

양질의 농업용수 확보를 위한  
**융복합 수처리기술 개발 및 적용(Ⅰ)**

Convergence technologies development and application  
for agricultural water treatment



농림축산식품부



한국농어촌공사



# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용”과제의 1차년도 보고서로 제출합니다.

2014년 12월 31일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사  
농어촌연구원

연구책임자 : 최 선 화

연구 원 : 김 해 도

이 태 호

이 진 경

김 동 환

유 선 아

공동연구기관명 : 충북대학교

연구책임자 : 정 세 응

연구 원 : 전 향 배

박 형 석

전 동 걸





# 요 약 문

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

2. 연구기간 : 2014년 1월 ~ 2014년 12월 (5년 중 1차년)

## 3. 연구 개요

### 3.1 연구배경 및 필요성

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

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

### 3.2 연구목적

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

### 3.3 연구범위 및 내용

#### 1) 국내 농업용 저수지 물리적 및 수질특성 분석

- 농업용 저수지의 시설수 현황
- 농업용 저수지 시설제원에 따른 분포현황
- 농업용 저수지의 수질 영향 요인분석
- 농업용 저수지의 물리적 인자에 따른 수질
- 농업용 저수지의 수질오염 유형 분류
- 농업용 저수지의 수질오염 원인

#### 2) 연구 대상지구 선정 및 현장 조사

- 융복합 수처리 기술 현장적용 저수지 선정
- 대상 저수지 호내 및 유입하천 수질조사
- 대상 저수지의 퇴적물 오염도 조사
- 대상 저수지의 퇴적물 오염물질 용출량 산정

#### 3) 농업용수 수질개선기술 개발 동향 분석

- 수질정화원리 및 수질개선기술 분류
- 국내외 수질개선기술 연구동향 분석
- 국내외 수질개선기술 개발 및 적용 사례 분석
- 기존 기술의 검토 및 농업용 저수지 적용성 평가

#### 4) 농업용 저수지 융복합 수처리 기술 개발 및 설계

- 융복합 수처리 기술의 구성
- 농업용 저수지 수질개선을 위한 융복합 수처리 공정 제안
- 유입부 오염부하 저감을 위한 수처리 시스템의 개발 및 설계
  - 복합응집장치, 생태융합형 미생물 매디아(수로식, 부유식) 개발
- 호 내 녹조발생 제어를 위한 복합수질정화장치의 개발 및 설계

#### 5) 융복합 수처리장치의 시제품 제작 및 성능평가

- 복합응집장치 시제품 제작
- 부유식, 수로식 생태융합형 시제품 설계
- 미생물 매디아의 부착능력 평가
- 현장적용방안 도출

### 4. 주요 연구결과

#### 4.1 국내 농업용 저수지의 물리적 및 수질 특성

- 국내에는 17,489개소(담수호 11개소 포함)의 농업용 저수지가 전국에 분포하고 있으며, 전체 수리답의 76.1%에 농업용수를 공급하고 있음
- 저수지 유효저수량별 분포현황은 10천 $m^3$ 이하가 전체의 45.7%, 10~50천 $m^3$ 의 규모가 36.7%, 50천 $m^3$ 이하의 소규모 저수지가 전체의 82.4%를 차지하고 있으며, 1945년 이전에 설치되어 경과연수가 70년 이상된 저수지가 전체의 약 52%이고, 1962년 이전에 설치되어 50년 이상된 저수지가 전체의 68.3%에 이르고 있음
- 유효수심에 따른 분포현황은 1m이하는 전체의 26.6%이고, 3m이하는 전체의 77.1%, 5m 이하가 전체의 91.1%로 수심이 낮은 저류지 형태이며, 유역배율(유역면적/만수면적) 5이상인 전체 시설의 97.4%로 국내 농업용 저수지는 태생적으로 부영양화에 취약한 구조로 되어 있음
- 저수지 물리적 인자와 호 내 수질과의 상관성을 분석한 결과, 유역면적, 유효저수량, 유효수심, 저수량은 수치가 작을수록, 유역배율은 수치가 클수록, 저수지 준공년도는 오래된 것일수록 수질오염도가 높은 것으로 나타남
- 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인을 규명하기 위해 주성분 및 요인분석을 실시한 결과, 6개의 주요인이 도출되었으며 각 요인과의

상관성이 높은 변수는 각각 다음과 같음. 요인 1은 저수량, 수해면적, 만수면적, 유역면적, 요인 2는 TN, TP, SS, 요인 3은 제당높이, 유효수심, 준공년도 등 저수지 용적과 관련된 변수, 요인 4는 pH, BOD, COD, TOC, Chl-a, 요인 5에는 제당길이, EC, Cl<sup>-</sup>, 요인 6은 수온과는 정(+)<sup>1</sup>의 상관성을, DO와는 부(-)<sup>2</sup>의 상관성을 나타냄

- 요인 1은 수리·수문학적 특성을 갖는 변수이고, 요인 2는 유입되는 입자성 오염물질과 상관성이 높은 변수, 요인 3은 저수지 용적에 관한 변수, 요인 4는 호소 내 물질대사와 관련 있는 변수, 요인 5는 호내 염류농도와 관련이 높은 변수, 요인 6은 계절적 변수로서, 농업용 저수지의 수질은 수리수문학적 특성에 의해 14.8%, 유역에서 유입되는 오염물질 등에 의해 14.5%, 유효수심 등 저수지 용적에 의해 13.3%, 호내 플랑크톤 증식 등 물질대사에 의해 11.8%, 강수량 등에 의해 10.5%, 그리고 겨울, 여름 등 계절적 요인에 의해 8.1%의 영향을 받는 것으로 나타났음

## 4.2 연구 대상지구 선정 및 현장 조사

- 본 연구에서 개발된 융복합 수처리기술의 현장적용실험을 위한 대상 지구로 국내 농업용저수지의 물리적 조건과 수질오염 특성을 대표할 수 있고, 농업용수 수질개선사업지구가 아니면서 지리적으로 접근이 용이한 경기도 관내 매화저수지, 과림저수지, 버들저수지를 대상 후보 지구로 선정하여 수질 및 퇴적물 조사를 실시하였음
- 매화저수지 수심은 2.0~2.4m이고, 표층수의 평균 COD는 12.9mg/L, 심층수는 11.1mg/L로 나타났고, 표층수의 TN과 TP는 각각 1.425mg/L, 0.121mg/L이고, 심층수의 TN과 TP는 각각 1.433mg/L, 0.126mg/L로 조사 시기에 상관없이 수질오염도가 높았으며, 수층 간에 수질차이가 없는 것으로 나타남
- 매화저수지 주 유입하천은 2개소가 있으며, 평상시 평균유량은 유입-1은 472.2m<sup>3</sup>/일이고, 유입-2는 982.3m<sup>3</sup>/일로 유입-2가 유입-1에 비해 유량이 풍부한 하천임. 유입-1과 유입-2의 COD, TN, TP는 각각 5.4 mg/L, 5.161mg/L, 0.284mg/L와 5.0mg/L, 6.467mg/L, 0.340mg/L로 유입-1에 비해 유입-2의 TN, TP 오염도가 더 높은 것으로 나타남

- 과림저수지의 수심은 2.1~3.6m(평균 2.9m)이고, 표층수의 평균 COD는 18.5mg/L, 심층수는 15.7mg/L, 표층수의 TN과 TP는 각각 2.726mg/L, 0.186mg/L이고, 심층수의 TN과 TP는 각각 2.485mg/L, 0.176mg/L로 평상시 높은 오염도를 보였으며, 표층수에서 오염도가 더 높았음
- 과림저수지 주 유입하천은 1개소가 있으며, 유입하천의 평상시 평균 유량은 928.5m<sup>3</sup>/일이고, COD, TN, TP는 각각 31.5mg/L, 8.456mg/L, 0.820mg/L로 수질오염도가 매우 높았으며, 이는 상류유역 미처리 생활오수의 지속적 유입에 기인된 것으로 판단됨
- 버들저수지 수심은 1.5~2.6m이고, 표층수의 평균 COD는 14.9mg/L, 심층수는 14.0mg/L이고, 표층수의 TN과 TP는 각각 1.622mg/L, 0.195mg/L, 심층수의 TN과 TP는 각각 1.742mg/L, 0.275mg/L로 모든 항목에서 높은 수질오염도를 보이고 있으며, TN 및 TP는 표층수에 비해 심층수에서 더 높은 경향을 보임
- 버들저수지는 농경배수로 형태인 유입하천 2개소와 오수 배출구 1개소가 있는데, 1개소 하천을 제외하고는 평상시에 유량이 거의 없음. 유입-1의 평상시 평균유량은 1,483.5m<sup>3</sup>/일이고, COD, TN, TP 평균농도는 4.8mg/L, 6.506mg/L, 0.264mg/L로 TN, TP의 오염도가 매우 높음
- 퇴적물 입도분석 결과, 토성은 매화저수지는 Sand, 버들저수지는 Silt, 과림저수지는 Silt Sand Loam에 근접하였으며, 퇴적물 오염도는 매화, 과림, 버들저수지 모두 높은 농도로 나타나 팔당호 준설 기준을 초과하였음. 매화저수지에서 TN 농도는 4629~6,152mg/kg, TP 1,145~1,228mg/kg, 강열감량은 13.27% 범위로 조사되었음
- 퇴적물 용출량 실험결과, 인 용출은 혐기성 조건에서 활발히 일어났으며, 혐기성 조건에서의 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물 내 인 용출속도는 각각 3.03~3.35mg/m<sup>2</sup>·d, 2.72~4.38mg/m<sup>2</sup>·d, 0.99~1.68mg/m<sup>2</sup>·d로 매화지의 용출속도가 가장 많은 것으로 나타남

#### 4.3 국내외 수질개선기술 개발 동향 및 실용화 사례

- 저수지 수질오염과 녹조문제를 해결하기 위해 국내외에서 오랫동안 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되었고, 현장적용을 시도하고 있음. 국내에서는 저수지와 댐을 관리하고 있는 우리 공사와 수자원공사에서 주로 현장적용 및 수질개선사업을 주도하고 있음

- 물리적 제어기술로는 인공폭기와 강제순환, 준설, 희석과 플러싱, 수위 저하와 침전여과, 퇴적물 건조, 퇴적물 캡핑, 선택취수, 수류 차단막, 초음파 기술 등이 개발되었고, 일부 기술은 현장에 적용되었음
- 화학적 제어기술은 천연살조제, 응집제, 보리벚짚 활용 등에 관한 연구가 주로 이루어졌으며, 국내와 달리 미국, 호주, 유럽 등의 국가에서는 알루미늄 화합물 등 응집제를 이용하는 기술 개발이 활발히 이루어졌으며, 오늘날에는 호소의 인 불활성화와 퇴적물 제어를 위한 일반적인 기술로 정착되고 있음
- 생물학적 제어기술로는 인공습지, 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 오염원 제어와 천적생물 및 어류조절을 통한 조류제어 기술들이 개발되어 적용되고 있으며, 최근에는 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어 방법에 대한 연구가 진행됨. 다양한 종류의 생물학적 수질 개선 방법이 연구되었으나, 저수지의 특성, 기후 등 환경조건에 따라 각기 다르게 반응하는 한계성 때문에 범용적 적용에 어려움이 있음
- 물리적 제어기술인 수중폭기장치, 인공물순환장치는 설치비용 대비 녹조제어 혹은 수질개선 효과가 미미하며, 실제 대규모 호소에 적용할 경우 영향반경이 작아 시설 투자 비용이 높아질 수 있음. 또한 수체의 성층 조건에 따라 운전을 정교하게 하지 않을 경우 수질악화 우려도 있으며, 가압부상장치와 조류제거선도 역시 국부적으로 밀집된 조류의 수거에 용이한 기술이지만 광범위한 수면에서는 효율이 떨어지며 일회성 대책으로 효과의 지속성이 부족한 한계성이 있음
- 초음파, 마이크로버블, 전기분해 및 응집 등은 국부적인 녹조제어 효과는 있으나, 대규모 저수지에서 처리 규모의 한계, 비용 상승의 한계점이 있으며, 조류 차단막 및 수류 차단막은 수온 성층 등 수리적 조건과 오염부하 경로 조건이 적합하지 않은 경우 조류 제어 효과가 미미하며, 홍수시 집적된 조류가 다시 유입될 우려가 높음
- 화학적 처리공법은 인 불활성화, 조류 성장 제어 등의 기술은 단기 효과가 뛰어난 반면 효과의 지속성, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점이 있어 단일기술로는 적용에 한계가 있음. 특히 실용화를 위해 적정투여량 측정기법, 응집제 투여 비용, 경제성 검토, 호소 내 투여 방법 및 설비 등에 관한 연구가 먼저 선행되어야 함

- 생물학적 처리공법은 호소의 수질정화 효과가 불확실하며, 한 가지 방법으로는 효과를 기대하기 어려움. 특히 계절에 따른 변동성에 취약하며, 인공습지 및 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 제거기법 이외에는 농업용 저수지에 적용사례가 거의 없음
- 물리적, 화학적, 생물학적 각각의 개별 기술들은 녹조발생과 관련된 요인들(영양염류, 빛, 수온성층, 남조의 부력조절 등) 중 일부 요인을 차단, 억제, 파괴, 제거함으로써 일시적으로 저수지 수질을 정화하는 효과는 있으나, 대부분 처리규모의 한계, 수질개선효과의 지속성, 유지관리의 어려움, 경제성, 생태·환경적 영향 등의 문제점 때문에 범용적 실용화에 한계가 있으므로, 이러한 한계성을 극복할 수 있는 기술개발이 필요함

#### 4.4 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리 기술 개발

- 본 연구에서는 국내 농업용 저수지의 물리적 및 수질오염 특성을 고려하여 저수지의 수리·수문학적 변화(강수량, 저수량 등)에 영향을 받지 않고, 유기물, N, P에 대한 처리효율이 높고, 수질효과를 장기간 지속할 수 있으며, 현장의 부지활용성, 시공가능성, 경관성, 유지관리 용이성, 경제성 등을 고려하여 융복합 수처리 기술을 개발하였음
- 융복합 수처리기술은 호소 유입수와 호내 수역을 대상으로 하였으며, 유입수 수처리의 목표는 호 내로 유입하는 고형물, 유기물, 질소, 인의 저감에 있으며, 호소는 DO 공급 등 수환경을 개선하여 부영양화를 사전에 예방하고 녹조 대발생시 녹조 제어를 목표로 하였음
- 호 유입부의 고형물, 유기물, N, P 부하량 저감을 위한 요소기술은 고속 응집 및 여과, 생물막 여재(유기물 제거)와 식물정화(질소, 인 제거) 기능을 유기적으로 조합하는 물리적, 화학적, 생물학적 융복합 처리 공정으로 구상하였음. 처리공정은 유입 및 전처리, 고속복합응집장치, 생태융합형 접촉산화조, 침전조, 흡착여과조, 방류조 순으로 구성되었으며, 고속복합응집장치는 유입수의 성상 및 현장여건에 따라 선택적으로 운영할 수 있도록 설계하였음
- 호 내에서는 호소 수질개선 및 녹조제어를 위한 융복합 기술로 구성·설계하였으며, 기술의 구성요소는 전기화학적 응집장치, 매디아를 이용한 미생물분해, 식물정화 및 토양흡착, 인공물순환장치, 마이크로버블, 이동이 용이한 인공섬 또는 바지선 등을 선택적으로 조합할 수 있도록 설계하였음

- 복합응집장치와 생태융합형 미디어조의 주요 설계인자인 체류시간, BOD 용적부하율, 미디어 충전률, 유효수심, 적정 DO 농도, 응집제 투입률 등을 Pilot Plant 실험을 통해 최적화할 계획임

#### 4.5 융복합 수처리장치 시제품 제작 및 성능평가

- 복합응집장치는 마이크로버블장치, 급속교반장치, 부상촉진장치, 회전식 플러 제거장치, Washing Type 스크린, 필터부로 구성되었으며, 시제품은 외형규모는  $\phi 1000 \times 2,000 \text{mmH}$ , 재질은 본체 및 내통 STS, 섬유상 (또는 펄라이트) 여과재, 스크레퍼 STS+EPDM, 유입유량은  $100 \text{m}^3/\text{일}$ , 체류시간은 10분 이내로 설계하여 시제품을 제작하였음
- 생태융합형 미디어는 저수지 유입부 및 저수지 가장자리에 적용할 수 있도록 수로식 및 부유식 일체형으로 고안하였으며, 구성은 미디어 모듈, 식생모듈, 공기공급시설, 에어 미스트, 펌프류 및 기타시설로 설계하였음. 현재 미디어의 선정을 위해서 미디어 재질에 따른 미생물 부착 능력과 수질정화효율 실험을 실시하고 있음
- 호소수 정화목적으로 개발된 수상복합정화장치는 전기화학적 응집장치, 미디어를 이용한 미생물분해, 식물정화, 토양흡착, 인공물순환장치, 마이크로버블장치로 구성되었고, 이동성과 고정성을 선택적으로 조합할 수 있도록 구상하여 현재 기술개발 중에 있으며, 2차 년도에 기술 완성도를 높여 시제품을 제작할 계획임

### 5. 기대효과 및 실용화방안

#### 5.1 기술적 측면

- 농업용수 대상 수처리기술 개발로 공사 관리 저수지의 수질개선효과
  - ☞ 2012년 농업용수 수질기준 초과시설 : 306개소(3,361개소의 9.1%)
- 개발된 수처리 기술의 실규모 현장적용실험으로 연구결과에 대한 신뢰도 제고 및 사업효과 분석으로 수질개선사업의 적용 타당성 확보
- 개발된 수처리 기술의 특허등록 및 환경 신기술 인증 취득으로 공사의 수처리 기술력에 대한 대외적인 신뢰도 제고로 국내 및 해외 사업화 진출 기반 마련



## 5.2 경제·산업적 측면

- 세계 물산업은 향후 10년간 2배 이상으로 확대(2015년 1,598조원)되어 세계 경제의 한 축으로 이를 것으로 전망되고 있으며, 국내에서도 농업용수의 사용량은 약 48%로 수요량이 가장 많은 분야이며, 최근에는 농업용수에서 농어촌용수로 다목적화 되고 있으며, 그 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다
- 본 연구개발 성과는 2013년 기준으로 오염된 농업용수 저수지 147개소(유효저수량 약 442,363천톤)에 적용이 가능할 것으로 예상되며, 자연정화공법 사업비(1저수지당 20~30억)을 적용할 경우 3,234억원의 경제적 효과가 예상된다
- 양질의 농업용수 공급이 가능함에 따라 고품질 수익형 수출주도형 농작물 재배시스템 구축이 가능해지고, 이로 인한 고부가가치 수익형 농작물 재배에 따른 농촌지역의 소득 창출 및 지역 발전에 기여
- 깨끗한 농업용수로 생산된 농산물에 대한 대국민 안전의식 제고 및 우리 농산물의 국제시장에서의 경쟁력 확보
- 농업용수 수질개선효과는 안전 및 친환경농산물 생산뿐만 아니라 농어촌지역의 어메니티 증가 등으로 인한 농업농촌 관광활성화 등 농어촌 지역에 미치는 직·간접적인 효과는 상당할 것으로 예상된다

# Summary

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

2. Period : 2014. 1.~ 2014. 12.(1st of five year)

## 3. Necessity and Objectives

### 3.1 Necessity

- Recently, agricultural reservoirs are considered as a useful resource for recreational purposes, tour and cultural amenity for regional people as well as irrigation water supply.
- However, most of the agricultural reservoirs are showing a serious eutrophic state and high level of organic contamination, and some of them have frequent algal bloom and offensive odor problems preventing from sustainable water use and recreation activities.
- In particular, 44.7% of the aged agricultural reservoirs that constructed before 1945 exceed the water quality criteria(COD 8.0 mg/L) for irrigational water use.
- Although Korean government has started water quality restoration programs for the agricultural reservoirs since 1998, it takes long time to make them effective because most of the projects are focused on natural purification facilities such as artificial wetlands and retention ponds, which are not suitable measures for a prompt treatment against algal bloom events.
- To cope with the algal bloom events, various physical, chemical, and biological techniques have been developed recently, but there are still a great deal of limitations between the techniques and the real worlds because of limited spatial scales of treatment, operations and maintenance issues, capital cost, and sometimes ecological impact.

### 3.2 Objectives

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

## 4. Scopes and results

### 4.1 Selection of an experiment reservoir and Survey of the water quality and sediment contamination

- 1) Selection of an experiment reservoir
  - Maehwa reservoir located in Kyunggi-do is selected as a test bed reservoir for this study after reviewing 3 reservoirs (Maehwa, Buddle, Gwarim).
  
- 2) Water quality survey of the reservoir and the inflow rivers
  - The water depth of the Maehwa reservoir is 2.0~2.4m. The average COD, TN, and TP of surface water are appeared as 12.9 mg/L, 1.425mg/L, and 0.121mg/L, and the those of deep water as 11.1mg/L, 1.433mg/L, and 0.126mg/L, respectively. The water pollution level is high regardless of the survey period, and the water quality appears to be no difference between the surface water and the deep water.
  - Main inflow rivers of the Maehwa reservoir are the two rivers. The average flow rate of the Maehwa-1 and Maehwa-2 each are 472.2m<sup>3</sup>/d and 982.3m<sup>3</sup>/d. COD, TN and TP of the Maehwa-1 and Maehwa-2 respectively showed 5.4mg/L, 5.161mg/L, 0.284mg/L and 5.0mg/L, 6.467mg/L, 0.340mg/L. Therefore, water pollution of the Maehwa-2 appear to be higher than the Maehwa-1.
  - The water depth of the Gwarim reservoir is 2.1~3.6m(average 2.9m). The average COD, TN, and TP of surface water are

appeared as 18.5mg/L, 2.726mg, and 0.186mg/L, and the those of deep water as 15.7mg/L, 2.485mg/L, and 0.176mg/L, respectively. Gwarim reservoirs showed a high pollution levels, and the pollution level was higher in the surface water than the deep water.

- Gwarim reservoir has only one main inflow river. The average flow rate of the river is 928.5m<sup>3</sup>/d. COD, TN and TP of the inflow river respectively showed 31.5mg/L, 8.456mg/L, and 0.820mg/L. It is showed a high pollution levels. This being judged to be due to the continued inflow of untreated sewage from watershed.
- The water depth of the Buddle reservoir 1.5~2.6m. The average COD, TN, and TP of surface water are appeared as 14.9mg/L, 1.622mg, and 0.195mg/L, and the those of deep water as 14.0mg/L, 1.742mg/L, and 0.275mg/L, respectively. Buddle reservoirs showed a high pollution levels, and the TN and TP concentration was higher in the deep waters than the surface water.
- Buddle reservoir have a sewage outlet and two rivers like a agricultural drainage. There is little flow at usual, except for one main stream. The average flow rate of the river is 1,483.5m<sup>3</sup>/d. COD, TN and TP of the inflow river respectively showed 4.8mg/L, 6.506mg/L, and 0.264mg/L. TN and TP concentration was very high in the main stream.

### 3) Sediment contamination survey

- Sediment contamination survey was implemented to assess the contamination level of sediment and release rate of nutrients in the reservoir.
- The grab sampled sediments showed a high level of contamination as TN 4,629~6,152mg/kg, TP 1,145~1,228mg/kg, and incineration rate of 13.27%.
- The phosphorus release rate under anaerobic condition was 3.19mg/m<sup>2</sup>·d in the Maewha reservoir.

## 4.2 Review on the water quality restoration techniques for agricultural reservoir

### 1) Domestic and international R&Ds

- In Korea, research for the development of water quality restoration techniques for lakes and reservoirs has been lead by Korea Rural Community Corporation(KRC) and K-water.
- The techniques that have been studied by KRC include design, construction and operations of artificial wetlands and retention ponds for the reduction of pollutant load into reservoirs, in-pool algal control techniques for a short-term emergency water quality management, ecological re-engineering of lake shore areas, re-use of wastewater for irrigation water using membrane techniques, biological control of algal bloom using predators.
- The techniques that have been studied by K-water include a curtain wall for preventing algal spreading, algicide made of natural materials, algae removal ship equipped with collection and filtering processes and ultrasonic treatment.
- For this study, numerous domestic patents were collected and analyzed, including 165 physical treatment techniques(membrane, centrifugal, absorption, filtration etc.), 62 physio-chemical techniques(ozne, ultraviolet, ultrasound, photo-catalyzators), 52 electro-chemical techniques, and 84 biological techniques.
- In other countries, diverse techniques for the restoration of reservoir water quality have been developed at the catchments level including point and non-point pollutant control. Non-point sources control measures include wetlands, retention ponds and pre-reservoirs. Point sources control measures include upgrading wastewater treatment plants by introducing precipitation and flocculation(tertiary treatment), or adjusting biological treatment to increase phosphorous removal.
- In-lake techniques are those that are conducted in the lake itself and include physical, chemical, and biological measures. Physical

techniques include aeration and water circulation, dredging, dilution and flushing, water level control and sediment dry, bottom capping, selective withdrawal, curtain wall, ultrasound, and micro bubbles. Chemical techniques include algicide, phosphorus inactivation using coagulation and settling, and barley straw. Biological techniques include biomanipulation, biopreparations containing saprophytic microorganisms and phyto-remediation using plants.

## 2) Analysis on the application cases of the techniques

- Several domestic techniques have been commercialized and applied to test-bed ponds, reservoirs, or for the emergency control of algal bloom events in some reservoirs.
- The techniques and developer are summarized as follows.
  - Physical techniques: Sola water circulation system, Contactless plasma system(s), Ultrasonic algae control system, Integrated submersible pressure flotation technique, Portable pressure flotation device, S-DAF flotation separation, Multistage pressure filter waster purifying system, Ultrasonic algae control system, Clay spraying ship, Hybrid electrochemical stream diffusion system, Aeration and agitation circulation system.
  - Chemical techniques: Natural inorganic coagulant complex method, Ozone micro-bubble method, Chlorine dioxide processing, Natural algicidal agent application technique,
  - Biological techniques: Predatory natural enemy utilization technique (RRI), Algicidal Medi-Tide, Complex microbial agent application.
  - Combined techniques: Combined system with underwater coagulation-flotation and plant island.
- In Germany, the most effective phosphorus elimination plant so called PEP has been constructed for Wahnbach reservoir. The method is based on phosphorus precipitation and flocculation by

ferric ions and following removal of precipitates by filtration. This method is extremely efficient, capable to decrease phosphorus concentration in effluent to  $5\mu\text{g/L}$ , however it is very expensive.

### 3) Limitations of existing techniques

- Most of the existing techniques are not an integrated technique but a single purpose or fractured method targeting control of partial process of algal bloom.
- The main limitations of most of the physical techniques are low efficiency in water quality treatment and algae control, difficulty for applying to large scale (spatial limitation), and sometimes high maintenance and operation costs.
- The main limitations of chemical techniques are a short time effectiveness, and potential side effect on ecosystem.
- The main limitations of the biological techniques are uncertainty in the effect of water quality improvement, seasonal variations, and site-specific effectiveness.

## **4.3 Development and design of a cost-effective Convergence water treatment system**

### 1) Basic considerations

- Capital Costs
- Easy operations and maintenance
- Removal efficiency
- Applicability
- Potential for negative impacts

### 2) Development of a hybrid water treatment system

- A hybrid water treatment system including physiochemical and biological treatment processes is designed for the reduction of pollutant loading into reservoir. The system includes a combined

coagulation and filtration device, string type media with aeration system for biological removal of organic pollutants, and phyto-remediation process using plants.

- An integrated movable water purification system is suggested for the control of algal bloom in reservoir. The system consists of artificial water circulation device with micro-bubbles, electrolysis device, soil filtration device, and plants for phyto-remediation.

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

### **5.1 Expectation**

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

### **5.2 Utilization plan**

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



# 목 차

<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
제1절 연구배경 및 목적 .....	3
1. 연구배경 및 필요성 .....	3
2. 연구목적 .....	4
제2절 연구내용 및 추진체계 .....	5
1. 연도별 연구개발 목표 .....	5
2. 연구범위 및 세부내용 .....	5
3. 연구 추진체계 .....	6
제3절 기대효과 및 활용방안 .....	8
1. 기술적 측면 .....	8
2. 경제·산업적 측면 .....	8
<b>제2장 농업용 저수지의 특성</b> .....	<b>9</b>
제1절 농업용 저수지의 물리적 특성 .....	11
1. 농업용 저수지의 시설수 현황 .....	11
2. 농업용 저수지 시설제원에 따른 분포현황 .....	12
제2절 농업용 저수지 수질특성 .....	15
1. 농업용 저수지의 수질현황 .....	15
2. 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인 .....	19
3. 농업용 저수지 수질오염 유형 .....	40
4. 농업용 저수지의 주요염원 .....	42
<b>제3장 연구대상지구 선정 및 현장조사</b> .....	<b>43</b>
제1절 연구대상지구 선정 .....	45
1. 대상지구 선정 조건 .....	45
2. 연구대상지구 후보지구 .....	46
3. 후보지구 수질현황 .....	47

제2절 저수지 및 유입하천 수질조사 .....	51
1. 수질조사 위치 및 방법 .....	51
2. 호 내 및 유입하천 수질조사 결과 .....	56
3. 매화저수지 정밀조사 결과 .....	74
제3절 저수지 퇴적물 오염도 및 용출량 산정 .....	83
1. 퇴적물 오염도 조사 .....	83
2. 퇴적물의 오염물질 용출량 산정 .....	101
<b>제4장 농업용수 수질개선기술 개발 동향 .....</b>	<b>111</b>
제1절 수질정화 원리 및 수질개선기술 분류 .....	113
1. 수질정화 원리 .....	113
2. 수질개선기술 분류 .....	114
제2절 농업용수 수질개선기술 연구동향 .....	117
1. 국내 연구동향 .....	117
2. 국외 연구동향 .....	121
제3절 수질개선기술 개발 및 실용화 사례 .....	125
1. 국내 수질개선기술 개발 및 적용사례 .....	125
2. 국외 수질개선기술 개발 및 적용사례 .....	153
제4절 기존 기술의 검토 및 적용성 평가 .....	165
1. 물리적 제어기술 .....	165
2. 화학적 제어기술 .....	170
3. 생물학적 제어기술 .....	173
<b>제5장 농업용 저수지 융복합 수처리기술 개발 .....</b>	<b>177</b>
제1절 적용성이 높은 요소기술 개발 및 설계 .....	179
1. 기술개발 방향 및 고려사항 .....	179
2. 융복합 수처리 기술의 구성 .....	180
3. 유입부 수처리장치의 기술구성과 설계 인자 .....	181
4. 호내 수질정화기술 구성과 설계인자 .....	192
제2절 융복합 수처리시스템 시제품 제작 .....	193
1. 복합응집장치 .....	193

2. 생태융합형 미디어 .....	194
제3절 성능평가 및 수질정화효율 검증 .....	195
1. 미디어 부착능력 평가 .....	195
2. 현장적용방안 .....	197
제6장 요약 및 결론 .....	199
참고문헌 .....	207

## 표 차 례

(표 2.1-1) 국내 농업용 저수지 지역별 분포현황 .....	11
(표 2.1-2) 농업용 저수지의 수혜면적별 분포 현황 .....	12
(표 2.2-1) 농업용 저수지 연도별 수질현황 .....	16
(표 2.2-2) 주성분 분석에 의한 요인 추출 .....	20
(표 2.2-3) 요인분석에 의한 변수 적재량 .....	21
(표 2.2-4) 저수지 수질에 영향을 미치는 요인특성 및 기여율 .....	22
(표 2.2-5) 저수지 물리적 인자와 수질항목간의 상관관계 .....	23
(표 2.2-6) 저수지 유효저수량에 따른 ANOVA 분석결과 .....	24
(표 2.2-7) 유효저수량에 따른 기술통계치 .....	25
(표 2.2-8) 저수지 유효저수량 구간별 사후 검정 결과 .....	27
(표 2.2-9) 저수지 준공 경과년수에 따른 ANOVA 분석결과 .....	28
(표 2.2-10) 저수지 준공 경과년수에 따른 기술통계치 .....	29
(표 2.2-11) 저수지 준공 경과년수별 사후 검정 결과 .....	31
(표 2.2-12) 저수지 유효수심에 따른 ANOVA 분석결과 .....	32
(표 2.2-13) 유효수심에 따른 기술통계치 .....	33
(표 2.2-14) 저수지의 유효수심 구간별 사후 검정 결과 .....	35
(표 2.2-15) 계절에 따른 ANOVA 분석결과 .....	36
(표 2.2-16) 계절에 따른 기술통계치 .....	37
(표 2.2-17) 조사계절별 사후 검정 결과 .....	39
(표 2.2-18) 농업용 저수지의 수질오염유형 .....	41
(표 3.1-1) 현장적용실험대상 후보지구의 시설제원 .....	46
(표 3.1-2) 연구대상 후보지구의 연도별 수질 현황 .....	50
(표 3.2-1) 매화저수지 유역의 오염배출부하량 .....	75
(표 3.3-1) 퇴적물 조사 일자 및 지점 .....	84
(표 3.3-2) 퇴적물 분석방법 및 분석에 이용된 기기 .....	86
(표 3.3-3) 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물의 입도 특성 .....	92

(표 3.3-4) 저수지 퇴적물의 이화학적 특성(1, 2차) .....	97
(표 3.3-5) 저수지 퇴적물의 이화학적 특성(3, 4차) .....	97
(표 3.3-6) 저수지별 퇴적물 입도분포 및 오염물질 함량 .....	100
(표 3.3-7) 저수지별 중금속 함량 .....	100
(표 3.3-8) 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물의 영양염류 용출속도 .....	105
(표 3.3-9) 국내 담수호의 인 용출 속도 비교 .....	110
(표 4.1-1) 수질정화 메카니즘 .....	113
(표 4.2-1) 농업용수 수질개선기술 연구실적 .....	118
(표 4.2-2) 호소 수질개선기술 연구실적 .....	119
(표 4.2-3) 국내 조류관련 연구개발 동향 .....	120
(표 4.2-4) 일본의 호소의 수질정화기술 실증모델사업 일람표 .....	124
(표 4.3-1) 국내의 물리적 수질정화기술 소개 .....	126
(표 4.3-2) 국내의 화학적 수질정화기술 소개 .....	127
(표 4.3-3) 국내의 생물학적 수질정화기술 소개 .....	128
(표 4.3-4) 국내의 융복합 수질정화기술 소개 .....	129
(표 4.3-5) 국내 수질개선기술 현장적용 및 사업화 사례 .....	130
(표 4.3-6) 인공물순환장치 적용사례 .....	131
(표 4.3-7) 수중포기장치 설치 현황 .....	134
(표 4.3-8) 이동식 가압부상법의 수질정화효과 .....	137
(표 4.3-9) 대청호에 적용한 조류제거선 제원 .....	141
(표 4.3-10) 퇴적물처리시범사업 대상 저수지 사업내용 .....	144
(표 4.3-11) 마이크로/나포기포 발생 관련 기술개발현황 .....	148
(표 4.3-12) 인공습지의 환경·생태적 기능 .....	149
(표 4.3-13) 농업용 저수지에 설치된 인공습지, 인공식물섬, 수초저류지 사례 ..	150
(표 4.4-1) 호소 수질개선을 위한 물리적 제어 기술 특징 .....	167
(표 4.4-2) 물리적 제어 기술의 적용성 평가 .....	169
(표 4.4-3) 호소 수질개선을 위한 화학적 제어 기술 특징 .....	171
(표 4.4-4) 화학적 제어 기술의 적용성 평가 .....	172
(표 4.4-5) 호소 수질개선을 위한 생물학적 제어 기술 특징 .....	174

(표 4.4-6) 생물학적 제어 기술의 적용성 평가 .....	175
(표 5.1-1) 농업용 저수지 융복합 수처리시스템 요소기술 구성 .....	180
(표 5.3-1) 매디아 부착능력 평가실험을 위한 운전조건 .....	196
(표 5.3-2) 실험에 사용된 인공연못 수질특성 .....	197

## 그 립 차 례

<그림 1.2-1> 효율적 연구수행을 위한 추진전략 .....	7
<그림 2.1-1> 농업용 저수지의 수혜면적 구간별 시설수 현황 .....	12
<그림 2.1-2> 농업용 저수지의 유효저수량 구간별 시설수 현황 .....	13
<그림 2.1-3> 농업용 저수지의 준공년도에 따른 시설수 현황 .....	13
<그림 2.1-4> 농업용 저수지의 유효수심에 따른 시설수 현황 .....	14
<그림 2.1-5> 저수지의 유역배율에 따른 시설수 현황 .....	14
<그림 2.2-1> 농업용 저수지 연도별 수질현황 .....	18
<그림 2.2-2> 계절에 따른 수질변화 추이 .....	38
<그림 2.2-3> 농업용 저수지 수질오염유형 분류도 .....	40
<그림 2.2-4> 연도별 주요염원 변화추이 .....	42
<그림 3.1-1> 현장적용실험대상 후보지구 저수지의 위성사진 .....	46
<그림 3.1-2> 매화저수지 전수조사결과 .....	47
<그림 3.1-3> 버들저수지 전수조사결과 .....	48
<그림 3.1-4> 과림저수지 전수조사결과 .....	49
<그림 3.2-1> 연구대상 후보지구 수질조사 위치도 .....	52
<그림 3.2-2> 매화저수지 및 유입하천 전경 .....	53
<그림 3.2-3> 과림저수지 및 유입하천 전경 .....	54
<그림 3.2-4> 버들저수지 및 유입하천 전경 .....	55
<그림 3.2-5> 매화저수지 및 유입하천 수질 .....	58
<그림 3.2-6> 매화저수지 및 유입하천 수질 .....	59
<그림 3.2-7> 매화저수지 및 유입하천 수질 .....	60
<그림 3.2-8> 과림저수지 호내 및 유입하천 수질 .....	63
<그림 3.2-9> 과림저수지 호내 및 유입하천 수질 .....	64
<그림 3.2-10> 과림저수지 및 유입하천 수질 .....	65
<그림 3.2-11> 버들저수지 호내 및 유입하천 수질 .....	68
<그림 3.2-12> 버들저수지 호내 및 유입하천 수질 .....	69

<그림 3.2-13> 버들저수지 호내 및 유입하천 수질 .....	70
<그림 3.2-14> 매화저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도 .....	71
<그림 3.2-15> 과림저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도 .....	72
<그림 3.2-16> 버들저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도 .....	73
<그림 3.2-17> 매화저수지 유역의 행정구역 위치도 .....	74
<그림 3.2-18> 매화저수지 호내 위치에 따른 수질현황 .....	77
<그림 3.2-19> 매화저수지 수층에 따른 수질현황 .....	79
<그림 3.2-20> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH .....	81
<그림 3.3-1> 퇴적물 형성 과정 및 수체 내에서의 일련의 변화 과정 ..	84
<그림 3.3-2> 퇴적물 채취 모습 및 각 조사지구별 위치도 .....	85
<그림 3.3-3> 매화, 버들, 과림 퇴적물 내 입도분포 결과(1차) .....	88
<그림 3.3-4> 매화, 버들, 과림 퇴적물 내 입도분포 결과(2차) .....	89
<그림 3.3-5> 매화저수지 위치별 퇴적물 내 입도분포 결과(1차) .....	90
<그림 3.3-6> 매화저수지 위치별 퇴적물 내 입도분포 결과(2차) .....	91
<그림 3.3-7> 매화지, 버들지, 과림지의 퇴적물 강열감량 .....	93
<그림 3.3-8> 매화저수지 위치별 퇴적물 강열감량 .....	94
<그림 3.3-9> 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물의 이화학적 특성 .....	98
<그림 3.3-10> 매화지 위치별 퇴적물의 이화학적 특성 .....	99
<그림 3.3-11> 퇴적물 용출실험 장치 모식도 .....	101
<그림 3.3-12> 매화지, 버들지, 과림지에 대한 1차 용출실험 .....	102
<그림 3.3-13> 2차, 3차, 4차의 용출실험 .....	102
<그림 3.3-14> 1차 용출실험 결과 .....	106
<그림 3.3-15> 2차 용출실험 결과 .....	107
<그림 3.3-16> 3차 용출실험 결과 .....	108
<그림 3.3-17> 4차 용출실험 결과 .....	109
<그림 4.1-1> 수처리방식에 따른 분류 .....	114
<그림 4.1-2> 수질개선시설의 설치 위치에 따른 분류 .....	115
<그림 4.1-3> 정화원리에 따른 수질개선공법 분류 .....	116
<그림 4.3-1> 국내 정체수역 수질정화기술 동향 .....	125



<그림 4.3-2> 인공물순환 원리 및 장치 .....	131
<그림 4.3-3> 수중포기장치 종류별 기작 .....	133
<그림 4.3-4> 심층포기의 개념도 .....	133
<그림 4.3-5> 분수를 이용한 조류증식 제어 사례 .....	134
<그림 4.3-6> 다양한 교반장치 .....	134
<그림 4.3-7> 가압부상 수질정화 개념도 .....	135
<그림 4.3-8> 일산호수공원의 가압부상장치(지상) .....	136
<그림 4.3-9> 인천 소래공원의 가압부상장치(지하) .....	136
<그림 4.3-10> 가압부상공법에 의한 조류제거 현장실험 .....	137
<그림 4.3-11> 초음파를 이용한 녹조 제어 원리 .....	138
<그림 4.3-12> 초음파를 이용한 녹조 제어 공정 .....	139
<그림 4.3-13> 대청호 조류 차단막 설치 전경 .....	139
<그림 4.3-14> 조류제거선의 모습 및 구조도 .....	140
<그림 4.3-15> 소규모 이동식 종합 수질개선 장치 .....	141
<그림 4.3-16> 대청호 황토살포선 및 황토살포 전경 .....	142
<그림 4.3-17> 오니전용 준설선 시험운영 사례 .....	144
<그림 4.3-18> 마이크로버블의 자기압괴 현상 .....	146
<그림 4.3-19> 오존마이크로버블의 원리 .....	146
<그림 4.3-20> 오존마이크로버블 장치의 설비 구성 .....	147
<그림 4.3-21> 고정식 및 이동식 오존마이크로버블 운영 방법 .....	147
<그림 4.3-22> 지표흐름 인공습지 정화원리 모식도 .....	149
<그림 4.3-23> 지표흐름 인공습지 설치 사례 .....	150
<그림 4.3-24> 천연수질개선제(워터헬스)의 구성성분 .....	151
<그림 4.3-25> 천연수처리제 지멘토스 .....	152
<그림 4.3-26> 아쿠아리프트 조류제거기술 모식도 .....	152
<그림 4.3-27> 일본 Terauchi 저수지 차단막 설치도 .....	155
<그림 4.3-28> 독일 수질개선을 위해 인 제거 시스템 .....	159
<그림 5.1-1> 농업용수 융복합 수처리기술 개발 방향 .....	179
<그림 5.1-2> 농업용수 융복합 수처리기술 구성 .....	180

<그림 5.1-3> 농업용저수지 유입부 수처리시스템 공정 .....	181
<그림 5.1-4> 농업용수 수질개선을 위한 유입부 수처리공정 개요도 ..	183
<그림 5.1-5> 복합응집장치의 모식도 .....	186
<그림 5.1-6> 일반적인 응집시스템 종류별 원리 및 특징 .....	187
<그림 5.1-7> 내부 Voltex Screen 모식도 .....	187
<그림 5.1-8> 하천의 자정작용 원리 및 미생물 접촉재의 발상 .....	189
<그림 5.1-9> 미생물 미디어를 이용한 오염물질 제거 모식도 .....	189
<그림 5.1-10> Air-mist 장치 .....	190
<그림 5.1-11> 생태융합형 접촉미디어 구성도 .....	191
<그림 5.1-12> 생태융합형 접촉미디어 상세도 .....	191
<그림 5.1-13> 수상복합정화장치의 개념도 .....	192
<그림 5.2-1> 복합응집장치 시제품 제작 과정 .....	193
<그림 5.2-2> 수로식 일체형 생태미디어 시스템 .....	194
<그림 5.2-3> 부유식 일체형 생태미디어 시스템 .....	194
<그림 5.3-1> Lab Scale 미디어 실험장치 .....	195
<그림 5.3-2> 미생물 부착능력 평가를 위한 미디어 .....	196
<그림 5.3-3> 시간경과에 따른 미생물 부착현상 .....	197

# 제1장

---

## 서론

---



# 제1장 서론

## 제1절 연구배경 및 목적

### 1. 연구배경 및 필요성

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

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

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

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

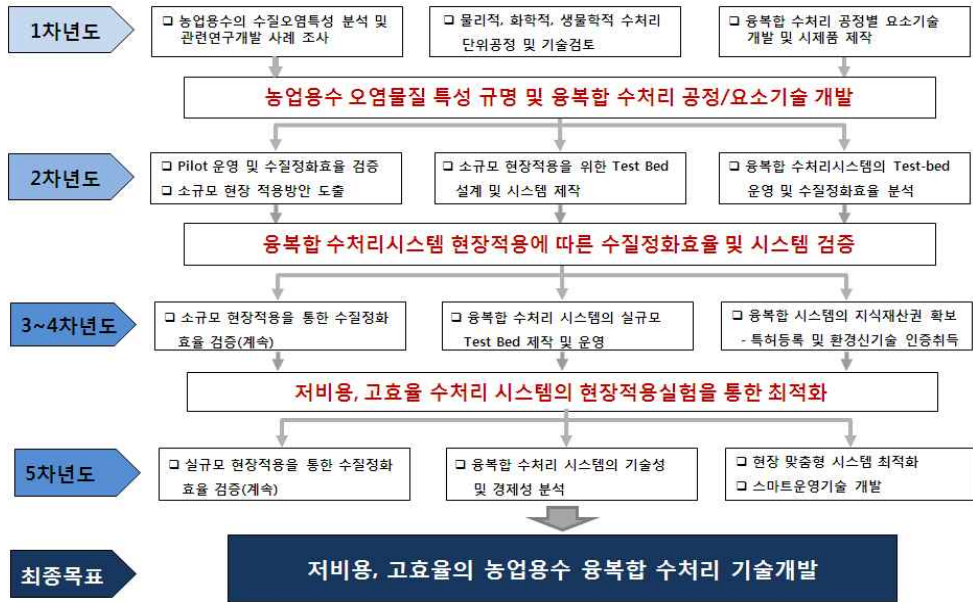
농업용수는 농어촌지역의 농업용수 공급이 목적이므로 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용 호소의 특성상 대규모의 많은 수량을 처리해야 하므로 수생태적으로 안전한 저비용, 고효율의 수처리 기술 및 시스템 개발이 필요한 실정이다.

## 2. 연구목적

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

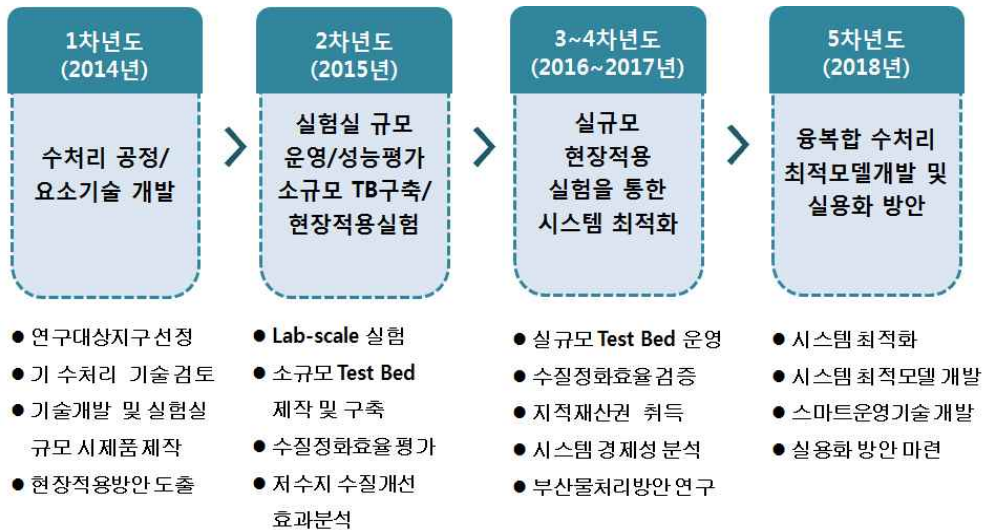
## 제2절 연구내용 및 추진체계

### 1. 연도별 연구개발 목표



### 2. 연구범위 및 세부내용

#### 1) 연도별 연구범위



## 2) 2014년도 연구내용

연구목표	연구내용 및 범위
농업용 저수지 특성 및 관련연구개발 동향 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농업용수 시설수 및 수질현황 파악               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 농업용수 측정망 DB 구축자료 활용</li> </ul> </li> <li>○ 농업용수 수질오염 특성분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지표수 및 저층수, 퇴적물 수질오염도 분석</li> <li>- 농업용수 수질요인 분석</li> </ul> </li> <li>○ 관련 연구개발 동향 조사</li> <li>○ 연구대상지구 선정 및 현장조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 호소 수질 및 퇴적물 오염도 조사</li> <li>- 유입하천 수질조사 등</li> </ul> </li> </ul>
기존 개발된 수처리기술 사례조사 및 농업용저수지 적용성 검토	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 호소 수질개선기술 개발 동향조사</li> <li>○ 수질개선기술의 농업용 저수지 적용성 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 물리적 기술의 적용성 검토</li> <li>- 화학적 기술의 적용성 검토</li> <li>- 생물학적 기술의 적용성 검토</li> </ul> </li> </ul>
융복합 수처리기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농업용수에 적용 가능한 공정/요소기술 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유입수 처리를 위한 처리공정/요소기술 개발</li> <li>- 호소 내 수질개선에 적합한 요소기술 개발</li> </ul> </li> </ul>
융복합 수처리시설의 시제품 제작 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리장치 시제품 제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개발된 융복합 수처리 장치의 시제품 제작</li> <li>- 수처리 장치의 Lab-scale 실험</li> <li>- 현장적용방안 도출</li> </ul> </li> </ul>

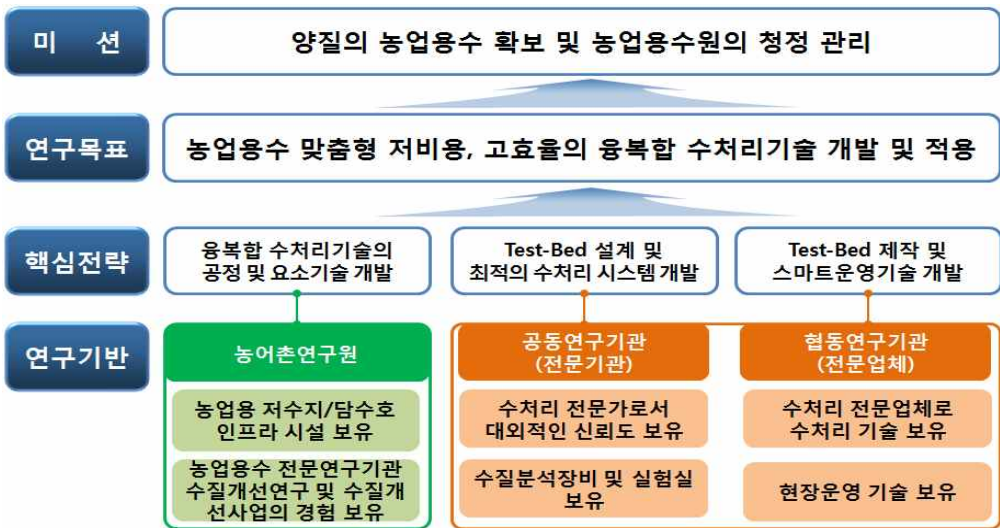
## 3. 연구 추진체계

### 1) 추진전략 및 방법

- 산·학·연 협동 및 공동연구로 연구의 효율성 제고 및 연구결과의 극대화
  - 수처리 전문업체와 협동연구로 연구 사업비의 효율적 비용집행
  - 수처리 전문기관과의 공동연구로 연구결과 대외적인 신뢰도 제고 및 정부기관의 신기술인증 자격취득 기반마련
  - 해외 사례 및 자료 수집을 위한 공동 네트워크 구성

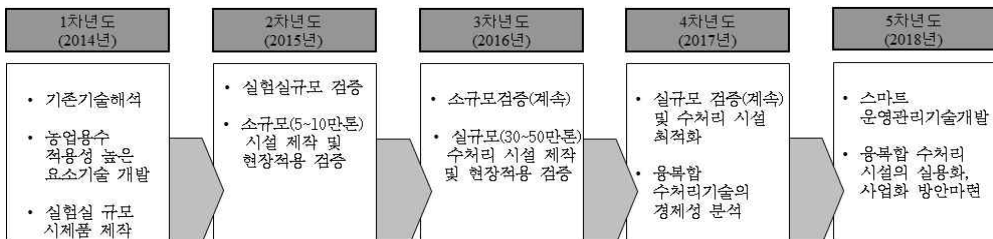


- 외부 공개입찰을 통한 협동 및 공동연구기관 선정
  - 공정한 기회를 부여하기 위해 공개 입찰을 통한 선정
- 수처리 장치의 실규모 현장적용 실험을 통한 최적모델 개발
  - 융복합 수처리장치의 실험실 규모, 소규모 현장적용실험을 통한 최적시스템 개발로 기술의 적용성을 높임
- 대외 수처리 전문가들의 자문회의 등을 통해 개발된 수처리 기술의 지속적 검증
  - 수처리 전문가들의 자문회의 등을 통한 지속적인 기술 검증
  - 수처리 대내외 전문가 초청 세미나 등을 통한 대외 기술력 흡수



<그림 1.2-1> 효율적 연구수행을 위한 추진전략

## 2) 연도별 단계적 추진체계



## 제3절 기대효과 및 활용방안

### 1. 기술적 측면

- 농업용수 적용 수처리기술 개발로 공사 관리 저수지의 수질개선효과
  - ☐ 2012년 농업용수 수질기준 초과시설 : 306개소(3,361개소의 9.1%)
- 개발된 수처리 기술의 실규모 현장적용실험으로 연구결과에 대한 신뢰도 제고 및 사업효과 분석으로 수질개선사업의 적용 타당성 확보
- 개발된 수처리 기술의 특허등록 및 환경 신기술 인증 자격 취득으로 공사의 수처리 기술력에 대한 대외적인 신뢰도 확보로 국내 및 해외 사업화 진출 기반 마련

### 2. 경제·산업적 측면

- 세계 물산업은 향후 10년간 2배 이상으로 확대(2015년 1,598조원)되어 세계 경제의 한 축을 이룰 것으로 전망되고 있으며, 국내에서도 농업용수의 사용량은 약 48%로 수요량이 가장 많은 분야이며, 최근에는 농업용수에서 농어촌용수로 다목적화 되고 있으며, 그 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다
- 본 연구개발 성과는 2013년 기준으로 오염된 농업용수 저수지 147개소(유효저수량 약 442,363천톤)에 적용이 가능할 것으로 예상되며, 자연정화공법 사업비(1저수지당 20~30억)를 적용할 경우 3,234억원의 경제적 효과가 예상된다
- 양질의 농업용수 공급이 가능함에 따라 고품질 수익형 수출주도형 농작물 재배시스템 구축이 가능해지고, 이로 인한 고부가가치 수익형 농작물 재배에 따른 농촌지역의 소득 창출 및 지역 발전에 기여
- 깨끗한 농업용수로 생산된 농산물에 대한 대국민 안전의식 제고 및 우리 농산물의 국제시장에서의 경쟁력 확보
- 농업용수 수질개선효과는 안전 및 친환경농산물 생산뿐만 아니라 농어촌 지역의 어메니티 증가 등으로 인한 농업농촌 관광활성화 등 농어촌 지역에 미치는 직·간접적인 효과는 상당할 것으로 예상된다

## 제2장

---

# 농업용 저수지의 특성

---



## 제2장 농업용 저수지의 특성

### 제1절 농업용 저수지의 물리적 특성

#### 1. 농업용 저수지의 시설수 현황

국내 농업용 저수지의 시설수는 저수지 17,478개소, 하구담수호 11개소를 포함하여 총 17,489개소에 이르며, 전체 수리답의 76.1%에 물을 관개하고 있다. 지역별로는 경북지역에 5,544개소(전체의 31.7%)로 가장 많이 위치하고, 다음으로 전남 3,231개소(18.5%), 경남 3,191개소(18.2%) 순으로 위치하고 있다. 농업용 저수지의 지역별 분포현황은 (표 2.1-1)과 같다.

(표 2.1-1) 국내 농업용 저수지 지역별 분포현황

구 분	소 계	농업용 저수지		담수호
		통계시설	사설시설	
계	17,489	17,477	1	11
(%)	(25.0%)	(24.9%)	(0.0%)	(0.0%)
수혜면적(ha)	593,235	453,010	1,601	138,623
(%)	(76.1%)	(58.1%)	(0.2%)	(17.8%)
서울	-	-	-	-
부산	104	104	-	-
대구	201	201	-	-
인천	36	36	-	-
광주	139	139	-	-
대전	15	15	-	-
울산	364	364	-	-
세종	38	38	-	-
경기	362	360	-	2
강원	317	317	-	-
충북	779	779	-	-
충남	901	897	-	4
전북	2,263	2,262	-	1
전남	3,231	3,226	1	4
경북	5,544	5,544	-	-
경남	3,191	3,191	-	-
제주	4	4	-	-

자료) 농업생산기반정비통계연보, 2013, 농림축산식품부·한국농어촌공사

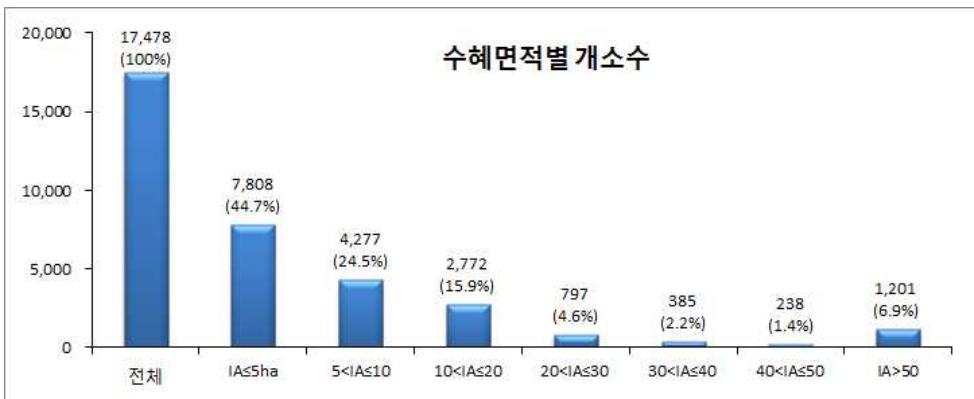
## 2 농업용 저수지 시설제원에 따른 분포현황

### 1) 수혜면적별 분포현황

국내에는 농업용 호소가 17,489개소(담수호 11개소 포함)가 전국에 분포하고 있으며, 농업용저수지에 의해 관개되는 면적은 약 593천ha로 전체 관개면적의 76%에 해당한다(표 2.1-2). 하구 담수호를 제외한 농업용저수지 17,478개소를 수혜면적별로 구분해보면 50ha이하가 전체의 93.1%에 이르고 있다. 이를 더 세분해 보면 <그림 2.1-1>에서 보는 바와 같이 5ha 이하가 7,808개소(44.7%), 5~10ha이하가 4,277개소(24.5%), 10~20ha가 2,772개소(15.9%), 20~30ha가 797개소(4.6%), 30~40ha가 385개소(2.2%), 40~50ha가 238개소(1.4%), 50ha이상이 1,201개소(6.9%)로 구성되어 있다.

(표 2.1-2) 농업용 저수지의 수혜면적별 분포 현황

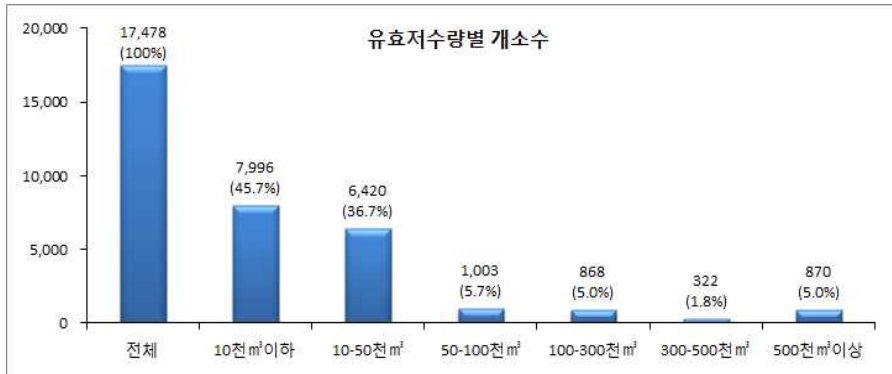
구 분	계	수혜면적 (ha)				
		50ha 미만	50ha이상 ~ 100ha미만	100ha이상 ~ 500ha미만	500ha이상 ~ 1,000ha미만	1,000ha 이상
농업용호소(A+B)	17,489	6,265	498	620	55	51
(구성비, %)	(100.0%)	(93.0%)	(2.8)	(3.5%)	(0.3%)	(0.3%)
저수지(A)	17,478	16,265	498	620	55	40
(구성비, %)	(100.0%)	(93.1%)	(2.9%)	(3.5%)	(0.3%)	(0.2%)
담수호(B)	11	-	-	-	-	11
(구성비, %)	(100.0%)	-	-	-	-	(100.0%)



<그림 2.1-1> 농업용 저수지의 수혜면적 구간별 시설수 현황

### 2) 유효저수량별 분포현황

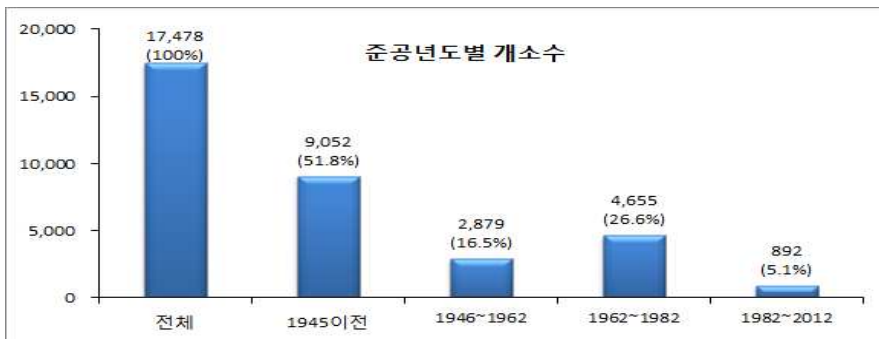
유효저수량별 시설수 현황은 <그림 2.1-2>와 같이 10천<sup>m</sup>이하가 7,996 개소로 전체의 45.7%를 차지하며, 10~50천<sup>m</sup>의 규모가 6,420개소(36.7%)로 전체 시설 중 50천<sup>m</sup>이하의 저수지가 82.4%임을 알 수 있다. 따라서 국내 농업용 저수지는 대부분이 소규모 저수지임을 알 수 있다.



<그림 2.1-2> 농업용 저수지의 유효저수량 구간별 시설수 현황

### 3) 준공연도에 따른 분포현황

1945년 이전에 설치되어 경과연수가 70년 이상된 저수지가 전체의 약 52%에 달하며, 1962년 이전에 설치되어 50년 이상된 저수지는 전체의 68.3%에 이르고 있다. 국내 약 70%에 해당하는 저수지는 50년이 넘은 노후화된 저수지로 오염물질의 장기간의 퇴적으로 인해 수용적이 많이 줄어들었으며, 퇴적층의 오염물질 재용출로 인해 수질오염을 악화시키고 있다.



<그림 2.1-3> 농업용 저수지의 준공연도에 따른 시설수 현황

4) 유효수심에 따른 분포현황

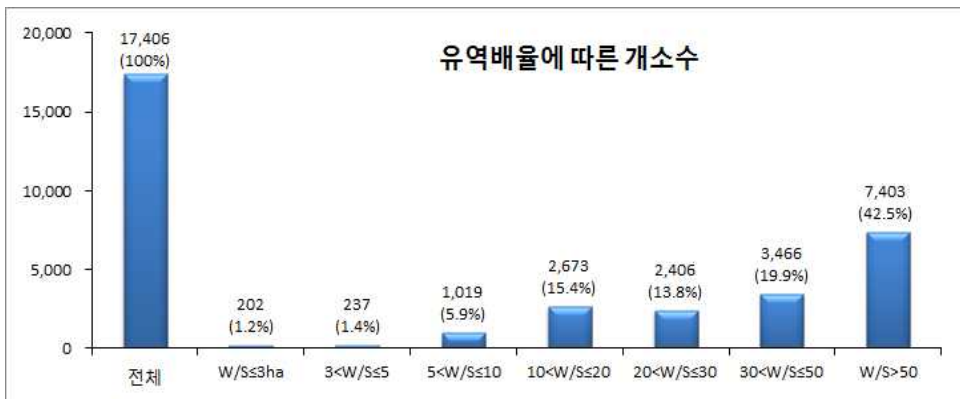
농업용 저수지를 유효수심별로 구분해보면 <그림 2.1-4>와 같이 1m 이하는 전체의 26.6%이고, 3m이하는 전체의 77.1%, 5m이하가 전체의 91.1%로 국내 대부분의 저수지들은 수심이 낮은 저류지형을 알 수 있다.



<그림 2.1-4> 농업용 저수지의 유효수심에 따른 시설수 현황

5) 유역배율에 따른 분포현황

유역배율(유역면적/만수면적)에 따라 구분해보면 <그림 2.1-5>와 같이 유역배율 3이하가 전체의 1.2%이고, 5이상인 전체의 97.4%를 차지하고 있어 국내 농업용 저수지는 태생적으로 수질오염 및 부영양화에 취약한 구조임을 알 수 있다. 일반적으로 유역배율 3이상이면 부영양화에 취약한 호소로 분류되고 있다.



<그림 2.1-5> 저수지의 유역배율(유역면적/만수면적)에 따른 시설수 현황



## 제2절 농업용 저수지 수질특성

### 1. 농업용 저수지의 수질현황

#### 1) 연도별 수질변화

농업용 저수지의 장기적인 수질변동 추이를 알아보기 위하여 농업용수 수질측정망 조사자료 중 2005년부터 2013년까지 9개년의 추이를 살펴보았다. (표 2.2-1)은 연도별로 측정망 저수지를 분기별로 연 4회 조사한 자료의 최대값, 최소값, 평균값, 편준편차에 대한 통계치를 수질항목별로 각각 나타냈고, <그림 2.2-1>은 수질항목별로 최소값, 최대값, 1사분위수, 3사분위수, 중앙값, 평균값을 상자 형태(Box plot)로 표시하였다. Box plot은 분포의 대칭성, 자료의 중심위치, 산포의 정도, 분포 상하부분의 집중정도, 이상점 등을 파악할 수 있는 장점을 가진 표현방식이며, 상자의 가장자리는 자료를 순서대로 늘어놓았을 때 5%, 25%, 50%, 75%, 95%와 그 범위를 벗어난 이상치를 확인할 수 있는 장점을 갖고 있다(정광욱 등, 2006; Paul and Linfield, 1998).

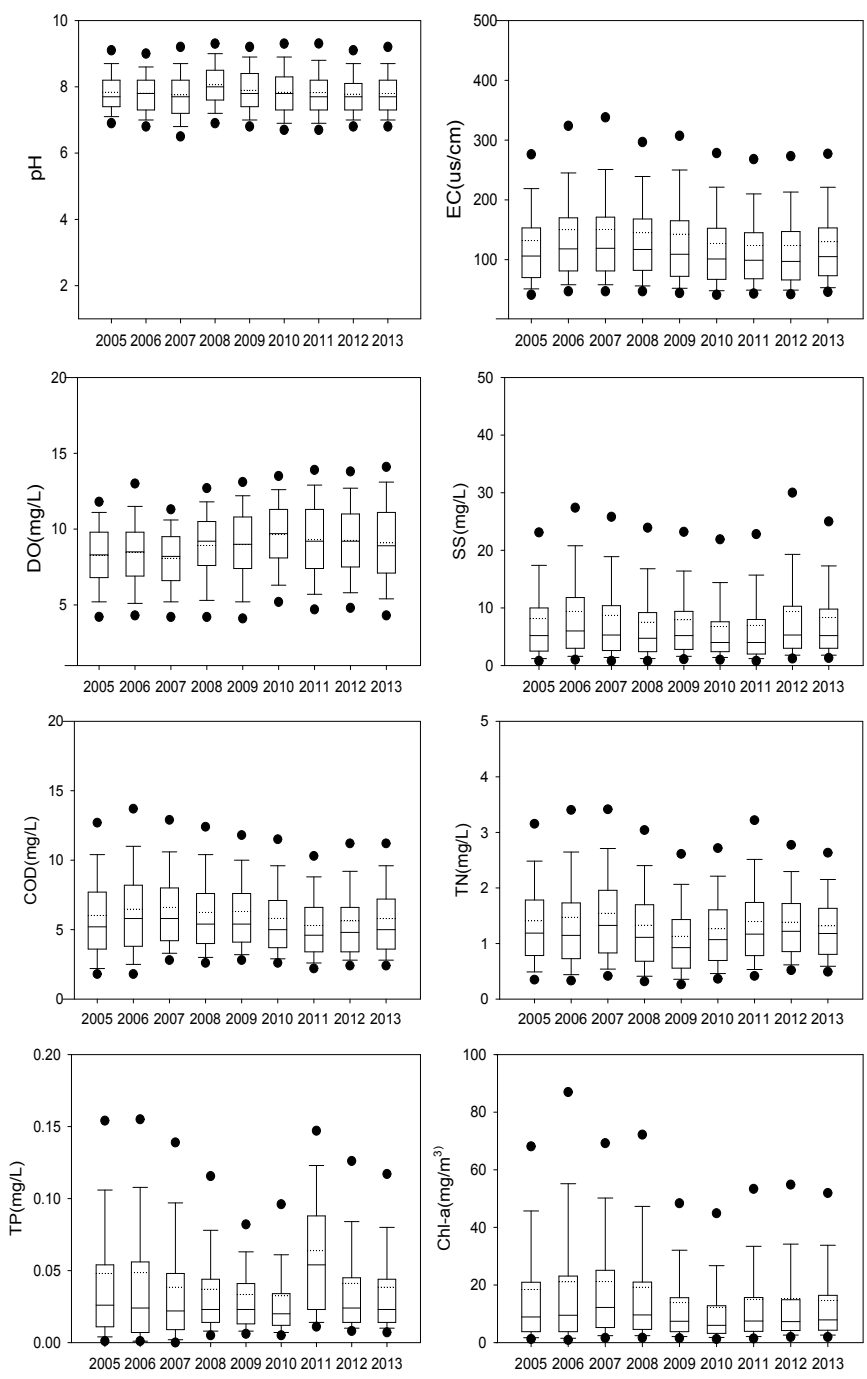
수온의 전체 평균은 16.8℃으로 2010년 이후에 평균 수온이 다소 낮아지는 경향을 보였고, pH의 평균은 7.8로 2008~2009년도의 7.9~8.1을 제외하고는 일정하게 나타났다. EC의 연도별 평균은  $136.0 \pm 11.0 \mu\text{s}/\text{cm}$ 으로 2000년대 후반에 비해 2010년도부터 감소하는 것으로 나타났다. COD의 연도별 전체 평균은  $6.0 \pm 0.4 \text{ mg}/\text{L}$ 이고, 2000년대 중후반부의 평균 COD가 6.2~6.6mg/L에 비해 2010~2013년의 연평균 COD는 5.3~5.8mg/L로 유기물 오염도가 점진적으로 감소하는 것을 알 수 있다. SS, TN, TP 역시 2005~2007년도에 평균 농도가 가장 높았으며, 그 이후에는 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. Chl-a는 2006~2008년도에 평균 19.3~21.2mg/m<sup>3</sup>의 값을 보였고, 2009~2010년도에는 평균 12.2~13.9mg/m<sup>3</sup>, 2011~2013년도에는 평균 14.7~15.3mg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 모든 수질항목에서 2005~2008년에 비해 2009년, 2010년 이후부터 전반적으로 수질오염도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 2000년대 하천과 호소의 수질오염이 사회적 문제로 대두되면서 수질개선사업 확대 등 범 정부차원에서 노력한 결과의 영향으로 판단된다.

(표 2.2-1) 농업용 저수지 연도별 수질현황

Year	N	Variable	Temp. (°C)	pH	EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)
2005	1,320	Max	32.5	10.9	1,099.0	26.0	16.8	34.0
		Min	6.2	6.1	17.0	0.3	0.2	0.3
		Average	19.1	7.8	131.7	8.3	3.4	6.0
		S.D	4.9	0.7	115.6	2.4	2.3	3.7
2006	1,220	Max	32.5	10.5	1,800.0	19.0	18.7	35.0
		Min	4.3	5.7	30.0	2.0	0.4	0.2
		Average	16.6	7.8	149.9	8.5	3.2	6.5
		S.D	5.6	0.7	139.5	2.5	2.0	3.9
2007	1,320	Max	33.1	10.6	1,620.0	18.3	12.0	31.9
		Min	6.2	5.5	24.0	2.3	0.5	1.4
		Average	18.6	7.8	150.4	8.1	2.8	6.6
		S.D	5.3	0.8	140.3	2.2	1.7	3.4
2008	1,928	Max	32.6	10.7	1,520.0	25.4	16.0	28.8
		Min	2.1	2.0	25.0	0.9	0.3	1.0
		Average	17.8	8.1	144.8	8.9	3.0	6.2
		S.D	5.9	0.7	127.2	2.6	2.0	3.4
2009	3,172	Max	28.1	10.2	1,760.0	15.6	8.6	20.8
		Min	1.0	6.1	25.0	1.6	0.2	1.0
		Average	16.5	7.9	142.7	9.0	2.6	6.3
		S.D	6.5	0.7	134.0	2.6	1.4	2.3
2010	3,180	Max	30.0	10.4	2,040.0	19.3	10.1	18.6
		Min	2.0	5.7	18.0	2.9	0.1	1.0
		Average	15.4	7.8	127.1	9.6	2.5	5.8
		S.D	6.8	0.7	122.9	2.2	1.1	2.2
2011	3,180	Max	30.0	11.7	2,800.0	17.6	9.0	19.4
		Min	1.0	5.7	7.0	1.2	0.1	0.3
		Average	15.6	7.8	123.6	9.3	2.4	5.3
		S.D	6.1	0.8	150.9	2.6	1.0	2.1
2012	3,180	Max	32.3	10.6	1,330.0	17.1	9.4	20.9
		Min	1.9	5.8	23.0	2.1	0.2	1.2
		Average	15.8	7.8	122.0	9.3	2.6	5.6
		S.D	6.5	0.6	91.4	2.5	1.2	2.1
2013	3,180	Max	31.0	10.7	1,930.0	16.4	8.5	24.1
		Min	1.9	6.0	26.0	0.3	0.2	1.4
		Average	16.2	7.8	129.9	9.1	2.6	5.8
		S.D	6.5	0.6	136.6	2.9	1.2	2.4

(표 2.2-1) 농업용 저수지 연도별 수질현황(계속)

Year	N	Variable	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	SS (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )
2005	1,320	Max	9.194	2.800	278.5	288.2	273.7
		Min	0.020	0.000	0.1	0.4	0.2
		Average	1.406	0.048	8.1	14.5	18.4
		S.D	1.0	0.1	12.0	26.0	27.4
2006	1,220	Max	39.899	2.484	176.6	430.8	335.4
		Min	0.017	0.000	0.1	0.7	0.2
		Average	1.473	0.049	9.4	15.9	21.1
		S.D	1.7	0.1	11.5	29.6	33.3
2007	1,320	Max	8.893	0.394	132.1	460.6	479.7
		Min	0.153	0.000	0.0	0.4	0.3
		Average	1.546	0.039	8.7	14.8	21.2
		S.D	1.1	0.0	11.3	32.0	29.1
2008	1,928	Max	9.574	0.626	75.9	370.9	386.6
		Min	0.037	0.001	0.0	0.1	0.2
		Average	1.332	0.037	7.5	12.9	19.3
		S.D	0.9	0.0	8.8	27.5	28.1
2009	3,172	Max	7.272	0.153	53.6	428.0	142.4
		Min	0.052	0.001	0.2	0.3	0.2
		Average	1.131	0.033	7.9	13.6	13.9
		S.D	0.7	0.0	4.9	27.3	11.4
2010	3,180	Max	8.592	0.274	92.6	564.0	89.5
		Min	0.059	0.001	0.1	0.4	0.2
		Average	1.264	0.032	6.8	12.1	12.2
		S.D	0.8	0.0	5.9	29.7	8.7
2011	3,180	Max	6.655	0.385	41.6	883.4	165.3
		Min	0.064	0.001	0.2	0.3	0.1
		Average	1.395	0.064	7.0	10.8	15.0
		S.D	0.8	0.0	4.9	42.3	11.9
2012	3,180	Max	7.888	0.376	148.0	281.9	164.7
		Min	0.216	0.003	0.2	0.0	0.4
		Average	1.386	0.041	9.4	10.5	15.3
		S.D	0.7	0.0	8.0	19.4	12.6
2013	3,180	Max	5.837	0.188	66.7	748.8	123.0
		Min	0.213	0.002	0.2	0.4	0.2
		Average	1.317	0.039	8.3	11.8	14.7
		S.D	0.7	0.0	6.4	38.3	12.0



<그림 2.2-1> 농업용 저수지 연도별 수질현황

## 2. 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인

### 1) 주성분 분석 및 요인분석

저수지의 수질에 영향을 미치는 인자로서는 체류시간, 수심, 유역면적, 유역형상, 유역경사, 토지이용상황, 수표면적, 저류량 등 여러 가지 요인이 있다. 농업용 저수지의 수질에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위하여 주성분 분석을 실시하였다. 주성분 분석(Principal Component Analysis)은 다양한 변수들에 대해 분석하는 다변량 분석기법의 일종으로 많은 변수들로부터 몇 개의 요인들을 추출하는 차원축소(Dimension Reduction)를 위한 분석 방법이다. 주성분이라는 것은 많은 변수들을 설명하는 주된(Principal) 성분이라는 것을 의미하며, 주성분 분석은 그 자체가 목적이 아니고, 일단 자료를 간단히 하여 요인분석을 수행하기 위한 사전분석으로 이루어지고 있다(Ryu, 2002; Jung et al., 2013). 요인분석은 여러 변수간의 상관행렬로부터 공통 요인을 도출하여 서로 상관이 있는 변수간의 공통요인을 설명하고, 변수를 적은 수로 축소시켜 요인을 추출하여 전체 자료를 대변할 수 있는 동질적인 요인으로 묶어주는 분석방법이다.

주성분 분석에 이용된 자료는 농업용수 수질측정망 조사자료(2012~2013년) 6,338개 자료를 이용하였고, 변수를 저수지의 물리적 인자와 수질 항목 등으로 하여 20개를 정하였다. SPSS 통계 프로그램(11.0 Version)을 이용하여 주성분 분석결과 20개 변수 각각에 대한 고유치(eigen value, 아이겐값)와 각 요인이 수질을 설명할 수 있는 설명력 즉, 요인적재량(요인부하량)을 (표 2.2-2)에 나타냈다. 고유값이란 요인이 설명해 주는 변량의 양을 말하는 것으로, 고유값이 1 이상이라는 의미는 하나의 요인이 변인 1개 이상의 변량을 설명해 줄 수 있음을 의미하고, 고유값이 1 이하가 되면 1개의 요인이 변수 1개의 분산도 설명해 줄 수 없기 때문에 변인 집단으로서의 의미가 없는 것이다. 또한, 요인패턴의 구조를 단순화시켜서 요인에 대한 해석을 보다 쉽게 하기 위해서 요인축을 회전시키는데, 요인축을 회전하는 방법에는 크게 직교회전(Orthogonal)과 사각회전(Oblique)이 있다. 직교회전은 회전 후 요인축이 직교하도록 하는 방법이고, 사각회전은 회전 후 요인축이 직교할 필요가 없는 회전방법이다. 본 연구에서는 직교회전방법으로서 요인 적재값이 가장 높은 변수의 수를 최소화하는 Varimax 회전 방법을 적용하였다.

(표 2.2-2)는 주성분 분석결과 20개의 변수에 대한 각각의 고유값과 분산력을 나타낸 것이고, 이 결과표를 통해서 6개의 주요인을 추출할 수 있었다. 요인 1의 초기고유값은 6.125이고, 분산값은 14.803%이었고, 요인 2의 고유값은 3.041, 분산값은 14.551%, 요인 3의 고유값은 1.637, 분산값 13.313%, 요인 4의 고유값은 1.516, 분산값은 11.802%, 요인 5의 고유값은 1.231, 분산값은 10.570%, 요인 6의 고유값은 1.086, 분산값은 8.143%로 나타났다. 여기서 분산율은 각 요인이 수질특성을 설명할 수 있는 기여율(설명력)을 의미하는 것으로, 이들 요인 1부터 요인 6까지의 누적기여율은 73.18%로 나타났다. 즉, 6개의 주 요인이 농업용 저수지 수질특성의 약 73.2%를 결정(설명)할 수 있는 것으로 나타났다.

(표 2.2-2) 주성분 분석에 의한 요인 추출

Component	Total Variance Explained								
	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	6.125	30.625	30.625	6.125	30.625	30.625	2.961	14.803	14.803
2	3.041	15.207	45.832	3.041	15.207	45.832	2.910	14.551	29.354
3	1.637	8.183	54.015	1.637	8.183	54.015	2.663	13.313	42.666
4	1.516	7.580	61.595	1.516	7.580	61.595	2.360	11.802	54.468
5	1.231	6.157	67.752	1.231	6.157	67.752	2.114	10.570	65.038
6	1.086	5.429	73.181	1.086	5.429	73.181	1.629	8.143	73.181
7	.919	4.597	77.778						
8	.833	4.163	81.942						
9	.658	3.292	85.234						
10	.479	2.393	87.627						
11	.439	2.197	89.824						
12	.434	2.168	91.992						
13	.372	1.860	93.852						
14	.345	1.727	95.579						
15	.271	1.353	96.932						
16	.216	1.082	98.014						
17	.159	.796	98.810						
18	.127	.634	99.444						
19	.078	.392	99.835						
20	.033	.165	100.000						

Extraction Method : Principal Component Analysis

요인분석에서 요인들의 회전은 중요한 개념이다. 요인의 회전이란 단어의 의미 그대로 요인들의 축을 어떤 원하는 위치에 도달할 때까지 원점을 중심으로 돌리는 것이다. 요인의 회전(factor rotation)은 최초의 해를 보다 명확하게 하기 위한 과정이다. 요인 분석에서 요인을 회전시키는 목적은 초기 회전되지 않은 요인의 해에서 보여지는 불확실성을 줄여 보다 간편하고 이론적으로 더 의미 있는 요인의 해를 구하기 위함이다. 요인적재량(factor loading)이란 요인에 대한 각 변수의 가중치 혹은 각 변수와 요인의 상관계수를 말한다. 요인적재량이 크면 그 만큼 해당 요인을 잘 설명하는 변수가 되는 것이다. 일반적으로 60% 이상의 누적설명력을 보이면 요인의 설명력이 높다고 판단된다. (표 2.2-3)은 요인분석에 의한 각 요인에 대한 변수들의 요인적재량(요인부하량)을 나타낸 것이다.

(표 2.2-3) 요인분석에 의한 변수 적재량

Rotated Component Matrix a						
변수	Main Component					
	1	2	3	4	5	6
저수량	<b>.907</b>	-.063	.185	.017	.127	.053
수해면적	<b>.870</b>	.033	-.017	.024	-.025	.001
만수면적	<b>.846</b>	-.020	-.174	.082	.304	.076
유역면적	<b>.760</b>	.055	-.051	-.078	-.079	-.073
TP	.008	<b>.801</b>	-.190	.262	.101	.188
SS	.043	<b>.695</b>	-.148	.118	.021	.144
TN	-.006	<b>.681</b>	-.019	-.078	.101	-.251
제당높이	.052	-.147	<b>.877</b>	-.164	-.253	-.055
유효수심	.056	-.179	<b>.858</b>	-.144	-.205	-.038
준공년도	-.142	-.131	<b>.807</b>	-.109	-.008	-.020
PH	.051	-.015	-.092	<b>.796</b>	.095	-.071
Chl-a	-.029	.550	-.135	<b>.602</b>	.119	.078
COD	-.032	.541	-.288	<b>.586</b>	.210	.287
BOD	-.018	.464	-.242	<b>.579</b>	.163	-.081
TOC	-.035	.454	-.321	<b>.535</b>	.217	.328
Cl <sup>-</sup>	-.018	.254	-.125	.122	<b>.836</b>	-.056
EC	.007	.361	-.279	.219	<b>.726</b>	-.060
제당길이	.234	-.127	-.104	.068	<b>.711</b>	.106
DO	-.017	-.120	-.004	.310	-.003	<b>-.832</b>
TEMP	.010	-.012	-.076	.274	.001	<b>.756</b>

Extraction Method : Principal Component Analysis.

Rotation Method : Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 9 iterations.

(표 2.2-3)에서 주성분 분석결과 추출된 6개의 요인에 대한 변수와의 관계를 보면 요인 1은 저수량, 수해면적, 만수면적, 유역면적과 70% 이상의 높은 정(+)의 요인부하량을 보였고, 요인 2는 TN, TP, SS와 높은 정(+)의 상관성을 보였다. 요인 3은 제당높이, 유효수심, 준공년도 등 저수지 용적과 관련된 변수에 80% 이상의 높은 정(+)의 상관성을 보였고, 요인 4는 pH, BOD, COD, TOC, Chl-a 등의 수질항목과 50% 이상의 정(+)의 상관성을 보였다. 요인 5에는 변수 제당길이, EC, Cl<sup>-</sup>에서 70% 이상의 높은 요인적 재량을 보였고, 요인 6은 수온과 정(+)의 상관성을, DO와는 부(-)의 상관성이 있는 것으로 나타났다.

(표 2.2-4)는 주성분 분석과 요인분석의 결과로부터 도출된 각각의 요인에 대한 상관변수와 그 변수들로 설명되어지는 요인특성 그리고 각 요인이 농업용 저수지의 수질에 미치는 영향력(설명력 또는 기여율)을 정리한 것이다. 요인 1은 수리·수문학적 특성을 갖는 변수로서 즉, 저수지에 물이 얼마나 들어오고 얼마나 방류되는가에 따라 저수지의 수질에 영향을 미치는 것으로 판단되고, 요인 2는 TN, TP, SS에서 높은 적재량을 나타낸 결과로, 이는 강우시 등 유역에서 유입되는 비점오염물질에 의한 입자성 오염물질에 의한 영향으로 판단된다. 요인 3은 저수지 용적에 관한 변수로서 준공년수가 오래된 저수지는 오염물질의 장기간 퇴적으로 인해 수체 용량 감소를 가져왔고, 저수지 용적이 적고, 유효수심이 낮은 저수지일수록 수질오염에 더 취약한 것으로 판단된다.

(표 2.2-4) 저수지 수질에 영향을 미치는 요인특성 및 기여율

구분	상관 변수	요인 특성	수질설명력 (기여율)
요인1	저수량, 수해면적, 만수면적, 유역면적	수리수문학 특성	14.8%
요인2	TN, TP, SS	유입수 영향 (입자성 오염물질)	14.5%
요인3	제당높이, 유효수심, 준공년도	저수지 용적	13.3%
요인4	pH, BOD, COD, TOC, Chl-a	호소 내 물질대사 (플랑크톤 과다증식)	11.8%
요인5	제당길이, EC, Cl <sup>-</sup>	호내 염류농도	10.5%
요인6	DO, 수온	계절적 영향 (여름, 겨울 등)	8.1%



요인 4는 pH, Chl-a에서 높은 상관성을 보였고, 이는 호소 내 물질대사 요인과 관련된 수질항목으로 호내 1차 생산력에 의한 물질대사인 플랑크톤 과다증식에 의한 요인으로 판단된다. 요인 5에서 상관성 높은 항목은 EC와 Cl<sup>-</sup>으로, 이는 호내 염류농도에 관한 항목으로 강수량 등에 의한 영향으로 판단된다. 요인 6은 수온과 높은 정(+)의 상관성을 보인 반면에 DO하고는 높은 부(-)의 상관성이 있는 것으로 봐서 여름, 겨울 등 계절적 영향으로 판단된다. 따라서 농업용 저수지의 수질은 저수지의 수리수문학적 특성에 의해 14.8%, 유역에서 유입되는 오염물질 등에 의해 14.5%, 유효수심 등 저수지 용적에 의해 13.3%, 호내 플랑크톤 증식 등 물질대사에 의해 11.8%, 강수량 등에 의해 10.5%, 그리고 겨울, 여름 등 계절적 요인에 의해 8.1%의 영향을 받는 것으로 나타났다.

## 2) 저수지 물리적 인자에 따른 수질

### 가. 물리적 인자와 수질항목간의 상관성 분석

저수지의 물리적 인자와 호 내의 수질과의 상관관계를 알아보기 위하여 피어슨의 상관분석을 실시한 결과는 (표 2.2-5)와 같다. 유역면적, 유효저수량, 유효수심, 유역배율, 저수율은 수질항목 다수와 부(-)의 상관관계가 있었고, 저수지 설치 경과년수와는 정(+)의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 즉, 유역면적이 작을수록, 유효저수량이 적을수록, 유효수심이 작을수록, 유역배율이 클수록, 저수율이 낮을수록, 저수지 준공년도가 오래된 것일수록 저수지의 수질오염도가 높은 것으로 나타났다.

(표 2.2-5) 저수지 물리적 인자와 수질항목간의 상관관계

구분	수혜 면적	유역 면적	유효 저수량	만수 면적	유효 수심	경과 년수	유역 배율	저수율
Temp	0.024	0.001	0.002	0.065**	-0.143**	0.125**	-0.072**	-0.297**
pH	0.045**	0.012	0.022	0.117**	-0.224**	0.190**	-0.096**	-0.121**
EC	0.052**	0.038**	0.004	0.211**	-0.459**	0.342**	-0.180**	-0.061**
DO	-0.030*	-0.007	-0.045**	-0.030*	0.013	-0.007	0.048**	0.135**
SS	0.020	-0.001	-0.025*	0.101**	-0.268**	0.232**	-0.110**	-0.181**
COD	0.008	-0.064**	-0.050**	0.150**	-0.472**	0.348**	-0.273**	-0.140**
TN	-0.002	0.031*	-0.050*	0.000	-0.167**	0.104**	0.046**	0.047**
TP	0.015	-0.025*	-0.040**	0.110**	-0.349**	0.282**	-0.156**	-0.144**
Chl-a	0.001	-0.047**	-0.055**	0.091**	-0.340**	0.255**	-0.180**	-0.103**

자료) 2012 ~ 2013년 수질측정망조사 자료(n= 6,350), \*\* p<0.01, \* p< 0.05

나. 유효저수량에 따른 수질

농업용 저수지의 유효저수량에 따른 수질이 구간별로 통계적으로 유의한 차이가 있는가를 알아보기 위하여 농업용 저수지의 유효저수량을 500천 $m^3$  이하( $Q \leq 500$ 천 $m^3$ ), 500천 $m^3$ 보다 크고 1,000천 $m^3$  이하( $500$ 천 $m^3 < Q \leq 1,000$ 천 $m^3$ ), 1,000천 $m^3$ 보다 크고 1,500천 $m^3$  이하( $1,000$ 천 $m^3 < Q \leq 1,500$ 천 $m^3$ ), 1,500천 $m^3$ 보다 크고 2,000천 $m^3$  이하( $1,500$ 천 $m^3 < Q \leq 2,000$ 천 $m^3$ ), 2,000천 $m^3$  초과( $Q > 2,000$ 천 $m^3$ ) 등 5개 구간으로 구분하여 일원분산분석을 실시하였다. 통계분석에 사용된 자료는 2013년도 농업용수 수질측정망 조사자료 3,175개를 활용하였고, SPSS 통계프로그램을 이용하였다.

(표 2.2-6)에서 나타난 바와 같이 수온, pH, DO, SS 항목에서는 구간에 따른 유의한 차이가 없는 것으로 나타났고, EC와 TN은 유의수준  $p < 0.05$ 에서 유의한 차이가 있었고, COD, TP, Chl-a는  $p < 0.001$  수준에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. COD는 유효저수량이 커질수록 COD 농도가 증가하였으며, 유효저수량 500천 $m^3$  이하에서 평균 COD가 6.7mg/L로 다른 구간에 비해 약 1.0mg/L 정도 높게 나타났다. Chl-a도 유효저수량 500천 $m^3$  이하인 구간에서 17.9mg/ $m^3$ 로 가장 높았고, 다음으로 1,000천 $m^3$ 보다 크고 1,500천 $m^3$  이하인 구간에서 16.2mg/ $m^3$ 로 높게 나타났다. 나머지 구간에서는 11.9~14.6mg/ $m^3$ 로 나타났다(표 2.2-7).

(표 2.2-6) 저수지 유효저수량에 따른 ANOVA 분석결과

구분	Sum of Square	Df	Mean Square	F-value	Sig.
Temp.	340.4	4	85.112	1.829	.120
pH	4.567	4	1.142	2.293	.057
EC	87217	4	21804.3	2.972	.018
DO	24.037	4	6.009	0.691	.598
COD	406.2	4	101.5	10.279	.000
TN	6.185	4	1.546	2.745	.027
TP	0.062	4	0.015	4.863	.001
SS	1198.0	4	299.5	1.791	.128
Chl-a	9836.8	4	2459.2	6.236	.000

(표 2.2-7) 유효저수량에 따른 기술통계치

항목	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	N	Max	Min	Mean	S.D
Temp.	Q≤500	355	30.8	2.2	16.8	6.8
	500<Q≤1000	1,212	32.0	1.3	15.8	6.6
	1000<Q≤1500	604	33.6	1.9	16.0	6.8
	1500<Q≤2000	300	30.7	1.9	16.4	6.8
	Q>2000	704	31.5	0.7	16.4	6.9
	Total	3,175	33.6	0.7	16.2	6.8
pH	Q≤500	355	10.8	6.2	7.8	0.7
	500<Q≤1000	1212	11.1	6.0	7.7	0.6
	1000<Q≤1500	604	10.9	6.0	7.8	0.7
	1500<Q≤2000	300	10.9	6.3	7.7	0.7
	Q>2000	704	10.8	6.6	7.8	0.7
	Total	3,175	11.1	6.0	7.7	0.7
EC	Q≤500	355	409	36	124.2	74.6
	500<Q≤1000	1,211	874	7	120.8	86.1
	1000<Q≤1500	601	915	32	133.3	95.1
	1500<Q≤2000	298	974	26	134.4	108.2
	Q>2000	704	560	32	125.1	69.0
	Total	3,169	974	7	125.8	85.7
DO	Q≤500	355	18.0	0.3	9.1	2.8
	500<Q≤1000	1212	17.2	0.3	8.9	3.0
	1000<Q≤1500	604	18.1	1.1	9.2	3.0
	1500<Q≤2000	300	17.4	0.6	9.1	2.7
	Q>2000	704	16.4	1.1	9.0	2.7
	Total	3,175	18.1	0.3	9.0	2.9
SS	Q≤500	355	116.7	0.5	9.8	12.5
	500<Q≤1000	1212	231.0	0.2	7.9	11.2
	1000<Q≤1500	604	86.0	0.3	8.4	9.7
	1500<Q≤2000	300	66.7	0.1	7.4	8.0
	Q>2000	704	449.0	0.4	8.4	18.6
	Total	3,175	449.0	0.1	8.3	12.9

(표 2.2-8)은 통계적 의미가 있는 수온, 수질항목에 대해서 구간별로 유의한 차이성을 알아보기 위해서 사후검정인 Scheffe Test를 수행한 결과이다. COD와 TP는 유효저수량 500천 $m^3$ 이하인 구간에 비해 모든 구간에서 유의한 수준으로 오염도가 증가하였고, Chl-a는 유효저수량 500천 $m^3$ 이하인 구간에 비해 1,000천 $m^3$ 보다 크고 1,500천 $m^3$ 이하인 구간을 제외하고 나머지 모든 구간에서는 유의한 수준으로 농도가 증가하였다.

(표 2.2-7) 유효저수량에 따른 기술통계치(계속)

항목	유효저수량 (천 $m^3$ )	N	Max	Min	Mean	S.D
COD	Q $\leq$ 500	355	22.5	1.6	6.7	4.1
	500<Q $\leq$ 1000	1,212	21.3	1.4	5.6	2.9
	1000<Q $\leq$ 1500	604	22.9	1.6	5.8	3.2
	1500<Q $\leq$ 2000	300	33.7	1.4	5.8	3.3
	Q>2000	704	24.1	1.4	5.4	2.5
	Total	3,175	33.7	1.4	5.7	3.1
TN	Q $\leq$ 500	355	5.74	0.20	1.33	0.88
	500<Q $\leq$ 1000	1,212	8.02	0.19	1.30	0.76
	1000<Q $\leq$ 1500	604	7.48	0.24	1.39	0.79
	1500<Q $\leq$ 2000	300	3.91	0.34	1.25	0.66
	Q>2000	704	7.78	0.16	1.28	0.65
	Total	3,175	8.02	0.16	1.31	0.75
TP	Q $\leq$ 500	355	0.55	0.00	0.04	0.07
	500<Q $\leq$ 1000	1,212	0.64	0.00	0.03	0.04
	1000<Q $\leq$ 1500	604	0.82	0.00	0.04	0.05
	1500<Q $\leq$ 2000	300	0.21	0.00	0.03	0.03
	Q>2000	704	1.64	0.00	0.03	0.07
	Total	3,175	1.64	0.00	0.03	0.05
Chl-a	Q $\leq$ 500	355	226.8	0.60	17.9	26.6
	500<Q $\leq$ 1000	1,212	256.3	0.10	14.6	19.5
	1000<Q $\leq$ 1500	604	172.8	0.40	16.2	22.4
	1500<Q $\leq$ 2000	300	125.3	0.60	11.9	16.5
	Q>2000	704	114.4	0.40	12.8	14.4
	Total	3,175	256.3	0.10	14.6	19.9

(표 2.2-8) 저수지의 유효저수량 구간별 사후 검정 결과

항목	유효저수량	500<Q≤1000	1000<Q≤1500	1500<Q≤2000	Q>2000
Temp.	Q≤500	*			
	500<Q≤1000				
	1000<Q≤1500				
	1500<Q≤2000				
	Q>2000				
pH	Q≤500				
	500<Q≤1000				*
	1000<Q≤1500				
	1500<Q≤2000				*
	Q>2000	*		*	
SS	Q≤500	*		*	
	500<Q≤1000				
	1000<Q≤1500				
	1500<Q≤2000				
	Q>2000				
COD	Q≤500	***	***	***	***
	500<Q≤1000				
	1000<Q≤1500				*
	1500<Q≤2000				
	Q>2000		*		
Chl-a	Q≤500	**		***	***
	500<Q≤1000			*	
	1000<Q≤1500			**	**
	1500<Q≤2000	*	**		
	Q>2000		**		
TN	Q≤500				
	500<Q≤1000		*		
	1000<Q≤1500	*		**	**
	1500<Q≤2000				
	Q>2000		**		
TP	Q≤500	***	*	***	**
	500<Q≤1000				
	1000<Q≤1500			*	
	1500<Q≤2000		*		
	Q>2000				

주) \*<0.05, \*\*<0.01, \*\*\*<0.001

다. 저수지 준공 경과년수에 따른 수질

농업용 저수지의 준공 경과년수 구간에 따른 수질이 통계적으로 유의한 차이가 있는가를 알아보기 위하여 농업용 저수지의 경과년수를 70년이상 ( $Y \geq 70$ ), 50년이상 70년 미만( $50 \leq Y < 70$ ), 30년이상 50년 미만( $30 \leq Y < 50$ ), 10년이상 30년미만( $10 \leq Y < 30$ ), 10년 미만( $Y < 10$ )으로 20년 간격으로 구분하여 5개 구간으로 분류하여 일원분산분석을 실시하였다. 통계분석에 사용된 자료는 2013년도 농업용수 수질측정망 조사자료 3,175개를 활용하였고, SPSS 통계프로그램을 이용하였으며, 그 결과는 (표 2.2-9)와 같다. (표 2.2-9)에서 보여준 바와 같이 수온, pH, EC, COD, TN, TP, SS, Chl-a 등 거의 모든 수질항목에서 유의수준  $p < 0.001$  에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

(표 2.2-10)은 pH, EC, DO, COD, TN, TP, SS, Chl-a에 대한 저수지 준공 경과년수 구간별로 각각 평균값, 최대값, 최소값, 표준편차 등의 기술 통계치를 정리하였다. 수온, pH, EC, SS 등 DO를 제외한 모든 항목에서 70년 이상된 구간과 50년이상 70년 미만의 구간에서 다른 구간에 비해 다소 높은 값을 보였고, 준공 경과년수가 작아질수록 농도가 점차적으로 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 저수지가 설치된 지 오래되어 노후화가 진행될수록 수질오염도 높아지는 것을 알 수 있다.

(표 2.2-9) 저수지 준공 경과년수에 따른 ANOVA 분석결과

구분	Sum of Square	Df	Mean Square	F-value	Sig.
Temp.	2490.9	4	622.7	13.577	.000
pH	61.4	4	15.3	32.010	.000
EC	245,386	4	613,467	93.125	.000
DO	61.6	4	15.4	1.773	.131
COD	3510.3	4	877.5	98.594	.000
TN	24.3	4	6.092	10.926	.000
TP	0.676	4	0.169	56.637	.000
SS	22399.3	4	5599.8	34.891	.000
Chl-a	83972.9	4	20993	56.586	.000

(표 2.2-10) 저수지 준공 경과년수에 따른 기술통계치

항목	경과년수	N	Max	Min	Mean	S.D
Temp.	Y≥70	304	33.6	1.3	17.8	7.2
	50≤Y<70	1,063	32.0	2.2	16.8	7.0
	30≤Y<50	880	31.3	0.7	15.9	6.5
	10≤Y<30	840	31.2	1.9	15.0	6.4
	Y<10	88	28.4	4.1	15.9	6.4
	Total	3,175	33.6	0.7	16.2	6.8
pH	Y≥70	304	10.9	6.6	8.0	0.7
	50≤Y<70	1,063	11.1	6.3	7.8	0.7
	30≤Y<50	880	10.9	6.1	7.7	0.6
	10≤Y<30	840	10.2	6.0	7.6	0.6
	Y<10	88	9.9	6.6	7.6	0.6
	Total	3,175	11.1	6.0	7.7	0.7
EC	Y≥70	304	535	33	171.8	81.6
	50≤Y<70	1,061	900	7	149.5	90.6
	30≤Y<50	879	856	32	118.5	76.9
	10≤Y<30	837	974	26	89.6	74.6
	Y<10	88	410	42	97.4	54.5
	Total	3,169	974	7	125.8	85.7
DO	Y≥70	304	17.4	0.6	8.7	3.1
	50≤Y<70	1,063	18.1	0.3	9.1	2.9
	30≤Y<50	880	16.7	1.0	8.9	2.9
	10≤Y<30	840	16.4	0.3	9.2	2.7
	Y<10	88	16.1	3.6	8.9	2.5
	Total	3,175	18.1	0.3	9.0	2.9
SS	Y≥70	304	449.0	16.5	13.3	27.5
	50≤Y<70	1,063	231.0	11.1	10.3	13.0
	30≤Y<50	880	95.3	7.9	7.3	8.3
	10≤Y<30	840	66.7	5.6	5.2	6.6
	Y<10	88	13.3	5.2	4.6	2.9
	Total	3,175	449.0	8.7	8.3	12.9

(표 2.2-10) 저수지 경과년수에 따른 기술통계치(계속)

항목	경과년수	N	Max	Min	Mean	S.D
COD	$Y \geq 70$	304	23.3	1.4	7.6	3.4
	$50 \leq Y < 70$	1,063	22.9	1.6	6.6	3.3
	$30 \leq Y < 50$	880	33.7	1.4	5.3	2.9
	$10 \leq Y < 30$	840	24.1	1.4	4.5	2.2
	$Y < 10$	88	9.8	1.4	4.9	2.0
	Total	3,175	33.7	1.4	5.7	3.1
TN	$Y \geq 70$	304	7.78	0.33	1.36	0.84
	$50 \leq Y < 70$	1,063	8.02	0.23	1.42	0.81
	$30 \leq Y < 50$	880	7.32	0.16	1.28	0.71
	$10 \leq Y < 30$	840	5.84	0.21	1.20	0.66
	$Y < 10$	88	2.78	0.34	1.23	0.52
	Total	3,175	8.02	0.16	1.31	0.75
TP	$Y \geq 70$	304	1.64	0.00	0.06	0.10
	$50 \leq Y < 70$	1,063	0.64	0.00	0.05	0.05
	$30 \leq Y < 50$	880	0.82	0.00	0.03	0.04
	$10 \leq Y < 30$	840	0.18	0.00	0.02	0.02
	$Y < 10$	88	0.06	0.00	0.02	0.01
	Total	3,175	1.64	0.00	0.03	0.05
Chl-a	$Y \geq 70$	304	154.1	0.6	24.5	27.3
	$50 \leq Y < 70$	1,063	256.3	0.1	18.8	24.8
	$30 \leq Y < 50$	880	125.3	0.6	12.1	14.4
	$10 \leq Y < 30$	840	111.2	0.2	8.7	10.9
	$Y < 10$	88	64.5	1.2	10.6	10.3
	Total	3,175	236.3	0.1	14.6	19.9



(표 2.2-11) 저수지 준공 경과년수별 사후 검정 결과

항목	경과년수	$50 \leq Y < 70$	$30 \leq Y < 50$	$10 \leq Y < 30$	$Y < 10$
Temp.	$Y \geq 70$	*	***	***	*
	$50 \leq Y < 70$		**	***	
	$30 \leq Y < 50$	**		**	
	$10 \leq Y < 30$	***	**		
	$Y < 10$				
pH	$Y \geq 70$	***	***	***	***
	$50 \leq Y < 70$		***	***	**
	$30 \leq Y < 50$	***		***	
	$10 \leq Y < 30$	***	***		
	$Y < 10$	**			
SS	$Y \geq 70$	***	***	***	***
	$50 \leq Y < 70$		***	***	***
	$30 \leq Y < 50$	***		***	
	$10 \leq Y < 30$	***	***		
	$Y < 10$	***			
COD	$Y \geq 70$	***	***	***	***
	$50 \leq Y < 70$		***	***	***
	$30 \leq Y < 50$	***		***	
	$10 \leq Y < 30$	***	***		
	$Y < 10$	***			
Chl-a	$Y \geq 70$	***	***	***	***
	$50 \leq Y < 70$		***	***	***
	$30 \leq Y < 50$	***		***	
	$10 \leq Y < 30$	***	***		
	$Y < 10$	***			
TN	$Y \geq 70$			**	
	$50 \leq Y < 70$		***	***	*
	$30 \leq Y < 50$	***		*	
	$10 \leq Y < 30$	***	*		
	$Y < 10$	*			
TP	$Y \geq 70$	***	***	***	***
	$50 \leq Y < 70$		***	***	***
	$30 \leq Y < 50$	***		***	
	$10 \leq Y < 30$	***	***		
	$Y < 10$	***			

주) \* $<0.05$ , \*\* $<0.01$ , \*\*\* $<0.001$

라. 저수지 유효수심에 따른 수질

농업용 저수지의 유효수심별 구간에 따른 수질이 통계적으로 유의한 차이가 있는가를 알아보기 위하여 농업용 저수지의 유효수심을 3m이하( $H \leq 3$ ), 3m보다 크고 5m이하( $3 < H \leq 5$ ), 5m보다 크고 8m이하( $5 < H \leq 8$ ), 8m보다 크고 12m이하( $8 < H \leq 12$ ), 12m초과( $H > 12$ ) 등 5개 구간으로 분류하여 일원분산분석을 실시하였다. 통계분석에 사용된 자료는 2013년도 농업용수 수질측정망 조사자료 3,175개를 활용하였고, SPSS 통계프로그램을 이용하였다. (표 2.2-12)에서 보는 바와 같이 모든 항목에서 구간별로 유의한 수준의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 저수지 준공 경과년수에 따른 수질차이에서와 같은 결과로서, 저수지가 설치된지 오래되었다는 것은 오염물질의 장기간의 퇴적으로 퇴적층이 두꺼워지면서 유효수심이 작아졌다는 것을 의미한다. 또, 유효수심이 작아진다는 것은 저수지 용적이 작아지는 것을 의미하며, 저수지 유효저수량이 작을수록 수질오염도가 높아지는 결과와 같은 결과라고 볼 수 있겠다.

(표 2.2-13)은 pH, EC, DO, COD, TN, TP, SS, Chl-a에 대한 저수지 유효수심 구간별로 각각 평균값, 최대값, 최소값, 표준편차 등의 기술통계치를 정리하였다. DO를 제외한 모든 항목에서 유효수심이 커질수록 농도값들이 낮아지는 것을 알 수 있으며, 특히 유효수심 3m이하의 구간에서 가장 오염도가 높은 것으로 나타났다.

(표 2.2-12) 저수지 유효수심에 따른 ANOVA 분석결과

구분	Sum of Square	Df	Mean Square	F-value	Sig.
Temp.	4012.8	4	1003.2	22.104	.000
pH	104.6	4	26.170	56.120	.000
EC	6390877	4	1597719	299.015	.000
DO	168.6	4	42.1	4.871	.001
COD	9339	4	2334	330.601	.000
TN	65.2	4	16.307	29.941	.000
TP	1.528	4	0.382	140.756	.000
SS	50725	4	12681	83.673	.000
Chl-a	12600	4	316.2	203.597	.000

(표 2.2-13) 유효수심에 따른 기술통계치

항목	유효수심	N	Max	Min	Mean	S.D
Temp.	H≤3	376	33.6	3.2	17.7	7.4
	3<H≤5	712	31.4	1.8	17.4	7.1
	5<H≤8	1,167	32.0	1.3	16.1	6.5
	8<H≤12	712	31.5	0.7	14.7	6.2
	>12	208	30.5	1.9	14.7	6.4
	Total	3,175	33.6	0.7	16.2	6.8
pH	H≤3	376	11.1	6.2	8.0	0.7
	3<H≤5	712	10.9	6.4	8.0	0.8
	5<H≤8	1,167	10.8	6.3	7.7	0.6
	8<H≤12	712	10.4	6.0	7.6	0.6
	>12	208	9.4	6.0	7.6	0.5
	Total	3,175	11.1	6.0	7.8	0.7
EC	H≤3	372	915	40	220	137.6
	3<H≤5	710	974	33	162	90.6
	5<H≤8	1,167	410	14	108	48.6
	8<H≤12	712	418	7	84	37.7
	>12	208	226	26	75	36.4
	Total	3,169	974	7	125	85.7
DO	H≤3	376	18.1	0.3	9.1	3.2
	3<H≤5	712	17.4	0.3	9.0	3.0
	5<H≤8	1,167	16.7	1.0	8.8	2.8
	8<H≤12	712	16.4	2.1	9.1	2.8
	>12	208	15.6	2.9	9.8	2.8
	Total	3,175	18.1	0.3	9.0	2.9
SS	H≤3	376	231.0	1.0	17.1	19.1
	3<H≤5	712	116.7	0.6	11.2	10.4
	5<H≤8	1,167	65.6	0.2	6.3	6.0
	8<H≤12	712	449.0	0.1	5.0	17.5
	>12	208	39.5	0.4	4.1	3.9
	Total	3,175	449.0	0.1	8.3	12.9

(표 2.2-13) 유효수심에 따른 기술통계치(계속)

항목	유효수심	N	Max	Min	Mean	S.D
COD	H≤3	376	22.9	1.6	9.2	3.8
	3<H≤5	712	33.7	1.8	7.2	3.4
	5<H≤8	1,167	24.1	1.4	5.0	2.2
	8<H≤12	712	19.3	1.4	4.1	1.7
	>12	208	9.8	1.4	3.7	1.4
	Total	3,175	33.7	1.4	5.7	3.1
TN	H≤3	376	8.02	0.28	1.57	1.14
	3<H≤5	712	7.32	0.27	1.44	0.85
	5<H≤8	1,167	7.78	0.16	1.27	0.62
	8<H≤12	712	3.72	0.19	1.18	0.55
	>12	208	2.61	0.26	1.06	0.43
	Total	3,175	8.02	0.16	1.31	0.75
TP	H≤3	376	0.64	0.01	0.08	0.08
	3<H≤5	712	0.82	0.00	0.05	0.05
	5<H≤8	1,167	1.64	0.00	0.02	0.05
	8<H≤12	712	0.43	0.00	0.01	0.02
	>12	208	0.16	0.00	0.01	0.14
	Total	3,175	1.64	0.00	0.03	0.05
Chl-a	H≤3	376	256.3	0.6	35.3	35.4
	3<H≤5	712	172.5	0.5	20.2	21.9
	5<H≤8	1,167	111.2	0.1	10.6	11.1
	8<H≤12	712	68.7	0.4	7.0	6.9
	>12	208	44.6	0.4	6.5	5.9
	Total	3,175	256.3	0.1	14.6	19.9

(표 2.2-14)는 각각의 수질항목별로 다중 구간별 유의한 차이수준을 알아보기 위해서 사후검정인 Scheffe Test를 수행한 결과이다. 수온과 TN은 유효수심 3m 이하( $H \leq 3$ )와 3m보다 크고 5m이하( $3 < H \leq 5$ )인 구간에 비해 5m보다 크고 8m이하( $5 < H \leq 8$ ), 8m보다 크고 12m이하( $8 < H \leq 12$ ), 12m초과( $H > 12$ )인 구간에 대해 각각 유의한 차이가 있었고, SS, COD, Chl-a, TP는 수심 3m 이하인 구간에 비해 다른 모든 구간에서 유의한 수준으로 차이가 있는 것으로 나타났다.

(표 2.2-14) 저수지의 유효수심 구간별 사후 검정 결과

수질항목	유효수심	$3 < H \leq 5$	$5 < H \leq 8$	$8 < H \leq 12$	$> 12$
Temp.	$H \leq 3$		**	***	***
	$3 < H \leq 5$		**	***	***
	$5 < H \leq 8$	**		**	
	$8 < H \leq 12$	***	**		
pH	$H \leq 3$		***	***	***
	$3 < H \leq 5$		***	***	***
DO	$3 < H \leq 5$				*
	$5 < H \leq 8$				**
SS	$H \leq 3$	***	***	***	***
	$3 < H \leq 5$		***	***	***
COD	$H \leq 3$	***	***	***	***
	$3 < H \leq 5$		***	***	***
	$5 < H \leq 8$			***	***
Chl-a	$H \leq 3$	***	***	***	***
	$3 < H \leq 5$		***	***	***
	$5 < H \leq 8$				***
TN	$H \leq 3$		***	***	***
	$3 < H \leq 5$		***	***	***
	$5 < H \leq 8$	***			***
TP	$H \leq 3$	***	***	***	***
	$3 < H \leq 5$		***	***	***
	$5 < H \leq 8$	***		**	*

주) \* $< 0.05$ , \*\* $< 0.01$ , \*\*\* $< 0.001$

### 3) 계절에 따른 수질

농업용 저수지의 계절에 따른 수질이 통계적으로 유의한 수준으로 차이가 있는가를 알아보기 위하여 2013년도 농업용수 수질측정망 조사자료 3,340개를 SPSS 통계프로그램(11.0 Version)을 이용하여 ANOVA 분석(일원분산분석)을 실시하였다. 일원분산분석은 단일 독립변수(요인변수)에 의한 종속변수의 평균의 차이를 검증하는데 이용된다. 일원분산분석은 하위 집단간 통계치 차이의 유의성을 동시에 검증해 주기는 하지만 한 집단과 다른 집단간의 의미있는 차이가 있는지를 판정할 수 없어, 사후검증(Post-Hoc Test)을 실시하여 특정 집단간의 유의성 차이를 검증하였다. 일원분산분석 결과는 (표 2.2-15)와 같으며, EC를 제외한 pH, DO, COD, TN, TP, SS, Chl-a 등 모든 항목에서 계절에 따른 통계적 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

(표 2.2-16)은 pH, EC, DO, COD, TN, TP, SS, Chl-a에 대한 3월, 5월, 8월, 11월 등으로 분류하여 각각 평균값, 최대값, 최소값, 표준편차 등의 기술통계치를 정리하였다. <그림 2.2-2>는 계절별 평균값을 시각적 이해도를 돕기 위해 Plot 그래프로 나타낸 것이다. pH는 3월과 11월에 비해 5월과 8월에 유의하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, DO는 3월에 비해 5월, 8월, 11월에 유의한 수준으로 감소하는 것을 알 수 있다. SS는 3월과 5월에 비해 8월과 11월에 유의한 수준으로 증가하였고, 여름 강우기와 가을 태풍 시기를 지나면서 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다.

(표 2.2-15) 계절에 따른 ANOVA 분석결과

구분	Sum of Square	Df	Mean Square	F-value	Sig.
pH	46.863	3	15.6	32.6	.000
EC	39148.3	3	13049.4	1.47	.221
DO	8402.9	3	2800.9	458.1	.000
COD	1440.3	3	480.1	49.9	.000
TN	70.1	3	23.3	38.2	.000
TP	0.188	3	0.063	20.0	.000
SS	8438.9	3	2812.9	17.5	.000
Chl-a	26363.5	3	8787.8	20.4	.000

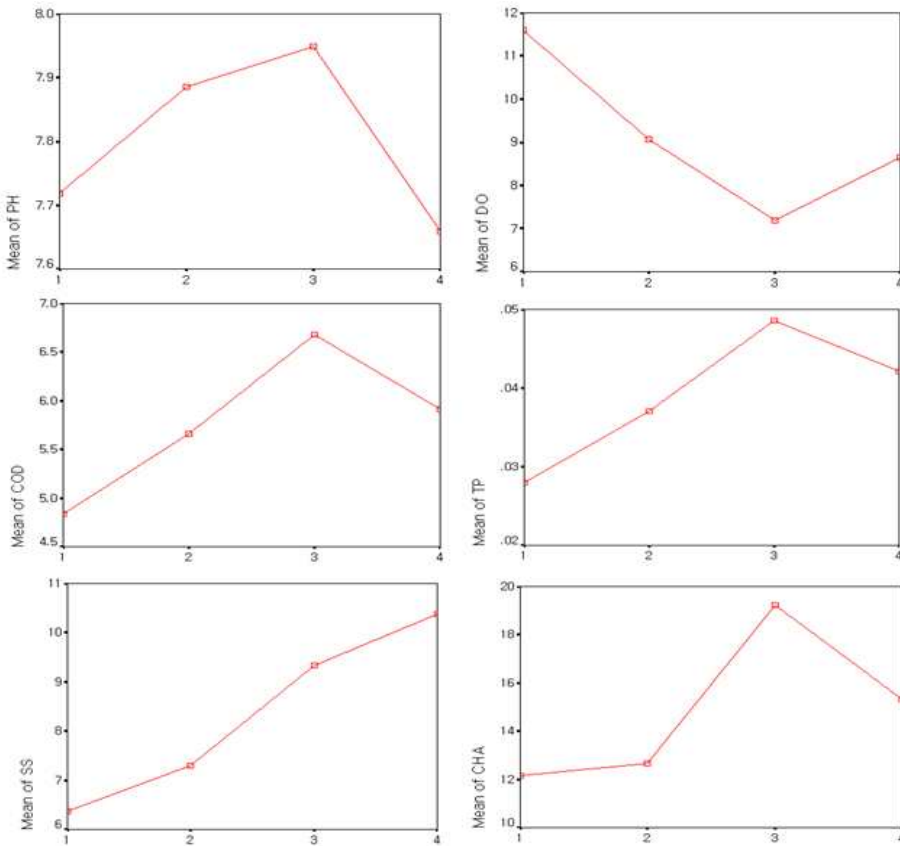
자료) 2013년 수질측정망조사 자료(n= 3,340), 조사시기 : 3월, 5월, 8월, 11월

(표 2.2-16) 계절에 따른 기술통계치

항목	Season	N	Max	Min	Mean	S.D
pH	3월	835	10.4	6.2	7.7	0.5
	5월	835	11.1	6.2	7.8	0.7
	8월	835	10.9	6.0	7.9	0.8
	11월	835	10.5	6.0	7.6	0.5
	Total	3,340	11.1	6.0	7.8	0.7
EC	3월	830	978	28	127	100.7
	5월	826	928	14	128	97.2
	8월	828	974	26	123	87.6
	11월	828	900	7	133	91.0
	Total	3,312	978	7	128	94.3
DO	3월	835	18.0	4.1	11.5	2.0
	5월	835	18.1	1.3	9.0	2.6
	8월	835	17.2	0.3	7.1	2.6
	11월	835	16.7	2.0	8.6	2.4
	Total	3,340	18.1	0.3	9.1	2.9
SS	3월	834	83.0	0.2	6.3	7.2
	5월	835	132.0	0.1	7.3	8.9
	8월	835	132.0	0.3	9.3	10.2
	11월	835	449.0	0.1	10.3	20.1
	Total	3,339	449.0	0.1	8.3	12.7
COD	3월	834	21.0	1.4	4.8	2.5
	5월	835	21.3	1.4	5.6	3.0
	8월	835	33.7	1.8	6.6	3.4
	11월	835	23.3	1.2	5.9	3.2
	Total	3,339	33.7	1.2	5.7	3.1
Chl-a	3월	834	160.2	0.6	12.1	17.9
	5월	835	141.5	0.6	12.6	17.5
	8월	835	348.2	0.1	19.2	26.7
	11월	835	144.2	0.4	15.3	19.3
	Total	3,339	348.2	0.1	14.8	20.9

(표 2.2-16) 계절에 따른 기술통계치(계속)

항목	Season	N	Max	Min	Mean	S.D
TN	3월	834	8.02	0.26	1.535	0.940
	5월	835	7.83	0.23	1.415	0.799
	8월	835	4.81	0.22	1.245	0.658
	11월	835	7.78	0.16	1.163	0.699
	Total	3,339	8.02	0.16	1.340	0.795
TP	3월	834	0.55	0.00	0.028	0.035
	5월	835	0.82	0.00	0.037	0.050
	8월	835	0.64	0.01	0.048	0.057
	11월	835	1.64	0.00	0.042	0.073
	Total	3,339	1.64	0.00	0.038	0.056



<그림 2.2-2> 계절에 따른 수질변화 추이



TN은 3월과 5월에 비해 8월과 11월에 오히려 농도가 감소하는 경향을 보였고, TP는 3월에 비해 5월, 8월, 11월 조사 시에 유의한 수준으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 COD와 비슷한 경향을 보였다. Chl-a는 3월과 5월에 비해 8월에는 유의한 수준으로 증가하였고, 11월에는 8월에 비해 유의한 수준으로 감소하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 SS와 유사한 결과이다. 이상의 결과로 부터 농업용 저수지의 수질은 계절별 차이가 큰 것으로 나타났고, 봄철부터 점진적으로 수질오염도가 증가해 여름철에 수질오염도가 가장 높은 것으로 나타났다.

(표 2.2-17) 조사계절별 사후 검정 결과

수질 항목	계절	5월	8월	11월
pH	3월	***	***	
	5월			***
	8월			***
DO	3월	***	***	***
	5월		***	**
	8월	***		***
SS	3월		***	***
	5월		***	***
COD	3월	***	***	***
	5월		***	
	8월			***
Chl-a	3월		***	***
	5월		***	***
	8월			***
TN	3월	**	***	***
	5월		***	***
	8월			*
TP	3월	**	***	***
	5월		***	
	8월			*

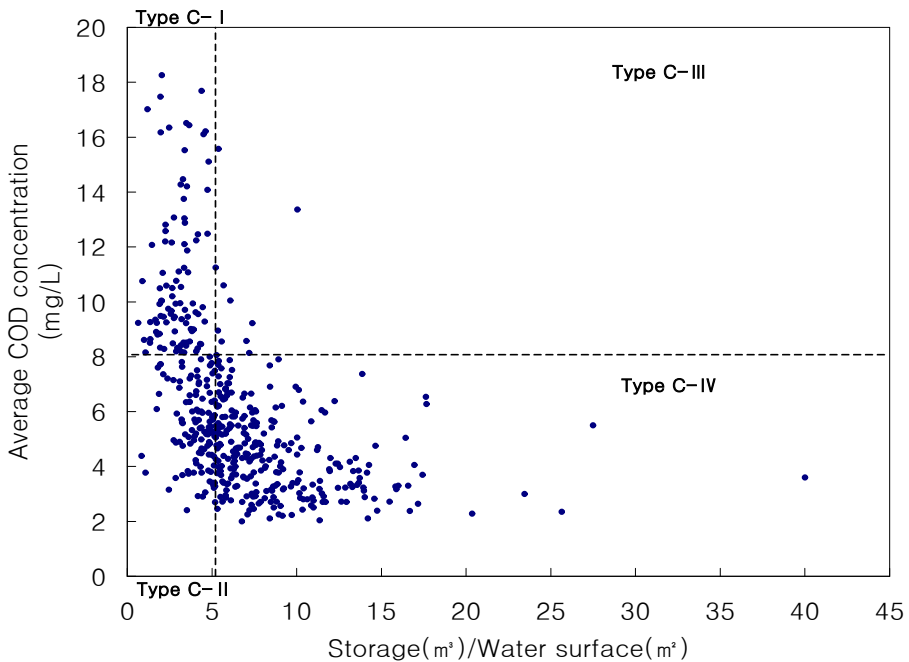
주) \*<0.05, \*\*<0.01, \*\*\*<0.001

### 3. 농업용 저수지 수질오염 유형

#### 1) 수질오염유형 분류방법

한국농어촌공사 농어촌연구원(2002년)에서는 전국 농업용저수지 및 담수호의 1990년부터 2001년까지의 수질성적과 호의 물리적 인자를 이용하여 저수지 오염유형을 분류하는 방법을 연구하였다. 호소의 수질을 대표하는 COD값과 호소의 물리적 인자인 유효저수량(ST, Effective Storage) 대 호의 만수면적(WS, Water surface)의 비, 즉, 유효평균수심을 물리적 지표로 활용하여 <그림 2.2-3>와 같은 저수지 오염유형 분류도를 작성하였다.

농업용저수지 수질오염유형 분류도에서 각 그룹을 오염특성에 따라 C-I형을 종합정비형, C-II형을 호내정비형, C-III형을 유역정비형, C-IV형을 관리형의 4가지 유형으로 분류하였다. 본 분류 방법은 저수지 유역의 오염현황 및 수질, 수리수문학적 특성에 대한 정밀조사 없이도 쉽게 저수지의 오염 유형을 분류하는 방법으로 최근에 많이 이용되고 있다.



<그림 2.2-3> 농업용 저수지 수질오염유형 분류도

## 2) 농업용 저수지 수질오염 유형

국내 농업용 저수지를 대상으로 <그림 2.2-3>의 수질오염유형 분류도에 의한 방법으로 수질오염 유형을 분류한 결과는 (표 2.2-18)과 같다. 2013년 농업용수 수질측정망 825개소와 공사관리 저수지의 3,369개소를 대상으로 하였으며, COD값은 연 평균값을 이용하였다. 농업용수 수질측정망 825개소를 분류한 결과, 복합원인형에는 122개소(14.8%), 내부원인형은 164개소(19.9%), 외부원인형은 25개소(3.0%), 일반관리형에는 164개소(19.9%)가 해당하는 것으로 나타났다. 복합원인형은 COD항목 기준으로 수질기준을 초과한 저수지의 83%에 해당하고 있다.

공사관리 저수지 3,369개소를 대상으로 분류한 결과는 복합원인형이 240개소로 전체의 7.1%, 내부원인형은 2,214개소(65.7%), 외부원인형은 22개소(0.7%), 일반관리형은 895개소(26.5%)로 분류되었고, 복합원인형은 수질기준 초과 저수지만을 대상으로 하였을 때의 91.6%에 해당하고 있다. 따라서 수질이 오염된 저수지의 수질오염유형은 대부분 복합원인형으로 호소 내부적 요인과 유역에서의 외부적 요인에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 농업용 저수지의 수질개선을 위해서는 호 유입부 대책과 호 내 대책이 함께 수립되어야 할 것이다. 그러나 본 오염유형 분류방법이 COD만 기준으로 하여 유기물 오염만 반영되어 있기 때문에 호 내 N, P 등 영양물질이 고려되지 않은 한계점이 있다.

(표 2.2-18) 농업용 저수지의 수질오염유형

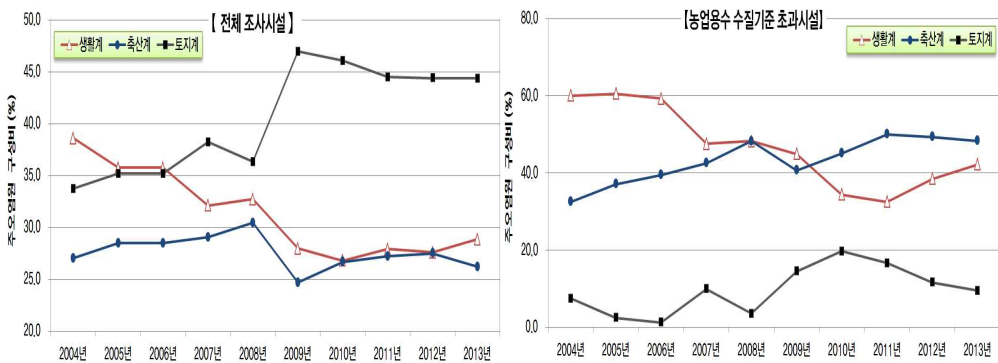
오염유형	C-I (복합원인형)	C-II (내부원인형)	C-III (외부원인형)	C-IV (관리형)
분류기준	COD > 8 W/S ≤ 5	COD ≤ 8 W/S ≤ 5	COD > 8 W/S > 5	COD ≤ 8 W/S > 5
관리방향	종합정비	호내정비	유역정비	일반관리
수질측정망 (825개소)	122개소 (14.8%)	164개소 (19.9%)	25개소 (3.0%)	164개소 (19.9%)
공사관리 (3,369개소)	240개소 (7.1%)	2,214개소 (65.7%)	22개소 (0.7%)	895개소 (26.5%)

#### 4. 농업용 저수지의 주요염원

2013년도 농업용수 수질측정망 조사결과에 의하면 825개소 전체 저수지를 대상으로 하였을 때는 주요염원 현황이 토지이용(44.4%), 생활계(28.8%), 축산계(26.2%)순으로 나타났지만, 수질기준을 초과한 저수지만을 대상으로 하였을 때는 축산계(48.3%), 생활계(42.2%), 토지이용(9.5%) 순으로 나타났다. 주요염원별로 저수지를 분류하여 수질기준 초과율을 살펴보면, 축산계 32.9%, 생활계 26.1%, 토지이용 3.8%로 비점오염원에 의한 오염보다는 축산계, 생활계 등 유역 내 점오염원이 농업용 저수지 수질오염의 주원인이 되고 있는 것을 알 수 있다.

2013년 3,374개소를 대상으로 하는 농업용 저수지 전수조사 결과에 의하면 비점오염원인 토지계에 의한 오염이 2,396개소(71.0%)로 가장 많은 것으로 조사되었으며, 생활계 645개소(19.1%), 축산계 307개소(9.1%), 산업계 13개소(0.4%), 양식계 13개소(0.4%) 등의 순으로 조사되었다.

<그림 2.2-4>는 연도별로 주요염원 변화추이를 나타낸 것이다. 전체 시설을 대상으로 하였을 때는 토지계에 의한 비중이 증가하고 있으며, 축산계와 생활계에 의한 비중은 상대적으로 감소하는 것을 보여주고 있다. 반면에 농업용수 수질기준을 초과한 저수지만을 대상으로 하였을 때는 축산계는 꾸준히 증가추세이고 토지계는 2000년대 후반에 증가추세를 보이다가 2010년 이후에 감소추세를 보이고 있다. 생활계는 2011년까지 감소추세를 보이다가 2012년부터 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.



자료) 2013년도 농업용수 수질측정망 조사보고서

<그림 2.2-4> 연도별 주요염원 변화추이

## 제 3 장

---

# 연구대상지구 선정 및 현장조사

---



## 제3장 연구대상지구 선정 및 현장조사

### 제1절 연구대상지구 선정

#### 1. 대상지구 선정 조건

본 연구에서 개발된 융복합 수처리 시스템의 현장적용실험을 위한 대상 지구를 선정하기 위해서는 국내 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염특성을 대표할 수 있는 저수지가 선정되어야 한다. 제2장에서 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질특성을 분석하였다. 물리적 특성으로는 유효저수량이 50천 $m^3$ 이하의 저수지가 전체의 82.4%이고, 1960년 이전에 설치되어 준공 경과년수가 50년 이상된 저수지가 전체의 약 69%를 차지한다. 또한, 유효수심 3m 이하인 저수지가 77.1%이고, 유역배율(유역면적/만수면적) 5이상이 전체의 97.4%를 차지하고 있다. 이러한 물리적 인자들은 저수지의 수질에 유의한 수준으로 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

저수지의 수질오염 특성으로는 유역 내 축산폐수 및 생활오수에 의한 점오염원의 영향으로 유입수 뿐만 아니라 호소수에서도 유기물 및 질소, 인 등의 오염도가 높다. 특히 하절기 기온상승 및 강수, 녹조 대발생 등으로 저수지 수질오염은 더욱 심각해지고, 이로 인해 호내 DO 부족 등으로 수생태계에까지 영향을 미치고 있다. 농업용 저수지의 수질오염유형에서 수질이 오염된 저수지는 대부분 물리적 인자에 의한 내부적 원인과 유역 내 오염원 유입에 의한 외부적 원인에 의해 수질오염이 발생하는 복합원인형에 해당하고 있으며, 수질기준 초과 저수지의 주요오염원은 유역내 축산폐수 및 생활하수 등 점오염원에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었다. 따라서 개발된 융복합 수처리 기술의 현장적용실험을 하기 위해서는 다음과 같은 조건에 부합되는 저수지가 선정되어야 한다. 첫째, 수질오염도가 5등급 이상인 저수지, 둘째, 수질오염유형이 복합원인형(COD>8mg/L, 수심<5m)에 해당하는 저수지, 셋째, 유기물농도 및 N, P 농도가 높은 저수지, 넷째, 1960년 이전에 설치된 저수지, 다섯째, 유효저수량 50만톤 이하이며, 유효수심이 3m 이하인 저수지, 여섯째, 지리적으로 접근이 가능하고 시설물 설치가 가능한 저수지, 일곱째, 농업용수 수질개선사업 시행지구가 아니고 사업 계획에 반영되지 않은 지구를 후보지구로 선정하였다.

## 2. 연구대상지구 후보지구

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



<그림 3.1-1> 현장적용실험 대상 후보지구 저수지의 위성사진

(표 3.1-1) 현장적용실험 대상 후보지구의 시설제원

저수지명	유역면적 (ha)	만수면적 (ha)	수해면적 (ha)	유효저수량 (천m <sup>3</sup> )	유효수심 (m)	준공년도
과림지	360	13.4	82.1	366.0	2.73	1956
버들지	296	15.3	85.5	283.7	1.85	1945
매화지	260	15.5	52.4	227.0	1.46	1941

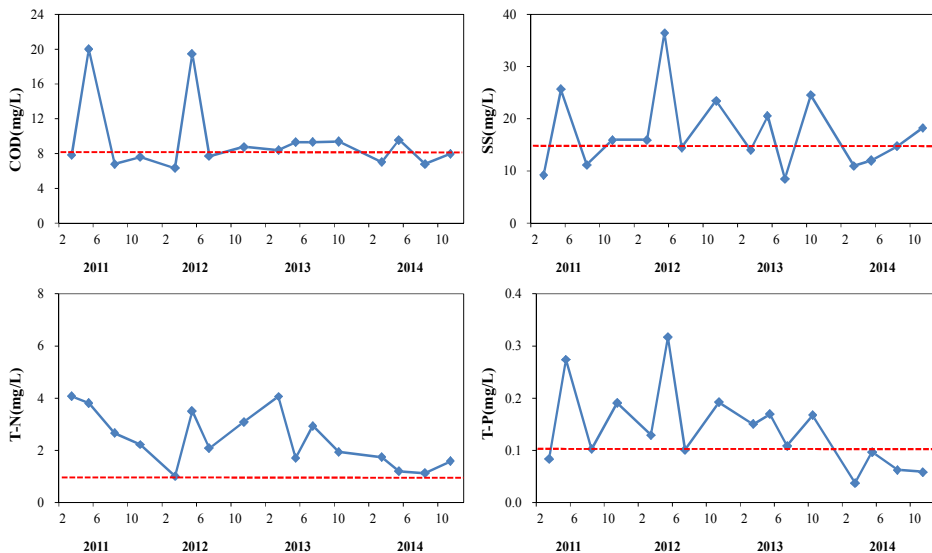


### 3. 후보지구 수질현황

현장적용실험을 위한 대상 후보 저수지의 수질오염 추이를 파악하기 위하여 한국농어촌공사에서 매년 시행하고 있는 전수조사 결과를 분석하였다. 전수조사는 분기별로 연 4회 조사를 하고 있으며, 조사항목으로는 pH, COD, T-N, T-P, SS 등 5개 항목을 대상으로 하며, 호소 수질을 대표할 수 있는 1개의 지점을 선정하여 채수 및 현장조사를 하고 있다. 2011년부터 2014년까지 최근 조사결과에 대한 COD, SS, TN, TP 항목에 대해서 분석하였다.

#### 1) 매화저수지

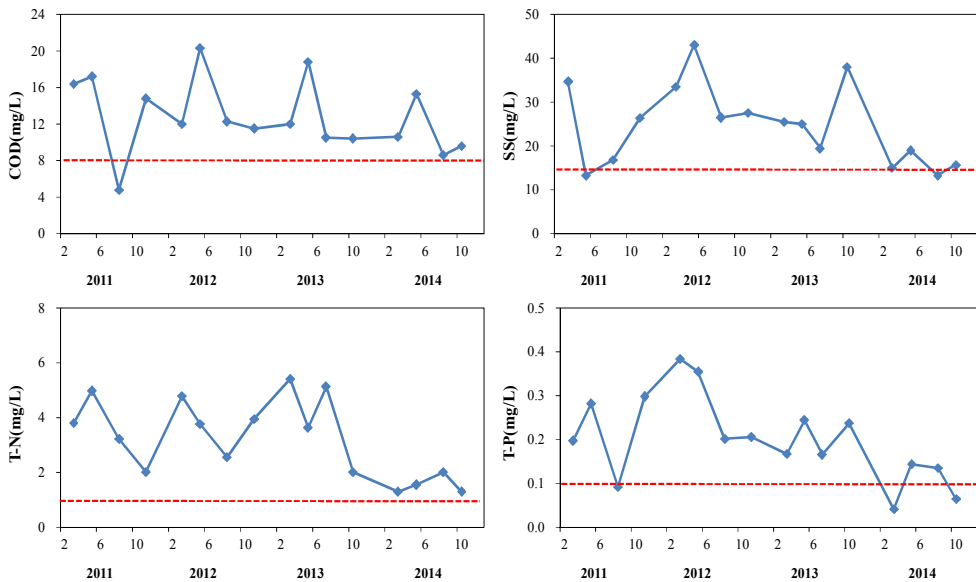
매화저수지의 연도별 수질현황은 <그림 3.1-2>와 같다. COD의 경우 2011년과 2012년 5월에 20 mg/L로 매우 높은 오염도를 나타낸 것을 제외하면 대체로 농업용수 기준인 8mg/L 내외의 값을 보이고 있다. 4개년 평균 값을 보면 COD가 9.6 mg/L, SS 17.2 mg/L, T-N 2.5 mg/L, T-P가 0.146 mg/L로 나타나 COD뿐만 아니라 다른 수질 항목들도 농업용수 기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다. 연도별 조사 시기에 따라 COD, SS, TP 농도 변화가 매우 유사한 경향을 보이고 있어 저수지의 수질이 유입수의 영향을 크게 받고 있는 것으로 판단된다.



<그림 3.1-2> 매화저수지 전수조사결과(2011~2014년)

## 2) 버들저수지

버들저수지의 수질은 COD가 평균 12.8mg/L를 보였으며, 거의 모든 시기에 농업용수 수질기준을 초과하고 있다. 시기적으로는 5월 조사 시에 다른 시기에 비교하여 수질오염도가 가장 높았으며, 최근 들어 수질이 개선되고 있는 추세를 보였다. SS의 평균농도는 24.5mg/L, T-N은 3.2 mg/L, T-P 0.201mg/L로 모든 항목에서 농업용수 수질기준을 크게 상회하고 있다. 버들저수지는 복합원인형에 해당하는 오염유형으로 외부요인은 유역에 많이 분포하고 있는 축산단지과 농경지 등에서 비점오염원유입과 저수지가 70년 이상된 노후화된 저수지로 호소 바닥 퇴적물에서 오염물질 재용출에 의한 내부생산에 의한 영향으로 판단된다.



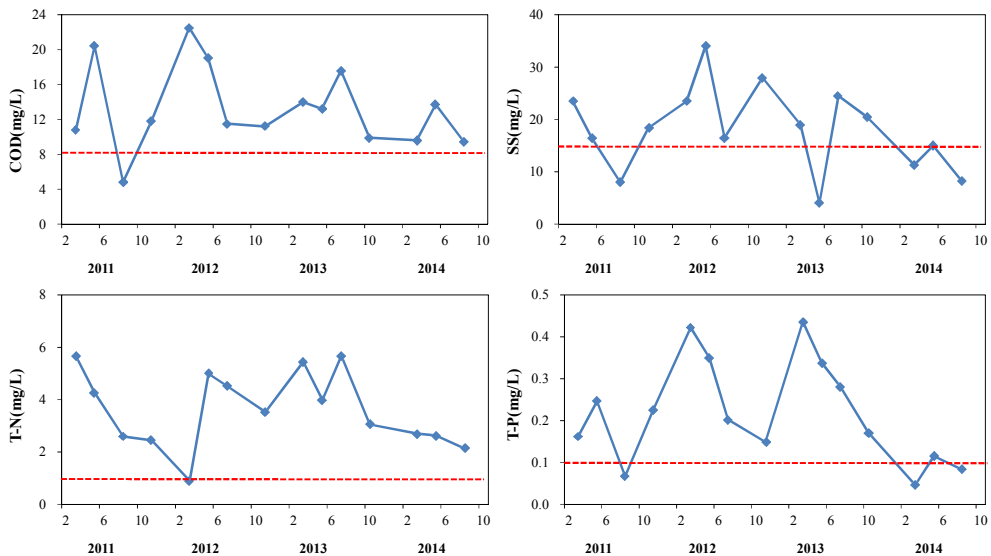
<그림 3.1-3> 버들저수지 전수조사결과(2011~2014년)

## 3) 과림저수지

과림저수지는 후보지구인 3개소의 저수지 중 오염도가 가장 심각한 저수지이다. 4개년 평균 COD는 13.3mg/L를 나타내고, 평균 SS는 18.1mg/L, T-N은 3.6mg/L, T-P는 0.220mg/L로 유기물과 영양물질 등에 의한 오염이 심한 지구로 나타났다. 특히 T-P는 연 중 0.4 mg/L를 상회하는 경우가 많았다. 과림저수지 유역 오염원 조사결과 축산시설, 주거시설, 산업시설이 골고루

다수 분포되어 있는데, 특히 저수지 인근의 식당가에서 배출되는 생활오수는 미처리상태로 저수지로 유입되고 있는 상태이다. 과림저수지는 버들지와는 반대로 강우 시에 오히려 저수지의 수질이 깨끗해지고 있으며, 이는 유입하천으로 들어가는 하수가 강우에 희석되기 때문으로 판단된다.

따라서 연구대상 후보지구 3개 저수지에 대한 수질오염 추이 및 유역 오염원을 분석한 결과, 버들지와 과림지는 외부 유역 요인에 의해 수질의 영향을 크게 받을 것으로 예상되어 융복합 수처리시설의 수질개선 여부를 비교적 쉽게 판단하기가 어렵다고 판단되었다. 따라서 본 연구 현장적용 실험 대상지구로 매화저수지가 가장 적합하다고 판단되어 매화저수지를 대상으로 수질 및 퇴적물에 대해 정밀조사를 실시하였다.



<그림 3.1-4> 과림저수지 전수조사결과(2011~2014년)

(표 3.1-2) 연구대상 후보지구의 연도별 수질 현황

구 분		pH	COD	TN	TP	SS	
과림지	2011	Max	9.7	20.4	5.68	0.246	23.5
		Min	7.9	4.8	2.446	0.067	8.0
		Ave.	8.6	11.9	3.746	0.175	16.6
	2012	Max	8.9	22.5	4.992	0.422	34.0
		Min	7.2	11.2	0.896	0.149	16.5
		Ave.	8.0	16.0	3.482	0.280	25.5
	2013	Max	7.9	17.6	5.672	0.436	24.5
		Min	7.4	9.9	3.051	0.171	4.0
		Ave.	7.6	13.6	4.540	0.306	17.0
	2014	Max	8.1	13.7	2.698	0.115	18.7
		Min	7.4	9.4	1.904	0.046	8.3
		Ave.	7.85	10.8	2.341	0.084	13.3
매화지	2011	Max	9.2	20.0	4.071	0.274	25.6
		Min	7.9	6.8	2.222	0.083	9.2
		Ave.	8.7	10.5	3.19	0.162	15.5
	2012	Max	8.3	19.5	3.516	0.317	36.5
		Min	7.3	6.3	1.008	0.101	14.5
		Ave.	7.8	10.5	2.424	0.185	22.6
	2013	Max	7.9	9.4	4.068	0.169	24.5
		Min	7.3	8.4	1.708	0.109	8.5
		Ave.	7.6	9.1	2.666	0.148	16.8
	2014	Max	8.3	9.6	1.736	0.097	18.3
		Min	7.4	6.8	1.127	0.038	11.0
		Ave.	7.8	7.8	1.411	0.064	14.0
버들지	2011	Max	9.5	17.2	4.984	0.298	34.7
		Min	7.5	4.8	2.016	0.092	13.3
		Ave.	8.5	13.3	3.51	0.217	22.8
	2012	Max	8.9	20.3	4.776	0.384	43.0
		Min	8.1	11.5	2.556	0.202	26.5
		Ave.	8.4	14.0	3.765	0.286	32.6
	2013	Max	8.2	18.8	5.411	0.244	38.0
		Min	7.4	10.4	2.008	0.166	19.5
		Ave.	7.7	12.9	4.048	0.203	27.0
	2014	Max	9.2	15.3	2.01	0.144	19.0
		Min	8.1	8.6	1.296	0.041	13.3
		Ave.	8.5	11.0	1.540	0.096	15.7

## 제2절 저수지 및 유입하천 수질조사

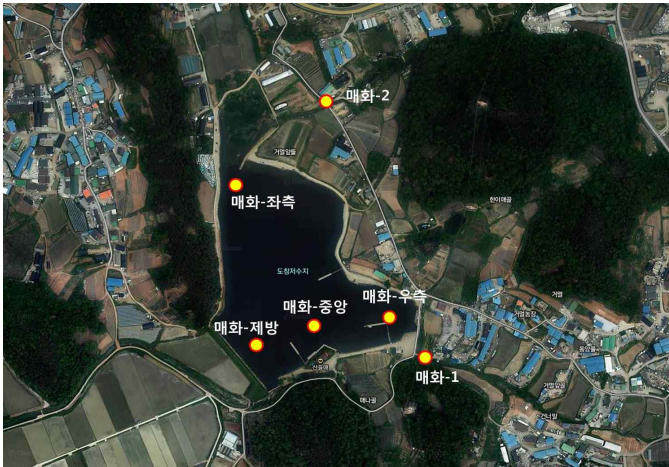
### 1. 수질조사 위치 및 방법

#### 1) 수질조사 위치 선정

연구대상 후보지구로 선정된 매화저수지, 과림저수지, 버들저수지를 대상으로 호 내 및 유입하천에서 수질조사를 실시하였다. 조사 횟수는 4월부터 10월까지 월 2회 조사를 실시하였고, 조사 초기에는 각 저수지 별로 저수지 표층의 대표지점 1개 지점을 선정하여 채수하였다. 연구 대상지구로 선정된 매화저수지는 지점을 추가하여 호 내 4개 지점과 유입하천 각각에 대해 조사를 실시하였다. 또한, 농업용 저수지의 수층에 따른 수질을 분석하기 위하여 6월부터 저수지 표층수와 심층수를 채수하였으며, 7월부터는 각 저수지의 유입하천에 대한 수질과 유량을 모두 측정하였다. 매화저수지와 버들저수지는 주요 유입하천이 2개소이며, 과림저수지는 1개소의 유입하천이 있다. 유입하천의 조사는 저수지 조사와 동일한 일자에 하였으며, 총 10회의 조사를 실시하였다. 조사기간 중 유량이 거의 없어 흐름이 없는 하천에 대해서는 수질조사를 실시하지 않았다. 유입하천 조사중 1회는 강우 시 조사를 실시하였으나 강우량이 매우 작아 강우에 의한 영향이 나타나지 않아 비강우시 조사로 분류하였다. 각 저수지의 조사지점은 <그림 3.2-1>와 같다.

#### 2) 수질조사 항목 및 방법

조사분석 항목은 현장에서 수온, EC, DO, pH, ORP, 수심, 투명도, 유속을 측정하였으며, 각 지점에 대해 3L의 물을 채수한 후 폴리에틸렌 시료통에 채워 분석실로 가져와 분석을 실시하였다. 분석항목으로는 COD, SS, T-N, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, T-P, PO<sub>4</sub>, Cl, 그리고 중금속 Cu, Pb, Cd 및 As, Hg 등을 분석하였다. COD, T-N, T-P, SS 등 기타항목은 수질오염공정시험법과 Standard Method에 준하여 조사 및 분석을 실시하였다.



(매화저수지)



(과림저수지)



(버들저수지)

<그림 3.2-1> 연구대상 후보지구 수질조사 위치도





<그림 3.2-2> 매화저수지 및 유입하천 전경



<그림 3.2-3> 과립저수지 및 유입하천 전경





<그림 3.2-4> 버들저수지 및 유입하천 전경

## 2. 호 내 및 유입하천 수질조사 결과

### 1) 호 내 및 유입하천 수질

#### 가. 매화저수지

매화저수지의 수심은 가장 깊은 곳을 기준으로 2.0~2.4m을 나타냈으며, 수체의 모형이 접시모양의 저류지형으로 하천 유입부를 제외한 모든 구역의 수심이 2m 이하로 거의 일정하였다. 투명도는 0.3~0.4 m 내외로 조사 시기에 따른 편차가 거의 없었으며, 물의 탁도가 높은 것으로 나타났다.

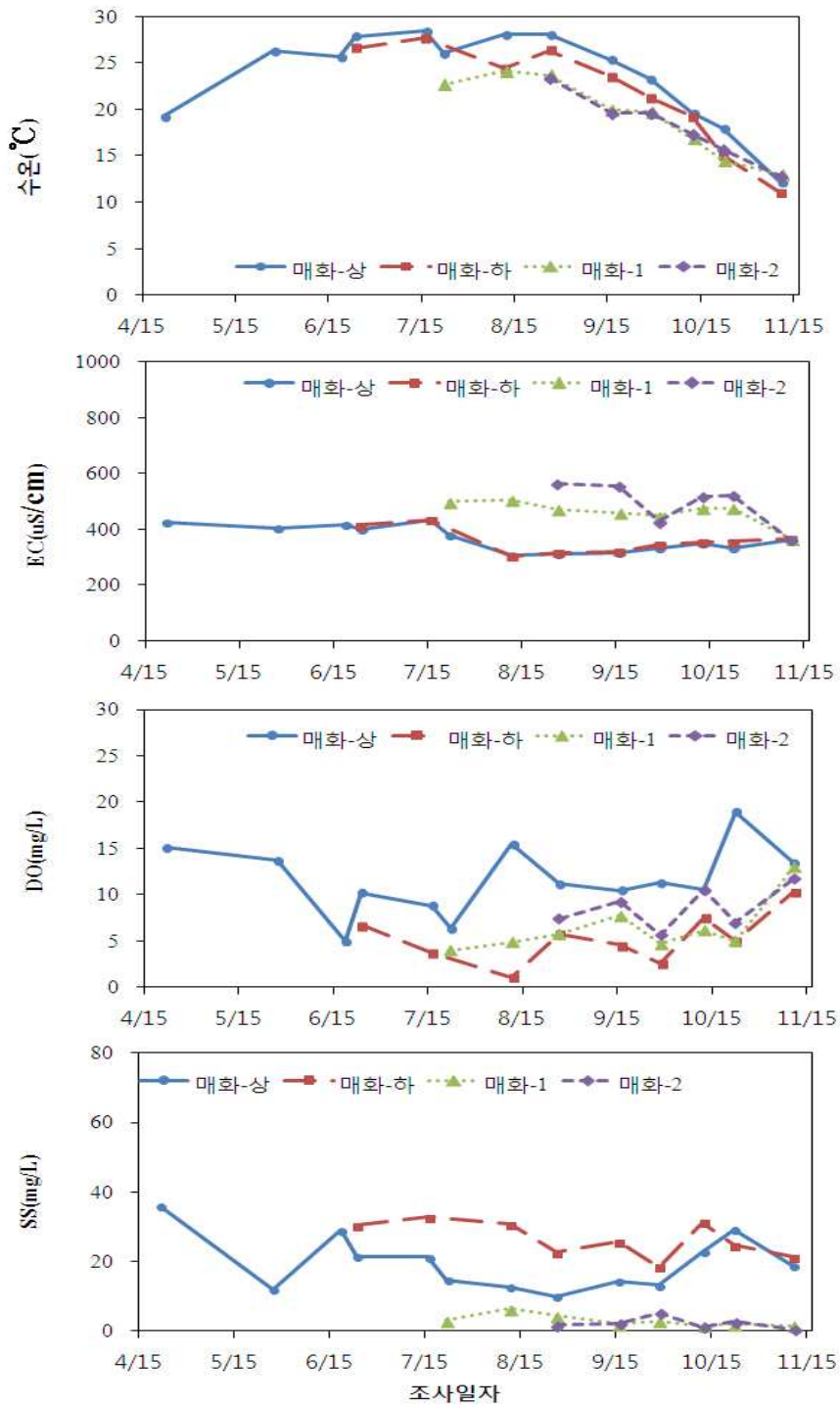
매화저수지 표층수의 평균 수온은 23.7℃, 심층수의 평균 수온은 21.7℃로 약 2℃ 정도 낮았으며, 유입하천인 매화-1 지점은 19.3℃, 매화-2지점은 18.1℃로 저수지에 비해 유입하천의 수온이 다소 낮게 나타났다. pH는 표층수에서 8.9, 심층수, 매화-1지점, 매화-2지점에서 8.3으로 나타나 약알칼리성 상태를 보였고, EC는 8월에 강우의 영향으로 310 $\mu$ s/cm의 가장 낮은 값을 보였으며, 봄철과 가을 시기에는 400 $\mu$ s/cm 내외의 값을 나타냈다. DO는 조사기간 동안 약 5.0~18.9mg/L의 넓은 범위를 나타냈으며, 표층수에서는 대부분 10mg/L의 이상의 농도를 나타내는 시기가 많았다. 저수지 표층수의 평균 DO는 11.6mg/L인 반면에 심층수는 5.2mg/L, 매화-1지점은 6.4mg/L로 다소 낮은 DO를 나타냈다.

매화저수지 표층수의 평균 COD는 12.9mg/L를 나타냈으며, 거의 모든 시기에 8mg/L 이상으로 수질기준을 초과하고 있었고, 특히, 4월과 10월에는 20mg/L 이상의 매우 높은 오염도를 보였다. 심층수의 COD는 평균 11.1mg/L로 표층 COD값과 비교해보면 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 매화저수지는 전 구역에 걸쳐 수심이 약 2m이하로 계절에 따른 성층현상이 없는 것으로 나타났다. 매화저수지의 주요 유입하천은 2개인데, 유입수1(매화-1) 지점은 금이동 유역에서 들어오는 하천이고, 유입수2(매화-2) 지점은 도창동 일부와 금이동 유역에서 들어오는 하천이다. 유입하천의 COD 오염도는 매화 1, 2에서 각각 5.4mg/L와 5.0mg/L로 저수지 수질에 비하여 매우 낮은 농도를 보였다. 이는 저수지 내 높은 COD가 강우 시에 유입되거나 저수지 내부에서 생성된 유기물에 의한 영향으로 판단되는데, 매화지 전체 수면에 걸쳐 분포하는 수생식물인 마름으로부터 배출되는 유기물에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다. 또한 저수지가

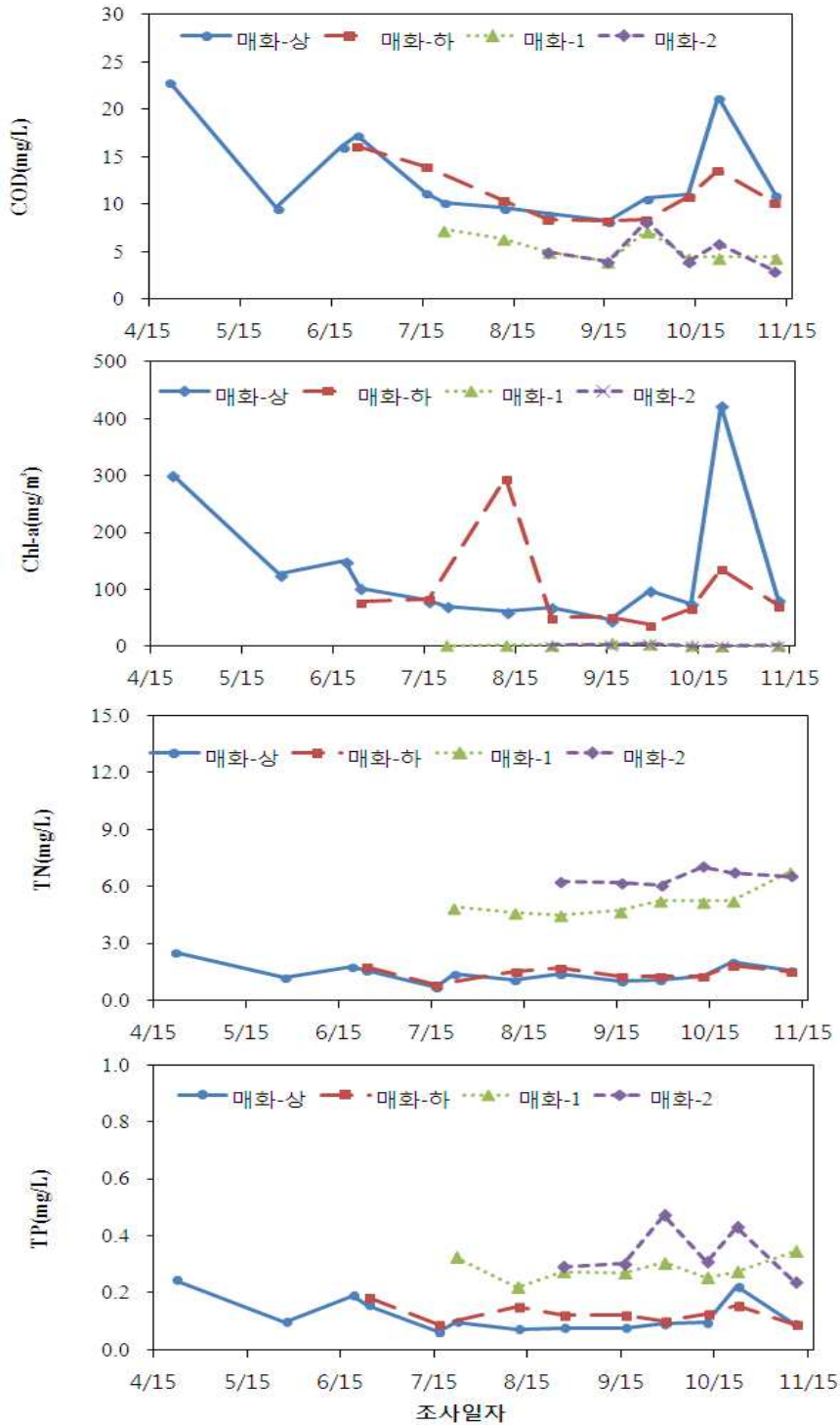
준공된 지 50년 이상된 저수지로 노후화가 심하며, 수심이 2m 내외로 낮아 퇴적층으로부터의 유기물 용출도 큰 부분을 차지할 것으로 보인다.

SS는 조사기간 동안 변화가 크지 않았으며, 표층 19.7mg/L보다 심층 26.4mg/L에서 더 높은 농도를 나타내었다. 유입하천의 SS는 매화-1, 2에서 각각 평균 3.0mg/L과 2.3mg/L로 나타나 저수지와 비교하여 매우 낮은 농도를 보였다. 저수지의 SS는 연중 높은 값을 나타내고 있어 강우에 유입된 토사에 영향을 받기보다는 내부적인 원인에 의해 오염도가 증가하는 것을 알 수 있다. 매화저수지는 유료낙시터로 이용되는 저수지이므로 이로 인한 영향도 크다고 판단된다.

TN과 TP는 조사기간 동안 큰 편차없이 비슷한 수준의 농도를 나타냈으며, 저수지 표층과 심층의 농도차이가 거의 없었다. 저수지 표층의 평균 TN은 1.43mg/L로 유입수인 매화-1(5.16mg/L)과 매화-2(6.47mg/L)에서 훨씬 높은 농도를 나타내었다. 저수지 표층수의 TP는 0.121mg/L, 매화-1과 2가 각각 0.347mg/L, 0.235mg/L로 TN과 마찬가지로 호 내보다는 유입수에서 더 높은 농도를 나타내었다. 유입하천 별로는 도창동유역에서 유입되는 매화-2에서 매화-1보다 TN, TP가 높게 나타났다. 매화지의 유입하천은 강우에 영향을 받지 않는 시기에 COD와 SS는 낮지만 TN, TP가 높은 농도로 유입되고 있었다. 인 성분 중 용존성 인은 유입하천에서 매화 1, 2가 각각 0.161mg/L과 0.264mg/L로 높은 농도를 나타냈으나 저수지에서는 불검출로 나와 인이 제한영양인자임을 알 수 있었고, 인이 유입되는 만큼 부영양화가 일어날 것으로 예상된다. 매화지의 Chl-a는 표층수와 심층수에서 각각 평균 83.1mg/m<sup>3</sup>, 71.9mg/m<sup>3</sup>로 농도 차이가 거의 없었으나 11월 조사에서 Chl-a가 422.8mg/m<sup>3</sup>로 매우 높았는데, 이는 일시적으로 증가한 COD와도 같은 경향을 보였다. 이러한 이유는 수면에 넓게 퍼져있는 마름이 수온이 내려가면서 분해되어 유기물과 엽록소가 용출되어 나오면서 농도가 높아진 것으로 판단된다. 4월 조사 시에도 Chl-a 농도가 301.8mg/m<sup>3</sup>로 매우 높았으며, 10월까지 서서히 감소하다가 11월에 높게 뛰는 경향을 나타내었다. 유입하천의 Chl-a는 두 하천에서 평균이 2.3mg/m<sup>3</sup>로 매우 낮게 나타났다. 매화저수지의 강우조사는 7월 23일에 1회 조사를 실시하였으나 시흥지역의 1일 강수량이 10.0mm 이하로 강우에 의한 토사 유출 등이 미비하여 비강우시 조사로 분류하였다.

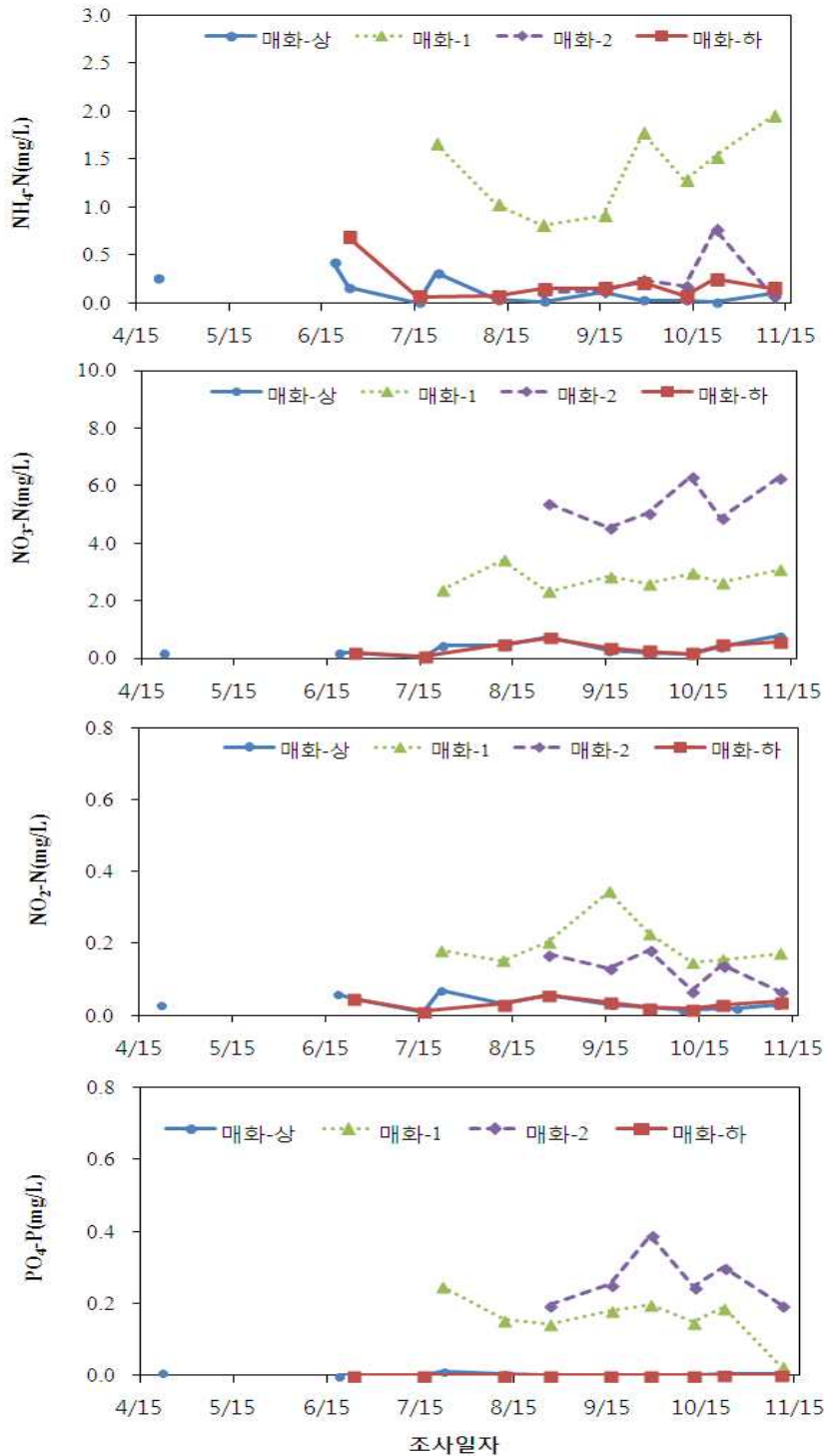


<그림 3.2-5> 매화저수지 및 유입하천 수질(수온, EC, DO, SS)



<그림 3.2-6> 매화저수지 및 유입하천 수질(COD, Chl-a, TN, TP)





<그림 3.2-7> 매화저수지 및 유입하천 수질( $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$ ,  $NO_2-N$ ,  $PO_4-P$ )

## 나. 과림저수지

과림저수지의 평균수심은 2.9m이고, 호소 중간지점을 기준으로 하여 약 2.1~3.6m의 범위였으며, 매화지나 버들지에 비해서 수심이 조금 깊은 편이었다. 투명도는 조사기간 동안 약 0.3m 내외로 물의 탁도가 심했으며, 물색은 흑색에 가까운 색을 띠는 것이 특징이다. 과림저수지 표층수의 수온은 13.4~29.2℃(평균 23.7℃), 심층수 수온은 11.7~27.9℃(평균 22.0℃)이고, 유입수의 수온은 12.1~28.1℃(평균 19.4℃)으로 표층수의 수온이 심층수나 유입수에 비해 다소 높았다. pH도 표층수에서 8.2~10.4(평균 9.0)으로 심층수 7.9~8.7(평균 8.4)나 유입수 8.0~10.2(평균 8.5)에 비해 다소 높았으며, 유입수 및 호소수 모두 알칼리성 상태를 보이고 있다. EC는 표층수에서 333~474 $\mu$ s/cm의 범위를 보였으며, 심층수 333~444 $\mu$ s/cm, 유입수 344~699 $\mu$ s/cm로 표층수, 심층수, 유입수 지점에 따른 차이가 없었으며, 조사 시기에 따른 편차도 거의 없었다. 물의 용존산소인 DO는 표층수에서 5.5~17.2mg/L(평균 9.0mg/l)로 조사 시기에 따라 편차가 크게 나타났으며, 심층수와 유입수의 평균농도는 각각 8.4mg/L, 8.5mg/L로 거의 차이가 없었다. 과림저수지의 유입하천은 상류부에 1개소가 존재하며, 습지가 인공적으로 조성되어 있으나 유입수량의 전량이 습지를 거치지 못하고 일부만 습지를 거쳐서 저수지로 유입되고 있다. 과림지의 경우에는 평상시에도 계속 하수가 유입되고 있고, 오염물질이 다량 쌓여 유입하천의 퇴적층도 검은 색을 띠고 있을 정도로 오염되어 있다.

과림 저수지의 COD는 표층과 심층이 각각 평균 18.5mg/l와 15.7mg/L로 모두 등급외의 수질을 보이고 있으며, 심층수보다 표층수에서 더 오염도가 높게 나타났다. 과림지는 COD가 다른 저수지와 비교하여 매우 높은 수준이었으며, 7월에는 20mg/L을 크게 넘는 경우도 있었다. 유입하천인 과림-1지점의 COD는 조사기간 중 평균 31.5mg/L로 매우 높은 농도를 나타내어 평상시 유입수의 오염정도를 알 수 있다. 특히 9월에는 COD 74.2mg/L, TN 11.236mg/L, TP 1.632mg/L를 나타내어 연중 오염도가 가장 심한 시기였다. SS는 저수지 표층과 심층에서 각각 12.0~39.0mg/L(평균 25.0 mg/L)와 14.0~28.5mg/L(평균 23.4mg/L)로 거의 차이가 없었으며, 시기별로는 6월과 7월에 가장 높은 값을 나타내었다. 유입하천의 SS는 8.0~81.0mg/L(평균 35.8mg/L)로 조사 시기에 따라 편차가 심했으며, 호소수보다 훨씬 높은 값을 나타내었다<그림 3.2-8>.

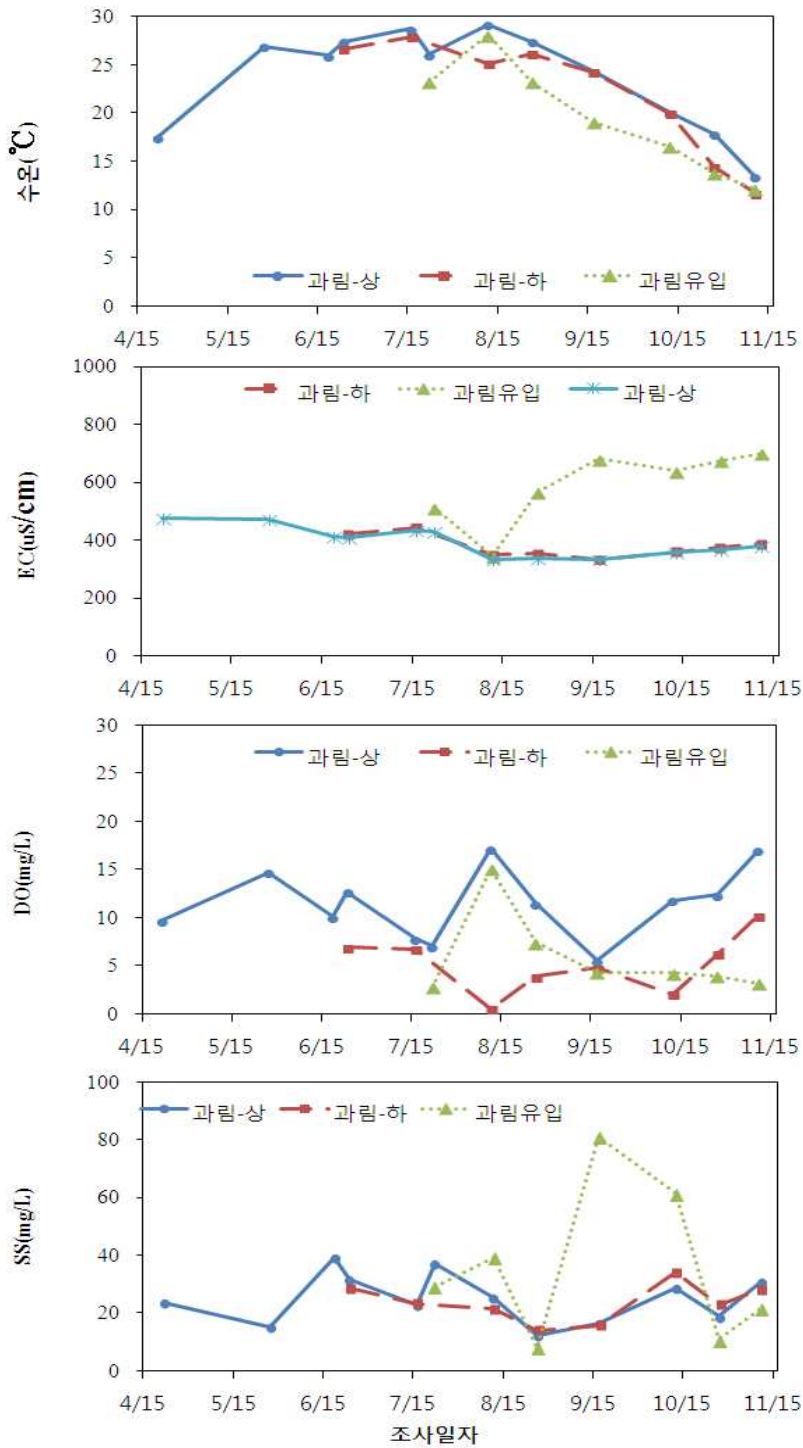
TN은 저수지 표층수에서 1.897~4.312mg/L(평균 2.726mg/L), 심층수에서 2.037~3.080mg/L(평균 2.485mg/L)로 조사되어 표층의 농도가 다소 높았으며, 시기적으로 4월에서 6월에 높은 경향을 나타내었다. 유입하천 TN 농도는 3.051~11.980mg/L(평균 8.456mg/L)로 표층수나 심층수에 비해 4배 정도 높은 농도를 보였으며, 특히 시기적으로 9~11월에 9.176~11.980mg/L로 아주 높은 농도를 나타냈다. 암모니아성 질소와 질산성 질소, 아질산질소의 경우에는 <그림 3.2-10>에서 나타난 바와 같이 유입하천이 표층수, 심층수보다 높게 나타났고, 암모니아성 질소와 질산성 질소는 표층수에서 심층수보다 높게 나타났지만, 반면에 아질산성 질소는 표층수와 심층수에서 비슷한 농도를 보였다.

TP는 저수지의 표층수와 심층수에서 각각 0.109~0.272mg/L(평균 0.186mg/L)와 0.138~0.244mg/L(평균 0.176mg/L)으로 농업용수 수질기준 0.1mg/L를 초과하고 있으며, 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 유입하천의 TP는 0.281~1.632mg/L(평균 0.820mg/L)로 호소수에 비해 매우 높았으며, 매화지, 버들지 유입하천에 비교해서도 매우 높은 값을 나타내었다. 시기적으로는 특히 9월과 10월에 가장 높은 농도를 나타냈는데, 이러한 결과는 TN 조사결과와 유사한 경향을 보였다.

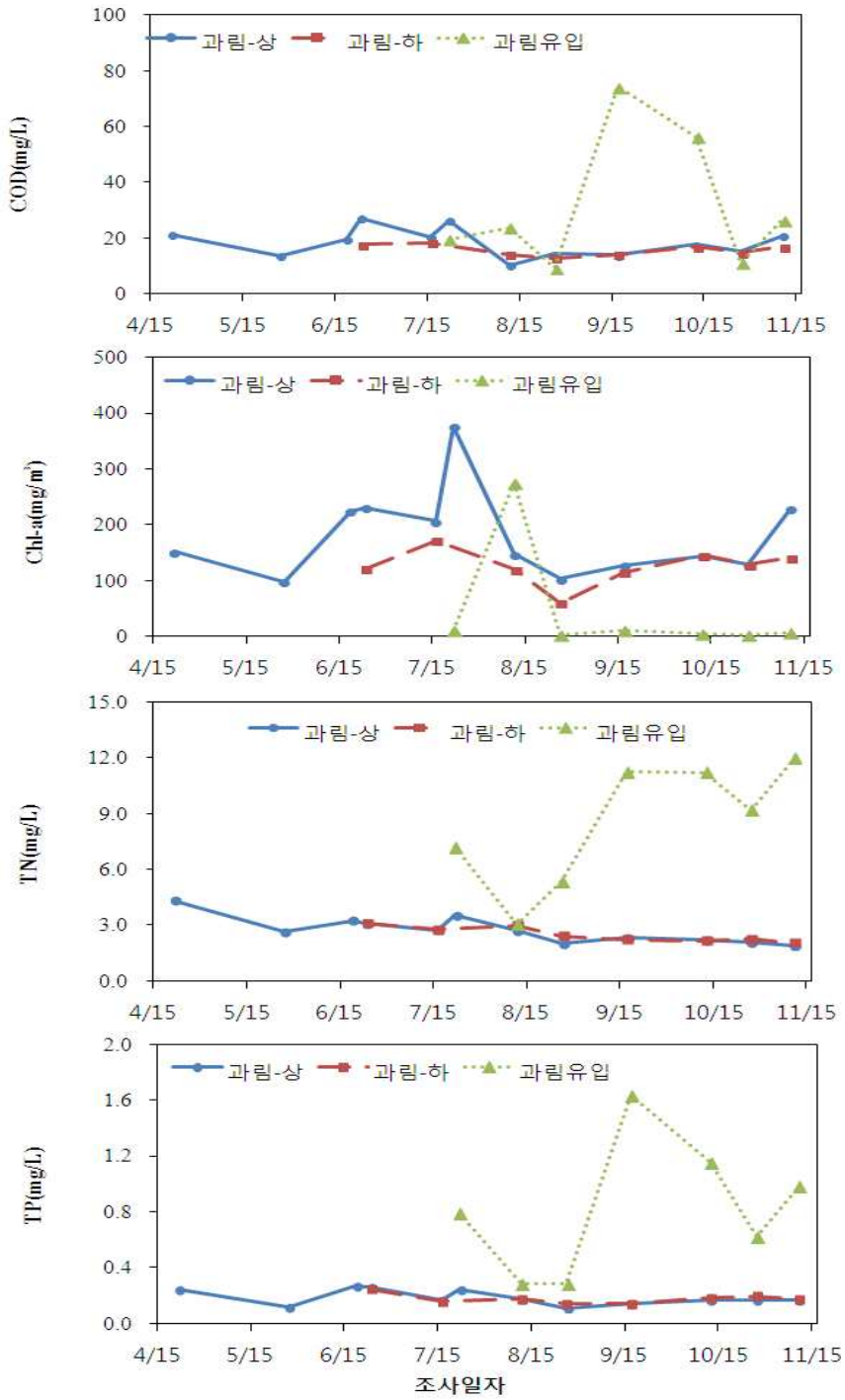
Chl-a는 저수지 표층수에서 97.4~376.3mg/m<sup>3</sup>(평균 180.4mg/m<sup>3</sup>), 심층수에서 59.4~172.0mg/m<sup>3</sup>(평균 125.3mg/m<sup>3</sup>)으로 표층수에서 심층수보다 훨씬 높게 나타났고, 조사시기별로 편차가 크게 나타났다. 매화저수지 표층수 평균 129.8mg/m<sup>3</sup>나 버들저수지 표층수 119.4mg/m<sup>3</sup>에 비해 매우 높은 농도를 보였다. 유입하천에서는 Chl-a가 2.1~274.0mg/m<sup>3</sup>(평균 44.7mg/m<sup>3</sup>)으로 호소수에 비해 훨씬 낮은 평균농도였고, 하천에서도 8월을 제외하고는 12.0mg/m<sup>3</sup>이하로 매우 낮은 농도를 보였다. 반면에 매화저수지 유입하천이나 버들저수지 유입하천에 비하면 상당히 높은 값을 나타내었다.

중금속에 대한 조사에서는 구리가 표층수와 심층수에서 0.003mg/L 정도 검출되었고, 나머지 Pb, Cd, As, Hg 등은 호소수 및 유입수에서 검출되지 않았다.

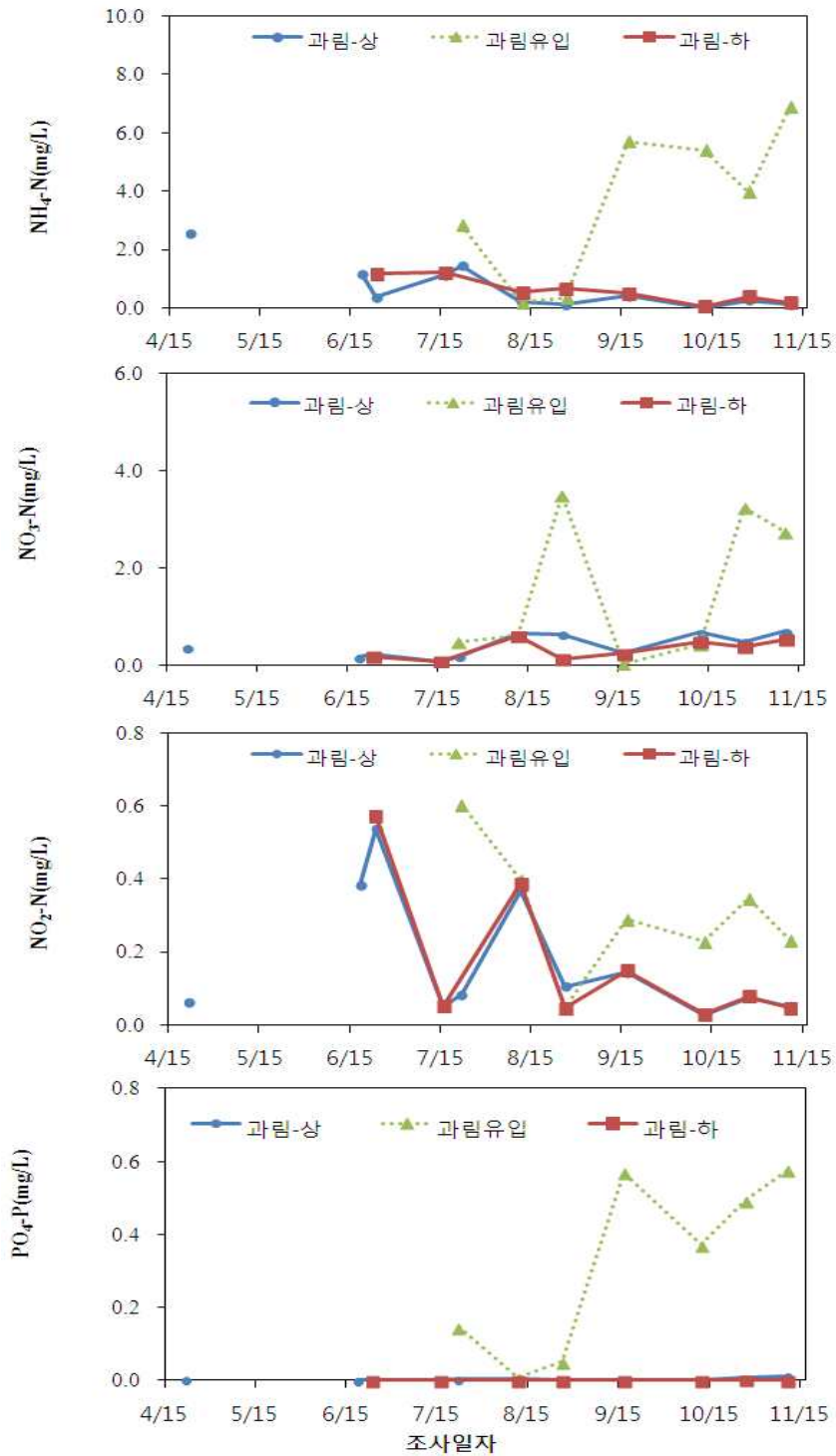




<그림 3.2-8> 과림저수지 호내 및 유입하천 수질(수온, EC, DO, SS)



<그림 3.2-9> 과림저수지 호내 및 유입하천 수질(COD, Chl-a, TN, TP)



<그림 3.2-10> 과림저수지 및 유입하천 수질(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P)

#### 다. 버들저수지

버들저수지의 평균수심은 2.2m이고, 호소 중앙을 기준으로 하여 약 1.5~2.6m의 범위로 매화저수지와 비슷한 수심을 보였다. 조사기간 동안 다소 수심의 변동이 있었는데, 이는 저수지 물넘이 공사가 한창 중이라 이로 인해 수심을 조절하였기 때문이다. 버들저수지 투명도는 조사기간 동안 약 0.2m 내외이고, 물색이 진한 갈색을 띠고 있어 연중 탁도가 심한 편이었다. 버들저수지 4월부터 11월까지의 표층수의 수온은 11.6~27.4℃(평균 22.8℃)를 보였고, 6월부터 11월까지의 심층수 수온은 10.9~27.0℃(평균 21.6℃)를 보였다. 7월부터 11월까지의 유입수(버들-1)의 수온은 9.4~25.6℃(평균 18.5℃)으로 호소수에 비해 다소 낮았다. 버들지의 유입하천은 배수로 형태로 만들어진 두 개의 주요 유입하천과 인근 축산시설 옆으로 배출구가 있는데, 한 개의 하천을 제외하고는 모두 강우 시에만 유량이 발생하였다. 유입하천 버들-2지점의 경우 조사 초기 2회 동안에는 약간의 유량이 존재하여 채수하였으나 그 이후는 유량이 없어 버들-1 지점에서만 수질조사를 실시하였다.

저수지의 pH는 표층수에서 8.0~9.6(평균 8.6), 심층수에서 7.8~9.0(평균 8.3)으로 약알칼리성 상태를 보이고 있으며, 유입수 버들-1지점의 pH는 7.7~9.0(평균 8.3)으로 호소수와 비슷한 상태를 보이고 있다. EC는 표층수에서 311~745 $\mu$ s/cm(평균 435.4 $\mu$ s/cm), 심층수에서 300~741 $\mu$ s/cm(평균 416.3 $\mu$ s/cm), 유입수(버들-1지점)에서 235~730 $\mu$ s/cm(평균 451.4 $\mu$ s/cm)로 표층수, 심층수, 유입수에서 거의 차이가 없었으며, 조사 시기에 따른 일정한 경향성은 없었다. 물의 용존산소인 DO는 표층수에서 5.4~15.0mg/L(평균 10.8mg/l)로 조사 시기에 따라 편차가 크게 나타났으며, 심층수 평균농도는 8.5mg/L, 유입수 평균농도는 8.9mg/L로 나타났다.

버들 저수지의 COD는 표층과 심층이 각각 평균 14.9mg/l와 14.0mg/L으로 모두 수질기준을 초과하고 있으며, 수심에 따른 농도변화도 거의 없었다. 유입하천인 버들-1 지점의 COD는 7월부터 11월까지의 평균치가 4.5mg/L로 낮은 농도를 나타냈고, 버들-2 지점의 7월과 8월에 2번 조사한 평균치가 11.8mg/L로 호소수와 비슷한 농도이고, 버들-1 지점보다는 오염도가 훨씬 높게 나타났다.

SS는 저수지 표층수와 심층수에서 각각 18.0~46.0mg/L(평균 28.3 mg/L)와 30~140.0mg/L(평균 28.0mg/L)으로 거의 차이가 없었으며, 시기별로는

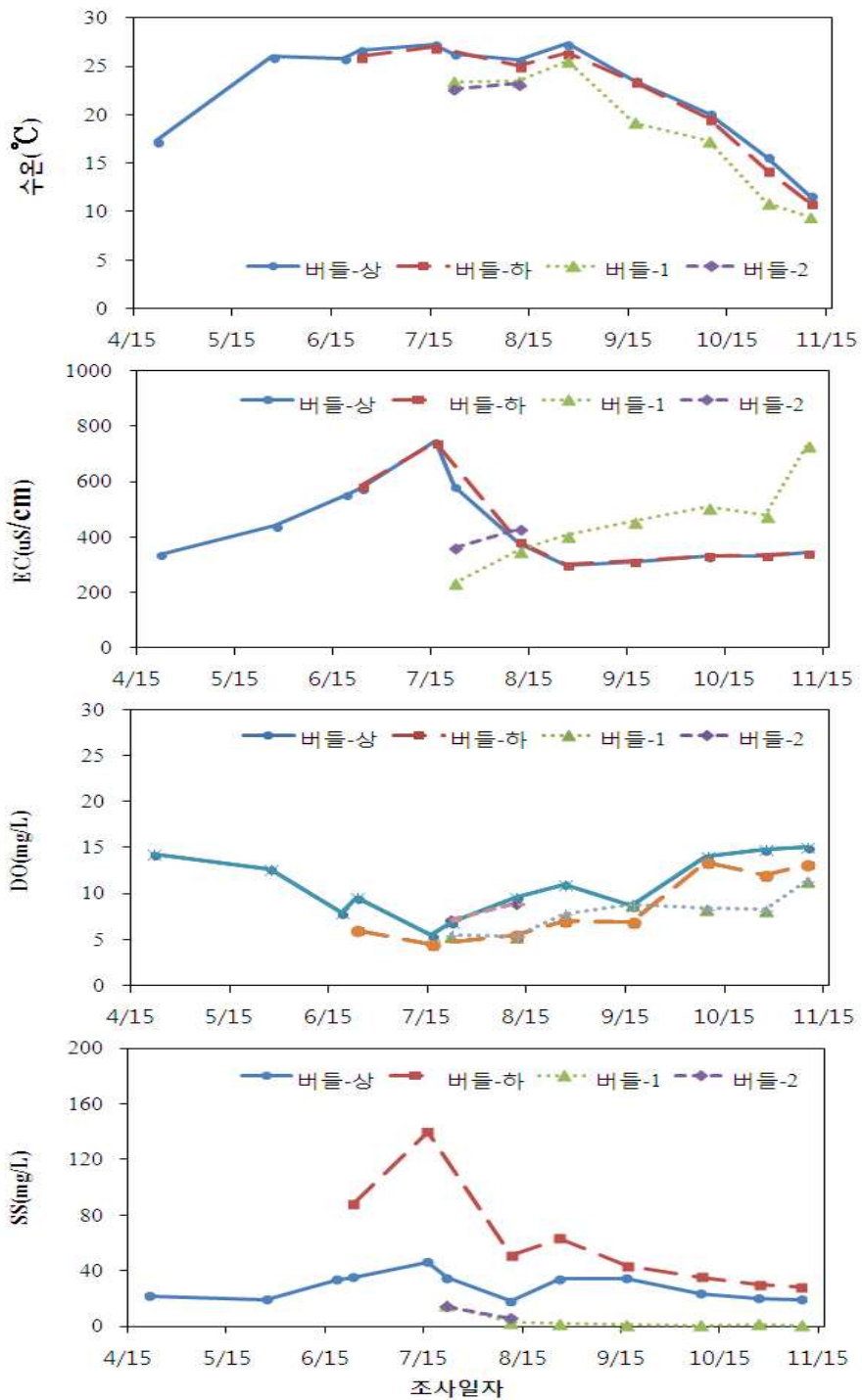
6월과 7월에 가장 높은 값을 나타내었다. 유입하천(버들-1)의 SS는 0.7~14.8mg/L(평균 3.4mg/L)로 조사 시기에 따라 편차가 심했으며, 버들-2 지점 9.9mg/L보다는 더 낮은 농도를 나타냈다.

TN은 저수지 표층수에서 1.005~2.950mg/L(평균 1.622mg/L)로 조사되었으며, 시기적으로 4월과 8~9월에 가장 높게 나타났다. 심층수에서의 TN은 1.061~2.959mg/L(평균 1.742mg/L)으로 표층수보다 약간 높았으나 큰 차이는 보이지 않았다. 유입하천 버들-1 지점의 TN은 1.975~9.793mg/L(평균 6.506mg/L)으로 조사 시기에 따라 농도의 편차가 심하였으며, 저수지보다 매우 높은 값을 나타내었다. 암모니아성 질소와 질산성 질소, 아질산질소의 경우에는 <그림 3.2-13>에서 나타난 바와 같이 유입하천이 표층수, 심층수보다 높게 나타났고, 특히, 질산성 질소와 아질산성 질소는 유입하천 버들-2 지점에서 매우 높게 나타났다.

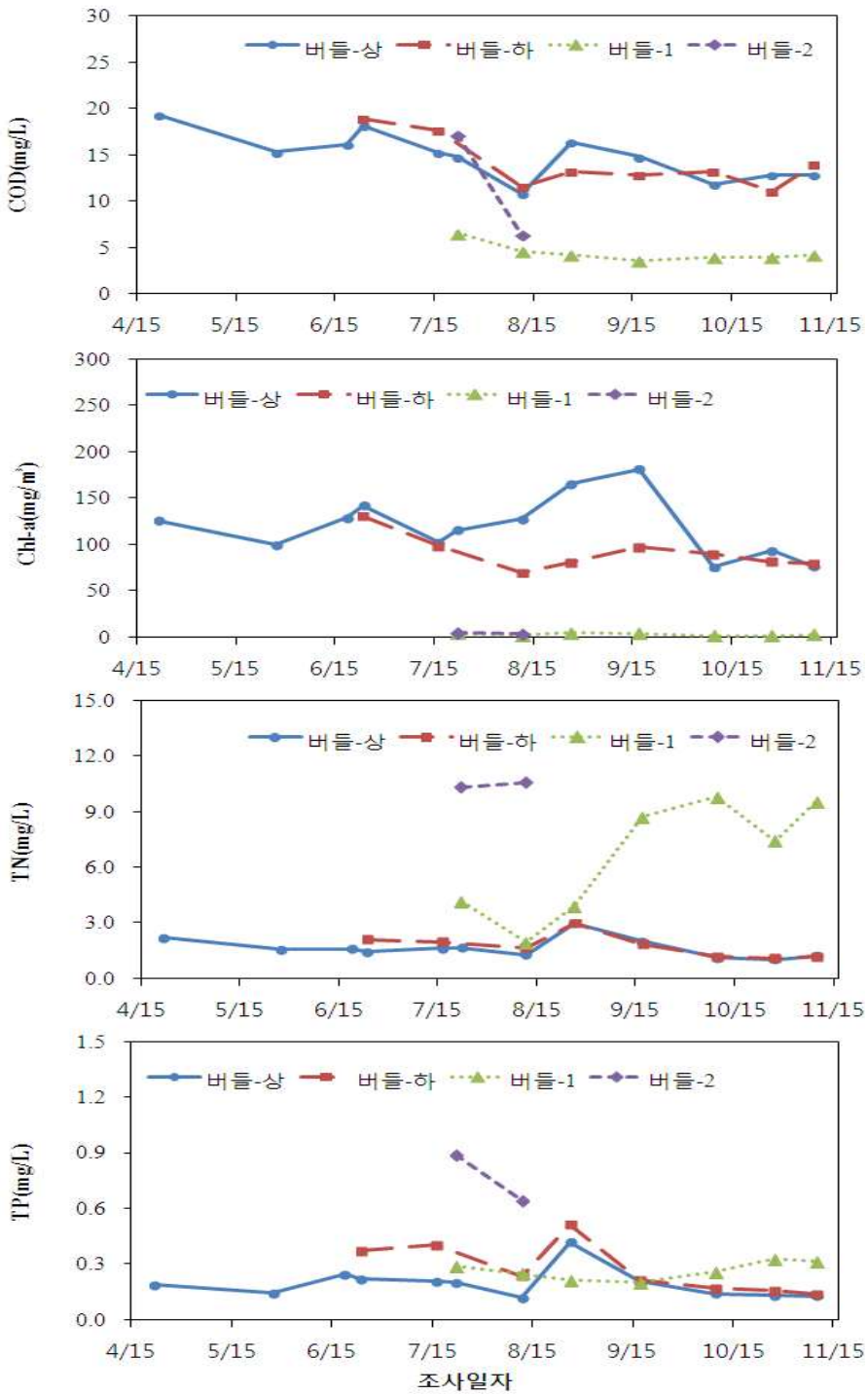
TP는 저수지의 표층수와 심층수에서 각각 0.116~0.418mg/L(평균 0.195mg/L)와 0.138~0.513mg/L(평균 0.275mg/L)로 모든 조사 시기에 농업용수 수질기준 0.1mg/L를 초과하고 있으며, 표층수에 비해 심층수에서 높은 농도를 보이고 있다. 유입하천 버들-1 지점의 TP는 0.201~0.313mg/L(평균 0.264mg/L)으로 연중 비슷한 농도를 보이고 있으며, 매화지 유입하천과 비슷한 농도를 나타내었다. 유입하천 버들-2 지점의 T-P는 7월 조사에서는 0.891mg/L, 8월 조사에서는 0.646mg/L로 버들-1 지점에 비해 매우 높은 농도를 나타냈다. 인산염은 <그림 3.2-13>에서 나타난 바와 같이 표층수에서의 농도가 심층수에 비해 높게 나타났다.

Chl-a는 저수지 표층수에서 75.4~180.9mg/m<sup>3</sup>(평균 119.4mg/m<sup>3</sup>), 심층수에서 69.4~130.7mg/m<sup>3</sup>(평균 91.0mg/m<sup>3</sup>)로 표층수에서 심층수보다 높게 나타났고, 조사 시기별로 편차가 크지 않았으며, 특히 8~9월에 다른 시기보다 높게 나타났다. 유입하천 버들-1 지점에서는 Chl-a가 1.3~4.4mg/m<sup>3</sup>(평균 3.0mg/m<sup>3</sup>), 버들-2 지점에서는 3.2~4.4mg/m<sup>3</sup>(평균 3.8mg/m<sup>3</sup>)로 호소수에 비해 훨씬 낮은 농도를 보였다.

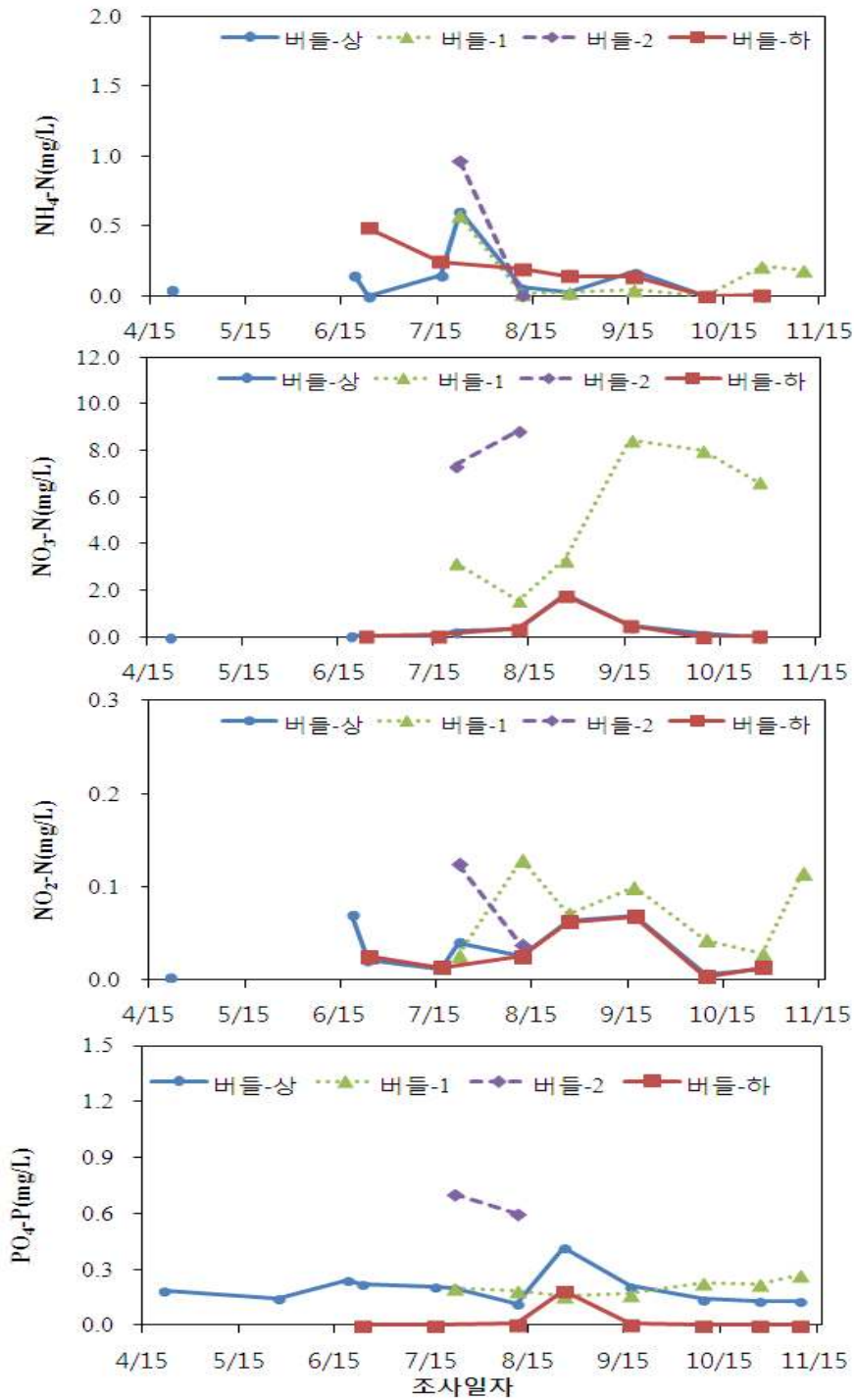
중금속에 대한 조사에서는 구리가 표층수, 심층수, 유입하천에서 0.000~0.007mg/L 정도 검출되었고, 나머지 Pb, Cd, As, Hg 등은 호소수 및 유입수에서 검출되지 않았다.



<그림 3.2-11> 버들저수지 호내 및 유입하천 수질(수온, EC, DO, SS)



<그림 3.2-12> 버들저수지 호내 및 유입하천 수질(COD, Chl-a, TN, TP)



<그림 3.2-13> 버들저수지 호내 및 유입하천 수질(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N)

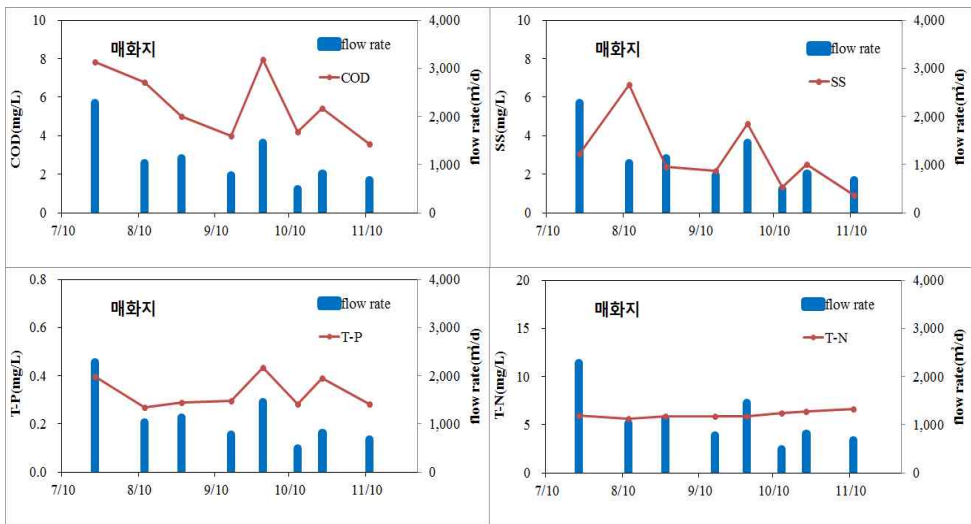


## 2) 유입하천 유량 및 오염부하량

### 가. 매화저수지

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

<그림 3.2-14>는 유입하천 유량과 COD, SS, TN, TP의 유량가중평균 농도를 나타낸 그래프이다. COD, SS, TP 농도는 유량과 비슷한 경향을 보이고 있으며, T-N은 유량에 관계없이 연중 일정한 농도를 유지하였다. 매화저수지 유입하천의 평상시 평균 유량은 676.5m<sup>3</sup>/일으로 연중 편차가 거의 없었고, 매화-1, 매화-2 유입하천의 유량가중 평균수질은 COD 5.6 mg/L, SS 3.0mg/L, TN 6.041mg/L, TP 0.329mg/L로 나타났다. 따라서 매화저수지 유입하천 2개소에서 평상시에 유입되는 평균 오염부하량은 COD 6.0kg/일, SS 3.2kg/일, TN 6.53kg/일, TP 0.356kg/일로 산출되었다. 유역 내 유기물계 및 질소계의 오염원에 대한 관리가 요구된다.

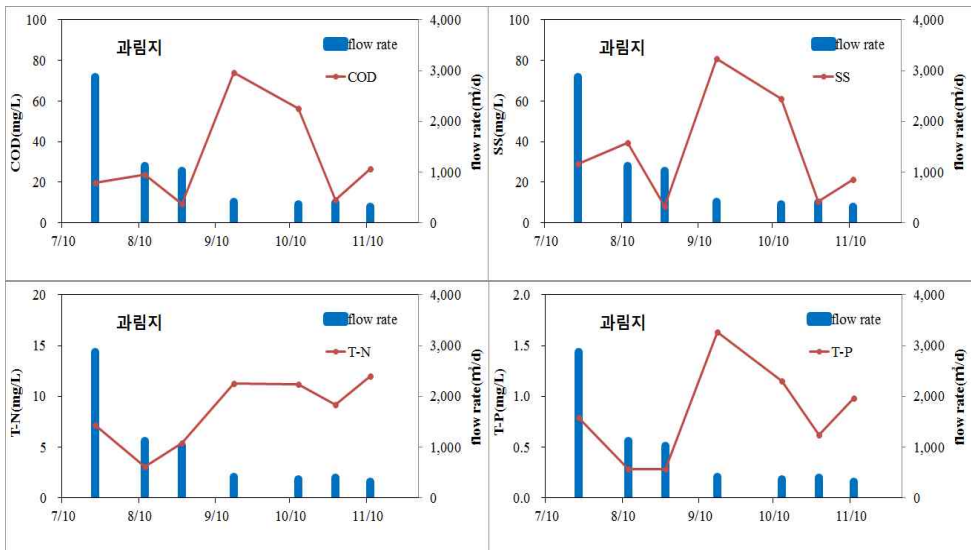


<그림 3.2-14> 매화저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도

## 나. 과림저수지

과림저수지에는 유역내에서 유입되는 주 유입하천이 한 개 있으며, 1개소에 대한 유속조사를 실시하여 유량을 산출하였다. 오염부하량 계산을 위해 사용된 수질자료는 7월부터 11월까지 조사한 자료의 평균을 사용하였으며, 오염부하량은 평균 유량에 평균 수질을 곱하여 산출하였다. 과림저수지 유입하천의 평상시 유출 유속은  $0.004\sim 0.033\text{m}^3/\text{s}$ (평균  $0.011\text{m}^3/\text{s}$ )으로 조사 시기에 따라 유량의 변화가 큰 것으로 나타났다.

<그림 3.2-15>는 과림저수지 유입하천 유량과 COD, SS, TN, TP의 평균 수질농도를 나타낸 그래프이다. COD, SS, TN, TP 모두 유량이 적은 시기에 높은 농도를 보이는 경향을 나타내고 있다. 과림저수지 유입하천의 평상시 평균 유량은  $928.5\text{m}^3/\text{일}$ 으로 7~8월 강우기를 제외하고는 연중 편차가 거의 없는 것으로 나타났다. 유입하천의 평균수질은 COD  $31.5\text{mg}/\text{L}$ , SS  $35.8\text{mg}/\text{L}$ , TN  $8.456\text{mg}/\text{L}$ , TP  $0.820\text{mg}/\text{L}$ 으로 모든 항목에서 높게 나타났으며, 매화저수지나 벼들저수지 유입하천보다 훨씬 높은 오염도를 보이고 있다. 과림저수지 유입하천에서 평상시에 유입되는 평균 오염부하량은 COD  $29.2\text{kg}/\text{일}$ , SS  $33.2\text{kg}/\text{일}$ , TN  $7.851\text{kg}/\text{일}$ , TP  $0.761\text{kg}/\text{일}$ 로 산출되었고, 과림저수지 호내의 수질은 유입수의 영향을 많이 받을 것으로 판단된다. 따라서 유입수에 대한 처리가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

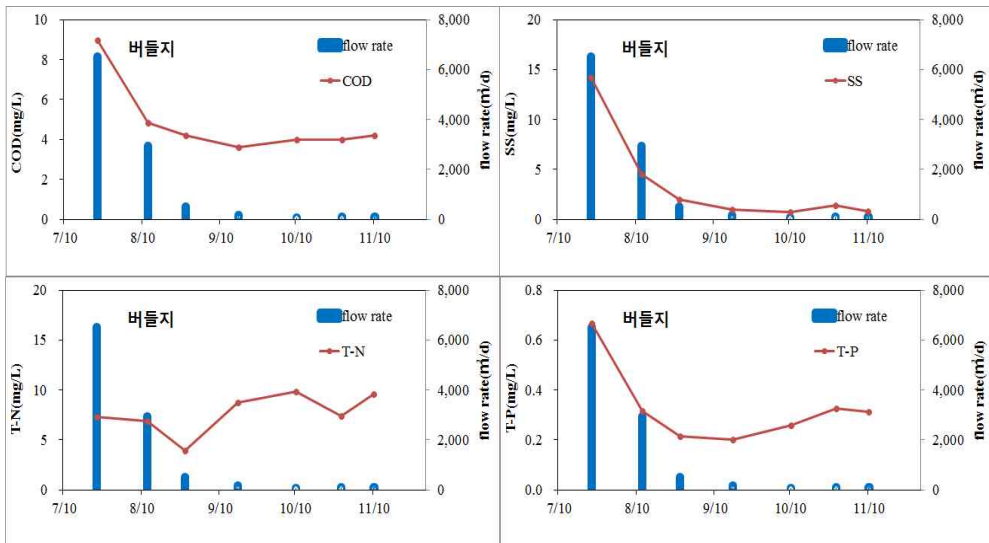


<그림 3.2-15> 과림저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도

#### 다. 버들저수지

버들저수지에는 유역내 주 유입하천이 2개소가 있는데, 버들-1 하천은 평상시에 지속적인 유량이 있는 하천이고, 버들-2 하천은 강우시를 제외하고는 평상시에 유량이 거의 없는 하천이다. 따라서 버들-2 하천의 유량은 무시하고 버들-1 하천의 유량 및 수질자료만 가지고 산출하였다. 버들-1 유입하천의 평상시 유출 유속은 0.001~0.075m<sup>3</sup>/s(평균 0.017m<sup>3</sup>/s)으로 7~8월의 강우기와 비강우기의 유량의 변화가 큰 것으로 나타났다.

<그림 3.2-16>은 유입하천 유량과 COD, SS, TN, TP의 평균수질농도를 나타낸 그래프이다. COD, SS, TP 농도는 유량과 비슷한 경향을 보이고 있으나, TN은 유량이 많을 시기보다 유량이 없는 시기에 농도가 많이 높아지는 경향을 보였다. 버들저수지의 유입하천의 평상시 평균 유량은 1483.5m<sup>3</sup>/일로 강우기와 비강우시의 편차가 심하였고, 다른 저수지에 비해 유량이 많은 하천이었다. 버들-1 유입하천의 평균수질은 COD 4.8mg/L, SS 3.5mg/L, TN 7.659mg/L, TP 0.328mg/L로 나타났고, 평균 오염부하량은 COD 7.1kg/일, SS 5.2kg/일, TN 11.3kg/일, TP 0.48kg/일로 산출되었다. COD나 SS의 오염부하량은 적은 반면에 TN, TP의 오염부하량은 상대적으로 많았으며, 이는 유역내 야적된 축분 등의 영향으로 판단되며, 강우시 이들이 강우와 함께 유입되면 저수지 물이 흑색으로 변하는 경우가 있다.



<그림 3.2-16> 버들저수지 유입하천 유량 및 유량가중평균농도

### 3. 매화저수지 정밀조사 결과

#### 1) 매화저수지 유역개황 및 오염원 현황

융복합 수처리 시스템의 현장적용실험 대상 저수지로 선정된 매화저수지의 유역 개황 및 오염원 조사를 실시하였다. 매화저수지의 유역은 행정구역상 경기도 시흥시 도창동과 금이동에 속하며, 금이동 지역 전체면적의 42.7%와 도창동 지역 면적의 23.4%를 차지하고 있다. <그림 3.2-17>은 매화저수지 유역 경계선을 위상사진 위에 그린 것으로, 노란색 실선은 도창동과 금이동 행정구역을 구분하는 경계선이고, 녹색 실선은 매화저수지 유역을 나타내는 경계선이다. 매화저수지 유역은 대부분 지역이 산림으로 이루어져 있고, 인근 시흥시 중심가와 접해 있어 주택가, 음식점, 소규모 산업시설, 농경지, 축산농가 등이 다양하게 위치해 있는 도농복합형태를 보이고 있다. 유역의 맨 위쪽으로는 100번 서울외곽순환고속도로가 지나고 있다.



<그림 3.2-17> 매화저수지 유역의 행정구역 위치도

2) 매화저수지 유역의 오염배출부하량

매화저수지 유역에 대한 오염원 자료는 환경부에서 제공하는 오염원 자료를 이용하여 오염부하량을 산출하였으며, 그 결과를 (표 3.2-1)에 나타내었다. 환경부에서 제공하는 오염원 자료는 행정구역인 동 단위로 정리되어 있으므로 해당 동 중 유역에 포함되는 면적비율로 환산하여 오염원과 오염부하량을 산출하였다. 유역에서 배출되는 오염배출부하량은 항목별로 BOD 80.1kg/일, TN 46.8kg/일, TP 4.80kg/일로 산출되었다. BOD 오염부하량은 생활계가 55.4%를 차지하여 가장 큰 오염원으로 나타났으며, 다음으로 토지계 오염이 38.3%를 차지하였다. 그 외 축산계 및 산업계에 의한 오염은 각각 5.7%, 0.7%를 차지하여 비율이 높지 않았다. TN과 TP에서도 역시 생활계가 60% 이상으로 가장 큰 오염원으로 산출되었고, 다음으로 토지계, 축산계, 산업계 순으로 오염 비율을 나타내었다. 따라서 매화저수지 유역 내에서 가장 큰 오염원은 생활계에 의한 것으로 축산계 및 산업계에 의한 배출은 거의 없는 것으로 조사되었다.

여기에서는 오염물질 배출부하량 산정을 단순히 행정상 자료에 의한 오염원 자료에 매화지 유역에 포함되는 면적비율을 곱하여 계산하였는데, 대규모 아파트단지 및 논이 매화지 유역 밖에 위치하고 있어 매화지 유역의 오염원으로 편입하기에는 오차가 크다. 향후에 유역에 대한 정밀한 현장 조사를 통해 유역 내 오염원 및 오염부하량을 산정할 계획이다.

(표 3.2-1) 매화저수지 유역의 오염배출부하량

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

주) 환경부 행정구역별 오염원 자료 참고, ( )는 비율

### 3) 매화저수지 수질조사

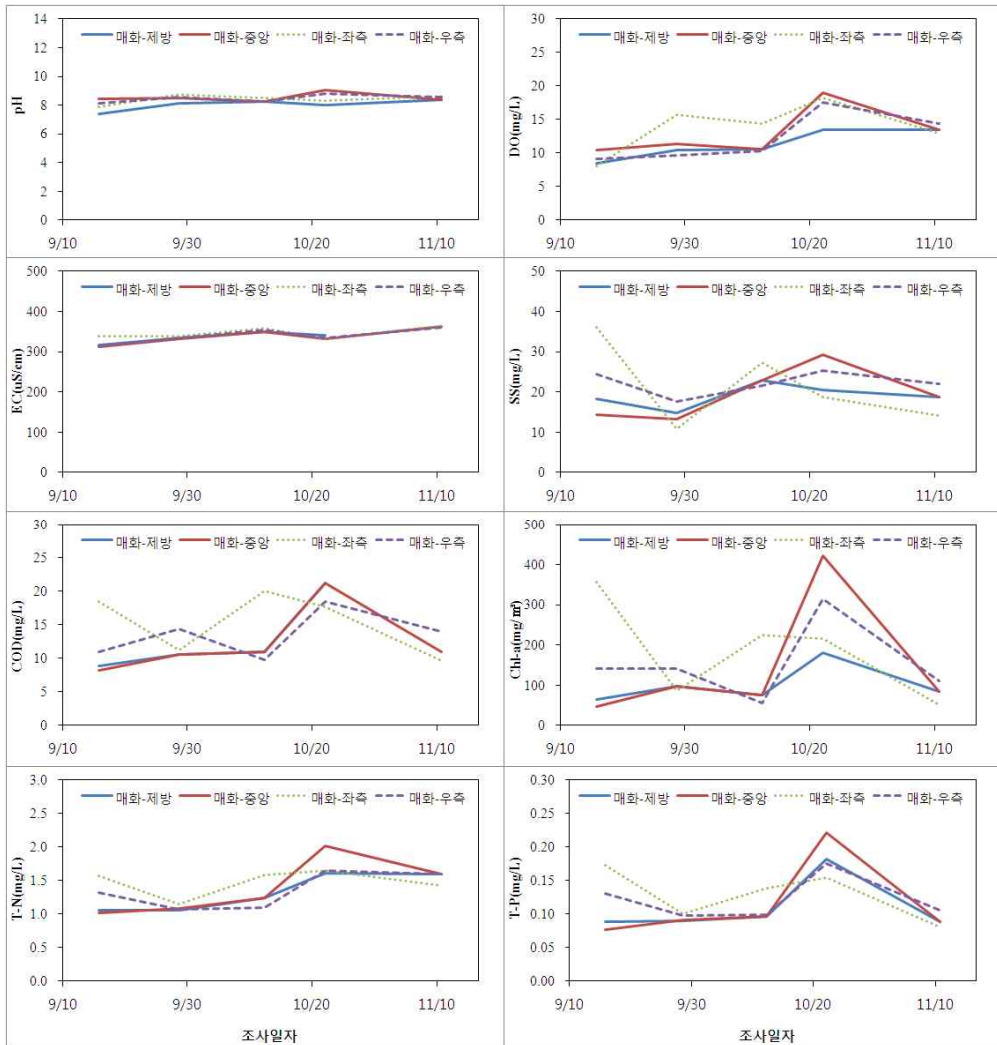
#### 가. 매화저수지 호내 위치별 수질

매화저수지는 만수면적이 약 15ha이며, 두 개의 주요 유입하천이 각각 저수지의 양쪽 끝으로 유입되며, 저수지 모양이 다소 V자 모양을 띠기 때문에 호 내 위치에 따른 수질 차이를 나타낼 수 있어 4개 지점(제방, 중앙, 저수지 유입부인 왼쪽, 오른쪽)을 선정하여 수질조사를 실시하였다. 조사는 9월 중순부터 11월까지 총 5회 실시하였으며, 수온, pH, EC, DO에 대한 현장조사와 함께 채수하여 COD, SS, TN, TP, Chl-a 항목에 대한 실험실 분석을 하였다. 그 결과는 <그림 3.2-18>과 같다.

저수지 제방과 중앙의 평균 수심은 2.4m이고, 저수지 왼쪽의 수심은 평균 1.2m, 오른쪽은 2.1m으로 저수지 좌안 쪽의 수심이 다소 낮은 편이다. 수온은 제방이 12.2~24.0℃(평균 19.2℃), 중앙 12.2~25.4℃(평균 19.7℃), 왼쪽이 13.0~24.7℃(평균 20.2℃), 오른쪽이 12.7~24.6℃(평균 19.6℃)으로 수심이 낮은 왼쪽에서 다소 높은 수온을 보이고 있다. pH는 제방이 7.4~8.4(평균 8.0), 중앙이 8.2~9.0(평균 8.5), 왼쪽 7.9~8.7(평균 8.4), 오른쪽 8.1~8.7(평균 8.4)으로 제방을 제외하고는 다소 높은 값을 나타내고 있다. 용존산소인 DO는 제방이 8.4~13.4mg/L(평균 11.3mg/L), 중앙이 10.4~18.9 mg/L(평균 12.9mg/L), 왼쪽이 8.1~18.2mg/L(평균 13.9mg/L), 오른쪽이 9.0~17.6mg/L(평균 12.2mg/L)으로 위치에 따른 편차가 거의 없는 것으로 나타났다. EC는 제방이 316~363 $\mu$ s/cm(평균 340.6 $\mu$ s/cm), 중앙이 313~363 $\mu$ s/cm(평균 337.8 $\mu$ s/cm), 왼쪽이 331~364 $\mu$ s/cm(평균 346.2 $\mu$ s/cm), 오른쪽이 314~360 $\mu$ s/cm(평균 339.6 $\mu$ s/cm)으로 저수지 호내 위치에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

유기물 지표인 COD는 제방과 중앙 지점에서는 각각 12.5mg/L, 12.4mg/L로 비슷한 농도를 나타냈으며, 좌측과 우측 지점은 15.4mg/L, 13.5mg/L로 제방과 중앙에 비해 높게 나타났다. SS는 지점별로 각각 제방이 14.8~22.8mg/L(평균 19.0mg/L), 중앙 13.2~29.2mg/L(평균 19.7mg/L), 좌측 10.8~36.0mg/L(평균 21.3mg/L), 우측이 17.6~25.3mg/L(평균 22.2mg/L)으로 조사 시기에 따라 편차가 있었으며, COD와 비슷한 경향으로 좌, 우 유입부 지점에서 다소 높게 나타났다. TN은 제방이 1.054~1.607mg/L(평균 1.31mg/L), 중앙이 1.015~2.015mg/L(평균 1.39mg/L), 좌측 지점이 1.151~1.646mg/L

(평균 1.48mg/L), 우측부 지점이 1.073~1.645mg/L(평균 1.35mg/L)으로 좌측 유입부 지점에서 다소 높게 나타났다. TP는 10월 조사시에 농도가 갑자기 높았으며, 지점에 따라 각각 제방이 0.109mg/L, 중앙 0.115mg/L, 좌측 0.130 mg/L, 우측 0.122mg/L로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. Chl-a는 지점 별로 제방 99.6mg/m<sup>3</sup>, 중앙 145.1mg/m<sup>3</sup>, 좌측 186.9mg/m<sup>3</sup>, 우측 152.5mg/m<sup>3</sup>으로 다른 수질항목에 비해 위치별로 편차가 다소 컸는데, 제방쪽에서 가장 낮았고, 좌측 유입부 지점에서 가장 높게 나타났다.



<그림 3.2-18> 매화저수지 호내 위치에 따른 수질현황



#### 나. 매화저수지 수층에 따른 수질

매화저수지의 수층에 따른 수질현황을 분석하기 위하여 표층수와 심층수를 현장조사와 함께 실험실 분석을 실시하였다. 매화저수지 제방과 중앙부의 평균 수심은 2.4m이고, 저수지 왼쪽 유입부의 수심은 평균 1.2m, 오른쪽 유입부 지점은 평균 2.1m으로 전체적으로 수심이 아주 작은 2m 내외의 수심을 가진 저수지이다. 표층수는 수면에서 채취하였고, 심층수는 저수지 퇴적층 바로 위에서 채수하였다.

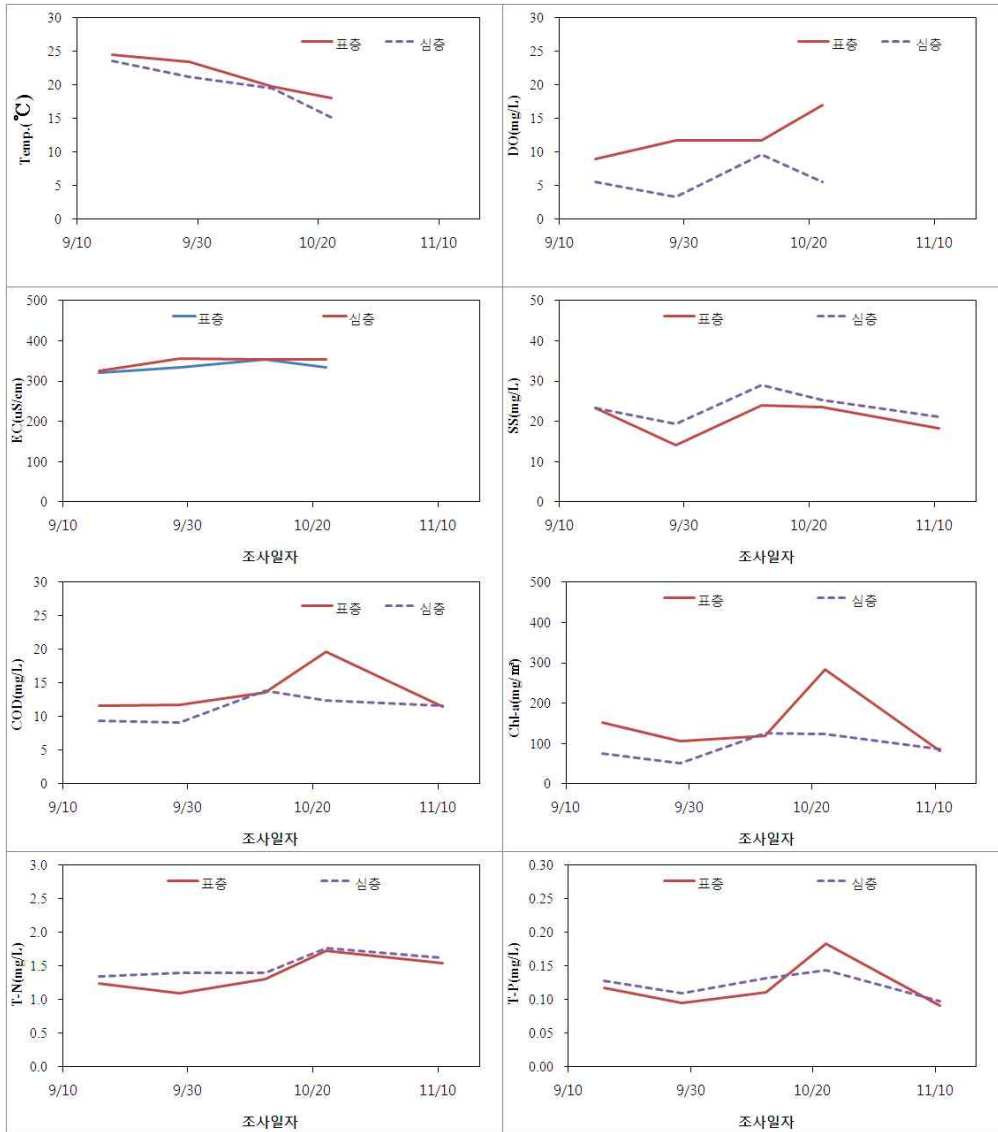
<그림 3.2-19>는 표층과 심층의 수질조사 결과를 나타낸 그래프이다. 수온은 표층수와 심층수에서 거의 차이가 없었으며, 표층수보다 심층수에서 약 1.5℃정도 낮은 것으로 나타났다. EC는 표층수에서 320.5~354.3 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (평균 336.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), 심층수에서 325.3~355.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (평균 347.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$ )로 거의 차이가 없었다. pH는 표층에서 8.0~8.5(평균 8.3), 심층수에서 7.8~8.5(평균 8.2)로 수층에 따른 차이가 거의 없었다. DO는 표층수에서 9.0~17.1mg/L(평균 12.4mg/L), 심층수에서 3.4~9.7mg/L(평균 6.0mg/L)으로 표층수에서 심층수보다 약 6mg/L 정도 높게 나타나 수층에 따른 차이가 많이 나타났다. 부유물질인 SS는 표층수에서 14.1~23.9mg/L(평균 20.6mg/L), 심층수에서 19.3~28.9mg/L(평균 23.6mg/L)으로 표층수보다 심층수에서 다소 높게 나타났고, 유기물질인 COD는 표층수에서 11.5~19.7mg/L(평균 13.6mg/L), 심층수에서 9.1~13.8mg/L(평균 11.3mg/L)으로 표층수에서 심층수보다 다소 높게 나타났다.

식물성 플랑크톤의 지표인 Chl-a는 표층수에서 81.4~283.4mg/m<sup>3</sup>(평균 148.1mg/m<sup>3</sup>), 심층수에서 76.1~125.9mg/m<sup>3</sup>(평균 92.5mg/m<sup>3</sup>)으로 심층수보다 표층수에서 높게 나타났고, 조사시기별로 농도의 편차가 크게 나타났다. TN은 표층수에서 1.091~1.728mg/L(평균 1.382mg/L), 심층수에서 1.346~1.762mg/L(평균 1.505mg/L)으로 수층간에 차이가 거의 없었고, TP는 표층수에서 0.092~0.184mg/L(평균 1.120mg/L), 심층수에서 0.098~0.144mg/L(평균 1.122mg/L)으로 대부분의 시기에는 비슷한 값을 나타냈으나 10월 조사에서는 표층에서 다소 높게 나타났다.

매화저수지는 전체적으로 수심이 2m 내외인 저류지 형태의 저수지로서 저수지 2/3이상에 마름이 피어 있는 저수지이다. 매화저수지 전체적인 수질은 가을철을 되면서 저수지내에 피어있는 마름이 분해되면서 일시적으로 COD, TP, Chl-a 농도가 높이 올라가는 현상과 강우기를 지나면서 SS가



증가하는 경향을 나타내기도 했지만 대체적으로 연중 편차가 심하지 않는 균질한 수질을 보여주고 있다. 또한, 전체적으로 수심이 작은 저수지로 4계절에 걸쳐 성층현상이 뚜렷하지 않을 것으로 판단된다.



<그림 3.2-19> 매화저수지 수층에 따른 수질현황

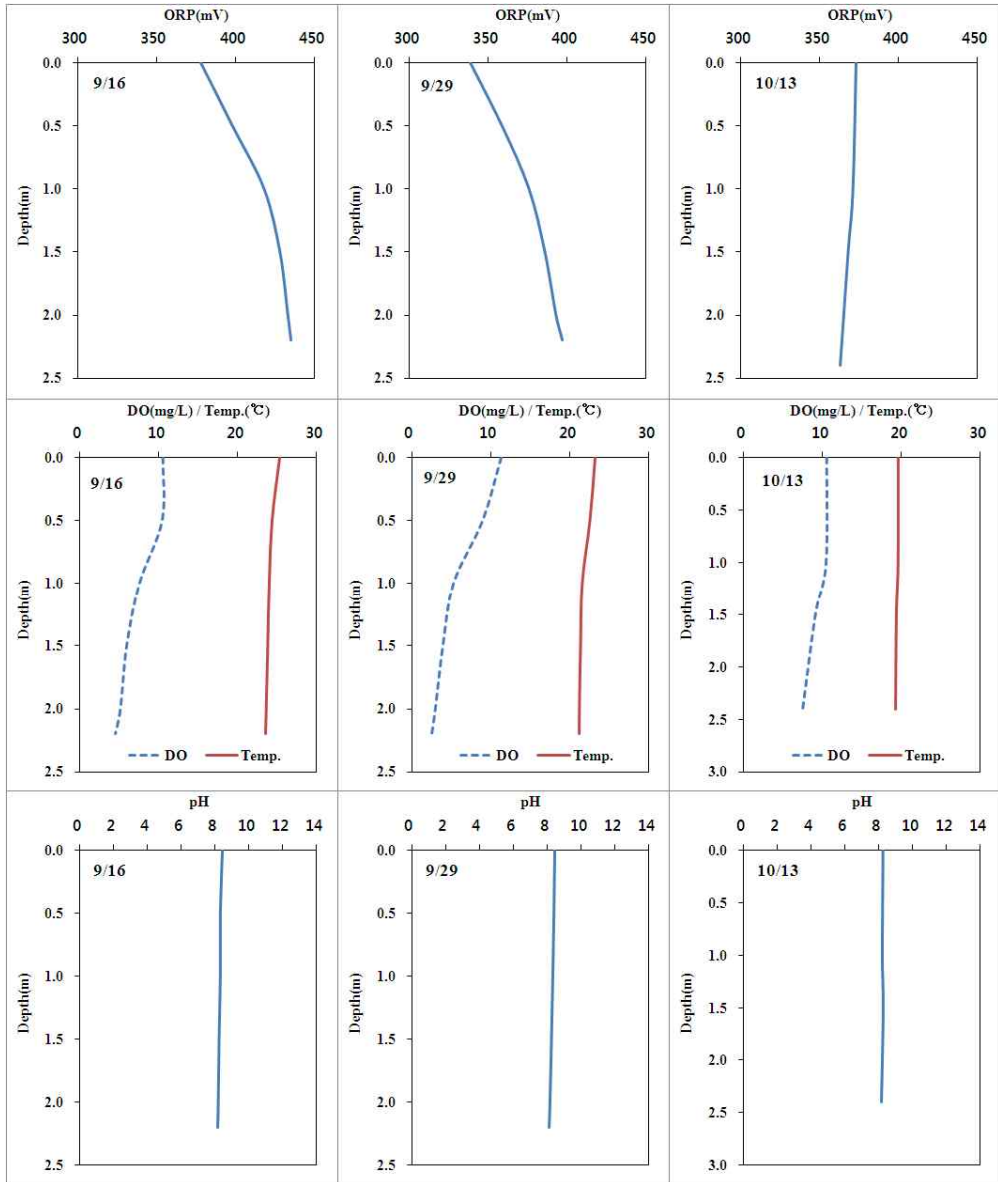
다. 저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH

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

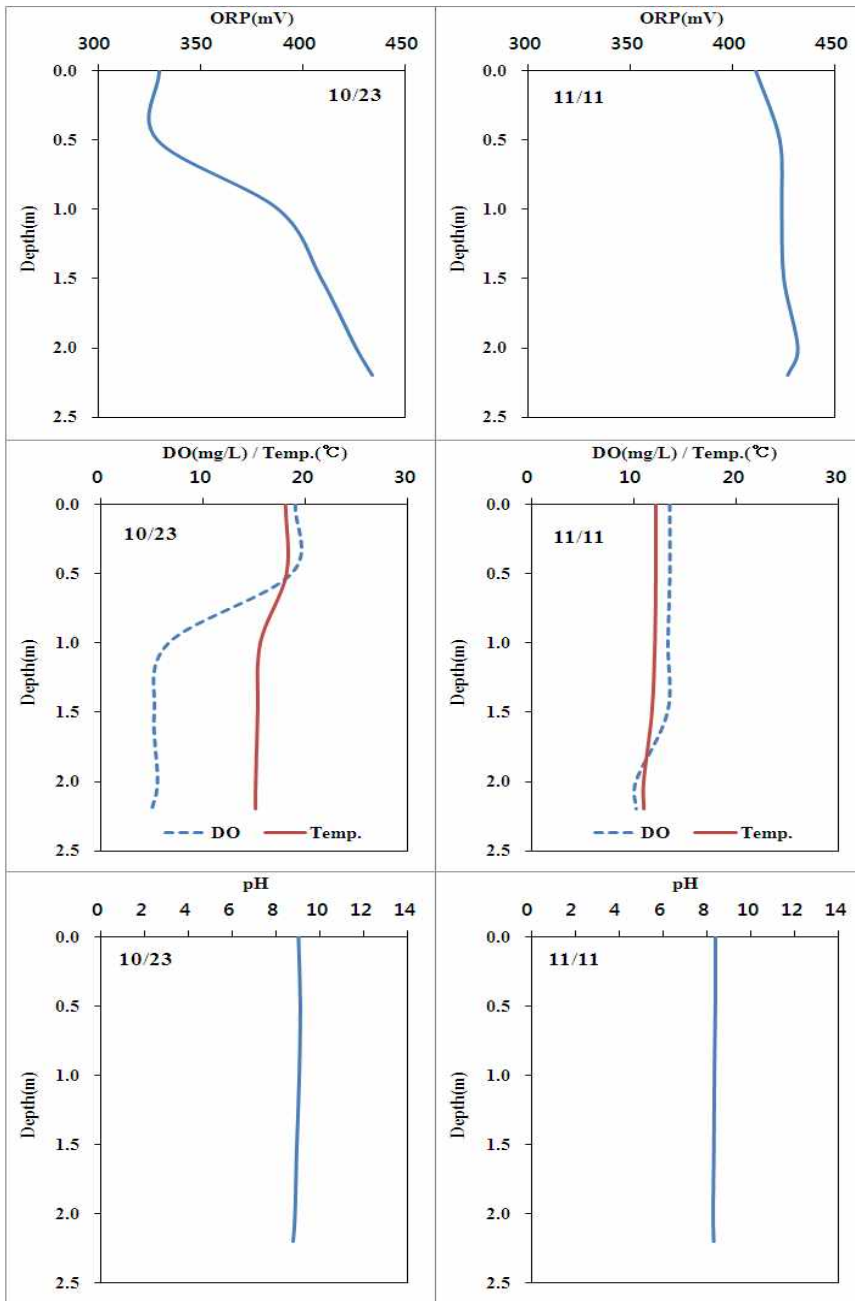
본 연구에서 ORP의 측정은 수심에 따라 50cm 간격으로 측정하였으며, 심층부에서는 퇴적층으로부터 10cm 상부까지 측정하였다. ORP와 함께 수온, DO, pH를 함께 측정하여 비교하였다. 9월 16일, 9월 29일, 10월 13일 조사에서는 수심에 따른 pH는 전혀 변화가 없었고, ORP는 수심 1m 지점부터 약간 상승하는 경향을, DO와 수온은 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 여름성층현상의 일부가 남아 있었던 것으로 판단된다. 10월 23일 조사에서는 수심에 따라 수온과 pH는 변화가 없었지만 ORP는 0.5m 지점부터 크게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

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

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



<그림 3.2-20> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH



<그림 3.2-20> 매화저수지 수심에 따른 ORP, DO, 수온, pH(계속)

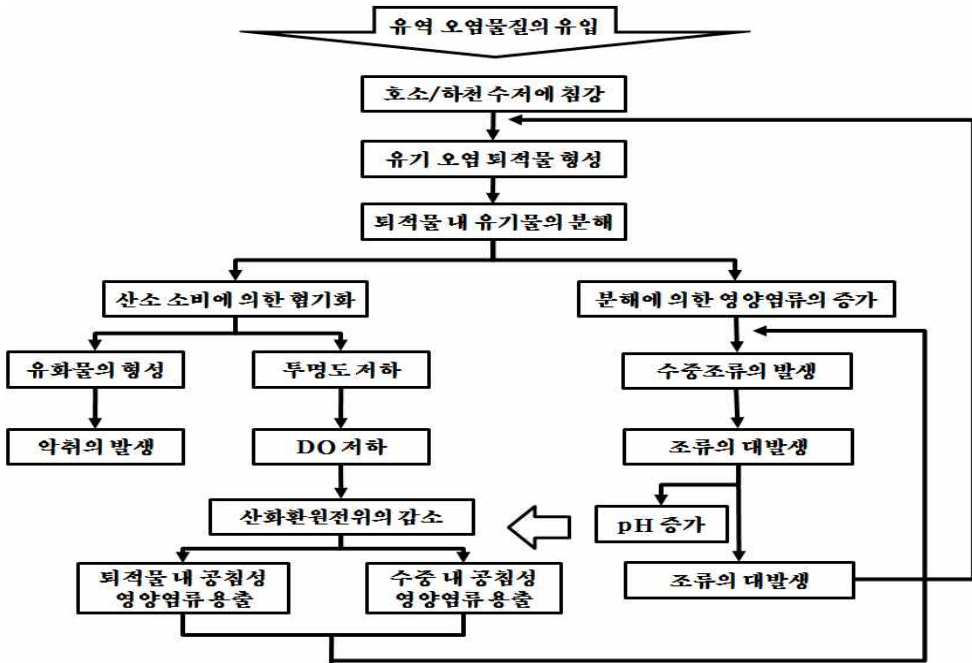
### 제3절 저수지 퇴적물 오염도 및 용출량 산정

#### 1. 퇴적물 오염도 조사

##### 1) 퇴적물 정의 및 영향

퇴적물(堆積物)은 사전적 의미로 많이 쌓인 물건 또는 지리학·지학·지명에서 쓰이는 뜻으로 암석의 파편이나 생물의 유해가 강물·빙하·바람·강우등의 작용으로 운반되어 지표에 쌓인 물건을 뜻한다(국립국어연구원, 1990). 퇴적물은 흐르는 물에 의하여 상류로부터 운반된 물질이 호수나 강 또는 바다 밑에 가라앉아 쌓이는 작용으로, 물 흐름의 속도가 갑자기 느려지는 강 하류일수록 많이 가라앉으며, 무거운 것부터 가벼운 것의 차례로 침전된다. 특히, 호소나 저수지와 같은 정체성 수역의 경우에는 물의 불규칙적인 흐름 때문에 퇴적물의 분포 특성도 약간의 차이를 보인다. 호소나 하천으로 유입된 오염물질은 수층에서 용존 상태나 입자상태의 물질로 변화거나 입자상 물질에 포함되어 수체의 바닥에 퇴적하게 되며, 이러한 퇴적물은 호소나 하천의 오염원으로 작용하여 수층을 오염시킨다. 특히, 저수지와 같은 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많으며, 단위 면적당 물의 양이 적기 때문에 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수계의 1차 생산과 수질변화에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

퇴적물은 생태학적으로는 저서생물의 부착 또는 생활할 수 있는 공간을 제공하는 수생태계의 중요한 요소로 수체와 유기적으로 연결되어 있다. 산업 폐수, 생활오수, 폐기물 처리장 침출수, 도시 및 농촌의 강우 유출수에 포함되어 하천으로 유입되는 유기물, 영양염류, 유해화학물질 등의 오염물질은 하류로 운반되다가 비교적 유속이 약한 하천, 호소, 하구 바닥에 침강된다. 침강된 오염물질은 일단 퇴적물 속에 축적되었다가 확산, 재부유, 생물교란 등의 생물·물리·화학적 과정에 의해 다시 수중으로 용출되어 수질 및 수생태계에 직·간접적으로 악영향을 미치게 된다(이 등, 1998). 퇴적물의 형성과정 및 퇴적물이 수체 내에서의 일련의 변화 과정은 <그림 3.3-1>에 도식화 한바와 같다.



<그림 3.3-1> 퇴적물 형성 과정 및 수체 내에서의 일련의 변화 과정

## 2) 조사 및 실험방법

용복합 수처리시스템의 현장적용실험을 위한 대상지구 과림, 매화, 버들저수지에 대한 퇴적물 오염도 조사를 실시하였다. 조사는 5월부터 10월까지 총 4회 실시하였으며, 1차와 2차 조사에서는 과림, 매화, 버들저수지 각각에서 1곳의 대표지점을 선정하여 채취하였으며, 3차와 4차 조사에서는 매화저수지 4곳의 지점을 선정하여 시료를 채취하여 분석하였다(표 3.3-1). 퇴적물의 채취는 Grab sampler를 이용하였으며, 채취 후 비닐 팩에 공기가 통하지 않도록 채워 밀봉한 후 실험실로 옮겨와 분석을 실시하였다. 퇴적물 조사지점의 위치는 <그림 3.3-2>에 나타내었다.

(표 3.3-1) 퇴적물 조사 일자 및 지점

조사회수	조사일자	조사지점
1차	2014.5.28	매화지, 과림지, 버들지 각 1지점 (중앙)
2차	2014.6.20	매화지, 과림지, 버들지 각 1지점 (중앙)
3차	2014.9.2	매화지 4지점 (제방, 중앙, 좌측, 우측)
4차	2014.10.28	매화지 4지점 (제방, 중앙, 좌측, 우측)

퇴적물의 이화학적 특성 및 오염도를 알아보기 위하여 퇴적물의 pH, 강열감량(Ignition Loss), 원소분석, 총질소(Total Nitrogen), 총인(Total Phosphorus), 인산염(Phosphate), 전기전도도, 입도분포 등을 분석하였다. 분석방법은 토양오염공정시험법 및 폐기물공정시험법에 준하여 분석하였으며, 분석방법 및 이에 따른 사용기기는 (표 3.3-2)에 나타내었다.

pH는 직접측정법을 이용하였으며, 퇴적물과 물의 비율을 1:5로 희석하여 현탁액을 만들어 거기에 pH meter를 꽂아 직접 측정하였다. 강열감량(Ignition Loss)은 퇴적물 내에 포함된 각종 유기성 물질을 700~800℃ 정도의 온도에서 연소시켜 연소되어 소실된 양을 환산하여 나타낸 값이다. 먼저 용기를 105℃ 건조기에서 항량으로 될 때까지 건조한 후 무게를 0.001g 까지 측정한다. 다음으로 시료 약 5g의 무게를 정확히 측정하여 용기에 담고, 그 후 온도를 1500℃까지 올려가면서 온도변화에 따른 시료의 무게 변화를 측정하였다.



퇴적물 채취 모습



매화저수지



버들저수지



과림저수지

<그림 3.3-2> 퇴적물 채취 모습 및 각 조사지구별 위치도

퇴적물의 입도분석은 퇴적물 시료에 존재하는 무기 입자의 크기 분포를 알아보려는 데 목적이 있다. 입도분석은 Cilas 제작사에서 제작한 1064 모델(측정범위:0.04 $\mu\text{m}$ ~500 $\mu\text{m}$  사이)로 직접 측정하였다. 원소분석은 퇴적물 시료 내 C, H, N, S, O 등 원소조성 성분을 알아보기 위한데 목적이 있다. 따라서 시료 내 C, H, N, S, O 등 원소분석은 Elemental Analyzer 기기를 이용하여 직접 측정하였다.

전기전도도(Electric Conductivity, EC)도 직접측정법을 이용하였으며, 퇴적물과 물의 비율을 1:5로 희석하여 현탁액을 만들어 거기에 EC meter를 꽂아 직접 측정하였다. 퇴적물 내의 총질소(Total Nitrogen, TN) 실험은 수질오염공정시험법상의 알칼리성 자외선 흡광광도법으로 실험하였다. 퇴적물의 일정 양을 취하여 거기에 알칼리성 과황산칼륨을 넣고 120 $^{\circ}\text{C}$ 에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화한 후 산성상태에서 자외선 흡광을 측정하여 질소를 정량하였다. 퇴적물의 TP는 아스코르빈산법으로 측정하였다. 퇴적물 일정 양을 취하여 과염소산을 주입한 뒤 Sand Batch 에서 가열하여 퇴적물의 인을 가용성 인으로 전환하고, 분해액을 자외선 흡광광도계를 이용하여 흡광도를 측정하여 총인을 정량하였다.

(표 3.3-2) 퇴적물 분석방법 및 분석에 이용된 기기

분석항목	분석방법	분석기기
pH	직접측정법	pH meter
강열감량 (Ignition Loss, IL))	무게차감법	Thermogravimetric analyzer, TGA
원소분석 (Elementary Analysis, EA)	C,H,N,S 분석기	Elemental Analyzer
총질소(Total Nitrogen, TN)	과황산칼륨분해법	UV
총인(Total Phosphorus, TP)	아스코르빈산법	UV
인산염(Phosphate, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )	아스코르빈산법	UV
전기전도도 (Electric Conductivity, EC)	직접측정법	EC meter
입도분포 (Particle Size Distribution, PSD)	직접측정법	PSA(Cilas-1064)



### 3) 조사지구별 퇴적물 오염도

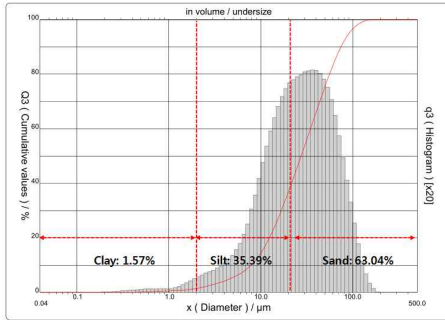
#### 가. 입도분석 결과

매화, 과림, 버들저수지 및 매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방 지점에 대한 퇴적물 내 입도분포 특성은 <그림 3.3-3>~<그림 3.3-6>과 같다. 입도분석은 초음파에 의한 전처리 사용 전·후를 비교 분석하여 관찰하였다.

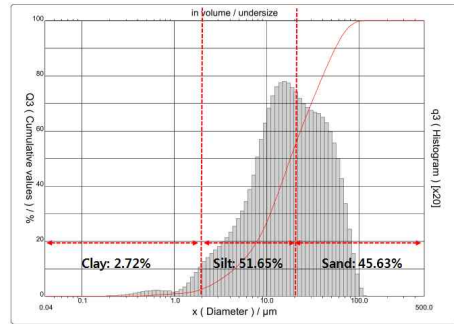
<그림 3.3-3>과 <그림 3.3-4>은 매화, 버들, 과림 세 저수지에 대한 2차례의 입도분포 결과이며, 1차 조사에서 매화지 내 퇴적물 90%는  $74.38\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자이었고, 버들지의 경우에는 90%가  $52.85\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자이었으며, 과림지의 경우에는  $71.07\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 90%를 차지하였다. 따라서, 60s의 초음파 전처리를 거친 매화지는  $54.87\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 90%를 차지하였고, 버들지는  $29.72\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 90%를 차지하였으며, 과림지는  $54.94\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 90%를 차지하였다. 2차 조사결과에서는 매화지의 초기 90%는  $63.60\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 차지하였고, 버들지의 경우에는 90%가  $44.11\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자로 분포되었으며, 과림지의 경우에는 90%가  $63.86\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자로 분포되어 있었다. 하지만 60s의 초음파 전처리 후에는 매화지의 90%가  $49.41\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자로 바뀌었고, 버들지의 경우에는  $23.83\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 90%를 차지하였으며, 과림지의 경우에는  $58.51\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자가 90%를 차지하였다.

<그림 3.3-5>과 <그림 3.3-6>은 2차례에 걸쳐 매화지의 우측, 좌측, 중앙, 제방 등의 위치에서의 퇴적물 입도분포특성을 나타낸 것이다. 매화지의 우측, 좌측, 중앙, 제방 등 4지점의 퇴적물 입도분포 또한 초음파 전처리 전후를 비교 분석하였다. 그 결과 1차에서 우측 지점은 90%이상  $89.97\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 좌측은  $198.70\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 중앙 지점은  $85.54\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 제방  $39.57\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자이었으며, 2차에서는 우측  $93.39\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 좌측  $114.394\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 중앙  $76.30\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 제방  $200.00\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자이었다. 60 s의 초음파 전처리를 하고 나서는 1차의 우측은  $72.93\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 좌측  $113.44\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 중앙  $66.79\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 제방  $27.31\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자로 바뀌었으며, 2차 또한 우측  $80.99\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 좌측  $92.72\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 중앙  $57.62\ \mu\text{m}$  이하 입경의 입자, 제방  $122.75\ \mu\text{m}$  이하

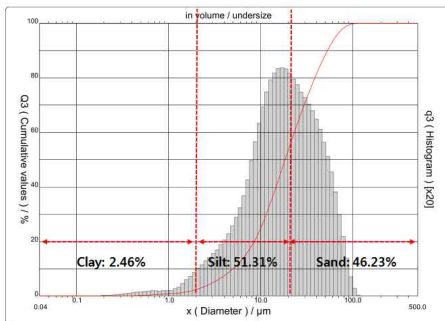
입경의 입자로 바뀌었다. 이에 따른 퇴적물 입도 특성은 (표 3.3-3)에 정리하여 나타내었다. 매화저수지의 토성은 Sand에 근접하였으며, 버들저수지의 경우에는 Silt에 가장 근접하였다. 그리고 과림저수지의 경우에는 Silt Sand Loam에 근접하였다.



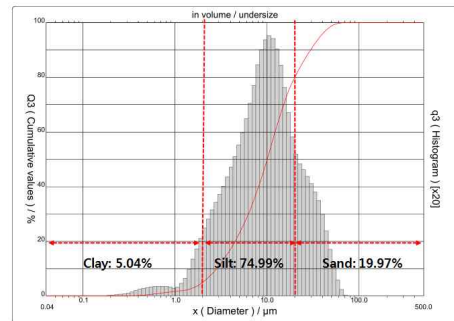
매화(Ultrasounds: 0s)



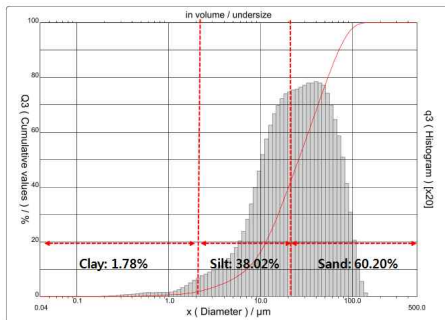
매화(Ultrasounds: 60s)



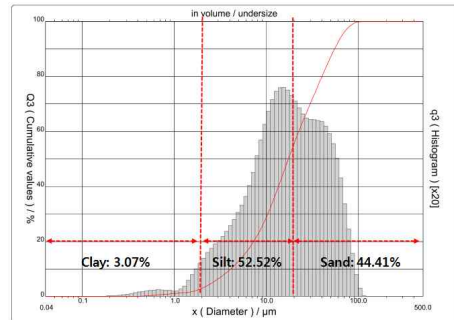
버들(Ultrasounds: 0s)



버들(Ultrasounds: 60s)

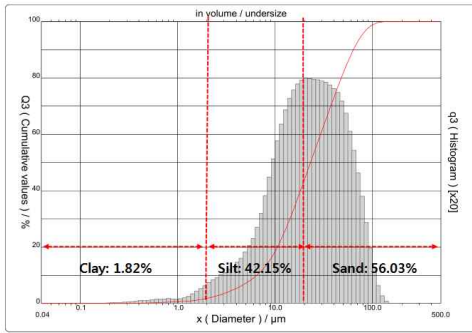


과림(Ultrasounds: 0s)

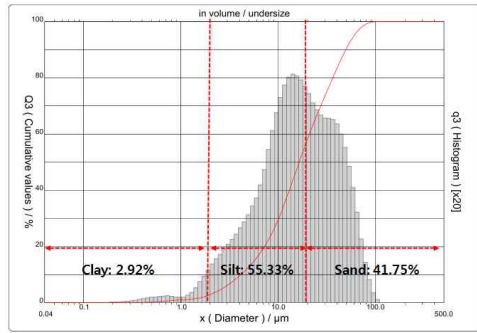


과림(Ultrasounds: 60s)

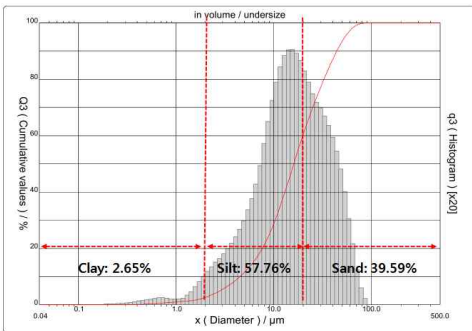
<그림 3.3-3> 매화, 버들, 과림 퇴적물 내 입도분포 결과(1차)



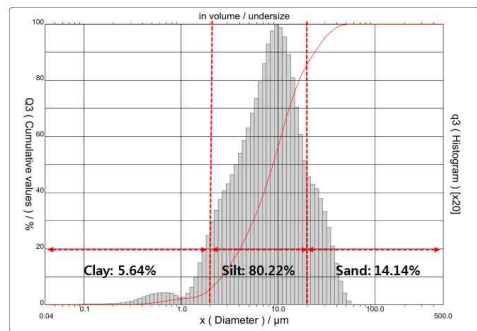
매화(Ultrasonics: 0s)



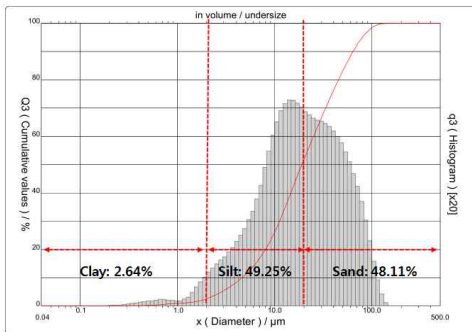
매화(Ultrasonics: 60s)



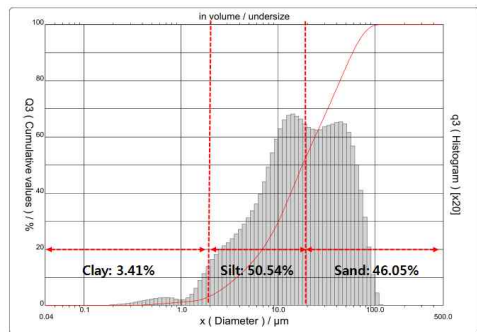
버들(Ultrasonics: 0s)



버들(Ultrasonics: 60s)

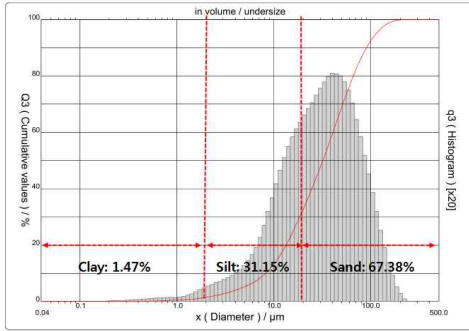


과림(Ultrasonics: 0s)

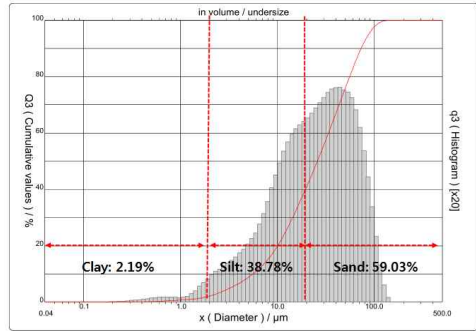


과림(Ultrasonics: 60s)

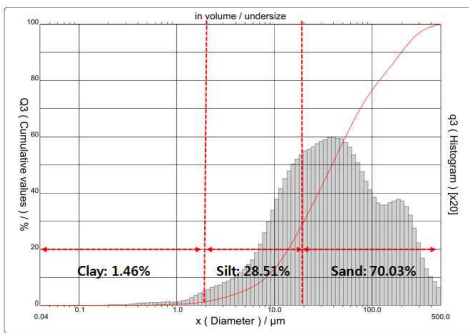
<그림 3.3-4> 매화, 버들, 과림 퇴적물 내 입도분포 결과(2차)



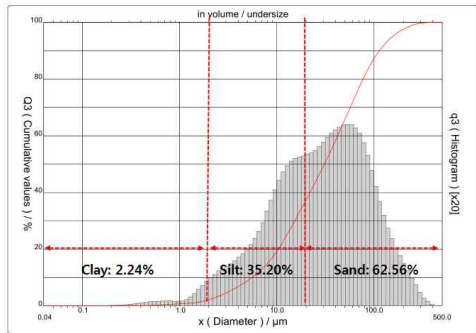
매화 우측(Ultrasonics: 0s)



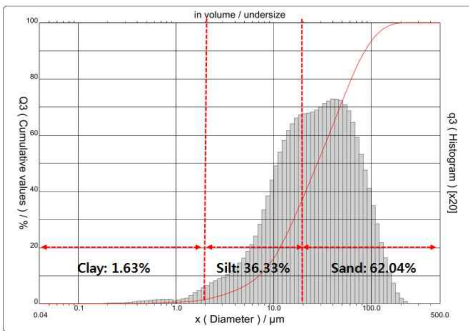
매화 우측(Ultrasonics: 60s)



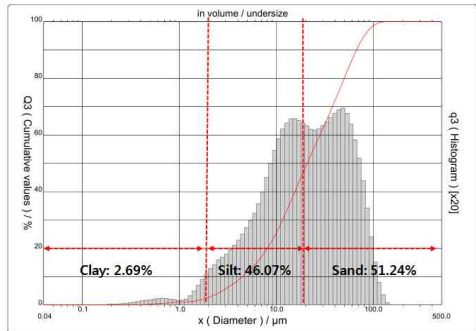
매화 좌측(Ultrasonics: 0s)



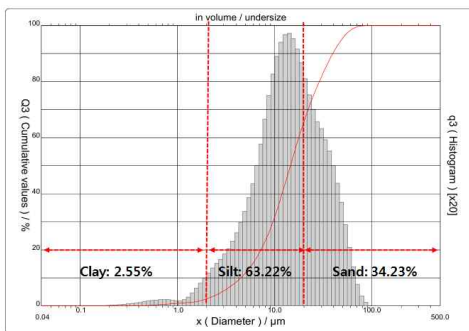
매화 좌측(Ultrasonics: 60s)



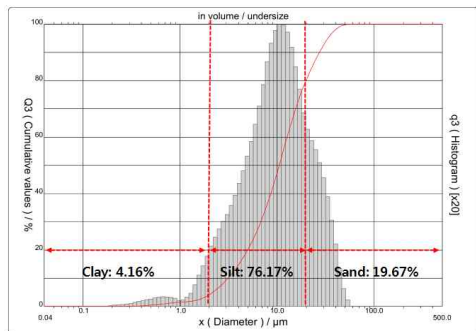
매화 중앙(Ultrasonics: 0s)



매화 중앙(Ultrasonics: 60s)

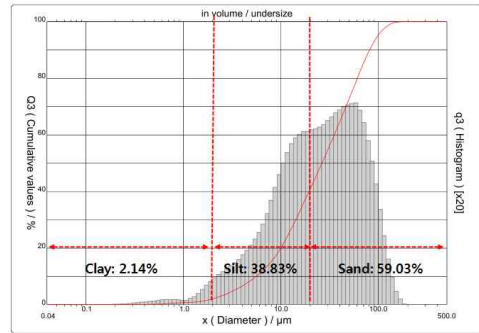
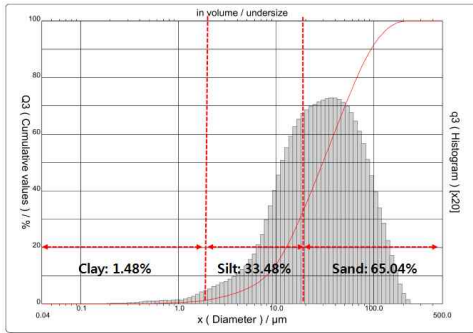


매화 제방(Ultrasonics: 0s)



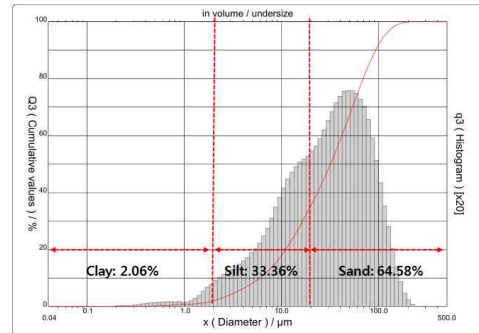
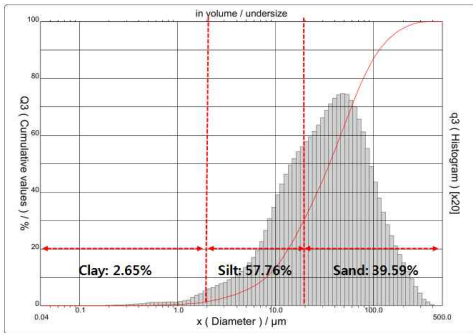
매화 제방(Ultrasonics: 60s)

<그림 3.3-5> 매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방 퇴적물 내 입도분포 결과(1차)



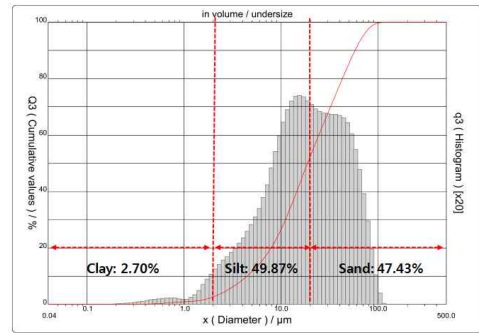
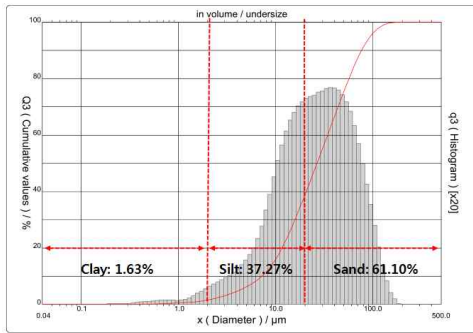
매화 우측(Ultrasonics: 0s)

매화 우측(Ultrasonics: 60s)



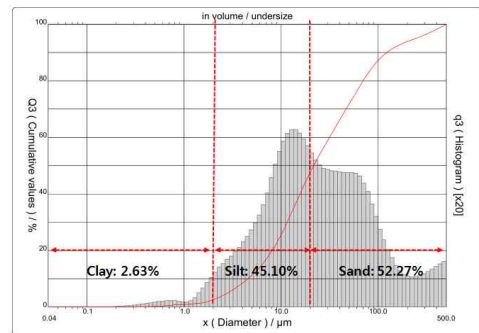
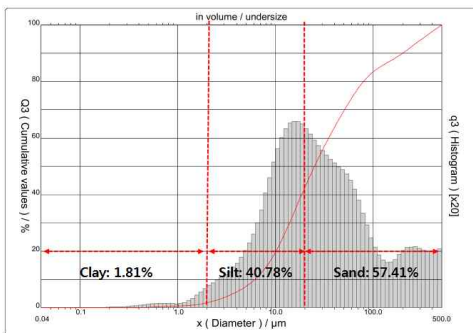
매화 좌측(Ultrasonics: 0s)

매화 좌측(Ultrasonics: 60s)



매화 중앙(Ultrasonics: 0s)

매화 중앙(Ultrasonics: 60s)



매화 제방(Ultrasonics: 0s)

매화 제방(Ultrasonics: 60s)

<그림 3.3-6> 매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방 퇴적물 내 입도분포 결과(2차)

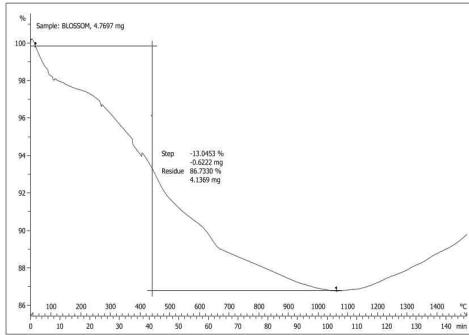
(표 3.3-3) 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물의 입도 특성

구 분		입도분포(%)					
		Clay( $\leq 2\mu\text{m}$ )		Silt( $2\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ )		Sand( $20\mu\text{m} >$ )	
		0s	60s	0s	60s	0s	60s
1차	매화	1.57	2.72	35.39	51.65	63.04	45.63
	버들	2.46	5.04	51.31	74.99	46.23	19.97
	과림	1.78	3.07	38.02	52.52	60.20	44.41
	매화 우측	1.47	2.19	31.15	38.78	67.38	59.03
	매화 좌측	1.46	2.24	28.51	35.20	70.03	62.56
	매화 중앙	1.63	2.69	36.33	46.07	62.04	51.24
	매화 제방	2.55	4.16	63.22	76.17	34.23	19.67
2차	매화	1.82	2.92	42.15	55.33	56.03	41.75
	버들	2.65	5.64	57.76	80.22	39.59	14.14
	과림	2.64	3.41	49.25	50.54	48.11	46.05
	매화 우측	1.48	2.14	33.48	38.83	65.04	59.03
	매화 좌측	2.65	2.06	57.76	33.36	39.59	64.58
	매화 중앙	1.63	2.70	37.27	49.87	61.10	47.43
	매화 제방	1.81	2.63	40.78	45.10	57.41	52.27

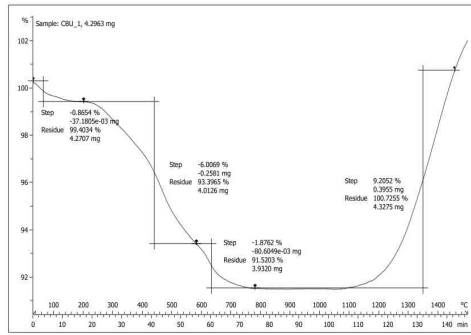
#### 나. 강열감량 결과

<그림 3.3-7>과 <그림 3.3-8>은 매화지, 버들지, 과림지 및 매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방 퇴적물에 대한 강열감량을 분석하고 평가한 것을 그래프로 나타낸 것이다. 1, 2차 평가 결과 매화지, 버들지 및 과림지 각각 8.48~13.27%(매화), 9.41%(버들), 5.96~13.23%(과림)의 강열감량을 나타내었으며, 세 저수지의 퇴적층에 포함된 유기물의 함량이 비슷한 것으로 나타났다. 이는 세 저수지가 모두 1940년대와 50년대 설치된 저수지로 준공 경과년수가 비슷한 이유라고 판단된다.

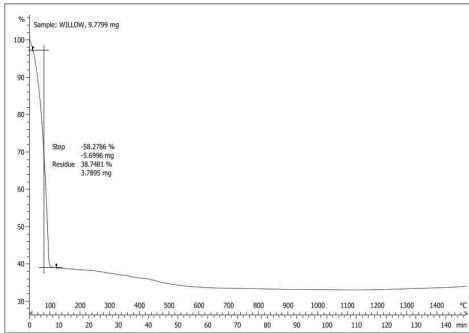
매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방은 각각 2.56~7.45%, 2.99~6.61%, 7.63~7.79%, 7.50~10.39%의 강열감량을 나타내었다. 우측과 좌측 유입부에 비해 중앙과 제방 지점에서 높게 나타났으며, 유기물이 지속적으로 유입되어 가장 하류인 제방쪽에 많이 퇴적되었을 것으로 판단된다.



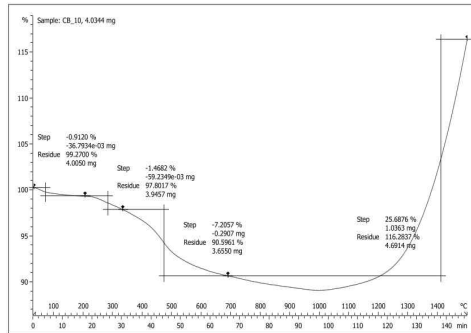
매화 1차(감량율 13.27%)



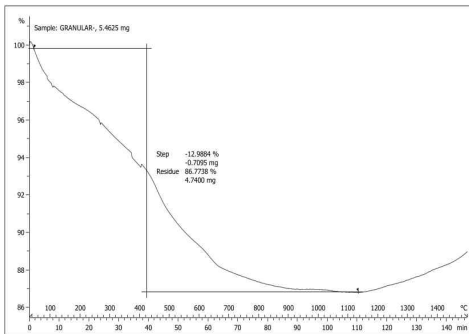
매화 2차



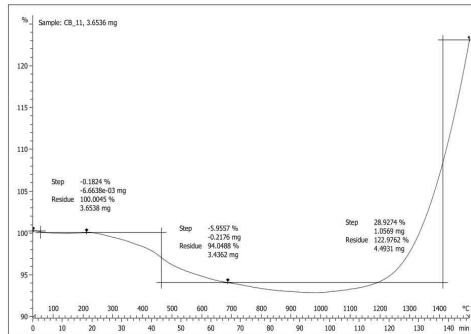
버들 1차(61.24%)



버들 2차

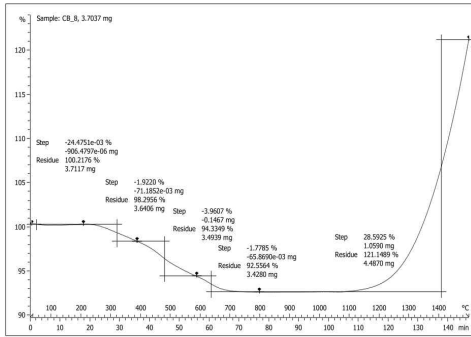


과림 1차(13.23%)

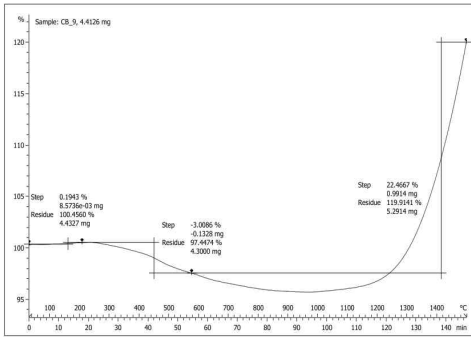


과림 2차

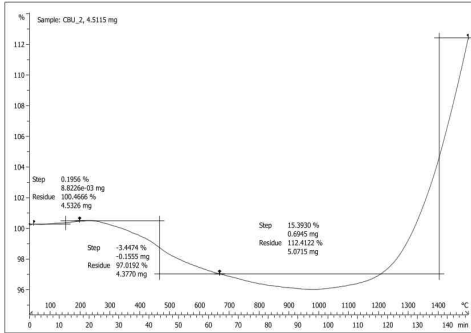
<그림 3.3-7> 매화지, 버들지, 과림지의 퇴적물 강열감량



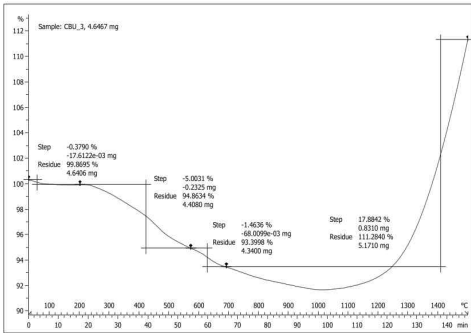
매화 우측 1차(감량율 7.45%)



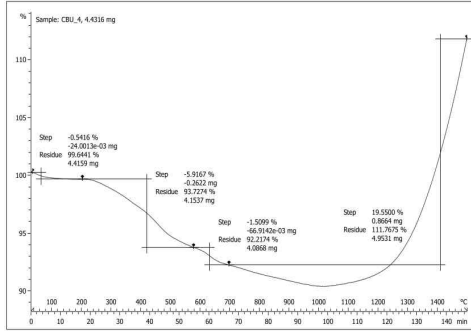
매화 우측 2차(감량율 2.56%)



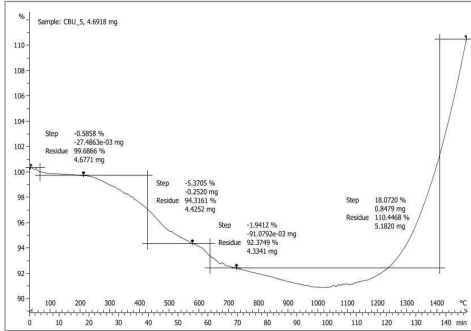
매화 좌측 1차(감량율 2.99%)



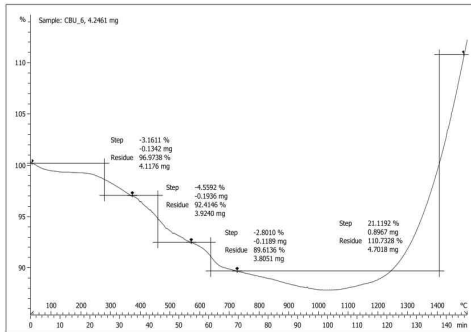
매화 좌측 2차(감량율 6.61%)



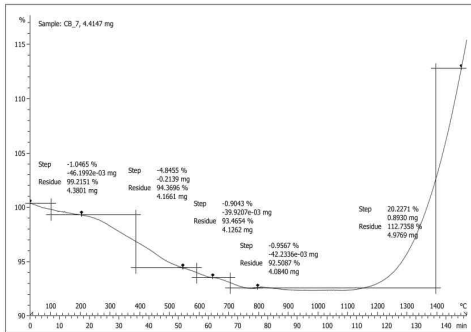
매화 중앙 1차(감량율 7.79%)



매화 중앙 2차(감량율 7.63%)



매화 제방 1차(감량율 10.39%)



매화 제방 2차(감량율 7.50%)

<그림 3.3-8> 매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방 퇴적물 강열감량



#### 다. 이화학적 특성 및 중금속 함량

(표 3.3-4)와 <그림 3.3-9>는 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물에 대한 이화학적 특성을 나타낸 것이다. 매화지 퇴적물의 pH는 6.86~7.19 범위인 것으로 조사되었고, 버들지의 경우에는 6.73~7.30 범위로 조사되었으며, 과림지의 경우에는 6.85~6.98 범위로 세 저수지 모두 약산성을 나타내었다. 퇴적물 내 TN의 경우 매화가 4,629~6,152mg/kg으로 조사되었고, 버들지는 7732~8,181mg/kg, 과림지가 3,908~5,406mg/kg으로 버들저수지에서 가장 높은 TN 농도를 나타내었다. 퇴적물 내 TP의 함량은 매화저수지가 1,145~1,228mg/kg으로 조사되었고, 버들저수지는 851~2,136 mg/kg으로, 과림저수지가 1,147~1,593mg/kg으로 나타났다. 퇴적물 내 TP 함량은 TN과 일치하게 버들지가 가장 높은 TP 농도를 나타내었고, 그 변화폭도 가장 큰 것으로 나타났다.  $PO_4^{3-}$ -P의 경우에는 매화저수지가 39~50mg/kg으로 조사되었고, 버들저수지는 62~72mg/kg으로, 과림저수지가 43~66mg/kg으로,  $PO_4^{3-}$ -P도 TP와 마찬가지로 버들지가 가장 높은 농도를 나타내었다. 이는 버들저수지 유역 내에 많은 축산농가가 위치하고 있어 야적된 축분 등이 강우시에 저수지로 유입되어 장기간 퇴적된 영향으로 판단된다. 퇴적물의 EC는 매화지가 568~587 $\mu$ s/cm 범위로 조사되었고, 버들지는 408~807 $\mu$ s/cm 범위로 조사되었으며, 과림지가 236~682 $\mu$ s/cm 범위로 버들저수지와 과림저수지는 조사 시기에 따라 편차가 크게 나타났다.

그 외 퇴적물의 C, H, N, S 등 원소분석 결과에서는 매화지가 C(2.70~2.85%), H(0.92~0.96%), N(0~0.6%), 버들지는 C(2.24~2.70%), H(1.11~1.17%), N(0~0.9%), 과림지는 C(1.93~2.79%), H(0.80~0.96%), N(0~0.75%)로 나타나 과림저수지의 C, H, N, S 함량이 매화저수지나 버들저수지에 비해 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다.

(표 3.3-5)와 <그림 3.3-10>는 매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방 등의 위치별로 퇴적물의 이화학적 특성을 나타낸 것이다. 매화지 우측 퇴적물의 pH는 7.18~7.26, 좌측의 경우에는 7.24~7.44, 중앙과 제방은 각각 7.12~7.25 범위와 7.36~7.45 범위로 모든 지점에서 중성으로 나타났다. 퇴적물 내 TN의 경우에는 저수지 우측은 3,481~3,834mg/kg으로 조사되었고, 좌측은 2,166~3,643mg/kg, 중앙지점은 3,639~3,988mg/kg, 제방 인접지역은 1,767~5,398mg/kg로 각각 조사되었으며, 그 중 제방이 조사 시기에 따라 값의 편차를 크게 보였으며, 또한 TN 농도가 가장 높은 5,398mg/kg의

농도가 검출되었다. 퇴적물 내 TP의 경우에는 우측은 929~963mg/kg으로 조사되었고, 좌측은 816~838mg/kg, 중앙 지점은 806~861mg/kg, 제방은 979~1,223mg/kg로 분석되어 TN과 마찬가지로 제방이 가장 큰 변화폭과 가장 높은 농도 1,223mg/kg이 검출되었다.  $PO_4^{3-}$ -P의 경우 우측은 22~42 mg/kg으로 조사되었고, 좌측은 12~30mg/kg, 중앙부는 28mg/kg, 제방은 24~38mg/kg으로 각각 조사되었다.  $PO_4^{3-}$ -P는 TP와는 다르게 위치별 큰 차이를 나타내지는 않았다.

매화저수지 위치별 수질조사에서는 유입부 지점인 좌측과 우측 지점에서 TN 및 TP 농도가 높게 나타난 반면 제방과 중앙부에서는 상대적으로 적은 농도가 검출되었다. 퇴적물 조사에서는 유입부 지점보다는 저수지 하류쪽인 제방과 중앙부에서 유입부 지점보다 TN, TP 농도가 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 하류 퇴적층에 장기간 퇴적된 결과로 판단된다.

퇴적물의 EC의 경우에는 우측은 313~370 $\mu$ s/cm으로 조사되었고, 좌측은 417~485 $\mu$ s/cm, 중앙 487~604 $\mu$ s/cm, 제방은 469~776 $\mu$ s/cm 범위로 조사되었다. 그 외 퇴적물의 C, H, N, S 등 원소분석 결과에서는 우측은 C(2.32~2.89%), H(0.73~0.78%), N(0%), 좌측 C(1.94~2.82%), H(0.60~0.85%), N(0%), 중앙 C(2.70~3.44%), H(0.77~0.95%), N(0%), 제방 C(1.18~3.15%), H(0.58~0.99%), N(0%)로 각각 조사되었으며, 네 지점 중에서도 저수지 우측 지점이 상대적으로 다른 위치들에 비해 높은 함유량을 나타냈다.

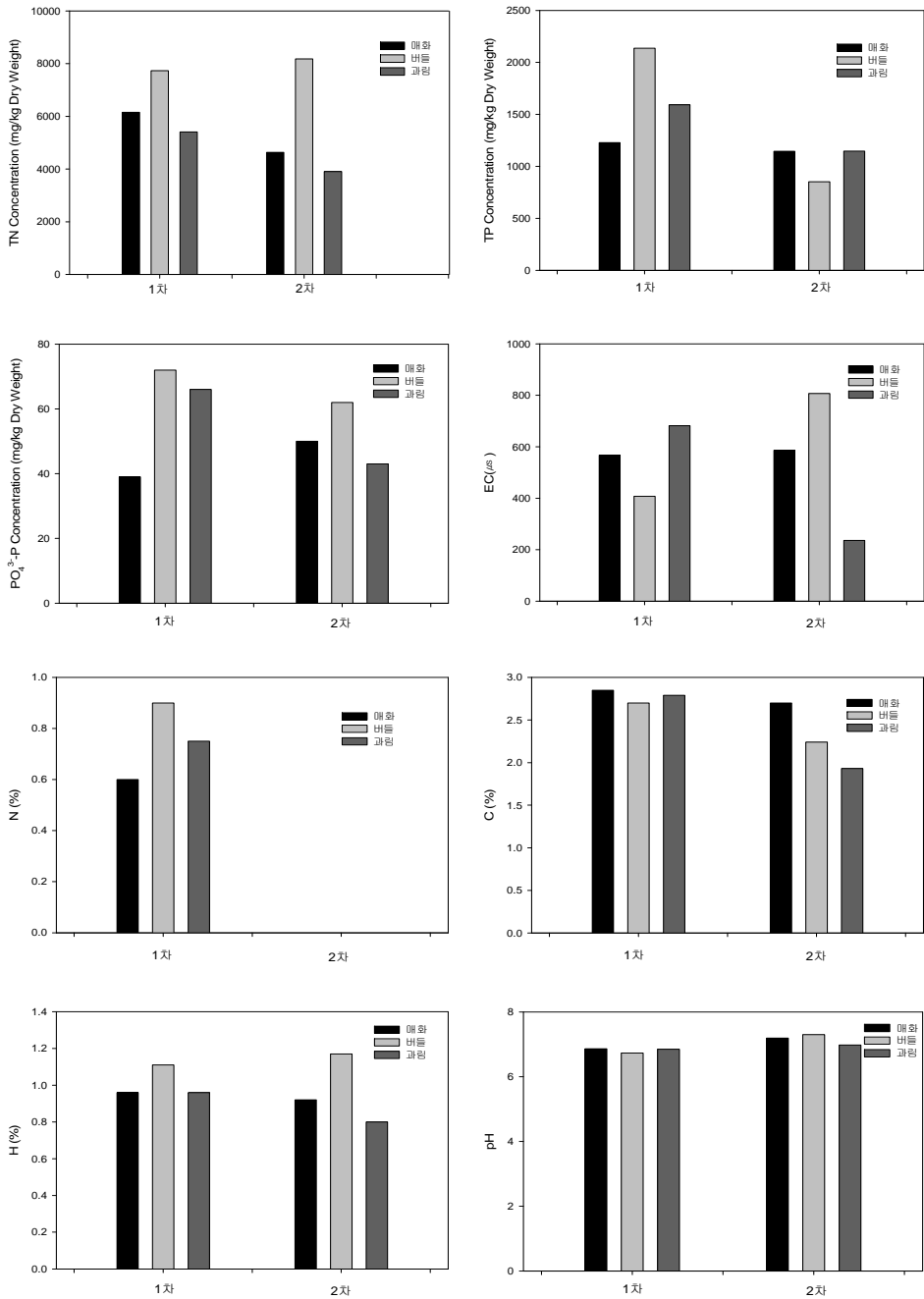
(표 3.3-7)은 저수지별로 퇴적물 내 중금속 함량을 분석한 결과이다. 6가크롬과 시안은 모든 저수지에서 불검출이었으며, 비소는 저수지 별로 평균 값이 각각 매화지 6.2mg/kg, 버들지 8.7mg/kg, 과림지 6.4mg/kg로 나타났다. 카드뮴은 모든 저수지에서 1.7~1.8mg/kg로 거의 같은 함량을 보였으며, 구리는 매화지가 54.7mg/kg, 버들지 47.3mg/kg, 과림지 162.4mg/kg로 과림저수지 퇴적층에서 다른 저수지에 비해 3배 높은 값을 나타내었다. 니켈은 세 개 저수지에서 30mg/kg 내외로 모두 비슷한 농도를 나타내었으며, 납은 매화지 47.7mg/kg, 버들지 37.6mg/kg, 과림지 47.1mg/kg로 나타났다. 아연은 매화지 183.6mg/kg, 버들지 151.6, 과림지 243.3mg/kg로 과림저수지 퇴적층에서 가장 높은 값을 나타내었고, 수은은 매화지 0.043mg/kg, 버들지 0.062mg/kg, 과림지 0.060mg/kg으로 대체로 비슷한 값을 나타내었다.

(표 3.3-4) 저수지 퇴적물의 이화학적 특성(1, 2차)

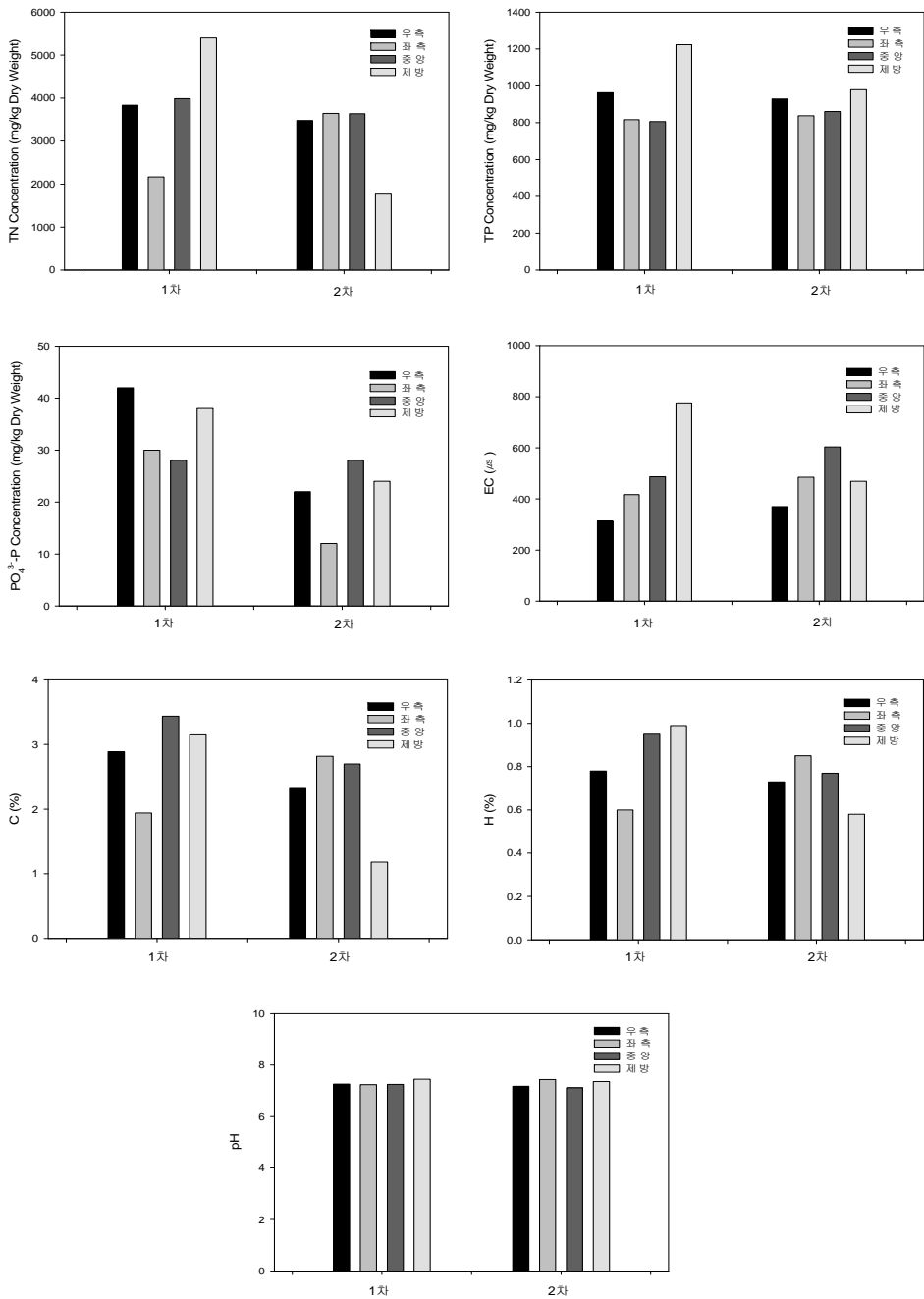
구분	항목	매화	버들	과림
1차	pH	6.86	6.73	6.85
	TN	6,152	7,732	5,406
	TP	1,228	2,136	1,593
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	39	72	66
	EC( $\mu$ S/cm)	568	408	682
2차	pH	7.19	7.30	6.98
	TN	4,629	8,181	3,908
	TP	1,145	851	1,147
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	50	62	43
	EC( $\mu$ S/cm)	587	807	236

(표 3.3-5) 저수지 퇴적물의 이화학적 특성(3, 4차)

구분	항목	제방	중앙	우측	좌측
3차	pH	7.45	7.25	7.26	7.24
	TN	5,398	3,988	3,834	2,166
	TP	1223	806	963	816
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	38	28	42	30
	EC( $\mu$ S/cm)	776	487	373	417
4차	pH	7.36	7.12	7.18	7.44
	TN	1,767	3,639	3,481	3,643
	TP	979	861	929	838
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	24	28	22	12
	EC( $\mu$ S/cm)	469	604	370	485



<그림 3.3-9> 매화지, 버들지, 과립지 퇴적물의 이화학적 특성



<그림 3.3-10> 매화지 위치별 퇴적물의 이화학적 특성

(표 3.3-6) 저수지별 퇴적물 입도분포 및 오염물질 함량

조사 일자	조사지	입도분포 (%)			유기물 %	강열감량 %	유효인산 mg/kg	T-N mg/kg	T-P mg/kg
		모래	미사	점토					
5/28	매화	18.8	73.2	8.0	5.7	9.9	15.1	2,982	1,323
	버들	4.0	64.0	32.0	4.2	10.8	10.8	2,870	1,760
	과림	12.4	76.6	11.0	5.8	10.4	33.3	3,311	1,935
6/20	매화	85.7	10.3	4.0	1.1	3.3	12.9	1,673	530
	버들	9.1	65.9	25.0	4.4	10.8	13.1	3,285	1,871
	과림	16.6	72.4	11.0	4.5	10.3	35.5	3,031	1,718
7/17	매화	26.1	65.9	8.0	5.2	9.1	13.6	2,598	1,333
	버들	26.4	53.6	20.0	4.9	11.1	16.4	3,447	1,787
	과림	23.1	67.9	9.0	4.2	8.8	30.0	2,254	1,549
8/13	매화	17.7	72.3	10.0	5.1	9.7	39.6	2,583	1,357
	버들	21.2	60.8	18.0	5.1	11.6	16.4	3,668	1,851
	과림	20.8	71.2	8.0	5.8	10.9	16.0	3,329	1,947
9/1	매화	14.7	78.3	7.0	5.0	9.6	33.0	2,573	1,314
	버들	15.0	67.0	18.0	4.9	11.6	10.0	3,698	1,755
	과림	18.7	73.3	8.0	3.9	8.9	8.5	1,967	1,451
평균	매화	19.3	72.4	8.3	5.3	9.6	25.3	2,684	1,332
	버들	15.1	62.3	22.6	4.7	11.2	13.3	3,394	1,805
	과림	18.3	72.3	9.4	4.8	9.9	24.7	2,778	1,720

(표 3.3-7) 저수지별 중금속 함량

(단위: mg/kg)

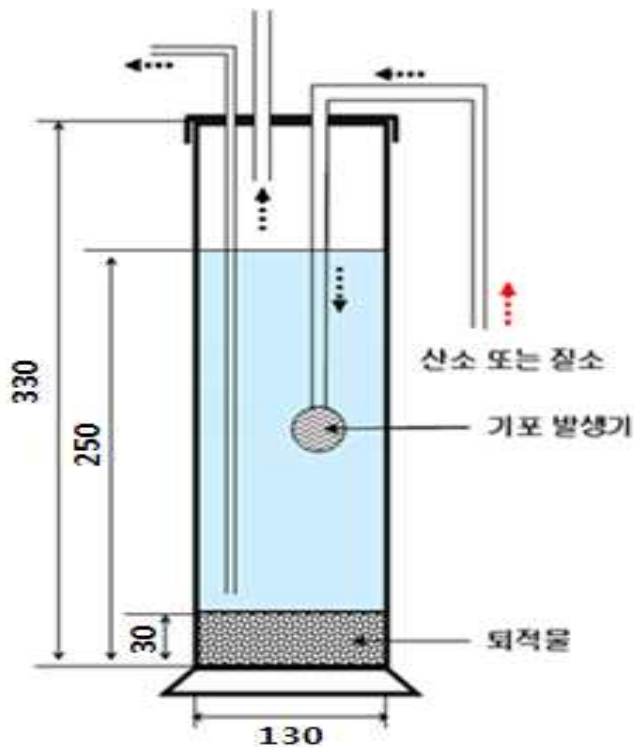
조사일	시료명	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
6/20	매화	6.4	0.7	46.7	24.3	37.7	158.7	0.000
	버들	9.7	0.8	46.3	33.6	36.9	146.8	0.059
	과림	6.7	0.9	151.9	33.4	45.6	227.0	0.053
7/17	매화	5.3	0.7	56.8	29.9	52.6	199.9	0.054
	버들	8.1	0.7	48.6	35.4	43.3	162.3	0.049
	과림	5.7	0.7	153.8	33.9	47.7	239.8	0.046
8/13	매화	6.0	2.6	56.5	28.6	51.7	186.4	0.075
	버들	8.6	2.8	46.2	31.1	34.8	146.7	0.071
	과림	7.6	2.7	181	33.8	50.8	282.9	0.100
9/1	매화	7.0	2.6	58.9	28.0	48.7	189.2	0.044
	버들	8.4	2.8	48.1	32.8	35.3	150.4	0.067
	과림	5.4	2.6	162.8	32.0	44.4	223.6	0.042
평균	매화	6.2	1.7	54.7	27.7	47.7	183.6	0.043
	버들	8.7	1.8	47.3	33.2	37.6	151.6	0.062
	과림	6.4	1.7	162.4	33.3	47.1	243.3	0.060

## 2. 퇴적물의 오염물질 용출량 산정

### 1) 조사 및 실험방법

퇴적물로부터의 영양염류 용출율을 분석하기 위해서 실험실 내에 <그림 3.3-11>과 같이 아크릴 재질로 용출실험장치를 설치하였다. 용출실험장치는 선행연구사례들을 참조하여 퇴적물 높이를 30mm, 수면 높이를 250mm로 하여 평균 20일 이상의 연속 운전을 수행하였다. 시료 채취는 3일 간격으로 상등액 50ml를 채수하여 수질공정시험법에 준하여 TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TP, pH,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  등을 분석하였다.

매화지, 버들지, 과림지에 대한 1차 용출실험은 <그림 3.3-12>에서와 같이 가스 폭기 위치를 반응조 중앙에서 수행하였다면 그 이후의 용출실험은 <그림 3.3-13>에 나타낸 것과 같이 가스 폭기 위치를 수면 바로 위에서 시켜줌으로서 퇴적물과 수층의 교란을 최소화 하였다.



<그림 3.3-11> 퇴적물 용출실험 장치 모식도(mm)



<그림 3.3-12> 매화지, 버들지, 과림지에 대한 1차 용출실험



**가스 공급을 위한 산기석 장착**

<그림 3.3-13> 2차, 3차, 4차의 용출실험



충북대학교 실험실내에 용출실험 장치를 설치하고, 각 저수지 별로 혐기성 및 호기성으로 각각 나누어 용출실험을 진행하였다. 실험은 3회에 걸쳐 수행하였으며, 1차는 단순히 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물에 대한 혐기성-암반응 조건에서의 영양염류 용출을 관찰하였고, 2차에서는 추가적으로 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물에 대한 호기성-암반응에서의 영양염류 용출을 관찰하였다. 3차 및 4차는 매화지의 우측, 좌측, 중앙, 제방에 대한 세부적인 분석을 수행하였다(혐기성, 호기성-암반응 모두 실시).

퇴적물로부터의 유기물질 및 영양염 용출속도는 다음과 같은 식으로 산출하였다. 식에서  $C_t$ 는 t시간 경과하고 나서의 농도(mg/L),  $C_0$ 는 초기 농도(mg/L)이며, V는 반응조 부피(L)이다. T는 용출시간(day)이고, A는 퇴적물과 액체와의 경계 접촉면적( $m^2$ )이다.

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

여기서,  $C_t$ : t시간 경과 후 농도(mg/L)

$C_0$ : 초기 농도(mg/L)

V: 반응조 액상 부피(L)

T: 용출시간(day)

(주) 반응조 내 액상 부피(V) 계산시에는 50 mL/번씩 채수하였으므로 샘플 채취시 마다 -50 mL 삭감함

## 2) 오염물질 용출량 산정

### 가. 유기물의 농도변화

퇴적물 층에서 유기물의 분해는 수층의 용존 산소의 고갈 및 유기물과 결합되어 있는 인의 재용출로 의미할 수 있다. 따라서 상등수의 COD를 측정함으로써 퇴적물로부터의 유기물의 용출 정도를 알 수 있다. 실험은 총 4회에 걸쳐 측정하였으며, 그 결과는 (표 3.3-8)과 <그림 3.3-14> ~ <그림 3.3-17>과 같다.

퇴적물로부터의 용출된 유기물의 양을 측정한 결과, 1차 조사에서는 용출실험장치의 혐기성 조건을 유지시키기 위한 질소 공급 위치가 적절하지 못한 탓으로 초기 퇴적물과 액체의 경계면에서 심한 교란이 발생하여 <그림 3.3-14>에 나타난 바와 같이 초기 유기물 농도가 30~70mg/L의 큰 변화폭을 보였으나, 5일 이후부터는 점차 안정화가 되면서 지속적인 유기물 증가 양상을 나타내었다. 2, 3, 4차 용출실험에서는 가스공급 위치를 수표면 2cm 부근에서 폭기함으로써 퇴적물의 교란을 최소화하였다. 그 결과는 <그림 3.3-15>, <그림 3.3-16>, <그림 3.3-17>에서 알 수 있듯이 1차 실험에서와는 달리 초기 운전부터 안정적인 증가 양상을 나타내었다. 1차, 2차, 3차의 용출실험에서 모두 혐기성조건에서 COD 용출속도가 호기성에 비해 높게 측정되었다. 저수지별 용출속도에서는 버들저수지, 과림저수지, 매화저수지 순으로 높게 용출되었는데, 편차가 크지는 않았다.

### 나. 질소계열의 농도변화

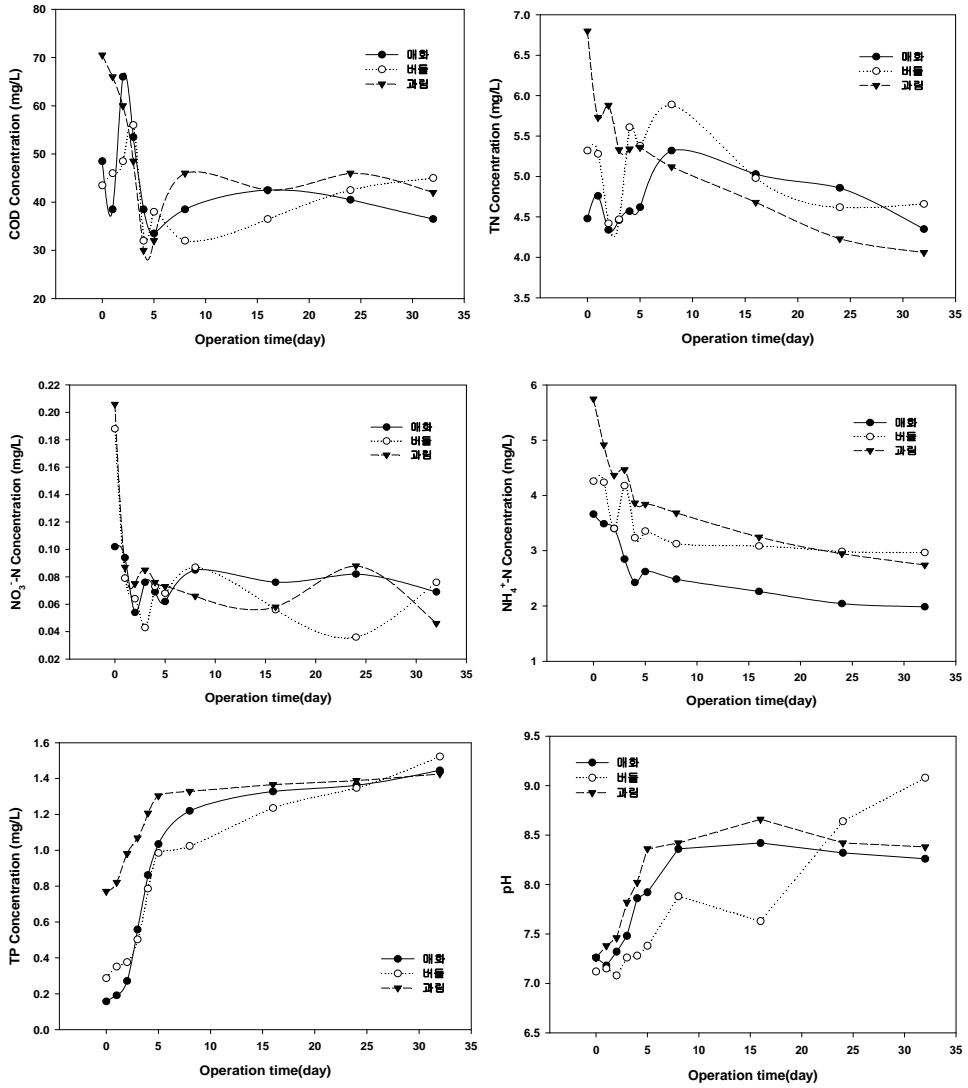
용출실험장치에서 상등수의 TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도를 측정함으로써 질소계열의 변화특성을 파악하였다. 전체적으로 질소 계열의 용출은 혐기성조건에서  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 용출되는 것으로 나타났다.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 꾸준히 용출되었으나 전반적인 총질소는 큰 변화를 나타내지 않았다. 1차 용출실험의 경우 초기 퇴적물의 교란 때문에 초기부터 높은 농도의 질소계열의 농도를 갖다보니 전반적으로 감소하는 양상을 보이고 있으나, 1차 용출실험을 보완한 2차 3차 실험에서는 총질소는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우 혐기성 조건에서 증가하는 양상을 나타내는 반면 호기성에서는 zero 상태를 나타내었다. 그 외 질산성 질소( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )의 경우에는 호기성 조건에서 대체적으로 증가하는 양상을 보이고 있었다.

다. 총인 농도변화

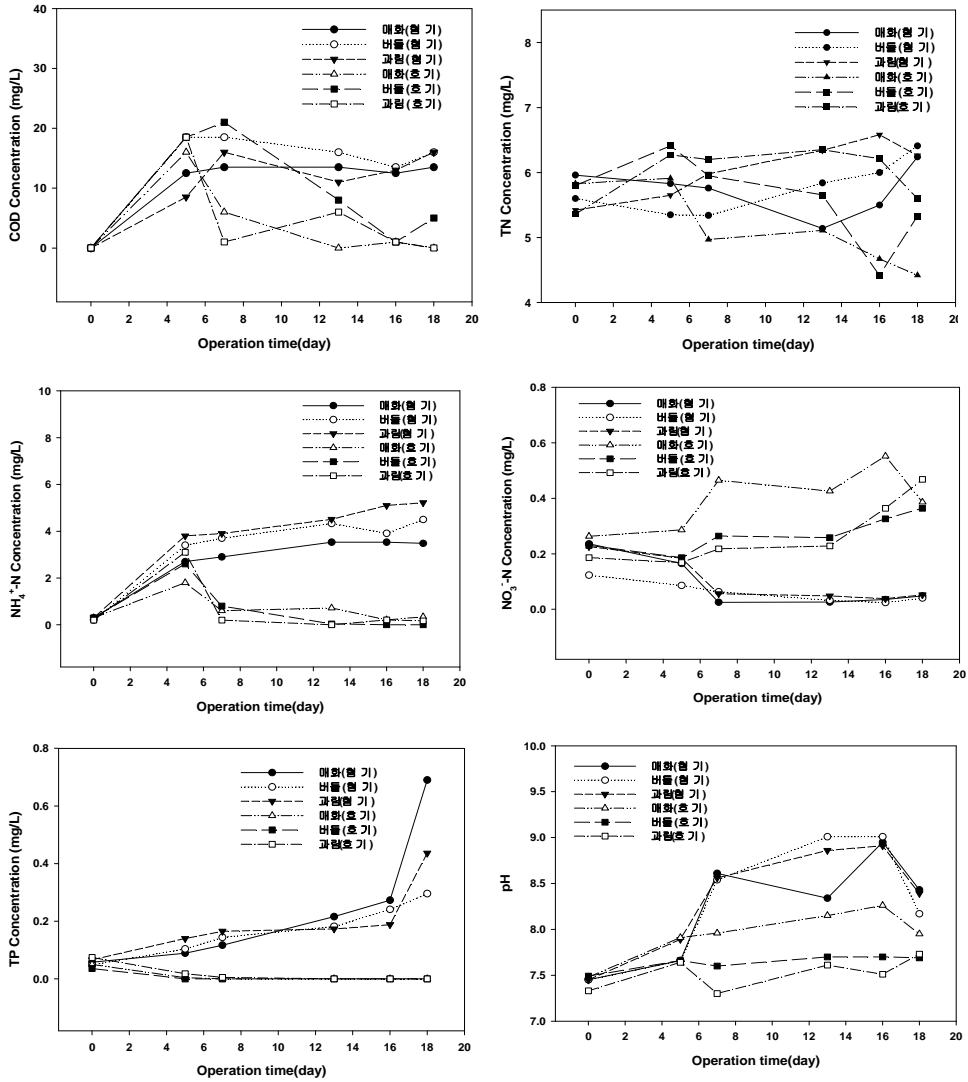
용출실험장치에서 상등수의 TP 농도를 측정함으로 인계열의 변화특성을 파악하였다. 전반적으로 인 용출은 혐기성 조건에서 활발히 일어났으며, 이와 반면에 호기성 조건은 인 용출을 억제하였다. 1차, 2차에 거쳐 혐기성 조건에서의 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물 내 인 용출속도는 각각 3.03~3.35mg/m<sup>2</sup>·d, 2.72~4.38mg/m<sup>2</sup>·d, 0.99~1.68mg/m<sup>2</sup>·d으로 분석되었고, 매화저수지가 평균 3.19mg/m<sup>2</sup>·d의 인 용출속도를 나타내었고, 버들저수지는 3.55mg/m<sup>2</sup>·d, 과림저수지는 1.34mg/m<sup>2</sup>·d의 인 용출속도를 나타내었다. 매화저수지와 버들저수지의 인 용출속도는 비슷하였고, 상대적으로 과림저수지의 인 용출속도가 낮은 것으로 나타났다. 매화지의 우측, 좌측, 중앙, 제방 위치별 인 용출속도를 산출한 결과는 중앙에서 가장 빠른 인 용출속도를 나타냈고, 좌측 유입부 지점이 상대적으로 인 용출이 저조한 것으로 나타났다. 퇴적물에서의 인 함량 결과와 비교했을 때 인 용출속도는 퇴적물에 함유되어 있는 함량과는 크게 관계가 없는 것으로 판단된다.

(표 3.3-8) 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물의 영양염류 용출속도

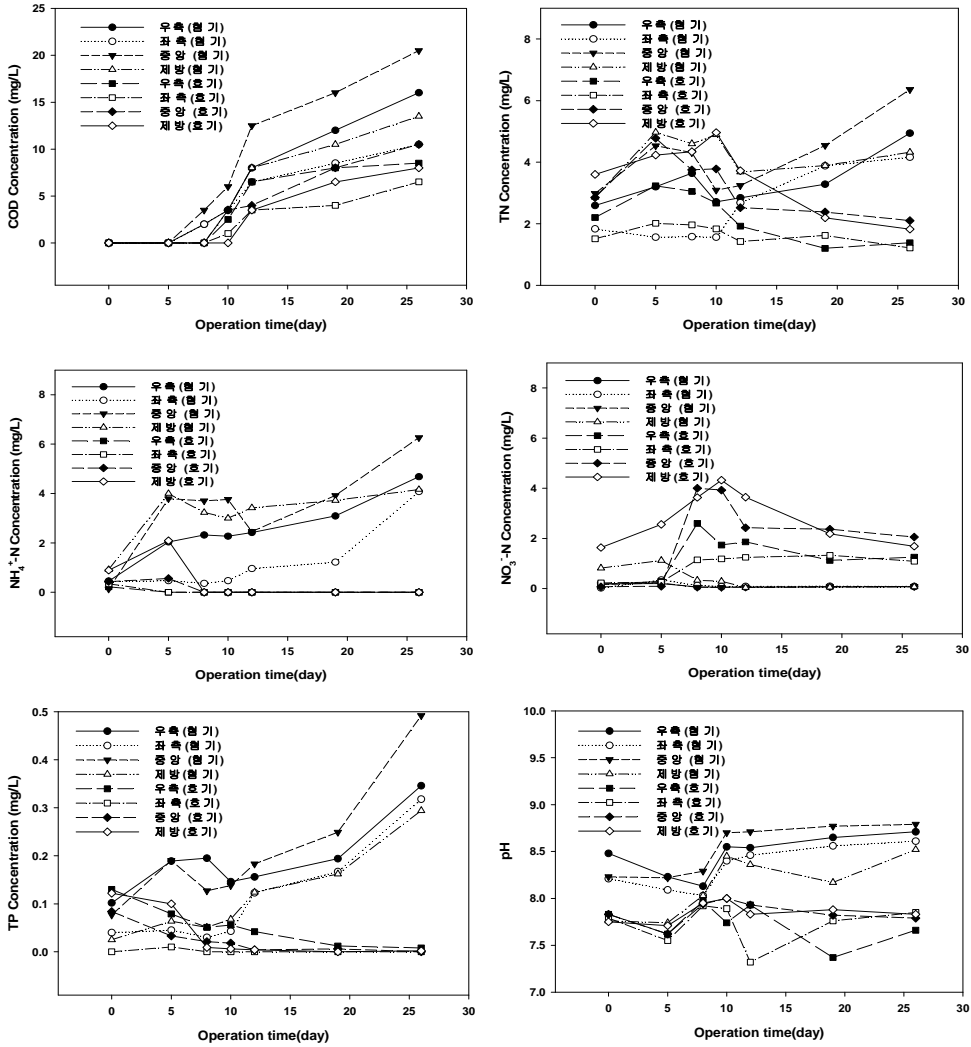
구 분		용출속도(mg/m <sup>2</sup> ·d)					
		COD		NH <sub>4</sub>		P	
		혐기	호기	혐기	호기	혐기	호기
1차	매화	24.44	-	N.D	-	3.35	-
	버들	81.48	-	N.D	-	4.38	-
	과림	57.04	-	N.D	-	0.99	-
2차	매화	180	14	46	N.D	3.03	N.D
	버들	195	14	53	N.D	2.72	N.D
	과림	187	14	68	N.D	1.68	N.D
3차	매화(우측)	140	74	36	N.D	2.05	N.D
	매화(좌측)	92	56	32	N.D	2.01	N.D
	매화(중앙)	180	92	53	N.D	3.56	N.D
	매화(제방)	118	70	28	N.D	2.33	N.D
4차	매화(우측)	135	77	32	N.D	2.71	N.D
	매화(좌측)	77	58	22	N.D	1.05	N.D
	매화(중앙)	154	116	32	N.D	2.74	N.D
	매화(제방)	77	58	19	N.D	1.78	N.D



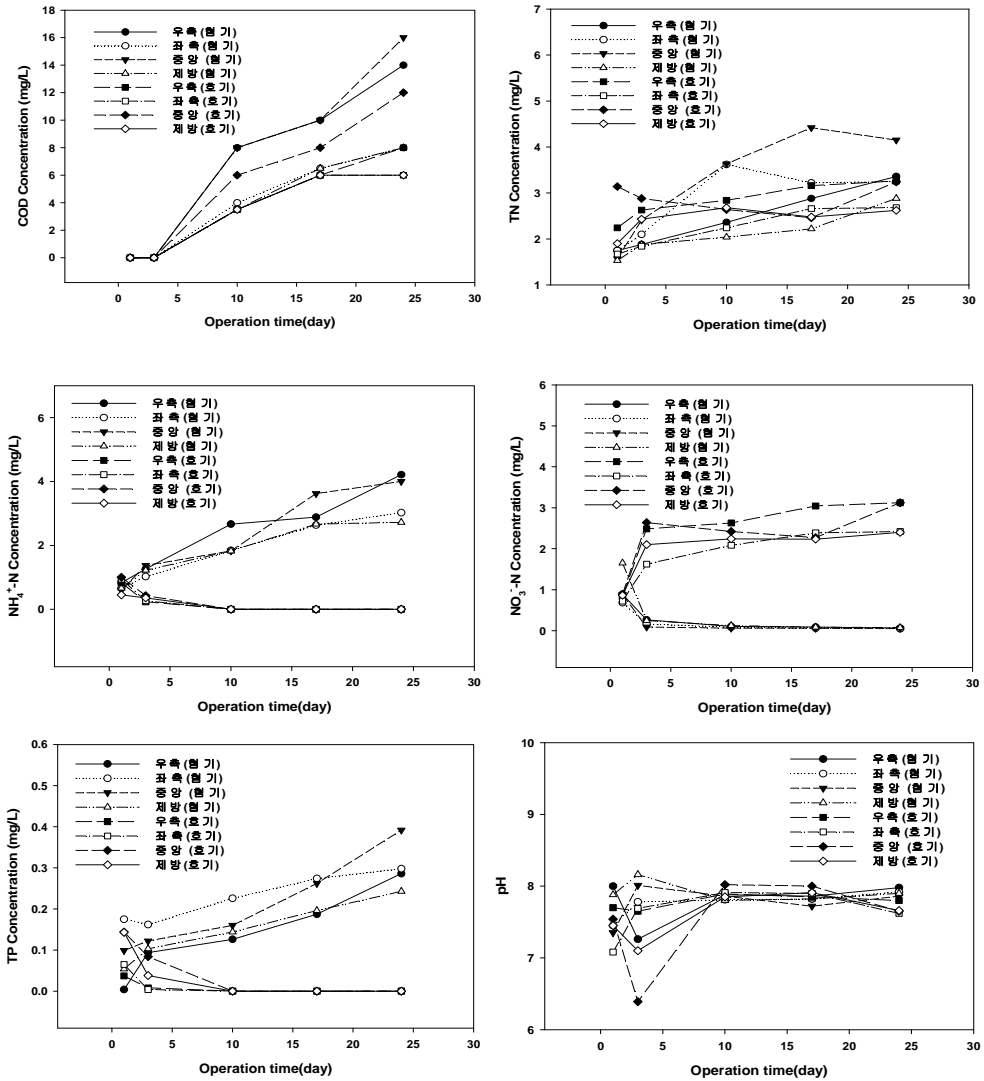
<그림 3.3-14> 1차 용출실험 결과(매화지, 버들지, 과림지-혐기성 압반응)



<그림 3.3-15> 2차 용출실험 결과(매화지, 버들지, 과림지-호기성, 혐기성)



<그림 3.3-16> 3차 용출실험 결과(매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방-혐기성, 호기성 암반응)



<그림 3.3-17> 4차 용출실험 결과(매화지 우측, 좌측, 중앙, 제방-혐기성, 호기성 암반응)

### 3) 퇴적물의 인 용출을 평가

본 연구의 결과와 국내 담수호에서 측정된 인 용출속도를 비교한 결과는 (표 3.3-9)와 같다. 매화저수지와 버들저수지는 2002년에 안동호에서 측정된 값과 가장 유사한 것으로 나타났으며, 과림저수지는 상대적으로 인 용출속도가 낮은 보령댐에 가장 유사할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 영양염류 용출속도는 제한된 시간 동안 실험실 내에서 얻은 결과물이므로 직접 실제 현장에 응용하기에는 한계가 있으나, 대략적인 영양염류 용출량을 예측하는 방법으로 사용하기에는 가능할 것으로 판단된다. 단 본 연구의 1차 실험과 같은 물리적인 교란이 발생하지 않는 상황 하에서는 가능할 것으로 판단된다.

(표 3.3-9) 국내 담수호의 인 용출 속도 비교( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )

구분	인 용출속도	참고문헌
남양호	2.14~3.55	한국농어촌공사, 2006
안동호	3.59~3.82	한국수자원공사, 2002
대청호	4.70~7.36	한국수자원공사, 2002
	2.01~9.85	이요상, 2005
보령댐	0.23	유병로, 2001
매화지	3.03~3.35	This study
버들지	2.72~4.38	This study
과림지	0.99~1.68	This study



## 제 4 장

---

# 농업용수 수질개선기술 개발 동향

---



## 제4장 농업용수 수질개선기술 개발 동향

### 제1절 수질정화 원리 및 수질개선기술 분류

#### 1. 수질정화 원리

수생태계에서 수질 정화를 바꾸어 말하면 수생태계의 기능을 보존·보호·개선·재편성·복원 등의 개념에 의해 수계환경을 건강하게 만드는 것이라 정의할 수 있다. 이러한 방법들은 수변 공간 또는 수체 내 등 어느 공간을 이용할 것인지에 따라 적용 기법은 달라지지만 오염된 물을 정화하는 방식은 수계환경의 자정작용 일부 또는 전부를 응용하여 인위적으로 그 정화 효과를 증대시키는 것으로, 수질정화의 기본 원리는 (표 4.1-1)과 같다 (조주연, 2001).

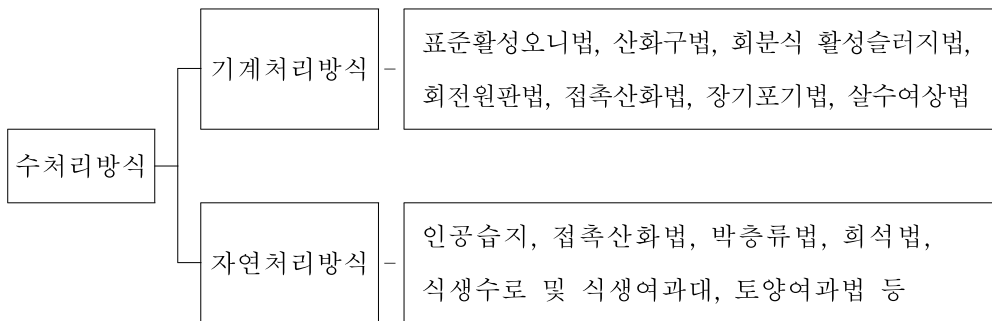
(표 4.1-1) 수질정화 메카니즘

구 분	주요 원리
회석	깨끗한 하천수, 지하수를 유입하여 오염된 물을 회석한다.
침전·흡착	흐름에 의한 유속변화, 하상형태 변화에 따라 수중의 오염물질은 자중에 의해 침전하거나, 하상면에 접촉하여 흡착된다.
여과	오염된 물이 침투성이 높은 하상을 통과할 때 오염물질이 여과 작용에 의해 제거된다.
생물의 유입, 산화 분해	수체 내에 서식하는 생물의 작용에 의해 오염물질이 분해된다.

## 2. 수질개선기술 분류

### 1) 수처리 방식에 따른 분류

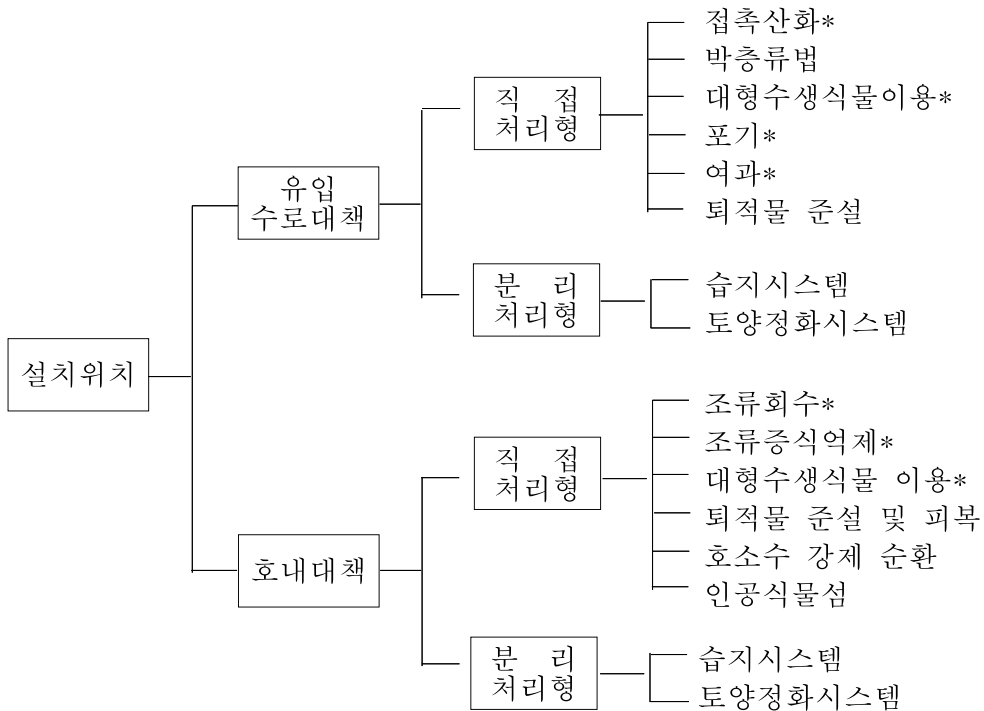
수질개선기술을 수처리 방식에 따라 분류하면 기계처리방식과 자연처리방식으로 나눌 수 있다. 기계처리방식은 주로 점오염물질의 제거가 주를 이루며 BOD 등의 유기물 제거효율은 높으나 TN 및 TP의 제거효율은 BOD에 비하여 낮은 편이다. 전통적인 기계처리방법에는 표준활성슬러지법, 산화구법, 회분식 활성슬러지법, 회전원판법, 접촉산화법, 장기포기법, 살수여상법 등이 있다. 자연처리방식은 인공습지, 접촉산화법, 박충류법, 토양정화법, 희석법, 식생수로 및 식생여과대 등이 있다. 주로 자갈, 토양, 식물 등 자연재료를 이용하여 자연정화기능을 강화한 방법들이 이에 속한다. 처리방식에 따른 수질개선공법의 종류는 <그림 4.1-1>과 같다.



<그림 4.1-1> 수처리방식에 따른 분류

### 2) 시설의 설치위치에 따른 분류

수질개선시설의 설치 위치에 따른 분류는 유입수로 대책과 호소 내 대책으로 구분되며, 각각 직접처리형(On-line)과 분리처리형(Off-line)으로 구분할 수 있다. 설치위치에 따른 분류는 <그림 4.1-2>와 같다. 유입수로 대책의 직접처리형으로는 접촉산화법, 박충류법, 대형수생식물이용법, 포기법, 여과법, 퇴적물 준설법 등이 있고, 호내 대책의 직접 처리형으로는 조류제거법, 인공습지조성 등 대형수생식물이용법, 퇴적물 준설 및 피복, 호소수 강제순환, 인공식물섬 등이 있다.



주) \* 는 분리처리형으로도 적용 가능

<그림 4.1-2> 수질개선시설의 설치 위치에 따른 분류

### 3) 정화원리에 따른 분류

수질개선기술을 정화원리에 따라 분류하면 물리적, 화학적, 생물학적 방법과 기타방법으로 분류할 수 있다. 정화원리에 따른 수질개선공법의 종류와 처리대상 오염물질을 분류하면 <그림 4.1-3>과 같다. 물리적 방법은 자연에너지를 이용하여 중력침강, 집축침전 및 여과에 의해 수질을 개선하는 방법으로서 대표적인 공법으로는 침강지, 식생대, 모래여과 등이 있다. 화학적 방법은 응집제, 살조제, 제초제 등의 화학약품을 이용하여 인위적으로 오염물질을 응집, 침전, 제거하는 공법을 말한다. 생물학적 방법은 식물이나 토양 및 수중의 미생물을 이용하여 오염물질을 흡수·분해하는 방법으로서 인공습지, 집축산화공법 등이 대표적이다. 기타 방법에는 유입되는 오염물질을 직접적으로 계외로 배제시키는 유입수 배제(By-pass), 오염물질 농도를 낮추는 희석, 수중에 산소를 공급하는 포기 등의 방법이 있다.



## 제2절 농업용수 수질개선기술 연구동향

### 1. 국내 연구동향

#### 1) 한국농어촌공사

농업용 저수지 수질개선 기술에 대한 연구개발은 주로 한국농어촌공사 농어촌연구원을 주축으로 이루어졌다. 1997년부터 인공습지, 침강지 등 자연정화공법을 대상으로 농업용수 수질개선관련 연구를 수행하기 시작하였다. 지금까지 수행된 연구개발내용은 저수지 유입 부하량 저감을 위한 인공습지와 침강지 설치 및 운영기술, 사상성 조류매트 산화지를 이용한 수질개선연구, 농경지 유출수의 수질개선기법연구, 녹조제어를 위한 단기 호 내 대책 기술, 호소 주변의 생태공학적 수질개선 기술, 하·폐수의 농업용수 재이용을 위한 고기능성 분리막 기술, 농업용 저수지 녹조방지를 위한 천적 생물 적용기술 실규모 실용화 연구 등 다양한 공법들이 개발되거나 개발 중에 있다. 특히 인공습지, 침강지 등 자연정화공법에 대한 연구는 장기간의 현장적용 시험연구 등을 통해 현장설계 및 관리지침들을 마련하였다. 또한 수질개선사업이 완료된 지구에 대해서는 지속적인 수질 모니터링을 통해 정화효율 검증 및 현장 적용성 향상 연구를 진행 중에 있다. 한국농어촌공사에서 수행한 저수지 수질개선 관련 연구과제의 목록은 (표 4.2-1)과 같다.

(표 4.2-1) 농업용수 수질개선기술 연구실적(한국농어촌공사)

연도	연구 과제명
2010~현재	농업용수원의 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술개발 및 실용화연구
1997~2004	농업용저수지의 수질개선시험연구
2013~2016	정체하천구간의 녹조제어를 위한 포식성 천적생물 적용 기술 개발연구
2013	양수저수지 수질개선방안 가이드라인 연구
2011~2014	농업용수 수질개선지구 사후 모니터링
2012~2013	농업용 저수지 수질자동모니터링 시스템을 통한 녹조예측 기술
2010~2012	농업용수원 녹조방지를 위한 천적생물 현장적용 기술개발
2011~2013	인공지능기법을 이용한 농업용저수지 수질지표 및 관리모델 개발
2013~2014	농업용저수지 녹조방지를 위한 천적생물 적용기술 실규모 실용화연구
2008~2010	담수호 수질개선시험조사 및 실용화
2002~2005	농업용저수지의 녹조제어기법 연구
2003~2005	저수지 준설 환경기준정립 및 준설토 활용방안 연구
2005	수질정화제품 및 시공기법의 효율성 평가
2005~2007	농업용수 수질개선 실용화 연구
2005~2007	농촌지역 비점오염 물질 관리방향 및 기술개발
2009	조류(algae)를 이용한 인 처리기법 타당성 연구
2010	농업용 저수지 유형별 수질예측모델 적용방안 연구
2004~2005	목적외 사용에 따른 농업용 저수지의 수질오염 영향과 수질관리방안 수립 연구
1994~1995	담수호의 수질변화 예측모형개발 연구
1997~1999	사상성 조류매트 산화지를 이용한 농업용수 수질개선기법 연구
2004~2005	농업용 저수지 호소주변 생태공학적 수질개선기법 연구
2005	농업용저수지의 녹조제어 기법개발
1992~1994	농어촌용수 환경관리에 관한 연구



2) 한국수자원공사

한국수자원공사에서는 다목적댐 및 생공용수 목적 저수지의 수질관리 및 수질개선을 위해 수류차단막 설치, 천연 조류제어제 개발, 녹조회수장치 개발 등 조류제어에 대한 기술개발 연구가 주로 이루어졌다. 여름철 강우시 지속되는 탁수의 장기화 문제를 해결하기 위해서는 선택취수 설비에 대한 효과 평가와 운영지침 개발을 위한 연구개발도 이루어졌다. 또한, 저수지 조류 발생 특성 분석을 통한 호 내 및 상류유역의 종합적인 대책을 마련하는 연구가 주를 이루었다. 한국수자원공사에서 수행한 저수지 수질개선관련 주요 연구과제 목록은 (표 4.2-2)과 같다.

(표 4.2-2) 호소 수질개선기술 연구실적(한국수자원공사)

연도	연구 과제명
2012~2014	고효율 녹조회수 및 미세조류 바이오매스 자원화기술 개발
2013	DMZ 상류 임남댐과 소양강댐을 고려한 하류 수계의 수질 개선방안 및 조류대책 연구
2012~2013	광역상수원에 적용가능한 농축된 조류제거방안
2012	조류 발생특성에 따른 경북지역 주요 댐 장단기적 저감기술 마스터플랜 수립
2008~2009	대청호 조류차단막 설치효과 예측 및 연구
2005	수질 생태보전을 위한 습지 설계지침 개발
2012~2014	고효율 녹조회수 및 미세조류 바이오매스 자원화기술 개발
2012~2013	4대강 보의 조류 성장특성을 반영한 최적 조류 제어 방안
2012~2013	광역상수원에 적용 가능한 농축된 조류 제거 방안 연구
2014	수질·녹조 대비 댐-보-저수지 연계운영 개선 방안 연구 (낙동강 수계)
2011~2013	하천수질개선 및 신개념 수자원 개발을 위한 다목적 천변 여과저류지 기술개발
2004~2005	대청 및 횡성댐 3차원 수리수질모형 구축 조사 및 대청댐 수질관리 MP 수립 연구

### 3) 기타 녹조관련 연구동향

지구 기온상승 등으로 하천 및 호소의 녹조문제가 전 지구적인 문제로 대두되면서 우리나라에서도 환경부를 비롯하여 여러 기관에서 녹조 제어 및 녹조 저감에 관한 연구가 다수 수행되었다. 국내에서 조류연구는 한국 하천호수학회(구 한국육수학회)를 중심으로 연구되어 왔으며, 1970년대까지는 주로 조류의 분류학적 연구가 중심이었고, 1980년대 후반에 들어서면서 조류의 생태학적 연구가 시작되었다. 1990년대 전국의 많은 호소와 하천에서 수질의 부영양화 및 녹조현상이 가시화되면서 국가적 관심과 함께 대규모 연구개발이 수행되기 시작했다. 2000년대 들어서는 환경부에 코스타프로젝트를 중심으로 조류관리를 위한 연구가 수행되기 시작했고, 2011년 이후 환경부의 에코이노베이션 사업과 함께 대규모 조류관련 연구들이 수행되었다.

(표 4.2-3) 국내 조류관련 연구개발 동향

과 제 명	주관기관	기간	지원기관
환경친화적 조류제어용 소재 및 장치개발	생명공학연구원	01~04	환경부 차세대 핵심환경 기술개발 사업
조류의 성장방지 및 제거 자동화시스템개발	과학기술연구원	02~05	
조류제거기술 및 기능성 소재 개발	인제대학교	02~05	
조류제거장치 및 시스템 개발	에코필부설연구소	02~04	
조류독소, 이취미 통합 모니터링 기술개발	생명공학연구원	04~07	
호소의 콤팩트형 조류제거 공법개발	건설기술연구원	04~07	
조류의 성장방지, 제거자동화시스템 실증화	월처화인텍	06~08	
천연물, 무기나노이용 담수조류 제어기술개발	화학연구원	08~11	
조류제거를 위한 전극 및 모듈기술 개발	테크로스	07~10	
조류균별 구분측정 전처리장치 측정장치개발	마이크로디지털	07~09	
남조류이용 수계위해성평가용 DNA칩 개발	생명공학연구원	09~11	
자연정화용 수질정화기술개발	한라산업개발	08~14	농기평
농업용저수지 녹조제거기법 개발	건국대	02~05	
생물조절을 이용한 농업용저수지 수질관리	건국대	06~09	환경부 수계관리 위원회
수중생물먹이망의 영양동태학 및 에너지전달	건국대	05~07	
상수원 호소내 다원적 수환경개선기법 개발	건국대	09~11	

자료) 한국환경공단, 2012

## 2. 국외 연구동향

미국, EU, 호주, 일본 등 국외에서도 오래 전부터 호소의 부영양화와 수질문제 해결을 위한 기술개발이 이루어져 왔다. 연구개발 동향은 국내의 상황과 유사하나, 국가별 지역별 수질문제가 호소의 부영양화와 녹조, 산성화, 퇴사, 탁수, 수초번성 등으로 다양하여 연구개발 내용도 매우 방대하다. 일반적으로 유역 내 하·폐수 처리와 비점오염원 관리를 통한 유역 오염부하 제어 대책이 기본이며, 호소 내 녹조발생 저감을 위한 호 내 대책 기술도 활발히 연구되었다. 호소와 저수지 수질개선 및 관리 기술도 유역 관리 기술과 호 내 제어기술로 구분된다. 유역관리 기술은 점오염원과 비점오염원에 대한 제어기술이 포함되며, 호 내 제어기술은 물리적, 화학적, 생물학적 제어기술로 구분될 수 있다(Cooke et al., 2005). 호소 수질개선을 위한 대안은 유역으로부터의 외부 오염부하량 감소를 위한 대책이 최우선이며, 다음으로 호 내부 인부하 저감을 위한 기술과 조류발생 억제를 위한 기술의 적용이 병행된다.

미국과 유럽의 저수지는 대부분 자연 호소가 대부분이며 주변 지형이 완만하고 자연적인 습지 형태를 많이 포함하기 때문에, 이를 활용하여 영양염류를 제거하는 자연적인 정화방법을 적용하는 사례가 많다. 또한 인공습지 또는 자연습지에서 식생을 매개체로 이용하여 오염물질 및 중금속을 정화하는 사례(폴란드), 모래와 식생을 동시에 응용하는 sand-plant 시스템(스위스), 부착조류와 수생식물을 이용하는 기술(스웨덴), 인공연못 형태의 저류조를 이용하는 기술(노르웨이), 인공습지, 식생완충대(buffer-strip), 저류조 등의 여러 가지 기법을 복합적으로 이용하는 기술(에스토니아), 수생식물과 어류를 동시에 적용하여 영양염 제거와 양식을 동시에 시행하는 기술(중국, 인도), 소규모의 하수를 처리하는 복합적(식생, 조류, 어류, 폭기 등) 기법을 응용하는 사례(스웨덴)들이 연구되고 있고, 이 중에서 많은 기술들이 실제 현장에 적용된 사례가 있다. 일본에서는 하천의 자연정화공법을 이용한 정화기술에 대한 연구와 현장적용이 많이 시행되고 있으며, 역간산화접촉법, 자연형 호안 정비, 미생물 부착여재의 이용 등 다양한 공법의 자연형 하천정화 기술들이 적용되고 있다(금강수계관리위원회, 2012).

유역 내 점오염원 제어기술은 하수처리장 인 고도처리, 비점오염원 저감 기술은 인공습지(Wetlands), 전댐(Pre-dam), 습식 및 건식 저류지(Dry and

Wet Detention Ponds), 식생여과대 복원(Riparian Zone Rehabilitation) 기술 등이 연구되었다(Cooke et al., 2005; <http://www.cyanodata.net/review.php>).

호소 내 제어기술 중 물리적 제어기술로는 인공폭기와 강제순환(Verner, 1994; Visser et al., 1996; Cooke et al., 2005), 준설, 희석과 플러싱(Welch and Patmond, 1990), 수위저하와 퇴적물 건조(Tsujimura, 2004), 퇴적물 캡핑(Jacobs and Forstner, 1999; Hart et al. 2003; <http://www.vattenresurs.se/>), 선택취수(Nurnberg, 1987; Dunalska et al., 2001; Cooke et al., 2005), 수류 차단막 기술(Asaeda et al., 1996; 2001), 초음파 기술(Lee et al., 2002) 등이 연구되었다. 화학적 제어기술은 살조제(Van Hullebusch, 2002), 응집제, 보리벼짚(Barley straw) 활용 연구(Welch et al., 1990; Barrett et al., 1996, 1999) 등이 이루어졌고, 생물학적 제어기술로는 먹이 연쇄를 이용한 생물 조절 기술(Biomanipulation) 연구(Shapiro et al., 1975; Gulati et al., 1990; Reynolds, 1994; DeBernardi and Giussani; 1995, Shapiro, 1995; Perrow et al., 1997; Lazzaro, 1997), 수생식물 제거를 통한 유기물 오염원 제거연구(미국, 스웨덴, 네델란드) 등이 수행되었다.

특히, 미국, 호주, 유럽 등의 국가에서는 알루미늄 화합물 등을 이용한 호소 내 인 불활성화 기술개발을 위한 연구개발이 활발히 이루어졌다. 알루미늄 등 응집제를 사용하는 방법은 정수장에서 오랫동안 사용해 오던 수처리 공정이다. 알루미늄이온은 수중에서 수산화물 hydroxide 침전물을 만들면서 부유물을 공침시키는 성질을 가지고 있으며, 또한 phosphate와 결합하면 용해도가 낮은 aluminum phosphate를 만드는 성질을 가지고 있으므로 부영양호의 수질개선에 적합하여 미국과 캐나다에서 적용된 바 있다. 조류성장 제어를 위해 alum을 사용하여 하천과 호소 내 인을 제거하는 기술은 1955년에 Lund가 최초로 제안하였으며(Cooke et al., 2005), 지금은 호소의 인 불활성화와 퇴적물 제어를 위한 일반적 기술로 정착되어 있다. Cooke와 Carlson(1986)은 Alum을 직접 미국 Ohio 주 Arkon 저수지로 유입하는 Cuyahoga 강에 직접 투입한 바 있으며, Harper 등(1983)은 우수 처리를 위한 Alum 주입장치를 개발한바 있다. Wisconsin 주의 Mirror Lake과 Shadow Lake에서는 알루미늄을 처리한 후 수년간 수질이 개선되는 효과를 얻은 바 있다(Cooke et al., 1993). Mirror Lake에서는 alum 처리전의 호수 내 인 농도가 0.04 mg-P/L 이었으나 처리 후에는 10여 년간 0.01 mg-P/L를 유지했다(Garrison and Ihm, 1991). 반면에 Wisconsin의

Eau Galle 저수지에서는 매년 인의 부하가 크기 때문에 수질개선에 효과적이지 못하였다(Barko et al., 1990).

퇴적물 준설과 캡핑 등의 방법은 높은 농도의 인이 함유되어 있는 퇴적물을 준설하여 인을 제거 또는 용출을 차단하는 방법으로서 퇴적물에 의한 내부 부하가 큰 경우에 효과적이다. 퇴적물 캡핑은 미국의 Ohio 주 Ottawa 강, New York 주의 Grasse 강, 스웨덴의 Turingen 호소에 적용된 바 있다 (<http://www.aquablokinfo.com>).

생물학적 제어 방법으로는 어류조절을 통한 조류제어(독일, 캐나다, 미국, 네덜란드)와 수생식물의 제거를 통한 유기물오염원 제어(미국, 스웨덴, 네덜란드) 등이 이용된 바 있다. 최근에 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이는 자연시스템의 일부를 직접 이용한다는 측면에서 의미가 있다. 지금까지 다양한 종류의 생물학적 수질개선 방법이 연구되었으나, 저수지의 특성, 기후 등 환경조건에 따라 각기 다르게 반응한다는 어려움이 있기 때문에, 연구결과의 범용적 확대 적용에 어려움이 있다.

일본의 경우 2008년부터 호수와 늪의 수질정화기술이 환경기술의 실증사업으로 실시되고 있다(박승택). 일본에서도 종래의 호수 수질정화기술은 유입 하천의 오염부하량 삭감대책과 준설, 모래 포설, 식생대 흡착 및 정화, 차단막 등 유동제어, 산소공급 등의 호소 내 기술이 적용되었다. 그러나 최근에는 현장에서 직접 적용 가능한 신기술을 실증모델화 하는 사업이 진행 중이며, 준설 등 큰 토목공사를 필요로 하는 것은 제외되어 있다. (표 4.2-4)는 일본에서 현장실증실험을 수행한 수질정화기술들을 정리한 것이다. 신일본 제철은 탄소섬유에 의한 하천 그리고 호수와 늪의 정화기술을 개발 중이다. 이 기술은 직경 7 $\mu$ 의 탄소섬유 몽치를 오염된 수중에 넣어 탄소섬유 표면에 부착한 미생물의 움직임에 따라서 유기물을 분해하고 수질을 정화하는 기술이다. (주)마이크로아쿠아는 마이크로 버블(기포)에 의한 수 환경정화기술을 개발 중이다. 직경 50 $\mu$ m 이하의 기포인 마이크로 버블은 소멸할 때에 화학 반응의 성질이 강한 원자, 분자(자유 라디칼)을 발생하며, 수용액 속에 존재하는 여러 가지 화학물질을 분해하는 효과가 있다고 알려져 있다. 마이크로 버블을 호수 바닥에서 발생시키면 오염물질이 감소하는 효과가 있음이 확인되었다. 현재 산업기술연구소 타카하시 연구원이 호수 바닥의 수질 개선 메커니즘을 해명하고 있으며, 효율적인 적용 방법을

확립하기 위한 기초 연구를 진행하고 있다. 쿠마모토 대학교의 아키야마 교수가 대용량의 섬유상 방전 플라즈마를 수중에서 생성시켜 오염물질을 억제 제거하고 호수와 늪의 수질을 정화하는 기술을 연구 개발 중이다. 이바라기 대학교의 코미네 교수가 고성능의 인 흡착 특성을 가진 재료를 호수와 늪의 바닥 퇴적층 위에 복토재로 깔고 바닥 퇴적층에서 수역에 대한 인의 용출을 줄이는 기술을 연구 개발 중이며, 현재 그 기초연구가 추진되고 있다. 동북대학교 나카노 교수가 호수와 늪의 수질정화기능을 담당하는 갈대 등의 식물을 이용한 뛰어난 중금속제거, 회수성을 가진 흡착제 개발에 관한 연구를 진행 중이다. 흡착제 원료로써의 갈대 이용의 확대와 베어 낸 갈대의 순환 이용 수법을 확립해서 습지 생태계의 보전에도 기여하고 있다.

(표 4.2-4) 일본 호소의 수질정화기술 실증모델사업 일람표

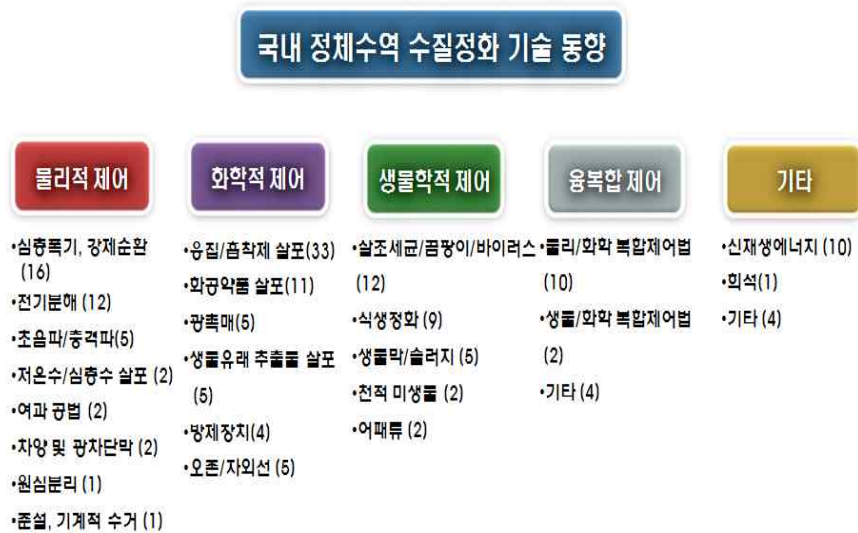
연도	실증시설명칭	신청자	실증기관	기술구분
2005	P-Catch(인 흡착제)에 의한 수질정화시스템	(주)쿠레아테라 린카이닛산켄세츠(주)	사미타마현	직접회수
	수질정화시스템(TAWS)	토요켄세츠(주)	사미타마현	직접회수
	미세기포의 의한 수질정화기술	(주)마이크로아쿠아	오사카부	산소공급
	수질정화장치 미즈키요	(주)료리츠	히로시마현	산소공급
2006	정화 블록	(주)호쿠에즈칸토 (주)호쿠에즈	사이타마현	그 외
	카본 리버스시스템	(주)호유쇼카이	사이타마현	그 외
	복합형 식생 부도(浮島) 정화법(웁스공법)	(주)후지타	사이타마현	식생이용
	미세 오존 기포에 의한 수질정화기술	노무라덴시교교(주)	오사카부	직접회수
	에카로시스템	세키스이아쿠아시스템(주)	카가와현	산소공급
	제트스트리머	(주)이시이코사쿠연구소	에히메현	산소공급
2007	다기능 유리 발포체에 의한 수질정화법	(주)이시카와 재자원화연구소	이시카와현	그 외
	다기능 세라믹 정화시스템	스프링 필드(유)	이시카와현	직접회수
	분류식(噴流式) 수질정화시스템	(주)사릭	이시카와현	산소공급
	자연정화공법	(주)파이프 비징	이시카와현	직접회수
	아오코 제어방법·아오코 제어를 위한 시공장치	(주)아쿠아 라보	오사카부	유동제어

### 제3절 수질개선기술 개발 및 실용화 사례

#### 1. 국내 수질개선기술 개발 및 적용사례

##### 1) 수질개선기술 개발 동향

국내에서 개발된 수질정화 기술들은 여러 가지 정화방법을 응용 또는 융합하여 사용하고 있다. 최근 한국건설기술연구원(2012)의 국내 정체성 수역 수질정화기술 특허동향 분석에서 크게 물리적 제어, 화학적 제어, 생물학적 제어, 융복합 제어, 기타 등으로 구분하여 분류하였다. 물리적 제어 기술에는 심층폭기 및 강제순환(16), 전기분해(12), 초음파 및 충격파(5), 저온수 및 심층수 살포(2), 여과 공법(2), 차양 및 광차단막(2), 원심분리(1), 준설 및 기계적 수거(1) 등이 개발되어 사용되고 있다. 화학적 제어 기술에는 응집 및 흡착제 살포(33), 화공약품 살포(11), 광촉매(5), 생물 추출물 살포(5), 방제장치(4), 오존 및 자외선(5)으로 구분되었다. 생물학적 제어기술은 살조 세균, 곰팡이 및 바이러스(12), 식생정화(9), 생물막 및 슬러지(5), 천적 미생물(2), 어패류(2)로 구분되었다. <그림 4.3-1>는 국내에서 개발된 수처리 기술들을 물리적, 화학적, 생물학적 제어, 융복합 제어, 기타 등으로 분류하였다.



<그림 4.3-1> 국내 정체수역 수질정화기술 동향

(표 4.3-1) 국내의 해리적 수질정화기술 소개

구분	심층 폭기	초음파 조류제어	여과	민도류 확산장치	부상처리기술
사진					
명칭	심층 마이크로 버블(RMSA)	L6 Sonic	DiscFilter	마린포럼	DAF, 조류부상제거
기본 원리	대량의 공기 흡입→펌프 내에서 혼합→마이크로 버블 생성→고압으로 수중 분사	Generator 초음파 발사→Transducer, 초음파 전달→조류의 액포, 세포막 파괴	유입수→미세여과막 통과→이동식세척장치(버이패스)→여과수	민도류 광역 확산 → 표층수은 저하, 저층 순환→조류대발생 억제, 영양염 용출 억제	2.5~3.5 kg/m <sup>2</sup> 압력에서 마이크로 버블(10~30µm) 분사 후 부상된 유기물을 탈수처리
특징	• 수체 직접 산소 공급 • 심층 폭기 가능	• 초음파로 조류의 기낭, 액포, 세포막 등 파괴 • 조류를 목표로 하여 수생태계 영향 없이 선택적 제거	• 디스크필터를 이용한 부유물질 직접 여과 • 여과를 통한 탁도 제거 및 주기적 역세 가능	• 하층의 저수온수를 확산시켜 성층 파괴 • 성층 파괴로 인한 계절적 부영양화 억제	• 공기입자에 조류를 부착시켜 부상류 제거 • 저층 유기물 및 조류제거 가능 • 수집조류는 탈수처리
장점	• 유기물 산화 촉진 • 사육 및 문영 편리	• 조류의 휴면포자 발생 가능성 • 대규모 문전사제 적음	• 필터 유지관리 • 플랜트 시설 필요	• 시설의 대형화 필요 • 시설 비용 증대	• 제거된 조류 및 유기물 후 속처리 필요
단점	• 주기적 유지관리 필요 • 지속적 동력 소모 필요				
키워드	공기, 폭기	초음파, 조류	디스크필터, 여과	민도류, 성층 파괴	DAF, 조류





(표 4.3-3) 국내의 생분해적 수질정화기술 소개

구분	천적생물 정화	식생정화	인공식물섬	미생물 신포	패류 수질정화
사진					
명칭	포식성 천적생물 배양	GMP 호안식생매트	인공식물섬, 부도	바이오펜로니	패류 수질정화
기본 원리	부영양화 수체 → 물벼룩 인위적 증가 → 조류섭식 → 수질정화	식생도인 공간 확보 (습지 등) → 식생의 N, P 흡수 및 흡착 → 수질정화	부영양화 수체 → 인공식물섬 설치 → N, P 흡수, 미생물 성장 → 수질정화, 생태계 보호	부영양화 수체 → 미생물 제거 투입 → N, P 흡수, 미생물 성장 → 수질정화, 생태계 보호	부영양화 수체 → 인공식물섬 설치 → N, P 흡수, 미생물 성장 → 수질정화, 생태계 보호
특징	• 동물플랑크톤의 섭식을 활 용한 조류 제거	• 식생의 성장을 유도하여 수질정화	• 수면 위에 식생을 부유시 켜 수질정화	• 미생물 살포 및 증식에 따 른 유기물 제거	• 패류의 섭식으로 조류 제 거 유도
장점	• 현장 맞춤형 생물정화작용 가능 • 생태계 기능 강화	• 녹지 조성, 자연형 하천 조 성 가능 • 경관 창출 효과	• 부유체로 깊은 수심에 부 유습지 조성 • 생태복원에 순기능	• 선택적인 저질 관리 • 미생물 체제를 통한 수질 적 순기능	• 생물 섭식에 의한 수질정 화로 생태계 영향 적음
단점	• 식규모 적용성 낮음 • 계절적 변동 있음	• 효율 비교적 낮음 • 계절적 변동 있음	• 효율 비교적 낮음 • 계절적 변동 있음	• 비교적 천천히 반응 • 소규모 수체에 적합	• 한정된 공간 및 환경조건 영향 큼
키워드	동물플랑크톤, 천적	식생매트	식생, 부유체	미생물 제거	패류

(표 4.3-4) 국내외 융복합 수질정화기술 소개

구분	태양전지 물순환	식물성 수면포기	생태부도 미세기포	독립발전 수순환	집속산화공법
사진					
명칭	태양전지+물순환	식물성+ROSTER	생태부도+미세기포	자체전력생산+순환	Bio-media+흡착산화
기본 원리	집적 수체에 도입→태양광 차질 후 동력 확보→하수 유량 상부 이송→수체 순환	인공식물성에 연계하여 식물에 영양염 공급 촉진	생태부도 하부에서 작동하여 식물 성장을 유도하고 내부 생물 서식처 공간 확보	회전수조낙차장치(동력확보) → 산소용해수 공급→확산장치로 광범위한 수체 내 전달	집적 수체에 도입→태양광 차질 후 동력 확보→하수 유량 상부 이송→수체 순환
특징	태양광 에너지를 물리적 순환에 활용	식생 정화 및 표면 폭기장치로 순환 유도	미세기포의 분사 및 생태부도의 수질정화	회전수조중중량하중식 발전으로 순환	지하구조물에서 침전, 흡착, 산화 분해
장점	별도의 에너지 공급 없음 정체구역 순환 유도	수면 폭기로 유수역 및 DO 증대 경관적 효과	복합적 작용으로 유기물 유기물 제거 가능 정체수역에 적합	독립형 수질정화 수류순환으로 물리적 정화 유도	미생물 정화작용 및 여재의 여과작용 지하 공간 활용
단점	비교적 가격 고가 장비 이동 어려움	동력 발생 소규모 정체수역 적합	별도의 동력 필요 유지관리 요구	초기투자비 발생 적정 부지 필요	일정 시설물 필요 유지관리 필요
키워드	태양전지, 물순환	수면폭기	생태부도, 미세기포	Zero-EMI	Bio-media

2) 수질개선기술 현장적용 및 사업화 사례

(표 4.3-5)은 국내 개발된 수질개선기술 중에서 현장적용 및 사업화된 사례를 정리한 내용이다. 물리적 기술로는 태양광 물순환장치, 가압부상장치, 폭기 순환장치, 조류 제거선, 초음파 조류제어 시스템 등이 있고, 화학적 처리기술로는 A업체의 천연수질개선제를 이용한 응집부상법 등이 실용화되고 있다. 생물학적 처리기술로는 우리 공사에서 다년간 연구된 인공습지가 농업용수 수질개선사업에 널리 이용되고 있고, 최근에 개발한 포식성 천적생물을 이용한 조류저감 기술이 실용화를 위해 실규모 저수지를 대상으로 현장적용실험을 하고 있는 중이다. 그 밖의 녹조제어제, 복합미생물 제제, 천연조류살포제 등이 개발되어 현장에서 소규모로 적용되고 있다.

(표 4.3-5) 국내 수질개선기술 현장적용 및 사업화 사례

구 분	기술명
물리적 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 태양광 물순환장치</li> <li>▪ 비접촉식 플라즈마 시스템</li> <li>▪ 초음파 조류 제어시스템</li> <li>▪ 일체형 가압부상장치</li> <li>▪ 이동형 가압부상장치</li> <li>▪ S-DAF 부상분리 장치</li> <li>▪ 가압필터여과시스템</li> <li>▪ 폭기 순환장치</li> <li>▪ 조류제거선</li> </ul>
화학적 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 천연 수질개선제를 이용한 응집부상</li> <li>▪ 오존 마이크로버블</li> <li>▪ Chlorine dioxide processing</li> </ul>
생물학적 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 지하흐름 및 지표흐름 인공습지</li> <li>▪ 인공식물섬</li> <li>▪ 포식성 천적생물을 이용한 조류저감</li> <li>▪ 맞춤형 녹조제어제(MEDI-TIDE)</li> <li>▪ 복합미생물(KEMM)제제</li> </ul>
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 천연조류살포제(워터헬스) 및 살포기술</li> <li>▪ 수중 혼화응집 및 식물섬 복합시스템</li> </ul>

가. 태양광 물순환장치

태양광 물순환장치는 태양광을 이용하여 저수지 하부의 물을 수직 및 수평방향으로 순환시켜 정체된 저수지에 흐름을 증가시키고, 저수지내 성층 현상 파괴 및 용존산소공급을 통하여 수질을 개선시키는 원리이다. 또한, 녹조발생제어, 용존산소공급, 물의 자정능력향상 등의 기능을 향상하고자 하였다. 주요 처리기작은 미세 산소기포 공급장치를 통하여 산소수로 펌핑된 물을 수표면에 따라 퍼져나가게 하고, 수직 흡입관 하부에서는 차가운 물이 흡입되어 저온수와 중온수의 혼합을 통해 성층화를 파괴하는 것이다. 국내 적용지구로는 일월저수지, 어천저수지, 송라저수지, 창림저수지 등 다수가 있다.

(표 4.3-6) 인공물순환장치 적용사례

(단위: mg/L, 천원)

저수지명	COD 목표치	사업비	사업기간
일월	10 이하	150,000	2011년5~12월
어천	7이하	150,000	2011년5~12월
송라	8이하	140,000	2012년5~11월



자료) <http://www.ecocotech.com>

<그림 4.3-2> 인공물순환 원리 및 장치

#### 나. 수중포기, 강제순환

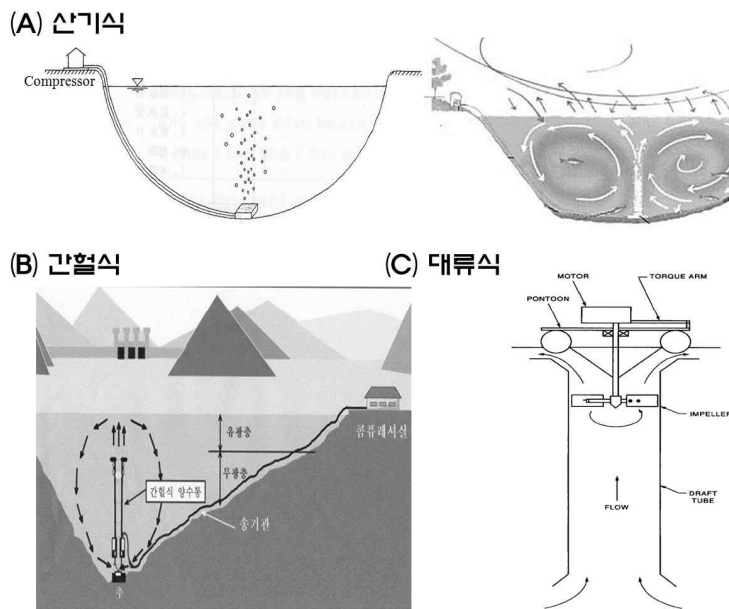
수중포기는 저수지의 부영양화와 녹조 현상을 억제하는 방안으로 수중에 공기를 불어넣거나 또는 공중에 물을 살포하여 물과 공기를 충분히 접촉시키는 방법으로써 산화작용과 호기성 미생물에 의한 소화작용을 촉진하고, 탄산가스, 황화수소, 메탄가스 등을 제거하여 물을 정화하는 공법이다. 호소 내에 용존산소를 증가시키는 방법으로는 공기를 수중에 직접 주입하는 폭기법, 분수를 이용한 폭기, 교반에 의한 강제 폭기 등이 있다. 폭기법은 유기물 오염농도가 높아 DO가 낮은 호 내에 인위적으로 산소 또는 공기를 공급하여 자정능력을 향상시켜 수질을 정화하는 방법이고, 분수포기는 녹조가 대량 발생한 수면에 대규모의 분수를 설치·운전함으로써 주로 식물플랑크톤의 증식과 번무를 억제하는 방법이다. 교반법은 다양한 교반장치를 이용하여 수표면을 강제적으로 혼합시켜 수중의 용존산소량을 높여주는 방법이다. <그림 4.3-6>은 다양한 교반장치를 보여주고 있다.

포기에는 포기하는 수심에 따라 표층포기, 전층포기, 심층포기로 구분되며, 표층포기는 호소의 수온약층을 파괴하지 않고 비교적 수심이 얕은 표층부분을 포기하여 혼합·교반하는 방법으로 주로 표층에 번무하는 식물플랑크톤을 유평층 이하로 끌어내림으로써 증식을 억제하는 방법으로, 수심이 비교적 낮고 조류의 대량발생 빈도가 높은 경우에 이용한다. 심층포기는 성층상태에 있는 호소의 심수층에 공기를 주입하여 호기화 하는 방법으로서 인 등의 용출 억제와 철, 망간, 황화수소 등을 산화시켜 악취발생이나 물의 착색을 방지할 수도 있다. 심층포기는 주로 수심이 깊어 퇴적물의 준설이나 피복이 어려운 경우에 이용된다. 심수층 폭기를 통해 혐기화 상태를 방지할 수 있으며 퇴적물로부터의 영양염류 용출억제를 도모할 수 있다. 심층포기의 개념도는 <그림 4.3-4>와 같다. 분수포기는 주로 공원 내 연못이나 골프장 연못에 많이 설치되어 있으며, 설치사례는 <그림 4.3-5>와 같다.

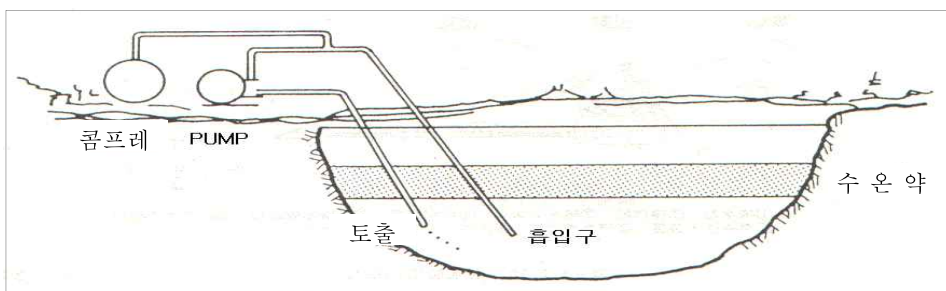
수중포기장치는 우리나라에서 1990년대부터 설치하기 시작하여 현재 약 300여기가 설치 운영 중이다. 표층포기의 포기시설로는 콤프레셔, 송기관, 산기장치 등이 필요하며, 수질정화효과는 호소특성에 따라 크게 차이가 나고 정량적으로 도출하기는 어렵다. 심층포기의 정화효과는 퇴적물에서 2차 용출이 억제되기 때문에 호소특성에 따라 정화효과가 큰 차이가 있다. 분수포기는 분수대 등 살수시설이 필요하며, 저수지 중·저층의 수온이 낮은 물을 표층으로 분수시키면 표층수의 수온이 낮아져 플랑크톤의 증식이



억제되는 효과가 있다. 지금까지 설치된 시설은 산기식과 간헐식이 대부분이지만, 최근에는 새로운 시스템(대류식 폭기장치)의 개발로 인하여 보다 효율적인 시스템의 도입이 진행되고 있다. <그림 4.3-3>은 수중포기장치 종류별 기작을 도식화 한 것이다. 국내 적용사례로는 대청호, 용담호, 연초댐, 회야댐, 달방댐, 석촌호, 일산호수공원, 세종시 중앙호수공원 등이 있다. (표 4.3-7)은 한국수자원공사에서 1990년대에 대청댐과 보령댐에 설치한 수중포기장치의 시설 현황이다.



<그림 4.3-3> 수중포기장치 종류별 기작 (한국수자원공사, 2012)



<그림 4.3-4> 심층포기의 개념도



<그림 4.3-5> 분수를 이용한 조류증식 제어 사례

(표 4.3-7) 수중포기장치 설치 현황

구 분	총저수용량 (백만m <sup>3</sup> )	운영수심(m)		수중폭기시설 형식			설치년도
		간헐식	산기식	계	간헐식	산기식	
대청댐	1,490	15	15	33	8	25	1990, 1992, 1998
보령댐	116.9	22	20	32	7	25	1998, 1999



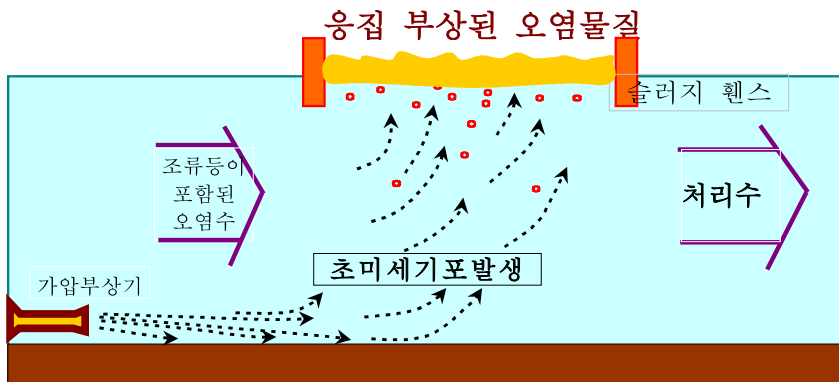
<그림 4.3-6> 다양한 교반장치



#### 다. 가압부상장치

가압부상에 의한 수질개선은 가압부상기 등을 이용하여 호소에 초미세기포 등을 불어넣어 조류 등이 포함된 오염물질의 비중을 가볍게 하여 수표면으로 오염물질을 부상시켜 제거하는 공법이다. 미세기포는 통상적으로 30  $\mu\text{m}$ 이하의 직경을 가진 미세한 가스입자를 의미한다. 미세기포는 물속에서 작은 부력에 의하여 낮은 상승속도로 높은 수중 체류율을 갖고, 또한 기포의 크기가 미세해짐에 따라 수가 증가하여 계면 면적이 증가하는 동시에 기포의 내부 압력이 증가하여 수중에서의 기체의 용해율이 향상되는 효과가 있다. 가압부상방식의 원리는 <그림 4.3-7>과 같다.

가압부상방법에는 이동식 가압부상방식과 고정식 가압부상방식이 있다. 고정식 가압부상방식은 지상 및 지하 구조물로 설치하여 물을 펌핑하여 처리한 후 수역으로 방류하는 개념이다. 가압부상장치 구조물은 현재 일산 중앙공원, 세종시 중앙공원, 인천시 소래신도시 공원 내에 있는 호소수를 정화하기 위해 설치되어 운영 중에 있다. 고양시 일산호수공원의 가압부상장치는 약 20년전에 지상에 설치된 구조물로서 하루 설계 처리용량은 약 4,000 $\text{m}^3$ 이고, 응집제로는 PAC를 사용하고 있으며, 호소수의 수질목표는 3등급으로 관리하고 있다<그림 4.3-8>. 인천 소래신도시의 호소수 수처리 시설은 지하에 설치된 구조물로 용존공기가압부상분리공법을 적용하였다. 호소의 하류에 취수펌프를 설치하여 취수하며, 유입되는 호소수는 PAC 주입과 튜브믹서로 응집혼화하여 1차 부상분리조에서 오염물질의 80~90%가 제거되고, 잔여 오염물질은 2차 부상분리조에서 처리하고 있다. 처리용량은 1일 4,000톤이며, 호소수의 수질목표는 2~3등급으로 설정하여 관리하고 있다<그림 4.3-9>.



<그림 4.3-7> 가압부상 수질정화 개념도



<그림 4.3-8> 일산호수공원의 가압부상장치(지상)



<그림 4.3-9> 인천 소래공원의 가압부상장치(지하)

이동식 가압부상장치는 호소 등 처리구역을 이동하면서 분획 처리하는 방법이다. 오염수역의 물을 유입한 후 활성 미세기포로 전환, 수중에 분사하여 수중 오염물질을 수면위로 부상시키는 직접 정화공법으로 처리구역을 구획 및 구분하여 이동하면서 처리하는 방식이다. 이동식 가압부상방식은 한국농어촌공사에서 시행하고 있는 단기수질개선사업지구인 버들저수지, 인산저수지, 고잔저수지, 이담저수지, 금정저수지 등 다수의 농업용 저수지에 적용되었다. 이동식 가압부상법의 수질정화효과는 수체가 완전히 분리되지 않은 경우에는 정화효과를 정량적으로 파악하기 어려우나, 2005년도 폐쇄된 수체에서 시험적용한 사례에 의한 정화효과는 (표 4.3-8)과 같다.

이동식 가압부상장치의 주요 설계제원으로는 수심, 온도, 압력, 용존기체의 농도, 처리대상 수질 및 용량, 응집제의 종류 및 농도, pH 등이 있다. 용존 공기부상법(Dissolved Air Flotation)의 경우 압력은 2.5~4.5kg/cm<sup>2</sup>, 체류 시간은 가압탱크에서는 2~5분, 부상분리조에서 20~30분, 부상속도는 6~16cm/분, 표면적부하는 90~220 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d 정도이다.

(표 4.3-8) 이동식 가압부상법의 수질정화효과

구 분	BOD	COD	Chl-a	T-N	T-P
처리전(mg/L)	6.07	19.07	136.63	3.18	0.14
처리후(mg/L)	1.03	3.93	2.23	1.42	0.003
제거율(%)	83.0	79.4	98.4	55.3	97.8

주) 간월호 일부수역에서 현장실험(2005년)한 결과임

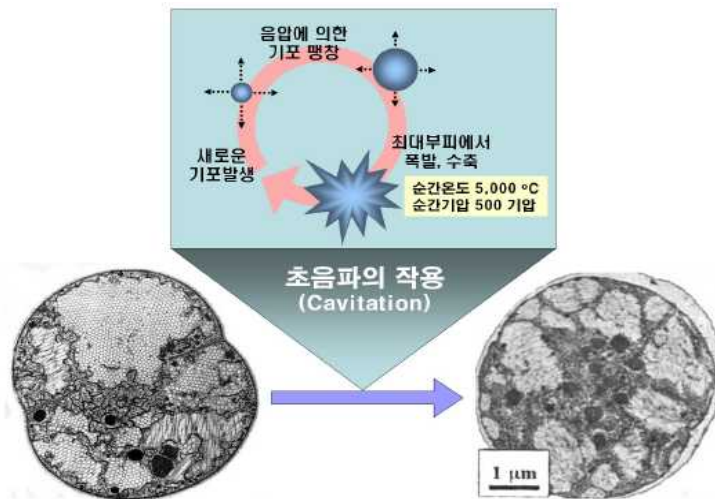


<그림 4.3-10> 가압부상공법에 의한 조류제거 현장실험

#### 라. 초음파를 이용한 조류제어 기술

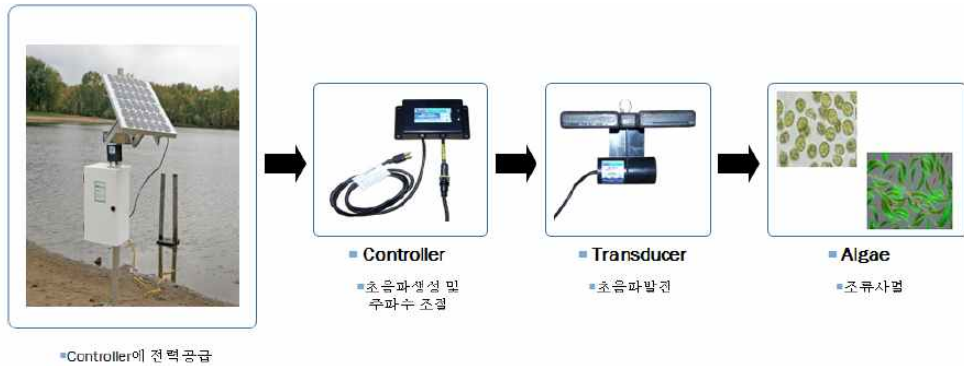
초음파를 이용한 조류제어 기술은 다과장 초음파(20,000 Hz 이상)를 연속적으로 발진시킬 때 발생하는 수중에서의 공동현상(cavitation)을 이용해 조류의 기낭(액포)을 파괴하거나 세포막을 손상시킴으로써 부력조절 능력을 상실시켜 조류의 사멸 또는 농도를 저감시키는 방법이다. 초음파에 의해 생성된 미소기포가 매우 짧은 시간(millisecons)에 팽창, 파괴될 때 압력이 500-10,000 기압까지 상승하고 온도가 3000-5000 °K까지 올라가는 극한 상태가 만들어지며, 이때 OH와 H 라디칼이 생성되어 물 속의 유기물을 산화시키는 것으로 알려져 있다(Doosti et al., 2012). 기낭의 파괴 이외에도 남조류의 세포분열을 억제하는 효과도 가지고 있다. <그림 4.3-11>은 초음파를 이용한 녹조 제어 원리에 대해 도식화 한 그림이고, <그림 4.3-12>는 초음파를 이용한 녹조 제어공정에 대한 내용이다.

초음파를 이용한 기술은 설치비가 저렴하고 유지관리가 용이하며, 다른 수서생물들에 영향을 주지 않는 친환경 수질개선공법이다. 초음파를 이용한 조류제어 기술은 소규모 연못에서 적용된 사례가 있다. 2010년에 경기도 광주시 소재 생태 저수지에 적용되어 운영 한 바 있으며, 2005년 충남 천안시 소재 연못에 3000m<sup>3</sup> 규모의 설비가 적용된 사례가 있다.



자료) 한국환경공단, 2012

<그림 4.3-11> 초음파를 이용한 녹조 제어 원리



자료) 한국환경공단, 2012

<그림 4.3-12> 초음파를 이용한 녹조 제어 공정

#### 마. 조류차단막 및 수류차단막

조류차단막은 폴리에스테르로 만들어진 오탁방지막(오일펜스) 형태로 조류가 발생한 지역으로부터 확산을 방지할 목적으로 설치하는 구조물이다. 수류차단막은 저수지 유입부 천이 구간에서 표층 수류를 차단함으로써 영양염류의 유광층 공급을 차단하고, 조류가 본류 수역으로의 확산되는 것을 억제하기 위한 목적으로 설치하는 구조물이다. 시설물은 불투수막(PVC), 앵커블록, STS wire 등으로 구성된다. 한국수자원공사는 대청호에서 녹조 제어와 확산방지를 위해 문의취수탑과 추동취수탑 인근, 그리고 소옥천 하류 2개소에 조류차단막을 설치 운영 중에 있으며, 수류차단막은 대청호 회남대교 상류에 1개소를 설치하여 운영하고 있다.



자료) 금강수계관리위원회, 2012

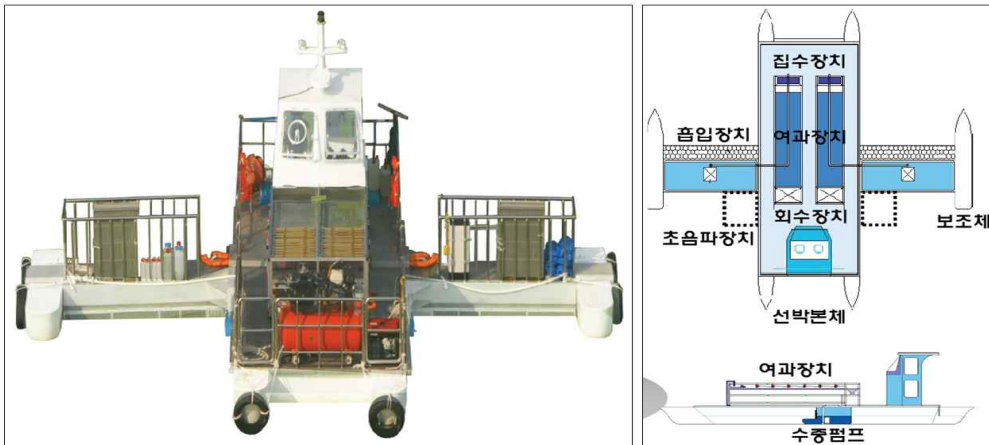
<그림 4.3-13> 대청호 조류 차단막 설치 전경



바. 조류제거선 및 이동식 수질개선장치

한국수자원공사에서 개발한 조류제거선은 녹조수역에서 녹조를 제거하기 위하여 개발된 이동형 선박으로, 선박 본체에 흡입장치, 집수장치, 여과장치 및 수집 장치 등으로 구성된 보조체가 결합된 형태이다. 채수된 호소수를 스크린필터에 압축에어 분사하여 녹조와 물을 분리하며, 선박의 외부에 부착된 초음파 장치를 사용하여 배출되는 여과수에 초음파를 조사함으로써 조류의 재부상을 억제하는 부가적인 효과를 가져올 수도 있다. <그림 4.3-14>는 조류제거선의 모습 및 구조도이다.

한국수자원공사는 현재 대청호와 4대강 보 구간에 조류제거선을 운영 중에 있다. (표 4.3-9)는 대청호에서 운영 중인 조류제거선에 대한 시설 제원이다. 조류제거선은 무게가 경량이고 저수심 수역에 접근 및 이동성이 용이하여 수심이 얇은 다발성 녹조발생 우심지역을 효과적으로 관리할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 운영 경비가 많이 들고, 녹조 저감에 대한 효과가 실증되지는 않았다. 또한 여과장치의 여과량이 적어 큰 호수에 광범위하게 적용하기는 비효율적일 것으로 평가된다. 하지만, 호소 내 만입부 또는 차단막으로 구획화한 수역과 같이 조류가 집적된 곳에서는 효과적인 조류 제거가 가능할 것으로 판단된다.



자료) 금강수계관리위원회, 2012

<그림 4.3-14> 조류제거선의 모습 및 구조도

(표 4.3-9) 대청호에 적용한 조류제거선 제원

구분	규격 및 특징	초음파	비 고
선박크기	10m(L) × 10.5m(W) × 0.8(H)	접촉시간	3~5초
선박중량	5.0 ton (세부장치 포함)	조사각도	180°
엔진성능	30~50 HP	영향거리	2m
시설용량	2,000 m <sup>3</sup> /d (8hr), 4~5노트	소요전력	20~45W/h

비용: 선박 (300,000천원/대), 운영비 (50,000천원/대)  
 자료) <http://geomarine.kr/>

인공지능 이동식 수질개선장치는 모 환경업체에서 개발한 장치로 폭기장치, 물순환장치 등 단일처리장치들이 갖는 단점 및 한계성을 보완하기 위하여 전력공급장치, 수질자동측정, 수질개선장치(천연조류제어제, 미세기포발생 물순환장치), 원격 데이터 송수신기능 등을 한꺼번에 갖춘 소규모 이동식 수질개선장치이며, 모식도는 <그림 4.3-15>와 같다. 이동식 수질개선장치는 인공바위섬을 이용함으로써 경관향상 효과도 기대할 수 있겠다.



자료) <http://www.mcek.co.kr>

<그림 4.3-15> 소규모 이동식 종합 수질개선 장치

### 사. 황토 살포

한국수자원공사는 다목적댐 저수지에 녹조가 발생하는 경우 긴급대응책으로 황토살포를 실시한다. 황토를 살포하여 조류와 결합 침강시킴으로서 조류를 제거하는 방법이다. 하지만, 조류의 농도에 따라 침강 조류가 중층에 장시간 체류할 수 있으며, 황토 자체에 고농도의 인이 함유되어 있어 장기적으로 인이 재 용출됨으로서 역효과가 발생할 우려가 있다. 특히 바다와 달리 호소에서는 황토와 조류의 응집을 촉진하는 염(Magnesium)이 없기 때문에 완전 응집이 되지 않아, 녹조의 제거 효과는 높지 않은 것으로 알려져 있다. 2009년 대청호 관리단에서 대청호에 살포한 황토의 양은 약 20톤 정도이며, 조류 농도에 따라 효과는 다양하나 황토와 응집제 (폴리염화알루미늄, Poly Aluminum Chloride, PAC, 6 mg/L)를 같이 살포하였을 경우, 30~33%의 조류가 감소(침강속도 약 2.0m/hr)된 것으로 평가되었다 (금강유역환경청, 2010).



자료) 금강수계관리위원회, 2012

<그림 4.3-16> 대청호 황토살포선 및 황토살포 전경



#### 아. 퇴적물 준설

퇴적물 준설은 유기물 및 영양염 함유율이 높은 퇴적물을 준설장비를 이용하여 오염물질을 직접 제거함으로써 퇴적물로부터 오염물질의 용출 및 재부유 등을 방지하는 공법으로 저층수의 용존산소 회복, 수심의 유지·확보, 내용적 확보 등에도 효과적인 방법이다. 퇴적물 준설방법에는 저수지의 운용방법, 퇴적물의 성질과 종류, 지형 및 지질조건 등에 따라 육상준설, 수중준설 및 이들 양자의 병행 방법 등이 있다. 육상준설의 경우 시공성과 운반기능이 용이하고 탄소배출을 최소화할 수 있으며, 경제성 확보에도 이점이 있다. 수중준설의 경우에는 탁수확산을 방지할 수 있고, 배사관 설치가 용이하며, 준설수심을 유지할 수 있는 장점이 있으나 오타방지막 및 다단계 침사지를 사전에 설치해 퇴적물 재부유 및 부유사 확산 등의 2차 오염에 대비해야 한다(위터저널, 2012).

국내에서 이루어진 퇴적물 준설은 대부분 홍수통제, 항만건설, 수로유지 및 호소 유량관리를 목적으로 시행되었으며, 1980년을 기점으로 수질개선을 위한 준설이 이루어지기 시작하여 마산만, 공지천, 경포호, 호암지, 한강 등에서 수질개선을 목적으로 시행된 사례가 있으며, 농업용 저수지는 <그림 4.3-17>처럼 2005년도에 충남 서천 신구저수지에서 친환경준설선을 이용해 시험한 사례가 있다. 또한, 농림식품부와 한국농어촌공사는 전국 16개 저수지에 대해 2009년부터 2년 간 시범적으로 친환경 준설 및 처리, 재활용 사업을 추진하고, 사업 효과를 평가한 바 있다. (표 4.3-10)은 퇴적물 시범 처리사업에 대한 세부적인 내용이다. 시범사업 후 저수지별 수질개선 효과가 미비하여 후속사업은 당분간 중단된 상태이다. 이때 평가항목은 준설 전후의 수질, 용출률 변화 및 관련 생물상 변화 등이 포함되었다(조영철과 김호일, 2011).

퇴적물 준설 후 대부분의 저수지에서 탁도, COD 및 Chl-a 농도가 감소하는 것으로 조사 되었고, 질소와 인 등 영양염류 농도는 사업대상지에 따라 감소 또는 증가했다. Chl-a의 경우 사업 전·후의 감소량과 증가량의 차이가 심하여 사업으로 인한 교란의 결과인지 사업 후 결과인지 해석이 어려웠다. 경기도에 위치한 설성저수지에서는 2009년에 퇴적물시범사업 전·후의 COD와 Chl-a은 감소경향을 보여 저수지 내부의 오염된 유기 퇴적물 제거 효과가 있는 것으로 해석할 수 있었다. 만수저수지는 2009년에 퇴적물시범사업이 이후 수질추이 분석 결과 사업으로 인한 수질개선효과는

미미한 것으로 나타났다. 기흥저수지는 사업 전·후 수질평가에서 TP를 제외한 COD, Chl-a, TN, SS 농도는 감소하는 것으로 나타났다(경기개발연구원, 2012).

(표 4.3-10) 퇴적물처리시험사업 대상 저수지 사업내용 (단위 : ha, m³)

지역	저수지	준설면적	준설량	준설토 처리공법	준설토 활용	사업연도
경기	만수	3.30	9,800	열반응 안정화 처리공법	토목 재료	2009
	설성	4.00	9,550	응집침전 처리공법	경작지 복토	
	왕송	4.60	11,900	토양개량안정제처리공법	토목 재료	2010
	기흥	4.50	11,700	토양개량안정제처리공법	토목 재료	
충남	성암	3.50	10,400	기계탈수침전 처리공법	경작지 복토	2009
	도고	3.20	9,460	열반응 안정화 처리공법	토목 재료	2010
	순성	-	-	기계탈수침전 처리공법	경작지 복토	
전북	궁산	3.60	11,398	토양개량안정제처리공법	도로 성토제	2009
	석남	4.30	12,064	토양개량안정제처리공법	체체 보강	2010
전남	월진	2.23	9,456	기계탈수침전 처리공법	경작지 복토	2009
	둔진	2.68	9,673	기계탈수침전 처리공법	경작지 복토	
	오동	4.50	10,879	응집침전 처리공법	경작지 복토	2010
	지정	3.00	9,698	기계탈수침전 처리공법	경작지 복토	
경북	가음	4.50	7,131	기계탈수침전 처리공법	경작지 복토	2010
경남	봉산	3.10	12,000	토양개량안정제처리공법	토목 재료	2010
	하빈	3.40	11,500	기계탈수침전 처리공법	호내 매립	

자료) 조영철 외(2010). “녹색성장 기반 조성을 위한 농업용 저수지의 친환경적 퇴적물 처리 사업”, 『전원과 자원』, 52(2), 45-52.



자료) 한국농어촌공사, 2005

<그림 4.3-17> 오니전용 준설선 시험운영 사례(서천 신구저수지)

### 자. 오존 마이크로버블

최근 마이크로버블 기술을 다양한 물리적 장치와 결합하여 하천과 호소 수질을 정화하는 기술 개발이 활발하다. 일반적으로 2.0~3.5 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> (또는 약 200~350 kPa) 압력조건(일반적 DAF 공정에서는 4.0kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> 이상 적용)에서 마이크로버블 발생 장치를 통해 직경 10~30μm 크기의 고농도의 마이크로버블이 생성된다. 생성된 마이크로버블의 내부압력은 표면장력 때문에 외부압력보다 높다. 마이크로버블의 내외 부 압력차는 Young-Laplace 식에 의해 표현 될 수 있다.

$$P = P_1 + 2\sigma/r$$

여기서, P는 마이크로버블의 내부 압력(즉 Gas 압력), P<sub>1</sub>은 외부 물의 압력, σ는 표면장력, r은 버블의 반경이다. 직경이 10μm인 버블의 경우 25℃에서 압력차는 약 30 kPa(대기압의 0.3배) 가량 되며, 직경이 1μm인 경우 300kPa(대기압의 3배)가 된다.

수중에 노출된 마이크로버블은 내부 기체가 주변 물에 의해 용해되면서 점차 크기가 작아지면서 결국 사라지게 된다(Takahashi et al., 2003). 마이크로버블이 수중에서 파괴될 때 라디칼이 형성되어 유기물을 산화시키는 기능이 발휘되는 것으로 보고되고 있다(Takahashi et al. 2007). Takahashi(2007) 등은 외부자극이 없이 생성된 마이크로버블의 파괴와 라디칼 생성과정을 실험을 통해 규명한 바 있다. 실험결과에 의하면, 초음파와 같은 외부 자극에 의해 마이크로버블이 생성되어 물속에서 파괴되는 경우 시간이 매우 짧고(microseconds) 고온·고압의 극한상황이 생성되어 버블이 파괴되는 반면, 외부 자극 에너지원이 없이 생성된 마이크로버블의 파괴는 수십 초에서 수분의 시간이 소요되며 파괴원인도 고온과 같은 극한 상황이 아니라 버블표면에 축적된 이온에 의한 것으로 제시하고 있다.

마이크로버블의 장점은 넓은 비표면적, 늦은 상승 속도, 그리고 라디칼 생성에 의한 산화작용이 있으며, 이는 수처리 공정 측면에서 오염물질의 흡착 및 부상, 산화에 유용하게 활용될 수 있는 특성이다. 반면 마이크로버블을 이용한 수중 DO 공급은 일반적인 공기 방울(mm 크기)보다 비효율적인 것으로 보고되고 있다(Kyotho, 2012). 오염된 물에서 마이크로버블의 내부 기체는 버블의 표면이 오염물질에 의해 덮여 있어 물속으로 용해되기 어렵다.

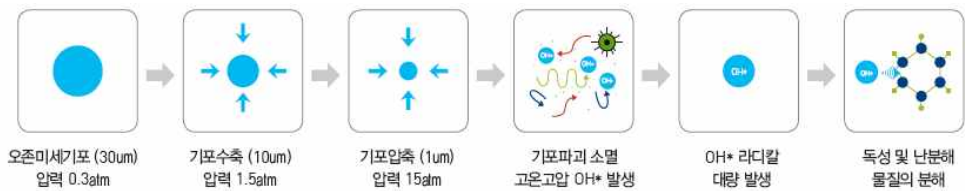


자료) 한국환경공단, 2012

<그림 4.3-18> 마이크로버블의 자기압파 현상

오존마이크로버블(직경 30 $\mu$ m)을 이용한 조류 저감 메커니즘은 오존을 마이크로버블화 하여 수중에 분출시키며, 분출된 버블은 수축 후 서서히 상승(직경 10 $\mu$ m → 상승속도 3mm/min)하면서 소멸과정을 거쳐 수중에 용해된다. 수중에서 소멸과정을 거칠 때 다량의 OH라디칼이 발생되어 조류와 유기물이 사멸 또는 분해되는 원리이다. 또한 오존을 완전하게 산화시키므로 잉여오존에 의한 냄새 발생이 없고 분해 후 산소로 되돌아가 용존산소를 높여 주며 소독, 유기물분해, 투명도 향상 등의 부가적 효과를 얻을 수 있다. <그림 4.3-19>는 오존마이크로버블의 원리를 도식화한 것이고, <그림 4.3-20>은 모 환경업체에서 개발한 오존 마이크로버블 장치의 설비 구성도이다. <그림 4.3-21>은 오존 마이크로버블 장치를 육상과 수상에서 고정식 또는 이동식으로 운영하는 운영방법에 대한 모식도이다.

2011년 4월 20일부터 2011년 7월 30일까지 경기도 의왕시 소재 왕송저수지에 설치되어 운영된 사례가 있으며, Chl-a 농도를 91.9% 저감하는 효과를 나타냈다. (표 4.3-11)은 국내외에서 마이크로 또는 나포기포 발생 관련 기술개발 현황을 정리한 내용이다.



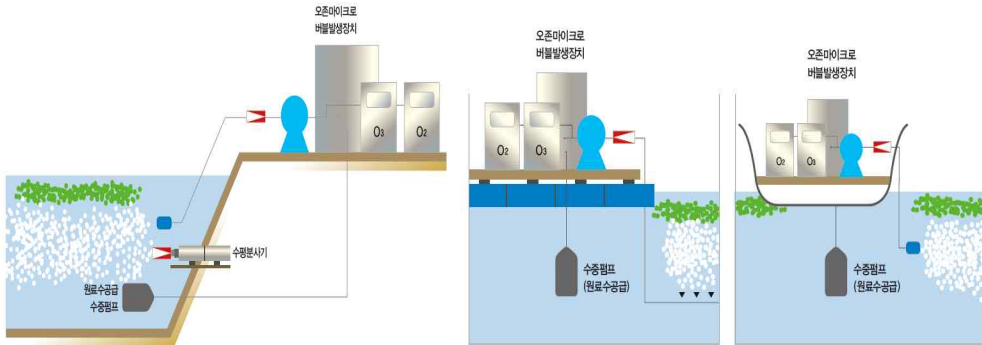
자료) <http://oxeng21.co.kr/>

<그림 4.3-19> 오존마이크로버블의 원리



자료) <http://oxeng21.co.kr/>

<그림 4.3-20> 오존마이크로버블 장치의 설비 구성



자료) <http://oxeng21.co.kr/>

<그림 4.3-21> 고정식 및 이동식 오존마이크로버블 운영 방법

(표 4.3-11) 마이크로/나포기포 발생 관련 기술개발현황

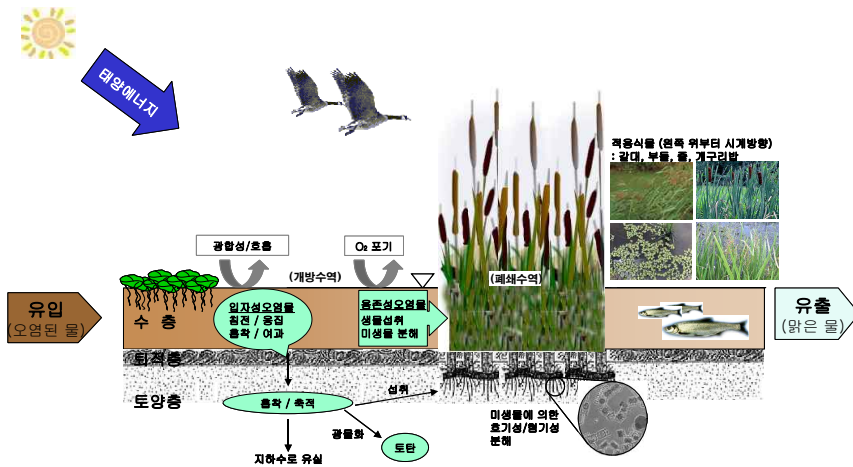
연구수행/ 기술보유 기관	연구개발의 내용
한국기계연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형마이크로버블을 이용한 친환경 기술</li> <li>- 마이크로기포/오존이용 도금폐수처리기술</li> <li>- 오존/마이크로기포를 이용한 의료용 살균시스템 개발</li> <li>- 호소정화장치 개발</li> </ul>
대경이엔비, 서울시립대	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 산소용해수와 미생물제재를 이용한 호소 및 폐쇄구역의 자정력</li> <li>- 복원기술</li> </ul>
네가트론	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유체의 마이크로 버블 산소용해장치 개발 및 응용</li> <li>- 중소형 마이크로 버블 발생기술 보유</li> </ul>
미시간기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 용존오존부상공정 개발</li> <li>- 오존을 마이크로 버블 발생기술에 적용</li> </ul>
경남환경(주)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 구형플라스틱여재와 초미세기포를 이용한 하천수질 정화공정</li> <li>- 유기물산화조와 침전산화조로 된 하천수질 정화공정</li> </ul>
영남대학교	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가축 액상분뇨의 고효율 고액분리기 개발</li> <li>- 마이크로버블과 부직포 여과막 결합공정 개발</li> </ul>
서울대학교	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 맞춤형 초미세 기포 발생장치를 이용한 부상분리 기술 개발</li> <li>- 용존공기부상법 적용을 위한 기포발생장치 개발</li> <li>- 저비용-저에너지 기포발생장치 개발</li> </ul>
한국식품연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 마이크로버블을 이용한 채소류 위해요소제어 연구</li> <li>- 소형 마이크로버블을 이용한 세척기술개발</li> </ul>
(주)씨엔에스,조아스텍, 씨엔아이, 드림	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 상수도 직결용 마이크로버블 샤워기 개발</li> <li>- 소형마이크로버블을 이용한 친환경샤워기</li> </ul>
東京大學大學院	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 마이크로버블을 이용한 빈산소수괴의 해소</li> <li>- 동경만을 중심으로 정체수역에 대한 실험</li> </ul>
熊本大學大學院	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저전력 마이크로버블 발생장치 개발 및 응용</li> <li>- 농업용, 양식장용 저전력 발생장치 개발</li> </ul>
(株)AURA Tech	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1998년부터 개발, 2001년부터 판매 개시</li> <li>- 20<math>\mu</math>m 이상의 기포 발생기술/에어젯트방식이 주요 기술</li> <li>- 호소, 해양, 양식업, 농업분야, 하/폐수 처리장치에 사용</li> </ul>
三洋設備産業(株)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1995년부터 마이크로 기포수 제조시스템 완성, 2001년 실용화 성공, 2004년부터 일본 판매시작</li> <li>- 20<math>\mu</math>m 기포 발생기술/가압용해</li> <li>- 하/폐수 처리 등 수질정화와 미용건강사업 분야</li> </ul>
和泉電氣(株)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1998년부터 GALF 기포수 제조시스템 판매</li> <li>- 20<math>\mu</math>m 기포 발생기술/가압용해 방식, 하/폐수 처리장치에 사용</li> </ul>
(株)富喜製作所	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1993년부터 마이크로 기포수 제조시스템 완성</li> <li>- 2005년 개량형 기포 발생기술/선회방식</li> <li>- 하/폐수 처리장치에 사용</li> </ul>
(株)多自然테크노	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 식량생산개선을 위한 농업분야 와 양식분야에 적용</li> </ul>
東洋電氣(株)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2000년 초에 양식장용으로 개발</li> <li>- 하/폐수 처리장치에 사용</li> </ul>
Aeration Industries international Inc. (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- air-jet 방식의 대용량 산소공급장치.</li> <li>- 대용량의 산소공급가능하며, 기포의 입자크기는 수백 미크론 2mm 정도임.</li> </ul>

자료) 홍원석 등(2010), 미세기포를 이용한 수질개선대책

### 차. 인공습지

인공습지는 갈대 등의 수생식물이 성장하도록 인공적으로 습지를 조성하여 오염된 하천수나 호소수를 인공습지의 지표면을 통해 흘려보냄으로서 식물에 의한 흡수, 미생물에 의한 분해·흡수, 식생대에 의한 접촉·침전·여과 등의 자연정화기능을 이용한 수질개선공법이다. 생활하수, 축산폐수 등과 같은 고농도 하·폐수에서 농촌비점오염물질이 함유된 저농도 오수에 이르기까지 적용범위가 넓으며, 질소와 인에 대한 수처리 효율이 매우 높다. <그림 4.3-22>는 지표흐름 인공습지의 정화원리 모식도이다.

국내에서 인공습지의 적용 및 사업화 실적은 많다. 한국농어촌공사에서는 1997년 마산저수지 수질개선시험사업을 시작으로 하여 농업용수 수질개선사업에 반영하여 감둔저수지, 설성저수지, 왕송저수지 등 많은 저수지 유입부에 설치하여 현재 운영 중에 있다. (표 4.3-13)은 농업용수 수질개선사업에 반영되어 설치된 인공습지, 인공식물섬, 수초저류지의 적용사례이다.



<그림 4.3-22> 지표흐름 인공습지 정화원리 모식도

(표 4.3-12) 인공습지의 환경·생태적 기능

구분	기능
수질정화 기능	습지 고유기능에 의한 오염물질의 제거
수문학적 기능	홍수통제, 지하수함양, 농·공업용수 공급
생태적 기능	야생동물의 섭식, 서식처, 곤충, 어류, 조류의 산란장, 수초, 저서 생물 서식, 산란장, 생물종다양성의 보고, 생태계의 연결고리
문화적 기능	지역환경에 따른 특징적 문화, 자연교육, 관광기능
경제적 기능	어패류의 산란장, 먹이공급처, 해·수산물 양식
기후조절 기능	국기적 대기 온·습도 조절



(표 4.3-13) 농업용 저수지에 설치된 인공습지, 인공식물섬, 수초저류지 사례

적용지구	조성면적(m <sup>2</sup> )		
	인공습지	인공식물섬	수초저류지
설성저수지	21,899 (4개소)	11,000 (3개소)	-
홍동저수지	53,043 (3개소)	400 (1개소)	2,826 (1개소)
성암저수지	39,274 (3개소)	1,000 (2개소)	-
신희저수지	29,212 (2개소)	1,808 (2개소)	-
상성저수지	24,789 (2개소)	1,388 (2개소)	-
승언2저수지	14,688 (3개소)	-	-
궁산저수지	74,115 (2개소)	981.3 (2개소)	-
감돈저수지	44,643 (2개소)	-	-
월천저수지	23,777 (1개소)	500 (1개소)	-
둔전저수지	19,473 (2개소)	500 (1개소)	-
도덕저수지	-	181 (1개소)	-
개천저수지	36,652 (2개소)	500 (1개소)	-
대승저수지	47,103 (2개소)	500 (1개소)	-
가산저수지	20,193 (2개소)	500 (2개소)	-

자료) 한국농어촌공사 내부자료



<그림 4.3-23> 지표흐름 인공습지 설치 사례(전남 감돈저수지)



카. 조류 제어용 미생물제제 살포

환경벤처기업인 A업체에서 개발한 천연수질개선제인 워터헬스의 조류 제어 원리는 식물질 성분인 ‘탄닌’성분이 조류를 살조하며 발생하는 다량의 미세기포를 이용한다. 응집력있는 제오라이트 등 광물질이 수중 및 바닥층의 유기슬러지를 응집하고, 미세기포의 부력에 의하여 수표면으로 부상되는 원리이다. 2012년 3월 21일~2012년 3월 30일까지 9일간 서울시 종로구 경희루지에 적용 하였으며, 단기간에 SS, T-N, T-P, Chl-a 등의 농도를 67.5~94.2% 저감하는 효과를 보였다. 2012년 8월에는 대청댐 유역 소옥천에서 시범 적용한 사례가 있으며, 경기도 기흥저수지 녹조긴급방제공사, 경북 영천 소재 도유지, 충남 홍성 소재 벽정지 등에 적용된 사례가 있다.

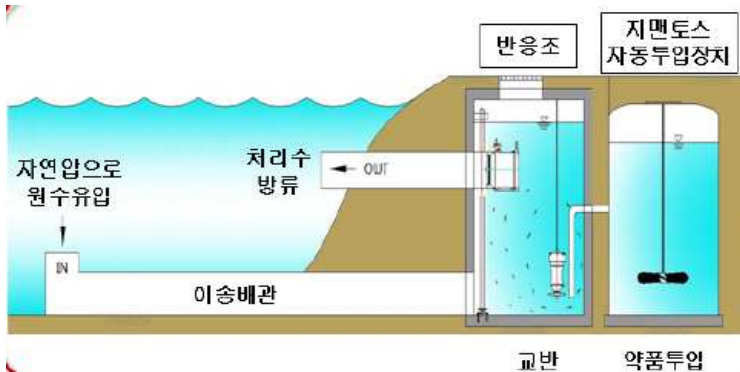


자료) <http://www.mcek.co.kr/>

<그림 4.3-24> 천연수질개선제(워터헬스)의 구성성분

환경업체 B업체에서 개발한 지멘토스 고속처리시스템은 천연광물질을 주원료로 한 천연수처리제(지멘토스)를 오염원과 빠르게 교반 및 흡착, 응집 및 침전, 침전슬러지의 자연분해 과정으로 이루어진다. 지멘토스는 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>4</sub> 등의 조합 광물로서, 각각의 광물에 결합된 산소가 해리되며, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 등의 양이온이 질소, 인등의 영양염류와 화학적 결합을 한다. 결합된 물질은 높은 비중으로 인해 중력 침강되어 빠르게 고액 분리하는 원리이다. 2012년 5월 2일~2012년 5월 8일까지 총 7일동안 충남 서산시소재 호수에 적용되어 처리성능을

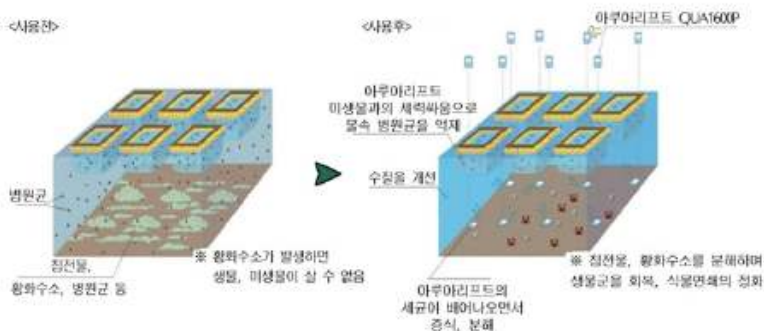
검토하였으며, BOD, T-N, T-P, Chl-a 농도를 각각 91.6%, 69.5%, 95.9%, 97.8%를 개선한 사례가 있다.



자료) <http://www.gcmkorea.com/>

<그림 4.3-25> 천연수처리제 지멘토스

아쿠아 리프트 조류제어기술은 박테리아를 이용한 기술이며, 박테리아가 폐수 및 수중의 유기물을 먹이로 급속하게 증식 확산, 물밑의 미생물 환경을 개선하여 먹이사슬을 촉진시키는 원리이다. 아쿠아리프트 미생물은 용존산소의 유무에 관계없이 증식속도가 빠르며, pH 조건이나 염분농도에 영향을 받지 않는 특성을 가지고 있다. 수중의 아쿠아리프트 박테리아는 물의 흐름을 따라 수체 전체에 확산되며, 저니층의 진흙과 모래에 정착하여 수중에 증식하고 분해활동을 통해 수역전체의 수질을 개선한다. 2011년 3월 2일부터 2012년 4월 30일까지 강원도 홍천 소재 H컨트리클럽 연못에 적용하였으며, BOD, T-P, Chl-a의 농도를 각각 68.9%, 85.9% 18.3% 개선한 사례가 있다.



<그림 4.3-26> 아쿠아리프트 조류제거기술 모식도

## 2. 국외 수질개선기술 개발 및 적용사례

### 1) 물리적 제어기술

#### 가. 수류차단막 기술

일본 큐슈에 위치한 Terauchi 댐은 수자원개발공단이 치수 및 이수의 목적으로 건설한 다목적 댐으로 저수지 길이 2.5km, 폭 400m, 총 저수용량이 1,800만<sup>m</sup>인 비교적 소규모의 중앙 코어형 Rock Fill댐으로 1978년에 완공되었다. Terauchi 댐으로 유입되는 강은 3개로 Sata 강은 저수지의 상류, Teishakuji 강과 Small 강은 중간부분에서 저수지로 유입된다. 특히, 유역 내에 농지, 목장 등이 많기 때문에 다량의 영양염류가 유입되고, Small 강이 다른 두 강에 비해 영양염류의 농도가 월등히 높지만 유량이 작다. 이는 대청호로 유입하는 소옥천과 유사한 환경에 해당한다. Terauchi 댐은 운영 직후부터 Phormidium의 이상발생에 수반하는 곰팡이 냄새 장애와 1991년부터 Microcystis에 의한 수화현상이 발생하고 있어 조류의 급성장으로 인해 여름철 심각한 수질 문제가 나타났다. 조류의 과다성장은 녹조현상과 투명도 감소 및 산소 결핍 등의 원인이 된다. 이러한 조류의 과다성장을 제어하기 위하여 다량의 영양염류를 포함한 유입수가 저수지 표층수 아래로 유입되면서 저수지 내부에 영양염류의 공급을 차단하고자 하였다. 이를 위해 저수지를 가로질러 2개의 불투과성 수직차단막을 설치하여 제어한 바 있다.

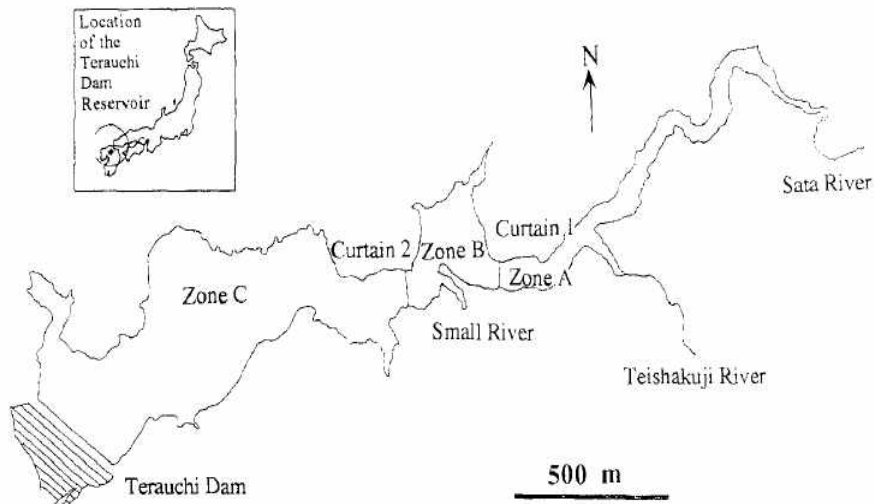
차단막은 수표면 아래 5m 깊이 정도에 지속적으로 떠 있는 형태로 설치되었고, 강물이 저수지로 유입되는 앞쪽에 설치되었다. 표층수의 식물성 플랑크톤에 영양분이 공급되는 것을 최소화하기 위해 차단막이 5m 깊이 정도로 부상하도록 설치하였다. 상류 지역에 설치된 차단막은 Sata 강과 Teishakuji 강의 유입수를 제어하기 위해 설치되었고, 하류쪽의 차단막은 Small 강을 제어하기 위하여 설치되었다.

조류 제어 차단막 설치 효과를 검토하기 위하여 매주 Zone A, B, C의 각각 0.5, 2, 4, 6m 깊이에서 수온, DO, pH, 전기전도도, 탁도, SS, BOD, COD, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, T-P, PO<sub>4</sub>-P 및 Chl-a를 분석하였다. Terauchi 저수지에서 3월에 식물성 플랑크톤의 우점종이었던 Melosira가 4월이 시작되면서 Synedra로 대체 되었고, 다시 4월말에는 Synedra가 Phormidium과

Cyclotella로 대체되었다. 4월 Zone A, B, C에서 Chl-a의 농도 차는 거의 없었고, 봄이 되면서 Zone A의 표층에서 Chl-a 농도가 증가하였다. 이는 유입수로부터 높은 영양염류가 이 시기에 표층으로 공급되었기 때문이다. 초봄부터 4월 중순까지 저수지 물보다 유입수의 밀도가 작아 상층밀도류(Overflow) 형태로 저수지 표층으로 유입된다. 따라서 차단막의 존재는 Zone C로 직접적으로 유입되는 고농도 영양염류를 포함하고 있는 하천 유입수를 제어하는 기능이 있다. 그리고 이 기간 동안에는 차단막 상류에서 조류 농도가 더 높으며, 이것은 많은 양의 유입 영양염류를 소모하여 하류로 유입되는 양을 줄여준다. 아울러 이 기간 동안에는 Zone A에서는 표층이 수온이 균일한데, 이것은 새로 유입되는 하천수를 대체하기 위해 표층의 물이 차단막 아래로 서서히 침강하는 것을 시사한다. Zone A에서 식물성 플랑크톤이 광합성 가능한 유광층의 깊이는 4m 정도이므로, 4m 아래 수층에서는 수류가 커튼을 지나 Zone B로 유입될 때까지 조류성장이 줄어들게 된다. Zone B로 유입한 수류는 다시 상승하는 과정에서 차가운 물과 혼합되면서 밀도가 증가하여 수심 2m 깊이에서 관입하게 된다. 이 과정을 반복하면서 하천수는 차가운 물과 혼합되어 밀도가 증가하게 되고 영양염류 농도가 높은 밀도류의 관입 깊이를 증가시키는 결과를 가져온다. 결과적으로 Zone A에서 표층으로 유입하던 영양염류는 Zone C에서 수심 2m 깊이 이상으로 유입되어 최고 PO<sub>4</sub>-P 농도 발생 수심을 증가시켰다.

늦봄과 초여름에는 저수지 표층수의 온도 상승으로 인해 유입수가 기존 저수지 표층수보다 밀도가 커 표층수 아래로 침강한다. 침강한 하천수는 따뜻한 주변 저수지 물과 혼합하며 밀도가 감소하며, 동일한 밀도층을 만나면 호수역으로 중층밀도류를 형성하며 이동한다. 이때 차단막은 상류 부에서 유입한 영양염류가 하류 저수역으로 확산되는 것을 줄여주는 역할을 하며, 중층 취수시설과 연계할 경우 중층밀도류를 유광층과 수직 혼합시키지 않고 안정하게 댐 하류로 바이패스 시키는 효과를 줄 수 있다.

결과적으로 차단막 공법은 폭이 좁아 길게 늘어진 모양의 저수지나 호수에서 최적으로 사용될 수 있고, 기존의 다른 조류제어 방법보다 신뢰도가 높았다. 또한 차단막 설치가 간단하고, 그 비용이 적게 드는 것을 알 수 있었다. 실 예로 Terauchi 댐 저수지의 차단막 설치비용은 수중 폭기 장치 설치비용의 75% 정도였으며 전력비용이 불필요하다.



<그림 4.3-27> 일본 Terauchi 저수지 차단막 설치도(Asaeda et al. 1996)

#### 나. 수위저하

호수를 채우고 있는 물을 호수 바닥면이 드러날 정도로 방출시키는 방법으로 바닥에 쌓인 저질층이 단단해져 영양물질이 호수로 유입되는 것을 저감시킬 수 있으며, 바닥수에 갇힌 외래어종 및 불필요한 수생식물도 제거할 수 있다. 호소수의 방류는 적절한 시기를 선택하는 것이 가장 중요하며 방류기간 동안 지류의 유입량을 낮게 유지하는 것이 필요하며, Vancouver Lake의 경우, 지류의 유입 및 조수의 유입을 차단한 후 방류하였다.

Long Lake(Washington, 미국)의 경우, 여름철 macrophyte를 감소시키고 저질층을 단단하게 만들기 위한 목적으로 이 방법을 적용하였다. 그 결과 호수에 다시 물을 채운 후에도 바닥물질이 다시 부유되지 않는 효과가 있다는 것을 확인하였으며, drawdown 기간 동안 대형수생식물군들을 제거하였다(Jacoby et al., 1982). Big Muskego Lake(Wisconsin, 미국)의 경우 일 년 반 동안 전체 호수 용량의 50% 정도로 수심을 유지하였고, 이때 저질층은 단단해진 것을 확인하였으며, 잉어과 같은 외래어종을 제거하고 수생식물을 재정비하였다. 이로 인해 drawdown 전과 비교하여 수질 및 호소의 영양상태가 70~80% 개선되었으며 그 정화효과가 약 7년 이상 지속되었으므로 추후에도 계속 drawdown을 주기적으로 시행할 것을 권고하였다(Helsel et al., 2003).

#### 다. 퇴적물 준설

호수의 저질층을 제거하는 것은 영양성분이 축적된 퇴적물을 제거하는 동시에 호수의 수심을 증가시키는 효과가 있으며, 호수내 물질 순환을 증가시키는 효과를 기대할 수 있다. 그러나 퇴적물을 준설하는 동안 퇴적물로부터 영양분이 방출되는 부작용이 있다. 준설은 준설토의 처리 비용 때문에 호수 정화 방법 중 고비용을 요하는 사업 중의 하나이므로, 호소수를 방류한 다음 준설하는 것이 영양분 방출 및 준설 비용을 감소시키는데 효과적이다. 또한 준설토는 호소의 형태를 변경시키는데 사용할 수 있다.

Lake Trummen(Sweden)의 경우 다년간 생활 하/폐수 및 직물폐수가 유입되어 조류 대발생 및 겨울철 어류의 폐사가 흔히 발생하였으므로, 폐수 유입량을 조절하여 호수 내로 유입되는 영양 염류량을 조절하려 시도하였지만, 호소 내에서 영양염류들의 순환이 활발하여 효과를 거두지 못하였다. 이에, 초기 약 2년간 영양성분이 많이 몰려있는 퇴적물의 표층(약1m 깊이)을 긁어내는 작업(sediment-skimming treatment)을 하였으며, 이후 수년간 퇴적층을 해엄치면서 퇴적층에 쌓여있던 인 성분을 호소 내로 방출시키는 것으로 알려진 잉어 등의 어류를 제거하는 추가적인 제어 방법을 병행하였다. 저질표층의 제거 결과 퇴적층의 인농도는 0.78mg/kg에서 0.03mg/kg으로 감소되었으며, 호소 내의 인농도 또한 90% 이상 감소되었고, 호소수의 투명도(clarity)는 향상되고 남조세균의 농도가 감소되었다. 이는 퇴적물의 제거를 통하여 조류 대발생 문제를 해결한 성공적인 사례로 알려지고 있다 (Cooke et al., 2005).

#### 라. 희석 및 플러싱

희석은 영양물질의 농도가 낮은 생활용수를 호수에 펌프나 배관을 통하여 인위적으로 공급하여 호수 내의 질소나 인의 농도를 감소시켜 녹조 발생을 예방하는 방법이다. 호수 내의 N, P의 농도나 호수로 유입되는 유입수의 N, P 농도에 비해 희석수에서의 N, P 농도가 훨씬 적은 경우에는 적은 양의 물로도 효과적으로 조류를 제어할 수 있으며, 많은 양의 희석수를 공급한다면, 물로 인해 조류 세포가 쓸려가는 방출효과, 즉 flushing 목적으로 조류발생을 제어할 수 있다. Flushing water의 유입율을 조류세포의 재증식 속도보다 빠르게 한다면 새로운 조류세포의 증식을 억제할 수 있다 (Cooke et al., 1993).

Green Lake(Seattle, WA, 미국)는 1962년부터 1970년대 중반까지 영양물질 농도가 낮은 생활용수를 희석수로 사용하여, 호수 내의 물의 체류시간은 14개월에서 3개월로 단축시켰다. 이 결과 질산염의 농도는 감소되었으나 인의 농도 감소는 미미하였다. 또한 희석수의 양이 줄어들었을 때 Green Lake의 수질은 다시 악화되었다. 이후 alum을 주입하였을 때 인 농도가 급격하게 감소됨으로써 남조세균의 증식이 억제되는 효과가 있었다.

Vancouver Lake(캐나다)에서는 1983년에 호수의 유입수를 증가시키고 이를 통해 수질 개선을 하기 위해 flushing channel을 설치하였으나, 호수 유입수가 2% 증가하는 효과를 보였으나, 수질의 부영양상태 및 녹조 발생에는 실효를 거두지 못하였다.

Moses Lake(WA, 미국)는 1977년과 1978년에 각각 3회와 1회에 걸쳐 인근의 Columbia 강의 물을 호수로 유입시켰다. 이 결과 1969~1970년과 비교하여 클로로필 a의 농도가 60~80% 감소하였으며, 총인의 농도도 약 50~60% 정도 감소하여, 호소 희석법의 성공 사례로 꼽힌다.

#### 마. 인공강제순환

인위적인 방법으로 호소수를 순환시키는 것은 호소수의 수질을 향상시키기 위해 가장 흔히 사용하는 방법 중 하나이다. 남조세균은 기낭을 가지고 있어 다른 유형의 식물성 플랑크톤에 비해 더 오래 부유 상태를 유지하거나, 영양분이 많은 호수의 표면에 표류하며 scum을 형성하게 되는데, 정체된 호수의 물을 인위적으로 순환시키면 이들을 저층으로 이동시킬 수 있다. 또한 호소수 순환을 통하여 수체 중 용존산소량을 증가시켜 퇴적층으로부터 인의 용출을 감소시킴으로서 조류 발생 및 성장을 감소시킬 수 있다. 폭기는 수중의 용존 이산화탄소의 농도를 증가시킬 수 있으며, 이를 통해 물의 pH가 낮아져 남조세균의 번식을 감소시키고 동물성 플랑크톤의 성장을 촉진시킬 수 있다. 폭기는 주로 크고 얇은 호수에 적용되었다. Waco Lake(Texas, 미국, 평균깊이 3.2m), Clear Lake(California, 미국; 평균 깊이 3.1m)에서 적용되었고, 그 결과 식물성플랑크톤 군에서 차지하는 남조세균의 비율은 감소되었으나, 총 남조세균이나 식물성플랑크톤의 생물량은 변화가 없었다(Cooke et al., 2005).

수중폭기장치와 비슷한 원리인 태양광물순환장치(SolarBee)의 경우, 미국의 Blue Lake(Oregon)와 St. Albans bay(Vermont)에 2007년과 2009년에

각각 설치되었다. Blue Lake의 경우, 설치 전에 비해 호소수의 투명도가 증가하였으나, 조류의 생물량 감소에는 큰 효과를 보이지 않았으며, 가을철 전도 발생시 퇴적층으로부터 인의 배출을 촉진시킬 수 있는 부작용이 있다고 보고되었다. St. Albans bay의 경우에도 SolarBee 장비가 설치되지 않은 지역에 비해 투명도에 큰 향상은 없는 것으로 보고되었다.

#### 바. 초음파 발생장치

세포기능 및 조직을 파괴하는 초음파를 발생시켜 조류를 죽이거나 남조 세균의 기낭을 파괴하여 조류농도를 저감시키는 기법이다. 이를 적용할 경우, 초음파에 의해 제거된 조류가 호소 내에 그대로 남아있어 사멸된 조류로부터 조류독소가 배출되어 나오거나, 사멸되어 남은 조류로 인하여 호소 내가 무산소 상태가 될 수 있다. 또한 초음파로 인하여 호소 내에 있는 어류, 식물 등의 기타 생물군에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. Klamath Lake(Oregon, 미국), Vancouver Lake(캐나다) 외 다수의 호수에 적용되었고, 보통 9월~11월에 걸쳐 조류를 수확한 다음 건조시켜 제거하였다. 2003년부터 미국 Massachusetts주에 위치한 SonicSolutions 회사는 골프장 연못, 호소 및 저수지 등을 대상으로 초음파를 이용한 녹조제어 기술을 사업화하고 있다.

## 2) 화학적 제어기술

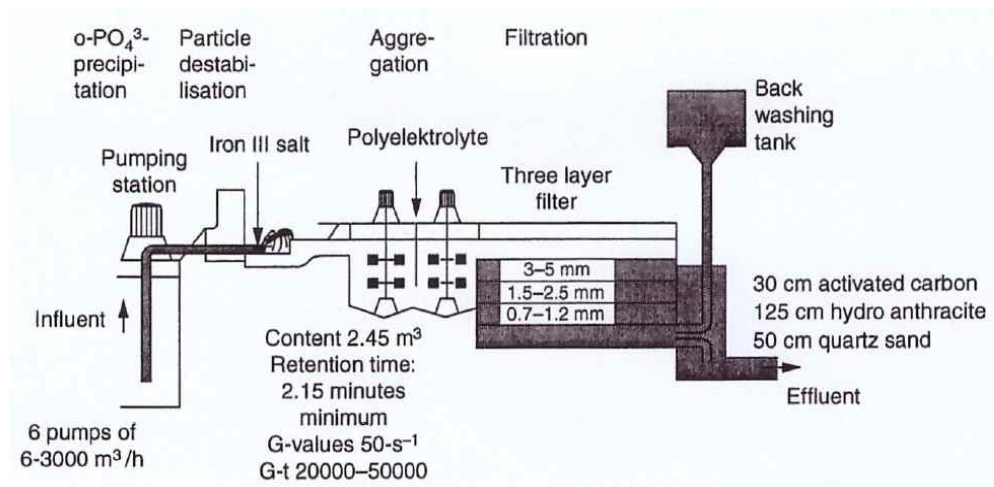
### 가. 독일 Wahnbach 저수지 인제거장치(PEP)

Bernhardt(1980)은 독일의 Bonn의 용수공급원인 Wahnbach 저수지의 수질개선을 위해 인 제거 시스템인 PEP(Phosphorus Elimination Plant)를 개발하여 적용하였다. 수처리를 위한 저류지로 500,000m<sup>3</sup> 규모의 전 댐(Pre-reservoir)이 이용되었고, 하천수는 PEP로 유입된 후 pH 6.0-7.0 범위에서 철을 4-10 mg-Fe/L로 투입하고 양이온성 고분자 전해질로 처리 한 후 활성탄, 안트라사이트, 모래로 구성된 여재를 통과하도록 설계되었다.

Wahnbach PEP는 하천 평균 유량의 5배에 달하는 최대 5m<sup>3</sup>/s(432,000 m<sup>3</sup>/일)의 처리용량을 갖도록 건설되었으며, Wahnbach 저수지로 배출되는 인 농도는 5µg-P/L이다. Wahnbach 저수지는 내부 인 부하가 적어 PEP 설치 후 녹조현상과 용존유기물(DOM)의 농도가 급격히 낮아졌다. 그 이후



최소 3개의 독일 저수지들에 PEP가 설치되었으며, 이들 저수지는 규모 면에서 Wahnbach 저수지보다 작지만 모두 좋은 효과를 거두었다(Cooke et al., 2005). 10만명의 베를린 주민들에게 용수를 공급하는 Tegel 호소에도 3m<sup>3</sup>/s(259,200m<sup>3</sup>/일)의 처리용량 PEP가 설치되었으며, Tegel 호소의 TP 농도를 750µg-P/L에서 60µg-P/L로 낮추었다. 총 공사비는 US\$ 333백만 (2002년 기준, 한화 약 3600억)이었으며, 유지관리비는 공사비의 약 10% 정도 소요된다.



<그림 4.3-28> 독일 Wahnbach 저수지의 수질개선을 위해 인 제거 시스템 PEP(Phosphorus Elimination Plant)

#### 나. 살조제

과탄산소다(sodium carbonate peroxyhydrate), endothall-amine salts products, diquat, 황산동 등과 같은 화학 약품을 사용하여 조류를 제거하는 방법이다. 조류 문제가 매우 심각한 호수에 적용될 경우 사멸된 조류가 수체 내 용존산소를 고갈시켜 무산소 상태를 만듦으로서 다른 생물체에 영향을 미칠 수 있다. 또한 사멸된 조류로부터 조류독소가 방출될 수 있는 2차적인 문제도 고려되어야 한다. 따라서 조류제거제의 적용은 조류 발생의 초기단계에 적용하는 것이 진행 억제 및 부차적인 문제의 발생을 최소화 하는데 효율적이다. 현재 사용되는 살조제는 남조세균에만 특이적으로 작용하는 것이 아니며, 적용 농도에 따라 조류 이외의 다른 생물체에도 독성을 나타내므로 사용 시 주의를 요한다.

Endothall-amine salt products의 경우 반감기가 7일로 짧기 때문에 호소 퇴적물에 축적되지 않으므로 Washington 주(미국)에서는 이의 사용을 허용하고 있으며, 과탄산소다(sodium carbonate peroxyhydrate)의 경우에는 부산물인 과산화수소(hydrogen peroxide)가 빠르게 분해되므로 장기적으로는 문제가 되지 않으나, 처리 당시 식물 및 곤충에 해를 미칠 수 있으므로 주의하여야 한다.

Algaestat는 조류의 성장을 억제하는 화학물질을 사용하는 것으로, 살조제를 사용할 때 보다 사멸된 남조세균이 부패하면서 소모시키는 산소의 양이 적다는 장점이 있다. 이는 이미 존재하고 있는 조류를 제거하지는 않지만 새로운 조류 세포의 생성은 저해하여 노화된 조류세포가 자연적으로 사멸하는 동안 새로운 조류세포의 성장을 저해하여 조류를 조절하게 된다. Algaestat의 대표적인 예로 보리짚(barley straw)이 있는데, 이는 물에서 부패하면서 독성을 띠는 물질을 방출하는 것으로 알려져 조류제어의 새로운 방법으로 주목받고 있다. 보리짚을 사용할 경우에는 되도록 건조된 것을 사용하여야 하며 수분이 남아 있는 반건초나 생초는 효과가 없는 것으로 보고되고 있다. Klamath Lake (Oregon, 미국)에 건조된 보리짚(dried barley straw)이나 건조된 습지식물(dried wetland plant)을 적용한 결과, 두 종류 모두 조류를 사멸시키거나 성장을 저해시키는 것으로 밝혀졌다.

#### 다. 인 불활성화

인 불활성화 방법은 alum, iron hydroxide, calcium hydroxide 등을 호소 내에 첨가하여 조류의 증식에 성장 제한 인자인 인 성분을 제거함으로써 조류의 증식을 억제하는 방법으로, 호소 바닥 퇴적층이 인성분의 주요 공급원일 때 효과가 있다. alum 처리시 고려할 사항은 뿌리 수생식물이 많으면 alum이 호수의 밑바닥에 침착되지 않으므로 봄에 처리하여야 한다는 것이다. 또한 alum 처리는 호수의 pH에 미치는 영향이 크므로 완충능력이 큰 호수에 적용할 때는 효율적이나 완충능력이 없으면 alum 첨가로 인하여 호소수의 pH가 낮아지면서 알루미늄의 농도가 증가하여 알루미늄 독성이 일어날 수 있다. 따라서 경도가 낮은 호수의 경우 황산알루미늄보다는 sodium aluminate의 염의 형태로 첨가하는 것이 효과적일 수 있다.

미국의 Green Lake(Seattle)에서 1차 호소 정화계획에 따라 1991년에 alum을 처리하였을 때 3년간 조류 발생 억제 효과가 있었으며, 호소수의

투명도가 증가하였다. 또한 2차 호소 정화 계획에 따라 2004년 3월에 다시 alum을 적용하였다. Green Lake에 처리된 총 alum의 양은 23mg Al/L이었다. 이후 현재까지 효과가 지속되고 있으며(10년 이상의 효과가 있을 것으로 예상), 2차 호소 정화 계획의 최종 보고서는 호수의 수질을 유지하기 위해 5~8년마다 alum 처리를 권고하고 있다. 미국 Wisconsin의 Mirror Lake, Shadow Lake, Eau Galle pond에서도 alum 처리 후 수년간 수질이 개선되는 효과가 있었다. Mirror Lake에서는 alum 처리 전 호수 내 인 농도가 0.04mg-P/L이었으나 처리 후 10년간 0.01mg-P/L를 유지하였다. Eau Galle pond의 경우에는 매년 외부로부터 유입되는 인의 부하가 크기 때문에 호소의 수질 개선에 크게 효과적이지 않았다. 캐나다의 Frisken Lake(British Columbia)에서는 1983년에 calcium hydroxide를 적용하였으나, 호소 내 수온이 상승하는 여름에 다시 호소수에 용존되면서 효과가 일시적이었다. 따라서 이 호수에서는 장기간 적용이 비효율적인 것으로 결론이 내려졌다. Vadnais Lake(Minnesota, 미국)의 경우 폭기시설과 함께 염화철(iron chloride)을 주입하였을 때는 단기간 개선 효과는 있었으나 장기적으로는 조류 억제에 비효율적이었으며, 그 외의 다른 호수에서의 적용사례도 비슷한 결과가 도출되었다.

#### 라. 퇴적물 피복(캡핑)

유기물이나 영양염류의 용출부하가 큰 퇴적물층을 화학적으로 안정된 물질로 피복함으로써 퇴적물로부터 오염물질의 재용출을 억제하여 호소의 수질개선을 도모하는 방법이다. 피복재로 모래, 토양, 점토, 암석, 토목섬유, 플라이애쉬(fly ash), 제강슬래그 등이 있다. 피복두께는 여러 가지 환경인자(오염물질, 오염정도, 물리적 환경 등)에 따라 달라질 수 있으나, 플라이애쉬의 경우는 2~5cm 정도가 제시되고 있으며, 기타 재료에 대해서는 구체적인 기준은 없으나 30~150cm로 다양하게 적용되고 있다.

일본 고지마 담수호에서는 호소 바닥을 준설 후 모래로 피복하였으며, Charles East호(미국 인디애나주)는 표면적 8.6ha, 평균수심 2.0m의 부영양화호로서 1975년 여름에 퇴적물 위에 1,430톤의 플라이애쉬와 275톤의 석회를 피복하였다. 플라이애쉬의 살포량은 실험에 의해서는 플라이애쉬층의 두께가 2cm 이상이 되면 인 용출억제에 효과가 있는 것으로 나타났으나, 두께가 5cm 이하인 경우에는 퇴적물 내에 발달된 기포에 의해

피복부분이 파괴될 우려가 있어 피복두께를 5cm로 적용해야 한다. 퇴적물 피복시 정화효과를 정량적으로 파악하기는 어려우나, 제강슬래그 피복시 물리적 용출억제 효과 50%, 흡착·침전 효과 40%, 화학적 반응효과 10% 정도로 보고되고 있다.

기타 피복 적용사례로는 스톤호(미국 미시간주)에서 플라이애쉬를 사용한 사례가 있고, 히로시마만(일본)에서는 모래 및 마사토를 이용한 피복 등의 적용사례가 있다. 그러나 피복 재료에 유해물질이 혼합되어 있는 경우에는 수생태계에 문제가 될 수 있으므로 주의를 요해야 한다.

### 3) 생물학적 제어기술

#### 가. 천적생물 이용

호소에는 녹조의 원인생물인 조류종의 자연적인 포식자가 공존하고 있으므로, 이들을 선택적으로 증가시키면 녹조의 초기 성장을 억제할 수 있다. 천적 생물의 이용법은 이러한 조류의 먹이연쇄와 경쟁 특성을 이용해 조류를 제어하는 방법이다. 조절 방법은 1) 먹이 사슬을 교란시키는 종을 인위적으로 투입하거나 제거하여 주는 방법(Nam et al. 2011; Hwang et al. 2004), 2) 퇴적층에서 부유물질이나 영양염류의 방출을 일으키는 종을 제거하는 것, 3) 남조세균 바이러스(cyanophage)를 주입하는 것 등이 있다.

Curlew Lake, Merwin Reservoir 등(Washington, 미국)에 Tiger muskies (이빨이 달린 대형 어류종의 하나로 물고기를 포식하는 최종 포식자)를 방류하여 먹이그물을 교란시켜 조류제거에 효과를 본 경우가 있다. Big headed carp(잉어류)를 식물성 플랑크톤 및 연쇄성 남조세균(filamentous cyanobacteria)의 제어에 사용된 사례도 있다. 또한 Mosquito fish(Gambusia)를 제거할 경우 조류를 먹는 동물성 플랑크톤(예, Daphnia)의 양이 증가하여 조류 제어에 효과가 있다는 연구 결과도 있다.

#### 나. 살조생물 이용

생물을 이용한 방법으로는 어류조절을 통한 조류제어(독일, 캐나다, 미국, 네덜란드)와 수생식물의 제거를 통한 유기물오염원 제어(미국, 스웨덴, 네덜란드)가 시행된 사례가 많으며, 최근에 들어와 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 자연시스템의

일부를 직접 이용한다는 측면에서 기대효과가 매우 크다. 특히, Milligan and Cosper (1994)는 연안의 “brown tide” 유발 조류로 알려진 *Aureococcus anophagefferens*에 특이적으로 반응하는 바이러스를 분리함으로써 생물 살조제(bioalgicide)를 이용한 생물학적 조류제어의 가능성을 보였다. 국내에서 개발된 남조류 제어를 위한 생물제재(Kim et al. 2004; Kim et al. 2005; Kim et al. 2007) 등이 있다.

#### 다. 미생물 생장 조절물질 이용

박테리아의 군집연구로부터 시작되어 최근 미생물 생태학 분야에서 주목되고 있는 quorum sensing(QS, 정족수 인식현상)은 세포의 개체수를 인식하여 일정수준 이상이 되면 inducer(유도물질)를 세포외부로 방출하여 세포의 특정 유전자 발현을 촉진하여 세포증식을 유도하는 현상으로, 자연계에서 생물막(biofilm), 녹조(cyanobacterial bloom) 등에서 볼 수 있다(Bachofen and Schenk 1998). QS에 의한 생물의 대량 증식에 대하여 주로 단세포성의 세균을 대상으로 많이 연구되고 있으나, 호소 부영양화에 관련되어 남세균의 대량발생 기작에 대한 QS계 연구 등 분자생물학적 연구는 극소수 그룹에 의해 수행되고 있다. 현재까지 남세균 및 조류의 quorum sensing계에 대한 연구는 몇 건의 연구 결과(*Chlamydomonas reinhardtii* & *Gloeotheca* PCC 6909) 이외에는 극히 미흡한 실정이다. 따라서 수중 생태계에서 biofilm의 형성, 녹조발생 등 미생물의 집단적 증식을 효율적으로 억제하기 위해서는 생물상호간 신호전달 체계를 규명하고, 분자수준에서 QS의 활동 방해, QS의 저해 인자 투여 등 유전체학과 생태학의 복합체라 할 수 있는 ecogenomics(생태유전체학)에 기초한 새로운 개념의 생태계 복원기술개발이 필요하다.

#### 라. 생분해성 제재

녹조발생 억제 물질로 알려진 lysine은  $50\mu\text{gL}^{-1}$  농도로 처리할 경우 효과가 있다고 보고되었으나(Takamura et al. 2004), 분자수준에서 작용하는 QS 저해인자(inhibitor)는 약  $10\text{ngL}^{-1}$ 의 극히 낮은 농도에서도 효과를 나타낸다.

#### 마. 식물이용

식물(예: 미나리, 개구리밥, 부레옥잠, 줄, 부들, 갈대 등)을 이용하여 수질을 개선하는 연구가 상당히 많이 진행되었으며, 이를 적용한 중소 규모의 사례도 호주, 유럽, 미국, 캐나다 등 여러 국가에서 찾아볼 수 있다. 호소 내 인공식물섬이 국내에 적용된 사례는 다수 있으며, 농업용 저수지에서도 적용한 사례가 많다. 인공식물섬은 수질개선효과 이외에 경관향상, 호소 내 생물들의 피난, 은신처를 제고하는 역할이 주목받고 있다.

또한, 해감류 (Zygnematales)는 질산성 염류와 인산성 염류 농도가 높은 작은 도랑 등에서 많이 서식하고 있는 분류군으로 활성도가 높기 때문에 염류 흡수력이 뛰어난 것으로 확인되고 있다.

## 제4절 기존 기술의 검토 및 적용성 평가

### 1. 물리적 제어기술

#### 1) 기존 물리적 제어기술의 장·단점

물리적 제어 기술은 자연 및 인공 구조물(또는 매체)과 에너지를 이용하여 중력침강, 접촉침전 및 여과, 차단, 강제순환, 제거 등의 원리를 이용하여 호소의 오염부하를 저감하고 수질을 개선하는 방법이다. 국내·외 적용되었던 대표적인 물리적 제어 기술로는 침강지, 식생여과, 수중폭기장치, 가압부상장치, 인공물순환장치, 선택취수설비, 차광막, 조류차단막, 조류 제거선, 초음파, 퇴적물 캡핑 등이 있다. 이들 중 일부 기술은 화학적 응집과 생물학적 처리 기작을 포함하므로 융복합 기술로도 구분 할 수 있다. 수중 폭기장치는 성층파괴를 통한 심층의 빈산소 또는 무산소 상태 제거를 위해 간헐식 또는 산기식으로 수중에 산소를 공급하며, 선택취수설비는 수심별 수온과 수질을 고려해 취수 수심을 선택함으로써 이용목적에 맞는 수온과 수질을 확보하는 방법이다. 차광막은 조류성장에 필요한 태양광을 차단함으로써 광합성을 저해하는 방법으로 상수원 취수탑 인근의 국부적 제어 대책으로 활용되고 있다. 조류차단막은 부유 조류의 공간적 이동과 확산을 방지할 목적으로 10m 내외의 수직 막을 설치하는 방법이며, 오염물질의 이동을 차단하는 목적인 수류차단막과 구분되기도 한다. 초음파 기술은 남조류의 부력 조절 기능인 기낭을 파괴하여 수체 바닥으로 가라앉게 함으로써 광합성을 억제하는 방법이며, 전자선 조사 기술은 수중에 방전을 일으켜 고전압 펄스를 이용해서 조체의 생장과 증식을 억제하는 방법이다. 마이크로버블은 넓은 비표면적, 낮은 상승 속도, 그리고 라디칼 생성에 의한 산화작용이 있으며, 이는 수처리 공정 측면에서 오염물질의 흡착 및 부상, 산화에 유용하게 활용될 수 있는 특성이다. 인공회석은 상류 댐 또는 유량 조절 시설로부터 회석수를 공급함으로써 일시적으로 수층의 성층 파괴, 혼합과 회석에 의해 조류 농도를 저감하는 방법이다. 조류 제거선은 흡입, 집수, 여과, 회수 장치로 구성된 녹조제거 선박이다.

수중폭기장치, 인공물순환장치, 가압부상장치, 조류제거선, 조류 차단막 등 저수지 수질 개선을 위해 개발된 물리적 처리 기술들은 대부분 융복합적인 기술이 아닌 단일 공정에 해당하는 기술이 대부분이다. 그리고 실제

대규모 호소에 적용할 경우 처리효과가 낮고, 수질개선 효과의 영향반경이 작아 시설 투자비용이 높아질 수 있으며, 인건비와 동력비 등 과도한 운영유지 비용이 소요될 수 있는 문제점도 발생한다. 수중폭기장치는 표층의 수온을 강하시켜 조류 증식을 억제하고, 퇴적물에 침강된 조류의 부패를 방지하는 장점이 있으나, 동력비 및 시설비가 많이 들어가고(수중폭기 시설 : 50,000천원/대, 운영비 3,000천원/년·대), 규모가 큰 호소에서는 시설 설치에 한계가 있으며, 조류가 발생한 상태에서 폭기시설을 가동할 경우 주로 표층에 서식하는 조류가 하층으로 내려가 취수구로 유입될 가능성이 높아질 수 있다. 또한 폭기시설을 수심이 깊은 호소(30~40m)에 적용할 경우 저층을 교란시켜 오히려 조류발생이 증가할 수 있다. 초음파는 사전·사후처리 기술로서 전기분해로 세포조직을 단락/파괴하고 여과지 폐색 현상을 방지하는 높은 처리효과를 기대할 수 있으나 처리 규모의 한계로 현장 적용에 어려움이 있다. 조류제거선은 국부적으로 밀집된 조류의 수거에 용이한 기술이지만 광범위한 수면에서의 수질개선 효율이 떨어지며, 조류제거를 일시적으로 제거하기 위한 단기 대책에 속하며 제거 효과의 지속성이 부족하다.

침강지는 인공습지와 함께 우리 공사에서 농업용수 수질개선사업으로 널리 활용하는 시설이다. 보통 인공습지 전단에 설치하고 있으며, 유역에서 유입되는 오염물질, 특히 입자성 고형물질을 초기에 침강시켜 저감할 수 시설이다. 유지관리를 위해서 정기적으로 준설을 해주면 더 효과적인 시설이 될 수 있으리라 판단된다. (표 4.4-1)은 농업용 호소 수질개선을 위한 물리적 제어기술의 특징과 장단점 그리고 적용사례를 정리한 내용이다.



(표 4.4-1) 호소 수질개선을 위한 물리적 제어 기술 특징

기술명	분류	특징	장점	단점	사례
수중 폭기 장치	사전 예방	성층과피를 통한 심층의 빈산소 또는 무산소 상태 제거를 위해 간헐식 또는 산기식으로 수중폭기	인용출 억제, 조류생장 억제, 어류폐사 방지	설치비용 대비 녹조제어 혹은 수질개선 효과 미미, 공간적 제한성	국내 대부분의 상수원 취수탑 부근에 설치
선택 취수 설비	사후 처리	취수수심을 선택하여 조류생물량을 최소한으로 취수하는 방법	양질의 수자원 공급 가능	녹조제어 효과 없음, 잘못된 취수시 조류 생물량 농축 결과 초래	국내 대부분의 상수원 취수탑 부근에 설치
차광 막 설치	사전 예방	차광막을 설치하여 녹조의 광합성 저해	녹조생장 억제 설치 및 관리비용 저렴	녹조제어 효과 미미, 빛 차단에 의한 다른 생물 피해	국내 대부분의 상수원 취수탑 부근에 설치
조류 차단 막	사후 처리 확산 방지	10m 내외의 막설치를 통해 다른 지역으로의 녹조확산 방지	녹조 확산방지 효과, 설치 및 운전비용 저렴	녹조제어 효과 미미 및 부가적인 회수처리장치 필요	대청호 설치효과에 대한 수치해석을 통해 조류 생물량 감소 보고 (김유경 et al., 2006) 일본 Terauchi 댐 (Asaeda et al., 1996; 2001)
초음파	사전 사후 기술	초음파에 의한 녹조 부력조절기능인 기낭을 파괴하여 호소바닥으로 가라앉게 함으로서 녹조의 광합성 억제	세포조직 단락 및 파괴, 여과지 폐색현상 방지, 폐쇄수역 녹조저감 효과, 친환경적 녹조제어 기술	공간적 제한성, 개방수역의 녹조저감 효과 미미, 설치 및 관리비용 높음	국내 실험실 규모로 연구 (심주현 et al., 2006) 일본 Senba호 (Nakano et al., 2001)

자료) 낙동강 조류발생 특성분석 및 관리정책 방안(2010)

(표 4.4-1) 호소 수질개선을 위한 물리적 제어 기술 특징(계속)

기술명	분류	특징	장점	단점	사례
전자선 조사	사전 사후 기술	수중에 방전을 일으켜 고전압 펄스를 이용해 조체의 생장과 증식 억제	Chl-a 감소, 광합성 저해세포파괴, 운전조작 용이 및 운영비용 저렴, 좁은 처리면적에 적용	초기설치비용 높음, 공간적 제한성	
인공 회석	사전 사후 기술	낙동강 조류제거 적용	일시적 조류제거 효과적	근본적인 조류제어 효과 적음	낙동강 하구 (양양용 et al., 2004)
녹조 제거선	사후 처리	흡입, 집수, 여과, 회수 및 초음파 장치로 구성된 선박을 이용한 녹조 제거	고효율, 저비용 및 환경친화적 처리용량 증설 용이	막힘현상 발생가능	
가압 부상 시설	사후 처리 (복합 장치)	미세기포를 발생시켜 호소 바닥에 퇴적된 오염물질을 수중으로 부상시켜 화학 물리적 방법으로 응집 제거하는 기술	수체 산소공급으로 영양염류 용출 억제 높은 처리효과 설치 및 이동 용이	선택적 제거 불가능으로 인한 수생태계 변화 초래 처리시간이 많이 소요되어 넓은 수역에 신속한 방제 적용 부적합	영국 Thames 강의 조류 제거 농업용저수지, 대청호 등에서 시범 운영 서낙동강 설치 운영
제트 스트리머	사후 처리	육상 또는 수중펌프를 이용하여 수류를 발생시키고 산소공급을 통한 녹조 제어	저층의 빈산소 및 무산소 상태 방지 영양염 용출 및 오염화 방지 소규모 및 대규모의 댐 저수지, 폐쇄성 수역에도 효과적 사용 가능 저비용 유지관리	광역적 적용시 설치 비용 높음	일본의 주요 호소와 하구역의 수중 용존산소 공급을 위해 적용 국내 적용 사례는 거의 없음
마이크로 버블	사후 처리	직경 10~30 $\mu$ m의 마이크로버블을 생성시켜 자기압괴 현상에 의해 라디칼 및 충격파가 생성되어 유기물과 조류를 살균 및 산화	다른 물리적 제어 방법과 융복합 적용이 용이 대용량화 가능	호소 수질정화 성능 검증 필요 광역적 적용시 설치 비용 높음	일본의 하천과 호소 녹조 및 악취 제거 적용사례 있음 국내에서는 하·폐수 처리 적용 사례 있음

## 2) 기존 물리적 제어기술의 적용성 평가

농업용 호소 수질개선을 위한 수처리 기술은 먼저, 관리 목표수질인 환경 정책기본법의 호소 수질기준 4등급을 만족할 수 있는 수처리 공정과 함께 다음과 같은 여러 관점에서 처리기술에 대한 적용성을 분석, 판단해야 할 것이다. 농업용 호소 수처리 공정과 기술을 결정할 때 고려하여야 할 평가 사항은 첫째, 처리효율이 목표수질을 만족해야 하며, 수질개선효과가 지속적일 것, 둘째, 처리시설이 간단하고 설비가 적어 비용면에서 경제적일 것, 셋째, 유지관리 측면에서 운전관리가 쉽고 무인관리가 가능하며, 설비 보수 등이 쉬울 것, 넷째, 슬러지의 발생량 등 2차적인 오염이 없으며, 수생태계에 미치는 영향이 없을 것, 다섯째, 유입수의 수질과 수량(또는 저수량) 변동에 대응성이 있을 것 등이다. 어느 기술이든지 (표 4.4-1)에서 살펴본 바와 같이 장단점이 있기 때문에 어느 처리기술이 우수하다고 결정하기는 어렵다. 하나의 처리방법을 사용하든지, 둘 이상의 기술을 조합해서 사용하든지 위에 제시한 5가지 평가항목 중 어느 것을 우선 순위에 두는지에 따라 결정될 수 있을 것이다. 기존 물리적 제어기술에 대해 수질개선효과의 단기효과, 장기효과, 비용, 생태영향, 유지관리 등 5개 항목을 비교, 검토하여 나타내면 (표 4.4-2)와 같다.

(표 4.4-2) 물리적 제어 기술의 적용성 평가

기술명	단기효과	장기효과	비용	생태영향	유지관리
수중폭기	F	U	G	F	P
선택취수	G	G	G	F	F
차광막	G	G	F	P	U
조류차단막	G	F	F	G	G
초음파	U	U	F	F	U
조류제거선	E	P	F	F	F
인공희석	G	G	F	F	F
준설	F	E	L	F	G
강제물순환	G	U	G	F	F
퇴적물 캡핑	E	F	P	L	F
가압부상	E	F	F	F	F

E: 매우 좋음, G: 좋음, F: 보통, P: 나쁨, L: 매우 나쁨, U: 모름

## 2. 화학적 제어기술

### 1) 기존 화학적 제어기술의 장·단점

화학적 제어 기술은 응집제와 살조제 등의 화학약품을 이용하여 인위적으로 오염물질을 응집, 침전, 부상 등의 원리를 이용하여 제거하는 방법이다. 국내·외 적용되었던 대표적인 화학적 제어 기술로는 Al, Fe, Phoslock 등 응집제에 의한 수체 내 인의 불활성화, 황산동, 식물추출 천연물제제 등 살조제투여가 있다.

응집제를 사용하는 화학적 처리기술은 가압부상공법과 결합하여 한정적으로 사용된 사례는 있으나 국내에서는 아직 수체 내 존재하는 인의 불활성화를 위해 사용된 사례는 없다. 황토 살포는 대청호에서 녹조가 과잉 번식할 때 긴급 대응책으로 이루어지고 있으나, 그 효과에 대한 평가는 회의적이다. 국내에서 응집제 처리를 호수에서 직접 적용한 예는 적으나, alum은 정수공정에서 탁도를 제거하기 위하여 흔히 사용되고 있으며, 최근 도시 호수공원에서는 호수 유입수를 처리하는 처리장을 만들고 alum을 사용하여 정수한 후에 호수에 유입시키고 있다. 그러나 이러한 처리시설을 만들고 운영하는 데에는 많은 비용이 드는 단점도 있으며, 농업용 저수지에서는 아직 적용된 사례가 없다. 이 방법이 농업용 저수지에서 실용화되기 위해서는 적정투여량 측정기법, 응집제 투여의 비용, 경제성 검토, 호소 내 투여방법 및 기구 등에 관한 연구가 선행되어야 경제성 있는 처리기술이 개발될 것이다.

화학적 처리공법은 인 불활성화, 조류 성장 제어 등 단기 효과가 뛰어난 반면 효과의 지속성, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점이 있어 단일 기술로는 적용에 한계가 있다. (표 4.4-3)는 호소 수질개선을 목적으로 기존에 개발되었던 화학적 제어기술의 특징과 장단점 그리고 적용사례를 정리한 내용이다.

(표 4.4-3) 호소 수질개선을 위한 화학적 제어 기술 특징

기술명	분류	특징	장점	단점	사례
응집제 처리	사전 사후 기술	응집제를 투여하여 인불활성을 통해 녹조 발생억제, 국내의 수계시스템 고려 시 소규모 연못에 적용 가능	인 불활성화를 통한 장기간 조류 생물량 증식 완화	처리면적에 따른 소요비용 증대, 다량 사용 시 생태계 독성 우려	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 를 이용한 무산소층 sediment로부터 인용출 억제 (Ripl. 1976) 덴마크 Lynby호 및 스웨덴 Lang호에 알루미늄 계열의 응집제 사용
황토 살포	사후 처리	황토를 살포하여 녹조의 응집 및 침강작용에 의한 제거와 차광효과에 의한 제어방법	녹조 및 영양염 흡착 및 침전, 일시적인 녹조제거 효과	녹조제어는 대부분 실험실 수준으로 연구, 다른 수중생물에 교란 영향으로 담수적용 부적합, 1회성으로 인력 및 소요경비 높음	국내 연안 적조발생 원인조류인 와편모류 제어에 사용 황토를 이용한 담수의 남조류 제어 연구 (나기환 et al., 1998; 박현진 et al., 2002)
살조제	사후 처리	황상동을 투여하여 사멸시키는 방법, 소규모 연못 적용에는 적합, 자연수계에는 부적합	녹조의 광합성, 인 흡수 및 질소고정을 방해 조류 증식 억제, 빠른 처리속도 및 효과	선택적 제어 불가능으로 인해 생태계 위해성 초래, 높은 처리 비용	
세라믹	사후 처리	세라믹 원적외선의 항균효과를 이용하여 녹조 제어	심층무산소층 제거, 인용출 억제, 조류 성장 억제, 어류 폐사 방지	세라믹 처리수에 의한 녹조제어 효과 연구결과 미흡, 구체적인 현장적용사례 거의 없음	국내연구 (김형진 et al., 2002)
은나노 이온수	사후 처리	은나노 이온수의 항균 및 살균 작용을 이용해 녹조 제거	조류성장 억제	광역적 적용 시 고비용, 소요금속이온의 축적에 의한 2차 오염 유발 가능	
천연 조류 제거제	사후 처리	식물체추출물(솔잎, 잣잎, 은행잎, 쥘, 쑥, 갈대, 습체식물, 건체식물 등)을 이용하여 녹조 증식 저해	친환경적 녹조제어 효과	효과적인 녹조제어를 위해서는 일반 화학적 처리보다 과다한 식물체 필요	영국의 Derbysire호에 보릿짚을 이용하여 조류제어 효과 연구 (Everall and Lees, 1996) 국내 잣잎, 솔잎 등을 이용한 조류 제어연구 (임병진 et al., 2002)

2) 기존 화학적 제어기술의 적용성 평가

기존 화학적 제어기술 중 국내외에서 가장 적용사례가 많았던 인 불활성화와 살조제 투여 기술에 대해 수질개선효과의 단기효과, 장기효과, 비용, 생태영향, 유지관리 등 5개 항목을 비교, 검토하여 나타내면 (표 4.4-4) 와 같다. 인 불활성화 기술은 단기효과로는 매우 좋으나 장기효과가 거의 없으며, 비용, 유지관리 측면에서는 보통으로 평가할 수 있으나 응집제를 호소에 직접 투여함으로써 발생하는 영향인 수생태계에 미치는 영향 측면에서는 매우 나쁨으로 평가되었다. 살조제 투여 기술도 모든 평가항목에서 인 불활성화 기술과 같은 평가 결과가 나왔다. 인 불활성화, 살조제 투여, 천연 조류제거제 투여 등 화학적 제어기술은 일반적으로 일시적인 단기 효과는 뛰어나지만 효과의 지속성 문제, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점 등으로 호소에 직접 적용하는 기술로는 한계가 있다고 말할 수 있겠다. 따라서 응집제를 정수 및 하·폐수 처리장에서 이용 하듯이 수계 밖에서 인 제거기술로 이용하면 적용성이 높은 기술이라고 판단된다.

(표 4.4-4) 화학적 제어 기술의 적용성 평가

기술명	단기효과	장기효과	비용	생태영향	유지관리
인 불활성화	E	F	F	L	F
살조제 투여	E	F	F	L	F

E: 매우 좋음, G: 좋음, F: 보통, P: 나쁨, L: 매우 나쁨, U: 모름

### 3. 생물학적 제어기술

#### 1) 기존 생물학적 제어기술의 장·단점

생물학적 제어 기술은 식물이나 미생물, 먹이사슬을 이용하여 오염물질을 흡수, 분해, 섭취하는 방법이다. 국내·외 적용되었던 대표적인 생물학적 제어 기술로는 인공습지, 인공식물섬, 수초저류지, 생물막을 이용한 접촉산화방식, 천적생물(포식자) 등 먹이사슬을 이용한 제어 기술 등이 있다.

호소 내 식물정화와 먹이사슬망의 천적관계를 이용한 생물학적 제어기술 등은 경제적이며 친환경적인 기술이나, 수질정화 효과가 불확실하며 한 가지 방법으로는 효과를 기대하기는 어렵다. 인공식물섬 및 인공습지 등 식물체를 이용하는 기술은 실제로 오염물질을 흡수하는데 식물의 역할은 10% 정도에 불과하며, 대부분 토양에 의한 흡착, 미생물의 흡수 및 침전 등 다른 기작을 통해 이루어지고 있다. 농업용 저수지 내 인공식물섬이 적용된 사례가 다수 있으나, 인공식물섬에 의한 직접적인 녹조제어의 기능은 별로 없고, 단지 경관향상 및 저수지 내 생물들의 피난 또는 은신처를 제공하는 역할로 주목받고 있다. 반면, 끈상생물막 등 생물막의 수질정화기능을 이용한 공법은 오염하천 정화에 적용된 사례가 다수 있으며, 오염된 하천에서 수질정화 효과가 검증된 공법이다. 따라서 농업용 저수지 유입하천 정화를 목적으로 적용하기에는 큰 무리가 없을 것으로 사료되나 유입하천의 유량이 평상시에도 어느 정도 확보된 하천에 적용해야 될 것으로 판단된다. 그러나, 농업용 저수지 호내 수질개선 공법으로 직접 적용한 사례가 없으므로 만약 호내 정화를 목적으로 설치한다면 최적설계를 위한 사전 연구가 선행되어야 할 것이다.

(표 4.4-5)는 기존 생물학적 제어기술에 대한 특징과 장단점을 분석한 내용이다. 세균 미생물은 살조 세균 미생물을 분리·배양하여 녹조에 직접 영향을 주어 조체를 사멸시키는 방법으로 녹조를 선택적으로 제어할 수 있다는 장점이 있는 반면에 살조 세균 미생물 분리 및 배양에 어려움이 있고, 녹조 제어를 위한 적정 농도 예측이 어려워 녹조 독소에 의한 오염 발생 가능성도 배제할 수 없다. 국외에서는 현장 적용 사례는 있으나 국내에서는 살조 미생물을 분리하고 배양하는 초기 연구단계에 있다.

(표 4.4-5) 호소 수질개선을 위한 생물학적 제어 기술 특징

기술명	분류	특징	장점	단점	사례
수생 식물	사전 예방	인공습지 또는 인공식물섬의 수생식물을 이용하여 영양염 제거 및 산소공급을 통한 녹조제거	수중영양염 제거, 조류발생 저감, 초기설치비용 저렴 및 유지관리 용이	시간이 지남에 따라 처리 효율 저감, 2차 오염방지를 위한 지속적인 관리 필요	국내 저수지, 상수원 취수량 유입부에 인공수초섬 설치 (박현진 et al., 2000)
세균 미생물	사후 처리	미생물을 분리·배양하여 녹조에 직접 영향을 주어 조체를 사멸시키는 방법	녹조의 선택적 제어가능	살조 세균 미생물 분리 및 배양이 어려움, 녹조 제어를 위한 적정 농도 예측이 어려워 녹조 독소에 의한 오염 발생 가능	Peridiniumbipes가 남조류에 영향을 미침 (Wu, 1998) Stretomyces sp.이 Microcystis aeruginosa 제어에 효과 (김백호 et al., 2005)
먹이 연쇄를 이용한 생물 조절	사전 사후 기술	식물플랑크톤을 섭식하는 원생생물, 동물플랑크톤, 패류, 어류 등 포식생물을 이용	물리, 화학적방법보다 시설비 및 유지관리비가 경제적	다양한 생물군이 존재하는 수계의 현장 적용성이 낮음, 개방수역에서 인위적 유지관리 어려움, 적용 생물체의 폐사나 배설물에 의한 수체 오염 가중 유발	어류를 이용한 수질개선연구 (Fukushima et al., 2000)

자료) 낙동강 조류발생 특성분석 및 관리정책 방안(2010)



2) 기존 생물학적 제어기술의 적용성 평가

기존 생물학적 제어기술 중 국내외에서 적용사례가 있었던 수생식물, 세균미생물, 생물조절 기술 등에 대해서 각각 수질개선효과의 단기효과, 장기효과, 비용, 생태영향, 유지관리 등 5개 항목에 대해 비교, 검토하여 정리한 결과는 (표 4.4-6)과 같다. 수생식물을 이용한 기술(인공습지, 인공식물섬, 수초저류지 등)은 생태영향 측면에서는 좋은 기술이나 비용과 유지관리 측면에서는 보통, 수질개선효과의 단기효과에 대해서는 매우 나쁨, 장기효과에 대해서는 좋음으로 평가되었다. 수생식물을 이용한 기술은 농어촌지역에 위치하고 있는 농업용 저수지 수질개선을 위한 시설로는 경관상 아주 좋은 시설이라고 판단되지만 단기효과의 미흡, 유입수를 대상으로 하고 있기 때문에 호소 수질개선 효과를 보기까지는 장기간이 걸린다는 점, 유기물 처리효율이 낮다는 점, 수생식물의 정기적인 절취문제, 홍수시 범람문제 등 이러한 몇 가지 문제점을 보완하고 해결된다면 농업용 저수지 수질개선을 위한 시설로는 적용성이 높은 시설로 판단된다.

세균 미생물을 이용한 기술은 국내에서는 개발 초기단계에 있고, 현장 적용사례가 없어 구체적으로 평가하기에는 무리가 있다. 생물조절기술은 국외에서는 1970년대부터 많은 연구가 이루어져 왔던 기술로서 적용사례도 많이 찾아볼 수 있다. 그러나 국내에서는 이제야 연구개발이 완료되었고, 실용화를 위한 현장적용시험을 하고 있는 중이다. 현장적용시험 결과로는 우수한 기술로 환경부 신기술인증을 받은 상태이다. 기술의 실용화 및 현장 적용성을 최대한 높이기 위해서 현재 실용화 연구를 수행 중에 있다.

(표 4.4-6) 생물학적 제어 기술의 적용성 평가

기술명	단기효과	장기효과	비용	생태영향	유지관리
수생식물	L	G	F	G	F
세균미생물	U	U	F	G	U
생물조절	L	G	G	U	P

E: 매우 좋음, G: 좋음, F: 보통, P: 나쁨, L: 매우 나쁨, U: 모름



## 제5장

---

# 농업용 저수지 용복합 수처리기술 개발

---

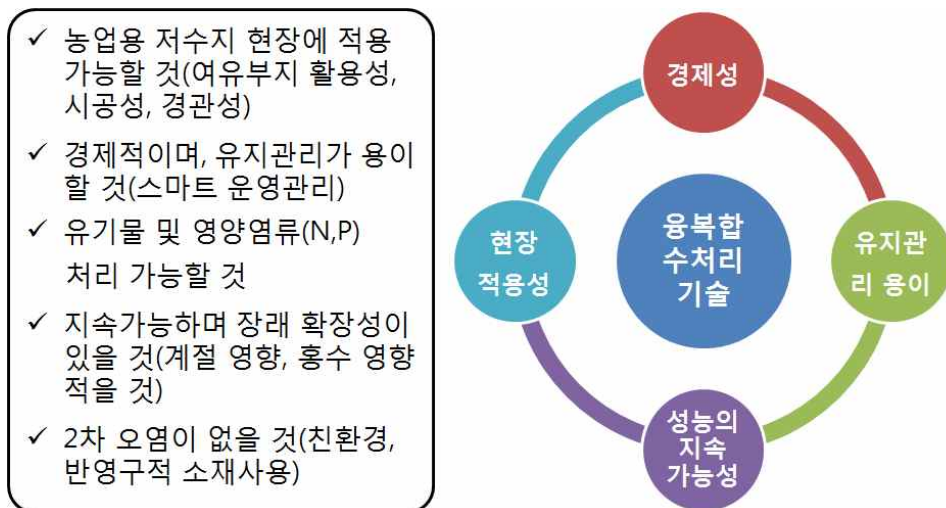


## 제5장 농업용 저수지 융복합 수처리기술 개발

### 제1절 적용성이 높은 요소기술 개발 및 설계

#### 1. 기술개발 방향 및 고려사항

본 연구에서는 국내·외에서 개발되어 적용되고 있는 물리적, 화학적, 생물학적 수질정화 기술들을 단위 공정별로 검토하여 농업용 저수지에 적용 가능한 처리공정과 요소기술을 개발하고자 한다. 농업용 저수지를 대상으로 하는 융복합 수처리 기술의 개발방향 및 고려사항은 <그림 5.1-1>과 같이 설정하였다. 농업용 저수지 수질개선을 목적으로 하는 융복합 수처리 기술의 전제조건은 시공성, 경관성, 여유부지 활용성, 유지관리 용이성, 경제성 등 현장적용성이 가장 중요하며, 수질개선효과가 계절적 영향과 저수량 등에 영향을 받지 않고 꾸준히 지속될 수 있는 지속성이 있어야 한다. 또한, 농업용 저수지의 수질관리 지표와 수질문제를 고려하여 수처리 대상 항목은 고형물질, 유기물, 영양물질, 조류를 포함하며, 각 항목별 물질 순환, 수처리 기작과 효율을 고려하여 요소기술을 설계해야 한다. 농업용 수처리시설은 친환경적, 반영구적 소재를 사용함으로써 수생태계에 영향을 주지 않는 즉, 2차 오염이 없는 기술이 개발되어야 한다.



<그림 5.1-1> 농업용수 융복합 수처리기술 개발 방향

## 2. 융복합 수처리 기술의 구성

기존 물리적, 화학적, 생물학적 기술들을 검토하여 농업용 저수지에 적용성이 높은 공정과 요소기술들을 (표 5.1-1)과 같이 추출하였다. 농업용 저수지의 수질오염 원인은 복합유형으로 외부 유역에서 들어오는 유입수의 영향과 저수지 물리적 조건으로 인한 내부에서 발생하는 오염물질에 의한 영향으로 저수지의 수질개선을 위해서는 유입수 대책과 호 내 대책으로 구분하여 수역별 수질특성에 맞는 수처리 기술이 개발되어야 한다.

유입수의 처리기술은 유역 내에서 들어오는 미처리 생활오수 및 축산 농가에 의한 축분 등에 의해 고형물, 유기물, N, P의 농도가 높으므로 이들에 대한 처리효율이 높은 기술과 경관성을 고려하여 침강, 여과, 응집, 부착 생물막, 식물정화기술을 도입하여 고속 응집 및 여과 장치와 생물막여재 (유기물 제거)와 식물정화(질소, 인 제거) 기능을 조합하는 물리적, 화학적, 생물학적 융복합처리 공정으로 구상하였다. 호 내 수질개선을 위해서는 호 내 산소공급 및 성층파괴로 수환경을 개선하고, 호소 1차 생산성의 제어 인자인 TP 저감 및 호소 경관성을 향상시키기 위하여 강제 물순환장치와 마이크로버블, 인불활성화, 식물정화의 요소기술을 포함하는 수상 복합 정화장치(고정형과 이동형)를 구상하였다.

(표 5.1-1) 농업용 저수지 융복합 수처리시스템 요소기술 구성

기술 구분 (주요 목적)	유입부 처리장치 (유기물, N/P 저감)	호내 정화장치 (호내 조류 발생 억제)	비 고
물리적 기술	침강, 여과	물순환, 마이크로버블	
화학적 기술	응집	전기화학적 분해	TP 제거
생물학적 기술	부착생물막, 식물정화	부착생물막, 식물정화	유기물 제거



<그림 5.1-2> 농업용수 융복합 수처리기술 구성

### 3. 유입부 수처리장치의 기술구성과 설계 인자

#### 1) 처리공정

유입부 수처리 시스템의 처리목표는 호 내로 유입하는 고형물, 유기물, 질소, 인의 제거에 있다. 수처리시스템의 주요 공정은 유입 및 전처리, 고속 복합응집장치(체류시간 1~10분 내외), 생태융합형 접촉산화조(식물 및 미생물 접촉재를 이용한 식생메디아조), 침전조, 흡착여과조(재폭기조), 방류조로 구성하며, 유입수 성상과 현장 여건에 따라 복합응집장치 등을 선택적으로 조합하여 적용 할 수 있도록 설계하였다. 유입 및 전처리 장치는 하천수 유입을 위한 펌프시설, 그리고 유입수 내에 포함된 토사 및 이물질 제거하기 위한 스크린 및 침사시설을 포함한다. 복합응집장치는 SS와 T-P 제거를 목표로 하며 마이크로버블 발생 장치, 부상축진을 위한 전기응집 부상 장치, 부상 플록 분리를 위한 와류 발생, 플록 배출을 위한 감소기 일체형 내통 회전, 응집제 자동 투여를 위한 폴리머 자동용해장치, 응집 처리수 최종 여과 필터층 등을 선택적으로 구성한다. 유동상 접촉산화조는 상향류 흐름의 유동상접촉재와 경사관으로 구성하여 유입 SS 플록 해체 및 침전효율 향상을 유도한다. 식생메디아조는 수생식물과 로프형 섬유상 미생물접촉재를 이용한 유기물 저감을 주목적으로 하며, 상부에 수생식물을 식재하는 탈착식 매트를 설치하여 경관을 창출한다. 미생물접촉재는 생물막에 의한 유기물 분해와 흡착 및 여과 기능을 포함한다. 슬러지 침전 방지와 산소용해율 증대를 위해 효율이 높은 폭기장치를 생태융합형 접촉산화조에 조합하였다. 흡착여과조는 산화분해된 잔류 유기물의 처리와 방류수 DO 증가를 위한 재폭기를 목적으로 한다.



<그림 5.1-3> 농업용저수지 유입부 수처리시스템 공정

## 2) 공정별 주요 기능

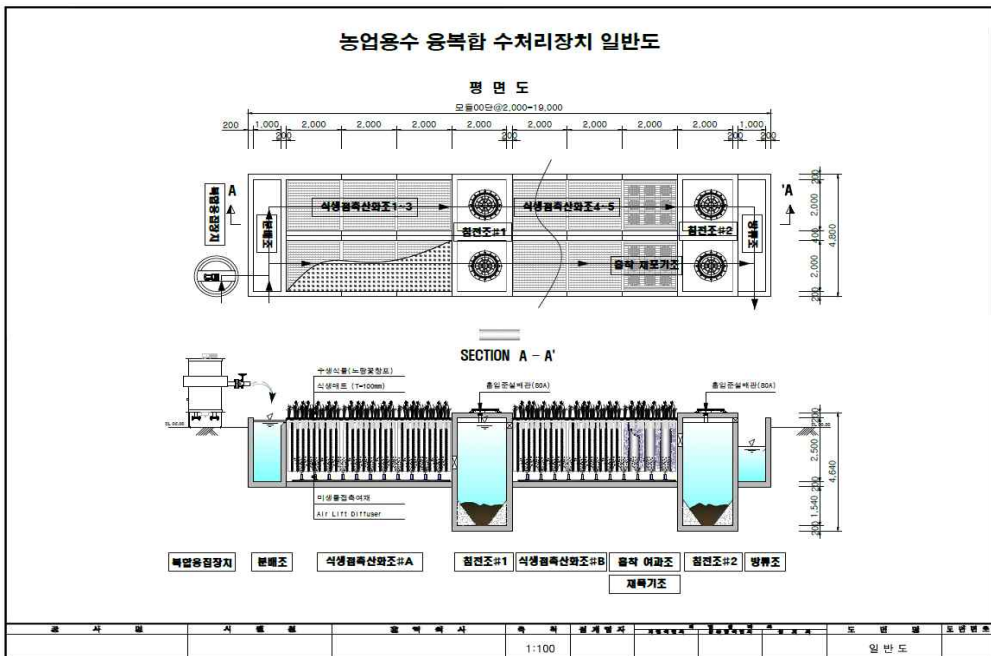
유입부 대책 처리공정의 공정별 주요 기능은 다음과 같다.

- 유입 및 전처리 : 토사 및 이물질 제거(스크린 및 침사시설)
- 복합응집장치 : SS 및 T-P 제거
  - Air-mist(마이크로버블형)+전기유도(부상촉진)
  - Voltex 원리를 이용한 부상 Floc 분리
  - 감속기 일체형 내통 회전으로 와류 가속
  - 폴리머 자동용해장치로 응집제 투여
  - 응집처리수 최종 여과 방류(필터층)
  - 유입성상/현장여건 따른 선택적 운영
- 분배조 : 유량조정 및 균등분배
- 유동상 접촉산화조
  - 상향류 흐름의 유동상접촉재와 경사판으로 구성  
(유입 SS Floc 해체 및 침전효율을 향상유도)
  - 유입성상 및 현장여건에 따른 선택적 운영
- 식생메디아조 : 수생식물 및 미생물접촉재를 이용한 유기물 저감
  - 상부 수생식물 식재(식재매트 탈착식)
  - 하부 모듈형 미생물접촉재 거치(Rope형 섬유상)
  - 수생식물에 의한 N, P 제거 및 상부 경관성 제고
  - Air-mist 및 폭기에 의한 유기물 산화
  - 미생물접촉재에 의한 미생물 분해, 흡착 및 여과
  - Air Lift 방식의 Diffuser 공기 공급에 의한 교반  
(슬러지 침전 방지, 산소용해율 증대, Air-mist 교반)
- 침전조 : 접촉산화조로부터 이송된 슬러지 침강, 농축 및 제거
- 흡착여과조 : 산화분해된 유기물의 흡착 및 여과와 방류수 재폭기
  - 미생물접촉재 충전된 Draft Tube를 이용한 선회류형 간접폭기 방식
  - 간접폭기방식으로 전단력에 의한 미생물막 탈리 방지
  - 미처리 SS 및 탈리 미생물 침강효율 증대
  - 방류수 용존산소 공급 증대(재폭기)
- 방류조 : 재폭기 처리수의 저수지 방류



### 3) 수처리 공정의 특징 및 장점

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



<그림 5.1-4> 농업용수 수질개선을 위한 유입부 수처리공정 개요도

#### 4) 복합응집장치 세부기술

##### (1) 장치 구성

본 장치의 구성은 다음과 같다.

마이크로버블+급속교반장치(인라인믹서)+부상촉진장치(전기유도)+볼텍스 흐름+Washing Type 스크린+회전식 플럭 제거장치+필터부로 구성되었다.

##### (2) 장치 원리

장치의 원리는 다음과 같다. 오염수 유입→ Air-mist(마이크로버블형)→ 급속교반장치(인라인믹서, 약액주입)→ 부상촉진장치(전기유도)→ 볼텍스 스크린 외측 와류형태 유입(상향류)→ Flocc 및 이물질은 상층으로 부상하고, 물은 스크린 타공을 통해 가운데 내통안쪽으로 유입(볼텍스 스크린 구조상 flocc과 이물질은 washing현상에 의해 걸러지고, 반대쪽으로 난 타공에 의해 물만 안쪽으로 유입된다. 스크린 본체 내통은 와류 회전방향과 반대방향으로 장치 상단에 부착된 감속기에 의해 저속으로 일체형 회전됨으로서 와류속도 가속화 시너지 효과→ 상층부로 이동된 플럭은 감속기에 부착된 Rubber Bar에 의해 서서히 슬러지 제거 수로로 이동시켜 저류조로 이송→ 스크린 내통 안쪽으로 유입된 플럭이 제거된 물은 하부로 이동(슬러지 부상 방지 배플에 의해 미제거 부유물질 부상방지)→ 장치 최외측을 통해 상향류로 처리수가 이동한 후, 필터부(필라이트, 섬유상매디아 등) 여과 단계를 거쳐 최종 방류된다.

##### (3) 개발목표 및 설계인자

- 외형규격 :  $\phi 1000 \times 2,000 \text{mmH}$
- 체류시간 : 10분 이내
- 재질 : 본체 및 내통 STS, 섬유상(또는 필라이트) 여과재, 스크래퍼 STS+EPDM
- 감속기 : 0.5HP  $\times 10 \sim 60 \text{rpm}$
- 유입펌프 : 0.5HP  $\times 100 \ell / \text{min} \times 6 \text{M}$
- 필터부 : 150mmH  $\times$  유동상 여재  $\phi 45$



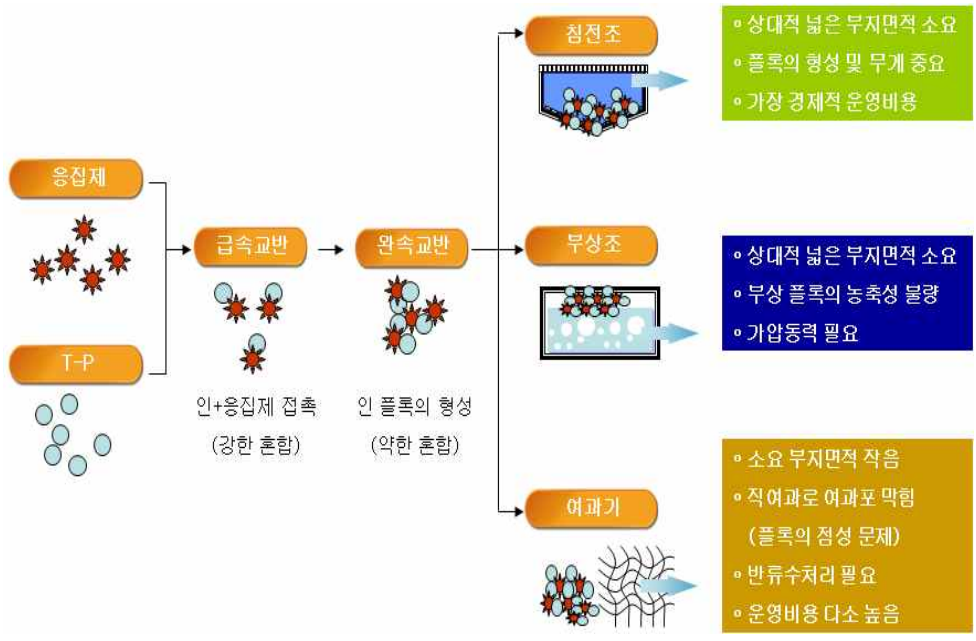
(5) 복합응집장치 특징(기존 기술과의 차별성)

본 연구에서 개발된 복합응집장치의 모식도는 <그림 5.1-5>과 같다. 복합응집장치의 가장 큰 특징은 교반, 혼화조, 응집제를 한조에 콤팩트하게 구성하여 체류시간을 10분 이내로 단축하고, 소요 부지면적을 효율적으로 이용할 수 있도록 설계하였다. 기존 응집장치는 교반, 혼화조, 응집조가 별도로 구성되어 체류시간이 길고 상대적으로 넓은 부지면적이 소요되는 단점이 있다. 응집침전, 응집부상, 응집여과 등 기존 일반적인 응집시스템의 종류별 원리 및 장단점은 <그림 5.1-6>과 같다.

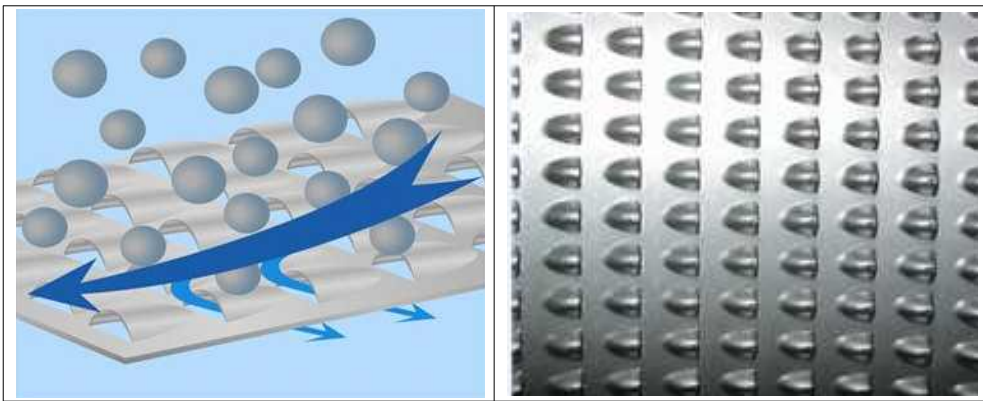
본 연구에서 개발된 복합응집장치는 <그림 5.1-7>과 같이 Voltex 흐름을 이용한 선회류와 루버홀 형태의 스크린을 적용하여 응집효과를 극대화하고, Floc에 의한 막힘이 없이 스크리닝이 이루어질 수 있도록 고안하였다. 또한, 부상축진장치(전기유도)를 이용해 응집 플럭의 부상효과를 상승시키고, 감속기와 일체화된 내통스크린이 선회류와 반대 방향으로 회전하면서 Voltex 흐름의 가속효과에 의한 스크린 폐색 방지와 응집부상 효율을 향상시킬 수 있도록 하였다. 부상슬러지는 별도의 플럭 제거 설비 없이 스크린 내통 회전에 이용되는 감속기에 부착된 스킴 제거 BAR에 의해 동시 제거가 가능하며, 응집부상 처리수는 장치 가장 바깥 외곽에 충전된 필터층에서 최종 여과되어 방류되도록 구성함으로써 모든 처리공정이 단일 장치 내에서 이루어지도록 설계하였다.



<그림 5.1-5> 복합응집장치의 모식도



<그림 5.1-6> 일반적인 응집시스템 종류별 원리 및 특징



<그림 5.1-7> 내부 Voltex Screen 모식도(루버홀 타공형)

## 5) 생태융합형 미디어공법 세부기술

생태융합형 미디어 공법은 다년생 식물과 고효율 미생물접촉재를 하나의 반응조내에서 동시에 사용하는 생물학적 수처리방법으로서, 기존의 식물을 이용한 인공습지 등의 자연형 처리공법과 접촉산화공법의 장점을 결합한 융복합 기술이다. 기존의 인공습지는 식물 및 토양의 흡착분해 기능만을 이용함에 따라 처리효율에 한계가 있고, 특히 동절기에는 식물고사로 효율이 오히려 저하되는 문제가 있다. 또한 홍수 시 토사 퇴적에 의한 유지관리문제가 대두되거나 모기 등 해충 서식처화되는 문제가 있다. 또한, 비자연형 수처리공법으로는 스크린, 와류형시설, 여과형시설 등의 물리적 처리방법과 약품을 이용한 화학적 처리방법 및 미생물접촉재를 이용한 생물학적 처리방법 등이 있으나, 물리적 처리방법은 처리효율이 상대적으로 낮고 동력비가 많이 소요되며, 특히 여과형시설은 여재 폐색에 의한 유지관리 효율저하의 문제가 크다. 화학적 처리방법은 약품 사용에 따른 유지관리비 증가, 처리수내 약품 잔량에 의한 2차 오염 문제가 대두될 수 있으며, 생물학적 처리방법은 미생물 생육에 필요한 용존산소, 수온 등에 민감하고 체류시간이 길어 부지면적이 크게 소요되는 단점이 있다. 특히 이러한 공법들은 농업용 저수지의 지리적 여건상 유지관리 인력이 상주하기 어려워 적용하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 수생식물과 미생물접촉재를 동시에 활용하여 기존 각각의 공법의 장점만이 결합된 처리효율이 높고 유지관리가 쉬운 융복합 기술로 개발하고자 하였다.

### (1) 장치 구성

본 장치는 로프형접촉재, 유동상접촉재, 경사판, Draft Tube(내통), 여과모듈, 탈착식 식생수로(달뿌리풀 등 식물포함), Air-mist, 봉형산기관(Draft Diffuser) 등으로 구성되어 있다.

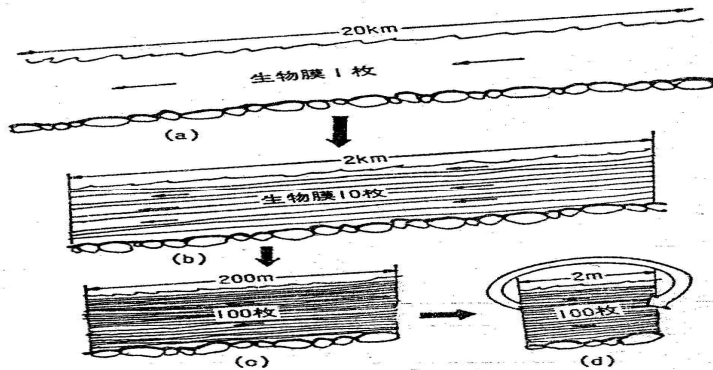
### (2) 공법의 기본원리

식생(달뿌리풀 등 식물)과 미생물접촉재(미디어)를 이용한 생물학적인 수처리 방법으로서, 미디어 부착미생물에 의한 BOD, SS 제거 및 식물뿌리에 의한 T-N, T-P 등 영양염류를 제거하는 공법이다. 정화원리는 <그림 5.1-8>과 같이 자연에서 하상 돌 표면에 부착되어 있는 미생물에 의해 오염물질이 분해되는 것을 이용한 원리로, 인공적으로 미생물막과

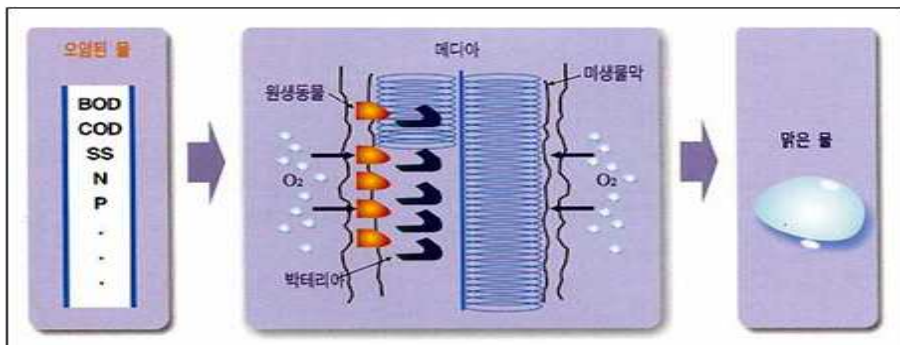
미생물 최적의 생존환경 조건을 만들어주어 오염물질 분해를 유도하는 시설이다.

(3) 개발목표 및 설계인자

- 체류시간 : 0.5~1.5시간
- BOD용적부하 :  $0.6\text{kg}\cdot\text{BOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$
- Media 충전률 :  $200\text{m}^3/\text{m}^3$  이내
- 유효수심 : 2mH 이하
- 적정 DO 농도 : 4ppm 이상
- Media 교체율 : 1회/10년 이상
- 식생예초율 : 1회/1년
- 시공가격(설치비) : 15만원/톤 수준 이하



<그림 5.1-8> 하천 자정작용 원리 및 미생물 접촉재의 발상



<그림 5.1-9> 미생물 메디아를 이용한 오염물질 제거 모식도



#### (4) 생태융복합 미디어의 특징(기존 기술과의 차별성)

생태융합형 미디어공법은 식생(달뿌리풀 등 식물)과 미생물접촉재(미디어)를 이용한 생물학적인 수처리 방법으로서, 미디어 부착미생물에 의한 BOD, SS 제거 및 식물뿌리에 의한 T-N, T-P 등 영양염류 제거가 가능한 미생물접촉산화방식의 생태융합형 자연정화방법이다.

미생물접촉산화방식의 미생물에게 필요한 공기를 공급할 때 단순히 수직으로 거치된 접촉재 하부에서 산기관을 이용해 직접폭기를 하는 경우, 전단력에 의한 미생물막이 탈리될 수 있으므로 본 장치에서는 Draft Tube(내통)를 이용한 간접 폭기방식을 이용하였다. 기존 장치에는 전단에 상향류 흐름의 유동상접촉재와 경사관을 두어 유입 SS Floc 해체 및 침전효율 향상을 유도하지만 본 연구의 개발 장치에서는 30 마이크로 크기의 마이크로버블 형태의 Air-mist을 도입하여 동력비 및 산기관 설치비용을 절감하였다. 또한, Air-mist는 부력이 작아 분당 3mm정도의 저속으로 부상하므로 물 표면에서 탈기하지 않고 수중에서 완전 소멸되어 산소 용해율을 극대화할 수 있으며, 음전하인 버블이 양전하의 유기성 오염물질을 쉽게 흡착 및 분해할 수 있을 것으로 기대된다.

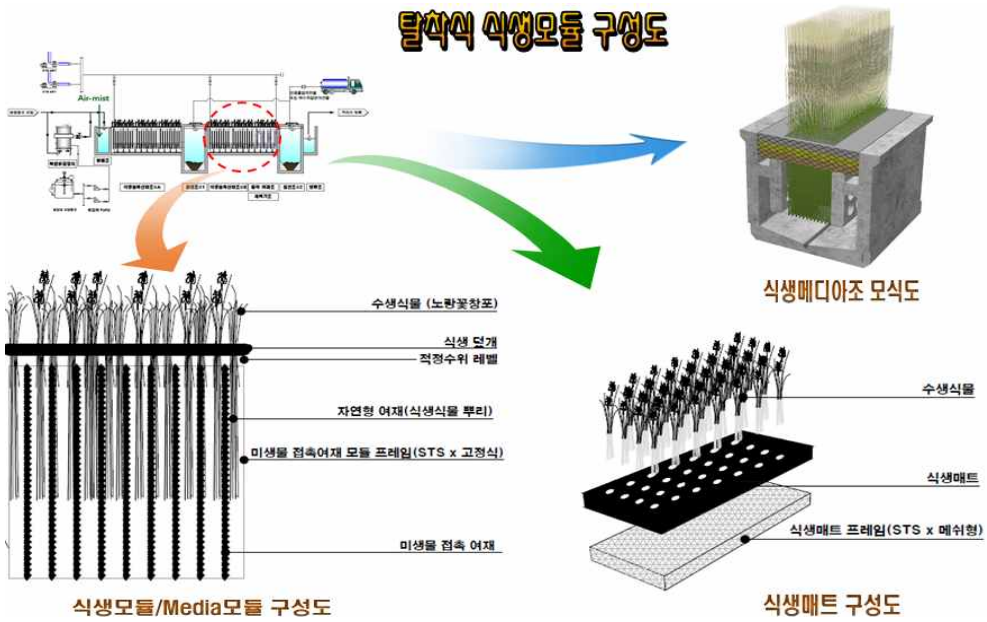
처리시설 상부는 수생식물을 식재함으로서 농업용 저수지의 자연성과 경관성을 향상시키고, 탈착식 식재매트 구성으로 홍수시 토사 퇴적 등에 의한 유지관리 문제점을 해소시켰다. 경제적인 측면에서도 이러한 Air-mist 공법 적용을 통해 산소 용해에 필요한 필요수심이 현저히 저감되어 수처리시설 토목구조물의 크기도 대폭 축소할 수 있을 것으로 예상된다. <그림 5.1-11>과 <그림 5.1-12>는 생태융합형 접촉미디어의 구성도 및 상세도이다.



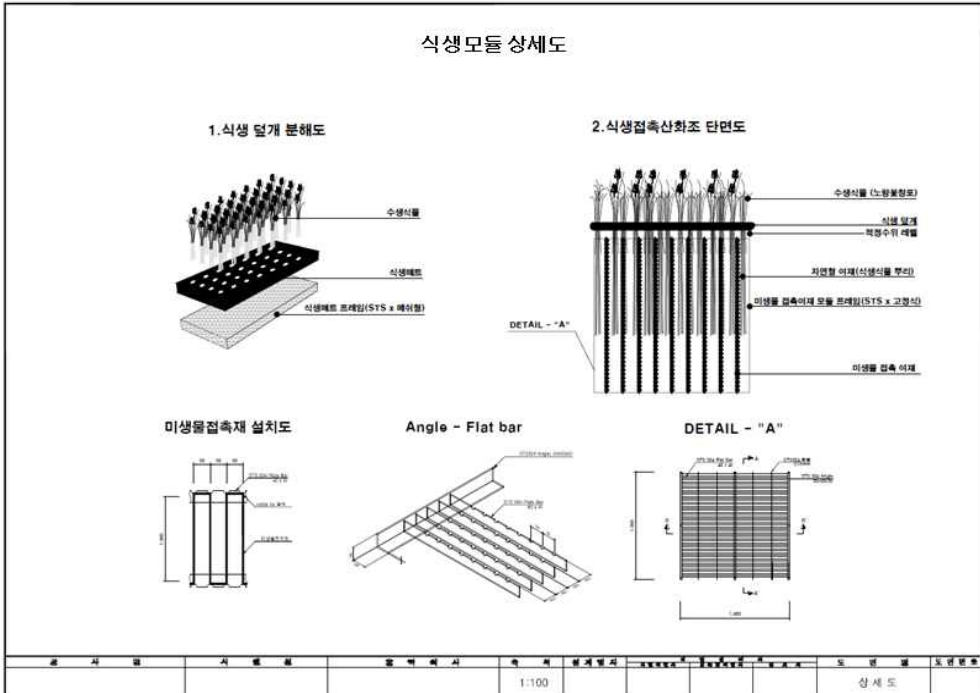
<그림 5.1-10> Air-mist 장치



# 탈착식 식생모듈 구성도



<그림 5.1-11> 생태융합형 접촉미디어 구성도



<그림 5.1-12> 생태융합형 접촉미디어 상세도

#### 4. 호내 수질정화기술 구성과 설계인자

##### 1) 수상복합정화장치(Multi-Floating Water Treatment Equip)

호내 수질개선을 도모하고 수환경을 개선하여 조류 증식을 억제하기 위하여 수상복합정화장치를 구상하였고, 구상도는 <그림 5.1-13>과 같다. 본 기술의 구성요소는 전기화학적 응집장치, 미디어를 이용한 미생물분해, 식물정화 및 토양흡착, 인공물순환장치, 마이크로버블장치로 구성되었고, 이동이 용이한 인공섬 또는 바지선 등을 선택적으로 조합하여 운영할 계획이다.

주요공정은 저수지 수면에 부유하도록 설치하여 저류조에 저수지 물을 펌프로 공급하여 전극봉이 다수 배치된 전기분해 및 전기응집수단에 의해 녹조균이 사멸 및 응집 침전되게 하고, 저류조의 외주 상측으로 미디어를 다수 수용한 미생물 처리조를 제한된 공간으로 마련하여, 녹조 사체와 물속의 부영양화 원인물질을 미생물이 섭취 제거하게 한 처리수는 미생물 처리조의 상방으로 오버플로우 되어 토양여과 및 식생분해조를 거쳐 저수지로 환류되도록 구성한 장치이다. 본 장치의 기능은 녹조제거 등 수면에서의 물순환 기능, 여과 및 분해작용을 이용한 수질정화기능, 식생에 의한 어류산란 및 조정기능 등 다양한 기능을 가진 복합정화장치이다.

본 장치는 연구의 2차년도인 2015년도에 기술을 완성하여 시작품을 제작할 계획이며, 제작된 수상복합정화장치는 실험실 및 소규모 저수지에서 성능평가 및 수질정화효율을 실험할 계획이다.



<그림 5.1-13> 수상복합정화장치의 개념도

## 제2절 융복합 수처리시스템 시제품 제작

### 1. 복합응집장치

#### 1) 장치의 구성

- 마이크로버블 발생장치
- 급속교반장치(인라인믹서)
- 부상촉진장치(전기유도)
- Washing Type 스크린(타공판)
- 회전식 floc 제거장치
- 필터부(여과재)

#### 2) 장치의 주요 제원

- 외형규격 :  $\phi 1000 \times 2,000\text{mmH}$
- 체류시간 : 10분 이내
- 재질 : 본체 및 내통 STS, 섬유상(또는 펄라이트) 여과재, 스크레퍼  
STS+EPDM
- 감속기 : 0.5HP  $\times$  10~60rpm
- 유입펌프 : 0.5HP $\times$ 100  $\ell$  /min  $\times$  6M
- 필터부 : 150mmH $\times$ 유동상 여재  $\phi 45$

#### 3) 지적재산권 취득 : 특허 출원 의뢰한 상태

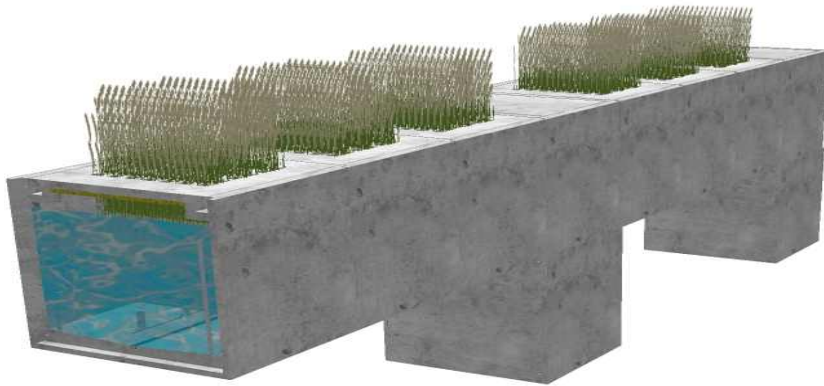
- 특허명 : 복합응집장치



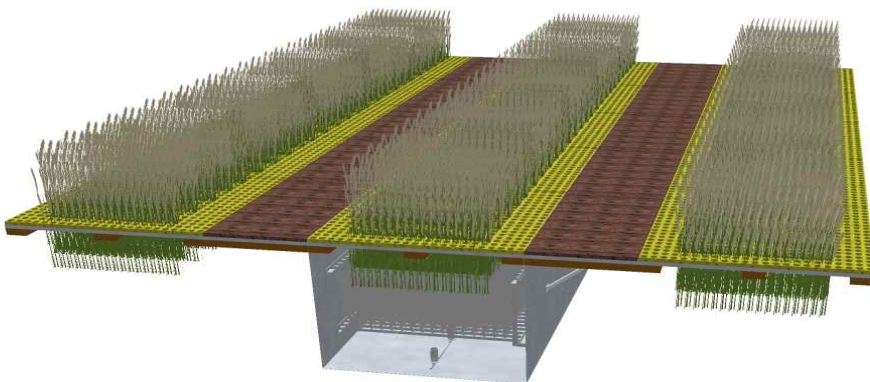
<그림 5.2-1> 복합응집장치 시제품 제작 과정

## 2. 생태융합형 미디어

생태융합형 미디어는 저수지 유입부 및 호소 가장자리에 적용할 수 있도록 <그림 5.2-2> 및 <그림 5.2-3>와 같이 수로식 및 부유식 일체형으로 고안하였다. 생태융합형 시스템은 Media모듈, 식생모듈, 공기공급시설, Air-mist, 펌프류 및 기타 시설로 구성되었다. 기타 필요 설비는 자동제어 설비, 초음파 수위계, 자동 모니터링 설비로 나눌 수 있다. 수로식 및 부유식 생태융합형 미디어 시스템은 미디어의 부착능력에 관한 실험실 규모의 성능 평가를 한 후에 시제품을 제작할 계획이다.



<그림 5.2-2> 수로식 일체형 생태미디어 시스템



<그림 5.2-3> 부유식 일체형 생태미디어 시스템

### 제3절 성능평가 및 수질정확효율 검증

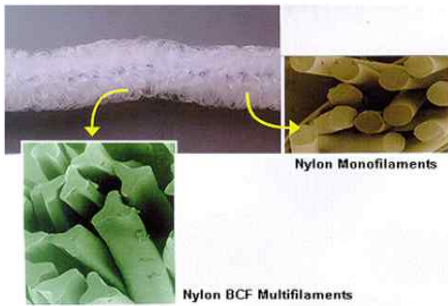
#### 1. 매디아 부착능력 평가

생태융합형 매디아시스템의 매디아의 선정을 위해서 매디아의 미생물 부착능력에 대한 평가를 실험실 규모로 하였다. 실험을 위하여 실험실에 337 ml의 용량의 아크릴 반응조에 두 종류의 매디아를 채우고, 5.4 L/d 유량으로 원수를 유입시켜 매디아 충전에 의한 생물학적 처리효율을 분석하였다. 매디아 실험을 위한 구성 장치는 <그림 5.3-1>과 같다. 실험을 위한 시스템은 크게 생물반응조와 송풍장치 및 유량조절 펌프로 구성되어 있으며, 생물반응조 내 미생물 접촉재로 사용된 매디아 사양은 각각 4mm 폴리프로필렌 로프사 재질로 직경이 40~45mm, 표면적이 1.4m<sup>2</sup>/m이상인 <그림 5.3-2,(a)>의 섬모상 매디아와 직경 10mm, 높이 6mm, 플라스틱 재질의 <그림 5.3-2,(b)> 담체형 매디아를 대상으로 하였다. 이 실험이 끝난 후에는 매디아 재질을 좀 더 다양화하여 부착실험을 할 예정이다.



<그림 5.3-1> Lab Scale 매디아 실험장치





(a) 섬모상 미디어



(b) 담체형 미디어

<그림 5.3-2> 미생물 부착능력 평가를 위한 미디어

일반적으로 나일론 섬모상 미디어는 미생물 부착능력이 타 재질의 미디어에 비해 월등하며, 표면적이 최대이고, 처리수질도 우수하며, 충격부하에 강한 장점이 있다. 또한, 통수 저항성이 적고 내심(접촉재가 끊어지지 않도록 지지하는 역할)이 있어 처지거나 끊어지는 현상이 없는 장점을 가지고 있다.

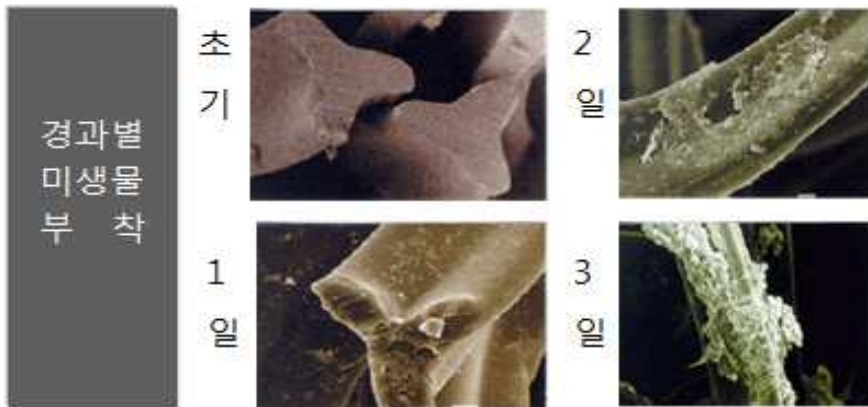
미디어 부착능력 평가 실험을 위한 운전조건은 (표 5.3-1)과 같다. 유입수량은 59L/일, 체류시간은 1.5시간, 유입수 DO는 2~3mg/L, 수온은 25±3℃를 유지하였다. 실험을 위한 오염수는 충북대학교 교내 연못물을 이용하였으며, 연못물의 수질특성은 (표 5.3-2)와 같다. 현재 실험수의 지속적인 공급으로 <그림 5.3-3>와 같이 미생물막을 형성 중에 있으며, 미생물막이 형성된 후에 SS, COD, TN, TP 항목을 대상으로 수질정화효율을 평가할 계획이다.

(표 5.3-1) 미디어 부착능력 평가실험을 위한 운전조건

구 분	운전조건
Q, L/day	59
Volume, L	3.7
HRT, hr	1.5
DO, mg/L	2~3
Temp., °C	25±3

(표 5.3-2) 실험에 사용된 인공연못 수질특성

수질항목	농도	평균
Color unit(CU)	13~14	13.5
TCDO (mg/L)	51~100	80
SCOD (mg/L)	25~50	40
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	7~10	8
DOC (mg/L)	4.22~4.23	4.23
Turbidity (NTU)	30~34	32
pH	8.45~8.73	8.59
UV254 (cm <sup>-1</sup> )	0.05~0.08	0.07



<그림 5.3-3> 시간경과에 따른 미생물 부착현상

## 2. 현장적용방안

복합응집장치는 12월에 제작된 시제품을 가지고 Lab 실험과 소규모 연못에서 현장적용실험을 할 예정이다. 생태융합형 메디아시스템은 Lab 실험 결과를 바탕으로, 미생물접촉재의 설계인자를 결정한 후 2차년도에 시제품을 제작하여 소규모 현장에 Pilot Plant를 설치하여 운영할 계획이다. 개발된 융복합 수처리 시스템은 소규모, 실규모 현장적용실험을 통해 시스템의 최적화를 도모할 계획이다.





## 제 6 장

---

# 요약 및 결론

---



## 제6장 요약 및 결론

### 6.1 국내 농업용 저수지의 물리적 및 수질 특성

- 국내에는 17,489개소(담수호 11개소 포함)의 농업용 저수지가 전국에 분포하고 있으며, 전체 수리담의 76.1%에 농업용수를 공급하고 있음
- 저수지 유효저수량별 분포현황은 10천 $m^3$  이하가 전체의 45.7%, 10~50천 $m^3$ 의 규모가 36.7%로, 50천 $m^3$  이하의 소규모 저수지가 전체의 82.4%를 차지하고 있으며, 1945년 이전에 설치되어 70년 이상된 저수지가 전체의 약 52%이고, 50년 이상된 저수지가 전체의 68.3%에 이르고 있음
- 유효수심에 따른 분포현황은 1m 이하는 전체의 26.6%이고, 3m 이하는 전체의 77.1%, 5m 이하가 전체의 91.1%로 수심이 낮은 저류지 형태이며, 유역배율(유역면적/만수면적) 5 이상이 전체 시설의 97.4%로 국내 농업용 저수지는 태생적으로 부영양화에 취약한 구조로 되어 있음
- 저수지 물리적 인자와 호 내 수질과의 상관성을 분석한 결과, 유역면적, 유효저수량, 유효수심, 저수량은 작을수록, 유역배율은 클수록, 저수지 준공년도는 오래된 것일수록 수질오염도가 높은 것으로 나타남
- 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인을 규명하기 위해 주성분 및 요인분석을 실시한 결과, 6개의 주요인이 도출되었으며, 각 요인과 상관성이 높은 변수는 각각 다음과 같음. 요인 1은 저수량, 수혜면적, 만수면적, 유역면적, 요인 2는 TN, TP, SS 변수, 요인 3은 제당높이, 유효수심, 준공년도, 요인 4는 pH, BOD, COD, TOC, Chl-a항목, 요인 5에는 제당길이, EC,  $Cl^-$ , 요인 6은 수온 및 DO로 분석됨
- 요인 1은 수리·수문학적 특성을 갖는 변수이고, 요인 2는 유입되는 입자성 오염물질과 상관성이 높은 변수, 요인 3은 저수지 용적에 관한 변수, 요인 4는 호소 내 물질대사와 관련 있는 변수, 요인 5는 호내 염류농도에 관한 변수, 요인 6은 계절적 변수로서, 저수지의 수질은 수리수문학적 특성에 의해 14.8%, 유역에서 유입되는 오염물질 등에 의해 14.5%, 유효수심 등 저수지 용적에 의해 13.3%, 호내 플랑크톤 증식 등 물질대사에 의해 11.8%, 강수량 등에 의해 10.5%, 그리고 겨울, 여름 등 계절적 요인에 의해 8.1%의 영향을 받는 것으로 나타났음

## 6.2 연구 대상지구 선정 및 현장 조사

- 본 연구에서 개발된 융복합 수처리기술의 현장적용실험을 위한 대상 지구로 국내 농업용저수지의 물리적 조건과 수질오염 특성을 대표할 수 있고, 농업용수 수질개선사업지구가 아니면서 지리적으로 접근이 용이한 경기도 관내 매화저수지, 과림저수지, 버들저수지를 대상 후보 지구로 선정하여 수질 및 퇴적물 조사를 실시하였음
- 매화저수지 수심은 2.0~2.4m이고, 표층수의 평균 COD는 12.9mg/L, 심층수는 11.1mg/L, 표층수의 TN과 TP는 각각 1.425mg/L, 0.121mg/L 이고, 심층수의 TN과 TP는 각각 1.433mg/L, 0.126mg/L로 시기에 상관 없이 수질오염도가 높았으며, 수층 간에 수질차이가 없는 것으로 나타남
- 매화저수지 주 유입하천은 2개소가 있으며, 평상시 평균유량은 유입-1은 472.2m<sup>3</sup>/일이고, 유입-2는 982.3m<sup>3</sup>/일로 유입-2가 유입-1에 비해 유량이 풍부한 하천임. 유입-1과 유입-2의 COD, TN, TP는 각각 5.4 mg/L, 5.161mg/L, 0.284mg/L와 5.0mg/L, 6.467mg/L, 0.340mg/L로 유입-1에 비해 유입-2의 TN, TP 오염도가 더 높은 것으로 나타남
- 과림저수지의 수심은 2.1~3.6m(평균 2.9m)이고, 표층수의 평균 COD는 18.5mg/L, 심층수는 15.7mg/L, 표층수의 TN과 TP는 각각 2.726mg/L, 0.186mg/L이고, 심층수의 TN과 TP는 각각 2.485mg/L, 0.176mg/L로 평상시 높은 수질오염도를 보였으며, COD, TN, TP 모두 심층수보다 표층수에서 더 높게 나타났음
- 과림저수지 주 유입하천은 1개소가 있으며, 유입하천의 평상시 평균 유량은 928.5m<sup>3</sup>/일이고, 유입하천의 COD, TN, TP는 각각 31.5mg/L, 8.456mg/L, 0.820mg/L로 유기물 및 영양물질의 수질오염도가 매우 높았으며, 이는 상류유역 미처리 생활오수의 지속적 유입에 기인된 것으로 판단됨
- 버들저수지 수심은 1.5~2.6m이고, 표층수의 평균 COD는 14.9mg/L, 심층수는 14.0mg/L이고, 표층수의 TN과 TP는 각각 1.622mg/L, 0.195 mg/L, 심층수의 TN과 TP는 각각 1.742mg/L, 0.275mg/L로 모든 항목에서 높은 수질오염도를 보이고 있으며, TN 및 TP는 표층수에 비해 심층수에서 더 높은 경향을 보임
- 버들저수지는 농경배수로 형태인 유입하천 2개소와 오수 배출구 1개소가 있는데 1개소 하천을 제외하고는 평상시에 유량이 거의 없으며,

유입-1의 평균유량은 1,483.5m<sup>3</sup>/일이고, COD, TN, TP 평균농도는 각각 4.8mg/L, 6.506mg/L, 0.264mg/L로 TN, TP의 오염도가 매우 높음

- 퇴적물 입도분석 결과, 토성은 매화저수지는 Sand, 버들저수지는 Silt, 과림저수지는 Silt Sand Loam에 근접하였으며, 퇴적물 오염도는 매화, 과림, 버들저수지 모두 높은 농도로 나타나 팔당호 준설 기준을 초과하였음. 매화저수지에서 TN 농도는 4629~6,152mg/kg, TP 1,145~1,228mg/kg, 강열감량은 13.27% 범위로 조사되었음
- 퇴적물 용출량 실험결과, 인 용출은 혐기성 조건에서 활발히 일어났으며, 혐기성 조건에서의 매화지, 버들지, 과림지 퇴적물 내 인 용출속도는 각각 3.03~3.35mg/m<sup>2</sup>·d, 2.72~4.38mg/m<sup>2</sup>·d, 0.99~1.68mg/m<sup>2</sup>·d로 매화지의 용출속도가 가장 많은 것으로 나타남

### 6.3 국내의 수질개선기술 개발 동향 및 실용화 사례

- 저수지 수질오염과 녹조문제를 해결하기 위해 국내외에서 오랫동안 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되었고, 현장적용을 시도하고 있음. 국내에서는 저수지와 댐을 관리하고 있는 우리 공사와 수자원공사에서 주로 현장적용 및 수질개선사업을 주도하고 있음
- 물리적 제어기술로는 인공폭기와 강제순환, 준설, 희석과 플러싱, 수위 저하와 침전여과, 퇴적물 건조, 퇴적물 캡핑, 선택취수, 수류 차단막, 초음파 기술 등이 개발되었고, 일부 기술은 현장에 적용되었음
- 화학적 제어기술은 천연살조제, 응집제, 보리벚짚 활용 등에 관한 연구가 주로 이루어졌으며, 국내와 달리 미국, 호주, 유럽 등의 국가에서는 알루미늄 화합물 등 응집제를 이용하는 기술 개발이 활발히 이루어졌으며, 오늘날에는 호소의 인 불활성화와 퇴적물 제어를 위한 일반적인 기술로 정착되고 있음
- 생물학적 제어기술로는 인공습지, 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 오염원 제어와 천적생물 및 어류조절을 통한 조류제어 기술들이 개발되어 적용되고 있으며, 최근에는 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어 방법에 대한 연구가 진행됨. 다양한 종류의 생물학적 수질 개선 방법이 연구되었으나, 저수지의 특성, 기후 등 환경조건에 따라 각기 다르게 반응하는 한계성 때문에 범용적 적용에 어려움이 있음

- 물리적 제어기술인 수중폭기장치, 인공물순환장치는 설치비용 대비 녹조제어 혹은 수질개선 효과가 미미하며, 실제 대규모 호소에 적용할 경우 영향반경이 작아 시설 투자비용이 높아질 수 있음. 또한 수체의 성층 조건에 따라 운전을 정교하게 하지 않을 경우 수질악화 우려도 있으며, 가압부상장치와 조류제거선도 역시 국부적으로 밀집된 조류의 수거에 용이한 기술이지만 광범위한 수면에서는 효율이 떨어지며 일회성 대책으로 효과의 지속성이 부족한 한계성이 있음
- 초음파, 마이크로버블, 전기분해 및 응집 등은 국부적인 녹조제어 효과는 있으나, 대규모 저수지에서 처리 규모의 한계, 비용 상승의 한계점이 있으며, 조류 차단막 및 수류 차단막은 수온 성층 등 수리적 조건과 오염부하 경로 조건이 적합하지 않은 경우 조류 제어 효과가 미미하며, 홍수시 집적된 조류가 다시 유입될 우려가 높음
- 화학적 처리공법은 인 불활성화, 조류 성장 제어 등의 기술은 단기 효과가 뛰어난 반면 효과의 지속성, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점이 있어 단일기술로는 적용에 한계가 있음. 특히 실용화를 위해 적정투여량 측정기법, 응집제 투여 비용, 경제성 검토, 호소 내 투여 방법 및 설비 등에 관한 연구가 먼저 선행되어야 함
- 생물학적 처리공법은 호소의 수질정화 효과가 불확실하며 한 가지 방법으로는 효과를 기대하기 어려움. 특히 계절에 따른 변동성에 취약하며, 인공습지 및 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 제어기법 이외에는 농업용 저수지에 적용된 사례가 거의 없음
- 물리적, 화학적, 생물학적 각각의 개별 기술들은 녹조발생과 관련된 요인들(영양염류, 빛, 수온성층, 남조의 부력조절 등) 중 일부 요인을 차단, 억제, 파괴, 제거함으로써 일시적으로 저수지 수질을 정화하는 효과는 있으나, 대부분 처리규모의 한계, 수질개선효과의 지속성, 유지관리의 어려움, 경제성, 생태·환경적 영향 등의 문제점 때문에 범용적 실용화에 한계가 있으므로, 이러한 한계성을 극복할 수 있는 기술개발이 필요함

#### 6.4 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리 기술 개발

- 본 연구에서는 국내 농업용 저수지의 물리적 및 수질오염 특성을 고려하여 저수지의 수리·수문학적 변화(강수량, 저수량 등)에 영향을

- 받지 않고, 유기물, N, P에 대한 처리효율이 높고, 수질효과를 장기간 지속할 수 있으며, 현장의 부지활용성, 시공가능성, 경관성, 유지관리 용이성, 경제성 등을 고려하여 융복합 수처리 기술을 개발하였음
- 융복합 수처리기술은 호소 유입수와 호내 수역을 대상으로 하였으며, 유입수 수처리의 목표는 호 내로 유입하는 고형물, 유기물, 질소, 인의 저감에 있으며, 호소는 DO 공급 등 수환경을 개선하여 부영양화를 사전에 예방하고 녹조 대발생시 녹조 제어를 목표로 하였음
  - 호 유입부의 고형물, 유기물, N, P 부하량 저감을 위한 요소기술은 고속 응집 및 여과, 생물막 여재(유기물 제거)와 식물정화(질소, 인 제거) 기능을 유기적으로 조합하는 물리적, 화학적, 생물학적 융복합 처리 공정으로 구상하였음. 처리 공정은 유입 및 전처리, 고속복합응집장치, 생태융합형 접촉산화조, 침전조, 흡착여과조, 방류조 순으로 구성하였으며, 고속복합응집장치는 유입수의 성상 및 현장여건에 따라 선택적으로 운영할 수 있도록 설계하였음
  - 호 내에서는 호소 수질개선 및 녹조제어를 위한 융복합 기술로 설계 하였으며, 기술의 구성요소는 전기화학적 응집장치, 미디어를 이용한 미생물분해, 식물정화 및 토양흡착, 인공물순환장치, 마이크로버블, 이동이 용이한 인공섬 또는 바지선 등을 선택적으로 조합할 수 있도록 설계하였음
  - 복합응집장치와 생태융합형 미디어조의 주요 설계인자인 체류시간, BOD 용적부하율, 미디어 충전률, 유효수심, 적정 DO 농도, 응집제 투입률 등을 Pilot Plant 실험을 통해 최적화할 계획임

## 6.5 융복합 수처리장치 시제품 제작 및 성능평가

- 고속복합응집장치는 마이크로버블장치, 급속교반장치, 부상축진장치, 회전식 플러 제거장치, Washing Type 스크린, 필터부로 구성되었으며, 시제품은 외형규모는  $\phi 1000 \times 2,000 \text{mmH}$ , 재질은 본체 및 내통 STS, 섬유상 (또는 펄라이트) 여과재, 스크레퍼 STS+EPDM, 유입유량은 100m<sup>3</sup>/일, 체류시간은 10분 이내로 설계하여 시제품을 제작하였음
- 생태융합형 미디어는 저수지 유입부 및 저수지 가장자리에 적용할 수 있도록 수로식 및 부유식 일체형으로 고안하였으며, 구성은 미디어 모듈, 식생모듈, 공기공급시설, 에어 미스트, 펌프류 및 기타시설로 되어 있고,

현재 설계는 완료되었으며, 시제품은 미디어 종류를 확정된 후 제작할 계획임. 현재 미디어의 선정을 위해서 미디어의 재질 종류에 따른 미생물 부착능력과 수질정화효율 실험을 실시하고 있음

- 호소수 정화목적으로 개발된 수상복합정화장치는 전기화학적 응집장치, 미디어를 이용한 미생물분해, 식물정화, 토양흡착, 인공물순환장치, 마이크로버블장치로 구성되었고, 이동성과 고정성을 선택적으로 조합할 수 있도록 구상하여 현재 기술개발 중에 있으며, 2차년도에 기술완성도를 높여 시제품을 제작할 계획임





---

## 참고문헌

---





## 참고문헌

- 강원도, (2014), 강원도 저수지의 수환경 특성과 지역자원화 방안  
경기개발연구원, (2012), 경기도 농업용수 수질현황 및 관리방안  
국립환경과학원, (2008), 제2단계 수계오염총량관리기술지침  
금강수계관리위원회, (2012), 대청호 및 보령호 수질관리를 위한 조류발생  
억제 방안 연구(III)  
금강유역환경청, (2010). 대청호 맑은 물 포럼 운영 결과 보고서  
김민영, 노황원, 이승윤, 지흥기, (2008), 에너지 순환시스템을 이용한 생태  
연못의 수질개선, 한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집, pp.  
2127~2131  
김범철, 알루미늄염 응집제를 이용한 저수지 수질개선방법. 농어촌과 환경  
No.93 pp. 148~157  
김종일, 송창수, (2008), 자연정화방식에 의한 농업용저수지 수질개선, 전남  
발전연구원  
김형진, 김지환, 오희목, 장감용, 임경묵, & 심문보. (2002). 연구논문: 세라믹  
처리수의 조류생장 억제 효과. 한국환경과학회지, 11(9), 979-985  
김호일, (2011), 농업용 호소 수질현황과 개선계획. 전원과 자원. 52(2):  
10-22  
나기환, 박경대, 최우정, 박영철. (1997), 수질관리 (2): 황토살포에 의한  
*Cochlodinium polykrikoides* 적조제어 기술개발. 한국물환경학회 학술  
발표논문집 (~1999), 1997(1), 53-55  
농어촌연구원. (2008), 농업용수 수질개선 대책 추진체계 정립 및 대안평  
가기법 연구  
농업기반공사, (2004), 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계·관리 요령  
농림수산식품부, 한국농어촌공사, (2012), 2012농업용수 수질측정망조사  
보고서  
농림수산식품부, 한국농어촌공사, (2009), 농업용저수지 수질개선사업 조사·  
설계편람  
박우하, 박희진, (2009), 인공습지 갈대관리, 물과미래, Vol. 42(3), pp. 29~32  
서동일, 송무석, 황현동, 최 재훈, (2004), "저수지의 수질관리를 위한 산기판형  
인공순환장치의 설계방법", 대한상하수도학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 437-444

- 유광현, 이건직, 성진욱, 김동섭, 박제철, (2011), 농촌지역 비점오염물질의 유출특성, *Korean J. Limnol.* 44(2), pp 178~186
- 윤진호, 서동일, 이용성, 서미진, 탄동천의 현황 및 수질개선을 위한 인공 습지 설계방안, *한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집*, pp. 1957~1961
- 이혜숙, 정선아, 신재기, (2010). K-Water 녹조제거선 기술 개발. *대한상하수도 학회·한국물환경학회 2010년 공동 추계학술발표회 논문요약집* 287-288
- 임병진, 김상훈, and 전선욱. "식물체를 이용한 조류제어 현장 적용성 실험." *Korean J. Limnol* 35.2 (2002): 123-132
- 조영철, (2011), 녹색성장 기반 조성을 위한 농업용 저수지의 친환경적 퇴적물 처리 사업. *전원과 자원.* 52(2): 45-52
- 장정렬, 최강원, 정지연, (2011), 새만금유역 농업비점오염 저감기법개발연구, *물과미래*, Vol.44(7), pp.37~43
- 조주연, (2001), 소하천에서 수질개선 시스템에 관한 연구. *서울과학기술대학교 석사학위논문*
- 최지용, 반양진. (2007), 저수지 비점오염원 저감을 위한 인공습지의 설치효과 및 개선방안. *한국환경정책평가연구원*
- 한국농촌공사, (2006), 농업용수 수질개선공법 매뉴얼
- 한국농촌공사, (2006), 농업용수 수질개선 조사·설계 매뉴얼
- 한국농촌공사, (2007), 농촌지역 비점오염관리 가이드북
- 한국농어촌공사, 농어촌연구원, (2012), 2012년 농업용수 수질개선특별대책 조사지구별 단기수질개선대책 보고서
- 한국수자원공사 수도권운영처, (1993), 연초댐 저수지의 수중폭기에 의한 수질 개선 효과분석 보고서
- 한국환경공단, (2012), 수생태계 안전성 향상을 위한 조류저감기술
- 허우명, 김재욱, 김범철, (1999), 상수원지(달방댐)에서 수중폭기에 따른 수질 변화 연구, *한국물환경학회지*, 제15권, pp 335~343
- 환경부, (2011), 지류·지천 수질·수생태계 개선계획 마련을 위한 연구 보고서
- 환경부, (2011), 수질오염공정시험기준
- 환경부 물환경정책국, (2009), 비점오염저감시설 모니터링 결과 자연유하형 접촉산화에 의한 저수지의 정화시스템/용수와 폐수/1984
- 환경부, (2001), 한국의 호소환경조사기법개발에 관한 연구
- 환경부, (2009), 한강수계 오염총량관리계획수립지침 개정안

- 환경부, (2009), 호소 수질관리방안에 관한 연구  
 홍원석, 송동근, 심완호, 오종민, 미세기포를 이용한 수질개선대책, Journal of KOSHAM, Vol.10(1), pp. 92~99
- Asaeda, T., Pham, H.S., Priyantha, D.G., Manatunge, J., and Hocking, G.C. (2001). Control of algal blooms in reservoirs with a curtain: a numerical analysis. *Ecological Engineering* 14: 395-404
- Asaeda, T., Priyantha, D.G., Saitoh, S., and Gotoh, K. (1996). A new technique for controlling algal blooms in the withdrawal zone of reservoirs using vertical curtains. *Ecological Engineering* 7: 95-104
- Barrett, P. R. F., Littlejohn, J. W., Curnow, J. (1999): Long-term algal control in a reservoir using barley straw. *Hydrobiologia*, 415, 309-313
- Barrett, P.R.F., Curnow, J.C., Littlejohn, J.W. (1996): The control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barley straw. *Hydrobiologia*, 340, 307-311
- Bernhardt, H. (1980): Reservoir protection by in-river nutrient reduction.  
 - In: *Restoration of Lakes and Inland Waters*. EPA 440/5-81-010. pp. 272-277
- Brainwood, M. A., S. Burgin, and B. Maheshwari (2004) Temporal variations in water quality of farm dams: Impacts of land use and water resources. *Agric. Water Mgmt.* 70(2):151-175
- Carlson, R.E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22(2):361-369
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A., Nichols, S. A. (2005): *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. 3rd edition. Editor - Cooke, G.D., Taylor an Francis, BocaRaton,Florida.591p
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S., & Nichols, S. A. (2005). *Restoration and management of lakes and reservoirs*. CRC press
- Cooke, G. Dennis, and Robert E. Carlson. "Water quality management in a drinking water reservoir." *Lake and Reservoir Management* 2.1 (1986): 363-371
- Cooke, G.D., Welch, E.B., Peterson, S.A., and Newroth, P.R. (2005).

- Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. Third ed.  
Taylor and Francis Group
- Cooke, G.D., Welch, E.B., Spencer, A.P. and Newroth, P.R. (1993).  
Restoration and management of lakes and reservoirs. Lewis  
Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 548
- De Bernardi, R., Giussani, G. (1995): Biomanipulation in Lakes and  
Reservoirs Management. Guidelines of Lake Management, Vol. 7.  
International Lake Environment Committee Foundation and the  
United Nations Environment Programme, Kusatsu
- Doosti, M.R., Kargar, R., Sayadi, M.H. Water treatment using  
ultrasonic assistance: A Review. Proceedings fo the International  
Academy of Ecology and Environmental Sciences, 2(2): 96-110
- Dunalska, J., Wisniewski, G., Mientki, C. (2001): Water balance as a factor  
determining the LakeKortowskierestoration.LimnologicalReview,1,65-72
- Everall, N.C., Lees, D.R. (1996): The use of barley-straw to control  
general and blue-green algal growth in a Derbyshire reservoir.  
Water Research, 30, 269-276
- Gulati, R.D., Lammers, E.H.R.R., Meijer, M.-L., van Donk, E. (1990):  
Biomanipulation. Tool for Water Management. Preface. Hydrobiologia,  
200, R9-R10, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- HARPER, HARVEY H., MARTIN P. WANIELISTA, and YOUSEF A.  
YOUSEF. "Restoration of Lake Eola." Lake Restoration, Protection,  
and Management (1983): 13-22
- Hart, B., Roberts, S., James, R., Taylor, J., Donnert, D., Furrer, R.  
(2003): Use of active barriers to reduce eutrophication problems in  
urban lakes. Water Science and Technology. 47, 157-163
- Helsel, D., Madsen, J., and James, B. (2003). Big Muskego Story:  
Rehabilitating a large shallow lake. Lakeline 23(1): 21-28
- Jacobs, P. H., Forstner, U. (1999): Concept of sub aqueous capping of  
contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using  
natural and modified zeolites. Water Research. 33, 2083-2087
- Jacoby, J.M., Lynch, D.D., Welch, E.B., and Perkins, M.A. (1982).

- Internal phosphorous loading in a shallow eutropic lake. *Water research* 16: 911-919
- Kyotoh, H. (2012) Applications of Swirling-type Micro-bubble Generator to Engineering Problems. Special Seminar on Micro/Nano-bubble Technology in Thailand
- Lazzaro, X. (1997): Do the trophic cascade hypothesis and classical biomanipulation approaches apply to tropical lakes and reservoirs? *Verh. Int. Verein. Limnol.* 26, 719-730
- Lee, T. J., Nakano, K., Matsumura, M. (2002): A novel strategy for cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation. *Water Science and Technology*, 46, 207-215
- Nürnberg, G.K. (1987): Hypolimnetic withdrawal as a lake restoration technique. *Journal of environmental engineering*, 113, 1006-1017
- Perrow, M.R., Meijer, M.-L., Dawidowitz, P., Coops, H. (1997): Biomanipulation in shallow lakes: State of the art. *Hydrobiologia*, 342/343, 355-365
- Reynolds, C.S. (1994): The ecological basis for the successful biomanipulation of aquatic communities. *Archiv für Hydrobiologie*, 130, 1-33
- Ripl, W. (1976): Biochemical oxidation of polluted lake sediment with nitrate. A new restoration method. *Ambio*, 4, 312-315
- Shapiro, J. (1995): Lake restoration by biomanipulation—a personal view. *Environ. Rev.* 3, 83-93
- Shapiro, J., Lammara, V., Lynch, M. (1975): Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration. In: Brezonik P.L., Fox J.F. (Eds), *Proceedings of a symposium on water quality management through biological control*. Univ of California, Gainesville, p.85-96
- Takahashi, M., Chiba, K., Li, P. (2007): Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus. *J. Phys. Chem. B*, 111, 1343-1347
- Takahashi, M., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Ohnari, H., Himuro, S., Shakutsui, H. (2003): Effect of Shrinking Microbubble on Gas

- Hydrate Formation. *J. Phys. Chem. B*, 107, 2171–2173
- Tsujimura, S. (2004): Reduction of germination frequency in *Anabaena* akinetes by sediment drying: a possible method by which to inhibit bloom formation. *Water Research*, 38, 4361–4366
- Van Hullebusch, E., Deluchat, V., Chazal, P.M., Baudu, M. (2002): Environmental impact of two successive chemical treatments in a small shallow eutrophied lake: Part II. Case of copper sulfate. *Environmental Pollution*, 120, 627–634
- Verner, B. (1996): Provozdušňování. in: Eiseltořá, M. (edit.): *Wetlands International*. 32: 69–74
- Visser, P.M., Ibelings, B.W., Van der Veer, B., Koedood, J., Mur, L.R. (1996): Artificial mixing prevents nuisance blooms of the cyanobacterium *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, the Netherlands. *Fresh water Biology*, 36, 435–450
- Welch, I.M., Barrett, P.R.F., Gibson, M.T., Ridge, I. (1990): Barley straw as an inhibitor of algal growth. *Studies in Chesterfield Canal*. *J. of Appl. Phycol.* 2, 231–239



## 연구 참여자

목 차	소 속	참여자	비고
1장 서론	농어촌연구원 농공연구실	최선화 이태호	
2장 농업용 저수지의 물리적 및 수질오염특성	농어촌연구원 농공연구실	최선화 김해도	
3장 연구대상지구 선정 및 현장조사	농어촌연구원 농공연구실	최선화 이진경 김동환 공동연구기관	
4장 농업용수 수질개선 기술 개발동향 및 적용성 검토	농어촌연구원 농공연구실	최선화 이태호 공동연구기관	
5장 농업용수 융복합 수처리기술 개발 및 설계	농어촌연구원 농공연구실	최선화 협동연구기관 공동연구기관	
6장 요약 및 결론	농어촌연구원 농공연구실	최선화	



## 주 의

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

### ■ 발 행 처

연구과제명 : 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용	
발 행 일	2014. 12
발 행 인	박 정 환
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 870 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	