



Office



Research



Farming



International

# 농업용 저수지 오염 퇴적물의 관리 기술 개발

## - 농업용 저수지 퇴적물의 오염유형별 관리 방안 연구

Development of Sediments Management Technology  
for Agricultural Reservoirs



농림축산식품부



한국농어촌공사



# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용 저수지 오염 퇴적물의 관리 기술 개발(농업용 저수지 퇴적물의 오염유형별 관리 방안 연구)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2015년 12월 일

주관연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

연구책임자 : 이진경

연구원 : 김이부

최선화

최은희

예한희

유선아

공동연구기관명 : 경희대학교 산학협력단

연구책임자 : 오종민

연구원 : 김태훈

이종준

김지아

김채림

김희수



# 요 약 문

1. 연구과제명 : 농업용 저수지 오염 퇴적물의 관리 기술 개발  
(농업용 저수지 퇴적물의 오염유형별 관리 방안 연구)

2. 연구기간 : 2015년 3월 ~ 2015년 12월

## 3. 연구 개요

### 3.1 연구배경 및 필요성

- 전국의 약 17,500여개의 농업용 저수지중 69.4 %가 설치된 지 50년 이상이며, 51.7 %가 1945년 이전에 설치된 저수지로 전반적으로 국내 농업용 저수지가 상당히 노후화됨
  - 오염물질이 장기간 퇴적되고 퇴적물내 오염물질이 재부유·확산 등을 통해 수계 내 내부오염원으로 재작용 → 부영양화 등 수질악화 및 수생태계 오염 가중
  - 하천과 호소의 퇴적물은 수계로 배출된 오염물질의 종착점이면서 동시에 지속적으로 오염물질을 수계로 배출하는 2차 오염원으로 작용함
- 오염퇴적물의 개선 및 오염평가 규정 신설 등을 위한 농업용 호소 퇴적물의 조사 필요성이 대두되었으며, 대규모 퇴적물 준설 요구 등으로 농업용 호소 퇴적물의 관리가 시급하게 되었고, 농업용 저수지 퇴적물 측정망 신설을 위해 퇴적물오염에 대한 기초조사의 필요성이 제기됨
- 농업용 저수지 퇴적물의 조사·오염도 평가 관리에 대한 실적 및 체계에 대한 연구 미흡
  - 오염퇴적물의 용출을 억제하기 위한 제어기술 연구는 해저 및 하구부 퇴적물에 대하여 다양하게 수행되어 왔으나, 농업용 저수지의 오염퇴적물에 대한 물리특성 분석이나 수질에 미치는 영향을 제어하기 위한 관리 연구는 미진함
- 농업용 저수지 특성에 맞는 오염 퇴적물의 용출 제어기술을 개발하고, 수질 오염에 미치는 영향을 최소화하기 위해 현장 적용 기술 연구 진행 필요

### 3.2 연구 목적

- 본 연구는 농업용 저수지 퇴적물의 오염실태 및 특성을 분석하고, 퇴적물내 오염물질의 용출 분석을 통해 수질오염에 미치는 영향을 파악하였으며, 오염퇴적물 특성에 따라 적합한 제어·관리기술을 제안함으로써 오염퇴적물로 인한 악영향을 최소화하기 위한 방안을 제시하고자 함

### 3.3 연구범위 및 내용

- 1) 농업용 저수지 물리적 특성에 따른 퇴적물 실태 및 오염도 조사·분석
  - 공사관리 저수지 중 부영양화로 인한 중점관리 저수지 71개에 대한 퇴적물의 오염현황 및 특성 분석
  - 저수지의 물리적 특성과 퇴적물과의 상관성 분석
- 2) 농업용 저수지의 수질 특성 및 오염도 조사·분석
  - 농업용수 오염원 및 수질현황 분석
  - 오염지구별(오염원, 설치년도, 저수량 등) 수계의 심층에 따른 수질특성 변화와 오염부하 분석
- 3) 오염퇴적물이 수질오염에 미치는 영향 분석
  - 오염퇴적물의 수질오염 영향도 분석  
: 정밀조사 지구의 퇴적물 오염특성, 용출률 등을 분석하여 저수지의 수질에 미치는 영향도(영향율) 분석 - 정밀조사 대상 저수지(4개 지구)
  - 수질오염 영향을 제어하기 위한 인자 도출  
: 오염퇴적물에 의한 수질오염 저감 및 수질 개선을 위한 고려 인자 검토
- 4) 농업용 저수지 퇴적물 오염 유형 분류 분석
  - 퇴적물 오염도 조사 결과를 통한 오염 유형별 특성 분류
  - 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적오염도 분석 및 물질수지 검토
- 5) 퇴적물 특성 및 제어기술 연구 동향, 적용 사례 분석
  - 국내외 퇴적물의 특성 연구 동향 조사
  - 퇴적물 제어기술 현황 및 사례 분석

## 4. 주요 연구결과

### 4.1 퇴적물의 오염 특성과 제어관리 기술 동향

- 수질 및 수생태계에 대한 퇴적물의 악영향으로는 퇴적물에 포함된 유기물이 미생물에 의해 분해되어 저서생물의 생존에 치명적인 악영향을 미치며, 침전된 유기물이 분해되어 무산소 환경이 되면 인(P), 질소(N) 등의 영양염류가 다시 무기이온 상태로 수중에 용출되어 영양염류의 증가 요인으로 작용한다. 이러한 여러 영향들은 퇴적물에 서식하는 저서생물과 먹이사슬을 통해 연결되어 있는 수생생물 및 인간에게 큰 악영향을 미칠 수 있음
- 저층 퇴적물에 존재하는 질소화합물은 대부분 입자성 유기질소에 의해 좌우되나 저층으로부터 용출 즉, 물리적인 확산과정에 의해 수층으로 이동되는 질소는 대부분 암모니아성 질소 형태로 존재
- 저층 퇴적물 내의 인은 주로 퇴적물 입자에 포함되어 있으며, 표면에 흡착되어 있는 용존 가능한 형태로 존재함. 퇴적물 중의 질소는 거의가 유기성질소가 대부분이나 인은 유기성인 형태보다는 주로 무기성 인의 형태로 존재함

### 4.2 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 현황 및 특성

#### 1) 퇴적물의 오염 실태 분석

- 농업용수 수질기준을 초과하는 연구 대상 저수지 71개에 대하여 퇴적물 오염 실태를 조사한 결과, 강열감량 10.5 %(4.5 ~ 16.1 %), 총질소 3,480 mg/kg(690 ~ 12,669 mg/kg), 총인 1,299 mg/kg(480 ~ 2,296 mg/kg)으로 퇴적물의 오염 수준이 높으며, 아래 그림에서와 같이 한강하류, 대청호의 퇴적물 제거기준을 초과하는 지구가 상당수 존재하는 것으로 조사됨

#### 2) 오염원에 따른 퇴적물 오염 특성 분석

- 축산계와 생활계 오염원에 따라 퇴적물 특성의 차이가 있는지 확인하기 위하여 t-검정을 실시한 결과, 각 오염원에 대해 퇴적물의 특성이 유의한 차이( $p < 0.05$ )가 있음을 확인함
- 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염도 분석결과, 생활계보다 축산계에서 강열감량, 총질소, 총인의 오염도가 높게 나타났으며, 저수지의 설

치년도가 1960년을 기준으로 설치 경과 년수가 오래된 저수지에서 오염원의 종류와 상관없이 오염도가 높게 조사됨

- 3) 물리적 환경인자, 토지이용도, 오염유입부하와 퇴적물 오염 특성에 대한 분석
  - 오염된 농업용 저수지의 물리적 환경인자간의 상관성 확인 결과, 모든 항목에서 설치년도와 부(-)의 상관관계를 가지며, 총인은 축산계 오염원에서 유역면적/만수면적이 부(-)의 상관관계를 보임
  - 오염된 농업용 저수지가 토지이용별 오염부하에 따른 퇴적물 오염특성과의 상관성을 분석한 결과, 토지 이용별 오염부하량/총 토지 오염부하량과의 관계에서 강열감량과 총인은 오염원의 종류와 관계없이 전(田)의 이용형태와 정(+)의 상관성을 가지는데, 특히 축산계에서 전과의 상관성이 생활계보다 높은 것으로 나타남
  - 토지이용별(오염부하량)과의 관계에서 답(畓)과 축산계의 총질소와 정(+)의 상관성을 가지는 것으로 분석되었으며, 생활계 오염원의 경우 토지이용도와는 관계가 적은 것으로 나타남
  - 퇴적물 중 총인은 [BOD, TP 토지계 오염부하량/BOD, TP 발생부하량]과 부(-)의 상관성을, [TN, TP 축산계(돼지) 오염부하량/TN, TP 발생부하량]이 정(+)의 상관성을 보임
- 4) 퇴적물 오염 특성과 수질 오염 특성과의 상관성 분석
  - 퇴적물중 총인이 수질오염과 가장 상관성이 높으며, 수질의 각 항목과 정(+)의 상관성을 나타냄
  - 수질오염 개선을 위해서는 퇴적물중 총인을 제어인자로 선정해야 하며, 퇴적물중 총인 저감을 위한 제어기술 개발 적용시 수질오염 항목의 농도 저감 및 수질 개선의 효과가 클 것으로 판단됨

#### 4.3 오염퇴적물의 용출 및 수질에 미치는 영향

- 1) 퇴적물중 오염물질의 용출 특성 비교 분석
  - 생활계 오염원과 축산계 오염원에 관계없이 모두 혐기조건에서 용출이 활발하게 진행되었으며, COD, T-N, T-P중 혐기조건에서 T-P의 농도가 오염원과 관계없이 가장 크게 용출되는 경향을 나타내어 수계내 저층부에서 혐기조건인 형성시 수층으로 총인이 용출되어 수질 악화의 원

인으로 작용할 수 있음

- 현장의 수층별 수질조사 결과, 계절에 따라 저층부의 산소농도가 0~2 mg/L로 혐기에 가까운 조건이 형성됨을 확인하였으며, 이후 수계내 순환 흐름에 따라 수질이 악화되는 경향을 나타냄

## 2) 오염퇴적물의 수질 오염 영향 분석

- 혐기상태일 때 퇴적물 중 오염물질이 용출이 활발하게 일어나 수질 오염에 영향을 더 크게 미치는 것으로 분석되었으며, 인의 경우 60년대 이전에 설치된 인평과 이담 저수지에서 각각 14.44 %, 22.13 %로 용출로 인한 수질오염 영향이 큰 것으로 분석됨. 오염원에 따른 영향으로 구분하면, 생활계오염원 저수지에서 11 %, 축산계오염원 저수지에서 13.7 % 수질에 영향을 미치는 것으로 나타남

## 4.4 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적 오염도 분석

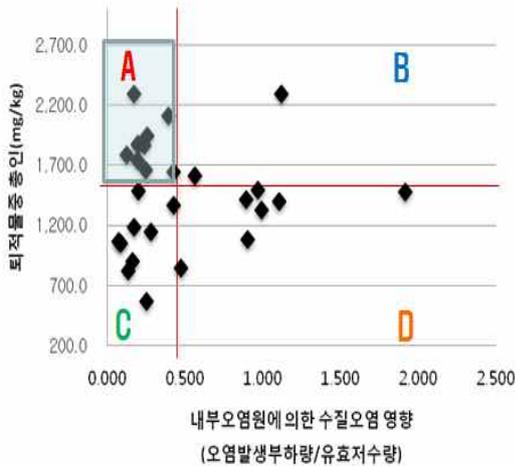
- 본 연구의 조사에서 예년에 비해 적은 유출량이라는 하나 유출이 발생하였으며, 비점오염원에 의한 오염물질의 수계 유입 과정에 대한 분석을 위해 강우 전, 후의 수질 변화를 조사함으로써 오염물질의 유입 · 이동 · 퇴적의 과정을 조사함
- 저수지의 물질수지에 의해 강우 전, 후의 오염물질 농도 차는 저수지내 퇴적되거나 용출되어 내부오염원으로 작용할 수 있다는 것을 의미함
- 인평저수지의 경우 내부오염에 의한 수질오염 영향이 상당히 큰 것으로 분석되었으며, 이는 2015년의 적은 강수량으로 저수율이 낮아 수질이 악화되었음을 의미하며, 이러한 과정에서 내부오염으로 인한 퇴적물의 오염물질이 수질악화에 영향을 더 크게 미쳤을 것이라 판단됨
- 적은 강우와 가뭄으로 인해 수심이 낮아진 수계에서, 유입된 비점오염물질이 수체 환란에 의해 용출 및 이동 과정을 거치면서 수질오염을 가중시킬 것이라 추정됨

## 4.5 퇴적물의 오염 유형 및 제어 관리 방안

### 1) 퇴적물의 오염 유형 및 영향 인자

- 저수지 수질의 부영양화에 대한 제한인자인 T-P의 농도가 농업용수

수질기준인 0.1 mg/L를 초과하는 저수지를 대상으로, 퇴적물중 총인에 대해 오염평가 기준인 1,600 mg/kg, 유입되는 오염발생부하량/유효저수량을 통해 저수지가 오염부하를 수용할 수 있는 능력을 기준으로 4개의 퇴적물 오염 그룹으로 분류



- **A : 내부생산형 퇴적물 오염 그룹**  
(적극적인 퇴적을 제어 기술 적용, 준설, 캠프, 응집제 등)
- **B : 외부원인형 퇴적물 오염 그룹**  
(외부 오염유입 차단 + 퇴적을 용출억제, 저층폭기, 물순환)
- **C : 잠재형 퇴적물 오염 그룹**  
(퇴적을 관리되지 않으면, 퇴적물로 인한 수질오염 진행 우려, 캠프, 고정화/안정화, 저층폭기, 물순환 등)
- **D : 지속관리형 퇴적물 오염 그룹**  
(유입부하 억제+ 수질개선기술 적용으로 수질개선 효과, 퇴적물에 대한 지속적 모니터링 필요)

## 2) 퇴적물의 오염 유형에 따른 관리 방안

- 각 해당 분류의 그룹별 관리 방안과 고려 인자는 다음과 같으며, 저수지의 오염 특성을 파악하여 해당 저수지에 맞는 최적의 제어 관리 기술을 선정하여 적용하는 것이 가장 중요함



## 5. 기대효과 및 실용화방안

### 5.1 기술적 측면

- 퇴적물 제어관리로 농업용 저수지 수질개선 및 기술 적용 효과의 지속성 향상 기대
  - 기존 개발된 수질개선기술 적용의 실효성을 높이기 위해 동반되어야 하는 퇴적물 제어기술 적용으로 수질개선 효과를 배가 시킬 수 있음  
: 2014년 공사관리 저수지 14개소 수질개선사업(사업비 총 9,662백만원)
- 농업용 저수지의 유형별 퇴적물 특성 분석연구는 퇴적물 제어기술 개발을 위한 기본 연구로써 농업용 저수지 오염 퇴적물 개선사업 추진시 기초자료로 활용가치가 높음
- 수질개선 효과의 극대화를 위해 수질개선 기술과 함께 퇴적물 제어가 진행되어야 하며, 이를 통해 지속적인 수질개선의 효과를 배가 시킬 수 있음

### 5.2 경제·산업적 측면

- 오염퇴적물로 인한 부영양화, 녹조 등 사회적 환경문제 감소 및 수서 생태계 회복 등을 통한 종합적인 수환경개선 기대
- 퇴적물 관리를 통한 노후 저수지의 저수능력 향상으로 경제성 제고 효과 기대
- 양질의 농업용수 공급을 통한 우수농산물 생산기반 구축으로 국제시장에서 경쟁력을 갖춘 고품질 농산물 생산 가능
- 농업용수 수질개선으로 고부가치의 유기농, 친환경 농산물 등의 생산을 통해 농가의 소득증대 뿐 아니라, 친수공간 확보, 농어촌 생활환경 개선 등의 효과 기대

# Summary

1. Title : Development of Sediments Management Technology for Agricultural Reservoirs

2. Period : 2015. 3. ~ 2014. 12.

## 3. Necessity and Objectives

### 3.1 Necessity

- Generally, Korea's agricultural reservoirs have been very worn out. 69.4% of about 17,500 agricultural reservoirs have been more than 50 years since it had been constructed, and 51.7% of them had been constructed before 1945.
- There is a need to investigate the sediment pollution of the reservoirs as well as enforcement of regulations and more evaluations. There is a large scale dredge residue in the agricultural which will be needing attention. Preliminary survey of polluted sediments is needed for installation of measurement network for agricultural reservoirs.
- There needs to be a development that can release the controlling systems to reduce the polluted residues to minimize water pollution.

### 3.2 Objectives

- This study analyzes the characteristics and contamination of sediment for agricultural reservoirs, Investigate the effect of water pollution due to the release of pollutants. For ways to reduce the adverse influence of the contaminated sediment it was present, by proposing an appropriate control and management technology based on the type characteristics of contaminated sediment.

## 4. Scopes and results

### 4.1 Review on Control · Management Technology and Characteristics for Contaminated Sediments

- Contaminated sediment has an adverse effect on water quality and aquatic ecosystems. Organic matter is decomposed by microorganisms and threaten the survival of the benthos. The degradation · dissolution of the precipitated organic matter act as a factor for increasing nutrients in the water. These multiple impacts may adversely affect aquatic organisms and to humans through the food chain that inhabit the sediment and benthic.
- The nitrogen compounds present in the sediments is influenced by many particulate organic nitrogen. However, nitrogen is to be moved into the water by dissolution · diffusion from the sediment, mostly present in the form of the ammonium nitrogen.
- Phosphorus is present in the sediment is mainly contained in the sediment particles. Phosphorus are present in dissolved form is adsorbed to the surface of sediments as possible. Phosphorus is mainly present in the form of inorganic phosphorus.

### 4.2 The contamination and characteristics of Sediments for the contaminated agricultural reservoirs

#### 1) Contamination of sediments in contaminated agricultural reservoirs

- Sediment contamination analysis result for eutrophic agricultural reservoirs , loss ignition 10.5%(4.5 ~ 16.1 %),, total nitrogen 3,480 mg/kg(690 ~ 12,669 mg/kg), total phosphorus 1,299 mg/kg(480 ~ 2,296 mg/kg) higher the contamination of sediments.

#### 2) Characterization of sediments on the pollution sources

- Depending on the sources and the characteristics of the sediments difference ( $p < 0.05$ ), the contamination of sediments high in livestock sources than from living sources.

- Sediment contamination of eutrophic agricultural reservoir analysis, Loss Ignition, Total Nitrogen, Total Phosphorus of sediment was investigating the pollution levels are high in livestock sources. Also the pollution level in the reservoir older than the 1960 year was analyzed to install high.

### **3) Characterization of sediments on physical environmental factors, land use, pollutant loads entering**

- The correlation between the physical environment factors and the characteristics of sediments were analyzed in eutrophic agricultural reservoirs. All items in the sediment has a negative correlation(-) to the installation year. The correlation between phosphorus and [basin area / area of full water] appear negative(-) in livestock sources
- The correlation between the type of land-use and the characteristics of sediments were analyzed in eutrophic agricultural reservoirs. Loss Ignition and Total Phosphorus of sediment has a correlation of the positive(+) to farmland.
- Total nitrogen pollution in the rice fields and livestock it was analyzed as having a high correlation, depending on the use of land.
- Total Phosphorus in the sediment has a negative correlation(-) to [BOD, TP land-based pollution load / BOD, TP total generated load], and has the positive(+) correlation(-) to [TN, TP livestock (pig) pollutant load / BOD, TP total generated load].

### **4) Characterization of sediments on Water Quality**

- Total Phosphorus in the sediment most significant affect of water pollution, has a positive correlation(+) to the characteristics of water
- The total phosphorus in sediment were selected as a control factor for the improvement of water pollution, it is effective for improvement and management techniques of water quality control.

## **4.3 Effect of Water and release of Contaminated sediments**

## **1) Analysis on the release characteristics of Contaminated sediments**

- Regardless of the living and livestock pollution sources, the release of sediment has been actively carried out under anaerobic conditions. Especially dissolved phosphorus can act as a source of water pollution when anaerobic conditions.
- The result of the aqueous layer quality in the field investigation, the oxygen concentration is low, a 0.2 mg/L depending on the season, this means formed anaerobic conditions. Then Water quality is worse after the water flow into my circulation.

## **2) Effect on Water Pollution of Contaminated sediments**

- In the case of anaerobic conditions, reservoirs installed before 1960 were found to receive the impact on water quality by 14.44 ~ 22.13 %. The impact factor(%) according to the pollution sources, was investigated by living source 11%, livestock source 13.7% of reservoirs.

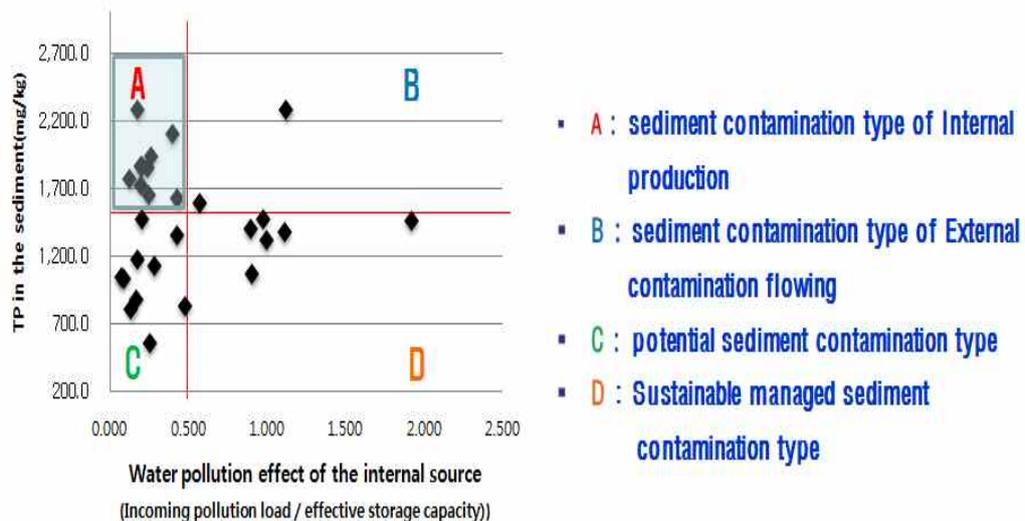
## **4.4 Analysis on Contaminated sediments in accordance with the variation of the pollution load flowing**

- By investigating changes in water quality when Before and after about the storm, we analyzed the process of introduction, moving and deposit of contaminants.
- For inpyeong reservoir water, pollution effects of internal contamination it has been analyzed to be quite large. This is because the water quality was deteriorating with little rainfall and low yield in 2015.
- The influx contaminants of non-point sources is estimated will be adding to water pollution, throughout the process of dissolution and moving due to water tribulation.

## 4.5 Pollution type and control · management of Contaminated sediment

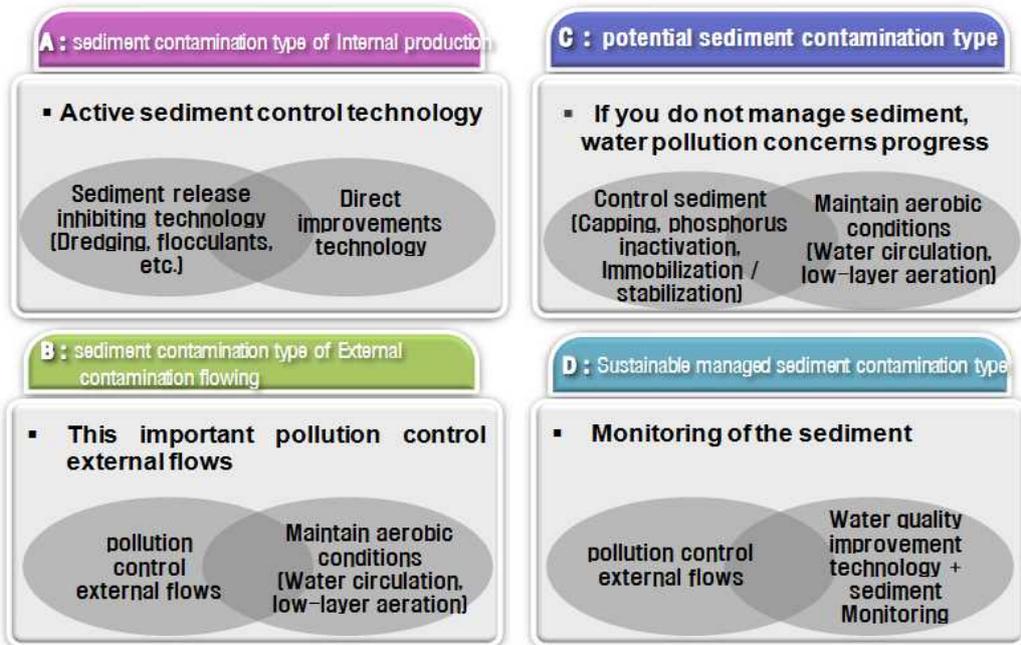
### 1) Pollution type and Impact factor of Contaminated sediment

- The study were classified into the 4 types with sediments characteristics of the agricultural reservoir to be contaminated internal sources. (Sort by TP of water exceeding the target of 0.1 mg/L which is agricultural water quality standards/ Total phosphorus in sediment of 1,600 mg/kg which is contamination assessment criteria/ Water pollution effect of the internal source Incoming pollution load / effective storage capacity  $\approx$  0.5)



### 2) Control and management of Contaminated sediment

- Each type of management plan and considering factors, It is important to select the best control technology on contaminated sediments' characteristics of the reservoir



## 5. Expectation and utilization of the results

- Take advantage of the monitoring projects and improvement projects for contaminated sediments as a basis study
- Development of control and management for agricultural technology of the contaminated sediment reservoir characteristics
- The Establish of management system for Korean agricultural reservoirs' Contaminated sediment



# - 목 차 -

|  |    |
|--|----|
| <b>1장. 서론</b> .....                          | 1  |
| 1절. 연구 배경 및 목적 .....                         | 3  |
| 1. 연구 배경 및 필요성 .....                         | 3  |
| 2. 연구 목적 .....                               | 5  |
| 2절. 연구의 내용 및 추진 체계 .....                     | 6  |
| 1. 연구 목표 및 범위 .....                          | 6  |
| 2. 연구 내용 .....                               | 7  |
| 3. 연구 추진 체계 .....                            | 8  |
| 3절. 기대효과 및 활용 방안 .....                       | 9  |
| 1. 기술적 측면 .....                              | 9  |
| 2. 경제·산업적 측면 .....                           | 10 |
| <br>   |    |
| <b>2장. 퇴적물의 오염특성과 제어 관리 기술 동향</b> .....      | 11 |
| 1절. 퇴적물의 오염 특성 및 영향 .....                    | 13 |
| 1. 퇴적 특성 및 오염의 기원 .....                      | 13 |
| 2. 퇴적물 내 물질의 순환 과정 .....                     | 15 |
| 3. 오염퇴적물의 수서 생태 영향 .....                     | 20 |
| 4. 퇴적물과 수체의 상호 유기적 연계성 및 용출 특성 관계 .....      | 23 |
| 5. 퇴적물의 SOD와 COD의 관계 .....                   | 28 |
| 2절. 국내외 퇴적물 관리 기준 및 현황 .....                 | 29 |
| 1. 국내 퇴적물 관리 현황 .....                        | 29 |
| 2. 국외 퇴적물 관리 현황 .....                        | 30 |
| 3. 국내외 퇴적물 관리 기준 및 지침 .....                  | 32 |
| 3절. 국내외 퇴적물 제어·관리 기술 및 적용 사례 .....           | 39 |
| 1. 유입오염원의 제어·관리 기술 및 적용 사례 .....             | 39 |
| 2. 호내 퇴적물 제어·관리 기술 및 적용 사례 .....             | 44 |
| <br>   |    |
| <b>3장. 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 현황 및 특성</b> ..... | 71 |

|   |           |
|---|-----------|
| 1절. 오염실태 조사 지구의 선정 .....                    | 73        |
| 1. 연구범위 및 방법 .....                          | 73        |
| 2. 연구 대상지구 선정 .....                         | 76        |
| 2절. 오염된 저수지의 퇴적물 오염 특성 .....                | 79        |
| 1. 오염된 저수지의 퇴적물 오염 현황 .....                 | 79        |
| 2. 오염원에 따른 퇴적물 오염 특성 분석 .....               | 81        |
| 3. 설치년도에 따른 퇴적물 오염 특성 분석 .....              | 82        |
| 4. 물리적 환경인자와 퇴적물 오염 특성과의 상관성 분석 .....       | 88        |
| 5. 토지 이용도에 따른 퇴적물의 오염 특성 분석 .....           | 89        |
| 6. 저수지 유입 오염부하에 따른 퇴적물의 오염 특성의 상관성 분석 ..... | 91        |
| 3절. 오염된 농업용 저수지의 수질 오염 특성 .....             | 93        |
| 1. 연구 대상지구(71개)의 수질 오염 현황 .....             | 93        |
| 2. 수질 오염 특성과 퇴적물 오염 특성에 대한 상관 분석 .....      | 97        |
| <br>  |           |
| <b>4장. 오염퇴적물의 용출특성 및 수질에 미치는 영향 .....</b>   | <b>99</b> |
| 1절. 정밀조사 지구의 선정 .....                       | 101       |
| 1. 연구범위 및 방법 .....                          | 101       |
| 2. 연구 대상지구 분류 및 선정 .....                    | 101       |
| 3. 조사 수행 방법 .....                           | 106       |
| 4. 조사 항목 및 분석방법 .....                       | 107       |
| 2절. 정밀조사 지구에 대한 오염도 조사 결과 .....             | 113       |
| 1. 생활계오염원 저수지의 수질 및 퇴적물 오염도 조사 결과 .....     | 113       |
| 2. 축산계오염원 저수지의 수질 및 퇴적물 오염도 조사 결과 .....     | 119       |
| 3. 정밀조사 대상 저수지의 오염 현황('14~'15) .....        | 125       |
| 3절. 퇴적물의 용출에 대한 비교 분석 .....                 | 129       |
| 1. 분석 목적 및 방법 .....                         | 129       |
| 2. 생활계 오염원 저수지의 조건/항목별 용출시험 결과 .....        | 132       |
| 3. 축산계 오염원 저수지의 조건/항목별 용출시험 결과 .....        | 144       |
| 4. 평균 용출 속도 비교 분석 .....                     | 158       |
| 4절. 퇴적물의 수질 오염 영향 및 제어 인자 .....             | 161       |
| 1. 조건에 따른 저수지의 총 용출량 .....                  | 161       |
| 2. 오염퇴적물이 수계에 미치는 영향 분석 .....               | 162       |

|   |            |
|---|------------|
| 3. 연구 대상 저수지의 퇴적물과 수질 오염 제어 인자 .....      | 165        |
| <b>5장. 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적 오염도 분석 .....</b> | <b>167</b> |
| 1절. 조사 지구의 특성 및 현황 .....                  | 169        |
| 1. 조사 목적 및 방법 .....                       | 169        |
| 2. 유입 하천의 강우시 수질 조사 결과 .....              | 170        |
| 3. 강우 사상에 대한 비점오염물질의 유입특성 .....           | 173        |
| 2절. 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적물 특성 .....           | 177        |
| 1. 유입/유출 추정량을 통한 물질수지 .....               | 177        |
| 2. 실측자료를 통한 물질수지 .....                    | 178        |
| <b>6장. 퇴적물의 오염 유형 및 제어 관리 방안 .....</b>    | <b>181</b> |
| 1절. 퇴적물의 오염 유형 및 영향 인자 .....              | 183        |
| 1. 퇴적물의 오염 유형 분류 기준 및 영향 인자 .....         | 183        |
| 2. 오염퇴적물의 특성별 유형 분류 .....                 | 183        |
| 2절. 유형별 퇴적물 제어·관리 방안 .....                | 185        |
| 1. 퇴적물 제어 관리 기술 선정 기준 및 절차 .....          | 185        |
| 2. 오염퇴적물 특성에 따른 관리 방안 .....               | 188        |
| <b>7장. 종합 평가 및 결론 .....</b>               | <b>191</b> |
| 1절. 주요 결론 및 요약 .....                      | 193        |
| 2절. 기대 효과 및 향후 계획 .....                   | 195        |
| <b>8장. 참고문헌 .....</b>                     | <b>197</b> |

## - 표 차 례 -

|   |    |
|---|----|
| (표 2.1-1) 퇴적물에 의한 영향 .....                                    | 21 |
| (표 2.2-1) 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준 .....                            | 32 |
| (표 2.2-2) 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준 .....                            | 33 |
| (표 2.2-3) 하천 · 호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준 .....                       | 34 |
| (표 2.2-4) 국내외 퇴적물 오염도(유기물 및 영양염류) 평가 기준 비교 .....              | 36 |
| (표 2.2-5) 국내외 퇴적물 오염도(중금속) 평가 기준 비교 .....                     | 37 |
| (표 2.2-6) 워싱턴주의 생물학적 퇴적물 관리 표준 .....                          | 38 |
| (표 2.3-1) 비점오염원 제어· 관리 기술 .....                               | 40 |
| (표 2.3-2) 인공습지 정화효율 사례 .....                                  | 43 |
| (표 2.3-3) Comparison of hydraulic and mechanical dredge ..... | 46 |
| (표 2.3-4) 퇴적물처리시범사업 대상 저수지 사업내용 .....                         | 48 |
| (표 2.3-5) 준설 공법의 적용 사례 .....                                  | 49 |
| (표 2.3-6) 생물학적 처리의 Bioslurry 기술의 특성 .....                     | 51 |
| (표 2.3-7) 화학적처리의 산화 공법 기술 특성 .....                            | 52 |
| (표 2.3-8) 화학적 처리 기술의 개요 .....                                 | 53 |
| (표 2.3-9) 고정화/안정화 처리 기술의 특성 .....                             | 56 |
| (표 2.3-10) 고정화/안정화 처리의 킬레이션 기술의 특성 .....                      | 58 |
| (표 2.3-11) 캡핑 기술의 특성 .....                                    | 60 |
| (표 2.3-12) Summary of field-scale capping projects .....      | 61 |
| (표 2.3-13) 오염퇴적물의 제어관리 기술의 분류 및 특성 .....                      | 63 |
| (표 2.3-14) 물순환장치의 목표 처리효율 및 평균 처리효율 .....                     | 65 |
| (표 2.3-15) 물순환장치의 영향권 및 수심별 평균 DO와 수온 .....                   | 65 |
| (표 2.3-16) 가압부상시설의 운전 기간 중 오염물질 농도 및 제거효율 .....               | 66 |
| (표 2.3-17) 기타 오염퇴적물의 제어 기술 및 적용 사례 .....                      | 69 |
| (표 3.1-1) 중점관리 대상 저수지 현황 .....                                | 73 |
| (표 3.1-2) 농업용수 측정망 저수지 중 수질기준 초과시설의 오염원 현황 .....              | 74 |
| (표 3.1-3) 연구대상지구의 지역 및 평년대비 저수율 및 강수량 현황 .....                | 75 |
| (표 3.1-4) 오염실태 조사 및 분석 항목 .....                               | 76 |
| (표 3.2-1) 오염된 농업용저수지의 퇴적물 오염현황 .....                          | 80 |

|   |     |
|---|-----|
| (표 3.2-2) 퇴적물 관련 기준과 부영양 농업용저수지의 퇴적물 오염 특성 비교   | 80  |
| (표 3.2-3) 퇴적물 오염 특성의 항목간 상관성 분석                 | 81  |
| (표 3.2-4) 오염원, 설치년도에 따른 퇴적물의 오염도 분석             | 81  |
| (표 3.2-5) 기준년도 변화에 따른 강열감량의 일원배치분산분석 결과         | 87  |
| (표 3.2-6) 기준년도 변화에 따른 총질소의 일원배치분산분석 결과          | 87  |
| (표 3.2-7) 기준년도 변화에 따른 총인의 일원배치분산분석 결과           | 88  |
| (표 3.2-8) 물리적 환경인자와 퇴적물 특성간 상관성 분석              | 89  |
| (표 3.2-9) 총 토지오염부하에 대한 토지이용별 오염부하와 퇴적물과의 상관성 분석 | 90  |
| (표 3.2-10) 각 토지이용에 따른 퇴적물 특성과의 상관성 분석           | 91  |
| (표 3.2-11) 저수지 오염 유입부하에 따른 퇴적물 특성간 상관성 분석       | 92  |
| (표 3.3-1) 연구대상지구의 수질오염 현황                       | 93  |
| (표 3.3-2) 오염원 종류에 따른 저수지의 수질 오염도 결과             | 94  |
| (표 3.3-3) 설치년도에 따른 저수지의 수질 오염도 결과               | 96  |
| (표 3.3-4) 퇴적물 특성과 수질 오염 간의 상관성 분석 결과            | 97  |
| (표 4.1-1) 사전 조사 대상지로 선정된 저수지                    | 101 |
| (표 4.1-2) 인평 저수지 사전 조사 결과                       | 102 |
| (표 4.1-3) 업성 저수지 사전 조사 결과                       | 102 |
| (표 4.1-4) 용담 저수지 사전 조사 결과                       | 103 |
| (표 4.1-5) 봉채 저수지 사전 조사 결과                       | 103 |
| (표 4.1-6) 공리 저수지 사전 조사 결과                       | 104 |
| (표 4.1-7) 장곡 저수지 사전 조사 결과                       | 104 |
| (표 4.1-8) 후보저수지 평가표                             | 105 |
| (표 4.1-9) 연구대상지구의 저수지 제원 및 퇴적물 특성               | 105 |
| (표 4.1-10) 시료 채취 적용범위 및 관련법                     | 107 |
| (표 4.1-11) 오염정밀 조사 및 분석 항목                      | 108 |
| (표 4.1-12) 입경의 크기 분류                            | 109 |
| (표 4.1-13) 토양 분류법                               | 109 |
| (표 4.1-14) 퇴적물 분석방법 및 분석에 이용된 기기                | 112 |
| (표 4.1-15) 수질 분석방법 및 분석에 이용된 기기                 | 113 |
| (표 4.2-1) 생활계오염원 저수지 수질 조사 결과                   | 115 |
| (표 4.2-2) 퇴적물 오염도 분석 결과(인평, 업성)                 | 118 |
| (표 4.2-3) 퇴적물 중금속 분석 결과(인평, 업성)                 | 119 |

|  |     |
|--|-----|
| (표 4.2-4) 퇴적물 입도분석 분석 결과(인평, 업성) .....   | 119 |
| (표 4.2-5) 축산계오염원 저수지 수질 조사 결과 .....  | 121 |
| (표 4.2-6) 퇴적물 오염도 분석 결과(이담, 공리) .....  | 124 |
| (표 4.2-7) 퇴적물 중금속 분석 결과(이담, 공리) .....  | 125 |
| (표 4.2-8) 퇴적물 입도분석 분석 결과(이담, 공리) .....   | 125 |
| (표 4.2-9) 정밀조사 대상 저수지의 수질 결과 .....   | 126 |
| (표 4.2-10) 정밀조사 대상 저수지의 퇴적물중 중금속 농도 비교 .....   | 128 |
| (표 4.3-1) 생활계오염원 저수지 용출 실험 조건 .....  | 132 |
| (표 4.3-2) 시간별 생활계오염원 저수지의 용출농도(COD, T-N, T-P) .....  | 133 |
| (표 4.3-3) 시간별 생활계오염원 저수지 용출농도(NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P) .....  | 135 |
| (표 4.3-4) 생활계오염원 저수지 평균 용출 속도 .....  | 137 |
| (표 4.3-5) 생활계오염원 저수지 COD 용출속도 .....  | 138 |
| (표 4.3-6) 생활계오염원 저수지 T-N 용출속도 .....  | 139 |
| (표 4.3-7) 생활계오염원 저수지 T-P 용출속도 .....  | 140 |
| (표 4.3-8) 생활계오염원 저수지 NH <sub>4</sub> -N 용출속도 .....   | 141 |
| (표 4.3-9) 생활계오염원 저수지 NO <sub>3</sub> -N 용출속도 .....   | 142 |
| (표 4.3-10) 생활계오염원 저수지 PO <sub>4</sub> -P 용출속도 .....  | 143 |
| (표 4.3-11) 축산계오염원 저수지 용출 실험 조건 .....   | 145 |
| (표 4.3-12) 시간별 축산계오염원 저수지 용출농도(COD, T-N, T-P) .....  | 147 |
| (표 4.3-13) 시간별 축산계오염원 저수지 용출농도(NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P) ..... | 149 |
| (표 4.3-14) 축산계오염원 저수지 평균 용출 속도 .....   | 151 |
| (표 4.3-15) 축산계오염원 저수지 COD 용출속도 .....   | 152 |
| (표 4.3-16) 축산계오염원 저수지 T-N 용출속도 .....   | 153 |
| (표 4.3-17) 축산계오염원 저수지 T-P 용출속도 .....   | 154 |
| (표 4.3-18) 축산계오염원 저수지 NH <sub>4</sub> -N 용출속도 .....  | 155 |
| (표 4.3-19) 축산계오염원 저수지 NO <sub>3</sub> -N 용출속도 .....  | 156 |
| (표 4.3-20) 축산계오염원 저수지 PO <sub>4</sub> -P 용출속도 .....  | 157 |
| (표 4.3-21) 연구 대상 저수지 별 평균 용출 속도 .....  | 159 |
| (표 4.3-22) 연구 대상 저수지 분류 조건 별 평균 용출속도 .....   | 160 |
| (표 4.4-1) 연구 대상 저수지 별 총 용출량(호기) .....  | 161 |
| (표 4.4-2) 연구 대상 저수지 별 총 용출량(혐기) .....  | 162 |
| (표 4.4-3) 연구 대상지 별 용출량이 수체에 미치는 영향(체류시간 35일 기준) .....  | 163 |

|   |     |
|---|-----|
| (표 4.4-4) 체류시간 35일 기준 분류 조건 별 용출량이 수체에 미치는 영향 ..... | 164 |
| (표 4.4-5) 경험식을 이용한 연구 대상 저수지 별 용출량이 수체에 미치는 영향..... | 165 |
| (표 5.1-1) 인평 저수지 비점오염원 오염물질 유입특성 .....              | 174 |
| (표 5.1-2) 각 유입원별 총오염부하량 및 기여율 .....                 | 175 |

## - 그림 차례 -

|   |    |
|---|----|
| <그림 1.1-1> 설치 년대에 따른 수질 현황 .....  | 4  |
| <그림 2.1-1> Sample conceptual site model focusing .....  | 14 |
| <그림 2.1-2> Classification of pollutants .....   | 15 |
| <그림 2.1-3> Transformation of organic matter in aquatic ecosystem .....  | 16 |
| <그림 2.1-4> Classification of nitrogen .....   | 17 |
| <그림 2.1-5> Nitrogen cycle in freshwater aquatic ecosystem .....   | 18 |
| <그림 2.1-6> Classification of phosphorus .....   | 19 |
| <그림 2.1-7> Phosphorus cycle in freshwater aquatic ecosystem .....   | 20 |
| <그림 2.1-8> 호소 퇴적물 오염물 용출에 의한 수질 및 생태계 영향 .....  | 21 |
| <그림 2.1-9> The effect on water quality according to the pollution process<br>and circulation of sediments ..... | 22 |
| <그림 2.1-10> Transport processes near the sediment-water interface .....   | 24 |
| <그림 2.1-11> Transformation and flux of nitrogen in water and sediment .....                                     | 25 |
| <그림 2.1-12> Transformation and flux of phosphorus in sediment and overlying water .....                         | 27 |
| <그림 2.3-1> 지표흐름형 습지(SF)와 지하흐름형습지(SFS) 모식도 .....   | 41 |
| <그림 2.3-2> 설성 저수지의 인공습지 설치 사례 .....   | 44 |
| <그림 2.3-3> 농업용 저수지 오염퇴적물에 대한 준설 .....   | 48 |
| <그림 2.3-4> Generalized Aerobic Bioslurry System .....   | 51 |
| <그림 2.3-5> 오염퇴적물에 화학물질 주입을 통한 제어 .....  | 55 |
| <그림 2.3-6> Diagram of a Solidification/Stabilization Process .....  | 56 |
| <그림 2.3-7> Typical Chelation Operation .....  | 57 |
| <그림 2.3-8> 복합재를 활용한 캡핑 .....  | 60 |
| <그림 2.3-9> 일산호수공원의 가압부상시설 적용 사례 .....   | 66 |
| <그림 2.3-10> 심층포기의 모식도 .....   | 67 |
| <그림 3.1-1> 농업용 저수지의 주요 오염원 .....  | 74 |
| <그림 3.1-2> 오염된 농업용 저수지의 조건별 대상저수지 분류(1차) .....  | 78 |
| <그림 3.2-1> 오염퇴적물의 실태조사 분석결과 .....   | 79 |
| <그림 3.2-2> 오염원별 퇴적물 오염 특성 비교 .....  | 82 |
| <그림 3.2-3> Score plot .....   | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| <그림 3.2-4> 각 오염물질에 따른 저수지의 물리적인자의 중요도 .....                   | 86  |
| <그림 3.3-1> 오염원 종류에 따른 저수지의 수질 오염도 비교 .....                    | 95  |
| <그림 3.3-2> 설치년도에 따른 저수지의 수질 오염도 비교 .....                      | 96  |
| <그림 4.1-1> 인평 저수지 사전 조사 .....                                 | 102 |
| <그림 4.1-2> 업성 저수지 사전 조사 .....                                 | 102 |
| <그림 4.1-3> 용담 저수지 사전 조사 .....                                 | 103 |
| <그림 4.1-4> 봉재 저수지 사전 조사 .....                                 | 103 |
| <그림 4.1-5> 공리 저수지 사전 조사 .....                                 | 104 |
| <그림 4.1-6> 장곡 저수지 사전 조사 .....                                 | 104 |
| <그림 4.1-7> 정밀조사 대상지구 위치 및 전경 사진 .....                         | 106 |
| <그림 4.1-8> 현장 샘플링 사진 .....                                    | 107 |
| <그림 4.1-9> 토양 분류법(삼각도법) .....                                 | 110 |
| <그림 4.2-1> 인평저수지의 수층별 수질 변화 .....                             | 116 |
| <그림 4.2-2> 업성저수지의 수층별 수질 변화 .....                             | 117 |
| <그림 4.2-3> 이담저수지의 수층별 수질 변화 .....                             | 122 |
| <그림 4.2-4> 공리저수지의 수층별 수질 변화 .....                             | 123 |
| <그림 4.2-5> 정밀조사 대상 저수지의 수질 오염도 변화('14 ~ '15) .....            | 127 |
| <그림 4.3-1> 용출실험 반응조 모식도 .....                                 | 130 |
| <그림 4.3-2> 저수지 용출량 실험 초기(정치 전) .....                          | 130 |
| <그림 4.3-3> 저수지 용출량 시료의 정치 .....                               | 131 |
| <그림 4.3-4> 용출량 실험 조건별 반응조 .....                               | 131 |
| <그림 4.3-5> 시간에 따른 생활계오염원 저수지의 용출실험 결과(COD외) ..                | 134 |
| <그림 4.3-6> 시간에 따른 생활계오염원 저수지의 용출실험 결과(NH <sub>4</sub> -N외) .. | 136 |
| <그림 4.3-7> 생활계오염원 저수지의 용출속도 비교 .....                          | 144 |
| <그림 4.3-8> 시간에 따른 축산계오염원 저수지 용출농도(COD외) .....                 | 148 |
| <그림 4.3-9> 시간에 따른 축산계오염원 저수지의 용출실험 결과(NH <sub>4</sub> -N외) .. | 150 |
| <그림 4.3-10> 축산계오염원 저수지의 용출속도 비교 .....                         | 158 |
| <그림 4.3-11> 연구 대상 저수지 별 평균 용출 속도 비교 .....                     | 159 |
| <그림 4.3-12> 연구 대상 저수지 분류 조건 별 평균 용출속도 비교 .....                | 160 |
| <그림 4.3-13> 체류시간 35일 기준 조건 별 용출량이 수체에 미치는 영향 ..               | 164 |
| <그림 5.1-1> 물질수지 검토 조사 흐름도 .....                               | 169 |
| <그림 5.1-2> 인평저수지의 위치 및 전경 사진 .....                            | 170 |

|  |     |
|--|-----|
| <그림 5.1-3> 인평 저수지 유입부 단면 .....                                       | 171 |
| <그림 5.1-4> 인평 저수지 유출부 단면 .....                                       | 171 |
| <그림 5.1-5> 인평 저수지 비점오염원 현장 측정 결과 .....                               | 172 |
| <그림 5.1-6> 인평 저수지 비점오염물질 유입 특성 .....                                 | 176 |
| <그림 5.1-7> 인평 저수지 추정 물질수지도 .....                                     | 177 |
| <그림 5.1-8> 인평 저수지 실측 물질수지도 .....                                     | 179 |
| <그림 6.1-1> 퇴적물 오염특성에 따른 분류 .....                                     | 184 |
| <그림 6.1-2> 오염퇴적물의 유형 및 특성 .....                                      | 185 |
| <그림 6.1-3> Applicable treatment options for contaminated sediment .. | 187 |
| <그림 6.1-4> 퇴적물 제어기술 적용시 고려 사항 .....                                  | 188 |
| <그림 6.1-5> 퇴적물 오염특성 분류별 관리 방안 .....                                  | 189 |

## 1장. 서 론

- 1 절. 연구의 배경 및 목적
- 2 절. 연구의 내용 및 추진 체계
- 3 절. 기대효과 및 활용 방안



# 1장. 서 론

## 1절. 연구의 배경 및 목적

### 1. 연구배경 및 필요성

전국의 약 17,500여개의 농업용 저수지중 69.4 %가 설치된 지, 50년 이상이며, 51.7 %가 1945년 이전에 설치된 저수지로 전반적으로 국내 농업용 저수지는 상당히 노후화 되어 있는 실정이다. 산업폐수, 생활오수, 폐기물처리장 침출수, 도시 및 농촌의 강우 유출수 등에 의해 하천으로 유입된 유기물, 영양염류, 유해화학물질 등의 오염물질은 하류로 운반되다가 비교적 유속이 약한 하천, 호소, 하구, 해양 바닥에 침강된다. 침강된 오염물질은 수중으로부터 제거되어 퇴적물 속에 축적되었다가 확산, 재부유, 생물교란 등의 생물·물리·화학적 과정에 의해 다시 수중으로 용출되고 수질 및 수생태계에 직·간접적인 악영향을 미치게 된다. 하천과 호소의 퇴적물은 수계로 배출된 오염물질의 종착점이면서 동시에 지속적으로 오염물질을 수계로 배출하는 2차 내부오염원으로 작용한다. 퇴적물에 포함된 유해물질은 환경의 변화에 따라 생지화학적 반응을 통해 수중으로 재용출되어 수생생물에게 악영향을 미친다.

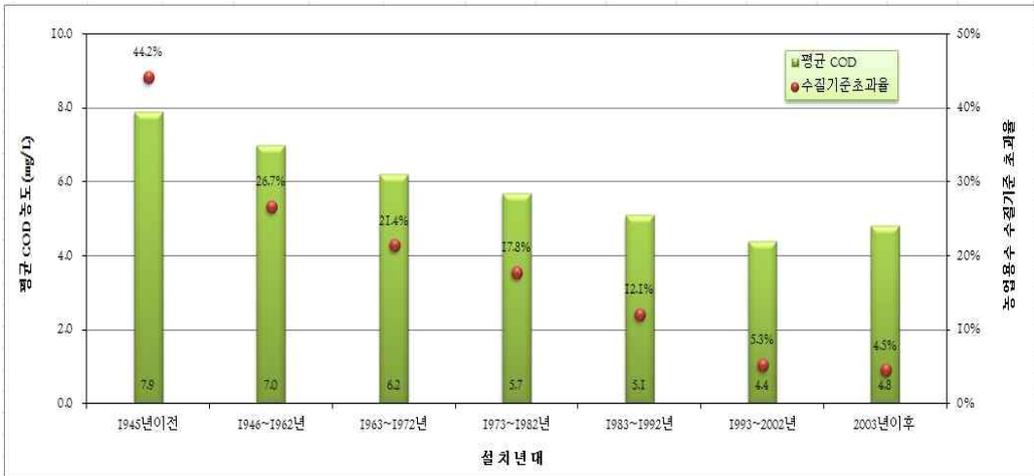
또한 오염퇴적물은 퇴적물에 서식하는 저서생물에게는 물론이고 먹이사슬을 통해 연결되어 있는 수생생물 및 더 나아가서 인류의 건강에 큰 악영향을 미친다는 사실이 최근 일련의 연구에 의해 조사되고 있다(이창희, KEI[1998]). 특히 저수지나 인공호수와 같이 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많으며, 단위 면적당 수용량이 적기 때문에 저층퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수계의 1차 생산과 수질에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(김도희[2002]).

따라서 오염 퇴적물이 수질 오염을 가중시키는 중요 원인으로 작용하며, 수질 개선을 위한 다양한 공법 적용에도 개선 효율에 한계가 있다는 지적이 지속적으로 제기됨에 따라 오염퇴적물의 관리에 대한 중요성이 증대되고 있으며, 퇴적물의 현황 분석 및 그에 대한 관리 방안 마련이 필요한 실정이다.

이러한 이유로 인해 오염퇴적물의 개선 및 오염평가 규정 신설 등을 위한

농업용 호소 퇴적물의 조사 필요성이 대두되었으며, 대규모 퇴적물 준설 요구 등으로 농업용 호소 퇴적물의 관리가 시급하게 되었고, 농업용 저수지 퇴적물 측정망 신설을 위해 퇴적물오염에 대한 기초조사의 필요성이 제기 되었다.

기존 퇴적물 조사 연구는 환경부, 국토교통부, 해양부에서 해양 및 하천 일부를 대상으로 한 준설기준, 준설토 활용방안을 위한 연구가 대부분이었으며, 농업용 저수지 퇴적물의 조사·오염도 평가 관리에 대한 실적 및 체계에 대한 연구는 미흡하다. 또한 오염퇴적물의 용출을 억제하기 위한 제어기술 연구 분야에서도 해저 및 하구부 퇴적물에 대하여서는 다양하게 수행되어 왔으나, 농업용 저수지의 오염퇴적물에 대한 물리특성 분석이나 수질에 미치는 영향을 제어하기 위한 관리 연구는 미진한 상황이므로 이에 대한 연구가 시급하다. 환경부에서는 주요 하천 및 호소 등 수질보전대상 공공수역에 대해 퇴적물 환경질 보전정책수립을 위하여 기초자료 확보를 위한 퇴적물 측정망을 2011년 신설하여 추진하고 있으나, 농업용 저수지에 대한 퇴적물 오염도 조사는 아직 퇴적물 측정망 사업 추진을 위한 준비 중이다.



<그림 1.1-1> 설치 년대에 따른 수질 현황(수질측정망 보고서, 2014)

오염퇴적물 관리는 오염퇴적물로 인해 발생할 수 있는 악영향을 예방 또는 최소화하기 위한 전반적인 활동이라 할 수 있다. 이를 위해서는 오염퇴적물의 분포 및 특성을 정확히 파악하고, 수질 및 인간을 포함한 생물에 미치는 영향 분석, 퇴적물 오염 가중을 제어하기 위한 주변 오염원관리 등을 통해 퇴적물의

오염을 최소화하고, 오염된 퇴적물에 대해서는 오염물질의 용출 제어나 퇴적물 내 오염물질 제거 등의 적합한 정화방법 및 기술개발을 통해 퇴적물에 대한 적절한 관리가 종합적으로 이루어져야 할 것이다.

따라서 본 연구는 국내 농업용 저수지 퇴적물의 오염 현황 및 특성을 분석하고, 오염퇴적물에 의한 수질오염 영향을 분석하여 퇴적물 오염 유형을 분류하고자 하며, 분류에 따라 기 개발된 적합한 정화기술을 제안함으로써 오염퇴적물에 대한 관리 방안을 제시하고자 수행하였다. 추후 농업용 저수지 특성에 맞는 오염퇴적물의 용출 제어기술을 개발하고, 수질오염에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 환경친화적 정화기술의 현장 적용을 통한 오염퇴적물 정화기술 연구의 진행이 필요하다고 판단된다.

## 2. 연구 목적

오염퇴적물 관리는 오염퇴적물로 인해 발생할 수 있는 악영향을 예방 또는 최소화하기 위한 전반적 활동이다. 이를 위해 오염퇴적물의 분포 및 특성을 정확히 파악하고, 인간을 포함한 생물에 미치는 영향 분석, 퇴적물 내 오염물질의 용출 제어나 제거 등 적합한 정화방법 및 기술개발을 통해 퇴적물에 대한 종합적이고 적절한 관리가 요구된다.

본 연구의 최종 목적은 농업용 저수지의 수질개선 향상을 위해 저수지 퇴적물의 오염특성 분석과 현장 특성에 맞는 효과적인 퇴적물 제어기술 개발이며, 이를 위해 1차년도 연구에서는 농업용 저수지 퇴적물의 오염 특성을 분석하고, 퇴적물내 오염물질의 용출 분석을 통한 수질오염 영향을 파악하여 오염퇴적물 특성에 따라 기 개발된 적합한 정화기술을 제안함으로써 오염퇴적물로 인한 악영향을 최소화하기 위한 방안을 제시하고자 하였다.

## 2절. 연구의 내용 및 추진 체계

### 1. 연구 목표 및 범위

- 연구의 최종 목표 : 농업용 저수지의 수질개선 향상을 위해 저수지 퇴적물의 오염특성 분석과 현장 특성에 맞는 효과적인 퇴적물 제어기술 개발
- 1차 연구 목표(2015년) : 농업용 저수지의 오염퇴적물 유형 분석 및 수질 오염에 미치는 영향 분석을 통해 추후 퇴적물 제어 기술 개발을 위한 기본 연구로 활용

### “농업용수 수질개선을 통한 양질의 용수 공급”

농업용 호소의 오염퇴적물 제어관리 기술 개발



농업용 저수지의 퇴적물 오염현황 및 특성분석, 제어관리를 위해 수행된 본 연구는 농업용수 공급원의 확보와 수질개선을 통한 양질의 농업용수 공급

으로 유기농산물 및 친환경농산물 생산이라는 근본적인 목표를 가지고 수행하였다. 따라서 수질에 크게 영향을 미칠 수 있는 유기오염 퇴적물을 중심으로 분석하였으며, 농업용수 측정망으로 관리되고 있는 825개 저수지중 2009년부터 2014년까지 6년 동안 중점관리 저수지로 지정된 저수지와 전수조사 저수지중 수질기준을 초과하는 저수지 등을 포함하여 총 71개 저수지에 대하여 퇴적물의 오염실태를 조사하였다. 또한 이 중에서 설치년도와 오염원이 다른 4개 저수지를 선정하여 정밀조사를 실시하였으며, 퇴적물의 용출로 인한 수질오염 영향을 분석하였다. 1개 저수지에 대해서는 유입, 유출을 조사하여 오염물질 유입부하에 따른 퇴적물의 퇴적 특성을 물질수지를 통해 검토하였다.

농업용 호소 중 1.3 %에 해당하는 담수호는 98.7%에 해당하는 농업용 저수지와는 상이하게 다양한 퇴적물의 오염 특성을 나타낼 수 있으므로 대상 저수지에서 제외하였다. 담수호에 대하여는 추후 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 2. 연구 내용

일반적인 농업용 저수지의 특성을 대표할 수 있는 저수지에 대하여 퇴적물의 오염특성을 분석하고자 하였으며, 부영양화로 인한 수질오염으로 수질개선이 필요한 저수지를 대상으로 특성을 파악하고자 하였다. 따라서 수질환경 호소기준 중 유기물과 영양염류의 오염이 의심되는 저수지를 선정하기 위해 COD, TN, TP 항목이 기준을 초과하는 저수지(중점관리 대상 저수지)를 중심으로 퇴적물 중의 강열감량, TN, TP를 분석하였다. 또한 농업용 저수지의 오염퇴적물과 저수지의 물리적 특성, 유입오염부하, 토지 이용 형태와의 상관성을 분석하고, 오염퇴적물의 용출을 분석하여 수질오염에 미치는 영향도를 분석하였다.

본 연구는 기존의 국내외 오염퇴적물 관련 자료를 근거로 국내외 퇴적물 관리 현황 및 제어기술을 분석하고 국내 농업용 저수지의 특성에 맞는 적용 가능 제어관리 기술을 제안하고자 하였다. 또한 선진 외국의 오염퇴적물 관리 현황과 국내의 퇴적물 관리 현황을 비교·분석하였으며, 국외의 관리 방안 및 기술은 분야별로 상당히 구체적으로 진행되어 있어 전체적인 기술동향 및 관리 기준을 중심으로 파악하였다.

국내의 퇴적물 관리에 대한 정책, 제어 기술, 기준설정 등 다양한 접근 및 체계에 대한 정립이 필요할 것으로 판단되며, 이에 대하여 2장에서 퇴적물의 특성 및 국내외 제어관리 현황, 기술 동향 및 적용 사례 등에 관하여 상세히 기술하였다.

- 농업용 저수지의 수질 특성 및 오염도 조사·분석
  - 농업용수 오염원 및 수질현황 분석
  - 오염지구별(오염원, 설치년도, 저수량 등) 수계의 심층에 따른 수질특성 변화와 오염부하 분석
- 오염퇴적물이 수질오염에 미치는 영향 분석
  - 오염퇴적물의 수질오염 영향도 분석
  - : 정밀조사 지구의 퇴적물 오염특성, 용출률 등을 분석하여 저수지의 수질에 미치는 영향도(영향율) 분석 - 정밀조사 대상 저수지(4개 지구)
  - 수질오염 영향을 제어하기 위한 인자 도출
  - : 오염퇴적물에 의한 수질오염 저감 및 수질 개선을 위한 고려 인자 검토
- 농업용 저수지 퇴적물 오염 유형 분류 분석
  - 퇴적물 오염도 조사 결과를 통한 오염 유형별 특성 분류
  - 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적오염도 분석 및 물질수지 검토
- 퇴적물 특성 및 제어기술 연구 동향, 적용 사례 분석
  - 국내외 퇴적물의 특성 연구 동향 조사
  - 퇴적물 제어기술 현황 및 사례 분석

### 3. 연구 추진 체계

#### 가) 추진전략 및 방법

- 공동연구로 연구의 효율성 제고 및 제어기술 개발 연구 추진을 위한 기반 구축
  - 연구원에서 실내분석이 어려운 퇴적물 용출실험이 가능한 퇴적물 전문 연구기관과 공동연구를 통해 연구결과와 질 향상 및 추후 퇴적물 제어기술개발 추진을 위한 기술 교류
  - 퇴적물 전문 연구기관을 공개입찰을 통해 공동연구기관으로 선정
- 추후 퇴적물 제어기술 연구 진행을 위해 대외 전문가들의 자문회의 등을 통

한 기술 교류

- 하천·호소 퇴적물 전문가들의 자문회의 등을 통한 지속적인 기술력 흡수
- 국내외 전문연구진과 네트워크를 구축하여 전문 기술 교류
- 국내외 유사연구 및 기술개발 자료를 수집·분석하여 연구질 향상

## 나) 단계별 추진계획



## 3절. 기대효과 및 활용방안

### 1. 기술적 측면

- 퇴적물 제어관리를 통해 농업용 저수지의 수질개선 뿐만 아니라 수질개선 기술 적용의 효과를 지속적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

- 2014년 농업용수 측정망 저수지 825개소 중 약 21% 수질기준 초과
- 2014년 전수조사 결과 3,387개 저수지중 약 23% 수질기준 초과
- 최근 수질기준 초과 저수지의 증가 추세가 현격히 나타남
- 농업용 저수지의 유형별 퇴적물 특성 분석연구는 퇴적물 제어기술 개발을 위한 기본 연구로써 농업용 저수지 오염 퇴적물 개선사업 추진시 기초자료로 활용가치가 높을 것이라 판단된다.
- 수질개선 효과의 극대화를 위해 수질개선 기술과 함께 퇴적물 제어가 진행되어야 할 것이라 사료되며, 이를 통해 지속적인 수질개선의 효과를 배가시킬 수 있을 것으로 기대된다.
  - 2014년 공사관리 저수지 14개소 수질개선사업 추진(사업비 총 9,662백만원)

## 2. 경제·산업적 측면

- 오염퇴적물로 인한 부영양화, 녹조 등 사회적 환경문제를 감소시키고, 수서 생태계 회복 등을 통한 종합적인 수환경개선을 기대할 수 있을 것이라 판단된다.
- 퇴적물 관리를 통한 노후 저수지의 저수능력 향상으로 경제성 제고 효과를 기대할 수 있을 것이라 생각된다.
  - 전국의 설치된 지 50년 이상된 저수지의 평균 유효저수량이 약 80%로 저수지 저부의 퇴적물 제어를 통해 저수율 증가 효과
- 양질의 농업용수 공급을 통한 우수농산물의 생산기반을 구축함으로써 국제시장에서 경쟁력을 갖춘 고품질 농산물의 생산이 가능하리라 기대된다.
- 농업용수 수질개선으로 고부가 가치의 유기농, 친환경 농산물 등의 생산이 가능할 것이라 생각되며, 이를 통해 농가의 소득증대 뿐 아니라, 친수공간의 확보와 농어촌 생활환경개선 등에도 효과가 있을 것으로 기대된다.

## 2장. 퇴적물의 오염특성과 제어 관리 기술 동향

1절. 퇴적물의 오염 특성 및 영향

2절. 국내외 퇴적물 관리 기준 및 현황

3절. 국내외 퇴적물 제어·관리 기술  
및 적용 사례



## 2장. 퇴적물의 오염특성과 제어 관리 기술 동향

### 1절. 퇴적물의 오염 특성 및 영향

#### 1. 퇴적 특성 및 오염의 기원

오염퇴적물은 수체 내에 존재하고 있지만 오염물질의 발생원은 대부분 육상으로부터 시작되며, 수질 보전을 위해 준설되어 육상으로 옮겨질 경우 폐기물 또는 오염 토양으로 간주된다. 이에 대한 오염의 기원 또는 경로는 다음과 같다(Clair N. Sawyer[2013]).

##### 가. 상류 지표수 및 퇴적물의 이동(Upstream Surface Water and Sediment Loading)

잠재오염물질은 상류의 다양한 오염원(주거지, 농경지, 광산, 산업체, 공공시설 등)으로부터 발생된 오염물질을 포함하고 있는 상류의 지표수 및 퇴적물로부터 유입될 수 있다. 이러한 잠재적 오염물질들은 지표유출, 투기, 누출 및 유출사고, 대기 침적 등에 의해 하천의 상류로 유입되며, 하천수의 이동에 따라 하류로 이동하면서 호소에서 점진적으로 퇴적되거나, 기존 퇴적물로 유입이 진행된다.

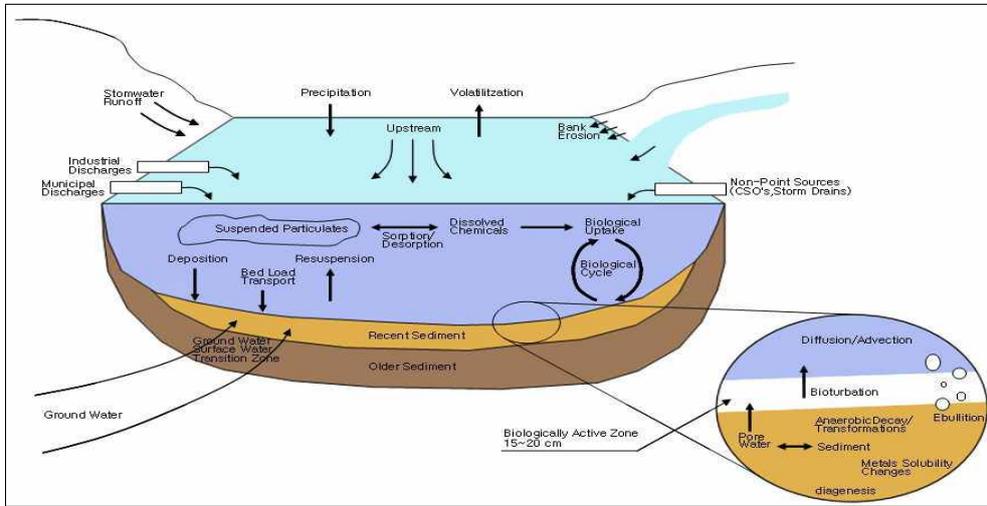
##### 나. 우수 유입(Stormwater)

토양에 존재하고 있거나, 대기로부터 또는 인간활동에 의해 도로, 지붕 등의 불투과성 또는 반투과성 표면에 침적된 잠재적 오염물질이 우수와 함께 수계내로 유입될 수 있다. 우수에 의해 유래한 오염물질의 경우 우수관거를 통해 수계내로 유입되거나, 일부 지표유출을 통해 직접 유입되기도 한다.

##### 다. 하수 또는 폐수의 직접적 유입(Direct Discharges)

산업시설, 상업시설, 주거시설 및 공공시설의 오폐수 배출구로부터 오염물질이 직접 유입되기도 한다. 이러한 직접적 유입의 대부분은 배출수 수질기준을 만족하도록 규제하고 있다. 이러한 배출수 수질기준은 수처리 시설의 방류수, 우수 유출수, 합류식 하수관거 월류수(combined sewer overflows, CSOs)에 대해 적용되고 있다. 퇴적물 내 오염물질이 수직적 또는 수평적으

로 일정하게 분포하는 양상을 보일 경우 장기간의 공장폐기물 또는 폐수의 유입에 의한 경우가 상당하다고 할 수 있다.



<그림 2.1-1> Sample conceptual site model focusing on sediment-water interaction(USEPA, 2005)

라. 지하수의 유입(Groundwater)

오염된 지하수는 하상 퇴적물내로 직접 유입되거나, 우수배관 등으로 침투에 의해 하천과 호소로 유입될 수 있다. 지하수내 오염물질은 LNAPL(Light non-aqueous phase liquids)과 DNAPL(Dense non-aqueous phase liquids)과 같은 비수용성물질(nonaqueous phase liquids, NAPLs) 또는 지하수내 용존성 형태로 이동하게 된다.

마. 대기 오염물질의 침적(Atmospheric Deposition)

자동차 및 산업시설로부터의 배출가스나 기타 연소물질, 비포장도로, 농경지, 건설현장 등의 비산먼지(fugitive dust)가 건조 또는 습윤 침적에 의해 하천이나 호소로 직접 유입되어 퇴적물의 잠재오염원이 될 수 있다.

바. 강둑 또는 제방 침식(Bank Erosion/Leaching)

강둑 또는 제방의 조성물질이 침식 등에 의해 하천 또는 호소에 직접 유입되

기도 한다. 이러한 침식은 수변구역을 따라 광범위하게 형성되는 특성이 있다.  
 사. 기타 활동으로부터의 유입(Releases from Overwater Activities)

하천 또는 호소 주변지역에서의 다양한 유지보수공사 및 장치 설비운영, 내수면양식 등과 같은 다양한 활동으로 발생된 오염물질이 주변 수계로 유입되기도 한다.

## 2. 퇴적물내 물질의 순환 과정

### 가. 물질순환(Material cycle)

자연수에는 인위적인 활동뿐만이 아니라 자연으로부터도 각종의 물질이 유입되기도 하는데, 인위적인 영향과는 관계없이 육지의 발생원으로부터 수계에 유입·강하하는 물질에 의하여 수질이 악화되는 현상을 오염 또는 오탁이라고 한다. 이러한 오염의 원인이 되는 오염물질은 <그림 2.1-2>와 같이 분류할 수 있으며, 보통 유기성 오염물질과 부영양화 영양염(Nutrient)으로 구분한다. 이 분류는 화학적 근거에 따른 것이 아니라 발생하는 전형적인 물환경의 오염현상 형태에 따른 편의적인 분류이다(Clair N. Sawyer. [2013])



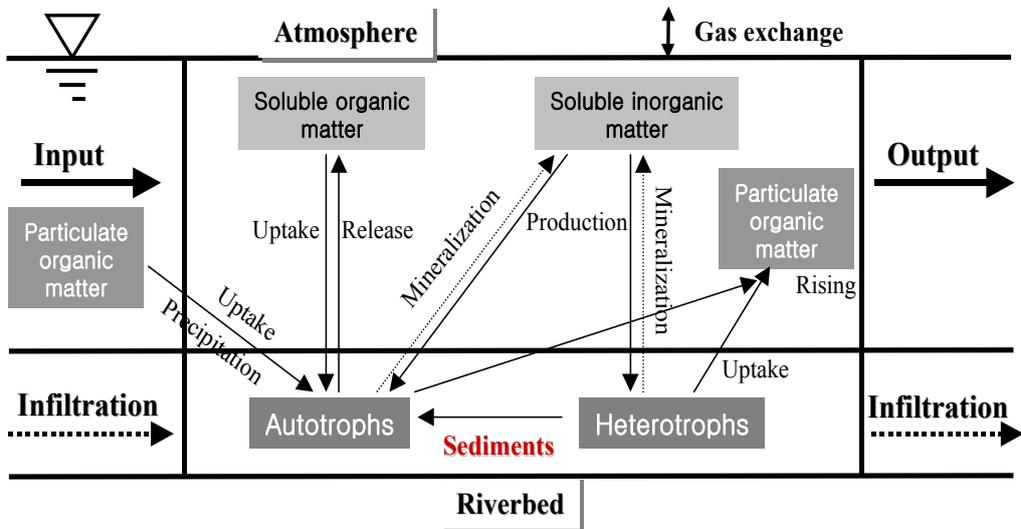
<그림 2.1-2> Classification of pollutants(Clair N. Sawyer, 2013)

유기성 오염물질은 탄소, 수소, 산소로 구성된 유기화합물의 총칭이고, 그 대부분은 분자 속에 질소와 인이 포함되어 있으며, 부영양화(Eutrophication) 물질로는 질소나 인 이외에 식물의 미량 필수원소, 비타민 등도 존재한다. 이

러한 오염물질들은 수계에서 다양한 변화를 일으키며 순환하게 되며, 때로는 오염원이나 영양공급원의 역할로써 이용되기도 한다.

나. 유기물의 순환 (Organic matter cycle)

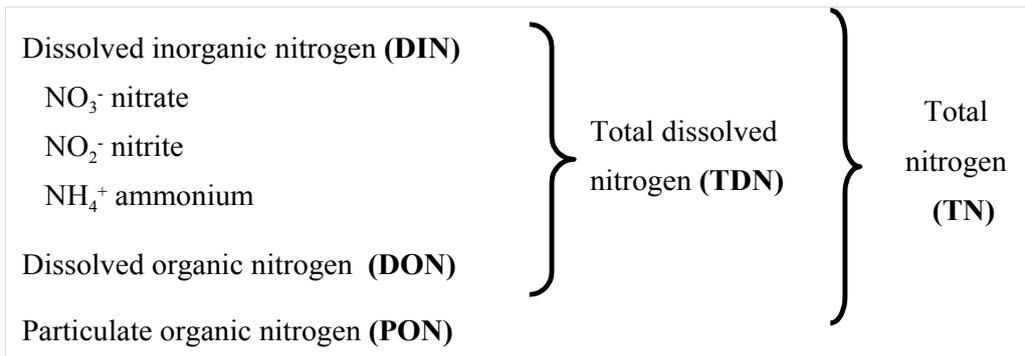
유기물을 중심으로 수계 내에서의 물질이동경로는 <그림 2.1-3>과 같다. 하상 퇴적물(Sediments)이 증가(+)하는 주된 원인은 입자성 유기물(Particulate organic matter)의 침전, 용존성 유기물(Soluble organic matter)의 유입에 의한 종속영양생물(Heterotrophs)의 증식, 용존성 무기물(Soluble inorganic matter)로부터의 독립영양생물(Autotrophs)의 증식 등이고, 손실(-)의 주된 경로는 퇴적물의 분리·소류와 분해·무기화 등이다.



<그림 2.1-3> Transformation of organic matter in aquatic ecosystem(홍일, 2003)

다. 질소의 순환(Nitrogen cycle)

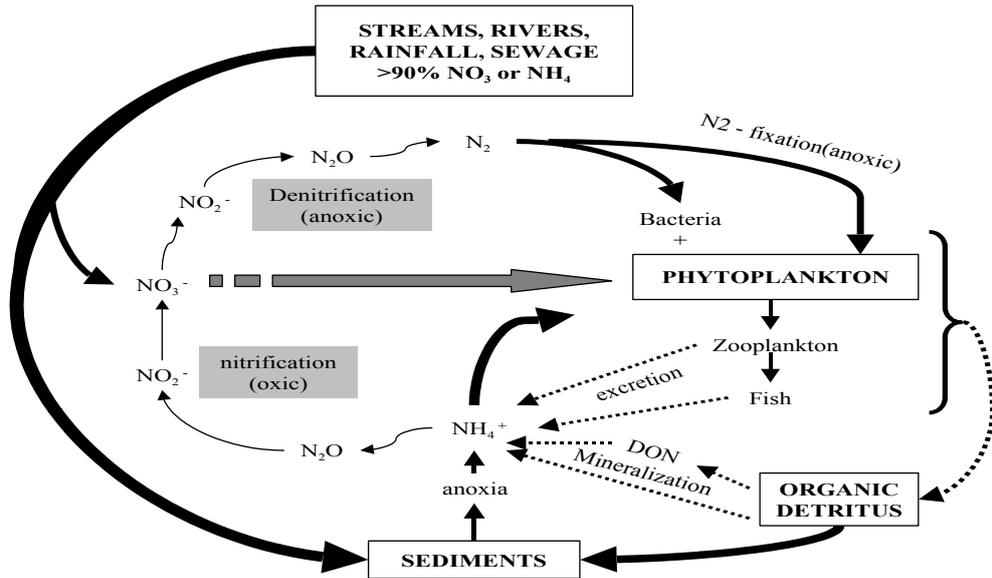
수계에서의 주된 질소의 형태는 네 가지 형태로 구분할 수 있는데, 유기성 질소, 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub>-N), 아질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N), 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N)이며, 질소에 대한 세부적인 조성은 <그림 2.1-4>과 같다.



<그림 2.1-4> Classification of nitrogen

수중생태계의 질소순환은 <그림 2.1-5>와 같으며, 수계로 유입되는 생물학적 이용 가능한 질소의 형태는 대부분이 질산염과 암모늄 이온의 형태를 이루고 있다. 이들은 조류에 의해 섭취되거나 하상퇴적물로 침전하게 되며, 침전물은 무산소 조건(anaerobic) 하에서 질산염과 아질산염의 탈질(Denitrification)작용에 의해 환원되어 대기 중으로 방출되고, 대기 및 토양에서의 질소는 고정세균에 의해(N<sub>2</sub> fixation) 강우를 통해 하천으로 유입된다. 탈질(Denitrification)의 경우 하천보다는 정체된 물에서 크게 일어나게 되고 수계의 부분 중 퇴적물(Sediments)에서 주로 일어나는 것으로 알려져 있다.

그 외에 순환은 호기성 상태(aerobic)에서 질산화, 무기화, 배출 등이 이루어진다. 유기성 질소의 경우 동·식물의 배설물과 Organic detritus(PON, DON)로 대부분 유입되고, Organic detritus의 경우 하상으로 침전하거나 무기화(Mineralization) 과정을 통해 미생물 및 조류의 성장에 이용된다.

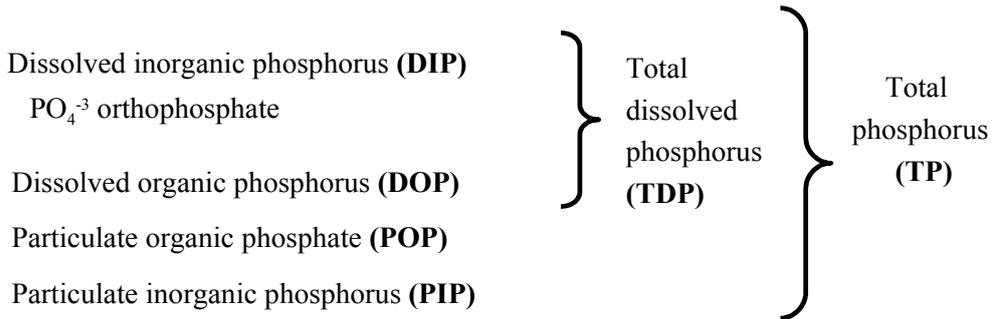


<그림 2.1-5> Nitrogen cycle in freshwater aquatic ecosystem(Bachand, P. A. M, 1999)

#### 라. 인의 순환(Phosphorus cycle)

수중 생태계에서 1차 생산량을 결정하는 중요한 물질중의 하나인 인은 수체 내 물질순환 과정에서 주로 퇴적물에 저장되는 원소로, Hakanson & Janson (1983)에 의하면 물리적인 교란 및 생·화학적 작용에 의해 수층으로 용출되어 부영양화 현상을 가속화 시키는 것으로 알려져 있다(안상원, [1999]). 수체에 유입되는 인은 자연적인 오염원과 인간활동에 의한 인위적인 오염원으로 구분되는데 자연적인 근원으로는 인회석 $[(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ 의 풍화작용에 의한 것과 대기로부터의 인부하가 있으며, 인위적인 오염원으로는 산업폐수, 도시하수, 농경하수, 가정하수 등으로 점오염원과 비점오염원을 들 수 있다.

수계로 유입되는 인은 DNA, RNA, 유기체 내에 포함된 인(Phosphorus)인 용존상태 인(TDP)과 Polyphosphates, 콜로이드와 결합된 인, 저분자 인산염 등의 입자상태 인(POP, PIP)으로 존재하며, 세분화된 인의 형태는 <그림 2.1-6>와 같다.

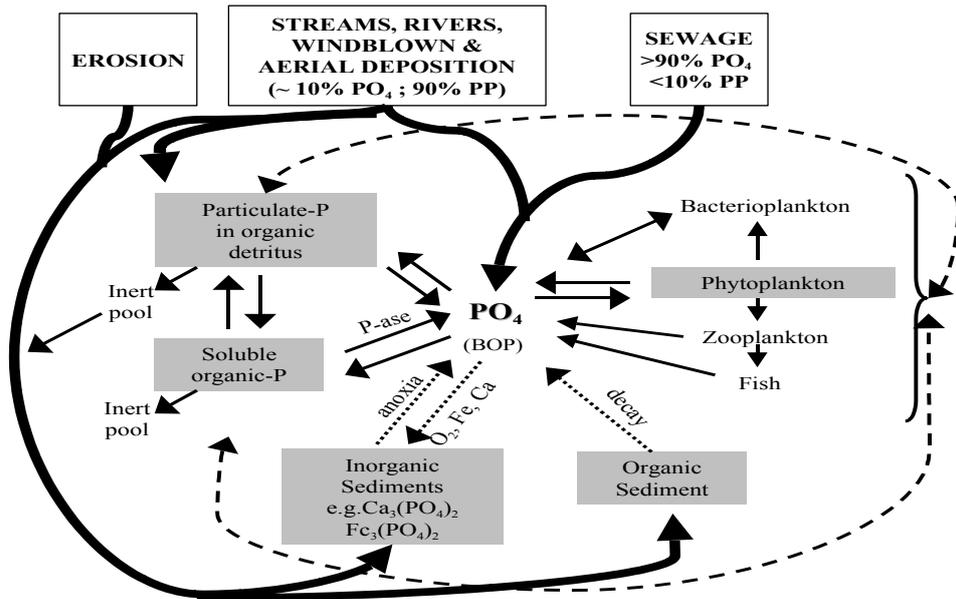


<그림 2.1-6> Classification of phosphorus

수계에서 인의 외부 부하는 침식작용, 하천·강·대기, 하수 등의 유입원에 기인하며, 내부 부하는 저질(Sediments)층에서 수층으로 인의 용출과정이 있다<그림 2.1-7>. 이렇게 수계에서의 인은 여러 가지 형태로 퇴적물에 침전한 후 수층으로 재부유된 퇴적물 입자로부터의 이동과 용존성 무기인(DIP)이 되어 간극수로 이용하여 주로 물리적인 요인에 의해 수층으로 전달되는 것으로 나눌 수 있으며, 물리·화학·생물학적 상호작용에 의해서 이루어진다.

이러한 물리, 화학적 반응으로는 침전물에 함유된 인의 유리(Desorption), 인산염과 OH<sup>-</sup> 혹은 킬레이팅 인자들과의 이온교환(Ligand exchange)등이 있으며, 생화학적 작용은 미생물에 의한 분해작용, 세포신진대사, 세포의 자가분해 등으로 볼 수 있다. 이와 같은 물리적, 생·화학적 상호작용에 영향을 미치는 요인들에는 온도, 산화환원전위, 미생물의 분해작용 등이 있으며, 이러한 것들에 의해 간극수에 용존된 인은 확산, 난류, 생물에 의한 교란, 가스 발생 등의 작용에 의해 수층으로 이동하게 된다.

또, 수체의 온도가 높아 미생물의 활동이 활발해져 용존산소가 소비되면 산화·환원전위는 낮아지는데, 이러한 환경에서 미생물은 유기물질의 분해과정 중에 필요한 전자수용체로 용존산소 대신에 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 결합된 산소를 이용한다. 이에 따라 수체 내에는 환원된 물질들이 배출됨으로써 인의 이동과 고정에 영향을 미치게 되고 이러한 미생물의 활동은 표층 퇴적물에서 직·간접적 방법으로 인의 순환에 많은 영향을 주게 된다(이시진, [2001]).



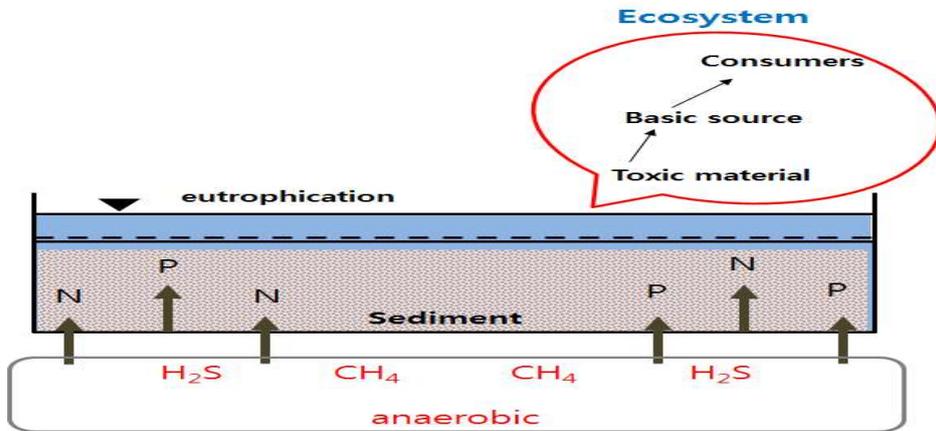
<그림 2.1-7> Phosphorus cycle in freshwater aquatic ecosystem

### 3. 오염퇴적물의 수서 생태 영향

퇴적물은 수체와 함께 수생태계를 구성하는 기본적인 요소로 저서생물의 서식지를 제공하는 동시에 수체와 유기적으로 연결되어 있다. 수계 주변에서 발생한 산업폐수, 생활오수, 폐기물처리장 침출수, 도시 및 농촌의 강우 유출수 등에 포함되어 있는 다양한 오염물질은 하천으로 유입되었다가 하류로 이동하면서 비교적 유속이 약한 하천, 호소, 하구, 해양 바닥에 침강된다. 침강된 오염물질은 일단 수중으로부터 제거되어 퇴적물 속에 축적되었다가 확산, 재부유, 생물교란 등의 생물·물리·화학적 과정에 의해 다시 수중으로 용출되고, 이는 수질 및 수생태계에 직·간접적인 악영향을 미치게 된다(이창희, [1998]).

수체 바닥에 침전된 퇴적물은 치수 문제 이외에도 수질 및 생태계에 악영향을 미치며, 이는 퇴적물이 일반적으로 저서생물의 서식지이면서 수체와 유기적으로 연계되어 있기 때문이다. 퇴적물 내의 오염물질이 자연적인 순환과정에 의해 수생태계 전체에 영향을 미칠 수 있으므로 그 중요성이 크다고 하겠다.

가) 퇴적물에 포함된 유기물은 미생물에 의해 분해되어 산소를 고갈시키므로, 미생물이 무산소 환경에서 메탄(CH<sub>4</sub>), 황화수소(H<sub>2</sub>S) 등의 유독성 가스를 생성하게 되고 이는 저서생물의 생존에 치명적인 악영향을 미치게 된다.



<그림 2.1-8> 호소 퇴적물 오염물 용출에 의한 수질 및 생태계 영향

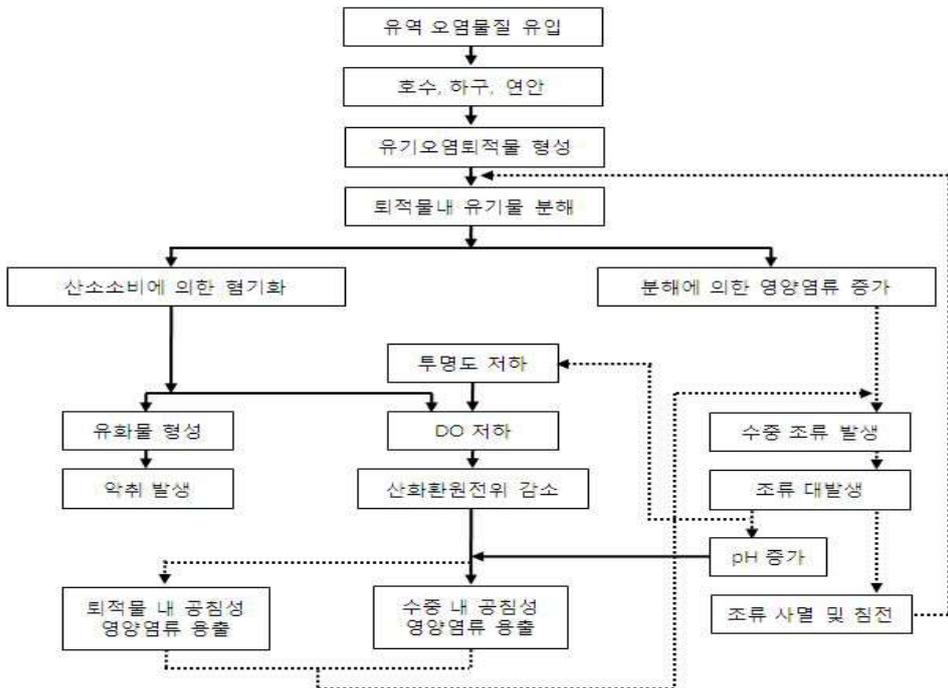
나) 유기물이 분해되는 환경이 되면 인, 질소 등의 영양염류가 다시 무기 이온 상태로 수중에 재용출 되어 수층 혼합에 의해 표층으로 이동하고, 식물성 플랑크톤의 영양원으로 공급되어 수중의 유기물 농도를 증가시킨다.

다) 퇴적물에 포함된 중금속 등의 유해물질이 환경변화에 따라 생물·화학적 반응을 통해 수중으로 재용출 되어 수생식물에 악영향을 미치며, 먹이 사슬을 통해 농축되어 결국 인간의 건강에도 영향을 미칠 수 있다.

(표 2.1-1) 퇴적물에 의한 영향(이창희, 1998)

| 항 목      |    | 자연자원 문제  | 관련 퇴적물 문제   |
|----------|----|--|---|
| 수생<br>생물 | 어류 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 어류의 이동</li> <li>• 어류의 산란</li> <li>• 먹이 확보</li> <li>• 치어 성장</li> <li>• 포식자로부터 보호</li> <li>• 겨울철 양육지</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 이동통로 차단</li> <li>• 산란을 위한 자갈층 손실</li> <li>• 퇴적물의 축적 또는 세굴</li> <li>• 하천지형의 변화</li> <li>• 수변녹지 손실</li> <li>• 세립퇴적물 축적으로 산소량 감소</li> </ul> |

|        |   |   |
|--------|---|---|
|        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 먹이 감소</li> </ul>   |   |
|        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 무척추 동물</li> <li>• 다양성 및 개체 밀도 감소</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 세립퇴적물 축적</li> <li>• 수변녹지 감소</li> </ul>                                     |
|        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 양서류</li> <li>• 유생(幼生)발생 및 성장</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 세립퇴적물 축적</li> </ul>  |
| 상수원수   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 저수용량 감소</li> <li>• 맛/미관 악화</li> <li>• 취수구 막힘</li> <li>• 원수처리 저해</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 퇴적</li> <li>• 부유물 농도(탁도)</li> <li>• 총부유물</li> <li>• 파손, 마모(취수구)</li> </ul> |
| 위락/심미  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미관저해</li> <li>• 하도구조 변경에 따른 낚시, 수영, 래프팅 저해</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부유물 농도(탁도)</li> <li>• 하도변경</li> <li>• 연못, 웅덩이 수심감소</li> </ul>              |
| 농업     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 취수펌프 막힘</li> <li>• 가축용 용수공급</li> <li>• 농업용 저수지 저수용량 감소</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부유물</li> <li>• 가축이 먹기에 너무 탁함</li> <li>• 부유물 퇴적</li> </ul>                  |
| 공업     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수처리</li> <li>• 냉각수</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 장비에 부유물 부착</li> <li>• 부유물 처리 곤란</li> </ul>                                 |
| 수운(水運) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수로변경</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부유물 퇴적</li> </ul>  |



<그림 2.1-9> The effect on water quality according to the pollution process and circulation of sediments(국립환경과학원, 1990)

#### 4. 퇴적물과 수체의 상호 유기적 연계성 및 용출특성 관계

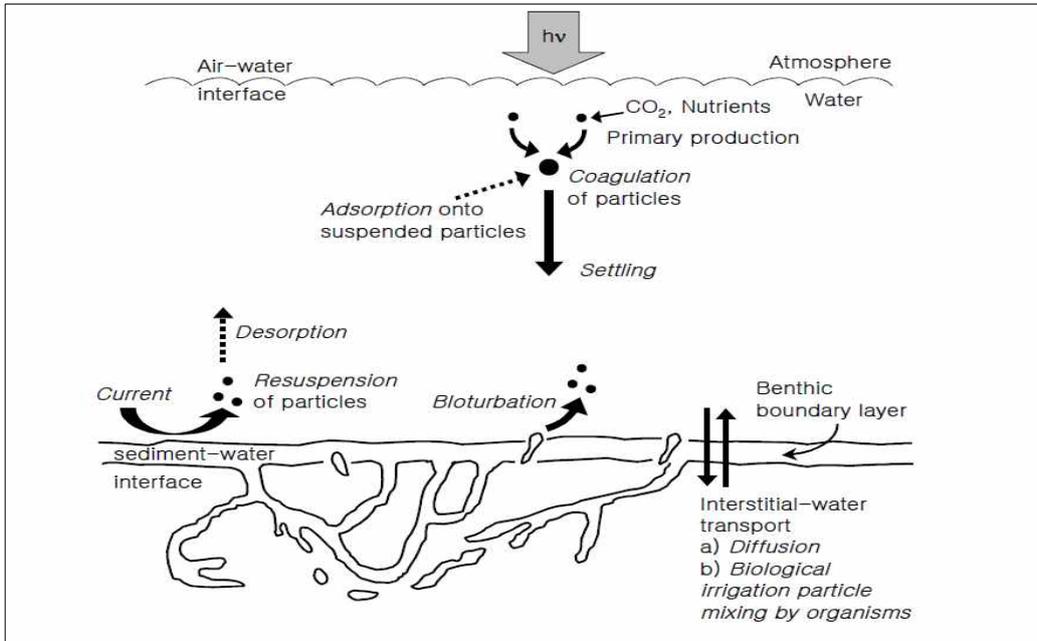
##### 가. 퇴적물과 수층의 상호 작용

수체에 유입된 오염물질은 부유물질에 부착되고 가라앉아 최종적으로는 수계 저층부에 침전·축적된다. 수계 내 생물들은 퇴적물에서 생활하므로 퇴적물의 환경조건에 따라 오염될 경우 오염물질이 생체 내에 축적되어 먹이사슬을 통해 인간에게까지 이동하기도 한다.

퇴적물과 수체사이의 경계층은 고체형태의 퇴적물과 수체에서 공급되는 공급수로 이루어져 있다. 이 경계층은 수체에서 가라앉은 물질들이 바닥에 머무르는 상당히 얇은 층이다. 퇴적물에 서식하는 생물체는 이 경계면에서 수 센티미터 내에 생존하기 때문에 그들의 움직임에 의해 바닥의 퇴적물이 교란되고 재배치되기도 하고, 수체의 흐름으로 인해 이러한 구조는 쉽게 영향을 받기도 한다(Lerman, [1979]).

많은 연구에서 수계의 퇴적물과 수층사이에 일어나는 상호작용이 오염물질의 이동에 중요한 역할을 한다는 것을 보여주고 있다(Morfett et al., [1988]; Jahnke et al., [1989]; Carignan and Lean [1991]; Barbanti et al., [1992]). 자연수계에서 퇴적물과 수층의 경계면은 물리학적, 화학적, 생물학적 반응이 가장 활발하게 일어나는 곳이다. 수체의 움직임이나 생물학적 작용에 의한 퇴적물의 교란으로 퇴적물 입자가 재부유되고, 퇴적물과 수층의 경계면에서 일어나는 여러 생화학적인 반응에 영향을 미치게 된다.

또한 화학적, 미생물학적 변환과정에 의해 수층과 퇴적물 사이에서 화학물질들의 물질순환과정이 일어난다. 용존성, 입자성 유기물질들과 여러 가지 화학물질, 광물질들 간의 생지화학적 반응은 퇴적물과 수층의 경계면에서 일어나는 과정으로 그 역할이 중요하다.



<그림 2.1-10> Transport processes near the sediment-water interface(나유미, 2005)

#### 나. 퇴적물의 용출 특성

연안 해역 및 호소와 같은 수역에서는 보통 육상으로부터 많은 유기물이 유입되고 있다. 이와 같은 수역에서는 일반적으로 영양염의 농도가 높기 때문에 수층에서 생산되어진 입자성 유기물이 저층으로 퇴적된다. 저층에 퇴적된 입자성 유기물이 분해, 무기화되어 생성된 용존성 무기질소와 인과 같은 영양염 그리고 비타민류와 중금속 등의 생물활성 물질들이 저층 퇴적물에 고농도로 존재한다. 특히 저층에 퇴적된 영양염의 일부는 퇴적물의 환경조건에 따라서 수중으로 재용출되어 내부오염원으로 작용하게 된다. 특히 수심이 얕은 연안이나 호소에서는 단위면적당 수용량이 적기 때문에 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수계의 1차 생산과 수질변화에 큰 영향을 미친다(김도희, [2002]).

수계의 부영양화 정도는 통상 질소와 인 등 무기영양염류의 농도를 나타내며, 이러한 무기 영양염의 증가로 인한 부영양화는 대규모 조류발생의 원인이 되어 수자원 이용성을 저하시킨다. 일반적으로 부영양화 정도가 심하지 않은 곳에서는 외부로부터 유입되는 오염물질에 의한 외부 부하가 크며, 퇴

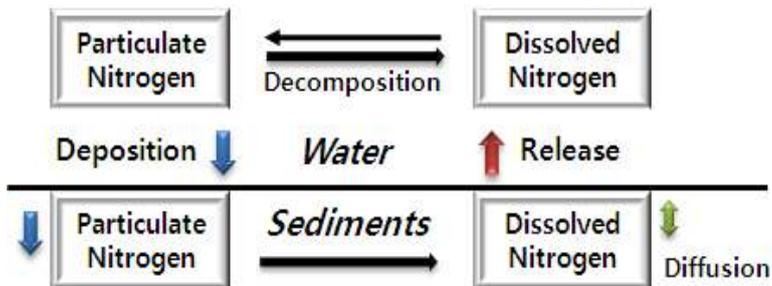
적물 내에 오염물질의 함량이 높은 곳에서는 오염물질의 용출에 의한 내부부하에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다(유승훈, [2010]).

이러한 퇴적물에서의 영양염류 용출은 수온, pH, OPR, DO, 유속 등의 물리화학적 요인과 저서 미생물 등의 생물학적 요인에 의해서도 결정(Kairesalo et al., [1995])되며, 특히 퇴적물에 서식하는 미생물의 활성이 중요한 작용을 한다. 질소의 용출은 용존산소의 영향을 덜 받는 것으로 보고되고 있으나, 인의 경우 용존산소에 대한 의존도가 크며 혐기상태와 높은 pH에서 인의 용출이 활발한 것으로 알려져 있다(국립환경과학원, [1997]).

### (1) 암모니아성 질소 용출과정

저층 퇴적물에 존재하는 질소화합물은 대부분이 입자성 유기질소에 의해 저층으로부터 용출되어 물리적인 확산과정에 의해 수층으로 이동되는데 암모니아성 질소가 대부분이다. 암모니아성 질소의 용출 과정은 다음과 같다.

- (가) 입자성 유기질소의 퇴적
- (나) 저층에서의 입자성 유기물 분해, 무기화에 따른 암모니아성 질소 생성
- (다) 암모니아성 질소의 입자(흡착성) 및 퇴적물 공극수(용존성)로의 분배
- (라) 암모니아성 질소의 농도 차이에 따른 공극수 이동
- (마) 퇴적물 표층부 공극수로부터 암모니아성 질소의 직상수 이동



<그림 2.1-11> Transformation and flux of nitrogen in water and sediment

퇴적물에서 생성되는 암모니아성 질소는 그 일부가 공극수 중에 용존하나 그 양은 퇴적물에 존재하는 총 암모니아성 질소 양에 비하면 미미한 양에 지

나지 않으며 대부분은 퇴적물 입자에 흡착되어 존재한다. 흡착평형은 공극수 중의 염분 농도가 높은 경우 또는 온도가 상승할 때 용출이 크며 퇴적물의 조성에 의해서도 좌우된다. 만약 용출에 의해서 용존성의 농도가 감소하여 그 비율이 변하게 되면 곧바로 퇴적물 내의 흡착성의 일부가 용존성으로 이동해서 평형으로 회복된다(홍일, [2003]).

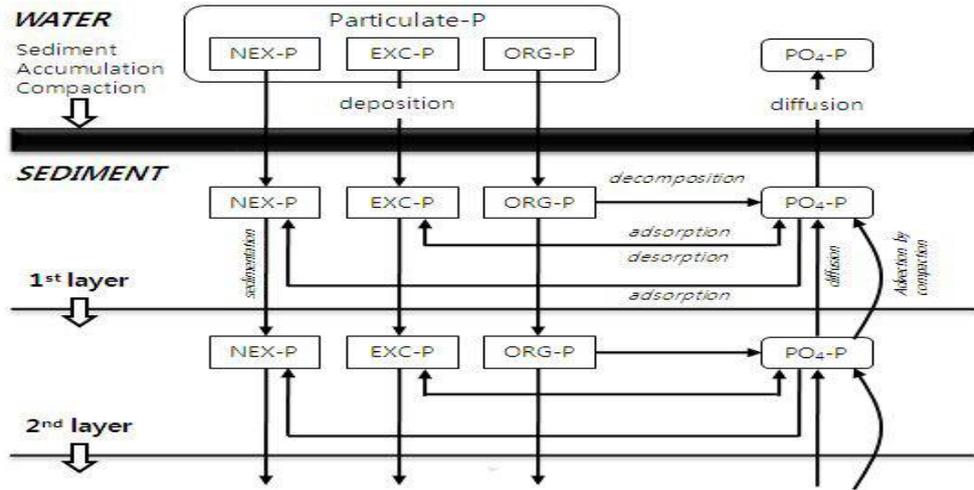
## (2) 인산인 용출과정

수계 퇴적물 내의 인은 주로 퇴적물 입자에 포함되어 있으며, 표면에 흡착되어 있는 용해성으로 구분된다. 퇴적물 중의 질소는 거의가 유기성질소가 대부분이나 인은 유기성인의 형태보다 주로 무기성 인 형태로 존재한다. 수층과 퇴적물간의 인의 변화는 다음과 같다

- (가) 침전·퇴적 : 수층에서 생산되어진 유기물과 유입된 무기물이 저층으로 침전하여 저층에서 퇴적물 입자로서 퇴적
- (나) 분해·퇴적 : 축적 과정에서 유기물의 일부는 분해되며, 무기물은 생물 화학적 영향을 받아 퇴적된 퇴적물 입자와 퇴적물 공극수간에 교환이 이루어짐
- (다) 이 동 : 저층 퇴적물 공극수와 저층수 사이의 확산에 의해서 이동되는데, 수계내 자연현상에 의해 상층으로 이동하거나 저서생물의 활동에 의해서 이동

침전, 퇴적, 압축에 의한 퇴적물 입자의 공극수 이동과정과 퇴적물 내의 불용성 및 용해성 인의 형태 변화를 포함한 인의 용출과정은 <그림 2.1-12>과 같다.

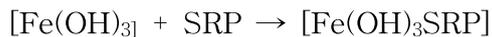
일반적으로 저층 퇴적물과 저층수의 경계면에서의 직상수가 호기성 상태가 되면 산화환원성 원소인 철이나 망간은 3가 철, 4가 망간의 수화물을 형성하여 인과 함께 공침하게 된다. 또한 퇴적물 내 활성화된 미생물이 호기성 세균 활성으로 유기물 분해가 이루어지며, 혐기성 상태로 변하여 퇴적물은 환원상태가 되고 혐기성 세균의 활동이 시작되면서 각종 발효현상이 발생하여 결합되어 있던 Ion들이 용출되어 수층으로 이동하게 된다. 따라서 이러한 산화환원 반응으로 인해 퇴적물과 저층수 사이에서 인의 교환이 이루어진다.



<그림 2.1-12> Transformation and flux of phosphorus in sediment and overlying water

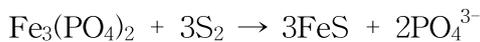
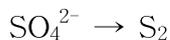
산화환원 과정에 따라서  $PO_4^{3-}$ , Fe, S의 거동은 다음 반응식과 같다.

(가) 산화반응(흡착 및 침전)



※ SRP : Soluble Reactive Phosphorous

(나) 환원반응(용출)



호소 퇴적물의 성상은 호소 상태 변화에 따라 인이 용출되어 수층에 영향을 줄 수 있다. 인의 용출은 용존산소, 온도, pH에 따라 달라지며, 20 ℃ 이상의 온도에서 용출률이 높고, 용존산소와 반비례하며, 용존산소의 농도가 1 mg/L 미만으로 떨어질 경우 저층 퇴적물로부터 인의 용출이 급격하게 일어난다(이창희, [1999]).

## 5. 퇴적물의 SOD와 COD의 관계

호소 저층부의 퇴적물에서 산소 농도는 저서 생물의 호흡 및 활동, 화학적 반응, 빛이 도달 범위에 따른 저층 광합성 영향 등으로 변화하게 된다. 수계와 퇴적물의 경계면 부근에서 많은 생물화학적 반응들이 발생하여 수계로부터 퇴적된 유기물이 미생물이나 저서생물 혹은 화학반응 등의 에너지 대사과정을 통해 분해되는데, 수중의 용존산소가 소비되는 것을 퇴적물 산소소비속도(SOD: Sediment Oxygen Demand)라고 한다.

수중에서 입자성 유기물질(POM)은 저질 퇴적층으로 침강하는데, 이와 같은 Flux에 의해 퇴적물의 유기물 함량이 증가하고, 이러한 유기물은 분해되어 POM과 같은 용존성 물질로 전환된다. 퇴적물은 호기 산화층과 혐기 환원층으로 나누어진다(최선호, [2004]). 두 층에서 유기탄소와 질소는 궁극적으로 퇴적물의 산소소모를 야기하는 변화과정을 거친다. 일부 용존성 물질은 입자에 흡착되기도 하지만 혐기성 퇴적층 내의 무기물질은 호기성 퇴적층으로 확산되어 산화되거나 또는 수중으로 이동한다.

일찍이 실내 반응조 실험에서 저질의 SOD는 저질의 깊이와 시간의 함수로서 SOD는 휘발성 고형물(Volatile VS)의 제곱근 함수 관계가 있다(Fair et al., [1941])고 알려져 있다. 또한 퇴적물의 산소소모량은 VS와 유사한 퇴적물 표층의 COD와도 제곱근 관계에 있다.

$$SOD = b_1\sqrt{COD}$$

따라서 COD의 농도는 SOD와 밀접한 관계가 있으며, 퇴적물의 COD를 측정함으로써 SOD를 다음의 식에 의하여 대략적으로 파악하는 것이 가능하다. 퇴적물의 산소소모량은 산소 농도가 3 mg/L 이상일 때 해당되며, 3 mg/L 이하에서는 저해를 받게 된다(Thomann and Muller, [1987]).

## 2절. 국내외 퇴적물 관리 기준 및 현황

### 1. 국내 퇴적물 관리 현황

국내의 오염퇴적물 관리는 환경정책기본법(제2장 환경보전계획의 수립 등)」에서 국가 차원의 환경보전을 위한 종합계획을 비롯한 환경보전중기종합계획을 수립을 근거로 수행되고 있다. 종합적인 관리 및 운영을 위한 많은 노력과 계획에도 불구하고 여전히 퇴적물에 대하여서는 수질에 미치는 영향 파악을 위한 수질오염 조사 일부로 시행되고 있으며, 퇴적물의 오염 현황을 파악하는 정도의 수준이다. 또한 퇴적물의 관리 기술로 준설이 대부분을 차지하고 있어, 비용 및 효과에 대한 한계와 적용 가능 대상지의 제한으로 퇴적물의 종합적인 관리는 여전히 미흡한 상태이다.

퇴적물 오염현황 파악을 위한 전국적인 규모의 조사는 1990년대에 시작되어 하천은 ‘수질보전장기종합계획수립(환경처, [1992])’을 위한 기초조사의 일환으로, 호소는 ‘전국 호소환경현황조사 및 주요 호소영향권역설정(환경처, 1994)’ 기초조사의 일부로 실시되었으며, 그 외 조사는 대부분 단위 사업별로 필요에 따라 수행되었다(이창희, [1998]).

공사관리 저수지는 노후화된 저수지가 많아 토사나 오염물질이 장기적으로 퇴적됨에 따라 준공 당시보다 저수지 능력이 현저히 저하되어 있다. 이에 저수지 본래의 기능유지를 위한 퇴적층 제거 필요성에 의해 ‘94년~‘14년까지 총 2,781억원을 투입하여 2,326개소 저수지에 대해 준설 사업을 수행하였으며, 현재까지 퇴적물 제거는 내용적 확보차원에서 대부분 육상준설을 실시하여 수질개선효과는 크게 기대하기 어려운 실정이다.

퇴적물 관리의 필요성에 따라 물환경종합평가방법 개발연구사업(‘03.12~‘06.10)을 통해 수질오염공정시험기준-퇴적물을 추가 · 보완하고 퇴적물 오염평가 기준을 위한 연구를 통해 퇴적물관리를 위한 기반을 구축하였다. (환경부 · 국립환경과학원, [2006]). 환경부에서는 2011년 4대강 보를 시작으로 전국 하천 및 호소 등 수질보전대상 공공수역에 대한 퇴적물의 이화학적 특성을 조사하여 환경질(Sediment Quality)을 평가하고, 이미 집행된 주요 정책사업의 효과를 분석하여 장래 퇴적물 환경질 보전정책수립을 위한 기초자료를 확보하기 위한 목적으로 “하천·호소 퇴적물측정망 운영”을 시행하고 있

다. 이는 「환경정책기본법 시행령 제10조(환경상태의 조사·평가 등)」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제9조(상시측정 및 수질·수생태계 조사)」, 같은 법 「시행규칙 제22조(환경부장관이 설치·운영하는 측정망의 종류 등)」을 근거로 하고 있으며, 퇴적물 관리를 추진하기 위한 관리기반 즉, 퇴적물의 오염현황 파악, 수질 및 수생태계에 미치는 영향 예측, 수질 관리 대책의 실효성 평가를 위한 국가차원의 퇴적물모니터링 체계 등이 확립되는 데에는 많은 시간이 소요될 것으로 보인다.

해양에 대한 오염퇴적물에 대해서는 퇴적물의 관리를 위한 다양한 연구와 제어 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며, 준설의 현장적용 및 기술 개발 연구도 대규모로 추진되고 있다. 현재 국내에서 발생하는 슬러지상의 폐기물이 대부분 해양투기 되어 왔으며, 이제 더 이상의 해양 투기가 어려워진 상황에서 해저 퇴적물의 오염정화에 대한 연구나 관심은 당연한 것일 수도 있다. 반면에 하천과 호소의 오염퇴적물에 대해서는 골재 채취에 의한 영향, 준설토 처리, 수질영향 등에 관한 연구가 대부분이었다. 퇴적물을 전체 수계 중의 한 매개체로서 종합적인 수계관리를 시스템화할 필요가 있다.

## 2. 국외 퇴적물 관리 현황

국외는 하천·호소의 오염퇴적물 관리를 위해 다양한 물리·화학적, 생물학적, 열적처리 공법들이 개발되어 현장에 적용되고 있으며, 매립지 조성을 제한하고 준설토 투기에 대한 환경영향평가의 강화로 준설토 오염도 평가에 의한 투기방법, 투기시설, 재활용 방안 등에 대한 연구를 활발히 진행 중에 있다.

미국의 경우 오염퇴적물에 대한 기술이 가장 먼저 발전되어 온 나라로서, 오염퇴적물 관리체계 정비에 목적을 두고 12개 이상의 법에 의해 관리되어지고 있으며, 1992년 ‘수자원개발법(Water Resources Development Act)’의 개정을 통해 퇴적물 오염 현황, 오염평가, 오염퇴적물 처리 및 정화, 관련 기술 개발 등을 진행하고 있다. 오염퇴적물의 준설과정에서 발생하는 4R(Resuspension, Residual, Release, Risk)을 고려한 다양한 기술이 개발되었으며, 현장적용을 통해 체계화가 진행되고 있다. 그러나 미국에서는 1970년부터 오염퇴적물에 관심을 가지고 이에 대한 관리가 수행되었음에도 불구하고 큰 효과를 거두지 못

했다는 평가가 있었다. 이에 대한 근본적인 원인 중 하나로 지적된 것은 오염퇴적물의 평가가 기형어류 발생, 오염에 강한 종의 출현, 특정 저서생물 종의 사멸 등의 현상에만 의존하였기 때문에 생태계 및 국민건강에 미치는 악영향을 근거로 설정된 연방정부 차원의 퇴적물 평가기준이 부재하였다는 점이다(USEPA, [1998a]).

실제로 퇴적물 오염평가를 위해 다양한 기술들이 적용되었으나, 퇴적물 오염은 수질오염의 경우와는 달리 같은 오염물질 농도라 할지라도 지역적인 특성, 퇴적물 특성, 생물에 의한 이용성 등에 따라 실제 생물에 미치는 독성이 상이하기 때문으로 평가되고 있다. 따라서 미환경청은 일반적인 퇴적물 오염평가를 위해 전 산하기관이 공통으로 사용할 수 있는 표준화된 생물·화학적 분석방법 및 영향평가 분석을 지속적으로 개발하고 있다.

미국은 미국공병단에서 보다 정밀하게 오염퇴적물을 분류하고, 준설하는 과정에서의 재부유, 재침강, 오염물질의 유출, 잔류물의 발생을 저감시킬 수 있는 기술 지침을 마련하고 있다. 또한 오염퇴적물의 생태 악영향이 밝혀짐에 따라 미국의 환경보호청에서는 저서생물 및 인간의 건강을 위한 환경준거치(Sediment Quality Criteria)를 설정하였으며, 이는 퇴적물을 단순한 수질악화의 매개체에서 인간을 포함한 건전한 생태계 유지를 위해 오염을 예방하고 관리해야 하는 주체로 판단했다는 데 큰 의의가 있다고 하겠다(이창희, [2000]).

캐나다는 환경부에서 담수퇴적물에 대한 잠정 환경기준 및 악영향이 발생 확률을 고려하여 퇴적물을 관리하고 있으며, 퇴적물 관리 기준이 저서생물에 미치는 영향을 대상으로 설정되어 규정화되어 유기물 및 영양염류에 관한 기준은 별도로 설정되어 있지 않다.

일본의 경우는 우리나라와 유사하게 오염정화를 목적으로 준설이 대표적인 퇴적물 관리 기술로 편중되어 있으며 종합적인 관리는 미흡한 상태이다. 또한 미국이나 캐나다처럼 저서생물 보호를 위한 퇴적물 환경기준 또는 퇴적물 환경지침이 개발되어 있지 않은 상태이다. 일본의 퇴적물 기준은 퇴적물의 제거를 위한 기준으로서 현재 동경만/요코하마만 기준과 나고야 항 기준이 있다. 미국과 캐나다 이외의 대부분 국가에서의 퇴적물 관리는 준설에 의존하고 있으며, 오염사고 건이나 유형에 따라 유동적으로 진행되고 있어 종합적이고 체계적인 퇴적물의 관리 요구되고 있다.

### 3. 국내외 퇴적물 관리 기준 및 지침

국내의 퇴적물 관련 기준으로는 연구 결과를 통해 도출된 팔당호, 한강하류, 대청호 등의 퇴적물 제거기준을 오염퇴적물에 대한 기준으로 활용되어 왔다.

최근 수질측정망 운영에 따른 퇴적물의 오염도 평가 적용을 위해 환경부, 국립환경과학원의 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 575호, 2012.4.10.)」이 신설되었으며, 올해 독성 발현 가능성과 지점별 퇴적물 상태에 대한 종합 평가를 포함하여 기준이 개정(국립환경과학원 예규 제 2015-687호, 2015.11.16.)되었다. 이 기준은 현실 여건 변화를 검토하여 매 3년마다 폐지, 개정에 대한 여부를 확인하게 되는데, 국내 퇴적물 오염에 대한 현황 파악 및 분석을 위한 자료가 아직은 부족한 상황이므로 퇴적물에 대한 관리 기준이 확립되어 적극적으로 활용 가능하기까지는 시간이 상당히 소요될 것으로 판단된다.

(표 2.2-1) 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준

| 항 목              |            | 등 급     |          |           |           |
|------------------|------------|---------|----------|-----------|-----------|
|                  |            | I       | II       | III       | IV        |
| 유기물<br>및<br>영양염류 | 완전연소가능량(%) |         |          |           | 13 초과     |
|                  | 총질소(mg/kg) |         |          |           | 5,600 초과  |
|                  | 총인(mg/kg)  |         |          |           | 1,600 초과  |
| 금속류              | 구리(mg/kg)  | 48 이하   | 228 이하   | 1,890 이하  | 1,890 초과  |
|                  | 납(mg/kg)   | 59 이하   | 154 이하   | 459 이하    | 459 초과    |
|                  | 니켈(mg/kg)  | 40 이하   | 87.5 이하  | 330 이하    | 330 초과    |
|                  | 비소(mg/kg)  | 15 이하   | 44.7 이하  | 92.1 이하   | 92.1 초과   |
|                  | 수은(mg/kg)  | 0.07 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) | 0.4 이하  | 1.87 이하  | 6.09 이하   | 6.09 초과   |
|                  | 크롬(mg/kg)  | 112 이하  | 224 이하   | 991 이하    | 991 초과    |

또한 환경부의 “하천·호소 퇴적물측정망 운영”을 통한 퇴적물 오염현황 결과와 한국농어촌공사 관리 저수지에 대한 퇴적물 오염현황 결과를 직접적으로 비교하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 이는 시료채취의 목적이 다르고, 측정 지점 선정, 시료채취 및 측정방법, 분석방법이 다소 상이하기 때문이다. 이를 비교하기 위해서는 농업용수 수질측정망과 같이 공사 관리 농업용 저수지에 대하여 퇴적물측정망 운영을 위한 운영 매뉴얼과 지침이 필요하며, 이에 따라 정기적이고 체계적인 퇴적물측정망의 운영이 필요할 것으로 사료된다.

(표 2.2-2) 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준

| 항목               |            | 등급     |          |           |           |
|------------------|------------|--------|----------|-----------|-----------|
|                  |            | I      | II       | III       | IV        |
| 유기물<br>및<br>영양염류 | 완전연소가능량(%) |        |          |           | 13 초과     |
|                  | 총질소(mg/kg) |        |          |           | 5,600 초과  |
|                  | 총인(mg/kg)  |        |          |           | 1,600 초과  |
| 금속류              | 구리(mg/kg)  | 60 이하  | 228 이하   | 1,890 이하  | 1,890 초과  |
|                  | 납(mg/kg)   | 65 이하  | 154 이하   | 459 이하    | 459 초과    |
|                  | 니켈(mg/kg)  | 53 이하  | 87.5 이하  | 330 이하    | 330 초과    |
|                  | 비소(mg/kg)  | 29 이하  | 44.7 이하  | 92.1 이하   | 92.1 초과   |
|                  | 수은(mg/kg)  | 0.1 이하 | 0.67 이하  | 2.14 이하   | 2.14 초과   |
|                  | 아연(mg/kg)  | 363 이하 | 1,170 이하 | 13,000 이하 | 13,000 초과 |
|                  | 카드뮴(mg/kg) | 0.6 이하 | 1.87 이하  | 6.09 이하   | 6.09 초과   |
|                  | 크롬(mg/kg)  | 112 이하 | 224 이하   | 991 이하    | 991 초과    |

비고 :

1. 등급별 퇴적물의 상태

가. 금속류

- I 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 거의 없음
- II 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있음
- III 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 비교적 높음
- IV 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 매우 높음

나. 유기물, 영양염류

- IV 등급 : 심각하고 명백한 오염

(표 2.2-3) 하천 · 호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준

| 단 계   | 조 건                                     |
|-------|---|
| 보통    | 금속류 8 항목 모두 'I' 등급                      |
| 약간 나쁨 | 금속류 8 항목 중 'II' 등급 또는 'III' 등급 항목 1개 이상 |
| 나쁨    | “금속류 'II' 등급 기준 지수” 0.34 이상             |
| 매우 나쁨 | 'IV' 등급인 항목 1개 이상                       |

비고 :

1. 단계별 퇴적물 지점의 상태 및 조치

- 가. 보통 : 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 곳에서 나타나는 상태
- 나. 약간 나쁨 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있으며, 독성시험을 통해 악영향 확인 필요
- 다. 나쁨 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 높으며, 조사 범위를 상하류로 확대하여 오염 규모 확인 필요
- 라. 매우 나쁨 : 심각하고 명백하게 오염되었으며, 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리 필요

2. 한 지점이 여러 조건에 중복 해당될 경우 오염도 높은 단계 쪽으로 판정

3. “금속류 'II' 등급 기준 지수” 는 아래 식에 따라 계산함

$$\text{금속류 'II' 등급 기준 지수} = \frac{\sum_{i=1}^8 \left( \frac{EC_i}{PEL_{Ki}} \right)}{8}$$

( $EC_i$  : 금속류 항목별 농도,  $PEL_{Ki}$  : 금속류 항목별 'II' 등급 기준치)

미국과 캐나다의 경우 퇴적물 영향지역, 잠정퇴적물 환경지침과 생물의 악영향 기준 등을 활용하여 퇴적물 오염지역을 선정하고 저서생물에 미치는 독성을 평가하여 조치 방안을 강구 · 적용하고 있다. 또한 이러한 기준은 국가 전체의 퇴적물에 획일적으로 적용하지 않으며, 지역특성과 용수 이용 목적 등을 고려하여 주, 행정구역 또는 대상 지구별로 설정하여 활용한다.

미국의 경우에는 지역적인 특성에 따라 수계에 미치는 영향이 달라질 수 있는 유기물이나 영양염류 등의 일반항목 보다는 주로 중금속, 유기화학물질 등 유해물질에 대한 투기기준이 제시되어 있다. 또한 생물영향에 대한 다양한 기준을 적용하고 있으며, 예비수준과 최대수준을 나누어 단계별로 퇴적물

의 오염 관리를 시행하고 있다.

미국과 캐나다는 70년대 이전부터 오염퇴적물에 관심을 가지고 기준 제시와 관리 방안을 모색하기 위해 지속적인 연구와 제도화가 진행되어 왔다. 이들 국가에서는 저서생물을 비롯한 수생태계와 인간에 미치는 영향을 오염퇴적물 관리의 가장 중요한 목표로 설정하고, 영향을 판단할 수 있는 생태지표를 설정하여 그에 따른 관리와 모니터링을 계속해 오고 있다.

퇴적물 관련 기준을 보면, 초기 설정 단계에서 준설 기술 적용시에도 투기 처리를 위해 유기물 및 영양염류 등의 일반항목을 포함한 기준 설정의 경우가 있었으나 대부분이 중금속, 유기화학물질 등에 한정하여 퇴적물 기준을 설정하고 있다. 이는 유해화학물질에 비해 유기물이나 영양염류가 수생태계에 직접적으로 영향을 미치는 사례가 적고, 유해성과 위해성에 크게 차이가 있기 때문이다.

유럽에서는 1980년대 초반부터 퇴적물질기준의 개발을 위한 연구가 영국, 프랑스, 독일, 벨기에, 네덜란드, 스웨덴 등지에서 개별적으로 추진되어 왔으며, 유럽연합의 출범과 더불어 퇴적물기준과 기술 개발을 위한 공동연구 노력이 지속되었다. 오염퇴적물이 미치는 악영향을 중심으로 금속물질과 유기화합물에 대한 안전기준과 생물영향기준이 있으며, 퇴적물에 대한 권고기준과 최대허용기준을 설정하여 준수하고 있다. 그러나 각국의 기준은 목적과 퇴적물 특성에 따라 예비기준, 정화기준, 권고기준 등 다양하게 설정되어 적용된다(이창희, [1998]).

일본의 경우는 미국이나 캐나다와 같이 수생태계의 보호를 위한 퇴적물 환경기준과 지침보다는 용수의 이용목적이나 자연 환경적 특성을 고려하여 단위 사업별 퇴적물기준을 설정하여 활용하고 있다.

우리의 퇴적물 관리에 있어서도 단순히 저수용량을 회복하고 유기물과 영양염류에 대한 농도 저감을 목표로 하는 단일화된 준설 방법에서 벗어나 저성생물과 나아가 인간에 미치는 악영향에 대해 예방하고 관리하기 위해 생태지표의 기준 설정이나 국내 수계 특성에 적합한 기준 설정이 필요할 것이라 판단된다. 또한 농업용 저수지 퇴적물의 환경질(Sediment Quality)을 평가하고, 종합적인 물환경 평가를 지원할 수 있도록 체계를 갖추는 것이 무엇보다 시급하다고 하겠다.

(표 2.2-4) 국내외 퇴적물 오염도(유기물 및 영양염류) 평가 기준 비교

(단위 : mg/kg)

| 기준               | 구분                          | 항목   | COD<br>(mg/kg)                       | 강열감량<br>(%)     | T-N<br>(mg/kg)  | T-P<br>(mg/kg) | 황화물<br>(mg/kg)                  |
|------------------|-----------------------------|------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------------------|
| 비<br>교<br>기<br>준 | 오염평가기준                      |      | -                                    | 13              | 5,600           | 1,600          | -                               |
|                  | 하천공사표준시방서                   |      | 20,000~<br>40,000                    | 10~20           | 1,600~<br>3,000 | 700~<br>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<br>오염정도<br>분류기준  | 비오염  | <40,000                              | <5              | <1,000          | <420           | -                               |
|                  |                             | 중간오염 | 40,000~<br>80,000                    | 5~8             | 1000~<br>2,000  | 420~<br>650    | -                               |
|                  |                             | 심한오염 | >80,000                              | >8              | >2,000          | >650           | -                               |
|                  | 미해양 대기청<br>환경권고치            | ERL  | -                                    | -               | -               | -              | -                               |
|                  |                             | ERM  | -                                    | -               | -               | -              | -                               |
|                  | 캐나다 온타리오<br>환경부 퇴적물<br>환경기준 | NEL  | -                                    | -               | -               | -              | -                               |
|                  |                             | LEL  | -                                    | -               | 545             | 600            | -                               |
|                  |                             | LTL  | -                                    | -               | 4,800           | 2,050          | -                               |
|                  | *일본 나고야항<br>퇴적물 제거기준        |      | 20,000                               | 10              | -               | -              | <1                              |
|                  | *동경만 및 요코하마만<br>퇴적물 제거기준    |      | 13,000<br>20,000<br>30,000<br>40,000 | 5,000<br>15,000 | -               | -              | 600<br>1,000<br>5,000<br>10,000 |

※ 일본의 나고야항과 동경만 및 요코하마만의 퇴적물 제거기준 설정은 각 범위에 대한 점수를 평가한 후, 평가점수에 따라 퇴적물을 제거기준 적용함

(표 2.2-5) 국내의 퇴적물 오염도(중금속) 평가 기준 비교

(단위 : mg/kg)

| 기준               | 구분                          |          | 항목                 | As   | Hg     | Cu        | Cd   | Pb        | Cr                         | Zn         | Ni        |
|------------------|-----------------------------|----------|--------------------|------|--------|-----------|------|-----------|----------------------------|------------|-----------|
|                  |                             |          |                    |      |        |           |      |           |                            |            |           |
| 비<br>교<br>기<br>준 | 호소 퇴적물 오염평가기준               |          |                    | 92.1 | 2.14   | 1,890     | 6.09 | 459       | 991                        | 13,000     | 330       |
|                  | 하천공사표준시방서                   |          |                    | -    | -      | -         | -    | -         | -                          | -          | -         |
|                  | 팔당호                         |          |                    | -    | -      | -         | -    | -         | -                          | -          | -         |
|                  | 한강                          |          |                    | -    | -      | -         | -    | -         | -                          | -          | -         |
|                  | 대청호                         |          |                    | -    | -      | -         | -    | -         | -                          | -          | -         |
|                  | 위성턴주<br>퇴적물<br>관리기준         | 관리<br>기준 | SQS                | 57   | 0.41   | 390       | 5.1  | 450       | 260                        | 410        | -         |
|                  |                             |          | SIZ <sub>max</sub> | 93   | 0.59   | 390       | 6.7  | 530       | 270                        | 960        | -         |
|                  |                             | 투기<br>기준 | SL                 | 57   | 0.21   | 81        | 0.96 | 66        | -                          | 160        | 140       |
|                  |                             |          | ML                 | 700  | 2.1    | 810       | 9.6  | 660       | -                          | 1,600      | -         |
|                  | Great호 퇴적물<br>오염정도<br>분류기준  |          | 비오염                | <3   | -      | <25       | -    | <40       | < 25                       | <90        | <20       |
|                  |                             |          | 중간<br>오염           | 3~8  | -      | 25~<br>50 | -    | 40~<br>60 | 25~<br>75                  | 90~<br>200 | 20~<br>50 |
|                  |                             |          | 심한<br>오염           | >8   | ≥1.0   | >50       | >6   | >60       | > 75                       | >200       | >50       |
|                  | 미해양 대기청<br>환경권고치            |          | ERL                | 8.2  | 0.15   | 34        | 1.2  | 47        | 81                         | -          | 21        |
|                  |                             |          | ERM                | 70   | 0.71   | 270       | 9.6  | 220       | 370                        | -          | 52        |
|                  | 캐나다 온타리오<br>환경부 퇴적물<br>환경기준 |          | NEL                | 4.0  | 0.1    | 15.0      | 0.6  | 23.0      | 22.0                       | 65.0       | 15.0      |
|                  |                             |          | LEL                | 5.5  | 0.12   | 25.0      | 1    | 31.0      | 31.0                       | 11.0       | 31.0      |
|                  |                             |          | LTL                | 33.0 | 2.0    | 114.0     | 10   | 250.0     | 111.0                      | 800        | 90.0      |
|                  |                             |          | 투기기준               | 8    | 0.3    | 25        | 1    | 50        | 25                         | 100        | 25        |
|                  | 일본 오염퇴적물의<br>유해폐기물기준        |          |                    | ≤0.5 | ≤0.005 | -         | ≤0.1 | ≤1        | ≤0.5<br>(C <sup>6+</sup> ) | -          | -         |

※ SQS : Sediment Quality Standards

SIZ<sub>max</sub> : Sediment Impact Zone maximum allowable contamination level

SL : Screening Level

ML : Maximum Level

ERL : 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 최소 농도(Effects Range Low)

ERM : 악영향을 끼칠 수 있는 범위의 중간 농도(Effects Range Median)

NEL : No Effect Level

LEL : Lowest Effect Level

LTL : Limit of Tolerance Level

(표 2.2-6) 워싱턴주의 생물학적 퇴적물 관리 표준

| 검사대상     | 퇴적물 관리 표준(Sediment Management Standards)  |   |
|----------|---|---|
|          | SQS   | SIZ <sub>max</sub> , CSL/MCUL   |
| 단각류      | 통계적 유의성 검정결과(t test, $p \leq 0.05$ ) 표준퇴적물보다 평균치사율이 크며, 평균치사율의 절대치가 표준퇴적물의 평균치사율의 25% 초과                            | 통계적 유의성 검정결과(t test, $p \leq 0.05$ ) 표준퇴적물보다 평균치사율이 크며, 평균치사율의 절대치가 표준 퇴적물의 평균치사율의 30% 초과             |
| 유충       | 통계적 유의성 검정결과(t test, $p \leq 0.05$ ) 표준퇴적물보다 평균생존율이 작으며, 평균치사율의 절대치가 표준 퇴적물의 평균치사율의 30% 초과                          | 통계적 유의성 검정결과(t test, $p \leq 0.05$ ) 표준퇴적물보다 평균생존율이 작으며, 평균 치사율의 절대치가 표준 퇴적물의 평균치사율의 30% 초과           |
| 저서동물수량   | 단각류, 연체동물류, 또는 다모류 중 한 종류의 평균 수량이 대조구 평균 수량의 50% 미만이고, 수량이 통계적으로 (t test, $p \leq 0.05$ ) 대조구의 수량과 다름               | 단각류, 연체동물류, 또는 다모류 중 한 종류의 평균 수량이 대조구 평균 수량의 50% 미만이고, 수량이 통계적으로 (t test, $p \leq 0.05$ ) 대조구의 수량과 다름 |
| 다모류 유충   | 다모류의 평균 생물량이 표준 퇴적물 평균 생물량의 70% 미만이고, 평균 생물량이 통계적으로 (t test, $p \leq 0.05$ ) 표준퇴적물의 생물량과 다름                         | 다모류의 평균 생물량이 표준 퇴적물 평균 생물량의 50% 미만이고, 평균 생물량이 통계적으로 (t test, $p \leq 0.05$ ) 표준퇴적물의 생물량과 다름           |
| Microtox | 최고 농도를 가진 퇴적물 시료에서 방출되는 평균 비 출력이 표준퇴적물의 빛 출력의 80% 미만이고, 시료의 평균 빛 출력이 통계적으로 (t test, $p \leq 0.05$ ) 표준 퇴적물 빛 출력과 다름 | 적용되지 않음   |

출처 : Washington Department of Ecology(1995)

### 3절. 국내외 퇴적물 제어·관리 기술 및 적용 사례

#### 1. 유입오염원의 제어·관리 기술 및 적용 사례

퇴적물에 오염물질이 장기적으로 퇴적되는 것을 제어관리하기 위해서는 수계로 유입되는 오염물질에 대한 관리가 필요하다. 유입오염원의 제어관리 방안으로는 점축산화, 대형수생식물이용, 포기, 여과, 침강지 설치 등이 있는데, 이들 기술은 상류부의 오염물질의 유입을 관리하여 유입부하량을 저감하고, 비점오염물질의 유입을 제어하기 위한 기술이다.

##### 가. 비점오염원 저감시설

비점오염원은 농지에 살포된 비료 및 농약, 대기오염물질의 강하물, 지표상 오염물질, 하수관거 월류수 내 오염물질 등으로 강우시 우수유출수와 함께 유출되는 오염물질을 말하며, 이러한 비점오염물질은 지표면에 퇴적된 입자성 오염물질이 빗물에 쓸려 한꺼번에 유입됨에 따라 수생태계를 오염시키는 수질오염의 원인이 될 수 있으므로 이를 저감시키기 위해 설치하는 시설을 비점오염 저감시설이라 말한다. 비점오염원은 인간에 의한 다양한 토지이용에서 기인한다. 즉, 인간에 의한 각종 토지이용, 상업지역, 산업지역, 주거지역, 도로 등과 같은 포장지역, 공공지역, 농업지역 등은 건조 시 많은 양의 비점오염물질을 축적하며, 강우 시 유출이 발생하여 수생태계에 심각한 위협을 끼친다(환경부, [2006]).

비점오염원 저감시설의 종류는 크게 저류시설, 침투시설, 식재시설, 장치시설 등으로 나눌 수 있으며, 아래 (표 2.3-1)에 대표적인 기술들을 정리해 제시하였다. 이중 저류시설 및 침투시설은 비점오염원의 저감뿐만 아니라 홍수방재를 위한 우수유출 저감 기능도 가진다.

(표 2.3-1) 비점오염원 제어·관리 기술

| 저류형   | 침투형  | 식생형   | 장치형     |
|-------|------|-------|---------|
| 습지저류지 | 유공포장 | 인공습지  | 여과형 시설  |
| 습식연못  | 침투조  | 생태 수로 | 와류형 시설  |
| -     | 침투도랑 | 수초재배섬 | 스크린형 시설 |

미국과 유럽의 저수지는 대부분 자연 호소가 대부분이며 주변 지형이 완만하고 자연적인 습지 형태를 많이 포함하기 때문에, 이를 활용하여 영양염류를 제거하는 자연적인 정화방법을 적용하는 사례가 많다. 또한 인공습지 또는 자연습지에서 식생을 매개체로 이용하여 오염물질 및 중금속을 정화하는 사례(폴란드), 인공연못 형태의 저류조를 이용하는 기술(노르웨이), 인공습지, 식생완충대(buffer-strip), 저류조 등의 여러 가지 기법을 복합적으로 이용하는 기술(에스토니아)들이 연구되고 있고, 이 중에서 많은 기술들이 실제 적용된 사례가 있다. 일본에서는 하천의 자연정화공법을 이용한 정화기술에 대한 연구와 현장적용이 많이 시행되고 있으며, 역간산화접촉법, 자연형 호안 정비, 미생물 부착여재의 이용 등 다양한 공법의 자연형 하천정화 기술들이 적용되고 있다(환경부, [2006]).

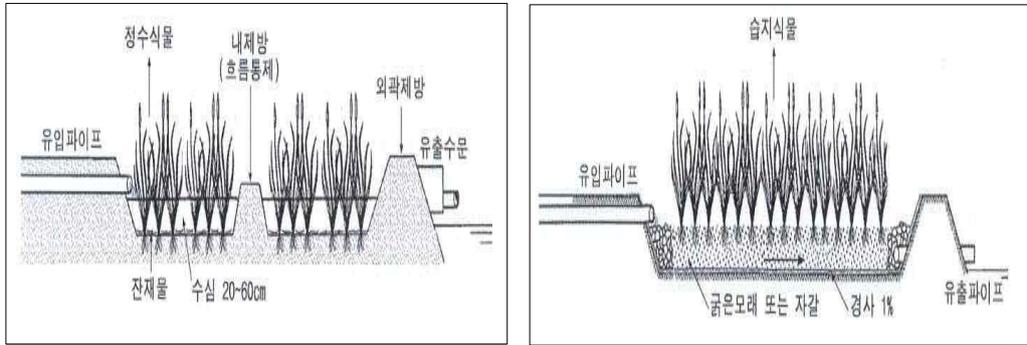
유역 내 점오염원 제어기술은 하수처리장 인 고도처리, 비점오염원 저감기술은 인공습지(Wetlands), 전댐(Pre-dam), 습식 및 건식 저류지(Dry and Wet Detention Ponds), 식생여과대 복원(Riparian Zone Rehabilitation) 기술 등이 연구되었다(Cooke et al., [2005]; <http://www.cyanodata.net/review.php>).

#### 나. 습지시스템

인공습지는 자연습지와 달리 인간이 특정한 목적을 위하여 자연습지를 모방하여 설계하고, 건설하고, 운영하는 습지를 가리킨다. 일반적으로 늪지(marsh)를 가리키며, 늪지는 cattail, bulrush, rush, reed와 같이 수생식물이 우점종인 수심이 낮은 지역으로서 매우 큰 토양이나 기후조건에 적응된 지역을 말한다. 늪지는 또한 다양한 수질과 유량과 수심에 적응할 수 있다.

대다수의 수질개선용 인공습지는 지표유출형(SF, surface flow system)으로 구분할 수 있는데, 여기에서는 유입수가 배지물질을 통과하는데 대부분이

지상으로 흐르며 배지는 일반적으로 자연 상태의 토양이다. 다른 형태의 습지로는 물이 완전히 배지 내에서 흐르고 자유수면은 보이지 않는 지하유출형(SFS, subsurface flow system)이 있다.



<그림 2.3-1> 지표흐름형 습지(SF)와 지하흐름형습지(SFS) 모식도

SFS 습지의 배지는 일반적으로 자갈이나 모래 등이 사용된다. 불과 몇 년 전만 하여도 SFS형 습지가 큰 가능성이 있는 것으로 보였지만 대부분의 SFS 습지는 실제 실험한 결과 2~3년이 지나면서 심한 막힘 문제가 발생하기도 하였다. 또한 SFS형 습지는 암모니아 제거를 위한 충분한 용존산소를 유지할 수 없었다. 그래서 북미에서는 몇 개의 SFS형 하수처리시스템만이 운영중인 반면에, 유럽에는 많은 SFS형 습지가 생활하수처리에 사용되고 있다.

SFS형 습지가 운영상에 막힘 현상을 나타냄에 따라 저농도의 영양물질을 함유한 하수의 고도처리시설을 제외하고는 SF형 습지를 추천한다. 인공습지는 현재 소규모 도시나 마을에서 발생하는 하수, 광산폐수, 도시 유출수, 축산폐수, 정화조 유출수, 매립장 침출수, 제지공장이나 통조림공장의 폐수, 식품폐수, 정유공장 폐수, 그리고 기타 소규모 사업장의 폐수를 처리하는데 사용되고 있다. 운영시스템은 해수면에서부터 해발 1,500 m까지, 열대지방에서 캐나다의 Ontario나 Scandinavia 극지방 아래까지 널리 분포하고 있다. 운영이 화학적·생물학적 과정에 의존하기 때문에 오염 제거율이 저온에서는 낮아지나 방류수의 수질은 허가기준을 잘 만족시킨다(김형철, [2010]).

습지는 자정능력을 통해 물을 정화할 수 있는 능력을 가지고 있다. 따라서

전 세계적으로 습지의 정화능력에 관심이 있었으며, 이를 응용 및 개선한 것이 인공습지라고 할 수 있다. 대부분 습지의 물 정화능력은 인공습지 위주로 평가되고 있으며, 설계 방법, 오염원의 종류 및 부하량 등에 영향을 받는다.

국내에서 인공습지의 적용 및 사업화 실적은 많다. 한국농어촌공사에서는 1997년 마산저수지 수질개선시험사업을 시작으로 하여 감돈저수지, 흥동저수지, 개천저수지, 가산저수지, 공산저수지, 월천저수지, 설성저수지, 성암저수지, 둔전저수지, 대승저수지, 신희저수지, 승언2저수지, 상성저수지, 도덕저수지, 동방저수지, 도고저수지, 양전저수지에 준공을 완료하고 운영 중에 있다.

남귀숙 등(2004)은 농업용 저수지 수질개선을 위한 방법으로 지하흐름 갈대 인공습지를 적용하여 수질정화 효율을 평가하였으며, 강창국 등(2010)은 경지 및 인근 축산단지로부터 발생하는 비점오염물질의 처리를 목적으로 충청남도 공주시 탄천면에 자유수면형 인공습지를 조성하여 수질정화효율을 연구하였다.

또한 최광순 등은 댐저수지 상류 유역의 비점오염물질 및 하수처리장 유출수 처리를 목적으로 조성되어 운영 중인 10개 인공습지의 수질정화 기능에 대해 평가하였으며, 국내의 댐, 저수지, 인공습지 중 조성 면적이 10,000 m<sup>2</sup> 이상인 소옥천 습지, 부항댐습지, 회야댐습지, 복내 Biopark, 신평천습지, 길성천습지, 이서천습지, 동북천습지, 내북천습지, 움천습지를 대상으로 하였다. 조사 대상의 인공습지는 모두 지표흐름형 처리방식을 적용하고 있다. 조사결과 일부 습지의 경우 제거효율이 없거나 낮게 나타나기도 하였다. 치익원 등(2011)은 주암호 상수원 상류지역에 위치한 송광 하수종말처리장의 배출수 및 인근지역 비점오염물질 처리를 위해 조성한 봉산 인공습지의 오염물질 처리효율에 대해 평가하였다.

인공습지의 처리효율은 설계방법, 오염원의 종류, 부하량, 전처리 방법, 처리면적, 체류시간에 따라 변하며, (표 2.3-2)는 처리효율에 관한 문헌조사 결과이다. 습지의 경우 생태계의 물 정화능력을 가지고 있으나 처리효율은 유입되는 오염물질의 양 및 습지의 구성에 따라 다르게 나타나며, 건식습지보다 습식습지의 효율이 더 높은 것으로 분석되고 있다. 일본의 습지와 국내의 신정호 습지의 경우는 처리효율보다 제거량을 많게 하여 호소수질을 개선하는데 기여하고자 체류시간을 0.5~10시간 정도로 짧게 운영하고 있어 같은 습지면적에 유량을 적게 공급하면 체류시간은 길어지고 이에 따라 처리효율도 높아진다(이용곤, [2012]).

(표 2.3-2) 인공습지 정화효율 사례

(단위 : 유입수질 mg/L, 처리효율(%))

| 평가 사례                      | 체류시간  | 구분   | SS   | BOD       | COD   | T-N       | T-P       | 유형   |
|----------------------------|-------|------|------|-----------|-------|-----------|-----------|------|
| 일본 가스미가우라호 Bio-Park        | 0.5   | 유입수질 | -    | 6.9       | 20.9  | 3.7       | 0.12      | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | 28        | 42    | 15        | 21        |      |
| 일본 세네가와(青明川)               | 5     | 유입수질 | -    | -         | -     | 2.82      | 0.185     | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | -         | -     | 17        | 21        |      |
| 일본 산노가와(山王川)               | 5~10  | 유입수질 | -    | -         | -     | 3.4       | 0.23      | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | -         | -     | 32        | 39        |      |
| 전남 고흥군 신양천 전남대 실험시설        | 1.5   | 유입수질 | -    | 6.0       | 15.4  | 5.8       | 0.198     | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | 58        | 65    | 57        | 57        |      |
| 북미 습지 DB(지표흐름형 습지)         | 4~14  | 유입수질 | -    | 5.1~151.0 | -     | 3.32~51.0 | 0.53~11.0 | -    |
|                            |       | 처리효율 | -    | 64.8      | -     | 70.1      | 54.3      |      |
| 미국 Lakeland, FL            | -     | 유입수질 | -    | 3.88      | 5.60  | 10.36     | 9.05      | 건식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | 19.6      | 16.1  | 80.8      | 53.4      |      |
| 미국 Canon Beach, OR         | 10~14 | 유입수질 | -    | 27        | 51    | -         | -         | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | 77.8      | 78.4  | -         | -         |      |
| 미국 West Jackson County, MS | 12    | 유입수질 | -    | 13~46     | 12~49 | -         | -         | 건식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | 62~93     | 53~89 | -         | -         |      |
| 미국 Hillsboro, OR           | 4~27  | 유입수질 | -    | 5.1       | 7.7   | 11.9      | 6.3       | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | 40        | -24.7 | 59.7      | 39.7      |      |
| 미국 Des Plains River, IL    | 6.5   | 유입수질 | -    | -         | 49.8  | 1.8       | -         | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | -    | -         | 86~90 | 61~92     | 65        |      |
| 마산저수지 인공습지                 | 6~72  | 유입수질 | 6.9  | 4.0       | 8.3   | 1.154     | 0.112     | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | 89.7 | 69.8      | 48.6  | 74.3      | 57.0      |      |
| 공주시 탄천면 인공습지               | 16.8  | 유입수질 | 7.3  | 1.3~4.8   | 6.5   | 6.5       | 0.3~1.8   | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | 26   | 28        | 18    | 16        | 39        |      |
| 봉산 인공습지                    | 72    | 유입수질 | 1.6  | 1.9       | -     | 11.5      | 4.4       | 습식습지 |
|                            |       | 처리효율 | 18   | 26        | -     | 16        | 9         |      |

그러나 유량을 많이 공급하면 처리효율은 낮으나 많은 유량이 처리되기 때문에 오염물질이 제거되는 양은 많아지게 된다. 미국은 일본과 한국에 비해 습지를 넓게 조성할 수 있는 지리적 여건인 체류시간이 길게 설계된다. 또한, 수질농도가 높은 경우가 효과가 높게 나타나며, 미국 Hillsboro 습지의 경우에는 SS의 농도가 낮기 때문에 습지의 처리수가 유입수보다 높게 나타나는 결과를 나타냈다(박병훈, [2003]).

그러나 최근 기후변화로 인한 극심한 가뭄으로 인공 습지가 그 기능을 충분히 하지 못하였으며 수질개선에 크게 도움이 되지 못하고 있어서 습지의 역할 및 기능의 한계를 보이고 있다.



<그림 2.3-2> 설성 저수지의 인공습지 설치 사례

## 2. 호내 퇴적물의 제어·관리 기술 및 적용 사례

오염퇴적물이 생태계 및 인체에 미치는 악영향을 미연에 방지하고 퇴적물로 인한 추가적인 오염을 제어하기 위하여 종합적인 수계관리에 있어서 오염퇴적물에 대한 관리가 중요시 되고 있다. 오염퇴적물의 제어 기술은 지역적인 특성, 오염퇴적물의 특성, 용수 이용 목적, 가용 예산 등 제반여건에 의해 크게 좌우되기 때문에 획일적으로 나누기는 어려우며 사안별로 적정 제어기술을 선택하여 적용해야 할 것이다. 제어기술 선정 시에 고려 요인은 특정 오염물질의 존재 및 유해성, 기술 적용 기간중 용수이용 문제, 대상 수계의 제원 및 수리학적 특성, 제어기술 적용시 소요 기간 및 퇴적물의 처리 방법과 비용, 사회적인 여론과 같은 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 이러한 대상 지구의 다양한 문제점과 특수성을 고려하고, 그에 따른 보다 효과적인 기술을 적용할 때 적은 비용으로 효과적인 오염퇴적물 제어가 가능하며, 이를 장

기적으로 안정하게 유지할 수 있을 것이다.

오염퇴적물 제어 기술로는 기본적으로 자연정화, 생물/화학적 처리, 고정/안정화, 준설, 자연정화, 캡핑 등으로 분류할 수 있으며, 호소 내 제어기술 중 물리적 제어기술로는 수중폭기와 강제순환, 준설, 퇴적물 캡핑(Jacobs and Forstner, [1999]; Hart et al. [2003]; <http://www.vattenresurs.se/>), 가압부상 등이 있다.

#### 가. 준설

현재까지 다양한 오염퇴적물의 제어기술이 연구되고 개발되었으나 수저에서 오염퇴적물을 제거한다는 점에서 준설은 가장 근본적이고 기본적인 처리방법이라 할 수 있다. 준설이 필요한 경우 준설여부의 판단, 준설방법의 선택, 처리장소의 선정이 중요하다. 퇴적물이 심하게 오염된 경우, 준설과정에서 재부유되는 오염물질이 수질 및 수생생물에게 악영향을 미치지 않도록 특별 조치가 요구되며 준설된 퇴적물의 운반, 처리장소 및 방법을 선택할 때도 퇴적물에 포함된 오염물질이 유출되지 않도록 특별한 관리가 필요하다(이창희, [1998]).

준설은 육상준설과 수중준설이 있다. 육상준설은 저수지 수면의 노출 지역의 토사를 제거함으로써 준설 비용이 저렴하고, 준설 효율이 높은 장점이 있으나, 노출지역과 비관개기에 한해 제한적으로 준설 가능하다는 것과 수변 공간의 생태계를 교란시킬 우려가 있다. 수중준설은 선박을 이용하여 물속에 잠겨있는 토사, 저니 등 오염퇴적물을 제거하는 방법으로 고비용·저효율이라는 단점이 있으나, 상시 준설 및 불특정지역의 준설이 가능하고 환경 준설이 가능한 방법이다(조영철 등, [2010]). 또한 전통적으로 준설의 방법을 크게 기계식 준설(mechanical dredges)과 압력식 준설(hydraulic dredges)로 나눌 수 있다. 기계식 준설은 버킷을 사용하여 오염된 퇴적물을 직접 떠내는 방식을 말하며 압력식 준설은 원심력을 이용하여 오염된 퇴적물을 물과 함께 빨아올리는 방식을 말한다. 압력식 준설은 흡입구에 맞는 cutterhead를 설치하여 오염된 퇴적물의 흡입을 돕는다. 압축공기식 준설(pneumatic dredges)은 압력식 준설의 일종으로 원심력 대신 공기압을 이용하여 오염된 퇴적물을 끌어올리는 방식을 말한다. 압축공기식 준설은 압력식 준설에 비해 준설퇴적물의 고체함량이 높으며 퇴적물의 재부유 현상이 적다는 장점이 있다.

**(Æ 2.3-3) Comparison of hydraulic and mechanical dredge**

| Type       | Advantages   | Disadvantages   |
|------------|--|---|
| Mechanical | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavation can proceed at the sediment's in situ water content</li> <li>- Highly maneuverable</li> <li>- All types of debris can be removed</li> <li>- Good dredging accuracy</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potential for large amounts of sediment resuspension</li> <li>- Dredged material must be rehandled</li> <li>- Production capacity is generally lower than hydraulic</li> <li>- Unit costs are typically high than hydraulic</li> </ul>                               |
| Hydraulic  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resuspension of sediment is limited</li> <li>- Dredged material can be piped directly to the disposal area, eliminating the need for rehandling</li> <li>- Production capacity is generally higher than mechanical</li> <li>- Unit costs are typically lower than mechanical</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Large volume of water removed with the sediment must be treated prior to disposal or release</li> <li>- Slurry pipelines can obstruct navigational traffic</li> <li>- Most debris cannot be removed hydraulically</li> <li>- Susceptible to debris damage</li> </ul> |
| Pneumatic  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Good for nonconsolidated solids</li> <li>- Use in interior waterway</li> <li>- Low solids content low resuspension of sediment</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- May obstruct traffic</li> <li>- Do not operate well in shallow(&lt;10 ft depths)</li> </ul>  |

국내 준설을 실시한 경기도의 아산호는 저수량 확보, 침수피해 방지, 수질 개선을 위해 1985년부터 1996년까지 모래 약 1200만 m<sup>3</sup>, 개흙 약 150만 m<sup>3</sup>을 준설하였다. 준설 폐기물 중 모래는 건축자재로 매각하였고 개흙은 도로보수용 또는 매립용으로 매각하였다(평택 농지개량조합, 1997). 김태철 등(1996)의 연평균 침전량 연구에 의하면 아산호의 지난 20년간 총 침전량은 619만 m<sup>3</sup>이었으며, 이 기간에 약 588만 m<sup>3</sup>의 토사가 준설된 것으로 조사하였다.

울산 태화강 하도정비 및 오염하천 정화사업도 국내 준설의 대표적인 사례로써 1960년대 산업화로 심각하게 오염되었으며 하천정비와 수질 개선 대책 등 많은 노력이 있었으나 하도 내 토사퇴적으로 홍수단면적 축소와 오염물질의 퇴적 등으로 수질이 지속적으로 악화되었다. 이에 무질서한 하도를 정비를 통한 치수대책과 수질 개선을 목적으로 하상 퇴적물의 준설 및 둔치를 친환경적으로 정비하고 휴식공간을 확보하여 재해예방은 물론 생활공간을 제공하였다.

국외의 준설사례로는 미국 위스콘신의 Starkweather Creek와 일리노이의 Waukegan Harbor가 있다. 준설장비의 이동에 소모되는 비용은 기계적 준설의 경우(clamshell) \$37,500, 압력식 준설(pipeline)의 경우 \$18,750이 소모된다(USACE Detroit District 제공). 또한 미국의 허드슨강은 오염을 둘러싼 GE(General Electric)와 미국환경청의 분쟁으로부터 시작되는데, 1947년부터 1977년까지 허드슨 강변에 있던 GE 축전기 공장에서 약 1.3백만 파운드 PCB를 방류했으며, 40년 가까이 흘러보낸 PCB가 320 km가 넘는 지역에 오염퇴적물이 퇴적된 것을 발견하고 법적 공방 끝에 2001년 준설 작업을 시행하기로 결정하고 GE에게 비용을 부담하도록 하였다. 허드슨강을 각 크게 3부분(Section 1,2,3)으로 나눠 준설사업을 진행하였으며, 크랩셸이 장착되어 있는 굴착기를 활용해 오염퇴적물을 준설후, 준설될 퇴적물을 바지선을 이용해 퇴적물 처리시설로 이송하고, 응집, 탈수 공정을 거쳐 최종 잔재물(슬러지)은 PCBs농도(50 ppm)에 따라 매립장으로 이송해 최종 처분하였다.

일본의 동경도에서 不忍池의 수질개선을 위해 1980년 초에 不忍池의 대대적인 준설작업을 실시하였고 1990년대 초에는 동물원 부근의 준설을 실시하여 어느 정도 수질이 개선되었다고 한다(한국건설기술연구원, [2003]). 기타 준설 사례는 아래 (표 2.3-4)에 나타내었다.

준설은 오염퇴적물의 제거라는 측면에서 근본적인 처리 방안이라 할 수 있으나 예산이 많이 소요되고, 준설후 오염퇴적물의 처리기준이나 처리과정이 복잡하여 한계가 있고 준설로 인하여 발생한 부유물질이 다시 침전하여 안정화된 후에 여전히 퇴적물 최상층에는 오염퇴적물이 존재할 수 있는 등 단점

또한 적지 않으므로 퇴적 상태와 오염정도, 퇴적깊이, 주변환경 여건 등 다양한 영향 요인에 따라 신중히 결정할 필요가 있다.

(표 2.3-4) 퇴적물처리시범사업 대상 저수지 사업내용(조영철, 2010)

(단위 : ha, m<sup>3</sup>)

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



<그림 2.3-3> 농업용 저수지 오염퇴적물에 대한 준설

(표 2.3-5) 준설 공법의 적용 사례

| 국명 | 대상 수역      | 지역      | 방법 | 기간    | 면적 (ha) | 물량 (천 m <sup>3</sup> ) | 준설토 처리 | 비고              |
|----|------------|---------|----|-------|---------|------------------------|--------|-----------------|
| 일본 | 시방호        | 장야현     | 펌프 | 69~80 | 250.0   | 1,509.0                | 용지매립   | 만수위 2.5 m 이상 오니 |
|    | 무포         | 이바라기현   | 펌프 | 81~83 | 61.7    | 304.3                  | 호안매립   | 50 cm까지         |
|    | 수가호        | 간염현     | 그랩 | 75~82 |         | 415.0                  |        | 호내 3개소          |
|    | 양호         | 간염현     | 펌프 | 75~83 | 107.6   | 101.4                  |        | 유입하천 10개소       |
|    | 간과호        | 자성형     | 펌프 | 76~82 | 0.18    | 230.0                  | 농지환원   | 대진천하구           |
|    | 중해         | 조시현     | 펌프 | 77    | 24      | 2.5                    |        | 동해안             |
|    | 호산지        | 조시현     | 펌프 | 88~91 | 17      | 120.0                  |        | 기수호             |
|    | 동향지        | 조시현     | 펌프 | 87    | 250     | 400.0                  |        |                 |
|    | 비파호        | 조시현     | 펌프 | 81    | 58.7    | 500.0                  | 경지매립   |                 |
|    | 독일         | Neckar호 |    | 73    |         | 219.0                  | 농지환원   |                 |
| 미국 | Liberty호   | 워싱턴     | 펌프 | 77~81 | 2,600.0 |                        | 용지매립   | 경광클레화           |
|    | Vancouver호 | 서남부     | 펌프 | 87    |         |                        | 탈수, 소각 |                 |
|    | Nutting호   | 미사추세츠   | 펌프 | 81    | 20      | 6,500.0                | 농지환원   |                 |
|    | Morsee호    | 미사추세츠   | 펌프 | 82    | 17.8    | 275.0                  |        |                 |
|    | Collins호   | 뉴욕      | 펌프 | 78~80 | 10.0    | 198.8                  |        |                 |
|    | Lilly호     | 위스콘신    | 펌프 | 77    | 3.6     | 52.0                   | 농지환원   |                 |
|    | Lansing호   | 미시칸     | 펌프 | 78~79 | 35.6    | 596.4                  |        |                 |
|    | Long호      | 미네소타    | 펌프 | 78~79 | 136.2   | 1,230.4                |        |                 |
|    | Blue호      | 아이오와    | 펌프 | 79~80 | 133.7   | 217.0                  |        |                 |
|    |            |         |    | 81    |         | 305.8                  |        |                 |

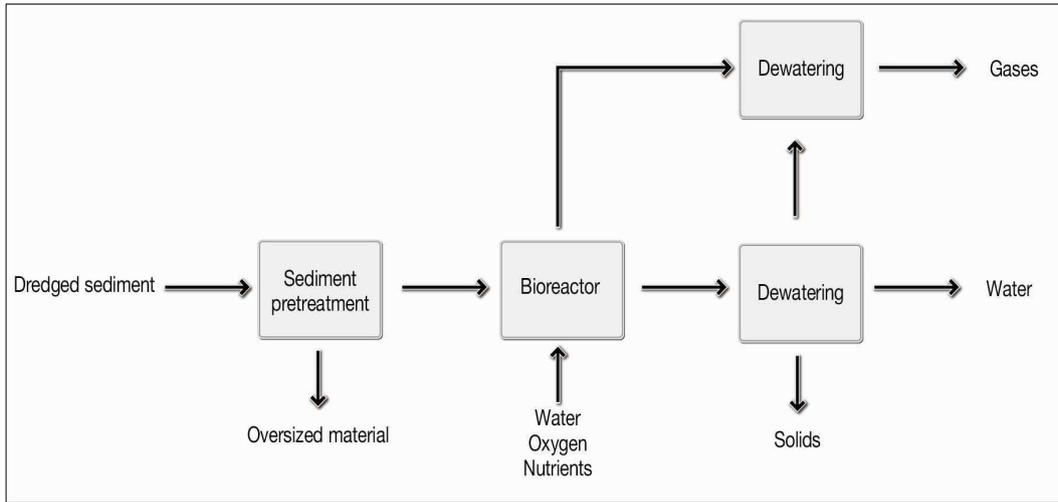
## 나. 생물/화학적 처리

### (1) 생물학적 처리

생물학적 처리는 퇴적물내에 존재하는 미생물을 이용하여 다양한 유기화합물이나 유류성분 등과 같은 오염물질을 먹이로 이용함으로써, 물이나 이산화탄소와 같은 무해한 물질로 분해하는 기술이다. 그러나 PCBs, PAHs 등과 같은 고분자 오염물질들은 퇴적물 내에 오랜 기간 잔류하고, 생분해가 매우 천천히 일어나므로 먹이연쇄 과정을 통한 농축으로 인간에게 도달하게 될 확률이 높다. 이와 같은 잔류 유기오염물질이 미생물에 의해 생분해가 잘 이루어지지 않는 것은 미생물이 오염물질의 독성에 민감하고, 적합하지 않은 퇴적물 내의 환경조건 등에서 미생물이 오염퇴적물을 정화하기가 쉽지 않기 때문이다. 이렇게 미생물을 활용하는 방법은 정화속도가 화학적 처리에 비하여 비교적 느리고 위험성이 적은 방법으로서 유기물 처리에는 유용하지만 농약과 같이 난분해성 물질은 분해하기 힘들고 온도, 전자수용체 농도 등에 영향을 받는다고 알려져 있다(Jafvert and Rogers, [1991]; Brooks et al., [2003]).

생물학적처리 방법인 Bioslurry는 Bio-reactor를 이용해 미세토 퇴적물을 처리하는 기술이다. 하수처리공정과 같이 호기성, 혐기성 미생물을 이용해 처리하게 되는데, 시스템 구성은 다양한 방식(혐기/호기, Soil Washing 기술과 결합 등)으로 가능하다. 혼합 및 폭기 공정을 거치면서 휘발성 오염물질이 공기중으로 배출될 수 있기 때문에 대기오염 방지시설도 필요하다(환경부, [2013]).

생물학적 처리를 오염퇴적물에 활용하기 위해서는 적용되는 미생물들이 현장에서 적응하여 우점종으로 생존 가능 여부와 생태계에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 선행연구가 필요하다.



<그림 2.3-4> Generalized Aerobic Bioslurry System

(표 2.3-6) 생물학적 처리의 Bioslurry 기술의 특성

|               |   |
|---------------|---|
| Applicability | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중금속이 포함되면 미생물의 대사 작용을 억제해 처리효율 저하</li> <li>- 휘발성유기화합물(VOCs), PCBs, PAHs, 농약 등에 적용 가능 기술</li> </ul> |
| Advantages    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유기물 처리에 효과적</li> <li>- 다양한 오염물질(농약, PCBs, 할로젠 휘발물질)처리에 적용 가능</li> </ul>                            |
| Limitations   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 처리 후 탈수공정 및 폐수처리공정 필수</li> <li>- 운전, 유지관리가 힘들다</li> <li>- 낮은 농도에서는 오염물질 제거 효율이 낮다</li> </ul>       |

※ 출처 : 환경부, 2013

그 밖의 생물학적 처리 기술로서 퇴비화 공법은 오염된 고형물질을 분해하여 무해한 물질(이산화탄소, 물)로 변화시키는 기술이다. 함수율 제어를 위해 우드칩, 나무껍질, 톱밥들을 추가하고, 박테리아 성장을 촉진시키기 위해 분해 가능한 탄소, 물, 산소, 영양염류를 첨가한다(환경부, [2013]).

## (2) 화학적 처리

화학적 처리는 오염물질의 농도가 높거나 긴급하게 복구할 필요성이 있는 지역에서 오염된 퇴적물을 과산화수소, 영가철, 기타 산화제 등의 화학물질을 이용하여 중화·침전·탈염소화 등의 반응을 통해 처리하는 방법을 말한다.(김건하 등, [2007]; Eggen and Majcherczyk, [2006]) 빠른 처리가 가능하고 적용 가능한 화학물질의 종류가 다양하기 때문에 적용시 화학물질의 효율성과 2차적인 위해성이 개선된다면 상당히 뛰어난 효과를 기대할 수 있는 기술이다.

화학적 현장 처리에 사용되는 화학 물질들은 독성을 띠거나 그 독성이 낮을 지라도 환경에 영향을 미칠 수 있는 물질들로 구성되어있기 때문에 오염 퇴적물의 복원을 위하여 적용하였을 경우 적용된 화학물질에 의해 부차적인 오염이 발생할 가능성이 있다는 단점이 있다. 화학적 현장 처리는 오염물질의 농도가 높거나, 긴급한 복구가 요구되거나, 오염지역이 격리 처리 되는 등의 제한적인 상황 아래서 활용될 수 있으며(USEPA, [1993]), 처리에 사용되는 화학물질의 독성여부나 환경에 미치는 영향, 화학변화에 의한 메카니즘 등을 고려하여 발생할 수 있는 2차 오염에 대한 연구가 반드시 수반되어야 한다.

화학적 처리 방법 중 산화공법은 화학물질을 첨가해 유기물질을 변형시키거나 분해시키는 방법이다. 산화 물질(단독으로 사용하거나 자외선과 함께 사용)로는 오존, 과산화수소, 과망간산칼륨, 질산칼륨, 산소를 주로 사용하며, 오존과 과산화수소를 이용한 산화공법은 고급 산화기술에 해당한다. 산화를 통해 생물학적으로 이용 가능한 형태로 만들거나, 독성이 없는 물질로 변형시킨다. 이론상 완전히 산화가 이루어지면 이산화탄소와 물로 분해가 된다. 트리할로메탄과 같은 부산물을 생성시키지 않기 위해서는 온도, pH, 접촉시간 등을 적절하게 조절해야 한다. 또 선택적으로 물질을 산화시키는 것이 아니라 모든 물질을 산화시킨다는 특징이 있다.

(표 2.3-7) 화학적 처리의 산화 공법 기술 특성

|               |  |
|---------------|--|
| Applicability | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 할로젠 유기화합물(PCBs, 다이옥신 등), 휘발성 유기화합물 제거에 적용</li> <li>- 슬러리형태, 슬러지에도 적용 가능</li> </ul>  |
| Advantages    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다른 In-Situ기술보다 낮은 투과성을 지닌 퇴적물(점토, 실트)에 적용 용이</li> <li>- 유기물, 무기물 처리에 효과적</li> </ul> |
| Limitations   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 점토의 비중이 많거나, 유기물질 농도가 높으면 처리 비용 상승</li> <li>- 특정 PAHs에 적용 불가능, 후처리 공정 필요</li> </ul> |

(표 2.3-8) 화학적 처리 기술의 개요(환경부, 2013)

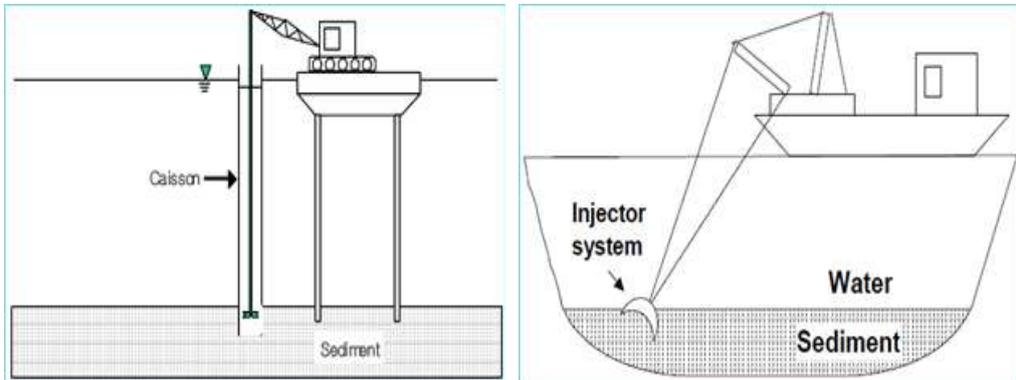
| Treatment method   | Treatment reagents   | Potential problems  |
|--|--|---|
| <p>Neutralization<br/>(acids and bases)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Weak acids and bases</li> <li>To neutralize acids: calcium carbonates, sodium carbonates or sodium bicarbonates; limestones or greenstone may be applied as active cover material.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Toxicity to pH-sensitive benthos if not properly placed on the spill</li> <li>Use of ferric sulfate under conditions may result in the formation of hydrous iron oxides which can scavenge heavy metals from water and may coat the gills of bottom feeder</li> </ul>  |
| <p>Precipitation<br/>(inorganic cations and anions)</p>                              | <p>Sulfide precipitation is most promising since metal sulfides are the least soluble metal compounds likely to form over a broad pH range. Calcium sulfide, iron sulfide or sodium sulfide may be used.</p>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Potential for formation of H<sub>2</sub>S gas; likelihood increase as the reactivity of sulfide and metals decrease.</li> <li>Effective only under reduced conditions, oxidation to more soluble sulfide species could occur under aerobic conditions.</li> </ul>  |
| <p>Oxidation<br/>(wide range of organics and nitroaromatics are not well suited)</p> | <p>Oxygen and/or ozone and hydrogen peroxide.</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Oxidation can result in more mobile degradation products</li> <li>Both ozone and hydrogen peroxide may react with organics in the water column or sediments which are not target compounds, thereby reducing effectiveness.</li> <li>Compounds which are sorbed to sediments may be difficult to oxidize</li> <li>Ozone will decompose back to oxygen rapidly in the presence of organics; stability of hydrogen peroxide is not well known</li> </ul> |
| <p>Chemical dechlorination<br/>(high chlorinated organics; PCB, dioxins)</p>         | <p>Polyethylene glycol and potassium hydroxide.</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Treatment system can tolerate some water but limits have been not seen established.</li> <li>Degradation is temperature dependent and may proceed slowly ambient temperature</li> </ul>  |

오염퇴적물의 처리를 위해 질산칼슘을 이용하는 것은 1976년 Rippl에 의해 처음 도입되었다. Rippl(1976)에 따르면 질산칼슘을 퇴적층의 약 20 cm 심도에 주입하면 박테리아의 탈질 작용에 의해 퇴적물이 산화되어 인의 용출량이 감소하며 동시에 인이 불활성화 된다고 하였다. 질산칼슘의 인 용출제어로 인해 조류의 발생이 저감된다. 그 예로, Brackish schlei fjord(Western Baltic, Germany)의 퇴적물을 질산칼슘으로 1981-1983동안 처리하는데, 질산칼슘 처리군과 비처리군으로 나누어 실험한 결과 처리군에서의 평균 phytoplankton의 농도는 5.2-7.6 mg FW/L이었으나 비처리군에서의 평균 phytoplankton의 농도는 21.2 mg FW/L이었다. 또한 질산칼슘의 주입으로 퇴적물의 환원상태의 황은 쉽게 산화되어 황산염( $\text{SO}_4^{2-}$ )으로 변환된다. 이외에도 실험실규모의 실험을 실시해본 결과 질산칼슘은 지속성 유기물질인 PAHs의 생물학적인 분해도를 증가시켰다(Murphy et al., [1995]). 질산이온은 혐기성 상태에 있는 퇴적물의 유기물을 분해하고  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{FeS}$ 와 같은 혐기성 상태의 물질을 산화시켜 퇴적물의 산화환원력(redox potential)을 증가시킨다. 퇴적물에 유기물 함량이 어느 수준 이하로 줄어들면 퇴적물에서 용출되는 인의 양이 줄어든다는 연구 결과가 있다(Rippl and Feibicke, [1992]).

질산이온이 퇴적물의 인 용출에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 다양하다. 높은 질산이온 농도에서는 퇴적물에서 인 용출이 일어나지 않는다는 연구(Jensen and Andersen, [1990])가 있는 반면 오히려 질산이온이 미생물 활성을 높이기 때문에 질산이온의 농도가 높을 때 인 용출이 많이 일어난다는 연구도 있다(Jensen and Anderssen, [1992]). Fe oxide와 결합된 인이 많은 퇴적물에서는 질산이온으로 인해 Fe oxide가 안정적으로 유지되어 인의 용출이 제어되지만 유기물과 결합된 인이 많은 퇴적물에서는 오히려 질산이온가 유기물의 활발한 분해를 가져오기 때문에 유기물로부터 분리된 인이 용출될 수도 있기 때문이다. 칼슘은 인과 결합하여 apatite( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ )와 같은 광물질이 되기도 하고  $\text{CaCO}_3$ 의 형태로 고체화되어 인의 공침전을 유도하여(Murphy et al., [1983]; House and Denison, [2002]) 인의 제어에 효과가 있다.

처리제 투입은 퇴적물에서 용출되는 인의 제어에는 효과적이지만 처리제를 수표면에서 퇴적물로 투여하기 위해서는 주입구, 펌프 등 많은 장비들이 필요하다(Rippl and Feibicke, [1992]). 이외에도 이들 퇴적물의 물리적인 교란으로 인한 퇴적물 재부유를 막기 위해서는 장비를 운전할 때 많은 주의가 요

구된다. 퇴적물 교란은 얇은 호수의 경우 수체의 총인 농도와 Chl-a의 증가를 가져오기 때문에(Murphy and Nalewajko, [1998]), 퇴적물 처리효과를 저해하는 현상이 된다.



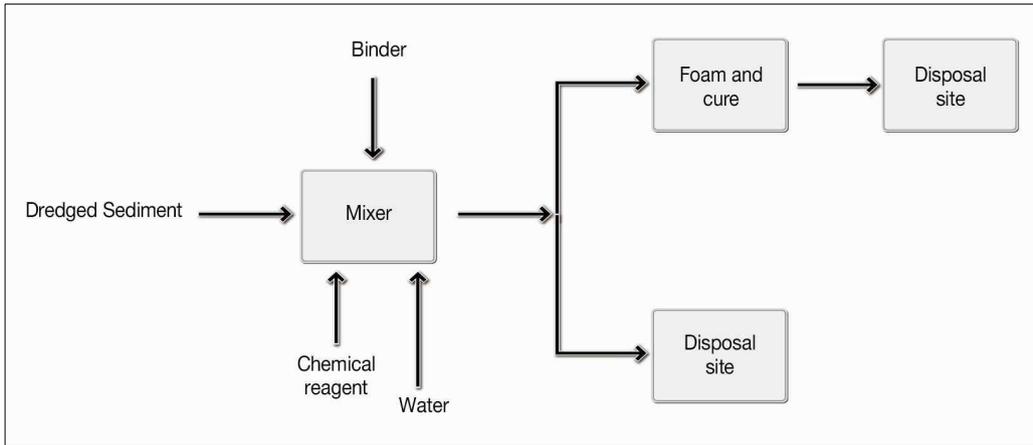
<그림 2.3-5> 오염퇴적물에 화학물질 주입을 통한 제어(화학적 처리)

#### 다. 고정화/안정화 처리

고정화/안정화 처리는 시멘트, 포졸란 등의 화학물질로 오염물이나 오염퇴적물의 성질을 변화시켜 오염물질 누출을 저감하는 기술이다. 첨가된 다양한 화학물질은 퇴적물과 결합하여 토양의 구조 및 공학적 특성을 개선시키며 오염물질의 거동을 억제하고 화학적으로 유해한 오염물질을 중화시키거나, 시멘트, 포졸란, 열가소성플라스틱과 같은 고화제를 이용하여 퇴적물의 물리·화학적 성질을 변화시킴으로써 오염물질이 더 이상 용출되지 않게 하는 원리이다.

고정화/안정화 기술은 오염물질을 Reagents를 이용해 화학적으로 이용이 불가능한 형태로 만드는 기술을 의미한다. Ex-Situ기술로는 기존 혼합장치를 이용해 쉽게 적용되었으며, 퇴적물을 액체나 슬러리형태로 만든 상태에서 Reagents를 주입한다. 입자상물질의 고정화 효과를 예측하기가 어렵고, 실험실에서 테스트를 통해서만 평가할 수 있다. In-Situ고화기술은 Ex-Situ기술보다 관리의 어려움으로 적용에 어려움이 있다(환경부, [2013]).

하지만 하천이나 해안과 같이 물의 흐름이 있는 경우 고화제 투입 위치 선정이 어렵고, 자연 수계에서 고화제와 퇴적물이 최적의 반응을 유도하기 어렵다는 한계점을 가지고 있다. 또한 고화제를 통한 고정화/안정화 처리시 수중 생물이나 수생식물 등 생태계에 미치는 환경영향이 검증되지 않아, 기존의 단점을 보완한 친환경 고화제의 개발이 필요할 것으로 판단된다.



<그림 2.3-6> Diagram of a Solidification/Stabilization Process

(표 2.3-9) 고정화/안정화 처리 기술의 특성

|               |  |
|---------------|--|
| Applicability | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중금속 처리 가능한 In-Situ기술</li> <li>- 일반적으로 유기물질처리에 사용되지 않음</li> </ul>  |
| Advantages    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 음이온물질 처리 가능(Entrapment or Microencapsulation)</li> </ul>  |
| Limitations   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 퇴적물에 포함되어 있는 오염물질이 여전히 존재</li> <li>- 유기물질(특히, VOCs)에 효과 없음</li> <li>- 긴 기간 동안 모니터링 필수</li> <li>- 수분이 많은 경우, 필요한 reagents 양도 증가</li> </ul> |

※ 출처 : 환경부, 2013

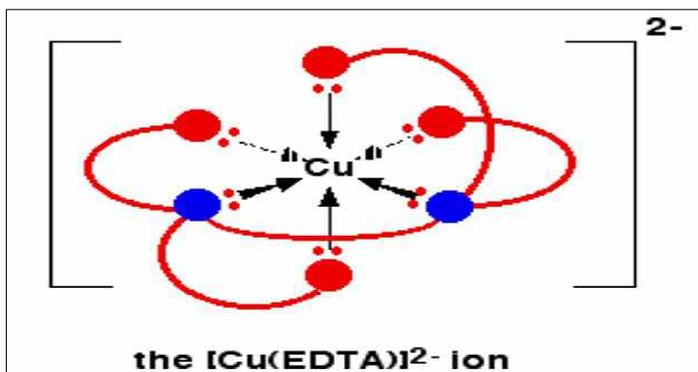
위스콘신의 Manitowoc Harbor에서 혼합기(Mec Tool)와 슬러리 주입기, hollow-stem kelly bar를 이용하여 시멘트와 비산회 현탁액(flyash slurry)을 오염된 퇴적물에 주입하는 고정화/안정화 처리의 적용 사례가 있다. 적용 사례 결과 퇴적물의 고정화가 어렵고 공극수의 이동 관리가 쉽지 않았는데 (Fitzpatrick, [1994]), 이 방법은 부착제 투여 위치를 선정하기 어렵고, 부착제 부식의 위험이 있을 수 있으며, 수중에서 부착제와 퇴적물의 혼합 및 반응이 어렵고 부착의 효과를 오랫동안 관찰해야 한다는 단점이 있기 때문이다. 또한 궁극적으로 오염된 퇴적물을 제거하거나 독성을 없애는 과정이 아니며,

비용에 대한 정보나 부작용이 일으킬 수 있는 환경문제에 대한 정보가 없어 오염된 퇴적물을 처리하기 위하여 대규모로 시행에는 무리가 있어 기술 보완이 필요할 것으로 보인다(USEPA, [1993]).

오오호리공원(大濠福岡縣) 내 호수의 저질개선을 위해서 연못물을 배수시키고 저니를 2주간 햇볕에 말린 후 고화제를 주입하여 고화시킨 후, 한 곳으로 모아 연못의 한구획에 매설하여 연못바닥을 모래로 덮었다. 기술 적용이 후 어류의 종다양성 및 퇴적물의 오염개선 효과를 확인할 수 있었다(한국건설기술연구원, [2007]).

### (1) 킬레이션

킬레이션(Chelation)이란 양이온 금속이온과 리간드(Chelating agent)사이 안정적인 형태로 만드는 기술을 의미한다. 널리 이용되는 리간드는 EDTA, DTPA, NTA 등이 있다. 이 기술은 고정화 공정이나 추출공정에도 사용될 수 있으며, 킬레이트화 된 양이온 물질은 화학적·생물학적 시스템에서 더 이상 반응이 일어나지 않게 된다. 리간드의 결합형태(단일결합, 이중결합 등)에 따라 반응성이 틀려지고, 일반적으로 결합 본드 수가 많을수록 양이온 물질과 결합하는 힘이 강해진다. 또한 pH가 처리공정의 효율을 결정하는 중요한 요소이다.(환경부, [2013])



<그림 2.3-7> Typical Chelation Operation

(표 2.3-10) 고정화/안정화 처리의 킬레이션 기술의 특성

|               |  |
|---------------|--|
| Applicability | - 금속물질을 포함한 탈수된 퇴적물에 적용 가능한 기술           |
| Advantages    | - 처리 비용은 보통<br>- 처리 기술을 통해 금속이온 농도 저감 가능 |
| Limitations   | - 유기물질 처리에 효과 없음                         |

※ 출처 : 환경부, 2013

## (2) 인 불활성화

수체 내 인의 불활성화 기술은 수면에 화학약품을 첨가하여 총인의 농도를 감소시키는 방법으로서 비교적 깊은 호수에서 효과적이며 산소가 결핍된 환경에서도 적용이 가능하다. 응집제로는  $AlCl_3$ 과  $CaCO_3$ 이 주로 이용되고 있으며, 투여량은 수체의 pH, 인 농도, 최종 목표 인농도에 따라 다르다. 그러나  $CaCO_3$ 은 인과의 결합능력이 작고 pH가 8보다 낮거나 이산화탄소 농도가 높은 경우는 인산염이 재용해 된다. 또한,  $AlCl_3$ 의 경우는 pH가 6이하인 경우 독성을 나타낼 수 있다. 이러한 부작용으로 최근에는 화학약품을 사용하는 경우가 감소하고 있다(한국건설기술연구원, [2007]).

미국, 호주, 유럽 등의 국가에서는 알루미늄 화합물 등을 이용한 호소 내 인 불활성화 기술개발을 위한 연구개발이 활발히 이루어졌다. 알루미늄 등 응집제를 사용하는 방법은 정수장에서 오랫동안 사용해 오던 수처리 공정이다. 알루미늄이온은 수중에서 수산화물 hydroxide 침전물을 만들면서 부유물을 공침시키는 성질을 가지고 있으며, 또한 phosphate와 결합하면 용해도가 낮은 aluminum phosphate를 만드는 성질을 가지고 있으므로 부영양호의 수질개선에 적합하여 미국과 캐나다에서 적용되어 왔다. 인불활성화를 위해 응집제를 투입하는 처리는 처음 네덜란드에서 도입되어 Groot Vogelenzang에 적용되었는데, 수면적 18 ha, 평균수심 1.75 m로 얕은 수체에 대해 응집제를 총 120톤의 40 %  $FeCl_3$ 가 100~150배로 희석되어 3주 동안 주입하였으나 지속적 효과를 기대하기 어려웠다. 조류성장 제어를 위해 alum을 사용하여 하천과 호소 내 인을 제거하는 기술은 1955년에 Lund가 최초로 제안하였으며(Cooke et al., [2005]), 지금은 호소의 인 불활성화와 퇴적물 제어를 위한 일반적인 기술로 정착되어 있다.

Cooke은 Alum을 직접 미국 Ohio 주 Arkon 저수지로 유입하는 Cuyahoga 강에 직접 투입한 바 있으며, Harper 등(1983)은 우수 처리를 위한 Alum 주 입장치를 개발한바 있다. Wisconsin 주의 Mirror Lake과 Shadow Lake에서는 알루미늄을 처리한 후 수년간 수질이 개선되는 효과를 얻은 바 있다 (Cooke et al., [1993]). Mirror Lake에서는 alum 처리전의 호수 내 인 농도가 0.04 mg-P/L 이었으나 처리 후에는 10여 년간 0.01 mg-P/L를 유지했다 (Garrison and Ihm, [1991]).

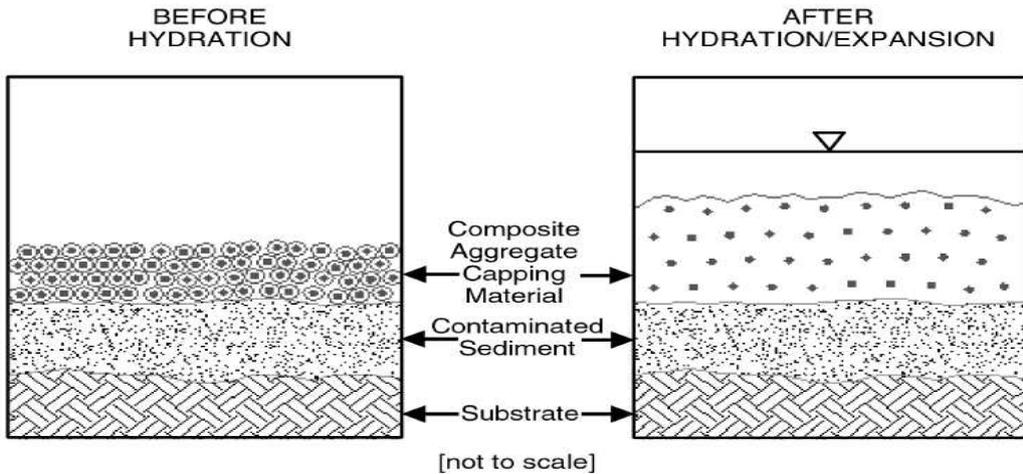
#### 라. 캡핑

캡핑(sediment capping)은 오염된 퇴적물 위에 모래나 오염되지 않은 퇴적물, 자갈 등과 같은 재료를 포설하는 방법이다(Mohan et al., 2000). 오염된 퇴적물을 모래와 같은 오염되지 않은 깨끗한 재질을 이용하여 복토하는 방법과 백반(alum), 석회(lime), 철 등의 화학물질을 퇴적물의 표층에 살포하여 퇴적물중 인과 같은 오염물질과의 반응을 통해 인이나 유기입자를 응집·침전시켜 수중으로 오염물질이 (재)용출되는 것을 막는 방법이 있다. 그러나 이 기술은 저서 생물 등 수생태계에 영향을 미칠 수 있으므로 대상 지구에 대한 선행연구가 이루어져야 한다.

캡핑은 단계적인 시공과 적절한 시간을 투자하여 시공 도중 해당 지역의 특성에 의해 예상치 못한 문제가 발생할 경우 단계적으로 안전하게 시공하여 생태계에 미치는 영향을 제어할 수 있는 장점이 있다. 또한 시공단계 과정에서 적절한 시공여부 확인이 가능하여 필요이상의 재료와 비용이 투입되거나 허용기준이하의 시공이 되었을 경우, 이에 대한 측정 및 교정이 가능하다. 그리고 시공 후 차후 관리를 통하여 홍수나 범람 시 발생할 수 있는 캡핑의 파손에 대한 유지 보수가 가능하다.

퇴적물의 표층에 모래나 자갈로 캡핑하는 경우, 입자의 공극이 크기 때문에 지표수-지하수 간의 연직 이동이 큰 경우에는 효과가 적을 수 있으나, 주변에 오염되지 않은 포설 재료를 쉽게 공급받을 수 있는 경우에는 경제성이 있어 적용 가능한 기술이다. 그러나 캡핑재 포설시 퇴적물량이 증가할 수 있으므로 저수량 감소, 퇴적물 교란, 부등침하, 캡핑재의 내구성 등 발생할 수 있는 다양한 상황들을 고려하여 캡핑재를 선정하여야 한다. 또한 오염현장의 상황에 따라 다른 문제점들이 나타날 수 있으므로, 오염지역의 범위, 퇴적층의 깊이, 수심, 퇴적물 밀도, 소성, 전단응력, 압밀도, 입도분포 등 물리화학적 특성을 고려하여 캡핑재료나 캡핑량, 캡핑범위 등에 대한 체계적 설계가

진행되어야 할 것이다. 캡핑은 준설과 비교하여 볼 때, 시공 방법이 상당히 간단하고 고가의 장비사용으로 인한 추가 비용을 줄일 수 있으며, 시공 중 발생하는 소음도 적어 준설의 대안 기술로 활용되거나 준설과 조합으로 오염 퇴적물의 복원이 가능하다(김건하 등, [2007]).



<그림 2.3-8> 복합재를 활용한 캡핑 (John Hull, P.E., 2000)

(표 2.3-11) 캡핑 기술의 특성

|               |  |
|---------------|--|
| Applicability | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 강기슭, 연안, 강하구 등과 같은 장소에 주로 적용</li> <li>- 침식작용이 강한 곳(강한 유속, 수로, 지하수 용출지점 등)에 적용 불가</li> <li>- 휘발성유기화합물(VOCs), PCBs, PAHs, 농약 등에 적용 가능 기술</li> </ul> |
| Advantages    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시공 즉시 효과 발생, 긴 시간동안 효과 지속</li> <li>- 오염물질의 확산과 휘발을 최소화</li> </ul>   |
| Limitations   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 실질적인 오염물질 제거는 불가능하며, 시공 후 모니터링 필수</li> <li>- 향후 수로로 이용될 지역, 강의 깊이가 얕은 경우엔 적용이 제한</li> </ul>   |

국외에서는 캡핑을 적용하여 오염퇴적물을 처리한 사례로는 일본의

Kihama Inner Lake, Akanoi Bay, 미국의 Hamilton Harbor, Eagle Harbor, Simpson Taco 등 상당수 있는데(Palermo, [1998]), 대부분 모래나 모래가 섞인 퇴적물 등을 사용하였으며 퇴적물 오염물질의 위험 여부에 따라 캡핑 재료를 달리하여 현장에 적용하였다.

일본의 부영양화가 진행된 Biwa호수에서는 퇴적물중 인 용출을 제어하기 위하여 준설로 오염된 퇴적물을 제거한 뒤에 모래로 퇴적물의 상층부를 덮는 방법을 선택하여 퇴적물을 처리하였다. 그러나 이 방법은 값싸고 깨끗한 모래를 얻을 수 없다면 불가능할 것이다(Murphy et al., [1999]).

퇴적물이 오염된 지역에 대해 자연적, 사회적 환경요인을 고려하여 준설과 캡핑 공법을 병행하면 보다 효율적이고 경제적이며, 위험성을 감소할 수 있는 퇴적물 처리 체계를 세울 수 있을 것으로 판단된다. 캡핑 또는 이와 유사한 개념의 오염 퇴적물 처리방안은 준설의 대안으로 거론된 바 있으나(환경관리공단, [1999]), 국내에서는 구체적인 연구가 진행된 바가 거의 없다.

(표 2.3-12) Summary of field-scale capping projects (Palermo, 1998)

| Project Location           | Contaminants            | Site Conditions                                       | Cap Design                     |
|----------------------------|-------------------------|---|--------------------------------|
| Kihama Inner Lake, Japan   | Nutrients               | 3700 m <sup>2</sup>                                   | Fine sand, 5 and 20 cm         |
| Akanoi Bay, Japan          | Nutrients               | 20,000 m <sup>2</sup>                                 | Fine sand, 20 cm               |
| Hamilton Harbor, Ontario   | PAHs, Metals, Nutrients | 10,000 m <sup>2</sup> portion of an industrial harbor | 0.5 m sand                     |
| Eagle Harbor, Washington   | Creosote                | 220,000 m <sup>2</sup> within empayment               | 0.9 m of sandy sediment        |
| Simpson Tacoma, Washington | Creosote, PAHs, Dioxins | 68,800 m <sup>2</sup> near shore with varying depth   | 1.2 to 6.1 m of sandy sediment |

#### 마. 자연정화

미환경청에서는 현장 조건에 따라 적용 가능한 경우 자연정화법을 오염퇴적물의 처리 방안으로 고려하고 있다. 오염된 퇴적물이 지속적인 자연 퇴적 과정에 의해 오염되지 않은 퇴적물로 덮이게 되는 경우, 퇴적물중 오염물질이 용출되거나 수생태계에 영향을 미치지 않을 것이라 판단되어 퇴적물에 특별한 처리를 하지 않고 지속적으로 모니터링 하는 방법을 자연정화라고 한다 (USEPA. [1993]).

이 방법은 오염물질의 유입이 지속되지 않고, 자연적 현상으로 오염물질이 변하거나 이동하지 않으며, 상류로부터 오염되지 않은 상등수가 유입되거나 오염되지 않은 입자가 유입·퇴적됨으로서 오염퇴적물의 오염정도가 호전되는 경우, 그리고 인위적인 처리를 할 경우 환경적으로 미치는 과장이 오히려 커질 수 있는 경우에 적용이 가능하다.

또한 인위적인 조치 없이도 적절한 기간 내에 정화가 가능할 것으로 판단되는 경우에 적용할 수 있으며, 오염원이 관리되지 않아 복구에 대한 대안이 없는 경우에도 활용되고 있다. 그러나 자연정화는 오염물질의 추가 유입이나 확산, 생물학적 분해 등에 의해 효과가 크게 달라질 수 있고, 이를 확인하기 위한 구체적인 모니터링 방안이 수립되어 있을 때 적용하는 것이 좋다. 오염퇴적물이 계속 수계로 유입될 수 있으므로 오염유입원의 제어가 함께 이루어지지 않으면 수질 개선은 기대하기 어렵다.

(표 2.3-13) 오염퇴적물의 제어관리 기술의 분류 및 특성

| 구분         | 조건   | 장점   | 단점   |
|------------|--|--|--|
| 준설         | <ul style="list-style-type: none"> <li>퇴적물의 오염도가 심각하여 근본적 처리가 유일한 방안인 경우</li> <li>저수량 확보, 수로 유지 등을 위해 퇴적물의 제거가 필요한 경우</li> <li>준설토의 운반, 처리장소에 대한 방안이 있는 경우</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>오염물질의 근본적이고 기본적인 제거 가능</li> <li>저수량 확보로 저수기능 회복</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>수질 및 수생태계에 악영향(생태계 교란 등)을 미칠 수 있음</li> <li>준설 및 준설토 처리비용이 많이 소요</li> <li>노출지역과 비관개기에 한해 제한적으로 준설 적용 가능</li> <li>준설로 발생한 부유물질이 재침전될 가능성</li> </ul> |
| 생물/화학적 처리  | <ul style="list-style-type: none"> <li>생물학적처리 : PCBs, PAHs, 유류 등 고분자 오염물질로 오염된 경우</li> <li>화학적처리 : 오염물질 농도가 높거나 긴급 복구 필요성이 있는 경우</li> <li>지하수 영향, 오염퇴적물 변화, 저서생물 및 생태계 영향 파악 가능한 경우</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>생물학적 처리는 타 처리에 비해 위험성이 적음</li> <li>화학적 처리는 긴급 오염처리 가능, 적용가능 화학물질 종류 다양, 효율성 높음</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>생물학적 처리는 정화속도가 느리고, 오염물질 독성에 민감하여 미생물의 적합한 환경조건 조성이 어려움</li> <li>화학적 처리는 화학물질의 독성, 환경영향의 2차 오염 발생 우려</li> </ul>                                   |
| 고정화/안정화 처리 | <ul style="list-style-type: none"> <li>대상지 환경 및 오염 특성에 적합한 고화제 선택 중요</li> <li>지속적 모니터링 가능한 경우</li> <li>저서생물 및 수생태계 영향 파악 가능한 경우</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>퇴적물내 오염물질의 재용출율이 낮음</li> <li>수계 환경과 적합한 고화제가 선택된 경우 안정화된 오염물질의 변화가 거의 없음</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>고화제 투입 위치 선정이 어려움</li> <li>수계내에서 오염물질과 고화제의 최적 반응 유도 한계</li> <li>고화제 안전성 검증 한계</li> </ul>   |
| 캡핑         | <ul style="list-style-type: none"> <li>오염범위, 퇴적층 깊이, 수심, 퇴적물 밀도 등 물리화학적 특성 확인 가능한 경우</li> <li>이에 따라 캡핑재, 캡핑량, 캡핑범위 설계 가능한 경우</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>캡핑재 종류에 따라 다르기는 하나 퇴적물내 오염물질의 재용출이 낮고, 비용이 저렴함</li> <li>넓은 범위의 오염퇴적물에 적용 가능</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>캡핑재의 종류에 따라 수생태계 영향을 미칠 수 있음</li> <li>퇴적물량 증가 가능성</li> <li>저수량 감소, 퇴적물 교란 우려</li> </ul>   |
| 자연정화       | <ul style="list-style-type: none"> <li>오염원이 관리되지 않아 대안이 없는 경우</li> <li>인위적인 기술 적용없이 정화 가능</li> <li>타 기술 적용시 부정적인 효과 발생</li> <li>오염개선에 대한 지속적인 모니터링 필요</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>모니터링 비용 이외에 투입 비용 없음</li> <li>저서생물 및 수생태에 추가적인 영향 없음</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>오염물질의 추가 유입, 확산, 생물학적 분해로 인해 오염상태가 변할 수 있음</li> <li>오염유입의 차단 없이는 오염개선을 기대할 수 없음</li> </ul>  |

## 마. 기타 호내 퇴적물 제어·관리 기술

### (1) 물순환장치

주로 대형 댐, 저수지 및 폐쇄성유역에 적용되며, 호소 내 발생하는 부영양화, 녹조 문제를 해결할 수 있는 호소수의 고도 수질정화장치이다. 인위적인 방법으로 호소수를 순환시키는 것은 호소수의 수질을 향상시키기 위해 가장 흔히 쓰이는 방법 중의 하나로서, 정체된 호수의 물을 인위적으로 순환시키면 이들을 저층으로 이동시켜 호소수 순환을 통하여 수체 중 용존산소량을 증가시켜 퇴적층으로부터 인의 용출을 감소시킴으로써 조류 발생 및 성장을 감소시킨다. 폭기는 수중의 이산화 탄소의 농도를 증가시켜 물의 pH를 낮아지게 하며, 이는 남조세균의 번식을 감소시키고 동물성플랑크톤의 성장을 촉진시킬 수 있다.

수중폭기장치와 비슷한 원리인 태양광물순환장치(SolarBee)의 경우, 미국의 Blue Lake(Oregon)와 St. Albans bay(Vermont)에 2007년과 2009년에 각각 설치되었다. Blue Lake의 경우, 설치 전에 비해 호소수의 투명도가 증가하였으나, 조류의 생물량의 감소에는 큰 효과를 보이지 않았으며 가을철 turnover시 퇴적층으로부터 인의 배출을 촉진시킬 수 있는 부작용이 있다고 보고되었다. St. Albans bay의 경우에도 SolarBee 장비가 설치되지 않은 지역에 비해 투명도에 큰 향상은 없는 것으로 분석되었다. 태양전지순환시스템(Solar-Powered Circulation)은 회전판을 이용한 인공순환장치로 산소가 고갈된 저층수를 표층으로 이송시켜 수체의 순환을 유도하는 방식으로 바지선에 태양전지판을 두어 자체 동력으로 운전이 가능하도록 하여 유지관리 측면에서 용이하다는 장점이 있다.

국외의 다수의 담수 및 해수, 하 폐수 및 상수 등의 수질개선에 있어서 경제적인 것으로 알려져 있다. 태양전지 순환시스템(Solar-Powered Circulation)의 작동원리는 태양열을 전지에 축적하여 회전원판을 회전시켜 호소 하부의 온도가 낮고 용존산소가 부족한 물을 표면으로 얇은 층류로 확산시키며 흡입호스내부의 물은 대기압의 의해 지속적으로 상층으로 순환시키게 된다. 확산된 물은 대기와 접촉하여 호수저층의 미생물 활동에 필요한 산소를 공급함으로써 퇴적된 유기염류를 분해 할 수 있다. 저층으로 공급된 용존산소는 미생물활동에 의해 유기염류를 분해함으로써 저층의 혐기화로 인한 메탄, 황화수소와 같은 가스도 제어할 수 있다 지속적으로 태양전지순환시스템의 운전으로 호소내 용존산소와 미생물의 활동을 증가시켜 수생태계를 회복할 수 있으며, 수생식물의 건강한 서식처를 제공하여 생태계 안전을 회복할 수 있는 장치이다(양종운, [2011]).

(표 2.3-14) 물순환장치의 목표 처리효율 및 평균 처리효율

| 항 목   | 목표효율(%) | 처리효율(%) |       |
|-------|---------|---------|-------|
|       |         | 표층      | -2.6% |
| Chl-a | 30%     | 심층      | 2.2%  |

(표 2.3-15) 물순환장치의 영향권 및 수심별 평균 DO와 수온

| 비 고  | 20 m<br>(직접영향권) |            | 220 m<br>(비영향권) |            |
|--|-----------------|------------|-----------------|------------|
|  | DO<br>(mg/L)    | 수온<br>(°C) | DO<br>(mg/L)    | 수온<br>(°C) |
| 표층   | 12.37           | 24.9       | 12.08           | 24.7       |
| 심층   | 7.33            | 21.2       | 5.93            | 19.5       |
| $\frac{\text{심층 DO(mg/L)}}{\text{표층 DO(mg/L)}} \times 100$ | 59.2%           |            | 49.1%           |            |
| $\frac{\text{심층 수온(°C)}}{\text{표층 수온(°C)}} \times 100$     | 85.1%           |            | 78.9%           |            |

※ 출처 : 오중민, 기흥저수지 수질개선 시범시설 적용방안 연구(2014)

## (2) 가압부상시설

가압부상이란 높은 압력으로 물에 공기를 충분히 용해시켜 이를 처리하고자 하는 원수에 주입시키면, 수중에서 다시 감압된 물은 과포화된 만큼의 공기가 미세한 기포로 형성되어 처리 수중의 입자에 부착되고, 기포의 부상력에 의해 부상하게 되는데, 입자의 비중이 물보다 작거나 또는 입자에 작은 기포를 부착시켜서 비중을 작게 한 뒤 수표면으로 부상시켜 물로부터 분리하는 방법을 말한다. 가압부상법에 있어서 결정적인 요소는 오염물질의 물에 대한 친수성을 낮춰 미세한 기포를 접촉시키는 것인데, 이러한 방식으로 물보다 더 무거운 밀도를 가진 오염물질도 부상 시킬 수 있다. 이 공정은 저탁도, 부식질 또는 자연적인 색도나 조류 등을 함유한 원수의 처리에 유용한 공정으로 알려져 있다(Zable, [1985]).

국내에서는 일산중앙공원, 세종시 중앙공원, 인천시 소래신도시 공원 내에 호소수질 정화를 목적으로 가압부상시설을 설치하여 운영 중에 있다. 고양시 일산호수공원의 가압부상장치는 약 20년전에 지상에 설치된 구조물로서 하루

설계 처리용량은 약 4,000m<sup>3</sup>이고, 응집제로는 PAC를 사용하고 있으며, 호소수의 수질목표는 3등급으로 관리하고 있다. 인천 소래신도시의 호소수 수처리시설은 지하에 설치된 구조물로 용존공기 가압부상 분리공법을 적용하였다. 호소의 하류에 취수펌프를 설치하여 취수하며, 유입되는 호소수는 PAC 주입과 튜브믹서로 응집혼화하여 1차 부상분리조에서 오염물질의 80~90%가 제거되고 잔여 오염물질은 2차 부상분리조에서 처리하고 있다. 처리용량은 1일 4,000톤이며, 호소수의 수질목표는 2~3등급으로 설정하여 관리하고 있다 (최선화, 2014).



<그림 2.3-9> 일산호수공원의 가압부상시설 적용 사례(최선화, 2014)

(표 2.3-16) 가압부상시설의 운전 기간 중 오염물질 농도 및 제거효율

| 항 목 |      | 오염물질농도(mg/L)  |               | 제거<br>효율(%) |
|-----|------|---------------|---------------|-------------|
|     |      | 유입수 범위(%)     | 유출수 범위(%)     |             |
| 탁도  | NTU  | 103.1 ~ 1.8   | 11.8 ~ 0.2    | 85.8        |
| SS  | mg/L | 63.6 ~ 1.0    | 23.2 ~ 0.0    | 77.9        |
| COD | mg/L | 22.8 ~ 2.5    | 14.4 ~ 0.4    | 55.3        |
| T-N | mg/L | 9.500 ~ 1.620 | 7.838 ~ 0.040 | 37.0        |
| T-P | mg/L | 2.711 ~ 0.055 | 2.096 ~ 0.000 | 83.3        |

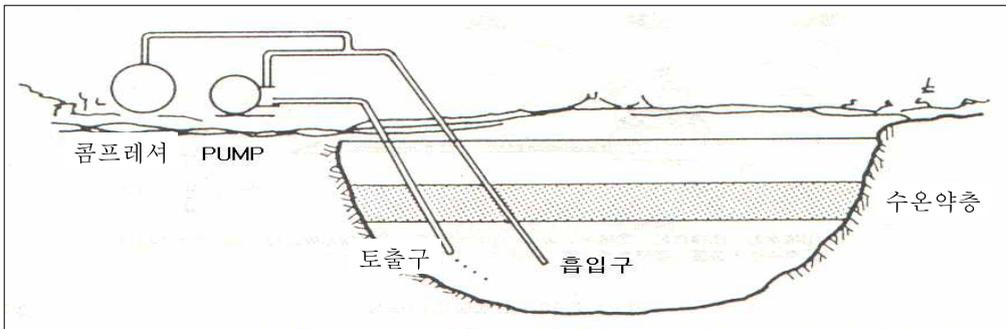
※ 출처 : 오종민, 기흥저수지 수질개선 시범시설 적용방안 연구(2014)

### (3) 수중폭기

수중폭기에는 포기하는 수심에 따라 표층포기, 전층포기, 심층포기로 구분되며, 표층포기는 호소의 수온약층을 파괴하지 않고 비교적 수심이 얕은 표층부분을 포기하여 혼합·교반하는 방법으로 주로 표층에 번무하는 식물플랑크톤을 유광층 이하로 끌어내림으로써 증식을 억제하는 방법으로, 수심이 비교적 낮고 조류의 대량발생 빈도가 높은 경우에 이용한다. 심층폭기는 심층에 폭기시설을 통해 인위적으로 산소를 공급함으로써, 심층의 호기성환경을 조성하는 방법으로 수온약층이 파괴되는 결과를 가져오기도 한다.

인이 많이 포함되어 있는 퇴적층에 호기성 환경이 조성되면 인이 퇴적물로부터 수체로 용출되는 것을 방지할 수 있다. 심층폭기는 주로 수심이 깊어 퇴적물의 준설이나 피복이 어려운 경우에 이용되며, 심층 폭기를 통해 혐기화 상태를 방지하여 퇴적물로부터의 영양염류 용출억제가 가능한 특징이 있다.

국내에서는 대청호, 용담호, 연초댐, 회야댐, 달방댐, 석촌호, 일산호수공원, 세종시 중앙호수공원에 적용한 사례가 있다. 지금까지 설치된 시설은 산기식과 간헐식이 대부분이지만, 최근에는 새로운 시스템(대류식 폭기장치)의 개발로 인하여 보다 효율적인 시스템의 도입이 진행되고 있다.



<그림 2.3-10> 심층폭기의 모식도

### (4) 수온약층 파괴

수온약층의 파괴는 표층수와 심층수의 혼합에 의한 희석효과, 심층의 산소농도 증가를 가져오며 전체적으로 수체 내 산소농도가 증가하게 된다. 따라서 심층폭기와 마찬가지로 퇴적층으로부터의 인용출을 감소시킬 수 있다.

또한, 광합성 생물이 빛이 없는 기간을 가지게 됨으로서 빛이 제한되어 조

류에 의한 유기물생성량이 감소하게 된다. 수온약층을 파괴하는 방법에는 표층수를 심층수로 펌프에 넣는 수문학적인 방법과 공기를 심층에 넣어주는 방법이 있는데, 일반적으로 후자의 경우는 상수원수로 사용되는 호수에서 적용되는 사례가 많다(한국건설기술연구원, [2007]).

#### (5) 퇴적층과 수체의 차단

퇴적층과 수체 사이에 물리적인 시설을 설치하여 차단함으로써 퇴적물과 수체사이의 영양염류 교환을 억제하는 방법이다. 미국에서는 침수식물의 성장을 억제하기 위해 사용되는 방법이기도 하다. 차단재로는 플라스틱, 모래, 자갈 그리고 진흙 등이 사용될 수 있다. 그러나 이러한 재료들은 구입이 용이한 반면, 효율성이 떨어질 수 있다.

또한 무기토양이 사용되는 경우는 정수식물이 성장할 수 있는 매질로 이용될 수 있는 반면에 플라스틱을 사용하는 경우는 수초의 성장이 제한된다. 이러한 방법의 유효성과 영속성은 사용된 재료에 따라 좌우된다. 예로 플라스틱의 경우 만약 빛이 도달되는 깊이에 설치된다면 부식이 가속화됨으로서 균열이 일어나고 누수 될 수 있다.

비교적 소규모 호수에 선박이 들어갈 수 없는 장소에도 적용 가능한 방법이나, 비용이 많이 들고 바닥이 균일하지 못한 형태의 호수에서는 적용하기가 어려우며, 설치 후에는 이동이나 제거가 힘들다(한국건설기술연구원, [2007]).

(표 2.3-17) 기타 오염퇴적물의 제어 기술 및 적용 사례

| 구분     | 특징   | 장점   | 단점   | 사례  |
|--------|--|--|--|---|
| 수중 폭기  | <ul style="list-style-type: none"> <li>성층과괴 및 저층의 혐기상태를 호기상태로 변화하기 위한 수중 폭기</li> </ul>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>인용출 억제</li> <li>조류생장 억제</li> <li>어류폐사 방지</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>설치비용 대비 효과 미미</li> <li>공간 제한성</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>상수원에 설치</li> </ul>   |
| 가압 부상  | <ul style="list-style-type: none"> <li>미세기포에 의해 퇴적된 오염물질을 수중으로 부상</li> <li>화학·물리적 방법으로 제거 처리하는 기술</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>수체 산소공급으로 영양염류 용출억제</li> <li>높은 처리효과</li> <li>설치·이동 용이</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>선택적 제거 불가능</li> <li>수생태계 변화 초래 우려</li> <li>소요 처리시간 높음</li> <li>넓은 오염범위 적용 한계</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>영국 Thames 강</li> <li>농업용저수지, 대청호 등</li> </ul>  |
| 응집제 처리 | <ul style="list-style-type: none"> <li>응집제를 투여하여 인불활성</li> <li>국내의 수계시스템 고려 시 소규모 연못에 적용 가능</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>인 불활성화를 통한 조류 발생 억제</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>소요비용 높고, 다량 사용 시 생태 독성에 안전하지 않음</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>혐기상태의 sediment로부터 <math>\text{Ca}(\text{NO}_3)_2</math> 이용한 인의 용출억제 (Ripl. 1976)</li> <li>덴마크 Lynby호 및 스웨덴 Lang</li> </ul> |
| 세라믹    | <ul style="list-style-type: none"> <li>세라믹 원적외선의 항균효과를 이용</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>저층의 무산소층 제거</li> <li>인용출 및 조류생장 억제</li> <li>어류 폐사 방지</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>세라믹 처리수에 의한 효과 미흡</li> <li>현장적용 효과 검증 미진</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>국내연구 (김형진 et al., 2002)</li> </ul>   |



### 3장. 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 현황 및 특성

1 절. 오염실태 조사 지구의 선정

2 절. 오염된 농업용 저수지의 퇴적물  
오염 특성

3 절. 오염된 농업용 저수지의 수질  
오염 특성



### 3장. 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 현황 및 특성

#### 1절. 오염실태 조사 지구의 선정

##### 1. 연구범위 및 방법

###### 가. 연구 범위

농업용 저수지의 퇴적물 오염현황 및 특성분석, 제어관리를 위해 수행된 본 연구는 농업용수 공급원의 확보와 수질개선을 통한 양질의 농업용수 공급으로 유기농산물 및 친환경농산물 생산이라는 근본적인 목표를 가지고 수행하였다. 농업용 저수지의 오염 유형을 유기물 및 영양염류의 과다로 인한 부영양화 저수지와 중금속, PCB, PAH 등으로 인한 유해물질에 의한 오염저수지로 구분할 수 있는데, 그 중 부영양 저수지에 대한 수질오염관리를 목표로 연구를 수행하였으며, 이에 유기물과 영양염류에 의한 오염퇴적물이 수질에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

농업용 저수지 825개 저수지중 수질 기준을 초과한 시설의 오염원을 살펴보면, 축산계(46.6%), 생활계(41.4%), 토지계(11.5%) 순으로 조사되었다. 본 연구에서는 농업용 저수지 중 약 55%에 해당하는 축산계와 생활계 오염원 저수지를 대상 저수지로 퇴적물의 특성을 분석하였으며, 대상 저수지의 수질 현황은 2014년 농업용수 측정망 수질결과를 기준으로 분석하였다.

(표 3.1-1) 중점관리 대상 저수지 현황

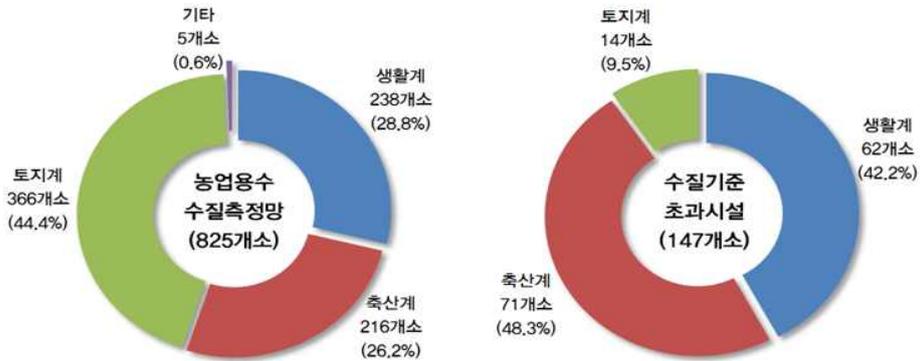
| 년도                | '09~'14년 | 2009년 | 2010년 | 2011년 | 2012년 | 2013년 | 2014년 |
|-------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 중점관리 저수지<br>(시설수) | 81       | 111   | 185   | 180   | 188   | 208   | 178   |

또한 수질에 크게 영향을 미칠 수 있는 유기물 및 영양염류에 의한 오염퇴적물을 중심으로 분석하였으며, 농업용수 측정망으로 관리되고 있는 825개 저수지와 공사관리 전수조사 저수지 중 2009년부터 2014년까지 6년 동안 지

속적 또는 최근 2~3년간에 걸쳐 중점관리 저수지로 관리되는 저수지 중 접근성 및 안전성 등이 용이한 71개 저수지를 대상으로 조사를 수행하였다. 공사에서는 수질환경 호소기준 중 COD, TN, TP 항목이 기준을 초과하는 저수지를 중점관리 대상 저수지로 지정 관리하고 있다. 최근 5년 이내의 기 연구 퇴적물 결과를 포함하여 활용하였으며, 기 연구 결과를 본 연구에 적용하기 위해 6개 저수지에 대하여 퇴적물 오염도 변화를 조사·검토 후 결과를 포함하였다. 농업용 호소 중 1.3 %에 해당하는 담수호는 98.7%에 해당하는 농업용 저수지와는 상이하게 다양한 퇴적물의 오염 특성을 나타낼 수 있으므로 대상 저수지에서 제외하였다. 담수호에 대하여는 추후 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(표 3.1-2) 농업용수 측정망 저수지 중 수질기준 초과시설의 오염원 현황

| 구분     | 계         | 생활계        | 축산계        | 토지계        | 산업계     | 양식계     |
|--------|-----------|------------|------------|------------|---------|---------|
| 전체 시설  | 825(100%) | 238(28.2%) | 223(27.0%) | 363(44.0%) | 2(0.2%) | 4(0.5%) |
| 기준초과시설 | 174(100%) | 72(41.4%)  | 81(46.6%)  | 20(11.5%)  | 1(0.6%) | -       |



<그림 3.1-1> 농업용 저수지의 주요 오염원

오염실태 조사 대상 저수지(총 71개 저수지)의 지역은 경기 16개 지구, 충북 3개 지구, 충남 28개 지구, 전북 7개 지구, 전남 6개 지구, 경북 7개 지구, 경남 4개 지구이며, 2015년 10월까지 강수량이 평균 873.2 mm로 평년 강수량 1,324.4 mm의 65.9 %에 해당하는 적은 강수량을 기록하였으며, 지역적 차이는 있으나

가뭄으로 인한 심각한 저수량 부족으로 급수가 어려운 저수지도 상당수 존재하였다. 2015년 10월 기준으로 전국의 평균 저수율은 51.8%로 평년 74.1 % 대비 -22.3% 낮은 저수율을 나타내었으며, 전북 33.3 %, 충남 44.1 %로 지역적으로 가장 낮은 저수율을 보였다. 하지만 2015년 11월 ~ 12월 기간 동안 상반기에 비해 상대적으로 많은 강수량으로 저수율은 경기 78.4 %, 강원 78.1%, 충북 90.4 %, 충남 90.6 %, 전북 83.9 %, 전남 75.3 %, 경북 86.7 %, 경남 81.6 %로 평년 저수율 수준으로 회복되었다. 조사기간인 4월 ~ 10월에는 저수율이 낮아 수질 및 퇴적물 오염도 조사 결과에 영향을 주었을 것으로 추정된다.

(표 3.1-3) 연구대상지구의 지역 및 평년대비 저수율 및 강수량 현황

15.10.31 기준

| 구 분          |      | 평균      | 경기      | 강원      | 충북      | 충남      | 전북      | 전남      | 경북      | 경남      |
|--------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| '15 저수율      | (%)  | 51.8    | 51.2    | 73.8    | 48.4    | 44.1    | 33.3    | 57.8    | 59.6    | 73.1    |
| 평년 저수율       | (%)  | 74.1    | 84.7    | 84.9    | 82.4    | 77.7    | 71.0    | 68.3    | 76.2    | 74.1    |
| '15 강수량      | (mm) | 873.2   | 687.2   | 859.5   | 737.1   | 740.3   | 805.9   | 1,151.3 | 736.3   | 1,267.7 |
| 평년 강수량       | (mm) | 1,324.4 | 1,290.1 | 1,389.5 | 1,264.8 | 1,310.2 | 1,346.3 | 1,364.7 | 1,126.8 | 1,502.7 |
| 실태조사 대상 저수지수 |      | 71      | 16      | -       | 3       | 28      | 7       | 6       | 7       | 4       |

#### 나. 조사 및 분석 방법

일반적인 부영양 농업용 저수지의 특성을 대표할 수 있는 저수지에 대하여 퇴적물의 오염을 확인하고자, 수질 중 COD, TN, TP 항목이 수질환경 호소 기준을 초과하는 저수지를 중심으로 퇴적물 중 강열감량, 총질소, 총인을 분석하였다. 오염실태 조사를 위한 퇴적물 및 수질분석항목은 (표 3.1-4)와 같으며, 오염퇴적물이 수질오염에 미치는 영향을 분석하기 위해 유기물 및 영양염류에 관한 항목을 중심으로 분석을 수행하였다. 이는 착수보고회와 중간 보고회의 자문의견을 바탕으로 선정된 분석 항목이며, 분석방법은 토양 및 식물체 분석법(농촌진흥청), USDA분석법, 토양오염공정시험기준, 수질오염공정시험기준에 따라 수행하였다.

(표 3.1-4) 오염실태 조사 및 분석 항목

| 퇴적물 분석                                 | 수질 분석                                 |
|--|---------------------------------------|
| 강열감량(Ignition Loss), 총질소(T-N), 총인(T-P) | pH, EC, COD, TOC, T-N, T-P, Chl-a, SS |

대상 지구에 대하여 오염실태 및 정밀조사는 집중 강우시를 제외한 4월 ~ 10월에 실시하였으며, 강우시 유입오염부하 조사는 8월24일 ~ 26일에 시행하였다. 퇴적물 시료 채취는 오염을 대표하는 제방부의 호심에서 grab sampler를 이용하여 채취 후, 비닐 팩에 공기가 통하지 않도록 채워 밀봉하여 실험실로 이동, 분석하였으며, 항목별 분석 방법은 4.1.4에 상세히 기술하였다.

## 2. 연구 대상지구 선정

### 가. 연구대상 저수지의 선정 조건

- 부영양화 수질 특성을 갖는 농업용 저수지
  - : 공사 관리 저수지중 유기물(COD), 영양염류(TN, TP)가 농업용수 수질 기준을 초과하는 농업용수 수질측정망 및 전수조사 대상 저수지 71개 선정 (대부분 '09~'14까지 6년간 중점관리 대상 저수지) : **오염실태조사**
- 오염원인의 대부분인 축산계, 생활계 오염원 저수지
  - : 농업용저수지의 약 55 %에 해당하는 축산계, 생활계 오염원을 대상, 수질기준 초과시설에서는 축산계(46.6%) > 생활계(41.4%) > 토지계(11.5%)로 나타남
- 이전에 준설 또는 퇴적물 제어기술 적용 지구가 아닌 곳
- 각 분류별(오염원, 설치년도, 저수량, 유효수심) 대표 저수지 4개 지구를 선정하여 퇴적물의 용출량과 수질에 미치는 영향을 확인 : **오염정밀조사**
- 각 분류당 최소 2개 이상의 대상 지구가 포함되도록 선정
- 효율적 연구를 위해 기 연구대상 5개 저수지의 결과를 포함하여 활용
- 해당 저수지 퇴적물 오염을 대표할 수 있는 제당부 호심에서 퇴적물 시료 채취

#### 나. 연구대상 저수지의 분류(1차)

퇴적물 오염도 조사를 위하여 저수지 퇴적물의 성상 및 특성에 영향을 미칠 수 있는 요소를 선별하고 이를 토대로 전국의 저수지를 구분하여 요소별 오염특성 및 관련성에 대하여 조사하였다. 타 연구결과(최선화, 2014)의 저수지 물리적 특성이 수질에 미치는 영향 분석에 대한 결과를 바탕으로 상관성이 크게 조사된 설치년도, 유효수량, 오염원인, 수심 등을 주요 저수지의 구분요인으로 선정하였다. 대상지구 초기 분류시, 오염원별, 설치년도(1970년 기준)와 유효수심(농업용 저수지 대부분이 유효수심 5m 내외)을 기준으로 하였으며, 유효저수량 1,000(천 m<sup>3</sup>)을 기준으로 각 분류 당 2개 이상의 저수지를 선정하여 조사하였다.

- (1) 저수지 설치년도 : 저수지의 퇴적물은 축적성을 가지고 있기 때문에 설치년도는 퇴적층의 두께 및 이화학적 특성을 결정하는 주요 요소
- (2) 유효수량 : 저수지의 유효용량은 수체의 체류시간을 지연시키고 그로 인한 퇴적속도 및 퇴적량, 퇴적물의 물리적 성상 특성에 영향을 미치는 요소
- (3) 오염원인: 저수지의 퇴적물 및 수질의 상태는 주변의 토지이용상태, 지역의 개발 정도, 산업적 특성 등 다양한 사회, 경제적 특성에 따라 영향

그 결과, 조사 대상 저수지 선정을 위해 오염원인을 생활계, 축산계를 기준으로 저수지 설치년도 및 유효수심, 유효저수량에 따라 1차적으로 분류<그림 3.1-2>하였으며, 본 연구과정에서 1차 초기 분류에 따라 오염특성에 따른 영향 및 상관성을 검토하고자 하였다.

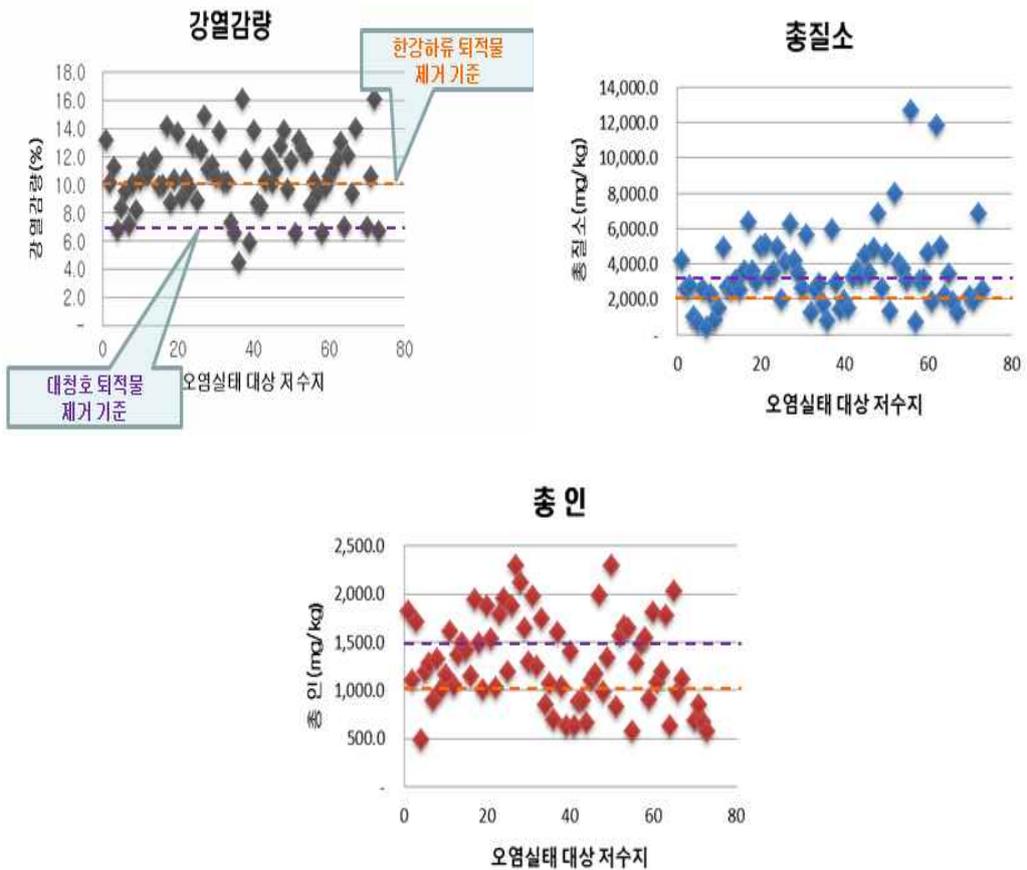


<그림 3.1-2> 오염된 농업용 저수지의 조건별 대상저수지 분류(1차)

## 2절. 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 특성

### 1. 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 현황

농업용수 수질기준을 초과하는 연구 대상 저수지 71개에 대하여 퇴적물 오염 실태를 조사한 결과, 강열감량 10.5 %(4.5 ~ 16.1 %), 총질소 3,480 mg/kg(690 ~ 12,669 mg/kg), 총인 1,299 mg/kg(480 ~ 2,296 mg/kg)으로 부영양 저수지의 퇴적물 오염 수준이 전체적으로 높게 조사되었다. <그림 3.2-1>에서와 같이 한강하류 퇴적물 제거기준을 초과하는 지구가 상당수 존재하는 것을 확인할 수 있다.



<그림 3.2-1> 오염퇴적물의 실태조사 분석결과

(표 3.2-1) 오염된 농업용저수지의 퇴적물 오염현황

| 구분  | 강열감량(%)            | 총질소(mg/kg)            | 총인(mg/kg)            |
|-----|--------------------|-----------------------|----------------------|
| 생활계 | 9.8<br>(5.8~16.1)  | 2,711<br>(690~5,949)  | 1,178<br>(570~1,983) |
| 축산계 | 11.1<br>(4.5~16.0) | 4,076<br>(762~12,669) | 1,393<br>(480~2,296) |
| 전체  | 10.5               | 3,480                 | 1,299                |

실태조사 대상 지구중 항목에 따라 환경부의 오염평가 기준을 초과하는 저수지가 약 15 ~ 20 %로 조사되어, 부영양 농업용 저수지의 퇴적물 오염을 간과할 수 있는 상황은 아니라고 판단된다. 하지만 환경부의 4대강을 중심으로 진행된 퇴적물 측정망 운영에 따라 수립된 퇴적물의 오염평가 기준은 본 연구와 조사목적, 시료의 채취방법 및 분석방법 등의 차이가 있어 이 기준을 적극적으로 적용하기에는 무리가 있을 것으로 사료된다.

(표 3.2-2) 퇴적물 관련 기준과 부영양 농업용저수지의 퇴적물 오염 특성 비교

| 항 목           | 단 위      | 조사결과<br>(평균) | 팔당호   | 한강<br>하류 | 대청호   | 오염평가<br>기준 |       |
|---------------|----------|--------------|-------|----------|-------|------------|-------|
| 유기물 및<br>영양염류 | 완전연소가능량  | %            | 10.5  | 7        | 10    | 7          | 13    |
|               | 총인(T-P)  | mg/kg        | 1,299 | 1,100    | 1,000 | 1,500      | 1,600 |
|               | 총질소(T-N) | mg/kg        | 3,480 | 800      | 2,000 | 3,000      | 5,600 |

실태조사 대상 지구 퇴적물의 강열감량, 총질소, 총인에 대하여 각 항목간 상관성을 분석한 결과, 각 항목간 정(+)의 상관성(p<0.01)을 가지는 것으로 분석되었으며, 설치년도, 오염원의 종류 등과 관계없이 상관성을 가지는 것으로 조사되었다. 이는 대상저수지의 전반적인 퇴적물 오염도 특성에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(표 3.2-3) 퇴적물 오염 특성의 항목간 상관성 분석

| 구분   | 강열감량    | 총질소     | 총인      |
|------|---------|---------|---------|
| 강열감량 | 1       | 0.531** | 0.569** |
| 총질소  | 0.531** | 1       | 0.367** |
| 총인   | 0.569** | 0.367** | 1       |

※ 전체 실태조사(n=71), \*\*p < 0.01, \*p < 0.05

## 2. 오염원에 따른 퇴적물 오염 특성 분석

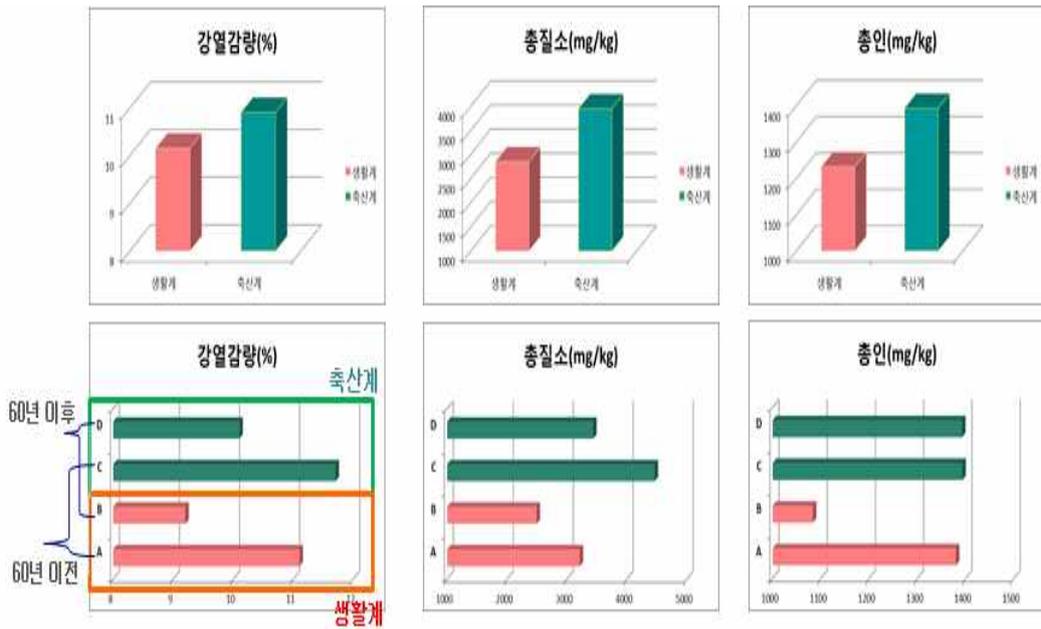
본 연구의 오염실태 조사 대상 저수지가 축산계와 생활계 오염원에 따라 퇴적물의 특성 차이를 나타내는지 확인하기 위하여 t-검정을 실시한 결과, 각 오염원에 대해 퇴적물의 특성이 유의한 차이(p<0.05)가 있음을 확인하였다.

부영양 농업용 저수지의 퇴적물 오염도 분석결과, 생활계 오염원 저수지의 퇴적물 내 평균 강열감량 9.8 %, 총질소 2,711 mg/kg, 총인 1,178 mg/kg이며, 축산계 오염원 저수지의 퇴적물 내 평균 강열감량 11.1 %, 총질소 4,076 mg/kg, 총인 1,393 mg/kg으로 조사되었다. 생활계보다 축산계에서 강열감량, 총질소, 총인의 오염도가 높게 나타났으며, 저수지의 설치연도가 1960년을 기준으로 설치 경과 년수가 오래된 저수지에서 오염원의 종류와 상관없이 오염도가 높게 분석되었다.

공변량 분석을 통해 설치연도 약 1953년이 기준으로 도출되었으며, 이에 대해 일원배치분산분석을 통해 분석한 결과, 1960년을 기준으로 특성이 유의한 차이를 갖는 것으로 나타났다. 저수지 설치연도가 1960년을 기준으로 분류하게 된 통계분석 결과의 근거는 3.2.3 에 상세히 기술하였다.

(표 3.2-4) 오염원, 설치연도에 따른 퇴적물의 오염도 분석

| 구분  |            | 강열감량(%) | 총질소(mg/kg) | 총인(mg/kg) |
|-----|------------|---------|------------|-----------|
| 생활계 | A 1960년 이전 | 10.0    | 3,201.1    | 1,274.1   |
|     | B 1960년 이후 | 9.4     | 1,819.0    | 1,004.2   |
| 평균  |            | 9.8     | 2,710.7    | 1,178.3   |
| 축산계 | C 1960년 이전 | 11.3    | 4,248.2    | 1,398.9   |
|     | D 1960년 이후 | 9.6     | 3,085.0    | 1,306.5   |
| 평균  |            | 11.1    | 4,075.5    | 1,392.7   |



<그림 3.2-2> 오염원별 퇴적물 오염 특성 비교

### 3. 설치년도에 따른 퇴적물 오염 특성 분석

가. 관련 통계 분석 개요

(1) 부분최소자승법 (partial least square, PLS)

부분최소자승법은 독립변수 X와 종속변수 Y의 두 자료행렬 각각에 대해서 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 이용하여 주성분(principal components, PC)를 구한 후 X와 Y 각각의 주성분 사이의 선형관계를 수식화 하였다. PCA는 독립변수 X를 T(score matrix)와 P/loading matrix)로 분해하여 아래 식과 같이 나타낸다.

여기서, k는 PC의 수, pi는 원래 변수와 PC사이의 선형관계를 나타내는 계수이며, ti는 변환된 PC를 나타낸다.

$$X = \sum_{i=1}^k t_i p_i^T + E = TP^T + E \quad \text{①}$$

종속변수 Y에 대해서도 PCA를 적용한 후 X와 Y의 score matrix들 간의

관계를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = UQ^T + F \quad \text{②}$$

$$U = TB \quad \text{③}$$

일반적으로 PLS모델의 계수를 계산하는 방법은 NIPALS(nonlinear iterative partial least squares) 알고리즘으로 Y에 대한 예측능력을 최대화하면서도 X의 주요 변동을 나타내도록 한다. 실제 종속변수 Y와 독립변수 X의 관계를 나타내는 방법은 아래 식과 같으며, 여기서 BPLS는 PLS모델의 계수를 나타내고, W는 NIPALS 알고리즘을 통해 정의된 가중치에 해당된다.

$$Y = XB_{PLS} = XW(P^T W)^{-1} BQ^T \quad \text{④}$$

변수중요도척도 (Variable Importance in Projection; VIP)는 개별 독립변수  $x_j$ 가 잠재변수  $t_i$ 들에 기여하는 정도를 나타내는 척도로써, Y의 총변화량 중  $t_i$ 가 기여한 가중치를 합산하여 산정한다.

$$VIP_j = \sqrt{p \frac{\sum_{i=1}^k w_{ji}^2 b_i^2 t_i^T t_i}{\sum_{i=1}^k b_i^2 t_i^T t_i}} \quad \text{⑤}$$

$w_{ji}$ 는  $i$ 번째 잠재변수에서  $j$ 번째 독립변수가 갖는 비중이며 VIP 제곱값의 평균이 1이므로 일반적으로 1보다 큰 VIP값을 가지면 유의한 변수후보로 판단한다.

## (2) 일원배치분산분석 (One-way Analysis of Variance, One-way ANOVA)

일원배치분산분석은 어떤 종속변인 1개에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중 하나의 독립변인을 변동요인으로 하여 두 개 이상 다수의 집단을 비교하고자 할 때, 집단 내의 분산, 총평균과 각 집단의 평균의 차이에 의해 생긴 집단간의 분산의 비교를 통해 만들어진 F분포를 이용하여 가설검정을 하는 방법이다. 귀무가설( $H_0$ )과 대립가설( $H_1$ )은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \cdots = \mu_n \quad \text{⑥}$$

$H_1$ : 적어도 하나는 나머지와 같지 않다.

두 개 이상의 집단들의 평균을 비교하기 위해서 검정통계량인 F값을 사용하며 집단간의 차이를 구하기 위해 전체평균과 집단의 평균간 차이와 집단평균과 개별측정치와의 차이로 구분해서 계산한다. 즉 집단내 변량(SSW)은 총 변량(SST)과 집단간 변량(SSB)을 합산하여 계산하며 각 변량은 아래 식과 같이 나타낸다.

$$SST = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (7)$$

$$SSB = \sum_{i=1}^c n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 \quad (8)$$

$$SSW = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (9)$$

여기서  $Y_{ij}$ 는 종속변수  $Y$ 의 개별 측정치,  $\bar{Y}_{..}$ 은 전체표본에서의 종속변수의 평균,  $n_i$ 는 집단  $i$ 의 표본 수,  $c$ 는 집단의 수이며,  $\bar{Y}_i$ 는  $i$ 번째 집단의 평균을 나타낸다.

계산된 집단간 변량과 집단내 변량을 통해 집단간의 차이를 검정할 수 있으며, 일원배치분산분석에서의 집단간 차이가 유의한지 검정하기 위해서는 집단간 분산과 집단내 분산의 상대적인 비율을 나타내는 F통계량을 사용하는데, 아래와 같이 정의된다.

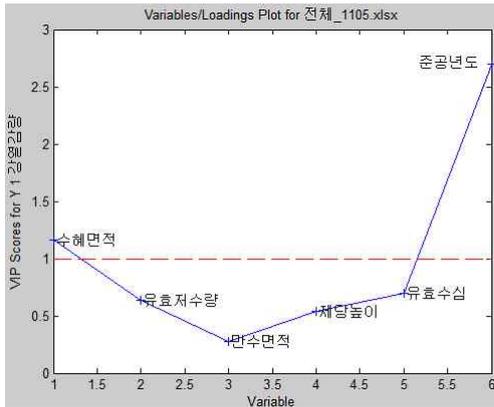
$$F = \frac{\text{집단간제곱평균}}{\text{집단내제곱평균}} = \frac{SSB/(c-1)}{SSW/(N-c)} \quad (10)$$

여기서  $c$ 는 집단의 수이며  $N$ 은 총 측정치의 수를 나타냄.

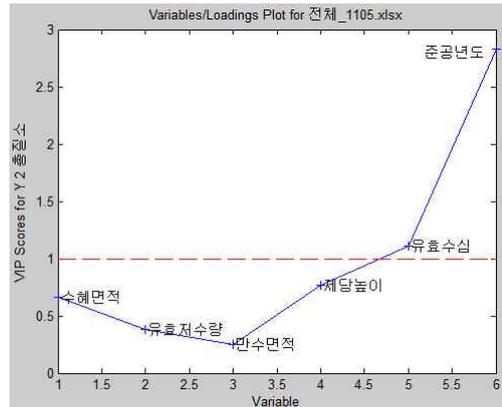
가설을 검정하기 위해서는 F통계량과 F임계치를 비교해야하며 F임계치는 유의수준( $\alpha$ ) 및 자유도( $c-1, N-c$ )에 의해서 결정된다. F통계량이 F임계치보다 크면 귀무가설을 기각하고 대립가설을 선택, 즉 집단간의 차이가 있다고 판단이 가능하다.

$$F_{\text{임계치}} = F_{(\alpha, c-1, N-c)} \quad (11)$$

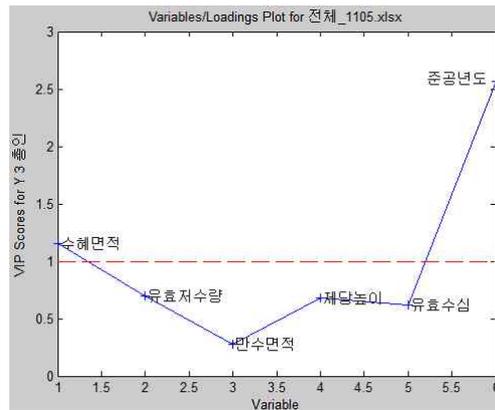




(a) 강열감량



(b) 총질소



(c) 총인

<그림 3.2-4> 각 오염물질에 따른 저수지의 물리적인자의 중요도 (VIP plot)

(2) 일원배치분산 분석을 이용한 주요변수의 기준값 설정 분석

○ 설치년도에 따른 강열감량의 유의성 분석

설치년도에 따라 강열감량 데이터를 두 그룹으로 나누기 위해서 각 기준년도에 따라 강열감량을 두 그룹으로 나누어, 나누어진 그룹 사이에 유의한 차이가 있는지 일원배치분산분석 방법을 이용하여 검정하였다.

유의한 차이( $p < 0.05$ )로 기준하여 분석한 결과, 1930, 1950, 1960년도를 기준년도로 설정시, 강열감량 결과의 유의한 차이를 나타내었다(표 3.2-5).

(표 3.2-5) 기준년도 변화에 따른 강열감량의 일원배치분산분석 결과

| 기준 설치년도     | Prob>F        | 유의차       |
|-------------|---------------|-----------|
| 1920        | -             | 없음        |
| <b>1930</b> | <b>0.0126</b> | <b>있음</b> |
| 1940        | 0.0567        | 없음        |
| <b>1950</b> | <b>0.0072</b> | <b>있음</b> |
| <b>1960</b> | <b>0.0185</b> | <b>있음</b> |
| 1970        | 0.1586        | 없음        |
| 1980        | 0.4655        | 없음        |
| 1990        | 0.4538        | 없음        |

○ 설치년도에 따른 총질소의 유의성 분석

기준 설치년도를 설정하기 위해, 설치년도에 따라 총질소를 두 그룹으로 분류하는 기준년도를 각각 분석하였다. (표 3.2-6)와 같이 각 기준년도에 따라 총질소 그룹 사이에 유의한 차이가 있는지를 검토한 결과, 1930, 1940, 1960년 일 때, 유의한 차이( $p < 0.05$ )가 있는 것을 확인하였다.

(표 3.2-6) 기준년도 변화에 따른 총질소의 일원배치분산분석 결과

| 기준 설치년도     | Prob>F                                    | 유의차       |
|-------------|---|-----------|
| 1920        | -   | 없음        |
| <b>1930</b> | <b><math>1.7780 \times 10^{-4}</math></b> | <b>있음</b> |
| <b>1940</b> | <b>0.0121</b>                             | <b>있음</b> |
| 1950        | 0.0937                                    | 없음        |
| <b>1960</b> | <b>0.0181</b>                             | <b>있음</b> |
| 1970        | 0.1254                                    | 없음        |
| 1980        | 0.4485                                    | 없음        |
| 1990        | 0.4952                                    | 없음        |

○ 설치년도에 따른 총인의 유의성 분석

총인에 대한 기준 설치년도 설정을 위해, 각 설치년도별로 총인을 두 그룹으로 나누어 일원배치분산분석을 실시하였다. 기준년도를 (표 3.2-7)와 같이 나누어 각 기준년도에 따라 구분한 총인 그룹 사이에 유의한 차이를 분석한

결과, 1930, 1940, 1960년도에서 유의한 차이( $p < 0.05$ )가 있는 것을 확인하였다.

(표 3.2-7) 기준년도 변화에 따른 총인의 일원배치분산분석 결과

| 기준 설치년도     | Prob>F        | 유의차       |
|-------------|---------------|-----------|
| 1920        | -             | 없음        |
| <b>1930</b> | <b>0.0346</b> | <b>있음</b> |
| <b>1940</b> | <b>0.0487</b> | <b>있음</b> |
| 1950        | 0.2048        | 없음        |
| <b>1960</b> | <b>0.0300</b> | <b>있음</b> |
| 1970        | 0.4215        | 없음        |
| 1980        | 0.3077        | 없음        |
| 1990        | 0.8352        | 없음        |

설치년도에 따른 각 퇴적물 내 오염특성(강열감량, 총질소, 총인)에 대한 유의성을 분석한 결과, 설치년도 1930년을 기준으로 적용시 해당 저수지의 수가 적어 대표성이 부족할 것으로 판단되며, 설치년도 1960년을 기준으로 설정 시 유의한 차이( $p < 0.05$ )를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 1960년에 대해 저수지 구분 기준이 되는 설치년도로 설정하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

#### 4. 물리적 환경인자와 퇴적물 오염 특성과의 상관성 분석

부영양 농업용 저수지의 물리적 환경인자간의 상관성 확인 결과, 모든 항목에서 설치년도와 부(-)의 상관관계를 가지며, 강열감량은 생활계 오염원에서 수해면적과 유효저수량에 대해 부(-)의 상관관계를 나타냈다. (표 3.2-8)에는 물리적 환경인자와 퇴적물 특성간의 상관관계에 대한 유의확률 결과를 기술하였다. 일반적으로 유의확률  $p < 0.05$ 에 대하여 검토하나, 퇴적물 분석의 정량범위를 고려할 때  $p < 0.10$  까지 검토범위에 포함하여 경향을 확인하고자 하였다. 그러나 상관계수의 결과값이 작고, 수질에서와는 달리 항목별로 물리적 환경인자와의 상관성이 설치년도 이외에는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 본 연구 대상저수지가 부영양 저수지에 한정되어 있어 오염여부와 관계없이 일반저수지에 대

한 퇴적물의 상관성 분석으로 판단하기에 목적이 다르기 때문이라 추정된다. 추후 농업용 저수지 측정망 운영을 통한 자료의 확보 시 충분한 결과를 활용하여 일반저수지의 상관 분석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

(표 3.2-8)에서 퇴적물과 저수지 물리적 인자간의 상관성을 살펴보면, 총질소는 생활계 오염원에서 만수면적, 유역면적, 유역면적/만수면적, 수혜면적, 유효수심과 부(-)의 상관관계를, 축산계 오염원에서 유역면적, 만수면적, 유효저수량과 정(+)의 상관관계를 보였다. 총인은 축산계 오염원에서 유역면적/만수면적과 부(-)의 상관관계를 나타냈다.

퇴적물 시료가 수질에 비해 시료의 균질성 확보가 어렵고, 분석의 정밀도에 대하여 허용 한계가 큰 점을 감안한다면 (표 3.2-8)에서의 분석결과를 통해 경향을 확인할 수 있다는 측면에서 의미있는 결과라 사료된다.

(표 3.2-8) 물리적 환경인자와 퇴적물 특성간 상관성 분석

| 구분   |     | 설치년도                 | 만수면적                | 유역면적                 | 유역면적/만수면적            | 수혜면적                 | 수혜면적/만수면적          | 유효저수량               | 유효수심                 |
|------|-----|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 강열감량 | 생활계 | -0.301*<br>(p=0.011) | -                   | -                    | -                    | -0.361<br>(p=0.054)  | -                  | -0.349<br>(p=0.055) | -                    |
|      | 축산계 | -                    | -                   | -0.269<br>(p=0.093)  | -                    | -                    | -                  | -                   | -                    |
| 총질소  | 생활계 | -0.346*<br>(p=0.003) | -0.352<br>(p=0.052) | -0.436*<br>(p=0.014) | -0.356*<br>(p=0.049) | -0.448*<br>(p=0.012) | 0.370<br>(p=0.093) | -                   | -0.359*<br>(p=0.048) |
|      | 축산계 | -                    | 0.276<br>(p=0.085)  | 0.323*<br>(p=0.042)  | -                    | -                    | -                  | 0.287<br>(p=0.072)  | -                    |
| 총인   | 생활계 | -0.200<br>(p=0.084)  | -                   | -                    | -                    | -                    | -                  | -                   | -                    |
|      | 축산계 | -                    | -                   | -                    | -0.272<br>(p=0.089)  | -                    | -                  | -                   | -                    |

※ 전체 실태조사(n=71), 생활계오염원 조사(n=31), 축산계오염원 조사(n=40), \*\*p < 0.01, \*p < 0.05

## 5. 토지 이용도에 따른 퇴적물의 오염 특성 분석

주변 토지이용도에 따른 부영양 농업용 저수지의 오염퇴적물 특성의 상관성을 분석하였다. 주변 토지 이용도는 토지 이용별 오염부하 유입량으로 산

정하였으며, 토지 이용별 오염부하량은 전, 답, 임야, 기타의 이용 종류에 따라 발생하는 오염부하량을 의미하고, 총 토지 오염부하량은 각 전, 답, 임야, 기타에 따른 오염부하량의 합을 나타낸다.

이에 해당 저수지 주변의 토지이용도에 따른 퇴적물 특성을 확인하기 위해, 총 토지계 오염부하량에 대한 각 토지 이용별 오염부하량이 퇴적물과 상관 관계에 대해 분석을 실시하였다.

[토지 이용별 오염부하량/총 토지 오염부하량]과 오염퇴적물의 관계를 살펴보면, 오염원의 종류와 관계없이 퇴적물내 강열감량은 전(田)과 정(+)<sup>1</sup>의 상관관계를, 임야와 부(-)<sup>2</sup>의 상관관계를 나타냈으며, 총인은 전(田)과 정(+)<sup>1</sup>의 상관관계를 가지는 것으로 조사되었다. 생활계 오염원인 저수지는 축산계 오염원인 저수지에 비해 토지계 이용도(토지의 오염부하)와 상관성이 적은 것으로 나타났으며, 축산계 오염원 저수지의 퇴적물에서 강열감량과 총인이 전(田)과 정(+)<sup>1</sup>의 상관성을 가지는 것으로 분석되었다(표 3.2-9).

(표 3.2-9) 총 토지오염부하에 대한 토지이용별 오염부하와 퇴적물과의 상관성 분석

(토지 이용별 오염부하량/총 토지 오염부하량)

| 구분   |     | 전      | 답      | 임야     | 기타     |         |         |        |        |
|------|-----|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 강열감량 | 생활계 | 0.284* | 0.029  | 0.110  | 0.057  | -0.279* | -0.285  | 0.084  | 0.185  |
|      | 축산계 |        | 0.341* |        | 0.072  |         | -0.360* |        | 0.223  |
| 총질소  | 생활계 | 0.085  | 0.000  | 0.089  | 0.017  | -0.073  | -0.043  | -0.037 | -0.002 |
|      | 축산계 |        | 0.014  |        | 0.038  |         | -0.154  |        | 0.294  |
| 총 인  | 생활계 | 0.258* | 0.121  | -0.120 | -0.329 | -0.086  | 0.056   | -0.038 | -0.008 |
|      | 축산계 |        | 0.265* |        | -0.154 |         | -0.242  |        | 0.169  |

※ 실태조사(n=67), 생활계오염원 조사(n=29), 축산계오염원 조사(n=38), \*\*p < 0.01, \*p < 0.05

(표 3.2-9)에서는 총 토지 오염에 대한 각각 토지 이용 종류의 상관성을 비교하였다면, (표 3.2-10)에서는 각 토지 이용 종류에 따라 유입되는 오염부하량의 크기에 퇴적물 특성이 상관성을 가지는지 분석하였다. [토지 이용별 오염부하량]에 따른 퇴적물 특성의 상관성은 답(畓)의 형태일 때, 축산계 오염원 저수지의 퇴적물내 총질소와 정(+)<sup>1</sup>의 상관성을 가지는 것으로 분석되어, 축산계에서 전(田)과의 상관성이 생활계보다 높은 것으로 조사되었다. 다시

말해 생활계 오염원 저수지의 퇴적물 특성이 주변 토지이용 형태와는 상대적으로 관계가 적은 것으로 조사되었다(표 3.2-10).

그러나 본 연구는 부영양화 된 농업용저수지에 대하여 퇴적물 특성이 주변 토지이용도와 갖는 상관성 분석 결과라는 점에서 제한적일 수 있다. 조사 대상저수지가 부영양 저수지로 한정되어 있어 퇴적물의 특성이 유기물과 영양염류 농도가 높은 저수지의 그룹에 편중되어 있고, 전수조사 대상 저수지에 대한 주변 토지이용별 오염부하량의 자료가 충분하지 않아 분석에 한계가 있을 수 있다. 이로 인해 상관계수 값이 크지 않은 결과를 보였다고 판단된다. 추후 각 저수지의 오염부하량 산정 연구를 통해 모든 저수지에 유입되는 오염부하량 자료가 확보된다면 좀 더 신뢰성 있고 안정적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

(표 3.2-10) 각 토지이용에 따른 퇴적물 특성과의 상관성 분석

| 구분  |     | 전     |         | 담     |        | 기타    |        |
|-----|-----|-------|---------|-------|--------|-------|--------|
| 총질소 | 생활계 | 0.105 | -0.398* | 0.205 | -0.291 | 0.184 | -0.103 |
|     | 축산계 |       | 0.293   |       | 0.365* |       | 0.359* |

※ 실태조사(n=67), 생활계오염원 조사(n=29), 축산계오염원 조사(n=38), \*\*p < 0.01, \*p < 0.05

## 6. 저수지 유입 오염부하에 따른 퇴적물의 오염 특성의 상관성 분석

(표 3.2-11)에서 저수지로 유입되는 오염부하량 및 그 종류에 따라 퇴적물의 오염특성이 갖는 상관성 분석 결과를 나타내었다. 저수지로 유입되는 오염부하량은 BOD발생 부하량, TN발생 부하량, TP발생 부하량으로 구분할 수 있으며, 각 종류별 발생 부하량은 다시 생활계 오염부하량, 축산계(한우, 돼지) 오염부하량, 토지계 오염부하량으로 구성된다. 예를 들어 BOD발생 부하량은 BOD 생활계 오염부하량과 BOD 축산계(한우, 돼지) 오염부하량, BOD 토지계 오염부하량의 합을 의미한다.

퇴적물중 강열감량은 [각 BOD, TN, TP의 토지계 오염부하량/ 각 BOD, TN, TP 발생부하량]에 대해 부(-)의 상관성을 나타내었으며, [TN, TP 발생부하량/유역면적]과는 정(+)의 상관성을 보였다.

총인은 [BOD 토지계 오염부하량/BOD 발생부하량]과 [TP 토지계 오염부

하량/TP 발생부하량]에 대해 부(-)의 상관성을 나타냈으며, [TN 축산계(돼지) 오염부하량/TN 발생부하량]과 [TP 축산계(돼지) 오염부하량/TP 발생부하량]에 대해 정(+)의 상관성을 나타내었다.

총질소는 [TN 축산계(한우) 오염부하량]과 [TP 축산계(한우) 오염부하량]에 대해 영향을 받는 것으로 분석되었으나 유의확률은 높지 않은 것으로 조사되었다.

- 총 오염부하량 = BOD발생 부하량 + TN발생 부하량 + TP발생 부하량
- BOD 발생부하량 = BOD 생활계 오염부하량 + BOD 축산계(한우, 돼지) 오염부하량 + BOD 토지계 오염부하량
- TN 발생부하량 = TN 생활계 오염부하량 + TN 축산계(한우, 돼지) 오염부하량 + TN 토지계 오염부하량
- TP 발생부하량 = TP 생활계 오염부하량 + TP 축산계(한우, 돼지) 오염부하량 + TP 토지계 오염부하량

(표 3.2-11) 저수지 오염 유입부하에 따른 퇴적물 특성간 상관성 분석

| 구분   | BOD토지계 부하량/<br>BOD발생 부하량 | BOD축산계 (한우) 부하량    | TN발생 부하량/<br>유역면적   | TN축산계 (한우) 부하량     | TN토지계 부하량/<br>TN발생 부하량 | TP발생 부하량/<br>유역면적   | TP축산계 (한우) 부하량      | TP축산계 (돼지)부하량/<br>TP발생 부하량 | TP토지계 부하량/<br>TP발생 부하량 |
|------|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| 강열감량 | -0.361*<br>(p=0.015)     | 0.230<br>(p=0.067) | 0.284*<br>(p=0.023) | 0.224<br>(p=0.076) | -0.267*<br>(p=0.033)   | 0.281*<br>(p=0.024) | 0.274*<br>(p=0.029) | 0.234<br>(p=0.063)         | -0.271*<br>(p=0.030)   |

| 구분   | BOD발생 부하량/<br>유효저수량 | BOD토지계 부하량/<br>BOD발생 부하량 | TN발생 부하량/<br>유역면적  | TN발생 부하량/<br>유효저수량 | TN축산계 (돼지)부하량/<br>TN발생 부하량 | TP발생 부하량/<br>유효저수량 | TP축산계 (돼지)부하량/<br>TP발생 부하량 | TP토지계 부하량/<br>TP발생 부하량 |
|------|---------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|
| 총 질소 | 0.238<br>(p=0.058)  | -0.365*<br>(p=0.014)     | 0.221<br>(p=0.080) | 0.221<br>(p=0.067) | 0.232<br>(p=0.065)         | 0.225<br>(p=0.074) | 0.261*<br>(p=0.037)        | -0.284*<br>(p=0.023)   |

※ 실태조사(n=67), 생활계오염원 조사(n=29), 축산계오염원 조사(n=38), \*\*p < 0.01, \*p < 0.05

저수지 유입 오염부하와 퇴적물 특성간의 상관성 분석 결과는, 토지 이용

형태와의 상관 분석 결과에서와 마찬가지로 조사 대상저수지가 부영양 저수지로 한정되어 있어 퇴적물의 특성이 유기물과 영양염류 농도가 높은 저수지의 그룹에 제한되어 있고, 전수조사 대상 저수지에 대한 유입 오염부하량의 자료가 충분하지 않아 분석에 한계가 있을 수 있다. 이후 연구에서 각 저수지의 유입 오염부하량 자료가 확보된다면 좀 더 신뢰성 있고 안정적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3절. 오염된 농업용 저수지의 수질 오염 특성

#### 1. 연구 대상지구(71개)의 수질 오염 현황

본 연구에서 퇴적물의 오염실태를 확인하기 조사를 수행한 71개 부영양 농업용 저수지에 대하여 2014년 농업용수 측정망 보고서의 자료를 활용하여 수질 특성을 분석하였다.

공사의 중점관리 대상 저수지인 연구 대상 저수지 71개에 대하여 수질 오염 특성을 분석한 결과, 평균농도가 COD 11.7 mg/L, TOC 6.8 mg/L, TN 1.844 mg/L, TP 0.101 mg/L, SS 18.1 mg/L, Chl-a 57.3 mg/m<sup>3</sup>로 분석되었다. 조사 대상 저수지 71개 지구 중 COD 46.3 %, TN 84.4 %, Chl-a 63.7 %가 농업용수 수질기준 초과 저수지로 조사되었다. 이들 기준 초과 저수지에서는 부영양화로 인한 조류의 발생, 악취 등의 수질 오염 개연성이 높으므로 저수지의 퇴적물 오염도와와의 관계에 대한 분석이 반드시 필요할 것이라 판단된다.

(표 3.3-1) 연구대상지구의 수질오염 현황

| 구분      | COD<br>(mg/L)      | TOC<br>(mg/L)     | TN<br>(mg/L)           | TP<br>(mg/L)           | SS<br>(mg/L)        | Chl-a<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|--------------------|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 생활계(31) | 11.1<br>(5.3~21.5) | 6.4<br>(3.3~11.8) | 1.824<br>(0.645~4.794) | 0.099<br>(0.030~0.249) | 19.8<br>(4.5~134.5) | 54.0<br>(9.8~209.7)           |
| 축산계(40) | 12.2<br>(5.5~19.3) | 7.1<br>(3.4~11.2) | 1.863<br>(0.610~6.510) | 0.103<br>(0.032~0.228) | 16.4<br>(3.7~35.3)  | 60.5<br>(5.6~180.4)           |
| 전체      | 11.7               | 6.8               | 1.844                  | 0.101                  | 18.1                | 57.3                          |

\* 자료출처 : 농업용수 측정망 조사결과(14)

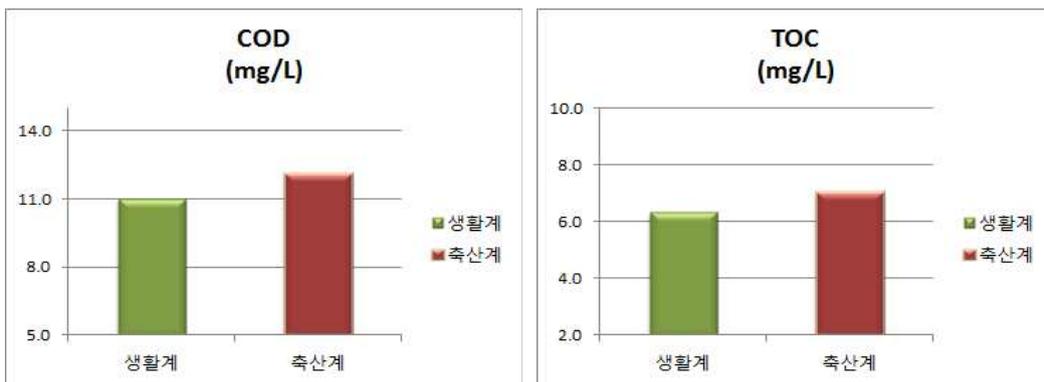
가. 오염원에 따른 수질 오염도 분석

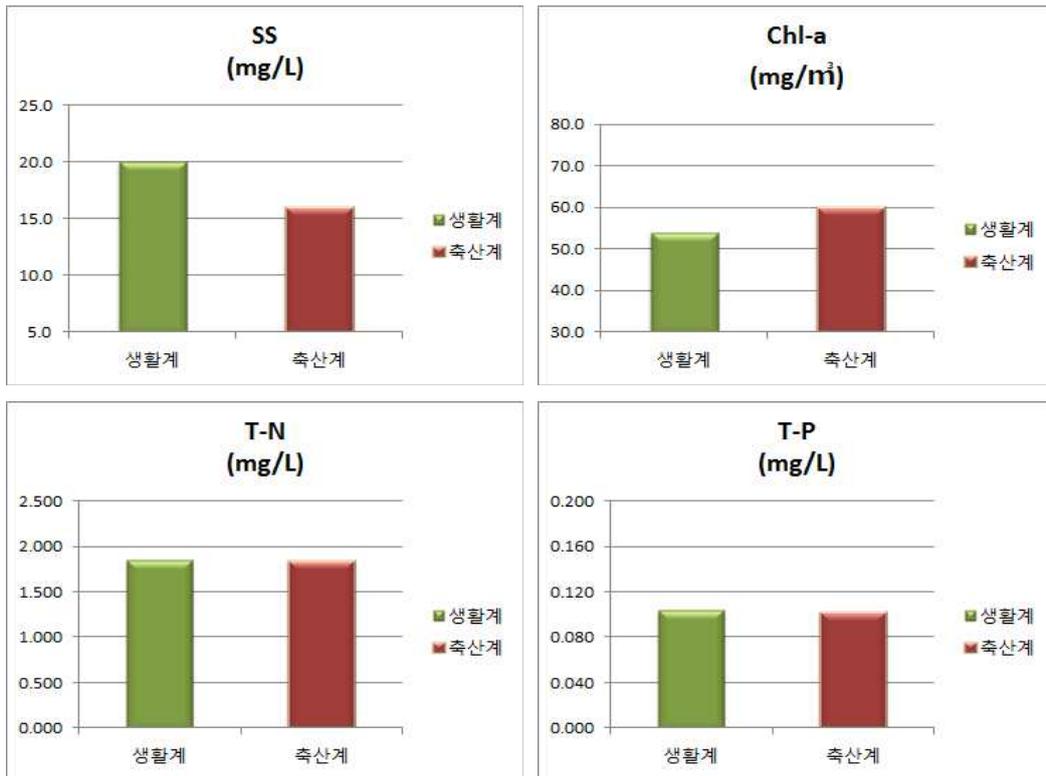
오염원에 따라 오염실태 조사지구인 부영양 농업용저수지의 수질 오염도를 비교·분석하였다. 본 연구의 조사대상 저수지는 COD, TN, TP가 농업용수 수질 기준을 초과하여 중점관리 대상저수지로 지정되어 있는 저수지가 대부분이므로 수질 오염도가 높게 나타날 것이라는 가정 하에 비교·분석을 수행하였다.

생활계 오염원인 31개 저수지와 축산계 오염원인 40개 저수지의 각 항목의 수질 결과에 대한 평균 오염도를 분석한 결과, 축산계 오염원이 생활계 오염원 저수지보다 부유물질(SS)를 제외하고 모든 항목에서 오염도가 높게 나타났다. 그러나 TN, TP는 오염원에 따라 크게 차이를 보이지는 않았으며, 축산계 오염원 저수지의 수질 오염도는 모든 항목에서 농업용수 수질기준을 초과하였다(표 3.3-2).

(표 3.3-2) 오염원 종류에 따른 저수지의 수질 오염도 결과

| 구분      | COD (mg/L) | TOC (mg/L) | TN (mg/L) | TP (mg/L) | SS (mg/L) | Chl-a (mg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|
| 생활계(31) | 11.1       | 6.4        | 1824      | 0.099     | 19.8      | 54.0                       |
| 축산계(40) | 12.2       | 7.1        | 1863      | 0.103     | 16.4      | 60.5                       |





<그림 3.3-1> 오염원 종류에 따른 저수지의 수질 오염도 비교

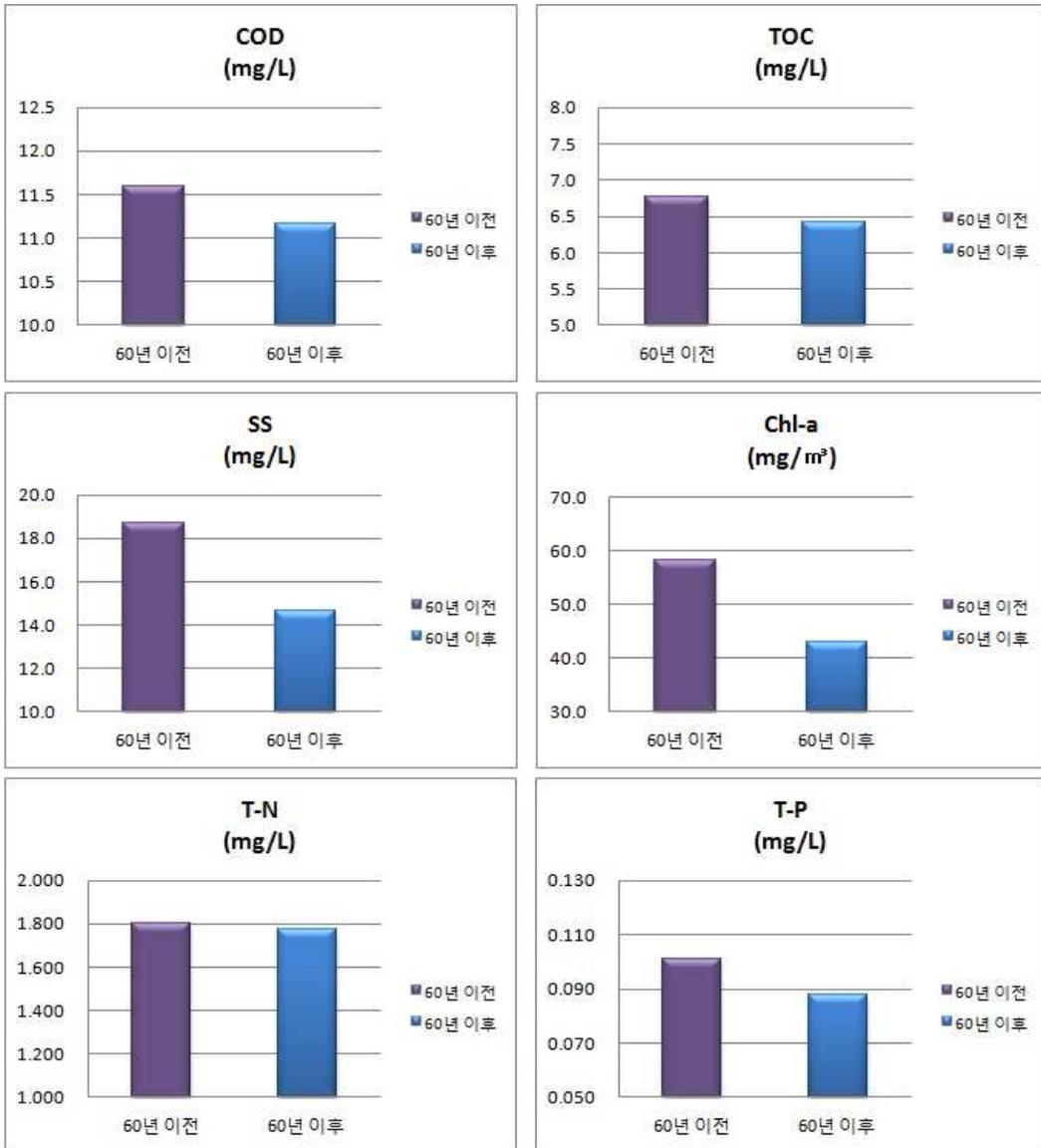
#### 나. 설치년도에 따른 수질 오염도 분석

설치년도 별 분류에 따라 오염실태 조사 대상지구 71개 저수지중 1960년대 이전에 설치된 저수지는 54개 지구이며, 60년대 이후 설치된 저수지는 17개 저수지로 조사되어 부영양 저수지로 중점관리 되고 있는 저수지의 상당수가 60년대 이전 설치된 저수지임을 확인할 수 있다.

60년을 기준 설치년도로 수질 오염도를 비교한 결과, 부유물질(SS)를 제외하고 1960년 이전에 설치된 저수지에서 모든 항목의 오염도가 높게 나타났다. 이는 오염물질의 종류 및 형태에 따라 입자성이 다르기 때문이라 판단된다. 클로로필 a 농도를 비롯한 전체적인 유기물 및 영양염류에 대한 수질 오염도가 1960년 이전 저수지에 높게 나타난 것으로 볼 때, 설치년도가 오래된 저수지에서 부영양화 저수지로 인한 녹조 발생 우려가 더 클 것으로 판단되며, 앞에서 퇴적물 오염도가 1960년 이전 저수지에서 높게 나타난 것과 무관하지 않을 것이라 사료된다.

(표 3.3-3) 설치년도에 따른 저수지의 수질 오염도 결과

| 구분               | COD<br>(mg/L) | TOC<br>(mg/L) | TN<br>(mg/L) | TP<br>(mg/L) | SS<br>(mg/L) | Chl-a<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|
| 1960년대<br>이전(54) | 11.6          | 6.8           | 1.801        | 0.101        | 18.7         | 58.3                          |
| 1960년대<br>이후(17) | 11.2          | 6.4           | 1.775        | 0.088        | 43.0         | 14.6                          |



<그림 3.3-2> 설치년도에 따른 저수지의 수질 오염도 비교

## 2. 수질 오염 특성과 퇴적물 오염 특성에 대한 상관 분석

본 연구의 오염실태 조사 대상 저수지인 부영양 저수지에 대하여 수질 오염과 퇴적물 오염 특성 간 상관성을 분석하였다.

수질 중 COD, TOC, TN, TP, SS, Chl-a의 오염도와 퇴적물중 강열감량, 총질소, 총인의 각 항목간 상관관계를 분석한 결과, 퇴적물내 다른 항목에 비해 총인이 SS를 제외하고 모든 수질 항목과 정(+)의 상관관계를 나타내었다. 특히 퇴적물 중 총인과 수질의 TP가 가장 높은 상관성을 나타내는 것으로 조사되었는데, 이는 퇴적물내 총인이 수질오염에 가장 많은 영향을 줄 수 있으며, 상호작용이 있음을 의미한다고 하겠다. 또한 수질의 TP 오염도에 따라 부영양화 및 조류의 활성화가 크게 영향을 받는다는 기존의 연구결과에 의하면 퇴적물내 총인의 농도가 부영양화와 조류 번식에 영향을 미칠 수 있음을 유추해 볼 수 있다.

이러한 이유는 퇴적물중 강열감량과 총질소의 경우 유기물 분해와 질산화 과정을 거치면서 농도가 감소하거나 형태가 변화 등으로 인해 수질 오염도와 정량적 상관성을 나타내는데 한계가 있는 반면, 총인은 형태가 쉽게 변하지 않고 퇴적되어 수질에 영향을 지속적으로 미치기 때문이라고 사료된다.

따라서 수질오염의 개선을 위해서는 퇴적물중 총인을 제어인자로 선정하는 것이 바람직할 것이라 판단되며, 퇴적물중 총인을 저감하기 위한 기술 적용 시 수질의 오염농도 저감 및 수질 개선의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

(표 3.3-4) 퇴적물 특성과 수질 오염 간의 상관성 분석 결과

| 구분  |    | 수 질     |         |        |         |       |        |
|-----|----|---------|---------|--------|---------|-------|--------|
|     |    | COD     | TOC     | TN     | TP      | SS    | Chl-a  |
| 퇴적물 | 총인 | 0.437** | 0.427** | 0.288* | 0.546** | 0.122 | 0.277* |

※ 전체 실태조사(n=71), \*\*p < 0.01, \*p < 0.05



## 4장. 오염퇴적물의 용출 및 수질에 미치는 영향

1 절. 정밀조사 지구의 선정

2 절. 정밀조사 지구에 대한 오염도 조사 결과

3 절. 퇴적물의 용출에 대한 비교 분석

4 절. 퇴적물의 수질 오염 영향 및  
제어 인자



## 4장. 오염퇴적물의 용출 특성 및 수질에 미치는 영향

### 1절. 정밀조사 지구의 선정

#### 1. 연구범위 및 방법

부영양 농업용 저수지의 퇴적물 오염실태 현황 및 특성에 대한 분석결과를 3장에 기술하였으며, 퇴적물의 오염 특성이 수질에 미치는 영향을 확인하기 위하여 연구 대상 저수지 71개 지구 중 4개 지구를 선정하였다. 정밀조사 4개 지구는 오염원별, 설치년도별 분류 중 대표적인 저수지를 현장조사를 통해 선정하였으며, 선정된 정밀조사 지구에 대하여는 퇴적물의 오염 특성을 다양하게 분석하였고, 시기별 수질의 변화와 수층에 따른 수질 특성을 조사하였다. 또한 퇴적물에 대하여 실내 용출실험을 실시함으로써 수계 내 미치는 영향을 정량화 하고자 하였다.

#### 2. 연구 대상지구 분류 및 선정

##### 가. 연구대상 저수지의 분류 및 선정 기준

퇴적물의 오염실태 조사를 위한 71개 저수지 중, 각 분류의 대표 저수지를 선정하여 퇴적물이 수질에 미치는 영향과 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적 오염도의 변화를 조사하였다. 이에 따라 연구 대상 기준 선정을 하여 각 분류 중 대표성을 고려하여 효과적인 현장 조사가 가능한 저수지를 선정하였다. 그 결과 후보 저수지는 인평, 장곡, 공리, 업성, 봉재, 떡우, 이담, 괴산, 용담 저수지로 선정되었다(표 4.1-1).

(표 4.1-1) 사전 조사 대상지로 선정된 저수지

|     | 1960년대 이전  | 1960년대 이후 |
|-----|------------|-----------|
| 생활계 | 인평, 칠성     | 업성, 용담    |
| 축산계 | 떡우, 봉재, 이담 | 공리, 장곡    |

(표 4.1-2) 인평 저수지 사전 조사 결과

| 생활계<br>60년대 이전 | 인평 저수지  |
|----------------|---|
| <p>전경 사진</p>   |  <p>&lt;그림 4.1-1&gt; 인평 저수지 사전 조사(2015.06.19.)</p>  |
| <p>특징</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 저수지로의 유입하천은 두 곳 임</li> <li>· 유입 및 유출수로가 습지 형태로 구성됨</li> <li>· 주변에 농배수로 형태의 소규모 비 점오염원 유입이 다수 있음</li> <li>· 유입과 유출이 단순하여 물질수지 파악이 용이</li> </ul> |

(표 4.1-3) 업성 저수지 사전 조사 결과

| 생활계<br>60년대 이후 | 업성 저수지  |
|----------------|---|
| <p>전경 사진</p>   |  <p>&lt;그림 4.1-2&gt; 업성 저수지 사전 조사(2015.06.19.)</p>  |
| <p>특징</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 유입구는 4~5 곳이 존재하는 것으로 추정되며, 수로 형태로 주변 공장 배관에서 합류 후 유출됨</li> <li>· 뉘시터 옆 배수구에서 유입되는 지점은 배관 형태로 배출되는데 주변의 공사 폐수가 유입되는 것으로 추정</li> <li>· 비점오염원의 유입이 예상되며, 뉘시터 운영중</li> <li>· 유출구는 일부 토사가 쌓여 있으며 일부 공사 중으로 확인됨</li> </ul> |

(표 4.1-4) 용담 저수지 사전 조사 결과

| 생활계<br>60년대 이후 | 용담 저수지  |  |  |
|----------------|---|--|--|
| <p>전경 사진</p>   |  <p style="text-align: center;">&lt;그림 4.1-3&gt; 용담 저수지 사전 조사(2015.07.09.)</p>  |  |  |
| <p>특징</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 저수량이 현저히 줄어들어 저수지 하상 바닥이 드러남</li> <li>· 용담댐시터 우측 부분(유입부) 퇴적물 준설작업이 진행 중</li> <li>· 용담교 아래 보 부근에는 유량의 흐름이 없어 녹조 다량 발생</li> <li>· 주요 유입 하천이 양 끝단에 존재함</li> </ul> |  |  |

(표 4.1-5) 봉재 저수지 사전 조사 결과

| 축산계<br>60년대 이전 | 봉재 저수지   |  |  |
|----------------|--|--|--|
| <p>전경 사진</p>   |  <p style="text-align: center;">&lt;그림 4.1-4&gt; 봉재 저수지 사전 조사(2015.06.19.)</p>   |  |  |
| <p>특징</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 마을회관 앞 관형 배수구가 다수 있고 배출이 일어나고 있음</li> <li>· 지자체에서 설치한 수질개선 유용 미생물 시설(디엔텍)이 존재</li> <li>· 농배수로 1 지점 위쪽에 저수지가 존재</li> <li>· 물이 많이 빠진 상태이고 배와 뉘시터 존재</li> <li>· 현재 굴삭기를 이용한 공사 중인 곳이 존재</li> </ul> |  |  |

(표 4.1-6) 공리 저수지 사전 조사 결과

| 측산계<br>60년대 이후 | 공리 저수지  |  |  |
|----------------|---|--|--|
| <p>전경 사진</p>   |  <p style="text-align: center;">&lt;그림 4.1-5&gt; 공리 저수지 사전 조사(2015.06.19.)</p>  |  |  |
| <p>특징</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 주변이 산지 및 농지로 되어 있고 농지 배수로가 다수 존재함</li> <li>· 유입부 중 한 지점은 세 곳에서 유입 되고 있음</li> <li>· 주변에 오리 등 축사가 다수 존재</li> <li>· 저수량이 현저히 줄어들어 저수지 하상 바닥이 드러남</li> <li>· 낚시터가 있으나 배의 존재는 불확실함</li> </ul> |  |  |

(표 4.1-7) 장곡 저수지 사전 조사 결과

| 측산계<br>60년대 이후 | 장곡 저수지   |  |  |
|----------------|--|--|--|
| <p>전경 사진</p>   |  <p style="text-align: center;">&lt;그림 4.1-6&gt; 장곡 저수지 사전 조사(2015.06.19.)</p>                               |  |  |
| <p>특징</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 형상이 사각 모양으로 특이하며 유입구가 3개 이상 존재하고 유출구가 좌측으로 편중됨</li> <li>· 주변으로부터 다수의 비점오염원 유입이 확인됨</li> <li>· 배가 없고 낚시터도 존재하지 않음</li> <li>· 유출부 주변에 축사 등이 존재</li> </ul> |  |  |

이에 각각의 저수지에 대해 효율성, 편의성, 안전성을 고려하여 직접 현장 답사 및 사전 조사를 실시하였으며, 이 현장 답사 및 사전조사 결과를 토대로 가장 적합한 조사대상 저수지 산정을 위한 평가표를 작성하였다(표 4.1-8). 효율성의 경우는 유효 저수량 및 중요도 등을 기준으로 평가하였고, 편의성의 경우는 저수지의 위치와 샘플링을 하기에 적절인가를 근거로 평가하였다. 그리고 안전성의 경우는 고무보트 등을 이용하여 조사시 안전성이 확보되는가를 근거로 평가하였다.

(표 4.1-8) 후보저수지 평가표

|     | 생활계     |    |         |    | 축산계     |    |         |    |
|-----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|----|
|     | 60년대 이전 |    | 60년대 이후 |    | 60년대 이전 |    | 60년대 이후 |    |
|     | 인평      | 칠성 | 업성      | 용담 | 봉재      | 이담 | 공리      | 장곡 |
| 효율성 | ◎       | ○  | ◎       | △  | ◎       | ◎  | ◎       | ○  |
| 편의성 | ○       | △  | ◎       | △  | ○       | ◎  | ○       | △  |
| 안전성 | ○       | ○  | ○       | ○  | ○       | ○  | ○       | ○  |

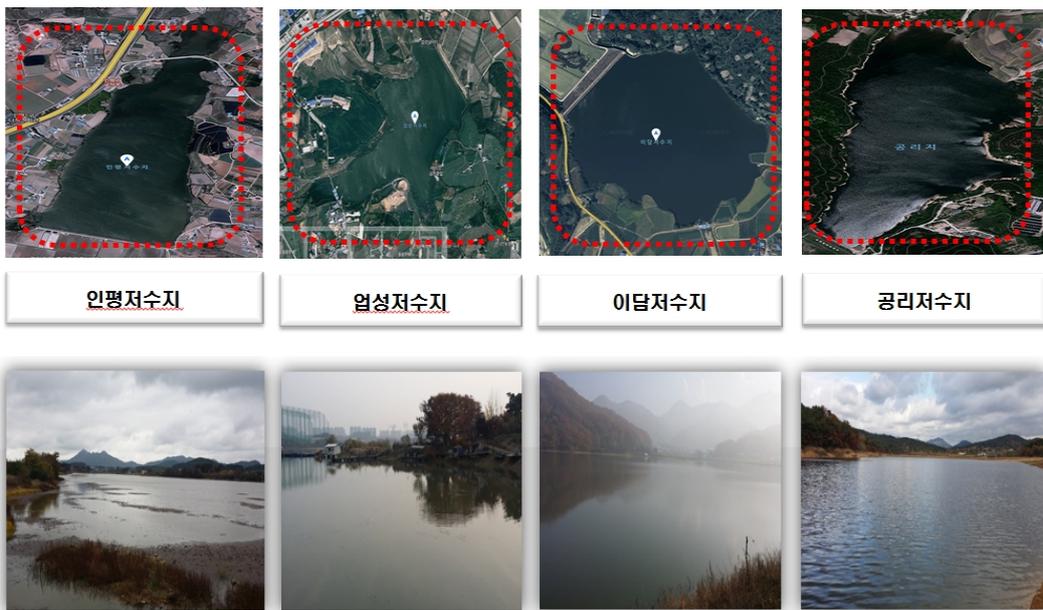
이에 따른 평가를 통해 최종적으로 선정된 조사 대상 저수지는 생활계의 경우 인평 저수지(1960년 이전)와 업성 저수지(1960년 이후)이고, 축산계의 경우 이담 저수지(1960년 이전)와 공리 저수지(1960년 이후)이다.

(표 4.1-9) 연구대상지구의 저수지 제원 및 퇴적물 특성

| 저수지명 | 설치년도 | 오염원 | 형태   | 유효저수량<br>(천m <sup>3</sup> ) | 유효수심<br>(m) | 만수면적<br>(ha) | 유역면적<br>(ha) | 수혜면적<br>(ha) | 제당높이<br>(m) |
|------|------|-----|------|-----------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 인 평  | 1938 | 생활계 | 저류지형 | 891                         | 2.0         | 43.8         | 1,062        | 202.9        | 7.0         |
| 업 성  | 1972 | 생활계 | 저류지형 | 952                         | 3.6         | 37.4         | 507          | 142.0        | 10.0        |
| 이 담  | 1931 | 축산계 | 산간형  | 644                         | 3.6         | 17.8         | 535          | 133.0        | 9.2         |
| 공 리  | 1985 | 축산계 | 산간형  | 1,410                       | 4.8         | 29.6         | 370          | 167.5        | 16.0        |

| 저수지명 | BOD발생 부하량(kg/d) |       |     |      |       | TN발생 부하량(kg/d) |       |      |      |       | TP발생부하량(kg/d) |      |     |     |      | 토지<br>이용도 |
|------|-----------------|-------|-----|------|-------|----------------|-------|------|------|-------|---------------|------|-----|-----|------|-----------|
|      | 생활계             | 축산계   | 산업계 | 토지계  | 계     | 생활계            | 축산계   | 산업계  | 토지계  | 계     | 생활계           | 축산계  | 산업계 | 토지계 | 계    |           |
| 인 평  | 47.5            | 25.1  | -   | 14.6 | 112.3 | 12.8           | 14.0  | -    | 50.9 | 91.8  | 1.5           | 2.0  | -   | 2.5 | 7.9  | 임야50.7%   |
| 업 성  | 82.9            | 35.1  | 7.2 | 5.9  | 166.2 | 22.3           | 19.1  | 0.61 | 8.7  | 69.7  | 2.5           | 3.2  | 0.1 | 0.6 | 9.6  | 기타70.8%   |
| 이 담  | 16.2            | 197.8 | -   | 6.9  | 418.6 | 4.4            | 93.2  | -    | 22.0 | 212.7 | 0.5           | 20.0 | -   | 1.1 | 41.6 | 임야59.1%   |
| 공 리  | 12.7            | 224.5 | -   | 4.2  | 465.9 | 3.4            | 109.2 | -    | 10.1 | 231.9 | 0.4           | 21.3 | -   | 0.6 | 43.7 | 임야71.6%   |

정밀조사지구로 선정된 4개 저수지의 물리적 특성은 (표 4.1-9)과 같으며, 인평과 업성 저수지는 가장 보편적인 저류지형의 형태를, 이담과 공리 저수지는 산간에 위치한 산간형의 형태를 갖는다. 4개 저수지 모두 가장 일반적인 농업용 저수지의 수심인 유효수심(유효저수량/만수면적) 5m 이내이며, 유효저수량도 1,000 (천 $m^3$ ) 부근으로 일반적 농업용 저수지의 조건에 따라 선정하고자 하였다. 또한 앞의 3장에서 퇴적물 오염 특성과 상관성이 있는 것으로 조사된 유입 오염부하량과 주요 토지이용 형태도 함께 표로 나타내었다.

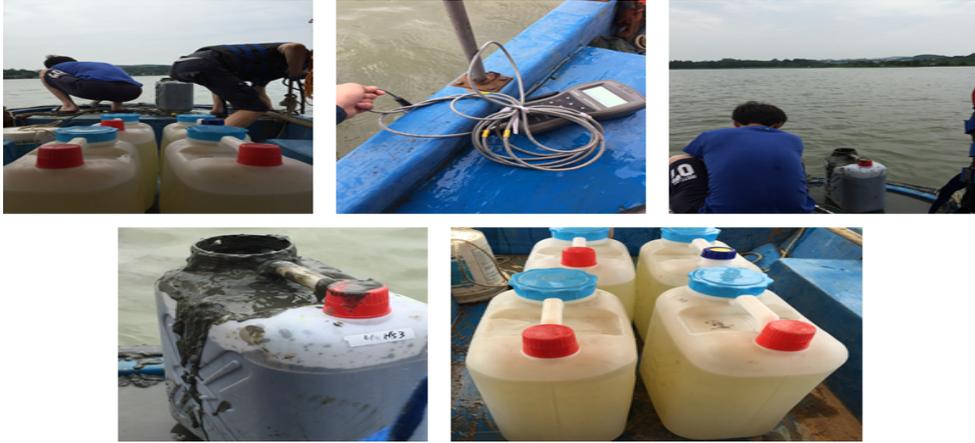


<그림 4.1-7> 정밀조사 대상지구 위치 및 전경 사진

### 3. 조사 수행 방법

각 대상 저수지 조사는 퇴적물의 특성도 중요하지만 저수지 수질과의 관련성도 중요한 분석 대상이므로 퇴적물 및 수 시료를 동시에 채취하였다. 각 시료의 채취는 고무보트를 이용하여 표면수를 채취하고, 수질시료는 폴리에틸렌 시료통에 채워 분석실로 가져와 분석하였다. 퇴적물 시료는 Grap Sampler를 사용하여 채취한 후, 채취 후 비닐 팩에 공기가 통하지 않도록 채워 밀봉한 후 실험실로 이동하였다. 수질 및 퇴적물 시료의 채취는 수질오염

공정시험기준에 제시되어있는 시료 채취방법에 의거하여 채수하였다.



<그림 4.1-8> 현장 샘플링 사진

(표 4.1-10) 시료 채취 적용범위 및 관련법

| 적용범위                              | 관련법                          |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 하천 및 호소의 환경기준 적합여부 판정 및 오염 실태 조사  | 환경정책기본법, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 |
| 폐수종말처리시설의 방류수 수질 기준 적합 여부 판정      | 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률          |
| 하수도 시설의 방류수 수질기준 적합 여부 판정         | 하수도법                         |
| 축산폐수의 방류수 수질기준 적합 여부 판정           | 가축분뇨의 이용 및 관리에 관한 법률         |
| 지하수의 수질기준 적합 여부 판정 및 지하수 오염 실태 조사 | 지하수법                         |

#### 4. 조사 항목 및 분석 방법

##### 가. 조사 및 분석항목

각 대상 저수지의 퇴적물 및 수질분석항목은 (표 4.1-11)와 같으며, 오염퇴적물이 수질오염에 미치는 영향을 분석하기 위해 유기물 및 영양염류에 관한 항목을

중심으로 분석을 수행하였다. 분석방법은 토양 및 식물체 분석법(농촌진흥청), USDA분석법, 토양오염공정시험기준, 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다.

정밀조사 지구에 대하여 퇴적물에 대한 분석은 퇴적물의 이화학적 특성 및 오염도를 알아보기 위해 수행하였으며, 수질 분석은 수질 오염 특성을 파악하고 퇴적물이 수질에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수행하였고 수질오염 공정시험기준에 따라 분석하였다.

(표 4.1-11) 오염정밀 조사 및 분석 항목

| 퇴적물 분석   | 수질 분석                                     |
|--|---|
| pH, EC, 입도분석, 강열감량, T-N, T-P, CODsed, 용출률, 중금속(As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) | pH, EC, DO, COD, T-N, T-P, TOC, Chl-a, SS |

#### 나. 조사 항목별 분석 방법

##### (1) 퇴적물 실내 분석

##### (가) 입도분석

일반적으로 입자크기는 입자가 통과할 수 있는 작은 체의 눈금으로 표시하거나, 입자의 침강속도를 가지는 구의 지름, 혹은 입자의 장축으로 나타낼 수 있다. 입도분석은 Stock's law에 따르며, 실험방법은 비중계법 (Hydrometer method)에 의해 분석하였다. 비중계를 일정한 시간별로 토양 혼탁액에 삽입하여 비중을 측정함으로써 점토의 함유비를 분석하고 체가름을 통해 모래 함유비를 구하는 방법이다. 또한 입경크기 분류와 토양분류법은 (표 4.1-12) 및 (표 4.1-13), <그림 4.1-9>에 나타내었다

##### <시험방법>

1. 제조된 시료 50 g을 취해 분산제 100 mL를 넣고 1일간 재운다.
2. 교반기로 1분정도 교반 후 메스실린더(1 L)에 넣고 물로 눈금을 맞춘다.
3. 1분 교반 후 7시간 20분을 기다린다.
4. 7시간 20분 후 눈금을 읽고 나서 체분석을 한다.
5. 메스실린더(1 L)에 남은 시료를 0.053 mm 체로 거른 후 체에 남은 시료의 건조 무게를 측정한다.

<계산식>

(체가름 시료무게)\*2= Sand(%)

7시간 20분 후 : (눈금치-Blank)\*2 = Clay(%)

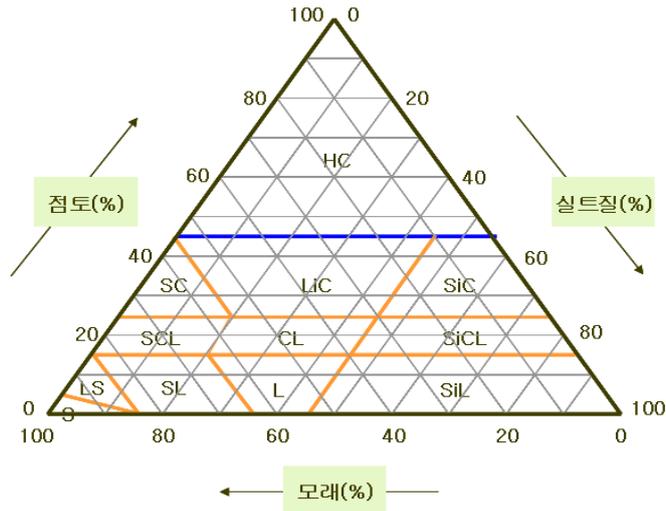
100- (Sand+Clay) = Silt(%)

(표 4.1-12) 입경의 크기 분류

| 구분명칭               | 입경            | 비고                               |
|--------------------|---------------|----------------------------------|
| 자갈(gravel)         | > 2 mm        | 토성에 관여하지 않음                      |
| 굵은 모래(coarse sand) | 2~0.2 mm      | 토성에 기여도가 낮고, 공극율, 통기성, 배수 작용에 관여 |
| 가는 모래(fine sand)   | 0.2~0.02 mm   |                                  |
| 실트(silt)           | 0.02~0.002 mm | 모래와 점토의 중간적 성질                   |
| 점토(clay)           | < 0.002 mm    | 토성에 가장 크게 기여함                    |

(표 4.1-13) 토양 분류법

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



<그림 4.1-9> 토양 분류법(삼각도법)

(나) 강열감량

호소 내 유기물량은 퇴적물의 환경을 평가하는데 중요한 척도 중의 하나로 사용된다. 일반적으로 유기물량의 측정에는 강열감량법이나 유기탄소량 측정법 등을 이용하여 직접 정량하는 방법이 주로 사용된다. 본 조사에서 강열감량은 해양환경공정시험방법 중 강열감량 분석방법을 활용하였으며, 시료 일정량을 550 °C 정도에서 90분간 가열하여 시료 속의 휘발성 성분과 열분해 될 수 있는 성분이 제거되어 감량된 양을 시료에 대한 백분율로 나타낸 양으로 분석하는 방법이다.

<시험방법>

1. 도가니 무게를 재고 조제된 시료를 10 g정도 넣어 다시 무게를 잰다(전자저울사용).
2. 전기로에 넣어 약 550 °C 정도에서 60 ~ 90분간 가열한다.
3. 전기로에서 꺼내 데시케이터에서 약 1시간 식힌 후 평량하여 그 감량을 구한다.

<계산식>

$$\text{강열감량(\%)} = \frac{\text{시료와 도가니의 무게} - \text{가열 후 시료와 도가니의 무게}}{\text{시료와 도가니 무게} - \text{도가니의 무게}} \times 100$$

(다) CODsed

퇴적물의 화학적 산소요구량(CODsed)은 유기물이 산화될 때 환경에 미치는 영향을 알아내기 위해, 유기물 산화 시 소비되는 산소량을 측정하는 방법

이다. 이 방법은 생물학적 산소요구량, 유기탄소량 혹은 유기물량과 상관관계가 좋은 것으로 알려져 있으며, 퇴적물 오염의 지표로 많이 사용된다. 본 조사에서는 해양퇴적물공정시험법에 따라 0.1N  $\text{KMnO}_4$  (과망간산칼륨)에 의한 산소소비량을 측정한다.

#### (라) T-N

질소의 순환 중에서 질산화와 탈질작용에 의해서 많은 질소가 대기로 탈기된다. 특히 퇴적물 내에서는 대부분의 경우 혐기성 상태가 되어 탈질작용이 발생할 수 있는 환경을 조성한다. 이때 저질 내에 질소 함량의 정도에 따라서 대기로 탈기되는 질소의 양도 결정된다. 토양에서의 총질소 분석은 킬달 증류법을 사용하며 이는 분해장치에서 황산을 이용하여 토양을 분해시키며 증류장치를 이용하여  $\text{NH}_4\text{-N}$  형태로 전환 및 정량하는 방법이다.

#### <시험방법>

1. 조제된 시료를 100 mesh 체로 1 g 거른 후, 반응촉진제 및 농황산 15 mL를 넣는다.
2. Kjeldahl 분해장치로 온도를 400 ~ 420 °C까지 서서히 가열·분해한다.
3. 2 시간 45 분 가열·분해 후 분해된 용액을 상온으로 냉각한다.
4. 분해용액을 Kjeldahl 증류장치에 연결한다.
5. 냉각수를 열고 Kjeldahl 분해시험관에 32 % NaOH 60 mL ,  $\text{H}_2\text{O}$  60 mL 를 가한 후 증류를 시작한다.
6. 2 %  $\text{H}_3\text{BO}_3$  50 mL 를 취한 수기에 증류액을 받아
7. 증류액을 0.02 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 end-point까지 적정한다.

#### (마) T-P

인은 수중 생태계의 일차 생산량을 결정하는 중요한 물질 중 하나이며, 수체 내 물질순환 과정에서 주로 퇴적물에 저장되는 원소로, 물리적인 교란 및 생물·화학적 적용에 의해 수층으로 용출되어 부영양화를 가속시키는 것으로 알려져 있다. 토양 중의 유기물의 분해를 위하여 질산으로 낮은 온도에서 분해한 후, 과염소산을 가하여 높은 온도에서 광물입자만이 남도록 분해하여 이 분해액 중의 인산함량을 측정하는 방법이다.

#### <시험방법>

1. 시료 1 g 을 삼각플라스크에 취하고 진한 질산 5 mL를 넣고 110 °C에서 10 분

정도 분해한다.

2. 식힌 후 과염소산 10 mL를 가하여 150 °C까지 온도를 올린다.
3. 분해액이 흰색이나 옅은 연두색이 될 때까지 분해한다.
4. 분해가 끝난 후 250 °C에서 30 분 정도 계속 가열한다.
5. 식힌 후 60 °C 가열한 증류수 50 mL를 가한다.
6. 100 mL volumetric flask에 여과하고 증류수 40 mL로 세척한 후 눈금을 맞춘다.
7. 여액 10 mL + 발색시약 5 mL를 test tube에 넣는다.
8. 30 분간 30 °C에서 발색한 후 440 nm에서 spectrophotometer로 측정

<계산식>

$$\text{표준곡선에서 얻은 mg/L} \times 100 = \text{Total P (mg/kg)}, 100\text{은 회석 배수 } \left( \frac{\text{용량}100\text{mL}}{\text{시료량}(g)} \right)$$

(바) 중금속

퇴적물의 중금속은 대부분 수질에서 저질로 옮겨지는 기작으로 저질의 중금속 농도가 증가하게 된다. 특히 분석을 통하여 과거 오염의 형태가 어떻게 변하는지를 파악할 수 있기 때문에 저질 중금속의 농도로 과거 수질의 중금속 농도가 어떻게 변화해 왔는지 추정할 수 있다. 또한 중금속의 경우, 수질에서 저질로의 흡착이 일어나는 반면 저질에서 수질로의 용출도 일어날 수 있기 때문에 상호 연계성을 가지고 있어서 저수지의 수질에 있어서도 중요하다.

(표 4.1-14) 퇴적물 분석방법 및 분석에 이용된 기기

| 분석항목                                  | 분석방법             | 분석기기   |
|---------------------------------------|------------------|--|
| pH                                    | 직접측정법            | pH meter   |
| 강열감량(Ignition Loss, IL)               | 무게차감법            | Thermogravimetric analyzer, TGA                      |
| CODsed                                | 과망간산칼륨법          | -  |
| 총질소(Total Nitrogen, TN)               | Kjeldahl법        | 질소정량장치 (Gerhardt Vapodest 50 & Vapodest 50 Carousel) |
| 총인(Total Phosphorus, TP)              | 바나도 몰리브덴 산법      | UV   |
| 전기전도도(Electric Conductivity, EC)      | 직접측정법            | EC meter   |
| 입도분포(Particle Size Distribution, PSD) | 비중계법             | PSA(Cilas-1064)                                      |
| 중금속(As, Cu, Cd, Pb, Ni, Zn)           | 유도결합플라스마-원자발광분광법 | JY Ultima 2  |
| Hg                                    | 환원기화법            | NIC RA-30  |

## (2) 수질 실내 분석

수질분석항목은 앞의 (표 4.1-11)와 같으며, 수질오염공정시험기준과 Standard Method에 준하여 분석을 실시하였다. 각 항목의 분석방법 및 분석기기를 간단히 정리하면 (표 4.1-15)과 같다.

(표 4.1-15) 수질 분석방법 및 분석에 이용된 기기

| 분석항목                            | 분석방법  | 분석기기                         |
|---------------------------------|---|------------------------------|
| 수소이온농도(pH)                      | 직접측정법   | HYDROLAB_Quanta              |
| 전기전도도(EC)                       | 직접측정법   |                              |
| 용존산소(DO)                        | 직접측정법   |                              |
| 화학적산소요구량(COD)                   | 과망간산칼륨법   | -                            |
| 총질소(T-N)                        | 연속흐름법   | SYNCA                        |
| 암모니아성질소<br>(NH <sub>3</sub> -N) | 자외선/가시선법<br>(Salicylate법, ISO 11732)                | 수질자동측정기<br>(BRAN+LUEBBE AA3) |
| 질산성질소<br>(NO <sub>3</sub> -N)   | 자외선/가시선법<br>(Cu-CD 환원·NEDD법, ISO 13395)             | 수질자동측정기<br>(BRAN+LUEBBE AA3) |
| 아질산성질소(NO <sub>2</sub> -N)      | 자외선/가시선법<br>(NEDD법, ISO 13395)                      | 수질자동측정기<br>(BRAN+LUEBBE AA3) |
| 총인(T-P)                         | 연속흐름법   | SYNCA                        |
| 인산염인(PO <sub>4</sub> -P)        | 자외선/가시선법<br>(Phospho Molybdenum Blue,<br>ISO 15681) | 수질자동측정기<br>(BRAN+LUEBBE AA3) |
| 총유기탄소(TOC)                      | 자외선-과황산 산화법   | GE사 siverse900 TOC           |
| 클로로필(Chl-a)                     | UV 법  | UV Spectrophotometer         |
| 부유물질(SS)                        | 여지무게측정  | -                            |

## 2절. 정밀조사 지구에 대한 오염도 조사 결과

### 1. 생활계오염원 저수지의 수질 및 퇴적물 오염도 조사 결과

가. 생활계오염원 저수지의 수질 오염도 조사 결과

(표 4.2-1) 는 인평과 업성저수지의 수질분석 자료를 정리하여 나타낸 것이다. 조사 시기는 2015년 8월부터 11월까지이며, 현장측정 항목인 pH, EC,

수온, DO는 5월부터 11월까지 측정한 결과이다. 인평저수지 및 업성저수지에 대하여 수층별 수질 오염도를 비교 분석하였으며, 이는 퇴적물내 오염물질의 용출로 수질오염에 미치는 영향과 관계가 있으므로 중요하다고 하겠다.

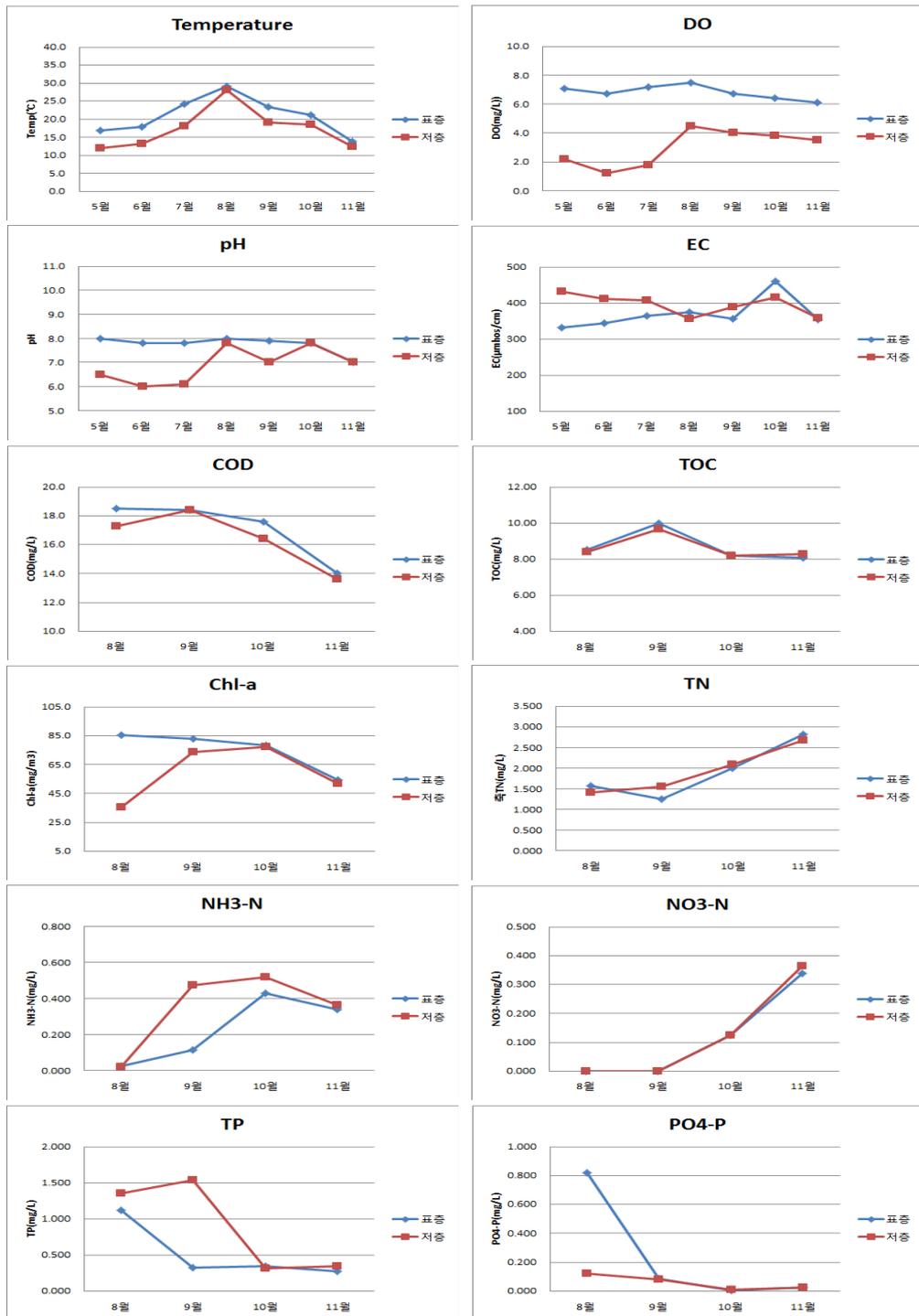
조사 시기에 해당 저수지에서는 가뭄의 영향으로 수위가 평년에 비해 상당히 낮았으며, 저수량의 부족으로 저수지 주변의 바닥이 드러나거나 유출이 없는 등의 특징을 보였다. 인평저수지와 업성저수지의 수심은 시기별 차이가 있으나 대체로 1.2~2.0m 이하로 측정되었으며, 수층별 평균 수온은 인평저수지의 경우 표층 20.9 °C, 저층 17.4 °C를 나타냈고, 업성저수지의 경우 표층 22.4 °C, 저층 17.5 °C로 측정되었다. 또한 DO 농도는 인평 저수지에서 표층 6.8 mg/L, 저층 3.0 mg/L로 나타났으며, 업성저수지는 표층 7.8 mg/L, 저층 3.6 mg/L로 측정되었다. 특히 수심이 낮은 본 연구 대상저수지에서 5~7월의 조사시기에 표층의 DO 농도가 높음에도 저층부의 DO 농도는 1.2~2.2 mg/L를 나타내 약혐기조건이 형성됨을 확인하였다. 현장측정기(HYDROLAB\_Quanta)를 이용한 DO측정은 저층부 퇴적물의 재부유를 막기 위해 저층경계면에서 30~50cm 윗부분을 측정했다는 점에서 저층부의 DO 농도가 더 낮을 수 있다고 추정할 수 있다.

인평저수지는 해마다 2차시의 수질이 악화되는 경향을 나타내는데 이는 정체되어 있던 오염물질이 계절적 영향으로 수계의 환란 및 이류 등 순환 과정을 거치면서 녹조의 발생 및 부영양화의 심화가 진행되었기 때문으로 판단된다. 또 업성저수지는 전체적으로 수질오염이 저감되는 경향을 나타내었는데, 이는 저수지의 제당부 보수 공사 및 유입오염원 차단 작업이 지속적으로 진행(2015년 11월 말경 완공)되어 수질 오염 저감에 영향을 미친 것으로 사료된다.

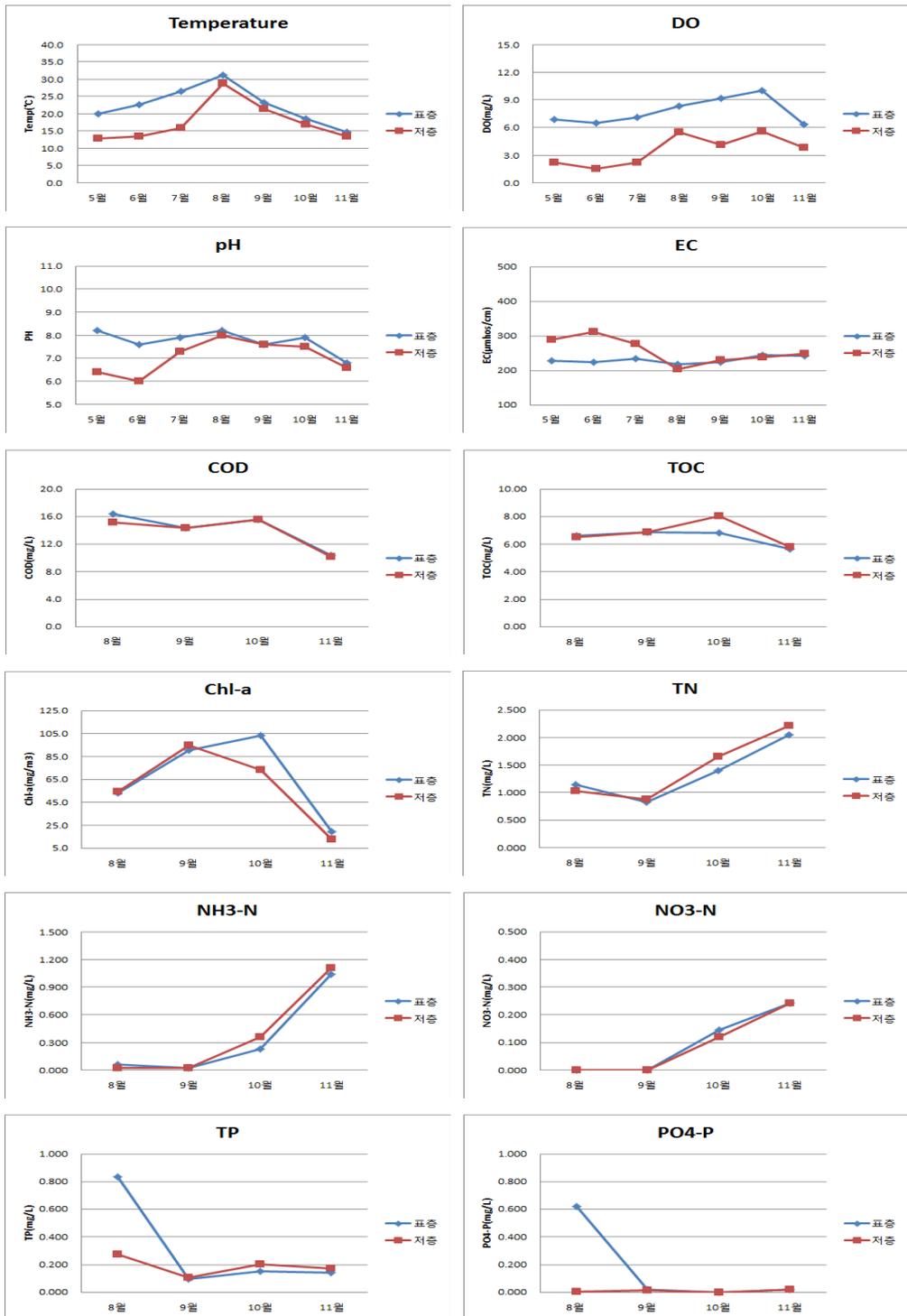
현장에서 두 저수지 모두 조류가 발생된 것을 확인할 수 있었으며, 표층의 마름의 생장이 활성화되어 다량의 유기물이 수계의 오염도를 높일 것으로 판단된다. 현장 수질 오염도를 보여주는 COD, TOC, T-N, T-P, SS 등의 농도가 인평저수지에서 더 높은 것으로 나타났다. 이들에 대한 측정결과를 호소 생활환경기준과 비교해 보면 두 저수지 모두 농업용수 수질기준을 초과하는 것으로 조사되었다.

(표 4.2-1) 생활계오염원 저수지 수질 조사 결과

| 조사 시기<br>(15.05~15.11)   |                           | 인평 저수지 |          | 업성 저수지 |          |
|--------------------------|---------------------------|--------|----------|--------|----------|
|                          |                           | 표층(0m) | 저층(1.5m) | 표층(0m) | 저층(1.5m) |
| 15.05<br>~<br>15.11      | 수온(℃)                     | 20.9   | 17.4     | 22.4   | 17.5     |
|                          | DO(mg/L)                  | 6.8    | 3.0      | 7.8    | 3.6      |
|                          | pH                        | 7.8    | 6.9      | 7.7    | 7.1      |
|                          | EC(μs/cm)                 | 370    | 396      | 231    | 257      |
| 15.08<br>~<br>15.11      | Chl-a(mg/m <sup>3</sup> ) | 75.3   | 59.5     | 66.7   | 58.9     |
|                          | SS(mg/L)                  | 78.1   | 85.9     | 24.7   | 36.6     |
|                          | COD(mg/L)                 | 17.1   | 16.4     | 14.2   | 13.9     |
|                          | TOC(mg/L)                 | 8.7    | 8.6      | 6.5    | 6.8      |
|                          | T-N(mg/L)                 | 1.907  | 1.933    | 1.358  | 1.447    |
|                          | NH <sub>3</sub> -N(mg/L)  | 0.227  | 0.344    | 0.337  | 0.378    |
|                          | NO <sub>3</sub> -N(mg/L)  | 0.116  | 0.122    | 0.097  | 0.091    |
|                          | NO <sub>2</sub> -N(mg/L)  | 0.021  | 0.020    | 0.011  | 0.012    |
|                          | T-P(mg/L)                 | 0.516  | 0.890    | 0.167  | 0.431    |
| PO <sub>4</sub> -P(mg/L) | 0.233                     | 0.060  | 0.007    | 0.620  |          |



<그림 4.2-1> 인평저수지의 수층별 수질 변화



<그림 4.2-2> 업성저수지의 수층별 수질 변화

나. 생활계오염원 저수지의 퇴적물 오염도 조사 결과

인평 저수지와 업성 저수지의 퇴적물에 대한 분석결과는 (표 4.2-2)에 제시하였다. pH는 교환산도의 특성을 파악할 수 있도록 H<sub>2</sub>O와 KCl 용액을 이용하여 비교 평가하였다. 그 결과 인평과 업성의 pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>와 pH<sub>KCl</sub>의 값은 각각 6.64, 5.61 및 6.43, 5.35로 나타났으며, 인평이 업성보다 약간 높은 수치를 보였으나 큰 차이는 없었다. 또한 EC는 인평 저수지와 업성 저수지가 각각 268.7  $\mu$ s/cm, 535.0  $\mu$ s/cm의 값을 보여 업성 저수지가 약 2배 정도 높은 것으로 조사되었으며, 용출될 수 있는 이온성 물질이 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다. 또한 유기물량을 간접적으로 나타내는 강열감량 및 COD에 있어서도 인평 저수지에 비하여 업성 저수지가 더 높은 것으로 나타났다. 부영양화에 큰 영향을 미치는 T-N 및 T-P의 경우 질소는 업성 저수지가 높은 반면에 인은 인평 저수지가 높은 것으로 조사되었다. 또한 중금속 분석 결과(표 4.2-3)에 대하여 국내의 퇴적물 오염 평가기준, 토양오염우려기준 1지역 및 국외의 퇴적물 오염기준과 비교했을 때 배경농도 정도 수준이며 오염을 우려할 수준은 아닌 것으로 분석되었다.

두 저수지의 퇴적물 오염정도를 USEPA의 미국 오대호 담수퇴적물 오염분류를 위한 지역환경보호청의 기준과 비교해 볼 때, 강열감량은 두 저수지 모두 8 % 이상으로 조사되어 심하게 오염된 것으로 나타났고, COD의 경우 인평 저수지는 비오염 수준, 업성 저수지는 중간오염 수준으로 평가되었다. 또한 T-N, T-P가 두 저수지 모두 심한 오염 수준으로 조사되었다. 환경부의 오염평가기준과 비교하면 업성저수지의 강열감량이 기준을 초과하였으며, 총인은 인평저수지에서 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

(표 4.2-2) 퇴적물 오염도 분석 결과

| 분석 항목           |                  | 인평 저수지 | 업성 저수지 |
|-----------------|------------------|--------|--------|
| pH              | KCl              | 5.61   | 5.35   |
|                 | H <sub>2</sub> O | 6.64   | 6.43   |
| EC( $\mu$ s/cm) |                  | 268.7  | 535.0  |
| 강열감량(%)         |                  | 11.5   | 14.0   |
| COD(mg/kg)      |                  | 25,655 | 45,405 |
| T-N(mg/kg)      |                  | 2,579  | 3,035  |
| T-P(mg/kg)      |                  | 1,744  | 1,483  |

(표 4.2-3) 퇴적물 중금속 분석 결과

| 중금속       | 인평 저수지 | 업성 저수지 |
|-----------|--------|--------|
| As(mg/kg) | 13.73  | 13.10  |
| Cd(mg/kg) | 0.57   | 0.73   |
| Cu(mg/kg) | 30.87  | 48.37  |
| Ni(mg/kg) | 25.63  | 71.43  |
| Pb(mg/kg) | 26.87  | 49.43  |
| Zn(mg/kg) | 95.43  | 276.60 |

(표 4.2-4) 퇴적물 입도분석 분석 결과

|       | 인평 저수지 | 업성 저수지 |
|-------|--------|--------|
| 모래(%) | 2.7    | 4.2    |
| 미사(%) | 63.3   | 65.8   |
| 점토(%) | 34.0   | 30.0   |
| 토성    | SiC    | SiC    |

## 2. 축산계오염원 저수지의 수질 및 퇴적물 오염도 조사 결과

가. 축산계오염원 저수지의 수질 오염도 조사 결과

(표 4.2-5) 는 이담과 공리 저수지의 수질분석 자료를 정리하여 나타낸 것이다. 조사 시기는 2015년 8월부터 11월까지이며, 현장측정 항목인 pH, EC, 수온, DO는 5월부터 11월까지 측정한 결과이다. 앞의 생활계 오염원으로서와 같이 이담저수지 및 공리 저수지에 대하여 수층별 수질 오염도를 비교 분석하였다.

조사 시기에 해당 지역의 적은 강수로 인해 저수량이 예년에 비해 적어 이담저수지의 경우 저수량 확보를 위해 충북지역본부와 지자체가 다양한 방안

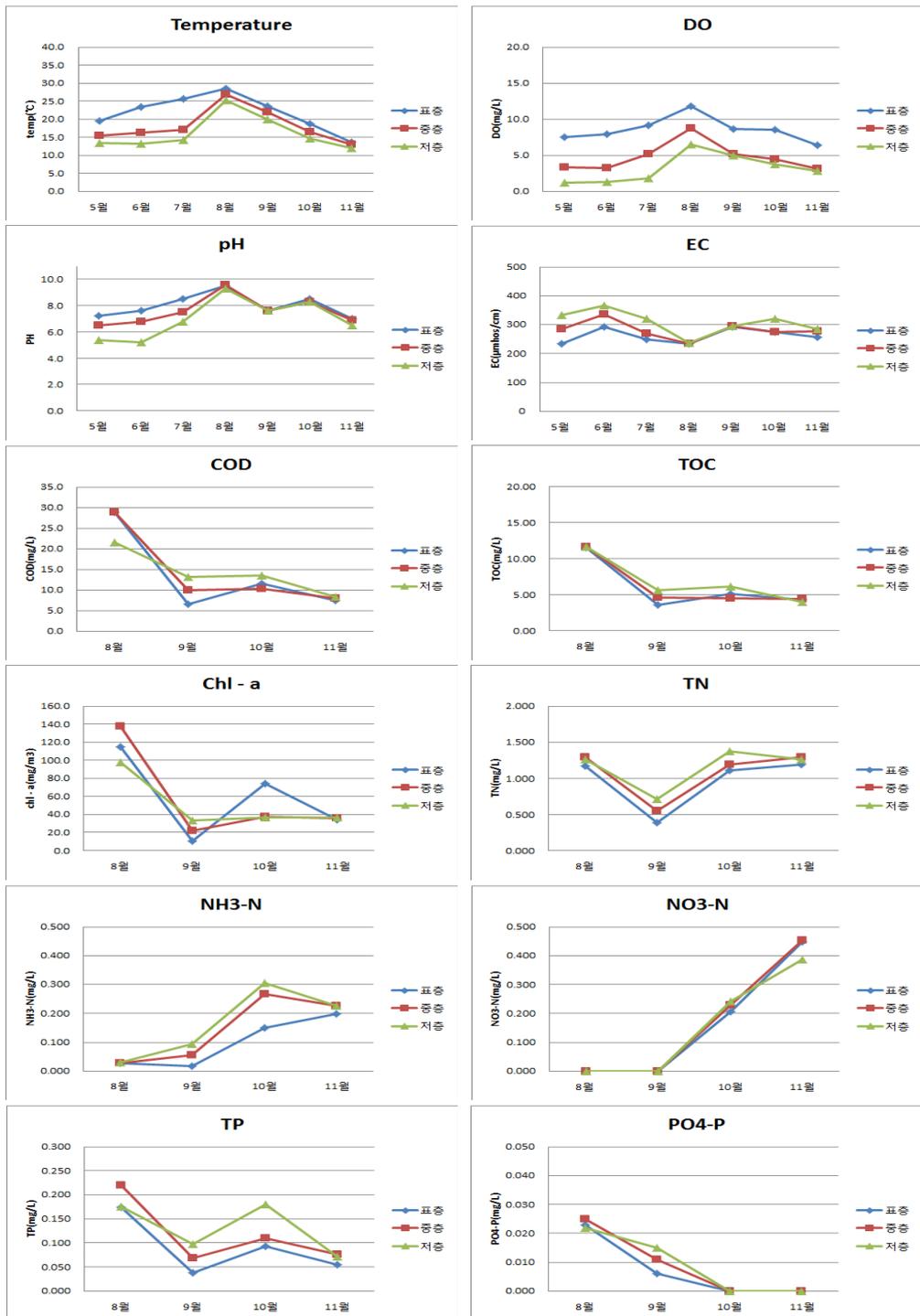
을 강구하였다. 공리저수지의 경우 정기적인 현장조사에서 저수지 주변의 바닥이 상당부분 드러나 있음을 확인하였다. 수심은 시기별 차이는 있으나 이담저수지의 경우 2.5m 정도였으며, 공리저수지의 경우 대체로 4.5m 정도로 측정되었다. 수층별 평균 수온은 이담저수지의 경우 표층 21.9 °C, 중층 18.1 °C, 저층 16.1 °C를 나타냈고, 공리저수지의 경우 표층 22.5 °C, 중층 19.1 °C, 저층 15.6 °C로 측정되었다. 또한 DO 농도는 이담 저수지에서 표층 8.6mg/L, 중층 4.8mg/L, 저층 3.2 mg/L로 나타났으며, 공리 저수지는 표층 6.5 mg/L, 중층 4.0 mg/L, 저층 2.6 mg/L로 측정되었다.

특히 본 연구 대상저수지에서 5~7월의 조사시기에 저층부의 DO 농도는 1.2~2.3 mg/L를 나타내 수계내 약성층이 형성되면서 저층부에 약혐기상태가 형성됨을 유추할 수 있다. 현장측정기(HYDROLAB\_Quanta)를 이용한 DO측정은 저층부 퇴적물의 재부유를 막기 위해 저층경계면에서 30~50cm 윗부분을 측정했다는 점에서 저층부의 DO 농도가 더 낮을 수 있다고 추정할 수 있다. 이는 이 시기에 퇴적층의 오염물질의 용출이 충분히 일어날 수 있으며, 이후 8~11월 동안 수계내 환란 및 순환에 의해 오염물질의 수중으로 이동하게 되고 수질을 악화시키는 원인으로 작용할 수 있음을 추론할 수 있다.

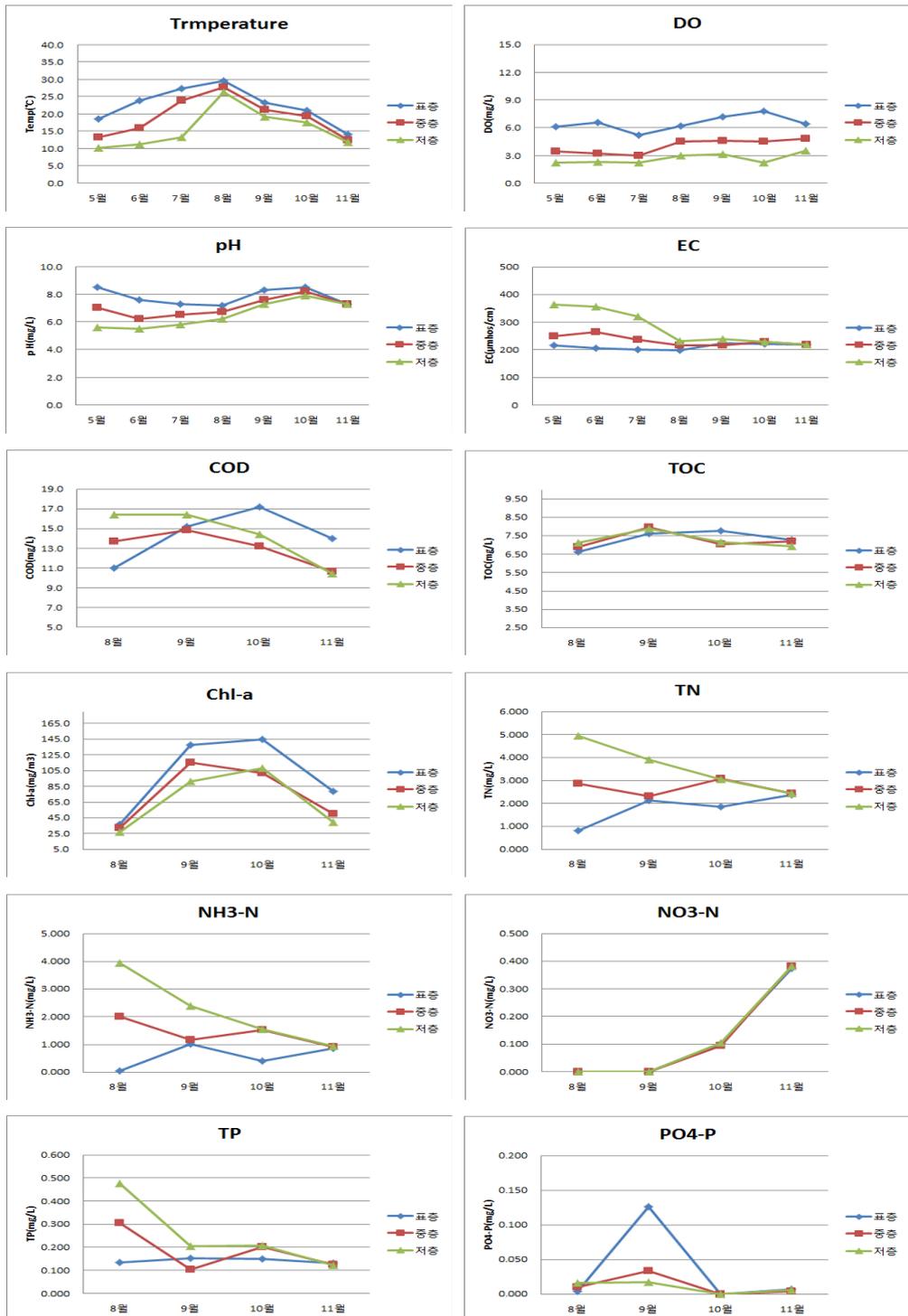
현장에서 두 저수지 모두 조류가 발생된 것을 확인할 수 있었으며, 이담저수지의 경우 8~9월경 수질중 COD농도가 급격하게 높아지고 녹조현상이 심화되어 충북지역본부에서는 일시적 조치로써 천연미생물 제제를 9~10월에 2회 정도 살포하였으며, 투입후 가압부상에 의해 스킴을 제거하였다. 이 결과 점차 수질오염이 완화되는 경향을 보였으나, 양호한 수질을 유지하는 것이 쉽지 않으므로 근본적인 대책이 필요할 것으로 판단된다.

(표 4.2-5) 축산계오염원 저수지 수질 조사 결과

| 조사 시기<br>(15.05~15.11)   |                           | 이담 저수지     |              |              | 공리 저수지     |            |              |
|--------------------------|---------------------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|
|                          |                           | 표층<br>(0m) | 중층<br>(1.2m) | 저층<br>(2.5m) | 표층<br>(0m) | 중층<br>(2m) | 저층<br>(4.5m) |
| 15.05<br>~<br>15.11      | 수온(℃)                     | 21.9       | 18.1         | 16.1         | 22.5       | 19.1       | 15.6         |
|                          | DO(mg/L)                  | 8.6        | 4.8          | 3.2          | 6.5        | 4.0        | 2.6          |
|                          | pH                        | 8.0        | 7.6          | 7.0          | 7.8        | 7.1        | 6.5          |
|                          | EC(μs/cm)                 | 262        | 281          | 308          | 212        | 233        | 280          |
| 15.08<br>~<br>15.11      | Chl-a(mg/m <sup>3</sup> ) | 58.3       | 58.1         | 51.1         | 99.8       | 75.0       | 66.8         |
|                          | SS(mg/L)                  | 19.8       | 27.0         | 40.9         | 17.4       | 25.5       | 38.3         |
|                          | COD(mg/L)                 | 13.6       | 14.3         | 14.2         | 14.4       | 13.1       | 14.4         |
|                          | TOC(mg/L)                 | 6.1        | 6.3          | 6.8          | 7.3        | 7.3        | 7.3          |
|                          | T-N(mg/L)                 | 0.964      | 1.085        | 1.155        | 1.805      | 2.685      | 3.587        |
|                          | NH <sub>3</sub> -N(mg/L)  | 0.099      | 0.145        | 0.165        | 0.589      | 1.402      | 2.211        |
|                          | NO <sub>3</sub> -N(mg/L)  | 0.164      | 0.170        | 0.158        | 0.119      | 0.119      | 0.122        |
|                          | NO <sub>2</sub> -N(mg/L)  | 0.006      | 0.005        | 0.006        | 0.060      | 0.065      | 0.062        |
|                          | T-P(mg/L)                 | 0.090      | 0.119        | 0.131        | 0.142      | 0.184      | 0.253        |
| PO <sub>4</sub> -P(mg/L) | 0.007                     | 0.009      | 0.009        | 0.034        | 0.012      | 0.010      |              |



<그림 4.2-3> 이담저수지의 수층별 수질 변화



<그림 4.2-4> 공리저수지의 수층별 수질 변화

나. 축산계오염원 저수지의 퇴적물 오염도 조사 결과

이담 저수지와 공리 저수지의 퇴적물에 대한 분석결과는 [표 49]에 제시하였다. 생활계와 마찬가지로 pH는 교환산도의 특성을 파악할 수 있도록 H<sub>2</sub>O와 KCl 용액을 이용하여 비교 평가하였다. 그 결과 이담과 공리의 pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>와 pH<sub>KCl</sub>의 값은 각각 6.7, 6.2 및 6.2, 5.6으로 나타났으며, 이담이 공리보다 약간 높은 수치를 보였고 공리에서 교환산도가 다소 큰 것으로 조사되었다. 또한 EC는 이담 저수지와 공리 저수지가 각각 517  $\mu$ s/cm, 189  $\mu$ s/cm의 값을 보여 이담 저수지가 약 2.7배정도 높은 것으로 조사되어 용출될 수 있는 이온성 물질이 상대적으로 많은 것을 알 수 있었다. 또한 유기물량을 간접적으로 나타내는 강열감량 및 COD에 있어서 두 저수지가 큰 차이를 보이지 않았다.

또한 중금속 분석 결과(표 4.2-7)에 대하여 국내의 퇴적물 오염평가기준, 토양오염우려기준 1지역 및 국외의 퇴적물 오염기준과 비교했을 때 배경농도 정도 수준이며 오염을 우려할 수준은 아닌 것으로 분석되었다.

두 저수지의 퇴적물 오염정도를 USEPA의 미국 오대호 담수퇴적물 오염분류를 위한 지역환경보호청의 기준과 비교해 볼 때, 강열감량은 이담 저수지와 공리저수지에서 심하게 오염된 것으로 나타났고, T-N과 T-P는 두 저수지 모두 퇴적물 오염평가기준을 초과하여 오염이 심각한 수준인 것으로 조사되었다. 환경부의 오염평가기준과 비교할 때 공리저수지는 강열감량, 총질소, 총인이 모두 기준을 초과하였으며, 이담저수지는 총인이 기준을 초과하는 것으로 조사되었다.

(표 4.2-6) 퇴적물 오염도 분석 결과

| 분석 항목           |                  | 이담 저수지 | 공리 저수지 |
|-----------------|------------------|--------|--------|
| pH              | KCl              | 6.2    | 5.6    |
|                 | H <sub>2</sub> O | 6.7    | 6.2    |
| EC( $\mu$ s/cm) |                  | 517    | 595    |
| 강열감량(%)         |                  | 11.4   | 13.8   |
| COD(mg/kg)      |                  | 56,849 | 58,852 |
| T-N(mg/kg)      |                  | 4,915  | 5,635  |
| T-P(mg/kg)      |                  | 1,613  | 1,978  |

(표 4.2-7) 퇴적물 중금속 분석 결과

| 중금속       | 이담 저수지 | 공리 저수지 |
|-----------|--------|--------|
| As(mg/kg) | 8.5    | 11.27  |
| Cd(mg/kg) | 0.97   | 0.53   |
| Cu(mg/kg) | 38.13  | 22.67  |
| Ni(mg/kg) | 57.6   | 16.37  |
| Pb(mg/kg) | 30.5   | 37.23  |
| Zn(mg/kg) | 100.5  | 100.90 |

(표 4.2-8) 퇴적물 입도분석 분석 결과

|       | 이담 저수지 | 공리 저수지 |
|-------|--------|--------|
| 모래(%) | 1.6    | 7.4    |
| 미사(%) | 67.4   | 61.6   |
| 점토(%) | 31.0   | 31.0   |
| 토성    | SiC    | SiC    |

### 3. 정밀조사 대상 저수지의 오염 현황('14 ~ '15)

#### 가. 정밀조사 대상 저수지의 수질 오염 현황

(표 4.2-1)는 오염원에 따른 정밀조사 대상 저수지의 수질 오염도 변화에 대한 현황 자료이며, 2014년부터 2015년까지(2년) 년4회 수질 결과이다. 본 자료는 농업용 수질측정망 결과를 활용하여 해당 저수지의 수질 오염도 특성을 분석하고, 수질 변화 경향을 분석한 그래프이다.

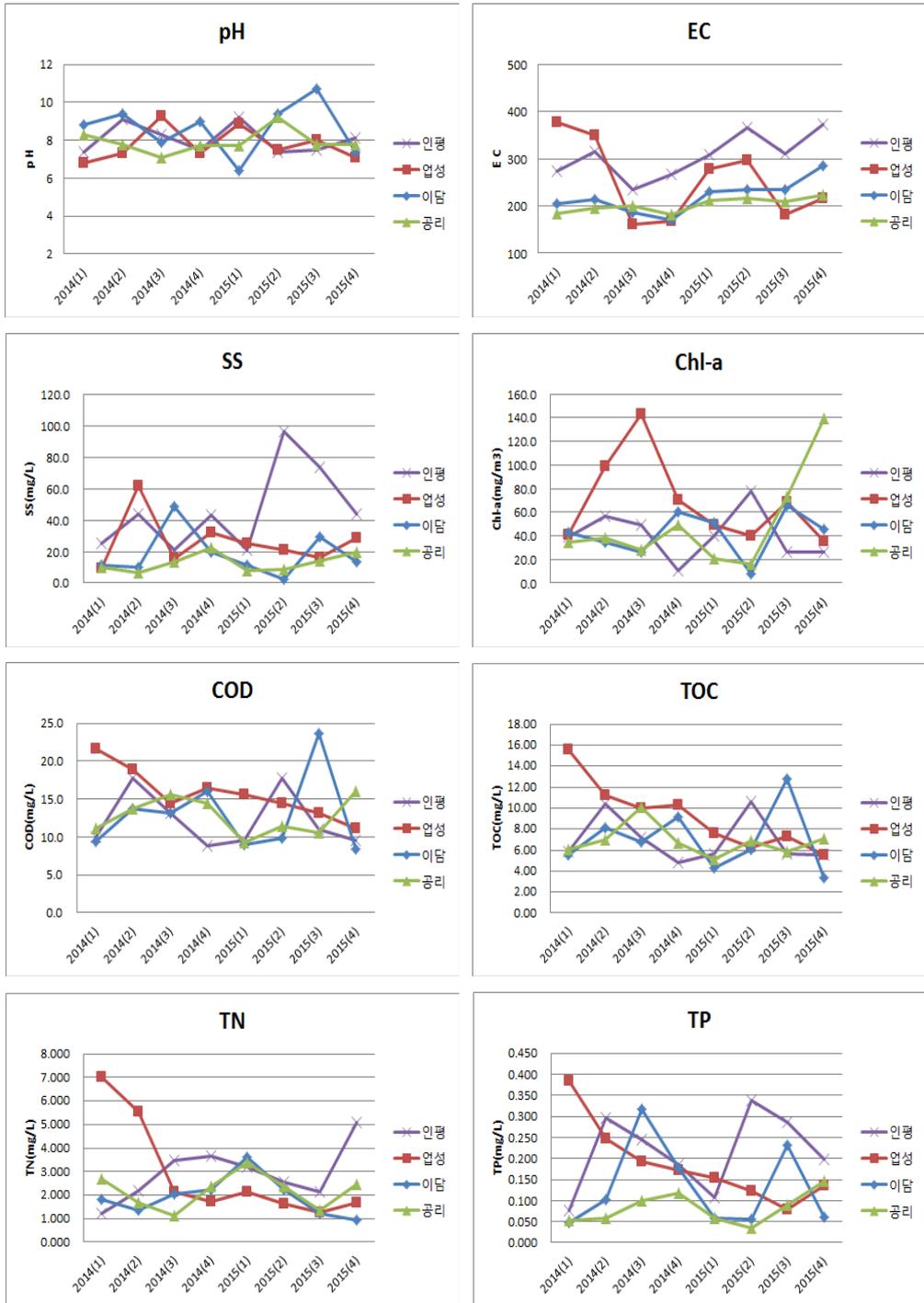
생활계 오염원으로 60년대 이전 설치된 인평저수지의 경우, 2014년과 2015년의 2차 조사시기에 수질이 악화되는 경향을 나타낸다. 5~6월 정도의 조사시기에 수계내 정체되어 있던 오염물질이 순환이 일어나고 그로 인한 수질의

오염심화 및 녹조 발생이 진행되며, 이는 수계의 부영양화를 심화시키는 결과를 가져오는 것으로 판단된다. 60년대 이후에 설치된 업성저수지의 경우 2014년부터 2015년에 이르기까지 전반적인 수질오염이 저감하는 경향을 나타내는데, 이는 제당부 및 유입오염원을 차단하기 위해 공사가 진행되면서 외부오염물질의 유입이 줄어들기 때문으로 추정되며, 15년 11월 말경 공사가 거의 완료되었다.

축산계 오염원으로 60년대 이전에 설치된 이담저수지는 2015년 3차 조사시기에 급격한 수질악화로 충북도본부의 응급대책이 시행되었다. 녹조발생으로 인한 악취와 수색의 변화에 대한 긴급오염 제어방법으로 천연응집제를 살포 후 부유시켜 수거하는 기술을 적용하였으며, 기술 적용이후 수질오염 농도가 저감되는 것을 확인하였다. 응집제 살포후 저수지의 퇴적물을 분석한 결과 오염의 변화는 크게 나타나지 않아, 수질악화로 시행된 긴급오염 제어기술이 퇴적물에는 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

(표 4.2-9) 정밀조사 대상 저수지의 수질 결과

| 조사 기간<br>(‘14~‘15)              | 생활계 오염원 |        | 축산계 오염원 |        |
|---------------------------------|---------|--------|---------|--------|
|                                 | 인평 저수지  | 업성 저수지 | 이담 저수지  | 공리 저수지 |
| pH                              | 8.1     | 7.9    | 8.5     | 8.1    |
| EC( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )   | 339     | 243    | 246     | 215    |
| Chl-a( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 42.6    | 48.3   | 42.5    | 62.5   |
| SS( $\text{mg}/\text{L}$ )      | 58.5    | 22.8   | 14.2    | 12.4   |
| COD( $\text{mg}/\text{L}$ )     | 12.0    | 13.6   | 12.7    | 11.8   |
| TOC( $\text{mg}/\text{L}$ )     | 6.85    | 6.67   | 6.62    | 6.2    |
| T-N( $\text{mg}/\text{L}$ )     | 3.257   | 1.687  | 2.001   | 2.399  |
| T-P( $\text{mg}/\text{L}$ )     | 0.232   | 0.123  | 0.102   | 0.083  |



<그림 4.2-5> 정밀조사 대상 저수지의 수질 오염도 변화('14 ~ '15)

나. 정밀조사 대상 저수지의 퇴적물중 중금속 오염 현황

본 연구 정밀조사 대상 지구에 대한 퇴적물 중 중금속 오염도 결과를 국내 기준과 비교하였다(표 4.2-9). 국내의 토양환경보전법 토양오염우려기준, 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 제2015-687호, 2015.11.16.) 과 정밀조사 대상 저수지의 중금속 오염도를 비교한 결과, 인평저수지와 공리저수지의 경우 퇴적물의 중금속 오염이 보통단계이며, 업성저수지와 이담저수지는 약간 나쁨 단계에 해당된다.

대부분의 항목에서 퇴적물 배경농도 수준의 농도를 나타냈으며, 업성저수지와 이담저수지의 경우 카드뮴과 니켈에서 보통단계 기준을 다소 초과하는 것으로 분석되었다.

국외의 오염퇴적물 기준은 (표 2.2-5)에 정리되어 있으며, 국내의 퇴적물 항목별 오염평가 기준은 (표 2.2-1)~(표 2.2-3)에서 확인할 수 있다.

(표 4.2-10) 정밀조사 대상 저수지의 퇴적물중 중금속 농도 비교

| 저수지명          | 비소<br>(mg/kg) | 구리<br>(mg/kg) | 카드뮴<br>(mg/kg) | 납<br>(mg/kg) | 아연<br>(mg/kg) | 니켈<br>(mg/kg) |
|---------------|---------------|---------------|----------------|--------------|---------------|---------------|
| 토양오염우려기준(1지역) | 25            | 150           | 4              | 200          | 300           | 100           |
| 호소퇴적물 오염평가기준  | 29            | 60            | 0.6            | 65           | 363           | 53            |
| 인 평           | 13.7          | 30.9          | 0.6            | 26.9         | 95.43         | 25.6          |
| 업 성           | 13.1          | 48.4          | 0.7            | 49.4         | 276.6         | 71.4          |
| 이 담           | 8.5           | 38.1          | 1.0            | 30.5         | 100.5         | 57.6          |
| 공 리           | 11.3          | 22.7          | 0.5            | 37.2         | 100.9         | 16.4          |

※ 보통단계 : 금속류 8 항목 모두 'I' 등급

약간 나쁨 단계 : 금속류 8 항목 중 'II' 등급 또는 'III' 등급 항목 1개 이상

나쁨 단계 : “금속류 'II' 등급 기준 지수” 0.34 이상

매우 나쁨 단계 : 'IV' 등급인 항목 1개 이상

### 3절. 퇴적물의 용출 특성에 대한 비교 분석

#### 1. 분석 목적 및 방법

농업용 저수지의 용출량을 산정하여 내부오염부하로 인한 수계에 미치는 영향을 평가하고자 실시하였다.

##### 가. 퇴적물에 의한 오염물질 용출량 산정 방법

저수지의 오염원으로는 주로 외부로부터 유입된 점오염원 및 비점오염원에 의한 영향만을 고려하기 쉬우나, 저수지와 같은 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많아 저부에서 슬러지 상태로 쌓이게 되고, 이렇게 퇴적된 오염물은 환경의 변화에 대응하며 수체에 영향을 미치기도 한다. 이러한 오염현상을 내부오염이라 하며 특히 퇴적물의 상태가 혐기상태인 경우 용출에 의한 내부오염은 가중되는 것으로 알려져 있다.

용출실험은 아크릴로 반응조를 제조하여 실시하고, 실험조건(환경조건)은 DO 조건 즉 호기성 및 혐기성 조건에 대하여 실험을 실시한다. 호기성 조건은 실험장치 내에 지속적으로 O<sub>2</sub>를 주입하여 DO 농도가 9~10 mg/L가 유지되도록 하고, 혐기조건은 실험장치내의 산소가 유입되지 않도록 밀봉 후, N<sub>2</sub> 가스를 계속 주입하여 조성한다. 이에 대한 실험 반응조 모식도 및 반응조 설계 모습을 <그림 4.3-1>에 나타내었다. 본 실험을 통하여 조사된 항목은 영양염류 물질로 COD, T-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, T-P, PO<sub>4</sub>-P이다.

$$\text{용출속도 (g N or P / m}^2\cdot\text{day)} = (\text{CA} - \text{CI}) \times \text{V} / (\text{T} \times \text{A})$$

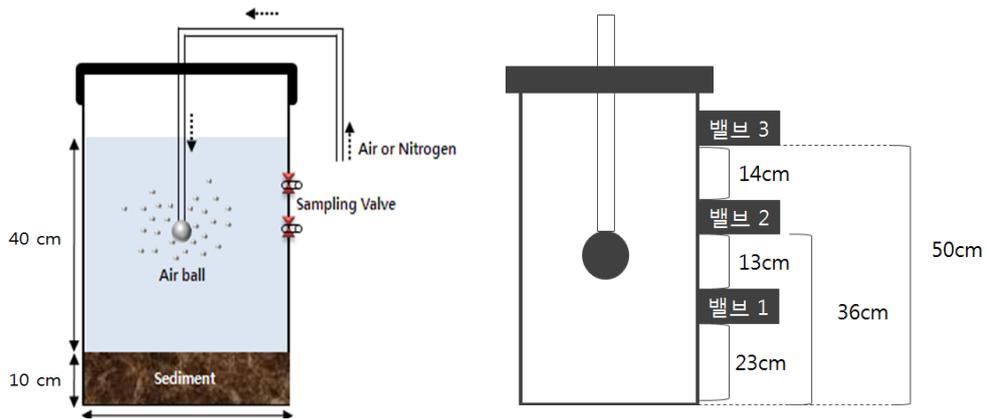
CI : 초기 N 및 P 계열의 초기농도 (g N or P / L)

CA : N과 P 계열의 나중 농도 (g N or P / L)

V : 반응조 내 현장수의 용량 (L)

T : 시간 (day)

A : 반응조의 면적 (m<sup>2</sup>)



<그림 4.3-1> 용출실험 반응조 모식도

나. 연구 대상저수지 퇴적물에 의한 용출량 실험 방법

연구 대상 저수지에서 채취한 퇴적물 시료에 대한 용출량 실험은 아크릴로 반응조를 제작하여 분석하였다. 실험 조건은 DO조건으로, 호기 조건과 혐기 조건, 아무런 조치를 취한지 않는 대조군 이 세 가지 조건으로 진행 하였으며 퇴적물과 대상 호소수를 투입한 후 정지한 모습을 <그림 4.3-2>에 제시하였다.

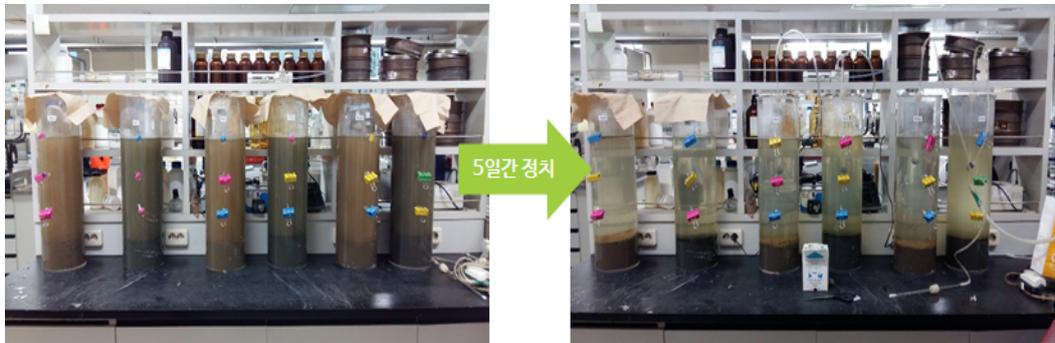


<그림 4.3-2> 저수지 용출량 실험 초기(정지 전)

시료는 보기와 같이 용출량 반응조에 넣어주는 과정에서 퇴적물 입자의 부상으 로 인해 혼탁한 모습을 띄고 있다. 이는 용출량 산정 시 방해요인으로 작용할 수 있으므로 입자성분이 충분히 다 가라앉을 때까지 정지를 시켰다. 특히 이번 연구 대상 저수지의 경우 미세 입자물질이 많아 정지한 후 안정화되는데 까지 비교적

많은 시간이 필요하였고 2 번의 실험 모두 총 5일 동안 시간이 소요되었다.

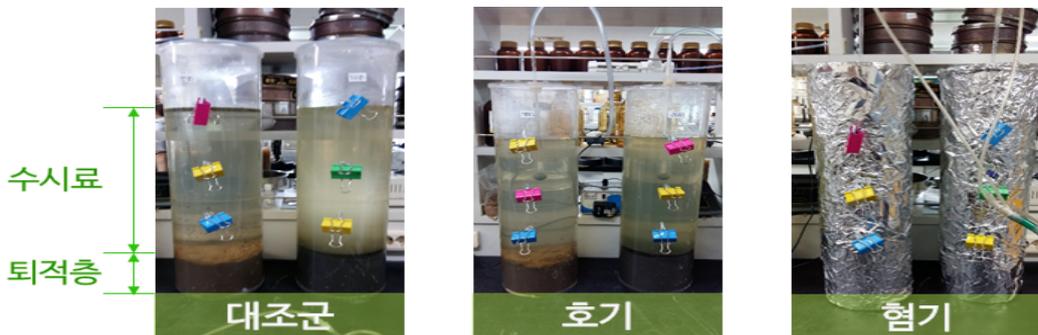
아래의 <그림 4.3-3>의 왼쪽 사진은 5일간 정치를 실시한 후 모습을 보여주고 있다. 초기의 오른쪽 사진과 비교하였을 때 확실히 수층의 입자성 물질이 거의 가라앉은 모습을 확인할 수 있다.



<그림 4.3-3> 저수지 용출량 시료의 정치

이렇게 정치시킨 상태에서 조건에 따른 차이를 주어 실험을 시작하였으며, 각 반응조의 실험 시작 전 0일차 모습은 <그림 4.3-4>에 제시하였다. 퇴적층 두께는 10 cm이고 수시료 층은 50 cm로 동일하게 설정하여 주었다. 대조군은 아무런 장치 없이 뚜껑을 덮은 상태를 유지해 주었고, 호기 조건에서는 폭기장치를 이용하여 지속적으로 폭기를 해주었다.

그리고 혐기 조건은 환원 조건을 유지해주기 위해 은박지로 감싸 암실조건을 유지하였고 산소의 유입을 방지하기 위해 질소를 주입하였다. 실험기간은 2주로 매일 500 mL의 시료를 채취하여 분석에 사용하였다.



<그림 4.3-4> 용출량 실험 조건별 반응조

## 2. 생활계 오염원 저수지의 조건/항목별 용출실험 결과

### 가. 생활계오염원 저수지 조건별/항목별 용출 실험 조건

용출 실험에 사용한 퇴적물과 수 시료는 인평과 업성 저수지 모두 2015년 7월 28일에 채취한 시료를 사용하였으며, 용출 실험을 위한 평균적 실험환경 유지조건은 조건별/항목별로 다음과 같다.

(표 4.3-1) 생활계오염원 저수지 용출 실험 조건

| 저수지 | 조건  | 수온<br>(℃) | EC<br>( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) | DO<br>(mg/L) | pH  |
|-----|-----|-----------|-----------------------------------|--------------|-----|
| 인평  | 대조군 | 25.1      | 379.2                             | 2.6          | 7.5 |
|     | 호기  | 25.0      | 353.2                             | 5.9          | 7.9 |
|     | 혐기  | 23.9      | 344.5                             | 2.1          | 9.1 |
| 업성  | 대조군 | 25.1      | 244.9                             | 2.2          | 7.3 |
|     | 호기  | 24.8      | 238.3                             | 6.1          | 8.0 |
|     | 혐기  | 23.7      | 228.3                             | 1.9          | 8.8 |

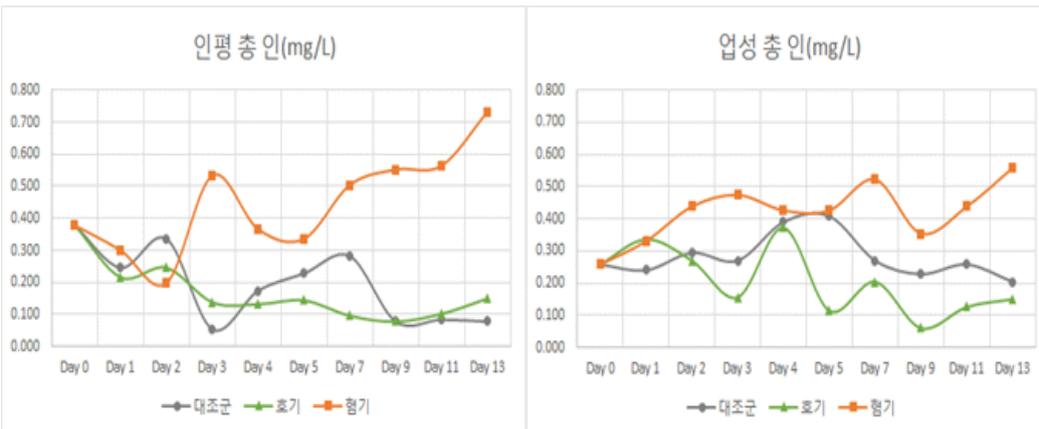
### 나. 생활계오염원 저수지 조건별/항목별 용출 실험 결과

인평 저수지와 업성 저수지의 퇴적물 용출 실험결과는 (표 4.3-2)와 (표 4.3-3)와 같으며, 농도 변화 그래프를 아래 <그림 4.3-5>에 나타내었다. 조건별/항목별 농도변화를 보면 COD의 경우, 혐기성 상태에서 COD의 농도가 대체로 증가하는 경향을 보였다. T-N은 인평 저수지의 경우 호기와 혐기 조건에서 모두 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 업성 저수지의 경우에는 호기와 혐기 조건에서 유사한 변화를 보여 2일차까지는 농도가 증가하다가 이후 농도가 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. T-P는 인평과 업성에서 모두 혐기 조건에서 농도가 증가하는 경향을 보였다. 다만 인평의 혐기 조건에서는 실험 시작 후 2일 동안은 농도가 감소하는 경향을 보이다가 이후 농도가 크게 증가하는 경향을 보인다.  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 경우, 인평과 업성 모두 호기 조건에서는 4일차까지 농도가 증가하다가 이후 크게 감소하는 경향을 보였으며, 혐기에서는 인평에서는 7일차 이후 농도가 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 인평의 경우, 호기에서는 Day 5 이전에는 호기와 혐기 모두 큰 변화가 없었으며 그 이후

에는 호기에서는 질산성 질소의 농도가 4배가량 증가하였고 혐기의 경우는 다 소 감소 경향을 보였다. 업성의 경우는 호기와 혐기 모두 Day 4까지 큰 변화가 없었으며, 그 이후 혐기는 감소가 일어나 농도가 0에 가까워지는 경향을 보였다. PO<sub>4</sub>-P의 농도는 인평의 경우, 혐기에서 용출로 인해 점진적으로 농도가 증가해 처음보다 약 9배 증가하였고 인평과 마찬가지로 업성에서도 혐기에서는 용출이 일어나 농도가 약 3.6 배까지 점진적으로 증가하였다.

(표 4.3-2) 시간별 생활계오염원 저수지의 용출농도(COD, T-N, T-P)

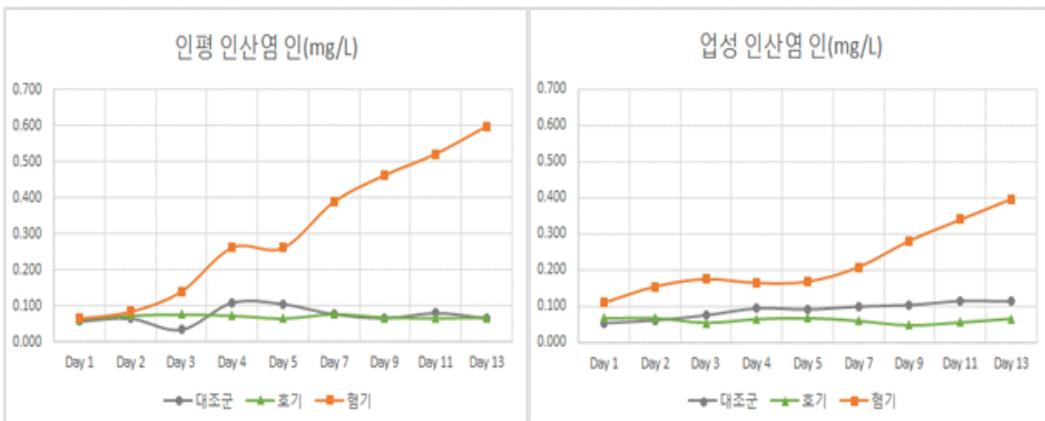
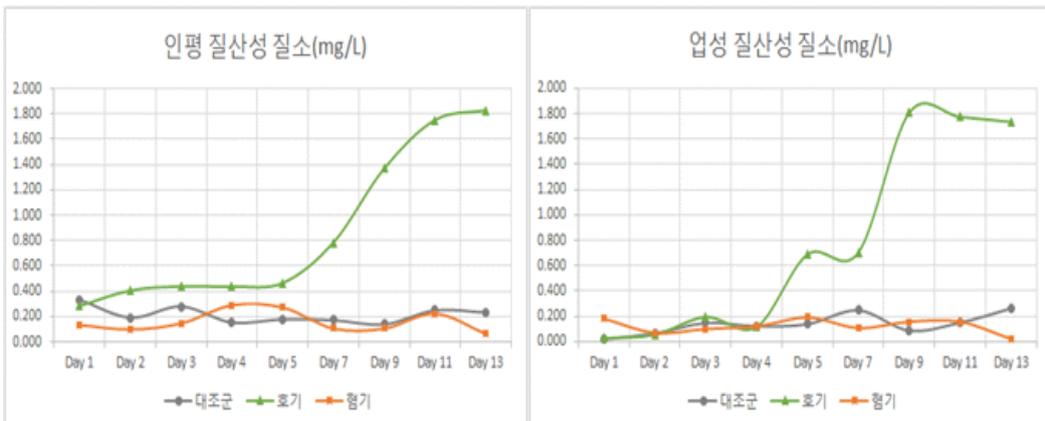
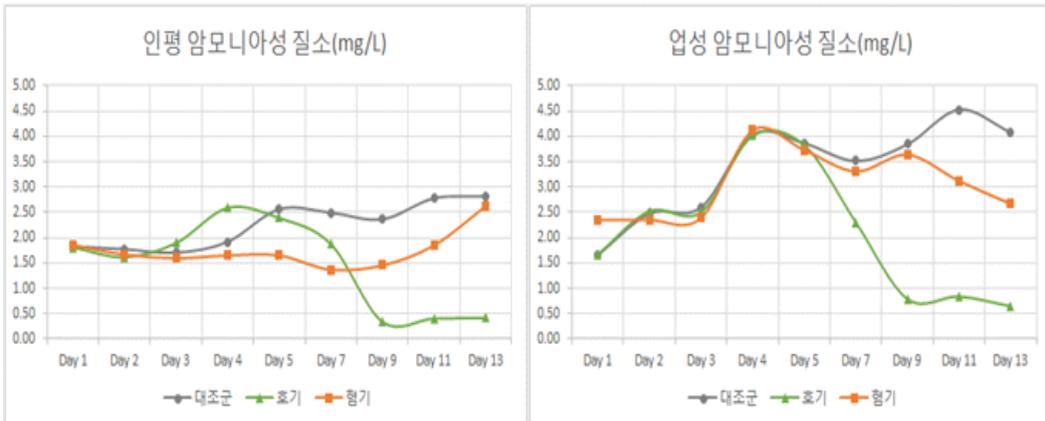
| 구분  | 시간<br>간격 | COD (mg/L) |     | T-N (mg/L) |      | T-P (mg/L) |       |
|-----|----------|------------|-----|------------|------|------------|-------|
|     |          | 인평         | 업성  | 인평         | 업성   | 인평         | 업성    |
| 대조군 | 0        | 7.6        | 9.6 | 4.75       | 4.56 | 0.246      | 0.240 |
|     | 1        | 5.6        | 8.0 | 5.30       | 3.44 | 0.336      | 0.294 |
|     | 2        | 2.8        | 5.2 | 6.71       | 7.31 | 0.054      | 0.270 |
|     | 3        | 8.4        | 7.2 | 3.58       | 9.31 | 0.174      | 0.390 |
|     | 4        | 5.6        | 8.0 | 4.69       | 7.10 | 0.228      | 0.408 |
|     | 6        | 7.6        | 8.4 | 4.16       | 6.80 | 0.282      | 0.270 |
|     | 8        | 6.8        | 8.0 | 3.70       | 6.68 | 0.078      | 0.228 |
|     | 10       | 6.8        | 8.0 | 5.26       | 5.56 | 0.084      | 0.258 |
|     | 12       | 5.2        | 6.8 | 4.68       | 4.43 | 0.078      | 0.204 |
| 호기  | 0        | 7.6        | 8.4 | 4.97       | 6.22 | 0.216      | 0.336 |
|     | 1        | 5.6        | 8.8 | 3.52       | 8.01 | 0.246      | 0.270 |
|     | 2        | 5.6        | 6.4 | 6.31       | 6.86 | 0.138      | 0.156 |
|     | 3        | 5.6        | 6.4 | 3.89       | 6.11 | 0.132      | 0.372 |
|     | 4        | 9.2        | 5.6 | 6.61       | 6.73 | 0.144      | 0.114 |
|     | 6        | 8.4        | 5.2 | 3.97       | 4.37 | 0.096      | 0.204 |
|     | 8        | 9.6        | 6.4 | 4.65       | 5.08 | 0.078      | 0.060 |
|     | 10       | 7.6        | 4.8 | 4.39       | 3.71 | 0.102      | 0.126 |
|     | 12       | 5.6        | 6.4 | 4.56       | 5.97 | 0.150      | 0.150 |
| 혐기  | 0        | 6.4        | 6.0 | 5.07       | 4.90 | 0.300      | 0.330 |
|     | 1        | 6.8        | 6.0 | 4.48       | 6.49 | 0.198      | 0.438 |
|     | 2        | 6.8        | 6.4 | 4.18       | 5.59 | 0.534      | 0.474 |
|     | 3        | 7.6        | 8.0 | 5.87       | 5.72 | 0.366      | 0.426 |
|     | 4        | 7.2        | 8.0 | 4.37       | 6.53 | 0.336      | 0.426 |
|     | 6        | 7.6        | 8.4 | 2.96       | 4.24 | 0.504      | 0.522 |
|     | 8        | 9.6        | 8.8 | 3.98       | 4.26 | 0.552      | 0.354 |
|     | 10       | 9.6        | 8.0 | 3.70       | 3.77 | 0.564      | 0.438 |
|     | 12       | 9.2        | 7.6 | 4.42       | 3.92 | 0.732      | 0.558 |



<그림 4.3-5> 시간에 따른 생활계오염원 저수지의 용출실험 결과(COD, T-N, T-P)

(표 4.3-3) 시간별 생활계오염원 저수지 용출농도(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P)

| 구분  | 시간<br>간격 | NH <sub>4</sub> -N (mg/L) |      | NO <sub>3</sub> -N (mg/L) |       | PO <sub>4</sub> -P (mg/L) |       |
|-----|----------|---------------------------|------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
|     |          | 인평                        | 업성   | 인평                        | 업성    | 인평                        | 업성    |
| 대조군 | 0        | 1.83                      | 1.66 | 0.334                     | 0.018 | 0.057                     | 0.053 |
|     | 1        | 1.78                      | 2.48 | 0.192                     | 0.065 | 0.065                     | 0.061 |
|     | 2        | 1.71                      | 2.60 | 0.280                     | 0.147 | 0.034                     | 0.075 |
|     | 3        | 1.92                      | 4.04 | 0.153                     | 0.122 | 0.109                     | 0.094 |
|     | 4        | 2.57                      | 3.87 | 0.179                     | 0.138 | 0.105                     | 0.091 |
|     | 6        | 2.50                      | 3.52 | 0.171                     | 0.247 | 0.077                     | 0.099 |
|     | 8        | 2.37                      | 3.85 | 0.139                     | 0.087 | 0.066                     | 0.103 |
|     | 10       | 2.78                      | 4.53 | 0.249                     | 0.150 | 0.080                     | 0.114 |
|     | 12       | 2.82                      | 4.08 | 0.232                     | 0.262 | 0.066                     | 0.113 |
| 호기  | 0        | 1.81                      | 1.67 | 0.284                     | 0.026 | 0.063                     | 0.066 |
|     | 1        | 1.62                      | 2.53 | 0.406                     | 0.054 | 0.073                     | 0.067 |
|     | 2        | 1.90                      | 2.51 | 0.439                     | 0.194 | 0.076                     | 0.054 |
|     | 3        | 2.59                      | 4.01 | 0.437                     | 0.116 | 0.073                     | 0.064 |
|     | 4        | 2.39                      | 3.83 | 0.466                     | 0.689 | 0.065                     | 0.067 |
|     | 6        | 1.88                      | 2.31 | 0.786                     | 0.704 | 0.077                     | 0.059 |
|     | 8        | 0.34                      | 0.79 | 1.372                     | 1.809 | 0.068                     | 0.047 |
|     | 10       | 0.41                      | 0.84 | 1.753                     | 1.775 | 0.066                     | 0.055 |
|     | 12       | 0.42                      | 0.65 | 1.830                     | 1.735 | 0.067                     | 0.065 |
| 혐기  | 0        | 1.86                      | 2.36 | 0.133                     | 0.182 | 0.065                     | 0.110 |
|     | 1        | 1.67                      | 2.35 | 0.099                     | 0.069 | 0.084                     | 0.154 |
|     | 2        | 1.60                      | 2.39 | 0.146                     | 0.100 | 0.140                     | 0.175 |
|     | 3        | 1.65                      | 4.12 | 0.290                     | 0.120 | 0.262                     | 0.164 |
|     | 4        | 1.65                      | 3.73 | 0.272                     | 0.191 | 0.261                     | 0.168 |
|     | 6        | 1.37                      | 3.31 | 0.105                     | 0.108 | 0.389                     | 0.208 |
|     | 8        | 1.46                      | 3.64 | 0.105                     | 0.157 | 0.463                     | 0.281 |
|     | 10       | 1.85                      | 3.12 | 0.223                     | 0.157 | 0.522                     | 0.339 |
|     | 12       | 2.63                      | 2.67 | 0.064                     | 0.021 | 0.599                     | 0.396 |



<그림 4.3-6> 시간에 따른 생활계오염원 저수지의 용출실험 결과  
(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P)

다. 생활계오염원 저수지 용출속도 분석 결과

퇴적물의 용출속도 실험결과를 다음의 (표 4.3-5)에 나타내었고 평균 용출속도는 아래의 (표 4.3-4)에 나타내었다. 인평과 업성 모두 호기 조건에서는 COD, T-N, T-P의 용출이 없었으며, 혐기 조건에서는 COD와 T-P의 용출이 일어났다. T-N의 경우는 혐기 조건에서도 용출이 없었다. 혐기 조건에서 COD의 용출 속도는 평균적으로 인평저수지에서 176 mg/m<sup>2</sup>·day, 업성저수지에서 52.4 mg/m<sup>2</sup>·day로 업성 보다 인평에서 3.4배 빠르게 용출이 일어났고, T-P의 경우 또한 인평에서 26.7 mg/m<sup>2</sup>·day, 업성에서 14.0 mg/m<sup>2</sup>·day로 인평에서의 용출 속도가 업성 보다 약 2배가량 빠르게 일어났다. 이온성물질의 경우, NH<sub>4</sub>-N은 혐기 조건에서만 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 호기에서는 용출이 일어나지 않았다.

NO<sub>3</sub>-N은 이와 반대로 호기 조건에서만 농도 증가가 관찰되었으며, 혐기에서는 용출이 일어나지 않았다. PO<sub>4</sub>-P는 인평 저수지에서는 모든 조건에서 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 호기<대조군<혐기 순으로 용출 속도가 큰 것으로 조사되었다. 업성의 경우, PO<sub>4</sub>-P는 호기 조건에서는 용출이 없었고, 대조군과 혐기 조건에서 농도가 증가하는 경향을 나타냈고 용출속도는 혐기조건에서 더 빠른 것으로 조사되었다. 전체적으로 인평과 업성 저수지는 호기 조건에서 용출이 대부분 일어나지 않았으며, 혐기 조건에서 인평 저수지가 업성 저수지에 비해 용출 속도가 더 큰 경향을 보였다. 단, 용출속도가 음의 값을 갖는 경우에는 용출이 일어나지 않는 것이므로 N.D로 표기하였으며, 평균값 산출 시에는 양, 음의 값을 고려하였다. <그림 4.3-7>에서는 양, 음을 비교하기 쉽게 표기하기 위하여 음의 값도 그래프로 나타내었다.

(표 4.3-4) 생활계오염원 저수지 평균 용출 속도(mg/m<sup>2</sup>·day)

| 구분                 | 인평저수지 |      |      | 업성저수지 |     |      |
|--------------------|-------|------|------|-------|-----|------|
|                    | 대조군   | 호기   | 혐기   | 대조군   | 호기  | 혐기   |
| COD                | 126   | N.D  | 176  | N.D   | N.D | 52.4 |
| T-N                | N.D   | N.D  | N.D  | N.D   | N.D | N.D  |
| T-P                | N.D   | N.D  | 26.7 | N.D   | N.D | 14.0 |
| NH <sub>4</sub> -N | 61.5  | N.D  | 46.6 | 152.0 | N.D | 20.6 |
| NO <sub>3</sub> -N | N.D   | 96.5 | N.D  | 15.0  | 107 | N.D  |
| PO <sub>4</sub> -P | 0.59  | 0.25 | 33.2 | 3.75  | N.D | 17.8 |

※ 용출속도가 음의 값을 갖는 경우에는 용출이 일어나지 않는 것이므로 N.D로 표기함

(표 4.3-5) 생활계오염원 저수지 COD 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 인평 저수지        |                                  | 업성 저수지        |                                  |
|-----|----------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|
|     |          | COD<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) | COD<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 5.6           | -                                | 7.6           | -                                |
|     | 1        | 6.0           | 200                              | 5.6           | N.D                              |
|     | 2        | 6.4           | 200                              | 5.6           | 0                                |
|     | 3        | 8.0           | 800                              | 5.6           | 0                                |
|     | 4        | 8.0           | 0                                | 9.2           | 1,800                            |
|     | 6        | 8.4           | 200                              | 8.4           | N.D                              |
|     | 8        | 8.8           | 200                              | 9.6           | 600                              |
|     | 10       | 8.0           | N.D                              | 7.6           | N.D                              |
|     | 12       | 7.6           | N.D                              | 5.6           | N.D                              |
|     | Average  | -             | 125.8                            | -             | N.D                              |
| 호기  | 0        | 10.0          | -                                | 7.6           | -                                |
|     | 1        | 8.8           | N.D                              | 5.6           | N.D                              |
|     | 2        | 6.4           | N.D                              | 6.4           | 400                              |
|     | 3        | 6.4           | 0                                | 6.8           | 200                              |
|     | 4        | 8.0           | 800                              | 5.6           | N.D                              |
|     | 6        | 7.2           | N.D                              | 5.2           | N.D                              |
|     | 8        | 6.4           | N.D                              | 6.8           | 800                              |
|     | 10       | 8.8           | 1,200                            | 6.8           | 0                                |
|     | 12       | 6.4           | N.D                              | 5.2           | N.D                              |
|     | Average  | -             | N.D                              | -             | N.D                              |
| 혐기  | 0        | 6.4           | -                                | 6.0           | -                                |
|     | 1        | 6.8           | 200                              | 6.8           | 400                              |
|     | 2        | 6.8           | 0                                | 5.2           | N.D                              |
|     | 3        | 7.6           | 400                              | 7.2           | 1,000                            |
|     | 4        | 7.2           | N.D                              | 8.0           | 400                              |
|     | 6        | 7.6           | 200                              | 8.4           | 200                              |
|     | 8        | 9.6           | 1,000                            | 8.0           | N.D                              |
|     | 10       | 9.6           | 0                                | 8.0           | 0                                |
|     | 12       | 9.2           | N.D                              | 6.8           | N.D                              |
|     | Average  | -             | 175.8                            | -             | 52.4                             |

(표 4.3-6) 생활계오염원 저수지 T-N 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 인평 저수지        |                                  | 업성 저수지        |                                  |
|-----|----------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|
|     |          | T-N<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) | T-N<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 4.75          | -                                | 4.56          | -                                |
|     | 1        | 5.30          | 276                              | 3.44          | N.D                              |
|     | 2        | 6.71          | 705                              | 7.31          | 1,935                            |
|     | 3        | 3.58          | N.D                              | 9.31          | 1,002                            |
|     | 4        | 4.69          | 552                              | 7.10          | N.D                              |
|     | 6        | 4.16          | N.D                              | 6.80          | N.D                              |
|     | 8        | 3.70          | N.D                              | 6.68          | N.D                              |
|     | 10       | 5.26          | 780                              | 5.56          | N.D                              |
|     | 12       | 4.68          | N.D                              | 4.43          | N.D                              |
|     | Average  | -             | N.D                              | -             | N.D                              |
| 호기  | 0        | 4.97          | -                                | 6.22          | -                                |
|     | 1        | 3.52          | N.D                              | 8.01          | 897                              |
|     | 2        | 6.31          | 1,395                            | 6.86          | N.D                              |
|     | 3        | 3.89          | N.D                              | 6.11          | N.D                              |
|     | 4        | 6.61          | 1,356                            | 6.73          | 312                              |
|     | 6        | 3.97          | N.D                              | 4.37          | N.D                              |
|     | 8        | 4.65          | 342                              | 5.08          | 351                              |
|     | 10       | 4.39          | N.D                              | 3.71          | N.D                              |
|     | 12       | 4.56          | 84.2                             | 5.97          | 1,095.0                          |
|     | Average  | -             | N.D                              | -             | N.D                              |
| 혐기  | 0        | 5.07          | -                                | 4.90          | -                                |
|     | 1        | 4.48          | N.D                              | 6.49          | 792                              |
|     | 2        | 4.18          | N.D                              | 5.59          | N.D                              |
|     | 3        | 5.87          | 849                              | 5.72          | 66                               |
|     | 4        | 4.37          | N.D                              | 6.53          | 405                              |
|     | 6        | 2.96          | N.D                              | 4.24          | N.D                              |
|     | 8        | 3.98          | 513                              | 4.26          | 12                               |
|     | 10       | 3.70          | N.D                              | 3.77          | N.D                              |
|     | 12       | 4.42          | 348.5                            | 3.92          | 72.6                             |
|     | Average  | -             | N.D                              | -             | N.D                              |

(표 4.3-7) 생활계오염원 저수지 T-P 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 인평 저수지        |                                  | 업성 저수지        |                                  |
|-----|----------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|
|     |          | T-P<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) | T-P<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 0.246         | -                                | 0.240         | -                                |
|     | 1        | 0.336         | 45                               | 0.294         | 27                               |
|     | 2        | 0.054         | N.D                              | 0.270         | N.D                              |
|     | 3        | 0.174         | 60                               | 0.390         | 60                               |
|     | 4        | 0.228         | 27                               | 0.408         | 9                                |
|     | 6        | 0.282         | 27                               | 0.270         | N.D                              |
|     | 8        | 0.078         | N.D                              | 0.228         | N.D                              |
|     | 10       | 0.084         | 3                                | 0.258         | 15                               |
|     | 12       | 0.078         | N.D                              | 0.204         | N.D                              |
|     | Average  | -             | N.D                              | -             | N.D                              |
| 호기  | 0        | 0.216         | -                                | 0.336         | -                                |
|     | 1        | 0.246         | 15                               | 0.270         | N.D                              |
|     | 2        | 0.138         | N.D                              | 0.156         | N.D                              |
|     | 3        | 0.132         | N.D                              | 0.372         | 108                              |
|     | 4        | 0.144         | 6                                | 0.114         | N.D                              |
|     | 6        | 0.096         | N.D                              | 0.204         | 45                               |
|     | 8        | 0.078         | N.D                              | 0.060         | N.D                              |
|     | 10       | 0.102         | 12                               | 0.126         | 33                               |
|     | 12       | 0.150         | 23.2                             | 0.150         | 11.6                             |
|     | Average  | -             | N.D                              | -             | N.D                              |
| 혐기  | 0        | 0.300         | -                                | 0.330         | -                                |
|     | 1        | 0.198         | N.D                              | 0.438         | 54                               |
|     | 2        | 0.534         | 168                              | 0.474         | 18                               |
|     | 3        | 0.366         | N.D                              | 0.426         | N.D                              |
|     | 4        | 0.336         | N.D                              | 0.426         | 0                                |
|     | 6        | 0.504         | 84                               | 0.522         | 48                               |
|     | 8        | 0.552         | 24                               | 0.354         | N.D                              |
|     | 10       | 0.564         | 6                                | 0.438         | 42                               |
|     | 12       | 0.732         | 81.3                             | 0.558         | 58.1                             |
|     | Average  | -             | 26.7                             | -             | 14.0                             |

(표 4.3-8) 생활계오염원 저수지 NH<sub>4</sub>-N 용출속도

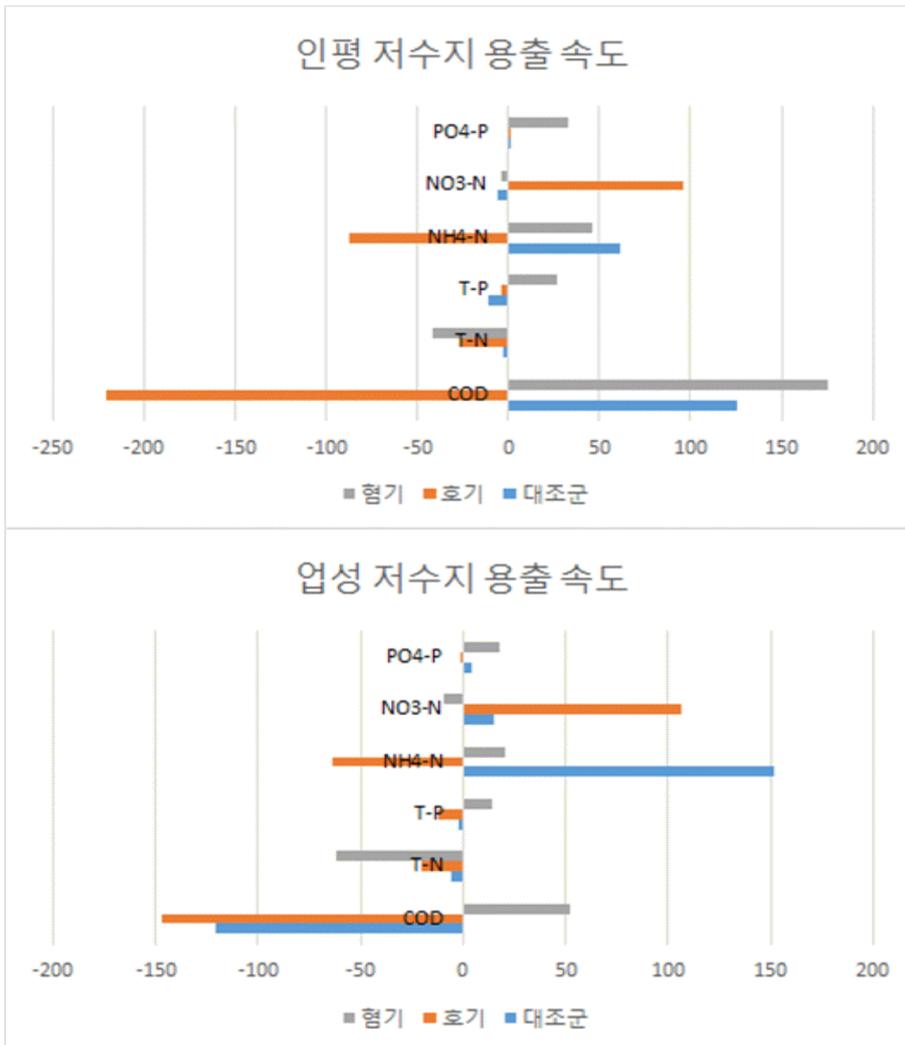
| 구분  | 시간<br>간격 | 인평 저수지                       |                                  | 업성 저수지                       |                                  |
|-----|----------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|     |          | NH <sub>4</sub> -N<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) | NH <sub>4</sub> -N<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 1.83                         | -                                | 1.66                         | -                                |
|     | 1        | 1.78                         | N.D                              | 2.48                         | 408                              |
|     | 2        | 1.71                         | N.D                              | 2.60                         | 63                               |
|     | 3        | 1.92                         | 108                              | 4.04                         | 718                              |
|     | 4        | 2.57                         | 323                              | 3.87                         | N.D                              |
|     | 6        | 2.50                         | N.D                              | 3.52                         | N.D                              |
|     | 8        | 2.37                         | N.D                              | 3.85                         | 165                              |
|     | 10       | 2.78                         | 208                              | 4.53                         | 343                              |
|     | 12       | 2.82                         | 16.9                             | 4.08                         | N.D                              |
|     | Average  | -                            | 61.5                             | -                            | 152.1                            |
| 호기  | 0        | 1.81                         | -                                | 1.67                         | -                                |
|     | 1        | 1.62                         | N.D                              | 2.53                         | 428                              |
|     | 2        | 1.90                         | 140                              | 2.51                         | N.D                              |
|     | 3        | 2.59                         | 348                              | 4.01                         | 753                              |
|     | 4        | 2.39                         | N.D                              | 3.83                         | N.D                              |
|     | 6        | 1.88                         | N.D                              | 2.31                         | N.D                              |
|     | 8        | 0.34                         | N.D                              | 0.79                         | N.D                              |
|     | 10       | 0.41                         | 33                               | 0.84                         | 25                               |
|     | 12       | 0.42                         | 4.8                              | 0.65                         | N.D                              |
|     | Average  | -                            | N.D                              | -                            | N.D                              |
| 혐기  | 0        | 1.86                         | -                                | 2.36                         | -                                |
|     | 1        | 1.67                         | N.D                              | 2.35                         | N.D                              |
|     | 2        | 1.60                         | N.D                              | 2.39                         | 20                               |
|     | 3        | 1.65                         | 28                               | 4.12                         | 865                              |
|     | 4        | 1.65                         | 0                                | 3.73                         | N.D                              |
|     | 6        | 1.37                         | N.D                              | 3.31                         | N.D                              |
|     | 8        | 1.46                         | 42                               | 3.64                         | 165                              |
|     | 10       | 1.85                         | 198                              | 3.12                         | N.D                              |
|     | 12       | 2.63                         | 375.2                            | 2.67                         | N.D                              |
|     | Average  | -                            | 46.6                             | -                            | 20.6                             |

(표 4.3-9) 생활계오염원 저수지 NO<sub>3</sub>-N 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 인평 저수지                       |                                  | 업성 저수지                       |                                  |
|-----|----------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|     |          | NO <sub>3</sub> -N<br>(mg/ℓ) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) | NO <sub>3</sub> -N<br>(mg/ℓ) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 0.334                        | -                                | 0.018                        | -                                |
|     | 1        | 0.192                        | N.D                              | 0.065                        | 24                               |
|     | 2        | 0.280                        | 44                               | 0.147                        | 41                               |
|     | 3        | 0.153                        | N.D                              | 0.122                        | N.D                              |
|     | 4        | 0.179                        | 13                               | 0.138                        | 8                                |
|     | 6        | 0.171                        | N.D                              | 0.247                        | 55                               |
|     | 8        | 0.139                        | N.D                              | 0.087                        | N.D                              |
|     | 10       | 0.249                        | 55                               | 0.150                        | 32                               |
|     | 12       | 0.232                        | N.D                              | 0.262                        | 54.2                             |
|     | Average  | -                            | N.D                              | -                            | 15.0                             |
| 호기  | 0        | 0.284                        | -                                | 0.026                        | -                                |
|     | 1        | 0.406                        | 61                               | 0.054                        | 14                               |
|     | 2        | 0.439                        | 17                               | 0.194                        | 70                               |
|     | 3        | 0.437                        | N.D                              | 0.116                        | N.D                              |
|     | 4        | 0.466                        | 15                               | 0.689                        | 287                              |
|     | 6        | 0.786                        | 160                              | 0.704                        | 8                                |
|     | 8        | 1.372                        | 293                              | 1.809                        | 553                              |
|     | 10       | 1.753                        | 191                              | 1.775                        | N.D                              |
|     | 12       | 1.830                        | 37.3                             | 1.735                        | N.D                              |
|     | Average  | -                            | 96.5                             | -                            | 106.9                            |
| 혐기  | 0        | 0.133                        | -                                | 0.182                        | -                                |
|     | 1        | 0.099                        | N.D                              | 0.069                        | N.D                              |
|     | 2        | 0.146                        | 24                               | 0.100                        | 16                               |
|     | 3        | 0.290                        | 72                               | 0.120                        | 10                               |
|     | 4        | 0.272                        | N.D                              | 0.191                        | 36                               |
|     | 6        | 0.105                        | N.D                              | 0.108                        | N.D                              |
|     | 8        | 0.105                        | 0                                | 0.157                        | 25                               |
|     | 10       | 0.223                        | 59                               | 0.157                        | 0                                |
|     | 12       | 0.064                        | N.D                              | 0.021                        | N.D                              |
|     | Average  | -                            | N.D                              | -                            | N.D                              |

(표 4.3-10) 생활계오염원 저수지 PO<sub>4</sub>-P 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 인평 저수지                       |                                  | 업성 저수지                       |                                  |
|-----|----------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|     |          | PO <sub>4</sub> -P<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) | PO <sub>4</sub> -P<br>(mg/L) | 용출속도<br>(mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 0.057                        | -                                | 0.053                        | -                                |
|     | 1        | 0.065                        | 4                                | 0.061                        | 4                                |
|     | 2        | 0.034                        | N.D                              | 0.075                        | 7                                |
|     | 3        | 0.109                        | 38                               | 0.094                        | 10                               |
|     | 4        | 0.105                        | N.D                              | 0.091                        | N.D                              |
|     | 6        | 0.077                        | N.D                              | 0.099                        | 4                                |
|     | 8        | 0.066                        | N.D                              | 0.103                        | 2                                |
|     | 10       | 0.080                        | 7                                | 0.114                        | 6                                |
|     | 12       | 0.066                        | N.D                              | 0.113                        | N.D                              |
|     | Average  | -                            | 0.6                              | -                            | 3.8                              |
| 호기  | 0        | 0.063                        | -                                | 0.066                        | -                                |
|     | 1        | 0.073                        | 5                                | 0.067                        | 1                                |
|     | 2        | 0.076                        | 2                                | 0.054                        | N.D                              |
|     | 3        | 0.073                        | N.D                              | 0.064                        | 5                                |
|     | 4        | 0.065                        | N.D                              | 0.067                        | 2                                |
|     | 6        | 0.077                        | 6                                | 0.059                        | N.D                              |
|     | 8        | 0.068                        | N.D                              | 0.047                        | N.D                              |
|     | 10       | 0.066                        | N.D                              | 0.055                        | 4                                |
|     | 12       | 0.067                        | 0.5                              | 0.065                        | 4.8                              |
|     | Average  | -                            | 0.2                              | -                            | N.D                              |
| 협기  | 0        | 0.065                        | -                                | 0.110                        | -                                |
|     | 1        | 0.084                        | 10                               | 0.154                        | 22                               |
|     | 2        | 0.140                        | 28                               | 0.175                        | 11                               |
|     | 3        | 0.262                        | 61                               | 0.164                        | N.D                              |
|     | 4        | 0.261                        | N.D                              | 0.168                        | 2                                |
|     | 6        | 0.389                        | 64                               | 0.208                        | 20                               |
|     | 8        | 0.463                        | 37                               | 0.281                        | 37                               |
|     | 10       | 0.522                        | 30                               | 0.339                        | 29                               |
|     | 12       | 0.599                        | 37.3                             | 0.396                        | 27.6                             |
|     | Average  | -                            | 33.2                             | -                            | 17.8                             |



<그림 4.3-7> 생활계오염원 저수지의 용출속도 비교( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ )

### 3. 축산계 오염원 저수지의 조건/항목별 용출시험 결과

가. 축산계오염원 저수지 조건별/항목별 용출 실험 조건

용출 실험에 사용한 퇴적물과 수 시료는 이담과 공리 저수지 모두 2015년 9월 3일에 채취한 시료를 사용하였으며, 용출 실험을 위한 평균적 실험환경 조건은 (표 4.3-11)와 같이 유지하였다.

(표 4.3-11) 축산계오염원 저수지 용출 실험 조건

| 저수지 | 조건  | 수온<br>(°C) | EC<br>( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) | DO<br>(mg/L) | pH  |
|-----|-----|------------|-----------------------------------|--------------|-----|
| 이담  | 대조군 | 24.0       | 293.6                             | 3.1          | 7.1 |
|     | 호기  | 23.9       | 258.4                             | 6.8          | 7.6 |
|     | 혐기  | 22.6       | 261.1                             | 2.7          | 8.7 |
| 공리  | 대조군 | 24.2       | 246.5                             | 2.8          | 7.6 |
|     | 호기  | 24.0       | 232.7                             | 6.6          | 7.8 |
|     | 혐기  | 22.5       | 230.4                             | 2.7          | 9.1 |

나. 축산계오염원 저수지 조건별/항목별 용출 실험 결과

이담 저수지와 공리 저수지 퇴적물의 용출농도 실험결과를 다음의 (표 4.3-12)와 (표 4.3-13)에 나타내었고, 농도 변화 그래프를 <그림 4.3-8>와 <그림 4.3-9>에 나타내었다. 조건별/항목별 농도변화를 보면 COD의 농도는 이담의 경우, 호기에서는 농도 초기에서 Day 4까지 용출이 일어나다 이후 농도가 감소하는 경향을 보였으며 혐기에서는 Day 5에서 주춤했으나 지속적인 용출이 일어난 것으로 보였고 공리의 경우는 호기에서는 Day 8까지는 큰 변화가 없었으나 Day 10이후 용출이 급격히 일어났다 감소하는 경향을 보였으며 혐기는 초기부터 용출이 일어나다가 Day 10이후 급격히 감소하는 경향을 보였다.

T-N의 농도는 이담의 경우 정도의 차이는 있지만 호기와 혐기 모두 초기에는 용출이 일어나 농도가 증가했으며 Day 5를 기점으로 농도가 소폭 감소한 뒤 호기에선 큰 변화가 없었으며 혐기에선 다시 용출이 일어난 것으로 판단되며 공리의 경우는 호기와 혐기 모두 초기에 용출이 약간 일어났으나 이후 감소하는 경향을 보였다.

T-P의 농도는 이담의 경우 호기에서는 Day 10까지는 큰 변화가 없다가 이후 용출에 의해 크게 증가하였고 혐기에서는 초기부터 용출이 일어나다가

Day 10 이후 농도 크게 증가해 처음보다 약 4배 증가하였고 공리의 경우는 호기에서는 농도 변화가 거의 없었으며 혐기에서는 초기부터 용출이 일어나 농도가 증가하다 Day 10이후 큰 폭으로 증가해 초기의 약 5배까지 증가하였다.

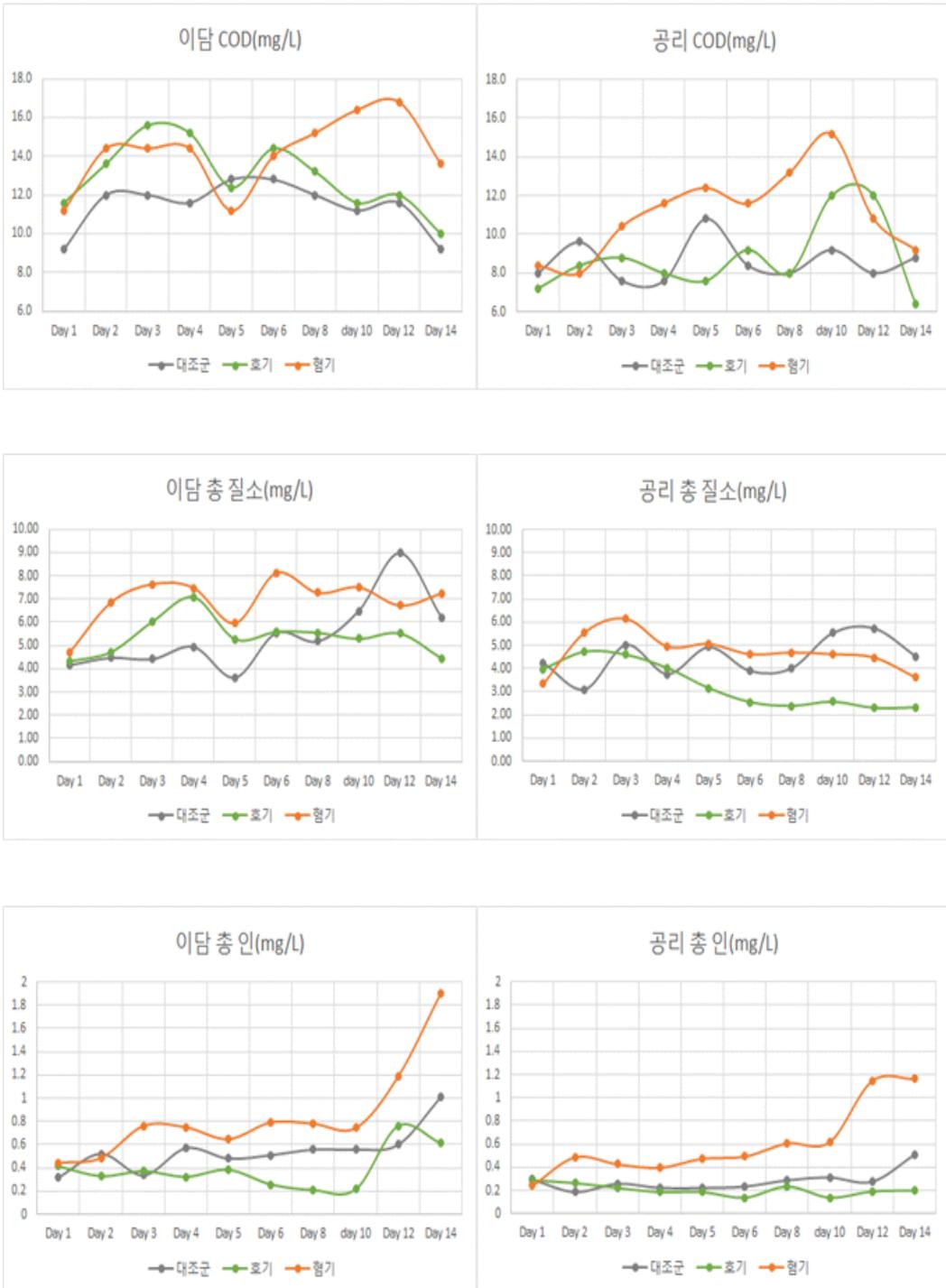
$\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 이담의 경우, 호기에서는 Day 10까지는 큰 변화가 없다가 이후 용출에 의해 크게 증가하였고 혐기에서는 초기부터 용출이 일어나다가 Day 10 이후 농도 크게 증가해 처음보다 약 4배 증가하였고 공리의 경우는 호기에서는 농도 변화가 거의 없었으며 혐기에서는 초기부터 용출이 일어나 농도가 증가하다 Day 10이후 큰 폭으로 증가해 초기의 약 5배까지 증가하였다.

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 이담의 경우, 호기에선 Day 5까진 거의 농도에 변화가 없다가 이후 크게 증가하여 초기의 약 16배가량으로 증가하였고 혐기는 농도에 큰 변화가 일어나지 않았으며 공리의 경우는 이담과 마찬가지로 공리에서도 호기에서는 농도가 Day 5이후 크게 증가하여 처음의 약 11배로 증가하였고 혐기에서는 농도의 큰 변화가 없었다.

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도는 이담의 경우, 호기에서는 변동이 크지 않지만 점차 용출이 일어나는 경향을 보이며 혐기에서는 초기부터 용출로 인해 점진적으로 농도가 증가해 처음보다 약 9배 증가하였고 공리의 경우는 호기에서는 농도의 증감은 있으나 변화가 크지 않았으며 혐기에서는 초기부터 용출이 일어나 농도가 약 5배까지 점진적으로 증가하였다.

(표 4.3-12) 시간별 축산계오염원 저수지 용출농도(COD, T-N, T-P)

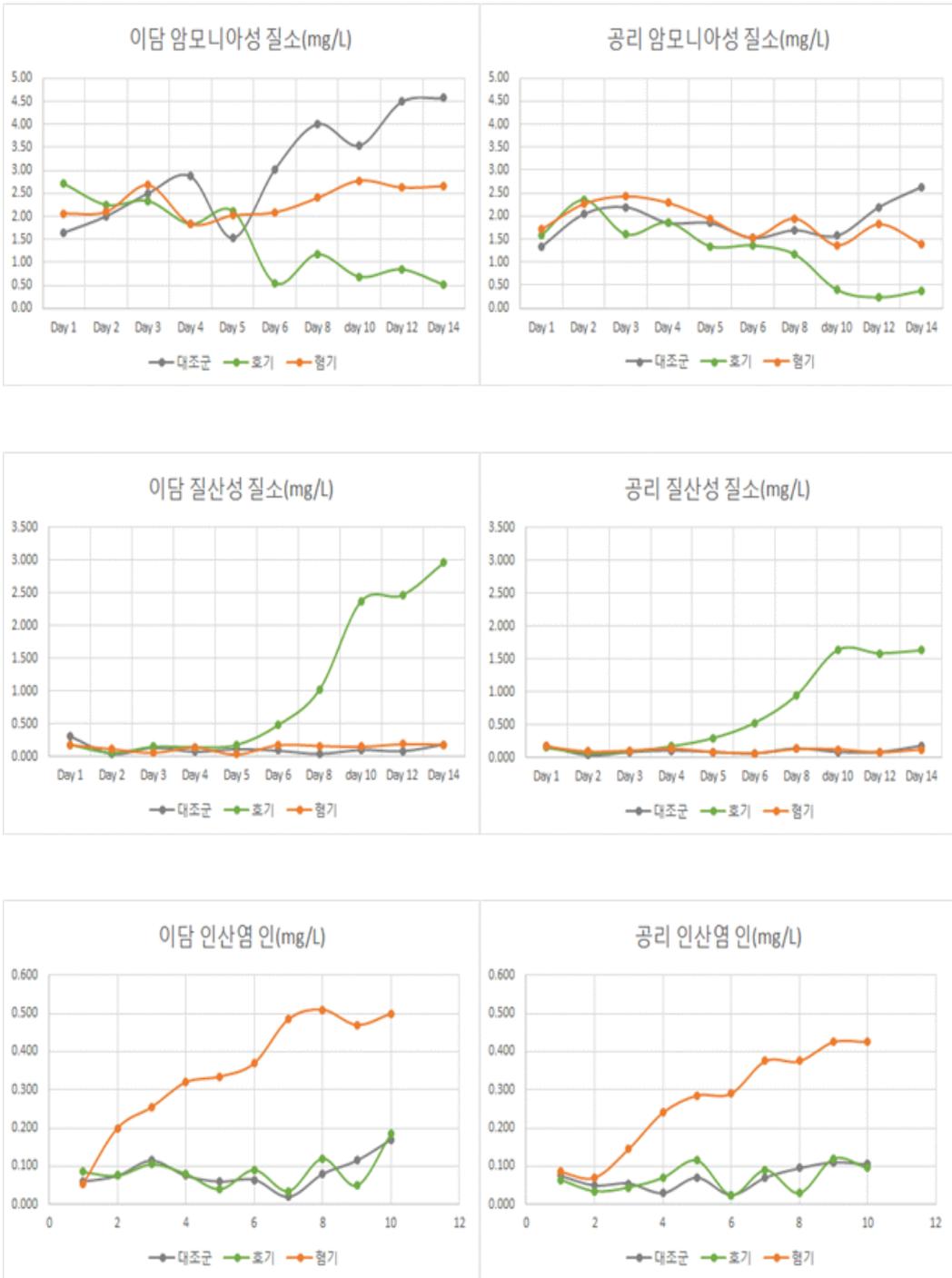
| 구분  | 시간<br>간격 | COD (mg/L) |      | T-N (mg/L) |      | T-P (mg/L) |       |
|-----|----------|------------|------|------------|------|------------|-------|
|     |          | 이담         | 공리   | 이담         | 공리   | 이담         | 공리    |
| 대조군 | 0        | 9.2        | 8.0  | 4.16       | 4.25 | 0.318      | 0.294 |
|     | 1        | 12.0       | 9.6  | 4.47       | 3.10 | 0.522      | 0.186 |
|     | 2        | 12.0       | 7.6  | 4.41       | 5.02 | 0.336      | 0.258 |
|     | 3        | 11.6       | 7.6  | 4.94       | 3.77 | 0.570      | 0.222 |
|     | 4        | 12.8       | 10.8 | 3.62       | 4.93 | 0.480      | 0.222 |
|     | 5        | 12.8       | 8.4  | 5.54       | 3.89 | 0.510      | 0.234 |
|     | 7        | 12.0       | 8.0  | 5.18       | 4.01 | 0.558      | 0.288 |
|     | 9        | 11.2       | 9.2  | 6.49       | 5.54 | 0.558      | 0.312 |
|     | 11       | 11.6       | 8.0  | 8.98       | 5.74 | 0.600      | 0.276 |
|     | 13       | 9.2        | 8.8  | 6.22       | 4.54 | 1.008      | 0.510 |
| 호기  | 0        | 11.6       | 7.2  | 4.33       | 3.98 | 0.414      | 0.288 |
|     | 1        | 13.6       | 8.4  | 4.72       | 4.73 | 0.330      | 0.264 |
|     | 2        | 15.6       | 8.8  | 6.02       | 4.60 | 0.372      | 0.222 |
|     | 3        | 15.2       | 8.0  | 7.08       | 4.03 | 0.324      | 0.186 |
|     | 4        | 12.4       | 7.6  | 5.28       | 3.16 | 0.384      | 0.186 |
|     | 5        | 14.4       | 9.2  | 5.59       | 2.56 | 0.258      | 0.138 |
|     | 7        | 13.2       | 8.0  | 5.55       | 2.39 | 0.210      | 0.234 |
|     | 9        | 11.6       | 12.0 | 5.29       | 2.57 | 0.216      | 0.138 |
|     | 11       | 12.0       | 12.0 | 5.51       | 2.30 | 0.762      | 0.192 |
|     | 13       | 10.0       | 6.4  | 4.45       | 2.33 | 0.612      | 0.198 |
| 혐기  | 0        | 11.2       | 8.4  | 4.71       | 3.33 | 0.444      | 0.240 |
|     | 1        | 14.4       | 8.0  | 6.86       | 5.56 | 0.486      | 0.486 |
|     | 2        | 14.4       | 10.4 | 7.64       | 6.15 | 0.762      | 0.426 |
|     | 3        | 14.4       | 11.6 | 7.48       | 4.95 | 0.750      | 0.396 |
|     | 4        | 11.2       | 12.4 | 5.96       | 5.06 | 0.648      | 0.474 |
|     | 5        | 14.0       | 11.6 | 8.12       | 4.62 | 0.792      | 0.492 |
|     | 7        | 15.2       | 13.2 | 7.27       | 4.70 | 0.780      | 0.606 |
|     | 9        | 16.4       | 15.2 | 7.51       | 4.62 | 0.744      | 0.618 |
|     | 11       | 16.8       | 10.8 | 6.72       | 4.48 | 1.188      | 1.146 |
|     | 13       | 13.6       | 9.2  | 7.24       | 3.62 | 1.902      | 1.164 |



<그림 4.3-8> 시간에 따른 축산계오염원 저수지 용출농도(COD, T-N, T-P)

(표 4.3-13) 시간별 축산계오염원 저수지 용출농도(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P)

| 구분  | 시간<br>간격 | NH <sub>4</sub> -N (mg/L) |      | NO <sub>3</sub> -N (mg/L) |       | PO <sub>4</sub> -P (mg/L) |       |
|-----|----------|---------------------------|------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
|     |          | 이담                        | 공리   | 이담                        | 공리    | 이담                        | 공리    |
| 대조군 | 0        | 1.65                      | 1.34 | 0.310                     | 0.178 | 0.060                     | 0.075 |
|     | 1        | 2.01                      | 2.05 | 0.044                     | 0.032 | 0.075                     | 0.050 |
|     | 2        | 2.51                      | 2.20 | 0.136                     | 0.082 | 0.115                     | 0.055 |
|     | 3        | 2.87                      | 1.86 | 0.074                     | 0.106 | 0.075                     | 0.030 |
|     | 4        | 1.53                      | 1.85 | 0.116                     | 0.084 | 0.060                     | 0.070 |
|     | 5        | 3.03                      | 1.53 | 0.092                     | 0.062 | 0.065                     | 0.025 |
|     | 7        | 4.01                      | 1.70 | 0.044                     | 0.138 | 0.020                     | 0.070 |
|     | 9        | 3.54                      | 1.58 | 0.104                     | 0.082 | 0.080                     | 0.095 |
|     | 11       | 4.49                      | 2.20 | 0.084                     | 0.084 | 0.115                     | 0.110 |
|     | 13       | 4.57                      | 2.64 | 0.186                     | 0.180 | 0.170                     | 0.105 |
| 호기  | 0        | 2.72                      | 1.59 | 0.184                     | 0.146 | 0.085                     | 0.065 |
|     | 1        | 2.26                      | 2.36 | 0.058                     | 0.068 | 0.075                     | 0.035 |
|     | 2        | 2.34                      | 1.61 | 0.152                     | 0.090 | 0.105                     | 0.045 |
|     | 3        | 1.84                      | 1.87 | 0.144                     | 0.170 | 0.080                     | 0.070 |
|     | 4        | 2.12                      | 1.35 | 0.178                     | 0.294 | 0.040                     | 0.115 |
|     | 5        | 0.55                      | 1.37 | 0.480                     | 0.526 | 0.090                     | 0.025 |
|     | 7        | 1.18                      | 1.17 | 1.022                     | 0.944 | 0.035                     | 0.090 |
|     | 9        | 0.69                      | 0.40 | 2.370                     | 1.638 | 0.120                     | 0.030 |
|     | 11       | 0.85                      | 0.24 | 2.468                     | 1.586 | 0.050                     | 0.120 |
|     | 13       | 0.52                      | 0.38 | 2.964                     | 1.630 | 0.185                     | 0.095 |
| 혐기  | 0        | 2.07                      | 1.71 | 0.178                     | 0.166 | 0.055                     | 0.085 |
|     | 1        | 2.10                      | 2.27 | 0.116                     | 0.090 | 0.200                     | 0.070 |
|     | 2        | 2.68                      | 2.43 | 0.058                     | 0.104 | 0.255                     | 0.145 |
|     | 3        | 1.84                      | 2.29 | 0.138                     | 0.136 | 0.320                     | 0.240 |
|     | 4        | 2.03                      | 1.93 | 0.034                     | 0.084 | 0.335                     | 0.285 |
|     | 5        | 2.09                      | 1.54 | 0.174                     | 0.064 | 0.370                     | 0.290 |
|     | 7        | 2.40                      | 1.95 | 0.164                     | 0.128 | 0.485                     | 0.375 |
|     | 9        | 2.78                      | 1.37 | 0.150                     | 0.124 | 0.510                     | 0.375 |
|     | 11       | 2.63                      | 1.83 | 0.190                     | 0.078 | 0.470                     | 0.425 |
|     | 13       | 2.66                      | 1.40 | 0.184                     | 0.122 | 0.500                     | 0.425 |



<그림 4.3-9> 시간에 따른 축산계오염원 저수지의 용출실험 결과  
(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P)

다. 축산계오염원 저수지 용출속도 산정 결과

축산계오염원 저수지 이담과 공리의 퇴적물 용출속도 실험결과를 다음의 (표 4.3-15) ~ (표 4.3-20)에 나타내었고, 평균 용출 속도는 (표 4.3-14)에 나타내었다. 공리에서는 호기 조건에서는 COD, T-N, T-P의 값이 음의 값을 나타내어 용출이 일어나지 않음을 의미하며 NO<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P만 농도가 증가하는 경향을 보였으나, 이담에서는 호기 조건에서도 T-N, T-P, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P의 항목에서 농도가 증가하는 경향을 보인 것으로 조사되었다.

특히 이담의 경우는 혐기 조건에서는 모든 항목에서 농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 조사되었고, 대조군에서도 NO<sub>3</sub>-N을 제외한 모든 항목에서 농도가 증가하는 경향을 보여 산소 조건에 관계없이 용출이 매우 잘 일어나는 것으로 조사되었다. 또한 혐기 조건에서 용출 속도도 공리 보다 훨씬 빠르게 일어난 것으로 조사되었는데 COD의 경우 이담의 경우 용출 속도가 139 mg/m<sup>2</sup>·day로 47.3 mg/m<sup>2</sup>·day인 공리보다 약 3배 빨랐고 특히 T-N의 경우는 이담에서 140 mg/m<sup>2</sup>·day로 17.5 mg/m<sup>2</sup>·day인 공리보다 8배 빠른 것으로 조사되었다. 단, 용출속도가 음의 값을 갖는 경우에는 용출이 일어나지 않는 것이므로 N.D로 표기하였으며, 평균값 산출 시에는 양, 음의 값을 고려하였다. <그림 4.3-10>에서는 양, 음을 비교하기 쉽게 표기하기 위하여 음의 값도 그래프로 나타내었다.

전체적으로 용출은 이담이 공리 보다 잘 일어나는 것으로 조사되었으며 따라서 퇴적물의 용출에 의한 내부 오염이 수체에 미치는 영향은 이담 저수지에서 더욱 심각할 것이라 사료된다.

(표 4.3-14) 축산계오염원 저수지 평균 용출 속도(mg/m<sup>2</sup>·day)

| 구분                 | 이담저수지 |      |      | 공리저수지 |      |      |
|--------------------|-------|------|------|-------|------|------|
|                    | 대조군   | 호기   | 혐기   | 대조군   | 호기   | 혐기   |
| COD                | 4.25  | N.D  | 139  | 43.0  | N.D  | 47.3 |
| T-N                | 119   | 8.56 | 140  | 18.1  | N.D  | 17.5 |
| T-P                | 37.6  | 11.3 | 79.7 | 11.6  | N.D  | 51.3 |
| NH <sub>4</sub> -N | 162   | N.D  | 33.0 | 71.5  | N.D  | N.D  |
| NO <sub>3</sub> -N | N.D   | 154  | 0.34 | N.D   | 82.4 | N.D  |
| PO <sub>4</sub> -P | 6.01  | 5.32 | 24.7 | 1.68  | 1.71 | 18.9 |

※ 용출속도가 음의 값을 갖는 경우에는 용출이 일어나지 않는 것이므로 N.D로 표기함

(표 4.3-15) 축산계오염원 저수지 COD 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 이담 저수지        |                          | 공리 저수지        |                          |
|-----|----------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
|     |          | COD<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) | COD<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 9.2           | -                        | 8.0           | -                        |
|     | 1        | 12.0          | 1400                     | 9.6           | 800                      |
|     | 2        | 12.0          | 0                        | 7.6           | N.D                      |
|     | 3        | 11.6          | N.D                      | 7.6           | 0                        |
|     | 4        | 12.8          | 600                      | 10.8          | 1600                     |
|     | 5        | 12.8          | 0                        | 8.4           | N.D                      |
|     | 7        | 12.0          | N.D                      | 8.0           | N.D                      |
|     | 9        | 11.2          | N.D                      | 9.2           | 600                      |
|     | 11       | 11.6          | 200                      | 8.0           | N.D                      |
|     | 13       | 9.2           | N.D                      | 8.8           | 387.3                    |
|     | Average  | -             | 4.2                      | -             | 43.0                     |
| 호기  | 0        | 11.6          | -                        | 7.2           | -                        |
|     | 1        | 13.6          | 1000                     | 8.4           | 600                      |
|     | 2        | 15.6          | 1000                     | 8.8           | 200                      |
|     | 3        | 15.2          | N.D                      | 8.0           | N.D                      |
|     | 4        | 12.4          | N.D                      | 7.6           | N.D                      |
|     | 5        | 14.4          | 1000                     | 9.2           | 800                      |
|     | 7        | 13.2          | N.D                      | 8.0           | N.D                      |
|     | 9        | 11.6          | N.D                      | 12.0          | 2000                     |
|     | 11       | 12.0          | 200                      | 12.0          | 0                        |
|     | 13       | 10.0          | N.D                      | 6.4           | N.D                      |
|     | Average  | -             | N.D                      | -             | N.D                      |
| 혐기  | 0        | 11.2          | -                        | 8.4           | -                        |
|     | 1        | 14.4          | 1600                     | 8.0           | N.D                      |
|     | 2        | 14.4          | 0                        | 10.4          | 1200                     |
|     | 3        | 14.4          | 0                        | 11.6          | 600                      |
|     | 4        | 11.2          | N.D                      | 12.4          | 400                      |
|     | 5        | 14.0          | 1400                     | 11.6          | N.D                      |
|     | 7        | 15.2          | 600                      | 13.2          | 800                      |
|     | 9        | 16.4          | 600                      | 15.2          | 1000                     |
|     | 11       | 16.8          | 200                      | 10.8          | N.D                      |
|     | 13       | 13.6          | N.D                      | 9.2           | N.D                      |
|     | Average  | -             | 139.0                    | -             | 47.3                     |

(표 4.3-16) 축산계오염원 저수지 T-N 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 이담 저수지        |                          | 공리 저수지        |                          |
|-----|----------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
|     |          | T-N<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) | T-N<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 4.16          | -                        | 4.25          | -                        |
|     | 1        | 4.47          | 156                      | 3.10          | N.D                      |
|     | 2        | 4.41          | N.D                      | 5.02          | 960                      |
|     | 3        | 4.94          | 267                      | 3.77          | N.D                      |
|     | 4        | 3.62          | N.D                      | 4.93          | 579                      |
|     | 5        | 5.54          | 963                      | 3.89          | N.D                      |
|     | 7        | 5.18          | N.D                      | 4.01          | 60                       |
|     | 9        | 6.49          | 657                      | 5.54          | 765                      |
|     | 11       | 8.98          | 1,245                    | 5.74          | 96                       |
|     | 13       | 6.22          | N.D                      | 4.54          | N.D                      |
|     | Average  | -             | 119.2                    | -             | 18.1                     |
| 호기  | 0        | 4.33          | -                        | 3.98          | -                        |
|     | 1        | 4.72          | 198                      | 4.73          | 375                      |
|     | 2        | 6.02          | 651                      | 4.60          | N.D                      |
|     | 3        | 7.08          | 528                      | 4.03          | N.D                      |
|     | 4        | 5.28          | N.D                      | 3.16          | N.D                      |
|     | 5        | 5.59          | 153                      | 2.56          | N.D                      |
|     | 7        | 5.55          | N.D                      | 2.39          | N.D                      |
|     | 9        | 5.29          | N.D                      | 2.57          | 90                       |
|     | 11       | 5.51          | 114                      | 2.30          | N.D                      |
|     | 13       | 4.45          | N.D                      | 2.33          | 11.6                     |
|     | Average  | -             | 8.6                      | -             | N.D                      |
| 혐기  | 0        | 4.71          | -                        | 3.33          | -                        |
|     | 1        | 6.86          | 1,074                    | 5.56          | 1,113                    |
|     | 2        | 7.64          | 393                      | 6.15          | 297                      |
|     | 3        | 7.48          | N.D                      | 4.95          | N.D                      |
|     | 4        | 5.96          | N.D                      | 5.06          | 57                       |
|     | 5        | 8.12          | 1,080                    | 4.62          | N.D                      |
|     | 7        | 7.27          | N.D                      | 4.70          | 39                       |
|     | 9        | 7.51          | 120                      | 4.62          | N.D                      |
|     | 11       | 6.72          | N.D                      | 4.48          | N.D                      |
|     | 13       | 7.24          | 252.7                    | 3.62          | N.D                      |
|     | Average  | -             | 139.7                    | -             | 17.5                     |

(표 4.3-17) 축산계오염원 저수지 T-P 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 이담 저수지        |                          | 공리 저수지        |                          |
|-----|----------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
|     |          | T-P<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) | T-P<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 0.318         | -                        | 0.294         | -                        |
|     | 1        | 0.522         | 102                      | 0.186         | N.D                      |
|     | 2        | 0.336         | N.D                      | 0.258         | 36                       |
|     | 3        | 0.570         | 117                      | 0.222         | N.D                      |
|     | 4        | 0.480         | N.D                      | 0.222         | 0                        |
|     | 5        | 0.510         | 15                       | 0.234         | 6                        |
|     | 7        | 0.558         | 24                       | 0.288         | 27                       |
|     | 9        | 0.558         | 0                        | 0.312         | 12                       |
|     | 11       | 0.600         | 21                       | 0.276         | N.D                      |
|     | 13       | 1.008         | 197.5                    | 0.510         | 113.3                    |
|     | Average  | -             | 37.6                     | -             | 11.6                     |
| 호기  | 0        | 0.414         | -                        | 0.288         | -                        |
|     | 1        | 0.330         | N.D                      | 0.264         | N.D                      |
|     | 2        | 0.372         | 21                       | 0.222         | N.D                      |
|     | 3        | 0.324         | N.D                      | 0.186         | N.D                      |
|     | 4        | 0.384         | 30                       | 0.186         | 0                        |
|     | 5        | 0.258         | N.D                      | 0.138         | N.D                      |
|     | 7        | 0.210         | N.D                      | 0.234         | 48                       |
|     | 9        | 0.216         | 3                        | 0.138         | N.D                      |
|     | 11       | 0.762         | 273                      | 0.192         | 27                       |
|     | 13       | 0.612         | N.D                      | 0.198         | 2.9                      |
|     | Average  | -             | 11.3                     | -             | N.D                      |
| 혐기  | 0        | 0.444         | -                        | 0.240         | -                        |
|     | 1        | 0.486         | 21                       | 0.486         | 123                      |
|     | 2        | 0.762         | 138                      | 0.426         | N.D                      |
|     | 3        | 0.750         | N.D                      | 0.396         | N.D                      |
|     | 4        | 0.648         | N.D                      | 0.474         | 39                       |
|     | 5        | 0.792         | 72                       | 0.492         | 9                        |
|     | 7        | 0.780         | N.D                      | 0.606         | 57                       |
|     | 9        | 0.744         | N.D                      | 0.618         | 6                        |
|     | 11       | 1.188         | 222                      | 1.146         | 264                      |
|     | 13       | 1.902         | 345.6                    | 1.164         | 8.7                      |
|     | Average  | -             | 79.7                     | -             | 51.3                     |

(표 4.3-18) 축산계오염원 저수지 NH<sub>4</sub>-N 용출속도

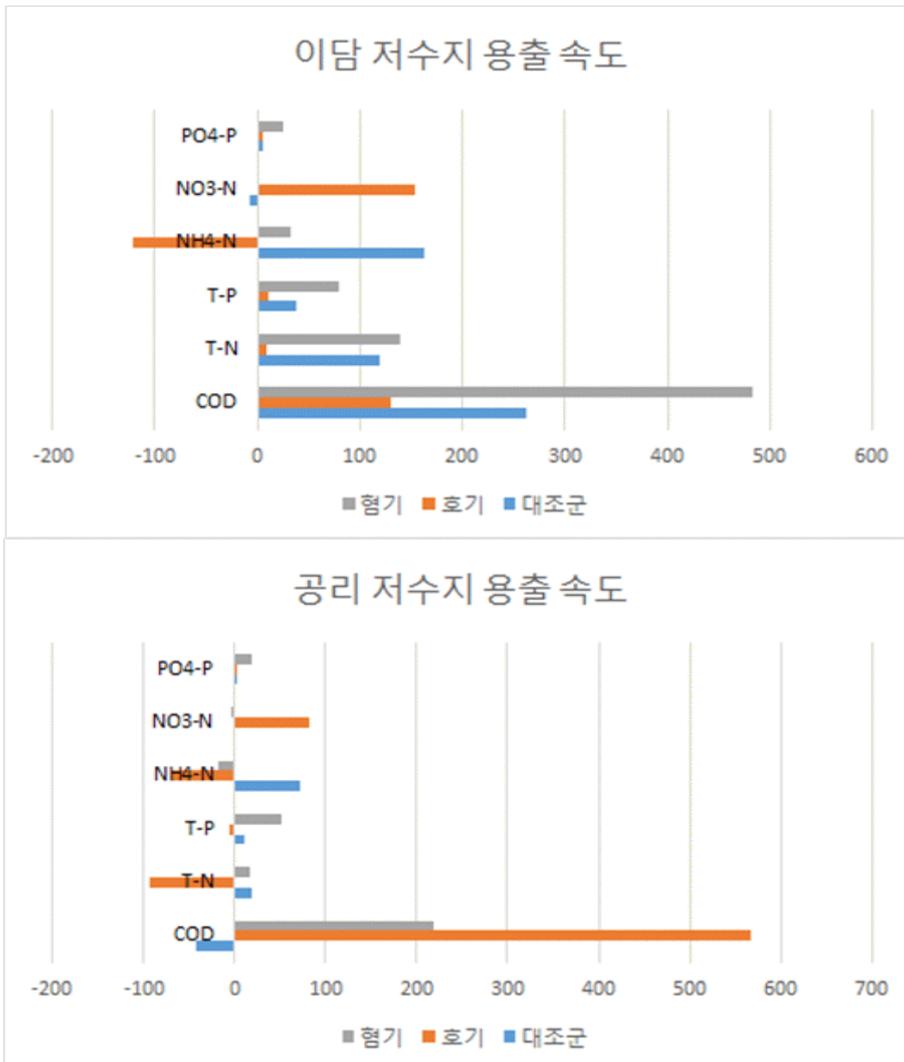
| 구분  | 시간<br>간격 | 이담 저수지                       |                          | 공리 저수지                       |                          |
|-----|----------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
|     |          | NH <sub>4</sub> -N<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) | NH <sub>4</sub> -N<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 1.65                         | -                        | 1.34                         | -                        |
|     | 1        | 2.01                         | 178                      | 2.05                         | 355                      |
|     | 2        | 2.51                         | 250                      | 2.20                         | 75                       |
|     | 3        | 2.87                         | 183                      | 1.86                         | N.D                      |
|     | 4        | 1.53                         | N.D                      | 1.85                         | N.D                      |
|     | 5        | 3.03                         | 748                      | 1.53                         | N.D                      |
|     | 7        | 4.01                         | 490                      | 1.70                         | 85                       |
|     | 9        | 3.54                         | N.D                      | 1.58                         | N.D                      |
|     | 11       | 4.49                         | 475                      | 2.20                         | 313                      |
|     | 13       | 4.57                         | 38.7                     | 2.64                         | 210.6                    |
|     | Average  | -                            | 162.1                    | -                            | 71.5                     |
| 호기  | 0        | 2.72                         | -                        | 1.59                         | -                        |
|     | 1        | 2.26                         | N.D                      | 2.36                         | 385                      |
|     | 2        | 2.34                         | 40                       | 1.61                         | N.D                      |
|     | 3        | 1.84                         | N.D                      | 1.87                         | 130                      |
|     | 4        | 2.12                         | 143                      | 1.35                         | N.D                      |
|     | 5        | 0.55                         | N.D                      | 1.37                         | 10                       |
|     | 7        | 1.18                         | 315                      | 1.17                         | N.D                      |
|     | 9        | 0.69                         | N.D                      | 0.40                         | N.D                      |
|     | 11       | 0.85                         | 80                       | 0.24                         | N.D                      |
|     | 13       | 0.52                         | N.D                      | 0.38                         | 67.8                     |
|     | Average  | -                            | N.D                      | -                            | N.D                      |
| 혐기  | 0        | 2.07                         | -                        | 1.71                         | -                        |
|     | 1        | 2.10                         | 18                       | 2.27                         | 278                      |
|     | 2        | 2.68                         | 290                      | 2.43                         | 82                       |
|     | 3        | 1.84                         | N.D                      | 2.29                         | N.D                      |
|     | 4        | 2.03                         | 93                       | 1.93                         | N.D                      |
|     | 5        | 2.09                         | 32                       | 1.54                         | N.D                      |
|     | 7        | 2.40                         | 155                      | 1.95                         | 208                      |
|     | 9        | 2.78                         | 190                      | 1.37                         | N.D                      |
|     | 11       | 2.63                         | N.D                      | 1.83                         | 228                      |
|     | 13       | 2.66                         | 14.5                     | 1.40                         | N.D                      |
|     | Average  | -                            | 33.0                     | -                            | N.D                      |

(표 4.3-19) 축산계오염원 저수지 NO<sub>3</sub>-N 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 이담 저수지                       |                          | 공리 저수지                       |                          |
|-----|----------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
|     |          | NO <sub>3</sub> -N<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) | NO <sub>3</sub> -N<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 0.310                        | -                        | 0.178                        | -                        |
|     | 1        | 0.044                        | N.D                      | 0.032                        | N.D                      |
|     | 2        | 0.136                        | 46                       | 0.082                        | 25                       |
|     | 3        | 0.074                        | N.D                      | 0.106                        | 12                       |
|     | 4        | 0.116                        | 21                       | 0.084                        | N.D                      |
|     | 5        | 0.092                        | N.D                      | 0.062                        | N.D                      |
|     | 7        | 0.044                        | N.D                      | 0.138                        | 38                       |
|     | 9        | 0.104                        | 30                       | 0.082                        | N.D                      |
|     | 11       | 0.084                        | N.D                      | 0.084                        | 1                        |
|     | 13       | 0.186                        | 49.4                     | 0.180                        | 46.5                     |
|     | Average  | -                            | N.D                      | -                            | N.D                      |
| 호기  | 0        | 0.184                        | -                        | 0.146                        | -                        |
|     | 1        | 0.058                        | N.D                      | 0.068                        | N.D                      |
|     | 2        | 0.152                        | 47                       | 0.090                        | 11                       |
|     | 3        | 0.144                        | N.D                      | 0.170                        | 40                       |
|     | 4        | 0.178                        | 17                       | 0.294                        | 62                       |
|     | 5        | 0.480                        | 151                      | 0.526                        | 116                      |
|     | 7        | 1.022                        | 271                      | 0.944                        | 209                      |
|     | 9        | 2.370                        | 674                      | 1.638                        | 347                      |
|     | 11       | 2.468                        | 49                       | 1.586                        | N.D                      |
|     | 13       | 2.964                        | 240.1                    | 1.630                        | 21.3                     |
|     | Average  | -                            | 153.6                    | -                            | 82.4                     |
| 혐기  | 0        | 0.178                        | -                        | 0.166                        | -                        |
|     | 1        | 0.116                        | N.D                      | 0.090                        | N.D                      |
|     | 2        | 0.058                        | N.D                      | 0.104                        | 7                        |
|     | 3        | 0.138                        | 40                       | 0.136                        | 16                       |
|     | 4        | 0.034                        | N.D                      | 0.084                        | N.D                      |
|     | 5        | 0.174                        | 70                       | 0.064                        | N.D                      |
|     | 7        | 0.164                        | N.D                      | 0.128                        | 32                       |
|     | 9        | 0.150                        | N.D                      | 0.124                        | N.D                      |
|     | 11       | 0.190                        | 20                       | 0.078                        | N.D                      |
|     | 13       | 0.184                        | N.D                      | 0.122                        | 21.3                     |
|     | Average  | -                            | 0.3                      | -                            | N.D                      |

(표 4.3-20) 축산계오염원 저수지 PO<sub>4</sub>-P 용출속도

| 구분  | 시간<br>간격 | 이담 저수지                       |                          | 공리 저수지                       |                          |
|-----|----------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
|     |          | PO <sub>4</sub> -P<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) | PO <sub>4</sub> -P<br>(mg/L) | (mg/m <sup>2</sup> ·day) |
| 대조군 | 0        | 0.060                        |                          | 0.075                        |                          |
|     | 1        | 0.075                        | 8                        | 0.050                        | N.D                      |
|     | 2        | 0.115                        | 20                       | 0.055                        | 3                        |
|     | 3        | 0.075                        | N.D                      | 0.030                        | N.D                      |
|     | 4        | 0.060                        | N.D                      | 0.070                        | 20                       |
|     | 5        | 0.065                        | 3                        | 0.025                        | N.D                      |
|     | 7        | 0.020                        | N.D                      | 0.070                        | 23                       |
|     | 9        | 0.080                        | 30                       | 0.095                        | 13                       |
|     | 11       | 0.115                        | 18                       | 0.110                        | 7                        |
|     | 13       | 0.170                        | 26.6                     | 0.105                        | N.D                      |
|     | Average  | -                            | 6.0                      | -                            | 1.7                      |
| 호기  | 0        | 0.085                        | -                        | 0.065                        | -                        |
|     | 1        | 0.075                        | N.D                      | 0.035                        | N.D                      |
|     | 2        | 0.105                        | 15                       | 0.045                        | 5                        |
|     | 3        | 0.080                        | N.D                      | 0.070                        | 13                       |
|     | 4        | 0.040                        | N.D                      | 0.115                        | 23                       |
|     | 5        | 0.090                        | 25                       | 0.025                        | N.D                      |
|     | 7        | 0.035                        | N.D                      | 0.090                        | 33                       |
|     | 9        | 0.120                        | 43                       | 0.030                        | N.D                      |
|     | 11       | 0.050                        | N.D                      | 0.120                        | 45                       |
|     | 13       | 0.185                        | 65.4                     | 0.095                        | N.D                      |
|     | Average  | -                            | 5.3                      | -                            | 1.7                      |
| 혐기  | 0        | 0.055                        | -                        | 0.085                        | -                        |
|     | 1        | 0.200                        | 73                       | 0.070                        | N.D                      |
|     | 2        | 0.255                        | 28                       | 0.145                        | 38                       |
|     | 3        | 0.320                        | 33                       | 0.240                        | 48                       |
|     | 4        | 0.335                        | 8                        | 0.285                        | 23                       |
|     | 5        | 0.370                        | 18                       | 0.290                        | 3                        |
|     | 7        | 0.485                        | 58                       | 0.375                        | 43                       |
|     | 9        | 0.510                        | 13                       | 0.375                        | 0                        |
|     | 11       | 0.470                        | N.D                      | 0.425                        | 25                       |
|     | 13       | 0.500                        | 14.5                     | 0.425                        | 0.0                      |
|     | Average  | -                            | 24.7                     | -                            | 18.9                     |



<그림 4.3-10> 축산계오염원 저수지의 용출속도 비교(mg/m<sup>2</sup>·day)

#### 4. 평균 용출 속도 비교 분석

가. 연구 대상 저수지 별 평균 용출 속도 비교

연구 대상 저수지의 COD, T-N, T-P 항목에 대한 평균 용출 속도를 아래 (표 4.3-21)와 <그림 4.3-11>에 나타내었다. 연구 대상지 모두 험기에서 용출이 호기보다 많은 항목에서 나타나며 용출 속도 또한 험기에서 보다 빠른 것

으로 조사되었다. 호기 조건에서 인평, 업성, 공리는 모든 항목에서 용출 속도가 음의 값을 나타내며 결국 용출이 완료된 후 더 이상 용출이 일어나지 않고 퇴적물에 흡수되었거나 용출된 오염물질이 호기 조건 하에서 오히려 분해되었기 때문으로 판단된다. 반면에 이담에서는 호기 조건에서도 T-N과 T-P의 용출이 일어나는 것으로 조사되었다. 혐기 조건에서는 이담과 공리는 COD, T-N, T-P의 모든 항목에서 용출이 일어났으며, 특히 이담에서는 T-N과 T-P의 용출 속도가 가장 빠른 것으로 조사되었다. 인평과 업성은 혐기조건에서 COD와 T-P의 용출이 일어나는 것으로 나타났으며 COD의 용출 속도는 인평에서 가장 빠른 것으로 조사되었다.

앞에서는 결과 표기 과정에서 용출속도가 음의 값을 갖는 경우, 용출이 일어나지 않는 것이므로 N.D로 표기하였는데, 전체적인 용출속도의 비교를 위하여 (표 4.3-21)과 <그림 4.3-11>에서는 양, 음을 표기하여 각 조건별 비교를 용이하도록 나타냈다.

(표 4.3-21) 연구 대상 저수지 별 평균 용출 속도

|     | 호기인평  | 호기업성  | 호기이담  | 호기공리  | 혐기인평  | 혐기업성  | 혐기이담 | 혐기공리 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| COD | -220  | -147  | -85.4 | -34.5 | 176   | 52.4  | 139  | 47.3 |
| T-N | -25.8 | -19.9 | 8.56  | -92.0 | -41.9 | -61.8 | 140  | 17.5 |
| T-P | -4.22 | -11.7 | 11.3  | -5.01 | 26.7  | 14.0  | 79.7 | 51.3 |



<그림 4.3-11> 연구 대상 저수지 별 평균 용출 속도 비교

나. 연구 대상 저수지 분류 조건 별 평균 용출속도 비교

연구 대상 저수지의 분류 조건인 오염원인 별, 설치년도 별로 나누어 평균

용출 속도를 아래의 (표 4.3-22)과 <그림 4.3-11>에 나타내었다. 생활계오염원 저수지는 호기 조건에서 용출이 일어나지 않았으며 축산계도 T-P를 제외하고는 용출이 일어나지 않은 것으로 조사되었다. 혐기 조건의 경우 호기보다 용출되는 항목들이 증가했으며 특히 생활계 보다 축산계에서 T-N 및 T-P의 용출량 증가가 눈에 띄었다. 또한 혐기 조건에서 축산계의 T-N과 T-P의 용출 속도는 생활계 보다 빨랐으나 COD의 용출 속도는 생활계가 보다 빠른 것으로 조사되었다. 설치 년도 별 저수지의 경우 호기 조건에서는 1960년대 이전에 설치된 저수지에서 T-P의 용출이 일어나는 것으로 조사되었으나 대부분의 항목이 음의 값으로 조사되었다. 혐기 조건에서는 1960년대 이전에 축조된 저수지의 경우 COD, T-N, T-P의 모든 항목에서 1960년대 이후에 설치된 저수지 보다 용출 속도가 빠른 것으로 조사되어 1960년대 이전에 축조된 저수지에서 용출이 보다 활발한 것으로 판단된다. 전체적으로 분류 조건에 관계 없이 호기 보다는 혐기에서 더욱 용출이 활발한 것으로 조사되었다.

앞의 대상지별 평균 용출속도의 내용에서와 마찬가지로 전체적인 용출속도의 비교를 위하여 (표 4.3-22)과 <그림 4.3-12>에서는 양, 음을 표기하여 각 분류별 비교를 용이하도록 나타냈다

(표 4.3-22) 연구 대상 저수지 분류 조건 별 평균 용출속도

|     | 호기 생활계 | 호기 축산계 | 호기 60년대 이전 | 호기 60년대 이후 | 혐기 생활계 | 혐기 축산계 | 혐기 60년대 이전 | 혐기 60년대 이후 |
|-----|--------|--------|------------|------------|--------|--------|------------|------------|
| COD | -184   | -60.0  | -153       | -90.7      | 114    | 93.2   | 157        | 49.8       |
| T-N | -22.9  | -41.7  | -8.64      | -55.9      | -51.9  | 78.8   | 49.0       | -22.1      |
| T-P | -7.95  | 3.15   | 3.54       | -8.34      | 20.3   | 65.5   | 53.2       | 32.7       |



<그림 4.3-12> 연구 대상 저수지 분류 조건 별 평균 용출속도 비교

## 4절. 퇴적물의 수질 오염 영향 및 제어 인자

### 1. 조건에 따른 저수지의 총 용출량

#### 가. 호기 조건에 따른 저수지 별 총 용출량

호기 및 혐기 조건에 따른 연구 대상 저수지 별 총 용출량은 각 저수지의 용출 속도에 만수 면적을 곱하여 산정하였다. 먼저 호기 조건에서의 총 용출량을 아래 (표 4.4-1)에 나타내었다. 인평과 업성 모두 호기 조건에서는 COD, T-N, T-P, NH<sub>4</sub>-N 항목에서는 용출이 일어나지 않는 것으로 조사되어 총 용출량이 없으며, 이는 호기 조건일 경우 오염 물질의 용출이 일어난다 하더라도 분해 또는 퇴적물에 흡착 및 흡수되는 기작이 활발하기 때문으로 판단된다. 그러나 이담은 호기 조건임에도 T-N이 0.15 kg/day, T-P가 0.20 kg/day, PO<sub>4</sub>-P 0.095 kg/day로 가장 큰 총 용출량을 나타냈고 과반수의 항목에서 영양 물질의 용출이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 다른 저수지에 비해 용출 속도가 빠르고 용출되는 양이 많아 수체에 내부오염으로 보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 전체적으로 NO<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P는 호기 조건임에서 총 용출량이 큰 항목으로 조사되었다.

(표 4.4-1) 연구 대상 저수지 별 총 용출량(호기)

| 호기 조건  | 만수 면적<br>(천㎡) | COD<br>(Kg/day) | T-N<br>(Kg/day) | T-P<br>(Kg/day) | NH <sub>4</sub> -N<br>(Kg/day) | NO <sub>3</sub> -N<br>(Kg/day) | PO <sub>4</sub> -P<br>(Kg/day) |
|--------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 인평 저수지 | 43.8          | -               | -               | -               | -                              | 4.23                           | 0.011                          |
| 업성 저수지 | 37.4          | -               | -               | -               | -                              | 3.99                           | -                              |
| 이담 저수지 | 17.8          | -               | 0.15            | 0.20            | -                              | 2.74                           | 0.095                          |
| 공리 저수지 | 29.6          | -               | -               | -               | -                              | 2.44                           | 0.051                          |

### 나. 혐기 조건에 따른 저수지 별 총 용출량

위와 같은 방법으로 산정한 혐기 조건에서의 연구 대상 저수지별 총 용출량을 아래(표 4.4-2)에 나타내었다. 인평과 업성 모두 호기조건에서는 용출이 있어나지 않았으나, 혐기에서는 용출되는 항목이 증가하였고 다른 저수지에 비해 면적이 넓은 인평에서 큰 값의 용출량을 보였다. 축산계가 생활계에 비해 용출 되는 항목과 양이 많았으며 특히 이담의 경우 용출 실험에서 모든 항목에서 용출 속도가 빠른 것으로 조사되어 면적이 제일 작은 것을 고려했을 때, 면적에 비해 총 용출량 값이 상대적으로 매우 크므로 퇴적물에서 용출된 오염물질이 수체에 미치는 영향이 가장 클 것으로 사료된다. 항목 중에서는 혐기 조건에서 COD, T-P, PO<sub>4</sub>-P가 모든 연구 대상 저수지에서 용출이 일어난 것으로 조사되어 혐기 조건이 형성되었을 때 가장 수체에 영향을 끼칠 가능성이 큰 항목으로 판단된다.

(표 4.4-2) 연구 대상 저수지 별 총 용출량(혐기)

| 혐기 조건  | 만수 면적<br>(천㎡) | COD<br>(Kg/day) | T-N<br>(Kg/day) | T-P<br>(Kg/day) | NH <sub>4</sub> -N<br>(Kg/day) | NO <sub>3</sub> -N<br>(Kg/day) | PO <sub>4</sub> -P<br>(Kg/day) |
|--------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 인평 저수지 | 43.8          | 7.70            | -               | 1.17            | 2.04                           | -                              | 1.46                           |
| 업성 저수지 | 37.4          | 1.96            | -               | 0.52            | 0.77                           | -                              | 0.66                           |
| 이담 저수지 | 17.8          | 2.47            | 2.49            | 1.42            | 0.59                           | 0.01                           | 0.44                           |
| 공리 저수지 | 29.6          | 1.40            | 0.52            | 1.52            | -                              | -                              | 0.56                           |

## 2. 오염퇴적물이 수계에 미치는 영향 분석

### 가. 연구 대상 저수지 별 용출량이 수체에 미치는 영향 비교

연구 대상 저수지별 용출량이 수체에 미치는 영향은 먼저 농도로 환산(총 용출량\*35 day/유효 저수량)한 후 저수지 수질 농도로 나눈 후 백분율로 환산한 값이다. 여기서 사용한 체류시간 35일은 '환경부 훈령 제 555호 수역별

수질평가지침'에서 정한 값을 사용하였다.

조건별 용출량이 수체에 미치는 영향은 호기 조건에서 보다 혐기 조건에서 수체에 대한 기여도가 더 크게 나타났다. 특히 인의 경우 수체에 미치는 영향이 가장 큰 항목으로 판단되며, 인평과 이담에서 각각 14.44%, 22.13%로 높은 기여도를 보였다. 또한 혐기 조건에서 COD와 T-P는 모든 저수지에서 수체에 영향을 미치는 항목으로 조사되어, 혐기 조건이 형성되었을 시 수체는 COD와 T-P의 항목에 대해 오염 물질이 용출되어 내부 오염으로 작용할 수 있을 것으로 사료된다.

(표 4.4-3) 연구 대상지 별 용출량이 수체에 미치는 영향(체류시간 35일 기준)

| 체류 시간<br>35일 기준 | 호기 COD(%) | 호기 T-N(%) | 호기 T-P(%) | 혐기 COD(%) | 혐기 T-N(%) | 혐기 T-P(%) |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 인평 저수지          | -         | -         | -         | 2.52      | -         | 14.44     |
| 업성 저수지          | -         | -         | -         | 0.69      | -         | 7.46      |
| 이담 저수지          | -         | 0.30      | 3.14      | 0.76      | 4.83      | 22.13     |
| 공리 저수지          | -         | -         | -         | 0.26      | 0.32      | 5.32      |

#### 나. 연구 대상 저수지 분류 조건 별 용출량이 수체에 미치는 영향 비교

연구 대상지를 오염원인, 설치년도에 따라 수체에 미치는 영향을 계산한 결과를 아래의 (표 4.4-4)과 <그림 4.3-13>에 나타내었다. 그 결과 호기 조건에서 생활계 및 1960년대 이후의 경우에는 용출량이 수체에 미치는 영향이 음의 값으로 오히려 감소한 것으로 조사되어 수체에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다.

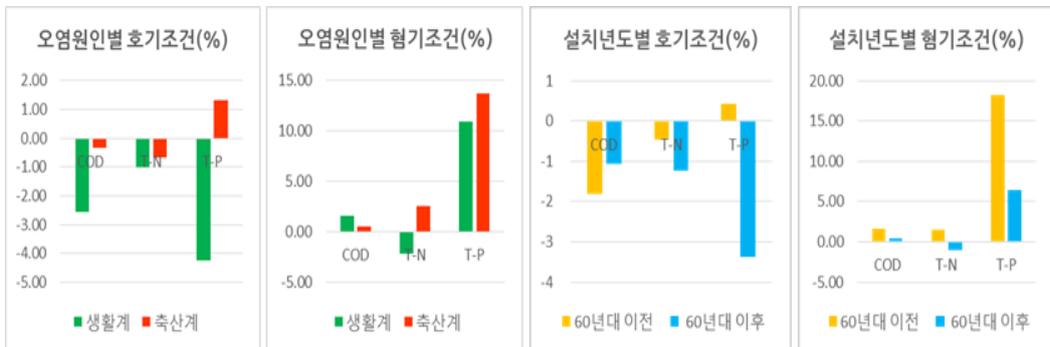
그러나 호기조건에서 축산계와 1960년대 이전 저수지의 경우 T-P에 미치는 영향이 각각 1.31%, 0.43%로 호기 조건에서도 약간 영향을 미치는 것을 조사되었다. 호기 조건에서는 이렇게 다소 미미한 영향을 미치는 것으로 조사되었으나 혐기 조건에서는 퇴적물의 용출이 저수지에 미치는 항목의 수와 영향이 크게 증가하는 것으로 조사되었다. COD는 모든 분류 저수지에서 영

향을 미치는 것으로 조사되었으며, 특히 T-P가 영향을 가장 크게 미치는 것으로 조사되었다. T-P의 경우, 용출량이 수체에 미치는 영향은 생활계에서 11.0%, 축산계에서 13.7%, 1960년대 이전에서 18.3%으로 높은 기여도를 보였고 1960년대 이후에서 6.39%로 상대적으로 낮은 기여도를 나타냈다.

앞에서는 결과 표기시 용출속도가 음의 값을 갖는 경우, 용출이 일어나지 않는 것이므로 N.D로 표기하였는데, 전체적인 용출속도의 비교를 위하여 (표 4.4-4)과 <그림 4.3-13>에서는 양, 음을 모두 표기하여 각 조건별 비교를 용이하도록 나타내었다.

(표 4.4-4) 체류시간 35일 기준 분류 조건 별 용출량이 수체에 미치는 영향

|        | 호기 생활계 | 호기 축산계 | 호기 60년대 이전 | 호기 60년대 이후 | 혐기 생활계 | 혐기 축산계 | 혐기 60년대 이전 | 혐기 60년대 이후 |
|--------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|------------|------------|
| COD(%) | -2.55  | -0.33  | -1.82      | -1.07      | 1.605  | 0.51   | 1.64       | 0.48       |
| T-N(%) | -0.99  | -0.68  | -0.45      | -1.22      | -2.18  | 2.58   | 1.45       | -1.05      |
| T-P(%) | -4.25  | 1.31   | 0.43       | -3.37      | 11.0   | 13.7   | 18.3       | 6.39       |



<그림 4.3-13> 체류시간 35일 기준 조건 별 용출량이 수체에 미치는 영향

다. 경험식을 이용한 연구 대상 저수지 별 용출량이 수체에 미치는 영향 비교

경험식을 이용한 연구 대상 저수지 별 용출량이 수체에 미치는 영향은 먼저 농도로 환산(총 용출량 \* 체류 시간/유효 저수량)한 후, 저수지 수질 농도로 나누고 백분율로 환산한 값이며, 여기서 체류시간은 Bartsch와 Gakstatter (1978)가 수리적 체류시간을 미국 북부지역 호수와 저수지를 대상으로 하여 호소표면적에 대한 호소 유역면적의 비로써 계산하였는데, 그들이 발표한 경험식을 이

용하였으며, 이 경험식을 이용한 “이, 2002”의 연구 결과를 비교·활용하였다.

$$\log t_d = -1.177 \log \frac{DA}{SA} + 4.077$$

(td: 체류시간, DA: 유역면적, SA: 호소 표면적)

이 식을 통해 산정한 체류시간과 연구 대상 저수지 별 용출량이 수체에 미치는 영향은 아래 (표 4.4-5)에 나타내었다. 경험식을 적용했을 경우, 앞서 사용했던 체류시간 35일을 보다 훨씬 긴 217~611일의 체류시간을 적용하므로 조건에 따른 수체에 대한 기여도가 보다 높게 나타났다. 따라서 모든 값에서 수체에 대한 기여도가 더 크게 나타났으며, 특히 35일의 체류시간에도 높은 기여도를 나타냈던 인의 경우 인평, 업성, 이담의 저수지에서 각각 115.54%, 118.25%, 137.35%로 100%가 넘는 기여도를 보였으며 공리에서도 92.92%의 높은 기여도를 보였다.

(표 4.4-5) 경험식을 이용한 연구 대상 저수지 별 용출량이 수체에 미치는 영향

| 만수 면적 적용 경험식 기준 | 체류 시간 | 호기 COD(%) | 호기 T-N(%) | 호기 T-P(%) | 혐기 COD(%) | 혐기 T-N(%) | 혐기 T-P(%) |
|-----------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 인평 저수지          | 280   | -25.29    | -9.57     | -18.29    | 20.19     | -15.53    | 115.54    |
| 업성 저수지          | 555   | -30.74    | -12.30    | -98.51    | 10.97     | -38.23    | 118.25    |
| 이담 저수지          | 217   | -2.91     | 1.83      | 19.47     | 4.74      | 29.99     | 137.35    |
| 공리 저수지          | 611   | -3.25     | -28.99    | -9.07     | 4.46      | 5.51      | 92.92     |

### 3. 연구 대상 저수지의 퇴적물과 수질 오염 제어 인자

용출실험에 의한 결과와 퇴적물의 오염도 및 수질오염도의 상관분석 결과를 통해 퇴적물의 수질오염 제어인자를 검토해 보았다. 연구결과로부터 먼저 혐기와 호기조건은 용출량에 크게 영향을 미치는 중요한 요인인 것으로 나타났다. T-P의 결과로부터 혐기조건은 호기조건보다 용출량을 크게 증가시키는

요인인 것으로 나타났다. 혐기조건의 경우 용출량이 수체의 수질에 미치는 영향을 조사한 결과 5~23 %의 범위를 보인 반면, 호기조건은 0~4 %인 것으로 조사되어 전체적으로 수질에 기여하는 영향율(%)은 혐기조건에서 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 심층부의 DO 농도가 퇴적물의 용출에 매우 크게 영향을 미친다는 것을 의미하며, 퇴적물에 의한 수질영향을 억제하기 위해서는 심층부의 혐기화를 막기 위한 대책이 필요하다는 사실을 시사한다.

또한 퇴적물로부터 용출되는 오염물의 양은 시간의 증가에 따라 증가하기 때문에 수체의 체류시간은 퇴적물의 수질에 대한 영향을 증가시키는 요인으로 작용한다. 앞의 결과에서 체류시간이 35일인 경우 T-P의 수질에 대한 영향율은 5~23 %인데 비하여 경험식에 의해 계산된 체류시간이 증가할수록 혐기조건에서의 영향율은 92~137.4 %로 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 일반적으로 체류시간이 길어질수록 호소의 수질이 악화되는 현상과 일정부분 맥을 같이하는 결과로 수질을 안정적으로 유지하기 위해서는 퇴적물의 용출을 억제하거나 수체 내 체류시간을 저감할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이라 판단된다.

인의 경우 흐름이 일정하게 유지되는 곳보다 정체되어 있는 곳에서 환경조건에 따라 용출이 활발히 일어나며 이는 수계내에 많은 문제를 야기하는 것으로 알려져 있다. 수질 오염에 가장 관계가 큰 퇴적물내 인은 수중 생태계의 일차 생산량을 결정하는 중요한 물질 중 하나이며, 수체 내 물질순환 과정에서 주로 퇴적물에 저장되는 원소로, 물리적인 교란 및 생물화학적 적용에 의해 수층으로 용출되어 부영양화를 가속시킨다. 수층에서 인의 농도가 높아지면 퇴적층에서도 높은 농도의 인이 존재하며, 퇴적물이 인을 보유할 수 있는 능력은 점점 포화상태에 이르게 된다. 이렇게 되면 환경의 변화에 따라 퇴적물에 함유된 인이 수층으로 용출될 가능성이 높아지며, 이 때 수계 내 저층부에서의 표층 퇴적물은 상부 수층의 인의 농도를 조절하는 일종의 완충역할을 하게 된다. 즉 수층과 퇴적물의 경계에서는 물질이동을 조절하는 경계면이 존재하고, 이 경계면의 두께에 따라 수층과 퇴적물 사이의 물질교환이 조절된다고 할 수 있다.

따라서 표층 퇴적물 내에 인이 포화되어 수계내로 용출되기 시작하면 수계내 인의 오염도가 증가하고 이는 부영양화를 가속화시켜 조류가 대발생하는 결과를 초래하게 된다. 또 부영양화 이후 수계내 유기물 및 영양염류의 증가하게 되고 퇴적층내 오염도를 증가시켜 반복·순환됨으로써 전체 수계의 오염도가 증가하게 되는 악순환이 우려된다.

## 5장. 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적 오염도 분석

1 절. 조사지구의 특성 및 현황

2 절. 유입 오염부하 변동에 따른  
퇴적물 특성



## 5장. 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적 오염도 분석

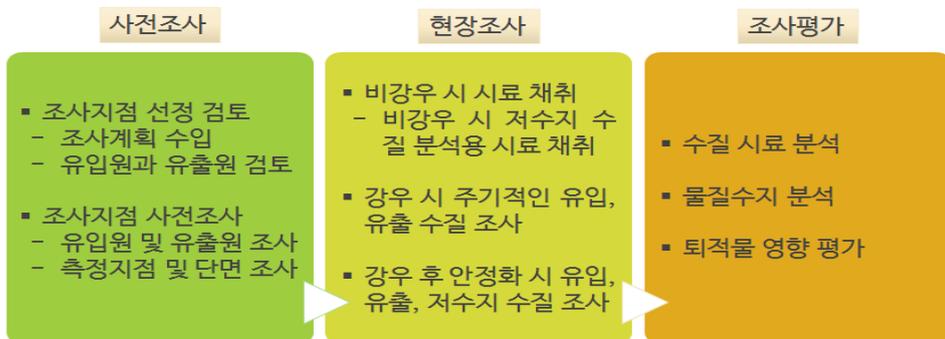
### 1절. 조사지구의 특성 및 현황

#### 1. 조사 목적 및 방법

점 및 비점오염원으로부터 유래하는 유입오염부하의 변동에 따른 저수지 내 수질의 변동성을 검토하고, 유입과 유출에 따른 물질수지 및 퇴적물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 실시하였다.

##### 가. 조사 절차 및 방법

조사 대상 저수지를 선정하고 유입 점오염원 및 비점오염원을 대상으로 정량적인 수질분석용 시료를 채취하여 수질 분석을 실시하였다. 동일시기에 저수지 및 저수지 유출수의 수질 상태에 대해서도 정량적 분석·평가를 수행하였으며 조사의 흐름도는 다음 <그림 5.1-1>에 나타내었다.



<그림 5.1-1> 물질수지 검토 조사 흐름도

- 점오염원의 유입원에 대한 수질분석용 시료채취
- 비점오염원의 유입원에 대한 수질분석용 시료채취
  - 모니터링 주기는 통상적으로 우리나라의 경우 계절적인 변화에 따라 강우 특성이 크게 다르기 때문에 다양한 시기의 강우특성별 시료 채취를 실시하는 것이 좋음. 다만 그 주기의 결정은 모니터링의 목적에

따라 선정하는 것이 바람직함 (환경부, 2008)

- 강우사상은 최소 3일(72시간)의 선행건기일수를 만족하고 강우량이 10 mm 이상의 강우사상을 대상으로 하는 것이 좋음 (환경부, 2008)
  - 시료채취방법에는 임의시료채취와 혼합시료채취(일정시간-일정부피, 일정시간-유출량 증가분, 일정시간-유량, 일정부피-유출량) 등이 있음 (환경부, 2008)
- 조사된 유입 및 유출, 수체의 수질을 기반으로 부하량 평가를 실시하고 물질수지도를 작성하며, 퇴적물에 미치는 영향을 평가

#### 나. 조사 지구의 위치 및 특성

저수지의 오염 유입부하를 통한 퇴적오염도 특성을 파악하기 위해 적합한 지구로 선정된 인평저수지는, 충남 태안에 위치하고 있으며 2개의 유입하천이 저수지로 합류되고 유입 및 유출수로가 습지 형태로 조성되어 있다. 또한 주변에 농배수로 형태의 소규모 비점오염원 유입 다수 존재하는 특성을 가지고 있으나 오염물질의 유입을 판단할 수 있는 유입/유출 경로가 단순하여 물질수지 파악이 용이한 저수지의 특성을 가지고 있다.



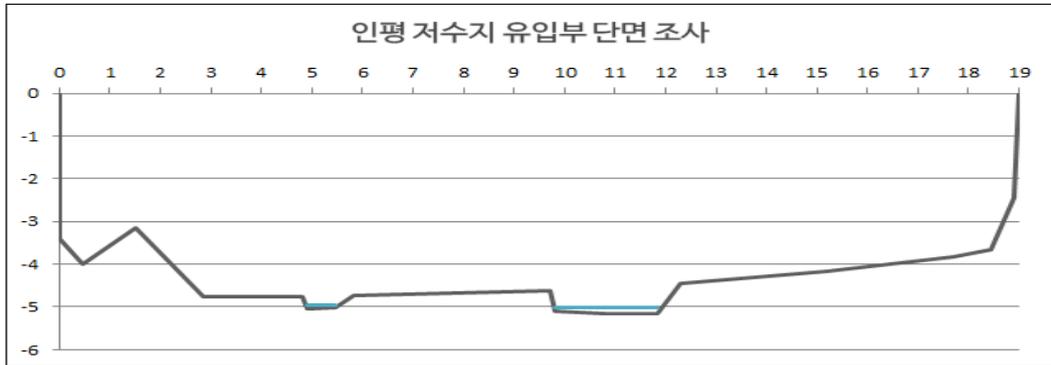
<그림 5.1-2> 인평저수지의 위치 및 전경 사진

## 2. 유입 하천의 강우시 수질 조사 결과

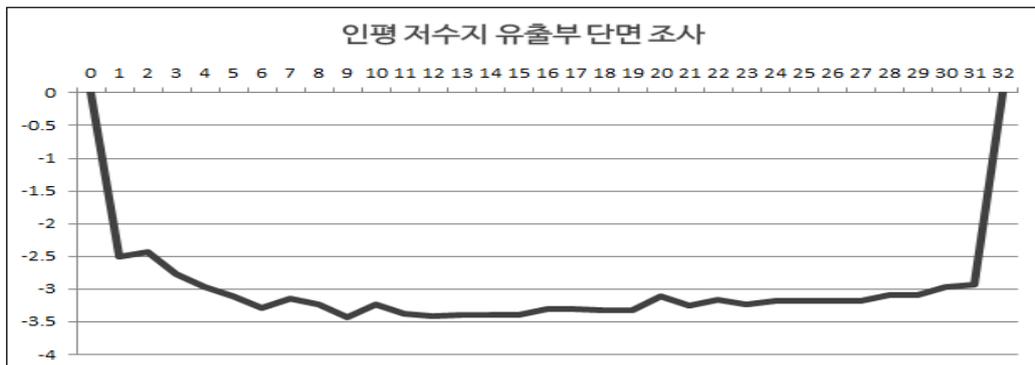
### 가. 하상 단면 조사결과

점 및 비점오염원의 유입 및 유출을 효율적으로 평가하기 위해서는 사전에 하상단면을 조사하는 것이 필요하다. 2015년 7월 28일 조사 대상지인 인평저

수지의 유입부, 유출부 하상단면 측정을 실시하였다. 유량이 거의 없던 유입부와 유출부에 직접 내려가 줄자와 자를 이용해 하상단면을 측정하였다.



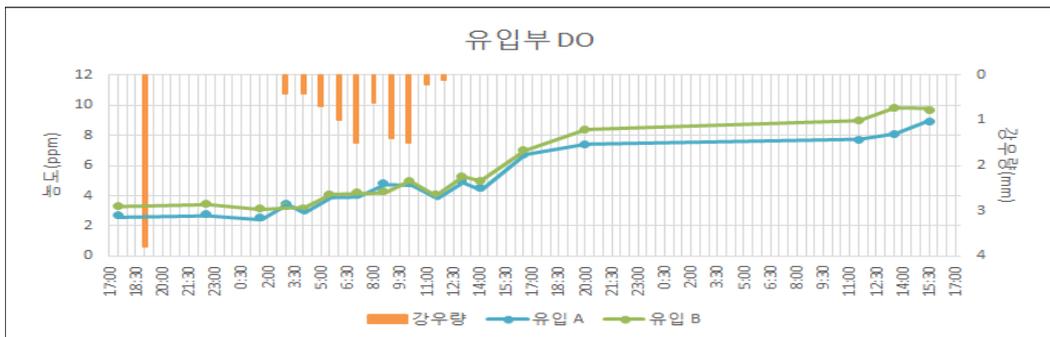
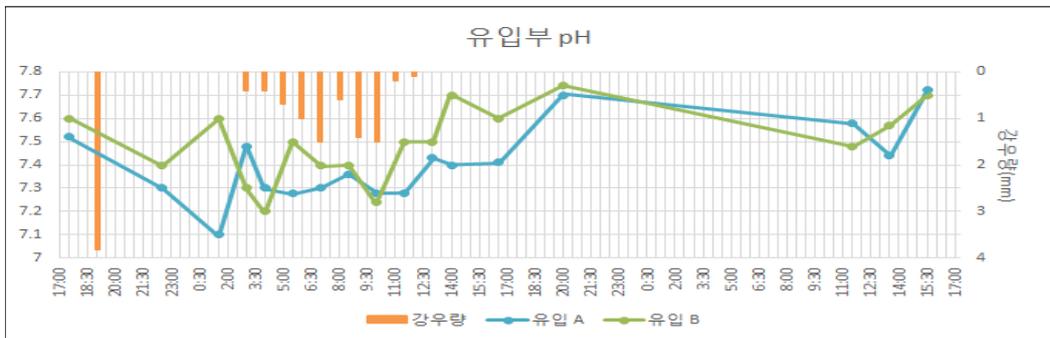
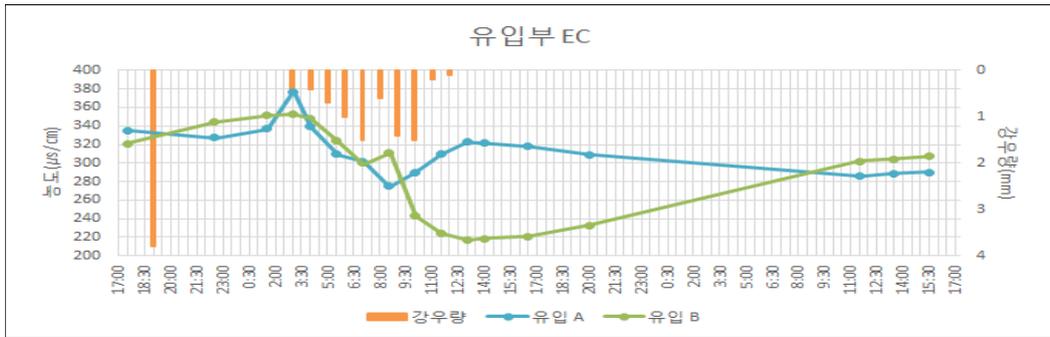
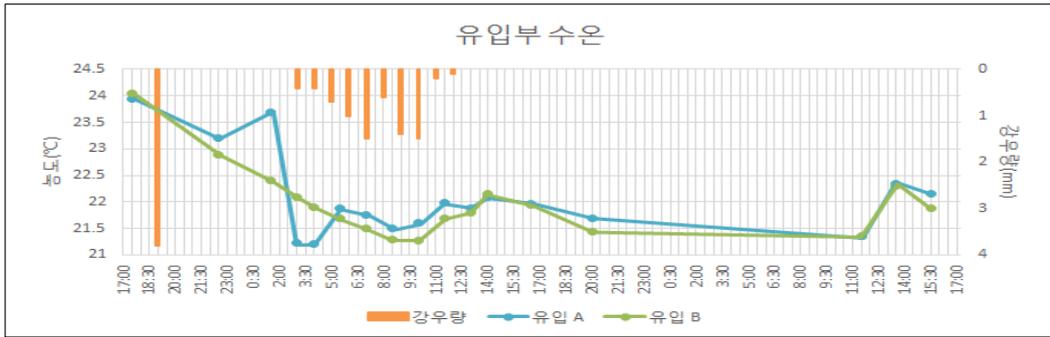
<그림 5.1-3> 인평 저수지 유입부 단면



<그림 5.1-4> 인평 저수지 유출부 단면

나. 강우시 유입 하천의 수질 조사 결과

인평 저수지의 유입 하천의 수질 조사는 총 강우 11.6 mm/hr의 강우가 내린 2015년 8월 24일~26일에 진행되었다. 아래의 <그림 5.1-5>에 조사시 현장 측정 항목에 대한 결과이며, 수온은 강우가 시작된 이후에 점차 감소하다가 강우 종료 후 증가하는 경향을 보이는데, 이는 강우로 인한 기온 저하와 측정 시간의 영향을 받은 것으로 판단된다. EC와 pH는 강우 초기에 강우로 인해 다소 변동이 발생하는 것으로 조사되었으나 강우 종료 후 빠른 속도로 강우 전 값으로 회복되는 경향을 보였다. 유입부의 DO는 강우로 인해 다소 증가하는 것으로 보이는데 이는 강우로 인해 감소한 수온의 감소의 영향을 받은 것으로 판단된다.



<그림 5.1-5> 인평 저수지 비점오염원 현장 측정 결과

### 3. 강우 사상에 대한 비점오염물질의 유입특성

인평 저수지의 유입부 지점에서의 오염물질 유입특성을 파악하기 위해 강우 시 측정된 유량조사와 수질 분석 자료를 토대로 (표 5.1-1)에 정리하여 나타내었다. (표 5.1-1)에는 강우시 동일한 강우지속시간 동안 유입부 A, B로 나뉘어져 조사된 강우사상별 침투유량, 평균유량 등 유입부의 수문학적 특성 및 각 오염물의 평균농도, 최대, 최저 농도 등 유입부의 수질상태를 나타내는 지표들을 나타내었다. 또한 강우 전 농도 및 유량변화에 따른 오염물의 농도변화를 고려한 EMC (event mean concentration) 농도를 산정하였는데, EMC 농도는 일반적으로 비점오염원에 의한 유출수의 오염물 평균농도를 나타내는데 주로 사용된다. 이러한 방법을 통해 EMC 농도는 보통 강우사상 시 측정되는 농도가 가지는 단점인 하천의 유출량을 고려하지 않고 수체 내에 포함되어 있는 오염물질의 농도만을 파악하기 때문에 강우강도의 변화에 잘 대응하지 못하는 단점을 해결해준다.

$EMC = \sum QiCi / \sum Qi$ , 여기서 Q는 유량을 C는 각 항목의 농도를 나타낸다.

최근 수체환경을 평가하는데 있어서 부하량은 매우 폭넓고 다양하게 이용된다. 이는 수체의 수질상태만을 파악하고자 할 때에는 농도 개념이 유용할 수 있으나 수계전체에서의 오염물질 거동을 파악하고 유입과 유출에 따른 물질수지를 파악하는데 있어서는 한계가 있기 때문이다. 특히 호소와 같은 정체성 수역에서는 유입하천에서 유입된 총량이 농도보다 더 중요하다. 이는 호소 내에서는 체류시간이 매우 길고 하천과 달리 점 및 비점오염원의 유입원만이 오염원으로 작용하는 것이 아니라 유입된 총량의 일부 중 퇴적된 물질은 지속적으로 내부오염을 일으켜 수질을 악화시킬 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 강우사상에 따른 비점오염원의 유입특성을 나타내고자 각 강우사상에 대한 유출 부하량을 산정하여 총유출부하량 및 강우사상별 최대, 최소, 평균 부하량도 같이 나타내었다. 이러한 전체적 결과로부터 인평 저수지의 수질에 영향을 미치는 유입하천은 유입 농도의 경우는 유입 B에서 전체적으로 높게 측정되었으나 부하량 관점에서는 유량이 더 큰 유입 A가 보다 높은 기여도를 나타낸다는 사실을 알 수 있으며, 강우강도의 증가는 비점오염원의 오염물질 유입량을 증가시켜 인평 저수지의 수질을 악화시킬 수 있다는 사실을 알 수 있다.

(표 5.1-1) 인평 저수지 비점오염원 오염물질 유입특성

|                | 유입 A                        |        | 유입 B   |        |      |       |      |       |
|----------------|-----------------------------|--------|--------|--------|------|-------|------|-------|
|                | 유입 A                        | 유입 B   | 유입 A   | 유입 B   |      |       |      |       |
| 강우 지속시간(hrs)   | 17 hrs                      |        |        |        |      |       |      |       |
| 유출 특성          | 평균 유량 (m <sup>3</sup> /hr)  | 483.25 | 312.78 |        |      |       |      |       |
|                | 침투 유량 (m <sup>3</sup> /hr)  | 936    | 896    |        |      |       |      |       |
|                | 총 유입 유량 (m <sup>3</sup> )   | 19,724 | 11,078 |        |      |       |      |       |
|                | 강우 전 유량(m <sup>3</sup> /hr) | 43.2   | 21.6   |        |      |       |      |       |
|                | SS                          | 26.12  | 34.28  |        |      |       |      |       |
|                | TOC                         | 4.43   | 5.44   |        |      |       |      |       |
|                | T-N                         | 5.08   | 7.74   |        |      |       |      |       |
|                | T-P                         | 0.281  | 0.403  |        |      |       |      |       |
| EMC<br>(mg/ℓ)  | SS                          | 35.95  | 110.61 | 5.62   | T-N  | 11.89 | T-P  | 0.597 |
|                | 최대                          | 26.23  | 50.52  | 5.51   | T-N  | 8.49  | T-P  | 0.439 |
|                | 평균                          | 9.62   | 34.19  | 5.39   | T-N  | 7.51  | T-P  | 0.359 |
|                | 최저                          | 8      | 12     | 6.88   | T-N  | 4.33  | T-P  | 0.126 |
|                | 강우                          | SS     | 29.38  | 36.00  | 5.01 | T-N   | 8.34 | T-P   |
| 부하량<br>(kg/hr) | 최대                          | 13.34  | 11.35  | 0.53   | T-N  | 2.56  | T-P  | 0.133 |
|                | 평균                          | 5.132  | 4.363  | 0.6918 | T-N  | 986.1 | T-P  | 51.32 |
|                | 총 부하량(kg/day)               | 0.35   | 0.26   | 0.15   | T-N  | 0.09  | T-P  | 0.003 |
|                | 강우                          |        |        |        |      |       |      |       |
|                |                             |        |        |        |      |       |      |       |

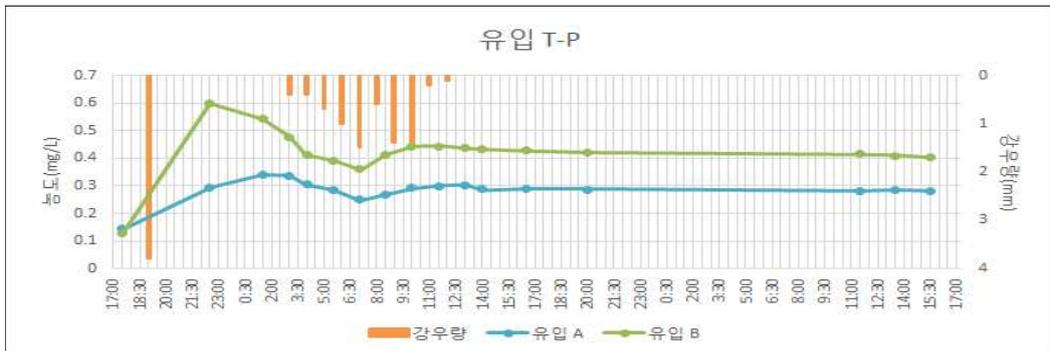
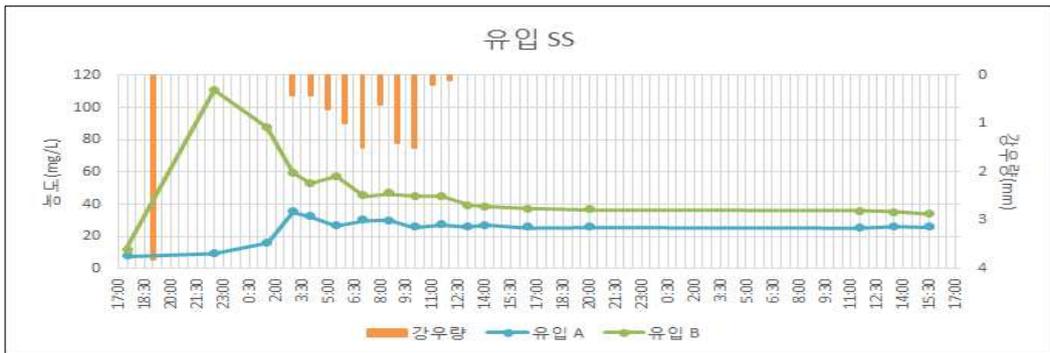
강우시 비점오염원 오염물질 유입 특성 조사에서는 강우시 오염부하량 및 유량과의 관계를 규명해 보고, 그에 따른 오염물의 유출특성 파악해 보고자 하였다. 오염부하량의 산정은 단순히 오염물의 온도에 유량을 곱하여 산출하였다. 강우시 비점오염원 오염물질 유입 특성조사를 통해 현장에서 채취한 시료의 분석 결과를 아래의 <그림 5.1-6>에 나타내었다.

이를 강우 전 농도 및 유량 변화에 따른 오염물의 농도 변화를 고려한 EMC 농도를 기준으로 보았을 때, SS는 강우가 시작한 이후 유입 B에서 크게 증가하였고 강우 종료 후 일정한 값을 나타냈다. T-N과 T-P는 강우 시작 직후에 크게 증가하는 양상을 보이며 이후 일정한 값으로 안정되었다. 모든 항목에서 유입 B가 유입 A에 비해 큰 농도를 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 부하량의 경우, 모든 항목에서 유량이 1.5배가량 더 많은 유입 A가 더 큰 값을 보였다. 따라서 오염부하량에 더 큰 영향을 미친 것은 농도보다는 유량으로 판단되며 유량은 오염부하량과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

각 비점오염원의 총 유입 오염 부하량에 대한 각 유입원이 얼마나 기여하고 있는지를 산정하여 %로 나타내었다. 산정한 영향율 결과는 다음의 (표 5.1-2)에 나타내었다. 그 결과 인평 저수지로 유입되는 비점오염원의 유입에 기여도가 더 큰 유입원은 유입 A로 밝혀졌다. 그러나 계산 결과, 영향율이 유입 B와 큰 차이가 없어 두 유입원 모두 인평 저수지의 비점오염원 유입에 각각 50%정도 기여하고 있는 것으로 판단된다.

(표 5.1-2) 각 유입원별 총오염부하량 및 영향율

|     |      | 총 오염 부하량<br>(kg/day) | 영향율<br>(%) |
|-----|------|----------------------|------------|
| SS  | 유입 A | 5,132                | 54.05      |
|     | 유입 B | 4,363                | 45.95      |
| TOC | 유입 A | 869.5                | 55.69      |
|     | 유입 B | 691.8                | 44.31      |
| T-N | 유입 A | 999.0                | 50.32      |
|     | 유입 B | 986.1                | 49.68      |
| T-P | 유입 A | 55.32                | 51.88      |
|     | 유입 B | 51.32                | 48.12      |

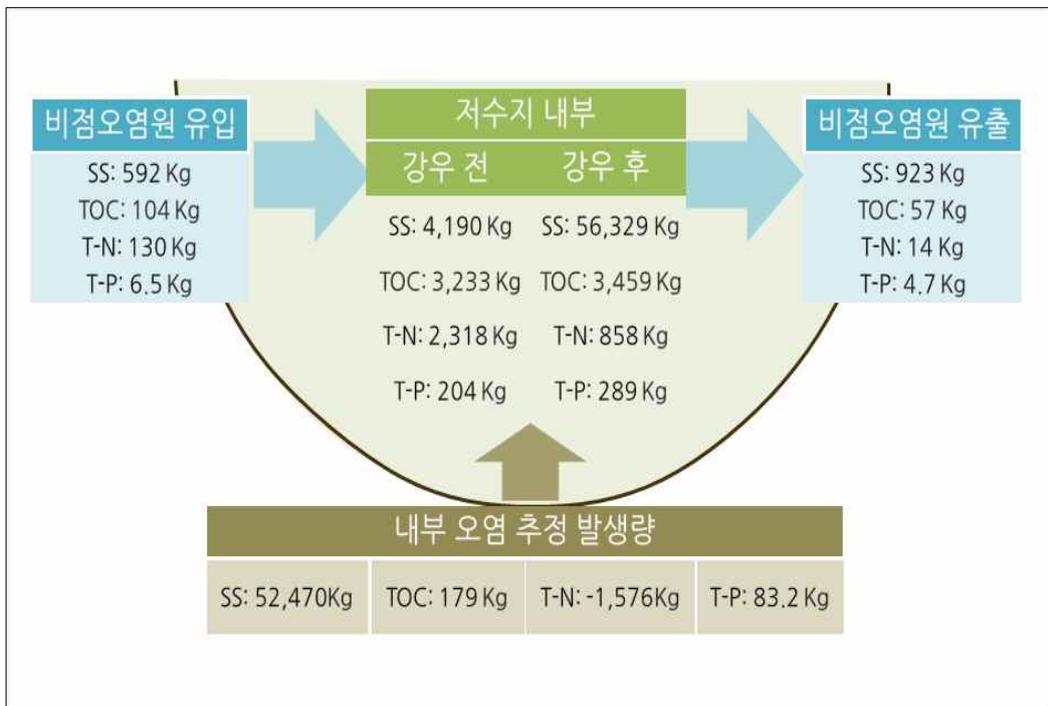


<그림 5.1-6> 인평 저수지 비점오염물질 유입 특성

## 2절. 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적물 특성

### 1. 유입/유출 추정량을 통한 물질수지

2015년도 8월 인평 저수지의 저수율 변화에 따른 유입 유출 추정량 현황 자료를 이용하여 작성한 물질수지도를 아래 <그림 5.1-7>에 나타내었다. 2015년의 기후 특성상 유출이 일어나지 않아 비점오염원 조사를 실시한 시기인 2015년 8월 24일~26일의 저수율 변화에 따른 유입 유출 추정량 현황 자료(농업기반시설관리시스템, RIMS)를 이용하여 강우 전과 후, 저수지 내부 오염물질량 변동을 산정하고 저수지 내부 오염 발생량을 추정하여 물질수지도를 작성하였다. 그 결과, SS는 유입량이 592 kg, 유출량이 923 kg으로 유출량이 더 많은 것으로 조사되었는데, 이는 오랫동안 강수량 부족으로 저수지의 저수율이 낮은 상태였기 때문으로 추정된다. 그 밖의 TOC, T-N, T-P는 유입 보다 유출이 적은 것으로 조사되었다.



<그림 5.1-7> 인평 저수지 추정 물질수지도

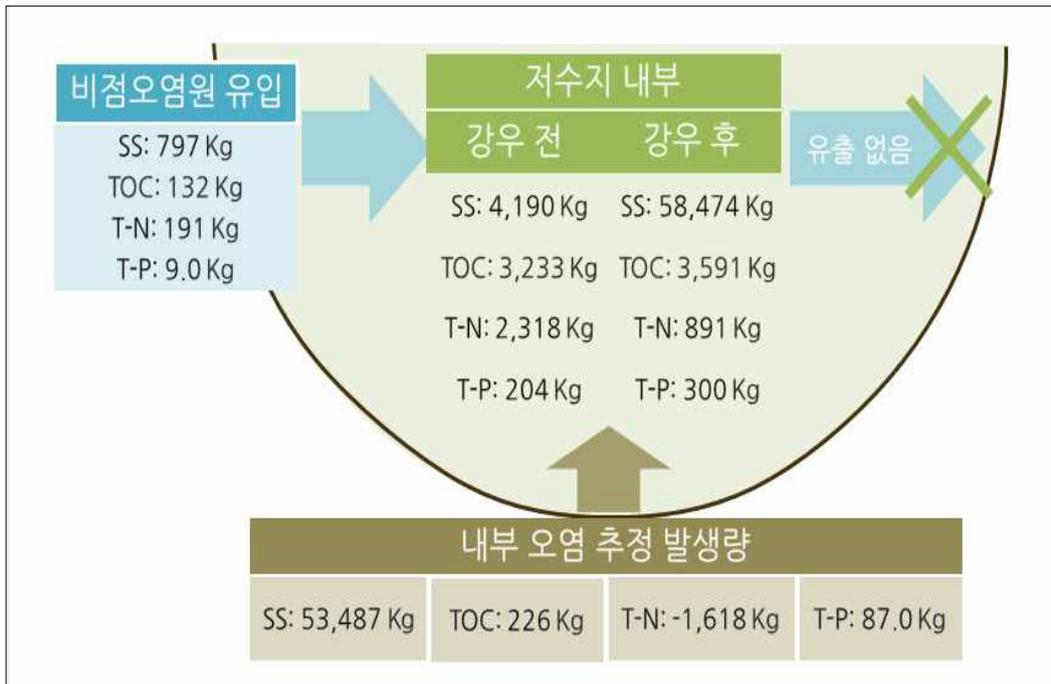
또한 T-N의 경우는 유입과 유출이 일어났다 하더라도 내부에서 침전된 양이 많아 1,576 kg이 감소된 것으로 나타났다. 내부 오염 발생량을 추정해 본 결과는 SS와 T-P 항목에서 내부 오염 추정 발생량이 비점오염원을 통해 유입된 양 보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 조사 결과는 2015년 여름 강우 특성상 비가 거의 내리지 않아 저수지 수심이 낮아진 것이 큰 변수로 작용한 것으로 판단된다. 저수지의 수심이 낮아지면서 비점오염원 유입수와 강우에 의한 수체 환란에 의한 오염물질의 용출이 심화되었을 가능성이 있기 때문인 것으로 사료된다.

## 2. 실측 자료를 통한 물질수지

2015년도 8월 24일~26일 진행된 인평 저수지의 유입 오염부하 변동에 따른 실측 자료를 바탕으로 한 물질수지도를 아래 <그림 5.1-8>에 나타내었다. 그러나 이는 2015년의 기후 특성상 유출이 일어나지 않아 비점오염원 유입량과 강우 전과 후의 저수지 내부 오염물질량 변동을 조사하여 내부 오염 발생량을 추정하여 작성하였다.

그 결과, SS는 강우 전 4,190 kg에서 강우 후 58,474 kg으로 강우 전에 비해 약 14배가량 증가하였으며, 비점오염원을 통해 유입된 양은 797 kg으로 유추된다. 따라서 내부 오염 추정 발생량은 53,487 kg으로 비점오염원으로 유입된 양 보다 약 67배 큰 것으로 조사되었다.

TOC는 강우 전 3,233 kg에서 강우 후 3,591 kg으로 358 kg이 증가하였으며 비점오염원에 의한 유입이 132 kg으로 내부오염 추정 발생량은 226 kg으로 내부 오염 추정 발생량이 비점유입량 보다 1.7배 정도 큰 것으로 조사되었다. T-N은 유일하게 강우 전 2,318 kg에서 강우 후 891 kg으로 절반이상 감소하였는데 비점오염원 유입량이 191 kg으로 조사되어 저수지 내에서 퇴적으로 인한 감소라고 하였을 때 총 1,618 kg이 퇴적된 것으로 조사되었다.



<그림 5.1-8> 인평 저수지 실측 물질수지도

마지막으로 T-P의 경우 강우 전 204 kg에서 강우 후 300 kg으로 96 kg이 증가하였는데 비점오염원에 의한 유입량은 9.0 kg으로 내부 오염 추정 발생량이 87.0 kg으로 비점유입량보다 9.6배가량 큰 것으로 조사되었다. 이러한 조사 결과는 2015년 여름 강우 특성상 비가 거의 내리지 않아 저수지 수심이 낮아진 것이 큰 변수로 작용한 것으로 판단된다.

저수지의 수심이 낮아지면서 비점오염원 유입수에 의한 수체 환란에 의한 오염물질의 용출이 심화되었을 가능성이 있기 때문이다. 따라서 내부 오염물질의 용출뿐만 아니라 수체의 환란에 의한 영향을 배제할 수 없으며, 이러한 원인으로 인평 저수지의 강우 전, 후의 오염물질 농도가 큰 차이를 보인 것으로 판단된다.



## 6장. 퇴적물의 오염 유형 및 제어 관리 방안

1 절. 퇴적물의 오염 유형 및 영향인자

2 절. 유형별 퇴적물 제어·관리 방안



## 6장. 퇴적물의 오염 유형 및 제어 관리 방안

### 1절. 퇴적물의 오염 유형 및 영향 인자

#### 1. 퇴적물의 오염 유형 분류 기준 및 영향 인자

퇴적물의 오염 특성과 수질오염의 관계에 대하여 앞의 3.3.2에서 살펴본 바와 같이, 퇴적물 중 총인이 수질 오염도와 상관성이 가장 높게 나타났으며, 특히 수질중 T-P와 가장 높은 상관성을 가지는 것으로 분석되었다. 또한 부영양 농업용 저수지의 가장 큰 문제인 부영양화로 인한 녹조 발생, 어류폐사, 악취 등이 매년 반복되고 있으며, 이는 또다시 다음 해에 퇴적층에 침적되어 유기물과 영양염류의 농도를 높이게 된다. 이로 인한 오염물질의 용출은 계절 변화에 따라 재부유·용출됨으로써 수질오염 악화의 원인으로 작용하고 있으며 2차 오염원이 될 수 있다는 문제점을 가지고 있다.

또 퇴적물의 오염 특성이 설치년도와 오염원과의 상관성이 높게 나타났으며, 항목에 따라 유입 오염부하의 종류나 토지 이용의 형태에도 영향을 받는 것으로 조사되었다. 이러한 결과들은 유기물 및 영양염류의 과다로 인한 부영양화 저수지의 오염퇴적물 개선시, 저수지의 물리적 특성을 비롯한 기본적 조건 및 기초자료의 파악을 통해 제어관리 방향 설정에 활용이 가능할 것이라 판단된다.

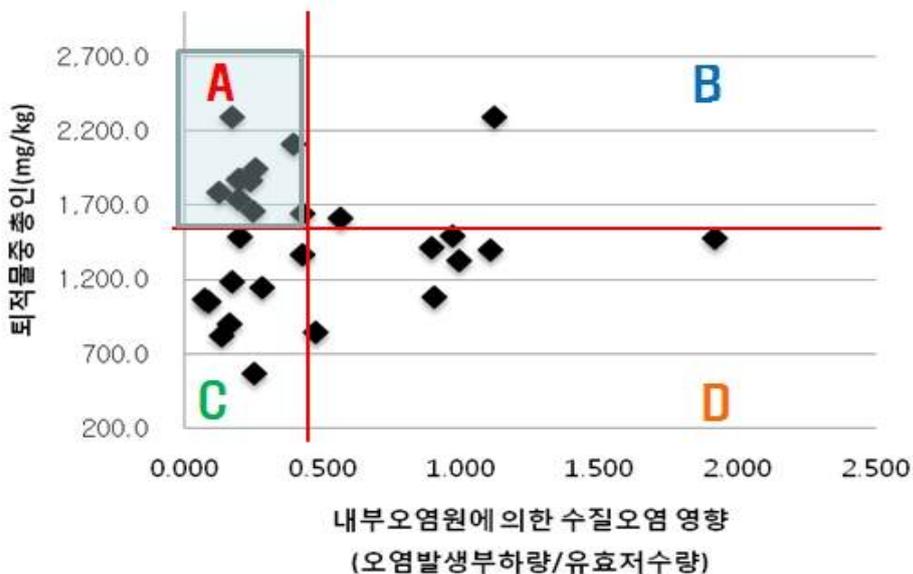
#### 2. 오염퇴적물의 특성별 유형 분류

오염퇴적물의 용출로 인한 내부생산성이 수질오염의 주요 원인이 되는 저수지에 대하여 오염퇴적물의 제어관리 기술을 적용할 때, 그 효과가 클 것이라 기대된다. 이러한 오염퇴적물이 수질오염에 영향을 미치는 저수지를 검토·선정하고 그에 따른 적절한 관리방안을 적용하는 것이 수질개선에 효과적일 것이라 판단된다. 그러나 반대로 수질오염이 심각하다고 해서 모든 저수지가 퇴적물 오염을 정화해야 하는 것은 아니다. 외부 유입오염부하가 저수지의 정화능력보다 크거나 주변에 특정오염원이 존재할 수 있으며, 저수지의 물리적 특성에 따라 수질오염이 발생하는 이유가 다양하기 때문이다. 본

연구에서 오염퇴적물에 대한 제어기술 적용이 필요한 저수지, 즉 오염퇴적물 정화로 저수지의 수질개선 효과를 기대할 수 있는 저수지를 선정하는 것이 오염퇴적물의 유형을 분류하는 목적이다.

외부의 오염유입이 크지 않으나 수질오염이 심각하며, 특별한 오염유입 없이 주기적으로 수질악화 경향을 나타내는 저수지는 높은 내부생산성이 저수지 수질 오염의 주요 원인일 가능성이 크다고 할 수 있기 때문이다. 이러한 퇴적물에 대한 적절한 기술 적용을 위해 오염퇴적물의 특성에 따라 유형을 구분하였으며, 그 기준은 다음과 같다.

- 부영양 농업용 저수지 수질의 제한인자인 T-P의 농도가 농업용수 수질 기준인 0.1 mg/L를 초과하는 저수지
- 퇴적물중 총인에 대해 오염평가 기준인 1,600 mg/kg으로 구분  
: 이는 국내의 퇴적물 관련 기준 중 가장 최소한의 기준임
- 오염발생부하량/유효저수량의 비 ≒ 0.5으로 구분  
: 유입되는 오염발생부하량/유효저수량을 통해 저수지가 오염부하를 수용할 수 있는 능력



<그림 6.1-1> 퇴적물 오염특성에 따른 분류

- **A : 내부생산형 퇴적물 오염 그룹**  
(적극적인 퇴적물 제어 기술 적용, 준설, 갯짚, 응집제 등)
- **B : 외부원인형 퇴적물 오염 그룹**  
(외부 오염유입 차단 + 퇴적물 용출억제, 저층폭기, 물순환)
- **C : 잠재형 퇴적물 오염 그룹**  
(퇴적물 관리되지 않으면, 퇴적물로 인한 수질오염 진행 우려, 갯짚, 고정화/안정화, 저층폭기, 물순환 등)
- **D : 지속관리형 퇴적물 오염 그룹**  
(유입부하 억제+ 수질개선기술 적용으로 수질개선 효과, 퇴적물에 대한 지속적 모니터링 필요)

<그림 6.1-2> 오염퇴적물의 유형 및 특성

여기에서 오염발생부하량/유효저수량의 비의 상수 0.5의 산출 근거는, 수질 T-P의 농도가 농업용수 수질기준인 0.1 mg/L를 초과하고, 퇴적물중 총인이 오염평가 기준인 1,600 mg/kg을 초과하는 대상 저수지에 대하여 오염발생부하량/유효저수량을 산출한 결과 약 0.5로 산정되어 이를 기준 상수로 적용하였다.

이러한 기준에 따라 4개의 퇴적물 오염 그룹으로 분류하였으며, 각 그룹의 특성에 따라 오염퇴적물의 적절한 관리가 적용될 때, 수질개선의 효과가 극대화될 수 있을 것이라 사료된다. 각 오염 유형 그룹에 대한 상세한 설명은 6.2.2에 상세히 기술하였다.

## 2절. 유형별 퇴적물 제어·관리 방안

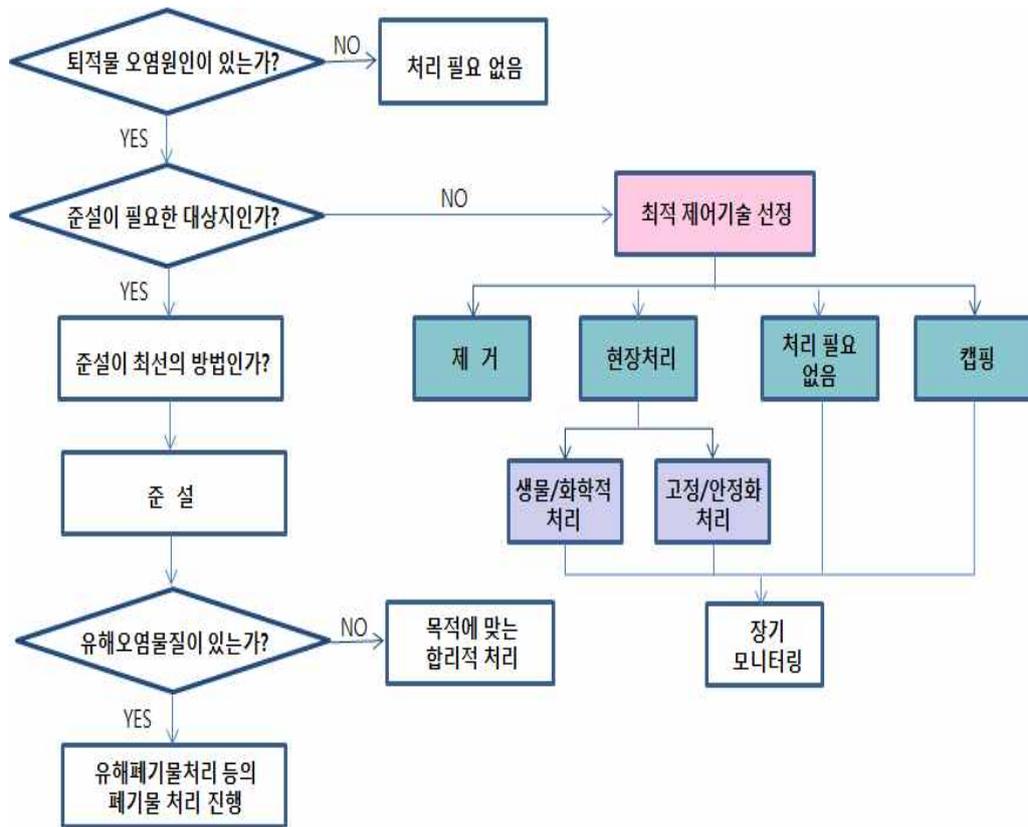
### 1. 퇴적물 제어·관리 기술 선정 기준 및 절차

오염퇴적물의 제어 기술은 지역적인 특성, 오염퇴적물의 특성, 용수 이용 목적, 가용 예산 등 제반여건에 의해 크게 좌우되기 때문에 확일적으로 나누기는 어려우며, 사안별로 적정 제어기술을 선택하여 적용해야 할 것이라 생각된다.

제어기술 선정 시에 구체적인 고려 요인은 특정 오염물질의 존재 및 유해성, 기술 적용 기간 중 용수이용 및 급수 문제, 대상 수계의 제원 및 수리학적 특성, 제어기술 적용 시 소요 기간 및 퇴적물의 처리 방법과 비용, 사회적 여론과 같은 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 이러한 대상지구의 다양한 문제점과 특수성을 고려하고, 그에 따른 보다 효과적인 기술을 적용할 때 적은 비용으로 효과적인 오염퇴적물 제어가 가능하며, 이를 장기적으로 안정하게 유지할 수 있을 것이다.

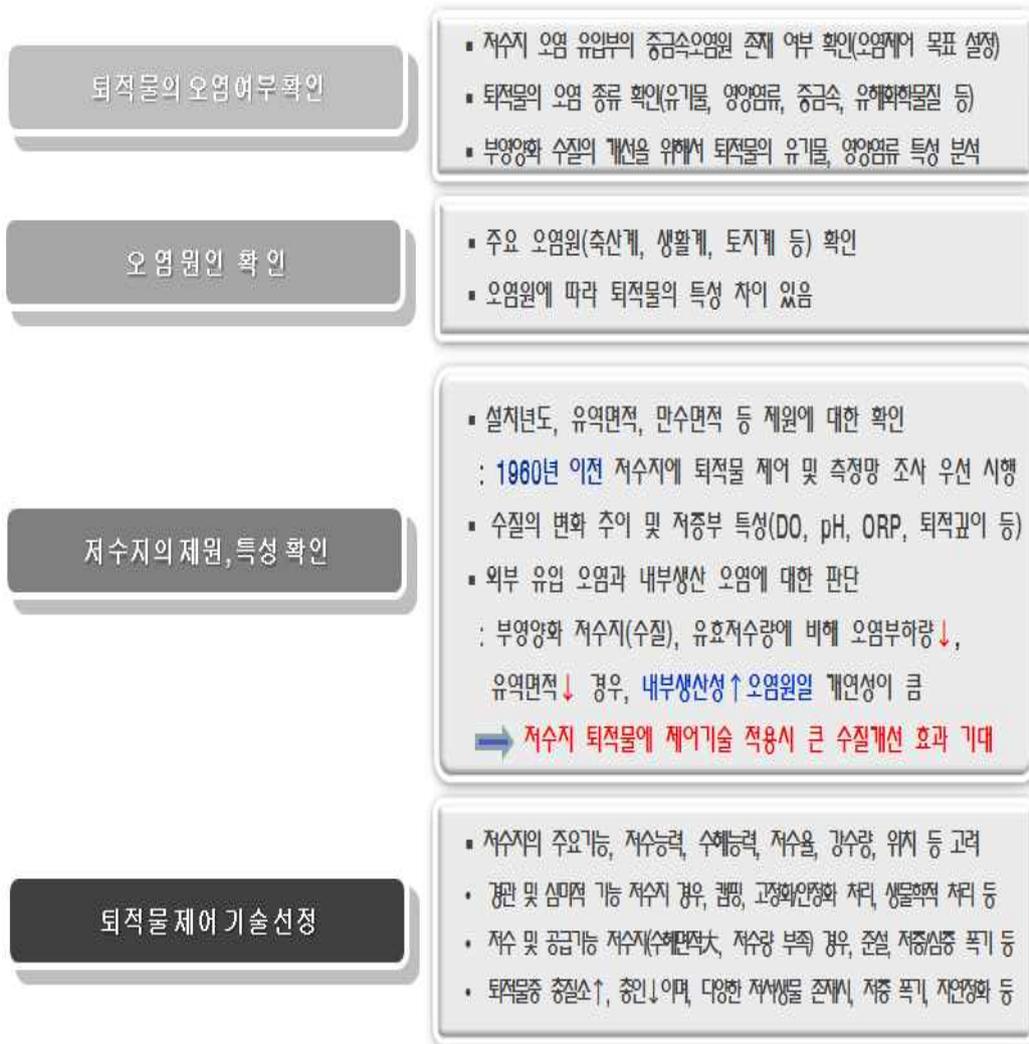
오염퇴적물의 제어·관리하는 궁극적인 목표는, 오염퇴적물이 생태계 및 인체에 미치는 악영향을 미연에 방지하기 위해 퇴적물의 추가적인 오염을 방지하는 것이며, 가능한 오염된 퇴적물을 적정한 수준까지 정화하여 오염 이전의 수계로 되돌리는 것이다. 마지막으로 오염퇴적물에 대하여 제어기술 적용 및 오염퇴적물의 제거, 운반, 처리 등의 모든 단계에서 환경 친화적인 방법을 고려하여 적용함으로써 수생태계 회복을 목표로 한다. 이러한 목표에 맞는 적절한 퇴적물 제어관리 기술을 해당 저수지에 적용하는 것이 무엇보다 중요하다고 하겠다.

오염퇴적물 제어 기술로는 자연정화, 생물/화학적 처리, 고정/안정화, 준설, 자연정화, 캡핑 등이 있으며, 퇴적물의 제어기술을 적용하기 위한 기술 선정 절차는 <그림 6.1-3>과 같다. 국내에서 오염퇴적물이 발생하였을 경우, 퇴적물을 제거하는 방법으로 준설이 가장 광범위하게 활용되어 왔으나, 퇴적물의 오염상황과 대상지구 특성에 따라 적절한 제어기술을 선택적으로 적용이 가능하다.



<그림 6.1-3> Applicable treatment options for contaminated sediment(USEPA, 1993)

오염퇴적물의 제어 관리 기술을 선정하기 위해 고려해야 할 조건 및 순서는 <그림 6.1-4>과 같으며, 먼저 퇴적물의 오염여부를 확인할 필요가 있다. 오염여부나 특성에 따라 제어기술 적용여부가 결정되기 때문이다. 다음 단계로는 오염원인에 대한 확인이 필요하다. 앞의 3장에서 저수지 오염원에 따라 퇴적물의 특성이 다르게 나타남을 확인했기 때문이다. 이어서 저수지의 제원 및 특성에 대한 상세한 확인이 필요하다. 설치년도, 유역면적, 수질변화 경향, 저수지 저층부의 특성, 외부 오염원 유입여부 등을 고려하여야 한다. 이러한 해당 저수지의 전체적인 특성이 확인되면 절차에 따라 적합한 기술을 선정한다. 각 단계별 사항에 대하여 확인 및 검토를 분명히 하여 해당 저수지에 맞는 최적의 퇴적물 제어 관리 기술을 선정하는 것이 가장 중요할 것이라 판단된다.



<그림 6.1-4> 퇴적물 제어기술 적용시 고려 사항

## 2. 오염퇴적물 특성에 따른 관리 방안

앞에서 설명한 오염퇴적물의 유형분류에 따라 적용하는 관리방안을 <그림 6.1-5>와 같이 정리하였다.

내부생산형 퇴적물 오염 그룹은 내부생산으로 인한 퇴적물내 오염물질 용출로 수질의 오염이 예상되는 그룹으로 적극적인 퇴적물 제어기술의 적용이

필요하다. 호내 수질개선을 위한 직접적 수질개선 정화기술 적용과 함께 저층부의 퇴적물 용출을 억제하기 기술 적용으로 준설, 응집제 처리, 캠프핑 등의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

외부원인형 퇴적물 오염 그룹은 외부 오염 유입이 계속되는 그룹으로 외부 오염물질 유입에 대한 차단이 함께 이루어지지 않는다면, 수질 및 퇴적물의 오염이 개선될 수 없는 그룹이다. 이 그룹은 호기 조건을 유지하기 위한 물순환 및 저층 폭기 등의 기술 적용과 함께 유입 오염원을 차단하여 개선을 기대할 수 있는 그룹이다.



<그림 6.1-5> 퇴적물 오염특성 분류별 관리 방안

잠재형 퇴적물 오염 그룹은 퇴적물의 관리가 이루어지지 않으며, 퇴적물의 오염이 진행되어 내부오염원으로 수질 오염에 크게 영향을 미치게 될 저수지의 그룹에 해당한다. 이 그룹은 저층부의 호기 조건을 유지하는 기술을 적용 하면서 퇴적물의 오염물질 불활성화, 고정화/안정화 기술 등의 적용이 필요

한 그룹이라 하겠다.

지속관리형 퇴적물 오염 그룹은 퇴적물 제어관리 기술보다는 적극적인 수질개선 기술 적용을 실시하며 퇴적물의 오염이 진행여부를 지속적으로 관찰할 필요가 있는 그룹이다. 이 그룹에는 퇴적물 제어관리 기술을 적용하더라도 다른 그룹에 비해 큰 효과를 기대하기 어려울 것으로 사료된다.

이러한 유형별 퇴적물 오염 그룹에 따라 적절한 제어관리 기술을 적용할 때, 수질개선 기술과 함께 시너지 효과를 기대할 수 있을 것이라 생각되며, 불필요한 기술 적용 없이 비용 절감과 함께 지속적인 수질개선 효과를 기대할 수 있을 것이다.

그러나 앞에서 언급했던 것과 마찬가지로 저수지마다 특성과 상황이 다르고 사안의 중요도나 사회적 민감도에 차이가 있으므로, 제어기술 선정 및 적용 시 구체적이고 계획적인 검토가 우선적으로 필요하다고 하겠다. 또한 유형별 오염퇴적물에 대한 제어기술 선정 및 적용을 위해 오염퇴적물의 특성 확인을 위한 정밀한 조사·분석이 선행되어야 하며, 이를 통해 해당 저수지에 적용하고자 하는 제어기술의 적합 여부를 판단할 수 있을 것이라 판단된다.

## 7장. 종합 평가 및 결론

1 절. 주요 결론 및 요약

2 절. 기대 효과 및 향후 계획



## 7장. 종합평가 및 결론

### 1절. 주요 결론 및 요약

하천과 호소의 퇴적물은 수계로 배출된 오염물질의 종착점이면서 동시에 지속적으로 오염물질을 수계로 배출하는 2차 오염원으로 작용하므로, 수질개선 공법의 적용만으로는 내부생산성이 높은 저수지의 수질오염 개선에 한계가 있다는 사실은 계속 제기되어 왔다.

본 연구는 농업용 저수지 퇴적물의 오염 특성을 분석하고, 퇴적물의 용출이 수질오염에 미치는 영향을 파악, 적용 가능한 오염퇴적물의 제어관리기술을 제안함으로써 오염퇴적물로 인한 수질오염 영향을 최소화하고자 수행되었다.

오염퇴적물이 수질의 미치는 영향에 대해 정량화하고 관리의 필요성에 대해 분석하였으며, 오염퇴적물이 수질오염에 미치는 영향을 최소화하기 위한 제어관리 기술 개발 기본 자료를 확보하는데 본 연구의 의의가 있다고 하겠다. 본 연구 결과에서 오염퇴적물을 제어하기 위한 제어인자를 도출하고, 각 제어관리 유형을 분류하였으며, 적합한 제어관리 기술을 적용하기 위해 고려해야 할 조건과 순서를 체계화하였다. 부영양 저수지의 오염퇴적물 특성에 대하여 내부생산형 퇴적물 오염 그룹, 외부원인형 퇴적물 오염 그룹, 잠재형 퇴적물 오염 그룹, 지속관리형 퇴적물 오염 그룹으로 나누어 관리하는 방안을 제시하였다. 이는 수질개선 공법 적용으로 수질개선의 효과를 기대할 수 있는 저수지와 내부생산성이 높아 호내 수질개선 공법 적용만으로는 지속적인 수질개선 효과를 기대할 수 없는 저수지를 구분하여 오염퇴적물의 관리가 필요한 저수지에 대하여 제어관리 기술을 효과적으로 적용하기 위한 방안이다. 이러한 적합한 기술 적용을 통해 비용과 노력을 절감하고, 지속적인 수질개선의 효과를 기대할 수 있을 것이라 사료된다.

또한 지금까지 국내에는 퇴적물 관리기술로 준설만을 적용하는 사례가 많았다. 그러나 국외의 퇴적물 관련 기준을 보면, 초기 설정 단계에서 준설도투기 처리를 위해 유기물 및 영양염류 등의 일반항목을 포함한 기준 설정의 경우가 있었으나 대부분이 중금속, 유기화학물질 등에 한정하여 퇴적물 기준을 설정하고 있다. 이는 유해화학물질에 비해 유기물이나 영양염류가 수생태계에 미치는 영향정도가 상대적으로 적고, 유해성과 위해성에 크게 차이가

있기 때문이다. 따라서 농업용 저수지에 대한 퇴적물 제어는 부영양화로 인한 수질오염을 개선하고 양질의 용수를 공급하기 위한 저수지 특성에 맞는 관리 기술 적용이 필요할 것이라 판단된다. 고비용의 준설공사와 폐기물 처리는 중금속이나 유해물질로 오염된 저수지나 저수량 부족으로 저수용량 확보가 시급한 저수지에 대하여 적용하는 것이 효율적일 것으로 사료된다. 저수지 오염퇴적물내 유기물이나 영양염류의 농도를 지나치게 낮추기 위해 과도한 비용을 투입하거나, 현실적으로 적용 불가능한 저수지에 획일적 제어기술을 적용하는 사례가 적지 않았다. 고비용이 소요되는 준설만을 최적의 농업용 저수지 관리 기술로 획일화하여 적용 할 필요는 없으며, 오염퇴적물의 제어기술을 다양하게 개발하여 저수지 특성에 적합한 기술 적용을 통해 수질 개선 효과를 극대화하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

저수지의 이용 목적이나 지역적 환경특성, 오염도의 심각성 등에 따라 다양한 퇴적물 제어관리기술의 적용이 가능하며, 이를 위해 효율적이고 한국형 농업용 저수지 특성에 맞는 퇴적물의 제어관리 기술 개발이 절실히 필요하다고 하겠다.

국내 농업용 저수지의 퇴적물에 대한 자료가 오랜 기간 축적된 다양한 수질 자료에 비해 상당히 부족하고, 미흡한 것이 현실이다. 퇴적물의 오염 개선을 통해 수질오염의 개선 효과를 배가시킬 수 있으며, 종합적인 수환경의 개선을 기대할 수 있으므로 이에 대한 지속적인 관심과 인식의 전환이 필요할 것이라 생각된다. 또한 퇴적물 측정망 운영을 통해 지속적인 퇴적물의 질을 평가·분석하고 필요시 활용할 수 있도록 데이터화할 필요성이 있으며, 수질 개선사업과 마찬가지로 오염퇴적물 개선사업을 추진하여 퇴적물의 오염도가 개선될 수 있도록 지속적인 노력이 필요하다고 판단된다.

## 2절. 기대 효과 및 향후 계획

### 1. 기대 효과

#### 가. 기술적 측면

퇴적물 제어관리를 통해 농업용 저수지 수질개선 및 기술 적용 효과의 지속성이 향상될 것으로 기대되며, 기존 개발된 수질개선기술 적용의 실효성을 높이기 위해 동반되어야 하는 퇴적물 제어기술 적용으로 수질개선 효과를 배가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

농업용 저수지의 유형별 퇴적물 특성 분석연구는 퇴적물 제어기술 개발을 위한 기본 연구로써 농업용 저수지 오염 퇴적물 개선사업 추진시 기초자료로 활용가치가 높다고 판단되며, 수질개선 효과의 극대화를 위해 수질개선 기술과 함께 퇴적물 제어관리가 진행되어야 할 것이다. 이를 통해 지속적인 수질개선의 효과를 배가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 나. 경제·산업적 측면

오염퇴적물로 인한 부영양화, 녹조 등 사회적 환경문제의 감소 및 수서 생태계 회복 등을 통한 종합적인 수환경의 개선을 기대할 수 있으며, 퇴적물 관리를 통한 노후 저수지의 저수능력 향상으로 경제성 제고 효과 또한 기대할 수 있을 것이라 사료된다.

또한 오염퇴적물의 제어관리로 양질의 농업용수 공급을 통한 우수농산물 생산기반 구축으로 국제시장에서 경쟁력을 갖춘 고품질 농산물의 생산이 가능해질 것이며, 농업용수 수질개선으로 인한 고부가치의 유기농, 친환경 농산물 등의 생산으로 농가의 소득증대 뿐 아니라, 친수공간 확보, 농어촌 생활환경개선 등의 시너지 효과도 기대할 수 있을 것이라 생각된다.

### 2. 향후 계획

효과적인 수질개선을 위해 퇴적물의 제어관리가 필수적이므로, 한국형 농업용 저수지 특성에 맞도록 최적의 오염 퇴적물 제어관리기술을 개발하고, 내부오염원에 의한 수질오염을 개선함으로써 한국형 농업용 저수지의 오염퇴적물 관리 체계를 확립하고자 한다.



## 8장. 참고 문헌



참고 문헌





## 8장. 참고 문헌

1. 강창국, Marla C. Maniquiz, 손영규, 김이형, 2010, 농업지역 내 FWS 인공 습지의 수질정화효율 분석/Vol.12(3), pp.39~47
2. 국립환경연구원, 1990, 팔당 상수원 보호 종합 대책에 관한 연구(III), NIER No. 90-17-291
3. 국립환경연구원, 1996, 호소 내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구(II) : 오염하천 유입부의 물질순환 및 식물의 정화능 평가, NIER No. 96-17-488
4. 국립환경연구원, 1997, 호소, 하천 퇴적물의 조사
5. 국립환경연구원, 2012, 소양호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가(IV)
6. 기보민, 임보미, 나은혜, 최정현, 2010, 아산호 퇴적물에서 영양염류 용출특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 32(1), 1~8
7. 김건하, 2003, International Conference on Remediation of Contaminated Sediments, 한국수자원학회지, 37(1), 104~107
8. 김건하, 정우혁, 2007, 오염퇴적물 관리방향 및 처리공법, 한국지하수토양환경학회지, 12(3), 1~9
9. 김도희, 2002, 영양염 용출 측정에 관한 고찰, 환경과학회지, 11(12), 1333~1337
10. 김영윤, 2012, 비점오염 관리를 위한 강우유출수 처리습지조성에 관한 연구, 부경대학교
11. 김영준, 2014, 새만금유역 퇴적물의 물리화학적 특성: 새만금 유역에서의 퇴적물관리, 한남대학교
12. 김용현, 2011, 우수유출 및 비점오염원 저감시설 고찰, 영남대학교 산업대학원
13. 김태유, 2011, 고령지 받 유역의 비점오염물질 유출 특성과 비점오염 저감시설의 효과 분석, 강원대학교
14. 김태훈, 2011, 화성호 퇴적물 내 인 존재 형태에 따른 거동특성 분석, 경희대학교
15. 김태철, 이재용, 윤오섭, 박승기, 1996, 담수호의 침전량과 분포 예측에 관한 연구, 한국농공학회지, 38(2), 97~107
16. 김형철, 2010, 인공습지에 의한 비점오염 저감효과 분석, 건국대학교

17. 나유미, 2005, 호수 퇴적물 인 용출 제어를 위한 현장 처리제 개발 및 모델 연구, 이화여자대학교
18. 남귀숙, 배요섭, 김형중, 이상준, 이광식, 2004, 농업용 저수지 수질개선을 위한 지하흐름 갈대 인공습지의 적용, 한국습지학회Vol.6(4), pp.59~69
19. 농림부, 2005, 농업용 저수지의 녹조제어 기법개발, 건국대학교
20. 박병훈, 2003, 자연형 하천정화를 위한 인공습지 조성방안
21. 안상원, 1999, 팔당호 표층퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출에 관한 연구, 강원대학교
22. 안재환, 김미경, 이미경, 황병기, 2005, 퇴적물 준설에 따른 수환경 영향 예측 모의, 대한환경공학회지, 27(11), 1228~1237
23. 오종민 외, 2014, 기흥저수지 수질개선 시범시설 적용방안 연구, 환경관리공단
24. 유승훈, 2010, 경안천 서하보 퇴적물이 수질에 미치는 영향분석, 명지대학교
25. 이민우, 2009, 부남호 유역의 비점오염원 배출 특성에 관한 연구, 한서대학교
26. 이상은, 2012,汽水域堆積物の汚染特性 및塩分變化에 따른營養塩類溶出特性研究 = A study on pollution level and characteristics of releasing from sediment according to salinity changes on brackish water zone, 경희대학교
27. 이시진, 박석순, 2001, 수질모형과 관리, 동화기술
28. 이요상, 2005, 저수지 퇴적물 용출이 수질에 미치는 영향, 대한환경공학회지 2005 춘계학술연구발표회 논문집, 1149~1152
29. 이용근, 2012, 수질개선을 위한 인공습지 활용 가능성, 경남발전 122호, 103~117
30. 이창희, 유혜진, 1998, 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국환경정책·평가연구원
31. 이창희, 유혜진, 2000, 수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원
32. 장봉, 2013, 중국의 저수지 퇴사 특성 비교, 동의대학교
33. 전기석, 2011, 수 환경 복원을 위한 퇴적물 준설 깊이 및 면적 설정에 관한 연구, 조선대학교
34. 전영봉, 2014, 부유토사 유출 억제를 위한 침사지 설계에 관한 연구, 광운대학교

35. 전상호, 박용안, 1989, 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재 형태와 용출 가능성에 대하여, 한국하천호수학회, 22(3), 261~271
36. 전상호, 김휘중, 1990, 경포호의 준설에 의한 수질개선 가능성에 관하여, 한국지구과학회지, 11, 174~180
37. 전지홍, 윤춘경, 함종화, 김호일, 황순진, 2002, 농업용 저수지의 물리적 인자가 수질에 미치는 영향, Korean J.Limnol. 35(1), 28~35
38. 정우혁, 2007, 모래캡핑(Capping)과 영가철(FeO)을 이용한 오염퇴적물 복원에 관한 연구, 한남대학교
39. 조영철, 김호일, 2010, 녹색성장 기반 조성을 위한 농업용 저수지의 친환경적 퇴적물 처리사업, Rural Resources, 52(2), 45~52
40. 최광순, 김세원, 김동섭, 이요상, 2014, 국내 10개 댐저수지 인공습지의 운영현황 및 개선방안, 한국습지학회, Vol.16(3), pp.431~440
41. 최선호, 2004, 저질퇴적층의 산소소모량(SOD) 추정에 관한 STELLA 모델, 인제대학교 교육대학원 환경교육과
42. 최선화, 김태훈, 오종민, 엄한용, 2013, 담수호 저층 퇴적물의 인 용출 특성, 한국관개배수논문집, 20(2), 205 ~ 216
43. 최선화, 이태호, 김해도, 이진경, 2014, 양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술 개발 및 적용, 농림축산식품부, 한국농어촌공사 농어촌연구원
44. 최익원, 문성동, 서동철, 강세원, 임병진, 박종환, 김갑순, 이준배, 허중수, 조주식, 2011, 비점오염원 저감을 위한 봉산 인공습지의 오염물질 정화효율 평가, 한국토양비료학회지, Vol.44(6), pp.1089~1094
45. 한국농어촌공사, 2011, 농업용수 수질개선 특별대책 조사지구별 단기수질개선대책 보고서
46. 한국농어촌공사, 2011, 농업용 저수지 퇴적물처리 시범사업 사후조사 보고서
47. 한국농어촌공사, 2011, 고농도 유기성준설토의 재이용 기술개발
48. 한국농어촌공사, 2009, 화성호 담수화에 관한 연구
49. 한국농어촌공사, 2005, 저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구
50. 홍일, 2003, 都市中小河川에서의 自淨能力 糾明에 관한 研究, 경희대학교
51. 한국건설기술연구원, 2007, 부영양화 호소의 수질향상을 위한 콤팩트형 조류제거 공법개발
52. 환경관리공단, 1999, 팔당호 퇴적물 현황 및 수리특성
53. 환경부, 2006, 도시비점오염원의 유출특성 변화에 적용 가능한 처리시스템 개발

54. 환경부, 2013, 생태하천 복원을 위한 오염퇴적물 최적관리 및 제도개선 방안 연구
55. 환경처, 1992, 수질보전 장기종합계획 수립 종합보고서
56. Alexander J. Horne & Charles R. Goldman, 1994, - Limnology, McGraw-Hill, Inc
57. Al Sosiak, M. Sc, 1997, Modeling if the response of PINE LAKE to reduced internal and external loadings, Water Science Br., Alberta environment protection
58. Bachand, P. A. M., and A. J. Horne, 1999, Denitrification in constructed free-water surface wetlands: II. Effects of vegetation and temperature Ecological Engineering, 14, 17~32
59. Barbanti, A., Ceccherelli, V.C., Frascari, F., Reggiani, G., Rosso, G., 1992, Nutrient regeneration process in bottom sediments in a Po delta lagoon(Italy) and the role of bioturbation in determining the fluxes at the sediment-water interface, 228, 1~21
60. Bott, T.L, 1983, Primary productivity in streams, Stream ecology, 29~53
61. Brooks, K.M., Stierms, A.R., Mahnken, C.V.W., Blackburn, D.B., 2003, Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farm, Aquaculture, 219, 355~377
62. Carignan, R., Lean, D.R.S., 1991, Regeneration of dissolved substances in a seasonally anoxic lake: The relative importance of processes occurring in the water column and in the sediments, Limnology and Oceanography, 36, 683~707
63. Cooke GD, Welch EB, Martin AB, Fulmer DG, Hyde JB, Schriever GD, 1993, Effectiveness of Al, Ca, and Fe salts for control of internal phosphorus loading in shallow and deep lakes. Hydrobiologia, 253, 323~335
64. Cooke GD, Welch EB, Peterson SA, Nichols SA, 2005, Restoration and management of lakes and reservoirs. Boca Raton, CRC Press
65. Clair N. Sawyer, Perry L. McCarty, Gene F. Parkin, 김덕찬, 배재호 외 1명 역, 2013, 환경화학, 동화기술
66. Eggen, T. and Majcherczyk, A., Effect zero-valent iron, 2006, Effects zero-valent iron(Fe<sup>0</sup>) and temperature on the transformation of DDT

- and its metabolites in lake sediment, *Chemosphere*, 62, 1116~1125
67. Fair, G. M., Moore, E. W., and Thomas, H. A., Jr, 1941, The natural purification of river muds and pollutional sediments, *Sewage Works J.*, 13(2), 270~307; 13(4), 756~779; 13(6), 1209~1228
  68. Hakanson & M. Janson, 1983, *Principles of lake sedimentology*, Springer Verlag, 245~247
  69. Hart BT, 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
  70. House, W.A. House and Denison, F.H., 2002a. Total phosphorus content of river sediments in relationship to calcium, iron and organic matter concentrations. *Science of the Total Environment*, 282-283, 341-351.
  71. Jacobs PH, Förstner U, 1999. Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites. *Water Research*, 33, 2083~2087
  72. Jafvert, C. T. and Rogers, J. E., 1991, Biological remediation of contaminated sediment with special emphasis on the Great Lakes. EPA/600/9-91/001. Environmental Research Laboratory
  73. Jahnke, R.A., Emerson, S.R., Reimers, C.E., Schuffert, J., Ruttenberg, J., Archer, D., 1989, Benthic recycling of biogenic debris in the eastern tropical Atlantic Ocean, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 2947~2960
  74. John Hull, P.E., 2000, Field-scale Testing of a Composite Particle Sediment Capping Technology, EPA/542/N00/001, Environmental Protection Agency
  75. Kairesalo,T, Tuominen,L., Hartikainen,K, 1995, The role of bacteria in the nutrient exchange between sediment and water in a flow-through system, *Microb. Ecol.*, 29, pp. 129 ~144
  76. Lerman, A., 1979, *Geochemical processes water and sediment environments*, John Wiley & Sons, Inc.
  77. Morfett, K., Davison, W., Hamilton-Taylor, J., 1988, Trace metal dynamics in a seasonally anoxic lake//*Environmental Geology and*

- Water Sciences, 11, 107~114
78. Murphy, T.P., Hall, K.J., Yesaki, I., 1983, Coprecipitation of phosphate with calcite in a naturally eutrophic lake, *Limnology and Oceanography*, 28, 58~69
  79. Murphy, T.P., Prepas, E.E., Lim, J.T., Crosby, J.M., Walty, D.T., 1990, Do it yourself dredging that works, *Lake Line*, 10, 2~4
  80. Murphy T.H., Brouwer, A., Moller, M., Fox, D., Jeffries, J., Thachuk, H., Savile, Don, H., 1993, Preliminary analysis of in situ bioremediation in Hamilton Harbour. In: *Proceeding of Workshop on the Removal and Treatment of Contaminated Sediments*, Environment Canada, Toronto, Ontario
  81. Murphy, T.P., Moller, A., Brouwer, H., 1995, In situ treatment of Hamilton Harbour sediment, *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 4, 195~203
  82. Murphy, T.P., Savile, H, 1996, System to reduce sediment toxicity, United States Patent, Patent number: 5,481,815, Date of Patent: Jan. 9
  83. Murphy, T.P., Lawson, A., Kumagai, M., Babin, J., 1999, Review of emerging issues in sediment treatment, *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2, 419~434
  84. Palermo, M. R., N. R. Francingues, and D. E. 1998, *Avevett, Environment Dredging and Disposal: Overview and Case Studies*
  85. Prepas, E., Murphy, T.P., Crosby, J.M., Walty, D.T., Lim, J.T., Babin, J., Chambers, P.A., 1990, Reduction of phosphorus and Chl-a concentration following CaCO<sub>3</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> additions to hypertrophic figure, Eight Lake, Alberta. *Environmental Science and Technology*, 24, 1252~1258
  86. Ripl W, 1976. Biochemical oxidation of polluted lake sediment with nitrate: new lake restoration method. *Ambio*, 4, 312~315.
  87. Ripl and Feibicke, 1992, Nitrogen metabolism in ecosystem, *Int Revue Ges Hydrobiol*, 77, 5~27
  88. Thomann & Mueller, 1987, *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row Publ.
  89. USEPA, 1985a, *Handbook: estimating sludge management costs*,

Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Published by Technomic Publishing Comp., Inc., Lancaster, PA

90. USEPA, 1985a, Removal and mitigation of contaminated sediments, Draft Report Prepared by Science Applications International Corporation for Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio
91. USEPA, 1993, Selection remediation techniques for contaminated sediment, EPA/823/B93/001, U.S. Environmental Research Agency
92. USEPA, 1994, Personal communication/Zeman, A.J./Environment Canada, National Water Research Institute/ Burlington, Ontario, Canada
93. USEPA, 2005, Contaminated Sdeiment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites, Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response

## 참여연구원

| 목 차                             | 소 속           | 성 명                |
|---------------------------------|---------------|--------------------|
| 제1장 서론                          | 농어촌연구원        | 이진경                |
| 제2장 퇴적물의 오염특성과 제어 관리 기술 동향      | 농어촌연구원, 경희대학교 | 이진경, 최은희<br>공동연구기관 |
| 제3장 오염된 농업용 저수지의 퇴적물 오염 현황 및 특성 | 농어촌연구원        | 이진경, 예한희           |
| 제4장 오염퇴적물의 용출특성 및 수질에 미치는 영향    | 농어촌연구원, 경희대학교 | 이진경, 김이부<br>공동연구기관 |
| 제5장 유입 오염부하 변동에 따른 퇴적 오염도 분석    | 경희대학교         | 공동연구기관             |
| 제6장 퇴적물의 오염 유형 및 제어 관리 방안       | 농어촌연구원        | 이진경, 최선화           |
| 제7장 종합평가 및 결론                   | 농어촌연구원        | 이진경, 최선화           |
| 제8장 참고문헌                        | 농어촌연구원, 경희대학교 | 이진경, 유선아<br>공동연구기관 |

## 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 : 농업용 저수지 오염퇴적물의 관리 기술 개발  
- 농업용 저수지 퇴적물의 오염유형별 관리 방안 연구

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

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