

제 1 차년도
연차보고서

축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템 개발

A Pond System for Treatment and Recycling of Animal Wastes

연구기관

전남대학교 농과대학

농림수산부



제 출 문

농림수산부 장관 귀하

본 보고서를 “축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템 개발”에 관한
연구 과제의 제1차년도 보고서로 제출합니다.

1995. 12.

주관연구기관명: 전남대학교 농과대학

총괄연구책임자: 양 홍 모

연 구 원: 이 종 욱

연 구 원: 최 수 명

연 구 원: 서 해 립

연 구 원: 김 은 선

연 구 원: 정 일 병

요 약 문

I. 제 목

축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

수질오염에 대한 국민적 관심이 고조되면서 축산시설에서 배출되는 축산폐수가 지탄의 대상이 되고있다. 축산폐수를 보다 안전하고, 효율적이며, 경제적으로 처리하면서, 축산폐수의 재활용으로 농가소득을 높일수 있는 처리방법이 절실히 요구되고 있다.

연못시스템(Wastewater Treatment Pond System)은 자연상태하에서 태양에너지와 생태계의 작용에의해 각종 하·폐수를 안전하고 효율적이며 경제적으로 처리할 수 있는 기법이다. 연못시스템은 도시하수, 공장폐수, 축산폐수를 처리하기위해 열대에서 한대에 걸쳐 전 세계적으로 도시나 마을에서 이용되고 있다.

본 연구개발의 최종목적은 우리나라 기후조건에 적합하며, 축산폐수를 효율적으로 처리할 수 있는 연못시스템을 개발하는데 있다. 연못시스템의 폐수처리를 촉진하고 연못시스템 소요면적을 줄이는데 기여할 Pit를 개발한다. 처리수를 이용한 양어기술과 양어지 모델을 개발하여 농가의 소득을 증대시킬수 있는 방안을 연구하며, 연못시스템과 양어지를 결합시켜 폐수처리 - 양어 과정이 수행되는 축산폐수 처리 - 재활용 시스템을 개발한다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1차년도 주요 연구 내용 및 범위는 1) 문헌조사, 연못시스템을 설치할 현장의 조사분석, 연못시스템의 설계요소 검토, 연못시스템 모델을 설계하였으며, 2) Pit의 기작연구 및 설계요소를 검토하고, Pit 모델을 설계하였으며, 3) 처리수를 이용한 양어의 문헌조사와 양어지를 설계하였다. 4) 설계한 연못시스템 모델과 양어지 모델을 시공하여 연못시스템의 초기적용 조사분석, 양어지의 초기어류사육을 실험하였다.

연못시스템의 시공은 1차년도 시공예산의 범위를 초과하여, 연못시스템의 초기적용과 초기양어 실험에 필수적인 시설과 공사성격상 先工事を 해야하는 부분은 선공사를 시행하였다.

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

연못시스템 모델의 유체흐름 실험결과 연결파이프를 방출연못의 상부에서 유입연못의 하층으로 연결하고, 각 연못의 유입구와 방출구를 대각선에 위치 하도록하는 것이 폐수의 단기이동방지를 완화할 수 있는 방안으로 규명되어 설계에 반영하였다.

국내 축산폐수 처리시설의 수질기준은 공동처리시설의 경우 1996. 1. 1 부터 BOD₅ 와 SS는 30mg/l, 총질소는 120mg/l, 총인은 16mg/l 이하가 적용된다. 축산폐수시설의 설치허가를 받은 자가 설치한 축산폐수 정화시설은 BOD₅와 SS를 150 mg/l 이하로 규정하고 있으며, 상수원 보호구역 및 특정호소 수질관리 구역에서는 BOD₅와 SS를 50mg/l이하로 규정하고 있다.

1차연못 초기실험 결과 BOD₅와 SS농도가 공동처리시설의 방류수질 기준에 근접하고 있다. 연못 및 Pit의 설계가 양호하고, 특히 Pit내부로 용존산소 침

투가 효율적으로 차단되기 때문으로 사료된다. 1차연못 처리수의 총질소와 총인의 농도는 공동처리시설 방류기준치보다 훨씬 낮은 수준이다. 연못시스템에서 녹조성장으로 N, P가 효율적으로 제거되기 때문이다.

초기양어 실험결과 잉어의 평균체중은 8월에 205.9 g에서 9월과 10월에 207.9와 209.2 g으로 각각 늘었다. 8월에서 9월까지의 일간성장률은 0.068 g/일/마리였고 9월에서 10월까지의 0.065 g/일/마리였다. 9월의 생산율이 90%, 10월의 생산율 82% 수준이었다. 1 차연못의 처리수를 2주간격으로 유입하면 양어지의 수질이 나빠 잉어가 죽는 현상은 일어나지 않았다.

개발한 연못시스템은 연못시스템을 구성할 연못의 수, 연못의 종류, 각 연못의 크기, 유입폐수의 BOD₅ 부하량을 적절히 조절하면 액상폐수 (뇨·오수) 뿐만아니라 분·뇨·오수를 동시에 처리할 수 있다.

축산농가의 산화구는 수심이 낮아 상층의 용존산소가 바닥으로 유입되어 메탄발효가 정지되는 현상이 일어나고 있으며, 폐수의 유입위치가 잘못 설계되어 폐수의 단기이동현상이 발생하여 처리효율이 매우 낮다. 연못시스템의 일부기능을 수행하는 간이정화조와 산화구를 연못시스템으로 설계하면 간이정화조와 산화구의 문제점을 동시에 해결할 수 있다.

국내여건에서는 중소규모 축산시설의 폐수를 처리하는데 연못시스템이 적합하다고 본다. 토지확보가 가능하면 대형 축산폐수 공동처리시설로 이용할수 있다.

연못시스템은 처리수를 양어에 이용하고 처리수의 조류를 퇴비로 사용할 수 있어 축산폐수를 처리하면서 자원화가 가능하다. 양어에의한 실질적 농가 소득이 가능하다.

연못시스템은 하천 및 호수 수질에 영향을 미치는 질소, 인등의 영양소, 기생충알 및 병원균을 동시에 제거하는 장점이 있다. 액상 축산폐수를 처리하는 기존 방법은 처리수내에 존재하는 영양소(N, P)를 동시에 제거하지 못하고 있다.

처리장의 건설 및 운영 비용을 동시에 고려하면, 서독의 경우 연못시스템이 전통적인 활성슬러지법보다 비용이 덜들며(Bucsteeg, 1987), 중국은 처리장의 양어소득을 고려하면 활성슬러지법의 1/5에서 1/6 수준이라고 한다(Baozhen, 1987). Pit의 도입으로 소요면적을 축소하고 양어소득을 고려하면 중소규모의 축산농가에서 경제적 활용가치는 높다고 할 수 있다.

SUMMARY

A model of a pond system is developed for treatment and recycling of wastes excreted by twenty three adult dairy cattles. The pond system is composed of a wastewater treatment pond system and six small fish ponds. The treatment pond system consists of three facultative ponds in series: primary - secondary - tertiary pond.

A pit is constructed at the bottom of primary pond for efficient sluge sedimentation and effective methane fermentation. It is designed to block the penetration of oxygen dissolved in the upper layer of pond water into it. Effluent from primary pond is channeled into fish ponds in which carps are reared without feeding.

The excreta passed from the cattles in their stalls are diluted by groundwater used for clearing the stalls. The diluted excreta are channeled into the pit.

The average concentrations of BOD₅ and SS in influent into the pit are 320 and 330 mg/l respectively. Analysis of those of BOD₅ and SS in effluent from primary pond shows that approximate 90% of BOD₅ and SS are removed.

The average concentrations of NO₃-N and PO₄-P in influent are 179 and 20 mg/l respectively. Those of NO₃-N and PO₄-P in effluent from primary pond are 32 and 5 mg/l respectively. Approximate 82% of NO₃-N and 79% of PO₄-P are removed in primary pond, which results mainly from active growth of algae in the upper layer of pond water.

The death rate of the carps is very low and the growth rate of them

increases slightly.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. Model of Pond System and Pit

Chapter 3. Treatment Level of Pond System at Early Stage

Chapter 4. Aquaculture Using Treated Animal Wastewater

Chapter 5. Conclusion and Utilization of the Model

목 차

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적과 범위

제 2 장 연못시스템 및 피트 모델 개발

제 1 절 연못시스템 특성

제 2 절 기존 연못시스템 연구

제 3 절 연못시스템과 양어, 유기농업 결합

제 4 절 기존 산화지, 간이정화조의 문제점

제 5 절 연못시스템 및 피트 모델설계

제 3 장 연못시스템 초기 폐수처리수준 분석

제 1 절 초기 폐수처리 수준

제 2 절 조류의 성장

제 4 장 처리수 이용 양어

제 1 절 어 종

제 2 절 재료 및 방법

제 3 절 실험 결과

제 5 장 연구 성과 및 활용방안

제 1 절 연못시스템 및 피트 모델

제 2 절 양어지 모델

제 3 절 연구개발성과 활용방안

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적과 범위

1. 연구개발의 배경

최근 상수원 및 하천의 수질오염에 대한 국민적 관심이 고조되면서 축산시설에서 배출되는 축산폐수가 지탄의 대상이 되고있어, 축산폐수처리는 축산업이 해결해야할 시급한 과제로 대두되고 있다.

축산폐수중 돈사와 우방 및 착유실에서 배출되는 슬러리, 소 운동장에서 우수시 씻겨내려오는 분이 수질오염을 야기하는 주된 원인이 되고있다. 이들을 처리하기위해 다양한 처리방법이 이용되고 있으나 처리효율과 설치운영비가 축산실정에 적합하지 않아 기술개발이 필요하다. 특히 대다수 축산농가에 설치되어 있는 간이정화조와 산화구는 처리효율이 매우 낮아 대체 기술이 필요하다. 축산폐수를 보다 안전하고, 효율적이며, 경제적으로 처리하면서, 축산폐수의 재활용으로 농가소득을 높일수 있는 처리방법이 절실히 요구되고 있다.

연못시스템(Wastewater Treatment Pond System)은 자연상태하에서 태양에너지와 생태계의 작용에의해 각종 하·폐수를 안전하고 효율적이며 경제적으로 처리할 수 있는 기법이다. 연못시스템은 도시하수, 공장폐수, 축산폐수를 처리하기위해 열대에서 한대에 걸쳐 전 세계적으로 도시나 마을에서 이용되고 있다.

국내의 경우 연못시스템의 보급이 늦은 편이며, 축산폐수처리에 이용하려는 연구가 활발하지 못한 상태이다. 연못시스템의 극히 일부과정을 수행하는 산화지(Oxidation Pond)와 간이정화조가 환경처 및 축산관련기관의 권장으로

축산농가에서 이용되고 있는 실정이다.

연못시스템의 처리수에는 다량의 藻類(Algae)가 있어 양어에 이용하거나, 농업관수로 사용하여 조류를 유기퇴비화할 수 있다. 廢水-綠藻-養漁-作物의 생태적 처리 및 재활용의 과정이 지속적으로 일어나는 연못시스템은 축산폐수를 효율적으로 처리할수 있어 수질개선에 기여할뿐만아니라, 양어와 작물의 수확으로 축산농가의 소득증대에도 기여할 수 있다. 연못시스템은 친환경적이며 지속가능한 개발개념에도 부합하는 축산폐수처리 방법이라 할수있다.

2. 연구개발의 목적

본 연구개발의 최종목적은 1) 우리나라 기후조건에 적합하며, 축산폐수를 효율적으로 처리할 수 있는 연못시스템을 개발하는데 있으며, 2) 처리수를 이용한 양어기술과 양어지 모델을 개발하여 농가의 소득을 증대시킬 수 있는 방안을 연구하며, 3) 연못시스템과 양어지를 결합시켜 폐수처리 - 양어 과정이 수행되는 축산폐수 처리 - 재활용 시스템을 개발하는데 있다.

3. 1 차년도 연구목표

1차년도의 주요 연구목표는 연못시스템과 Pit의 연구를 통해 연못시스템과 Pit의 모델을 설계한 후 1차년도 예산의 범위내에서 이들을 시공하고, 연못시스템 초기적응을 분석하며, 처리수를 이용하는 양어지 모델을 설계하고 예비양어지를 시공하여 처리수를 재활용하는 초기 양어를 실험하는데 있다. 1

차년도 예산의 범위를 초과하나 연못시스템 초기적용과 초기양어 실험에 필수적인 시설 혹은 공사성격상 先工事를 해야하는 부분은 선공사를 시행하고 2차년도의 예산에서 처리하도록 조치하였다.

4. 1 차년도 연구범위

1) 연못시스템을 설치할 현장의 조사분석, 연못시스템의 설계요소 검토, 연못시스템 모델을 설계하며, 2) 연못시스템의 폐수처리를 촉진하고 연못시스템 소요면적을 줄이는데 기여할 Pit의 기작연구 및 설계요소 검토, Pit 모델을 설계하며, 3) 처리수를 이용한 양어의 문헌조사, 양어지를 설계하며, 4) 설계한 연못시스템 모델과 양어지 모델을 1차년도 예산범위내에서 시공하여 연못시스템의 초기적용 조사분석, 양어지의 초기어류사육을 실험한다.

제 2 장 연못시스템 및 피트(Pit) 모델 개발

제 1 절 : 연못시스템 특성

1. 연못의 종류

폐수처리 연못의 종류는 유기물부하가 과다하여 용존산소층이 없는 혐기성 연못(Anaerobic Pond), 유기물 부하가 적어 전체에 용존산소가 존재하며 흔히 마무리처리(Maturation or Polishing Pond)로 이용되는 호기성 연못(Aerobic Pond), 호기성층과 혐기성층이 공존하는 조건성 연못(Facultative Pond), 조류(Algae) 성장에 의한 산소 공급보다는 기계로 산소를 공급하는 폭기식 연못(Aerated Pond), 수심 30 - 40 cm의 고속처리연못(high-rate pond)이 있다.

혐기성 연못이 유기물 부하량이 적어지면 조건성 연못으로, 호기성 연못이 유기물 부하량이 증가하면 조건성 연못으로 변하기 때문에, 조건성 연못이 일반적으로 많이 이용되고 있다. 온대권에서는 혐기성, 조건성, 호기성 연못을 적절히 연결시켜 병렬형(series), 직렬형(parallel), 혹은 병렬과 직렬 혼합형으로 연못시스템을 설계하고 있다.

2. 폐수처리 기작

연못속의 폐수처리는 수많은 생물학적, 화학적, 물리적 반응에 의해서 이루어진다. 1)침전(Sedimentation), 2)유기산생성(Acid Formation), 3)메탄발효(Methane Fermentation), 4)호기성산화(Aerobic Oxidation), 5)광합성산소

배출(Photosynthetic Oxygenation), 6)황 및 질소 변형 (Sulphur and Nitrogen Transformation), 7)영양소, 중금속, 기생충알 및 병원균 제거가 규명되어 왔다 (EPA, 1983; Oswald, 1968; Oswald, 1988b; Parker, 1979). 이들 반응중 연못시스템을 설계할때 이용하는 핵심반응은 호기상태에서 일어나는 호기성산화와 광합성산소배출, 혐기상태에서 일어나는 유기산생성과 메탄발효이다.

그림 1은 전형적인 조건성연못의 단면을 보여준다. 수심 1.5 - 2.5 m의 조건성 연못은 햇빛이 비치면 태양열로 온난하고 밀도가 낮은 상층과, 차갑고 밀도가 높은 하층으로 구분된다. 상하층이 구분되면 수직으로 물의 이동이 없어 바닥에 고형물이 침전되고, 얇은 슬러지층이 형성된다. 하층은 혐기성 상태가 되어 혐기성 박테리아 활동으로 침전된 有機物이 분해되어 유기산이 생성된다. 이 유기산을 메탄박테리아가 메탄과 이산화탄소로 분해시킨다. 상층에서는 호기성 미생물에의해 유기물이 이산화탄소, 물, 영양분으로 분해된다. 햇빛이 쬐이면 藻類(algae)가 이산화탄소와 영양분을 흡수하여 성장하면서 산소를 배출한다. 이때 상층은 용존산소가 포화상태에 이르게 된다. 호기성산화와 광합성산소배출은 상호공생관계이다 (Oswald, 1988b).

3. 연못시스템 구성

일반적으로 연못시스템을 구성하는 기본연못은 조건성 연못이다. 효율적인 하·폐수처리를 위해 그림 2 처럼 여러 종류의 연못시스템이 직렬형 혹은 병렬형으로 구성된다.

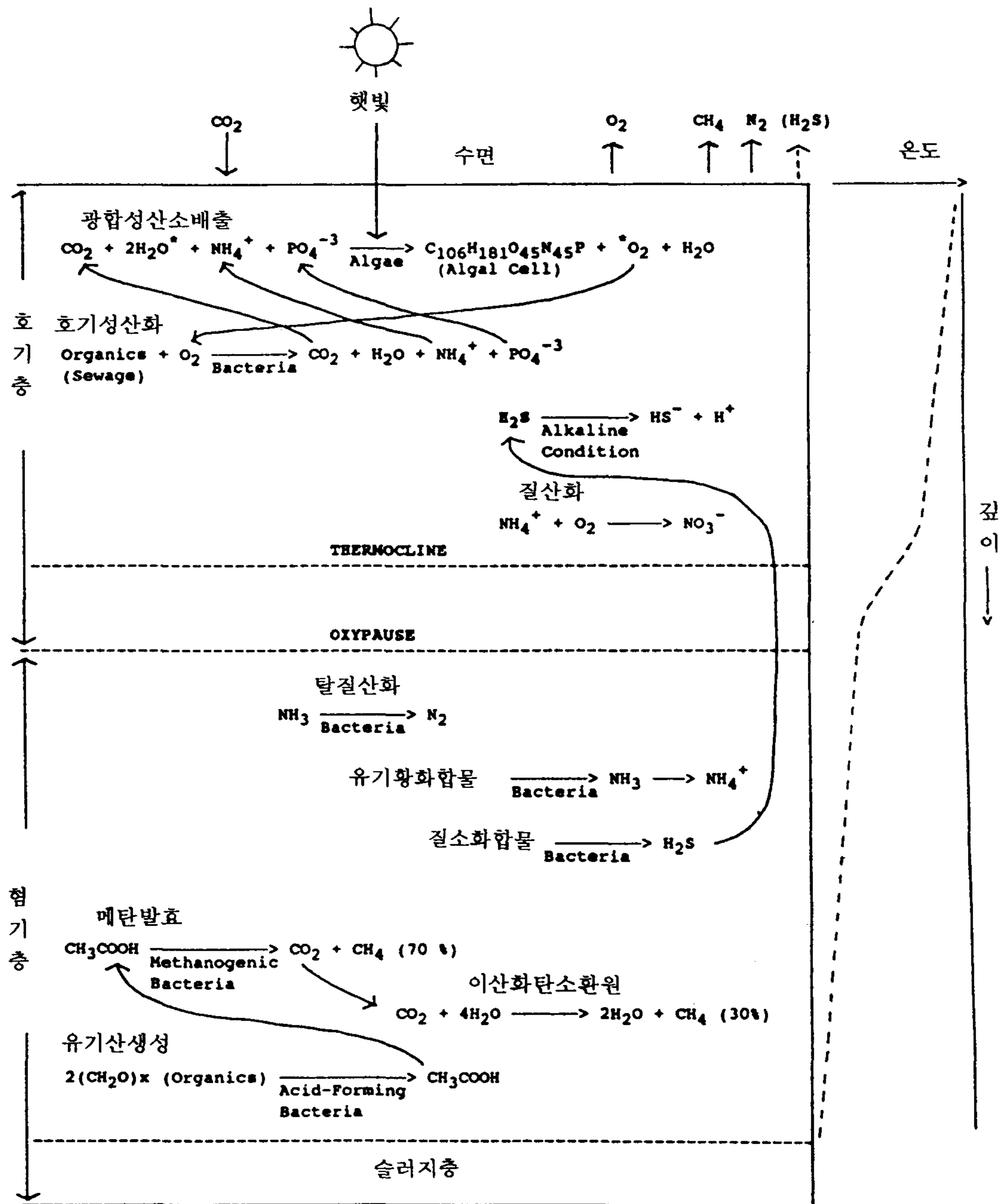


그림 1 : 조건성연못의 하·폐수분해 작용

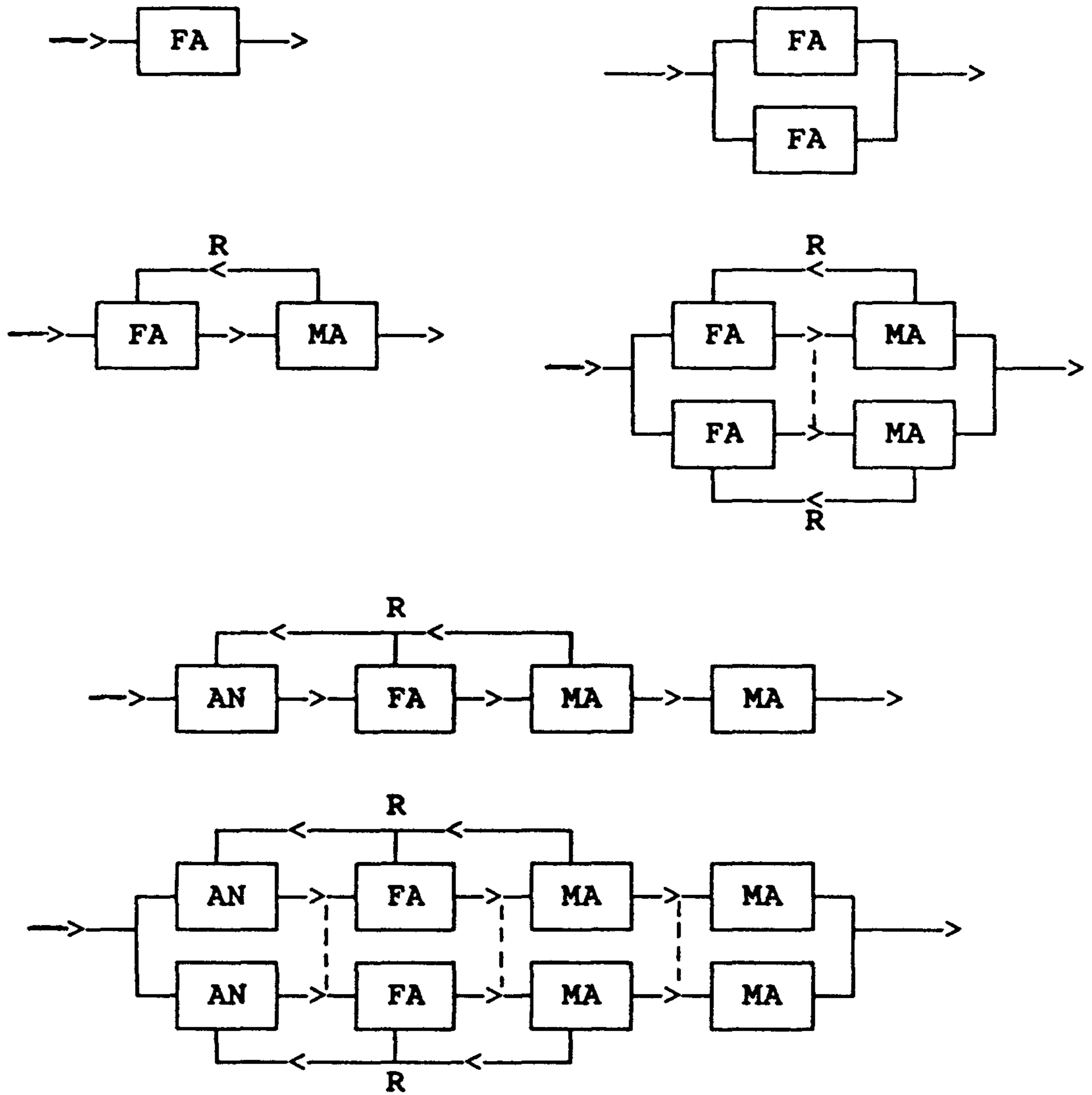


그림 2 : 병렬형 및 직렬형 연못시스템 구성

FA: 조건성 연못

AN: 혐기성 연못

MA: 호기성(마무리) 연못

R: 재순환(recirculation)

→: 하·폐수 흐름

---: 우회파이프

4. 연못시스템의 장점

연못시스템은 태양에너지가 공급되고 적절한 온도가 유지되면, 산소가 무한정 생성되고, 폐수의 유기물이 미생물의 번식과 藻類의 성장에 이용되면서 폐수가 생태적으로 처리되어 BOD₅ 를 30 mg/ℓ 이하로 낮출수 있다.

연못시스템은 영양소(질소, 인등), 기생충알 및 병원균, 중금속을 동시에 제거할수 있다. 2차처리수준의 기계적 활성오니처리법은 이들을 처리할 수 없어 과다한 비용이 소요되는 3차이상의 처리수준이 요구된다. 녹조의 성장으로 영양소 특히 인(P)과 질소(N)의 제거가 용이하다. 다른 처리기법과는 달리 연못처리시스템은 축조된 뚝을 손쉽게 원상으로 회복시킬 수 있어 연못시스템 설치장소를 다른 토지용도로의 전용이 쉽다.

제 2 절 기존 연못시스템 연구

연못시스템 설계기법들은 BOD₅ 부하량에 기초를 두고있다. 면적부하율 모델(areal loading rate)(EPA, 1983), Gloyna 모델(Gloyna, 1971), 완전혼합 모델(complete mix model)(Marias & Shaw, 1970), 플러그유하모델(plug flow model)(Middlebrooks et al., 1982), Oswald 모델(Oswald, 1988b)등이 연못시스템 설계를 위해 개발되어 왔다. 온대권에서는 면적부하율모델, Gloyna 모델, Oswald 모델을 응용하는 것이 바람직하다.

미국 환경처(EPA)에서 1983년 개발한 면적부하율모델은 아래 도표를 기준으로 연못시스템의 설계를 권장한다. 이 모델은 최근에 연구가 진행되고 있는 Pit를 고려하지 않은 모델이다.

표 1: 면적부하율 모델 권장 연못시스템 구성

겨울평균기온	총체류기간(일)	수심(m)	평균 BOD ₅ 부하량 (kg/ha/day)	시스템구성	연못 수
0 - 15°C	40 - 60	1.2 - 1.8	22.4 - 44.8	직렬형	3 - 4+
0°C 이하	80 - 120	1.5 - 2.4	11.2 - 22.4	직렬형	3 - 4+

겨울 평균기온이 0°C이하인 지역(예, 서울지역 - 1.8°C)에, EPA기준에 따라 연못시스템을 설계했을때 많은 면적이 요구되는 원인은 첫번째 조건성연못의 수심을 1.5 m로 하면서, H₂S 냄새를 막기위해 BOD₅ 부하량을 40 kg/ha/day 이하로 하기 때문이다. 면적부하율모델에서는 후속 연못의 수심을 2.4 m로 권장한다. 겨울철 평균기온이 0 - 15°C인 지역의 첫번째연못의 BOD₅ 부하량은 100 kg/ha/day를 제시하고 있다. 온대권에 위치한 연못시스템의 폐수 총체류기간은 약 100일정도가 일반적이다.

첫번째 조건성연못은 연못시스템에서 중요한 역할을 한다. 유기물이 바닥에 침전되어 슬러지층이 형성되고, 쌓인 슬러지가 메탄발효에의해 완전히 없어지는 것이 이상적인 첫번째 조건성연못의 조건이다. 수심 1.5 m의 연못에서는 강한 바람이 불면 수직으로 물이 섞이게되어 윗층의 용존산소가 바닥으로 침투하여 혐기성분해가 정지하는 결합이 있다(Yang, 1992).

첫번째 조건성연못의 문제점인 소요면적을 축소하고 용존산소의 바닥침투를 차단하기위한 방안으로 Pit에 관한 연구가 필요하다. 기존의 연못시스템이 효율적으로 폐수 처리를 하지못하는 원인으로 지적되는 폐수의 단기이동현상(short-circuiting)을 해소하는 방안도 연구가 필요하다.

국내의 연못시스템 연구로 미국 Corinne과 Eudora에 설치된 연못시스템의 설계요소들을 국내에 응용하기위해 김포지역의 기온과 태양복사열을 비교한 연구가 있다(양, 1995a).

제 3 절 연못시스템과 양어, 유기농업 결합

연못시스템의 처리수에는 많은 藻類가 있어 조류를 회수해서 거름으로 쓰거나, 처리수를 직접 원예나 농업 관개수로 사용하여 조류를 비료대신 사용하는 국가가 많다.

이스라엘, 서독, 미국, 중국, 대만, 태국등은 연못시스템의 일부 연못을 양어에 직접 이용하거나, 처리수를 양어장에 보내서 잉어(Carp)나 돔(Tilapia)를 생산하고 있다(Yang, 1992; Edwards, 1987). 캘리포니아주 알카타 연안저습지에 설치된 도시하수처리 연못시스템에서는 처리수를 이용하여 연어치어를 길러 바다로 방류한후 성어가되어 돌아오면 수확한다. 알카타 연못시스템은 야생동물(wildlife)서식처가 되면서 鳥類(bird)감상 관광지로 유명한 곳이다(Allen etc, 1978). 축산폐수 공동처리장을 대형 연못시스템으로 설계하면 양어, 유기농업, 조류서식처와 결합할 수 있어 축산폐수의 다양한 재활용이 가능할 수 있다.

제 4 절 기존 산화지, 간이정화조의 문제점

축산농가에서 사용하고 있는 간이정화조는 슬러리를 유입시켜 임시적으로 정화시키고 있다. 바닥에 쌓이는 슬러지는 혐기성상태에서 메탄발효로 분

해시키고, 위층의 액체는 흘려보내거나 소규모 산화지(oxidation pond)에 유입시키고 있다. 간이정화조의 문제는 쌓이는 슬러지를 제거해야하고, 수온이 14°C로 내려가면 메탄발효가 정지되어(Oswald, 1968; Yang, 1992) 14°C 이하로 내려가는 기간의 슬러지를 저장할 수 있는 용량이 필요하다.

산화지는 흔히 처리된 폐수를 마무리 처리하기 위해 사용한다. 대다수 소규모 축산농가에서 이용하고있는 산화지는 BOD₅ 부하량 과다로 혐기성층이 높게 형성되어 효율적인 폐수처리 기능을 못하고 있다. 기계로 산소를 폭기시키던지, 표면적당 BOD₅ 부하량을 줄이기위해 면적을 확대해야 한다. 특히 기존 산화지는 폐수의 유입 및 유출지점이 잘못 설계되어 폐수가 단기이동(short circuiting)하는 현상(Yang, 1992)이 일어나 BOD₅가 효율적으로 제거되지 않고 있다. 폐수가 서서히 움직이면서 호기층과 혐기층이 섞이지 않도록 하는 연못시스템으로 대체가 필요하다.

제 5 절 연못시스템 및 피트(Pit) 모델 설계

1. 연못시스템 개념도

아래 개념도를 기본으로 축산농가에 적합한 연못시스템 모델을 개발한다.

조건성(Pit) - 조건성 - 호기성 연못으로 연못시스템을 구성하며 첫번 연못 바닥에 Pit를 설치 한다. 4차연못은 BOD₅ 부하량이 과다한 경우 필요한 예비연못이다.

수자원이 풍부한 지역에서는 처리수를 유기농업에 관수하여 처리수의 조

류(Algae)를 유기퇴비화 한다. 처리수를 방류할 경우는 처리수의 조류를 연못 3 혹은 4에 침전 시켜 조류농도를 100 mg/ℓ 로 조절하여 방류한다. 미국의 경우 최종처리수의 조류농도를 100 mg/ℓ 까지 허용하고 있다(Middlebrooks, etc, 1982). 희석수는 슬러지 및 분등 고농도 축산폐수를 처리할때 이용한다.

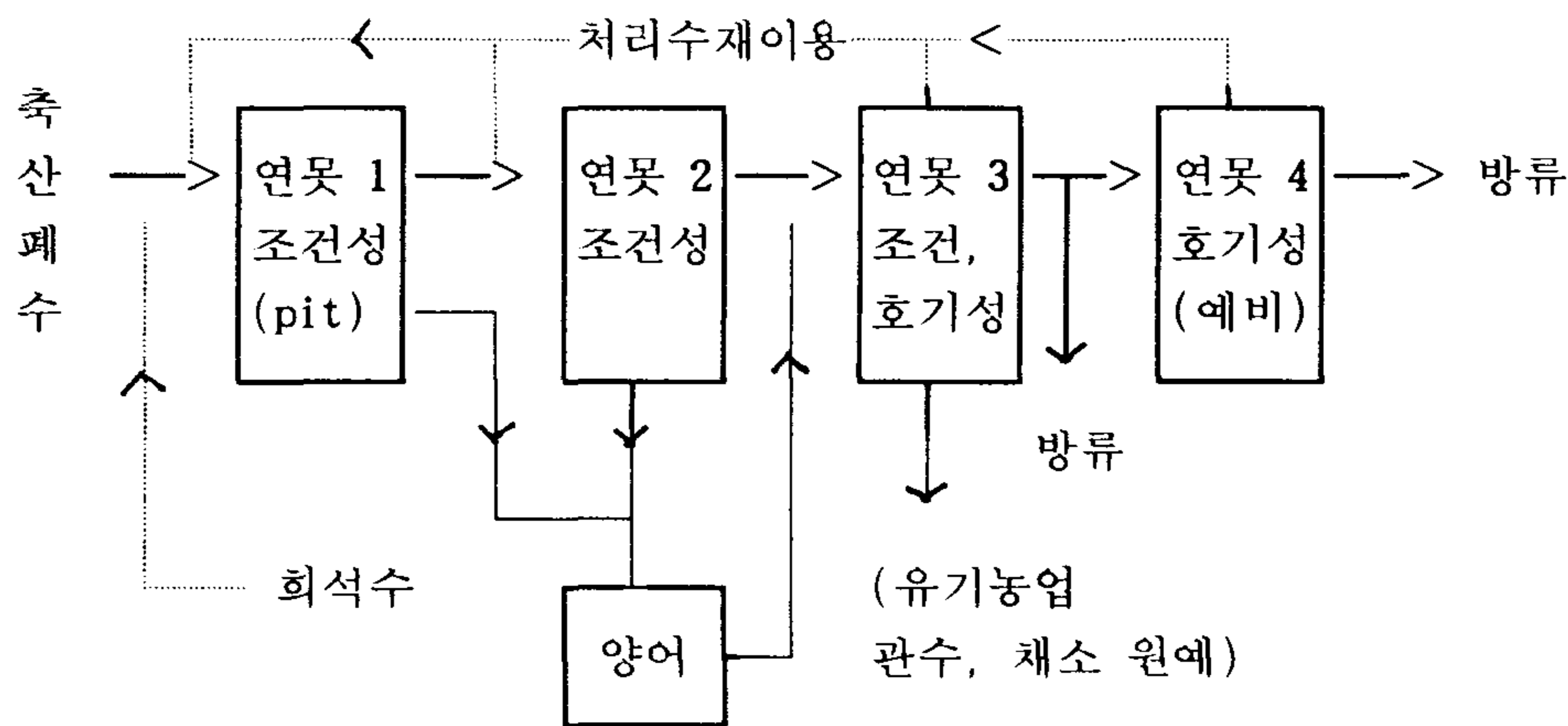


그림 3 : 개발할 연못시스템 개념도

유입폐수의 BOD₅가 500 mg/l 정도이면 희석수가 필요없다. 수자원이 부족한 지역에서는 최종처리수를 희석수로 재이용한다.

2. 처리목표

현장 기후조건 및 폐수의 성상을 고려하여 최종처리수의 BOD₅ 가 150 mg/ℓ 혹은 30 mg/ℓ 이 되도록 연못시스템 모델을 개발한다.

3. 현장조건

연못시스템은 전남대학교 농과대학 동물사육장 부지내에 설치한다
 그림 4는 현장의 등고선과 연못시스템 설치 위치를 나타낸다.

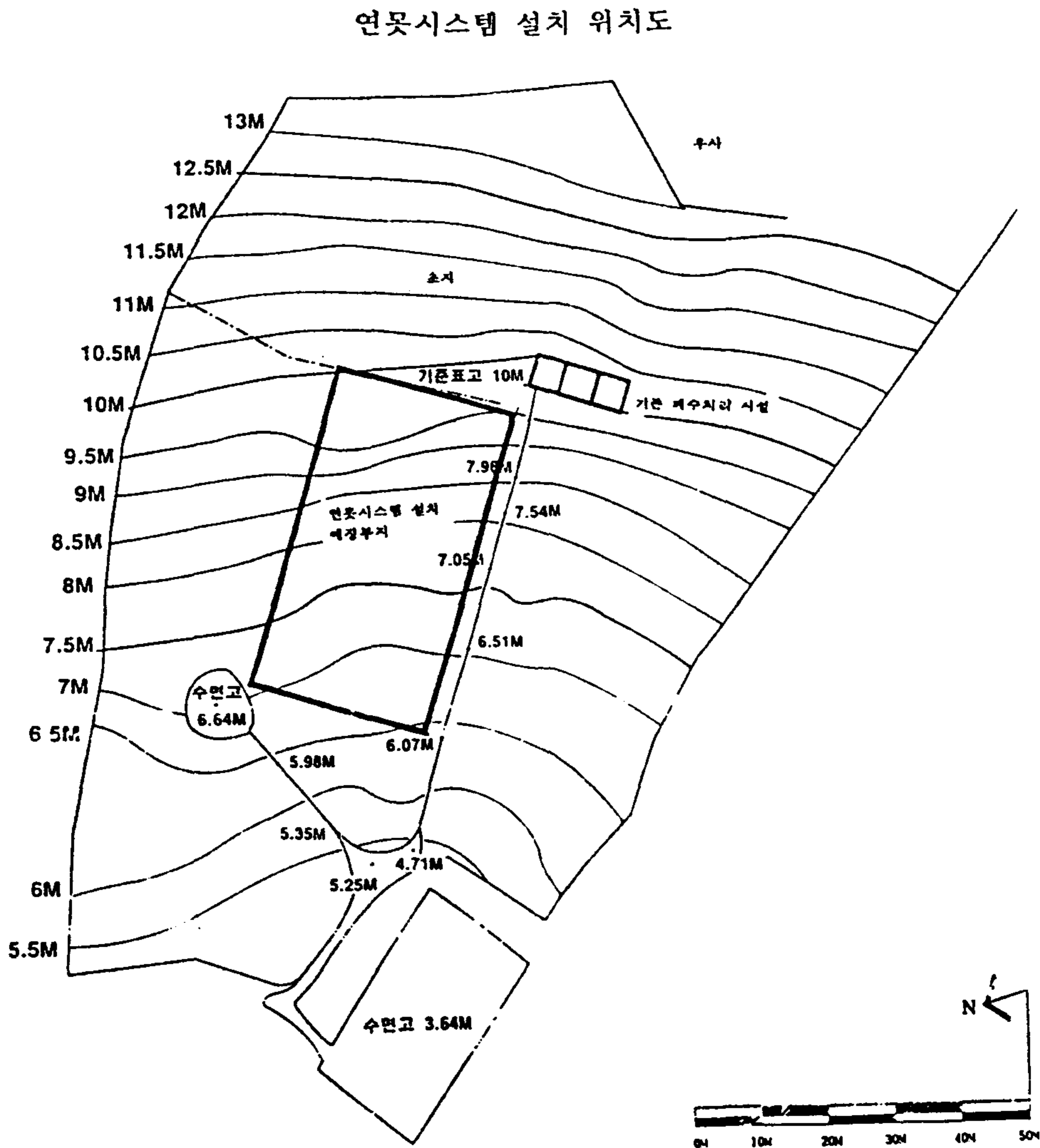


그림 4 : 연못시스템 설치 위치도

가. 자연환경

경사도는 6%정도이며 시스템을 설치할 위치는 저습지로 초지조성이 불가능 하다. 표토 50cm 깊이는 황색 점질토이며 그 아래는 진흙층으로 형성되어 배수가 불량하다. 서쪽 끝에는 배수를 위해 연못이 조성되어 있다. 골바람의 영향으로 낮에는 남서풍이 주풍방향이다.

나. 인문환경

(1) 우사: 현재 젓소를 23마리 사육하고 있으나 앞으로 사육두수를 증가시킬 예정이다.

(2) 폐수발생: 착유실에서 세척되어나오는 슬러리, 우방에서 누출되는 분뇨, 운동장에서 씻겨내려오는 분, 간이실험실에서 나오는 폐수가 전체폐수를 구성한다. 이들 폐수의 발생량은 시간대별로 현저한 차이를 보이고 있다.

(3) 폐수성상: 착유실에서 내려오는 폐수를 분석한 결과 폐수성상은 아래 표와 같다. 우방합류지점의 수치는 착유실에서 세척한후 5시간 후의 측정치로 착유실에서 흘러 내려오는 슬러리의 영향을 거의 받지않은 수치로 사료된다.

표 2 : 폐수의 성상

항목 \	SA	착유실	우방합류지점
pH		7.1	7.4
SS mg/l		8650.0	720.0
BOD ₅ mg/l		2700.0	356.3
COD mg/l		3423.5	412.8
T-P mg/l		159.7	42.3
T-N mg/l		392.3	132.7
대장균수 MPN/100ml		1.3*10 ⁶	1.3*10 ⁷

4. 연못시스템 설계요소

가. 유입폐수 BOD₅

착유실, 우방, 실험실에서 내려오는 폐수를 평균 BOD₅ 가 500 mg/l 정도되도록 착유실에서 세척시 유량을 조절하도록 한다. 하수의 경우 BOD₅

500 mg/ℓ 는 강한 하수로 분류된다.

나. 폐수유량

1차년도 실험에서는 착유실, 우방, 실험실에서 배출되는 폐수를 처리한다. 일일 평균유량은 약 4.5m³이나 안전성을 고려하여 5m³으로 한다.

다. BOD₅ 부하량

일일 BOD₅ 부하량: $500 \text{ mg/ℓ} \times 5000 \text{ ℓ} = 2,500,000 \text{ mg} = 2.5\text{kg}$

라. 연못시스템 설계유량(Design Flow) 및 설계BOD₅부하량

설계유량: 5m³, 설계BOD₅ 부하량: 2.5kg BOD₅ /day

5. 연못시스템 설계 (설계도면 참조)

미국환경처(EPA)에서 권장하는 면적부하율모델, Gloyna 모델, Oswald 모델을 응용하여 설계하였다. 설계도면 1은 연못시스템 평면도이다. 폐수는 스크린조 - 저류조 - Pit - 1차연못 - 2차연못 - 3차연못으로 이동한다.

BOD₅ 유입량과 최종처리수의 수질기준에 따라 1차연못만 필요하거나, 3차

연못까지 필요한 경우를 생각하여 시스템을 설계하였다. 특정 연못에 결함이 생겨 보수가 필요할 경우를 대비하여, 저류조에서 2차연못으로, 1차연못에서 3차연못으로, 저류조에서 3차연못으로 폐수가 유입될 수 있도록 우회파이프를 설치하였다. 1차연못 바닥에는 Pit를 설치하였다.

스크린조는 직경이 굵은 입자나 파이프를 막을수 있는 지프라기등 부유물을 침전시키거나 거르는 역할을 한다. 저류조는 1일 평균 폐수유입량과 평균 BOD₅ 농도를 측정하기위해 2개를 설치하여 교대로 유입폐수를 저류했다가 Pit로 보낼수 있도록 설계하였고, 밸브의 조작으로 Pit내의 폐수유속조절이 가능하도록 하였다. 설계도면 2는 스크린조와 저류조의 설계도이다. 설계도면 4는 Pit의 구조, 설계도면 5는 수질측정용다리 설계도이다. Pit의 조사분석이 용이하도록 1차연못에 수질측정용 다리를 설계하였다.

조류조와 수질측정용다리는 실험목적상 필요한 시설로 실제 축산폐수처리 연못시스템에는 필요하지 않다.

1차 및 2차연못의 처리수를 양어지로 보내 양어실험을 할수 있도록 설계하였으며, 양어지의 유출수는 3차연못으로 유입시켜 처리가 되도록 설계하였다. 4차연못은 예비연못으로 필요할경우 후속연도에 시공할 예정이다. 표 3은 연못시스템 주요구성요소들의 구조를 나타낸다.

폐수의 지하 침투방지를 위해 연못바닥은 콘크리트로 포장하였으며 연못의 내부는 비닐천으로 덮었다. 안전성을 고려 울타리를 설치하였으며 폭우시 제방보호를 위해 제방상단으로부터 0.3 m에 월류파이프를 설치하였다.

표 3 : 연못시스템의 구조

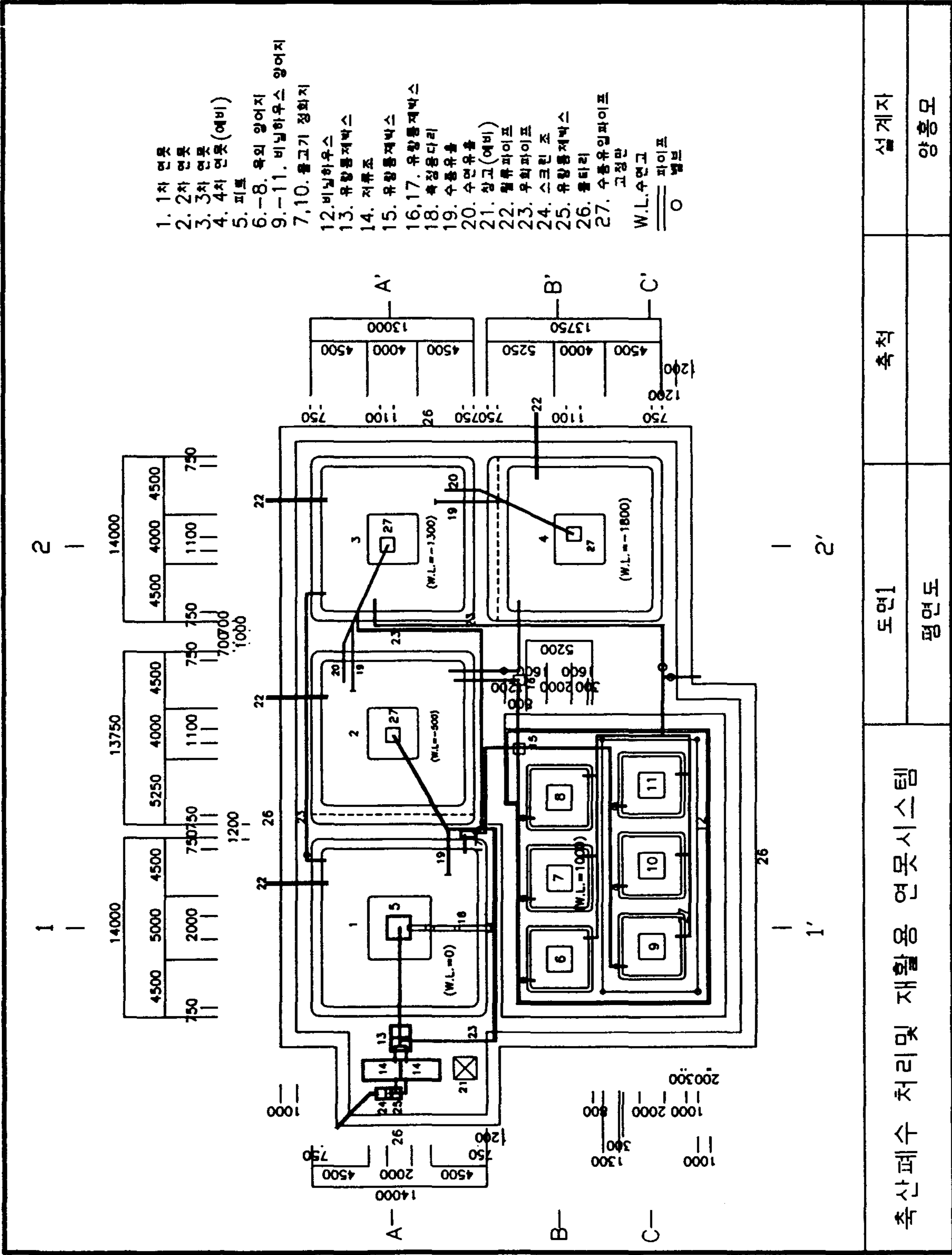
	수심 (m)	여유고 (m)	슬러지 퇴적 (m)	뚝높이 (m)	내경사	외경사	수표면 (m ²)	하수체적 (m ³)	하수체류 (일)
1차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1:1.5	1:1	12.5 x 12.5	166	33
2차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1:1.5	1:1	11.5 x 11.5	148	30
3차연못	2.2	0.5	0.3	3.0	1:1.5	1:1	11.5 x 11.5	148	30
4차연못(예비)	2.2	0.5	0.3	3.0	1:1.5	1:1	11.5 x 11.5	148	30
양어지	1.3	0.3		1.6	1:1	1:1	4.6 x 4.6	14.2	

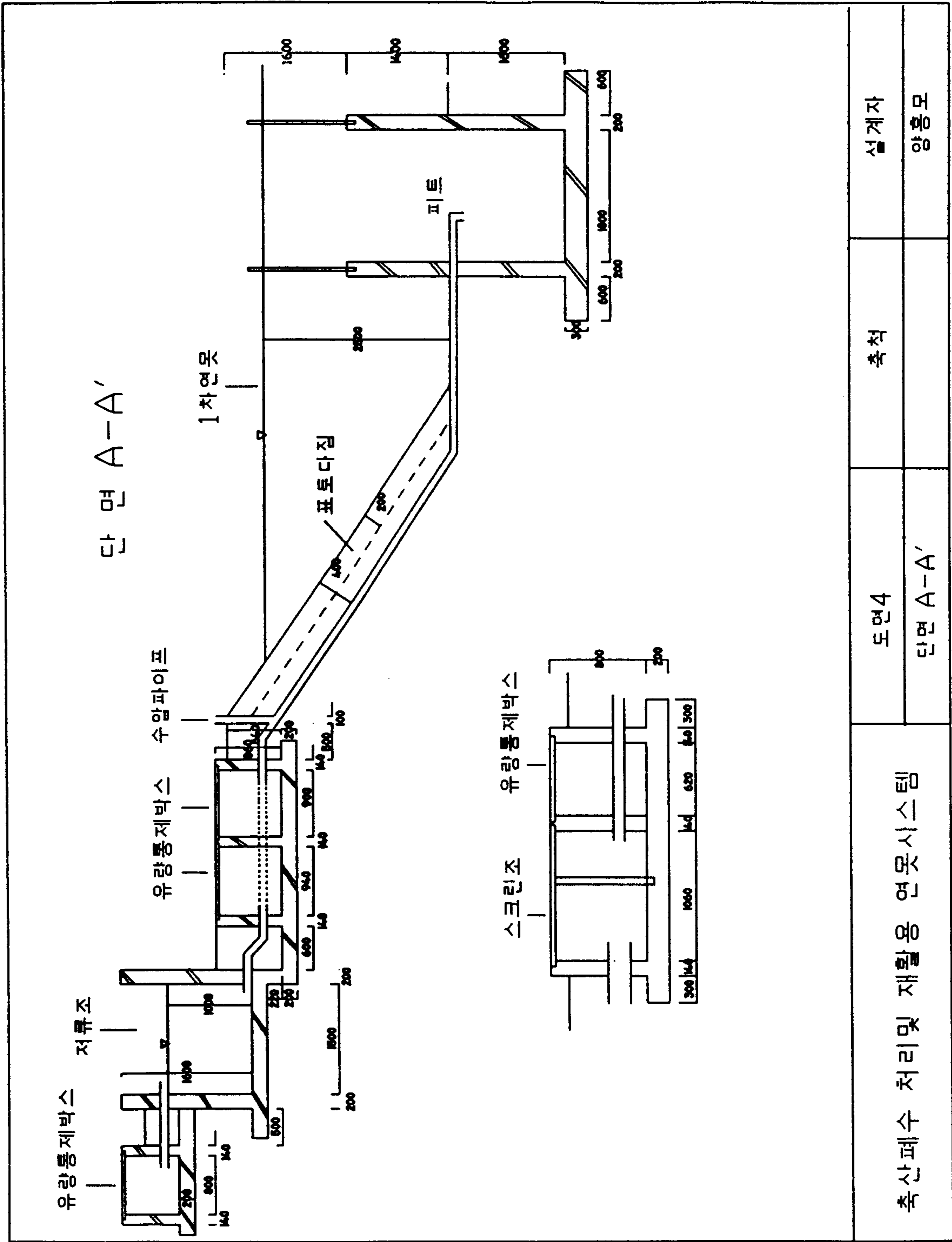
연못총표면적: 420 m²(4차연못제외).

총폐수체류기간: 93일(차연못제외).

4차연못: 예비연못

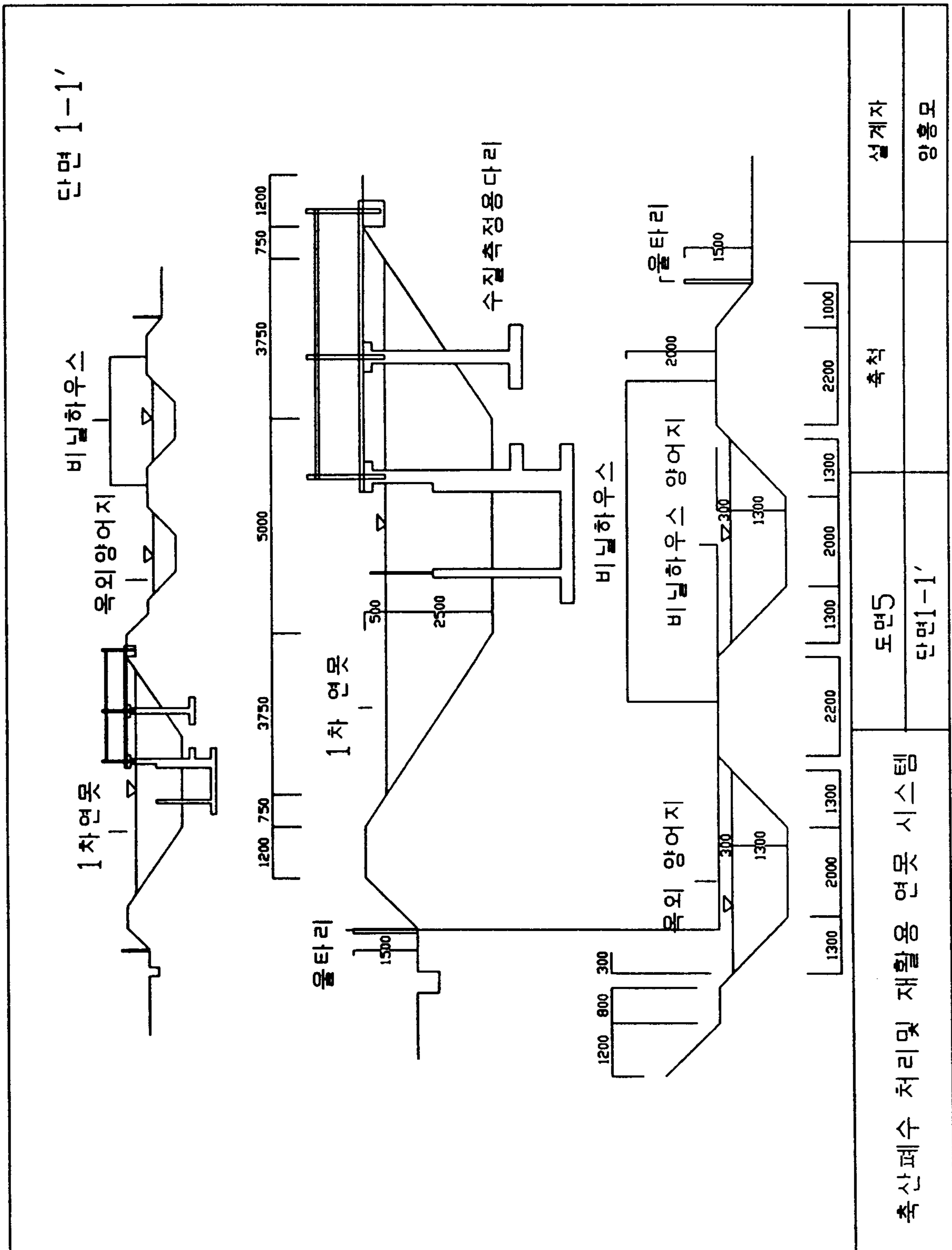
설계도면 1 : 연못시스템 평면도





설계도면 4 : Pit와 저류조 설계도

축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템	도면4	축척	설계자
	단면 A-A'		양홍모



설계도면 5 : Pit와 수질측정용다리 설계도

6. 피트(Pit) 구조 및 기작

설계도면 4는 Pit의 단면도이다. 표면적이 3.24 m^2 ($1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$), 깊이가 연못바닥 지하 1.6 m , 연못바닥 위 1.4 m 로 체적이 9.72 m^3 이다. 폐수체류기간이 $9.72 \text{ m}^3 \div 5 \text{ m}^3/\text{day} = 1.9$ 일이 된다. Pit의 BOD_5 제거율을 60%로 예상하여 설계하였다.

연못시스템에서 이상적인 하수처리는 유기물의 탄소가 메탄발효에 의해 메탄으로 변형되어 유기물의 양이 줄어드는 것이다. 메탄발효는 혐기성상태가 유지되어야 한다.

그림 5는 1차연못의 단면과 Pit의 구조 및 역할을 보여주는 개념도다. 강한 바람($2 - 3 \text{ m}/\text{sec}$)에 의해서 용존산소가 많은 상층의 물이 제방에 부딪쳐 (surface drift) 연못바닥으로는 이동하여도 Pit내부로 용존산소의 침투를 차단하여 메탄발효를 보호하도록 설계하였다.

폐수는 Pit바닥으로 향하여 유입된 후 서서히 Pit상부로 이동시킨다. 유속을 $2 - 3 \text{ m}/\text{day}$ 로 유지시켜 유기물입자와 기생충알이 Pit내부에 침전되도록 한다. 혐기성상태에서 유기산생성박테리아와 메탄박테리아가 유기물의 표면에 증식하면 가스가 유기물 표면에 발생하여 일부 유기물이 부상하게 된다. 부상한 유기물이 Pit상부에 도달하면 수압차이로 가스가 터져 유기물로부터 분리되며 부상유기물은 다시 Pit바닥으로 침전한다. 이런 운동이 지속적으로 일어나면서 슬러지의 분해가 촉진될수 있도록 설계하였다.

Oswald(1968)의 실험에 의하면 메탄박테리아는 14°C 에서 거의 활동을 멈추게 되어 슬러지가 쌓이기 시작하며, 19°C 에서는 일일 슬러지 침전량과 분해량이 같아지고, 24°C 에서 왕성한 활동을하여 분해량이 침전량보다 많아진다. 햇빛이 충분히 쬐일 경우 $1.5 - 4 \text{ m}$ 깊이의 조건성연못은 수심이 0.9 m (3 ft)깊어지면 수온이 1°C 내려간다.

우리나라 중부지방과 기온조건이 유사한 지역에 위치한 미국의 연못시스

템 연구(Yang, 1992)는 연못 시스템의 바닥수온이 메탄발효가 거의 정지하는 14℃ 이하가 되는 기간이 약 6 -7 개월이라고 언급하고 있다. 온대권에서는 연간 슬러지 침전량이 분해량보다 많아 어느정도 슬러지가 쌓이게 된다. 온대 지역의 연못시스템은 여분의 30cm 수심을 두어 15 - 20 년에 한번 슬러지를 제거하도록 설계한다.

연못시스템을 설치할 현장은 겨울철 평균기온이 3℃로 중부지방보다 평균 기온이 3 - 4 ℃ 높은 지역으로 연못바닥 지하 1.6m에 위치한 Pit의 수온이 14℃이하가 되는 기간이 약 7 개월이 될것으로 예측된다.

Oswald(1989)조사에 의하면 남미 볼리비아의 La Paz에 설치된 연못시스템(바닥에 Pit설치하지 않음)에서는 연못바닥의 온도가 8℃에서도 메탄발효가 활발히 일어나고 있다. 고원기후로 연못의 온도변화가 상대적으로 적기 때문 이라고 본다. 온도변화를 줄일수 있는 2 - 3 m 깊이의 Pit를 조건성연못의 바닥에 설치하여 유입폐수를 2일정도 체류하도록 설계하면 겨울에도 Pit내부의 메탄발효를 어느정도 유지할 수 있을 것이다.

Pit에 슬러지 퇴적량이 많아 Pit의 기능이 떨어질 경우 폐수유입 파이프에 연결된 수압파이프에 펌프로 수압을 가하여 Pit내부에 쌓인 슬러지를 1차 연못바닥으로 이동시켜 메탄발효에의해 분해되도록 설계하였다. 설계도면 4는 Pit의 구조와 저류조의 수위를 보여준다.

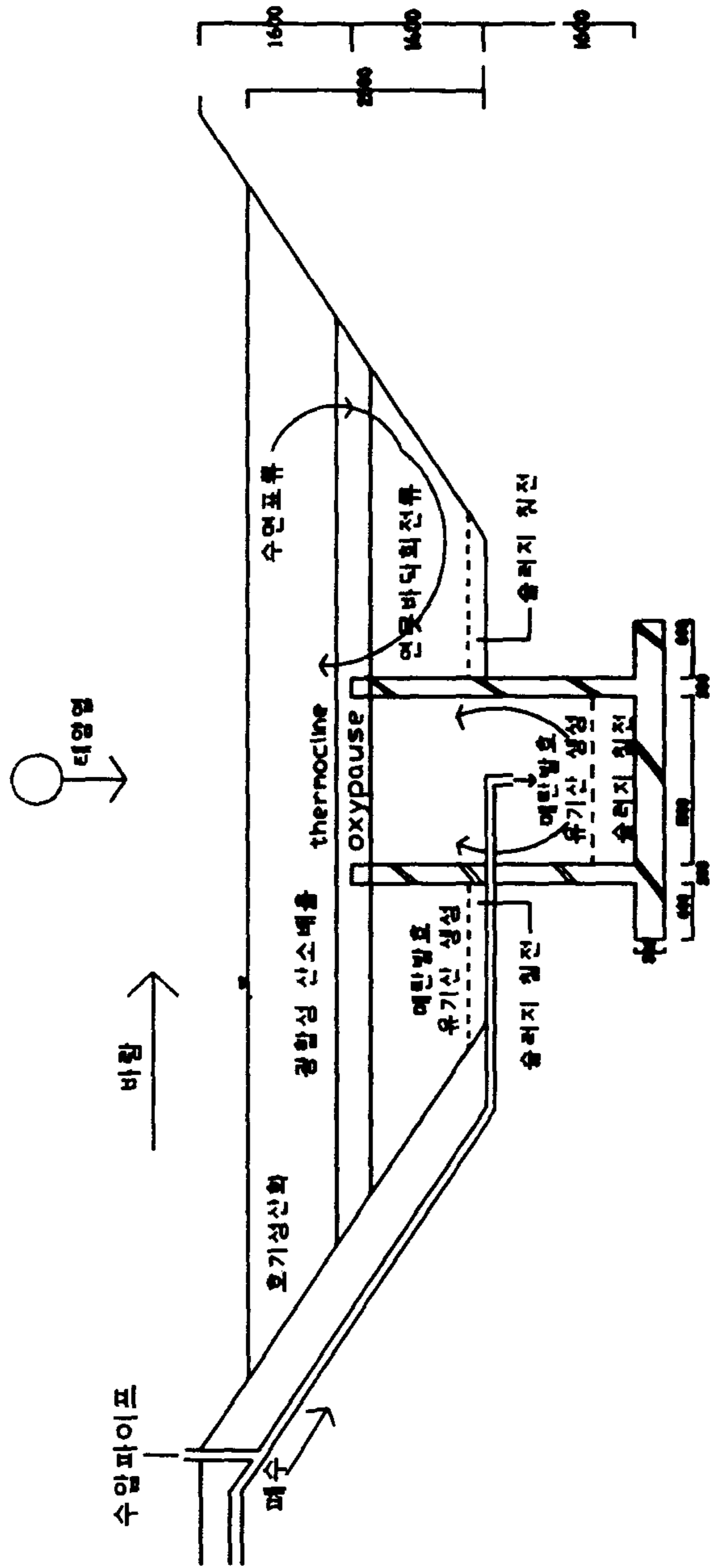


그림 5 : 1차연못과 Pit의 구조 및 작용

7. 1차연못의 피트(Pit)를 고려한 BOD₅ 표면부하량

Pit의 BOD₅ 제거율이 60%로 예측되며, 이 경우 일차연못의 표면부하는 64 kg BOD₅ / ha가 된다. 연못시스템이 설치될 장소의 겨울평균기온이 3℃ 이므로 미국 EPA에서 권장하는 1차연못 표면부하량에 근접한 수치이다.

8. 폐수 단기이동현상 (Short Circuiting) 방지

폐수 단기이동현상은 밀도와 수온에 관련이 있다. 여름에는 연못의 수온이 높고 폐수의 수온은 낮으며, 겨울에는 반대로 연못의 수온이 낮고 폐수의 수온은 높게 된다. 첫번 연못의 경우 슬러지 침전을 위해 Pit내부로 유입폐수를 보내거나 Pit를 설치하지 않는 경우는 연못바닥으로 유입폐수를 보내게 된다. 따라서 유입폐수가 연못 바닥에 가깝도록 유입 된다.

첫번 연못에서 둘째 연못으로 폐수를 보낼 파이프 입구의 수심을 잘못 선정하면 첫번 연못의 폐수와 유입폐수의 밀도 차이로 인해, 유입폐수가 첫번 연못의 설계체류기간 동안 머무르지 않고 곧바로 둘째 연못으로 이동하는 경우가 생긴다. 따라서 겨울과 여름철의 반대현상을 고려하여 첫번 연못의 수심 중간부근에서 2차연못으로 폐수가 이동되도록 설계하여 여름과 겨울철의 단기이동 현상이 완화되도록하였다. 그림 6은 3개의 연못으로 구성된 연못시스템에서는 이런 폐수 단기이동현상을 방지하기위해 수중유출 (low level transfer)과 수면유출(high level transfer)을 조합한 개념도이다. 설계도면 7, 8은 수중유출과 수면유출의 구조를 보여준다. 설계도면 9는 2차 및 3차 연못의 폐수유입 구조물을 보여준다.

2차연못과 3차연못에는 수중유출과 수면유출 구조를 동시에 설치하여 폐

수단기이동의 방지를 실험할 수 있도록 설계하였다. (설계도면 1 참조)

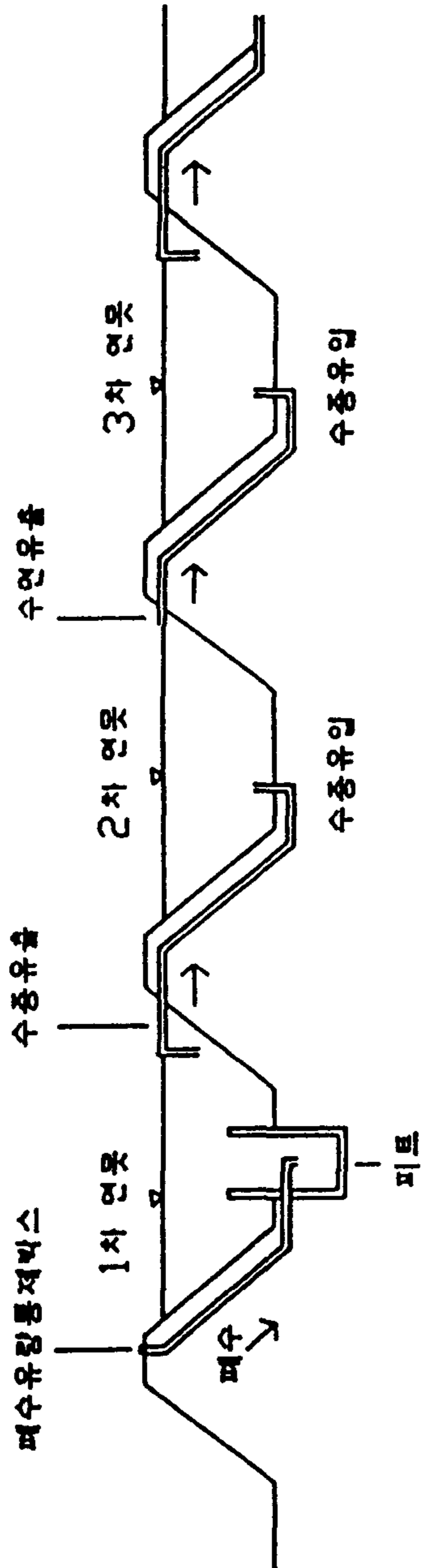


그림 6 : 폐수의 단기이동방지 파이프 연결개념도

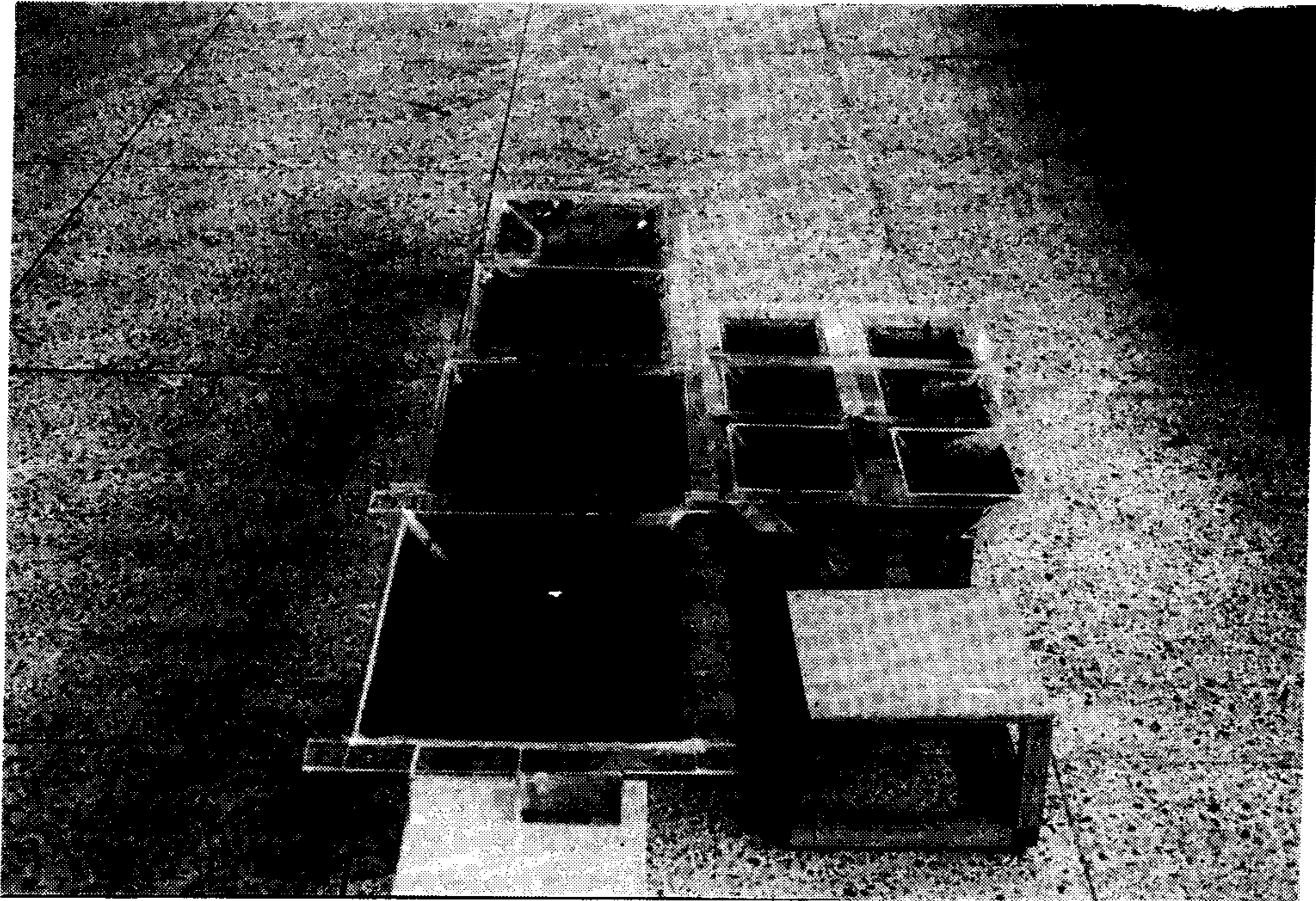


사진 1 : 연못시스템 수리모형 실험

아래쪽 네개의 큰 연못이 폐수처리 연못시스템이며
오른쪽부터 1차연못, 2차연못, 3차연못, 4차연못이다.
위쪽의 6개연못은 양어연못의 모형과 위치를 나타낸다.

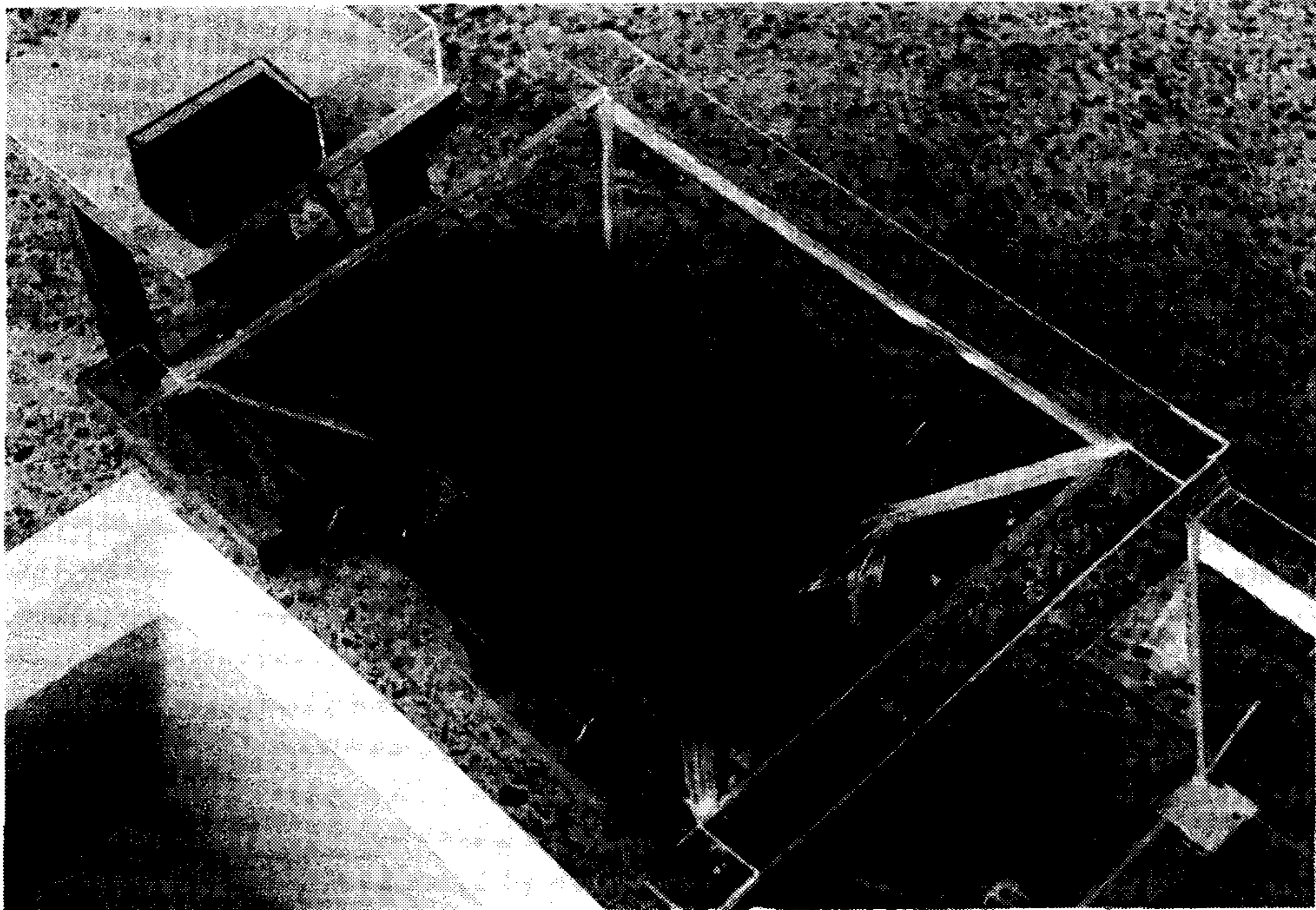


사진 2 : 1차연못의 물 이동실험

Pit로부터 물이 서서히 흘러넘쳐 왼쪽상단 상층의 방출 Pipe(effluent pipe)로 이동해 가고 있다.

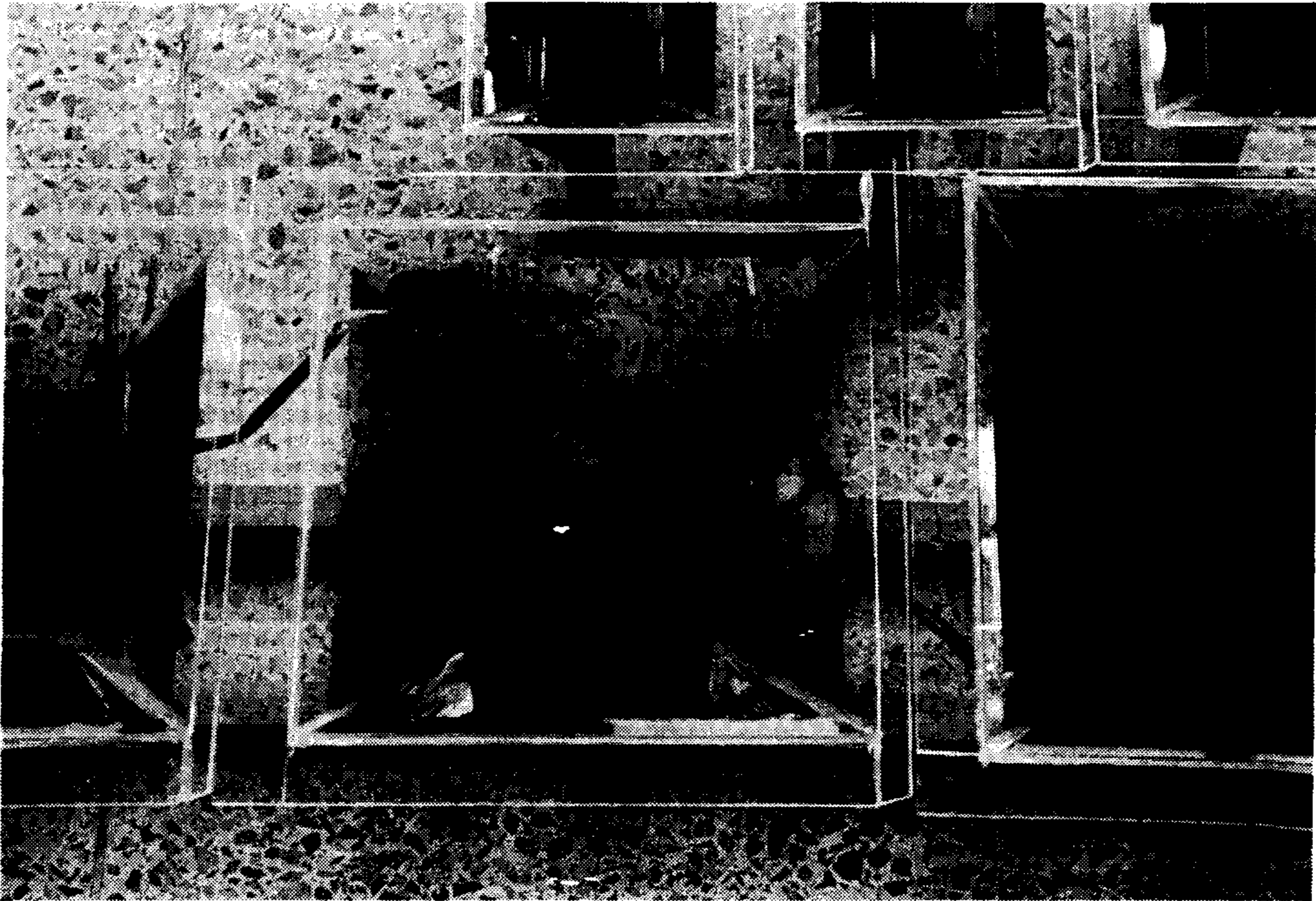
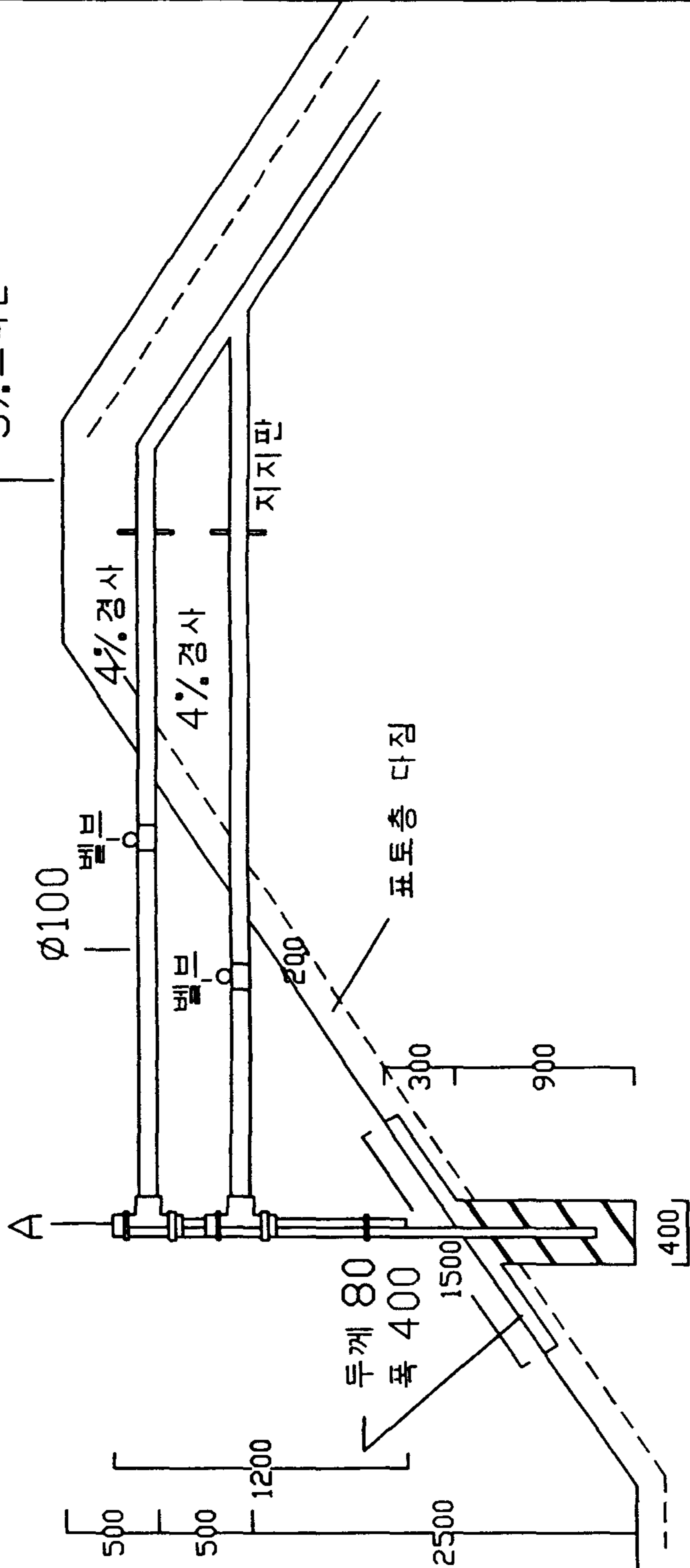
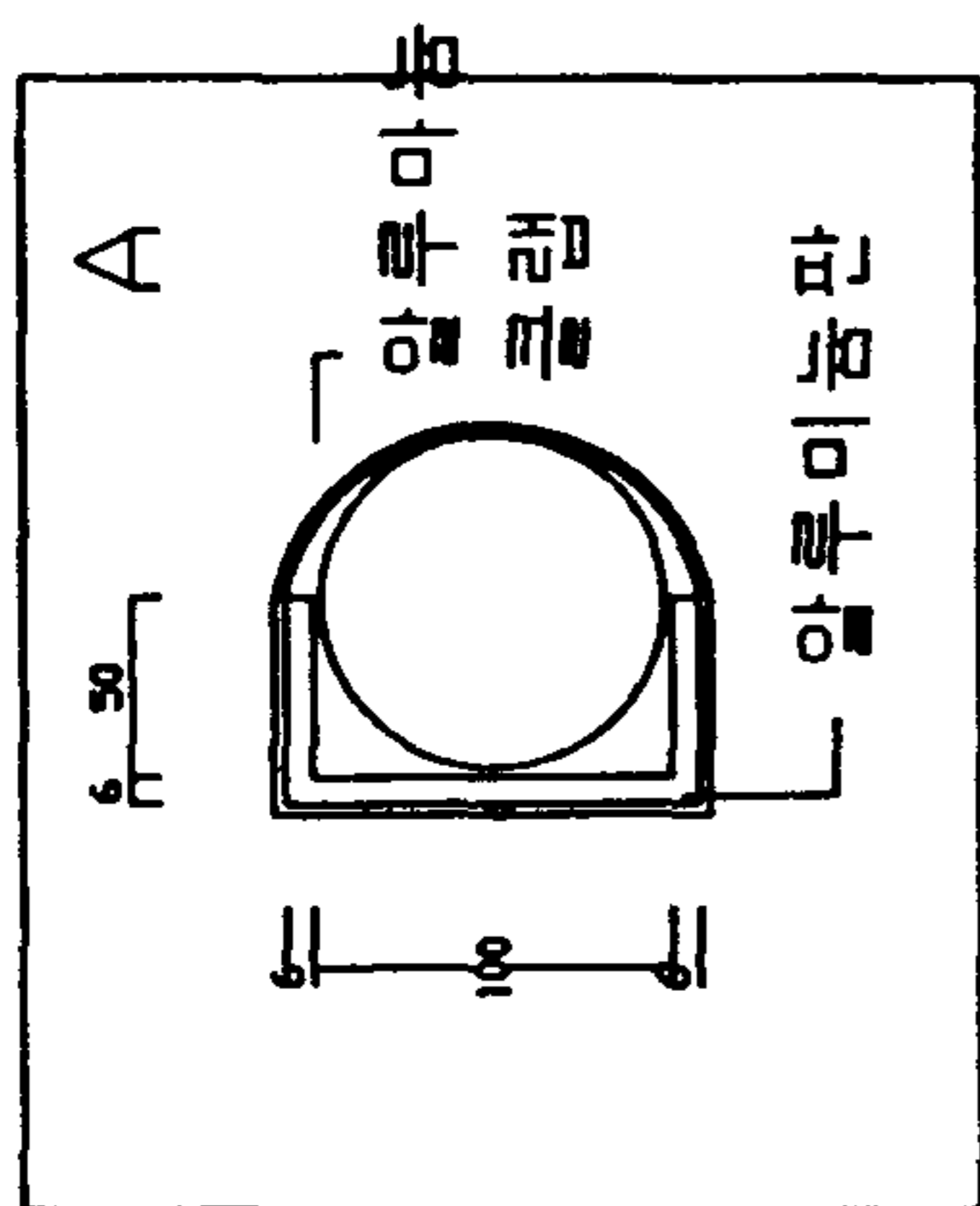


사진 3 : 2차연못의 물 이동실험

1차연못의 왼쪽하단 상층의 방출 Pipe에서 2차연못의 우측하단 하층 유입 Pipe로 물이 이동하여, 2차연못의 왼쪽상단 상층의 방출Pipe로 물이 이동해가는 모습을 보여준다.

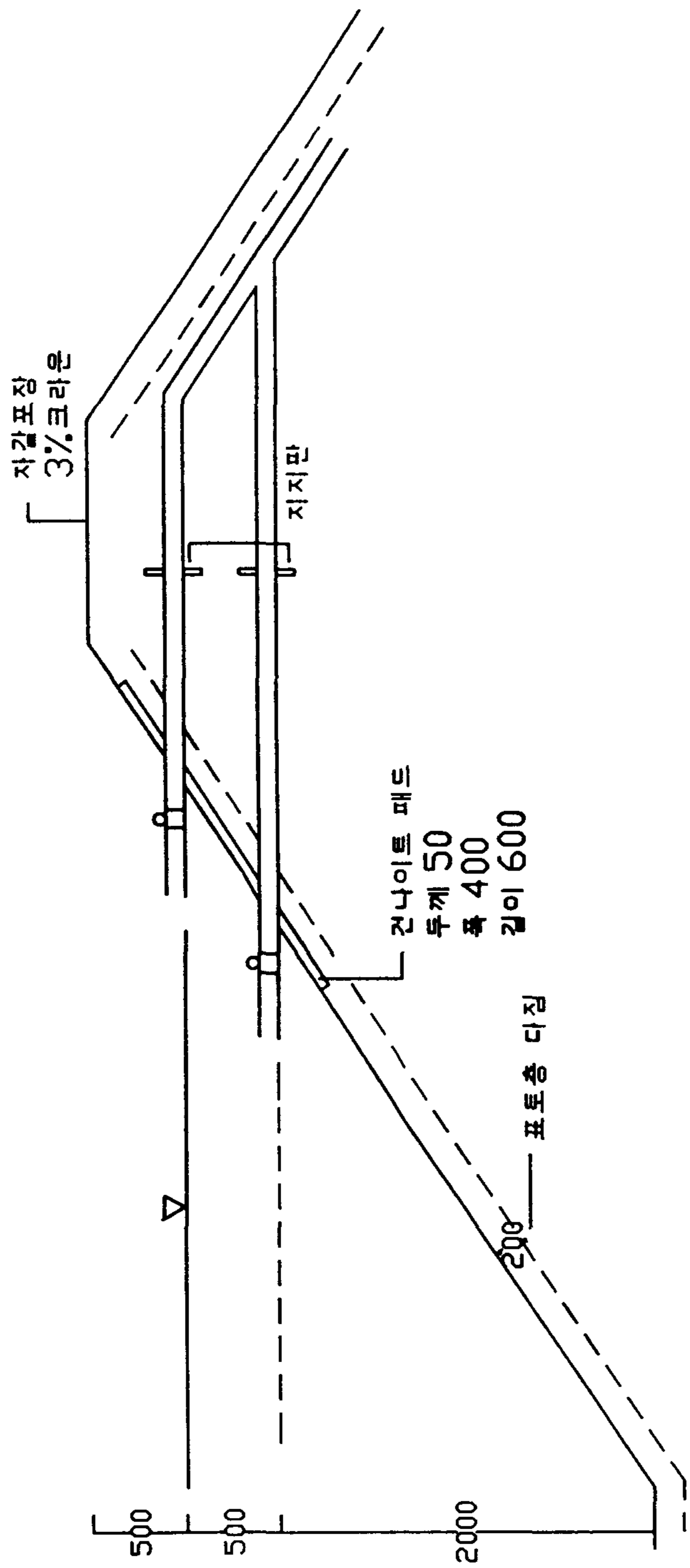
수중 유출 구조(19)



속산폐수 처리 및 재활용 연못 시스템	도면 7	속석	설계자
	수중 유출 구조		양홍모

설계도면 7 : 수중유출 설계도

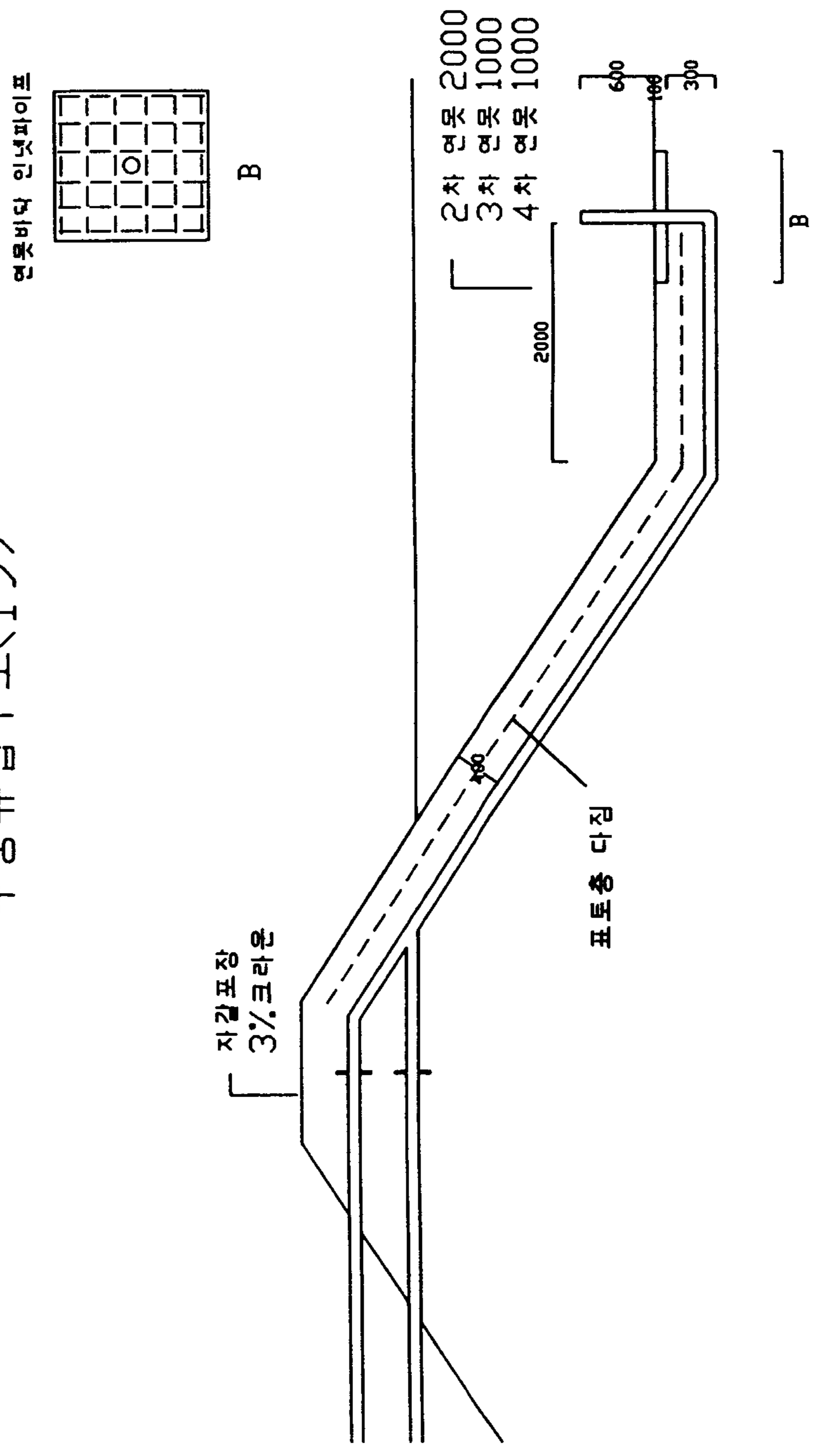
수면유출 구조(20)



축산폐수 처리및 재활용 연못 시스템	도면8	축척	설계자
	수면유출 구조		양홍모

설계도면 8 : 수면유출 설계도면

수중유입구조(19)



축산폐수 처리및 재활용 연못시스템	도면9	축적	설계자
	수중유출구조		양홍모

설계도면 9 : 2차 및 3차 연못의 폐수유입 구조물 설계도



사진 4 : 연못시스템 토공작업 전경

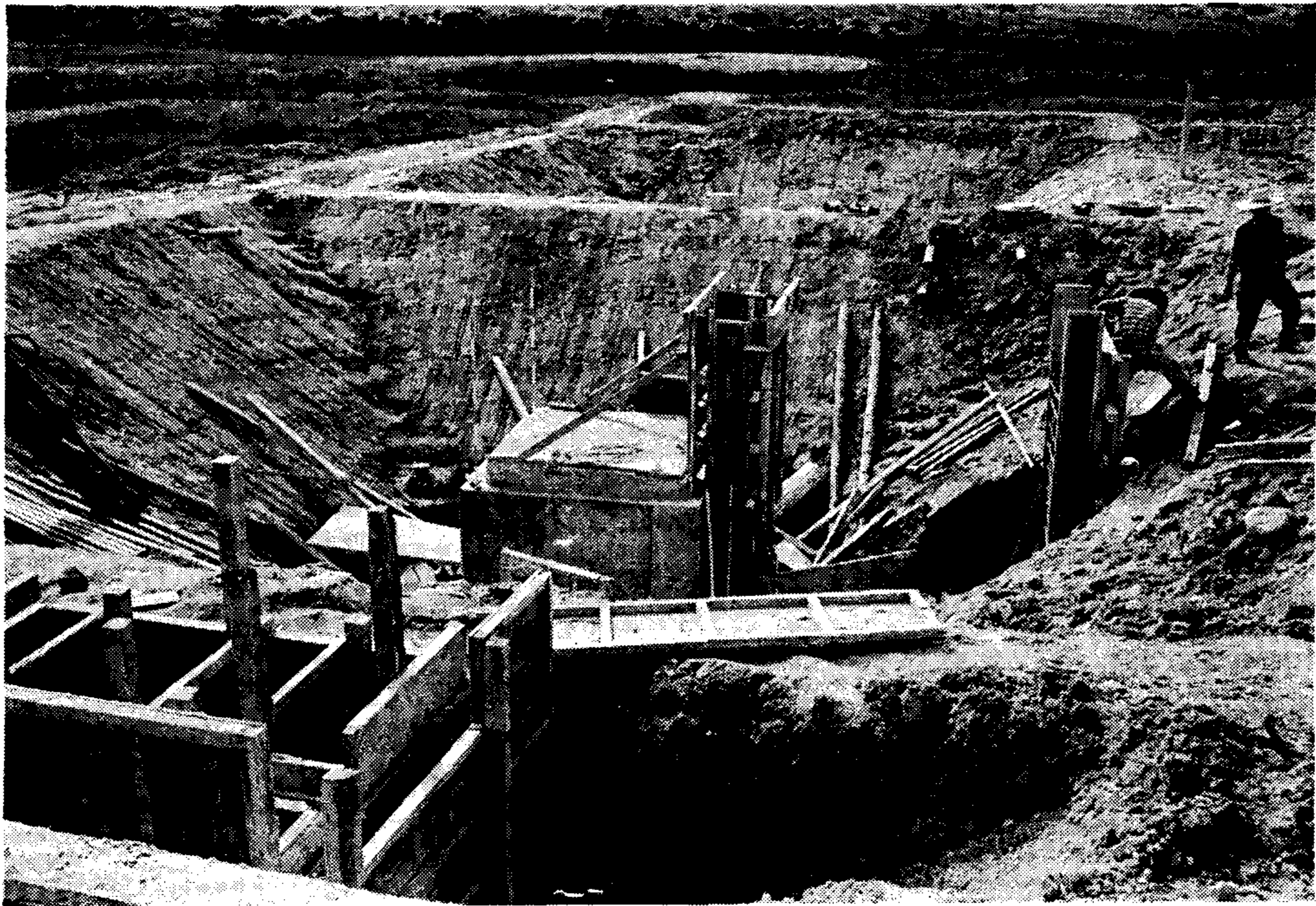


사진 5 : 1차연못 바닥에 Pit를 시공하고 있다.

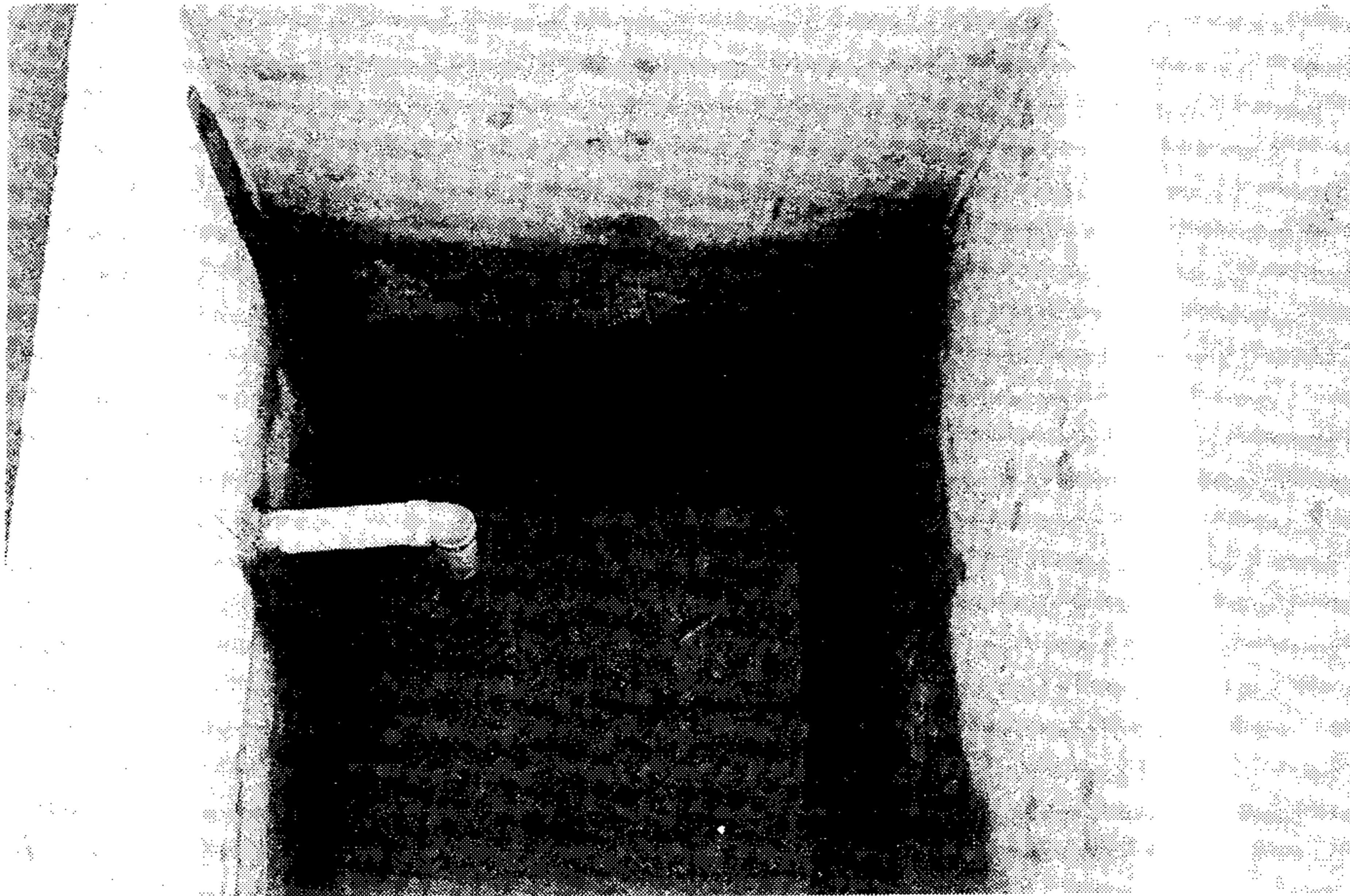


사진 6 : Pit의 내부구조, 유입파이프 입구가 바닥을 향해 있다

폐수가 Pit아래로 내려와 Pit상부로 서서히 이동해
가면서 침전과 분해 효율이 높도록 설계하였다.

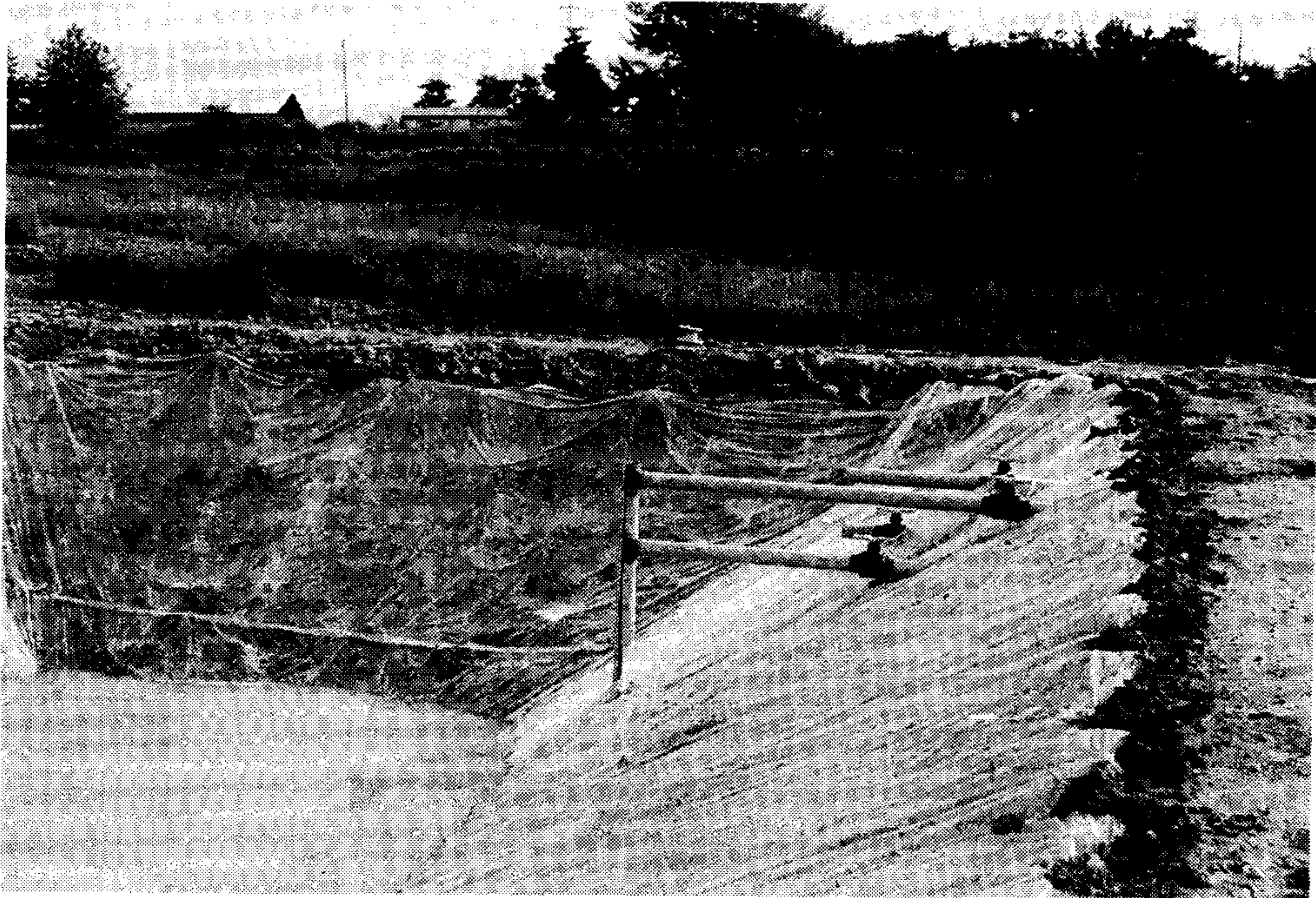


사진 7 : 수중유출(앞의 구조물)과 수면유출(뒤의 구조물) 구조 시공

벨브의 개폐로 0.5 m 수심을 조절할 수 있다.
비닐을 설치하여 사면보호를 하였다.



사진 8 : 옥외 및 비닐하우스 양어지

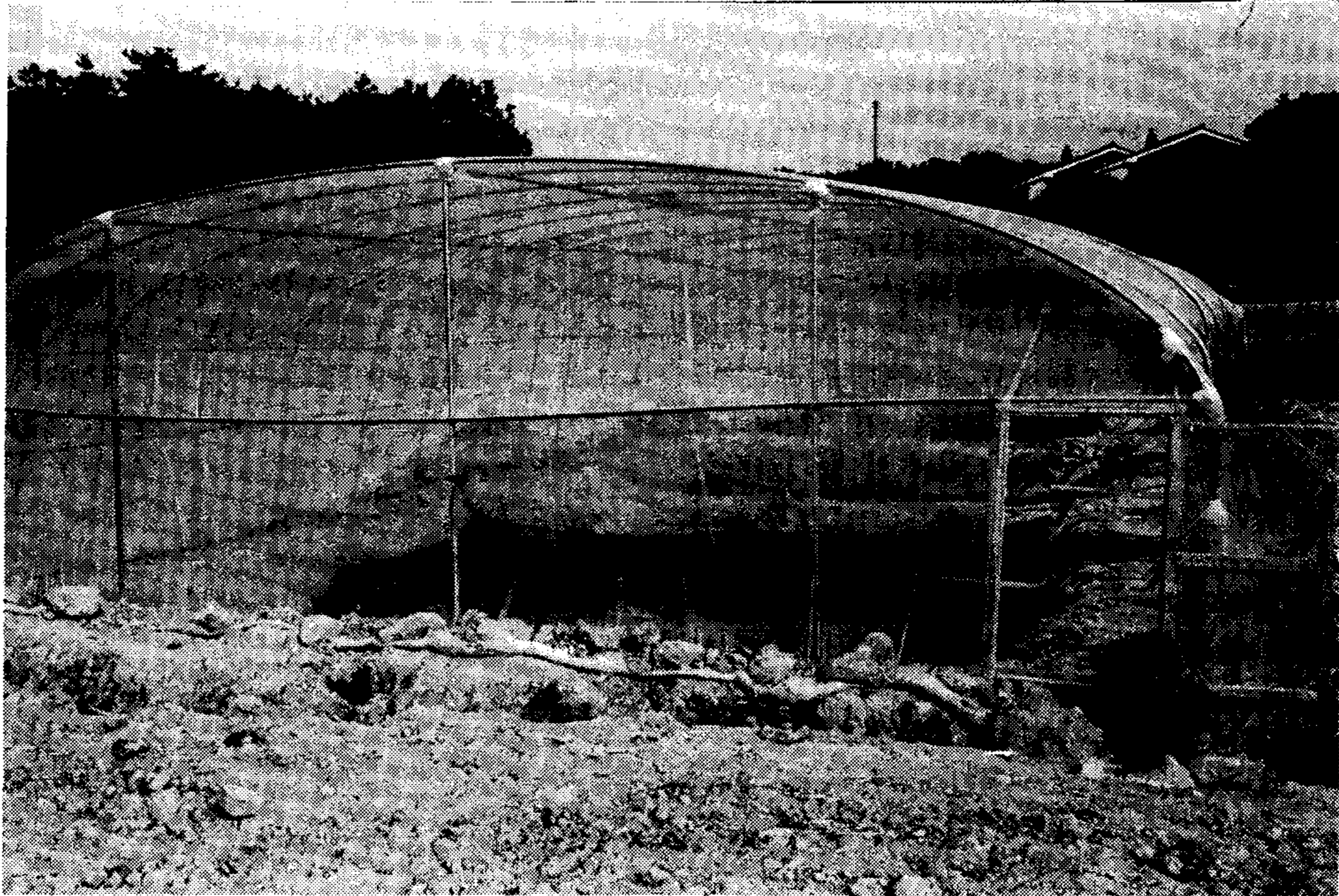


사진 9 : 비닐하우스 양어지 내부, 물고기 채집을 위해 그물을 설치하였다.



사진 10 : 연못시스템 전경, 앞 부분이 스크린조와 저류조이다.
우측에 비닐하우스 양어지가 보인다.

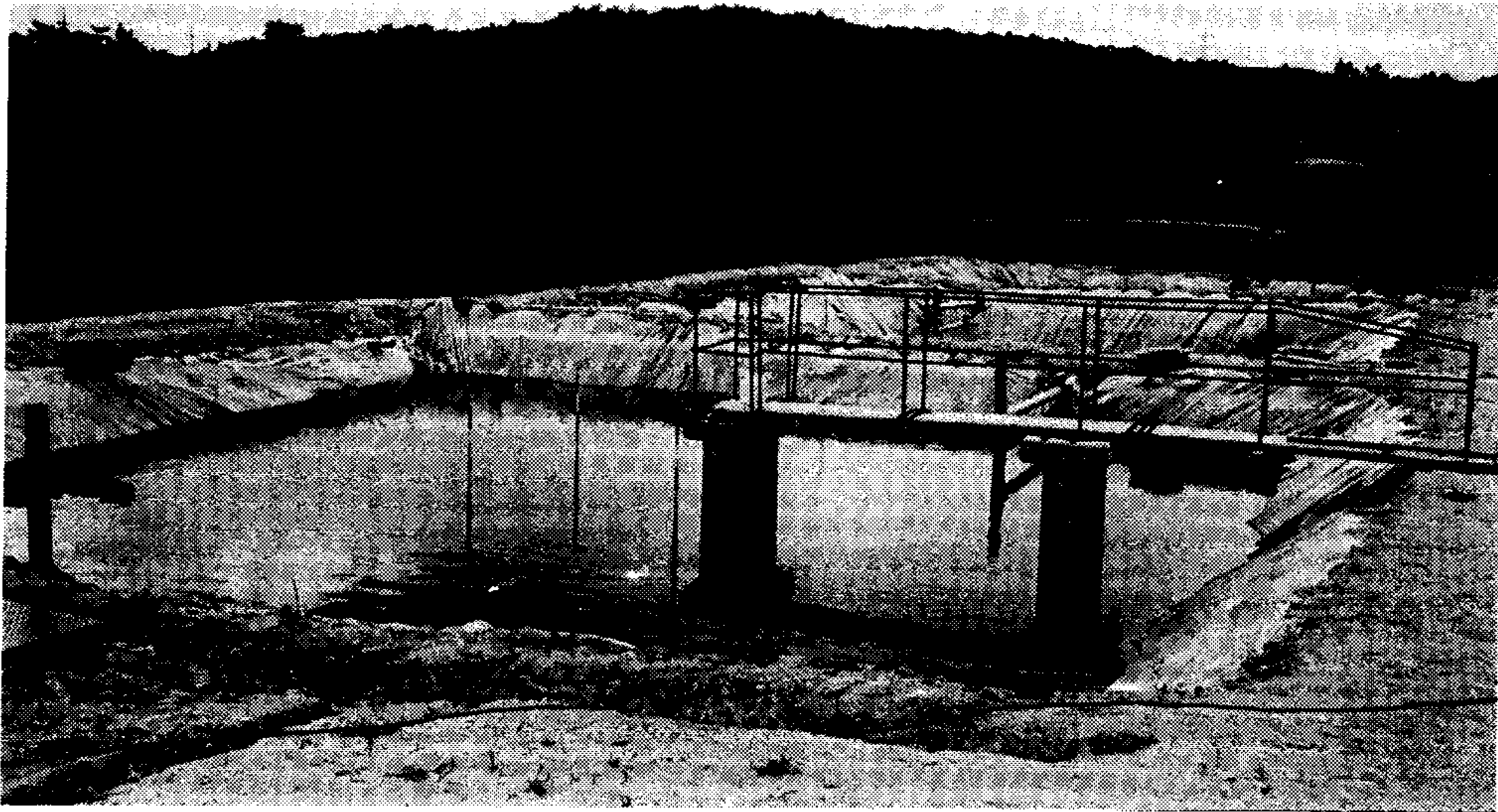
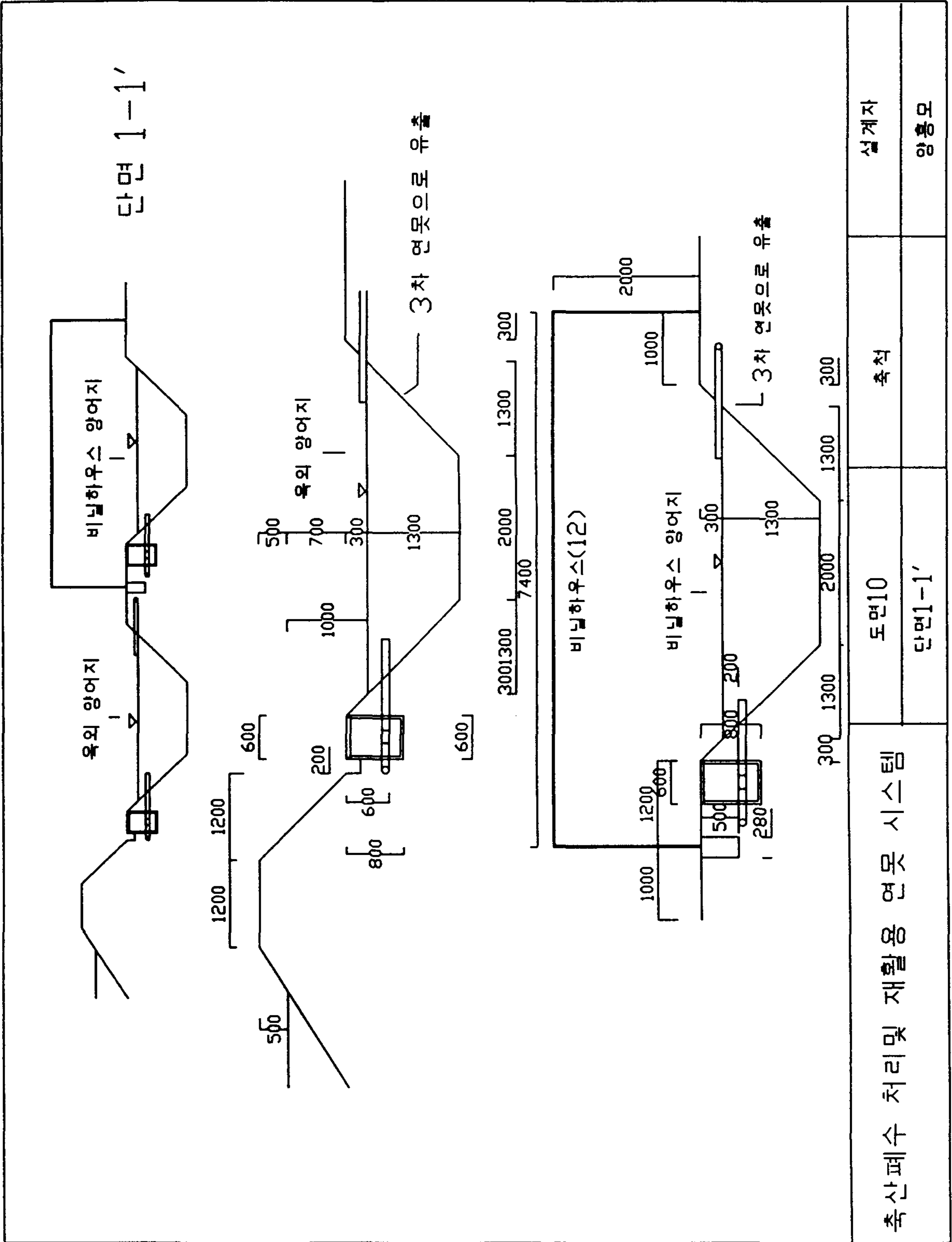


사진 11 : 연못시스템 전경, 앞이 1차연못이며 뒷쪽의 연못이 2차, 3차 연못이다.

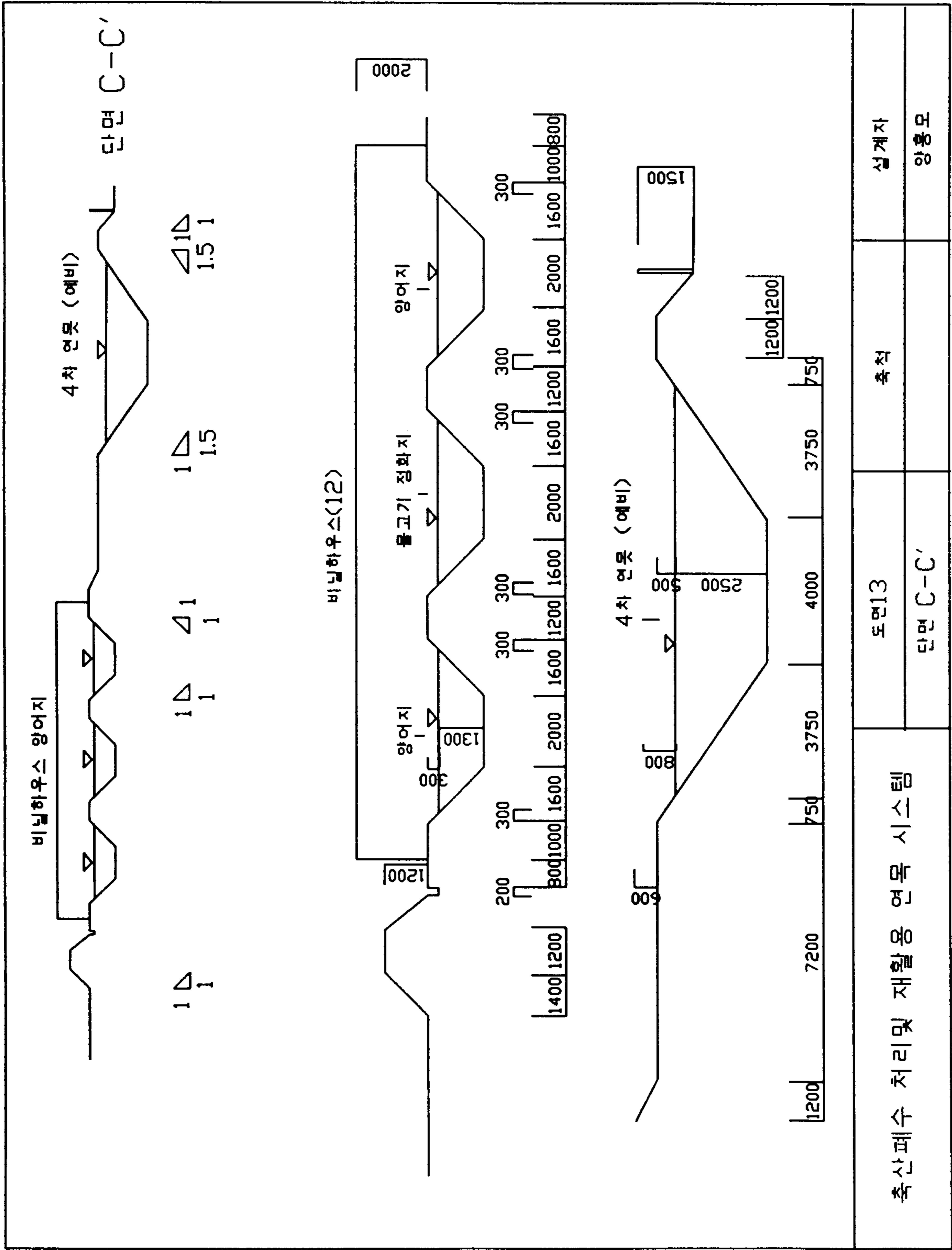


사진 12 : 수질측정용다리에서 Pit내부의 수질을 측정하고 있다.
4개의 폴대는 수위점검과 Pit의 위치를 알려준다.

연못시스템 모델 (1:33 스케일 축소)의 유체흐름 실험결과 폐수단기이동 방지를 완화할 수 있는 방안은 연결파이프를 방출연못의 상부에서 유입연못의 하층으로 연결하고, 각 연못의 유입구와 방출구를 대각선에 위치 하도록하는 것이 바람직하다고 규명되어 설계에 반영하였다. 사진 1, 2, 3는 수리모형 실험 사진이다.



설계도면 12 : 욕외 및 비닐하우스 양어지 설계도



설계도면 13 : 비닐하우스 양어지 설계도

9. 양어연못

처리수를 이용하는 옥외양어지(3개)와 비닐하우스양어지(3개)를 설치하여 폐수에서 성장가능하고 농가의 수입원이될 수 있는 어종을 연구한다. 처리수의 양어 재활용 연구에서 양어에 최적인 BOD₅ 와 조류농도가 규명되면, 연못시스템의 어느 연못의 처리수를 양어에 이용하는 것이 적합한가를 판단하여 처리연못에서 양어를 하는 방법을 강구한다. 설계도면 10, 12, 13은 옥외양어지 및 비닐하우스 양어지 단면도이다.

제 3 장 연못시스템 초기 폐수처리수준 분석

시스템 시공 후, 수중펌프를 이용하여 저류조 및 1차연못에 물을 채워 가며 자연유하에 의한 폐수 이동 및 파이프연결을 점검한 결과 각 연못과 양어지로 폐수의 이동이 정상적이었다. 8월 12일부터 폐수를 시스템으로 유입시켜 9월 25일경 1차연못의 수위가 정상수위까지 올라 왔다.

폐수처리 수준을 측정하기 위해 저류조유입폐수와 1차연못처리수의 COD, BOD₅, SS, NO₃-N, PO₄-P, E.Coli, 온도를 분석하였다.

샘플은 월요일과 목요일에 연못시스템 샘플채취시각으로 흔히 이용되는 24시간대표성을 갖는 오전 10시 30분에 채취하였다. 유입폐수 샘플은 착유실, 우방, 소규모 사육실험실에서 스크린조로 유입되는 폐수가 시간대별로 현저한 차이를 보여, 평균 BOD₅를 측정할수 없어 저류조에 채워진 폐수를 저어서 채취하였다.

연못의 샘플은 수면으로부터 30cm 깊이에서 채취하였다. 8월 17일부터 9월 25일까지의 1차연못 샘플은 연못수위가 올라가면서 채취한 것이다. 수질측정용다리가 설치되지 않은 2, 3차 연못은 폐수가 연못에 완전히 채워진 후부터 측정한다.

제 1 절 초기 폐수처리 수준

그림 7, 그림 8, 그림 9은 저류조유입폐수 및 1차연못처리수의 COD(화학적 산소 요구량), BOD₅(생물학적 산소 요구량), SS(부유물)의 농도를 나타낸다. 유입폐수의 평균 COD는 578mg/l, 1차연못처리수의 평균 COD는 85mg으로 1

차연못에서의 COD가 약 85% 제거된다. 평균 BOD₅는 유입폐수 318mg/l, 1차연못처리수 39mg/l로 1차연못에서 BOD₅가 88% 제거된다

유입폐수의 평균 SS가 330mg/l, 1차연못처리수의 평균 SS가 35mg/l로 1차연못에서 SS가 90% 제거 된다. 저류조의 BOD₅가 다소 낮은 이유는 스크린조에 유입되는 폐수의 슬러지 일부가 침전되기 때문으로 사료되며, 스크린조에 어느정도 슬러지가 침전된 후는 유입폐수의 BOD₅양이 1차연못으로 유입될 것이다.

그림 10과 그림 11은 조류조유입폐수와 1차연못 처리수의 NO₃-N, PO₄-P 농도를 나타낸다. 유입폐수의 평균 NO₃-N은 179mg/l, 1차연못처리수의 평균 NO₃-N은 32mg/l으로 1차연못에서 NO₃-N이 82% 제거된다. 유입폐수의 평균 PO₄-P는 20mg/l, 1차연못 처리수의 NO₃-N은 5mg/l로 1차연못에서 79%가 제거 된다. 그림 11은 유입폐수와 1차연못처리수의 E.Coli 농도를 보여준다. 유입폐수의 평균 E.Coli는 2.9x10⁵ (100ml), 1차연못처리수의 평균 E.Coli는 7x10³ MPN/100ml로 1차연못에서 97%가 제거된다.

그림 13은 유입폐수와 1차연못처리수의 pH농도를 나타낸다. 유입폐수의 평균 pH는 7.4이며 1차연못처리수의 pH는 8.8로 1차연못 처리수의 pH가 20% 증가한다. 햇빛이 비치면 연못상층의 광합성산소배출로 pH가 증가한다. 상층의 pH 증가는 연못 아래서 발생한 H₂S가 상층에서 H⁺ S⁻로 해리되어 악취발생을 제거해 주는 역할을 하게된다.

그림 14는 1차연못의 수위가 정상으로 된후 날씨가 맑은 9월 25일과 9월 28일 오후 2시에 연못상층으로부터 pit바닥까지 측정한 온도, pH, DO 의 평균치를 나타낸다. 온도는 0.3m 깊이에서 24.6℃, 1m 깊이에서 18.8℃로 급격히 떨어진후 완만하게 내려가 pit바닥에서 17.3℃가 된다. 상층부의 DO는 18mg/l로 과포화 상태를 보이며 Pit바닥은 3mg/l로 떨어져 혐기상태에 근접한다. 수온이 24℃이면 녹조(algae)성장에 좋은 조건으로 녹조의 광합성배출이 증가하기 때문이다. 녹조의 성장으로 처리수 중의 N, P가 상당량 제거 된다.

수심 약 1m 깊이에서 thermocline과 oxypause가 형성됨을 알수 있다.

상층부의 pH 10.21는 1m 깊이에서 8.16으로 내려가 거의 일정한 수준을 유지한다. 연못바닥이나 피트에서 유기산생성과정에서 발생한 H₂S는 대기중으로 이동하여 악취를 야기한다. 연못상층에서 조류의성장으로 pH가 8 - 10으로 유지되면 H₂S가 냄새를 막을 수 있다. pH가 8 - 10에서는 H₂S가 H⁺와 S²⁻로 해리되기 때문이다.

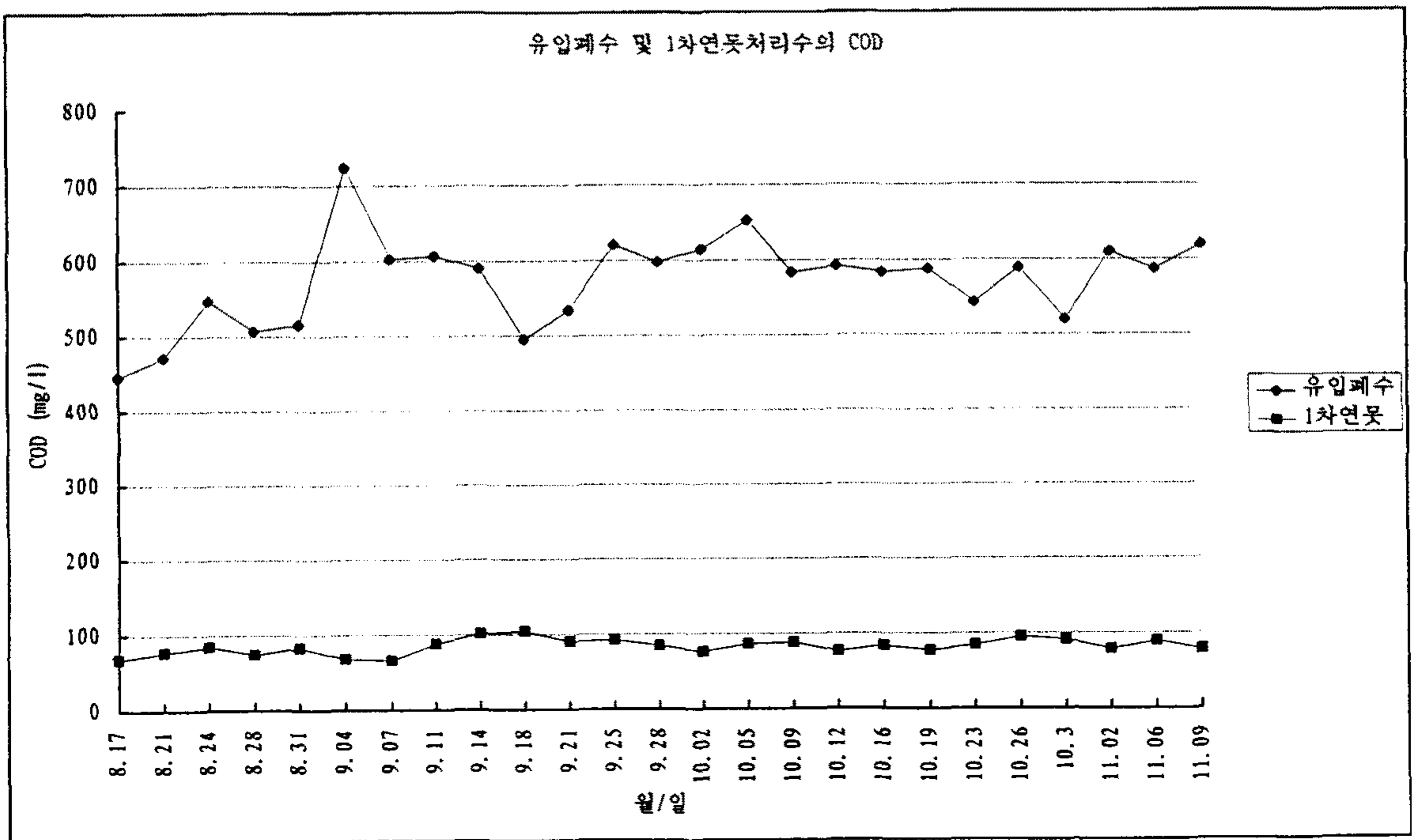


그림 7 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 COD

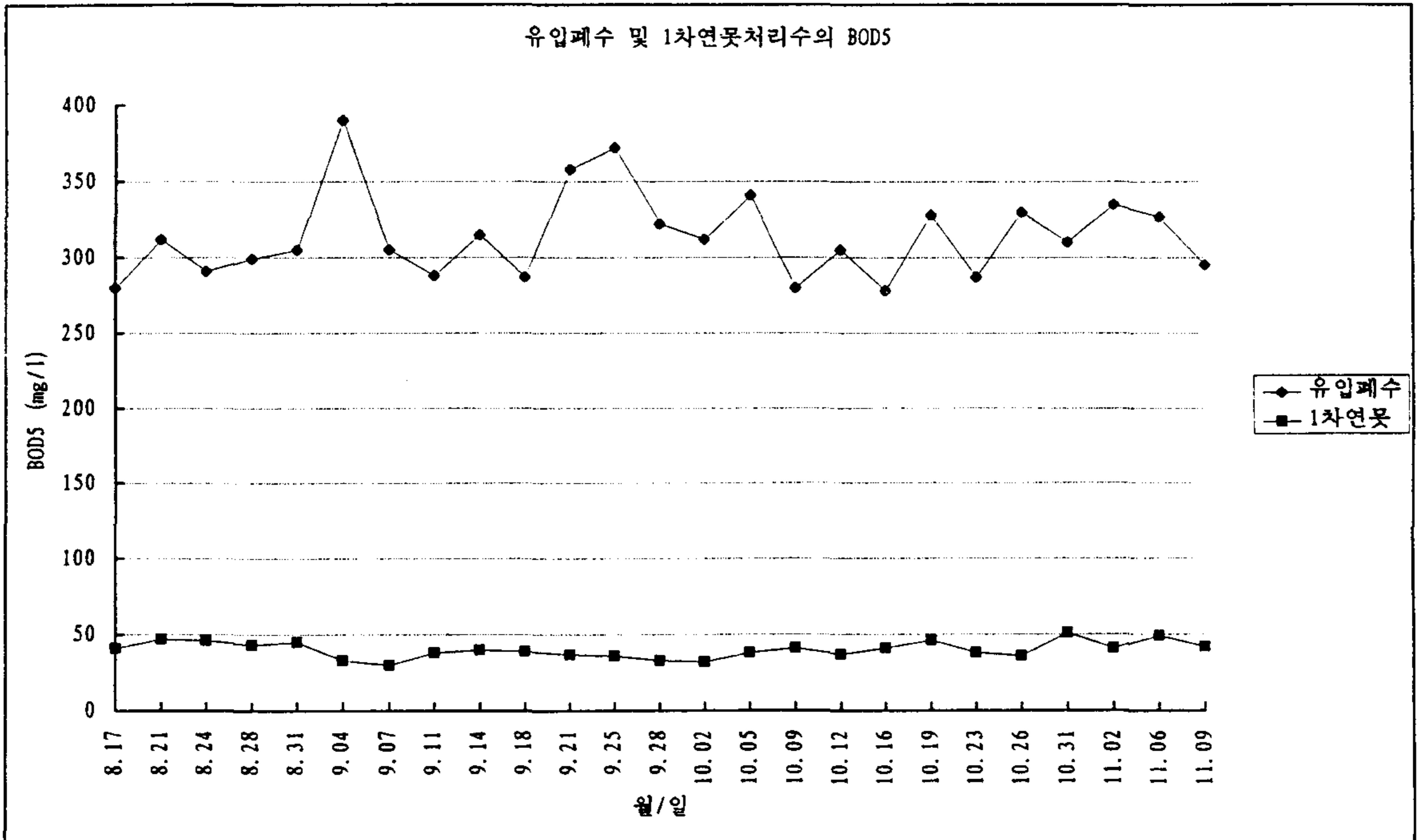


그림 8 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 BOD₅

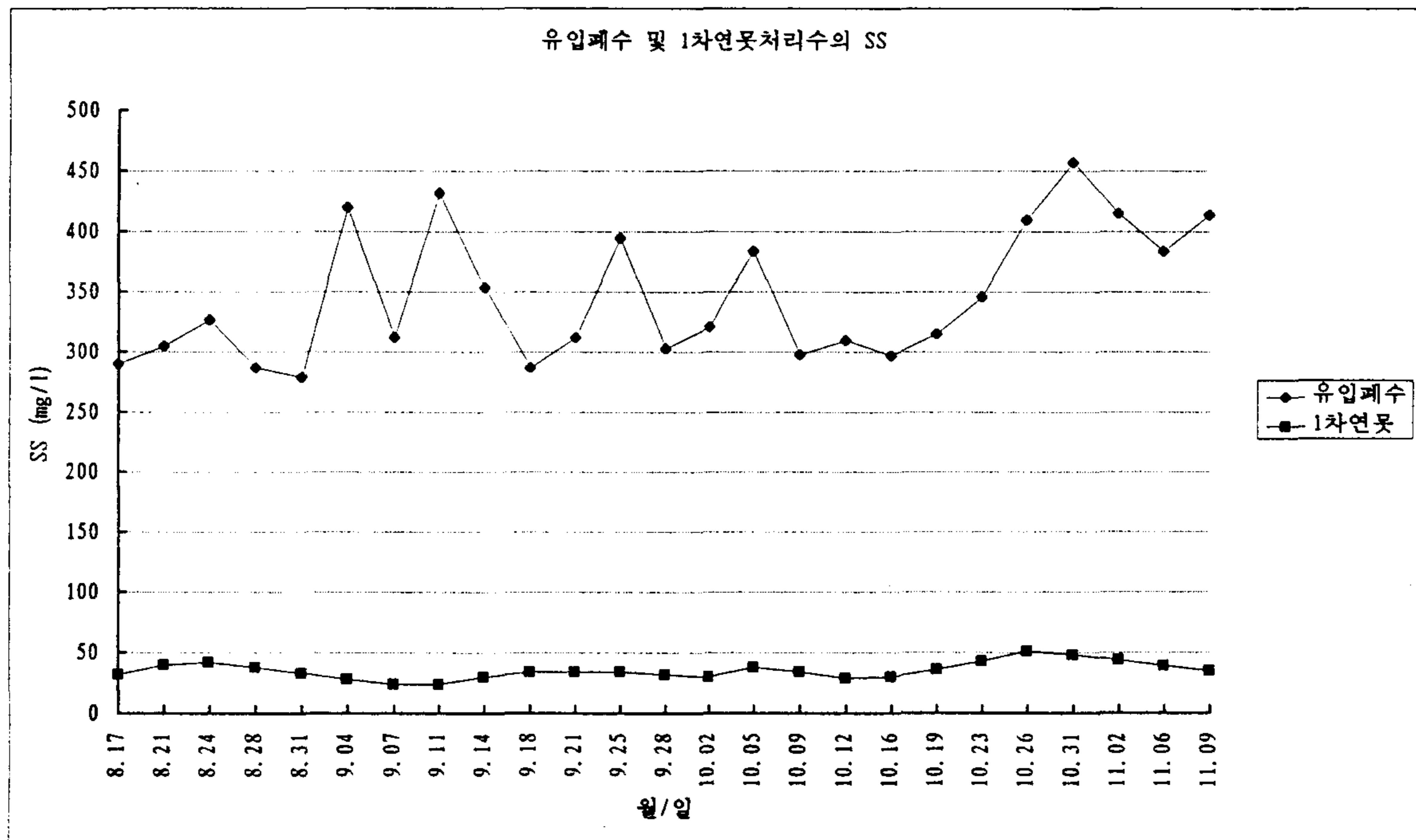


그림 9 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 SS

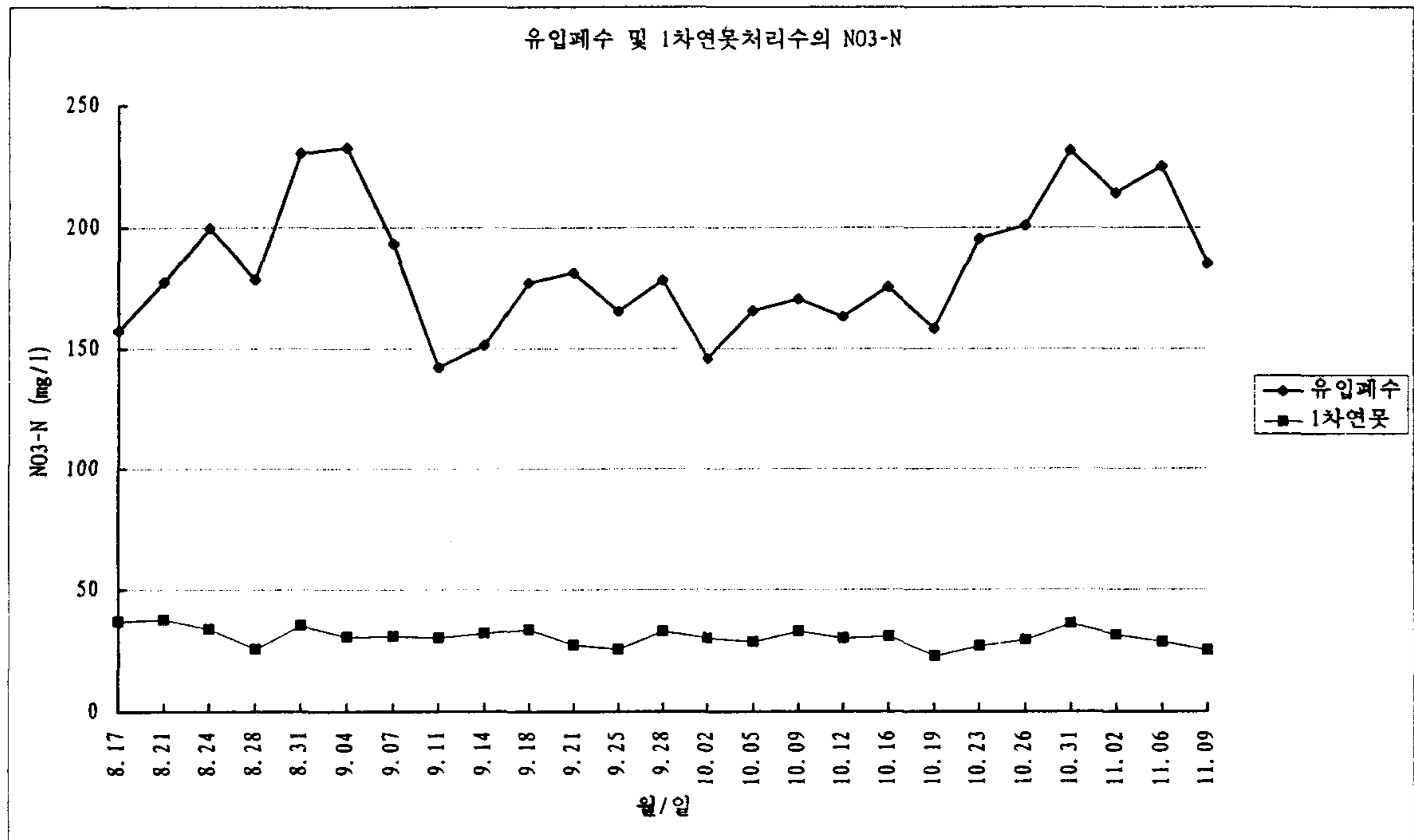


그림 10 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 NO₃-N

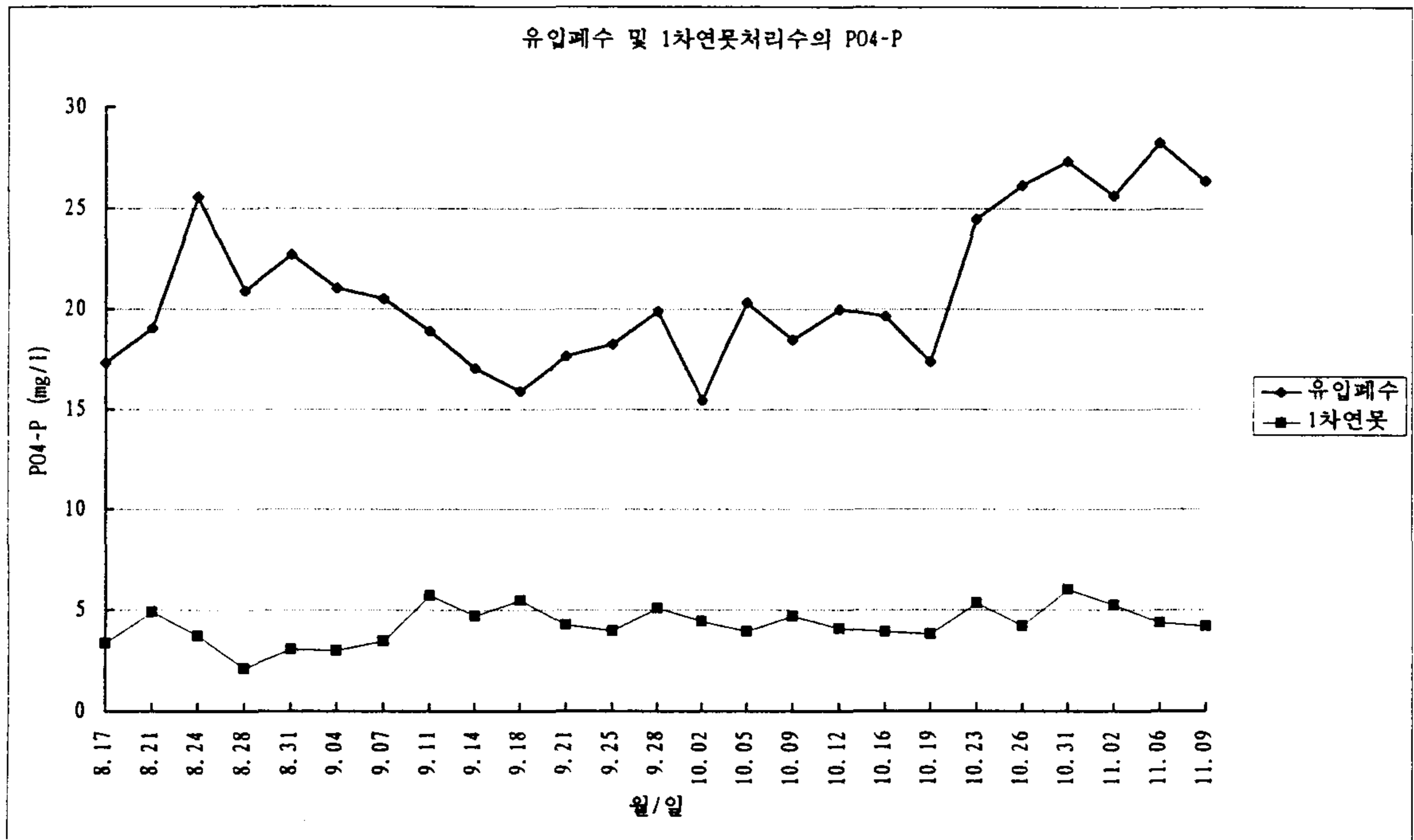


그림 11 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 PO₄-P

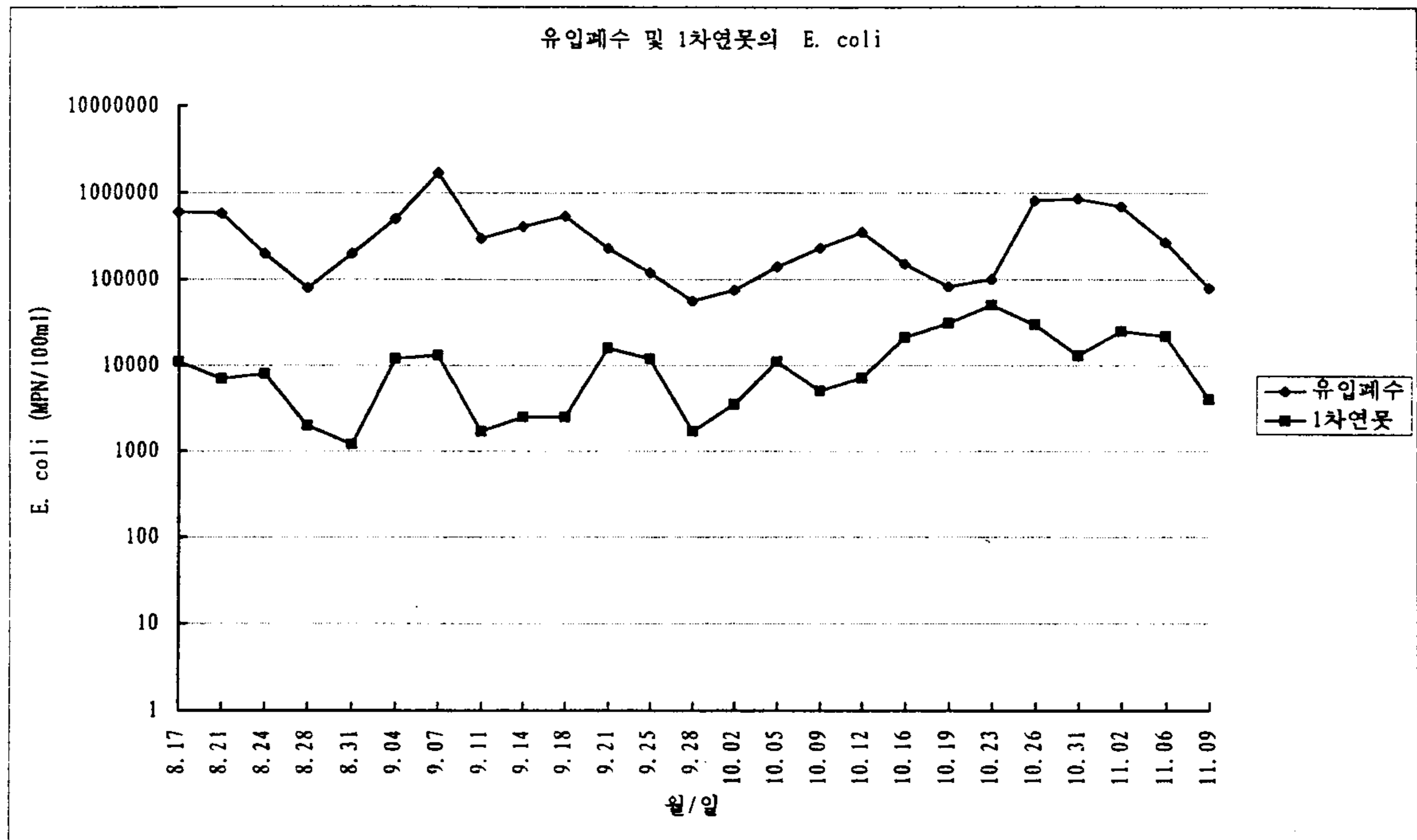


그림 12 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 E. coli

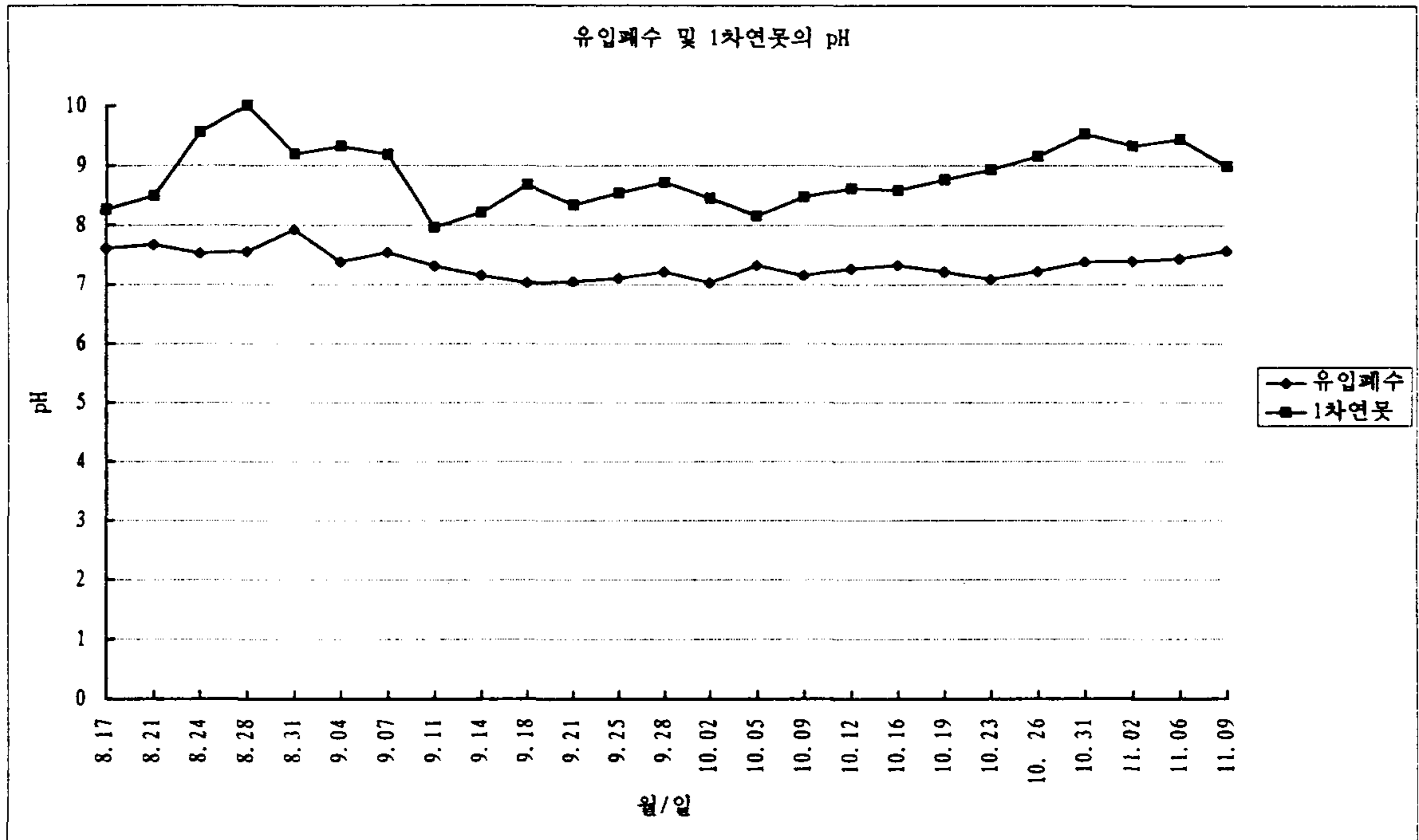


그림 13 : 유입폐수 및 1차연못처리수의 pH

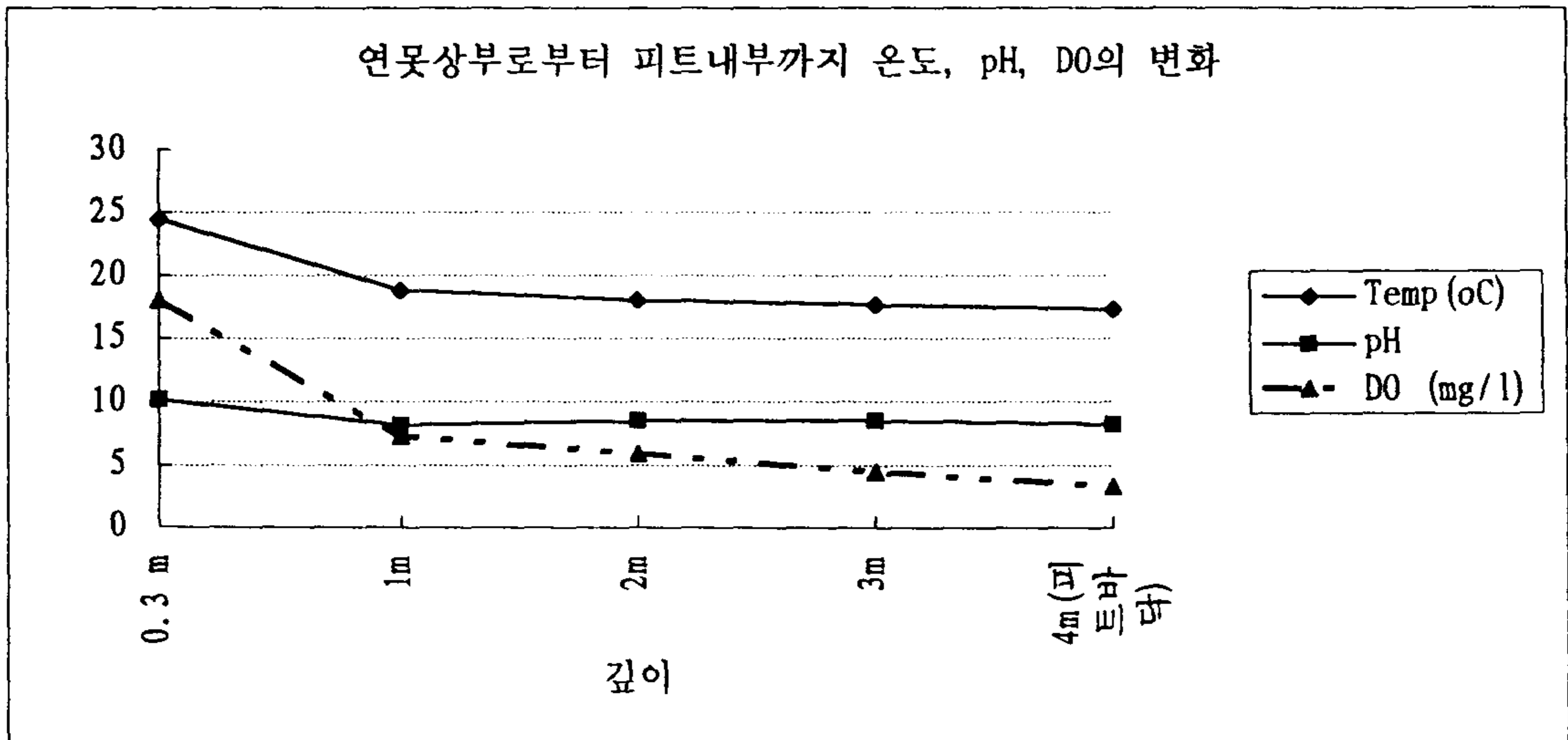


그림 14 : 수심변화에 따른 온도, pH, DO 변화

제 2 절 藻類의 성장

그림 15, 그림 16는 실험시스템 지역의 30년간 월평균 태양복사량과 월평균 기온이다. 여름철 복사량이 다소 낮은 이유는 장마로 인하여 햇빛이 차단되기 때문이다. 태양빛은 藻類(algae)의 성장에 영향을 미치며 조류의 성장은 유기물의 분해로 생성된 질소 인등 영양분을 제거하는데 중요한 역할을 한다. 조류 성장량의 공식은 다음과 같다.

$$Pr = k_p (S - S_0) \text{ ----- (1)}$$

여기서 Pr은 조류성장량 (g/m²/day), k_p는 성장계수, S는 태양에너지 [cal/cm²/day (langley/day)], S₀는 1차함수로 분석했을 경우 절편이다.

표 4 : 하수처리 연못시스템의 조류생산량

	Richmond ¹	Haifa ²
. 평균수온 (°C)	15.6	17.5
. 태양 복사열(S ₀)	125	138
. 최대 태양복사량(S _m)	500	658
. 성장계수 (K _p)	0.108	0.070

1. After Oswald(1988) 2. After Shelef(1982)

표 4는 Richmond(California) 와 Haifa(Israel)에 있는 하수처리 연못시스템의 고속처리연못의 조류성장량 실험결과이다. 공식 (1)에 대입하면 Richmond는 Pr = 0.108(S - 125)이며, Haifa는 Pr = 0.070(S - 138)가 된다.

수온이 적절하고 태양에너지가 약 $140 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ 이상이면 조류가 성장함을 알 수 있다. 연못시스템에서 조류는 수온이 5°C 에서 아주 낮은 성장을 하며 23°C 에서 왕성한 성장을 하고 40°C 이면 성장이 거의 멈추게 된다(Yang, 1992). 실험시스템지역의 경우 4월 - 10월 사이에는 연못상층의 녹조활동에 지장이 없을 것이다.

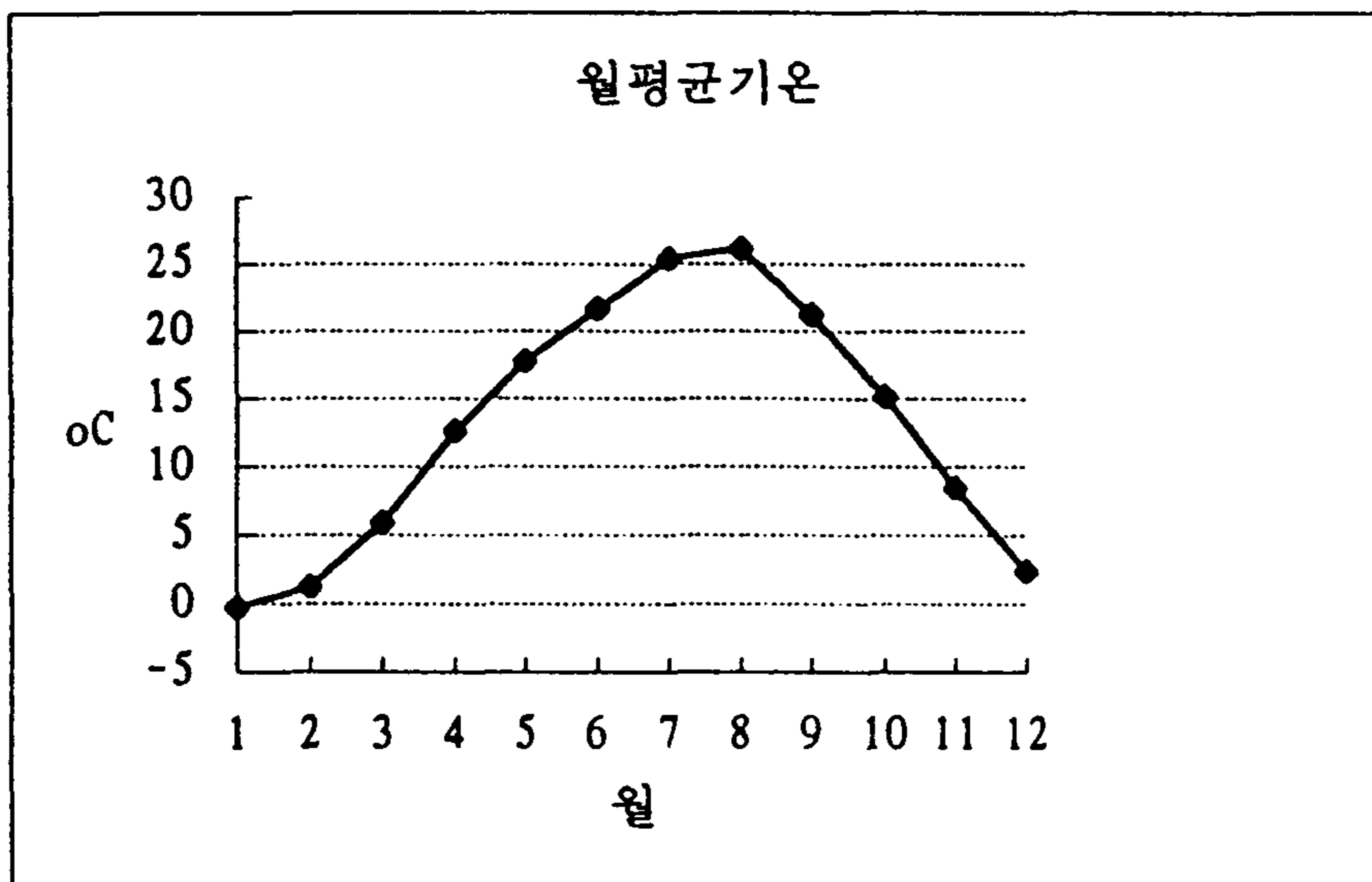


그림 15 : 실험 연못시스템지역 월평균기온

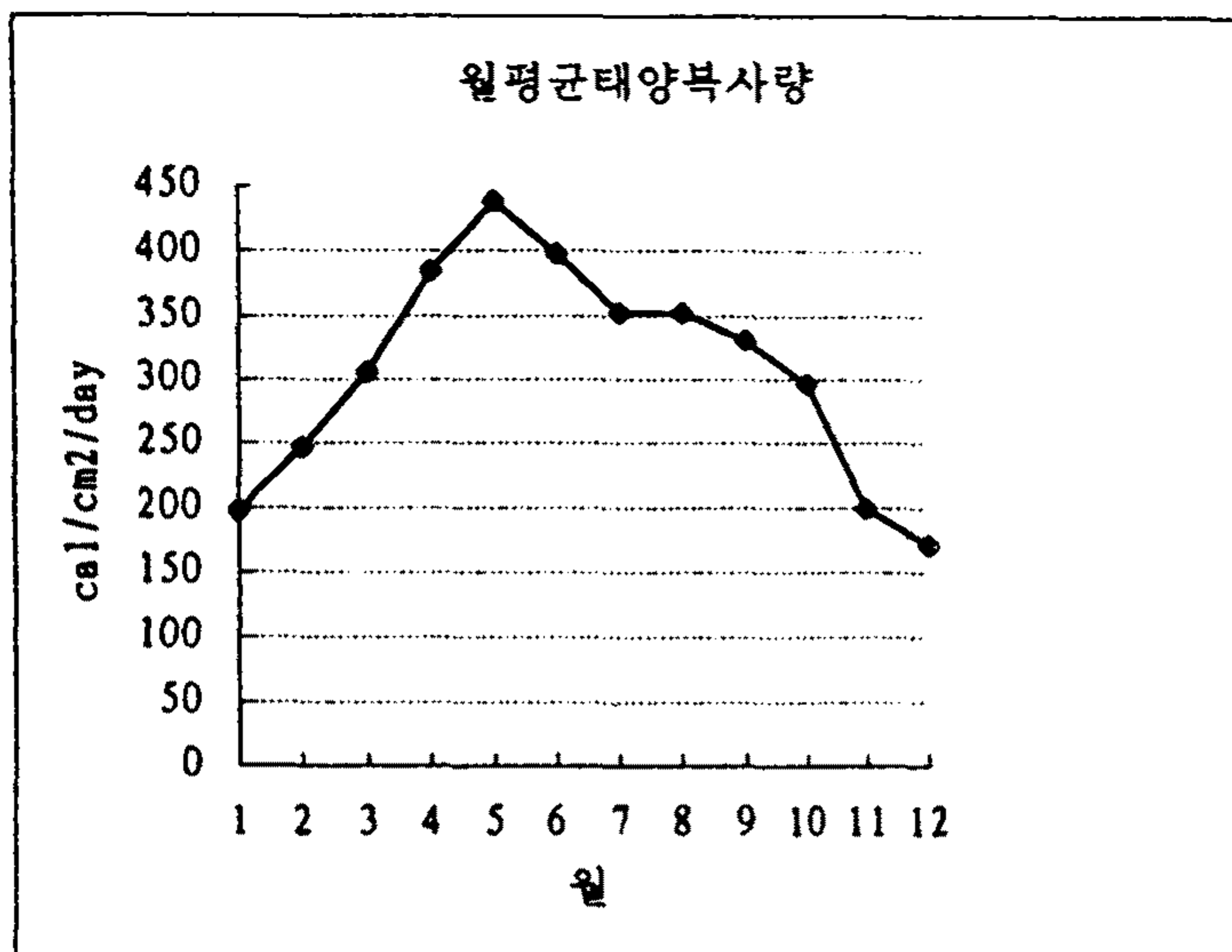


그림 16 : 실험 연못시스템지역 월태양복사량

제 4 장 처리수 이용 양어

문헌보고에 의하면 공업하수가 유입되지 않은 생활하수의 처리수를 이용한 양어 고기는 생체실험결과 인체에 전혀 해가 없다고 규명되어왔다 (Guerrin, 1990). 축산폐수 처리수를 이용한 양어고기는 인체에 해가 없을 것으로 사료된다. 처리수에서 기른 물고기의 냄새가 문제가 될 경우 시장출하 전 1 - 2주 맑은 물에서 길러 (depuration) 출하한다.

제 1 절 어종

처리수를 이용한 양어실험에는 잉어를 이용하였다. 우리 나라 평지에서 어디나 살고 있는 잉어는 온수성 담수어류에 속한다. 여름철 30℃를 넘는 물에도 잘 견디며, 겨울에는 얼어붙은 물 속에서도 견뎌내는 종류이다. 역사적으로도 잉어 양식은 오래되어 담수양식을 대표한다. 호소, 저수지, 강 등이 잉어의 좋은 서식지가 되는데, 맑은 물보다 약간 흐린 물을 더 좋아한다. 현재 잉어는 우리 나라를 비롯한 아시아 여러 나라, 유럽, 소련, 중동 아시아, 아프리카 등 세계 여러 지역에서 양식되고 있다.

제 2 절 재료 및 방법

양어지에 1차연못의 처리수를 유입시켜 2주 후인 1995년 8월 28일에 금년 봄에 부화하여 육성 중이던 잉어를 구입하여 비닐하우스 시험양어지에 수용했다. 2주간격으로 1차연못의 처리수를 소량유입시켰다. 양어지의 BOD₅는

10 mg/l 수준이었다. 시험 양어지에 잉어 73마리를 수용하면서, 전장과 체중을 측정했다. 전장은 입 끝에서 꼬리지느러미 끝까지를 가리킨다. 전장의 범위는 14.2-40.0 cm이었다. 그리고 매월 한 번씩 잉어 전부를 체포하여 마리 수를 확인하여 생존율을 조사하고, 전장과 체중을 측정하여 성장률을 조사했다. 생존율은 금월 마리수를 전월 마리 수로 나누어 백분율로 표시했다. 그리고, 일간성장률은 평균체중 증가 분을 사육 일수로 나누어 구했다.

제 3 절 실험결과

실험기간에 얻은 결과를 표 5에 정리했다. 잉어의 몸길이는 실험 시작할 때에 평균 전장이 23.3 cm이었고, 매월 0.1 cm씩 증가했다 (그림16). 평균 체중은 8월에 205.9 g에서 9월과 10월에 207.9와 209.2 g로 각각 늘었다 (그림 17). 그러나 8월에 잉어 73마리로 시작한 것이 9월에는 66마리가 남아 7마리가 죽었고 (생존율 90%), 10월에는 60마리가 남았다 (생존율 82%). 양식을 시작할 때 잉어의 총중량은 15.03 kg이었으나 9월에는 12.31 kg으로 2.82 kg이 줄었고, 10월에는 12.55 kg으로 전월에 비하여 0.24 kg이 늘었다. 8월에서 9월까지의 일간성장률은 0.068 g/일/마리였고 9월에서 10월까지의 0.065 g/일/마리였다.

총 50일간 사육하여 생존율이 82%를 넘고 있고 운반 및 조사시 충격을 감안한다면, 양어지의 수질은 잉어 양식에 나쁘지 않았다고 여겨진다. 비록 적은 폭이지만 몸 길이와 무게가 함께 증가하고 있는 것이 이를 뒷받침해주고 있다. 잉어의 성장은 먹이와 수온에 직접 영향을 받는다. 잉어의 먹이는 동물성과 식물성을 다같이 먹는 잡식성이며, 진흙 속에 있는 작은 벌레와 조류나 수초 또는 동·식물의 찌꺼기 등을 먹는다. 따라서, 본 실험에서

양어지에 가축폐수를 투입한 것이 조류, 물벼룩 등 잉어의 먹이생물을 증가시켰고, 이를 먹이로 이용하여 잉어가 성장한 것으로 추정할 수 있다. 잉어는 봄이 되어 수온이 10℃ 정도로 올라가면 먹이를 찾기 시작하고, 약 15℃를 넘으면 더욱 활발해진다. 잉어의 최적 수온은 24~28℃이며, 30℃를 넘으면 먹이를 먹지 않는 것이 보통이다. 본 실험에서 잉어의 일간성장률이 0.065~0.068 g/일/마리로 비교적 높게 나타났는데, 이것은 조사기간에 양어지 수온이 25~30℃로 최적 수온에 가깝게 유지되었기 때문에 가능했다고 여겨진다.

표 5 : 잉어 양식 시험 결과표.

조사항목 \ 조사일	95. 8. 28.	95. 9. 27.	95. 10. 17.
전장(평균±SD)	23.3±6.4 cm	23.4±6.8 cm	23.5±6.5 cm
체중(평균±SD)	205.9±190.2 g	207.9±192.0 g	209.2±194.5 g
마리 수	73	66	60
생잔율	--	90%	82%
총중량	15.03 kg	12.31 kg	12.55 kg
일간성장률	--	0.068 g/일/마리	0.065 g/일/마리

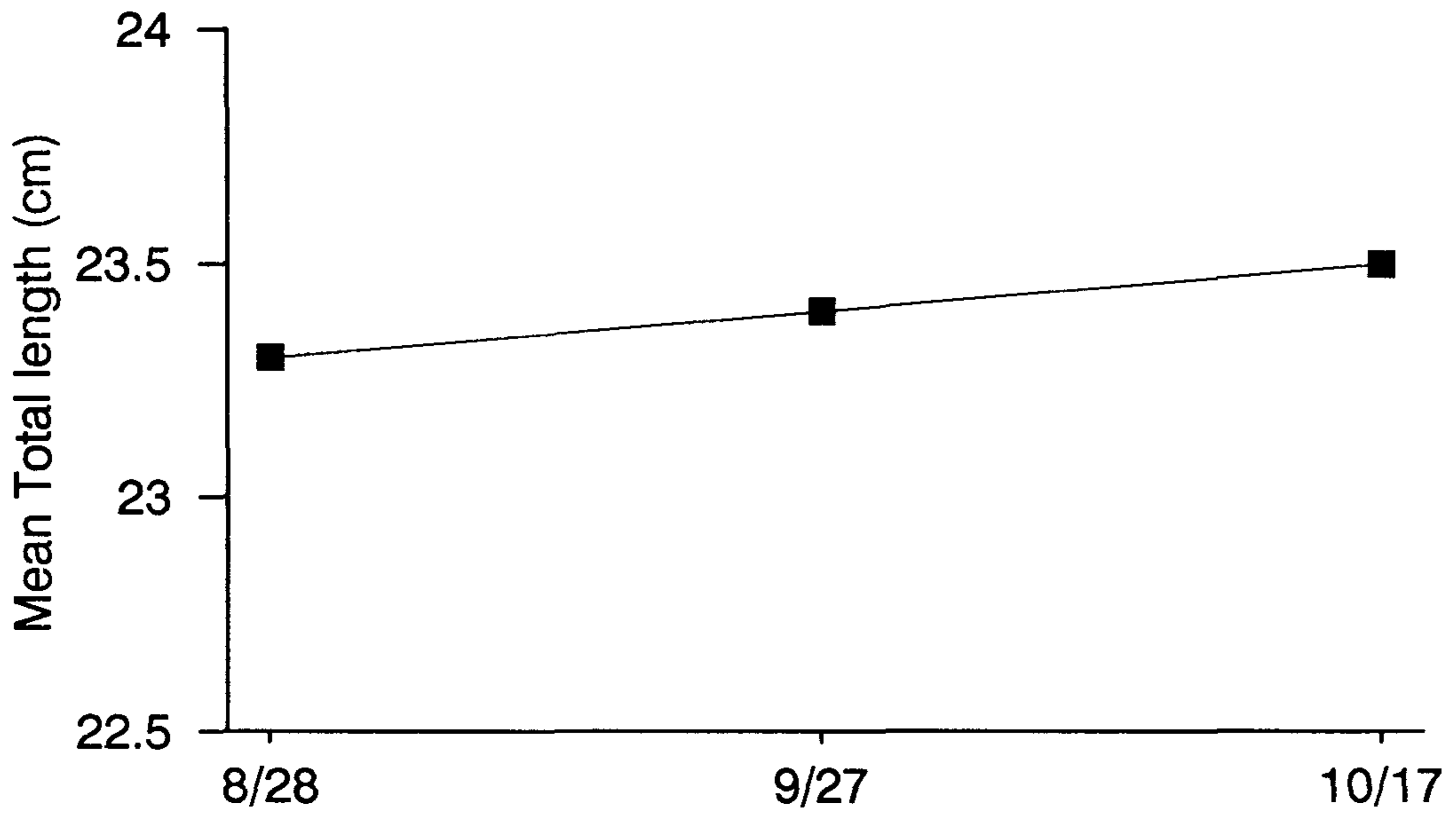


그림 17 : 잉어의 월간 평균총체장 변화

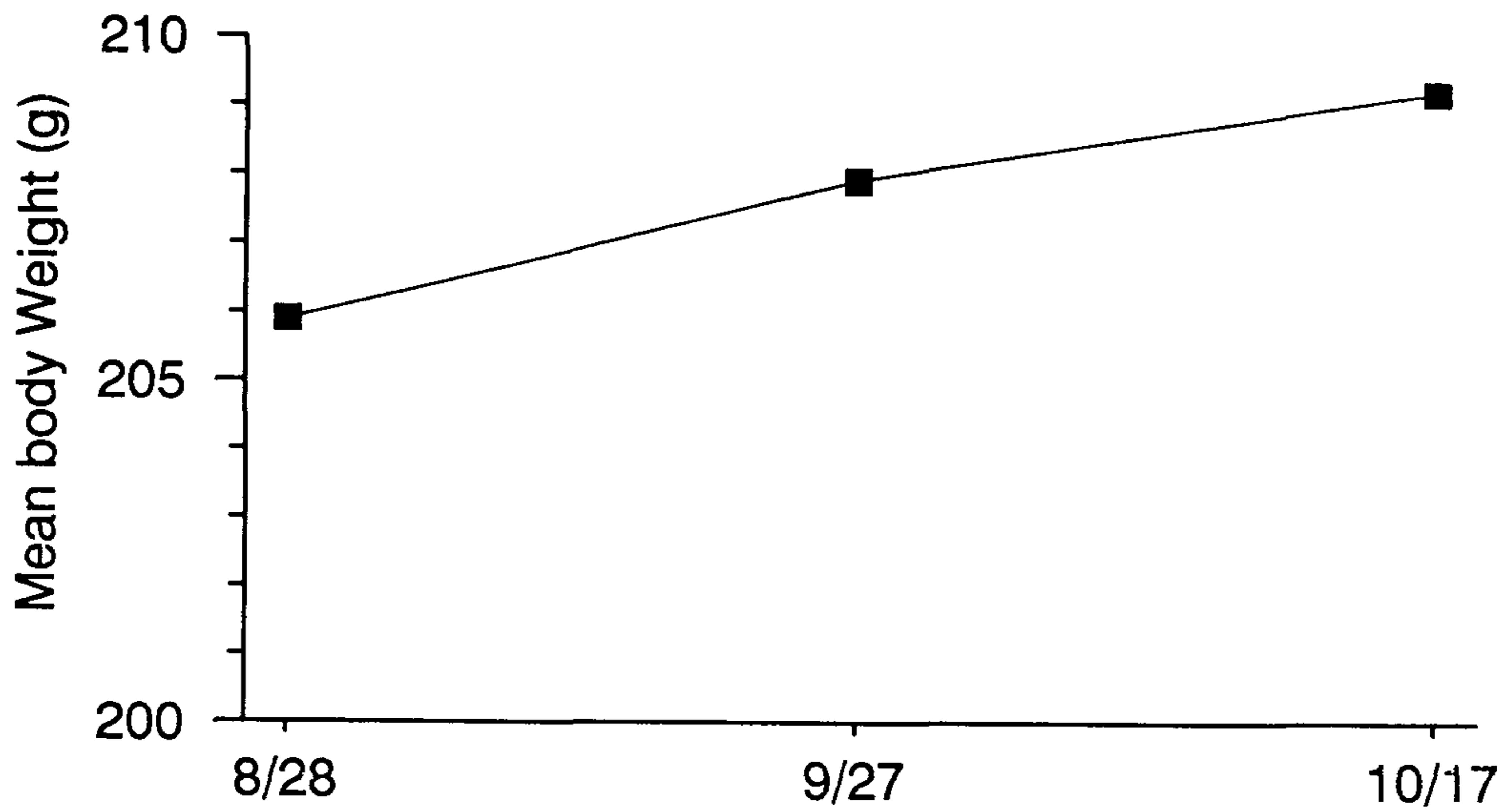


그림 18 : 잉어의 월간 평균체중 변화

제 5 장 연구성과 및 활용방안

제 1 절 연못시스템 및 Pit 모델

표 6은 개발중인 실험연못시스템의 1차연못과 미국 Eudora 하수처리 연못시스템의 1차연못 처리수준 비교표이다. 9, 10월 실험시스템 실험기간과 비교한 것이다. Eudora 시스템은 3개의 조건성연못으로 구성되어 있으며, 미국 환경처(EPA)에서 설계가 잘된 평가시스템으로 선정하여 일년간 처리수준을 조사한 시스템이다. (EPA, 1977) Eudora 시스템의 기온및 태양복사열은 실험연못시스템 지역과 유사하며, 1차연못의 수심이 약 1.5m이고 연못바닥에 Pit가 설치되어 있지않다. 실험데이터는 가동 5년후에 측정된 것이다. 표 6에서 두 시스템의 수온은 거의 비슷하며, 실험시스템에 유입되는 폐수의 BOD₅, SS의 농도가 높다.

표 6 : 실험연못시스템과 Eudor시스템 처리 비교

.실험시스템 10월 값은 10월 2일-10월 16일 평균 값임

.두 시스템의 1차 연못은 수심 0.3m에서 측정된 값임.

			BOD ₅ (mg/l)		SS(mg/l)		온도(°C)	
			9월	10월	9월	10월	9월	10월
실험 시스템	연못시	유입폐수	330	303	352	322	22	18
		1차연못 처리수	31	37	30	32	21	17
Eudora 시스템	연못	유입하수	330	260	290	230	23	19
		1차연못 처리수	41	49	89	110	22	17

1차연못에서 BOD₅ 제거율이 실험시스템 90 %, Eudora 시스템 84%, SS 제거율이 실험시스템 91% Eudora 시스템 62%로 실험시스템의 제거율이 높다. 실험시스템 1차연못의 pit와 연못바닥에 침전된 슬러지층이 메탄박테리아 생육조건에 최적으로 조성되지 않은 상태인데도 실험시스템의 처리효율이 높다. 유사한 수온조건과 태양복사열에서 연못상층의 호기성산화와 광합성산소 배출 활동이 비슷하다고 가정하면, 실험시스템에 설계된 Pit의 유기물 침전과 분해가 효율적이며, Pit내부로 용존산소의 침투가 효과적으로 차단되는데 원인이 있다고 사료된다.

실험시스템 1차연못의 실제 BOD₅ 표면부하량이 80 kg/day, Eudora시스템 1차연못의 실제 BOD₅ 표면부하량이 43 kg/day로 실험시스템이 두배 높으나 처리효율은 오히려 양호하다. 실험시스템의 Pit가 BOD₅ 제거에 중요함을 알수 있다.

표 7은 혐기성연못의 슬러지층이 BOD 제거에 미치는 영향을 보여준다. 슬러지가 16 inch 쌓인 연못과 슬러지를 완전히 제거한 연못에 같은 양의 폐수를 유입시키며 10개월동안 호주에서 실험한 결과이다(Parker, 1979). 슬러지층이 형성된 연못에서 BOD 제거가 높음을 알 수 있다. 메탄발효 박테리아활동이 슬러지층의 표면에서 훨씬 높기 때문이다. Parker(1979)는 슬러지층이 제거된 연못이 슬러지층이 형성된 연못의 BOD 제거수준에 이르는데는 1년이 소요된다고 보고하고 있다.

표 7: 슬러지층이 BOD 제거에 미치는 영향

유입폐수	BOD mg/l	
	슬러지제거 연못 처리수	슬러지층형성(슬러지 16 inch) 연못 처리수
437	221	167

실험시스템의 pit와 연못바닥에 1년정도 슬러지가 침전되어 슬러지층의 표면에서 메탄발효활동이 원활히 수행되면 BOD₅ 제거율이 더 높아질 것으로 예측된다. 초기적용 실험결과 실험시스템의 1차연못 및 Pit의 설계 및 시공이 성공적임을 알수 있다.

일반적으로 2차처리수준(Secondary Treatment) 하폐수처리장의 방류수질 기준으로 BOD₅와 SS의 농도를 각각 30mg/l로 적용한다. 국내 축산폐수 처리 시설의 수질기준은 공동처리시설의 경우 1996. 1. 1 부터 BOD₅ 와 SS는 30mg/l, 총질소는 120mg/l, 총인은 16mg/l 이하가 적용된다. 축산폐수시설의 설치허가를 받은 자가 설치한 축산폐수 정화시설은 BOD₅와 SS를 150 mg/l 이하로 규정하고 있으며, 상수원 보호구역 및 특정호소 수질관리 구역에서는 BOD₅와 SS를 50mg/l이하로 규정하고 있다.

1차연못 초기실험 결과 BOD₅ 농도는 공동처리시설의 방류수질 기준에 근접하고 있다. 2차 혹은 2차와 3차 연못을 동시에 연결하여 사용하면 30 mg/l 기준을 충족시킬수 있을 것으로 사료된다. 그림 10, 11에서 1차연못 처리수의 총질소와 총인의 농도는 공동처리시설 방류기준치보다 훨씬 낮은 수준이다. 연못시스템에서 녹조성장으로 N, P가 제거되기 때문이다.

제 2 절 양어지 모델

잉어의 몸길이가 실험기간동안 매월 0.1cm씩 증가하고, 평균체중은 8월에 205.9 g에서 9월과 10월에 207.9와 209.2 g로 각각 늘었다. 8월에서 9월까지의 일간성장률은 0.068 g/일/마리였고 9월에서 10월까지는 0.065 g/일/마리였다. 9월의 생산율이 90%, 10월의 생산율 82%로 수준이었다. 운반과 조사시 물고기가 받는 충격을 고려하면 높은 생산율이다. 1차연못의 처리수를 2주

간격으로 유입하면 양어지의 수질이 나빠 잉어가 죽는 현상은 일어나지 않으며, 잉어의 체중이 늘고 있음을 알 수 있다.

표 8은 사료 투입없이 연못시스템의 연못에 직접 기르거나, 처리수를 관수하여 양어한 각국의 양어생산량을 보여준다 (양, 1995a).

표 8 : 연못시스템 처리수만을 이용한 세계각국의 양어생산

나라	어종	생산량
독일	carp (잉어)	56g/m ² /year
헝가리	carp	170g/m ² /7months
이스라엘	Tilapia(역돔)	376g/m ² /year
이스라엘	carp과 Tilapia 복합	500g/m ² /year
인도네시아	Tilapia	300g/m ² /year
인도	carp	96-137g/m ² /year
중국	carp	18g/m ² /year

생산량은 18 - 500g/m²/year로 범위가 넓다. 양식기술, 기후 조건등이 다르기 때문이다. 8 - 10월의 초기실험 결과만으로 연간 25 g/year의 성장이 예측되어 다소 낮은 수준이나, 잉어가 양어지에 완전히 적응하면 생산량 증가가 기대된다.

제 3 절 연구개발성과 활용방안

1. 액상폐수(뇨·오수)뿐만아니라 분·뇨·오수 동시처리 가능

그림 19은 액상축산폐수 처리시스템으로 첫번연못에 유입되는 폐수의 단위면적당 BOD₅부하량이 적은 모델이다. 희석수대신 처리수를 재이용할 수 있다. 폐수의 BOD₅ 농도에 따라 희석수 및 처리수재이용이 결정된다. BOD₅가 500 mg/l 이하이면 희석이 필요하지 않다. 그림 20 모델은 분·뇨·오수를 동시 처리하는 시스템으로 BOD₅ 부하량이 많아 첫번연못이 혐기성연못의 기능을 한다. 연못시스템을 구성할 연못의 수, 연못의 종류, 각 연못의 크기는 유입폐수의 BOD₅ 부하량과 방류수 수질기준에 따라 결정된다. 그림 19과 20을 적절히 혼합하여 시스템을 구성하면 한 시스템내에서 분과 뇨·오수를 분리 및 동시 처리할 수 있다.

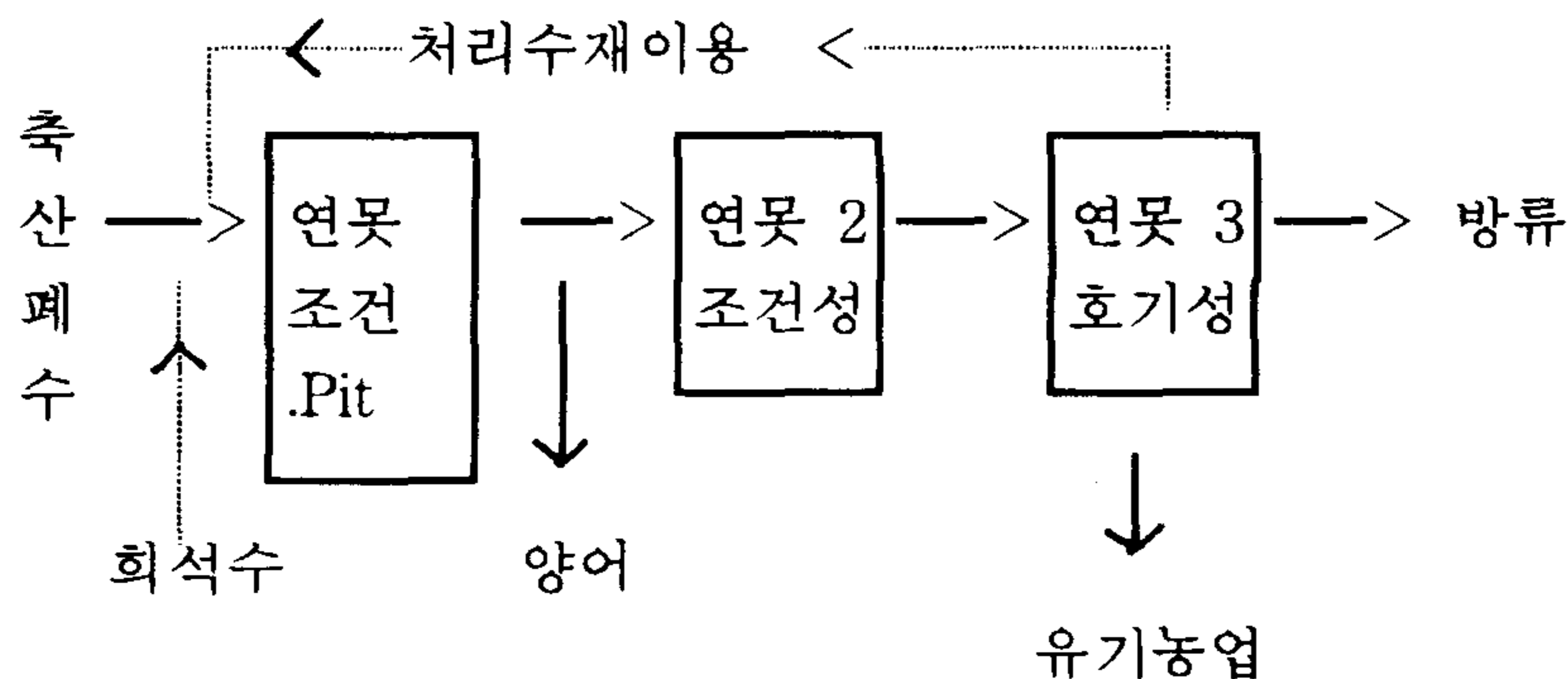


그림 19 : 단위면적당 BOD 부하량이 적은 시스템

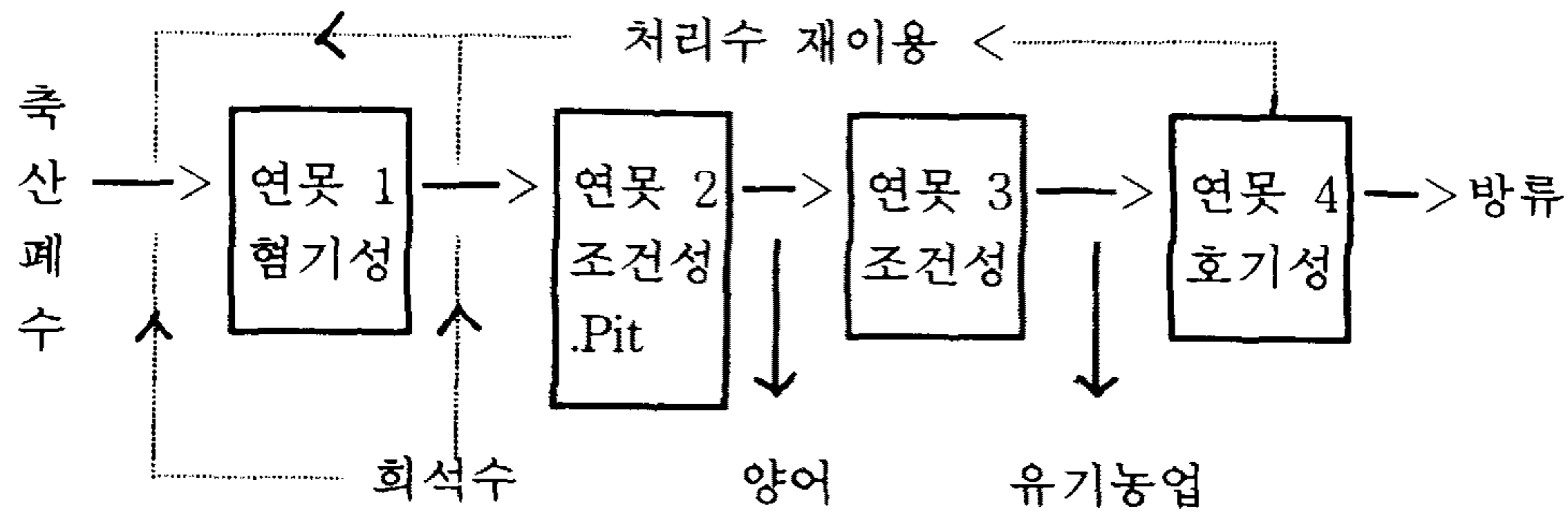


그림 20 : 단위면적당 BOD 부하량이 많은 시스템

2. 축산농가 간이정화조와 산화지의 문제점 해결가능

축산농가의 간이정화조는 그림 20의 혐기성 연못과 비슷한 기능을 수행한다. 상층액체는 고농도로 수질오염을 야기할수 있다. 수온이 14°C로 내려가면 메탄발효가 거의 정지하게 되어(Yang, 1992), 수온이 14°C 이하로 내려가는 기간동안 축사에서 나오는 슬러리를 저장할 수 있는 용량이 필요하거나, 수시로 슬러지를 제거해야하는 어려움이 있다.

축산농가에 설치된 산화지는 설계상 결함이 발견된다. 환경처에서 제시한 산화구 구조(환경처, 1988)는 우리나라 기후조건과 연못시스템의 기능을 정확히 반영하지 못하고 있다. 연못시스템의 일부로 고속처리연못(high-rate pond, 수심 30 -40 cm)을 제시하고 있으나 우리나라 기후에서는 사용이 불가능하다.

축산농가의 산화구는 수심이 낮아 바람이 강하게 불면 상층의 용존산소가 바닥으로 유입되어 메탄발효가 정지되는 현상이 일어나고 있으며, 폐수의

유입위치가 산화구 상층수면으로 폐수의 단기이동현상이 발생하여 처리효율이 매우 낮다. 단위면적당 BOD₅ 부하량이 과다하여 폐수처리기능을 수행하지 못하는 경우도 있다. 이들의 문제는 본 연구에서 제시한 설계로 전환하면 해결이 가능하다고 본다. 연못시스템의 일부기능을 수행하는 간이정화조와 산화구를 연못시스템으로 설계하면 간이정화조와 산화구의 문제점을 동시에 해결할 수 있다.

3. 축산농가의 폐수처리비 경감

중소규모의 축산농가에서 사용하고 있는 폭기식 정화조는 돼지 90두 혹은 소 30두에서 배출되는 액상폐수만을 처리하는데 시설비만 약 650만원이 소요된다 (1994년 기준). 유지비 및 관리비가 제외된 비용이다. 분은 따로 분리하여 퇴비화 해야한다. 같은 양의 액상폐수를 처리하는데 연못시스템은 설치비용이 덜 들며 유지 및 관리비용이 거의 들지 않는다. 연못시스템이 다른 기법에 비해 상대적으로 많은 토지를 필요로 한다는 잘못된 인식이 국내 보급을 지연시킨 원인이라고 본다. 처리장의 건설 및 운영 비용을 동시에 고려하면, 서독의 경우 연못시스템이 전통적인 활성슬러지법보다 비용이 덜들며 (Bucsteeg, 1987), 중국은 처리장의 양어소득을 고려하면 활성슬러지법의 1/5에서 1/6 수준이라고 한다(Baozhen, 1987). Pit의 도입으로 소요면적을 축소하고 양어소득을 고려하면 중소규모의 축산농가에서 경제적 활용가치는 높다고 할수 있다. 연못시스템은 생태적으로 적용되면 시스템의 운영 및 관리에 거의 인력이 필요하지 않다. 처리수를 이용한 양어도 사료투입이 없어 인력이 거의 필요없다. 일손이 모자라는 농촌현실에 적합한 처리기법이라 사료된다.

4. 중소규모 및 대규모 축산시설 폐수처리 이용

미국의 경우 농촌지역 소도시의 하수는 거의 연못시스템으로 처리하고 있으며, 독일은 수도 뮌헨의 50만 인구가 배출하는 하수를 대규모 연못시스템으로 처리하고 있다(Beck, 1984). 국내여건에서는 중소규모 축산시설의 폐수를 처리하는데 연못시스템이 적합하다고 본다. 토지확보가 가능하면 대형 축산폐수 공동처리시설로 이용할수 있다. 특히 비육우 및 젖소 사육시설은 초지등 부속 토지가 있으므로 연못시스템 설치가 용이할 것 이다.

5. 축산폐수의 자원화 및 농가소득 증대

연못시스템은 처리수를 이용한 양어와 처리수의 조류를 퇴비대신 사용할 수 있어 축산폐수를 처리하면서 자원화가 가능하다. 양어에의한 실질적 농가소득이 가능하다.

6. 수질오염 개선

연못시스템은 하천 및 호수 수질에 영향을 미치는 질소, 인등의 영양소, 기생충알 및 병원균을 동시에 제거하는 장점이 있다. 액상 축산폐수를 처리하는 기존 방법은 처리수내에 존재하는 영양소(N, P)를 동시에 제거하지 못하고 있다. 세계보건기구는 4개 직렬형으로 구성되고, 각 연못의 체류기간이 20 - 25일인 연못시스템은 기생충알을 완전히 제거할 수 있으며 대장균을 99.99 % 제거할 수 있다고 보고하면서, 처리수를 채소재배, 공원관수 등에 사

용하기 위해서는 연못시스템이 필수적이라고 보고하고 있다(Shuval, 1988).

7. 친환경적 지속가능한 축산업에 적합

국내의 수질환경오염이 심각한 상태에 이르고있어, 축산폐수 처리기준의 강화는 필연적인 상황이다. 환경적으로 안전하고 지속가능한 축산업의 기술개발이 절실히 요청된다. 폐수-녹조-양어-작물의 과정이 진행되며 축산폐수를 처리 및 재활용할수 있는 연못시스템은 환경적으로 안전하고 지속가능한 축산업에 적합한 축산폐수처리 기법이다.

연못시스템의 양어장 일부를 레크레이션 낚시터로 활용하는 나라도 있다. 알카타 연못시스템의 일부 연못은 새들의 서식처가 되면서 새 감상 관광지로 유명한 곳이다. 혐오시설로만 여기던 폐수처리장이 연못시스템을 이용하면 주민들의 휴식공간이 될수 있다. 대규모 축산폐수처리 연못시스템에서 나오는 처리수를 이용하여 노지와 온실에서 유기농 작물을 재배하고, 일부는 도시민들이 직접 수확해보면서 자연과 접촉할 수 있도록하면 연못시스템과 관광농원의 개념을 결합시킬 수 있다 (양, 1995b).

연구참고문헌

1. Allen, G.H. and Gearheart, R.A., 1978, *Arcata Integrated Wastewater Treatment, Reclamation, and Salmon Ranching Project*, Presented at the 1978 Winter Meeting, American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan.
2. Baozhen, W., 1987, The development of Ecological Wastewater Treatment and Utilization Systems in China, *Wat. Sci. Tech.* 19:51-63
3. Beck, v. P., 1984, Das Teichut Birkenhof der Kraftwerkstreppe Mittle Iser, *Oesterreichische Wasserwirtschaft*, 36(5/6):127-129
4. Bucsteeg, K., 1987, German Experiences with Sewage Treatment Ponds, *Wat. Sci. Tech.* 19(12):17-24
5. Edwards, P., 1987, *Resource Recovery and Health Aspects of Sanitataion*, AIT Research Report No. 205, Environmental Sanitation Information Center, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
6. EPA, 1977, *Performance Evaluation of an Existing Seven Cell Lagoon System*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/ 2-77-086, Municipal Environmental Research Laboratory Cincinnati, Ohio, pp.112-130
7. EPA, 1977, *Performance Evaluation of an Existing Lagoon System at Eudora, Kansas*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/2-77-167, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, pp.35-135
8. EPA, 1983, *Design Manual: Municipal Wastewater Stabilization Ponds*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-625/1-83-015, Washington, D.C. pp.2-7
9. Finney, B.A., and E.J., Middlebrooks, 1979, Evaluation of Facultative Waste Stabilization Ponds Design, in *Performance and Upgrading of Wastewater Stabilization Ponds*, EPA, EPA-600/9-79-011, pp. 18-35.
10. Gloyna, E.F.and L.F., Tischler, 1979, Design of Waste Stabilization Pond Systems, *Progress in Water Technology*, II(4/5):47-70
11. Goldman C.R. and A.J. Horne, 1983, *Limnology*, McGraw-Hill Book Company,

New York, pp.15-17

12. Guerrin. F., et al, 1990, Levels of Heavy Metals and Organochlorine Pesticides of Cyprinid Fish Reared Four Years in a Wastewater Treatment Pond, *Bull. Enviro. Contam. Toxicol.*, 44:461-467
13. Metcalf & Eddy, Inc., 1979, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuses*, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York. pp.64
14. Middlebrooks, E.J., et al., 1982, *Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading*, Macmillan Publishing Co., New York, pp. 1-12,
15. Oswald, W.J., 1968, Advances in Anaerobic Pond System Designs, in *Advances in Water Quality Improvement*, E.F. Gloyna and W.W. Jr. Eckenfelder (Eds.), University of Texas Press, Austin, pp. 186-194.
16. Oswald, W.J., 1988, Large-Scale Algal Culture Systems (engineering aspects), in *Micro-Algal Biotechnology*, M.A. Browitzka and L.J. Borowitzka (Eds.), Cambridge University Press, PP 357-414.
17. Oswald, W.J., 1988, *A Syllabus on Waste Pond Fundamentals*, University of California, Berkeley, Spring 1988, BEHS 259, pp.66-68
18. Oswald, W.J., 1989, *Bolivia Sojourn 1989*, Presented before a seminar held at the University de San Simon, October 1-10, 1989
19. Schneiter R.W., 1982, *Cold Region Wastewater lagon Sludge: Accumulation, Characterization, Digestion*, pH.D. Dissertation, Utah State University, Logan, Utah
20. Shelef, G., 1982, Higrate-rate algae ponds for wastewater treatment and protein production, *Wat. Sci. Tech.*, 14:493-495
21. Shuval, H., 1988, rationale for Engelberg Guidelines, *IRCWD (International Reference Center for Waste Disposal) News*, 24/25:18-19
22. Parker, C.D., 1979, Biological Mechanisms in Lagoons, *Progress in Water Technology*, II(4/5):71-85.
23. WHO, 1987, *Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning &*

Practice, Regional Office for the Eastern Mediterranean Alexandria, WHO EMRO
Technical Publication No. 10,

World Health Organization

24. Yang, H., 1992, *Ecological Design of Estuarine Environment for a Sustainable Urban Ecosystem*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley. pp. 103-167

25. 김동문, 김수생, 1984, 폐수처리, 서울, 녹원문화사

26. 양상현, 상하수도공학, 서울, 동화기술

27. 이규성외,5인, 수질오염방지기술, 서울, 동화기술

28. 양홍모, 1995a, 하수처리 및 재활용 연못시스템의 국내응용, 1995, 3, 대한상하수도
학회, 9(2): 108-117

29. 양홍모, 1995b, 하구환경의 생태적 설계, 한국조경학회지, 23(2): 167-181

30. 환경청, 1988, 축산폐수정화시설(표준설계도 및 해설)