



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

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



농림축산식품부



한국농어촌공사



본 보고서를 “양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용(Ⅳ)”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017년 12월 31일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사  
농어촌연구원

연구책임자 : 최 선 화

연구 원 : 이 승 헌

허 남 주

김 민 규

유 선 아

공동연구기관명 : 충북대학교  
산학협력단

연구책임자 : 조 영 철

연구 원 : 정 세 응

오 경 희

협동연구기관명 : 수생태복원(주)

연구책임자 : 김 흥 섭



## 요 약 문

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

### 2. 연구기간 : 2017.01 ~ 2017.12. (4년 중 4년차)

### 3. 연구개요

#### 3.1 연구배경 및 필요성

- 전국에는 약 17,500여개의 농업용 저수지가 있으며, 전체 물 이용량의 약 60%를 농업용수로 사용하고 있음. 최근에는 농어촌 지역의 도농복합형태 개발 및 농업용 저수지의 레저 관광지화 등 오염원의 꾸준한 증가와 극심한 가뭄 등 이상 기후현상 등으로 농업용수 수질오염이 심화되고 있음
- 국민들의 먹거리에 대한 관심 증가로 친환경 안전농산물 생산을 위한 양질의 농업용수 수요 증가, 농업·농촌지역의 어메니티 중시, 농어촌지역 관광산업 활성화, 농업용수의 다목적 활용 요구 증가 등 농업용 저수지에 대한 역할이 지속적으로 증가되고 있음
- 농업용 저수지에는 유역의 미처리 생활하수, 축산폐수, 토지이용에 의한 비점오염원 등이 특별한 처리 없이 유입되고 있어 호 내에는 부유물질, 유기물, 영양물질 등 오염물질의 종류가 다양하게 존재하며, 설치된 저수지의 퇴적층에서 수중으로 재 용출되는 영양염류 등은 호소의 수질오염 및 부영양화 등을 촉진시키는 요인이 되고 있음
- 특히, 늦봄~초가을에 외기온도 상승 및 저수지의 수위 저하와 함께 호소의 부영양화 증가, 녹조 대량 발생 등으로 수질오염도가 급상승하고 있으며, 이로 인해 물고기 폐사, 악취발생 등으로 민원이 발생되고 있음
- 농업용수 수질개선 연구는 그동안 주로 유입수의 질소, 인 등을 저감하기 위한 인공습지와 같은 자연정화공법이 주를 이루었음. 최근에는 호소와 하천의 녹조 및 수질오염 문제를 해결하기 위해 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되고 있으나 대부분 처리 규모의 한계, 유지관리의 어려움, 경제성, 생태·환경적 영향 등의 문제로 인하여 농업용 저수지의 현장적용에 어려움이 있었음

- 농어촌 지역의 농업용 저수지는 농업용수 공급이 주 목적이므로 친환경적이며, 설치비가 저렴하고 유지관리가 용이하여야 하며, 농업용 저수지의 특성상 대규모의 많은 수량을 대상으로 하므로 저비용, 고효율의 융복합 수처리 기술 개발이 필요한 실정임

### 3.2 연구 목적

- 농업용 저수지의 부영양화 및 수질오염을 사전에 방지하여 양질의 농업용수를 확보하고자 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 특성에 적합한 저비용·고효율의 융복합 수처리 기술을 개발하고자 하였음

### 3.3 연도별 연구범위 및 내용

구분	연구목표	연구내용 및 범위
2014년 (1차년도)	농업용 저수지의 물리적/수질오염특성 분석 및 관련기술개발 사례분석	○ 농업용수 물리적 특성 분석 ○ 농업용수 수질오염 진단 ○ 관련 기술개발 현황 및 사례분석 ○ 농업용수 수처리 시스템 개발 방향 정립
	기존 수처리 단위공정 /요소기술 검토	○ 수처리 기술의 농업용저수지 적용 실효성 분석 - 물리적 제어기술의 적용 실효성 검토 - 화학적 제어기술의 적용 실효성 검토 - 생물학적 제어기술의 적용 실효성 검토
	대상수역별 수처리 요소기술 개발	○ 대상수역별 적용 가능한 공정/요소기술 개발 - 저수지 유입부에 적합한 단위공정 추출 - 저수지 호내 수질개선에 적합한 공정 추출
	융복합 수처리 공정의 요소기술 검증	○ 요소기술에 대한 실험실 규모의 검증 - 실험실 규모의 기초 실험 검증 - 공정/요소기술의 문제점 도출
2015년 (2차년도)	현장적용실험을 위한 대상지구 선정/조사	○ 현장적용실험을 위한 연구 대상지구 선정 ○ 대상지구 환경조건 연속모니터링 ○ 대상지구 수질 및 퇴적물 오염도 변화 조사
	융복합 수처리 시스템의 현장 Test-bed 설치 및 성능평가	○ 융복합 수처리시설의 현장적용 성능평가 - 현장적용실험을 위한 Test-bed 구축 - Test-bed를 통한 수처리효율 평가 - 저수지 수질개선에 미치는 효과 분석(모델링)
	저수지 호 내 대상 수질정화시스템 기술개발	○ 호소 수질정화기술개발 및 성능평가 - 부력체 및 동력장치 등 제반기술 검토 - 단위공정별 시제품 제작 및 성능평가
	융복합 수처리 기술의 지식재산권 확보	○ 지식재산권 확보 - 개발 수처리공법/기술에 대한 특허 등록

구 분	연구목표	연구내용 및 범위
2016년 (3차년도)	유입수 수처리 기술의 현장적용실험 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험 및 성능평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합응집장치와 연계 성능평가</li> <li>- 기술개선(바이오스톤 볼 담체 개발)</li> <li>- 요소기술의 성능평가 및 수처리효율 평가</li> <li>- 저수지 수질 및 퇴적물 오염도 개선에 미치는 영향(효과) 분석</li> <li>- 수생태계에 미치는 영향 검토 및 분석</li> <li>- 타 저수지 확대적용을 위한 적용모형 개발</li> </ul> </li> <li>○ 바이오스톤 접촉산화시스템 현장적용실험 및 성능평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 요소기술의 성능평가 및 수처리효율 평가</li> <li>- 저수지 수질개선효과 분석</li> <li>- 수생태계에 미치는 영향 검토 및 분석</li> <li>- 타 저수지 확대적용을 위한 적용모형 개발</li> </ul> </li> </ul>
	호소수 대상 융복합 수처리시스템 시제품 제작 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 호소수 대상 수처리 시스템의 시험모형 제작 및 현장적용실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 호소수 대상 융복합 수처리시스템 시험모형 제작</li> <li>- GPS기반 무인항법 프로그램 요소기술 평가</li> <li>- 저수지 수생태계에 미치는 영향 분석</li> </ul> </li> </ul>
	융복합 수처리 기술의 기술성/경제성 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리 기술의 기술성/경제성 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 타 유사기술 대비 기술적 우위성 분석</li> <li>- 타 유사기술 대비 경제적 우위성 분석</li> </ul> </li> </ul>
2017년 (4차년도)	융복합 수처리 기술의 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리시스템의 현장적용성 평가(계속)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 여재 폐색성 등 핵심기술에 대한 성능평가</li> <li>- 수질정화효율 및 수질개선효과 분석</li> <li>- 부착미생물에 의한 오염물질 정화기작 규명</li> </ul> </li> <li>○ 융복합 수처리 시스템의 최적모델 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 농업용 저수지에 적합한 최적의 시스템 개발                   <ul style="list-style-type: none"> <li>· 유입수 수처리기술 및 공정</li> <li>· 호소수 수처리기술 및 시스템</li> </ul> </li> <li>- 융복합 수처리시스템 최적 설계인자 도출</li> </ul> </li> </ul>
	융복합 수처리공법 운영관리메뉴얼 마련	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수처리 시스템의 스마트 운영관리기술 개발</li> <li>○ 융복합 수처리시설의 운영관리 메뉴얼 마련               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유입수 수처리 기술 및 시스템</li> <li>- 호소 대상 수질정화시스템</li> </ul> </li> </ul>
	융복합 수처리 기술의 실용화/사업화방안	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리 시스템의 현장적용방안 제시               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현장적용 유형 및 기술이전 방안</li> <li>- 수처리 시스템의 실용화/사업화 방안 제시</li> </ul> </li> </ul>

## 4. 주요 연구결과

### 4.1 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 진단

#### 1) 농업용 저수지의 물리적 특성

- 국내에는 17,489개소의 농업용 저수지가 전국에 분포하고 있으며, 저수지에서 전체 수리답의 76.1%에 농업용수를 공급하고 있음
- 농업용 저수지의 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 차지하며, 1945년 이전에 설치되어 70년 이상 된 저수지가 전체의 약 52%이고, 50년 이상 된 저수지가 전체의 68.3%에 이르고 있음
- 유효수심(유효저수량/만수면적)에 따른 분포는 1m 이하가 전체의 26.6%, 3m 이하가 전체의 77.1%, 5m 이하가 전체의 91.1%로 농업용 저수지는 대부분 수심이 5m 이하이며, 유역배율(유역면적/만수면적)은 5이상이 전체 시설의 97.4%로 국내 농업용 저수지는 태생적으로 부영양화에 취약한 구조로 되어 있음
- 저수지 물리적 설계인자와 호 내 수질과의 상관관계를 분석한 결과, 유역면적, 유효저수량, 유효수심, 저수량은 수치가 작을수록, 유역배율 지수가 클수록, 저수지 준공연도가 오래된 것일수록 수질오염도가 높은 것으로 나타남

#### 2) 농업용 저수지의 수질영향 요인 및 수질오염 진단

- 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인 규명을 위해 농업용수 수질측정망 DB 자료 6,338개의 수질자료와 저수지의 시설제원 등을 대상으로 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 주성분 및 요인분석을 실시한 결과, 저수지 수질에 영향을 주는 주요 요인으로 6개의 주요인이 도출되었음
- 요인 1은 저수량, 수해면적, 만수면적, 유역면적 등의 수리·수문학적 설계인자이고, 요인 2는 TN, TP, SS 등으로 유역 내에서 저수지로 유입되는 입자성 오염물질과 상관성이 높은 변수, 요인 3은 제당높이, 유효수심, 준공연도 등 저수지 용적과 관련된 변수, 요인 4는 pH, BOD, COD, TOC, Chl-a 등으로 호소 내 유기물질 대사와 관련 있는 변수, 요인 5는 EC,  $Cl^-$ 으로 호 내 염류 농도와 관련이 높은 변수, 요인 6은 수온, DO 등 계절적 요인에 의한 변수와 상관성이 높은 것으로 나타났음
- 따라서, 농업용 저수지의 수질은 수리·수문학적 설계 변수에 의해 14.8%, 유역에서 유입되는 입자성 오염물질 등에 의해 14.5%, 유효수심 등 저수지 용적에 의해 13.3%, 호소 내 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 나타나 여러 복합적인 요인에 의해 저수지 호 내 수질이 결정되는 것으로 나타났음

- 결론적으로, 저수지로 유입되는 오염물질을 저감시키거나 저수지의 수환경을 개선하여 내부 생산성을 줄일 수 있는 방안이 저수지 수질개선을 도모할 수 있는 최선의 방법이며, 이러한 인위적인 수질개선방법에 의해 개선될 수 있는 저수지의 수질은 최대 50%로 산출되었음

구분	상관 변수	요인 특성	수질설명력 (기여율)
요인1	저수량, 수해면적, 만수면적, 유역면적	수리·수문학 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>	호 내 염류농도	10.5%
요인6	DO, 수온	계절적 영향 (여름, 겨울 등)	8.1%

## 4.2 농업용수 수질개선기술 개발 동향 및 현장 적용성 검토

### 1) 농업용수 수질개선기술 개발 동향

- 정체수역 및 하천의 수질오염과 녹조문제를 해결하기 위해 국내외에서는 오랫동안 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되어 현장적용을 시도해 오고 있으며, 농업용 저수지와 상수원 댐을 관리하고 있는 한국농어촌공사와 수자원공사에서 주로 현장적용 및 수질개선사업을 주도적으로 하고 있음
- 물리적 제어기술로는 인공포기, 강제순환, 준설, 희석, 플러싱, 수위저하, 침전여과, 퇴적물 건조, 퇴적물 캡핑, 선택 취수, 수류 차단막, 초음파 기술 등이 개발되었고, 일부 기술은 현장에도 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 이루어져 왔고, 현재에도 호소의 인 불활성화와 퇴적물 제어를 위한 기술로 활용되고 있음

- 생물학적 제어기술로는 인공습지, 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 기술과 천적생물 및 어류조절을 통한 조류제어 기술들이 개발되었고, 최근에는 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어기술 연구도 진행되고 있음

## 2) 기존 개발된 수처리 기술의 현장 적용성 검토

- 물리적 제어기술인 수중 포기장치, 인공 물순환장치는 설치비용 대비 수질 개선 효과가 너무 미미하며, 실제 대규모 호소에 적용할 경우 영향반경이 작아 시설 투자비용이 높아질 수 있음. 또한 수체의 성층 조건에 따라 운전율을 정교하게 하지 않을 경우 수질악화를 유발할 수 있으며, 가압 부상장치와 조류 제거선도 역시 국부적으로 밀집된 조류의 수거에 용이한 기술이지만 광범위한 수면에서는 비효율적이며, 일회성 대책으로 수처리 효과의 지속성이 부족한 한계성이 있음
- 초음파, 마이크로버블, 전기분해 및 응집 등은 국부적인 녹조제어 효과는 있으나, 대규모 저수지에서 처리 규모 및 비용 상승의 한계점이 있으며, 조류 차단막 및 수류 차단막은 수온 성층 등 수리적 조건과 오염부하 경로 조건이 적합하지 않을 경우에는 조류 제어효과가 미미하며, 홍수 시 집적된 조류가 다시 유입될 우려도 높음
- 화학적 처리공법인 인 불활성화와 조류 성장 제어 등의 기술은 단기 효과가 뛰어난 반면 효과의 지속성, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점이 있어서 단일기술로는 현장적용에 한계성이 있음. 특히 실용화를 위해서는 적정투여량 측정기법, 응집제 투여 비용, 경제성 검토, 호소 내 투여방법 및 기구 등에 관한 연구가 먼저 선행되어야 할 것임
- 생물학적 처리공법은 수질정화 효과가 불확실하며, 한 가지 방법으로는 수질 개선 효과를 기대하기는 어려움. 특히 계절별 변동성에 취약하며, 인공습지 및 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 기법 이외에는 저수지 수질개선 공법으로 적용사례가 없으며, 저수지의 특성, 기후 등 환경조건에 따라 각기 다르게 반응하는 한계성 때문에 범용적 적용에 어려움이 있음
- 물리적, 화학적, 생물학적 처리공법 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 문제점으로 범용적 실용화에 한계가 있으며, 이러한

한계성을 극복할 수 있는 기술개발이 필요함. 물리적, 화학적, 생물학적 제어기술들을 대상으로 효과지속성, 설치비용, 생태영향, 유지관리 측면에서 현장 적용성을 평가하여 제시하면 다음과 같음

구분	기술명	단기효과	장기효과	비용	생태영향	유지관리
물리적 제어기술	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
	강제 물순환	G	U	G	F	F
	퇴적물 캡핑	E	F	P	L	F
	가압부상	E	F	F	F	F
화학적 제어기술	인 불활성화	E	F	F	L	F
	살조제 투여	E	F	F	L	F
생물학적 제어기술	수생식물	L	G	F	G	F
	세균미생물	U	U	F	G	U

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

### 4.3 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리기술 개발

#### 1) 수처리 기술개발 방향

- 본 연구에서는 국내 농업용 저수지의 물리적 특성 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, 시공 가능성, 경관성, 유지관리 용이성, 경제성 등을 고려하여 농업용 저수지에 적합한 수처리 기술을 개발하였음
- 농업용수 융복합 수처리 기술은 저수지 유입수와 호소 내 수역을 대상으로 하였으며, 유입수 수처리의 목표는 호 내로 유입하는 유기물, 질소, 인의 저감에 있으며, 호소는 DO 공급 등 수환경을 개선하여 부영양화와 녹조 발생을 사전에 예방하고 지속적으로 수질을 관리할 수 있는 오염 예방적 수질관리 기술 개발을 목표로 하였음

2) 개발된 융복합 수처리 기술 개요

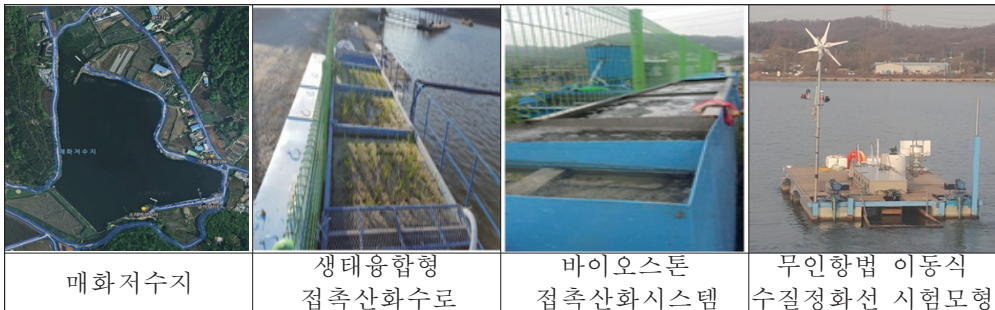
- 유입수 오염물질 저감 및 호소 만족부 수환경 개선 기술로 개발된 생태융합형 접촉산화시스템은 식생과 미생물 매디아의 생물학적 처리과 산소포기 등 물리적 처리를 융복합한 수처리 기술로서, 미생물에 의한 유기물 산화·분해와 상부 식생에 의한 N, P 등 영양염류 분해를 정화 원리로 하여 고농도의 유기물, SS, TP 처리를 주 목적으로 하고 있음
- 생태융합형 접촉산화공법의 기술을 보완 및 개선시킨 바이오스톤 접촉산화공법은 쇄석을 활용하여 수처리 유용미생물을 코팅한 직경 10cm에 해당하는 바이오스톤 불을 이용한 수처리 기술로서, 정화원리는 바이오스톤 불에 부착 성장하는 호기성, 임의성, 혐기성 미생물에 의한 유기물 및 영양염류의 산화·분해(생물학적 처리)와 바이오스톤 불에 의한 흡착·여과 기능(물리적 처리) 등에 의해 친자연적으로 정화되는 수처리 기술임
- 호소 수질관리를 위한 무인항법 이동식 수질정화시스템은 GPS 기반 무인항법 프로그램에 의해 무인으로 운행되는 수처리 시스템으로, 사전 입력된 프로그램에 의해 원하는 위치에서, 정해진 시간 동안 무인 체류하면서 수질을 정화하고, 접안 도크에서 충전, 유지관리, 기상악화 시 대피 등이 가능하도록 설계된 ICT 등 첨단기술이 융합된 다기능 수질관리시스템임

적용수역	개발기술	기술개요	모식도
유입부	바이오스톤 접촉산화공법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 바이오스톤 불(미생물 코팅한 직경 10 cm 구형담체)을 이용한 접촉산화공법</li> <li>• 친환경 수처리시설로 영구적 사용 및 유지관리 용이</li> </ul>	
	생태융합형 접촉산화수로	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상부의 탈부착 식생과 하부의 끈상 접촉재를 이용한 수로식 수처리 시설</li> <li>• 자연친화적 소재 사용</li> </ul>	
만곡부	생태융합형 접촉산화부도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정체수역인 만곡부에 적용가능</li> <li>• 생태융합형 수로식을 부도식으로 변형한 시설</li> <li>• 태양광이나 풍력을 이용하여 필요 에너지 자체 조달</li> </ul>	
호소 내	무인항법 이동식 다기능 수질정화장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ICT를 융복합한 미래시대에 적합한 첨단 수처리 기술 (GPS 기반한 자동 프로그램)</li> <li>• 원하는 위치에서 원하는 시간 동안 체류하며, 수질을 자동으로 측정, 정화하는 장치</li> </ul>	

#### 4.4 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

##### 1) 현장적용실험을 위한 시제품 제작 및 Test-bed 구축

- 본 연구를 통해 개발된 기술(공법)의 핵심 요소기술에 대한 성능평가 및 현장적용성 평가를 위해 경기도 시흥시에 위치한 농업용 저수지인 매화저수지에 생태융합형 접촉산화시스템(수로 1식, 부도 1식)과 바이오스톤 접촉산화시스템에 대해 실규모의 플랜트를 제작하여 현장 Test-Bed를 구축하였음. 생태융합형 접촉산화시스템에 대해서는 2015년 9월~2017년 11월, 바이오스톤 접촉산화시스템은 2016년 9월~2017년 11월까지 운영하면서 성능 및 수질정화효율, 저수지 수질개선효과 등을 분석하고 평가하였음
- 저수지 수질관리 및 수질개선을 위한 목적으로 개발된 무인항법 이동식 수질정화선에 대한 현장적용실험을 위하여 부력체 규모가 6.0m(L)×3.4m(W) × 0.8m(H), 총 부력무게 10톤에 해당하는 시험모형을 제작하여 매화저수지에서 2016년 하반기부터 무인항해 등 핵심기술에 대한 성능평가와 현장 적용성에 대해 검토하였음

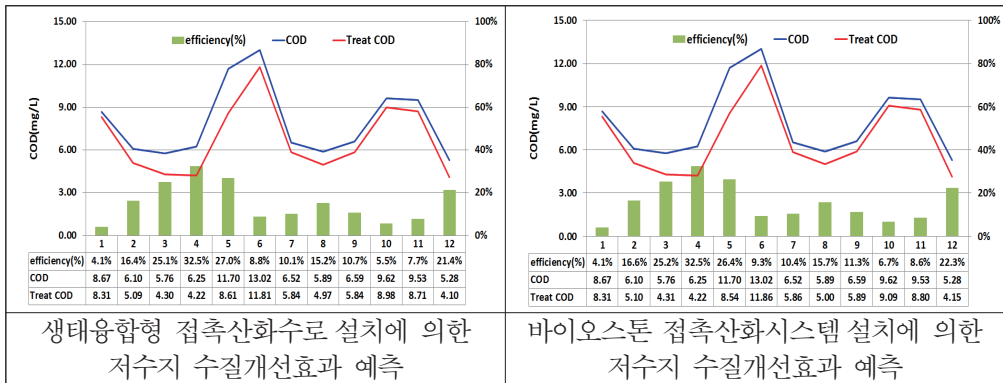


##### 2) 유입수 수처리시설의 수질정화효율 및 수질개선효과

- 생태융합형 접촉산화수로에 대한 수질정화효율을 분석한 결과, 평균적으로 Chl-a 77.8%, SS 71.8%, BOD 74.7%, COD 46.0%, TP 46.6%로 나타났고, 바이오스톤 접촉산화시스템의 정화효율은 BOD 70.3%(최대 97.2%), COD 45.3%(최대 64.5%), TOC 19.2%(최대 50%), SS 82.8%(최대 92.7%), Chl-a 80.4%(최대 91.8%), TN 23.2%(최대 39.5%), TP 51.8%(최대 80.1%)으로 나타나 BOD, Chl-a, SS 효율이 70~90% 이상으로 매우 높게 나타남
- 매화저수지 유입수 대책시설로 생태융합형 접촉산화수로 및 바이오스톤 접촉산화시설을 COD 수질정화효율 46%, 45.3%, TP 정화효율 46.6%, 45.2%로 각각 가정하여 저수지 유입하천 2개소에 실규모 처리용량(유입-1

1,800 m<sup>3</sup>/d, 유입-2 3,500 m<sup>3</sup>/d)으로 설치한다고 가정하였을 경우, 저감되는 연간 오염부하량은 13,658 kg/yr으로 평시 유입되는 부하량의 약 44%가 저감되는 것으로 나타났고, 저수지의 수질개선효과는 생태융합형 집축산화수로, 바이오스톤 집축산화시스템 각각 COD, TP 기준으로 연평균 14.9%, 25.8% 및 14.5%, 25.1%가 개선되는 것으로 예측되었음

- 매화저수지는 평상시에 유입되는 수량이 저수지 총 유출량의 약 20%에 불과하므로 이러한 저수지는 수문학적 특성으로 인해 평시 유량을 대상으로 유입수 수처리 시설을 설치한다면 저수지의 수질개선효과가 단기간에 나타나기는 어려움. 따라서 이러한 저수지의 수질은 강우시의 유입수에 의해 크게 영향을 받으므로 집축산화시스템을 침강지와 조합하여 운영하면 수질개선효과가 매우 클 것으로 판단됨



### 3) 무인항법 이동식 수질정화선 현장적용

- 무인항법 이동식 수질정화선의 시제품에는 GPS 통신기, 경광등 싸이렌, 배터리 보관함, 고액분리 수질정화장치, 미생물 살포기, 마이크로 버블 제너레이터, 풍력발전기 등을 탑재하였고, 주요 요소기술에 대해 매화저수지에서 성능평가를 실시하였으며, 현장적용성이 충분하다는 결론을 얻었음
- 무인항법 이동식 수질정화선에 탑재된 오염물질 제거기술인 초고속 고액분리시스템은 SS, TP, COD 등의 오염물질을 ZT(제타전위 제너레이터) 이용하여 급속 응집 및 부상시켜 슬러지를 제거하는 방식으로 1일 평균 오염물질 제거량은 300 kg/일이고, 수처리 용량은 50만m<sup>3</sup>/일(1일 8시간 기준)로 추정되었음
- 매화저수지 연간 유입되는 오염부하량 65,809.5 kg/y을 대상으로 오염물질

제거하는데 걸리는 일수를 추정한 결과, 하루 8시간 기준으로 항속 0(정지시)~4.0km/h로 운항시 1일 운항되는 수면적은 약 80,000m<sup>2</sup>이고, 유입되는 오염물질을 전부 제거하는데 걸리는 기간은 219일(내부생산성 0으로 가정), 저수지 내부에서 자체 생산되는 오염부하량을 연간 유입되는 부하량의 30%로 가정한다면 저수지 오염물질을 제거하는데 285일로 산출되었음

#### 4.5 접촉산화시스템 부착미생물에 의한 수질정화 기작 규명

- 바이오스톤 접촉산화시스템의 핵심기술인 바이오스톤 볼의 부착 미생물에 의한 수질정화 기작을 규명하고자 매화저수지에 설치되어 운영되고 있는 플랜트에서 바이오스톤 볼을 채집하여 미생물의 부착생물량, 군집구조, 활성도 등을 분석 및 평가하였음
- 바이오스톤 볼 생물막에서 MLSS는 1,686~11,762 mg/m<sup>2</sup>, MLVSS 비율은 18.5~35.3%(평균 26.1%), DNA 농도는 평균 12,257(±10,674) μg/m<sup>2</sup>, 종속 영양세균 수(HPC) 농도는 평균 27,088×10<sup>6</sup> CFUs/m<sup>2</sup>로 분석되었고, 이는 끈상 생물막에 비해 상대적으로 높게 나타나 바이오스톤 볼에서 생물막 형성 능력이 우수한 것으로 판단됨
- 플랜트를 가동하여 안정화된 바이오스톤 볼 생물막에는 다양한 미생물 군집이 형성되어 있으며, 이에 따라 다양한 종류의 대사 작용(유기물 분해능, 질소 산화능 등)이 일어날 것으로 예측되었음. 생물막 군집에는 주로 유기물 분해능이 우수한 세균과 난분해성 유기물 분해에 관여하는 세균들이 주를 이루고 있어 유기물 분해율이 뛰어날 것으로 판단되며, 또한 질산화 또는 탈질에 관여하는 세균도 다수 발견되었음
- 바이오스톤 볼에 대해 DGGE band를 분류학적으로 분석하면, Phylum(문) 단계에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 “*proteobacteria*”로 전체의 52.6~63.2%를 구성하였으며, 질산화에 관여하는 세균이 주로 속한 “*Nitrospirae*”의 비율도 4.1~13.8%로 높은 비율로 나타났음. “*Proteobacteria*”의 비율이 국내외 하수처리장 0~6.2%에 비해 엄청 높았으며, 이러한 결과로 볼 때 바이오스톤 볼의 생물막에는 유기물 분해 세균의 비율이 매우 높게 유지되고 있는 것으로 판단됨
- Pyrosequencing 분석에서 나온 종(species)의 결과를 이용하여 다양성지수(Shannon index)를 분석한 결과, 6.37~6.90의 범위로, 이는 국내외 하수 활성슬러지 및 생물막 분석 결과에서 나타난 지수에 비해 매우 높은 값을 나타내고 있어 군집의 종 다양성이 매우 높음을 알 수 있음

분 류	바이오 스톤 볼	김택승 등 (2010)	Sibag, (2014)	Wang et al., (2014a)	Wang et al., (2014b)	Isazadeh et al., (2014)	
Phylum (문)	<b>Proteobacteria</b>	<b>52.6-63.2</b>	<b>51.1-77.7</b>	<b>60-73</b>	<b>21-53</b>	<b>12.8-27.8</b>	<b>42.7±1.2</b>
	Bacteroidetes	5.7-15.1	4.9-25.8		11-64	1.5-5.0	49±1.6
	Acidobacteria	2.1-4.7	1.3-6.7		1-27	1.4-18.1	0.2±0.1
	Chlorofexi	1.1-3.5	0.6-5.2		1-17	2.1-10.0	2.1±0.8
	<b>Nitrospirae</b>	<b>4.1-13.8</b>	<b>0.0-6.2</b>			<b>0-0.8</b>	<b>&lt;0.1</b>
	Planctomycetes	1.7-4.3	0.2-5.9			0.02-2.3	-0.1
	Actinobacteria	2.1-4.7	0.3-4.1			0.17-2.6	0.2±0.1
	Firmicutes	0-3.9	0.2-1.5			0.29-3.3	0.9±0.1
	<b>Verrucomicrobia</b>	<b>2.7-4.2</b>				<b>0-0.74</b>	0.2±0.1
	Gemmatimonadetes	0-1.3				0.03-0.32	0.1
Shannon index	6.37-6.90	5.16-6.29	3.5-4.2	6.2-8.0	5.2-5.5	3.17-4.86	

#### 4.6 융복합 수처리시스템에 대한 기술성 및 경제성 평가

- 농업용 저수지 유입수 수처리공법으로 가장 많이 사용되고 있는 인공습지는 동일 유량 처리시 넓은 부지면적이 필요하며, 주기적인 식생관리, 퇴적토 준설 등 유지관리가 필요한 반면에 생태융합 접촉산화 및 바이오스톤 접촉산화시스템은 다른 접촉산화 기술에 비해 작은 부지면적이 소요되며, 시설비 및 유지관리비가 타 기술 평균치의 87.4%, 73.2%에 해당하며, 이는 충분히 경제성이 있는 것으로 판단됨
- 무인항법 이동식 수질정화선은 기존 녹조 제거선들이 사후 오염물질 제거기술인 반면에 무인항법 수질정화선은 평시에 지속적인 수질관리를 통해 수질오염을 사전에 방지하고, 실시간 수질측정 및 수질자료 송수신이 가능하여 수질조사 및 수질개선 비용 절감, 무인 운영으로 인한 인건비 절감 등으로 타 유사 기술대비 운영관리 비용을 많이 절감할 수 있을 것으로 기대됨

#### 4.7 융복합 수처리기술의 현장적용 및 실용화 방안

- 바이오스톤 접촉산화시스템은 농업용 저수지의 유입수, 저수지 물 순환수, 양수 및 도수 저수지 등의 수질정화를 목적으로 한 수질개선사업에 다양하게 활용될 수 있을 것이며, 수질정화가 요구되는 대상지역에 따라 구조물형, 습지형 등 다양한 형태로 설치·조성하여 운영할 수 있음
- 토지(부지) 면적이 협소한 하천 둔치 및 농업용 저수지 홍수터 등에 지하 또는 지상 구조물 형식으로 조성이 가능하며, 지상구조물 형식으로 조성할 경우에는 상부에 수생식물과 조합하여 경관성을 향상시킬 수도 있음.



또한, 현재 널리 이용되고 있는 인공습지와 조합하거나 또는 전면 대체하여 지하흐름형 인공습지 형태로도 활용이 가능함

- 저수지 호 내 수질관리 및 수질정화를 대상으로 하고 있는 무인항법 이동식 수질관리시스템은 농업용 저수지뿐만 아니라 상수원 댐, 한국농어촌공사에서 관리하는 하구 담수호 등에도 널리 활용될 수 있으며, 또한 4대강 및 전국 하천의 정체수역 등에도 폭넓게 적용될 수 있을 것으로 판단됨
- 수처리 담체(여재)로 개발된 바이오스톤 불은 수처리 시설 여재 이외에도 자연형 어도, 부댐 조성, 사방댐 조성, 인공습지 사면, 하천 및 해안침식방지 등의 호안 보호공 등으로 확대 적용이 가능할 것으로 기대됨

## 5. 기대효과 및 실용화방안

### 5.1 기술적 측면

- 농업용 저수지 대상 수처리기술 개발로 공사 관리 저수지의 수질관리 및 수질개선사업에 적극 활용
  - ☞ 2016년 농업용수 수질기준 초과시설 : 232개소(COD기준, 975개소의 23.8%)
- 농업용수 수질개선사업의 유입수 대책 시설인 인공습지의 전면 대체 또는 인공습지 후처리 시설로 활용하여 수질개선사업 효과 제고
- 개발된 수처리 기술의 특허등록 및 신기술 인증 취득으로 농업용수 관리 기관인 한국농어촌공사의 수처리 기술력에 대한 대외적인 신뢰도 제고

### 5.2 경제·산업적 측면

- 영국의 물 전문 리서치 기관인 글로벌 워터 인텔리전스(GWI)에 따르면, 2016년 현재기준 세계 물 시장 규모는 7,139억 달러(약 820조원)이며, 연평균 4.2%씩 성장하여 2025년에는 8천 600억불로 급성장할 것으로 전망되고 있음. 국내에서도 농업용수 사용량은 약 60%로 수요량이 가장 많은 분야이며, 최근에는 농업용수의 다목적화로 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다
- 본 연구개발 성과는 오염된 농업용 저수지 및 최근 사회적 갈등 문제가 되고 있는 4대강 녹조문제 해결에도 적용될 수 있을 것으로 기대됨
- 양질의 농업용수 확보·공급으로 친환경 농작물 재배시스템 구축이 가능해지고, 이로 인해 농촌지역의 소득 창출과 지역 발전에 기여할 것임
- 농어촌지역 어메니티 증가로 농업·농촌 관광산업 등 6차 산업 활성화에 따라 농어촌지역에 미치는 직·간접적인 효과는 상당할 것으로 기대됨

## Summary

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

2. Period : 2017. 1. ~ 2017. 12.(4<sup>th</sup> Year)

### 3. Necessity and Objectives

#### 3.1 Necessity

- There are about 17,500 agricultural reservoirs distributed across the country. Most of the agricultural reservoirs are showing a serious eutrophic state and high level of organic contamination and some of them have frequent algal bloom and offensive odor problems preventing from sustainable water use, recreation activities, and supply of irrigation water.
- With increased interest in food for the public, there has been an increase in demand for high quality agricultural water for the production of environmentally safe agricultural products. In addition, the role of agricultural reservoirs is increasing due to the importance of amenity and tourism industry in agriculture and rural areas. The demand for multi-purpose utilization of agricultural water is also steadily increasing.
- Recently, coping with the algal bloom events, various physical, chemical, and biological techniques for water purification have been developed, but there are still a great deal of limitation between the techniques and the real worlds because of limited spatial scales of treatment, operations and maintenance issues, economic feasibility, and sometimes ecological impact and so on.
- Agricultural water is intended to supply water in rural areas, therefore costs and methods for installation and maintenance should be low and easy. In addition, it is necessary to develop water treatment technology having low cost and high efficiency.

### 3.2 Objectives

- This study is to develop a cost-effective convergence water treatment technologies suitable for physical and water pollution characteristics of agricultural reservoir in order to prevent eutrophication and water pollution of the agricultural reservoirs in advance, and supply high quality of irrigation water.

### 3.3 Scopes and contents

Objective	Main contents
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Development and design of a cost-effective convergence water treatment system</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analysis on the application cases of the techniques</li> <li>- Limitations of existing techniques</li> <li>- Review on the water quality restoration techniques for agricultural reservoir</li> <li>- Development of a convergence water treatment system</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Application and performance evaluation of convergence water treatment system</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selection of an experiment reservoir</li> <li>- Survey of the water quality and sediment contamination</li> <li>- Construct prototype and test-bed for field application</li> <li>- Analysis of water purification efficiency of the CWTSSs</li> <li>- Analysis of water quality improvement rate of reservoir</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identification of water purification mechanism by evaluation of microbial activity in contact-oxidation water purification system</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Assessment of microbial adherence and cluster structure</li> <li>- Activity evaluation of adherent microorganisms</li> <li>- Stability evaluation of attached microorganisms</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Evaluation of the economic and technical advantages of the CWTSSs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluation of the economic advantages of the CWTSSs</li> <li>- Evaluation of the technical advantages of the CWTSSs</li> <li>- Prepare field application manual</li> </ul>

## 4. Research results

### 4.1 Development and design of a cost-effective convergence water treatment system(CWTs)

#### 1) 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 are summarized as follows:
  - Physical techniques : Solar water circulation system, Contactless plasma systems, 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, convergence 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, Algicidal Medi-Tide, Complex microbial agent application.
  - Combined techniques : Combined system with underwater coagulation-flotation and plant island

#### 2) Limitations of existing technologies

- Most of the existing technologies are not an integrated technology but a single purpose or fractured method targeting control of partial process of algal bloom.
- The main limitations of most 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 biological techniques are uncertainty in the effect of water quality improvement, seasonal variations, and site-specific effectiveness.

### **3) Development of convergence water treatment technology**

- The eco-convergence type aerated string contacted oxidation system including physical and biological treatment processes is designed for the reduction of pollutant loading into reservoir. The system includes a filtration device and string type media with aeration system for biological removal of organic pollutants, and phyto-remediation process using aquatic plants.
- Bio-stone contact oxidation technology, which supplemented and improved the technology of the eco-convergence type aerated string contacted oxidation, is a water treatment technique using bio-stone balls with a diameter of 10cm coated with microorganisms using crushed stone. The principle of purification that pollutants are removed is the oxidation and decomposition of organic matter and nutrients caused by aerobic, arbitrary and anaerobic microorganisms adhering to the bio-stone ball and the adsorption by the bio-stone ball.
- The mobile water purification system for water quality management of reservoir is an unmanned water treatment system based on a GPS navigation program. Water purification boat automatically operated removes the water pollutant by staying in the desired position by the pre-programmed program for a fixed time. It is a multi-functional water quality management system with advanced technology such as ICT(Information & Communication Technology) designed to enable charging, maintenance, and natural disaster evacuation in a dock.

## **4.2 Application and performance evaluation of convergence water treatment systems**

### **1) Construct plant and test-bed for field application**

- The real-scale plants of eco-convergence type aerated string contacted oxidation systems made two types(channel type and

floating type) was constructed in Maewha reservoir located in Siheung city, for field application test and water purification efficiency evaluation. In addition, a bio-stone contact oxidation plant was installed to verify water purification efficiency.

- A prototype boat having body size of 6.0m (L)× 3.4m (W)×0.8m(H) and a total floating weight of 10 tons was constructed for the field application test on the unmanned navigation program based on GPS. The applicability to the field including the performance evaluation of main technology such as unmanned navigation program was examined from the half of 2016 to 2017, in the Maewha reservoir.

## 2) Analysis of water quality purification efficiency and water quality improvement of influent combined water treatment systems

- The average water purification efficiencies of eco-convergence type aerated string contacted oxidation systems were 77.8% for Chl-a, 71.8% for SS, 74.7% for BOD, 46.0% for COD and 46.6% for TP. The average purification efficiency of the bio-stone contact oxidation system is BOD 70.3%(up to 97.2%), COD 45.3% (up to 64.5%), TOC 19.2% (up to 50%), SS 82.8% (up to 92.7%) and Chl-a 80.4 % (up to 91.8%), TN 23.2%(up to 39.5%) and TP 51.8%(up to 80.1%). Both the bio-stone contact oxidation system and eco-convergence type aerated string contacted oxidation systems were very high at 70~90% in the BOD, Chl-a, and SS.
- In Maewha Reservoir, the effective range of jet flow discharged from the eco-convergence type aerated string contacted oxidation system(floating type) was about 70m, and after then the jet plume moved up to 100m to 120m through the advection and diffusion processes of ambient water.
- The 3D water quality model constructed in second year was applied to simulate the effect of the CWTSs on the water improvement of Maehwa reservoir. The simulation scenarios were applications of contact oxidation reactor(case1) and bio-stone ball reactor(case2). The simulation results showed that the water quality improvement rates(%) for case1 and case2 were COD 14.9%, TP 25.8% and COD 14.5%, TP 25.1%.

- It is assumed that inflow water treatment facilities will be installed at two sites of influent river with actual scale treatment capacity(inflow-1; 1,800 m<sup>3</sup>/d, inflow-2; 3,500m<sup>3</sup>/d). Assuming that the COD and TP water purification efficiency of the influent treatment facility are approximately 45.3~46% and 45.2~46.6%, the pollutant load to be reduced annually is 13,658 kg / yr. The amount reduced is equivalent to about 44% of the pollutant load that normally flows in. The water quality improvement effect of the reservoir was predicted to be improved 14.5~14.9% of COD and 25.1~25.8% of TP by an average annual.

#### 4.3 Identification of water purification mechanism by evaluation and community cluster structure of microbial activity in contact oxidation water purification system

##### 1) Assessment of microbial adherence and cluster structure

- MLSS, MLVSS, and DNA concentrations were higher in the bio-stone ball than in the string-media, and thus biofilm formation in the bio-stone ball was superior to that of the string-media. As a result of comparing biomass according to facility operation method, biomass constituting biofilm is high when operated intermittently or without aeration.
- As a result of the community structure analysis in the bio-stone ball, it was found that bacteria predominantly belong to bacteria in activated sludge, bacteria which are known to constitute biofilm or decomposition of degradable organic matter, and bacteria involved in nitrification or denitrification are found.
- Compared with the results of previous studies analyzing the bacterial community structure of the wastewater treatment facility, the proportion of phylum "*proteobacteria*" involved in decomposition of organic matter was higher than that of domestic and overseas sewage treatment plants, suggesting that the proportion of organic-degrading bacteria in the bio-stone ball bio-film is maintained at a very high level.

- The most characteristic phylum was “*Nitrospirae*”, 4.1~13.8% in bio-stone ball. It was very high compared with the results of domestic and overseas sewage treatment plants.
- The Shannon index, a diversity index, was found to be in the range of 6.37~6.90 using the results of pyrosequencing analysis, which is very high compared to the diversity index obtained from domestic and foreign activated sludge and biofilm analysis results.
- A wide variety of microbial communities are formed in biofilm, and it is thought that various kinds of metabolism (ie various kinds of organic matter decomposition ability, nitrogen oxidation ability, etc.) will occur.

## 2) Activity evaluation of adherent microorganisms

- The activity of dehydrogenase and glycosidase in the bio-stone ball contact oxidation system is very different depending on the characteristics of the influent and operating conditions. These changes appear to be dependent on the biomass of the biofilm, not on the activity per cell of the bacteria.
- As a result of comparing bio-stone balls with string-media biofilms, bio-stone balls showed higher enzymatic activity of dehydrogenase, glycosidase and lipase per unit area than that of string-media.
- Organic acid decomposition ability will be much better in the contact oxidation system using bio-stone balls than those of string-media.

## 3) Stability evaluation of attached microorganisms

- The amount of dehydrogenase and lipase transferred from the coating solution to bio-stone ball was about 2.6 times higher than that of glycosidase, thus bacteria with high lipid resolution tend to stick to bio-stone balls than bacteria with high carbohydrate resolution ability during coating process.
- The microbial coating solution was predominantly composed of bacteria that are highly effective in decomposing organic matter, such as bacteria involved in the decomposition of refractory



substances, degrading bacteria found in the wastewater treatment system, and bacteria found in the biofilm of various media.

- Although the biomass on the media, the number of bacteria and the activity of the enzyme are reduced when the bio-stone ball is dried, it is estimated that the activity of bacteria in biofilm can be easily recovered when re-wetting.

#### **4.4 Evaluation of the economic and technical advantages of the convergence water treatment systems(CWTSs)**

- The artificial wetland technology, which is most widely used method for the treatment of contaminated inflow for agricultural reservoirs, needs much larger land area for the same design flow comparing to the proposed CWTSs, and requires regular management of vegetation and sediment dredging.
- The proposed string-type contacted oxidation reactor and bio-stone ball contacted oxidation reactor are evaluated as a cost-effective method because they need less land areas comparing to the other contact oxidation technologies, and the total costs of initial cost and operating cost for 20 years are 87.4% and 73.2% of the other technologies on average.
- While existing water removal ships are post pollutant removal technologies, the unmanned navigation water purification system is a technology to prevent water pollution in advance through continuous water quality management in the daytime. And also, it enables real-time water quality measurement and data transmission and reception, which can reduce the cost of water quality survey and water quality improvement. The most important advantage of the unmanned navigation mobile water purification system is that it can save a lot of operation management cost compared with other similar technologies by reducing labor costs due to unmanned operation.

## 5. Expectation and utilization of the results

### 5.1 Expectation

- The results can be used to develop policy by government for the water quality improvement projects of agricultural reservoirs, and to provide an effective alternative to make maximize the benefit of the investment.
- It will improve the water quality improvement project effect by replacing the existing wetland used for improving agricultural water quality or using it as a post-treatment wetland treatment facility.
- The suggested convergence water treatment system, through optimized design, can overcome the limitations of individual physical, chemical, and biological water treatment technology that developed for the implement of reservoir water quality.

### 5.2 Utilization plan

- The convergence water treatment systems will be applied to the agricultural reservoirs that require urgent restoration treatment to confirm the benefits of the new technique; low cost, high efficiency, easy operation and less maintenance.
- The system can be used as a core component of the best management practice for the water quality improvement in the agricultural reservoirs.
- The convergence systems can be applied to many other agricultural reservoirs and four major rivers to deal with recent algal bloom issues.
- By registering the patent and acquiring the certificate of the environment new technology on the developed technology in this study, we will raise the external reliability of the water treatment technology of our corporation.

## 목 차

제1장 서론 .....	1
제1절 연구배경 및 목적 .....	3
1. 연구배경 및 필요성 .....	3
2. 연구목적 .....	5
제2절 연구내용 및 추진체계 .....	6
1. 연도별 연구개발 목표 .....	6
2. 연구개발 공정 및 연구범위 .....	7
3. 연구 추진체계 .....	11
제3절 기대효과 및 활용방안 .....	13
1. 기술적 측면 .....	13
2. 경제·산업적 측면 .....	13
제2장 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 진단 .....	15
제1절 농업용 저수지의 물리적 특성 .....	17
1. 농업용 저수지의 시설수 현황 .....	17
2. 농업용 저수지 시설제원에 따른 현황 .....	18
제2절 농업용 저수지 수질영향 요인 및 수질오염 진단 .....	21
1. 농업용 저수지의 수질현황 .....	21
2. 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인 .....	25
3. 농업용 저수지 수질오염 유형 .....	46
4. 농업용 저수지의 주요오염원 .....	48
제3장 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리기술 개발 .....	49
제1절 기존 수처리 기술의 농업용 저수지 적용성 평가 .....	51
1. 물리적 제어기술 .....	51
2. 화학적 제어기술 .....	56
3. 생물학적 제어기술 .....	59

제2절 농업용수 수처리기술 개발 방향.....	62
1. 수처리 기술 개발의 고려사항.....	62
2. 농업용수 수처리 기술개발 방향.....	63
제3절 대상수역별 융복합 수처리기술 구상 및 설계.....	64
1. 농업용 저수지 유입수 오염물질 저감기술 .....	64
2. 농업용 저수지 호내 수질정화기술 .....	66
제4절 융복합 수처리 개발기술의 개요.....	67
1. 생태융합형 접촉산화시스템 .....	67
2. 바이오스톤 접촉산화시스템 .....	74
3. 무인항법 이동식 수질정화시스템 .....	80
제4장 농업용수 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가.....	83
제1절 현장적용실험 대상지구 개요.....	85
1. 매화저수지 유역현황 및 주요염원.....	85
2. 매화저수지 유입하천 수질오염도 평가.....	91
3. 매화저수지의 수질오염도 평가.....	104
4. 매화저수지의 퇴적물 오염도 및 용출량 평가.....	121
제2절 생태융합형 접촉산화수로 성능평가.....	134
1. 생태융합형 접촉산화수로 현장적용 Test-bed 구축.....	134
2. 생태융합형 접촉산화수로의 수질정화효율 평가.....	139
3. 저수지 수질개선효과 분석.....	142
제3절 생태융합형 접촉산화부도의 성능평가.....	145
1. 접촉산화부도의 현장적용 Test-bed 구축.....	145
2. 생태융합형 접촉산화부도 영향반경 평가.....	148
제4절 바이오스톤 접촉산화시스템의 성능평가.....	154
1. 바이오스톤 접촉산화시스템 현장 Test-bed 구축.....	154
2. 바이오스톤 볼(BSB)의 압축강도 실험 및 평가.....	157
3. 바이오스톤 접촉산화시스템 폐색정도 평가.....	158
4. 바이오스톤 접촉산화시스템 슬러지 발생량 산출.....	163
5. 바이오스톤 접촉산화시스템의 수질정화효율 평가.....	164
6. 저수지 수질개선효과 분석.....	172

제5절 무인항법 이동식 수질정화시스템 성능평가	175
1. 호소 수질정화선 설계 및 시험모형 제작	175
2. 수질정화선 현장적용실험 및 성능평가	177
3. 무인항법 수질정화선 오염물질 제거량 추정	179
<b>제5장 접촉산화시스템 부착미생물에 의한 수질정화기작 규명</b>	<b>181</b>
<b>제1절 미생물 부착량 및 군집구조 변화 평가</b>	<b>183</b>
1. 연구 재료 및 방법	183
2. 접촉산화시스템의 부착된 미생물 생물량 분석 결과	190
3. 접촉산화시스템의 미생물 군집구조 평가	195
<b>제2절 접촉산화시스템 부착 미생물 활성화도 평가</b>	<b>211</b>
1. 연구 재료 및 분석방법	211
2. 접촉산화시스템 부착 미생물 활성화도 분석결과	211
<b>제3절 바이오스톤 볼의 부착 미생물 안정도 평가</b>	<b>222</b>
1. 연구재료 및 방법	222
2. 바이오스톤 볼 미생물 코팅 전/후 미생물 군집 분석	224
3. 접촉산화시스템 운영에 따른 미생물 부착량 및 군집구조 변화	233
4. 바이오스톤 볼 건조에 따른 부착 미생물 군집의 안정도 평가	249
<b>제4절 접촉산화 수처리시스템의 수질정화 기작 규명</b>	<b>253</b>
1. 유기물 제거 기작	255
2. 영양염류 제거 기작	257
3. 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 생물막 형성 및 안정성	258
<b>제6장 융복합 수처리시스템의 기술성·경제성 평가</b>	<b>261</b>
<b>제1절 융복합 수처리 시스템의 기술성 평가</b>	<b>263</b>
1. 유입수 수질정화기술(시스템)	263
2. 무인항법 이동식 수질정화선	270
<b>제2절 융복합 수처리 시스템의 경제적 우위성 평가</b>	<b>276</b>
1. 저수지 유입수 오염물질 저감기술	276
2. 무인항법 이동식 수질정화선	278

제7장 융복합 수처리기술 현장적용 및 실용화 방안	281
제1절 융복합 수처리기술의 타 지구 확대 적용	283
1. 물질수지 해석모델 개발	283
2. 매화저수지 유입 오염부하량 산정	285
3. 수처리시스템 시설규모에 따른 수처리 용량	288
4. 수처리 시스템별 처리용량에 따른 호내 수질변화	288
5. 융복합 수처리 시스템 확대 적용을 위한 물질수지 해석 모델 적용	292
제2절 바이오스톤 접촉산화시스템 현장적용	295
1. 현장적용 유형 및 분야	295
2. 기술이전 및 기술보급 계획	298
제3절 무인항법 이동식 수질정화시스템 현장적용	299
1. 현장적용 유형 및 분야	299
2. 기술이전 및 기술보급 계획	299
제8장 요약 및 결론	301
참고문헌	311
부록	323
제1절 융복합 수처리기술의 현장적용 매뉴얼	325
제2절 융복합 수처리기술의 특허등록증 사본	355

## 표 차 례

(표 1-1) 연구수행기관별 연구내용	12
(표 2-1) 국내 농업용 저수지 지역별 분포현황	17
(표 2-2) 농업용 저수지의 수혜면적별 시설수 분포현황	18
(표 2-3) 농업용 저수지 연도별 수질현황	22
(표 2-4) 주성분 분석에 의한 요인 추출	26
(표 2-5) 요인분석에 의한 변수 적재량	27
(표 2-6) 저수지 수질에 영향을 미치는 요인특성 및 기여율	28
(표 2-7) 저수지 물리적 인자와 수질항목간의 상관관계	29
(표 2-8) 저수지 유효저수량에 따른 ANOVA 분석결과	30
(표 2-9) 유효저수량에 따른 기술통계치	31
(표 2-10) 저수지의 유효저수량 구간별 사후 검정 결과	33
(표 2-11) 저수지 준공 경과년수에 따른 ANOVA 분석결과	34
(표 2-12) 저수지 준공 경과년수에 따른 기술통계치	35
(표 2-13) 저수지 준공 경과년수별 사후 검정 결과	37
(표 2-14) 저수지 유효수심에 따른 ANOVA 분석결과	38
(표 2-15) 유효수심에 따른 기술통계치	39
(표 2-16) 저수지의 유효수심 구간별 사후 검정 결과	41
(표 2-17) 조사 시기에 따른 ANOVA 분석결과	42
(표 2-18) 조사 시기에 따른 기술통계치	43
(표 2-19) 조사 시기별 사후 검정 결과	45
(표 2-20) 농업용 저수지의 수질오염 유형 분류	47
(표 2-21) 농업용 저수지의 주요오염원 현황	48
(표 3-1) 호소 수질개선을 위한 물리적 제어 기술 특징	53
(표 3-2) 물리적 제어 기술의 적용성 평가	55
(표 3-3) 호소 수질개선을 위한 화학적 제어 기술 특징	57
(표 3-4) 화학적 제어 기술의 적용성 평가	58
(표 3-5) 호소 수질개선을 위한 생물학적 제어 기술 특징	60
(표 3-6) 생물학적 제어 기술의 적용성 평가	61

(표 3-7) 농업용 저수지의 수질관리 및 수질개선 방향.....	63
(표 3-8) 기존 유입 오염물질 저감시설 검토내용.....	64
(표 3-9) 농업용 저수지 융복합 수처리시스템 요소기술 구성.....	65
(표 3-10) 기존 호소내 수질정화시설 검토내용.....	66
(표 3-11) 바이오스톤 접촉산화시스템 처리공정별 기능 및 특성.....	78
(표 3-12) GPS 기반 무인항법 프로그램 개발 항목별 주요내용.....	82
(표 4-1) 현장적용실험 대상지구의 시설제원.....	85
(표 4-2) 매화저수지 유역의 오염부하량.....	90
(표 4-3) 매화저수지 유입하천 수질조사 일자.....	92
(표 4-4) 물 시료 분석 항목 및 분석 방법.....	92
(표 4-5) 매화저수지 유입하천의 연도별 수질현황.....	96
(표 4-6) 유입하천의 중금속 등 미량금속물질 오염도 현황.....	103
(표 4-7) 매화저수지 조사 위치에 따른 연평균 수질농도.....	106
(표 4-8) 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황.....	118
(표 4-9) 매화저수지의 중금속 등 오염현황.....	120
(표 4-10) 조사지점별 입도분포 및 토성.....	122
(표 4-11) 매화저수지 퇴적물의 유기물, 강열감량, 총질소, 총인.....	125
(표 4-12) 국내외 퇴적물 오염도 평가기준 비교.....	126
(표 4-13) 매화저수지 위치별 퇴적물의 중금속 등 농도.....	128
(표 4-14) 호소 퇴적물 항목별 오염평가기준.....	129
(표 4-15) 퇴적물 오염물질 용출속도.....	131
(표 4-16) 실내 용출실험과 현장 용출실험 비교.....	133
(표 4-17) 매화저수지의 용출부하 비교.....	133
(표 4-18) 생태융합형 접촉산화수로 규격 및 사양.....	137
(표 4-19) 생태융합형 접촉산화수로 시설별 세부 내역.....	138
(표 4-20) 생태융합형 접촉산화수로 체류시간에 따른 수질정화효율.....	140
(표 4-21) 생태융합형 접촉산화시스템의 평균 오염물질 저감효율.....	141
(표 4-22) 생태융합형 접촉산화수로의 오염물질 저감효율 가정치.....	142
(표 4-23) 생태융합형 접촉산화부도 시설제원.....	145
(표 4-24) 생태융합형 접촉산화부도 시설별 세부 내역.....	146
(표 4-25) 매화저수지 경과시간에 따른 구간 분리.....	150



(표 4-26) 바이오스톤 접촉산화시스템 세부 시설별 제원 ..... 155

(표 4-27) 바이오스톤 볼 압축강도 시험결과 ..... 157

(표 4-28) 일반 쇄석조와 바이오스톤 볼 충전조의 수두손실 측정값 ..... 162

(표 4-29) 소규모 바이오스톤 처리조 운전 조건 및 발생 슬러지 부피 ..... 163

(표 4-30) 바이오스톤 볼 미생물 코팅 전/후의 수질정화효율 비교 ..... 164

(표 4-31) 바이오스톤 접촉산화시스템 실증시설의 수질정화효율 ..... 167

(표 4-32) 바이오스톤 접촉산화공법 실증시설의 수질정화효율 ..... 168

(표 4-33) 처리수 수질에 영향을 미치는 유입수 수질항목 ..... 169

(표 4-34) 바이오스톤 접촉산화시스템의 오염물질 저감효율 ..... 172

(표 4-35) 현장적용실험 대상 후보지구의 시설제원 ..... 177

(표 4-36) 매화저수지에 유입되는 오염물질 총량 ..... 179

(표 5-1) 미생물 분석 항목별 시료 채집일정 ..... 184

(표 5-2) PCR 반응 용액의 조성 ..... 188

(표 5-3) PCR primer 염기서열 ..... 189

(표 5-4) 바이오스톤 접촉산화시스템에서 생물량의 변화 ..... 192

(표 5-5) 바이오스톤 볼과 끈상 접촉산화시스템에서 생물량 비교 ..... 194

(표 5-6) 접촉산화시스템 DGGE band의 유사도 분석 ..... 197

(표 5-7) 접촉산화시스템 DGGE band의 기능 및 역할 ..... 198

(표 5-8) 접촉산화시스템 군집구조에서 DGGE band의 분류학적 위치 ..... 200

(표 5-9) Pyrosequencing 분석에서 분류단계별 출현수 ..... 203

(표 5-10) Pyrosequencing 분석에서 Phylum의 종류별 분포 ..... 204

(표 5-11) 바이오스톤 볼과 국내외 선행 연구 결과의 비교 ..... 205

(표 5-12) Pyrosequencing 분석에서 Class의 종류별 분포 ..... 208

(표 5-13) 접촉산화시스템에서 dehydrogenase의 활성도 ..... 213

(표 5-14) 접촉산화시스템에서 glycosidase의 활성도 ..... 215

(표 5-15) 접촉산화시스템에서 lipase의 활성도 ..... 218

(표 5-16) 접촉산화시스템에서 질산화효소의 활성도 ..... 220

(표 5-17) 시료 채취 일정 및 분석 내용 ..... 223

(표 5-18) 바이오스톤 볼의 코팅 전/후 생물량 및 효소활성도 ..... 224

(표 5-19) 아크릴 바이오스톤 볼과 쇄석 반응조에서 생물량 비교 ..... 226

(표 5-20) 바이오스톤 볼과 쇄석 반응조에서 효소 활성도 비교 ..... 227

(표 5-21) 바이오스톤 불 코팅 전/후 DGGE band의 유사도 분석	229
(표 5-22) 바이오스톤 불 코팅 전/후 DGGE band의 기능 및 역할	230
(표 5-23) 바이오스톤 불 코팅 전/후 DGGE band의 분류학적 위치	232
(표 5-24) 아크릴 바이오스톤 불 반응조에서 생물량의 변화	233
(표 5-25) 아크릴 반응조 바이오스톤 불에서 dehydrogenase의 활성도	235
(표 5-26) 아크릴 반응조 바이오스톤 불에서 glycosidase의 활성도	237
(표 5-27) 아크릴 반응조 바이오스톤 불에서 lipase의 활성도	239
(표 5-28) 아크릴 반응조에서 DGGE band의 유사도 분석	244
(표 5-29) 아크릴 반응조에서 DGGE band의 기능 및 역할	245
(표 5-30) 아크릴 반응조에서 DGGE band의 분류학적 위치	247
(표 5-31) 바이오스톤 불 건조기간에 따른 생물량 변화	249
(표 6-1) 유입수 정화시설 기술성 평가(기술 특징)	265
(표 6-2) 유입수 정화시설 기술성 평가(유지관리 용이성, 정화효과)	266
(표 6-3) 바이오스톤 불 담체의 특징	268
(표 6-4) 다공성 팽창 세라믹 담체의 특징	269
(표 6-5) 무인항법 수질정화선과 기존 호내 정화시설과 비교분석	271
(표 6-6) 무인항법 수질정화선과 기존 녹조제거선과 비교분석(기술성)	275
(표 6-7) 유입수 오염저감 시설별 사업비 분석	277
(표 6-8) 수처리 공법별 경제성 평가	278
(표 6-9) 무인항법 이동식 수질정화선과 유사기술의 사업비 분석	278
(표 6-10) 무인항법 이동식 수질정화선의 제작비용 세부내역	279
(표 6-11) 무인항법 이동식 수질정화선의 운영비 추정	280
(표 6-12) 무인항법 이동식 수질정화선의 연간 유지관리비 추정	280
(표 7-1) 매화저수지 연도별 유입유량분석(2006~2015)	284
(표 7-2) 매화저수지 월별 유입량 및 유출량	285
(표 7-3) 매화저수지의 평시 및 강우시의 평균 유입수질	286
(표 7-4) 매화저수지의 월별 COD 유입부하	286
(표 7-5) 매화저수지의 월별 TN 유입부하	287
(표 7-6) 매화저수지의 월별 TP 유입부하	287
(표 7-7) 접촉산화시스템의 시설용량에 따른 유입량 처리 비율	288
(표 7-8) 생태융합 접촉산화조의 처리용량에 따른 호내 COD농도	289

(표 7-9) 생태융합 접촉산화조의 처리용량에 따른 호내 COD농도..... 289

(표 7-10) 생태융합 접촉산화조의 수처리용량에 따른 호내 COD농도..... 289

(표 7-11) 생태융합 접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 TP농도..... 290

(표 7-12) 생태융합 접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 TP농도..... 290

(표 7-13) 생태융합 접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 TP농도..... 290

(표 7-14) 바이오스톤 접촉산화조의 수처리용량에 따른 호내 COD농도..... 291

(표 7-15) 바이오스톤 접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 TP농도..... 291

(표 7-16) 접촉산화조의 적정규모 산정결과(1차반응 미고려)..... 293

(표 7-17) 접촉산화조의 적정규모 산정결과(1차반응 고려)..... 293

(표 7-18) 바이오스톤조의 적정규모 산정결과(1차반응 미고려)..... 294

(표 7-19) 바이오스톤조의 적정규모 산정결과(1차반응 고려)..... 294

## 그 립 차 례

<그림 1-1> 농업용 저수지의 수질오염 사례.....	3
<그림 1-2> 하천 및 정체수역 대상 수처리기술 현황.....	4
<그림 1-3> 연구 최종목표 달성을 위한 연차별 연구목표.....	6
<그림 1-4> 효율적 연구수행을 위한 추진전략.....	11
<그림 2-1> 농업용 저수지의 수혜면적 구간별 시설수 현황.....	18
<그림 2-2> 농업용 저수지의 유효저수량 구간별 시설수 현황.....	19
<그림 2-3> 농업용 저수지의 준공년도에 따른 시설수 현황.....	19
<그림 2-4> 농업용 저수지의 유효수심에 따른 시설수 현황.....	20
<그림 2-5> 저수지의 유역배율(유역면적/만수면적)에 따른 시설수 현황.....	20
<그림 2-6> 농업용 저수지 연도별 수질현황.....	24
<그림 2-7> 조사 시기에 따른 수질변화 추이.....	44
<그림 2-8> 농업용 저수지 수질오염유형 분류도.....	46
<그림 2-9> 연도별 주요오염원 변화추이.....	48
<그림 3-1> 물리적 제어기술 적용 사례.....	52
<그림 3-2> 화학적 제어기술 적용 사례.....	56
<그림 3-3> 지표흐름 인공습지 설치 사례.....	60
<그림 3-4> 농업용수 융복합 수처리기술 개발의 고려사항.....	62
<그림 3-5> 농업용수 수질개선을 위한 종합 MAP.....	65
<그림 3-6> 하천 자정작용 원리 및 미생물 접촉재의 발상.....	68
<그림 3-7> 미생물 매디아를 이용한 오염물질 제거 모식도.....	68
<그림 3-8> 생태융합형 탈착식 식생모듈 구성도.....	69
<그림 3-9> 생태융합형 생태모듈 상세도.....	70
<그림 3-10> 생태융합형 접촉산화수로 모식도.....	71
<그림 3-11> 생태융합형 접촉산화수로 설계(예시).....	72
<그림 3-12> 생태융합형 접촉산화부도.....	73
<그림 3-13> 생태융합 접촉산화부도 측면도.....	73
<그림 3-14> 바이오스톤 볼 제작 과정.....	74
<그림 3-15> 바이오스톤 볼 외형.....	75

<그림 3-16> 바이오스톤 불 직경 크기에 따른 공극률..... 75  
 <그림 3-17> 바이오스톤 불의 유리현상에 의한 고액 분리..... 76  
 <그림 3-18> 바이오스톤 반응조 내의 오염물질 거동..... 77  
 <그림 3-19> 바이오스톤 불 접촉산화시설의 기본구성 모식도..... 77  
 <그림 3-20> 바이오스톤 불을 이용한 접촉산화공법 수처리 공정 구성도..... 78  
 <그림 3-21> 천연셀룰로오스, 백토와 물로 구성된 코팅액과 코팅 미생물..... 79  
 <그림 3-22> 바이오스톤 불 코팅과 표면에서의 미생물 생물막 형성과정..... 79  
 <그림 3-23> 무인항법 이동식 수질정화시스템 모식도..... 81  
 <그림 3-24> 무인항법 이동식 수질정화선 구성요소..... 81  
 <그림 4-1> 매화저수지 전경 사진..... 85  
 <그림 4-2> 매화저수지 유역의 행정구역 위치도..... 86  
 <그림 4-3> 매화저수지 유입하천 전경..... 87  
 <그림 4-4> 매화저수지 인근지역 강수량 현황(2014~2017년)..... 88  
 <그림 4-5> 매화저수지의 일별 저수율(2014~2017년)..... 88  
 <그림 4-6> 유입하천 유속 측정 장치 및 조사 전경..... 89  
 <그림 4-7> 매화저수지 유입하천별 유속 변화..... 89  
 <그림 4-8> 매화저수지 유입하천 조사 지점..... 91  
 <그림 4-9> 유입하천 수질 및 유속조사 전경..... 92  
 <그림 4-10> 유입하천 수질현황(수온, pH, EC)..... 98  
 <그림 4-11> 유입하천 수질현황(DO, SS, Chl-a)..... 99  
 <그림 4-12> 유입하천 수질현황(COD, TOC, TN)..... 100  
 <그림 4-13> 유입하천 수질현황(NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)..... 101  
 <그림 4-14> 유입하천 수질현황(TP, PO<sub>4</sub>-P)..... 102  
 <그림 4-15> 매화저수지 수층별 수질특성 조사지점..... 104  
 <그림 4-16> 매화저수지 수질조사 전경..... 104  
 <그림 4-17> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(수온, pH)..... 109  
 <그림 4-18> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(EC, DO)..... 110  
 <그림 4-19> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(SS, Chl-a)..... 112  
 <그림 4-20> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(COD, TOC)..... 113  
 <그림 4-21> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(TN, NO<sub>2</sub>-N)..... 114  
 <그림 4-22> 매화저수지 위치별 수층에 따른 수질현황(NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)..... 116

<그림 4-23> 매화저수지 위치별 수층에 따른 수질현황(TP, PO <sub>4</sub> -P).....	117
<그림 4-24> 조사지점별 입도분포 비율.....	121
<그림 4-25> 매화저수지 조사지점별 퇴적물의 유기물, 강열감량 함량.....	124
<그림 4-26> 매화저수지 조사지점별 퇴적물의 TN, TP 함량.....	124
<그림 4-27> 접촉산화수로 및 접촉산화부도 설치 위치.....	134
<그림 4-28> 생태융합형 접촉산화수로 모식도.....	135
<그림 4-29> 생태융합형 접촉산화수로 설계도.....	136
<그림 4-30> 생태융합형 접촉산화수로 설치 전경.....	136
<그림 4-31> 생태융합형 접촉산화수로 유입수와 처리수 채수 후.....	140
<그림 4-32> 접촉산화수로 월평균 수질 변화(TOC, COD).....	143
<그림 4-33> 접촉산화수로 월평균 수질 변화(Chl-a, TP).....	144
<그림 4-34> 생태융합형 접촉산화부도 입체도 및 하부 전경.....	146
<그림 4-35> 생태융합형 접촉산화부도 평면도.....	147
<그림 4-36> 생태융합형 접촉산화부도 설치 전경.....	147
<그림 4-37> 생태융합형 접촉산화부도의 로다민 추적실험 가이드라인.....	148
<그림 4-38> 매화지 추적실험조사 전경.....	149
<그림 4-39> 매화저수지 추적 실험기간 동안 풍향 및 풍속.....	149
<그림 4-40> 매화저수지 Rhodamine 주입 후 경과시간별 수면 변화.....	151
<그림 4-41> 구간별로 거리에 따른 수심별 Rhodamine 농도.....	152
<그림 4-42> 수심 0.5m에서 거리에 따른 구간별 Rhodamine 농도 변화.....	152
<그림 4-43> 구간별로 거리에 따른 수심별 수온.....	153
<그림 4-44> 구간별로 거리에 따른 수심별 DO 농도.....	153
<그림 4-45> 바이오스톤 접촉산화시스템의 단명도(위) 및 평면도(아래).....	154
<그림 4-46> 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트 설치 지구.....	156
<그림 4-47> 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트 설치 전경.....	156
<그림 4-48> 바이오스톤 불 요구 압축강도 산출 개념도.....	157
<그림 4-49> 바이오스톤 불 폐색 정도 평가를 위한 반응조 평면도.....	158
<그림 4-50> 바이오스톤 불 폐색 정도 평가를 위한 반응조 정면도.....	158
<그림 4-51> 수두손실 측정을 위한 플랜트 설치 과정.....	159
<그림 4-52> 바이오스톤 불 충전조(실험군).....	160
<그림 4-53> 바이오스톤 불 충전조(대조군).....	160

<그림 4-54> 운전기간에 따른 실험군과 대조군의 폐색정도..... 161

<그림 4-55> 운전기간에 따른 실험군과 대조군의 수두손실 측정결과..... 162

<그림 4-56> 바이오스톤 볼과 일반 쇄석의 부착 고형물량..... 162

<그림 4-57> 바이오스톤 처리조의 슬러지 양 실측..... 163

<그림 4-58> 끈상접촉조와 바이오스톤 볼 접촉조의 슬러지 발생량..... 163

<그림 4-59> 바이오스톤 코팅에 따른 수질정화효율 비교..... 165

<그림 4-60> 산소 포기방법에 따른 수질정화효율 비교..... 166

<그림 4-61> 유입수와 처리수의 육안상 비교..... 168

<그림 4-62> 유입수 수온에 따른 수질정화효율..... 170

<그림 4-63> 접촉산화조에서 수온과 BOD, Chl-a 제거율과의 관계..... 170

<그림 4-64> 바이오스톤 접촉산화시스템의 동절기 수질정화효율..... 171

<그림 4-65> 바이오스톤 접촉산화시스템 설치에 따른 저수지 수질 변화(COD, TOC)..... 173

<그림 4-66> 바이오스톤 접촉산화시스템 설치에 따른 저수지 수질 변화(Chl-a, TP)..... 174

<그림 4-67> 무인항법 이동식 수질정화선 시험모형 제작과정..... 175

<그림 4-68> 무인항법 이동식 수질정화선 구성 장치..... 176

<그림 4-69> 무인항법 수질정화선 현장적용실험 대상지구..... 177

<그림 4-70> 무인항법 이동식 수질정화선(좌) 및 초고속 고액분리장치(우)..... 178

<그림 5-1> 접촉산화시스템 운영의 주요 내용..... 183

<그림 5-2> 접촉산화시스템에서 시료 채취 지점..... 185

<그림 5-3> 생물막 시료 전처리 절차..... 186

<그림 5-4> 초음파 처리 전후의 바이오스톤 볼의 형상..... 186

<그림 5-5> 바이오스톤 접촉산화시스템에서 MLSS/MLVSS 변화..... 191

<그림 5-6> 바이오스톤 접촉산화시스템에서 생물량의 변화..... 192

<그림 5-7> 바이오스톤 볼과 끈상 생물막에서 생물량 비교..... 194

<그림 5-8> 접촉산화시스템에서 시기에 따른 DGGE의 pattern..... 196

<그림 5-9> 접촉산화시스템에서 DGGE band의 계통학적 분석 결과..... 201

<그림 5-10> GelCompar를 사용한 DGGE band의 연관성 분석..... 202

<그림 5-11> Pyrosequencing 분석에서 Phylum의 종류별 분포..... 204

<그림 5-12> Pyrosequencing 분석에서 우점하는 Phylum의 분포..... 206

<그림 5-13> Pyrosequencing 분석에서 Class의 종류별 분포..... 207

<그림 5-14> Pyrosequencing 분석에서 우점하는 Class의 분포..... 209

<그림 5-15> Pyrosequencing 분석에서 우점하는 Genus의 분포	209
<그림 5-16> Pyrosequencing 분석에서 Shannon index 분석 결과	210
<그림 5-17> 탈수소효소에 의한 tetrazolium의 formazan 전환과정	212
<그림 5-18> 접촉산화시스템에서 dehydrogenase의 활성도	214
<그림 5-19> Dehydrogenase의 활성도와 생물량의 비교	214
<그림 5-20> 접촉산화시스템에서 glycosidase의 활성도	216
<그림 5-21> Glycosidase의 활성도와 생물량의 비교	216
<그림 5-22> 접촉산화시스템에서 lipase의 활성도	217
<그림 5-23> Lipase의 활성도와 생물량의 비교	219
<그림 5-24> 접촉산화시스템에서 질산화효소의 활성도	220
<그림 5-25> 질산화효소의 활성도와 생물량의 비교	221
<그림 5-26> 소규모 아크릴 수처리조에서 시료 채취 지점	223
<그림 5-27> 아크릴 반응조에서 생물량 비교	227
<그림 5-28> 바이오스톤 불 코팅 전/후 세균 군집구조 분석	228
<그림 5-29> 바이오스톤 불 코팅 전/후 DGGE band에 대한 계통학적 분석	231
<그림 5-30> 플랜트에서 시간에 따른 MLSS/MLVSS 변화	234
<그림 5-31> 아크릴 바이오스톤 불 반응조에서 생물량의 변화	235
<그림 5-32> 바이오스톤 불에서 dehydrogenase의 활성도	236
<그림 5-33> Dehydrogenase의 활성도와 생물량의 비교	236
<그림 5-34> 아크릴 반응조 바이오스톤 불에서 glycosidase의 활성도	238
<그림 5-35> Glycosidase의 활성도와 생물량의 비교	239
<그림 5-36> 아크릴 반응조 바이오스톤 불에서 lipase의 활성도	240
<그림 5-37> Lipase의 활성도와 생물량의 비교	240
<그림 5-38> 아크릴 반응조에서 시기에 따른 DGGE의 pattern	241
<그림 5-39> 아크릴 반응조에서 DGGE band의 계통학적 분석 결과	246
<그림 5-40> GelCompar를 사용한 DGGE band의 연관성 분석	248
<그림 5-41> 바이오스톤 불 건조시 생물량의 변화	250
<그림 5-42> 바이오스톤 불 건조시 효소활성도의 변화	250
<그림 5-43> 바이오스톤 불 건조 시간에 따른 DGGE의 pattern	251
<그림 5-44> GelCompar를 사용한 DGGE band의 연관성 분석	252
<그림 6-1> 환경부 가압부상식 조류제거선(환경공단, 2012)	273



<그림 6-2> 환경부 가압부상식 조류제거선 운영전경 .....	273
<그림 6-3> 조류 제거선(한국수자원공사, 2014) .....	274
<그림 7-1> 간소화된 저수지 물질수지 해석모델 .....	292
<그림 7-2> 바이오스톤 인공습지의 수로구조물 유형 .....	295
<그림 7-3> 바이오스톤 접촉산화시스템의 인공습지 유형 .....	296
<그림 7-4> 초기강우 등 비점오염원 처리를 위한 적용 유형 .....	296
<그림 7-5> 바이오스톤 볼 담체의 확대 적용방안 .....	297
<그림 7-6> 연구개발기술의 지적재산권(특허등록 등) .....	298



# 제1장

## 서론

제1절 연구배경 및 목적

제2절 연구내용 및 추진체계

제3절 기대효과 및 활용방안



## 제1장 서론

### 제1절 연구배경 및 목적

#### 1. 연구배경 및 필요성

국내에는 17,478개소 하구 담수호 11개소 포함의 농업용 저수지가 전국에 분포하고 있으며, 전체 물 이용량의 약 60%를 농업용수로 사용하고 있다(수자원장기종합계획, 2016). 최근 농어촌지역의 도농복합형태 개발 및 관광지, 유원지화로 농업용수의 오염원이 증가하는 추세에 있으며, 이로 인해 농업용수 수질이 지속적으로 악화되고 있다. 2016년도 농업용수 수질측정망 조사결과에 의하면 조사대상 975개소 중 약 10%에 해당하는 98개소가 농업용수 수질기준(TOC 6mg/L이하)을 초과하고 있다. 특히, 늦봄에서 초가을까지 외기온도 상승 및 저수율 저하와 함께 부영양화 증가, 녹조 대량 발생 등으로 수질오염도가 급상승하고 있으며, 이로 인해 호 내 물고기 폐사, 악취발생 등으로 민원이 발생되고 있다. 2013년도 조사결과 여름철(7~9월) 수질기준 초과율(COD 기준)은 26.8%로 연평균 17.8%보다 9%이상 증가하고 있다.

농업용 저수지에는 유역 내 미처리 생활오수 및 축산폐수 등 점오염원뿐만 아니라 야적된 축분, 농경지, 임야 등에서 유출되는 비점오염원이 처리 없이 호 내로 유입되고 있어 수질오염의 주요 원인이 되고 있으며, 이로 인해 저수지에는 부유물질, 유기물, 영양물질 등 오염물질의 종류가 다양하게 존재한다. 또한, 설치된 지 오래된 저수지는 퇴적층에서 인 등의 오염물질이 수중으로 재 용출되고 있으며, 이러한 오염물질의 재 용출은 호소 부영양화 촉진 및 녹조 발생의 중요한 원인으로 작용하고 있다.



<그림 1-1> 농업용 저수지의 수질오염 사례

최근 국민들의 웰빙과 먹거리에 대한 관심증가로 안전농산물, 친환경농산물 생산을 위한 양질의 농업용수를 요구하고 있으며, 농업·농촌의 어메니티 증진, 관광산업화 등의 정책으로 농어촌 지역에 위치하고 있는 농업용 저수지에 대한 역할이 점진적으로 증대되고 있다. 또한, 농업용수에 대한 다목적 활용에 대한 수요도 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 수질오염도가 높은 물을 농업용수로 사용하는 경우에는 생산물의 수확량과 품질에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 논·밭의 생태계 및 농민들의 농작업 환경에도 영향을 미치고 있다. 또한, 오염된 물의 사용은 친환경농산물 인증자격 취득에 제한 요인이 되고 있어 농민들의 불만과 민원이 제기되고 있다. 최근에는 농업용 저수지를 대상으로 수상태양광 발전, 주민들의 휴식공간을 위한 공원화, 수상 레저 공간, 임대 낚시터 등 농업용수 공급 이외의 다목적 활용 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 농업용 저수지도 3등급의 수질관리가 요구되고 있다.

농업용 저수지를 대상으로 한 수질개선기술 개발은 그동안 주로 유입수의 질소, 인 등의 영양염류를 저감하는 인공습지 또는 침강지와 같은 자연정화공법이 대부분이었다. 이러한 공법은 유입수를 대상으로 하기 때문에 호소의 수질개선 효과가 가시적으로 나타나기까지는 장기간이 소요되며, 녹조 등 기상과 수리·수문상황에 따라 발생하는 수질오염사고(녹조 대량발생, DO 부족으로 어류집단폐사 등)에 신속하게 대처할 수 없는 단점이 있다.

물리적 제어	화학적 제어	생물학적 제어	융복합 제어	기타
<ul style="list-style-type: none"> <li>·심층복기, 강제순환 (16)</li> <li>·전기분해 (12)</li> <li>·초음파/충격파(5)</li> <li>·저온수/심층수 살포 (2)</li> <li>·여과 공법 (2)</li> <li>·차양 및 광차단막 (2)</li> <li>·원심분리 (1)</li> <li>·준설, 기계적 수거 (1)</li> </ul> <p><b>(41개)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·응집/응축제 살포(33)</li> <li>·화공약품 살포(11)</li> <li>·광촉매(5)</li> <li>·생물유래 추출물 살포 (5)</li> <li>·방제장지(4)</li> <li>·오존/자외선 (5)</li> </ul> <p><b>(63개)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·살조세균/곰팡이/바이러스 (12)</li> <li>·식생정화 (9)</li> <li>·생물막/슬러지 (5)</li> <li>·천적 미생물 (2)</li> <li>·어패류 (2)</li> </ul> <p><b>(30개)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·물리/화학 복합제어법 (10)</li> <li>·생물/화학 복합제어법 (2)</li> <li>·기타 (4)</li> </ul> <p><b>(16개)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·신재생에너지 (10)</li> <li>·희석(1)</li> <li>·기타 (4)</li> </ul>

<그림 1-2> 하천 및 정체수역 대상 수처리기술 현황

자료) 한국건설기술연구원, 2012

최근에는 호 내의 용존산소 농도를 증가시켜 유기물을 제거하는 수중 포기 장치 및 물 순환장치, 그리고 녹조 제거를 주 대상으로 하는 가압부상공법 및 수초제거선 등과 같은 물리화학적 기술 등이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 처리규모의 한계, 유지관리의 어려움, 낮은 경제성, 생태적·환경적 영향 등의 문제점 때문에 대부분 하천 정체수역이나 소규모 호소에 일부 적용되어 왔으며, 범용적 실용화를 하기에는 아직까지 많은 어려움을 가지고 있다.

농업용 저수지는 대부분이 농어촌지역에 위치하고 있으며, 농업용수 공급을 목적으로 하므로 설치비가 저렴하고 유지관리 비용이 적게 소요되어야 하며, 농업용 호소의 특성상 대규모의 많은 수량을 처리해야 한다. 농업용 저수지 수질개선기술로는 수생태적으로 안전하면서 유지관리가 용이한 저비용, 고효율의 수처리 기술(공법) 개발이 필요한 실정이다.

## 2. 연구목적

본 연구에서는 농업용 저수지의 부영양화 및 수질오염을 사전에 방지하여 양질의 농업용수를 확보하고자 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 특성에 적합한 저비용·고효율의 융복합 수처리 기술을 개발하고자 하였다. 본 연구에서 개발하고자 했던 수처리 기술의 목표는 다음과 같다.

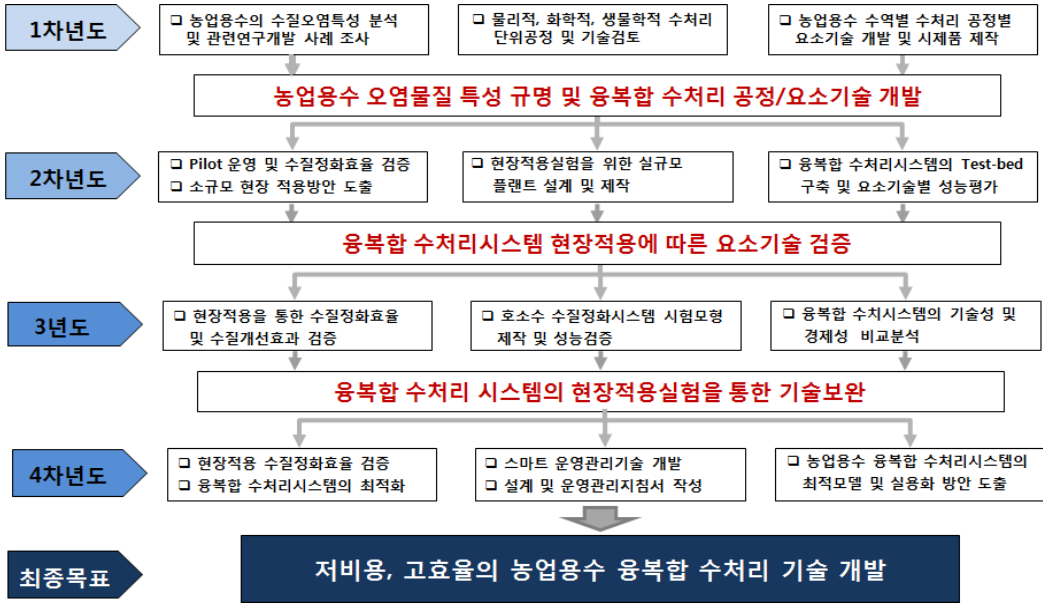
첫째, 수질기준 4등급 이내의 목표달성이 가능한 수처리 기술

둘째, 인공습지의 단점을 개선하여 인공습지 전면 대체 또는 인공습지와 조합하여 후처리 시설로 활용할 수 있는 기술

셋째, 저수지의 수질오염 및 녹조발생을 사전에 방지할 수 있는 수처리 기술

## 제2절 연구내용 및 추진체계

### 1. 연도별 연구개발 목표

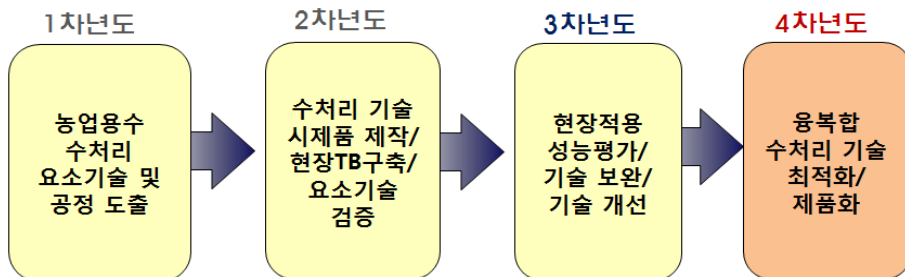


#### 최종 목표

#### “농업용수 수질개선” 을 위한 융복합 수처리 기술 개발

- 농업용 저수지 수환경 개선으로 부영양화 및 녹조발생 사전 방지
- 깨끗한 양질의 농업용수 확보 및 공급

#### 연차별 연구목표



<그림 1-3> 연구 최종목표 달성을 위한 연차별 연구목표



## 2. 연구개발 공정 및 연구범위

### 가. 연구개발 공정

2014년 (1차년)	2015년 (2차년)	2016년 (3차년)	2017년 (4차년)
기술구상단계 (설계)	기술개발단계 (시작품)	기술 보완단계 (Upgrade)	기술 완성단계 (최적화)
농업용저수지 오염진단 기존 수처리기술 검토	개발기술 TB 구축 핵심요소기술 검증	성능/효율평가 및 기술 보완	응답속도 수처리기술 최적화
수질오염현황파악 수질오염요인분석 기존연구자료 조사	호소수 정화기술 자료조사 요소기술 검토	TB 현장적용실험 /성능, 효율평가 (문제점 보완/기술개선)	최적설계 및 운전 인자 도출/설계 및 운영 관리메뉴얼 작성
기존 기술검토 수역별 요소기술 도출 수처리공정 설계	시제품제작 및 TB 구축/ 시험운영 (유입수 대책)	호소 수질정화시스템 시험모형 제작/현장실험 /요소기술 검증	호소 수질정화시스템 성능/효율 평가/정량화 (최적설계인자 도출)
요소기술 검증 (Lab-scale) (유입수 대책)	호소 수질정화시스템 기본개념 구상 (호소수 대상)	호소 수질정화시스템 기본개념 구상 (호소수 대상)	스마트운영관리 기술개발 (원격 자동 제어관리)

### 나. 연도별 연구목표에 따른 세부 추진실적

2014년 (1차년)	2015년 (2차년)	2016년 (3차년)
기술구상단계 (기술 설계)	기술 개발단계 (시작품)	기술 보완단계 (Upgrade)
<b>응답속도 수처리기술의 공정 및 요소기술 개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 농업용저수지 물리적/수질오염 특성 분석(수질DB 활용)</li> <li>- 농업용 저수지 수질오염 원인 요인분석(통계분석)</li> <li>- 기존 국내외 수처리기술 검토 및 현장적용 사례조사</li> <li>- 농업용저수지 적용성 평가</li> <li>- 적용성이 높은 요소기술 추출</li> <li>- 유입수 대책 수처리공정 개발</li> <li>- 생태융합형 접촉산화시스템 공 정 개발/설계</li> <li>- 호소수 대책기술 기본구상 설계</li> </ul>	<b>수처리 시제품 제작/TB 구축 /요소기술 검증</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구대상지구 선정 및 현장모니 터링(수질조사, 퇴적물 조사, 퇴 적물 용출실험, 하천 유속조사 등)</li> <li>- 연구대상지구 3차원 수리-수질 모형 구축(유출량 등 수문분석)</li> <li>- 현장적용실험을 위한 Test-bed 구축/ 현장적용실험</li> <li>- 요소기술 성능평가/효율평가</li> <li>- 저수지 수질개선효과(모델링)</li> <li>- 호소 수질정화시스템 기술개발 /요소기술 검토 및 추출</li> <li>- 부채 및 동력 등 제반 기술 검토</li> <li>- 연구성과물 지식재산권 취득 (특허 출원 및 등록 3건)</li> </ul>	<b>Test-Bed 현장적용평가/ 적용성 제고</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유입수 수처리시스템의 현장 적용성 평가/기술개선/시설보완</li> <li>- 생태융합형 접촉산화시스템</li> <li>- 바이오스톤 접촉산화공법 개발</li> <li>- 수처리시스템의 저수지 수질 개선효과분석</li> <li>- 타 저수지 확대적용을 위한 시스템별 적정규모 선정</li> <li>- 기술적/경제적 우위성 평가</li> <li>- 현행 인공습지 및 기타 다른 기술과 비교분석</li> <li>- 호소 수질정화선 시험모형 제작 / 요소 기술별 성능검증</li> <li>- 기술적/경제적 우위성 분석</li> </ul>

다. 연도별 연구내용

본 연구는 총 4개년(2014~2017년)동안 진행되었으며, 연도별 연구목표 및 연구 세부내용은 다음과 같다. 연구의 진행은 1차년도는 기술의 구상단계, 2차년도는 기술의 개발단계 및 시제품 제작단계, 3차년도는 현장적용실험을 통한 기술의 보완단계, 4차년도는 기술의 최적화를 통한 기술의 완성단계로 구분하여 연구목표를 설정하였고, 연구목표 달성을 위해 세부 연구내용을 수립하여 진행하였다.

구분	연구목표	연구내용 및 범위
2014년 (1차년도)	농업용 저수지의 물리적/수질오염특성 분석 및 관련기술개발 사례분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농업용수 물리적 특성 분석</li> <li>○ 농업용수 수질오염 진단</li> <li>○ 관련 기술개발 현황 및 사례분석</li> <li>○ 농업용수 수처리 시스템 개발 방향 정립</li> </ul>
	기존 수처리 단위공정 /요소기술 검토	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수처리 기술의 농업용저수지 적용 실효성 분석</li> <li>- 물리적 제어기술의 적용 실효성 검토</li> <li>- 화학적 제어기술의 적용 실효성 검토</li> <li>- 생물학적 제어기술의 적용 실효성 검토</li> </ul>
	대상수역별 수처리 요소기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 대상수역별 적용 가능한 공정/요소기술 개발</li> <li>- 저수지 유입부에 적합한 단위공정 추출</li> <li>- 저수지 호내 수질개선에 적합한 공정 추출</li> </ul>
	융복합 수처리 공정의 요소기술 검증	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 요소기술에 대한 실험실 규모의 검증</li> <li>- 실험실 규모의 기초 실험 검증</li> <li>- 공정/요소기술의 문제점 도출</li> </ul>
2015년 (2차년도)	현장적용실험을 위한 대상지구 선정/조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 현장적용실험을 위한 연구대상지구 선정</li> <li>○ 대상지구 환경조건 연속모니터링</li> <li>○ 대상지구 수질 및 퇴적물 오염도 변화 조사</li> </ul>
	융복합 수처리 시스템의 현장 Test-bed 설치 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리시설의 현장적용 성능평가</li> <li>- 현장적용실험을 위한 Test-bed 구축</li> <li>- Test-bed를 통한 수처리효율 평가</li> <li>- 저수지 수질개선에 미치는 효과 분석(모델링)</li> </ul>
	저수지 호 내 대상 수질정화시스템 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 호소 수질정화기술개발 및 성능평가</li> <li>- 부력채 및 동력장치 등 제반기술 검토</li> <li>- 단위공정별 시제품 제작 및 성능평가</li> </ul>
	융복합 수처리 기술의 지식재산권 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지식재산권 확보</li> <li>- 개발 수처리공법/기술에 대한 특허 등록</li> </ul>

구 분	연구목표	연구내용 및 범위
2016년 (3차년도)	유입수 수처리 기술의 현장적용실험 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 생태융합형 접촉산화시스템 현장적용실험 및 성능평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 복합응집장치와 연계 성능평가</li> <li>- 기술개선(바이오스톤 불 담체 개발)</li> <li>- 요소기술의 성능평가 및 수처리효율 평가</li> <li>- 저수지 수질 및 퇴적물 오염도 개선에 미치는 영향(효과) 분석</li> <li>- 수생태계에 미치는 영향 검토 및 분석</li> <li>- 타 저수지 확대적용을 위한 적용모형 개발</li> </ul> </li> <li>○ 바이오스톤 접촉산화시스템 현장적용실험 및 성능평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 요소기술의 성능평가 및 수처리효율 평가</li> <li>- 저수지 수질개선효과 분석</li> <li>- 수생태계에 미치는 영향 검토 및 분석</li> <li>- 타 저수지 확대적용을 위한 적용모형 개발</li> </ul> </li> </ul>
	호소수 대상 융복합 수처리시스템 시제품 제작 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 호소수 대상 수처리 시스템의 시험모형 제작 및 현장적용실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 호소수 대상 융복합 수처리시스템 시험모형 제작</li> <li>- GPS기반 무인항법 프로그램 요소기술 평가</li> <li>- 저수지 수생태계에 미치는 영향 분석</li> </ul> </li> </ul>
	융복합 수처리 기술의 기술성/경제성 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리 기술의 기술성/경제성 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 타 유사기술 대비 기술적 우위성 분석</li> <li>- 타 유사기술 대비 경제적 우위성 분석</li> </ul> </li> </ul>
2017년 (4차년도)	융복합 수처리 기술의 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리시스템의 현장적용성 평가(계속)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 여재 폐색성 등 핵심기술에 대한 성능평가</li> <li>- 수질정화효율 및 수질개선효과 분석</li> <li>- 부착미생물에 의한 오염물질 정화기작 규명</li> </ul> </li> <li>○ 융복합 수처리 시스템의 최적모델 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 농업용 저수지에 적합한 최적의 시스템 개발                   <ul style="list-style-type: none"> <li>· 유입수 수처리기술 및 공정</li> <li>· 호소수 수처리기술 및 시스템</li> </ul> </li> <li>- 융복합 수처리시스템 최적 설계인자 도출</li> </ul> </li> </ul>
	융복합 수처리공법 운영관리매뉴얼 마련	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수처리 시스템의 스마트 운영관리기술 개발</li> <li>○ 융복합 수처리시설의 운영관리 매뉴얼 마련               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유입수 수처리 기술 및 시스템</li> <li>- 호소 대상 수질정화시스템</li> </ul> </li> </ul>
	융복합 수처리 기술의 실용화/사업화방안	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 융복합 수처리 시스템의 현장적용방안 제시               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현장적용 유형 및 기술이전 방안</li> <li>- 수처리 시스템의 실용화/사업화 방안 제시</li> </ul> </li> </ul>

라. 2017년도 연구내용

2017년도 연구기관별 세부 연구내용은 다음과 같다.

	농어촌연구원 (연구총괄/성능평가)	충북대학교 (오염정화기작 분석)	(주)수생태복원 (제작, 운영)
수처리 기술 현장적용실험/ 최적화	<ul style="list-style-type: none"> <li>매화지, 유입하천 수질, 퇴적물 조사 및 분석</li> <li>설계인자별 수질정화효율 평가/수질개선효과 평가</li> <li>3차원 CFD 모델을 통한 유체역학 해석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>접촉산화시스템 미생물에 의한 수질정화 기작 규명</li> <li>- 부착미생물 부착량 평가</li> <li>- 시간(수온)에 따른 미생물 군집 변화 평가</li> <li>- 부착미생물의 활성도 평가</li> <li>- 바이오스톤볼 미생물 코팅 전/후 미생물 안정도 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장실험시설 운영관리</li> <li>실험시설 보완/개선</li> <li>슬러지 실측/관리방안 도출</li> </ul>
무인항법 이동식 수질 정화시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>요소기술별 성능평가</li> <li>저수지 수질개선효과 분석 및 정량화</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>현장적용방안 도출</li> </ul>
접촉산화시스 템 최적모델 개발 및 운영 관리방안	<ul style="list-style-type: none"> <li>최적 설계인자 값 도출</li> <li>설계 및 운영관리 메뉴얼 작성(총괄)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>설계 및 운영관리 메뉴얼 작성(미생물 부분)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>최적모델 제안</li> <li>스마트 운영관리기술 개발</li> <li>설계 및 운영관리메뉴얼 작성(설계/시공/운전)</li> </ul>
수처리 기술 사업화/실용화 방안 마련	<ul style="list-style-type: none"> <li>개발기술의 지적재산권 취득(특허출원)</li> <li>신기술인증신청 보고서 작성(총괄/정화효율)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>신기술인증 신청 보고서 작성(시설 제원/설계)</li> </ul>

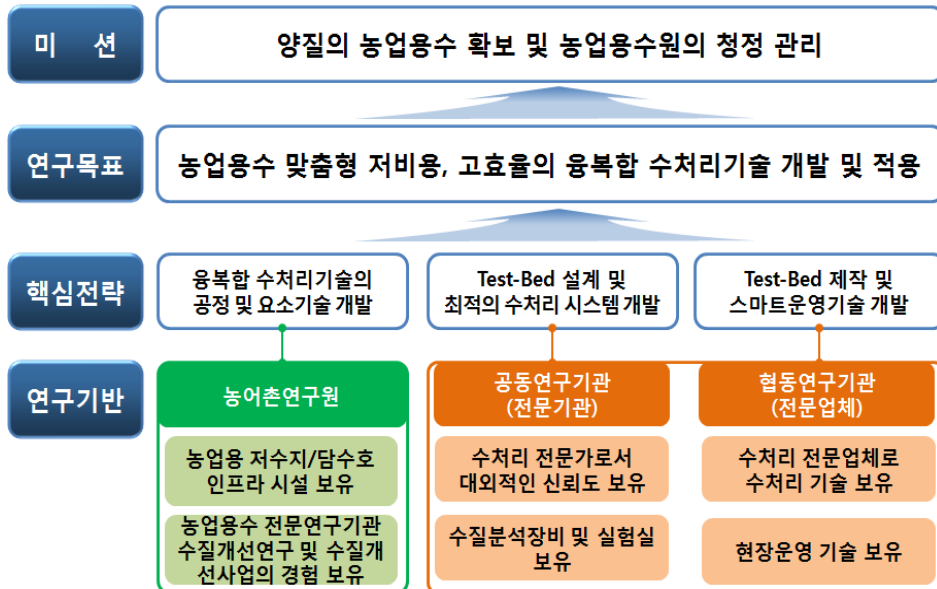
마. 연구 추진절차



### 3. 연구 추진체계

#### 가. 추진전략 및 방법

- 산·학·연 협동연구 및 공동연구 수행으로 연구의 효율성 제고 및 연구 성과의 극대화 도모
  - 수처리 전문업체와 협동연구로 연구 사업비의 효율적 비용 집행
  - 외부 수처리 전문가와의 공동연구로 연구결과 대외적인 신뢰도 제고
- 수처리 장치의 실규모 현장적용 실험을 통한 최적모델 개발
  - TB 구축 및 현장적용실험으로 현장에 적용성이 높은 최적 모델 개발
- 수처리 전문가들의 자문 등을 통해 개발된 기술에 대한 지속적 검증
  - 수처리 전문가들의 자문회의 등을 통한 지속적인 기술 검증
  - 연구 성과물에 대한 전문학회 학술활동을 통한 대외 기술력 검증
- 연구 성과물에 대한 지식재산권 등록으로 원천기술 확보
  - 연구 성과물에 대한 특허출원 및 등록으로 원천기술에 대한 권리 확보
  - 정부기관의 신기술인증 자격취득으로 사업화의 기반 마련



<그림 1-4> 효율적 연구수행을 위한 추진전략

(표 1-1) 연구수행기관별 연구내용

구분	세 부 내 용
농어촌 연구원	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 농업용수의 물리적/수질오염 특성 조사 및 분석</li> <li>▪ 국내 농업용수 수질개선사례 및 관련연구 조사</li> <li>▪ 융복합 수처리장치의 단위공정별 설계인자 도출</li> <li>▪ 농업용수 융복합 수처리기술 개발</li> <li>▪ 현장적용실험을 위한 연구대상지 조사/선정</li> <li>▪ 융복합 수처리 시스템의 현장검증 Test-bed 구축</li> <li>▪ 수처리시스템의 설계인자별 수질정화효율 분석</li> <li>▪ 수처리 시스템의 사업화 방안 제시</li> <li>▪ 지적재산권 취득관련 제반 업무</li> </ul>
공동연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 해외 수처리장치 개발 및 사업화 사례 수집</li> <li>▪ 수처리기술의 단위공정 및 요소기술 검토</li> <li>▪ 매디아 미생물 부착력 등 평가</li> <li>▪ 접촉산화시스템 미생물에 의한 수질정화기작 규명</li> <li>▪ 수처리 시스템의 유효 영향반경조사</li> <li>▪ 저수지 수질개선에 미치는 영향 분석(모델링)</li> <li>▪ 수처리 시스템이 수생태계에 미치는 영향 분석</li> <li>▪ 개발된 수처리기술의 기술성 분석</li> <li>▪ 개발된 수처리기술의 경제성 비교분석</li> </ul>
협동연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 융복합 수처리 장치 세부설계</li> <li>▪ 수처리장치 제작, 현장설치 및 운영관리</li> <li>▪ 수처리 장치의 최적 설계인자 및 설계모델 개발</li> <li>▪ 수처리 시스템의 스마트 운영기술 개발</li> <li>▪ 개발된 수처리기술의 경제적 우위성 분석</li> <li>▪ 지적재산권 취득관련 제반업무 지원</li> <li>▪ 융복합 수처리 장치의 해외진출 가능성 분석</li> </ul>

### 제3절 기대효과 및 활용방안

#### 1. 기술적 측면

- 농업용 저수지 대상 수처리기술 개발로 공사 관리 저수지의 수질관리 및 수질개선사업에 적극 활용
  - ☞ 2016년 농업용수 수질기준 초과시설 : 232개소(COD기준, 975개소의 23.8%)
- 농업용수 수질개선사업의 유입수 대책 시설인 인공습지 전면 대체 또는 인공습지 후처리 시설로 활용하여 수질개선사업 효과 제고
- 개발된 수처리 기술의 특허등록 및 환경 신기술 인증 취득으로 농업용수 관리기관인 한국농어촌공사의 수처리 기술력에 대한 대외적인 신뢰도 제고

#### 2. 경제·산업적 측면

- 영국의 물 전문 리서치 기관인 글로벌 워터 인텔리전스(GWI)에 따르면, 2016년 현재기준 세계 물시장 규모는 7,139억 달러(약 820조원)이며, 연평균 4.2%씩 성장하여 2025년에는 8천 600억불로 급성장할 것으로 전망되고 있음. 국내에서도 농업용수 사용량은 약 60%로 수요량이 가장 많은 분야이며, 최근에는 농업용수의 다목적화로 사용량은 지속적으로 증가할 전망이다
- 본 연구개발 성과는 오염된 농업용수저수지 및 최근 사회적 문제가 되고 있는 4대강 녹조문제 해결에도 적용될 수 있을 것으로 기대됨
- 양질의 농업용수 확보·공급으로 친환경 농작물 재배시스템 구축이 가능해지고, 이로 인해 농촌지역의 소득 창출과 지역 발전에 기여할 것임
- 농어촌지역 어메니티 증가로 농업·농촌 관광산업 등 6차 산업 활성화에 따라 농어촌지역에 미치는 직·간접적인 효과는 상당할 것으로 기대됨





## 제2장

# 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 진단

제1절 농업용 저수지의 물리적 특성

제2절 농업용 저수지의 수질오염 진단



## 제2장 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 진단

국내 농업용 저수지 특성에 적합한 수처리 기술을 개발하기 위하여 국내 농업용 저수지를 대상으로 물리적 특성과 수질오염 특성 등에 대해 본 연구의 1차년(2014년)에 분석하였으며, 세부적인 내용은 다음과 같다.

### 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)과 같다.

(표 2-1) 국내 농업용 저수지 지역별 분포현황

구 분	소 계	농업용 저수지		담수호
		통계시설	시설시설	
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%)
부 산	104	104	-	-
대 구	201	201	-	-
인 천	36	36	-	-
광 주	139	139	-	-
대 천	15	15	-	-
울 산	364	364	-	-
세 중	38	38	-	-
경 기	362	360	-	2
강 원	317	317	-	-
충 북	779	779	-	-
충 남	901	897	-	4
전 북	2,263	2,262	-	1
전 남	3,231	3,226	1	4
경 북	5,544	5,544	-	-
경 남	3,191	3,191	-	-
제 추	4	4	-	-

자료) 농업생산기반정비통계연보, 2013, 농림축산식품부 · 한국농어촌공사

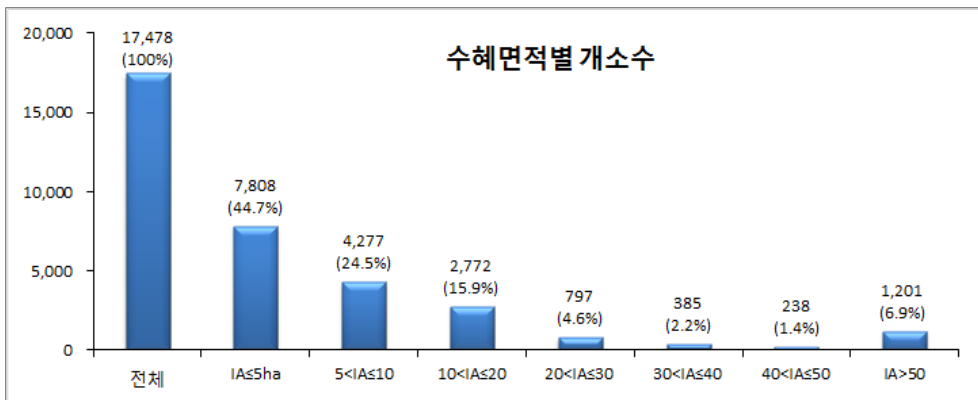
## 2 농업용 저수지 시설제원에 따른 분포현황

### 가. 수혜면적별 분포현황

국내에는 농업용 호소가 17,489개소(담수호 11개소 포함)가 전국에 분포하고 있으며, 농업용 저수지에 의해 관개되는 면적은 약 593천ha로 전체 관개면적의 76%에 해당한다. 하구 담수호를 제외한 농업용 저수지 17,478개소를 수혜면적별로 구분해보면 50ha이하가 전체의 93.1%에 이르고 있다(표 2-2). 이를 좀 더 세부적으로 구분해 보면 <그림 2-1>에서 보는 바와 같이 5ha이하가 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 2-2) 농업용 저수지의 수혜면적별 시설수 분포현황

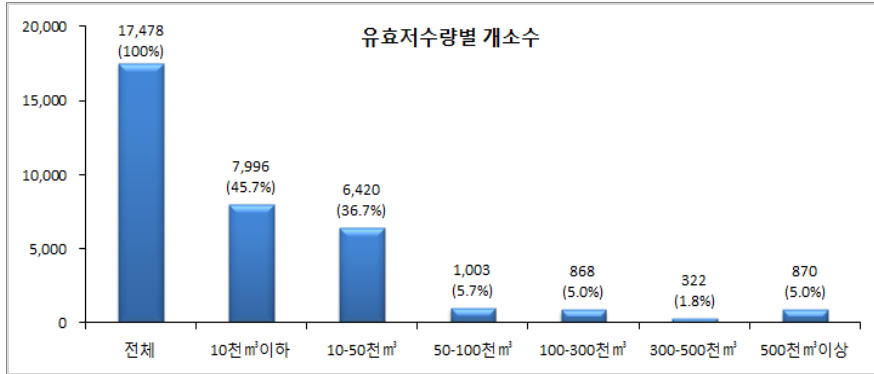
구 분	계	수혜면적 (ha)				
		50ha 미만	50ha이상 ~ 100ha미만	100ha이상 ~ 500ha미만	500ha이상 ~ 1,000ha미만	1,000ha 이상
농업용호소(A+B)	17,489	6,265	498	620	55	51
(구성비, %)	(100.0%)	(93.0%)	(2.8)	(3.5%)	(0.3%)	(0.3%)
저수지(A)	17,478	16,265	498	620	55	40
(구성비, %)	(100.0%)	(93.1%)	(2.9%)	(3.5%)	(0.3%)	(0.2%)
담수호(B)	11	-	-	-	-	11
(구성비,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



<그림 2-1> 농업용 저수지의 수혜면적 구간별 시설수 현황

나. 유효저수량별 분포현황

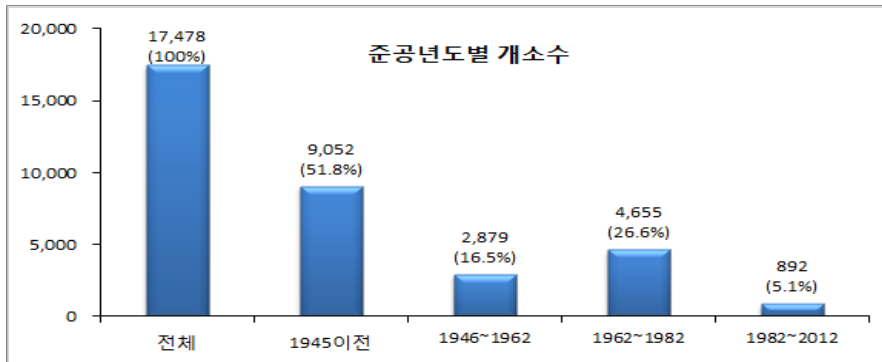
유효저수량별 시설수 현황은 <그림 2-2>와 같이 10천 $m^3$ 이하가 7,996개소로 전체의 45.7%를 차지하며, 10~50천 $m^3$ 의 규모가 6,420개소(36.7%)로 전체 시설 중 50천 $m^3$ 이하의 저수지가 82.4%임을 알 수 있다. 따라서 국내 농업용 저수지는 대부분이 5만 $m^3$  이하의 소규모 저수지임을 알 수 있다.



<그림 2-2> 농업용 저수지의 유효저수량 구간별 시설수 현황

다. 준공연도에 따른 분포현황

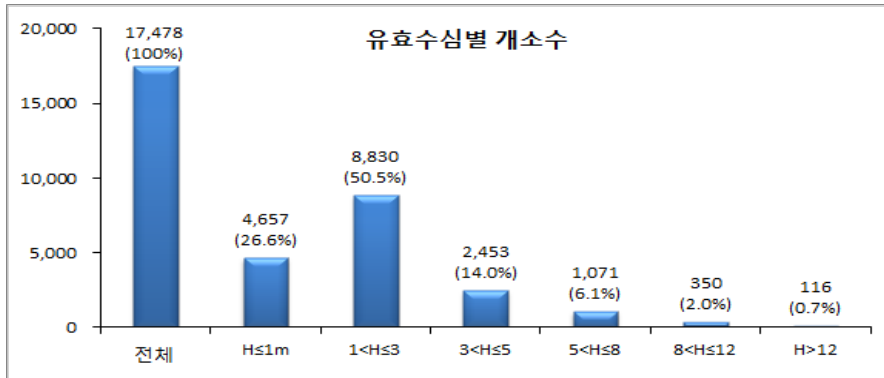
1945년 이전에 설치되어 경과연수가 70년 이상된 저수지가 전체의 약 52%에 달하며, 1962년 이전에 설치되어 50년 이상된 저수지는 전체의 68.3%에 이르고 있다. 국내 약 70%에 해당하는 농업용 저수지는 설치된 지 50년이 넘은 노후화된 저수지로 오염물질의 장기간 퇴적으로 인해 수용적이 많이 줄어들었으며, 퇴적 오염물질의 채용출로 인해 수질오염을 악화시키고 있다.



<그림 2-3> 농업용 저수지의 준공연도에 따른 시설수 현황

라. 유효수심에 따른 분포현황

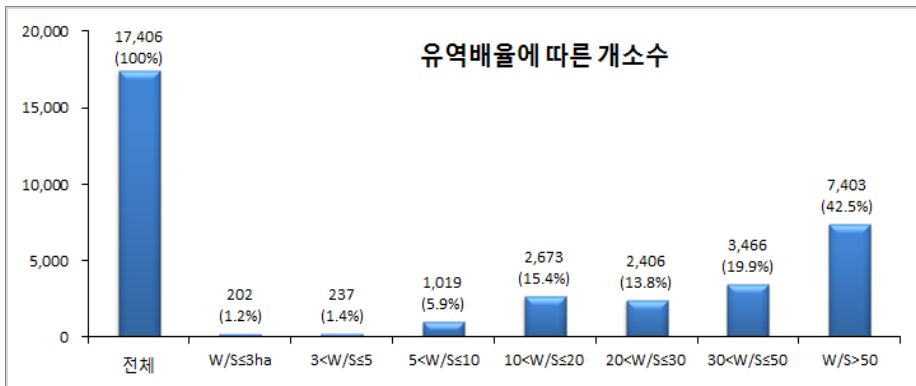
농업용 저수지를 유효수심별로 구분해보면 <그림 2-4>와 같이 1m이하는 전체의 26.6%이고, 3m이하는 전체의 77.1%, 5m이하가 전체의 91.1%로 국내 대부분의 저수지들은 수심이 낮은 저류지형을 알 수 있다.



<그림 2-4> 농업용 저수지의 유효수심에 따른 시설수 현황

마. 유역배율에 따른 분포현황

유역배율(유역면적/만수면적)에 따라 구분해보면 <그림 2-5>와 같이 유역 배율 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 2-5> 저수지의 유역배율(유역면적/만수면적)에 따른 시설수 현황

## 제2절 농업용 저수지 수질오염 진단

### 1. 농업용 저수지의 수질현황

농업용 저수지의 장기적인 수질변동 추이를 알아보기 위하여 농업용수 수질측정망 조사자료 중 2005년부터 2013년까지 9개년의 추이를 살펴보았다. (표 2-3)은 연도별로 측정망 저수지를 분기별로 연 4회 조사한 자료의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차에 대한 통계치를 수질항목별로 각각 나타냈고, <그림 2-6>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℃로 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 6.2~6.6 mg/L에 비해 2010~2013년의 연평균 COD는 5.3~5.8 mg/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 19.3~21.2 mg/m<sup>3</sup>의 값을 보였고, 2009~2010년도에는 평균 12.2~13.9 mg/m<sup>3</sup>, 2011~2013년도에는 평균 14.7~15.3 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 모든 수질항목에서 2005~2008년에 비해 2009년, 2010년 이후부터 전반적으로 수질오염도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 2000년대 들어 하천과 호소의 수질오염이 사회적 문제로 대두되면서 수질개선사업 확대 등 범 정부차원에서 노력한 결과의 영향으로 판단된다.

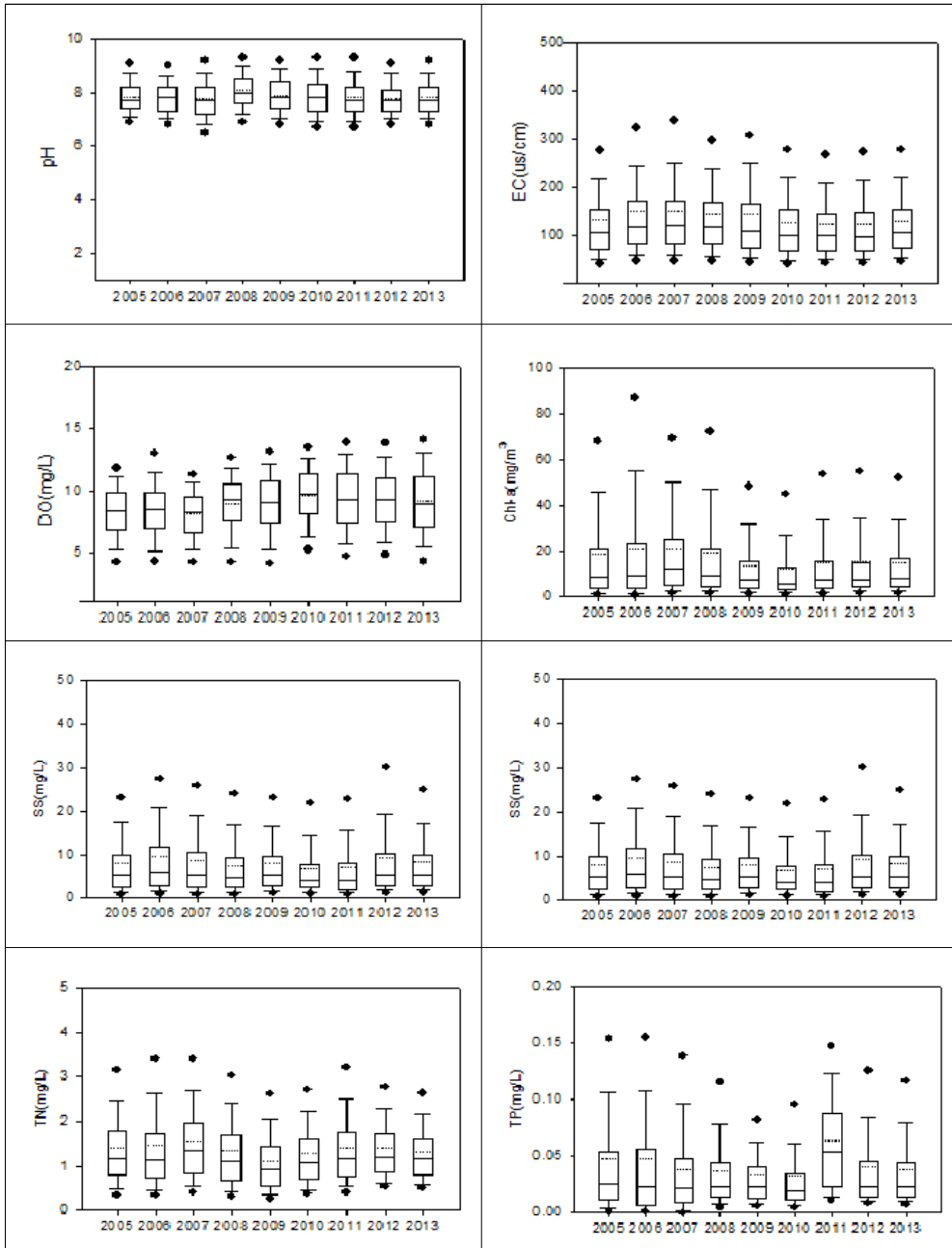
(표 2-3) 농업용 저수지 연도별 수질현황

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 2-3) 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 2-6> 농업용 저수지 연도별 수질현황

## 2. 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인

### 가. 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 추출하기 위하여 주성분 분석과 요인분석을 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 분석방법이다. 주성분이라는 것은 많은 변수들을 설명하는 주된(Principal) 성분이라는 것을 의미하며, 주성분 분석은 그 자체가 목적이 아니고, 일단 자료를 간단히 요약하여 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, 변수는 저수지의 물리적 인자와 수질항목 등으로 총 20개를 정하였다. SPSS 통계 프로그램(11.0 Version)을 이용하여 주성분 분석결과 20개 변수 각각에 대한 고유치(Eigen value, 아이젠값)와 각 요인이 수질을 설명할 수 있는 설명력 즉, 요인적재량(요인부하량)을 (표 2-4)에 나타냈다. 고유값이란 요인이 설명해 주는 변량의 양을 말하는 것으로, 고유값이 1 이상이라는 의미는 하나의 요인이 변인 1개 이상의 변량을 설명해 줄 수 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 회전방법을 적용하였다.

(표 2-4)는 주성분 분석결과 20개의 변수에 대한 각각의 고유값과 분산력을 나타낸 것이고, 이 결과표를 통해서 6개의 주요인을 추출할 수 있었다. 요

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

인 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 수질의 약 73.2%를 결정(설명)할 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

(표 2-4) 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						

주) 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 2-5)은 요인분석에 의한 각 요인에 대한 변수들의 요인적재량(요인부하량)을 나타낸 것이다.

(표 2-5) 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 2-5)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 요인적재량을 보였고, 요인 6은 수온과 75.6%의 정(+)의 상관성을, DO와는 83.2%의 부(-)의 상관성이 있는 것으로 나타났다.

(표 2-6)은 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 관련되는 변수로서 준공년수가 오래된 저수지는 오염물질의 장기간 퇴적으로 인해 수체 용량 감소를 가져오고, 저수지 용적이 적고, 유효수심이 낮은 저수지일수록 수질오염에 더 취약한 것으로 판단된다.

(표 2-6) 저수지 수질에 영향을 미치는 요인특성 및 기여율

구분	상관 변수	요인 특성	수질설명력 (기여율)
요인 1	저수량, 수해면적, 만수면적, 유역면적	수리수문학 특성	14.8%
요인 2	TN, TP, SS	유입수 영향 (입자성 오염물질)	14.5%
요인 3	제당높이, 유효수심, 준공년도	저수지 용적	13.3%
요인 4	pH, BOD, COD, TOC, Chl-a	호소 내 물질대사 (플랑크톤 과다증식)	11.8%
요인 5	제당길이, EC, Cl <sup>-</sup>	호내 염류농도	10.5%
요인 6	DO, 수온	계절적 영향 (여름, 겨울 등)	8.1%

요인 4는 pH, Chl-a에서 높은 상관성을 보였고, 이는 호소 내 물질대사 요인과 관련된 수질항목으로 호 내 1차 생산력에 의한 물질대사인 플랑크톤 과다증식에 의한 요인으로 판단된다. 요인 5에서 상관성 높은 항목은 EC와 Cl<sup>-</sup>으로, 이는 호 내 염류농도에 관한 항목으로 강수량 등에 의한 영향으로 판단된다. 요인 6은 수온과는 높은 정(+)의 상관성을, DO와는 높은 부(-)의 상관성을 나타냈으며, 이는 여름, 겨울 등 계절적 영향에 의한 요인으로 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%, 호 내 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.

#### 나. 저수지 물리적 인자에 따른 수질

##### 1) 물리적 인자와 수질항목간의 상관성 분석

저수지의 물리적 인자와 호 내의 수질과의 상관관계를 알아보기 위하여 피어슨의 상관분석을 실시한 결과는 (표 2-7)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 2-7) 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

2) 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 통계프로그램(version 11)을 이용하였다.

(표 2-8)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 17.9 $\mu s/cm$ 로 가장 높았고, 다음으로 1,000천 $m^3$ 보다 크고 1,500천 $m^3$  이하인 구간에서 16.2 $\mu s/cm$ 로 높게 나타났다. 나머지 구간에서는 11.9~14.6 $\mu s/cm$ 로 나타났다(표 2-9).

(표 2-8) 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 2-9) 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 2-9) 유효저수량에 따른 기술통계치(계속)

항목	유효저수량 (천m <sup>3</sup> )	N	Max	Min	Mean	S.D
COD	Q≤500	355	22.5	1.6	6.7	4.1
	500<Q≤1000	1,212	21.3	1.4	5.6	2.9
	1000<Q≤1500	604	22.9	1.6	5.8	3.2
	1500<Q≤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≤500	355	5.74	0.20	1.33	0.88
	500<Q≤1000	1,212	8.02	0.19	1.30	0.76
	1000<Q≤1500	604	7.48	0.24	1.39	0.79
	1500<Q≤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≤500	355	0.55	0.00	0.04	0.07
	500<Q≤1000	1,212	0.64	0.00	0.03	0.04
	1000<Q≤1500	604	0.82	0.00	0.04	0.05
	1500<Q≤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≤500	355	226.8	0.60	17.9	26.6
	500<Q≤1000	1,212	256.3	0.10	14.6	19.5
	1000<Q≤1500	604	172.8	0.40	16.2	22.4
	1500<Q≤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 2-10)은 통계적 의미가 있는 수온, 수질항목에 대해서 구간별로 유의한 차이성을 알아보기 위해서 사후검정인 Scheffe Test를 수행한 결과이다. COD와 TP는 유효저수량 500천m<sup>3</sup> 이하인 구간에 비해 모든 구간에서 유의한 수준으로 오염도가 증가하였고, Chl-a는 유효저수량 500천m<sup>3</sup> 이하인 구간에 비해 1,000천m<sup>3</sup>보다 크고 1,500천m<sup>3</sup> 이하인 구간을 제외하고 나머지 모든 구간에서는 유의한 수준으로 농도가 증가하였다.

(표 2-10) 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

3) 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 2-11)와 같다. (표 2-11)에서 나타난 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 2-12)은 pH, EC, DO, COD, TN, TP, SS, Chl-a에 대한 저수지 준공 경과년수 구간별로 각각 평균값, 최대값, 최소값, 표준편차 등의 기술통계치를 정리하였다. 수온, pH, EC, SS 등 DO를 제외한 모든 항목에서 70년 이상된 구간과 50년 이상 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 2-11) 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 2-12) 저수지 준공 경과년수에 따른 기술통계치

항목	경과년수	N	Max	Min	Mean	S.D
Temp.	$Y \geq 70$	304	33.6	1.3	17.8	7.2
	$50 \leq Y < 70$	1,063	32.0	2.2	16.8	7.0
	$30 \leq Y < 50$	880	31.3	0.7	15.9	6.5
	$10 \leq Y < 30$	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	$Y \geq 70$	304	10.9	6.6	8.0	0.7
	$50 \leq Y < 70$	1,063	11.1	6.3	7.8	0.7
	$30 \leq Y < 50$	880	10.9	6.1	7.7	0.6
	$10 \leq Y < 30$	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	$Y \geq 70$	304	535	33	171.8	81.6
	$50 \leq Y < 70$	1,061	900	7	149.5	90.6
	$30 \leq Y < 50$	879	856	32	118.5	76.9
	$10 \leq Y < 30$	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	$Y \geq 70$	304	17.4	0.6	8.7	3.1
	$50 \leq Y < 70$	1,063	18.1	0.3	9.1	2.9
	$30 \leq Y < 50$	880	16.7	1.0	8.9	2.9
	$10 \leq Y < 30$	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	$Y \geq 70$	304	449.0	16.5	13.3	27.5
	$50 \leq Y < 70$	1,063	231.0	11.1	10.3	13.0
	$30 \leq Y < 50$	880	95.3	7.9	7.3	8.3
	$10 \leq Y < 30$	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 2-12) 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 2-13) 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) \* $<0.05$ , \*\* $<0.01$ , \*\*\* $<0.001$

4) 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 통계프로그램(version 11)을 이용하였다. (표 2-14)에서 보는 바와 같이 모든 항목에서 구간별로 유의한 수준의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 저수지 준공 경과년수에 따른 수질차이에서와 같은 결과로서, 저수지가 설치된 지 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 2-15)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 3m 이하의 구간에서 가장 오염도가 높은 것으로 나타났다.

(표 2-14) 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 2-15) 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 2-15) 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 2-16)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 2-16) 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) \* $<0.05$ , \*\* $<0.01$ , \*\*\* $<0.001$

다. 조사 시기에 따른 수질

농업용 저수지의 조사 시기에 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 하위집단간 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 2-17)와 같으며, EC를 제외한 pH, DO, COD, TN, TP, SS, Chl-a 등 모든 항목에서 계절에 따른 통계적 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

(표 2-18)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 2-7>는 조사시기별 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 2-17) 조사 시기에 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

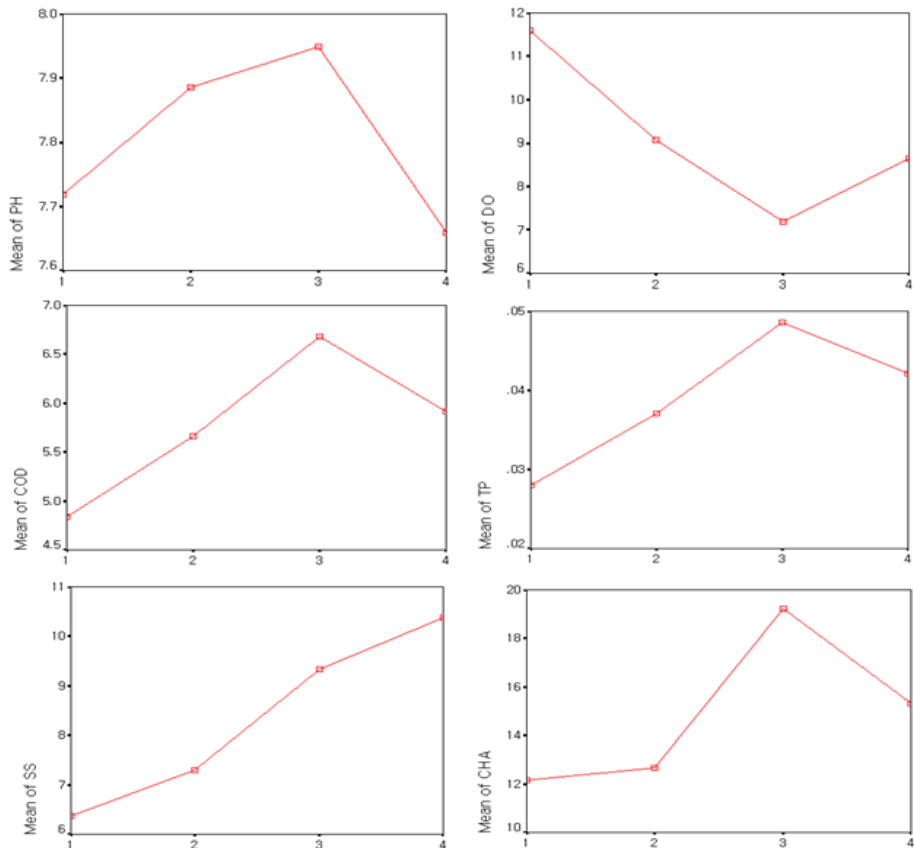
자료) 2013년 수질측정망조사 자료(n= 3,340), 조사시기는 3월, 5월, 8월, 11월

(표 2-18) 조사 시기에 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 2-18) 조사 시기에 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 2-7> 조사 시기에 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 조사시기별로 차이가 큰 것으로 나타났고, 3월(봄철)부터 점진적으로 수질오염도가 증가해 8월(여름철)에 수질오염도가 가장 높은 것으로 나타났다.

(표 2-19) 조사 시기별 사후 검정 결과

수질항목	조사시기	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			*

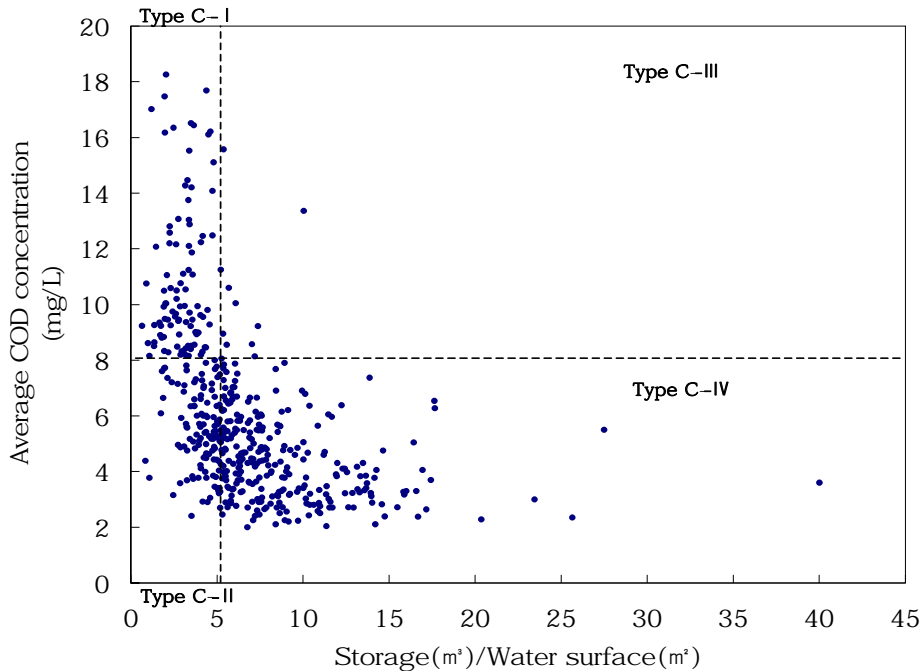
주) \* < 0.05, \*\* < 0.01, \*\*\* < 0.001

### 3. 농업용 저수지 수질오염 유형

#### 가. 수질오염유형 분류방법

한국농어촌공사 농어촌연구원(2002년)에서는 전국 농업용 저수지 및 담수호의 1990년부터 2001년까지의 수질측정 자료와 호의 물리적 인자를 이용하여 저수지 오염유형을 분류하는 방법을 연구하였다. 호소의 수질을 대표하는 COD 값과 호소의 물리적 인자인 유효저수량(ST, Effective Storage) 대 호의 만수면적(WS, Water surface)의 비, 즉, 유효평균수심을 물리적 지표로 활용하여 <그림 2-8>와 같은 저수지 오염유형 분류도를 작성하였다.

농업용 저수지 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 2-8> 농업용 저수지 수질오염 유형 분류도



## 나. 농업용 저수지 수질오염 유형

국내 농업용 저수지를 대상으로 <그림 2-8>의 수질오염유형 분류도에 의한 방법으로 수질오염 유형을 분류한 결과는 (표 2-20)과 같다. 2013년 농업용수 수질측정망 825개소와 공사관리 저수지의 3,369개소를 대상으로 하였으며, COD값은 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 COD 기준으로 수질기준을 초과한 저수지의 83%에 해당하고 있는 것으로 나타났다.

공사관리 농업용 저수지 3,369개소를 대상으로 분류한 결과는 복합원인형이 240개소로 전체의 7.1%, 내부원인형 2,214개소(65.7%), 외부원인형 22개소(0.7%), 일반관리형 895개소(26.5%)로 분류되어 내부원인에 의한 오염유형이 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 수질기준 초과 저수지만을 대상으로 하였을 때는 복합원인형이 91.6%에 해당하는 것으로 나타났고, 이러한 결과로부터 수질이 오염된 농업용 저수지의 수질오염유형은 대부분 복합원인형으로 호소 내부적 요인과 유역에서의 외부적 요인에 의한 복합적인 영향으로 판단된다. 따라서 수질오염기준을 초과한 농업용 저수지의 수질개선을 위해서는 호소 유역에서 들어오는 오염물질에 대한 저감대책과 호 내 정화대책이 함께 수립되어야 할 것이다. 그러나 본 오염유형 분류방법은 COD 항목만을 대상으로 하여 유기물 오염만 반영되어 있기 때문에 호 내 N, P 등 영양물질이 고려되지 않은 한계점도 있다.

(표 2-20) 농업용 저수지의 수질오염 유형 분류

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

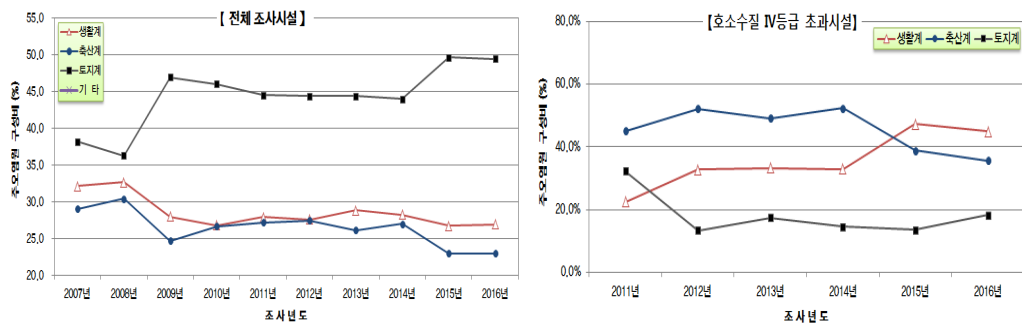
2016년도 농업용수 수질측정망 975개소를 대상으로 주요염원을 분석하였을 때, 토지이용에 의한 비점오염원이 482(49.4%), 미처리 생활하수 등 생활계에 의해 263개소(27.0%), 축산계에 의해 224개소(23.0%)순으로 나타났지만, 농업용수 수질기준(IV등급)을 초과한 저수지만을 대상으로 하였을 때는 생활계 44개소(44.9%), 축산계 35개소(35.7%), 토지계 18개소(18.4%) 순으로 나타나 비점오염원에 의한 수질오염보다는 축산계, 생활계 등 유역 내 점오염원이 농업용 저수지 수질오염의 주원인이 되고 있는 것을 알 수 있다.

(표 2-21) 농업용 저수지의 주요염원 현황

구 분	계	생활계	축산계	토지계	산업계	양식계
전체 조사시설	975 (100%)	263 (27.0%)	224 (23.0%)	482 (49.4%)	2 (0.2%)	4 (0.4%)
기준 초과시설	98 (100%)	44 (44.9%)	35 (35.7%)	18 (18.4%)	1 (1.0%)	-

자료) 2016년도 농업용수 수질측정망 조사보고서

<그림 2-9>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 2014년 이후 감소하는 추세이고, 생활계와 토지계는 증가하는 경향을 보이고 있다.



자료) 2016년도 농업용수 수질측정망 조사보고서

<그림 2-9> 연도별 주요염원 변화추이

## 제3장

### 농업용 저수지에 적용성이 높은 융복합 수처리기술 개발

제1절 기존 수처리기술의 농업용 저수지 적용성 평가

제2절 농업용수 수처리기술 개발 방향

제3절 대상수역별 융복합 수처리기술 구상/설계

제4절 융복합 수처리 개발 기술의 개요



## 제3장 농업용 저수지에 적용성이 높은 융복합 수처리 기술 개발

### 제1절 기존 수처리 기술의 농업용 저수지 적용성 평가

#### 1. 물리적 제어 기술

##### 가. 기존 물리적 제어기술의 종류 및 특징

물리적 제어 기술은 자연 및 인공 구조물(또는 매체)과 에너지를 이용하여 중력침강, 접촉침전 및 여과, 차단, 물의 강제순환, 오염물질 제거 등의 원리를 이용하여 호소의 오염부하를 저감하고 수질을 개선하는 방법이다. 국내·외에 적용되었던 대표적인 물리적 제어 기술로는 침강지, 식생여과, 수중폭기장치, 가압부상장치, 인공물순환장치, 선택취수설비, 차광막, 조류차단막, 조류 제거선, 초음파, 퇴적오염물질 캐핑 등이 있다. 이들 중 일부 기술은 화학적 응집과 생물학적 처리 기작을 포함하므로 융복합 기술로도 구분 할 수 있다. 수중폭기장치는 성층과피를 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 조류체의 성장과 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. 인공희석은 상류 댐 또는 유량 조절 시설로부터 희석수를 공급함으로써 일시적으로 수층의 성층 파괴, 혼합과 희석에 의해 조류 농도를 저감하는 방법이다. 조류 제거선은 최근에 이용되는 기술로서, 호소 내 조류의 흡입, 집수, 여과, 회수 장치로 구성되는 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 효과가 있을 수 있으나, 수심이 10m 미만의 얕은 호소에 적용할 경우 저층을 교란시켜 오히려 조류발생이 증가할 수 있다. 초음파는 사전·사후처리 기술로서 전기분해로 조류 세포조직을 단락/파괴하고 여과지 폐색 현상을 방지하는 높은 처리효과를 기대할 수 있으나 처리 규모의 한계로 현장 적용에 어려움이 있다. 조류 제거선은 국부적으로 밀집된 조류의 수거에 용이한 기술이지만 광범위한 수면에서의 수질개선 효율이 떨어지며, 조류제거를 일시적으로 제거하기 위한 단기 대책에 속하며 제거 효과의 지속성이 떨어지는 단점이 있다.

침강지는 인공습지와 함께 농업용수 수질개선사업으로 널리 활용하는 시설이다. 보통 농업용 저수지 유입부에 설치하고 있으며, 유역에서 유입되는 오염물질, 특히 거대 입자성 고형물질을 초기에 침강시켜 오염물질 유입을 저감시킬 수 시설이다. 유지관리를 위해서 정기적으로 준설을 해주면 더 효과적인 시설이 될 수 있으리라 판단된다. (표 3-1)은 호소 수질개선을 위한 물리적 제어기술의 특징과 장단점 그리고 적용사례를 정리한 내용이다.



<그림 3-1> 물리적 제어기술 적용 사례

(표 3-1) 호소 수질개선을 위한 물리적 제어 기술 특징

기술명	분류	특징	장점	단점	사례
수중 폭기 장치	사전 예방	성층파괴를 통한 심층의 빈산소 또는 무산소 상태 제거를 위해 간헐식 또는 산기식으로 수중 폭기	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
차광막 설치	사전 예방	차광막을 설치하여 녹조의 광합성 저해	녹조성장 억제 설치 및 관리비용 저렴	녹조제어 효과 미미, 빛 차단에 의한 다른 생물 피해	국내 대부분의 상수원 취수탑 부근에 설치
조류 차단막	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), 낙동강유역 환경관리청

(표 3-1) 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 조류제거 효과 적음	낙동강 하구 (양상용 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	막힘 현상 발생가능	
가압 부상 시설	사후 처리	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
제트스 트리머	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 하폐수 처리 적용사례 있음



## 나. 기존 물리적 제어기술의 적용성 평가

농업용 호소 수질개선을 위한 수처리 기술은 먼저, 관리 목표수질인 환경정책기본법의 호소 수질기준 4등급을 만족할 수 있는 수처리 공정과 함께 다음과 같은 여러 관점에서 처리기술에 대한 적용성을 분석 및 판단해야 할 것이다. 농업용 호소 수처리 공정과 기술을 결정할 때 고려하여야 할 평가사항은 첫째, 처리효율이 목표수질을 만족해야 하며, 수질개선효과가 지속적일 것, 둘째, 처리시설이 간단하고 설비가 적어 비용 측면에서 경제적인 것, 셋째, 유지관리 측면에서 운전관리가 쉽고 무인관리가 가능하며, 설비 유지보수 등이 쉬울 것, 넷째, 슬러지의 발생량 등 2차적인 오염이 적으며, 수생태계에 미치는 영향이 없을 것, 다섯째, 유입수의 수질과 수량(또는 저수량) 변동에 대응성이 있을 것 등이다. 어느 기술이든지 (표 3-1)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 우선순위에 두는지에 따라 결정될 수 있을 것이다. 기존 물리적 제어기술에 대해 수질개선효과의 단기효과, 장기효과, 비용, 생태영향, 유지관리 등 5개 항목을 비교, 검토하여 나타내면 (표 3-2)와 같다.

(표 3-2) 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
강제 물순환	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

### 가. 기존 화학적 제어기술의 종류 및 특징

화학적 제어 기술은 응집제와 살조제 등의 화학약품을 이용하여 인위적으로 오염물질을 응집, 침전, 부상 등의 원리를 이용하여 제거하는 방법이다. 국내외에 적용되었던 대표적인 화학적 제어 기술로는 Al, Fe, Phoslock 등 응집제에 의한 수체 내 인의 불활성화와 황산동 또는 식물추출 천연물추출제 등 살조제 투여가 있다. 응집제를 사용하는 화학적 처리기술은 가압부상공법과 결합하여 한정적으로 사용된 사례는 있으나 국내에서는 아직 수체 내 존재하는 인의 불활성화를 위해 사용된 사례는 없었다. 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 저감하기 위하여 흔히 사용되고 있으며, 최근 도시 호수공원에서는 호수 유입수를 처리하는 처리장을 만들고 alum을 사용하여 정수한 후에 호수에 유입시키고 있다. 그러나 이러한 처리 시설을 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, 수생생물에 미치는 영향 등에 관한 연구가 선행되어야 경제성 있는 처리 기술이 개발될 것이다. 화학적 처리공법은 인 불활성화, 조류 성장 제어 등 단기적인 효과가 뛰어난 반면에 수질개선 효과의 지속성, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점이 있어 단일기술로는 현장적용에 한계가 있다고 판단된다. (표 3-3)는 호소 수질개선을 목적으로 기존에 개발되었던 화학적 제어기술의 특징과 장단점 그리고 적용사례를 정리하였다.



<그림 3-2> 화학적 제어기술 적용 사례

(표 3-3) 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 휴착 영양염 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, 갯잎, 은행잎, 짚, 쭉, 갈대, 습채식물, 견채식물 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 갯잎, 솔잎 등을 이용한 조류 제어연구 (임병진 et al., 2002)

자료) 낙동강 조류발생 특성분석 및 관리정책 방안(2010), 낙동강유역 환경관리청

나. 기존 화학적 제어기술의 적용성 평가

기존 화학적 제어기술 중 국내외에서 가장 적용 사례가 많았던 인 불활성화와 살조제 투여 기술에 대해 수질개선효과의 단기효과, 장기효과, 비용, 생태영향, 유지관리 등 5개 항목을 비교, 검토하여 나타내면 (표 3-4)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 정수처리장 및 하·폐수 처리장에서 이용하는 방식인 수계 밖에서 인 제거기술로 이용하면 적용성이 높은 기술이라고 판단된다.

(표 3-4) 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

#### 가. 기존 생물학적 제어기술의 종류 및 특징

생물학적 제어 기술은 식물이나 미생물, 먹이사슬을 이용하여 오염물질을 흡수, 분해, 섭취하는 방법이다. 국내외에 적용되었던 대표적인 생물학적 제어 기술로는 인공습지, 인공식물섬(인공부도), 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 수질 정화기능을 이용한 공법은 국내 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 호 내 수질개선 공법으로 직접 적용한 사례가 없으므로 만약 호소 내 정화를 목적으로 설치한다면 최적설계를 위한 사전 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다. (표 3-5)는 기존 생물학적 제어기술에 대한 특징과 장단점을 분석한 내용이다. 세균 미생물은 살조 세균 미생물을 분리·배양하여 녹조에 직접 영향을 주어 녹조 체를 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 현장에 적용된 사례는 있으나 국내에서는 살조 미생물을 분리하고 배양하는 초기 연구단계에 있다.

(표 3-5) 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) Streptomyces 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), 낙동강유역 환경관리청



<그림 3-3> 지표흐름 인공습지 설치 사례(전남 감둔저수지)

## 나. 기존 생물학적 제어기술의 적용성 평가

기존 생물학적 제어기술 중 국내외에서 적용사례가 있었던 수생식물, 세균 미생물, 생물조절 기술 등에 대해서 각각 수질개선효과의 단기효과, 장기효과, 비용, 생태영향, 유지관리 등 5개 항목에 대해 비교, 검토하여 정리한 결과는 (표 3-6)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. 먹이사슬을 이용한 생물조절기술은 국외에서는 1970년대부터 많은 연구가 이루어져 왔던 기술로서 적용사례도 많이 찾아볼 수 있다. 그러나 국내에서는 연구개발이 완료된 시점에 있으며, 기술의 실용화 및 현장 적용성을 높이기 위한 연구 중에 있다.

(표 3-6) 생물학적 제어 기술의 적용성 평가

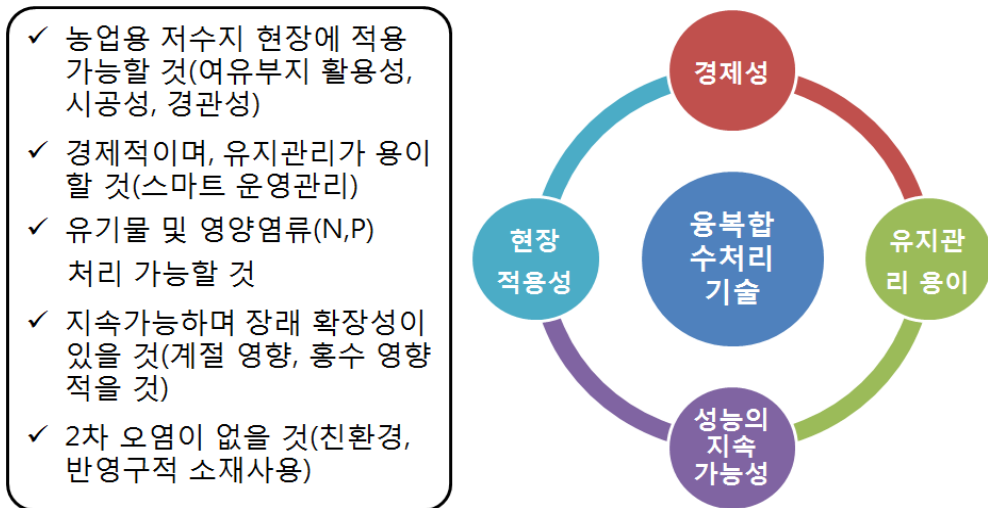
기술명	단기효과	장기효과	비용	생태영향	유지관리
수생식물	L	G	F	G	F
세균미생물	U	U	F	G	U
생물조절	L	G	G	G	F

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

## 제2절 농업용수 수처리 기술 개발 방향

### 1. 수처리 기술 개발의 고려사항

국내 농업용 저수지는 농촌지역 및 도시인근 등 전국적으로 분포하고 있으며, 대부분이 소규모인 인공호소로서 연간 저수량의 변화가 심한 호소이다. 농업용 호소의 수질개선을 위한 기술 개발에는 농업용수 특성상 다음과 같은 전제조건을 만족하여야 할 것이며, 기술의 개발방향 및 고려사항을 <그림 3-4>과 같이 설정하였다. 농업용 저수지 수질개선을 목적으로 하는 융복합 수처리 기술의 전제 조건은 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 물질순환, 수처리 기작과 효율을 고려하여 요소기술을 설계해야 한다. 농업용수 수처리시설은 친환경적, 반영구적 소재를 사용함으로써 수생태계에 나쁜 영향을 주지 않고, 농업용수로 급수 시에는 벼 등 재배 작물에 영향을 주지 않는 즉, 2차 오염이 없는 기술 개발을 전제 조건으로 하였다.



<그림 3-4> 농업용수 융복합 수처리기술 개발의 고려사항



## 2. 농업용수 수처리 기술개발 방향

농업용 저수지 수질개선을 위한 수처리기술 개발에 앞서 농업용 저수지에 수질오염에 영향을 미치는 요인을 진단하여 농업용 저수지의 수질관리 및 수질개선에 대한 방향을 (표 3-7)과 같이 제시하였다. 수질오염 영향 요인으로 호소 물리적 요인에 의한 기여율 38.5%를 제외하고는 호소 외부에서 유입되는 요인에 의해 28.0%, 호소 내부생산에 의한 요인 27.3%로 구성되어 있다. 따라서 저수지의 수질오염을 차단하기 위해서는 유역에서 호소로 유입되는 오염물질 제어와 호소 내부에서 자체적으로 생산되는 내부 오염 부하량을 최소화해야 저수지의 수질개선을 기대할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 농업용수 융복합 수처리 기술을 유입수 저감대책과 호내 내부 생산성을 최소화 하는 방향으로 기술개발 방향을 설정하였다.

양질의 농업용수를 지속적으로 확보하고 공급하기 위해서는 저수지 외부에서 유입되는 입자성 오염물질을 저감할 수 있는 유입수 대책이 강구되어야 할 것이며, 호소 내에서는 호소 내부생산량을 최대한 방지할 수 있도록 호소에 부족한 DO를 공급하고 퇴적물에서의 오염물질 용출을 최대한 방지하며, 오염된 퇴적물에 대해서는 준설, 캡핑 등을 통한 퇴적물에 대한 적극적인 관리가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

(표 3-7) 농업용저수지의 수질관리 및 수질개선 방향

구분	수질기여율	수질영향 요인	수질관리 및 개선 방향
호소 물리적 요인	38.5%	유역환경 특성 (오염물질 유입량 등)	저수지 신규 설치시 수질을 고려한 설계 - 유역배율(유역면적/만수면적) 3이하 - 유역 오염원 관리 단속
		호소 수리수문학적 특성 (체류시간 등)	저수지 수체 용량 확보방안 강구 - 퇴적 오염물 준설 등
호소내 오염물질 유입	28.0%	TN, TP, SS	입자성 오염물질 유입 저감방안 - 유역 내 오염원(비점, 축분 등) 저감 대책 - 수질오염도 높은 유입수 처리대책 - 초기 강우 처리대책 등
호소 내부적 요인	27.3%	pH,, Chl-a, BOD, COD, TOC, DO, EC, Cl <sup>-</sup>	호소 내 물질생산 저감방안 강구 - 호소 내 수환경 개선 대책(DO 공급 등) - 퇴적 오염물질 용출 저감, 퇴적물 처리 등

### 제3절 대상수역별 융복합 수처리기술 구상 및 설계

#### 1. 농업용 저수지 유입수 오염물질 저감기술

농업용 저수지로 유입되는 오염물질의 저감 대책을 마련하기 위해서 저수지로 유입되는 오염물질의 특성을 살펴보았다. 오염된 농업용 저수지는 대부분이 도시 인근에 위치하고 있어 유역이 도시와 농촌의 복합적인 형태로 이루어져 오염원이 복잡하거나 또는 농경지와 소규모의 분산된 마을로 이루어진 전형적인 농촌으로 되어 있다. 따라서 저수지의 주 오염원은 유역에서 유입되는 축산분뇨, 미처리 생활하수, 비점오염원 등으로 구성되어 있다.

2007년부터 시행하고 있는 농업용수 수질개선사업에서는 유입되는 오염물질의 제거를 위해 인공습지를 많이 이용하고 있으며, 환경부 등 오염된 하천의 수질정화를 위해서 끈상 등 접촉산화공법을 국내에서는 널리 활용하고 있다. 본 연구에서는 기존 시설의 장점은 최대한 살릴 수 있고 단점은 최대한 보완할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다. 농업용수 유입 오염물질 저감시설인 인공습지와 접촉산화공법에 대해서 장점과 단점으로 구분하여 구체적으로 살펴보았으며 그 내용은 (표 3-8)와 같다. 농업용수 유입수의 오염물질 정화를 위해 설치되고 있는 인공습지의 최대 장점은 식생을 이용한 친자연적 처리법으로 영양염류의 처리효율이 높고, 유지관리가 용이하다는 장점이 있는 반면에 계절적 영향에 민감하고, 소요되는 부지면적이 많이 들고, 특히 여름철이면 모기, 해충 등으로 인해 민원이 발생하고 있다. 1980년대 들어 오염된 하천의 정화사업을 위해 널리 활용되었던 끈상 및 자갈 접촉산화공법은 유기물 처리효율이 70% 이상으로 매우 높고, 소요되는 부지면적이 매우 적다는 장점이 있는 반면에 N, P 처리효율이 낮고 유지관리비가 높은 단점이 있다.

(표 3-8) 기존 유입 오염물질 저감시설 검토내용

기존공법	장점	단점
접촉산화공법 (자갈/끈상 등)	<ul style="list-style-type: none"> <li>유기물 처리효율이 높음</li> <li>소요 부지면적이 작음</li> <li>소재가 친자연적임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>영양염류 처리효율이 낮음</li> <li>설치공사비 높음</li> <li>유지관리비 높음</li> </ul>
인공습지	<ul style="list-style-type: none"> <li>영양염류 처리효율이 높음</li> <li>식물이용으로 친자연적임</li> <li>유지관리가 용이함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>유기물 처리효율이 낮음</li> <li>소요 부지면적이 많이 소요</li> <li>모기/해충 서식이 많음</li> </ul>

따라서 본 연구에서는 인공습지와 접촉산화공법의 문제점을 해결하여 토지 부지면적이 적게 들고, 유기물 및 영양염류 처리효율이 높고, 설치비 및 유지관리가 용이하며 녹조 예방 효과가 큰 기술을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 저수지 유입수, 상시 정체수역으로 녹조대량 발생지역인 만곡부, 호소 중심부 등 수역별로 물리적 특성과 수질오염특성이 다른 점을 감안하여 대상수역별로 적합한 요소기술과 처리공정을 도출하고자 하였다(표 3-9).

(표 3-9) 농업용 저수지 융복합 수처리시스템 요소기술 구성

구분	유입수	호소 내		비 고
		만곡부	호 중심부	
오염특성	고농도 SS, N, P 유입	고농도 N, P 녹조대량발생	고농도 N, P 부영양화 저서층 DO 고갈	
처리대상	입자성 물질, (유기물, N, P)저감	수환경 개선 P 저감	수환경 개선 오염물질 제거	
물리적 기술	침강, 여과	산소 포기	산소 포기	SS 제거 DO 공급
화학적 기술	응집	응집	응집	N, P 제거
생물학적 기술	부착생물막, 식물정화	부착생물막, 식물정화	-	유기물제거 P 제거
융복합 기술구성	응집+부착미생물 +식생	포기+부착미생물 +식생	포기+응집+ SS센서+살포기	
수처리시스템	접촉산화수로 (고정형)	접촉산화부도 (고정형)	수질정화선 (이동형)	



<그림 3-5> 농업용수 수질개선을 위한 종합 MAP

## 2. 농업용 저수지 호내 수질정화기술

농업용 저수지의 수질 악화는 평상시에 들어오는 오염물질보다 강우시에 초기 강우와 함께 일시에 대량으로 들어오는 오염물질에 의한 영향이 크다. 강우시에는 농경지의 비점오염원뿐만 아니라 축산분뇨 등 입자성 오염물질이 한꺼번에 대량으로 유입되고 있으며, 이렇게 유입된 입자성 오염물질은 저수지 바닥에 침전되어 있다가 저니 층이 무산소 상태가 되면 오염물질이 수중으로 재 용출되어 수질오염을 악화시키는 주요한 원인이 되고 있다.

농업용수 수질개선사업에서 호소 수질정화시설로 주로 이용되는 기술로는 물순환장치, 인공식물섬이 그동안 주를 이루었으며, 물순환장치, 인공식물섬에 대해서 장점과 단점으로 구분하여 구체적으로 살펴보았으며, 그 내용은 (표 3-10)와 같다. 물순환장치는 유지관리방법은 용이하고 수심이 깊은 호소에서는 성층 파괴로 저층에 산소를 전달해주는 장점이 있는 반면에 물순환장치에 의한 영향 반경이 너무 좁아 규모가 큰 저수지에서는 설치비용 상승으로 적용이 어렵고, 저수지의 직접적인 수질개선효과가 매우 낮으며, 동력소모로 고정적인 유지관리비용이 소요되는 단점이 있다. 인공식물섬(인공부도)은 식물을 이용한 친환경적인 경관 창출 및 부도 부력체에 의한 어류산란 장소, 유지관리가 용이한 장점 등이 있으나 저수지 수질개선효과가 매우 미흡하며, 녹조 대량발생 등 수질오염 발생시 긴급 대처하기 어려운 단점 등을 가지고 있다. 따라서 호소의 수질관리를 위해서는 수환경의 개선으로 수질오염을 사전에 방지할 수 있고, 수질오염 사고시 긴급 대처할 수 있는 수처리 기술을 개발하고자 하였다.

(표 3-10) 기존 호소내 수질정화시설 검토내용

기존공법	장점	단점
물순환장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>유지관리가 용이</li> <li>수심이 깊은 호소에서 성층 파괴로 저층에 산소 공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>영향반경이 너무 좁아 규모가 큰 저수지에 적용 어려움</li> <li>저수지 수질개선효과 낮음</li> <li>동력소요 등으로 고정적인 유지관리 비용 소요</li> </ul>
인공식물섬 (인공부도)	<ul style="list-style-type: none"> <li>식물을 이용한 친환경적 경관 창출</li> <li>어류 산란장소 제공</li> <li>유지관리가 용이함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>저수지 수질개선효과 낮음</li> <li>수질오염 발생시 긴급 대처 어려움</li> </ul>

## 제4절 융복합 수처리 개발기술의 개요

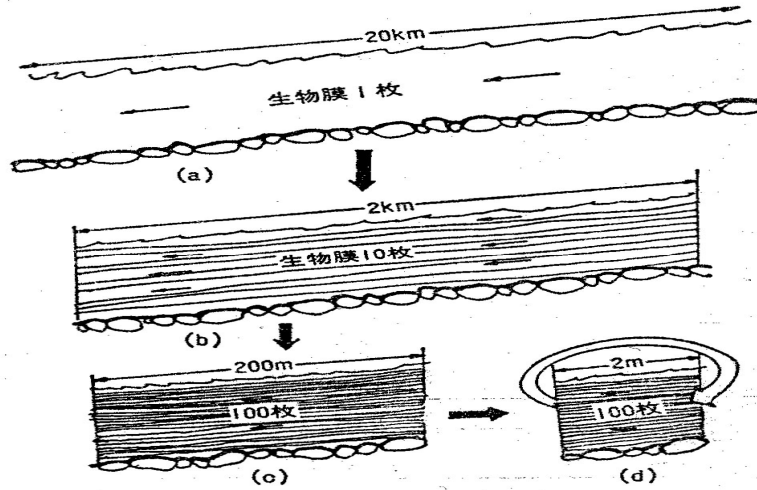
### 1. 생태융합형 접촉산화시스템

#### 가. 생태융합형 접촉산화공법 개요

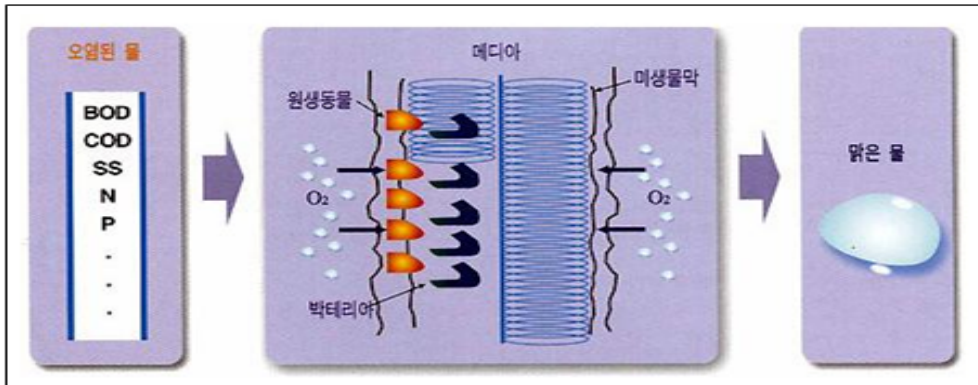
생태융합형 접촉산화공법은 다년생 식물과 고효율 미생물 접촉재를 하나의 반응조내에서 동시에 사용하는 생물학적 수처리방법으로서, 기존의 식물을 이용한 인공습지 등의 자연형 처리공법과 접촉산화공법의 장점을 결합한 융복합 기술이다. 기존의 인공습지는 식물 및 토양의 흡착분해 기능만을 이용함에 따라 처리효율에 한계가 있고, 특히 동절기에는 식물고사로 효율이 오히려 저하되는 문제가 있다. 또한 홍수 시 토사 퇴적에 의한 유지관리문제가 대두되거나 모기 등 해충의 서식화가 문제가 되기도 한다. 또한, 비자연형 수처리공법으로는 스크린, 와류형시설, 여과형시설 등의 물리적 처리방법과 약품을 이용한 화학적 처리방법 및 미생물 접촉재를 이용한 생물학적 처리방법 등이 있으나, 물리적 처리방법은 처리효율이 상대적으로 낮고 동력비가 많이 소요되며, 특히 여과형시설은 여재 폐색에 의한 유지관리 효율저하의 문제가 크다. 화학적 처리방법은 약품 사용에 따른 유지관리비 증가, 처리수 내 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 적용하는 데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 수생식물과 미생물 접촉재를 동시에 활용하여 기존 각각의 공법의 장점만이 결합된 처리효율이 높고 유지관리가 쉬운 융복합 기술을 개발하고자 하였다.

#### 나. 공법의 기본원리

생태융합형 접촉산화시스템은 식생(달뿌리풀 등 식물)과 미생물접촉재(매디아)를 이용한 생물학적인 수처리 방법으로서, 매디아 부착미생물에 의한 BOD, SS 제거 및 식물뿌리에 의한 TN, TP 등 영양염류를 제거하는 공법이다. 정화원리는 자연에서 하상 돌 표면에 부착되어 있는 미생물에 의해 오염물질이 분해되는 것을 이용한 원리로, 인공적으로 미생물 막과 미생물 최적의 생존환경 조건을 만들어주어 오염물질 분해를 유도하는 시설이다.



<그림 3-6> 하천 자정작용 원리 및 미생물 접착재의 발상  
 자료) 김학용(2000), 끈상접착여재를 이용한 하천정화방안, 아주대 환경공학과 박사학위 논문



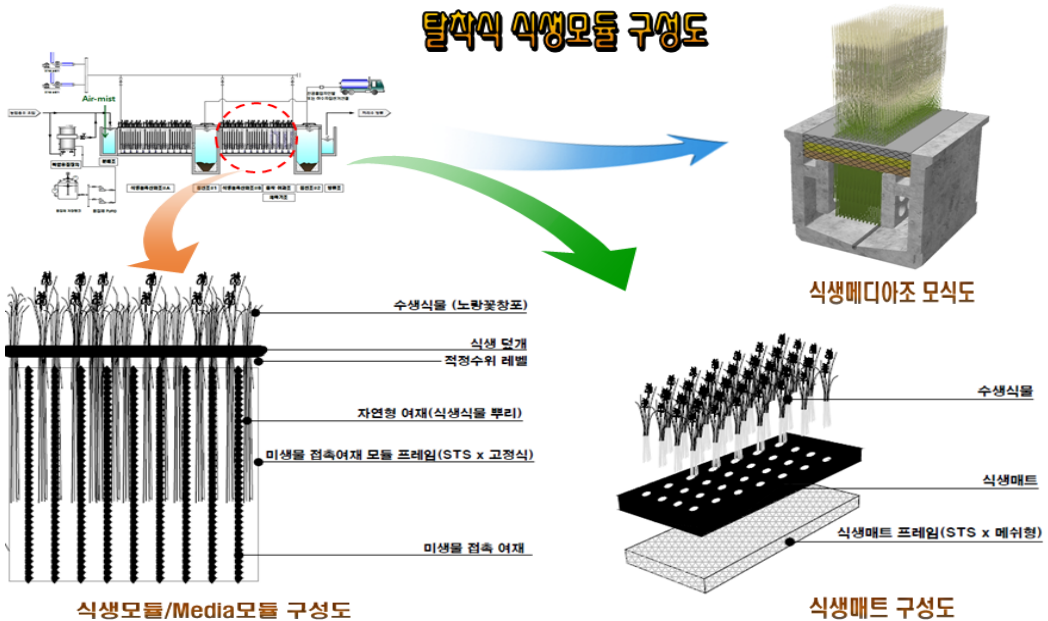
<그림 3-7> 미생물 매디아를 이용한 오염물질 제거 모식도  
 자료) 김관수 등(2006), 한국환경과학회 가을학술발표회지 제15권(제2호)

다. 생태융합형 접착산화공법의 특징(기존 기술과의 차별성)

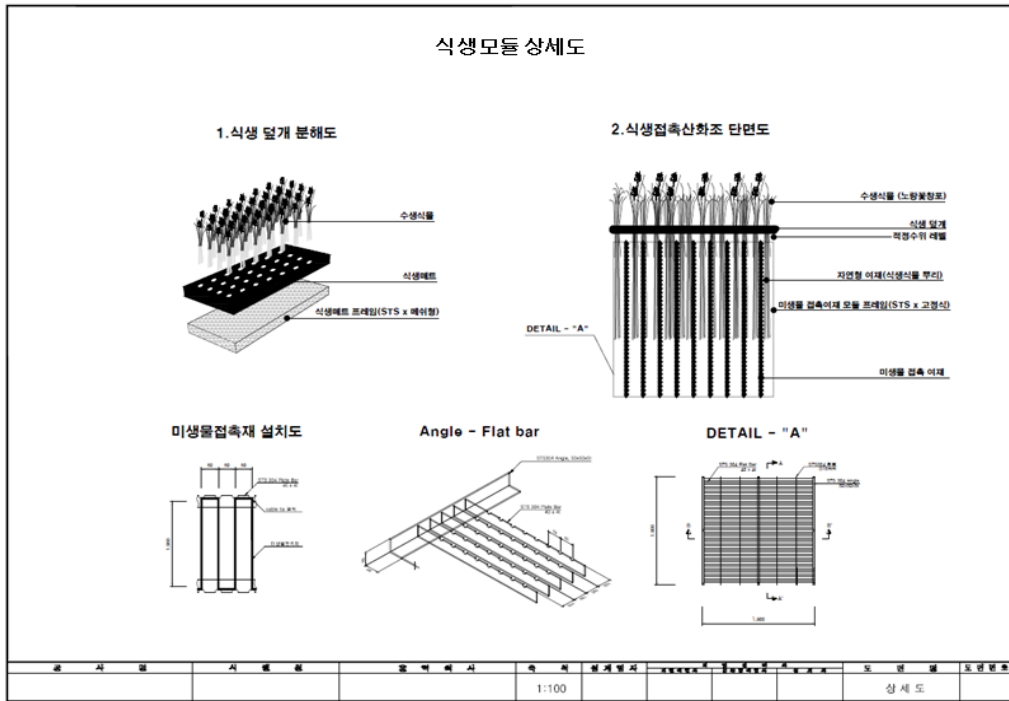
생태융합형 접착산화공법은 식생(달뿌리풀 등 수생식물)과 미생물 접착재(여재)를 이용한 생물학적인 수처리 방법으로서, 매디아 부착미생물에 의한 BOD, SS 제거 및 식물뿌리에 의한 TN, TP 등 영양염류 제거가 가능한 미생물접착 산화방식의 생태융합형 자연정화방법이다. 기존의 미생물 생물막을

이용한 접촉산화방식과 비교해보면, 기존 시설에서는 미생물에게 필요한 공기를 공급할 때 단순히 수직으로 거치된 접촉재 하부에서 산기관을 이용해 직접 폭기를 하는 경우, 전단력에 의한 미생물막이 탈리될 수 있다. 본 개발 장치에서는 Draft Tube(내통)를 이용한 간접 폭기 방식을 이용하였다. 기존 장치에는 전단에 상향류 흐름의 유동상 접촉재와 경사관을 두어 유입 SS Floc 해체 및 침전효율 향상을 유도하지만 본 연구의 개발 장치에서는 30 마이크로 크기의 마이크로버블 형태의 Air-mist 또는 순산소 용해기를 도입하여 동력비 및 산기관 설치비용을 절감하였다. 또한, Air-mist는 부력이 작아 분당 3 mm정도의 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 상부에는 수생식물을 식재함으로써 농업용 저수지의 자연성과 경관성을 향상시키고, 탈착식 식재매트 구성으로 홍수시 토사 퇴적 등에 의한 유지관리 문제점을 해소시켰다. 경제적인 측면에서도 이러한 마이크로 버블이나 순산소 포기를 통해 산소 용해에 필요한 필요수심이 현저히 저감되어 수처리시설 토목구조물의 크기도 대폭 축소할 수 있을 것으로 예상된다.



<그림 3-8> 생태융합형 탈착식 식생모듈 구성도



<그림 3-9> 생태융합형 생태모듈 상세도

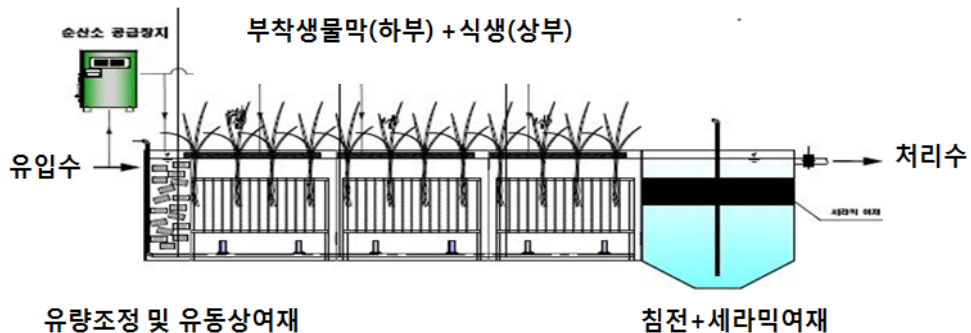
라. 생태융합형 집축산화공법의 활용

1) 생태융합형 집축산화수로

생태융합형 집축산화수로는 농업용 저수지 유입수의 오염물질 저감을 목적으로 설치할 수 있는 시설이다. 생태융합형 집축산화수로의 수처리 공정은 유입수 → 에어미스트(산소공급 장치) → 유량조정 및 전처리 → 융복합 산화조(3조) → 여과침전조 → 방류로 매우 단순하게 구성되어 있다. 고속복합 응집장치는 유입되는 오염물질의 TN, TP가 고농도이거나 초기 강우시의 수처리를 위해 유입수 정상과 현장 여건에 따라 선택적으로 조합하여 운영할 수 있도록 구성하였다. 에어미스트는 입자크기가 30 $\mu$ m 이하 크기의 마이크로 버블 발생장치 또는 순산소 발생 장치(용해장치 포함)를 수처리조 앞단에 설치하였고, 에어미스트는 수처리조에 산소를 넣어 주어 DO 농도를 최소 4.0mg/L 이상의 호기성 상태로 유지시켜 주는 역할을 한다. 유량조정조는 유입되는 유량을 조정하고 SS 제거효율을 높이기 위한 목적이며, 전처리는 유량조정조에 유동상 매디아(CBC 매디아, D 100mm×H 100mm)를 충전하였다. 유동상



여재의 기능은 처리수 유입시 함유되는 조대 SS의 크기를 최소화시켜 유기물 분해를 촉진시키는 기능과 미생물 보유량을 증가시켜 후단 접촉산화조의 처리효율을 향상시키기 위한 목적이다. 식생 뿌리와 끈상 매디아로 이루어진 접촉산화조는 3조로 구성하였으며, 끈상 매디아에 부착된 미생물에 의해서 유기물질을 산화·분해하고, 상부 식생 뿌리에 의해 영양염류를 흡수하여 제거하는 역할을 한다. 마지막 공정에 설치된 침전여과조는 상단과 하단을 분리하여 상단에는 세라믹 여재를 충전하였고, 하단은 침전조로 활용하였다. 상단에 여과재로 사용된 세라믹 여재는 접촉산화조로부터 탈리되어 유출된 미생물을 제거하고, 침전조는 이송된 슬러지를 침강시켜 농축하는 역할 및 최종 방류수의 유량조정 기능을 담당한다. 전체적인 공정 및 모식도는 <그림 3-10>과 같다.

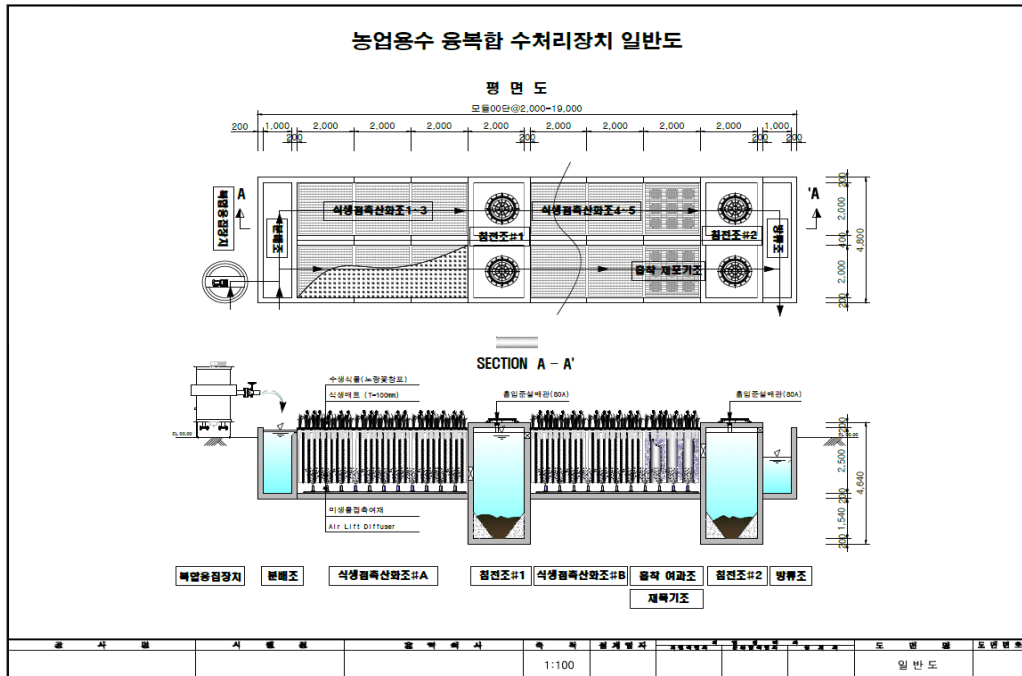


<그림 3-10> 생태융합형 접촉산화수로 모식도

농업용수 수질개선을 위한 유입수 대상 생태융합형 접촉산화수로의 특징 및 장점은 다음과 같다. 첫째, 전처리시설, 생태융합형 매디아조, 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 수질정화효과를 극대화할 수 있다. 다섯째, 미생물 매디아가 교체가 필요 없는 반영구적인 재료이므로 유지관리비용이 적게 든다. 여섯째, 수처리 시설에 ICT를 융합한 스마트 운영관리기술 개발

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

로 무인 원격관리가 가능하여 유지관리가 용이하다. 기존 수질개선사업에 널리 이용되던 인공습지, 침강지에 비하여 토지이용도가 집약적이며, 유기물에 대한 처리효율이 높다.

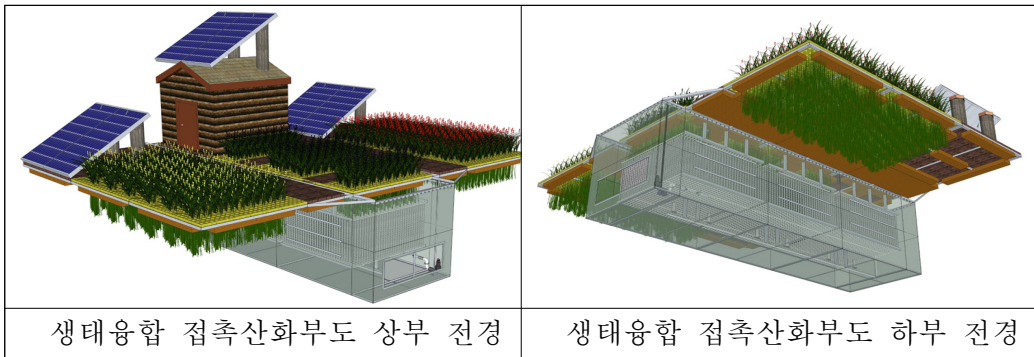


<그림 3-11> 생태융합형 접촉산화수로 설계(예시)

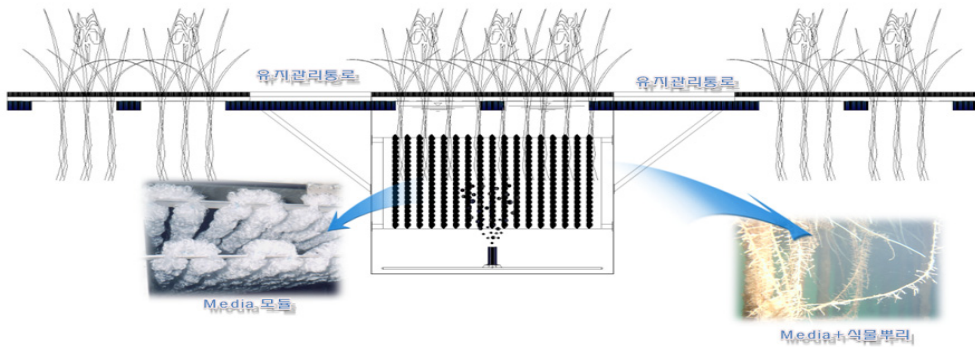
2) 생태융합형 접촉산화부도

생태융합 접촉산화부도는 호소 내 녹조 대발생 구역인 정체수역 수면위에 부유하면서 호소의 수환경을 개선시키고, 이로 인해 녹조 대발생과 호소의 부영양화를 사전에 방지하는 목적으로 개발되었다. 생태융합 접촉산화부도는 <그림 3-12>~<그림 3-13>과 같이 식물정화 및 생태적 기능을 가진 수면 위 인공식물섬과 부채 하부 수중에 미생물 접촉산화방식에 의한 생물학적 수질정화시설을 접목한 수질정화시스템이다. 본 시스템의 정화원리는 수생식물의 뿌리에 의해 인(P)을 제거하고 부채 하부에 부착된 미생물 접촉재에 의해 BOD, COD 등 유기물을 제거하는 원리로 생태융합 접촉산화수로를 응용한 기술이다. 또한 수로 유입부에 마이크로버블을 설치하여 처리조 내에 산소를 공급하여 항상 호기성 상태를 유지시킬 수 있게 하였고, 처리수와 함께 용존 산소가 수체에 확산되어 호소 수환경이 개선될 수 있도록 설계하였다. 생물

학적 정화가 이루어지는 부력체의 양측에 설치되는 식재 패널 하부에서는 수생식물의 뿌리에 의한 인(P)의 처리뿐만 아니라 동식물상 플랑크톤이 증식하기 좋은 환경을 제공하고, 물고기의 은신처나 산란처를 제공하는 기능도 갖는다. 식재 패널의 수생식물의 생장은 하천이나 호수 등의 수면을 은폐하기 때문에 햇빛을 차단하여 물 속에서의 녹조 발생을 억제할 수 있는 기능도 제공한다. 본 시스템의 최대 장점은 하부 수질정화장치의 프레임이 하천이나 호수 등의 수위 변동에 따라 높이가 가변적으로 조절되도록 함으로써 수량 감소에 의해 수생식물이 물 위로 드러나 고사하는 것을 방지하였고, 부체 하부의 수질정화장치가 하부의 바닥에 접촉하여 파손되는 것을 방지하였다. 또한 수류에 의한 저항을 최대한 줄여 빠른 수류에 의한 망실이나 파손을 방지할 수 있도록 하였다.



<그림 3-12> 생태융합형 접촉산화부도



<그림 3-13> 생태융합 접촉산화부도 측면도

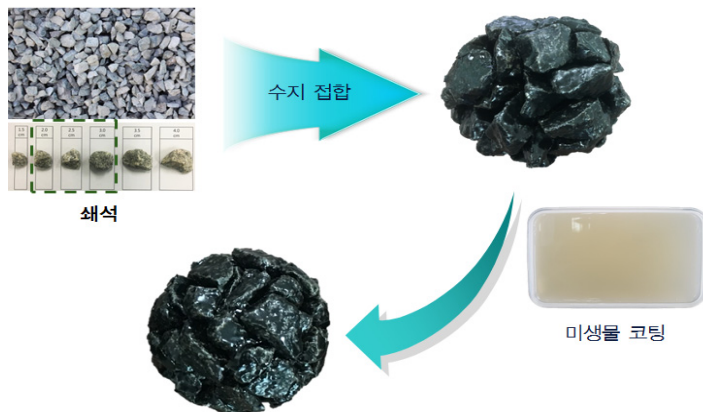
## 2. 바이오스톤 접촉산화시스템

### 가. 기술개발 배경

바이오스톤 접촉산화공법은 생태융합형 접촉산화시스템에 적용되어 있는 식생을 대신하여 N, P의 제거효율을 향상시키기 위해서 본 연구의 3차년도에 개발한 기술이다. 1차년도에 개발된 기술에 대해 2차년도에 현장적용실험을 실시하였고, 실험결과와 유지관리 측면에 대한 대내외 전문가들의 기술자문과 의견을 수렴한 결과, 관리가 어려운 식생을 대체할 수 있는 고도의 담체(여재)에 대한 기술 개발이 요구되었다. 따라서 연구팀에서는 생태융합형 접촉산화시스템의 식생을 없애고, 대신 식생의 주요 기작이었던 N, P의 처리효율을 개선하고 끈상 매디아의 장점이었던 유기물 제거 기능을 대체할 수 있는 바이오스톤 볼(Bio-Stone Ball ; BSB)과 바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화공법을 개발하였다.

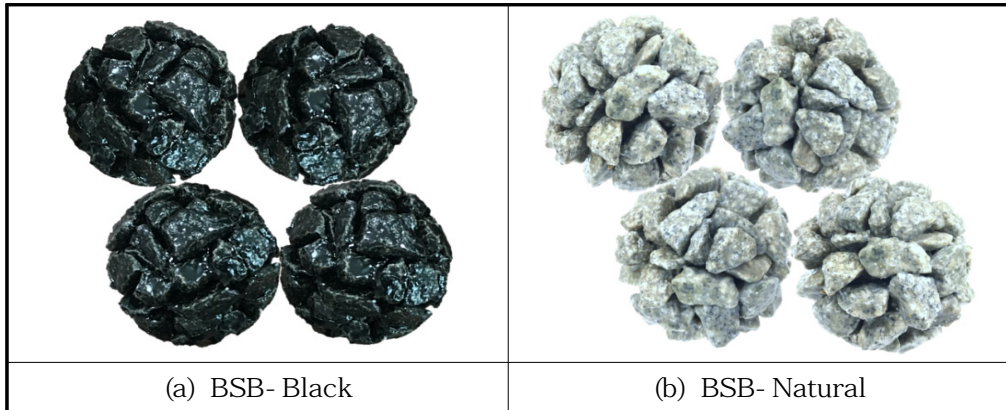
### 나. 기술 개요

바이오스톤 접촉산화공법은 바이오스톤 볼이라는 여재(담체)를 이용한 생물막 여과법의 일종인 접촉산화공법으로, 자연계에 존재하는 쇄석과 미생물을 이용한 매우 친환경적인 기술이다. 바이오스톤 볼(Bio-Stone Ball, BSB)은 2~3 cm 크기의 자연 쇄석(또는 자갈)을 에폭시 계열 수지로 접합하여 직경이 10cm 크기로 성형한 후, 성형된 구상체(볼)을 천연셀룰로오스, 백토, 물, 수처리 유용 복합미생물로 구성된 겔 형태의 미생물 코팅재로 함침 및 건조시켜 제작하였다. 바이오스톤 볼 제작과정은 <그림 3-14>와 같다.

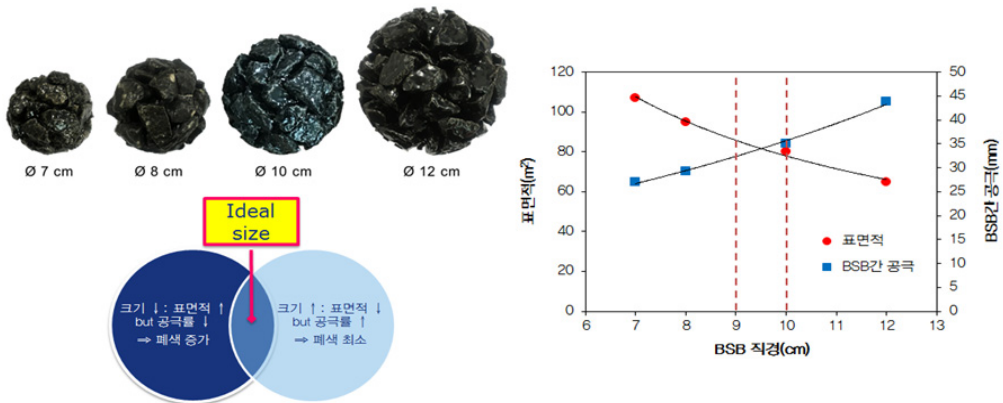


<그림 3-14> 바이오스톤 볼 제작 과정

바이오스톤 볼 직경 10cm는 유체 흐름을 위한 공극률과 생물막 형성을 위한 표면적을 고려한 가장 이상적인 크기이며, 바이오스톤 볼을 다양한 크기로 제조하여 직경의 크기와 공극률과의 관계식으로부터 도출하였다.



<그림 3-15> 바이오스톤 볼 외형



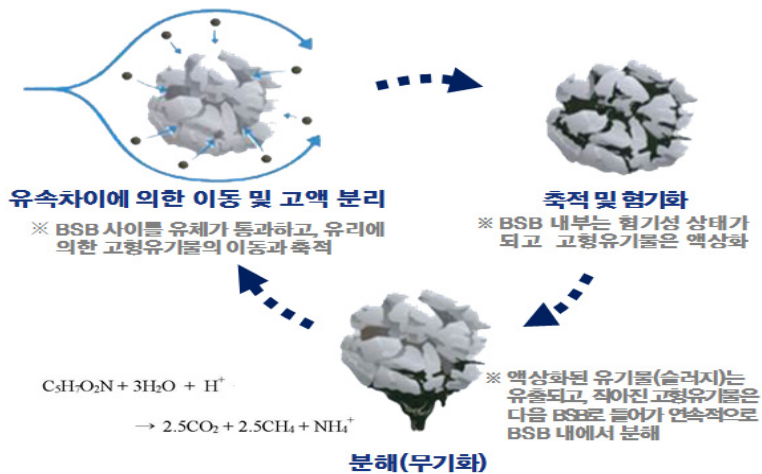
<그림 3-16> 바이오스톤 볼 직경 크기에 따른 공극률

다. 공법의 정화원리 및 특징

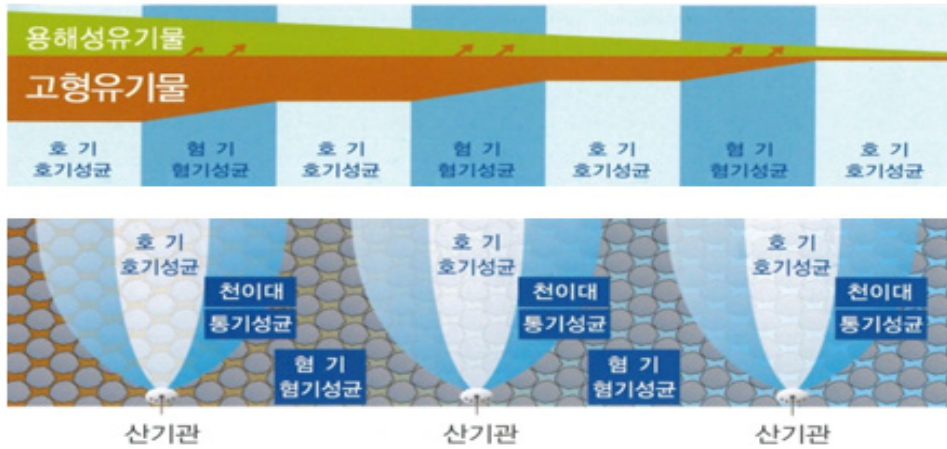
바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화공법은 수처리용 접촉 담체인 바이오스톤 볼 내, 외부 표면에 부착 성장하는 호기성, 임의성, 혐기성 미생물에 의한 유기물과 영양염류의 산화 및 분해(생물학적 처리)와 바이오스톤 볼에 의한 여과 기능(물리적 처리) 등을 이용한 생물막 여과법에 해당하는 수질개선 공법이다. 즉, 바이오스톤에 자연계 미생물을 부착하여 부착된 미생물에 의해서

유기성 오염물질이 산화, 분해되는 원리이며, 유리(流離)에 의한 고액분리로 고형물은 바이오스톤 내부에 흡수되어 액상화되어 일단위로 유출되고, 용해성 유기물은 물과 함께 시간단위로 유출되는 원리이다. 고형물질의 유리란 유리(流離) 유동장에서 비중 1.05 되는 입자성 물질이 속도가 빠른 장에서 속도가 느린 장으로 이동하여 입자가 작게 파쇄되어 다음 유동장으로 이동하는 현상을 말한다<그림 3-17>. 오염물질별 제거기작을 살펴보면, 질소의 제거기작은 바이오스톤 조의 바닥에서 산소를 포기시켜 주어 호기성 지역과 혐기성 지역의 반복으로 호기지역에서는 질산화가, 혐기지역에서는 질소가 탈기되어 제거되는 것이다. 인의 제거기작은 호기지역에서는 미생물에 의해 인이 섭취되고 혐기지역에서는 미생물에 의해 섭취된 인이 방출되는 다음 호기지역에서 분해되고 흡수되는 기작으로 인이 제거된다. <그림 3-18>은 바이오스톤 접촉산화조 내에서의 오염물질 거동과 오염물질이 제거되는 기작을 모식화한 개요도이다.

바이오스톤 접촉산화공법의 가장 큰 특징은 자연계에 존재하는 쇄석과 미생물을 이용한 공법으로 매우 자연친화적이며, 쇄석을 여재로 활용함으로써 여재 사용이 반영구적이며, 접촉산화조 내의 바닥에서 산소를 공급시켜 줌으로써 역세척이 필요 없고, 슬러지의 발생량이 거의 없다는 장점이 있다. 또한, 별도의 유지관리가 필요 없어 설치비 및 유지관리비가 매우 저렴한 장점도 가지고 있다. 단점으로는 모래 및 토사 등 거대 입자성 오염물질의 유입 방지를 위한 전처리 시설로 침사지, 침강지 등이 필요하며, 기존의 유입수 처리시설과 마찬가지로 본 시설도 초기강우 등 대규모 유량 처리가 곤란하다.



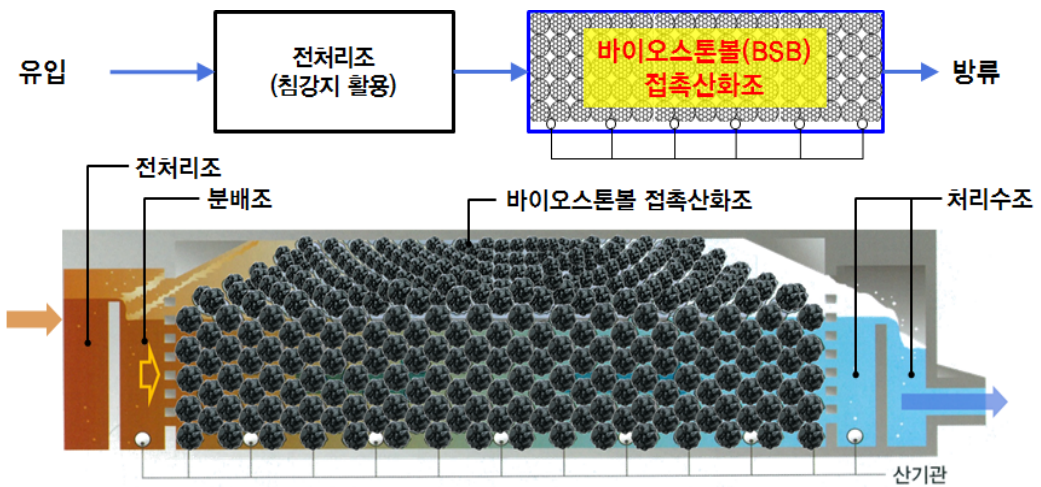
<그림 3-17> 바이오스톤 불의 유리현상에 의한 고액 분리



<그림 3-18> 바이오스톤 반응조 내의 오염물질 거동

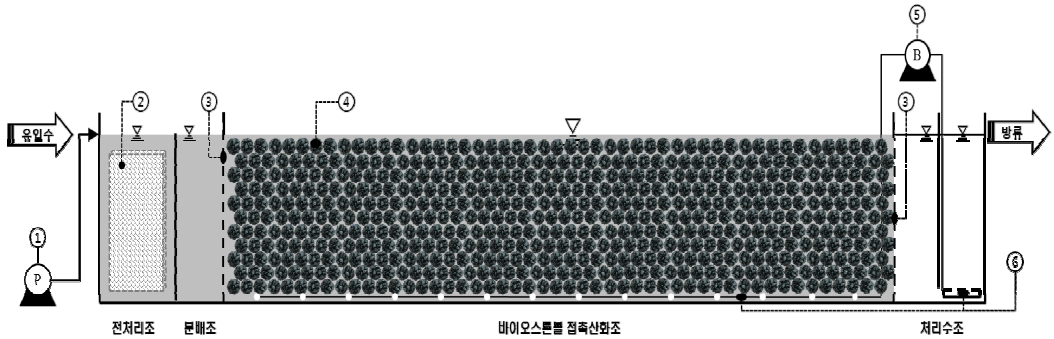
라. 기술의 수처리 공정

농업용수 유입수 처리대책인 바이오스톤 접촉산화시스템의 처리공정은 <그림 3-19>과 같이 거대 SS 등을 여과하기 위한 침사지와 바이오스톤 접촉산화조로 구성되는 매우 단순하고 콤팩트한 처리공정이다. 침사지는 저수지 유입부에 설치되어 있는 부댐 등을 활용할 수 있으며, 기존 수질개선시설인 인공습지가 설치되어 있는 지구는 모두 침사지가 설치되어 있으므로 이를 활용한다면 바이오스톤 접촉산화시스템 단일공정만 가지고도 충분히 유기성 오염물질 등을 처리할 수 있다.



<그림 3-19> 바이오스톤볼 접촉산화시설의 기본구성 모식도

바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화시스템의 일반적인 수처리 공정 구성도는 <그림 3-20>과 같으며, 송풍기와 산기관은 현장 여건에 따라 선택적으로 설치할 수 있다. 산기관은 산소를 포기할 수 있는 포기시설이며, 이는 바이오스톤 접촉산화시설을 장기간 운영시 발생할 수도 있는 폐색현상 등이 발생하면 역세를 위한 목적으로 설치된다. 또한, 산기관은 호기성 유기물 분해 효율을 증가시키기 위한 목적으로도 사용될 수 있는 시설이다.



① 유입펌프(또는 자연유하)	④ 바이오스톤 볼
② 전처리 여재	⑤ 송풍기(필요시)
③ 정류벽	⑥ 산기관(필요시, 역세척시)

<그림 3-20> 바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화공법 수처리 공정 구성도

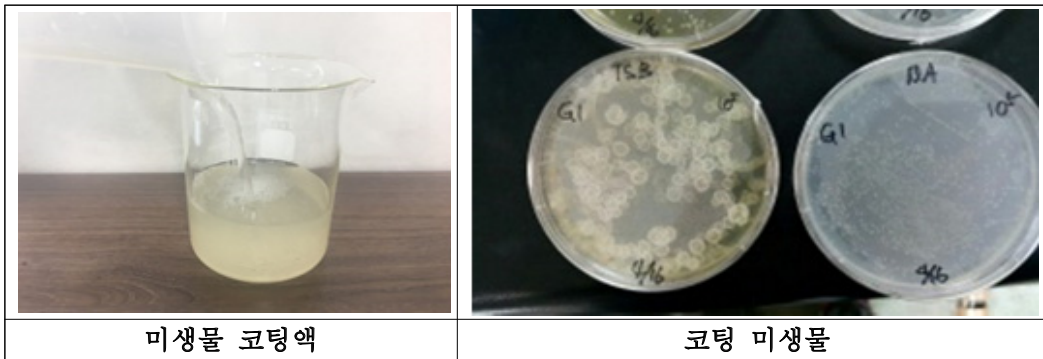
(표 3-11) 바이오스톤 접촉산화시스템 처리공정별 기능 및 특성

구 분	기능 및 특성
전처리조	<ul style="list-style-type: none"> <li>유입되는 0.2mm 이상의 입자성 오염물질을 침전시켜 제거</li> <li>바이오스톤 볼 산화조 시설 보호 및 수처리 효율 제고 목적</li> </ul>
분배조	<ul style="list-style-type: none"> <li>바이오스톤 볼 접촉산화조 전단부로, 접촉산화조에 수평 흐름으로 균등하게 유입수를 분배하는 역할</li> </ul>
바이오스톤 접촉산화조	<ul style="list-style-type: none"> <li>바이오스톤 볼 사이의 공극과 내부 쉘 사이의 공극에 의해 형성되는 유리(流離) 현상을 이용한 입자성 고형 유기물 분리 및 분해</li> <li>바이오스톤 볼에 부착 성장하는 호기성, 혐기성, 혐기성 미생물에 의한 유기물과 영양염류의 생물학적 처리</li> <li>※ 현장여건에 따라 상부 수생식물 식재 가능(습지형)</li> </ul>

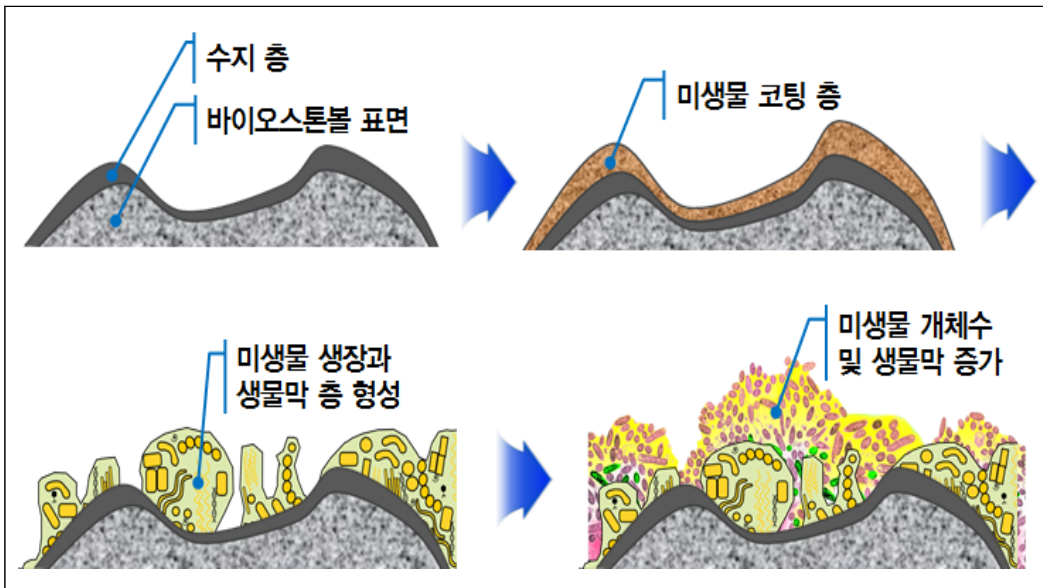


마. 미생물 코팅액

바이오스톤 볼은 직경 10cm 크기의 구형으로 성형하여 미생물 코팅액(천연 셀룰로오스, 백토, 물, 복합유용미생물로 구성)에 함침 및 건조시켜 구형으로 성형화한다. 구형으로 성형화된 볼에 유용미생물(EM bacteria)에 의해 코팅을 하면 바이오스톤 볼이 된다. 바이오스톤 볼은 운전초기 다양한 미생물 군집으로 형성된 생물막(bio-film)의 형성 속도 및 부착 미생물의 개체수 증가 효과를 제공함으로써 운전 초기에 미생물 안정화 기간을 단축시키고, 유입수 유량이나 수질 변동으로 인한 비정상적 조건에서도 안정적인 수처리 기능을 가능하게 유지시켜 주는 기술이다.



<그림 3-21> 천연셀룰로오스, 백토와 물로 구성된 코팅액과 코팅 미생물



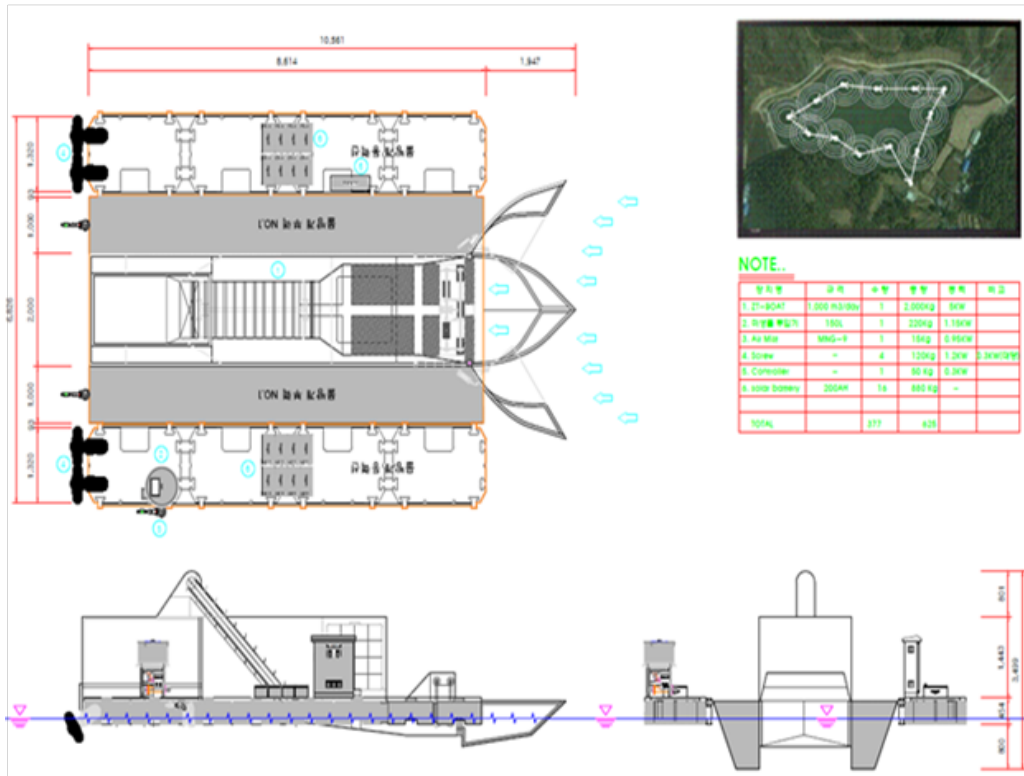
<그림 3-22> 바이오스톤볼 코팅과 표면에서의 미생물 생물막 형성과정

### 3. 무인항법 이동식 수질정화시스템

#### 가. 기본 개념

무인항법 이동식 수질정화시스템은 호소 내 수질개선을 도모하고 수중 환경을 개선하여 조류 증식을 억제하기 위한 목적으로 개발된 수처리 장치이다. 무인항법 이동식 수질정화선은 기존의 유인 운전에 의한 녹조제거선에서 탈피하여 수처리 시스템의 기본 개념을 원하는 위치에서, 원하는 시간 동안 무인 체류하며 수질을 정화하고, 접안 도크에서 충전/유지관리 및 악천후 대피 등이 가능하도록 ICT를 융복합한 최첨단 이동식 수질정화선이다. 즉, 수처리 장치를 탑재하고 지정된 경로에 따라 지정된 시간에 맞추어 이동하면서 오염물질 등을 제거하는 저수지 수질개선 시스템이다.

본 기술의 핵심 요소기술은 GPS를 이용한 무인항법 프로그램, 오염물질 처리를 위한 초고속 고액분리시스템, 호소에 DO를 공급하기 위한 마이크로 버블 장치, 자동 수질측정장치, SS농도 자동 센서, 수심측정센서, 장애물 감시 센서, 풍속계 등 기상측정센서 등을 주요 장치로 하고 있으며, 이동이 용이한 선박일체형 형태로 되어 있다. 무인항법 이동식 수질정화시스템 세부적인 구성요소는 <그림 3-24>와 같다. 무인항법 이동식 수질정화선의 무인 운전은 GPS를 이용한 무인항법 프로그램을 이용한 방법으로 GPS(Global Positioning System)란 인공위성을 이용하여 지구 전역에 대한 위치를 정확히 측정하여 전송해주는 시스템으로 사전에 입력된 위치정보에 따라 수질정화선이 이동하는 원리이다. 무인항법 수질정화선의 오염물질 처리기술인 초고속 고액분리시스템은 SS, TP, COD를 ZT(제타전위 제너레이터) 이용하여 급속 응집 및 부상시켜 슬러지를 제거하는 방식이다. 무인항법 이동식 수질정화시스템의 사용동력은 태양광 및 풍력 등 자연력을 이용한 방식과 도크 내 충전(전기 또는 태양광) 등을 이용하는 방식이 전부 가능하며, 수질정화시스템의 운영방식은 주간에는 호소 내를 이동하면서 수질정화를 하고, 야간에는 시스템 보호 및 동력 충전을 위해 수변 도크에 접안하여 배터리 충전 및 피항 등을 하는 주·야간 별도의 운영방식을 계획하고 있다.



<그림 3-23> 무인항법 이동식 수질정화시스템 모식도



<그림 3-24> 무인항법 이동식 수질정화선 구성요소

나. GPS 기반 무인항법 프로그램

무인항법 이동식 호소 수질정화시스템을 개발하기 위하여 GPS 기반 자율항법장치기술의 원천기술을 보유하고 있는 전문업체(두웰네트웍스(주))와 공동기술개발 협약을 체결하여 협동연구로 진행하였다. GPS 기반 무인항법 프로그램에 대한 항목별 주요내용은 다음과 같다.

(표 3-12) GPS 기반 무인항법 프로그램 개발 항목별 주요내용

항목	내 용
컨트롤러 MCU	64Bit CPU, Embedded Linux, 4MB memory, 64GB MSD USB, Serial, TTL, RS485, 12V On/Off 접점, 평형 수 제어, 이동 목표지점, 속도, 항속거리 제어, 수질장치 제어, 크루즈 컨트롤, 수동제어모드
서버 관제시스템 (스마트폰 APP, 인터넷 웹)	비트맵지도에 이동경로/작업시작시간/작업종료시간 설정 출항이동을 시작, 종료시간 복귀 설정 수질정화장치 작동 및 정지 설정 현재의 위치/진행 시간/진행 거리/평균속도 등 모니터링 지나온 항로/현재 항해속도 표시 모의주행 시뮬레이션 모니터링 각종장비 작동상태 전송 및 모니터링 수질지도/수심지도/일별/월별/년별/전년대비 통계표 수동 강제입항 지시 각종 관제상황 문자알람(알림) 기타 기능설정
지도 MAP	디지털 배열기반 도트매트릭스 비트맵
스틸카메라	가변셔터, 가변마이크 헤드, 디지털 데이터
DGPS	3D Dynamic Sensor, beacon DGPS Receive, three-antenna system, accuracy of 0.5° rms, 0.25° rms heading, 0.5° rms. tracking, compensated for with 20cm rms accuracy
레이더	적외선 (905nm) 광원 1등급 360° 개구각, 5Hz~10Hz 스캔 주파수 0.5m~250m 작업구역, 10%에서의 스캔범위 80m반사율 거의 모든 형태 물체감지 가능 ≥ 100ms 반응속도

## 제4장

### 농업용수 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

제1절 현장적용실험 대상지구 개요

제2절 생태융합형 접촉산화수로 성능평가

제3절 생태융합형 접촉산화부도 성능평가

제4절 바이오스톤 접촉산화시스템 성능평가

제5절 무인항법 이동식 수질정화시스템 성능평가



## 제4장 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

### 제1절 현장적용실험 대상지구 개요

#### 1. 매화저수지 유역현황 및 주요염원

##### 가. 매화저수지 시설제원

본 연구에서 농업용 저수지 수질개선을 위한 수질정화시설로 개발된 기술에 대한 현장적용실험을 경기도 시흥시 도창동에 위치하고 있는 농업용 저수지인 매화저수지(도창저수지)에서 수행하였다. 매화저수지는 1941년도에 설치된 농업용 보조 수원공으로 소규모 인공 호소이다. 저수지의 유역면적은 260 ha에 해당하며, 만수면적은 15.5 ha, 수해면적은 52.4 ha이고, 호소의 유효저수량은 227 천 $m^3$ , 평균 수심은 2~3m로 호소 전체적으로 수심이 매우 낮은 저류지 형태의 저수지이다. 현재 하류지역 농경지에 농업용수 공급 목적 이외에 유료 낚시터로 수면 활용되고 있다.

(표 4-1) 현장적용실험 대상지구의 시설제원

저수지명	유역면적 (ha)	만수면적 (ha)	수해면적 (ha)	유효저수량 (천 $m^3$ )	총저수량 (천 $m^3$ )	준공년도
매화지	260	15.5	52.4	227.0	248.0	1941

자료) 한국농어촌공사 농업기반시설관리시스템(RIMS)



<그림 4-1> 매화저수지 전경 사진

나. 매화저수지 유역개황 및 오염원 현황

농업용수 융복합 수처리기술의 현장적용실험 대상 저수지로 선정된 매화저수지의 유역 개황 및 오염원에 대한 조사 분석은 본 연구의 1년차에 수행하였다. 매화저수지의 유역은 행정구역상 경기도 시흥시 도창동과 금이동에 해당하며, 금이동 지역 전체 면적의 42.7%와 도창동 지역 전체 면적의 23.4%를 차지하고 있다. <그림 4-2>는 검색엔진 구글에서 다운받은 위성사진 위에 매화저수지 유역의 경계선을 그린 것으로, 노란색 실선은 도창동과 금이동의 행정구역을 구분하는 경계선이고, 녹색 실선은 매화저수지 유역을 구분하는 경계선이다.

매화저수지는 시흥시 북동쪽에 위치하고 있으며, 유역의 대부분 지역이 산림과 구릉지역으로 이루어져 있고, 인근에는 주민 약 40만명이 살고 있는 시흥시 중심지와 인접하고 있다. 지리적으로 시흥 시가지와 접해있으며, 유역 내에는 주택가, 음식점, 소규모 산업시설, 농경지, 축산농가 등이 다양하게 분포하고 있는 도시와 농촌의 복합형태를 보이고 있는 지역이다. 저수지 상류 유역에는 42번 국도와 100번 서울외곽순환고속도로가 지나가고 있으며, 인근에 위치하고 있는 물왕저수지의 유역과 경계를 이루고 있다. 매화저수지는 서울 근교에 위치한 지리적 여건으로 주말에 많은 낚시인들이 찾고 있다.



<그림 4-2> 매화저수지 유역의 행정구역 위치도



다. 매화저수지 유입하천 현황

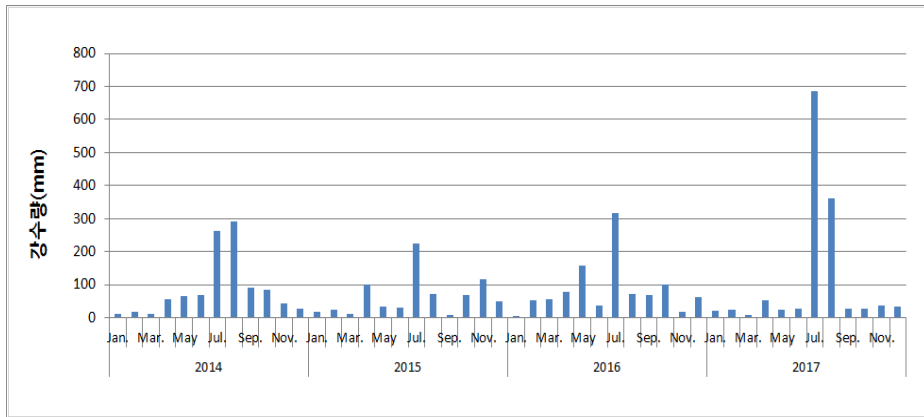
매화저수지의 주요 유입하천은 2개소이며, 유입하천-1은 금이동 유역에서 유입되는 소하천이고, 유입하천-2는 도창동 일부와 금이동 유역에서 유입되는 소하천이다. 유입하천-1은 해발 205m 운흥산에서 발원하여 금이동을 통과하여 저수지 상류 우안 쪽으로 유입되는 소하천으로 하폭과 유량이 아주 작은 지방 소하천이다. 도창동 유역에서 들어오는 유입하천-2는 상류 유역의 봉재산 계곡에서 발원하여 유하하는 소하천으로 유입-1과 마찬가지로 하폭과 유량이 아주 작은 지방 소하천이다. 유입하천-1의 평균 하폭은 1.8m(0.98~2.17m), 평균 수심은 12.1cm(7.0~16.0cm)으로 조사되었고, 유입하천-2는 평균 하폭이 1.93m(1.23~2.19m)이고, 평균 수심은 15.2cm(13.0~19.0cm)으로 조사되었다. <그림 4-3>은 매화저수지로 유입되는 유입하천-1과 유입하천-2의 전경을 찍은 사진이다.



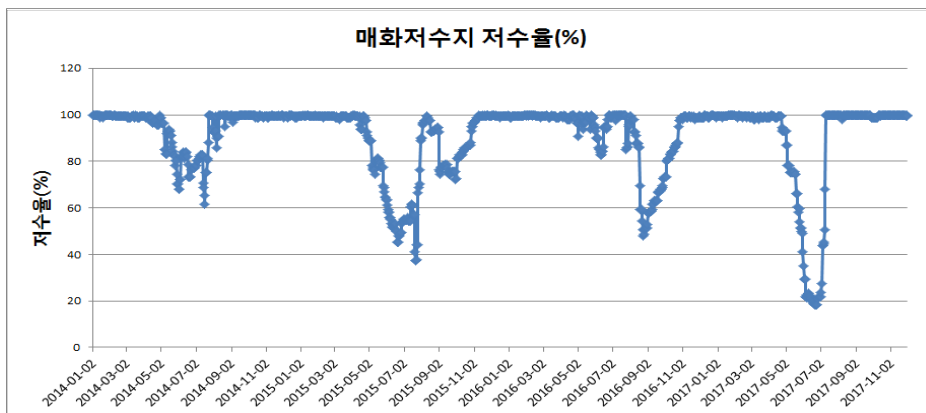
<그림 4-3> 매화저수지 유입하천 전경

라. 강수량과 저수율 현황

매화저수지 유역의 2014~2017년의 강수량 현황과 매화저수지의 저수율 현황에 대한 그래프를 <그림 4-4>와 <그림 4-5>에 각각 나타내었다. <그림 4-4>에서 보는 바와 같이 2014년과 2015년에는 봄 가뭄이 극심하였고, 2017년에는 6월까지 강수량이 거의 없었고, 7월과 8월에는 지속적인 강우로 인해 강수량이 약 700mm까지 기록하는 것으로 나타났다. 매화저수지의 저수율은 <그림 4-5>에서 보는 바와 같이 보통 5월초부터 저수율이 하락하기 시작하여 50% 이하까지 감소하였다가 8월말에 만수위를 나타내는 경향을 보이고 있다. 특히 2017년도 5~6월에는 강수량의 부족과 농업용수 공급으로 인해 저수지의 저수율이 20% 이하까지 감소하였다.



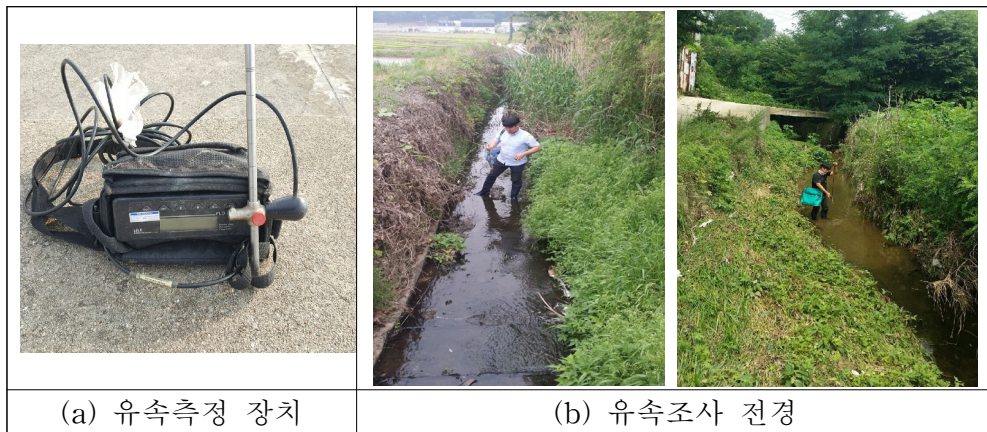
<그림 4-4> 매화저수지 인근지역 강수량 현황(2014~2017년)



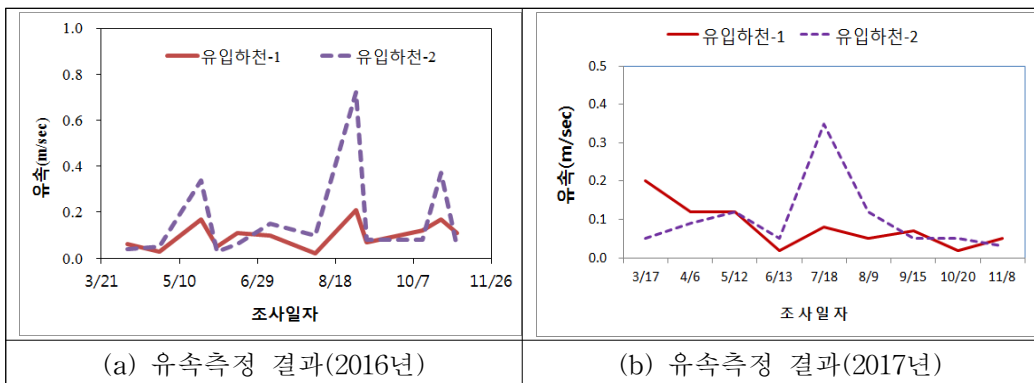
<그림 4-5> 매화저수지의 일별 저수율(2014~2017년)

다. 유입하천 유속

매화저수지 유입하천 2개소에 대한 유속조사는 수질조사와 동일한 일시에 유속계(FLO-MATE Model 2000)를 이용하여 측정하였고, 그 결과를 <그림 4-7>에 나타내었다. 유입하천-1의 유출 유속은 2016년에는 0.020~0.210 m/s(평균 0.102m/s), 2017년에는 0.020~0.200 m/s(평균 0.086 m/s)로 나타났고, 유입하천-2의 유출 유속은 2016년에는 0.030~0.720 m/s(평균 0.173m/s), 2017년에는 0.030~0.350 m/s(평균 0.117 m/s)로 조사되었다. 평상시에는 두 유입하천 간의 유출속도가 1.4~1.7배 정도의 차이를 보인 반면에 강우 시에는 유입하천-1은 평상시와 변동 변이가 크지 않았지만, 유입하천-2에서는 평상시보다 4배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 유입하천-2는 금이동 일부와 도창동을 포함하는 넓은 유역면적을 포함하고 있다.



<그림 4-6> 유입하천 유속 측정 장치 및 조사 전경



<그림 4-7> 매화저수지 유입하천별 유속 변화

바. 매화저수지 유역의 오염부하량

매화저수지 유역에 대한 오염원 자료는 환경부에서 제공하는 오염원 자료를 이용하여 오염부하량을 산출하였으며, 그 결과를 (표 4-2)에 나타내었다. 환경부에서 제공하는 오염원 자료는 행정구역인 동 단위로 정리되어 있으므로 해당 동 중 유역에 포함되는 면적비율로 환산하여 오염원과 오염부하량을 산출하였다. 유역에서 배출되는 오염부하량은 항목별로 BOD 80.1kg/일, TN 46.8kg/일, TP 4.80kg/일로 산출되었다. BOD 오염부하량은 생활계가 55.4%를 차지하여 가장 큰 오염원으로 나타났으며, 다음 순으로 토지계가 38.3%를 차지하였다. 그 외 축산계 및 산업계에 의한 오염은 각각 5.7%, 0.7%를 차지하여 비율이 높지 않았다. TN과 TP에서도 역시 생활계가 60% 이상으로 가장 큰 오염원으로 산출되었고, 다음으로 토지계, 축산계, 산업계 순으로 나타나고 있다. 따라서 매화저수지 유역 내에서 가장 큰 오염원은 생활계에 의한 것으로 축산계 및 산업계에 의한 오염물질 배출은 거의 없는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 오염물질 배출부하량 산정을 단순히 행정 통계상 자료에 의한 오염원 자료에 매화지 유역에 포함되는 면적비율을 곱하여 계산하였는데, 대규모 아파트단지 및 농경지가 매화저수지 유역 밖에 위치하고 있어 매화저수지 유역의 오염원으로 편입하기에는 상당한 오차가 있다고 판단된다.

(표 4-2) 매화저수지 유역의 오염부하량

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

주) 환경부 행정구역별 오염원 자료 참고, ( )는 비율  
 자료) 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리기술개발 및 적용(I) 보고서

## 2. 매화저수지 유입하천 수질오염도 평가

### 가. 조사지점 및 조사방법

본 연구에서 개발된 융복합 수처리 시설에 대한 현장적용실험 대상지구인 매화저수지의 주요 유입하천-1(R1)과 유입하천-2(R2)에 대해 정기적으로 수질 및 유속 등을 조사하였다. 본 조사는 농업용수 유입수 수질특성과 유출량 등을 분석하여 농업용 저수지 유입수 수질정화기술 개발에 활용하고자 하였다. 또한, 매화저수지의 수리·수문 분석과 유입 오염부하량 분석을 통해 매화지에 실규모 수처리 시설을 설치하였을 경우에 저수지의 수질개선효과를 정량화하기 위하여 조사를 수행하였으며, 연도별 조사일자는 (표 4-4)와 같다. 매화저수지의 주요 유입하천은 총 2개소이며, 유입하천-1(R1)은 시흥시 금이동 유역에서 들어오는 소하천이고, 유입하천-2(R2)은 시흥시 도창동 유역 일부와 금이동 유역에서 들어오는 소하천이다. 하천의 수질 및 유량조사는 매월 1회, 저수지 유입부 전방 200~500m 지점에서 조사를 수행하였고, 강우사상에 대한 수질농도 및 유출량 등을 분석하기 위하여 강우 시에도 간헐적으로 조사를 실시하였다. 현장측정항목인 수온, pH, EC, DO 등은 현장에서 YSI 수질측정 장비를 이용하여 측정하였고, COD, SS, TOC, TN, TP 등 이화학적 항목과 중금속 등을 분석하기 위해 물 시료를 폴리에틸렌 1L 시료통에 채수하여 분석실로 운반하였으며, 수질오염공정시험기준(환경부, 2016)에 준하여 실내분석을 실시하였다(표 4-4).



<그림 4-8> 매화저수지 유입하천 조사 지점

(표 4-3) 매화저수지 유입하천 수질조사 일자

조사연도	조사 일자	조사기관
2015년	4/24, 5/14, 6/5, 7/3, 7/27, 9/4, 9/22, 10/27, 11/5	농어촌연구원
2016년	4/8, 4/27, 5/24, 6/3, 7/7, 8/5, 8/31, 9/7, 11/4, 12/27	
2017년	2/6, 3/17, 4/6, 5/12, 6/13, 7/18, 8/9, 9/15, 10/20, 11/8	

(표 4-4) 물시료 분석 항목 및 분석 방법

번호	측정 항목	측정법	수질오염공정시험기준
1	수온	수온계	ES 04307.1a
2	pH	pH meter	ES 04306.1b
3	용존산소	전극법	ES 04308.2b
4	전기전도도	전극법	ES 04310.1b
5	부유물질량(SS)	여과법	ES 04303.1b
6	생물화학적산소 요구량	윙클러-아자이드화 나트륨변법	ES 04305.1b
7	화학적 산소요구량	적정법-산성 과망간산칼륨법	ES 04315.1a
8	총유기탄소	과황산 UV 및 과황산 열 산화법	ES 04311.2b
9	클로로필-a	아세톤 추출법	ES 04312.1a
10	암모니아성질소	자외선/가시선 분광법	ES 04355.1b
11	아질산성질소	자외선/가시선 분광법	ES 04354.1b
12	질산성질소	자외선/가시선 분광법-부루신법	ES 04361.2b
13	용존성 무기인	분광법-아스코빈산환원법	ES 04360.2c
14	총질소	자외선/가시선 분광법-산화법	ES 04363.1b
15	총인	자외선/가시선 분광법-산화법	ES 04362.1c



<그림 4-9> 유입하천 수질 및 유속조사 전경

## 나. 유입하천 수질조사 결과

## 1) 이화학적 항목

유입하천에 대한 수질조사 결과를 연도별, 수질항목별로 구분하여 최대치, 최소치, 평균치, 표준편차에 대해 정리하여 (표 4-5)에 나타내었고, 수질항목별로 2015년부터 2017년까지 조사일자에 따른 수질현황을 <그림 4-10> ~ <그림 4-14>에 나타내었다.

현장 측정항목인 수온, pH, EC, DO에 대한 조사결과, 유입하천별 평균 수온은 2015년도에는 R1 15.8℃, R2 11.7℃로 R1 지점이 R2 지점에 비해 수온이 다소 높았으나, 2016년도 R1 13.3℃, R2 13.1℃, 2017년도 R1 12.6℃, R2 12.6℃로 유입 하천간에 수온 차이가 없는 것으로 나타났다. 하절기(7~8월) 수온은 2015년 < 2016년 < 2017년으로 수온이 조금씩 증가하는 추이를 나타내었다. 연도별 평균 pH는 2015년에는 유입하천-1, 유입하천-2 모두 평균 7.6으로 동일하였고, 2016년에는 유입하천-1은 7.6, 유입하천-2는 7.7로 나타났고, 2017년도에는 두 유입하천 모두 7.7로 나타나 유입하천에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다. EC는 2015년에는 유입하천-1은 389.0~554.0 $\mu$ s/cm(평균 491.0 $\mu$ s/cm), 유입하천-2는 246.0~623.0 $\mu$ s/cm(평균 527.3 $\mu$ s/cm)으로 나타났고, 2016년도 유입하천-1에서는 283.0~626.0 $\mu$ s/cm(평균 494.7 $\mu$ s/cm)으로 나타났고, 유입하천-2에서는 240.0~634.0 $\mu$ s/cm(평균 495.1 $\mu$ s/cm)로 나타났다. 2017년도 유입하천-1은 472.0~723.0 $\mu$ s/cm(평균 587.5 $\mu$ s/cm), 유입하천-2는 523.0~985.0 $\mu$ s/cm(평균 641.7 $\mu$ s/cm)로 나타나 유입하천-1에 비해 유입하천-2에서 대체적으로 높은 EC를 나타내었고, 2017년에는 다른 연도에 비해 EC가 전반적으로 증가한 것으로 나타났다.

유입하천별 DO는 2015년에는 유입하천-1에서 3.0~14.6 mg/L(평균 6.3 mg/L), 유입하천-2에서 3.8~14.7 mg/L(평균 7.2 mg/L)을 나타내었고, 2016년도에는 유입하천-1은 3.0~8.2 mg/L(평균 4.8 mg/L), 유입하천-2에서는 3.8~12.0 mg/L(평균 6.7 mg/L)을 나타냈다. 2017년도 유입하천-1에서는 1.6~13.4 mg/L(평균 5.8 mg/L)으로 나타났고, 유입하천-2에서는 3.4~10.9 mg/L(평균 6.6 mg/L)을 나타내어 유입하천-1 보다 유입하천-2에서 전반적으로 모든 시기에 DO가 다소 높게 나타났다. 유입하천-2는 유입하천-1에 비해 유역면적이 넓어 평상시 유량이 2배 정도 풍부하며, 하천 바닥 경사가 유입하천-1에 비해 급한 형상을 나타내고 있다.

유입하천의 COD 농도는 2015년도 유입하천-1에서는 6.0~10.2 mg/L(평균 7.2 mg/L)를 나타냈고, 유입하천-2에서는 4.6~9.6 mg/L(평균 6.3 mg/L)으로 나

타내었다. 2016년도에는 유입하천-1은 3.6~32.0 mg/L(평균 9.8 mg/L), 유입하천-2는 4.0~10.8 mg/L(평균 6.6 mg/L)으로 나타났고, 2017년도 조사에서는 유입하천-1은 5.2~14.4 mg/L(평균 8.8 mg/L), 유입하천-2는 3.4~9.4 mg/L(평균 5.9 mg/L)를 나타내어 유입하천-1이 유입하천-2에 비해 높은 COD 농도로 나타내었다. 이러한 결과는 2016년 저수지 표층수의 평균 COD 16.5mg/L 및 저층수 평균 COD 16.4mg/L, 그리고 2017년 저수지 표층수의 평균 COD 18.1mg/L 및 저층수의 평균 COD 12.3mg/L 비해서는 매우 낮은 농도를 나타내었다.

유입하천의 SS 농도는 2015년에는 유입하천-1, 2에서 각각 평균 5.9 mg/L(3.3~13.7 mg/L)과 10.9 mg/L(2.2~53.0 mg/L)로 나타났고, 2016년도에는 유입하천-1, 2에서 각각 9.3 mg/L(1.1~49.3 mg/L), 11.1 mg/L(1.1~79.3 mg/L)으로 나타나 조사 시기에 따른 농도 편차가 매우 심한 것으로 나타났다. 2017년도에는 유입하천-1에서는 2.0~15.0 mg/L(평균 6.5 mg/L)를 나타냈고, 유입하천-2에서는 0.7~33.0 mg/L(평균 5.1 mg/L)로 나타나 하절기를 제외하고는 유입하천-1이 유입하천-2보다 더 높은 SS 농도를 나타내고 있으며, 하절기 유입하천-2에서 SS 농도의 증가 원인은 유입하천-2 유역 내에서 도로 공사가 이루어지고 있어 강우 시에 토사가 하천으로 유입되는 것으로 판단된다.

유입하천의 Chl-a 농도는 2015년에는 유입하천-1에서 1.3~7.5 mg/m<sup>3</sup>(평균 4.3 mg/m<sup>3</sup>), 유입하천-2에서 0.8~16.3 mg/m<sup>3</sup>(평균 4.3 mg/m<sup>3</sup>)로 대부분의 시기에 거의 비슷한 농도를 보였으나 6월 5일 조사에서 유입하천-1 3.8 mg/m<sup>3</sup>에 비해 유입하천-2에서 16.3 mg/m<sup>3</sup>로 유입하천-1에 비해 약 5배 정도의 높은 농도로 나타났다. 2016년에는 유입하천-1에서 1.3~30.6 mg/m<sup>3</sup>(평균 7.4 mg/m<sup>3</sup>), 유입하천-2에서 0.6~38.0 mg/m<sup>3</sup>(평균 9.9 mg/m<sup>3</sup>)로 대부분의 시기에 거의 비슷한 농도를 보였으나 6월 3일과 10월 25일 조사에서 유입하천-1에 비해 유입하천-2에서 5배 이상의 높은 농도로 나타났다. 이러한 결과는 2015년도 조사결과와 매우 유사하였다. 2017년에는 유입하천-1에서 0.9~43.4 mg/m<sup>3</sup>(평균 10.9 mg/m<sup>3</sup>), 유입하천-2에서 0.8~10.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 5.6 mg/m<sup>3</sup>)로 유입하천-2에 비해 유입하천-1에서 전반적으로 높은 농도를 나타내었다.

유입하천의 TN 농도는 2015년도에는 유입하천-1은 5.736~8,080 mg/L(평균 7.011 mg/L), 유입하천-2는 4.134~10,005 mg/L(평균 7.344 mg/L)로 나타났고, 2016년도에는 유입하천-1은 4.038~8,914 mg/L(평균 6.738 mg/L), 유입하천-2는 2.485~9.311 mg/L(평균 6.594 mg/L), 2017년도 유입하천-1은 5.896~12.060 mg/L(평균 8.531 mg/L), 유입하천-2는 5.011~10.552 mg/L(평균 7.605 mg/L)로 나타나 유입하천 TN 농도가 점진적으로 증가 추이에 있는 것으로 나타났다.



유입하천의  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 2016년에는 유입하천-1에서 각각 0.033~0.338 mg/L(평균 0.157 mg/L), 0.453~5.128 mg/L(평균 1.863 mg/L), 0.583~7.255 mg/L(평균 4.014 mg/L)으로 나타났고, 유입하천-2에서는 0.023~0.615 mg/L(평균 0.199 mg/L), 1.357~6.876 mg/L(평균 5.012 mg/L), 0.158~1.614 mg/L(평균 0.779 mg/L)으로 나타났다. 2017년도에는 유입하천-1에서 각각 0.010~0.620 mg/L(평균 0.260 mg/L), 0.075~4.510 mg/L(평균 1.991 mg/L), 1.620~11.090 mg/L(평균 5.010 mg/L)으로 나타났고, 유입하천-2에서는 0.042~0.720 mg/L(평균 0.277 mg/L), 3.108~7.325 mg/L(평균 5.060 mg/L), 0.130~3.414 mg/L(평균 1.138 mg/L)으로 나타나  $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 거의 모든 시기에 유입하천-2에서 유입하천-1보다 매우 높은 농도를 보였고,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 모든 조사 시기에 유입하천-2보다 유입하천-1에서 매우 높은 농도를 나타내었다. 이러한 결과로부터 유입하천-1은 상류 유역에서 유입된 질산계 유기물이 하천을 따라 흐르면서 호기성 미생물에 의한 질산화가 완료되고 있음을 알 수 있다.

유입하천의 TP 농도는 2015년도의 유입하천-1은 0.375~0.694 mg/L(평균 0.556 mg/L)이고, 유입하천-2는 0.375~1.111 mg/L(평균 0.539 mg/L)로 나타났고, 2016년도에는 유입하천-1에서 0.323~1.242 mg/L(평균 0.708 mg/L)이고, 유입하천-2는 0.214~0.568 mg/L(평균 0.354 mg/L)으로 나타났다. 2017년도에는 유입하천-1은 0.405~1.335 mg/L(평균 0.729 mg/L), 유입하천-2는 0.092~0.948 mg/L(평균 0.400 mg/L)로 나타나 대체적으로 모든 시기에 유입하천-1이 유입하천-2보다 높은 농도를 나타내었다. 이러한 결과는 COD, TOC와도 동일한 결과로서, 유입하천-1은 유기물 오염도가 높고, 하천 내 DO는 부족한 상태인 것으로 판단된다.

유입하천의 인산염( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) 농도는 2015년에는 유입하천-1에서 0.250~0.555 mg/L(평균 0.393 mg/L)으로 나타났고, 유입-2 지점에서는 0.230~0.455 mg/L(평균 0.350 mg/L)로 대체적으로 유입하천-1에서 높은 농도로 나타났다. 2016년에는 유입하천-1에서 0.099~0.686 mg/L(평균 0.424 mg/L)으로 나타났고, 유입-2 지점에서는 0.112~0.424 mg/L(평균 0.243 mg/L)로 모든 시기에 유입하천-1에서 유입하천-2보다 높게 나타났다. 2017년도에는 유입하천-1에서 0.160~0.830 mg/L(평균 0.432 mg/L)으로 나타났고, 유입하천-2 지점에서는 0.043~0.910 mg/L(평균 0.311 mg/L)으로 2015년, 2016년과 동일하게 거의 모든 시기에 유입하천-1에서 유입하천-2보다 높은 농도를 나타내었다. 이러한 결과는 TP 농도의 거의 유사한 유형으로 나타났다.

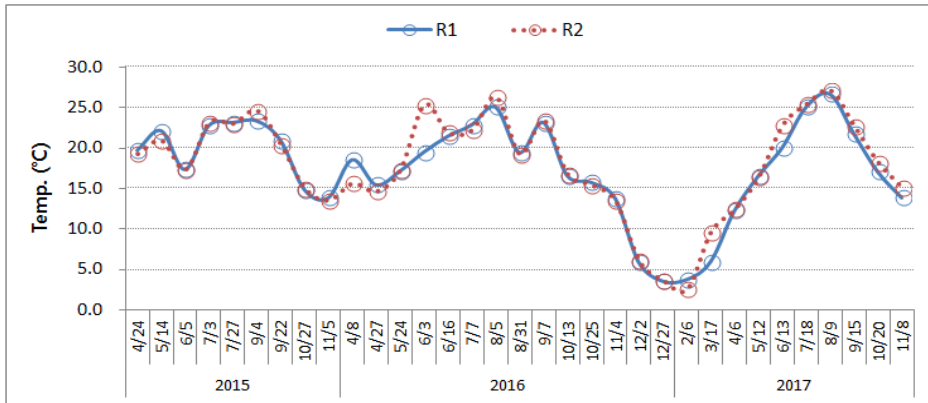
(표 4-5) 매화저수지 유입하천의 연도별 수질현황

구 분		수온 (°C)	pH	EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	DO (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	
2015	R1	최대값	27.1	8.2	554.0	14.6	10.2	13.7	7.5
		최소값	2.5	6.7	389.0	3.0	6.0	3.3	1.3
		평균	15.8	7.6	491.0	6.3	7.2	5.9	4.3
		표준편차	9.0	0.6	51.9	4.2	1.5	3.7	2.3
	R2	최대값	27.1	8.1	623.0	14.7	9.6	53.0	16.3
		최소값	2.5	6.8	246.0	3.8	4.6	2.2	0.8
		평균	11.7	7.6	527.3	7.2	6.3	10.9	4.3
		표준편차	9.4	0.5	129.6	4.0	2.0	18.6	5.6
2016	R1	최대값	27.1	8.9	626.0	8.2	32.0	49.3	30.6
		최소값	2.5	6.4	283.0	3.0	3.6	1.1	1.3
		평균	13.3	7.6	494.7	4.8	9.8	9.3	6.7
		표준편차	9.6	0.6	99.3	1.6	6.7	12.0	7.1
	R2	최대값	27.1	8.6	634.0	12.0	10.8	79.3	38.0
		최소값	2.5	6.3	240.0	3.8	4.0	1.1	0.6
		평균	13.1	7.7	495.1	6.7	6.6	11.1	9.9
		표준편차	9.4	0.6	137.0	2.9	2.8	20.5	12.0
2017	R1	최대값	27.1	8.5	732.0	13.4	14.4	15.0	43.4
		최소값	2.5	6.8	472.0	1.6	5.2	2.0	0.9
		평균	12.6	7.7	587.5	5.8	8.8	6.5	10.9
		표준편차	8.5	0.6	96.6	4.2	2.7	4.4	12.1
	R2	최대값	27.1	8.5	985.0	10.9	9.4	33.0	10.8
		최소값	2.5	7.0	523.0	3.4	3.4	0.7	0.8
		평균	12.6	7.7	641.7	6.6	5.9	5.1	5.6
		표준편차	8.6	0.5	135.8	2.5	2.0	9.9	3.7

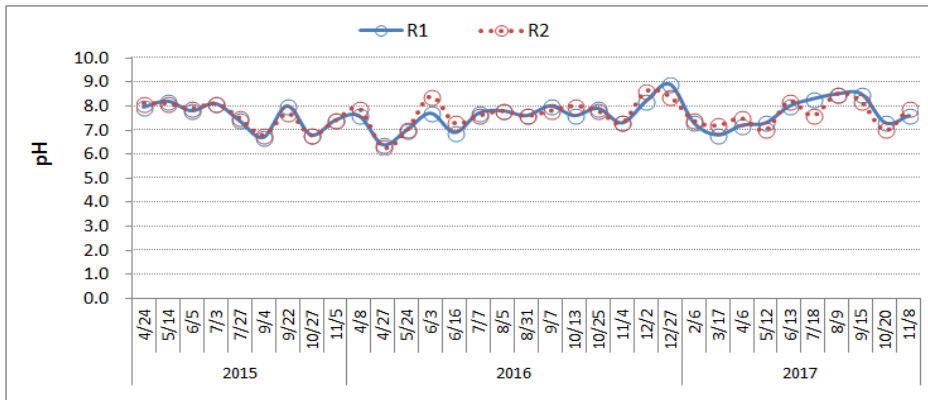
(표 4-5) 매화저수지 유입하천의 연도별 수질현황(계속)

구 분		T-N (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	TOC (mg/L)	
2015	R1	최대값	8.080	0.410	4.085	4.805	0.694	0.555	7.2
		최소값	5.736	0.144	1.075	0.076	0.375	0.250	3.8
		평균	7.011	0.255	2.797	3.088	0.556	0.393	5.5
		표준편차	0.878	0.091	1.125	1.761	0.122	0.117	1.7
	R2	최대값	10.005	0.370	7.846	2.546	1.111	0.455	4.7
		최소값	4.134	0.005	3.111	0.159	0.375	0.230	3.1
		평균	7.344	0.158	5.313	0.718	0.539	0.350	3.9
		표준편차	2.133	0.125	1.777	0.914	0.261	0.078	0.8
2016	R1	최대값	8.914	0.338	5.128	7.255	1.242	0.686	14.8
		최소값	4.038	0.033	0.453	0.583	0.323	0.099	2.4
		평균	6.738	0.157	1.863	4.014	0.708	0.424	6.3
		표준편차	1.527	0.079	1.437	2.382	0.320	0.186	2.8
	R2	최대값	9.311	0.615	6.876	1.614	0.568	0.424	6.7
		최소값	2.485	0.023	1.357	0.158	0.214	0.112	2.8
		평균	6.594	0.199	5.012	0.779	0.354	0.243	4.1
		표준편차	2.090	0.152	1.613	0.477	0.089	0.084	1.3
2017	R1	최대값	12.060	0.620	4.510	11.090	1.335	0.830	7.0
		최소값	5.896	0.010	0.075	1.620	0.405	0.160	3.6
		평균	8.531	0.260	1.991	5.010	0.729	0.432	5.5
		표준편차	2.119	0.199	1.370	3.153	0.309	0.179	1.2
	R2	최대값	10.552	0.720	7.325	3.414	0.948	0.910	6.6
		최소값	5.011	0.042	3.108	0.130	0.092	0.043	2.1
		평균	7.605	0.277	5.060	1.138	0.400	0.311	3.7
		표준편차	1.691	0.203	1.569	1.221	0.239	0.232	1.6

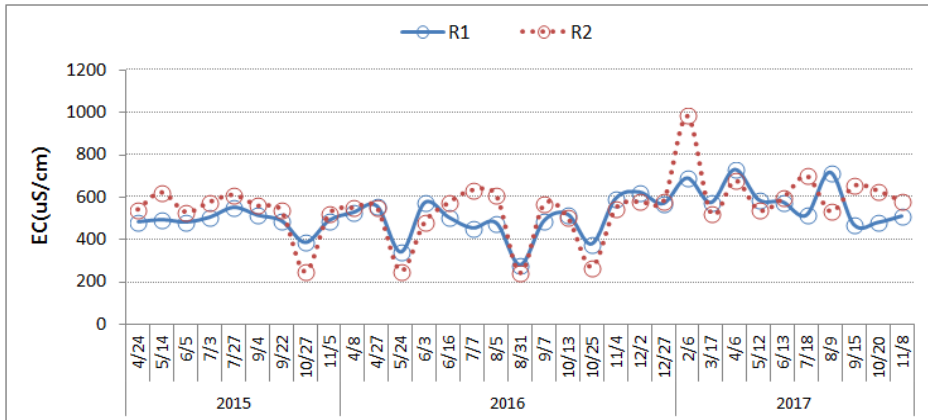
양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용(IV)



(a) 수온

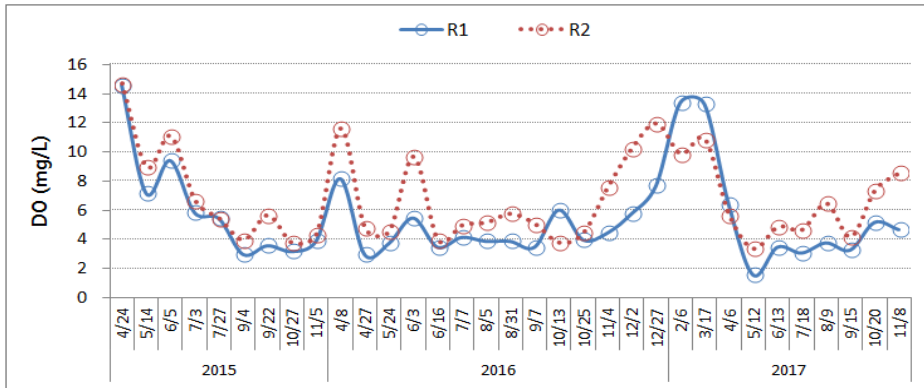


(b) pH

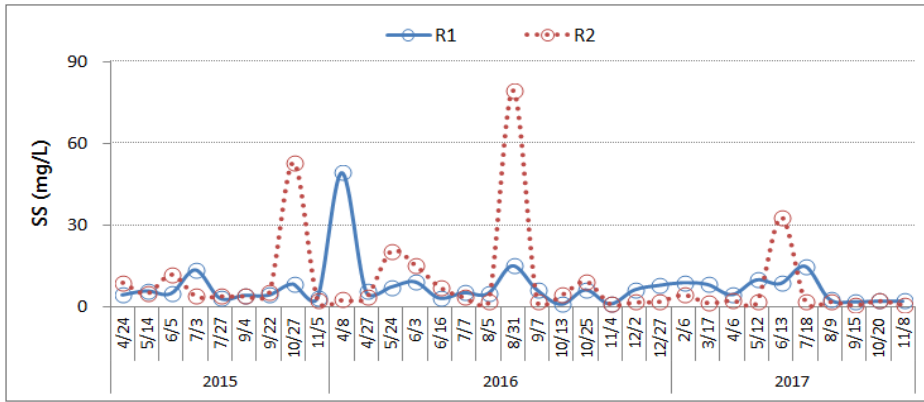


(c) 전기전도도 (EC)

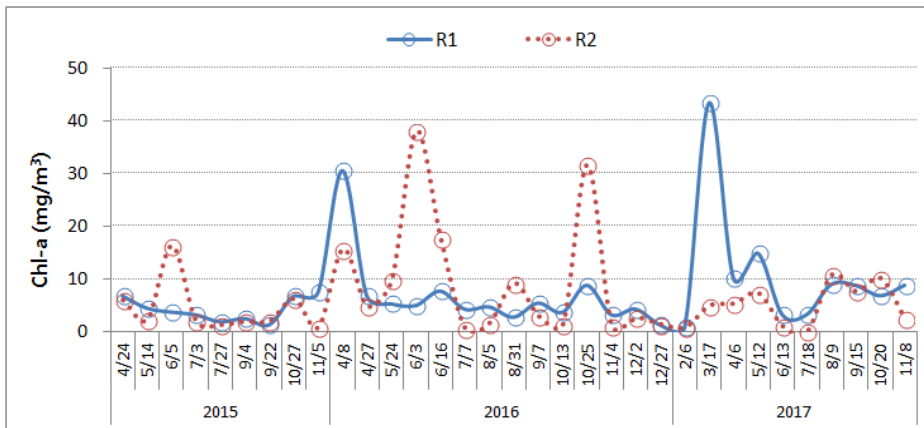
<그림 4-10> 유입하천 수질 현황(수온, pH, EC)



(a) DO



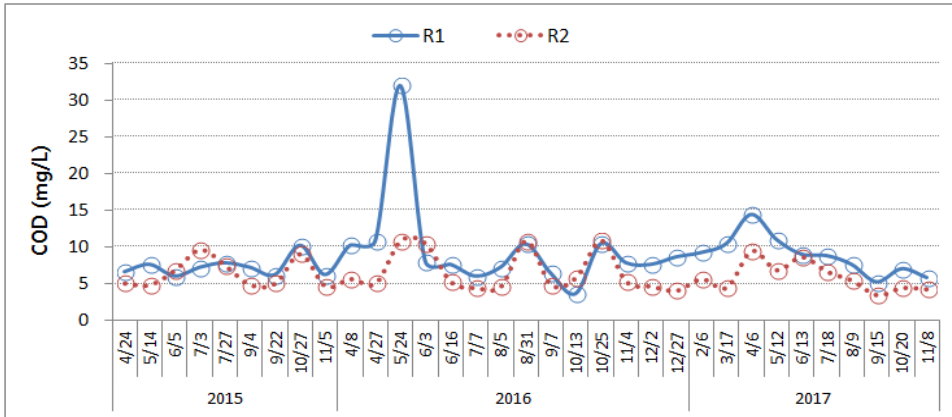
(b) SS



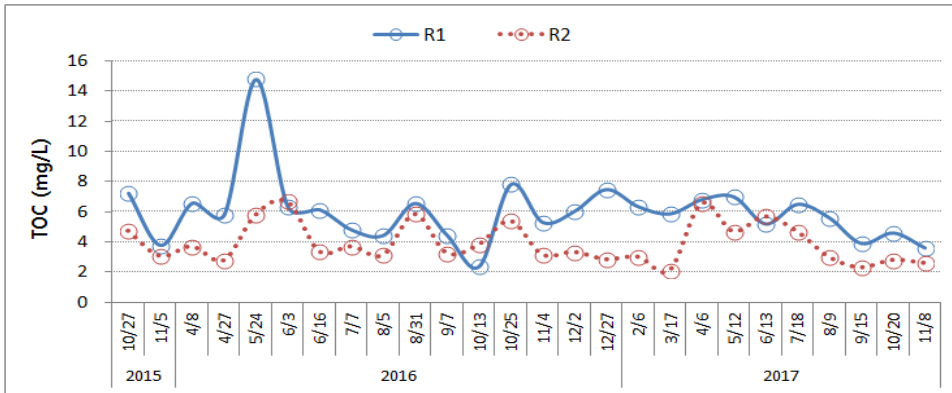
(c) Chl- a

<그림 4-11> 유입하천 수질현황(DO, SS, Chl-a)

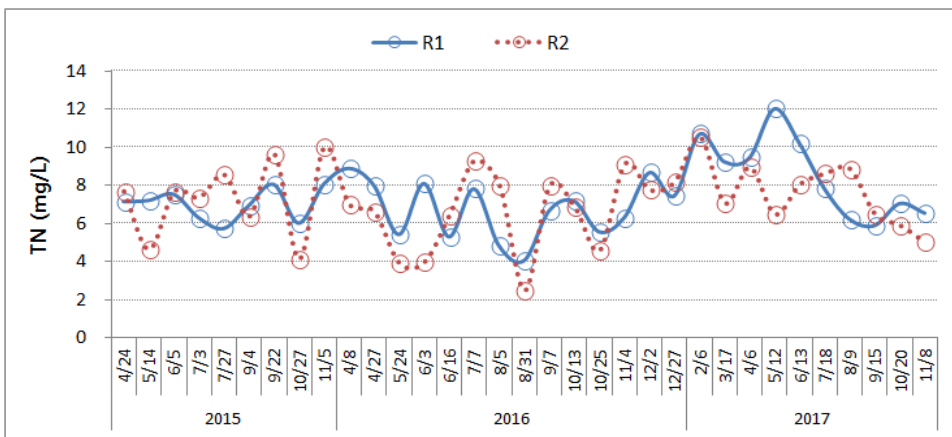
양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용(IV)



(a) COD

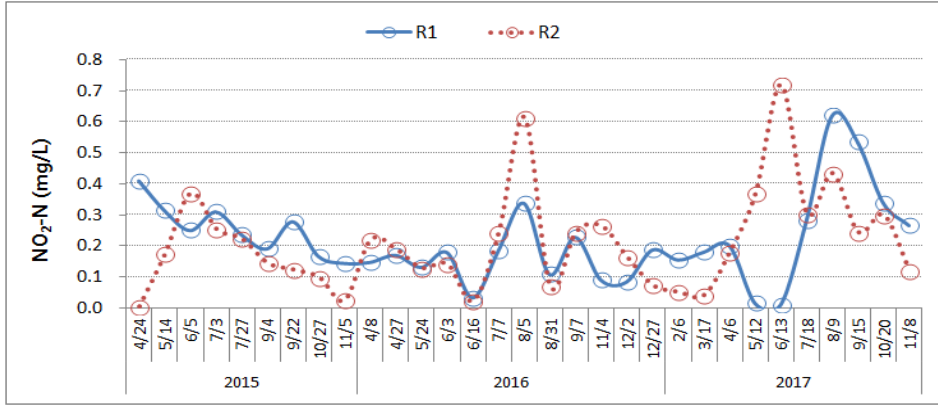


(b) TOC

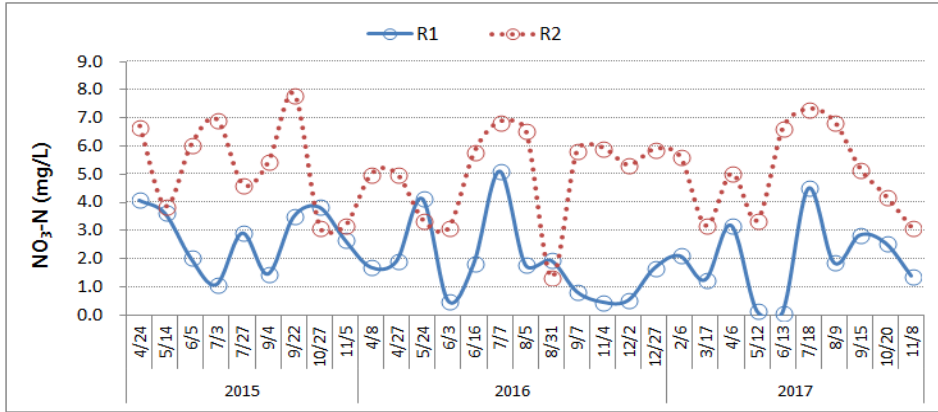


(c) TN

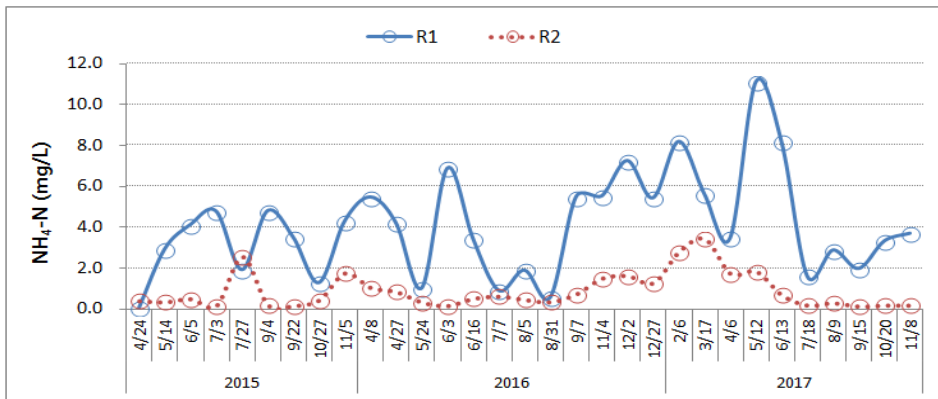
<그림 4-12> 유입하천 수질현황(COD, TOC, TN)



(a) NO<sub>2</sub>- N

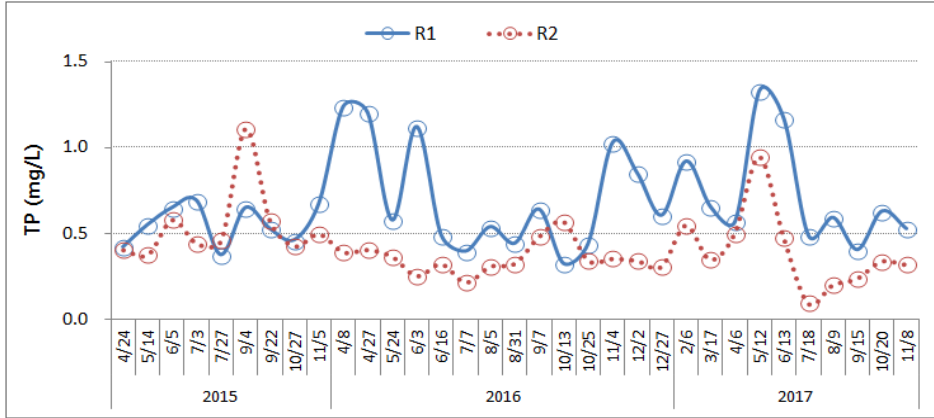


(b) NO<sub>3</sub>- N

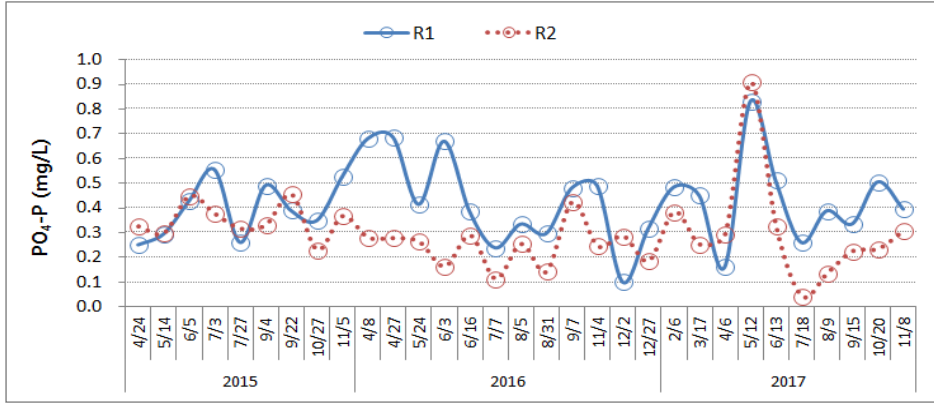


(c) NH<sub>4</sub>- N

<그림 4-13> 유입하천 수질현황(NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)



(a) TP



(b) PO<sub>4</sub>-P

<그림 4-14> 유입하천 수질 현황(TP, PO<sub>4</sub>-P)



## 2) 중금속 등 미량금속물질의 오염도

매화저수지 유입하천의 중금속 등 미량금속물질의 오염도를 조사한 결과는 (표 4-6)과 같다. Cu는 유입하천-1에서는 불검출~0.013 mg/L로 나타났고, 유입하천-2에서는 불검출~0.027 mg/L로 나타났다. 미국 환경청(USEPA)에 의해 발암물질 A등급으로 분류된 As는 유입하천-1, 유입하천-2 모두 모든 조사 시기에 불검출로 나타났고, 발암물질 B등급으로 분류된 Pb은 불검출~0.007 mg/L로 검출되어 현행 수질환경기준치인 0.05 mg/L 이하를 만족하였다. 발암물질 B등급으로 분류된 Cd도 불검출~0.003 mg/L로 검출되어 현행 수질환경기준치인 0.005 mg/L 이하를 만족하였다. Hg은 모두 불검출로 검출되었고, Cr<sup>6+</sup>는 2016년도에 유입하천-1에서 0.001 mg/L, 유입하천-2에서 0.002 mg/L로 미량으로 검출되었으나 2017년 조사에서는 모두 불검출로 나타났다. 이러한 결과는 유역에 소규모로 산재하고 있는 산업체에 의한 중금속 등의 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다.

(표 4-6) 유입하천의 중금속 등 미량금속물질 오염도 현황

연도	조사 지점	조사 일자	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)	Cr <sup>6+</sup> (mg/L)
2015	R1	4/24	0.003	N.D	N.D	-	N.D	-
		5/14	0.003	N.D	N.D	-	N.D	-
		6/5	N.D	N.D	0.003	-	N.D	-
		7/3	N.D	N.D	0.003	-	N.D	-
		7/27	N.D	N.D	0.003	-	N.D	-
	R2	4/24	0.004	N.D	N.D	-	N.D	-
		5/14	N.D	N.D	0.002	-	N.D	-
		6/5	N.D	N.D	0.002	-	N.D	-
		7/3	N.D	N.D	0.003	-	N.D	-
		7/27	0.003	N.D	N.D	-	N.D	-
2016년	R1	4/7	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		4/27	0.013	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D
		5/24	0.013	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		10/25	0.010	N.D	N.D	N.D	N.D	0.001
		12/2	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	R2	4/7	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		4/27	0.027	0.006	N.D	N.D	N.D	N.D
		5/24	0.025	0.007	N.D	N.D	N.D	N.D
		10/25	0.025	0.006	N.D	N.D	N.D	0.002
		12/2	0.002	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
2017년	R1	2/6	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	R2	2/6	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
수질환경기준			-	0.05 이하	0.005 이하	0.05 이하	불검출	불검출

### 3. 매화저수지의 수질오염도 평가

#### 가. 조사지점 및 조사방법

본 연구에서 개발된 수처리 기술의 현장적용실험을 위하여 매화저수지를 대상지구로 선정하였고, 매화저수지의 수질특성 및 수처리 설치에 의한 저수지 수질개선효과를 정량화하기 위하여 호 내 수질조사를 실시하였다. 매화저수지는 만수면적이 약 15ha이며, 두 개의 주요 유입하천이 각각 저수지의 양쪽 끝으로 유입되며, 저수지 모양이 다소 V자 모양을 하고 있기 때문에 호 내 위치에 따른 수질 차이를 나타낼 수 있어 접근이 용이한 3개 지점을 선정하여 각 지점별로 상층(표층), 하층(심층)으로 구분하여 수질조사를 실시하였다. 현장에서는 다항목 수질측정장비(YSD)를 이용하여 각 지점별로 수온, EC, DO, pH, ORP, 수심 등을 측정하였고, COD, SS, TN, TP, Chl-a 등 기타 항목에 대한 실내분석을 위하여 물을 폴리에틸렌 병에 채수하여 분석실로 운반하였으며, 수질오염공정시험기준(환경부, 2016)에 준하여 분석을 실시하였다.



<그림 4-15> 매화저수지 수층별 수질특성 조사지점



<그림 4-16> 매화저수지 수질조사 전경

## 나. 조사 위치에 따른 수질현황

매화저수지의 호 내 조사 위치별로 수질항목별 연평균 수질농도를 분석한 결과를 (표 4-7)에 나타내었다. 호 내에서 낚시 수상좌대가 설치되어 있는 지점(M1)과 유입하천-1이 들어오는 유입부 인근 지점(M2), 저수지 중간 지점에 해당하는 지점(M3)의 연평균 수질농도는 다음과 같다.

위치별 수온은 2016년에는 M1, M2, M3에서 각각 18.6℃, 18.9℃, 18.6℃를 나타내어 유입수가 들어오는 유입부 부근에서 다소 높은 수온을 나타내었고, 2017년도에는 M1, M2, M3에서 모두 18.5℃로 위치에 따른 수온의 차이가 없는 것으로 나타났다. 위치별 pH는 2016년에는 M1, M2, M3에서 각각 8.0, 8.2, 8.0으로 나타나 수온과 동일한 결과를 보였고, 2017년도에는 M1, M2에서는 8.5, M3에서는 8.6으로 나타났다. DO는 2016년도에는 M1, M2, M3에서 각각 7.7 mg/L, 8.0 mg/L, 7.3 mg/L으로 나타났고, 2017년도에는 M1, M2, M3에서 각각 9.4 mg/L, 8.6 mg/L, 8.6 mg/L으로 나타나 2016년에 비해 호소 내 DO 농도가 높아졌고, 생태융합형 접촉부도가 위치해 있는 인근 지점 M1에서 가장 높은 DO를 나타내었다.

유기물 지표인 COD는 2016년도에 M1, M2, M3에서 각각 13.9 mg/L, 13.7 mg/L, 13.5 mg/L으로 나타났고, 2017년도에는 M1, M2, M3 각각 15.6 mg/L, 15.4 mg/L, 14.7 mg/L로 나타나 호소 내 COD 농도가 2016년도에 비해 2017년도에 전반적으로 상승하였고, 수상좌대가 설치되어 있는 M1 지점에서 가장 높게 나타났다. TOC 농도는 2016년도에는 M1, M2, M3에서 각각 7.1 mg/L, 6.5 mg/L, 6.5 mg/L으로 나타났고, 2017년에는 M1, M2, M3에서 각각 7.5 mg/L, 7.3 mg/L, 6.9 mg/L로 나타나 COD와 동일한 경향성을 보였다. SS 농도는 2016년과 2017년도에 각 지점별로 M1에서 33.3 mg/L/37.8 mg/L, M2에서 30.7 mg/L/37.4 mg/L, M3에서 33.2 mg/L/41.0 mg/L으로 M1과 M2에 비해 M3에서 다소 높은 농도를 나타내었다. 이러한 원인은 M3의 위치가 저수지 물의 유출에 영향을 받지 않는 수역에 해당하는 지점이기 때문으로 판단된다.

영양염류인 TN은 2016년도에는 M1, M2, M3에서 각각 1.871 mg/L, 1.811 mg/L, 1.690 mg/L이었고, 2017년도에는 M1, M2, M3 각각 2.576 mg/L, 2.545 mg/L, 2.395 mg/L으로 나타나 2017년도에 농도가 전반적으로 상승하였고, M3에 비해 M1과 M2에서 다소 높게 나타났다. NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 농도는 M1에서 각각 0.134 mg/L, 1.039 mg/L, 0.213 mg/L으로 나타났고, M2에서는 0.137 mg/L, 1.004 mg/L, 0.202 mg/L, M3에서는 0.132 mg/L, 0.978 mg/L, 0.210 mg/L으로 나타나 모두 조사 위치에 따른 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

매화저수지 조사 위치에 따른 2017년 TP 및 PO<sub>4</sub>-P 농도는 M1, M2, M3 조사지점별로 각각 0.169 mg/L, 0.170 mg/L, 0.145 mg/L 및 0.027 mg/L, 0.021 mg/L, 0.019 mg/L으로 나타났다. 위의 결과를 종합해보면 SS 농도를 제외하고는 COD, TOC, TN, TP 등이 M3에 비해 M1과 M2에서 다소 높은 농도를 나타내고 있다. 이러한 원인은 M1과 M2 지점은 낚시를 위한 수상좌대와 인접해 있고, M2 지점은 유입수가 들어오는 유입부 지점으로 낚시인의 낚시활동 및 유입되는 오염물질에 의해 수질오염도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

(표 4-7) 매화저수지 조사 위치에 따른 연평균 수질농도

구 분		수온 (℃)	pH	EC ( $\mu$ s/cm)	DO (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	
2016	M1	상층	19.1	8.1	385.9	8.9	14.9	32.7	95.8
		하층	18.0	7.9	389.1	6.5	12.9	33.9	67.7
		평균	18.6	8.0	387.5	7.7	13.9	33.3	81.8
	M2	상층	19.6	8.3	375.5	9.0	14.5	30.4	90.3
		하층	18.2	8.1	427.0	7.0	12.8	31.0	64.9
		평균	18.9	8.2	401.3	8.0	13.7	30.7	77.6
	M3	상층	19.1	8.2	388.0	8.4	13.8	25.7	88.9
		하층	18.0	8.0	387.8	6.2	13.1	40.6	67.7
		평균	18.6	8.1	387.9	7.3	13.5	33.2	78.3
2017	M1	상층	19.4	8.6	450.9	10.2	18.9	37.1	163.0
		하층	17.5	8.3	456.7	8.5	12.2	38.5	87.6
		평균	18.5	8.5	453.8	9.4	15.6	37.8	125.3
	M2	상층	19.5	8.6	455.9	9.2	18.3	42.1	158.5
		하층	17.5	8.3	455.8	7.9	12.4	32.6	83.9
		평균	18.5	8.5	455.9	8.6	15.4	37.4	121.2
	M3	상층	19.6	8.7	450.7	10.0	17.0	45.4	130.8
		하층	17.4	8.4	454.9	7.2	12.3	36.6	84.5
		평균	18.5	8.6	452.8	8.6	14.7	41.0	107.7

(표 4-7) 매화저수지 조사 위치에 따른 연평균 수질농도(계속)

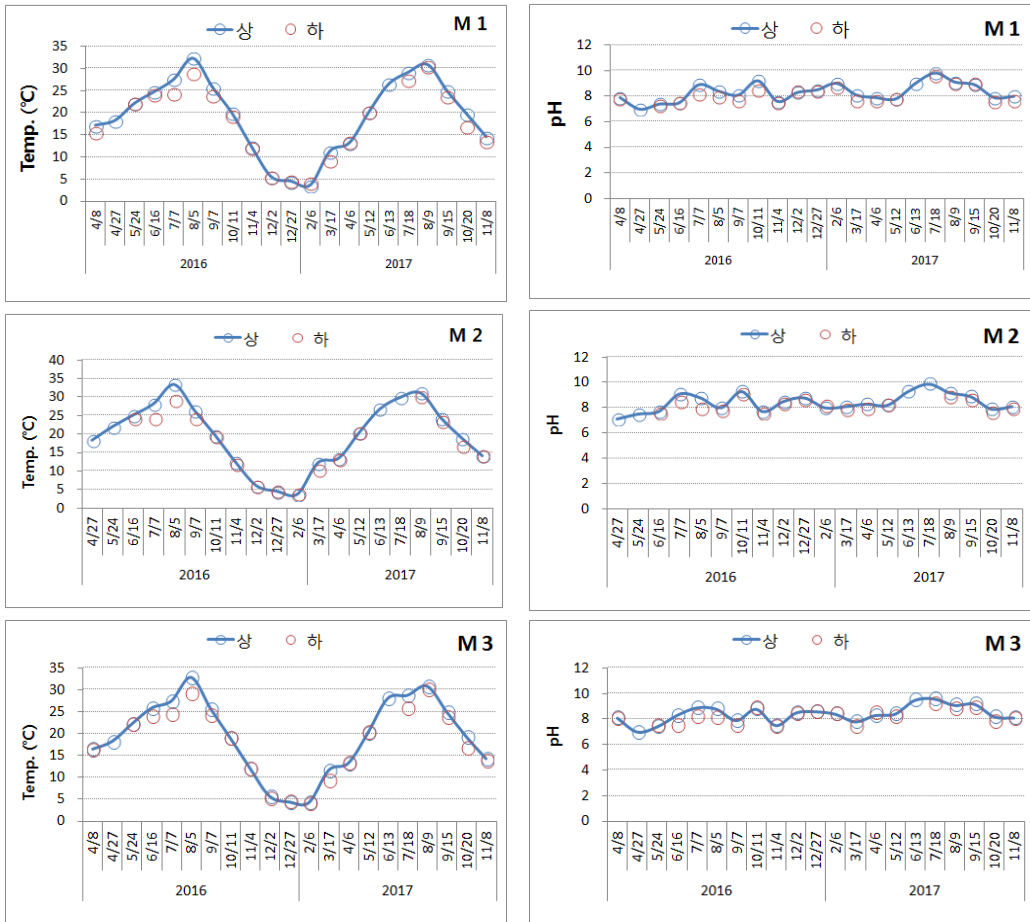
구 분			T-N (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	TOC (mg/L)
2016	M1	상층	1.852	0.038	0.695	0.313	0.121	0.013	7.6
		하층	1.889	0.042	0.657	0.368	0.125	0.017	6.5
		평균	1.871	0.040	0.676	0.341	0.123	0.015	7.1
	M2	상층	1.664	0.036	0.551	0.403	0.115	0.019	6.7
		하층	1.958	0.044	0.627	0.421	0.136	0.035	6.3
		평균	1.811	0.040	0.589	0.412	0.126	0.027	6.5
	M3	상층	1.607	0.034	0.501	0.292	0.107	0.006	6.8
		하층	1.773	0.039	0.568	0.344	0.127	0.020	6.2
		평균	1.690	0.037	0.535	0.318	0.117	0.013	6.5
2017	M1	상층	2.576	0.125	1.013	0.178	0.187	0.032	8.8
		하층	2.557	0.143	1.065	0.248	0.150	0.021	6.1
		평균	2.567	0.134	1.039	0.213	0.169	0.027	7.5
	M2	상층	2.530	0.126	0.967	0.198	0.192	0.022	8.3
		하층	2.560	0.148	1.041	0.306	0.147	0.019	6.3
		평균	2.545	0.137	1.004	0.252	0.170	0.021	7.3
	M3	상층	2.358	0.120	0.933	0.170	0.162	0.017	7.6
		하층	2.431	0.143	1.022	0.249	0.128	0.021	6.1
		평균	2.395	0.132	0.978	0.210	0.145	0.019	6.9

다. 조사지점별 수층에 따른 수질현황

1) 수온, pH

매화저수지의 조사지점별 표층수(그래프에서 “상”으로 표기)와 저층수(그래프에서 “하”로 표기)의 수질특성을 분석하기 위하여 호 내 조사지점별로 수질현황을 분석하였다. <그림 4-17>은 매화저수지의 조사지점별 표층수와 저층수의 수온과 pH에 대한 결과를 나타낸 그래프이다. 수온과 pH는 M1, M2, M3의 모든 지점에서 매우 유사한 경향을 보였으며, 2017년 조사기간 동안의 M1 지점의 표층수(평균 19.4℃, 3.6~31.0℃)와 저층수(평균 17.5℃, 4.0~30.3℃)의 평균 수온 차이는 1.9℃, 최대 3.9℃로 나타났다. 이러한 결과는 2015년도, 2016년도 조사결과와 거의 유사한 결과를 보여주었다. M2 지점에서의 표층수(평균 19.5℃, 3.7~31.1℃)와 저층수(평균 17.5℃, 3.9~30.0℃)의 평균 수온 차이는 2.0℃로 M1 지점과 거의 유사한 온도 차이를 나타내었다. M3 지점에서는 표층수(평균 19.6℃, 4.3~30.9℃), 저층수(평균 17.4℃, 4.0~30.0℃)의 평균 수온 차이가 2.2℃, 최대 3.8℃로 M1, M2 지점보다 다소 높은 수온차이가 발생하는 것으로 나타났다. M3 지점이 다른 지점에 비해 수온 차이가 다소 큰 이유는 수심이 M1, M2 보다 더 깊기 때문으로 판단된다. M1, M2, M3 지점 모두 7~9월 하절기에 다른 시기에 비해 수온 차이가 다소 크게 발생하고 있는데, 이러한 이유는 다른 호소와 마찬가지로 하절기 수온 성층에 의한 영향으로 판단된다.

매화저수지의 조사지점별 pH는 조사지점에 상관없이 표층수와 저층수에서 모두 유사한 경향으로 나타났다. 2017년도 조사 자료에 의하면 M1 지점의 표층수 pH는 평균 8.6(7.8~9.8)으로 나타났고, 저층수의 pH는 평균 8.3(7.6~9.6)으로 나타났으며, M2 지점에서는 표층수에서 평균 8.6(7.9~9.9), 저층수는 평균 8.3(7.7~9.1), M-3 지점에서는 표층수 pH가 평균 8.7(7.8~9.6), 저층수 pH는 평균 8.4(7.4~9.2)로 나타나 2015년 2016년에 비해 2017년도에는 모든 지점에서 전반적으로 상승한 것으로 나타났다. 표층과 저층의 평균 pH 차이는 M1, M2, M3의 모든 지점에서 0.3으로 나타났고, 표층수에 비해 저층수에서 0.3 정도가 낮은 것으로 나타났다. 특히 늦봄~하절기의 녹조가 발생하는 시기에는 상층과 하층의 pH 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 수온

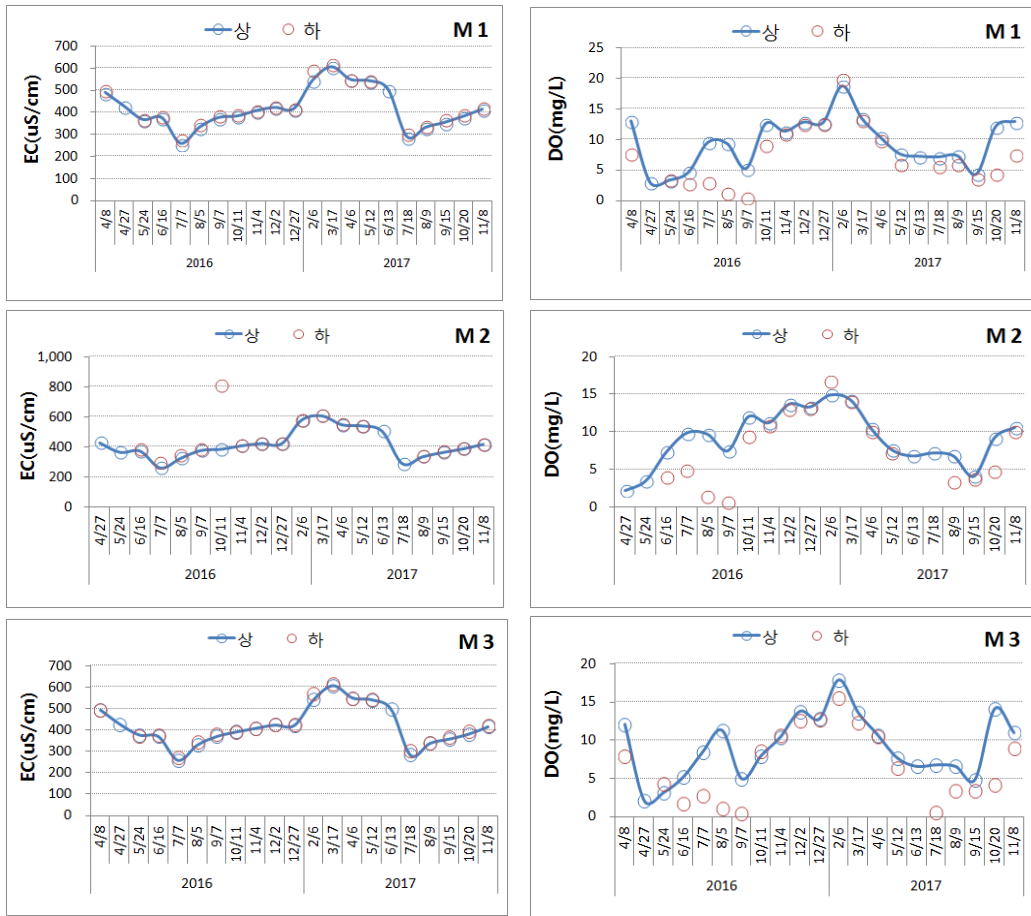
(b) pH

<그림 4-17> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(수온, pH)

2) EC, DO

매화저수지의 조사지점별 표층수와 저층수의 전기전도도(EC)와 용존산소(DO)에 대한 조사결과를 나타낸 그래프는 <그림 4-18>과 같다. 조사기간 동안 표층수와 저층수의 전기전도도는 M1, M2, M3 지점에서 모두 유사한 경향으로 나타났고, M1 지점의 표층수 EC는 평균  $450.9 \mu\text{s}/\text{cm}$ ( $289.0 \sim 605.0 \mu\text{s}/\text{cm}$ ), 저층수는 평균  $456.7 \mu\text{s}/\text{cm}$ ( $300.0 \sim 615.0 \mu\text{s}/\text{cm}$ )으로 표층수와 저층수에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. M1 지점에서의 2016년도 조사결과인 표층수 EC  $258.0 \sim 489.0 \mu\text{s}/\text{cm}$ (평균  $385.9 \mu\text{s}/\text{cm}$ ), 저층수 EC  $276.0 \sim 499.0 \mu\text{s}/\text{cm}$ (평균  $389.1 \mu\text{s}/\text{cm}$ )와 비교해보면, 2017년도 평균값과 최대값이 다소 증가한

것으로 나타났다. M2 지점에서의 표층수의 평균 EC는 455.9  $\mu\text{s}/\text{cm}$ (288.0~605.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), 저층수 EC 305.0~611.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ (평균 455.8  $\mu\text{s}/\text{cm}$ )으로 표층수와 저층수간에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. M3 지점에서 표층수의 평균 EC는 450.7  $\mu\text{s}/\text{cm}$ (283.0~606.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ )으로 나타났고, 저층수의 평균 EC는 454.9  $\mu\text{s}/\text{cm}$ (302.0~615.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ )으로 나타나 표층수와 저층수간에 차이가 거의 없었으며, 이러한 경향은 M1, M2 결과와 동일하였다.



(a) EC

(b) DO

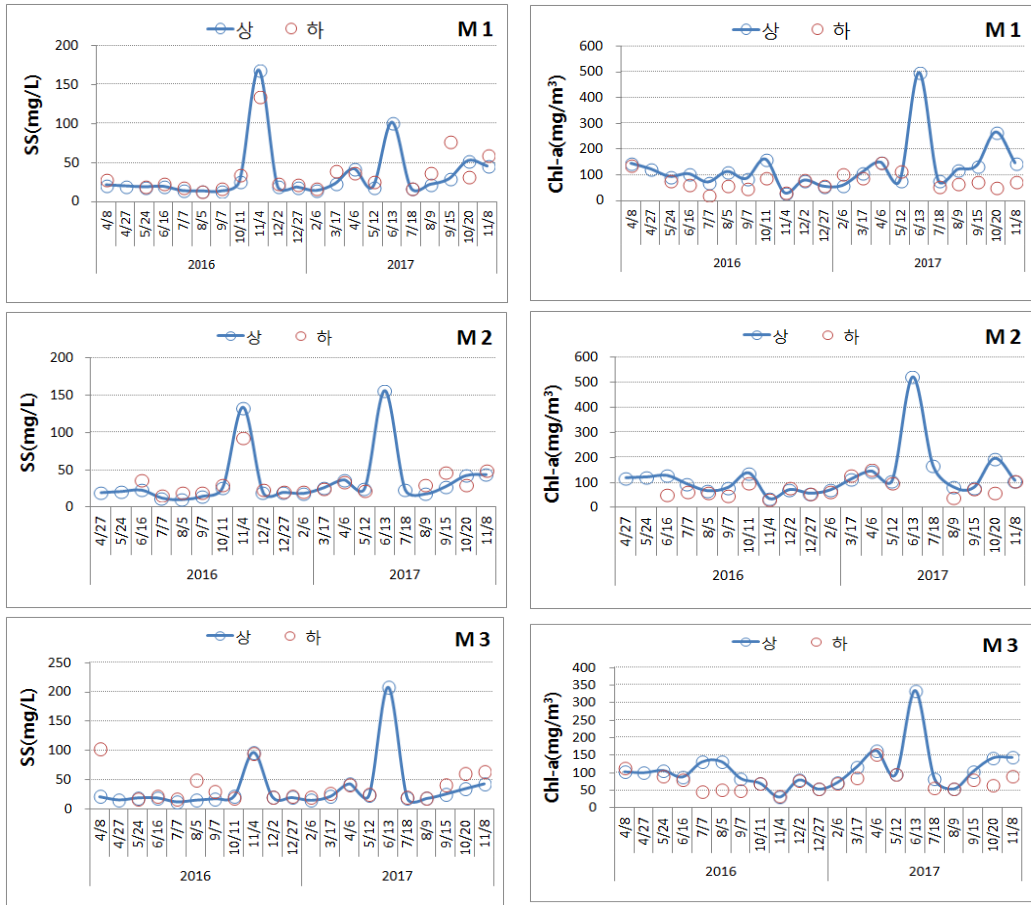
<그림 4-18> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(EC, DO)



## 3) SS, Chl-a

매화저수지의 조사지점별 표층수와 저층수의 부유물질(SS) 및 클로로필(Chl-a)에 대한 조사결과를 나타낸 그래프는 <그림 4-19>와 같다. 조사기간 동안의 SS 농도는 M1, M2, M3 모든 지점에서 유사한 유형을 나타내었다. 지점별 SS의 평균 농도는 M1의 표층수는 37.1 mg/L, 저층수는 38.5 mg/L, M2 지점의 표층수는 42.1 mg/L, 저층수 32.6 mg/L, M3 지점의 표층수는 45.4 mg/L, 저층수는 36.6 mg/L으로 나타나 M1 지점에서는 표층과 저층에서 유사한 농도를 나타내었고, M2와 M3 지점에서는 저층수에 비해 표층수에서 약 10 mg/L의 정도 더 높은 농도로 나타났다. 특히 장마 시기인 5월~7월에는 표층수의 SS 농도가 저층수에 비해 많이 증가하는 것으로 나타났다.

조사지점별 식물성플랑크톤의 지표인 Chl-a 농도는 M1 지점의 표층수에서는 57.3~496.8 mg/m<sup>3</sup>(평균 163.0 mg/m<sup>3</sup>)으로 나타났고, 저층수에서는 53.2~148.1 mg/m<sup>3</sup>(평균 87.6 mg/m<sup>3</sup>)으로 저층수에 비해 표층수에서 높은 농도를 나타내었다. M2 지점에서는 표층수 69.9~521.4 mg/m<sup>3</sup>(평균 158.5 mg/m<sup>3</sup>), 저층수 28.4~150.5 mg/m<sup>3</sup>(평균 83.9 mg/m<sup>3</sup>)로 나타났고, M3 지점에서는 표층수 53.8~333.6 mg/m<sup>3</sup>(평균 130.8 mg/m<sup>3</sup>), 저층수 55.1~153.9 mg/m<sup>3</sup>(평균 84.5 mg/m<sup>3</sup>)으로 저층수에 비해 표층수에서 높은 농도를 나타내었다. 조사지점 M1, M2, M3 모두 조사 시기별로 농도변화가 유사한 경향을 보였으며, 2017년도 6월에 다른 시기에 비해 3~5배 이상의 높은 농도를 나타내고 있는데, 이 시기에는 극심한 가뭄과 농업용수 공급으로 저수율이 20% 미만으로 감소하여 저수량이 거의 없는 상태에서 수질 조사가 이루어졌기 때문으로 판단된다.



(a) SS

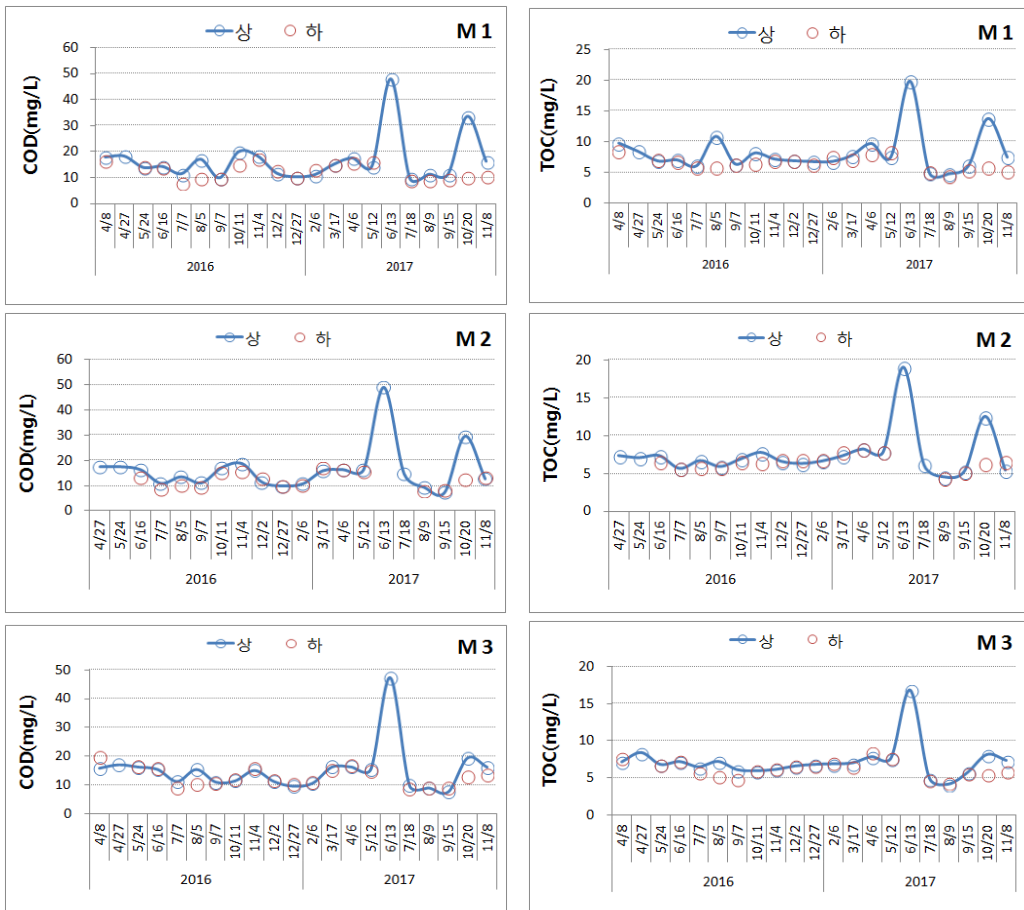
(b) Chl-a

<그림 4-19> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(SS, Chl-a)

4) COD, TOC

매화저수지의 조사지점별 표층수와 저층수의 유기물 오염지표인 COD와 TOC에 대한 조사결과를 <그림 4-20>에 나타내었다. 조사지점별 COD 농도는 M1의 표층수에서 9.8~48.1 mg/L(평균 18.9 mg/L), 저층수에서 9.0~16.4 mg/L(평균 12.2 mg/L)로 나타났고, M2에서는 표층수는 7.4~49.1 mg/L(평균 18.3 mg/L), 저층수는 8.0~17.2 mg/L(평균 12.4 mg/L)이고, M3 지점에서는 표층수 7.8~47.3 mg/L(평균 17.0 mg/L), 저층수에서 8.6~16.8 mg/L(평균 12.3 mg/L)으로 나타나 모든 지점에서 저층수에 비해 표층수에서 5~6.0 mg/L 정도 더 높은 농도를 나타내었다. 표층수의 COD 농도는 M1, M2에 비해 M3에서 다소 낮았으나 저층수는 조사지점에 따른 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

조사기간 동안의 지점별 TOC 농도는 위치에 따른 차이는 거의 없었으며, 모든 지점에서 표층수가 저층수에 비해 약간 높은 농도를 보였다. M1 지점의 표층수에서 4.7~19.8 mg/L(평균 8.8 mg/L), 저층수에서 4.3~8.1 mg/L(평균 6.1 mg/L)으로 표층수와 저층수의 농도 차이가 약 2.7 mg/L 차이를 나타내었다. M2 지점의 표층수는 4.5~19.0 mg/L(평균 8.3 mg/L)이고, 저층수는 4.3~8.1 mg/L(평균 6.3 mg/L)으로 나타났고, M3 지점에서는 표층수에서 4.1~16.8 mg/L(평균 7.6 mg/L), 저층수에서 4.3~8.3 mg/L(평균 6.1 mg/L)으로 나타나 표층수가 저층수에 비해 1.5~2.0 mg/L 정도 더 높게 나타났다.



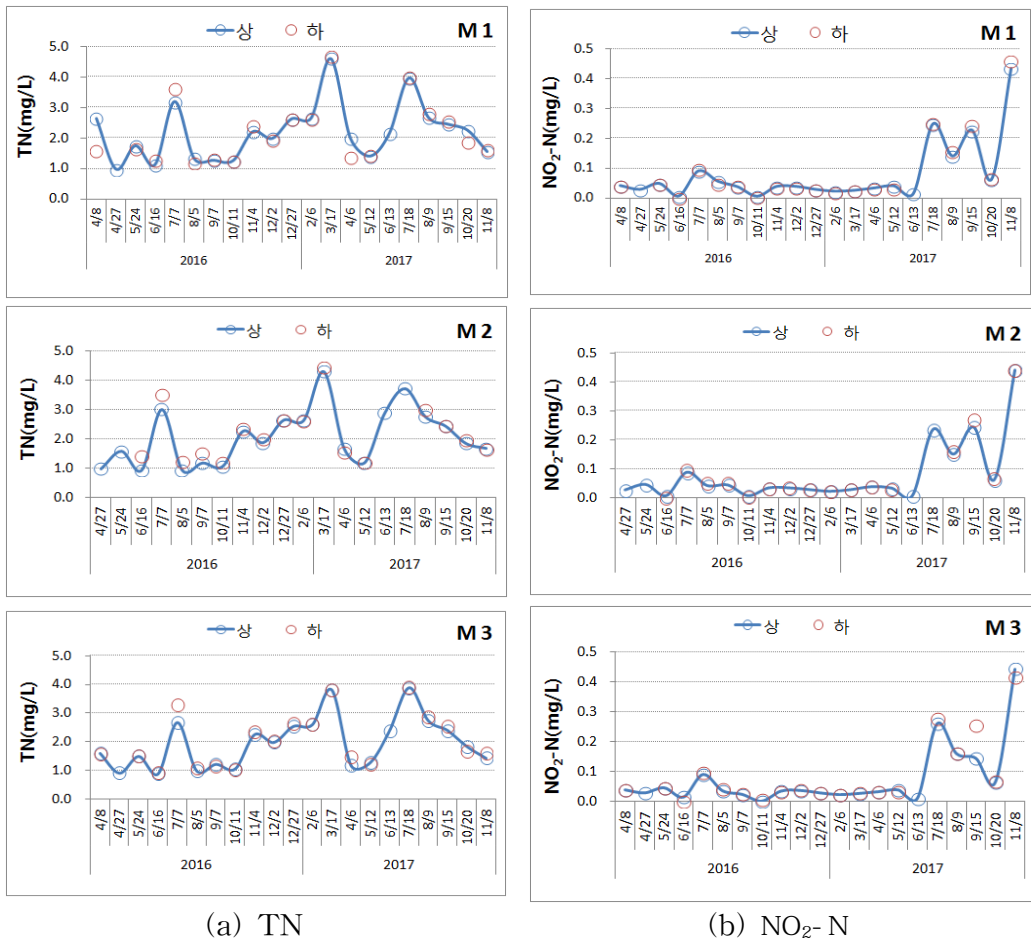
(a) COD

(b) TOC

<그림 4-20> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(COD, TOC)

5) TN, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N

매화저수지의 조사 지점별 표층수와 저층수의 TN 및 NO<sub>2</sub>-N에 대한 조사결과를 나타낸 그래프는 <그림 4-21>과 같다. 2017년 TN 농도는 M1, M2, M3 위치에 상관없이 모두 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. 각 조사 지점별 TN 농도는 M1 지점의 표층수에서 1.403~4.615 mg/L(평균 2.576 mg/L), 저층수에서 1.371~4.679 mg/L(평균 2.557 mg/L)으로 나타났고, M2 지점의 표층수는 1.204~4.314 mg/L(평균 2.530 mg/L), 저층수에서 1.223~4.458 mg/L(평균 2.560 mg/L)으로 나타났다. M3 지점에서는 표층수 1.188~3.876 mg/L(평균 2.358 mg/L), 저층수에서 1.224~3.917 mg/L(평균 2.431 mg/L)로 표층수와 저층수에서 거의 비슷한 농도를 나타내었다.



(a) TN

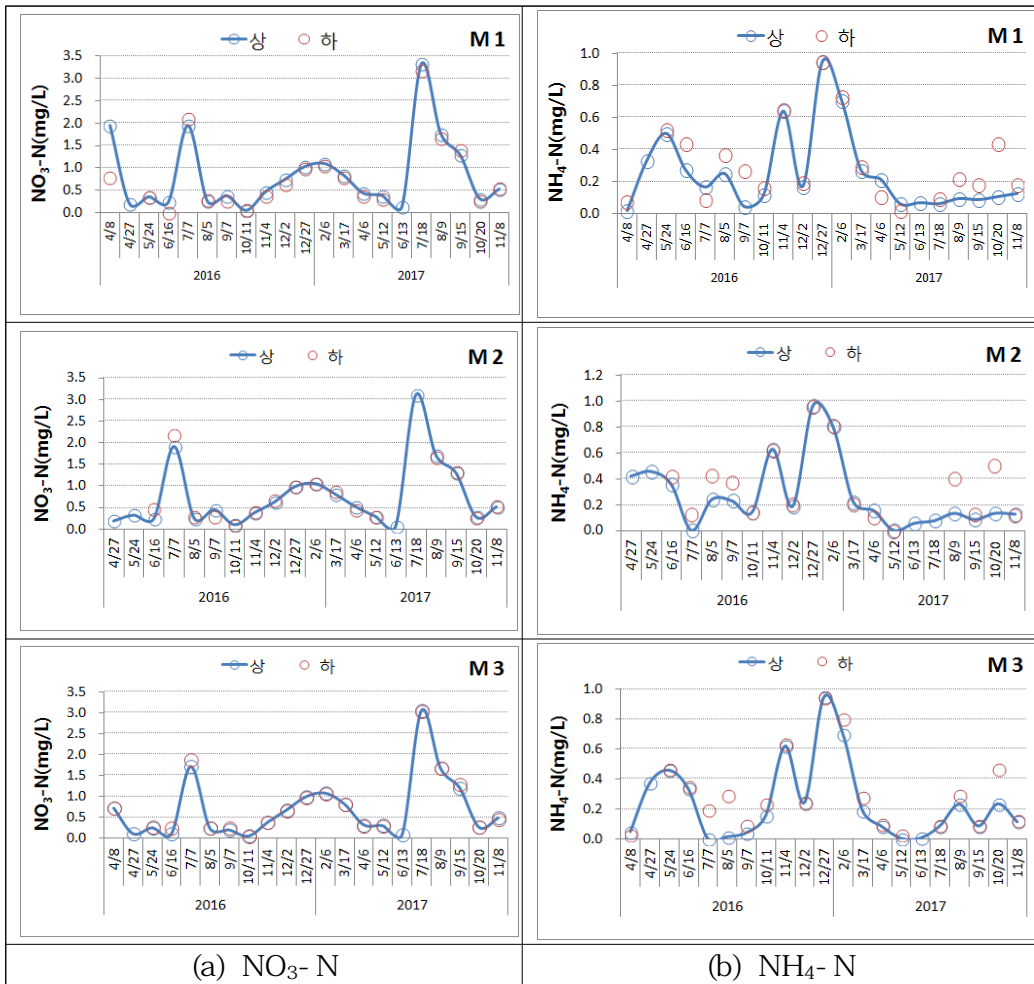
(b) NO<sub>2</sub>-N

<그림 4-21> 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(TN, NO<sub>2</sub>-N)

매화저수지의  $\text{NO}_2\text{-N}$  농도는 M1, M2, M3 위치에 상관없이 모두 유사한 경향을 나타내었다. 각 조사 위치별  $\text{NO}_2\text{-N}$  농도는 M1 지점의 표층수에서 0.014~0.434 mg/L(평균 0.125 mg/L), 저층수에서 0.021~0.460 mg/L(평균 0.143 mg/L)로 나타났고, M2 지점에서는 표층수에서 0.007~0.442 mg/L(평균 0.126 mg/L), 저층수에서 0.022~0.442 mg/L(평균 0.148 mg/L), M3 지점에서는 표층수에서 0.010~0.444 mg/L(평균 0.120 mg/L), 저층수에서 0.023~0.415 mg/L(평균 0.143 mg/L)으로 모든 조사 위치에서 비슷한 농도를 보였으며, 표층수에 비해 저층수에서 다소 높은 농도를 나타내었다.

매화저수지의 조사지점별 표층수와 저층수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  및  $\text{NH}_4\text{-N}$ 에 대한 조사결과를 나타낸 그래프는 <그림 4-22>과 같다. 조사지점별  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 M1, M2, M3의 조사 위치에 상관없이 모두 유사한 경향을 나타내고 있다. 각 조사 지점별  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 M1 지점의 표층수에서 0.132~3.328 mg/L(평균 1.013 mg/L), 저층수에서 0.266~3.174 mg/L(평균 1.065 mg/L)로 나타났고, M2 지점에서는 표층수에서 0.067~3.098 mg/L(평균 0.967 mg/L), 저층수에서 0.255~3.014 mg/L(평균 1.041 mg/L), M3 지점에서는 표층수에서 0.088~3.056 mg/L(평균 0.933 mg/L), 저층수에서 0.263~3.034 mg/L(평균 1.022 mg/L)로 수층에 따른 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

매화저수지의 조사지점별  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도는 M1, M2, M3 위치에 따라 매우 유사한 특성을 나타내고 있다. M1 지점에서는 7~11월에는 저층수에서 표층수보다 더 높은 농도를 나타내고 있으며, 표층수에서는 0.059~0.706 mg/L(평균 0.178 mg/L), 저층수에서 0.016~0.725 mg/L(평균 0.248 mg/L)로 저층수에서 표층수보다 평균 0.077 mg/L 정도 더 높은 농도를 나타내고 있다. 이러한 결과는 2016년도 조사결과와 일치하는 경향을 보여주었다. M2 지점에서는 표층수에서 0.055~0.800 mg/L(평균 0.198 mg/L), 저층수에서 0.104~0.816 mg/L(평균 0.306 mg/L)으로 저층수에서 표층수보다 평균 0.108 mg/L, 최대 0.188 mg/L까지 더 높은 농도로 나타났다. M3 지점에서는 표층수에서 0.000~0.696 mg/L(평균 0.170 mg/L), 저층수에서 0.026~0.800 mg/L(평균 0.249 mg/L)으로 저층수에서 표층수보다 평균 0.079 mg/L 높았고, 8월에는 최대 0.275 mg/L까지 더 높게 나타났다. 이러한 원인은 수질오염도가 높은 시기인 6~8월에 저수지 바닥 층의 DO 결핍으로 인한 혐기성상태에서의 오염물질 환원반응으로 질산성 이온이 암모니아성 이온으로 환원되었기 때문으로 판단된다.

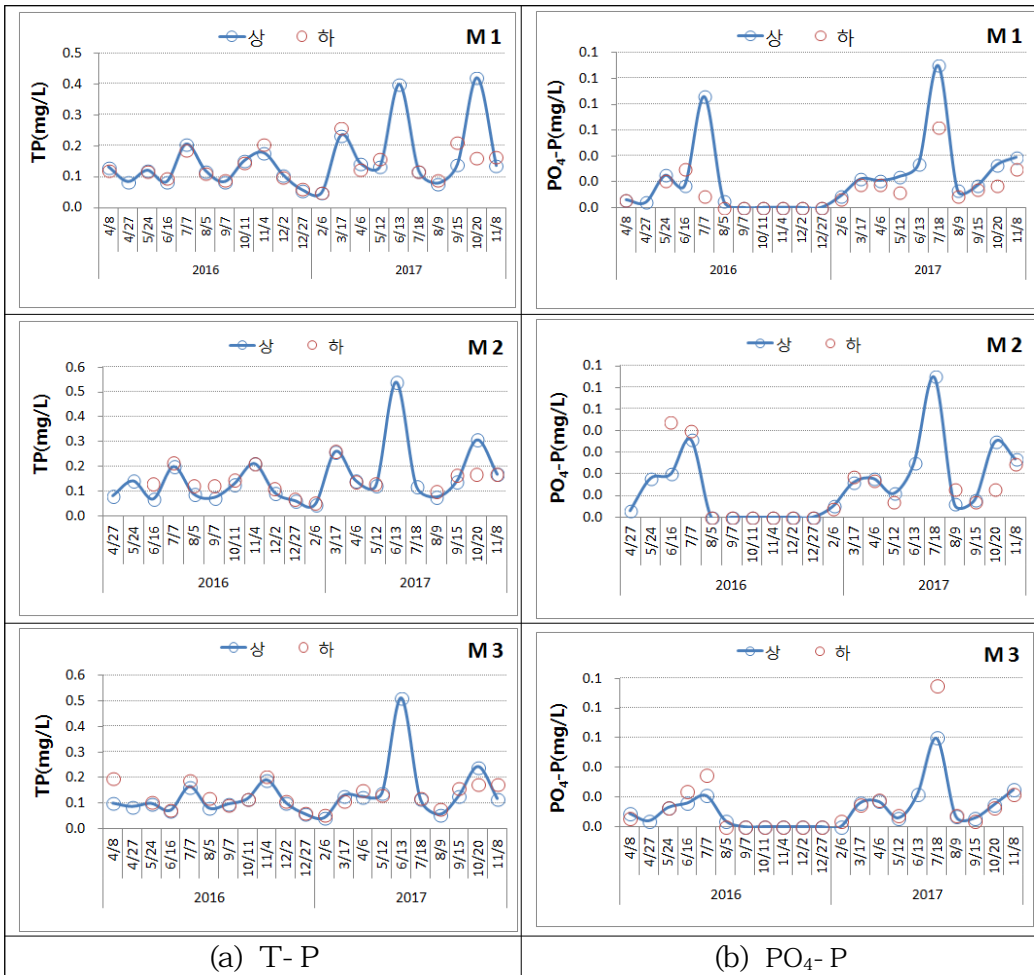


<그림 4-22> 매화저수지 위치별 수층에 따른 수질현황(NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N)

6) TP, PO<sub>4</sub>-P

매화저수지의 조사지점별 표층수와 저층수의 TP 및 PO<sub>4</sub>-P에 대한 조사 결과를 나타낸 그래프는 <그림 4-23>와 같다. 매화저수지의 조사시기별 TP 농도는 M1, M2, M3 지점에서 유사한 경향성을 보였고, M1, M2 지점에서는 표층수에서 저층수에 비해 높은 농도를 나타냈고, M3 지점에서는 저층수에서 표층수보다 다소 높은 농도를 나타나고 있다. M1 지점의 평균 TP 농도는 표층수에서 0.187 mg/L, 저층수에서 0.150 mg/L, M2 지점에서는 표층수에서 0.192 mg/L, 저층수 0.147 mg/L로 나타났다. M3 지점에서는 표층수에서 평균 0.162 mg/L(0.044~0.512 mg/L), 저층수에서 0.128 mg/L으로 나타났다.

매화저수지의 조사지점별 조사 시기에 따른  $PO_4\text{-P}$  농도도 TP와 동일하게 M1, M2, M3 지점에서 유사한 경향성으로 나타났다. 각 조사지점별  $PO_4\text{-P}$  농도는 M1 지점의 표층수에서 평균 0.032 mg/L(0.009~0.110 mg/L, 저층수에서는 0.021 mg/L(0.007~0.062 mg/L)로 나타났다. M2 지점의 표층수에서는 0.005~0.065 mg/L, 저층수는 0.004~0.064 mg/L로 표층과 저층간에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. M3 지점의 표층수에서는 불검출~0.060 mg/L(평균 0.017mg/L), 저층수에서는 0.004~0.095 mg/L(평균 0.021 mg/L)로 나타났다.



<그림 4-23> 매화저수지 위치별 수층에 따른 수질현황(TP,  $PO_4\text{-P}$ )

(표 4-8) 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황

구 분		수온 (°C)	pH	EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	DO (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	
2016	M1 (상)	최대값	32.4	9.2	489.0	13.1	20.1	168.7	160.1
		최소값	4.5	7.0	258.0	3.0	10.0	14.0	29.3
		평균	19.1	8.1	385.9	8.9	14.9	32.7	95.8
	M1 (하)	최대값	28.8	8.5	499.0	12.6	17.3	134.7	137.7
		최소값	4.5	7.3	276.0	0.6	8.2	13.3	22.4
		평균	18.0	7.9	389.1	6.5	12.9	33.9	67.7
	M2 (상)	최대값	33.4	9.3	426.0	13.7	18.9	133.8	137.3
		최소값	4.5	7.1	260.0	2.2	10.0	10.7	34.7
		평균	19.6	8.3	375.5	9.0	14.5	30.4	90.3
	M2 (하)	최대값	29.1	9.1	806.0	13.2	16.8	92.6	99.4
		최소값	4.5	7.4	294.0	0.6	9.0	16.0	32.0
		평균	18.2	8.1	427.0	7.0	12.8	31.0	64.9
	M3 (상)	최대값	32.9	8.9	493.0	13.8	17.2	96.9	131.8
		최소값	4.4	7.0	259.0	2.1	9.8	12.7	31.0
		평균	19.1	8.2	388.0	8.4	13.8	25.7	88.9
M3 (하)	최대값	29.1	8.9	492.0	12.7	19.6	104.0	114.5	
	최소값	4.4	7.4	272.0	0.4	9.0	17.7	36.0	
	평균	18.0	8.0	387.8	6.2	13.1	40.6	67.7	
2017	M1 (상)	최대값	31.0	9.8	605.0	18.8	48.1	102.0	496.8
		최소값	3.6	7.8	289.0	4.4	9.8	14.7	57.3
		평균	19.4	8.6	450.9	10.2	18.9	37.1	163.0
	M1 (하)	최대값	30.3	9.6	615.0	19.9	16.4	77.4	148.1
		최소값	4.0	7.6	300.0	3.7	9.0	17.0	53.2
		평균	17.5	8.3	456.7	8.5	12.2	38.5	87.6
	M2 (상)	최대값	31.1	9.9	605.0	14.9	49.1	156.0	521.4
		최소값	3.7	7.9	288.0	4.1	7.4	18.2	69.9
		평균	19.5	8.6	455.9	9.2	18.3	42.1	158.5
	M2 (하)	최대값	30.0	9.1	611.0	16.7	17.2	50.0	150.5
		최소값	3.9	7.7	305.0	1.3	8.0	21.0	28.4
		평균	17.5	8.3	455.8	7.9	12.4	32.6	83.9
	M3 (상)	최대값	30.9	9.6	606.0	17.9	47.3	208.0	333.6
		최소값	4.3	7.8	283.0	4.9	7.8	15.3	53.8
		평균	19.6	8.7	450.7	10.0	17.0	45.4	130.8
M3 (하)	최대값	30.0	9.2	615.0	15.5	16.8	66.0	153.9	
	최소값	4.0	7.4	302.0	0.5	8.6	20.4	55.1	
	평균	17.4	8.4	454.9	7.2	12.3	36.6	84.5	



(표 4-8) 매화저수지 조사지점별 수층에 따른 수질현황(계속)

구 분		T-N (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	TOC (mg/L)	
2016	M1 (상)	최대값	3.201	0.090	1.954	0.947	0.207	0.086	10.8
		최소값	0.978	0.005	0.051	0.016	0.058	0.000	6.0
		평균	1.852	0.038	0.695	0.313	0.121	0.013	7.6
	M1 (하)	최대값	3.626	0.097	2.104	0.946	0.206	0.030	8.3
		최소값	1.199	0.005	0.064	0.070	0.064	0.006	5.6
		평균	1.889	0.042	0.657	0.368	0.125	0.017	6.5
	M2 (상)	최대값	3.025	0.088	1.913	0.965	0.211	0.036	7.7
		최소값	0.949	0.007	0.107	0.142	0.061	0.003	5.6
		평균	1.664	0.036	0.551	0.403	0.115	0.019	6.7
	M2 (하)	최대값	3.545	0.098	2.159	0.961	0.212	0.044	6.7
		최소값	1.229	0.005	0.073	0.129	0.066	0.020	5.6
		평균	1.958	0.044	0.627	0.421	0.136	0.035	6.3
	M3 (상)	최대값	2.676	0.090	1.723	0.945	0.192	0.021	8.4
		최소값	0.895	0.000	0.058	0.000	0.059	0.000	5.9
		평균	1.607	0.034	0.501	0.292	0.107	0.006	6.8
	M3 (하)	최대값	3.291	0.095	1.880	0.939	0.204	0.035	7.6
		최소값	0.956	0.005	0.053	0.024	0.061	0.006	4.7
		평균	1.773	0.039	0.568	0.344	0.127	0.020	6.2
2017	M1 (상)	최대값	4.615	0.434	3.328	0.706	0.422	0.110	19.8
		최소값	1.403	0.014	0.132	0.059	0.050	0.009	4.7
		평균	2.576	0.125	1.013	0.178	0.187	0.032	8.8
	M1 (하)	최대값	4.679	0.460	3.174	0.725	0.259	0.062	8.1
		최소값	1.371	0.021	0.266	0.016	0.052	0.007	4.3
		평균	2.557	0.143	1.065	0.248	0.150	0.021	6.1
	M2 (상)	최대값	4.314	0.442	3.098	0.800	0.541	0.065	19.0
		최소값	1.204	0.007	0.067	0.055	0.046	0.005	4.5
		평균	2.530	0.126	0.967	0.198	0.192	0.022	8.3
	M2 (하)	최대값	4.458	0.442	3.014	0.816	0.260	0.064	8.1
		최소값	1.223	0.022	0.255	0.104	0.051	0.004	4.3
		평균	2.560	0.148	1.041	0.306	0.147	0.019	6.3
	M3 (상)	최대값	3.876	0.444	3.056	0.696	0.512	0.060	16.8
		최소값	1.188	0.010	0.088	0.000	0.044	0.000	4.1
		평균	2.358	0.120	0.933	0.170	0.162	0.017	7.6
	M3 (하)	최대값	3.917	0.415	3.034	0.800	0.175	0.095	8.3
		최소값	1.224	0.023	0.263	0.026	0.054	0.004	4.3
		평균	2.431	0.143	1.022	0.249	0.128	0.021	6.1

라. 매화저수지의 중금속 등

매화저수지의 표층수 및 저층수에 대한 중금속 등 미량금속물질의 오염도를 조사하여 분석한 결과는 (표 4-9)와 같다. Cl<sup>-</sup> 농도는 표층수에서 67.1~67.6 mg/L, 저층수에서 66.4~67.5 mg/L로 조사 지점과 수층에 상관없이 유사한 농도를 보이고 있고, Cu는 모든 지점에서 불검출~0.003 mg/L로 아주 미량이 검출되었으며, 지점 및 수층에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다. 그 밖의 Pb, Cd, As, Hg, Cr<sup>6+</sup>는 모든 지점에서 모두 불검출로 나타나 현행 환경법의 호소 수질환경기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다. As는 미국 환경청(US EPA)에서 발암물질 A 등급으로, Cd 및 Pb는 발암물질 B등급으로 분류되어 있는 물질이다(US EPA, 1999). 매화저수지의 호소 수는 중금속 등의 독성물질에 의한 오염은 없는 것으로 나타났다.

(표 4-9) 매화저수지의 중금속 등 오염현황

구분	조사 일자	조사 지점	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)	Cr <sup>6+</sup> (mg/L)
표층수	'16.4.8	M1	67.1	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		M3	67.6	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	'16.5.24	M1	-	0.002	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		M2	-	0.002	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		M3	-	0.002	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	'17.2.6	M1	-	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
저층수	'16.4.8	M1	67.5	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		M3	66.4	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	'16.4.8	M1	-	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		M2	-	0.003	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		M3	-	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	'17.2.6	M1	-	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
수질환경기준					0.05 이하	0.005 이하	0.05 이하	불검출	불검출

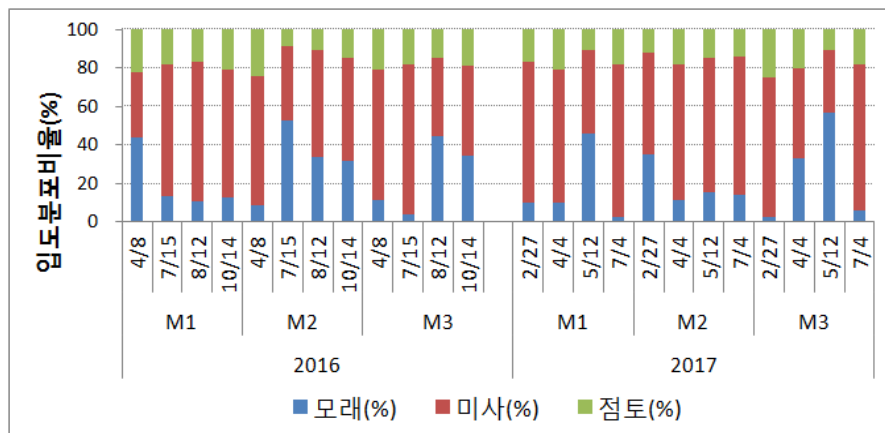
비고) N.D : Not Detected

#### 4. 매화저수지의 퇴적물 오염도 및 용출량 평가

가. 매화저수지 퇴적물 오염도

##### 1) 입도분석 결과

매화저수지의 조사지점별 퇴적물을 입경크기에 따라 모래, 미사, 점토로 분류하여 입경크기 분류법에 따른 토성 및 입도분포비율을 (표 4-10) 및 <그림 4-24>에 나타내었다. M1 지점은 생태융합형 점축산화시스템 설치와 인접한 지역으로 4월 조사에서는 모래, 미사, 점토가 고른 분포를 보이고 있는 반면에 시간이 지남에 따라 모래와 점토 비율은 줄어들고 미사 분포비율이 증가하는 것으로 나타났다. M2 지점은 유입하천-1이 유입되는 유입부의 인근 지역으로 M1 지점과는 다른 경향으로 4월 조사에서는 모래 분포비율은 매우 적고 미사가 67% 정도를 차지하고 있었는데, 7월 조사에서는 미사와 점토의 비율이 줄어들고 모래의 비율이 높게 증가하는 경향을 보였다. M3 지점은 제방과 정 반대편에 위치하고 있는 지역으로 4월과 7월에는 모래보다는 미사와 점토가 대부분을 차지하다가 8월 이후부터는 모래와 미사가 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 하절기 폭우와 함께 상류지역의 토사가 많이 유입되었기 때문으로 판단되며, 강우기 토사의 유입은 농업용 저수지 수질오염의 가장 중요한 원인이 되고 있다. 따라서 비점오염물질 처리를 위한 유입수 대책은 반드시 필요하다고 판단된다.



<그림 4-24> 조사지점별 입도분포 비율

(표 4-10) 조사지점별 입도분포 및 토성

연도	조사지점	조사일자	모래 (%)	미사 (%)	점토 (%)	토성
2016년	M1	4/8	44.0	34.0	22.0	L
		7/15	13.1	68.9	18.0	SiL
		8/12	10.6	72.4	17.0	SiL
		10/14	12.7	66.3	21.0	SiL
	M2	4/8	8.5	67.5	24.0	SiL
		7/15	52.6	38.4	9.0	SL
		8/12	34.0	55.0	11.0	SiL
		10/14	31.4	53.6	15.0	SiL
	M3	4/8	11.3	67.7	21.0	SiL
		7/15	4.1	77.9	18.0	SiL
		8/12	44.2	40.8	15.0	L
		10/14	34.4	46.6	19.0	L
2017년	M1	2/27	10.1	72.9	17.0	SiL
		4/4	9.8	69.2	21.0	SiL
		5/12	46.0	43.0	11.0	L
		7/4	2.3	79.7	18.0	SiL
	M2	2/27	35.1	52.9	12.0	SiL
		4/4	11.5	70.5	18.0	SiL
		5/12	15.1	69.9	15.0	SiL
		7/4	13.8	72.2	14.0	SiL
	M3	2/27	2.7	72.3	25.0	SiL
		4/4	33.0	47.0	20.0	L
		5/12	56.8	32.2	11.0	SL
		7/4	6.0	76.0	18.0	SiL

2) 유기물, 강열감량, 총질소, 총인 조사결과

매화저수지 퇴적물의 유기물, 강열감량, 총질소, 총인에 대한 분석 결과를 (표 4-11) 및 <그림 4-25>~<그림 4-26>에 정리하였다. 유기물농도는 2016년에는 M1, M2, M3 지점에서 각각 5.2~6.2%(평균 5.6%), 4.2~5.9%(평균 5.1%), 3.4~8.0%(평균 5.1%)로 나타났고, 2017년에는 M1, M2, M3 지점에서 각각 3.6~5.7%(평균 5.1%), 5.5~6.3%(평균 6.0%), 4.5~8.3%(평균 6.7%)로 나타났다. M1 지점에서는 2016년에 비해 2017년도에 감소하였으나 M2, M3 지점에서는 2016년에 비해 2017년도에 큰 폭으로 증가하였으며, 특히 7월 강우기에 크게 증가한 것으로 나타났다.

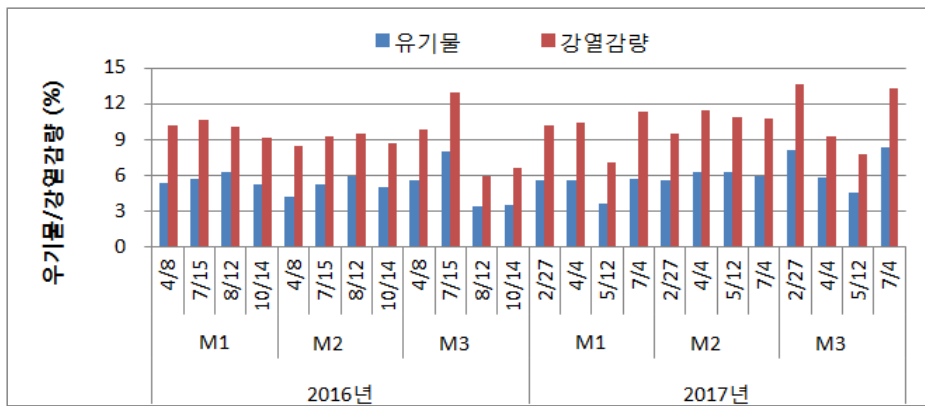
퇴적물 내 평균 강열감량은 2016년 조사에서는 M1 10.0%(9.1~10.6%), M2

9.0%(8.4~9.5%), M3 8.8%(5.9~12.9%)로 나타났고, 2017년 조사에서는 M1, M2, M3 각각 9.8%(7.1~11.3%), 10.6%(9.5~11.4%), 11.0%(7.8~13.6%)으로 나타났다. 이러한 결과를 (표 4-12)의 환경부(2015년)의 호소 퇴적물 오염평가기준과 비교해보면 “심각하게 명백한 오염” 상태라고 말할 수 있는 IV등급에 해당하는 13%는 초과하지 않는 것으로 나타났다. 미국 환경보호청(USEPA)의 Great호 퇴적물 오염정도 분류기준과 비교했을 때는 평균치가 모두 8% 이상으로 “심한 오염(heavily polluted)” 상태로 나타났고, 국내 팔당호, 한강, 대청호의 퇴적물 제거기준과 비교했을 때도 대부분의 시기에 기준치인 7~10%를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 위의 결과로 볼 때, 대부분의 지점에서 9.8~11.0%로 나타나 기준치인 13%에 근접하고 있어 매화저수지는 전체적으로 퇴적물의 유기물질 오염도가 높다는 것을 알 수 있다.

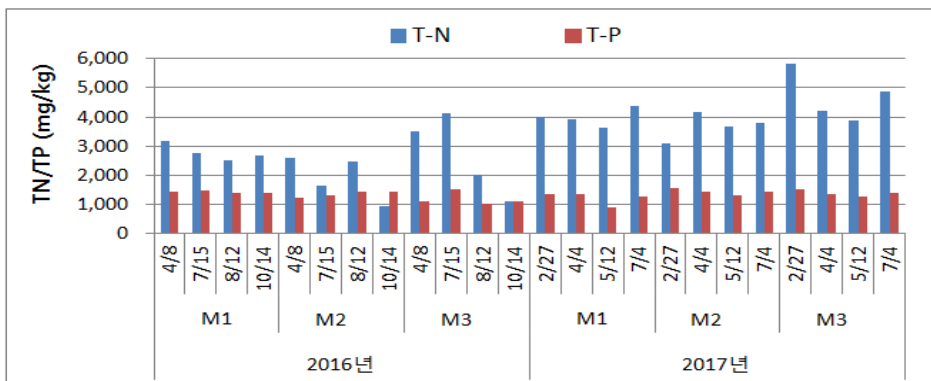
융복합 수처리장치 설치 전·후의 오염도 저감 효과를 검토하기 위해 수처리장치 인접지역에서 조사한 강열감량 결과 값을 비교해 볼 때, 2015년에는 9.0~19.0%, 2016년 조사에서는 8.4~9.5%, 2017년에는 7.1~11.3%으로 나타나 2015년에 비해 2016년 및 2017년도에는 최대 10%까지 감소되는 걸로 나타났다. 이러한 결과는 조사위치가 융복합 수처리 장치(수로식과 부유식)를 설치한 위치와 인접한 지역으로 융복합 수처리시스템의 배출수에 의해 수리학적 영향을 받을 수 있는 수역에 해당하고 있어 수처리 장치에 의한 영향으로 퇴적물의 유기물 오염도가 개선된 것으로 판단된다.

매화저수지 퇴적물 내 TN 농도는 2016년도 조사결과, M1에서 2,510~3,161 mg/kg(평균 2,781 mg/kg), M2 지점에서 962~2,594 mg/kg(평균 1,911 mg/kg), M3 에서 1,104~4,149 mg/kg(평균 1,104 mg/kg)으로 나타났다. 2017년 조사에서는 M1에서 3,638~4,370 mg/kg(평균 3,981 mg/kg), M2에서 3,083~4,180 mg/kg(평균 3,684 mg/kg), M3에서 3,897~5,836 mg/kg(평균 4,707 mg/kg)으로 2016년에 비해 모든 지점에서 TN 농도가 큰 폭으로 증가하였다. (표 4-12)의 국내외 퇴적물 오염도 평가기준과 비교해보면, 국내 호소 퇴적물 오염평가기준인 “심각하게 명백한 오염”된 상태인 5,600 mg/kg에는 2017년 M3 지점의 2월 조사를 제외하고는 모두 기준치 이하로 나타났다. 그러나 대부분의 지점에서 미국 Great호 퇴적물 오염정도 분류기준인 “심각한 오염((heavily polluted)” 기준인 2,000 mg/kg 이상에 해당되고 있다. 또한 국내 팔당호 및 한강의 퇴적물 제거 기준인 1,100 mg/kg 및 2,000 mg/kg 이상과 비교했을 때도 모든 지점에서 대부분의 조사 시기에 제거기준 이상에 해당되어 매화저수지 퇴적물의 TN 오염도는 상당히 높은 것으로 판단된다.

퇴적물 내 TP 농도는 2016년에는 M1, M2, M3의 지점별로 각각 1,411~1,476 mg/kg(평균 1,432 mg/kg), 1,253~1,442 mg/kg(평균 1,358 mg/kg), 1,010~1,533 mg/kg(평균 1,190 mg/kg)으로 나타났고, 2017년 조사에서는 지점별로 각각 M1 920~1,276 mg/kg(평균 1,229 mg/kg), M2 1,325~1,582 mg/kg(평균 1,445 mg/kg), M3 1,288~1,543 mg/kg(평균 1,397 mg/kg)으로 나타났다. 퇴적물 내 TP 농도는 국립환경연구원의 “호소 퇴적물 오염평가 기준”의 IV등급(1,600 mg/kg 초과, 심각하고 명백한 오염상태)에 비해서는 모든 지점에서 다소 낮았으나, 팔당호, 한강 하류, 대청호 퇴적물 제거 기준인 800 mg/kg 이상, 1,000 mg/kg 이상, 1,500 mg/kg 이상과 비교했을 때, 모든 지점에서 한강, 팔당호 퇴적물 제거기준 이상에 해당되는 것으로 조사되었다. 매화저수지 퇴적물 내 TN, TP 농도는 2016년도에 비해 2017년도에 전반적으로 상승하였으며, 특히, 모든 지점에서 TN 농도가 많이 증가하였다.



<그림 4-25> 매화저수지 조사지점별 퇴적물의 유기물, 강열감량 함량



<그림 4-26> 매화저수지 조사지점별 퇴적물의 TN, TP 함량

(표 4-11) 매화저수지 퇴적물의 유기물, 강열감량, 총질소, 총인

연도	조사지점	조사일자	유기물 (%)	강열감량 (%)	총질소 (mg/kg)	총인 (mg/kg)
2016년	M1	4/8	5.3	10.2	3,161	1,436
		7/15	5.7	10.6	2,781	1,476
		8/12	6.2	10.1	2,510	1,405
		10/14	5.2	9.1	2,672	1,411
		평균	5.6	10.0	2,781	1,432
	M2	4/8	4.2	8.4	2,594	1,253
		7/15	5.2	9.2	1,631	1,311
		8/12	5.9	9.5	2,455	1,424
		10/14	5.0	8.7	962	1,442
		평균	5.1	9.0	1,911	1,358
	M3	4/8	5.6	9.8	3,512	1,113
		7/15	8.0	12.9	4,149	1,533
		8/12	3.4	5.9	2,025	1,010
		10/14	3.5	6.6	1,104	1,104
		평균	5.1	8.8	2,698	1,190
2017년	M1	2/27	5.6	10.2	3,993	1,364
		4/4	5.6	10.4	3,923	1,355
		5/12	3.6	7.1	3,638	920
		7/4	5.7	11.3	4,370	1,276
		평균	5.1	9.8	3,981	1,229
	M2	2/27	5.5	9.5	3,083	1,582
		4/4	6.3	11.4	4,180	1,441
		5/12	6.3	10.9	3,677	1,325
		7/4	5.9	10.7	3,795	1,431
		평균	6.0	10.6	3,684	1,445
	M3	2/27	8.1	13.6	5,836	1,543
		4/4	5.8	9.2	4,213	1,351
		5/12	4.5	7.8	3,897	1,288
		7/4	8.3	13.3	4,882	1,407
		평균	6.7	11.0	4,707	1,397

(표 4-12) 국내외 퇴적물 오염도 평가기준 비교

구분	항목	COD (mg/kg)	강열감량 (%)	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	황화물 (mg/kg)
*호소 퇴적물 오염평가기준 (국립환경연구원 예규)		-	13	5,600	1,600	-
하천공사표준시방서		20,000 ~ 40,000	10 ~ 20	1,600~ 3000	700 ~ 1,000	1,000
팔당호		20,000	7	1,100	800	-
한강		20,000	10	2,000	1,000	1,000
대청호		20,000	7	3,000	1,500	-
Great호 퇴적물 오염정도 분류기준	비오염	<40,000	<5	<1000	<420	-
	중간오염	40,000 ~ 80,000	5 ~ 8	1000 ~ 2,000	420 ~ 650	-
	심한오염	>80,000	>8	>2,000	>650	-
미해양 대기청 환경권고조치	ERL	-	-	-	-	-
	ERM	-	-	-	-	-
캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준	NEL	-	-	-	-	-
	LEL	-	-	545	600	-
	LTL	-	-	4,800	2,050	-
**일본 나고야항 퇴적물 제거기준		20,000	10	-	-	<1
**동경만 및 요코하마만 퇴적물 제거기준		13,000 20,000 30,000 40,000	5,000 15,000	-	-	600 1,000 5,000 10,000

\* 국립환경과학원 예규 제2015- 687호(2015.11.16)

\*\* 일본의 나고야 항, 동경만, 요코하마만의 퇴적물 제거기준 설정은 각 범위에 대한 점수를 평가한 후, 평가점수에 따라 퇴적물을 제거기준 적용함  
자료) 농업용저수지의 오염퇴적물 관리기술 연구보고서(농림축산식품부, 한국농어촌 공사, 2015)



## 3) 중금속 등

매화저수지 퇴적물 내 중금속 및 Hg, CN 등에 대해 분석한 결과를 (표 4-13)에 정리하였다. 퇴적물 내 비소 농도는 2016년도에는 M1, M2, M3 지점별로 각각 6.7~8.2 mg/kg, 5.5~7.4 mg/kg, 7.8~10.7 mg/kg로 검출되었고, 2017년도에는 M1, M2, M3에서 각각 6.6~8.1 mg/kg, 6.5~7.6 mg/kg, 8.4~9.4 mg/kg으로 검출되었다. 환경부의 호소 퇴적물 오염평가 기준인 I 등급(저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음) 29 mg/kg의 이하에는 해당되고 있으나 미국 Great호 퇴적물 오염정도 분류기준 “중간 오염(moderately polluted)”에 해당하는 3~8 mg/kg에는 모든 지점에서 해당되는 것으로 나타났다.

카드뮴은 M1, M2, M3 지점별로 2016년에는 각각 1.2~1.7 mg/kg, 1.1~1.4 mg/kg, 0.7~1.6 mg/kg로 검출되었고, 2017년에는 각각 1.2~1.4 mg/kg, 1.3~1.6 mg/kg, 1.2~1.9 mg/kg로 검출되었다. 2017년 M3 7월 조사시 1.9 mg/kg을 제외하고는 환경부의 호소 퇴적물 오염평가 기준인 II 등급(저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있음) 1.87 mg/kg 이하에 해당되는 것으로 나타났다.

퇴적물 내 구리농도는 2016년 조사에서는 M3 지점을 제외하고는 M1, M2 지점에서는 호소 퇴적물 오염평가기준인 I ~ II 등급(60.0~228 mg/kg 이하)에 해당하고, 2017년 조사에서는 M2 지점에서만 II 등급 이내이고, M1과 M3은 I 등급을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 니켈도 2016년, 2017년 조사결과 모든 지점에서 22.1~37.6 mg/kg로 호소 퇴적물 오염평가기준인 I 등급(저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음)에 해당하는 53 mg/kg 이하를 만족하고 있지만 미국 Great호 퇴적물 오염정도 분류기준 “중간 오염(moderately polluted)”에 해당하는 25~50 mg/kg에는 해당하는 것으로 나타났다.

퇴적물 내 납 농도는 2016년 조사에서는 38.8~57.6 mg/kg으로, 2017년 조사에서도 47.3~57.4 mg/kg으로 모든 지점에서 비슷한 농도로 검출되었고, 호소 퇴적물 오염평가기준인 I 등급(저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음)에 해당하는 65 mg/kg 이하를 만족하였다. 그러나 미국 Great호 퇴적물 오염정도 분류기준 “중간 오염(moderately polluted)”에는 해당하는 40~60 mg/kg에는 해당하는 것으로 나타났다.

퇴적물 내 아연 농도는 2016년에는 모든 조사지점에서 96.5~204.6 mg/kg으로 검출되었고, 2017년도에는 161.0~210.2 mg/kg으로 검출되었다. 아연농도는 모든 지점에서 호소 퇴적물 오염평가기준인 I 등급(저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음)인 363 mg/kg 이하에 만족하고 있는 것으로 나타났지만 미국 Great호 퇴적물 오염정도 분류기준 “중간 오염(moderately

polluted)”에 해당하는 90~200 mg/kg의 범위에는 해당하는 것으로 나타났다.

퇴적물 내 수은 농도는 2016년에는 M1, M2, M3 지점별로 각각 불검출~0.05 mg/kg, 불검출~0.04 mg/kg, 불검출~0.05 mg/kg로 검출되었고, 2017년에는 M1, M2, M3 모두 거의 모든 조사 일자에 불검출로 나타나 호소 퇴적물 오염평가기준인 I 등급(저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음)인 0.1 mg/kg 이하에 만족하고 있는 것으로 나타났다. 기타 6가크롬 및 시안은 2016년, 2017년 모두 모든 지점에서 조사 시기에 관계없이 불검출로 나타났다.

(표 4-13) 매화저수지 위치별 퇴적물의 중금속 등 농도(단위 : mg/kg)

연도	지점	조사 일자	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Cr <sup>+6</sup>	CN
2016	M1	4/8	8.2	1.6	62.4	31.5	49.6	190.1	0.05	N.D	N.D
		7/15	6.7	1.4	60.4	30.9	49.0	191.0	N.D	N.D	N.D
		8/12	6.9	1.7	59.6	32.9	52.2	195.7	0.04	-	-
		10/14	7.1	1.2	60.0	37.6	51.2	183.1	N.D	-	-
	M2	4/8	7.4	1.2	61.9	30.6	47.3	180.4	0.04	N.D	N.D
		7/15	6.1	1.3	73.2	30.6	48.2	204.6	0.04	N.D	N.D
		8/12	5.5	1.4	65.4	29.5	50.3	191.9	N.D	-	-
		10/14	5.9	1.1	69.0	29.8	50.2	189.2	N.D	-	-
	M3	4/8	10.7	1.2	45.9	25.8	49.4	148.7	0.05	N.D	N.D
		7/15	7.8	1.6	60.3	30.5	57.6	193.6	0.04	N.D	N.D
		8/12	8.5	1.0	29.8	23.1	39.8	96.5	N.D	-	-
		10/14	8.1	0.7	31.6	22.1	38.8	101.7	N.D	-	-
2017	M1	2/27	8.1	1.4	52.3	27.4	49.5	173.6	N.D	-	-
		4/4	6.6	1.3	52.4	27.9	53.1	180.1	N.D	-	-
		5/12	6.8	1.2	49.0	26.9	51.4	161.0	N.D	-	-
		7/4	7.9	1.8	59.6	29.2	55.7	193.9	N.D	-	-
	M2	2/27	6.5	1.3	68.4	29.8	47.3	195.6	1.0	-	-
		4/4	7.6	1.3	58.8	28.1	50.1	184.0	0.1	-	-
		5/12	7.0	1.4	65.9	29.9	50.6	197.1	N.D	-	-
		7/4	7.2	1.6	74.0	30.3	52.2	210.2	N.D	-	-
	M3	2/27	9.4	1.5	59.8	29.0	57.4	198.3	N.D	-	-
		4/4	8.8	1.2	47.8	26.8	50.0	162.1	N.D	-	-
		5/12	8.4	1.4	49.2	27.1	50.1	164.1	N.D	-	-
		7/4	9.1	1.9	61.0	30.6	56.0	198.3	N.D	-	-

(표 4-14) 호소 퇴적물 항목별 오염평가기준

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

비고) 등급별 퇴적물의 오염상태

- \*금속류 ( I 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음
- ( II 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있음
- ( III 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높음
- ( IV 등급) : 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 매우 높음

자료) 국립환경과학원 누리집([www.nier.go.kr](http://www.nier.go.kr))

나. 매화저수지 퇴적오염물질 용출량 평가

1) 실내실험에 의한 오염물질 용출속도

매화저수지 퇴적물 내 오염물질 용출속도를 2014년과 2015년도에 분석하였고, 그 결과는 (표 4-15)와 같다. 1차 년도와 2차 년도의 채취시기 및 장소가 일치하지 않아 정확한 비교에 어려움은 있으나, 비슷한 시기와 장소를 대상으로 2개년의 결과와 비교하였다. COD의 경우, 1차년도 호기조건에서  $58.3 \sim 76.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서는  $118.1 \sim 139.9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도를 보였고, 2차년도 호기조건에서  $-52.5 \sim 73.3 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $56.7 \sim 204.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도로 나타나 1·2차년 모두 호기조건보다 혐기조건에서 높은 농도로 용출되고 있는 것으로 나타났다. 2차년도 실험에서는 호기조건에서 COD 농도가 오히려 감소하고 있는 결과를 보여주며, 이러한 결과는 호기조건에서 미생물에 의한 유기물 분해가 일어나고 있음을 알 수 있다.  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 의 경우는 1차년도 실험에서는 호기조건에서  $-8.6 \sim -2.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $-4.9 \sim 36.6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도를 보였으며, 2차년도 실험에서는 호기조건에서  $-4.8 \sim -3.0 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $3.2 \sim 20.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 의 용출속도를 나타내었다. 이러한 결과로부터  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  또한 호기조건 보다 혐기조건에서 용출이 일어나고 있음을 알 수 있고, 호기조건에서는 오히려 퇴적층에 침전되고 있는 것을 알 수 있다. TN의 1차년도 실험결과에서는 호기조건에서  $-19.7 \sim 19.2 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $10.3 \sim 34.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 로 나타났고, 2차년도 조사에서는 호기조건에서  $-51.9 \sim -11.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서  $6.1 \sim 30.4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 로 나타나 호기조건에서는 용출이 거의 없고 혐기조건에서 많은 용출이 일어나고 있음을 알 수 있다. 퇴적물 내 TP 용출실험에서도 1·2차년도 실험결과, 호기조건에서는  $-3.2 \sim 0.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ , 혐기조건에서는  $-4.6 \sim 3.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 으로 나타나 COD,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , TN의 결과와 마찬가지로 혐기조건에서 용출이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 인의 경우 호기조건에서는 인의 용출량이 매우 적거나 용출이 거의 일어나지 않으며, 혐기 조건에서는 많은 양의 인이 용출되는 선행연구 결과와 일치하였다(조영철, 2007). 이러한 원인은 인이 호기조건하에서는 철이나 망간 등과 함께 퇴적물 내에 흡착 및 침전되는 반면, 혐기조건하에서는 환원반응이 일어나 수층으로 재 용출이 일어났기 때문으로 판단된다.

매화저수지 퇴적물 용출실험 결과를 종합해보면, 혐기조건에서 COD, 총질소 및 총인의 용출이 활발하게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 호

소 바닥 퇴적물 층에 적정한 호기 환경조건이 유지된다면 퇴적물로부터 용출되는 영양염류의 양이 많이 감소될 것으로 예측되며, 이러한 결과는 궁극적으로 호소 수질개선에 많은 기여를 할 것으로 판단된다.

(표 4-15) 퇴적물 오염물질 용출속도( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )

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

2) 매화지 현장 용출실측 결과

매화저수지 퇴적물에 의한 용출량 실측 평가를 위하여 연구 3차 년도인 2016년도에는 매화저수지 현장에서 직접 용출량을 실측하였다. 연구 2년차에 수행한 실내 용출실험과 현장에서 직접 용출실험을 한 결과를 비교하여 (표 4-16)에 정리하였다. 저수지의 유입부 지점의 용출속도는 모든 분석항목에 대해 용출속도가 감소하였고, 공기공급 조건에서 폐쇄수면 조건보다 더 높은 용출속도 감소폭이 확인되었다. 그러나 유출부 지점에서의 용출속도는 실내 실험 결과와 유사한 결과로서, 공기공급 조건(실내 : 호기조건)에서 용출속도 감소현상이 관찰되었으며, 폐쇄수면 조건(실내 : 혐기조건)에서 용출속도가 증가하는 현상이 나타났다. 이는 외부로부터 오염물질이 유입되어 상대적으로 유출부보다 퇴적물 내 오염물질 농도가 높아 더 높은 용출 속도가 나올 것으로 예상한 것과 상반된 결과가 나타났는데, 현장실험의 특성상 유입부의 낙시좌대 부근에 설치한 유동하는 사람들로 부터 제대로 된 통제를 하지 못했기 때문에 일어난 결과로 판단된다. 하지만 유출부에 설치한 실험 장치는 상대적으로 유동하는 사람들로 부터 통제가 수월한 좌대와 육지의 연결다리 하부에 설치하여 보다 정확한 실험결과가 나왔고, 유출부의 실험결과를 바탕으로 실내용출 실험과 비교해 보았다. 그 결과, 공기공급 조건에서 모든 측정 항목에 대해 용출속도 감소폭이 실내실험 보다 높았는데, 이는 공기를 공급 함으로서 현장에 있는 다양한 미생물들의 생장이 빨라졌기 때문에 나타난 결과로 해석할 수 있고, 폐쇄수면 조건에서 T-N을 제외한  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및 T-P의 경우도 실내실험보다 용출속도가 감소한 원인이 위와 같은 결과에 의한 것이라 판단된다. T-N은 보다 다양한 미생물들의 대사과정에 의해 제거되는 기작이기 때문에 증가한 원인에 대해서 정확한 해석은 어려우나, 실내실험보다 상대적으로 긴 시간동안 유기물이 산화되는 과정에서 생성된 유기성 질소로 인해 이와 같은 용출속도가 나온 것이라 사료된다.

매화저수지 유출부 지점의 실내 용출속도와 현장 용출속도를 기준으로 하여 매화지 수면적(95,400 $\text{m}^2$ ) 전체에 대한 용출부하량을 산정한 결과는 (표 4-17)과 같이 도출되었다. 실험결과를 정리하면, 실내실험과 현장 실측 모두 공기를 공급할 때(포기상태)에 T-N, T-P 모두 퇴적물 용출부하량이 감소되는 결과를 보이고 있다.

(표 4-16) 실내 용출실험과 현장 용출실험 비교

구분	실내실험 (mg/m <sup>2</sup> ·d)		현장실험 (mg/m <sup>2</sup> ·d)		
			실험조건	유입부	유출부
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	호기조건	-4.5	공기공급	-11.6	-28.2
	혐기조건	12.0	폐쇄수면	-10.5	0.0
T-N	호기조건	-31.7	공기공급	-45.7	-61.2
	혐기조건	6.9	폐쇄수면	-27.1	53.8
T-P	호기조건	0.0	공기공급	-0.8	-0.3
	혐기조건	2.8	폐쇄수면	-0.6	1.1

※실내실험 용출속도는 본 과제의 2차년도 실내실험 데이터의 평균치 사용

(채수위치 : 매화지 제방 유출부)

※현장실험 용출속도는 2016년 저수지내 수위저하 직전 데이터를 최종 농도로 사용

(표 4-17) 매화저수지의 용출부하 비교

구 분		용출부하량 (kg/day)	
		실내	현장
T-N	공기공급 (실내 : 호기조건)	-3.02	-5.84
	폐쇄수면조건 (실내 : 혐기조건)	0.06	5.13
T-P	공기공급 (실내 : 호기조건)	0.00	-0.03
	폐쇄수면조건 (실내 : 혐기조건)	0.27	0.10

## 제2절 생태융합형 접촉산화수로 성능평가

### 1. 생태융합형 접촉산화수로 현장적용 Test-bed 구축

#### 가. Test-Bed 구축 개요

농업용 저수지 유입수의 유기물, SS, TN, TP 등의 처리를 목적으로 개발된 생태융합형 접촉산화시스템 수로식(이하 생태융합형 접촉산화수로)의 실규모 현장적용실험을 수행하기 위해 Test Bed를 경기도 시흥시 도창동에 위치하고 있는 매화저수지 수변에 2015년 8월 하순에 설치하였다. 생태융합형 접촉산화수로는 토지 활용성, 전기시설 이용편리성, 대형차량 접근의 용이성 등 현장 여건을 고려하여 설치 위치를 선정하였다(세부 내용은 2차년도 연구보고서 참고). 매화저수지는 현재 유료납시터로 운영되고 있어 임대 사업자 및 한국농어촌공사의 관리 지사(수원화성지사)와 협의하여 설치 위치 등을 선정하였다. 생태융합형 접촉산화수로의 설치 위치는 <그림 4-27>과 같다.

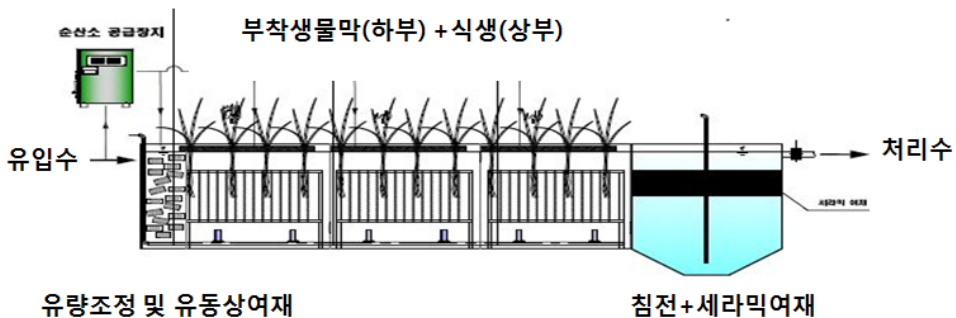


<그림 4-27> 접촉산화수로 및 접촉산화부도 설치 위치

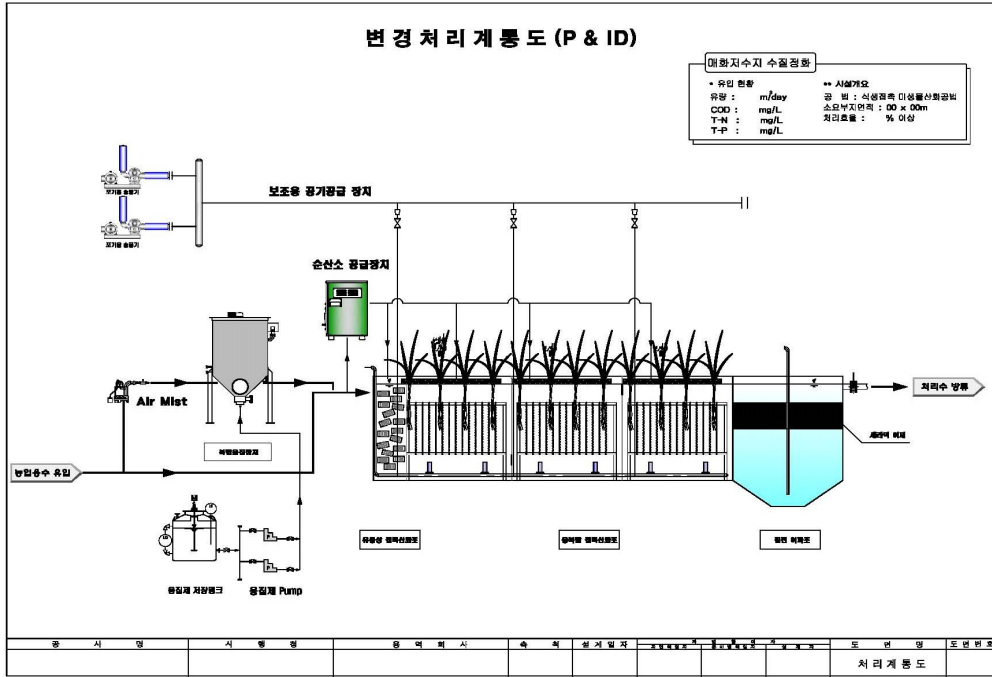


나. 공정구성 및 기능

농업용 저수지 유입수 대책인 생태융합형 접촉산화수로의 처리 공정은 유입수 → 에어미스트(또는 순산소) → 유량조정 및 전처리 → 융복합 산화조(3조) → 여과침전조 → 방류 순서로 매우 단순하게 구성되었다. 고속복합용 집장치는 유입수 오염물질의 TN, TP 농도가 고농도이거나 초기 강우시 입자성 오염물질 처리를 위해 유입수 성상과 현장 여건에 따라 선택적으로 조합하여 운영할 수 있도록 구성하였다. 에어미스트 또는 순산소 공급장치는 끈상 매디아 반응조 앞단에 설치하여 산소를 주입하여 접촉산화조의 DO 농도를 4.0mg/L 이상의 호기성 상태로 유지시켜 주는 역할을 한다. 유량 조정조는 유입되는 유량을 조정하고, SS 제거효율을 높이기 위한 목적이며, 유량 조정조에 유동상 매디아(CBC 매디아, D 100 mm\*H 100 mm)를 충전하였다. 유동상 여재의 기능은 처리수 유입시 함유되는 조대 SS의 크기를 최소화시켜 유기물 분해를 촉진시키는 기능과 미생물 보유량을 증가시켜 후단 접촉산화조의 처리효율을 향상시키기 위한 목적이다. 식생 뿌리와 끈상 매디아로 이루어진 접촉산화조는 3조로 구성하였으며, 끈상 매디아에 부착된 미생물에 의해서 유기물질을 산화·분해하고, 상부 식생 뿌리에 의해 영양염류를 흡수하여 제거하는 역할을 한다. 마지막 공정에 설치된 침전여과조는 상단과 하단을 분리하여 상단에는 세라믹 여재를 충전하였고, 하단은 침전조로 활용하였다. 상단에 여과재로 사용된 세라믹 여재는 접촉산화조로부터 유출되어 탈리된 미생물을 제거하는 목적이고, 침전조는 이송된 슬러지를 침강시켜 농축하는 역할 및 최종 처리수의 유량조정 역할을 담당하는 기능을 한다. 매화저수지에 설치된 생태융합형 접촉산화수로의 모식도, 설계도, 설치 전경은 <그림 4-28>~<그림 4-30>과 같다.



<그림 4-28> 생태융합형 접촉산화수로 모식도



<그림 4-29> 생태융합형 집축산화수로 설계도



<그림 4-30> 생태융합형 집축산화수로 설치 전경

다. 생태융합형 접촉산화수로 제원

수로식 수질정화장치는 기본적으로 유량조정조, 미생물접촉산화조(#1~#3), 여과침전조, 제어반으로 구성되었다. 유량 조정조는 유입수에 포함된 조대 SS(Suspended Solid)을 작게 파쇄하여 후단 공정의 유기물 부하를 줄이는 공정이다. 구성은 유입부 펌프, 마이크로버블 또는 순산소 공급장치, 유동상 여재로 구성된다. 생태융합형 접촉산화수로의 시설제원 및 각 시설별 세부 내역은 (표 4-18)~(표 4-19)와 같다. 본 연구에서 사용된 순산소 공급장치는 DO를 공급하는 장치로서, 순산소 발생기와 산소 용해기로 구분되며, 정상적인 운전시 유량조정조의 DO는 약 11~15 mg/L로 유지되었다. 유동상 여재는 기성제품인 CBC 매디아(D100 mm\*H100 mm) 70개를 충전하였고, 끈상 미생물 접촉조는 2,000 mm(W)×2,000 mm(L)×2,000 mm(H)의 3조로 구성하였다. 상부에 있는 식생 기반재는 2,000 mm(W)×2,000 mm(L)×50 mm(H)의 3조로 구성되어 있고, 식생은 노랑꽃창포 49주×3SET가 식재되어 있다. 세라믹 여과조는 침전조의 상단에 위치하며, 내부규격이 2,000 mm(W)×2,000 mm(L)×600 mm(H)으로 기성 세라믹 여재(GR 2.9E)가 2m³ 규모로 충전되어 있다.

(표 4-18) 생태융합형 접촉산화수로 규격 및 사양

구분	규격 및 사양	비고
1. 형식	철재프레임	상부 : 식생 하부 : 미생물 여재
2. 규격	2.0mW × 8.6mL × 2.0mH	유량조정조 × 1조 미생물접촉조 × 3조 여과침전조 × 1조
3. 처리용량	360m³ ~ 1200m³/day	체류시간 30Min ~ 90Min
4. 처리효율	BOD 70%, SS 80% 이상 처리효율 예측	유입BOD 20ppm이하 유입 SS 100ppm이하
5. 용적(m³)	2.0mW × 6.0mL × 2.0mH (24m³)	침전조 8m³제외
6. 구성	1) 식생면적 : 12m²(노랑꽃 창포) 2) 미생물모듈: 여재 1,200m × 3SET 3) 산기관 : 400ℓ/min × 6EA 4) Air Mist : 950W × 25LPM × 1SET 5) 순산소공급장치 : 7lpm@90% × 1SET:	

(표 4-19) 생태융합형 접촉산화수로 시설별 세부 내역

시설구분	내부 규격	비고
유입펌프	250L/min×220V×950W×1EA	
순산소공급장치	7lpm@90%/O2MOS-7LC × 480W × 1EA	
유량조정조	2,000Wmm × 0.5Lmm × 2,000Hmm	
유동상여재	D100mm× H100mm× 70EA	
미생물접촉산화조 (#1 ~ #3)	2,000Wmm×2,000Lmm×2,000mm	
미생물 모듈	1,800mm×1,800mm×1,500mm× 3EA 미생물접촉재 1,200m× 3EA	
여과침전조	2,000Wmm×2,000Lmm×2,500Hmm	
세라믹여과조	2,000Wmm×2,000Lmm×600Hmm 세라믹여재 2~6mm× 2m³	
식생 기반재	2,000Wmm×2,000Lmm×50Hmm×3SET 식재 : 노랑꽃창포 49주×3SET	

## 2. 생태융합형 접촉산화수로의 수질정화효율 평가

### 가. 운전조건에 따른 수질정화효율

생태융합형 접촉산화시스템의 단위 요소기술별로 수질정화효율을 평가하기 위하여 단계별로 시스템을 구성하여 정화효율을 평가하였다. 1단계로 2015년도에는 마이크로버블 제너레이터와 끈상 매디아 산화조를 조합하여 수질정화효율을 평가하였고, 2016년도 상반기에는 순산소 발생기와 끈상 매디아 산화조를 조합하여 수질정화효율을 평가하였다. 2016년도 하반기에는 끈상 접촉산화조에 전처리 공정과 후처리 공정을 조합하여 100%의 시스템을 구성하였다. 생태융합형 접촉산화수로의 시스템을 완전히 구축한 후에는 시험 운전기간이 끝나고 정상 운영이 가능해지자 운전조건을 2단계로 구분하여 수질정화효율에 대한 평가를 실시하였다. 첫 번째의 시설 운전조건(운전 설계조건 I)은 처리유량 300 m<sup>3</sup>/일, 체류시간 1.5 hr로 설계하여 운전하였으며, 운영기간은 2016년 9월 27일 부터 10월 30일까지 약 한달 동안 진행되었다. 이때 유입수의 수질특성은 수온은 19~21℃, pH 8.3, BOD 5.9~12.2 mg/L, COD 11.8~19.7 mg/L, SS 14.7~28.7 mg/L, TP 0.099~0.154 mg/L, Chl-a 51.8~120.5 mg/m<sup>3</sup>이었으며, 반응조 내의 미생물 활성도(MLVSS/MLSS)는 20~45%로 나타났다. 두 번째 운전(운전 설계조건 II)은 처리유량 300 m<sup>3</sup>/일, 체류시간은 3 hr으로 설계하여 운전하였으며, 2017년 8월 중순부터 10월말까지 약 80일간 운영하였다. 이때의 유입수 수질특성은 수온은 17.8~24.8℃, pH 8.3, BOD 3.6~10.1 mg/L, COD 7.2~15.2 mg/L, SS 26.5~45.0 mg/L, TP 0.180~0.194 mg/L, Chl-a 38.3~168.4 mg/m<sup>3</sup>이었으며, 끈상 매디아 반응조 내의 미생물 활성도(MLVSS/MLSS)는 35~50%로 나타났다.

농업용 저수지 유입수 수처리 기술인 생태융합형 접촉산화수로에 대해 설계조건 I 과 설계조건 II에 대해 수질정화효율을 평가한 결과는 (표 4-20)과 같다. BOD 처리효율은 운전조건 I에서는 평균 74.7%로 나타났고, 운전조건 II 기간 동안에는 평균 처리효율이 82.5%로 증가하였다. COD 처리효율은 운전조건 I에서는 평균 처리효율이 46.0%로 나타났고, 운전조건 II에서는 평균 45.6%로 나타나 운전조건에 따른 COD 처리효율에 미치는 영향은 없었다. TOC의 평균 처리효율은 운전조건 I에서는 18.5%로 나타났고, 운전조건 II에서는 24.0%로 나타나 운전조건 II에서 처리효율이 향상되는 것으로 나타났다. SS의 평균 처리효율은 운전조건 I, II 각각 71.8%, 79.3%로 운전조건 II에서 더 높은 효율을 나타내었다. 평균 Chl-a 처리효율은 77.8%, 81.4%

로 다른 항목과 동일하게 운전 조건 II에서 더 높은 정화효율을 나타내었다. TP의 평균 처리효율은 운전조건 I, II에서 각각 46.6%, 44.3%로 나타나 운전 조건 I에서 오히려 처리효율이 더 높은 것으로 나타났으나 효율 차이가 약 2% 정도로 매우 미미하여 거의 동일한 효율이라고 평가하여도 무방할 것으로 판단된다. 위의 결과로부터 생태융합형 접촉산화수로의 수리학적 체류시간이 1.5시간 보다 3시간일 때 수질정화효율이 조금 더 향상 되는 것으로 나타났다. 그러나 실제로 현장에 적용할 때에는 수질정화효율 및 경제성을 함께 검토하여 결정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.



(a) 운전 10일 후 채수

(b) 운전 30일 후 채수

<그림 4-31> 생태융합형 접촉산화수로 유입수와 처리수 채수 후

(표 4-20) 생태융합형 접촉산화수로 체류시간에 따른 수질정화효율

구분	생태융합형 접촉산화수로 (운전설계조건 I)			생태융합형 접촉산화수로 (운전설계조건 II)		
	유입수	처리수	처리효율 (%)	유입수	처리수	처리효율 (%)
BOD (mg/L)	9.8 (5.9-12.2)	2.1 (0.7-2.5)	74.7 (57.7-93.8)	8.1 (3.6-10.1)	1.4 (0.4-2.7)	82.5 (71.9-95.6)
COD (mg/L)	15.6 (11.8-19.7)	8.1 (7.6-8.8)	46.0 (32.2-59.4)	11.3 (7.2-15.2)	5.9 (4.8-6.8)	45.6 (22.2-61.8)
TOC (mg/L)	6.4 (5.9-7.2)	5.2 (4.9-5.5)	18.5 (6.5-27.7)	5.5 (3.9-8.3)	4.0 (3.5-4.6)	24.0 (7.7-56.6)
SS (mg/L)	21.7 (14.7-28.7)	6.1 (2.7-12.5)	71.8 (46.8-86.5)	33.2 (26.5-45.0)	6.7 (3.5-11.4)	79.3 (68.3-89.1)
Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	86.7 (51.8-120.5)	15.6 (9.0-19.9)	77.8 (61.6-91.7)	115.0 (38.3-168.4)	17.8 (12.0-28.0)	81.4 (68.5-92.0)
TP (mg/L)	0.121 (0.099-0.154)	0.062 (0.049-0.079)	46.6 (22.5-62.3)	0.189 (0.180-0.194)	0.105 (0.076-0.139)	44.3 (22.8-60.8)

## 나. 수처리조에 의한 오염부하량 저감효율 평가

생태융합형 접촉산화수로의 농도기준으로 산출한 평균 수질정화효율과 오염부하량 기준으로 산출한 평균 오염물질 제거효율을 정리하여 (표 4-21)에 나타내었다. 여기서 적용된 수질정화효율은 보수적으로 접근하기 위하여 수리학적 체류시간을 1.5시간으로 적용하여 운전해서 얻은 수질정화효율을 적용하였다. 생태융합형 접촉산화수로의 하루 처리수량 300 kg/일을 기준하여 평균 수질농도와 유입수량을 곱하여 오염부하량을 산출하였다. 농도기준으로 산출한 수질정화효율과 오염부하량 기준으로 산출한 오염물질 저감효율은 거의 유사하였으나 오염부하량 기준으로 산출된 정화효율이 조금 더 높게 산출되었다. BOD 기준으로 수처리시설에 들어오는 유입부하량은 2.94 kg/일인데, 그 중 2.31 kg/일의 유기물이 수처리에서 제거되고 제거되지 않은 0.63 kg/일의 유기물이 저수지로 유입되는 것으로 나타났다. 오염물질 부하량을 기준으로 산출한 오염물질 제거효율은 항목별 각각 BOD 78.6%, COD 48.1%, SS 71.9%, Chl-a 82%로 산출되었다.

본 현장적용실험용 수처리 시설은 원활한 실험과 연구비의 한계로 인해 지상에 노출되게 설치한 시설로서 10월 이후부터 외기 기온이 내려가면서 미생물 활성도 저하와 함께 수처리 효율도 감소되었다. 본 연구에서 개발된 수처리 시설을 지하구조물로 설치하여 운영한다면 외기온도에 영향을 덜 받을 것으로 예측되며, 따라서 오염물질 제거효율도 (표 4-21)에서 나타난 효율보다는 최소한 더 높은 제거 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

(표 4-21) 생태융합형 접촉산화시스템의 평균 오염물질 저감효율

구 분	수질정화효율			오염물질 저감효율		
	유입수 (mg/L)	유출수 (mg/L)	처리효율 (%)	유입량 (kg/d)	유출량 (kg/d)	저감효율 (%)
BOD	9.8	2.1	74.7	2.94	0.63	78.6
COD	15.6	8.1	46.0	4.68	2.43	48.1
TOC	6.4	5.2	18.5	1.92	1.56	18.8
SS	21.7	6.1	71.8	6.51	1.83	71.9
Chl-a	86.7*	15.6	77.8	0.026	0.005	82.0
T-P	0.121	0.062	46.6	0.036	0.019	48.8

비고) Chl-a 단위 : mg/m<sup>3</sup>

### 3. 저수지 수질개선효과 분석

#### 가. 시나리오 구성 및 기본 가정

매화저수지 수질개선을 위해 실규모로 저수지 유입부에 생태융합형 접촉산화시스템 수로식을 설치하였다고 가정하여 매화저수지의 수질개선효과를 분석하였다. 매화저수지의 유입 및 유출 등에 관한 물질수지는 본 연구 2차년도 연구내용에서 구축한 3차원 수리-수질 모형인 ELCOM-CADYM을 사용하였다. ELCOM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model)은 범용 3차원 수리동력학 모델로서, 수질-생태계 해석 모델인 CAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model)과 연결되어 수리-수질-생태계의 동적 모의가 가능하며, 남조류의 부력조절 기능을 모의할 수 있는 장점이 있다.

시나리오에서 base는 무대책이며, 저수지 유입 유출량을 위한 강우사상은 모델 구축 기간인 2013년에 해당하는 인근의 강수량을 이용하였다. 매화저수지에는 유입하천이 2개소가 있는데, 평균 유입수량을 설계유량으로 하여 강우, 평시에 상관없이 유입하천-1에는 일 처리용량 1,800 m<sup>3</sup>/d 규모의 시설을 설치하며, 유입하천-2에는 3,500 m<sup>3</sup>/d 규모의 시설을 설치한다고 가정하고, 수질항목별 오염물질 저감 효율은 (표 4-22)에 나타내었다. 수처리 시설의 오염물질 저감효율은 현장적용실험을 통해 얻은 자료 중에서 보수적인 효율 적용을 위해 수리학적 체류시간이 1.5 시간으로 운영하였을 경우의 효율을 적용하였다. 수질모델링을 통해 분석한 수질항목은 COD, TOC, T-P, Chl-a이며, 생태융합형 접촉산화수로는 유입수 수질 대비 처리수에서 COD 46%, TOC 18.5%, Chl-a 77.8%, T-P 46.6%가 저감되는 것으로 입력 자료를 구성해 수질모델에 적용하였다.

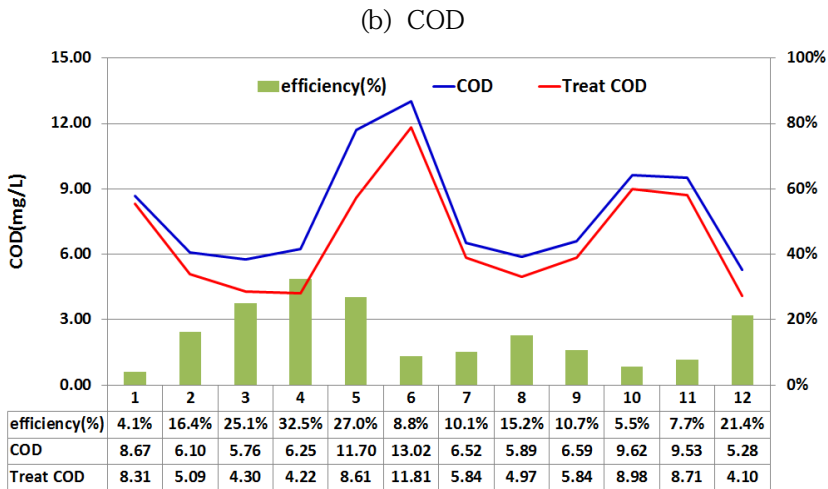
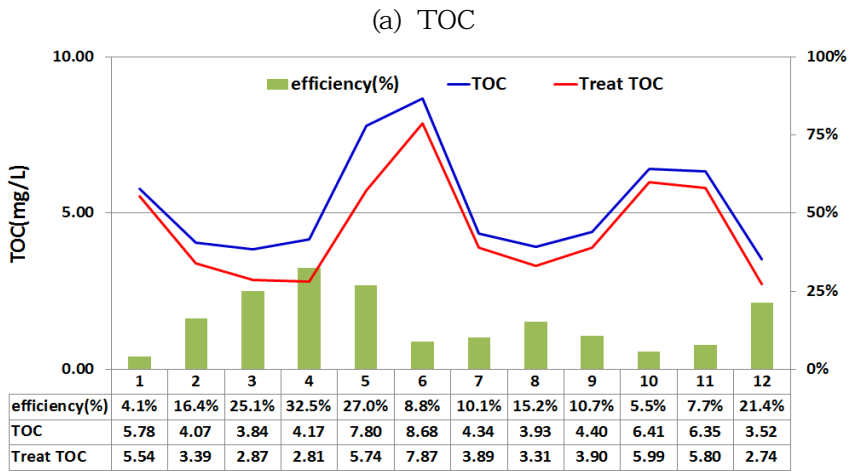
(표 4-22) 생태융합형 접촉산화수로의 오염물질 저감효율 가정치

구분	유입	유출	저감율(%)
COD(mg/L)	15.6	8.1	46.0
TOC(mg/L)	6.42	5.2	18.5
Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	86.8	15.6	77.8
T-P(mg/L)	0.121	0.062	46.6



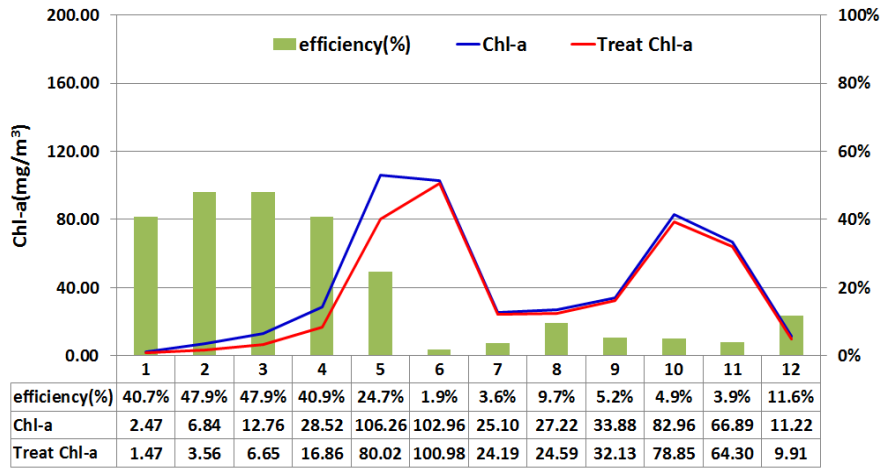
나. 저수지 연간 수질개선효과 분석

매화저수지 유입하천 수질정화를 위해 생태융합형 접촉산화시스템 수로식을 유입부 대책 수질개선시설로 설치하였을 경우에 저수지의 수질개선에 미치는 효과에 대해서 분석하였다. 무대책(base) 대비 생태융합형 접촉산화시스템(수로식)을 유입수 대책으로 단독운영 할 경우 수질항목별 월간 수질개선효율을 <그림 4-32>~<그림 4-33>에 나타내었다. 수질항목별 연간 수질개선 효과는 TOC 5.3 → 4.5 mg/L로 연평균 14.9%의 개선효과가 있었고, COD는 7.9 → 6.7 mg/L로 연평균 14.9%의 개선효과, Chl-a 42.3 → 37.0 mg/m<sup>3</sup>로 12.5%의 개선, T-P 0.201 → 0.149 mg/L로 25.8%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다.

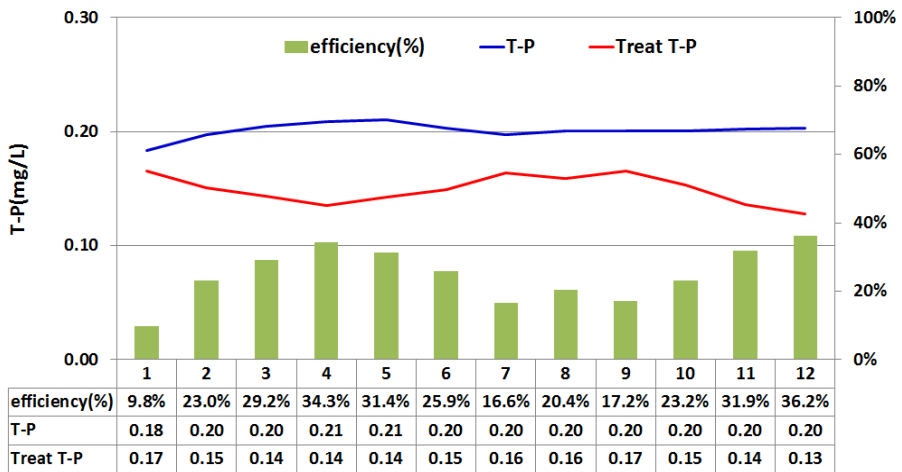


<그림 4-32> 접촉산화수로 월평균 수질 변화(TOC, COD)

(a) Chl- a



(b) T- P



<그림 4-33> 집축산화수로 월평균 수질 변화(Chl-a, T-P)

### 제3절 생태융합형 접촉산화부도의 성능평가

#### 1. 접촉산화부도의 현장적용 Test-bed 구축

##### 가. 적용대상지구 및 공정 구성

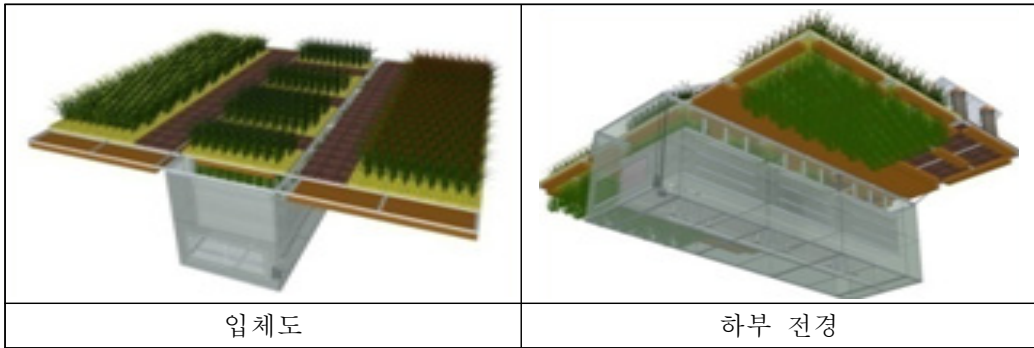
생태융합형 접촉산화부도의 현장적용실험을 위한 실험장치는 매화저수지의 생태융합형 접촉산화수로가 설치되어 있는 인근의 저수지 수중에 설치하였다. 생태융합형 접촉산화부도의 기본구성은 미생물 접촉산화조, 에어미스트, 수초재배섬, 제어반으로 구성되며, 수처리 공정은 생태융합형 접촉산화수로를 부도형으로 변형시킨 것으로서 상부의 식물재배섬과 하부의 미생물 접촉조에 의해 수질정화가 이루어진다.

##### 나. 생태융합형 접촉산화부도 시설제원

농업용 호소에서 상시적으로 정체수역인 만곡부의 수질정화를 위한 시설인 생태융합형 접촉산화부도의 기본적인 구성은 미생물 접촉산화조, 에어미스트, 수초재배섬, 제어반으로 구성되며, 현장적용실험을 위해 Test-bed로 구축한 플랜트의 시설제원 및 시설별 세부내역은 (표 4-23)~(표 4-24)와 같다.

(표 4-23) 생태융합형 접촉산화부도 시설제원

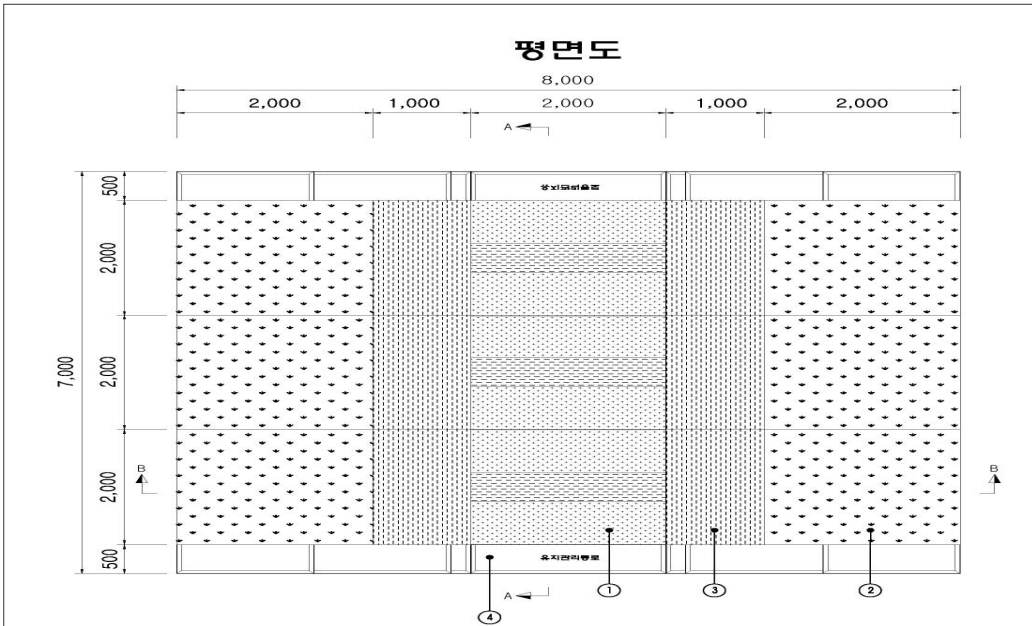
구분	규격 및 사양	비고
형식	철재프레임	상부 : 식생 하부 : 미생물 여재
규격	8.0m(W)x7.0m(L)x2.0m(H)	
처리용량	450m <sup>3</sup> ~ 1,300m <sup>3</sup> /day	유입농도, 체류시간고려 30min ~ 90min
처리효율	BOD 70%, SS 80%, TP 60% 이상	유입BOD 20mg/L이하 유입 SS 100mg/L이하
용적(m <sup>3</sup> )	2.0m(W)x7.0m(L)x2.0m(H)(28m <sup>3</sup> )	장막형(융합산화조)
구성	1) 식생면적 : 36m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



<그림 4-34> 생태융합형 집축산화부도 입체도 및 하부 전경

(표 4-24) 생태융합형 집축산화부도 시설별 세부 내역

시설구분	내부 규격	비고
에어미스트	950W×25LPM×1SET	
미생물 모듈	1,800mm×1,800mm×1,500mm×3EA 미생물접촉재 1,200m × 3EA	
미생물접촉산화조 (#1 ~ #3)	2,000Wmm×7,000Lmm×2,000Hmm	
수초재배섬 #1 ~ #2	2,000Wmm×7,000Lmm×100Hmm 꽃창포 98주× 2SET	
방류펌프	250L/min× 220V×950W×3EA	



<그림 4-35> 생태융합형 집축산화부도 평면도



<그림 4-36> 생태융합형 집축산화부도 설치 전경

## 2. 생태융합형 접촉산화부도 영향반경 평가

생태융합형 접촉산화부도는 매화저수지의 수중에 설치되어 있는 시설로서 개방형 수역으로 인해 수질정화효율을 정확하게 평가하기가 힘들다. 따라서 본 연구에서는 로다민이라는 생물체 염료를 사용하여 생태융합형 접촉산화부도에서 배출되는 처리수에 의해 수리학적으로 영향을 미칠 수 있는 수역의 공간적 반경에 대해서 정량적으로 측정하였다.

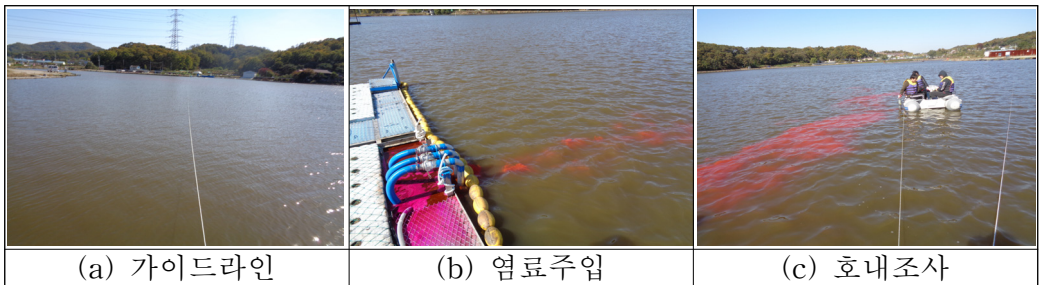
### 가. 로다민 추적실험 설계

생태융합형 접촉산화부도의 수리학적 유효 영향반경을 파악하고자 매화저수지에 직접 Rhodamine 용액을 주입하여 추적실험을 시행하였다. Rhodamine 용액은 생물체에 무해한 성분으로 생물체 염색에 주로 사용되고 있는 염료이며, Rhodamine 추적실험은 수중에서 주입된 용액의 확산범위 등을 실험하기 위하여 주로 이용되고 있는 방법이다. 부유식 수처리장치를 기점으로 수평방향 10m 간격으로 총 160m의 가이드라인을 설치하였으며, Rhodamine 주입량은 저수지 체적인 243,000 m<sup>3</sup>을 고려하여 0.232 kg으로 산정하였다. 로다민 염료는 호소수와 희석하여 수질개선장치 방류부에 직접 주입하였다. 매화저수지의 부유식 수질개선장치의 설치 위치 및 가이드라인 개념도는 <그림 4-37>와 같고, Rhodamine 추적실험 전경은 <그림 4-38>과 같다.



<그림 4-37> 생태융합형 접촉산화부도의 로다민 추적실험 가이드라인

호 내에 주입된 염료의 추적은 10m 간격으로 각 지점별로 수심을 측정 한 후, 수심 0.5m, 2m지점에서 Rhodamine 센서를 부착한 수질 다항목측정장치 (YSI 6600)를 이용하여 측정하였다. 그 밖의 수온, DO, 전기전도도 등의 항목도 동시에 측정하였고, 동시에 기상장치(Davis WS-Pro2\_Plus)를 설치하여 풍향 및 풍속을 측정해 결과 해석에 활용하였다.

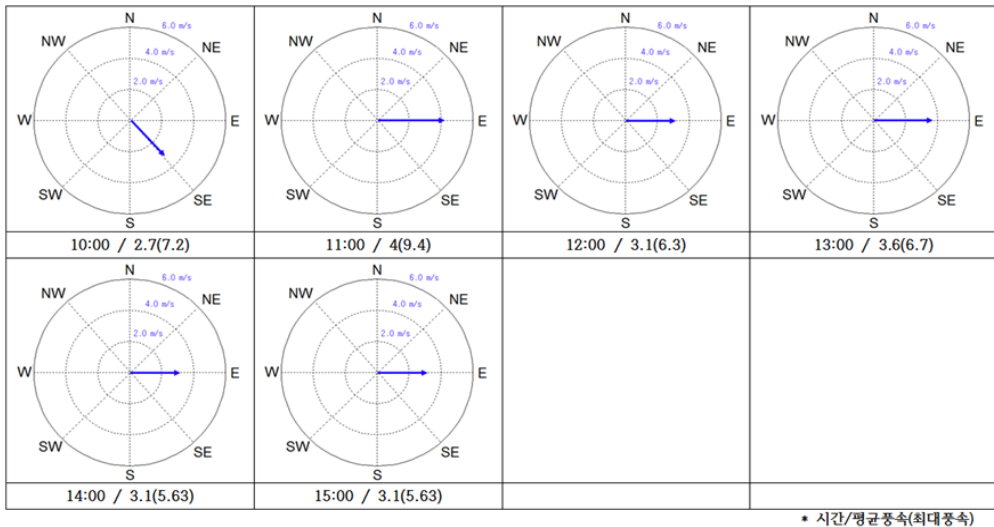


<그림 4-38> 매화지 추적실험조사 전경

나. 추적실험 결과

1) 풍향 및 풍속

로다민 추적실험 동안의 매화저수지의 풍향 및 풍속에 대한 측정값은 <그림 4-39>와 같다. 실험하는 동안 바람은 주로 서쪽에서 동쪽 방향으로 불었 으며, 평균 풍속은 2.7~4m/s로 나타났다.



<그림 4-39> 매화저수지 추적 실험기간 동안 풍향 및 풍속

2) Rhodamine 농도

염료 주입 후 경과시간에 따라 (표 4-25)와 같이 4개 구간으로 분리하여 실험결과를 해석하였으며, 경과시간에 따른 측정구간 내 Rhodamine 농도의 수면 변화를 <그림 4-40>에 나타내었고, 시간경과에 따른 측정구간 내 거리에 따른 Rhodamine 농도는 <그림 4-41>에 나타내었다.

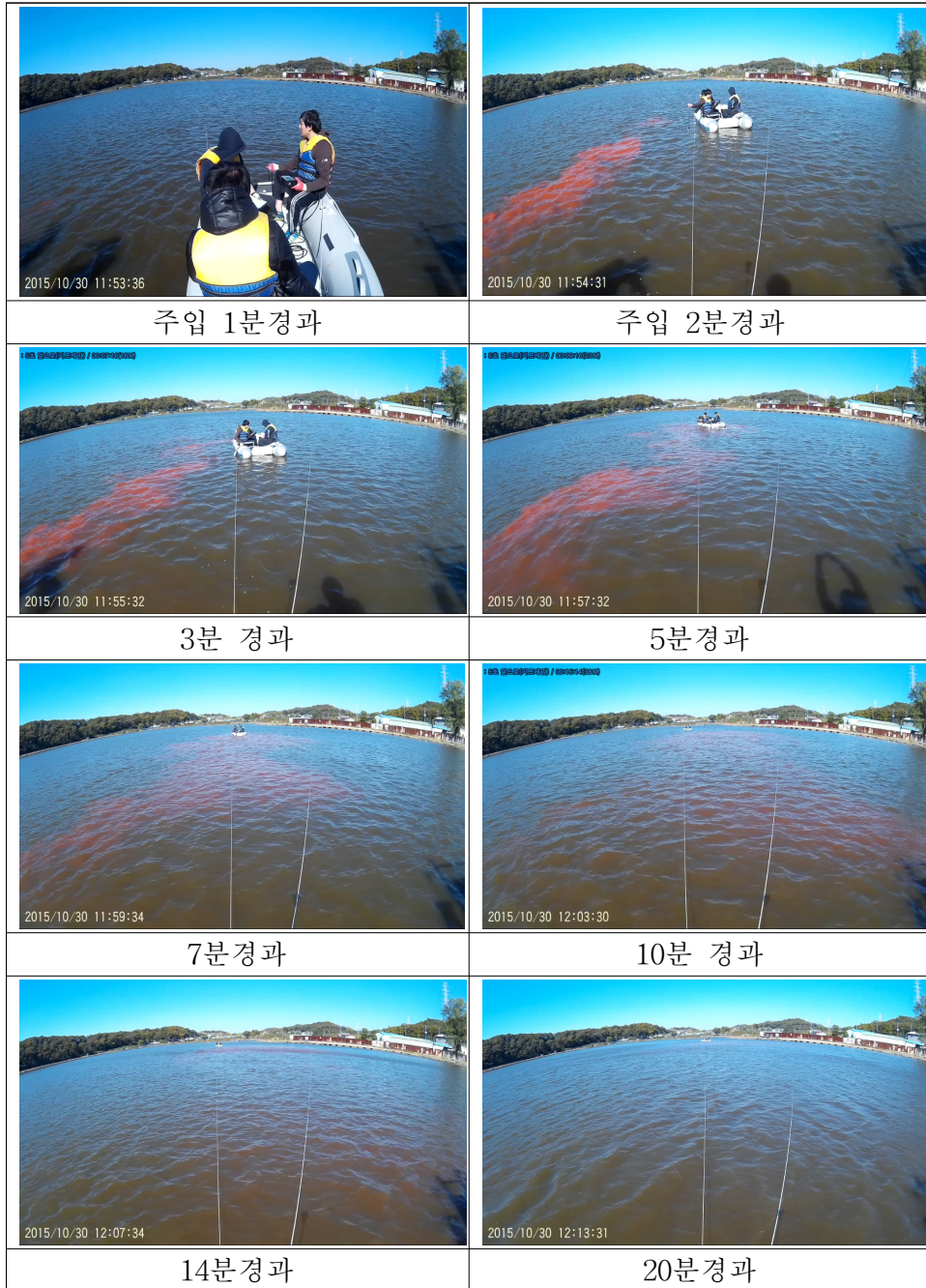
Rhodamine 용액을 주입하기 전 매화저수지의 배경농도는 물 속 형광물질의 영향으로 0.2~0.3 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다. 로다민 용액을 주입하자 물 속 염료는 부유식 수처리장치의 제트류 영향으로 추진방향으로부터 부채꼴 형태로 퍼져나가는 것을 볼 수 있었다. Rhodamine 주입 후 첫 번째 측정(T1구간)에서 주입된 용액은 수질개선 장치 제트류의 영향으로 거리 70m까지 이동하였으며, 수심 0.5m에서 11.4 $\mu\text{g/L}$ , 2m에서 2.4 $\mu\text{g/L}$ 의 농도를 보였다. 두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

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

(표 4-25) 매화저수지 경과시간에 따른 구간 분리

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



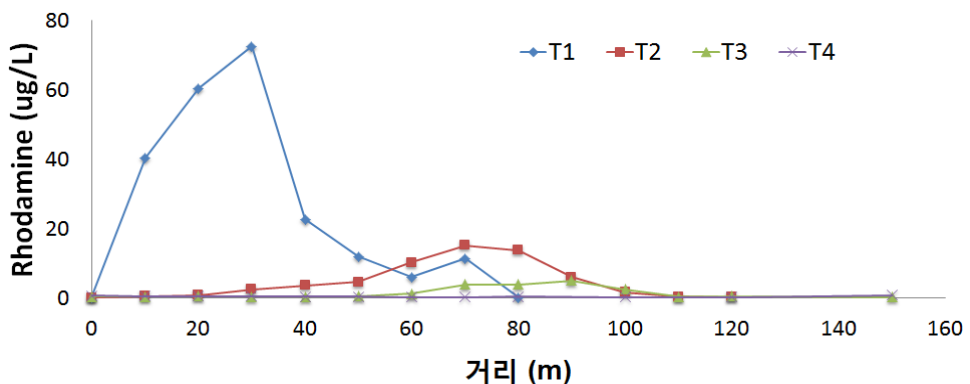


<그림 4-40> 매화저수지 Rhodamine 주입 후 경과시간별 수면 변화

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

<그림 4-41> 구간별로 거리에 따른 수심별 Rhodamine 농도

Rhodamine 용액 주입 후 수심 0.5m에서 거리에 따른 Rhodamine 농도를 측정한 결과는 <그림 4-42>와 같다. T1 구간(주입 후 20분 경과)에서는 마이크로 버블 제트류의 영향으로 약 50~70m까지 이동(속도 7cm/sec) 후 소멸되는 것을 볼 수 있고, T2(25분~45분 경과 후), T3 구간(1시간~1시간 20분 경과 후)에서는 이류에 의해 평균 3cm/s 속도로 약 100~120m 거리까지 이동하다가 소멸되는 것을 볼 수 있었다. 용액 주입 후 2시간 후인 T4 구간에서는 Rhodamine 용액이 배경농도와 비슷하여 완전 희석되어 소멸되는 것으로 나타났다.



<그림 4-42> 수심 0.5m에서 거리에 따른 구간별 Rhodamine 농도 변화

3) 수온

로다민 주입 후 경과시간에 따른 측정구간 내의 수온(℃) 변화를 <그림 4-43>에 나타내었다. 조사결과 상층과 하층간의 수온 차이는 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 조사 시기가 10월말이었고, 대기 기온 강하와 바람에 의한 난류로 인해 저수지 표층과 하층의 수직혼합(가을철 전도현상)이 활발하게 일어났기 때문으로 판단된다.

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

<그림 4-43> 구간별로 거리에 따른 수심별 수온

4) DO 농도

로다민 주입 후 경과시간에 따른 측정구간 내의 DO 농도 변화를 <그림 4-44>에 나타내었다. DO는 전 구간에서 9.0 mg/L 이상의 높은 농도를 나타냈으며, 수온 조사 결과와 동일하게 상층과 하층간의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 계절적 요인 및 바람에 의한 영향으로 판단된다.

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

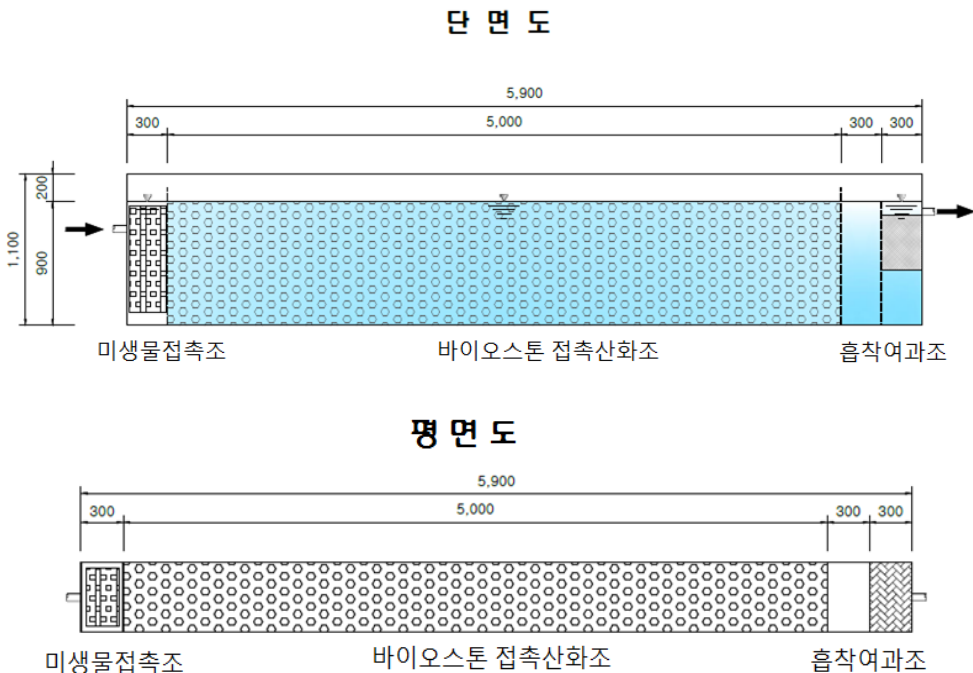
<그림 4-44> 구간별로 거리에 따른 수심별 DO 농도

## 제4절 바이오스톤 접촉산화시스템의 성능평가

### 1. 바이오스톤 접촉산화시스템 현장 Test-bed 구축

#### 가. 시설 제원

바이오스톤 접촉산화시스템의 공정 구성은 <그림 4-45>과 같이 미생물 접촉조, 바이오스톤 접촉산화조, 흡착여과조로 매우 단순하게 구성되어 있다. 미생물 접촉재는 끈상으로 이루어진 유동상 여재로 생태융합형 접촉산화시스템의 전처리조에 사용된 유동상 여재와 동일한 기성 제품이고, 유입되는 SS를 제거하고 바이오스톤 반응조의 미생물 증식을 도와주기 위한 목적의 전처리 공정이다. 바이오스톤 접촉산화조는 본 공법의 핵심 수처리 반응조로서 바이오스톤에 부착된 미생물에 의해 유기물 산화 및 분해가 일어나고, 처리조의 호기지역과 혐기지역의 반복으로 인해 질소와 인이 제거되는 원리이다. 후처리 공정인 흡착여과조는 바이오스톤 반응조에서 탈리된 미생물을 여과하고 방류수에 산소를 포기시키기 위한 목적으로 이용된다.



<그림 4-45> 바이오스톤 접촉산화시스템의 단면도(위) 및 평면도(아래)

바이오스톤 접촉산화시스템의 플랜트의 시설제원은 (표 4-26)과 같다. 전처리조인 미생물 접촉조의 시설제원은 규모 1,500mm×500mm×1,100mm의 1조로 구성되며 매디아 소요량은 약 150m를 사용하였다. 바이오스톤조의 규격은 500mmW×5,900mmL×1,100mmH으로 바이오스톤 볼 약 2,500개를 충전하였고, STS 304을 사용하여 프레임을 제작하였다. 제어반은 24시간 타이머를 이용하여 자동으로 간헐 운전되며, 수동 설정으로 각 해당 설비를 간단한 밸브조작을 통해 조작이 가능하도록 제작되었다

(표 4-26) 바이오스톤 접촉산화시스템 세부 시설별 제원

구분	사 양	비 고
미생물 접촉조	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,500mm×500mm×1,100mm</li> <li>• 매디아 소요량 : 부유식 여재(0.075 m<sup>3</sup>, 약 150m)</li> </ul>	
바이오스톤 접촉산화조 및 흡착여과조	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규격: 500mmW×5,900mmL×1,100mmH</li> <li>• 재질: STS 304</li> <li>• 구성: 바이오스톤 볼(2,500 ea) 유입펌프 100L/min×0.29kW 링브로워 (1.4m<sup>3</sup>/min×1,200mmAq×0.3kW)</li> </ul>	 

나. 데모 플랜트 설치 및 운영

바이오스톤 접촉산화시스템의 현장적용실험을 위하여 생태융합형 접촉산화시스템이 설치되어 있는 경기도 시흥시 도창동에 위치한 매화저수지 수변에 데모 플랜트를 설치하여 운영하였다<그림 4-46>~<그림 4-47>. 생태융합형 접촉산화시스템(수로식) 바로 옆에 설치하여 2개의 공법을 동시에 운영하여 서로의 정화효율 등을 검증하여 비교분석하고자 하였다. 바이오스톤 접촉산화시스템은 2016년 상반기에는 바이오스톤 불에 대한 정화효율 등을 검증하였고, 9월부터는 전처리조와 후처리조를 추가 설치하여 바이오스톤 접촉산화시스템을 완비하고, 설계조건별로 수질정화효율 등을 검증하였다.



<그림 4-46> 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트 설치 지구



<그림 4-47> 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트 설치 전경

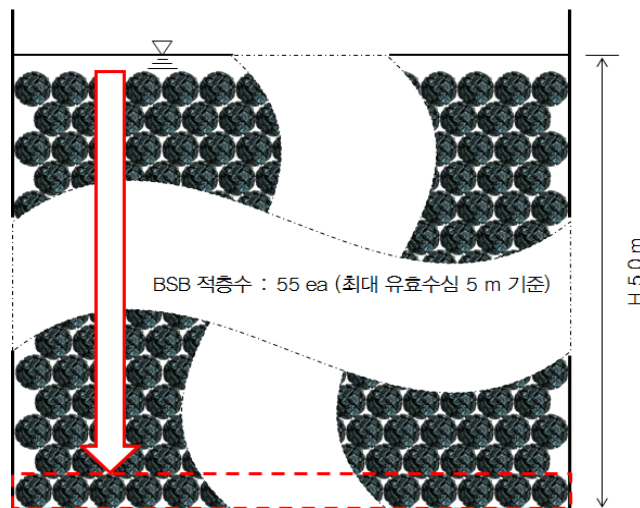
## 2. 바이오스톤 볼(BSB)의 압축강도 실험 및 평가

바이오스톤 점축산화시스템의 핵심기술은 바이오스톤 볼(BSB)이라는 수처리용 담체이다. 수질개선 또는 수처리를 위한 담체는 충분한 내구성을 기본 조건으로 하기 때문에 압축강도는 매우 중요하다. 바이오스톤 볼 압축강도는 압축하중 하에서 견딜 수 있는 재료의 최대 응력으로, 수처리 시설에 적용될 여재인 바이오스톤 볼의 경우 충분한 내구성을 갖는 것이 가장 중요하다.

바이오스톤 볼 압축강도에 대한 시험은 한국건설생활환경시험연구원(KCL)에 의뢰하여 2016.10.17.~2016.11.02. 기간 동안 실시하였다. 바이오스톤 볼에 요구되는 최대 압축강도는 최대 유효수심 5m인 점축산화조에 충전할 경우 BSB 최대 적층수는 55 ea, BSB 중량은 0.7 kg/ea, 바닥층 BSB에 가해지는 힘은 370.4 N으로 산출되었다. 따라서 요구되는 BSB의 압축강도는 최소 3.8 MPa 이상으로 산출되었고, 시험결과 바이오스톤 볼의 압축강도는 (표 4-27)과 같이 평균 4.3 MPa(4.0~4.6 MPa)로 산출되어 요구되는 압축강도 3.8 MPa를 충분히 만족하고 있는 것으로 분석되었다.

(표 4-27) 바이오스톤 볼 압축강도 시험결과

시 료	단위	시험결과			
		#1	#2	#3	평균
바이오스톤 볼	MPa	4.6	4.0	4.3	4.3

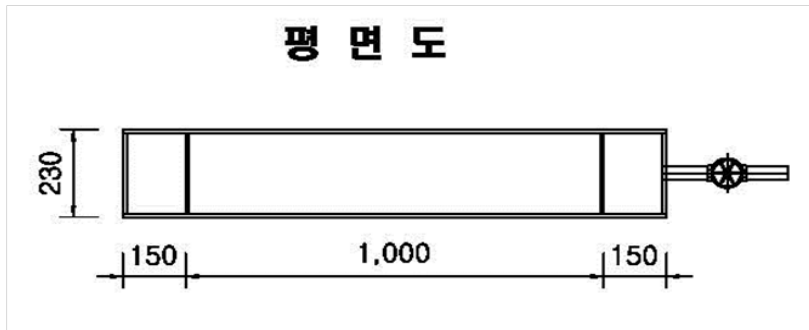


<그림 4-48> 바이오스톤볼 요구 압축강도 산출 개념도

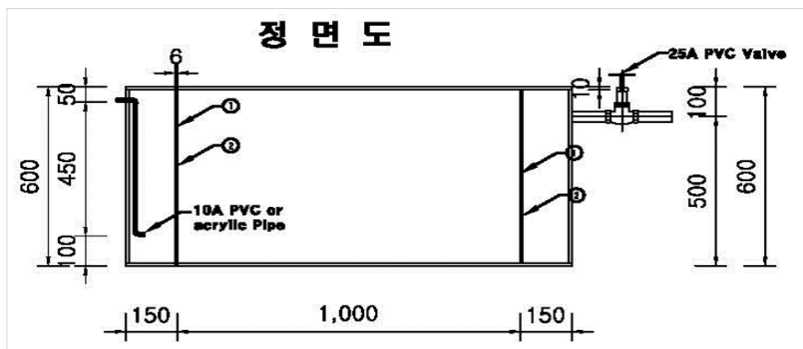
### 3. 바이오스톤 접촉산화시스템 폐색정도 평가

담체(여재)를 이용한 수처리공법의 가장 큰 문제점은 오염물질의 지속적인 흡착 때문에 발생하는 폐색으로 인한 수처리 효율의 감소이다. 본 연구에서 개발된 바이오스톤 접촉산화시스템의 핵심기술도 바이오스톤 볼이라는 담체로 구성되어 충분히 폐색 문제가 발생할 수 있으므로 바이오스톤 볼로 구성된 접촉산화시스템의 폐색 정도에 대해서 실측을 통해 평가하였다.

바이오스톤 볼과 일반 쇠석의 폐색정도를 평가하기 위하여 <그림 4-51>과 같이 쇠석 충전조(1조), 바이오스톤 볼 충전조(1조)을 각각 제작하였다. 소규모 실험장치는 1조의 규모가 각각 0.23m(W)×1.3m(L)×0.6m(H)으로 실험조와 대조구로 제작되었으며, 실험장치는 경기도 시흥시 매화저수지 수변에 설치하였다. 운전 조건은 매화저수지 물을 유입수로 유도하였으며, 유입 유량 1.5 L/min, 체류시간 1.4 hr, 수심 0.5 m으로 하여 2017.4.~2017.6.30.(90일) 기간 동안 운영하면서 일정시간 경과별로 수두손실을 측정하였다.



<그림 4-49> 바이오스톤 볼 폐색 정도 평가를 위한 반응조 평면도

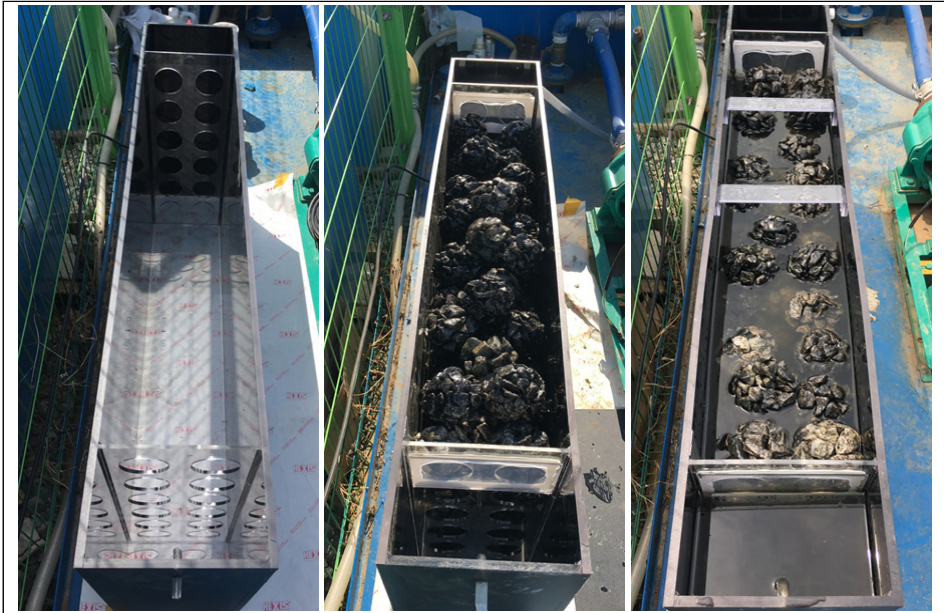


<그림 4-50> 바이오스톤 볼 폐색 정도 평가를 위한 반응조 정면도



	
<p>아크릴 처리조</p>	<p>반응조 외형</p>
	
<p>바이오스톤 볼</p>	<p>일반 쇄석</p>
	
<p>바이오스톤 볼 충전</p>	<p>바이오스톤 볼 충전 직 후</p>
	
<p>일반 쇄석 충전 직 후</p>	<p>쇄석 산화조 운영</p>

<그림 4-51> 수두손실 측정을 위한 플랜트 설치 과정



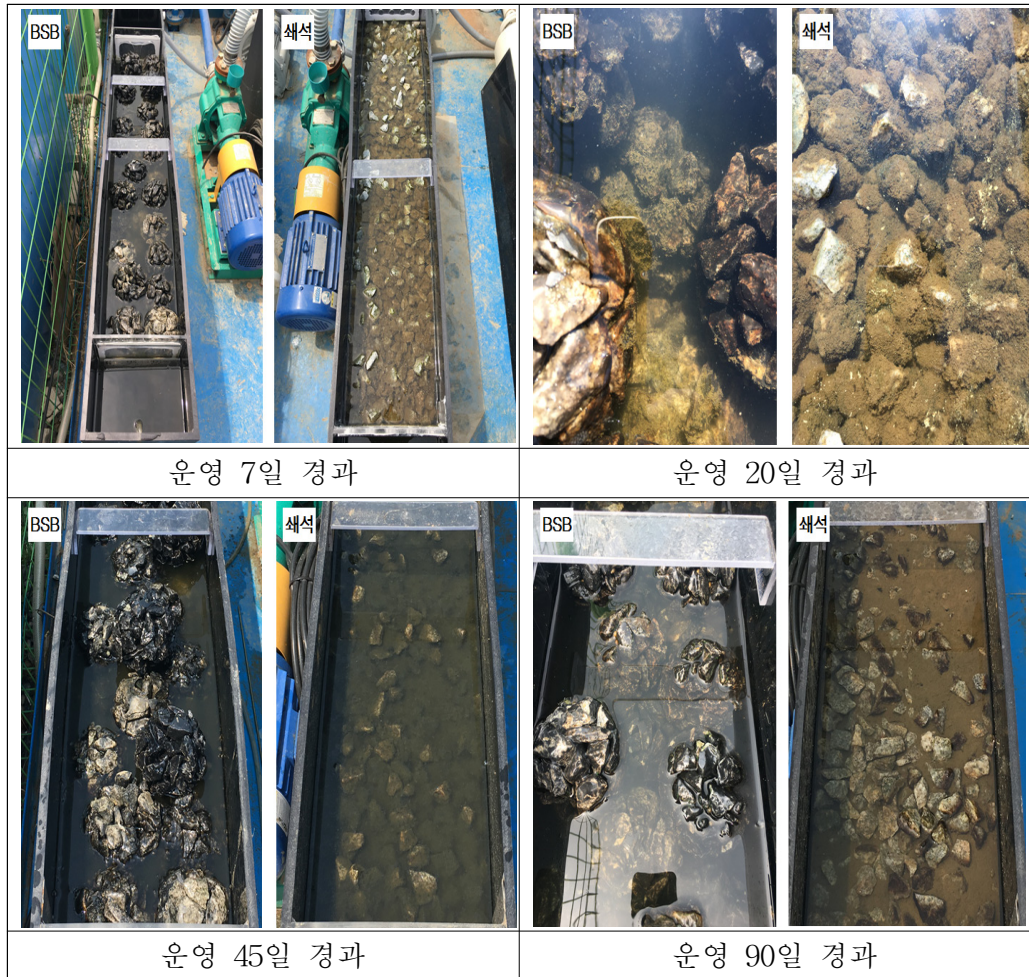
바이오스톤 볼 충전 반응조(실험군)

<그림 4-52> 바이오스톤 볼 충전조(실험군)



쇄석 충전 반응조(대조군)

<그림 4-53> 바이오스톤 볼 충전조(대조군)

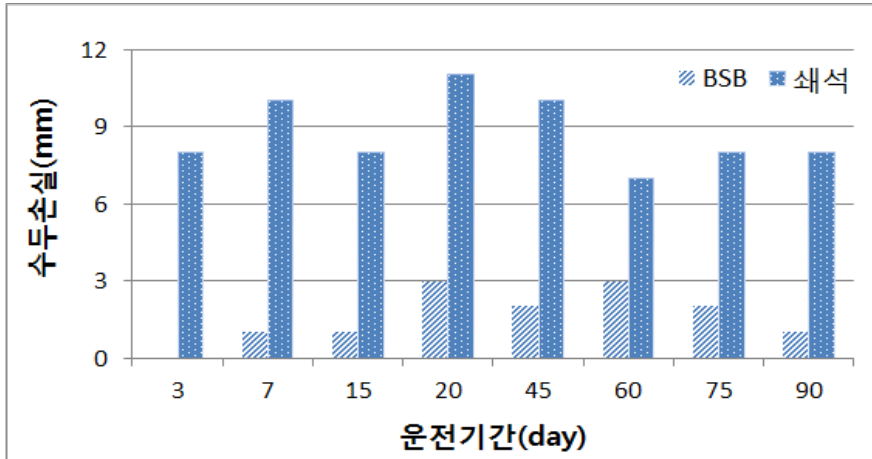


<그림 4-54> 운전기간에 따른 실험군과 대조군의 폐색정도

바이오스톤 볼(BSB)과 일반 쇄석으로 충전한 반응조에 대해 3일, 7일, 15일, 20일, 45일, 60일, 75일, 90일 등 일정한 기간별로 수두손실을 측정하였고, 그 결과를 <그림 4-55>에 나타내었다. 바이오스톤 볼의 최대 수두손실은 3 mm 이하, 평균은 1.6 mm로 나타났고, 일반 쇄석으로 충전한 반응조의 수두손실은 7~11mm로 측정되어 바이오스톤 볼의 폐색정도는 일반 쇄석에 비해 81.4%의 저감율을 보여 매우 낮은 것으로 나타났다(표 4-28).

<그림 4-56>는 바이오스톤 볼과 일반 쇄석 처리조의 부착 고형물량 측정을 통하여 바이오스톤 볼과 쇄석 반응조의 폐색 가능성을 살펴보고, 그 결과를 나타낸 것이다. 일반 쇄석의 부착고형물량은 3,739 mg/m<sup>2</sup>로 나타났고,

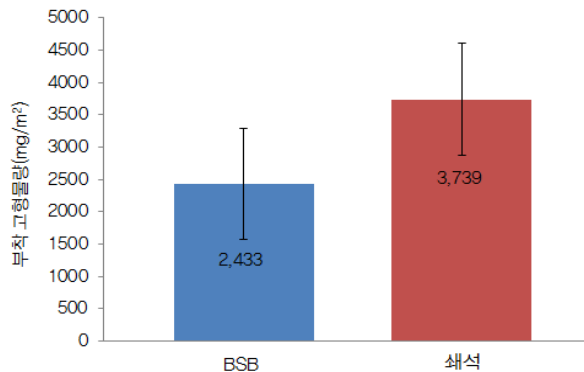
바이오스톤 볼에 부착된 고형물량은 2,433 mg/m<sup>2</sup>으로 측정되어 일반 쇄석에 비해 바이오스톤 볼에서 2/3 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.



<그림 4-55> 운전기간에 따른 실험군과 대조군의 수두손실 측정결과

(표 4-28) 일반 쇄석조와 바이오스톤 볼 충전조의 수두손실 측정값

구분	쇄석 처리조	BSB 처리조
수두손실(mm)	7~11.0	0~3.0
평균 수두손실(mm)	8.8	1.6
저감율(%)	-	81.4



<그림 4-56> 바이오스톤볼과 일반 쇄석의 부착 고형물량

#### 4. 바이오스톤 접촉산화시스템 슬러지 발생량 산출

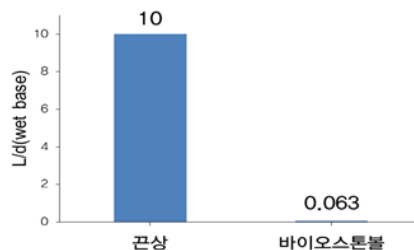
바이오스톤 접촉산화시스템에서 오염물질 처리 부산물로 발생하는 슬러지 양을 산출하였다. 바이오스톤 반응조와 일반 쇄석 반응조의 슬러지 발생량을 비교하기 위하여 바이오스톤 충전조와 일반 쇄석 충전조의 소규모 시설 (0.23m(W)×1.3m(L)×0.6m(H))를 제작하여 5개월 동안 매화저수지에서 운영하였다. 일정기간이 경과한 후 생성된 슬러지를 수거하여 슬러지의 무게를 측정하였다. 90일 운영기간 동안의 실험조건은 (표 4-29)와 같고, 발생한 슬러지 양은 슬러리 상태에서 9.5 L로서, 하루 발생량으로 환산하면 0.063 L/d에 해당하였다.



<그림 4-57> 바이오스톤 처리조의 슬러지 양 실측

(표 4-29) 소규모 바이오스톤 처리조 운전조건 및 발생 슬러지 부피

구분	측정값
유량(m <sup>3</sup> /d)	1.9
수리학적 체류시간(hr)	1.3
운전기간	2017.04.15.~2017.09.22
슬러지발생 부피(L, wet base)	9.5



<그림 4-58> 관상접촉조와 바이오스톤 볼 접촉조의 슬러지 발생량

## 5. 바이오스톤 접촉산화시스템의 수질정화효율 평가

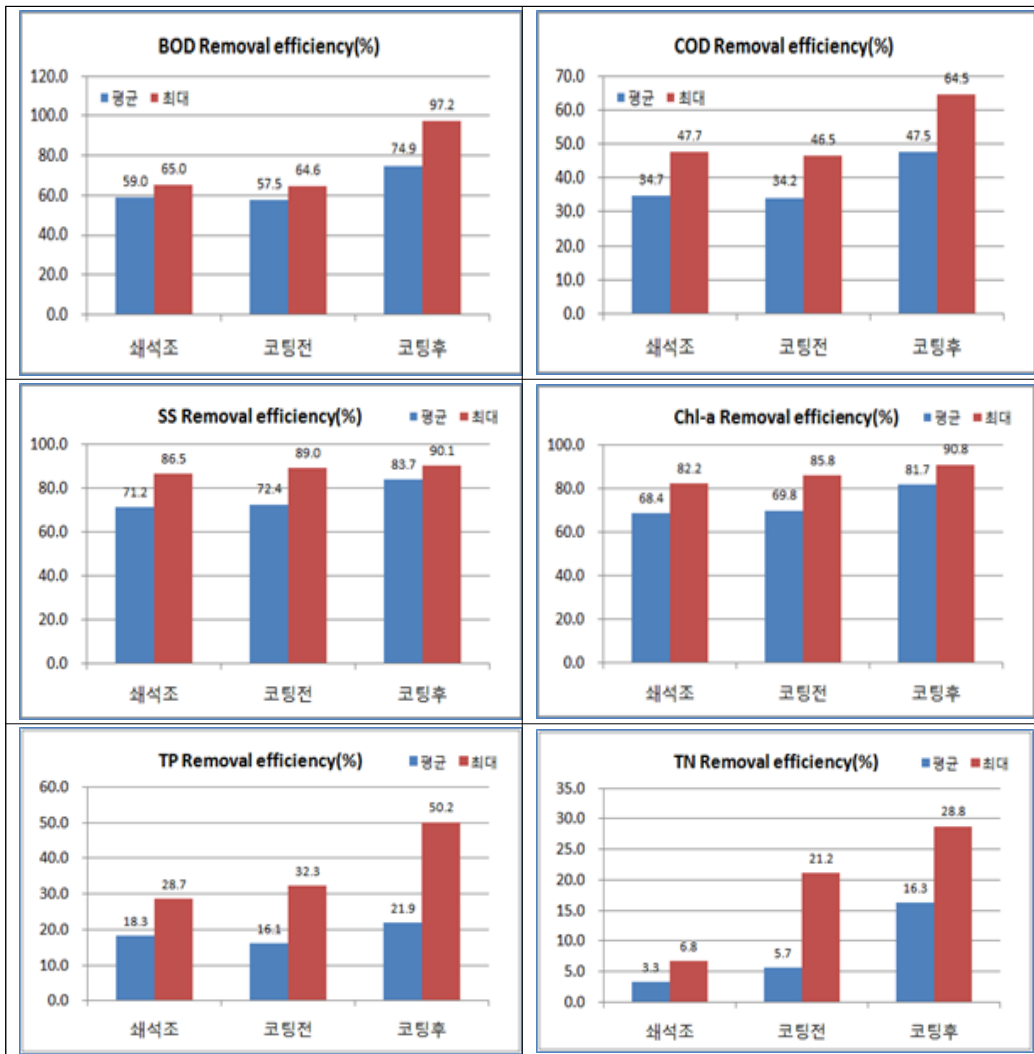
### 가. 바이오스톤 코팅여부에 따른 수질정화효율

복합유용미생물로 사전 코팅한 바이오스톤볼과 비교를 위해 복합유용미생물로 코팅하지 않은 바이오스톤볼, 그리고 쇠석을 충전한 접촉산화공정을 운전하여 수질정화효율 비교하였다(표 4-30). 복합유용미생물로 사전 코팅한 바이오스톤 볼 접촉산화공정의 수질정화효율은 COD 40.7%, SS 80.8%, Chl-a 77.8%, T-N 16.3%, T-P 21.9%로 나타났고, 복합유용미생물로 코팅하지 않은 바이오스톤 볼 접촉산화공정의 수질정화효과는 COD 34.2%, SS 72.4%, Chl-a 69.8%, T-N 5.7%, T-P 16.1%, 쇠석을 사용한 접촉산화공정의 수질정화효과는 COD 34.7%, SS 71.2%, Chl-a 68.4%, T-N 3.3%, T-P 18.3%로 나타났다. 복합유용미생물로 사전 코팅한 바이오스톤 볼 접촉산화공정은 쇠석을 사용한 접촉산화공정보다 향상된 수질개선효과를 나타내는 것으로 나타났다.

(표 4-30) 바이오스톤 볼 미생물 코팅 전/후의 수질정화효율 비교

구분	바이오스톤볼 미생물 코팅(O)			바이오스톤볼 미생물 코팅(x)		
	유입수	유출수	처리효율 (%)	유입수	유출수	처리효율 (%)
COD (mg/L)	30.6 (18.0-47.3)	17.7 (9.2-26.5)	40.7 (26.1-48.9)	28.7 (17.2-47.3)	20.0 (9.2-35.3)	34.2 (18.8-46.5)
SS (mg/L)	76.0 (32.7-120.0)	15.8 (2.4-28.0)	80.8 (74.3-92.7)	66.6 (22.0-120.0)	23.4 (3.6-52.0)	72.4 (56.7-89.0)
Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	296.1 (1328-500.7)	59.2 (11.2-99.9)	77.8 (57.2-91.8)	270.6 (95.9-500.7)	101.4 (19.4-241.7)	69.8 (41.6-85.8)
T-N (mg/L)	4.377 (1.853-8.594)	3.455 (1.731-6.115)	16.3 (6.6-28.8)	4.391 (1.853-8.594)	3.800 (1.982-6.768)	5.7 (-7.0-21.2)
T-P (mg/L)	0.391 (0.176-0.854)	0.259 (0.178-0.425)	21.9 (-1.1-50.2)	0.431 (0.176-0.854)	0.328 (0.154-0.578)	16.1 (3.4-32.3)

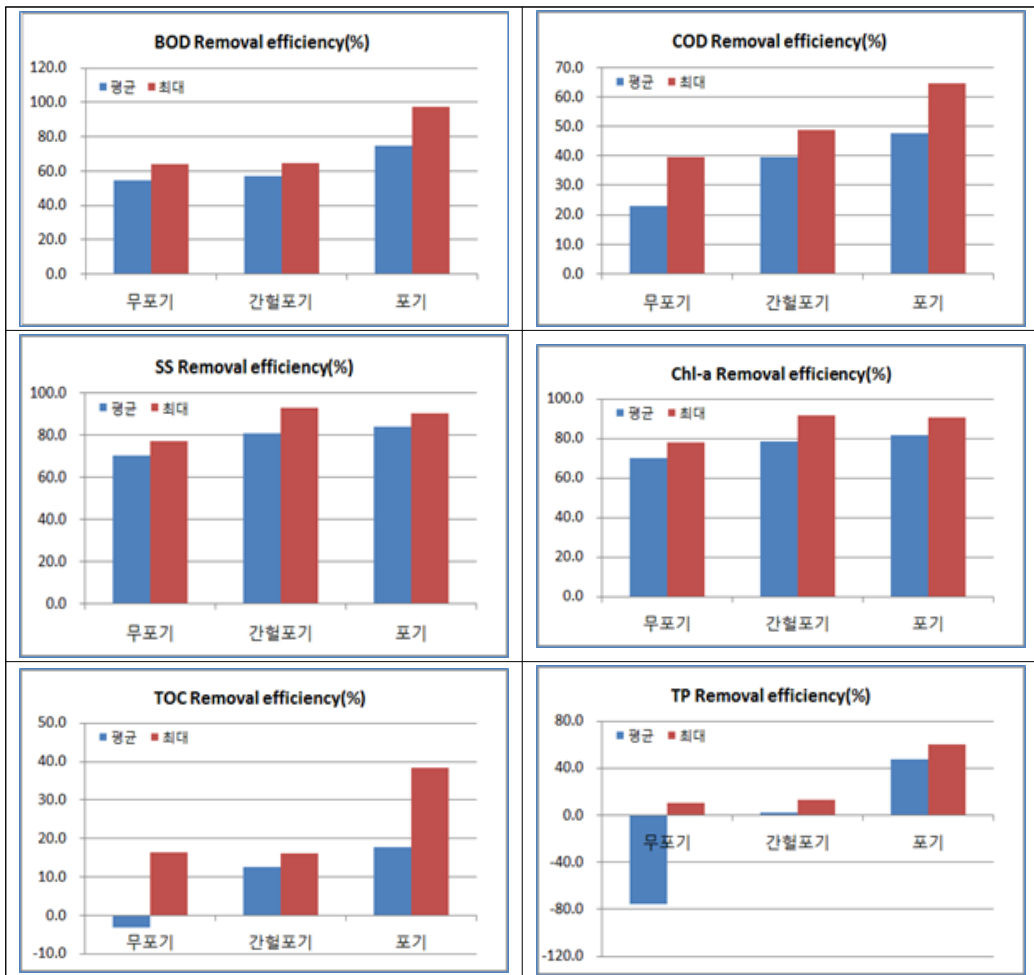
일반 쇄석, 바이오스톤 볼(미생물 코팅 X), 바이오스톤 볼(코팅 O)을 각각 충전한 수처리조를 실험실 규모로 제작(1조당 0.23m(W)×1.3m(L)×0.6m(H)) 하여 2017년 4월부터 7월까지 운영하면서 수질정화효율을 측정하였다. 모든 항목에서 미생물 사전 코팅을 한 바이오스톤 볼에서 정화효율이 높게 나타났고, 코팅하지 않은 스톤과 일반 쇄석 수처리조에서는 거의 비슷한 효율을 나타냈다. 특히, BOD, COD, TP, TN에서 미생물 코팅한 바이오스톤 처리조에서 제거효율이 매우 우수하였다.



<그림 4-59> 바이오스톤 코팅에 따른 수질정화효율 비교

나. 산소 포기방법에 따른 수질정화효율

경기도 시흥시 매화저수지에 설치되어 있는 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트를 완전 호기(24시간), 간헐포기(2시간 간격으로 포기), 무포기(24시간 무포기)로 구분하여 각각의 조건에서 일정기간 동안 시설을 운영하여 수질정화 효율을 평가하였다. 조사한 모든 항목에서 지속포기 > 간헐포기 > 무포기 순으로 수처리 효율이 높게 나타났으며, 특히, TOC, T-P 항목에서는 무포기, 간헐포기에 비해 지속 포기 시에 효율이 아주 우수하게 나타났다. 실제로 현장 적용시에는 처리항목 및 처리수질 목표에 따라 간헐포기 또는 지속포기로 설계 및 운영하면 좋을 것으로 판단된다.



<그림 4-60> 산소 포기방법에 따른 수질정화효율 비교



#### 다. 바이오스톤 접촉산화시스템의 수질정화효율

바이오스톤 접촉산화공법 실증시설의 수질정화효율을 평가한 결과, BOD 70.3%(최대 97.2%), COD 45.3%(최대 64.5%), TOC 19.2%(최대 50%), SS 82.8%(최대 92.7%), Chl-a 80.4%(최대 91.8%), TN 23.2%(최대 39.5%), TP 51.8%(최대 80.1%)으로 나타났고(표 4-31), 외부기관 한국화학융합시험연구원(KTR)에 의뢰하여 분석한 바이오스톤 접촉산화공법 실증시설의 수질정화효율은 BOD 35%, COD 40%, TOC 11%, SS 96%, Chl-a 91%, TN 37~39.5%, TP 61~80%으로 나타났다(표 4-32). BOD 처리효율이 35%로 저조한 원인은 채수 당일 날 유입수의 BOD 농도가 매우 낮은 것에서 기인된 것으로 판단되었다.

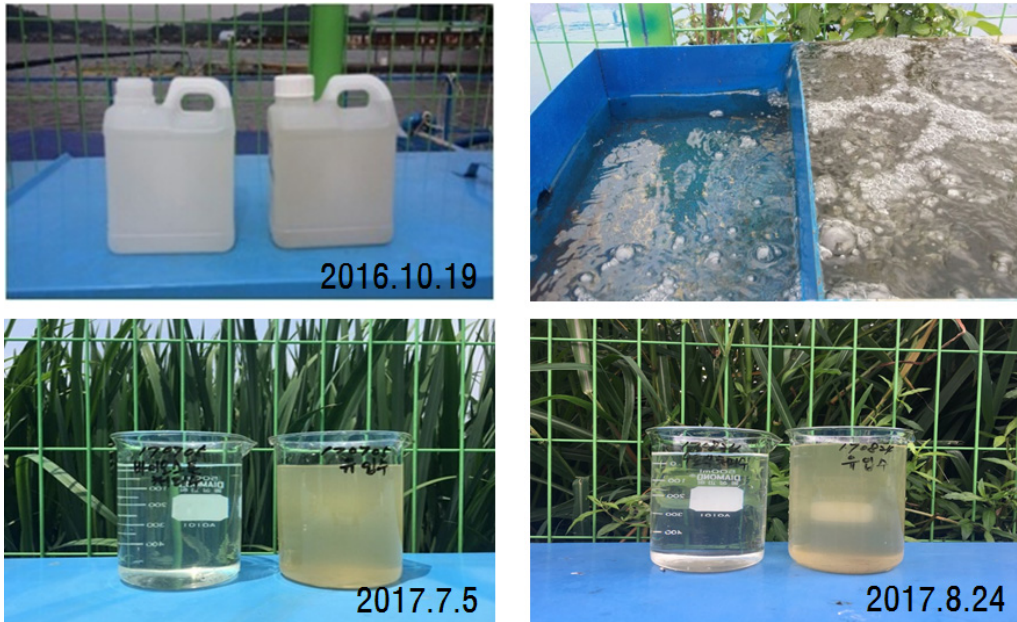
바이오스톤 접촉산화공법 실증시설의 수질정화효율은 기존에 수질개선시설로 널리 활용되고 있는 인공습지의 BOD, COD, TOC, SS, Chl-a의 수질정화효율보다 매우 높게 나타났다. 바이오스톤 접촉산화공법은 별도의 질소 및 인 제거를 위한 시설이 없는 공법임에도 불구하고 최대 40%와 80%의 TN과 TP 정화효율을 나타내었다.

(표 4-31) 바이오스톤 접촉산화시스템 실증시설의 수질정화효율

구분	유입수	유출수	처리효율 (%)
BOD (mg/L)	10.1 (5.9~12.2)	2.9 (0.3~4.7)	70.3 (47.2~97.4)
COD (mg/L)	21.1 (11.8~47.3)	11.4 (7.6~11.4)	45.3 (26.1~64.7)
TOC (mg/L)	8.8 (5.9~18.2)	6.8 (5.1~14.7)	19.2 (8.5~50.0)
SS (mg/L)	42.8 (20.0~120.0)	8.1 (2.2~28.0)	82.8 (73.1~92.7)
Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	173.8 (51.8~500.7)	32.5 (11.1~99.9)	80.4 (57.2~91.8)
T-N (mg/L)	3.899 (1.853~8.594)	2.930 (1.350~6.115)	23.2 (6.4~39.5)
T-P (mg/L)	0.321 (0.167~0.854)	0.156 (0.046~0.425)	51.8 (-1.1~80.1)

(표 4-32) 바이오스톤블 접촉산화공법 실증시설의  
수질정화효율(한국화학융합시험연구원(KTR))

채수일자	항목	유입수	유출수	처리효율(%)
2017.07.25	BOD(mg/L)	4.3	2.8	34.9
	COD(mg/L)	8.6	5.2	39.5
	SS(mg/L)	78	3.1	96.0
	TOC(mg/L)	4.6	4.1	10.9
	Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	40	3.7	90.8
	T-N(mg/L)	4.43	2.79	37.0
	T-P(mg/L)	0.457	0.091	80.1
2.17.08.16	T-N(mg/L)	3.49	2.11	39.5
	T-P(mg/L)	0.168	0.065	61.3



<그림 4-61> 유입수와 처리수의 육안상 비교

### 라. 처리수 수질에 영향을 미치는 유입수 수질항목

유입수 항목별 수질농도와 수처리 효율과의 상관관계를 분석한 결과는 (표 4-33)과 같다. 처리수의 BOD, COD, Chl-a 처리율에 영향을 미치는 유입수 수질항목 인자는 Temp, C/N, TP이고, TN 처리율에 영향을 미치는 수질항목 인자는 Chl-a, C/N으로 나타났다. 기존 연구결과에서 하수처리시설(활성슬러지법, 생물막법)에서 유입수 수온은 BOD, COD 처리율에 영향을 미치고, TN, TP 처리율과는 상관성이 없는 결과와 일치하는 결과를 보여주었다.

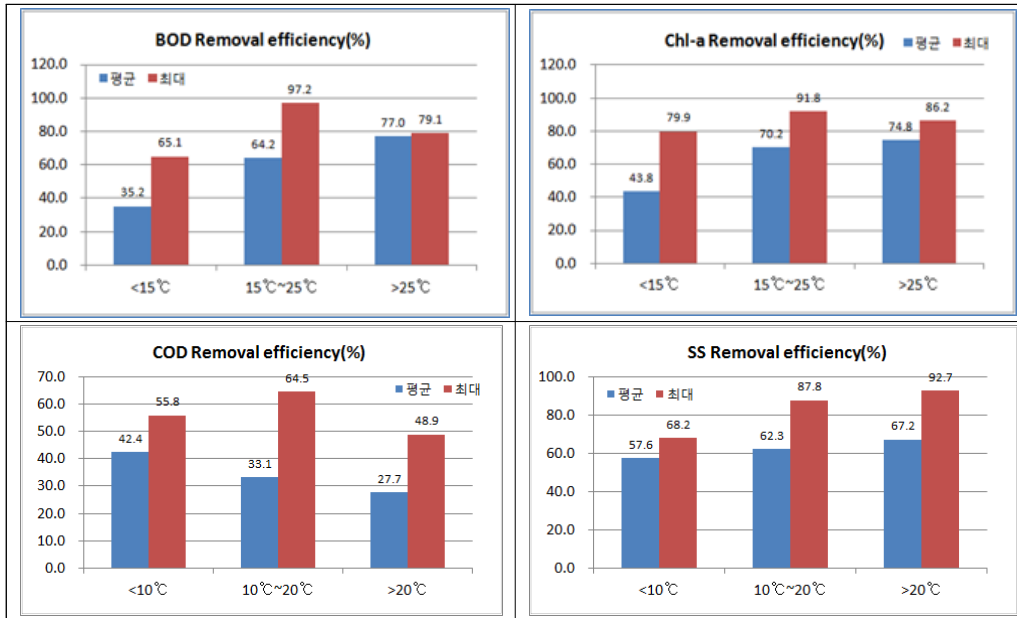
(표 4-33) 처리수 수질에 영향을 미치는 유입수 수질항목

	T-BOD	T-COD	T-SS	T-Chla	T-TN	T-TP
Temp	0.395*	0.231	0.182	0.423*	-0.295	-0.112
pH	0.041	0.300	0.106	-0.035	0.210	0.201
EC	-0.288	-0.095	-0.141	-0.292	-0.060	-0.186
DO	-0.285	-0.073	-0.079	-0.271	0.290	0.164
BOD	0.345*	0.389*	0.112	0.211	-0.042	0.052
COD	0.247	0.508**	0.248	0.440*	-0.345	0.019
SS	0.059	0.337	0.244	0.319	-0.241	0.027
Chl-a	0.181	0.455*	0.231	0.420*	-0.350*	0.047
TN	-0.245	0.053	0.146	0.091	0.128	0.060
TP	0.248	0.394*	0.295	0.386*	-0.046	0.141
C/N	0.434*	0.407*	0.007	0.275	-0.390*	-0.028

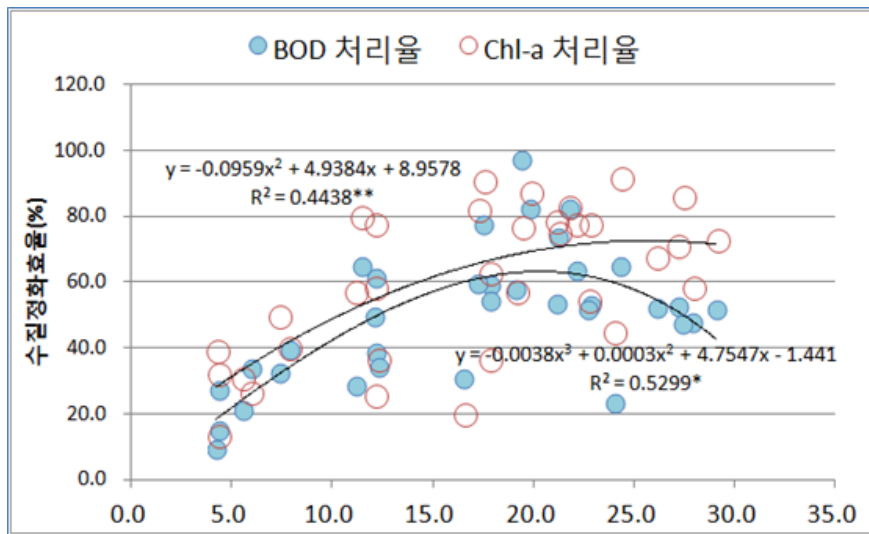
주) \* p<0.05, \*\* p<0.01, \*\*\* p<0.001

### 마. 유입수 수온에 따른 수질정화효율 평가

유입수 수질과 처리수 수질과의 상관관계 분석결과에서 유입수 수온에 영향을 받는 BOD와 Chl-a 처리효율에 대해서 수온에 따른 수질정화효율을 분석하여 <그림 4-62>에 나타내었다. BOD, Chl-a 모두 15℃ 이하에 비해 15℃ 이상에서 정화효율이 상승하였고, 15℃~25℃와 25℃ 이상에서의 정화효율은 거의 유사하게 나타났다. 유입수 수온과 BOD, Chl-a 처리율과의 관계식(회귀식)에서는 <그림 4-63>과 같이 20℃~25℃.에서 처리효율이 가장 높은 것으로 나타났다.



<그림 4-62> 유입수 수온에 따른 수질정화효율

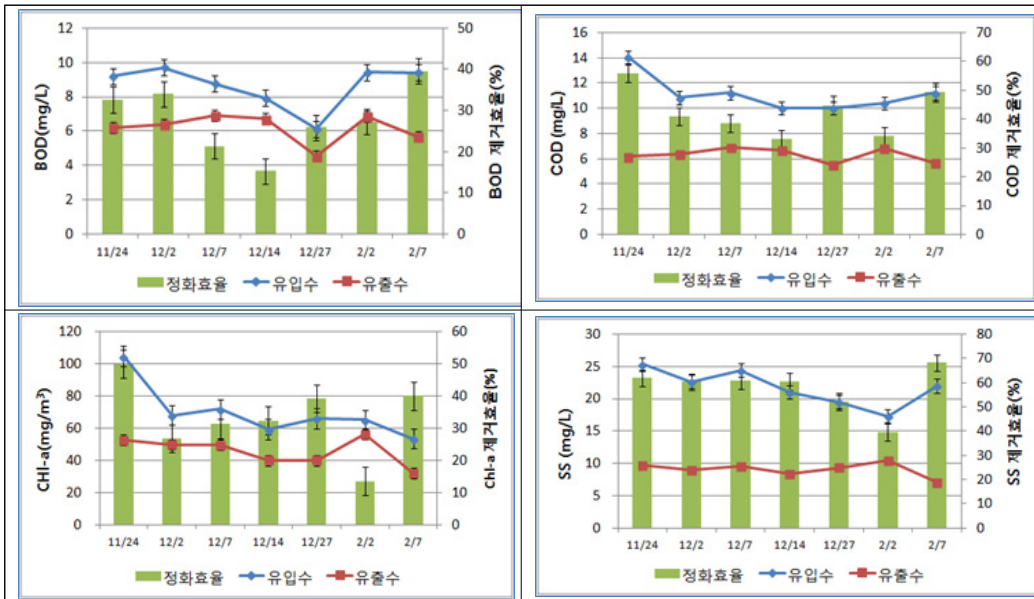


<그림 4-63> 접촉산화조에서 수온과 BOD, Chl-a 제거율과의 관계

바. 동절기의 수질정화효율 평가

바이오스톤 접촉산화시스템의 핵심기술인 바이오스톤에 부착된 미생물에 의한 오염물질의 분해 및 산화이기 때문에 수온은 처리효율에 가장 많은 영향을 미치는 인자이므로 바이오스톤 접촉산화시스템의 동절기 오염물질 처리 효율을 평가하여 <그림 4-64>에 나타내었다. 11월부터 다음해 2월까지 4개월간의 수질결과를 분석한 결과, 유입수의 수온은 평균 5.3℃(S.D 1.3℃)이었고, 수질항목별 오염물질 처리효율은 BOD는 평균 28.0%(최대 39.5%), COD 평균 42.4%(최대 55.8%), SS 평균 57.6%(최대 68.2%), Chl-a 평균 33.3%(최대 49.9%)의 효율을 나타내는 것으로 나타났다.

현재 끈상 접촉산화공법은 오염 하천수의 수질 정화를 위하여 1990년대에 양재천, 안양천 등을 비롯하여 전국적으로 여러 곳에 설치되어 운영되고 있다. 끈상 접촉산화공법은 보통 하천 홍수터 부지 내에 지하구조물로 설치되어 있다. 동절기의 지하구조물인 수처리시설의 유입수 수온을 알아보기 위하여 동절기에 현장을 방문하여 수온을 실측하였으며, 동절기의 유입수 수온은 약 5~10℃를 유지하고 있는 것으로 실측되었다. 따라서 바이오스톤 접촉산화시스템의 동절기 수처리 효율은 최소한 BOD는 평균 28.0%(최대 39.5%), COD 평균 42.4%(최대 55.8%), SS 평균 57.6%(최대 68.2%), Chl-a 평균 33.3%(최대 49.9%)의 효율은 보증할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 4-64> 바이오스톤 접촉산화시스템의 동절기 수질정화효율

## 6. 저수지 수질개선효과 분석

### 가. 시나리오 구성 및 기본 가정

매화저수지 수질개선을 위해 매화저수지 유입하천 정화시설로 바이오스톤 접촉산화시스템을 실규모로 설치하였다고 가정하였을 때의 매화저수지 수질개선효과를 분석하였다. 매화저수지의 유입 및 유출 등에 관한 물질수지 등 분석방법은 생태융합형 접촉산화시스템 수질개선효과 분석방법과 동일한 방법으로 분석하였다.

바이오스톤 접촉산화시스템 설치시 저수지 수질개선 효과를 정량화하기 위한 시나리오의 구성은 평균 유입수량을 설계유량으로 하여 강우, 평시에 상관없이 유입하천-1에는 일 처리용량 1,800 m<sup>3</sup>/d 규모의 시설을 설치하고, 유입하천-2에는 3,500m<sup>3</sup>/d 규모의 시설을 설치한다고 가정하였다. 수질모델링을 통해 분석한 수질항목은 COD, TOC, T-P, Chl-a이며, 바이오스톤 접촉산화수로의 수질정화효율은 유입수질 대비 COD 45.3%, Chl-a 80.7%, T-P 45.2%가 저감되는 것으로 입력 자료를 구성해 수질모델에 적용하였다.

(표 4-34) 바이오스톤 접촉산화시스템의 오염물질 저감효율

구 분	유입	유출	저감율(%)
COD(mg/L)	15.6	8.3	45.3
TOC(mg/L)	6.4	5.5	14.1
Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	86.7	16.1	80.7
T-P(mg/L)	0.121	0.064	45.2

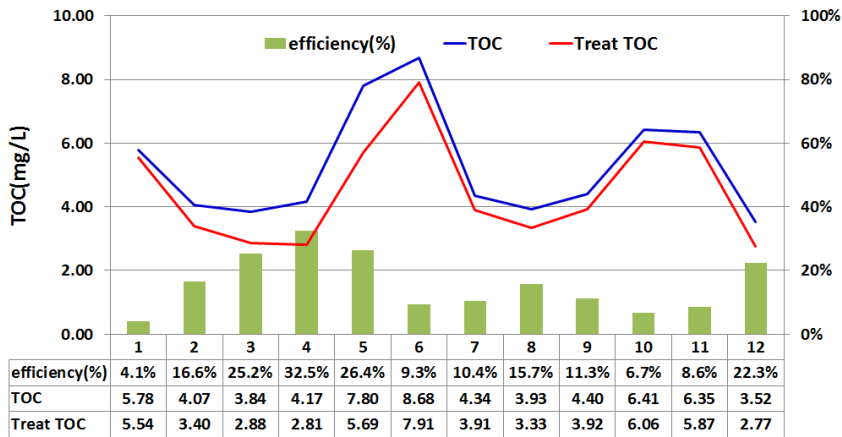
### 나. 저수지 연간 수질개선효과 분석

매화저수지에 바이오스톤 접촉산화시스템을 유입수 대책 수질정화시설로 설치하였을 경우 저수지의 수질개선에 미치는 효과에 대해서 분석하였다. 무대책(base) 대비 바이오스톤 접촉산화시스템을 운영 할 경우 수질항목별 월간 수질개선효율을 <그림 4-65>~<그림 4-66>에 나타내었다. 매화저수지의 수질항목별 연간 수질개선효과는 TOC 5.3 → 4.5mg/L로 14.5%, COD 7.9 → 6.8mg/L로 14.5%, Chl-a 42.3 → 37.0mg/m<sup>3</sup>로 12.5%, T-P 0.201 → 0.150 mg/L로 25.1%가 평균 개선되는 것으로 나타났다.

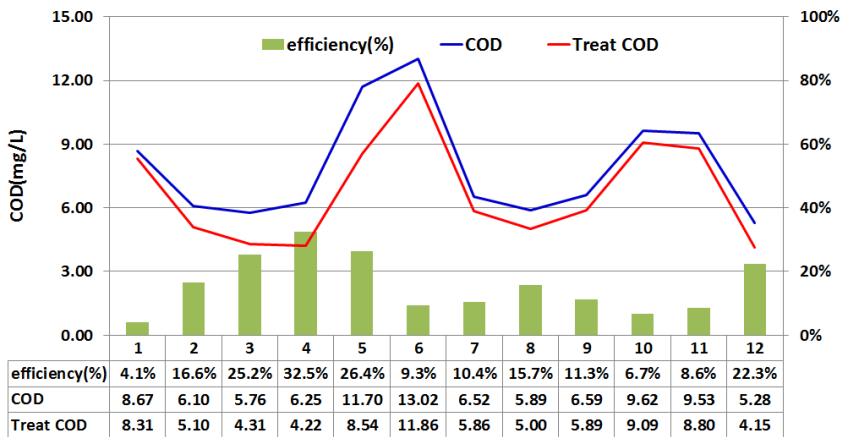
바이오스톤 접촉산화시스템의 저수지 수질개선효과는 생태융합형 접촉산화

시스템의 수질개선효과(TOC 14.9%, COD 14.9%, Chl-a 12.5%, T-P 25.8%)와 매우 유사하게 나타났다. 매화저수지는 완전혼합인 정상상태에 도달하기 위한 시간이 1.58년(580일)로 산출되었고, 평상시 유입되는 수량이 저수지 총 유출량의 약 20%에 지나지 않는다. 이러한 저수지 구역의 수문학적 특성으로 인해 평시 유량을 대상으로 수처리시설을 설치한다면 저수지의 수질개선 효과가 단기간에 나타나기는 어렵다. 이러한 저수지의 수질은 강우시에 유입되는 수질에 의해 크게 영향을 받으므로 접촉산화시스템을 침강지와 조합하여 운영하면 수질개선효과가 매우 높아질 것으로 판단되었다.

(a) TOC

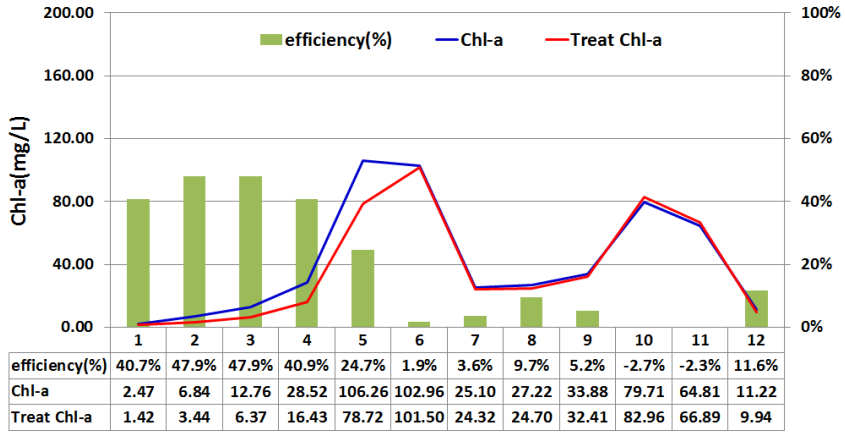


(b) COD

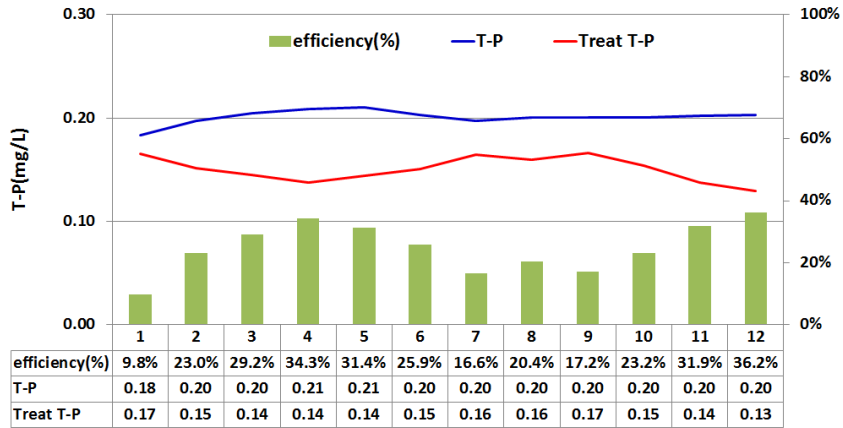


<그림 4-65> 바이오스톤 접촉산화시스템 설치에 따른 저수지 월평균 수질 변화(TOC, COD)

(a) Chl- a



(b) T- P



<그림 4-66> 바이오스톤 접촉산화시스템 설치에 따른 저수지 월평균 수질 변화(Chl-a, T-P)



## 제5절 무인항법 이동식 수질정화시스템 성능평가

### 1. 호소 수질정화선 설계 및 시험모형 제작

저수지 수질개선을 위한 목적으로 개발된 무인항법 이동식 수질정화선에 대한 현장적용실험을 위하여 2016년 5월부터 6월까지 시험모형을 <그림 4-67>과 같이 자체적으로 제작하였다. 부력체의 전체 크기는 6.0m(L)×3.4m(W)×0.8m(H) 이고, 총 부력무게는 약 10톤에 해당한다. 부력체는 스티로폼과 STS, 방부목 등을 이용하여 제작하였다.



<그림 4-67> 무인항법 이동식 수질정화선 시험모형 제작과정

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

무인항법 이동식 수질정화선에 탑재된 시설들은 <그림 4-68>에서 같이 GPS 통신기, 경광등 싸이렌, 배터리 보관함, 수질정화장치, 미생물 살포기, 마이크로버블 제너레이터, 풍력발전기 등을 탑재하였다.



<그림 4-68> 무인항법 이동식 수질정화선 구성 장치

## 2. 수질정화선 현장적용실험 및 성능평가

### 가. 현장적용지구 대상지 선정

무인항법 이동식 수질정화선 시험모형의 현장적용실험을 실시하기 위한 대상 지구로 경기도 시흥시 도창동에 위치하고 있는 매화저수지를 선정하였다. 무인항법 이동식 수질정화선의 원활한 시험운전 및 현장적용실험을 하기 위해서는 수심이 최소 1m 이상 확보되어야 하고 마름 등 수생식물이 없는 수체가 가장 최적의 조건이나 경기도 또는 충남에 위치하고 있는 농업용저수지의 대부분은 유료 낚시터로 이용되고 있어 낚시터 임대 사업자에게 사용 협의를 받기가 어려웠다. 매화저수지는 저수지의 대부분의 수심이 2m 이하로 매우 낮고 수면의 2/3가 마름으로 덮여있어 무인항법 이동식 수질정화 시험모형을 시운전하고 현장적용실험하기에는 적당한 장소가 아니었지만, 당초 수질정화선 시험모형을 매화저수지 홍수터 부지를 활용하여 제작했고, 인근에 적합한 저수지가 없어서 매화저수지에서 현장적용실험을 수행하였다. 2016년도에는 저수지의 2/3을 덮고 있는 마름으로 인해 실험이 어려웠는데, 2017년에 들어서는 초여 방사로 인해 마름이 대부분 없어져 수질정화선 운행에 있어서 양호한 환경이 조성되었다.

(표 4-35) 현장적용실험 대상 후보지구의 시설제원

저수지명	유역면적 (ha)	만수면적 (ha)	수혜면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	유효수심 (m)	준공년도
매화지	260	15.5	52.4	227.0	1.46	1941



<그림 4-69> 무인항법 수질정화선 현장적용실험 대상지구

## 나. 무인항법 이동식 수질정화선 성능평가

호소 수질정화시설인 무인항법 이동식 수질정화선에 대한 성능평가는 단계적으로 시행하고 있다. 먼저 1단계로 GPS 프로그램을 이용한 무인항법 프로그램의 오차범위 확인 및 검증, 2단계는 고액분리장치, 미생물 살포기 등 오염물질 정화장치를 탑재 후 오염물질 정화장치의 가동여부 및 수질개선효과 등에 대한 성능평가, 3단계에서는 무인항법 이동식 수질정화선의 지속적인 운영을 통한 저수지 수질개선효과 및 퇴적 오염도 개선효과 분석, 4단계에서는 수질자동측정 장비 탑재 및 인터넷과 연결해 수질자료의 실시간 송수신 가능여부 확인 및 수질자료의 정확성 검증, 5단계에서는 장애물 감시센서 및 수심 자동 센서 등에 의한 비상상황 발생 시 대처능력 검증 등 총 5단계로 나누어 성능평가를 진행하고 있다. 2016년에는 2015년도에 개발된 무인항법 프로그램 검증을 위한 현장적용실험과 고액분리장치 및 미생물 살포기, 마이크로버블 제너레이터 등을 장착하여 각 설비의 성능이상 여부, 무인항법 이동식 수질정화선의 적용성 등을 시험하였다. 2016년에는 무인항법 프로그램의 정확도 검증에 초점을 맞추었고, 2017년도에는 무인선을 유도장치에 의해 목표지점으로 유인할 때 큰 오차 없이 도크 안으로 입항할 수 있도록 유도장치에 대한 실험을 반복하였다. 저수지의 오염물질 제거를 위한 고액분리장치는 <그림 4-70>과 같이 선박과 일체형으로 선박이 서서히 이동하면서 수중의 오염물질을 급속하게 응집, 부상시켜 배 진행방향 후단으로 슬러지를 이동시켜 스키머에 의해 수거하는 장치이다.



<그림 4-70> 무인항법 이동식 수질정화선(좌) 및 초고속 고액분리장치(우)

### 3. 무인항법 수질정화선 오염물질 제거량 추정

무인항법 이동식 수질정화시스템에 의해 저수지에서 제거되는 오염물질 양을 추정하기 위한 선박 규모 및 운영조건은 다음과 같다. 대상저수지는 경기시흥시 매화저수지를 대상으로 하였으며, 선박 크기는 3m(W)x5m(L)x0.6m(H)(부력 10톤), 운항 속도는 정지상태 0 에서부터 4 km/h로 운항되며, 1회 충전시 운항 가능한 8시간을 기준으로 하였다. 1일 운항 거리는 수면적 기준으로 40,000 m<sup>2</sup>이고, 현재 시험모형에 탑재된 수처리 장치는 초고속 고액분리장치(농어촌연구원과 블루비에스(주) 공동개발)이므로 초고속 고액분리장치에 의해 제거되는 오염물질 양을 추정하였다.

매화저수지에 유입하천 2개소에서 연간 유입되는 오염물질 추정량은 약 65,809.5 kg/y이며(2013년 강우 기준), 1일에 제거되는 녹조 등 오염물질 양은 300 kg/d으로 가정하였을 때(육상에 설치하여 실측한 결과임), 유입되는 오염물질 총량을 제거하기 위해 걸리는 시간은 219일(내부 발생이 없다고 가정시)로 산출되었다. 저수지 내부에서 자체 생산되는 내부 부하량을 전체 오염물질 양의 30%로 가정하였을 때 저수지 오염물질을 제거하는 기간은 285일(내부발생량 30% 가정시)로 산출되었다. 무인항법 이동식 수질정화선에 의해 제거되는 오염물질 양 및 저수지 수질개선효과는 대상 저수지의 오염물질 유입량, 내부 생산성, 호소 물순환 주기 등 여러 요인에 의해 결정되므로 무인항법 이동식 수질정화선을 적용하기 전에 대상저수지에 대해 수질모델링을 활용하면 정밀한 예측이 가능할 것이다.

(표 4-36) 매화저수지에 유입되는 오염물질 총량

구분	강우시		평시		연간 총유입량
	유입하천1	유입하천2	유입하천1	유입하천2	
COD	3,208.4	5,655.8	7,539.9	16,567.2	32,971.3
T-N	1,922.3	4,326.7	5,544.7	19,188.8	30,982.6
T-P	152.5	317.6	362.5	1,023.1	1,855.6
계	5,283.1	10,300.1	13,447.2	36,779.2	65,809.5



## 제5장

### 접촉산화시스템 부착미생물에 의한 수질정화기작 규명

제1절 미생물 부착량 및 군집구조 변화 조사/평가

제2절 접촉산화시스템 부착미생물 활성도 평가

제3절 바이오스톤 볼의 부착 미생물 안정도 평가

제4절 접촉산화시스템의 수질정화 기작 규명





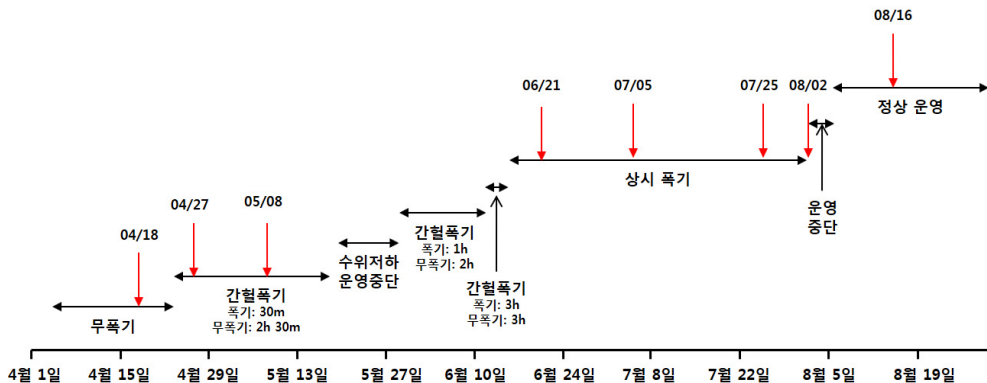
## 제5장 접촉산화시스템 부착미생물에 의한 수질정화 기작 규명

### 제1절 접촉산화시스템의 미생물 부착량 및 군집구조 평가

#### 1. 연구 재료 및 방법

##### 가. 접촉산화시스템의 운영 일지

매화저수지에 설치되어 있는 바이오스톤 접촉산화시스템의 부착 미생물의 생물량, 군집구조 변화 등에 의한 수질정화기작 규명에 대한 연구는 공동연구기관인 충북대학교 산학협력단에서 수행하였다. 본 과업 기간 중 접촉산화시스템 플랜트의 운영과 관련된 세부내용을 <그림 5-1>에 정리하였다. 4월 4일부터 4월 24일까지는 무폭기 운전으로 운영하였으며, 4월 24일부터 5월 19일까지는 간헐적 폭기방식으로 운영하였다. 간헐폭기는 폭기 30분과 무폭기 2시간 30분 단위로 운영하였다. 5월 19일부터 6월 30일까지는 매화지 수위 저하로 인하여 접촉산화시스템의 정상적 운영이 원활하지 않았으며, 일부 기간에는 저수지 수위가 약 10%까지 떨어져 수처리 시설 운영이 중단되기도 하였다. 7월 초부터 매화저수지 수위가 회복되기 시작하여 8월부터는 정상적인 운영이 가능하였으며, 8월 2일까지 상시폭기를 실시하였다. 8월 2일부터 6일까지는 접촉산화시스템의 점검을 위하여 단기적으로 운영을 중지하였으며, 8월 17일부터는 전처리조 폭기를 통하여 접촉산화조에 DO를 공급하였다.



<그림 5-1> 접촉산화시스템 운영의 주요 내용

나. 물 시료 및 미생물 시료 채취 일정

접촉산화시스템의 수질특성 및 미생물에 의한 생물막 활성도를 분석하기 위하여 물 시료 및 생물막 시료를 채취하였다. 바이오스톤 접촉산화시스템의 물 시료는 유입수(매화저수지 원수)와 처리수를 채수하였으며, 물시료 채수는 4월 18일부터 7월 5일까지 총 4회에 걸쳐 이루어졌고, 바이오스톤 볼 시료 채집은 4월 18일부터 9월 21일까지 9회에 걸쳐 이루어졌다(표 5-1).

생물막 활성도 분석을 위한 시료의 채취는 주로 바이오스톤 볼에 대하여 수행하였다. 생물량, 효소활성도, 군집구조(DGGE) 분석을 위하여 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트에서 바이오스톤 볼을 4월 18일부터 8월 16일까지 7회에 걸쳐 채집하였다. 생태융합형 접촉산화시스템과의 비교분석을 위해 끈상 반응조에서 끈상 매디아를 6월 21일과 7월 5일에 2회에 걸쳐 채집하였다. 16S rRNA pyrosequencing을 통한 군집구조에 분석할 시료는 파일럿 플랜트의 바이오스톤 볼에 대하여 4월 18일부터 7월 25일까지 5회 채집하였다. 세균 군집구조 해석은 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 폭기 방식에 따라 분류하였는데, 4월 8일은 무폭기, 5월 8일은 간헐 폭기, 6월 21일부터 7월 25일까지 기간은 상시폭기 방식으로 운영한 기간이었다.

(표 5-1) 미생물 분석 항목별 시료 채집일정

분석 내용		바이오스톤 볼 산화조	끈상 산화조
수질	유입수/ 처리수	4월 18일, 5월 8일 6월 21일, 7월 5일 7월 25일, 8월 16일 8월 24일, 9월 6일 9월 21일	4월 18일, 5월 8일 6월 21일, 7월 5일
생물량 효소활성도 군집구조(DGGE)		4월 18일, 5월 8일 6월 21일, 7월 5일 7월 25일, 8월 2일 8월 16일	6월 21일, 7월 5일
군집구조 (Pyrosequencing)		4월 18일, 5월 8일 6월 21일, 7월 5일 7월 25일	-

※수시료 중 7월 25일 이후는 한국화학융합시험연구원(KTR)에서 분석한 자료임

다. 채수 및 채집 지점

물 시료는 비이커를 이용하여 채수하였으며, 채수 즉시 수온, pH, DO, 전기전도도를 측정하였고, 채수된 시료는 냉장 상태를 유지하면서 실험실로 옮겨 당일에 COD, SS 등 수질 항목에 대하여 분석하였다. 접촉산화시스템에서 미생물 부착량 및 군집구조 분석을 위한 바이오스톤 볼 시료는 전처리조(고정상 여재), 바이오스톤 볼 산화조(포기/비포기 영역)에서 각각 채집하였으며, 바이오스톤 볼 채집 시 표면에 있는 바이오스톤 볼을 제거하고 수직 중간 지점에서 채집하였다. 끈상 매디아 시료는 생태융합형 접촉산화수로의 중간 지점에 위치한 것을 채집하였다. 채집된 바이오스톤 볼과 끈상 매디아는 냉장 상태를 유지하며 실험실로 옮긴 후 즉시 전처리를 하였으며, 생물량 및 효소활성도 분석은 시료 채집 당일에 시행하였고, 군집구조 분석에 필요한 DNA 추출을 위한 시료는 DNA 분석 때까지 -70℃ 초저온 냉동고에 보관하였다.



<그림 5-2> 접촉산화시스템에서 시료 채취 지점

라. 항목별 분석방법

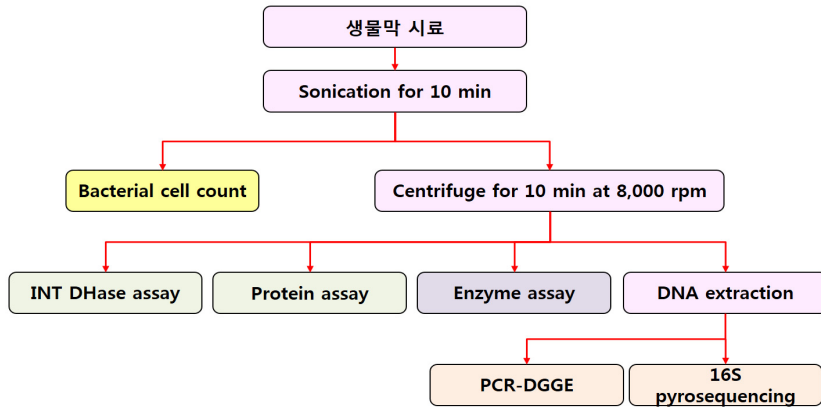
1) 물 시료 분석 항목 및 방법

물 시료에서 측정 항목은 수온, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC), 부유물질량(SS), 생물화학적 산소요구량(BOD<sub>5</sub>), 화학적 산소요구량(COD<sub>Mn</sub>), 총유기탄소(TOC), 클로로필-a, 암모니아성질소, 아질산성질소, 질산성질소, 총질소, 무기인, 총인이었으며, 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다(환경부, 2016). 수온, pH, 용존산소, 전기전도도는 휴대용 다항목 수질측정기(HQ40d Dual-Input Digital Multi-Meter, Hach Co.)를 사용하여 현장에서 측정하였고, 나머지 항목은 채취된 시료를 냉장 상태를 유지하면서 실험실로 옮긴 후 채취 당일 수질오염공정시험기준(환경부)에 준하여 분석을 하였다.

2) 생물막 시료 분석 항목 및 방법

(1) 생물막 탈리를 위한 전처리

바이오스톤 볼 산화조의 전처리조(고정상 여재) 및 포기/비포기 영역에서 획득한 바이오스톤 볼과 끈상 매디아에 부착된 생물막을 탈리하기 위하여 초음파 처리를 수행하였다(그림 5-3). Ultrasonic cleaner에 얼음을 채우고 증류수 1L를 넣은 플라스틱 용기(2L 크기)를 cleaner에 넣은 후, 생물막 시료를 넣고 10분 동안 초음파 처리를 하였다. 시료를 꺼낸 후 다시 증류수를 채우고 10분간 초음파 처리를 하여 1차 처리시 획득한 시료와 섞어서 생물막 시료로 활용하였다. 초음파 처리 후 생물막 시료를 관찰한 결과 시료에 있는 생물막이 효과적으로 탈리된 것을 확인하였다(그림 5-4). 시료로부터 종속영양세균수(heterotrophic bacterial count; HPC)를 계수하였으며, 생물량 및 효소활성도, 군집구조 분석을 위한 시료는 원심분리(8,000 rpm, 10분)하여 시료를 농축한 후 분석을 수행하였다.



<그림 5-3> 생물막 시료 전처리 과정



<그림 5-4> 초음파 처리 전후의 바이오스톤 볼의 형상

## (2) 생물량 분석

생물막 시료에서 생물량을 분석하기 위하여 MLSS(mixed liquor suspended solid), MLVSS(mixed liquor volatile suspended solid), 단백질, DNA, 종속영양세균수 농도를 정량하였다. MLSS는 전처리된 시료를 미리 무게를 잰 GF/C 여과지(Whatman, UK)로 여과한 후, 105°C에서 1시간 동안 말리고 무게를 재어, 건조 전과 건조 후의 무게 차이를 이용하여 계산하였다. MLSS를 측정할 여과지를 550°C의 전기로(furnace)에 넣어 1시간 동안 처리하여 유기물을 소성한 후 무게를 재고, 소성 전과의 무게 차이를 이용하여 MLVSS를 계산하였다(APHA, 2005).

단백질의 농도는 Bradford method를 사용하여 측정하였다(Stoscheck, 1990). 전처리된 시료를 급속 해냉동(-70°C/60°C, 각각 15분) 처리를 3회 실시하여 세포를 파쇄한 후, Bradford reagent를 첨가하여 실온에서 5분간 반응시켰다. 시료를 원심분리(8,000 rpm, 10분)한 후 595 nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준 시료로 bovine serum albumin을 사용하여 작성된 검량선으로 부터 시료 중 단백질 농도를 환산하였다.

DNA의 농도는 전처리된 시료로부터 DNA를 추출한 후 Quant-iT PicoGreen dsDNA Reagent kit(Invitrogen, USA)와 Rotor Gene-6000(Corbett Research, Australia)을 사용하여 정량하였다. 이 kit는 DNA와 선택적으로 결합하는 형광 염색제인 PicoGreen을 시료에 첨가한 후, DNA와 염색제의 결합으로 인해 발생하는 형광도를 측정함으로써 DNA를 정량할 수 있다.

종속영양세균수는 먹는물수질공정시험기준(환경부, 2013)에서 제시된 저온 일반세균-평판집락법(ES 05701.1b)에 따라 분석하였다. 전처리된 시료를 인산완충희석액으로 10<sup>-1</sup>~10<sup>-7</sup>까지 희석하고, 이 중 적절한 희석배수를 선택하여 희석액 1mL을 사용하여 R2A 평판배지에 도말한 후 20°C 저온배양기에서 2주 동안 배양된 후 형성된 집락을 계수하였다. 계수결과와 희석 비율을 사용하여 종속영양세균수의 농도를 계산하였다.

## (3) DNA 추출 및 증폭

바이오스톤 볼과 끈상의 전처리된 시료에서 DNA를 추출하기 위하여 시료를 22,000×g에서 10분간 원심분리한 후, lysozyme이 포함된 완충용액(0.15 M NaCl, 0.1 M EDTA, 15 mg/mL lysozyme, pH 8.0)을 넣고 37°C에서 1시간 동안 처리하였다. 처리된 용액에 SDS가 포함된 완충용액(0.1 M NaCl, 0.5 M Tris-HCl, 6%(w/v) SDS, pH 8.0)을 넣고 5 분간 초음파 처리하여 세균

을 파쇄 하였다. 세균의 파쇄 효율을 높이기 위해 급속 해냉동(-70°C/60°C, 각각 15분) 처리를 3회 실시하였다. 용액 중 DNA는 phenol:chloroform법을 사용하여 정제하였다. 시료 중 DNA의 양은 Quant-iT PiboGreen dsDNA Reagent kit(Invitrogen, USA)와 Rotor Gene-6000(Corbett Research, Australia)을 사용하여 정량하였다.

시료 중 추출한 DNA를 PCR로 증폭한 후 DGGE법을 사용하여 세균 군집 구조를 분석하였다. 세균의 DNA를 증폭하기 위한 PCR 반응의 반응액은 primer인 F357GC와 517R(10 μM) 각 1 μl 씩, dNTP(10mM) 0.5 μl, 10× PCR buffer(Promega, USA) 3 μl, GoTaq Flexi polymerase(5U/μl) 0.2 μl의 조성을 사용하였으며, DNA 증폭효율을 향상시키기 위하여 BSA(20mg/ml)를 첨가하였다(표 5-2).

DNA를 증폭하기 Primer는 세균의 16S rRNA 유전자로부터 설계되었다(표 5-3). 16S rRNA 유전자는 모든 종류의 원핵생물이 가지고 있는 것으로 세균을 동정하는데 활용된다(Muyzer et al., 1993). PCR 조건은 95°C에서 5분간 전처리한 후, 변성(95°C, 30초), 결합(65°C, 30초), 증합(72°C, 30초) 단계를 10주기 수행하였으며, 결합온도를 60°C로 변경한 후 10주기를 수행하고, 다시 결합온도를 55°C로 변경한 후 10주기를 수행하였다. 마지막으로 72°C에서 7분 동안 후처리를 하였다. PCR을 위한 thermal cycler는 MJ Mini Gradient Thermal Cycler(Bio-Rad, USA)를 사용하였다. PCR 산물은 PCR purification kit(Takara, Japan)로 정제한 후, DGGE를 수행하였다.

(표 5-2) PCR 반응 용액의 조성

반응물질	농도	반응물질 양
Forward primer: F357GC	10 μM	1.0 μl
Reverse primer: 517R (10 μM)	10 μM	1.0 μl
dNTP mixture	10mM	0.5 μl
10× PCR Buffer	-	3.0 μl
GoTaq Flexi polymerase	5U/μl	0.2 μl
Bovine serum albumin	20mg/ml	0.2 μl
Template DNA	0.2ng/μl	1.0 μl
TDW up to 30 μl	-	23.1 μl

(표 5-3) PCR primer 염기서열

이름	염기서열
GC clamp	CgCCCgCCgCgCCCCgCgCCCggCCCgCCgCCCCgCCCC
F357GC	CCTACgggAggCAgCAg
517R	TATTACCgCggCTgCTggC

## (4) 미생물 군집 구조 분석

미생물 군집구조 분석을 위하여 DGGE법과 16S rRNA pyrosequencing 방법을 사용하였다. DGGE법은 세균의 유전적 다양성을 확인하기 위하여 널리 사용되는 방법이다(Ishii and Fukui, 2001; Muyzer et al., 1993). DGGE gel의 제작을 위하여 DCode Universal Mutation Detection system(Bio-Rad, Hercules, CA, USA)을 사용하였다. Denaturing gradient gel은 8% polyacrylamide (acrylamide 37.5 : bis-acrylamide 1), 1.0mm 두께로 만들었으며, 변성제 (urea와 formamide)는 35%에서 50%의 농도구배를 이루도록 첨가하였다. DGGE는 만들어진 gel에 PCR 증폭산물 20  $\mu$ L와 10X loading dye 2  $\mu$ L을 loading한 후, 60 $^{\circ}$ C 수조에서 0.5 $\times$  TBE(Tris-Borate-EDTA) 완충용액을 사용하여 70 V로 17시간 동안 전기영동하였다. 전기영동이 끝난 gel은 gelstar(Cambrex BioScience, USA)로 30분 동안 염색한 후 gel image documentation system(SL-20 High Performance DNA Image Visualizer; SeoLin Bioscience Co., Korea)을 사용하여 관찰하였다. Band의 분석은 GelCompar 4.0 software package(Applied Maths, Kortrijk, Belgium)를 사용하였다. 각 band를 분석하기 위하여, band의 gel을 떼어낸 후, DNA를 추출하고 PCR로 증폭한 후, 염기서열을 분석하였다.

DGGE gel에서 추출된 band의 염기서열을 분석하기 위하여, 추출된 band를 T-blunt vector (Solgent, Korea)를 사용하여 cloning을 하였다. Clone 중에서 6개의 colony를 선택한 후, 이를 24시간 동안 배양하였다. 배양된 colony에서 DNA를 추출한 후, 원래의 primer로 다시 증폭하여 PCR 산물이 삽입된 것을 확인하였다. PCR 산물이 삽입된 plasmid를 Plasmid Miniprep Kit (Solgent, Korea)로 정제하였다.

염기서열은 Macrogen에 의뢰하여 분석하였으며, DNA 분석기는 ABI PRISM 3730XL DNA analyzer(Applied Biosystems, USA)를 사용하였다. 16S rRNA의 염기서열을 GenBank에 입력하여 기존에 알려진 세균의 염기서

열과 비교 분석하였다. 계통수는 MEGA 5.1(Tamura et al., 2011)을 사용하여 Neighbor-Joining method로 작성하였다.

Pyrosequencing 기법을 통한 세균 군집구조 분석은 추출된 DNA 시료를 활용하여 (주)천랩에 의뢰하여 분석하였다. (주)천랩의 pyrosequencing 기법은 16S rRNA 유전자를 이용하여 실험을 진행하였고, 모든 샘플은 universal primers를 이용하여 실험을 진행하였다. 사용된 primer 쌍은 27F(AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG)와 518r(WTT ACC GCG GCT GCT GG)이었다. 실험을 진행하기 위해 설정된 PCR 조건은 95°C에 5분간 initial denaturation을 하고, 95°C에 denaturation을 30초 동안 30회 반복하였으며, 55°C에 30초 동안 annealing을 진행하고, 72°C에 30초간 extension을 한 후에 마지막으로 elongation을 72°C에 5분간 진행하였다. 이 후 증폭시킨 생성물은 증폭 시 생긴 잔여 primer를 제거하기 위해 QIAquick PCR purification kit (Qiagen, Valencia, CA)을 통해 정제하였다. 얻어진 생성물로부터 bellerophone 방법을 통해 염기서열을 얻어내었다. 최종적으로 얻어진 자료는 (주)천랩에서 제공하는 CLcommunity program((주)천랩, Seoul, Korea)을 통해 미생물 군집 분석 및 다양성 등의 자료들을 얻었다.

## 2. 접촉산화시스템의 부착된 미생물 생물량 분석 결과

바이오스톤 접촉산화시스템에서 전처리조(고정상 여재)와 바이오스톤 산화조의 포기/비포기 영역에서 채집된 바이오스톤 볼에서 생물막을 분리한 후 이를 섞어 부착된 미생물 생물량을 측정하였다. 또한 바이오스톤 볼 접촉산화시스템과 비교분석하기 위하여 생태융합형 접촉산화조에서 끈상 매디아를 채집하여 매질에 부착된 미생물 생물량을 측정하였다. 생물막은 미생물 이외에 다량의 무기질로 구성되어 있어 총세균수(total cell count) 등 직접적인 방법으로 생물량을 측정하기 어렵기 때문에 간접적 생물량 측정법을 사용한다(Wallander et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 MLSS, MLVSS, DNA, 단백질, HPC를 생물량 측정을 위한 간접 지표로 사용하였다. 바이오스톤 볼에서 MLSS는 1,686~11,762 mg/m<sup>3</sup>의 범위였으며, 평균 8,023(±3,847) mg/m<sup>3</sup>으로 시기에 따른 차이가 매우 큰 것으로 나타났다(표 5-4, 그림 5-5).

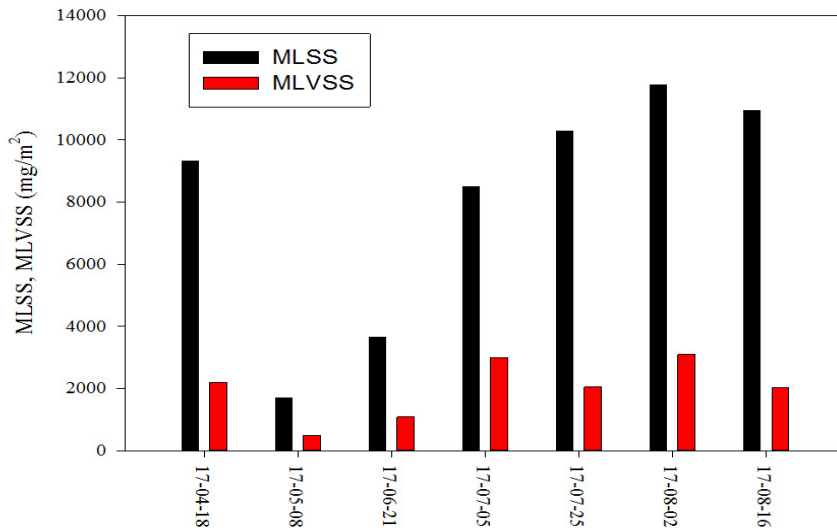
MLSS의 최대값은 8월 2일에 11,762 mg/m<sup>3</sup>이었으며, 최소값은 5월 8일에 나타난 1,686 mg/m<sup>3</sup>이었다. 산화 가능한 탄소화합물을 의미하는 MLVSS의 농



도는 495~3,095 mg/m<sup>2</sup>의 범위였으며, 평균 1,993(±944) mg/m<sup>2</sup>이었다. 최소값은 5월 8일에 측정되었으며, 최대값은 8월 2일에 측정된 3,095 mg/m<sup>2</sup>으로 MLSS와 같은 시료에서 나타났다. MLSS 중 MLVSS가 차지한 비율은 18.5~35.3%이었고 평균 26.1%로 시료에 따른 차이는 크지 않았다.

접촉산화시스템의 운영 방법에 따른 차이를 비교하면, 간헐폭기를 실시한 기간인 4월24일~5월19일 중에 채집한 5월 8일 시료에서 MLSS와 MLVSS는 각각 1,686과 495 mg/m<sup>2</sup>으로 최소값을 나타내었으며, 상시폭기를 실시한 기간인 6월15일~8월2일의 기간 중 채집된 4회(6월 21일, 7월 5일, 7월 25일, 8월 2일)의 시료에서 MLSS와 MLVSS의 평균은 각각 8,551과 2,307 mg/m<sup>2</sup>이었으며, 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 상시폭기 기간에 바이오스톤 볼에서 MLVSS의 농도가 증가하는 원인으로, 폭기에 의한 생물량의 증가 또는 수온의 상승으로 인한 효과일 가능성이 있다.

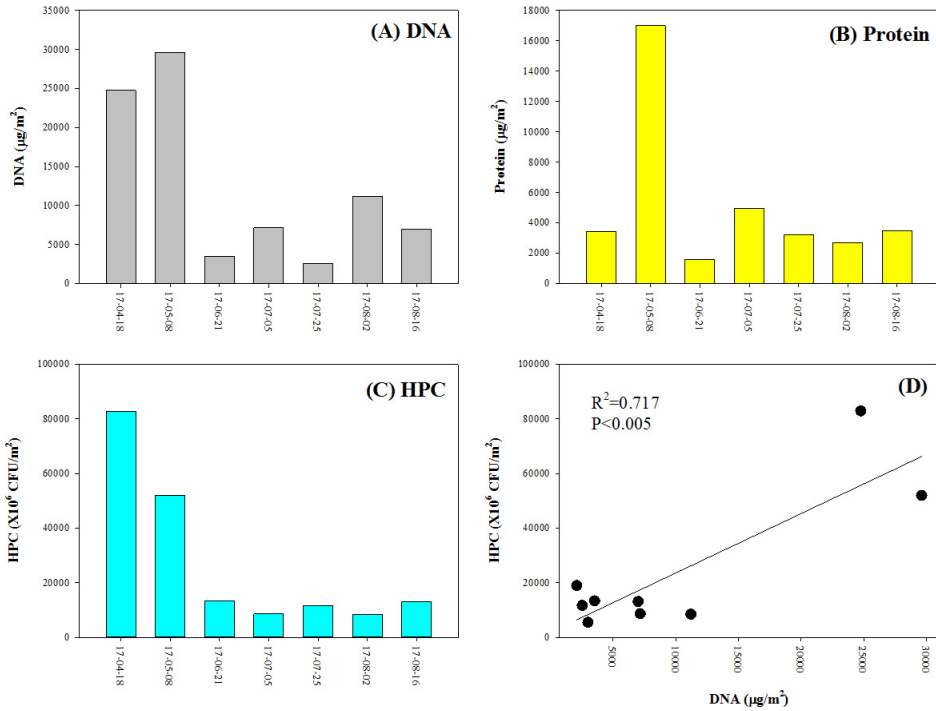
무폭기로 운영된 4월 18일에 바이오스톤 볼에서 MLSS와 MLVSS는 각각 9,329와 2,200 mg/m<sup>2</sup>으로 간헐폭기 기간에 비해 높았으며, 상시폭기 운전 기간과 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 간헐폭기 기간에 비하여 상시폭기 기간에 MLSS와 MLVSS의 농도가 높은 것은 폭기 방법에 의한 영향보다 수온의 상승에 따른 영향이 큰 것으로 판단된다.



<그림 5-5> 바이오스톤 접촉산화시스템에서 MLSS/MLVSS 변화

(표 5-4) 바이오스톤 접촉산화시스템에서 생물량의 변화

일자	MLSS (mg/m <sup>3</sup> )	MLVSS (mg/m <sup>3</sup> )	VSS/SS (%)	DNA (μg/m <sup>3</sup> )	단백질 (μg/m <sup>3</sup> )	세균수 (×10 <sup>6</sup> CFU/m <sup>3</sup> )
4월 18일	9,329	2,200	23.6	24,763	3,437	82,857
5월 8일	1,686	495	29.4	29,623	16,997	51,905
6월 21일	3,657	1,086	29.7	3,519	1,599	13,286
7월 5일	8,500	3,000	35.3	7,157	4,961	8,571
7월 25일	10,286	2,048	19.9	2,535	3,212	11,571
8월 2일	11,762	3,095	26.3	11,210	2,700	8,381
8월 16일	10,943	2,029	18.5	6,992	3,491	13,048
최소	1,686	495	18.5	2,535	1,599	8,381
최대	11,762	3,095	35.3	29,623	16,997	82,857
평균	8,023	1,993	26.1	12,257	5,200	27,088
표준편차	3,847	944	5.9	10,674	5,298	29,004



<그림 5-6> 바이오스톤 접촉산화시스템에서 생물량의 변화

바이오스톤 볼에서 DNA의 농도는 평균  $12,257(\pm 10,674) \mu\text{g}/\text{m}^2$ 이었으며, 5월 8일에 최대값인  $29,623 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 을 나타내었고, 최소값은  $2,535 \mu\text{g}/\text{m}^2$ (7월 25일)이었다. 무폭기 또는 간헐폭기로 운영된 기간에 각각  $24,763$ 과  $29,623 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 으로 높았으며, 상시폭기로 운영된 기간에 평균  $6,105 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 으로 낮은 값을 나타내었다. 단백질의 농도는  $5,200(\pm 5,298) \mu\text{g}/\text{m}^2$ 이었으며, 무폭기 또는 간헐폭기로 운영된 시기에 각각  $3,437 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 과  $16,997 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 로 비교적 높은 값을 나타내었으며, 상시폭기 운영 기간에는 평균  $3,118 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 이었다.

생물막의 종속영양세균수(HPC)의 농도는 평균  $27,088 \times 10^6 \text{CFUs}/\text{m}^2$ 이었으며, 무폭기 또는 간헐폭기 기간에는 각각  $82,857 \times 10^6 \text{CFUs}/\text{m}^2$ 와  $51,905 \times 10^6 \text{CFUs}/\text{m}^2$ 이었고, 상시폭기 기간에는 평균  $10,452 \times 10^6 \text{CFUs}/\text{m}^2$ 으로 나타났다. DNA와 단백질의 농도는 생물막을 구성하는 주요 물질이며, 특히 DNA의 경우 생물막의 간접 지표로 널리 사용되고 있다(Wallander et al., 2013). 종속영양세균수와 DNA 농도의 상관관계를 구한 결과 양의 상관관계( $R^2=0.717$ ,  $p<0.001$ )가 있는 것으로 나타났다. 따라서 생물막을 평가할 때 DNA 농도가 가장 적합한 것으로 판단된다.

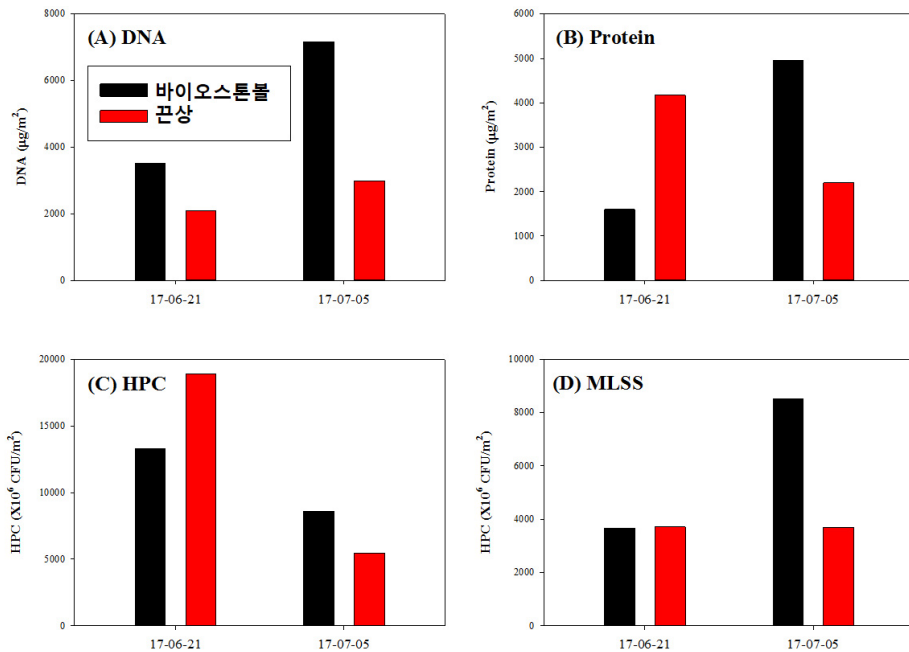
바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 운영 방법에 따른 DNA 농도 변화를 보면 무폭기 또는 간헐폭기로 운영하였을 때의 DNA 농도가 상시폭기로 운영할 때 보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 MLSS와 MLVSS의 농도 결과와 다른 양상이다. MLVSS의 경우 유기물의 양을 나타내는 지표이므로 생물막을 구성하는 생물보다는 생물이 아닌 유기물의 양을 나타내는 것으로 보인다. 본 연구에서 MLSS 또는 MLVSS 중 DNA가 차지하는 비율을 계산한 결과, 0.12%와 0.47%로 매우 낮은 값을 나타내었다. 결론적으로 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 생물막의 지표로는 DNA 농도가 가장 적절한 것으로 판단된다. 또한 운영 방법에 따른 생물막을 비교한 결과, 간헐폭기 또는 무폭기로 운영할 때 생물막을 구성하는 생물량이 높은 것으로 보인다.

바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 대조군으로 운영한 끈상접촉산화조에서 6월 21일과 7월 5일에 채집한 끈상에서 MLSS와 MLVSS의 평균은 각각  $3,700$ 과  $1,233 \text{mg}/\text{m}^2$ 이었으며, 동일 일자에 채집된 바이오스톤 볼에서는 각각  $6,079$ 와  $2,043 \text{mg}/\text{m}^2$ 으로 바이오스톤 볼에서의 MLSS 및 MLVSS가 끈상 생물막에 비하여 약 2배이상 높게 나타났다. DNA의 농도를 보면 바이오스톤 볼과 끈상에서 각각  $5,338$ 과  $2,541 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 으로 바이오스톤 볼에서 약 2배 높았다(표 5-5). 단백질과 종속영양세균수의 경우에는 끈상의 농도가 바이오스톤 볼에 비해 평균값이 약간 높았으나, 채집 시기에 따라 바이오스톤 볼에서 더

높기도 하였다. 이러한 결과로 볼 때 단위 면적당 바이오스톤 볼에서 끈상과 생물막 형성이 유사하거나 끈상에 비해 뛰어난 것으로 판단된다.

(표 5-5) 바이오스톤 볼과 끈상 접촉산화시스템에서 생물량 비교

일자	MLSS (mg/m <sup>2</sup> )	MLVSS (mg/m <sup>2</sup> )	VSS/SS (%)	DNA (μg/m <sup>2</sup> )	단백질 (μg/m <sup>2</sup> )	세균수 (×10 <sup>6</sup> CFU/m <sup>2</sup> )
<b>바이오스톤 볼</b>						
6월 21일	3,657	1,086	29.7	3,519	1,599	13,286
7월 5일	8,500	3,000	35.3	7,157	4,961	8,571
<b>평균</b>	<b>6,079</b>	<b>2,043</b>	<b>32.5</b>	<b>5,338</b>	<b>3,280</b>	<b>10,929</b>
<b>끈상</b>						
6월 21일	3,707	1,520	41.0	2,093	4,171	18,889
7월 5일	3,693	947	25.6	2,990	2,194	5,440
<b>평균</b>	<b>3,700</b>	<b>1,233</b>	<b>33.3</b>	<b>2,541</b>	<b>3,182</b>	<b>12,164</b>



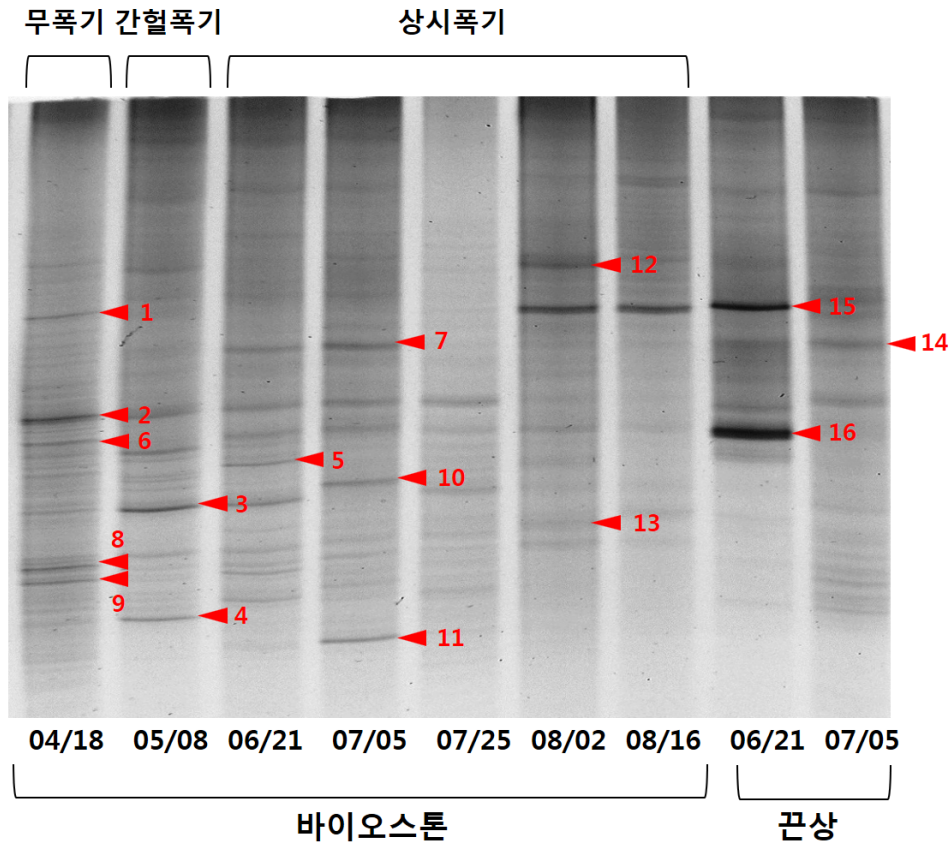
<그림 5-7> 바이오스톤 볼과 끈상 생물막에서 생물량 비교

### 3. 접촉산화시스템의 미생물 군집 구조 평가

#### 가. DGGE 분석

PCR-DGGE(Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) 법은 유전자 finger-printing 기법의 일종으로 미생물 군집의 시공간적 변동을 분석하는데 가장 널리 사용되는 방법이다(Yan et al., 2007). DGGE법은 DNA 이중 가닥을 단일가닥으로 만드는 변성제 농도의 연속 구배(gradient)를 준 전기영동 gel을 사용하는 것으로, DNA 염기서열 차이로 인해 전기영동 시 이의 이동성에 차이가 나는 것을 이용하여 다양한 미생물이 포함된 시료에 존재하는 미생물의 군집 구조를 분석하는 방법이다(Muyzer et al., 1993). DGGE법은 많은 시료를 빠른 시간 안에 동시에 분석할 수 있을 뿐 아니라 전기영동 gel에 나타난 band의 염기서열 분석을 통하여 해당 개체군의 계통 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있어 다양한 환경 시료를 대상으로 널리 사용되고 있다(Wang et al., 2004; 최명은 등, 2013).

DGGE pattern을 분석한 결과, 채집시기에 따라 세균 군집구조에 차이가 있었으며, 우점종의 종류에서도 차이가 있는 것으로 나타났다(그림 5-8). 바이오스톤 볼 접촉산화시스템이 무폭기로 운영되는 시기인 4월 18일에 채집된 바이오스톤 볼에서는 band #2가 우점하였으며, #1, #6, #8, #9이 높은 농도로 존재하는 것으로 나타났다. 간헐폭기로 우운영된 5월 8일 시료에서는 band #3의 비율이 가장 높았으며, #4가 아우점하는 것으로 관찰되었고, band #2의 농도도 높은 것으로 나타났다. 상시폭기로 운영된 6월 21일 시료에서는 간헐폭기로 운영된 5월 8일 시료와 마찬가지로 #3이 우점하였고, #7과 #5의 농도가 높은 것으로 관찰되었다. 6월 21일과 5월 8일에 우점하는 세균의 종류가 같은 것은 6월 21일은 상시폭기 운영 초반이어서 세균의 군집구조가 크게 변하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 7월 5일 시료에서는 band #7, #10, #11의 농도가 높았으며, #2와 #6의 비율도 높은 것으로 나타났다. 7월 25일 시료에서는 4월 18일과 비슷한 군집구조를 나타내었는데, #2와 #6, #3의 비율이 높았다. 8월 2일과 8월 16일 시료에서는 band #15의 비율이 가장 높았으며, 8월 2일 시료에서는 #12의 농도가 매우 높았고 8월 16일 시료에서는 #15 이외에 특별히 우점하는 band는 관찰되지 않았다.



<그림 5-8> 점축산화시스템에서 시기에 따른 DGGE의 pattern

DGGE gel로부터 우점하는 band를 추출하여 이의 염기서열을 분석한 후 RDP(ribosomal database project)에서 각각의 band와 유사한 염기서열을 가진 세균을 탐색하였다(그림 5-8, 표 5-6). 탐색 결과, band #1은 활성슬러지에서 분리된 uncultured bacterium P092904\_P1G05 (GenBank accession number, HQ385532)와 일치하는 것으로 나타났다. Uncultured bacterium P092904\_P1G05는 BOD와 질산화능이 뛰어난 폐수처리시설의 생물반응조 중 활성슬러지를 분자생물학적 방법으로 분석하였을 때 검출된 세균으로, 분류학적으로 분류상으로 alphaproteobacteria에 속하는 것으로 알려져 있다 (Wells et al., 2011). Band #1은 4월 18일 시료에서만 관찰되었다. Band #2와 가장 일치한 세균은 가축사료저장소 인근 토양에서 발견된 uncultured alpha proteobacterium AKYG900(AY921774; Tringe et al., 2005)의 16S rRNA와 염기서열이 일치하는 것으로 나타났다. 또한 국내 해변 습지에서

분리된 *Novosphingobium* sp. HZ11(AY690709; Choi et al., 2004)과 일치하였다. Band #3과 가장 일치한 세균은 벌킹(bulking) 활성슬러지에서 발견된 연쇄상(filamentous) 세균인 *Thiothrix eikelboomii* ATCC 49788(AB042819; Kanagawa et al., 2000)과 가장 일치하는 것으로 나타났다. Band #4는 민물로 채워진 어항에서 발견된 아질산염 산화세균인 *Nitrospira* sp.(AF035813; Hovanec et al., 1998)의 염기서열과 일치하는 것으로 나타나 질산화 과정에 관여하는 세균의 유전자인 것으로 판단되었다.

(표 5-6) 접촉산화시스템 DGGE band의 유사도 분석

Band	Name	GenBank	유사도
01	uncultured bacterium P092904_P1G05	HQ385532	1.000
02	<i>Novosphingobium</i> sp. HZ11	AY690709	1.000
	uncultured alpha proteobacterium AKYG900	AY921774	1.000
03	<i>Thiothrix eikelboomii</i> ATCC 49788	AB042819	0.994
04	<i>Nitrospira</i> sp.	AF035813	1.000
05	<i>Thiothrix</i> sp. CT3	AF148516	1.000
06	uncultured bacterium cpw3b916	HM921121	1.000
07	uncultured bacterium M11	AY444975	0.974
08	uncultured Candidatus Nitrotoga sp. JS20NT21	KM017114	1.000
09	uncultured bacterium 3H-229	EU786126	1.000
10	uncultured bacterium 0719	AB286439	1.000
11	uncultured bacterium lp282	KC331500	0.962
	uncultured bacterium BXHB61	GQ480097	0.962
12	uncultured bacterium BF0002B067	AM697117	0.957
	<i>Roseomonas riguiloci</i> 03SU10-P	HQ436503	0.957
13	<i>Bacillus</i> sp. TW2-HongKong	AY704918	1.000
	<i>Bacillus senegalensis</i> RS4 CIP 106 665	AF519465	1.000
14	<i>Brucella melitensis</i> biovar Suis 1997003632	AY513506	1.000
15	uncultured bacterium SHCB1004	JN698106	0.982
	uncultured Caulobacteraceae bacterium T302B1	HM438267	0.982
16	uncultured bacterium B08	HM773461	1.000

(표 5-7) 접촉산화시스템 DGGE band의 기능 및 역할

Band	GenBank	분리위치/역할	참고문헌
01	HQ385532	활성슬러지/질산화	Wells et al., 2011.
02	AY690709	습지	Choi et al., 2004
	AY921774	가축사료저장소 인근 토양	Tringe et al., 2005.
03	AB042819	활성슬러지/Bulking	Kanagawa et al., 2000.
04	AF035813	아질산염산화	Hovanec et al., 1998.
05	AF148516	활성슬러지	Rossetti et al., 2003.
06	HM921121	생물활성탄 생물막	White et al., 2012.
07	AY444975	호기공정의 생물막	Cole et al., 2004.
08	KM017114	활성슬러지/질산화	Luecker et al., 2014.
09	EU786126	토양 근권	Zhang et al., 2011.
10	AB286439	활성슬러지	Sadaie et al., 2007.
11	KC331500	토양	Chen et al., 2014.
	GQ480097	활성슬러지	Liu and Yang, 2009.
12	AM697117	실내 분진	Rintala et al., 2008.
	HQ436503	담수 습지	Baik et al., 2012.
13	AY704918	탄소필터의 생물막	Zhang et al., 2004.
	AF519465	열대 토양/탈질	Garcia et al., 2002.
14	AY513506	unknown	Gee et al., 2004.
15	JN698106	토양/질소고정	Hardoim et al., 2011.
	HM438267	토양/난분해성 유기물 분해	Vazquez-Nunez et al., 2012.
16	HM773461	식품폐수처리공정 생물막	Lee et al., 2010.

Band #5는 활성슬러지에서 발견된 *Thiothrix* sp. CT3(AF148516; Rossetti et al., 2003)의 유전자와 일치하였으며, Band #6은 정수처리 과정의 생물 활성탄에서 발견된 uncultured bacterium cpw3b916(HM921121; White et al., 2012)과 일치하였다. Band #7은 uncultured bacterium M11(AY444975; Cole et al., 2004)과 매우 유사하였는데, 이는 호기 공정의 생물막에서 유기물 분해에 관여하는 세균이다. Band #8은 uncultured *Candidatus Nitrotoga* sp. JS20NT21(KM017114; Luecker et al., 2014)의 염기서열과 일치하였는데 이 세균은 SBR 활성슬러지에서 발견된 것으로 아질산염 산화에 관여하는 것으로 밝혀졌다. Band #9는 토양 근권에 존재하는 uncultured bacterium 3H-229(EU786126; Zhang et al., 2011)와 일치하였다. Band #10은 활성슬러지에서 유기물 분해에 관여하는 uncultured bacterium 0719(AB286439;

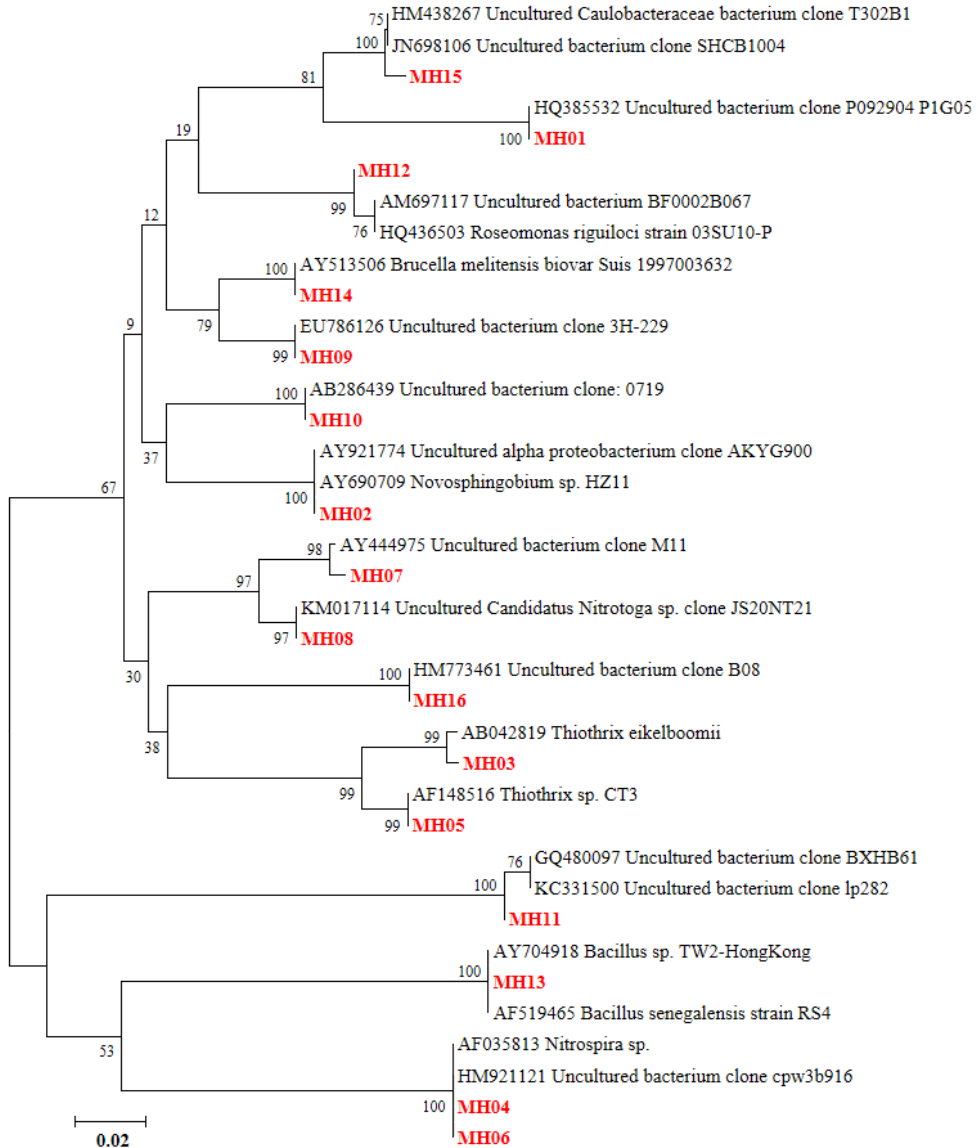


Sadaie et al., 2007)와 일치하였다. Band #11은 토양 미생물인 uncultured bacterium Ip282(KC331500; Chen et al., 2014)와 매우 유사한 염기서열을 나타내었다. 또한 하폐수처리시설의 활성슬러지에서 분리된 uncultured bacterium BXHB61(GQ480097; Liu and Yang, 2009)과 유사한 염기서열을 나타내었다. 따라서 Band #11은 유기물 분해에 관여하는 것으로 판단된다. Band #12는 실내 공기 분진에서 발견된 uncultured bacterium BF0002B067(AM697117; Rintala et al., 2008)과 국내 우포늪에서 분리된 Roseomonas riguiloci 03SU10-P(HQ436503; Baik et al., 2012)와 매우 유사한 염기서열을 나타내었다. Band #13은 먹는물 탄소필터의 생물막에서 발견된 Bacillus sp. TW2-HongKong(AY704918; Zhang et al., 2004)과 열대 토양 시료에서 탈질 반응을 수행하는 Bacillus senegalensis RS4 CIP 106665(AF519465; Garcia et al., 2002)와 일치하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 Band #13 세균은 Bacillus 속에 속하며, 탈질에 관여할 것으로 판단된다. Band #14는 Brucella melitensis biovar Suis 1997003632(AY513506; Gee et al., 2004)와 일치하였다. Band #15는 질소고정능이 뛰어난 토양에서 발견된 uncultured bacterium SHCB1004(JN698106; Haroim et al., 2011)와 anthracene으로 오염된 토양에서 발견된 uncultured Caulobacteraceae bacterium T302B1(HM438267; Vazquez-Nunez et al., 2012)과 매우 유사한 염기서열을 나타내었다. Band #16은 식품폐수를 처리하는 공정의 생물막에서 발견된 uncultured bacterium B08(HM773461; Lee et al., 2010)과 일치하는 염기서열로 나타났다.

DGGE band와 유사 또는 일치하는 세균의 역할을 보면 주로 활성슬러지에 있거나, 생물막을 구성하는 것으로 알려진 세균 또는 난분해성 유기물 분해에 관여하는 세균 들인 것으로 파악되었다. 또한 질산화 또는 탈질에 관여하는 세균도 다수 발견되었다. 따라서 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 바이오스톤 볼의 생물막을 구성하는 세균의 종류로 판단할 때 주로 유기물 분해능이 뛰어나거나 질소의 순환에 관여하는 세균들이 우점하는 것으로 나타나, 바이오스톤 볼이 유기물 분해에 뛰어난 성능을 가지는 것으로 판단된다.

(표 5-8) 접촉산화시스템 군집구조에서 DGGE band의 분류학적 위치

Domain	Phylum	Class	Order-Family-Genus-Species	
Bacteria (16)	Nitrospirae (2)	"Nitospira" (2)	order "Nitrospirales" family "Nitrospiraceae" MH06 MH04	
	"Proteobacteria" (12)	Alpha- proteobacteria (8)	MH09 MH12 order Caulobacterales family Caulobacteraceae MH15 order Rhizobiales family Brucellaceae genus Brucella MH14 unclassified_Rhizobiales MH10 order Rhodobacterales family Rhodobacteraceae MH16 order Sphingomonadales family Erythrobacteraceae MH02 unclassified_Alphaproteobacteria MH01	
			Beta- proteobacteria (2)	order Rhodocyclales family Rhodocyclaceae genus Dechloromonas MH07 order Gallionellales family Gallionellaceae genus Sideroxydans MH08
			Gamma- proteobacteria (2)	order Thiotrichales family Thiotrichaceae genus Thiothrix MH05 MH03
	"Verrucomicrobia" (1)	Opitutae (1)	order Opitutales family Opitutaceae genus Opitutus MH11	
Firmicutes (1)	Bacilli (1)	order Bacillales family Bacillaceae genus Bacillus MH13		

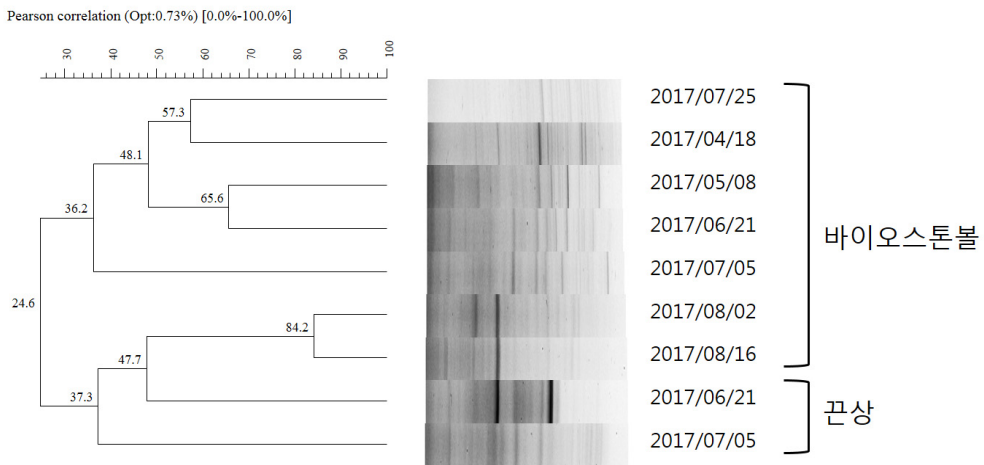


<그림 5-9> 접촉산화시스템에서 DGGE band의 계통학적 분석 결과

DGGE band를 분류학적으로 분석하면, 4개의 phylum으로 나누어졌으며, phylum Nitrospirae, "Proteobacteria", "Verrucomicrobia", Firmicutes에 각각 2개, 12개, 1개, 1개에 속하여 phylum "Proteobacteria"에 속하는 세균이 가장 많은 것으로 나타났다. Phylum Nitrospirae에 속하는 band는 #04와 #06으로 이들은 주로 질산화에 관여하는 세균으로, #4는 5월 8일 시료에서 우점하였

으나 다른 시료에서는 관찰되지 않았다. 하지만 Band #6의 경우에는 5월 8일을 제외하고 모든 시료에서 일정 수준 이상의 비율을 나타내고 있었다. Proteobacteria 중 Class alphaproteobacteria의 세균은 주로 유기물 분해능이 뛰어난 것으로 알려져 있는데, DGGE 분석 결과 총 8개의 band가 Class alphaproteobacteria에 속하는 것으로 나타났다(그림 5-9).

GelCompar를 사용하여 DGGE band와의 연관성을 분석한 결과, 바이오스톤 볼과 끈상은 서로 유사성이 낮은 것으로 나타났다(그림 5-10). 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 8월 5일 이후에 band #13이 우점하면서 끈상 접촉산화시스템의 6월 21일 시료와 유사한 것으로 나타났다. 하지만 바이오스톤 볼에서 다양한 종류의 band가 관찰되었으므로 바이오스톤 볼과 끈상의 상관성이 낮았다. 이러한 결과로 판단할 때 끈상에 비하여 바이오스톤 볼에 다양한 종류의 미생물이 우점하며, 이에 따라 다양한 종류의 유기 오염물질의 제거에 바이오스톤 볼이 끈상에 비하여 유리할 것으로 판단된다.



<그림 5-10> GelCompar를 사용한 DGGE band의 연관성 분석

나. 16S rRNA의 pyrosequencing 분석

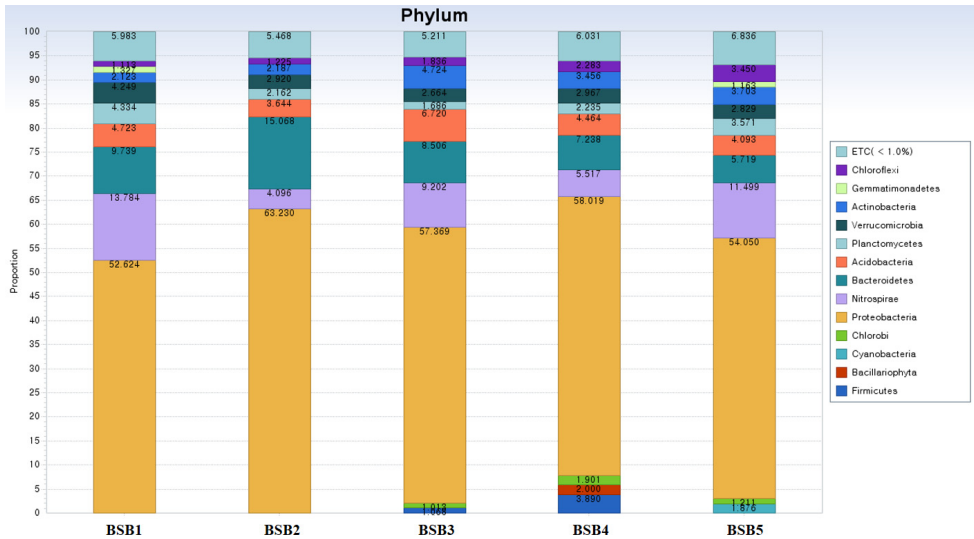
16S rRNA 유전자 기반의 pyrosequencing 방법을 이용한 세균 군집구조 분석법은 기존의 Sanger 염기서열 분석법의 단점을 극복하고 매우 복잡한 군집구조를 빠른 시간에 분석할 수 있는 장점이 있기 때문에 전세계적으로 널리 사용되고 있다(김택승 등, 2010). Sanger DNA 염기서열 결정방법이 dideoxynucleotide를 이용해 DNA 사슬을 종결하면서 염기서열을 결정하는데 반해, pyrosequencing DNA 염기서열 결정방법은 효소를 이용해 DNA 사슬을 신장시키면서 염기서열을 분석한다 (Rothberg and Leamon, 2008). 16S rRNA 유전자 기반의 pyrosequencing 방법을 이용한 미생물군집구조의 연구는 토양, 대장, 분변, 침적토, 해수, 지표수 등의 시료를 대상으로 활발히 진행되고 있다(김택승 등, 2010). 우선 각각의 시료에서 선별된 염기서열을 분류단계별로 정리하였다(표 5-9). 분석에 사용된 모든 시료에서 비슷한 수의 분류단계별 개수를 나타내는 것으로 나타났다.

(표 5-9) Pyrosequencing 분석에서 분류단계별 출현수

분류단계	BSB1	BSB2	BSB3	BSB4	BSB5	평균	표준편차
	04/18	05/08	06/21	07/05	07/25		
Phylum	9	8	10	11	11	9.8	1.3
Class	15	13	14	18	17	15.4	2.1
Order	28	20	21	23	26	23.6	3.4
Family	26	17	20	23	21	21.4	3.4
Genus	14	16	16	16	11	14.6	2.2
Species	4	11	11	8	4	7.6	3.5

※ 1% 미만은 제외

Phylum(문) 단계에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 Broteobacteria 로 52.6~62.2%를 나타내었다(표 5-10). 질산화에 관여하는 세균이 주로 속한 Nitrospirae의 비율도 4.1~13.8%로 높은 비율이었으며, Bacteroidetes의 비율은 5.72~15.1%의 범위로 높은 비율은 나타내었다. 하폐수처리시설의 세균 군집 구조를 분석한 선행 연구의 결과와 비교하면, 유기물 분해능이 있는 것으로 알려진 Proteobacteria의 비율이 일부 연구(김택승 등, 2010; Sibag, 2014)와 유사하지만, 국외 하수처리장에 비해 높은 것으로 나타났다.



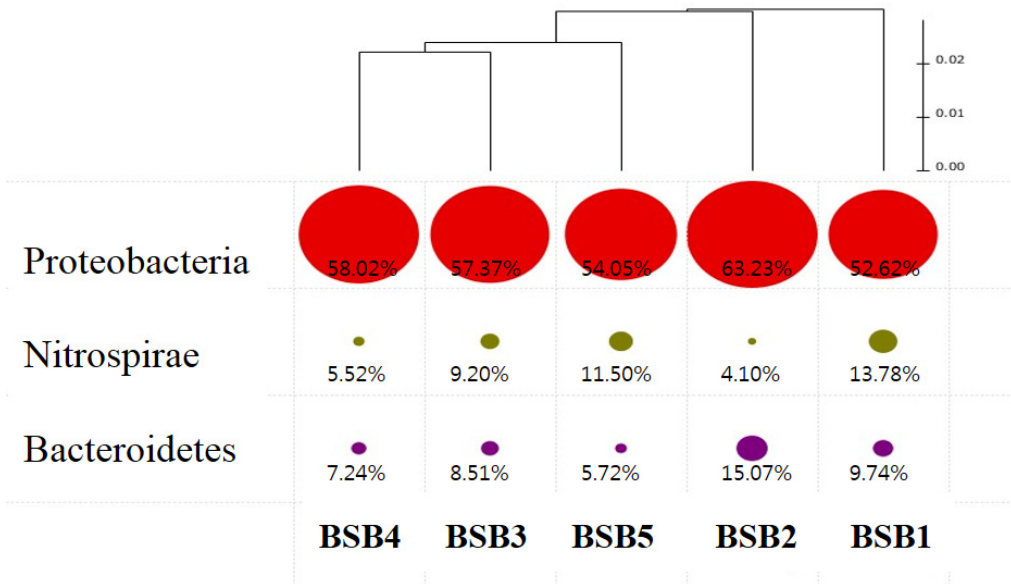
<그림 5-11> Pyrosequencing 분석에서 Phylum의 종류별 분포

(표 5-10) Pyrosequencing 분석에서 Phylum의 종류별 분포

Phylum	BSB1	BSB2	BSB3	BSB4	BSB5	평균	편차
Proteobacteria	52.62	63.23	57.37	58.02	54.05	57.06	4.1
Nitrospirae	13.78	4.10	9.20	5.52	11.50	8.82	4.0
Bacteroidetes	9.74	15.07	8.51	7.24	5.72	9.25	3.6
Acidobacteria	4.72	3.64	6.72	4.46	4.09	4.73	1.2
Planctomycetes	4.33	2.16	1.69	2.24	3.57	2.80	1.1
Verrucomicrobia	4.25	2.92	2.66	2.97	2.83	3.13	0.6
Actinobacteria	2.12	2.19	4.72	3.46	3.70	3.24	1.1
Gemmatimonadetes	1.33	-	-	-	1.16	1.25	0.1
Chloroflexi	1.11	1.23	1.84	2.28	3.45	1.98	0.9
Chlorobi	-	-	1.01	1.90	1.21	1.38	0.5
Cyanobacteria	-	-	-	-	1.88	1.88	
Bacillariophyta	-	-	-	2.00	-	2.00	
Firmicutes	-	-	1.07	3.89	-	2.48	2.0
ETC(1% 미만)	5.98	5.47	5.21	6.03	6.84	5.91	0.6

(표 5-11) 바이오스톤 불과 국내의 선행 연구 결과의 비교

분 류	바이오스톤 불	김택승 등, 2010	Sibag, 2014.	Wang et al., 2014a	Wang et al., 2014b	Isazadeh et al., 2014
<b>Proteobacteria</b>	52.6~63.2	51.1~77.7	60~73	21~53	12.8~27.8	42.7±1.2
Bacterioidetes	5.7~15.1	4.9~25.8		11~64	1.5~5.0	49±1.6
Acidobacteria	2.1~4.7	1.3~6.7		1~27	1.4~18.1	0.2±0.1
Chloroflexi	1.1~3.5	0.6~5.2		1~17	2.1~10.0	2.1±0.8
<b>Nitrospirae</b>	<b>4.1~13.8</b>	<b>0.0~6.2</b>			<b>0~0.8</b>	<b>&lt;0.1</b>
Planctomycetes	1.7~4.3	0.2~5.9			0.02~2.3	<0.1
Actinobacteria	2.1~4.7	0.3~4.1			0.17~2.6	0.2±0.1
Firmicutes	0~3.9	0.2~1.5			0.29~3.3	0.9±0.1
<b>Verrucomicrobia</b>	<b>2.7~4.2</b>				<b>0~0.74</b>	<b>0.2±0.1</b>
Gemmatimonadetes	0~1.3				0.03~0.32	0.1
<b>Shannon index</b>	6.37~6.90	5.16~6.29	3.5~4.2	6.2~8.0	5.2~5.5	3.17~4.86



<그림 5-12> Pyrosequencing 분석에서 우점하는 Phylum의 분포

이러한 결과로 볼 때 바이오스톤 볼의 생물막에는 유기물 분해 세균의 비율이 매우 높게 유지되고 있는 것으로 판단된다. 국내외 하수처리장의 선행 연구 결과와 비교할 때 가장 특징적인 phylum은 Nitrospirae로 바이오스톤 볼에서 4.1~13.8%로 국내 하수처리장에서 0~6.2%로 나타난 결과와 비교할 때 매우 높은 값이다(김택승 등, 2010).

Pyrosequencing 방법을 사용한 세균 군집구조 분석 결과에서 유기물 분해세균 및 질산화 관련 미생물의 농도가 높게 나온 것은 DGGE법을 통한 세균 군집 구조 분석 결과와 일치한다. 또한 Phylum Verrucomicrobia에 속하는 세균의 경우에도 2.7~4.2%로 국내외 연구에서 거의 발견되지 않는 종류이다. Verrucomicrobia은 그람음성균 계열의 세균으로 해양과 담수, 토양에서 발견되며, 동물이나 원생 생물의 공생체, 호기성 메탄산화 세균까지 다양한 종이 포함되어 있으며, 배양이 비교적 어렵기 때문에 이들의 기능에 대해서는 아직 밝혀져 있지 않다. 추정하면 바이오스톤 볼 내 생물막의 안정적 형성에 기여하는 것으로 판단된다. 따라서 바이오스톤 볼에는 특이적인 생물막이 나타나고 있는 것으로 판단된다.

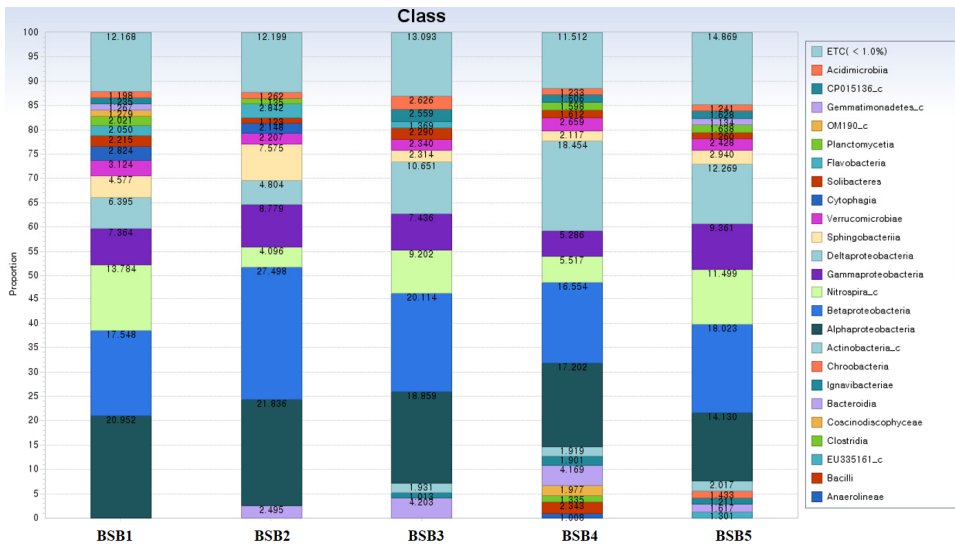
Class 단위에서 분석한 결과에서도 Phylum Proteobacteria에 속하는 Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria, Gammaproteobacteria, Deltaproteobacteria의



비율이 가장 높았으며, Phylum Nitrospirae에 속하는 Class Nitrospira\_c의 비율도 4.1~13.8%로 높은 비율을 차지하고 있었다(표 5-12, 그림 5-13, 그림 5-14).

Genus 단계에서 분석한 결과에 따르면 매우 많은 종류의 genus가 관찰되었으나, 단일 Genus로 가장 많이 관찰된 것은 Genus Nitrospira에 속하는 종이다.

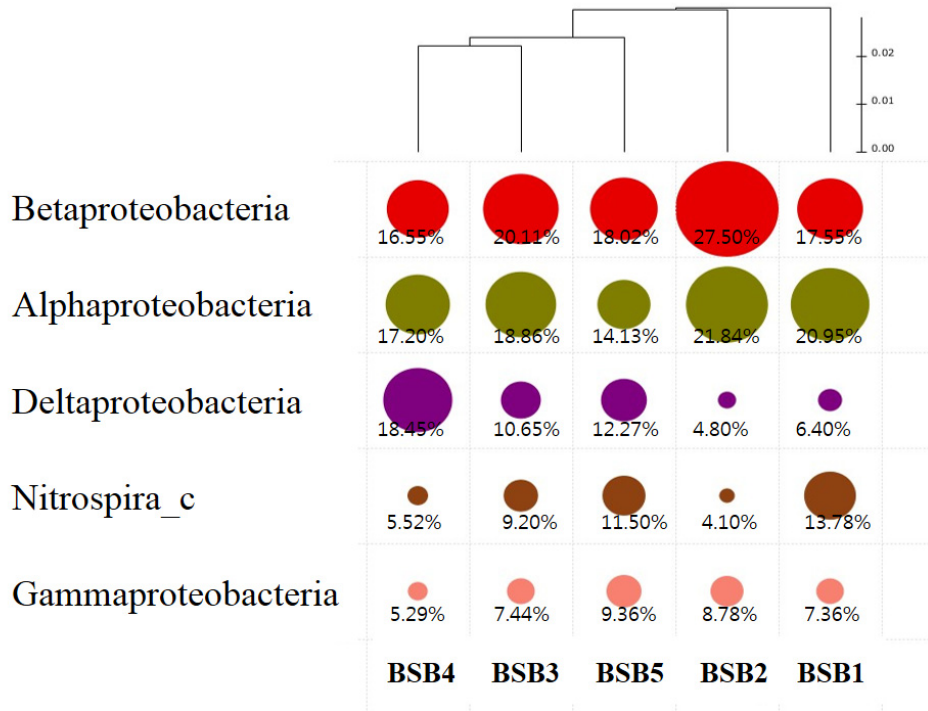
Pyrosequencing 분석에서 나온 종의 결과를 이용하여 다양성 지수인 Shannon index를 분석한 결과 시료에 따른 차이가 크지 않았으며, 6.37~6.90의 범위였다. 이러한 값은 중국 하수처리시설에서 분석한 Wang 등 (2014)과 유사한 값을 가지며, 기타 활성슬러지 및 생물막에서 나타난 다양성 지수에 비해 매우 높은 값을 가진다.



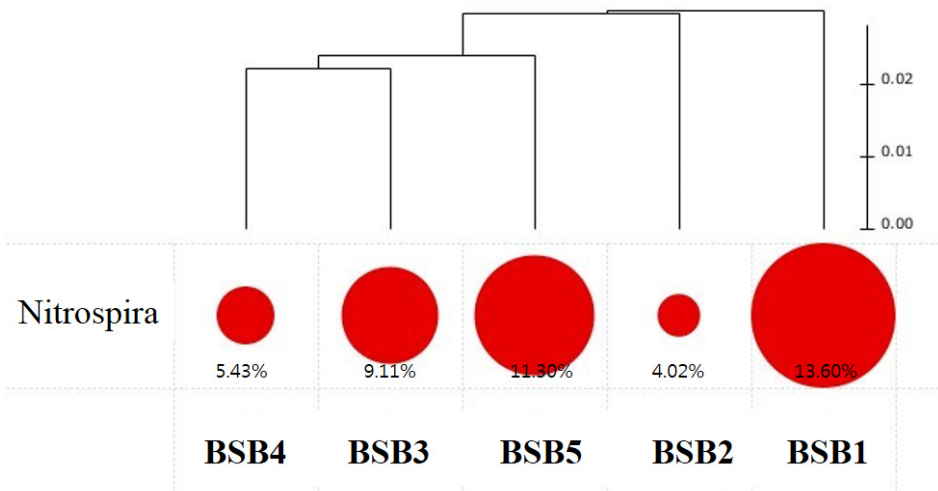
<그림 5-13> Pyrosequencing 분석에서 Class의 종류별 분포

(표 5-12) Pyrosequencing 분석에서 Class의 종류별 분포

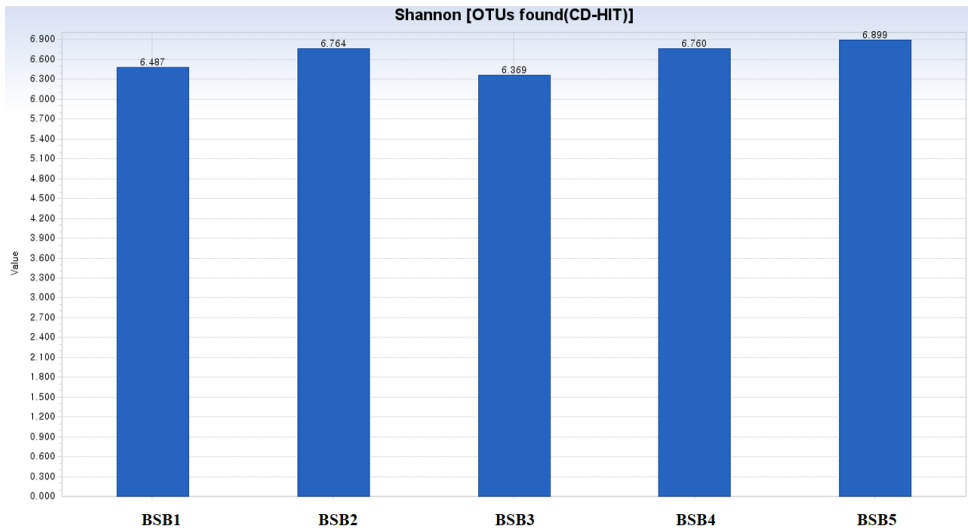
Class	BSB1	BSB2	BSB3	BSB4	BSB5	평균	편차
Alphaproteobacteria	20.95	21.84	18.86	17.20	14.13	18.60	3.1
Betaproteobacteria	17.55	27.50	20.11	16.55	18.02	19.95	4.4
Gammaproteobacteria	7.36	8.78	7.44	5.29	9.36	7.65	1.6
Deltaproteobacteria	6.40	4.80	10.65	18.45	12.27	10.51	5.4
Nitrospira_c	13.78	4.10	9.20	5.52	11.50	8.82	4.0
Sphingobacteriia	4.58	7.58	2.31	2.12	2.94	3.90	2.3
Verrucomicrobiae	3.12	2.21	2.34	2.66	2.43	2.55	0.4
Cytophagia	2.82	2.15	-	-	-	2.49	0.5
Solibacteres	2.22	1.12	2.29	1.61	1.26	1.70	0.5
Flavobacteria	2.05	2.84	1.37	-	-	2.09	0.7
Planctomycetia	2.02	1.14	-	1.60	1.64	1.60	0.4
OM190_c	1.28	-	-	-	-	1.28	
Gemmatimonadetes_c	1.27	-	-	-	1.13	1.20	0.1
CP015136_c	1.24	-	2.56	1.61	1.63	1.76	0.6
Acidimicrobiia	1.20	1.26	2.63	1.23	1.24	1.51	0.6
Bacteroidia	-	2.50	4.20	4.17	1.62	3.12	1.3
Actinobacteria_c	-	-	1.93	1.92	2.02	1.96	0.1
Ignavibacteriae	-	-	1.01	1.90	1.21	1.38	0.5
Bacilli	-	-	-	2.34	-	2.34	
Coscinodiscophyceae	-	-	-	1.98	-	1.98	
Clostridia	-	-	-	1.34	-	1.34	
Anaerolineae	-	-	-	1.01	-	1.01	
Chroobacteria	-	-	-	-	1.43	1.43	
EU335161_c	-	-	-	-	1.30	1.30	
ETC(1% 미만)	12.17	12.20	13.09	11.51	14.87	12.77	1.3



<그림 5-14> Pyrosequencing 분석에서 우점하는 Class의 분포



<그림 5-15> Pyrosequencing 분석에서 우점하는 Genus의 분포



<그림 5-16> Pyrosequencing 분석에서 Shannon index 분석 결과

바이오스톤 불 접촉산화시스템의 운영 방식에 따른 세균 군집구조의 변화를 분석한 결과, 폭기 방식에 따른 세균 종 다양성은 차이가 없었으며, 우점 군집인 proteobacteria의 비율도 큰 차이가 없었다. 하지만 질산화 세균이 주로 속한 genus Nitrospira의 비율이 간헐폭기 기간인 5월 8일에 매우 낮았다. 하지만 무폭기 기간인 4월 18일에 genus Nitrospira의 비율이 13.6%로 매우 높았다. 또한 상시 폭기 기간 중 7월 5일 시료에서는 비율이 5.43%로 다시 낮아지는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 바이오스톤 불 접촉산화시스템의 폭기 방식에 따라 미생물 군집에는 큰 영향이 없음을 의미한다. 이러한 이유는 운영 방식의 변동이 매우 짧은 시간에 이루어졌기 때문에 세균 군집이 변하기에 충분한 시간이 주어지지 않은 것으로 보인다. 따라서 바이오스톤 불 접촉산화시스템에 형성된 생물막은 산소 공급 방식이 변하여도 안정적으로 유지되고 있음을 의미한다. 또한 바이오스톤의 생물막에 매우 다양한 미생물 군집이 형성되어 있으며, 이에 따라 다양한 종류의 대사 작용(즉, 다양한 종류의 유기물 분해능, 질소 산화능 등)이 일어날 것으로 판단된다.

## 제2절 접촉산화시스템 부착 미생물 활성화도 평가

### 1. 연구재료 및 방법

#### 가. 시료의 확보 및 전처리

접촉산화수처리시스템 부착 미생물 활성화도 평가를 위하여 부착 미생물의 부착량 및 군집구조 분석에 사용한 시료를 사용하였다. 바이오스톤 불 접촉산화시스템의 전처리조에서 채집된 고정상 여재, 바이오스톤 불 산화조(포기/비포기 영역)에서 채집한 바이오스톤 불, 끈상 접촉산화조에서 채집한 끈상 시료에 대해 분석하였으며, 고정상 여재 및 바이오스톤 불은 4월 18일부터 8월 16일까지 7회 분석하였고, 끈상은 6월 21일과 7월 5일에 채집하여 분석하였다. 채집된 매디아는 ultrasonicator로 전처리한 후, 원심분리하여 분석 시료를 확보하였다.

#### 나. 부착 미생물 활성화도 분석

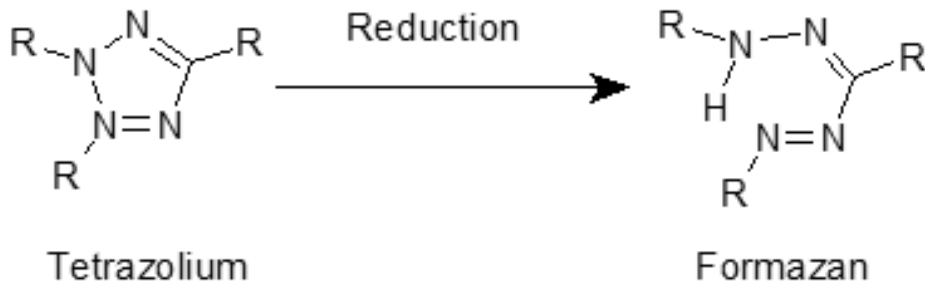
미생물 효소활성도는 dehydrogenase, glycosidase, lipase, 질산화 효소(AOB 활성화도)를 분석하였다. Dehydrogenase의 활성화도는 효소에 의한 INT의 전환율을 측정하여 분석하였다(오유미 등, 2010). 전처리된 시료에 INT(2-(4-iodophenyl)-5-phenyl-tetrazolium chloride)를 가하여 혼합한 다음 20°C 암소에서 20분간 반응시켰다. Dehydrogenase에 의해 변환된 INT-formazan을 추출하기 위하여 THF를 첨가한 후 원심분리(8,000 rpm, 10분)를 하였다. 원심분리 후 상정액을 취하여 465 nm에서 흡광도를 측정하여 형성된 INT-formazan을 정량하였다.

Glycosidase와 lipase의 활성화도는 형광 기질인 MUF-butyrate, MUF- $\alpha$ -D-glucopyranoside, MUF- $\beta$ -D-glucopyranoside의 MUF(4-methylumbelliferone)로의 전환율을 측정하여 계산하였다. 가수분해에 의해 생성된 MUF의 양은 형광광도계(Glomax Multi Jr, Promega)를 사용하여 측정하였다.

질산화효소 활성화도는 농축된 시료에 INT와 nalidizic acid를 첨가하고, 기질로 NH<sub>4</sub>Cl, NaNO<sub>2</sub>를 첨가한 후 20°C 암소에서 4시간 배양하여 형성된 INT-formazan을 정량하여 측정하였다(유재철 등, 2007).

## 2. 접촉산화시스템 부착 미생물 활성도 분석 결과

바이오스톤 볼 및 끈상 매디아에 부착된 미생물의 활성도를 평가하기 위하여 dehydrogenase, glycosidase, lipase 및 질산화효소의 활성도를 분석하였다. 탈수소효소(dehydrogenase)는 기질에 hydrides(H<sup>-</sup>)를 첨가하는 산화효소로서, 세포의 물질 및 에너지 대사에 중요한 역할을 담당한다. 대표적인 탈수소효소는 전자전달계를 구성하는 효소로, 이는 세포의 호흡률과 상관관계를 가진다. 따라서 탈수소효소의 활성도 변화를 측정하면 접촉산화수처리 시스템의 생물막에 존재하는 부착 미생물의 활성도를 평가할 수 있다. 탈수소효소의 활성도는 tetrazolium 염이 환원되는 정도로 측정할 수 있으며, 기질로는 INT [2-(p-iodophenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyl tetrazolium chloride]와 TTC (2,3,5-triphenyl-tetrazolium chloride), XTT(2,3-bis-(2-methoxy-4-nitro-5-sulfo phenyl)-2H-tetrazolium-5-carboxanilide)가 사용되며, 이들 기질이 탈수소효소에 의해 formazan으로 전환된 정도를 측정하여 효소의 활성도를 측정할 수 있다. Formazan은 붉은 색의 불용성 염으로 acetone 또는 THF와 같은 유기용매로 추출한 후 분광광도계로 농도를 측정할 수 있다.



<그림 5-17> 탈수소효소에 의한 tetrazolium의 formazan 전환과정

바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 탈수소효소의 활성도는 2.81~48.70  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 의 범위였으며, 최대값은 4월 18일에 나타났으며, 이후 8월 2일까지 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 탈수소효소 활성도는 세균의 수 또는 생물량과 관련성이 크기 때문에 종속영양세균수(HPC) 및 DNA 농도와 효소활성도의 관계에 대해 분석하였다. 탈수소효소 활성도/종속영양세균수의 비율을 구한 결과, 0.335~0.834로 시기에 따른 변이가 크지 않았다. 탈수소 효소 활성도/DNA 함량의 경우에는 탈수소효소 활성도/종속영양세균수의 비율에 비하여 변이가 크게 나타났다. 따라서 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 시간이 경과됨에 따라 dehydrogenase의 활성이 줄어든 것은 생물량 또는 세균수가 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

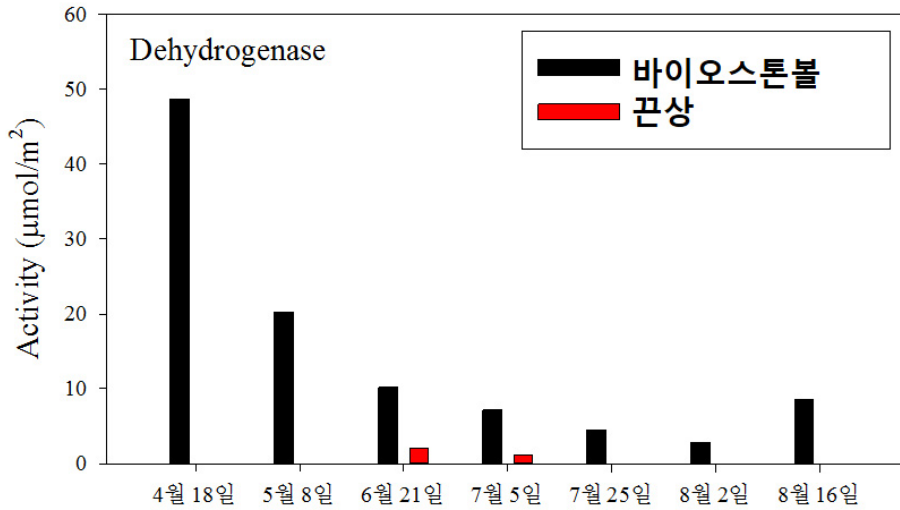
끈상 접촉산화시스템에서는 6월 21일과 7월 5일에 탈수소효소 활성도는 각각 2.02  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 과 1.15  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 로 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에 비해 낮았다(표 5-13). 이를 종속영양세균수와 DNA 농도에 대한 비율로 환산하였을 때에도 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에 비하여 낮았다. 따라서 바이오스톤 볼 접촉산화시스템이 끈상 접촉산화시스템에 비하여 탈수소효소 활성이 높게 유지되는 것으로 판단된다.

(표 5-13) 접촉산화시스템에서 dehydrogenase의 활성도

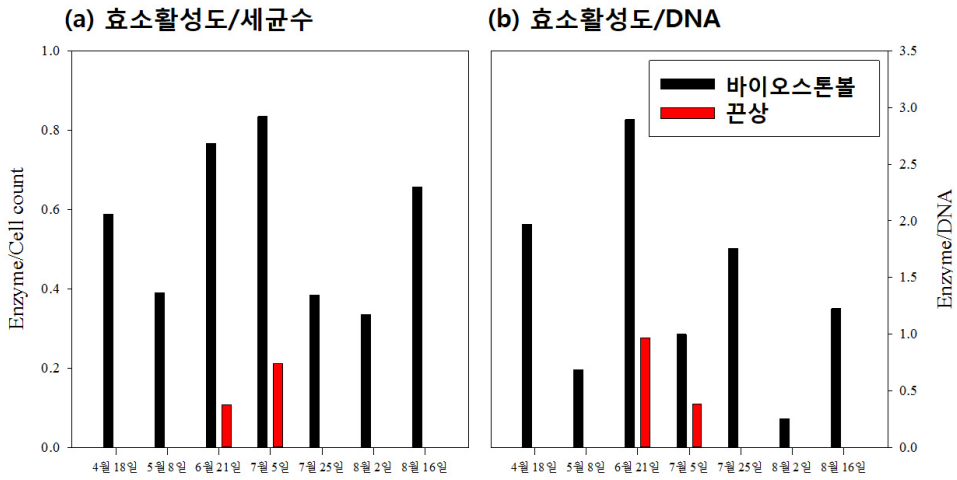
시스템	일자	Dehydrogenase ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	효소활성도/생물량	
			활성도/HPC	활성도/DNA
바이오스톤 산화조	04월 18일	48.70	0.588	1.967
	05월 08일	20.25	0.390	0.684
	06월 21일	10.18	0.766	2.893
	07월 05일	7.15	0.834	0.999
	07월 25일	4.45	0.385	1.755
	08월 02일	2.81	0.335	0.251
	08월 16일	8.57	0.657	1.226
끈상 산화조	06월 21일	2.02	0.107	0.965
	07월 05일	1.15	0.211	0.385

※ 활성도/HPC=Dehydrogenase( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )/세균수( $\times 10^6$  CFU/ $\text{m}^2$ ) $\times 1,000$

※ 활성도/DNA=Dehydrogenase( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )/DNA 농도( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ) $\times 1,000$



<그림 5-18> 점축산화시스템에서 dehydrogenase의 활성도



<그림 5-19> Dehydrogenase의 활성도와 생물량의 비교



Glycosidase는 각종 당류에 작용하여 글리코시드 결합을 가수분해하며 당과 아글리콘의 생성반응을 촉매하는 효소를 총칭하는 것으로 글리코시드 하이드롤라아제(glycoside hydrolase)라고도 한다. 글리코시드를 형성하는 당이 glucose일 때는 glucosidase, galactose일 때는 galactosidase라 하여 구분한다. 또한 녹말을 가수분해하는 amylase, 젓당을 가수분해하는  $\beta$ -galactosidase 등이 이에 속한다.

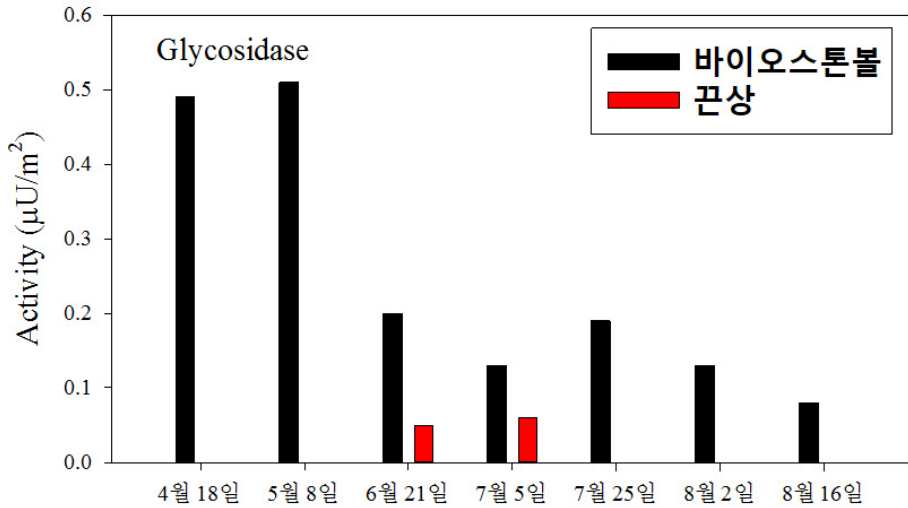
본 연구에서는 MUF- $\alpha$ -D-glucofuranoside와 MUF- $\beta$ -D-glucofuranoside를 기질로 사용하였으며, glycosidase에 의해 MUF(4-methylumbelliferone)로 전환율을 측정하여 효소의 활성도를 계산하였다. 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 바이오스톤 볼에서 glycosidase의 활성도는 0.08~0.51  $\mu$ U/m<sup>2</sup>의 범위였으며, 5월 8일 시료에서 최대값을 나타내었고, 8월 16일 시료에서 최소값이었으며, 대체적으로 실험 초기에는 높은 값이었으나, 6월 21일 이후 활성이 줄어드는 것으로 나타났다(표 5-14, 그림 5-20). 끈상 접촉산화시스템에서 6월 21일과 7월 5일에 측정된 값은 각각 0.05와 0.06  $\mu$ U/m<sup>2</sup>으로 바이오스톤 볼에 비해 활성이 낮은 것으로 평가되었다.

(표 5-14) 접촉산화시스템에서 glycosidase의 활성도

시스템	일자	Glycosidase ( $\mu$ U/m <sup>2</sup> )	효소활성도/생물량	
			활성도/HPC	활성도/DNA
바이오스톤 볼 산화조	04월 18일	0.49	5.91	19.79
	05월 08일	0.51	9.83	17.22
	06월 21일	0.20	15.05	56.83
	07월 05일	0.13	15.17	18.16
	07월 25일	0.19	16.42	74.95
	08월 02일	0.13	15.51	11.60
	08월 16일	0.08	6.13	11.44
끈상 산화조	06월 21일	0.05	2.65	23.89
	07월 05일	0.06	11.03	20.07

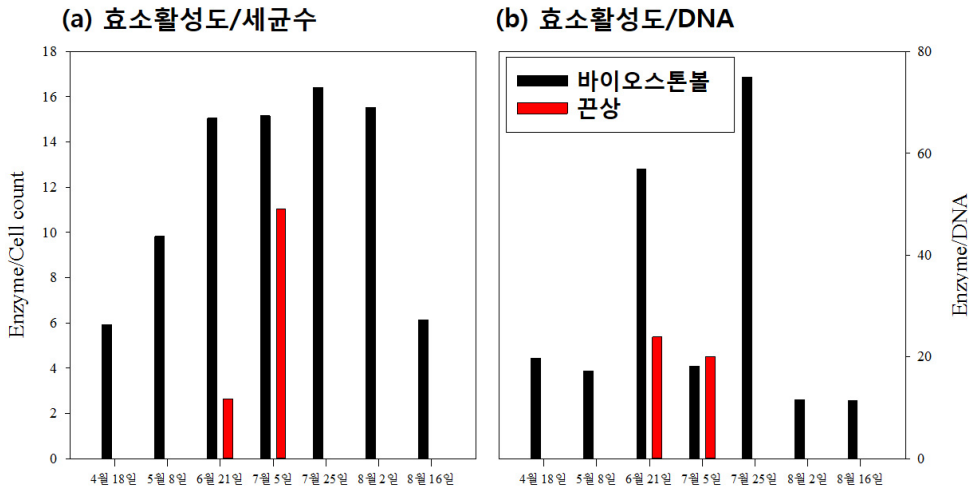
※ 활성도/HPC=Glycosidase( $\mu$ U/m<sup>2</sup>)/세균수( $\times 10^6$  CFU/m<sup>2</sup>) $\times 10^6$

※ 활성도/DNA=Glycosidase( $\mu$ U/m<sup>2</sup>)/DNA 농도( $\mu$ mol/m<sup>2</sup>) $\times 10^6$



<그림 5-20> 접촉산화시스템에서 glycosidase의 활성도

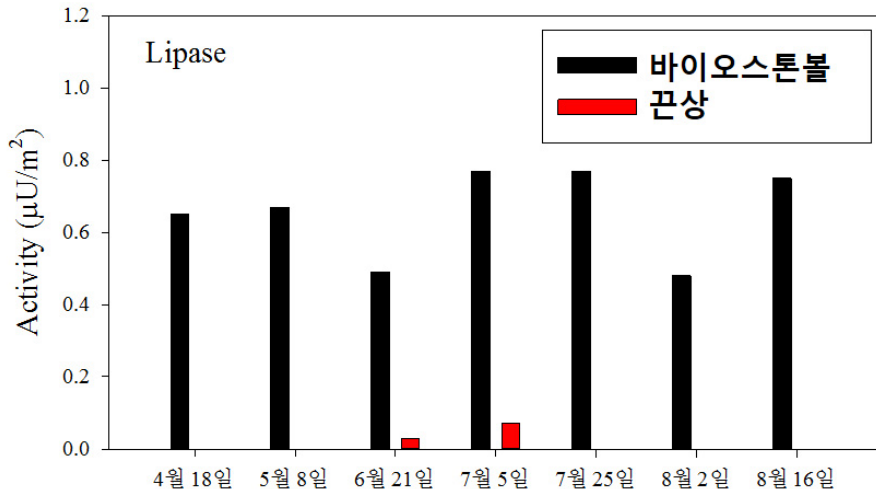
Glycosidase 활성도/중속영양세균수의 비율을 구한 결과, 5.91~16.42로 시기에 따른 변이가 크게 나타났으며, 6월 21일부터 8월 2일까지는 큰 값을 나타내었으며, 나머지 기간에는 낮은 값을 나타내었다(그림 5-21).



<그림 5-21> Glycosidase의 활성도와 생물량의 비교

Glycosidase 활성도/DNA 함량의 경우에는 6월 21일과 7월 25일 시료에서는 높았으나 나머지 기간에는 변이가 크지 않았다. 바이오스톤 볼과 끈상에서 효소활성도/세균수를 구한 결과, 6월 21일에는 바이오스톤 볼과 끈상에서 각각 15.05와 2.65로 차이가 컸으나, 7월 5일에는 각각 15.17과 11.03으로 큰 차이가 없었다. 또한 효소활성도/DNA를 구한 결과, 6월 21일에는 각각 56.83과 23.89이었으며, 7월 5일에는 각각 18.16과 20.07이었다. 즉 6월 21일에는 끈상에 비해 바이오스톤 볼의 세포당 효소활성도가 높았으며, 7월 5일에는 두 시스템의 활성도가 비슷한 것으로 나타났다. 결론적으로 끈상에 비해 바이오스톤 볼의 glycosidase 활성도가 높은 것으로 판단된다.

Lipase는 esterase의 일종으로 glycerin과 지방산과의 ester인 지방의 가수분해에 관여하는 지방분해효소이다. 본 연구에서는 기질로 MUF-butyrate를 사용하여 lipase의 활성도를 측정하였다. 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 바이오스톤 볼에서 lipase의 활성도는 0.48~0.77  $\mu\text{U}/\text{m}^2$ 의 범위로 시기에 따른 변이가 크지 않았다(표 5-15, 그림 5-22). 끈상 접촉산화시스템에서 6월 21일과 7월 5일에 측정된 값은 각각 0.03과 0.07  $\mu\text{U}/\text{m}^2$ 으로 바이오스톤 볼에 비해 활성이 매우 낮은 것으로 평가되었다.



<그림 5-22> 접촉산화시스템에서 lipase의 활성도

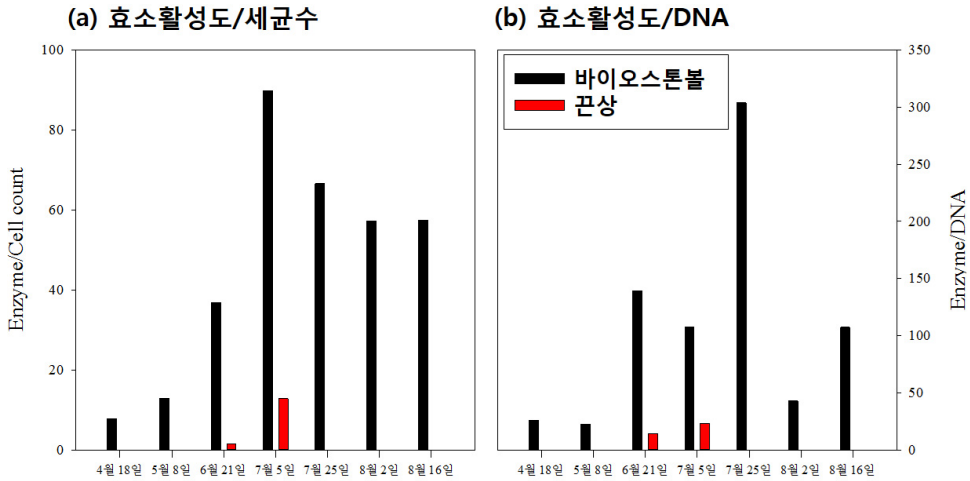
(표 5-15) 접촉산화시스템에서 lipase의 활성도

시스템	일자	Lipase ( $\mu\text{U}/\text{m}^3$ )	효소활성도/생물량	
			활성도/HPC	활성도/DNA
바이오스톤 불 산화조	04월 18일	0.65	7.84	26.25
	05월 08일	0.67	12.91	22.62
	06월 21일	0.49	36.88	139.24
	07월 05일	0.77	89.84	107.59
	07월 25일	0.77	66.55	303.75
	08월 02일	0.48	57.27	42.82
	08월 16일	0.75	57.48	107.27
끈상 산화조	06월 21일	0.03	1.59	14.33
	07월 05일	0.07	12.87	23.41

※ 활성도/HPC=Lipase( $\mu\text{U}/\text{m}^3$ )/세균수( $\times 10^6$  CFU/ $\text{m}^3$ ) $\times 1,000$

※ 활성도/DNA=Lipase( $\mu\text{U}/\text{m}^3$ )/DNA 농도( $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ ) $\times 1,000$

Lipase 활성도/중속영양세균수의 비율을 구한 결과, 7.84~89.84로 시기에 따른 변이가 크게 나타났으며, 4월 18일과 5월 8일 시료에서는 낮은 값을 보였으며, 6월 21일부터는 높은 값을 유지하였다. Lipase 활성도/DNA 함량의 경우에는 8월 2일에 낮은 값을 나타내었으나, 효소활성도/중속영양세균수의 비율과 마찬가지로 5월 8일까지는 낮은 값이었고 이후에 급격히 증가하는 양상을 나타내었다. 끈상의 경우에는 Lipase 활성도/중속영양세균수 비율이 6월 21일과 7월 5일에 각각 1.59와 12.87로 바이오스톤 불에 비해 매우 낮은 값을 나타내었으며, Lipase 활성도/DNA 함량의 비율에서도 같은 경향을 나타내었다. 결론적으로 바이오스톤 불의 생물막은 유입수의 상태나 운전 조건에 상관없이 지질분해능이 뛰어난 것으로 판단되며, 끈상의 생물막에 비해 지질 분해능이 매우 높은 것으로 판단된다.



<그림 5-23> Lipase의 활성도와 생물량의 비교

질산화효소는 암모니아성질소와 아질산성질소를 산화시키는 효소로 이를 직접적으로 평가하기 보다는 기질로 암모니아성질소와 아질산성질소를 공급한 후 질산화미생물의 활성도를 측정하는 방법이 사용된다(유재철 등, 2007). 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 바이오스톤 볼에서 질산화효소의 활성도는  $18.22 \sim 229.43 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ 의 범위로 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타내었다(표 5-16, 그림 5-24). 끈상 접촉산화시스템에서 6월 21일과 7월 5일에 측정된 값은 각각  $29.31$ 과  $22.93 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ 으로 같은 시기에 바이오스톤 볼 반응조에서 측정된 값과 비슷한 활성을 나타내었다. 생물량과 비교하였을 때, dehydrogenase와 glycosidase에서 나타난 결과와 유사하게, 생물량에 따른 효소 활성도는 거의 비슷하게 유지하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로 볼 때 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 탈수소효소, glycosidase, 질산화효소의 활성은 유입수의 성상이나 운전조건에 따라 매우 상이한 것으로 나타났으나 이러한 변화는 세균의 세포당 활성도가 변하는 것이 아니라 생물막의 생물량에 따라 달라지는 것으로 나타났다. Lipase의 경우는 탈수소효소나 glycosidase에 비해 효소 활성도 및 세포당 활성도가 일정하게 유지되었으며, 유입수의 성상이나 운전조건에 따른 변이가 크지 않았다. 바이오스톤 볼과 끈상 생물막을 비교한 결과, 바이오스톤 볼에서 끈상에 비해 탈수소효소, glycosidase, lipase의 단위 면적당 효소 활성도가 높았을 뿐 아니라 세포당 효소활성도도 더 높은

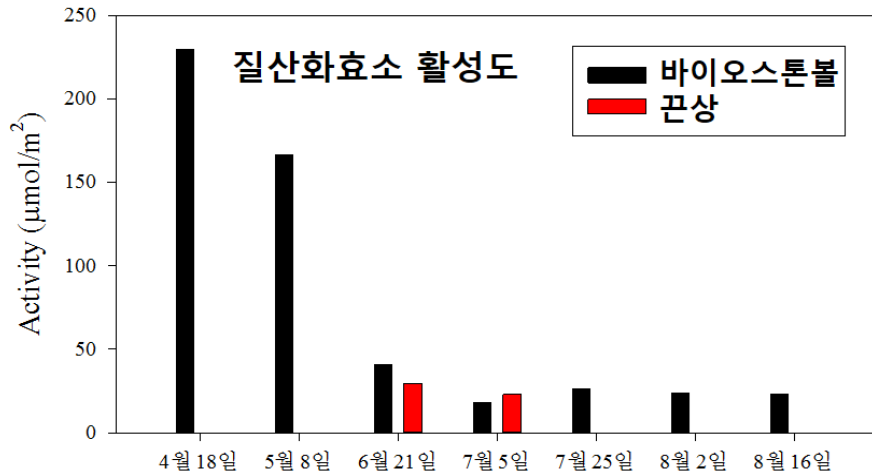
것으로 판단되었다. 따라서 바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화시스템에서 유기물 분해능이 훨씬 더 뛰어날 것으로 판단된다.

(표 5-16) 접촉산화시스템에서 질산화효소의 활성도

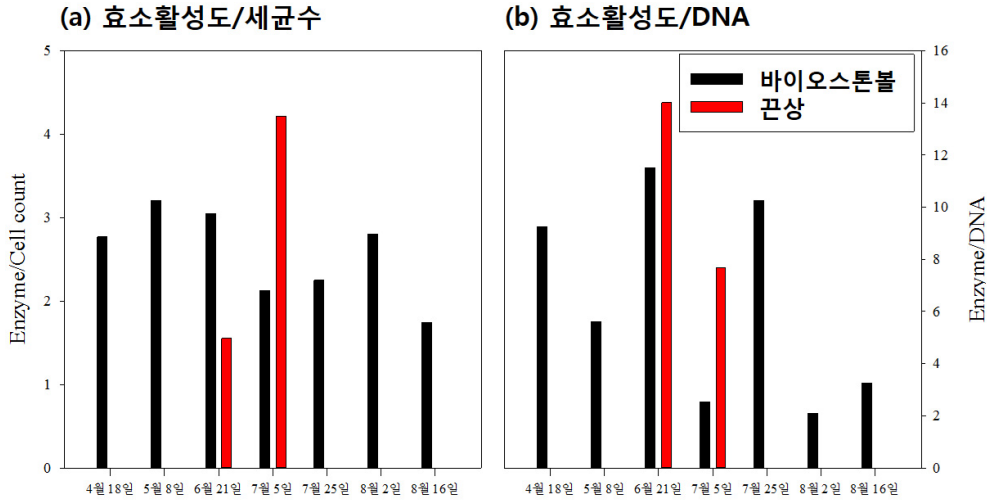
시스템	일자	질산화효소 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	효소활성도/생물량	
			활성도/HPC	활성도/DNA
바이오스톤 산화조	4월 18일	229.43	2.769	9.265
	5월 8일	166.38	3.205	5.617
	6월 21일	40.55	3.052	11.524
	7월 5일	18.22	2.126	2.546
	7월 25일	26.01	2.248	10.263
	8월 2일	23.49	2.802	2.095
	8월 16일	22.77	1.745	3.256
끈상 산화조	6월 21일	29.31	1.552	14.009
	7월 5일	22.93	4.216	7.669

※ 활성도/HPC=질산화효소( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )/세균수( $\times 10^6$  CFU/ $\text{m}^2$ ) $\times 1,000$

※ 활성도/DNA=질산화효소( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )/DNA 농도( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ) $\times 1,000$



<그림 5-24> 접촉산화시스템에서 질산화효소의 활성도



<그림 5-25> 질산화효소의 활성도와 생물량의 비교

## 제3절 바이오스톤 볼의 부착 미생물 안정도 평가

### 1. 연구재료 및 방법

#### 가. 바이오스톤 볼 코팅 전/후 생물량 및 효소활성도 변화

바이오스톤 볼에 미생물 혼합액을 코팅한 후 코팅 전/후의 미생물 군집 구조 및 생물량, 효소 활성도를 분석하였다. 혼합미생물 코팅 원액 희석액(1/100)에 바이오스톤 볼을 담그고 이를 굴려 미생물 코팅을 실시하였다. 또한 바이오스톤 볼 및 쇄석으로 구성된 소규모 아크릴 반응조에서 바이오스톤 볼과 쇄석을 채집하여 미생물 군집구조 및 생물량, 효소 활성도를 분석하였다. 쇄석의 경우 미생물 혼합액 코팅을 하지 않았으므로, 코팅하여 주입한 바이오스톤 볼과 비교하면 미생물 코팅의 효과를 분석할 수 있다. 코팅 후 바이오스톤 볼, 소규모 아크릴 반응조에서 채집된 바이오스톤 볼, 쇄석을 ultrasonication으로 전처리하여 부착된 미생물을 탈착시켰다. 탈착액을 사용하여 생물량(DNA, 단백질, 종속영양세균수) 및 효소활성도(dehydrogenase, glycosidase, lipase)를 측정하였다. 코팅 원액 희석액을 증류수로 1/5 희석한 후 이에 대하여 동일한 항목에 대한 분석을 실시하였다. 코팅된 바이오스톤 볼, 소규모 아크릴 반응조의 바이오스톤 볼과 쇄석의 경우에는 단위 면적당 생물량과 효소활성도로 환산하였으며, 코팅원액 희석액의 경우에는 단위 부피당 생물량과 효소활성도로 환산하였다.

#### 나. 운영기간에 따른 미생물 부착량/군집구조변화 분석

미생물로 코팅한 바이오스톤 볼을 물에 담근 상태 및 물이 지속적으로 흐르는 상태에서 미생물 부착량 및 군집구조 변화를 분석하기 위해 소규모 아크릴 반응조를 제작하여 4월 25일부터 운영하였으며, 상시 폭기 방식으로 운영하였다. 가뭄으로 인해 매화저수지 수위가 낮은 시기에는 운영을 중지하였다. 소규모 아크릴 플랜트의 유입수와 처리수의 물 시료는 비이커를 이용하여 채수하였으며, 4월 27일부터 8월 30일까지 총 7회 채수하였다. 소규모 아크릴 플랜트에서 바이오스톤 볼은 4월 27일부터 8월 16일까지 7회 채집하였으며, 쇄석 시료는 7월 25일과 8월 2일의 2회에 걸쳐 채집하였다(표 5-17).

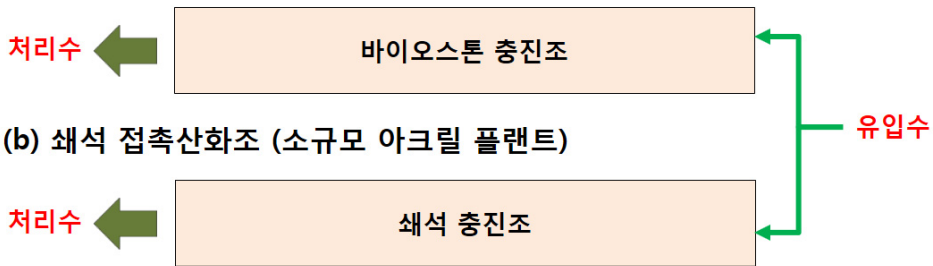


(표 5-17) 시료 채취 일정 및 분석 내용

분석 내용		바이오스톤 불 산화조	쇄석 산화조
수질	유입수/ 처리수	4월 27일, 5월 8일	4월 27일, 5월 8일
		6월 21일, 7월 5일	6월 21일, 7월 5일
		7월 25일, 8월 17일	7월 25일, 8월 17일
		8월 30일	8월 30일
생물량 효소활성도 군집구조(DGGE)		4월 27일, 5월 8일 6월 21일, 7월 5일 7월 25일, 8월 2일 8월 16일	7월 25일, 8월 2일

바이오스톤 불과 쇄석은 반응조의 수평 중간 지점에서 표면에 있는 바이오스톤 불 또는 쇄석을 제거하고 수직 중간 지점에서 채집하였다(그림 5-26). 채집된 바이오스톤 불과 쇄석은 냉장상태를 유지하며 실험실로 옮긴 후 부착된 생물막을 탈리하기 위하여 초음파 처리를 수행하였다. 생물량(DNA, 단백질, 중속영양세균수) 및 효소 활성도(dehydrogenase, glycosidase, lipase) 분석은 샘플링 당일에 시행하였고, 군집구조 분석에 필요한 DNA 추출을 위한 시료는 DNA 분석 때까지 -70℃ 초저온 냉동고에 보관하였다. 미생물 군집구조는 DGGE법으로 분석하였다.

(a) 바이오스톤불 접촉산화조 (소규모 아크릴 플랜트)



<그림 5-26> 소규모 아크릴 수처리조에서 시료 채취 지점

**다. 바이오스톤 볼 건조에 따른 부착 미생물 군집의 안정도 평가**

일반적으로 소규모인 농업용 저수지는 유역이 작아 가뭄 등으로 강수량이 부족한 경우에는 유입수가 거의 없는 상태가 되기도 한다. 유입수가 없을 때 바이오스톤 처리시설의 핵심기술인 바이오스톤 담체가 건조되는 경우가 발생할 수도 있어 바이오스톤 볼의 건조에 의한 부착 미생물 군집의 안정도를 평가하였다. 안정도 평가를 위하여 7월 25일에 바이오스톤 볼 접촉산화시스템 파일럿 플랜트에 있는 바이오스톤 볼을 채집하여 실험실로 옮긴 후 25℃ 항온 암실에서 공기 중에 노출시킨 후 2주, 4주, 6주의 경과 후 생물량 및 효소활성도 변화를 측정하였다. 해당 기간이 경과된 후 바이오스톤 볼을 취하여 ultrasonication으로 전처리하여 부착된 미생물을 탈착시켰다. 전처리된 시료로부터 생물량(DNA, 단백질, 종속영양세균수) 및 효소활성도(dehydrogenase, glycosidase, lipase)를 측정하였다.

**2. 바이오스톤 볼 미생물 코팅 전/후 미생물 군집 분석**

**가. 바이오스톤 볼 코팅 전/후 생물량 및 효소활성도 변화**

미생물 코팅액과 코팅된 바이오스톤 볼에서 효소활성도 및 미생물 군집 구조 분석을 통하여 미생물 코팅에 의한 바이오스톤 볼의 초기 미생물군집의 형성에 대한 분석을 실시하였다. 실험에 사용된 코팅액은 미생물 원액을 1/100 희석한 것으로 실제 바이오스톤 볼 코팅에 사용되는 용액을 분석에 사용하였다. 미생물 코팅액에서 DNA의 농도는 365.8  $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 바이오스톤 볼에서는 46  $\mu\text{g/m}^2$ 이었다(표 5-18).

(표 5-18) 바이오스톤 볼의 코팅 전/후 생물량 및 효소활성도

	시료	코팅액(1/100 희석액)	바이오스톤 볼
생물량	DNA	365.8 ( $\mu\text{g/L}$ )	46 ( $\mu\text{g/m}^2$ )
	단백질	100,697 ( $\mu\text{g/L}$ )	433 ( $\mu\text{g/m}^2$ )
	종속영양세균수	16,167 ( $\times 10^6$ CFU/L)	2,768 ( $\times 10^6$ CFU/ $\text{m}^2$ )
효소활성	Dehydrogenase	6.58 ( $\mu\text{mol/L}$ )	2.06 ( $\mu\text{mol/m}^2$ )
	Glycosidase	0.05 ( $\mu\text{U/L}$ )	0.006 ( $\mu\text{U/m}^2$ )
	Lipase	0.49 ( $\mu\text{U/L}$ )	0.156 ( $\mu\text{U/m}^2$ )

중속영양세균수는 코팅액에서  $16,167 \times 10^6$  CFU/L이었으며, 바이오스톤 볼에서는  $2,768 \times 10^6$  CFU/m<sup>2</sup>이었다. 바이오스톤 볼의 개당 평균 면적은 0.07 m<sup>2</sup>이므로, 이를 활용하여 바이오스톤 볼에 코팅된 미생물 코팅액의 양을 계산하면, DNA 농도 기준으로 8.8 mL이며, 중속영양세균수 기준으로 12.0 mL에 해당된다. 미생물 코팅액에서 단백질의 농도는 100,697  $\mu$ g/L이었으며, 바이오스톤 볼에서는 433  $\mu$ g/m<sup>2</sup>이었다. 바이오스톤 볼의 면적과 미생물 코팅액 및 바이오스톤 볼에서 단백질의 농도를 기준으로 계산하면, 미생물 코팅액 0.3 mL에 해당되는 단백질이 바이오스톤 볼에 코팅된 것으로 판단된다. 전이된 단백질의 양은 DNA 또는 중속영양세균수에 비하여 적은 것으로 나타났다. 이상의 결과는 미생물 코팅액에 생물 유래성이 아닌 다량의 단백질이 포함되어 있으며, 이러한 단백질 물질은 코팅 과정에서 바이오스톤 볼로 전이되지 않는 것으로 판단된다. 결론적으로 DNA와 중속영양세균수 기준으로 판단할 때 코팅 과정에서 약 10 mL의 미생물 코팅액에 포함된 세균이 바이오스톤으로 전이되는 것으로 판단된다.

효소 활성도를 보면 미생물 코팅액에서 dehydrogenase의 활성도는 6.58  $\mu$ mol/L이었으며, 바이오스톤 볼에서는 2.06  $\mu$ mol/m<sup>2</sup>이었다(표 5-18). 또한 lipase의 경우에 미생물 코팅액과 바이오스톤 볼에서 각각 0.49  $\mu$ U/L와 0.156  $\mu$ U/m<sup>2</sup>이었다. 생물량에서 계산한 바와 같이 바이오스톤 볼의 면적, 바이오스톤 볼에서 효소활성도, 미생물 코팅액에서 효소활성도를 활용하여 계산한 결과, 미생물 코팅액 22 mL에 포함된 효소가 코팅 과정에서 바이오스톤 볼로 전이된 것으로 판단된다. Glycosidase의 경우에는 코팅액과 바이오스톤 볼에서 각각 0.05  $\mu$ U/L와 0.006  $\mu$ U/m<sup>2</sup>이었으며, 8.4 mL의 코팅액이 바이오스톤으로 전이된 것으로 계산되었다. 이러한 결과를 보면 코팅과정에서 코팅액으로부터 바이오스톤 볼로 전이된 dehydrogenase와 lipase의 양이 glycosidase에 비해 약 2.6배 높은 것으로 계산되었다. 따라서 미생물 코팅과정에서 탄수화물 분해능이 높은 세균(glycosidase) 보다 대사활성이 뛰어난 세균(dehydrogenase)과 지질 분해능이 높은 세균(lipase)이 바이오스톤 볼로 점착되는 경향이 큰 것으로 판단된다.

**나. 바이오스톤 볼과 쇠석 처리조의 미생물 생물량 비교**

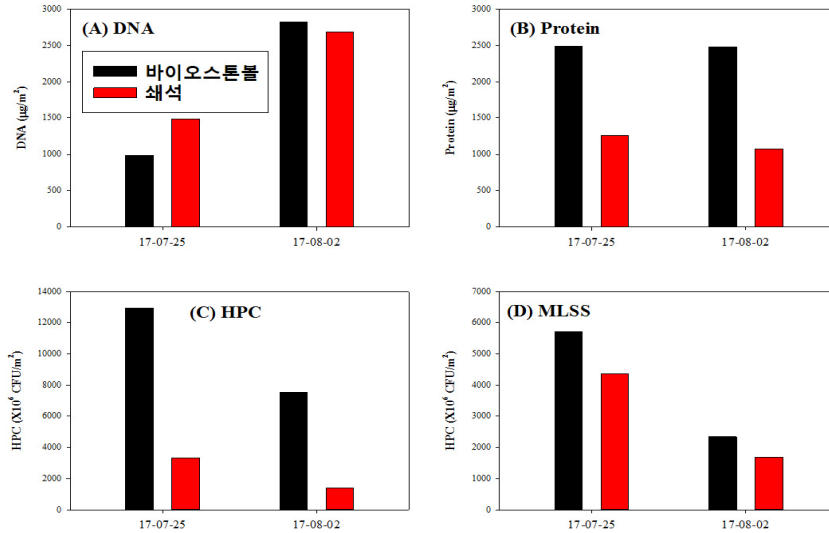
매화저수지에 설치된 소규모 아크릴 반응조에서 바이오스톤 볼 반응조와 쇠석 반응조의 분석 결과를 비교하였다. 바이오스톤 볼은 미생물 활성액을 코팅하였으며, 쇠석은 코팅을 하지 않은 자연 상태이므로 이를 비교하면 미생물 코팅의 효과를 확인할 수 있다고 판단된다.

바이오스톤 볼 반응조와 쇠석 반응조에서 7월 25일과 8월 2일에 채집한 바이오스톤 볼과 쇠석에서 MLSS와 MLVSS의 결과를 비교하였다. 일반 쇠석에서 MLSS와 MLVSS의 평균은 각각 3,023과 455 mg/m<sup>2</sup>이었으며, 동일 일자에 채집된 바이오스톤 볼에서는 각각 5,714와 2,343 mg/m<sup>2</sup>으로 바이오스톤 볼에서 MLSS와 MLVSS가 쇠석에 비하여 높았다(표 5-19, 그림 5-27).

DNA의 농도를 보면 바이오스톤 볼과 쇠석에서 각각 평균 1,907과 2,084 µg/m<sup>2</sup>으로 비슷한 농도를 나타내었다. 단백질의 경우에는 바이오스톤 볼에서 쇠석에 비해 2배 정도 높게 나타났으며, 종속영양세균수의 경우에는 바이오스톤 볼에서 쇠석에 비해 4배 이상 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 쇠석에 비해 바이오스톤 볼에서 유기물을 분해하는 종속영양세균수의 농도가 높게 형성된 것으로 판단된다. 따라서 바이오스톤 볼에서는 코팅하지 않은 쇠석에 비해 생물량이 높은 것으로 나타났으며, 이는 미생물의 사전 코팅이 바이오스톤 볼의 생물막 형성에 중요한 역할을 하고 있다는 것을 의미한다.

(표 5-19) 아크릴 바이오스톤 볼과 쇠석 반응조에서 생물량 비교

일자	MLSS (mg/m <sup>2</sup> )	MLVSS (mg/m <sup>2</sup> )	VSS/SS (%)	DNA (µg/m <sup>2</sup> )	단백질 (µg/m <sup>2</sup> )	세균수 (×10 <sup>6</sup> CFU/m <sup>2</sup> )
바이오스톤 볼 산화조						
7월 25일	5,714	1,095	19.2	989	2,483	12,952
8월 2일	2,343	648	27.6	2,824	2,480	7,524
평균	4,029	871	23.4	1,907	2,482	10,238
쇠석 산화조						
7월 25일	4,354	668	15.3	1,484	1,265	3,339
8월 2일	1,692	242	14.3	2,685	1,074	1,397
평균	3,023	455	14.8	2,084	1,170	2,368



<그림 5-27> 아크릴 반응조에서 생물량 비교

#### 다. 바이오스톤 볼과 쇄석 처리조의 세균 활성도 비교

바이오스톤 볼 및 쇄석 반응조에서 부착 미생물의 활성도를 비교하기 위하여 dehydrogenase, glycosidase, lipase의 활성도를 분석하였다. 바이오스톤 볼 반응조와 쇄석에서 탈수소효소의 활성도는 각각 2.17과 3.05  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 이었으며, glycosidase는 각각 0.056과 0.048  $\mu\text{U}/\text{m}^2$ 이었다. Lipase는 각각 0.65와 0.43  $\mu\text{U}/\text{m}^2$ 이었다(표 5-20). 탈수소효소 활성도는 바이오스톤 볼에 비해 쇄석에서 높았으나, glycosidase와 lipase의 활성도는 바이오스톤 볼에서 높게 나타났다. 이러한 결과는 미생물 코팅을 통해 탄수화물 또는 지질과 같은 유기물 분해 효소 활성이 뛰어난 미생물이 바이오스톤 볼의 생물막에 많이 부착되었기 때문인 것으로 판단된다.

(표 5-20) 바이오스톤 볼과 쇄석 반응조에서 효소 활성도 비교

효소	바이오스톤 볼	쇄석
Dehydrogenase ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	2.17	3.05
Glycosidase ( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )	0.056	0.048
Lipase ( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )	0.65	0.43

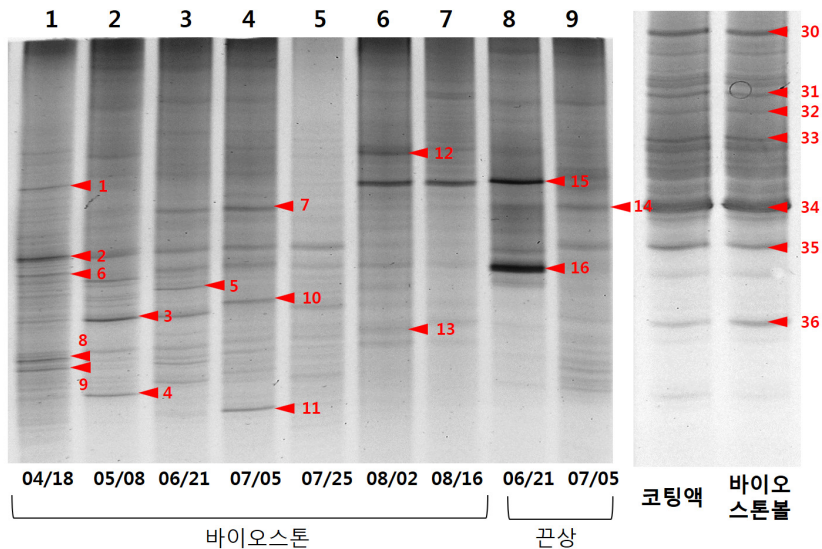
※ 7월 25일과 8월 2일 결과의 평균

라. 바이오스톤 볼 코팅 전/후 세균 군집구조의 변화

미생물 코팅액과 코팅 직후 바이오스톤 볼에서 DGGE법을 사용하여 세균 군집구조를 분석한 결과, 미생물 코팅액과 바이오스톤 볼의 세균 군집구조는 거의 유사하였다(그림 5-28). 두 종의 시료에서 우점한 세균은 band #34이었으며, band #30, #35, #36의 밀도도 높은 것으로 관찰되었다. 또한, #31, #32, #33의 밀도도 높은 것을 확인하였다. Band를 추출하여 염기서열을 분석하였으며, 분석된 염기서열과 일치 또는 유사한 염기서열을 가진 세균의 특성에 대하여 조사하였다.

Band #34는 말 배설물로 만든 비료 또는 생물막에서 발견된 uncultured bacterium wet54 (GenBank accession no. AY212757; Simpson et al., 2004) 또는 *Acinetobacter lwoffii* 2.34(DQ328322; Burmolle et al., 2006) 와 완전히 일치하는 염기서열을 나타내었다.

분류학적으로는 *Acinetobacter* 속에 속하는 것으로 판단되었다 (표 5-21). *Acinetobacter* 속 세균은 그람 음성으로 gammaproteobacteria에 속하며, 일부 세균의 경우 토양에서 방향족 화합물과 같은 난분해성 물질을 제거하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. Band #30과 #35는 난분해성 물질 분해를 위한 처리 시설에서 발견된 세균의 염기서열과 일치하였다(표 5-21).



<그림 5-28> 바이오스톤 볼 코팅 전/후 세균 군집구조 분석

Band #30은 Pseudomonads 속의 세균에 속하는 것으로 판단되었으며, 난분해성물질인 TCE(trichloroethylene)의 분해를 위한 생물공정에서 발견된 Pseudomonas sp. LAB-26(AB051700; Futamata et al., 2001)과 활성슬러지 처리를 위한 고온성 호기 소화조에서 발견된 Pseudomonas fluorescens bv. C PC24(AF228367; Heinaru et al., 2000)의 염기서열과 일치하였다. Band #35은 Sphingobium 속의 세균에 속하는 것으로 판단되었으며, 난분해성물질인 Azo 염색액의 분해를 위한 생물공정에서 발견된 aerobic bacillus C7(L22759; Govindaswami et al., 1993)과 난분해성 물질인 chlorophenol 처리 공정에서 발견된 Sphingobium xenophagum BN6(X94098; Nohynek et al., 1996)의 염기서열과 일치하였다. Band #36은 웨일오일 폐기물 분해 세균으로 알려진 Rhizobiales bacterium 3\_4K(EF540474; Vedler et al., 2007), 식물잎에 형성된 생물막에서 발견된 uncultured bacterium 9\_B11(FN421799; Delmotte et al., 2009), 구리 광산 광미 처리를 위한 습지의 세균 군집에서 발견된 uncultured bacterium YJ-34(JQ769763; Liu and Sun, 2012)와 일치하였다.

(표 5-21) 바이오스톤 볼 코팅 전/후 DGGE band의 유사도 분석

Band	Name	GenBank	유사도
30	<i>Pseudomonas</i> sp. LAB-26	AB051700	1.000
	<i>Pseudomonas fluorescens</i> bv. C PC24	AF228367	1.000
31	<i>Pseudomonas</i> sp. LAB-26	AB051700	0.963
32	<i>Rhizobium</i> sp. BA-57-09	HF548375	0.957
33	drinking water bacterium MB11	AY328842	1.000
	<i>Brevundimonas</i> sp. EMB 68	DQ413152	1.000
	uncultured bacterium SC-38	AB255092	1.000
34	uncultured bacterium wet54	AY212757	1.000
	<i>Acinetobacter lwoffii</i> 2.34	DQ328322	1.000
35	aerobic bacillus C7	L22759	1.000
	<i>Sphingobium xenophagum</i> BN6	X94098	1.000
36	Rhizobiales bacterium 3_4K	EF540474	1.000
	uncultured bacterium 9_B11	FN421799	1.000
	uncultured bacterium YJ-34	JQ769763	1.000

(표 5-22) 바이오스톤 볼 코팅 전/후 DGGE band의 기능 및 역할

Band	GenBank	분리위치/역할	참고문헌
30	AB051700	난분해성물질(TCE) 분해	Futamata et al., 2001.
	AF228367	활성슬러지 처리를 위한 고온성 호기 소화조	Heinaru et al., 2000.
31	AB051700	난분해성물질(TCE) 분해	Futamata et al., 2001.
32	HF548375	바이칼호의 생물막에 존재하는 종속영양세균	Sukhanova et al., 2012.
33	AY328842	정수배급수 시스템의 생물막	Williams et al., 2004.
	DQ413152	혐기/호기 SBR 반응조	Jeon and Park, 2006.
	AB255092	하수처리시스템	Okabe et al., 2007.
34	AY212757	말 배설물 비료	Simpson et al., 2004.
	DQ328322	생물막	Burmolle et al., 2006.
35	L22759	Azo 염색액의 호기분해세균	Govindaswami et al., 1993.
	X94098	난분해성물질(chlorophenol) 분해	Nohynek et al., 1996.
36	EF540474	셰일오일 폐기물 분해 세균	Vedler et al., 2007.
	FN421799	식물 잎에 형성된 생물막	Delmotte et al., 2009.
	JQ769763	구리광산 광미 처리를 위한 습지에서 세균 군집	Liu and Sun, 2012.

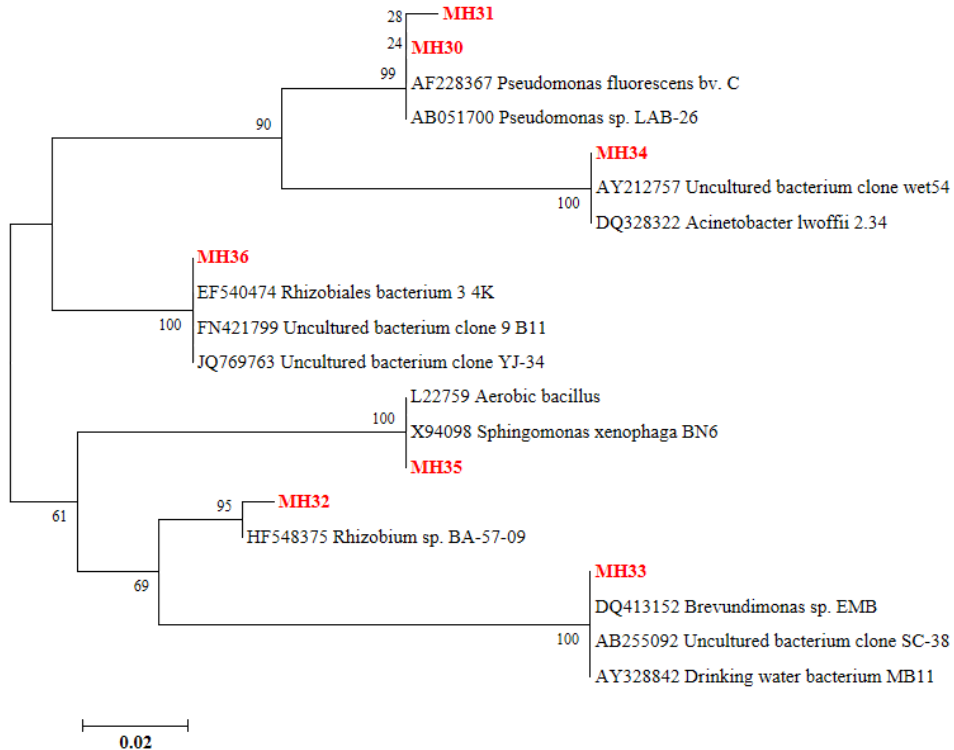
미생물 코팅액과 바이오스톤 볼에서 밀도가 높은 것으로 나타난 band #31의 경우에는 band #30과 완전히 일치하지는 않았으나, TCE 분해에 관여하는 *Pseudomonas* sp. LAB-26(AB051700; Futamata et al., 2001)와 유사(유사도, 0.963)하였다. Band #32는 바이칼호의 생물막에 존재하는 종속영양세균인 *Rhizobium* sp. BA-57-09(HF548375; Sukhanova et al., 2012)와 유사한 염기서열을 보였다. Band #33은 정수의 배급수 시스템에 있는 생물막의 세균인 drinking water bacterium MB11(AY328842; Williams et al., 2004), 혐기/호기 SBR 반응조에서 발견된 *Brevundimonas* sp. EMB 68(DQ413152; Jeon and Park, 2006), 하수처리 시스템에서 검출된 uncultured bacterium SC-38(AB255092; Okabe et al., 2007)의 염기서열과 일치하였다.

분리된 band의 분류학적 분석 결과 모든 band가 phylum Proteobacteria에 속하는 것으로 나타났으며, 이들은 각각 class alphaproteobacteria와



gammaproteobacteria에 속하였다(표 5-23, 그림 5-29). 즉 바이오스톤 볼 코팅액은 주로 유기물 분해능이 뛰어난 세균으로 구성되어 있으며, 군집 구조가 비교적 단순한 것으로 판단된다.

이상의 결과로 볼 때, 미생물 코팅액과 바이오스톤 볼에서 우점한 세균은 난분해성 물질의 분해에 관여하는 세균과 일치(#30, #31, #35)하거나, 하폐수처리시스템에서 발견된 분해 세균과 일치(#30, #33, #36), 정수의 배급수시스템, 호수, 식물 잎 등에 형성된 생물막에서 발견된 세균과 일치(#32, #33, #34, #36), 폐기물의 분해 과정에서 발견된 세균과 일치(#30, #34, #36)하는 등, 미생물 코팅액에는 주로 유기물의 분해 활성이 뛰어난 세균이나 생물막 형성에 필요한 세균 군집이 우점하는 것으로 판단되었다.



<그림 5-29> 바이오스톤 볼 코팅 전/후 DGGE band에 대한 계통학적 분석

(표 5-23) 바이오스톤 볼 코팅 전/후 DGGE band의 분류학적 위치

Domain	Phylum	Class	Order-Family-Genus-Species
Bacteria (7)	"Proteobacteria" (7)	Alpha- proteobacteria (4)	order Caulobacterales family Caulobacteraceae genus Brevundimonas <b>MH33</b> order Rhizobiales <b>MH32</b> family "Aurantimonadaceae" genus Aureimonas <b>MH36</b> order Sphingomonadales family Sphingomonadaceae genus Sphingobium <b>MH35</b>
		Gamma- proteobacteria (3)	class Gammaproteobacteria <b>MH31</b> order Pseudomonadales family Moraxellaceae genus Acinetobacter <b>MH34</b> family Pseudomonadaceae genus Pseudomonas <b>MH30</b>

바이오스톤 볼에 초기에 코팅된 미생물 군집과 바이오스톤 볼 산화시스템에서 발견된 미생물 군집을 비교하면, 초기 바이오스톤 볼에서 우점한 band #34는 7월 5일 바이오스톤 볼 시료에서 발견된 band #7과 끈상 시료의 #14와 유사한 것으로 나타났다. Band #31, #33, #35, #36은 바이오스톤 볼 또는 끈상에 우점도는 줄어들었으나 생물막의 주요 군집으로 유지되는 것으로 판단되었다. 초기 코팅액에 비하여 우점도가 감소한 것은 산화시스템 유입수에 포함된 유기물의 성장에 따라 이들의 분해에 적합한 세균의 성장이 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

### 3. 접촉산화시스템 운영기간에 따른 미생물 부착량 및 군집구조 변화 분석

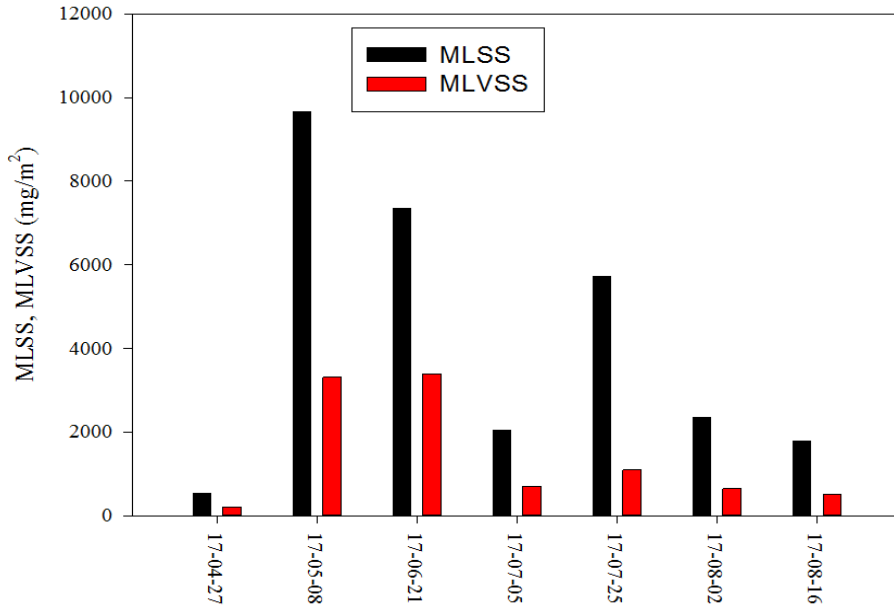
#### 가. 운영기간에 따른 생물량 및 효소 활성도 분석

바이오스톤 접촉산화시스템의 운영기간에 따른 바이오스톤 볼 생물막에 부착량 미생물의 생물량과 효소활성도 변화를 분석하기 위하여 소규모 아크릴 접촉산화시스템에서 바이오스톤 볼을 채집하여 이들 매질에 부착된 미생물 생물량을 측정하였다. 본 연구에서는 MLSS, MLVSS, DNA, 단백질, HPC를 생물량 측정을 위한 간접 지표로 사용하였다.

소규모 아크릴 반응조의 바이오스톤 볼에서 MLSS는 543~9,657 mg/m<sup>2</sup>의 범위였으며, 평균 4,204(±3,398) mg/m<sup>2</sup>으로 시기에 따른 차이가 매우 크게 나타났다. 바이오스톤 접촉산화시스템 플랜트의 바이오스톤 볼 반응조의 8,023(±3,847) mg/m<sup>2</sup>에 비해 낮은 값을 나타내었다. MLVSS의 농도는 205~3,400 mg/m<sup>2</sup>의 범위였으며, 평균 1,412(±1,355) mg/m<sup>2</sup>로 시기에 따른 변화가 크게 나타났다. MLSS 중 MLVSS가 차지한 비율은 19.2~46.3%이었으며, 평균 32.6%로 과일렛 접촉산화시스템의 바이오스톤 볼 반응조에서 측정된 26.1%에 비해 높은 값을 나타내었다(표 5-24, 그림 5-30).

(표 5-24) 아크릴 바이오스톤 볼 반응조에서 생물량의 변화

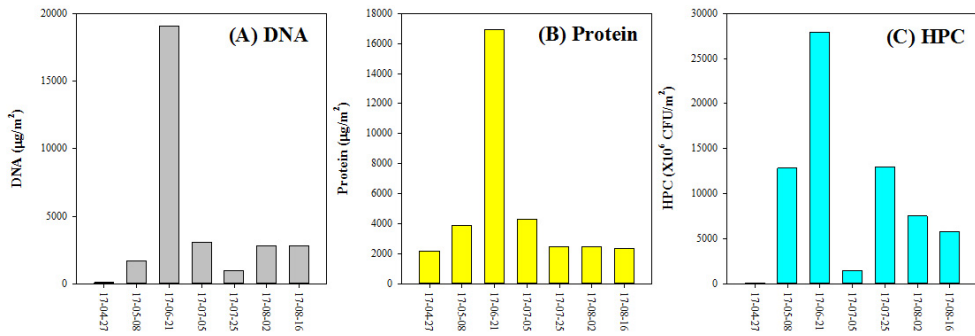
일자	MLSS (mg/m <sup>2</sup> )	MLVSS (mg/m <sup>2</sup> )	VSS/SS (%)	DNA (μg/m <sup>2</sup> )	단백질 (μg/m <sup>2</sup> )	세균수 (×10 <sup>6</sup> CFU/m <sup>2</sup> )
4월27일	543	205	37.7	100	2,171	87
5월 8일	9,657	3,314	34.3	1,680	3,895	12,857
6월21일	7,343	3,400	46.3	19,041	16,922	27,905
7월 5일	2,048	714	34.9	3,078	4,325	1,495
7월25일	5,714	1,095	19.2	989	2,483	12,952
8월 2일	2,343	648	27.6	2,824	2,480	7,524
8월16일	1,781	505	28.3	2,784	2,356	5,778
최소	543	205	19.2	100	2,171	87
최대	9,657	3,400	46.3	19,041	16,922	27,905
평균	<b>4,204</b>	<b>1,412</b>	<b>32.6</b>	<b>4,357</b>	<b>4,948</b>	<b>9,800</b>
표준편차	3,398	1,355	8.6	6,566	5,346	9,414



<그림 5-30> 플랜트에서 시간에 따른 MLSS/MLVSS 변화

소규모 아크릴 반응조에서 바이오스톤 볼의 MLSS는 초기에 급격히 증가하다가 이후 서서히 감소하는 경향을 나타내었으며, MLVSS도 비슷한 경향을 나타내었다. 이러한 것은 소규모 아크릴 반응조 내 생물막 형성이 잘 이루어지지 않은 것을 의미한다. 소규모 아크릴 반응조를 4월 24일에 설치하여 한 2주가 경과한 시점에서는 MLSS, MLVSS 모두 높은 값을 나타내고 있으나 5월 들어 가뭄과 농업용수 공급으로 저수지 물이 빠지기 시작하여 수위 감소로 인해 유입수가 제대로 공급되지 않는 상황이 발생하였다. 이런 이유로 안정화가 되어 가던 생물막 미생물 군집이 잘 형성되지 않았다고 판단된다. 아쉽게도 저수지 수위는 점점 감소하여 급기야 20% 이하까지 감소하여 중간에 실험이 중단되기도 하였다. 8월에 들어 물이 차기 시작하여 만수위가 되어 시설이 정상적으로 가동이 되었다.

소규모 아크릴 반응조의 바이오스톤 볼에서 DNA 농도는 평균  $4,357(\pm 6,566) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 6월 21일에 비정상적으로 높은 값을 나타내었으며, 다른 시기에는 비슷한 값을 유지하였다. 또한 소규모 반응조에서 측정된 DNA 농도는 파일럿 반응조의 평균값인  $12,257(\pm 10,674) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 매우 낮은 값이었다. 이는 실험 기간 중 소규모 아크릴 반응조에 유입수가 잘 공급되지 않아 생물막 형성이 잘 되지 않았음을 의미한다.



<그림 5-31> 아크릴 바이오스톤 볼 반응조에서 생물량의 변화

나. 운영기간에 따른 세균 활성도 분석

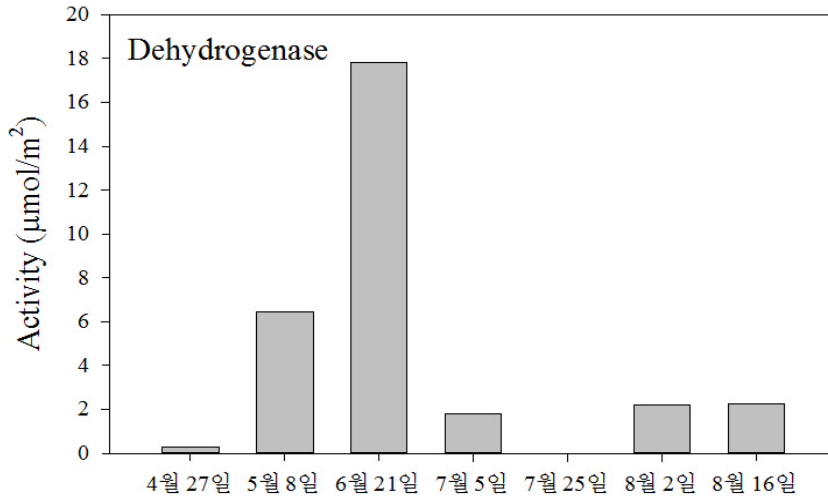
바이오스톤 접촉산화시스템 운영에 따른 바이오스톤 볼 부착 미생물의 활성도를 평가하기 위하여 dehydrogenase, glycosidase, lipase의 활성도를 분석하였다. 아크릴 바이오스톤 볼 반응조에서 탈수소효소의 활성도는 0.29~2.17  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 의 범위였으며, 6월 21일에 최대값을 나타내었다(표 5-25, 그림 5-32).

(표 5-25) 아크릴 반응조 바이오스톤 볼에서 dehydrogenase의 활성도

일자	Dehydrogenase ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	효소활성도/생물량	
		활성도/HPC	활성도/DNA
04월 27일	0.29	3.347	2.893
05월 08일	6.46	0.503	3.847
06월 21일	17.82	0.639	0.936
07월 05일	1.80	1.205	0.586
07월 25일	-	-	-
08월 02일	2.17	0.289	0.770
08월 16일	2.26	0.391	0.811

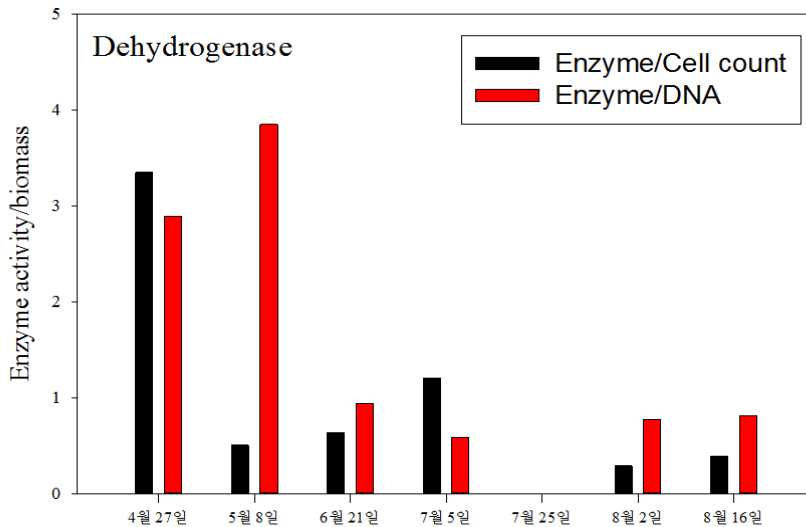
\* 활성도/HPC=Dehydrogenase( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )/세균수( $\times 10^6$  CFU/ $\text{m}^2$ ) $\times 1,000$

\* 활성도/DNA=Dehydrogenase( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )/DNA 농도( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ) $\times 1,000$



<그림 5-32> 바이오스톤 볼에서 dehydrogenase의 활성도

이러한 값은 파일럿 플랜트의 바이오스톤 볼에서 나타난 2.81~48.70  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 에 비하여 낮은 값이다. 탈수소효소 활성도는 세균의 수 또는 생물량과 관련성이 크기 때문에 종속영양세균수(HPC) 및 DNA 농도와 효소활성도의 관계에 대해 분석하였다. 탈수소효소 활성도/종속영양세균수의 비율을 구한 결과, 0.289~3.347의 범위로 나타났다.



<그림 5-33> Dehydrogenase의 활성도와 생물량의 비교

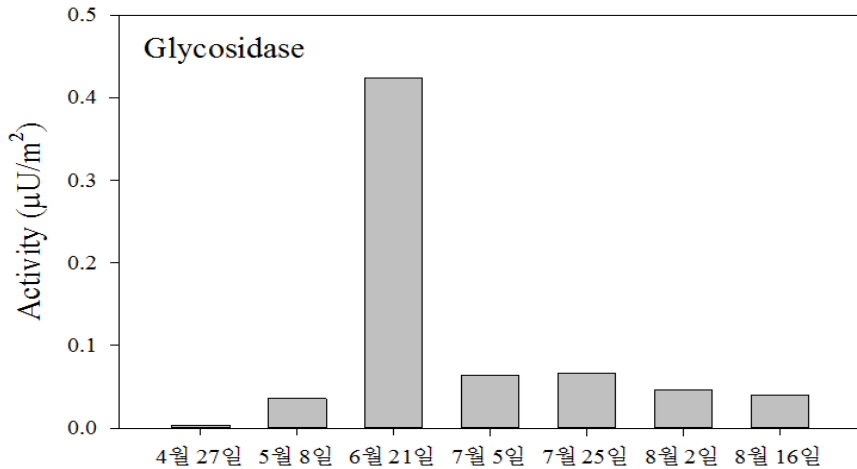
4월 27일에 높은 값이 나타난 것은 4월 27일 시료에서 종속영양세균수가 적기 때문이다. 최대값을 제거하면, 탈수소효소 활성도/종속영양세균수의 비율은 0.289~1.205의 범위로 과일렛 바이오스톤 볼 반응조와 유사한 값의 범위였다. 따라서 소규모 아크릴 반응조에서 과일렛 반응조에 비해 dehydrogenase 활성도가 낮은 것은 세균의 활성이 낮은 것이 아니라 세균 생물량이 적기 때문인 것으로 판단된다. 탈수소 효소 활성도/DNA 함량의 경우에는 탈수소효소 활성도/종속영양세균수의 비율에 비하여 변이가 컸다. 소규모 아크릴 바이오스톤 볼 반응조에서 glycosidase의 활성도는 0~0.42  $\mu\text{U}/\text{m}^2$ 의 범위였으며, 6월 21일에 최대값을 나타내었다. 6월 21일을 제외하고 glycosidase의 활성은 크지 않은 것으로 나타났다(표 5-26, 그림 5-34).

(표 5-26) 아크릴 반응조 바이오스톤 볼에서 glycosidase의 활성도

일자	Glycosidase ( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )	효소활성도/생물량	
		활성도/HPC	활성도/DNA
04월 27일	0.00	38.54	33.31
05월 08일	0.04	2.77	21.17
06월 21일	0.42	15.18	22.25
07월 05일	0.06	42.89	20.84
07월 25일	0.07	5.14	67.30
08월 02일	0.05	6.03	16.08
08월 16일	0.04	6.92	14.35

※ 활성도/HPC=Glycosidase( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )/세균수( $\times 10^6$  CFU/ $\text{m}^2$ ) $\times 10^6$

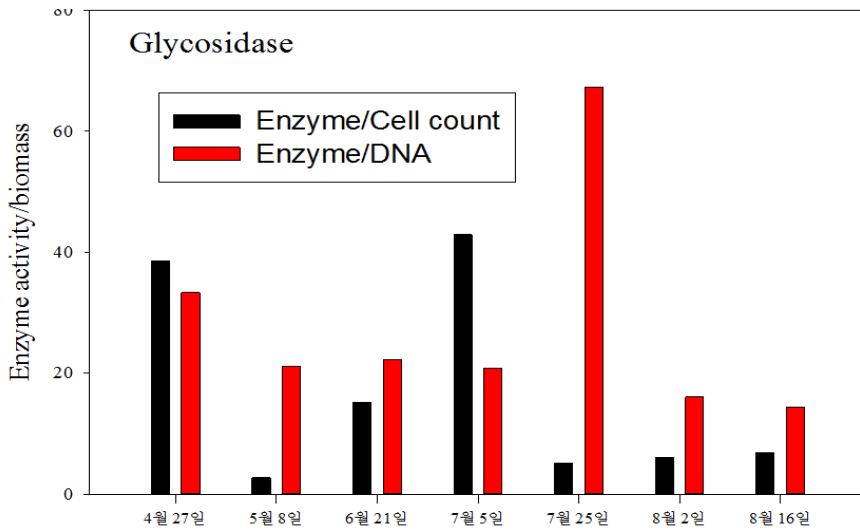
※ 활성도/DNA=Glycosidase( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )/DNA 농도( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ) $\times 10^6$



<그림 5-34> 아크릴 반응조 바이오스톤 볼에서 glycosidase의 활성도

Glycosidase 활성도/중속영양세균수의 비율을 구한 결과, 6.03~42.89의 범위였다. 4월 27일과 7월 5일에 높은 값이 측정된 것은 해당일에 중속영양세균수가 효소 활성도에 비해 낮게 평가되었기 때문이다. 이들 결과를 제외하면 범위가 6.03~15.18의 범위였다. 파일럿 바이오스톤 볼 반응조에서 측정된 값은 5.91~16.42로 소규모 아크릴 반응조의 값과 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 glysidase의 활성은 분해능이 낮은 것이 아니라 소규모 아크릴 반응조에서 세균 생물량이 낮기 때문인 것으로 나타났다. Glycosidase 활성도/DNA 함량의 경우에는 7월 25일을 제외하고 거의 비슷한 값을 유지하였다. 소규모 아크릴 바이오스톤 볼 반응조에서 lipase의 활성도는 0.15~0.80  $\mu\text{U}/\text{m}^2$ 의 범위로 생물량이 매우 낮은 것으로 나타난 4월 27일 시료를 제외하고 시기에 따른 변이가 크지 않았다. 이상의 결과로 볼 때 소규모 아크릴 반응조에서 효소 활성도의 경우 바이오스톤 볼 반응조와 쇠석 반응조에서 유사한 값을 나타내었다. 또한 파일럿 바이오스톤 볼 반응조에 비해 소규모 아크릴 바이오스톤 볼 반응조에서 효소 활성이 낮은 것은 생물당 효소 활성도가 낮기 때문은 아니며, 아크릴 반응조의 경과 기간이 파일럿 반응조에 비해 짧기 때문에 반응조 내 매질의 생물막 형성이 덜 되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 아크릴 반응조 설치 초기에 매화저수지의 가뭄에 의해 운전이 중단되는 등의 문제에 의해 생물막 형성에 지장을 받았기 때문인 것으로 판단된다.





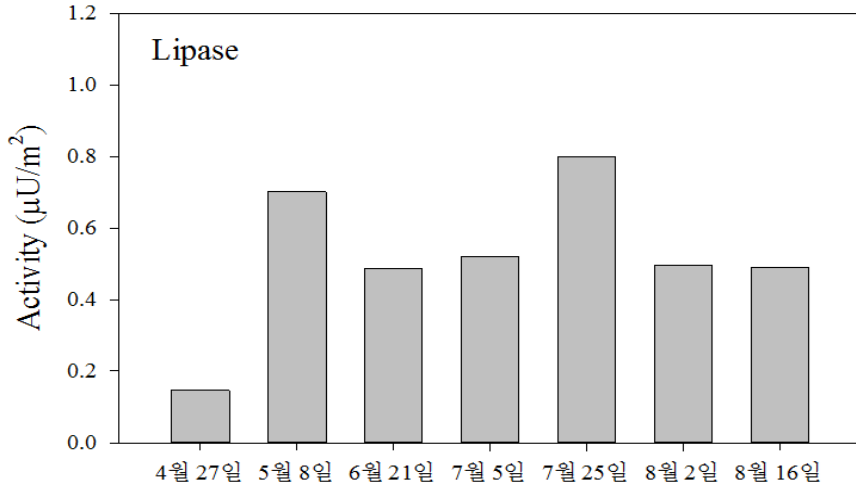
<그림 5-35> Glycosidase의 활성도와 생물량의 비교

(표 5-27) 아크릴 반응조 바이오스톤 볼에서 lipase의 활성도

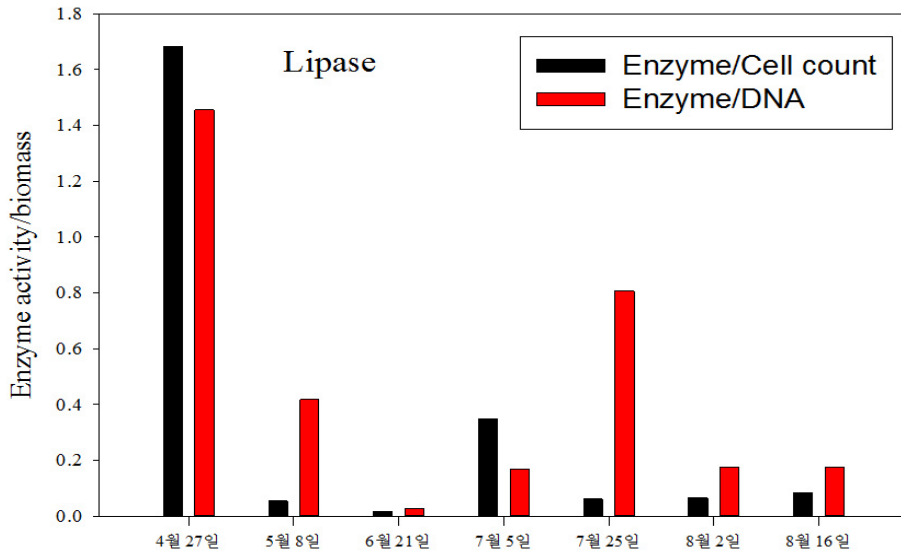
일자	Lipase ( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )	효소활성도/생물량	
		활성도/HPC	활성도/DNA
04월 27일	0.15	1.68	1.46
05월 08일	0.70	0.05	0.42
06월 21일	0.49	0.02	0.03
07월 05일	0.52	0.35	0.17
07월 25일	0.80	0.06	0.81
08월 02일	0.50	0.07	0.18
08월 16일	0.49	0.09	0.18

※ 활성도/HPC=Lipase( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )/세균수( $\times 10^6$  CFU/ $\text{m}^2$ ) $\times 1,000$

※ 활성도/DNA=Lipase( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )/DNA 농도( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ) $\times 1,000$



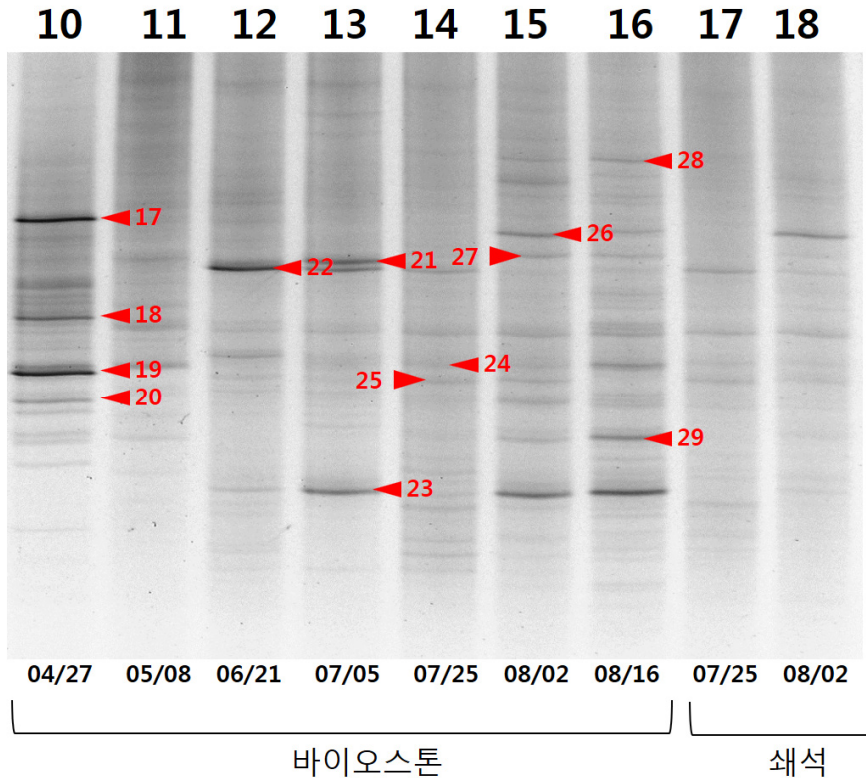
<그림 5-36> 아크릴 반응조 바이오스톤 볼에서 lipase의 활성도



<그림 5-37> Lipase의 활성도와 생물량의 비교

**다. 접촉산화시스템 운영기간에 따른 세균 군집구조 분석**

바이오스톤 접촉산화시스템의 운영기간에 따른 미생물 생물막의 세균 군집구조를 살펴보기 위하여 소규모 아크릴 반응조에서 채집한 바이오스톤 볼과 쇠석으로부터 DNA를 추출하여 DGGE pattern을 분석하였다. <그림 5-38>에서와 같이 채집시기에 따라 세균 군집구조에 차이가 있었으며, 우점종의 종류에서도 차이가 있는 것으로 나타났다.



<그림 5-38> 아크릴 반응조에서 시기에 따른 DGGE의 pattern

4월 27일에 채집된 바이오스톤 볼에서는 band #17과 #19가 우점하였으며, #18, #20이 높은 농도로 관찰되었다. 5월 8일 시료에서는 특별히 우점하는 것은 관찰되지 않았다. 6월 21일 시료에서는 band #22가 가장 우점하였으며, 나머지 세균의 band는 매우 미약하게 관찰되었다. 7월 5일 시료에서는 band #21, #22, #23의 농도가 비교적 높게 나타나 이들이 우점하

는 것으로 보인다. 7월 25일 시료에서는 매우 다양한 band가 관찰되었으나 대체적으로 낮은 비율을 유지하였으며, band #22, #24, #25의 비율이 상대적으로 높았다. 8월 2일과 8월 16일은 거의 유사한 양상을 보였으며, #23이 최우점하였고, #29, #24, #26, #28이 관찰되었다. 쇠석 반응조에서는 진한 band는 관찰되지 않았으나, 7월 25일 시료에서는 #22가 우점하였으며, 8월 2일 시료에서는 #26의 농도가 높은 것으로 나타났다.

DGGE gel로부터 우점하는 band를 추출하여 이의 염기서열을 분석한 후 RDP에서 각각의 band와 유사한 염기서열을 가진 세균을 탐색하였다. Band #17은 축사 인근 하천에서 발견된 uncultured bacterium 146ds20(AY212597; Simpson et al., 2004)과 매우 유사(유사도, 0.989)하였으며, 정수처리시설의 생물막에서 분리된 *Aquabacterium* sp. Aqua2 Aqua216S(AF089858; Manz et al., 1998)와 0.995의 유사도를 나타내었다. Band #18은 uncultured bacterium Uday45-12(HQ011601; Wang et al., 2010)와 염기서열이 일치하였으며, 이는 난분해성물질 분해능이 뛰어난 토양에서 분리된 염기서열이다.

Band #19는 TNT 분해 세균인 *Pseudomonas* sp. OK-5(EF157292; Cho et al., 2006)와 일치된 염기서열을 나타내었다. Band #20은 유기물 분해 세균인 *Sphingomonas* sp. V1-2(FN377699; Srinivas et al., 2009)와 정수기 생물막에서 발견된 *Sphingomonas panni* 231(EU730921; Seo et al., 2008)과 염기서열이 일치하는 것으로 밝혀졌다. Band #21은 난분해성 물질의 분해 토양에서 분리된 *Chryseobacterium lxb-14*(GQ249224; Li et al., 2009)의 염기서열과 유사(유사도, 0.946)한 것으로 밝혀졌다.

Band #22는 유기물 분해를 통한 슬러지 감량 공정에서 발견된 uncultured bacterium 1601(AB286607; Sadaie et al., 2007)과 0.988의 유사도를 나타내었다. Band #23은 uncultured alpha proteobacterium SepB-8(EF032656; Anderson-Glenna et al., 2008)과 uncultured bacterium 0719(AB286439; Sadaie et al., 2007)와 일치하였는데, 이들은 각각 하천 생물막과 슬러지 감량을 위한 유기물 분해 공정에서 발견된 염기서열이다. Band #24는 난분해성물질 분해 공정에서 발견된 *Dechloromonas* sp. MissR(AF170357; Coates et al., 1999)과 인 제거를 위한 호기 공정에서 발견된 uncultured bacterium 20-ORF29(DQ376558; Ahn et al., 2006)와 일치된 염기서열을 나타내었다.

Band #25는 탈질 공정에서 발견된 *Dechloromonas* sp. JJ(AY032611; Coates et al., 2001), 활성슬러지에서 발견된 uncultured bacterium B59(FJ660533; Wang et al., 2011)와 uncultured bacterium SludgeG\_bottom\_25(AB516175; Oshiki et al., 2009)와 염기서열이 일치하였다. Band #26은 폐기물 매립/처리장에서 발견된 uncultured bacterium SIFC923\_N9D4\_16S\_A(LN574653; Scott et al., 2014)와 유사율이 0.506으로 나타났다. Band #26의 경우에 기존에 알려진 세균과 유사도가 매우 낮아 새로운 역할을 수행하는 종으로 여겨진다.

Band #27은 *Erythrobacter* sp. SMB2(DQ868669; Choong et al., 2006)와 염기서열이 일치하였는데, 이는 해양 생물막에서 발견된 종이다. Band #28은 토양 근권에서 발견된 rape rhizosphere bacterium tsb058(AJ295445; Kaiser et al., 2001)과 일치하였다. Band #29는 uncultured bacterium DSSD45(AY328743; Williams et al., 2004), uncultured bacterium M1-5(EU015101; Jin et al., 2007), uncultured bacterium c13(FN687453; Hayes et al., 2011)과 일치하였는데, 이들은 각각 정수 배급수시스템 생물막, 생물반응조 생물막, 고온성 호기분해조에서 분리된 것으로 유기물 분해능이 높을 것으로 예상된다.

소규모 아크릴 반응조에서 발견된 band의 기능적 특징을 살펴보면 활성슬러지(#25), 생물막(#17, #20, #23, #27, #29), 난분해성 분해 토양/공정(#18, #19, #21, #24), 슬러지 감량을 위한 유기물 분해 공정(#22, #23, #29) 등 대부분의 band가 유기물 분해능이 뛰어난 세균의 염기서열과 일치하는 것으로 관찰되었다. 따라서 소규모 아크릴 반응조의 바이오스톤 볼에는 유기물 분해능이 뛰어난 세균이 우점하고 있는 것으로 판단된다.

DGGE band를 분류학적으로 분석하면, band #26을 제외하고 모두 domain bacteria에 속하는 것으로 나타났다. 또한 이들은 3개의 phylum으로 나누어졌으며, phylum "Proteobacteria"에 속하는 세균이 가장 많았다(표 5-28, 그림 5-39). Phylum Nitrospirae에 속하는 band는 #29로 8월 2일과 8월 16일에 바이오스톤 볼 반응조에서 우점하였다.

GelCompar를 사용하여 DGGE band와의 연관성을 분석한 결과, 파일럿 바이오스톤 볼 반응조와 아크릴 소규모 바이오스톤 볼 반응조의 생물막이 완전히 다른 분류군으로 구분되는 것으로 나타났다(그림 5-40). 이러한 결과로 판단할 때, 소규모 아크릴 바이오스톤 볼 생물막은 파일럿 반응조

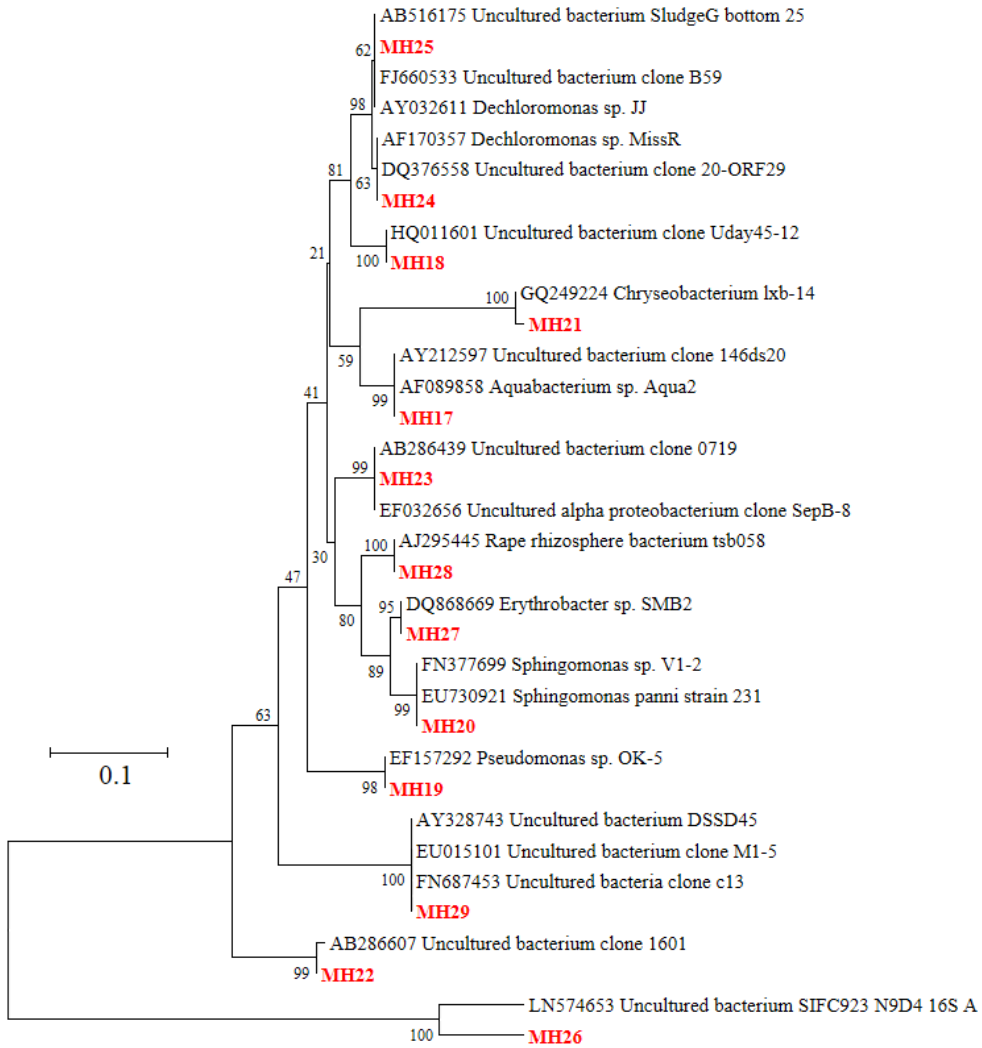
에 비하여 가동시간이 다르며, 산소 조건이 상이하고, 반응조의 크기가 다른 이유로 인하여 과일렛 바이오스톤 접촉산화조와 다른 세균 군집이 형성되는 것으로 판단된다.

(표 5-28) 아크릴 반응조에서 DGGE band의 유사도 분석

Band	Name	GenBank	유사도
17	uncultured bacterium 146ds20	AY212597	0.989
	Aquabacterium sp. Aqua2 Aqua216S	AF089858	0.995
18	uncultured bacterium Uday45-12	HQ011601	1.000
19	Pseudomonas sp. OK-5	EF157292	1.000
20	Sphingomonas sp. V1-2	FN377699	1.000
	Sphingomonas panni 231	EU730921	1.000
21	Chryseobacterium lxb-14	GQ249224	0.946
22	uncultured bacterium 1601	AB286607	0.988
23	uncultured alpha proteobacterium SepB-8	EF032656	1.000
	uncultured bacterium 0719	AB286439	1.000
24	Dechloromonas sp. MissR	AF170357	1.000
	uncultured bacterium 20-ORF29	DQ376558	1.000
25	Dechloromonas sp. JJ	AY032611	1.000
	uncultured bacterium B59	FJ660533	1.000
	uncultured bacterium SludgeG_bottom_25	AB516175	1.000
26	uncultured bacterium SIFC923_N9D4_16S_A	LN574653	0.506
27	Erythrobacter sp. SMB2	DQ868669	1.000
28	rape rhizosphere bacterium tsb058	AJ295445	1.000
29	uncultured bacterium DSSD45	AY328743	1.000
	uncultured bacterium M1-5	EU015101	1.000
	uncultured bacterium c13	FN687453	1.000

(표 5-29) 아크릴 반응조에서 DGGE band의 기능 및 역할

Band	GenBank	분리위치/역할	참고문헌
17	AY212597	축사 인근 하천	Simpson et al., 2004.
	AF089858	정수처리시설 생물막	Manz et al., 1998.
18	HQ011601	난분해성물질 분해 토양	Wang et al., 2010.
19	EF157292	TNT 분해 세균	Cho et al., 2006.
20	FN377699	유기물 분해 세균	Srinivas et al., 2009.
	EU730921	정수기 생물막	Seo et al., 2008.
21	GQ249224	난분해성물질 분해 토양	Li et al., 2009.
22	AB286607	슬러지감량/유기물 분해	Sadaie et al., 2007.
23	EF032656	하천 생물막	Anderson-Glenna et al., 2008.
	AB286439	슬러지감량/유기물 분해	Sadaie et al., 2007.
24	AF170357	난분해성물질 분해	Coates et al., 1999.
	DQ376558	인 제거를 위한 호기공정	Ahn et al., 2006.
25	AY032611	탈질 세균	Coates et al., 2001.
	FJ660533	활성슬러지	Wang et al., 2011.
	AB516175	활성슬러지	Oshiki et al., 2009.
26	LN574653	폐기물 처리장	Scott et al., 2014.
27	DQ868669	해양 생물막	Choong et al., 2006.
28	AJ295445	토양 근권	Kaiser et al., 2001.
29	AY328743	정수 배급수시스템 생물막	Williams et al., 2004.
	EU015101	생물반응조 생물막	Jin et al., 2007.
	FN687453	고온성 호기분해조	Hayes et al., 2011.

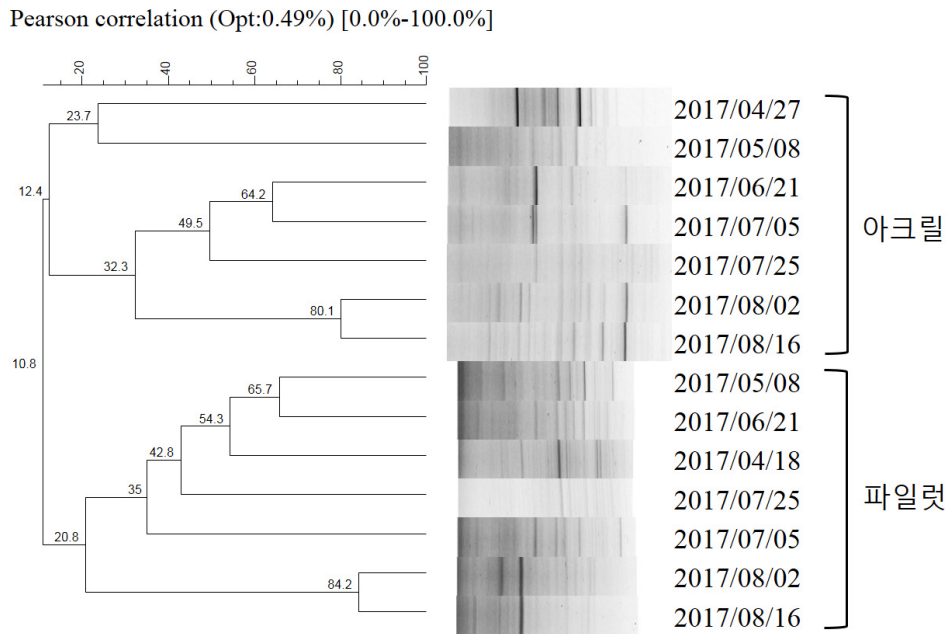


<그림 5-39> 아크릴 반응조에서 DGGE band의 계통학적 분석 결과



(표 5-30) 아크릴 반응조에서 DGGE band의 분류학적 위치

Domain	Phylum	Class	Order-Family-Genus-Species
<b>MH26</b> (1)			
Bacteria (12)	"Bacteroidetes" (1)	Flavobacteria (1)	order "Flavobacteriales" family Flavobacteriaceae <b>MH21</b>
	Nitrospirae (1)	"Nitrospira" (1)	order "Nitrospirales" family "Nitrospiraceae" genus Nitrospira <b>MH29</b>
	"Proteobacteria" (10)	Alpha- proteobacteria (4)	order Rhizobiales family Rhizobiaceae genus Rhizobium <b>MH28</b> unclassified_Rhizobiales <b>MH23</b> order Sphingomonadales family Erythrobacteraceae <b>MH27</b> family Sphingomonadaceae genus Sphingomonas <b>MH20</b>
		Beta- proteobacteria (4)	order Burkholderiales family Burkholderiales_incertae_sedis genus Aquabacterium <b>MH17</b> order Methylophilales family Methylophilaceae <b>MH18</b> order Rhodocyclales family Rhodocyclaceae <b>MH25</b> genus Dechloromonas <b>MH24</b>
		Delta- proteobacteria (1)	order Bdellovibrionales family Bdellovibrionaceae genus Bdellovibrio <b>MH22</b>
		Gamma- proteobacteria (1)	order Pseudomonadales family Pseudomonadaceae genus Pseudomonas <b>MH19</b>



<그림 5-40> GelCompar를 사용한 DGGE band의 연관성 분석

#### 4. 바이오스톤 볼 건조에 따른 부착 미생물 군집의 안정도 평가

##### 가. 바이오스톤 볼 건조시 생물량 및 효소활성도 변화 분석

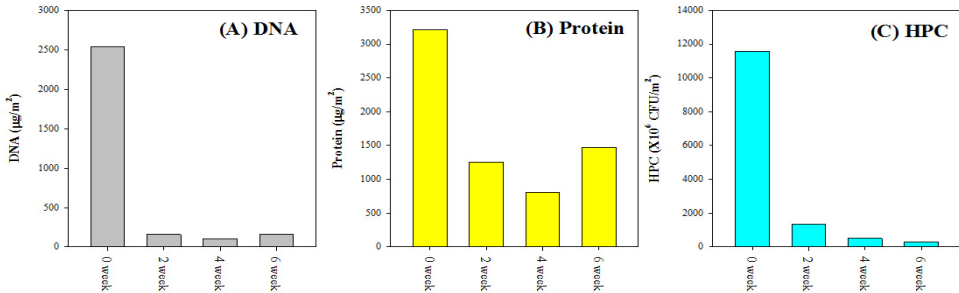
바이오스톤 접촉산화시스템을 현장에 운영시 가뭄으로 인해 유입수가 없을 때를 대비하여 바이오스톤 볼이 건조기간에 따른 생물막의 생물량 및 효소활성도에 대한 변화를 살펴보고자 하였다. 연구방법은 현장에서 운영되고 있는 접촉산화시스템의 플랜트에서 7월 25일에 바이오스톤 볼을 채집하여 실험실로 운반하여 항온 암실에 방치한 후 2주, 4주, 6주에 각각 바이오스톤 볼에서 생물량 및 효소 활성도 변화를 분석하였다. 생물량은 DNA, 단백질, 종속영양수를 측정하였으며, 효소활성도는 dehydrogenase, glycosidase, lipase의 활성도를 분석하였다.

바이오스톤 볼 건조기간에 따른 바이오스톤 볼 생물막의 DNA 농도는 초기 2,545  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 에서 시간이 지남에 따라 급격히 감소하였으며, 4주 경과 후 최소 농도인 107  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 를 나타내었으며, 6주 후에는 159  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 로 다시 약간 증가되는 것으로 나타났다. 단백질의 농도도 3,312  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 에서 6주 후 1,475  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 로 감소하였고, 종속영양세균수의 경우는 건조 시작 시기에  $11,571 \times 10^6 \text{ CFU}/\text{m}^2$ 이었으나, 6주 후에는  $308 \times 10^6 \text{ CFU}/\text{m}^2$ 로 초기에 비해 1/38로 감소하였다(표 5-31, 그림 5-41). 종속영양세균수의 농도가 떨어진 것은 건조에 의해 생물막 세균이 사멸하였기 때문인 것으로 판단되며, DNA의 경우에도 세균의 사멸시 DNase에 의해 분해되기 때문에 농도가 감소한 것으로 판단된다. 단백질의 경우에는 세균이 사멸하여도 건조된 상태로 바이오스톤 볼에 부착되어 있기 때문에 상대적으로 적게 감소한 것으로 보인다.

(표 5-31) 바이오스톤 볼 건조기간에 따른 생물량 변화

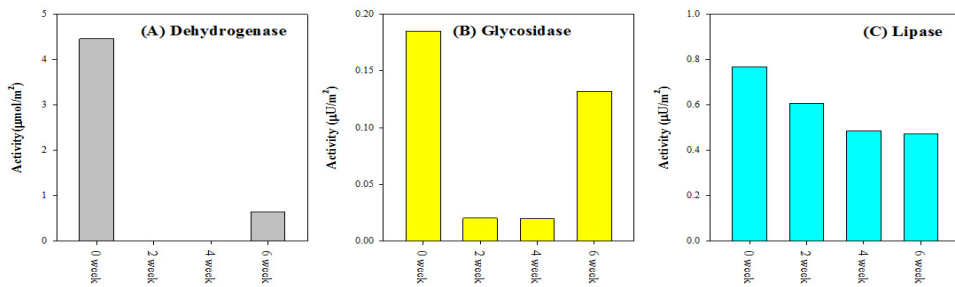
기간	생물량			효소 활성도		
	DNA ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )	단백질 ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )	세균수 ( $\times 10^6 \text{ CFU}/\text{m}^2$ )	Dehydrogenase ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	Glycosidase ( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )	Lipase ( $\mu\text{U}/\text{m}^2$ )
0주	2,535	3,212	11,571	4.45	0.19	0.77
2주	160	1,257	1,362	0.0	0.02	0.61
4주	107	811	514	0.0	0.02	0.49
6주	159	1,475	308	0.64	0.13	0.47

따라서 바이오스톤 볼이 건조될 경우 2주 후에도 1/10 수준으로 세균 수가 감소하기 때문에 바이오스톤 볼 반응조가 건조되지 않도록 유지시켜 주는 것이 필요할 것으로 판단된다.



<그림 5-41> 바이오스톤 볼 건조시 생물량의 변화

건조시 효소활성도를 분석한 결과, 세균의 생리 활성을 나타내는 dehydrogenase의 경우에는 건조 2주와 4주 후 활성이 나타나지 않았으며, 6주 후에는 약간의 활성도가 나타났다. Glycosidase의 경우에는 2주와 4주 후에 효소 활성도가 급감하였으며, 6주 후에는 초기의 71% 수준으로 회복되는 것으로 나타났으나, 이와 같이 효소 활성도가 회복되는 것이 지속될 것인지는 확실하지 않다. Lipase는 본 연구에서 분석된 효소 중 활성도가 가장 천천히 감소하는 경향을 나타내었으며, 시간에 따라 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 건조에 따른 효소 활성도를 평가한 결과, 세균의 생리 활성을 나타내는 dehydrogenase의 경우에는 급격히 감소하는 것으로 판단되며, 유기물(탄수화물 또는 지질)을 분해하는데 관여하는 효소의 활성도는 건조 시간에 따라 서서히 감소하는 것으로 판단되었다.

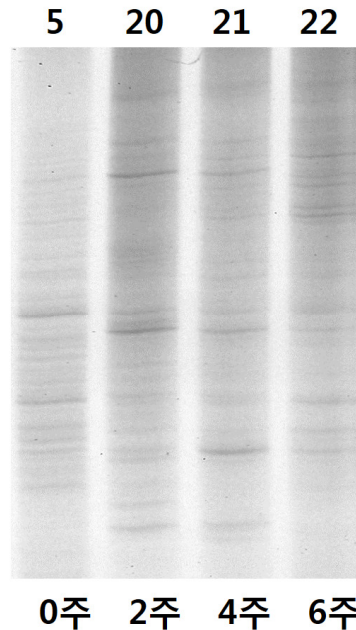


<그림 5-42> 바이오스톤 볼 건조시 효소활성도의 변화

### 나. 바이오스톤 볼 건조시 세균 군집구조 변화

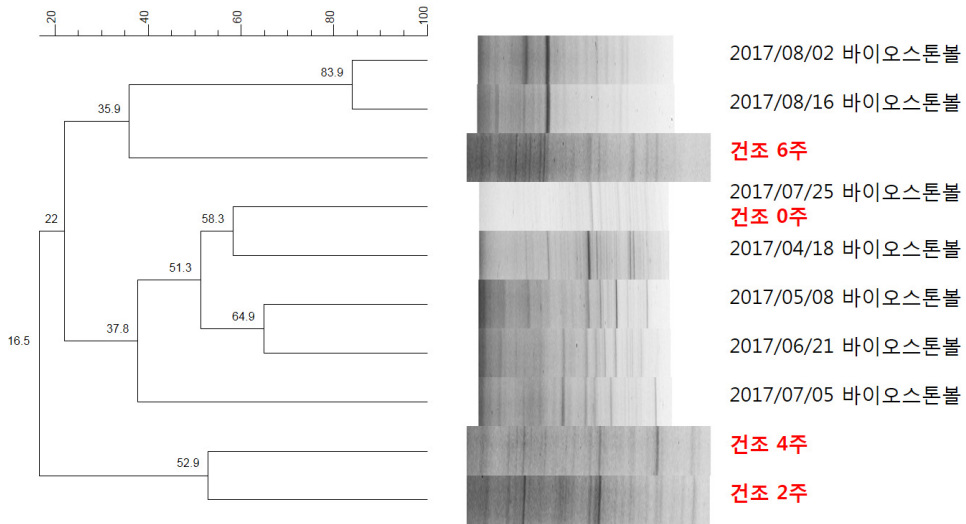
생물막 건조에 따른 DGGE pattern을 분석한 결과, 건조 경과 기간에 따라 우점하는 세균의 종류가 변하는 것으로 나타났다. GelCompar를 사용하여 과일렛 바이오스톤 볼 접촉산화조의 바이오스톤 볼과 DGGE band pattern의 연관성을 분석한 결과, 건조 2주와 건조 4주의 시료의 pattern이 거의 유사하였으며, 건조 6주의 경우 8월 2일 또는 8월 16일 시료와 유사한 것으로 나타났다(그림 5-43).

실험 결과 바이오스톤 볼을 건조시킬 경우 바이오스톤 볼의 생물량과 세균수 및 효소 활성도가 감소할 뿐 아니라 생물막의 세균 군집의 변화가 발생하기 때문에 바이오스톤 볼 접촉산화시스템을 효율적으로 운영하기 위하여 반응조의 건조를 방지하여야 할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 건조된 바이오스톤 볼이 반응조에 재투입 되었을 때 활성의 회복 여부에 대해서는 검증하지 않았다.



<그림 5-43> 바이오스톤 볼 건조 시간에 따른 DGGE의 pattern

Pearson correlation (Opt:2.58%) [0.0%-100.0%]



<그림 5-44> GelCompar를 사용한 DGGE band의 연관성 분석

바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 운영일지를 보면 5월 19일부터 6월 30일까지 매화지 수위 저하로 인하여 접촉산화 시스템의 운영이 원활하지 않았으며, 수위가 회복될 때까지 운영이 중단되었다. 또한 8월 2일부터 8월 6일까지 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 점검을 위하여 운영이 중단하고 반응조 내의 물을 모두 빼는 일이 발생하였다. 하지만 이와 같이 급격한 운영 조건 변경의 변화가 일어난 후에 반응조의 오염물질 제거 효과를 분석한 결과, 유기물 및 총인 제거 효율이 매우 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 건조 실험의 생물량 및 효소 활성도 분석에서 생물량과 효소 활성도는 건조에 의해 감소하였으나, 생물량에 따른 효소 활성도(효소활성도/생물량)의 값은 유사한 값을 나타내어 세균 당 활성도는 유지되고 있는 것으로 나타났다. 또한 건조 실험에서 세균 군집구조 분석 결과에서도 군집의 다양성이 유지되었으며, 과일렛 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 수처리 효율이 높은 시기인 8월 2일, 8월 16일과 건조 6주 후 미생물 군집이 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 판단할 때 건조에 의해 바이오스톤 볼에 부착된 생물량은 감소하지만, 다시 습윤 상태가 되면 생물막의 활성이 회복되는 것으로 판단된다.

## 제4절 접촉산화 수처리시스템의 수질정화 기작 규명

호소 및 하천의 수질개선을 위한 가장 근본적인 대책은 호소나 하천에 유입되는 오염물질의 양을 최소화하는 것이나 하수도정비의 확대, 배출규제강화 등 여러 가지 대책에도 불구하고 하천이나 호수에서의 수질오염도가 높아, 상수도의 이용이나 시민의 친수 활동 및 청정한 생태계 조성에 악영향을 미치고 있다. 이를 해결하기 위해서는 하, 폐수 등의 점오염원의 처리와 함께 비점오염원에 대한 적극적인 처리가 요구된다. "하천자연정화"는 하천으로 유입된 오염물질을 하천에서 정화하여 하천기능의 저하 또는 열악한 상태를 복원시키기 위한 인위적인 자연보존행위로서 침전, 분해, 산화 등 물리적, 화학적, 생물학적이란 인위적인 방법을 이용하여 하천수의 수질을 개선하는 것이다. 이러한 필요에 따라 많은 자연정화 방법이 고안되었다. 일본의 경우는 10여년 전부터 170여 개소에 하천정화시설을 설치하여 가동하고 있으며, 국내에는 초기에 자갈접촉산화법이 몇 군데 시공되었고 그 후 경안천, 덕소천 등에 끈상 접촉산화법이 적용되고 있다.

"끈상 접촉산화법"이란 생물막 공법의 일종으로서 끈 형태의 접촉재를 일정한 간격을 두고 수직으로 설치하고, 접촉재 사이에 산기유도관을 설치하며 산기유도관 아래 산기장치를 설치하여 공기를 공급하며, 하부에는 슬러지 호퍼(Hopper)를 두는 구조로 되어있으며, 처리조 내에 설치한 접촉재에 미생물이 부착되어 생물막을 형성하며, 미생물 막에 형성된 다양한 미생물에 의해 유기물의 흡착, 산화, 분해과정과 부유물의 침전작용을 통해 오염물질을 제거하는 공법이다.

고정상 담체를 이용한 생물막 공정은 잉여슬러지 발생량이 적고 반응조 내 MLSS 유지를 위한 슬러지 반송이 불필요하여 하수처리장의 규모를 크게 축소화 할 수 있는 장점이 있다. 생물막 공법은 미생물이 담체에 부착되어 생물막을 형성하므로 분산상태의 미생물은 종과 생리학적 기작이 상이하하여 저항성 증가, 성장률의 증가, 대사 활동의 증가 및 독성효과에 대한 저항성이 증가하게 된다.

고체 표면에 형성된 미소 환경은 전체 환경에 비해 pH, 이온강도, 유기물 농도 등이 상이하므로 미생물 군집이 다양하게 변화하게 되며 Nitrifiers, Methanogens와 같이 성장속도가 느린 미생물들까지 부착에 의

한 시스템 내에 보존되어 높은 농도를 유지할 수 있게 된다. 또한 고체 표면의 부착에 의해 이용 가능한 유기물 농도가 증가하게 되고 가수분해물이 유출되지 않아 미생물 생장에 좋은 환경을 제공함으로써 미생물 활성이 높아지게 된다. 또한 생물막이 형성되므로 활성슬러지 공정과는 달리 슬러지 팽화(Bulking)현상으로 인한 슬러지 부상현상 등이 없어 운전 관리가 용이하고 운전특성상 단위체적당 미생물농도를 높게 유지할 수 있다는 장점이 있다.

생물막의 미생물학적 특성을 활성슬러지법과 비교하여 보면, 첫째 정화에 관여하는 생물종이 다양하다. 활성슬러지법에서는 비증식 속도가 낮은 생물은 유출되어 슬러지 중에 서식하는 일이 없지만 생물막법에서는 폐수의 체류시간에 무관하게 비증식속도가 매우 낮은 생물도 존재한다. 따라서 활성슬러지법에 비하여 다양한 생물종이 존재하고 먹이사슬이 복잡하게 되어 안정한 생태계를 형성하므로 환경조건의 변동에 대응할 수 있다. 둘째는 생물막의 각 단계에 있어서 우점종이 다르다. 오수가 하천에 유입된 경우, 하류로 갈에 따라 정화가 진행되는 잘 알려진 현상이다. 이 경우 정화의 정도에 따라서 각각의 장소에서 출현하는 우점 미생물의 종류가 다르다. 이것과 같은 현상이 생물막법을 다단계로 한 경우 정화의 정도에 대한 각 단계에서 우점종으로 출현하는 미생물의 종류는 각각 다르다. 따라서 각 단계의 수질에 가장 우점종인 생물막이 형성하게 되므로 매우 합리적인 처리법이라 할 수 있다. 셋째로는 먹이사슬이 길게 된다. 생물막에서는 활성슬러지법에 비교하여 미소동물이 점유하는 비율이 높고 미소후생동물의 현존량이 현저하게 크다. 따라서 생물막에서는 세균을 포식하는 생물보다도 더욱 고차원의 영양수준의 생물이 생식할 수 있는 점에서 활성슬러지보다도 먹이사슬이 길다. 이러한 고차의 영양수준 생물이 많아질수록 에너지로서 소멸되는 비율이 커지기 때문에 발생 슬러지량은 감소되기 마련이다. 넷째 산화세균 및 탈질세균이 잘 증식한다. 암모니아 산화세균 및 아질산 산화세균의 비증식 속도는 상당히 작아서 통상의 활성슬러지법에서는 씻겨 나가기 쉬우나 생물막법에서는 하수의 체류시간에 관계없이 미생물이 증식할 수 있으므로 산화세균과 같은 비증식속도가 작은 세균도 안정되게 증식할 수 있다. 특히 유기물 농도가 낮은 폐수에서 생성된 산화세균이 우점종으로 증식한다. 일반적으로 생물막의 내부가 혐기성 상태가 되므로 어느 정도의 탈질 현상이 발생하게 된다. 따라서 활성



슬러지법과 비교하여 생물막의 질소제거율이 높은 것은 이러한 작용에도 관련이 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 개발된 바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화공법은 2~3 cm의 쇄석을 수지로 적합한 직경 10 cm의 구상 담체(Bio-Stone Ball)를 반응조에 병렬로 충전 후 유리 작용에 의한 고액분리와 호기부, 천이대 및 혐기부 등 다양한 환경조건을 반복하고, 고농도의 순산소를 공급하여 오염된 저수지 유입수를 물리적, 생물학적으로 처리하는 공법이다. 이 공법은 소요부지 및 사업비가 타 공법대비 낮은 수준이며, 유기물과 부유물질 처리에 매우 좋은 효율을 보인다. 여제를 반영구적으로 사용 가능하고, 폐색이 발생하지 않아 역세설비를 설치할 필요가 없다. 또한 별도의 슬러지를 처리할 필요가 없으며, 순산소를 활용하여 기존 시설대비 포기 효율 증가 등으로 운영경비를 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 오염물질 제거 기작에 대한 이해가 부족하고, 건조 등에 의한 환경 변화에 대한 바이오스톤 볼의 안정성에 대한 분석이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 수질정화의 기작을 규명하기 위하여 접촉산화시스템의 수질 분석, 미생물 군집구조 분석, 부착 생물량 및 효소 활성도 분석, 생물막 안정성 분석을 수행하였다.

## 1. 유기물 제거 기작

바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 유기물의 제거는 침강과 산화 과정을 통해 일어나는 것으로 판단된다. 파일럿 플랜트에서 시간에 따른 SS 제거효율은 52.6~96.2%이었으며, 평균은 81.4%이었다. 실험 기간 중 유입수의 SS 농도가 가장 높았던 시료에서 89.2%의 SS가 제거되었다. 이는 접촉산화시스템으로 유입된 입자성 물질이 유속이 느려지면서 침강에 의해 제거되는 것으로 판단된다. 바이오스톤 볼 접촉산화조의 SS 제거율은 대조 실험군으로 사용된 끈상 접촉산화조의 SS 제거 효율에 비하여 높았다.

바이오스톤 볼 접촉산화조에서 유기물은 산화 작용에 의해서도 제거되는 것으로 판단된다. 바이오스톤 볼의 초기 코팅액에 있는 세균 군집을 분석한 결과, 난분해성 물질의 분해에 관여하는 세균, 하폐수 처리시스템에서 발견된 분해 세균, 여러 매질의 생물막에서 발견된 세균 등 주로 유

기물의 분해 활성이 뛰어난 세균이나 생물막 형성에 필요한 세균 군집이 우점하는 것으로 나타났다. 바이오스톤 볼에 초기에 코팅된 미생물 군집과 파일럿 플랜트 바이오스톤 볼 산화조에서 발견된 미생물 군집은 상이하였으나, 코팅액에 있는 일부 세균 군집이 바이오스톤 볼에서 유지되고 있었으며, 일부는 유입수에 포함된 유기물의 성장에 따라 이들의 분해에 적합한 세균의 성장이 촉진된 것으로 나타났다.

파일럿 플랜트의 바이오스톤 볼의 세균 군집 구조를 분석한 결과, 유기물 분해능이 뛰어난 세균인 phylum "Proteobacteria"에 속하는 세균이 가장 많았으며, 질산화 과정에 관여하는 phylum Nitrospirae에 속하는 세균도 다수 발견되었다.

16S rRNA pyrosequencing 법을 통해 세균 군집구조를 분석한 결과에서도 Phylum(문) 단계에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 proteobacteria로 52.6~62.2%이었으며, 질산화에 관여하는 세균이 주로 속한 Nitrospirae의 비율도 4.1~13.8%로 높은 비율로 관찰되었다. 하폐수 처리시설의 활성슬러지 또는 생물막에서 세균 군집 구조를 분석한 선행 연구의 결과와 비교할 때 Proteobacteria의 비율이 국내외 하수처리장에 비해 높았으며, 이러한 결과로 볼 때 바이오스톤 볼의 생물막에는 유기물 분해 세균의 비율이 매우 높게 유지되고 있는 것으로 판단되었다. Pyrosequencing 방법을 사용한 세균 군집구조 분석 결과에서 유기물 분해세균 및 질산화 관련 미생물의 농도 결과는 DGGE법을 통한 세균 군집 구조 분석 결과와 일치하였다. 특히 Pyrosequencing 분석에서 나온 종의 결과를 이용하여 다양성 지수인 Shannon index를 분석한 결과 6.37~6.90의 범위였으며, 이는 국내외 활성슬러지 및 생물막 분석 결과에서 나타난 다양성 지수에 비해 매우 높은 값을 나타내고 있었다. 따라서 바이오스톤 볼의 생물막에 매우 다양한 미생물 군집이 형성되어 있으며, 이에 따라 다양한 종류의 유기물 대사에 의하여 활발한 유기물 분해가 일어나는 것으로 판단된다. 바이오스톤 볼과 끈상 생물막에서 탈수소효소, glycosidase, lipase의 단위 면적당 효소 활성도를 비교한 결과, 바이오스톤 볼에서 끈상에 비해 높았을 뿐 아니라 세포(생물량)당 효소활성도도 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 바이오스톤 볼 반응조의 유기물 분해능이 끈상 반응조에 비해 높은 것으로 판단되었다.

## 2. 영양염류 제거 기작

바이오스톤 불 반응조에서 총인 제거율은 15.7~80.1%로 시료에 따른 변이가 매우 컸으며, 평균은 51.8%이었다. 파일럿 시스템이 설치된 매화저수지의 수위 저하 및 간헐폭기 등을 적용한 시기에는 총인 제거 효율의 변동성이 컸으나, 7월 25일 이후에는 저감율이 평균 65.0%로 안정적인 제거 효율을 나타내었다. 총질소의 경우에도 제거율이 -14.5~39.5%로 시료에 따른 변이가 매우 컸으며, 평균은 23.2%이었다. 이와 같이 바이오스톤 불 접촉산화시스템에서 유기물과 총인의 제거능은 매우 우수하지만 질소의 제거능은 다소 높지 않은 것으로 나타났다.

유입수와 처리수의 무기질소(암모니아성질소, 아질산성질소와 질산성질소의 농도를 더한 값) 농도의 변화를 보면 대부분의 시료에서 유입수에 비해 처리수의 농도가 낮았으며, 이는 접촉산화시스템의 유기물 분해 과정에서 유기질소가 분해되어 암모니아성질소로 전환되며, 암모니아성질소는 폭기에 의해 질산화 되어 질산성질소로 전환된 것으로 판단된다.

유입수에 비해 처리수의 암모니아성질소 농도가 높은 것은 DO 농도 결과에서 확인한 바와 같이 반응조의 DO 농도가 낮아 질산화가 충분히 이루어지지 않은 것으로 보인다. 또한 접촉산화시스템에서 상시 폭기로 인해 암모니아성질소로부터 전환된 질산성질소가 질소로 전환되는 탈질 반응이 원활하게 진행되지 않은 것으로 보인다. 따라서 접촉산화시스템의 질소 제거능을 높이기 위하여 폭기량을 증가시키거나 폭기시 산소 전달 효율을 증대시키기 위한 대책이 필요하며, 탈질 반응이 원활히 일어날 수 있도록 혐기대를 충분히 형성해주는 것이 필요할 것으로 판단된다.

바이오스톤 불에 부착된 세균의 군집구조를 DGGE법으로 분석한 결과에 따르면 질산화 과정에 관여하는 phylum Nitrospirae에 속하는 세균이 다수 발견되었다. 또한 16S rRNA pyrosequencing 법으로 분석한 결과에서도 phylum Nitrospirae에 속하는 세균의 비율이 4.1~13.8%로 매우 높았으며, 국내외 하수처리장의 활성슬러지나 생물막에서 분석한 선행 연구 결과와 비교할 때 매우 높은 값을 나타내었다. 따라서 바이오스톤 불에는 질산화에 관여하는 세균의 비율이 매우 높을 것으로 판단된다.

질소의 제거는 호기-혐기 환경에서 질산화-탈질 과정을 통해 일어난다. 본 연구에서 분석된 파일럿 플랜트나 소규모 아크릴 반응조는 반응조의

규모가 작기 때문에 혐기 환경이 충분히 조성되지 않았으며, 이에 따라 총질소의 제거가 효율적으로 일어나지 않은 것으로 판단된다. 따라서 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 총질소 제거 효율을 좀 더 향상시키기 위해서는 반응시설 내에 혐기 조건이 형성될 수 있도록 규모를 크게 하거나 운전 조건의 조절을 통한 혐기 환경 조성이 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 바이오스톤 볼 접촉산화시스템의 생물막 형성 및 안정성

바이오스톤 볼의 초기 코팅 과정에서 미생물 코팅액과 코팅 후 바이오스톤 볼을 분석한 결과 코팅 과정에서 바이오스톤 볼 당 약 10 mL의 미생물 코팅액에 포함된 세균이 바이오스톤으로 전이되는 것으로 나타났다. 효소 활성도 분석 결과로 보면 코팅과정에서 코팅액으로 부터 바이오스톤 볼로 전이된 dehydrogenase와 lipase의 양이 glycosidase에 비해 약 2.6배 높은 것으로 계산되었다. 따라서 미생물 코팅과정에서 탄수화물 분해능이 높은 세균(glycosidase) 보다 대사활성이 뛰어난 세균(dehydrogenase)과 지질 분해능이 높은 세균(lipase)이 바이오스톤 볼로 점착되는 경향이 큰 것으로 판단된다.

미생물 코팅액과 코팅 직후 바이오스톤 볼에서 DGGE법을 사용하여 세균 군집구조를 분석한 결과, 미생물 코팅액과 바이오스톤 볼의 세균 군집구조는 거의 유사하였다. 코팅 후 바이오스톤 볼에 부착된 세균은 주로 난분해성 물질의 분해 세균, 하폐수 처리시스템에서 발견된 분해 세균, 정수의 배급수시스템, 호수, 식물 잎 등에 형성된 생물막에서 발견된 세균, 폐기물의 분해 과정에서 발견된 세균 등과 일치하여, 미생물 코팅액에는 주로 유기물의 분해 활성이 뛰어난 세균이나 생물막 형성에 필요한 세균 군집이 우점 하는 것으로 판단되었다. 따라서 바이오스톤 볼의 코팅 과정에서 유기물 분해능이 뛰어난 세균이 바이오스톤 볼에 점착하면서 오염물질의 분해에 필요한 생물막의 생성을 촉진시키는 것으로 판단된다.

바이오스톤 볼을 건조하였을 때 바이오스톤 볼에서 DNA 농도와 종속 영양세균수가 시간이 지남에 따라 감소하였으며, 이는 건조에 의해 생물막의 세균의 일부가 사멸하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 건조에 따른 효소 활성도를 평가한 결과, 세균의 생리 활성을 나타내는 dehydrogenase는 감소하였으며, 유기물(탄수화물 또는 지질)을 분해하는

데 관여하는 효소의 활성도는 건조 시간에 따라 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 건조 실험의 생물량 및 효소 활성도 분석에서 생물량과 효소활성도는 건조에 의해 감소하였으나, 생물량에 따른 효소 활성도(효소활성도/생물량)의 값은 유사한 값을 나타내어 세균 당 활성도는 유지되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 건조 실험에서 세균 군집구조 분석 결과에서도 군집의 다양성이 유지되었으며, 파일럿 바이오스톤 볼 접촉산화시스템에서 수처리 효율이 높은 시기인 8월 2일, 8월 16일과 건조 6주 후 미생물 군집이 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 판단할 때 건조에 의해 바이오스톤 볼에 부착된 생물량은 감소하지만, 다시 습윤 상태가 되면 생물막의 활성이 회복되는 것으로 판단된다.



## 제6장

# 농업용수 융복합 수처리시스템의 기술성 · 경제성 평가

---

제1절 융복합 수처리시스템의 기술성 평가

제2절 융복합 수처리시스템의 경제성 평가







## 제6장 융복합 수처리시스템의 기술성 · 경제성 평가

### 제1절 융복합 수처리시스템의 기술성 평가

#### 1. 유입수 수질정화기술(시스템)

##### 가. 유입수 수질정화시설의 비교 분석

본 연구에서 농업용 저수지 유입수에 들어있는 오염물질을 저감 및 제거하기 위한 수처리 시설로 개발한 생태융합형 접촉산화시스템과 바이오스톤 접촉산화시스템을 대상으로 기존 유입수 대책으로 널리 활용되었던 인공습지, 끈상 접촉산화공법, 혼합여재 접촉산화공법과 기술성 및 유지관리 용이성, 수질정화효율 등을 비교 검토하여 (표 6-1)~(표 6-2)에 제시하였다. 인공습지는 갈대 등 수생식물 군락 및 이들과 결합되어 있는 미생물을 인공적으로 조성한 습지로서, 물이 수중 식물 군락을 통과하는 동안 세균, 유기물질, 화학물질 등을 제거해 물을 정화하는 기술이다. 인공습지는 식물을 이용한 친자연적 정화방법이며, 적절한 식생을 선택할 경우 경관성이 우수한 장점을 가지고 있다. 또한, 체험형 생태환경 공간으로 조성이 가능하고, 초기강우 유출수의 저류 및 정화 기능을 수행하며, 영양염류인 N, P의 제거효율이 특징을 가지고 있다. 반면에 인공습지는 유기물의 처리효율이 낮으며, 주기적으로 식생관리 및 퇴적오니의 준설이 필요하다. 넓은 부지면적이 소요되며, 토사 퇴적 등에 대한 대책으로 인공습지 전단에 침사지 등을 설치해야한다. 또한 수리학적 체류시간(HRT)이 1~2일의 장시간이 소요되는 단점을 가지고 있다.

국내에서 1990년대 들어 오염하천 정화사업에 널리 이용되었던 끈상 접촉산화공법은 섬유소재를 이용한 미생물 접촉재가 충전된 정화시설에 오염된 하천수를 유입시켜 끈상 접촉여재에 부착된 미생물을 이용하여 유입수를 정화하는 수처리 기술이다. 끈상 접촉산화공법의 특징은 오염도가 높은 하천수의 처리가 가능하고, 여재를 반영구적으로 사용할 수 있으며, 여재의 폐색이 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 공법에서 Draft tube를 이용한 선회류 방식으로 공기를 공급하여 미생물막의 탈리 발생을 최소화하여 역세 장치가 필요 없는 특성을 가지고 있다. 단점으로는 미생물을 활용한 생물학적 공법으로 독성물질 유입에 취약한 특성을 가지고 있으며, 강우 발생, 가뭄 등의 이상기후 요인으로 반응조의 운영을 중지하

였다가 재 가동시에는 처리효율이 크게 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 또한 송풍기 운영에 따른 소음과 유지관리 및 슬러지 처리를 위한 유지관리 비용 등이 발생한다.

혼합여재 접촉산화공법은 일정크기의 표면적과 공극율을 갖는 자갈 쇄석과 소정의 형상으로 가공된 인공의 접촉재(Bio-Media)를 이용하여 오염된 하천수를 정화하고, 슬러지는 하부로 저류시키는 개량 접촉산화 공법이다. 유입수의 수질에 따라 다양한 여재(다공성 바이오모듈 여재, 바이오 여재, 자갈여재)의 선택이 가능하고, 초기 유기물의 제거효율이 높은 특성을 가지고 있다. 단점으로는 미생물을 활용한 생물학적 공법으로 독성물질 유입에 취약한 특성을 가지며, 여재선택에 따라 공극의 폐색 발생 주기가 변동되며, 주기적인 여재 교체 및 역세장치가 필요하다. 또한 포기 시설이 필요하며, 수온 및 계절적 변동에 따른 제거효율 변동이 발생한다.

본 연구를 통해 개발한 생태융합형 접촉산화수로는 유동상 접촉재(전처리), 끈상 접촉여재(주처리), 세라믹 여재(후처리)의 3단계로 서로 유기적으로 구성되어 있다. 저수지 유입수의 유기물질을 물리적 및 생물학적으로 처리하고, 상부에는 정수식물을 식재하여 경관향상 및 영양염류를 추가로 제거하는 생태융합형 공법이다. 본 시설의 장점은 끈상 접촉재와 수생식물을 결합한 형태로 인공습지와 동일한 유량을 처리할 경우 상대적으로 작은 부지면적 및 적은 사업비가 소요된다. 유기물, 부유물질, 영양염류 등을 동시에 처리가 가능하며, 여재를 반영구적으로 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 여재의 폐색이 많이 발생하지 않아 역세장치가 필요하지 않으며, 상부 식생으로 경관성을 향상시키는 장점도 가지고 있다. 반면에 미생물을 활용한 생물학적 공법으로 독성물질 유입에 취약한 특성을 가지며, 거대 입자를 포함한 초기 강우 유출수의 처리가 어려워 전처리 시설로 인공습지와 동일하게 침사지 시설 등을 필요로 한다. 또한, 처리조의 DO를 최소 4 mg/L 이상으로 유지시켜 주기 위해 산소포기가 필요하며, 이에 따라 시설운영 비용 발생과 슬러지 처리비용 발생 등이 있다.

바이오스톤 접촉산화시스템은 2~3 cm의 쇄석을 친환경 에폭시 수지로 접합 후 미생물 코팅 처리를 한 직경 10 cm의 구상담체(Bio-Stone Ball)를 반응조에 병렬로 충전 후 유리작용에 의한 고액분리와 호기부, 천이대 및 혐기부 등 다양한 환경조건을 조성하여 오염된 물을 물리적, 생물학적으로 처리하는 생물막 여과공법의 일종이다. 본 기술의 특징으로는 자연 쇄

석인 친환경적 소재 활용으로 2차 오염에 대한 우려가 없으며, 소요부지 및 사업비가 타 공법대비 낮은 수준이며, 유기물과 부유물질 처리효율이 매우 높으며, 식생 없이도 일정수준 이상의 TN, TP 처리효율을 보이며, 여재는 반영구적 사용이 가능하고, 여재의 폐색 발생이 거의 없어 역세설비가 필요하지 않는 장점이 있다. 또한 별도의 슬러지를 처리할 필요가 없으며, 순산소를 활용하여 기존 시설대비 포기 효율 증가 등으로 운영비를 절감 할 수 있는 장점도 있다. 본 처리시설의 단점으로는 토사 유입시 폐색 가능성이 커지고, 제거가 곤란하여 유입수 대책시설로 활용 시에는 초기강우 유출수의 유입을 대비한 전처리 시설(침사지, 침전지 등)이 필요하다. 그러나 본 시설을 저수지 호소수를 정화하기 위한 수처리 시설로 활용한다면 침사지, 침전지 등의 전처리 시설은 필요하지 않다.

(표 6-1) 유입수 정화시설 기술성 평가(기술 특징)

구분	인공습지	끈상 접촉산화	자갈 접촉산화	바이오스톤볼 접촉산화
개요	식물군락에 물을 통과시켜 유기물질, N, P 등 제거	끈상접촉재에 부착된 미생물을 이용한 수처리 공법	자갈을 접촉여재로 적용한 수처리 공법	바이오스톤 볼을 이용한 수처리 공법
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>친환경 정화 방법</li> <li>식생에 의한 영양염류 제거</li> <li>초기강우 유출수 저류 및 정화 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>오염도 높은 원수 처리가능</li> <li>반영구적 여재사용</li> <li>역세장치 불필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단위 용적 대비 정화능력 높음</li> <li>부유물질 제거효율 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>친환경 여재(쇄석) 사용</li> <li>유기물 및 SS 제거 효율이 높음</li> <li>여재 폐색이 없음</li> <li>슬러지 발생이 적음</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>넓은 부지면적 필요</li> <li>유기물 처리효율 저조</li> <li>저수지 수질개선 효과 장시간 소요</li> <li>주기적 식생관리 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>독성물질에 취약</li> <li>슬러지 처리계획 필요</li> <li>송풍기 운영에 따른 소음발생</li> <li>인공여재 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>독성물질에 취약</li> <li>여재 폐색현상 발생</li> <li>슬러지 처리 계획 필요</li> <li>주기적 여재 교체 및 역세척 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>모래 및 토사 등 유입방지를 위한 전처리 시설 (침사시설, 침강지 등)필요</li> <li>초기강우 등 대규모 유량 처리 곤란</li> </ul>
현장 적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>농업용 저수지 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>경안천, 안양천 등</li> <li>오염하천에 다수 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>안양천, 양재천 등 다수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>매화저수지</li> </ul>
모식도				



(표 6-2) 유입수 정화시설 기술성 평가(유지관리 용이성, 정화효과)

구분	인공습지	끈상 접촉산화	자갈 접촉산화	바이오스톤블 접촉산화	
유지관리 용이성	여재	• 정수식물(갈대, 애기부들, 창포 등)	• 나일론 끈상여재	• 자갈여재	• 바이오스톤 블
	동력 사용	• 펌프 전력	• 송풍기 전력	• 폭기시 송풍기 전력	• 공기공급시설 전력(유지관리 필요시)
	식생 관리	• 동절기 식생관리 • 주기적 예초 필요	• 필요 없음	• 필요 없음	• 필요 없음
	운전	• 유입시설(취수보, 펌프) 관리	• 포기시설 • 전동 밸브(유입/방류) 펌프관리	• 포기시설 • 전동 밸브(유입/방류) 펌프관리	• 유입시설(취수보, 펌프 등) 관리
	슬러지 처리	• 주기적 퇴적오니 준설(1회/년)	• 주기적 슬러지 인발(Air Lift)(2회/년)	• 주기적 슬러지 인발(1회/월)	• 필요 없음(역세 필요시 1회/년)
수질정화 효율	BOD	25.6%	20~60%	54~65%	50~97%
	SS	36.0%	55~80%	52~77%	70~90%
	COD	15.1%	-	-	25~65%
	T-N	40.6%	10~25%	2.5%	10~30%
	T-P	31.1%	2~36%	5.8%	15~60%


## 나. 수처리용 담체(여재)의 비교 분석

본 연구를 통해 개발한 수처리용 담체(여재)인 바이오스톤 볼과 기존의 유사한 수처리용 담체인 다공성 팽창 세라믹 여재와 특성, 장점, 단점, 유지관리성 등을 비교 분석한 결과는 (표 6-3)~(표 6-4)와 같다. 바이오스톤 볼의 원 재료는 2~3cm에 해당하는 자연 쇄석(자갈)을 이용하여 친환경 예폭시 수지를 사용하여 구형 10 cm의 볼로 성형하여 미생물로 코팅한 제품이고, 팽창 세라믹 여재는 황토, 점토 등의 천연광물과 유기물을 균일하게 배합하여 1,150~1,200 °C의 고온에서 소성시켜 팽창 발포시킨 다공성 여재이다. 바이오스톤 볼의 직경은 100 mm인 반면에 팽창 세라믹의 직경은 1~25 mm로 바이오스톤 볼에 비해 크기가 4배에서 100배까지 작은 알갱이 수준의 여재이다. 세라믹 여재는 압축강도나 공극률이 바이오스톤 볼에 비해 매우 낮고 조밀한 공극율로 인해 여재의 폐색이 가장 큰 단점으로 판단된다. 따라서 바이오스톤은 한번 설치하면 여재의 교체 없이 반영구적으로 사용할 수 있는 반면에 팽창 세라믹 여재는 폐색으로 인해 여과 또는 흡착기능 상실이 우려되며, 폐색 발생 시에는 여재 교체가 불가피하여 월 1회 이상의 주기적인 역세가 요구되나 현장 적용 시에 역세시설을 갖추고 있지 않아 일정기간 운영 후에는 슬러지 폐색으로 수처리 효율이 급격히 감소하는 문제점을 가지고 있다. 반면에 바이오스톤 접촉산화시설에 들어가는 바이오스톤 볼은 최대 연 1회 이상의 역세가 이루어진다면 바이오스톤 볼의 교체 없이 거의 반영구적으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

(표 6-3) 바이오스톤 볼 담체의 특징

구 분		바이오스톤 볼(Bio-Stone Ball)
개요		○ 2~3cm의 천연자갈 또는 쇄석을 친환경 수지로 접합한 후, 천연셀룰로스에 함침된 수질정화용 복합유용미생물을 담체 내외부 표면에 코팅 및 건조시킨, 직경 10cm의 자갈 구상 담체(Bio-Stone Ball)
개요도		 
물리적 특성		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 직경 : <math>\Phi 100\text{mm}</math></li> <li>○ 압축강도 : 약 4 MPa 이상</li> <li>○ 공극률 : 여재 30~50%, 충전조 70%이상</li> </ul>
장점		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 한국농어촌공사 공동 개발(공동특허) - 농식품부 농업용 저수지 수질개선과제</li> <li>○ 여재공극(조내 63~74%)이 커서 막힘(폐쇄) 및 흐름저항이 거의 없음</li> <li>○ 천연자갈 원재료로 친환경적임</li> <li>○ 상부 식생 적용 가능(친자연형)</li> <li>○ 여재가 쇄석결합물이므로 구조적으로 안정하고, 영구적으로 사용 가능</li> <li>○ 짧은 체류시간(1.3hr)에 처리효율 높음</li> <li>○ 미생물코팅으로 충격부하에 강함(초기 또는 갈수기 초기 안정화에 기여)</li> </ul>
단점		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 무기성 SS 유입방지를 위한 전처리 필요(침강지 등)</li> <li>○ 고농도 유입시 별도의 폭기시설 필요</li> <li>○ 최신기술로서 국내 적용실적이 적음</li> <li>○ 담체(여재) 단가가 상대적으로 고가임</li> <li>○ 주기적인 역세(1회/년 이상, 필요시)</li> </ul>
유 지 관 리 성	여재 교체	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 미생물코팅 쇄석 접합 구상담체(Bio-Stone Ball)</li> <li>○ 여재 교체 필요 없음</li> </ul>
	진력	○ 주기적 역세(년 1회)
	식생 적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 상부 식생 적용 가능</li> <li>○ 동절기 식생관리 및 필요시 주기적 예초</li> </ul>
	슬러지	○ 슬러지 발생 매우 적음
적용현황		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 하천/저수지 : 매화저수지 pilot</li> <li>※ 폐쇄이 없어, 입자성 SS가 적은 하수, 폐수와 오염된 하천, 저수지 등 유역 비점오염원 처리에도 적합</li> </ul>

(표 6-4) 다공성 팽창 세라믹 담체의 특징

구 분		다공성 팽창 세라믹
개요		○ 황토, 점토 등의 천연 광물과 유기물을 균일하게 배합하여 1,150~1,200℃의 고온에서 소성시켜 팽창 발포시킨 다공성여재
개요도		
물리적 특성		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 직경 : <math>\Phi 1\sim 25\text{mm}</math></li> <li>○ 압축강도 : 약 2~3 MPa</li> <li>○ 공극률 : 여재 30~35%, 충전조 약 40%</li> </ul>
장점		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 혈암, 황토, 천연유기질 등 자연소재 주재료</li> <li>○ 충분한 체류시간을 확보하는 경우, 여재 기공 및 금속이온에 의한 수처리효율 향상</li> <li>○ 화학제품 인공여재에 비해 여재 비용이 상대적으로 저렴</li> <li>○ 고온 소성으로 팽창 발포시켜, 화산석과 같은 천연여재 보다 강도가 높고 알갱이 모양 일정</li> <li>○ 상부 식생 적용 가능(친자연형)</li> <li>○ 다양한 적용 사례가 있음</li> </ul>
단점		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 무기성 입자 및 미생물 증식에 의해 여재 내부공극 및 여재 간 공극 막힘(폐색) 발생</li> <li>○ 여재 공극 폐색으로 운영기간 지속시 흐름저항 및 처리유량 감소</li> <li>○ 주기적인 역세(1회/월) 또는 교체(약 5년)</li> <li>○ 단순 매립형인 경우, 역세 공정 적용이 구조적으로 불가(공극률이 적어 역세효율 저하)</li> <li>○ 시간경과에 따라, 흡착기능상실로 인 제거효율 저하</li> </ul>
유지관리성	여재 교체	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다공성 팽창 세라믹</li> <li>○ 폐색시 또는 흡착기능 상실시 여재 교체 필요(저수지 정상상태 약 5년 주기)</li> </ul>
	전력	○ 주기적 역세(1회/월 이상, 단 역세적용 곤란)
	식생적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 상부 식생 적용 가능</li> <li>○ 동절기 식생관리 및 필요시 주기적 예초</li> </ul>
	슬러지	○ 별도 슬러지 처리 없음(폐색시 교체)
적용현황		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 인공습지에 다수 적용</li> <li>○ 입자성 SS가 적은 하수처리 등에 적합</li> <li>※ 폐색에 의한 비정상가동 인공습지 국내 다수.</li> </ul>

## 2. 무인항법 이동식 수질정화선

### 가. 기존 호내 정화시설과 비교 분석

본 연구에서 개발한 무인항법 이동식 수질정화선과 현재 농업용수 수질 개선사업으로 설치하고 있는 인공식물섬 및 물 순환장치와 기술성 등을 비교 분석한 결과는 (표 6-5)과 같다. 무인항법 이동식 수질정화선은 이동이 가능한 선박형태의 수처리 시스템이며, 물순환 장치나 인공식물섬은 지정된 위치에 고정식으로 설치되어 있는 수질정화 시설이다. 인공식물섬은 식물을 이용한 친환경적 경관창출, 어류 산란장소 제공 등의 장점이 있으며, 물순환 장치는 유지관리가 용이하며 녹조발생을 억제하는 장점 등이 있다. 반면에 인공식물섬은 저수지 수질개선효과가 낮으며, 식생관리의 유지관리가 필요하고, 물순환 장치는 영향반경에 한계가 있어 저수지 수질개선효과가 미미하고, 동력이 소요되며, 수질오염사고 발생시 긴급 대처가 어려운 단점을 가지고 있다.

무인항법 이동식 수질정화선은 상시 운영으로 수질오염을 사전에 예방할 수 있고, 수질자료를 실시간으로 측정 및 수집할 수 있는 장점 등을 가지고 있다. 단점으로는, 태풍 등 기상 악화시 운영이 곤란하며, 기계고장 등 비상사항 발생 시에 대처능력이 떨어지는 한계점을 가지고 있다. 그러나 무인항법 이동식 수질정화시스템은 기상이 양호한 날에는 매일 운영하는 방식으로 굳이 기상 상태가 좋지 않은 날까지 운영할 필요성은 없으므로 이 점은 크게 문제가 되지 않는다고 판단된다. 또한, 기계고장 등 비상사항 발생 시에는 자동 고장 신호 알람의 작동으로 즉시 관리담당자 핸드폰 또는 PC에서 신고가 울리며, 동시에 자동 운전 중지 및 멈춤(정지) 작동 프로그램에 의해 운전이 자동으로 중지 및 정지가 된다. 이런 경우에는 기계고장 상태에 의한 관리자의 판단에 의해 수질정화선의 도크 회항 또는 고장 원인 해소를 위한 장비의 교체 및 수리 등이 요구된다.



(표 6-5) 무인항법 수질정화선과 기존 호내 정화시설과 비교분석

구 분		무인항법 수질정화선	인공식물섬+물순환장치 (동방저수지)
형식		이동식(무인 운전)	고정식
체류시간		1.0~1.5 hr	평균 40 hr (19~70 hr)
요소기술		전기응집+산소포기+무인운전+수질자동측정	식생+산소포기
수질정화효율		수환경개선, 오염물질 제거 * 개방수역으로 오염물질제거율 정량화에 어려움	수환경개선, 영양염류 제거 * 개방수역으로 오염물질제거율 정량화에 어려움
크기(규모)		3m(W)×6m(L)	인공식물섬 8㎡, 물순환장치 2기
내구연한		10~20년	30년
비용	설치비	400 백만원	514 백만원
	유지관리	10백만원/년	7백만원/년
기술성	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>상시 운영으로 수질오염 사전예방</li> <li>무인운전으로 운영편리 및 인건비절감</li> <li>태양광 등 자연동력이용으로 동력비 절감</li> <li>수질 실시간 측정 및 송수신</li> <li>도크설치로 안전한 유지관리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>녹조발생 억제</li> <li>수생식물에 의한 오염물질의 여과기능</li> <li>반영구적 사용 및 유지관리 용이</li> <li>식물 이용한 친환경적 경관장출</li> <li>어류 산란장소 제공</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>태풍등 기상악화시 운영곤란</li> <li>비상 상황시 긴급 대처 곤란</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수질개선효과 낮음</li> <li>물순환장치의 동력비 소요</li> </ul>

#### 나. 기존 녹조제거선과 비교분석

국내에서 제작된 호소 수질정화선은 환경부에서 제작한 녹조제거선(2012년), 한국농어촌공사 충남본부에서 제작한 녹조 제거선(2012년), 한국수자원공사에서 제작한 녹조 수거선(2015년), 한국건설기술연구원에서 제작한 녹조 제거선(2015년) 등 소수가 있는데 모두 유인 운전에 의한 이동식으로 이루어져 있다. 반면에 본 연구에서 개발한 무인항법 이동식 수질정화선은 GPS를 이용한 프로그램에 의해 무인으로 운전되는 이동식 방식이다. 본 연구에서 개발한 무인항법 이동식 수질정화선을 환경부, 충남본부, 수자원공사의 녹조 제거 및 수거선과 비교하여 기술성을 검토하였다.

무인항법 이동식 수질정화시스템은 현재 기술을 개발하여 시제품을 제작하여 현장적용실험을 진행하였으며, 오염물질 처리를 위하여 탑재하는 기술은 현장 상황에 적합한 기술을 키트식으로 탑재하여 사용하는 방식이

다. 본 연구에서는 농어촌연구원과 블루비에스(주)에서 공동으로 개발한 초고속 고액분리시스템을 시제품에 장착하여 현장적용실험을 하였다. 초고속 고액분리시스템은 SS, TP, COD를 ZT(제타전위 제너레이터) 이용하여 급속으로 응집 및 부상시켜 제거하는 방법으로 크게는 가압응집부상공법에 속하는 기술이다. 기술원리는 크게 3단계로 구분되며, 1단계는 마이크로버블을 이용한 거대 입자성 물질을 형성하는 단계이고, 2단계는 제타전위 제너레이터를 이용하여 극미세버블에 의해 이온 흡착된 콜로이드입자가 응집제와 결합하여 극미세기포 응집복합체로 결합하는 단계, 3단계는 응집복합체를 초고속으로 부상 분리시켜 스키머에 의해 제거하는 기술이다. 이 기술은 수초~2분 이내에 응집 부상분리가 이루어지며, COD, TP 등 오염물질 제거 효율이 매우 높은 장점을 가지고 있다. 또한, 친환경 응집제를 사용하며, 일정 전류 이하로 운영시 온도 및 pH에 변화가 없어, 수생태계에 대한 영향이 극히 적은 것으로 알려져 있다.

무인항법 이동식 수질정화선의 최대 장점은 무인 운전으로 인해 자격증을 소지한 전문 운영인력이 필요하지 않아 인건비를 절감할 수 있으며, 상시운전이 가능하고 수질자료를 실시간으로 측정, 수집, 송수신 등을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 상시 운영으로 인해 오염물질 유입 등을 감시할 수 있으며, SS 농도 센서 등에 의해 필요한 지역에서 자동으로 수질정화에 필요한 작동(산소 포기, 응집제 투여, 미생물 살포제 투여 등)을 하여 수질오염에 의한 부영양화 및 녹조 대 발생 등을 사전에 방지할 수 있다. 본 시스템의 단점으로는 태풍 등 기상 악화 시에는 운영이 곤란하며, 비상 사항 발생 시에는 대처능력이 떨어지는 한계점을 가지고 있다.

환경부에서 제작한 조류 제거선은 마이크로 버블 발생장치, 오토 펜스, 선박 본체 등의 시설물로 구성되어 있다(환경공단, 2012). 가압응집부상원리를 응용하여 호소 및 하천, 항만 등의 조류와 영양염류를 동시에 제거하는 기술로서 시스템은 미세기포 발생장치와 저니층 교란장치로 구성된다. 미세기포 발생장치는 10~30 $\mu$ m의 초미세기포를 생성하는데, 응집제 미세기포 복합체를 형성하여 응집성을 부여한다. 이러한 기능성 미세기포를 포함한 가압수를 수체 내에 분사시켜 오염물질들이 플록을 형성하도록 응집반응을 유도하고, 동시에 기포에 의해 수면위로 부상시켜 제거한다. 모든 과정은 수중에서 이루어지며, 수중오염물질 뿐만 아니라 퇴적층의 오염물질을 동시에 제거할 수 있으며, 부상된 슬러지는 부유물 자동 수집장

치를 통해 수거가 이루어진다. 하지만, 바닥 저니층을 교란시켜 퇴적오염 물질을 재부상 처리하는 과정에서 완벽하게 처리는 어려우며, 재 부상된 오염물질이 오히려 수생태계에 악영향을 미칠 우려도 있다. 또한 부상 슬러지에 대한 처리 방안 대책도 필요하다.

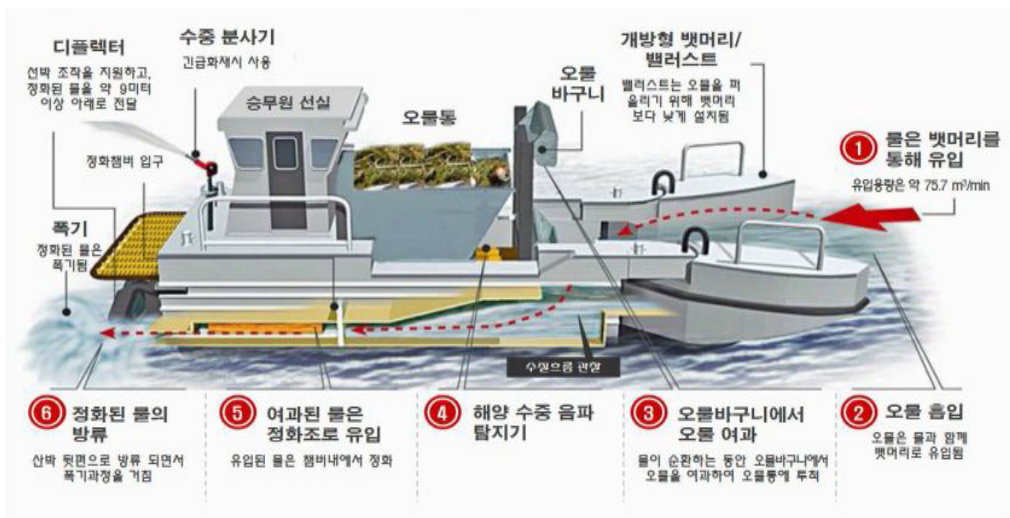


〈그림 6-1〉 환경부 가압부상식 조류제거선(환경공단, 2012)



〈그림 6-2〉 환경부 가압부상식 조류제거선 운영전경

한국수자원공사에서 제작한 조류제거선은 조류를 물리적으로 농축하여 수거하는 시설이다. 조류의 수중확산에 즉각적인 대응을 위해 개발된 수상 이동형 조류 제어 기술로 조류 대량 발생시 신속하게 수거·처리하는 것을 목적으로 한다. 수심이 낮은 정체수역으로 집중되어 형성된 스컴을 효율적으로 제거 할 수 있으며, 발생 조류를 고농축 수집 및 분리가 가능한 시설이다. 물과 함께 유입한 조류를 선박 본체 내에서 수집관과 스크린을 통해서 농축하고, 컨베이어 벨트에 연결된 조류수거 바구니로 농축된 조류를 저장탱크로 이동시킨다. 조류와 함께 유입한 물은 정화조로 유입시키며 선박 하단으로 이송되어 방류시키며 폭기 과정을 거치게 된다. 수자원공사 녹조 수거선의 단점은 농축 스크린의 폐색이 자주 발생하며, 미세조류의 응집 수거를 위해 수체에 응집제의 주입이 필요하다. 응집제(PAC)를 사용할 경우 잔류하는 알루미늄 농도가 높을 경우 인체의 뇌신경 장애를 유발할 수 있다. 또한 수중의 pH 범위가 4.5~5.5이고, 알칼리도가 35 mg-CaCO<sub>3</sub> 이하에서는 독성을 유발하여 생태계에 악영향을 미칠 가능성도 있다. 또한 수거한 농축조류의 탈수율이 떨어지며, 탈수 슬러지 처리를 위한 2차 비용이 발생하는 문제점을 가지고 있다.



〈그림 6-3〉조류 제거선(한국수자원공사, 2014)

(표 6-6) 무인항법 수질정화선과 기존 녹조제거선과 비교분석(기술성)

구분	무인항법 수질정화선	녹조제거선 (충남본부 2012년 제작)	조류제거선 (환경공단 2012년 제작)	조류 수거선 (수자원공사 2015년 제작)
크기(규모)	이동식(무인 운전) 길이 6m × 폭 3m × 높이 2m	수상 이동형(유인 운전) 길이 12m × 폭 3m × 높이 2.4m	수상 이동형(유인 운전) 길이 35m × 폭 10m	수상 이동형(유인) 길이 8m × 폭 3.4m
총톤수	10톤	13톤	-	-
요소기술	GPS 기반 무인운전+ 수질 자동측정+키트식 수질정화장치	마이크로버블 발생+응집+부상분리 (응집부상 분리)	마이크로버블 발생+저니층 교란장치+ 응집+부상분리 (가압부상 분리)	수집관, 스크린, 조류수거 바구니, 저장탱크 (조류 농축수거)
수질정화 효율	수처리용량 : 6,000m <sup>3</sup> /hr 1일 평균 녹조처리량 : 300kg/일	수처리용량 : 1,200m <sup>3</sup> /hr 1일 평균 녹조처리량 : 125kg/일	수처리용량 : 50~400 m <sup>3</sup> /hr 30,000m <sup>3</sup> /일	-
내구연한	20~30년	30년	30년	30년
비제작비	400 백만원	300 백만원	400 백만원	116 백만원
비용	10백만원/년	70~100백만원/년	20백만원/년	5.8백만원/년
기술성	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상시 운영으로 수질오염 사전예방</li> <li>· 무인운전으로 운영편리, 인건비절감</li> <li>· 태양광등 자연동력 이용으로 동력비 절감</li> <li>· 수질자료 실시간 측정 및 송수신</li> <li>· 도크 설치로 안전한 유지관리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 퇴적오염물질 제거</li> <li>· 모든 과정이 수체에서 이루어짐</li> <li>· 비상시 녹조 제거 (사후 관리)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 조류 발생시 녹조제거 (사후관리)</li> <li>· 수심이 낮은 정체수역의 스크럼을 효율적으로 제거</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 태풍 등 기상악화시 운영 곤란</li> <li>· 비상 상황시 긴급 대처 곤란</li> <li>· 수거된 슬러지 처리 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 호소 바닥층 교란으로 수질 악영향/생태계 교란</li> <li>· 장비일체형으로 이동 어려움</li> <li>· 부상 슬러지 처리 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 농축 스크린의 폐색 발생</li> <li>· 장비일체형으로 이동 어려움</li> <li>· 농축슬러지 처리 필요</li> </ul>

## 제2절 융복합 수처리 시스템의 경제적 우위성 평가

### 1. 저수지 유입수 오염물질 저감 기술

본 연구에서 개발된 생태융합형 접촉산화시스템과 바이오스톤 접촉산화시스템을 기존 농업용수 수질개선사업의 유입수 대책으로 활용되던 인공습지와 1990년대 오염하천 정화사업에 널리 이용되던 끈상 접촉산화공법 및 혼합여재 접촉산화공법과 대략적인 사업비와 연간유지관리비를 산정하여 (표 6-7)에 나타내었다. 농업용수 수질개선사업 기본조사 결과 홍양지구 인공습지 조성의 시설비용은 대상 저수지의 단위 저수량 당 40,942원/ $m^3/day$ , 소요부지면적은 1.66  $m^2/(m^3/day)$ 로 산정되었으며, 인공습지 조성을 위한 토지구입에 소모되는 비용이 상당히 클 것으로 판단되나 본 시설에서는 토지구입비용은 제외되었다. 본 연구에서 개발된 바이오스톤 불 접촉산화공법의 대략적인 시설 설치비용은 단위 유입수량 당 200,000원/ $m^3/day$ , 소요 부지면적은 0.05~0.07 $m^2/(m^3/day)$ 이며, 인공습지 대비 시설 설치비용이 크지만, 소요 부지면적이 약 30~50배 적게 소요된다. 따라서 토지구입 비용이 비싼 도시유역의 저수지에 유입수 개선대책으로 인공습지를 조성할 경우 큰 비용이 소요될 것으로 예상되므로 부지확보가 어려운 지역에서는 바이오스톤 접촉산화공법이 널리 활용될 것으로 기대된다.

본 연구에서 현장실증시설을 설치하여 운영하고 있는 생태융합형 접촉산화공법 및 바이오스톤 접촉산화공법과 유사한 끈상 접촉산화공법, 혼합여재 접촉산화 공법의 경제성에 대해 대략적인 분석을 수행하였으며, 그 결과를 (표 6-8)에 나타내었다. 분석결과 본 연구에서 개발된 바이오스톤 접촉산화기술은 기존 기술과 비교하여 시설비 및 유지관리비가 기존 처리공법들의 평균치의 78.4%, 27.5%로 충분한 경제성이 있는 것으로 나타났으며, 20년 운영시에는 기존 공법 대비 73.2%로 나타났다.

또한, 생태융합형 접촉산화공법은 유지관리비 측면에서 A사의 끈상 접촉 산화수로부터 약 1.4% 많은 비용이 소모되지만, 시설 설치비가 비교 대상 공법 평균치의 86.3%로 나타났고, 20년 운영을 기준하였을 때는 비용이 87.4%로 유사한 기술 대비 경제성 있는 것으로 평가되었다.

(표 6-7) 유입수 오염저감 시설별 사업비 분석

구분	인공습지	바이오스톤 불 접촉산화공법	생태융합형 접촉수로	근상접촉산화공법	혼합여재 접촉산화공법
공사비	토목	30,000원/m <sup>2</sup> /day	75,000원/m <sup>2</sup> /day	130,000원/m <sup>2</sup> /day	155,000원/m <sup>2</sup> /day
	건축	15,000원/m <sup>2</sup> /day	20,000원/m <sup>2</sup> /day	20,000원/m <sup>2</sup> /day	20,000원/m <sup>2</sup> /day
	기계/배관	40,000원/m <sup>2</sup> /day	32,000원/m <sup>2</sup> /day	42,000원/m <sup>2</sup> /day	30,000원/m <sup>2</sup> /day
	재료	100,000원/m <sup>2</sup> /day	68,000원/m <sup>2</sup> /day	78,000원/m <sup>2</sup> /day	65,000원/m <sup>2</sup> /day
	전기/제어	15,000원/m <sup>2</sup> /day	25,000원/m <sup>2</sup> /day	30,000원/m <sup>2</sup> /day	30,000원/m <sup>2</sup> /day
	합계	200,000원/m <sup>2</sup> /day	220,000원/m <sup>2</sup> /day	300,000원/m <sup>2</sup> /day	300,000원/m <sup>2</sup> /day
	여재교체	-	-	-	1,200원/m <sup>2</sup> /day
	동력사용	취수시설 운영시 동력 필요	300원/m <sup>2</sup> /day	500원/m <sup>2</sup> /day	900원/m <sup>2</sup> /day
	식생관리		-	20원/m <sup>2</sup> /day	-
	운전개		100원/m <sup>2</sup> /day	200원/m <sup>2</sup> /day	500원/m <sup>2</sup> /day
연간유지관리비	슬러지처리	주기적 퇴적오니 준설(5년 1회)	하수 연계처리(년1회)	하수 연계처리(월1회)	하수 연계처리(월1회)
			하수 연계처리(월1회)	하수 연계처리(월1회)	500원/m <sup>2</sup> /day

(표 6-8) 수처리공법별 경제성 평가

(단위 : 원/m<sup>3</sup>/day)

구분	끈상접촉산화수로	혼합여재접촉산화	생태융합형접촉산화	바이오스톤블접촉산화조	비고
시설비	300,000	300,000	220,000	200,000	평균 : 255,000
시설비 비율(%)	117.6	117.6	86.3	78.4	
유지관리비 (연간)	1,400	2,600	1,420	400	평균 : 1,455
유지관리비 비율(%)	96.2	178.7	97.6	27.5	
20년 운영시 유지관리비	28,000	52,000	28,400	8,000	
20년 운영시 합계	328,000	352,000	248,400	208,000	평균 : 284,100
20년 운영시 비율(%)	115.5	123.9	87.4	73.2	

※ 20년 운영시 유지관리비는 할인율 및 수선비를 고려하지 않음

## 2. 무인항법 이동식 수질정화선

농업용 저수지 호내 수질관리를 위한 무인항법 이동 수질정화선과 유사한 기술인 환경부 가압부상식 조류제거선, 한국수자원공사 조류제거선에 대한 사업비 분석 결과를 (표 6-9)에 나타내었다. 각 기술별로 처리하는 대상과 구성하는 요소기술이 달라 상세하게 경제성을 평가하기는 어렵다. 본 연구의 성과물인 무인항법 이동식 수질정화선은 무인 운전에 따라 전문 운영자 인건비 절감 등으로 타 기술대비 운영비용이 적게 소요되는 것으로 분석되었다.

(표 6-9) 무인항법 이동식 수질정화선과 유사기술의 사업비 분석

구분	무인항법 이동식 수질정화선	독조제거선 (충남본부/2012년 제작)	조류제거선 (환경공단/2012년 제작)	조류 수거선 (수자원공사/2015년 제작)	
내구연한	20~30년	30년	30년	30년	
비용	제작비	400 백만원	300 백만원	400 백만원	116 백만원
	관리비	10백만원/년	70~100백만원/년	20백만원/년	5.8백만원/년



(표 6-10) 무인항법 이동식 수질정화선의 제작비용 세부내역

항목	규격	수량	단가	금액	내구년수	비고	
5	Main Controller(4CPU, 5코어),HP DL150Server	1				PCB(MCU 펌웨어) Web 프로그램 안드로이드 APP.	
	. DGPS(Differential Global Positioning System)	2					
	. 접안 유도장치 8T(50m에서 선박유도)	3	50,000,000	50,000,000	10년		
	. 외부장치(수질장치) 전원제어	2					
	. LED 경광등(적, 황)	2					
	. 경보기(사이렌, 부저)	2					
	. 도킹 전자석(100kg) 및 접촉식 텐션콘센트	1					
	DC12V, 100A 젤배터리 및 케이블(DC12V,3KA)	30	300,000	9,000,000	5년		5년마다교체(소모품)
	인버터 6KW(DC24V to AC220V)	2	1,000,000	2,000,000	10년		수질장치전원용
	전자접촉기2KW마드네트	4	500,000	2,000,000	10년		인버터 제어
	방수 방열 분전함(DC 500A(In)*75A(Out)*6EA)	2	2,000,000	4,000,000	10년		
	고주파 고속충전기(AC220V to DC24V, 500A)	1	10,000,000	10,000,000	10년		
	다목적 수질센서	1	10,000,000	10,000,000	10년		디지털 통신용
	전방장애물감지용 레이더	1	15,000,000	15,000,000	10년		디지털 통신용
	전자(용량계, 강수계, 수심계)	3	2,000,000	6,000,000	10년		디지털 통신용
평형수 계측.제어	6	1,000,000	6,000,000	10년	선박무게중심제어		
방수 배터리 및 컨트롤러 합체	2	1,500,000	3,000,000	10년			
소 계				117,000,000			
엔진	24~48V BLDC Mortor, Driver 및 감속기(3:1)	2	5,000,000	10,000,000	10년	4.3마력 2대	
	모터합체(알루미늄, 통풍장치 포함)	2	2,000,000	4,000,000	10년	모터류외고 2,000KPFW	
	바다, 방수(원형, 절체, 50Φ)	2	4,000,000	8,000,000	10년		
	헬리컬 기어(1:1, 2:1)	4	500,000	2,000,000	10년	상단, 하단	
	동력 원축(10Φ), 포인트	4	500,000	2,000,000	10년		
	알루미늄 스크류(직경 11" * Pitch 14)	2	600,000	1,200,000	10년		
	절판 고정판, 방진(600mm* 600mm *20mm)	5	2,000,000	10,000,000	10년	선박예고정, 높이조절	
	V벨트(A25) 및 알루미늄 풀리(5")	4	200,000	800,000	10년		
	소 계				38,000,000		
선박	FRP부유체(2,000mm*600mm*600mm), 라운드	6	5,000,000	30,000,000	20년	Polynt도장포함	
	사각알루미늄파이프 (3,000mm*100mm*4mm)	20	150,000	3,000,000	20년	크기 : 6m * 3m	
	상판 FRP 판넬(3,000mm*200mm*50mm)	20	100,000	2,000,000	20년	용량 10톤	
	알루미늄 가이드 각파이프 사각 라운드	4	1,000,000	4,000,000	20년		
	접안전자석 및 설비(컨트롤러포함)	2	1,500,000	3,000,000	20년		
	텐션 충전풀러그(해바라기)	2	600,000	1,200,000	20년	충전용	
	부유체 고정핀	10	400,000	4,000,000	20년		
	접안충격방지 부유물(고무보빈)	20	100,000	2,000,000	20년		
	평형수 모터 장치 및 센서	6	1,000,000	6,000,000	20년		
	소 계				55,200,000		
접안설비	FRP 부유체(500mm*500mm*500mm)	60	400,000	24,000,000	20년	크기 : 8m * 4m	
	상판 FRP 판넬(2,000mm*200mm*100mm)	60	150,000	9,000,000	20년	용량 20톤	
	텐션 충전풀러그, 방수분전함	2	2,000,000	4,000,000	20년		
	스텐식사슬(6m*9mm), 비너	4	1,000,000	4,000,000	20년		
	방수 전원케이블 100sq	1	2,000,000	2,000,000	20년		
	수중 앵커	4	500,000	2,000,000	20년		
	고정식사슬 텐션추(철 10Kg)	4	500,000	2,000,000	20년		
	부유체 고정핀	100	30,000	3,000,000	20년		
소 계				50,000,000			
발전설비	솔라 집전판(300W)	40	500,000	20,000,000	10년	DC12V,4KA용량 충전,	
	충전컨트롤러	4	750,000	3,000,000	10년	1일 3.5시간 발전시,	
	DC12V, 100A 젤배터리 및 케이블(DC12V,4KA)	40	250,000	10,000,000	5년	예비전력 500A	
	방수 배터리 합체	4	1,000,000	4,000,000	10년		
	방수 분전함(브레이커, 암페어계기)	1	2,000,000	2,000,000	10년		
	설치용 알루미늄 빔	100	10,000	1,000,000	10년		
	소 계				40,000,000		
수처리시설	오염물질 처리장치	1	50,000,000	50,000,000			
	산소발생장치	2	20,000,000	40,000,000			
	미생물 살포기	1	10,000,000	10,000,000			
				100,000,000			
합 계(부가세포함, 제작/설치 비용포함)				400,000,000			

(표 6-11) 무인항법 이동식 수질정화선의 운영비 추정

세 부 내 용	비용(월)
예방정비(엔진 발란스 튜닝, 그리스 주유, 베어링 및 기어 케이블 등 마모부품교체, 접안설비 보수 등)	400,000
프로그램기능지능화, 기능개선 및 기능추가(펌웨어, 웹, 앱), 수질지도, 운항기록 관리, 제어를 위한 서버호스팅 비용	400,000
태양광 발전 효율 유지를 위한 솔라 집전판 청소	150,000
WiFi요금(서버와의 통신, 제어를 위한 통신요금 납부)	50,000
긴급복구 응급 콜(고장 . 장애수리 등 비용)	500,000
수처리장치 약품비	500,000
<b>총 액</b>	<b>2,000천원/월</b>

(표 6-12) 무인항법 이동식 수질정화선의 연간 유지관리비 추정

세 부 내 용	비용(년)
장애를 대비한 예비부품 보유 비용 (설치장비의 10% 보유)	3,000,000원
정기적 배터리 교체(소모품)	3,000,000원
선박본체 도장(미관보완 및 부유체 방수효율 유지)	1,000,000원
수처리 장치 촉매단자모듈 교체비	3,000,000원
<b>총 액</b>	<b>10,000천원/년</b>

## 제7장

### 농업용수 융복합 수처리기술의 현장적용 및 실용화 방안

---

제1절 융복합 수처리기술의 타 지구 확대 적용

제2절 바이오스톤 접촉산화시스템 현장적용

제3절 무인항법 이동식 수질정화시스템 현장적용



## 제7장 융복합 수처리기술 현장적용 및 실용화 방안

### 제1절 융복합 수처리기술의 타 지구 확대 적용

#### 1. 물질수지 해석모델 개발

##### 가. 물질수지 해석

본 연구에서 개발된 융복합 수처리 시스템을 다른 저수지에 확대 적용하기 위하여 물질수지를 이용한 규모산정 모델을 개발하였다. 즉, 저수지 지구 특성 요인(수질상태, 저수지 용량, 유입수 수질, 유역면적, 강우 일수 등)을 입력하면 저수지 수질목표 달성을 위해서 처리해야 할 적정 규모(수량)가 산정될 수 있도록 엑셀을 이용하여 개발하였다.

매화저수지를 대상으로 하여 각 융복합 수처리시스템의 수질개선효과 평가를 위해 (식 1)과 같은 물질수지식을 개발하여 물수지 및 COD, T-N, T-P 항목에 대한 해석을 수행하였다. 입력 자료는 3차원 수리-수질모델을 이용하여 각 융복합 수처리시스템 설치에 따른 저수지 수질개선 효과분석을 위해 적용하였던 수처리 시스템별 수질정화효율 자료와 동일하게 적용하였다. 2013년도 수문사상의 일별 유입·유출량 및 저수위 변화를 동일하게 재현하였으며, 수위변화에 따른 저수지 수면적 변화를 고려하여 내부부하를 계산하였다. 내부부하는 4월~8월까지 총 5개월간 발생이 있다고 가정하여 2015년도에 수행한 실내 용출실험 결과를 적용하였으며, 수질항목별 용출 부하량은 COD 200 mg/m<sup>2</sup>, T-N 30.4 mg/m<sup>2</sup>, T-P 3.1 mg/m<sup>2</sup> 으로 산출되었다.

$$\frac{\Delta \bar{c} \Delta V_r}{\Delta t} = Q_{In} \cdot C_{In} + S_r - \kappa V_r C_r - Q_{out} \cdot C_r \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $V_r$  = 저수지 체적,  $Q_{In}$  = 유입유량,  $C_{In}$  = 유입수 수질,

$S_r$  = 내부 부하,  $C_r$  = 호내 수질,  $Q_{out}$  = 유출량

나. 매화저수지 월별 유입·유출량 산정

매화저수지 월별 유입 및 유출량을 산정하기 위하여 2006년도부터 2015년도까지 최근 10년간의 강우량 및 매화저수지 유입량을 비교하여 (표 7-1)에 나타내었다. 최근 10년 연평균 강우량은 1,188mm, 연평균 유입량은 4,074,961 m<sup>3</sup>/year로 나타났다. 매화저수지 월별 유입·유출량은 2차년도에 구축하였던 수리-수문모델 HEC-HMS를 이용하여 해석한 2013년도 유출모의 결과를 활용하였다. 월별 유입 및 유출 유량에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 (표 7-2)에 나타내었다. 유출 모의에서 강우량이 5,000 m<sup>3</sup>/d를 초과한 경우에는 강우 유입으로 가정하였고, 유입 하천별로 평시와 강우시로 나누어 월별 총유입량을 산출하였다. 강우기인 7~9월의 유입량이 연간 전체 유입량의 60%를 차지하였으며, 평시의 유입량은 연간 전체유입량의 약 21% 정도로 산정되었다. 또한 호 내 유입량의 약 70%는 유입하천-2를 통해 유입하는 것으로 나타났다.

(표 7-1) 연도별 유입유량 분석(2006~2015)

연도	연강우량 (mm)	강우유입 (m <sup>3</sup> /year)	평시유입 (m <sup>3</sup> /year)	총유입량 (m <sup>3</sup> /year)	평시/총유입 (%)
2006	1093.0	2,871,331.2	895,363.2	3,766,694.4	24
2007	1017.5	2,785,708.8	876,960.0	3,662,668.8	24
2008	822.5	2,271,801.6	886,723.2	3,158,524.8	28
2009	1298.0	3,474,921.6	915,321.6	4,390,243.2	21
2010	1292.5	3,571,430.4	806,976.0	4,378,406.4	18
2011	1953.5	5,243,011.2	852,422.4	6,095,433.6	14
2012	1721.0	4,659,724.8	835,056.0	5,494,780.8	15
2013	1259.0	3,205,470.0	863,364.0	4,068,838.0	21
2014	740.5	2,013,120.0	928,627.2	2,941,747.2	32
2015	682.5	1,854,835.2	937,440.0	2,792,275.2	34
평균	1,188.00	3,195,135.48	879,825.36	4,074,961.24	23.1

(표 7-2) 매화저수지 월별 유입량 및 유출량

구분	유입량(m <sup>3</sup> /d)				유출량 (m <sup>3</sup> /d)
	유입-1		유입-2		
	평시	강우시	평시	강우시	
1	36,196	6,763	67,386	15,922	47,082
2	20,909	46,051	46,310	113,789	232,935
3	23,933	25,229	53,050	59,789	163,165
4	18,230	47,088	40,781	110,074	216,173
5	21,299	108,407	44,973	247,684	438,314
6	26,310	31,450	54,390	72,835	170,195
7	11,750	368,770	26,525	845,698	1,250,417
8	24,526	101,434	53,989	235,267	415,216
9	16,416	167,357	36,115	389,491	607,039
10	25,229	7,258	55,642	16,848	106,148
11	21,341	39,744	47,347	91,757	203,684
12	28,080	17,107	62,640	39,658	147,485
합계	274,218	966,658	589,146	2,238,812	3,997,853

## 2. 매화저수지 유입 오염부하량 산정

매화저수지의 오염물질에 대한 물질수지 해석을 위해 매화저수지 유입 오염부하량을 산정하였다. 유입하천의 수질은 2015~2016년도의 조사 자료를 바탕으로 평시 및 강우시의 평균 유입수질을 가정하여 (표 7-3)과 같이 입력하였다. 수질항목별 월별 오염부하량은 월별 유입수량에 유입 오염부하량을 곱하여 산정하였고, 오염부하량은 유입수질에 유량을 곱하여 산출하였다. COD, T-N, T-P 항목에 대해 월별 유입·유출 및 내부 부하량을 산정하여 (표 7-4)~(표 7-6)에 나타내었다. COD의 총 유입부하는 34,852.7 kg/year, 총 유출부하는 35,623.4 kg/year로 산정되었으며, 내부부하는 4,040 kg/year로 총부하량의 약 11.6%로 평가되었다. TN의 총 유입부하는 25,975 kg/year, 내부부하는 1,979 kg/year로 총부하량의 약 7.1%로 평가되었다. TP의 총 유입부하는 1,768.7 kg/year로 산정되었으며, 유출부하는 842.4 kg/year로 총 부하량의 약 32.2%로 평가되었다.

(표 7-3) 매화저수지의 평시 및 강우시의 평균 유입수질

구 분		유입수질 (mg/L)		
		COD	TN	TP
유입-1	평시	9.6	7.12	0.68
	강우시	11.5	5.41	0.43
유입-2	평시	7.7	7.35	0.46
	강우시	7.4	6.46	0.40

(표 7-4) 매화저수지의 월별 COD 유입부하

월	외부부하(kg/month)				합계	유출부하 (kg/month)	내부부하 (kg/month)
	유입-1		유입-2				
	평시	강우시	평시	강우시			
1	347.5	518.9	77.8	117.8	1,062.0	560.5	-
2	200.7	356.6	529.6	842.0	1,928.9	2,640.6	-
3	229.8	408.5	290.1	442.4	1,370.8	1,523.8	-
4	175.0	314.0	541.5	814.5	1,845.1	1,896.8	818
5	204.5	346.3	1,246.7	1,832.9	3,630.3	3,821.4	792
6	252.6	418.8	361.7	539.0	1,572.0	1,433.5	764.2
7	112.8	204.2	4,240.9	6,258.2	10,816.1	11,048.5	831.7
8	235.5	415.7	1,166.5	1,741.0	3,558.6	3,494.5	834.1
9	157.6	278.1	1,924.6	2,882.2	5,242.5	5,351.2	-
10	242.2	428.4	83.5	124.7	878.8	898.7	-
11	204.9	364.6	457.1	679.0	1,705.5	1,715.2	-
12	269.6	482.3	196.7	293.5	1,242.1	1,238.7	-
합계	2,631.7	4,536.4	11,114.7	16,567.2	34,852.7	35,623.4	4,040



(표 7-5) 매화저수지의 월별 TN 유입부하

월	외부부하(kg/month)				합계	유출부하 (kg/month)	내부부하 (kg/month)
	유입-1		유입-2				
	평시	강우시	평시	강우시			
1	257.7	495.3	36.6	102.9	892.4	204.4	-
2	148.9	340.4	249.1	735.1	1,473.5	903.2	-
3	170.4	389.9	136.5	386.2	1,083.0	431.6	-
4	129.8	299.7	254.7	711.1	1,395.4	582.7	818
5	151.7	330.6	586.5	1,600.0	2,668.7	1,680.5	792
6	187.3	399.8	170.1	470.5	1,227.7	608.2	116
7	83.7	195.0	1,995.0	5,463.2	7,736.9	6,388.3	126
8	174.6	396.8	548.8	1,519.8	2,640.0	1,652.5	127
9	116.9	265.4	905.4	2,516.1	3,803.8	2,802.5	-
10	179.6	409.0	39.3	108.8	736.7	330.9	-
11	151.9	348.0	215.0	592.7	1,307.7	533.6	-
12	199.9	460.4	92.5	256.2	1,009.1	409.0	-
합계	1,951.4	4,330.3	5,227.5	14,462.6	25,974.9	16,527.4	1,979

(표 7-6) 매화저수지의 월별 TP 유입부하

월	외부부하(kg/month)				합계	유출부하 (kg/month)	내부부하 (kg/month)
	유입-1		유입-2				
	평시	강우시	평시	강우시			
1	24.6	31.0	2.9	6.4	64.9	11.4	-
2	14.2	21.3	19.8	45.5	100.8	50.9	-
3	16.3	24.4	10.8	23.9	75.4	23.8	-
4	12.4	18.8	20.2	44.0	95.4	32.7	818
5	14.5	20.7	46.6	99.1	180.9	100.2	792
6	17.9	25.0	13.5	29.1	85.6	35.1	11.8
7	8.0	12.2	158.6	338.3	517.0	401.2	12.9
8	16.7	24.8	43.6	94.1	179.2	97.1	12.9
9	11.2	16.6	72.0	155.8	255.5	171.5	-
10	17.2	25.6	3.1	6.7	52.6	18.2	-
11	14.5	21.8	17.1	36.7	90.1	29.8	-
12	19.1	28.8	7.4	15.9	71.1	23.1	-
합계	185.6	271	413.6	895.5	1,768.5	995	1,647.6

### 3. 수처리시스템 시설규모에 따른 수처리 용량

유입수 대책으로 수처리시설을 설치하였을 때 시설용량에 따라 처리되는 수량이 달라지고 이에 따라 저수지의 수질에도 영향을 줄 수 있다. 생태융합형 접촉산화 및 바이오스톤 접촉산화시스템의 각 유입 하천별 시설용량 변화에 따른 유입량 처리 비율을 (표 7-7)에 나타내었다. 시설용량 범위는 유입지류1(S1)는 400~2,000 m<sup>3</sup>/day, 유입지류2(S2)는 500~5,000 m<sup>3</sup>/day로 적용하여 검토하였다. S1에는 2,000 m<sup>3</sup>/day, S2에는 5,000 m<sup>3</sup>/day의 처리용량의 시설을 적용하면 전체 유입수량의 37.8%까지 처리가 가능한 것으로 나타났다.

(표 7-7) 생태융합형/바이오스톤 접촉산화시스템의 유입하천별 시설용량에 따른 유입량 처리 비율

구분		S1(m <sup>3</sup> /d)				
		400	800	1,200	1,600	2,000
S2 (m <sup>3</sup> /d)	500	8.1%	11.7%	13.5%	14.7%	15.8%
	1,000	12.6%	16.1%	18.0%	19.2%	20.3%
	1,500	17.0%	20.6%	22.5%	23.7%	24.8%
	2,000	21.1%	24.6%	26.5%	27.7%	28.8%
	2,500	22.9%	26.5%	28.4%	29.6%	30.7%
	3,000	24.6%	28.2%	30.0%	31.3%	32.4%
	3,500	26.1%	29.7%	31.5%	32.8%	33.9%
	4,000	27.5%	31.1%	32.9%	34.1%	35.2%
	4,500	28.8%	32.4%	34.2%	35.4%	36.5%
5,000	30.0%	33.6%	35.4%	36.7%	37.8%	

### 4. 수처리 시스템별 처리용량에 따른 호내 수질변화

#### 가. 생태융합형 접촉산화시스템

생태융합접촉산화조의 수처리 용량 및 COD 처리효율에 따른 매화저수지 연평균 수질변화를 (표 7-8)~(표 7-10)에 나타내었다. 수처리 용량은 유입하천별로 S1 400~1,600m<sup>3</sup>/d, S2 500~3,500m<sup>3</sup>/d의 용량에 대해 검토하였고, COD 처리효율은 46.0%, 60%, 80% 경우에 대해 물질수지 해석을 통해 산정하였다. 생태융합형 접촉산화조 적용 전 호내 연평균 COD 농도는 8.82mg/L이며, 목표수질인 IV등급의 COD는 8mg/L 이하이다. 현재

COD 저감 효율인 46%에서는 S1 800m<sup>3</sup>/d, S2 1,000m<sup>3</sup>/d 이상의 시설용량 적용 시에 목표수질을 만족하는 것으로 나타났다.

(표 7-8) 생태융합접촉산화조의 처리용량에 따른 호내 평균 COD농도(처리효율 46.0%)

구분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		400	800	1,200	1,600
S2 (m <sup>3</sup> /d)	500	8.34	8.12	8.02	7.96
	1,000	8.11	7.88	7.78	7.73
	1,500	7.87	7.64	7.54	7.49
	2,000	7.66	7.43	7.34	7.28
	2,500	7.58	7.35	7.25	7.2
	3,000	7.51	7.28	7.18	7.13
	3,500	7.45	7.22	7.13	7.07

(표 7-9) 생태융합접촉산화조의 처리용량에 따른 호내 평균 COD농도(처리효율 60%)

구분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		400	800	1,200	1,600
S2 (m <sup>3</sup> /d)	500	8.2	7.91	7.78	7.71
	1,000	7.89	7.6	7.47	7.4
	1,500	7.58	7.29	7.16	7.09
	2,000	7.31	7.02	6.89	6.82
	2,500	7.21	6.91	6.78	6.71
	3,000	7.11	6.82	6.69	6.62
	3,500	7.04	6.74	6.61	6.54

(표 7-10) 생태융합접촉산화조의 수처리용량에 따른 호내 평균 COD농도(처리효율 80%)

구분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		400	800	1,200	1,600
S2 (m <sup>3</sup> /d)	500	8	7.61	7.44	7.34
	1,000	7.59	7.2	7.02	6.93
	1,500	7.18	6.78	6.61	6.52
	2,000	6.81	6.42	6.25	6.15
	2,500	6.67	6.28	6.11	6.01
	3,000	6.55	6.16	5.99	5.89
	3,500	6.45	6.06	5.88	5.79

생태융합접촉산화조의 수처리 용량 및 T-P 처리효율에 따른 매화저수지 연평균 TP 농도변화를 (표 7-11)~(표 7-13)에 나타내었다. 수처리 용량은 유입하천별로 S1 500~2,000m<sup>3</sup>/d, S2 1,000~4,000m<sup>3</sup>/d의 용량에 대해 검토하였다. TP 저감효율은 46.1%, 70%, 90% 저감되는 경우에 대해 물질수지 해석을 통해 산정하였다. 생태융합형 접촉산화조 적용 전 호내 연평균 TP농도는 0.20mg/L이며, 농업용수 사용이 가능한 호소 수질기준 IV등급의 TP 농도는 0.1mg/L 이하이다.

(표 7-11) 생태융합접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 평균 TP농도(처리효율 46.1%)

구 분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		500	1,000	1,500	2000
S2 (m <sup>3</sup> /d)	1,000	0.179	0.172	0.169	0.167
	2,000	0.167	0.160	0.157	0.155
	3,000	0.162	0.155	0.152	0.150
	4,000	0.158	0.151	0.148	0.146

(표 7-12) 생태융합접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 평균 TP농도(처리효율 70%)

구 분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		500	1,000	1,500	2000
S2 (m <sup>3</sup> /d)	1,000	0.173	0.165	0.161	0.159
	2,000	0.159	0.150	0.147	0.145
	3,000	0.154	0.145	0.142	0.139
	4,000	0.149	0.140	0.137	0.135

(표 7-13) 생태융합접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 평균 TP농도(처리효율 90%)

구 분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		500	1,000	1,500	2000
S2 (m <sup>3</sup> /d)	1,000	0.166	0.154	0.152	0.148
	2,000	0.147	0.136	0.132	0.129
	3,000	0.140	0.129	0.125	0.125
	4,000	0.135	0.123	0.120	0.117

나. 바이오스톤 접촉산화시스템

바이오스톤 접촉산화조의 수처리 용량 및 COD 처리효율에 따른 매화저수지 연평균 수질변화를 (표 7-14)에 나타내었다. 수처리 용량은 유입하천별로 S1 400~1,600m<sup>3</sup>/d, S2 500~3,500m<sup>3</sup>/d의 용량에 대해 검토하였으며, COD의 처리효율은 45.3%가 저감되는 경우에 대해 물질수지 해석을 통해 산정하였다. 바이오스톤 접촉산화조를 적용하기 전의 호내 연평균 COD농도는 8.82mg/L이며, 목표수질인 호소 수질환경기준 IV등급의 COD는 8mg/L 이하이다. 현재 COD 정화효율인 46%를 적용하면 S1 800m<sup>3</sup>/d, S2 1,000m<sup>3</sup>/d 이상의 시설용량을 적용하면 목표수질을 만족하는 것으로 나타났다.

바이오스톤 접촉산화조의 수처리 용량 및 T-P 처리효율에 따른 매화저수지 연평균 수질변화를 (표 7-15)에 나타내었다. T-P 정화효율은 45.2%를 적용하여 물질수지 해석을 통해 호내 평균 T-P 농도를 산정하였다.

(표 7-14) 바이오스톤접촉산화조의 처리용량에 따른 호내 평균 COD농도(처리효율 45.3%)

구 분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		400	800	1,200	1,600
S2 (m <sup>3</sup> /d)	500	8.35	8.13	8.03	7.98
	1,000	8.12	7.89	7.8	7.74
	1,500	7.88	7.66	7.56	7.51
	2,000	7.68	7.46	7.36	7.3
	2,500	7.6	7.38	7.28	7.22
	3,000	7.53	7.31	7.21	7.15
	3,500	7.47	7.25	7.15	7.1

(표 7-15) 바이오스톤 접촉산화조 수처리용량에 따른 호내 평균 TP농도(처리효율 45.2%)

구 분		S1(m <sup>3</sup> /d)			
		500	1,000	1,500	2000
S2 (m <sup>3</sup> /d)	1,000	0.183	0.177	0.175	0.174
	2,000	0.173	0.168	0.166	0.164
	3,000	0.170	0.164	0.162	0.161
	4,000	0.167	0.161	0.159	0.158

### 5. 융복합 수처리 시스템 확대 적용을 위한 물질수지 해석 모델 적용

개발된 물질수지식(식1)을 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 간소화하여 개발된 융복합 수처리기술을 다른 저수지에 확대 적용할 수 있도록 모델을 개발하였다(그림 7-1). 개발된 모델은 저수지 체적 및 유입유량, 유입수질에 따라 간략하게 수처리 시설용량을 산정할 수 있으며, 입력 변수로는 수체 저수용량(m<sup>3</sup>), 평균저수율(%), 유역면적(ha), 강우시/평시 유입수질(mg/L), 강우 일수, 수처리 시설의 수질항목별 수질정화효율 등이다.

간소화시킨 물질수지 해석 모델을 활용하여 유입수질, 수량, 저수지 규모에 따라 COD 4등급 목표수질인 8mg/L 이하를 만족할 수 있는 시설별 적정 규모를 산정하였다. 각 시설별로 1차 반응을 고려할 경우와 고려하지 않는 경우로 나누어 산정하였으며, 그 결과를 (표 7-16)~(표 7-19)에 나타내었다. 1차 반응을 고려한 경우에는 매화저수지와 같이 조류성장 등호 내 생산에 의해 내부유기물이 생성되는 경우를 가정하였다. 1차 반응을 고려하지 않은 경우는 유기물의 내부부하가 적은 저수지에 해당한다.

저수지 제원	단위	값	강우시	평상시
저수용량	m <sup>3</sup>	50,000		
평균저수율	%	100		
연평균 저수량 (V)	m <sup>3</sup>	50,000		
유역면적 (A)	ha	52		
연간 유입량 (Q)	m <sup>3</sup> /yr	813,800	610,350	203,450
연간 유출량 (Q)	m <sup>3</sup> /yr	813,800		

저수지 수질	단위	연평균	강우시	평상시
COD	mg/L	9.0		

유입수 수질	단위	연평균	강우시	평상시
COD	mg/L	9.0	9.00	9.00

처리 유량	단위	강우시	평상시
유입하천 1	m <sup>3</sup> /d	760	760
강우시 처리일수	일	95	270

수처리시설 효율	단위	강우시	평상시
COD	%	47	47

정상상태 모델	반응속도 (k, /yr)	농도(mg/L)
삭감전	-0.9	9.53
삭감후(목표수질)		8.00
효율		16.02

모듈	개수	시설용량(m <sup>3</sup> )
1000	0.7600	760.0000

◀그림 7-1▶ 간소화된 저수지 물질수지 해석모델

(표 7-16) 접촉산화조의 적정규모 산정결과 (1차반응 미고려)

저수지 체적 (천 m <sup>3</sup> )	유역 면적 (ha)	유입 유량 (천 m <sup>3</sup> )	유입수질(mg/L)						
			8.5	9	10	11	12	15	18
50	52	814	273	516	929	1,342	1,755	2,168	2,581
	65	1,017	342	645	1,161	1,677	2,193	2,710	3,226
	78	1,221	410	774	1,393	2,013	2,632	3,251	3,871
200	208	3,255	1,093	2,064	3,716	5,368	7,019	8,671	10,322
	260	4,069	1,366	2,581	4,645	6,709	8,774	10,838	12,903
	312	4,883	1,639	3,097	5,574	8,051	10,529	13,006	15,483
500	520	8,138	2,732	5,161	9,290	13,419	17,548	21,677	25,805
	650	10,173	3,415	6,451	11,612	16,774	21,935	27,096	32,257
	780	12,207	4,099	7,742	13,935	20,128	26,322	32,515	38,708
1,000	1,040	16,276	5,465	10,322	18,580	26,838	35,095	43,353	51,611
	1,300	20,345	6,831	12,903	23,225	33,547	43,869	54,191	64,514
	1,560	24,414	8,197	15,483	27,870	40,256	52,643	65,030	77,416

(표 7-17) 접촉산화조의 적정규모 산정결과 (1차반응 고려)

저수지 체적 (천 m <sup>3</sup> )	유역 면적 (ha)	유입 유량 (천 m <sup>3</sup> )	유입수질(mg/L)						
			8.5	9	10	11	12	15	18
50	52	814	516	746	1,136	1,455	1,721	2,305	2,695
	65	1,017	646	932	1,420	1,818	2,151	2,882	3,369
	78	1,221	775	1,118	1,703	2,182	2,580	3,459	4,043
200	208	3,255	2,064	2,984	4,544	5,820	6,884	9,220	10,780
	260	4,069	2,582	3,729	5,678	7,274	8,603	11,527	13,477
	312	4,883	3,100	4,474	6,813	8,727	10,322	13,835	16,174
500	520	8,138	5,160	7,460	11,360	14,550	17,210	23,050	26,950
	650	10,173	6,455	9,322	14,196	18,184	21,507	28,818	33,692
	780	12,207	7,750	11,184	17,032	21,818	25,804	34,586	40,434
1,000	1,040	16,276	10,320	14,920	22,720	29,100	34,420	46,100	53,900
	1,300	20,345	12,910	18,644	28,392	36,368	43,014	57,636	67,384
	1,560	24,414	15,501	22,369	34,065	43,636	51,609	69,173	80,869
호내 평형 COD농도 (mg/L)			9.0	9.53	10.59	11.65	12.71	15.88	19.06

(표 7-18) 바이오스톤조의 적정규모 산정결과 (1차반응 미고려)

저수지 체적 (천 m <sup>3</sup> )	유역 면적 (ha)	유입 유량 (천 m <sup>3</sup> )	유입수질(mg/L)						
			8.5	9	10	11	12	15	18
50	52	814	279	527	949	1,370	1,792	2,214	2,635
	65	1,017	349	659	1,186	1,713	2,240	2,767	3,294
	78	1,221	419	791	1,423	2,056	2,688	3,321	3,953
200	208	3,255	1,116	2,108	3,795	5,482	7,168	8,855	10,542
	260	4,069	1,395	2,635	4,744	6,852	8,961	11,069	13,177
	312	4,883	1,674	3,163	5,693	8,223	10,753	13,283	15,813
500	520	8,138	2,790	5,271	9,488	13,704	17,921	22,138	26,354
	650	10,173	3,488	6,589	11,860	17,130	22,401	27,672	32,943
	780	12,207	4,186	7,906	14,231	20,556	26,882	33,207	39,532
1,000	1,040	16,276	5,581	10,542	18,975	27,409	35,842	44,276	52,709
	1,300	20,345	6,976	13,177	23,719	34,261	44,803	55,344	65,886
	1,560	24,414	8,371	15,813	28,463	41,113	53,763	66,413	79,063

(표 7-19) 바이오스톤조의 적정규모 산정결과 (1차반응 고려)

저수지 체적 (천 m <sup>3</sup> )	유역 면적 (ha)	유입 유량 (천 m <sup>3</sup> )	유입수질(mg/L)						
			8.5	9	10	11	12	15	18
50	52	814	527	762	1,160	1,486	1,757	2,355	2,753
	65	1,017	659	952	1,450	1,857	2,196	2,943	3,441
	78	1,221	791	1,142	1,740	2,228	2,636	3,532	4,129
200	208	3,255	2,110	3,047	4,640	5,943	7,029	9,418	11,011
	260	4,069	2,637	3,808	5,799	7,428	8,786	11,773	13,764
	312	4,883	3,164	4,570	6,959	8,914	10,543	14,127	16,516
500	520	8,138	5,275	7,617	11,599	14,857	17,572	23,546	27,528
	650	10,173	6,593	9,521	14,498	18,571	21,965	29,431	34,409
	780	12,207	7,910	11,424	17,397	22,284	26,357	35,317	41,290
1,000	1,040	16,276	10,550	15,235	23,199	29,715	35,145	47,091	55,055
	1,300	20,345	13,185	19,041	28,997	37,142	43,930	58,863	68,818
	1,560	24,414	15,820	22,848	34,794	44,569	52,714	70,634	82,581
호내 평형 COD농도 (mg/L)			9.0	9.53	10.59	11.65	12.71	15.88	19.06

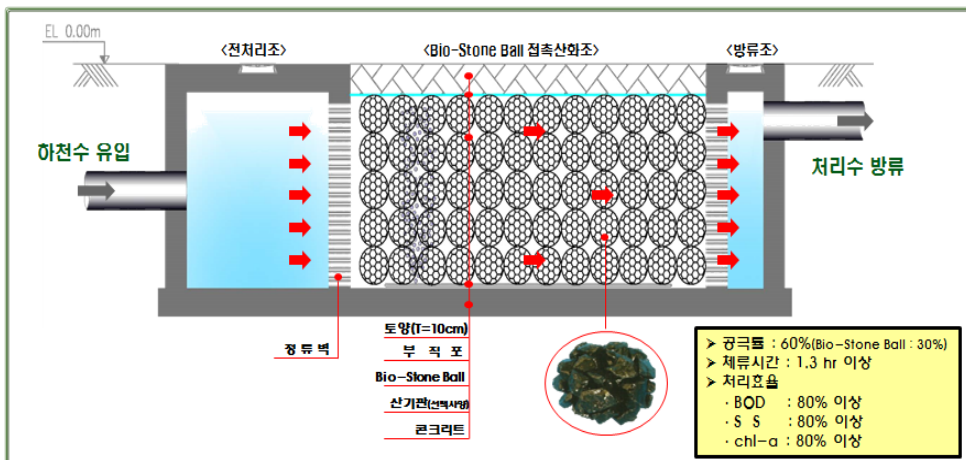


## 제2절 바이오스톤 접촉산화시스템 현장적용

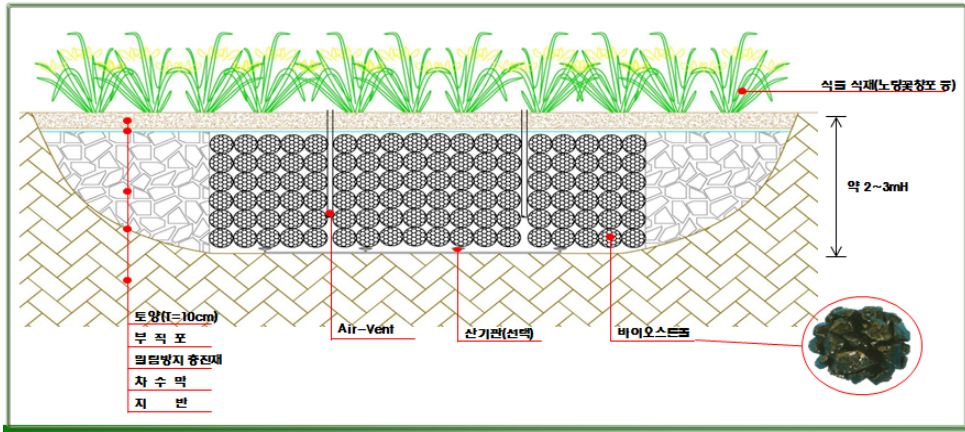
### 1. 현장적용 유형 및 분야

#### 가. 농업용 저수지 현장적용 유형

바이오스톤 접촉산화시스템은 농업용 저수지의 유입수, 저수지 물순환수, 저수지 방류수(관개용수, 하천유지용수) 수질정화, 저수지의 도수 및 양수의 수질정화 목적으로 활용할 수 있으며, 적용하고자 하는 대상지역에 따라 다양한 형태로 조성하여 운영할 수 있다. 토지(부지) 면적이 협소한 하천 둔치, 농업용 저수지 홍수터 등에는 <그림 7-2>과 같이 지하구조물 또는 지상구조물로 수로 형식으로 조성이 가능하며, 지상 구조물에는 상부에 식생 또는 조경 등을 선택적으로 적용할 수 있다. 또한, 유기물 농도가 높은 지역에서는 산소공급 장치를 선택적으로 사용하여 유기물 처리효율을 제고할 수 있다. 또한, 기존에 널리 이용되고 있는 인공습지와 조합하여 <그림 7-3>와 같이 지하흐름형 인공습지 형식으로도 조성이 가능하다. 바이오스톤 볼을 바닥에 충전하여 콘크리트 구조물이 없는 인공습지형태로 조성할 수도 있다. 현행 저수지 및 담수호 수질개선을 위한 유입수 수질개선시설로 널리 활용되고 있는 인공습지를 전면적으로 대체하여 활용할 수 있을 것으로 기대된다.



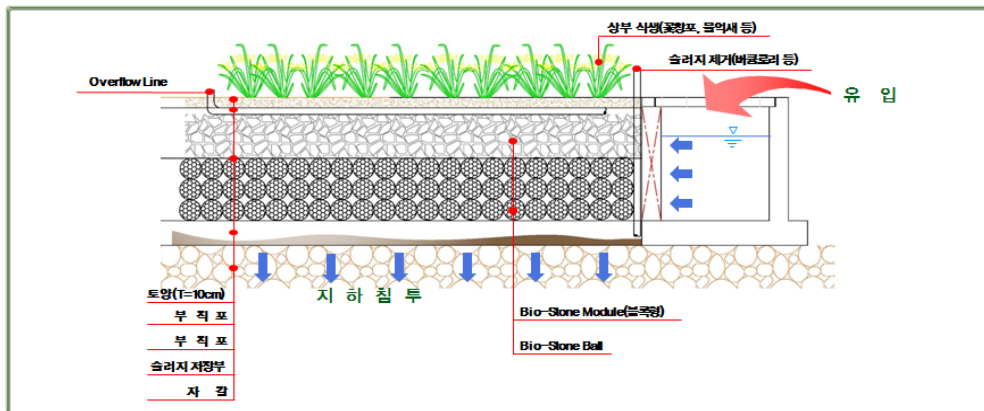
<그림 7-2> 바이오스톤 인공습지의 수로구조물 유형



<그림 7-3> 바이오스톤 접촉산화시스템의 인공습지 유형

나. 기술적용 분야

바이오스톤 접촉산화공법은 농업용 저수지 수질개선 목적 이외에도 다양한 분야에 활용이 가능하다. 환경부 생태하천복원사업(하천수 직접정화, 토구정화, 초기강우 등 비점오염처리), 국토교통부 고향의 강 조성사업, 호수공원 조성사업 적용, 마을하수처리, 빗물재이용, 공공하수 및 폐수 재이용시설 활용, 해양생태복원 및 수자원 증식(인공어초, 해중립 조성), 산지 토석류 방지(사방댐, 절개지 보호), 저수지 부댐(침강지) 조성, 하천 수리시설 보호(하상세굴방지, 호안조성, 콘크리트 보 대체), LID적용, 하천 생태서식처 및 피난처 조성(인공어소, 친환경어도) 등으로 적용 가능하다.



<그림 7-4> 초기강우 등 비점오염원 처리를 위한 적용 유형

다. 바이오스톤 볼 담체의 확대 적용방안

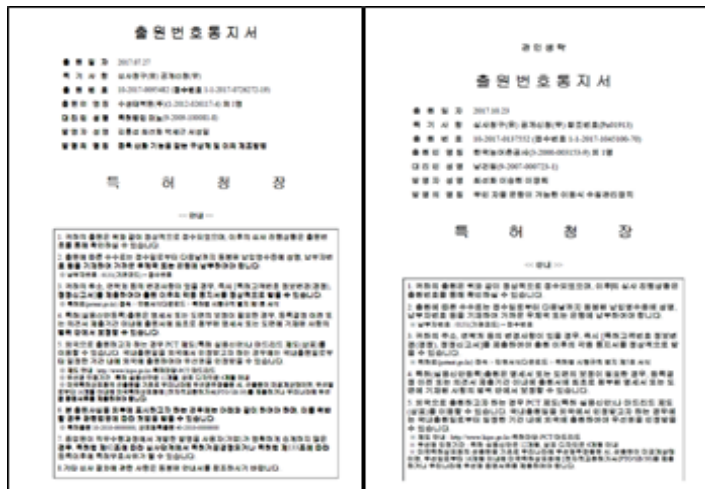
수처리용 담체로 개발된 바이오스톤 볼의 확대 적용방안으로는 <그림 7-5>와 같이 자연형 어도, 저수지 부댐(저수지) 조성, 산지 토석류 방지(사방댐, 절개지 보호), 호안보호공(저수지, 인공습지, 호안사면 등), 해안 침식 방지, 해양생태복원 및 수자원 증식(인공어초, 해중립조성), 세굴방지용 하단구조물(보하류부 하상), 인공어소 겸용 근고공(저수호안), 산지 토석류 방지(사방댐, 절개지 보호) 등으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

	
자연형 어도	부댐 조성
	
사방댐 조성	호안 보호공
	
해안침식 방지	해중립 조성

<그림 7-5> 바이오스톤 볼 담체의 확대 적용방안

## 2. 기술이전 및 기술보급 계획

농업용 저수지 유입수 수처리 기술인 생태융합형 접촉산화공법, 바이오스톤 접촉산화공법은 협동연구 참여기업(수생태복원(주), 지분율 50%)에게 전용실시권을 이전할 계획이며, 현재 지적재산권 취득현황은 특허 3건 등록, 특허출원 1건 완료, 농림식품신기술 인증 1건이 있다. 기술 적용사례로는 최근에 바이오스톤 볼 접촉산화공법이 광주 풍암저수지의 수질보전 대책사업 반영되어 진행 중에 있으며(처리용량 200 m<sup>3</sup>/d, 사업비 55백만원), 저수지의 물을 펌핑하여 바이오스톤 접촉산화시스템을 통해 처리하여 다시 저수지 상류로 순환하여 저수지 수질개선을 도모하는 방법이다.



<그림 7-6> 연구개발기술의 지적재산권(특허등록 등)

## 제3절 무인항법 이동식 수질정화시스템 현장적용

### 1. 현장적용 유형 및 분야

저수지 수질관리 및 수질개선을 대상으로 하고 있는 무인항법 이동식 수질정화시스템은 농업용 저수지뿐만 아니라 상수원 댐, 한국농어촌공사에서 관리하는 하구 담수호, 4대강 및 전국 대하천 등의 정체수역을 대상으로 하기 때문에 널리 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 2. 기술이전 및 기술보급 계획

저수지 수질관리 및 수질개선을 대상으로 하고 있는 무인항법 이동식 수질정화시스템은 현재 지식재산권 취득을 위해 특허 출원을 1건 완료하여 등록을 진행하고 있으며, 지식재산권을 취득 한 후에는 공동기술개발 협약기관인 두웰네트웍스(주)(지분율 50%)에 전용실시권을 이전할 계획이다. 환경부 등의 신기술 인증은 '18년 이후 시험사업 등을 통해 무인선박 선 등의 완제품 등이 제작되면 신청할 계획이다.

기술보급 계획은 무인항법 이동식 수질정화시스템에 대한 현장적용 매뉴얼을 보고서 부록 편에 게재하여 연구보고서 등을 관련 부처 및 본사 등에 배포할 계획이며, 대외적으로 학술대회, 전시회 등을 참가하여 널리 홍보할 계획이다.



# 제8장

## 연구결과 요약 및 결론







## 제8장 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 농업용 저수지의 특성에 적합한 저비용 고효율의 농업용수 수처리 기술을 개발하여 현장 적용성을 검토하는 것이 본 연구의 목적이다. 연구목적 달성을 위해 연구추진을 2014~2017년까지 연차별로 단계적으로 수행하였으며, 핵심 내용과 주요 결과를 요약 및 정리하였다.

### 8.1 농업용 저수지의 물리적 특성 및 수질오염 진단

#### 1) 농업용 저수지의 물리적 특성

- 국내에는 17,489개소(담수호 11개소 포함)의 농업용 저수지가 전국에 분포하고 있으며, 전체 수리담의 76.1%에 농업용수를 공급하고 있음
- 저수지의 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 차지하며, 1945년 이전에 설치되어 70년 이상 된 저수지가 전체의 약 52%이고, 50년 이상 된 저수지가 전체의 68.3%에 이르고 있음
- 유효수심(유효저수량/만수면적)에 따른 분포는 1m 이하는 전체의 26.6%, 3m 이하는 전체의 77.1%, 5m 이하가 전체의 91.1%로 농업용 저수지는 대부분 수심이 5m 이하이며, 유역배율(유역면적/만수면적)은 5이상인 전체 시설의 97.4%로 국내 농업용 저수지는 태생적으로 부영양화에 취약한 구조로 되어 있음
- 저수지 물리적 설계인자와 호 내 수질과의 상관관계를 분석한 결과, 유역면적, 유효저수량, 유효수심, 저수량은 수치가 작을수록, 유역배율 지수가 클수록, 저수지 준공년도가 오래된 것일수록 수질오염도가 높은 것으로 나타남

#### 2) 농업용 저수지의 수질영향 요인 및 수질오염 진단

- 농업용 저수지 수질에 영향을 미치는 요인 규명을 위해 농업용수 수질측정망 DB 자료 6,338개의 수질자료와 저수지의 시설제원 등을 대상으로 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 주성분 및 요인분석을 실시한 결과, 저수지 수질에 영향을 주는 주요 요인으로 6개의 주요인이 도출되었음
- 요인 1은 저수량, 수혜면적, 만수면적, 유역면적 등의 수리·수문학적 설계인자이고, 요인 2는 TN, TP, SS 등으로 유역 내에서 저수지로

유입되는 입자성 오염물질과 상관성이 높은 변수, 요인 3은 제당높이, 유효수심, 준공년도 등 저수지 용적과 관련된 변수, 요인 4는 pH, BOD, COD, TOC, Chl-a 등으로 호소 내 유기물질 대사와 관련 있는 변수, 요인 5는 EC, Cl<sup>-</sup>으로 호 내 염류농도와 관련이 높은 변수, 요인 6은 수온, DO 등 계절적 요인에 의한 변수와 상관성이 높음

- 따라서, 농업용 저수지의 수질은 수리·수문학적 설계 변수에 의해 14.8%, 유역에서 유입되는 입자성 오염물질 등에 의해 14.5%, 유효수심 등 저수지 용적에 의해 13.3%, 호소 내 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 나타나 여러 복합적인 요인에 의해 저수지 호 내 수질이 결정되는 것으로 나타났음
- 결론적으로, 저수지로 유입되는 오염물질을 저감시키거나 저수지의 수환경을 개선하여 내부 생산성을 줄일 수 있는 방안이 저수지 수질 개선을 도모할 수 있는 최선의 방법이며, 이러한 인위적인 수질개선 방법에 의해 개선될 수 있는 저수지 수질은 최대 50%로 산출되었음

## 8.2 농업용수 수질개선기술 개발 동향 및 현장 적용성 검토

### 1) 농업용수 수질개선기술 개발 동향

- 정체수역 및 하천의 수질오염과 녹조문제를 해결하기 위해 국내외에서는 오랫동안 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되어 현장적용을 시도해 오고 있으며, 농업용 저수지와 상수원 댐을 관리하고 있는 한국농어촌공사와 수자원공사에서 주로 현장적용 및 수질개선사업을 주도적으로 하고 있음
- 물리적 제어기술로는 인공포기와 강제순환, 준설, 희석, 플러싱, 수위저하, 침전여과, 퇴적물 건조, 퇴적물 캡핑, 선택 취수, 수류 차단막, 초음파 기술 등이 개발되었고, 일부 기술은 현장에도 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 이루어졌고, 현재에도 호소의 인 불활성화와 퇴적물 제어를 위한 기술로 적용되고 있음
- 생물학적 제어기술로는 인공습지, 인공식물섬 등 수생식물을 이용한

기술과 천적생물 및 어류조절을 통한 조류제어 기술들이 개발되었고, 최근에는 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어기술 연구도 진행되고 있음

## 2) 기존 개발된 수처리 기술의 현장 적용성 검토

- 물리적 제어기술인 수중 포기장치, 인공 물순환장치는 설치비용 대비 수질개선 효과가 너무 미미하며, 실제 대규모 호소에 적용할 경우 영향반경이 작아 시설 투자비용이 높아질 수 있음. 또한 수체의 성층 조건에 따라 운전을 정교하게 하지 않을 경우 수질악화를 유발할 수 있으며, 가압 부상 장치와 조류 제거선도 역시 국부적으로 밀집된 조류의 수거에 용이한 기술이지만 광범위한 수면에서는 비효율적이며, 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 않을 경우에는 조류 제어 효과가 미미하며, 홍수 시 집적된 조류가 다시 유입될 우려도 높음
- 화학적 처리공법인 인 불활성화와 조류 성장 제어 등의 기술은 단기 효과가 뛰어난 반면 효과의 지속성, 2차 오염 및 생태계 영향 등의 문제점이 있어서 단일기술로는 현장적용에 한계성이 있음. 특히 실용화를 위해서는 적정투여량 측정기법, 응집제 투여 비용, 경제성 검토, 호소 내 투여방법 등에 관한 연구가 먼저 선행되어야 할 것임
- 생물학적 처리공법은 수질정화 효과가 불확실하며, 한 가지 방법으로는 수질개선 효과를 기대하기는 어려움. 특히 계절별 변동성에 취약하며, 인공습지 및 인공식물섬 등 수생식물을 이용한 제어기법 이외에는 저수지 수질개선 공법으로 적용사례가 없으며, 저수지의 특성, 기후 등 환경조건에 따라 각기 다르게 반응하는 한계성 때문에 범용적 적용에 어려움이 있음
- 물리적, 화학적, 생물학적 처리공법 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 문제점으로

범용적 실용화에 한계가 있으며, 이러한 한계성을 극복할 수 있는 기술개발이 필요함

### 8.3 농업용 저수지에 적용성이 높은 수처리기술 개발

#### 1) 수처리 기술개발 방향

- 본 연구에서는 국내 농업용 저수지의 물리적 특성 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, 시공 가능성, 경관성, 유지관리 용이성, 경제성 등을 고려하여 농업용 저수지에 적합한 수처리 기술을 개발하였음
- 농업용수 융복합 수처리 기술은 저수지 유입수와 호소 내 수역을 대상으로 하였으며, 유입수 수처리의 목표는 호 내로 유입하는 유기물, 질소, 인의 저감에 있으며, 호소는 DO 공급 등 수환경을 개선하여 부영양화와 녹조 발생을 사전에 예방하고 지속적으로 수질을 관리할 수 있는 오염 예방적 수질관리 기술 개발을 목표로 하였음

#### 2) 개발된 융복합 수처리 기술 개요

- 유입수 오염물질 저감 및 호소 만족부 수환경 개선 기술로 개발된 생태융합형 접촉산화시스템은 식생과 미생물 매디아, 산소 포기의 생물학적 처리과 물리적 처리를 융복합한 수처리 기술로서, 미생물에 의한 유기물 산화·분해와 상부 식생에 의한 N, P 등 영양염류 분해를 정화 원리로 하여 고농도의 유기물, SS, TN, TP 처리를 주 목적으로 하고 있음
- 생태융합형 접촉산화공법의 기술을 보완 및 개선시킨 바이오스톤 접촉산화공법은 쇄석을 활용하여 미생물을 코팅한 직경 10cm에 해당하는 바이오스톤 볼을 이용한 수처리 기술로서, 정화원리는 바이오스톤 볼에 부착 성장하는 호기성, 혐기성, 혐기성 미생물에 의한 유기물 및 영양염류의 산화·분해(생물학적 처리)와 바이오스톤 볼에 의한 흡착·여과 기능(물리적 처리) 등에 의해 정화되는 수처리 기술임
- 호소 수질관리를 위한 무인항법 이동식 수질정화시스템은 GPS 기반 무인항법 프로그램에 의해 무인으로 운영되는 수처리 시스템으로, 사전 입력된 프로그램에 의해 원하는 위치에서, 정해진 시간 동안 무인

체류하면서 수질을 정화하고, 접안 도크에서 충전, 유지관리, 기상악화시 대피 등이 가능하도록 설계된 ICT 등 첨단기술이 융복합된 다기능 수질관리시스템임

## 8.4 융복합 수처리시스템 현장적용 및 성능평가

### 1) 현장적용실험을 위한 시제품 제작 및 Test-Bed 구축

- 본 연구를 통해 개발된 기술(공법)에 대해 요소기술의 성능평가 및 현장 적용성 평가를 위해 경기도 시흥시에 위치한 농업용 저수지인 매화저수지에 생태융합형 접촉산화시스템(수로 1식, 부도 1식)과 바이오스톤 접촉산화시스템에 대해 실규모의 플랜트를 설치하여 현장 Test-Bed를 구축하고, 생태융합형 접촉산화시스템에 대해서는 2015년 9월~2017년까지, 바이오스톤 접촉산화시스템은 2016년 9월~2017년까지 성능평가, 수질정화효율평가, 저수지 수질개선효과 등을 분석하고 평가하였음
- 저수지 수질개선을 위한 목적으로 개발된 무인항법 이동식 수질정화선에 대한 현장적용실험을 위하여 부력체 규모 6.0m(L)×3.4m(W)×0.8m(H), 총 부력무게 10톤에 해당하는 시험모형을 제작하여 경기도 시흥 매화저수지에서 2016년 하반기부터 2017년까지 무인항해 등 핵심기술에 대한 성능평가 등 현장 적용성에 대해 검토하였음

### 2) 유입수 수처리시설의 수질정화효율 및 수질개선효과

- 생태융합형 접촉산화수로에 대한 수질정화효율을 분석한 결과, 평균적으로 Chl-a 77.8%, SS 71.8%, BOD 74.7%, COD 46.0%, TP 46.6%로 나타났고, 바이오스톤 접촉산화시스템의 정화효율은 BOD 70.3%(최대 97.2%), COD 45.3%(최대 64.5%), TOC 19.2%(최대 50%), SS 82.8%(최대 92.7%), Chl-a 80.4%(최대 91.8%), TN 23.2%(최대 39.5%), TP 51.8%(최대 80.1%)으로 나타나 BOD, Chl-a, SS 효율이 70~90% 이상으로 매우 높게 나타남
- 매화저수지 유입수 대책시설로 생태융합형 접촉산화수로 및 바이오스톤 접촉산화시설을 COD 수질정화효율 46%, 45.3%, TP 정화효율 46.6%, 45.2%로 각각 가정하여 저수지 유입하천 2개소에 실규모 처리용량(유입-1 1,800 m<sup>3</sup>/d, 유입-2 3,500m<sup>3</sup>/d)으로 설치한다고 가정하였을 경우, 저감되는 연간 오염부하량은 13,658 kg/yr으로 평시 유입되는 부하량

의 약 44%가 저감되는 것으로 나타났고, 저수지의 수질개선효과는 생태융합형 접촉산화수로, 바이오스톤 접촉산화시스템 각각 COD, TP 기준으로 연평균 14.9%, 25.8% 및 14.5%, 25.1%가 개선되는 것으로 예측되었음

- 매화저수지는 평상시에 유입되는 수량이 저수지 총 유출량의 약 20%에 불과하므로 이러한 저수지는 수문학적 특성으로 인해 평시 유량을 대상으로 유입수 수처리 시설을 설치한다면 저수지의 수질개선효과가 단기간에 나타나기는 어렵고, 이러한 저수지는 강우시 유입수에 의해 크게 영향을 받으므로 접촉산화시스템을 침강지와 조합하여 운영하면 수질개선효과가 매우 클 것으로 판단됨

### 3) 무인항법 이동식 수질정화선 현장적용

- 무인항법 이동식 수질정화선의 시제품에는 GPS 통신기, 경광등 싸이렌, 배터리 보관함, 고액분리 수질정화장치, 미생물 살포기, 마이크로 버블 제너레이터, 풍력발전기 등을 탑재하였고, 주요 요소기술에 대해 매화저수지에서 성능평가를 실시하였으며, 현장적용성이 충분하다는 결론을 얻었음
- 무인항법 이동식 수질정화선에 탑재된 오염물질 제거기술인 초고속 고액분리시스템은 SS, TP, COD 등의 오염물질을 ZT(제타전위 제너레이터) 이용하여 급속 응집 및 부상시켜 슬러지를 제거하는 방식으로 1일 평균 오염물질 제거량은 300 kg/일이고, 수처리 면적은 80,000m<sup>2</sup>/일(1일 8시간 기준)로 추정되었음
- 매화저수지 연간 유입되는 오염부하량 65,809.5 kg/y을 대상으로 오염물질 제거하는데 걸리는 일수를 추정한 결과, 하루 8시간 기준으로 항속 0(정지시)~4.0km/h로 운항시 1일 운항되는 수면적은 80,000 m<sup>2</sup>이고, 유입되는 오염물질을 전부 제거하는데 걸리는 기간은 219일(내부생산성 0으로 가정), 저수지 내부에서 자체 생산되는 오염 부하량을 연간 유입되는 부하량의 30%로 가정한다면 저수지 오염물질을 제거하는데 걸리는 기간은 285일로 산출되었음

## 8.5 접촉산화시스템 부착미생물에 의한 수질정화 기작 규명

- 바이오스톤 접촉산화시스템의 핵심기술인 바이오스톤 볼의 부착 미생물에 의한 수질정화 기작을 규명하고자 매화저수지에 설치되어 운영

- 되고 있는 플랜트에서 바이오스톤 볼을 채집하여 미생물의 부착생물량, 군집구조, 활성도 등을 분석 및 평가하였음
- 바이오스톤 볼 생물막에서 MLSS는 1,686~11,762 mg/m<sup>2</sup>, MLVSS 비율은 18.5~35.3%(평균 26.1%), DNA 농도는 평균 12,257(±10,674) μg/m<sup>2</sup>, 종속영양세균 수(HPC) 농도는 평균 27,088×10<sup>6</sup> CFUs/m<sup>2</sup>로 분석되었고, 이는 끈상 생물막에 비해 상대적으로 높게 나타나 바이오스톤 볼에서 생물막 형성 능력이 우수한 것으로 판단됨
  - 플랜트를 가동하여 안정화된 바이오스톤 볼 생물막에는 다양한 미생물 군집이 형성되어 있으며, 이에 따라 다양한 종류의 대사 작용(유기물 분해능, 질소 산화능 등)이 일어날 것으로 예측되었으며, 생물막 군집에는 주로 유기물 분해능이 우수한 세균과 난분해성 유기물 분해에 관여하는 세균들이 주를 이루고 있어 유기물 분해율이 뛰어날 것으로 예측되며, 질산화 또는 탈질에 관여하는 세균도 다수 발견되었음
  - 바이오스톤 볼에 대해 DGGE band를 분류학적으로 분석하면, Phylum(문) 단계에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 “proteobacteria”로 전체의 52.6~62.2%를 구성하였으며, 질산화에 관여하는 세균이 주로 속한 “Nitrospirae”의 비율도 4.1~13.8%로 높은 비율로 나타났음. “Proteobacteria”의 비율이 국내외 하수처리장 0~6.2%에 비해 엄청 높았으며, 이러한 결과로 볼 때 바이오스톤 볼의 생물막에는 유기물 분해 세균의 비율이 매우 높게 유지되고 있는 것으로 판단됨
  - Pyrosequencing 분석에서 나온 종(species)의 결과를 이용하여 다양성 지수(Shannon index)를 분석한 결과, 다양성 지수가 6.37~6.90의 범위에 있으며, 이는 국내외 하수 활성슬러지 및 생물막 분석 결과에서 나타난 지수에 비해 매우 높은 값을 나타내고 있어 군집의 종 다양성이 매우 높음을 알 수 있음

## 8.6 융복합 수처리시스템에 대한 기술성 및 경제성 평가

- 농업용 저수지 유입수 수처리공법으로 가장 많이 사용되고 있는 인공습지는 동일 유량 처리시 넓은 부지면적이 필요하며, 주기적인 식생관리, 퇴적토 준설 등 유지관리가 필요한 반면에 생태융합 접촉산화 및 바이오스톤 볼 접촉산화시스템은 다른 접촉산화 기술에 비해 작은 부지

면적이 소요되며, 시설비 및 유지관리비가 타 기술 평균치의 87.4%, 73.2%에 해당하며, 이는 충분히 경제성이 있는 것으로 판단됨

- 무인항법 이동식 수질정화선은 기존 녹조 제거선들이 사후 오염물질 제거기술인 반면에 무인항법 수질정화선은 평시에 지속적인 수질관리를 통해 수질오염을 사전에 방지하고, 실시간 수질측정 및 자료 송수신이 가능하여 수질조사 및 수질개선 비용 절감, 무인 운영으로 인한 인건비 절감 등으로 타 유사 기술대비 운영관리 비용을 많이 절감할 수 있을 것으로 판단됨

## 8.7 융복합 수처리기술의 현장적용 및 실용화 방안

- 바이오스톤 접촉산화시스템은 농림식품신기술 인증을 받은 신기술로서, 농업용 저수지의 유입수, 저수지 물 순환수, 양수 및 도수 저수지 등의 수질정화를 목적으로 한 수질개선사업에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 수질정화가 요구되는 대상지역에 따라 구조물형, 습지형 등 다양한 형태로 설치·조성하여 운영할 수 있음
- 토지(부지) 면적이 협소한 하천 둔치 및 농업용 저수지 홍수터 등에 지하 또는 지상 구조물 형식으로 조성이 가능하며, 지상구조물 형식으로 조성할 경우에는 상부에 수생식물과 조합하여 경관성을 향상시킬 수도 있음. 또한, 현재 널리 이용되고 있는 인공습지와 조합하거나 또는 전면 대체하여 지하흐름형 인공습지 형태로도 활용이 가능함
- 저수지 호 내 수질관리 및 수질정화를 대상으로 하고 있는 무인항법 이동식 수질관리시스템은 농업용 저수지뿐만 아니라 상수원 댐, 한국농어촌공사에서 관리하는 하구 담수호 등에도 널리 활용할 수 있을 뿐만 아니라 4대강 및 전국 하천의 정체수역 등에도 폭넓게 적용할 수 있을 것으로 기대됨
- 수처리 담체(여재)로 개발된 바이오스톤 불은 수처리 시설 여재 이외에도 자연형 어도, 부댐 조성, 사방댐 조성, 인공습지 사면, 하천 및 해안침식방지 등의 호안 보호공 등으로 확대 적용이 가능할 것으로 기대됨





# 참고문헌

---





## 참고문헌

- 강성종, 2010, 유기물 및 질소 제거를 위한 나선형 생물막 파일럿 공정의 성능 평가와 특성 연구, 한국외국어대학교 대학원 석사학위논문
- 고광백, 1997, 폐수처리공학, 동화기술
- 구본우, 2010, 담수호의 수질개선을 위한 물순환시스템 가동시 미생물 집적여재 적용에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문
- 국립환경연구원, 2003, 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 최종 보고서, 국립환경연구원
- 국립환경과학원, 2015, 하천·호소 퇴적물 오염평가기준, 국립환경과학원 예규 제2015-687호
- 국토교통부, 2016, 제4차 수자원장기종합계획(2011~2020) 제3차 수정계획(안) 공청회자료
- 김남천, 이태수, 1995, 생물학적 폐수처리, 동화기술
- 김태철, 1998, 접촉산화수로공법에 의한 수질개선연구, 환경연구 16 ('98.12), p.1-10
- 김택승, 김한신, 권순동, 박희등, 2010, 16S rRNA 유전자 기반의 pyrosequencing을 이용한 하수처리시설 생물반응기의 세균군집구조 분석. Kor. J. Microbiol. 46(4): 352-358
- 김관수, 손한형, 이상호, 박성순, 2006, 나선형 끈상 매디아의 시간에 따른 바실러스 미생물 부착량 변화에 관한 연구, 한국환경과학회 가을학술 발표회, 15(2), p.357-361
- 김학용, 2000, 끈상 접촉여재를 이용한 하천정화 방안, 아주대학교 산업대학원 환경공학과 석사학위논문
- 금강수계관리위원회, 2012, 대청호 및 보령호 수질관리를 위한 조류발생 억제 방안 연구(III)
- 금강유역환경청, 2010, 대청호 맑은 물 포럼 운영 결과 보고서
- 낙동강유역 환경관리청, 2010, 낙동강 조류발생 특성분석 및 관리정책방안 연구보고서
- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2013, 농업생산기반정비통계연보
- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2014, 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술개발 및 적용(I) 연구보고서

- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2015, 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술개발 및 적용(Ⅱ) 연구보고서
- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2015, 농업용 저수지 오염퇴적물의 관리 기술 개발 - 농업용저수지 퇴적물의 오염유형별 관리방안 연구-보고서
- 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2016, 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술개발 및 적용(Ⅲ) 연구보고서
- 농림수산식품부, 한국농어촌공사, 2013, 2013농업용수 수질측정망조사 보고서
- 농림수산식품부, 한국농어촌공사, 2016, 2016농업용수 수질측정망조사 보고서
- 류희구, 2015, 가압부상장치와 생물막 복합공정을 이용한 장치형 하천정화 시스템에 관한 연구, 경기대학교 일반대학원 환경에너지시스템공학과 석사학위논문
- 박재로, 임현만, 우효섭, 2001, 하천정화를 위한 상향류식 접촉산화공법의 운전특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 17(5), p.557-564
- 박종웅, 1988, 호기성침지형 생물막공법의 처리효율에 미치는 영향인자, 서울시립대학교 대학원 박사학위논문
- 배준삼, 2006, 끈상 미생물접촉재와 수초근을 이용한 하수의 고도처리 효율에 관한 연구, 상명대학교 대학원 석사학위논문
- 안광호, 고광백, 김이태, 김광수, 2012, 호기성 생물막을 이용한 HRT 변화에 따른 오염물질 제거, 한국환경과학회지, 21(12), p.1495-1501
- 안영희, 2002, 끈상접촉산화공법의 처리효율에 관한 연구, 서울시립대학교 도시과학대학원 환경공학 석사학위논문
- 오유미, 이재호, 박정진, 최기충, 박태주, 이태호, 2010, 상향류 활성탄 생물막 공정을 이용한 정체 수역 수질 개선 및 공정내 미생물 군집 해석. 대한환경과학회지 32(1): 1191~1200.
- 유재철, 박정진, 허성호, 김유진, 변임규, 이태호, 박태주, 2007, 호기성 생물막 반응기에서 ammonia oxidizing bacteria에 의한 DO 농도의 영향. 대한환경과학회지 29(1): 106-112.
- 이상호, 2000, Bio-contactor를 이용한 하천수 정화에 관한 연구, 상명대학교 산업과학연구소
- 이창근, 1997, 고정 생물막공법에서 부착미생물의 역세에 관한 연구, 한국환경과학회지, 6(3): 219-224.
- 정용, 1984, 현수미생물접촉법(HBC)에 의한 오수처리효과에 관한 연구,

- 연세대학교, 환경공해연구소
- 최명은, 홍성준, 임중희, 곽윤영, 백창기, 정희영, 이인중, 신재호, 2013, Denaturing gradient gel electrophoresis를 이용한 한국의 논 토양 미생물 다양성 분석 방법. J. Appl. Biol. Chem. 56(2): 95-100.
- 최승희, 1987, 미생물막을 이용한 반응조내의 기질제거와 부착 미생물량에 관한 수학적 모델, 한국과학기술원 석사학위논문
- 한국농촌공사, 2006, 농업용수 수질개선공법 매뉴얼
- 한국농촌공사, 2006, 농업용수 수질개선 조사·설계 매뉴얼
- 한국농촌공사, 2007, 농촌지역 비점오염관리 가이드북
- 한국농어촌공사, 2012, 2012년 농업용수 수질개선 특별대책 조사지구별 단기수질개선대책 보고서
- 한국농어촌공사, 2015, 한국농어촌공사 농업기반시설관리 웹사이트 <http://rims.ekr.or.kr/>
- 한국수자원공사, 2014, 하천 대상 녹조 개화 후 고효율 제거 및 활용기술 개발
- 한국환경공단, 2012, 수생태 안전성 향상을 위한 조류저감기술
- 허명노, 2010, 슬러지 가용화 공정이 결합된 A<sub>2</sub>O-MBR공정에서 슬러지 발생량과 생물학적 인제거특성에 관한 연구, 성균관대학교 대학원
- 홍원석, 신완호, 송동근, 오종민, 2010, 미세기포를 이용한 수질개선대책, 한국방재학회지, 10(1), p.92-99
- 환경부, 2016, 수질오염공정시험기준
- 환경부, 2011, 부유매디아 생물막 공법을 이용한 난분해성 산업폐수의 고도처리 기술개발, 환경부
- 황환국, 1998, 오염된 소하천의 고효율 정화방법, 건설기술연구원 건설기술 정보, 171('98.2), p.27-31
- 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
- Atlas copco. 1980. Communications Dept., Wilrijk, Belgium

- 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
- 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.,1986, 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
- 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
- Fast, A.W., V.A. Dorr and R.J. Rosen., 1975, A submerged hypolimnion aerator. *Water Resour. Res.*(11) p.287-293
- Gotzinger, M., Weigl, B., Peukert, W. and Sommer, K. (2007) Effect of roughness on particle adhesion in aqueous solutions : A study of *Saccharomyces cerevisiae* and a silica particle, *Colloids and Surface B: Biointerfaces*, 55, pp. 44-50
- Garcia, J.-L., Cayol, J.-L., Verhe, F., Fardeau, M.-L., and Ollivier, B. (2002) Characterization of six new species of denitrifying *Bacillus* from tropical rice soils. Unpublished.
- Gee, J.E., De, B.K., Levett, P.N., Whitney, A.M., Novak, R.T., and Popovic, T., 2004, Use of 16S rRNA gene sequencing for rapid confirmatory identification of *Brucella* isolates. *J. Clin. Microbiol.* 42(8): 3649-3654
- Govindaswami, M., Schmidt, T.M., White, D.C., and Loper, J.C., 1993, Phylogenetic analysis of a bacterial aerobic degrader of azo dyes. *J. Bacteriol.* 175(18): 6062-6066
- Hardoim, P.R., Reinhold-Hurek, B., van Overbeek, L.S., Woyke, T., Brar, D.S., van Elsas, J.D., and Sessitsch, A., 2011, Field-rice roots host diverse endophyte communities, which are dominated by nitrogen-fixing *Enterobacter* strains. Unpublished
- 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
- Hayes, D., Izzard, L., and Seviour, R., 2011, Microbial ecology of autothermal thermophilic aerobic digester (ATAD) systems for treating waste activated sludge. *Syst. Appl. Microbiol.* 34(2): 127-138
- Helsel, D., Madsen, J., and James, B., 2003, Big Muskego Story: Rehabilitating a large shallow lake. *Lakeline* 23(1): 21-28
- Heinaru, E., Truu, J., Stottmeister, U., and Heinaru, A., 2000, Three types of phenol and p-cresol catabolism in phenol- and p-cresol-degrading bacteria isolated from river water continuously polluted with phenolic compounds. *FEMS Microbiol. Ecol.* 31(3): 195-205
- Hovanec, T.A., Taylor, L.T., Blakis, A., and DeLong, E.F., 1998, *Nitrospira*-like bacteria associated with nitrite oxidation in

- freshwater aquaria. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 258-264
- Jeon, C.O. and Park, M., 2006, Comparative Analysis of Microbial Communities from Culture-dependent and -independent Approaches in an Anaerobic/Aerobic SBR Reactor. Unpublished.
- Jin, T., Lee S., and Chen, G., 2007, Investigation of bacterial community in estrogen-degrading membrane bioreactors. Unpublished.
- Kortmann, R.W., G.W. Knoecklein and C.H. Bonnell, 1994, Aeration of stratified lakes(Theory and practice), *Lake and Reservoir Manage.* 8, p.99-120
- Kairesalo, T., 1995, Fractional composition, adsorption and release of sediment phosphorus in the Kis-Balaton Reservoir, *water Res.*, 28(3), pp. 717~726
- Kaiser, O., Puehler, A., and Selbitschka, W., 2001, Phylogenetic analysis of microbial diversity in the rhizoplane of oilseed rape (*Brassica napus* cv. Westar) employing cultivation-dependent and cultivation-independent approaches. *Microb. Ecol.* 42: 136-149
- Kanagawa, T., Kamagata, Y., Aruga, S., Kohno, T., Horn, M., and Wagner, M., 2000, Phylogenetic analysis of and oligonucleotide probe development for eikelboom type 021N filamentous bacteria isolated from bulking activated sludge. *Appl. Environ. Microbiol.* 66(11): 5043-5052
- Lee, D.-G., Sung, G.M., and Park, S.J., 2010, 16S rDNA sequences of biofilm-consortium on RABC of food-wastewater treatment plant. Unpublished.
- Li, X.B., Sun, Y.J., and Wang, H.Q., 2009, Isolation and Identification of Bacteria Capable of Degrading PAHs and their Degrading Characteristics. Unpublished
- Liu, M. and Sun, Q., 2012, Bacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings. Unpublished
- Liu, X.-C. and Yang, M., 2009, Analysis of bacterial community changes during sewage treated process. Unpublished
- Luecker, S., Schwarz, J., Gruber-Dorninge, C., Spieck, E., Wagner, M., and Daims, H., 2014, Nitrotoga-like bacteria are previously unrecognized key nitrite oxidizers in full-scale wastewater treatment plants. *ISME J.* 9(3): 708-720.
- Manz, W., Kalmbach, S., and Szewzyk, U., 1998, The early stage of drinking water biofilm formation is dominated by bacteria of the



- new genus *Aquabacterium*. Unpublished.
- Muyzer, G., de Waal, E.C., and Uitterlinden, A.G., 1993, Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Appl. Environ. Microbiol.* 59: 695-700
- Nohynek, L.J., Nurmiaho-Lassila, E.L., Suhonen, E.L., Busse, J., Mohammadi, M., Hantula, J., Rainey, F., and Salkinoja-Salonen, M.S., 1996, Description of the chlorophenol-degrading *Pseudomonas* sp. strains KF1, KF and NKF1 as a new species of the genus *Sphingomonas*, *Sphingomonas subarctica* sp. nov. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 46(4): 1042-1055
- Okabe, S., Odagiri, M., Ito, T., and Satoh H., 2007, Succession of Sulfur-Oxidizing Bacteria in the Microbial Community on Corroding Concrete in Sewer Systems. *Appl. Environ. Microbiol.* 73: 971-980
- Oshiki, M., Onuki, M., Satoh, H., and Mino, T., 2009, Polyhydroxyalkanoates (PHA)-accumulating organisms in full-scale wastewater treatment plants. Unpublished.
- Rintala, H., Pitkaranta, M., Toivola, M., Paulin, L., and Nevalainen, A., 2008, Diversity and seasonal dynamics of bacterial community in indoor environment. *BMC Microbiol.* 8: 56.
- Rossetti, S., Blackall, L.L., Levantesi, C., Uccelletti, D., and Tandoi, V., 2003, Phylogenetic and physiological characterization of a heterotrophic, chemolithoautotrophic *Thiothrix* strain isolated from activated sludge. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 53(Pt 5):1271-1276
- Rothberg, J.M. and Leamon, J.H., 2008, The development and impact of 454 sequencing. *Nature Biotechnol.* 26: 1117-1124
- Rittmann, B. E. and Brunner, C.W., 1984, The nonsteady state biofilm process for advanced organics removal, *WPCF*, 56(7), p.874-880
- Sadaie, T., Sadaie, A., Takada, M., Hamano, K., Ohnishi, J., Ohta, N., Matsumoto, K., and Sadaie, Y., 2007, Reducing Sludge Production and the Domination of Comamonadaceae by Reducing the Oxygen Supply in the Wastewater Treatment Procedure of a Food-Processing Factory. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 71: 791-799
- Scott, J.J., Lewin, G.R., Suen, G., Tringe, S.G., Barry, K.W., Touchon, J.C., Currie, C.R., 2014, Leaf-cutter ant refuse dumps are nutrient reservoirs harboring diverse microbial assemblages Unpublished.
- Seo, L., Park, S., and Lee, G.H., 2008, The Microbiological Water Quality of Water Purifiers in Elementary Schools Located in Gunsan

- Area. Unpublished.
- Sibag, M.L., 2014, 고도하수처리를 위한 미세호기/호기 막여과 생물반응조의 미생물생태와 적용. 명지대학교 박사학위논문.
- Shimp, R.J. and Pfaender, F.K., 1982, Effects of surface area and flow rate on marine bacterial growth in activated carbon columns, *Applied and Environmental Microbiology*, Aug, pp. 471-477
- Steinberg, C. and K. Arzet., 1984, Impact of hypolimnetic aeration on abiotic and biotic conditions in a small kettle lake, *Environ. Tech. Lett.* 5, p. 151-162
- Simpson, J.M., Santo Domingo, J.W., and Reasoner, D.J., 2004, Assessment of equine fecal contamination: the search for alternative bacterial source-tracking targets. *FEMS Microbiol. Ecol.* 47(1): 65-75
- Srinivas, T.N., Nageswara Rao, S.S., Vishnu Vardhan Reddy, P., Pratibha, M.S., Sailaja, B., Kavya, B., Hara Kishore, K., Begum, Z., Singh, S.M., and Shivaji, S., 2009, Bacterial Diversity and Bioprospecting for Cold-Active Lipases, Amylases and Proteases, from Culturable Bacteria of Kongsfjorden and Ny-Alesund, Svalbard, Arctic. *Curr. Microbiol.* 59(5): 537-547
- Stoscheck, C. M., 1990. Quantitation of protein. *Methods Enzymol* 182: 50-68
- Sukhanova, E.V., Bel'kova, N.L., and Tulupova, U.R., 2012, Identification of heterotrophic bacteria from biofilms, Lake Baikal, Russia. Unpublished.
- Truax, D.D., A. Shindala and H. Sartain., 1995, Comparison of two sediment oxygen demand measurement techniques, *J. Environ. Eng.*, 121, p.619-624
- Tamura, K., Peterson, D., Peterson, N., Stecher, G., Nei, M., and Kumar, S., 2011, MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods. *Molecular Biology and Evolution* 28: 2731-2739
- Tringe, S.G., von Mering, C., Kobayashi, A., Salamov, A.A., Chen, K., Chang, H.W., Podar, M., Short, J.M., Mathur, E.J., Detter, J.C., Bork, P., Hugenholtz, P., and Rubin, E.M., 2005, Comparative metagenomics of microbial communities. *Science* 308 (5721): 554-557
- US EPA, 1999, Integrated risk information system(IRIS), National Center for Environmental Assessment

- Vazquez-Nunez, E., Valenzuela-Encinas, C., Alcantara-Hernandez, R.J., Navarro-Noya, Y.E., Luna-Guido, M., Marsch, R., and Dendooven, L., 2012, Modifications of bacterial populations in anthracene contaminated soil. *Appl. Soil Ecol.* 61: 113-126
- Vedler, E., Jutkina, J., and Kasper, L., 2007, Impact of phytoremediation on the community structure of semi-coke, the solid waste from oil-shale chemical industry. Unpublished
- Wang, Q., Zou, L., Zhang, S., and Xie, S., 2010, Impact of anthracene amendment on microbial community structure in soil microcosms from contaminated and uncontaminated sites. Unpublished
- Wang, X., Hu, M., Xia, Y., Wen, X., and Ding, K., 2014a, Pyrosequencing analysis of bacterial diversity in 14 wastewater treatment systems in China. *Appl. Environ. Microbiol.* 78(19): 7042-7047
- Wang, X., Wen, X., Yan, H., Ding, K., Zhao, F., and Hu, M., 2011, Bacterial community dynamics in a functionally stable pilot-scale wastewater treatment plant. *Bioresour. Technol.* 102(3): 2352-2357
- Wang, Y.S., Wen, C.Y., Chiu, T.C., and Yen, J.H., 2004, Effect of fungicide iprodione on soil bacterial community. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 59: 127-132
- Wang, Z., Zhang, X.X., Lu, X., Liu, B., Li, Y., Long, C., Li, A., 2014b, Abundance and diversity of bacterial nitrifiers and denitrifiers and their functional genes in tannery wastewater treatment plants revealed by high-throughput sequencing. *PLoS One* 9(11): e113603
- Wells, G.F., Park, H.D., Eggleston, B., Francis, C.A., Criddle, C.S., 2011, Fine-scale bacterial community dynamics and the taxa-time relationship within a full-scale activated sludge bioreactor. *Water Res.* 45(17): 5476-5488
- White, C.P., Debry, R.W., and Lytle D.A., 2012, Microbial survey of a full-scale, biologically active filter for treatment of drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* 78(17):6390-6394
- Williams, M.M., Domingo, J.W.S., Meckes, M.C., Kelty, C.A., and Rochon, H.S., 2004, Phylogenetic diversity of drinking water bacteria in a distribution system simulator. *J. Appl. Microbiol.* 96(5): 954-964
- Yan, Q.Y., Yu, Y.H., Feng, W.S., Deng, W.N., and Song, X.H., 2007, Genetic diversity of plankton community as depicted by PCR-DGGE fingerprinting and its relation to morphological composition and environmental factors in Lake Donghu. *Microb. Ecol.*, 54(2): 290-297
- Zhang, T., Qin, X.L., and Fang, H.H.P., 2004, Isolates from drinking water biofilm and tap water. Unpublished

Zhang, Y., Du, B.-H., Jin, Z.-G., Li, Z.-H., Song, H.-N., Ding, Y.-Q., 2011, Analysis of bacterial communities in rhizosphere soil of healthy and diseased cotton (*Gossypium* sp.) at different plant growth stages. *Plant Soil* 339(1-2): 447-455

# 부 록

---

## 1. 융복합 수처리기술 현장적용매뉴얼

제1절 바이오스톤 접촉산화시스템

제2절 무인항법 이동식 다기능 수질정화시스템

## 2. 융복합 수처리 기술 특허등록증 등(5건)



## 【부록 1】 융복합 수처리기술 현장적용 매뉴얼

### 제1절 바이오스톤 접촉산화시스템

(※ 농림식품신기술 인증번호 51-048, 농림축산식품부 공고 제2017-506호)

#### 1. 시설개요

##### 가. 정의

- “바이오스톤 볼(Bio-Stone Ball, BSB)”이란 크기 2~3cm의 쇠석(자갈)을 친환경 에폭시계 수지로 접착하여 직경 10cm 크기의 구형으로 성형 후, 담체 내·외부 표면에 천연셀룰로오스, 백토, 물 그리고 복합유용미생물로 구성된 미생물 코팅재로 함침 및 건조시켜 제조한 수처리용 담체이다.
- 바이오스톤볼을 이용한 접촉산화시설은 수처리용 접촉 담체인 바이오스톤볼 내외부 표면에 부착 성장하는 호기성, 혐기성, 혐기성 미생물에 의한 유기물과 영양염류의 산화 및 분해(생물학적 처리)와 바이오스톤볼에 의한 여과 기능(물리적 처리) 등을 이용한 수질 개선 공법이다.

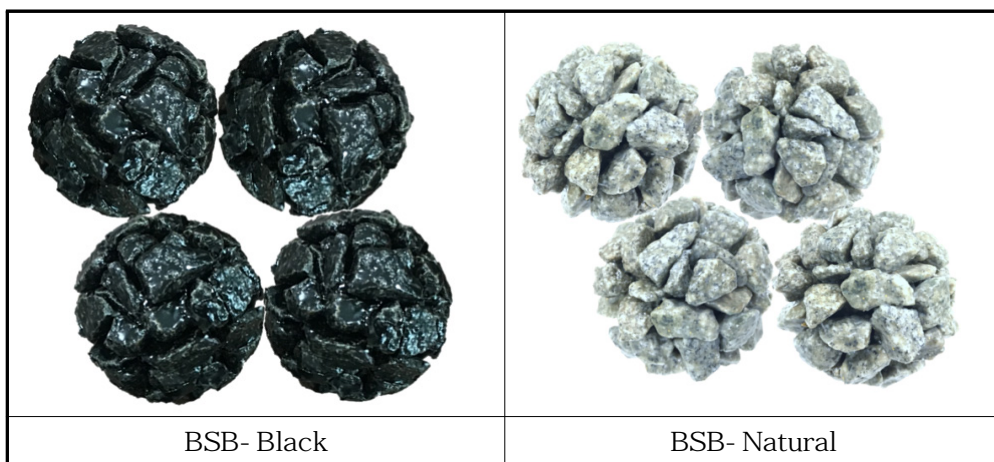


그림 1. 수처리용 바이오스톤볼(Bio-Stone Ball, BSB)

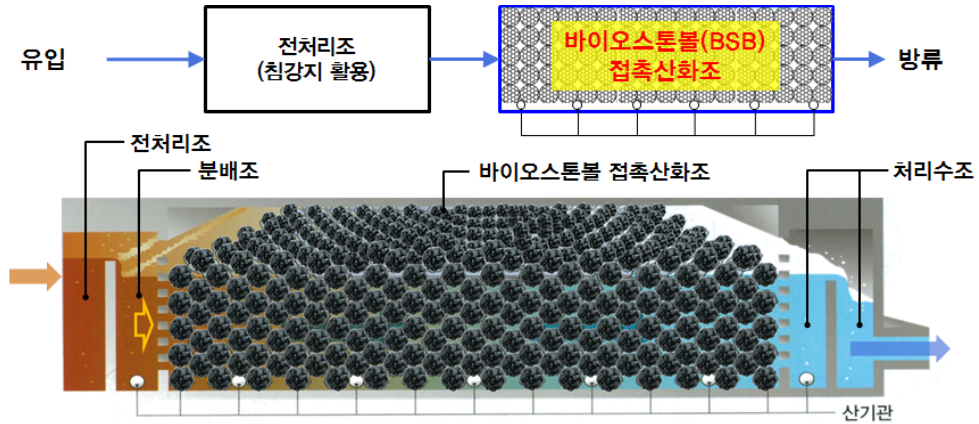


그림 2. 바이오스톤볼 접촉산화시설의 기본구성 및 흐름도

표 1. 바이오스톤볼 접촉산화시설의 기능 및 역할

구 분	기능 및 특성
전처리조	<ul style="list-style-type: none"> <li>입자성 오염물질을 침전시켜 제거</li> <li>바이오스톤 접촉산화조 시설 보호 및 수처리효율 제고 목적</li> <li>침강지, 침사지 등 활용</li> </ul>
분배조	<ul style="list-style-type: none"> <li>바이오스톤볼 접촉산화조 전단부로, 접촉산화조에 수평 흐름으로 균등하게 유입수를 분배하는 역할</li> </ul>
바이오스톤볼 접촉산화조	<ul style="list-style-type: none"> <li>바이오스톤볼 사이의 공극과 내부 쇄석 사이의 공극에 의해 형성되는 유리(流離) 현상을 이용한 입자성 고형 유기물 분리 및 분해</li> <li>바이오스톤 볼에 부착 성장하는 호기성, 임의성, 혐기성 미생물에 의한 유기물과 영양염류의 생물학적 처리</li> <li>현장여건에 따라 상부 수생식물 식재 가능(습지형)</li> </ul>

#### 나. 목적

- 저수지로 유입되는 유입수 및 오염된 농업용 저수지의 수질정화 및 수질개선을 목적으로 한다.



## 다. 특징

- 농림축산식품부 농촌개발시험연구과제 “양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술개발 및 적용” 일환으로 농어촌연구원과 충북대학교 협동연구를 통해 개발된 기술이다.
- 바이오스톤볼 접촉산화시설은 농업용 저수지 유입수 처리, 저수지 호내 정체수 순환 처리, 관개용수 도수 및 양수 전처리 등으로 다양하게 적용할 수 있다.
- 바이오스톤볼 접촉산화시설은 구조물형 또는 습지형의 단독시설로 적용하거나, 조합형 인공습지와 연계하여 습지간 연결용 접촉수로 또는 지하 흐름형 습지로 활용할 수도 있다.
- 자갈 또는 쇄석을 접착력이 높은 친환경 수지로 접합하여 강도와 내구성을 극대화함으로써 구조적으로 안정되고 반영구적으로 사용이 가능한 수처리용 담체가 적용된 기술이다.
- 바이오스톤 볼을 구성하고 있는 쇄석들에 의해 형성되는 내부공극과 바이오스톤 볼 사이의 간극에 의해 생기는 외부공극으로 인해 접촉산화조 내에서 60% 이상의 공극률이 형성됨으로써 유체 흐름이 원활하고 폐색현상이 거의 없는 기술이다.
- 바이오스톤 볼을 이용한 접촉산화시설에서는 바이오스톤볼 내부와 외부에 유속차이로 인한 유리(流離) 현상이 발생함으로써 고액분리와 접촉 침전 효과가 높다.
- 직경 10cm 크기의 구형으로 성형된 담체 내·외부 표면에 천연셀룰로오스, 백토, 물 그리고 복합유용미생물로 구성된 미생물 코팅재로 함침 및 건조시켜 제조한 바이오스톤볼은, 운전초기 다양한 미생물 군집으로 구성된 생물막의 형성 속도 및 부착 미생물의 개체수 증가 효과를 제공함으로써 운전 초기에 미생물 안정화 기간을 단축시키고, 유입수 유량이나 수질 변동으로 인한 비정상적 조건에서도 안정적인 수처리 기능 유지가 가능한 기술이다.
- 바이오스톤 볼을 충전한 접촉조내에서는 다양한 미생물이 서식할 수 있는 혐기성, 임의성, 호기성 조건이 동시에 형성되어 유기물질과 영양염류를 함께 처리한다.
- 바이오스톤 볼 접촉산화시설은 생물학적 반응과 물리적 기능 등이 단일 반응조에서 이루어지는 컴팩트한 기술이다.

- 수질정화를 위한 수리학적 체류시간이 짧아 부지면적이 매우 적게 소요된다.
- 바이오스톤볼 내외부 표면의 부착 미생물에 의한 유기물 산화와 유기물을 먹이로 하는 원생동물과 후생동물 및 고등생물을 공존시켜 일반 접촉산화공법보다 슬러지 발생이 적다.

## 라. 장단점

### (1) 장점

- 접촉 담체가 친환경적이고 반영구적으로 사용 가능함
- 유기물과 SS, 총인 및 클로로필-a의 제거 효율이 높음
- 유체 흐름을 방해하는 폐색현상이 거의 없음
- 슬러지 발생 적음
- 시설 설치비용이 경제적임(타 접촉산화공법 대비 약 40%이상 절감)
- 소요 부지면적이 작음(인공습지의 약 1/50~1/100)
- 구조물 단독 또는 상부 식생이 적용된 습지형이나 수로형으로 다양하게 적용가능

### (2) 단점

- 모래 및 토사 등의 유입 방지를 위한 전처리 시설(침사지, 침강지 등) 필요
- 초기강우 등 대규모 유량 처리 곤란

## 2. 정화 원리 및 효율

### 가. 정화원리

- 바이오스톤볼을 이용한 접촉산화공법은 접촉 담체인 바이오스톤볼의 표면에 생물막을 부착 및 형성시키는 고정 생물막법의 일종으로, 근본적인 원리는 바이오스톤볼 내부와 바이오스톤볼과 바이오스톤볼 사이에서 발생하는 유속 변화에 따른 물리적 침강과 생물학적 분해에 의한다.
- 접촉 침전, 분리, 생물 흡착과 미생물에 의한 유기물과 영양염류의 산화와 환원이 정화작용의 주를 이루고 있으며, 바이오스톤볼은 물리적·생물학적 정화작용의 효율을 극대화시키는 접촉재이다.

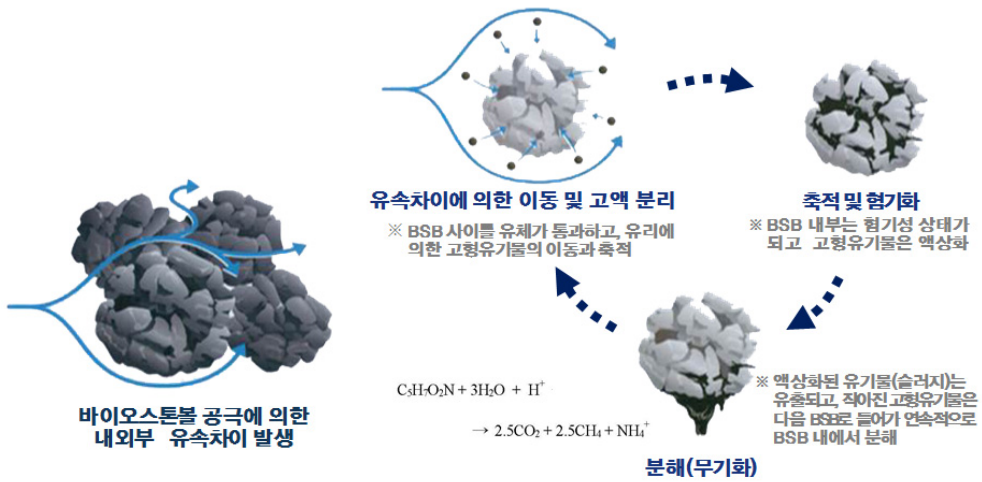


그림 2. 바이오톤볼을 이용한 접촉산화시설의 정화원리

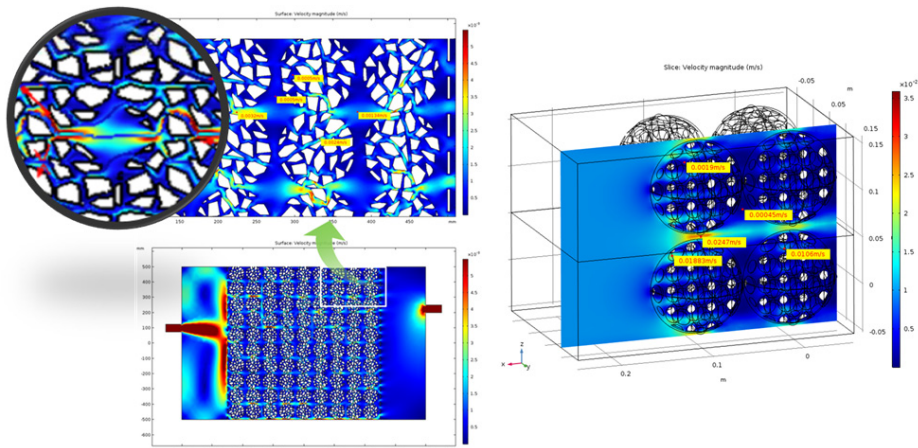


그림 3. 바이오톤볼 접촉산화시설의 전산유체유동해석(CFD)

- 바이오톤볼 접촉산화시설은 다음과 같은 정화작용을 갖는다.
  - ① 접촉 침전 효과 : 담체와 담체 사이에는 대소의 간극(間隙)이 존재하는데, 그 공간은 작고 침전 거리가 극히 짧기 때문에 침전이 일어나기 쉬움.
  - ② 생물 흡착 효과 : 수중의 부유물과 접촉 여재는 미약하지만 상반되는 전기적 성질을 갖기 때문에 흡착 현상이 생기며, 여재 표면에 생긴 생물막의 점성으로 부유물이 흡착됨.
  - ③ 생물 산화 및 분해 효과 : 여재 표면에 발달한 생물막으로 수중의 유기물이 흡수되어 미생물의 에너지원이 되고, 이 때문에 유기물의 일부는 생물체로 동화되고, 일부는  $CO_2$ ,  $H_2O$ 로 산화 분해됨.

- ④ 슬러지의 분해 및 감량 효과 : 침전 및 흡착에 따라 수중에서 분리되고, 또 생물체가 된 슬러지는 다시 미생물의 먹이가 되면서 슬러지에 포함된 유기물은 약 1/4까지 감소함. 또 동시에 슬러지의 체적은 시간이 흐름에 따라 압밀(壓密)에 의해 1/10~ 1/15까지 감소함.
- ⑤ 부유성 물질의 정화 : 접촉산화법에서는 유기성 SS 뿐만 아니라 무기성 SS도 생물막의 표면에 부착되어 생화학적 작용을 하므로, 부유성 물질의 제거 및 분해 작용에 중요한 역할을 함.
- 특히, 바이오스톤볼을 이용한 접촉산화시설은 바이오스톤볼 내부와 외부에 유속차이로 인한 유리(流離) 현상이 발생함으로써 고액분리와 접촉 침전 효과가 높다.
- 쇄석 결합제로 사용된 천연 수지와 미생물 코팅액 성분인 천연셀룰로오스와 백토로 도포된 바이오스톤볼의 표면은 생물막 형성에 유리한 표면 환경을 제공함으로써, 결국 바이오스톤볼 표면에 잘 발달한 생물막은 생물 흡착 효과와 생물 산화 및 분해 효과를 향상시킨다.
- 바이오스톤볼 내외부 표면의 부착 미생물에 의한 유기물 산화와 유기물을 먹이로 하는 원생동물과 후생동물 및 고등생물을 공존시켜 슬러지 발생량을 최소화시킨다.

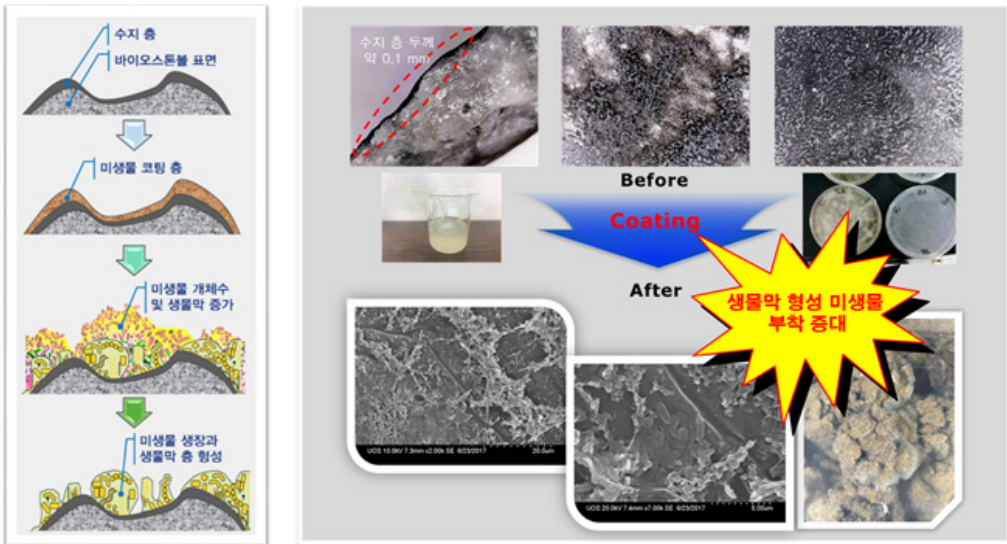


그림 4. 바이오스톤볼 표면의 생물막

## 나. 정화효율

구분	유입수	유출수	처리효율 (%)
BOD(mg/L)	9.7 (4.3~12.2)	2.9 (0.3~4.7)	68.9 (34.9~97.4)
COD(mg/L)	20.1 (7.8~47.3)	11.0 (3.3~11.4)	44.4 (26.1~64.7)
TOC(mg/L)	8.4 (4.6~18.2)	6.6 (3.7~14.7)	18.9 (8.5~50.0)
SS(mg/L)	45.5 (20.0~120.0)	7.7 (1.4~28.0)	85.5 (73.1~96.2)
Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )	163.5 (40.0~500.7)	30.3 (3.7~99.9)	81.9 (57.2~91.8)
T-N(mg/L)	3.899 (1.853~8.594)	2.930 (1.350~6.115)	23.2 (6.4~39.5)
T-P(mg/L)	0.321 (0.167~0.854)	0.156 (0.046~0.425)	51.8 (15.7~80.1)

## 3. 설치기준 및 설계인자

### 가. 설치 기준

- 바이오스톤 불 접촉산화시설은 농업용 저수지 유입수 처리, 저수지 호내 정체수 순환 처리, 관개용수 도수 및 양수 전처리 등으로 다양하게 적용할 수 있다.
- 바이오스톤 불 접촉산화시설은 구조물형 또는 습지형의 단독시설로 적용하거나, 조합형 인공습지와 연계하여 습지간 연결용 접촉수로 또는 지하 흐름형 습지로 활용할 수도 있다.
- 자연친화적인 측면 또는 경관적인 측면을 고려하여, 구조적 안정성에 문제가 없는 범위 이내에서는 가능한 토목 구조물은 최소화하는 것이 바람직하다.
- 바이오스톤 불 접촉산화시설은 저수지로 유입되는 평상시 유량 전체를 처리하는 것을 기본 원칙으로 하며, 강우시에는 시설내부로 토사가 유입되지 않도록 유입수를 차단하는 것이 바람직하다.

- 바이오스톤 볼 접촉산화시설은 미생물을 이용한 생물학적 처리공법의 특성면에서 유기물의 흡착, 산화, 분해 등의 과정이 원활히 일어날 수 있도록 최소한의 유하거리(5m 이상) 및 체류시간(1.3hr 이상)이 확보되도록 설계하여야 한다.
- 바이오스톤 볼은 최대 직경이  $10\pm 0.5\text{cm}$ , 단위쇄석 크기 20~25 mm, 볼 내부공극률 30~50%, 충전체적 전체 공극률 60%이상, 압축강도 3MPa 이상이어야 한다.
- 바이오스톤 볼의 접촉 수지는 수중 생물에 위해가 없는 친환경적인 재료이어야 하며, 하절기 및 동절기를 고려하여 내열성 및 내한성을 가진 것이어야 한다. 또한 장기간 사용시 접촉력이 떨어지지 않도록 내구성을 가진 것이어야 한다.
- 미생물 코팅액은 천연 셀룰로오스, 백토 등 천연재료로 배합된 것으로서, 바이오스톤 볼을 쉽게 함침 및 건조될 수 있도록 묽은 점도를 유지하여야 하며, 함침 후 자연 건조는 30분~1시간 이내에 이루어지는 것이 바람직하다. 또한, 수처리시설 운전 중 물에 의해 벗겨지거나 분해되지 않아야 하며, 피복된 코팅액 내부의 미생물이 쉽게 활성화될 수 있는 성상이어야 한다.
- 바이오스톤 볼 접촉산화시설 하부에는 슬러지 퇴적 및 오염물질 재용출 또는 바이오스톤 볼 공극 폐색을 방지하기 위한 공기 또는 수 세척 설비를 갖추는 것이 바람직하며, 역세척 주기는 주1회, 월1회, 반기1회, 년1회 등 현장여건에 따라 선택적으로 시행한다. 역세척 배관은 폭 1~2m 간격, 공기 또는 세척수 토출공은 길이 50cm~1m 간격으로 배치한다. 단, 세척 및 인발설비는 전기를 이용한 동력시스템이 가장 효율적이거나, 현장 여건상 부득이한 경우에는 슬러지 인발 배관을 지상부 호스커플링으로 연결하여 필요시, 주기적으로 버큘로리 등을 이용하여 강제흡입하여 수동인발하거나, 콤푸레샤를 이용하여 강제 수동 역세척 수 있도록 구성하는 것이 좋다.
- 유입 BOD 기준 20 mg/L 이하의 농업용 저수지 유입수는 경제성을 고려하여 자체 용존산소(DO)만으로 처리하는 무폭기 시스템으로 설계할 수도 있다. 다만, 항상 일정한 처리효율을 유지하기 위해서는 유입 분배조에 상시 공기를 공급하는 전단 폭기방식으로 설계 및 운전하는 것이 가장 효율적이다.

- 바이오스톤 접촉산화조 유입수의 DO는 평균 6~7mg/L 이상을 유지하여야 한다. 다만 방류수의 저수지 영향을 고려하여 최소 DO 2 mg/L 이상이 유지되도록 운영하는 것이 바람직하다. 따라서, 처리수의 DO가 낮은 경우에는 처리수조에 별도의 재폭기 시스템을 구축하는 것이 좋다.
- 바이오스톤볼 접촉산화시설을 습지 형식으로 조성할 경우, 상부에 식재되는 식물은, 가능한 수질정화효율이 높고, 다년생이며, 경관성이 좋은 노랑꽃창포, 갈대, 부들, 물억새, 부처꽃, 줄, 세모고랭이, 달뿌리풀 등의 정수식물을 적용하는 것이 바람직하다.

#### 나. 설계인자

- 주요 설계제원으로는 체류시간, 접촉산화조의 규모, 바이오스톤볼의 충전수량, 바이오스톤 볼의 공극률과 압축강도 등이 있음.
- 체류시간은 유입 BOD 기준으로, 10 mg/L 이하 일때는 1.3 시간, 10~20 mg/L일 경우는 1.5시간, 20 mg/L 이상일 경우는 적정 체류시간을 별도로 검토하여 적용하여야 함.

- 접촉산화조의 규모(V)

$$V(m^3) = \frac{Q \cdot HRT}{24}$$

여기서, Q : 설계 유입유량(m<sup>3</sup>/day)

HRT : 수리학적 체류시간(hr)

- 접촉산화조의 유효용적을 산출하기 위해서는 바이오스톤 볼의 공극률을 고려해야함. 일반적으로 접촉산화조 내에서 바이오스톤 볼의 공극률은 약 60~70% 정도임.

접촉산화조 유효 용적(m<sup>3</sup>)

= 접촉산화조 전체 용적(m<sup>3</sup>) - 바이오스톤 볼이 차지하는 용적(m<sup>3</sup>)

- 바이오스톤볼 충전수량은 다음 식을 이용하여 산출함

바이오스톤볼 충전수량

$$= \frac{\text{접촉산화조 용적} \times \text{조내 바이오스톤볼 공극률}}{\text{바이오스톤볼 용적} \times 100}$$

- 바이오스톤볼 접촉산화조의 최적 처리효율을 위해서는 유하거리(조의 길이)는 최소 5m 이상으로 하고, 유효수심은 유입유량, 부지특성 및 현장의 여건에 따라 1~4m 내에서 결정한다.

- 접촉산화조 유입 및 유출부는 층류흐름 형성을 위한 정류벽을 설치해야함. 다만, 정류벽 정류공의 직경과 개수는 바이오스톤볼의 직경 및 수량을 고려하여 결정함.
- 정류벽의 규격은 접촉산화조의 폭 및 유효높이와 동일하게 결정함. 다만, 정류벽에서 정류공의 면적은 전체의 40% 수준으로 산정함.
- 정류공의 개수는 정류벽에 맞는 바이오스톤볼의 개수와 동일하게 산정함. 또한 정류공의 직경은 바이오스톤볼이 유실되지 않는 크기로서, 정류공의 면적에서 정류공의 개수로 나누어 산정함.
- 유입 BOD 기준 20 mg/L 이하의 농업용 저수지 유입수는 경제성을 고려하여 자체 용존산소만으로 처리하는 무폭기 시스템으로 설계할 수 있음. 다만, 항상 일정한 처리효율을 유지하기 위해서는 유입 분배조에 상시 공기를 공급하는 전단 폭기방식으로 운전하는 것이 효율적임.
- 역세척 배관은 폭 1~2m 간격, 공기 또는 세척수 토출공은 길이 50cm~1m 간격으로 배치함.

#### 4. 운영 및 유지관리를 위한 설계 반영 사항

##### 가. 운영 및 유지관리를 위한 중점 설계 요소

바이오스톤 접촉산화시스템을 현장에 설치하여 운영시에 운영 및 관리를 위한 중점 설계요소는 다음과 같다.

- 전처리 시설
- 바이오스톤볼 접촉산화조
- 송풍기
- 펌프류
- 콤프레셔
- 유입수 분배조
- 처리수조
- 산기관
- 밸브류

##### 나. 운영 및 유지관리를 위한 설계 반영 사항

- 전처리 시설의 모래침전 유무 또는 헤파물 부착 상태 등
- 유입수 분배조 유입수의 정상적 유입점검, 유입구내 토사 퇴적량 조사 및 인발

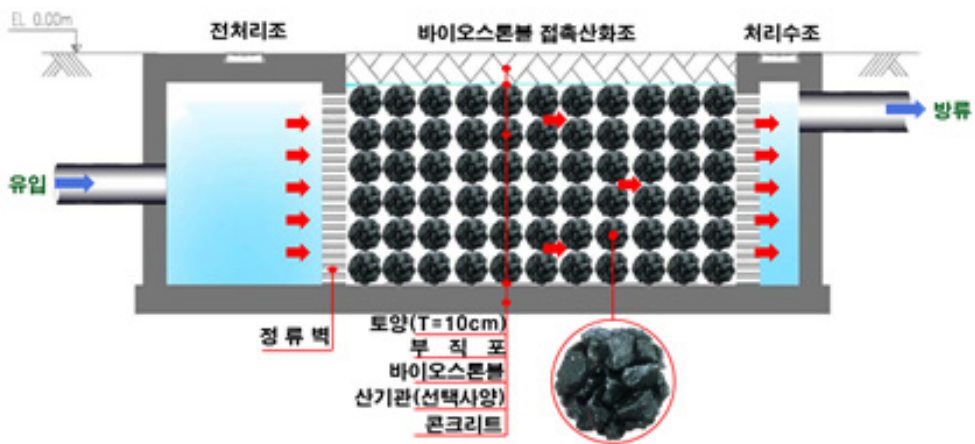


- 바이오스톤 볼 접촉산화조 이물질 제거, 슬러지 퇴적 상태 및 폐색 여부 등
- 처리수조의 협잡물에 의한 막힘 점검, 미처리 SS 및 탈리 미생물 유출 여부 등
- 송풍기 오일 주유상태, 동력전달 벨트상태, 기계 이상 소음 유무상태, 베어링 및 구동부 온도, 전류계 및 압력계의 정상 여부 등
- 산기관의 막힘 여부 및 슬러지 부착 상태, 펌프류 이물질 여부 등 수시 확인
- 밸브류 수동 작동여부, 부식 및 볼트 이완 상태, 작동부 그리스 및 오일 주입 상태
- 콤프레셔 오일 주유상태, 동력전달 벨트상태, 기계 이상 소음 유무상태, 베어링 및 구동부 온도, 전류계 및 압력계의 정상 여부 등
- 바이오스톤 볼 접촉산화시설을 토목구조물이 없는 습지 형식으로 조성할 경우, 상부에 식재되는 식물은 가능한 수질정화효율이 높고, 다년생이며, 경관성이 좋은 노랑꽃창포, 갈대, 부들, 물억새, 부처꽃, 줄, 세모고랭이, 달뿌리풀 등의 정수식물을 적용한다. 식재 이후 식재한 식생이 잘 활착할 수 있도록 경쟁식물을 제거하거나 성장을 억제시키는 것이 바람직하다. 동절기 고사에 의한 오염물질 재용출과 식물의 고사체 부패에 의한 유기물 증가를 방지하기 위하여, 년1회(동절기 고사전) 예초하는 것이 바람직하다. 또한 주기적인 점검을 통해 외래 잡초류 및 환삼덩굴류의 덩굴식물은 자생식물에 비해 침식안정성, 생태서식처, 하천경관 등의 측면에서 불리하므로 제초작업을 하는 것이 바람직하다. 특별히, 수질개선을 위한 습지 등의 보조적인 공정으로 활용하는 경우에는, 목표수질 달성에 필요한 기준 체류시간(1.3hr) 또는 유하거리(5m)와 무관하게 현장여건에 맞추어 단순 충전 포설 깊이, 폭, 길이로 설계 및 적용이 가능하다.

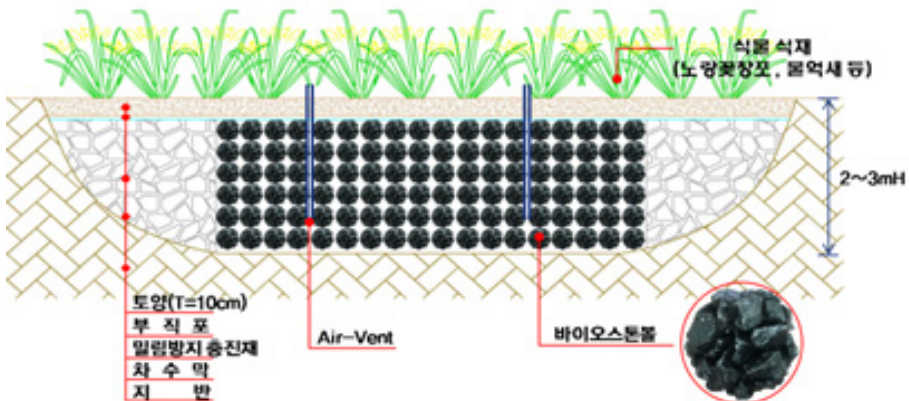
## 5. 설계예시 및 시방서

### 가. 설계예시

- 바이오스톤 접촉산화시설은 구조물형 또는 습지형의 단독시설로 적용하거나, 조합형 인공습지 시스템과 연계하여 인공습지의 지하흐름형 부분 공정으로서 활용할 수도 있다.



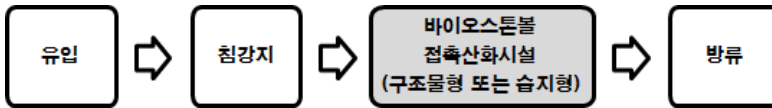
[구조물형]



[습지형]

그림 3. 바이오스톤볼 접촉산화시설의 적용 유형

○ 설계 유형 1(단독처리형)



- 저수지로 유입되는 하천수를 전량 취수하여 단독으로 정화하는 방법
- 취수보를 이용한 자연유하 유입 또는 필요시 펌핑 유입
- 유입하천 둔치 또는 저수지 유입부 여유부지 활용
- 바이오스톤볼로 유입되는 무기성SS 제거를 위한 침사지 또는 침강지 조성
- 주처리 단독공정으로서, 생물학적인 분해에 필요한 최소한의 유하거리(5m이상) 및 체류시간(1.3hr이상) 확보 바람직
- 처리효율 제고를 위하여, 유입분배조에 공기공급시설(폭기시설) 적용 바람직 (유입수 DO 6~7ppm 항상 유지)
- 현장 여건에 따라, 토목구조물 또는 비구조물 습지형으로 선택 적용
- 강우시에는 토사유입 방지 및 시설물 보호를 위하여 침사후 By-pass 운영
- 공극폐색을 방지하기 위하여, 슬러지 자동 역세 및 인발시스템을 갖추거나, 인발배관 지상부 호스커플링 연결로 필요시 콤푸레서를 이용한 수동 강제역세 또는 버큘로리를 이용한 수동 강제인발 시스템 적용

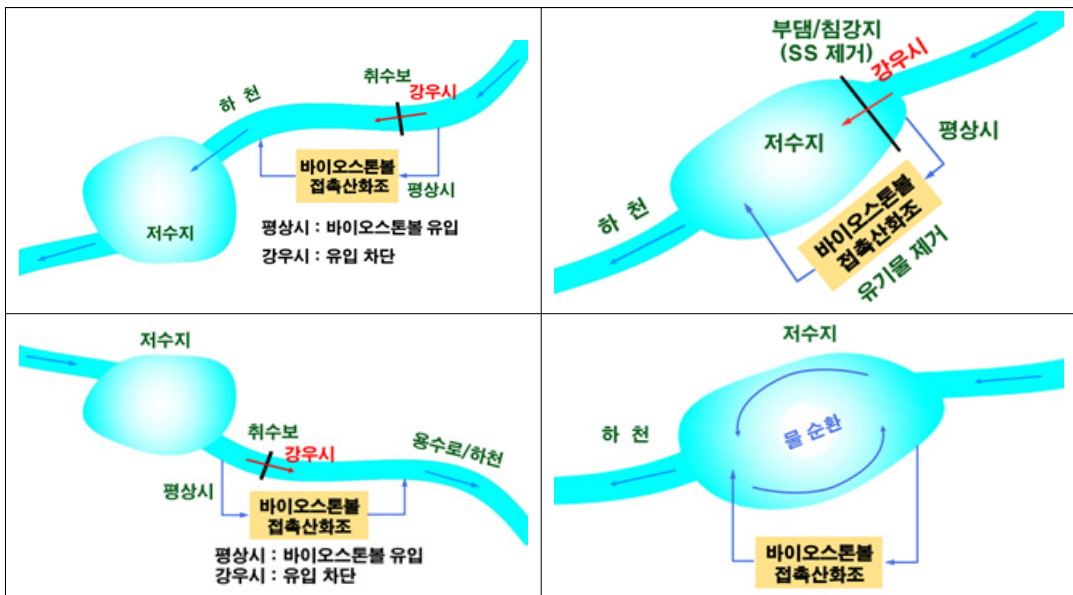


그림 4. 설계유형 1(단독처리형) 적용 예시

○ 설계 유형 2(지하흐름 습지형)



- 조합형 인공습지의 후공정 지하흐름형인공습지로 활용하는 경우
- 기존의 자갈, 모래, 기능성여재 등으로 구성되는 지하흐름형인공습지 충전용 담체를 단순 대체하는 것으로서, 담체간 공극률이 상대적으로 커서 공극폐색 및 유수소통 저해로 인한 Overflow 및 처리유량 감소 문제점 개선 효과
- 지하흐름형의 특성상, 장기간 운영 또는 홍수시 등 비정상운영에 따른 토사 유입 등에 대비하여 역세 또는 슬러지 인발시스템을 구축하는 것이 유지관리적인 측면에서 유리함
- 현장여건에 따라, 자갈이나 모래 또는 기능성여재 등과 병행 적용
- 상부 수생식물은 최소한 30cm 토피가 확보되도록 하며, 수생식물과 바이오스톤볼 경계면에는 부직포와 자갈을 포설함.
- 충전된 바이오스톤볼 담체층으로 상부 수생식물의 뿌리가 파고들어 생육할 경우, 식물 뿌리에 의해 추가적인 수중의 영양염류인 인이나 질소 제거효과를 기대할 수 있음. 단, 원활한 지하 유체흐름에 방해가 되거나, 입자성물질의 퇴적을 가중할 우려도 있으므로, 유입수 성상 또는 식재 식물의 생육특성 등을 면밀하게 고려하여, 부직포 대신 방근시트 적용 등도 함께 검토하는 것이 바람직함
- 바이오스톤볼이 충전된 지하흐름습지 유입수의 용존산소는 높을수록, 체류시간은 길수록 정화효율 향상 및 유지관리적인 측면에서 유리하나, 유입수의 수질이나 전단계 지표흐름습지에서의 처리효율, 경제성 등을 종합적으로 판단하여 가능한 현장 여건에 적합한 제원으로 설계

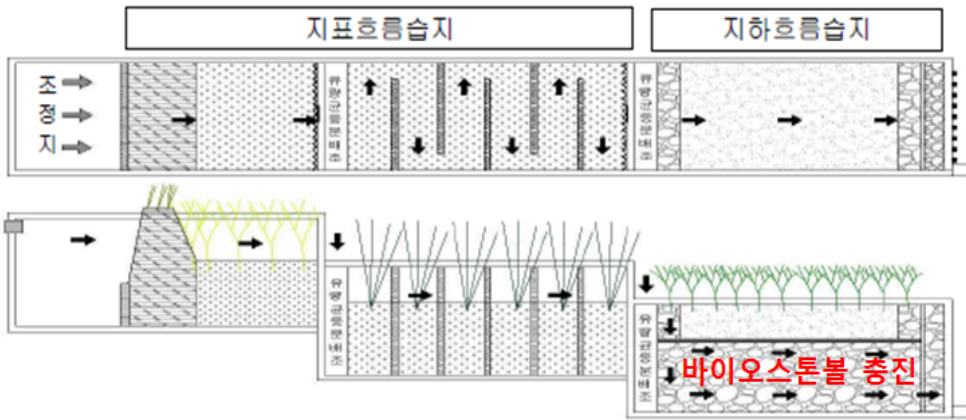
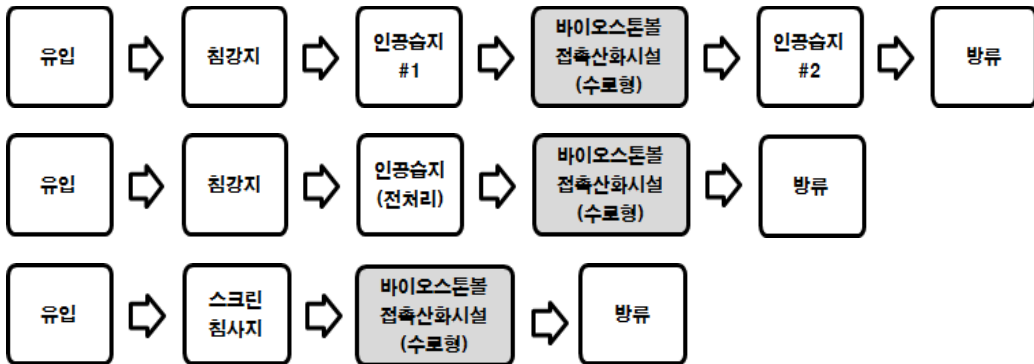


그림 5. 설계유형 2(지하흐름습지형) 적용 예시

○ 설계 유형 3(수로형)



- 습지와 습지를 연결하는 경우, 또는 독립적인 단일 수로로 운영하는 경우, 또는 인공습지 후처리공정으로 적용하여, 인공습지에서는 T-N, T-P 등 영양염류와 초기강우를 처리하고, 바이오스톤볼 접촉산화시설에서는 전단계에서 미처리된 유기물질을 2차로 처리하는 경우
- 공기공급 또는 체류시간이나 분해에 필요한 유하거리 등과 무관하게 단순 포설 또는 충전
- 포설깊이는 30cm이상으로 하되, 수로의 길이가 길어지는 경우에는 매 5m 간격마다 약 2m정도의 침사 및 유지관리를 비포설구간을 두는 것이 좋음
- 수로 상부 또는 호안은 필요에 따라 정수식물을 식재한 식생형으로 선택 적용할 수 있음. 다만, 식재된 식물이 침수에 의해 줄기가 부패되거나 고사되지 않도록 포설된 바이오스톤볼 상부 수심은 최대 30cm를 초과하지 않도록 하여야 하며, 침수에 강한 갈대, 부들, 노랑꽃창포 등의 식물로 선정.
- 포설구간 입구부에는 쓰레기나 협잡물 또는 대량의 토사가 유입되지 않도록 스크린이나 토사유입방지장치를 적용하는 것이 좋으나, 부득이한 경우에는 최소한 소규모 침사지 또는 침강지를 조성하고 오일펜스를 설치하는 것이 바람직함.
- 수로형의 특성상, 홍수시 충전된 바이오스톤볼이 유실되지 않도록 일정 간격마다 말뚝, 타공판, 격벽 등의 밀림방지조치를 하거나, 바이오스톤볼 일정수량을 블록화된 일체형으로 충전 또는 망태로 감싸서 포설
- 현장여건에 따라, 샛강, 도랑형태의 자연수로식 또는 PC구조물이나 콘크리트 현장타설 암거수로식 등으로 선택적 설계. 다만, 상부가 개방되지 않은 암거수로식의 경우에는 점검맨홀이나 역세설비 등을 갖추는 것이 효율적임.

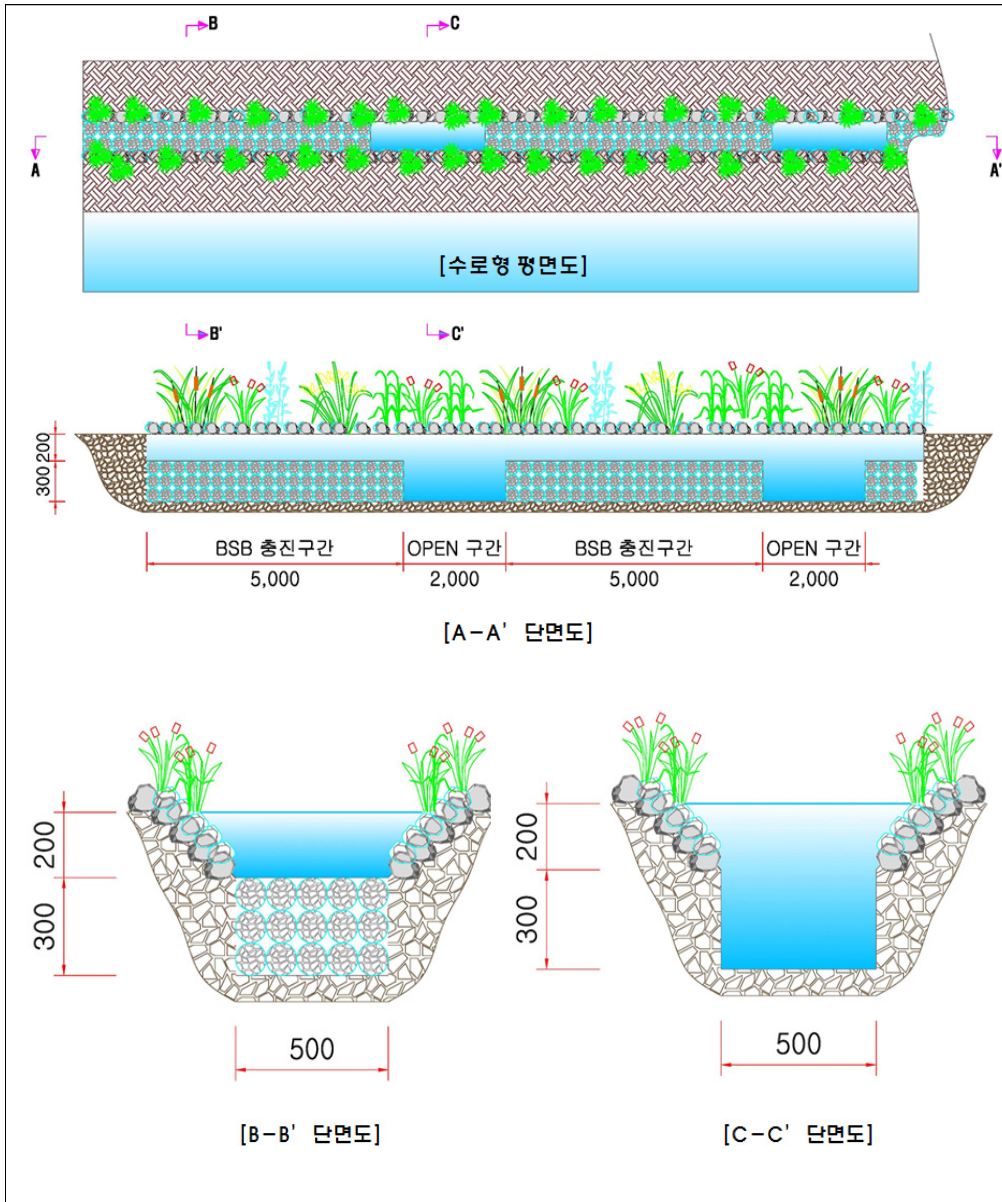


그림 6. 설계유형 3(수로형) 설계 예시(자연수로식)

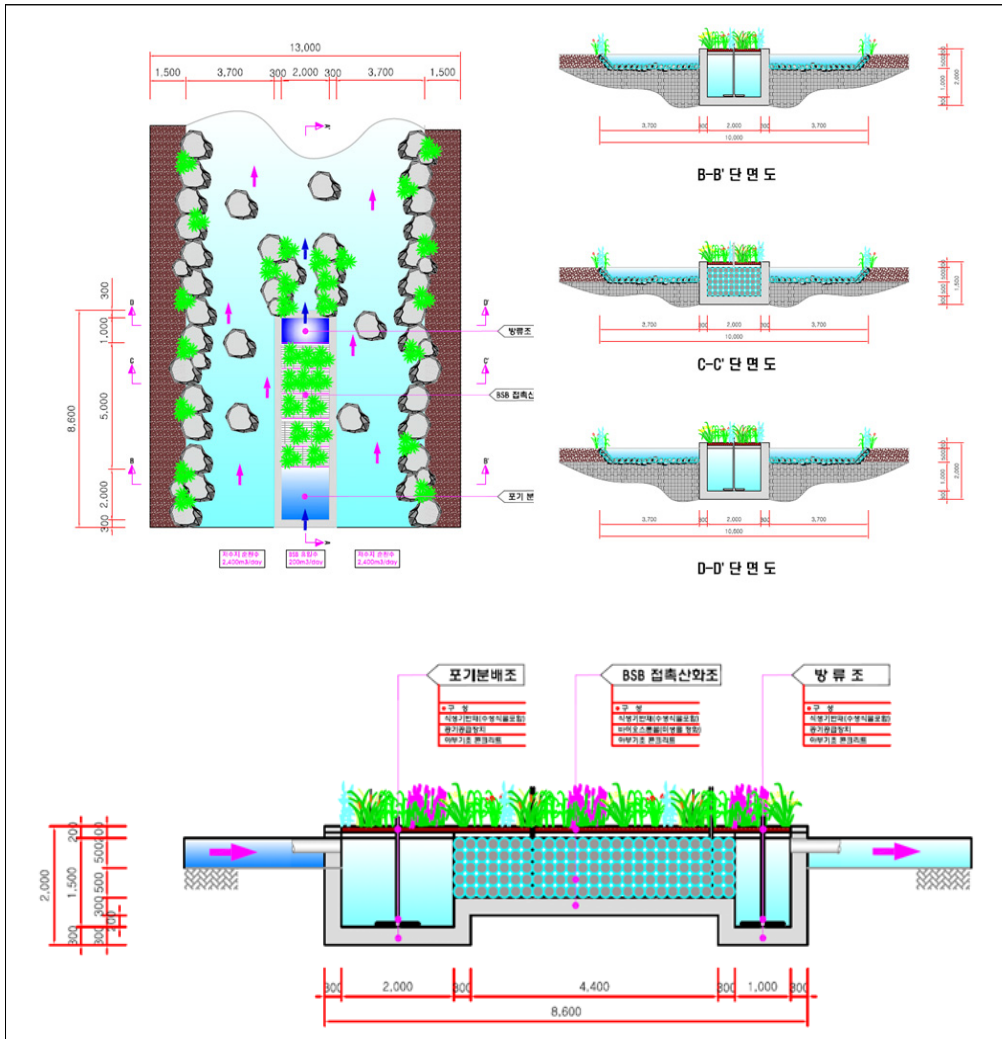


그림 7. 설계유형 3(수로형) 설계 예시(암거수로식)

○ 기타 응용 및 활용방안

- 복합유용미생물이 함침 코팅된 쇠석이나 자갈을, 바이오스톤 볼의 형태 또는 블록형, 봉형, 판형 등으로 다양하게 성형 제작하거나, 일정한 틈이 없이 접합수지만을 도포 및 혼합하여 일반 자갈포설과 같은 방식으로 무작위 포설하는 등 현장 여건에 맞게 선택적으로 응용하거나 활용이 가능





- 접합수지 결합에 의한 구조적 안정성 및 내구성 확보
- 부착미생물에 의한 오염물질 분해 및 쇠석 여과에 의한 수질개선 기능
- 쇠석간 공극에 의한 자연 식물 생육조건 확보(자연발아 유도)

구체적인 활용방안은 다음과 같다.

- ① 수로 또는 습지 사면이나 호안
  - 농업용 관개수로, 인공습지, 습지 연결수로 등의 호안재로 활용
  - 콘크리트 블록 또는 식생매트 대체하여 호안 침식 등에 내구성 확보
- ② 부댐 조성
  - 부댐 내부 충전재로 활용
- ③ 취수보 또는 여울 조성
  - 콘크리트 보를 자연형으로 대체
- ④ 취수보 에이프런 하류부 세굴방지
  - 보 하류부 낙차에 의한 세굴 방지
  - 거석이나 돌망태 또는 콘크리트블록제품 대체
- ⑤ 콘크리트 보 자연형 피복
  - 기존의 콘크리트 보(洑) 표면에 포설하여 피복
  - 피복층 공극 배양토 타설 또는 자연 퇴적 유도
  - 공극간 토양에 의한 식물 생육 또는 자연발아 유도
  - 식물 생육형 자연형 보로 전면 개체 가능
- ⑥ 자연형 어도(魚道) 조성
  - 기존의 콘크리트 블록형 어도 대체
  - 자연형 계단 격벽 조성 및 격벽 식물 생육 유도
  - 식물 생육에 의한 어도 이용 물고기 먹이원 확보로 생태적 기능성 제고

## 나. 시방서

- 바이오스톤 접촉산화시설은 미생물을 이용한 생물학적 처리공법의 특성 면에서 유기물의 흡착, 산화, 분해 등의 과정이 원활히 일어날 수 있도록 최소한의 유하거리(5m 이상) 및 체류시간(1.3hr 이상)이 확보되도록 설계하여야 한다. 단, 인공습지 등 타 공법과 연계하는 보조적인 공정으로 활용하는 경우에는 체류시간과 무관하게 단순 충전 또는 포설할 수 있다.
- 바이오스톤 볼은 최대 직경이  $10\pm 0.5$  cm, 쇠석 크기 20~25 mm 볼 내 부공극률 30~50%, 충전 체적 전체 공극률 60%이상, 압축강도 3 MPa 이상, 반영구적이어야 한다.
- 바이오스톤 볼 접촉수지는 수중 생물에 위해가 없는 친환경적인 재료이어야 하며, 하절기 및 동절기를 고려하여 내열성 및 내한성을 가진 것이어야 한다. 또한 장기간 사용시 접착력이 떨어지지 않도록 내구성을 가진 것이어야 한다.
- 미생물 코팅액은 천연 셀룰로오스, 백토가 주원료인 천연재료로 배합된 것으로서, 바이오스톤 볼을 쉽게 함침 및 건조될 수 있도록 묽은 점도를 유지하여야 하며, 함침 후 자연 건조는 30분~1시간 이내에 이루어지는 것이 바람직하다. 또한, 수처리 시설 운전 중 물에 의해 벗겨지거나 분해되지 않아야 하며, 피복된 코팅액 내부의 미생물이 쉽게 활성화될 수 있는 성상이어야 한다.
- 바이오스톤 볼 접촉산화시설 하부에는 슬러지 퇴적 및 오염물질 재용출 또는 바이오스톤 볼 공극 폐색을 방지하기 위한 공기 또는 수세척 설비를 갖추는 것이 바람직하며, 역세척 주기는 주1회, 월1회, 반기 1회, 년 1회 등 현장여건에 따라 선택적으로 시행한다. 역세척 배관은 폭 1~2m 간격, 공기 또는 세척수 토출공은 길이 50 cm~1m 간격으로 배치한다.

## <첨부> 농림식품 신기술인증제 공고문

농림축산식품부 공고 제2017-506호

### 「농림식품 신기술(NET)인증제」 2017년 하반기 인증 신기술 공고

「농림식품과학기술 육성법」 제12조의2 제4항 및 동법 시행령 제15조의4 제1항과 2항에 따라 농림식품신기술인증제 인증신기술을 다음과 같이 공고합니다.

2017년 12월 29일

농림축산식품부장관

#### ○ 인증신기술

인증번호	인증 기술명	유효기간	업체명	기술보유자 (대표자)
51-048	농업용수 수질개선을 위한 바이오스톤 불 수처리 기술	2년	한국농어촌공사 /수생태복원(주)	정승/김홍섭

## 2017년도 하반기 농림식품 인증신기술 설명서

번호	기술분야		기술명	기관명	신청인 (대표)	유효 기간
	대분 류	중분류				
4	농림 식품 기반	토목· 시설· 환경	농업용수 수질개선을 위한 바이오스톤볼 수처리 기술	수생태복원(주)/ 한국농어촌공사	김홍섭/ 정승	2년
<p>○ 내용</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수처리용 접촉담체인 친환경 바이오스톤볼과 이를 이용한 접촉산화공법은 농업용 저수지로 유입되는 하천수와 오염된 저수지의 수질정화 및 개선을 목적으로 개발된 친환경 수처리 기술</li> </ul> <p>○ 특징</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수처리용 접촉담체인 바이오스톤볼은 친환경적이고 반영구적으로 사용 가능하며, 일반 쇄석(자갈) 접촉담체보다 공극률이 매우 높음(바이오스톤볼 60~70% vs 쇄석 자갈 30~50%)</li> <li>- 공극률이 높아 유체 흐름을 방해하는 폐색현상이 거의 없으며, 내·외부 표면에 오염물질 제거를 위한 다양한 미생물 군집이 형성되고, 군집의 다양성 지수값이 매우 높음(6.5~7.1)</li> <li>- 수질정화를 위한 수리학적 체류시간이 짧고(1.3 시간), 오염물질에 대한 수질정화 효율이 높음(평균 처리효율 BOD 68.9%, COD 44.4%, TOC 18.9% SS 85.5%, 클로로필-a 81.9%, T-N 23.2%, T-P 51.8%)</li> <li>- 유리현상과 긴 먹이사슬로 인한 슬러지 분해 미생물의 서식이 가능하여 슬러지 발생이 적음</li> <li>- 시설설치비용이 경제적(기존 접촉산화법 대비 약 40% 이상 절감)이며, 소요 부지면적이 매우 작고(인공습지의 약 1/50~1/100 수준), 구조물 단독 또는 상부 식생을 적용한 습지형이나 수로형으로 다양하게 적용 가능</li> </ul> <p>○ 적용제품의 개요</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 바이오스톤볼(Bio-Stone Ball)은 2~3cm 크기의 쇄석(자갈)을 친환경 에폭시계 수지로 접착하여 직경 10cm 크기의 구형으로 성형 후 담체 내·외부 표면에 천연셀룰로오스, 백토, 물 및 복합유용미생물(<i>EM bacteria</i>, <i>Bacillus subtilis</i>, 탈질미생물 등)로 구성된 미생물 코팅재로 함침 및 건조시켜 제조한 수처리용 담체</li> <li>- 접촉담체 사용에 적합한 내구성(평균 압축강도 4.3MPa)을 갖고 있으며, 시간 경과 후에도 미생물 코팅 및 부착 상태가 잘 유지됨</li> <li>- 바이오스톤 볼을 충전한 접촉산화공법은 전처리 조와 접촉산화조로 구성되어, 생물학적 및 물리적 처리가 단일 반응조인 접촉산화조에서 이루어지는 매우 콤팩트하고, 짧은 체류시간, 적은 부지면적, 높은 수질정화효율을 특징으로 함</li> </ul>						

## 제2절 무인항법 이동식 다기능 수질정화시스템

### 1. 시설개요

#### 가. 정의

- GPS 항법을 기반으로 무인으로 운전하는 다기능 수질관리시스템으로 원하는 위치에서, 정해진 시간 동안 무인 체류하면서 수질을 정화하고, 접안 도크에서 배터리 충전, 유지관리, 악천 후 대피 등이 가능하도록 설계된 ICT 등 첨단기술이 융복합된 차세대 수질관리/정화 시스템

#### 나. 목적

- 농업용 저수지, 4대강 등 오염된 하천의 수질오염과 부영양화를 사전에 방지하고, 호소, 하천 등 정체수역의 수질을 상시적으로 관리

#### 다. 특징

- 수질관리의 자동화(무인운전 및 원격조정)로 수질관리 인력 및 비용 절감 효과
- 자연태양광 및 풍력 발전의 동력 이용으로 유지관리비용 절감
- 수질정화선의 접안 도크 설치로 자연재난으로부터 안전한 관리 가능
- 저수지 유입 오염물질에 대한 상시 감시로 농업용 저수지의 수질오염 사전 예방 및 오염물질 배출행위 사전 차단
- 처리하고자 하는 대상 수역의 수질 등 현장여건에 따라 맞춤형 수질 정화장치(키트식) 이용으로 수질개선효과의 제고

#### 라. 장단점

##### 1) 장점

- 상시 운영으로 저수지 유입 오염원 감시 및 수질오염의 사전 예방
- 무인 운전 및 원격 조정으로 운영관리 편리 및 인건비 절감
- 태양광 등 자연 에너지 이용으로 동력비 절감
- 수질의 실시간 측정 및 수질자료 실시간 송수신으로 업무의 고도화
- 도크 설치로 장비의 안전한 유지관리

2) 단점

- 태풍 등 기상 악화 시 수질정화선 운행 곤란
- 비상 상황 시 긴급 대처 곤란

2. 정화 원리 및 효율

가. 정화원리

- 무인항법 이동식 수질정화시스템은 필요 목적에 따라 필요한 장비를 키트식으로 장착하여 사용할 수 있도록 고안되었으며, 평상시 수질 관리를 위해 산소 포기장치, 수질/수심 자동측정기를 탑재하여 호 내에 산소를 포기하여 수환경을 개선
- 오염된 저수지의 수질개선을 목적으로 도입하였을 때는 저수지 내의 오염물질 저감을 위한 적정 수질정화장치를 탑재하여 운영
  - 녹조 대량발생 등 비상 상황시 : 녹조 제거제, 미생물 재제 살포
  - 인 등 오염물질 저감 : 초고속 고액분리장치, 응집제 살포장치 등을 탑재하여 수체 내에서 급속응집 및 부상시켜 슬러지 수거

나. 수질정화효율

- 저수지 호 내를 무인으로 이동하면서 수질과 수심을 자동으로 측정하고, 오염원 유입을 감시하며, 평상시에는 산소를 포기시켜 수환경을 개선, 녹조가 발생된 수역에서는 녹조를 효과적으로 제거/수거
  - 1일 처리 대상규모 : 50만 $m^3$ /일(8시간/일, 항속 0.6~1.0km/h 기준)
  - 엔진 : 9HP 이상

3. 설치기준 및 설계인자

가. 설치기준

- 수질관리 및 수질개선을 대상으로 하는 저수지의 규모, 수질오염상태, 수질개선 목표기준 등을 기준으로 무인항법 이동식 수질정화시스템의 용량 및 규모를 결정한다.

\* 수질오염 사전예방을 위한 수질관리 측면에서 저수지 유효저수량 50만톤 당 무인 이동 선박선 1대 설치 추천

#### 나. 주요시설 및 시설별 사양(저수지 규모 50만톤 기준)

- 선박크기 : 3m(W)x5m(L)x 0.6m(H), 부력 5톤(LLDPE 부력체)
- 속도, 항속거리 : 정지(0)~4km/h, 1회 충전 시 8시간/1일 운항 가능
- 컨트롤러 MCU : 64Bit CPU, Embedded Linux, 4MB memory, 64GB MSD, USB, Serial, TTL, RS485, 12V On/Off 접점, 평형 수 제어, 이동 목표지점, 속도, 항속거리 제어, 수질장치 제어, 크루즈 컨트롤, 수동제어 모드
- 서버 관제시스템(스마트폰 APP, 인터넷 웹) : 비트맵지도에 이동경로, 작업시작시간, 작업종료시간 설정, 출항이동을 시작, 종료시간 복귀 설정, 수질정화장치 작동 및 정지 설정, 현재의 위치, 진행 시간, 진행 거리, 평균속도 등 모니터링, 지나온 항로, 현재 항해속도 표시, 모의 주행 시뮬레이션 모니터링, 각종장비 작동상태 전송 및 모니터링, 수질지도, 수심지도, 일별, 월별, 년별, 전년대비 통계표, 수동 강제입항 지시 각종 관제상황 문자알람(알림), 기타 기능설정
- UHF 통신 : 2~5W, 400 MHz
- 지도 MAP : 디지털 배열기반 도트매트릭스 비트맵
- 스틸카메라 : 가변셔터, 가변마이크 헤드, 디지털 데이터
- 배터리 : DC24V, 1,200A
- 충전기 : 급속충전기, DC12V~24V, 120A병렬충전
- 엔진, 스크류 : 24~48V DC 1,500W \* 2대(감속포함 총 9마력)
- DGPS : 3D Dynamic Sensor, beacon DGPS Receive, three-antenna system, accuracy of 0.5° rms, 0.25° rms heading, 0.5° rms. tracking, compensated for with 20cm rms accuracy
- 레이더 : 적외선 (905nm) 광원 1등급, 360° 개구각, 5Hz~10Hz 스캔 주파수, 0.5m~250m 작업구역, 10%에서의 스캔범위 80m반사율, 거의 모든 형태 물체감지 가능, ≥ 100ms 반응속도
- 다목적 수질측정기 : Digital Portable Multi Meter(키트 형)
- 풍향, 풍속계 : 바람속도, 공기, 온도, 공기량 측정
- 우량계 : 디지털 우량계
- 태양광 발전 : DC태양광발전 및 충전설비
- 접안 시설 : 보트접안설비, 전자석 고박장치, 선박 충전 Kit, OMR 접안 유도장치

(표 1) 무인항법 이동식 수질정화 선박 제원(저수지 규모 50만톤 기준)

항목	내용
선박크기	3mW x 5mL x 0.6mH, 부력 5톤(LLDPE 부력체)
속도, 항속거리	0(정지)~4Km/h, 1회충전 시 8시간/1일 운항 가능
컨트롤러 MCU	64Bit CPU, Embedded Linux, 4MB memory, 64GB MSD USB, Serial, TTL, RS485, 12V On/Off 접점, 평형 수 제어, 이동 목표지점, 속도, 항속거리 제어, 수질장치 제어, 크루즈 컨트롤, 수동제어모드
서버 관제시스템 (스마트폰 APP, 인터넷 웹)	비트맵지도에 이동경로/작업시작시간/작업종료시간 설정, 출항이동을 시작, 종료시간 복귀 설정, 수질정화장치 작동 및 정지 설정, 현재의 위치/진행 시간/진행 거리/평균속도 등 모니터링, 지나온 항로/현재 항해속도 표시, 모의주행 시뮬레이션 모니터링, 각종장비 작동상태 전송 및 모니터링, 수질지도/수심지도/일별/월별/년별/전년대비 통계표, 수동 강제입항 지시, 각종 관제상황 문자알람(알림), 기타 기능설정
UHF 통신	2~5W, 400MHz
지도 MAP	디지털 배열기반 도트매트릭스 비트맵
스틸카메라	가변서터, 가변마이크 헤드, 디지털 데이터
배터리	DC24V, 1,200A
충전기	급속충전기, DC12V~24V, 120A병렬중전
엔진, 스크류	24~48V DC 1,500W * 2대(감속포함 총 90마력)
DGPS	3D Dynamic Sensor, beacon DGPS Receive, three-antenna system, accuracy of 0.5° rms, 0.25° rms heading, 0.5° rms. tracking, compensated for with 20cm rms accuracy
레이더	적외선 (905nm) 광원 1등급, 360° 개구각, 5Hz~10Hz 스캔 주파수, 0.5m~250m 작업구역, 10%에서의 스캔범위 80m반사율, 거의 모든 형태 물체감지 가능, ≥ 100ms 반응속도
다목적수질측정기	Digital Portable Multi Meter(키트 형)
풍향, 풍속계	바람속도, 공기, 온도, 공기량 측정
우량계	디지털 우량계
태양광 발전	DC태양광발전 및 충전설비
접안시설	보트접안설비, 전자석 고박장치, 선박 충전 Kit OMR 접안 유도장치



#### 4. 운영 및 유지관리를 위한 설계 반영 사항

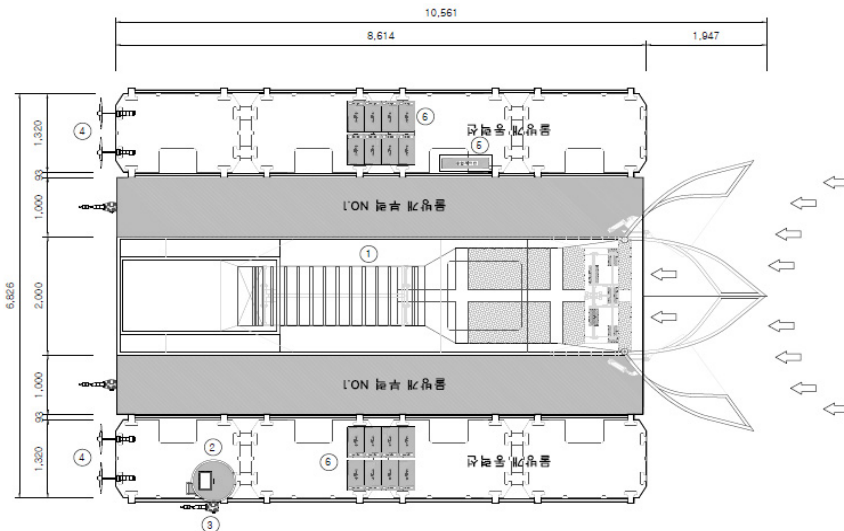
- 저수지 호 내를 무인으로 이동하면서 수질과 수심을 자동으로 측정, 오염원 유입 감시, 산소 포기, 녹조가 발생한 구역에서는 녹조 제거 등을 수행하는 다기능 복합시스템으로서 최소 1일 8시간 기준으로 운행이 가능한 엔진과 동력이 확보되어야 한다.
  - 제거성능 : 50만m<sup>3</sup>/일 이상(8시간/일, 항속 0.6~1.0km/h 기준)
  - 엔진 : 9HP 이상
- 무인항법 이동 선박에 탑재되는 수질정화장치는 고정식이 아닌 필요 목적에 따라 필요한 정화장치를 장착하는 키트식으로 구성되며, 장착할 수 있는 장치는 미생물 살포기(황토, 녹조제거제 등), 고속 고액분리장치, 산소 포기장치, SS 농도 센서 등 적용하는 대상 구역의 수질 상태, 목표수질 등에 따라 수질정화장치를 선정하여야 한다. 특히 녹조가 대량으로 발생하였거나 수질오염도가 심한 호 내에서 오염물질을 제거하고자 하는 저수지에서는 초고속 고액분리장치를 통해 신속하게 호 내 녹조 및 오염물질을 제거할 수 있다.
- 본체 및 부력재는 통신장비, 수질정화 설비 등을 안전하게 부양할 수 있는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.
  - 부력재의 구조적인 안전성 및 강도, 수상 이동성(저수지 수변 수심이 얇은 곳)
  - 장치 운용시 바람 및 너울 등에 대한 충분한 안전성
- 오염물질 제거장치로 응집부상 또는 가압부상장치, 고액분리장치 등을 이용하여 수면에서 응집제 살포 및 스킴 등을 수거하여 선박위에서 슬러지를 여과 및 탈수하여 처리수는 수체로 보내고 슬러지는 육상으로 이송하여 처리하고 하는 경우에는 다음과 같은 공정과 조건을 만족해야 한다.
  - 약품을 저장·살포하여 물속의 녹조를 응집·부상시킬 수 있는 약품 살포장치(약품탱크, 공급펌프 및 배관)를 장착한다.
  - 장치가 전진하면서 수표면에 집적 또는 응집·부상한 녹조체를 호퍼 내로 농축시키고, 후속 공정인 스크린으로 이송한다.
  - 호퍼 내에서 1차 농축된 녹조체는 스트레인레스 재질의 스크린-컨베이어에 연속적으로 이동하면서 탈수와 2차 농축과정이 진행

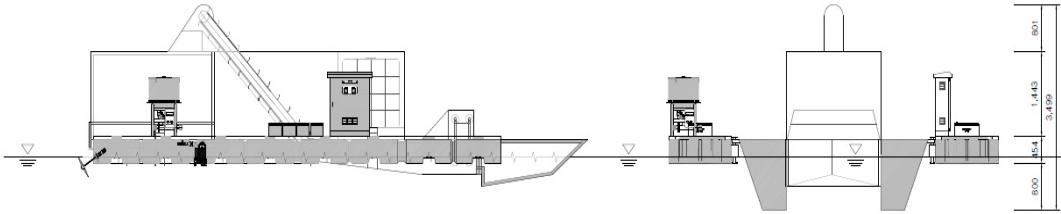
된다.

- 여과 및 탈수를 거친 녹조체는 브러쉬에 의해 스크린으로부터 탈리되고, 브러쉬 청소를 위해 스크래퍼 보조기구를 장착한다.
- 녹조체와 이물질을 분리하여 수거하기 위한 별도의 수집함을 설치한다.
- 육상으로 이송된 슬러지 등은 법에 근거하여 안전하게 처리한다.
- 선박 등을 포함한 모든 장치의 유지보수 및 사후관리 등이 용이하고, 주요 설비(모듈)의 내구성이 보장되어야 한다.
- 제조된 선박을 다른 지역으로의 도로운반 시 법적요건을 충족할 수 있어야 한다.
- 무인항법 이동식 수질정화선은 농업용수 공급을 목적으로 하는 농업용 저수지에서 운영될 장치이므로 수질정화선에 탑재된 일체의 장치 및 설비는 수생태계에 미치는 유해한 영향이 없어야 하며, 유류 유출 등으로 인한 2차 환경오염이 발생되지 않도록 설계 및 제작되어야 한다.

## 5. 설계 예시 및 시방서

### 가. 설계 예시





## 나. 시방서

- 본 장치는 무인 이동 수상 선박으로서 탑재되는 모든 설비 등에 대해 부력체의 구조적인 안전성이 보장되어야 하며, 특히 비상 상황시에도 안전이 최우선적으로 고려되어야 한다.
- 장치의 유지관리, 보수, 사후관리 등이 용이하고 유지관리 비용 측면에서 경제적이어야 하며, 다른 지역으로 이동을 고려 시에는 장치 이동을 위한 도로운반 등에 따른 법적요건이 충족되어야 한다.
- 본 장치 및 장치에 탑재되는 모든 설비는 「선박법」, 「선박안전법」, 「선박설비기준」, 「소형선박의 구조 및 설비 등에 관한 기준」 등 선박을 제작하고 운항과 관련되는 모든 관계법규와 선박 검사기관에서 요구하는 모든 기준을 만족하여야 한다.
- 본 설비의 유지관리, 보수, 사후관리 등이 용이하고, 주요 설비(엔진, 부력체, GPS 수신기, 송호퍼, 스크린컨베이어 등)의 내구성이 보장되어야 한다.
- 본 장치의 사용으로 인한 수생태계에 미치는 영향이 없고, 2차 환경오염이 발생되지 않아야 한다.
- 본 장치의 이동 및 작업과정 중에 유류 유출 등에 의한 수질오염이 발생되지 않도록 설계 및 제작되어야 한다.
- 무인항법 이동식 수질정화선 설계 및 제작에는 고도의 전문기술이 요구되므로 선박제조 전문업체나(이와 동등한 기술력을 가진 업체 가능) 또는 기술 개발 참여업체에 의뢰함이 바람직하다고 판단된다.



## 【부록 2】 융복합 수처리기술 특허등록증

### 1. 기술명 : 수질정화기능을 갖는 생태수로



**특허증**  
CERTIFICATE OF PATENT

**특 허** 제 10-1635966 호  
Patent Number

**출원번호** 제 10-2015-0064359 호  
Application Number

**출원일** 2015년 05월 08일  
Filing Date

**등록일** 2016년 06월 28일  
Registration Date

**발명의 명칭** Title of the Invention  
수질정화 기능을 갖는 생태수로

**특허권자** Patentee  
등록사항란에 기재

**발명자** Inventor  
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.  
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



2016년 06월 28일

**특허청장**  
COMMISSIONER,  
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

최 동 규

## 2. 기술명 : 수생식물 및 접촉여재를 이용한 생태융합형 수상 정화장치



발명의 명칭 Title of the Invention

수생식물 및 접촉여재를 이용한 생태 융합형 수상 정화장치

특허권자 Patentee

등록사항란에 기재

발명자 Inventor

등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

2016년 05월 10일



특허청장  
COMMISSIONER,  
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

최 동 규

### 3. 기술명 : 스크린, 와류, 여과 및 응집기능 복합형 종합 수처리 장치



**특허증**  
CERTIFICATE OF PATENT

<b>특허</b> <small>Patent Number</small>	<b>제 10-1577348 호</b>
<b>출원번호</b> <small>Application Number</small>	<b>제 10-2015-0077910 호</b>
<b>출원일</b> <small>Filing Date</small>	<b>2015년 06월 02일</b>
<b>등록일</b> <small>Registration Date</small>	<b>2015년 12월 08일</b>

발명의 명칭 Title of the Invention  
스크린, 와류, 여과 및 응집기능 복합형 종합 수처리장치

특허권자 Patentee  
등록사항란에 기재

발명자 Inventor  
등록사항란에 기재

**위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.**  
**This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.**



2015년 12월 08일

**특허청장**  
COMMISSIONER,  
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

**최 동 규**

## 4. 기술명 : 접촉산화기능을 갖는 구상체 및 이의 제조 방법

### 출원번호통지서

**출원일자** 2017.07.27  
**특기사항** 심사청구(유) 공개신청(무)  
**출원번호** 10-2017-0095482 (접수번호 1-1-2017-0726272-19)  
**출원인명칭** 수생태복원(주)(1-2012-026117-4) 외 1명  
**대리인성명** 특허법인 이노(9-2009-100081-8)  
**발명자성명** 김흥선 최선화 박세근 서성일  
**발명의명칭** 접촉산화기능을 갖는 구상체 및 이의 제조방법

### 특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납인영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.  
 ※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
 ※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.  
 ※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드  
 ※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내  
 ※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.  
 ※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명이 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.



## 5. 기술명 : 무인자율 운항이 가능한 이동식 수질관리장치

## 출원번호통지서

출원일자 2017.10.23  
 특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(Pn01913)  
 출원번호 10-2017-0137552 (접수번호 1-1-2017-1045100-70)  
 출원인명칭 한국농어촌공사(3-2000-003153-9) 외 1명  
 대리인성명 남건필(9-2007-000723-1)  
 발명자성명 최선화 이승현 이장희  
 발명의명칭 무인 자율 운항이 가능한 이동식 수질관리장치

## 특 허 청 장

&lt;&lt; 안내 &gt;&gt;

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 통보된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.  
 ※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
 ※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허-실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.  
 ※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드>  
 ※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내  
 ※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

## 참 여 연 구 원

목 차		소 속	참여자
1장	연구 총괄(서론)	농어촌연구원	최선화
2장	농업용 저수지 물리적 특성 및 수질오염 진단	농어촌연구원	최선화
3장	농업용 저수지에 적용성이 높은 융복합 수처리기술 개발		
	○ 기존 수처리기술 개발 검토	충북대학교	공동연구기관
	○ 수처리기술 개발방향 정립	농어촌연구원	최선화
	○ 요소기술 개발	농어촌연구원 수생태복원(주)	최선화 협동연구기관
4장	농업용수 융복합 수처리 시스템 현장적용 및 성능평가		
	○ 연구대상지 선정조사 분석	농어촌연구원	최선화
	○ 수질조사 및 현장분석 - 저수지 수질/퇴적물 조사 - 유입하천 수질/유속 조사 - 수처리시스템 수질조사	농어촌연구원	최선화 김민규 허남주 유선아
	○ 수처리효율 분석	농어촌연구원	최선화
	○ 유입수 대책기술 현장적용 Test-bed 구축/운영	수생태복원(주)	협동연구기관
	○ 저수지 수질개선 효과분석을 위한 3차원 모델링 구축	충북대학교	공동연구기관
	○ 무인항법 이동식 현장적용실험	농어촌연구원 두웰네트웍스(주)	최선화 공동기술개발
5장	접촉산화시스템 부착 미생물에 의한 수질정화기작 규명	충북대학교	공동연구기관

	목 차	소 속	참여자
6장	융복합 수처리시스템의 기술성, 경제성 평가		
	○ 유입수 대책기술 기술성 검토	충북대학교 수생태복원(주)	공동연구기관 협동연구기관
	○ 호소수 대책기술 기술성 검토	농어촌연구원	최선화
	○ 경제성 검토	충북대학교 수생태복원(주)	공동연구기관 협동연구기관
7장	융복합 수처리기술 현장적용 및 실용화 방안	농어촌연구원	최선화
8장	결론 및 제언	농어촌연구원	최선화
부록	현장적용 매뉴얼 작성		
	○ 바이오스톤 접촉산화공법	수생태복원(주)	협동연구기관
	○ 무인항법 이동식 수질정화선	농어촌연구원 두웰네트웍스(주)	최선화 공동기술개발
	○ 검토 및 정리	농어촌연구원	최선화
기타	기술지도 및 자문	농어촌연구원	장규상 이승헌



## 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(IV)	
발 행 일	2017. 12.
발 행 인	장 중 석
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.	