델이 완성된다. 이러한  $k-\epsilon$ 모델은 Launder and Spalding(1972,1974)에 의해 상세히 토의되었으며 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \left( \rho u k - \frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla k \right) = G - \rho \epsilon \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \left( \rho u \epsilon - \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \nabla \epsilon \right) = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (14)$$

이때, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 식 (12)에 주어져 있으며 난류확산계수

$\Gamma_\phi$ 는,

$$\Gamma_\phi = \frac{\mu_t}{Pr_\phi} \quad (15)$$

로 주어진다. 위에서  $C_\mu$ ,  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ 와  $Pr_\phi$ 는 모두 경험적인 상수이며,  $G$ 는 난류운동 에너지의 생성률로 다음과 같이 정의된다.

$$C_\mu = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x^i} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x^i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x^j} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x^j} \quad (16)$$

흔히, 경험상수는  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ,  $Pr_\epsilon = 1.3$ 의 값을 사용한다.

## ② RNG $k-\epsilon$ 모델

RNG(Renormalized Group Theory)  $k-\epsilon$ 난류모델은  $k-\epsilon$ 난류모델의 단점을 보완하기 위하여 Yakhot 등(1992)이 개발한 모형으로 통계적인 기법을 도입하여 얻은 모델상수를 적용하므로 모델상수에 민감하지 않은 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 전통적인  $k-\epsilon$ 난류모델에 비해 복잡한 난류 유동장의 해석을 정확하게 수행할 수 있으며, 특히 낮은 레이놀즈수와 고전단 흐름의 모의에 적합한 것으로 알려져 있다.

③ LES 모델

LES(Large Eddy Simulation)의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식에 공간적인 여과를 실시하여 얻을 수 있다. 시간 평균이 아닌 공간에 대한 여과이기 때문에 변동속도의 시간에 대한 변동은 무시되고, Navier-Stokes 방정식으로부터 다음과 같은 LES의 지배방정식인 연속방정식과 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \overline{\mu}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \overline{\mu}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{U_i U_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (18)$$

여기서,  $\nu$ 는 물의 점성계수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\overline{p}$ 는 공간 여과된 수정 압력항,  $\overline{u}$ 는 여과 속도(filtered velocity), 그리고  $U$ 는 순간속도이다. 식(18)의 좌측 두 번째 항을 여과 속도와 잔여속도(residual velocity)로 나누어 표시하면 다음 식(19)과 같다.

$$\overline{U_i U_j} = \overline{u_i u_j} + \overline{u'_i u'_j} + \overline{u_i u'_j} + \overline{u'_i u_j} \quad (19)$$

식 (4.19) 우측의 오른쪽 3개항을 잔여 응력항  $\tau_{ij}^R$ 이라고 정의 하면 식(18) 좌측의 두 번째 항을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{U_i U_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^{-R}) \quad (20)$$

식 (20)의 잔여 응력항을 비등방성 잔여 응력항  $\tau_{ij}^r$ 을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{ij}^r = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3} k_{ij} \delta_{ij} \quad (21)$$

여기서  $k_r$ 은 잔여 운동에너지,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다. 식 (18)에 식(20)과 식(21)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 LES의 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{-r}}{\partial x_j} \quad (22)$$

지배방정식의 완결문제를 해결하기 위해 비등방성 잔여 응력항에 대한 모형화가 필요하다. 비등방성 잔여 응력항에 대한 모형은 여러 가지가 있지만, Smagorinsky(1963)가 제안한 방법을 사용하여 운동량 방정식의 비등방성 잔여 응력항을 표현하면 다음 식 (23)과 같다.

$$\tau_{ij}^{-r} = -2 \nu_r \overline{S_{ij}} \quad (23)$$

여기서,  $\overline{S_{ij}}$ 는 여과 속도에 대한 변형률,  $\nu_r$ 은 잔여유속의 난류점성계수이다. 잔여 유속의 난류점성계수를 정의하기 위해 혼합거리 모형을 사용하면 난류 점성계수는 다음과 같다.

$$\nu_r = I_s^2 \overline{S} \quad (24)$$

$$I_s = C_s \Delta \quad (25)$$

여기서,  $I_s$ 는 Smagorinsky 특성길이,  $\overline{S} = (2 \overline{S_{ij} S_{ij}})^{1/2}$ 는 여과된 특성 변형률,  $\Delta$ 는 필터의 크기, 그리고  $C_s$ 는 Smagorinsky 상수이다.

#### 라) 수치모형의 경계조건

3차원 수치모형을 위해서는 반드시 지형 및 구조물의 형상을 3차원으로 입력하여야 한다. 이를 위해서는 도면을 기초로 하여 3차원 캐드 상에서 솔리드(Solid)작업을 하여야 한다.

솔리드 작업은 단면을 통해 나타내는 것이 아니고 실제 형상과 같이 모든 위치에서의 좌표(x, y, z)와 부피를 가지도록 구현하는 것이다. 3차원 캐드는 난이도에 따라 수 시간에서 수 주의 작업을 요하는 과정이며, 경우에 따라 해석의 결과를 좌우하므로 해석의 목적에 부합하는 방향으로 모델링을 실시하여야한다.

지형의 3차원화를 위해서 평면도와 중·횡단면도를 모두 이용하였으며 해석에 영향을 주지 않거나, 고려할 필요가 없는 부분들은 상세히 모델링하지 않았다.

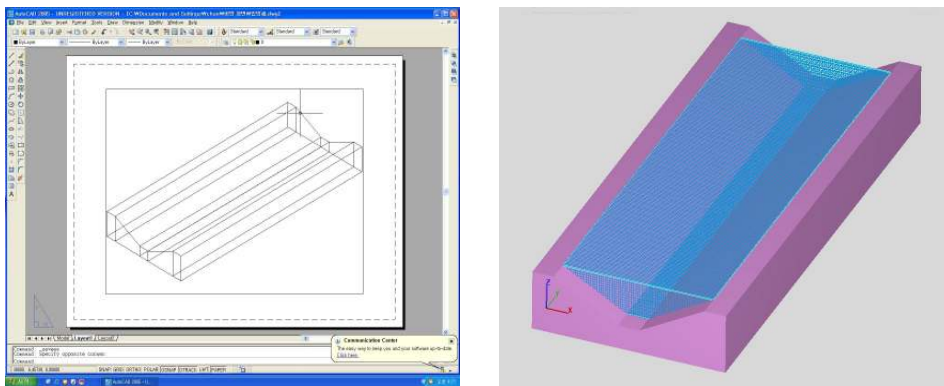
본 연구에서는 이 과정을 위해서 오토캐드(AutoCAD)를 사용하였다. Solid화 작업은 설계도면을 기초로 이루어진다. 작업 순서를 간단히 정리하면 아래와 같다.

- ① 설계도면 분석
- ② 수로 단면의 Poly-Line화 작업
- ③ 횡 방향 위치결정 및 전체 모형 작성

사다리꼴 농업용 토공배수로를 표준으로 하여 수치해석을 실시하였으며, 용·배수로 설계 기준(농림부, 2000)을 바탕으로 폭 9.5m, 수로 바닥폭 1.5m, 기울기 1/1000, 사면경사 1:2로 설계하였으며 조도계수는 일반 토공수로에서의 값인 0.035를 사용하였다. 최대수위는 2.0m, 여유고는 0.5m로 간격을 두었다.

홍수시 유량을 고려하여 최대유량은 16.5m<sup>3</sup>/s로 하였다. <그림 3.1.26>(좌)는 캐드 프로그램을 이용하여 수로를 솔리드 모델링한 것이다.

FLOW-3D에서는 .stl확장자를 지원하여 <그림 3.1.26(우)>와 같이 지형자료를 구성하였다.



<그림 3.1.26> 솔리드 모델링과 FLOW-3D 지형자료

#### 다) FLOW-3D 수치해석 결과

##### (1) 수치해석에 의한 수로의 안정성 검토

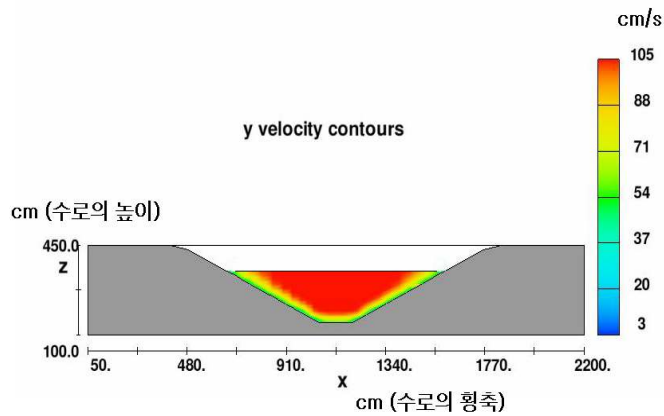
본 연구에서는 수질정화체를 설치한 수로의 수리적 안정성 검토를 위하여 수치해석을 실시하였다.

수질정화체의 부피변화 및 모양변화에 따른 수심 및 유속 모의를 실시함으로써 허용유속과 여유고에 대하여 분석이 가능하도록 하였다.

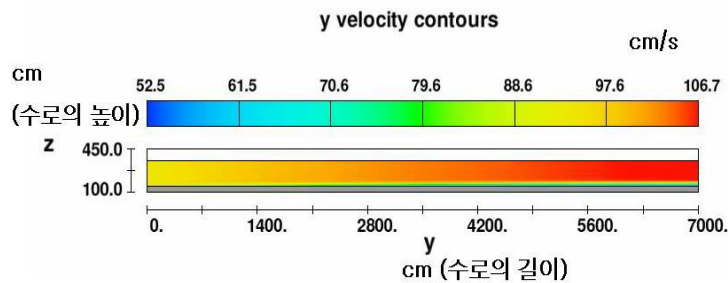
수치해석을 통하여 모의된 기본수로의 유속분포 결과는 <그림 3.1.27>과 같다. 결과는 횡단면(a), 종단면(b)으로 나타내었다. 최대유속은 106.7cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 최대유속의 분포지점은 횡단면을 기준으로 수로의 가운데 부분에서 나타나게 되며 종단면을 기준으로 하류로 내려갈수록 나타나게 됨을 알 수 있다.

이러한 결과는 수로의 기울기 때문에 발생하는 가속도 때문이며, 일반적인 수로에서의 유속분포를 나타내어 수치해석에 문제가 없다고 판단된다.





(a) 유속분포(횡단면)

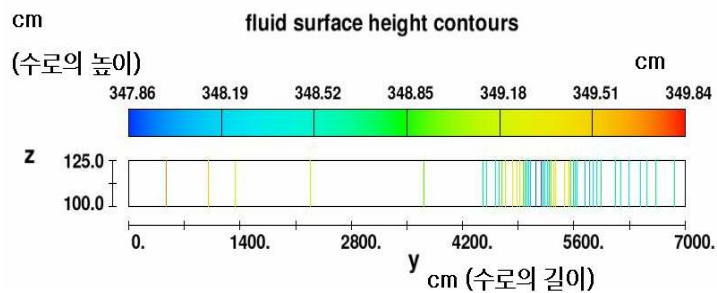


(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.27> 유속분포(수치해석, 기본수로)

수치해석을 통하여 모의된 수심 분포의 결과는 <그림 3.1.28>과 같다. 결과는 종단면으로 나타내었다. 최대수심은 349.84cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당된다.

수심은 유속분포와 달리 하류부 4.8m 지점부분에서 최소수심을 나타내었는데 이는 유속 증가에 의한 수심 감소로 인한 것이며, 말단부에서는 FLOW-3D에서의 입력조건에 따라 다시 수심이 복귀된 것으로 판단된다.



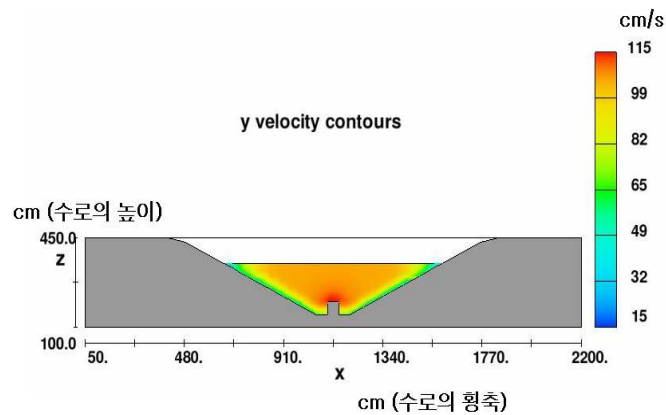
<그림 3.1.28> 수심분포(수치해석, 기본수로)

2) 수질정화체 부피변화에 따른 검토

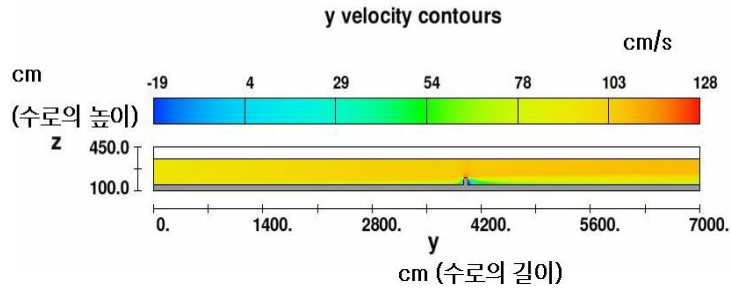
(가) 수질정화체 한 변의 길이가 50cm인 경우

수치해석을 통하여 모의된 유속분포의 결과는 <그림 3.1.29>와 같다. 결과는 횡단면(a), 종단면(b)으로 나타내었다. 최대유속은 115.2cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 기본수로에 수질정화체는 장애물로서 작용하여 유속은 증가한 상태를 나타내며 최대유속은 수질정화체 주변에서 발생하게 된다.

유속분포를 종축으로 분석하여 본 결과 수질정화체 앞뒷면에 해당하는 부분에서는 수질정화체에 의한 마찰 및 장애물에 대한 영향으로서 유속이 감소된다고 판단된다.



(a) 유속분포(횡단면)

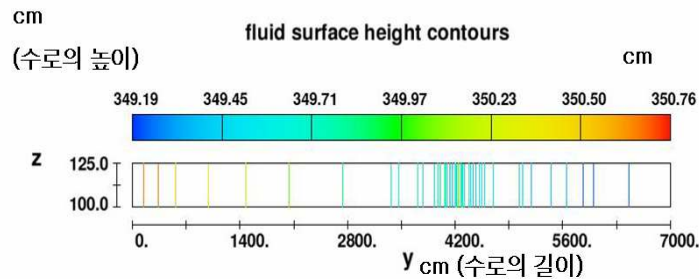


(b) 유속분포(중단면)

<그림 3.1.29> 유속분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 50cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심분포의 결과는 <그림 3.1.30>와 같다. 결과는 종단면으로 나타내었다. 최대수심은 350.76cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당된다.

최소수심은 수질정화체가 설치된 4m 지점 하류부에서 발생하였으며, 수질정화체에 의해 수심분포가 변동한 것을 알 수 있다. 그러나, 수질정화체 설치부분을 전후하여 수심분포가 변화하지만 그 변화는 미비하여 큰 영향은 주지 않을 것으로 판단된다.



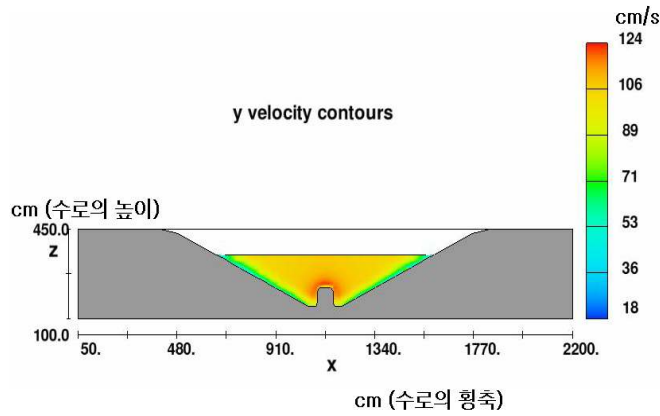
<그림 3.1.30> 수심분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 50cm)

(나) 수질정화체 한 변의 길이가 70cm인 경우

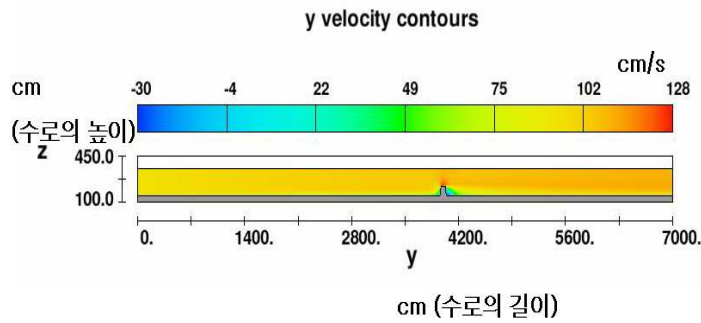
수질정화체의 부피 변환을 위하여 한 변 길이를 70cm로 변화시켰다. 수치해석을 통하여 모의된 유속분포의 결과는 <그림 3.1.31>과 같다. 결과는 횡단면(a), 종단면(b)으로 나타내었다. 최대유속은 129.0cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 한 변 길이가 50cm인 경우보다 최대유속이 증가하는 것으로 결과가 나타났다.

한 변의 길이가 50cm인 경우와 마찬가지로, 수질정화체가 설치된 곳의 단면적이 급속하게 감소되어 유속이 수질정화체 주변에서 증가하였으며, 유속분포를 종축으로 분석하여 본 결과 수질정화체 앞뒷면에 해당하는 부분에서는 수질정화체에 의한 마찰 및 장애물에 대한

영향으로서 유속이 감소된다고 판단된다. 이러한 영향이 미치는 부분은 50cm보다 많이 나타났는데, 이는 부피 증가로 인한 것으로 판단된다.



(a) 유속분포(횡단면)

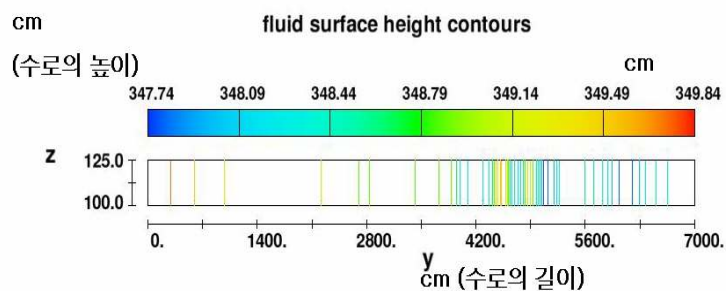


(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.31> 유속분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 70cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심 분포의 결과는 <그림 3.1.32>와 같다. 결과는 한 변 길이 50cm와 같이 종단면으로 나타내었다. 최대수심은 349.84cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 한 변 길이 50cm와 비교할 때 증가되는 것으로 나타났다.

50cm와 비교하여 볼 때, 수심변화가 나타나는 부분인 4m 지점에서의 변화부분이 넓게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 부피 증가에 따른 영향이라고 판단된다.

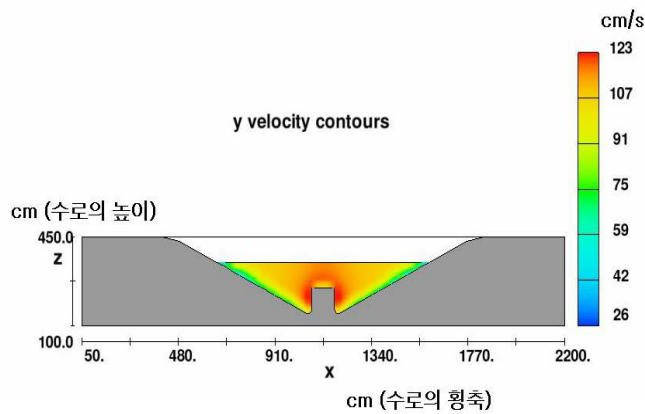


<그림 3.1.32> 수심분포(수치해석, 정육면체 한 변길이 70cm)

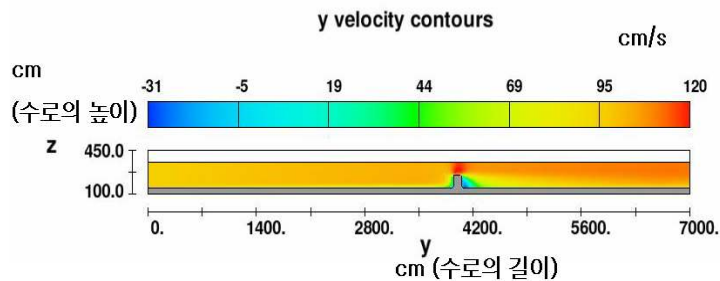
(다) 수질정화체 한 변의 길이가 100cm인 경우

수질정화체의 부피 변화를 위하여 한 변 길이를 100cm로 변화시켰다. 수치해석을 통하여 모의된 유속분포의 결과는 <그림 3.1.33>과 같다. 결과는 횡단면(a), 종단면(b)으로 나타내었다. 최대유속은 130.4cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 한 변 길이가 50cm, 70cm인 경우보다 최대유속이 증가하는 것으로 결과가 나타났다.

한 변의 길이가 100cm인 경우는 다른 경우보다 부피의 증가에 따른 단면적의 감소가 현저하므로, 이에 따른 최대유속의 증가가 나타났다고 판단된다.



(a) 유속분포(횡단면)

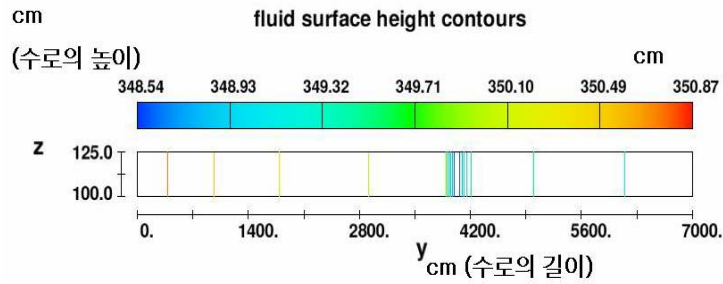


(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.33> 유속분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 100cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심 분포의 결과는 <그림 3.1.34>와 같다. 결과는 한 변 길이 50cm, 70cm와 같이 종단면으로 나타내었다. 최대수심은 350.87cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 한 변 길이 50cm, 70cm와 비교할 때 증가되는 것으로 나타났다.

수질정화체가 설치된 지점인 4m 지점에서 수심이 최소로 나타났으며 이는 수질정화체에 의해 나타나는 급격한 유속의 증가로 나타나는 결과로 판단된다. 그러나 이러한 변화는 미비하여 수로 전체에서 수심변화는 의미가 없는 것으로 판단된다.



<그림 3.1.34> 수심분포(수치해석, 정육면체, 한 변길이 100cm)

이상과 같이 수질정화체 부피변화에 따른 결과를 유속과 수심에 대하여 정리하였다. <표 3.1.18>과 같이 수질정화체의 부피가 증가함에 따라 유속은 증가하였다.

이러한 결과는 부피증가에 따른 통수 단면적의 감소로 인한 유속증가로 판단되어지며, 78.5% 이상의 수질정화체 부피에 대하여는 최대허용유속을 초과하는 것으로 나타났다.

<표 3.1.18> 수질정화체 부피변화에 따른 수로 내 유속 변화

형 태	부 피	유 속
기본수로		1.07m/s
정육면체	한 변길이 50cm	1.15m/s
	한 변길이 70cm	1.29m/s
	한 변길이 100cm	1.30m/s

<표 3.1.19>에서는 수질정화체 부피변화에 따른 수심 변화를 나타내었다. 아래와 같이 수심 변화는 수질정화체 부피 변화와는 크게 관계가 없는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 수질정화체의 부피가 수로 전체 길이인 80m에 대하여 미비하여 수심변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

<표 3.1.19> 수질정화체 부피변화에 따른 수로 내 수심 변화

형 태	부 피	수 심
기본수로		2.00m
	한 변길이 50cm	2.01m
정육면체	한 변길이 70cm	2.00m
	한 변길이 100cm	2.01m

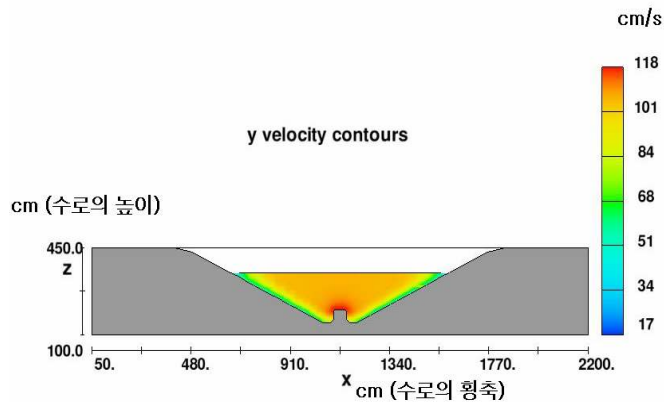
(3) 수질정화체 형태에 따른 검토

(가) 원기둥 형태의 수질정화체

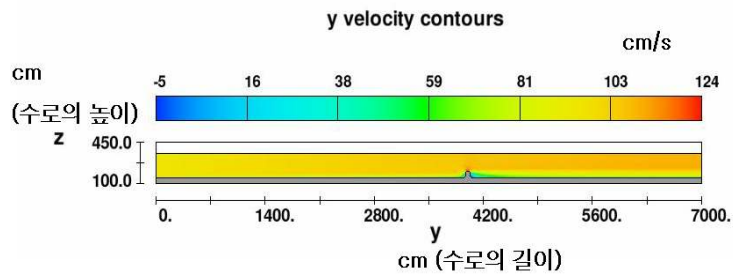
① 반지름 길이 28cm

수치해석을 통하여 모의된 유속분포의 결과는 <그림 3.1.35>와 같다. 최대유속은 118.5cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 정육면체와 비교할 때 유속은 더 빠르게 나타났으며, 최대유속은 정육면체 형태와 마찬가지로 수질정화체 주변에서 발생하였다.

수질정화체가 설치된 곳의 단면적이 급속하게 감소되어 유속이 수질정화체 주변에서 증가하였으며, 유속분포를 종축으로 분석하여 본 결과 수질정화체 앞뒷면에 해당하는 부분에서는 수질정화체에 의한 마찰 및 장애물에 대한 영향으로서 유속이 감소된다고 판단된다.



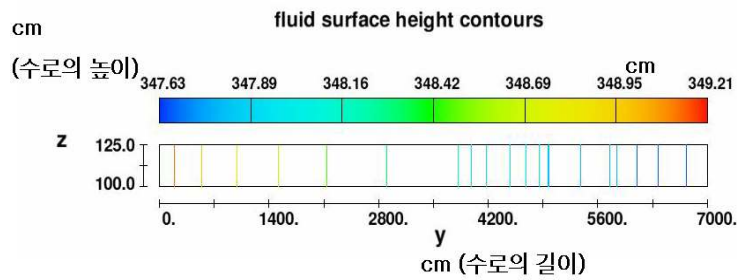
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(중단면)

<그림 3.1.35> 유속분포(수치해석, 원기둥, 반지름 28cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심의 분포는 <그림 3.1.36>과 같다. 최대수심은 349.21cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 정사각형 형태에 비해 감소하는 것으로 나타났다.

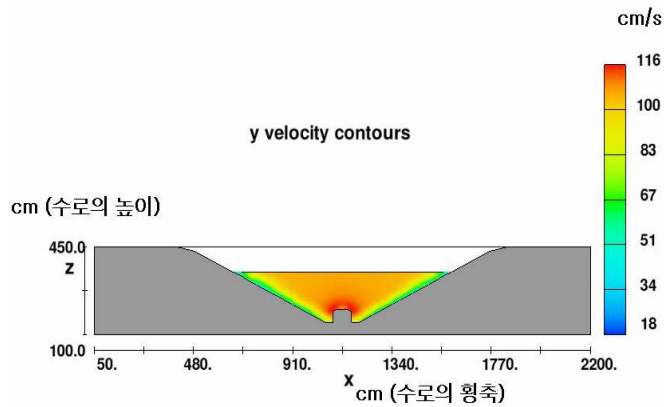


<그림 3.1.36> 수심분포(수치해석, 원기둥, 반지름 28cm)

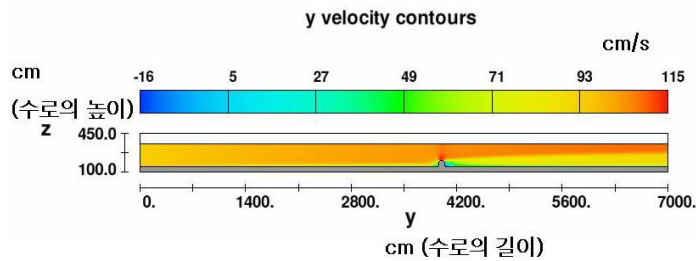
② 반지름 길이 40cm

수치해석을 통하여 모의된 유속의 분포는 <그림 3.1.37>과 같다. 최대유속은 117.3cm/s로 모의되어 반지름이 28cm인 경우보다 감소하는 것으로 나타났다. 최대유속은 다른 형태 및 부피와 마찬가지로 수질정화체 주변에서 발생하였다.





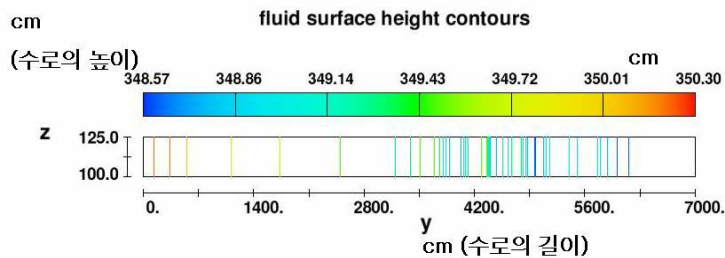
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.37> 유속분포(수치해석, 원기둥, 반지름 40cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심의 분포는 <그림 3.1.38>과 같다. 최대수심은 350.30cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 반지름 길이 28cm 인 경우와 정육면체 70cm인 경우보다 증가하였다.

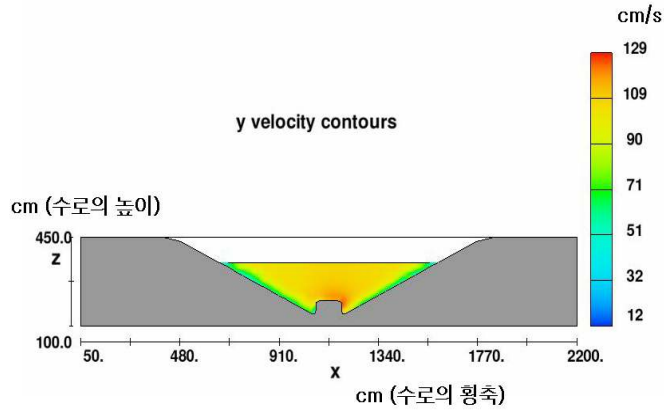


<그림 3.1.38> 수심분포(수치해석, 원기둥, 반지름 40cm)

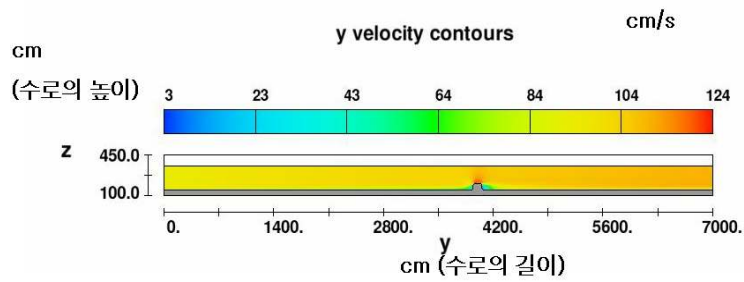
③ 반지름 길이 56cm

수치해석을 통하여 모의된 유속의 분포는 <그림 3.1.39>와 같다. 최대유속은 122.9cm/s로 모의되어 반지름이 40cm, 50cm인 경우보다 증가하는 것으로 나타났다. 최대유속은 다른 형

태 및 부피와 마찬가지로 수질정화체 주변에서 발생하였으나 다른 경우와 비교할 때 편중되지는 않았다.



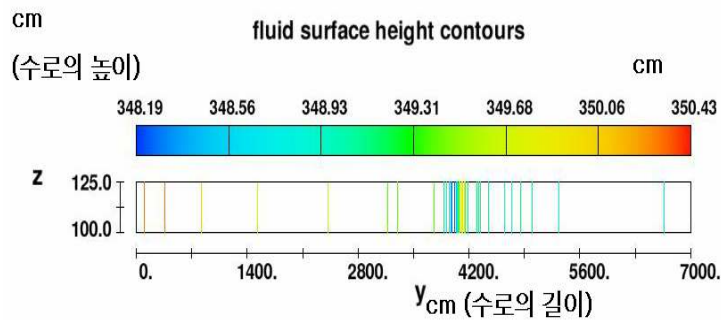
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.39> 유속분포(수치해석, 원기둥, 반지름 56cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심의 분포는 <그림 3.1.40>과 같다. 최대수심은 350.4cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 반지름 길이 28cm, 40cm 보다 증가하였다.



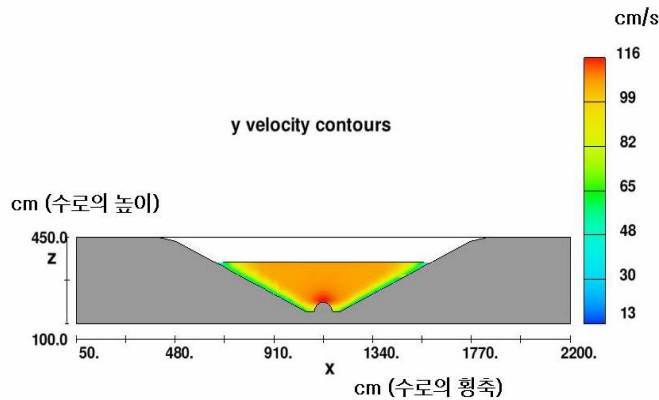
<그림 3.1.40> 수심분포(수치해석, 원기둥, 반지름 56cm)

(나) 반구 형태의 수질정화체

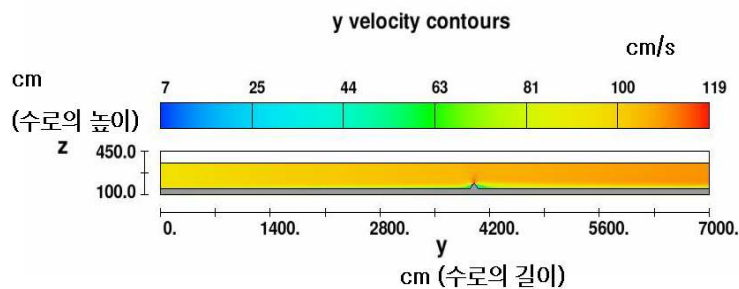
① 반지름 길이 39cm

수치해석을 통하여 모의된 유속의 분포는 <그림 3.1.41>과 같다. 최대유속은 116.1cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 정육면체와 원기둥의 중간정도의 유속을 나타내고 있으며 최대유속은 종단면을 기준으로 수질정화체 주변에서 발생하고 있다.

수질정화체가 설치된 곳의 단면적이 급속하게 감소되어 유속이 수질정화체 주변에서 증가하였으며, 유속분포를 종축으로 분석하여 본 결과 수질정화체 앞뒷면에 해당하는 부분에서는 수질정화체에 의한 마찰 및 장애물에 대한 영향으로서 유속이 감소된다고 판단된다.



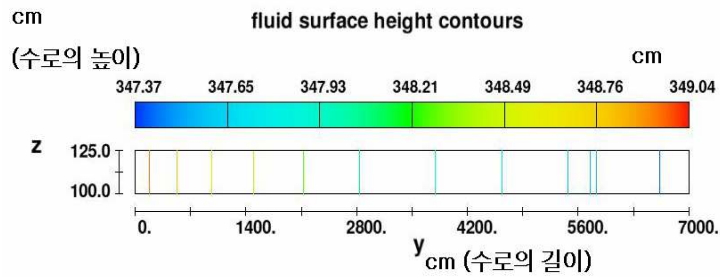
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.41> 유속분포(수치해석, 반구, 반지름 39cm)

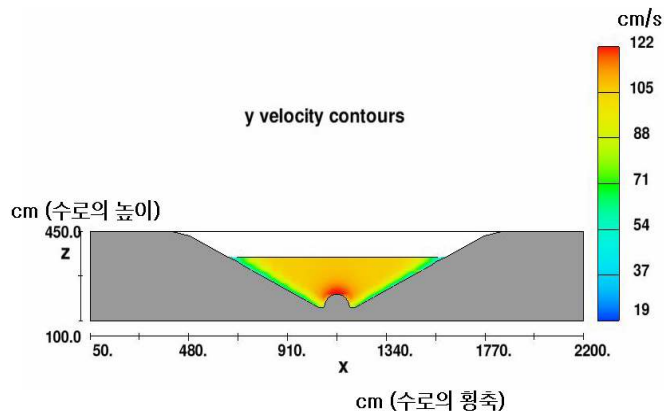
수치해석을 통하여 모의된 수심의 분포는 <그림 3.1.42>와 같다. 최대수심은 349.0cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 다른 형태에 비하여 수심은 감소하는 것으로 나타났다.



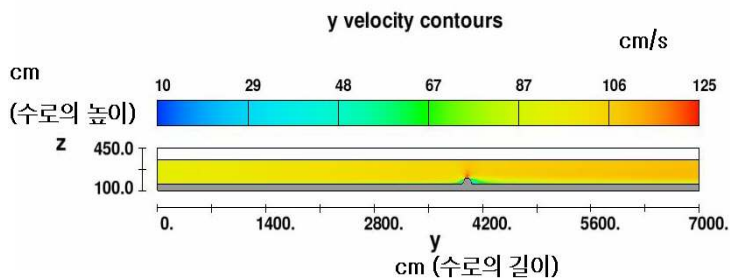
<그림 3.1.42> 수심분포(수치해석, 반구, 반지름 39cm)

② 반지름 길이 55cm

수치해석을 통하여 모의된 유속의 분포는 <그림 3.1.43>과 같다. 최대유속은 123.5cm/s로 모의되어 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 다른 경우와 마찬가지로 최대유속은 종단면을 기준으로 수질정화체 주변에서 발생하고 있는 것으로 나타난다.



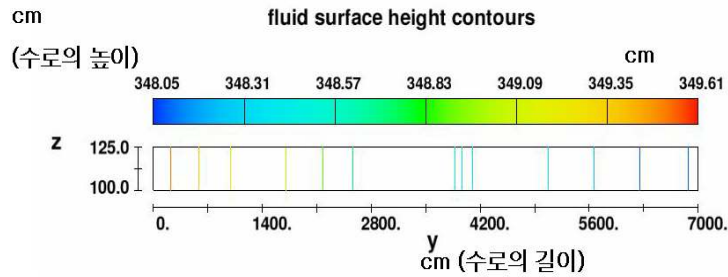
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.43> 유속분포(수치해석, 반구, 반지름 55cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심의 분포는 <그림 3.1.44>와 같다. 최대수심은 349.6cm로 모의되어 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 다른 형태에 비하여 수심은 감소하는 것으로 나타났다.

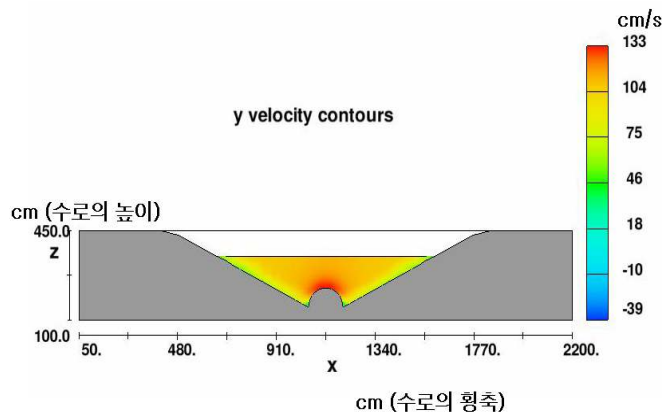


<그림 3.1.44> 수심분포(수치해석, 반구, 반지름 55cm)

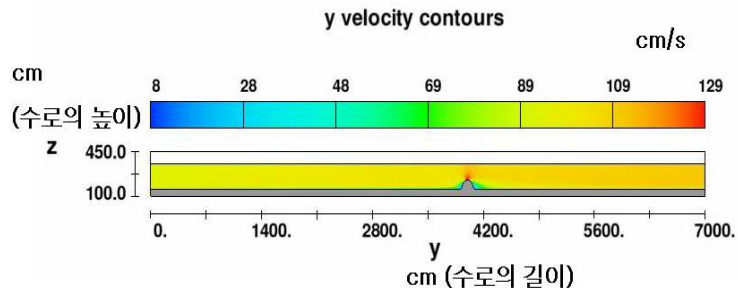
③ 반지름 길이 75cm

수치해석을 통하여 모의된 유속의 분포는 <그림 3.1.45>와 같다. 최대유속은 최대허용유속조건인 150cm/s 이하에 해당된다. 다른 경우와 마찬가지로 최대유속은 종단면을 기준으로 수질정화체 주변에서 발생하고 있는 것으로 나타난다.

수질정화체가 설치된 곳의 단면적이 급속하게 감소되어 유속이 수질정화체 주변에서 증가하였으며, 유속분포를 종축으로 분석하여 본 결과 수질정화체 앞뒷면에 해당하는 부분에서는 수질정화체에 의한 마찰 및 장애물에 대한 영향으로서 유속이 감소된다고 판단된다.



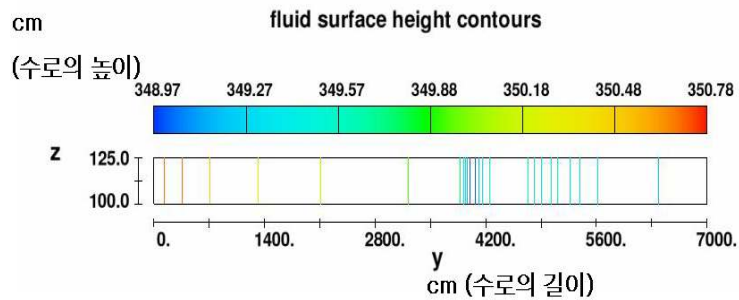
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(중단면)

<그림 3.1.45> 유속분포(수치해석, 반구, 반지름 75cm)

수치해석을 통하여 모의된 수심의 분포는 <그림 3.1.46>과 같다. 최대수심은 최대수심조건인 400cm 이하에 해당되며 다른 형태에 비하여 수심은 감소하는 것으로 나타났다.



<그림 3.1.46> 수심분포(수치해석, 반구, 반지름 75cm)

이상과 같이 수질정화체 형태에 따른 결과를 유속과 수심에 대하여 정리하였다. <표 3.1.20>과 같이 정육면체 형태에서 수질정화체의 부피가 증가함에 따라 유속은 증가하는 것으로 나타났으며, 원기둥형태에서는 반지름이 40cm인 경우 감소하였다가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이 때 유속이 작게 나타나 수질정화에 있어서 효율성을 나타낼 것으로 판단된다.

<표 3.1.20> 수질정화체 형태에 따른 유속 변화

형 태	부 피	유 속
기본수로		1.07m/s
정육면체	한 변길이 50cm	1.15m/s
	한 변길이 70cm	1.29m/s
	한 변길이 100cm	1.30m/s
원기둥	반지름 28cm	1.19m/s
	반지름 40cm	1.17m/s
	반지름 56cm	1.23m/s
반 구	반지름 39cm	1.16m/s
	반지름 55cm	1.24m/s
	반지름 75cm	1.24m/s

<표 3.1.21>에서는 수질정화체 형태에 따른 수심 변화를 나타내었다. 아래와 같이 수심 변화는 수질정화체 부피 변화와는 크게 관계가 없는 것으로 나타났다.

<표 3.1.21> 수질정화체 형태에 따른 수심 변화

형 태	부 피	수 심
기본수로		2.00m
정육면체	한 변길이 50cm	2.01m
	한 변길이 70cm	2.00m
	한 변길이 100cm	2.01m
원기둥	반지름 28cm	1.99m
	반지름 40cm	2.00m
	반지름 56cm	2.00m
반 구	반지름 39cm	1.99m
	반지름 55cm	2.00m
	반지름 75cm	2.01m

### (3) 수질정화체 배치에 따른 검토

본 연구에서는 수질정화체 배치에 따른 수로 내 유체 변동 검토를 위하여 일렬형 배치, 복합형 배치, 측면형 배치에 대하여 모의를 실시하였으며, 수질정화체 간격에 대한 수로 내 유체 변동을 분석하기 위하여 10m, 20m, 30m 간격으로 모의를 실시하였다. 배치에 대한 부분에서는 수질정화체의 형태는 정육면체 형태로서 형태를 동일하게 하고 모의를 실시하였다. 시공이 편리하고 식물의 식재 및 다공성 콘크리트의 활용에 있어서 편리성 때문에 정육면체 형태로 실시하였으며, 부피는 50cm인 경우에 대하여 모의를 실시하였다.

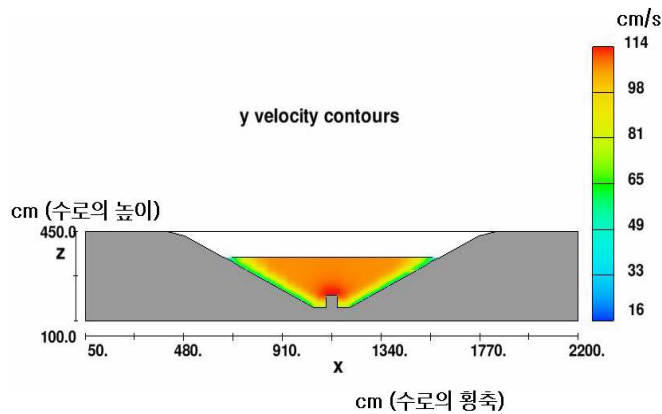
검증된 수질정화체에 대하여 본 연구에서는 수질정화체 배치에 따른 흐름변화 분석을 실시하였다. 배치는 일렬형 배치, 복합형 배치, 측면형 배치에 대하여 분석을 실시하였으며, 선행 작업으로서 수치해석을 통하여 배치에 따른 모의를 실시하였다.

(가) 일렬형 배치에서의 수심 및 유속 모의

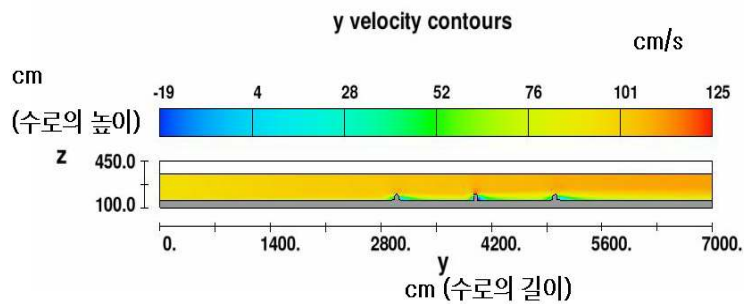
수질정화체를 일렬로 배치하여 모의를 실시하였으며, 간격은 10m, 20m, 30m에 대하여 각각 모의를 실시하였다.

① 수질정화체 사이의 간격이 10m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 10m로 하여 일렬로 배치하여 모의하여 본 결과 <그림 3.1.47>과 같은 유속분포를 나타내었다. 수질정화체를 연속적으로 설치하여 각 수질정화체 별로 유속이 감소하였다가 복귀하였으며, 단위 수질정화체와 마찬가지로 수질정화체 주변에서 최대 유속분포를 나타내고 있다.



(a) 유속분포(횡단면)



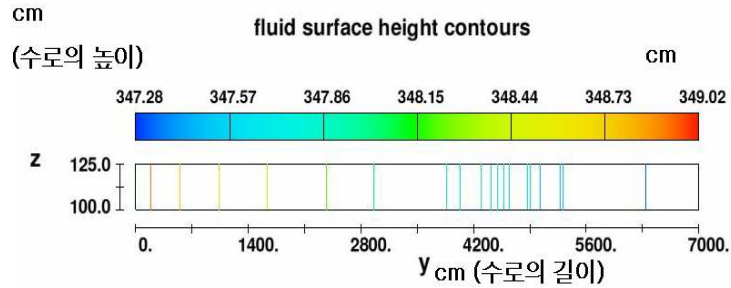
(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.47> 유속분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 10m)

수심분포는 <그림 3.1.48>과 같이 나타났으며 수질정화체를 설치한 부분 이후에 감소하는



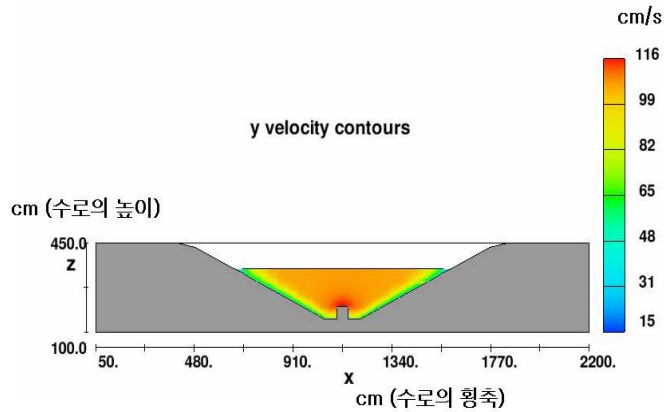
것으로 나타난다.



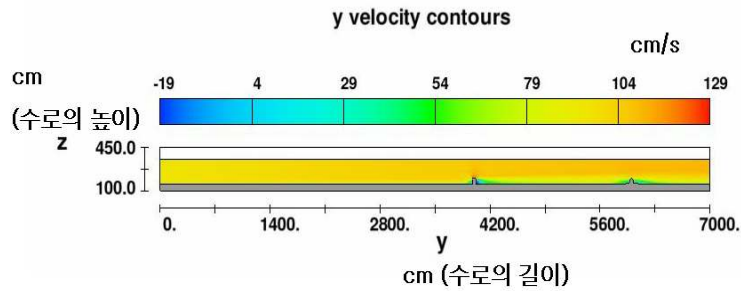
<그림 3.1.48> 수심분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 10m)

② 수질정화체 사이의 간격이 20m인 경우

수질정화체 간의 간격을 20m로 하여 모의한 결과는 <그림 3.1.49>와 같다. 최대유속분포 지점은 수질정화체 주변에서 발생하고 있으며, 간격이 10m인 경우보다 유속이 1.29m/s로 증가한 것을 알 수 있다.



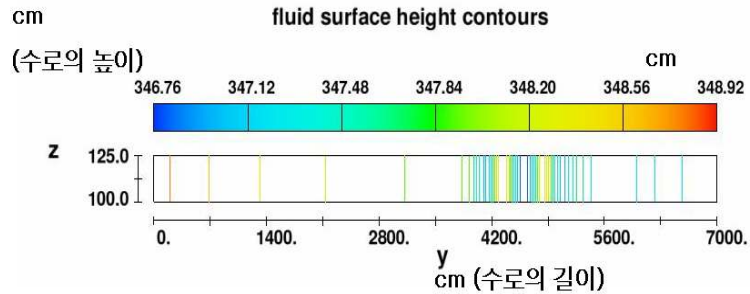
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.49> 유속분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 20m)

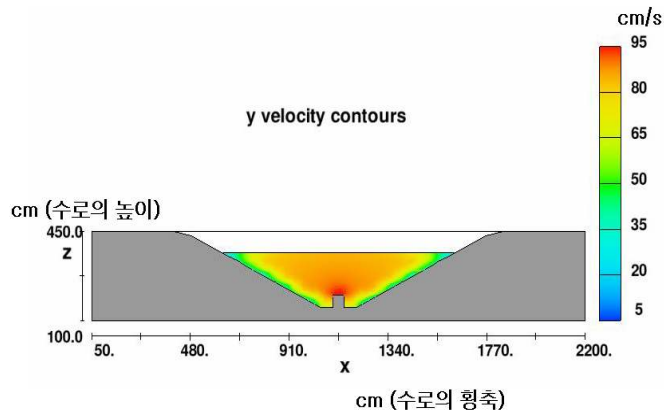
최대수심은 10m인 경우보다 348.92cm로서 감소하는 것으로 나타났다. <그림 3.1.50>에서는 일렬형 배치에 따른 수로의 수심 분포를 나타내고 있다.



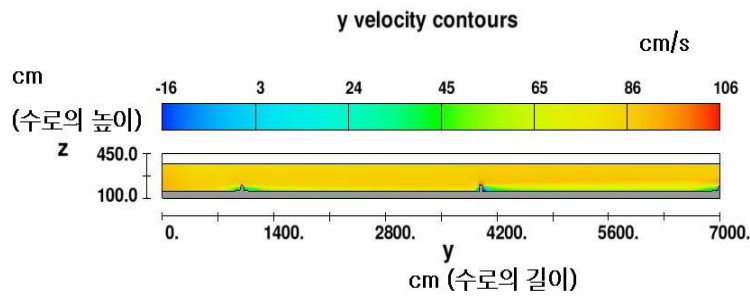
<그림 3.1.50> 수심분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 20m)

③ 수질정화체 사이의 간격이 30m인 경우

수질정화체의 간격이 30m인 경우 최대유속은 1.12m/s로 10m, 20m인 경우보다 감소하는 것으로 나타났다. 최대유속을 나타내는 지점은 다른 경우와 마찬가지로 수질정화체 주변으로 나타났다.



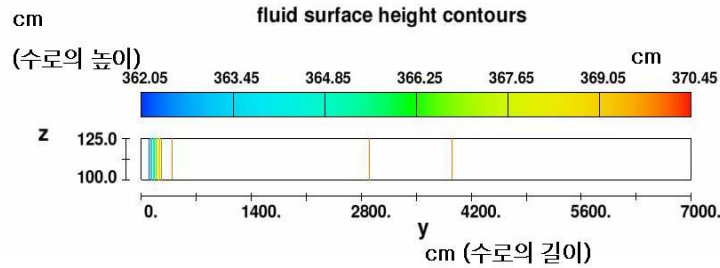
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.51> 유속분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 30m)

간격이 30m인 경우 일렬형 배치에서의 수로의 수심분포는 <그림 3.1.52>와 같이 모의되었다. 10m, 20m인 경우보다 증가하는 것으로 나타났으며, 초기 수로의 유입부에서 감소가 탁월하게 나타난다.



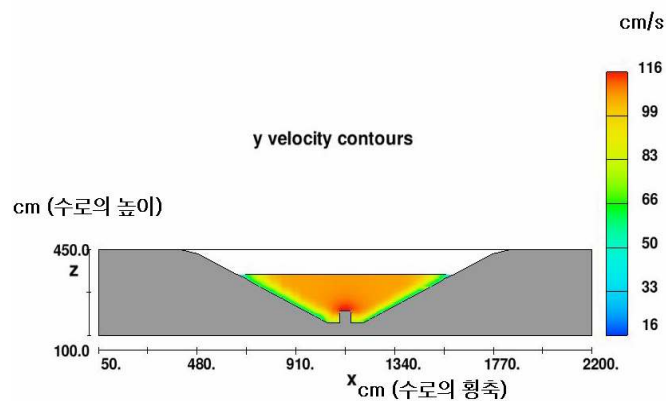
<그림 3.1.52> 수심분포(수치해석, 일렬형 배치, 간격 30m)

(나) 복합형 배치에서의 수심 및 유속 모의

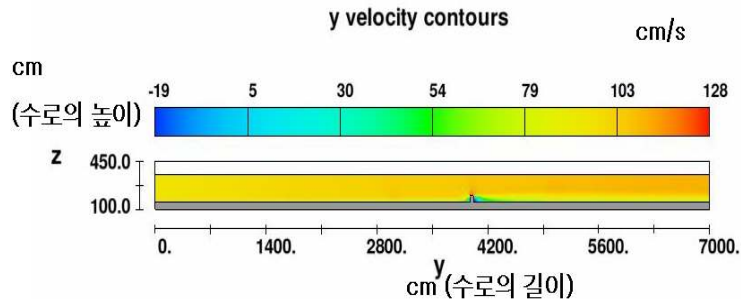
일렬형 배치와 마찬가지로 정육면체 형태의 수질정화체를 모의하였으며, 간격마다 지그재그 형태로 배치하여 각 수질정화체별로 측면 양쪽에 번갈아 위치하도록 모의를 실시하였다. 간격 또한 일렬형 배치와 동일하게 10m, 20m, 30m로 동일하게 각각 모의를 실시하였다.

① 수질정화체 사이의 간격이 10m인 경우

수질정화체를 10m 간격으로 지그재그 형태로 배치한 결과 <그림 3.1.53>과 같은 유속분포를 나타내었다. 일렬형 배치의 경우보다 유속이 1.17m/s로 증가하였으며 수질정화체에 의한 영향의 길이가 일렬형 배치보다 길게 나타났다.



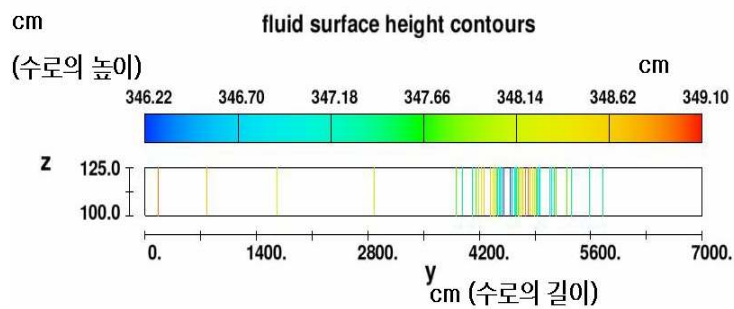
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.53> 유속분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 10m)

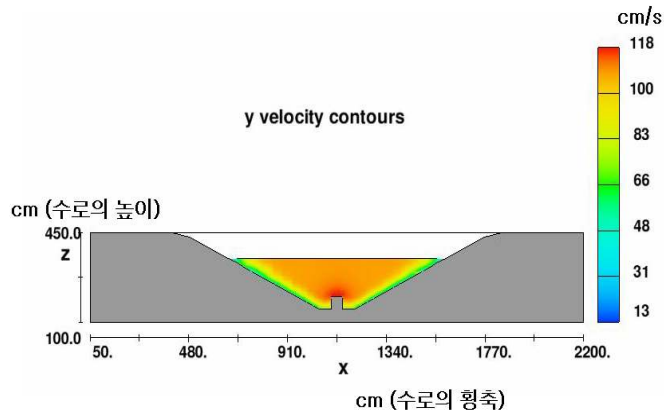
간격이 10m인 경우 복합형 배치에서의 수로의 수심분포는 <그림 3.1.54>와 같이 모의되었다. 일렬형 배치보다 수심변화가 수질정화체가 설치된 지점에서 변화가 나타나며 여유고에 대해서는 최대수심이 안전한 것으로 판단된다.



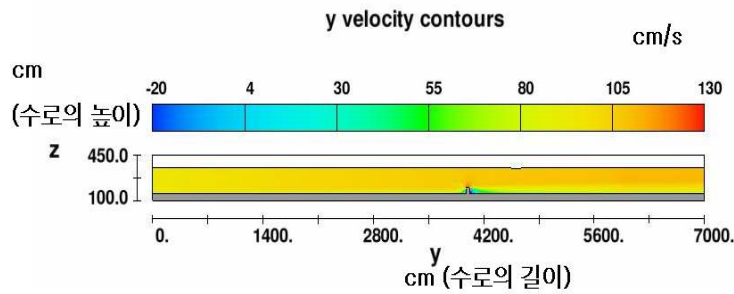
<그림 3.1.54> 수심분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 10m)

② 수질정화체 사이의 간격이 20m인 경우

간격을 20m로 변화시킨 결과 유속은 1.30m/s로 간격이 10m인 경우보다 증가하는 것으로 나타났으며, 최대허용유속인 1.50m/s 이하 인 것으로 나타났다. 다른 경우와 마찬가지로 최대허용유속은 수질정화체 주변에서 발생한다.



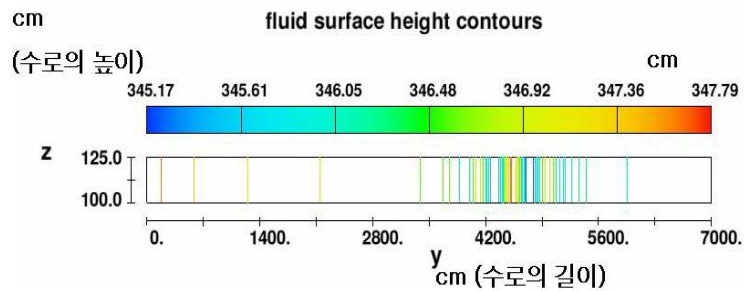
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.55> 유속분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 20m)

간격이 20m인 복합형 배치에 따른 수로의 수심 분포는 <그림 3.1.56>과 같이 나타나며, 10m인 경우보다 347.79cm로 감소하는 것으로 나타났다.

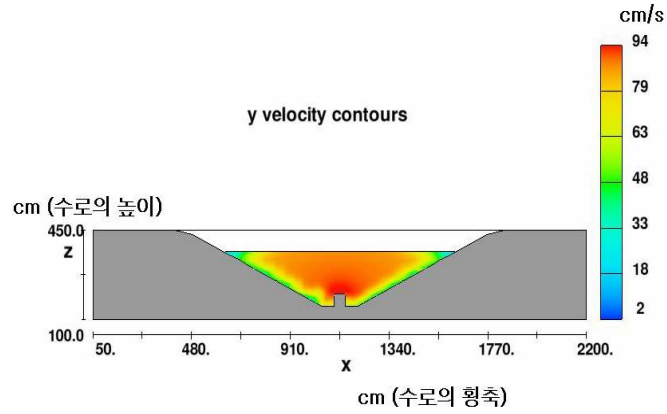


<그림 3.1.56> 수심분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 20m)

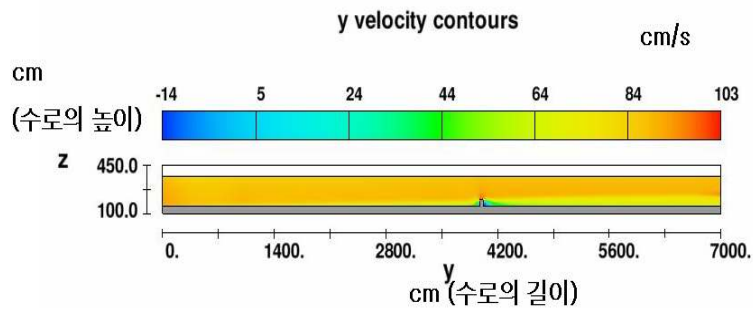
③ 수질정화체 사이의 간격이 30m인 경우

간격이 30m인 경우 최대유속은 10m, 20m인 경우보다 작게 나타나고 있으며, 전체적인 수로의 유속도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 간격이 멀수록 안정하다는 것을 나타내고

있다.



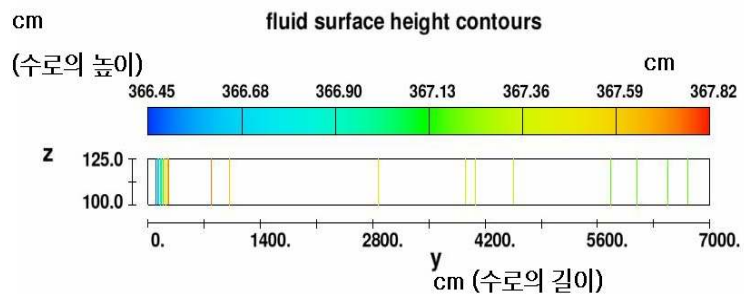
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.57> 유속분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 30m)

유속과는 달리 수로의 수심분포는 10m, 20m인 경우보다 증가하였으며, 일렬형 분포와 비교하여 볼 때 증가한 것을 알 수 있다.



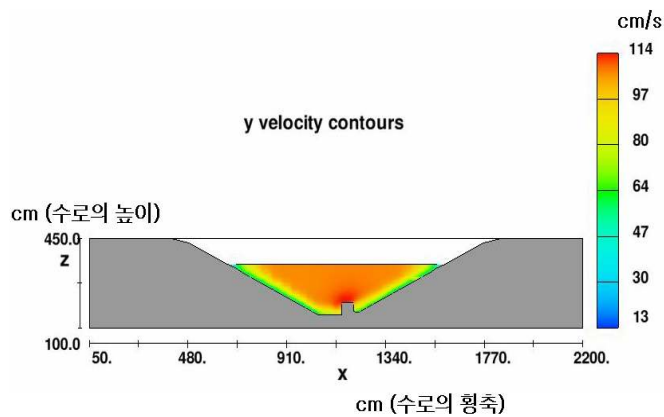
<그림 3.1.58> 수심분포(수치해석, 복합형 배치, 간격 30m)

(다) 측면형 배치에서의 수심 및 유속 모의

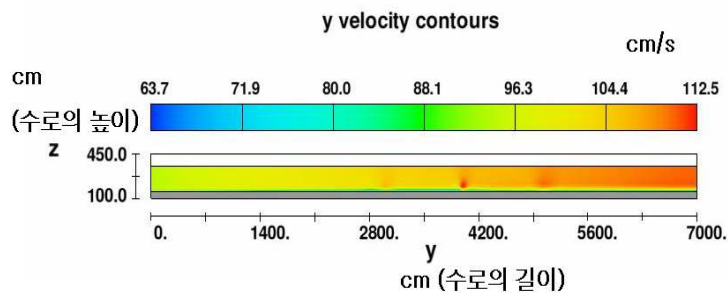
일렬형 배치와 복합형 배치와 마찬가지로 형태와 간격을 동일하게 하였으며, 배치를 한 측면에 배치함으로써 이에 따른 수로의 수심과 유속을 모의하였다.

① 수질정화체 사이의 간격이 10m인 경우

간격이 10m인 경우 측면형 배치에 따른 수로의 유속분포는 <그림 3.1.59>와 같다. 일렬형 배치와 복합형 배치의 경우보다 유속이 감소하였으며 최대유속을 나타내는 부분도 수질정화체 주변으로 편중하여 발생하는 것으로 나타났다.

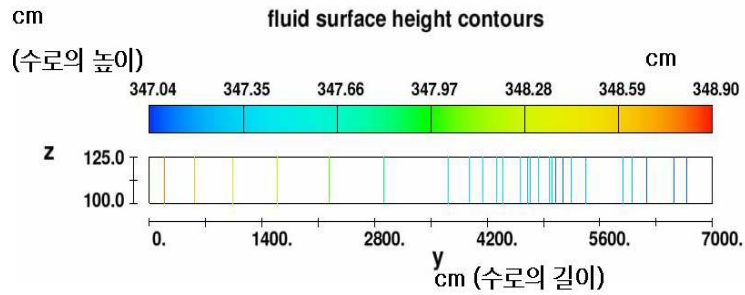


(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

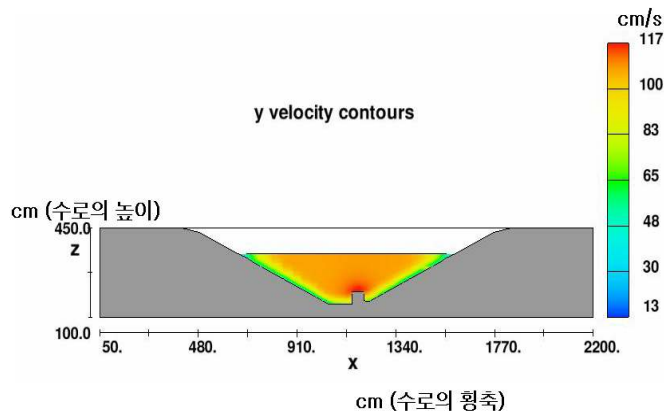
<그림 3.1.59> 유속분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 10m)



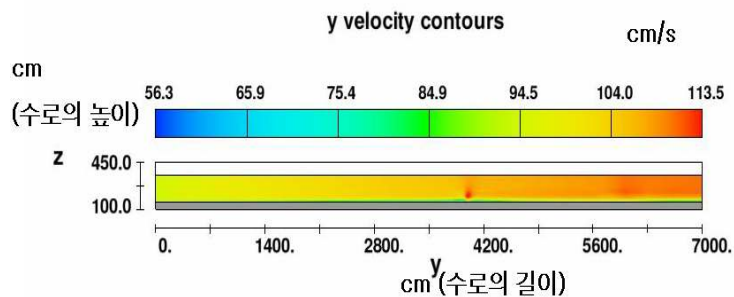
<그림 3.1.60> 수심분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 10m)

② 수질정화체 사이의 간격이 20m인 경우

다른 경우와 마찬가지로 수질정화체 간격이 10m에서 20m로 증가할 때 최대유속은 증가하는 것으로 나타났으며, 수로의 바닥은 전체적으로 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 유속분포(횡단면)

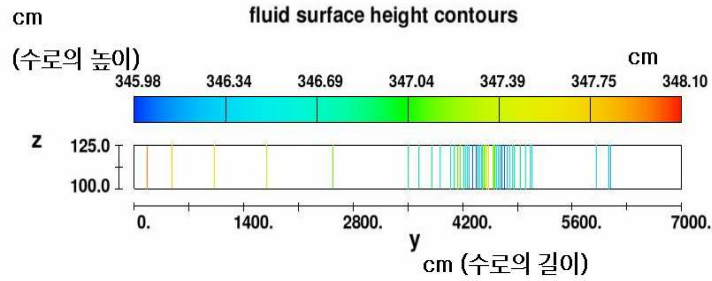


(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.61> 유속분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 20m)



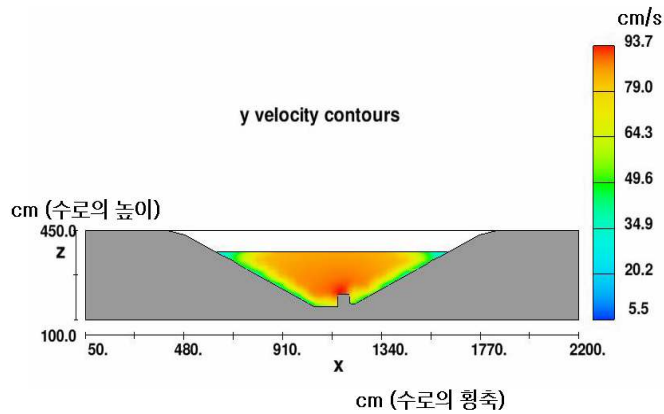
수로의 수심분포는 일렬형 배치나 복합형 배치에 비하여 감소하는 것으로 나타났으며 수질정화체가 설치된 부분에서 급격한 수심변화를 <그림 3.1.62>과 같이 나타내고 있다.



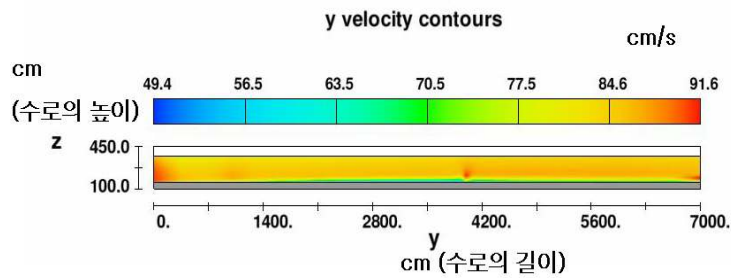
<그림 3.1.62> 수심분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 20m)

③ 수질정화체 사이의 간격이 30m인 경우

일렬형 배치나 복합형 배치와 마찬가지로 최대유속은 감소하는 것으로 나타났으며 10m, 20m인 경우보다 수질정화체에 의한 영향 구간이 길게 나타났다.



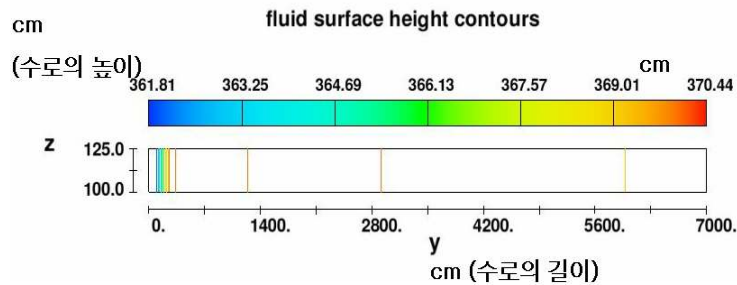
(a) 유속분포(횡단면)



(b) 유속분포(종단면)

<그림 3.1.63> 유속분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 30m)

일렬형 배치와 복합형 배치와 마찬가지로 최대수심은 증가하였으며 초기수심에 대하여 급격한 변화를 나타내는 것으로 결과가 나타났다.



<그림 3.1.64> 수심분포(수치해석, 측면형 배치, 간격 30m)

이상과 같이 수질정화체 배치에 따른 유속 변화를 <표 3.1.22>와 같이 나타내었다. 복합형 배치일 경우에 간격 20m인 경우 유속이 1.30m/s으로 최대를 나타내었다. 일렬형 배치인 경우 간격이 20m인 경우 유속이 최대로 나타났는데 이는 간격이 10m인 경우는 전면 수질정화체와 후면 수질정화체 간에 상호 영향에 의해 유속이 감소되고, 30m인 경우는 수질정화체 사이에 영향이 거의 없어 영향을 미치지 않아 생긴 결과로 판단된다.

<표 3.1.22> 수질정화체 배치에 따른 유속 변화

형 태	배 열	간 격	유 속
기본수로			1.07m/s
정육면체	일렬	간격 10m	1.16m/s
		간격 20m	1.29m/s
		간격 30m	1.12m/s
정육면체	복합	간격 10m	1.17m/s
		간격 20m	1.30m/s
		간격 30m	1.11m/s
정육면체	측면	간격 10m	1.16m/s
		간격 20m	1.19m/s
		간격 30m	1.11m/s

수질정화체 배치에 따른 수심 변화를 <표 3.1.23>과 같이 나타내었다. 수질정화체 배치와 무관하게 수심 변화는 크게 나타나지 않았으나, 간격이 30m인 경우는 수심이 2.20m로 다른 간격에 비하여 크게 증가하는 것으로 나타났다.

<표 3.1.23> 수질정화체 배치에 따른 수로 내 수심 변화

형 태	배 열	간 격	수 심
기본수로			2.00m
정육면체	일렬	간격 10m	1.99m
		간격 20m	1.99m
		간격 30m	2.20m
정육면체	복합	간격 10m	1.99m
		간격 20m	1.98m
		간격 30m	2.18m
정육면체	측면	간격 10m	1.99m
		간격 20m	1.98m
		간격 30m	2.20m

2) 실내 수리모형 제작 및 시험을 통한 수리적 안정성 검토

가) 시험 목적 및 방법

수리모형시험은 수로의 형태와 수리조건 등을 적정 축척으로 재현시켜 수로 내에서의 흐름 특성을 장기간에 걸쳐 세밀히 측정할 수 있다는 측면에서 일반 현지실험에 비해 장점을 갖는다.

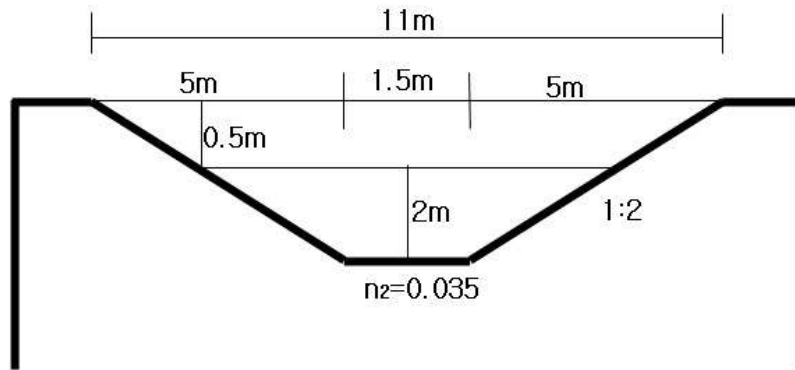
수로 현장에 설치된 수질정화체를 통해 식생 활착과 수리적 안정성을 검토할 수는 있다. 그러나 이 경우 장기간에 걸쳐 측정한다는 것이 매우 어려우며, 현지 기상조건과 수로여건에 따라 측정이 변동이 많으므로 세밀한 검토를 위해서는 많은 인원과 시간이 소요된다. 따라서 실험실 내부에서 장기적으로 비교적 세밀히 측정할 수 있다는 점에서 수리실험의 필요성과 목적에 타당성을 갖는다.

실험은 경우의 수를 두고 수질정화체를 설치했을 때의 수로의 안정성(범람)과 효율성(유속, 수심)을 바탕으로 시험을 진행한다.

경우의 수란 정화체의 개수, 배치(측면 일렬형), 복합형(수로 양쪽 측면 지그재그)과 수질정화체 배치의 거리 차이를 말한다.

(1) 실험방법

실내수리모형시험은 건국대학교 야외수리시험장에서 수행되었다. 시험수로는 효과적인 시험을 위하여 실제 하천과 비슷한 모델을 설치하였다. 다음은 시험수로의 체원이다.



<그림 3.1.65> 시험수로 제원

<표 3.1.24> 시험수로 제원

항목	값	비고
기울기(I)	1/1000	기울기에 의한 급격한 유속변화를 방지하기 위함
조도계수(n)	0.035	인공수로의 일반값(0.025 ~ 0.040)
높이(h)	2.0m	사면경사 1:2 에 따른 높이
여유고(h')	0.5m	
수로 바닥폭(b)	1.5m	
단면적(A)	11m <sup>2</sup>	
최대허용유속(V)	1.5m/s	Chow(1959)의 식생 및 시공재료에 따른 허용유속지표
최대유량(Q)	16.5m <sup>3</sup> /s	홍수시 유량고려

모델 축척은 현지 설치되는 블록의 규모를 고려하여 시험수로의 여건을 고려하여 s=1:1.0으로 하였다.

수리모형시험용 수로는 수로부, 저수조, 고가수조, 펌프 및 모터라인, Channel 낙수부로 구성되어 있다. 모형수로의 길이는 총 8m이며, 축소비는 1:10 이다. 각 부분에 대한 설명은 다음과 같다.

(가) 수로부

- ① 단면 Type : 사다리꼴
- ② 크기

- ㉞ 단면 : 1m × 0.15m × 0.28m (H)
- ㉟ 길이 : 7m
- ③ 재질 : 투명 Acryl판 10mm
- ④ Channel 지지대 구조
- ㉞ 철 사각 Pipe (40 × 40 × 2t)
- ㉟ 철 Angle (50 × 50 × 4t)
- ㊱ tilting 기능 : 0~3cm (Max)

(나) 저수조 (Sump Tank)

- ① 재질 : PVC판 10mm, 15mm
- ② 크기 : 2m(L) × 1m(W) × 0.8m(H)
- ③ 수조 지지대 구조
- ㉞ 철 Angle 60 × 60 × 5t
- ㉟ 40 × 40 × 3t
- ④ Drain Valve : 25A Ball Valve

(다) 고가 수조

- ① 수조
  - (a) 재질 : PVC 10mm
  - (b) 크기 : 150L × 50W × 50H (cm)
- ② 지지대 구조
  - (a) 철 Angle 40 × 40 × 3t
  - (b) 철 사각 Pipe 40 × 40 × 2t
- ③ 높낮이 조정구 : 4ea
- ④ Weir : Rectangular Weir
- ⑤ Hook Gauge (360mm) 및 설치대
- ⑥ 정류 Screen : 3ea
- ⑦ Drain (Ball Valve) : 1ea

(라) Pump, Motor Line

- ① Type : 배수용 수중 Pump
- ② 필요 양수량 : 60 L/sec 18m<sup>3</sup>/min × 2 SET
- ③ Pump 구성 : 2SET (1.8m<sup>3</sup>/m × 2 = 3.6m<sup>3</sup>/min)
- ④ 전원 및 출력 : 220/380V, 3.7kW × 2 = 7.4kW (10HP)
- ⑤ 연결 Hose : 80φ flexible
- ⑥ 유량조절 Valve : 3" Gate Valve 2ea
- ⑦ Hose 연결 Jinter : 80φ 용 Hose Joint

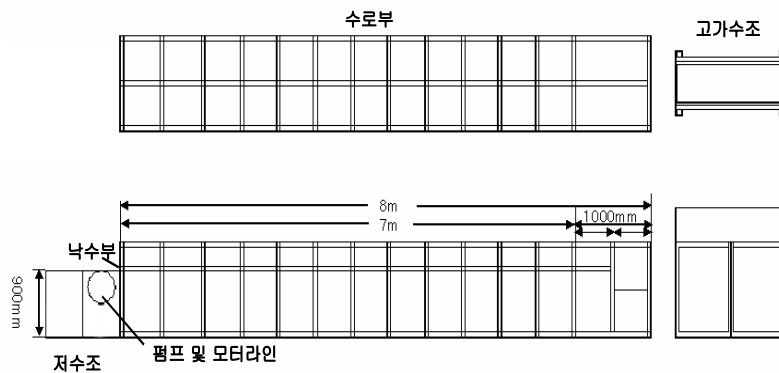
⑧ Hose Hanger 구 부착

(마) Channel 낙수부

① 낙수 비산 방지 장치 (Acryl 또는 PVC 10mm)

② Drain (Ball Valve) 1ea

위와 같은 각 부분으로 설명되어지며 입면도 및 측면도는 다음과 같다.



<그림 3.1.66> 수리모형시험 개수로의 입면도 및 측면도

<표 3.1.25> 수리모형시험 개수로의 제원

항목	단위	값
수로경사(I)	무단위	1/1000
조도계수(n)	무단위	0.024
수심(h)	m	0.2
여유고(h')	m	0.05
하부폭(b)	m	0.15

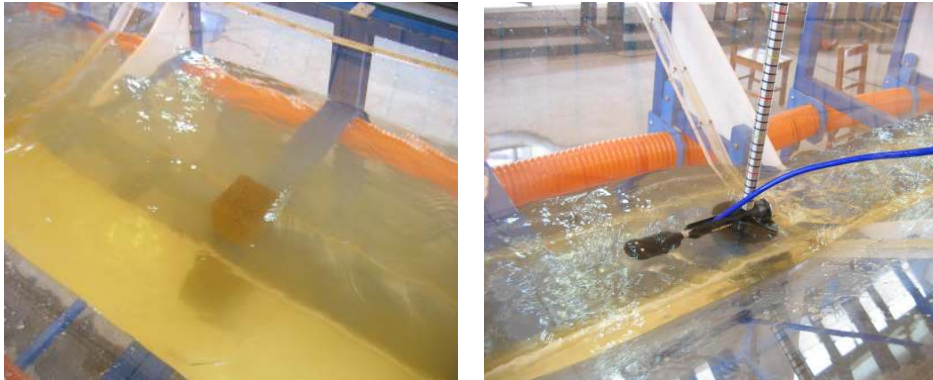


<그림 3.1.67> 수리모형시험 개수로

나) 실내수리모형시험 결과

(1) 수리모형시험에 의한 수로의 안정성 검토

수치해석의 검증 및 비교 분석을 위하여 수리모형시험을 실시하였다. 수리학적 상사법칙에 적용된 수질정화체 모형을 수리모형에 설치하여 수질정화체의 부피변화 및 모양변화에 따른 수심 및 유속 측정을 실시함으로써 수치해석으로 모의된 허용유속과 여유고에 대하여 비교 분석이 가능하도록 하였다. <그림 3.1.68>에서는 한 변 길이 5cm인 정육면체를 설치하여 유속을 측정하는 모습을 나타내고 있다.



<그림 3.1.68> 유속측정(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 5cm)

수리모형장치의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.26>과 같다.

<표 3.1.26> 최대유속(수리모형시험, 기본수로)

측 점	유 속(m/s)		
	최대유속 지점(6m)	0.316	0.285
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속지점(6m)	1.00	0.90	1.10

유속을 측정하여 수리학적 상사법칙으로 환산하여 본 결과, 유속에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있다고 판단된다.

또한, 수리모형장치의 수심을 측정하여 안정성을 평가하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였으며, 측정결과는 <표 3.1.27>과 같다.

<표 3.1.27> 최대수심(수리모형시험, 기본수로)

측 점	수 심(m)
	최대수심 지점(4.5m)
측점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(4.5m)	2.05

수심을 측정하여 수리학적 상사법칙으로 환산하여 본 결과, 수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

(2) 수질정화체 부피변화에 따른 검토

수치해석을 통해서 모의된 수질정화체의 부피변화에 따른 수로의 수리적 안정성 검증을 위하여 수리모형시험을 실시하였다. 수리학적 상사법칙을 적용하여 수질정화체의 크기 및 조도계수를 변환하였으며 수질정화체 모형 설치에 따른 수심 및 유속을 측정하여 수치해석의 검증을 실시하였다.

(가) 수질정화체 한 변의 길이 5cm인 경우

한 변길이 5cm인 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.28>와 같다.



<표 3.1.28> 최대유속(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 5cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(6.85m)	0.367	0.380	0.364
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속지점(6.85m)	1.16	1.20	1.15

한변길이 5cm인 수질정화체 모형이 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표3.1.29>와 같다.

<표 3.1.29> 최대수심(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 5cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(4.5m)	0.201
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(4.5m)	2.01

수심을 측정하여 수리학적 상사법칙으로 환산하여 본 결과, 수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

(나) 수질정화체 한 변의 길이가 7cm인 경우

한 변 길이 7cm인 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.30>과 같다.

<표 3.1.30> 최대유속(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 7cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(6.7m)	0.389	0.392	0.405
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속지점(6.7m)	1.23	1.24	1.28

한 변 길이가 7cm인 수질정화체 모형이 설치된 수리모형장치의 수위를 측정하였다. 수위측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.31>과 같다.

수위를 측정하여 수리학적 상사법칙으로 환산하여 본 결과, 수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

<표 3.1.31> 최대수심(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 7cm)

측 점	수 심(m)
최대수위 지점(4.3m)	0.199
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수위 지점(4.3m)	1.99

(다) 수질정화체 한 변의 길이 10cm인 경우

한 변 길이 10cm인 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.32>와 같다.

<표 3.1.32> 최대유속(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 10cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(6.1m)	0.383	0.386	0.392
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속지점(6.1m)	1.21	1.22	1.24

한 변 길이가 10cm인 수질정화체 모형이 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였으며, 그 결과는 <표 3.1.33>과 같다.

<표 3.1.33> 최대수심(수리모형시험, 정육면체, 한 변길이 10cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(0.4m)	0.202
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(0.4m)	2.02

수심을 측정하여 수리학적 상사법칙으로 환산하여 본 결과, 한 변 길이 5cm 및 7cm보다 수심이 증가하는 것을 알 수 있다. 수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

이상과 같이 수질정화체 부피변화에 따른 유속 변화를 수리모형시험을 통하여 측정하여 보았다. 수치해석에서는 부피가 증가함에 따라 유속이 증가하였으나, 수리모형시험에서는 한 변길이 7cm에서 유속이 증가하다가 10cm에서 다시 감소하는 것으로 나타났다.

<표 3.1.34> 수질정화체 모형의 부피변화에 따른 유속 변화

형 태	부 피	유 속
기본수로		1.00m/s
정육면체	한 변길이 5cm	1.17m/s
	한 변길이 7cm	1.25m/s
	한 변길이 10cm	1.22m/s

수질정화체 모형의 부피 변화에 따른 수심 변화를 <표 3.1.35>와 같이 나타내었다. 수치해석의 경우와 같이 수심 변화가 크게 나타나지 않았다. 한 변 길이 7cm의 경우에 수심이 감소하여 이 때 여유고 조건에 대한 수리적 안정성이 양호한 것으로 판단된다.

<표 3.1.35> 수질정화체 모형의 부피 변화에 따른 수심 변화

형 태	부 피	유 속
기본수로		2.05m
정육면체	한 변길이 5cm	2.01m
	한 변길이 7cm	1.99m
	한 변길이 10cm	2.02m

### (3) 수질정화체 형태에 따른 검토

수치해석을 통해서 모의된 수질정화체의 형태 변화에 따른 수로의 수리적 안정성 검증을 위하여 수리모형시험을 실시하였다. 수리학적 상사법칙을 적용하여 수질정화체의 크기 및 조도계수를 변환하였으며 수질정화체모형 설치에 따른 수심 및 유속을 측정하여 수치해석의 검증을 실시하였다. 모형 축척 1/10을 적용하여 수질정화체 모형에 대하여 수심 및 유속을 측정하였다.

#### (가) 원기둥 형태의 수질정화체

① 반지름 길이 2.8cm

반지름 길이 2.8cm인 원기둥 형태의 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.36>과 같다.

<표 3.1.36> 최대유속(수리모형시험, 원기둥, 반지름 2.8cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(6.1m)	0.370	0.377	0.392
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속지점(6.1m)	1.17	1.19	1.24

반지름 길이 2.8cm인 원기둥 형태의 수질정화체 모형을 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.37>과 같다.

<표 3.1.37> 최대수심(수리모형시험, 원기둥, 반지름 2.8cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(0.4m)	0.202
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(0.4m)	2.02

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

② 반지름 길이 4.0cm

반지름 길이 4.0cm인 원기둥 형태의 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.38>과 같다.

<표 3.1.38> 최대유속(수리모형시험, 원기둥, 반지름 4.0cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.364	0.377	0.367
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.15	1.19	1.16

반지름 길이 4.0cm인 원기둥 형태의 수질정화체 모형을 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.39>과 같다.

<표 3.1.39> 최대수심(수리모형시험, 원기둥, 반지름 4.0cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(3.0m)	0.203
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(3.0m)	2.03

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

### ③ 반지름 길이 5.6cm

반지름 길이 5.6cm인 원기둥 형태의 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.40>과 같다.

<표 3.1.40> 최대유속(수리모형시험, 원기둥, 반지름 5.6cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.408	0.383	0.392
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.29	1.21	1.24

반지름 길이 5.6cm인 원기둥 형태의 수질정화체 모형을 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.41>과 같다.

<표 3.1.41> 최대수심(수리모형시험, 원기둥, 반지름 5.6cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(3.8m)	0.205
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(3.8m)	2.05

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

(나) 반구 형태의 수질정화체

① 반지름 길이 3.9cm

반지름 길이 3.9cm인 반구 형태의 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대 유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.42>와 같다.

<표 3.1.42> 최대유속(수리모형시험, 반구, 반지름 3.9cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.370	0.367	0.377
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.17	1.16	1.19

반지름 길이 3.9cm인 반구 형태의 수질정화체 모형을 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.43>과 같다.

<표 3.1.43> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 3.9cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(1.0m)	0.197
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(1.0m)	1.97

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

② 반지름 길이 5.5cm

반지름 길이 5.5cm인 반구 형태의 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대 유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.44>와 같다.

<표 3.1.44> 최대유속(수리모형시험, 반구, 반지름 5.5cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.386	0.392	0.402
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.22	1.24	1.27

반지름 길이 5.5cm인 반구 형태의 수질정화체 모형을 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.45>와 같다.

<표 3.1.45> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 5.5cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(1.6m)	0.193
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(1.6m)	1.93

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

③ 반지름 길이 7.5cm

반지름 길이 7.5cm인 반구 형태의 수질정화체 모형을 설치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대 유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.46>과 같다.

<표 3.1.46> 최대유속(수리모형시험, 반구, 반지름 7.5cm)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.373	0.392	0.427
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.18	1.24	1.35

반지름 길이 7.5cm인 반구 형태의 수질정화체 모형을 설치된 수리모형장치의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.47>과 같다.

<표 3.1.47> 최대수심(수리모형시험, 반구, 반지름 7.5cm)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(2.0m)	0.210
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(2.0m)	2.10

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및



분석실험이 가능하다고 판단된다.

이상과 같이 수질정화체 모형의 형태에 따른 수리적 안정성을 검토하였으며 정육면체, 원기둥, 반구 형태에 따른 유속 변화를 <표 3.1.48>에 나타내었다.

정육면체 형태의 수질정화체 모형에서는 유속이 증가하였다가 감소하였고, 원기둥 형태에서는 유속이 감소하였다가 증가하는 등 각 형태에 따라 다른 변화를 나타내는 것으로 측정되었다.

수치해석과 마찬가지로 원기둥 형태의 반지름 4.0cm인 경우가 허용유속에 대하여 가장 안정하다고 판단된다.

<표 3.1.48> 수질정화체 모형의 형태에 따른 유속 변화

형 태	부 피	유 속
기본수로		1.00m/s
정육면체	한 변길이 5cm	1.17m/s
	한 변길이 7cm	1.25m/s
	한 변길이 10cm	1.22m/s
원기둥	반지름 2.8cm	1.20m/s
	반지름 4.0cm	1.17m/s
	반지름 5.6cm	1.25m/s
반 구	반지름 3.9cm	1.17m/s
	반지름 5.5cm	1.24m/s
	반지름 7.5cm	1.26m/s

수리모형시험을 통하여 수질정화체 형태에 따른 수심변화를 측정한 결과는 <표 3.1.49>와 같다. 수치해석과 마찬가지로 수심에 대하여 수질정화체 형태는 크게 변화가 없는 것으로 나타났다. 다만 반지름이 75cm인 경우는 수심이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

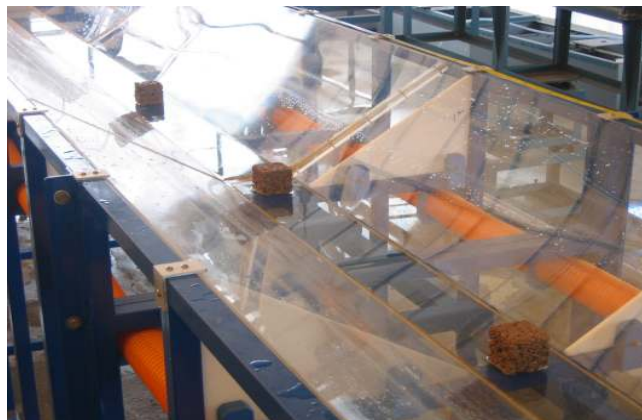
<표 3.1.49> 수질정화체 모형의 형태에 따른 수심 변화

형 태	부 피	수 심
기본수로		2.05m
정육면체	한 변길이 50cm	2.01m
	한 변길이 70cm	1.99m
	한 변길이 100cm	2.02m
원기둥	반지름 28cm	2.02m
	반지름 40cm	2.03m
	반지름 56cm	2.05m
반구	반지름 39cm	1.97m
	반지름 55cm	1.93m
	반지름 75cm	2.10m

(4) 수질정화체 배치에 따른 검토

(가) 일렬형 배치에서의 수심 및 유속 측정

수질정화체 모형을 일렬로 배치하여 수심 및 유속을 측정하였으며, 간격은 1m, 2m, 3m에 대하여 각각 측정을 실시하였다. 수심을 전압식 수위계를 사용하여 측정하였으며, 유속은 미속유속계를 설치하여 작은 유속에도 민감하게 측정이 가능하도록 하였다.



<그림 3.1.69> 수리모형시험(일렬형 배치, 간격 1m)

① 수질정화체 사이의 간격이 1m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 1m로 하여 일렬로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정

하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.50>과 같다.

<표 3.1.50> 최대유속(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 1m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.402	0.383	0.392
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.27	1.21	1.24

수질정화체 사이의 간격을 1m로 하여 일렬로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.51>과 같다.

<표 3.1.51> 최대수심(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 1m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(1.0m)	0.198
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(1.0m)	1.98

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

② 수질정화체 사이의 간격이 2m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 2m로 하여 일렬로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.52>와 같다.

<표 3.1.52> 최대유속(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 2m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.402	0.389	0.408
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.27	1.23	1.29

수질정화체 사이의 간격을 2m로 하여 일렬로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수위측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.53>과 같다.

<표 3.1.53> 최대수심(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 2m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(4.4m)	0.190
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(4.4m)	1.90

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

③ 수질정화체 사이의 간격이 3m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 3m로 하여 일렬로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.54>와 같다.

<표 3.1.54> 최대유속(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 3m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.342	0.316	0.297
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.08	1.00	0.94

수질정화체 사이의 간격을 3m로 하여 일렬로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.55>와 같다.

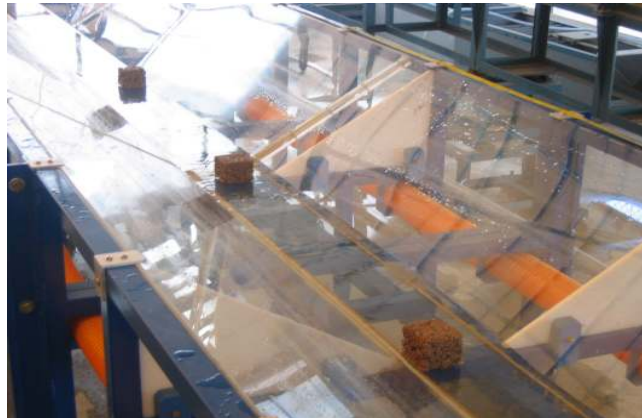
<표 3.1.55> 최대수심(수리모형시험, 일렬형 배치, 간격 3m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(4.0m)	0.222
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),( $\times 10$ )
최대수심 지점(4.0m)	2.22

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

(나) 복합형 배치에서의 수심 및 유속 측정

일렬형 배치와 마찬가지로 정육면체 형태의 수질정화체 모형을 배치하여 수심 및 유속을 측정하였으며, 간격마다 지그재그 형태로 배치하여 각 수질정화체 모형 별로 측면 양쪽에 번갈아 위치하도록 하여 측정을 실시하였다. 간격 또한 일렬형 배치와 동일하게 측정을 실시하였다.



<그림 3.1.70> 수리모형시험(복합형 배치, 간격 1m)

① 수질정화체 사이의 간격이 1m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 1m로 하여 복합형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속 분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.56>과 같다.

<표 3.1.56> 최대유속(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 1m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.411	0.418	0.427
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.30	1.32	1.35

수질정화체 사이의 간격을 1m로 하여 복합형으로 배치하여 수리모형장치에서의 수심을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.57>과 같다.

<표 3.1.57> 최대수심(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 1m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(5.0m)	0.199
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(5.0m)	1.99

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및 분석실험이 가능하다고 판단된다.

② 수질정화체 사이의 간격이 2m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 2m로 하여 복합형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속 분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.58>과 같다.

<표 3.1.58> 최대유속(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 2m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.427	0.418	0.430
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.35	1.32	1.36

수질정화체 사이의 간격을 2m로 하여 복합형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.59>과 같다.

<표 3.1.59> 최대수심(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 2m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(4.8m)	0.195
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(4.8m)	1.95

수심에 대하여 수로의 수치해석이 적용성이 있으며, 수질정화체 모형을 설치하여 비교 및

분석실험이 가능하다고 판단된다.

③ 수질정화체 사이의 간격이 3m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 3m로 하여 복합형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였다.

<표 3.1.60> 최대유속(수리모형시험, 복합형, 배치, 간격 3m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.341	0.354	0.364
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.08	1.12	1.15

수질정화체 사이의 간격을 3m로 하여 복합형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.61>과 같다.

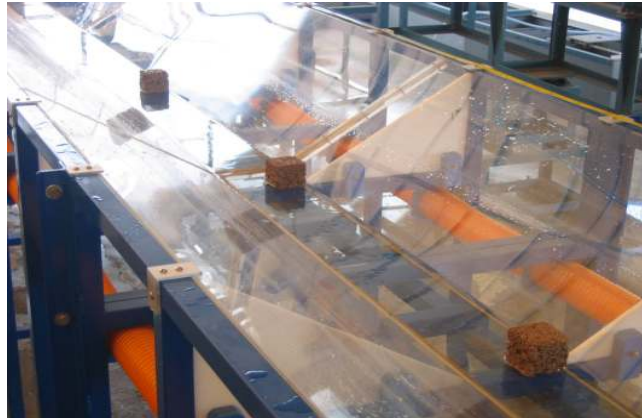
<표 3.1.61> 최대수심(수리모형시험, 복합형 배치, 간격 3m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(1.0m)	0.219
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(1.0m)	2.19

(다) 측면형 배치에서의 수심 및 유속 측정

일렬형 배치와 복합형 배치와 마찬가지로 형태와 간격을 동일하게 하였으며, 배치를 한 측면에 배치함으로써 이에 따른 수로모형의 수심과 유속을 측정하였다.





<그림 3.1.71> 수리모형시험(측면형 배치, 간격 1m)

① 수질정화체 사이의 간격이 1m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 1m로 하여 측면 형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속 분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.62>와 같다.

<표 3.1.62> 최대유속(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 1m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.323	0.351	0.364
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.02	1.11	1.15

수질정화체 사이의 간격을 1m로 하여 측면 형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.63>과 같다.

<표 3.1.63> 최대수심(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 1m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(1.0m)	0.197
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(1.0m)	1.97

② 수질정화체 사이의 간격이 2m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 2m로 하여 측면 형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속 분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.64>와 같다.

<표 3.1.64> 최대유속(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 2m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.370	0.358	0.373
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.17	1.13	1.18

수질정화체 사이의 간격을 2m로 하여 측면 형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.65>와 같다.

<표 3.1.65> 최대수심(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 2m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(4.4m)	0.202
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(4.4m)	2.02

③ 수질정화체 사이의 간격이 3m인 경우

수질정화체 사이의 간격을 3m로 하여 측면 형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 유속은 전기식 유속계를 사용하였으며, 측정지점은 수치해석을 통하여 최대유속 분포를 나타내고 있는 지점으로 하였다. 측정은 3회를 실시하였으며, 측정결과는 <표 3.1.66>과 같다.

<표 3.1.66> 최대유속(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 3m)

측 점	유 속(m/s)		
최대유속 지점(4.0m)	0.358	0.351	0.323
측 점	수리학적 상사법칙 환산유속(m/s),(=×3.16)		
최대유속 지점(4.0m)	1.13	1.11	1.02

수질정화체 사이의 간격을 3m로 하여 측면 형으로 배치하여 수리모형장치에서의 유속을 측정하였다. 수심측정은 전압식 수위계 및 실측치를 사용하였다. 측정결과는 <표 3.1.67>과 같다.

<표 3.1.67> 최대수심(수리모형시험, 측면형 배치, 간격 3m)

측 점	수 심(m)
최대수심 지점(4.4m)	0.221
측 점	수리학적 상사법칙 환산수심(m),(=×10)
최대수심 지점(4.4m)	2.21

이상과 같이 수리모형시험을 통하여 일렬형, 복합형, 측면형 배치에 대하여 수리적 안정성을 검토하였다.

수질정화체 모형의 배치에 따른 유속 변화는 <표 3.1.68>와 같다. 복합형 배치에서 간격이 2m인 경우 1.34m/s로 최대 유속을 나타내었다.

<표 3.1.68> 수질정화체 모형의 배치에 따른 유속 변화

형 태	배 열	간 격	유 속
기본수로			1.00m/s
정육면체	일렬	1m	1.24m/s
		2m	1.26m/s
		3m	1.00m/s
정육면체	복합	1m	1.32m/s
		2m	1.34m/s
		3m	1.12m/s
정육면체	측면	1m	1.09m/s
		2m	1.16m/s
		3m	1.09m/s

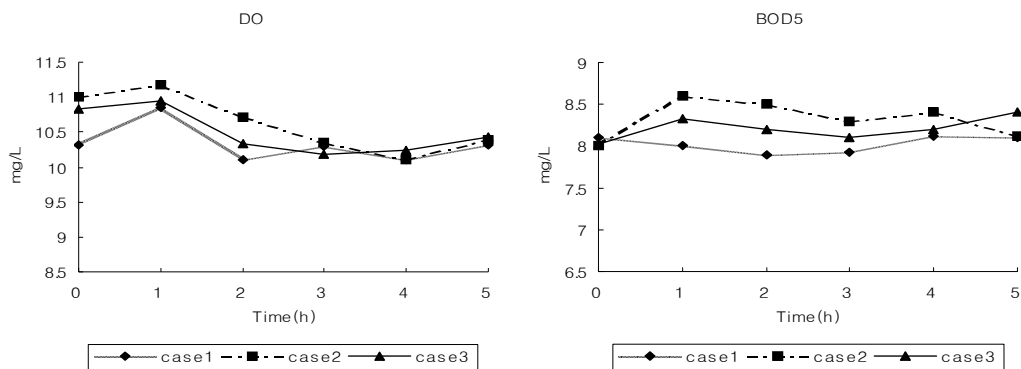
수질정화체 모형의 배치에 따른 수심 변화를 <표 3.1.69>에 나타내었다. 수질정화체 모형의 배치에 관계없이 수심은 큰 변화가 없었다. 다만 간격 2m인 경우가 가장 수심이 적게 측정되어 여유고 조건에 의한 수리적 안정성에 있어서 유리할 것으로 판단된다.

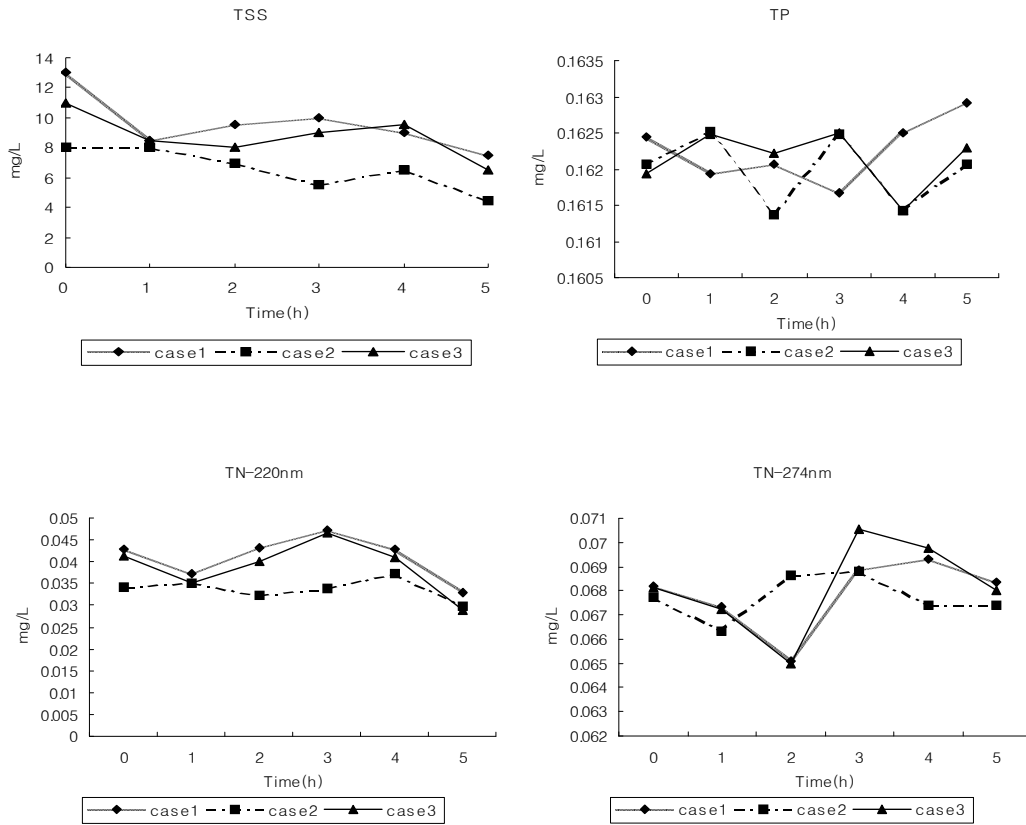
<표 3.1.69> 수질정화체 모형의 배치에 따른 수심 변화

형 태	배 열	간 격	수 심
기본수로			2.05m
정육면체	일렬	1m	1.98m
		2m	1.90m
		3m	2.22m
정육면체	복합	1m	1.99m
		2m	1.95m
		3m	2.19m
정육면체	측면	1m	1.97m
		2m	2.02m
		3m	2.21m

#### 나. 수질정화효율 평가

수리모형시험 장치에 4지점의 샘플링을 실시하여 실측한 수질측정 자료를 바탕으로 수질정화체의 수처리 효율을 검증하고 운영함에 있어 수질처리효율에 미치는 영향을 분석하여 수질정화체의 효율이 있는지 분석을 실시하였다.





<그림 3.1.72> 수질정화체가 설치된 수리모형시험장치의 수질변화

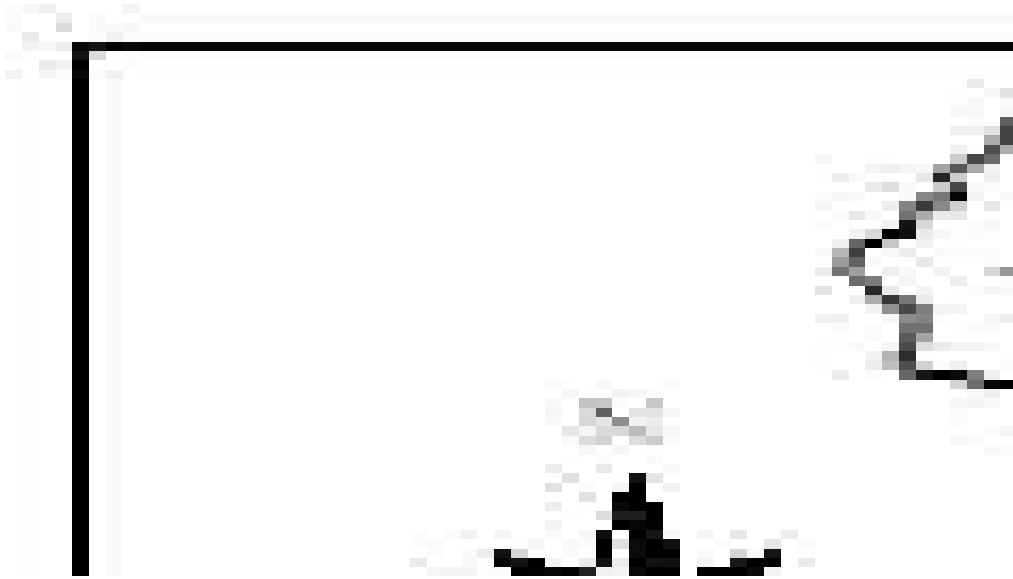
수질정화체를 설치한 배수로의 DO농도를 분석하였을 때 처음 1시간 동안 DO농도는 증가 추세(평균 10.7 mg/L에서 평균 11.0 mg/L)를 나타내었는데, 이는 펌프순환에 의한 폭기로 인한 산소의 용해도 증가로 생각된다. 이후의 시간에는 커다란 변화를 나타내지 않았다. BOD<sub>5</sub>, TP, TN-220nm, 274nm는 농도변화에 있어 큰 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 수질정화체 특성상 용해되어 있는 성분에 있어 효율성이 적은 것으로 생각된다.

TSS는 농도가 감소(평균 8.2mg/L에서 평균 6.2mg/L)하여 수질분석 조사항목 중에서 가장 효율성이 있는 것으로 나타났으며, 수질정화체가 고형물질에 있어 효과를 나타낼 것으로 판단된다<그림 3.1.72, 표 3.1.70>.

<표 3.1.70> 각 경우에 따른 수리모형시험장치에서의 수질변화

항목	시간 (hour)	값(mg/L)			
		Case 1	Case 2	Case 3	average
DO	0	10.3	11.0	10.8	10.7
	1	10.8	11.2	11.0	11.0
	2	10.1	10.7	10.3	10.4
	3	10.3	10.4	10.2	10.3
	4	10.1	10.1	10.2	10.1
	5	10.3	10.4	10.4	10.4
BOD	0	8.1	8.0	8.0	8.0
	1	8.0	8.6	8.3	8.3
	2	7.9	8.5	8.2	8.2
	3	7.9	8.3	8.1	8.1
	4	8.1	8.4	8.2	8.2
	5	8.1	8.1	8.4	8.2
TSS	0	13.0	8.0	11.0	10.7
	1	8.5	8.0	8.5	8.3
	2	9.5	7.0	8.0	8.2
	3	10.0	5.5	9.0	8.2
	4	9.0	6.5	9.5	8.3
	5	7.5	4.5	6.5	6.2
TP	0	0.162	0.162	0.162	0.162
	1	0.162	0.163	0.162	0.162
	2	0.162	0.161	0.162	0.162
	3	0.163	0.162	0.162	0.162
	4	0.163	0.161	0.161	0.162
	5	0.163	0.162	0.162	0.162
TN-220nm	0	0.043	0.034	0.041	0.039
	1	0.037	0.035	0.035	0.036
	2	0.043	0.032	0.040	0.038
	3	0.047	0.034	0.047	0.043
	4	0.043	0.037	0.041	0.040
	5	0.033	0.030	0.029	0.031
TN-274nm	0	0.068	0.068	0.068	0.068
	1	0.067	0.066	0.067	0.067
	2	0.065	0.069	0.065	0.066
	3	0.069	0.069	0.070	0.069
	4	0.069	0.067	0.070	0.069
	5	0.068	0.067	0.068	0.068

#### 4. 수질정화체의 농수로 현장시험 연구

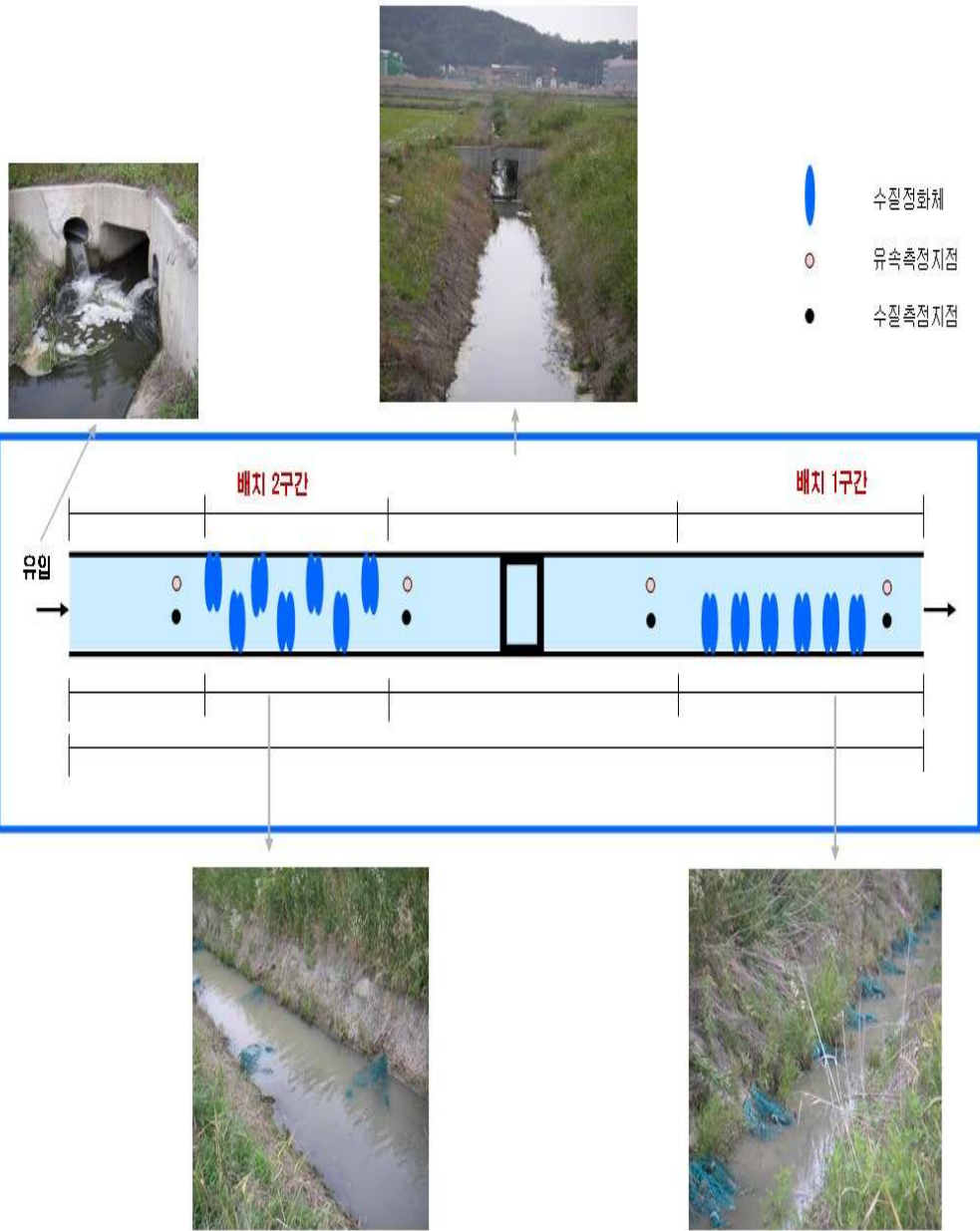


<그림 3.1.73> 대상지구

수질정화체가 설치된 수로에서의 수리적 안정성 및 효율성을 알아보기 위해 충남 당진군의 성문간척지구내 100m수로 두 곳에 나누어 한쪽 수로는 수질정화체를 측면 일렬형, 다른 수로는 복합형으로 수질정화체를 설치하여 실험 하였다.

당진석문지구는 담수호 유입부 중안 퇴적구간이며 전체 유역면적 22,672 ha이며 농지 22ha, 습지3.2 ha, 유수지 0.32ha 그리고 기타 부대시설 등 총 4 ha로 구성되었다.

수로 두 곳에 한쪽은 측면 일렬형, 다른 한쪽은 복합형으로 시공하여 모니터링 하였다.



<그림 3.1.74> 대상지구 현장의 수질정화체 배치도





<그림 3.1.75> 수질정화체의 농수로 적용 모습



<그림 3.1.76> 농수로 측면 일렬형 배치 모습



<그림 3.1.77> 농수로 측면 복합형 배치 모습

5. 현장시험 적용 모니터링

가. 수리학적 안전성

1) 연구대상 수로의 수리학적 분석

제방과 저수로에 대해서 설계 시공시 사용된 50년 빈도 설계 홍수량 12.70 m<sup>3</sup>/s를 유하시켜 설계시 사용한 조도계수 0.025의 값과 0.03, 0.035, 0.04로 변화시켜가며 각각의 경우에 대한 측정지점 유속과 소류력의 변화를 모의함으로써 지점별 수질정화체에 의한 증가된 조도계수가 수로 단면에서의 흐름에 미치는 영향을 분석하였다.

<표 3.1.71>에서 수질정화체가 설치된 수로에서의 최고 유속은 3.23 m/s로 나타났으며 소류력은 최고 112.54 N/m<sup>2</sup>로 나타났다. 단면별 조도계수 값은 수로내 하도의 경우 모든 측정지점에 대하여 0.03의 고정 값을 입력하였으며 각각의 수질정화체 설치별 특징에 따라 조도계수의 입력 값은 적합한 조도계수를 입력하였으며 입력한 조도 값을 점차로 증가시켜 변화를 분석하였다.

유속과 소류력에 있어서 각 측정지점의 조도계수가 증가할수록 소류력과 유속은 감소하는 것을 볼 수 있다.

<표 3.1.71> 조도계수 변화에 따른 사면부 유속과 소류력

조도계수	정화체 설치방법 (Section No.)	평균유속(m/s)		소류력(N/m <sup>2</sup> )	
		좌안	우안	좌안	우안
0.03	측면 일렬형 1-1	1.36	1.26	20.54	18.18
	측면 일렬형 1-2	2.02	1.33	45.45	24.5
	복합형 1-1	1.38	1.33	23.32	21.45
	복합형 1-2	2.27	1.84	53.17	38.85
0.035	측면 일렬형 1-1	1.29	1.19	16.73	14.81
	측면 일렬형 1-2	1.77	1.17	43.58	23.34
	복합형 1-1	1.31	1.24	18.85	17.65
	복합형 1-2	2.00	1.62	50.72	36.94
0.04	측면 일렬형 1-1	1.24	1.14	13.19	11.67
	측면 일렬형 1-2	1.57	1.05	38.34	20.63
	복합형 1-1	1.22	1.27	15.06	14.26
	복합형 1-2	1.78	1.45	47.06	34.15

조도계수의 변화에 따른 측정지점 사이의 수리특성을 비교하였으며 특징적 경향은 나타나

지 않았으나 각 각의 측정지점에서 조도계수의 증가에 따라 평균유속과 소류력은 감소하는 경향을 보이고 있다.

2) 수질정화 제품이 설치된 수로의 수리적 안정성 평가

가) 수질정화체 설치별 수리특성 분석

(1) 수질정화체 설치별 수리특성 분석

평수위 유량 측정을 통하여 단면별 유량을 계산하였다. 계산된 0.041 m<sup>3</sup>/s의 유량을 모형의 유량자료에 입력하여 모의하였으며, 모의 유속과 실측 유속에 대하여 <표 3.1.72>에 비교 검토하였다.

<표 3.1.72> 수질정화체 설치방법에 따른 실측값과 모의 값의 비교

수질정화체 설치방법	평균유속 (m/s)	
	실측	모의
측면 일렬형 1-1	0.882	0.9
측면 일렬형 1-2	1.226	1.24
복합형 2-1	1.070	1.01
복합형 2-2	1.069	1.12

수질정화체 설치에 따른 조도계수, 유속, 소류력을 비교하였으며 수로에서의 모형에 의해 모의된 값을 나타낸다.

<표 3.1.73> 설치별 사면부 최대유속과 소류력

설치 방법	조도계수(n)	사면부 최대유속 (m/s)	사면부 최대소류력 (N/m <sup>2</sup> )
측면 일렬형 1-1	0.035	2.0	50.72
	0.04	1.78	47.06
측면 일렬형 1-2	0.035	1.27	19.02
	0.04	1.22	14.96
복합형 1-1	0.035	1.31	18.85
	0.04	1.22	15.06
복합형 1-2	0.035	1.77	43.58
	0.04	1.57	38.34

(2) 저수호안의 유속저감 효과 분석

모의결과 나타난 수리특성 자료를 통해 수로의 유속 저감효과를 분석한 결과 수로에 수질정화체가 설치된 구간의 유속범위는 0.41~0.66m/s로 나타났으며, 수질정화체가 설치되지 않은 구간의 유속 범위 0.68~1.02m/s 보다 약 10~15%의 유속 감속 효과가 있는 것으로 분석되었다 <표 3.1.74>

<표 3.1.74> 수질정화체 설치에 따른 유속 비교

대상지역	수질정화체 설치방법		조도계수	유속	
				좌안	우안
수질 정화체 설치 수로	측면 일렬형	1-1	0.040	0.66	0.66
			0.045	0.59	0.59
		1-2	0.040	0.76	0.76
			0.045	0.68	0.68
	복합형	2-1	0.040	0.86	0.86
			0.045	0.41	0.52
		2-2	0.040	0.46	0.58
			0.045	0.41	0.52
미설치 수로	정화체 설치 無		0.040	0.90	1.02
			0.045	0.68	0.68

나) 수질정화체의 설치별 안정성 해석

(1) 허용유속 지표에 의한 안정성 해석

자연하안 및 인공제방은 침식 또는 세굴의 영향을 받기 때문에 허용유속 기준이 제시되고 있으나 환경친화적 정비공법은 여러 가지 공법이 혼용되어 시공되고 있으며 이에 대한 기준이 명확히 마련되어 있지 않다. 따라서, 기존의 공법에 대한 허용유속 기준과 재료에 대한 허용유속 기준을 지표로 하여 허용유속에 대한 안전성을 분석하였다. 점착성과 비점착성 토양에 대한 허용유속의 기준은 Olsen과 Florey(1953), Mosonyi(1963) Chow(1970) 등에 의하여 제시된 기준을 검토하였으며, Olsen 등과 Mosonyi의 기준은 유사한 재료에 대한 유사한 범위의 허용유속을 제시한 유속범위를, M.Escameia(1988)의 수로안정성 기준에 대하여 비교 검토하였다.

<표 3.1.75> 허용유속 기준 비교 값

수질정화체 설치방법		조도계수					
		0.045	0.045	0.040	0.040	0.035	0.035
		좌안	우안	좌안	우안	좌안	우안
측면 일렬형	1-1	13.02	12.99	13.09	13.05	13.14	13.10
	1-2	0.67	0.67	0.75	0.75	0.86	0.85
복합형	2-1	10.65	10.66	10.72	10.73	10.78	10.79
	2-2	0.62	0.62	0.7	0.7	0.79	0.79

수질정화체 설치한 수로에 블록자체에 의한 이탈이 발생하지 않을 경우, M.Escarameia (1988)가 제시한 유속 기준에 대하여 허용범위 내에 있으며 대체로 유속에 의한 파괴에 있어 안전하나, 수질정화체 상부에 식생으로 피복된 부분의 세굴에 의한 침식을 막는 것이 중요하며 유속의 영향을 많이 받는 부분에 대해서는 수질정화체가 수로에 완전히 잠기도록 시공이 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

수로의 친환경 정비 공법에 의해 수질정화체가 설치된 구간에서의 평균유속은 <표 3.1.76>과 같이 분석되었으며, Chow(1959)가 제시한 수로의 허용유속 기준에 의해 분석하였다.

<표 3.1.76> 허용유속 기준 비교 값

조도계수	적용공법 (Section No.)	평균유속(m/s)	
		좌안	우안
0.035	측면 일렬형 1-1	1.29	1.19
	측면 일렬형 1-2	1.77	1.17
	복합형 1-1	1.31	1.24
	복합형 1-2	2.00	1.62

Chow에 의해 제시된 “수로의 허용유속 기준” 1.23~1.54 m/s 범위 내에 있으며 측면 일렬형으로 설치된 것에 대하여 유속 감소와 소류력 감소가 안전성에 기여하는 것으로 분석되었다.

(2) 모니터링에 의한 안정성 해석

수로에 수질정화체 시공이 완료된 후 2007년 7월 22일 1일 333.2mm의 집중호우가 발생하였으며 이때의 홍수량 17.32m<sup>3</sup>/s를 모형에 적용하였다.

<표 3.1.77>은 설계초기 퇴적이 없는 상태에서의 시공 단면을 모형에 적용하여 조도계수 0.04를 모의한 결과 값을 나타낸다.

<표 3.1.77> 2007년 7월 홍수량에 대한 모의

조도계수	수질정화체 설치방법		설계홍수량 (14.76m <sup>3</sup> /s)		모의유량(17.32m <sup>3</sup> /s)	
			평균유속(m/s)		평균유속(m/s)	
			좌안	우안	좌안	우안
0.04	측면 일렬형	1-1	1.24	1.14	1.28	1.18
		1-2	1.57	1.05	2.31	1.55
	복합형	2-1	1.22	1.27	1.5	1.45
		2-2	1.78	1.45	2.65	2.14

복합형 2-2에 부분의 평균 유속이 다른 곳에 비해 비교적 높게 분석되었으며, 실제 홍수 유하 후 각각의 단면들에 대해서 모니터링 결과 유속이 빠르게 나타난 부분에 대해서 토사의 유실이나 옆 논들에서의 유입이 발생한 것으로 조사되어 모형에 의한 모의 결과와 유사하게 나타는 것으로 분석되었다.

모의 되었던 다른 구간에 대한 모니터링 결과 홍수에 의한 발생 부분이 없는 것으로 조사되어 수질정화체 설치의 홍수에 비교적 안전한 것으로 판단된다.

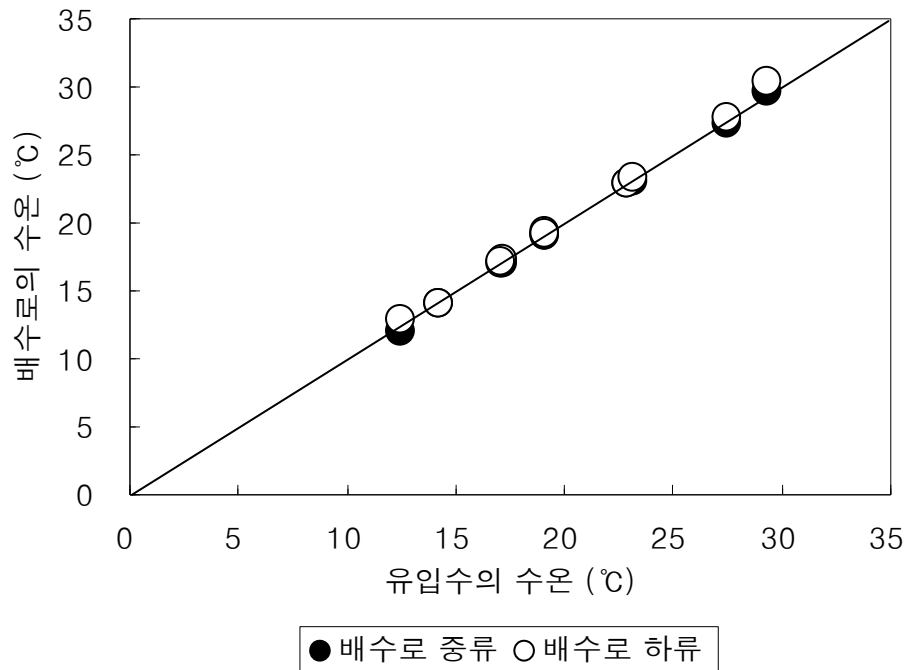
#### 나. 수질정화 효율 분석

수질 효율 조사는 2007년 7월부터 11월 사이에 총 10회, 수질정화체를 설치한 배수로 구간 상류부, 중류부, 하류부에서 실시하였다. 시험기간 중 유량은 2,592~13,248 m<sup>3</sup>/d, 평균 8,064 m<sup>3</sup>/d이었으며, 수질정화효과는 다음과 같다.

조사기간 동안의 수온은 <표 3.1.78> 및 <그림 3.1.78>과 같이 유입지점인 상류가 12.4~29.3 ℃, 평균 20.1 ℃였다. 배수로 중류는 12.1~29.7 ℃, 평균 20.2 ℃, 하류는 12.9~30.4 ℃, 평균 20.5 ℃로서 하류로 가면서 햇빛의 영향으로 수온이 다소 높아지기는 하였으나 큰 차이는 없었다. <그림 3.1.78>에서도 상류, 중류, 하류 사이에 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 수질정화체 설치구간이 비교적 짧아 햇빛의 영향이 적기 때문이다.

<표 3.1.78> 수질정화체 부설 배수로의 수온, pH, EC, DO

항목	지점	평균	최소	최대	표준편차
수온 (°C)	상류	20.1	12.4	29.3	5.5
	배수로 중류	20.2	12.1	29.7	5.6
	배수로 하류	20.5	12.9	30.4	5.6
pH	상류	7.6	7.3	8.4	0.3
	배수로 중류	7.6	7.4	8.4	0.3
	배수로 하류	7.8	7.4	8.4	0.3
EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	상류	486.9	347.0	613.0	100.3
	배수로 중류	486.5	345.0	613.0	100.8
	배수로 하류	491.2	337.0	613.0	101.5
DO (mg/L)	상류	6.7	3.4	12.3	2.6
	배수로 중류	7.3	4.7	12.3	2.5
	배수로 하류	7.9	5.1	12.3	2.2

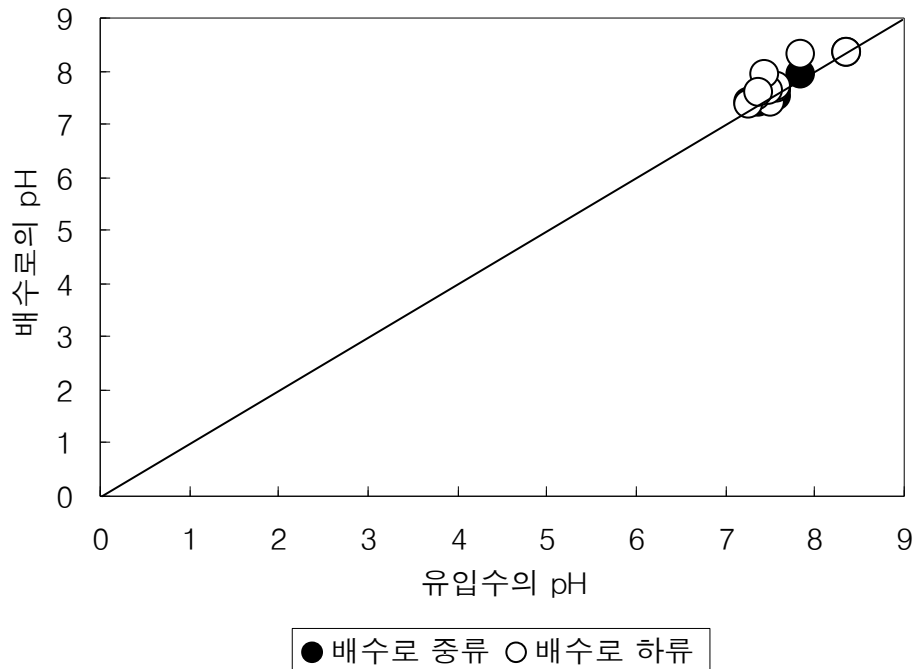


<그림 3.1.78> 수질정화체 부설 배수로의 수온 변화

농업용수에 있어서 pH를 측정하는 주요 이유는 비정상적인 용수를 검출하는 것이다 (FAO, 1994). pH는 그 자체로는 농작물에 영향을 끼치지 않지만 토양 내 병원체에 의한 식물병 발병과 진행에 큰 역할을 한다. 이러한 식물병은 특정 pH에서 잘 나타나고 활성화되는 반면, 다른 pH에서는 완전히 억제된다. 또한 일부는 토양 내 상태를 바꾸어 식물체를 약

하게 하고 병의 발병정도에 영향을 미친다. pH가 낮으면 산성토양을 형성하여 토양 중 알루미늄이나 철이 활성화되어 양분흡수를 방해하고 뿌리의 생육을 저해한다. pH는 토양미생물의 활성화나 식물의 효소활성에도 영향을 미치며 미량원소들 중에도 낮은 pH에서 식물에 해를 끼치는 경우가 있기(농촌진흥청, 2008) 때문에 수질관리상 pH는 꼭 필요한 항목이다.

본 연구에서 조사기간 동안 pH는 <표 3.1.79> 및 <그림 3.1.79>과 같이 상류가 7.3~8.4, 평균 7.6이고, 중류가 7.4~8.4, 평균 7.6, 하류가 7.4~8.4, 평균 7.8로서 상류에 비해 중류와 하류에서 다소 높아지는 경향을 보였으나, 모두 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하였다. 따라서 수질정화체의 화학성 분석에서 pH가 높았으나 이의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다기 때문에 수질정화체의 부설에 의한 pH상승의 문제는 없을 것으로 판단된다.



<그림 3.1.79> 수질정화체 부설 배수로의 pH 변화

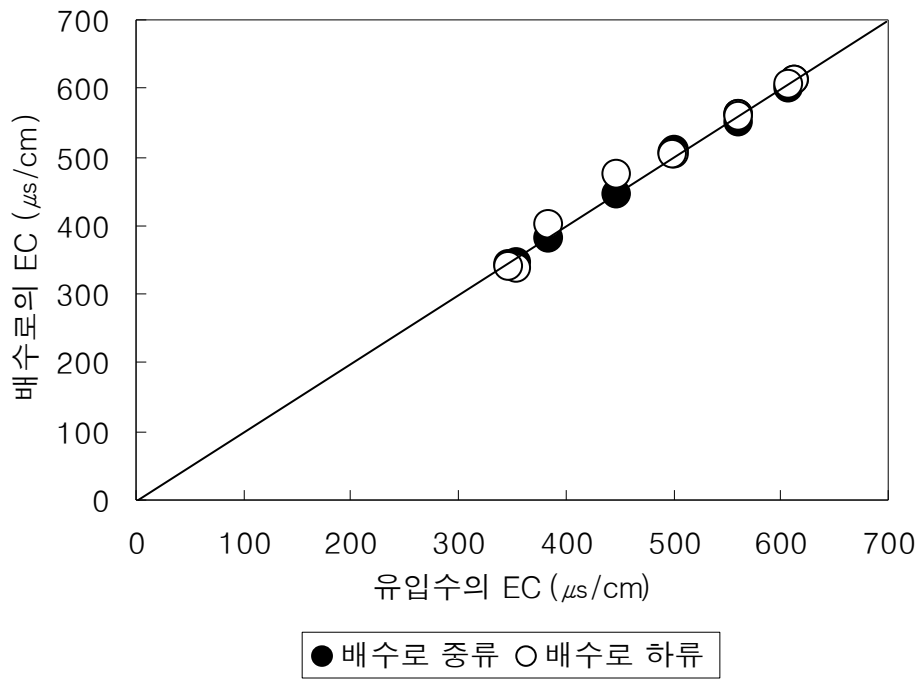
전기전도도(EC)는 염도의 지표로 식물뿌리 주변에 염농도가 높으면 수분결핍과 이온 독성을 나타낸다. 자연조건에서는 해안 염습지와 내륙의 건조한 지역에서 강우량이 적어 축적된 염을 씻어내지 못하여 염 스트레스가 높은 경우와 관개를 많이 한 농지에서 고농도의 염을 함유하고 있는 경우가 있다. 관개는 특히 건조한 지역에서 많이 이루어지는데 이곳에서는 증발과 증산이 혼합된 대규모 수분손실이 일어나게 된다. 그 결과 관개수를 따라 운반된 염이 토양에 농축되는데 농업지역의 염퇴적은 해당지역의 토양에서 생산을 할 수 없는 심각한 결과를 초래하게 된다. 농업적으로 중요한 대부분의 작물은 염 스트레스에 약한데, 특히 콩, 벼, 옥수수 등은 염도에 아주 민감하다. 이와 같이 염농도에 민감한 식물들은 매우 저



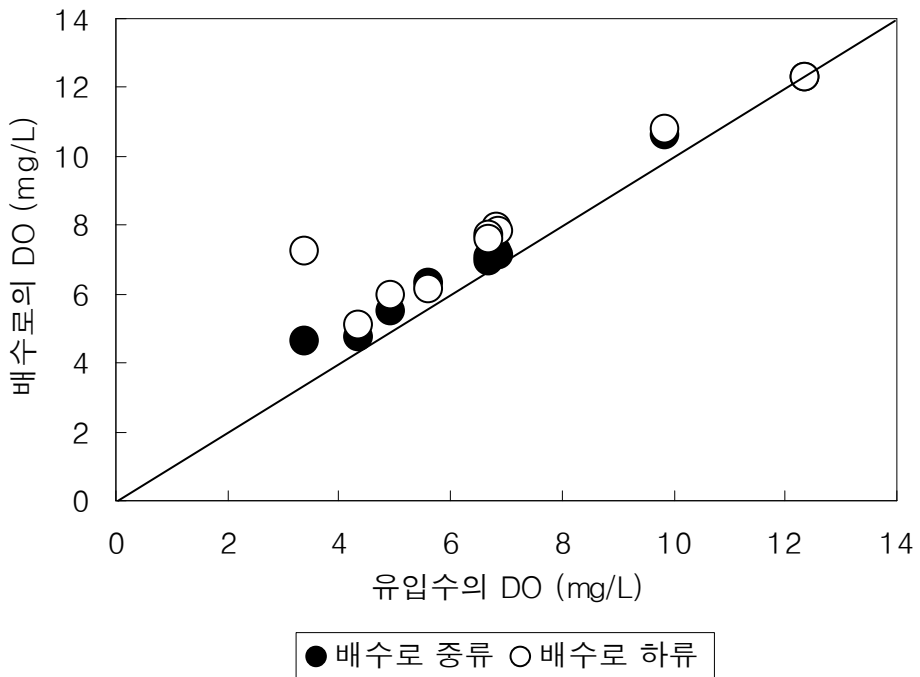
농도에서만 견딜 수 있어 50 mM미만의 염도에서도 회복할 수 없는 손상을 입을 수 있다. 염 스트레스로 인한 식물체가 받을 수 있는 손상은 크게 세 가지로 정리되는데, 첫째 높은 나트륨농도는 토양의 구조를 변화시켜 토양의 다공성이 감소되기 때문에 토양의 통풍과 수분전도도를 저하시킨다. 둘째, 고농도의 염은 토양 수분 포텐셜을 낮추어 식물체가 수분과 영양분을 흡수하기 어렵게 만든다. 셋째, 고농도의 나트륨이 막에 문제를 일으키거나, 효소의 저해 또는 대사기능의 장애(농어촌진흥공사, 1997 ; 진흥청, 2008)를 일으킬 수 있기 때문에 염농도의 지표인 EC도 주의하여 관리할 필요가 있다.

본 연구에서 EC는 <표 3.1.79> 및 <그림 3.1.80>와 같이 상류가 347.0~613.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 486.9  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 중류가 345.0~613.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 486.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 하류가 337.0~613.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 491.2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 지점 간에 차이가 없었다. 또한 모두 작물생장에 안전한 기준인 700.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$  이하를 만족하고 있어 농업용수로 사용하는데 문제는 없는 것으로 보인다. 또한 수질정화체가 물의 EC에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보인다.

관개용수에서 DO의 양이 BOD나 COD보다 낮을 경우 혐기성상태를 초래하여 작물의 생육에 큰 악영향을 끼친다. 특히 용존산소는 뿌리와 관계가 깊는데 뿌리의 형성 및 생육에 필수적(Soffer and Burger, 1988)이기 때문에 농업용수 수질기준으로서 2.0 mg/L를 제시하고 있다. 조사기간 동안 DO는 <표 3.1.79>과 같이 유입수가 3.4~12.3 mg/L, 평균 6.7 mg/L였는데, 중류는 4.7~12.3 mg/L, 평균 7.3 mg/L, 하류는 5.1~12.3 mg/L, 평균 7.9 mg/L를 나타내 <그림 3.1.81>과 같이 하류로 이동하면서 다소 높아지는 경향을 보였다. 이는 배수로를 유하하면서 대기 중으로 부터의 재폭기가 이루어지기 때문이다. 그러나 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.5851$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지는 않았고, 모든 지점에서 농업용수 수질기준인 2.0 mg/L 이상을 만족하고 있었기 때문에 하류에서 농업용수로 재이용되거나 농업용수원인 저수지로 유입되어도 문제는 없을 것이다. DO의 표준편차는 상류의 2.6에 비해 중류 및 하류는 2.5, 2.2로서 하류로 가면서 안정되는 경향을 보였다.



<그림 3.1.80> 수질정화체 부설 배수로의 EC 변화



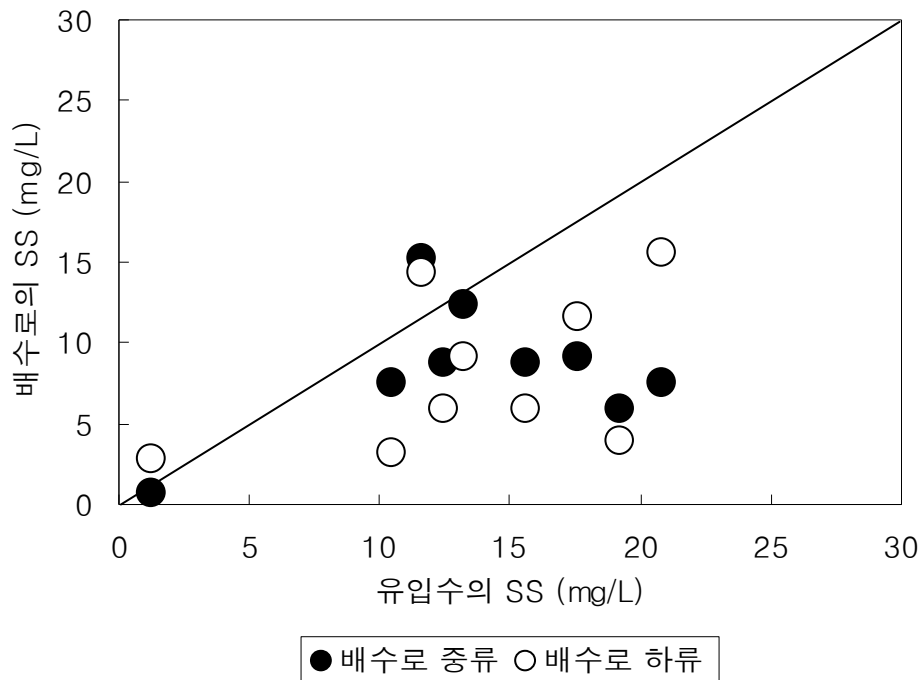
<그림 3.1.81> 수질정화체 부설 배수로의 DO 변화

인위적인 각종 활동에 의해 발생하는 점토, 모래, 산업배수가 농업용수에 혼합되면 토양의 투수성을 저해하여 산소의 공급이 불량하게 되고 뿌리의 발달을 저해하여 작물생육에 영향을 미치게 된다. 또한 수체내 부유물질들이 태양광선을 분산시키거나 흡수하여 자외선 투과를 저해하고 미생물 살균을 저해(진홍청, 2008)한다.

조사기간 동안 SS는 <표 3.1.79>와 같이 상류가 1.2~20.8 mg/L, 평균 13.6 mg/L였는데, 중류에서는 0.8~15.2 mg/L, 평균 8.5 mg/L로 낮아져 37.4%가 제거되었다. 하류지점에서는 2.8~15.6 mg/L, 평균 8.1 mg/L로 중류에 비해 다소 낮아져 조사구간에서 총 40.3%가 제거되었다. 조사기간 동안 조사구간에서 제거된 SS양은 14,169.6~72,422.4 g-SS/day, 평균 44,083.2 g-SS/day였다. <그림 3.1.82>에서도 알 수 있는 바와 같이 유입수인 상류지점에 비해 하류 및 중류지점의 SS가 대부분 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 수질정화체에 의한 접촉침전의 영향을 받은 것으로 판단되며, 배수로를 유하하면서 자연 침강된 것도 하나의 원인이다. 또한 상류지점에서 SS의 표준편차가 5.8이었는데 중류 및 하류에서는 각각 4.0, 4.8로 낮아져 안정된 경향을 보였다. 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.0496$ 으로서 상류와 중류 및 하류 사이에 유의적인 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 따라서 배수로에 수질정화체를 부설한다면 이것에 SS성분이 접촉 침전되어 수질정화효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

<표 3.1.79> 수질정화체 부설 배수로의 SS, COD, BOD

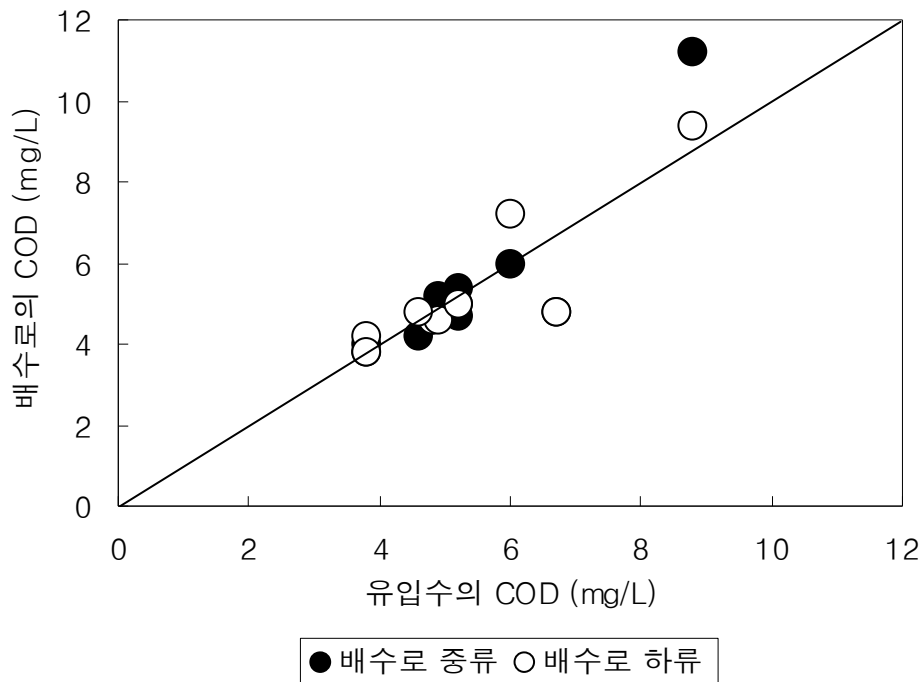
항목	지점	평균	최소	최대	표준편차	제거율 (%)
SS (mg/L)	상류	13.6	1.2	20.8	5.8	-
	배수로 중류	8.5	0.8	15.2	4.0	37.4
	배수로 하류	8.1	2.8	15.6	4.8	40.3
COD (mg/L)	상류	5.4	3.8	8.8	1.5	-
	배수로 중류	5.4	3.8	11.2	2.1	-0.2
	배수로 하류	5.3	3.8	9.4	1.7	0.7
BOD (mg/L)	상류	1.3	0.7	3.1	0.8	-
	배수로 중류	1.3	0.6	3.2	0.9	-1.4
	배수로 하류	1.6	1.1	3.4	0.8	-22.1



<그림 3.1.82> 수질정화체 부설 배수로의 SS 변화

관개용수 오염물질 중 하나인 유기물은 다양한 상태로 존재하며 논과 밭에 따라서 다양하게 변화한다. 유기물이 밭에 유입되면 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 완전 분해되나, 논과 같은 조건에서는 수소 및 가스 등의 중간분해물이 생성된다. 이러한 과정에서 수중의 용존산소가 소비되고 토양의 산화환원전위가 감소되어, 중요 양분의 흡수가 저해되어 감수를 가져오기 때문에 (한국농촌공사, 1997) 용수중의 유기물관리가 중요하여 하천에서는 BOD를, 호소에서는 COD를 유기물 지표로 하여 수질을 관리하고 있다.

COD는 <표 3.1.79>와 같이 유입수인 상류가 3.8~8.8 mg/L, 평균 5.4 mg/L였는데, 배수로 중류에서는 3.8~11.2 mg/L, 평균 5.4 mg/L로서 상류와 비슷한 값을 나타냈다. 배수로 하류에서는 3.8~9.4 mg/L, 평균 5.3 mg/L를 나타내 상류 및 중류와 비슷한 값을 나타냈다. 조사구간에서 제거된 COD량은 103.7~529.9 g-COD/day, 평균 322.6 g-COD/day 이었다. <그림 3.1.83>에서도 알 수 있는 바와 같이 상류에 비해 중류 및 하류에서 COD 농도가 높아지기도 하고, 낮아지기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았다. 95% 신뢰수준에서의 분산분석결과도 p=0.9978로서 유의적인 차이를 보이지 않았다. 이는 수질정화체의 부설면적이 넓지 않고, 또한 설치하고 얼마 되지 않아 미생물이 충분히 부착생장하지 못했기 때문으로 생각된다. 따라서 배수에 영향을 미치지 않는 한도에서 부설면적을 넓게 한다면 효과가 있을 것으로 사료된다.



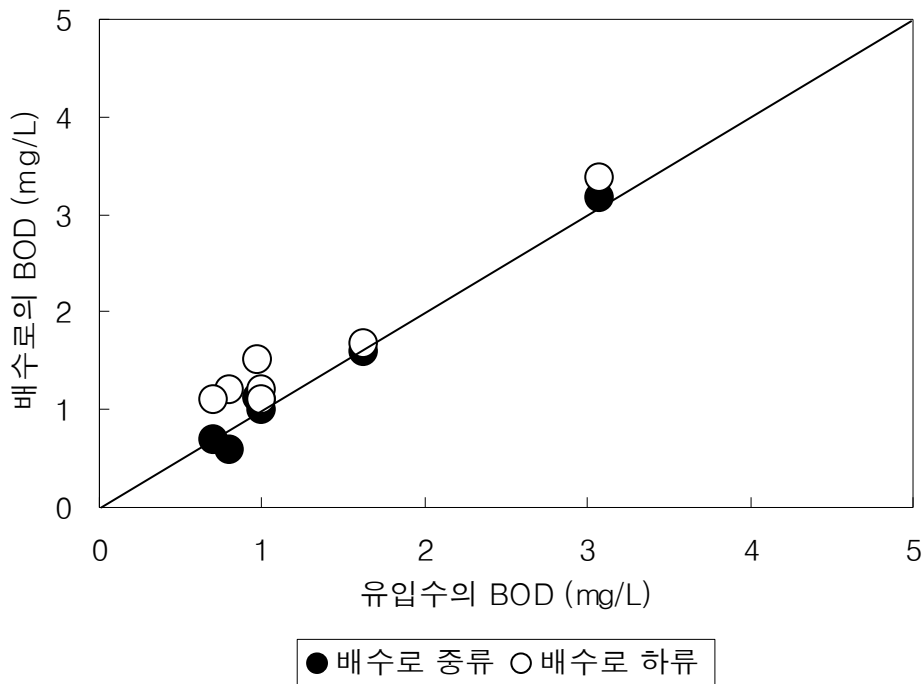
<그림 3.1.83> 수질정화체 부설 배수로의 COD 변화

하천, 호수, 강이나 바다에 유기물을 함유한 생활하수가 유입되면 BOD가 증가하게 된다. BOD가 높으면 유기물이 분해되는 과정에서 수중의 산소를 소비하여 혐기성 상태를 일으키며 분해과정에서  $Fe^{+3}$ ,  $Mn^{+5}$ ,  $SO_4^{-2}$  와 같은 토양 내 산화물들이 산소를 소비하여 산소결핍에 따른 토양의 산화환원전위가 낮아지게 된다. 따라서 Fe, Mn, 황화물 등이 생성되고 이러한 물질들이 유기산과 함께 양분흡수를 방해하고 체내대사를 저해하여 결국은 비의 수확량 감소를 가져올 수 있으므로 수질관리 상 유기물 지표인 BOD도 대단히 중요하다 (2008, 농촌진흥청).

BOD의 경우는 <표 3.1.79>와 같이 유입수가 0.7~3.1 mg/L, 평균 1.3 mg/L이고, 중류가 0.6~3.2 mg/L, 평균 1.3 mg/L, 하류가 1.1~3.4 mg/L, 평균 1.6 mg/L로서 지점 간에 큰 차이가 없었다. <그림 3.1.84>에서와 같이 상류에 비해 중류 및 하류에서 농도가 높아지는 경우가 많았으나 이는 유입수인 상류의 BOD농도가 2 mg/L 이하로 매우 낮기 때문이다. 95% 신뢰수준에서의 분산분석결과  $p=0.7751$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지 않았고, 표준편차도 상류, 중류, 하류가 각각 0.8, 0.9, 0.9로서 차이가 없었다. 지점 간에 BOD 농도에 차이가 없고, 모두 4.0 mg/L 이하로서 하천의 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L보다 크게 낮기 때문에 농업용수로서 문제는 없다.

이상과 같이 유기물 지표인 BOD, COD가 배수로 상류, 중류, 하류 사이에 차이가 없으므로 수질정화효율을 향상시키기 위해서는 수질정화체의 부설면적을 넓히고, 또한 미생물이

부착 성장할 수 있는 안정 기간을 확보할 필요가 있는 것으로 판단된다.



<그림 3.1.84> 수질정화체 부설 배수로의 BOD 변화

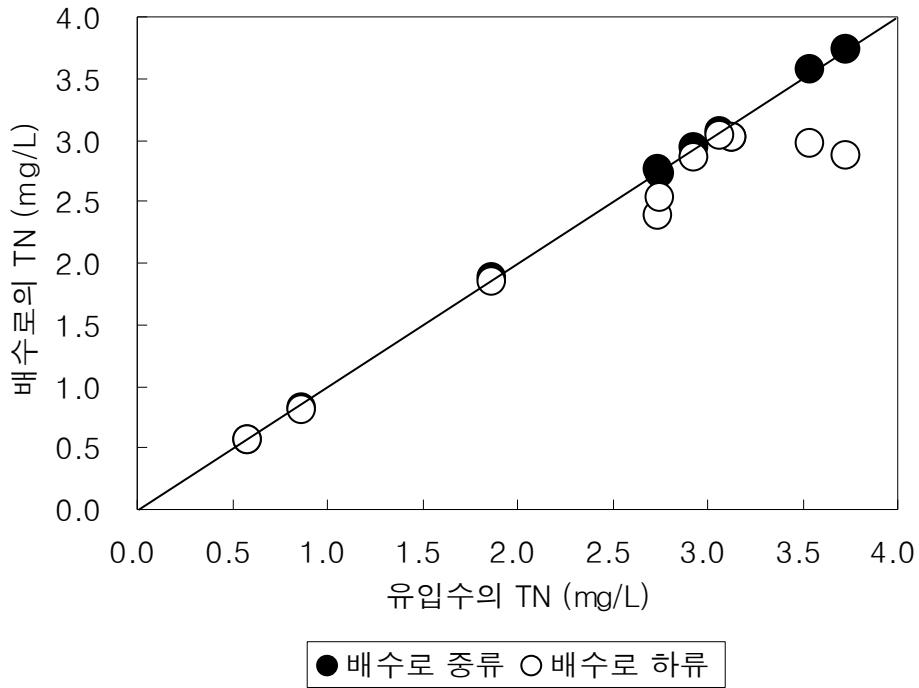
질소는 생물의 질소순환에 의해 자연적으로 발생되며 미생물활성에 의해 감소될 수 있다. 질소는 식물의 필수원소이지만 식물이 이용하는 형태로 존재하는 양이 적으므로 주로 비료로 공급(2008, 농촌진흥청)되므로 농업배수의 TN관리는 농업용수원의 부영양화에 의한 녹조현상 제어 상 중요한 항목이다.

TN은 <표 3.1.80>과 같이 실험구간 상류가 0.58~3.72 mg/L, 평균 2.52 mg/L이었는데, 중류는 0.57~3.74 mg/L로서 상류와 비슷한 값을 나타냈다. 배수로 하류에서는 0.56~3.04 mg/L, 평균 2.29 mg/L로서 8.9% 정도 낮아지는 정도에 그쳤다. 조사구간에서 제거된 TN양은 579.1~2,959.6 g-TN/day, 평균 1,801.5 g-TN/day이었다. <그림 3.1.85>에서 보는 바와 같이 상류에 비해 중류 및 하류에서 농도가 낮아지는 경우가 다소 많은 경향을 보였다. 그러나 95% 신뢰수준에서의 분산분석 결과  $p=0.8574$ 로서 지점 간에 유의적인 차이가 없었고, 표준편차도 상류, 중류, 하류가 각각 1.07, 1.08, 0.92로서 하류가 다소 안정되는 경향을 보였으나 큰 차이는 없었다. 이와 같이 TN 정화율이 낮은 것은 배수로의 수심이 평균 25 cm로 낮아 공기 중으로부터 재폭기되어 들어온 용존산소가 바닥까지 영향을 미쳐 수체가 모두 호기성상태이기 때문에 질산화는 이루어졌으나 탈질이 이루어 지지 못했기 때문이다. 이는 각 지점의  $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 0.17 mg/L,  $\text{NO}_2\text{-N}$ 이 0.06 mg/L로 낮고, TN에서 차지하는 비율도 3.0% 정도로 낮은 반면  $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 평균 3.02 mg/L로 TN 중에서 차지하

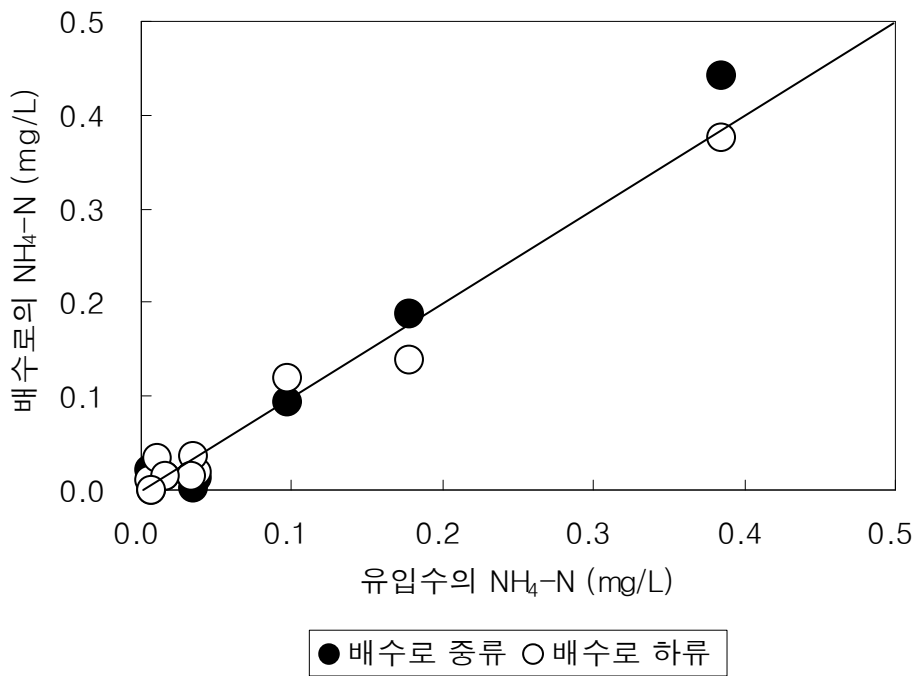
는 비율이 84.0~85.0%로 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것에서도 확인할 수 있다. 즉, <그림 3.1.85~88>에서와 같이 상류, 중류, 하류에서 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N의 농도가 차이가 없는 것으로 보아 논의 경우 수심이 낮아 수체가 호기성 상태이기 때문에 대부분의 유기성 질소가 NH<sub>4</sub>-N으로 분해되고, 질산화가 활발히 진행되어 분해된 NH<sub>4</sub>-N이 NO<sub>2</sub>-N → NO<sub>3</sub>-N으로 변환되었으나, 배수로로 유입된 뒤에도 수체가 호기성을 유지한 반면, 혐기성 부분이 존재하지 않아 NO<sub>3</sub>-N → NO<sub>2</sub>-N → N<sub>2</sub>↑, H<sub>2</sub>O로 탈질화되지 못하기 때문이다. 따라서 질소의 제거효율을 높이기 위해서는 수로의 중간 구간을 깊게 준설하여 웅덩이를 조성함으로써 혐기성 부분을 확보할 필요가 있다.

<표 3.1.80> 수질정화체 부설 배수로의 TN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N

항목	지점	평균	최소	최대	표준편차	제거율 (%)
TN (mg/L)	상류	2.52	0.58	3.72	1.07	-
	배수로 중류	2.51	0.57	3.74	1.08	0.1
	배수로 하류	2.29	0.56	3.04	0.92	8.9
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	상류	0.08	0.01	0.39	0.12	-
	배수로 중류	0.08	0.00	0.44	0.14	-
	배수로 하류	0.08	0.00	0.38	0.12	-
NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	상류	0.08	0.00	0.66	0.20	-
	배수로 중류	0.07	0.00	0.62	0.19	-
	배수로 하류	0.06	0.00	0.45	0.14	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	상류	2.14	0.05	3.18	1.04	-
	배수로 중류	2.12	0.05	3.20	1.04	-
	배수로 하류	1.95	0.03	2.74	0.93	-

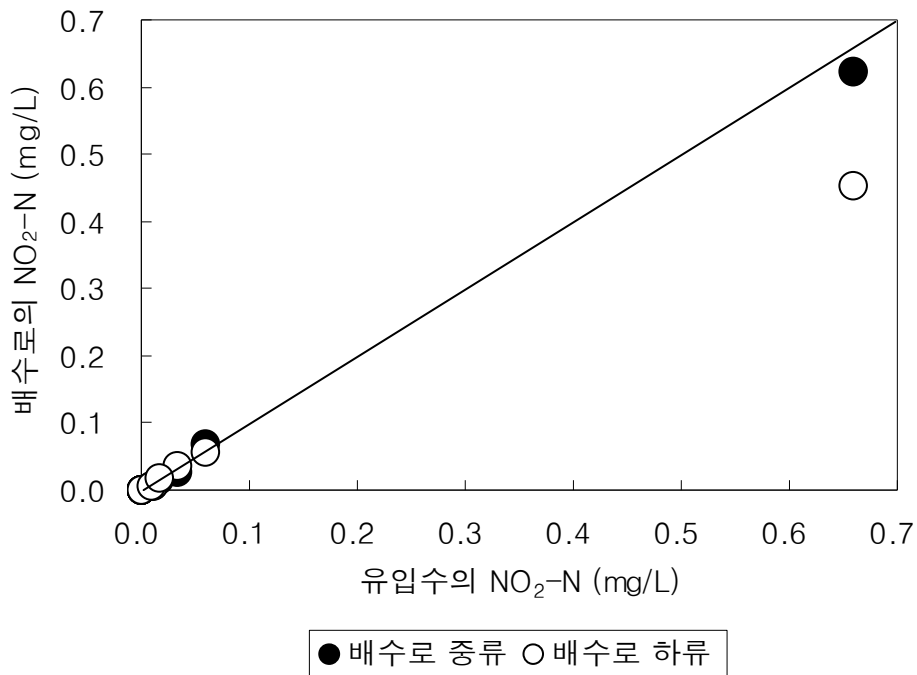


<그림 3.1.85> 수질정화체 부설 배수로의 TN 변화

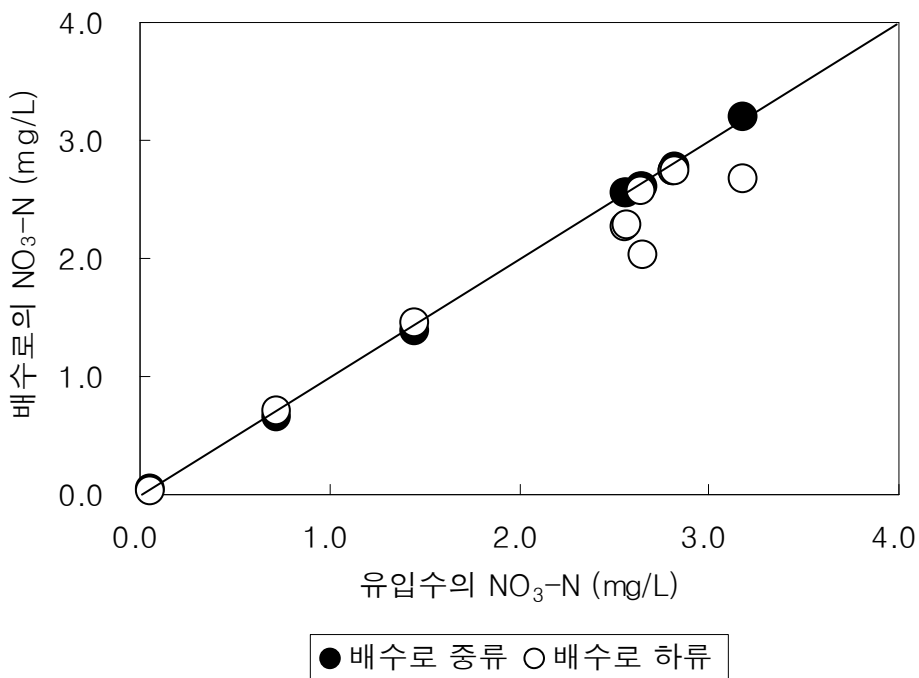


<그림 3.1.86> 수질정화체 부설 배수로의 NH<sub>4</sub>-N 변화





<그림 3.1.87> 수질정화체 부설 배수로의 NO<sub>2</sub>-N 변화



<그림 3.1.88> 수질정화체 부설 배수로의 NO<sub>3</sub>-N 변화

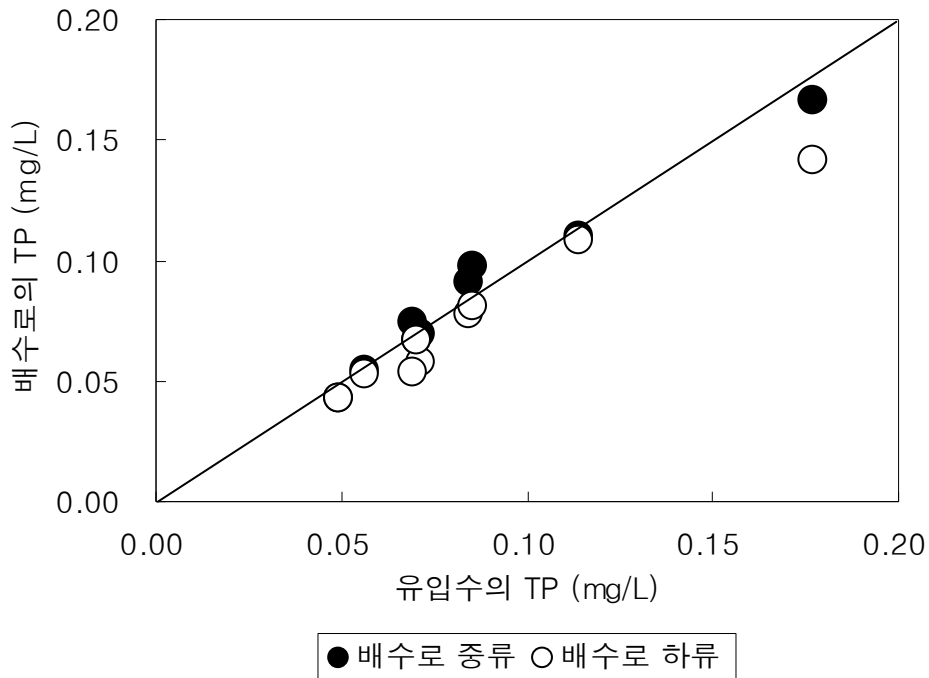
인도 질소와 같이 식물의 필수원소 중의 하나이다. 인은 수중에 많이 함유되어 있지는 않지만 비료의 과다시비와 합성세제가 혼합된 용수로 인해 문제가 될 수 있다. 인은 자체만으

로는 인간에 직접적인 해를 끼치지 않는으나 용수내의 인이 과다 투입 시 수중생물에 영양이 과잉 공급되어 심각한 부영양화를 일으킬 수 있다. 인은 식물에 양분균형을 개선하고 빨리 성장하도록 도와 어린식물에 잘 발생하는 병원체의 감염으로부터 벗어날 수 있도록 도와주며 병에 대한 저항성도 높인다. 인이 결핍될 경우 잎이 자주 색조를 나타내고 생장이 부진해진다. 또한 줄기가 짧고 가늘어지며 길쭉하게 자라고 생장이 저해된다. 우리나라 저수지의 부영양화에 의한 녹조현상을 일으키는 제한 인자는 주로 인이므로 농업용수의 수질관리 상 대단히 중요한 항목이다.

TP는 <표 3.1.81>과 같이 유입수인 상류가 0.05~0.18 mg/L, 평균 0.09 mg/L이었는데, 중류는 0.04~0.17 mg/L, 평균 0.09 mg/L로서 상류와 차이가 없었다. 배수로 하류에서는 0.04~0.14 mg/L, 평균 0.08 mg/L로서 상류에 비해 하류에서 11.6%가 감소되었다. 조사 구간에서 제거된 TP양은 25.9~132.5 g-TP/day, 평균 80.6 g-TP/day이었다. <그림 3.1.89>에서 보는 바와 같이 상류에 비해 중류에서는 TP농도가 낮아지는 경우가 적으나 하류에서는 TP농도가 낮아지는 경우가 많은 것에서도 확인할 수 있다. 이와 같이 TP농도가 낮아진 것은 SS성분과 이동하던 인성분이 수질정화체에 의해 접촉 침전되거나 자연 침강되었기 때문이다. 따라서 수질정화체를 농경배수의 정화제품으로 이용이 가능한 것으로 판단된다. 다만 질소의 제거효율을 높이기 위해서는 수질정화체의 부설 면적을 넓게 할 필요가 있다. 이와 같이 상류에 비해 하류에서 TP농도가 낮아지기는 하였으나, 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과 p=0.7921로서 지점 간에 유의적인 차이를 보이지는 않았고, 표준편차도 0.04~0.03으로 거의 차이가 없었다.

<표 3.1.81> 수질정화체 부설 배수로의 TP, PO<sub>4</sub>-P

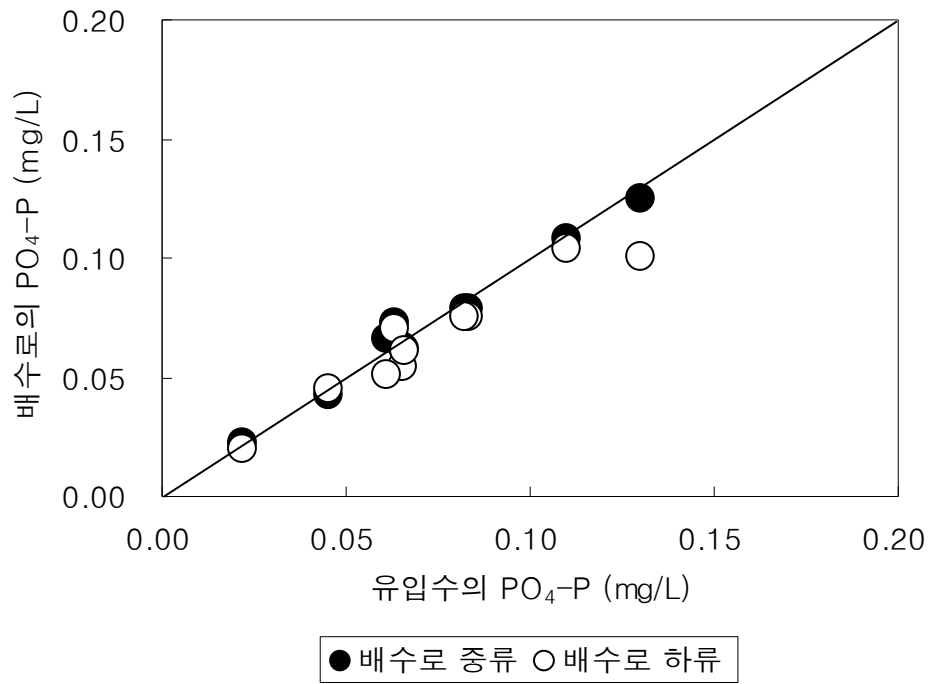
항목	지점	평균	최소	최대	표준편차	제거율 (%)
TP (mg/L)	상류	0.09	0.05	0.18	0.04	-
	배수로 중류	0.09	0.04	0.17	0.04	-0.1
	배수로 하류	0.08	0.04	0.14	0.03	11.6
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	상류	0.07	0.02	0.13	0.03	-
	배수로 중류	0.07	0.02	0.13	0.03	-
	배수로 하류	0.07	0.02	0.10	0.03	-



<그림 3.1.89> 수질정화체 부설 배수로의 TP 변화

PO<sub>4</sub>-P는 <표 3.1.81>과 같이 배수로 상류와 하류가 모두 0.02~0.13 mg/L, 평균 0.07 mg/L로서 같은 값을 보였다. 배수로 하류에서는 0.02~0.10 mg/L, 평균 0.07 mg/L로서 9.2% 정도가 감소되어 수질정화체의 적용가능성을 확인할 수 있었다. <그림 3.1.90>에서도 TP와 유사하게 중류에서는 상류에 비해 낮아지는 경우가 적었으나, 하류에서는 상류에 비해 낮아지는 경우가 많은 것을 알 수 있다. PO<sub>4</sub>-P는 토양이나 여재 등에 잘 부착되는 특징이 있으므로 수질정화체의 부설 면적을 넓게 한다면 인의 정화효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 수질정화체를 부설한 배수로에서 유기물과 영양염류의 정화효율은 낮지만, 수질정화체를 짧은 구간에 부분적으로 부설한 점을 감안 한다면 긍정적인 결과인 것으로 판단되며 부설면적을 넓히면 농경배수의 수질정화에 많은 효과가 있을 것으로 기대된다. 또한 나이론 망에 수질정화체를 담아 배수로의 중간 중간에 부설하는 간단한 방법으로 설치가 가능하고, 제거도 가능하므로 시공 면에서도 대단히 효율적이기 때문에 수질정화체를 이용한 배수로 수질개선방법으로 적용성이 매우 좋은 것으로 판단된다.



<그림 3.1.90> 수질정화체 부설 배수로의 PO<sub>4</sub>-P 변화

## 제 2 절 친환경 수질정화 수로관 및 시공기법 개발

### 1. 농수로에 적합한 수로관의 요구특성 검토

본 연구에서는 기존의 문헌자료와 현장답사 등을 통하여 용·배수로에 적용되고 있는 공법, 재료의 현황 및 차이점을 파악하고 이를 바탕으로 수질정화 및 생태계가 고려된 수로관 제품을 개발하도록 방향을 설정하였다.

#### 가. 농수로의 공법 적용상의 차이점 분석

##### 1) 용수로의 특성

- 가) 목표로 하는 시간내에 필요량의 농업용수를 목적지까지 보내야 한다.
- 나) 용수의 유실을 가능한 적게 해야 한다.
- 다) 용수의 흐름을 방해하는 요소가 적어야 한다.
- 라) 용수를 공급시기 외에는 물이 거의 없다.
- 마) 주변의 농지보다 높은 곳에 위치한다.
- 바) 별도의 수질 문제와는 다소 무관하다.
- 사) 홍수에 의한 직접적인 유량 증가가 적다.

##### 2) 배수로의 특성

- 가) 농지로 물이 역류되지 않도록 물의 배출능력을 확보해야 한다.
- 나) 지하수로 충분히 물을 누수시켜도 좋다.
- 다) 배수로의 흐름을 방해하는 요소가 적어야 한다.
- 라) 주변의 농지보다 낮은 곳에 위치한다.
- 마) 농약과 비료로 인한 수질오염을 정화할 수 있는 능력을 보유해야 한다.
- 바) 일정한 유지수량의 확보가 어렵다.
- 사) 홍수시 급격하게 유량이 증가한다.

#### 나. 수로 고유의 통수, 배수기능 및 생태특성을 고려한 친환경 수로관의 개발방향

##### 1) 친환경 용수로 수로관의 개발방향

- 가) 일정한 유지수량을 확보해야 한다.
- 나) 중간에 비오톱의 조성을 통하여 절수기에 수서생물의 서식공간을 확보해야 한다.

- 다) 유지관리측면을 고려하여 수로 측면부에 식물의 도입공간을 확보해야 한다.
- 라) 지형적 조건에 따른 경관적인 측면도 고려해야 한다.

2) 친환경 배수로 수로관의 개발방향

- 가) 농약과 비료로 인한 수질오염을 정화할 수 있는 능력을 보유해야 한다.
- 나) 수로의 바닥부와 측면부에 모두 투수성 재료를 사용 가능하다.
- 다) 식물의 종류와 빈도를 조절할 수 있는 재료의 선택이 필요하다.
- 라) 비오름의 조성을 통하여 절수기에 수서생물의 서식공간을 확보해야 한다.
- 마) 논과 같은 수로 주변에 생물의 서식공간을 제공할 수 있어야 한다.
- 바) 홍수에 대한 제방의 보호능력을 보유해야 한다.
- 사) 지형적 조건에 따른 경관적인 측면도 고려해야 한다.

2. 친환경 농수로관 제품 개발을 위한 배합 시험

현재까지 농업용 용배수로에 사용되고 있는 수로관의 재료로는 시멘트 및 콘크리트 재질의 수로관이 대부분을 차지하고 있다. 하지만 이들 재료는 특성상 이수 및 치수 기능의 장점을 가지고 있지만 생태계의 고려와 수질정화 기능이 없다는 단점이 있었다. 또한, 용배수로의 구분이 없고 간선, 지선, 지거에 적합하지 않는 특징 없는 제품들이 대부분을 차지하고 있었으며, 각종 사업에 구분 없이 적용되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 친환경 수로조성으로 많은 연구가 수행되고 있는 간선급 수로보다는 수질정화 및 생태계의 고려 시설이 필요한 지선, 지거 및 기존 라이닝으로 정비된 수로에 적용 가능한 수로를 개발하고자 하였다.

가. 배합조건 결정 및 시험

1) 시험의 개요

본 연구는 고로슬래그, 고로슬래그 시멘트, 재생골재, 황토 기타 기능성 첨가재 등을 혼합하여 황토 콘크리트 수로관 시스템을 개발하고 기존의 시멘트와 유사한 물성 및 구조성능을 가지도록 하기 위하여 먼저 각 구성 재료들의 물리, 화학적 특성 및 기존의 연구 동향을 파악하며 구성 재료들을 상호 배합 및 혼합하여 황토가 첨가된 소일 콘크리트 블록 공시체를 여러 케이스로 제작하여 물성을 파악하는데 있으며, 그 중 최적 배합비를 찾아내는데 그 목적이 있다. 기존 연구의 동향을 조사하고 각 재료의 특성을 고려하여 배합을 도출하였으며

도출된 배합으로 압축강도, 흡수율, pH, 동결융해 후 압축강도를 측정한다. 그 중 물성 결과가 가장 좋은 최적의 배합을 도출하고 기존 시멘트 모르타르 제품 및 콘크리트 제품과의 물성, 경제성을 비교 검토하여 상온 경화형 결합재를 이용한 소일 콘크리트 수로관 블록제품의 배합을 도출하였다.

## 2) 배합 재료

본 연구에서 사용된 배합재료인 고로슬래그 시멘트, 고로슬래그, 소성황토, 소석회, 무수석고, 혼화제 등의 각각의 특성과 물성값은 <표 3.1.5>~<표 3.1.11>에 나타낸 바와 같다.

## 3) 배합비 결정

배합은 황토의 양을 20%~30%하여 바인더의 총 양의 비율에 맞추어 고로슬래그 양과 고로슬래그 시멘트 양을 조절하였다. 시멘트 양의 비율에 맞추어 고로슬래그 시멘트와 고로슬래그를 사용함으로써 좀 더 좋은 분말도와 결합력을 보여줄 수 있을 것이라는 판단 하에서 고로슬래그 시멘트를 사용하였다. 아래 <표 3.2.1>에서 보듯이 황토의 양을 10%~25%의 범위에서 조절하였으며 고로슬래그 시멘트와 고로슬래그의 혼합 비율에 따라 달라지는 결과를 보기 위하여 각 배합마다 다르게 조절을 하였다. 따라서 대조구 일반 콘크리트 배합을 포함하여 총 13 Case 의 배합을 도출하였다.

<표 3.2.1> 소일 콘크리트블록 배합표

배합	고로슬래그 시멘트(%)	고로슬래그 (%)	황토 (%)	무수석고 (%)	물/시멘트 비 (%)	고성능 감수제	재생 골재(kg)	잔골재 (kg)	소석회 (%)
SC-1	45	25	20	10	43.1	2.84	961	793	-
SC-2	45	25	20	-	43.1	2.84	961	793	10
SC-3	55	15	20	10	43.1	2.84	961	793	-
SC-4	55	15	20	-	43.1	2.84	961	793	10
SC-5	40	25	25	10	43.1	2.84	961	793	-
SC-6	40	25	25	-	43.1	2.84	961	793	10
SC-7	50	15	25	10	43.1	2.84	961	793	-
SC-8	50	15	25	-	43.1	2.84	961	793	10
SC-9	40	20	30	10	43.1	2.84	961	793	-
SC-10	40	20	30	-	43.1	2.84	961	793	10
SC-11	50	10	30	10	43.1	2.84	961	793	-
SC-12	50	10	30	-	43.1	2.84	961	793	10
일반 콘크리트	포틀랜드시멘트 100%				43.1	2.84	쇄석골재 961	793	-

## 나. 공시체 제작 및 물성시험

### 1) 공시체 제작

시험용 공시체는 공장에서의 생산과정과 같이 믹서기에 골재를 넣고 분말 재료들을 따로 넣어서 바로 믹싱을 하였다. 그 다음 물, 고성능감수제와 함께 2~3분간 비빔을 실시하였다. 이때 물량은 페이스트의 플로우 값을  $150\pm 10\text{mm}$ 가 되게 조정하였으며 각 배합의 Case마다 물량은 조금 차이가 있었다. 비빔 후  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원형공시체 몰드를 사용하여 바이브레이터로 일정시간 다져주었으며 마무리는 최대한 끝면이 평평하도록 시험용 공시체를 제작하였다. 시험용 공시체 각 Case마다 12개(동결융해시험 포함)의 시편을 제작하였다. 2일 습윤양생( $28^\circ\text{C}$ )을 실시하고 각각의 시험을 행하기 전까지 소정의 수중양생( $20^\circ\text{C}$ )을 실시하였다. 다음 <그림 3.2.1>은 압축강도시편과 동결융해시편의 모습을 보여주고 있으며, <그림 3.2.2> 흡수율과 pH측정 시편을 보여주고 있다.



<그림 3.2.1> 압축강도 시편과 동결융해 시편



<그림 3.2.2> 흡수율과 pH측정 시편



## 2) 압축강도 시험

압축강도 시험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의해 각각 실시하였으며 모든 시편은 표면을 연마하였다. <그림 3.2.3>는 압축강도 시험장면을 보여주고 있다.



<그림 3.2.3> 압축강도 시험

## 3) 흡수율 시험

시험용 공시체를 24시간 물에 침적 후 그 무게를 측정하여 실시하도록 한다.

$$\text{흡수율} = \frac{(A-B)}{B} \times 100$$

여기에서, A는 시료의 포화무게이며 B는 시료의 건조무게이다.

## 4) pH 측정 시험

pH 측정은 5×5×5cm의 큐빅시편을 제작하여 일반 수돗물에 침적하여 0, 24, 48, 72시간 및 5일에 있어서의 pH를 측정한다. 비교를 위하여 일반 시멘트 모르타르도 같이 타설하여 비교·분석 하였다. <그림 3.2.4>에 pH값 측정 시편, 측정 장면과 측정기를 나타내었다.



<그림 3.2.4> pH 시편, 측정장면과 측정기

#### 5) 동결융해 저항성 시험

ASTM C 666-92 (Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing) 및 KS F 2456-93 (급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)에 준하여  $-17.8^{\circ}\text{C}$ 에서  $4.4^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 공시체의 동결융해시험을 실시한다. 동결융해 0, 30, 60, 90사이클 주기별로 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의해 압축강도를 측정한다. <그림 3.2.5>은 동결융해 시험장면 그림이다.



<그림 3.2.5> 동결융해 시험

#### 다. 물리, 화학적 특성 실험결과

##### 1) 압축강도 시험 결과

동결융해 시편 초기강도 0사이클에서의 압축강도 평가 실험 결과는 아래 <표 3.2.2>에 나타나 있다. 표에 나타나 있듯이 같은 조건에서 제작한 일반 콘크리트 시편의 압축강도에 대비해서 압축강도가 평균 20~30kgf/cm<sup>2</sup>의 강도 차이를 보였으며 황토량의 첨가가 적은 시편과 많은 시편의 압축강도 차이가 두드러지게 나타나지 않았다. 그 이유는 황토량에 따라 약간의 강도차이는 있지만 소석회와 무수석고와의 반응도 함께 포졸란 반응을 일으켰다고 사료된다. SC-1~4의 초기 압축강도는 평균 280~300kgf/cm<sup>2</sup> 강도를 확보하였는데, SC-5~8의 강도와 크게 차이가 나지 않았으며 오히려 황토량이 5%더 들어가 포졸란 반응을 활발히 일으킨 것으로 사료된다. 하지만 SC-9~12의 시편들의 압축강도 시험결과를 살펴보면 황토량 30%이상은 강도가 현저히 떨어진다는 것을 볼 수 있다. 모든 시편의 강도가 대체적으로 높았지만 절대적인 비교가 아닌 상대적인 비교이기 때문에 동결융해 저항성에 대한 30, 60, 90 사이클의 압축강도 평가는 일반 콘크리트 배합에 대비해서 비교해야한다. SC-1~12 배합까지 30사이클 주기마다 압축강도를 시행한다. SC-1~4의 배합은 평균 280~300kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 확보하였으며, SC-5~8의 배합은 평균 290~305kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 확보하였다.

<표 3.2.2> 초기강도(0 사이클) 압축강도 측정 결과

배합	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	초기강도(2일 건조후 5일 수중 양생)			
	시편 1	시편 2	시편 3	평균강도
SC-1	282.5	279.7	280.5	280.9
SC-2	285.6	263.7	294.5	281.3
SC-3	296.8	287.6	295.5	293.3
SC-4	305.7	298.6	310.9	305.1
SC-5	294.7	280.7	297.2	290.8
SC-6	287.6	270.8	300.3	286.2
SC-7	288.1	308.9	296.7	297.9
SC-8	298.8	306.6	311.2	305.5
SC-9	272.6	230.6	240.4	247.8
SC-10	272.5	263.7	253.1	263.1
SC-11	264.9	269.8	270.1	268.3
SC-12	273.7	262.4	250.4	262.2
일반콘크리트	318.8	328.8	325.7	324.4

2) 흡수율 시험 결과

흡수율은 5×5×5cm 시편으로 건조무게와 포화무게를 측정하였다. 아래 <표 3.2.3>은 흡수율 측정 결과를 보여주고 있다. 표에서 보듯이 일반 시멘트 페이스트의 흡수율은 4.2%로 다른 배합의 시편보다 현저히 낮게 흡수율이 측정되었으며, 황토량에 비례하여 흡수율이 높게 나타났다. SC 1~4의 시편은 평균 5~6%의 흡수율을 보였으며, SC 5~8의 시편은 평균 6.6~6.8%의 흡수율을 보이고 있다.

3) PH 측정 시험 결과

pH측정 실험은 5×5×5cm 시편을 중화시킨 수돗물에 0, 24, 48, 72시간, 5일, 6일 시간대로 진행하였으며 측정결과는 아래 <표 3.2.4>와 같다.

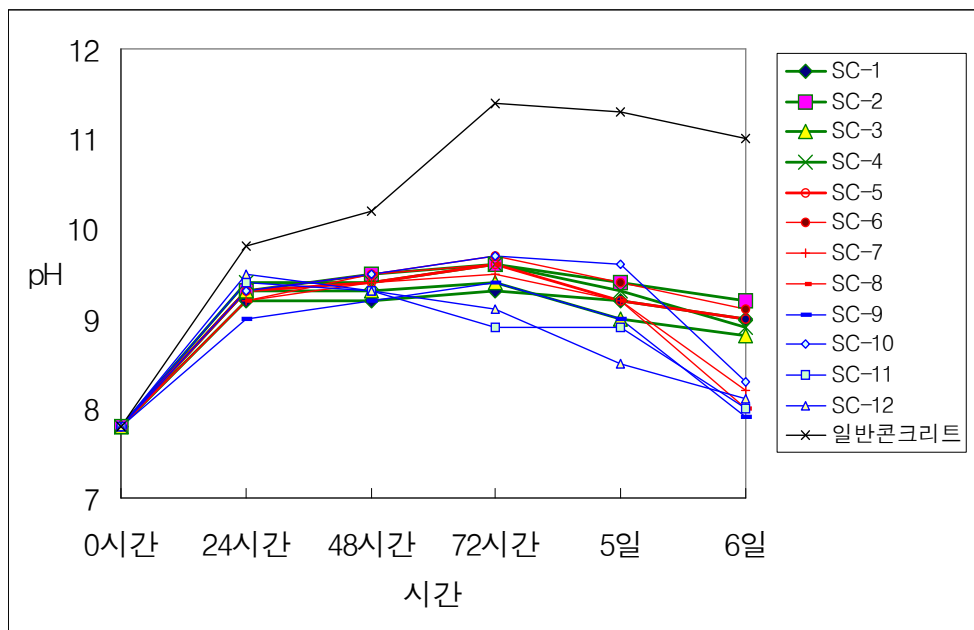
<표 3.2.3> 흡수율 측정 결과

페이스트 시편	건조무게(g)	포화무게(g)	흡수율(%)
SC-1	225	238	5.7
SC-2	236	248	5.3
SC-3	241	252	4.6
SC-4	244	260	6.5
SC-5	242	258	6.6
SC-6	235	250	6.3
SC-7	233	246	5.7
SC-8	230	246	6.8
SC-9	196	214	9.1
SC-10	207	226	9.3
SC-11	214	234	9.4
SC-12	225	247	9.5
<b>일반 콘크리트</b>	<b>253</b>	<b>264</b>	<b>4.2</b>

<표 3.2.4> pH값 측정 결과

시간 시편	0	24(18.5°)	48(18.2°)	72(18.5°)	5일(18.5°)	6일(19°)
일반 수돗물	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.6
SC-1	7.8	9.2	9.2	9.3	9.2	9.0
SC-2	7.8	9.3	9.5	9.6	9.4	9.2
SC-3	7.8	9.3	9.3	9.4	9.5	8.9
SC-4	7.8	9.4	9.4	9.6	9.3	8.9
SC-5	7.8	9.3	9.4	9.6	9.2	8.6
SC-6	7.8	9.3	9.5	9.7	9.4	8.5
SC-7	7.8	9.2	9.4	9.5	9.2	8.2
SC-8	7.8	9.2	9.5	9.6	9.2	8.0
SC-9	7.8	9.0	9.2	9.4	9.0	7.9
SC-10	7.8	9.3	9.5	9.7	9.6	8.3
SC-11	7.8	9.4	9.3	8.9	8.9	8.0
SC-12	7.8	9.5	9.3	9.1	8.5	8.1
<b>일반 콘크리트</b>	<b>7.8</b>	<b>9.8</b>	<b>10.2</b>	<b>11.4</b>	<b>11.3</b>	<b>11.0</b>

위의 실험에서 일반 시멘트 페이스트 배합을 기준으로 소일배합과 pH를 비교하였을 때 SC-1~4는 pH값이 최대 9.0에서 8.8까지 떨어지면서 그 상태를 유지하였고, SC-5~8은 최대 9.0에서 8.0까지 떨어지면서 pH값을 유지하였다. 두 경우 pH값이 0.8정도 차이가 나타났으며 시멘트 페이스트 pH 11의 값에 비해 현저히 낮다는걸 알 수 있다. 이 값들은 절대적인 수치가 아니라 상대적인 기준에 의해서 나타난 결과이기 때문에 시멘트 페이스트 배합과 비교하였을 때 pH 값이 2.0이상 차이를 보였음을 알 수 있다. 여기에서도 알 수 있듯이 황토량의 차이에 따라 pH값이 비례적으로 나타난다는걸 알 수 있다. 아래 <그림 3.2.6>은 pH값의 변화를 그래프로 보여주고 있다.



<그림 3.2.6> pH값의 시간에 따른 변화

라. 동결융해 저항성 시험 결과

1) 동결융해 30사이클 후 압축강도 평가

동결융해 시편 30사이클에서의 압축강도 평가 실험 결과는 <표 3.2.5>에 나타나 있다. 30 사이클에서의 압축강도 평가는 SC-1~12의 배합과 일반콘크리트 배합으로 만든 시편으로 압축강도를 측정하였다. 표에 나타나 있듯이 SC-1~8의 평균 압축강도는 275~293kgf/cm<sup>2</sup>으로 초기 강도에 대비해서 95%이상의 압축강도를 확보하였다. 또한 일반콘크리트 배합의 평균 강도는 324kgf/cm<sup>2</sup>로 초기강도에 비하여 거의 강도의 차이를 보이지 않았다. 그리고 SC-9~12까지의 압축강도 결과에서 초기강도에 비해 평균 강도는 조금 떨어졌지만 각 배합에서 강도의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았다.

<표 3.2.5> 30사이클 후 압축강도 측정 결과

배합	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	30사이클 후 강도			
	시편 1	시편 2	시편 3	평균강도
SC-1	275.3	280.5	269.8	275.2
SC-2	280.4	270.7	284.5	278.5
SC-3	290.1	282.4	291.7	288.0
SC-4	296.7	297.2	287.9	293.9
SC-5	296.5	282.0	291.2	289.9
SC-6	303.2	280.5	282.9	288.8
SC-7	293.3	290.5	286.7	290.2
SC-8	292.3	310.2	298.6	300.4
SC-9	261.5	240.0	220.9	240.8
SC-10	267.0	245.2	233.3	248.5
SC-11	234.2	252.1	264.6	250.3
SC-12	253.5	248.0	251.9	251.1
일반콘크리트	324.7	318.8	328.8	324.1

2) 동결융해 30사이클 후 압축강도 평가

동결융해 시편 60사이클에서의 압축강도 평가 실험 결과는 <표 3.2.6>에 나타나 있다. 60사이클에서의 압축강도 평가에서도 SC-1~12의 배합과 일반콘크리트 배합으로 만든 시편으로 압축강도를 측정하였다. SC-1~8의 평균 압축강도는 270~289kgf/cm<sup>2</sup>로 초기 강도 대비해서 88%이상의 압축강도를 확보하였다. 또한 일반 콘크리트 배합의 평균강도는 315kgf/cm<sup>2</sup>로 초기강도 대비해서 95%이상의 압축강도를 확보하였다. 하지만 SC-9~12의 배합은 압축강도가 220kgf/cm<sup>2</sup>까지 떨어졌으며 황토의 양이 25%와 30%가 확연히 다른 차이를 보인다는 것을 볼 수 있다. 따라서 60사이클까지의 동결융해 저항성에서 일반 콘크리트 배합보다 SC-1~12 배합의 압축강도 확보 차이가 7%정도 떨어졌음을 볼 수 있었다.

<표 3.2.6> 60 사이클 후 압축강도 측정 결과

배합	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	60사이클 후 강도			
	시편 1	시편 2	시편 3	평균강도
SC-1	268.0	263.5	280.3	270.6
SC-2	278.9	280.5	269.0	276.1
SC-3	279.2	287.7	288.1	285.0
SC-4	292.3	283.3	277.2	284.3
SC-5	271.9	281.0	278.4	277.1
SC-6	281.5	273.2	277.7	277.5
SC-7	282.6	270.0	289.4	280.7
SC-8	282.3	288.8	298.2	289.8
SC-9	222.0	231.5	220.9	224.8
SC-10	230.3	225.8	247.1	234.4
SC-11	232.0	254.2	248.6	244.9
SC-12	243.4	245.7	233.2	240.8
일반콘크리트	315.3	308.9	321.1	315.1

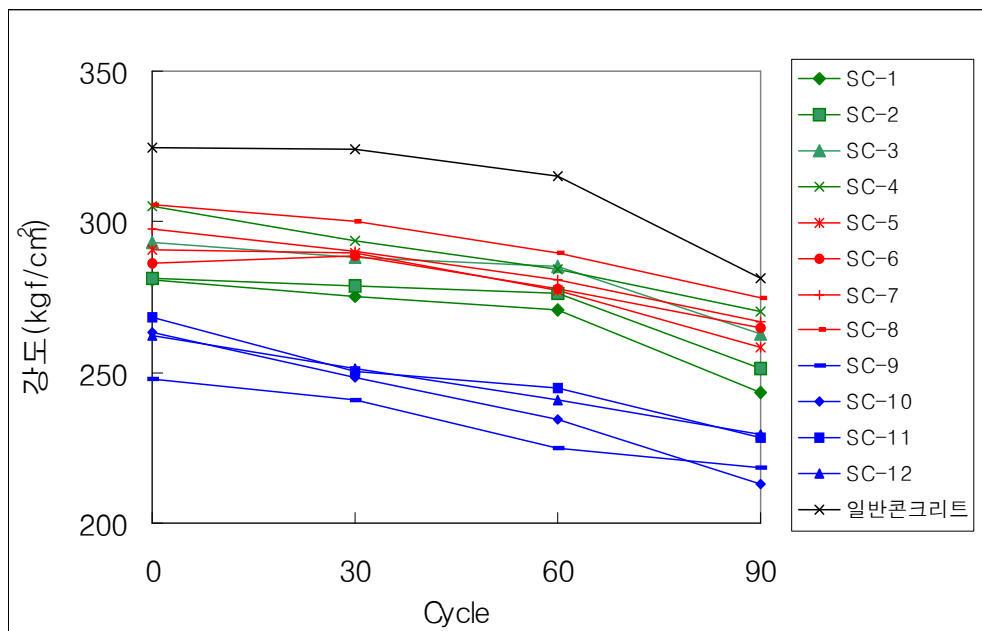
3) 동결융해 90사이클 후 압축강도 평가

동결융해 시편 90사이클에서의 압축강도 평가 실험 결과는 <표 3.2.7>에 나타나 있다. 표에 나타나 있듯이 SC-1~12의 배합에서는 90사이클 후 초기강도 280~300kgf/cm<sup>2</sup>에 비례해서 평균 250~260kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 확보함으로써 초기강도대비 80%이상의 강도를 확보하였다. 이것은 황토와 고로슬래그가 포졸란 반응을 일으킨다는 것을 뜻한다. 또한 위의 압축강도 실험의 결과를 살펴보면 모든 배합에서 무수석고와의 결합보다 소석회의 결합력이 더 우수하다는 결과가 나오고 있다. 이는 소석회의 주성분인 CaO가 고로슬래그, 황토와의 포졸란 반응을 한다고 판단된다. 또한 일반 콘크리트 배합은 90사이클 후 평균강도 280kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 확보함으로써 초기강도 대비 90%이상의 압축강도 결과를 보여준다. 따라서 위의 결과들을 종합하여보면 SC-1~12의 배합 중 강도와 pH, 동결융해 실험결과가 소일 콘크리트 어도블록에 적합한 배합은 SC-5~8의 배합으로 모든 실험결과가 우수하다는 걸 볼 수 있다. 그러므로 황토량이 25%일 때 강도와 pH 모두 만족을 하며 30%이상 일때 pH값은 우수하지만 강도 확보를 하지 못하였다. <그림 3.2.7>은 동결융해 사이클에 따른 압축강도의 변화를 보여주고 있다.



<표 3.2.7> 90 사이클 후 압축강도 측정 결과

배합	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	90사이클 후 강도			
	시편 1	시편 2	시편 3	평균강도
SC-1	250.3	241.5	238.8	243.5
SC-2	240.6	264.1	248.9	251.2
SC-3	259.7	266.0	262.8	262.8
SC-4	269.4	276.1	265.3	270.3
SC-5	258.0	267.6	249.5	258.4
SC-6	263.7	271.5	259.2	264.8
SC-7	262.6	267.0	271.5	267.0
SC-8	280.5	272.2	271.9	274.9
SC-9	212.4	223.3	218.7	218.2
SC-10	205.5	208.8	225.3	213.2
SC-11	224.9	230.3	229.8	228.3
SC-12	230.7	225.8	231.1	229.2
일반콘크리트	297.1	278.3	268.8	281.4



<그림 3.2.7> 동결융해 사이클에 따른 압축강도 변화

## 라. 결론

1) 초기 압축강도 평가 실험 결과 일반 콘크리트 시편의 압축강도에 대비해서 압축강도가 평균  $20\sim 30\text{kgf/cm}^2$  의 강도 차이를 보였으며 황토량의 첨가가 적은 시편과 많은 시편의 압축강도 차이가 두드러지게 나타나지 않았다. 그 이유는 황토량에 따라 약간의 강도차이는 있지만 소석회와 무수석고와의 반응도 함께 포졸란 반응을 일으켰다고 사료된다. 또한, 황토량 30%이상은 강도가 현저히 떨어진다는 것을 볼 수 있었으며 SC-5~8의 배합은 평균  $290\sim 305\text{kgf/cm}^2$ 의 강도를 확보하였다.

2) 흡수율 측정 결과 일반 시멘트 페이스트의 흡수율은 4.2%로 다른 배합의 시편보다 현저히 낮게 흡수율이 측정되었으며, 황토량에 비례하여 흡수율이 높게 나타났다. SC 1~4의 시편은 평균 5~6%의 흡수율을 보였으며, SC 5~8의 시편은 평균 6.6~6.8%의 흡수율 실험결과가 나타났다.

3) pH 측정 실험 결과 SC-1~4는 pH값이 최대 9.0에서 8.8까지 떨어지면서 그 상태를 유지하였고, SC-5~8은 최대 9.0에서 8.0까지 떨어지면서 pH값을 유지하였다. 두 경우 pH값이 0.8정도 차이가 나타났으며 시멘트 페이스트 pH 11의 값에 비해 현저히 낮게 측정되었다. 따라서 황토량이 높을수록 pH값이 비례적으로 낮게 측정되었다.

4) 동결융해 후 압축강도 평가 실험 결과 SC-1~8의 배합에서는 90사이클 후 초기강도  $280\sim 300\text{kgf/cm}^2$ 에 비례해서 평균  $250\sim 260\text{kgf/cm}^2$ 의 강도를 확보함으로써 초기강도대비 80%이상의 강도를 확보하였다. 이것은 황토와 고로슬래그가 포졸란 반응을 일으키며 무수석고와의 결합보다 소석회의 결합력이 더 우수하다는 결과를 보여준다. 이는 소석회의 주 성분인 CaO가 고로슬래그, 황토와의 포졸란 반응을 한다고 판단된다. 또한 일반 콘크리트 배합은 90사이클 후 평균강도  $280\text{kgf/cm}^2$ 의 강도를 확보함으로써 초기강도 대비 90%이상의 압축강도를 확보하였다.

5) 친환경 소일 콘크리트 블록 재료 실험 결과들을 종합하여보면 SC-1~12의 배합 중 강도와 pH, 동결융해 실험결과가 소일 콘크리트 블록에 적합한 배합은 SC-5~8의 배합으로 모든 실험결과가 기준에 만족하였다. 따라서 황토량이 25%일때 소석회와의 반응이 최적배합이라고 사료된다.

6) 경제적인 측면에서 SC-5~8의 배합 소일 콘크리트블록 생산시 소요되는 원재료비는 기존 일반 콘크리트 블록 원재료비 대비 8~10%정도 상승하게 된다. 일위대가 적용 시 원재료비의 점유비는 비교적 적기 때문에 기존 제품과 차이가 나지 않는다고 판단된다.

7) 소일 콘크리트 블록의 전체 바인더량의 황토량이 25%, 골재는 재생골재를 사용하고 고로슬래그와 고로슬래그 시멘트 및 소석회를 혼합하여 저독성 소일 콘크리트 수로관 블록을 제품화하였으며 구조적으로 안정된 자연생태계와 잘 어우러지는 친환경적인 소일 콘크리트 수로관 이라고 판단한다.

### 3. 수질정화 수로관 제품 및 친환경 생태수로관 제품 개발

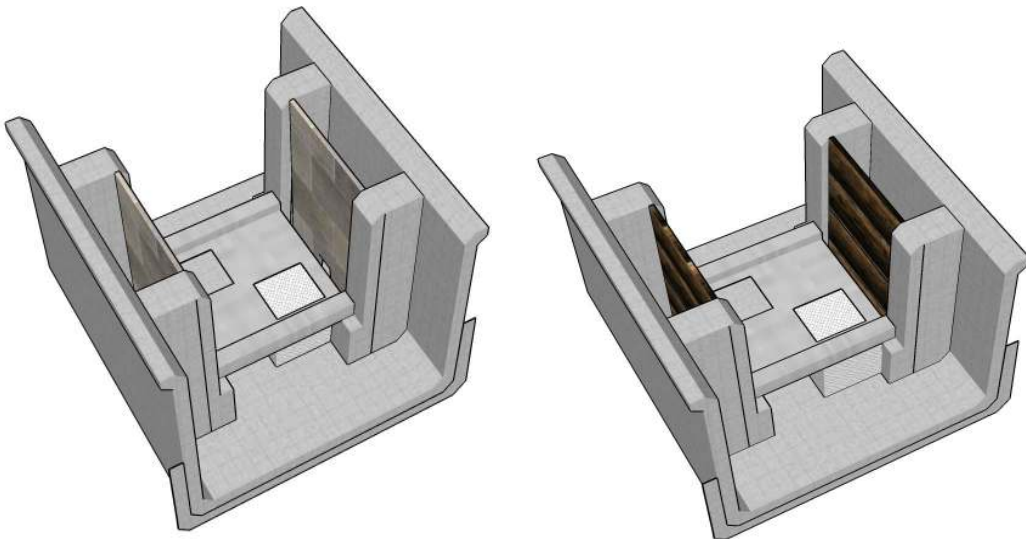
#### 가. 수질정화 수로관 제품

수질정화수로관은 수로관의 기본기능인 이수과 치수 기능뿐만 아니라 수질정화부와 식재부, 어류와 양서류를 고려한 공간과 미생물과 갈수기의 물을 저류할 수 있는 저류부를 가진 다기능의 수로관으로써 일반 수로관과의 연결이 가능하다.

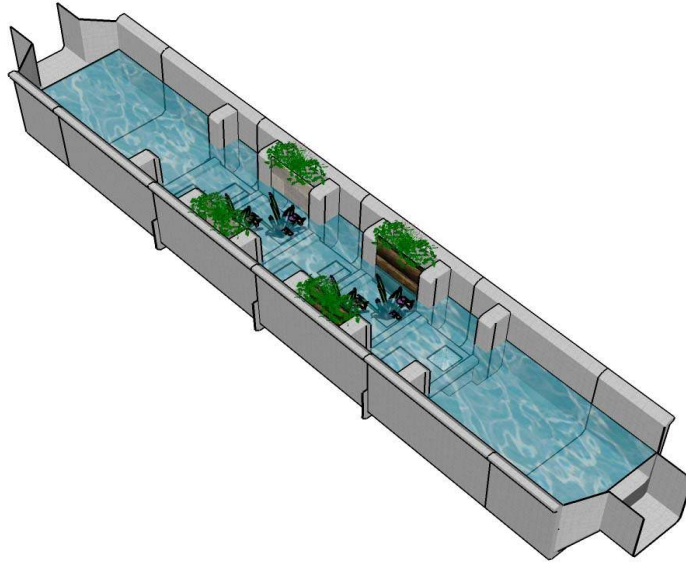
수질정화 수로관은 크게 용배수로겸용, 용수로용, 배수로용으로 구분해서 개발하였으며 각각의 특징은 다음과 같다.

##### 1) 용배수로 겸용

용배수로 겸용 수질정화수로관은 누수손실과 통수단면의 확보를 위해 식재부와 저류부를 두었으며 적용 위치와 옆측판의 재료 즉 나무와 콘크리트에 따라서 경관형과 일반형으로 구분하여 설계하였다. 저류부와 식재부에는 수질정화체를 이용한 수질정화망을 내장하여 수질이 정화될 수 있도록 하는 한편, 갈수기에 수중 동, 식물에 필요한 최소량의 물이 저장될 수 있도록 하였다. 또한 수로관 바닥과 측벽에 웅덩이 및 어소 공간을 마련하여 평상시 수중 동물의 서식에 유리하도록 하였으며, 수로관의 양 측면에 식물 식재부를 마련하여 식물은 물론 물가 생물들이 함께 살 수 있도록 하였다.



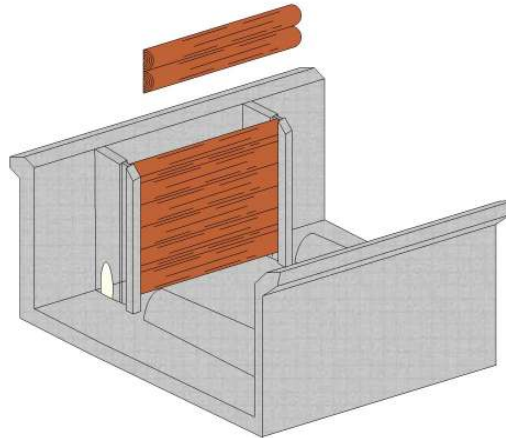
<그림 3.2.8> 용배수로 겸용 수질정화수로관의 일반형, 경관형 제품 모식도



<그림 3.2.9> 수질정화수로관의 일반형, 경관형 제품 결합 설치 가상도

## 2) 용수로용

용수로용 수로관의 경우 바닥 누수를 고려하여 바닥면이 있는 수로관으로 설계 되었으며, 바닥에 원뿔 모양의 조류제를 설치하여 물의 저류 및 어도의 기능을 가지도록 하였다.



<그림 3.2.10> 용수로용 수질정화수로관 제품 모식도

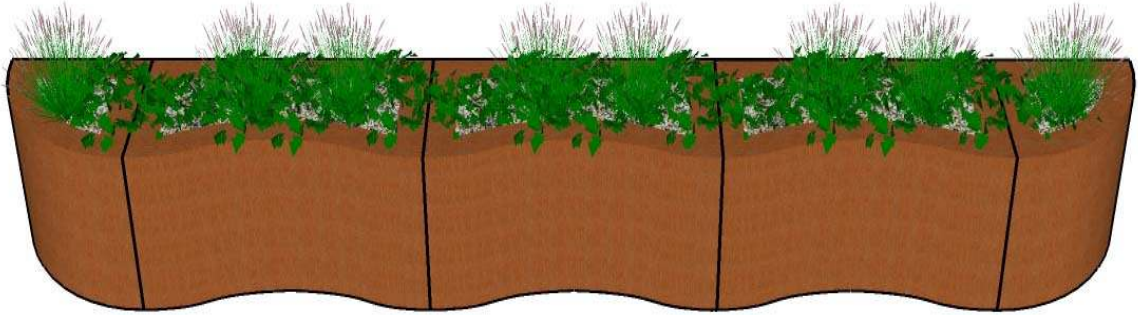
## 3) 배수로용

배수로용 수질정화수로관의 경우 지하침투와 하폭조절의 자유로움을 고려하여 L형의 측면모양으로 설계되었다. 측면 벽면을 조립 또는 조립하지 않음으로써 하폭의 확대 및 축소가 이루어져 다양한 경관을 형성할 수 있다.



#### 다. 수질정화 식생포트

수질정화 식생포트는 기존의 콘크리트 제품이 아닌 포러스 콘크리트와 황토를 사용하여 제조한 제품으로써 경지정리사업이나 배수개선사업으로 이미 정비된 수로에 간단하게 적용 가능하다. 식재기반재와 수질정화체를 이용하여 기존 라이닝 수로의 수질정화효과와 경관기능을 향상시킨 제품이다. 또한 수로내에 사행의 조성으로 수질정화효과 뿐만 아니라 어류와 양서류 및 저서생물의 대피처로서의 역할도 할 수 있도록 하였다.



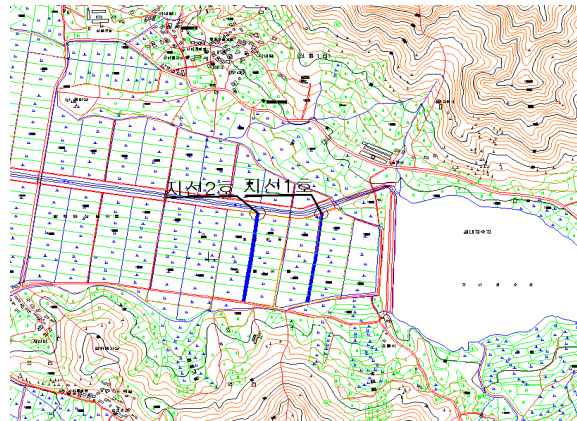
<그림 3.2.13> 수질정화 식재포트 제품 및 수로내 적용 이미지



#### 4. 수질정화수로관 및 환경생태보호형수로관 현장 시험시공

##### 가. 대상지역

서해안이 위치한 삽교호, 아산호가 인접해 있으며, 북동에서 남서쪽으로 뻗은 산맥이 서해안의 해양성 기류를 차단하여 온난 다습한 기후 특성을 나타내기도 한다. 연평균기온은 11.6℃, 연평균강수량 1,229mm, 연평균풍속은 1.5m/s로 인접지역인 대전, 청주보다는 약한 편이다. 특히 겨울과 봄에 북서풍이 해안을 지나면서 발생하는 기류로 약한 눈, 비가 자주 오는 특성을 보이고 있다. 금해년도 첫서리는 10월 5일, 첫얼음은 10월 12일, 첫눈은 10월 23일에 관측되었으며, 기상값은 평년수치(연평균강수량 1,230.4mm)와 큰 차이를 나타내지 않았다.



<그림 3.2.14> 시험 대상지역 유역도 및 대상 수로

아산시 성내저수지 인근의 배수지선 1호의 설계홍수량은 0.44m<sup>3</sup>/sec로 분석되어졌고, 이를 바탕으로 하여 단면을 검토 확정하였다.



노선명		단		면		기설단면 검토	
지선1호 배수로 NO. 0 + 00 ~ NO. 4 + 00 L = 200		1.5	1: 1.2	1.0	1: 1.2	$Q = 0.440 \text{ m}^3/\text{s}$ $l = 1 / 2,000$ $n = 0.035$ $h = 1.00 \text{ m}$ $B = 0.8 \text{ m}$ $A = 2,000 \text{ m}^2$ $P = 3,924 \text{ m}$ $R = 0.51 \text{ m}$ $V = 0.408 \text{ m/s}$ $Q = 0.816 > 0.440 \text{ m}^3/\text{s}$ Ok	
지선1호 배수로 NO. 4 + 00 ~ NO. 6 + 30 L = 130		0.4	1: 0.8	0.3	1: 1.0	$Q = 0.140 \text{ m}^3/\text{s}$ $l = 1 / 400$ $n = 0.035$ $h = 0.30 \text{ m}$ $B = 0.8 \text{ m}$ $A = 0.321 \text{ m}^2$ $P = 1,649 \text{ m}$ $R = 0.195 \text{ m}$ $V = 0.480 \text{ m/s}$ $Q = 0.154 > 0.140 \text{ m}^3/\text{s}$ Ok	
지선2호 배수로 NO. 0 + 00 ~ NO. 6 + 26 L = 326		1.2	1: 0.9	0.9	1: 0.9	$Q = 0.480 \text{ m}^3/\text{s}$ $l = 1 / 400$ $n = 0.035$ $h = 0.90 \text{ m}$ $B = 1.0 \text{ m}$ $A = 1,629 \text{ m}^2$ $P = 3,422 \text{ m}$ $R = 0.476 \text{ m}$ $V = 0.871 \text{ m/s}$ $Q = 1,419 > 0.480 \text{ m}^3/\text{s}$ Ok	
지선2호 배수로 NO. 6 + 26 ~ NO. 8 + 30 L = 104		1.1	1: 0.9	0.7	1: 1.0	$Q = 0.200 \text{ m}^3/\text{s}$ $l = 1 / 600$ $n = 0.035$ $h = 0.70 \text{ m}$ $B = 1.0 \text{ m}$ $A = 1,166 \text{ m}^2$ $P = 2,980 \text{ m}$ $R = 0.391 \text{ m}$ $V = 0.624 \text{ m/s}$ $Q = 0.728 > 0.200 \text{ m}^3/\text{s}$ Ok	

<그림 3.2.15> 시험수로의 단면검토

나. 시험대상구간의 시험시공

본 연구의 대상수로인 충청남도 아산시 성내저수지 인근의 배수지선 1호의 하류부에서 상류부로 100m를 수질정화수로관의 시험구간으로 하여 시공하였다. 구조물의 시공은 2007년 3월 바닥부와 기초를 완료하였으며, 수질정화수로관의 밀판 및 옆판을 설치한 후 수질정화체와 식재부의 식재를 완료하였다. 환경생태보호형수로관의 경우 익산시 영만1지구의 용배수로에 100m에 1본씩 총 57본을 설치하였다.





<그림 3.2.16> 시험수로의 토공 및 기초 타설



<그림 3.2.17> 수질정화수로관 본체 설치



<그림 3.2.18> 옆판 및 밑판 설치





<그림 3.2.19> 수질정화체 설치 및 식재부 식재



<그림 3.2.20> 환경생태보호형수로관 시공

## 5. 시험시공 현장의 모니터링

현행 용배수로의 설치 및 개보수는 수로손실을 줄이고 유지관리의 효율성을 높이기 위해 콘크리트 현장타설 및 수로관으로의 구조물화에 역점을 두고 있고 이에 따른 식물의 고사로 인해 수질정화효과와 경관보존의 효과가 떨어지고 있으며, 양서류 및 파충류 등이 수로내에서의 탈출이 어려워 비 급수기에는 고사하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 또한 유지관리 부분에서도 많은 어려움이 나타나고 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 개발된 수로관에서의 수질정화효과 및 경관, 양서류 및 파충류 등과 소동물의 이동 또는 탈출 유형을 조사하여 구조물 수로의 친환경성과 수질정화효과, 생태이동통로 설치의 필요성 및 개선방안을 도출하였다. 이에 아산시 배수로와 익산시 용배수로에 설치하여 경관, 뱀과 개구리, 어류상을 모니터링 하였다.

생태계 모니터링의 목적은 시험수로인 수질정화수로관 구간과 환경생태보호형수로관 구간의 생물 상황을 조사·분석하여 친환경적 수로정비사업을 위한 생물 모니터링 기법을 확립하고, 뱀과 개구리, 어류의 수로내 이동과 탈출경로를 모니터링함으로써 친환경적 수로정비 시 양서류 및 소동물의 탈출로(등선로)설치 기준정립에 필요한 기초자료를 도출하였다.

#### 가. 수질정화수로관의 현장 모니터링 및 생태환경 조사 (아산)

일반 수로관에서 수질정화, 생태계 보존과 유지관리의 측면 3가지 측면 전부를 고려하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반 수로관의 형태를 벗어나지 않으며 수질정화가 가능하도록 수질정화체망을 설치할 수 있는 공간을 마련하였다. 지역주변의 여건과 잘 어울릴 수 있도록 조립식 식재부를 두었으며, 식물의 지나친 번무를 억제하기 위해 조립식 밀판을 설치하였다. 또한 옆판과 밀판의 설치여부에 따라 수로폭의 자유로운 확대 축소가 가능하여 수로내 다양한 흐름을 형성시키고, 여름철 수로내에 그늘을 형성하여 다양한 생물이 휴식과 산란을 할 수 있도록 하였다. 2007년 5월부터 2008년 3월까지 식재부의 모니터링 결과 식재한 식물들이 자연스럽게 활착 되었으며, 특히 여름철 수로관내 그늘을 제공하는 효과가 두드러지게 나타났다. 그 결과 흙수로와 같이 다양한 생물들이 서식하는 것으로 조사되었다. 또한 옆판의 자연석 문양도 시간이 흐름에 따라 인공적인 부분이 거의 없어져 자연스럽게 보였다.

어류 모니터링 결과 2006년 기본 조사 시 발견된 붕어와 미꾸라지가 시공 후 수로에 서식하는 것으로 나타났다. 그리고 농민들의 청문조사 결과 유지관리 측면에서도 만족하고 있는 것으로 나타났다.



자연스러운 옆판 및 수질정화체 설치



수로내 식물 번무 억제





수로폭의 자유로운 확대 축소



주변과 어울리는 자연스러운 경관

<그림 3.2.21> 수질정화 수로관 제품의 시험시공 현장 모습



<2007년 5월>



<2007년 7월>





<2007년 10월>



<2007년 12월>



<2008년 1월>



<2008년 3월>

<그림 3.2.22> 수질정화 수로관 제품 시험시공 현장의 시기별 변화 모습

#### 나. 환경생태보호수로관의 현장 모니터링 및 생태환경 조사 (익산)

구조물 수로의 대부분은 측벽이 수직으로 되어있어 뱀과 개구리 등의 양서류와 오소리, 너구리 등 소동물은 측벽의 높이가 일정 이상(양서류는 20cm, 소동물은 50cm로 판단)일 경우 수로 밖으로 탈출이 어렵다.

특히, 구조물화 된 용배수로는 비 급수기에 양서류를 비롯한 소동물이 용배수로 내에 들어오게 된 경우에는 장기간 탈출이 불가능하여 고사 할 가능성이 높다. 본 연구에서는 개구리와 뱀을 대상으로 구조물 수로에서의 탈출경로와 수로관 내 저류홈 내 어류의 서식처 및 산란처를 모니터링 하였다.

개구리와 뱀은 물이 고여있는 생태수로관의 저류 홈으로 잘 접근하여 머무는 경향이 있었다. 특히, 수로내에서 뱀은 수로 측벽을 따라 이동하여 비교적 쉽게 환경생태보호형수로관의 등선로로 접근하였으나, 개구리는 생태수로의 저류 홈까지의 이동은 뚜렷한 특징이 없었다.



<그림 3.2.23> 환경생태수로관의 저류부에서 관찰된 양서류와 파충류

환경생태보호수로관의 등선로에서 뱀과 개구리의 이동은 등선로 경사와 바닥상태에 많은 영향이 있었다. 예를 들면, 수로에 설치된 생태수로관의 등선로 부분은 콘크리트로 바닥이 미끄러워 뱀과 개구리가 등선로를 통하여 탈출하는데 5분가량 시간이 소요되었다. 개구리는 힘겹게 수로 밖으로 탈출에 성공하였지만 뱀은 여러 차례 시도 끝에 탈출하지 못했다. 그래서 등선로 바닥에 축축한 흙을 뿌려 실험한 결과 비교적 쉽게 등선로를 통하여 수로 바깥으로 탈출하였다.

어류는 2006년 기본 조사 시 미꾸라지, 붕어, 송사리 3종이 발견되었으며, 2007년 시공 후 2008년 3월 현재 환경생태보호형수로관의 저류홈 부분에서 3종 모두가 서식하고 있는 것으로 조사되어 저류홈이 갈수시나 겨울철 생태계 보존을 위해 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.





<2007년 9월>



<2007년 11월>



<2008년 2월>

<그림 3.2.24> 환경생태수로관 적용 현장의 시기별 모습



<갈수기 환경생태수로관 저류홈에서의 어류 피난처 역할>



<갈수기 일반수로관내에 어류 고사 모습>

<그림 3.2.25> 환경생태수로관의 어류의 피난처 기능 비교 모습

#### 다. 수질정화수로관의 정화효율 평가

본 연구를 통해 개발한 수질정화수로관을 충남 아산시 성내저수지 하류부의 배수로 100 m 구간에 설치하고 수질정화효율을 조사하였다. 조사는 2007년도 관개기인 5~8월 사이에 총 8회 실시하였다.

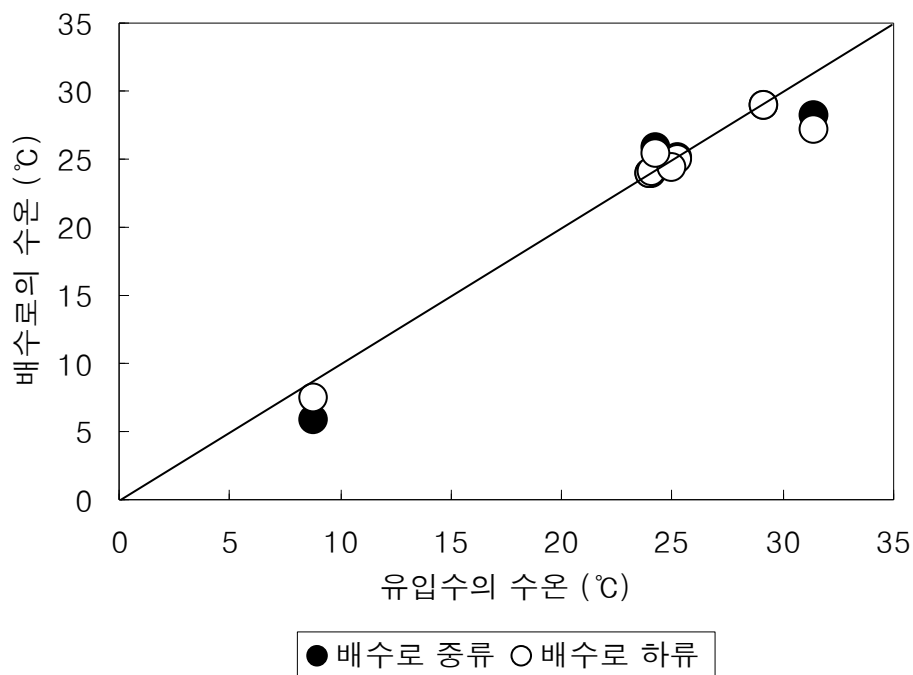
조사기간 동안 수온은 <표 3.2.8>과 같이 유입수인 상류지점이 8.8~31.4 °C, 평균 24.0 °C였고, 배수로 중류는 5.9~29.0 °C, 평균 23.3 °C, 하류는 7.5~29.0 °C, 평균 23.3 °C로서 상류에 비해 중류 및 하류에서 낮아지는 경향을 보였으나 95% 신뢰구간에서  $p=0.9759$ 로서 지점 간에 유의적인 차이는 없었다. <그림 3.2.26>에서 보는 바와 같이 상류에 비해 중류 및 하류에서 높아지기도 하고, 낮아지기도 하여 일정한 경향을 보이지는 않았다.

pH는 <표 3.2.8>과 같이 유입수인 상류지점이 6.9~7.6, 평균 7.2, 중류가 7.0~7.6, 평균

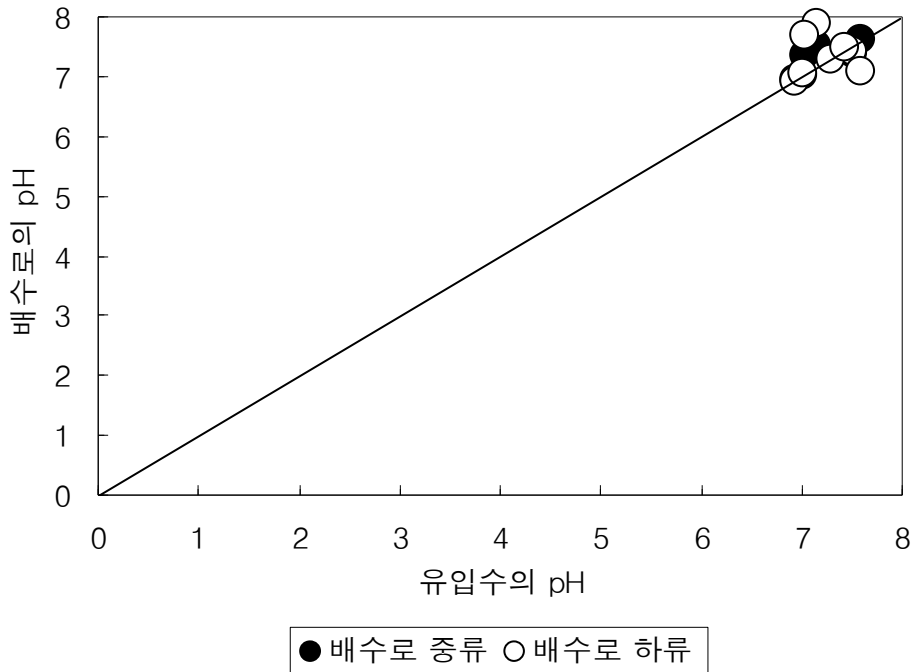
7.3, 하류가 6.9~7.9, 평균 7.4로서 지점 간 차이가 없었고, 모두 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하였다. 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.6202$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지 않았고, 표준편차도 0.2~0.3으로서 지점간 차이가 없었다. <그림 3.2.27>와 같이 상류에 비해 중류 및 하류에서 다소 높아지는 경향을 보였다.

<표 3.2.8> 수질정화수로관 부설 배수로의 수온, pH, EC, DO

항목	지점	평균	최소	최대	표준편차
수온 (°C)	유입	24.0	8.8	31.4	6.7
	배수로 중류	23.3	5.9	29.0	7.3
	배수로 하류	23.3	7.5	29.0	6.6
pH	유입	7.2	6.9	7.6	0.3
	배수로 중류	7.3	7.0	7.6	0.2
	배수로 하류	7.4	6.9	7.9	0.3
EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	유입	218.2	156.0	286.0	38.9
	배수로 중류	226.4	156.0	290.0	41.2
	배수로 하류	226.2	157.0	290.0	39.6
DO (mg/L)	유입	5.7	3.6	7.8	1.9
	배수로 중류	5.0	2.8	7.4	1.7
	배수로 하류	5.5	4.0	7.4	1.7



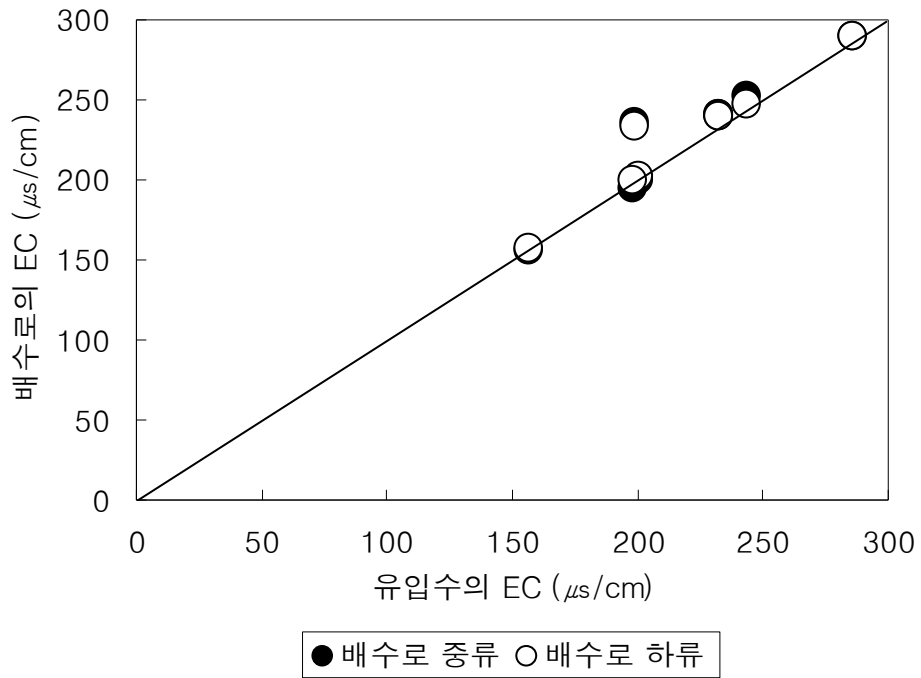
<그림 3.2.26> 수질정화수로관 부설 배수로의 수온 변화



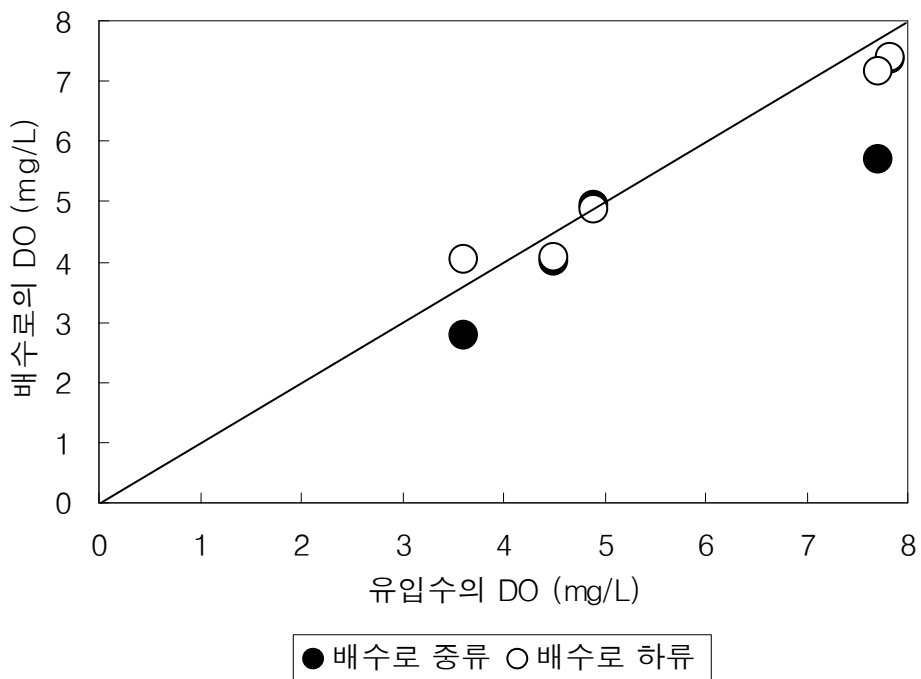
<그림 3.2.27> 수질정화수로관 부설 배수로의 pH 변화

EC는 <표 3.2.8>와 같이 상류가 156.0~286.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 218.2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 중류가 156.0~290.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 226.4  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 하류가 157.0~290.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 226.2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 지점 간 차이가 없었다. 95% 신뢰수준에서의 분산분석 결과에서도  $p=0.6202$ 로서 지점 간 유의적인 차이가 없었다. <그림 3.2.28>와 같이 상류지점에 비해 중류 및 하류에서 EC가 다소 높아지는 경향을 보였으나 모든 지점에서 작물이 자라는데 안전한 기준인 700.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$  이하를 만족하고 있었다.

DO는 <표 3.2.8>와 같이 상류는 3.6~7.8 mg/L, 평균 5.7 mg/L이었는데, 중류가 2.8~7.4 mg/L, 평균 5.0 mg/L, 하류가 4.0~7.4 mg/L, 평균 5.5 mg/L로 다소 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 95% 신뢰수준에서  $p=0.7941$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지 않았다. <그림 3.2.29>과 같이 상류에 비해 중류 및 하류에서 DO농도가 낮아지는 경우가 많았으나 모두 농업용수 수질기준인 2.0 mg/L 이상을 만족하고 있으므로 농업용수로 재이용되어도 문제는 없을 것으로 판단된다.



<그림 3.2.28> 수질정화수로관 부설 배수로의 EC 변화



<그림 3.2.29> 수질정화수로관 부설 배수로의 DO 변화

SS는 <표 3.2.9>과 같이 유입수인 상류가 5.6~57.6 mg/L, 평균 26.3 mg/L였는데, 중류에서는 4.4~22.0 mg/L, 평균 13.3 mg/L로 낮아져 49.6%가 제거되었다. 하류에서는 4.0~



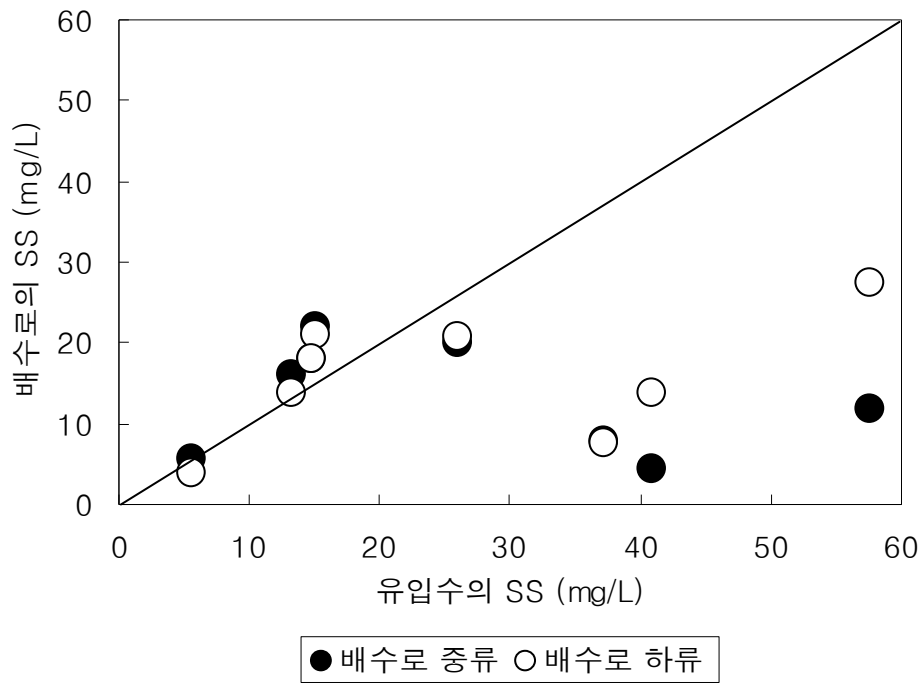
27.6 mg/L, 평균 15.9 mg/L를 나타내 중류에 비해 다소 높아지기는 하였으나 유입수에 비해 39.6%가 제거되었다. SS의 표준편차도 유입수가 17.6이었으나 중류 및 하류에서는 각각 6.7, 7.6으로 낮아져 유입수에 비해 안정된 경향을 보였다. 이는 수질정화수로관 바닥에 포설한 수질정화체에 의해 부유물질이 접촉 침전되었기 때문이다. 그러나 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.0868$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지는 않았다. <그림 3.2.30>과 같이 유입수에 비해 중류 및 하류에서 농도가 높아지기도 하고, 낮아지기도 하여 일정한 경향을 보이지는 않았지만, 유입수의 SS가 20 mg/L 이상에서는 모두 중류와 하류에서 낮아지는 경향을 보였다.

이상과 같이 수질정화수로관에서는 수로바닥에 포설한 수질정화체에 의한 접촉침전으로 SS가 제거되고 있는 것을 알 수 있어 수질정화를 겸비한 시설로 배수로 등에 적용이 가능한 것으로 판단된다.

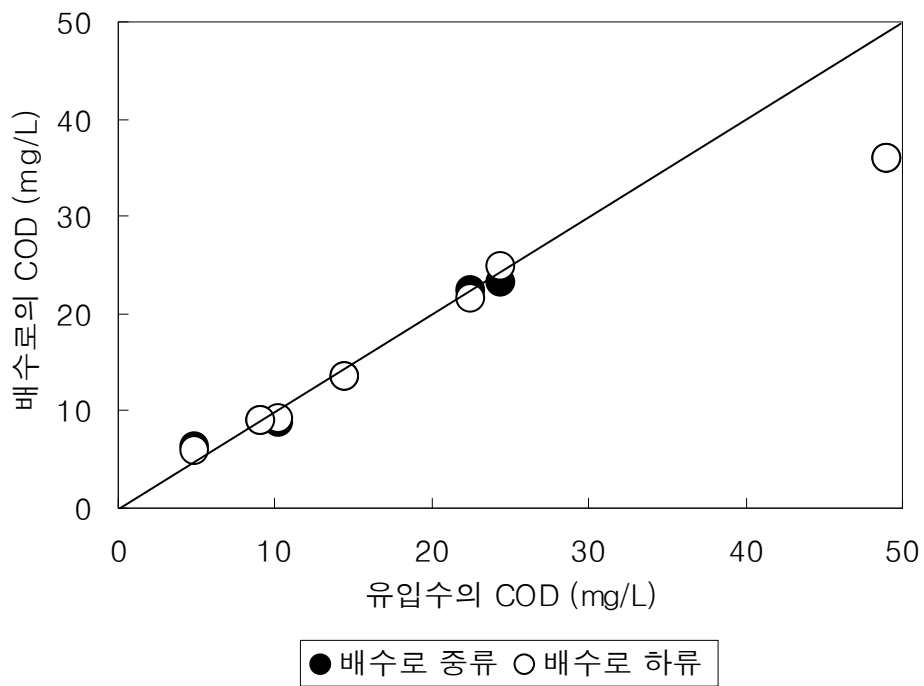
<표 3.2.9> 수질정화수로관 부설 배수로의 SS, COD, BOD

항목	지점	평균	최소	최대	표준편차	제거율 (%)
SS (mg/L)	유입	26.3	5.6	57.6	17.6	
	배수로 중류	13.3	4.4	22.0	6.7	49.6
	배수로 하류	15.9	4.0	27.6	7.6	39.6
COD (mg/L)	유입	19.2	4.8	49.0	14.9	
	배수로 중류	17.1	6.4	36.0	10.7	11.0
	배수로 하류	17.2	6.0	36.0	10.8	10.4
BOD (mg/L)	유입	2.4	0.6	4.9	1.5	
	배수로 중류	2.6	1.0	5.4	1.7	-9.6
	배수로 하류	3.2	1.2	7.6	2.4	-37.2

COD는 <표 3.2.9>과 같이 유입수는 4.8~49.0 mg/L, 평균 19.2 mg/L였는데, 중류에서는 6.4~36.0 mg/L, 평균 17.1 mg/L로 낮아져 11.0%가 제거되었다. 하류에서는 6.0~36.0 mg/L, 평균 17.2 mg/L를 나타내 중류와는 비슷한 값을 나타냈으나 유입수에 비해서는 10.4%가 낮아졌다. 이는 수질정화수로관 바닥에 설치한 수질정화체에 부착성장하는 미생물에 의해 유기물이 분해되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 표준편차가 유입수는 14.9였으나 중류와 하류는 10.7~10.8로서 상류에 비해 다소 안정된 경향을 보였다. 시기별로는 <그림 3.2.31>과 같이 유입수와 중류 및 하류 사이에 큰 차이가 없었다. 95% 신뢰구간에서의 분산분석 결과도  $p=0.9369$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지는 않았다.



<그림 3.2.30> 수질정화수로관 부설 배수로의 SS 변화

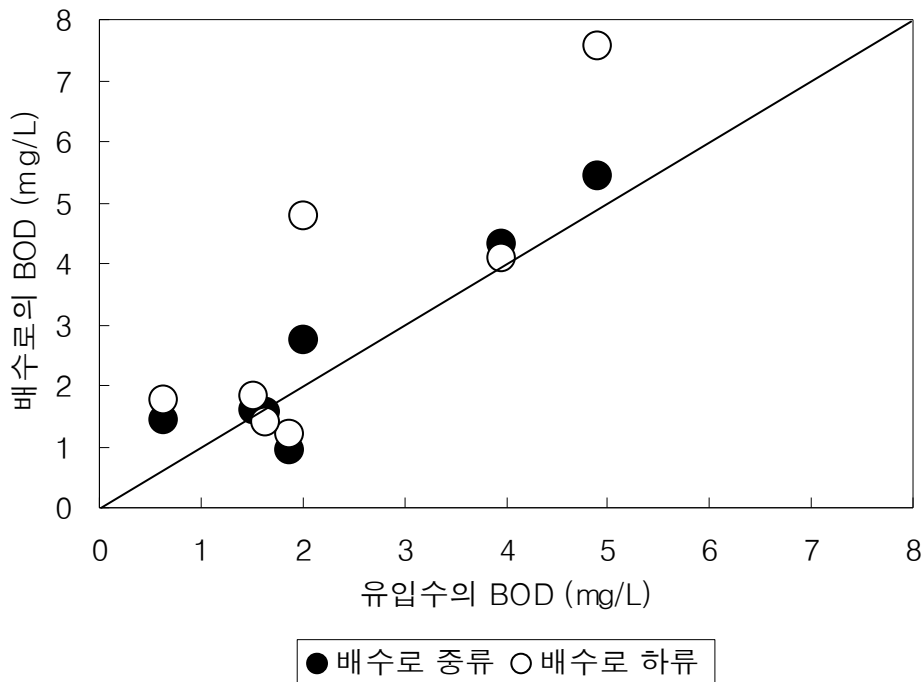


<그림 3.2.31> 수질정화수로관 부설 배수로의 COD 변화

이상과 같이 수질정화수로관에서 유입수에 비해 배수로 중류 및 하류에서 COD가 감소

되어 수질정화효과가 있는 것을 알 수 있었으며, 이는 수질정화체를 부설한 수질정화수로관을 농지배수의 수질정화를 겸비한 시설로 이용이 가능하다는 것을 나타내는 것이다.

BOD는 <표 3.2.9>과 같이 유입수가 0.6~4.9 mg/L, 평균 2.4 mg/L였는데, 중류에서는 1.0~5.4 mg/L, 평균 2.6 mg/L로 높아지고, 하류에서는 1.2~7.6 mg/L, 평균 3.2 mg/L로 더욱 높아졌다. 또한 <그림 3.2.32>와 같이 대부분 유입수에 비해 중류 및 하류에서 BOD농도가 높아지는 경향을 보였다. 또한 유입수의 표준편차가 1.5였는데, 중류와 하류에서는 각각 1.7, 2.4로 높아져 유입수에 비해 편차가 큰 경향을 보였다. 유입수의 농도가 최고 4.9 mg/L로 낮고, 유출수도 모두 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L 이하이기 때문에 하류에서 재이용되거나 농업용수에 유입되어도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 이와 같이 BOD는 지점에 관계없이 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L 이하를 나타냈고, 신뢰구간 95%에서의 분산분석 결과도  $p=0.6712$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지는 않았다.



<그림 3.2.32> 수질정화수로관 부설 배수로의 BOD 변화

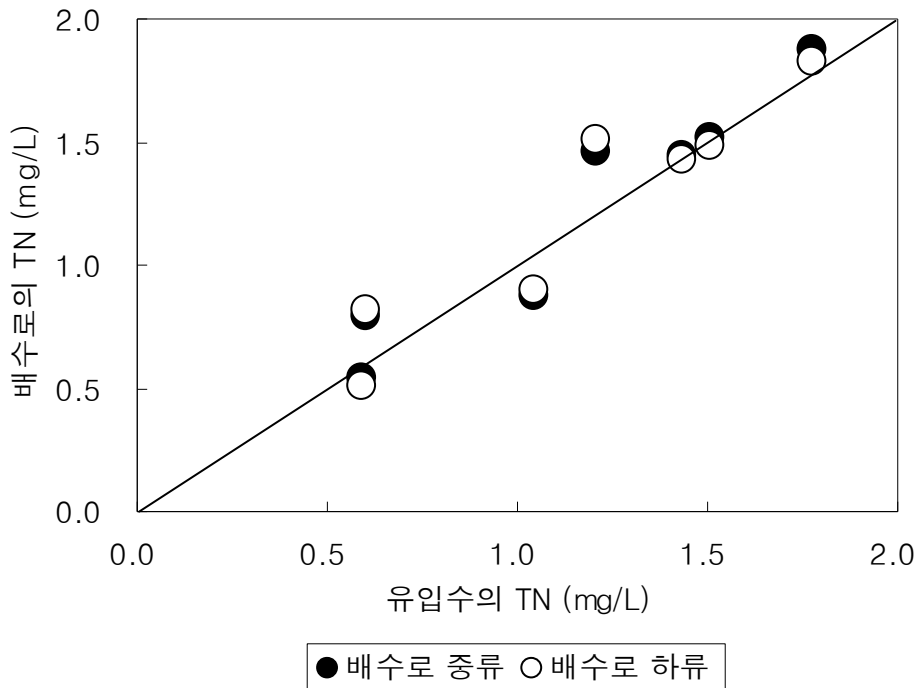
TN은 <표 3.2.10>와 같이 유입수가 0.59~1.77 mg/L, 평균 1.16 mg/L였는데, 배수로 중류에서는 0.55~1.88 mg/L, 평균 1.22 mg/L, 하류에서 0.51~1.83 mg/L, 평균 1.22 mg/L로서 유입수에 비해 중류와 하류에서 다소 증가되는 경향을 보였다. <그림 3.2.33>에서도 유입수에 비해 중류와 하류에서 TN농도가 높아지는 경우가 많았다. 그러나 분산분석 결과 95% 신뢰수준에서  $p=0.9703$ 으로서 지점 간에 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 이와 같이 TN이 낮아지지 않은 것은 배수로가 수심이 낮아 수체가 호기성 상태를 유지하나 혐기성



부분이 존재하지 않아 탈질이 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. TN이 낮아지지 않는 원인을  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 같은 질소의 태별 분석을 통하여 살펴보고자 한다.

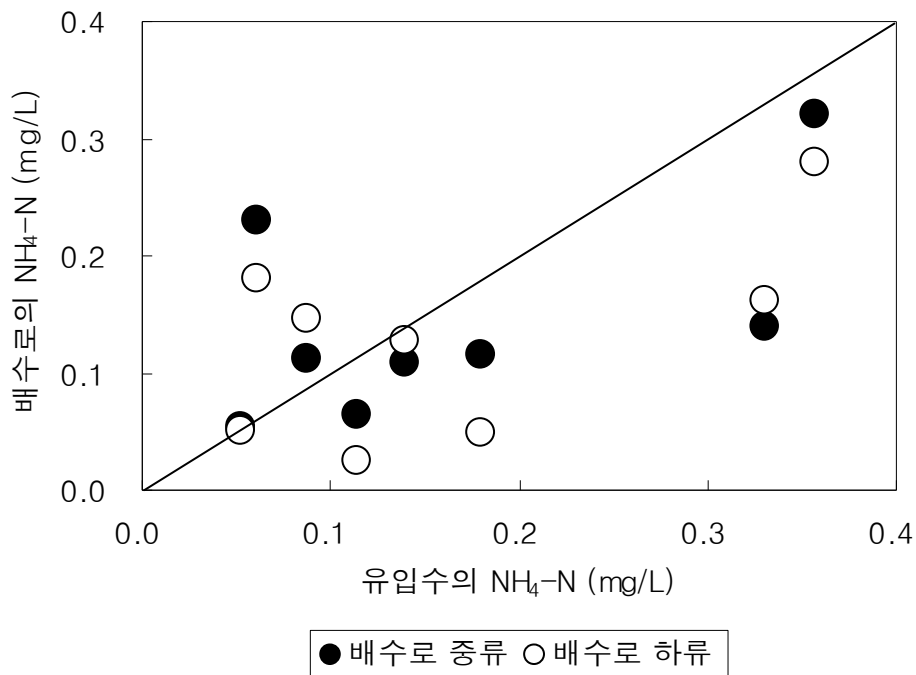
<표 3.2.10> 수질정화수로관 부설 배수로의 TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$

항목	지점	평균	최소	최대	표준편차	제거율 (%)
TN (mg/L)	유입	1.16	0.59	1.77	0.45	
	배수로 중류	1.22	0.55	1.88	0.48	-4.7
	배수로 하류	1.22	0.51	1.83	0.47	-4.4
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)	유입	0.16	0.05	0.36	0.12	
	배수로 중류	0.14	0.05	0.32	0.09	
	배수로 하류	0.13	0.03	0.28	0.08	
$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L)	유입	0.00	0.00	0.02	0.01	
	배수로 중류	0.00	0.00	0.01	0.01	
	배수로 하류	0.00	0.00	0.02	0.01	
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	유입	0.04	0.01	0.17	0.05	
	배수로 중류	0.18	0.04	0.32	0.12	
	배수로 하류	0.24	0.07	0.41	0.15	



<그림 3.2.33> 수질정화수로관 부설 배수로의 TN 변화

NH<sub>4</sub>-N의 경우 <표 3.2.10>와 같이 유입수가 0.05~0.36 mg/L, 평균 0.16 mg/L인데, 중류에서는 0.05~0.32 mg/L, 평균 0.14 mg/L로 낮아지고, 하류에서는 0.03~0.28 mg/L, 평균 0.13 mg/L로 다소 낮아졌다. <그림 3.2.34>에서도 유입수에 비해 중류와 하류에서 NH<sub>4</sub>-N 농도가 낮아진 경우가 많은 것을 알 수 있다. 이와 같이 NH<sub>4</sub>-N 농도가 낮아진 것은 배수로의 수심이 낮아 수체가 호기성 상태를 유지하기 때문에 질산화가 이루어져 NH<sub>4</sub>-N이 NO<sub>2</sub>-N → NO<sub>3</sub>-N으로 변화되었기 때문으로 판단된다. NH<sub>4</sub>-N 농도의 표준편차도 유입수가 0.12였으나 배수로 중류 및 하류는 0.09 및 0.08로 다소 안정된 경향을 보였다. 그러나 분산 분석 결과 95% 신뢰수준에서 p=0.7652로서 지점 간에 유의적인 차이는 없었다.

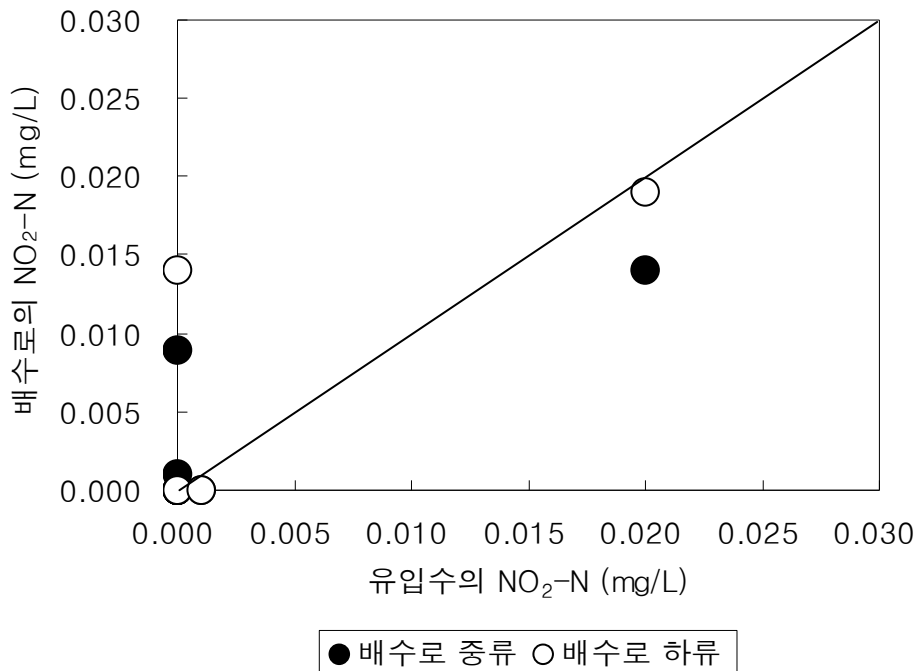


<그림 3.2.34> 수질정화수로관 부설 배수로의 NH<sub>4</sub>-N 변화

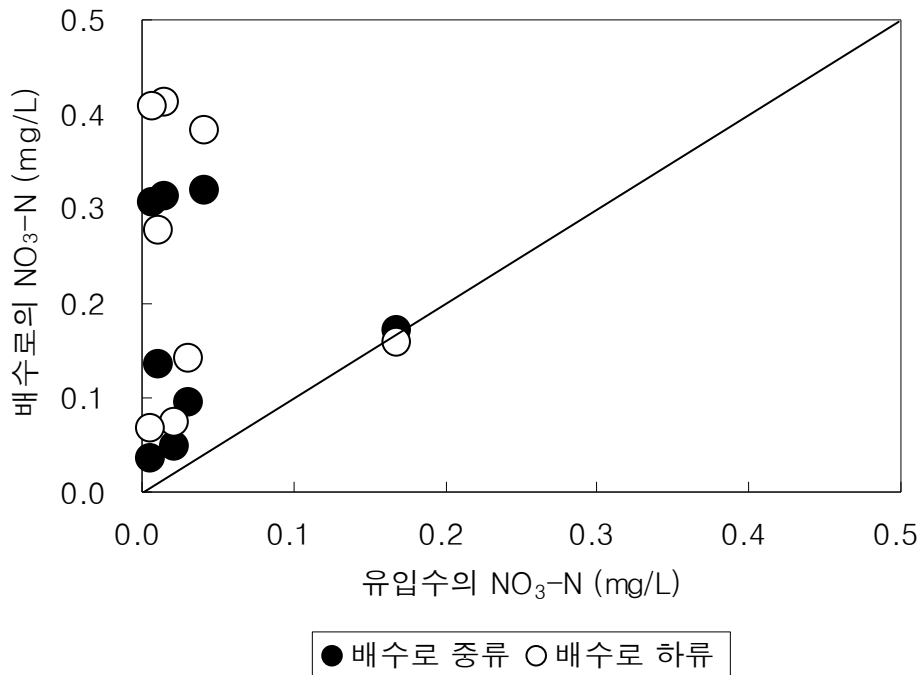
NO<sub>2</sub>-N의 경우는 <표 3.2.10> 및 <그림 3.2.35>와 같이 지점에 관계없이 모두 0.02 mg/L이고, 검출되지 않은 경우도 많았다. 질산화과정에서 NH<sub>4</sub>-N이 NO<sub>2</sub>-N으로 변환됨에도 불구하고 NO<sub>2</sub>-N이 증가되지 않는 것은 NH<sub>4</sub>-N이 NO<sub>2</sub>-N로 변환되는 속도보다 NO<sub>2</sub>-N이 NO<sub>3</sub>-N으로 변환되는 속도가 빠르기 때문이다.

NO<sub>3</sub>-N의 경우 <표 3.2.10>와 같이 유입수가 0.01~0.17 mg/L, 평균 0.04 mg/L였으나, 중류에서는 0.04~0.32 mg/L, 평균 0.18 mg/L로 높아지고, 하류에서는 0.07~0.41 mg/L, 평균 0.24 mg/L로 더욱 높아졌다. 또한 <그림 3.2.36>과 같이 대부분 유입수는 거의 0 mg/L에 가까웠으나 유입수에 비해서 중류 및 하류에서 NO<sub>3</sub>-N농도가 증가되는 경향을 보였다. 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과에서도 p=0.0057로서 지점 간에 유의적인 차이를 보일

정도로 하류로 가면서  $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 높아진 것을 알 수 있었다. 이는 위에서 기술한 바와 같이 배수로의 수심이 낮아 수체가 호기성 상태가 유지되어 질산화가 잘 이루어져  $\text{NH}_4\text{-N}$ 이  $\text{NO}_2\text{-N}$ 을 거쳐  $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 변환되어 하류로 가면서  $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 높아진 것이다. 반면 배수로에 혐기성 부분이 없어 증가된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이  $\text{NO}_2\text{-N}$ 을 거쳐 질소가스로 대기 중으로 배출되는 탈질작용이 이루어지지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 전체적으로 TN농도가 낮아지지 않는 원인이 되었다. TN의 정화효율을 높이기 위해서는 혐기성 부분이 존재하도록 중간 중간에 깊은 수심을 갖는 부분을 조성할 필요가 있다. 수심이 깊은 부분을 조성하면 탈질이 이루어져 질소의 제거효율이 높아질 뿐만 아니라 물고기 등의 수서생물의 휴식처 및 피난장소로도 이용될 수 있기 때문에 생태적으로도 바람직할 것으로 판단된다.



<그림 3.2.35> 수질정화수로관 부설 배수로의  $\text{NO}_2\text{-N}$  변화



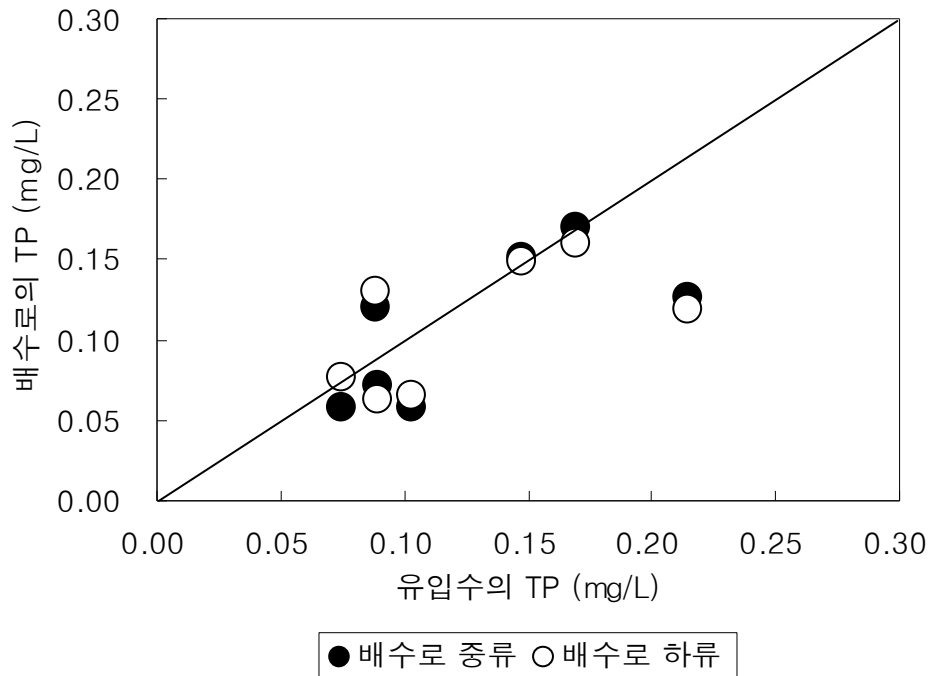
<그림 3.2.36> 수질정화수로관 부설 배수로의 NO<sub>3</sub>-N 변화

TP는 <표 3.2.11>와 같이 유입수가 0.07~0.21 mg/L, 평균 0.13 mg/L였는데, 배수로 중류에서는 0.06~0.17 mg/L, 평균 0.11 mg/L로 다소 낮아져 14.3%가 제거되었다. 하류에서는 0.06~0.16 mg/L, 평균 0.11 mg/L로서 중류와 비슷한 값을 나타냈고, 상류에 비해서는 13.0%가 제거되었다. 시기별로 살펴보면 <그림 3.2.37>와 같이 유입수에 비해 배수로 중류와 하류에서 농도가 낮아지는 경우가 많았다. 그러나 95% 신뢰수준에서의 분산분석 결과  $p=0.7269$ 로서 지점 간 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 본 수질정화수로는 부설구선이 100 m 정도로서 구간이 짧기 때문에 정화효율이 낮은 것으로 판단되며, 이 정도 구간에서 수질정화효과가 있는 것으로 보아 부설길이를 길게 하면 정화효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통하여 우리나라 저수지의 한계영향인자인 인을 정화함으로서 농업 용수원의 부영양화에 의한 녹조현상을 방지하는데 도움일 될 것으로 판단된다.

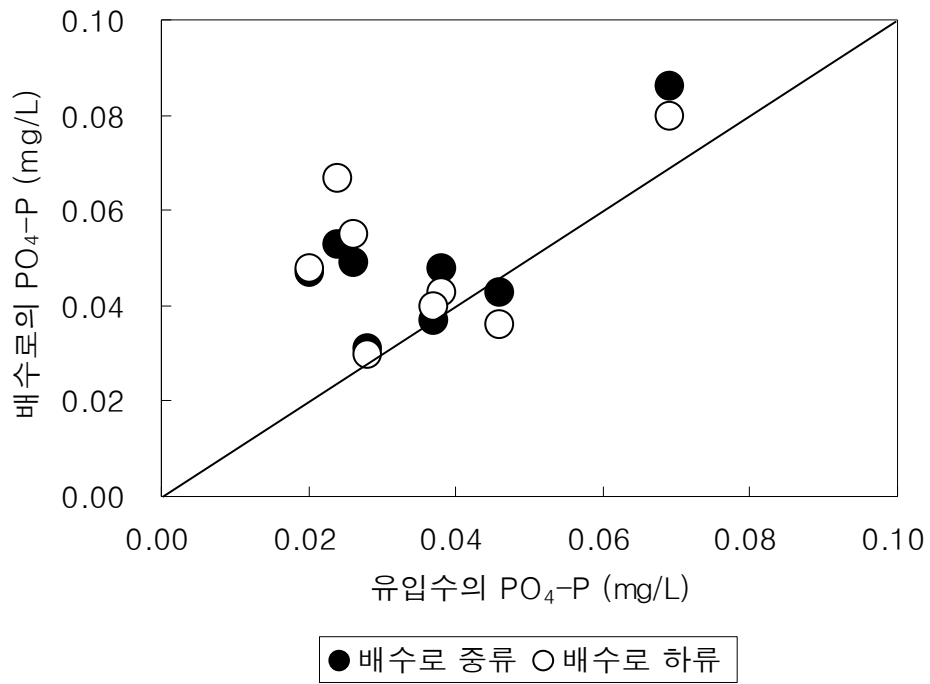
PO<sub>4</sub>-P는 <표 3.2.11> 및 <그림 3.2.38>와 같이 유입수에 비해 배수로 중류 및 하류에서 농도가 높아지는 경향을 보였다. 그러나 95% 신뢰수준에서  $p=0.1839$ 로서 지점간에 유의적인 차이를 보이지는 않았다.

<표 3.2.11> 수질정화수로관 부설 배수로의 TP, PO<sub>4</sub>-P

항목	지점	평균	최소	최대	표준편차	제거율 (%)
TP (mg/L)	유입	0.13	0.07	0.21	0.05	
	배수로 중류	0.11	0.06	0.17	0.05	14.3
	배수로 하류	0.11	0.06	0.16	0.04	13.0
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	유입	0.04	0.02	0.07	0.02	
	배수로 중류	0.05	0.03	0.09	0.02	
	배수로 하류	0.05	0.03	0.08	0.02	



<그림 3.2.37> 수질정화수로관 부설 배수로의 TP 변화



<그림 3.2.38> 수질정화수로관 부설 배수로의 PO<sub>4</sub>-P 변화

### 제 3 절 고효율 인공습지 개발

#### 1. 농지배수 수질특성 조사

농지배수에 적합한 인공습지를 개발하기 위하여 기초조사로 농경배수의 수질특성을 조사하였다<표 3.3.1>. 조사는 2005년 6월부터 10월까지의 농번기에 실시하였는데, 조사기간 동안 수온은 14.1~32.0 ℃, 평균 25.3 ℃를 나타냈다. pH는 6.9~8.6으로서 대부분 농업용수 수질기준인 6.0~8.5의 범위에 있기 때문에 농지배수를 재이용하거나 저수지에 유입되어도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

EC는 245.0~971.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타냈다. EC의 경우는 농업용수 수질기준에는 없지만 미국 캘리포니아 대학교 대외 협력국(UCCES)이 개발한 농업용수 수질기준지침에는 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하에서는 문제가 없는 것으로, 700~3,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서는 오염우려, 3,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상에서는 작물생육에 큰 영향을 미치는 것으로 분류하고 있다. 따라서 대부분 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하이기 때문에 큰 문제는 없을 것으로 판단되나, 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상인 경우도 있으므로 농산물의 안전을 위하여 가능하면 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하로 처리하여 저수지에 유입시키는 것이 좋을 것으로 판단된다.

<표 3.3.1> 농지배수의 수질특성

구 분	6월 17일	6월 25일	7월 2일	7월 17일	8월 13일	8월 17일	10월 7일	최소	최대	평균
수온 (℃)	27.2	27.7	24.7	32.0	27.1	24.5	14.1	14.1	32.0	25.3
pH	8.5	8.6	7.6	8.2	7.6	7.6	6.9	6.9	8.6	7.9
EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	971.0	774.0	551.0	281.0	331.0	421.0	245.0	245.0	971.0	510.6
DO (mg/L)	8.5	5.8	3.1	5.6	6.0	4.3	9.8	3.1	9.8	6.2
BOD (mg/L)		3.7	1.5	5.2	1.6	2.4	4.2	1.5	5.2	3.1
COD (mg/L)	14.8	14.8	11.6	6.6	6.8	7.8	3.4	3.4	14.8	9.4
SS (mg/L)	9.6	3.6	25.6	9.6	22.4	10.4	2.4	2.4	25.6	11.9
TN (mg/L)	6.18	2.83	1.42	1.03	1.09	1.08	3.95	1.03	6.18	2.51
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	3.77	0.04	0.05	0.10	0.26	0.17	0.05	0.04	3.77	0.63
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	1.53	2.02	0.57	0.76		0.61	3.28	0.57	3.28	1.46
NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	0.36	0.21	0.08	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	0.36	0.10
TP (mg/L)	0.12	0.10	0.12	0.12	0.18	0.09	0.11	0.09	0.18	0.12
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)		0.01		0.07	0.16	0.09	0.02	0.01	0.16	0.07

DO의 경우는 3.1~9.8 mg/L로서 농업용수 수질기준인 2.0 mg/L 이상을 만족하였고, BOD도 1.5~5.2 mg/L로서 하천의 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L 이하를 만족하였다.

그러나 COD는 3.4~14.8 mg/L로서 호소의 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L 이하를 초과하는 경우도 있었으며, SS의 경우도 2.4~25.6 mg/L로서 호소의 농업용수 수질기준인 15 mg/L를 초과하는 경우가 있기 때문에 농업용 저수지에 유입되기 전에 정화하여 유입시킬 필요가 있다.

영양염류인 TN의 경우 1.03~6.18 mg/L로서 모든 시기에 농업용수 수질기준인 1.0 mg/L를 상회하였다. 따라서 저수지의 부영양화를 방지하기 위해서는 질소에 대한 대책이 필요한 것으로 나타났다. 질소의 경우  $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 25.1%인 평균 0.63 mg/L이므로 본 연구를 통해 개발한 혼합여재는  $\text{NH}_4\text{-}$ 흡착율이 높기 때문에  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 충분히 제거해 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 약 58.2%를 차지하는  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우는 본 연구에서 적용 예정인 상하흐름형 인공습지의 혐기성부분에서 탈질에 의해 제거될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 인공습지에 식물을 식재하면 식물에 의해서도 흡수·제거되기 때문에 질소의 제거율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

TP의 경우는 0.09~0.18 mg/L로서 대부분 농업용수 수질기준인 0.1 mg/L를 상회하고 있었다. 우리나라 저수지의 부영양화 제한인자가 대부분 인이기 때문에 인의 제거는 꼭 필요하다. TN 중  $\text{PO}_4\text{-P}$ 가 58.3%인 0.07 mg/L인데, 본 연구에서 개발한 혼합여재는  $\text{PO}_4^{3-}$ 의 흡착효율이 높기 때문에 인의 제거효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 농지배수의 수질을 조사한 결과 농지배수의 농도가 농업용수 수질기준을 초과하는 경우도 있으므로 공공수역의 수질보전을 위해서는 농지배수를 정화하여 배출시킬 필요가 있다.

## 2. 농지배수 처리를 위한 고효율 인공습지개발

가. 고효율 인공습지 개발을 위한 설계인자 분석 및 고찰 (Sherwood C. Reed, et al., 1995)

모든 인공습지방법은 부착생물반응장치로 볼 수 있다. 이 장치의 BOD와 질소제거효율은 일차 plug flow 반응식을 이용해서 계산할 수 있다. 여기서는 BOD, SS, 암모니아성 질소, 질산성질소, 전질소(T-P) 및 전인(T-N)의 제거를 위한 지하흐름형 인공습지(SFS습지)의 설계인자를 자료 분석을 통하여 소개하고자 한다. plug flow 반응장치의 기본적인 관계는 식(2-1),(2-2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t) \quad (2-1)$$

여기서,  $C_e$  : 유출수의 오염물질 농도 [mg/L]



$C_o$  : 유입수의 오염물질 농도 [mg/L]

$K_T$  : 온도의존 1차반응속도정수 [ $d^{-1}$ ]

$t$  : 수리학적 체류시간(HRT) [d]

습지에서 HRT는 식 (2-2)로 계산할 수 있다.

$$t = \{ L W y n \} / Q \quad (2-2)$$

여기서,  $L$  : 습지길이 [m]

$W$  : 습지폭 [m]

$y$  : 습지수심 [m]

$n$  : 공극률, 혹은 물이 습지를 유하하는데 이용할 수 있는 공간비율

$Q$  : 습지를 통과하는 평균유량 [ $m^3/d$ ]

$$Q = (Q_{in} + Q_{out}) / 2 \quad (2-3)$$

오수가 습지를 유하할 때 침투나 강수에 의한 손실 또는 증가를 보정하기 위해 식 (2-3)을 이용해서 평균유량을 결정할 필요가 있다. 설계에서는 일반적으로 침투가 없는 것으로 가정하고, 대상지역에서의 기상자료로부터 월별 증발산손실과 강수에 의한 증가분에 대하여 적절한 추정치를 결정한다. 이 방식에서는 손실 또는 증가수량을 계산하기 위해 먼저 습지면적을 가정해야 한다. 예비설계의 계산에서는  $Q_{in}$ 은  $Q_{out}$ 과 같다고 가정한다.

식 (2-1)과 (2-2)를 조합하여 습지의 표면적을 결정할 수 있다.

$$A_s = L W = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T y n} \quad (2-4)$$

여기서,  $A_s$  : 습지표면적 [ $m^2$ ]

식 (2-1)과 (2-4)에 이용되는  $K_T$ 값은 제거가 필요한 오염물질의 성질과 온도에 의존한다. 이에 관해서는 뒤에서 기술한다.

처리에 관련된 생물학적 반응은 온도에 의존하기 때문에 적절한 설계를 위해서는 습지의 수온을 예측해야 한다. 한냉지에서 지표흐름형 인공습지(FWS습지)의 효율과 기본적인 실현 가능성은 결빙의 영향도 받는다. 극단적인 경우 상당히 얇은 습지는 바닥까지 동결어 효과적인 처리가 불가능한 경우도 있을 수 있다. 이 장에서는 습지의 수온과 동결되었을 경우의

결빙두께를 예측하는 계산순서도 설명하고자 한다.

습지의 수리학적 설계는 오염물질의 제거를 결정하는 모델과 마찬가지로 대단히 중요하다. 그것은 이 모델이 습지단면을 균일하게 흘러 단락이 최소화된다고 하는 조건 하에서 plug flow를 가정하고 있기 때문이다. FWS습지와 SFS습지의 도입 초기에는 많은 설계에서 수리학적인 요건을 충분히 고려하지 않았기 때문에 단락류를 포함한 예기치 못한 유황이나 기대하는 성능을 달성하지 못하는 경우가 종종 발생하였다. 이들 문제는 본장의 수리학적 설계순서를 이용함으로써 해결할 수 있다.

설계를 가지 있는 것으로 하기 위해서는 제거반응속도와 마찬가지로 수리학적, 열적인 것도 고려할 필요가 있다. 순서는 보통 서로 관계를 갖고 있기 때문에 운동방정식을 풀기 위해서는 수심과 온도를 가정하여 반복계산하게 된다. 이 방법에 의해 관계되는 오염물질의 제거에 필요한 습지면적을 예측할 수 있다. 제거하는데 가장 많은 면적을 필요로 하는 오염물질이 설계제한인자(LDP)이며, 이것이 습지의 규격을 결정한다. 일단 습지면적을 알면 습지내의 이론적인 수온을 결정하기 위해 온도방정식을 이용할 수 있다. 만약 당초에 가정한 수온과 계산한 수온이 일치하지 않으면 2개의 온도값이 수렴할 때까지 계산을 반복한다. 최후단계에서는 최종적인 종횡비(길이:폭)와 습지내의 유속을 적절한 수리학적 계산에 의해 결정하게 된다. 만약 최종값이 온도계산을 위해 가정한 초기치와 크게 차이가 나면 다시 한번 반복계산을 한다.

#### 1) 수리학적 설계순서

인공습지방법의 수리학적 설계는 양호한 처리결과를 얻는데 결정적인 요소가 된다. 현재 이용되고 있는 모든 설계모델에서는 균일 흐름조건 및 오수성분과 처리미생물이 무제한적으로 접촉할 수 있다고 가정하고 있다. SFS습지에서는 시스템의 설계수명기간동안 지하류가 정상상태를 유지해야 한다. 수리학적 설계와 건설방법에 세심한 주의를 기울이지 않으면 이들 전제와 목표를 달성할 수 없다.

습지시스템을 유하하는 흐름은 마찰저항을 극복하고 흘러야 한다. 이 마찰은 FWS습지에서는 식생과 litter층에 의해서, SFS습지에서는 여재, 뿌리나 퇴적물에 의해서 발생한다. 이 저항을 극복하기 위한 에너지는 유입구와 유출구 사이의 수두차이다. 이 차이는 바닥에 경사가 있는 습지를 건설함으로써 확보할 수 있다. 그러나 유체저항은 시간이 지남에 따라 증가할 수 있고, 바닥경사는 시스템의 수명이 끝날 때 까지 고정되어 있기 때문에 필요한 수두차를 단순히 바닥경사에만 의존하는 것은 경제적으로도 현명하지 않다. 바람직한 방법은 필요에 따라서 완전배수가 가능하도록 바닥의 경사를 충분히 확보하고, 아울러 습지말단의 수위를 조절할 수 있는 방류구를 설치하는 것이다.

식 (2-5)의 Darcy법칙은 다공질 여재 속에서의 물 흐름을 나타낼 수 있으며, 흙이나 모

래, 자갈을 여재로 하는 SFS습지의 설계에 일반적으로 이용된다. 대단히 굵은 자갈을 이용하는 경우는 보다 강한 난류가 발생하기 때문에 이 경우는 Ergun식이 보다 적당하다. Darcy의 법칙은 실제 시스템의 물리적인 제약조건 때문에 엄밀히 말하면 SFS습지에 적용할 수 없다. 즉, Darcy의 법칙은 층류를 가정하고 있으나, 설계에서 동수구배를 크게 할 경우에는 대단히 굵은 모래, 자갈의 공극속에서는 난류가 발생하는 경우가 있다. 또한 Darcy의 법칙에서는 시스템 내의 흐름이 정상류이고 균일하다고 가정하고 있으나, 실제 흐름은 강수, 증발이나 침투 때문에 변화되기도 하고, 불균일한 공극이나 시공불량의 원인으로 부분적인 단락류가 발생할 수 있다. 만약 작은 규격에서 중간정도의 규격을 갖는 모래, 자갈을 여재로 이용되어 시스템이 단락류가 최소로 발생할 수 있도록 건설되고, 또한 동수구배가 최소가 되도록 설계되고, 더욱이 물의 손실과 증가가 고려되어 있으면 Darcy의 법칙을 적용하여 SFS습지의 수리학적 상황을 설명할 수 있다.

$$v = k_s s$$

이므로

$$v = Q/Wy$$

따라서

$$Q = k_s A_c s \quad (2-5)$$

여기서,  $Q = [(Q_{in} + Q_{out})/2]$ 로 습지의 평균유량 [ $m^3/d$ ]

$k_s$  : 습지의 흐름방향에 수직인 방향의 단위면적당 투수계수 [ $m^2/m^2 \cdot d$ ]

$A_c$  : 흐름방향에 수직인 단면의 총단면적 [ $m^2$ ]

$s$  : 흐름 시스템내의 동수구배 또는 수면구배 [ $m/m$ ]

$v$  : Darcy유속[여재의 전단면적당 겉보기 유속 [ $m/d$ ]]

이므로 다시 정리하면 설계상의 동수구배에 적합한 SFS습지의 허용최소폭을 결정할 수 있게 방정식을 전개할 수 있다.

$$s = my/L \quad L = A_s/W \quad A_c = Wy$$

여기서,  $W$  : 습지폭 [ $m$ ]

$A_s$  : 습지 표면적 [ $m^2$ ]

$L$  : 습지의 길이 [ $m$ ]

$m$  : 수두차로서 작용하는 수심의 증분 [%]

$y$  : 습지의 수심 [ $m$ ]

$$W = \frac{1}{y} \left[ \frac{QA_s}{mk_s} \right]^{0.5} \quad (2-6)$$

습지의 표면적  $A_s$ 는 이장의 끝부분에서 설명할 오염물질 제거용의 한정설계모델을 이용해서 먼저 결정한다. 다음에 식 (2-6)에 의해 선정된 동수구배에 적합한 완전최소 허용폭을 직접 계산한다. 만약 계획지구에 지형적 제약이 있으면 폭과 동수구배 외의 조합도 가능하다. 식 (2-6)의  $m$ 은 이용 가능한 수두의 5~20% 정도이다.  $m$ 이 100%일 때에는 최대 수두는 습지의 전수심  $y$ 와 같다. 이것은 습지가 방류부에서 수심이 0이 되어 습지의 유체저항이 더욱 증가된 경우에 대비한 여유가 없으므로 완전한 설계가 아니다. 공극폐색의 가능성, 점성효과나 설계시에는 알 수 없는 예측불허의 사태에 대응할 수 있는 큰 안전계수를 확보하기 위해서 유효투수계수  $k_s$ 의 1/3 이하의 값을 선정하고,  $m$ 이 20%를 초과하지 않도록 하는 것이 좋다.

식 (2-5)와 (2-6)은 여재내의 공극을 통과하는 흐름이 층류일 때 정확해진다. 이것은 Reynolds 수가 10 미만인 경우에 해당된다. 식 (2-7)과 같이 레이놀즈수는 유속, 공극의 크기, 물의 점성계수의 함수이다. 대부분의 경우  $N_R$ 은 1 미만이고 이에 따라 층류가 되어 Darcy의 법칙의 적용이 가능하다. 만약 난류라면 유효투수계수는 Darcy의 법칙에 의해 예측된 것 보다 상당히 작아진다.

$$N_R = vD/\tau \quad (2-7)$$

여기서,  $N_R$  : 레이놀즈수, 무차원

$v$  : Darcy속도 [m/s]

$D$  : 여재내 공극의 직경, 여재의 평균사이즈와 동일한 것으로 한다 [m]

$\tau$  : 물의 점성계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

식 (2-5)와 (2-6)에서 투수계수  $k_s$ 는 물의 점성의 변화와 함께 직접적으로 변화된다. 이 점성은 수온의 함수가 된다.

$$\frac{k_{sT}}{k_{s20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad (2-8)$$

여기서,  $k_s$  : 온도  $T$  및 20°C에서의 투수계수

$\mu$  : 온도  $T$  및 20°C에서 물의 분자점성계수

한냉지에서는 겨울철 SFS습지 가동시 점성효과가 중요하다. 예를 들면 수온 5°C에서의 투수계수는 20°C에서의 투수계수의 66%가 된다. 이 효과는 이전에 추천한 안전계수(설계  $k_s$ 가 예측된 유효한  $k_s$ 의 1/3 이하)에는 고려되어 있다.

식 (2-5) 및 식 (2-6)의 투수계수  $k_s$ 는 SFS습지에 이용되는 여재의 공극의 수와 크기에 따라 변화된다. <표 3.3.2>은 SFS습지에 사용될 수 있는 입상물질의 추정치를 나타내고 있다.

<표 3.3.2> SFS습지에 이용되는 대표적인 여재의 특징

여재크기	유효경 $D_{10}$ (mm)	공극율 $n$ (%)	투수계수 $k_s$ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )
굵은모래	2	28~32	100~1,000
모래자갈	8	30~35	500~5,000
가는자갈	16	35~38	1,000~10,000
중간자갈	32	36~40	10,000~50,000
굵은바위	128	38~45	50,000~250,000

자료 : Natural systems for waste management and treatment  
(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

최종설계 전에 현지 또는 실험실에서 여재의 투수계수를 측정할 필요가 있다. 투수계수 측정장치는 주로 실험실용의 표준적인 장치이지만 이 시스템에서 종종 이용되고 있는 모래 자갈이나 바위에는 그다지 적용되지 않는다.

식 (2-5)에서 투수계수 이외의 파라미터는 모두 예측할 수 있으므로 투수계수를 계산할 수 있다. 층류의 가정이 유효하다는 것을 확인하기 위해서는 레이놀즈수도 계산할 필요가 있다.

SFS습지에서 이용되는 여재의 공극률  $n$ 도 또한 최종적인 시스템설계에 앞서 예측해 놓아야 한다. 이것은 표준적인 방법을 이용하여 실험실 내에서 예측할 수 있다. 용량을 알 수 있는 큰 용기를 이용해서 현지에서 예측할 수 있다. 용기에 시험여재를 채우고 다지거나 용기를 낙하시켜 건설작업시 걸리는 압력을 재현한다. 그리고 용기에 표시를 하고 표시까지 물을 채우고 그 양을 측정한다. 이때 들어간 수량은 공극량  $V_v$ 를 나타낸다. 총체적  $V_t$ 를 알고 있기 때문에 공극률  $n$ 을 계산할 수 있다.

$$n = (V_v / V_t) \times 100 \quad (2-9)$$

토양이나 모래자갈의 공극률은 많은 참고문헌에 수록되어 있다. 이들 값은 <표 3.3.2>에서 나타낸 값이나 상술한 현지시험으로 측정한 값보다 작은 경향이 있다. 이들 출판물에 제시된 값은 자연 상태에서 다져진 원위치의 토양이나 퇴적자갈에 대한 것이므로 SFS에는 적당하지 않다. 거친 모래자갈이나 바위가 여재로 이용될 때에는 투수계수를 추정하는데 Ergun식에 기초한 관계식을 사용해도 좋다.

$$k_s = n^{3.7} \quad (2-10)$$

위식과 <표 3.3.2>은 개략적인 값을 추정할 때만 사용하는 것이 좋다. 공극률과 투수계수의 실측치에 기초해서 SFS습지를 최종 설계해야 한다.

현존하는 많은 SFS습지에서는 시스템 내의 plug flow를 유지하기 위하여 높은 종횡비(L : W = 10 : 1이거나 그 이상)로 설계되었다. 이와 같은 높은 종횡비는 불필요하다. 왜냐하면 이용 가능한 동수구배에서는 의도한 지하수류를 실현하기에는 불충분하기 때문에 자유표면류가 생기기 때문이다. 표면류는 어떠한 SFS습지에서도 큰비가 내릴 때 조금 발생하지만 그 때 오염물질농도는 비례적으로 감소하므로 처리효율에는 영향을 미치지 않는다. 이 시스템은 평균적인 설계유량과 예상되는 최대유량이나 큰비의 영향을 고려해서 당초부터 설계되어야 한다.

설계동수구배를 가능최대수두의 20% 미만으로 억제해야 한다고 앞에서 제시한 추천값에 따르면 시스템의 실행 가능한 종횡비를 상당히 작은 값(수심이 0.6 m에서는 3:1 이하, 수심이 0.3 m에서는 0.75:1 이하)로 줄일 수 있다. 모래자갈대신 흙을 이용하고 있는 유럽의 SFS습지에서는 충분한 동수구배를 확보하기 위해 경사를 8%까지 주고 있지만 안전계수가 부적절하기 때문에 언제나 표면류가 생기고 있다.

몇 개의 SFS설계법에서는 공극폐색을 방지하기 위하여 SFS습지의 폭을 시스템 유입부의 단면적 기준의 유기물부하(kg-BOD/m<sup>2</sup>·d)에 의해 결정하는 것을 장려하고 있다. SFS습지의 설계시에는 이용가능 최대동수구배의 20% 이하로 해야 한다고 상술한 설계방법에는 합리적인 근거가 있으므로 바람직한 값이다. 이 설계방법에서는 넓은 유입부를 필요로 하므로 오수중의 고형물에 의한 공극폐색을 최소로 할 수 있게 되어 있다.

## 2) 온도

습지 시스템에서 물리적, 생물적 작용은 모두 습지의 온도의 영향을 받는다. 극단적인 경우이기는 하지만 저온이 계속되어 결빙되면 습지는 물리적인 기능을 상실한다. BOD제거, 질산화나 탈질에 관계되는 생물적 반응은 온도에 의존하는 것으로 알려져 있다. 그러나 많은 경우 한냉지에서 기존 습지법의 BOD제거율은 온도 의존성을 명확하게 나타내지는 못한다. 이것은 이 시스템의 수리학적 체류시간(HRT)가 길기 때문에 겨울의 낮은 반응율을 보충하고도 남음이 있기 때문인 것으로 생각된다. 캐나다나 미국의 몇몇 시스템은 겨울에 질

소제거능력이 감소되는 것을 실제로 보여주고 있다. 이것은 생물적 반응에 대한 온도의 복합적인 영향과, 일단 수면이 얼어 피복되어 버리면 산소가 부족하기 때문으로 생각된다.

본장의 후반부에서는 온도에 의존하는 BOD 및 질소제거모형을 위한 속도계수에 대하여 설명한다. 따라서 설계용 생물적 모형을 적절하고 효율적으로 사용하기 위해서 습지의 수온을 추정하기 위한 신뢰할 수 있는 방법을 준비할 필요가 있다. 본 절에서는 SFS습지에서 수온을 결정하기 위한 계산방법에 대하여 설명하고자 한다.

SFS습지의 실제 온도분포 양상은 매우 복잡하다. 부설된 토양, 시스템에 유입하는 오수나 대기를 통한 열의 흡수나 방산이 있다. 기본적인 열수송기구에는 지면으로부터 지면으로의 전달, 오수로부터 오수로의 전달, 대기로부터 대기로의 전달과 대류, 대기로부터 대기로의 방사가 있다. 지면으로부터 들어가는 에너지는 중요하지만 종래의 설계에서는 무시되었던 것이 상례이다. 태양방사로부터 얻은 에너지도 무시하는 것이 통례였다. 이것은 온도조건이 가장 결정적인 북부지방에서 겨울기간 동안에는 무시할 수 없다. 연간을 통해서 태양방사가 중요한 미국 남서부에서는 이 요소를 계산에 반영하는 것이 좋다. 개수면에서 바람에 의한 대류손실은 중요하지만 밀생하는 식생, litter층 및 상당히 건조한 사력층이 존재하는 것이 보통인 SFS습지에서는 중요하지 않다. 이것이 습지 내에 있어서 물에 미치는 바람의 영향을 줄여주며 그 결과 대류손실은 상당히 적어지므로 열모델에서 무시할 수 있게 되는 것이다. 따라서 아래에서 기술하는 단순화된 모델은 단순히 대기로의 전달손실만을 고려한 것으로 보통 사용할 수 있는 것이다. 이 방법은 기본적인 열이동관계에 기초해서 전문가의 도움을 받아 만든 것이다(Chapman, A. J., 1974). SFS습지 모든 지점에서의 온도도 추정열손실과 시스템내에서 이용할 수 있는 에너지를 비교함으로써 예측할 수 있다(Calkins, D., 1993 ; Ogden, M., 1994).

열손실은 대기에의 열전도에 의해 발생하고, 이용 가능한 유일한 에너지원은 SFS습지를 흘러가는 물이라고 가정한다. 물은 차가워질 때 에너지를 방출한다. 이 에너지는 비열이라 한다. 이 비열은 온도가 높아지거나 낮아 질 때 축적되거나 방출되는 에너지의 총량이다. 비열은 압력이나 적지만 온도에 의존한다. 이 책에서 논하고 있는 시스템의 수면에서는 대기압이 지배적이고 온도의 영향은 작으므로 실용적으로 비열은 일정한 것으로 가정한다. 이 책의 계산에서 비열  $C_p$ 는 4,215 J/kg·°C로 한다. 이 값은 물의 결빙점인 0°C까지 적용할 수 있다. 0°C의 물은 이용 가능한 잠열이 없어질 때까지는 얼지 않는다. 또한 잠열은 일정하고, 334,944 J/kg이라고 가정할 수 있다. 잠열은 실제상 시스템의 결빙을 막아주는 최후의 안전계수이다. 그러나 온도가 0°C까지 내려간 경우는 결빙되기 직전이기 때문에 시스템은 물리적 기능이 불완전한 경계에 있게 된다. 안전을 고려한 설계를 보장하기 위해 최대 결빙두께를 구하는 경우에 한해서 잠열을 이들 계산에 포함시킨다.

습지를 유하하는 물의 이용 가능한 에너지는 식 (2-11)로 정의된다.

$$q_G = c_p \delta A_s y n \quad (2-11)$$

여기서,  $q_G$  : 물에서 얻을 수 있는 에너지 [J/°C]

$c_p$  : 물의 비열, 4,215 J/kg·°C

$\delta$  : 물의 밀도, 1,000 kg/m<sup>3</sup>

$A_s$  : 습지의 표면적 [m<sup>2</sup>]

$y$  : 습지의 수심 [m]

$n$  : 습지의 공극율

만약 습지를 유하하는 물의 일일 온도변화를 계산하고 싶은 경우는 식 (2-11)에서  $A_s/t$ 를  $A_s$ 에 대입하면 된다.

$$q_G = c_p \delta (A_s/t) y n \quad (2-12)$$

여기서,  $q_G$  : 물에서 얻을 수 있는 1일분의 에너지 [J/°C·d]

$t$  : 시스템의 HRT [d]

SFS습지 전체에서의 열손실은 식 (2-13)으로 구한다.

$$q_L = (T_0 - T_{air}) U \sigma A_s t \quad (2-13)$$

여기서,  $q_L$  : 대기로의 열전달에 의한 에너지 손실 [J]

$T_0$  : 습지 유입수의 수온 [°C]

$T_{air}$  : 대상기간중의 평균기온 [°C]

$U$  : 습지표면에서의 열전달계수 [W/m<sup>2</sup>·°C]

$\sigma$  : 시간변환계수, 86,400 s/d

$A_s$  : 습지표면적 [m<sup>2</sup>]

$t$  : 습지내의 HRT [d]

만약 일일 열손실과 온도를 계산하고 싶은 경우는 식 (2-13)은 다음과 같이 된다.

$$q_L = (T_0 - T_{air}) U \sigma (A_s/t) (1d) \quad (2-14)$$

여기서,  $q_L$  : 1일의 에너지 손실 [J/d]

$T_0$  : 대상습지구획 유입수의 수온 [°C]

식 (2-13) 및 (2-14)에서  $T_{air}$  값은 그 지역의 기상기록으로부터 또는 습지계획지에서



가장 가까운 기상관측소에서 얻는다. 과거 20 혹은 30년간의 기록 중에서 겨울의 온도가 가장 낮은 해를 계획 년으로 선정한다. 이 열계산을 위해서는 습지내의 설계수리학적 체류 시간(HRT)과 같은 기간의 평균기온을 이용하는 것이 바람직하다. 만약 계획년의 월평균기온만이 있는 경우는 그 결과는 보통 1차근사치로서 사용할 수 있다. 만약 열계산 결과가 겨우 허용 가능한 조건을 상회하는 경우에는 최종적으로 시스템을 설계하기 위하여 보다 정밀하게 추정하는 것이 좋다.

열전달계수 또는 식 (2-13)의  $U$ 값은 습지단면적의 열전달용량이다. 그 것은 식 (2-15)와 같이 두께에 따라 분할한 주요 구성요소 각각의 열전달율을 조합한 것으로 한다.

$$U = \frac{1}{\frac{y_1}{k_1} + \frac{y_2}{k_2} + \frac{y_3}{k_3} + \frac{y_n}{k_n}} \quad (2-15)$$

여기서,  $U$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$k_{(1-n)}$  : 1부터  $n$ 층의 열전달계수 [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

$y_{(1-n)}$  : 1부터  $n$ 층의 두께 [m]

<표 3.3.3>은 SFS습지에 통상적으로 존재하는 열전달율을 나타내고 있다. 습지의 litter층을 제외하고 구성요소 전부의 열전달율은 이미 알려져 있으며, 많은 참고문헌이 있다. SFS습지의 litter층의 열전달율은 작은 값이 있는데, 확실히 알려져 있지 않으므로 보다 명확해지기까지는 주의해서 사용해야 한다.

<표 3.3.3> SFS습지 구성요소의 열전달율

재 료	$k[W/m \cdot ^\circ C]$
공기(대류없음)	0.024
눈(새로쌓임, 따듯함)	0.08
눈(장기간)	0.23
얼음( $0^\circ C$ )	2.21
물 ( $0^\circ C$ )	0.58
습지litter층	0.05
건조(습도 25%)사력	1.5
습윤사력	2.0
건조토	0.8

자료 : Natural systems for waste management and treatment  
(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

식 (2-11) 및 (2-12)에 나타난 열의 손실과 흡수에 의해 발생하는 온도  $T_c$ 의 변화는 2개의 식을 조합해서 얻을 수 있다.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(T_0 - T_{air}) U \sigma A_s t}{c_p \sigma A_s \gamma n} \quad (2-16)$$

여기서,  $T_c$  : 습지의 온도변화 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

습지 유출수의 수온  $T_e$ 는

$$T_e = T_0 - T_c \quad (2-17)$$

또는

$$T_e = T_0 - (T_0 - T_{air}) \frac{U \sigma t}{c_p \delta \gamma n} \quad (2-18)$$

일단위로 계산할 경우에는  $T_0$ 는 대상습지의 유입수온,  $T_e$ 는 습지 유출수의 수온,  $T_{air}$ 은 그 기간동안의 일평균기온이다.

SFS습지내의 평균수온  $T_w$ 는 다음과 같다.

$$T_w = (T_0 + T_e) / 2 \quad (2-19)$$

이 평균수온을 BOD 혹은 질소제거 모델에서 습지 규모 및 HRT를 결정할 때의 추정온도값과 비교해서 이 2개의 온도에 차이가 있을 때에는 추정치가 계산치에 수렴할 때까지 반복해서 계산한다.

이 방법에서 태양방사 및 지반과의 전도에 의한 에너지의 취득과 손실을 포함시키면 더욱 정밀하게 할 수 있다. 가을과 겨울에는 흙의 온도가 습지 수온보다 높기 때문에 겨울에 지반으로부터의 전도는 순에너지 취득을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 지반으로부터 유입하는 에너지는 식 (2-13)으로 계산할 수 있다. 적절한  $U$ 값은  $0.32 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ , 지반온도는  $10^{\circ}\text{C}$ 일 것이다. 대상 장소에서 태양으로부터의 흡수는 해당기록으로부터 순일사량을 구해서 추정할 수 있다. 이 때 식 (2-20)은 태양으로부터의 유입열을추정하는데 사용할 수 있다.

$$q_{solar} = \emptyset A_s t s \quad (2-20)$$

여기서,  $q_{solar}$  : 태양방사로부터의 에너지 유입량 [J]

$\emptyset$  : 현지의 태양방사 [ $\text{J/m}^2\cdot\text{d}$ ]

$A_s$  : 습지의 표면적 [ $\text{m}^2$ ]

$t$  : 습지의 HRT [d]

$s$  : SFS습지내의 물에 도달하는 태양방사에너지의 비율, 보통 0.05 이하

식 (2-20)의 결과를 이용할 때에는 주의해야 한다. 방사는 먼저 식생과 litter층에 다음으

로 반사가 가능한 눈에 도달하기 때문에 이 방사 태양에너지는 대부분 실제에는 SFS습지내의 물에는 이르지 못한다. 이 때문에 식 (2-20)는 보정해야 한다. 앞에서 기술한 바와 같이 이들 태양원으로부터 습지에 유입하는 열은 무시하는 것이 좋다. 만약 이들 열유입을 계산에 포함시키려면 이들은 식 (2-11), (2-12) 및 시스템 내의 온도변화를 결정하기 위한 식 (2-16)에 더해주어야 한다.

SFS 또는 FWS습지의 온도모델에서 1°C 미만의 수온이 지속될 것으로 예상되는 경우에는 설계상의 수리학적 체류시간(HRT)으로 입지장소에서 습지를 겨울동안에 가동하는 것이 물리적으로 불가능한 경우가 많다. 질소제거는 이와 같은 온도에서는 거의 일어나지 않는다. 마찬가지로 만약 겨울에 FWS습지의 설계심도의 약 75% 이상까지 얼을 것으로 예상되는 경우는 겨울에 습지를 사용할 수 있는 가능성은 없다. 이와 같은 경우에도 3°C 미만에서 질소제거를 위한 산소이동을 방해하는 얼음층 아래에서 설계처리수질을 달성하려면 가동수심을 증가시키는 것이 좋다. 인공습지는 대부분의 온대 북부에서 겨울에도 잘 가동된다. 본절에서 소개한 온도모델은 습지의 크기가 결정된 경우에 가정한 온도를 검증하기 위한 것이다. 가정온도와 계산온도를 수렴시키기 위해서는 몇 번의 반복계산이 필요하다.

### 3) BOD제거를 위한 설계

모든 인공습지는 부착미생물형의 반응기로 생각할 수 있으며, 이들 기능은 1차 plug flow의 반응식에 근사시킬 수 있다.

SFS습지에서는 수중에 있는 여재의 표면적이 FWS보다 크고 부착생물의 증식 가능성이 높기 때문에 반응은 보다 빨리 진행된다. 크기 25 mm의 사력을 포함한 1 m<sup>3</sup>의 습지는 식물 뿌리의 표면적에 더하여 적어도 146 m<sup>2</sup>의 표면적을 갖게 된다. 같은 크기의 FWS습지에서는 15~50 m<sup>2</sup> 정도의 표면적 밖에 갖지 못한다. SFS습지 모델은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \quad (2-21)$$

$$K_T = K_{20} \times 1.06^{T-20} \quad (2-22)$$

$$K_{20} = 1.104 d^{-1} \quad (2-23)$$

습지면적은 식 (2-24)를 이용해서 구할 수 있다.

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_T y n} \quad (2-24)$$

여기서,  $C_e$  : 유출 BOD농도 [mg/L]

$C_0$  : 유입 BOD농도 [mg/L]

$K_T$  : 속도정수 [ $d^{-1}$ ]

$t$  : 체류시간(HRT) [d]

$Q$  : 시스템의 평균유량 [ $m^3/d$ ]

$A_s$  : SFS습지의 면적 [ $m^2$ ]

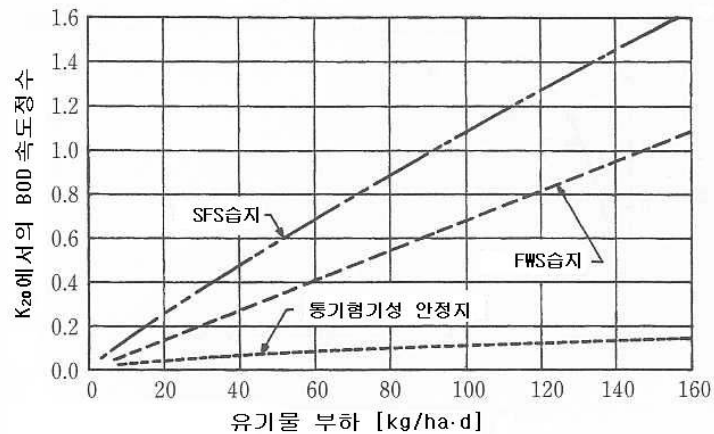
$y$  : 시스템의 설계수심 [m]

$n$  : 습지의 공극률

공극률  $n$ 은 <표 3.3.2>과 같이 시스템에 이용되는 여재의 형상에 따라 다르기 때문에 최종설계에 사용하는 여재에 대하여 추정해야 한다.

습지의 BOD제거율은 시스템에 유입하는 유기물부하와 관계가 있다. 기 관계는 <그림 3.3.1>과 같이 적어도 100 kg/ha·d의 유기물부하에 이르기 까지 유기물부하의 증가와 함께 확실히 직선적으로 속도정수가 증가되고 있다. 이들 자료는 미국에서 실규모의 운전시스템에서 도출된 것이다. <그림 3.3.1>은 SFS습지의 속도정수가 다른 두 시스템보다 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 분명히 미생물이 활동하기 위한 표면적이 크기 때문인 것으로 판단된다. 이 그림은 현존하는 시스템의 실적을 평가하는데 이용할 수 있으나, 장래의 시스템을 설계하는 데에는 사용할 수 없다. 해석에 이용된 많은 습지는 비교적 긴 수리학적 체류시간(HRT)을 갖고 있으며, 유입과 최종방류 BOD자료밖에 없다. 대부분의 BOD제거는 비교적 짧은 시간에 일어나므로 최종방류수 농도에 이르기까지에는 전HRT를 필요로 하지 않기 때문에 이 자료를 이용하면 분명히 낮은  $K_{20}$ 밖에 얻을 수 없다. BOD가 일단 습지 속에서 평형상태에 달하면 분해 litter층에 의해 그 농도가 유지되는 경향이 있다.

<그림 3.3.1>에서 낮은 유기물부하 및 낮은  $K_{20}$ 이 되는 횡축의 좌측부근에 위치하는 습지는 당초 설계자가 유입 BOD값이나 유입량 또는 양쪽을 과대하게 추정하였으나 실제는 부하가 대단히 적었기 때문이다. 미국이나 다른 나라에서의 성공사례에서 살펴보면 FWS 및 SFS습지 모두 신뢰성이 높은 설계가 100 kg/ha·d까지의 유기물부하와 식 (2-22)과 (2-23)으로 나타내는  $K_{20}$ 의 값에 대하여 가능하다. <그림 3.3.1>은 기존시스템의 평가에는 사용할 수 있으나, 불필요할 정도로 낮은  $K_{20}$ 값을 갖는 새로운 습지를 설계할 것을 권장하는 것은 아니다.



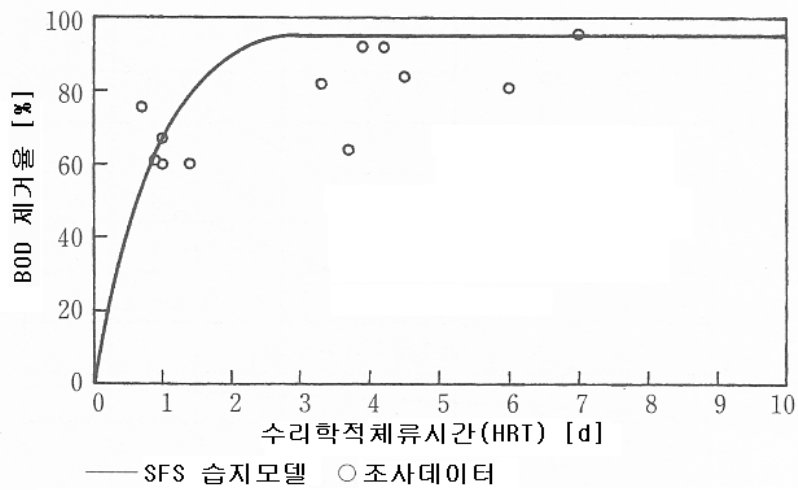
<그림 3.3.1> 유기물부하에 대한 BOD제거율

자료 : Natural systems for waste management and treatment  
(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

<그림 3.3.2>는 SFS습지모델과 대표적인 시스템의 데이터를 비교한 것이다. 곡선은 약 95% 제거율에서 직선이 된다. SFS습지를 설계할 때에는 시스템 속의 자연유기물을 고려하여 계획 유출수 BOD를 5 mg/L 이하로 설계하지 않아야 한다.

SFS습지에서 여재층의 깊이는 0.6 m 정도가 보통이다. 그 상부에 종종 76~150 mm 두께의 잔자갈층을 설치한다. 이 잔자갈층은 식물이 초기에 뿌리를 내리기 위한 기반이 되며, 통상의 운전에서는 건조 상태로 유지된다. 만약 20 mm 이하 정도의 비교적 작은 모래자갈을 주처리층으로 선택한 경우에는 보다 미세한 표층은 필요치 않다. 그러나 전층의 두께는 상부에 건조한 부분이 생길도록 약간 두껍게 한다.

미국의 많은 SFS습지에서는 처리층과 0.6 m의 운전수심을 갖고 있다. 기후가 따뜻해서 동결이 큰 문제가 되지 않는 몇몇 습지에서는 깊이 0.3 m로 운영되고 있다. 깊이를 줄이는 것은 산소수송 잠재능력을 개선하는 것이 되지만, 보다 큰 비표면적이 필요하고, 한냉지에서는 동결 가능성이 높다.



<그림 3.3.2> SFS습지에서 처리성능의 예측치와 실측치

자료 : Natural systems for waste management and treatment

(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

깊이 0.6 m의 습지에서는 바닥까지 뿌리가 잘 침입할 수 있도록 하기 위한 특별한 조장이 필요 없다. 습지 속에서 뿌리나 지하경의 수처리에 대한 기여도는 <표 3.3.4>과 같다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 BOD 및 암모니아성질소의 처리실적은 뿌리의 침입깊이와 직접적으로 관계가 있다. 기후가 1년 내내 온난한 Santee에서 연속성장기의 결과를 기초로 작성한 <표 3.3.4>에서 3종류의 식물의 침입깊이는 실용상 최대치를 나타냈다. 이것은 결국 출현을 예상한 식생의 뿌리가 침입할 수 있는 깊이 보다 깊게 설계하는 것은 그다지 의미가 없다는 것을 보여주고 있다.

미국에 있는 FWS습지 및 SFS습지는 1차처리 정도의 전처리를 한다. 전처리로서는 정화조, 임호프탱크, 침전지, 보통의 1차처리 혹은 유사한 시스템을 갖추고 있다. 전처리 목적은 전처리를 하지 않으면 습지의 유입부에 집적되어 공극이 막히거나 냄새가 나고 유입부의 식물에 악영향을 미치게 된다. 분해가 잘되는 유기물의 농도를 저하시키는 역할도 한다. 전처리하지 않은 배수가 단계적으로 유입될 수 있도록 설계한 시스템에서는 이와 같은 문제는 발생하지 않는다.

<표 3.3.4> 캘리포니아주 Santee의 식재구와 무식재구 여재습지의 처리성능 비교

식생	뿌리깊이 [cm]	BOD	유출수 농도 [mg/L]	
			SS	NH <sub>3</sub>
Scirpus (골풀)	76	5.3	3.7	1.5
Phragmites (갈대)	>60	22.3	7.9	5.4
Typha (부들)	30	20.4	5.5	17.7
무식생	0	36.4	5.6	22.1

$Q=3.04 \text{ m}^3/\text{d}$  ;  $\text{HRT} = 6\text{d}$  ; 습지조건  $L=18.5 \text{ m}$ ,  $W=3.5 \text{ m}$ ,  $y=0.76 \text{ m}$  ;

유입 1차 처리수  $\text{BOD}=118 \text{ mg/L}$ ,  $\text{SS}= 57 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_3 = 25\text{mg/L}$

자료 : Natural systems for waste management and treatment

(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

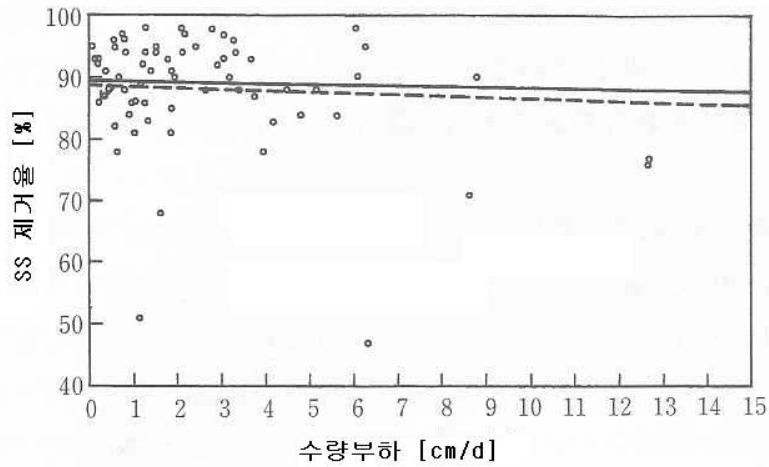
혐기성 반응조에 의한 전처리는 고농도 산업배수의 유기현탁물질을 저하시키는데 유효하다. 유럽의 많은 SFS습지에서는 스크린을 설치하여 토사를 제거한 배수를 습지에 유입시키고 있다. 이것은 오니의 집적, 냄새, 공극폐색 등의 원인이 된다. 몇몇의 사례에서는 유입수를 설치하여 현탁물질을 침전시키고, 정기적으로 수로를 청소하고 있다.

#### 4) SS제거를 위한 설계

FWS습지 및 SFS습지에서 SS의 제거는 물리적 작용에 의한 것으로 수류의 점성효과에 의해 이루어지므로 수온의 영향만을 받는다. 그러나 입자의 침강거리는 비교적 짧으나 습지의 체류시간은 매우 길기 때문에 이 점성의 효과는 무시할 수 있다. SS제거는 BOD, 질소제거 등에 비해 대단히 빠르기 때문에 습지의 크기를 결정하는 설계제한인자는 되지 않는다.

생활배수, 도시배수, 여러 종류의 산업배수에 함유되어 있는 대부분의 고형물은 유기물적 성질을 갖기 때문에 시간이 경과함에 따라서 분해되어 최소한의 잔여물만 남는다. BOD에서의 1차처리와 마찬가지로 이들 배수를 전처리하면 습지에 유입하기 전에 적당한 수준까지 저하시킬 수 있다. 습지에 잔류된 고형물은 계속해서 분해되어 최소한의 잔여물만 남기므로 공극폐색을 잘 일으키지 않는다. 강우처리, 합류식 하수도 월류수나 무기질 현탁물질 농도가 높은 산업배수를 위해 설계된 습지에서는 1차처리가 필요하지 않을지 모르나 습지에 무기물질이 급격히 쌓이는 것을 방지하기 위해 침전지 또는 습지의 제1단위공정으로서 별도의 여재층이 필요하다.

<그림 3.3.3>는 도시배수처리용 FWS 및 SFS습지의 SS제거 능력과 수량부하와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 실선은 SFS습지에서 가장 양호한 유사회귀식이다. 점선은 FWS습지의 사례이다. 이들 2개 조건에서의 방정식은 다음과 같다.



<그림 3.3.3> 습지에 의한 SS제거율과 수량부하의 관계

자료 : Natural systems for waste management and treatment  
(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

$$\text{SFS습지 } C_e = C_0[0.1058 + 0.0011(HRL)] \quad (2-25)$$

$$\text{FWS습지 } C_e = C_0[0.1139 + 0.00213(HRL)] \quad (2-26)$$

여기서,  $C_e$  : 유출수 SS농도 [mg/L]

$C_0$  : 유입수 SS농도 [mg/L]

$$HRL : \text{수량부하 [cm/d]} = (Q/A_s) \times 100$$

저~중 수량부하에서 식 (2-25)와 (2-26)은 SFS습지나 FWS습지에 관계없이 유출수의 SS는 같다는 것을 보여주고 있다. 왜냐하면 두 가지 형태 모두 SS제거가 대단히 효과적이기 때문에 SS제거는 시스템의 설계에서 제한인자가 되지 않기 때문이다.

어떤 모델이건 사용할 때에는 몇 가지 제약이 있다. 먼저 모델을 유도하는데 이용된 범위(수량부하 = 0.4~75 cm/d)를 초과하는 수량부하에는 유효하지 않다는 것이다. 대단히 높거나 낮은 수량부하에서는 다른 결과를 초래하게 된다. 더욱이 이들 습지에서 SS제거에서는 BOD제거 부분에서도 설명한 바오 같이 시스템 자체가 잔여유기물을 생한다고 하는 것이다. 이 잔여유기물은 최종방류수에 SS로서 나타나기 때문에 식 (2-25), (2-26)은 최종방류수 농도는 5mg/L 이하로 상정하는 경우에는 사용할 수 없다. 또한 식 (2-25), (2-26)을 변형하여 습지의 필요면적을 산정해서는 안된다. 습지면적은 BOD 혹은 질소설계모델 중 하나를 사용해서 결정해야 한다. 그 다음에 수량부하를 구해서 식 (2-25), (2-26)를 해석하여 시



스텝의 SS제거능력을 추정한다.

#### 5) 질소제거를 위한 설계

FWS습지 혹은 SFS습지에서 질소제거를 위한 설계방법은 복잡하다. 왜냐하면 질소는 여러 종류의 형태로 존재하기 때문에 이를 제거하기 위해서는 많은 화학적 및 환경적 조건을 필요로 하기 때문이다. 암모니아성질소는 최종 방류수에서 가장 많이 규제되는 질소형태이다. 이것은 이온화되지 않은 암모니아는 대단히 저농도에서도 어류에 유해하며, 방류하천에서의 암모니아의 산화는 용존산소 농도를 저하시키기 때문이다.

배출수의 암모니아 혹은 전질소 농도를 엄격하게 제한하는 경우에 질소제거는 일반적으로 습지설계에서 대단히 중요한 항목이 된다. 극단적으로 낮은 기온이 계속되는 한냉 기후에서는 질소제거에 관한 제약조건에 따라서 겨울철의 운전을 제한할 가능성이 있다. 이와 같은 경우 겨울철에 오수를 저류하고 여름철에 습지를 운전해야 하는 경우도 있다. 질소제거를 목적으로 습지규모를 결정할 때에는 앞에서 기술한 온도계산을 실시하여 실현 가능성을 확인해야 한다.

암모니아를 제거할 수 있도록 시스템을 설계하는 경우 시스템에 유입하는 킬달질소는 전부 최종적으로는 암모니아로 변화되는 것으로 가정하는 것이 바람직하다. 유입된 유기질소 중 바닥의 여재와 영원히 결합되는 양은 적기 때문에 안전율을 고려한 시스템에서는 이 양을 무시해도 된다. 시스템 가동 초기의 1, 2년은 암모니아가 기대이상으로 제거될 가능성이 높다. 이것은 여재흡착과 급격히 증식하는 식생에 의한 것이다. 2번째 성장기가 끝나가는 무렵이 되면 생태계는 평형상태에 접근하여 암모니아 제거속도는 안정화된다. 본 장에서 기술하는 설계방법은 장기간의 처리를 상정한 것이다.

SFS습지에서는 수위가 지표면보다 낮게 유지되기 때문에 대기에 의한 재폭기속도는 FWS습지에 비해 대단히 작아질 수 있다. 그러나 식생의 뿌리나 지하경은 이들 표면에 호기적인 미소부위를 갖고 있으므로 오수는 혐기적 환경의 여재 속을 흐르지만 이들 호기적 부분과 반복해서 접촉하는 것으로 생각할 수 있다. 그 결과 질산화와 탈질을 위한 조건이 하나의 반응조 속에 존재하는 것이 된다. 이들 생물학적 산화 및 탈질반응은 모두 온도에 의존하며, 식물 뿌리에의 산소공급속도도 계절적인 변동이 있는 것으로 판단된다.

탈질을 유지하는 주요 탄소원은 고사되거나 분해된 뿌리나 지하경, 유기퇴적물, 오수중의 잔존 BOD 등이다. 이들 탄소원의 공급은 FWS습지의 경우에 비해 SFS습지에서는 운전초기에 상당히 적다. 이것은 대부분의 litter가 지표부근에 집적되어 있기 때문이다. 몇 년 후에는 litter가 쌓이고 분해되므로 두 가지 형태의 습지 모두 탈질을 유지할 수 있을 정도의 탄소원은 대부분 공급된다.

SFS습지에서 주된 산소원은 식물의 뿌리이기 때문에 습지층 하부까지 뿌리가 확실히 침

입할 수 있도록 하는 것이 절대적으로 중요하다. 뿌리가 침입하고 있는 부분 아래로 흐르는 물은 완전한 혐기조건하에 놓이게 되므로 상부 층으로 확산되지 않는 한 질산화가 일어나지 않는다. 이 반응은 <표 3.3.4>과 같이 암모니아 제거는 식물뿌리가 침입하는 깊이와 직접적으로 관계가 있다. 부들을 식재한 습지는 암모니아를 32%밖에 제거하지 못하는데 반해 곱풀을 식재한 습지에서는 뿌리가 하부까지 전부 침입해서 94%를 제거하였다.

미국에서 기존의 많은 SFS습지에서는 선정된 식물 중에 관계없이 뿌리가 바닥까지 뻗어 필요한 산소를 자동적으로 공급한다는 가정 하에 설계되었다. 이러한 현상은 실제로 발생하지 않기 때문에 이들 중 많은 시스템에서는 암모니아 방류수 수질기준을 만족하지 못하고 있다. 앞으로는 시스템을 설계하거나 운전할 때 이것을 적절히 고려함으로써 이러한 문제를 방지할 수 있다. <표 3.3.4>에 있는 식물들의 뿌리 침입깊이는 가능 최대깊이를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 왜냐하면 Santee는 온난한 기후에서 성장기가 연속되고, 유입배수는 충분한 영양염류를 함유하고 있기 때문이다. 이것은 암모니아제거를 위한 산소가 필요하다면 설계수심은 도입예정식물의 뿌리 침입깊이를 초과하지 않도록 해야 한다는 것을 보여주는 것이다.

식물은 필요한 수분과 영양분을 비교적 얇은 수심에서 모두 흡수할 수 있기 때문에 뿌리의 침입깊이를 실제로 가능 최대 깊이까지 도달할 수 있도록 운전해야 한다. 유럽에서는 매년 가을에 수위를 서서히 낮추어 뿌리의 침입깊이가 깊어지도록 하고 있다. 이 방법으로 갈대의 뿌리침입깊이를 완전히 바닥까지 이르게 하기 위해서는 3회의 성장기가 필요한 것으로 알려져 있다. 통상 겨울에는 넓은 면적을 필요로 하지만, 한냉한 기후에서 또다른 방법으로 평행으로 3개를 배열한 습지를 조성하고 온난한 시기에는 2개만을 1개월간 운전하는 경우가 있다. 운전을 중지하고 있는 습지에서는 식물의 뿌리가 수중의 영양염류를 소비함에 따라서 지중 깊숙이 침입한다. 동결의 염려가 없는 온난한 기후 지역에서는 습지의 깊이를 0.3 m 이하로 할 수 있다. 이와 같이 하면 완전한 뿌리의 침투를 빨리 달성할 수 있다. 습지의 깊이에 관계없이 필요한 모래자갈의 양은 일정하지만 깊이가 감소하면 동일한 처리수준을 달성하기 위해 필요한 면적은 그 만큼 증대된다.

#### 가) 질산화

SFS습지에서 뿌리부분에 공급되는 산소의 양이나 식물종에 따른 산소수송효과에 관해서 통일된 견해는 없다. 그러나 성장한 식물은 통상적인 스트레스수준에서 고사되지 않을 정도의 충분한 산소를 뿌리에 수송하는 것으로 알려져 있다. 또한 생물적 활동을 유지하기 위해서는 뿌리 표면에 어느 정도의 산소가 이용 가능한가에 대해서는 여러 가지 견해가 있다. 기존의 추정치에 의하면 습지표면에서 5~45 g-O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d 정도의 범위이다. 오수에 함유되어 있는 BOD와 자연에서 유래하는 유기물을 분해할 때에는 이 이용 가능한 산소를 거의 대부분

분 이용하게 된다. 그러나 캘리포니아주 Santee에서 측정된 암모니아제거<표 3.3.4>에 의하면 뿌리부분에는 질산화를 유지하기 위해 필요한 만큼의 충분한 양의 산소가 있는 것으로 생각된다.

만약, 캘리포니아주 Santee에서 측정된 암모니아제거가 생물적 질산화에 의한 것이라 한다면 1 g의 암모니아를 질산화시키기 위해서는 5 g의 산소가 필요한 것이 되므로 이를 위해 이용 가능한 것으로 판단되는 산소량을 계산할 수 있다. 그 계산결과는 <표 3.3.5>와 같다.

식물에 따라서 뿌리의 침입깊이가 다르기 때문에 단위표면적당 질산화에 이용가능한 산소량은 2.1~5.7 g/m<sup>2</sup>·d로 서로 간에 차이가 있다. 여기에서의 산소량은 기존의 추정치의 범위(5~45 g/m<sup>2</sup>·d)에서는 가장 낮은 수준이다. 그러나 각 식물의 실제의 뿌리부분의 체적으로 표시한 경우 이용가능한 산소량은 식물 중에 관계없이 거의 동일하다(평균 7.5 g/m<sup>2</sup>·d). 이것은 적어도 이들 3종류에 대해서는 질산화에 이용가능한 공급 산소량은 거의 같기 때문에 질산화속도는 SFS습지에 존재하는 뿌리부분의 깊이에 의존한다는 것을 의미하고 있다. 식 (2-27)은 그 관계를 나타내고 있다.

<표 3.3.5> 습지에 출현한 식물에 의해 공급된 최대산소량

식생	뿌리 깊이*	공급가능 산소량	
		[g/m <sup>2</sup> ·d]**	[g/m <sup>2</sup> ·d]***
Scirpus (골풀)	0.76	7.5	5.7
Phragmites (갈대)	0.60	8.0	4.8
Typha (부들)	0.30	7.0	2.1
평균		7.5	

\* 모래자갈여재 전체의 깊이는 0.76 m

\*\* 측정된 뿌리 부분의 단위체적당 이용가능한 산소량

\*\*\* 0.76 m 깊이의 습지에서 단위표면적당 이용가능한 산소량

자료 : Natural systems for waste management and treatment

(Sherwood C. Reed, et al., 1995)

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922(rz)^{2.6077} \quad (2-27)$$

여기서,  $K_{NH}$  : 20°C에서의 질산화속도계수 [d<sup>-1</sup>]

$rz$  : 뿌리부분이 차지하는 SF습지의 깊이 비율(0~1로 나타내는 비율)

$K_{NH}$ 는 뿌리부분이 완전히 발달되어 있을 때에는 0.4107, 식물이 전혀 없는 경우는 0.01854가 된다. 이것은 U.S. EPA에서 업무용으로 평가한 SFS습지에서 관측된 값과 일치한다. 이 속도계수는 별도로 Bavor 등의 설계모델에서 확인되었다. 이 모델은 식 (2-28)과 같은 형태에서 속도계수는 식물의 뿌리가 습지 깊이의 50~60%를 차지하고 있는 자갈모래 습지 시스템에서 20°C에서 0.107d<sup>-1</sup>로 되어있다.

기초가 되는 속도계수  $K_{NH}$ 를 결정하면 식 (2-28), (2-29)을 이용해서 SFS습지에 있어서 질산화에 의한 암모니아제거를 계산할 수 있다.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t) \quad (2-28)$$

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T y n} \quad (2-29)$$

여기서,  $A_s$ : SFS습지의 면적 [m<sup>2</sup>]

$C_e$  : 유출 암모니아농도 [mg/L]

$C_o$  : 유입 암모니아농도 [mg/L]

$K_T$  : 온도에 의존하는 속도정수 [d<sup>-1</sup>]

$n$  : 습지의 공극률

$t$  : 체류시간(HRT) [d]

$y$  : 습지의 수심 [m]

$Q$  : 습지를 흐르는 유량 [m<sup>3</sup>/d] =  $Q = (Q_{in} + Q_{out})/2$

속도정수  $K_T$ 의 온도의존성은 다음과 같다.

$$0^\circ\text{C에서} : K_0 = 0 d^{-1} \quad (2-30)$$

$$1^\circ\text{C에서} : K_T = K_{10} (1.15)^{T-10} d^{-1} \quad (2-31)$$

$$1^\circ\text{C 이상에서} : K_T = K_{NH} (1.048)^{T-20} d^{-1} \quad (2-32)$$

온도에 관계없이 우선 식 (3-27)을 계산하여  $K_{NH}$ 값을 결정해야 한다. 0°C부터 1°C 사이에서는 보간법으로 구한다.

20 mm 이하의 가는 모래자갈을 이용한 비교적 얇은 (0.3 m 보다 얇음) 시스템을 제외하고는 뿌리가 자동적으로 습지전체적을 차지한다고 가정할 수는 없다. 0.6 m 정도의 깊이의 습지에서는 완전히 뿌리를 침입시키기 위해 전술한 특별한 대책이 필요하다. 만약 이 대책을 시행하지 않는 경우는 실측결과가 없는 한 뿌리부분은 습지깊이의 50% 이상을 차지하

지 않는 것으로 가정하는 것이 타당하다. 또한 많은 운전시스템의 실측결과에 의하면 습지의 여재로서 큰 규격의 자갈(50 mm 이상)을 선택한 경우에 생기는 큰 공극에는 식물의 뿌리가 깊이 침투한다고 생각하지 않는 것이 좋다.

뿌리부분이 완전히 발달한 상태에서 여름에 엄격한 암모니아 기준을 만족하기 위해서는 식 (2-29)에서는 보통 HRT 6~8일이 필요하고, 겨울철 낮은 온도에서는 더욱 긴 기간이 필요하다.

#### 나) 탈질

식 (2-27)~(2-32)는 암모니아로부터 질산염으로의 변화만을 고려하여 이 변화량에 대해 필요한 면적을 예측하기 위한 것이다. 계획의 필요조건이 질소제거인 경우 탈질에 필요한 조건을 고려해서 습지면적을 구해야 한다. 일반적으로 SFS습지에서 생산된 대부분의 질산염은 질산화를 위한 장소에서 탄소원을 추가하지 않고 탈질되어 제거된다. SFS습지가 생물적 반응을 일으킬 수 있는 면적은 넓지만 탄소이용가능성이 탈질을 제한하기 때문에 SFS습지와 FWS습지의 능력은 비슷한 것으로 생각된다. 탈질에 의한 질산염 제거를 예측하기 위해 장려하는 설계모델은 식 (2-33)과 (2-34)와 같다.

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \quad (2-33)$$

$$A_s = \frac{Q \ln(C_0/C_e)}{K_T y n} \quad (2-34)$$

여기서,  $A_s$ : SFS습지의 면적 [ $m^2$ ]

$C_e$ : 유출 질산염농도 [mg/L]

$C_0$ : 유입 질산염농도 [mg/L]

$K_T$ : 온도에 의존하는 속도정수 [ $0^\circ C$ 에서  $0 d^{-1}$ ,  $1^\circ C$  이상에서  $1000(1.15)^{T-20} d^{-1}$ ]

$n$ : 습지의 공극률

$t$ : 체류시간(HRT) [d]

$y$ : 습지의 수심 [m]

$Q$ : 습지를 흐르는 유량 [ $m^3/d$ ] =  $Q = (Q_{in} + Q_{out})/2$

식 (2-33), (2-34)에 이용되고 있는 유입질산염농도( $C_0$ )는 식 (2-28)에서 구한 유입과 유출 암모니아 농도의 차이이다. 식 (2-28)로 SFS습지에서 질산화 후의 잔류 암모니아 농도를 계산할 수 있으므로 그 차이 ( $C_0 - C_e$ )가 질산염으로서 이용 가능한 것으로 가정

할 수 있다. 0℃와 1℃사이의 탈질속도는 보간법으로 구할 수 있다. 실제로 이들 수온에서는 탈질이 거의 일어나지 않는다. 식 (2-33), (2-34)는 습지에 존재하는 질산염에 대해서만 적용이 가능하다는 것을 염두에 두어야 한다.

SFS습지는 보통 혐기적이지만 뿌리 및 지하경의 표면에는 호기적 부분도 존재하기 때문에 한 개의 반응조에서 질산화와 탈질을 동시에 진행시킬 수 있다. 이 탈질에 필요한 면적은 식 (2-29)에서 구한 질산화에 필요한 면적에 추가해야 하는 것은 아니다. 이 면적은 미처리 오수중의 질산염 농도와 수온에 의존하지만 식 (2-29)로부터 구한 결과와 같거나 그 이하이다.

#### 다) 전질소

탈질이 요구되는 경우는 대부분 전질소(T-N)에 대한 배수기준이 있는 경우이다. SFS습지에서의 T-N은 (2-28)과 (2-33)에서 구한 값의 합이 된다. 어떤 지정된 방류수 T-N농도를 만족하는데 필요한 면적은 식 (2-29), (2-33)을 이용하여 반복 계산하여 구할 수 있다.

① 잔류암모니아농도( $C_e$ )를 가정하고, 질산화에 필요한 면적을 식 (2-29)로 구하고 그 시스템에 대한 HRT를 구한다.

②  $C_o - C_e$ 를 식 (2-29)으로부터 구한 질산염량이라 가정하고, 이 값을 식 (3-33)의 유입농도( $C_o$ )로 이용하여 방류수 농도를 구한다.

③ 방류 T-N농도는 식 (2-28)과 (2-33)에서 구해진  $C_e$ 값의 합계이다. 만약 이 값이 요구 T-N농도를 만족하지 않는 경우 다시 계산을 반복해야 한다.

이상의 질소제거용 장려모델은 한정된 자료를 이용하여 작성되었기 때문에 사용할 때에는 주의해야 한다. 이들 모델은 SFS습지법과 FWS습지법의 안전한 처리능력을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 엄격한 질소기준이 적용되는 대규모시설을 계획할 때에는 설계기준을 작성하기 위해 소규모 실험을 실시할 것을 권한다.

#### 6) 인의 제거를 위한 설계

FWS습지와 SFS습지 모두 인의 제거에 대해서는 그다지 기대할 수 없다. 운전개시 초기년도 전후에 뛰어난 인제거 효과를 나타내는 경우가 많다. 특히 FWS습지에서는 인이 습지 바닥의 토양입자 표면에 흡착되어 높은 효과를 보인다. 그러나 장기간에 걸친 인의 제거는 퇴적물의 장기간에 걸친 집적에 의해서만 가능하다. 현탁물질의 침강, 화학적 침전, 식생으로부터 유래된 노후화된 난분해성 유기물의 공급에 의해 퇴적이 일어난다. 이 퇴적물은 이탄으로서 FWS습지의 수층에 또한 SFS습지 속 및 표면위에 집적된다. 인은 이 퇴적물중에 철, 알루미늄 혹은 칼슘과의 침전물로서 유지된다.

인은 보통 대부분의 도시배수 중에 4~15 mg/L 정도 함유되어 있다. 습지방법의 일반적인 유속과 수량부하에서는 유입인의 30~60%를 제거할 수 있다. 인 농도의 배수기준이 매우 낮을 경우 (1 mg/L 이하) 전처리 또는 후처리 단계에서 인 제거에 대하여 검토해야 한다.

퇴적이 인 제거기구의 대부분이기 때문에 제거율은 습지면적과 유입수 중의 인 농도의 함수가 된다. 많은 연구자들이 이 목적을 달성하기 위하여 면적에 의존하는 1차 모델식의 일반형에 대하여 합의가 도출되고 있다. 그러나 이 모델 중 속도정수의 크기는 아직 합의가 이루어지지 않았다. 이 모델에 기초하여 플로리다주 Everglades에 유입하는 오수로부터 인을 제거하기 위하여 16,000 ha의 FWS 인공습지가 제안되었다.

North American Data Base의 해석에 기초해서 Kadlec는 인공습지 시스템에서 인의 제거를 예측하기 위하여 10 m/year를 속도정수로 제안하고 있다. 10 m/year는 식 (2-35)에 사용하는 경우 평균 일속도 2.74 cm/d와 같다.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp \frac{-K_p}{HLR} \quad (2-35)$$

여기서,  $C_e$  : 유출 인 농도 [mg/L]

$C_o$  : 유입 인 농도 [mg/L]

$K_p$  : 2.74 cm/d

HLR : 연평균 수량부하 [cm/d]

$$A_s = \frac{bQ \ln(C_o/C_e)}{K_p} \quad (2-36)$$

여기서,  $A_s$  : 습지면적 [ $m^2$ ]

$b$  : 100 cm/m로 변환계수

$Q$  : 습지를 흐르는 평균유량 [ $m^3/d$ ] =  $(Q_{in} + Q_{out})/2$

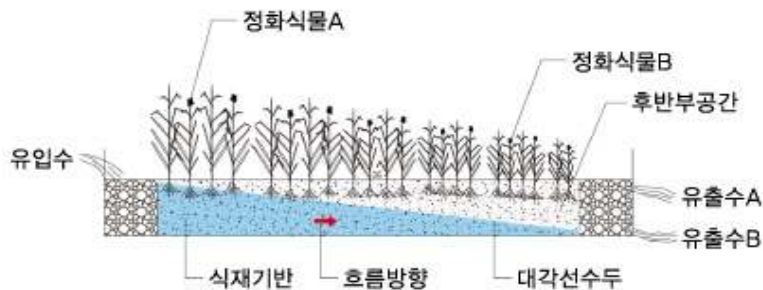
모델은 원래 FWS습지 데이터로부터 작성되었지만, SFS습지 및 FWS습지의 연평균 인 제거량을 예측하는데 이용할 수 있다. 왜냐하면 이 모델은 습지표면의 면적에 의존하는 것이며, 여재표면이나 유수부의 식물 litter에서 일어나는 생물반응이 아니기 때문이다.

## 나. 고효율 인공습지 시스템 개념 도출

### 1) TRIZ기법 적용

농업용 저수지의 수질개선을 위하여 유량이 많고 농도가 낮은 용수의 수질개선에 적합한 지표흐름형 인공습지가 도입되고 있다. 지표흐름형 인공습지는 유지관리가 용이하고, 농촌지역의 자연과 조화를 이루는 효과적인 수질개선공법이다. 그러나 지표흐름형 인공습지는 많은 면적을 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 반면 지하흐름형 인공습지는 지표흐름 인공습지에 비해 정화효율이 높고, 소요면적이 넓지 않다는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 정화효율이 높고 이용할 수 있는 부지가 넓지 않은 지역에 적용할 수 있는 지하흐름형 인공습지를 도입하여 정화효율을 분석하고자 한다. <그림 3.3.4> 같은 기존의 지하흐름형 인공습지는 ① 침투 수두 손실로 유량증가시 월류현상이 발생할 수 있고, ② 전반부와 후반부에 식생이 일정하게 분포하지 않고 식생 편중현상이 발생할 수 있으며, ③ 대각선 수두형성으로 후반부 여재의 미사용 공간이 존재할 뿐만 아니라, ④ 공간낭비를 위해 <그림 3.3.4>의 유출수A 지점으로 유출시킬 경우 지표흐름형 인공습지화되어 정화효율이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점 및 <그림 3.3.4>와 같은 모형을 이용한 수질정화효율 실험을 통하여 도출된 문제점을 개선하기 위한 방안을 도출하기 위하여 “TRIZ기법”을 적용하였다.



<그림 3.3.4> 기존의 지하흐름형 인공습지 개요도

TRIZ기법이란 주어진 문제의 가장 이상적인 결과를 얻어내는데 관건이 되는 모순을 찾아내고 이를 극복함으로써 혁신적인 해결방안을 얻을 수 있는 방법론이다. 1946년 러시아 해군의 특허부서에서 일했던 알트슐러는 특허를 분석하는 과정에서 ‘화학’분야의 특정 특허와 ‘기계’분야의 특정 특허들이 다른 전공분야 임에도 불구하고 유사한 문제의 성격을 가지고 있고, 동일한 문제 해결 기법을 사용했다는 것을 발견했다. 전공의 영역을 넘어 공통의 표준 문제와 표준 해법이 존재한다는 것을 깨닫고 TRIZ를 정리하게 된다.

이와 같이 TRIZ는 25만 건의 러시아 특허 중에서 우수한 4만 건의 특허를 분석하여 도출된 문제 해결 원리로 처음엔 기술 분야에서만 이용되었으나 현재에는 경영, 사회, 소프트



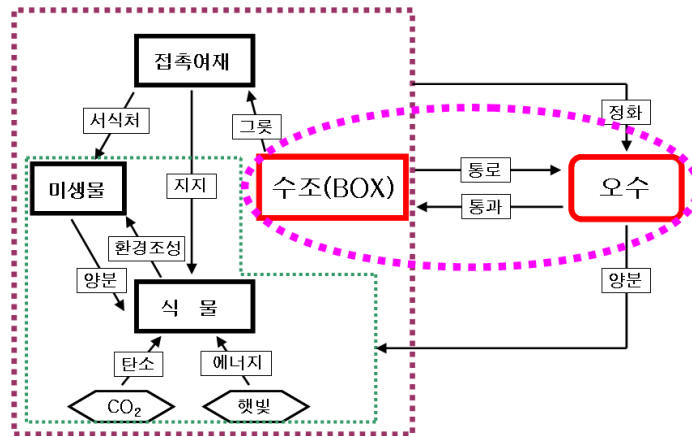
웨어 등 비 기술 분야에서도 이용되고 있다. 뿐만 아니라 처음에는 러시아에서만 이용되었지만 1990년대 이후 지금은 전 세계적으로 이용되고 있다.

TRIZ기법을 적용하기 앞서 <그림 3.3.4>의 모형실험에서 TSS와 TN의 정화효율이 낮게 나타났는데 그 이유와 해결 방안으로서는 다음과 같은 것을 생각할 수 있었다. 첫째, 실험 기간이 비교적 짧아 접촉여재에 미생물이 충분히 부착성장하지 못한 것이 하나의 원인으로 추정되며 이는 장기간 운영하면 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 둘째,  $\text{NH}_4^+$ 는 잘 흡착되거나 오수가 정지 상태이고 포기를 해주지 않았기 때문에 호기성상태가 확보되지 않아 유기성 질소가 암모니아성질소로 충분히 분해되지 못한 것으로 추정되며, 이를 해결하기 위해서는 DO가 충분히 공급되도록 시스템을 구성할 필요가 있다. 셋째, 오수가 정지 상태이기 때문에 여과작용이 발휘되지 못했으며, 이는 물이 잘 흐르도록 시스템을 구성하면 해결될 것으로 판단된다. 넷째, 식물에 의한 질소성분의 흡수제거 기능이 발휘되지 못했으므로 식재를 하면 영양염류의 제거율이 높아질 것으로 판단된다.

이러한 문제점 및 해결방안을 토대로 TRIZ기법을 적용하여 지하흐름형 인공습지의 정화 효율 향상방안을 도출하고자 한다.

#### 가) 시스템 기능 분석

TRIZ기법을 적용하기 위하여 모형실험수조의 시스템을 분석하였다. 모형실험에서 수조는 접촉여재를 담아주는 그릇 역할을 하고, 오수에 대해서는 통로역할을 한다. 수조에 담겨진 접촉여재는 식물을 지지하는 기반재의 역할을 하고, 미생물에 대해서는 미생물이 표면에 부착성장할 수 있는 서식처를 제공하며, 오수에 대해서는 오수속의 오염물질을 흡착하는 역할을 한다. 접촉여재 표면에 부착 성장하는 미생물은 오수 중의 오염물질을 분해하는 핵심적인 역할을 한다. 식물은 미생물이 무기물의 형태로 분해한 오염물질을 양분으로 흡수하여 성장함으로써 오염물질을 제거하는 기능을 하고, 미생물에 대해서는 기공을 통하여 뿌리부분에 산소를 공급함으로써 서식환경을 조성하는 역할을 한다. 이와 같이 접촉여재, 미생물, 식물이 서로 관련을 갖으며 오염물질을 분해 제거하는 정화시스템을 구성한다. 이러한 정화시스템의 정화효율을 높이기 위하여 일차적으로 비표면적이 넓은 다공성의 고효율 인공습지를 개발하였다. 한편 미생물과 식물의 활동은 자연환경에서 자연스럽게 이루어지는 작용인데, 이를 인위적으로 활성화시키는 데에는 제약이 많이 있기 때문에 본 연구에서는 단순히 오수의 통로역할만을 하는 수조의 기능을 향상시키는 것에 착안하여 수질정화효율 향상방안을 도출하고자 하였다.



<그림 3.3.5> 인공습지의 시스템 분석

나) 이상 해결책 가정

수조 안에서의 수질정화기능을 개선하기 위한 이상 해결책을 가정하면, ① 총질소(TN)의 제거율을 높이기 위해서는 질산화와 탈질작용이 잘 발휘되어야 하며, 이를 위해서는 호기성과 혐기성 조건이 형성되어야 한다. ② 총부유물질(TSS)의 제거율을 높이기 위해서는 여과작용이 충분히 발휘되어야 하며, 이를 위해서는 물이 잘 흘러야 한다. ③ 위 2가지 기능이 수조 안에서 일어나야 한다. ④ 또한 비용이 들지 않아야 하며, 이를 위해서는 추가 설비를 도입하지 않아야 한다. 등을 들 수 있다.

다) 모순관계와 해결책

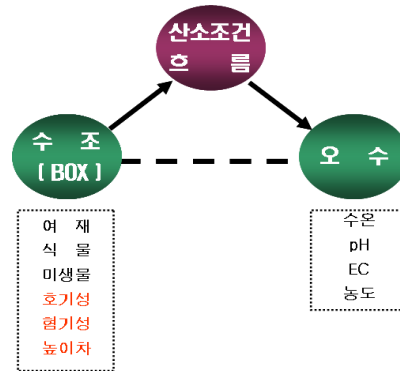
문제를 해결하기 위하여 모순관계를 설정하고, 이를 해결하기 위한 해결책을 찾아야 한다. 우선 TN을 제거하기 위해서는 질산화와 탈질이 이루어 져야하는데, “질산화를 위해서는 산소가 있어야 하고 탈질을 위해서는 산소가 없어야 한다”라는 모순관계가 성립한다. 이를 해결하기 위해 “산소가 공급되는 지표부분과 산소가 공급되지 않는 깊은 부분으로 공간을 분리”한다면 가능할 것이다.

두 번째로 TSS를 제거하기 위해서는 여과작용이 충분히 발휘되어야 하는데, “여과를 위해서는 물이 잘 흐르고 또한 가능하면 유하거리가 길어야 하나 수조에서는 물이 흐르지 않고 유하거리도 짧은 모순관계”를 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서 공간적으로 분리되어 있는 유입부와 유출부에 대하여 유입부는 높고 유출부는 낮게 설치하여 수두차이를 두고, 물이 상하, 또는 좌우로 흐르게 하여 유하거리를 길게 한다면 문제를 해결할 수 있다.

라) 상호작용

위와 같은 조건을 만족한다면 수조안에서 습지의 자연현상인 여재, 식물, 미생물에 의한

정화작용에 의하여 호기성과 혐기성 부분이 조성되고, 높이차가 생기면 흐름조건이 개선되며, 인공습지의 깊이를 깊게 하여 오수가 깊은 부분과 얇은 부분을 번갈아가면서 통과하도록 유도하면 산소조건이 개선되어 오수의 수질이 정화되는 상호관계를 형성하게 된다.



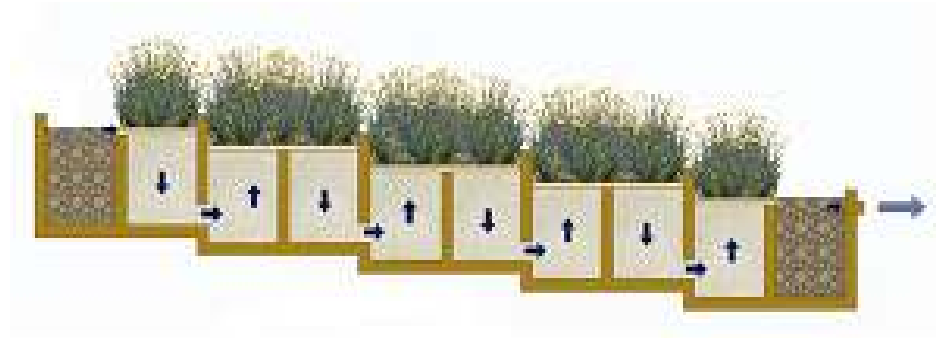
<그림 3.3.6> 수조와 물의 상호작용

마) 문제의 해결책

질소의 제거율을 높이기 위해서는 접촉여재에 의한 흡착에 대하여 질산화와 탈질이 잘 이루어질 수 있도록 호기성 부분과 혐기성 부분이 형성되어야 한다. TN의 경우 본 연구에서 적용한 혼합여재는  $\text{NH}_4^+$ 의 흡착효율이 높기 때문에 호기성 부분이 조성된다면 유기성 질소가  $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 같은 무기성질소로 변환되어  $\text{NH}_4^+$ 가 흡착되기 때문에 질소제거효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 호기성 상태에서 질산화가 충분히 이루어진 후 혐기성 상태가 조성되면 탈질화에 의해 질소의 제거효율이 더욱 높아질 것으로 판단된다. 이와 같은 호기성조건과 혐기성조건을 연속적으로 조성될 수 있도록 하기 위하여 <그림 3.3.7>와 같은 상하흐름형 인공습지를 구상하였다. 그림과 같이 오수가 인공습지의 표면을 흐를 때에는 대기와의 접촉에 의한 재폭기가 이루어질 뿐만 아니라 식물의 기공과 뿌리를 통하여 근권에 산소가 공급되기 때문에 표면부에는 호기성상태가 유지되어 질산화가 이루어질 수 있는 조건이 형성된다. 다음에 바닥 쪽으로 내려가면 산소의 공급이 없어 혐기성상태가 유지되기 때문에 탈질작용이 일어날 수 있는 조건이 형성된다. 이와 같이 인공습지 내에서 물이 상하로 이동하면서 흐르기 때문에 하나의 습지 내에 호기성조건과 혐기성조건이 조성되어 질소의 제거효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

또한 SS를 제거하기 위해서는 물이 잘 흘러야하고, 유하거리가 길어야 한다. 이를 위해서 <그림 3.3.7>와 같이 유입부와 유출부의 높이를 다르게 하면 된다. 즉, 유입부의 높이를 유출부의 높이보다 높게 하면 물이 유하한다. 그러나 바닥을 경사지게 하는 경우 바닥기울기를 주는데 한계가 있고, 적은 양의 물에 대해서도 월류현상이 발생하는 등의 단점이 발견되어 그림과 같이 계단형으로 구성하여 단계적으로 낮아지도록 하였다. 또한 물이 상하로

흐르도록 함으로서 접촉여재와 물이 접촉하는 길이를 길게 함으로서 여과효율을 높일 수 있는 효과도 기대할 수 있다.



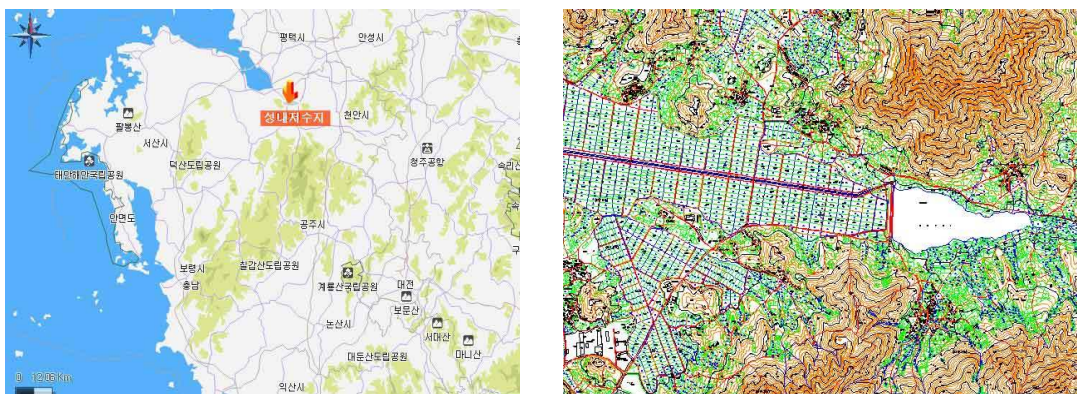
<그림 3.3.7> 계단형 상하흐름 인공습지 모식도

본 연구에서는 <그림 3.3.7>와 같은 계단형 상하흐름 인공습지를 도입하고, 고효율 접촉 여재를 충전하여 정화효율을 확인하였다.

나. 현장시험연구 시설의 설치

농촌지역에서 발생하는 비점오염물질을 처리하기 위한 정화시설로서 <그림 16>과 같은 계단형 상하흐름 인공습지를 설치하고 정화효율을 분석하였다.

인공습지는 충남 아산시 영인면 성내리에 위치하고 있는 성내저수지를 선정하였다. 유입 경로가 단순하고 시설물 설치에 용이하며 오염하천의 주 오염원이 연구목적과 일치하며 현장에 적용하기 유리하여 상류의 하천 유입부 홍만수면 부지에 인공습지를 설치하였다.



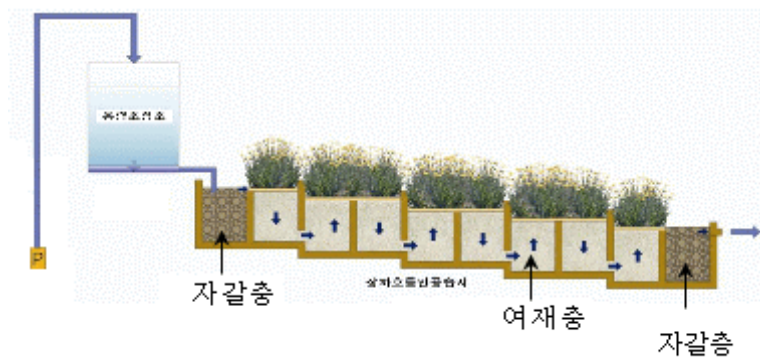
<그림 3.3.8> 고효율 인공습지 시험연구시설 설치지역 및 위치

길이 16 m × 폭 2.6 m × 깊이 1.0 m 규격의 인공습지를 2계열 설치하였다. 인공습지에는 2005년도에 개발한 여재를 충전하고, 상부에는 노랑꽃창포를 식재하였다. 2계열의 차이점

은 인공습지 끝단에 1계열에는 난석을 충전(인공습지 1)하고, 다른 1계열에는 자갈을 충전(인공습지 2)하였다.

인공습지 유입수는 저수지 유입부의 물을 유량조정조에 양수하고, 유량조정조에서 수압에 의해 인공습지로 자연유하되도록 하였다. 인공습지를 통과한 물은 저수지로 유입되도록 하였다. 인공습지에 유입되는 물의 유량은 유량조정조에 부착한 밸브로 조절하였다. 유입량은 인공습지1 및 2 모두 각각 평균 208 m<sup>3</sup>/d가 유입되었으며, 이때의 체류시간은 인공습지1, 2가 각각 0.2일 약 5시간이다.

수질조사는 인공습지 유입수, 유출수, 저수지 및 유입 하천수에 대하여 실시하였다.



<그림 3.3.9> 계단형 상하흐름 인공습지 실험시설 개요도 및 전경

조사는 2006~2007년 사이에 총 25회 실시하였다. 현장에서 수온, pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO)를 측정하고, 시료를 채취하여 전처리 후 신속히 실험실로 운반하여 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소(TN), 암모니아성질소(NH<sub>4</sub>-N), 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N), 아질산성질소(NO<sub>2</sub>-N), 총인(TP), 무기태 인산염(PO<sub>4</sub>-P) 등을 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였는데, 각 항목의 분석 방법은 <표 3.3.6>과 같다.

<표 3.3.6> 수질측정 항목 및 분석방법

항 목	측정기기	측정 및 분석방법
수온	휴대용 종합수질측정장비	직접측정법
pH	”	직접측정법
EC	”	직접측정법
DO	”	직접측정법
CODMn	COD Water Bath	산성(KMnO <sub>4</sub> )산화법
T-N	HP 8453	자외선흡광광도법
NO <sub>3</sub> -N	HP 8453	흡광광도법(부르신법)
NO <sub>2</sub> -N	HP 8453	흡광광도법(디아조아법)
NH <sub>4</sub> -N	HP 8453	흡광광도법(인도페놀법)
T-P	HP 8453	아스코르빈산환원법
PO <sub>4</sub> -P	HP 8453	흡광광도법(몰리브덴산법)
SS	유리섬유여지(GF/C), Dry oven	중량법

### 3. 고효율 인공습지 시험연구시설의 수질정화효율

#### 가. 수온

시험기간 중 수온은 <표 3.3.7> 및 <그림 3.3.10>과 같이 유입수의 경우 겨울철 최저 3.4℃에서 여름철 최고 29.0℃에 이르기까지 계절별로 차이가 많았고, 유출수도 3.3~27.5℃로서 계절별로 차이가 많았다. 반면 95% 신뢰수준에서 유입수와 유출수에 대하여 분산분석을 실시한 결과  $p=0.7878$ 로서 동일 조사시기에서는 유입수와 유출수 사이에 유의적인 차이를 보이지 않고 비슷한 수온을 보였다. 본 연구에서는 수온에 따른 인공습지의 정화효율 변화 특성을 살펴보기 위하여 수온을 10℃ 미만, 10~20℃, 20℃보다 큰 경우로 구분하여 정화효율을 비교하였다. 조사기간 중 수온이 10℃ 미만인 경우들의 평균 수온은 8.3℃, 10~20℃인 경우는 평균 18.6℃, 20℃보다 큰 경우의 평균은 25.8℃였다.

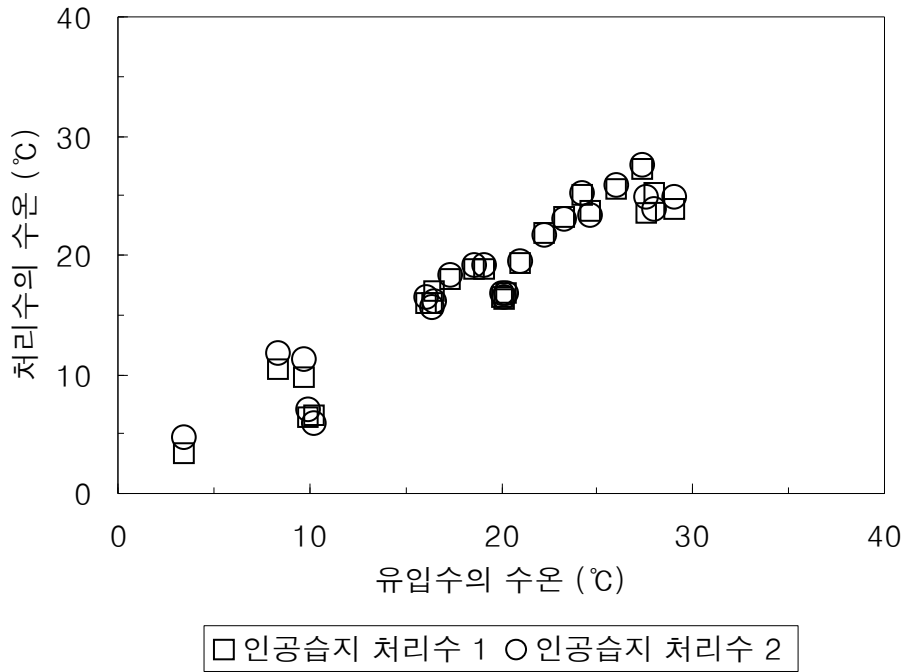
#### 나. pH

pH는 일반적으로 관개수나 토양이 산성일 경우에는 토양 또는 여재 중의 Al, Fe, Mn 등의 유해물질농도가 높아져 작물이나 습지식물의 영양물질흡수에 장애를 주며 인산을 불용화 시킨다. 반면 알칼리성일 경우에는 점토를 분산시키고 토양 물리성을 악화시키며 인산을 불용화한다. 시험기간 중 pH는 <표 3.3.7> 및 <그림 3.3.11>과 같이 인공습지 유입수가 6.4~8.2, 평균 7.3이었고, 인공습지 1 유출수는 6.2~8.0, 평균 7.4, 인공습지 2 유출수는 5.9~9.1, 평균 7.6으로서 유입수에 비해서 유출수에서 다소 높아지는 경향을 보였다. 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.0427$ 로서 유의적인 차이를 보일 정도로 유출수에서 높아지는 경향을 보였다. 그러나 인공습지 유출수는 대부분 농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하고 있으므로 농업용 저수지에 유입되어도 문제는 없을 것으로 판단된다. 유입하천 및 저수지는 각각 평균 7.5, 8.0을 나타내 서로 간에 큰 차이를 보이지 않고 대부분 중성을 나타냈다.

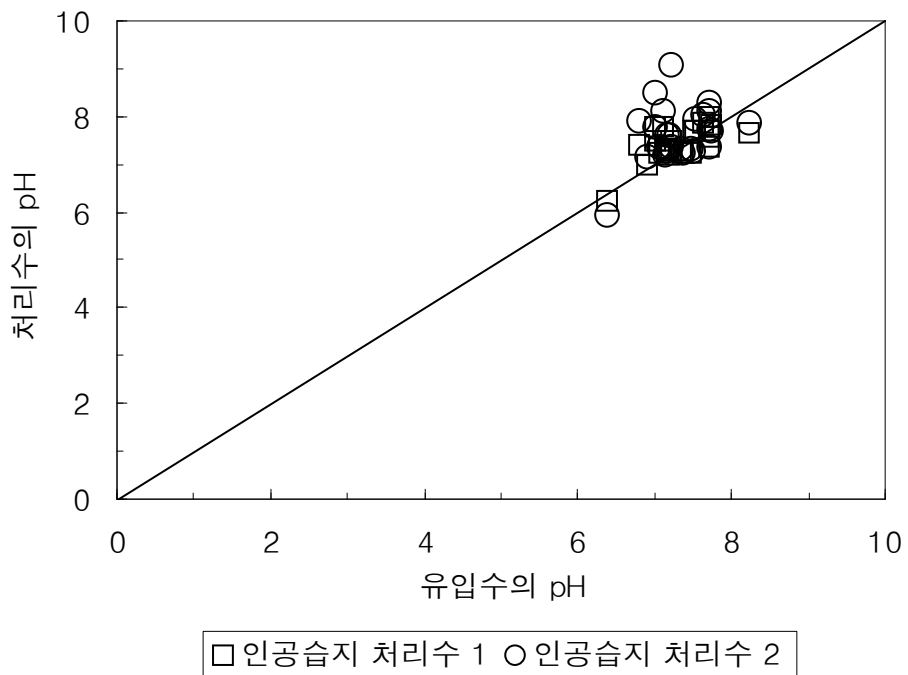
<표 3.3.7> 인공습지 유입수 및 유출수의 수온, pH, EC, DO

항목	지점	평균	최소	최대	표준 편차	수온구간별 평균농도 및 체거율		
						< 10℃	10~20℃	20~30℃
수온 (℃)	유입수	19.1	3.4	29.0	6.9	8.3	18.6	25.8
	인공습지1 처리수	17.9	3.3	27.3	6.6	7.3	17.4	24.4
	인공습지2 처리수	18.1	4.7	27.5	6.4	8.1	17.4	24.5
	유입하천	19.9	9.2	27.5	6.3	10.9	19.2	24.8
	저수지	16.2	1.9	27.8	9.1	7.6	18.7	26.1
pH	유입수	7.3	6.4	8.2	0.4	7.4	7.4	7.2
	인공습지1 처리수	7.4	6.2	8.0	0.4	7.4	7.5	7.5
	인공습지2 처리수	7.6	5.9	9.1	0.6	7.8	7.5	7.8
	유입하천	7.5	6.5	9.8	0.9	-	-	-
	저수지	8.0	7.2	8.9	0.6	-	-	-
EC (μs/cm)	유입수	200.6	110.0	285.0	62.6	258.3	175.0	197.3
	인공습지1 처리수	237.1	131.0	328.0	58.4	267.3	203.0	256.2
	인공습지2 처리수	238.0	130.0	347.0	57.2	267.7	201.8	259.4
	유입하천	182.0	98.0	281.9	53.3	-	-	-
	저수지	134.2	88.0	173.0	33.3	-	-	-
DO (mg/L)	유입수	8.6	3.4	16.4	3.0	13.1	8.4	6.7
	인공습지1 처리수	7.7	4.1	16.5	2.7	10.6	7.9	6.1
	인공습지2 처리수	7.6	3.6	16.4	2.7	10.4	8.2	5.7
	유입하천	8.9	4.9	20.0	4.1	-	-	-
	저수지	7.7	4.7	10.8	2.3	-	-	-





<그림 3.3.10> 인공습지 유입수 및 유출수의 수온

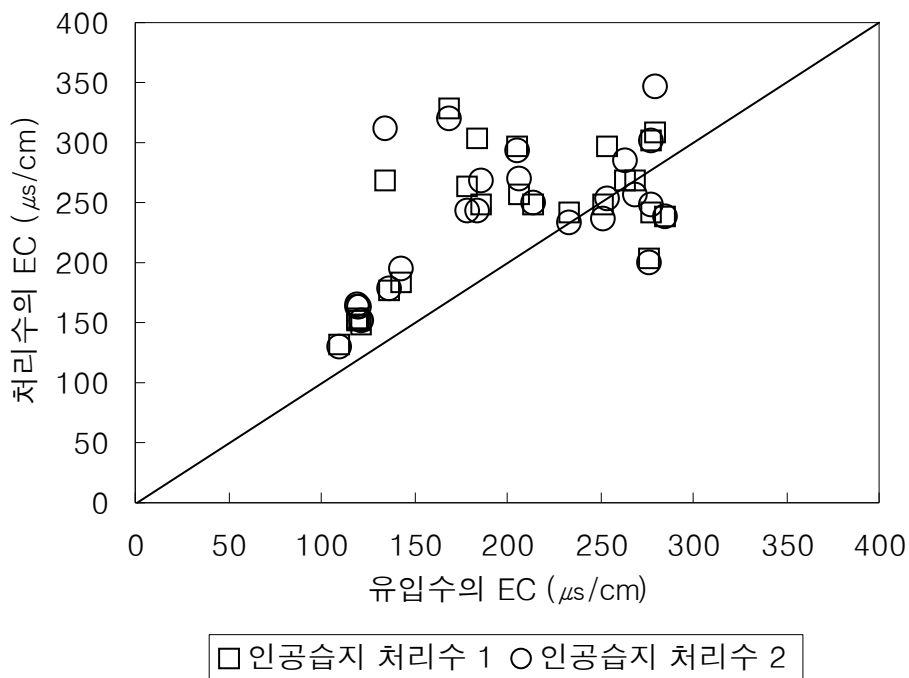


<그림 3.3.11> 인공습지 유입수 및 유출수의 pH

다. 전기전도도(EC)

물의 EC는 물속 도전성 성분(주로 염분)의 지표이다. 관개수나 토양 용액중의 염류농도가

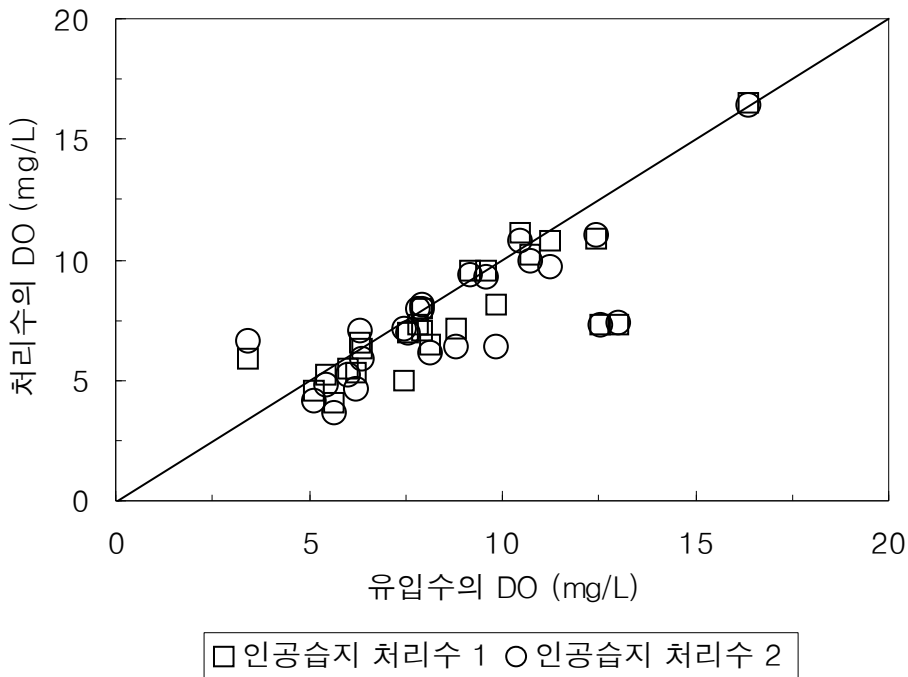
높으면 작물은 농도장해(염해)를 받는다. 농도장해는 뿌리가 접하고 있는 외액의 침투압이 높아짐으로서 생기는 흡수저해로부터 시작된다. 우리나라는 강우량이 많고 관개 필요시기가 제한되는 경우가 많아 관개수중의 염류가 토양에 집적되는 위험은 적으나, 시설재배 등 강우차단 조건에서 관개수 중 염류성분이 토양 표층에 집적되어 문제가 된다. 미국 캘리포니아 대학교 대외 협력국(UCCES)이 개발한 농업용수 수질기준지침에는 700  $\mu\text{s}/\text{cm}$  이하에서는 문제가 없는 것으로, 700~3,000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 에서는 오염우려, 3,000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  이상에서는 작물생육에 큰 영향을 미치는 것으로 분류하고 있다. 시험기간 중 EC는 <표 3.3.7> 및 <그림 3.3.12>와 같이 유입수는 110.0~285.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 200.6  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 조사시기에 관계없이 700  $\mu\text{s}/\text{cm}$  이하를 나타냈다. 인공습지 처리수는 인공습지1 처리수가 131.0~328.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 237.1  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이고, 인공습지2 처리수가 130.0~347.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 평균 238.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 나타내 유입수에 비해 다소 높아지는 경향을 보였으나 모두 작물에 영향을 미치는 기준인 700.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$  이하를 나타내고 있으므로 인공습지 처리수가 농업용 저수지로 유입되어 농업용수로서 재이용되어도 문제는 없는 것으로 나타났다. 인공습지1 및 2 처리수에 대하여 95% 신뢰 수준에서 분산분석한 결과  $p=0.9575$ 로서 서로 간에 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 수온에 따른 인공습지 처리수의 EC는 수온이 10  $^{\circ}\text{C}$  미만인 경우는 평균 267.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 10~20  $^{\circ}\text{C}$ 에서는 202.4  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 20  $^{\circ}\text{C}$ 보다 높은 경우는 257.8  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 수온변화에 따라 일정한 경향을 보이지는 않았다.



<그림 3.3.12> 인공습지 유입수 및 유출수의 EC

라. 용존산소(DO)

인공습지 유입수의 DO는 <표 3.3.7>와 같이 3.4~16.4 mg/L, 평균 8.6 mg/L였는데, 인공습지1 처리수는 4.1~16.5 mg/L, 평균 7.7 mg/L로 낮아졌고, 인공습지2 유출수는 3.6~16.4 mg/L, 평균 7.6 mg/L로 낮아졌다. 또한 <그림 3.3.13>과 같이 대부분의 조사시기에 유입수에 비해서 유출수의 DO가 낮아지는 경향을 보였다. 이는 유입수 중의 오염물질을 분해하는 과정에서 미생물이 산소를 소모했기 때문이다. 그러나 95% 신뢰수준에서 분산분석을 실시한 결과  $p=0.9987$ 로서 유입수와 처리수간에는 유의적인 차이가 없었다. 이와 같이 오염물질의 분해과정에서 DO가 소모됨에도 불구하고 인공습지 유출수가 높은 DO농도를 유지한 것은 유입수의 오염물질 농도가 그다지 높지 않아 오염물질을 분해하는데 DO소모가 적을 뿐만 아니라 인공습지 표면부분을 흐를 때 대기 중으로 부터의 재폭기와 식물에 의해 산소가 충분히 공급되기 때문이다.



<그림 3.3.13> 인공습지 유입수 및 유출수의 DO

<그림 3.3.13>과 같이 유입수에 비해 인공습지 처리수의 DO가 낮아지는 경향을 보였으나, 처리수는 모두 DO가 농업용수 수질기준인 2 mg/L보다 크게 높기 때문에 농업용수로 사용하여도 문제는 없다. 또한 인공습지 유출수의 평균농도가 유입하천 및 저수지의 평균 DO농도인 8.9 및 7.7 mg/L와 비슷하기 때문에 인공습지 처리수가 저수지나 하천에 유입되어도 DO감소에 따른 문제는 발생하지 않을 것이다. 인공습지1 및 2 처리수 사이에 95% 신

퇴수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.9076$ 으로서 유의적인 차이를 보이지 않았다.

수온에 따른 처리수의 DO 농도는 <표 3.3.7>와 같이 수온이 10 °C 미만인 경우 예는 평균 10.5 mg/L, 10~20 °C에서는 8.0 mg/L, 20 °C보다 높은 경우에는 5.9 mg/L를 나타내 수온이 낮아질수록 DO는 높아지는 일반적인 경향을 보였다.

#### 마. 부유고형물질(SS)

SS는 <표 3.3.8>와 같이 인공습지 유입수가 0.8~317.0 mg/L, 평균 43.0 mg/L로서 대부분 호소의 농업용수 수질기준인 15 mg/L보다 높았다. 반면 인공습지1 처리수는 0.0~2.8 mg/L, 평균 1.0 mg/L로 낮아지고, 인공습지2 처리수는 0.0~11.2 mg/L, 평균 1.5 mg/L로 낮아져 평균 82.2% 및 84.2%의 높은 제거율을 보였다. 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과도  $p=0.0001$ 로서 유입수와 처리수간에 유의적인 차이를 보일 정도로 처리수의 농도가 낮아졌다. <그림 3.3.14>과 같이 모든 조사시기에 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮고, 모두 농업용수 수질기준을 만족하였다. 지하흐름형 인공습지의 가장 큰 정화기작 중 하나가 접촉여재에 의한 접촉침전 등의 여과효과인데 본 연구시설에서도 이와 같은 여과효과가 잘 발휘되고 있었다.

인공습지 1 및 2 처리수 사이에 차이가 있는지를 살펴보기 위하여 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과  $p=0.2980$ 으로서 서로 간에 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 또한 유입수의 표준편차는 64.4인데 반하여 인공습지1 및 2 처리수의 표준편차는 0.8, 2.4로서 유입수에 비해 안정인 SS농도를 유지하여 인공습지가 안정적으로 SS를 제거해 주고 있는 것을 알 수 있었다.

조사기간 동안 제거된 SS량은 인공습지1에서 0.0~114,566.4 g-SS/day, 평균 35,791.6 g-SS/day이고, 인공습지2에서 0.0~114,015.6 g-SS/day, 평균 35,625.5 g-SS/day으로서 2계열의 인공습지에서 총 71,417.0 g-SS/day이 제거되었다. 이는 실험을 위하여 유량을 다양하게 변화시키면서 수행한 결과이며, 최대 제거량인 114,566.4 g-SS/day인 경우에도 유출수는 1.6 mg/L 이하로서 모두 농업용수 수질기준 이하를 유지하고 있으므로 본 시설에서 총 228,582 g-SS/day까지 제거가 가능한 것으로 판단된다.

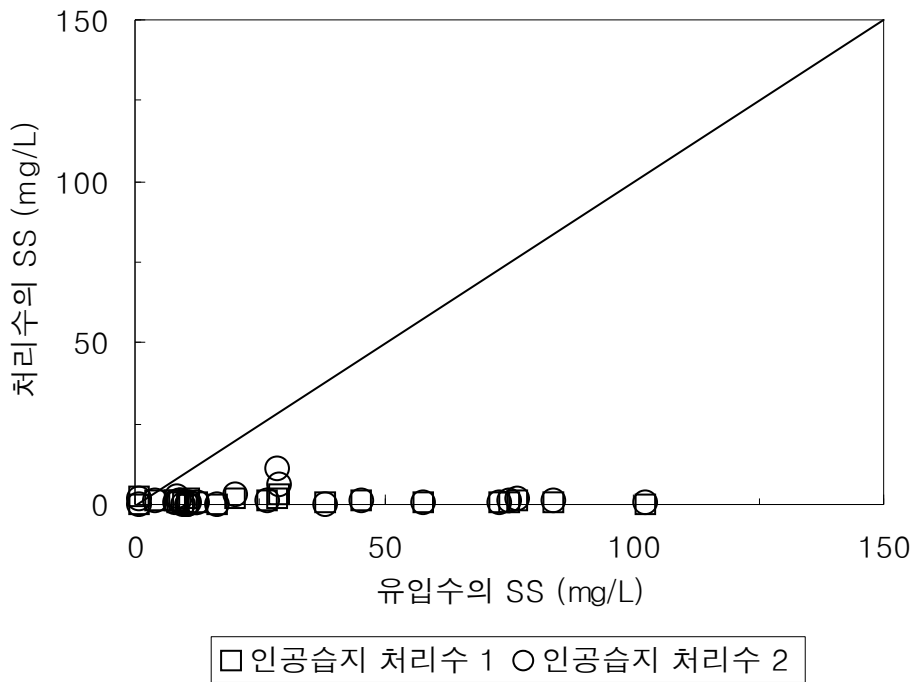
유입하천의 평균 SS농도는 46.3 mg/L이고, 저수지는 평균 14.5 mg/L로서 인공습지 처리수보다 높기 때문에 인공습지 처리수가 유입되어도 하천이나 저수지의 수질을 악화시키지 않고 오히려 회석에 의해 개선해 주는 효과를 기대할 수 있다.

수온에 따른 처리수의 SS는 수온이 10°C 미만인 구간에서는 1.2 mg/L, 10~20 °C 구간에서는 0.8 mg/L, 20 °C보다 높은 구간에서는 1.7 mg/L로서 수온이 높아짐에 따라 처리수의 평균 SS가 높아지기도 하고 낮아지기도 하여 일정한 경향을 보이지는 않았다. 일반적으로 SS제거는 물리적인 여과작용이기 때문에 수온과는 상관성이 낮으며, 이러한 물리적인 여과

작용은 BOD, 질소제거에 비해 상당히 빠르기 때문에 습지의 크기를 결정할 때 SS는 제한 인자가 되지는 않는다.

<표 3.3.8> 인공습지 유입수 및 유출수의 SS, BOD, COD

항목	지점	평균	최소	최대	표준 편차	수온구간별 평균농도 및 제거율			
						< 10℃	10~20℃	20~30℃	
SS (mg/L)	유입수	43.0	0.8	317.0	64.4	5.4	42.9	61.8	
	인공습지1 처리수	1.0	0.0	2.8	0.8	1.1	0.7	1.2	
	인공습지2 처리수	1.5	0.0	11.2	2.4	1.2	0.9	2.2	
	유입하천	46.3	8.4	185.0	51.7	-	-	-	
	저수지	14.5	6.8	29.6	6.9	-	-	-	
	제거율 (%)	습지1	82.2	-200.0	100.0	59.2	30.3	97.2	93.1
		습지2	84.2	-100.0	100.0	39.9	47.1	97.2	89.8
BOD (mg/L)	유입수	6.5	2.3	12.2	3.0	7.8	6.8	5.9	
	인공습지1 처리수	1.2	0.2	9.6	2.1	5.2	0.9	0.5	
	인공습지2 처리수	1.2	0.1	9.8	2.2	5.3	0.8	0.5	
	유입하천	4.3	0.7	8.5	3.3	-	-	-	
	저수지	5.5	4.8	6.7	0.9	-	-	-	
	제거율 (%)	습지1	80.9	-41.9	97.9	31.3	24.3	85.5	90.4
		습지2	82.6	-44.0	99.0	32.2	23.1	87.6	92.5
COD (mg/L)	유입수	9.9	3.6	20.8	4.8	6.5	12.4	9.0	
	인공습지1 처리수	4.8	2.4	7.0	1.2	4.1	4.8	5.1	
	인공습지2 처리수	4.9	3.0	7.6	1.5	4.1	5.0	5.2	
	유입하천	7.8	4.0	13.2	2.7	-	-	-	
	저수지	8.8	5.6	11.6	1.9	-	-	-	
	제거율 (%)	습지1	43.6	-50.0	72.9	26.6	19.9	56.6	42.6
		습지2	43.6	-22.2	70.0	23.8	21.3	56.4	42.0



<그림 3.3.14> 인공습지 유입수 및 유출수의 SS

바. 생물화학적 산소요구량(BOD)

BOD는 <표 3.3.8>와 같이 인공습지 유입수의 경우 2.3~12.2 mg/L, 평균 6.5 mg/L를 나타냈다. 반면 인공습지1 처리수는 0.2~9.6 mg/L, 평균 1.2 mg/L로 낮아지고, 인공습지2 처리수는 0.1~9.8 mg/L, 평균 1.2 mg/L를 나타내 유입수에 비해 처리수의 농도가 낮아지는 경향을 보였다. <그림 3.3.15>에서도 알 수 있는 바와 같이 거의 대부분의 시기에 유입수에 비해 처리수의 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 95% 신뢰수준에서 분산 분석한 결과도  $p=8.402E-09$ 로서 유입수와 처리수 사이에 유의적인 차이가 인정될 정도로 인공습지에서 BOD가 잘 제거되고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 유입수의 표준편차는 3.0인데 반하여 인공습지1 및 2 처리수의 표준편차는 각각 2.1 및 2.2로서 유입수에 비해 안정된 수질을 유지하고 있어 인공습지가 BOD를 안정적으로 제거해 주고 있는 것을 알 수 있다.

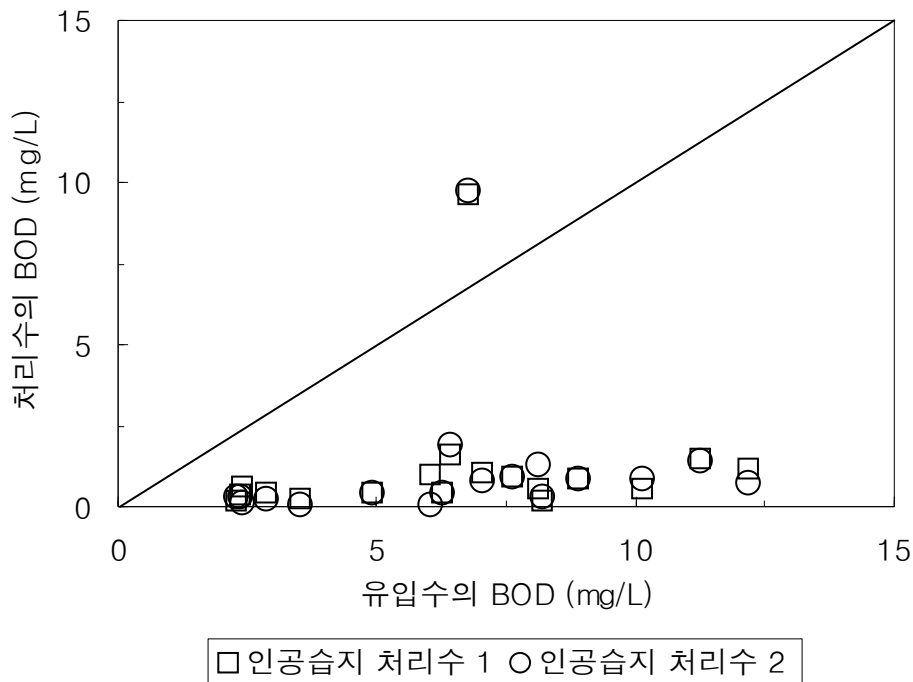
인공습지1 및 2 처리수 사이에 95% 신뢰수준에서 분산분석을 실시한 결과  $p=0.9575$ 로서 서로 간에 유의적인 차이를 보이지 않았다.

조사기간 동안 제거된 BOD양은 인공습지1에서 -4.6~15,188.3 g-BOD/day, 평균 4,144.4 g-BOD/day이고, 인공습지2에서 -4.8~15,711.6 g-BOD/day, 평균 4,127.5 g-BOD/day으로서 본 시설에서 최대 30,899.9 g-BOD/day까지 제거가 가능하였다.

수온에 따른 BOD제거율을 살펴보면 수온이 10 °C보다 낮은 구간에서 인공습지의 BOD 제거율은 평균 23.7%이고, 10~20 °C 사이에서는 86.5%, 20 °C보다 높은 구간에서는 91.5%

로서 수온이 높아짐에 따라서 BOD 제거율이 높아지는 경향을 보였다. 따라서 BOD 제거율은 수온의 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 농경배수의 경우 주로 5~10월의 관개기에 주로 발생하고, 이 시기에는 대부분 수온이 20 ℃ 이상이기 때문에 인공습지는 농경배수를 안정적으로 정화하여 주므로 농업용 저수지의 수질개선에 기여할 것으로 판단된다.

<표 3.3.8>와 같이 하천수 및 저수지의 BOD는 각각 4.3, 5.5 mg/L로서 인공습지 처리수의 농도가 낮기 때문에 인공습지 처리수가 하천 및 저수지에 유입되어도 수질을 악화시키지는 않을 것이다.



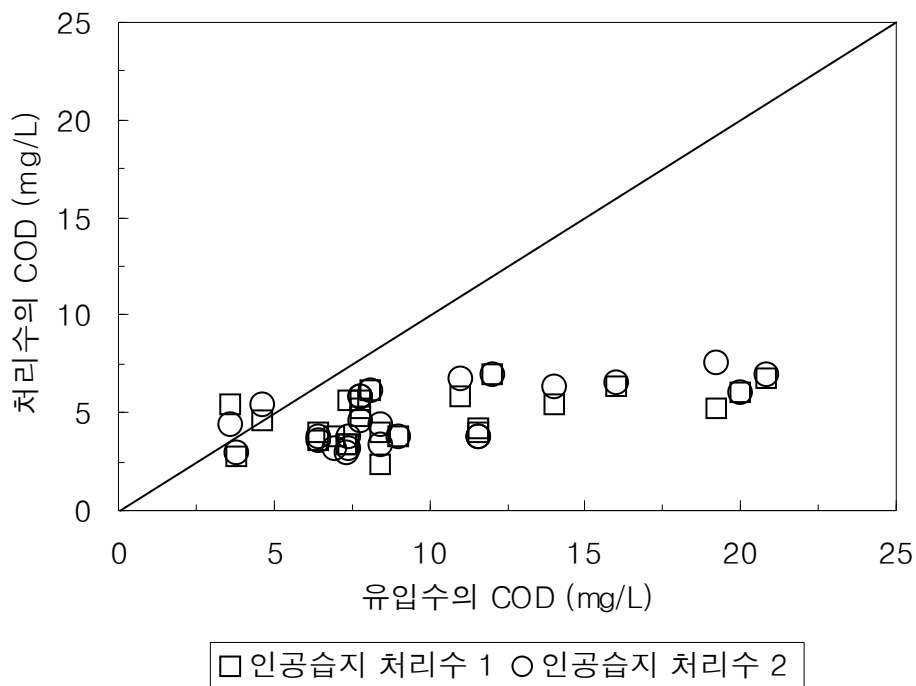
<그림 3.3.15> 인공습지 유입수 및 유출수의 BOD

사. 화학적 산소요구량(COD)

COD는 인공습지 유입수의 경우 <표 3.3.8>와 같이 3.6~20.8 mg/L, 평균 9.9 mg/L로서 호소의 농업용수 수질기준인 8.0 mg/L보다 높은 경우가 많았다. 이에 비해 인공습지1 처리수는 2.4~7.0 mg/L, 평균 4.8 mg/L로 낮아지고, 인공습지2 처리수는 3.0~7.6 mg/L, 평균 4.9 mg/L로 낮아져 평균 43.6%의 제거율을 나타냈다. <그림 3.3.16>과 같이 대부분의 조사 시기에 인공습지 유입수에 비해서 처리수의 농도가 낮아지는 경향을 보였고, 또한 인공습지 처리수는 모든 시기에 호소의 농업용수 수질기준 이하를 만족하고 있었다. 처리수의 농도가 유입수에 비해 높아지는 경우도 처리수의 농도는 수질기준 이하를 만족하였다. COD의 경우도 인공습지 유입수와 처리수 사이에 95% 신뢰수준에서  $p=1.063E-08$ 로서 유입수와 처리수 사이에는 유의적인 차이가 인정될 정도로 습지에서 COD가 제거되는 것으로 나타났다. 인공

습지1과 2 처리수 사이에는 95% 신뢰수준에서  $p=0.7583$ 으로서 유의적인 차이를 보이지 않았다. 유입수와 인공습지 처리수의 표준편차는 각각 4.8, 1.2~1.5로서 유입수에 비해 처리수가 안정적인 농도를 유지하고 있는 것으로 보아 인공습지는 COD를 안정적으로 제거해주는 것으로 판단된다.

조사기간 동안 제거된 COD양은 인공습지1에서 0.0~19,278.0 g-COD/day, 평균 5,949.8 g-COD/day이고, 인공습지2에서 0.0~19,278.0 g-COD/day, 평균 5,576.8 g-COD/day으로서 본 시설에서 최대 38,556.0 g-COD/day까지 제거가 가능하였다.



<그림 3.3.16> 인공습지 유입수 및 유출수의 COD

수온에 따른 COD제거율은 수온이 10 °C보다 낮은 구간에서는 평균 20.6%이고, 10~20 °C 사이에서는 56.5%, 20 °C보다 높은 구간에서는 42.3%로서 수온이 10 °C에서는 매우 낮은 제거율을 보였고, 10 °C보다 높은 구간에서는 일정한 경향을 보이지 않았다. 관개기에는 수온이 10 °C 보다 높기 때문에 인공습지는 농경배수의 정화시설로 도입할 수 있다.

BOD에 비해 COD의 제거효율이 낮은 경향을 보였는데, 이는 식물고사체 등에서 난분해성 유기물이 생성되기 때문인 것으로 판단된다.

저수지 및 유입 하천수의 COD농도는 각각 평균 8.8, 7.8 mg/L를 나타냈으나, 인공습지 처리수는 최대 7.6 mg/L 이하이기 때문에 인공습지 처리수는 저수지 및 하천의 수질개선에 긍정적으로 작용하는 것으로 나타났다.



#### 아. 질소

총질소(TN)은 <표 3.3.9>과 같이 인공습지 유입수가 0.73~3.73 mg/L, 평균 2.00 mg/L로서 호소의 농업용수 수질기준인 1.0 mg/L를 상회하는 경우가 많았다. 반면 인공습지1 처리수는 0.03~2.83 mg/L, 평균 0.78 mg/L로 낮아져 62.0%의 제거율을 보였다. 인공습지2 처리수는 0.06~2.84 mg/L, 평균 0.80 mg/L로 낮아져 62.1%의 제거율을 보였다. 또한 <그림 3.3.17>와 같이 모든 조사시기에 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮은 경향을 보임으로서 인공습지에서 질소가 잘 제거되는 것으로 나타났다. TN의 경우도 95% 신뢰수준에서  $p=4.451E-10$ 로서 인공습지 유입수와 처리수 사이에 유의적인 차이를 보임으로서 본 연구에 도입한 인공습지는 TN 제거효과가 높은 것으로 나타났다. 또한 유입수의 표준편차 0.71에 비해 인공습지 처리수의 표준편차는 평균 0.61로서 처리수가 안정된 경향을 보였다.

인공습지1 및 2 처리수 사이에는 95% 신뢰수준에서  $p=0.9286$ 으로서 서로 간에 유의적인 차이를 보이지 않았다.

조사기간 동안 제거된 TN양은 인공습지1에서 0.0~3,165.7 g-TN/day, 평균 877.4 g-TN/day이고, 인공습지2에서 0.0~3,120.3 g-TN/day, 평균 794.8 g-TN/day으로서 본 시설에서 최대 6,286.0 g-TN/day까지 제거가 가능하였다.

수온에 따른 TN제거율은 수온이 10 °C보다 낮은 구간에서는 평균 42.0%이고, 10~20 °C 사이에서는 68.4%, 20 °C보다 높은 구간에서는 65.7%로서 수온이 10 °C보다 낮은 경우에는 매우 낮은 제거율을 보였고, 10 °C보다 높은 구간에서는 일정한 경향을 보이지 않았다. 이는 질산화-탈질화 작용에 의한 질소성분의 제거는 온도의 영향을 받는데(Herskowitz, J., et al., 1987 ; Watson, J. T., 1987), 보통 10 °C 이하로 기온이 낮으면 제거효율이 낮아지며, 12 °C 이상에서는 크게 영향을 미치지 않는다(Knight, R. L., et al., 1986)고 기술하고 있는 것과 같은 결과이다. 따라서 수온이 10 °C 이상을 유지하는 관개기에 인공습지를 농경배수를 정화하기 위한 시설로 도입한다면 농업용 저수지 및 하천의 수질을 개선하는 효과를 볼 수 있다.

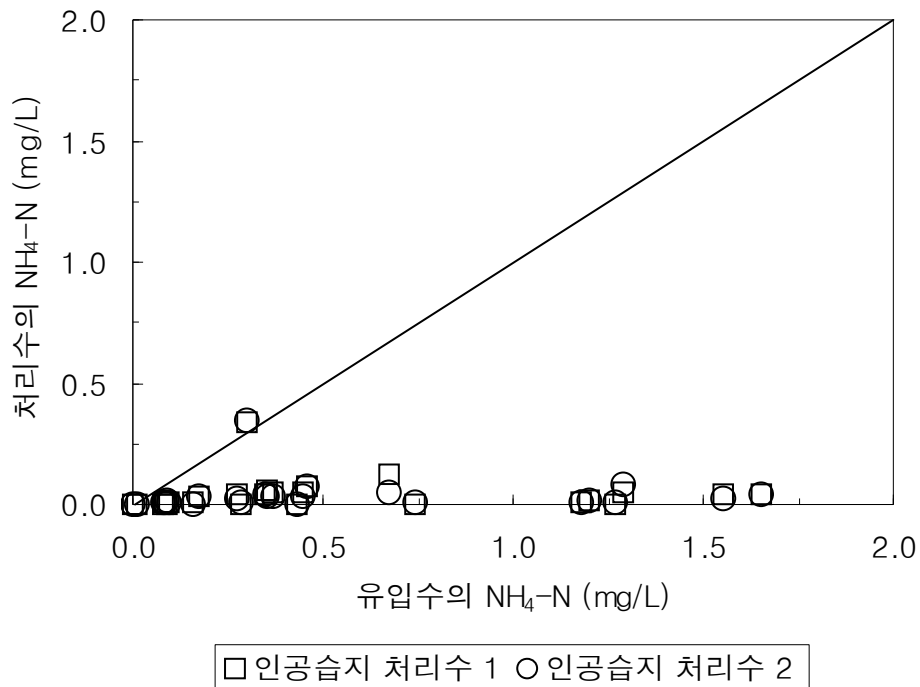
TN의 경우도 인공습지 유출수가 저수지 및 유입 하천수에 비해 낮아 인공습지 유출수가 저수지 및 하천수의 오염원이 되지 않고 오히려 수질개선에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

<표 3.3.9> 인공습지 유입수 및 유출수의 TN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N

항목	지점	평균	최소	최대	표준 편차	수온구간별 평균농도 및 제거율		
						< 10℃	10~20℃	20~30℃
TN (mg/L)	유입수	2.00	0.73	3.73	0.71	2.30	1.92	1.93
	인공습지1 처리수	0.78	0.03	2.83	0.62	1.40	0.64	0.60
	인공습지2 처리수	0.80	0.06	2.84	0.60	1.36	0.74	0.57
	유입하천	2.14	1.27	3.23	0.83	-	-	-
	저수지	1.26	0.54	2.18	0.46	-	-	-
	제거율 (%)	습지1	62.0	1.7	97.2	25.6	40.8	70.9
	습지2	62.1	1.4	94.1	22.6	43.2	66.0	67.7
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	유입수	0.54	0.00	1.65	0.51	0.18	0.79	0.47
	인공습지1 처리수	0.04	0.00	0.34	0.07	0.07	0.03	0.04
	인공습지2 처리수	0.04	0.00	0.35	0.07	0.07	0.03	0.03
	유입하천	0.19	0.03	0.48	0.16	-	-	-
	저수지	0.24	0.06	0.49	0.13	-	-	-
NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	유입수	0.09	0.00	0.44	0.13	0.01	0.05	0.18
	인공습지1 처리수	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00
	인공습지2 처리수	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	유입하천	0.06	0.01	0.14	0.05	-	-	-
	저수지	0.02	0.00	0.07	0.02	-	-	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	유입수	1.10	0.31	3.10	0.71	1.85	0.75	1.07
	인공습지1 처리수	0.52	0.00	2.48	0.57	1.20	0.37	0.33
	인공습지2 처리수	0.55	0.01	2.50	0.56	1.14	0.47	0.33
	유입하천	1.46	0.81	2.50	0.69	-	-	-
	저수지	0.63	0.12	1.58	0.46	-	-	-

암모니아성질소(NH<sub>4</sub>-N)는 <표 3.3.9>과 같이 인공습지 유입수가 0.00~1.65 mg/L, 평균 0.54 mg/L인데 반하여 인공습지1 처리수는 0.00~0.34 mg/L, 평균 0.04 mg/L, 인공습지2 처리수는 0.00~0.35 mg/L, 평균 0.04 mg/L로서 유입수에 비해 처리수의 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 이때 인공습지1 및 인공습지2에서의 NH<sub>4</sub>-N 감소율은 각각 평균 76.5, 79.2%이다. <그림 3.3.18>와 같이 총 25회 중 1회를 제외하고는 모두 유입수에 비해 처리수의 NH<sub>4</sub>-N 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 또한 유입수의 표준편차는 0.51인데 반하여 인공습

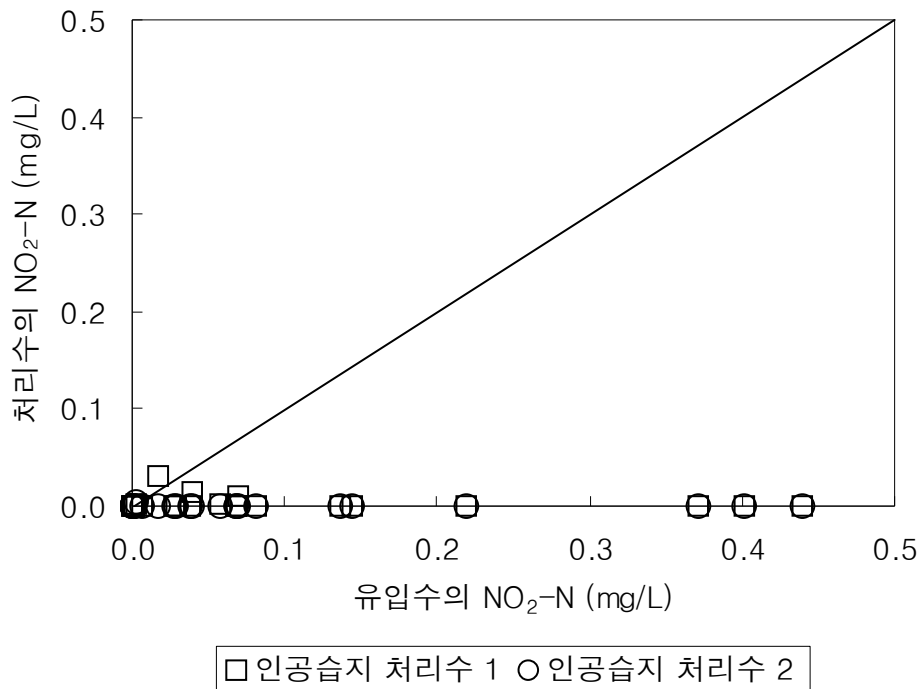




<그림 3.3.18> 인공습지 유입수 및 유출수의 NH<sub>4</sub>-N

아질산성질소 (NO<sub>2</sub>-N)의 경우는 <표 3.3.9> 및 <그림 3.3.19>과 같이 인공습지 유입수가 0.00~0.44 mg/L, 평균 0.09 mg/L였으나, 인공습지 1, 2 처리수는 거의 대부분 NO<sub>2</sub>-N이 검출한계 이하로 나타났다. 또한 유입수의 표준편차가 0.13인데 반하여 인공습지 처리수의 표준편차는 0.00~0.01로서 인공습지에서 안정적으로 질산화와 탈질이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. NO<sub>2</sub>-N이 거의 검출되지 않은 것은 NH<sub>4</sub>-N에서 NO<sub>2</sub>-N로 산화되는 속도보다 NO<sub>2</sub>-N이 NO<sub>3</sub>-N으로 산화되는 속도가 빠르기 때문이다. 또한 NO<sub>2</sub>-N의 경우는 혐기성 상태에서 탈질되어 질소가스와 물로 변화되기도 한다. 즉, 본 연구에서 적용한 상하흐름형 인공습지는 물이 습지의 표면부근을 흐를 때에는 산소가 공급되어 호기성 상태를 나타내기 때문에 질산화가 이루어져 빠른 속도로 NO<sub>2</sub>-N이 NO<sub>3</sub>-N으로 변환된다. 반대로 바닥부분을 흐를 때에는 깊이가 1m 정도 되기 때문에 산소가 공급되지 않아 혐기성상태를 유지하고 있어 NO<sub>2</sub>-N이 탈질되어 질소가스와 물로 변환되어 수중의 NO<sub>2</sub>-N이 감소된다.

수온에 따른 NO<sub>2</sub>-N 감소율은 수온이 10 °C보다 낮은 구간에서는 평균 -150%로 오히려 증가된 반면 10 °C 이상에서는 평균 99.7%가 감소되었다. 수온이 10 °C보다 낮은 경우에 NO<sub>2</sub>-N이 오히려 증가된 것은 호기성 상태일지라도 수온이 낮아 미생물의 활동이 둔화되어 질산화 및 탈질작용이 둔화되고, 반면 식물의 고사체로부터 NO<sub>2</sub>-N이 재용출되었기 때문이다.



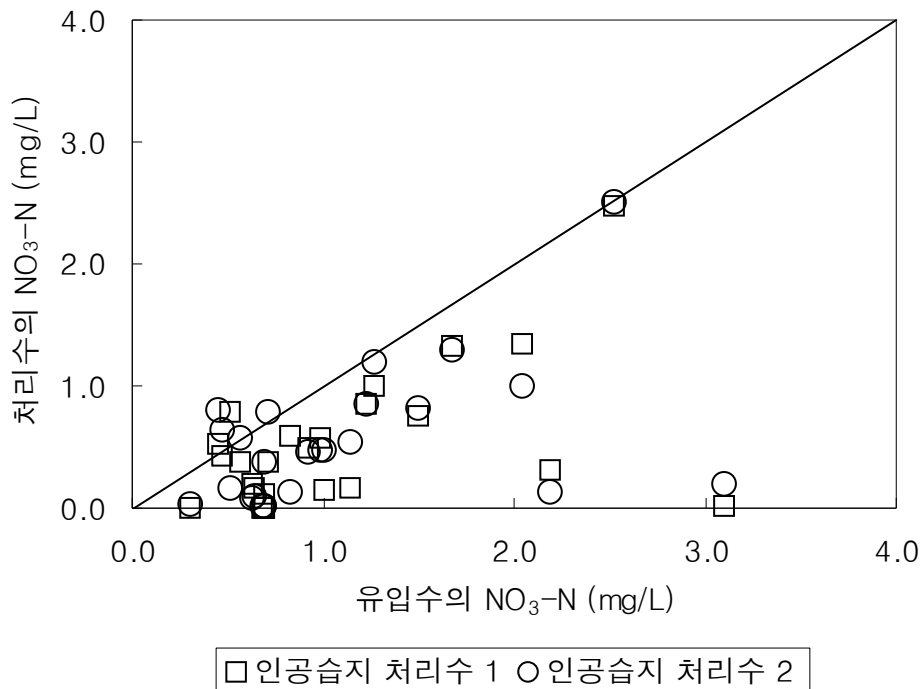
<그림 3.3.19> 인공습지 유입수 및 유출수의 NO<sub>2</sub>-N

질산성질소 (NO<sub>3</sub>-N)의 경우는 <표 3.3.9>과 같이 인공습지 유입수의 농도가 0.31 ~ 3.10 mg/L, 평균 1.10 mg/L를 나타냈다. 반면 인공습지1 처리수는 0.00~2.48 mg/L, 평균 0.52 mg/L로 낮아져 37.6%가 감소되었다. 또한 인공습지2 처리수의 경우도 0.01~2.50 mg/L, 평균 0.55 mg/L로 낮아져 54.8%의 감소율을 보였다. 또한 유입수의 표준편차가 0.71인데 반하여 인공습지 처리수는 평균 0.56을 나타내 유입수에 비해 안정된 경향을 보였다. 이와 같이 NO<sub>2</sub>-N이 NO<sub>3</sub>-N로 질산화됨에도 불구하고 인공습지 유입수에 비해 유출수에서 NO<sub>3</sub>-N이 감소되고, 안정된 값을 보인 것은 탈질이 잘 이루어지고 있다는 것을 의미한다. 이는 혐기성 구간이 존재하는 것을 나타내며 본 상하호를 인공습지에서 바닥부분이 1.0 m 정도로서 산소가 공급되지 않아 혐기성 상태를 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 인공습지 표면에 식재한 노랑꽃창포가 양분으로서 흡수한 것도 NO<sub>3</sub>-N이 감소된 원인의 하나이다.

수온에 따른 NO<sub>3</sub>-N 감소율은 수온이 10 °C보다 낮은 구간에서는 평균 44.6%이었는데, 10~20 °C 사이에서는 34.5%로 낮아졌고, 20 °C보다 높은 구간에서는 50.9%로서 다시 높아져 수온과 일정한 상관성을 보이지는 않았다.

질소제거 기작인 질산화와 탈질에 관여하는 미생물의 종류와 특성이 매우 다양하기 때문에 관여하는 미생물, 오수 등 여러 조건에 따라 제거 기작이 달라지지만, 일반적인 생물학적 질소제거는 질산화과정과 탈질과정에 의해 이루어지는데, 질산화과정에서 TN의 5~20%가

제거되며, 탈질과정에서 T-N의 70~95%, NO<sub>3</sub>-N의 80~90%가 제거된다(Metcalf & Eddy, 1991). 본 연구에 적용된 계단형 상하흐름 인공습지는 질산화를 위한 호기성구간과 탈질을 위한 혐기성구간이 충분히 확보되었기 때문에 질소가 제거되었다. 즉, 물이 인공습지의 상부를 흐르는 구간에서는 식물에 의한 산소공급과 공기 중으로부터의 재폭기에 의해 산소가 공급되어 호기성상태를 유지하기 때문에 질산화가 이루어지고, 하부구간을 흐를 때는 산소가 공급되지 않으므로 혐기성 상태를 유지하여 탈질이 잘 이루어지기 때문에 질소가 제거되는 것이다. 따라서 본 연구에 적용한 계단형 상하흐름 인공습지는 농경배수 등의 농촌지역 비점오염 물질을 제거하기 위한 정화시설로 도입 가능성이 매우 높은 것을 알 수 있었다.



<그림 3.3.20> 인공습지 유입수 및 유출수의 NO<sub>3</sub>-N

자. 인

총인(TP)의 경우 <표 3.3.10>과 같이 인공습지 유입수가 0.02~0.25 mg/L, 평균 0.10 mg/L였는데, 인공습지1 처리수는 0.01~0.16 mg/L, 평균 0.05 mg/L였고, 인공습지2 유출수는 0.02~0.23 mg/L, 평균 0.06 mg/L를 나타내 인공습지를 통과하면서 인이 제거되었다. 이때 인공습지1의 TP 제거율은 평균 30.1%이고, 인공습지2는 평균 12.2%이다. <그림 3.3.21>과 같이 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮은 경우가 많았고, 특히 유입수의 농도가 0.1 mg/L 이상인 경우는 대부분 유출수의 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 분산분석 결과 95%

신뢰수준에서  $p=0.0082$ 로서 유입수와 인공습지 유출수 간에 유의적인 차이가 인정될 정도로 유출수의 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이와 같이 인공습지에서 인이 제거되는 주된 기작은 비표면적이 넓은 다공성 접촉여재에 흡착되거나 식재식물인 노랑꽃창포에 의해 양분으로 흡수되는 것으로 사료된다. 인공습지1 및 2 처리수 사이에는 95% 신뢰수준에서  $p=0.3628$ 로서 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

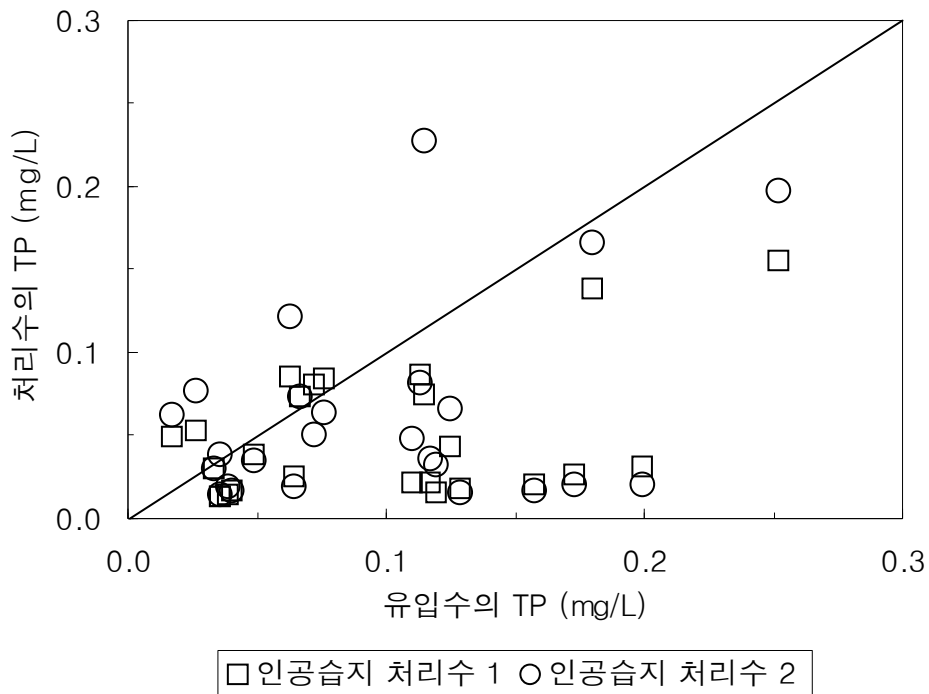
조사기간 동안 제거된 TP양은 인공습지1에서 0.0~152.8 g-TP/day, 평균 47.8 g-TP/day이고, 인공습지2에서 0.0~155.6 g-TP/day, 평균 40.1 g-TP/day으로서 본 시설에서 최대 308.4 g-TP/day까지 제거가 가능하였다.

수온에 따른 TP 제거율은 수온이 10 °C보다 낮은 구간에서는 평균 -63.1%이었는데, 10 ~20 °C 사이에서는 53.5%로 높아졌고, 20 °C보다 높은 구간에서는 31.0%를 나타냈다. 이와 같이 수온이 10 °C 이하에서는 TP의 제거효과가 없고 오히려 TP가 증가되는 경향을 보였는데, 이는 수온이 낮은 시기인 겨울철에는 식물이 휴면상태이기 때문에 식물에 의해 흡수되지 못하고, 또한 고사한 식물체의 분해에 의해 인성분이 재용출되기 때문인 것으로 판단된다.

$PO_4-P$ 는 <표 3.3.10>과 같이 인공습지 유입수가 0.00~0.14 mg/L, 평균 0.04 mg/L이었는데, 인공습지1 처리수는 0.00~0.14 mg/L, 평균 0.04 mg/L를, 인공습지2 처리수는 0.00~0.18 mg/L, 평균 0.05 mg/L를 나타내 유입수와 유출수 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. <그림 3.3.22>에서와 같이 유입수에 비해 유출수의 농도가 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았다.

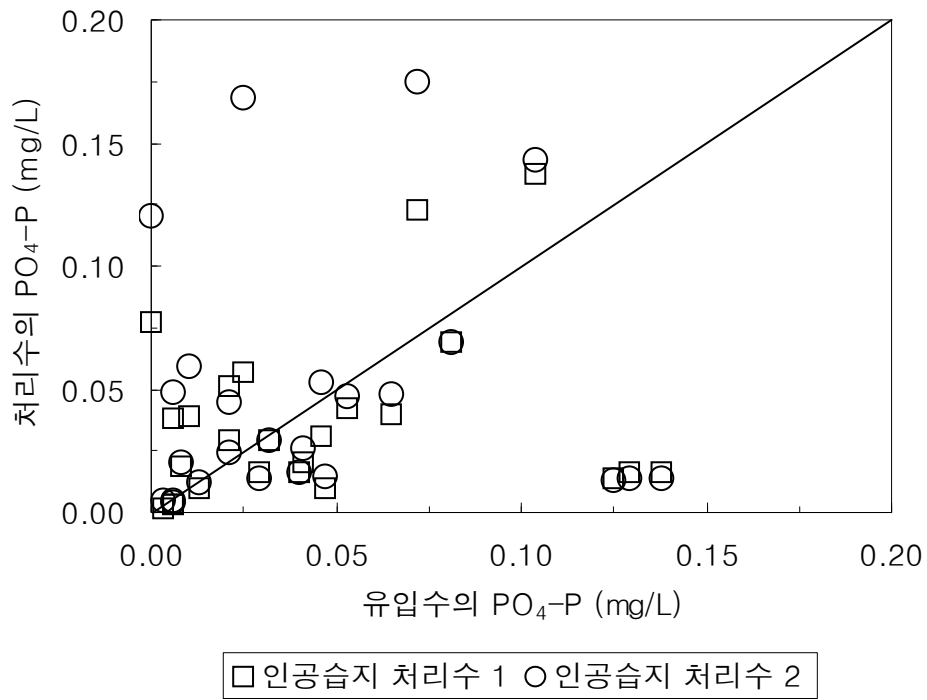
<표 3.3.10> 인공습지 유입수 및 유출수의 TP, PO<sub>4</sub>-P

항목	지점	평균	최소	최대	표준 편차	수온구간별 평균농도 및 제거율		
						< 10℃	10~20℃	20~30℃
TP (mg/L)	유입수	0.10	0.02	0.25	0.06	0.03	0.09	0.14
	인공습지1 처리수	0.05	0.01	0.16	0.04	0.04	0.03	0.07
	인공습지2 처리수	0.06	0.02	0.23	0.06	0.05	0.04	0.09
	유입하천	0.12	0.04	0.21	0.06	-	-	-
	저수지	0.04	0.03	0.10	0.02	-	-	-
	제거율 (%)	습지1	30.1	-188.2	86.6	65.4	-39.3	56.2
	습지2	12.2	-270.6	90.0	89.2	-86.9	50.7	23.2
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	유입수	0.04	0.00	0.14	0.04	0.02	0.03	0.07
	인공습지1 처리수	0.04	0.00	0.14	0.03	0.03	0.02	0.06
	인공습지2 처리수	0.05	0.00	0.18	0.05	0.04	0.02	0.08
	유입하천	0.07	0.02	0.14	0.04	-	-	-
	저수지	0.02	0.00	0.07	0.02	-	-	-



<그림 3.3.21> 인공습지 유입수 및 유출수의 TP





<그림 3.3.22> 인공습지 유입수 및 유출수의 PO<sub>4</sub>-P





## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 연구개발목표의 달성도

#### 1. 1단계(기초연구)의 달성도

목 표	연구개발 수행내용	달성도 (%)
○ 영양물질 흡착능력이 우수한 수질정화 재료 조사	- 미생물 부착생장이 용이한 비표면적이 크고 공극이 많은 다공질의 재료조사 - 인의 흡착능력이 우수한 재료를 발굴	100
○ 인공습지용 식재기반형 접촉여재 개발	- 기존 인공습지 기반재료의 단점을 개선하고 효율이 높은 재료 개발 - 재료의 혼합 등을 통하여 최적화 - 부지면적을 최소화 할 수 있는 습지방식선정	100
○ 시험시공을 위한 대상지역 선정에 관한 조사	- 자료조사와 현장조사를 통한 대상지역 선정 - 부지확보 및 입지여건 분석 - 시험시설 시공을 위한 조사 및 계획	100
○ 오염소하천 및 농지배수 처리를 위한 고효율 인공습지 시험시설 시공	- 효율을 높이고 부지면적을 감소시킬 수 있는 효과적인 흐름방식 및 선정 - 시험연구시설 설계 및 운전계획 수립 - 시험연구시설의 시공	100
○ 연구 대상지역의 용·배수로 현황 및 특성 조사	- 연구대상지역의 선정 및 기초조사 - 용·배수로의 현황 파악 - 강우량, 증발산량 등의 기상자료 수집 - 수문특성 조사 및 분석(강우 및 유출특성)	100
○ 수질정화 제품의 효율성 평가/분석을 위한 실내 모형 제작 및 시험가동	- 수리모형 및 재료의 축소제작에 관한 기초자료 수집 및 분석 - 실험항목의 선정 및 모형 설계·제작 - 실내시험수로의 시험가동 및 문제점 보완	100
○ 재료의 물리화학적 특성 조사	- 입경, 투수성, 영양염류 함유량, pH 등의 물리화학적 분석	100
○ 칼럼모형실험을 통한 재료의 수질정화효율성 분석	- 흡착실험 및 모형실험을 통하여 인공습지 여재로 도입 가능성 확인	100

2. 2단계(응용연구 및 시제품 제작)의 달성도

목 표	연구개발 수행내용	달성도 (%)
○ 인공습지 시험시설의 운전 및 모니터링	- 강수량 변화에 따른 운전 대책 - 기온 변화에 따른 인공습지의 운전 적용성 - 에너지 소비량 평가	100
○ 수질정화 재료에 관한 성형화 및 제품화 시험	- 다양한 형태의 성형화 시험 - 다양한 수질정화체 형태 제작 - 성형화를 위한 다양한 결합재 조사 및 시험 - 시공이 용이한 부자재 조사 및 적용	100
○ 농업용수로 시험시공을 위한 시제품 생산	- 시제품 생산을 위한 금형 설계 및 제작 - 시제품 생산을 위한 공정 선정 - 시제품 생산 및 품질평가	100
○ 시제품을 적용한 농업용수로의 시험시공	- 시험시공을 위한 측량 및 조사 - 용배수로 특성에 맞는 시공기법 마련 - 시험시공을 위한 설계도면 및 시방서 작성 - 시제품 설치 및 시공	100
○ 수질정화 제품의 효율성 평가/분석을 위한 실내 모형 실험	- 수질정화제품의 수리학적 특성 분석 - 수질정화 제품의 정화 효율성 분석 - 수질정화 제품과 수질(BOD, DO, TP, TN, SS)등의 상관성 조사 분석	100
○ 연구대상 수로의 수리/수문학적 특성 검토	- 유입량 및 유출량 실측자료 분석 - 유량 산정을 위한 수로단면 측량 및 수로 특성조사 - 유속계를 이용한 수로의 유속 변동 실측 - 대상지 수문특성 조사 및 분석 - 적용제품의 수로적용에 따른 수리특성 분석	100
○ 종합적 효율평가를 통한 수질정화재료 선정	- 여재를 발굴하고, 이를 이용한 수질정화체를 개발하여 물리·화학적 평가	100
○ 인공습지 수질정화 효율 평가	- 인공습지 유입 및 유출수 수질조사를 통한 정화 효율 평가	100
○ 농수로용 수질정화 시설 설치	- 농업배수 정화에 적합한 수질정화시설을 개발하고, 수질정화효율 평가를 위한 시범시공	100

### 3. 3단계(사업화)의 달성도

목 표	연구개발 수행내용	달성도 (%)
○ 인공습지 시험시설의 운전 및 모니터링	- 인공습지 시험시설의 운전 및 문제점 보완개선 - 지속적인 운전을 통한 유지관리상 문제점 파악 및 개선 - 에너지 소비량 및 운전 비용 분석	100
○ 수질정화 및 생태, 경관을 고려한 수로관 제품의 구상 및 설계	- 수로의 다양한 위치에 적합한 형태의 수로관 구상 - 수로의 규격에 따른 다양한 형태의 수로관 구상	100
○ 수질정화수로관의 모니터링 및 효율평가에 의한 제품 보완 및 개선	- 수질정화수로관의 효율적 시공 방법 검토 - 균일한 제품 제작을 위한 제작 공정 방법 확립 - 개선방안 및 보완점 제시	100
○ 유지관리 지침, 시방서 등의 사업화 준비	- 유지관리 지침 조사 - 시방서 및 기준 마련 - 특허 및 실용신안 취득	100
○ 수질정화 제품의 효율성 평가/분석을 위한 실내 모형실험	- 수질정화제품의 수리학적 특성분석 - 수질정화 제품의 정화 효율성 분석	100
○ 수질정화 제품이 적용된 농업용 수로와 고효율 습지에 대한 모니터링	- 관-비관계기에 따른 유량 조사 - 강우량에 따른 수로내 유량변동 조사 - 시제품 설치에 따른 수로 안전성 조사	100
○ 농수로용 수질정화시설 효율 평가	- 농수로의 시기별 수질변화특성 조사분석 수온, pH, DO, EC,SS, BOD, COD, T-N, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, T-P, PO <sub>4</sub> -P 등 - 농수로용 수질정화시설 유출입수의 수질조사 - 적정 농수로용 수질정화시설 도출	100
○ 인공습지 설계인자 분석	- 계절별 수질정화효율 조사 수온, pH, DO, EC,SS, BOD, COD, T-N, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, T-P, PO <sub>4</sub> -P 등 - 인공습지 유입수 및 유출수의 수질조사 - 인공습지 시스템의 질소, 인 등의 영양염류 제거 효율조사 - 인공습지 설계인자 도출	100
○ 종합평가에 의한 공법의 문제점 및 개선안 제시	- 농수로용 수질정화 제품의 수리적 특성 종합분석 - 인공습지 시스템의 종합분석 - 농수로용 수질정화시설의 종합분석 - 문제점 및 개선방안 제시	100

## 제 2 절 관련분야의 기술발전 기여도

### 1. 농업용 수로에 적용 가능한 수질정화체 개발

본 연구과제에서는 친환경적 농수로와 농업용수 수질개선을 위한 고효율 인공습지에 적용하기 위하여 수질정화 역할과 식재기반재의 역할을 동시에 만족시켜서 효율을 향상시키고 부지사용을 최소화 할 수 있는 재료를 조사하고 화학적·생태적·수리학적인 다양한 실험을 통하여, 수질정화체를 개발하였다. 연구 과정에서 개발된 수질정화체는 내부 공극을 인위적으로 크게 하여 주어 접촉표면적이 높고 미생물이 안정하게 서식할 수 있는 공간을 확보하여 줌으로써 수로의 자정 능력을 극대화하였다. 또한 수질정화체는 친환경 재료로써 그 효율성과 상품성이 매우 높을 것으로 판단된다.

### 2. 친환경 수질정화 수로관 및 시공기법 개발

기존의 문헌자료와 현장답사 등을 통하여 용·배수로에 적용되고 있는 공법, 재료의 현황 및 차이점을 파악하고 농수로에 적합한 수로관의 요구특성을 검토하여, 이를 바탕으로 수질정화 및 생태계가 고려된 수로관 제품을 개발하도록 방향을 설정하였다. 그 결과 수질정화 수로관과 환경생태보호수로관을 개발하였으며, 농업용 수로의 본래의 기능을 유지하면서도 친환경적인 기능을 동시에 확보할 수 있는 우수한 친환경 제품으로 판단된다.

또한 개발된 제품은 그 특성 및 용도에 비추어 볼 때, 용·배수로와, 소하천의 호안 정비 등에 그 적용성이 높을 것으로 판단된다.

### 3. 농업용수 수질 개선을 위한 고효율 인공습지 개발

농지배수에 적합한 인공습지를 개발하기 위하여 기초조사로 농경배수의 수질특성, 수리학적 설계, 온도, 수질항목별 농도측정 등을 통하여, 고효율 인공습지를 개발하였다. 농업용 저수지의 수질개선을 위하여 유량이 많고 농도가 낮은 용수의 수질개선에 적합한 지표흐름형 인공습지가 도입되고 있다. 지표흐름형 인공습지는 유지관리가 용이하고, 농촌지역의 자연과 조화를 이루는 효과적인 수질개선공법이다. 그러나 지표흐름형 인공습지는 많은 면적을 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 반면 지하흐름형 인공습지는 지표흐름 인공습지에 비해 정화효율이 높고, 소요면적이 넓지 않다는 장점을 갖고 있다. 이와 같은 호기성조건과 혐기

성조건을 연속적으로 조성될 수 있도록 하기 위하여 상하흐름형 인공습지를 구상하였다. 오수가 인공습지의 표면을 흐를 때에는 대기와의 접촉에 의한 재폭기가 이루어질 뿐만 아니라 식물의 기공과 뿌리를 통하여 근권에 산소가 공급되기 때문에 표면부에는 호기성상태가 유지되어 질산화가 이루어질 수 있는 조건이 형성된다. 다음에 바닥 쪽으로 내려가면 산소의 공급이 없어 혐기성상태가 유지되기 때문에 탈질작용이 일어날 수 있는 조건이 형성된다. 이와 같이 인공습지 내에서 물이 상하로 이동하면서 흐르기 때문에 하나의 습지 내에 호기성조건과 혐기성조건이 조성되어 질소의 제거효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.





## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

최근의 농촌현실이 농촌인구의 감소와 고령화로 농업기반시설의 주기적인 유지관리가 농민 자력으로는 힘들게 되었으며, 수리시설의 노후 및 파손으로 용수로의 기능 발휘 차질에 따른 농업인 영농불편이 제기되고 있으며, 수공원의 개보수 사업비는 계속증가 추세에 있으나 노후시설 개보수에 치중되므로 집중호우나 태풍 등 재해대비 능력의 확대에는 크게 미흡하였다.

이러한 문제점들을 개선하고자 중장기 계획을 수립하여 연차적으로 노후 수리시설 개보수하고 시설물의 기능과 성능을 향상시켜 재해대응능력을 확대하기 위한 노력들을 지속적으로 추진하고 있다.

하지만 농업용수이용이라는 공익적 기능을 우선으로 시행하였고 지역적 특성을 반영한 친환경적인 정비방식의 도입에 깊은 관심을 갖지 못하였지만 본 연구를 통하여 이 두가지의 기능을 조화시킴으로 효율적인 농촌정비계획을 실행할 수 있게 되었다고 판단한다.

하지만 다양한 지역환경에 적용될 수 있는 제품의 개발과 효율적인 유지관리를 위하여 중장기적인 연구개발 계획 수립이 필요하다.

### 1. 사업화 추진방안

#### 가. 시장성

농촌환경개선을 위하여 정부에서는 올해 배수개선사업에 2천49억원, 발기반정비에 798억원, 농지기반조성에 1천841억원, 농업생산기반종합정비에 32억원, 농촌마을종합개발에 1천263억원 등 총 6천여억원(농림수산식품부, 2008년 예산개요)의 예산을 계획하고 있고, 지방자치단체에서도 예산을 편성하여 시행하거나 계획을 가지고 있다. 특히 충청남도에서는 노후된 저수지의 용배수로시설 등을 항구적 차원으로 개보수하기 위해 91개지구 549억 7500만원을 투입, 수리설 개보수사업을 추진한다고 밝혔고, 전라북도에서는 32개지구 총사업비 1천20억원을 신규사업에 사용할 계획을 가지고 있다.

정부 및 지방자치단체에서는 농업기반을 현대적이며 친환경적인 자원을 개발하고자 지속적으로 예산을 집행할 것으로 예상되며, 이러한 조건에서 환경적인 기술에 대한 수요는 더욱 늘어날 것이고 시장성 또한 지속적으로 성장할 것으로 판단된다.

#### 나. 생산성

개발된 제품의 생산 방식에서는 제품의 모양, 크기 및 재질 등으로 인하여 기존의 노동집약적인 생산기술과 큰 차이는 없으나, 생산시설의 현대화와 효율적인 생산관리, 체계적인 품질관리 등 생산공정의 시스템화를 추진하여 대량양산체계를 구축한다면, 생산성이 향상되고 이로 인하여 원가절감 및 품질향상을 이룰수 있다.

#### 다. 사업추진계획

본 연구를 통하여 개발된 제품인 친환경수질정화수로관과 환경생태보호수로관은 양서류 및 소동물들의 수로내이동과 등선로를 이용한 탈출과 어류들의 활동에 대한 생물 상황들을 제품의 개발에 충분히 반영하였고, 수질정화체 또한 농경배수의 수질정화에 효과적으로 적용이 가능하여, 전북 익산 영만지구와 전북 임실 제방 제내지 측구, 충북 아산 배수로 등에 적용하였다. 그리고 고효율 인공습지는 농촌지역의 비점오염물질에 대한 높은 처리 효율을 나타내었고, 충남 아산시 성내저수지의 여러 지역에 시공을 하였다.

이러한 연구의 수행결과를 바탕으로 특허 등 지적재산권을 확보하고 있으며, 조달청 물품등록과 환경관련 인증을 취득하기 위 업무를 추진중에 있다.

제품의 기술적 우수성과 생산시설이 확보되면 대단위 사업지구, 수리시설개보수사업, 경지정리사업, 배수개선사업, 친환경 공간정비 사업, 농업용수 개선사업 등 정부 및 지방자치단체에서 시행하는 국책사업을 대상으로 사업을 추진해 나갈 계획이다.





## 제 6 장 참고문헌

1. 강원대학교 과학기술정책관리연구소, 1997, 인공습지를 이용한 군부대 오수정화처리에 관한 연구.
2. 권오병(1999) 인공식물섬을 설치한 호소의 수질개선 및 생태계변화에 관한 연구
3. 김복영, 이상규, 권창식, 소규호, 윤은호, 1991, 부레옥잠에 의한 생활오수의 정화효과, 한국환경농학회지, 10(1), pp.51-57.
4. 김판건, 2002, 인공습지 토양에서 중질소 추적법을 이용한 질소의 형태변환 및 탈질 평가, 서울대학교 석사학위논문.
5. FAO. 1994. Water Quality for agriculture. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
6. 공동수, 정원화, 천세억, 김종택, 1996, 호소내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구(II), 국립환경연구원.
7. 공동수, 천세억, 정원화, 김종택, 1997, 호소내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구(III), 국립환경연구원.
8. 국립환경연구원, 2001, 마을 하수처리시스템 구축에 관한 연구(I).
9. 국립환경연구원, 2002, 마을 하수처리시스템 구축에 관한 연구(II).
10. 권순국, 윤춘경, 1999, 흡수성 Biofilter를 이용한 농촌 소규모 오수처리시설의 성능, 한국환경농학회지, 18(4), pp.310-315.
11. 권애량, 박철휘, 2003, 수생식물을 이용한 수질정화에 관한 연구, 대한환경공학회지, 25(4), pp.415-420.
12. 권오병, 2000, 인공식물섬을 설치한 호소의 수질개선 및 생태계변화에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문.
13. 김건중, 2000, 갈대습지를 이용한 군부대 오수정화 효율의 향상, 대전대학교 석사학위논문.
14. 김규식, 김복영, 조일환, 우기대, 박영대, 1988, 축산폐수 정화를 위한 부레옥잠 이용 연구, 농시논문집 토양비료편, 30(3), pp.39-45.
15. 김선곤, 2001, 자연정화기법을 이용한 소규모 하수처리 적용에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문.
16. 김영철, 강민기, 이진우, 2003, 고속 산화지와 인공습지 수생처리 시스템에 의한 2차 처리수의 영양소 처리에 관한 연구, 한국물환경학회지, 19(5), pp.543-554.
17. 김은호, 김석택, 김일배, 김형석, 1999, Bohart-Adams 식을 이용한 폐굴껍질 충전탑의 설계, 한국환경농학회지, 18(3), pp.209-214.
18. 김응호, 1996, 마을하수도 정비의 특성과 효율적 관리방안, 하수도 건설담당공무원연찬회 자료집.
19. 김응호, 2002, 마을하수도의 정비 특성 및 관리 대책, 첨단환경기술, 10(11).
20. 김일환, 2003, 부산지역 자연형 하천 습지의 모기 발생소장과 미생물 살충제,

*Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*를 이용한 모기방제 효과, 고신대학교 석사학위논문.

21. 김준호, 문형태, 민병미, 조경제, 1989, 낙동강하구 염습지 식물군락의 질소 및 인의 동태, 한국생태학회지, 12, pp.1-7.
22. 김형근, 1990, 濕地生態系 土壤의 窒素 및 磷酸의 動態, 공주사범대학교 박사학위논문.
23. 김형중, 1997, 자연정화방법을 이용한 농촌지역의 소규모 오폐수처리 시스템, 건국대학교 박사학위논문.
24. 나용규, 김동엽, 2002, 인공지반녹화지에서의 인공토양 내 토양미생물 활동, 한국임학회 학술연구 발표논문집, pp.59-61.
25. 남귀숙, 2003, 농업용 저수지의 생물학적 수질정화 및 미생물군집동태, 부산대학교 박사학위논문
26. 노진환, 1990, 유리질 암석으로부터 제올라이트 합성에 관한 연구 (I): Na-P, Na-X 및 Na-A 제올라이트의 저온 수열 합성. 한국광물학회지, 3, pp.7-17.
27. 노진환, 1992, 유리질 암석으로부터 제올라이트 합성에 관한 연구 (II): 알칼리 용액에서 진주암의 용해 거동과 제올라이트의 합성, 한국광물 학회지, 5, pp.61-71.
28. 노진환, 2000, 규질 이암으로부터 제올라이트의 수열 합성에 관한 연구. 한국광물학회지, 13, pp.171-185.
29. 농림부, 농업기반공사, 2002, 농업용수 수질개선 시험연구사업보고서(VI).
30. 농어촌진흥공사. 1997. 농업용수 수질기준 제정 등 제도개선에 관한연구.
31. 농업과학기술원, 2000, 토양 및 식물체 분석법, 농업과학기술원.
32. 농업기반공사, 2002, 저수지와 담수호의 수질개선 방안.
33. 농업기반공사, 2003, 농촌지역 오수의 자원순환형 영양염류 저감시스템 개발(I) 보고서
34. 농업기반공사, 2004, 농촌지역 오수의 자원순환형 영양염류 저감시스템 개발(II) 보고서
35. 농업기반공사, 2005, 농촌지역 오수의 자원순환형 영양염류 저감시스템 개발(최종) 보고서
36. 농촌진흥청, 2008, 농업용수 수질오염 방지기술 개발
37. 류지혁, 2002, 인공습지 토양의 인 흡착 및 제거 특성, 서울대학교 석사학위논문.
38. 문형태, 남궁정, 김정희, 1999, 대형수생식물의 물질생산과 질소와 인의 흡수량, 한국환경생물학회지, 17(1), pp.27-34.
39. 민경석, 2001, 슬래그 여재 살수여상의 유기물제거와 질산화 특성, 대한토목학회집논문, 21(4B), pp.455-465.
40. 박준규, 최용수, 전양근, 2002, 자연형 하천정화를 위한 황토여재 개발에 관한 연구, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, pp.547-550.
41. 박현건, 이춘식, 이홍재, 서동철, 허중수, 2004, 모래와 굴폐각을 이용한 인공습지 오수처리장치 개발, 한국물환경학회지, 20(5), pp.437-446.
42. 박현진, 2001, 생활오수 처리를 위한 지표면하 흐름식 인공습지의 적용, 강원대학교 석사학위논문.

43. 방천희, 2001, 소규모 오수처리 시스템에서의 제올라이트에 의한 질소 제거, 서울대학교 석사학위 논문.
44. 배범한, 권영석, 김동일, 이인숙, 정연규, 2003, 토착 야초류(어저귀, 자귀풀)의 수경재배를 이용한 Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(RDX) 분해 연구, 대한환경공학회지, pp.1100-1107.
45. 백룡부대, 1994, 부레옥잠 접촉법에 의한 오·폐수 처리, p.5-33.
46. 변종영, 김문규, 이종식, 1985, 수생식물을 이용한 수질오염원제거에 관한 연구 제1보 부레옥잠의 유기물 제거효과 및 생장에 미치는 제요인, 한국잡초학회지, 5(2), pp.143-148.
47. 사동민, 2001, 시설재배지 폐양액 재활용 및 정화기술개발, 농림기술개발사업 연구보고서.
48. 서동철, 이홍재, 조주식, 박현진, 김형갑, 허중수, 2003, 자연정화공법에 의한 하수처리장에서 최적여재 선정, 한국환경농학회지, 22(1).
49. 서정윤, 2002, 제올라이트 칼럼에 의한 인공생활하수처리, 한국환경농학회지, 21(3), pp.178-188.
50. 서정윤, 김태형, 최민수, 2003, 수직 흐름 제올라이트 갈대 여과상의 간헐적 주입에 의한 인공하수 처리, 한국생물공학회지, 18(2), pp.140-122.
51. 수자원공사, 1993, 수생식물 재배를 통한 댐저수지 유입수 수질개선 타당성 조사연구, p.211.
52. 신정미, 2000, 수리학적 체류시간과 농도에 따른 달뿌리풀과 갯버들의 질소와 인 제거능, 경희대학교 박사학위논문.
53. 안운주, 1993, 생이가래를 이용한 수질오염물질 제거방안 연구, 서울대학교 도시계획학석사학위논문.
54. 안운주, 공동수, 1995, 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구, 대한환경공학회지, 17(6), pp.593-603.
55. 안창우, 1994, 수처리를 위한 모의습지의 실험적 연구, 서울대학교 석사학위논문.
56. 양홍모, 2003a, 고수부지에 조성한 수질정화 자유수면 습지의 초기운영단계 질소제거, 환경복원녹화기술학회, 6(6).
57. 양홍모, 2003b, 고수부지에 조성한 수질정화 자유수면 습지의 초기운영단계 총인제거, 환경복원녹화기술학회, 6(6).
58. 오경환, 1990, 수생관속식물이 호소생태계의 부영양화에 미치는 영향, 경상대 기초과학연구소보, 6, pp.91-108.
59. 윤춘경, 1995, Wetland를 이용한 농촌 오·폐수처리 System, 한국농공학회 학술발표대회 발표논문집, pp.205-212.
60. 윤춘경, 김선주, 임용호, 정일민, 1998, 슬러지를 이용하여 생산한 인공토양의 흡착 및 용출 특성, 한국농공학회지 40(4), pp.77-84.
61. 윤춘경, 정재춘, 1996, 축조된 습지(wetland)를 이용한 폐수처리의 설계기준에 관한 연



- 구, 한국유기성폐기물자원화협의회학회지, 4(1).
62. 이규승, 김문규, 변종영, 이종식, 1985, 수생식물을 이용한 수질오염원제거에 관한 연구 제2보 부레옥잠의 영양염류 및 중금속 제거효과, 한국잡초학회지, 5(2), pp.149-154.
63. 이기영, 김지영, 2003, 경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구, 경기개발연구원, pp. 29-30.
64. 이남희, 1993, 수생식물을 이용한 돈사폐수의 처리, 부산수산대학교 석사학위논문.
65. 이동근, 2003, 경남지역 소규모 하수·오수 처리시설 실태조사 및 효율화 방안, 경남 지역환경기술개발센터.
66. 이동훈, 최정, 1995, Zeolite의 축산폐수 정화효과와 그 잔사의 Sudangrass에 대한 시용효과, 한국토양비료학회지, 28(4), pp.232-238.
67. 이병설, 정문호, 두옥주, 1995, 미나리에 의한 수중 중금속 Cd와 Pb의 제거에 관한 연구, 환경위생지, 21(1), pp.47-55.
68. 이병헌, 이남희, 김정숙, 1992, 조류 성장이 부레옥잠을 이용한 폐수처리공법의 유출수에 미치는 영향, 환경과학회지, 1(2), pp.81-92.
69. 이종식, 1986, 부레옥잠의 수질오염제거법에 의한 연구, 충남대학교 석사학위논문.
70. 이형집, 독고석, 양기혜, 정팔진, 2003, HBC media를 이용한 살수여상 공정에서 온도와 내부순환비의 영향 평가, 상하수도학회지, 17(6), pp.892 -897.
71. 이형집, 독고석, 정팔진, 2003, 살수여상에서 현수여재를 이용한 폐수처리에 관한 연구, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp.195-201.
72. 이호식, 2002, 충북지역 내 오·폐수처리시설의 고도처리 개선 방안 및 경제적 유지관리 기술, 충북지역환경기술개발센터.
73. 이홍재, 서동철, 조주식, 허중수, 2003, 인의 흡착능 평가를 통한 인공습지 하수처리 시스템의 여재 선발, 한국환경농학회지, 22(2), pp.148-152.
74. 일본지역자원순환센터, 2005, <http://www.jarus.or.kr/>
75. 장병일, 2001, 인공습지 하수처리장에서 수초 및 골재의 특성, 경상대학교 석사학위논문.
76. 정동양, 1999, 자연친화형 농어촌 하수처리장 모델개발, 한국환경복원녹화기술학회지, 2(1), pp.10-19.
77. 정동양, 2003, 수초·골재하수처리장의 투수속도, 한국환경복원녹화기술학회지, 6(3), pp.29-34.
78. 정동양, 2004a, 농어촌 생활하수처리를 위한 수초·골재 하수처리장의 특성, 한국실과교육연구학회, 10(1), pp.222-233.
79. 정동양, 2004b, 제강슬래그를 여재로 사용한 자연정화 하수처리장의 인(P)제거 효과, 한국환경복원녹화기술학회, 7(2), pp.68-74.
80. 정수일 등, 1995, 수생식물을 이용한 분뇨의 N, P 제거에 관한 연구, 전라북도보건환경연구원보, 8, pp.1-15.
81. 정재욱, 류홍일, 류재근, 1994, 중금속이 수생히야신스(부레옥잠)를 이용한 하수처리

- 공정에 미치는 영향, 대한환경위생지, 9(2), pp.110-119.
82. 정팔진, 2003, 전북지역 소규모 하수·오수 처리시설 실태조사, 전북지역환경기술개발센터.
83. 정팔진, 정정권, 권지영, 1995, 패각을 여재로 한 살수여상공법에 의한 유기물질 제거에 관한 연구, 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문초록집, pp.212-214.
84. 조강현, 1991, 팔당호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환, 서울대학교 박사학위논문.
85. 조영일, 오영민, 정연규, 이수구, 정팔진, 이철희, 양병수, 신성의, 1987.폐수처리공학, 도서출판 동화기술, pp. 913.
86. 조인성, 2003, 장기간 운영한 환경친화형 인공습지 하수처리장에서 오염물질의 처리, 경상대학교 석사학위 논문.
87. 창의적 문제해결 기법 TRIZ, <http://blog.naver.com/shin710514/40048806741>
88. 최민수, 2003, 제올라이트 갈대 여과상에 의한 생활하수 처리, 창원대학교 석사학위 논문.
89. 환경부. 2000. 수질환경기준 개선방안
90. American Public Health Association, 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater 19th Edition, Washington DC.,USA. pp. 953.
91. Ansola, G., González, J. M., Cortijo, R. & Luis, E., 2003, Experimental and full-scale pilot plant constructed wetlands for municipal wastewater treatment, Ecological Engineering, 21, pp.43-52.
92. Arias, C. A., Cabello, A., Brix, H. & Johansen, H., 2003, Removal of indicator bacteria from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland system, Wat. Sci. Tech., 48(5), pp.35-41.
93. Arias, C. A. & Brix, H., 2005, Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified?. Wat. Sci. Tech., 51(9), pp.267-273.
94. Arthur F. M. Meulrman, R. L., Gerard, B. & Verhoeven T.A., 2003, Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment, Ecological Engineering, 20, pp.31-44.
95. Reddy, K. R., Sutton, D. L., 1984, Waterhyacinths for water quality improvement and biomass production, J. Environ. Qual., 13(1), 1-8
96. Reddy, K. R., De Busk, T. A., 1987, State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control, Wat. Wei. Tech., 19(10), 61-79
97. Gearheart, R. A., Use of constructed wetlands to treat domestic wastewater, City of Arcata, California, Wat. Sci. Tech, 26(7-8), 1625-1637
98. Gersberg, R. M., Elkins, B. V., Goldman, C. R., 1983, Nitrogen removal in

- artificial wetlands, *Water Res.*, 17(9), 1009-1014
99. Toth, L., 1972, Reeds control eutrophication of Balaton Lake, *Water Res.*, 6(12), 1533-1539
100. 尾崎 保夫, 阿部 薫, 1993, 植物を活用した資源循環型水質浄化技術の課題と展望－潤いのある農村景観の創出を目指して－, *用水と排水*, 35(9), 5-17.
101. 中村圭吾, 2002, 効率的な植物浄化法「コンパクトウェットランド」による水質浄化, 土木研究所 home page, <http://www.pwri.go.jp/team/kasenseitai/ja/kasenseitai/kenk3/html/305/wetland.htm>
102. 中村圭吾, 細見正明, 酒井義尚, 宮下明雄, 通井仁, 2002, 日本における表面流方式の植生浄化事例の整理, 土木研究所 home page
103. 農業研究センター, 1994, 陸上と水生の有用植物を活用した水質浄化, 農林水産研究 Web Server, [http://www.affrc.go.jp/seika/data\\_niaes/h06/niaes94009.html](http://www.affrc.go.jp/seika/data_niaes/h06/niaes94009.html)
104. 農業研究センター, 1996, 水路-濾材系(バイオジオフィルター)水路の窒素浄化機能の強化, 農林水産研究 Web Server, [http://www.affrc.go.jp/seika/data\\_narc/h08/narc96S103.html](http://www.affrc.go.jp/seika/data_narc/h08/narc96S103.html)
105. 農業研究センター, 1997, 有用植物を用いた自然循環型水質浄化システムの開発, 農業研究センター home page, <http://www2.affrc.go.jp/press/H9/1126/1126.html>
106. 農業研究センター, 2000, バイオジオフィルター水路を用いた農業集落排水二次処理水の高度処理, 農林水産研究 Web Server, [http://www.affrc.go.jp/seika/data\\_niaes/h12/niaes00006.html](http://www.affrc.go.jp/seika/data_niaes/h12/niaes00006.html)
107. 細見正明, 1992, ヨシ湿地による水質浄化, *水*, 34(12)
108. 田火田 眞佐子ら, 1996, ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去 果, *水環境學會誌*, 19(4)
109. 竹倉新吉, 1991, 河川湖沼の水質浄化対策の推進, 霞ヶ浦の水質浄化対策, *河川*, 539
110. 川村實ら, 1995, アシ原による水質浄化, *長野縣衛生公害研究所報告*, 18
111. 荒木弘一, 香林仁司, 1986, 植生酸化池での処理 果, *下水道研究発表會講演集*, 123
112. 中村榮一, 森田弘明, 1987, 低湿地浄化に関する調査, *土木研究所資料*, 2480
113. 北詰昌義ら, 1998, 生態工学を活用した水環境修復人工湿地による水質浄化, *用水と廃水*, 40(10)
114. 井上博貴ら, ヨシ群落による水質浄化試験, *日本陸水學會甲信越支部會報*, 20
115. 小川哲郎, 2001, 天然素材や生物の力を活用した水質浄化, *ときめき*, 253, 島根縣農業試験場 home page, <http://www2.pref.shimane.jp/nousi/home/news/tokimeki/253.htm>
116. 小川哲郎, 2002, 微生物を利用した水質浄化, *ときめき*, 275, 島根縣農業試験場 home

page, <http://www2.pref.shimane.jp/nousi/home/news/tokimeki/275.htm>

117. 春木和久, 2001, 水質浄化に利用するためのアシ・ガマの改良, ときめき, 255, 島根縣農業試験場 home page, <http://www2.pref.shimane.jp/nousi/home/news/tokimeki/255.html>

## 주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.