

발 간 등 록 번 호

11-1541000-001409-01

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수  
처리기술 개발

(Development of Resource Cycling System for Treating the  
Livestock Wastewater by Natural Purification Method)

경 상 대 학 교

농 립 수 산 식 품 부

# 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2012년 4월 9일

주관연구기관명 : 경상대학교

주관연구책임자 : 허 종 수

세부연구책임자 : 허 종 수

연 구 원 : 서 동 철

연 구 원 : 박 종 환

연 구 원 : 박 성 규

연 구 원 : 천 영 석

연 구 원 : 임 종 서

연 구 원 : 김 아 름

연 구 원 : 김 성 현

연 구 원 : 이 충 현

연 구 원 : 정 창 윤

연 구 원 : 이 성 태

연 구 원 : 이 준 호

연 구 원 : 이 정 구

연 구 원 : 심 혜 진

연 구 원 : 하 가 영

연 구 원 : 이 홍 재

협동연구기관명 : 순천대학교

협동연구책임자 : 조 주 식 (1년차)

협동연구책임자 : 정 용 화 (2-3년차)

연 구 원 : 한 명 자

연 구 원 : 최 익 원

연 구 원 : 강 세 율

연 구 원 : 서 영 진

연 구 원 : 이 상 규

연 구 원 : 한 종 학

연 구 원 : 김 민 옥

연 구 원 : 장 현 속

연 구 원 : 구 제 복

연 구 원 : 김 은 미

연 구 원 : 양 주 동

여 백

# 요 약 문

## I. 제 목

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 국내 축산업 생산액 (2006년)은 11.7조원으로 쌀 생산액 8.7조원보다 높으며, 전체 농림업 생산액 36.4조원의 32.1%를 차지하고 있어 매우 중요한 산업임에도 불구하고 수질과 토양 오염이나 악취 등으로 인한 환경오염의 주요인 중의 하나임.
- 근래 축산업의 고도성장으로 인한 집약화, 대규모화에 따라 가축분뇨의 발생량은 급격히 증가한 반면에 분뇨를 환원시킬 수 있는 초지나 경지면적은 증가율이 제자리 또는 감소하는 추세이기 때문에 가축분뇨가 환경에 미치는 영향에 대해서는 국내에는 물론 세계적으로 첩예의 관심사가 되었음.
- 2006년말 기준으로 우리나라에서 발생하는 오·폐수는 하루 25,646천 톤으로 이 중에서 축산폐수는 하루 131천 톤으로 하폐수 발생량의 0.51%를 차지하고 있음.
- 2007년말 소·돼지의 가축분뇨 발생량은 1일 135,402 m<sup>3</sup>/일이며, 이 중 돼지가 82,610 m<sup>3</sup>/일, 젓소가 20,657 m<sup>3</sup>/일, 한우가 31,135 m<sup>3</sup>/일로 돼지사육농가에서 발생하는 가축분뇨가 전체의 61%로 가장 많은 양을 차지하고 있음.
- 사육규모별로는 대규모 사육농가인 허가대상이 53%, 중규모 사육농가인 신고대상이 34%로 축산농가가 대규모화하고 있음. 또한 전체 가축분뇨 발생량 중 약 80%는 자체적으로 퇴비·액비화시설을 갖추어 비료로 활용하고 있으며, 일부 농가에서는 정화처리하거나 재활용업체 및 해양배출, 공공처리시설을 이용하여 가축분뇨를 처리하고 있음.
- 하지만 신고미만 가축분뇨 발생량이 전체 가축분뇨 발생량의 11%인 15,787m<sup>3</sup>/일로 아직까지 소규모이고, 지역적으로 분산되어 있어 축산폐수의 관리가 쉽지 않은 상황임.
- 축산분뇨는 유기질 및 무기질 비료 뿐만 아니라 작물 성장에 유익한 미생물들이 다량 함유되어져 있는 친환경적이며 가장 우수한 천연비료로 농작물 재배에 널리 사용되어져 왔으나 수거된 후 방치되면 수분, 악취 및 해충 등의 발생이 증가됨으로써 주변 환경을 오염시킬 위험성이 큼.
- 축산 분뇨는 고형분과 액체인 뇨로 나누어지는데 고형분은 쉽게 퇴비화하여 농가에 보급되어 활용되어지지만 액체인 뇨는 자체 폐수정화시스템을 운영하거나 폐수처리장으로 이송하여 위탁 처리함으로써 축산물의 생산 단가를 상승시키는 요인으로 작용하고 있음.
- 축산폐수는 BOD부하가 매우 높고 상대적으로 질소농도도 매우 높아 하천수질 악화 및 호

수 부영양화의 주된 원인이 되고 있음. 축산폐수의 처리는 현재 화학적·생물학적 처리방법을 적용하여 BOD 5,000 mg L<sup>-1</sup> 정도의 축산폐수를 대상으로 처리하고 있으나 오염물의 부하가 매우 높고 농도변화가 심하여 처리에 많은 어려움이 있으며, 유기성 오염물질의 제거와 질소와 인의 동시 처리가 불가능하여 다양한 고차처리 공법이 필요한 실정임.

- 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 생물학적인 축산폐수 처리방식은 활성슬러지법이나 이 방식은 질소·인 제거효율이 낮아 점차 강화되고 있는 폐수배출 허용기준에 대응하기 어려워 다양한 고차처리 방법이 개발되었다. 개발된 대표적인 축산폐수 처리공법은 A/O, A<sup>2</sup>/O, Bardenpho, UCT, VIP, SBR 및 장기폭기법 등이 있으나, 이들 축산폐수의 정화처리시설은 생활하수 또는 공장폐수 처리시설과는 달리 농가자신이 유지관리를 행하는 경우가 많고 처리에 드는 모든 비용이 축산경영에 직접 영향을 끼치기 때문에 유지관리가 쉽고, 건설비 및 유지관리비가 저렴하며, 질소 및 인의 처리효율이 높은 축산폐수 처리기술이 필요할 것임.
- 화학적인 축산폐수 처리는 고부하로 인해 화학약품 사용량이 매우 많이 소요되며, 특히 고농도의 BOD, T-N 및 T-P의 처리가 어려워 과다한 투자 및 고부하의 운전조건을 요구하므로 처리하기가 어려운 실정임.
- 화학적·생물학적인 축산폐수 처리이외에 퇴비화법, 저장액비법, 톱밥발효법, 토지환원법 등의 많은 자원화방법들이 있으나, 이들 기술로 전체 축산폐수를 처리한다는 것은 역부족이며, 또한 자원화를 위해서는 수분조절을 위한 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제가 다량 요구되어 경제성측면에서 비용상승의 우려가 있고, 토양오염 및 수질오염 등의 2차 오염이 우려되고 있음.
- 축산분뇨의 비료화 방법은 톱밥 등을 혼합하여 퇴비화시키는 방법이 가장 진전되어 있으며, 현재 액비화 시키기 위한 축산분뇨 액비 연구 또한 활발하게 이루어지고 있으나, 이들 축산분뇨의 퇴·액비화는 농작물의 burning 현상, 뿌리 썩음 현상, 산소 결핍 현상, 사료 작물의 오염, 토양의 산성화, 생육억제, 악취 확산 및 해충 확산 등의 다양한 문제점이 발생할 수 있어 농가 보급을 위해 체계적·경제적인 퇴·액비화 기술 개발이 시급한 실정임.
- 최근 들어 한·미 FTA 체결로 외국산 축산물의 수입이 본격화됨에 따라 농업생산은 향후 15년간 6,700억원 감소 할 것으로 전망됨.
- 이에 정부는 농업부문의 급속한 시장개방에 능동적으로 대처하고, 국내 축산업의 경쟁력 제고와 생산성 향상을 위해 가축분뇨 관리정책의 기본방향을 종전의 가축 분뇨 정화처리 중심에서 퇴·액비화를 통한 자원화로 전환하고, 나아가 축산과 경종이 함께하는 자원순환형 친환경 축산단지를 도입 중에 있음.
- 최근 신정부는 기후변화 대응과 동시에 신재생에너지 보급화를 위해 “저탄소 녹색성장” 산업화 전략을 발표하였으며, 농업분야의 “녹색성장”의 중점사업화 전략에 있어 자원순환형 기술을 축산단지 및 청정에너지 생산에 활용하기 위한 다양한 방안이 진행되고 있다.
- 축산폐수와 관련하여 많은 폐수처리공법과 자원화방법들이 난립하고 있으나, 아직까지 자

원화나 폐수처리 모두를 완벽히 해결할 수 있는 대안이 없는 실정임.

- 이에 축산폐수 처리와 자원화 기술은 농가자신이 유지관리를 행하는 경우가 많기 때문에 축산폐수 처리 측면에서는 운전이 용이하고, 건설비 및 유지관리비가 저렴하고, 질소 및 인의 처리효율이 높아야 하며, 자원화 측면에서는 퇴·액비화에 적은 에너지가 소모되어야 하며, 경제성이 높고, 관리가 용이해야 할 것임.
- 이에 본 연구진은 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발하여 축산폐수 처리와 퇴액비화를 통한 자원화를 자원순환 방법으로 동시 수행하고자 함.
- 특히 본 자연정화공법에 의한 인공습지는 안정적인 수처리 효율과 함께 처리장내에 성장한 수생식물을 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용할 수 있어 자원화의 경제성측면과 토양오염, 수질오염 등의 2차 오염문제를 동시에 해결할 수 있을 것으로 판단됨.
- 일반적으로 인공습지에서는 수생식물의 영양염류 흡수에 따른 수질정화능력 효과의 극대화를 위해서는 지속적인 수생식물의 제거가 필수적이거나, 관리가 소홀한 인공습지의 경우 지속적인 수생식물의 제거가 이루어지지 못하여 폐기물화한 다 자란 갈대가 썩으면서 흡수된 영양염류가 다시 유출되어 수질악화를 초래하고 있음. 또한 지속적인 수생식물의 제거가 이루어지는 인공습지는 제거된 수생식물의 활용방법이 없어 주변지역에 야적하여 주변경관을 크게 훼손하고 향후 이들이 부식되어 영양염류가 다시 유출될 수 있음.
- 따라서 본 연구는 축산폐수를 효과적으로 처리하면서 인공습지에서 부산물로 발생하는 수생식물을 이용한 자원의 재활용을 동시에 수행하여 축산, 경종 및 폐수처리가 함께하는 친환경 축산 폐수처리 시스템인 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발하고자 함.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

현행 농촌의 축산폐수를 처리하는 물리·화학·생물학적인 정화공법은 폐수의 처리효율이 낮아 시설의 개선과 고차처리가 필요하고, 다양한 자원화공법들은 2차오염과 경제성부분에서 많은 문제점이 있으며, 특히 질소와 인의 처리는 현행 공법만으로 방류수 수질기준을 만족하기가 매우 어려운 실정이므로 본 연구는 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리와 퇴비화를 통한 자원화(수생식물을 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용)를 자원순환 방법으로 동시에 수행할 수 있는 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발하고자 하였으며, 그 연구개발 내용 및 범위는 아래와 같다.

## 1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

### 가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

- 1) 축산폐수 종류별 이화학적 특성
- 2) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성
  - 가) 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착특성
  - 나) 여재 종류별 인의 흡착특성
  - 다) 질소 및 인 흡착능에 따른 최적 등온흡착식 선정
- 3) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리
  - 가) 처리시일에 따른 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인 처리
  - 나) 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량
- 4) 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험
  - 가) 소형축산폐수처리장치에서의 수처리 효율
  - 나) 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성
  - 다) 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량
  - 라) 소형 축산폐수처리장치에서의 미생물상

### 나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구

- 1) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석
- 2) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석
- 3) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴
- 4) 소형퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화
- 5) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토
- 6) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화

### 다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구

- 1) 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리효율
- 2) 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 수처리효율

## 2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

- 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율
- 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성
- 3) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량
- 4) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상
- 5) 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링

### 나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발

- 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율

- 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석
- 3) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토

### 3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화

#### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화

- 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 장기간 수처리 효율
- 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성
- 3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안
- 4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화
- 5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치
- 6) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 효율 비교
- 7) 현장 자원순환형 축산폐수 처리장의 설계규격화 및 관리지침 제시

#### 나. 자원순환형 퇴비화기술 실용화

- 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산
- 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정
- 3) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험
- 4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 설계 규격화
- 5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리지침 제시

## IV. 연구개발결과

본 연구는 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리와 수생식물의 퇴비화를 통한 자원화를 자원순환 방법으로 동시에 수행할 수 있는 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발하기 위해 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발과 수생식물의 퇴비화 기술개발로 세분화하여 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

### 1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

#### 가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위해 서부경남 인근 지역의 축산농가에서 배출되는 축산폐수의 종류별 이화학적 특성을 각각 조사하였고, batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성과 column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리능력을 조사하여 축산폐수처리기술 개발을 위한 기초연구를 수행하였다. 이들 기초연구결과를 이용하여 자원순환형 축산폐수처리기술을 개발하기 위해 소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별, 처리공법의 조합방법별 및 축산폐수 부하량별로 구분하여 최적조건을 조사한 후 이들 최적조건하에서 자원순환형 축산폐수처리기술 개발을 위한 기반연구로 축산폐수 종류별, 특수여재 주



입별 및 수생식물을 이용한 전처리방법별로 구분하여 수처리 효율을 각각 조사하였다. 또한 축산폐수처리장치에서 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량, 여재의 이화학적 특성 및 미생물상 변화 등을 조사하였다.

#### 1) 축산폐수 종류별 이화학적 특성

- 서부경남 축산농가에서 배출되는 축산폐수 종류별 BOD : N : P의 비율은 계분뇨의 경우 7.9 : 1.7 : 1이었다.
- 우분뇨의 경우 BOD : N : P의 비율은 26.1 : 4.3 : 1이었다.
- 돈분뇨의 경우 BOD : N : P의 비율은 28.5 : 4.0 : 1이었다.
- 계분뇨는 생물학적 오폐수처리의 최적 조건인 BOD : N : P = 100 : 5 : 1에 비해 질소와 유기물의 함량이 매우 부족한 편이었고, 우분뇨와 돈분뇨는 유기물의 함량이 매우 부족하였다.

#### 2) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착 특성

- Batch 실험에서 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착능은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 모두에서 제올라이트가 다른 여재에 비해 높았다.
- 여재종류별 인의 흡착능은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 모두에서 방해석이 다른 여재에 비해 높았다.

#### 3) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리

- 제올라이트는 암모니아성 질소의 처리효율이 가장 높았으며, 방해석은 인의 처리효율이 가장 높았다.

#### 4) 소형 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험

- 소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별, 처리공법의 조합방법별 및 축산폐수 부하량별로 구분하여 최적조건을 조사한 결과 최적 여재는 왕사이었고, 최적 조합방법은 호기-혐기 조합형이었으며, 최적 축산폐수 부하량은  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었다.
- 축산폐수 종류별 수처리 효율은 COD 및 SS의 처리효율은 축산폐수 종류에 따라 큰 차이 없이 높은 처리효율을 보였다.
- 축산폐수 종류별 T-N 및 T-P의 처리효율은 계분뇨를 제외한 우분뇨와 돈분뇨에서 대조구인 축산폐수와 별 차이 없이 비슷한 처리효율을 보였으나, 계분뇨의 경우 처리효율이 약간 낮았다.
- 특수여재를 주입한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 84, 94, 65 및 98%로 특수여재를 주입하지 않은 대조구에 비해 질소 및 인 처리효율이 각각 15% 및 7% 향상되었다.

- 소형 축산폐수처리장치의 호기성조에 이식한 갈대의 수분흡수율은 213%로 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 톱밥과 벚짚의 수분흡수율과 유사하였다.
- 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포의 수분흡수율은 467%로 기존의 톱밥과 벚짚의 수분흡수량인 267% 및 222%에 비해 월등히 높아 수분조절제로서의 가치가 충분한 것으로 판단된다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 축산폐수 전처리 효율을 조사한 결과 호기성조에 사용된 갈대를 건조/분쇄하여 축산폐수를 전처리한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 57, 62, 48 및 29%이었다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 축산폐수 전처리 효율을 조사한 결과 혐기성조에 사용된 노랑꽃창포를 건조/분쇄하여 축산폐수를 전처리한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 67%, 85%, 54% 및 36%로 노랑꽃창포가 갈대에 비해 전반적으로 높은 전처리 효율을 보였으며, 특히 노랑꽃창포의 SS 전처리효율은 갈대에 비해 23%정도 높았다.
- 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 오염물질의 수처리 효율을 조사한 결과 전처리를 하지 않은 대조구에 비해 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 87, 94, 50 및 91%이었다.
- 수생식물을 이용하여 전처리를 한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 95, 99, 95 및 97%로 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율이 각각 8, 5, 45 및 6%가 향상되었다.
- 특히, 수생식물을 이용하여 전처리한 경우의 최종방류수 중 COD, SS, T-N 및 T-P의 함량은 각각 47, 29, 58 및 2.24 mg L<sup>-1</sup>으로 모든 오염물질에서 현행 “가축분뇨 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨 방류수 수질기준인 SS 150 mg L<sup>-1</sup>, T-N 850 mg L<sup>-1</sup> 및 T-P 200 mg L<sup>-1</sup>을 만족하였다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 호기성조 및 혐기성조에 이식한 수생식물의 생육시기별 식물체 중 T-N 및 T-P 함량은 왕사와 썩석의 경우 수생식물의 생육 시일이 경과함에 따라 약간씩 증가하거나 별 차이 없었다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 여재의 유기물, T-N 및 T-P의 함량을 조사한 결과 모든 조에서 축산폐수 처리 시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리시기별 여재 표면의 미생물상 변화를 조사한 결과 1차 처리인 호기성조 및 2차 처리인 혐기성조 모두에서 총세균이 가장 많았다.
- 질소대사에 관련하는 미생물의 밀도분포는 호기성조에서는 암모니아 산화세균이 많았으며, 혐기성조에서는 탈질균과 질산환원균이 많았다.
- 축산폐수 원수의 일반세균 및 대장균군은 호기성조 처리수에서 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 방류수가 호기성조 처리수에 비하여 다시 큰 폭으로 감소하였다.

#### 나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구

자원순환형 축산폐수처리장에서 생산되는 수생식물의 퇴비화 기술을 개발하기 위해 축산폐수 및 수생식물체 종류별 비료적 가치를 분석하였고, 수생식물체별 퇴비화 과정중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴을 조사하였다. 또한 소형퇴비화조를 이용하여 수생식물을 퇴비화 하였고 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성을 검토하여 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화를 실시하였다.

##### 1) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석

- 축산폐수 종류별 비료적 가치를 평가하기 위해 한육우 축산폐수의 물리화학적 특성 및 중금속 함량을 조사한 결과 pH는 7.5~9.2로 축산폐수 종류별 차이가 약간 있었다.
- 한육우 축산폐수 내 비료의 주성분인 T-N 및 T-P의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 0.310~0.490% 및 22.67~63.21 mg L<sup>-1</sup> 범위로 조사되었다.
- 한육우 축산폐수 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 K의 함량은 1,983~6,891 mg L<sup>-1</sup> 범위이었고, Ca의 함량은 26.1~89.6 mg L<sup>-1</sup> 범위, Mg의 함량은 236.8~693.6 mg L<sup>-1</sup> 범위이었으며, Na의 함량은 298.6~789.5 mg L<sup>-1</sup> 범위이었다.
- 돼지 축산폐수의 경우 T-N의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 0.21~1.25% 범위로 평균 0.61%이었으며, 한육우 폐수의 평균 T-N 함량에 비해 높았다.
- 돼지 축산폐수 내 T-P의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 49.4~2,745 mg L<sup>-1</sup> 범위로 평균 약 733 mg L<sup>-1</sup>으로 T-N의 함량과 비슷하게 한육우 축산폐수의 평균 T-P 함량에 비해 높았다.
- 돼지 축산폐수 내 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 각각 512~4,562, 67.5~2,309, 34.7~1,334 및 88.5~1,048 mg L<sup>-1</sup> 범위로 조사되었다.
- 한육우 및 돼지 축산폐수의 중금속 함량은 여름철에 낮고, 겨울철에 높은 경향이었다.

##### 2) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석

- 수생식물 종류별 비료적 가치를 분석하기 위한 수생식물은 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대, 줄, 물잔디, 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포, 사초류, 미나리 및 백련으로 총 11종이었다.
- 수생식물별 및 시기에 상관없이 수분함량은 50.2~87.9% 범위로 미나리의 수분함량이 가장 높았다.
- 수생식물별 유기물의 함량은 전반적으로 8월에 비해 11월에 높았으며 평균 90% 이상의 함량을 나타냈다.
- 수생식물별 C/N율은 유기물 함량과 비슷한 경향으로 8월에 비해 11월에 높았으며, 시기별 및 수생식물 종류에 상관없이 17.3~38.9로 조사되었다.

### 3) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴

- 갈대, 줄 및 부들의 경우 수확 시기별 식물체 퇴비화 과정 동안의 산소 소비량은 전반적으로 8월에 수확한 식물체가 11월에 수확한 식물체에 비하여 많았다.
- 퇴비화 최적온도는 갈대의 경우 55°C이었고, 줄, 부들 및 혼합식물체의 경우 55~65°C이었다.
- 소형 퇴비화조를 이용하여 수생식물체별 퇴비화한 결과 수확시기에 상관없이 갈대, 부들, 줄 및 혼합식물체에서 각각 퇴비화 6일째 (69.6°C), 4일째 (75.0°C), 10일째 (75.4°C) 및 10일째 (73.7°C)에 최고온도를 기록하였다.
- 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 수확시기에 상관없이 갈대에서 약 465 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>, 부들은 510 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>, 줄에서 약 747 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup> 및 혼합식물체에서는 약 644 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>으로 각각 최고 CO<sub>2</sub>량을 나타내었다.

### 4) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토

- 퇴비화 기간 중 NH<sub>3</sub> 발생량을 나타내는 누적 NH<sub>3</sub> 발생곡선 및 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴은 NH<sub>3</sub>는 퇴비화 후기에 발생되기 시작하였다.
- 퇴비화 40일 동안 NH<sub>3</sub> 총 발생량은 톱밥에서 약 31.1 mg NH<sub>3</sub>/30 kg, 혼합식물체에서 약 61 mg NH<sub>3</sub>/30 kg으로 톱밥보다 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서 많았다.
- 퇴비화 단계별로는 부숙기인 26~40일 사이에 톱밥은 전체 발생량의 약 82%, 혼합식물체에서는 약 63%가 발생되었다.

### 5) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화

- 현장 퇴비화를 뒤집기 공법을 이용하여 수생식물체 퇴비화를 조사한 결과 퇴비 부숙기준에 맞게 조사되었다.

### 다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구

- 수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치에서 최종방류수 중의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 83, 89, 63 및 87%이었다.
- 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치에서 최종방류수의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 96, 95, 86 및 92%이었다.
- 수생식물여과조 및 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 처리공법은 자연정화공법의 전처리로서 질소와 인 처리효율을 향상시킬 수 있어 고농도의 축산폐수를 자연정화공법으로 처리하기 위해 필요할 것으로 판단된다.

## 2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 개발

본 연구는 1차년도 연구결과의 최적조건을 이용하여 진주시 이반성면에 소재한 실제 축산농가에 자원순환형 축산폐수처리장을 설계 및 시공한 후 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리 기술을 개발하기 위해 축산폐수 처리시기별, 부하량별, 주입방법별 및 질소 및 인 처리효율 극대화 방안 연구를 수행하였다.

#### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율

- 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율은 전반적으로 처리시일이 경과함에 따라 안정적인 처리가 가능하였다.
- 특히 고농도의 오염물질이 처리장내에 유입됨에도 불구하고 최종방류수에서는 축산폐수 배출허용기준을 만족하였다.
- 축산폐수 부하량에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>까지는 안정적인 수처리 효율을 보였으나, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup> 주입시 수처리 효율이 약간 감소하는 경향이였다.
- 자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 연속적 주입의 경우 각각 99.5, 99.8, 99.0 및 99.8%이었고, 간헐적 주입의 경우 각각 99.2, 99.5, 98.5 및 99.3%로서 두 주입방법 모두 별 차이 없었다.
- 현장 축산폐수처리장에서 질소 및 인의 처리효율 극대화 방안을 구명하기 위하여 최종방류수의 호기성조 재주입 비율별, 수생식물여과조의 여과시간별 및 활성슬러지조 체류시간별로 수처리 효율을 조사한 결과 질소 및 인 처리효율이 향상이 가능한 공법개선은 축산폐수 재주입방법의 경우 재주입 비율 100%조건이었고, 수생식물여과조의 여과시간의 경우 여과시간 90분이었으며, 활성슬러지조 체류시간의 경우 체류시간 24시간이었다.

#### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성

- 3차 처리인 호기성조 여재의 pH는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 낮아지는 경향이였고, 특히, 여재의 표층이 심층에 비해 낮았다.
- 4차 및 5차 처리조인 혐기성조 I 및 혐기성조 II의 pH는 전반적으로 1차 처리조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과할수록 감소하였고, 처리조내 처리수의 유하거리가 증가할수록 약간씩 감소하는 경향이였다.
- 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 유기물 함량은 0.59~0.69% 범위이었다. 3차 처리조에서 여재의 유기물 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다.
- 4차 및 5차 혐기성조의 여재 중 유기물 함량도 3차 호기성조와 비슷한 경향으로 전반적

으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였다.

- 3차 처리조인 호기성조에서 여재 중 T-N의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 4차 및 5차 혐기성조 여재의 T-N의 함량은 3차 호기성조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였고, 처리조내 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.
- 3차 호기성조에서 여재 중 T-P의 함량은 표층이 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수 처리 5개월 후에는 표층내 T-P의 함량이  $48.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았다. 이와 같이 3차 호기성조 표층에서 T-P의 함량이 높은 것은 상기 유기물의 함량과 유사한 경향이였다.
- 여재 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.

3) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량

- 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 3차 호기성조 및 4차, 5차 혐기성조 I, II에 이식한 수생식물의 생육시기별 식물체 중 T-N 및 T-P 함량은 수생식물의 생육 시일이 경과함에 따라 약간씩 증가하거나 별 차이 없었으며, 다른 무기성분 및 중금속도 유사한 경향이였다.
- 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 여재의 유기물, T-N 및 T-P의 함량을 조사한 결과 모든 조에서 축산폐수 처리 시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.
- 특히, 3차 처리인 호기성조는 표층이 다른 지점에 비해 약간 높은 경향이였으며, 다른 무기성분 및 중금속도 유사한 경향이였다.

4) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상

- 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시기별 여재 표면의 미생물상 변화를 조사한 결과 3차 처리인 호기성조 및 4차 및 5차 처리인 혐기성조 모두에서 총세균이 가장 많았다.
- 특히 모든 미생물은 전반적으로 호기성조가 혐기성조에 비해 많이 분포하였다.
- 질소대사에 관련하는 미생물의 밀도분포는 호기성조에서는 암모니아 산화세균이 많았으며, 혐기성조에서는 탈질균과 질산환원균이 많았다.
- 축산폐수 원수의 일반세균 및 대장균군은 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리수에서 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였다.

#### 나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발

자연정화공법을 이용하여 자원순환형 퇴비화 기술 개발을 위해 축산폐수 처리장내에 퇴비화조를 설치하여 퇴비화 기간 동안 수생식물별 온도, pH, 총 질소, 총 탄소 및 C/N을 변화와 수생식물별 퇴비화 과정 중 분해특성을 각각 조사하였다. 또한 축산폐수처리장에서 생육중인 수생식물체의 퇴비재료 및 비료적 가치를 평가하였으며, 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성을 검토하였다.

##### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율

- 수생식물별 퇴비화 과정 중 온도 변화는 갈대, 부들 및 줄 처리구에서 최고 온도는 65~70℃ 범위로 부들이 70℃로 가장 높았으며, 이후 모든 처리구의 온도는 퇴비화 25일 후부터 40℃내외로 안정한 상태를 유지하였다.
- pH는 처리구에 상관없이 퇴비화 20일째 까지는 pH가 꾸준히 증가하였으며 이후 7.77~7.95의 범위로 유지하였다.
- 총 질소의 함량은 모든 처리구에서 퇴비화가 진행됨에 따라 점점 증가하는 경향이였다.
- 총 탄소의 함량은 총 질소의 함량과 대조적으로 퇴비화가 진행될수록 점점 감소하는 경향으로 조사되어, 갈대, 부들 및 줄 처리구에서 C/N율은 점점 감소하는 경향이였다.
- 수생식물별 퇴비의 부숙도를 판정한 결과 갈대는 중숙 퇴비, 부들은 완숙 퇴비 및 줄은 중숙 퇴비로 조사되었다.
- 수생식물별 퇴비의 무게 감소율은 갈대, 부들 및 줄이 각각 28, 30 및 33%이었으며, 부피 감소율은 64~71% 범위로 부들의 부피 감소율이 가장 높았다.
- 퇴비 생산량은 퇴비화 이전의 인공습지에서 채취한 갈대, 부들 및 줄의 단위 면적당 무게는 각각 0.981, 1.101 및 2.002 kg m<sup>-2</sup>였으며, 퇴비화 후 무게는 0.706~1.341 kg m<sup>-2</sup>로 단위 면적당 무게가 가장 많은 줄의 퇴비 생산량이 1.341 kg m<sup>-2</sup>로 가장 높았다.
- 돈분 퇴비와 자연퇴비의 품질을 비교한 결과 유기물 및 수분 함량은 퇴비화 공정규격내 일반퇴비의 유기물 및 수분 함량 기준에 적합하였다.
- 돈분 퇴비의 C/N율은 18.2~27.3 범위였고, 자연퇴비의 C/N율은 31.4~42.8이었다. 돈분퇴비와 자연퇴비의 T-C 함량은 차이가 크지 않았지만, T-N 함량의 증가 폭이 돈분 퇴비가 더 크게 나타나 C/N율이 자연퇴비에서 약간 높게 측정되었다. 중금속의 경우 퇴비화는 돈분뇨와 수생식물로만 퇴비화를 시켰기 때문에 중금속의 함량이 함유할 수 있는 유해 성분의 최대량보다 낮게 조사되었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 퇴비화를 위한 최적 수생식물은 부들이라고 판단된다.

##### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석

- 식물체별 단위면적 (m<sup>2</sup>)당 biomass 건중량은 단위면적내 식생의 개체수와 식생의 외형적인 형태 및 전체중량과 생체중량의 비율에 따라 차이가 크게 났으며 전체적으로 8월에

비하여 11월에 단위면적당 biomass 생산량이 증가하였다.

- 수생식물별 단위면적 ( $m^2$ )당 biomass 생산량은 11월의 경우 창포가 약 1.579 kg으로 가장 많았고, 다음으로 갈대, 부들 및 줄이 약 0.155~0.776 kg 범위였으며, 갈대가 약 0.155 kg으로 가장 작았다.
- 축산폐수처리장내 인공습지에서 성장한 식물체의 주요 비료성분의 평균 함량을 수생식물별로 조사한 결과 질소의 함량은 줄 (1.92%) > 부들 (1.89%) > 창포 (1.24%) > 갈대 (0.38%)로 줄이 가장 높았다.
- 식물체별 인산 ( $P_2O_5$ )의 평균 함량은 창포 (0.295%) > 줄 (0.245%) > 부들, 갈대 (0.15~0.21%)로 창포에서 가장 높았다.
- 식물체별 칼리 및 칼슘의 평균 함량은 각각 5.81 및 0.808% 다른 식물체들에 비해 높았다.
- 마그네슘의 ( $MgO$ ) 평균 함량은 부들이 0.39%로 가장 높았으며, 갈대가 0.148%로 다른 식물체들에 비해 낮았다.
- 수생식물별 비료성분 함량은 다소 차이는 있지만 전반적으로 줄과 창포에서 높았고 갈대는 모든 성분에서 비교적 낮은 편이었다.

### 3) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토

- 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토를 위해 복내 바이오파크 인공습지의 퇴적층내 화학적 특성을 조사하였다.
- 복내바이오파크 인공습지 퇴적층내 pH 및 EC는 1, 2 및 3처리구에서 각각 6.17~6.20 및 4.04~4.07  $dS\ m^{-1}$  범위로 큰 차이 없이 비슷하였다.
- 복내 바이오파크 인공습지에서 조사된 퇴적물의 유해중금속의 함량은 유해 중금속 허용치보다 낮은 결과로 조사되어 토양개량제로서 이용이 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화

### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화

2차년도에 자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장의 최적조건을 활용하여 현장 축산폐수처리장의 실용화하기 위한 설계 규격화 및 관리지침을 제시하기 위해 2차년도의 설계 모델에서 불필요한 요소를 제외하고 수정 및 보완하여 공법개선된 현장 축산폐수처리장을 설계 및 시공하였다.

공법개선된 축산폐수처리장의 수처리 효율 조사는 축산폐수 부하량별, 축산폐수 처리시일별, 계절별, 이상기후 시, 오염물질의 반응비 및 분해속도 및 용존형태별 수처리 효율을 각각 조사하였다. 그리고 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량을 조사하였고, 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 및 여재의 무기성분 흡착특성을 조사하였으며, 축산폐수처리장의 미생물상을 조사하였다. 이들 결과를 통해 실제 축산농가의



여러 환경요인하에서 다양한 적용성 조사와 함께 실제 국내 다양한 규모의 축산농가에서 실용화를 위한 적합성과 효율성을 모두 검증하였다. 또한 이들 수질, 수생식물, 여재 및 미생물 결과를 이용하여 본 축산폐수처리장에서 오염물질 수지를 조사하여 향후 국내 축산농가에 배출되는 축산폐수를 효과적으로 처리하기 위한 축산폐수처리장의 설계 및 시공을 규격화하고 축산폐수처리장의 관리 및 운영지침을 제시하였다.

1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 수처리 효율

- 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 처리 효율을 조사한 결과 축산폐수처리장의 COD, T-N 및 T-P 처리효율은 1차 처리인 활성슬러지조 처리수 및 2차 처리조인 호기성조의 경우 전반적으로 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소하는 경향이였다.
- 3차 처리인 혐기성조 처리수의 경우 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 안정적으로 처리되였다.
- 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수처리 처리시일에 따른 수처리 효율을 조사한 결과 축산폐수 원수의 COD, SS, T-N 및 T-P 함량은 각각 9,753~20,833, 9,600~27,113, 4,290~7,225 및 461~895 mg L<sup>-1</sup>범위로서 시기에 따라 매우 불규칙하였으며, 축산폐수 처리시일이 경과할수록 축산폐수처리장의 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율이 점점 안정화되는 경향이였으며, 방류수 중 COD, SS, T-N 및 T-P 함량은 각각 8.3~278.5, 3.1~243, 8.6~118.4 및 0.01~11.8 mg L<sup>-1</sup>로 안정적인 처리가 되었다. 하지만 본 자원순환형 축산폐수처리장은 고농도 축산폐수가 유입되기 때문에 5년 이상의 장기간 정화효율을 검토한 후 안정성과 효율성을 확보한 뒤 실용화 되어야 할 것으로 판단된다.
- 공법개선된 현장 축산폐수처리장에서 각 처리조별 오염물질의 분해속도는 전반적으로 1차 처리인 활성슬러지조는 COD > T-N > T-P > SS 순이였고, 2차 처리인 호기성조는 T-P > COD > SS > T-N 순이였으며, 3차 처리인 혐기성조는 SS > T-P > T-N > COD 순이였다.
- 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장에서 계절별 수처리 효율을 조사한 결과 COD, SS, T-N 및 T-P 모두 겨울철에는 약간 감소하는 경향이였으며, 여름철에는 가장 높은 처리효율을 보였다.
- 공법개선된 현장 축산폐수처리장에서 운전 10개월 동안의 이상기후에서의 수처리 효율을 조사한 결과 방류수 중의 COD 처리효율은 장마기가 99.8%로 가뭄기와 혹한기의 98.1% 및 89.6%에 비해 높은 처리효율을 보였고, 방류수 중의 SS 처리효율은 혹한기에 98.8%로 장마기와 가뭄기에 비해 낮았다. T-N 처리효율은 SS와 동일한 경향으로 혹한기에 98.5%로 가장 낮은 처리효율을 보였고, T-P의 처리효율은 이상기후와 상관없이 99%이상의 높은 처리효율을 보였다. 하지만 본 연구는 단기간의 실험의 결과로 보다 안정적인 수

처효율의 결과는 장기간의 정밀 모니터링을 통하여 도출되어야 할 것으로 판단된다.

#### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성

- 공법개선된 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성은 pH, EC, 유기물, T-N,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , T-P 및 기타 무기성분 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였다.
- 유기물 및 T-N 함량은 축산폐수처리장 2차 처리인 호기성조의 표층이 다른 층위에 비해 약간 높았다.
- 여재의 무기성분 흡착특성을 조사한 결과 축산폐수 처리 9개월 후의 여재 표면은 원 여재의 표면에 비해 무기성분 함량이 증가하였다.

#### 3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안

- 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 전반적으로 왕성하게 성장하였으며, 겨울철에는 모든 수생식물이 고사하였다.
- 무기성분 함량은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 비슷하거나 약간씩 감소하는 경향이였다.
- 수생식물의 생육시기에 따른 질소 흡수량은 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 모두 수생식물의 이식 후 시일이 경과함에 따라 점점 증가하였고, 질소 흡수량이 최대인 수생식물이식 후 5개월인 2011년 9월에 각 수생식물의 질소 흡수량은 2차 처리인 호기성조에 이식한 갈대가  $0.15 \text{ g plant}^{-1}$ 이었으며, 3차 처리인 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포 및 부들이  $6.75$  및  $1.14 \text{ g plant}^{-1}$ 로 노랑꽃창포  $\gg$  부들  $>$  갈대 순이였고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 질소 흡수량이 매우 높았다.
- 인 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 5개월 후인 2011년 9월에 각 수생식물의 인 흡수량은 2차 처리인 호기성조에 이식한 갈대가  $0.54 \text{ g plant}^{-1}$ 이며, 3차 처리인 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포 및 부들이  $1.47$  및  $0.63 \text{ g plant}^{-1}$ 로 노랑꽃창포  $\gg$  부들  $>$  갈대 순이였고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 월등히 높은 흡수량을 보였다.

#### 4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화

- 여재 표면의 생물막은 2차 처리인 호기성조 모두에서 총세균수가 가장 많았다.
- 모든 미생물은 전반적으로 2차 처리인 호기성조에서 3차 처리인 혐기성조보다 많이 분포하였고, 모든 미생물상은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 점차 증가하였다.
- 공법개선된 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일에 따른 여재 표면의 생물막은 총세균수가 가장 많았고 그 다음으로 일반세균, 셀룰로오스 분해균, 사상균 순이었다.
- 암모니아산화균 및 아질산산화균은 2차 처리인 호기성조가 3차 처리인 혐기성 처리조에 비해 많았다. 질산환원균 및 탈질균은 전반적으로 혐기성조가 호기성조에 비해 많았고, 깊이에 따라서는 전반적으로 심층이 표층에 비해 많이 분포하였다.

5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치

- COD 총 부하량은 연간 3293.4 kg이었으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 COD 총 부하량의 78.5% 처리되었으며, 2차 처리인 호기성조에서 COD 총 부하량의 8% 처리되었고, 3차 처리인 혐기성조에서 COD 총 부하량의 12.5%가 처리되어 총 COD 방류량은 COD 총 부하량의 1%이하로 방류되었다.
- SS 총 부하량은 연간 4779.5 kg정도였으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 SS 총 부하량의 72.2% 처리되었으며, 2차 처리인 호기성조에서 SS 총 부하량의 12.7% 처리되었고, 3차 처리인 혐기성조에서 SS 총 부하량의 14.5% 처리되었다. SS 총 방류량은 연간 0.15 kg으로 SS 총 부하량의 0.6%이하였다.
- T-N의 총 부하량은 연간 1473.3 kg정도였으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-N 총 부하량의 79.7% 처리되었다. 2차 처리인 호기성조에서 T-N 총 부하량의 5.8% 처리되었으며, T-N 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-N 총 부하량의 0.0024%이었으며, 여재의 흡착량은 T-N 총 부하량의 0.46%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-N 총 부하량의 12.5%이었다. 3차 처리인 혐기성조에서 T-N 총 부하량의 13.5% 처리되었으며, T-N 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-N 총 부하량의 0.033%이었으며, 여재의 흡착량은 T-N 총 부하량의 0.96%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-N 총 부하량의 12.51%이었다. T-N 총 방류량은 연간 11.7 kg으로 T-N 총 부하량의 1.0%이하였다.
- T-P의 총 부하량은 연간 172.2 kg정도이며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-P 총 부하량의 68.6% 처리되었다. 2차 처리인 호기성조에서 T-P 총 부하량의 20.1% 처리되었으며, T-P 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-P 총 부하량의 0.022%이었으며, 여재의 흡착량은 T-P 총 부하량의 1.57%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-P 총 부하량의 18.51%이었다. 3차 처리인 혐기성조에서 T-P 총 부하량의 10.9% 처리되었으며, T-P 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-P 총 부하량의 0.13%이었으며, 여재의 흡착량은 T-P 총 부하량의 3.32%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-P 총 부하량의 17.5%이었다. T-P 총 방류량은 연간 0.57 kg으로 T-P 총 부하량의 0.4%이하였다.

나. 자원순환형 수생식물 퇴비화기술 실용화

1, 2차년도 연구 결과를 바탕으로 보완 및 개선한 퇴비화조는 송풍형 정치 더미식 퇴비화 공법으로 실시하였고, 폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산 및 품질검정을 하였으며, 퇴비화조 설계 규격화 및 관리지침을 제시하였다. 또한 생산된 퇴비의 작물에 대한 시용효과 시험을 하였다.

1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산

- 수생식물별 연간 퇴비 생산량을 조사하기 위한 수생식물은 전남 보성군 복내면 복내 바

이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄의 연간 생산량을 조사하였으며, 식물체별 단위 면적당 ( $m^2$ ) 퇴비 생산량은 갈대가  $1.908 \text{ kg m}^{-2}$ , 부들이  $4.711 \text{ kg m}^{-2}$  및 줄이  $2.450 \text{ kg m}^{-2}$ 이었다.

- 식물체 면적과 단위면적당 ( $m^2$ ) 퇴비 생산량을 대상으로 복내 바이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄의 연간 퇴비 생산량은 각각 3,854, 11,693 및 2,940  $\text{kg year}^{-1}$ 으로 조사되었다.

### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정

- 퇴비 시제품의 이화학적 특성을 우리나라의 퇴비 부산물 비료 공정규격 및 수생식물별 돈분 퇴비를 비교한 결과 유기물 함량의 기준은 25%이상으로 갈대, 부들 및 줄의 유기물 함량이 각각 74.6, 86.9 및 77.9%로 퇴비 기준에 만족하였다. C/N비의 기준은 50 이하로 갈대, 부들 및 줄의 C/N비는 18.0~23.9로 기준에 적합하였고, 염분 및 수분함량 역시 퇴비 기준에 적합하였다.
- 갈대, 부들 및 줄의 중금속 함량 역시 퇴비 기준에 적합하게 조사되어 본 실험에서 제조한 수생식물별 돈분 퇴비는 비료 공정규격에 모두 적합하였다.

### 3) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험

- 수생식물 퇴비를 이용한 포트 재배시험에서 배추, 상추 및 무 토양의 이화학적 특성은 돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 다소 차이는 있지만 T-N, Av.  $P_2O_5$ , O.M,  $SiO_2$ , K, Ca, Mg, Na 및 CEC의 함량이 전반적으로 다른 처리구에 비해 높게 나타났다.
- 배추의 T-N, T-P,  $K_2O$ , CaO 및 MgO의 함량은 돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 가장 높게 조사되었으며, 상추 및 무의 T-N, T-P,  $K_2O$ , CaO 및 MgO의 함량도 배추의 결과와 유사한 경향이였다.
- 배추, 상추 및 무의 지상부 길이는 9월 16일에 최대 생육을 보였으며, 돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 배추, 상추 및 무의 지상부 길이가 다른 처리구에 비해 길었다.
- 포트 재배시험에서 돈분 퇴비 시용량에 따른 식물체의 무기성분 함량은 작물의 종류에 상관없이 돈분 퇴비의 시용량이 많을수록 무기성분의 함량이 높았으며, 지상부의 길이도 돈분 퇴비의 시용량이 많을수록 길었다.
- 수생식물 퇴비를 이용한 필드 재배시험에서 배추, 양배추 및 브로콜리 토양의 T-N 및 Av.  $P_2O_5$ 의 함량은 돈분 퇴비와 함께 NPK를 사용한 처리구에서 높은 함량을 보였으며, K, Ca, Mg 및 Na의 함량도 작물의 종류에 상관없이 T-N 및 Av.  $P_2O_5$ 의 함량과 유사한 경향이였다.
- 필드 재배시험에서 배추, 양배추 및 브로콜리의 무기성분을 지상부와 지하부로 나누어 시기별로 조사한 결과 T-N, T-P,  $K_2O$ , CaO 및 MgO의 함량은 11월 5일에 최대 함량을 나타냈으며, 이후 12월 10일까지 감소하는 경향이였다.

- 배추, 양배추 및 브로콜리의 최대 함량을 나타낸 11월 5일에 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO 함량은 다소 차이는 있지만 전반적으로 NPK를 시용한 처리구에서 높은 함량을 나타내었다.
- 필드 재배시험 중 배추, 양배추 및 브로콜리의 생육은 8월 27일부터 12월 10일까지 꾸준히 증가하는 경향이었다. 12월 10일에 조사된 배추 지상부의 길이는 BE 처리구에서 34.8 cm로 가장 길었으며, 잎수도 BE 처리구에 60개로 가장 많았다.
- 수확기 배추 지상부의 건물중은 BE 처리구에서 53.7 g plant<sup>-1</sup>으로 가장 많았고, 지하부의 건물중은 BB 처리구에서 8.4 g plant<sup>-1</sup>으로 가장 많았으며, 옆쪽은 BN 처리구에서 12.1 cm로 가장 넓었다.
- 수확기 양배추의 지상부 길이 및 잎수는 배추의 길이 및 잎수와 유사한 경향으로 YE 처리구에서 각각 34.9 cm 및 32.7개이었다. 지상부 및 지하부 건물중과 옆쪽은 YE 처리가 다른 처리구에 비해 많았으며, 전반적으로 NPK를 시용한 처리구에서 높았다.
- 수확기 브로콜리의 KN, KA, KB, KC, KD 및 KE 처리구의 지상부 길이는 각각 37.8, 46.1, 46.0, 51.8, 52.4 및 55.8 cm 이었으며, 잎수는 각각 15.3, 15.3, 16.4, 18.0, 18.1 및 18.7개로 YE 처리구에서 높은 생육을 나타내었다. 수확기 브로콜리의 지상부 및 지하부의 건물중은 배추 및 양배추의 건물중과 비슷한 경향으로 조사되었다.

#### 4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 설계 규격화

- 자원순환형 축산폐수 처리장내 퇴비화조 설계 규격화 및 관리지침 제시를 위한 수생식물 별 설계 규격은 갈대의 경우 줄기가 단단하여 부숙화가 쉽게 진행되지 않기 때문에 1~3 cm 간격으로 다른 수생식물 보다 더 잘게 절단해야 하며, 부들 및 줄의 경우 줄기와 잎의 표면이 부드러운 벚짚의 퇴비화 과정과 비슷하게 3~5 cm 정도로 절단하여 퇴비화를 진행해야 한다.
- 돈분뇨 : 수생식물의 혼합 비율은 1 : 1로 혼합하여야 양질의 퇴비를 생산할 수 있다.
- 수생식물 퇴비의 비료효율을 증진하기 위해서는 수분함량을 35% 내외로 조절하여야 하고, 선별과정을 통하여 이물질 제거하여야 양질의 퇴비를 생산 및 이용할 수 있다.
- 고품질 비료생산을 위해 퇴비화 초기의 수분함량, 영양분 균형 (C/N율) 및 통기량의 조건을 맞춰주어야 한다.

#### 5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리지침 제시

- 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리는 수분조절, 공기공급, 기계적 혼합, 별균과정, 조업조건, 분석 및 환경 부분을 적절히 조합하여 관리하여야 한다.

V. 연구성과 및 성과활용 계획

1. 연구성과

가. 논문게재

게재 연도	논 문 명	교신저 자	학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
2011	Optimum Configuration Method and Livestock Wastewater Loading for Treating Livestock Wastewater in Constructed Wetlands by Natural Purification Method	허종수	한국토양비료 학회지	44(2)	국내	
2011	Selection of Optimum Filter Media in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus by Natural Purification Method	허종수	한국토양비료 학회지	44(2)	국내	
2011	A Study on the Improvement of Treatment Efficiency for Nitrogen and Phosphorus in Livestock Treatment System Using Constructed Wetlands	허종수	한국토양비료 학회지	44(3)	국내	
2011	Optimum Pre-treatment Method in Constructed Wetlands by Natural Purification Method for Treating Livestock Wastewater	허종수	한국토양비료 학회지	44(3)	국내	
2012	Evaluation of Possibility of Water Plant Wastes in Composting for Agricultural Recycling	조주식	한국토양비료 학회지	45(2)	국내	
2012	Removal Velocities of Pollutants under Different Wastewater Injection Methods in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허종수	한국토양비료 학회지	45(2)	국내	
2012	Effect of Sawdust Mixing Ratio on Composting of Animal Cadaver Residue Using Rendering Treatment method	조주식	한국토양비료 학회지	45(3)	국내	

나. 학술회의 논문발표

발표 연도	논 문 명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2010	Optimum Combination Method of Livestock Wastewater Treatment Apparatus Using Natural Purification Mehtod	허중수	한국환경농학회	2010.7	한국
2010	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater in Constructed Wetland by Natural Purification Method under Different Filter Media	허중수	한국환경농학회	2010.7	한국
2011	자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산 폐수 처리기술 개발	허중수	녹색기술포럼	2011.2	한국
2011	Optimum Conditions in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus by Natural Purification Method for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국응용생명화학회	2011.4	한국
2011	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater in Small-scale Livestock Wastewater Constructed Wetlands with Water Plant Filtration Bed for Establishing Resource Cycling System	허중수	한국토양비료학회	2011.5	한국
2011	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater under Different Livestock Wastewater Loads and Types in Small-scale Livestock Wastewater Apparatus by Natural Purification Method	허중수	한국토양비료학회	2011.5	한국
2011	Treatment Efficiencies of Pollutants in Full-scale Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater under Different Wastewater Injection Methods	허중수	한국환경농학회	2011.7	한국
2011	Treatment Efficiencies of Pollutants in Full-scale Livestock Wastewater Plant by Natural Purification Method under Different Livestock Wastewater Loads	허중수	한국환경농학회	2011.7	한국

(계속)

발표 연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2011	Optimum Pre-treatment Conditions Using Water Plant Filtration and Activated Sludge Beds in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국환경농학회	2011.7	한국
2011	Decomposition Velocities of Pollutants under Different Injection Methods in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater (우수 포스터 발표상 수상)	허중수	한국토양비료학회	2011.10	한국
2011	Characteristics of Nutrient Uptake by Water Plants in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국토양비료학회	2011.10	한국
2011	Evaluation of Purification Efficiency in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings	2011.10	미국
2012	자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술 개발	허중수	녹색기술포럼	2012.4	한국
2012	축산자원의 자원화를 위한 환경·축산·경종이 연계된 자원순환시스템 개발 (학술상 수상)	서동철	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Evaluation of Livestock Wastewater Treatment Efficiency in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater Containing High Nitrogen and Phosphorus	허중수	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Composting Efficiency of Compost by Water Plant and Effect of Compost on Growth Status of Crop	조주식	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Effect of Pig Manure Compost Using Water Plants on Growth Status of Various Crops	조주식	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater in Constructed Wetlands under Different Livestock Wastewater Loads	허중수	한국환경농학회	2012.7	한국
2012	Characteristics of Nutrient Uptake by Water Plants in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국환경농학회	2012.7	한국
2012	Treatment Efficiency of Existing Forms of Pollutants in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method	허중수	한국환경농학회	2012.7	한국



다. 특허 성과

- 현재 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리 기술은 특허출원 준비중에 있음.

라. 기술료 징수 현황

- 본 연구과제의 연구성과물은 자연정화공법을 이용한 축산폐수처리장과 수생식물 퇴비화 기술에 관련된 것이므로 기업체를 통한 사업화 보다는 축산영농법인이나 축산농가에 무상기술이전 예정임.
- 현재 함안군 산인면 축산농가 1개소, 사천시 실안동 축산농가 3개소, 고성군 영오면 축산농가 1개소에 무상기술이전을 하고 기술지도 중에 있으며, 추가로 무상기술이전을 위해 서부경남지역 주변 축산영농법인, 축산농가와 협의 중에 있음.

마. 사업화 현황

- 본 연구과제에서 개발된 축산폐수처리기술을 실제 축산농가에 보급할 예정임.
- 본 연구과제에서 개발된 축산폐수처리기술 및 수생식물 퇴비화 기술은 시장조사 및 정밀 사업성 분석을 실시한 후 사업화를 진행할 예정임.
- 축산영농법인이나 축산농가에서 본 개발기술의 사업화를 희망할 경우 적극적으로 기술을 지도할 예정임.

바. 인력활용/양성 성과

(1) 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
22	0	6	16	-	11	11	-	-	22

(2) 장·단기 연수지원 성과

해당사항 없음.

(3) 산업기술인력 양성 성과

해당사항 없음.

사. 경제사회 파급효과

산업지원 성과 (단위 : 건)				고용창출 성과 (단위 : 명)		
기술지도	기술이전	기술평가	합계	창업	사업체 확장	합계
14	5		19			

- 현재 함안군 산인면 축산농가 1개소, 사천시 실안동 축산농가 3개소, 고성군 영오면 축산농가 1개소 등 총 5개소에 무상기술이전을 하고 기술지도 중에 있음.
- 실제 축산농가에 축산폐수처리 기술지도 : 2건
  - 경남지역의 축산폐수공공처리시설, 축산농가 및 축산영농법인으로부터 축산폐수처리와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 축산폐수처리에 대한 올바른 이해와 처리기술 등을 지도하고 있음.
- 축산폐수처리장 분석지원 : 10건
  - 축산폐수처리장에서 정화효율과 중금속 함량 등 축산폐수처리 공정관리와 처리기술 보완을 위한 분석 지도.
- 축산농가에서 축산폐수처리관련 애로사항 지원 : 2건
  - 현재 운영중인 축산농가의 축산폐수처리와 관련된 애로사항을 축산폐수처리와 퇴비화에 의한 자원화로 유도하였고, 정기적으로 축산농가의 축산폐수 관리방안을 지도하였음.

2. 연구성과 활용계획

가. 기대효과

1) 기술적 측면

- 본 처리장은 가축별 폐수 성상 변화에 쉽게 적응할 수 있을 뿐만 아니라 고농도의 무기성분을 함유한 폐수에도 쉽게 적응할 수 있을 것임.
- 본 처리장내에 성장한 수생식물은 퇴비화시 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용할 수 있어 자원화의 처리비용을 경감할 수 있을 것임.
- 본 자원순환형 축산폐수 처리기술은 축산폐수 처리와 퇴·액비화를 통한 자원화를 자원순환 방법으로 동시 수행할 수 있을 것임.
- 본 처리장은 축산폐수 처리 과정에서 수질의 부영양화의 주원인인 질소 및 인을 효과적으로 처리할 수 있을 것임.
- 본 공법은 인근 농가의 하수와 축산폐수의 병합처리에 광범위하게 적용할 수도 있을 것으로 판단되며, 이를 활용하면 산간지역이나 외딴 독립농가의 축산폐수 뿐만 아니라 하수까지 처리할 수 있어서 농촌지역의 다양한 수질오염원에 광범위하게 적용할 수 있을 것으로 기대됨.

- 현행 축산폐수 처리시 발생하는 대량의 슬러지가 본 공법에는 거의 발생되지 않으므로 별도의 침전지가 필요 없음.

## 2) 경제·산업적 측면

- 자원순환형 축산폐수 처리장은 한번 설치로 반영구적으로 사용할 수 있으며, 고장이 없고, 운전시 고급기술인력을 요하지 않아 누구나 쉽게 운전이 가능함.
- 운전시 전기 등 에너지 소비가 없고, 유지관리비가 소요되지 않음.
- 본 자원순환형 축산폐수 처리기술은 축산농가에서 배출되는 고농도의 다양한 성상의 폐수에 전처리과정 없이 동시에 처리할 수 있는 처리공법으로 실용화시 경제적, 산업적 효율이 높음.
- 소규모 축산농가의 축산폐수 처리에 대한 부담을 덜어주고 수질도 개선할 수 있으며, 공공처리시설로 운영할 수 있을 것임.
- 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리장은 시설비용이 기계식 하수처리장 시설비용에 비해 상당히 감소할 것으로 판단됨.
- 현행 활성슬러지법 등의 기계식 축산폐수 처리장은 전문기술인력이 최소한 4~5명이 필요하나, 본 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수 처리장은 인근 지역 3~4곳을 1명으로 처리할 수 있어 인건비가 약 80%이상 절감됨.
- 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리장은 농촌뿐만 아니라 비교적 폐수 발생량이 적은 소규모 비신고 대상시설에 설치시 주변환경에 대한 오염원을 줄일 수 있을 것으로 판단됨.
- 본 처리장은 마을, 산 및 하천 둔치 등의 주변환경과 잘 부합되는 곳에 설치할 수 있으므로 주변환경과 잘 부합되어 하수로 인한 환경오염을 방지할 뿐만 아니라 처리장 주변은 철새, 잠자리, 개구리 등의 서식지로 이용되어 생태계 환원 및 복원에 크게 기여할 것임.
- 성장하는 수생식물을 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용하므로 경제성측면에서 축산농가의 채산성 문제를 해결 할 수 있을 것으로 판단됨.
- 비료산업을 위하여 국내 수입원자재가 연간 800~1,000천 톤인 100~150백만불을 수입에 의존하고 있으나, 본 처리장내의 수생식물을 퇴비화의 원자재로 사용함으로써 연간 10%이상의 비료 원자재 수입 대체 효과를 올릴 수 있을 것임.

## 나. 활용방안

- 자연정화공법에 의한 축산폐수처리를 실용화함으로써 규격화하고 사업화 할 수 있을 것임
- 자원순환형 축산폐수 처리 기술을 축산단지 및 청정에너지 생산에 활용
- 자원순환형 축산폐수 처리 기술을 축산, 경종의 자원순환형 친환경 축산단지의 기반 기술로 활용
- 수생식물을 활용한 퇴비화기술을 농가에 보급

- 고농도의 축산폐수를 방류수질기준에 부합시킴으로서 환경오염 방지
- 소규모로 발생하는 축산폐수 농가에 직접 활용
- 비신고대상의 축산폐수 농가에 직접 활용
- 돈분, 우분, 계분 및 인분 처리에도 활용
- 각종 하수, 오폐수 및 소규모 연수원, 관광단지, 휴양지, 국립공원 내의 외판 화장실에 직접 활용

#### 다. 추가연구의 필요성

본 과제에 의해 개발된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술은 축산폐수처리와 퇴비화를 통한 수생식물의 자원화를 동시에 수행할 수 있는 경제성과 효율성을 갖춘 우수한 공법으로 판단되며, 현행 “가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨처리시설 방류수 수질기준인 질소 850 mg L<sup>-1</sup>과 인 200 mg L<sup>-1</sup>만족시켰으나 장기간 운영시 배출허용기준을 만족시킨다고 단정지우기는 어렵다. 따라서 본 자원순환형 축산폐수처리장에서 장기간 모니터링을 통해 축산폐수처리장의 수명을 예측하여 축산농가에 맞게 처리시설을 규격화하는 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장에서 수생식물의 퇴비화를 통한 자원화 방안이외에 수생식물과 돈분을 활용한 액비화 연구가 추가적으로 필요하며, 향후 추가연구를 통해 그 활용성과 적용성의 범위를 넓힐 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 라. 타 연구에 활용계획

본 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술은 현재까지 연구된 기술로도 타 공법과 비교하여 기술적인 경쟁력을 충분히 갖고 있다. 현재까지 개발된 고농도의 유기성 오염물질, 질소 및 인 처리기술은 다양한 고농도의 오·폐수의 처리에도 적용이 가능할 것으로 판단되어 다양한 폐수처리에 적용할 계획이다. 향후 본 개발기술을 난분해성 폐수처리에도 적용할 계획을 하고 있으나 적용이전에 난분해성 오염물질 분해능력 증대와 질소 및 인의 처리기술의 개선 및 보완이 필요할 것으로 판단된다.

#### 마. 실용화, 산업화 계획

본 연구과제에 의해 개발된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리 기술은 축산현장에 직접 적용시켜 개발되었기 때문에 공공시설과 축산영농법인에 무상기술이전을 통해 실용화 및 산업화할 계획이다. 또한 본 개발 기술과 관련된 기술지도를 통해 축산농가나 중·소규모의 축산단지의 애로사항을 해결할 수 있게 지도할 것이다.

#### 바. 교육, 지도, 홍보 등 기술확산 계획

본 연구는 우선 5개소 축산농가에 무상기술이전을 하여 기술을 보급 및 확산하고 있으며, 축

산농가에 기술지도를 2건 수행하였다. 현재 경남지역의 축산폐수공공처리시설, 축산농가 및 축산영농법인으로부터 축산폐수처리와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 축산폐수처리에 대한 올바른 이해와 처리기술 등을 지도할 계획이다. 또한 축산폐수처리장 분석을 문의한 10건에 대한 분석지원을 실시하였으며, 축산폐수 정화효율은 축산폐수처리장 운영 및 관리를 위해 반드시 필요하므로 본 과제 종료이후에도 꾸준히 분석지원을 진행할 계획이다.

#### 사. 특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획

본 연구를 통해 그동안 꾸준히 국내 저명학술지에 논문을 7편 게재하였고, 국내외 학술발표회에서 다수의 연구성과를 발표하였다. 특히 본 연구결과 중 우수결과는 현재 SCI 저널에 투고 준비중에 있으며, 최종 연구결과를 이용하여 국내외 저명학술지에 향후 몇 년간 꾸준히 투고하여 본 개발 기술을 홍보하고 보급할 계획이다.

## SUMMARY

### **1. The basic study for development of livestock wastewater treatment technology by natural purification method**

In order to develop livestock wastewater treatment technology by natural purification method, physico-chemical characteristics of livestock wastewater discharged from cattle shed in west Gyeongnam province were investigated. Adsorption capacities of pollutants on filter media in batch experiments, and treatment efficiencies of pollutants in column experiments were investigated for treating livestock wastewater. To obtain optimum conditions of livestock wastewater treatment system by natural purification method, treatment efficiencies of pollutants under different filter media, combination methods, and livestock wastewater loading in small-scale livestock wastewater treatment apparatus were investigated.

Based on the results from the optimum conditions, the treatment efficiencies of pollutants were investigated according to different types of livestock wastewater, injection of special filter media and pre-treatment methods by water plant. Also, the growth status and inorganic element contents of water plants were investigated in small-scale livestock wastewater treatment apparatus. Physico-chemical properties on filter media, and the variation of microorganisms were investigated in livestock wastewater treatment apparatus.

The ratios of BOD : N : P at different types of livestock wastewater were 7.9 : 1.7 : 1 for poultry manure, 26.1 : 4.3 : 1 for cow manure, and 28.5 : 4.0 : 1 for pig slurry. The adsorption capacity of ammonium nitrogen in zeolite was higher than that in other filter media using Freundlich and Langmuir adsorption isotherm. The adsorption capacity of phosphorus in calcite was higher than that in other filter media by both adsorption isotherms in batch experiment. The optimum filter media were calcite for phosphorus and zeolite for ammonium nitrogen for treating livestock wastewater in column and batch experiments.

Therefore, to treat livestock wastewater in small-scale livestock wastewater treatment apparatus, the optimum filter media was coarse sand, and optimum configuration method was anaerobic-aerobic plots combination. The optimum livestock wastewater loading was  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  in small-scale livestock wastewater treatment apparatus.

To treat livestock wastewater in small-scale livestock wastewater treatment apparatus,

the treatment efficiencies of pollutants were investigated with different types of livestock wastewater, injection methods of special filter media, and pre-treatment methods. Removal rates of COD and SS were higher than that of T-N and T-P in all conditions except the types of livestock wastewater. Removal rates of T-N and T-P in cow manure and pig slurry were similar with those in control. However, in poultry manure, removal rates of T-N and T-P were lower than control. In small-scale livestock wastewater treatment apparatus, removal rates of COD, SS, T-N and T-P with special filter media were 84, 94, 65, and 98%, respectively, and removal rates of COD, SS, T-N and T-P without special filter media were 87, 94, 50 and 91%, respectively.

To substitute for sawdust and improve T-N and T-P removal rates, the water absorption rates of water plants and treatment efficiencies of pollutants by pre-treatment methods using water plant were investigated. The treatment efficiencies of livestock wastewater in small-scale livestock wastewater treatment apparatus with or without pre-treatment methods were investigated. The rate of water absorption by *Phragmites communis* in aerobic bed was 213%. The rate of water absorption by *Phragmites communis* was similar with those by sawdust and rice straw. The rate of water absorption by *Iris pseudocorus* in anaerobic bed was 467%. The rate of water absorption by *Iris pseudocorus* was even higher than those by sawdust and rice straw in anaerobic bed. Thus, *Iris pseudocorus* is worth as a bulking agent.

The removal rates of COD, SS, T-N and T-P in aerobic bed with crushed-dried *Phragmites communis* were 57, 62, 48, and 29%, respectively. The removal rates of COD, SS, T-N and T-P in anaerobic bed with crushed-dried *Iris pseudocorus* were 67, 85, 54, and 36%, respectively, showing those values were higher than those with *Phragmites communis*.

The treatment efficiencies of COD, SS, T-N and T-P in small-scale livestock wastewater treatment apparatus without pre-treatment methods were 87, 94, 50 and 91%, and, those with pre-treatment methods were 95, 99, 95, and 97%, respectively. Therefore, pre-treatment methods using water plants was suitable for treating livestock wastewater and composting.

The concentrations of T-N and T-P in coarse sand and broken stone were slightly increased as growing of water plants. In all beds, the concentrations of O.M, T-N and T-P by the filter media were increased with time. Especially, in aerobic (1<sup>st</sup>) bed, the concentrations of O.M, T-N and T-P in surface layer were higher than those in anaerobic (2<sup>st</sup>) bed.

The variation of microorganisms according to treatment time in aerobic (1<sup>st</sup>), anaerobic

(2<sup>nd</sup>) beds were investigated in livestock wastewater treatment plant. The number of microorganisms in all beds increased as time progressed. The number of most microorganisms in surface layer was more than those in subsurface layer. On the other hand, nitrate reducing bacteria and denitrification bacteria in subsurface layer were more than those in surface layer.

To develop composting technology by using water plant wastes, fertilizer values of livestock wastewater and water plant wastes were investigated. Oxygen consumption and its patterns during composting were investigated at different water plants. In this study, water plant wastes were composted by using small-scale composting apparatus. To check usability of water plant wastes as a bulking agent, composting of water plant wastes was conducted with turning the heap of the compost.

To evaluate fertilizer values at different livestock wastewater, physico-chemical characteristics and heavy metal contents were investigated. The concentrations of T-N, T-P, K, Ca and Na in cow wastes ranged 0.310~0.490%, 22.67~63.21 mg L<sup>-1</sup>, 1,983~6,891 mg L<sup>-1</sup>, 26.1~89.6 mg L<sup>-1</sup>, 236.8~693.6 mg L<sup>-1</sup> and 298.6~789.5 mg L<sup>-1</sup>, respectively. The concentrations of T-N, T-P, K, Ca and Na in pig wastewater ranged 0.21~1.25%, 49.4~2,745 mg L<sup>-1</sup>, 512~4,562 mg L<sup>-1</sup>, 67.5~2,309 mg L<sup>-1</sup>, 34.7~1,334 mg L<sup>-1</sup> and 88.5~1,048 mg L<sup>-1</sup>, respectively.

To evaluate fertilizer values at specific water plants, water plants from various constructed wetlands were collected in August. We found 11 water plants such as *Phragmites communis* (reed grass), *Zizania aquatica* (wild rice), *Typha orientalis* (cattail), *Phragmites japonica*, *Iris pseudocorus*, *Oenanthe javanica*, *Nymphoides peltata*, *Carex dimorpholepis*, *Gelidiopsis variabilis*, *Nymphaea tetragona*, *Nelumbo nucifera* in various constructed wetlands. Biomass in wild rice was 2.547 kg m<sup>-2</sup>, showing that the value was higher than those of the other plants. Biomass in *Oenanthe javanica* was 0.260 kg m<sup>-2</sup>, showing that the value was lower than those of the other plants. T-N contents in *Oenanthe javanica*, *Nymphaea tetragona* and *Gelidiopsis variabilis* ranged 2.83~2.96%, 2.53~2.62% and 0.53~0.56%, respectively. T-P contents in *Phragmites japonica* (0.96%) were the highest in those in water plants. T-P contents in *Gelidiopsis variabilis* (0.08~0.14%) were the lowest in those in all plants. Amounts of T-N and T-P uptake were high in August at specific water plants. Amounts of T-N and T-P uptake by wild rice were 48.744 and 12.989 g m<sup>-2</sup>, respectively, showing these values were the highest uptake compared with those of other conditions. Amounts of T-N and T-P uptake by *Gelidiopsis variabilis* were 2.800 and 0.700 g m<sup>-2</sup>, respectively, showing these values were lower than those of others. The amounts of nutrients uptake by water plants were slightly different at specific plants.



Oxygen consumption and its patterns were investigated at different water plants during composting process. In composting, oxygen consumption of reed grass, wild rice and cattail harvested in August was higher than that in November. Optimum temperature for composting was 55°C in reed grass and ranged 55~65°C in wild rice, cattail and mixed plants.

Small-scale composting apparatus were used for composting of reed grass. The compost made by reed grass reached the maximum temperature (69.6°C) at 6 days after starting composting and had emitted around 465 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by wild grass harvested in August reached the maximum temperature (72°C) at 8 days after starting composting and had emitted around 380 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by cattail harvested in August reached the maximum temperature (75°C) at 4 days after starting composting and had emitted around 452 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by cattail harvested in November reached the maximum temperature (72°C) at 6 days after starting composting and had emitted around 510 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by wild rice harvested in August reached the maximum temperature (75.4°C) at 10 days after starting composting and had emitted around 747 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by wild rice harvested in November reached the maximum temperature (73.7°C) at 10 days after starting composting and had emitted around 595 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by mixed plants harvested in August reached the maximum temperature (66.4°C) at 8 days after starting composting and had emitted around 644 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. The compost made by mixed plants harvested in November reached the maximum temperature (69.7°C) at 8 days after starting composting and had emitted around 521 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>. Water contents, C/N and organic contents of the compost made by water plant wastes were 29.6~41.6%, 16.2~19.2 and 36.5~43.8%. The compost was satisfied with the official standards, and had important components like N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO and MgO for cultivating.

Usability of mixed water plants for managing moisture was evaluated at different composting stages. In the use of sawdust, CO<sub>2</sub> emission was 43% of total CO<sub>2</sub> emissions during initial composting (0~5 days), and was 49% of total CO<sub>2</sub> emissions in the stage of middle composting (5~15 days). CO<sub>2</sub> emissions were 4.7% of total CO<sub>2</sub> emissions for 15~25 days. During 25~40 days of composting, CO<sub>2</sub> emission was 4.3% of total CO<sub>2</sub> emissions. In the use of mixed water plants, CO<sub>2</sub> emission was 64% of total CO<sub>2</sub> emissions at initial composting, and was 20% of total CO<sub>2</sub> emissions at middle composting.

Accumulated NH<sub>3</sub> incidence curve and NH<sub>3</sub> emission incidence patterns at different stages during composting generated at latter stage of composting. Total NH<sub>3</sub> emission in sawdust was 31.1 mg NH<sub>3</sub>/30kg for 40 days of composting. Total NH<sub>3</sub> emission in mixed water

plants were 61 mg NH<sub>3</sub>/30kg for 40 days of composting. Total NH<sub>3</sub> emission in mixed water plants was higher than that of sawdust. NH<sub>3</sub> emissions in sawdust at decomposed stage were around 82% between 26~40 days after starting composting. NH<sub>3</sub> emissions in mixed water plants at decomposed stage were around 63% between 26~40 days after starting composting.

The removal rates of COD, SS, T-N and T-P in effluent were 83, 89, 63 and 87% in small-scale livestock wastewater treatment apparatus with water plant filtration bed, respectively. The removal rates of COD, SS, T-N and T-P in effluent were 96, 95, 86 and 92% in small-scale livestock wastewater treatment apparatus with activated sludge bed, respectively. For increasing COD, SS, T-N and T-P removals in small-scale livestock wastewater treatment apparatus, the water plant filtration and activated sludge beds should be recommended.

## **2. Development of livestock wastewater treatment technology by natural purification method**

To develop livestock wastewater treatment technology by natural purification method, the treatment efficiencies of pollutants in livestock wastewater treatment plant with filtration bed and activated sludge tank were investigated. Removal rates of COD, SS, T-N, and T-P were higher during operating period. Removal rates of COD, SS, T-N, and T-P in effluent at 600 L day<sup>-1</sup> of livestock wastewater loading were higher than those 900 L day<sup>-1</sup> of livestock wastewater loading. Thus, optimum loading of livestock wastewater was 600 L day<sup>-1</sup> in livestock wastewater treatment plant. Removal rates of COD, SS, T-N, and T-P in effluent were 99.5, 99.8, 99.0, and 99.8% by continuous injection method and 99.2, 99.5, 98.5, and 99.3% by intermittent injection method, respectively. The decomposition velocities of pollutants were rapid in the order of continuous injection method > intermittent injection in method in livestock wastewater treatment plant.

To develop resource recycling composting technology by using natural purification method, temperature, pH, T-N, T-C, C/N and decomposition characteristics were investigated during composting at different water plants in composting apparatus. Also, compost materials and compost values of water plants were evaluated. Usability of sediment as soil amendment in livestock wastewater treatment by natural purification method was checked.

Composting apparatus for developing composting technology on resource recycling designed and installed in livestock wastewater treatment plants in Jinju-si, Gyeongnam.

For composting, The water plants such as *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* were used. The maximum temperatures during composting process at different water plants ranged 65~70°C, showing these values in *Typha orientalis* were the highest (70°C) compared with other water plants. After 25 days from composting, the temperature at all water plant wastes was maintained as  $\pm 40^\circ\text{C}$ .

Regardless of treatment conditions, pH was steadily increased until 20 days after composting. Later, pH ranged 7.77~7.95 at all conditions. T-N contents at all conditions were higher with progression of composting. In contrast, T-C contents and C/N at all conditions were steadily lower with progression of composting. Weight reduction rates of the composts in *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* were 28, 30 and 33%, respectively. Volume reduction rates of the composts in all water plant wastes ranged 64~71%. Liveweights per unit area of *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* before composting were 0.981, 1.101 and 2.002 kg m<sup>-2</sup>, respectively. Compost production amounts per unit area of *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* after composting ranged 0.706~1.341 kg m<sup>-2</sup>, showing the value in wild rice was the highest (1.341 kg m<sup>-2</sup>) compared with the other conditions. We compared quality of pig waste compost with quality of natural compost, showing it was satisfied with the official standard. C/N rates of pig waste compost and natural compost ranged 18.2~27.3 and 31.4~42.8, respectively. As a result, the optimum water plant for composting is *Typha orientalis*.

Dry weight biomass per unit area (m<sup>2</sup>) was quite different by external shape, numbers, dry weight of water plants. Biomass production amounts per unit area (m<sup>2</sup>) in November were high in the order of *Iris pseudoacorus* (1.579 kg) > *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* (0.155~0.776 kg) > *Phragmites communis* (0.155 kg). Average T-N contents of main fertilizer components were high in the order of *Zizania latifolia* (1.92%) > *Typha orientalis* (1.89%) > *Iris pseudoacorus* (1.24%) > *Phragmites communis* (0.38%) in livestock wastewater treatment. Average P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents were high in the order of sweet flag (0.295%) > *Zizania latifolia* (0.245%) > *Typha orientalis* and *Phragmites communis* (0.15~0.21%). Average K and Ca contents with different water plants were 5.81 and 0.808%, respectively. Average MgO contents in *Typha orientalis* (0.39%) were the highest in those of the other plants. Average MgO contents in *Phragmites communis* (0.148%) were the lowest in those of the other plants.

To evaluate usability of soil amendment, chemical characteristics of sediment in constructed wetlands were investigated. pH and EC in 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> beds ranged 6.17~6.20 and 4.04~4.07 dS m<sup>-1</sup>, respectively.

### 3. Commercialization of livestock wastewater treatment technology by natural purification method

To suggest standardization and management guidelines for commercialization of livestock wastewater treatment plant, livestock wastewater treatment plant was re-designed and constructed. The treatment efficiencies of pollutants according to the wastewater loading, the treatment time, seasons, climate, decomposition velocity of pollutants were investigated in livestock wastewater treatment plant. The growth status and inorganic elements uptake of water plants were investigated by the time of livestock wastewater treatment. And the physico-chemical properties of filter media were investigated by the time of livestock wastewater treatment. And the variation of microorganisms that were attached to filter media were investigated by the time of livestock wastewater treatment.

For commercialization of livestock wastewater treatment technology by natural purification method in diverse livestock farms, suitability and efficiency were investigated in several environment factors. Also, pollutants balances based on the results of the water quality, water plants, filter media and microorganisms were investigated in livestock wastewater treatment plant. Thus, design and construction of livestock wastewater treatment plant were standardized, and Management and guideline of that were also suggested.

Removal rates of COD, T-N, and T-P in water in activated sludge (1<sup>st</sup>) bed and aerobic (2<sup>nd</sup>) bed were decreased as the livestock wastewater loading increased. COD, SS, T-N, and T-P contents in raw water were varied, but rapidly decreased in all beds of livestock wastewater treatment plant. Those in effluent were 9,753~20,833, 9,600~27,113, 4,290~7,225, and 461~895 mg L<sup>-1</sup>, respectively. COD, SS, T-N, and T-P contents in effluent were 8.3~278.5, 3.1~243, 8.6~118.4, and 0.01~11.8 mg L<sup>-1</sup>, respectively. The decomposition velocities of pollutants were rapid in the order of COD > T-N > T-P > SS in activated sludge (1<sup>st</sup>), T-P > COD > SS > SS in aerobic (2<sup>nd</sup>), and SS > T-P > T-N > COD in anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed in livestock wastewater treatment plant. Removal rates of COD, SS, T-N and T-P in effluent on spring, summer and autumn was slightly higher than winter. Removal rates of COD, SS, T-N and T-P in effluent on summer was the highest on seasons.

pH, EC, O.M, T-N, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, T-P and other inorganic elements in filter media in all beds were slightly increased as time progressed. Especially, O.M and T-N of filter media at the surface layer in aerobic (2<sup>nd</sup>) beds were higher than those at the other layers.

The growth status of water plants in aerobic (2<sup>nd</sup>), and anaerobic (3<sup>rd</sup>) beds were better as time progressed, the water plants withered to death on winter.

Inorganic elements in effluent were similar or slightly decreased as time progressed. Uptake of nitrogen by water plant in aerobic (2<sup>nd</sup>) and anaerobic (3<sup>rd</sup>) beds increased gradually after transplanting water plant as time progressed. Amount of nitrogen uptake by water plant were high in the order of *Iris pseudocorus* L (3<sup>rd</sup>) > *Typha orientalis* PRESEL (THYOR) (3<sup>rd</sup>) > *Phragmites communis* TRINUS (2<sup>nd</sup>), respectively.

The number of microorganisms in aerobic (2<sup>nd</sup>) bed was more than that in anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed. All of microorganism were slightly increased as time progressed.

The water pollutant balance was analogized to know treatment tendency according to the treatment time. The total influent amount of livestock wastewater was 0.900 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> on the average for ten months, the amount of livestock wastewater evapotranspiration was about 17%.

In the case of COD balance, the inflow was 3293.4 kg year<sup>-1</sup>. About 78.5% of COD in activated sludge (1<sup>st</sup>) bed was treated and 8% of COD in aerobic (2<sup>nd</sup>) bed was treated. And 12.5% of COD in anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed was treated, therefore, the outflow in COD was below 1.0%.

In the case of SS balance, the inflow was 4779.5 kg year<sup>-1</sup>. About 72.2% of SS in activated sludge (1<sup>st</sup>) bed was treated. And 12.7% of SS in aerobic (2<sup>nd</sup>) bed was treated. And 14.5% of SS in anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed was treated. Therefore, the outflow of 0.15 kg year<sup>-1</sup> in SS was about 0.6%.

In the case of T-N balance, the inflow was 1473.3 kg year<sup>-1</sup>. About 79.7% of T-N in activated sludge (1<sup>st</sup>) bed was treated. And 13.5% of T-N in aerobic (2<sup>nd</sup>) bed was treated. In aerobic (2<sup>nd</sup>) bed, about 0.0024% of T-N by water plant, 0.46% of T-N by filter media and 12.5% of T-N by the others were treated, respectively. And 13.5% of T-N in anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed was treated. In anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed, 0.033% of T-N by water plant, 0.96% of T-N by filter media and 12.51% of T-N by the others were treated, respectively. Therefore, the outflow of 11.7 kg year<sup>-1</sup> in T-N was about 1.0%.

In the case of T-P balance, the inflow was 172.2 kg year<sup>-1</sup>. About 68.6% of T-P in activated sludge (1<sup>st</sup>) bed was treated. In aerobic (2<sup>nd</sup>) bed, 0.022% of T-P by water plant, 1.57% of T-P by filter media and 18.51% of T-P by the others were treated, respectively. About 10.9% of T-P in anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed was treated. In a anaerobic (3<sup>rd</sup>) bed, About 0.13% of T-P by water plant, 3.32% of T-P by filter media and 17.5% of T-P by the others were treated, respectively. Therefore, the outflow of 0.57 kg year<sup>-1</sup> in T-P was about 0.4%.

Composting apparatus was re-designed and installed in livestock wastewater treatment plant. In addition, design and management guidelines for composting were suggested. Also, effect test of the produced compost on crops was conducted.

In constructed wetlands, the production amounts of the compost per unit area made by reed grass, cattail and wild rice were 1.908, 4.711 and 2.450 kg m<sup>-2</sup>, respectively. Organic contents of the prototype compost made by *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* were 74.6, 86.9 and 77.9%, respectively, showing it was satisfied with the official standard (above 25%). C/N of the prototype compost made by *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* ranged 18.0~23.9, showing it was satisfied with the official standard (below 50). Also salinity, water contents and heavy metal contents of the prototype compost made by *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* were satisfied with the official standard. Pig waste composts made by *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* were satisfied all official standards.

In pot experiment, T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, OM, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg, Na and CEC contents in soil with pig manure compost were generally high compared with the other conditions. T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO and MgO contents in soil with pig manure compost were the highest in those of all treatments.

In field experiment, T-N and Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents in soil with pig manure compost were higher than other treatments. Dry weight in BE treatment was 53.7 g plant<sup>-1</sup> higher than those of other treatments. Dry weight of chinese cabbage in BB treatment was 8.4 g plant<sup>-1</sup>. Dry weight of cabbage in YE treatment was higher than those of other treatments. Dry weight of broccoli was similar with chinese cabbage and cabbage.

For effective composting, standard of design and management guidelines were suggested at different water plants. *Phragmites communis* has hard stems and is not easily composted. On the other hand, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* have soft stems and are easily composted in compost apparatus. Therefore, *Phragmites communis*, *Typha orientalis* and *Zizania latifolia* are better to cut in 1~3, 3~5, and 3~5 cm. To enhance compost efficiency, water contents should be ±35% in the compost.

## CONTENTS

SUMMARY .....	29
CONTENTS .....	38
<b>Chapter 1. Outline of Research Program</b> .....	<b>57</b>
<b>Chapter 2. Current Status of This Research Program</b> .....	<b>60</b>
Section 1. Current Status of This Research in Korea .....	60
Section 2. Current Status of This Research in Overseas .....	62
<b>Chapter 3. Investigation and Results</b> .....	<b>63</b>
Section 1. Introduction .....	63
Section 2. Materials and Methods .....	73
<b>1. Basic Experiment for Development of Resource Cycling System for</b> <b>Treating the Livestock Wastewater by Natural Purification Method</b> .....	<b>73</b>
1) Basic Experiment for Development of a Natural Purification Technology for Treating Livestock Wastewater by Natural Purification Method .....	73
(1) Materials .....	73
(2) Experiment Apparatus .....	75
① Column Experiment Apparatus .....	75
② Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus .....	75
(3) Methods .....	82
① Investigation of Physical and Chemical Characteristic under Different Livestock Wastewater .....	82
② Investigation of Adsorption Characteristics of Pollutants under Different Filter Media in Batch Experiment .....	82
③ Investigation of Removal Rates of Pollutants in Column .....	85
④ Basic Experiment for Development of Livestock Wastewater Treatment Technology in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus .....	85
(4) Examination Time .....	89
(5) Analysis .....	89
2) Basic Experiment for Development of Composting Technology by Water Plants ..	91
(1) Composting Condition of Water Plants by Literature Search .....	91

(2) Evaluation of Fertilizer Value under Different Livestock Wastewater .....	91
① Materials .....	91
② Methods .....	92
③ Analysis .....	92
(3) Evaluation of Fertilizer Value under Different Water Plants .....	93
① Materials .....	93
② Methods .....	93
③ Analysis .....	93
(4) Pattern of Oxygen Consumption in Compost under Different Water Plants .....	95
① Materials .....	95
② Methods .....	95
③ Analysis .....	96
(5) Compost of Water Plants in Small-scale Composting Apparatus .....	96
① Materials .....	96
② Methods .....	96
③ Analysis .....	98
(6) Examination of Possible of Mixed Water Plants for Bulking Agent .....	98
① Materials .....	98
② Methods .....	98
③ Analysis .....	99
(7) Composting of Water Plants Using Windrow Composting Method .....	99
① Materials .....	99
② Methods .....	100
③ Analysis .....	100
3) Combination Method of Livestock Wastewater Treatment and Composting Technologies .....	101
(1) Investigation of Removal Rates of Pollutants in the Water in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus with Water Plant Filtration Bed ...	101
(2) Investigation of Removal Rates of Pollutants in the Water in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus with Activated Sludge Bed .....	103
<b>2. Development of Resource Cycling System for Treating the Livestock     Wastewater by Natural Purification Method .....</b>	<b>105</b>
1) Development of Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	105



(1) Materials .....	105
(2) Experiment Apparatus .....	105
① Design and Construction of Livestock Wastewater Treatment Plant .....	105
② Design and Construction of Column Experimental Apparatus .....	109
(3) Methods .....	110
① Investigation of Removal Rates of Pollutants in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	110
② Investigation of Physico-chemical Characteristics of Filter Media in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	112
③ Investigation of Growth, Contents and Absorption of Inorganic Elements in Water Plants in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	113
④ Investigation of Microorganisms in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	113
⑤ Investigation of Absorption/Movement Modeling in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	113
(4) Examination Time .....	114
(5) Analysis .....	115
2) Development of Composting Technology of Resource Recycling Using Natural Purification Method .....	115
(1) Install and Pre-operation Composting Apparatus in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	115
① Experiment Apparatus .....	115
② Methods .....	118
(2) Investigation of Composting Efficiency in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	118
① Materials .....	118
② Methods .....	120
③ Examination Time .....	122
④ Analysis .....	123
(3) Evaluation of Fertilizer Value and Composting Materials of Water Plants in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	123
① Materials .....	123
② Experiment Apparatus .....	123
③ Methods .....	123
④ Examination Time .....	124
⑤ Analysis .....	124

(4) Usability of Sediment for Soil Amendment in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	124
① Materials .....	124
② Methods .....	124
③ Examination Time .....	124
④ Analysis .....	124
<b>3. Practical application of Resource Cycling System for Treating the Livestock Wastewater by Natural Purification Method .....</b>	<b>126</b>
1) Practical Application of Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method for Treating Livestock Wastewater .....	126
(1) Materials .....	126
(2) Experiment Apparatus .....	126
(3) Methods .....	130
① Investigation of Removal Rates of Pollutants in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	130
② Investigation of Physico-chemical Characteristics of Filter Media in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	131
③ Investigation of Growth, Contents and Absorption of Inorganic Elements in Water Plants in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	131
④ Investigation of Microorganisms in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	132
⑤ Pollutants Balances in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	133
⑥ Comparison of Removal Rate between Natural Purification Method and the Commercial Methods .....	135
⑦ Standardized Design and Management Guideline for Livestock Wastewater Treatment Plant .....	135
2) Practical Application of Composting Technology Using Water Plants .....	135
(1) Improvement of Composting Apparatus for Resource Recycling .....	136
① Experiment Apparatus .....	136
② Methods .....	136
(2) Production of Prototype Compost in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	136
① Materials .....	136
② Methods .....	138
③ Analysis .....	138

(3) Quality Test of Prototype Compost in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	138
(4) Application Effect of Compost for Cultivation .....	138
① Pot Experiment Using Water Plant Compost for Cultivation .....	138
② Field Experiment Using Water Plant Compost for Cultivation .....	142
(5) Design of Composting Apparatus in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	145
(6) Management Plan of Composting Apparatus in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	145
Section 3. Results and Discussions .....	146
<b>1. Basic Experiment for Development of Resource Cycling System for Treating the Livestock Wastewater by Natural Purification Method .....</b>	<b>146</b>
1) Basic Experiment for Development of a Natural Purification Technology for Treating Livestock Wastewater by Natural Purification Method .....	146
(1) Physico-chemical Characteristic under Different Livestock Wastewater .....	146
(2) Adsorption Characteristics of Pollutants under Different Filter Media in Batch Experiment .....	147
(3) Removal Rates of Pollutants in Column Experiment .....	154
(4) Basic Experiment for Development of Livestock Wastewater Treatment Technology in Small-scale Livestock Wastewater Apparatus .....	158
① Removal Rates of Pollutants in the Water in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus .....	158
② Physico-chemical Characteristics of Filter Media in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus .....	180
③ Growth and Inorganic Elements Contents of Water Plants in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus .....	188
④ Microorganisms in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus .....	192
2) Basic Experiment for Development of Composting Technology by Water Plants .....	199
(1) Composting Condition of Water Plants by Literature Search .....	199
(2) Evaluation of Fertilizer Value under Different Livestock Wastewater .....	200
(3) Evaluation of Fertilizer Value under Different Water Plants .....	209
(4) Pattern of Oxygen Consumption in Compost under Different Water plants .....	216
(5) Water Plants Compost in Small-scale Composting Apparatus .....	224
(6) Examination of Possible of Mixed Water Plants for Bulking Agent .....	232
(7) Composting of Water Plants Using Windrow Composting Method .....	234

3) Combination Method of Livestock Wastewater Treatment and Composting Technologies .....	235
(1) Removal Rates of Pollutants in the Water in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus with Water Plant Filtration Bed .....	235
(2) Removal Rates of Pollutants in the Water in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus with Activated Sludge Bed .....	236
<b>2. Development of Resource Cycling System for Treating the Livestock Wastewater by Natural Purification Method .....</b>	<b>237</b>
1) Development of Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	237
(1) Removal Rates of Pollutants in Livestock Wastewater Plant .....	237
(2) Physico-chemical Characteristics of Filter Media in Livestock Wastewater Plant .....	267
(3) Growth, Contents and Absorption of Inorganic Elements in Water Plants in Livestock Wastewater Plant .....	276
(4) Microorganisms in Livestock Wastewater Plant .....	289
(5) Absorption/Movement Modeling in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	298
2) Development of Composting Technology of Resource Recycling Using Natural Purification Method .....	302
(1) Investigation of Composting Efficiency in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	302
(2) Evaluation of Fertilizer Value and Composting Materials of Water Plants in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	322
(3) Usability of Sediment for Soil Amendment in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	334
<b>3. Practical Application of Resource Cycling System for Treating the Livestock Wastewater by Natural Purification Method .....</b>	<b>335</b>
1) Practical Application of Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method for Treating Livestock Wastewater .....	335
(1) Removal Rates of Pollutants in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	335
(2) Physico-chemical Characteristics of Filter Media in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	360
(3) Growth, Contents and Absorption of Inorganic Elements in Water Plants in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	371
(4) Microorganisms in Livestock Wastewater Plant .....	386

(5) Pollutants Balances in Livestock Wastewater Treatment Plant .....	393
(6) Comparison of Removal Rate between Natural Purification Method and the Commercial Methods .....	398
(7) Standardized Design and Management Guideline for Livestock Wastewater Plant .....	401
2) Practical Application of Composting Technology using Water Plants .....	408
(1) Production of Prototype Compost in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	408
(2) Quality Test of Prototype Compost in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	410
(3) Application Effect of Compost for Cultivation .....	410
(4) Design of Composting Apparatus in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	458
(5) Management Plan of Composting Apparatus in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method .....	459
Section 4. Summary .....	462
<b>Chapter 4. Accomplishment and Major Contribution .....</b>	<b>476</b>
<b>Chapter 5. Application Plan of the Research .....</b>	<b>481</b>
<b>Chapter 6. Information Obtained Oversea during Research .....</b>	<b>489</b>
<b>Chapter 7. References .....</b>	<b>490</b>

# 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 .....	57
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	60
제 1 절 국내의 기술개발 현황 .....	60
제 2 절 국외의 기술개발 현황 .....	62
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	63
제 1 절 이론적 접근방법 .....	63
제 2 절 실험적 접근방법 .....	73
1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구 .....	73
가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구 .....	73
1) 공시재료 .....	73
2) 실험장치 .....	75
가) Column 실험장치 .....	75
나) 소형 축산폐수처리장치 .....	75
3) 실험방법 .....	82
가) 축산폐수 종류별 이화학적 특성 조사 .....	82
나) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성 조사 .....	82
(1) 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착특성 .....	83
(2) 여재 종류별 인의 흡착특성 .....	83
(3) 질소 및 인 흡착능에 따른 최적 등온흡착식 선정 .....	84
다) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리 .....	85
(1) 처리시일에 따른 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인 처리 .....	85
(2) 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량 .....	85
라) 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험 .....	85
(1) 소형축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 조사 .....	85
(가)자연정화공법에 의한 축산폐수처리장치에서 최적 조건 연구 .....	85
(나) 자원순환형 축산폐수 처리기술개발을 위한 기반 연구 .....	86
(2) 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성 조사 .....	87
(가) 여재의 이화학적 특성 .....	87
(나) 여재 표면의 무기성분 흡착특성 .....	87

(3) 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량 .....	88
(가) 수생식물의 생육상황 .....	88
(나) 수생식물의 무기성분 함량 .....	88
(4) 소형 축산폐수처리장치에서의 미생물상 조사 .....	88
(가) 여재 표면의 미생물상 .....	88
(나) 여재 표면의 생물막 부착상태 .....	88
(다) 축산폐수 중 미생물상 변화 .....	88
4) 조사시기 .....	89
5) 분석방법 .....	89
나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구 .....	91
1) 문헌조사를 통한 수생식물 퇴비화 조건 도출 .....	91
2) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석 .....	91
가) 공시재료 .....	91
나) 실험방법 .....	92
다) 분석방법 .....	92
3) 수생식물 종류별 비료 가치 분석 .....	93
가) 공시재료 .....	93
나) 실험방법 .....	93
다) 분석방법 .....	93
4) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴 조사 .....	95
가) 공시재료 .....	95
나) 실험방법 .....	95
(1) 산소 소비량 측정 퇴비화 반응조 시스템 및 운전조건 .....	95
(2) 산소 소비량 측정 퇴비화 반응조 처리조건 .....	95
다) 분석방법 .....	96
5) 소형 퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화 .....	96
가) 공시재료 .....	96
나) 실험방법 .....	96
(1) 소형퇴비화조 제작·설치 및 운전조건 .....	96
(2) 수생식물 퇴비화를 위한 소형퇴비화조 처리조건 .....	97
다) 분석방법 .....	98
6) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토 .....	98
가) 공시재료 .....	98
나) 실험방법 .....	98
다) 분석방법 .....	99

7) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화 .....	99
가) 공시재료 .....	99
나) 실험방법 .....	100
다) 분석방법 .....	100
다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구 .....	101
1) 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율 조사 .....	101
가) 공시재료 .....	101
나) 실험장치 .....	102
다) 실험방법 .....	103
라) 조사시기 .....	103
마) 분석방법 .....	103
2) 활성슬러지와 자연정화공법을 연계한 수처리 효율 조사 .....	103
가) 공시재료 .....	103
나) 실험장치 .....	103
다) 실험방법 .....	104
라) 조사시기 .....	104
마) 분석방법 .....	104
<b>2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발 .....</b>	<b>105</b>
가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 개발 .....	105
1) 공시재료 .....	105
2) 실험장치 .....	105
가) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 설계 및 시공 .....	105
나) 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링을 위한 칼럼 장치 .....	109
3) 실험방법 .....	110
가) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율 조사 .....	110
(1) 축산폐수 처리시일에 따른 수처리 효율 .....	110
(2) 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 .....	110
(3) 축산폐수 중 고농도 질소 및 인 처리효율 극대화 방안조사 .....	110
(가) 축산폐수 재주입 비율별 수처리 효율 .....	110
(나) 축산폐수 전처리 시간에 따른 수처리 효율 .....	111
(4) 축산폐수 주입방법에 따른 수처리 효율 .....	111
(5) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 오염물질의 분해속도 .....	111
나) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 조사 .....	112
(1) 여재의 이화학적 특성 .....	112
(2) 여재 표면의 무기성분 흡착특성 .....	112



다) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량 조사 .....	113
(1) 수생식물의 생육상황 .....	113
(2) 수생식물의 무기성분 함량 .....	113
(3) 무기성분 흡수량 .....	113
라) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상 조사 .....	113
(1) 여재 표면의 미생물상 .....	113
(2) 여재 표면의 생물막 부착상태 .....	113
(3) 축산폐수 중 미생물상 변화 .....	114
마) 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링 조사 .....	114
4) 조사시기 .....	114
5) 분석방법 .....	115
나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발 .....	115
1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조 설치 및 시운전 .....	115
가) 실험장치 .....	115
나) 실험방법 .....	118
2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율조사 .....	118
가) 공시재료 .....	118
나) 실험방법 .....	120
(1) 수생식물별 퇴비화 (composting) 기간 결정 .....	120
(2) 수생식물별 부숙도 판정 .....	120
(3) 수생식물별 퇴비화 효율 검토 .....	121
(4) 수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화 .....	121
(5) 수생식물별 퇴비화 최적 조건 .....	121
(6) 수생시물+돈분퇴비와 수생식물 퇴비의 품질비교 .....	121
(7) 퇴비화를 위한 최적 수생식물 선정 .....	122
다) 조사시기 .....	122
라) 분석방법 .....	123
3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석 .....	123
가) 공시재료 .....	123
나) 실험장치 .....	123
다) 실험방법 .....	123
라) 조사시기 .....	124
마) 분석방법 .....	124

4) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토 .....	124
가) 공시재료 .....	124
나) 실험방법 .....	124
다) 조사시기 .....	124
라) 분석방법 .....	124
<b>3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화 .....</b>	<b>126</b>
가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화 .....	126
1) 공시재료 .....	126
2) 실험장치 .....	126
3) 실험방법 .....	130
가) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 장기간 수처리 효율 .....	130
(1) 부하량별 수처리 효율 .....	130
(2) 시기별 수처리 효율 .....	130
(3) 계절별 수처리 효율 .....	130
(4) 이상기후에서의 수처리 효율 .....	130
(5) 오염물질의 분해속도 .....	130
(6) 용존형태별 수처리 효율 .....	131
나) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성 .....	131
(1) 장기간 여재의 이화학적 특성 .....	131
(2) 장기간 여재 표면의 무기성분 흡착특성 .....	131
다) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안 .....	131
(1) 수생식물 생육특성 .....	131
(2) 수생식물의 무기성분 함량 .....	132
(3) 무기성분 흡수량 .....	132
라) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화 .....	132
(1) 생물막 구성 및 미생물 분포 .....	132
(2) 여재 및 식물부착 생물막의 전자현미경 조사 .....	132
(3) 축산폐수 중 미생물상 변화 .....	132
마) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치 .....	133
(1) 총유입량, 총유출량 및 증발산량 조사 .....	133
(2) 오염물질의 물질수지 조사 .....	133
(가) COD 및 SS 물질수지 .....	134
(나) T-N 및 T-P 물질수지 .....	134
바) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 효율 비교 .....	135

(1) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간의 수처리효율 비교 .....	135
(2) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간의 경제성 비교 .....	135
사) 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 설계규격화 및 관리지침 제시 .....	135
(1) 자원순환형 축산폐수처리장 설계규격화 .....	135
(가) 사육 가축에 따른 설계규격화 .....	135
(나) 시설규모 및 비용을 고려한 설계 규격화 .....	135
(2) 자원순환형 축산폐수 처리시스템의 관리지침 제시 .....	135
(3) 자원순환형 축산폐수 처리장의 실용화 (농가형, 공장형, 공동이용 등) 모델 제시 .....	135
나. 자원순환형 수생식물 퇴비화기술 실용화 .....	136
1) 자원순환형 현장 퇴비화조의 보완 및 개선 .....	136
가) 실험장치 .....	136
나) 실험방법 .....	136
2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산 .....	136
가) 공시재료 .....	136
나) 실험방법 .....	138
다) 분석방법 .....	138
3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정 .....	138
4) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험 .....	138
가) 수생식물 퇴비를 이용한 포트 재배시험 .....	138
(1) 공시재료 .....	138
(2) 실험방법 .....	139
(가) 퇴비화시험을 위한 현장포장 위치 선정 .....	139
(나) 처리방법 및 대상 작물 선정 .....	139
(다) 생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정 .....	142
(3) 조사시기 .....	142
(4) 분석방법 .....	142
나) 수생식물 퇴비를 이용한 필드 재배시험 .....	142
(1) 공시재료 .....	142
(2) 실험방법 .....	143
(3) 조사시기 .....	145
(4) 분석방법 .....	145
5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화시 퇴비조건 규격화 .....	145
6) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화시스템 관리지침 .....	145

제 3 절 연구내용 및 연구결과 .....	146
1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구 .....	146
가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구 .....	146
1) 축산폐수 종류별 이화학적 특성 .....	146
2) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성 .....	147
가) 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착특성 .....	147
나) 여재 종류별 인의 흡착특성 .....	150
다) 질소 및 인 흡착능에 따른 최적 등온흡착식 선정 .....	152
3) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리 .....	154
가) 처리시일에 따른 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인 처리 .....	154
나) 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량 .....	156
4) 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험 .....	158
가) 소형축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 .....	158
(1) 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장치에서 최적 조건 연구 .....	158
(가) 여재종류에 따른 수처리 효율 .....	158
(나) 처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율 .....	166
(다) 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 .....	170
(2) 자원순환형 축산폐수 처리기술개발을 위한 기반 연구 .....	173
(가) 축산폐수 종류별 수처리 효율 .....	173
(나) 특수여재 주입에 따른 수처리 효율 .....	175
(다) 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 수처리 효율 .....	175
나) 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성 .....	180
(1) 여재의 이화학적 특성 .....	180
(2) 여재 표면의 무기성분 흡착특성 .....	184
다) 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량 .....	188
(1) 수생식물의 생육상황 .....	188
(2) 수생식물의 무기성분 함량 .....	190
라) 소형 축산폐수처리장치에서의 미생물상 .....	192
(1) 여재 표면의 미생물상 .....	192
(2) 여재 표면의 생물막 부착상태 .....	196
(3) 축산폐수 중 미생물상 변화 .....	198
나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구 .....	199
1) 문헌조사를 통한 수생식물 퇴비화 조건 도출 .....	199
2) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석 .....	200
가) 축종별 폐수 발생량 .....	200

나) 축산폐수 종류별 비료가치 분석 .....	201
3) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석 .....	209
가) 수생식물 종류별 퇴비화 관련사항 검토 .....	209
(1) 수생식물별 퇴비 재료 활용 가능성 검토 .....	209
(2) 수생식물체의 bulking agent 활용 가능성 검토 .....	212
(3) 수생식물체내 유해성 중금속 함량 기준 관련 검토 .....	212
나) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석 검토 .....	213
4) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴 .....	216
가) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 소비 패턴 .....	216
나) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 총 산소 소비량 및 단계별 산소 소비량 .....	223
5) 소형 퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화 .....	224
가) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 소비 패턴 .....	224
나) 수생식물체 퇴비의 물리·화학적 특성 .....	231
6) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토 .....	232
7) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화 .....	234
다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구 .....	235
1) 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율 .....	235
2) 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 수처리 효율 .....	236
<b>2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발 .....</b>	<b>237</b>
가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발 .....	237
1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율 .....	237
가) 축산폐수 처리시일에 따른 수처리 효율 .....	237
나) 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 .....	242
다) 축산폐수 중 고농도 질소 및 인 처리효율 극대화 방안 .....	249
(1) 축산폐수 재주입 비율별 수처리 효율 .....	249
(2) 축산폐수 전처리 시간에 따른 수처리 효율 .....	250
(가) 수생식물 여과시간에 따른 수처리 효율 .....	251
(나) 활성슬러지 체류시간에 따른 수처리 효율 .....	254
라) 축산폐수 주입방법에 따른 수처리 효율 .....	258
마) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 오염물질의 분해속도 .....	263
2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 .....	267
가) 여재의 이화학적 특성 .....	267
나) 여재 표면의 무기성분 흡착특성 .....	273
3) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량 .....	276

가) 수생식물의 생육상황 .....	276
나) 수생식물의 무기성분 함량 .....	278
다) 무기성분 흡수량 .....	282
4) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상 .....	289
가) 여재 표면의 미생물상 .....	289
나) 여재 표면의 생물막 부착상태 .....	296
다) 축산폐수 중 미생물상 변화 .....	297
5) 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링 .....	298
나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발 .....	302
1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율 .....	302
가) 수생식물별 퇴비화 (composting) 기간 결정 .....	302
(1) 온도변화 .....	302
(2) pH 변화 .....	303
(3) 총 질소 .....	304
(4) 총 탄소 .....	305
(5) C/N율 변화 .....	306
(6) 수생식물별 퇴비화 과정 중 분해특성 .....	307
나) 수생식물별 부속도 판정 .....	309
다) 수생식물별 퇴비화 효율 검토 .....	310
(1) 퇴비 무게 및 부피 감소율 .....	310
(2) 퇴비 생산량 .....	311
라) 수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화 .....	311
(1) 수생식물별 퇴비화 과정 중 온도 변화 .....	311
(2) 수생식물별 퇴비화 과정 중 pH 변화 .....	312
(3) 수생식물별 퇴비화 과정 중 총 질소 함량 변화 .....	313
(4) 수생식물별 퇴비화 과정 중 총 탄소 함량 변화 .....	313
(5) 수생식물별 퇴비화 과정 중 C/N율 변화 .....	314
(6) 수생식물별 퇴비화 과정 중 중금속 (As, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn)함량 변화 .....	315
(7) 수생식물별 퇴비화 과정 중 미량원소 (Al, Fe, Mn 및 Mo)함량 변화 .....	316
마) 수생식물별 최적 조건 .....	317
바) 수생식물+돈분퇴비와 수생식물 퇴비의 품질비교 .....	319
(1) 유기물 .....	319
(2) 수분 .....	319
(3) C/N율 .....	320
(4) 중금속 .....	321

사) 퇴비화를 위한 최적 수생식물 선정 .....	321
2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석 ·	322
가) 수생식물별 생육특성 및 화학적 성분 특성 .....	322
(1) 수생식물별 생육특성 .....	322
(2) 인공습지에서 수생식물체의 주요 구성 성분 함량 .....	323
(3) 유입원수의 T-N 및 T-P 농도 범위별 영양염류 함량 .....	325
(4) 수생식물 종류별 T-N 및 T-P 흡수량 평가 .....	326
(5) 식물체내 중금속 함량 .....	328
나) 축산폐수처리장내 수생식물 종류별 비료적 가치 분석 .....	330
(1) 축산폐수처리장내 수생식물별 퇴비 재료 활용 가능성 검토 .....	330
(2) 수생식물체의 bulking agent 활용 가능성 검토 .....	331
(3) 수생식물체내 유해성 중금속 함량 기준 관련 검토 .....	332
(4) 축산폐수처리장내 수생식물 종류별 비료적 가치 분석 검토 .....	333
3) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제	
이용가능성 검토 .....	334
<b>3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화</b> .....	<b>335</b>
가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화 .....	335
1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 장기간 수처리 효율 .....	335
가) 부하량별 수처리 효율 .....	335
나) 시기별 수처리 효율 .....	341
다) 계절별 수처리 효율 .....	346
라) 이상기후에서의 수처리 효율 .....	349
마) 오염물질의 분해속도 .....	352
바) 용존형태별 수처리 효율 .....	355
2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성 .....	360
가) 장기간 여재의 이화학적 특성 .....	360
나) 장기간 여재 표면의 무기성분 흡착특성 .....	370
3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안 .....	371
가) 수생식물 생육특성 .....	372
나) 수생식물의 무기성분 함량 .....	374
다) 무기성분 흡수량 .....	378
4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화 .....	386
가) 생물막 구성 및 미생물 분포 .....	386
나) 여재 및 식물부착 생물막의 전자현미경 조사 .....	391
다) 축산폐수 중 미생물상 변화 .....	392

5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치 .....	393
가) 총유입량, 총유출량 및 증발산량 .....	393
나) 오염물질의 물질수지 .....	394
(1) COD 및 SS 물질수지 .....	394
(2) T-N 및 T-P 물질수지 .....	396
6) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 효율 비교 .....	398
가) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간의 수처리효율 비교 .....	398
나) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간의 경제성 비교 .....	399
7) 현장 자원순환형 축산폐수 처리장의 설계규격화 및 관리지침 제시 .....	401
가) 자원순환형 축산폐수처리장 설계규격화 .....	401
(1) 사육 가축에 따른 설계규격화 .....	401
(2) 시설규모 및 비용을 고려한 설계 규격화 .....	401
나) 자원순환형 축산폐수 처리시스템의 관리지침 .....	402
다) 자원순환형 축산폐수 처리장의 실용화 (농가형, 공장형, 공동이용 등) 모델 제 제시 .....	406
나. 자원순환형 수생식물 퇴비화기술 실용화 .....	408
1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산 .....	408
가) 수생식물별 연간 퇴비 생산량 .....	408
나) 퇴비 시제품의 품질조사 .....	409
2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정 .....	410
가) 농촌진흥청 퇴비규격에 따른 퇴비 품질검정 .....	410
나) 수생식물별 품질검정 및 주성분 함량보정 .....	410
3) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험 .....	410
가) 수생식물 퇴비를 이용한 포트 재배시험 .....	410
(1) 토양의 이화학적 특성 .....	410
(가) 작물 및 퇴비 종류별 토양의 이화학적 특성 .....	410
(나) 수생식물+돈분 퇴비 시용량별 토양의 이화학적 특성 .....	414
(2) 식물체 무기성분 함량 변화 .....	416
(가) 작물 및 퇴비 종류별 식물체 무기성분 함량 변화 .....	416
(나) 부들+돈분 퇴비 시용량별 식물체 무기성분 함량 변화 .....	421
(3) 작물의 생육상황 및 수량 .....	426
(가) 작물 및 퇴비 종류별 식물체 생육상황 .....	426
(나) 부들+돈분 퇴비 시용량별 식물체 생육상황 .....	428
나) 수생식물 퇴비를 이용한 필드 재배시험 .....	429
(1) 토양의 이화학적 특성 변화 .....	429



(2) 식물체 무기성분 함량 변화 .....	437
(3) 작물의 생육상황 및 수량 .....	451
(4) 수생식물 퇴비와 일반 퇴비의 경제성, 효율성 .....	457
4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 설계 규격화 .....	458
5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리지침 제시 .....	459
제 4 절 요약 .....	462
제 4 장    목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	476
제 5 장    연구개발 성과 및 성과활용 계획 .....	481
제 6 장    연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	489
제 7 장    참고문헌 .....	490

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

국내 축산업 생산액 (2006년)은 11.7조원으로 쌀 생산액 8.7조원보다 높으며, 전체 농림업 생산액 36.4조원의 32.1%를 차지하고 있어 매우 중요한 산업임에도 불구하고 축산분뇨에 의해 수질과 토양오염이나 악취 등의 문제가 발생되고 있다. 근래 축산업의 고도성장으로 인한 집약화 및 대규모화에 따라 가축분뇨의 발생량은 급격히 증가한 반면에 분뇨를 환원시킬 수 있는 초지나 경지면적의 증가율은 제자리이거나 감소하는 추세이기 때문에 가축분뇨가 환경에 미치는 영향에 대해서는 국내는 물론 세계적으로 첨예의 관심사가 되고 있다. 축산 폐수가 환경에 미치는 영향은 크게 수질 및 악취분야로 나눌 수 있으며, 특히 축산폐수는 수질오염에 의한 수계의 부영양화와 심각한 악취를 유발할 수 있으며, 수계 인근지역의 토양오염, 지하수오염 및 상수원오염 등을 유발시킬 수 있으므로 이들 축산폐수의 처리는 시급한 실정이다.

2006년말 기준으로 우리나라에서 발생하는 오·폐수는 하루 25,646천 톤으로 이중에서 축산폐수는 하루 131천 톤으로 하폐수 발생량의 0.51%를 차지하고 있다. 국내에서의 축산업은 집단지·다두화 되어가면서 축산물 생산량이 계속 증가하여 폐수 발생량은 연간 5%씩 지속적으로 늘어나고 있으며, 이를 처리하기 위한 비용은 해마다 25%씩 상승하고 있다. 2007년말 소·돼지의 가축분뇨 발생량은 1일 135,402 m<sup>3</sup>/일이며, 이 중 돼지가 82,610 m<sup>3</sup>/일, 젓소가 20,657 m<sup>3</sup>/일, 한우가 31,135 m<sup>3</sup>/일로 돼지사육농가에서 발생하는 가축분뇨가 전체의 61%로 가장 많은 양을 차지하고 있다.

사육규모별로는 대규모 사육농가인 허가대상이 53%, 중규모 사육농가인 신고대상이 34%로 축산농가가 대규모화되고 있다. 또한 전체 가축분뇨 발생량 중 약 80%는 자체적으로 퇴비·액비화시설을 갖추어 비료로 활용하고 있으며, 일부 농가에서는 정화처리하거나 재활용업체 및 해양배출, 공공처리시설을 이용하여 가축분뇨를 처리하고 있다. 하지만 신고미만 가축분뇨 발생량이 전체 가축분뇨 발생량의 11%인 15,787 m<sup>3</sup>/일로 아직까지 소규모이고, 지역적으로 분산되어 있어 축산폐수의 관리가 쉽지 않은 상황이며, 이를 처리하기 위하여 축산폐수공공처리시설의 운영비만 연간 151억원의 (2001년 기준) 처리비용이 소모되었다.

축산분뇨는 유기질 및 무기질 비료 뿐만 아니라 작물 성장에 유익한 미생물들이 다량 함유되어져 있는 친환경적이며 가장 우수한 천연비료로 농작물 재배에 널리 사용되어져 왔으나 수거된 후, 방치하면 수분, 악취 및 해충 등이 증가됨으로써 주변 환경을 오염시킬 위험성이 있다. 축산 분뇨는 고형분과 액체인 뇨로 나누어지는데 고형분은 쉽게 퇴비화하여 농가에 보급되어 활용되어지지만 액체인 뇨는 자체 폐수정화시스템을 운영하거나 폐수처리장으로 이송하여 위탁 처리함으로써 축산물의 생산 단가를 상승시키는 요인으로 작용하고 있다. 또한 축산폐수는 BOD부하가 매우 높고 질소농도가 매우 높아 하천수질 악화 및 호수 부영양화의 주된 원인이 되고 있다. 현재 보편적인 축산폐수의 처리는 화학적·생물학적 처리방법을 적용하고 있으며, 평균적으로 BOD 5,000 mg L<sup>-1</sup> 정도의 축산폐수를 대상으로 처리하고 있으나 오염물의 부하가 매우 높고 농도변화가 심하여 처리하기에 많은 어려움이 있으며, 유기성 오염물질의 제거

및 질소와 인의 동시 처리가 불가능하여 다양한 고차처리법이 필요한 실정이다.

정부에서는 소규모 축산농가의 축산폐수 부담을 덜어주고 수질도 개선하기 위하여 1991년부터 축산폐수 공공처리시설을 설치 운영하고 있으며, 2002년 말 현재 여주, 양평 및 김해 등에 39개 시설 (9,575 m<sup>3</sup>/L)이 설치 가동되고 있다. 그러나 현행 축산폐수 처리기술인 활성슬러지법, 장기폭기법, 살수여상법, 톱밥토양여과법, 산화구법, 호기성소화법, 혐기성소화법, 고효율산화법 및 액상부식법 등은 운영과정에서 나타나는 가동률 저하 및 오염물질 제거효율 감소 등의 문제점으로 질소·인 제거시설 설치, 공법 개선 및 운영방안을 개선하여야 하는 등의 경제·산업적인 재투자가 불가피한 실정이다.

현재까지 가장 많이 사용되고 있는 생물학적인 축산폐수 처리방식은 활성슬러지법이나 이 방식은 질소 및 인 제거효율이 낮아 점차 강화되고 있는 폐수배출 허용기준에 대응하기 어려워 다양한 고차처리 방법이 개발되었다. 개발된 대표적인 축산폐수 처리공법은 A/O, A<sup>2</sup>/O, Bardenpho, UCT, VIP, SBR 및 장기폭기법 등이 있으나, 이들 축산폐수의 정화처리시설은 생활하수 또는 공장폐수 처리시설과는 달리 농가자신이 유지관리를 행하는 경우가 많고 처리에 드는 모든 비용이 축산경영에 직접 영향을 끼치기 때문에 유지관리가 쉽고, 건설비 및 유지관리비가 저렴하며, 질소 및 인의 처리효율이 높은 축산폐수 처리기술이 필요할 것이다. 화학적인 축산폐수 처리는 고부하로 인해 화학약품 사용량이 매우 많이 소요되며, 특히 고농도의 BOD, T-N 및 T-P의 처리가 어려워 과다한 투자 및 고부하의 운전조건을 요구하므로 처리하기가 어려운 실정이다. 화학적·생물학적인 축산폐수 처리 이외에 퇴비화법, 저장액비법, 톱밥발효법 및 토지환원법 등의 많은 자원화방법들이 있으나 이들 기술로 전체 축산폐수를 처리한다는 것은 역부족이며, 또한 자원화를 위해서는 수분조절을 위한 톱밥 및 왕겨 등의 수분조절제가 다량 요구되어 경제성측면에서 비용상승의 우려가 있고, 토양오염 및 수질오염 등의 2차 오염이 우려되고 있다. 최근 들어 톱밥가격의 상승이 축산농가의 채산성에 걸림돌로 작용하고 있는 실정이나, 본 개발공법은 폐수정화용으로 성장하는 수생식물을 톱밥 및 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용하므로 경제성측면에서 축산농가의 채산성 문제를 해결할 수 있을 것을 판단된다. 국내 축산업 생산성 향상과 축산농가의 경쟁력 강화를 위해서는 가축분뇨의 퇴·액비 형태의 자원화에 의한 처리비용 경감과 동시에 조사료 생산기반 구축에 의한 가축생산비 절감이 요구되며, 이를 실현하기 위해서는 가축분뇨의 자원순환을 전제로 한 경종, 축산 및 폐수처리가 연계된 자원순환형 친환경 축산폐수처리장의 개발이 필요하다.

축산분뇨의 비료화 방법은 톱밥 등을 혼합하여 퇴비화시키는 방법이 가장 진전되어 있으며, 현재 액비화 시키기 위한 축산분뇨 액비 연구 또한 활발하게 이루어지고 있으나, 이들 축산분뇨의 퇴·액비화는 농작물의 burning 현상, 뿌리 썩음 현상, 산소 결핍 현상, 사료 작물의 오염, 토양의 산성화, 생육억제, 악취 확산 및 해충 확산 등의 다양한 문제점이 발생될 수 있어 농가 보급을 위해 체계적·경제적인 퇴·액비화 기술 개발이 시급한 실정이다.

최근 들어 한·미 FTA 체결로 외국산 축산물의 수입이 본격화됨에 따라 농업생산은 향후 15년간 6,700억원 감소 할 것으로 전망된다. 이에 정부는 농업부문의 급속한 시장개방에 능동적으

로 대처하고, 국내 축산업의 경쟁력 제고와 생산성 향상을 위해 가축분뇨 관리정책의 기본방향을 종전의 가축 분뇨 정화처리 중심에서 퇴·액비화를 통한 자원화로 전환하고, 나아가 축산과 경종이 함께하는 자원순환형 친환경 축산단지를 도입 방안을 적극적으로 검토 중에 있다.

최근 신정부는 기후변화 대응과 동시에 신재생에너지 보급화를 위해 “저탄소 녹색성장” 산업화 전략을 발표하였으며, 농업분야의 “녹색성장”의 중점사업화 전략에 있어 자원순환형 기술을 축산단지 및 청정에너지 생산에 활용하기 위한 다양한 방안이 진행되고 있다.

축산폐수와 관련하여 많은 폐수처리공법과 자원화방법들이 난립하고 있으나, 아직까지 자원화나 폐수처리 모두를 완벽히 해결할 수 있는 대안이 없는 실정이다. 이에 축산폐수 처리와 자원화 기술은 농가 자신이 유지관리를 행하는 경우가 많기 때문에 축산폐수 처리 측면에서는 운전이 용이하고, 건설비 및 유지관리비가 저렴하며, 질소 및 인의 처리효율이 높아야 한다. 자원화 측면에서는 퇴·액비화에 적은 에너지가 소모되어야 하며, 경제성이 높고, 관리가 용이해야 할 것이다.

이에 본 연구진은 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발하여 축산폐수 처리와 퇴·액비화를 통한 자원화를 자원순환 방법으로 동시 수행하고자 하였다. 특히 본 자연정화공법에 의한 인공습지는 안정적인 수처리 효율과 함께 처리장 내에 성장한 수생식물을 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용할 수 있어 자원화의 경제성측면과 토양 및 수질오염 등의 2차 오염문제를 동시에 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 인공습지에서는 수생식물의 영양염류 흡수에 따른 수질정화능력 효과의 극대화를 위해서는 지속적인 수생식물의 제거가 필수적이나, 관리가 소홀한 인공습지의 경우 지속적인 수생식물의 제거가 이루어지지 못하여 폐기물화한 다 자란 수생식물이 부식되면서 흡수된 영양염류가 다시 유출되어 수질악화를 초래하고 있다. 또한 지속적인 수생식물의 제거가 이루어지는 인공습지는 제거된 수생식물의 활용방법이 없어 주변지역에 야적하여 주변경관을 크게 훼손하고 향후 이들이 부식되어 영양염류가 다시 유출될 수 있다.

따라서 본 연구는 축산폐수를 효과적으로 처리하면서 인공습지에서 부산물로 발생하는 수생식물을 이용한 자원의 재활용을 동시에 수행하여 축산, 경종 및 폐수처리가 함께하는 자원순환형 친환경 축산 폐수처리 시스템인 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발하고자 하였다. 본 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술은 축산폐수 처리와 자원화 문제의 해결뿐만 아니라 우수한 비료의 생산에 따른 농업 발전 및 축산 농가와 경종농가 모두에게 비전을 제시할 것이며, 향후 축산 농가와 경종 농가간에 상호 대립이 아닌 신뢰성을 갖는 지역순환형농업 시스템 구축에 일익을 담당할 것이다. 또한 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장을 축산농가 인근에 설치함으로써 농촌지역 주변환경과 부합하여 환경친화적인 농촌환경 개선에 이바지 할 수 있으며, 지속적인 축산업 발전을 위한 토대가 마련될 수 있을 것이다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내의 기술개발 현황

축산폐수 처리의 대부분은 활성슬러지법에 의한 생물학적 처리가 대부분이며, 이 방법에 의한 축산폐수는 질소 및 인 등의 영양소 제거가 어렵다. 특히 분뇨분리방식에 의한 축산폐수의 생물학적 처리방식은 방류수질의 법적 규제치가 강화되는 현실에서 전문지식이 없는 축산농가에서 처리시설의 운전 및 유지관리가 어려워 축산폐수의 무방류 처리시스템을 선호하여 톱밥발효 퇴비화, 증발방식 등을 많이 채택하고 있다. 그러나 분뇨가 혼합된 슬러리상태의 축산폐수를 톱밥발효, 증발방식으로 처리하는 기술은 슬러리의 높은 함수율로 인하여 경제적 및 기술적으로 많은 문제점을 안고 있어 분뇨 분리방식에 의한 분의 퇴비화와 뇨의 생물학적 처리가 가장 보편적이다.

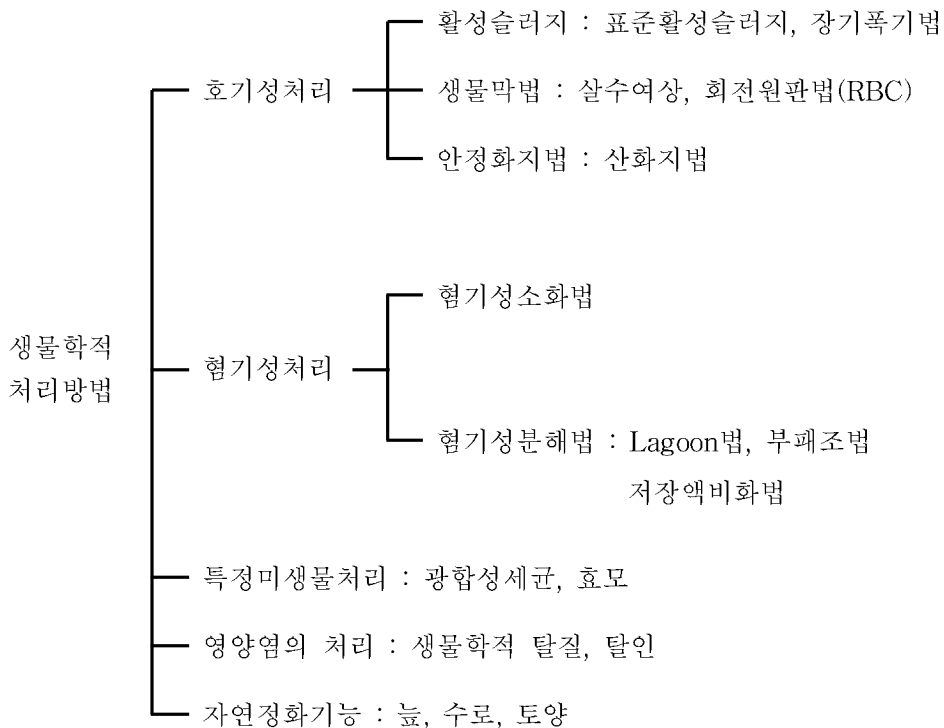


Fig. 2-1. 생물학적처리법의 분류

고액분리한 축산폐수 처리만을 처리하는 방법으로서 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 처리방식은 축산 분뇨의 액비화를 통해 감량화하고, 청소수 등을 포함한 폐수는 활성슬러지법으로 처리하고 있으나, 질소·인 등의 영양소 제거효율이 낮아 점차 강화되고 있는 방류수 수질기준에 대응하기 어려운 실정이다.

축산폐수 중 질소·인의 제거에 대해서는 MLE, A/O, A<sup>2</sup>/O, Bardenpho, UCT, VIP, SBR, 장기 폭기법 등의 처리공법으로 연구되어 왔으나, 질산화-탈질 및 탈인을 위한 소요부지가 많

이 들고 특히 농촌지역에 위치한 숙달된 전문가가 아닌 축산폐수 처리장의 운전여건상 운전조건 및 유지관리가 어렵다는 점에서 축산농가에 적용되어 성공한 사례는 극히 드문 실정이다.

퇴비화방법은 크게 퇴적방식과 교반방식으로 구분되어 간단한 퇴비화에서 대규모시설까지 다양한 방법들이 개발되었다. 주요한 퇴비화처리시설의 종류 및 특징은 아래와 같다.

Table 2-1. 주요한 퇴비화처리시설의 종류 및 특징

구 분 시 설 명		시설의 특징							경영별 이용 현황						
		태양열 이용	수분 조절	악취처리 난이도와 탈취법	처리 노력	소요 부지	시설비 운전비	처리 기간	축종별				규모별		
									낙농	비육우	양돈	양계	中	小	
퇴적 방식	퇴비사	Y	Y	어렵다	크다	크다	적다 적다	길다	◎	◎	○	△	△	○	
	통기형태비사	Y	Y	쉽다 (톱, 토)	크다	중간	적다 중간	중간	○	○	○	○	○	○	
	상형통기발효	Y	Y	쉽다 (톱, 토)	크다	중간	중간 중간	중간	○	○	○	○	○	○	
교반 방식	개 방	로타리식	Y	Y, N	어렵다 (토)	적다	크다 크다	조금 짧다	○	○	○	○	○	△	
		스쿠프식	Y	Y, N	어렵다 (토)	적다	크다 크다	조금 짧다	○	○	○	○	○	△	
	밀 폐	횡형	N	N	쉽다 (톱, 토)	적다	적다	크다 크다	아주 짧다	×	×	△	○	○	×
		종형	N	N	쉽다 (톱)	적다	적다	크다 크다	아주 짧다	×	×	△	○	○	×

\*()속의 톱은 톱밥탈취장치, 토는 토양탈취를 의미

\*Y는 긍정, N은 부정

\*×는 거의 이용되지 않음, ○는 이용됨, ◎는 많이 이용됨, △는 일부 이용됨

축산폐수의 적정 처리를 위해서는 처리공법만이 대상이 아니고, 처리시설 설치 대상 축산농가의 현실을 파악한 실용적이며, 경제성이 있는 처리 공법의 개발이 필요하다.

따라서 국내 축산업 생산성 향상과 축산농가의 경쟁력 강화를 위해서는 가축분뇨의 퇴·액비 형태의 자원화에 의한 처리비용 경감과 동시에 조사료 생산기반 구축에 의한 가축생산비 절감이 요구되며, 이를 실현하기 위해서는 가축분뇨의 자원순환을 전제로 한 경종, 축산 및 폐수처리가 연계된 자원순환형 친환경 축산폐수 처리장의 개발이 필요하다.

## 제 2 절 국외의 기술개발 현황

축산 분뇨 처리에 관련 기술은 세계적으로 일본이 가장 발달되어 있고 아시아의 개발 도상국들이 일본의 기술을 기반으로 하는 축산 분뇨 처리 기술을 발전시켜 나가고 있다. 일본의 경우 우리나라에서 환경의 중요성을 인식하기 이전부터 축산폐수 처리기술을 발전시켜왔다. 특히 약취제거제를 비롯하여 발효억제제 및 미생물제제 등 많은 화학약품을 비롯하여 폐수의 고도처리기술과 각종 여과에 필요한 필터, 세라믹여과기 등 우리나라에도 많은 기술이나 장치가 도입되었다. 일본은 축산분뇨의 60%를 자원으로 재활용하여 각종 비료화로 상품화시키고 있다. 특히 근래 들어 축산분뇨 내의 질소와 인을 활용하여 Struvite ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) 결정화로 합성하여 완효성 비료 개발에 활기를 띠고 있다.

미국의 축산규모는 대단히 규모가 크다. 예를 들면 축산 폐수처리를 대규모 연못을 여러개 설치하여 증발과 발효 등 자연처리기법에서부터 질소제거를 위한 염소첨가와 대규모 탈염설비 등 대규모의 형태를 가지고 있다.

유럽의 경우 하수처리를 제외하고 축산폐수 처리는 거의 생물학적, 즉 환경친화형으로 처리되고 있다. 특히 이들의 환경친화적 처리기술은 국가적인 사회기반시설하에서 보편화되어 매우 발달되어 있으나, 처리비용 또한 만만치 않은 실정이다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 이론적 접근방법

#### 1. 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리방법

인류가 처음 자신들이 필요한 물을 관리하기 시작한 것은 정착생활을 시작한 신석기 시대라고 추정하고 있다. 인류는 맑은 물을 쉽게 구할 수 있는 곳에 정착하여 자신들이 필요로 하는 생활용수를 관리하였으며 농경에 필요한 용수를 확보하기 위하여 저수지를 만든 것으로 알려지고 있다. 또한 북미 대륙의 인디언들이 자신들의 생활용수를 얻는 호수 수질을 정화하기 위하여 조개껍질을 사용한 것으로 알려져 있다. 오늘날과 같은 과학적인 수질관리기술은 19세기 이후에 와서 개발되기 시작하였다.

1889년 영국에서 처음으로 생활하수와 부유물을 침전 처리하는 1차 처리방법을 개발하여 사용했으며 1893년에는 오늘날 우리가 사용하는 살수여상법이 개발되었다. 그 후 1914년에는 영국의 Arden과 Lockett에 의해 활성슬러지법이 개발되어 사용되기 시작하였다. 습지식물의 정화효과는 1950년대 독일의 Max-plank 연구소의 Kaethe Seidel에 의해 최초로 세상에 알려졌으며, 수생식물에 의한 수처리기술은 1960년대에 미국의 NASA와 독일의 Max-plank 연구소에 의해 주로 유기물처리를 목적으로 개발되기 시작되었다.

NASA에 의한 일련의 연구는 폐쇄 생태학적 생명부양계 프로젝트 (Closed Ecological Life Support Systems)를 통하여 위성의 수질과 대기질의 개선을 위한 부수식물처리시스템을 고안하면서 시작되었으며, 그 이후에는 토양과 정수식물 근계의 여과처리 기능을 극대화한 토양-정수식물여과처리시스템으로 연구가 이루어졌다.

독일 Max-plank 연구소의 Kaethe Seidel은 1960년대에 식물정화조를 고안하였고, 그 이후 독일인 Kickuth가 골재층에 수초를 식재하여 하수를 골재 층으로 흐르게 하여 처리하는 방법을 연구하여, 갈대의 근권을 이용한 폐수정화방법을 고안하였다. 이들 연구결과는 오랫동안 빛을 보지 못하다가 1980년대 들어서면서 환경친화적 수질개선방안으로, 특히 수자원 분야에서 관심을 모으기 시작하면서 오수 및 폐수를 정화하기 위한 여러가지 모델의 식물정화조들이 개발되었다.

1970년대 이후 미국을 중심으로 서구 선진국에서 인공습지를 이용한 수질을 정화하는 기술을 개발해오고 있다. 이들 선진국에서는 인공습지를 점원 오염물질 처리뿐만 아니라 비점원 오염물질을 처리하는데도 이용하고 있다. 미국과 캐나다 등 북미에서는 하·폐수를 연못이나 전통적 2차 처리장에서 처리한 후 고도로 처리하기 위해 자유수면 인공습지를 주로 사용하고 있으며, 유럽은 하·폐수를 2차 처리수준으로 처리하기 위해 토양여과 인공습지를 일반적으로 사용하고 있다.

인공습지의 수질정화기능은 수질, 식생, 미생물 및 습지하부층 (토양 및 퇴적물) 등 4가지가



주요한 인자가 된다 (Green and Martin, 1996).

수질의 중요한 기능은 인공습지에 오염물질인 영양분을 공급하여 습지생태계를 유지하는 주요한 역할을 한다. 수질은 화학적 반응을 할 수 있는 매체 (media)를 제공하며, 미생물군집에게 먹이 (오염물질)와 가스 (산소, 이산화탄소 등)를 운반하고, 생성된 부산물을 외부로 이동시킨다. 또한 식물과 미생물의 생화학적 반응과정을 조성하기 위한 환경을 제공한다.

식생의 중요한 기능은 미생물이 서식할 수 있는 환경을 조성하는 것이다. 대부분의 식물은 물이 고여 있는 토양에서는 뿌리가 침수 후 급격하게 형성된 혐기성 상태에서 산소를 얻을 수 없기 때문에 잘 자랄 수가 없다. 그러나 수생식물의 잎과 줄기 및 뿌리는 통기조직으로 각각 연결되어 있어 생육이 가능하다. 이들 수생식물은 공기 중의 산소를 잎 표면을 통하여 줄기 및 뿌리조직에 이르게 하여, 뿌리주위의 미생물에게 산소를 공급한다. 또한 뿌리털 주변의 얇은 호기성 지역인 근권역 (rhizosphere)이 형성되고, 근권역 외곽은 혐기성 상태로 남아 있게 된다. 이러한 혐기성과 호기성 조건은 질소처리를 위해서 중요한 기능을 한다. 즉, 질소의 경우 호기성 상태에서 유기성 질소와 암모니아성 질소는 아질산성 질소를 거쳐서 질산성 질소로 전환되는 질산화과정과 주변의 혐기성상태에서 질산성 질소가 아산화질소와 질소가스로 변환되어 대기로 방출된다 (Green and Martin, 1996). 식물은 자라서 고사함에 따라 습지 토양면에 떨어진 잎과 줄기는 유기물 부스러기의 다층구조를 형성한다. 이런 생물체의 축적은 매우 다공질의 습지 하부층을 형성하여 미생물의 성장을 위한 많은 양의 부착면적을 제공한다. 또한 생물체의 분해는 미생물에게는 지속적이고, 쉽게 이용이 가능한 탄소원이 된다. 인공습지나 자연습지에서 수질개선은 주로 이러한 잎과 줄기가 떨어져 형성된 부스러기 층이나 부식토층의 높은 활동성과 미생물 부착을 위한 넓은 표면적에 의존한다. 습지식물은 습지 표면과 아랫부분에서 미생물이 활동하기에 유리한 호기성, 혐기성 조건을 계속 증가시킨다. 따라서 습지에서 수생식물의 매우 중요한 기능은 단순히 자라고 죽으면서 수질정화가 될 수 있는 조건을 형성하는 것이다 (Green and Martin, 1996).

미생물의 기능은 박테리아, 균류, 원생동물과 같은 미생물들이 오염물질을 영양물질이나 에너지로 변환시켜 그들의 생명 유지를 위해 활용한다. 또한 자연적으로 발생하는 많은 미생물군은 포식성이며, 병원균을 잡아먹는다. 수질개선에 있어서 습지의 효과는 미생물의 군집을 위한 환경을 개발하고 유지하는데 달려 있으며, 일반적인 습지의 미생물들은 서식범위가 넓고, 대부분의 물에서 자연적으로 발생하며 영양염류 또는 오염원을 에너지원으로 이용하여 오염된 습지와 물속에서 대규모로 서식하고 있다 (EPA, 1999).

토양, 모래, 자갈 등인 습지 하부층 (기질, substrate)의 기능은 식물을 물리적으로 지지하는 역할을 하며, 이온들이나 화합물들의 반응성 표면을 제공하고, 미생물이 부착하여 서식할 수 있는 표면을 제공한다 (Bartlett et al., 1979). 인공습지의 운영 초기에는 토양의 흡착작용과 식물의 생육 때문에 인의 제거 효율이 높게 나타날 수 있으나 점점 평행상태에 도달하게 된다. 또한 인은 질소와 달리 기체로의 처리기작이 없어 언젠가는 토양표면에 흡착 및 침전으로 포화되면서 토양의 수명이 다하게 된다. 점토와 같이 비표면적이 크고 양전하를 띤 입자의 경우

일반적으로 인 흡착능력이 매우 높으며, Ca, Mg 및 Al 등의 산화물들도 이러한 흡착반응에 매우 중요한 인자로 작용한다. 자유수면형 습지의 경우 이러한 인 제거능력은 접촉면이 항상 물속의 토양표면에 국한되어 있어 지하흐름형 인공습지나 수직흐름형 인공습지에 비해 낮다.

동물은 인공습지의 주요 구성인자는 아니지만, 이들은 미생물과 대형수초를 먹이로 하여 영양분과 에너지를 공급받으며, 물질들을 재이용하거나 경우에 따라서는 습지 외부로 기질을 버리기도 한다. 기능적으로 이들은 오염물질 처리에 제한된 기능을 하지만 성공적인 시스템내에서 부가적인 혜택 (레크리에이션 및 교육 등)을 제공한다. 또한 이들은 습지시스템의 건전함을 알아보는 지표로서 역할을 한다.

이러한 인공습지에서의 처리기작 모식도는 Fig. 3-1에서 보는 바와 같다. 오염물질에 대한 주요 처리기작은 Table 3-1에서와 같으며, 습지에서 처리되는 오염물질은 유기물, 부유고형물, 영양염류, 그리고 병원성 미생물과 중금속까지도 포함된다 (Kim, 2000).

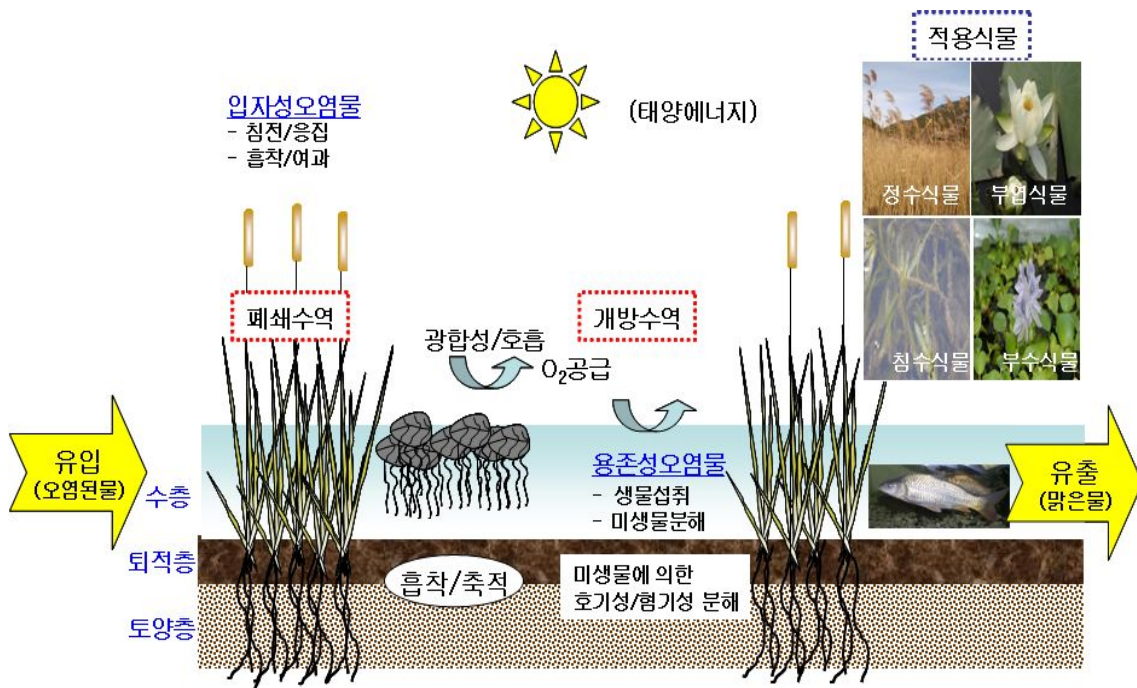


Fig. 3-1. 인공습지의 정화기작 모식도.

Table 3-1. 인공습지에서 오염물질의 주요 처리기작 (Brooks, 1991)

Mechanism		Settleable Solids	Colloidal Solids	BOD	N	P	Heavy Metals	Refractory Organics	Bacteria & Virus
Physi-cal	Sedimentation	P	S	I	I	I	I	I	I
		Gravitational settling of solids (and constituent contaminants) in pond/marsh settings.							
	Filtration	S	S						
		Particulates filtered mechanically as water passes through substrate, root masses, or fish.							
Adsorption			S						
		Inter-particle attractive force (van der Waals force).							
Chem-ical	Precipitation				P	P			
		Formation of or co-precipitation with insoluble compounds.							
	Adsorption				P	P	S		
		Adsorption on substrate and plant surfaces.							
Decomposition							P		P
		Decomposition or alteration of less stable compounds by phenomena such as UV irradiation, oxidation, and reduction.							
Biolo-gical	Bacterial Metabolism <sup>b</sup>		P	P	P			P	
		Removal of colloidal solids and soluble organics by suspended, benthic, and plant-supported bacteria. Bacterial nitrification/denitrification.							
	Plant Metabolism <sup>b</sup>							S	S
		Uptake and metabolism of organics by plants. Root excretions may be toxic to organisms of enteric organic.							
	Plant Adsorption				S	S	S	S	
		Under proper conditions, significant quantities of these contaminants will be taken up by plants.							
Natural Die-off									P
		Natural decay of organisms in an unfavorable environment.							

P=primary effect, S=secondary effect, I=incremental effect  
(effect occurring incidental to removal of another contaminant)

<sup>b</sup>=The term metabolism includes both biosynthesis and catabolic reactions

## 2. 수생식물의 퇴비화 방법

퇴비화란 농업폐기물, 축산폐기물, 슬러지, 도시쓰레기 등의 유기물질들을 미생물의 활동에 의하여 안정적으로 분해하여 부식토 (humus)로 변환시키는 생물학적 공정으로 호기 또는 혐기 조건하에서 미생물의 산화·분해에 의해 고분자 유기물질을 안정된 저분자 유기물질로 전환시키는 과정 중 탄소, 질소 및 다른 물질들이 미생물의 성장을 촉진시키고 열을 발생시키게 되는 과정이다. 일반적으로 혐기성 퇴비화는 퇴비화 속도가 늦기 때문에 대규모 퇴비화 플랜트에서는 호기성 퇴비화 공법을 선호하고 있다.

호기성 퇴비화는 제한된 조건하에서 미생물에 의한 유기물의 호기적 또는 산소요구성 분해를 의미하며 호기성 퇴비화 과정은 아래와 같은 식으로 요약할 수 있다.



퇴비화가 일어나는 동안 미생물은 유기물을 먹이로 이용하며 동시에 산소를 소비하고, 퇴비화가 활발히 진행되는 동안에 열이 많이 발생하고 다량의 이산화탄소가 (CO<sub>2</sub>)가 발생되며 수증기는 대기로 방출된다.

### 가. 퇴비화 과정

#### 1) 초기단계

중온성 진균과 세균들이 유기물을 분해하고 이에 따라 퇴비더미의 온도가 40℃ 이상으로 상승되어 고온성 세균과 방선균으로 대체되기 시작하는 단계이다.

#### 2) 고온단계

중온성 미생물에 의하여 발생된 열이 퇴비더미에 축적되면서 온도가 상승되고 고온성 미생물의 밀도가 증가하며 수주간 지속되는 단계로서 퇴비온도는 일반적으로 50~60℃가 유지되지만 70℃까지 상승하기도 하며 고온으로 인하여 병원균과 기생충란이 사멸되고 잡씨앗이 불활성화 되는 단계로서 퇴비화과정 중 가장 중요한 단계이다.

#### 3) 숙성단계

고온성 미생물에 의한 분해가 어느 정도 이루어지면 대부분의 분해가능 물질이 분해되었고 남은 유기물질은 분해가 어려운 humus 등으로 분해속도가 느려지며 퇴비더미의 온도도 40℃ 이하로 떨어진다. 이 단계에서는 중온성 미생물이 재정착하게 되는데 이때는 cellulose와 lignin의 분해능력이 있는 곰팡이류와 방선균이 우점한다.

#### 4) 퇴비화의 영향인자

퇴비화과정에서 가장 중요한 것은 퇴비화에 관여하는 미생물의 원활한 증식과 이를 위한 적

절한 환경조건을 유지하여야 하는 것이다. 퇴비화에 영향을 미치는 주요 인자들을 요약하면 아래와 같다.

#### 가) 퇴비재료의 입자크기

미생물이 퇴비재료를 분해하기 위해서는 미생들이 부착 생육하는 재료의 표면적이 클수록 효율적이다. 그렇기 때문에 재료를 절단하거나 잘게 파쇄하면 공극률이 작게 되어 호기성 분해를 위한 산소의 공급이 어렵고 에너지를 지나치게 소비하여 실용성을 잃게 된다. 즉, 입도가 작을 경우 입자 사이의 간극이 작아 퇴비더미 내로의 산소전달과 퇴비화 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>의 배출이 어려워 반응속도가 낮아지므로 적절한 크기로의 입도조절이 요구된다. 일반적으로 입도의 크기는 대상 폐기물에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 적절한 입자의 크기는 약 13~ 50 mm 정도가 적절하다고 할 수 있다.

#### 나) 수분함량

미생물 세포는 생리학적으로 물을 필요로 하며 물리적으로도 기질의 용액과 염류, 가스 교환시의 수분함량 등에 의한 영향을 받는다 (Griffin, 1981b; Harris, 1981). 미생물의 대사에 필요한 영양분은 대부분 체외 가수분해효소를 분비하여 영양분을 흡수하기 좋은 상태로 분해후 수용액 상태에서 흡수하므로 수분함량은 미생물의 에너지 대사 및 세포증식에 매우 중요한 역할을 한다. 일반적으로 미생물활성과 퇴비화를 위한 적정수분함량은 50~60%인 것으로 알려져 있다. 수분 함유율이 전체 퇴비질량의 30% 이하일 때는 생물반응이 저해되며 20% 이하일 때는 반응이 불가능해지게 된다. 또한 너무 높은 함유율 하에서는 입자표면으로의 산소전달에 문제가 생기기 때문에 반응이 저해된다. 산소의 이전율이 대사에 소요되는 소요량을 충족시키지 못하는 경우에는 퇴비화 미생물의 활동은 제한되고 결국에는 혐기성으로 된다. 가스로 채워진 공극을 통한 산소의 확산계수는 0.189 cm<sup>2</sup>/s이지만 물을 통한 산소의 확산계수는  $2.56 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>으로서 약 1만배 가량 더디다. Campbell에 의하면 가스 확산계수가 가스로 채워진 공극의 제공에 비례하듯이 수분함량은 가스확산의 억제도를 예측할 수 있는 유용한 인자라고 하였다.

또한 퇴비내 수분은 미생물의 유기물 분해과정에서 발생하는 데 이 양은 발생된 열에 의한 수분의 증발량에 비하여 매우 적은 양으로 퇴비화가 진행됨에 따라서 점점 수분이 감소하게 된다. 따라서 미생물의 대사과정에서 발생하는 물은 퇴비화 모델과 관리에 있어서 고려되어야 한다. 분해된 유기물질 1 kg 당 0.55~0.80 g의 물이 발생되고 이에 따라 발생하는 열량을 약 25,000 J이라 볼 때 이 열로 인해 10.2 g의 물이 증발되므로 9~13배가 많이 증발되는 것으로 계산된다. 쓰레기 퇴비화의 물질수지에 관한 초기의 연구에서 Wiley와 Pearce는 분해물질 kg 당 0.63 g의 물이 생성됨을 발견하였다. 한편 Griffin은 셀룰로스 kg당 0.55 g의 물이 생성됨을 알았다. Hogen 등은 왕겨와 쌀겨를 퇴비화 할 때 kg당 0.50 ~ 0.53 g의 물이 생성된다고 하였다. 짚과 계분의 퇴비화에 있어서 Harper 등은 분해물질 kg당 0.50 ~ 0.60 g의 물이 생성됨을 알았다. Haug는 이론적인 모형을 사용하여 폐수 슬러지 퇴비화식 분해물질 kg당 0.72 g의

물이 생성 되어야 한다고 계산하였다. 따라서 퇴비화 말기에는 미생물이 기질에 의하여 제한 받기보다는 수분에 의하여 제한받게 된다. 미생물 분해가 진행되면 고온이 되어 증발하기 쉬우나 동시에 유기물 분해에서 수분이 생기기 때문에 시작할 때의 수분 조절만으로 퇴비화를 할 수 있는 경우가 많다. 일반적으로 최적 활동율은 산소의 이용을 저해시키지 않는 최대 수분함량에 의해 달성된다. 퇴비화 초기에 수분함량은 높아야 한다. 그러나 이로 인해 최종제품이 너무 젖어 있거나 퇴비재의 취급이 불편할 정도면 안된다.

#### 다) C/N 비

탄질비는 미생물의 분해대상인 유기물의 특성으로 효과적으로 퇴비화를 진행시키기 위한 가장 중요한 직접적인 영향인자이며 주로 반응속도론적인 면과 퇴비화 후 생성된 퇴비의 질적인 면에 영향을 나타낸다. 탄소는 미생물이 성장하기 위한 에너지원으로, 질소는 세포증식을 위한 단백질 합성에 이용되는데 보통 미생물 세포의 탄질비가 5~15로 퇴비화는 이 수준에 도달할 때까지 지속된다.

퇴비화의 경우에는 분해하기 어려운 유기물도 많고 그 유기탄소가 영양원이 되기도 어려우므로 C/N 비를 30~50으로 선택하여야 한다. 일반적으로 퇴비화에 적합한 폐기물의 초기 탄질율이 20~35로 탄질율이 35보다 높으면 질소부족현상이 나타나기 시작하여 미생물의 증식이 억제되고 따라서 퇴비화의 속도가 늦어진다. 일반적으로 축산분뇨의 경우에는 C/N율이 15~25로 낮은 편인데 돈분의 경우는 5~6정도로 아주 낮아 탄소분이 풍부한 bulking agent의 첨가가 필요하다. 한편 C/N비는 퇴비 숙성도를 간접적으로 파악할 수 있는 지표로도 널리 적용된다.

#### 라) 온도

온도는 퇴비화 과정에서 퇴비화 진행 및 완료여부를 나타내는 지표이며, 퇴비화과정에서는 발열반응이 필수적이다. Finstein은 퇴비화과정 중 온도가 상승하면 유기물의 분해속도가 빨라지고 병원성미생물도 사멸하게 되지만 퇴비화미생물도 사멸하게 된다고 하였다. Willson은 생물학적으로 달성 가능한 최고온도는 82℃이며 이 온도에서 미생물활동과 대사에 의한 발열작용이 중지된다고 하였으며, Ishii는 60℃이상의 온도에서 씨앗이 불활성화 되며 병원성미생물이 사멸된다고 하였다. 일반적으로 병원균 사멸을 위해서는 55~60℃ 이상의 온도로 2~3일간 유지시켜야 한다. 또한 55~60℃ 이상의 온도는 고온성 미생물에 적합한 범위로서 55~60℃ 이상의 온도 이상에서는 미생물의 불활성을 초래하여 충분한 유기질 부분의 감량과 공기량 조절이 필요하며 처음 온도 상승기에서는 빠른 속도로 미생물이 활성화되도록 통기량을 미생물대사에 필요한 만큼만 공급하여 발생된 열에너지가 퇴비더미 내에 그대로 남아있게 하고 이후로는 퇴비더미 내에 설치한 온도감지기로부터 감지되는 온도에 따라 통기량을 조절하여 일정한 온도가 유지되게 하여야 한다.

#### 마) 산소 농도

호기성 퇴비화 과정은 유기물의 호기적 산화분해로서 산소의 존재가 필수적이며, 이 결과 유기물이 분해되어 CO<sub>2</sub> 가스가 생성되는데 산소 부족시 CO<sub>2</sub> 외에 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> 및 유기산 등이 형성되고 악취가 발생하고 유기물 분해가 감소하게 된다. 공기공급은 미생물이 호기적 대사를 할 수 있도록 산소를 공급하고 온도를 조절하고 수분과 CO<sub>2</sub> 및 다른 가스를 제거하는 역할을 한다.

퇴비더미내의 산소의 유지는 이용속도와 공급속도에 의해 결정되며 기질의 높은 밀도와 쉽게 이용할 수 있는 성질 때문에 기질의 이용 속도는 상당히 빨라질 수 있다. 그러나 산소가 결여되면 퇴비화는 크게 지연되며 이것이 퇴비화가 실패하는 흔한 이유이다. Walker와 Harrison은 산소를 제거하면 발열량이 100배 이상 감소됨을 발견하였다.

퇴비재료의 종류와, 수분조절제의 종류 및 퇴비화공법에 따라 최적공기량은 다르지만 Miller는 0.4~0.45 L/vs kg · min.이라 하였으며, Tadahiro는 200~300 mL/L · min.이라 하였고, 그는 퇴비화 초기에는 많은 양의 공기가 필요하며 공기주입량이 적을 경우 퇴비화조 내부가 혐기성 상태가 되어 악취가 발생하고 공기주입량이 많을 경우 과도한 열손실로 정상적인 퇴비화가 진행되기 어려우며, 함수율이나 밀도가 높은 슬러지는 공기를 많이 공급해야 한다고 하였다. Shoda는 하수슬러지의 퇴비화를 위한 반응조의 온도가 50~60℃로 제어될 때 최적공기 공급율은 50~200 mL/L · min.이며, 유기물의 분해속도를 증가시키기 위하여 퇴비화시기별 공기공급율을 달리하는 것이 바람직하다고 하였다.

#### 바) pH

퇴비재료의 pH도 퇴비화효율을 결정하는 중요한 인자로서 퇴비화 초기에는 유기산의 생성으로 pH가 산성으로 나타나지만 점차 시간이 경과함에 따라 암모니아의 발생으로 염기성으로 되고 pH가 5이하로 낮아지면 거의 퇴비화가 이루어지지 않는 것으로 알려져 있으며, Schulze 등은 퇴비화 기간중 분해율은 pH 6~9범위내에서는 pH가 증가할수록 증가하고 퇴비화 초기에 pH가 낮으면 퇴비화가 지연된다고 하였고, 송 등도 pH 11이상에서 퇴비화과정 중 초기 CO<sub>2</sub>발생 소요시일이 4일 정도 지연되었으며 pH 12이상에서는 퇴비화가 불가능하다고 하였으나, 일반적으로 대부분 폐기물의 초기 pH는 퇴비화 공정의 실패를 유발할 정도로 극단적인 수준에 있는 경우는 드물다.

#### 사) 미생물

퇴비화과정은 미생물에 의해 유기물을 분해 안정화시키는 과정으로서 퇴비화 관련 미생물과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, Strom 등은 bacteria가 퇴비화에 가장 중요하게 기여하며, 병원균을 사멸시키는 55℃이상에서의 퇴비화 활동은 주로 고온성 bacteria라고 하였고, Miller 등은 폐수슬러지의 퇴비화과정 중 50~60℃에서 처음 7일 동안 휘발성물질이 40%이상 분해되었으며, 고온에서는 황산염의 환원이 일어나는 것으로 보고하였다.

Strom 등은 퇴비화과정 중 50~60℃범위에서 퇴비화 물질로부터 분리된 세균은 대부분이

Bacillus속이었고, 65°C 이상에는 B. Stearothermophilus만 생존가능하다고 하였으며, Henssen 등은 퇴비화 bacteria는 Bacillus, Chlostridium 및 Pseudomonas라고 하였다. 퇴비화과정 중 중요한 역할을 하는 fungi는 중온범위에서 퇴비화 후반기에 나타나며 기질은 cellulose 및 lignin이며 퇴비화에 관여하는 Actinomycetes는 Stpaptomtces, Thermoactino 및 Thermomonospori라고 하였다 (Fermor 등).

아) Bulking agent

퇴비화과정의 중요한 사항중 하나는 유기물 내에 포함된 수분을 어떠한 방법으로 제어하고 퇴비층 내의 공극을 개량하여 유기물질의 생물학적 분해가 원활히 잘 일어나도록 하는 것이며, 이를 위해 bulking agent를 첨가하게 된다.

Bulking agent로는 나무조각, 톱밥, 짚단, 왕겨 및 생산된 퇴비를 많이 사용하고 있으며 퇴비 내의 공기소통과 수분함량 조절, 탄질율 (C/N)을 조절하는 역할을 하며, 이러한 기능을 하기 위해서 bulking agent는 쉽게 조달 가능하여야 하고, 적절한 분해도를 갖는 carbon rich compound를 다량 함유하여야 하며, 분해도가 적을 때에는 퇴비로부터 쉽게 분리가 가능하여야 하고, 수분 흡수능력이 좋아야 하며, 입자간 구조적 안정성이 있어야 한다.

현재 많이 사용되고 있는 bulking agent들의 성장과 특성들을 Table 3-2에서 보는 바와 같다. 현재 우리나라서는 bulking agent로 톱밥을 가장 많이 사용하고 있으며 일부에서 왕겨와 볏짚도 사용하고 있다. 일부 외국에서 수피 (Bark)를 사용하고 있으나 우리나라에서는 지역적인 면에 있어서 발생량이 적어 공급이 어려운 실정이다.

Table 3-2. 퇴비화에 사용하는 통기개량제의 종류 및 특징

구 분	왕겨(파쇄)	톱밥	수피 (bark)	볏짚	파쇄목편
함수율 (%)	10~15	23.7~36.7	49.4~52.7	8~13	15~30
pH	6.9~7.2	5.1~6.1	5.9	-	5.3~6.5
유기분 (DS%)	78.5~80.0	98.8~99.8	83.5	84~87	98~99.5
C/N	120~160	44~55	1.04	41	
T-C (DS%)	28~40	48.1~49.7	41.5	37.1	46.5~48
T-N (DS%)	0.25~1.05	0.9~1.1	0.4	0.9	0.8~1
K <sub>2</sub> O (%)	0.28	0.08~0.13	0.3	1.39	0.1~0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	1.43	0.04~0.05	0.15	2.60	0.06
입경 (mm)	3이하	3이하	4~19	30	5~20



#### 자) 암모니아의 효과

퇴비화 중에 발생하는 암모니아 가스의 영향에 대해서는 장비의 부식이나 대기오염 등 측면을 제외하고는 전무하다. 암모니아화는 대체로 퇴비화가 활발한 시스템에서 짧은 기간 동안 발생하며 일주일 이내에 종료된다. 버섯재배용 및 화훼용 퇴비 등 최종 질소의 함량이 중요하게 되는 퇴비에서 암모니아의 농도가 연구되었다. 암모니아화는 온도에 좌우되며 10~50℃ 사이에서 반응이 빨리 완결되었다. 암모니아의 농도는 단백질의 농도가 높은 기질에서 최대 1000 ppm 또는 그 이상까지 올라갈 수 있다. 암모니아와 암모늄 사이의 이온평형은 pH에 의해 결정된다. pH가 7 또는 그 이하에서는 거의 암모늄 이온만이 존재한다. 그러나 pH가 9 또는 그 이상이 되면 거의 자유암모니아는 당류와 반응한다. 그리고 카복실기, 카보닐기, 에놀기, 페놀기, 키논 하이드록실기 또는 관능기 근처의 불포화 탄소와 반응하여 유기물로부터 안정된 반응산물을 형성할 수 있다. 이러한 반응 또한 온도에 따라 증가한다. 산소가 존재하기 때문에 훨씬 더 많은 암모니아가 유기물과 반응하게 된다. 퇴비제품의 최종이용에 있어서는 암모니아가 안정한 형태로 변화되어 더 이상의 암모니화가 일어나지 않을 것이 중요하다. 자유 암모니아는 대단히 반응성이 강하며 토양에서는 유기물을 용해시켜 다음 단계의 분해를 쉽게 해준다. 혐기성 조건에서 암모니아의 농도가 높게 되면 메탄 생성균을 억제하여 휘발성 지방산이 축적된다. 자유암모니아는 많은 미생물 개체군에게 유독하기 때문에 개체군의 구조 변동을 가져올 수 있다.

## 제 2 절 실험적 접근방법

### 1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

#### 가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

##### 1) 공시재료

본 실험에 사용된 공시 축산폐수는 산청군 축산폐수 공공처리시설에 유입되어 종합협잡물처리기, 조정조 및 원심분리를 거친 축산폐수를 공시 원수로 채취하였으며, 축산폐수 종류별 수처리효율 조사를 위해 축산폐수를 우분뇨, 돈분뇨 및 계분뇨로 구분하여 각 원수를 채취한 후 상기 공시 축산폐수와 동일한 전처리를 수행한 후 사용하였다. 공시 여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다.

공시 축산폐수의 이화학적 특성은 Table 3-3과 같고, 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성은 Table 3-4 및 3-5에서 보는 바와 같다. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 여재는 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트의 총 4종류를 사용하였고, 여재의 입도분포도는 Fig. 3-2에서 보는 바와 같다. 원 여재인 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트의 유효입경(여재를 입경순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10%되는 부분의 여재의 입경 ;  $d_{10}$ )은 각각 1.2, 1.3, 1.4 및 1.4 mm이었으며, 균등계수(여재를 입경순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10%되는 입경과의 비 ;  $d_{60} d_{10}^{-1}$ )는 각각 2.92, 2.07, 2.14 및 2.86이었다. 그리고 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대 및 노랑꽃창포 등 2종이었으며, 모든 수생식물은 야외노지에서 성장한 수초를 분주하여 이식하였다.

Table 3-3. 공시 축산폐수의 이화학적 특성

Items	pH	EC	DO	COD	SS	T-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	T-P	PO <sub>4</sub> -P
		(dS m <sup>-1</sup> )	----- (mg L <sup>-1</sup> ) -----								
Livestock wastewater	6.5	2.42	5.4	2,485	3,658	2,520	2,110	118	33.6	125.9	89.7
Cattle manure	6.9	2.56	6.2	3,241	2,916	3,246	2,560	125	37.3	150.5	87.9
Pig manure	6.8	2.50	4.9	2,620	3,420	2,875	2,254	131	35.4	136.4	91.8
Chicken manure	7.1	3.12	5.1	1,983	2,851	4,410	3,320	141	38.2	246.3	101.4

Table 3-4. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 여재의 물리학적 특성

	Porosity (%)	Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	d <sub>10</sub> (mm)	d <sub>60</sub> (mm)	Uniformity coefficient (d <sub>60</sub> d <sub>10</sub> <sup>-1</sup> )
Coarse sand	29	1.58	1.2	3.5	2.92
Broken stone	38	1.47	1.3	2.7	2.07
Calcite	36	1.60	1.4	3.0	2.14
Zeolite	39	1.24	1.4	4.0	2.86

Table 3-5. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 여재의 이화학적 특성

	pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M (%)	T-N ----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----	T-P
Coarse sand	7.9	0.05	0.54	15.9	23.0
Broken stone	7.8	0.04	0.85	3.9	20.6
Calcite	8.9	0.12	0.20	11.0	72.8
Zeolite	5.7	0.09	0.80	7577.0	198.0

	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
Coarse sand	1,638	2,212	489	464	2,428	0.2	51.0	15
Broken stone	1,394	1,031	1,942	154	4,955	2.4	264.0	18
Calcite	32	407,540	9,555	153	5,251	2.7	214.0	150
Zeolite	2153	7.1	700	245	640	63.0	6.4	13

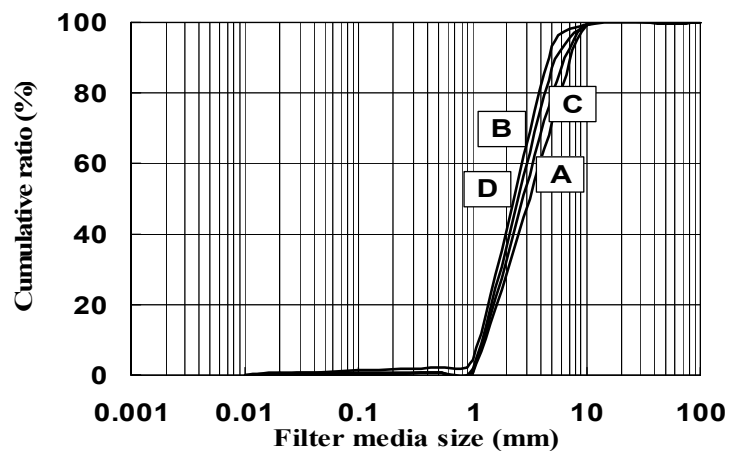


Fig. 3-2. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 여재의 입경분포도.

A : Coarse sand, B : Broken stone, C : Calcite, D : Zeolite.

## 2) 실험장치

### 가) Column 실험장치

여재종류별 암모니아성 질소와 인의 처리효율을 조사하기 위한 column 실험장치는 Fig. 3-3과 같이 직경이 21 mm이고 길이가 365 mm인 column을 사용하였으며, column내부에 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트를 각각 100 g씩 충전하였다. 실험에 사용된 공시용액은 암모니아성 질소와 인 표준용액을 각각  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 되게 조제하여 사용하였으며, 공시용액은 정량펌프를 이용하여  $300 \text{ mL day}^{-1}$  (HRT 3.52 hr)되게 column상부에 연속적으로 30일 동안 주입하였다. Column내부의 용액수위는 용액으로 포화시키기 위해 column내 여재의 표층까지 항상 유지되도록 하였다.

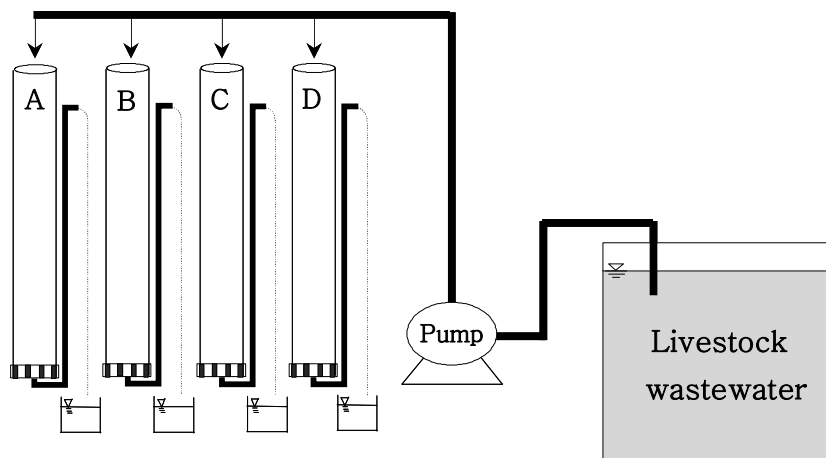


Fig. 3-3. Column 실험장치 설계도.

A : Coarse sand, B : Broken stone, C : Calcite, D : Zeolite.

### 나) 소형 축산폐수처리장치

소형 축산폐수처리장치는 호기성조, 혐기성조 및 무산소조를 조합방법별로 구분하여 호기-혐기 조합형, 호기-호기 조합형, 호기-무산소 조합형, 혐기-혐기 조합형, 혐기-호기 조합형, 혐기-무산소 조합형, 무산소-혐기 조합형, 무산소-호기 조합형 및 무산소-무산소 조합형으로 하여 총 9개의 조합으로 설계 및 시공하였다. 그리고 따로 여재 종류별 처리효율 비교를 위해 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 여재종류를 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트로 각각 구분하여 설계 및 시공하였다. 실제 시공전경은 Fig. 3-5~3-7에서 보는 바와 같다.

#### (1) 호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 설계 및 시공

호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <A>와 같이 호기성조와 혐기성조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 호기성조 및 혐기성조의 크기는 공히 직

경 0.60 m × 높이 0.72 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.20 m<sup>3</sup>되게 제작하였다. 소형 축산폐수처리장치의 호기성조 및 혐기성조에 각각 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트를 충전하였고, 여재 종류별 주입위치는 각 여재를 하부에서 높이 0.7 m까지 충전하였다. 호기성조에는 통기관을 각조의 밑바닥 하부로 부터 0.35 m위치에 각각 설치하여 자연통풍이 되게 하였고, 혐기성조에는 체류시간을 최대화하기 위해 혐기성조를 3등분으로 구획하였다. 호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 호기성조에 축산폐수를 수직여과방식으로 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 혐기성조에 유입되게 하였고, 혐기성조에 유입된 축산폐수는 3등분된 혐기성조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

#### (2) 호기-호기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 설계 및 시공

호기-호기 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <B>와 같이 호기성조와 호기성조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 호기-호기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 1차 및 2차 호기성조에는 각각 왕사를 주입하였다. 1차 및 2차 호기성조 크기 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 호기-호기 조합형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 1차 호기성조에 축산폐수를 수직여과방식으로 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 2차 호기성조에 유입되게 하였고, 2차 호기성조에 유입된 축산폐수는 다시 수직여과방식으로 흐르게 하였다.

#### (3) 호기-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치의 설계 및 시공

호기-무산소 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <C>와 같이 호기성조와 무산소조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 무산소조의 크기는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 사용한 조와 동일한 크기로 제작하였고, 조 표면을 덮어 무산소조내로 산소 유입을 완전히 차단하였다. 호기-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치의 호기성조와 무산소조에는 각각 왕사를 주입하였다. 호기성조 및 무산소조의 크기 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 호기-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 호기성조에 축산폐수를 유입시켜 수직여과방식으로 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 무산소조에 유입되게 하였고, 무산소조에 유입된 축산폐수는 3등분된 무산소조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

#### (4) 혐기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 설계 및 시공

혐기-혐기 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <D>와 같이 혐기성조와 혐기성조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 혐기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 1차 및 2차 혐기성조에는 각각 왕사를 주입하였다. 1차 및 2차 혐기성조의 크기 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 혐기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 1차 혐기성조에 축산폐수를 유입시켜 수평여과방식으로

처리하여 유출된 혐기성조 처리수는 자연유하식으로 2차 혐기성조에 유입되게 하였고, 혐기성조에 유입된 축산폐수는 3등분된 혐기성조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

#### (5) 혐기-호기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 설계 및 시공

혐기-호기 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <E>와 같이 혐기성조와 호기성조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 혐기-호기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 혐기성조 및 호기성조에는 각각 왕사를 주입하였다. 혐기성조와 호기성조 각 크기, 여재종류 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 혐기성조에 축산폐수를 유입시켜 수평의 지그재그 방향의 수평여과 방식으로 처리하여 유출된 혐기성조 처리수는 자연유하식으로 호기성조에 유입되게 하였고, 호기성조에 유입된 축산폐수는 수직여과방식으로 처리하여 유출되게 하였다.

#### (6) 혐기-무산소 조합형 소형 축산폐수 처리장치의 설계 및 시공

혐기-무산소 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <F>와 같이 혐기성조와 무산소조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 혐기-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치의 혐기성조와 무산소조에는 각각 왕사를 주입하였다. 혐기성조와 무산소조의 크기 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 혐기-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 1차 혐기성조에 축산폐수를 유입시켜 수평여과방식으로 처리하여 유출된 혐기성조 처리수는 자연유하식으로 2차 무산소조로 유입되게 하였고, 무산소조에 유입된 축산폐수는 3등분된 무산소조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

#### (7) 무산소-혐기 조합형 소형 축산폐수 처리장치의 설계 및 시공

무산소-혐기 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <G>와 같이 무산소조와 혐기성조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 무산소-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치의 무산소조와 혐기성조에는 각각 왕사를 주입하였다. 무산소조와 혐기성조의 크기 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 무산소-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 1차 무산소조에 축산폐수를 유입시켜 수평여과방식으로 처리하여 유출된 무산소조 처리수는 자연유하식으로 2차 혐기성조에 유입되게 하였고, 혐기성조에 유입된 축산폐수는 3등분된 혐기성조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

#### (8) 무산소-호기 조합형 소형 축산폐수 처리장치의 설계 및 시공

무산소-호기 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <H>와 같이 무산소조와 호기성조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 무산소-호기 조합형 소형 축산폐수처리장치의

무산소조 및 호기성조에는 각각 왕사를 주입하였다. 무산소조와 호기성조 각 크기, 여재종류 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 무산소조에 축산폐수를 유입시켜 수평의 지그재그 방향의 수평여과방식으로 처리하여 유출된 무산소조 처리수는 자연유하식으로 호기성조에 유입되게 하였고, 호기성조에 유입된 축산폐수는 수직여과방식으로 처리하여 유출되게 하였다.

(9) 무산소-무산소 조합형 소형 축산폐수 처리장치의 설계 및 시공

무산소-무산소 조합형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-4 <I>와 같이 무산소조와 무산소조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 무산소-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치의 1차 및 2차 무산소조에는 각각 왕사를 주입하였다. 1차 및 2차 무산소조의 크기 및 여재주입 위치는 상기 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치와 동일하게 하였다. 무산소-무산소 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 1차 무산소조에 축산폐수를 유입시켜 수평여과방식으로 처리하여 유출된 무산소조 처리수는 자연유하식으로 2차 무산소조에 유입되게 하였고, 2차 무산소조에 유입된 축산폐수는 3등분된 무산소조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

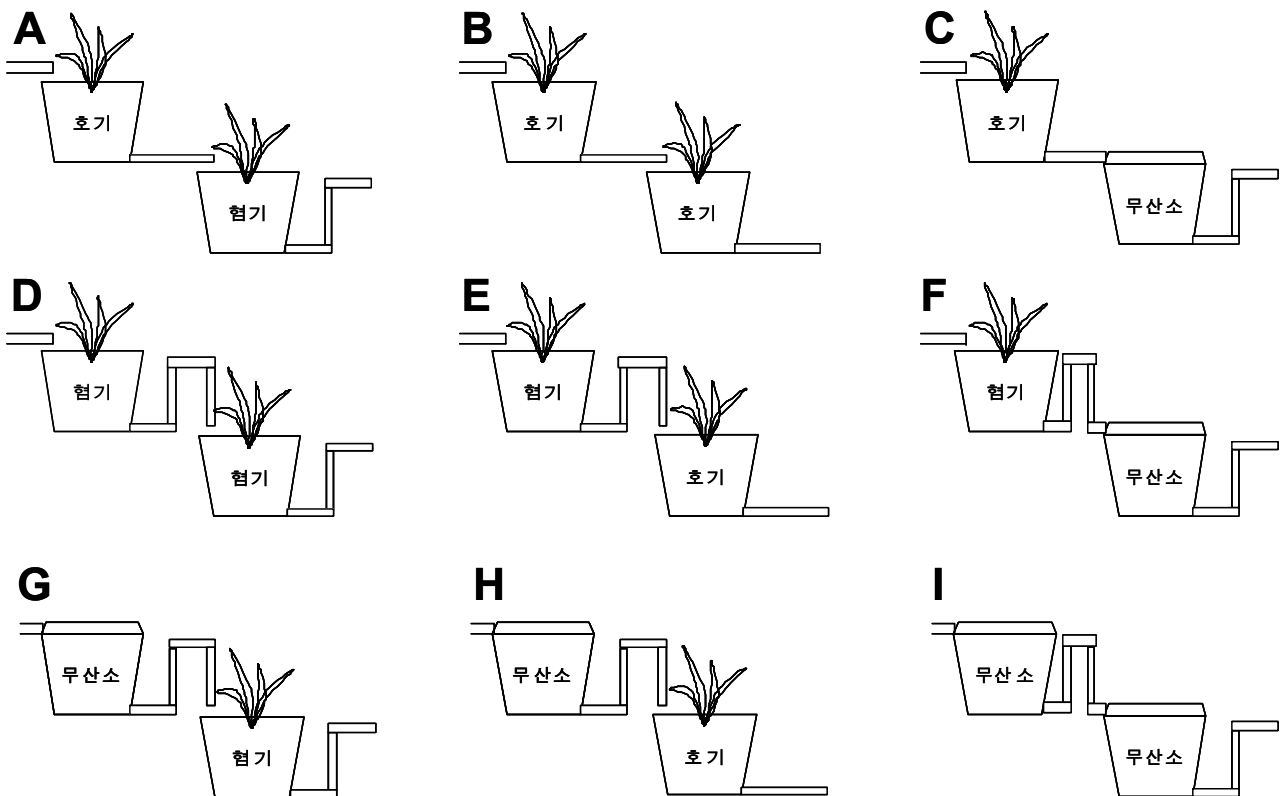


Fig. 3-4. 소형 축산폐수처리장치의 설계도.



소형 축산폐수처리장치의 위치



기초 터파기



평탄화 작업



배수로 작업



호기성조 배관작업



혐기성조/무산소조 배관작업

Fig. 3-5. 소형 축산폐수처리장치의 시공진경.





혐기성조/무산소조 배관 조립



호기성조 통기관 조립



호기성조 통기관 완성



1차 처리조 설치



2차 처리조 설치



1차 및 2차 처리조 완공

Fig. 3-6. 축산폐수처리장치의 시공진경.



공시여재



여재 제거름



여재 충전



호기성조에 수생식물 이식



혐기성조에 수생식물 이식



소형 축산폐수처리장치 완공전경

Fig. 3-7. 축산폐수처리장치의 시공전경.

### 3) 실험방법

#### 가) 축산폐수 종류별 이화학적 특성 조사

축산폐수 종류별 이화학적 특성조사를 위해 서부경남지역의 실제 축산농가에서 축산폐수를 종류별로 채취하여 이화학적 특성을 조사하였다. 우분뇨는 경남 고성군 영오면 성산리 소 축사에서 채취하였고, 돈분뇨는 경남 사천 동서동 영복마을과 경남 남해군 창선면 수산리 마을의 돼지 축사에서 각각 채취하였다. 계분뇨는 경남 진주지 일반성면 답천리의 양계장에서 채취하였다. 채취된 축산폐수는 실험실로 운반한 후 축산폐수의 이화학적 특성을 조사하였다.

#### 나) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성 조사

여재 종류별 오염물질의 흡착특성 조사는 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식을 적용하였으며, 그 결과를 토대로 여재 종류별 오염물질의 흡착능, 흡착경향 및 결합세기 등을 조사하였다.

여재 종류별 오염물질의 흡착특성 조사를 위한 Freundlich 등온흡착식의 일반식은 다음 (1)과 같다.

$$(1) q = KC^{\frac{1}{n}}$$

q : 흡착제 단위 g당 흡착된 오염물질의 양(mg g<sup>-1</sup>).

C : 평형상태에서 남은 오염물질농도(mg L<sup>-1</sup>).

K : 오염물질의 흡착능력.

$\frac{1}{n}$  : 오염물질의 흡착경향.

여기서 q는 흡착제 단위 g당 오염물질의 흡착량(mg)이고, C는 평형상태에서 용액중에 남아 있는 오염물질의 평형농도이며, 그리고 K와 1/n은 Freundlich 상수로서 K는 오염물질의 흡착능을 나타내고 1/n은 흡착경향을 나타낸다.

(1)식의 양변에 log를 취하면 아래 (2)식과 같이 되고, 이것을 y=ax±b의 1차방정식으로 나타내면 (3)식과 같이 된다.

$$(2) \log q = \frac{1}{n} \log C + \log K$$

$$(3) y = ax \pm b$$

여재 종류별 오염물질의 흡착특성 조사를 위한 Langmuir 등온흡착식의 일반식은 다음 (1)식과 같다.

$$(1) q = \frac{abC}{1+bC}$$

q : 흡착제 단위 g당 흡착된 오염물질의 양(mg g<sup>-1</sup>).

C : 평형상태에서 남은 오염물질농도( $\text{mg L}^{-1}$ ).

a : 최대흡착량에 관한 상수 혹은 최대흡착능력( $\text{mg g}^{-1}$ ).

b : 흡착에너지에 관한 상수.

여기서 q는 단위 g당 오염물질 흡착량 (mg)을 나타내며, C는 평형상태에서 용액중에 남아있는 오염물질의 평형농도, 그리고 a와 b는 경험적인 상수로서 a는 최대 흡착능을 나타내고 b는 흡착결합력을 나타낸다. (1)식을 다시 정리하면 다음 (2)식과 같이 되고 이것을  $y=ax\pm b$ 의 1차 방정식으로 나타내면 (3)식과 같이 된다.

$$(2) \frac{C}{q} = \frac{1}{a} \cdot C + \frac{1}{ab}$$

$$(3) y=ax\pm b$$

#### (1) 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착특성

여재종류별 암모니아성 질소의 흡착실험은 왕사, 쇠석, 제올라이트 및 방해석을 각각 20, 10, 5 및 1 g씩 삼각플라스크에 주입하고, 암모니아 표준용액 ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )을 각각 0, 1, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160 및 320  $\text{mg L}^{-1}$ 농도가 되게 제조하여 이들 용액을 각 여재가 충전된 삼각플라스크에 각각 100 mL되게 주입하여 밀봉한 후 삼각플라스크를 shaking incubator에서 175 rpm으로 24시간 온도 20°C하에 항온시켜 침전시킨 후 Whatman GF/C filter로서 필터한 후 Standard Method (APHA, 1995)의 인도페놀법에 의해 암모니아성 질소농도를 측정하여 각 여재 (흡착제)의 단위 g당 흡착된 암모니아성 질소의 양과 평형상태에서 용액 중 남아있는 암모니아성 질소의 농도를 구하여 이를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 적용하였다.

Freundlich 등온흡착식에 의한 암모니아성 질소의 흡착능 조사는 평형상태에서 용액 중에 남아있는 암모니아성 질소의 농도 ( $\log C$ )를 X축으로 하고, 여재 (흡착제) 단위 g당 암모니아성 질소의 흡착량 ( $\log q$ )을 Y축으로 하여 이들 관계를  $Y=AX+B$ 의 직선회귀식으로 나타내었으며, 이 직선식의 기울기를 이용하여 암모니아성 질소의 흡착강도 ( $1/n$ )를 구하고, 절편 (B)을 이용하여 암모니아성 질소의 흡착능력 (K)을 구하였다.

Langmuir 등온흡착식에 의한 암모니아성 질소의 흡착능 조사는 평형상태에서 용액중에 남아있는 암모니아성 질소의 농도 (C)를 X축으로 하고, 평형농도 (C)를 흡착제 단위 g당 암모니아성 질소의 흡착량 (q)으로 나눈 값 ( $C/q$ )을 Y축으로 하여 이들 관계를  $Y=AX\pm B$ 의 직선회귀식으로 나타내었으며, 이 직선식의 기울기를 이용하여 암모니아성 질소의 최대 흡착능 (a)을 구하였고, 절편 (B)을 이용하여 암모니아성 질소의 결합세기 (b)를 구하였다.

#### (2) 여재 종류별 인의 흡착특성

여재종류별 인의 흡착실험은 왕사, 쇠석, 제올라이트 및 방해석을 각각 1, 5, 10 및 20 g씩 삼각플라스크에 주입하고, 여기에 인 표준용액( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )을 각각 0, 1, 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160

및  $320 \text{ mg L}^{-1}$  농도가 되게 제조하여 이들 용액을 각 여재가 충전된 삼각플라스크에 각각 100 mL 되게 주입하여 밀봉한 후 삼각플라스크를 shaking incubator에서 175 rpm으로 24시간 20°C 하에 항온시켜 침전시킨 후 Whatman GF/C filter로서 필터한 후 Standard Method (APHA, 1995)의 아스코르빈산 환원법에 의해 인 농도를 측정하여 각 여재 (흡착제)의 단위 g 당 흡착된 인의 양과 평형상태에서 용액 중 남아있는 인의 농도를 구하여 이를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 적용하였으며, 등온흡착식을 이용한 인 흡착능 조사는 상기 (1)항의 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착특성과 같다.

### (3) 질소 및 인 흡착능에 따른 최적 등온흡착식 선정

실제 축산폐수처리장에서 암모니아성 질소의 정확한 흡착량을 예측하기 위하여 여재종류별 실제 흡착실험에서 각 여재의 암모니아성 질소의 평형농도에 따른 암모니아성 질소의 흡착량에 상기 가)항의 여재 종류별 암모니아성 질소의 흡착특성 조사에서 구한 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식의 각 상수를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착 일반식을 대입하여 나온 각 등온흡착식을 동시에 적용하여 암모니아성 질소의 흡착량과 가장 일치되는 등온흡착식을 선정하였다.

장차 실제 축산폐수처리장에서 인의 정확한 흡착량을 예측하기 위하여 여재종류별 실제 흡착실험에서 각 여재의 인의 평형농도에 따른 인의 흡착량에 상기 나)항의 여재 종류별 인의 흡착특성 조사에서 구한 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식의 각 상수를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착 일반식을 대입하여 나온 각 등온흡착식을 동시에 적용하여 인의 흡착량과 가장 일치되는 등온흡착식을 선정하였다.

다) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리

(1) 처리시일에 따른 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인 처리

처리시일에 따른 여재종류별 암모니아성 질소 및 인의 처리효율 조사는 50 mg L<sup>-1</sup>되게 제조한 암모니아성 질소와 인 표준용액을 정량펌프를 이용하여 column에 300 mL day<sup>-1</sup> (HRT 3.52hr)씩 하향류로 연속적으로 30일 동안 주입하여, 처리 1일부터 30일까지 매일 1회씩 유출수를 채취하여 암모니아성 질소와 인의 함량을 조사하였다.

(2) 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량

Column실험에서의 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량은 처리 30일 동안 유입된 암모니아성 질소 및 인의 총 유입량에서 총 유출량을 제외한 양으로 계산하였다. 암모니아성 질소 및 인의 총 유입량은 유입된 암모니아성 질소 또는 인 농도 (mg L<sup>-1</sup>)×유입 암모니아성 질소 또는 인 용액량 (L 30day<sup>-1</sup>)으로 산출하였고, 총 유출량은 유출된 암모니아성 질소 또는 인 농도 (mg L<sup>-1</sup>)×유출 암모니아성 질소 또는 인 용액량 (L 30day<sup>-1</sup>)으로 산출하였다.

라) 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험

(1) 소형축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 조사

소형 축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 조사를 위해서 여재종류별, 처리공법의 조합방법별, 축산폐수 부하량별, 축산폐수 종류별, 특수여재 주입별 및 수생식물을 이용한 전처리방법별로 각각 구분하여 수처리효율을 조사하였다.

(가) 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장치에서 최적 조건 연구

자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치에서 최적 조건 조사를 위해 여재 종류별, 처리공법의 조합방법별 및 축산폐수 부하량별로 구분하여 최적여재, 최적공법 및 최적 부하량을 조사하였다.

① 여재종류에 따른 수처리 효율

여재 종류에 따른 수처리 효율조사는 호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 여재를 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트로 각각 구분하여 조립한 후 축산폐수 부하량을 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 한 조건하에서 pH, EC, DO, COD, T-N, T-P, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

② 처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율

처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율 조사는 자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치를 호기-혐기 조합형, 호기-호기 조합형, 호기-무산소 조합형, 혐기-혐기 조합형, 혐기-호기 조합형, 혐기-무산소 조합형, 무산소-혐기 조합형, 무산소-호기 조합형 및 무산소-무산소 조합형의 총 9개 조합으로 구분하여 설계 및 시공하여 축산폐수 부하량을 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 한

조건하에서 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율을 각각 조사하였다.

### ③ 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율

축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 상기 ①항의 여재종류에 따른 수처리 효율 조사결과 최적 여재와 ②항의 처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율 조사결과 최적 조합방법 하에서 축산폐수 부하량에 대한 대응성을 조사하기 위해 축산폐수 부하량을 50, 100 및 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 달리하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

### (나) 자원순환형 축산폐수 처리기술개발을 위한 기반 연구

자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기반연구를 위해 상기 (가) 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장치에서의 최적 조건하에서 축산폐수 처리효율을 향상시키고, 생산되는 자원을 재활용하기 위해 축산폐수 종류별, 특수여재 주입별 및 수생식물을 이용한 전처리 방법별로 구분하여 각각의 수처리 효율을 조사하였다.

#### ① 축산폐수 종류별 수처리 효율

축산폐수 종류별 수처리 효율 조사는 본 축산폐수처리장치가 다양한 축산폐수에 대한 대응성을 조사하기 위해 상기 (가), ①항의 여재종류에 따른 수처리 효율 조사에서의 최적 여재와 (가), ②항의 처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율 조사에서의 최적 조합방법, 그리고 (가), ③항의 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사에서의 최적 부하량하에서 축산폐수를 우분뇨, 돈분뇨 및 계분뇨로 각각 구분하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

#### ② 특수여재 주입에 따른 수처리 효율

질소와 인 처리효율이 우수한 특수여재 주입에 따른 수처리 효율 조사는 상기 (가), ①항의 여재종류에 따른 수처리 효율 조사에서의 최적 여재와 (가), ②항의 처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율 조사에서의 최적 조합방법, 그리고 (가), ③항의 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사에서의 최적 부하량하에서 질소와 인의 처리효율 향상을 위해 소형 축산폐수처리장치에 호기성조에는 질소처리능력이 우수한 제올라이트를, 혐기성조에는 인 처리능력이 우수한 방해석을 전체 여재의 30%되게 첨가하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

#### ③ 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 수처리 효율

자원순환형 축산폐수처리장에서 자원의 재활용을 위한 기초연구를 위해 본 축산폐수처리장치에서 생육된 수생식물을 건조 파쇄한 후 퇴비화를 위한 수분조절제로 사용하여 현행 수분조절제인 톱밥의 대체제와 축산폐수의 전처리를 통한 수처리 효율 향상방안을 동시에 달성하기 위해 수생식물의 수분흡수율, 수생식물의 축산폐수 전처리 효율 조사 및 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 전처리 유무에 따른 수처리 효율을 각각 조사하였다.

#### ㉑ 수생식물의 수분흡수율

수분흡수율 조사를 위한 수생식물 시료는 호기성조에 성장한 갈대와 혐기성조에 성장한 노랑꽃창포를 축산폐수의 전처리제와 퇴비화의 수분조절제로 활용하기 위해 수확하여 건조하고 섬유조직이 일정하게 분포되도록 3~5 mm의 크기로 분쇄하여 수분흡수율을 조사하였다. 수분흡수율 비교를 위해 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 수분조절제인 벚짚과 톱밥을 동일한 방법으로 조제하여 수분흡수율을 함께 조사하였다. 수생식물의 수분흡수율 조사는 모든 재료를 120℃에서 2시간 동안 건조하여 항량이 되도록 데시케이터에서 방냉 후 전자저울을 이용하여 10 g씩 정량하고, 증류수에 1시간동안 침지하여 수분을 흡수시켜 수분흡수 전후의 중량을 측정하여 수분흡수율을 조사하였다.

#### ㉒ 수생식물의 축산폐수 전처리 효율

수분조절제로 제조된 수생식물의 축산폐수 전처리 효율 조사는 상기 ㉑항의 시료 조제방법에 따라 조제된 수생식물 시료에 공시 축산폐수를 여과시켜 전처리하고, 전처리된 축산폐수 중의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

#### ㉓ 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 전처리 유무에 따른 수처리 효율

자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기반연구를 위해 본 축산폐수처리장치에서 생육된 수생식물을 건조 파쇄한 후 퇴비화를 위한 수분조절제로 사용하여 현행 수분조절제인 톱밥의 대체제와 축산폐수의 전처리를 통한 수처리 효율 향상방안을 동시에 달성하고자 소형 축산폐수처리장치에 축산폐수를 주입하기 전에 파쇄된 수생식물을 이용하여 1차적으로 여과하여 파쇄된 수생식물에 남은 영양분들은 퇴비화로 재활용하고, 1차 여과된 축산폐수를 상기 (가)항의 축산폐수처리장치에서 최적조건 연구에서의 최적조건하에서 축산폐수 부하량을  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 하여 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율을 각각 조사하였다.

### (2) 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성 조사

#### (가) 여재의 이화학적 특성

자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치에 채워 넣은 여재의 이화학적 특성 조사는 소형 축산폐수처리장치 시설직전의 공시여재와 2009년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 2개월), 2009년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 4개월) 및 2009년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 6개월)에 본 축산폐수처리장치의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 각조의 분석용 여재는 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 각각 조사하였다.

#### (나) 여재 표면의 무기성분 흡착특성

소형 축산폐수처리장치에 채워 넣은 여재 표면의 무기성분 흡착특성 조사는 축산폐수처리장치 시공직전의 공시여재와 2009년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 6개월)에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 여재 표면의 무기성분을 SEM 및 EDS로 각각 분석하였다.



### (3) 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량

#### (가) 수생식물의 생육상황

자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치의 수생식물은 2009년 6월 1일에 이식하였으며, 호기성조에는 갈대를 이식하였고, 혐기성조에는 노랑꽃창포를 각각 이식하였으며, 무산소조에는 수생식물을 이식하지 않았다. 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 조사는 2009년 8월 1일 (수생식물 이식 후 2개월), 2009년 10월 1일 (수생식물 이식 후 4개월), 2009년 12월 1일 (수생식물 이식 후 6개월)에 건물중량 등을 각각 조사하였다.

#### (나) 수생식물의 무기성분 함량

소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 무기성분 함량 조사는 2009년 8월 1일 (수생식물이식 후 2개월), 2009년 10월 1일 (수생식물 이식 후 4개월) 및 2009년 12월 1일 (수생식물 이식 후 6개월)에 채취한 식물체의 T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn을 각각 조사하였다. 수생식물의 무기성분 함량은 생육상황 조사시 채취한 수생식물을 각각 조사하였다.

### (4) 소형 축산폐수처리장치에서의 미생물상 조사

#### (가) 여재 표면의 미생물상

소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 표면 부착미생물은 축산폐수 처리시기별로 총세균, 암모니아산화균, 질산환원균, 탈질균 및 아질산산화균 등을 각각 조사하였다. 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 표면 부착미생물은 2009년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 2개월), 2009년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 4개월) 및 2009년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 6개월)에 본 축산폐수처리장치의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 각조의 분석용 여재는 각조의 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 조사하였다.

#### (나) 여재 표면의 생물막 부착상태

여재 표면의 생물막 부착상태 조사는 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리 6개월 후의 여재를 각 여재별로 채취하여 전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다.

#### (다) 축산폐수 중 미생물상 변화

축산폐수 중 미생물상 조사는 호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 여재를 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트로 각각 구분하여 조립한 후 축산폐수 부하량을  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 한 조건하에서 일반세균 및 대장균군을 각각 조사하였다. 일반세균 및 대장균군의 조사시기는 소형 축산폐수처리장치에서 수처리 효율 조사와 동일한 시기에 조사하였다.

#### 4) 조사시기

소형 축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 조사는 2009년 6월부터 2010년 1월 31일까지 매달 실시하였으며, 한 조건에서 1개월간 운전하였다. 시료의 채취는 처음 3주간은 1주 1회, 마지막주에는 격일로 4회 분석하여, 총 7회 분석한 결과를 평균하여 각 조건에서의 수처리 효율을 구하였다.

소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성 조사는 축산폐수처리장치 시공직전, 2009년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 2개월), 2009년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 4개월) 및 2009년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 6개월)에 본 축산폐수처리장치의 여재를 채취하여 조사하였다.

축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육 조사는 2009년 8월 1일 (수생식물 이식 후 2개월), 2009년 10월 1일 (수생식물 이식 후 4개월) 및 2009년 12월 1일 (수생식물 이식 후 6개월)에 각각 조사하였다.

본 소형 축산폐수처리장치에서 여재 중의 미생물상 조사는 축산폐수처리장치 시공직전, 2009년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 2개월), 2009년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 4개월) 및 2009년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 6개월)에 본 축산폐수처리장치의 여재를 채취하여 조사하였다.

축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 미생물상 조사는 최적조건인 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량을 50, 100 및 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 달리하여 일반세균 및 대장균군을 각각 조사하였다. 일반세균 및 대장균군의 조사시기는 소형 축산폐수처리장치에서 수처리 효율 조사와 동일한 시기에 조사하였다.

#### 5) 분석방법

##### 1) 수질

수질 분석은 수질오염공정시험법 및 APHA의 standard method 준하여 다음과 같이 하였다 (Kim et. al., 2001; APHA, 1995). 수질의 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany), DO는 윙클러 아지드화나트륨 변법, COD는 산성 KMnO<sub>4</sub>법, SS는 유리섬유여과지법, T-N은 자외선 흡광광도법, NH<sub>4</sub>-N은 인도페놀법, NO<sub>3</sub>-N은 부루신법 및 T-P는 아스코르빈산 환원법으로 각각 분석하였다. 축산폐수 중 일반세균 및 대장균군은 평판집락법으로 분석하였다.

##### 2) 여재

여재 분석은 농촌진흥청의 토양화학분석법 (토양, 식물체, 토양미생물)에 준하여 다음과 같이 하였다 (Kim et. al., 1998). pH는 초자전극법 및 EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 각각 분석하였으며, 유기물은 Tyurin법, T-N은 Kjeldahl법 및 T-P는 Vanado molybdate법으로 각각 분석하였다. 그리고 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn의 분석은 시료를 습식분해액으로 분해시킨 여액을 적당히 희석하여 atomic absorption spectrophotometer (Shimadzu AA-680, Japan)로 각각 분석하였다.

소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 무기성분 흡착특성은 소형 축산폐수처리장치 운전 4개월 후의 여재를 채취하여 멸균증류수로 3회 세척하여 2.5% glutaraldehyde로 실온에서 2시간 전 고정시킨 후 1% osmium tetroxide로 24시간 후 고정 시켰다. 이때 사용한 모든 시약의 희석은 0.1 M 인산 완충용액 (pH 7.0)으로 하였으며, 동일한 완충용액으로 세척하였다. 시료를 연속적으로 60, 70, 80, 90 및 100%의 ethanol로 탈수하고, hexamethyl disilazane로 임계점으로 건조한 후 gold coating 하여 Scanning Electron Micrograph (SEM; Jeol JSM-6380LV, Japan)으로 관찰 후 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS; Jeol JSM-6380LV, Japan)로 분석하였다.

### 3) 식물체

식물체 분석은 농촌진흥청의 토양화학분석법 (토양, 식물체, 토양미생물)에 준하여 다음과 같이 하였다 (Kim et al., 1998). 식물체의 분석은 시료를 습식분해액 ( $H_2SO_4:HClO_4 = 1:1$ )으로 분해시킨 다음 T-N은 Kjeldahl법 및 T-P는 Vanado molybdate법으로 각각 분석하였다. 그리고 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn의 분석은 습식분해액으로 분해시킨 여액을 적당히 희석하여 atomic absorption spectrophotometer (Shimadzu AA-680, Japan)로 각각 분석하였다.

### 4) 미생물

여재 중 미생물 분석은 농촌진흥청의 토양화학분석법 (토양, 식물체, 토양미생물)에 준하여 다음과 같이 하였다. 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 생물막 및 미생물상을 조사하기 위해 시료를 멸균한 0.9% NaCl 용액에 적당하게 희석한 후 각각의 선택배지를 사용하여 다음과 같이 계수하였다. 총세균은 PCA배지에 희석액을 접종하여 29°C에서 48시간, 사상균은 Rose-bengal agar배지에 희석액을 접종하여 29°C에서 5일간, 박테리아는 NA배지에 희석액을 접종하여 29°C에서 48시간동안 각각 배양하여 형성된 콜로니를 희석평판법으로 측정하였다. 암모니아산화균은 시험관에 배지를 분주하여 희석액을 접종하였고, 이때 2~3개의 무접종 시험관과 함께 29°C에서 4일간 배양 후 Griess liosvay 시약으로 발색시켜 (적색 또는 갈색) 발색유무에 따라 희석정도법으로 계수하였다. 2~3분 후 미발색 시험관에 소량의 아연분말을 가해서 적색으로 발색되는 것은 일차 성장된  $NO_2^-$ 가 공존하는 아질산산화세균에 의해서  $NO_3^-$ 까지 산화된 것으로 판정하고 같이 계수하였다. 아질산산화균 (nitrite oxidizing bacteria)은 암모니아산화균 계수방법에 준하여 Griess liosvay 시약을 떨어뜨려 무발색되는 것을 계수하였다. 셀룰로오스분해균은 TY-CMC배지에 희석액을 접종하여 29°C에서 48시간 배양하여 0.2% congo red 용액으로 환모양의 균수를 측정하였다. 탈질균은 도립관을 넣은 GILTAY배지 시험관에 희석액을 접종한 후 29°C에서 3일간 배양한 후 도립관에 생성된 gas 유무로 판정하여 희석정도법으로 계수하였다. 질산환원균은 탈질균과 동일한 방법으로 배양하여 BTB (Bromothymolblue)의 녹색에서 청색으로 변색되는 유무로 판정하여 희석정도법으로 계수하였다 (Table 6).

소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재 및 식물체의 생물막 부착상태는 축산폐수처리장치 운

전 6개월 후의 여재 및 식물체 뿌리를 채취하여 멸균증류수로 3회 세척하여 2.5% glutaraldehyde로 실온에서 2시간 전 고정시킨 후 1% osmium tetroxide로 24시간 후 고정 시켰다. 이때 사용한 모든 시약의 희석은 0.1M 인산 완충용액 (pH 7.0)으로 하였으며, 동일한 완충용액으로 세척하였다. 시료를 연속적으로 60, 70, 80, 90 및 100%의 ethanol로 탈수하고, hexamethyl disilazane로 임계점 건조한 후 gold coating 하여 Scanning Electron Microscopy (SEM; Jeol JSM-6380LV, Japan)으로 관찰하였다.

Table 3-6. 미생물 분석을 위한 배지 조성

Items	Media	Compositions
Total bacteria	Plate Count Agar(PCA)	Digest of Casein 5.0 g, Yeast Extract 2.5 g, Dextrose 1.0 g, Agar 18 g, D.W 1 L, Final pH 7.0±0.2
Fungi	Rose-bengal agar	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 1.0 g, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.5 g, Glucose 10 g, Peptone 5 g, Rose-bengal 0.033 g, Agar 20 g, D.W 1 L, Final pH 6.8
General bacteria	NA medium	Nutrient broth 8 g, Agar 15 g, D.W 1 L
Ammonia oxidation bacteria	Ammonia oxidation bacteria count media	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5 g, NaCl 0.3 g, K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 1.0 g, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.3 g, FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.03 g, CaCO <sub>3</sub> 7.5 g, D.W 1 L
Nitrite bacteria	Nitrite bacteria count media	KNO <sub>2</sub> 0.006 g, FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.03 g, K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 1.0 g, CaCO <sub>3</sub> 0.3 g, NaCl 0.3, CaCO <sub>3</sub> 1.0 g, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.1 g, D.W 1 L
Cellulose decomposing bacteria	TY-CMC media	CMC 5 g, trypton 5 g, Yeast extract 5 g, CaCl <sub>2</sub> 1 g, Agar 20 g, D.W 1 L, 0.2%-Congo Red Method
Nitrification bacteria	GILTAY media	a) KNO <sub>3</sub> 1.0 g, Asparagin 1.0 g, 1% BTB 5 mL, D.W 0.5 L b) Sodium citrate 8.5 g, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 1.0 g, FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O 0.05 g, H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 1.0 g, CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O 0.2 g, D.W 0.5 L a)+b) pH 7.0-7.2
Nitrite reduction bacteria	GILTAY media	a) KNO <sub>3</sub> 1.0 g, Asparagin 1.0 g, 1% BTB 5 mL, D.W 0.5 L b) Sodium citrate 8.5 g, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 1.0 g, FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O 0.05 g, H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 1.0 g, CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O 0.2 g, D.W 0.5 L a)+b) Final pH 7.0-7.2
Total coliforms	EMB Agar media	EMB Agar powder 36 g, Agar 5 g, D.W 1 L

## 나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구

### 1) 문헌조사를 통한 수생식물 퇴비화 조건 도출

수생식물 퇴비화를 위한 기본조건을 도출하기 위하여 국내외 퇴비화 관련 문헌과 국내외 퇴비품질 기준 및 선진사례 연구를 참고하여 조사하였다.

### 2) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석

#### 가) 공시재료

축산폐수 종류별 물리화학적인 특성과 작물영양학적인 측면에서의 특성을 검토하기 위한 축산폐수 시료는 경남지역과 전남지역의 대규모의 한우사육단지 5개소와 양돈단지 10개소를 대상으로 월별 2회씩 시료를 채취하였다. 한육우 축산단지의 경우에는 대부분의 사육단지에서 바닥 깔개를 사용하기 때문에 소의뇨는 대부분 깔개에 흡수되고 배출되지 않기 때문에 깔개를 거의 사용하지 않거나 약간만 사용하고 밀집 사육하는 단지만을 대상으로 하였다. 폐수 성

분분석을 위한 시료는 각 축산단지내 액체폐수 저장탱크내의 폐수를 충분히 혼합 후 6개 지점에서 시료를 채취하였다.

나) 실험방법

축산폐수 종류별 비료의 가치를 분석하기 위하여 축종별 1두당 1일 폐수 발생량을 조사하기 위하여 조사대상 각 축산단지내 액체폐수 수집 및 저장탱크내의 집수량을 7일 주기로 조사하여 가축 1두당 월별 및 연평균 폐수 발생량을 조사하였다.

다) 분석방법

축산폐수의 물리, 화학적 특성은 농촌진흥청의 가축분뇨 액비중의 주요 성분 분석방법에 근거하여 pH, EC, 수분함량, 유기물함량, 총 질소, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, C/N율, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO 및 Na<sub>2</sub>O의 성분을 분석하였다.

Table 3-7. 주요 조사항목, 분석방법 및 분석기기

조사항목	시험방법	주요 분석기기
수분함량	감량법	정밀저울 (Mettler Toledo 0.0001mg)
pH 및 EC	pH 및 EC meter	pH meter (Mettler Toledo S40), EC meter (Mettler Toledo S47-K)
ORP	ORP meter	ORP meter (Mettler Toledo Inlab 501)
유기물함량	회화법	-
T-C, TOC	TOC meter	TOC meter (Shimadzu TOC-V/CPN)
C/N		-
T-N	Kjeldahl법	질소자동분석기 (Gerhardt autosampler Vapodest 50 carouse)
NH <sub>4</sub> -N	Indophenol method	Full Automatic Discrete Analyzer (SmartChem)
NO <sub>3</sub> -N	Burusin method	
T-P	Vanadate법	UV Spectrophotometer (UV2550PC)
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Molydenic acid method	Full Automatic Discrete Analyzer (SmartChem)
SS	GF/C 여과지법	Micro Analytical Balance (Mettler Toledo XP105DRV)
양이온, 중금속	습식분해법	ICP(Shimadzu ICPE9000), ICP-MS(Agilent ICP-MS 7500)

### 3) 수생식물 종류별 비료 가치 분석

#### 가) 공시재료

수생식물 종류별 물리화학적인 특성과 퇴비화시 비료로서의 가치를 검토하기 위한 수생식물 시료는 전남지역의 점원 및 비점오염원 관리를 위해 설치 운영되고 있는 인공습지 13개소와 본 연구에서 축산폐수 처리용 인공습지 개발을 위해 기초연구용으로 설치한 소규모의 인공습지에서 생육한 갈대, 줄, 부들, 창포, 미나리, 사초, 달뿌리풀 및 연 등을 대상으로 하였다.

조사대상 인공습지 14개소의 위치, 시스템 구성, 주요 유입수 및 식재 수생식물은 Table 3-8에서 보는 바와 같다.

수생식물 분석을 위한 인공습지는 습지내 유입원수의 질소와 인산 관련 오염도와 수생식물 구성, 습지시스템 구조 등을 기준으로 선정하였다. 복내 바이오파크, 봉산 인공습지, 승주 인공습지는 비교적 고농도의 질소와 인산이 함유된 생활하수 처리수가 유입되는 인공습지이며, 나머지 인공습지들은 하천수와 농경지 비점오염원이 유입되는 인공습지이다.

#### 나) 실험방법

수생식물체내 비료학적 성분은 생육이 가장 왕성한 8월과 식물의 생육이 저조한 11월의 식물체를 각각 2회에 걸쳐 조사하였다.

#### 다) 분석방법

수생식물체의 수분함량, 유기물, T-C의 함량을 조사하기 위한 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 수분함량은 감량법을 사용하였으며, 유기물은 회화법을 사용하였고, T-C는 총 유기탄소 측정기 (TOC-V/CPN)로 측정하여 T-C의 함량을 구하였다.

Table 3-8. 조사대상 인공습지의 운영현황 및 개요

인공습지명	준공시기	총면적 (습지면적) (m <sup>2</sup> )	처리용량 (강우시) (m <sup>3</sup> day <sup>-1</sup> )	처리방식	주요 수생식물	주요 처리 용수	위 치
1 복내 Bio-Park	'02.12	23,092 (13,655)	385 (7,402)	자유수면형 (FWS-FWS)	갈대, 부들, 줄, 달뿌리풀, 수련	하수처리방류수 강우시 비점오염원	보성군 복내면 복내리
2 신평천 인공습지	'04.12	12,360 (3,605)	600 (800)	자유수면형 (FWS-FWS)	갈대, 부들	하수처리방류수 신평천 하천수	순천시 송광면 신평리
3 용암 인공습지	'05.07	6,000 (2,638)	600 (950)	자유수면형 (FWS-FWS)	부들, 물잔디, 수련, 노랑어리연꽃	용암천 하천수 강우시 비점오염원	보성군 문덕면 용암리
4 죽산 인공습지	'05.05	6,900 (4,900)	3,700 (4,800)	자유수면형 (FWS-FWS)	창포, 수련, 노랑어리연꽃	죽산천 하천수 하수처리 방류수 강우시 비점오염원	보성군 문덕면 죽산리
5 길성 인공습지	'03.12	52,947 (46,531)	- (53,880)	자유수면형 (FWS-FWS)	갈대, 부들, 줄	길성천 하천수 강우시 비점오염원	화순군 북면 와촌리
6 내북 인공습지	'06.12	50,000 (45,200)	10,000 (30,000)	자유수면형 (FWS-FWS)	달뿌리풀, 사초류, 창포, 줄	내북천 하천수	화순군 북면 다곡리
7 동북 인공습지	'06.06	50,000 (18,756)	10,000 (30,000)	자유수면형 (FWS-FWS)	창포, 부들, 사초류	동북천 하천수	화순군 북면 임곡리
8 이서 인공습지	'05.06	36,000 (22,475)	10,000 (30,000)	자유수면형 (FWS-FWS)	달뿌리풀, 창포, 줄, 부들, 노랑어리연꽃	이서천 하천수 하수처리방류수 강우시 비점오염원	화순군 이서면 이서리
9 삼청 인공습지	'06.08	21,500 (21,500)	1,000 ( - )	지하흐름형 (VF-HF-FWS)	갈대, 줄	삼청천 하천수 강우시 비점오염원	순천시 송광면 삼청리
10 봉산 인공습지	'07.01	4,241 (3,650)	- (1,000)	자유수면형 (FWS)	갈대, 부들	하수처리 방류수 강우시 비점오염원	순천시 송광면 봉산리
11 후곡 인공습지	'06.08	250 (250)	- ( - )	자유수면형 (FWS)	미나리	소하천수 마을오수	순천시 송광면 후곡리
12 복내 인공습지	'01.12	1,700 (1,700)	88 ( - )	자유수면형 (FWS)	미나리, 창포, 사초, 백련	용전천 하천수	보성군 복내면 용전리
13 승주 인공습지	'09.03	-	-	자유수면형 (FWS)	갈대, 부들, 줄	이사천 하천수 강우시 비점오염원	순천시 승주읍 신성리
14 소형축산폐 수처리습지	'09.05	소형 인공습지	-	지하흐름형 (VF-HF)	창포, 갈대	축산폐수	경상대학교내

4) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴 조사

가) 공시재료

수생식물체 퇴비화 과정 중 산소 소비량과 소비패턴을 조사하기 위한 공시 수생식물체의 이화학적 특성은 Table 3-9에서 보는 바와 같다. 퇴비화 재료는 생육이 왕성한 8월과 생육이 저조한 11월에 수확한 부들, 갈대 및 줄을 1:1:1 중량으로 혼합하여 사용하였다.

Table 3-9. 공시 수생식물체의 이화학적 특성

식물체	항목 수확기	수분	유기물	C/N	T-N	T-P
		----- (%) -----	-----		----- (%) -----	-----
갈대	8월	54.3	91.9	27.94	1.91	0.56
	11월	50.2	92.1	28.73	1.86	0.57
부들	8월	79.8	89.3	32.96	1.57	0.52
	11월	74.4	90.6	38.90	1.35	0.48
줄	8월	70.8	91.1	29.54	1.79	0.58
	11월	66.9	91.8	32.82	1.62	0.54
혼합 식물체* (1:1:1)	8월	68.1	90.2	31.27	1.64	0.58
	11월	64.5	91.3	32.16	1.55	0.49

\* : 갈대 : 부들 : 줄 = 1 : 1 : 1

나) 실험방법

(1) 산소 소비량 측정 퇴비화 반응조 시스템 및 운전조건

수생식물체 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 소비 패턴을 측정하기 위해 밀봉된 유리 반응조에 각 식물체 퇴비시료 200 g을 넣고 산소를 3 psi 압력으로 공급하면서 미생물 호흡측정장치에 연결하여 소비되는 산소량과 CO<sub>2</sub> 발생량을 측정하였다. 퇴비반응조의 운전은 반응조내 퇴비량이 적으므로 퇴비화 반응 자체적으로는 최적온도인 60℃까지 상승하기에는 무리가 있을 것으로 판단되어 항온순환시스템을 이용하여 퇴비화 15일까지는 35 ± 1℃로 가온하면서 운전하였고 그 이후에는 실온으로 운전하였다. 퇴비화 반응조내 산소 소비량은 미생물 호흡측정기 (AER-208, Challenge Environment System, Inc, Arkansas, USA)를 이용하여 측정하였다.

(2) 산소 소비량 측정 퇴비화 반응조 처리조건

수생식물체별 퇴비화과정 중 산소 소비량 및 소비 패턴 측정을 위한 갈대, 줄, 부들 및 혼합 (갈대+줄+부들, 1:1:1) 식물체 퇴비재료의 처리조건은 Table 3-10에서 보는 바와 같다. 퇴비



재료인 식물체의 입자크기는 30~50 mm 크기로 절단 하였으며, 각각의 식물체에 기존의 퇴비를 습윤 중량으로 10%가 되게 고르게 혼합한 후 수분함량은 별도의 수분조절제를 첨가하지 않고 갈대는 물을 가하고, 부들과 줄은 자연 건조하여 적정 수분함량을 조절하였으며 조정된 전체적인 수분함량은 60~63% 범위이었다. C/N율은 갈대의 경우 C/N율이 90이상으로 매우 높은 물잔디 식물체를 첨가하여 적정 C/N율을 조정하였으며, 다른 식물체들은 그대로 사용하였고 조정된 퇴비재료의 전체적인 C/N율 범위는 30~34 범위이었다.

Table 3-10. 수생식물체 퇴비화 재료별 처리조건

식물체	항목 수확기	수분	입자크기	C/N	T-N	T-P
		( % )	( mm )		---- ( % ) ----	----
갈대	8월	62.2	30~50	32.5	1.64	0.49
	11월	60.2	30~50	30.6	1.76	0.53
부들	8월	63.8	30~50	32.6	1.53	0.57
	11월	62.4	30~50	34.2	1.42	0.49
줄	8월	60.8	30~50	31.5	1.46	0.55
	11월	62.9	30~50	32.8	1.37	0.61
갈대+줄+부들 (1:1:1)	8월	63.1	30~50	31.27	1.43	0.54
	11월	63.5	30~50	32.16	1.41	0.29

다) 분석방법

퇴비화 반응조내 산소 소비량은 미생물 호흡측정기 (AER-208, Challenge Environment System. Inc, Arkansas. USA)를 이용하여 측정하였다.

5) 소형 퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화

가) 공시재료

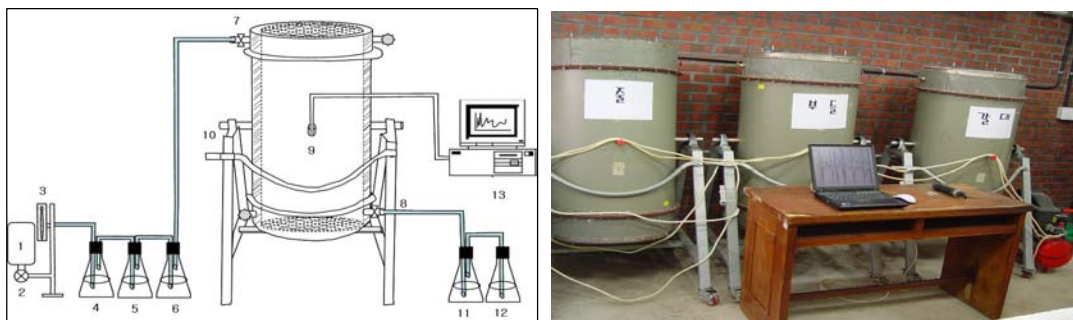
소형 퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화를 위한 식물체 퇴비화 재료는 8월과 11월에 수확한 부들, 갈대 및 줄과 이들을 1:1:1 중량으로 혼합한 식물체를 사용하였으며, 각 식물체 시료의 이화학적 특성은 상기 4), 가)항의 공시재료의 Table 3-9와 같다.

나) 실험방법

(1) 소형 퇴비화조 제작·설치 및 운전조건

수생식물체 퇴비화를 위해 사용한 소형 퇴비화 시스템의 개요도는 Fig. 3-8에서 보는 바와 같다. 퇴비화조의 재질은 철판으로 내부에는 플라스틱으로 이중벽을 설치하고 보온재를 충진하여 퇴비화과정 중 발생하는 열의 손실을 방지하였으며, 퇴비화조내 공기는 유량게이지가 부착

된 에어펌프를 이용하여 필요량만큼 주입하였으며 공기가 주입되기 전 먼저, CO<sub>2</sub> 및 수분제거 장치를 각각 설치하여 공기를 정화시킨 후 주입시켰다. 정화된 공기를 퇴비화조내에 일정하게 주입시키기 위하여 퇴비화조 상부와 하부에 그물철망으로 5 cm의 공간을 확보하였다. 원활한 공기 유통과 퇴비화조의 안정화를 위해 퇴비화조를 회전장치를 이용하여 1일 2회씩 상부와 하부를 뒤집어 공기의 흐름을 바꾸어 주면서 운전하였다. 퇴비화조내 공기 주입량은 50~100 L/min. m<sup>3</sup> 범위에서 퇴비화조내의 온도변화에 따라 공기량을 조절하였다. 그리고 퇴비화과정 중 퇴비화조에서 발생하는 CO<sub>2</sub>의 분석을 위하여 퇴비화조 상부를 밀폐시켜 발생하는 배출가스를 CO<sub>2</sub> 포집기내의 NaOH에 포집되도록 하였다. 그리고 퇴비화과정 중 퇴비화조내의 온도변화는 퇴비화조 내부에 온도 센서를 설치하여 실시간으로 자동 모니터링하였다.



- |                               |                               |               |                   |                            |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------|----------------------------|
| 1. Air compressor             | 2. Needle valve               | 3. Rota meter | 4. Dust removal   | 5. CO <sub>2</sub> removal |
| 6. Moisture removal           | 7. Air in                     | 8. Air out    | 9. Control system | 10. Rotate handle          |
| 11. NH <sub>4</sub> collector | 12. CO <sub>2</sub> collector | 13. Computer  |                   |                            |

Fig. 3-8. 수생식물 퇴비화를 위한 소형 퇴비화조 개요도 및 운전 사진.

## (2) 수생식물 퇴비화를 위한 소형퇴비화조 처리조건

수생식물체별 퇴비화를 위한 갈대, 줄, 부들 및 혼합 (갈대+줄+부들, 1:1:1) 식물체 퇴비재료의 처리조건은 Table 3-11에서 보는 바와 같다. 공시 수생식물체의 크기는 절단기를 이용하여 모두 30~50 mm 크기로 절단하였으며, 각각의 식물체에 기존의 퇴비를 습윤중량으로 10%가 되게 고르게 혼합한 후 수분함량은 별도의 수분조절제를 첨가하지 않았다. 또한 적정 수분함량을 조절하기 위하여 갈대에는 물을 가하였고, 부들 및 줄은 자연 건조하여 적정 수분함량을 조절하였다. 수분함량은 공기 주입에 의한 손실을 고려하여 야적식 퇴비화방법에 비하여 약간 높게 조절하였으며 조정된 전체적인 수분함량은 약 64~68% 범위이었다. C/N율은 갈대의 경우 C/N율이 90이상으로 매우 높은 물잔디를 첨가하여 적정 C/N율을 조정하였으며, 다른 식물체들은 그대로 사용하였고 조정된 퇴비재료의 전반적인 C/N율 범위는 30~32이었다. 퇴비화조 내에 수생식물체 퇴비재료를 각각 30 kg을 주입하고 40일간 퇴비화하면서 온도변화, CO<sub>2</sub> 발생량, NH<sub>3</sub> 발생량 등을 시기별로 모니터링하고 퇴비화 전후의 물리화학적 특성을 비교 검토하였다.

Table 3-11. 수생식물체 퇴비화 재료별 처리조건 및 물리화학적 특성

식물체	항목 수확기	수분	입자크기	C/N	T-N	T-P
		(%)	(mm)		(%)	(%)
갈대	8월	64.6	30~50	31.7	1.57	0.50
	11월	67.5	30~50	29.9	1.66	0.52
부들	8월	65.5	30~50	31.6	1.51	0.49
	11월	66.2	30~50	32.8	1.55	0.57
줄	8월	65.2	30~50	31.2	1.66	0.52
	11월	64.9	30~50	32.3	1.39	0.51
갈대+줄+부들 (1:1:1)	8월	65.1	30~50	30.5	1.45	0.64
	11월	67.5	30~50	31.6	1.51	0.53

다) 분석방법

소형 퇴비화조에서 포집된 CO<sub>2</sub>의 분석은 NaOH에 흡수된 CO<sub>2</sub>를 BaCl<sub>2</sub>로 침전시킨 다음 남은 NaOH를 phenolphthalein지시약을 사용하여 HCl로 역적정하여 CO<sub>2</sub> 발생량을 구하였다.

6) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토

가) 공시재료

수생식물체의 퇴비화 수분조절제로서의 활용가능성을 검토하기 위하여 11월에 수확한 갈대, 줄, 부들 식물체를 사용하였으며, 퇴비화 재료의 물리화학적 특성은 Table 3-12에서 보는 바와 같다.

Table 3-12. 공시 퇴비화 재료의 물리화학적 특성

재료	수분	C/N	T-C	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na
	함량 %								
돈분	71.8	11.88	35.41	2.98	0.16	0.29	0.08	0.05	0.04
톱밥	9.2	243.65	48.17	0.21	0.27	0.13	0.05	0.02	0.01
혼합식물체 (갈대:줄:부들)	10.3	32.18	53.09	1.65	0.59	1.75	0.44	0.11	0.18

나) 실험방법

수확한 수생식물체를 30~50 mm 크기로 절단하여 완전히 건조한 다음 동일 중량비율로 혼합 (갈대+줄+부들, 1:1:1) 식물체와 톱밥을 각각 돈분 퇴비화에 수분조절제로 첨가하여 수분조절제로서의 활용가능성을 검토하였으며, 사용된 퇴비재료의 처리조건은 Table 3-13과 같다. 본 실험에 사용한 돈분은 수분함량이 약 71%였고 C/N율은 약 11.88로 매우 낮았다. 수분조절제로 사용한 톱밥은 C/N율이 약 244로 매우 높았고, 수생식물 혼합식물체는 C/N율이 약 32범

위였다. 돈분과 톱밥 및 혼합식물체 첨가 비율은 돈분과 톱밥은 동일 비율 (돈분 15 kg + 톱밥 15 kg)로 섞였으며, 돈분과 혼합 수생식물체는 1 : 5의 비율 (돈분 5 kg + 식물체 25 kg)로 혼합하였으며 수분조절제 첨가로 조정된 C/N 비율은 약 26~27 범위였다. 수분함량은 공기 주입에 의한 손실을 고려하여 야적식 퇴비화방법에 비하여 약간 높게 조절하였으며 전체적인 수분함량은 약 64~65% 범위로 하였다. 퇴비화조내에 각각의 수생식물체 퇴비재료 약 30 kg을 주입하고 40일간 퇴비화하면서 온도변화, CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub> 발생량 등을 시기별로 모니터링하고 퇴비화 전후의 물리화학적 특성을 비교 검토하였다.

소형 퇴비화 시스템은 상기의 소형 퇴비화조를 사용하였으며 퇴비화조 운전조건도 상기와 동일한 방법으로 운전하였다 (Fig. 3-8).

Table 3-13. 퇴비화조 처리 조건

	혼합량 ( kg )	수분 ( % )	C/N	T-N ( % )	T-P ( % )
돈분 + 톱밥	15 + 15	63.5	26.20	1.60	0.33
돈분 + 혼합식물체 (갈대:줄:부들 1:1:1)	5 + 25	64.8	26.79	1.87	0.47

#### 다) 분석방법

수분조절제 이용 가능성 검토를 위해 퇴비화 과정 중 퇴비화조에서 CO<sub>2</sub>의 분석은 NaOH에 흡수된 CO<sub>2</sub>를 BaCl<sub>2</sub>로 침전시킨 다음 남은 NaOH를 phenolphthalein지시약을 사용하여 HCl로 역적정하여 CO<sub>2</sub> 발생량을 구하였으며, NH<sub>3</sub>의 분석은 Kjeldahl법 (질소자동분석기, Gerhardt autosampler Vapodest 50 carouse, Germany)으로 분석하였다.

### 7) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화

#### 가) 공시재료

뒤집기 퇴비단공법을 이용하여 퇴비화를 하기 위한 수생식물체는 2009년 11월에 주암호 주변 인공습지에서 채취하였으며 (Fig. 3-9), 채취한 수생식물체의 이화학적 특성은 Table 3-14에서 보는 바와 같고, 전남 순천시 승주읍에 위치한 야적장에서 갈대 및 부들을 혼합하여 퇴비화를 실시하였다.



[여름철 수생식물체 수확]

[가을철 수생식물체 수확]

[수확된 수생식물체]

Fig. 3-9. 수생식물체 수확 및 수확된 수생식물체 사진.

Table 3-14. 공시 수생식물의 이화학적 특성

Aquatic plants	Part	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na
		----- (%) -----					
갈대	Stem+Leaf	0.21	0.16	0.70	0.39	0.08	0.01
	Root	0.30	0.13	0.45	0.17	0.06	0.04
부들	Stem+Leaf	0.75	0.11	2.81	1.32	0.21	0.18
	Root	0.68	0.08	0.86	0.63	0.26	0.27

#### 나) 실험방법

뒤집기 퇴비단공법을 이용한 현장 퇴비화는 수생식물체를 적당한 크기로 절단하였으며, 퇴비단 뒤집기는 포크레인을 이용하였다. 수생식물 퇴비화 과정 중 시기별로 채취한 퇴비는 2009년 12월 31일, 2010년 1월 12일, 1월 22일 및 3월 24일에 조사하였으며, 수분함량, 유기물, 무기물, T-C, T-N 및 C/N율을 각각 조사하였다. 또한, 퇴비화 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub> 발생량을 현장에서 직접 측정하였다.

#### 다) 분석방법

수생식물체를 이용한 현장 퇴비화 과정 중 채취한 시료의 수분함량은 가열감량법을 사용하였으며, 유기물의 함량은 회화법을 사용하였고, T-C의 함량은 건조 회화법을 사용하였다. 질소의 함량은 습식분해법 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HClO<sub>4</sub>)으로 전처리하여 Kjeldahl법 (질소자동분석기, Gerhardt autosampler Vapodest 50 carouse, Germany)으로 분석하였고, CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub>의 함량은 검지기 (기체채취기)와 검지관을 이용하여 측정하였다.

다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구

1) 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리효율 조사

가) 공시재료

실험에 사용된 공시 축산폐수는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산농가에서 채취하여 공시 원수로 사용하였으며, 공시 여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다.

공시 축산폐수의 이화학적 특성은 Table 3-15과 같고, 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성은 Table 3-16 및 3-17에서 보는 바와 같다. 자원순환형 축산폐수처리시스템 구축을 위한 기초보완 연구에 사용된 여재는 호기성조의 경우 왕사, 쇠석 및 방해석을 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 사용하였고, 혐기성조의 경우 왕사, 쇠석 및 제올라이트를 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 사용하였다. 호기성조 여재 및 혐기성조 여재의 유효입경 (여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10%되는 부분의 여재의 입경 ;  $d_{10}$ )은 각각 2.6 mm이었으며, 균등계수 (여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10%되는 입경과의 비 ;  $d_{60} d_{10}^{-1}$ )는 각각 2.53 및 2.62이었다. 그리고 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대 및 노랑꽃창포 등 2종이었으며, 모든 수생식물은 야외노지에서 성장한 수초를 분주하여 처리장내에 이식하였다.

Table 3-15. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 공시폐수의 이화학적 특성

pH	EC	COD	SS	T-N	T-P
	( $\text{dS m}^{-1}$ )	----- ( $\text{mg L}^{-1}$ ) -----			
6.8±0.7	2.64±0.28	10,639±2,451	9,400±2,514	5,024±1,127	725±102

Table 3-16. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 공시여재의 물리학적 특성

	Porosity	Bulk density	$d_{10}$	$d_{60}$	Uniformity coefficient
	(%)	( $\text{g cm}^{-3}$ )	(mm)	(mm)	( $d_{60} d_{10}^{-1}$ )
Mixed filter media 1 for Aerobic bed	33.1	1.54	1.26	3.2	2.53
Mixed filter media 2 for Anaerobic bed	33.6	1.48	1.26	3.3	2.62

Mixed filter media 1 (Coarse sand : Broken stone : Calcite = 3 : 2 : 1)

Mixed filter media 2 (Coarse sand : Broken stone : Zeolite = 3 : 2 : 1)

Table 3-17. 소형 축산폐수처리장치에 사용된 여재의 이화학적 특성

	pH	EC	O.M	T-N	T-P			
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS m <sup>-1</sup> )	(%)	----(mg kg <sup>-1</sup> )----				
Mixed filter media 1 for Aerobic bed	8.03	0.06	0.59	11.1	30.5			
Mixed filter media 2 for Anaerobic bed	7.5	0.05	0.69	1,272	51.4			
	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
Mixed filter media 1 for Aerobic bed	15,688	69,373	2,484	308.8	3,741	1.35	149.2	85.5
Mixed filter media 2 for Anaerobic bed	1,643	1,451	1,009	324.1	2,972	11.4	114.6	5.2

Mixed filter media 1 (Coarse sand : Broken stone : Calcite = 3 : 2 : 1)

Mixed filter media 2 (Coarse sand : Broken stone : Zeolite = 3 : 2 : 1)

나) 실험장치

수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-10과 같이 수생식물여과조와 자연정화공법을 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 수생식물여과조와 자연정화공법의 처리조인 호기성조 및 혐기성조의 크기는 공히 직경 0.60 m × 높이 0.72 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.20 m<sup>3</sup>되게 제작하였다. 수생식물여과조에는 자갈을 하부에서부터 0.30 m까지 충전한 후 인공습지에서 생육한 수생식물을 건조하여 3~5 cm 크기로 분쇄하여 하부 0.30 m부터 0.70 m까지 충전하였다. 수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치에서 폐수의 흐름은 폐수를 위로부터 유입하여 아래로 수직여과 방식으로 처리하여 유출된 수생식물여과조의 처리수는 자연유하식으로 아래의 자연정화공법으로 유입되게 하였다. 또한 자연정화공법의 각 조의 크기, 여재종류, 여재 주입위치 및 축산폐수의 흐름은 상기 1차년도 최적조건 조사의 호기-혐기 조합형과 동일하게 제작하였다.

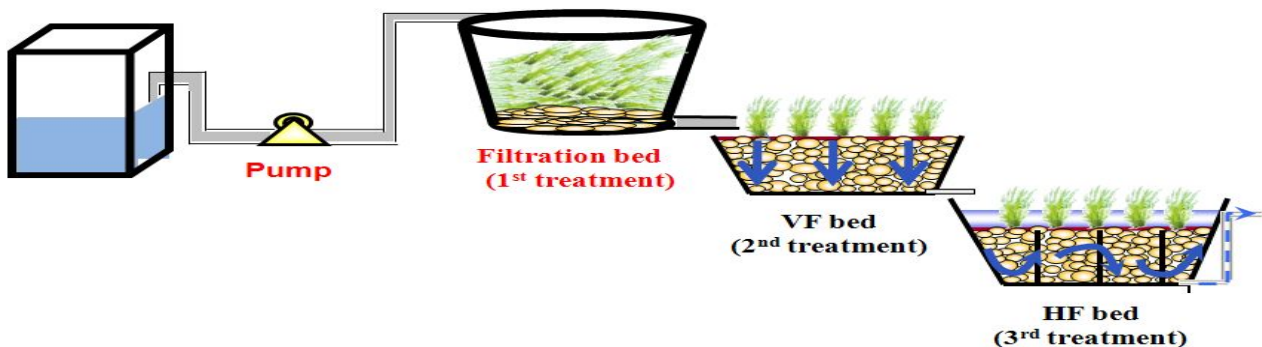


Fig. 3-10. 수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치 설계도.

#### 다) 실험방법

수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치의 수처리 효율 조사는 자연정화공법의 최적조건하에서 수생식물여과조에 공시 축산폐수를 주입시켜 1차 처리하고, 1차 처리된 축산폐수를 소형 축산폐수처리장치에 주입한 후 축산폐수 중의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

#### 라) 조사시기

소형 축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 조사는 2010년 3월 1일부터 2010년 3월 31일까지 1개월간 운전하였다. 시료의 채취는 처음 3주간은 1주 1회, 마지막 주에는 격일로 4회 분석하여, 총 7회 분석한 결과를 평균하여 각 조건에서의 수처리 효율을 구하였다.

#### 마) 분석방법

수질 분석은 수질오염공정시험법 및 APHA의 standard method에 준하여 다음과 같이 하였다. 수질의 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany), DO는 윙클러 아지드화나트륨 변법, COD는 산성  $\text{KMnO}_4$ 법, SS는 유리섬유여과지법, T-N은 자외선 흡광광도법,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 인도페놀법,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 부루신법 및 T-P는 아스코르빈산 환원법으로 각각 분석하였다.

### 2) 활성슬러지와 자연정화공법을 연계한 수처리 효율 조사

#### 가) 공시재료

본 실험에 사용된 공시 축산폐수는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산농가에서 채취하여 공시 원수로 사용하였으며, 공시 여재는 상기 1)항의 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율 조사에 사용되었던 여재와 동일하였다.

공시 축산폐수 및 공시여재의 이화학적 특성과 호기성조 및 혐기성조의 내부구성은 상기 1)항의 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율과 동일하다.

#### 나) 실험장치

활성슬러지조와 연계된 자연정화공법의 소형 축산폐수처리장치는 Fig. 3-11과 같이 활성슬러지조와 자연정화공법을 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 활성슬러지조 크기는 세로 0.10 m × 가로 0.45 m × 높이 0.45 m인 아크릴을 결합하여 용량이 0.02 m<sup>3</sup>되게 제작하였고, 폭기조 및 교반기를 각각 설치하였으며, 2등분으로 구획하여 침전조를 설치하였다. 자연정화공법의 호기성조 및 혐기성조의 크기는 세로 0.30 m × 가로 0.30 m × 높이 0.50 m 플라스틱 통을 이용하여 용량이 0.045 m<sup>3</sup> 되게 제작하였다. 활성슬러지는 산청군 축산폐수 공공처리시설에 사용하고 있는 활성슬러지를 채수하여 주입하였다. 소형 축산폐수처리장치의 호기성조는 왕사, 쇠석 및 방해석을 3 : 2 : 1로 혼합한 여재를 충전하였고, 혐기성조는 왕사, 쇠



석 및 제올라이트를 3 : 2 : 1로 혼합하여 충전하였다. 활성슬러지공법과 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 흐름은 활성슬러지조에 축산폐수를 위로부터 유입시켜 활성슬러지에 의해 축산폐수를 1차 처리되게 하였으며, 1차 처리하여 유출된 처리수는 자연정화공법으로 유입되게 하였다. 또한 자연정화공법의 축산폐수의 흐름은 상기 1차년도 최적조건 조사의 호기-혐기 조합형과 동일하게 하였다.

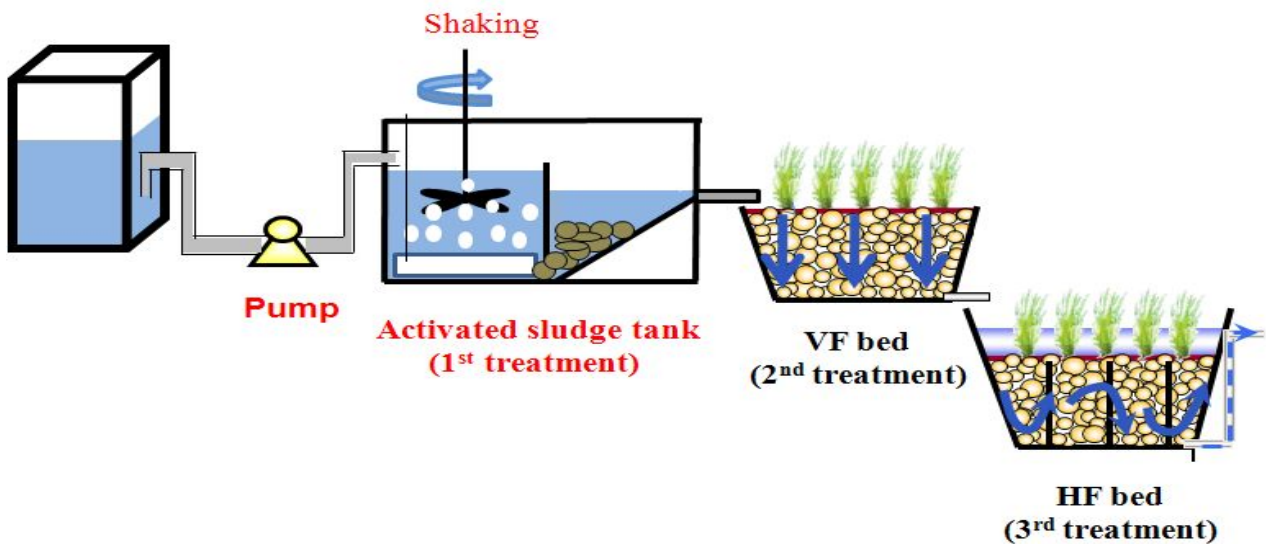


Fig. 3-11. 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치의 설계도.

#### 다) 실험방법

활성슬러지조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율 조사는 자연정화공법의 최적조건하에서 공시 축산폐수를 활성슬러지조에 주입하여 1차 처리하고 1차 처리된 축산폐수를 소형 축산폐수 처리장치에 주입한 후 축산폐수 중의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

#### 라) 조사시기

소형 축산폐수처리장치에서의 수처리 효율 조사는 2010년 3월 1일부터 2010년 3월 31일까지 1개월간 운전하였다. 시료의 채취는 처음 3주간은 1주 1회, 마지막 주에는 격일로 4회 분석하여, 총 7회 분석한 결과를 평균하여 각 조건에서의 수처리 효율을 구하였다.

#### 마) 분석방법

수질 분석은 수질오염공정시험법 및 APHA의 standard method에 준하여 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany), DO는 잉클러 이지드화나트륨 변법, COD는 산성  $\text{KMnO}_4$ 법, SS는 유리섬유여과지법, T-N은 자외선 흡광광도법,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 인도페놀법,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 부루신법 및 T-P는 아스코르빈산 환원법으로 각각 분석하였다.

## 2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

#### 1) 공시재료

본 실험에 사용된 공시 축산폐수는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산농가에서 채취하여 공시 원수로 사용하였으며, 공시 여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다.

공시 축산폐수와 여재의 이화학적 특성은 상기 1. 다. 가)항의 공시재료인 Table 3-15와 Table 3-16 및 3-17과 동일하다. 여재의 입도분포도는 상기 1. 가. 가)항의 Fig. 3-2와 같다.

#### 2) 실험장치

##### 가) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 설계 및 시공

자원순환형 현장 축산폐수처리장 설계 및 시공은 1차년도에서의 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술 개발을 위한 기초실험 결과를 적용하여 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법을 하나의 시스템으로 연계하여 설계 및 시공하였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장은 Fig. 3-12와 같이 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법을 연계하여 하나의 시스템으로 운전이 가능하게 제작하였다. 각 조의 크기는 수생식물여과조의 경우 공히 직경 0.90 m × 높이 1.00 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.63 m<sup>3</sup> 되게 제작하였으며, 활성슬러지조는 세로 3 m × 가로 3 m × 높이 1 m로 용량이 9 m<sup>3</sup>이 되게 제작하였다. 또한 자연정화공법의 호기성조의 경우 세로 4 m × 가로 4 m × 높이 1 m로 용량이 16 m<sup>3</sup>이 되게 제작하였고, 1차 혐기성조의 경우는 세로 4 m × 가로 5 m × 높이 1 m로 용량이 20 m<sup>3</sup>이 되게 제작하였으며, 2차 혐기성조의 경우 세로 4 m × 가로 5 m × 높이 0.5 m로 용량이 10 m<sup>3</sup>이 되게 제작하였다. 수생식물여과조에는 자갈을 하부에서부터 0.30 m까지 충전한 후 자연정화공법처리장에서 생육한 수생식물을 건조하여 3~5 cm 크기로 분쇄하여 하부 0.30 m에서부터 0.90 m까지 충전하였고, 활성슬러지조에는 산청군 축산폐수 공공처리시설에서 채수한 활성슬러지를 하부에서 0.90 m까지 주입하였다. 그리고 자연정화공법의 호기성조에는 왕사, 쇠석 및 방해석 3 : 2 : 1의 비율로 혼합하여 여재를 충전하였고, 혐기성조에는 경우는 왕사, 쇠석 및 제올라이트를 3 : 2 : 1의 비율로 혼합하여 충전하였다. 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법을 연계한 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수의 흐름은 1차 수생식물여과조에 축산폐수를 유입시켜 수직여과방식으로 처리하여 유출된 수생식물여과조 처리수는 자연유하식으로 2차 활성슬러지조로 유입되게 하였고, 활성슬러지조에 유입된 축산폐수는 체류시간을 고려한 반응조에서 처리가 되게 하였으며, 활성슬러지조에서 처리된 처리수는 자연정화공법으로 유입되게 하였다. 또한 자연정화공법의 축산폐수의 흐름은 호기성조에 활성슬러지조에서 처리된 처리수를 위로부터 유입시켜 아래로 수직여과방식으로 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 1차 및 2차 혐기성조로 유입되게 하였고, 각 혐기성조에 유입된 축산

폐수는 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

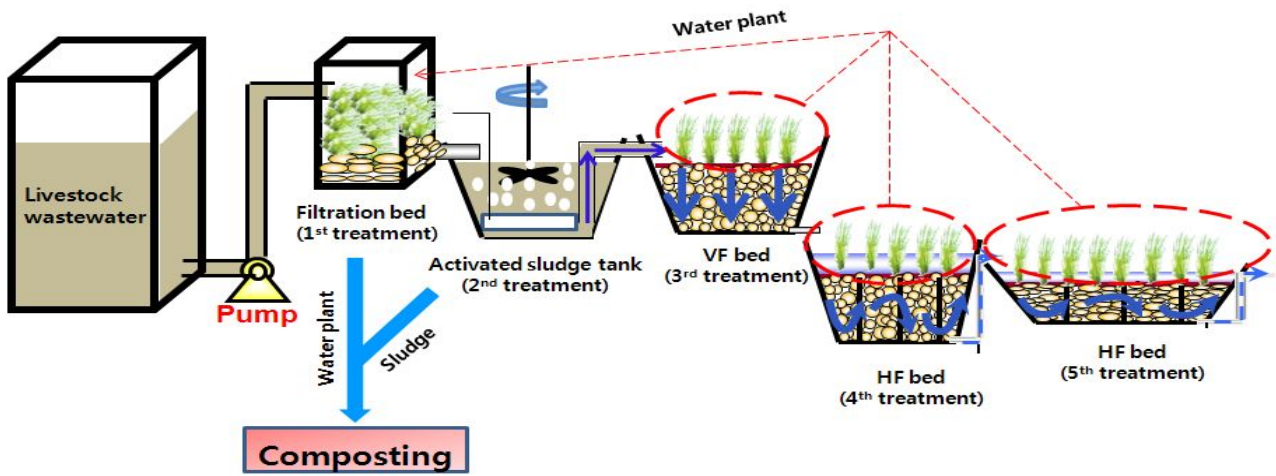


Fig. 3-12. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 설계도.



(현장 축산폐수처리장 부지선정)



(기초 터파기)



(공시여재 세척)



(통기관 제작)

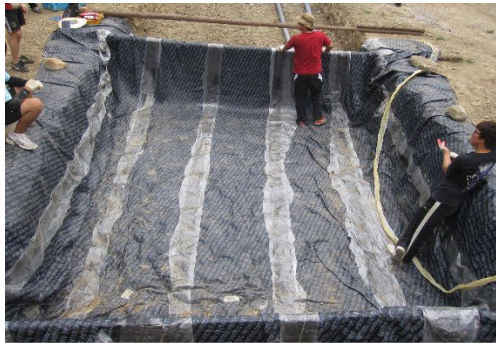
Fig. 3-13. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 시공진경.



(호기성조 통기관 설치)



(호기성조 여재충진)



(혐기성조 I 차수막 설치)



(혐기성조 I 여재충진)



(혐기성조 II 여재충진)



(각 조 여재충진 완료)



(침전조 설치)



(방류수 집수조 설치)

Fig. 3-14. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 시공진경.



(호기성조 갈대 이식)



(혐기성조 I 창포 이식)



(혐기성조 II 부들 이식)



(각조 수생식물 이식 완료)



(주변 평탄화 작업)



(활성슬러지조 차수막 설치)



(수생식물 여과조 설치)



(주변 잔디 이식)

Fig. 3-15. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 시공진경.



(수생식물여과조 및 활성슬러지조 설치)



(축산폐수 유도관 설치)



(활성슬러지 주입 완료)



(현장 축산폐수처리장 완공전경)

Fig. 3-16. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 시공전경.

나) 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링을 위한 컬럼 장치

축산폐수처리장에서 오염물질의 흡착/이동 모델링을 위한 컬럼 장치는 Fig. 3-17에서 보는 바와 같다. 플라스틱 컬럼에는 본 현장 축산폐수처리장내에 사용한 여재를 균일하게 충전하였으며, 가능한 한 서로의 밀도 (bulk density)가 비슷하도록 하였다. 플라스틱 컬럼의 양 끝은 여과지로 막아서 실험 중 충전 된 여재입자 혹은 콜로이드가 유출되는 것을 방지하였다. 본 실험에 사용된 컬럼 실험 장치는 컬럼에서 일정한 흐름을 조절하기 위한 정량펌프와 유출수를 정량으로 채취하기 위한 분획기 (fraction collector)로 구성되어 있다.

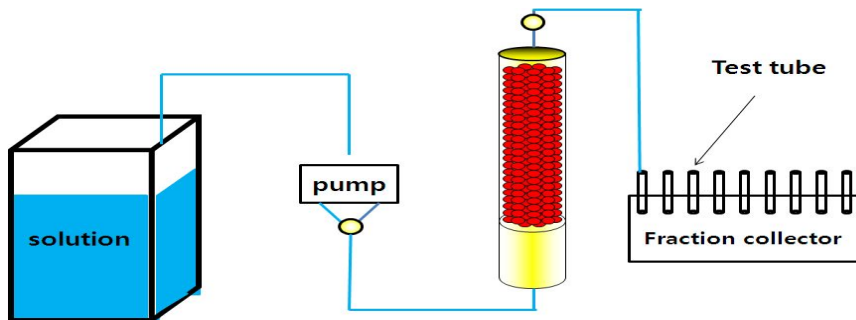


Fig. 3-17. 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링을 위한 컬럼 장치의 모식도.

### 3) 실험방법

#### 가) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율 조사

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 운전은 축산농가에서 배출되는 축산폐수를 집수조로부터 수중펌프를 이용하여 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 유입시켰으며, 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법 1개 시스템으로 조합한 조합형 축산폐수처리장에서는 축산폐수처리장의 유입수를 유입원수, 1차 처리인 수생식물여과조 통과수를 수생식물여과조 처리수, 2차 처리인 활성슬러지 통과수를 활성슬러지조 처리수, 3차 처리인 자연정화공법의 호기성조 통과수를 호기성조 처리수, 4차 혐기성조 I 통과수를 혐기성조 I의 처리수, 그리고 5차 혐기성조 II의 통과수를 방류수로 각각 명명하였다.

현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율 조사는 축산폐수의 처리시일별, 축산폐수의 부하량별, 축산폐수 중 고농도 질소 및 인 처리효율 극대화 방안 및 축산폐수 주입방법별 수처리효율과 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질의 분해속도를 각각 조사하였다.

#### (1) 축산폐수 처리시일에 따른 수처리 효율

축산폐수의 처리시일에 따른 수처리 효율 조사는 1차년도 연구결과의 최적 공법하에서 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법을 연계한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 2010년 7월 1일부터 2010년 12월 31일까지 축산농가에서 배출되는 축산폐수의 처리시일 따른 수처리 효율 변화를 조사하기 위해 축산폐수처리장 운전 6개월 동안 유입원수, 1차 처리인 수생식물여과조 처리수, 2차 처리인 활성슬러지조 처리수, 3차 처리인 호기성조 처리수, 4차 처리인 혐기성조 I의 처리수 및 5차 처리인 혐기성조 II의 방류수를 각각 채취하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 함량을 조사하였다.

#### (2) 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 축산폐수 부하량에 대한 대응성을 조사하기 위해 축산폐수 부하량을 각각 300, 600 및 900 L day<sup>-1</sup>로 달리하여 pH, EC, DO, COD, SS, T-N T-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

#### (3) 축산폐수 중 고농도 질소 및 인 처리효율 극대화 방안조사

자연정화공법에 의한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 질소 및 인 처리효율을 극대화하기 위한 방안 조사로서 상기 (2)항의 축산폐수 부하량별 최적조건하에서 축산폐수 재활용 비율별 및 축산폐수 전처리 시간별 수처리 효율을 각각 조사하였다.

#### (가) 축산폐수 재주입 비율별 수처리 효율

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 재주입 비율별 수처리 효율 조사는 축산폐수

의 질소 및 인 처리효율 향상과 재활용율을 극대화하기 위해 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 유입량  $600 \text{ L day}^{-1}$  조건하에서 배출되는 최종 방류수를 호기성조에 30%인  $180 \text{ L day}^{-1}$ , 70%인  $420 \text{ L day}^{-1}$  및 100%인  $600 \text{ L day}^{-1}$ 로 구분하여 재주입하여 수처리 효율을 조사하였다.

#### (나) 축산폐수 전처리 시간에 따른 수처리 효율

축산폐수의 전처리 시간에 따른 수처리 효율 조사는 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법을 연계한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간별 및 활성슬러지조 체류시간별 수처리 효율을 조사하였다.

##### ① 수생식물 여과시간에 따른 수처리 효율

수생식물 여과시간에 따른 수처리 효율 조사는 현장 축산폐수처리장의 1차 처리조인 수생식물여과조에 축산폐수 주입량을  $600 \text{ L day}^{-1}$  조건으로 동일하게 한 후 수생식물여과조에서 여과되는 시간을 30분, 60분 및 90분으로 구분하여 수처리 효율을 조사하였다.

##### ② 활성슬러지 체류시간에 따른 수처리 효율

활성슬러지조 체류시간에 따른 수처리 효율 조사는 상기 ①항의 수생식물 여과시간에 따른 수처리 효율 결과 최적조건인 여과시간 30분하에서 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 유입량을 조절하여 활성슬러지조내 축산폐수의 체류시간을 각각 8, 16 및 24시간으로 조절한 후 수처리 효율을 조사하였다.

#### (4) 축산폐수 주입방법에 따른 수처리 효율

자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 수처리 효율 조사는 고농도 축산폐수의 주입방법이 처리장에 미치는 영향을 조사하기 위해 축산폐수 주입량을 동일하게 하되 주입방법을 연속주입 및 간헐주입 방법으로 나누어 수처리 효율을 조사하였다. 축산폐수의 연속주입은 축산폐수 원수를  $600 \text{ L day}^{-1}$ 로 하여 1개월 동안 연속적으로 처리장내에 주입하였고, 간헐주입은 축산폐수 총 주입량을 연속주입과 동일하게 하되 주입방법을 하루 3시간 간격으로 번갈아가며 주입하였고, 한번 주입시 축산폐수를 3시간동안  $150 \text{ L day}^{-1}$ 되게 주입하여 수처리 효율을 조사하였다.

#### (5) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 오염물질의 분해속도

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 분해속도 조사는 1차년도 연구결과 최적공법을 적용한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 처리경향을 파악하고, 이를 토대로 축산폐수처리장의 설계 및 시공 시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료로 활용하기 위해 상기 (4)항의 축산폐수 주입방법에 따른 수처리 효율 조사 결과를 이용하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 분해속도를 각각 조사하였으며, 각 오염물질의 분해속도는  $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응속도식을 이용하였다.



오염물질의 분해속도는 1차 반응으로 가정하여  $V=KC$ 로 정의할 수 있으며, 반응속도  $V$ 는 하나의 오염물질 농도에 관계될 때 순간적인 시간  $dt$ 에서 농도  $C$ 가  $dc$ 만큼 변하는 순간으로  $-dc/dt$ 로 정의된다 (반응물질의 농도는 시간이 경과함에 따라 감소되므로  $-$ 로 표시).

그러므로  $V=KC$ 에서  $V$ 대신에  $-dc/dt$ 를 대입하여 정리하면  $dc/c=-Kdt$  식을 유도할 수 있으며, 이 식은  $t=0$  일 때,  $C=C_0$ 의 조건을 주어 적분하면 ①식과 같고 이를 정리하여 ②식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{C_0}^C \frac{1}{C} dC = -K \int_0^t dt \text{ ----- ①}$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -Kt \text{ ----- ②}$$

$C_0$ : 초기 ( $t=0$ ) 농도,

$C$ : 나중 ( $t$ 시간 후) 농도,

$K$ : 반응속도상수 또는 감수속도정수 ( $\text{time}^{-1}$ ),

$t$ : 반응시간 (time).

따라서 상기 ②식에서 오염물질의 분해속도 상수  $K$ 는 초기 농도에서 체류시간에 따른 오염물질의 감소된 농도로부터 Y축에는  $\ln [C/C_0]$ , X축에는 시간 ( $t$ )로 직선식을 그어서 나온 기울기를 이용하여 구할 수 있다.

#### 나) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 조사

##### (1) 여재의 이화학적 특성

자연정화공법에 의한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 충전된 여재의 이화학적 특성 조사는 현장 축산폐수처리장 시설직전의 공시여재와 2010년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 1개월), 2010년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 3개월) 및 2010년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 5개월)에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 각 조의 분석용 여재는 호기성조, 혐기성조I 및 혐기성조II 에서 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 각각 조사하였다.

##### (2) 여재 표면의 무기성분 흡착특성

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 채워 넣은 여재 표면의 무기성분 흡착특성 조사는 축산폐수처리장 시설직전의 공시여재와 2010년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 5개월)에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 여재 표면의 무기성분을 SEM 및 EDS로 각각 분석하였다.

다) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량 조사

(1) 수생식물의 생육상황

자연정화공법에 의한 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 수생식물은 2010년 7월 1일에 이식하였으며, 호기성조에는 갈대를 이식하였고, 혐기성조 I에는 노랑꽃창포를 이식하였으며, 혐기성조 II에는 갈대, 창포 및 부들을 각각 이식하였다. 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황 조사는 2010년 8월 1일 (수생식물 이식 후 1개월), 2010년 10월 1일 (수생식물 이식 후 3개월), 2010년 12월 1일 (수생식물 이식 후 5개월)에 건물중량 등을 각각 조사하였다.

(2) 수생식물의 무기성분 함량

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 무기성분 함량 조사는 2010년 8월 1일 (수생식물 이식 후 1개월), 2010년 10월 1일 (수생식물 이식 후 3개월) 및 2010년 12월 1일 (수생식물 이식 후 5개월)에 채취한 식물체의 T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn 을 각각 조사하였다. 수생식물의 무기성분 함량은 생육상황 조사시 채취한 수생식물을 각각 조사하였다.

(3) 무기성분 흡수량

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 무기성분 흡수량은 수생식물 이식 후 1, 3 및 5개월의 각 수생식물의 무기성분 함량에 건물생산량을 곱하여 무기성분 흡수량을 산출하였다.

라) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상 조사

(1) 여재 표면의 미생물상

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 표면 부착미생물은 축산폐수 처리시일별로 총세균, 암모니아산화균, 질산환원균, 탈질균 및 아질산산화균 등을 각각 조사하였다. 자원순환형 축산폐수처리장에 사용한 여재의 표면 부착미생물은 2010년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 1개월), 2010년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 3개월) 및 2010년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 5개월)에 본 축산폐수처리장치의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 각 조의 분석용 여재는 각조의 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 조사하였다.

(2) 여재 표면의 생물막 부착상태

여재 표면의 생물막 부착상태 조사는 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리 5개월 후의 여재를 각 여재별로 채취하여 전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다.

### (3) 축산폐수 중 미생물상 변화

축산폐수 처리시기에 따른 축산폐수 중 미생물상 조사는 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시기를 1, 3 및 5개월로 구분하여 일반세균 및 대장균군을 각각 조사하였다. 일반세균 및 대장균군의 조사시기는 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수처리 효율 조사와 동일한 시기에 조사하였다.

#### 마) 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링 조사

자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질/이동 모델링 조사는 대조구인 브롬과 처리구인 암모니아성 질소, 질산성 질소 및 인의 표준용액을 각각  $50 \text{ mg L}^{-1}$  되게 제조하여 공시원수로 사용하였으며, 공시원수는 정량펌프를 이용하여  $0.4 \text{ mL min}^{-1}$  되게 column 상부에 연속적으로 각 여재의 1 pore volume이 되는 시간동안 주입하고, 이후에 증류수를 연속적으로  $0.4 \text{ mL min}^{-1}$  되게 하여 총 90시간 동안 주입하였다. 5분간 1회씩 유출수를 채취하여 브롬, 암모니아성 질소, 질산성 질소 및 인의 함량을 조사하였으며, 그 결과를 CXTFIT 모델에 적용하여 pore volume에 대한 반응속도 조사하였으며, 각 여재종류별 이동특성을 조사하였다.

### 4) 조사시기

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율 조사는 2010년 7월부터 2010년 12월 31일까지 매달 실시하였으며, 한 조건에서 1개월간 운전하였다. 시료의 채취는 처음 3주간은 1주 1회, 마지막주에는 격일로 4회 분석하여, 총 7회 분석한 결과를 평균하여 각 조건에서의 수처리 효율을 구하였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 조사는 현장 축산폐수처리장 시공직전, 2010년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 1개월), 2010년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 3개월) 및 2010년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 5개월)에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 조사하였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육 조사는 2010년 8월 1일 (수생식물 이식 후 1개월), 2010년 10월 1일 (수생식물 이식 후 3개월) 및 2010년 12월 1일 (수생식물 이식 후 5개월)에 각각 조사하였다.

본 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 여재 중의 미생물상 조사는 현장 축산폐수처리장 시공직전, 2010년 8월 1일 (축산폐수 처리 후 1개월), 2010년 10월 1일 (축산폐수 처리 후 3개월) 및 2010년 12월 1일 (축산폐수 처리 후 5개월)에 본 자원순환형 축산폐수처리장 여재를 채취하여 조사하였다.

### 5) 분석방법

수질, 여재, 식물체 및 미생물의 분석은 상기 1. 가. 5)항의 분석방법과 같고, 오염물질 흡착/이동에 따른 bromide의 농도는 이온 크로마토그래피를 사용하여 측정하였으며, 이들 결과를 이용하여 breakthrough curve를 만들었다. 0.1M Calcium chloride 용액을 이용하여 여재컬럼을 pore volume (P.V.)의 5~6배정도 되게 세척한 후 질소와 인이 함유된 용액을 목표하는 만큼의 pore volume (4~5 P.V.) 수만큼 여재 컬럼에 흐르게 한 후 컬럼의 유출수는 fraction collector를 이용하여 일정한 시간 간격으로 채취하여 T-N은 자외선 흡광광도법으로 분석하였고, T-P는 아스코르빈산 환원법으로 분석하였다.

### 나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발

#### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조 설치 및 시운전

##### 가) 실험장치

현장 퇴비화조는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산 농가에 설치된 현장 자원순환형 축산폐수처리장내에 설계 시공하였다. 퇴비화조 설계는 1차년도 연구에서 자원순환형 모델 구축을 위한 최적 퇴비화조 설계 인자로 선정된 퇴비화조의 최적 비율, 최적 크기, 최적 위치, 공기 주입량 등을 고려하여 설계 시공하였다. 퇴비화조의 크기는 가로 6 m × 세로 3 m로 시공되었으며, 퇴비화조 내에서 다양한 퇴비화 조건 연구를 위하여 퇴비화조를 3등분 하였다 (Fig. 3-18). 퇴비화조 시공은 바닥 기초 작업 후 강우시 빗물이 자연 유하될 수 있도록 퇴비화조 지붕 경사를 10°정도로 완만하게 하여 기본 골격을 제작하였으며, 천장 골격작업을 완료한 후 가운데 부분이 처치지 않게 중간에 지지대를 세운 뒤 외벽과 천장 작업을 하였다 (Fig. 3-19).

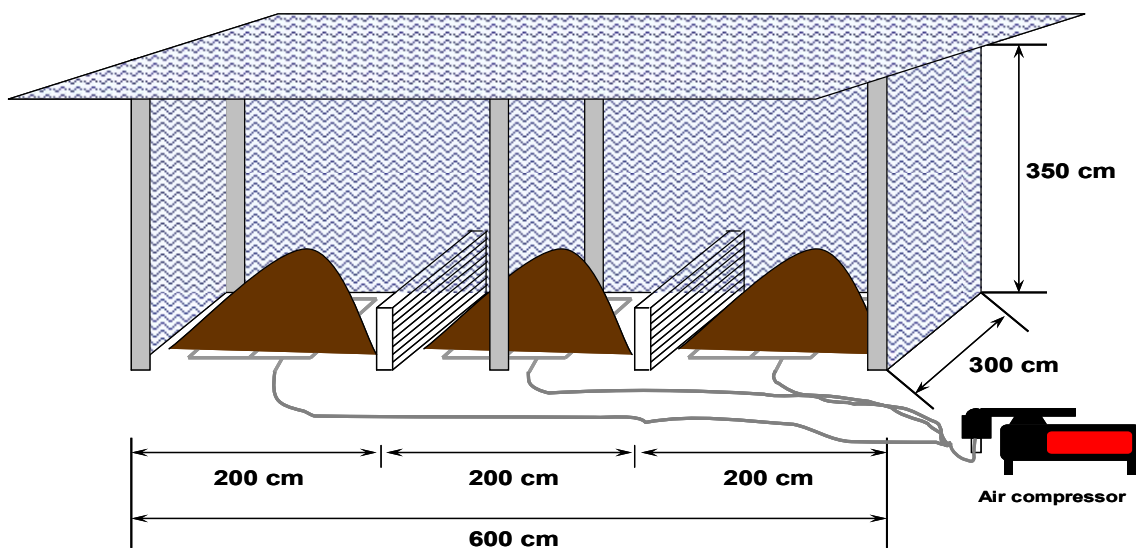


Fig. 3-18. 현장 퇴비화조 설계도.



<퇴비화조 위치 선정>



<퇴비화조 시공을 위한 기초작업>



<퇴비화조 골격 제작>



<퇴비화조 외벽 작업>



<퇴비화조 시공 전경>



<퇴비화조 바닥 복토 작업>



<퇴비화조 바닥 시멘트 작업>



<퇴비화조 완공 전경>

Fig. 3-19. 자원순환형 축산폐수처리장내 현장 퇴비화조 시공 전경.

퇴비화조내 공기주입장치 (Fig. 3-20)는 각 퇴비조의 크기에 맞게 PVC 파이프를 이용하여 가로 0.6 m × 세로 2 m로 제작하였으며, 퇴비화조 내에 주입 노즐이 막힘없이 공기주입을 원활히 하기 위하여 특수 노즐은 5시와 7시 방향에 위치하게 하여 제작하였으며, 특수 노즐의 간격은 15 cm로 하였다. 또한 원활한 공기 주입을 위해 공기주입장치를 세로방향으로 30 cm 간격으로 나열하였으며 (Fig. 3-21), 공기의 주입은 공기압축기 (Air compressor)를 사용하여 조건별로 조정하여 공급하였으며, 조절밸브를 사용하여 공기의 주입량을 조절하였다.

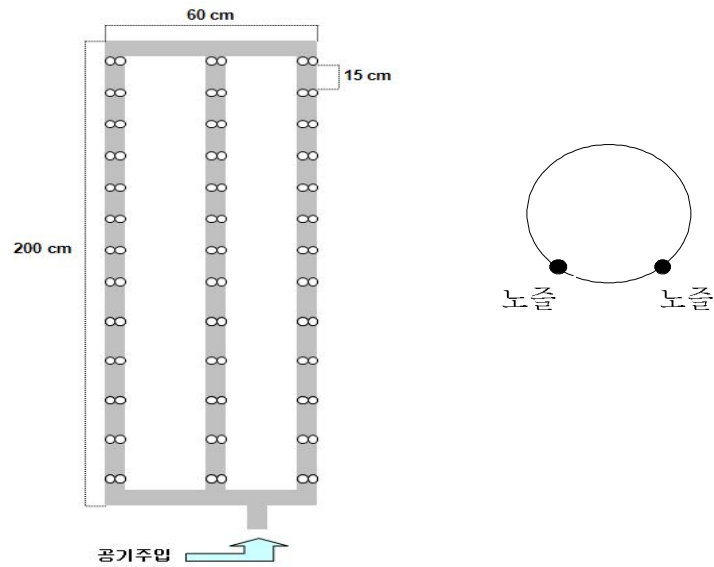


Fig. 3-20. 퇴비화조내에 설치된 공기주입장치 설계도.



Fig. 3-21. 퇴비화조내에 설치된 공기주입장치 제작 전경.

## 나) 실험방법

퇴비화 효율 조사를 위한 퇴비화조 운전은 수확한 수생식물체를 30~50 mm 크기로 절단하여 완전히 건조한 다음 (Fig. 3-22) 식물체별로 50 kg을 퇴비화조에 각각 주입하고 퇴비화 조건별로 수분 및 C/N을 조절을 위하여 축산폐수를 적절하게 혼합한 후 공기주입장치를 통해 퇴비화에 필요한 산소를 주입하면서, 퇴비화조를 시운전하였다.



Fig. 3-22. 퇴비화를 위해 절단된 수생식물체 전경.

## 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율조사

### 가) 공시재료

현장 퇴비화조 운전에 사용한 수생식물은 제1세부과제에서 설치 운영 중인 자원순환형 축산폐수처리장과 전남 보성군 복내면 복내리에 있는 복내 바이오파크 인공습지에서 성장한 갈대, 부들 및 줄 3종을 사용하였다. 제1세부과제에서 설치운영중인 축산폐수처리장은 설치기간이 짧고 수생식물체 생육면적이 적어서 퇴비화 실험 진행에 충분한 biomass를 공급할 수 없었기 때문에 부족한 수생식물은 복내 바이오파크 인공습지에서 성장한 식물체로 충당하였으며, 수생식물 채취 전경은 Fig. 3-23에서 보는 바와 같다. 퇴비화에 사용된 수생식물의 화학적 특성을 조사한 결과는 Table 3-18에서 보는 바와 같이 T-N 함량은 갈대가 1.233%로 가장 높았고, T-C 함량은 모든 수생식물에서 45.1~52.4%로 그 중 부들의 T-C 함량이 52.4%로 가장 높았다. 갈대, 부들 및 줄의 Zn 함량은 수생식물 종류에 따라 별 차이 없이 7.07~13.2 mg kg<sup>-1</sup>범위였으며, 수생식물 내에 함유된 다른 중금속들은 전반적으로 낮은 함량을 보였다.

수분과 C/N을 조절을 위한 축산폐수는 경남 진주시 이반성면에 위치한 돈사로부터 배출되는 것을 사용하였으며 (Fig. 3-24), 공시 축산폐수의 화학적 특성은 Table 3-19에서 보는 바와 같다. 공시 축산폐수의 pH는 7.79이었고, 수분함량은 99.3%이었으며, C/N율은 45이었다. 중금속 함량은 Cu가 1.28 mg kg<sup>-1</sup>이었고, Fe가 3.91 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, Zn이 0.692 mg kg<sup>-1</sup>이었고, Cd, Cr 및 Ni 등의 중금속 함량은 매우 낮았다.



Fig. 3-23. 공시 수생식물 채취 전경.



Fig. 3-24. 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 공시 축산폐수 채취 전경.

Table 3-18. 퇴비화에 사용된 수생식물의 화학적 특성

Water plants	T-N			T-C			C/N	
	----- (%) -----			-----				
<i>Phragmites communis</i>	1.233			47.7			38.9	
<i>Typha orientalis</i>	1.003			52.4			52.3	
<i>Zizania latifolia</i>	0.871			45.1			51.9	
Water plants	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
<i>Phragmites communis</i>	0.033	ND	2.149	1.647	ND	0.994	ND	13.2
<i>Typha orientalis</i>	0.067	ND	0.308	1.175	ND	0.435	0.015	8.46
<i>Zizania latifolia</i>	0.126	ND	1.884	0.199	ND	0.641	ND	7.07
Water plants	Al		Fe		Mn		Mo	
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
<i>Phragmites communis</i>	16.6		50.3		407		ND	
<i>Typha orientalis</i>	56.8		126		849		ND	
<i>Zizania latifolia</i>	47.4		145		406		ND	



Table 3-19. 공시 축산폐수의 화학적 특성

pH	Water content		T-N		T-C		C/N
	-----		(%)		-----		
7.79	99.3		0.926		41.6		45.0
As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
ND	0.01	0.02	1.28	ND	0.09	ND	0.692
Al	Fe		Mn		Mo		
----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
ND	3.91		ND		ND		ND

나) 실험방법

현장 자원순환형 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율을 조사하기 위해 수생식물을 건조한 후 30~50 mm 크기로 절단하여 각 퇴비화조에 식물체별로 50 kg을 주입하고 퇴비화 조건별로 수분 및 C/N을 조절을 위하여 축산폐수를 일정량씩 혼합하였다. 축산폐수가 혼합된 수생식물은 퇴비화조에 퇴적된 후 공기주입장치를 통해 퇴비화에 필요한 산소를 퇴비화 기간동안 일정량씩 주입하면서 퇴비화조 운전기간별 이화학적 특성 변화를 조사하였다.

(1) 수생식물별 퇴비화 (composting) 기간 결정

수생식물별 퇴비화 기간 결정은 퇴비화의 수분조절제로 사용되는 수생식물을 갈대, 부들 및 줄의 3종으로 달리하여 각 수생식물별로 퇴비화 하였다. 퇴비화를 위해 수생식물 50 kg을 퇴비화조에 주입하고, 축산폐수 50 L를 주입하여 수생식물대 축산폐수 비율을 1대1로 한 후 공기주입장치를 통해 퇴비화에 필요한 산소를 주입하였다. 수생식물별 퇴비화 기간 결정을 위해 퇴비화중 시료는 퇴비화 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 및 60일 후의 총 10회에 채취하였으며, 이들 시료 중 온도, pH, T-N, T-C 및 C/N을 분석하여 퇴비화 기간 결정을 수행하였다. 또한 이들 수생식물의 퇴비화 기간의 비교검토를 위해 기존에 가장 보편적으로 사용하고 있는 수분조절제인 톱밥을 대조구로 하여 비교하였다.

(2) 수생식물별 부숙도 판정

수생식물별 부숙도 판정은 상기 가. 항의 수생식물별 퇴비화 기간결정 실험에서 퇴비화가 완료된 60일째에 실시하였다. 부숙도를 파악하는 방법은 화학적인 방법, 생물학적인 방법 및 관능적인 방법이 있으나, 본 실험에서는 이 중 관능적인 방법을 통해 수생식물별 부숙도를 판정하였다. 관능적인 방법에 의한 수생식물별 부숙도 판정은 현장에서 다양한 관능적인 조건을 고

려하기 위해 부숙도 종합 판정법을 적용하였다. 부숙도 종합판정 항목은 색, 형상, 냄새, 수분, 퇴적중 최고 온도, 퇴적기간, 뒤집기 횟수 및 강제통기 유무 등으로 정하고, 각 인자별로 점수를 환산하여 총점을 기준으로 하여 종합적으로 부숙도를 판정하였다.

### (3) 수생식물별 퇴비화 효율 검토

수생식물별 퇴비화 효율은 자원순환형 현장 축산폐수처리장내의 퇴비화조에서 생산된 각 수생식물별 퇴비를 대조구인 톱밥을 이용한 퇴비와 비교 검토하였다. 수생식물별 퇴비화 효율 검토에 사용된 수생식물은 갈대, 부들 및 줄의 3종으로 선정하였고, 이들 수생식물과 축산폐수를 이용하여 퇴비화를 진행한 후 퇴비화 완료시점인 퇴비화 후 60일에 각 수생식물별 퇴비시료를 채취하였다. 채취된 퇴비시료를 이용하여 퇴비화 효율을 검토하기 위해 각 수생식물 퇴비의 무게와 부피 감소율, 단위면적당 생산되는 퇴비의 양을 분석하였다. 또한 이들 수생식물의 퇴비화 효율 검토를 위해 기존에 가장 보편적으로 사용하고 있는 수분조절제인 톱밥을 대조구로 하여 비교하였다.

### (4) 수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화

수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화는 2010년 5월 3일부터 2010년 7월 2일까지 60일간 조사하였으며, 시료 퇴비화 후 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 및 60일째에 채취하였다. 수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화 조사를 위한 분석항목은 온도, pH, T-N, T-C, C/N, 중금속 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb 및 Zn) 및 미량원소 (Al, Fe, Mn 및 Mo)로 각 수생식물별 및 채취시기별로 3반복으로 실험을 수행하였다.

### (5) 수생식물별 최적 조건

수생식물별 최적 조건 조사를 위해 상기 라. 항의 수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화 결과를 활용하여 각 수생식물별 최적 조건을 도출하였다. 각 수생식물별 최적 조건 도출을 위한 항목은 pH, 온도, 함수율 및 C/N율이었고, 톱밥을 이용한 퇴비를 대조구로 하여 수생식물별 최적 조건을 비교하였다.

### (6) 돈분퇴비와 자연퇴비의 품질비교

수생식물+돈분 퇴비는 돈분뇨와 갈대, 부들 및 줄을 각각 1대1로 혼합한 후에 60일간 퇴비화시켰으며, 수생식물 퇴비는 인공습지에서 생산되는 수생식물 (갈대, 부들 및 줄)을 수확한 후 자연상태로 야적하여 인위적인 분뇨 등의 주입이 없이 퇴비화를 진행한 것으로, 본 실험에 사용한 자연퇴비는 야적 후 약 1년간 퇴비화 된 것이었다. 돈분퇴비와 자연퇴비의 품질 비교는 농림수산식품부에서 정하고 있는 비료 공정 규격의 일반퇴비의 기준에 준하였으며, 비교항목은 유기물함량, C/N율, 염분함량, 수분함량 및 유해성분인 8종의 중금속 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb 및 Zn)이었다 (Table 3-20).

Table 3-20. 우리나라의 퇴비 부산물 비료 공정규격 (농림수산식품부 기준)

항 목	일반퇴비 기준
유기물함량	25% 이상
C/N비	50% 이하
염분	2.0% 이하
수분함량	55% 이하
As	111 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Cd	11 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Cu	667 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Cr	667 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Hg	4 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Ni	111 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Pb	333 mg kg <sup>-1</sup> 이하
Zn	2000 mg kg <sup>-1</sup> 이하

(7) 퇴비화를 위한 최적 수생식물 선정

퇴비화에 적합한 최적 수생식물을 선정하기 위해 수생식물을 갈대, 부들 및 줄의 3종으로 달리하였으며, 이들 수생식물별 최적 퇴비화 조건하에서 수생식물별 퇴비화 기간, 부숙도, 퇴비화 효율, 퇴비화 물질변화, 퇴비화의 최적 조건 및 퇴비품질을 종합적으로 비교하여 최적 수생식물을 선정하였다.

다) 조사시기

수생식물별 퇴비화 조사기간은 2010년 5월 3일부터 2010년 7월 2일까지 60일간 조사 하였으며, 퇴비화 기간동안 공기주입장치를 통해 공기를 주입하였다. 퇴비화 기간동안의 시료채취는 퇴비화 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 및 60일째에 수행하여 퇴비화 과정 중 물질변화를 조사하였고, 퇴비화 완료일인 60일째에 수생식물별 부숙도 판정 및 퇴비화 효율을 검토하였다.

수생식물 퇴비의 식물종류별 퇴비화 기간은 2009년 12월 초부터 2010년 11월 말까지 약 1년간 조사하였으며, 공기주입 및 뒤집기는 실시하지 않았다. 자연그대로의 퇴비화 진행을 보았으며 퇴비화 후 약 1, 30, 60 및 360일에 시료채취를 하여 수생식물 퇴비의 물질변화를 조사하였고, 수생식물+돈분 퇴비와 마찬가지로 퇴비화 완료일에 수생식물별 부숙도 판정 및 퇴비화 효율을 검토하여 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비를 비교하였다.

라) 분석방법

공시 축산폐수의 화학적 특성은 상기 1. 나. 2), 다)항의 분석방법과 동일하게 분석하여 조사하였으며, 식물체의 분석은 상기 1. 나. 3), 다)항의 분석방법으로 동일하게 실시하였다.

3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석

가) 공시재료

제1세부과제에서 설치 운영중인 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 생육한 수생식물체의 물리화학적인 특성과 퇴비화시 비료로서의 가치를 검토하기 위하여 8월과 식물이 고사된 11월의 식물체의 화학적인 특성을 조사하였다.

나) 실험장치

자원순환형 축산폐수처리장 시스템 (Fig. 3-25) 구성은 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화공법을 연계한 시스템으로서 축산폐수의 흐름은 1차 수생식물여과조에 축산폐수를 유입시켜 수직여과방식으로 처리하여 유출된 수생식물여과조 처리수는 자연유하식으로 2차 활성슬러지조로 유입되며, 활성슬러지조에 유입된 축산폐수는 체류시간을 고려한 반응조에서 처리가 되어 수생식물 생육습지로 유입되게 되어 있다. 습지조의 축산폐수의 흐름은 호기성조에 활성슬러지조에서 처리된 처리수를 위로부터 유입시켜 아래로 수직여과방식으로 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 4차 및 5차 혐기성조로 유입되게 하였고, 각 혐기성조에 유입된 축산폐수는 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 되어 있다.

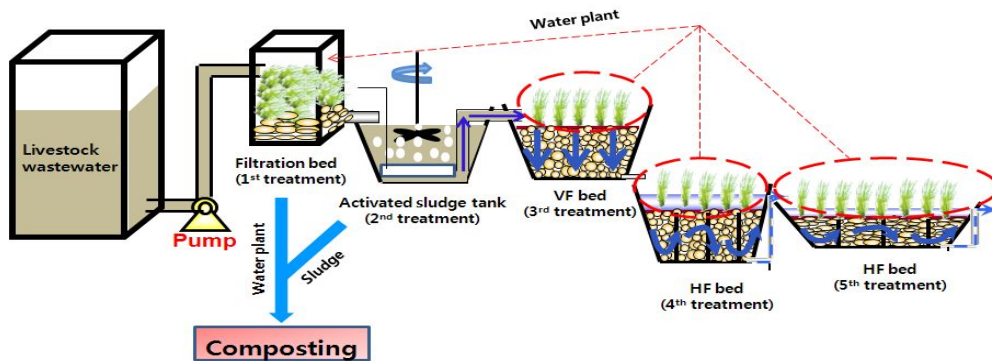


Fig. 3-25. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 설계도.

다) 실험방법

제1세부과제에서 설치 운영중인 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 생육한 수생식물체의 물리화학적인 특성과 퇴비화시 비료로서의 가치를 검토하기 위하여 생육이 왕성한 8월과 식물이 생육이 저조한 11월에 채취한 식물체의 화학적인 특성을 조사하였다.

#### 라) 조사시기

자원순환형 축산폐수처리장에서 수생식물의 비료적 가치 분석을 위해 8월 및 11월에 각각 채취하여 조사하였다.

#### 마) 분석방법

수생식물체의 수분함량, 유기물, T-C, T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na 및 중금속 (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb 및 Zn)의 함량을 조사하기 위한 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 식물체는 습식분해법 ( $H_2SO_4 + HClO_4$ )으로 전처리하여 T-N은 Kjeldahl법 (질소자동분석기, Gerhardt autosampler Vapodest 50 carouse, Germany)으로 분석하였고, T-P는 Vanado molybdate법 (UV2550PC, Pekinelmmer)으로 분석하였으며, K, C, Mg, Na 및 중금속의 함량은 산으로 전처리 후 여액을 ICP (ICPE-9000, Shimadzu)를 사용하여 분석하였다. 수분함량은 감량법을 사용하였으며, 유기물은 회화법을 사용하였고, T-C는 총 유기탄소 측정기 (TOC-V/CPN)로 측정하여 T-C의 함량을 구하였다.

#### 4) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토

##### 가) 공시재료

현재 제1세부과제에서 실제 축산농가에 설치하여 운영중인 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장은 짧은 운영기간으로 퇴적층에 쌓인 퇴적물의 양이 충분하지 않아 전남보성군 복내면에 있는 하수종말처리장 방류수 처리 목적으로 2000년 3월에 설치 운영중인 바이오파크 인공습지의 퇴적층을 관련기관의 협조를 구하여 2010년 12월에 퇴적층을 채취 (Fig. 3-26)하여 퇴적물 내에 존재하는 식물영양학적인 특성과 유해 중금속 함량 조사 등 토양개량제로서의 이용가능성을 조사하였다.

##### 나) 실험방법

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 인공습지의 퇴적층에서 발생하는 퇴적물의 토양개량제로서의 이용 가능성을 검토하기 위해 pH, EC, T-N, O.M, T-C, T-P, K, Ca, Mg, Na 및 유해 중금속 (As, Cd,  $Cr^{6+}$ , Cu, Hg, Ni, Pb 및 Zn)을 조사하였다.

##### 다) 조사시기

자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성을 검토하기 위한 조사는 2010년 10월에 조사를 실시하였다.

##### 라) 분석방법

토양개량제 이용가능성 검토를 위한 습지 퇴적층의 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분

석법 (NIAST, 2000)에 준하여 pH, EC, O.M, T-N, T-P, T-C, K, Ca, Mg, Na 및 중금속 (As, Cd, Cr6+, Cu, Hg, Ni, Pb 및 Zn)를 분석하였다.



[인공습지 퇴적물 채취]



[채취된 퇴적물 수송]



[갈대 서식 인공습지 퇴적물]



[줄 서식 인공습지 퇴적물]



[부들 서식 인공습지 퇴적물]



[채취된 퇴적물 구성물]

Fig. 3-26. 복내 바이오파크 인공습지 퇴적층에서 채취한 퇴적물.

### 3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화

#### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화

##### 1) 공시재료

본 실험에 사용된 공시 축산폐수는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산농가에서 채취하여 공시 원수로 사용하였으며, 공시 여재는 2차년도 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재를 공법개선 및 보완한 후 다시 충전하여 사용하였다.

공시 축산폐수의 이화학적 특성은 Table 3-21과 같고, 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성은 상기 1. 다. 1)항의 공시여재의 특성과 동일하다.

Table 3-21. 공시 축산폐수의 이화학적 특성

pH	EC	COD	SS	T-N	T-P
	(dS m <sup>-1</sup> )	----- (mg L <sup>-1</sup> ) -----			
6.8±0.7	2.64±0.28	13,553±2,390	19,669±4,581	6,063±900	709±122

##### 2) 실험장치

1-2차년도의 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리기술 개발 결과의 최적 조건을 이용하여 3차년도의 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리기술 실용화를 위해 2차년도에 시공된 축산폐수 처리장을 개선 및 보완하였다.

현장 축산폐수처리장은 2차년 연구결과 최적공법이었던 수생식물여과조-활성슬러지조-호기성조-혐기성조 I-혐기성조 II로 총 5단계의 처리과정을 거치면서 오염물질을 처리하였다. 5단계 축산폐수처리시스템은 99%이상의 높은 처리효율을 보였지만 시설관리 및 운영면에 있어서 수생식물여과조의 잦은 수생식물 교체, 활성슬러지조의 오염물질 부하에 따른 처리효율 감소 등의 문제가 있었고, 수위조절을 위해 설계했던 혐기성조 II는 혐기성조 I에서 대부분의 오염물질이 처리됨에 따라 큰 영향이 없는 것으로 판단되었으며, 차후 장기간 처리효율에 있어서 혐기성조 II는 부적합 할 것으로 판단되었다. 그로 인해 3차년도 자연정화공법에 의한 축산폐수처리기술의 실용화를 위해 기존의 시설관리 및 운영에 어려움이 많았던 수생식물여과조를 제거하였으며, 활성슬러지조의 경우 기존 일체형을 2단 활성슬러지조를 구성하여 1단은 운영조, 다른 1조는 회복조로 구성하여 부하량에 따른 수처리 효율을 감소를 방지하고자 하였다. 또한 기존의 혐기성조 I, 혐기성조 II로 구성되었던 혐기성조를 일체형으로 구성하여 장기간의 오염물질 처리효율을 극대화 하고자 하였다. 공법개선된 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장의 모식도는 Fig. 3-27과 같다.

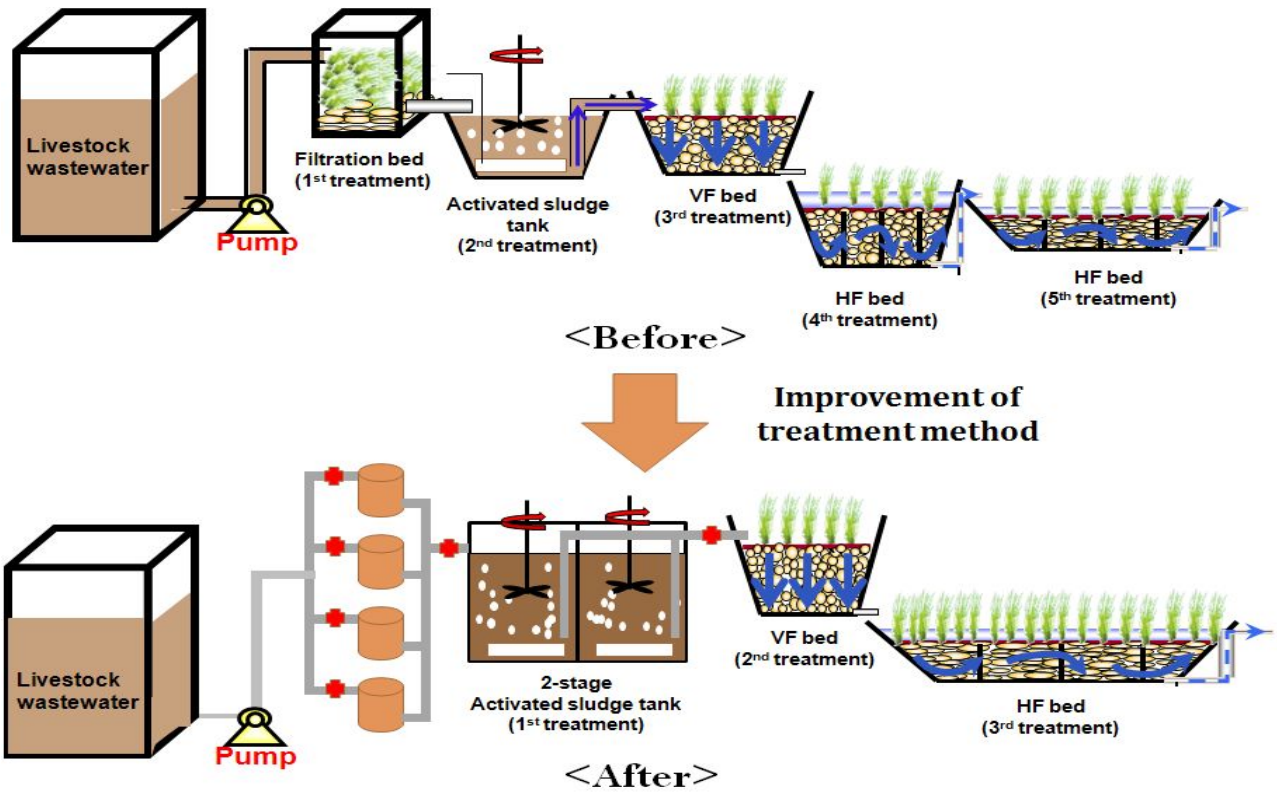


Fig. 3-27. 공정개선된 현장 축산폐수처리장의 설계도.

공정개선된 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 활성슬러지조-호기성조-혐기성조를 연계하여 하나의 시스템으로 운전이 가능하게 제작하였다. 활성슬러지조는 세로 4 m × 가로 2 m × 높이 1 m로 용량이 8 m<sup>3</sup>이 되게 2단으로 구성하여 제작하였으며, 자연정화공법의 호기성조의 경우 세로 4 m × 가로 4 m × 높이 1 m로 용량이 16 m<sup>3</sup>이 되게 제작하였고, 3차 혐기성조의 경우는 세로 10 m × 가로 5 m × 높이 1 m로 용량이 50 m<sup>3</sup>이 되게 제작하였다. 2단 활성슬러지조에는 산청군 축산폐수 공공처리시설에서 채수한 활성슬러지를 하부에서 0.90 m까지 주입하였다. 그리고 자연정화공법의 호기성조에는 왕사, 쇠석 및 방해석 3 : 2 : 1의 비율로 혼합하여 여재를 충전하였고, 혐기성조에는 경우는 왕사, 쇠석 및 제올라이트를 3 : 2 : 1의 비율로 혼합하여 충전하였다. 공정개선된 자원순환형 축산폐수처리장에서 축산폐수의 흐름은 1차 활성슬러지조에 축산폐수를 유입시켜 체류시간을 고려한 반응조에서 처리하였고 유출된 활성슬러지 처리수는 호기성조에 유입되게 하였고, 호기성조에 활성슬러지조에서 처리된 처리수는 위로부터 유입시켜 아래로 수직여과방식으로 처리하여 유출된 호기성조 처리수는 자연유하식으로 혐기성조로 유입되게 하였고, 각 혐기성조에 유입된 축산폐수는 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.





(2차년도 혐기성조 )



(기존 혐기성조 굴착)



(혐기성조 굴착 완공)



(혐기성조 차수막 설치)



(혐기성조 호기성조와 배관 연결)



(혐기성조 여재 충전)



(수생식물 이식)



(공정개선된 혐기성조)

Fig. 3-28. 자원순환형 현장 축산폐수처리장 공정개선 전경.



(기존 활성슬러지조)



(활성슬러지 제거)



(2단 활성슬러지 시공)



(2단 구성된 활성슬러지 완공)



(활성슬러지조 호기성조와 배관 연결)



(완공된 활성슬러지조 시험 가동)



(공정개선된 자원순환형 축산폐수처리장)

Fig. 3-29. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 공정개선 전경.

### 3) 실험방법

#### 가) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 장기간 수처리 효율

##### (1) 부하량별 수처리 효율

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 축산폐수 부하량에 대한 대응성을 조사하기 위해 축산폐수 부하량을 각각 400, 800 및 1200 및 1600 L day<sup>-1</sup>로 달리하여 pH, EC, DO, COD, SS, T-N T-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

##### (2) 시기별 수처리 효율

공정개선된 현장 축산폐수처리장의 처리시일에 따른 수처리 효율 조사는 2011년 6월 13일부터 2012년 3월 19까지 축산농가로부터 배출되는 축산폐수를 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 수처리 효율의 장기간 변화를 조사하기 위해 축산폐수처리장의 공정개선 후부터 연구종료 시점인 3월 까지 총 10개월간 주 1회 원수, 1차 처리인 활성슬러지조 처리수, 2차 처리인 호기성조 처리수 및 3차 처리인 혐기성조 처리수 (방류수)를 각각 채취하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 함량을 각각 조사하였다.

##### (3) 계절별 수처리 효율

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리 경과기간 동안의 계절별 수처리 효율은 여름은 2011년 6, 7, 8월, 가을은 2011년 9, 10, 11, 겨울은 2011년 12, 2012년 1, 2월 및 봄은 2012년 3월로 각각 구분하여 축산폐수 처리효율을 평균하여 조사하였다.

##### (4) 이상기후에서의 수처리 효율

현장 축산폐수처리장은 외부환경에 그대로 노출되어 있기 때문에 정상적인 환경이 아닌 장마기, 가뭄기 및 혹한기의 이상기후에서 하수처리장의 대응성을 조사하기 위해 이상기후에서의 수처리 효율을 조사하였다. 장마기 및 가뭄기의 처리효율 조사는 축산폐수처리장이 위치한 진주시의 강수량 및 평균기온의 통계자료를 이용하여 장마기의 처리효율 조사는 장마가 지속되었던 2011년 7-8월경의 장마기간에 수처리 효율을 조사하였고, 가뭄기의 처리효율 조사는 월별 강우량이 가장 낮았던 2011년 12월 가뭄기간에 수처리 효율을 조사하였으며, 혹한기의 처리효율 조사는 2012년 1-2월까지의 수처리 효율을 조사하였다.

##### (5) 오염물질의 분해속도

현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 분해속도 조사는 축산폐수처리장에서 오염물질의 처리 경향을 파악하고, 이를 토대로 축산폐수처리장의 설계 및 시공 시 부지면적 감소와 오염물질의 처리효율 극대화를 위한 기초자료로 활용하기 위해 현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 반응비 조사결과를 이용하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 분해속도를 각각 조사하였으며, 각 오염물

질의 분해속도는 상기 2. 가. 3)항의 실험방법 중 오염물질 분해속도와 동일한 방법으로  $\ln(C/C_0) = -Kt$ 의 1차 반응속도식을 이용하였다.

#### (6) 용존형태별 수처리 효율

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 중 COD의 존재형태는 각각 유리섬유 여지(GF/C)에 축산폐수를 흡인 여과시켜 여액을 SCOD (Soluble COD)로 하고, GF/C에 여과시켜 여과지를 통과하지 못한 것을 ICOD (Insoluble COD)로 구분하였다. 축산폐수 중 SS의 존재형태는 하수를 회화시켰을 때 타서 휘발되어 감량되는 부분인 VSS (Volatile Suspended Solid)와 잔류하는 부분인 FSS (Fixed Suspended Solid)로 구분하였고, T-N과 T-P의 존재형태는 GF/C에 여과시켜 여과지를 통과한 여액을 DTN (Dissolved T-N) 및 DTP (Dissolved T-P)로 하고, GF/C에 여과시켜 여과지를 통과하지 못한 것을 STN (Suspended T-N) 및 STP (Suspended T-P)로 구분한 후 오염물질 용존형태별 수처리 효율을 조사하였다.

#### 나) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성

##### (1) 장기간 여재의 이화학적 특성

현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성조사는 시공직전의 공시여재와 2011년 7월 (축산폐수 처리 후 1개월), 2011년 9월 (축산폐수 처리 후 3개월), 2011년 11월 (축산폐수 처리 후 5개월), 2012년 1월 (축산폐수 처리 후 7개월) 및 2012년 3월 (축산폐수 처리 후 9개월)에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 각각 조사하였다. 그리고 분석용 여재는 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조에서 각각 깊이별로 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 여재 중 pH, EC, 유기물, T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn 함량을 각각 조사하였다.

##### (2) 장기간 여재 표면의 무기성분 흡착특성

현장 축산폐수처리장에 채워 넣은 여재 표면의 무기성분 흡착특성 조사는 축산폐수처리장 시공직전의 공시여재와 2011년 7월 (축산폐수 처리 후 1개월), 2011년 9월 (축산폐수 처리 후 3개월), 2011년 11월 (축산폐수 처리 후 5개월), 2012년 1월 (축산폐수 처리 후 7개월) 및 2012년 3월 (축산폐수 처리 후 9개월)에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 여재 표면의 무기성분을 SEM 및 EDS로 각각 분석하였다.

#### 다) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안

##### (1) 수생식물 생육특성

공정개선된 현장 축산폐수처리장의 수생식물은 2011년 6월에 이식하였으며, 2차 호기성조에는 갈대를 이식하였고, 3차 혐기성조에는 노란꽃창포 및 부들을 각각 이식하였다. 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육조사는 2011년 7월 (수생식물 이식 후 1개월), 2011년 9월

(수생식물 이식 후 3개월), 2011년 11월 (수생식물 이식 후 5개월), 2012년 1월 (수생식물 이식 후 7개월) 및 2012년 3월 (수생식물 생육 후 9개월)에 건물중을 각각 조사하였다.

### (2) 수생식물의 무기성분 함량

현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 무기성분 함량 조사는 2011년 7월 (수생식물 이식 후 1개월), 2011년 9월 (수생식물 이식 후 3개월), 2011년 11월 (수생식물 이식 후 5개월), 2012년 1월 (수생식물 이식 후 7개월) 및 2012년 3월 (수생식물 생육 후 9개월)에 식물체 중의 T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn 함량을 각각 조사하였다.

### (3) 무기성분 흡수량

현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 무기성분 흡수량은 수생식물 이식 후 1, 3, 5, 7, 및 9개월 후의 각 수생식물의 무기성분 함량에 건물생산량을 곱하여 식물체 중의 T-N, T-P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량을 각각 산출하였다.

## 라) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화

### (1) 생물막 구성 및 미생물 분포

현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 표면 부착미생물은 축산폐수 처리시기별로 총세균, 암모니아산화균, 질산화원균, 탈질균 및 아질산산화균 등을 각각 조사하였다. 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 표면 부착미생물은 2011년 7월 (축산폐수 처리 후 1개월), 2011년 11월 (축산폐수 처리 후 5개월) 및 2012년 3월 (축산폐수 처리 후 9개월)에 본 축산폐수처리장치의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 각 조의 분석용 여재는 각조의 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 조사하였다.

### (2) 여재 및 식물부착 생물막의 전자현미경 조사

여재 표면의 생물막 부착상태 조사는 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리 9개월 후의 여재를 각 처리조별로 채취하여 전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다.

### (3) 축산폐수 중 미생물상 변화

축산폐수 처리시기에 따른 축산폐수 중 미생물상 조사는 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시기를 1, 5 및 9개월로 구분하여 일반세균 및 대장균군을 각각 조사하였다. 일반세균 및 대장균군의 조사시기는 현장 축산폐수처리장에서 수처리 효율 조사와 동일한 시기에 조사하였다.

마) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치

(1) 총유입량, 총유출량 및 증발산량 조사

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수처리장 운전 2년 동안 매주 1회 축산폐수 원수, 활성슬러지조, 호기성조 및 혐기성조 처리수 및 방류수의 유량을 측정하여 그 차이를 평균하여 연간 증발산량을 조사하였다.

(2) 오염물질의 물질수지 조사

현장 축산폐수처리장에서의 오염물질의 수지는 총 부하량, 활성슬러지조 처리량, 호기성조 처리량, 혐기성조 처리량 및 총 방류량으로 구분하였다. 오염물질 중 질소 및 인은 호기성조와 혐기성조에서 처리되는 양을 수생식물의 흡수량, 여재에 의한 흡착 또는 침전, 그리고 기타 처리량으로 세분화하였다.

축산폐수처리장 운영 10개월 동안 유입된 축산폐수 중의 각 오염물질의 연간 총 부하량은 연 평균 유입되는 오염물질 농도 ( $\text{mg L}^{-1}$ )  $\times$  유입하수량 ( $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$ )으로 산출하였다. 각 오염물질의 연간 총 부하량을 토대로 하여 오염물질 수치식을 아래와 같이 작성하였다. ①식은 오염물질 수치식으로서 축산폐수처리장에 유입된 오염물질의 10개월간 총 유입량이 활성슬러지조, 호기성조 및 혐기성조에서 처리되어 방류된 것으로 나타내었으며, ①식 중 활성슬러지조의 오염물질 수지를 ②식과 같이 나타내었고, 호기성조의 오염물질 수지를 ③식과 같이 나타내었으며, 혐기성조의 오염물질 수지를 ④식과 같이 나타내었다.

$$\textcircled{1} \sum I_{in} = \sum T_{ac} + \sum T_{ae} + \sum T_{an} + \sum E_{ef}$$

$\sum I_{in}$  : 오염물질의 연간 총 유입량

$\sum T_{ac}$  : 활성슬러지조에서 오염물질의 연간 총 처리량

$\sum T_{ae}$  : 호기성조에서 오염물질의 연간 총 처리량

$\sum T_{an}$  : 혐기성조에서 오염물질의 연간 총 처리량

$\sum E_{ef}$  : 오염물질의 연간 총 방류량

$$\textcircled{2} \sum T_{ac} = \sum T_{acm}$$

$\sum T_{axf}$  : 활성슬러지조에서 미생물에 의한 오염물질의 연간 총 처리량

$$\textcircled{3} \sum T_{ae} = \sum T_{aep} + \sum T_{aef} + \sum T_{aao}$$

$\sum T_{ap}$  : 호기성조에서 수생식물의 분해에 의한 오염물질의 연간 총 처리량

$\sum T_{af}$  : 호기성조에서 여재에 의한 오염물질의 연간 총 흡착량

$\sum T_{ao}$  : 호기성조에서  $\sum T_{ap}$ 와  $\sum T_{af}$ 를 제외한 오염물질의 연간 총 처리량

$$\textcircled{4} \sum T_{an} = \sum T_{anp} + \sum T_{anf} + \sum T_{ano}$$

$\sum T_{anp}$  : 혐기성조에서 수생식물의 분해에 의한 오염물질의 연간 총 처리량

$\sum T_{anf}$  : 혐기성조에서 여재에 의한 오염물질의 연간 총 흡착량

$\sum T_{ann}$  : 혐기성조에서  $\sum T_{anp}$ 와  $\sum T_{anf}$ 를 제외한 오염물질의 연간 총 처리량

①식에서  $\Sigma I_{in}$ 은 축산폐수처리장에 유입된 연간 오염물질의 총 유입량이며, 이 총 유입량은 활성슬러지조에서 처리되는  $\Sigma T_{ac}$ , 호기성조에서 처리되는  $\Sigma T_{ae}$  및 혐기성조에서 처리되는  $\Sigma T_{an}$ 으로 구분하였고, 활성슬러지, 호기성조 및 혐기성조에서 처리되지 못하고 방류되는 오염물질의 총 방류량은  $\Sigma E_{ef}$ 로 나타내었다.

②식은 활성슬러지조에서 처리되는 오염물질 수지를 나타낸 식으로  $\Sigma T_{ac}$ 는 활성슬러지조에서 처리되는 오염물질의 연간 총 처리량이며, 활성슬러지조에서 미생물에 의한 오염물질의 연간 총 처리량은  $\Sigma E_{acm}$ 로 나타내었다.

③식은 호기성조에서 처리되는 오염물질 수지를 나타낸 식으로  $\Sigma T_{ae}$ 는 호기성조에서 처리되는 오염물질의 연간 총 처리량이며, 호기성조에서 처리되는 오염물질 중 호기성조에 채워진 수생식물에 의해 축적되는 오염물질의 연간 총 축적량인  $\Sigma T_{aep}$ 와 호기성조에 채워진 여재에 의해 축적되는 오염물질의 연간 총 축적량인  $\Sigma T_{aef}$ 와 호기성조에서  $\Sigma T_{aep}$ 와  $\Sigma T_{aef}$ 를 제외한 오염물질의 연간 총 처리량인  $\Sigma T_{aeo}$ 로 구분하였다.

④식은 혐기성조에서 처리되는 오염물질 수지를 나타낸 식으로  $\Sigma T_{an}$ 은 혐기성조에서 처리되는 오염물질의 연간 총 처리량이며, 혐기성조에서 처리되는 오염물질 중 혐기성조에 채워진 수생식물에 의해 축적되는 오염물질의 연간 총 축적량인  $\Sigma T_{anp}$ 와 혐기성조에 채워진 여재에 의해 축적되는 오염물질의 연간 총 축적량인  $\Sigma T_{anf}$ 와 혐기성조에서  $\Sigma T_{anp}$ 와  $\Sigma T_{anf}$ 를 제외한 오염물질의 연간 총 처리량인  $\Sigma T_{ano}$ 로 구분하였다.

#### (가) COD 및 SS 물질수지

현장 축산폐수처리장에서 COD 및 SS 수지는 상기 오염물질 수지 계산식 ①에 의해 축산폐수 원수, 1차 처리인 활성슬러지조 처리수, 2차 처리인 호기성조 처리수 및 3차 처리인 혐기성조 처리수인 방류수의 연간 농도와 유입량을 고려하여 각각 계산하였다.

#### (나) T-N 및 T-P 물질수지

현장 축산폐수처리장에서 T-N 및 T-P 수지는 상기 오염물질 수지 계산식 ①, ②, ③ 및 ④에 의해 1차 처리인 활성슬러지조 처리수, 2차 처리인 호기성조 처리수 및 3차 처리인 혐기성조 처리수인 방류수의 연간 농도와 유입량을 고려하고, 여기에 호기성조 및 혐기성조에서는 수생식물의 연간 T-N 및 T-P 흡수량과 여재의 연간 T-N 및 T-P 증가량을 고려하여 각각 계산하였다.

바) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 효율 비교

(1) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 수처리효율 비교

본 처리공법과 타 기계식 공법간 수처리효율 비교 조사는 유입수의 성상과 농도가 달라 직접적인 비교가 힘들어 최종 방류수중의 COD, SS, T-N 및 T-P 농도만을 비교하였다.

(2) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 경제성 비교

본 처리공법과 타 공법간 경제성 비교는 유입수 성상, 설계용량 및 처리공법이 달라 직접적인 비교가 힘들어 단순히 2006년 환경부 “축산폐수 처리통계” 자료 및 2000년 한국농촌경제연구원 “가축분뇨처리시설의 시설비 및 운영비 조사연구” 자료를 토대로 하여 본 처리공법과 타 공법의 경제성을 비교하였다.

사) 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 설계규격화 및 관리지침 제시

(1) 자원순환형 축산폐수처리장 설계규격화

(가) 사육 가축에 따른 설계규격화

사육 가축에 따른 설계규격화는 본 축산폐수처리장이 시공된 축산농가에서 일일 발생하는 폐수의 총량을 기준으로 축산폐수처리장으로 설계 시공할 시 소요되는 부지면적을 기준으로 하여 설계규격화 하였다.

(나) 시설규모 및 비용을 고려한 설계 규격화

시설규모 및 비용을 고려한 설계규격화는 축산농가 규모에 따라 허가대상 및 신고대상으로 구분하였고, 신고대상 중 중규모와 소규모로 구분하여 축산폐수처리장을 설계규격화 하였다.

(2) 자원순환형 축산폐수 처리시스템의 관리지침 제시

자원순환형 축산폐수 처리시스템의 관리지침은 2년간의 축산농가에서부터 배출되는 축산폐수를 처리함으로써 문제점과 보완 및 개선점 등을 고려하여 일반적인 사항과 처리조별 관리사항을 구분하여 제시하였다.

(3) 자원순환형 축산폐수 처리장의 실용화 (농가형, 공장형, 공동이용 등) 모델 제시

자원순환형 축산폐수처리장의 실용화 모델은 농가형, 공장형 및 공동이용형으로 구분하여 제시하였으며, 각 농가에서 발생하는 축산폐수 배출량 및 현 자연정화공법 축산폐수처리장의 운전인자 등을 고려하여 제시하였다.



## 나. 자원순환형 수생식물 퇴비화 기술 실용화

### 1) 자원순환형 현장 퇴비화조의 보완 및 개선

#### 가) 실험장치

자원순환형 퇴비화 기술을 실용화하기 위해 본 연구진에 보완 및 개선한 퇴비화조는 송풍형 정지 더미식 퇴비화 공법 (Aerated static pile)이다. 송풍형 정지 더미식은 퇴비화 물질에 공기를 공급하기 위하여 송풍기를 사용하는 한단계 위의 관 송풍 시스템을 이용한다. 일단 퇴비화 더미가 형성되면 재료의 뒤집거나 교반은 실시하지 않고 blower에서 공기를 충분히 공급하여 퇴비화를 진행하는 공법이다. 본 연구에서 제작한 송풍형 정지 더미식 퇴비화 장치는 Fig. 3-30에서 보는 바와 같이 퇴비 더미의 가로 × 세로 × 높이는 300 × 200 × 60 cm의 단일더미 (Individual pile)로 하여 퇴비를 생산하였다.

공기가 공급되는 blower의 전류는 11/6.3 A이고 최대 풍량은 3,510 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>이었으며, 회전수는 2,980 rpm이었다.

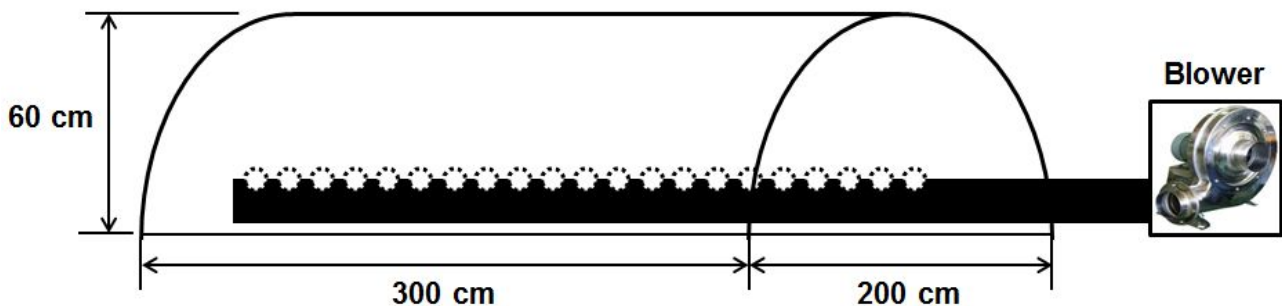


Fig. 3-30. 송풍형 정지 더미식 퇴비화 장치.

#### 나) 실험방법

송풍형 정지 더미식 퇴비화 공법을 활용한 퇴비화는 2011년 8월에 채취한 갈대, 부들 및 줄을 3~5 cm 크기로 절단하여 완전히 건조한 다음 퇴비화를 진행하였으며, 퇴비화 수생식물별로 축산폐수를 적절하게 혼합한 후 송풍기를 통해 공기를 공급하여 시운전하였다.

### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산

#### 가) 공시재료

자원순환형 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산 및 품질검정을 하기 위한 공시 수생식물체는 2011년 8월에 복내 바이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄을 채취하였으며, 공시 수생식물체의 무기성분 특성은 Table 3-22에서 보는 바와 같다. T-N의 함량은 식물체 종류에 상관없이 2.11~2.52%이었고, K의 함량은 1.71~2.21% 범위이었다.

Table 3-22. 공시 수생식물체의 무기성분 특성

Aquatic plants	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na
	----- (%) -----					
<i>Phragmites communis</i>	2.00	0.61	1.84	0.22	0.08	0.15
<i>Typha orientalis</i>	2.20	0.95	2.21	0.80	0.14	0.37
<i>Zizania latifolia</i>	2.15	0.51	1.71	0.46	0.07	0.34

자원순환형 축산폐수처리장에서 퇴비로 사용될 수생식물별 생육상황을 조사한 결과는 Table 3-23에서 보는 바와 같다. 2011년 8월에 조사한 갈대, 부들 및 줄의 건물중은 각각 26.0, 71.6 및 31.8 g plant<sup>-1</sup>으로 부들이 가장 많았으며, 개체수는 각각 102, 94 및 115 ea m<sup>-2</sup>으로 줄의 개체수가 가장 많았다. 이에 따른 건물 바이오매스 생산량은 부들이 6.73 kg m<sup>-2</sup>으로 가장 많았다.

Table 3-23. 수생식물별 생육상황 특성

Aquatic plants	Fresh weight	Dry weight	Plant heights	No. of plants	Biomass
	(g plant <sup>-1</sup> )		(cm)	(ea m <sup>-2</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> )
<i>Phragmites communis</i>	47.7	26.0	274.6	102	2.65
<i>Typha orientalis</i>	384.5	71.6	270.3	94	6.73
<i>Zizania latifolia</i>	96.1	31.8	250.6	115	3.66

수분과 C/N을 조절을 위한 축산폐수는 2차년도 연구에서 사용한 축산폐수를 사용하였으며 공시 축산폐수의 이화학적 특성은 Table 3-24와 같다. 공시 축산폐수의 pH는 7.82이었고, 수분 함량은 99.1%이었으며, C/N율은 43.8이었다. 중금속 함량은 Cu가 1.36 mg kg<sup>-1</sup>이었고, Fe가 4.02 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, Zn이 0.81 mg kg<sup>-1</sup>이었고, As, Cd, Hg 및 Pb 등의 중금속 함량은 검출되지 않았다.

Table 3-24. 공시 축산폐수의 화학적 특성

pH	Water content		T-N		T-C		C/N
	-----		(%)		-----		
7.82	99.1		0.906		39.7		43.8
As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
ND	ND	0.01	1.36	ND	0.21	ND	0.81
Al		Fe		Mn		Mo	
----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
ND		4.02		ND		ND	

나) 실험방법

자원순환형 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품을 생산하기 위해 수생식물별 퇴비화를 각각 진행하여 연간 퇴비 생산량을 조사하였으며, 퇴비 시제품의 품질을 조사하였다. 품질조사는 퇴비 중 N, P, O.M, K, Ca 및 Mg 등의 함량을 분석하였다.

다) 분석방법

공시 축산폐수의 분석은 상기 1. 나. 2), 다)항의 분석방법과 같고, 식물체의 분석은 상기 1. 나. 3), 다)항의 분석방법과 동일하게 하였으며, 퇴비의 분석은 상기 2. 나. 2), 라)항의 분석방법과 같다.

3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정

생산된 수생식물별 퇴비 시제품의 품질검정을 위해 농촌진흥청 퇴비규격에 따른 퇴비 품질검정과 퇴비공정개선을 통한 주성분의 함량보정을 실시하였다.

4) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험

가) 수생식물 퇴비를 이용한 포트 재배시험

(1) 공시재료

생산된 퇴비의 작물시용 효과시험을 하기 위한 공시 토양의 이화학적 특성은 Table 3-25에서 보는 바와 같다. 공시 토양은 경남 진주시 사봉면 방촌리 1201-35번지에 위치한 밭에서 채취한 토양으로 pH는 6.80, O.M의 함량은 3.06%이었으며, T-N의 함량은 0.15%이었다.

공시 퇴비는 2차년도에 연구에서 최적 수생식물로 선정된 부들과 돈분뇨를 혼합한 퇴비와 돈분뇨를 혼합하지 않은 갈대, 부들 및 줄은 퇴비와 수생식물 잔여물로 만든 혼합퇴비 1 및 2

를 작물의 시용효과 시험에 사용하였다. 공시 퇴비의 이화학적 특성은 Table 3-26와 같다. 공시 퇴비 중 T-N의 함량은 돈분 퇴비가 2.08%로 가장 많았고, 갈대, 부들 및 줄 퇴비의 T-N 함량은 각각 1.52, 1.84 및 1.68%이었다.

포트 재배실험에 사용된 공시 작물은 파종 후 10일된 상추, 배추 및 무를 사용하였다.

Table 3-25. 공시 토양의 이화학적 특성

pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M ----- (%) -----	T-N -----	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----	SiO <sub>2</sub> -----
6.80	0.76	3.06	0.15	291	13.70
K -----	Ca -----	Mg ----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----	Na -----	CEC -----	
0.57	6.63	4.10			12.8

Table 3-26. 포트 재배실험에 사용된 공시 퇴비의 이화학적 특성

	pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M -----	T-N ----- (%) -----	T-P -----	SiO <sub>2</sub> -----
부들+돈분 퇴비	7.50	10.05	32.13	2.08	0.32	12.56
갈대 퇴비	6.14	6.94	32.67	1.52	0.19	12.82
부들 퇴비	5.65	13.48	30.74	1.84	0.27	12.85
줄 퇴비	4.90	9.11	35.75	1.68	0.16	27.37
혼합 퇴비1	6.90	4.44	67.20	0.76	0.18	56.41
혼합 퇴비2	4.70	1.41	81.13	0.39	0.14	68.95

## (2) 실험방법

### (가) 퇴비화시험을 위한 현장포장 위치 선정

퇴비화시험을 위한 현장포장 위치는 경남 진주시 이반성면 장안리에 위치한 실제 축산 농가에 선정하였다.

### (나) 처리방법 및 대상 작물 선정

포트 재배실험에 대한 시비처방은 Table 3-27에서 보는 바와 같다. 배추의 경우 질소, 인산 및 칼리를 각각 11.1, 17.5 및 9.7 kg 10a<sup>-1</sup>으로 기비하였고, 상추는 각각 8.0, 9.9 및 7.0 kg 10a<sup>-1</sup>으로 기비하였으며, 무는 각각 7.8, 13.7 및 6.6 kg 10a<sup>-1</sup>으로 기비하였다.

Table 3-27. 포트 재배실험에 대한 시비처방

작물		질소	인산	칼리
		(kg 10a <sup>-1</sup> )		
배추	기비	11.1	17.5	9.7
	추비 (1회)	20.7	-	7.9
상추	기비	8.0	9.9	7.0
	추비 (1회)	8.0	-	7.0
무	기비	7.8	13.7	6.6
	추비 (1회)	14.6	-	6.6

포트 재배실험은 2011년 8월 12일에 실시하였으며, 재배실험에 사용된 포트는 작물재배 시험에 자주 쓰이는 와그너 포트 (Wagner pot, 1 5000a<sup>-1</sup>)를 사용하였고, 포트 재배실험의 처리조건은 Table 3-28에서 보는 바와 같이 작물은 배추, 상추 및 무 3종류를 사용하였다. 와그너 포트에 투입되는 토양 및 퇴비는 각각 4 kg pot<sup>-1</sup> 및 30 g pot<sup>-1</sup>으로 토양과 퇴비를 잘 혼합하여 와그너 포트에 담았으며, 모든 처리구는 4반복 하였다. 또한 퇴비 시용량에 따른 재배실험은 부들+돈분 퇴비 1500, 3000 및 4500 g 10a<sup>-1</sup> + NPK 처리구로 각각 투입하여 3반복으로 하였다 (Fig. 3-31 및 3-32).



Fig. 3-31. 포트 재배시험 준비.

Table 3-28. 포트 재배실험 처리조건

처리구	배추, B	상추, S	무, N
N, Control	BN	SN	NN
A, 부들+돈분 퇴비 + NPK	BA	SA	NA
B, 갈대 퇴비 + NPK	BB	SB	NB
C, 부들 퇴비 + NPK	BC	SC	NC
D, 줄 퇴비 + NPK	BD	SD	ND
E, 혼합 퇴비1 + NPK	BE	SE	NE
F, 혼합 퇴비2 + NPK	BF	SF	NF
G, NPK	BG	SG	NG



배추



상추



무



퇴비 시용량별 (배추, 상추, 무)

Fig. 3-32. 포트 재배실험 전경.

### (다) 생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정

#### ① 토양의 이화학적 특성

생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정을 위한 토양의 이화학적 특성은 수확기 때 조사하였으며, 주요 조사항목은 pH, EC, O.M, T-N, Av.  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ , K, Ca, Mg 및 Na의 함량을 각각 조사하였다.

#### ② 식물체중 무기성분 함량 변화 조사

생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정을 위한 식물체중 무기성분 함량 변화 조사는 포트 재배 실험의 경우 생산된 퇴비의 종류 및 작물의 종류별로 조사하여 작물의 수확기 때 조사하였으며, 주요 조사항목은 T-N, T-P,  $K_2O$ , CaO 및 MgO의 함량을 각각 조사하였다.

#### ③ 작물의 생육상황 및 수량 조사

생산된 퇴비의 작물시용효과 검정을 위한 작물의 생육상황 및 수량조사는 포트 재배실험의 경우 작물의 생육기 동안의 지상부 길이를 조사하였으며, 필드 재배실험의 경우 작물의 생육기 동안의 지상부 길이 및 잎수를 조사하였다.

### (3) 조사시기

생산된 퇴비의 작물에 대한 시용효과 검정을 위한 토양 조사는 포트 재배토양의 경우 작물의 수확일인 9월 16일 (작물 이식 후 35일)에 토양시료를 채취하였다.

작물의 생육조사 및 식물체 분석을 위한 시료채취는 포트 재배실험의 경우 작물 이식 후 15일 (8월 27일) 및 35일 (9월 16일)에 각각 조사하였다.

### (4) 분석방법

본 시험에서 퇴비의 분석방법은 2. 나. 2), 라)항의 분석방법과 동일하며, 식물체의 무기성분 분석은 상기 1. 나. 3), 다)항의 분석방법과 동일하게 하였고, 토양의 분석은 상기 1. 나. 5), 라)항의 분석방법과 동일하게 하였다.

#### 나) 수생식물 퇴비를 이용한 필드 재배시험

##### (1) 공시재료

생산된 퇴비를 작물에 시용효과 시험을 하기 위한 공시 토양의 이화학적 특성은 상기 6)항의 공시토양과 동일하였다. 공시 토양은 경남 진주시 사봉면 방촌리 1201-35번지에 위치한 밭에서 채취한 토양으로 pH는 6.80, O.M의 함량은 3.06%이었으며, T-N의 함량은 0.15%이었다.

공시 퇴비는 2차년도 연구에서 최적 수생식물로 선정된 부들과 돈분뇨를 혼합한 퇴비와 돈분뇨를 사용하였으며, 공시 퇴비의 이화학적 특성은 포트재배실험에 사용된 돈분퇴비와 같다. 필드 재배시험에 사용된 공시 작물은 파종 후 10일된 배추, 양배추 및 브로콜리를 사용하여 생산된 퇴비의 작물에 대한 시용효과를 시험하였다.

## (2) 실험방법

### (가) 퇴비화시험을 위한 현장포장 위치 선정

생산된 퇴비를 작물에 사용하기 위한 필드 재배시험은 포트 재배시험 장소와 동일하게 선정하였다.



Fig. 3-33. 필드 재배시험 전경.

### (나) 처리방법 및 대상 작물 선정

필드 재배시험에 대한 시비처방은 Table 3-29와 같이 배추의 경우 질소, 인산 및 칼리를 각각 11.1, 17.5 및 9.7 kg 10a<sup>-1</sup>으로 기비하였으며, 추비는 질소와 칼리를 각각 20.7 및 7.9 kg 10a<sup>-1</sup>을 2회에 나누어 시비하였다. 양배추는 질소, 인산 및 칼리를 각각 11.5, 9.9 및 7.0 kg 10a<sup>-1</sup>으로 기비하였고, 추비는 질소의 경우 21.3 kg 10a<sup>-1</sup>, 칼리의 경우 8.7 kg 10a<sup>-1</sup>을 2회에 걸쳐 각각 시비하였다. 브로콜리는 질소 15.0 kg 10a<sup>-1</sup>, 인산 15.4 kg 10a<sup>-1</sup> 및 칼리를 9.4 kg 10a<sup>-1</sup>으로 기비하였으며, 질소 및 칼리를 각각 8.1 및 5.0 kg 10a<sup>-1</sup>으로 2회에 나누어 시비하였다.



Table 3-29. 필드 재배실험에 대한 시비처방

작물		질소	인산	칼리
		(kg 10a <sup>-1</sup> )		
배추	기비	11.1	17.5	9.7
	추비 (2회)	20.7	-	7.9
양배추	기비	11.5	20.2	10.7
	추비 (2회)	21.3	-	8.7
브로콜리	기비	15.0	15.4	9.4
	추비 (2회)	8.1	-	5.0

필드 재배실험은 2011년 8월 27일에 실시하였으며, 재배실험에 사용된 작물은 배추, 양배추 및 브로콜리 3종류를 사용하였다. 작물의 종류별 처리구는 Table 3-30과 같이 control, 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>, 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>, NPK, 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK 및 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK 처리구로 나누어 각 처리구 (m<sup>2</sup>)는 9반복으로 하였다 (Fig. 3-34).

Table 3-30. 필드 재배실험 처리조건

처리구	배추, B	양배추, Y	브로콜리, K
N, Control	BN	YN	KN
A, 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a <sup>-1</sup>	BA	YA	KA
B, 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a <sup>-1</sup>	BB	YB	KB
C, NPK	BC	YC	KC
D, 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a <sup>-1</sup> + NPK	BD	YD	KD
E, 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a <sup>-1</sup> + NPK	BE	YE	KE



Fig. 3-34. 작물별 처리구 전경.

(다) 생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정

① 토양의 이화학적 특성 변화 조사

생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정을 위한 토양의 이화학적 특성 변화 조사는 작물종류별

생육시기에 따라 조사하였으며, 주요 조사항목은 pH, EC, O.M, T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na의 함량을 각각 조사하였다.

#### ② 식물체중 무기성분 함량 변화 조사

생산된 퇴비의 작물 시용효과 검정을 위한 식물체중 무기성분 함량 변화 조사는 작물종류별 생육시기에 따라 조사하였으며, 주요 조사항목은 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO의 함량을 각각 조사하였다.

#### ③ 작물의 생육상황 및 수량 조사

생산된 퇴비의 작물시용효과 검정을 위한 작물의 생육상황 및 수량조사는 작물의 생육기 동안의 지상부 길이 및 잎수를 조사하였고, 수확한 작물은 지상부 및 지하부로 나누어 생체중, 건물중 및 길이를 조사하였고, 엽폭 및 잎수를 조사하였다.

#### ④ 수생식물 퇴비와 일반퇴비의 경제성, 효율성 검토

수생식물 퇴비와 일반퇴비의 경제성 및 효율성 검토는 여러 항목을 서로 비교하여, 현재 시판되고 있는 일반적인 퇴비를 대상으로 검토하여 비교하였다.

### (3) 조사시기

생산된 퇴비의 작물에 대한 시용효과 검정을 위한 토양 조사는 10월 1일 (이식 후 35일), 11월 5일 (70일) 및 12월 10일 (105일)에 각각 토양시료를 채취하였다.

작물의 생육조사 및 식물체 분석을 위한 시료채취는 작물 이식 후 35일 (10월 1일), 70일 (11월 5일) 및 105일 (12월 10일)에 각각 식물체 시료 채취 및 생육조사를 실시하였다.

### (4) 분석방법

본 시험에서 퇴비의 분석방법은 2. 나. 2), 라)항의 분석방법과 동일하며, 식물체의 무기성분 분석은 상기 1. 나. 3), 다)항의 분석방법과 동일하게 하였고, 토양의 분석은 상기 1. 나. 5), 라)항의 분석방법과 동일하게 하였다.

### 5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화시 퇴비조건 규격화

자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조 설계 규격화를 위해 3차년도 연구에서 보완 및 개선한 퇴비화조의 특성을 파악하여 수생식물별, 퇴비화된 수생식물의 비료효율 증진 및 고품질 비료 생산을 위한 설계 규격화를 하였다.

### 6) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화 시스템 관리지침

자원순환형 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리지침은 1, 2 및 3차년도 연구를 종합적으로 검토하여 제시하였다.

### 제 3 절 연구내용 및 연구결과

#### 1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

##### 가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

###### 1) 축산폐수 종류별 이화학적 특성

축산폐수 종류별 이화학적 특성조사는 서부경남지역의 실제 축산농가 (고성, 사천, 남해 및 진주 등)에서 축산폐수를 우분뇨, 돈분뇨 및 계분뇨로 구분하여 채취하였으며, 이들의 이화학적인 특성은 Table 3-31에서 보는 바와 같다.

실제 축산농가에서 배출되는 축산폐수 종류별 이화학적 특성을 조사한 결과 BOD는 계분뇨 > 우분뇨 > 돈분뇨 순으로 계분뇨가 다른 축산폐수에 비해 62,500 mg L<sup>-1</sup>으로 약간 높았다. 그러나 BOD는 전반적으로 축산폐수 종류에 따라 큰 차이가 없이 평균 53,133 mg L<sup>-1</sup>이었다. COD는 BOD와 달리 우분뇨 > 계분뇨 > 돈분뇨 순으로 우분뇨가 다른 축산폐수에 비해 49,800 mg L<sup>-1</sup>으로 약간 높았다. BOD와 COD 결과를 비교해 볼 때, 우분뇨의 BOD는 계분뇨에 비해 약간 낮았으나 COD의 경우 오히려 약간 높아 생물학적으로 분해가 용이하지 않은 유기물(non-biodegradable organic matter)이 많이 함유되어 있는 것으로 판단된다. 이에 반해 계분뇨는 우분뇨에 비해 상대적으로 생물학적으로 분해가 용이한 유기물(biodegradable organic matter)이 많이 함유되어 있는 것으로 사료된다. 또한 전반적으로 돈분뇨의 유기물 함량은 우분뇨나 계분뇨에 비해 약간 낮았다. 축산폐수의 종류별 SS 함량은 전반적으로 축산폐수 종류에 상관없이 100,500~122,500 mg L<sup>-1</sup>정도이었다. T-N 함량은 계분뇨 >> 우분뇨 > 돈분뇨 순으로 계분뇨가 다른 축산폐수에 비해 13,450 mg L<sup>-1</sup>으로 월등히 높았으며, 특히 T-N 함량은 돈분뇨에 비해 약 2배 이상 높은 수치를 보였다. T-P 함량도 T-N과 유사한 경향으로 계분뇨 >>> 우분뇨 > 돈분뇨 순으로 계분뇨가 다른 축산폐수에 비해 7,880 mg L<sup>-1</sup>으로 매우 높았으며, 특히 T-P 함량은 계분뇨가 돈분뇨와 우분뇨에 비해 약 3배 이상 높은 수치를 보였다.

이상의 결과에서 축산폐수 중 계분뇨의 오염물질 함량은 다른 축산폐수에 비해 높은 경향이었고, 이에 반해 돈분뇨의 오염물질 함량은 다른 축산폐수에 비해 낮은 경향이였다. 또한 생물학적 분해지표인 BOD : N : P의 비율은 계분뇨의 경우 7.9 : 1.7 : 1이었고, 우분뇨의 경우 26.1 : 4.3 : 1이었으며, 돈분뇨의 경우 28.5 : 4.0 : 1이었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 생물학적 폐수처리를 위해서 계분뇨는 질소와 유기물의 함량이 매우 부족한 편이었고, 우분뇨와 돈분뇨는 유기물의 함량이 매우 부족하였다.

일반적으로 생물학적 오폐수처리의 최적 조건은 BOD : N : P = 100 : 5 : 1로서 본 축산폐수의 경우 대부분 유기물의 함량이 매우 부족한 실정이었다. Seo et al. (2005)에 의하면, 국내 하수 중의 BOD : N : P의 비율은 평균 19.3~27.0 : 7.2~8.4 : 1로 보고하였다. 이들 결과를

축산폐수 결과와 비교해 보면, 유기물 함량 비율은 우분뇨와 돈분뇨의 경우 인을 기준 (1)으로 할 때 하수와 거의 유사한 경향이었으나, 질소의 경우 약간 낮은 경향이였다. 하지만 계분뇨의 유기물 함량 비율은 하수에 비해 유기물과 질소 함량이 매우 낮고, 상대적으로 인의 함량이 매우 높았다. 따라서 계분뇨를 효과적으로 처리하기 위해서는 반드시 고농도 인을 저감하는 기술이 필요할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 축산폐수를 효과적으로 처리하기 위한 축산폐수처리장은 유기물 처리기술과 함께 질소와 인을 효과적으로 처리할 수 있는 기술을 함께 확보해야 할 것으로 판단된다. 또한 축산폐수 원수의 경우 유기물, T-N 및 T-P의 농도가 일반 오폐수에 비해 매우 높기 때문에 실제 축산폐수를 직접처리하기 이전에 효율적인 전처리 방법이 필요할 것으로 판단된다.

Table 3-31. 실제 축산농가로부터 채취한 축산폐수 종류별 이화학적 특성

Items	BOD	COD	SS	T-N	T-P
	----- (mg L <sup>-1</sup> ) -----				
Cattle manure	51,600	49,800	122,500	8,570	1,980
Pig manure 1	45,300	37,200	100,500	6,350	1,590
Pig manure 2	48,500	39,600	103,700	6,280	1,650
Chicken manure	62,500	41,300	118,700	13,450	7,880

## 2) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성

자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치에 사용될 여재의 질소와 인의 흡착능력과 이들의 포화시기를 조사하기 위해 여재를 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트로 달리한 후 등온흡착 실험을 통해 오염물질의 흡착능 및 흡착경향을 조사하였다.

### 가) 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착특성

여재종류별 암모니아성 질소 흡착능을 조사하기 위해 여재종류별 암모니아 표준용액을 수준별로 주입하여 흡착실험을 한 후 용액 중 남아있는 암모니아성 질소 농도를 측정하여 각 여재(흡착제)의 단위 g당 흡착된 암모니아성 질소의 양과 평형상태에서 용액 중 남아있는 암모니아성 질소의 농도를 구하였다. 이를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 Freundlich 등온흡착식에서는 흡착능 (K) 및 흡착강도 (1/n)를 구하였고, Langmuir 등온흡착식에서는 최대흡착능 (a) 및 결합세기 (b)를 구하였다.

여재종류별 암모니아성 질소의 흡착실험을 한 후 그 결과를 Freundlich 등온흡착식에 적용하

여 흡착능 (K) 및 흡착강도 (1/n)를 조사한 결과는 Fig. 3-35 및 Table 3-32에서 보는 바와 같다. 흡착제 단위 g당 오염물질 흡착량 (log q)과 평형상태에서 용액 중에 남아있는 오염물질의 평형농도 (log C)와의 상관관계를 검토한 결과 모든 여재에서 서로 고도의 유의성 있는 정(+)의 상관을 보였다.

여재종류별 암모니아성 질소의 흡착능 (K)은 제올라이트 >> 방해석 > 왕사 > 쇄석의 순으로 제올라이트 및 방해석이 각각 0.6239 및 0.0514로 다른 여재에 비해 매우 높았으며, 제올라이트 및 방해석을 제외한 나머지 여재들의 흡착능 (K)은 0.0078~0.0203으로 매우 낮았다.

여재종류별 암모니아성 질소의 흡착강도 (1/n)는 모든 여재가 0.3420~0.6752 범위였으며, 모든 여재의 흡착강도 (1/n) 값이 1보다 작으므로 모두 L형의 등온흡착식으로 판단되었다.

일반적으로 흡착강도 (1/n)값이 1보다 클 경우에는 S형 등온흡착식을 갖게 되며, 1보다 작을 경우 L형의 등온흡착식을 갖게 되고, 1일 경우에는 C형의 등온흡착특성을 갖는 것으로 알려져 있다 (Weber and Miller, 1986).

여재종류별 암모니아성 질소의 흡착실험을 한 후 그 결과를 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 최대흡착능 (a) 및 결합세기 (b)를 조사한 결과는 Fig. 3-36 및 Table 3-32에서 보는 바와 같다. 평형농도 (C)를 흡착제 단위 g당 오염물질 흡착량 (q)으로 나눈 값 (C/q)과 평형상태에서 용액 중에 남아있는 오염물질의 평형농도 (C)와의 상관관계를 조사한 결과 모든 여재에서 서로 고도의 유의성 있는 정 (+)의 상관을 보였다.

여재종류별 암모니아성 질소의 최대흡착능 (a)은 제올라이트 >> 방해석 >> 왕사 > 쇄석의 순으로 제올라이트, 방해석이 각각 1,623 및 427 mg kg<sup>-1</sup>으로 다른 여재에 비해 매우 높았으며, 제올라이트 및 방해석을 제외한 나머지 여재는 전반적으로 최대흡착능은 26.92~40.63 mg kg<sup>-1</sup>으로 매우 낮았다. 여재종류별 암모니아성 질소의 결합세기 (b)는 왕사 및 제올라이트가 1.5181 및 0.9987로서 다른 여재에 비해 가장 높았으며, 왕사 및 제올라이트를 제외한 나머지 여재의 결합세기는 0.1337~0.4003범위이었다.

이상의 결과에서 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착능은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 모두에서 제올라이트 및 방해석이 다른 여재에 비해 높았으며, 특히 제올라이트가 1,623 mg kg<sup>-1</sup>으로 여재 중 암모니아성 질소의 흡착능이 가장 높았다.

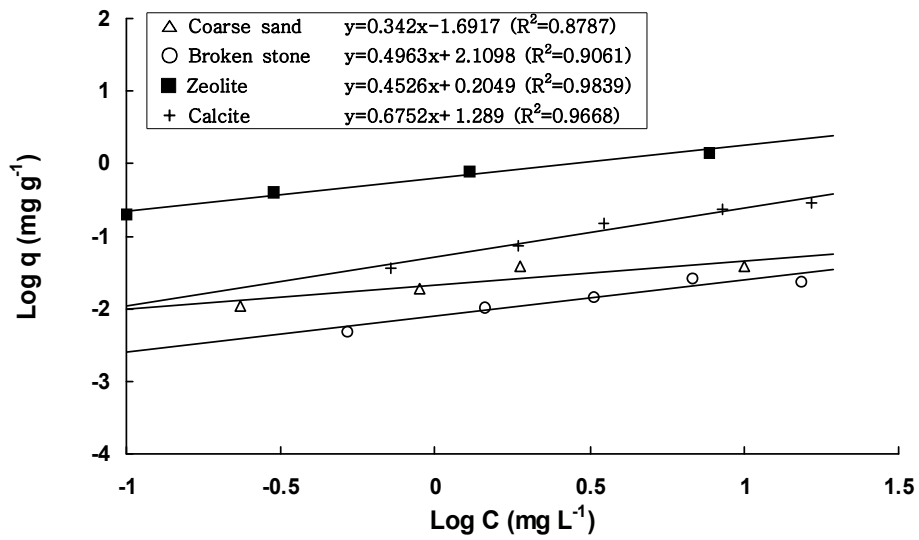


Fig. 3-35. Freundlich 등온흡착식을 이용한 여재종류별 NH<sub>4</sub>-N 흡착.

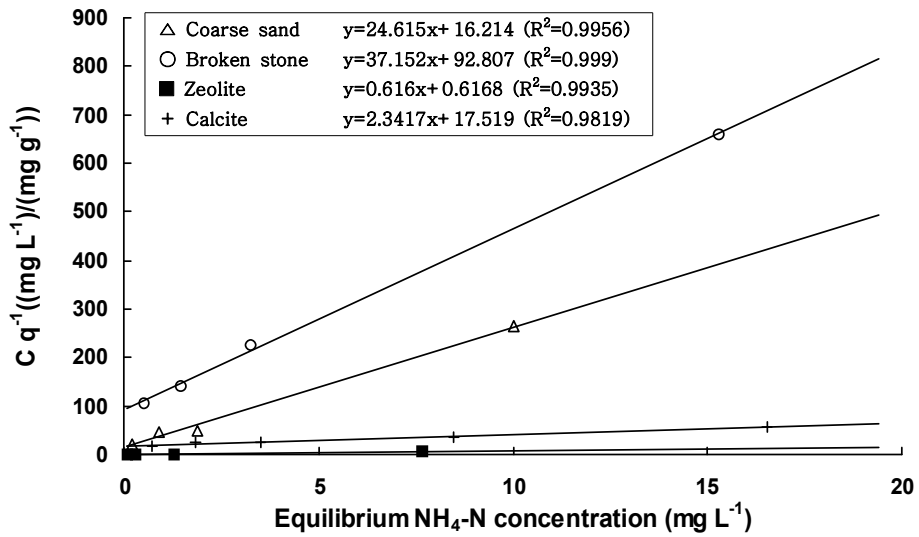


Fig. 3-36. Langmuir 등온흡착식을 이용한 여재종류별 NH<sub>4</sub>-N 흡착.

Table 3-32. Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 의한 여재종류별 NH<sub>4</sub>-N의 흡착능 (K), 흡착강도 (1/n), 최대흡착능 (a) 및 결합세기 (b)

Filter media	Freundlich adsorption isotherm			Langmuir adsorption isotherm		
	K	1/n	r	a	b	r
Coarse sand	0.0203	0.3420	0.9374**	40.63	1.5181	0.9978**
Broken stone	0.0078	0.4963	0.9519**	26.92	0.4003	0.9995**
Calcite	0.0514	0.6752	0.9833**	427	0.1337	0.9909**
Zeolite	0.6239	0.4526	0.9919**	1623	0.9987	0.9968**

(r : Coefficient of correlation, \* and \*\* denote significance at 5.0 and 1.0% levels, respectively).

나) 여재 종류별 인의 흡착특성

여재종류별 인 흡착능을 조사하기 위해 여재종류별 인 표준용액을 수준별로 주입하여 흡착 실험을 한 후 용액 중 남아있는 인 농도를 측정하여 각 여재 (흡착제)의 단위 g당 흡착된 인의 양과 평형상태에서 용액 중 남아있는 인의 농도를 구하였다. 이를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 Freundlich 등온흡착식에서는 흡착능 (K) 및 흡착강도 (1/n)를 구하였고, Langmuir 등온흡착식에서는 최대흡착능 (a) 및 결합세기 (b)를 구하였다.

여재종류별 인의 흡착실험을 한 후 그 결과를 Freundlich 등온흡착식에 적용하여 흡착능 (K) 및 흡착강도 (1/n)를 조사한 결과는 Fig. 3-37 및 Table 3-33에서 보는 바와 같다. 흡착제 단위 g당 오염물질 흡착량 (log q)과 평형상태에서 용액 중에 남아있는 오염물질의 평형농도 (log C)와의 상관관계를 검토한 결과 모든 여재에서 서로 고도의 유의성 있는 정 (+)의 상관을 보였다.

여재종류별 인의 흡착능 (K)은 방해석 >> 제올라이트 > 쇄석 > 왕사의 순으로 방해석이 0.3100으로 다른 여재에 비해 매우 높았으며, 방해석을 제외한 나머지 여재들의 흡착능은 0.0019~0.0040범위로 매우 낮았다.

여재종류별 인의 흡착강도 (1/n)는 모든 여재가 약 0.4949~0.7178 범위이었다. 따라서 모든 여재의 흡착강도 (1/n) 값이 1보다 적으므로 모두 L형의 등온흡착식으로 판단할 수 있었다. 일반적으로 흡착강도(1/n)값이 1보다 클 경우에는 S형 등온흡착식을 갖게 되며, 1보다 적을 경우 L형의 등온흡착식을 갖게 되고, 1일 경우에는 C형의 등온흡착특성을 갖는 것으로 알려져 있다 (Weber and Miller, 1986).

여재종류별 인의 흡착실험을 한 후 그 결과를 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 최대흡착능 (a) 및 결합세기 (b)를 조사한 결과는 Fig. 3-38 및 Table 3-33에서 보는 바와 같다. 평형농도 (C)를 흡착제 단위 g당 오염물질 흡착량 (q)으로 나눈 값 (C/q)과 평형상태에서 용액 중에 남아있는 오염물질의 평형농도 (C)와의 상관관계를 조사한 결과 모든 여재에서 서로 고도의 유의

성 있는 정 (+)의 상관을 보였다.

여재종류별 인의 최대흡착능 (a)은 방해석 >> 제올라이트 > 쇠석 > 왕사의 순으로 방해석이 1,292 mg kg<sup>-1</sup>으로 다른 여재에 비해 매우 높았으며, 방해석을 제외한 나머지 여재는 전반적으로 최대흡착능은 약 11.5~64.9 mg kg<sup>-1</sup>으로 매우 낮았다. 여재종류별 인의 결합세기 (b)는 여재종류별로 별 차이 없이 약 0.0517~0.2953정도 이었다.

이상의 결과에서 여재종류별 인의 흡착능은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 모두에서 방해석이 다른 여재에 비해 높았다. 이와 같이 방해석에서의 인 흡착능이 높은 것은 방해석의 주성분이 대부분 CaCO<sub>3</sub>형태로 이루어져 있으므로 정석탈인법에 의해 인이 처리되기 때문으로 사료된다. 정석탈인법을 이용한 인 처리는 인을 함유하는 물에 인산칼슘으로 되는 동종동계종의 화합물과 접촉시키면 탈인제인 방해석 위에 인산칼슘이 생성, 정석하는 현상을 이용한 정석탈인법으로 수중의 인은 Ca이온과 반응하여 난용성인 hydroxyapatite [Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]로 처리되는 것으로 알려져 있다 (Heyman, 1998; Lahmann, 1989).

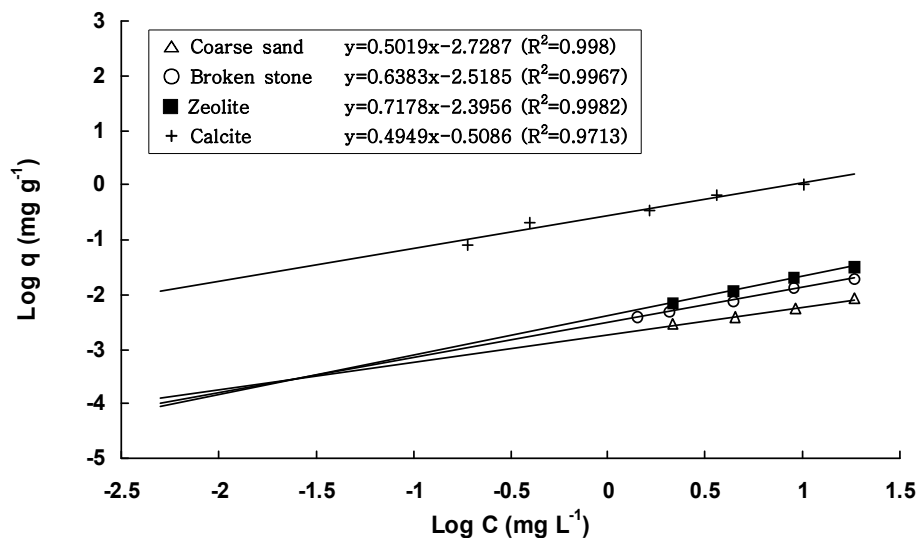


Fig. 3-37. Freundlich 등온흡착식을 이용한 여재종류별 PO<sub>4</sub>-P 흡착.



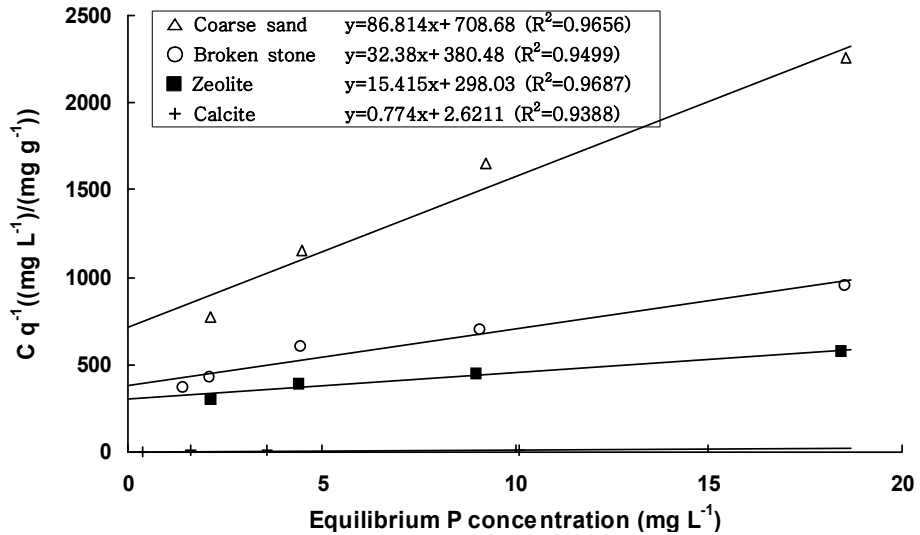


Fig. 3-38. Langmuir 등온흡착식을 이용한 여재종류별 PO<sub>4</sub>-P 흡착.

Table 3-33. Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 의한 여재종류별 PO<sub>4</sub>-P의 흡착능 (K), 흡착강도 (1/n), 최대흡착능 (a) 및 결합세기 (b)

Filter media	Freundlich adsorption isotherm			Langmuir adsorption isotherm		
	K	1/n	r	a	b	r
Coarse sand	0.0019	0.5019	0.9999**	11.5	0.1225	0.9826**
Broken stone	0.0030	0.6383	0.9983**	30.9	0.0851	0.9746**
Calcite	0.3100	0.4949	0.9855**	1,292	0.2953	0.9689**
Zeolite	0.0040	0.7178	0.9990**	64.9	0.0517	0.9842**

(r : Coefficient of correlation, \* and \*\* denote significance at 5.0 and 1.0% levels, respectively).

#### 다) 질소 및 인 흡착능에 따른 최적 등온흡착식 선정

실제 축산폐수처리장에서 암모니아성 질소 또는 인의 정확한 흡착량을 예측하기 위하여 여재종류별 실제 흡착실험에서 각 여재의 암모니아성 질소 또는 인의 평형농도에 따른 암모니아성 질소 또는 인의 흡착량에 상기 가) 및 나)항의 여재의 암모니아성 질소 또는 인의 흡착능에서 구한 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식의 각 상수를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식의 일반식을 대입하여 나온 각 등온흡착식을 동시에 적용하여 암모니아성 질소 또는 인의 흡착량과 가장 일치되는 등온흡착식을 선정하였다.

여재 종류별 암모니아성 질소의 흡착실험결과 조사된 암모니아성 질소의 평형농도에 따른 암모니아성 질소의 흡착량을 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 각각 적용한 결과는 Fig.

3-39에서 보는 바와 같다.

왕사 및 제올라이트의 경우 Langmuir 등온흡착식은 실제 흡착량과 일치하였으며, Freundlich 등온흡착식은 평형농도 0~5 mg L<sup>-1</sup>까지는 실제 흡착량과 일치하였으나, 평형농도 5 mg L<sup>-1</sup> 이후부터는 실제 흡착량에 비해 곡선이 크게 벗어나는 경향을 보였다.

쇄석 및 방해석의 경우 Langmuir 등온흡착식은 실제 흡착량과 일치하였으며, Freundlich 등온흡착식은 평형농도 0~10 mg L<sup>-1</sup>까지는 실제 흡착량과 일치하였으나, 평형농도 10 mg L<sup>-1</sup> 이후부터는 실제 흡착량에 비해 곡선이 크게 벗어나는 경향을 보였다.

이상의 결과 모든 여재에서 저농도 (10 mg L<sup>-1</sup>이하)의 암모니아성 질소 흡착은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식이 모두 적용이 가능하나 고농도의 암모니아성 질소의 흡착은 Langmuir 등온흡착식을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단되었다.

따라서 실제 하수처리장에서 암모니아성 질소의 정확한 흡착량을 예측하기 위하여 모든 여재에서 Langmuir 등온흡착식을 적용하는 것이 적합할 것으로 사료된다.

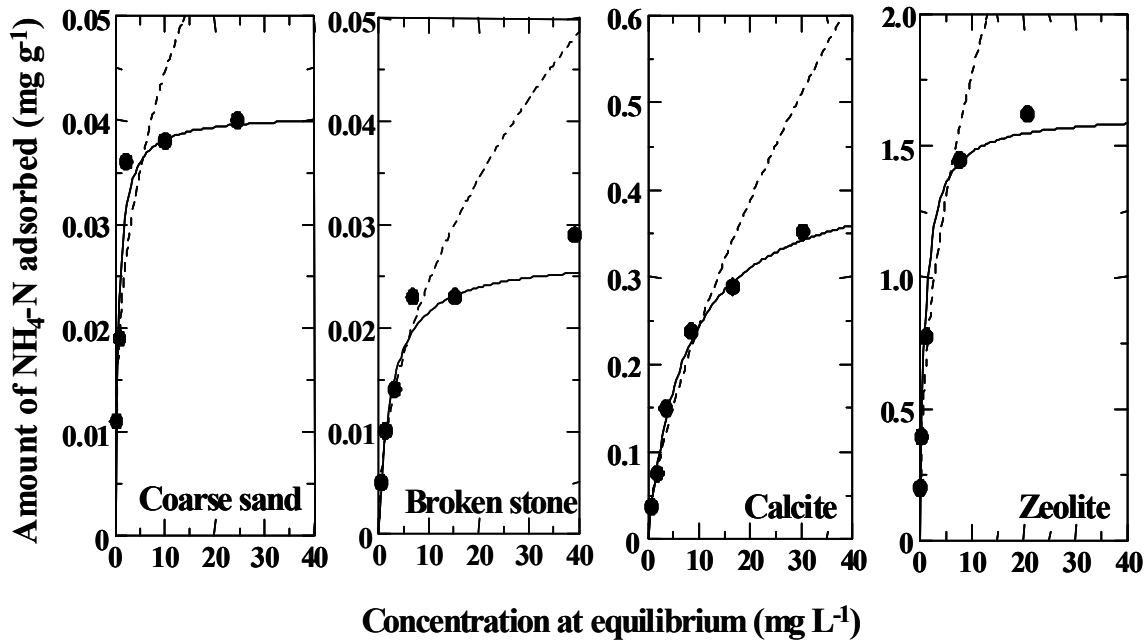


Fig. 3-39. NH<sub>4</sub>-N의 흡착을 위한 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 비교.

● : Experiment, ... : Freundlich Eq., — : Langmuir Eq.

여재 종류별 인의 흡착실험결과 조사된 인의 평형농도에 따른 인 흡착량을 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 각각 적용한 결과는 Fig. 3-40에서 보는 바와 같다.

왕사, 쇄석 및 제올라이트의 경우 Langmuir 등온흡착식은 실제 흡착량과 일치하였으며, Freundlich 등온흡착식은 평형농도 0~20 mg L<sup>-1</sup>까지는 실제 흡착량과 일치하였으나, 평형농도 20 mg L<sup>-1</sup> 이후부터는 실제 흡착량에 비해 곡선이 크게 벗어나는 경향을 보였다.

방해석의 경우 Langmuir 등온흡착식은 실제 흡착량과 일치하였으며, Freundlich 등온흡착식은 평형농도 0~10 mg L<sup>-1</sup>까지는 실제 흡착량과 일치하였으나, 평형농도 10 mg L<sup>-1</sup> 이후부터

는 실제 흡착량에 비해 곡선이 약간 벗어나는 경향을 보였다.

이상의 결과에서 모든 여재의 인 흡착은 저농도 ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ 이하)의 경우 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식이 모두 적용이 가능하였으나, 고농도의 경우 ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ 이상) Langmuir 등온흡착식을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단되었다.

따라서 실제 하수처리장에서 인의 정확한 흡착량을 예측하기 위하여 모든 여재에서 Langmuir 등온흡착식을 적용하는 것이 적합할 것으로 사료된다.

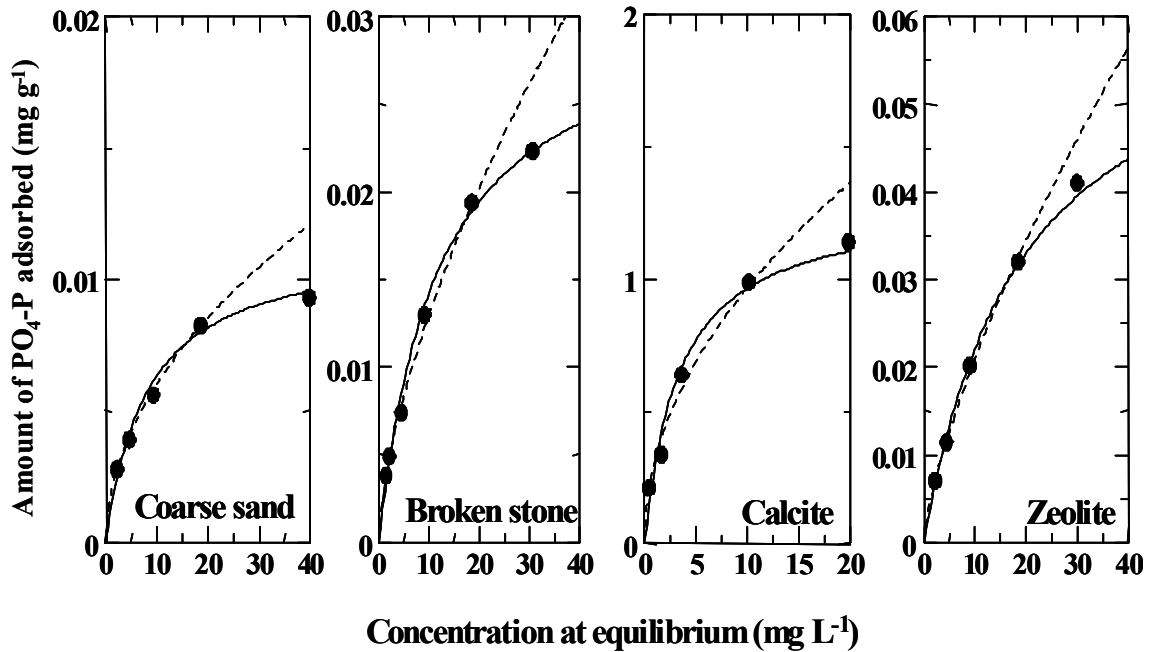


Fig. 3-40.  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 흡착을 위한 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 비교.

● : Experiment, ... : Freundlich Eq., — : Langmuir Eq.

### 3) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리

Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리효율을 조사하기 위해 처리시일에 따른 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량을 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

#### 가) 처리시일에 따른 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인 처리

처리시일에 따른 여재종류별 암모니아성 질소 및 인의 처리효율 조사는 축산폐수 중 암모니아성 질소와 인 농도를 각각  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 되게 제조하여 정량펌프를 이용하여 column에  $300 \text{ mL day}^{-1}$  (HRT 3.52hr)씩 하향류식으로 연속적으로 30일 동안 주입하여, 처리 1일부터 30일까지 매일 1회씩 유출수를 채취하여 암모니아성 질소와 인의 함량을 조사하였다.

Column실험에서의 처리시일에 따른 여재종류별 암모니아성 질소의 처리는 Fig. 3-41에서 보는 바와 같이 제올라이트의 경우 30일 동안  $0.43\sim 0.57 \text{ mg L}^{-1}$ 정도로 유출되어 매우 안정적으

로 처리되었으며, column의 흡착능력을 상실하는 시점인 파과점(Break point: 유출농도가 유입농도의 약 10%가 되는 점을 파과점이라 하며, 일반적으로 유출수의 농도가 일정하게 유지되다가 유출수의 농도가 급격히 증가하기 시작하는 점을 파과점이라 함)에 도달하지 않았다. 방해석의 경우 25일까지 13.3~18.9 mg L<sup>-1</sup>정도로 유출되어 안정적으로 처리되었으나, 25일 이후부터 점점 유출농도가 높아져서 column의 흡착능력을 상실하는 시점인 파과점이 약 25일인 것으로 나타났으며, 그 후 급격히 흡착능력을 상실하여 약 30일 경에 약 40 mg L<sup>-1</sup>정도로 암모니아성 질소가 거의 포화되었음을 알 수 있었다.

왕사 및 쇠석의 경우 4일까지 각각 19.7~26.0 및 22.6~28.6 mg L<sup>-1</sup>정도로 유출되어 제올라이트 및 방해석에 비해 흡착능력이 낮음을 알 수 있었고, 4일 이후부터 점점 유출농도가 높아져서 column의 흡착능력을 상실하는 시점인 파과점이 약 4일인 것으로 나타났으며, 이후 급격히 흡착능력을 상실하여 쇠석 및 왕사의 경우 각각 6 및 8일 경에 약 50 mg L<sup>-1</sup>정도로 암모니아성 질소가 완전히 포화되었음을 알 수 있었다.

따라서 암모니아성 질소를 가장 효과적으로 처리할 수 있는 여재는 제올라이트이었다.

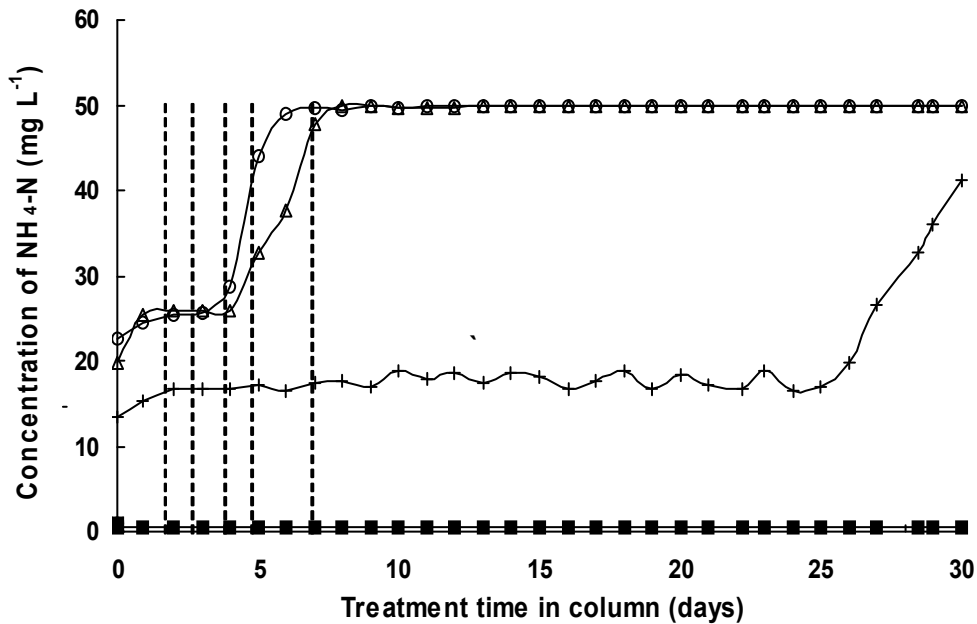


Fig. 3-41. Column 실험에서 유출수 중의 NH<sub>4</sub>-N 함량 변화.

Δ: Coarse sand, O: Broken stone, +: Calcite, ■: Zeolite.

Column실험에서의 처리시일에 따른 여재종류별 인의 처리는 Fig. 3-42에서 보는 바와 같이 방해석의 경우 30일 동안 각각 0.51~0.69 mg L<sup>-1</sup>정도로 유출되어 매우 안정적으로 처리되었으며, column의 흡착능력을 상실하는 시점인 파과점에 도달하지 않았다. 쇠석 및 제올라이트의 경우 4일까지 각각 7.7~30.4 및 5.0~31.4 mg L<sup>-1</sup>정도로 유출되어 방해석에 비해 흡착능력이 매우 낮음을 알 수 있었고, 4일 이후부터 점점 유출농도가 높아져서 흡착능력을 상실하는 시점인 파과점이 약 4일인 것으로 나타났으며, 그 후 급격히 흡착능력을 상실하여 쇠석의 경우 각

각 7일 경에 약 50 mg L<sup>-1</sup>정도로 column이 인에 완전히 포화가 되었음을 알 수 있었다.

왕사의 경우 흡착 초기부터 column의 흡착능력을 상실하는 시점인 파괴점이 나타나 3일경에 약 50 mg L<sup>-1</sup>정도로 column이 인에 완전히 포화가 되었음을 알 수 있었다. 따라서 인을 가장 효과적으로 처리할 수 있는 여재는 방해석이었다.

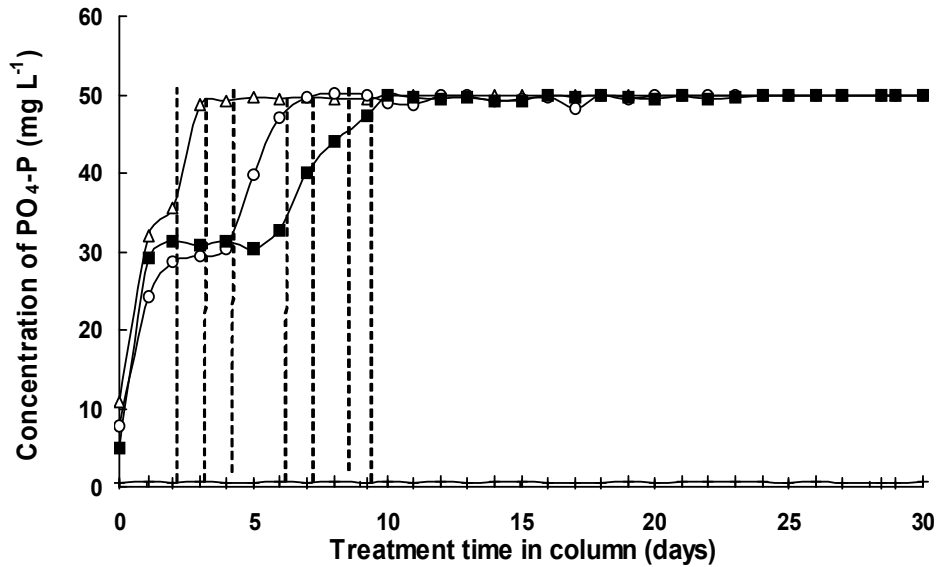


Fig. 3-42. Column 실험에서 유출수 중의 PO<sub>4</sub>-P 함량 변화.

Δ: Coarse sand, ○: Broken stone, +: Calcite, ■: Zeolite.

#### 나) 축산폐수 중 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량

Column실험에서의 암모니아성 질소 및 인의 총 처리량은 처리 30일 동안 유입된 암모니아성 질소 및 인의 총 유입량에서 총 유출량을 제외한 양으로 계산하였다. 암모니아성 질소 및 인의 총 유입량은 유입된 암모니아성 질소 또는 인 농도 (mg L<sup>-1</sup>) × 유입 암모니아성 질소 또는 인 용액량 (L 30day<sup>-1</sup>)으로 산출하였고, 총 유출량은 유출된 암모니아성 질소 또는 인 농도 (mg L<sup>-1</sup>) × 유출 암모니아성 질소 또는 인 용액량 (L 30day<sup>-1</sup>)으로 산출하였다.

처리 시일에 따른 암모니아성 질소의 처리결과를 토대로 하여 암모니아성 질소의 총 처리량을 조사한 결과는 Fig. 3-43에서 보는 바와 같다.

Column실험 30일 동안 주입된 암모니아성 질소의 총 유입량은 9,000 mg L<sup>-1</sup>로서 여재 중에서 제올라이트 및 방해석의 총 처리량은 각각 8,908 및 5,491 mg kg<sup>-1</sup>으로 유입된 암모니아성 질소를 대부분 처리함을 알 수 있었다. 그러나 왕사 및 채석의 총 처리량은 각각 935 및 768 mg kg<sup>-1</sup>으로 제올라이트 및 방해석에 비해 암모니아성 질소의 총 처리량이 매우 적었다.

따라서 암모니아성 질소를 효과적으로 처리할 수 있는 여재는 제올라이트 >> 방해석 >> 왕사 > 채석 순으로 특히 제올라이트는 다른 여재에 비해 암모니아성 질소의 처리능력이 매우 우수하였다.

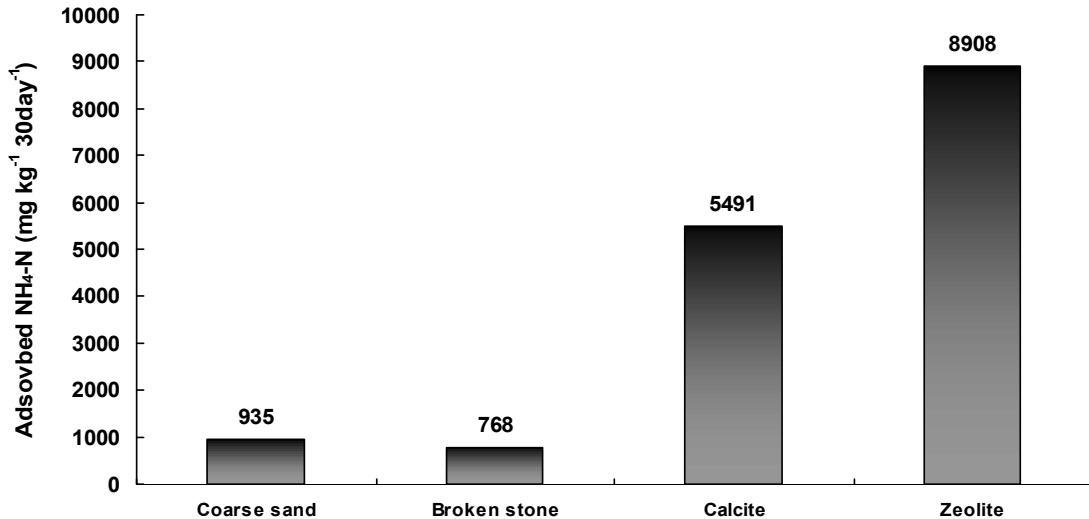


Fig. 3-43. Column실험에서의 30일 동안 NH<sub>4</sub>-N의 총 처리량.

처리 시일에 따른 인의 처리결과를 토대로 하여 인의 총 처리량을 조사한 결과는 Fig. 3-44에서 보는 바와 같다.

Column실험 30일 동안 주입된 인의 총 유입량은 9,000 mg L<sup>-1</sup>로서 여재 중에서 방해석의 총 처리량은 8,894 mg kg<sup>-1</sup>으로 유입되는 인을 대부분 처리함을 알 수 있었는데, 이는 방해석의 경우 CaO함량이 약 56%정도로 매우 높아 (Chae et al, 1998) Ca-P로 결합하여 침전되었기 때문인 것으로 사료되었다. 그러나 왕사, 쇄석 및 제올라이트의 총 처리량은 각각 445, 872 및 1,067 mg kg<sup>-1</sup>으로 방해석에 비해 인의 총 처리량이 매우 적었다.

따라서 인을 효과적으로 처리할 수 있는 여재는 방해석 >> 제올라이트 > 쇄석 > 왕사 순으로 특히 방해석이 다른 여재에 비해 인의 처리능력이 매우 높았다.

일반적으로 batch실험과 column실험에서 여재의 암모니아성 질소의 흡착은 실제 인공습지 하수처리장에서는 중요한 변수가 되지 못하는데, 이는 실제 축산폐수처리장에서의 질소의 주요 처리기작은 호기성조에서 미생물에 의해 암모니아성 질소가 질산성 질소로 질산화되고, 이는 다시 혐기성조에서 미생물에 의해 탈질되어 N<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>O로 대기중으로 탈질되는 생물학적인 처리기작이 있기 때문이다. 따라서 질소의 흡착능력이 낮더라도 생물학적인 질소처리 때문에 장기적인 처리가 가능하다 (Brix, 1994 and 1997). 하지만 축산폐수의 경우 질소의 농도가 매우 높아 여재의 선정시 질소의 흡착능이 우수한 여재를 선정해야 할 것으로 판단된다.

또한 인의 흡착은 인공습지에 의한 축산폐수처리장에서 기체로의 처리기작이 없기 때문에 축산폐수처리장에 유입되어 유출되지 않는 한 처리장에 계속 축적되게 되어 언젠가는 여재의 인 흡착이 포화에 도달하여 인의 처리능력을 상실하게 되고, 오히려 누적되었던 인이 용출되어 유출수 중의 인 함량이 증가하게 되어 하수처리장의 수명을 다하게 된다. 따라서 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장을 장기간 운영하기 위해서는 질소와 인의 흡착능력이 높은 여재를 우선적으로 선정해야 할 것으로 판단된다.

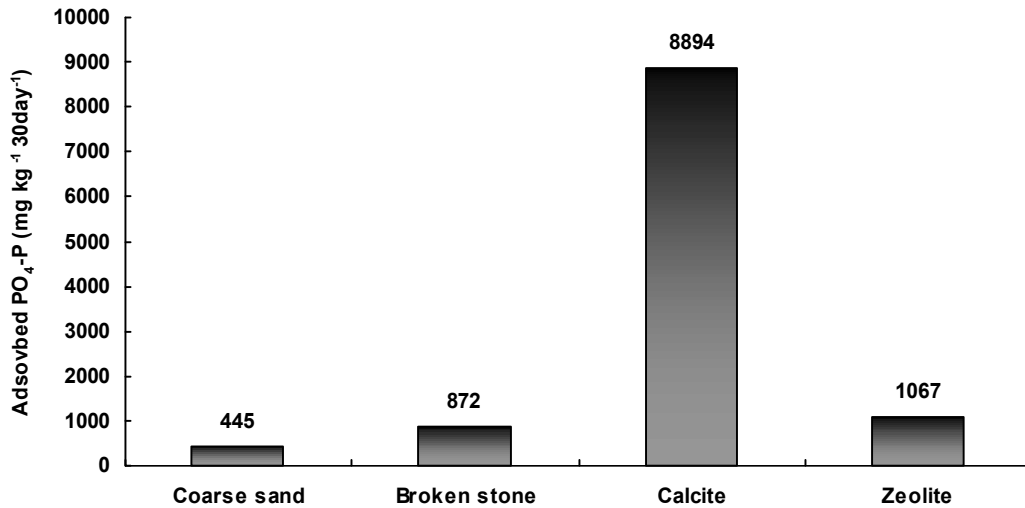


Fig. 3-44. Column실험에서의 30일 동안 PO<sub>4</sub>-P의 총 처리량.

#### 4) 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험

##### 가) 소형축산폐수처리장치에서의 수처리 효율

자원순환형 축산폐수처리기술을 개발하기 위해 소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별, 처리공법의 조합방법별 및 축산폐수 부하량별로 구분하여 최적조건을 조사한 후 이들 최적조건하에서 자원순환형 축산폐수처리기술 개발을 위한 기반연구로 축산폐수 종류별, 특수여재 주입별 및 수생식물을 이용한 전처리방법별로 구분하여 수처리 효율을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

##### (1)자연정화공법에 의한 축산폐수처리장치에서 최적 조건 연구

###### (가) 여재종류에 따른 수처리 효율

여재 종류에 따른 수처리 효율 조사는 호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 여재를 왕사, 쇄석, 방해석 및 제올라이트로 각각 구분하여 설치한 후 축산폐수 부하량을 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 한 조건하에서 수처리 효율을 각각 조사하였으며, 그 결과는 Table 3-34~3-35 및 Fig. 3-45~3-48에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 pH는 약 6.5로 중성에 가까웠으며, 축산폐수처리장치의 호기성조를 통과한 호기성조 처리수의 pH는 모든 여재에서 약간 증가하는 경향이였다. 이는 호기성조를 통과하면서 미생물에 의해 축산폐수의 유기물이 분해되어 그 대사산물로 CO<sub>2</sub>와 유기산이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

호기성조에서 1차 처리된 후 혐기성조를 통과한 방류수 중의 pH는 여재 종류에 따라 별 차이 없이 약 6.7~7.4범위이였다. 이와 같이 호기성조와 혐기성조 모두에서 여재종류별 pH가 별 차이가 없는 것은 주로 탄산염의 완충작용 때문이라 사료되였다.

축산폐수 원수의 EC는 2.42 dS m<sup>-1</sup>이였으며, 축산폐수처리장치의 호기성조를 통과한 호기성조 처리수의 EC는 모든 여재에서 미미하게 감소하였으며, 특히 왕사에서 EC의 감소폭이 다른

여재에 비해 약간 컸다. 이는 왕사의 경우 여재 표면에 미생물의 활착이 용이하여 다른 여재에 비해 영양염류들의 제거효율이 전반적으로 미미하게 높기 때문으로 판단된다.

호기성조에서 1차 처리된 후 혐기성조를 통과한 방류수의 EC는 전반적으로 여재종류에 따라서는 별 차이가 없이 1.79~2.12 dS m<sup>-1</sup>범위이었다. 일반적으로 EC는 물 중에 함유되어 있는 양이온, 음이온의 합계와 관계가 있다. 동일한 오폐수에서는 pH 5~9의 범위에서 용해성 물질의 양에 비례하여 전기전도율과 용해성 물질과의 비는 1 : 0.8~1.5의 범위에 있다.

축산폐수 원수의 DO는 3.4 mg L<sup>-1</sup>로 매우 낮았고, 호기성조 처리수의 DO는 전반적으로 여재종류에 따라 큰 차이 없이 5.1~6.0 mg L<sup>-1</sup>로 축산폐수 원수에 비해 약간 증가하였으며, 혐기성조 처리수인 방류수중의 DO는 전반적으로 4.1~4.5 mg L<sup>-1</sup>로 호기성조 처리수 중의 DO에 비하여 약간 감소하는 경향이였다. 일반적으로 집수조에 있는 축산폐수는 재폭기가 없이 고여 있는 혐기성상태가 유지되므로 집수조로부터 채취된 축산폐수의 DO는 약간 낮다.

Table 3-34. 소형 축산폐수처리장치에서 여재 종류별 축산폐수 중 pH, EC 및 DO 함량 변화

Filter media	pH			EC (dS m <sup>-1</sup> )			DO (mg L <sup>-1</sup> )		
	Raw water	1 <sup>st</sup> treatment	2 <sup>nd</sup> treatment	Raw water	1 <sup>st</sup> treatment	2 <sup>nd</sup> treatment	Raw water	1 <sup>st</sup> treatment	2 <sup>nd</sup> treatment
Coarse sand		6.7	6.9		2.02	1.79		5.4	4.1
Broken stone	6.5	6.8	7.0	2.42	2.13	1.98	3.4	6.0	4.4
Calcite		7.2	7.4		2.25	2.12		5.1	4.5
Zeolite		6.6	6.7		2.12	1.96		5.7	4.3

소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별 COD 처리효율은 Fig. 3-45에서 보는 바와 같다. 소형 축산폐수처리장치에서 유입된 축산폐수 원수의 COD는 2,100~2,610 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 2,355 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 하수나 오수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었으며, 비교적 일정한 농도가 유지되었다.

왕사의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 COD는 890~1,105 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 981 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 58.3%의 COD가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 COD는 260~430 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 305 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 87%의 COD가 처리되었다.

쇄석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 COD는 900~1,120 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,017 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 56.7%의 COD가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 COD는 295~410 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 346 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 85.2%의 COD가 처리되었다.

방해석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 COD는 980~1,200 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,048 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 55.2%의 COD가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 COD는



415~540 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 489 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 79.1%의 COD가 처리되었다.

제올라이트의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 COD는 1,120~1,420 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,317 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 43.7%의 COD가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 COD는 410~530 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 489 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 80.3%의 COD가 처리되었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 여재 종류별 COD 처리효율은 왕사 ≙ 쇄석 > 제올라이트 > 방해석순이었다. 이와 같이 왕사와 쇄석의 COD 처리효율이 높은 것은 이들 여재의 표면이 여러 무기성분들로 구성되어 있어 미생물 생육에 필요한 영양분의 공급이 용이하고, 여재표면이 거칠고 다공성 구조를 가지고 있기 때문에 미생물의 활착이 용이하기 때문으로 사료된다. 반면에 방해석의 COD 처리효율이 낮은 것은 방해석이 대부분 CaCO<sub>3</sub>로 구성되어 있어서 미생물 생육에 필요한 다른 무기원소가 거의 없어 미생물 생육이 용이하지 않고, 표면이 왕사와 쇄석에 비해 매끄러워 미생물의 활착이 원활하지 않기 때문으로 사료된다.

일반적으로 자연정화공법을 이용한 축산폐수처리장에서 COD의 감소는 수초 뿌리부의 미생물에 의해 유기물이 표면으로부터 1.5 cm 깊이 사이에서 주로 분해되는데, 그 이유는 이 층에 반응기질과 산소가 풍부하여 박테리아의 성장과 활력이 가장 좋기 때문인 것으로 알려져 있다 (Seo et al., 2005).

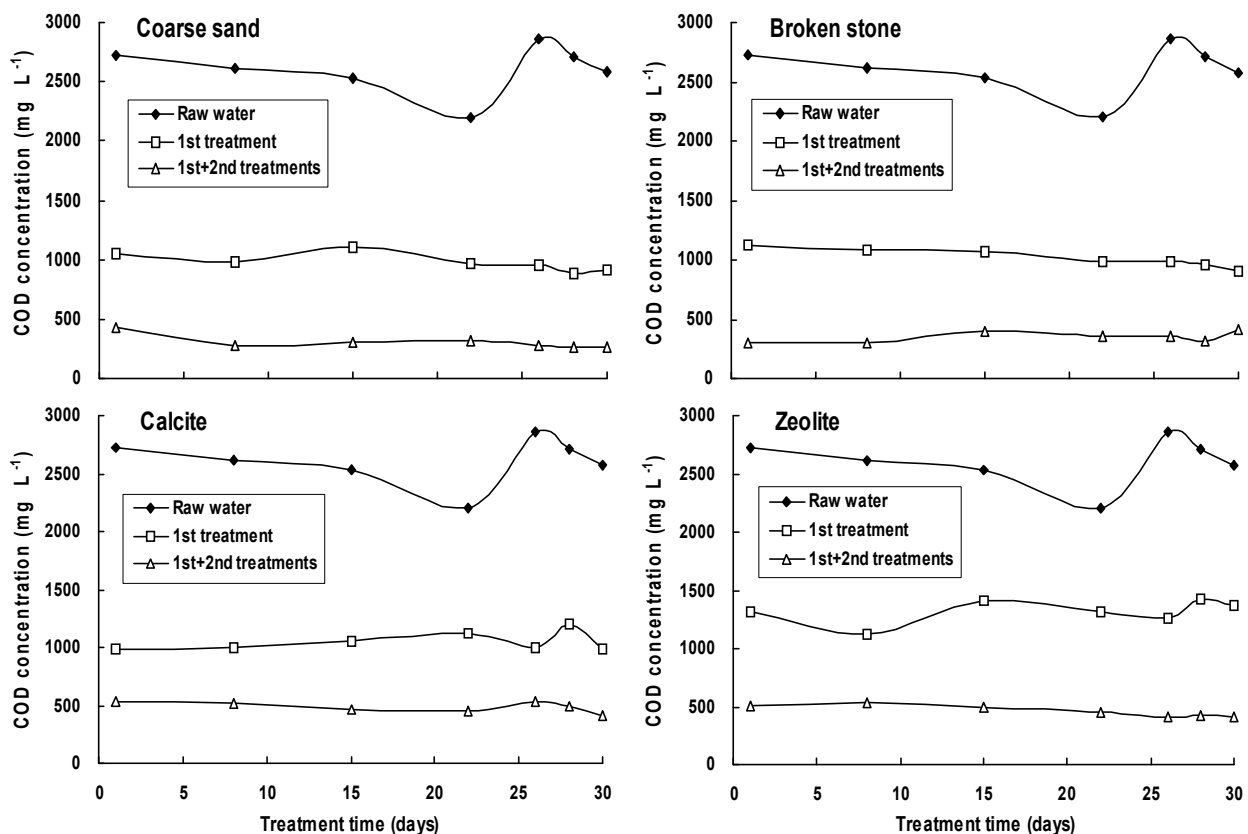


Fig. 3-45. 소형 축산폐수처리장치에서 여재 종류별 축산폐수 중 COD 변화.

소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별 SS 처리효율은 Fig. 3-46에서 보는 바와 같다. 소형 축산폐수처리장치에서 유입된 축산폐수 원수의 SS 함량은 3,150~4,020 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 3,649 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반 오폐수에 비해 매우 높은 농도를 보였다.

왕사의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 SS 함량은 550~625 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 592 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 83.7%의 SS가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 SS 함량은 195~245 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 217 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 94%의 SS가 처리되었다.

쇄석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 SS 함량은 525~710 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 639 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 82.3%의 SS가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 SS 함량은 180~210 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 193 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 94.7%의 SS가 처리되었다.

방해석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 SS 함량은 670~810 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 719 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 80.2%의 SS가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 SS 함량은 180~225 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 204 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 94.4%의 SS가 처리되었다.

제올라이트의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 SS 함량은 615~730 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 661 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 81.7%의 SS가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 SS 함량은 90~240 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 214 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 94.1%의 SS가 처리되었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 여재 종류별 축산폐수 처리효율은 모든 여재에서 별 차이 없이 높은 처리효율을 보였는데, 이는 본 축산폐수처리장치에서 SS는 주로 여재에 의한 여과가 주된 처리이기 때문이다. 그러나 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리되는 것으로 알려져 있다 (Kim, 2000; Jo, 2003).

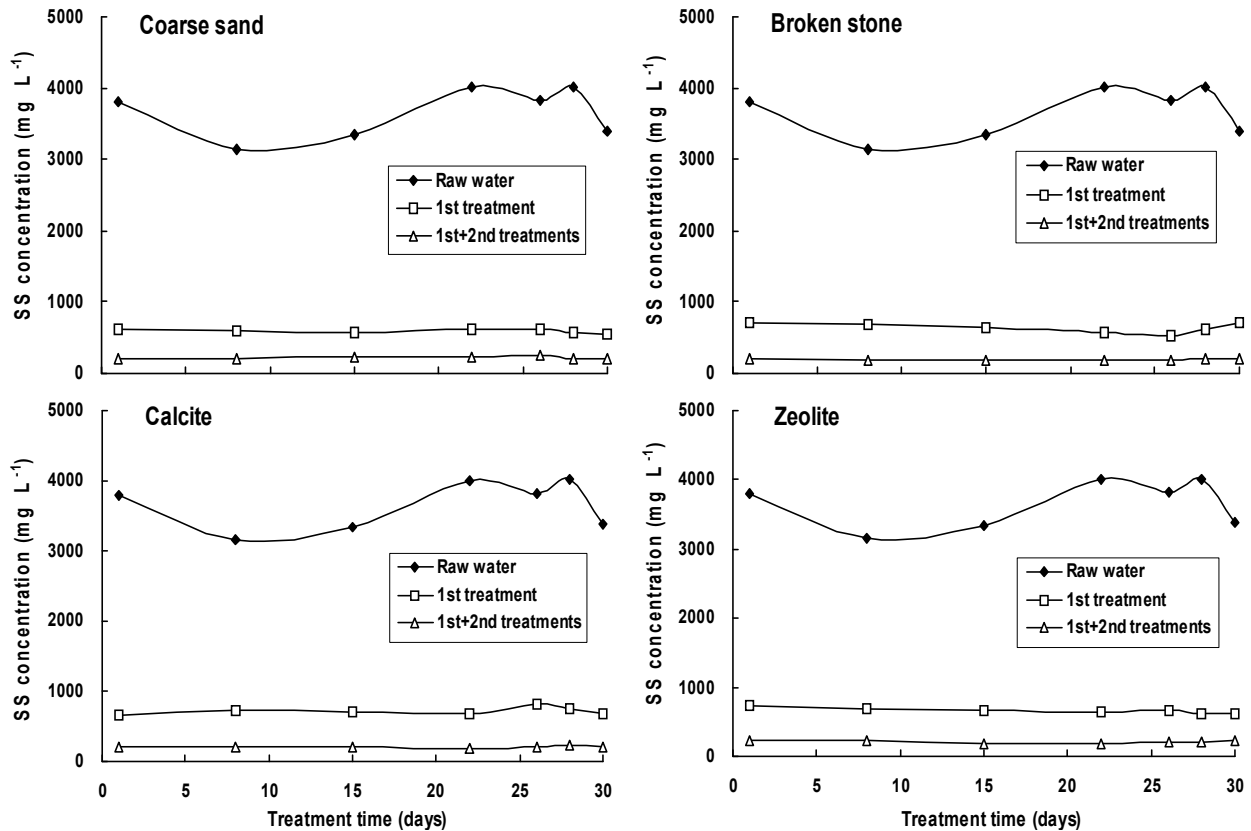


Fig. 3-46. 소형 축산폐수처리장치에서 여재 종류별 축산폐수 중 SS 변화.

소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별 T-N 처리효율은 Fig. 3-47에서 보는 바와 같다. 소형 축산폐수처리장치에서 유입된 축산폐수 원수의 T-N 함량은 2,240~2,710 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 2,455 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 오폐수 농도에 비해 매우 높은 경향이였다.

왕사의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-N 함량은 1,328~1,880 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,557 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 35.9%의 T-N이 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-N 함량은 약 1,030~1,428 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,208 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 50.4%의 T-N이 처리되었다.

쇄석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-N 함량은 1,352~1,650 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,449 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 40.8%의 T-N이 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-N 함량은 998~1,245 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,161 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 52.6%의 T-N이 처리되었다.

방해석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-N 함량은 1,510~1,752 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,642 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 32.7%의 T-N이 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-N 함량은 980~1,642 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 1,227 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 49.8%의 T-N이 처리되었다.

제올라이트의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-N 함량은 954~1,210 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균

1,075 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 혐기성조에서 55.9%의 T-N이 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-N 함량은 521~780 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 628 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 74.5%의 T-N이 처리되었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 여재 종류별 T-N 처리효율은 제올라이트 >> 쇄석 ≧ 왕사 ≧ 방해석 순이었다. 이와 같이 제올라이트에서 T-N 처리효율이 높은 것은 제올라이트의 이온교환용량이 다른 여재에 비해 매우 높기 때문으로 판단된다. 제올라이트에 의한 암모니아 처리공법은 다른 공법에 비하여 암모니아의 처리속도가 빠르고 수온의 변화에 대한 영향이 적으며, 저농도뿐만 아니라 고농도의 암모니아에 대하여도 안정적인 처리효율을 보이는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 제올라이트의 이온교환용량은 제올라이트의 구조상 알루미늄의 실리콘에 대한 치환정도를 나타내는 것으로 알루미늄의 치환량이 클수록 전하의 부족량이 많아지게 되고, 전하의 부족량이 클수록 전기적 중화에 필요한 양이온의 수가 증가하게 된다. 그러나 실제 이온교환에 영향을 미치는 인자는 제올라이트의 양이온 특성과 용액상의 양이온 농도 및 제올라이트 구조상의 특성 등이다.

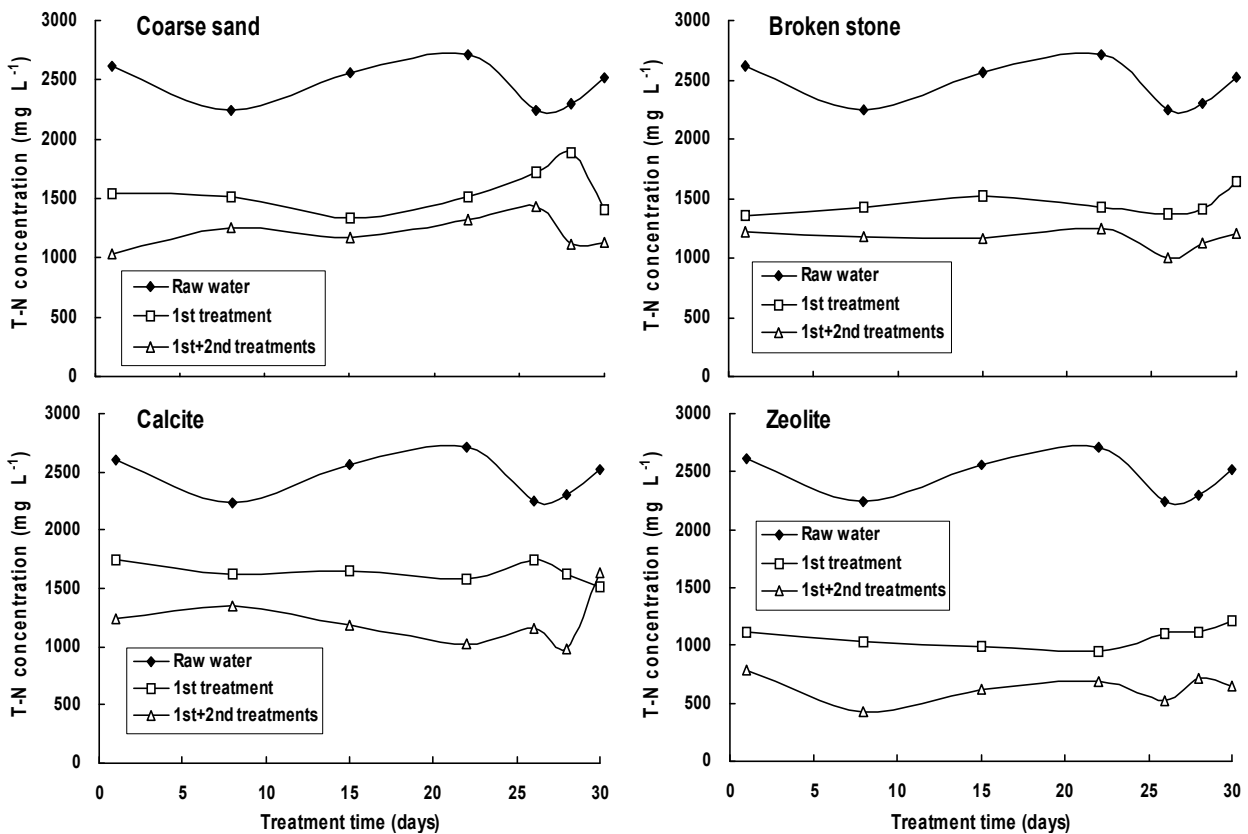


Fig. 3-47. 소형 축산폐수처리장치에서 여재 종류별 축산폐수 중 T-N 변화.

소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별 T-P 처리효율은 Fig. 3-48에서 보는 바와 같다. 소형 축산폐수처리장치에서 유입된 축산폐수 원수의 T-P 함량은 112.3~132.7 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 124.6 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 오폐수에 비해 매우 높은 농도를 보였다.

왕사의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-P 함량은 22.7~26.1 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 24.4 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 80.3%의 T-P가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-P 함량은 9.8~12.8 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 11.4 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 90.8%의 T-P가 처리되었다.

쇄석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-P 함량은 19.8~29.1 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 23.8 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 80.9%의 T-P가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-P 함량은 9.9~13.9 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 11.3 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 90.9%의 T-P가 처리되었다.

방해석의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-P 함량은 15.3~21.2 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 18.1 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 85.4%의 T-P가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-P 함량은 4.1~5.4 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 5.1 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 95.3%의 T-P가 처리되었다.

제올라이트의 경우 1차 호기성조 처리수 중의 T-P 함량은 22.5~27.2 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 25.2 mg L<sup>-1</sup>으로서 1차 호기성조에서 76.8%의 T-P가 처리되었고, 2차 혐기성조 처리수 중의 T-P 함량은 11.2~13.3 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 12.4 mg L<sup>-1</sup>으로서 2차 혐기성조에서 89.9%의 T-P가 처리되었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 여재 종류별 T-P 처리효율은 방해석 > 쇄석 ≒ 왕사 ≒ 제올라이트 순이었다. 이와 같이 방해석에서의 인 흡착능이 높은 것은 방해석의 주성분이 대부분 CaCO<sub>3</sub>형태로 이루어져 있으므로 정석탈인법에 의해 인이 Ca-P로 흡착되어 처리되기 때문으로 사료된다. 정석탈인법을 이용한 인 처리는 인을 함유하는 물에 인산칼슘으로 되는 동종동계종의 화합물과 접촉시키면 탈인제인 방해석 위에 인산칼슘이 생성, 정석하는 현상을 이용한 정석 탈인법으로 수중의 인은 Ca이온과 반응하여 난용성인 hydroxyapatite [Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]로 처리되는 것으로 알려져 있다 (Heyman, 1998; Lahmann, 1989).

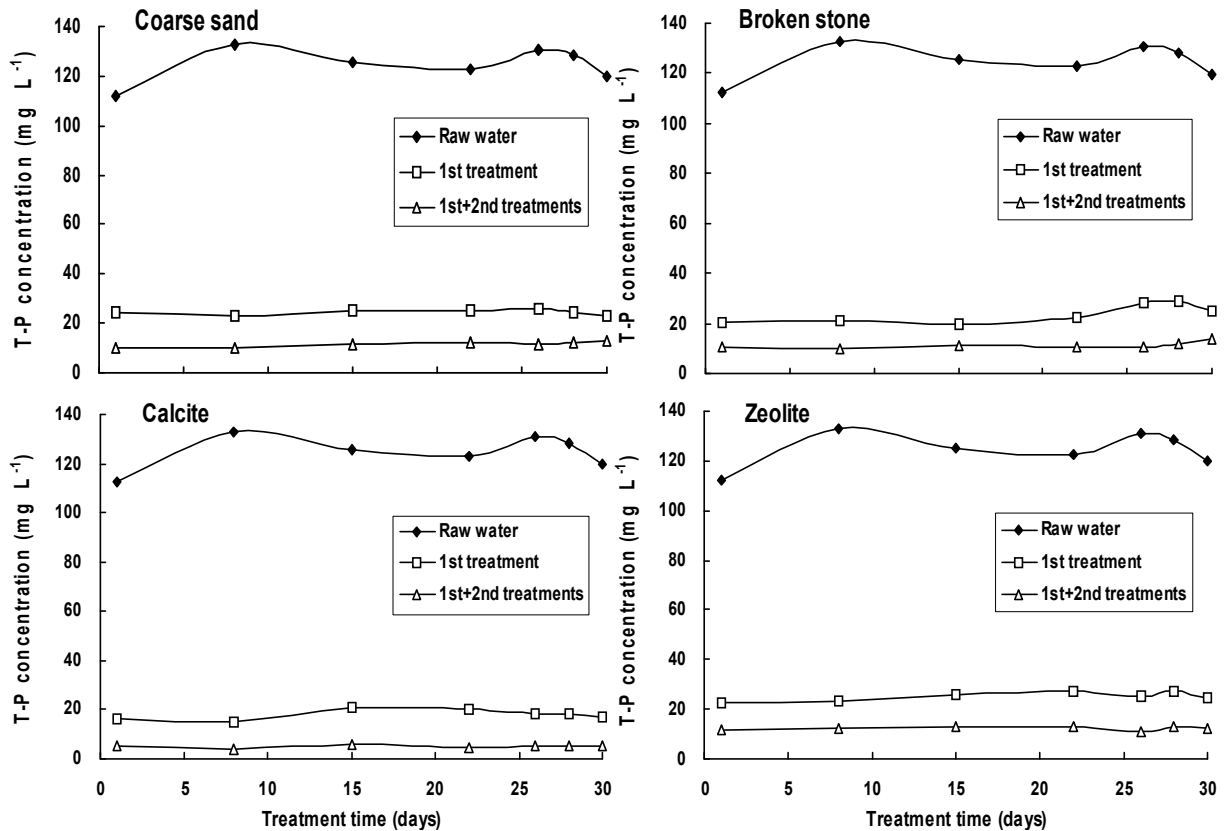


Fig. 3-48. 소형 축산폐수처리장치에서 여재 종류별 축산폐수 중 T-P 변화.

소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  및  $\text{PO}_4\text{-P}$  농도 변화를 조사한 결과는 Table 3-35에서 보는 바와 같다.

소형 축산폐수처리장치에서의 축산폐수 원수 중  $\text{NH}_4\text{-N}$  함량은  $2,110 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 호기성조를 통과한 호기성조 처리수 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$  함량은 제올라이트를 제외한 모든 여재에서 큰 차이 없이  $1,189\sim 1,301 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 하수원수에 비해 약간 감소되었으며, 호기성조를 통과한 다음 혐기성조를 통과한 방류수 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$  함량도 제올라이트를 제외한 모든 여재에서 큰 차이 없이  $924\sim 939 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 호기성조 처리수에 비해 더욱 감소되었다. 하지만 제올라이트에서 축산폐수 원수 중  $\text{NH}_4\text{-N}$  함량은 호기성조 처리수의 경우  $820 \text{ mg L}^{-1}$ 로 하수원수에 비해 급격히 감소되었으며 그 감소폭도 다른 여재에 비해 매우 컸다. 제올라이트에서 방류수 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$  함량은  $412 \text{ mg L}^{-1}$ 로 호기성조 처리수에 비해 더욱 감소되었다.

소형 축산폐수처리장치에서의 축산폐수 원수 중  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량은  $118 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 호기성조를 통과한 호기성조 처리수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량은 모든 여재에서 큰 차이 없이  $165.5\sim 170.1 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 하수원수에 비해 급격히 증가되었으며, 호기성조를 통과한 다음 혐기성조를 통과한 방류수 중의  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량은 모든 여재에서 큰 차이 없이  $144.2\sim 149.1 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 호기성조 처리수에 비해 약간 감소되었다. 이와 같이 호기성조 처리수에서  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량이 급격히 증가하는 것은 호기성조에서 여재에 부착된 호기성미생물이 축산폐수 중의  $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 질산

화시켜 NO<sub>3</sub>-N으로 전환시켰기 때문으로 사료된다.

소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 원수 중 NO<sub>2</sub>-N 함량은 33.7 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 호기성조 처리수와 방류수 중의 NO<sub>2</sub>-N 함량은 여재종류에 따라 별 차이 없이 각각 18.5~22.6 및 13.1~14.3 mg L<sup>-1</sup>이었다.

소형 축산폐수처리장치에서의 축산폐수 원수 중 PO<sub>4</sub>-P 함량은 89.7 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 호기성조를 통과한 호기성조 처리수 중의 PO<sub>4</sub>-P 함량은 모든 여재에서 큰 차이 없이 15.4~23.0 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 급격히 감소되었으며, 호기성조를 통과한 다음 혐기성조를 통과한 방류수 중의 PO<sub>4</sub>-P 함량도 모든 여재에서 큰 차이 없이 4.2~10.8 mg L<sup>-1</sup>범위로 호기성조 처리수에 비해 더욱 감소되었다.

Table 3-35. 소형 축산폐수처리장치에서 여재 종류별 축산폐수 중 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P 함량 변화

(Unit : mg L<sup>-1</sup>)

Filter media	NH <sub>4</sub> -N		NO <sub>3</sub> -N		NO <sub>2</sub> -N		PO <sub>4</sub> -P					
	Raw water	1 <sup>st</sup> treat-ment	2 <sup>nd</sup> treat-ment	Raw water	1 <sup>st</sup> treat-ment	2 <sup>nd</sup> treat-ment	Raw water	1 <sup>st</sup> treat-ment	2 <sup>nd</sup> treat-ment			
Coarse sand		1,236	924		169.9	148.7		22.6	14.3		21.64	9.96
Broken stone	2,110	1,189	839	118	168.1	146.2	33.6	17.8	13.7	89.66	21.46	10.12
Calcite		1,301	924		170.1	149.1		22.3	14.1		15.35	4.22
Zeolite		820	412		165.5	144.2		18.5	13.1		22.95	10.78

(나) 처리공법의 조합방법에 따른 수처리 효율

처리공법의 1차, 2차 처리조의 조합방법에 따른 수처리 효율 조사는 자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치를 호기-혐기 조합형, 호기-호기 조합형, 호기-무산소 조합형, 혐기-혐기 조합형, 혐기-호기 조합형, 혐기-무산소 조합형, 무산소-혐기 조합형, 무산소-호기 조합형 및 무산소-무산소 조합형의 총 9개 조합으로 구분하여 설계 및 시공하여 축산폐수 부하량을 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 한 조건하에서 수처리 효율을 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

소형 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 COD 처리효율은 Fig. 3-49에서 보는 바와 같다.

1차 처리수 중의 조합방법별 COD 처리효율은 호기성조가 55.3~58.3% 정도로 혐기성조의 47.1~48.2%와 무산소조의 43.9~46.7%에 비해 약간 높았다. 이와 같이 호기성조가 혐기성조 및 무산소조에 비해 COD 처리효율이 약간 높은 것은 호기성상태에서 대부분의 유기물이 쉽게 분해되기 때문으로 판단된다.

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 조합방법별 COD 처리효율은 Ae-Ae > Ae-An ≒ Ae-Ao > An-Ae ≒ Ao-Ae > Ao-An ≒ An-Ao ≒ An-An ≒ Ao-Ao의 순으로 호기성조 (Ae)-호기성조 (Ae) 조합형이 90.5%로 다른 조합방법에 비해 약간 높은 반면에 무산소조 (Ao)-무산소조 (Ao)와 혐기성조 (An)-혐기성조 (An) 조합형은 각각 72.3% 및 72.6%로 가장 낮은 처리효율을 보였다. Seo et al. (2006) 은 하수처리를 위한 인공습지에서 유기물 처리효율이 가장 높은 조합방법은 호기성조-호기성조 조합형으로 보고하였는데, 본 축산폐수도 동일한 경향이였다. 하지만 호기성조-호기성조 조합형의 경우 질소처리를 위한 탈질과정이 없어 축산폐수처리에 적합하지 않을 것으로 판단된다. 따라서 축산폐수를 효율적으로 처리하기 위해서는 유기물 처리효율이 높으면서 탈질이 가능한 호기성조-혐기성조 조합형이 바람직할 것으로 판단된다.

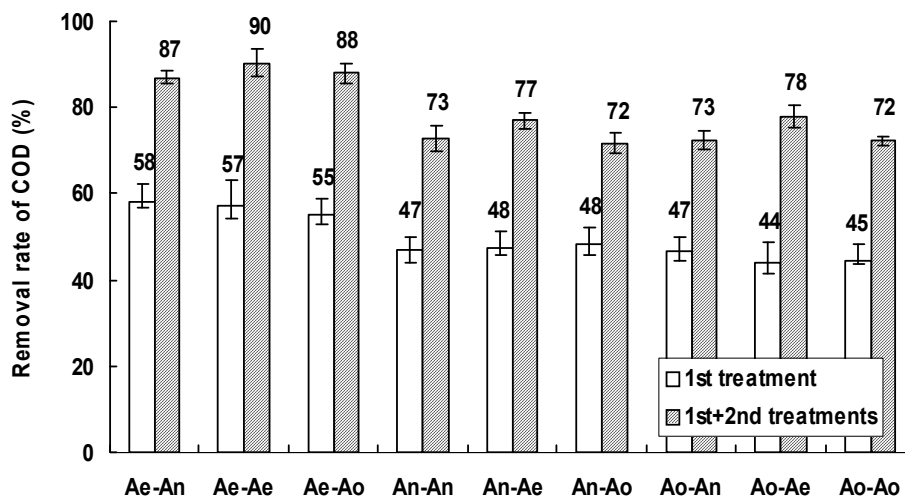


Fig. 3-49. 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 COD 처리효율.

Ae : 호기성조, An : 혐기성조, Ao : 무산소조.

소형 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 SS 처리효율은 Fig. 3-50에서 보는 바와 같다.

1차 처리수 중의 조합방법별 SS 처리효율은 처리공법에 따라 별 차이 없이 82.7~88.1% 정도로 전반적으로 높은 처리효율을 보였다. 이와 같은 결과는 부유물질의 주된 처리가 여재에 의한 여과이기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Kim, 2000; Jo, 2003).

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 조합방법별 SS 처리효율은 Ae-Ae 및 Ao-Ae 조합형을 제외한 모든 조합방법에서 큰 차이 없이 약 90~94%로 매우 높았으나, 이에 반해 무산소조 (Ao)-호기성조 (Ae)와 호기성조 (Ae)-호기성조 (Ae) 조합형은 각각 89.3% 및 88.4%로 가장



낮은 처리효율을 보였다. Seo et al. (2006) 은 하수처리를 위한 인공습지에서 SS 처리효율은 조합방법에 상관없이 모든 조건에서 높은 처리효율을 보인다고 보고하였는데, 축산폐수의 처리도 유사한 경향이였다.

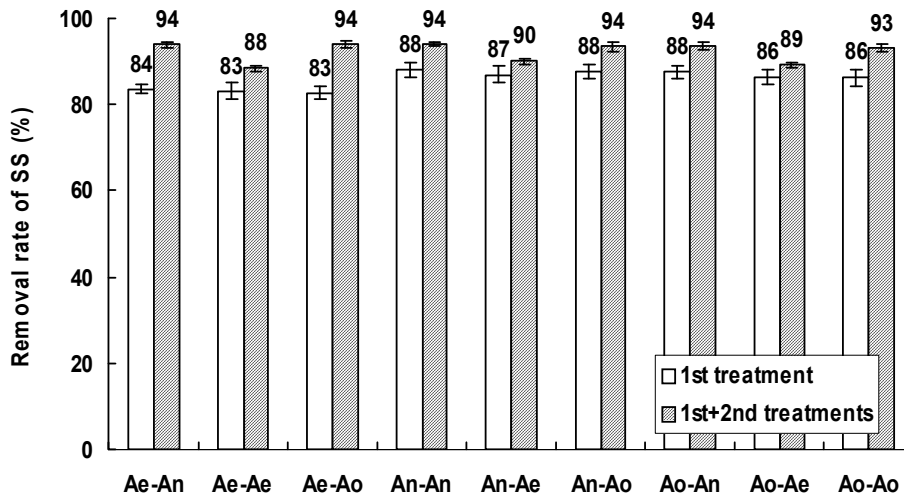


Fig. 3-50. 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 SS 처리효율.

Ae : 호기성조, An : 혐기성조, Ao : 무산소조.

소형 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 T-N 처리효율은 Fig. 3-51에서 보는 바와 같다.

1차 처리수 중의 조합방법별 T-N 처리효율은 호기성조가 35.5~36.1%정도로 혐기성조의 25.1~26.1%와 무산소조의 23.6~25.0%에 비해 약간 높았다. 이와 같이 호기성조가 혐기성조 및 무산소조에 비해 T-N 처리효율이 약간 높은 것은 축산폐수 중 질소의 대부분이 암모니아성 질소로 이들의 질산화에 의한 것으로 판단된다.

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 조합방법별 T-N 처리효율은 Ae-An > Ae-Ao > Ae-Ae > Ao-Ae > An-Ae ≒ An-An ≒ Ao-An > An-Ao > Ao-Ao의 순으로 호기성조 (Ae)-혐기성조 (An) 조합형이 50.4%로 다른 조합방법에 비해 약간 높은 반면에 혐기성조 (An)-무산소조 (Ao)와 무산소조 (Ao)-무산소조 (Ao) 조합형은 각각 39.2% 및 38.7%로 가장 낮은 처리효율을 보였다. Seo et al. (2006)은 하수처리를 위한 인공습지에서 T-N 처리효율이 가장 높은 조합방법은 호기성조-혐기성조 조합형으로 보고하였는데, 본 축산폐수도 동일한 경향이였다. 이와 같이 호기성조-혐기성조 조합형이 축산폐수 중의 질소처리에 적합한 이유는 유입수의 질소 중 대부분의 질소가 NH<sub>4</sub>-N의 형태로서 생물학적 탈질에 의해 질소가 처리되기 위해서는 호기성조에서 암모니아성 질소를 질산화시키는 기작이 필요하고, 이를 다시 혐기성조에서 N<sub>2</sub>O와 N<sub>2</sub>로 탈질시키는 기작이 필요하기 때문이다.

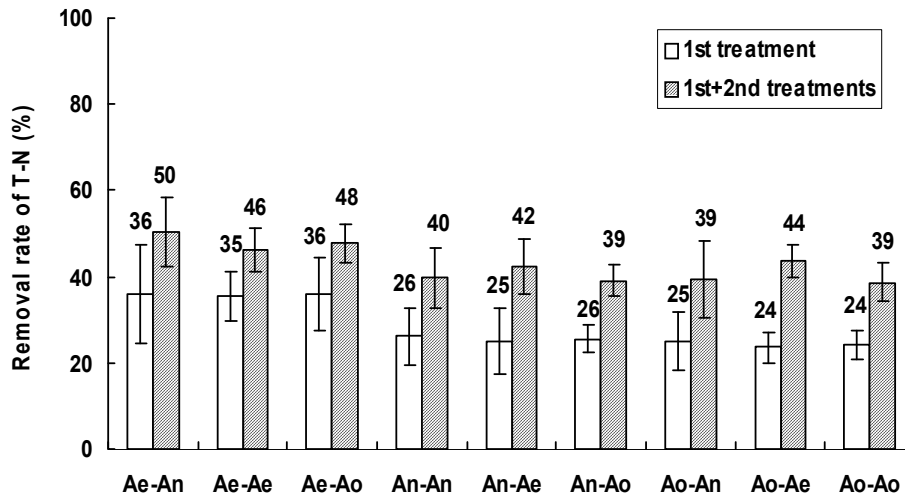


Fig. 3-51. 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 T-N 처리효율.  
 Ae : 호기성조, An : 혐기성조, Ao : 무산소조.

소형 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 T-P 처리효율은 Fig. 3-52에서 보는 바와 같다.

1차 처리수 중의 조합방법별 T-P 처리효율은 무산조가 83.9~85.6% 정도로 호기성조의 79.2~80.3%와 혐기성조의 84.0~84.1%에 비해 미미하게 높았다.

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 조합방법별 T-P 처리효율은 An-Ao ≒ Ao-Ao ≒ An-An > Ao-An > Ae-An > Ae-Ao > Ao-Ae ≒ An-Ae > Ae-Ae의 순으로 혐기성조 (An)-무산소조 (Ox) 조합형이 93.6%로 다른 조합방법에 비해 약간 높은 반면에 혐기성조 (An)-호기성조 (Ae)와 호기성조 (Ae)-호기성조 (Ae) 조합형은 각각 88.2 및 87.3%로 가장 낮은 처리효율을 보였다.

이와 같이 혐기성조 및 무산소조가 호기성조에 비해 T-P의 처리효율이 약간 높은 것은 수평흐름인 혐기성조 및 무산소조가 수직흐름조인 호기성조에 비해 축산폐수의 체류시간이 상대적으로 길게 설계되었기 때문으로 사료된다.

T-P의 처리기작은 인산염의 침전, 기질에의 흡착, 수생식물에 의한 흡수 및 조류와 세균에 의한 흡수 등으로 예상할 수 있다. 일반적으로 인공습지에서 인 처리는 대부분 흡착과 침전에 의해 주로 처리되며, 식물흡수에 의한 흡수나 미생물에 의한 처리량은 전반적으로 매우 낮은 것으로 알려져 있다 (Seo et al., 2005). 따라서 T-P의 효과적인 처리를 위해서는 인의 흡착과 침전에 용이한 여재의 선정이 필요할 것으로 판단된다.

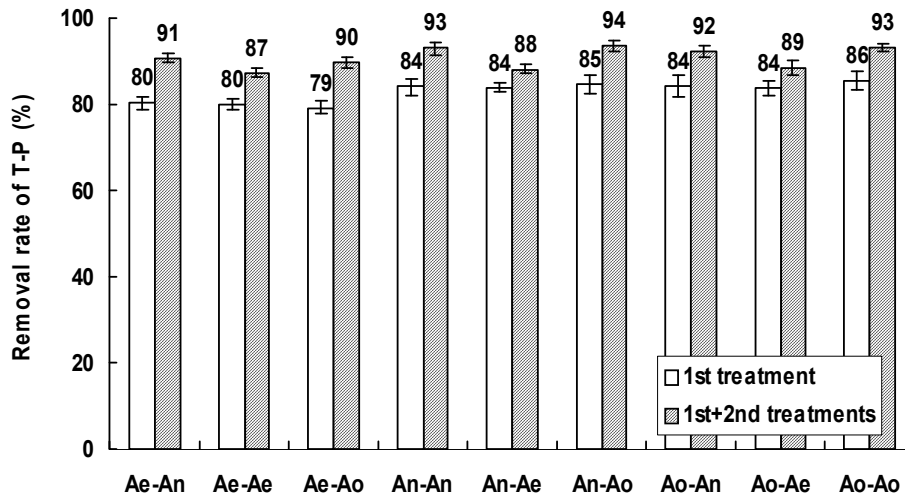


Fig. 3-52. 축산폐수처리장치에서 처리공법의 조합방법에 따른 T-P 처리효율.

Ae : 호기성조, An : 혐기성조, Ao : 무산소조.

(다) 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율

축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 최적 여재인 왕사와 최적 조합방법인 호기-혐기 조합형에서 축산폐수 부하량에 대한 적응성을 조사하기 위해 축산폐수 부하량을 50, 100 및 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 달리하여 수처리 효율을 각각 조사하였고, 그 결과는 다음과 같다.

소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 COD의 처리효율은 Fig. 3-53에서 보는 바와 같다. 축산폐수 원수의 COD는 2,355 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 처리인 호기성조를 통과하면서 899.3~1,172.6 mg L<sup>-1</sup>정도로 처리되어 COD 처리효율이 49.9~61.8%정도이었고, 전반적으로 1차 처리수의 경우 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 COD 처리효율이 점점 감소되는 경향이였다. 특히, 축산폐수 부하량 50~100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 경우 COD 처리효율은 58.3~61.8%정도이었으나, 축산폐수 부하량 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 경우 COD 처리효율이 49.9%정도로 축산폐수 부하량 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이상부터 처리효율이 감소하는 것으로 판단된다.

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 축산폐수 부하량별 COD 처리효율은 축산폐수 부하량 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>까지는 별 차이 없이 유사하거나 미미하게 감소하였으나, 축산폐수 부하량 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이상에서는 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 따라서 축산폐수 부하량별 COD 처리효율은 50 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> ≒ 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> > 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 순이었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 소형 축산폐수처리장치에서 효과적인 COD 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었다.

소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 SS의 처리효율은 Fig. 3-53에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 SS 함량은 3,684 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 처리인 호기성조를 통과하면서 518.6~638.6 mg L<sup>-1</sup>정도로 유출되어 SS 처리효율이 82.3~85.7%정도로 SS 처리효율은 COD 처리효율과 달리 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없었다. 이와 같이 축산폐수 부하량에 따라 SS

처리효율이 별 차이 없는 것은 본 소형 축산폐수처리장치는 여재에 의해 대부분의 SS가 여과되는 시스템이기 때문이다. 하지만 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Kim, 2000; Jo, 2003).

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 축산폐수 부하량별 SS 처리효율은 93.1~95.4%정도로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다. 따라서 축산폐수 부하량별 SS 처리효율은  $50 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} \approx 100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} \approx 200 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  순으로 나타났다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 소형 축산폐수처리장치에서 효과적인 SS 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은  $200 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 정도로 SS 처리만을 위해서는 그 이상의 부하량도 가능할 것으로 판단된다. 하지만 상기 축산폐수 부하량별 COD 처리효율에서 부하량  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이상 처리시 처리효율이 감소되어  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이상으로 처리가 어려울 것으로 판단된다.

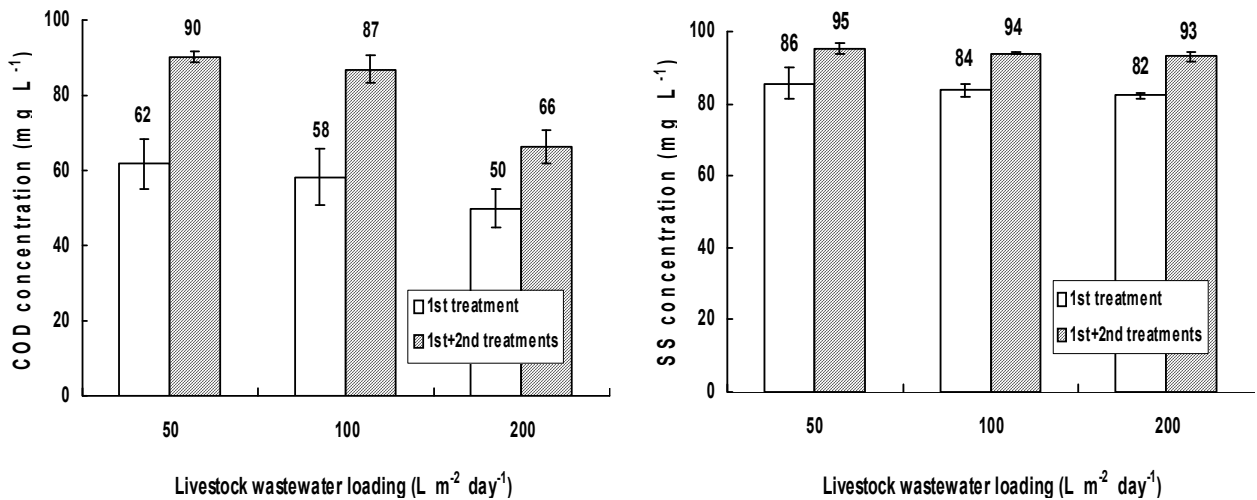


Fig. 3-53. 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량에 따른 COD 및 SS 처리효율.

소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 T-N의 처리효율은 Fig. 3-54에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 T-N 함량은  $2,455 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 1차 처리인 호기성조를 통과하면서  $1,497 \sim 1,707 \text{ mg L}^{-1}$ 정도로 유출되어 T-N 처리효율이 30.3~38.6%정도이었고, 전반적으로 1차 처리수의 경우 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 T-N 처리효율이 점점 감소되는 경향이였다. 특히, 축산폐수 부하량  $50 \sim 100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 경우 T-N 처리효율은 35.9~38.6%정도이었으나, 축산폐수 부하량  $200 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 경우 T-N 처리효율이 30.3%정도로 축산폐수 부하량  $200 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이상부터 처리효율이 감소하는 것으로 판단된다.

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 부하량별 T-N 처리효율은 축산폐수 부하량  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 까지는 별 차이 없이 비슷하거나 미미하게 감소하였으나, 축산폐수 부하량  $200 \text{ L m}^{-2}$

day<sup>-1</sup>이상에서는 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>에 비해 약간 감소하였다. 따라서 축산폐수 부하량별 T-N 처리효율은 50 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> ≃ 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> > 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 순으로 나타났다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 소형 축산폐수처리장치에서 효과적인 T-N 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었다.

소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 T-P의 처리효율은 Fig. 3-54에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 T-P는 124.6 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 처리인 호기성조를 통과하면서 20.0~34.6 mg L<sup>-1</sup> 정도로 처리되어 T-P 처리효율이 72.1~83.9% 정도이었고, 전반적으로 1차 처리수의 경우 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 T-P 처리효율이 점점 감소되는 경향이 있었다. 특히, 축산폐수 부하량 50~100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 경우 T-P 처리효율은 80.3~83.9% 정도이었으나, 축산폐수 부하량 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 경우 T-P 처리효율이 72.1% 정도로 축산폐수 부하량 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 이상부터 처리효율이 감소하는 것으로 판단된다.

1차 처리된 후 2차 처리수 중의 부하량별 T-P 처리효율은 축산폐수 부하량 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>까지는 별 차이 없이 비슷하거나 미미하게 감소하였으나, 축산폐수 부하량 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 이상에서는 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>에 비해 감소하였다. 따라서 축산폐수 부하량별 T-P 처리효율은 50 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> ≃ 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> > 200 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 순으로 나타났다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 소형 축산폐수처리장치에서 효과적인 T-P 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 100 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>이었다.

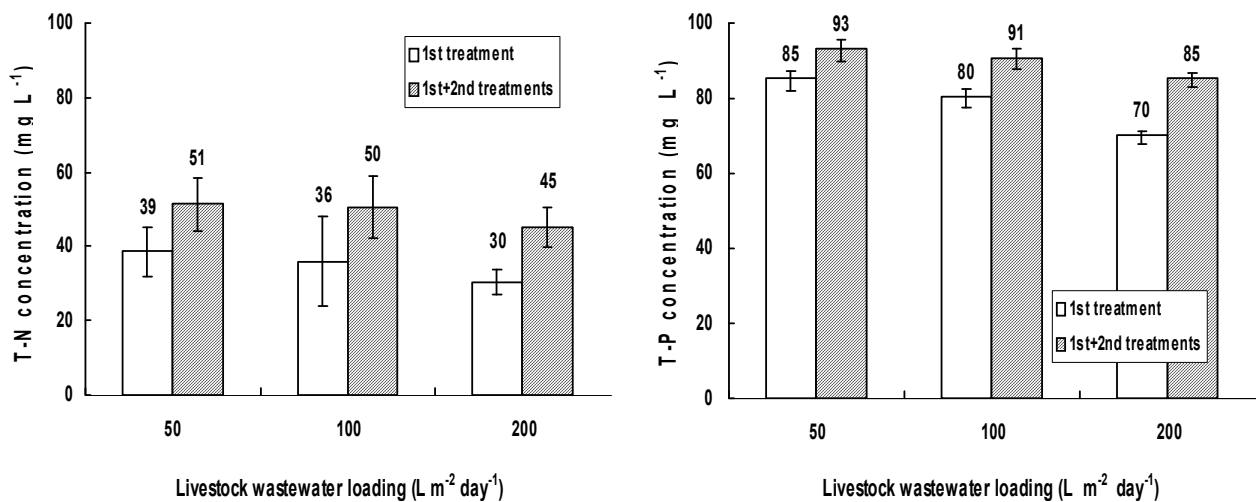


Fig. 3-54. 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 부하량에 따른 T-N 및 T-P 처리효율.

(2) 자원순환형 축산폐수 처리기술개발을 위한 기반 연구

(가) 축산폐수 종류별 수처리 효율

축산폐수 종류별 수처리 효율 조사는 최적 여재인 왕사와 최적 조합방법인 호기-혐기 조합방법 및 최적 부하량인  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 하에서 축산폐수를 우분뇨, 돈분뇨 및 계분뇨로 구분하여 수처리 효율을 각각 조사하였다.

호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 우분뇨 주입에 따른 COD 처리효율은 Fig. 3-55와 같이 1차 호기성조에서 49.9%이었고, 2차 혐기성조에서 84.9%로 대조구인 축산폐수 주입에 따른 COD 처리효율과 큰 차이 없었다. 돈분뇨 주입에 따른 COD 처리효율도 우분뇨와 유사한 경향으로 1차 호기성조에서 56.2%이었고, 2차 혐기성조에서 86.3%로 대조구인 축산폐수 주입에 따른 COD 처리효율과 별 차이 없었다. 하지만 계분뇨 주입에 따른 COD 처리효율은 1차 호기성조에서 62.0%이었고, 2차 혐기성조에서 88.4%로 대조구인 축산폐수 주입에 따른 COD 처리효율에 비해 약간 높은 경향으로 보였다. 이는 공시 계분뇨의 COD가 우분뇨와 돈분뇨의 COD 함량에 비해 약간 낮아 상대적으로 COD 부하량이 적었기 때문으로 판단된다.

이상의 결과에서 본 소형 축산폐수처리장치에서 COD의 처리는 축산폐수 종류에 따라 큰 차이 없이 높은 처리효율을 보였다.

호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 우분뇨 주입에 따른 SS 처리효율은 Fig. 3-55와 같이 1차 호기성조에서 81.8%이었고, 2차 혐기성조에서 94.6%로 대조구인 축산폐수 주입에 따른 SS 처리효율과 큰 차이 없었고, 돈분뇨 및 계분뇨와도 큰 차이 없이 유사한 경향을 보였다. 돈분뇨 주입에 따른 SS 처리효율은 1차 호기성조에서 81.7%이었고, 2차 혐기성조에서 93.8%로 우분뇨와 큰 차이 없이 유사하였다. 계분뇨 주입에 따른 SS 처리효율은 우분뇨와 돈분뇨와 유사한 경향으로 호기성조에서 82.2%이었고, 2차 혐기성조에서 94.8%이었다. 이와 같이 축산폐수 종류별로 SS 처리효율이 큰 차이 없는 것은 본 축산폐수처리장치에서 부유물질의 처리는 화학적인 처리보다 여재에 의한 물리적인 여과가 주된 처리이기 때문이다.

이상의 결과에서 본 소형 축산폐수처리장치에서 SS의 처리는 축산폐수 종류에 따라 별 차이 없이 높은 처리효율을 보였다.

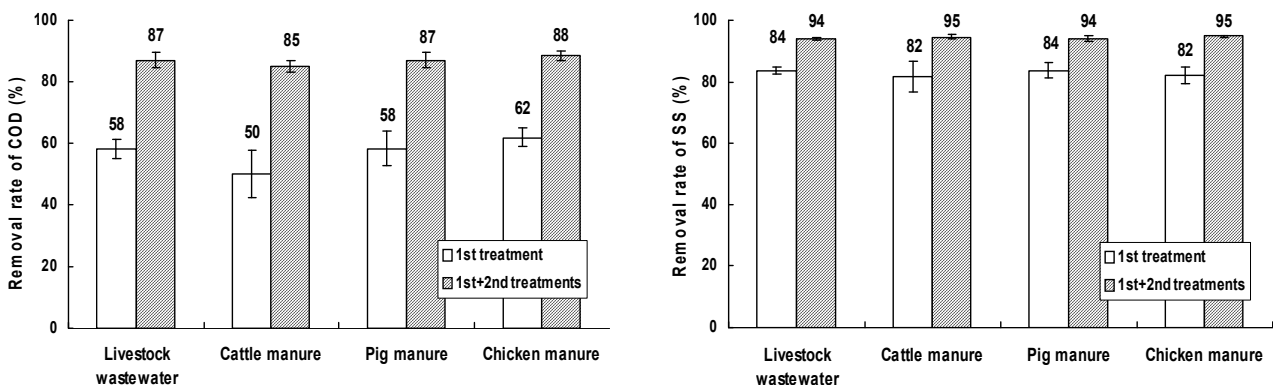


Fig. 3-55. 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 종류별 COD 및 SS 처리효율.

호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 우분뇨 주입에 따른 T-N 처리효율은 Fig. 3-56과 같이 1차 호기성조에서 30.9%이었고, 2차 혐기성조에서 49.3%로 대조구인 축산폐수 주입에 따른 T-N 처리효율과 큰 차이 없었고, 돈분뇨와도 큰 차이 없이 유사한 경향을 보였다. 돈분뇨 주입에 따른 T-N 처리효율은 우분뇨와 유사한 경향으로 1차 호기성조에서 33.7%이었고, 2차 혐기성조에서 50.0%이었다. 하지만 계분뇨 주입에 따른 T-N 처리효율은 1차 호기성조에서 20.6%이었고, 2차 혐기성조에서 40.6%로 우분뇨와 돈분뇨에 비해 약간 낮은 처리효율을 보였다. 이와 같은 결과는 유입된 계분뇨 중의 T-N 함량이 우분뇨와 돈분뇨에 비해 1.3~1.8배 정도 높기 때문으로 판단된다.

이상의 결과에서 본 소형 축산폐수처리장치에서 T-N의 처리효율은 계분뇨를 제외한 우분뇨와 돈분뇨에서 대조구인 축산폐수와 별 차이 없이 비슷한 처리효율을 보였으나, 계분뇨의 경우 처리효율이 약간 낮았다. 따라서 계분뇨의 안정적인 T-N 처리를 위해서는 소형 축산폐수처리장에서 T-N 처리효율을 향상시킬 방안이 필요할 것으로 판단된다.

호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 우분뇨 주입에 따른 T-P 처리효율은 Fig. 3-56과 같이 1차 호기성조에서 78.3%이었고, 2차 혐기성조에서 88.6%로 대조구인 축산폐수 주입에 따른 T-P 처리효율과 큰 차이 없었고, 돈분뇨와도 큰 차이 없이 유사한 경향을 보였다. 돈분뇨 주입에 따른 T-P 처리효율은 우분뇨와 비슷한 경향으로 1차 호기성조에서 79.4%이었고, 2차 혐기성조에서 90.8%이었다. 하지만 계분뇨 주입에 따른 T-P 처리효율은 1차 호기성조에서 51.5%이었고, 2차 혐기성조에서 71.7%로 우분뇨와 돈분뇨에 비해 약간 낮은 처리효율을 보였다. 이와 같은 결과는 유입된 계분뇨 중의 T-P 함량이 우분뇨와 돈분뇨에 비해 1.6~1.9배 정도 높기 때문으로 판단된다.

이상의 결과에서 본 소형 축산폐수처리장치에서 T-P의 처리효율은 계분뇨를 제외한 우분뇨와 돈분뇨에서 대조구인 축산폐수와 별 차이 없이 비슷한 처리효율을 보였으나, 계분뇨의 경우 처리효율이 약간 낮았다. 따라서 계분뇨 중의 T-P를 안정적으로 처리하기 위해서는 소형 축산폐수처리장에서 T-P 처리효율을 향상시킬 방안이 필요할 것으로 판단된다.

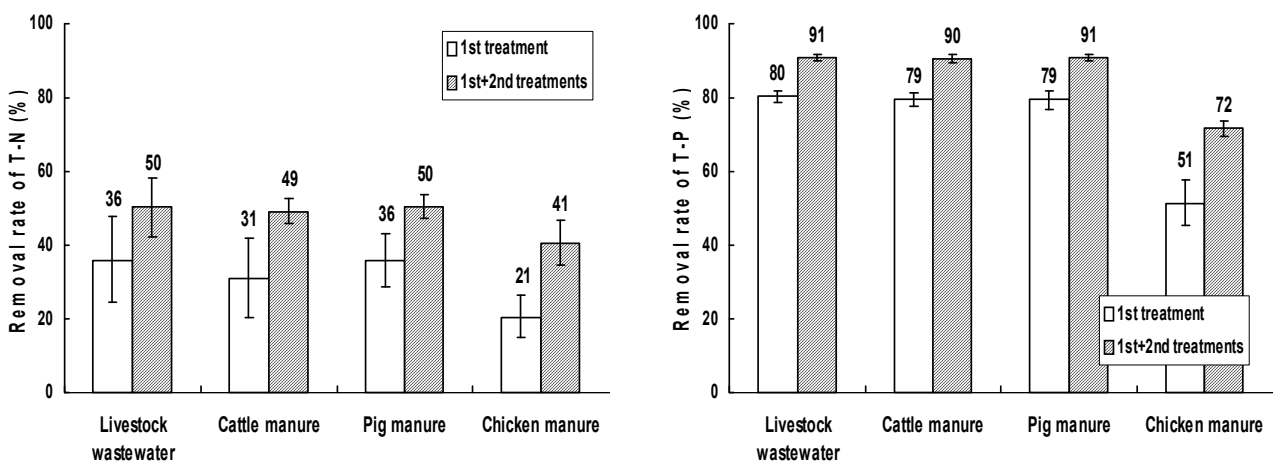


Fig. 3-56. 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 종류별 T-N 및 T-P처리효율.

(나) 특수여재 주입에 따른 수처리 효율

질소와 인 처리효율이 우수한 특수여재 주입에 따른 수처리 효율 조사는 여재종류에 따른 수처리효율 조사결과 최적 여재와 처리공법의 조합방법에 따른 수처리효율 조사결과 최적 조합방법, 그리고 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사결과 최적 부하량하에서 질소와 인의 처리효율 향상을 위해 소형 축산폐수처리장치에 호기성조에는 제올라이트를, 혐기성조에는 방해석을 각 조의 최적여재의 30%에 해당하게 첨가하여 수처리 효율을 조사하였고, 그 결과는 Fig. 3-57에서 보는 바와 같다.

특수여재 주입에 따른 오염물질의 수처리 효율을 조사한 결과 특수여재를 주입하지 않는 경우(대조구) COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 87, 94, 50 및 91%로 이었고, 특수여재를 주입한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 84, 94, 65 및 98%로 특수여재를 주입한 경우 질소 및 인 처리효율이 각각 15% 및 7% 향상되었다.

이와 같이 질소 및 인 처리효율이 향상된 것은 호기성조에 암모니아성 질소 흡착능이 우수한 제올라이트를 사용하였고, 혐기성조에 인 흡착능이 우수한 방해석을 사용하였기 때문으로 판단된다.

따라서 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장치에서 질소와 인의 처리효율 향상을 위해서는 호기성조에는 제올라이트를 혐기성조에는 방해석을 주입하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

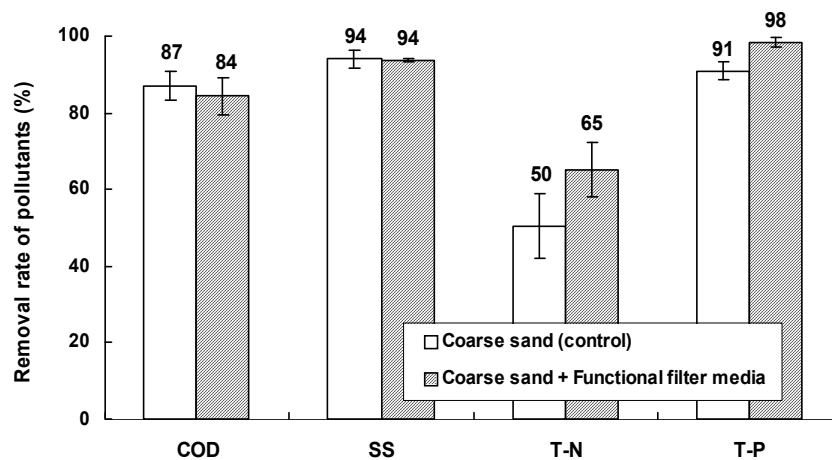


Fig. 3-57. 소형 축산폐수처리장치에서 특수여재 주입에 따른 오염물질의 처리 효율.

(다) 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 수처리 효율

자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기반연구를 위해 본 축산폐수처리장치에서 생육된 수생식물을 건조 파쇄한 후 퇴비화를 위한 수분조절제로 사용하여 현행 수분조절제인 톱밥의 대체제와 축산폐수의 전처리를 통한 수처리 효율 향상방안을 동시에 달성하고자 수생식물의 수분흡수율, 수생식물의 축산폐수 전처리 효율 및 소형 축산폐수처리장치에서 전처리 유무에 따른 수처리 효율을 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.



① 수생식물의 수분흡수율

자연정화공법에 의한 소형 축산폐수처리장치에서 생육된 수생식물을 축산폐수와 함께 퇴비화하여 자원화하기 위해 우선 수생식물이 퇴비화를 위한 수분조절제로서의 가능성을 조사하기 위해 수분흡수율을 조사하였고, 그 결과는 Fig. 3-58에서 보는 바와 같다.

소형 축산폐수처리장치의 호기성조에 이식한 갈대의 수분흡수율은 213%로 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 톱밥과 벚짚의 수분흡수율과 유사하였다. 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포의 수분흡수율은 467%로 기존의 톱밥과 벚짚의 수분흡수량인 267% 및 222%에 비해 월등히 높아 수분조절제로서의 가치가 충분한 것으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 호기성조에 이식한 갈대와 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포 모두 수분조절제로서의 충분한 가치가 있는 것으로 판단된다. 하지만 퇴비화를 위한 수생식물은 수분조절제로서의 가치 이외에도 탄질비 (C/N) 및 용출액의 영양성분 등의 중요지표를 모두 고려하여 선정되어야 할 것이다. (기타 수생식물의 퇴비화관련 연구결과는 제 1 협동연구인 “수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구”를 참고)

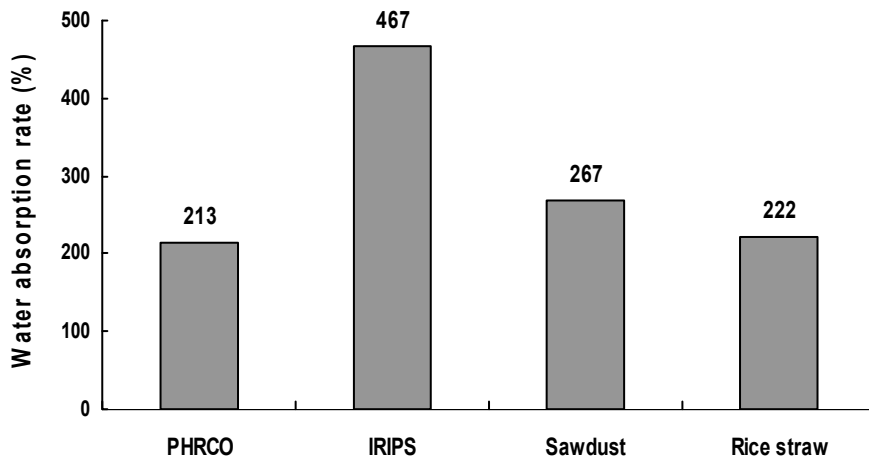


Fig. 3-58. 수생식물 종류별, 톱밥 및 벚짚의 수분 흡수율.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS,

IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.

② 수생식물의 축산폐수 전처리 효율

자원순환형 축산폐수처리장에서 수처리 효율 향상을 위해 수생식물의 축산폐수 전처리 효율을 조사한 결과는 Fig. 3-59에서 보는 바와 같다.

소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 축산폐수 전처리 효율을 조사한 결과 호기성조에 사용된 갈대를 건조/분쇄하여 축산폐수를 전처리한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 57, 62, 48 및 29%이었고, 혐기성조에 사용된 노랑꽃창포를 건조/분쇄하여 축산폐수를 전처리한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 67, 85, 54 및 36%로 노랑꽃창포가 갈대에 비해 전반적으로 높은 전처리 효율을 보였으며, 특히 노랑꽃창포의 SS 전처리 효율은

갈대에 비해 23%정도 높았다. Seo et al. (2005)의 연구결과 자연정화공법에 의한 하수처리장의 호기성조에서는 갈대가, 혐기성조에서는 노랑꽃창포가 최적 수생식물로 보고하였다. 일반적으로 갈대의 경우 줄기와 잎이 가늘고 줄기의 가운데 부분이 비어있어 건물중량이 다른 수생식물에 비해 적은편으로 수생식물을 이용한 퇴비화에는 효율적이지 못한 것으로 판단된다. 하지만 노랑꽃창포의 경우 축산폐수처리장치에서 성장속도가 다른 수생식물에 비해 매우 빠르고, 바이오매스 생산량이 매우 크며, 생명력이 강한 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 줄기와 잎이 많고, 수분조절 효과가 매우 우수하였다. 특히 노랑꽃창포의 섬유조직은 모세관흡수현상(capillary effect)을 촉진시키는 최적의 구조이며, 또한 흡수된 액체와 공기를 최대한 저장할 수 있는 형태를 가지고 있다. 또한 퇴비화 공정 중 노랑꽃창포를 이용하면 노랑꽃창포 섬유조직에서 용출되는 물질은 탄소원을 공급하는 역할을 하게 되며, 노랑꽃창포 섬유조직내에 있는 산소는 퇴비화에 적합한 혐의성 조건을 만드는 역할을 하는 것으로 기존의 수분조절제 (톱밥, 볏짚)와 다른 특징을 갖는다.

따라서 축산폐수처리장에서 성장한 수생식물을 재활용한다면 수생식물의 퇴비화를 위한 수분조절제로 활용하여 톱밥의 대체효과를 확보할 수 있고, 또한 수생식물의 축산폐수 전처리를 통한 수처리 효율 향상이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 축산폐수처리장에서 생산된 수생식물이 우수한 전처리제와 수분조절제로서 사용되기 위해서는 다양한 수생식물을 이용하여 전처리 효율과 퇴비화를 위한 수분조절제로서의 특성을 조사해야 할 것으로 판단된다.

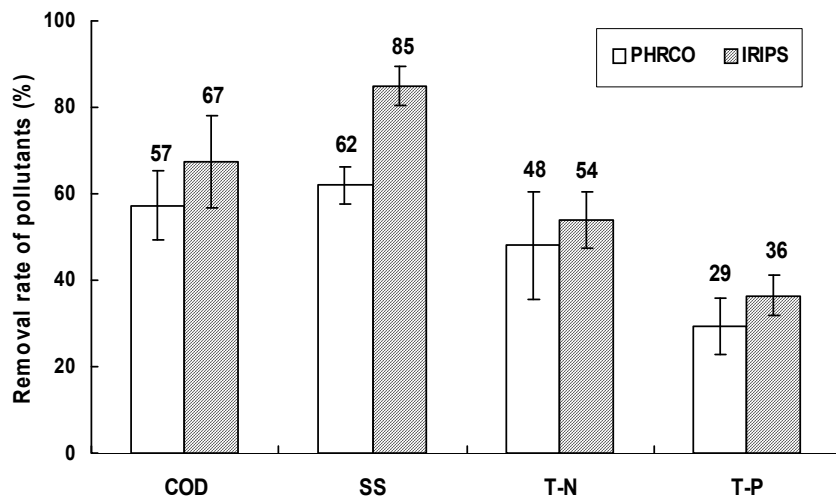


Fig. 3-59. 수생식물의 축산폐수 전처리 효율.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.

### ③ 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 전처리 유무에 따른 수처리 효율

자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기반연구를 위해 본 축산폐수처리장치에서 생육된 수생식물을 건조 파쇄한 후 퇴비화를 위한 수분조절제로 사용하여 현행 수분조절제인 톱밥

의 대체제와 축산폐수의 전처리를 통한 수처리 효율 향상방안을 동시에 달성하고자 소형 축산폐수처리장치에 축산폐수를 주입하기 전에 파쇄된 수생식물을 이용하여 1차적으로 여과하여 파쇄된 수생식물에 남은 영양분들은 퇴비화로 재활용하고, 1차 여과된 축산폐수를 최적조건으로 운전 중인 소형 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에 주입하여 수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 수처리 효율을 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 3-60에서 보는 바와 같다.

수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 오염물질의 수처리 효율을 조사한 결과 전처리를 하지 않은 경우 (대조구) COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 87, 94, 50 및 91% 이었고, 수생식물을 이용하여 전처리를 한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 95, 99, 95 및 97%로 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율이 각각 8, 5, 45 및 6%가 향상되었다. 특히, 수생식물을 이용한 T-N 처리효율은 다른 오염물질에 비해 급격히 증가되는 경향이였다.

이와 같이 질소 및 인 처리효율이 향상된 것은 건조 파쇄된 수생식물을 이용하여 축산폐수를 1차 여과한 후 대부분의 질소 및 인 등의 영양성분들이 제거된 1차 처리수를 소형 축산폐수처리장치에 유입시켰기 때문으로 판단된다. 또한 수생식물에 의해 전처리된 축산폐수는 질소와 인 등의 영양염류의 농도와 유입량이 크게 줄어들어 축산폐수처리장에서 오염물질 부하량을 감소시키는 효과가 있어 축산폐수처리장의 수명연장에도 도움이 될 것으로 판단된다.

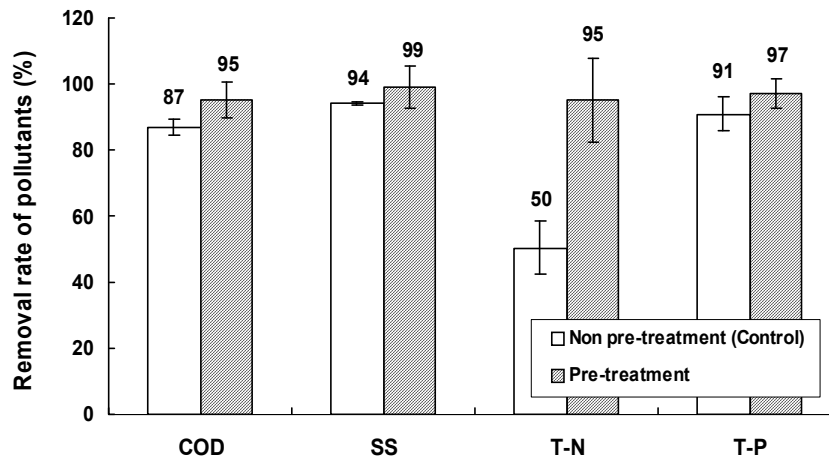


Fig. 3-60. 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 오염물질의 처리 효율.

소형 호기-혐기 조합형 축산폐수처리장치에서 파쇄된 수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P 함량 변화를 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 3-61에서 보는 바와 같다.

수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 COD는 1차 처리수는 전처리를 하지 않은 경우  $1004 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $235 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 COD는 전처리를 한 경우가 전처리를 하지 않은 경우에 비해 매우 낮은 경향이였다. 1차 처리된 후 2차 처리수 중의 COD는 전처리를 하지 않은 경우  $295 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $47 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 1차 처리수에 비해 더욱 감소하였다. 하지만 보다 안정적인 COD 처리를 위해서는 축산폐수처리장에 적합한 최적공법과

수생식물에 의한 축산폐수의 전처리 방법을 확립하여 최적의 운전조건을 도출해야 할 것으로 판단된다.

수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 SS 함량은 1차 처리수는 전처리를 하지 않은 경우  $599 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $89 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 SS 함량은 전처리를 한 경우가 전처리를 하지 않은 경우에 비해 매우 낮았다. 1차 처리된 후 2차 처리수 중의 SS 함량은 전처리를 하지 않은 경우  $228 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $29 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 1차 처리수에 비해 더욱 감소하였으며, 특히 전처리를 한 경우는 현행 “가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨처리시설 방류수 수질기준인  $150 \text{ mg L}^{-1}$ 을 만족하였다. 하지만 보다 안정적인 SS 처리를 위해서는 축산폐수처리장에 적합한 최적공법과 수생식물에 의한 축산폐수의 전처리 방법을 확립해야 할 것으로 판단된다.

수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 T-N 함량은 1차 처리수는 전처리를 하지 않은 경우  $1,520 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $470 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 T-N 함량은 전처리를 한 경우가 전처리를 하지 않은 경우에 비해 매우 낮았다. 1차 처리된 후 2차 처리수 중의 T-N 함량은 전처리를 하지 않은 경우  $1,295 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $58 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 1차 처리수에 비해 더욱 감소하였으며, 특히 전처리를 한 경우는 현행 “가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨처리시설 방류수 수질기준인  $850 \text{ mg L}^{-1}$ 을 만족하였다. 하지만 보다 안정적인 T-N 처리를 위해서는 축산폐수처리장에 적합한 최적공법과 수생식물에 의한 축산폐수의 전처리 방법을 확립하여 최적의 운전조건을 도출해야 할 것으로 판단된다.

수생식물을 이용한 전처리 유무에 따른 T-P 함량은 1차 처리수는 전처리를 하지 않은 경우  $24.9 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $4.94 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 T-P 함량은 전처리를 한 경우가 전처리를 하지 않은 경우에 비해 매우 낮았다. 1차 처리된 후 2차 처리수 중의 T-P 함량은 전처리를 하지 않은 경우  $12 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 전처리를 한 경우  $2.24 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 전처리를 한 경우가 전처리를 하지 않은 경우에 비해 매우 낮았으며, 특히 전처리를 한 경우는 현행 “가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨처리시설 방류수 수질기준인  $200 \text{ mg L}^{-1}$ 을 만족하였다. 하지만 보다 안정적인 T-P 처리를 위해서는 축산폐수처리장에 적합한 최적공법과 수생식물에 의한 축산폐수의 전처리 방법을 확립하여 최적 운전조건을 도출해야 할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물을 이용한 전처리 방법은 COD, SS, T-N 및 T-P 모두에서 현행 “가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨처리시설 방류수 수질기준을 만족하였다. 따라서 수생식물을 이용한 전처리 방법은 축산폐수처리와 퇴비화기술을 기반으로 하는 자원순환형 축산폐수처리기술 개발에 적합한 방법으로 판단된다. 하지만 보다 안정적인 축산폐수 처리와 효율적인 퇴비화를 위해서는 축산폐수처리장에 적합한 최적공법과 수생식물에 의한 축산폐수의 전처리 방법을 확립해야 할 것으로 판단된다. 또한 축산폐수의 재활용율을 높여 처리장의 수명을 연장하고, 퇴비화율을 높이기 위해서는 수생식물의 선정, 퇴비화율 및 수처리 효율 등 다양한 인자하에서 자원순환형 축산폐수처리기술을 개발해야 할 것으로 판단된다.

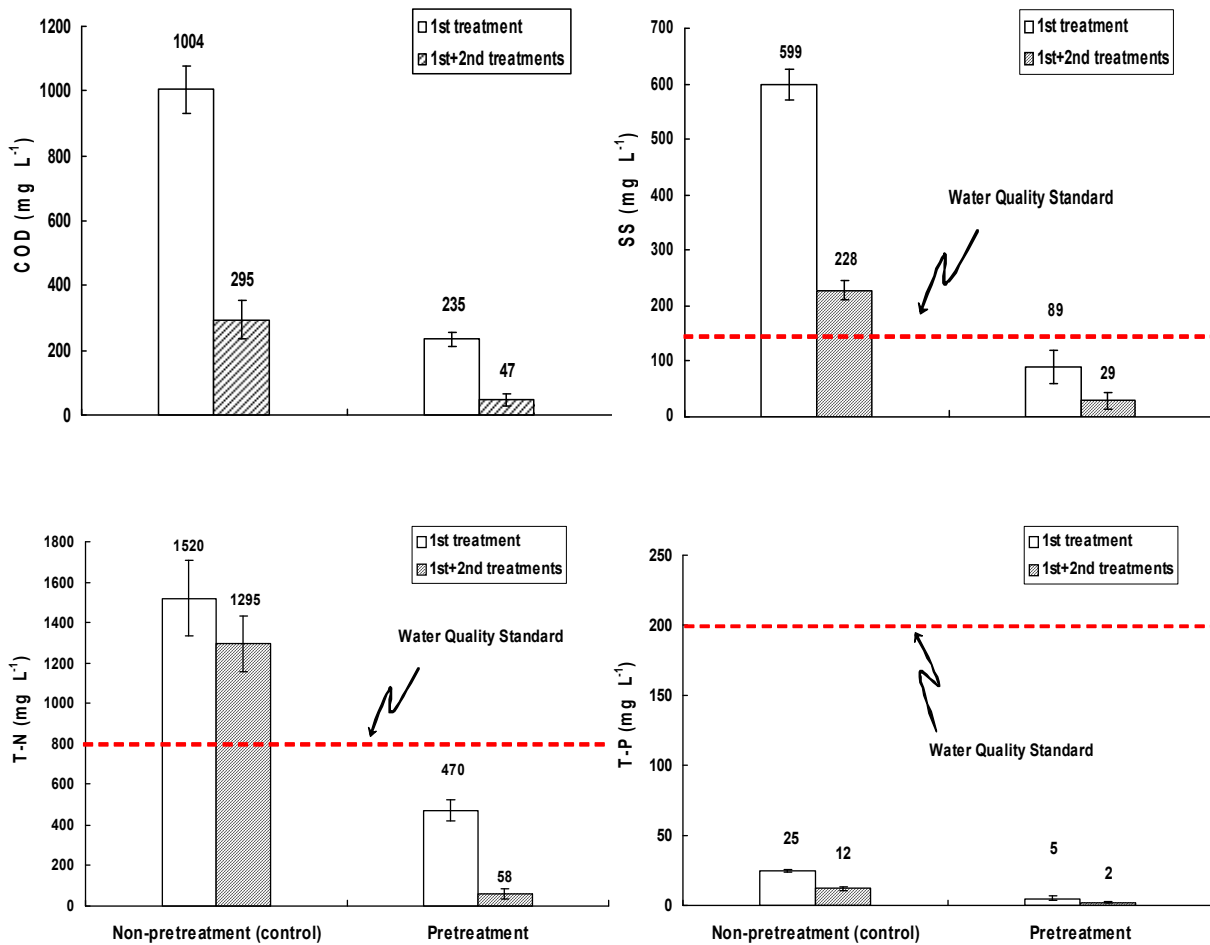


Fig. 3-61. 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 오염물질의 농도 변화.

## 나) 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성

### (1) 여재의 이화학적 특성

소형 축산폐수처리장치는 1차 처리인 호기성조 및 2차 처리인 혐기성조로 구분하여 여재를 왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트를 각각 사용하였고, 그 표면에 수생식물을 이식하였다. 축산폐수처리 2, 4 및 6개월 후의 여재의 이화학적인 특성 변화는 호기성조 및 혐기성조를 각각 표층과 심층으로 구분하여 조사하였고, 그 결과는 Table 3-36~3-41에서 보는 바와 같다.

호기-혐기 조합형 소형 축산폐수처리장치에서 처리시일이 경과함에 따른 여재의 pH는 왕사, 쇠석 및 제올라이트의 경우 6.6~6.9로 거의 중성 부근이었고, 방해석의 경우 층위에 따라 약간의 차이는 있으나 pH가 8.9~9.2정도로 다른 여재에 비해 약간 높은 경향이였다. EC는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 모든 여재에서 비슷한 경향으로 0.05~0.21 dS m<sup>-1</sup>범위였으나, 전반적으로 호기성조의 표층이 심층에 비해 약간 높은 경향이였다. 이는 축산폐수가 표층으로부터 유입되어 수직여과되기 때문으로 표층에 다량의 유기물이 집적되었기 때문인 것으로 판단된다.

여재의 유기물, T-N 및 T-P의 함량을 조사한 결과 모든 조에서 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이었고, 특히 1차 처리인 호기성조는 표층이 다른 층에 비해 매우 높은 경향이였다.

여재의 기타 무기성분을 조사한 결과 1차 처리인 호기성조는 처리시일이 경과함에 따라 약간씩 증가하는 경향이였으며, 표층이 심층에 비해 약간 높은 경향이였다. 하지만 2차 처리인 혐기성조에서는 처리시일별 및 층위별로 큰 차이 없었다. 이는 대부분의 오염물질이 1차 처리조인 호기성조에 집적되기 때문으로 판단된다.

소형 축산폐수처리장에 사용된 여재의 중금속을 조사한 결과 기타 무기성분과 비슷한 경향으로 1차 처리인 호기성조는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 별 차이 없었으며, 표층이 심층에 비해 약간 높은 경향이였다. 하지만 2차 처리인 혐기성조에서는 처리시일별 및 층위별로 큰 차이 없었다.

Table 3-36. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 pH, EC 및 유기물 함량

Filter media	Bed	Layer	pH (1:5H <sub>2</sub> O)			EC(dS m <sup>-1</sup> )			Organic matter (%)		
			At months after livestock wastewater treatment								
			2	4	6	2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	Surface	7.4	8.1	7.5	0.21	0.20	0.22	4.00	4.12	4.31
		Subsurface	7.3	7.4	7.3	0.08	0.09	0.10	2.49	2.62	2.73
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	7.3	7.4	7.3	0.11	0.10	0.10	2.21	2.22	2.25
		Subsurface	7.1	7.2	7.2	0.05	0.06	0.07	1.18	1.22	1.32
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	Surface	7.2	7.7	7.1	0.18	0.17	0.17	4.00	4.15	4.21
		Subsurface	7.2	7.0	7.1	0.07	0.08	0.09	2.50	2.35	2.48
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	7.1	7.4	7.2	0.14	0.13	0.11	2.15	2.25	2.36
		Subsurface	6.9	7.1	7.0	0.08	0.06	0.7	1.45	1.38	1.52
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	9.1	9.2	9.2	0.19	0.20	0.19	4.18	4.68	4.84
		Subsurface	9.0	9.0	9.0	0.07	0.07	0.08	3.28	2.94	3.30
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	8.9	9.0	9.0	0.12	0.12	0.14	2.98	3.08	3.11
		Subsurface	8.9	8.9	8.9	0.08	0.09	0.09	2.11	2.25	2.35
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	6.8	7.4	7.2	0.18	0.17	0.16	4.15	4.24	4.35
		Subsurface	6.7	6.6	6.7	0.11	0.11	0.12	2.41	2.43	2.57
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	6.7	6.7	6.6	0.08	0.09	0.10	2.31	2.34	2.38
		Subsurface	6.6	6.7	6.7	0.06	0.07	0.05	1.89	1.91	1.98

Table 3-37. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 T-N 및 T-P 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Filter media	Bed	Layer	T-N			T-P		
			At months after livestock wastewater treatment					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	Surface	423	756	898	68.9	78.9	92.4
		Subsurface	208	261	315	41.4	45.8	50.9
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	116	147	154	30.2	31.6	32.4
		Subsurface	16.9	17.1	17.5	23.5	23.6	23.8
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	Surface	398	687	825	64.2	72.9	85.7
		Subsurface	182	231	287	34.2	38.9	43.2
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	72	83	97	27.4	30.3	32.9
		Subsurface	4.1	4.3	4.5	20.8	21.0	21.4
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	421	787	917	115.6	130.8	141.8
		Subsurface	231	289	335	92.3	100.7	112.6
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	127	168	172	83.6	85.7	90.2
		Subsurface	11.3	11.5	11.8	78.0	78.2	78.5
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	7,842	8,007	8,141	290	324	397
		Subsurface	7,718	1,807	1,850	251	264	280
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	7,624	7,658	7,671	221	224	232
		Subsurface	7,580	7,586	7,590	200	206	213

Table 3-38. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 K 및 Ca 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Filter media	Bed	Layer	K			Ca		
			At months after livestock wastewater treatment					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	Surface	2,010	2,122	2,327	2,320	2,380	2,540
		Subsurface	1,724	1,820	1,890	2,289	2,291	2,296
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	1,676	1,706	1,752	2,238	2,246	2,251
		Subsurface	1,641	1,648	1,652	2,212	2,215	2,220
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	Surface	1,649	1,789	1,823	11.20	11.56	12.01
		Subsurface	1,456	1,512	1,589	10.84	11.15	11.40
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	1,420	1,455	1,489	10.58	10.64	10.72
		Subsurface	1,394	1,403	1,420	10.31	10.34	10.37
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	102	132	151	408,010	408,120	408,260
		Subsurface	76	82	86	407,860	407,920	408,070
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	51	58	64	407,680	407,710	407,730
		Subsurface	32	34	36	407,540	407,550	407,550
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	2,430	2,510	2,590	32.65	34.11	36.12
		Subsurface	2,230	2,285	2,310	21.40	22.68	22.91
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	2,198	2,215	2,235	11.21	12.23	12.84
		Subsurface	2,153	2,164	2,165	7.11	7.23	7.46

Table 3-39. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 Mg 및 Na 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Filter media	Bed	Layer	Mg			Na		
			At months after livestock wastewater treatment					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	Surface	520	568	610	511	534	565
		Subsurface	495	510	524	489	492	498
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	492	500	511	472	472	490
		Subsurface	490	494	498	464	468	450
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	Surface	2,010	2,038	2,068	184	191	201
		Subsurface	1,987	1,998	2,012	176	183	184
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	1,958	1,962	1,975	162	163	168
		Subsurface	1,942	1,948	1,954	155	155	160
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	9,650	9,710	9,784	189	198	208
		Subsurface	9,594	9,620	9,638	181	184	190
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	9,572	9,580	9,597	169	170	173
		Subsurface	9,559	9,563	9,575	153	157	157
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	810	834	893	301	316	340
		Subsurface	762	784	795	272	279	290
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	731	746	765	267	280	282
		Subsurface	703	706	711	245	251	261

Table 3-40. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 Fe 및 Mn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Filter media	Bed	Layer	Fe			Mn		
			At months after livestock wastewater treatment					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	Surface	2,620	2,648	2,721	87	89	92
		Subsurface	2,514	2,598	2,617	62	65	67
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	2,456	2,463	2,469	56	56	58
		Subsurface	2,430	2,430	2,431	53	54	54
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	Surface	5,112	5,124	5,138	306	315	326
		Subsurface	4,970	4,991	5,042	281	287	295
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	4,968	4,972	4,975	273	279	282
		Subsurface	4,958	4,960	4,965	265	267	268
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	5,428	5,510	5,568	257	264	269
		Subsurface	5,311	5,328	5,381	231	239	245
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	5,285	5,302	5,312	228	229	229
		Subsurface	5,253	5,259	5,270	215	216	218
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	691	697	702	10.9	11.6	12.0
		Subsurface	667	670	672	7.9	8.5	8.9
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	649	659	664	7.2	7.3	7.6
		Subsurface	640	642	644	6.6	6.8	6.9



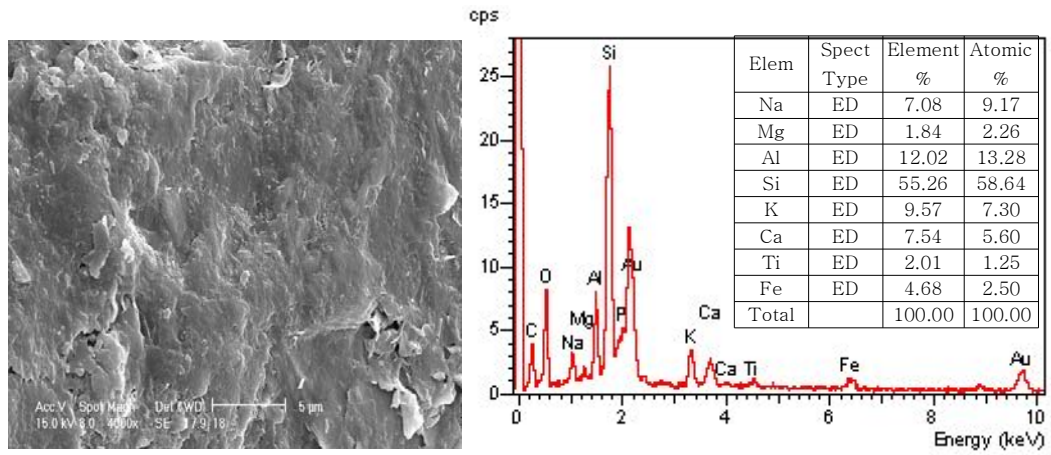
Table 3-41. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 Cu 및 Zn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

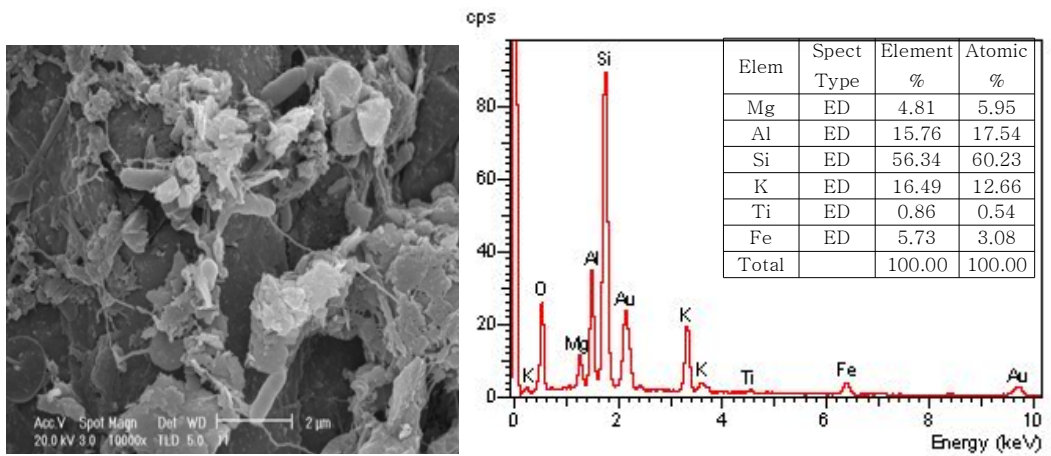
Filter media	Bed	Layer	Cu			Zn		
			At months after livestock wastewater treatment					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	Surface	0.9	1.0	1.0	24	25	28
		Subsurface	0.6	0.6	0.7	19	20	22
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	0.4	0.4	0.4	17	17	19
		Subsurface	0.2	0.3	0.3	15	16	17
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	Surface	3.0	3.1	3.3	24	24	25
		Subsurface	2.6	2.6	2.7	20	21	21
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	2.6	2.6	2.6	19	19	20
		Subsurface	2.5	2.5	2.5	19	19	19
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	3.2	3.3	3.4	162	162	165
		Subsurface	2.9	2.9	3.0	158	159	161
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	2.8	2.9	2.9	155	157	169
		Subsurface	2.8	2.8	2.8	152	153	155
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	Surface	0.7	0.7	0.8	18	19	20
		Subsurface	0.6	0.6	0.7	17	17	18
	2 <sup>nd</sup> bed	Surface	0.4	0.5	0.5	16	17	17
		Subsurface	0.4	0.4	0.4	14	14	16

(2) 여재 표면의 무기성분 흡착특성

소형 축산폐수처리장치에서 원 여재와 축산폐수처리 6개월 후 여재 표면을 SEM과 EDS로 분석한 결과는 Fig. 3-62~3-65에서 보는 바와 같다. 황사, 쇄석, 방해석 및 제올라이트의 전자현미경 사진을 보면 축산폐수처리 6개월 후의 모든 여재표면은 원 여재에 비해 많은 미생물이 관찰되었다. 여재의 시기별 EDS 분석결과 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 여재 표면의 무기성분들은 원 여재에 비하여 함량이 증가하거나 원 여재에 없었던 새로운 원소들이 검출되었다.

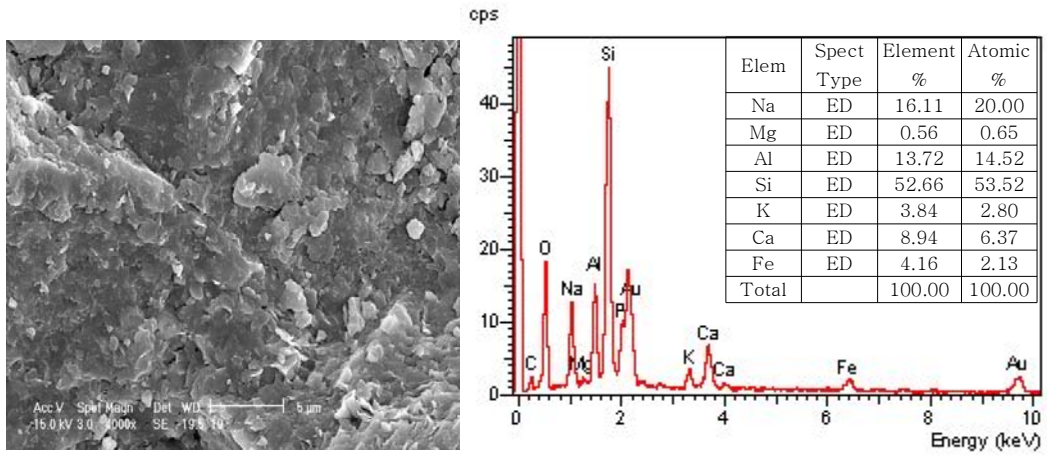


Raw coarse sand

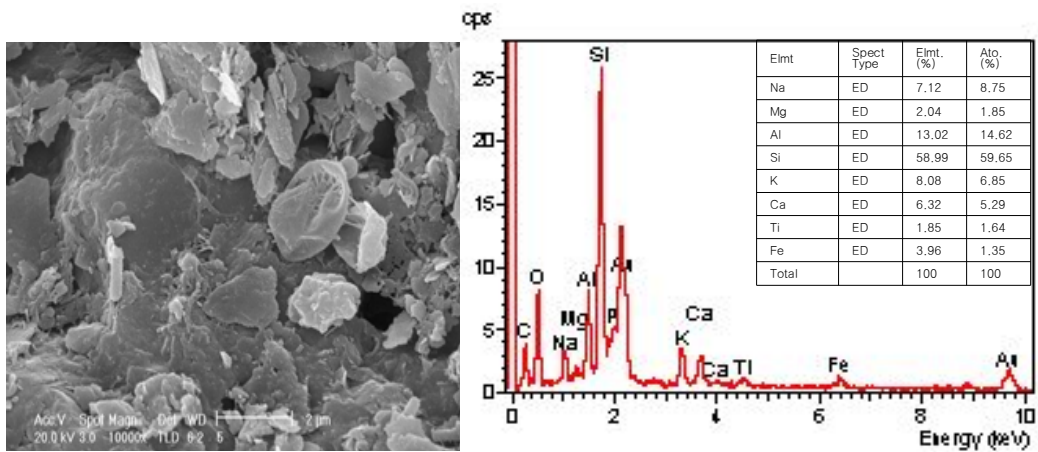


Coarse sand at 6 months after treatment

Fig. 3-62. 소형 축산폐수처리장치에서 사용된 왕사의 SEM (Scanning Electron Micrograph) 사진 및 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 분석.

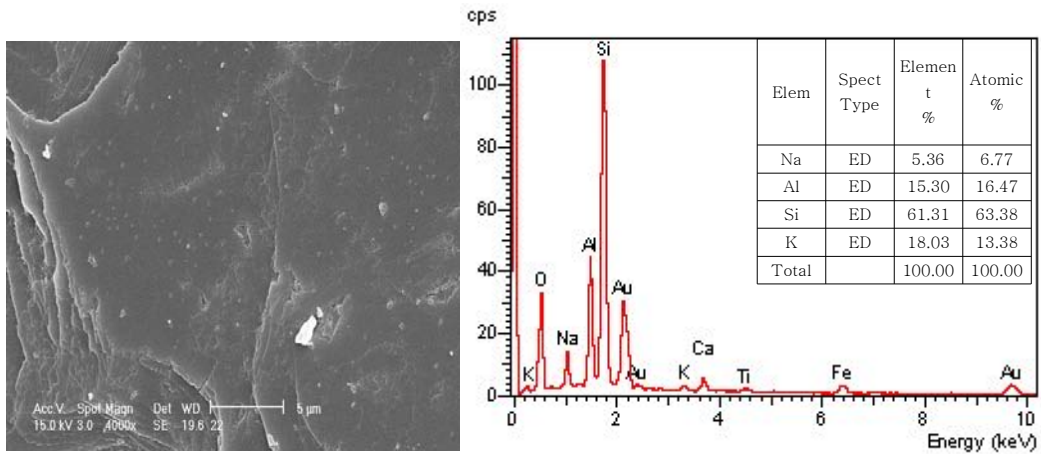


Raw broken stone

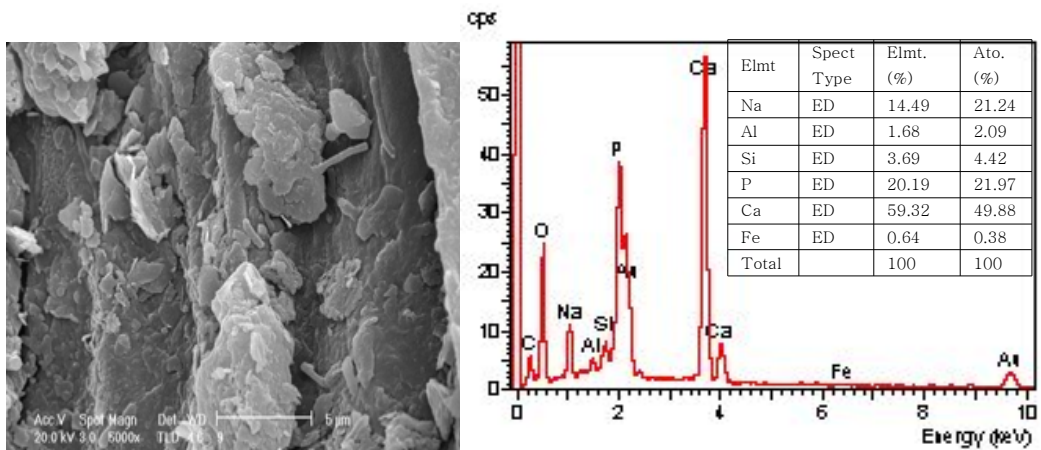


Broken stone at 6 months after treatment

Fig. 3-63. 소형 축산폐수처리장치에서 사용된 쇄석의 SEM (Scanning Electron Micrograph) 사진 및 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 분석.

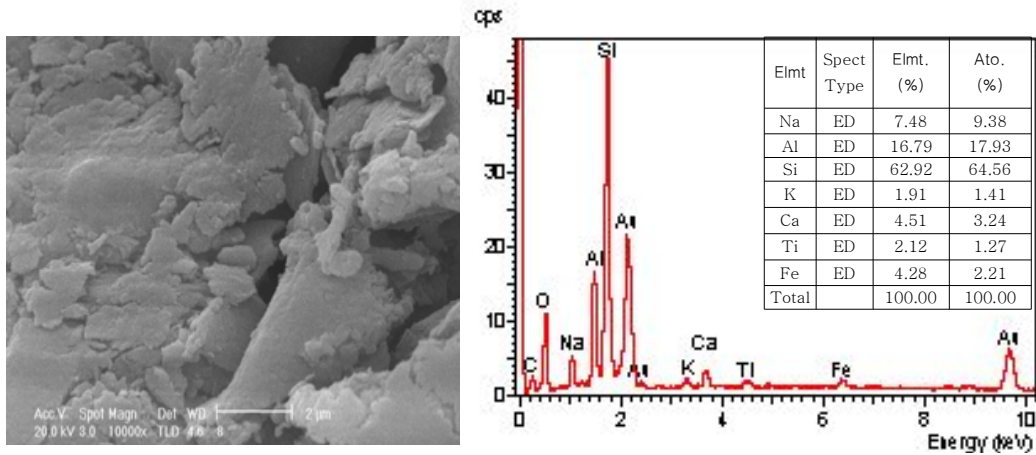


Raw calcite

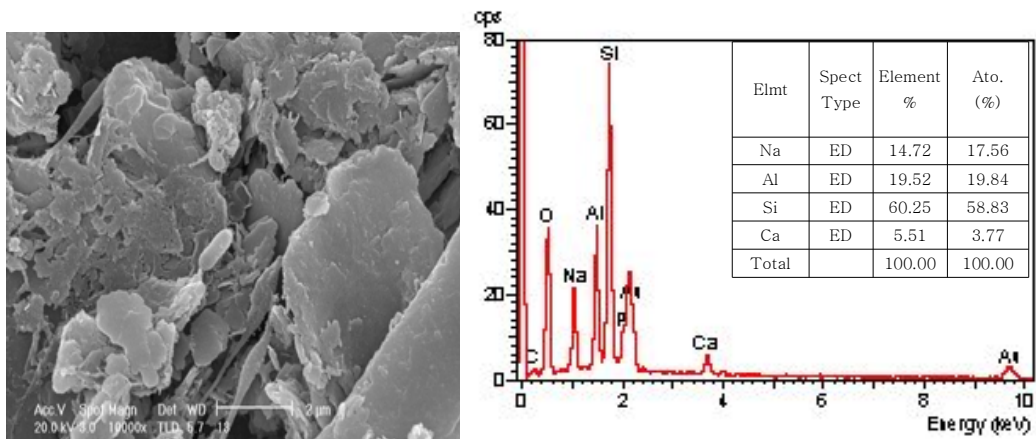


Calcite at 6 months after treatment

Fig. 3-64. 소형 축산폐수처리장치에서 사용된 방해석의 SEM (Scanning Electron Micrograph) 사진 및 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 분석.



Raw zeolite



Zeolite at 6 months after treatment

Fig. 3-65. 소형 축산폐수처리장치에서 사용된 제올라이트의 SEM (Scanning Electron Micrograph) 사진 및 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 분석.

다) 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량

본 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대 및 노랑꽃창포 등 2종이었으며, 이들 수생식물은 야외노지에서 성장한 수생식물을 분주하여 이식하였다. 수생식물의 이식은 호기성조에는 갈대를 혐기성조에서 노랑꽃창포를 각각 이식하였고, 각 수생식물은 재식거리 15 cm가 되게 이식하였다. 이식한 각 수생식물들은 생육시기에 따라 생육상황 및 무기성분 함량을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 수생식물의 생육상황

소형 축산폐수처리장치에서의 수생식물은 호기성조 및 혐기성조에서 축산폐수 처리효율을

증가시키고, 여재층 내부에 뿌리가 침투하여 투수속도를 유지하며, 냄새를 방지하고, 주위환경과 조화를 이룰 수 있다. 따라서 본 소형 축산폐수처리장치에서는 호기성조에는 갈대를, 혐기성조에는 노랑꽃창포를 이식하였으며, 이식된 수생식물의 생육상황은 수생식물 이식 직후 및 수생식물 생육 2, 4 및 6개월 후에 조사하였다.

소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 생육은 수생식물 이식 후부터 3개월 동안 전반적으로 골고루 성장하고 있었으며, 수생식물 이식 6개월 후인 겨울철에 수생식물은 모두 고사하였다.

1차 처리인 호기성조에서 수생식물의 생육상황을 조사한 결과 생육초기에 왕사, 쇠석 및 제올라이트에 이식된 갈대의 경우 방해석에 이식된 갈대에 비해 생육이 약간 좋았으나, 수생식물 이식 1개월 후부터 여재종류에 따라 별 차이 없이 왕성하게 성장하였다. 2차 처리인 혐기성조에서 수생식물의 생육상황을 조사한 결과 왕사, 쇠석, 제올라이트 및 방해석에 이식된 노랑꽃창포는 초기부터 왕성한 생육을 보였다. 이와 같은 결과는 축산폐수 중에는 식물생장에 필요한 질소 및 인 등의 다양한 양분을 함유하고 있기 때문으로 판단된다.

소형 축산폐수처리장치에서 호기성조에 이식된 갈대와 혐기성조에 이식된 노랑꽃창포의 건물중량은 Table 3-42에서 보는 바와 같다. 1차 처리인 호기성조에 이식된 수생식물의 건물중량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이었고, 왕사에 이식된 갈대는 수생식물의 생육 4개월 후의 건물중량이  $81 \text{ g plant}^{-1}$ 로 다른 여재에 이식된 갈대에 비해 가장 높았다. 2차 처리인 혐기성조에 이식된 수생식물인 노랑꽃창포의 건물중량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이었고, 왕사에 이식된 노랑꽃창포는 수생식물 생육 4개월 후의 건물중량이  $228 \text{ g plant}^{-1}$ 로 다른 여재에 이식된 노랑꽃창포에 비해 가장 높았다. 하지만 소형 축산폐수처리장치는 최적조건을 선정하기 위한 연구로서 이들 조에 생육된 수생식물은 각 조의 크기가 적어 이식 개체수가 실제 생육환경과 다를 수 있다. 따라서 실제 현장 축산폐수처리장에서 최적수생식물을 선정하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3-42. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 여재종류별 수생식물의 건물중량

(Unit :  $\text{g plant}^{-1}$ )

Filter media	Bed	Bayer code	Dry weight		
			At months after transplanting		
			2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	52	81	63
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	130	228	160
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	48	73	60
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	109	185	162
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	32	54	43
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	100	160	128
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	46	75	63
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	112	189	167

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS, IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.

(2) 수생식물의 무기성분 함량

소형 축산폐수처리장치에서 호기성조 및 혐기성조에 이식한 수생식물의 생육시기별 식물체 중 무기성분 함량은 Table 3-43~3-47에서 보는 바와 같다. 수생식물의 T-N 함량은 왕사와 썬석의 경우 수생식물의 생육 시일이 경과함에 따라 약간씩 증가하거나 별 차이가 없었으며, 증가하는 경우 그 증가량은 미미하였다. 수생식물의 T-P의 함량을 조사한 결과 T-N 함량과 비슷한 경향으로 수생식물의 생육 시일이 경과함에 따라 별 차이 없거나, 약간씩 증가하였다. 소형 축산폐수처리장치에서 호기성조 및 혐기성조에 이식한 수생식물의 생육시기별 수생식물의 무기성분 및 중금속 함량은 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 비슷하거나 약간씩 증가하는 경향이였다.

Table 3-43. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 수생식물의 T-N 및 T-P 함량

(Unit : %)

Filter media	Bed	Bayer code	T-N			T-P		
			At months after transplanting					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	2.48	2.50	2.51	0.34	0.35	0.35
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	2.62	2.81	2.83	0.36	0.39	0.39
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	2.46	2.48	2.48	0.23	0.30	0.28
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	2.68	2.86	2.90	0.28	0.31	0.34
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	2.28	2.34	2.41	0.28	0.31	0.32
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	2.68	2.88	2.92	0.33	0.34	0.37
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	2.32	2.34	2.36	0.32	0.34	0.34
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	2.73	2.85	2.87	0.33	0.40	0.40

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS, IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.

Table 3-44. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 수생식물의 K 및 Ca 함량

(Unit : %)

Filter media	Bed	Bayer code	K			Ca		
			At months after transplanting					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	26.4	27.5	28.6	0.71	0.74	0.78
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	25.7	28.1	29.4	1.52	1.55	1.59
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	25.8	27.1	28.4	0.69	0.71	0.73
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	26.2	28.2	28.9	1.48	1.51	1.52
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	26.2	26.4	27.2	0.70	0.70	0.72
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	27.4	28.5	29.7	1.44	1.48	1.50
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	24.2	25.8	26.4	0.69	0.71	0.72
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	24.8	25.9	27.6	1.45	1.46	1.49

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS, IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.

Table 3-45. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 수생식물의 Mg 및 Na 함량

(Unit : %)

Filter media	Bed	Bayer code	Mg			Na		
			At months after transplanting					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	0.34	0.35	0.37	0.25	0.25	0.28
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	0.35	0.35	0.36	1.28	1.30	1.30
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	0.32	0.32	0.33	0.26	0.24	0.28
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	0.30	0.31	0.32	1.25	1.26	1.27
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	0.31	0.30	3.32	0.29	0.27	0.30
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	0.34	0.35	0.35	1.24	1.25	1.27
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	0.32	0.31	0.33	0.28	0.29	0.31
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	0.29	0.31	0.31	1.27	1.28	1.28

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS, IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.

Table 3-46. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 수생식물의 Fe 및 Mn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Filter media	Bed	Bayer code	Fe			Mn		
			At months after transplanting					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	3,953	4,314	4,423	142.4	145.8	146.3
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	3,682	3,625	3,741	263	270	278
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	3,891	4,181	4,347	140	144	145
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	3,765	3,776	3,826	261	266	273
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	3,152	3,379	3,360	140	142	140
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	3,818	3,841	3,947	257	262	268
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	3,777	4,072	4,236	145	146	151
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	3,740	3,947	4,020	266	269	283

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS, IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.

Table 3-47. 소형 축산폐수처리장치에서 시기에 따른 수생식물의 Cu 및 Zn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Filter media	Bed	Bayer code	Cu			Zn		
			At months after transplanting of plant					
			2	4	6	2	4	6
Coarse sand	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	39.3	41.5	42.7	38.3	42.8	41.5
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	19.9	23.6	24.7	27.9	30.7	31.3
Broken stone	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	37.9	40.6	41.2	42.8	43.3	42.7
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	23.4	24.8	25.3	31.3	34.8	35.2
Calcite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	35.8	38.3	38.9	41.1	40.9	40.0
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	21.7	22.0	22.6	29.7	33.3	34.8
Zeolite	1 <sup>st</sup> bed	PHRCO	35.1	37.8	37.5	39.8	41.4	40.8
	2 <sup>nd</sup> bed	IRIPS	20.2	20.5	20.9	28.6	32.5	33.1

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS, IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.



## 라) 소형 축산폐수처리장치에서의 미생물상

### (1) 여재 표면의 미생물상

소형 축산폐수처리장치에서 처리시기별 여재 표면의 미생물상 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-66~3-69에서 보는 바와 같다. 전반적인 미생물상의 밀도 분포는 1차 처리인 호기성조 및 2차 처리인 혐기성조 모두에서 총세균이 가장 많았으며, 특히 모든 미생물은 전반적으로 호기성조가 혐기성조에 비해 많이 분포하였는데, 이는 호기성조의 공기 유입이 원활하여 미생물이 성장하기 좋은 조건이기 때문인 것으로 사료된다. 여재종류별 여재표면의 미생물상 변화는 전반적으로 왕사와 쇠석이 방해석과 제올라이트에 비해 많이 분포하였다.

그리고 질소대사에 관련하는 미생물의 밀도분포는 호기성조에서는 암모니아 산화세균이 많았으며, 혐기성조에서는 탈질균과 질산환원균이 많았다. 이는 미생물이 호기적인 조건에서는 암모니아를 산화시켜  $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 전환되는 질산화작용이 주된 질소의 대사과정이기 때문이며, 혐기적인 조건에서는 호기성조에서 산화된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 을  $\text{N}_2$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 로 휘산시키는 탈질작용이 주된 질소의 대사과정이기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 모든 미생물상은 처리시일이 경과할수록 미생물 수가 증가하는 경향이였다.

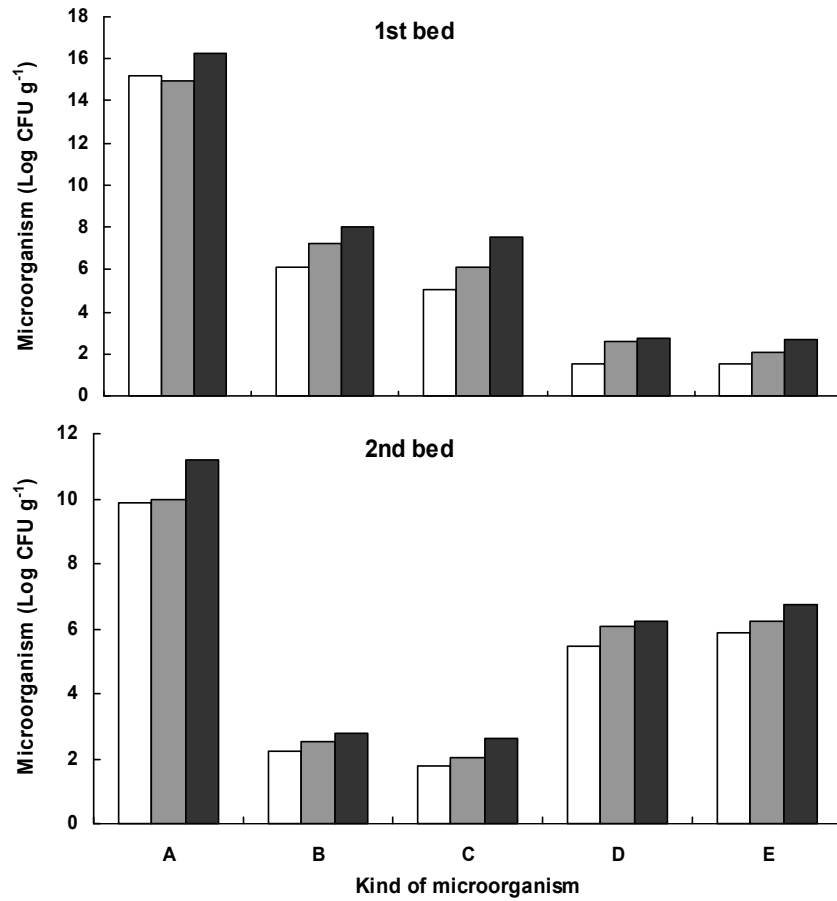


Fig. 3-66. 소형 축산폐수처리장치에서 시기별 왕사 표면의 미생물상 변화.

□ : At 2 months after treatment,

■ : At 4 months after treatment,

■ : At 6 months after treatment,

A : Total bacteria,

B : Ammonia oxidation bacteria,

C : Nitrite bacteria,

D : Nitrification bacteria,

E : Nitrite reduction bacteria.

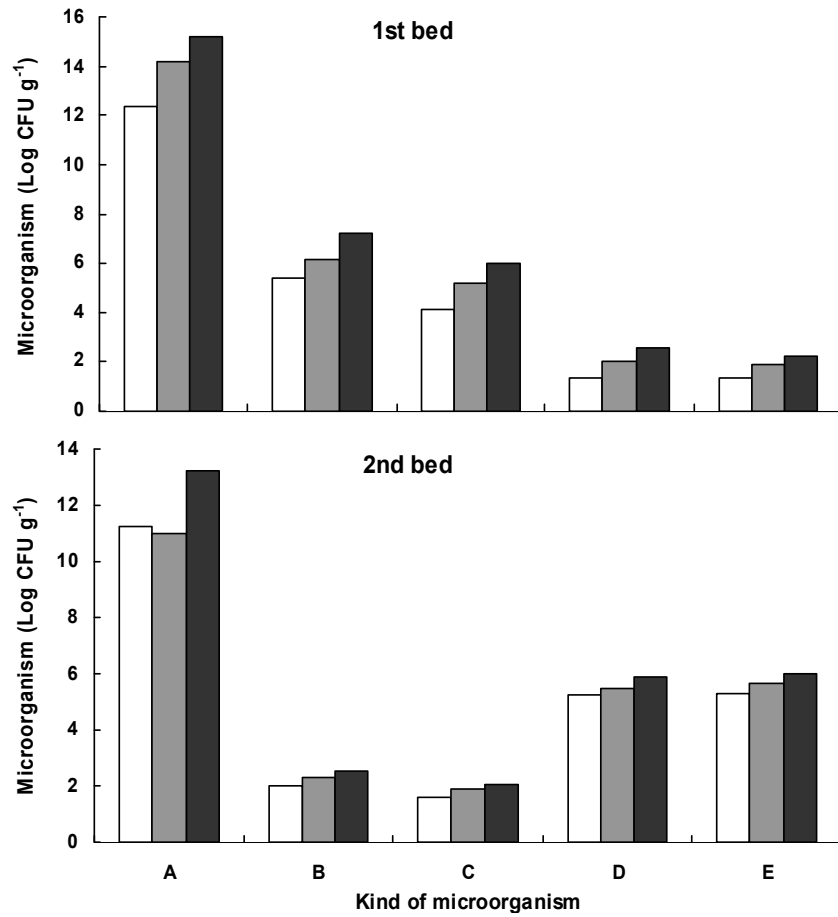


Fig. 3-67. 소형 축산폐수처리장치에서 시기별 쇠석 표면의 미생물상 변화.

□ : At 2 months after treatment,

■ : At 4 months after treatment,

■ : At 6 months after treatment,

A : Total bacteria,

B : Ammonia oxidation bacteria,

C : Nitrite bacteria,

D : Nitrification bacteria,

E : Nitrite reduction bacteria.

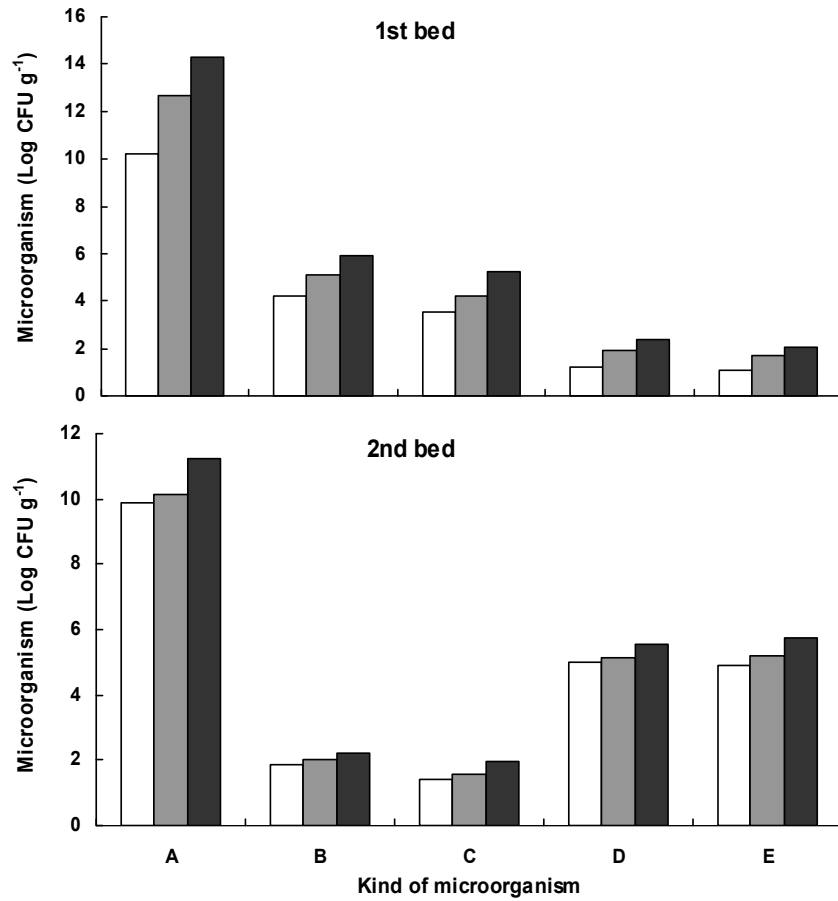


Fig. 3-68. 소형 축산폐수처리장치에서 시기별 방해석 표면의 미생물상 변화.

□ : At 2 months after treatment,

■ : At 4 months after treatment,

■ : At 6 months after treatment,

A : Total bacteria,

B : Ammonia oxidation bacteria,

C : Nitrite bacteria,

D : Nitrification bacteria,

E : Nitrite reduction bacteria.

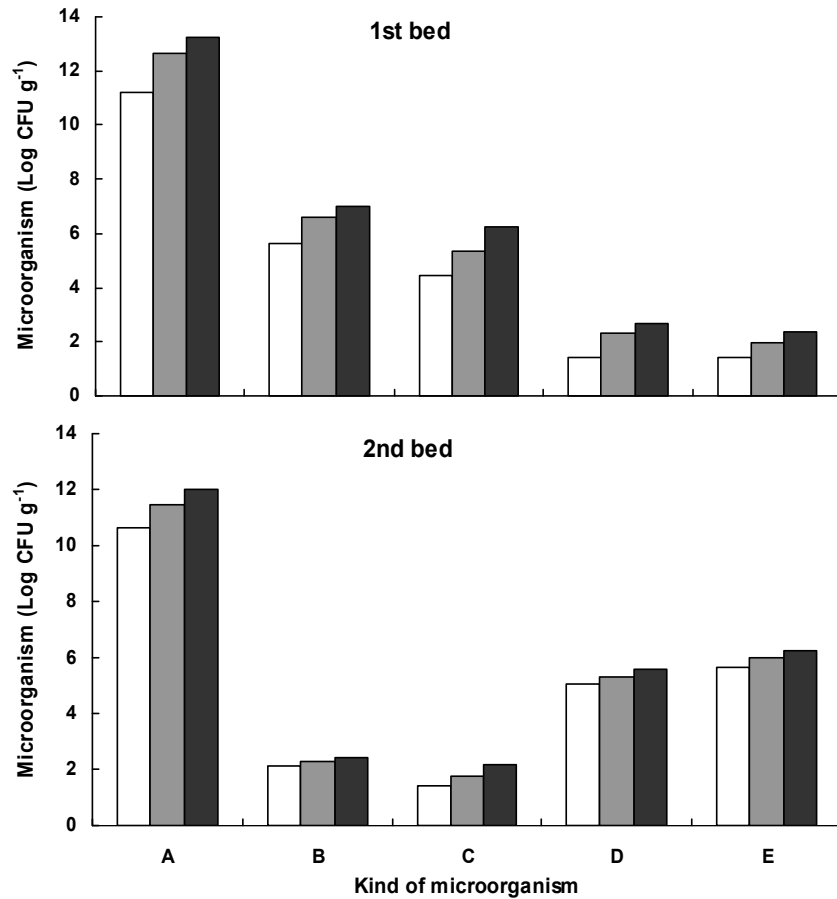


Fig. 3-69. 소형 축산폐수처리장치에서 시기별 제올라이트 표면의 미생물상 변화.

□ : At 2 months after treatment,

■ : At 4 months after treatment,

■ : At 6 months after treatment,

A : Total bacteria,

B : Ammonia oxidation bacteria,

C : Nitrite bacteria,

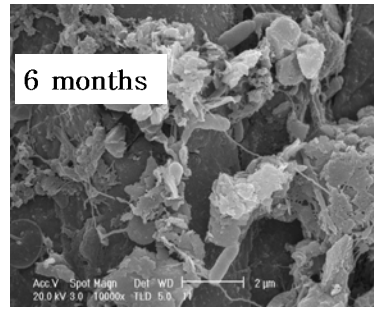
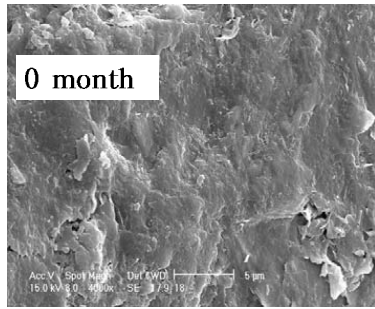
D : Nitrification bacteria,

E : Nitrite reduction bacteria.

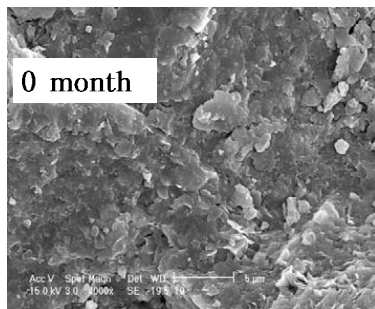
## (2) 여재 표면의 생물막 부착상태

소형 축산폐수처리장치에서 원 여재와 축산폐수처리 6개월 후 여재 표면을 SEM으로 관찰한 결과는 Fig. 3-70에서 보는 바와 같다.

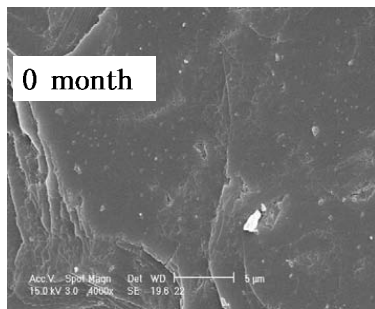
왕사, 쇠석, 방해석 및 제올라이트의 전자현미경 사진을 보면 축산폐수처리 6개월 후 여재 표면이 원 여재에 비해 미생물이 많이 분포되어 있었다. 또한 여재별 미생물 흡착은 방해석을 제외한 모든 여재에서 별 차이 많은 양이 분포하였으나, 방해석의 경우 미생물이 다른 여재에 비해 적었다. 이는 방해석의 경우 주성분이 Ca로 미생물 생육에 필요한 영양분이 불균형을 이루기 때문으로 방해석 표면에 미생물이 활착하는데 어려움이 있는 것으로 판단된다.



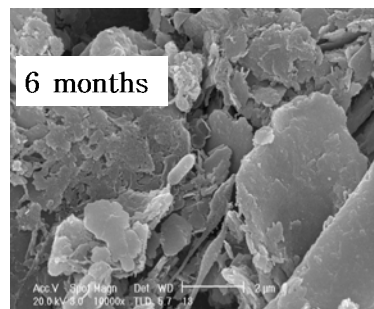
Coarse sand



Broken stone



Calcite



Zeolite

Fig. 3-70. 소형 축산폐수처리장치에서 사용된 여재종류별 여재주입직전과 축산폐수처리 후 6개월 후의 SEM (Scanning Electron Micrograph) 사진.

(3) 축산폐수 중 미생물상 변화

소형 축산폐수처리장치의 호기성조 및 혐기성조를 통과한 처리수 중의 일반세균 및 대장균을 조사한 결과는 Table 3-48에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 일반세균은 평균 약 927,666 CFU mL<sup>-1</sup>이었으며, 호기성조 처리수의 일반세균은 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 방류수 중의 일반세균은 호기성조 처리수 중에 비하여 다시 큰 폭으로 감소하였다. 여재 종류별 호기성조 처리수와 방류수의 일반세균은 왕사, 쇠석 및 제올라이트가 방해석에 비해 적은 경향이였다.

축산폐수의 대장균군은 평균 약 140,000 CFU mL<sup>-1</sup>이었으며, 호기성조 처리수의 대장균군은 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 방류수 중의 대장균군은 호기성조 처리수에 비해 다시 큰 폭으로 감소하였다. 여재 종류별 호기성조 처리수와 방류수의 대장균군은 왕사, 쇠석 및 제올라이트가 방해석에 비해 적은 경향이였다.

Table 3-48. 소형 축산폐수 처리장치의 시기에 따른 여재종류별 축산폐수 중 미생물상 변화  
(Unit : CFU mL<sup>-1</sup>)

Filter media	Treatment	General bacteria			<i>E.coli</i>		
		At months after livestock wastewater treatment					
		2	4	6	2	4	6
Coarse sand	Raw water	985,000	875,000	923,000	135,000	147,000	138,000
	1 <sup>st</sup> treatment	132,000	132,000	125,000	14,500	9,000	8,600
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> treatment	43,500	44,500	48,600	1,200	1,350	1,250
Broken stone	Raw water	985,000	875,000	923,000	135,000	147,000	138,000
	1 <sup>st</sup> treatment	154,600	175,200	168,500	11,200	12,600	9,800
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> treatment	39,420	43,620	43,840	1,850	2,400	1,650
Calcite	Raw water	985,000	875,000	923,000	135,000	147,000	138,000
	1 <sup>st</sup> treatment	179,500	194,000	172,700	34,800	43,200	34,800
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> treatment	43,580	54,620	55,130	6,200	5,450	5,800
Zeolite	Raw water	985,000	875,000	923,000	135,000	147,000	138,000
	1 <sup>st</sup> treatment	128,000	115,900	94,200	13,200	14,800	13,800
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> treatment	30,980	36,450	44,650	1,900	1,500	1,450

## 나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구

### 1) 문헌조사를 통한 수생식물 퇴비화 조건 도출

현재 수생식물의 퇴비화와 관련된 체계적인 연구는 거의 없으며, 보고된 연구결과들도 그 활용가능성만 검토되어, 본 연구에서는 하수슬러지, 축산분뇨, 음식물 쓰레기, 도시쓰레기 등의 퇴비화와 관련된 국내외 문헌조사와 선진사례연구들을 종합 검토하여 Table 3-49에서 보는 바와 같이 수생식물의 퇴비화를 위한 기본적인 운전조건들을 도출하였다. 도출된 운전조건들을 토대로 소형퇴비화조를 이용하여 퇴비화 최적조건들을 구명하였으며 그 결과들을 이용하여 실제 축산농가에서 경제적으로 쉽게 활용할 수 있는 뒤집기 퇴비단식 공법에 적용하여 효율성을 검토하였다.

Table 3-49. 문헌조사를 통한 수생식물 퇴비화 조건 도출 및 수생식물 퇴비화 실험시 선택한 운전조건

구 분	퇴비화에 미치는 영향	적정조건	퇴비화 실험시 선택한 운전 조건	
			소형퇴비화조	뒤집기퇴비단공법
입자 크기	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 작을수록 표면적이 증가하여 분해속도 향상</li> <li>- 너무 작으면 통기성 악화로 인한 분해도 저하</li> <li>- 물질전달의 메체, 퇴비화가 진행 됨에 따라 점차 감소</li> </ul>	1.3~5 cm	3.0~5.0 cm	5.0~10 cm
C/N 비	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 미생물의 동화작용에 필요한 영양물질 공급</li> <li>- 낮은 경우: 질소손실, 냄새 및 부식 유발</li> <li>- 높은 경우: 질소부족으로 인한 퇴비화 지연</li> </ul>	25~40	25~35 (탄질율별 퇴비화 정도 검토)	25~35
미생물 접종	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 통상적으로 별도의 미생물 접종 필요 없음</li> </ul>		기존퇴비 비율별 혼합	기존 퇴비 혼합
온도	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 60℃이상 : 수분 감소와 미생물 종류 및 활성도 감소</li> <li>- 병원균, 잡초, 종자 사멸을 위해 일정 기간 고온기간 유지 필요</li> </ul>	55~60℃	55~60℃ (반응조 온도가 65℃를 넘어갈 경우 공기량 조절하여 온도 조절)	55~65℃ (퇴비단 내부 온도가 65℃를 넘어갈 경우 뒤집기를 통하여 온도 조절)
산소 공급	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호기성의 유지 및 온도조절기능</li> <li>- 5~15%가 퇴비내에 잔존하도록 유지</li> <li>- 퇴비의 건조와 온도조절을 목적으로 하는 경우 송기량 증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호기성유지: 50~500 L /min. m<sup>3</sup></li> <li>- 온도조절시: 2500 L /min. m<sup>3</sup>이상</li> </ul>	50~200 L /min. m <sup>3</sup> (공기 공급량별 퇴비화 정도 검토)	뒤집기를 통한 산소 공급
pH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 폐기물의 pH 완충능력이 낮아 쉽게 변화</li> <li>- 유기산, 암모니아에 의해 pH 좌우됨</li> </ul>	5.5~8.5	5.5-8.5	5.5-8.5
통기 개량제	적절한 생분해율과 퇴비화 물질내 공기가 차지하는 부피 및 퇴비더미의 침하와 다짐작용을 견딜 수 있는 물질로 선택	퇴비 대상물에 따라 다름	필요시 왕겨 사용	필요시 왕겨 사용
뒤집기 (교반)	온도가 급격히 올라가거나 악취 등이 심할 때	경우에 따라 다양	4회전/day	초기 : 7일 간격 중기 : 10일 간격



2) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석

가) 축종별 폐수 발생량

한우와 돼지의 1두당 1일 폐수 발생량을 조사하기 위하여 경남지역과 전남지역의 대규모의 한우사육단지 5개소와 양돈단지 10개소를 대상으로 각 축산 단지내 축산폐수 수집 및 저장탱크내의 집수량을 7일 주기로 조사하여 가축 1두당 월별 및 연평균 폐수 발생량을 조사한 결과는 Table 3-50 및 Fig. 3-71과 같다.

축산 농가별 폐수발생량은 사료 및 물 급여 방법, 축사 세척 정도, 축사 바닥재 사용정도 등과 같은 농가별 축사관리 상황에 따른 차이가 많이 있었고, 강우와 폐수 수집방법에 따른 차이도 있었다. 한육우와 돼지 모두 동일 농가에서도 시기별 및 계절별로 폐수 배출량 편차가 매우 컸으며, 소에 비하여 돼지의 폐수 배출량이 약간 높은 경향이였다.

한우 축산단지 5개소의 1두당 계절별 평균 폐수 배출량은 봄에는 약 11.8 L, 여름에는 약 17.2 L, 가을에는 약 14.1 L, 그리고 겨울에는 약 9.7 L로 여름과 가을에 가장 많았으며, 한육우 1두당 연평균 폐수배출량은 약 13.2 L로서 기존의 김 (2004)이 보고 (Table 3-51)한 육우 1두당 연평균 폐수 발생량 33 L에 비하여 매우 적었다. 조사대상 한육우 축산단지는 깔개를 거의 사용하지 않거나 약간만 사용하는 밀집 사육하는 단지만을 대상으로 한 결과이다.

그리고 돼지돈사 10개소의 1두당 계절별 평균 폐수 배출량은 봄에는 약 13.8 L, 여름에는 약 20.3 L, 가을에는 약 15.5 L, 그리고 겨울에는 약 11.8 L로 여름에 가장 많고 겨울에 가장 적었으며 봄과 가을에는 비슷한 수준이었다. 조사 단지 10개소의 1두당 연평균 폐수배출량은 약 15.4 L로서 한우에 비하여 많았으며 이러한 결과는 기존의 김 (2004)이 보고한 돼지 1두당 연평균 폐수 발생량 12.5 L에 비하여 약간 많았다.

Table 3-50. 축종별 계절별 축종 1두당 폐수 배출량

축종	축산폐수	폐수 발생량 (L/두.일)								연평균
		봄		여름		가을		겨울		
		범위	평균	범위	평균	범위	평균	범위	평균	
한육우	A	5.5-14.3	9.8	9.6-30.6	18.2	4.5-29.5	13.2	4.5-15.2	8.2	12.4
	B	4.8-15.8	8.6	7.5-27.8	12.2	6.8-23.4	12.5	6.2-23.2	10.7	11.0
	C	5.5-20.6	14.5	11.4-38.9	21.6	7.8-36.4	14.6	7.5-19.7	9.8	15.2
	D	6.2-19.8	10.5	10.7-26.7	15.9	8.1-39.6	18.5	4.7-29.3	11.2	14.1
	E	6.8-29.2	15.7	8.8-25.8	17.9	5.4-19.7	11.6	4.8-23.6	8.8	13.5
돼지	A	8.2-27.5	18.1	10.5-36.2	20.9	10.7-21.8	15.2	5.6-18.7	12.5	16.7
	B	4.5-20.5	8.8	8.5-26.3	15.6	8.9-24.3	13.8	8.2-23.1	15.2	13.4
	C	13.3-19.6	13.2	13.7-29.1	23.8	13.2-30.5	17.2	10.5-19.9	13.2	16.9
	D	6.2-18.2	9.3	7.8-21.9	15.4	9.7-21.8	14.1	7.3-17.2	9.8	12.2
	E	6.3-20.5	10.6	8.8-29.6	18.9	13.5-24.7	15.3	8.7-23.6	12.7	14.9
	F	8.2-33.5	23.5	11.2-27.8	19.6	6.7-24.9	12.5	5.3-18.5	11.7	16.8
	G	4.5-23.7	12.8	12.3-30.6	24.4	9.5-20.6	15.2	6.4-18.9	9.5	15.5
	H	7.2-18.2	8.7	11.9-34.2	18.2	13.5-29.7	18.9	6.7-21.7	10.8	14.2
	I	9.3-25.6	17.6	18.5-40.5	26.8	8.8-30.5	17.1	8.8-22.5	13.9	18.9
	J	7.4-24.6	15.4	12.7-33.5	19.3	9.9-25.7	15.6	4.8-17.7	8.7	14.8

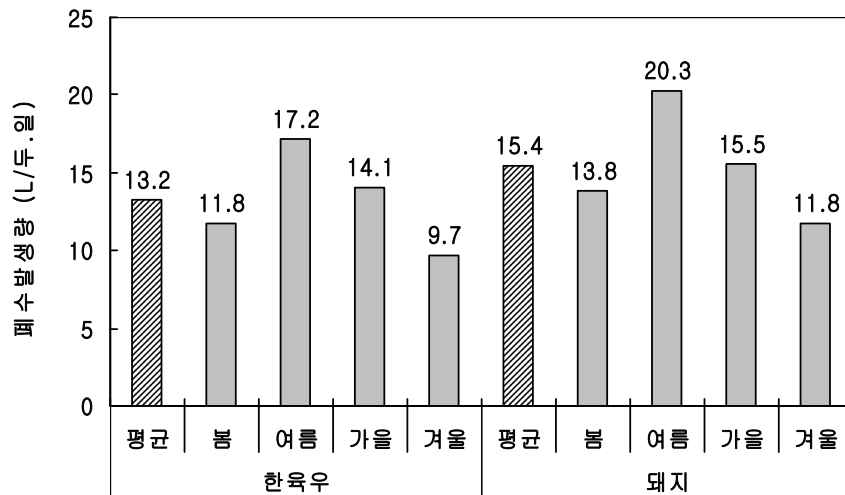


Fig. 3-71. 축종별 계절별 축종 1두당 평균 폐수 배출량.

Table 3-51. 축종별 1두당 분뇨 및 폐수 발생량 (Kim, 2004)

구분	1일 1두당 분뇨 발생량			1년 1두당 분뇨 발생량			1일 1두당 폐수 발생량	
	분량 (kg)	요량 (kg)	합계 (kg)	분량 (kg)	요량 (kg)	합계 (kg)	범위 (L)	평균 (L)
젓소	21.9	11.1	33.0	7,993	4,052	12,045	17~60	40
육우	12.5	3.8	16.3	4,563	1,387	5,950	30~40	33
한우	12.7	3.7	16.4	4,636	1,351	5,987		
돼지	2.4	4.0	6.4	876	1,460	2,336	6~33	12.4
닭	0.14		0.14	51		51		

#### 나) 축산폐수 종류별 비료가치 분석

축산폐수 종류별 물리화학적인 특성과 작물영양학적인 측면에서 비료로서의 가치를 검토하기 위하여 한우사육단지 5개소와 양돈단지 10개소의 폐수를 대상으로 pH, EC, 수분함량, 고형물, 유기물함량, 총탄소, 총질소, 총인산, C/N비, 양이온 (K, Ca, Mg 및 Na), Si 및 중금속류 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Ti, Fe 및 Mn) 등의 성분을 분석한 결과는 아래와 같다.

분뇨중에는 각종의 화학성분이 포함되어 있으며, 이들 성분이 이용될 경우에는 유효한 비료 성분으로 작용하지만 경지에 다량 사용하거나 지하수위가 높은 장소와 하천 등에 배출될 경우에는 수질과 대기의 오염물질이 된다. 돼지 1두당 돈분뇨의 BOD 부하량은 1인당 인분뇨의 13

배에 달한다.

축산폐수는 통상 분뇨, 뇨, 깔감, 오수 및 사료 등을 포함하기 때문에 이러한 축산분뇨의 성상과 이화학적 특성은 급여사료의 종류, 계절, 그리고 가축의 영양 상태 등과 같은 많은 요인에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서도 한우 및 돼지 축산 폐수의 색깔, 고형물 함유 정도 등의 외형적인 성상 (Fig. 3-72)은 축사 바닥 세척 정도, 바닥재 사용 여부 등 축사관리 방법에 따라 달랐으며 한우 폐수는 돼지 폐수에 비하여 약간 붉은 갈색을 띠었고, 돼지 폐수는 전체적으로 검은 색을 띠었다. 특히, 돼지 축산폐수는 한육우 축산폐수에 비하여 돈사 바닥의 세척 정도와 세척수를 포함한 폐수의 수집방법에 따라 고형물 함유량, 수분함유량 등의 외형적인 특성과 물리화학적인 특성들이 크게 달랐다.

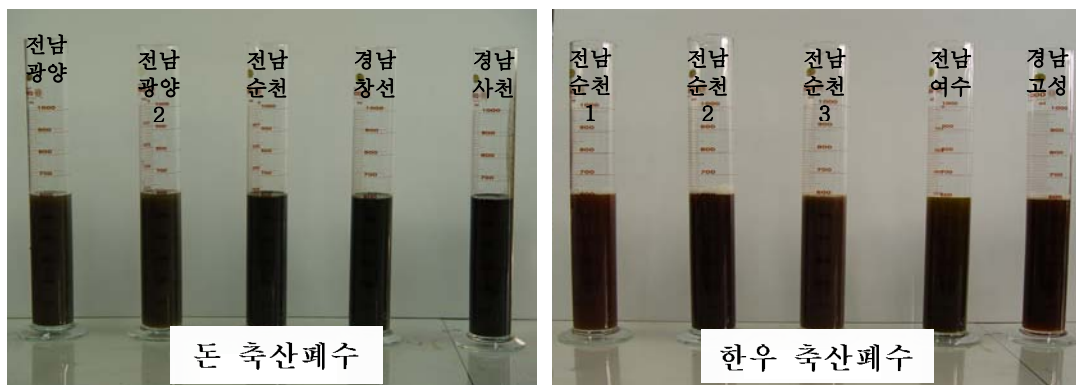


Fig. 3-72. 한육우 축산폐수와 돼지 축산폐수의 외형적인 성상 비교.

축산폐수 중에는 각종의 화학성분이 포함되어 있으며, 이들 성분이 이용될 경우에는 유효한 비료성분으로 작용하지만 경지에 다량 사용하거나 지하수위가 높은 장소와 하천 등에 배출될 경우에는 수질과 대기의 오염물질이 된다. 돼지 1두당 돈분뇨의 BOD 부하량은 1인당 인분뇨의 13배에 달할 정도로 환경에 미치는 부하량이 크다.

따라서 본 연구에서는 한육우 사육단지과 돼지 사육단지에서 발생하는 축산폐수의 비료학적 가치를 비교 검토하기 위하여 한우사육단지 5개소와 양돈단지 10개소의 폐수를 대상으로 물리화학적인 성분들을 조사한 결과를 토대로 작물생육에 중요한 유기물함량, 질소, 인산, C/N비, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO 등의 식물 영양학적 측면과 토양환경적인 측면에서 주요한 인자들을 비교 검토하였으며, 그 결과는 Table 3-52~3-53 및 Fig. 3-73~3-74에서 보는 바와 같다.

축산폐수에 포함되어 있는 비료 성분은 질소 (N), 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 칼리 (K<sub>2</sub>O), 칼슘 (CaO) 그리고 고토 (MgO)이며, 토양환경적인 측면에서 중요 요인은 EC, 유기물 함량 및 C/N 비율이라고 볼 수 있다. 이러한 축산분뇨와 축산폐수내의 비료성분 함량과 화학비료 소비량을 비교해보면 축산분뇨의 비료성분 생산량이 차지하는 비율이 매우 높으며, 실제로 소, 돼지, 닭에 의해 생산된 비료성분 총생산량과 화학비료성분 소비량을 비교해 보면 질소의 경우 국내 화학비료 소비량에 미치지 못하나 인산과 칼리의 경우에는 화학비료 소비량보다 높은 수준인 것으로 알

려져 있다.

본 연구에서 조사한 한육우 사육단지 5개소와 돼지 사육단지 10개소의 축산폐수 중의 비료로서의 성분함량을 축종별 및 계절별로 비교 검토한 결과를 보면 유기물 함량은 한육우 폐수가 약 3.1%, 돼지 폐수가 약 1.7%로서 한육우 폐수에서 약 1.8배 높으며 계절적으로는 여름철에 약간 낮지만 전체적으로 일정한 발생량을 보였고, C/N비율도 유기물함량과 비슷한 경향을 보였다. 특히, 돼지 사육단지 폐수내의 유기물함량과 C/N비율은 한육우 폐수에 비하여 낮지만 일반적으로 돈분에는 셀룰로스나 리그닌 등과 같은 난분해성 유기물의 함량이 적고, 전분이나 단백질의 함량이 높기 때문에 다른 축종의 분뇨보다 비교적 분해가 빠르게 이루어지는 장점이 있다.

한육우 사육단지와 돼지 사육단지 축산폐수의 질소 함량은 돼지 축산폐수가 약 0.60%로서 한육우 폐수의 0.39%보다 약 1.5배 높았으며, 계절적인 함량의 경우 돼지 폐수의 질소 함량은 봄과 겨울에 비하여 여름과 가을에 약간 감소되었다. 돼지 분뇨 내의 질소는 대부분 노를 통해 요소형태로 배설되며, 이러한 요소는 아미노산이 탈아미노화 반응을 거쳐 아미노기가 요소회로라는 체내 대사작용에 의해 전이되어 생성된 화합물이다. 탈아미노화 반응은 사료내 단백질 및 에너지의 공급 불균형과 섭취 단백질내 아미노산 조성의 불균형에 의해 기인한 것이며, 요소는 분뇨에 존재하는 요소분해효소에 의해 암모니아로 분해된다.

축산 분뇨를 토양에 시용하면 유기태질소는 질산화과정에 의하여 무기질화 되어 식물이 이용할 수 있는 질산태 질소와 암모늄태 질소로 전환된다. 분뇨 중의 질소가 무기화 과정을 거쳐 생성된 질산태 질소는 용해성이므로 토양에서 자유로이 이동된다. 이러한 질산성 질소의 특성 때문에 식물체가 흡수하지 못한 잔여 질소는 빗물에 의해 토양의 하층으로 이동하여 지하수로 내려가 지하수를 오염시키게 되므로 식물체가 필요로 하는 이상의 액비를 사용하거나 살포시 균일하게 하지 않으면 질산태 질소의 용탈량은 증가하게 된다. 탈질과정은 질소산화물 (NOx)이 환원되어 가스 형태의 산물이 생성되어 공기중으로 손실되는 과정이다. 토양의 산소 부족시에는 암모니아 (NH<sub>3</sub>) 및 메탄 (CH<sub>4</sub>) 등과 같은 유해 가스의 대기중 방출량이 높아지며 이는 토양이나 산림생태계 또는 지구 온난화에 관여하게 된다. 대부분 분뇨의 암모늄이온 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)은 동물의 오줌 내에 존재하는 요소에서 유래되며 용해된 요소는 쉽게 암모니아로 전환된다.

한육우 폐수와 돼지 폐수의 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량은 한육우 축산폐수는 약 0.01%로 낮았다. 그러나 돼지 축산폐수의 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량은 약 0.17%로서 한육우 축산폐수에 비하여 약 17배 이상이 높았다. 가축 분뇨 중의 인은 대부분 분을 통해 배설되며, 인산은 질소 및 칼리와는 달리 토양에 잘 흡착 고정되어 거의 유실되지 않는다. 우리나라에 분포되어 있는 경작 토양은 인산함량이 낮아 인산의 시용이 요구되나 돈분뇨를 과다하게 시용하여 토양에 인산이 축적되면 빗물에 의해 인산이 유실되어 하천 등을 오염시키게 된다.

한육우 폐수와 돼지 폐수의 K<sub>2</sub>O 함량 및 CaO 함량은 한육우 축산폐수가 약 0.55%, 돼지 축산폐수는 약 0.21%로 한육우 축산폐수가 약 2.6배 정도 높았고, CaO 함량은 한육우 축산폐수가 약 0.01%, 돼지 축산폐수가 약 0.1%로서 돼지 축산 폐수가 약 10배 정도 많았다. 일반적으

로 축산분뇨 중의 칼리는 거의 대부분 뇨를 통해 배설되며, 대부분 수용성이고 질소와 같이 유실되기 쉬운 성분이다. 토양에 칼리함량이 높을 때 식물체는 필요이상 흡수하여 길항작용에 의하여 칼슘이나 마그네슘의 흡수가 저해되기도 한다. 그리고 MgO 및 Na<sub>2</sub>O 함량은 한육우 축산폐수와 돼지 축산폐수 모두 비슷한 함량을 보였다.

우리나라에서 사육되고 있는 가축의 총 사육두수를 기준으로 한 연간 가축분뇨 발생량은 33,116천 톤 (2004년 기준)으로 이를 질소, 인산, 칼리로 환산하면 한우분뇨에서 질소, 인산, 칼리가 각각 약 29,495 톤, 13,789 톤, 16,339 톤, 젓소에서 각각 약 19,188 톤, 4,719 톤, 12,975 톤, 돼지에서 각각 약 135,172 톤, 26,078 톤, 36,927 톤, 양계에서 각각 약 38,961 톤, 13,119 톤, 18,228 톤이 발생된다고 한다. 전체 가축분뇨로부터 배설되는 비료성분량은 질소가 222,816 톤, 인산이 57,705 톤, 칼리가 84,529 톤으로 가축분뇨 및 폐수의 적절한 처리를 통한 자원회원은 토양의 개선효과 외에도 화학비료 대체효과가 매우 큰 것으로 생각된다. 축산산업에서 분뇨와 폐수, 그리고 악취의 발생은 필연적인 것이다. 잠재적 오염원인 분뇨와 폐수의 방출량이나 농도가 환경의 수용능력 내에 해당될 경우에는 큰 문제가 발생되지 않지만 환경의 수용능력을 초과하여 분뇨처리를 위한 비용이 추가되는 경우 환경문제가 발생된다. 여러 과정을 거쳐 축산분뇨와 폐수를 자원화 하는 것은 축산분뇨가 자원재로서 경제적 이용가치를 가져야만 타당하다. 예를 들어 돈분뇨를 비료자원으로 활용한다면 질소, 인산, 그리고 칼리와 같은 성분은 비료로 이용되며, 또한 돈분뇨 자체가 우수한 토양조절재로 이용될 수 있기 때문에 화학비료 대체용으로 충분한 경제적 가치를 지니고 있다. 그러나 축산분뇨를 유기물 자원으로 활용하기 위해서 양축농가는 분뇨를 수거 및 저장한 후 적절한 시기에 경지에 살포하든지 아니면 축분비료 공장으로 운반하여 유기질 비료를 생산해야 할 것이다. 또한 환경오염을 방지하기 위하여 자연의 자정능력과 환경법에 제시된 허용농도 이상으로 액비 및 축분비료를 살포하지 말아야 하는 제한사항이 있다.

양축농가가 축산경영을 하는 궁극적인 목적이 순이익의 극대화에 있기 때문에 이유를 막론하고 축산분뇨의 처리비용이 자원으로 이용됨으로써 얻어지는 경제적 가치보다 크다면 폐기물로 간주될 것이며, 반면에 자원으로로서의 경제적 가치가 축산분뇨의 처리비용보다 크다면 자원으로 간주될 수 있을 것이므로 이러한 축산분뇨와 폐수를 효율적이고 경제적으로 농업자원화할 수 있는 기술을 개발을 위한 부단한 노력이 필요하다.

Table 3-52. 한육우 축산폐수의 계절별 비료성분

한우사육 단지	계절	유기물	질소	C/N비	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
		--- (%) ---			----- (%) -----				
A	봄	2.55	0.39	3.79	0.006	0.556	0.005	0.065	0.070
	여름	2.36	0.31	4.42	0.005	0.455	0.004	0.049	0.049
	가을	2.57	0.39	3.80	0.006	0.497	0.006	0.057	0.065
	겨울	2.65	0.42	3.65	0.007	0.603	0.008	0.061	0.076
	평균	2.53	0.38	3.86	0.006	0.528	0.006	0.058	0.065
B	봄	3.32	0.41	4.70	0.011	0.479	0.007	0.068	0.084
	여름	2.51	0.37	3.93	0.010	0.443	0.006	0.039	0.058
	가을	2.93	0.35	4.82	0.009	0.640	0.007	0.074	0.063
	겨울	3.55	0.39	5.26	0.011	0.830	0.008	0.087	0.089
	평균	3.08	0.39	4.64	0.010	0.598	0.007	0.067	0.074
C	봄	3.13	0.41	4.41	0.009	0.261	0.004	0.064	0.045
	여름	2.59	0.37	4.04	0.013	0.239	0.004	0.056	0.040
	가을	3.89	0.40	5.64	0.007	0.358	0.007	0.055	0.060
	겨울	3.48	0.47	4.33	0.010	0.463	0.006	0.050	0.049
	평균	3.27	0.41	4.64	0.010	0.330	0.005	0.056	0.049
D	봄	2.97	0.41	4.19	0.010	0.598	0.007	0.082	0.087
	여름	3.01	0.32	5.56	0.008	0.497	0.006	0.080	0.065
	가을	3.28	0.38	5.00	0.012	0.650	0.011	0.055	0.107
	겨울	3.21	0.48	3.86	0.009	0.788	0.007	0.094	0.088
	평균	3.12	0.40	4.53	0.010	0.633	0.008	0.078	0.087
E	봄	4.05	0.34	6.93	0.011	0.574	0.010	0.061	0.049
	여름	2.69	0.32	4.94	0.007	0.616	0.006	0.061	0.067
	가을	3.57	0.49	4.22	0.011	0.712	0.006	0.115	0.038
	겨울	3.62	0.39	5.53	0.014	0.662	0.013	0.079	0.063
	평균	3.48	0.38	5.29	0.011	0.641	0.009	0.079	0.054
1년 전체 평균		3.01	0.38	4.74	0.009	0.546	0.007	0.068	0.066

Table 3-53. 돼지 축산폐수의 계절별 비료성분

돼지사육 단지	계절	유기물	질소	C/N비	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
		--- (%) ---	----		----- (%) -----				
A	봄	1.55	0.45	3.29	0.094	0.154	0.089	0.067	0.058
	여름	0.86	0.53	2.59	0.118	0.184	0.110	0.083	0.032
	가을	1.59	0.32	4.66	0.114	0.104	0.127	0.055	0.080
	겨울	1.45	0.63	2.44	0.125	0.079	0.121	0.050	0.050
	평균	1.00	0.43	3.06	0.113	0.130	0.112	0.064	0.055
B	봄	2.31	0.80	2.41	0.205	0.117	0.114	0.082	0.084
	여름	1.73	0.79	1.85	0.129	0.151	0.094	0.061	0.058
	가을	1.65	0.46	3.70	0.177	0.287	0.078	0.048	0.063
	겨울	2.50	0.93	2.22	0.155	0.237	0.176	0.081	0.089
	평균	1.67	0.62	2.39	0.167	0.198	0.116	0.068	0.074
C	봄	1.13	0.53	3.43	0.084	0.139	0.052	0.065	0.032
	여름	1.19	0.37	4.05	0.052	0.118	0.070	0.058	0.027
	가을	2.21	0.48	4.71	0.110	0.117	0.090	0.035	0.045
	겨울	1.40	0.67	3.02	0.091	0.222	0.083	0.033	0.030
	평균	1.55	0.50	3.73	0.084	0.149	0.074	0.048	0.033
D	봄	2.97	0.43	4.02	0.053	0.116	0.014	0.016	0.020
	여름	1.01	0.35	5.00	0.044	0.119	0.019	0.014	0.012
	가을	0.68	0.38	5.00	0.082	0.107	0.055	0.026	0.026
	겨울	1.29	0.25	7.44	0.094	0.163	0.040	0.015	0.019
	평균	1.55	0.42	5.17	0.068	0.127	0.032	0.018	0.019
E	봄	3.05	0.98	2.40	0.320	0.360	0.201	0.197	0.119
	여름	2.75	0.83	1.88	0.290	0.444	0.188	0.112	0.091
	가을	2.51	0.90	2.30	0.345	0.343	0.178	0.165	0.135
	겨울	2.68	0.97	2.17	0.343	0.478	0.237	0.182	0.099
	평균	2.47	0.78	2.20	0.325	0.406	0.201	0.164	0.111

(계속)

돼지사육 단지	계절	유기물	질소	C/N비	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
		(%)	(%)		----- (%) -----				
F	봄	2.67	0.78	1.99	0.328	0.327	0.167	0.117	0.111
	여름	2.16	0.59	2.12	0.226	0.331	0.095	0.114	0.062
	가을	2.33	0.83	1.63	0.259	0.409	0.209	0.107	0.079
	겨울	2.45	0.78	1.82	0.294	0.444	0.134	0.149	0.104
	평균	2.39	0.73	1.85	0.277	0.377	0.151	0.122	0.089
G	봄	0.57	0.39	0.85	0.036	0.117	0.015	0.011	0.020
	여름	0.51	0.37	0.81	0.037	0.082	0.020	0.006	0.019
	가을	0.95	0.33	1.67	0.021	0.062	0.042	0.015	0.030
	겨울	1.21	0.92	0.76	0.032	0.107	0.022	0.011	0.022
	평균	1.11	0.46	0.92	0.032	0.092	0.025	0.011	0.023
H	봄	1.13	0.35	1.89	0.023	0.078	0.018	0.014	0.027
	여름	0.54	0.21	1.48	0.019	0.107	0.014	0.008	0.016
	가을	0.39	0.31	0.74	0.030	0.081	0.029	0.006	0.013
	겨울	0.97	0.22	2.55	0.037	0.119	0.019	0.016	0.021
	평균	0.79	0.33	1.63	0.027	0.096	0.020	0.011	0.019
I	봄	3.10	1.25	1.44	0.629	0.474	0.294	0.182	0.141
	여름	2.81	0.95	1.72	0.539	0.408	0.212	0.146	0.107
	가을	3.13	1.16	1.57	0.599	0.529	0.278	0.221	0.120
	겨울	3.58	1.21	1.72	0.516	0.550	0.323	0.209	0.135
	평균	2.46	0.92	1.61	0.571	0.490	0.277	0.190	0.126
J	봄	1.05	0.39	1.56	0.020	0.092	0.019	0.010	0.023
	여름	0.61	0.46	0.76	0.016	0.062	0.009	0.010	0.016
	가을	0.87	0.25	2.04	0.018	0.084	0.020	0.006	0.018
	겨울	0.67	0.34	1.15	0.011	0.087	0.026	0.010	0.027
	평균	1.25	0.51	0.77	0.016	0.081	0.019	0.009	0.021
1년 전체 평균		1.71	0.61	1.62	0.168	0.215	0.103	0.070	0.057



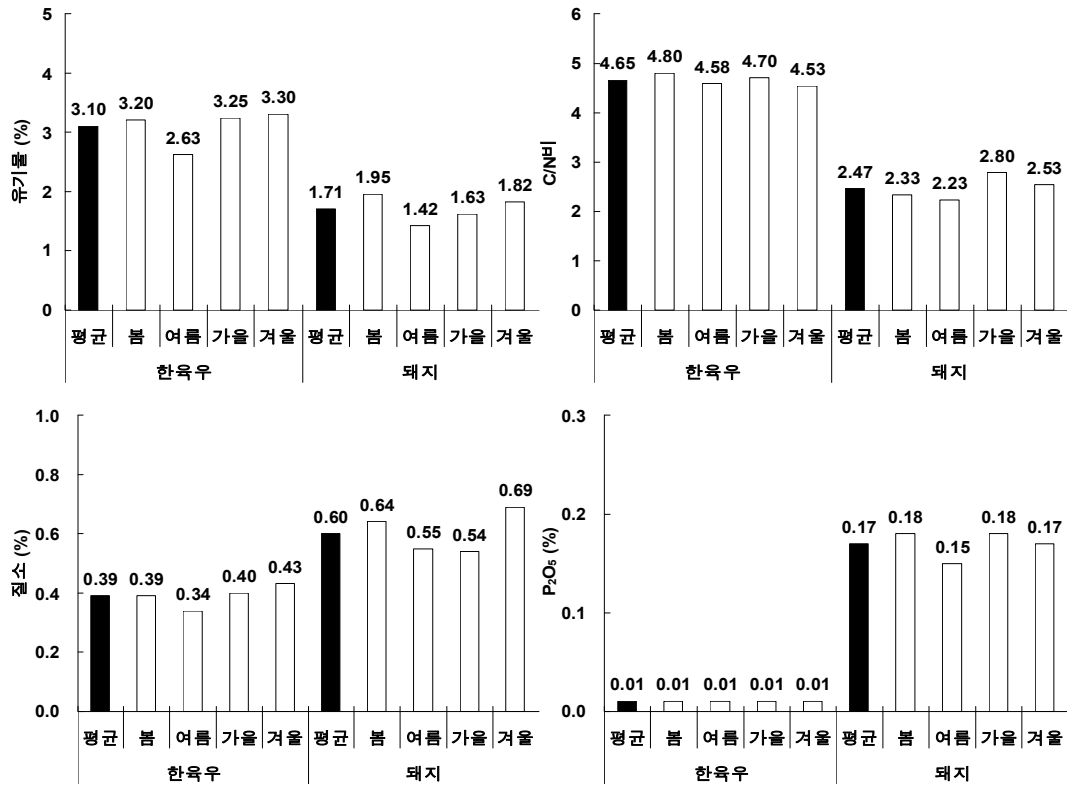


Fig. 3-73. 한육우 및 돼지 사육단지 축산폐수의 계절별 유기물 함량, C/N비율, 질소 및 인 함량 비교.

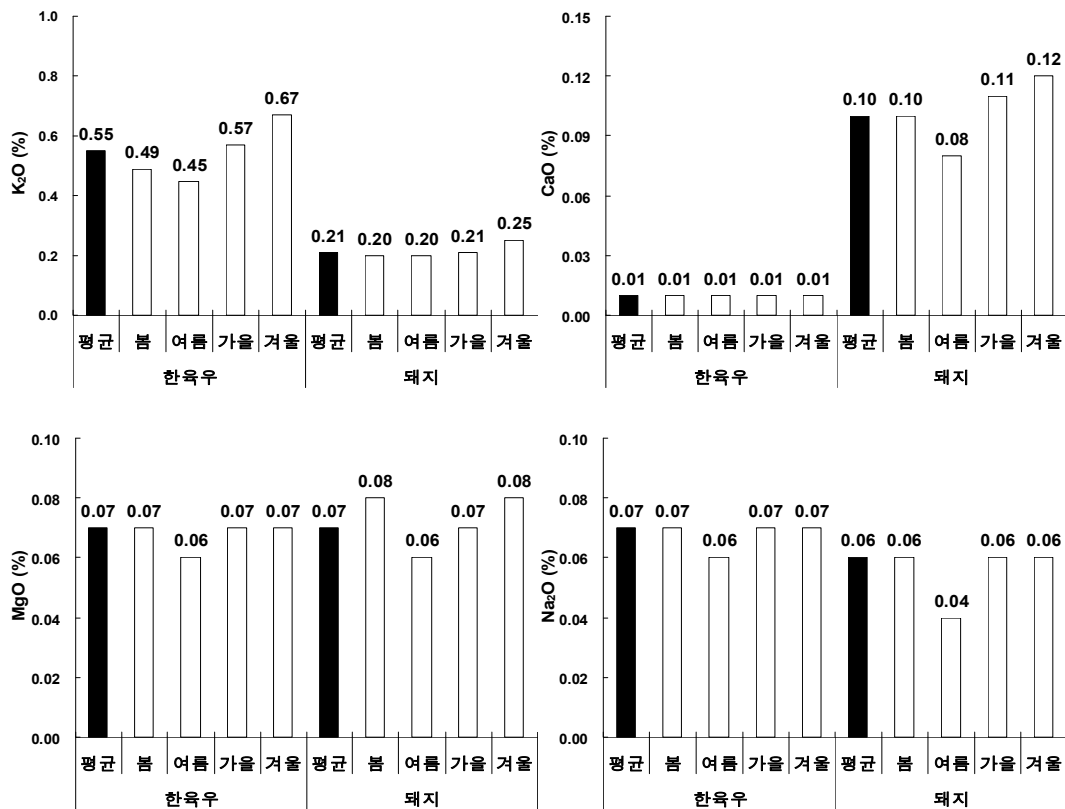


Fig. 3-74. 한육우 및 돼지 사육단지 축산폐수의 계절별 K<sub>2</sub>O, CaO, MgO 및 Na<sub>2</sub>O 함량 비교.

### 3) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석

#### 가) 수생식물 종류별 퇴비화 관련사항 검토

##### (1) 수생식물별 퇴비 재료 활용 가능성 검토

축산폐수 처리 인공습지에서 생산되는 수생식물체의 퇴비화 재료로서의 활용 가능성을 검토하기 위하여 퇴비화의 중요한 인자인 수분함량, 유기물함량, C/N비율을 비교 검토한 결과는 Table 3-54에서 보는 바와 같다. 축산폐수는 질소, 인산 등의 고농도의 영양염류를 함유하고 있기 때문에 축산폐수가 유입되는 습지의 식물체 생육은 일반적인 습지에 비하여 매우 왕성하며 단위면적당 생산되는 biomass량도 훨씬 많으므로 효율적인 축산폐수처리와 안정한 습지생태계 유지를 위해서 주기적으로 식물체를 제거할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 식물체 생육이 가장 왕성한 8월과 생육이 중지되고 식물체가 고사되는 11월의 두 번에 걸쳐 식물체를 제거하는 방안을 고려하여 검토하였다.

수생식물 종류별 식물체내 수분함량은 식물종류에 따라 차이가 크게 났으며, 동일 식물체에서 시기별로도 차이가 있었고, 전반적으로 11월에 비하여 8월에 제거한 식물체 중의 수분함량이 높았다. 식물종별 수분함량은 수련, 노랑어리연꽃, 백련, 미나리는 8월에 약 83.4~87.9% 범위, 11월에 약 78.9~83.5% 범위로 가장 높았다. 대표적인 정수식물인 갈대, 부들, 줄, 노랑꽃창포는 갈대가 8월에 약 54.3%, 11월에 50.2%로 전체 수생식물 중에서 가장 낮았으며, 노랑꽃창포는 8월에 약 76.4%, 11월에 81.6%, 부들은 8월에 79.8%, 11월에 74.4%로 비교적 높았으며, 줄은 8월에 약 70.8%, 11월에 66.9%였다.

퇴비화과정 중 퇴비화 미생물의 유기물 분해과정에서 미생물 세포는 생리학적으로 물을 필요로 하며 물리적으로도 기질의 용액과 염류, 가스 교환 시의 수분함량 등에 의한 영향을 받는다. 미생물의 대사에 필요한 영양분은 대부분 체외 가수분해효소를 분비하여 영양분을 흡수하기 좋은 상태로 분해 후 수용액 상태에서 흡수하므로 수분함량은 미생물의 에너지 대사 및 세포증식에 매우 중요한 역할을 한다. 일반적으로 미생물활성과 퇴비화를 위한 적정 수분함량은 50~60%인 것으로 알려져 있고, 수분 함유율이 전체 퇴비질량의 30% 이하일 때는 생물반응이 저해되며, 20% 이하일 때는 반응이 불가능해지게 된다. 또한 너무 높은 함유율 하에서는 입자 표면으로의 산소전달에 문제가 생기기 때문에 반응이 저해된다. 그리고 퇴비화과정 중 미생물에 의한 유기물의 분해가 진행된다면 고온이 되어 증발하기 쉬우나 동시에 유기물 분해에서 수분이 생기기 때문에 시작할 때의 수분 조절만으로 퇴비화를 할 수 있는 경우가 많다.

인공습지 설치시 정수식물로서 가장 많이 이용되는 갈대, 부들, 줄 및 노랑꽃창포는 수질오염물질 흡수능력이 우수할 뿐만 아니라 단위면적당 biomass 생산량도 다른 식물에 비하여 많으므로 퇴비화 재료물질로서의 이용가능성이 높은 수생식물들이다. 본 연구에서 조사한 이들 식물체들의 수분함량은 갈대의 경우 8월과 11월의 식물체 모두 일반적인 퇴비화 적정기준인 50~60%내였으며, 부들, 줄, 노랑꽃창포의 경우 66~79% 범위로 약간 높았으나 수분조절제의 첨가 없이 약간의 자연식 건조과정을 통하면 퇴비화를 위한 초기 수분함량 유지에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

식물체내 C/N비율은 효과적으로 퇴비화를 진행시키기 위한 가장 중요한 직접적인 영향인자이며 주로 반응속도론적인 면과 퇴비화 후 생성된 퇴비의 질적인 면에 영향을 준다. 탄소는 미생물이 성장하기 위한 에너지원으로, 질소는 세포증식을 위한 단백질 합성에 이용되는데 보통 미생물 세포의 탄질비가 5~15로 퇴비화는 이 수준에 도달할 때까지 지속된다.

본 연구에서 조사한 수생식물 종류별 C/N비율은 식물종류에 따라 차이가 크게 났으며 동일 식물체에서 시기별로도 차이가 있었고, 전반적으로 8월에 비하여 11월에 제거한 식물체 중의 C/N비율이 약간씩 증가되는 경향이였다. 수생식물종별 C/N비율은 식물체내 질소 함량이 매우 낮은 물잔디가 8월에 약 91.7, 11월 97.6으로 매우 높았으며, 미나리가 8월에 약 17.8, 11월에 약 17.3으로 가장 낮았다. 대표적인 정수식물인 갈대, 부들, 줄, 노랑꽃창포에서 노랑꽃창포는 8월에 약 31.9, 11월에 36.6, 부들은 8월에 약 33.0, 11월에 38.9로 비교적 높았고, 줄은 8월에 29.5, 11월에 32.8, 갈대는 8월에 약 27.9, 11월에 28.7이였다.

일반적으로 퇴비화 물질내에 분해하기 어려운 유기물이 많고 그 유기탄소가 미생물의 영양원이 되기 어려운 경우에는 초기 탄질율을 30~50범위로 높게 선택하여야 한다. 그러나 음식물 쓰레기나 가축분뇨와 같은 일반적인 물질의 퇴비화에 적합한 초기 탄질율은 25~40범위 정도이다. 일반적으로 수생식물체내의 유기물은 다른 퇴비화물질들에 비하여 비교적 분해되기 쉬운 유기물로 구성이 되어 있으며, 퇴비화 반응속도도 빠르므로 수생식물만을 퇴비화물질로 할 경우에는 초기 C/N율을 25~35정도가 적당할 것으로 생각된다. 본 연구에서 조사된 갈대, 부들, 줄, 노랑꽃창포의 C/N비율로 볼 때 4종의 식물 모두 적정 C/N비율 범위 내에 들었다.

미생물분해에 탄질율이 35보다 높으면 질소부족현상이 나타나기 시작하여 미생물의 증식이 억제되고 따라서 퇴비화의 속도가 늦어진다. 또 탄소가 많으므로 이것에 의해 생긴 유기산 등이 퇴비의 pH를 낮추고 역시 미생물의 성장과 활동도 억제된다. 반면에 탄질율이 너무 낮으면 질소가 암모니아로 변하여 pH를 증가시키고, 낮은 pH로 인해 암모니아 가스가 발생되어 퇴비화 과정 중 악취를 유발시킨다. 그러나 이러한 C/N비는 대상폐기물의 유형, 성상에 따라 각각 다르게 나타날 수 있으며 운전 중 pH 조절을 통하여 질소성분의 유실을 방지하고 최종 퇴비내에 많은 양의 질소성분이 함유하는 것이 좋다. 일반적으로 축산분뇨의 경우는 C/N비가 15~25로 낮은 편인데 돈분의 경우는 5~6정도로 아주 낮아 탄소분이 풍부한 bulking agent의 첨가가 필요하다.

Table 3-54. 수생식물별 퇴비화과정 영향 인자 분석 검토

수생식물	시기	수분	유기물	T-C	C/N
		-----	(%) -----	-----	
달뿌리풀	8월	63.027	92.040	53.383	31.137
	11월	59.703	92.440	53.613	31.780
수련	8월	86.280	91.023	52.793	26.935
	11월	83.277	91.993	53.353	33.555
부들	8월	79.801	89.281	51.781	32.961
	11월	74.380	90.614	52.559	38.904
갈대	8월	54.265	91.882	53.290	27.944
	11월	50.222	92.133	53.438	28.730
줄	8월	70.843	91.057	52.812	29.537
	11월	66.895	91.795	53.241	32.824
물잔디	8월	80.260	88.540	51.350	91.696
	11월	73.690	89.180	51.720	97.585
노랑어리 연꽃	8월	87.047	92.783	53.813	25.589
	11월	81.600	93.217	54.067	31.073
노랑꽃 창포	8월	76.416	90.761	52.640	31.942
	11월	71.677	91.489	53.063	36.620
사초류	8월	76.403	92.983	53.933	31.050
	11월	72.210	93.470	54.213	33.736
미나리	8월	87.860	86.805	50.345	17.821
	11월	82.065	88.140	51.120	17.299
백련	8월	83.490	86.920	50.410	20.004
	11월	78.870	90.330	52.390	19.996

## (2) 수생식물체의 bulking agent 활용 가능성 검토

축산폐수 처리 인공습지에서 생산되는 수생식물체의 bulking agent로서의 이용 가능성을 검토하기 위하여 11월에 수확한 수생식물 고사체를 자연 건조후 3~5 cm 크기로 절단하여 수분 흡수율, 공기 보유율 및 산소 이진율 등을 현재 조사 중에 있다.

일반적으로 노랑꽃창포, 갈대, 부들 및 줄 등 수생식물의 섬유조직은 모세관흡수현상 (Capillary effect)을 촉진시키는 최적의 구조로 되어 있으며, 또한 흡수된 액체와 공기를 최대한 저장할 수 있는 형태를 가지고 있다. 또한 퇴비화 공정 중 수생식물체를 이용하면 섬유조직에서 용출되는 물질은 탄소원을 공급하는 역할을 하게 되며, 수생식물체 섬유조직 내에 있는 산소는 퇴비화에 적합한 임의성 조건을 만드는 역할을 하는 등 기존의 톱밥, 왕겨 및 벚짚 등의 수분조절제와는 다른 특성을 갖고 있다.

## (3) 수생식물체내 유해성 중금속 함량 기준 관련 검토

축산폐수 처리 인공습지에서 생산되는 수생식물체를 퇴비화 재료로서 활용할 경우 생산된 퇴비의 유해성 중금속 8종에 대한 함량을 검토한 결과는 Table 3-55에서 보는 바와 같다.

현재 우리나라에서는 퇴비와 관련해서 농림수산식품부의 비료 공정 규격의 부산물비료에서 퇴비를 그린퇴비와 일반퇴비의 두 개의 등급으로 구분하고 유기물함량, C/N비율, 염분함량 및 수분함량과 유해성분으로서 8종의 중금속에 대하여 기준을 정해 놓고 있다.

수생식물 종류별 유해 중금속 8종의 함량은 동일 식물이라도 중금속 종류별로 농도 차이가 많았고, 계절별 중금속 농도는 전체적으로 8월에 비하여 11월에 약간씩 증가되는 경향이었으며, 전반적으로 수생식물체내 8종의 중금속 농도는 비교적 낮은 편이었다. 식물종류별 유해 중금속 8종의 전체적인 평균 농도범위는 Cr의 경우 2.69~13.97 mg L<sup>-1</sup> 범위이었고, Zn의 경우 5.55~46.24 mg L<sup>-1</sup> 범위이었다. Cu의 경우 5.16~75.3 mg L<sup>-1</sup> 범위이었으며, As의 경우 1.13~3.21 mg L<sup>-1</sup> 범위로 낮았으며, Cd, Pb, Ni 및 Hg는 검출되지 않았다.

따라서 본 연구에서 14개 인공습지에서 성장한 수생식물들의 As, Cd, Hg, Pb, Cu, Cr, Ni 및 Zn의 함량은 퇴비 부산물 비료공정의 그린퇴비의 기준보다 훨씬 낮거나 검출한계 이하로서 이러한 식물체들을 효율적으로 퇴비화시켜 양질의 퇴비로 제조하여 농경지에 재활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3-55. 수생식물 종류별 식물체내 중금속 평균 함량

수생 식물	시기	Cr	Zn	Cu	Cd	Pb	As	Ni	Hg
		----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
달뿌리풀	8월	8.64	22.04	50.93	ND*	ND	ND	ND	ND
	11월	11.98	21.50	57.00	ND	ND	ND	ND	ND
수련	8월	12.38	24.63	53.80	ND	ND	ND	ND	ND
	11월	13.97	27.78	60.77	ND	ND	ND	ND	ND
부들	8월	9.30	44.66	39.78	ND	ND	1.52	ND	ND
	11월	12.07	41.86	43.01	ND	ND	1.47	ND	ND
갈대	8월	8.43	46.24	36.98	ND	ND	1.25	ND	ND
	11월	8.96	44.58	39.60	ND	ND	1.13	ND	ND
줄	8월	6.93	23.95	42.19	ND	ND	1.65	ND	ND
	11월	8.33	22.32	46.32	ND	ND	1.77	ND	ND
물잔디	8월	8.33	18.91	65.50	ND	ND	ND	ND	ND
	11월	13.29	16.32	75.30	ND	ND	ND	ND	ND
노랑어리연꽃	8월	9.89	15.32	66.10	ND	ND	ND	ND	ND
	11월	11.29	19.50	71.70	ND	ND	ND	ND	ND
노랑꽃창포	8월	8.56	36.30	52.42	ND	ND	1.74	ND	ND
	11월	11.38	36.59	56.44	ND	ND	2.07	ND	ND
사초류	8월	5.95	21.98	33.97	ND	ND	3.21	ND	ND
	11월	7.70	20.12	33.90	ND	ND	1.54	ND	ND
미나리	8월	2.69	33.09	5.87	ND	ND	1.57	ND	ND
	11월	3.41	24.06	5.16	ND	ND	1.08	ND	ND
백련	8월	5.12	5.55	8.30	ND	ND	1.64	ND	ND
	11월	5.55	20.93	5.50	ND	ND	1.84	ND	ND

\*: Non Detector

#### 나) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석 검토

축산폐수 처리 인공습지에서 발생하는 수생식물체의 비료학적 가치를 비교 검토하기 위하여 유입수 특성에 따른 14개 인공습지에서 생장한 식물체를 대상으로 작물생육에 중요한 질소, 인산, 칼리, 칼슘, 고토 등의 식물 영양성분들의 함량을 비교 검토하였으며, 그 결과는 Table 3-56에서 보는 바와 같다.

일반적으로 식물체 중에 포함되어 있는 비료 성분은 질소 (N), 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 칼리 (K<sub>2</sub>O), 칼슘 (CaO) 그리고 고토 (MgO)이며, 토양환경적인 측면에서 중요 요인은 EC, 유기물 함량 및 C/N 비율이라고 볼 수 있다.

본 연구에서 조사한 14개소 인공습지에서 생장한 식물체의 주요 비료성분의 평균 함량을 수생식물별로 보면, 질소함량은 미나리 (2.89%) > 백련 (2.57%) > 갈대, 노랑어리연꽃 (1.79~1.92%) > 달뿌리풀, 수련, 줄, 사초류 (1.67~1.88%) > 부들, 노랑꽃창포 (1.46~1.54%) > 물잔디 (0.55%)로 미나리와 백련이 가장 높았고, 물잔디가 가장 낮았다. 식물체별 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 평균

함량은 달뿌리풀, 백련 (1.52~1.64%) > 갈대, 줄, 사초류 (1.24~1.30%) > 부들, 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포 (1.00~1.15%) > 미나리 (0.79%) > 물잔디 (0.25%)로 달뿌리풀과 백련에서 가장 높았다. 식물체별 칼리 ( $K_2O$ ) 평균함량은 미나리 (2.49%) > 갈대 (2.09%) > 부들, 줄, 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포, 백련, 달뿌리풀 (1.66~1.90%) > 수련, 사초류 (1.32~1.45%) > 물잔디 (0.93%)로 미나리에서 가장 높았으며 물잔디에서 가장 낮았다. 식물체별 칼슘 (CaO) 평균함량은 부들, 백련 (1.01~1.07%) > 수련, 줄, 사초류, 미나리 (0.59~0.71%) > 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포 (0.43~0.54%) > 달뿌리풀, 갈대 (0.30~0.34%) > 물잔디 (0.58%)로 부들과 백련에서 가장 많았다. 식물체별 고토 (MgO) 평균함량은 백련 (0.38%) > 미나리 (0.25%) > 수련 (0.22%) > 부들, 줄, 사초류, 달뿌리풀 (0.20~0.22%) > 갈대, 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포 (0.18~0.19%) > 물잔디 (0.07%)로 백련에서 가장 높았다.

이와 같이 수생식물별 비료성분 함량은 식물별로 차이가 많았으며 전반적으로 백련과 미나리에서 높았고 물잔디는 모든 성분에서 매우 낮았다. 정수식물로 가장 많이 이용되고 있는 부들, 갈대, 줄 및 노랑꽃창포도 전반적으로 비료성분 함량이 비교적 높은 편이었으며, 본 연구에서 사용한 수생식물체내 각 비료성분 함량은 자연적인 환경조건에서 성장한 수생식물들에 비하여 비교적 높았다. 따라서 습지내 자생 식물체들을 퇴비화시켜 토양에 시비할 경우 토양의 물리화학적인 특성 개량과 식물영양성분으로서의 활용가치는 충분히 있다고 생각된다.

Table 3-56. 수생식물 종류별 작물 비료성분 함량

수생식물	시기	T-N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
		-----%-----					
달뿌리풀	8월	1.713	1.695	1.844	0.350	0.194	0.085
	11월	1.687	1.580	1.627	0.332	0.211	0.050
	평 균	1.700	1.637	1.735	0.341	0.203	0.068
수련	8월	1.960	1.129	1.157	0.668	0.199	1.053
	11월	1.590	0.969	1.744	0.752	0.244	1.170
	평 균	1.775	1.049	1.450	0.710	0.222	1.112
부들	8월	1.571	1.198	1.809	0.946	0.194	0.423
	11월	1.351	1.097	1.792	1.086	0.211	0.423
	평 균	1.461	1.147	1.800	1.016	0.203	0.423
갈대	8월	1.907	1.278	1.895	0.241	0.169	0.138
	11월	1.860	1.312	2.287	0.360	0.194	0.117
	평 균	1.884	1.295	2.091	0.300	0.182	0.128
줄	8월	1.788	1.326	1.676	0.552	0.189	0.424
	11월	1.622	1.239	1.863	0.631	0.214	0.440
	평 균	1.705	1.282	1.770	0.592	0.202	0.432
물잔디	8월	0.560	0.321	0.759	0.112	0.050	0.068
	11월	0.530	0.183	1.109	0.238	0.083	0.068
	평 균	0.545	0.252	0.934	0.175	0.066	0.068
노랑어리연꽃	8월	2.103	1.069	1.992	0.340	0.178	0.675
	11월	1.740	0.955	1.811	0.528	0.204	0.549
	평 균	1.922	1.012	1.901	0.434	0.191	0.612
노랑꽃창포	8월	1.648	1.053	1.548	0.476	0.163	0.463
	11월	1.449	0.960	1.768	0.599	0.193	0.460
	평 균	1.549	1.006	1.658	0.538	0.178	0.462
사초류	8월	1.737	1.207	1.763	0.578	0.221	0.162
	11월	1.607	1.276	0.880	0.770	0.194	0.198
	평 균	1.672	1.241	1.321	0.674	0.208	0.180
미나리	8월	2.825	0.767	2.476	0.735	0.257	0.176
	11월	2.955	0.813	2.506	0.623	0.249	0.209
	평 균	2.890	0.790	2.491	0.679	0.253	0.192
백련	8월	2.520	1.420	1.916	1.148	0.398	1.283
	11월	2.620	1.626	1.868	0.994	0.365	0.972
	평 균	2.570	1.523	1.892	1.071	0.382	1.127



#### 4) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴

##### 가) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 소비 패턴

###### (1) 갈대

생육이 왕성한 8월과 생육이 중지되고 고사된 11월에 수확한 갈대 식물체를 40일 동안의 퇴비화과정 중 산소 소비량, 퇴비화 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-75에서 보는 바와 같다. 8월에 수확한 갈대와 11월에 수확한 갈대의 퇴비화 기간 중 산소 소비량을 나타내는 누적 산소 소비곡선 (A), 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화는 거의 비슷한 경향을 보였으며, 전반적인 산소 소비량은 8월에 수확한 갈대가 11월에 수확한 식물체에 비하여 약간 많았다. 퇴비화 반응조내 최고온도 도달 시기는 8월에 수확한 갈대는 퇴비화 8일째에 최고온도 69°C에 도달하였고 최고온도 도달시까지 소비된 산소량은 약 1,908 mg O<sub>2</sub>/200 g이었으며, 11월에 수확한 식물체는 퇴비화 7일째에 최고온도 66.5°C에 도달하였고 최고온도 도달시까지 소비된 산소량은 약 1,868 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다.

일반적인 퇴비화 최적온도로 알려진 55~65°C를 유지한 기간은 8월에 수확한 갈대는 퇴비화 3일째에 55°C에 도달하여 퇴비화 15일째에 55°C이하로 감소되어 12일 동안 최적온도인 55°C 이상을 유지하였으며 이 기간동안 소비된 산소량은 약 1,476 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다. 11월에 수확한 갈대는 퇴비화 5일째에 55°C에 도달하여 11일동안 55°C 이상을 유지하였으며 이 기간동안 약 1,249 mg O<sub>2</sub>/200 g의 산소를 소비하였다.

갈대의 수확 시기별 식물체 퇴비화과정 동안의 산소 소비량은 전체적으로 8월에 수확한 식물체가 11월에 수확한 식물체에 비하여 많았으며, 퇴비화 최적온도인 55~65°C범위 도달시기는 8월 식물체가 11월 식물체에 비하여 약 2일정도 빨랐으며, 최적온도 유지기간도 8월 식물체가 약 1일 정도 길었고, 최고온도는 8월 식물체는 약 69°C, 11월 식물체는 약 66.5°C였다.

###### (2) 줄

8월과 11월에 수확한 줄 식물체의 퇴비화과정 중 산소 소비량, 퇴비화 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-76에서 보는 바와 같이 시기별 퇴비화 기간 중 누적 산소 소비곡선 (A), 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화는 거의 비슷한 경향을 보였으며, 전반적인 산소 소비량은 8월에 수확한 줄이 11월에 수확한 식물체에 비하여 약간 많았다. 퇴비화조내 최고온도는 8월에 수확한 줄은 퇴비화 8일째에 최고온도 70.2°C에 도달하였고, 11월에 수확한 줄은 11일째에 최고온도 72.2°C에 도달하여 11월 식물체가 약 3일 정도 늦었으며, 최고온도 도달시까지 산소 소비량은 각각 약 2,586 및 2,480 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다.

퇴비화 최적온도인 55~65°C범위 유지기간은 8월에 수확한 줄은 퇴비화 2일째에 55°C에 도달하여 12일 동안 유지하였고, 이 기간동안 소비된 산소량은 약 2,461 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다. 11월에 수확한 줄은 퇴비화 4일째에 55°C에 도달하여 11일 동안 55°C 이상을 유지하였으며, 이 기간 동안 약 1,830 mg O<sub>2</sub>/200 g의 산소를 소비하였다.

줄의 수확 시기별 식물체 퇴비화 과정동안 산소 소비량은 전체적으로 8월에 수확한 식물체

가 11월에 수확한 식물체에 비하여 많았으며, 퇴비화 최적온도인 55~65℃범위 도달시기는 8월 식물체가 11월 식물체에 비하여 약 2일정도 빨랐으며 최적온도 유지기간도 8월 식물체가 약 1일 정도 길었고, 최고온도는 8월에 약 70.2℃, 11월에 약 72.2℃였다.

### (3) 부들

8월과 11월에 수확한 부들 식물체의 퇴비화과정 중 산소 소비량, 퇴비화 단계별 산소 소비 패턴 및 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-77에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 누적 산소 소비곡선 (A), 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화는 8월에 수확한 식물체와 11월에 수확한 식물체 모두 거의 비슷한 경향을 보였다. 퇴비화조내 최고온도는 8월에 수확한 부들은 퇴비화 7일째에 최고온도 71.7℃에 도달하였고, 11월에 수확한 부들은 10일째에 최고온도 70.2℃에 도달하여 11월 식물체가 약 3일 정도 늦었으며, 최고온도 도달시까지 산소 소비량은 각각 약 2,490 및 2,497 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다.

퇴비화 최적온도인 55~65℃범위 유지기간은 8월에 수확한 부들은 퇴비화 2일째에 55℃에 도달하여 12일 동안 유지하였고 이 기간동안 소비된 산소량은 약 2,467 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다.

11월에 수확한 부들은 퇴비화 3일째에 55℃에 도달하여 11일 동안 55℃이상을 유지하였으며 이 기간동안 약 2,370 mg O<sub>2</sub>/200 g의 산소를 소비하였다.

부들의 수확 시기별 식물체 퇴비화과정 동안의 산소 소비량은 전반적으로 8월에 수확한 식물체가 11월에 수확한 식물체에 비하여 많았으며, 퇴비화 최적온도인 55~65℃범위 도달시기는 8월 식물체가 11월 식물체에 비하여 약 1일정도 빨랐고, 최적온도 유지기간도 8월 식물체가 약 1일 정도 길었으며, 최고온도는 8월 식물체는 약 71.7℃, 11월 식물체는 약 70.2℃였다.

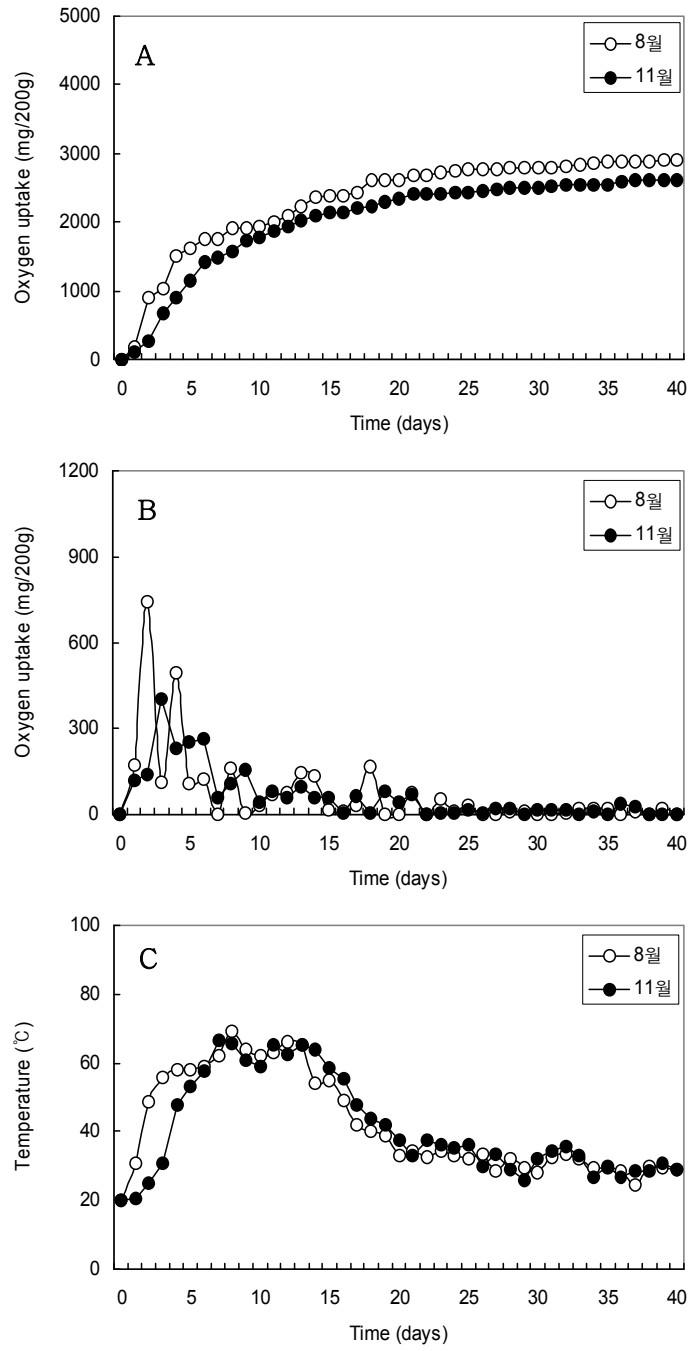


Fig. 3-75. 갈대의 퇴비화 과정 중 누적산소 소비량 (A), 단계별 산소 소비패턴 (B) 및 온도변화 (C).

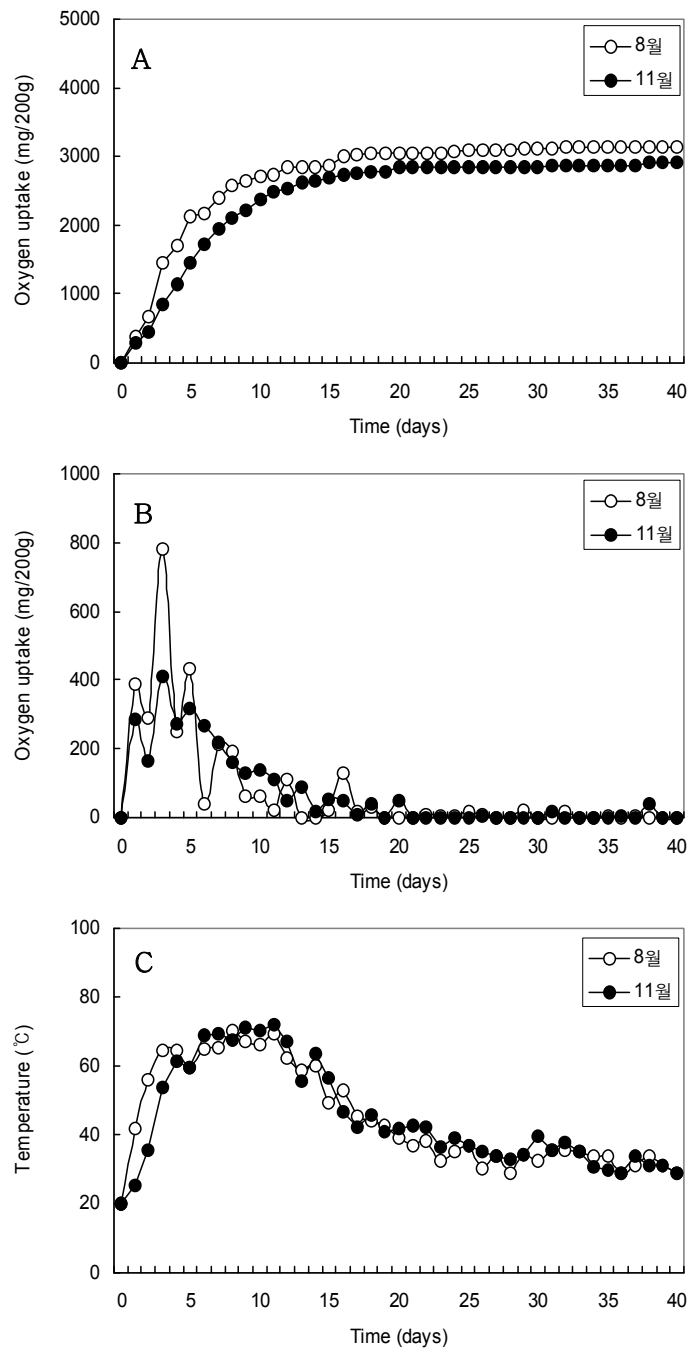


Fig. 3-76. 줄의 퇴비화 과정 중 누적산소 소비량 (A), 단계별 산소 소비패턴 (B) 및 온도변화 (C).

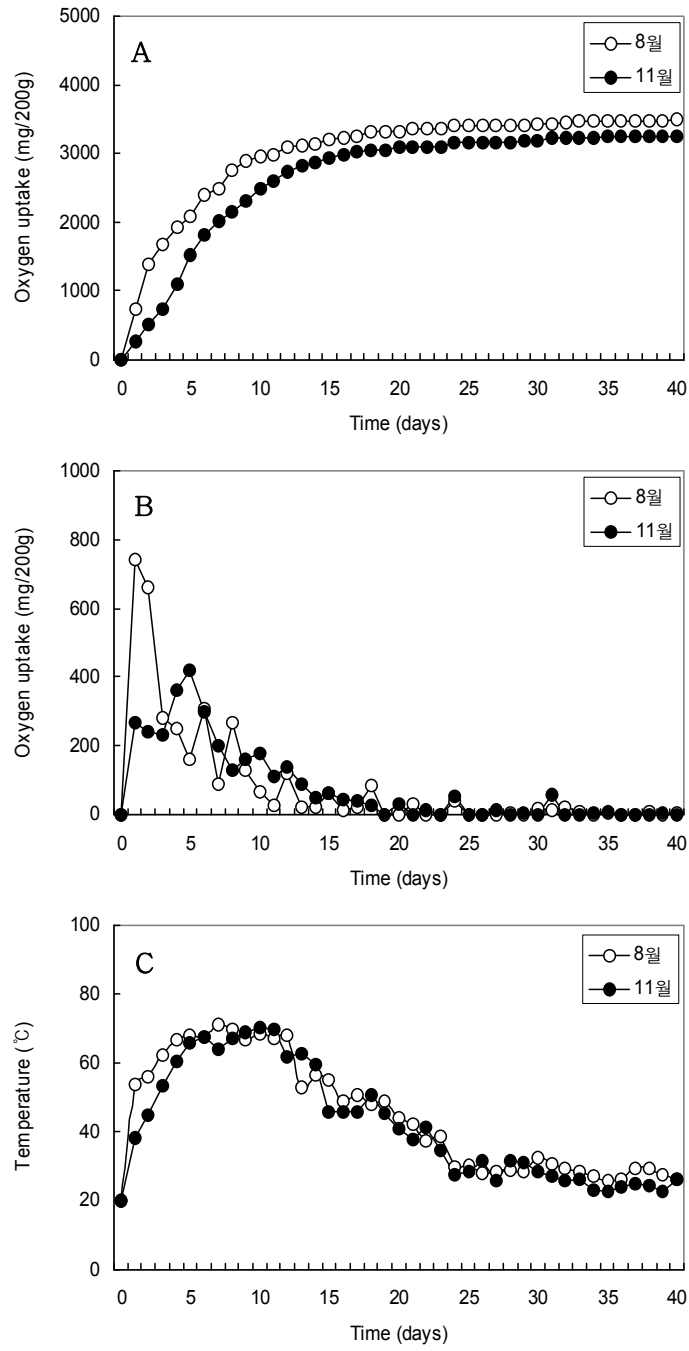


Fig. 3-77. 부들의 퇴비화 과정 중 누적산소 소비량 (A), 단계별 산소 소비패턴 (B) 및 온도변화 (C).

(4) 혼합 식물체 (갈대+줄+부들, 1 : 1 : 1)

수확시기별 갈대, 줄, 부들 식물체를 동일 중량비 (갈대+줄+부들, 1 : 1 : 1)로 혼합한 식물체의 퇴비화 과정 중 산소 소비량, 퇴비화 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-78에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 누적 산소 소비곡선 (A), 단계별 산소 소비패턴 및 온도변화는 8월에 수확한 혼합식물체와 11월에 수확한 혼합 식물체 모두 거의 비슷한 경향을 보였다. 퇴비화조내 최고온도는 8월에 수확한 혼합 식물체는 퇴비화 11일째에 최고온도 69.8°C에 도달하였고 11월에 수확한 부들은 10일째에 최고온도 70.2°C에 도달하여 11월 식물체가 약 1일 정도 빨리 도달하였으며, 최고온도 도달시까지 산소소비량은 각각 약 2,418 및 2,346 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다.

퇴비화 최적온도인 55~65°C범위 유지기간은 8월에 수확한 혼합 식물체는 퇴비화 4일째에 55°C에 도달하여 9일 동안 유지하였고, 이 기간동안 소비된 산소량은 약 1,323 mg O<sub>2</sub>/200 g이었다. 11월에 수확한 혼합 식물체는 퇴비화 5일째에 55°C에 도달하여 10일 동안 55°C이상을 유지하였으며 이 기간동안 약 1,511 mg O<sub>2</sub>/200 g의 산소를 소비하였다.

혼합 식물체의 수확 시기별 식물체 퇴비화 과정동안의 산소 소비량은 각 개별 수생식물 식물체와 마찬가지로 8월에 수확한 식물체가 11월에 수확한 식물체에 비하여 많았다. 퇴비화 최적온도인 55~65°C범위 도달시기는 8월 수확 혼합 식물체가 11월 수확 혼합 식물체에 비하여 약 1일정도 빨랐고, 최적온도 유지기간은 11월 수확 혼합 식물체가 약 1일 정도 길었으며, 최고온도는 8월 수확 혼합 식물체는 약 69.8°C, 11월 수확 혼합 식물체는 약 70.2°C였다.

이와 같이 각 수생식물체별 산소 소비량 특성은 부들과 줄이 갈대에 비하여 비교적 많았으며, 퇴비화 반응조내 최고온도도 갈대에 비하여 부들과 줄이 높았다. 퇴비화 최적온도 범위인 55~65°C 도달시간은 부들과 줄이 갈대에 비하여 1일 정도 빨랐으며, 최적온도 유지기간은 모두 10~11일로 같았다. 갈대, 부들 및 줄을 동일 중량비로 혼합한 식물체는 최고온도는 부들 및 줄과 비슷하였고 퇴비화 최적온도 도달시간은 약 1일정도 늦었고 유지기간도 약 1일정도 짧았다.

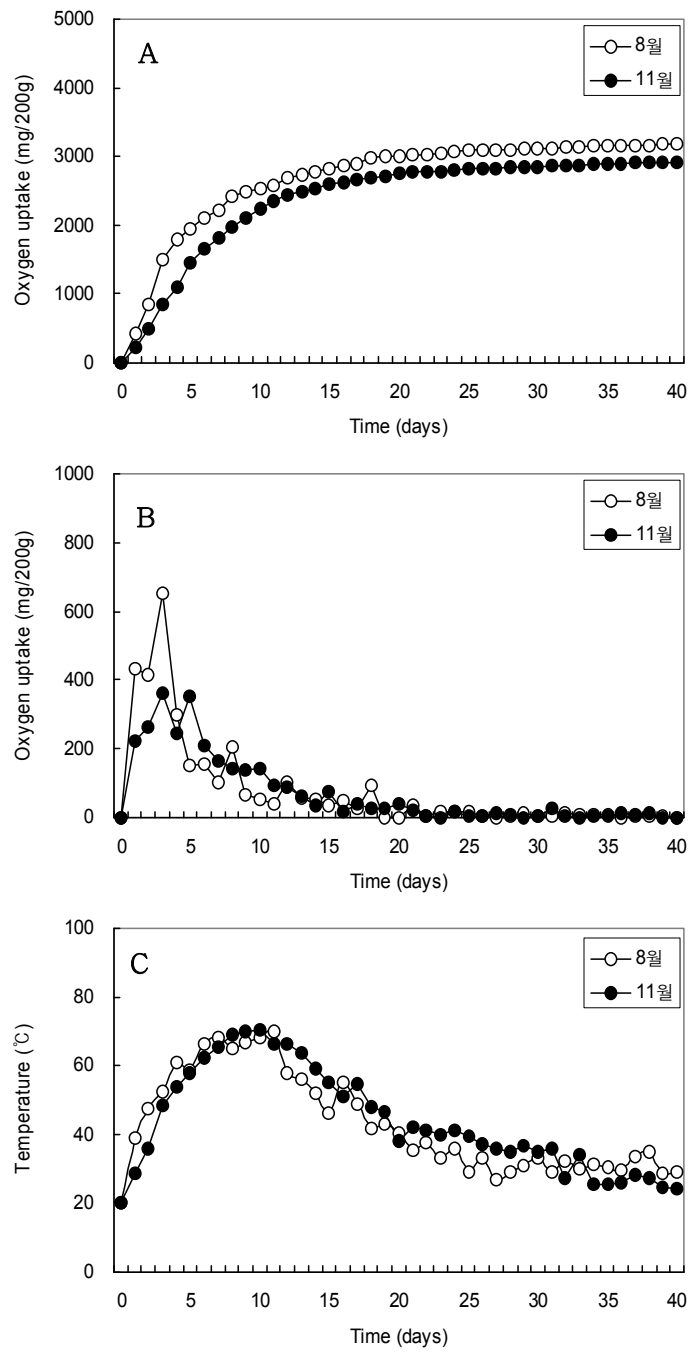


Fig. 3-78. 혼합식물체의 퇴비화 과정 중 누적산소 소비량 (A), 단계별 산소 소비패턴 (B) 및 온도변화 (C).

나) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 총 산소 소비량 및 단계별 산소 소비량

수확시기별 수생식물체별 및 혼합 식물체 (갈대+줄+부들, 1 : 1 : 1)의 총 산소 소비량과 퇴비화 단계별 산소 소비량을 비교 검토한 결과는 Table 3-57에서 보는 바와 같이 수확시기별 총 산소 소비량은 모두 8월에 수확한 식물체가 11월에 수확한 식물체보다 약간 많았다. 8월에 수확한 식물체의 수생식물체별 퇴비화 40일 동안 소비된 총 산소 소비량은 줄 (3,487 mg O<sub>2</sub>/200 g) > 혼합식물체 (3,178 mg O<sub>2</sub>/200 g) > 부들 (3,143 mg O<sub>2</sub>/200 g) > 갈대 (2,904 mg O<sub>2</sub>/200 g) 순으로 줄이 가장 많았으며, 11월에 수확한 식물체도 줄 (3,251 mg O<sub>2</sub>/200 g) > 혼합식물체 (2,925 mg O<sub>2</sub>/200 g) > 부들 (2,908 mg O<sub>2</sub>/200 g) > 갈대 (2,617 mg O<sub>2</sub>/200 g) 순으로 줄이 가장 많았고, 11월에 수확한 식물체에 비하여 8월에 수확한 식물체에서 더 많았다.

퇴비화 단계별 산소 소비량은 갈대의 경우 퇴비화 초기 (0~5일)인 온도상승기에 총 산소 소비량의 약 56%가 소비되었고 최적온도가 유지되는 고온단계인 퇴비화 중기 (5~15일)에 약 26.2%, 숙성단계 (15~25일)인 퇴비화 후기에 약 13.4%, 퇴비화가 진행이 끝난 단계 (25~40일)인 부숙기에 약 4.4%가 소비되었고, 부들과 줄 및 혼합 식물체에서 거의 유사한 경향을 보였다. 퇴비화 단계별 산소 소비량 및 소비패턴은 퇴비화의 진행 정도를 알 수 있는 지표로 이용될 수 있으며, 일반적으로 미생물의 유기물 분해가 활발하게 일어나는 초기단계와 최적온도 유지기간인 고온단계에서 산소 소비량이 최대가 되어 퇴비화가 어느 정도 완료된 숙성단계에는 산소 소비량이 급격하게 감소된다. 본 연구에서는 온도 상승기인 초기와 최적온도 유지기간인 고온단계인 중기의 15일 동안에 전체 산소소비량의 약 80% 이상이 소비되고 그 이후에는 모든 식물체에서 급격히 감소되어 산소 소비량과 온도가 감소되는 40일 전후에 퇴비화가 거의 이루지는 것으로 판단된다.

Table 3-57. 수생식물체별 퇴비화 과정 중 총 산소 소비량 및 단계별 산소 소비량 (\*: Index)

식물체	수확기	총산소소비량 (mg/200g)	퇴비화 단계별 산소 소비량 (mg O <sub>2</sub> /200g)			
			초기 (0~5일)	중기 (5~15일)	후기 (15~25일)	부숙기 (25~40일)
갈대	8월	2904 (100*)	1626 (56.0)	762 (26.2)	389 (13.4)	127 (4.4)
	11월	2617 (100*)	1155 (44.1)	990 (37.8)	296 (11.3)	176 (6.7)
부들	8월	3143 (100*)	2139 (68.1)	734 (23.4)	212 (6.7)	58 (1.8)
	11월	2908 (100*)	1450 (49.9)	1240 (42.6)	152 (5.2)	66 (2.3)
줄	8월	3487 (100*)	2090 (59.9)	1117 (32.0)	196 (5.6)	84 (2.4)
	11월	3251 (100*)	1520 (46.8)	1424 (43.8)	218 (6.7)	90 (2.8)
혼합 식물체 (갈대+줄+부들) (1:1:1)	8월	3178 (100*)	1952 (61.4)	871 (27.4)	266 (8.4)	89 (2.8)
	11월	2925 (100*)	1452 (49.6)	1157 (39.6)	206 (7.0)	111 (3.8)



## 5) 소형 퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화

### 가) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 소비 패턴

#### (1) 갈대

갈대 식물체 퇴비재료 30 kg을 소형 퇴비화조에서 40일 동안 퇴비화 과정 중  $\text{CO}_2$  및  $\text{NH}_3$  발생량과 퇴비화 단계별 소비패턴 및 퇴비화조내 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-79~3-81에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중  $\text{CO}_2$  소비량을 나타내는 누적  $\text{CO}_2$  발생곡선 및 단계별  $\text{CO}_2$  발생 패턴 (Fig. 3-79)은 수확시기별로 큰 차이 없이 거의 비슷한 경향을 보였으며, 퇴비화 40일 동안 총  $\text{CO}_2$  발생량은 8월에 수확한 갈대는 약 1,085 g  $\text{CO}_2/30$  kg, 11월에 수확한 갈대는 약 1,049 g  $\text{CO}_2/30$  kg으로 별 차이가 없었다. 퇴비화 단계별  $\text{CO}_2$  발생량은 8월에 수확한 갈대의 경우 퇴비화 초기 (0~5일)인 온도상승기에 총  $\text{CO}_2$  발생량의 약 43%가 발생되었고, 최적온도가 유지되는 고온단계인 퇴비화 중기 (5~15일)에 약 30%, 숙성단계 (15~25일)인 퇴비화 후기에 약 17.3%, 퇴비화가 진행이 끝난 단계 (25~40일)인 부숙기에 약 9.9%가 발생되었고, 11월 수확한 갈대는 퇴비화 초기에 약 24%, 중기에 약 47%로 중기에 더 많았다.

퇴비화 기간 중  $\text{NH}_3$  발생량을 나타내는 누적  $\text{NH}_3$  발생곡선 및 단계별  $\text{NH}_3$  발생 패턴은 Fig. 3-80에서 보는 바와 같이  $\text{NH}_3$ 는 퇴비화 후기에 발생되기 시작하였으며, 전반적으로 8월에 수확한 갈대는 약 20일 이후에, 11월에 수확한 갈대는 30일 이후에 발생되기 시작하였다.

퇴비화 40일 동안 총  $\text{NH}_3$  발생량은 8월에 수확한 갈대의 경우 약 37.5 mg  $\text{NH}_3/30$  kg, 11월에 수확한 갈대의 경우 약 17.9 약 37.5 mg  $\text{NH}_3/30$  kg으로 매우 작았으며, 퇴비화 단계별로는 부숙기인 26~40일 사이에 전체 발생량의 약 73%가 발생되었다.

퇴비화 기간 중 반응조내 온도변화 (Fig. 3-81)는 반응조내 최고온도 도달 시기의 경우 8월에 수확한 갈대는 퇴비화 6일째에 최고온도 69.6°C에 도달하였고, 최고온도 도달시까지 발생된  $\text{CO}_2$ 량은 약 465 g  $\text{CO}_2/30$  kg이었으며, 11월에 수확한 식물체는 퇴비화 8일째에 최고온도 72°C에 도달하였고 최고온도 도달시까지 발생된  $\text{CO}_2$ 량은 약 380 g  $\text{CO}_2/30$  kg이었다. 일반적인 퇴비화 최적온도로 알려진 55~65°C를 유지한 기간은 8월에 수확한 갈대는 퇴비화 4일째에 55°C에 도달하여 퇴비화 12일째 부터 55°C이하로 감소되어 8일 동안 최적온도인 55°C 이상을 유지하여 발생된  $\text{CO}_2$ 량은 약 523 g  $\text{CO}_2/30$  kg이었다. 11월에 수확한 갈대는 퇴비화 4일째에 55°C에 도달하여 10일 동안 55°C 이상을 유지하였으며 약 523 g  $\text{CO}_2/30$  kg의  $\text{CO}_2$ 가 발생하였다.

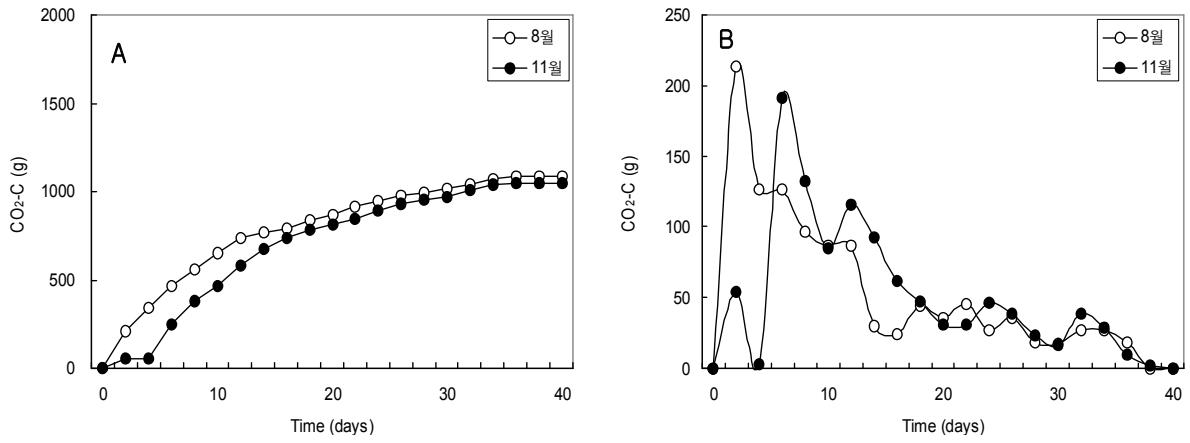


Fig. 3-79. 갈대의 퇴비화 과정 중 CO<sub>2</sub> 누적발생량 (A), 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (B).

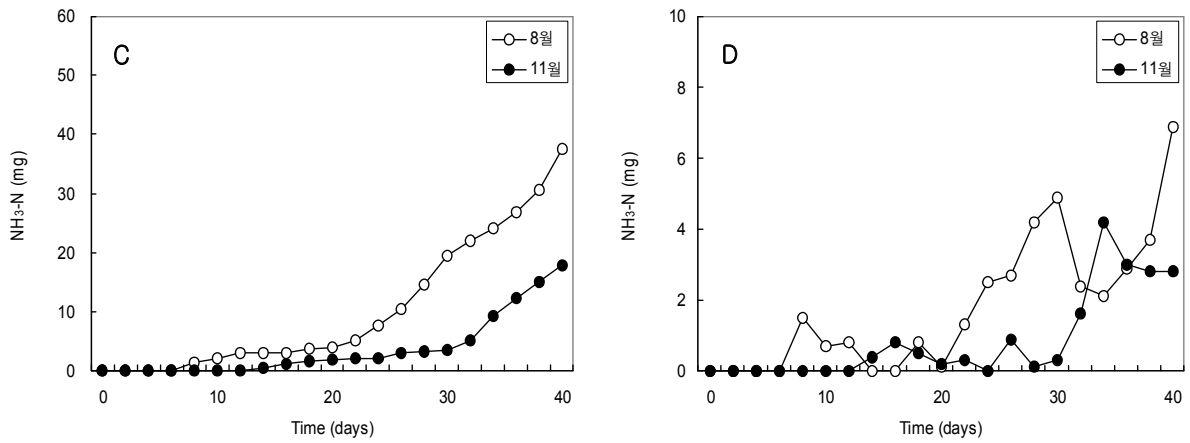


Fig. 3-80. 갈대의 퇴비화 과정 중 NH<sub>3</sub> 누적발생량 (A), 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴 (B).

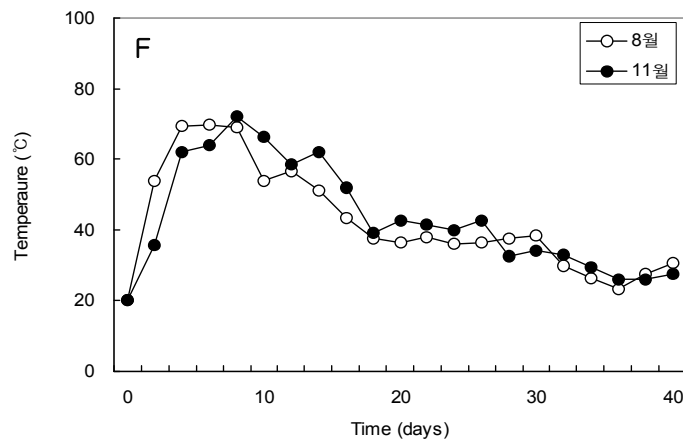


Fig. 3-81. 갈대의 퇴비화 과정 중 퇴비화조내 온도변화.

(2) 줄

줄의 퇴비화과정 중 CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub> 발생량과 퇴비화 단계별 소비패턴, 퇴비화조내 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-82~3-84에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 CO<sub>2</sub> 소비량을 나타내는 누적 CO<sub>2</sub> 발생곡선 및 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (Fig. 3-82)은 수확 시기별로 큰 차이 없이 거의 비슷한 경향을 보였으며, 퇴비화 40일 동안 총 CO<sub>2</sub> 발생량은 8월에 수확한 줄에서는 약 1,691 g CO<sub>2</sub>/30 kg, 11월에 수확한 줄에서는 약 1,567 g CO<sub>2</sub>/30 kg으로 큰 차이 없었다. 퇴비화 단계별 CO<sub>2</sub> 발생량은 8월에 수확한 줄의 경우 퇴비화 초기 (0~5일)인 온도상승기에 총 CO<sub>2</sub> 발생량의 약 35%가 발생되었고 최적온도가 유지되는 고온단계인 퇴비화 중기 (5~15일)에 약 38%, 숙성단계 (15~25일)인 퇴비화 후기에 약 13.5%, 퇴비화 진행이 끝난 단계 (25~40일)인 부숙기에 약 13.7%가 발생되었고, 11월 수확한 갈대는 퇴비화 초기에 약 33%, 중기에 약 38%가 발생되었다.

퇴비화 기간 중 NH<sub>3</sub> 발생량을 나타내는 누적 NH<sub>3</sub> 발생곡선 및 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴은 Fig. 3-83에서 보는 바와 같이 갈대와는 달리 퇴비화 중기부터 NH<sub>3</sub>가 발생되기 시작하였으며 전반적으로 8월에 수확한 줄은 약 15일 이후에, 11월에 수확한 줄은 22일 이후에 발생되기 시작하였다. 퇴비화 40일 동안 총 NH<sub>3</sub> 발생량은 8월에 수확한 줄은 약 73.9 mg NH<sub>3</sub>/30 kg, 11월에 수확한 줄은 약 53.6 mg NH<sub>3</sub>/30 kg으로 갈대에 비하여 매우 많았다.

퇴비화 기간 중 반응조내 온도변화 (Fig. 3-84)는 반응조내 최고온도 도달 시기는 8월에 수확한 줄은 퇴비화 10일째에 최고온도 75.4℃에 도달하였고 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 약 747 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었으며, 11월에 수확한 식물체도 퇴비화 10일째에 최고온도 73.7℃에 도달하였고 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 약 595 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다. 일반적인 퇴비화 최적온도로 알려진 55~65℃를 유지한 기간은 8월과 11월에 수확한 줄에서 퇴비화 4일째에 55℃에 도달하였다. 퇴비화 14일째부터 55℃이하로 감소되었으며, 10일 동안 최적온도인 55℃ 이상을 유지하여 발생된 CO<sub>2</sub>량은 각각 약 778 및 742 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다.

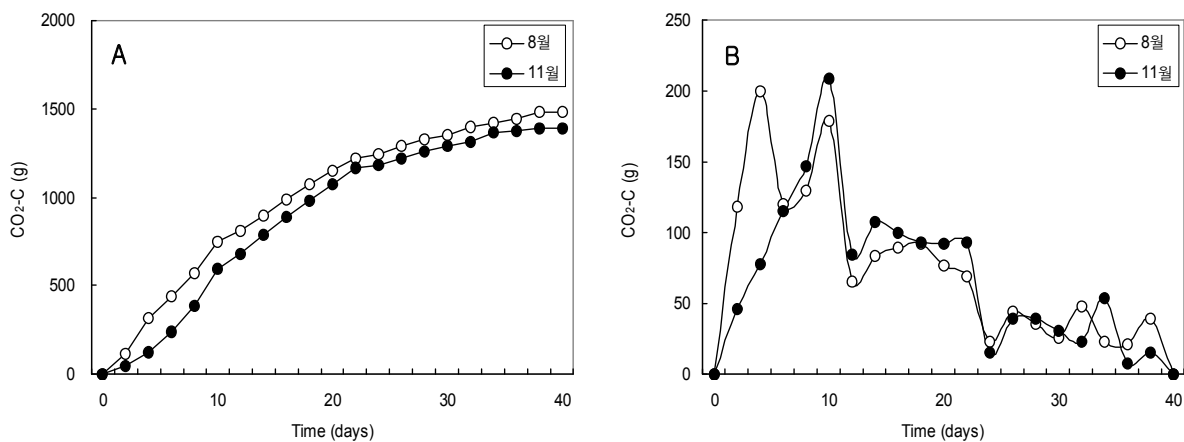


Fig. 3-82. 줄의 퇴비화 과정 중 CO<sub>2</sub> 누적발생량 (A), 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (B).

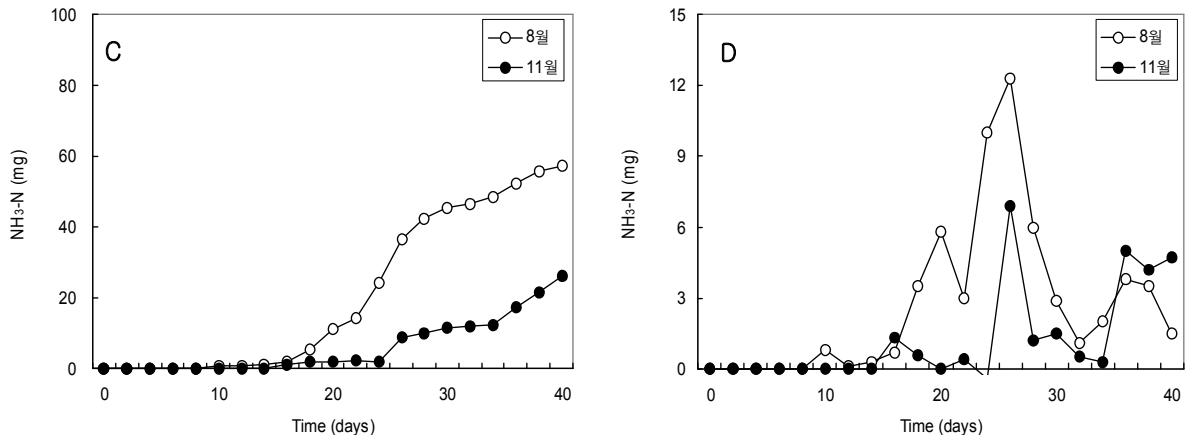


Fig. 3-83. 쯔의 퇴비화 과정 중 NH<sub>3</sub> 누적발생량 (C), 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴 (D).

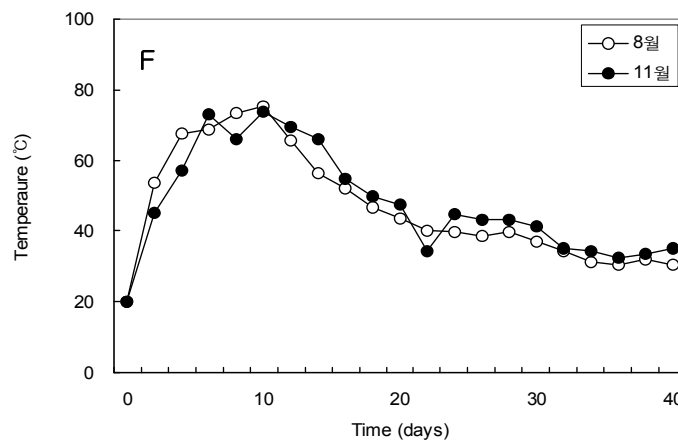


Fig. 3-84. 쯔의 퇴비화 과정 중 퇴비화조내 온도 변화.

### (3) 부들

부들의 퇴비화과정 중 CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub> 발생량과 퇴비화 단계별 소비패턴, 퇴비화조내 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-85~3-87에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 CO<sub>2</sub> 소비량을 나타내는 누적 CO<sub>2</sub> 발생곡선 및 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (Fig. 3-85)은 수확시기별로 큰 차이 없이 거의 비슷한 경향을 보였으며, 퇴비화 40일 동안 총 CO<sub>2</sub> 발생량은 8월에 수확한 부들에서는 약 1,483 g CO<sub>2</sub>/30 kg, 11월에 수확한 부들에서는 약 1,390 g CO<sub>2</sub>/30 kg으로 8월에 수확한 식물체에서 약간 많았다. 퇴비화 단계별 CO<sub>2</sub> 발생량은 8월에 수확한 부들의 경우 퇴비화 초기 (0~5일)인 온도상승기에 총 CO<sub>2</sub> 총발생량의 약 30%가 발생되었고 최적온도가 유지되는 고온 단계인 퇴비화 중기 (5~15일)에 약 37%, 숙성단계 (15~25일)인 퇴비화 후기에 약 21%, 퇴비화가 진행이 끝난 단계 (25~40일)인 부숙기에 약 13%가 발생되었고, 11월 수확한 부들은 퇴비화 초기에 약 17%, 중기에 약 47%가 발생되었다.

퇴비화 기간 중 NH<sub>3</sub> 발생량을 나타내는 누적 NH<sub>3</sub> 발생곡선 및 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴은 Fig. 3-86에서 보는 바와 같이 갈대와는 달리 퇴비화 초기부터 NH<sub>3</sub>가 발생되기 시작하였으며

전체적으로 8월에 수확한 부들은 약 7일 이후에, 11월에 수확한 부들은 12일 이후에 발생되기 시작하였다. 퇴비화 40일 동안 NH<sub>3</sub> 총발생량은 8월에 수확한 부들은 약 57.3 mg NH<sub>3</sub>/30 kg, 11월에 수확한 부들은 약 26.2 mg NH<sub>3</sub>/30 kg으로 8월에 수확한 부들에서 훨씬 많았다.

퇴비화 기간 중 반응조내 온도변화 (Fig. 3-87)는 반응조내 최고온도 도달 시기는 8월에 수확한 부들은 퇴비화 4일째에 최고온도 75℃, 11월에 수확한 부들은 6일째에 72℃에 도달하여 다른 식물체에 비하여 도달시간이 빨랐으며 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 각각 약 452 및 510 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다. 일반적인 퇴비화 최적온도로 알려진 55~65℃를 유지한 기간은 8월에 수확한 부들은 약 8일, 11월에 수확한 부들은 약 6일이었으며, 발생된 CO<sub>2</sub>량은 각각 약 1,000 및 856 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다.

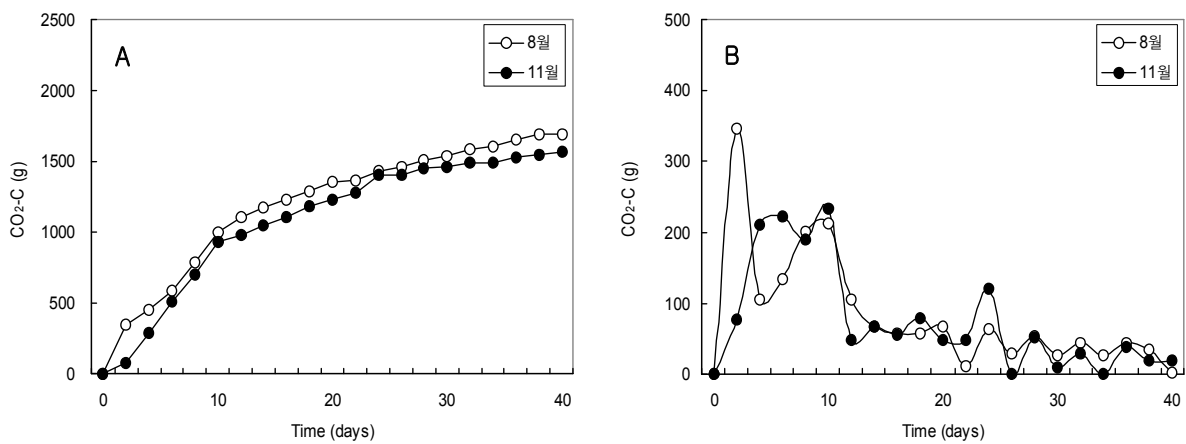


Fig. 3-85. 부들의 퇴비화 과정 중 CO<sub>2</sub> 누적발생량 (A), 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (B).

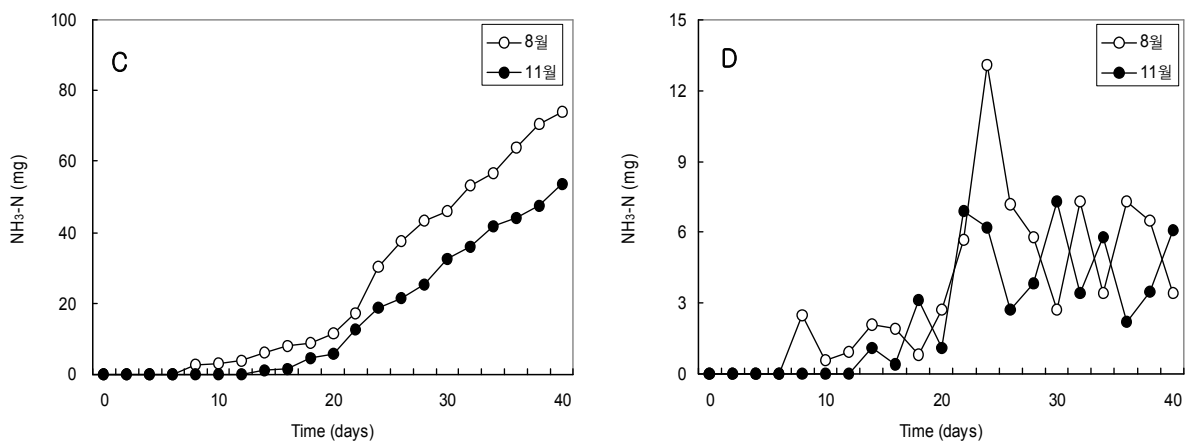


Fig. 3-86. 부들의 퇴비화 과정 중 NH<sub>3</sub> 누적발생량 (C), 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴 (D).

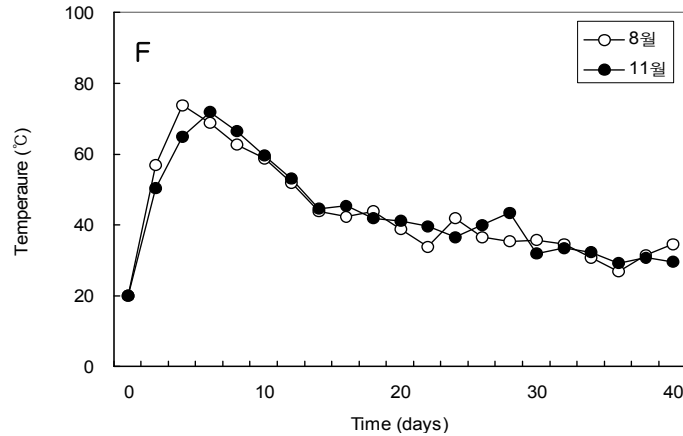


Fig. 3-87. 부들의 퇴비화 과정 중 퇴비화조내 온도변화.

(4) 혼합 식물체 (갈대+줄+부들, 1 : 1 : 1)

수확시기별 갈대, 줄, 부들 식물체를 동일 중량비 (갈대+줄+부들, 1 : 1 : 1)로 혼합한 식물체의 퇴비화과정 중 CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub> 발생량과 퇴비화 단계별 소비패턴, 퇴비화조내 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-88 및 3-89에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 CO<sub>2</sub> 소비량을 나타내는 누적 CO<sub>2</sub> 발생곡선 및 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (Fig. 3-88)은 수확시기별로 큰 차이 없이 거의 비슷한 경향을 보였으며, 퇴비화 40일 동안 총 CO<sub>2</sub> 발생량은 8월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 1,466 g CO<sub>2</sub>/30 kg, 11월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 1,494 g CO<sub>2</sub>/30 kg으로 11월에 수확한 혼합 식물체에서 약간 많았다. 퇴비화 단계별 CO<sub>2</sub> 발생량은 8월에 수확한 혼합 식물체의 경우 퇴비화 초기 (0~5일)인 온도상승기에 총 CO<sub>2</sub> 발생량의 약 39%가 발생되었고 최적온도가 유지되는 고온단계인 퇴비화 중기 (5~15일)에 약 33%, 숙성단계 (15~25일)인 퇴비화 후기에 약 22%, 퇴비화가 진행이 끝난 단계 (25~40일)인 부숙기에 약 7%가 발생되었고, 11월 수확한 혼합 식물체에서는 퇴비화 초기에 약 15%, 중기에 약 49%가 발생되었다.

퇴비화 기간 중 NH<sub>3</sub> 발생량을 나타내는 누적 NH<sub>3</sub> 발생곡선 및 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴은 Fig. 3-89에서 보는 바와 같이 8월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 17일 이후에, 11월에 수확한 혼합 식물체에서는 20일 이후에 발생되기 시작하였다. 퇴비화 40일 동안 총 NH<sub>3</sub> 발생량은 8월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 53.4 mg NH<sub>3</sub>/30 kg, 11월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 30 mg NH<sub>3</sub>/30 kg으로 8월에 수확한 부들에서 훨씬 많았다.

퇴비화 기간 중 반응조내 온도변화 (Fig. 3-90)는 반응조내 최고온도 도달 시기는 8월 및 11월에 수확한 혼합 식물체 모두 퇴비화 8일째에 최고온도 66.4°C 및 69.7°C에 도달하였으며 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 각각 약 644 및 521 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다. 일반적인 퇴비화 최적온도로 알려진 55~65°C를 유지한 기간은 8월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 10일, 11월에 수확한 혼합 식물체에서는 약 8일이었으며 이 기간동안 발생된 CO<sub>2</sub>량은 각각 약 742 및 748 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다.

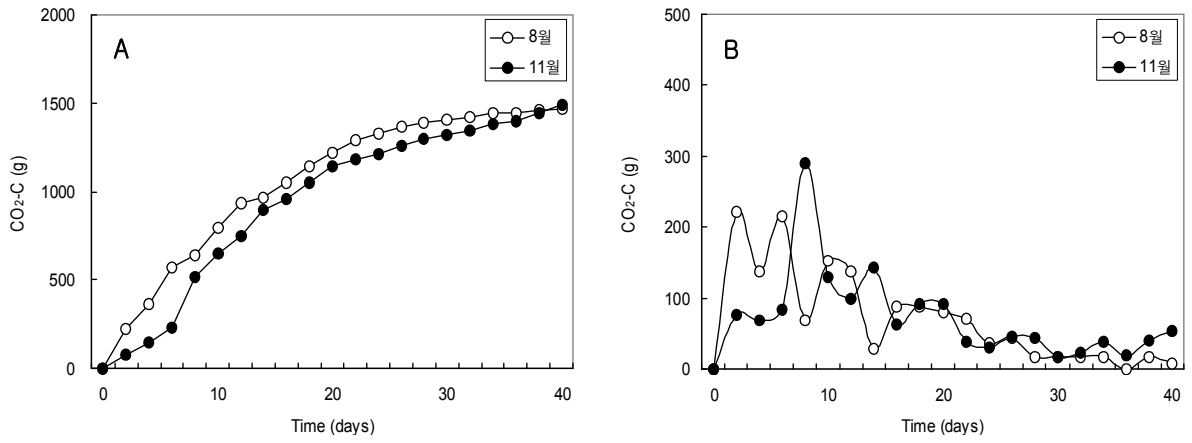


Fig. 3-88. 혼합 식물체의 퇴비화 과정 중 CO<sub>2</sub> 누적발생량 (A), 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (B).

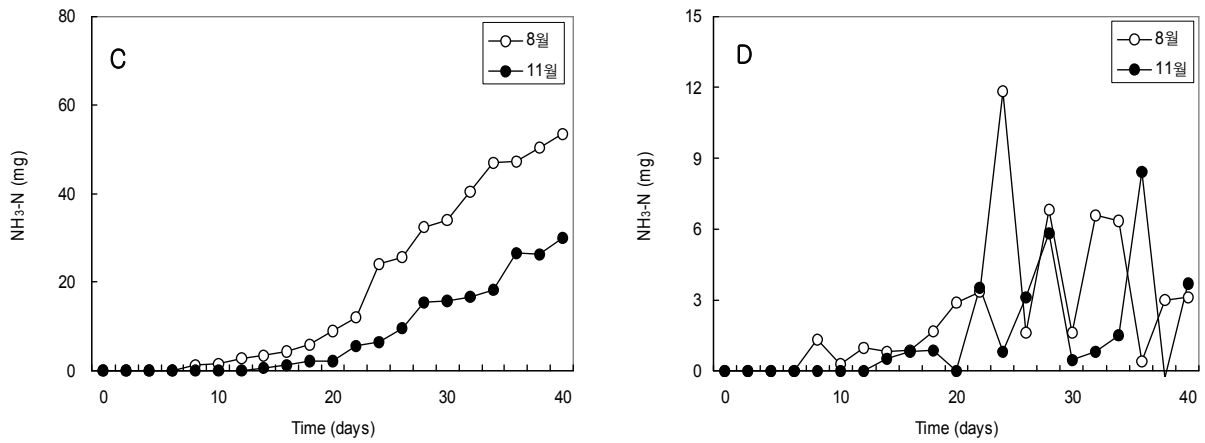


Fig. 3-89. 혼합 식물체의 퇴비화 과정 중 NH<sub>3</sub> 누적발생량 (C), 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴 (D).

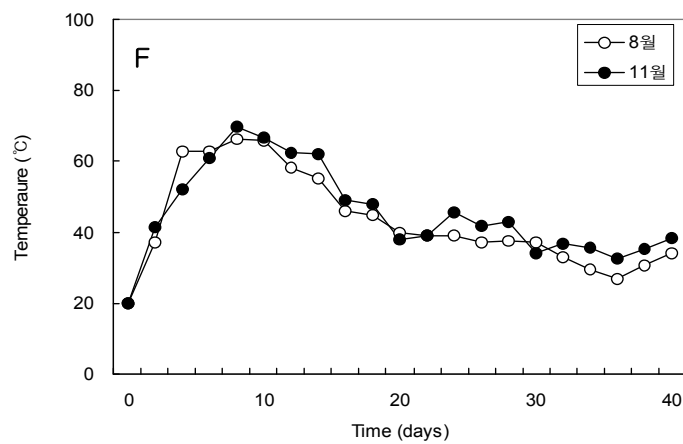


Fig. 3-90. 혼합 식물체의 퇴비화 과정 중 퇴비화조내 온도변화.

나) 수생식물체 퇴비의 물리·화학적 특성

소형 퇴비화조를 이용하여 생산된 수생식물체별 퇴비의 물리·화학적 특성과 중금속 함량을 조사한 결과는 Fig. 3-91 및 Table 3-58~3-59에서 보는 바와 같다. 수생식물체별 퇴비화 전후의 외형적인 형상은 Fig. 3-91에서 보는 바와 같이 상당히 안정적으로 퇴비화가 진행되었음을 알 수 있다. 생산된 퇴비의 물리·화학적 특성 (Table 3-58)을 보면 수분함량은 전반적으로 29.6~41.6% 범위, C/N율은 16.2~19.2 범위, 유기물함량은 36.5~43.8%범위로 우리나라 퇴비부산물 비료 공정 규격 기준을 충족하였다. 그리고 토양처리시 작물생육에 중요한 비료성분인 질소 (N), 인산 ( $P_2O_5$ ), 칼리 ( $K_2O$ ), 칼슘 (CaO), 고토 (MgO)도 비교적 많이 함유되어 있었다.

생산된 퇴비내에 함유된 퇴비부산물 비료 공정 규격 유해성분 기준에 들어있는 8종의 중금속 함량 (Table 3-59)을 보면 수생식물체별 생산된 퇴비의 유해 중금속 8종의 전반적인 평균 농도범위는 Hg는 검출되지 않았고 Cr은 28.85~10.92 mg L<sup>-1</sup> 범위, Zn은 38.55~57.81 mg L<sup>-1</sup> 범위, Cu는 36.85~42.57 mg L<sup>-1</sup>범위, As는 0.32~1.23 mg L<sup>-1</sup>범위, Ni는 0.15~0.87 mg L<sup>-1</sup>범위, Cd는 0.17~0.38 mg L<sup>-1</sup>범위, Pb는 0.32~1.23 mg L<sup>-1</sup>범위로 우리나라 퇴비부산물 비료 공정 규격 기준보다 훨씬 낮았다.

따라서 본 연구에서 소형 퇴비화조를 이용하여 생산된 수생식물체별 퇴비는 As, Cd, Hg, Pb, Cu, Cr, Ni 및 Zn의 함량이 퇴비 부산물 비료공정의 양질퇴비인 그린퇴비의 기준보다 훨씬 낮았으며, 수분함량, C/N율도 그린퇴비 기준을 충족하였다. 그리고 작물의 중요한 비료성분인 질소 (N), 인산 ( $P_2O_5$ ), 칼리 ( $K_2O$ ), 칼슘 (CaO) 및 고토 (MgO) 등도 비교적 많이 함유되어 있는 양질의 퇴비인 것으로 판단된다.



Fig. 3-91. 수생식물체별 퇴비화 전·후의 외형적인 형상.



Table 3-58. 수생식물체 퇴비의 물리·화학적 특성

수생식물	수확 시기	C/N	수분	유기물 함량	T-N	T-P	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
갈대	8월	18.7	33.4	41.6	1.29	1.35	1.94	0.24	0.21	0.13
	11월	18.5	29.6	43.8	1.37	1.14	2.42	0.37	0.29	0.24
부들	8월	16.5	41.6	36.5	1.28	1.42	2.29	1.25	0.25	0.43
	11월	19.1	35.6	44.8	1.36	1.46	1.89	1.17	0.33	0.39
줄	8월	18.2	36.8	36.8	1.17	1.55	1.70	0.83	0.18	0.52
	11월	16.2	34.2	39.5	1.41	1.33	2.02	0.69	0.26	0.49
혼합식물체	8월	16.3	37.6	38.6	1.37	1.28	1.87	0.72	0.19	0.38
	11월	18.4	41.5	41.5	1.31	1.45	1.92	0.86	0.27	0.51

Table 3-59. 수생식물체 퇴비 중 중금속 함량

수생 식물	시기	Cr	Zn	Cu	Cd	Pb	As	Ni	Hg
부들	8월	10.56	48.65	42.45	ND	1.36	0.32	0.42	ND
	11월	10.92	57.81	41.10	0.17	0.34	ND	0.15	ND
갈대	8월	8.91	52.63	39.99	ND	0.21	ND	ND	ND
	11월	9.35	48.96	42.57	ND	ND	1.23	ND	ND
혼합식물체	8월	10.25	38.55	37.30	0.38	0.78	1.05	0.87	ND
	11월	8.85	39.48	36.85	ND	ND	1.21	ND	ND

6) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토

돈분에 수분조절제로서 톱밥과 혼합식물체를 첨가한 퇴비재료 30 kg을 소형 퇴비화조에서 40일 동안 퇴비화시키면서 퇴비화과정 중 CO<sub>2</sub> 및 NH<sub>3</sub> 발생량과 퇴비화 단계별 소비패턴, 퇴비화조내 온도변화를 조사한 결과는 Fig. 3-92~3-94에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 CO<sub>2</sub> 소비량을 나타내는 누적 CO<sub>2</sub> 발생곡선 및 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (Fig. 3-92)은 수분조절제로 톱밥과 혼합식물체 사용간에 차이가 있었으며, 퇴비화 40일 동안 총 CO<sub>2</sub> 발생량은 톱밥을 사용한 퇴비화조에서 약 706 g CO<sub>2</sub>/30 kg, 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서 약 926 g CO<sub>2</sub>/30 kg으로 수분조절제로 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서 많았다. 퇴비화 단계별 CO<sub>2</sub> 발생량은 톱밥사용의 경우 초기 (0~5일)인 온도상승기에 총 CO<sub>2</sub> 발생량의 약 43%가 발생되었고 최적온도가 유지되는 고온단계인 퇴비화 중기 (5~15일)에 약 49%, 숙성단계 (15~25일)인 퇴비화 후기에 약 4.7%, 퇴비화가 진행이 끝난 단계 (25~40일)인 부숙기에 약 4.3%가 발생되었고, 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서는 퇴비화 초기에 약 64%, 중기에 약 20%로 초기에 훨씬 많았다.

퇴비화 기간 중 NH<sub>3</sub> 발생량을 나타내는 누적 NH<sub>3</sub> 발생곡선 및 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴은 Fig. 3-93에서 보는 바와 같이 NH<sub>3</sub>는 퇴비화 후기에 발생되기 시작하였으며, 퇴비화 40일 동안 총 NH<sub>3</sub> 발생량은 톱밥에서 약 31.1 mg NH<sub>3</sub>/30 kg, 혼합식물체에서 약 61 mg NH<sub>3</sub>/30 kg

으로 톱밥보다 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서 많았으며, 퇴비화 단계별로는 부숙기인 26~40일 사이에 톱밥은 전체 발생량의 약 82%, 혼합식물체에서는 약 63%가 발생되었다.

퇴비화 기간 중 반응조내 온도변화 (Fig. 3-94)는 반응조내 최고온도 도달 시기는 톱밥에서는 퇴비화 6일째에 최고온도 68℃에 도달하였고 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 약 300 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었으며, 혼합식물체에서는 퇴비화 8일째에 최고온도 66℃에 도달하였고 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 약 629 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다. 일반적인 퇴비화 최적온도로 알려진 55~65℃를 유지한 기간은 수분조절제로 톱밥을 사용한 퇴비화조에서는 약 12일, 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서는 약 10일이었으며 발생된 CO<sub>2</sub>량은 각각 약 547 및 487 g CO<sub>2</sub>/30 kg이었다.

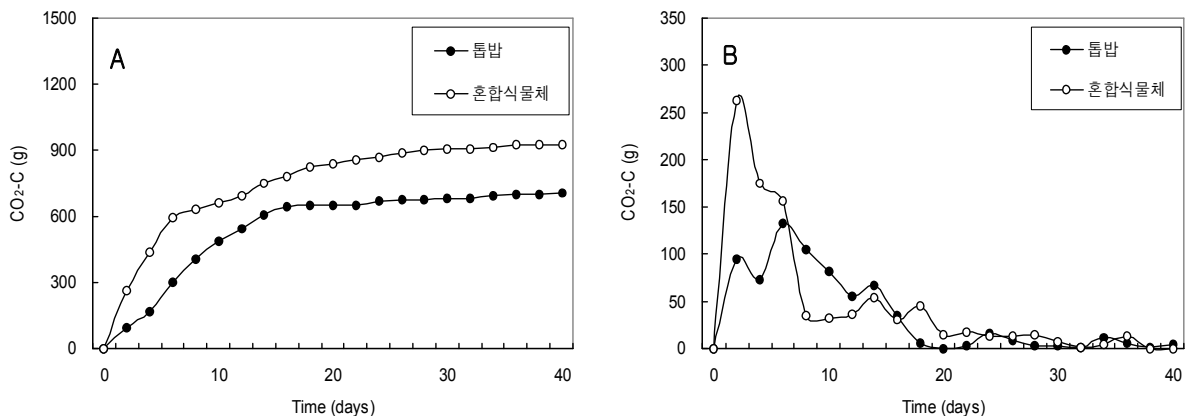


Fig. 3-92. 수분조절제로 톱밥 및 혼합식물체를 사용한 돈분퇴비 퇴비화 과정 중 CO<sub>2</sub> 누적발생량 (A), 단계별 CO<sub>2</sub> 발생 패턴 (B).

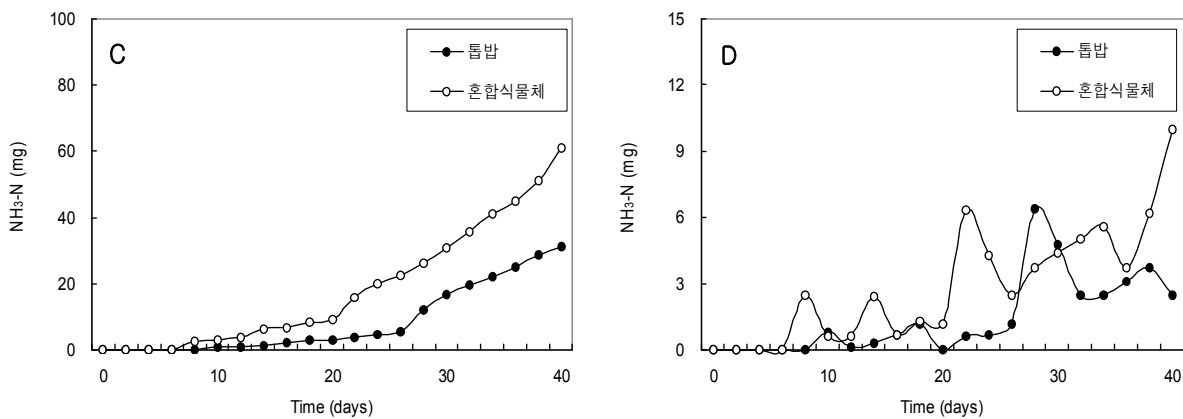


Fig. 3-93. 수분조절제로 톱밥 및 혼합식물체를 사용한 돈분퇴비 퇴비화 과정 중 NH<sub>3</sub> 누적발생량 (C), 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴 (D).

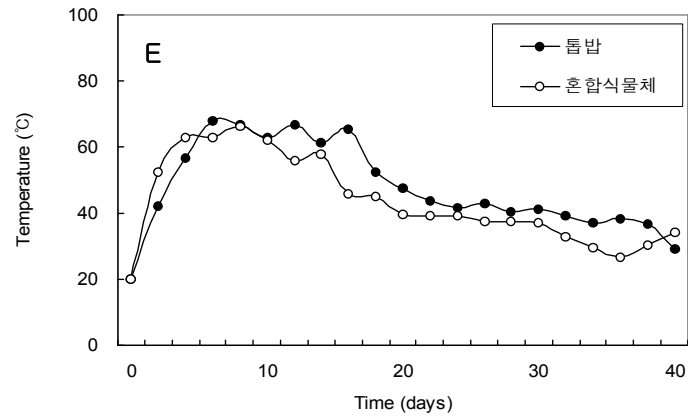


Fig. 3-94. 수분조절제로 톱밥 및 혼합식물체를 사용한 돈분퇴비 퇴비화 과정 중 퇴비화조내 온도 변화.

7) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화

수생식물체를 이용하여 퇴비단공법을 사용한 뒤집기 퇴비단공법 전경은 Fig. 3-95와 같고 퇴비의 시기별 특성은 Table 3-60에서 보는 바와 같다.



Fig. 3-95. 뒤집기 퇴비단공법 전경.

Table 3-60. 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 퇴비 특성

조사시기	수분함량	유기물	T-C	T-N	C/N	비고
	----- (%) -----					
09.12.31	36.89	41.97	17.21	1.41	17.21	
10.01.12	33.72	34.10	14.93	1.33	14.93	CO <sub>2</sub> : 3.2-3.6 (%) NH <sub>3</sub> : 280-300 (ppm)
10.01.22	39.08	39.05	22.65	1.51	14.96	CO <sub>2</sub> : 3.4-3.6 (%) NH <sub>3</sub> : 280-300 (ppm)
10.03.24	35.77	28.41	16.48	1.35	12.21	CO <sub>2</sub> : 0.6-0.7 (%) NH <sub>3</sub> : 80-100 (ppm)

다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구

1) 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율 조사

수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율은 Fig. 3-96에서 보는 바와 같다. 수생식물여과조와 자연정화공법을 연계하여 수처리 효율을 조사한 결과 1차 수생식물여과조 처리수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 22, 52, 16 및 45%이었다. 2차 호기성조 처리수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 62, 75, 41 및 77%였으며, 3차 혐기성조 처리수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 83, 89, 63 및 87%이었다.

이와 같이 수생식물여과조를 전처리조로 활용한다면 실제 축산폐수처리장에 축산폐수를 1차 여과한 후 일부분의 질소 및 인 등의 영양성분들이 제거된 1차 처리수를 소형 축산폐수처리장치에 유입시킬 수 있어 질소 및 인 처리효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 이들 수생식물은 퇴비화에 의해 자원재활용이 가능하게 될 것으로 판단된다. 또한 수생식물에 의해 전처리된 축산폐수는 질소와 인 등의 영양염류의 농도와 유입량이 크게 줄어들어 축산폐수처리장에서 오염물질 부하량을 감소시키는 효과가 있어 축산폐수처리장의 수명연장에도 도움이 될 것으로 판단된다.

따라서 축산폐수처리장에서 성장한 수생식물을 재활용한다면 축산폐수 전처리를 통한 수처리 효율 향상이 가능할 것으로 판단되며 현장 축산폐수처리를 위한 전처리 방법으로 적용가능성이 높을 것으로 판단되어진다.

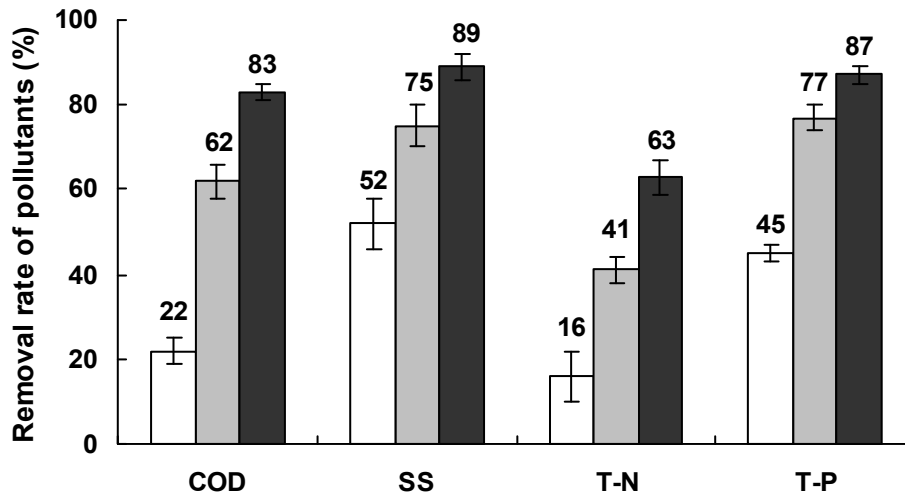


Fig. 3-96. 수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치의 처리효율.

- : 1<sup>st</sup> treatment (Filtration bed),
- (light gray) : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment (Aerobic bed),
- (dark gray) : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment (Anaerobic bed).

#### 2) 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 수처리 효율 조사

활성슬러지조와 연계된 자연정화공법의 수처리 효율은 Fig. 3-97에서 보는 바와 같다. 활성슬러지와 자연정화공법을 연계하여 수처리 효율을 조사한 결과 1차 활성슬러지조 처리수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 63, 72, 53 및 51%이었다. 1차 처리된 후 2차 호기성조 처리수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 89, 88, 68 및 88%였으며, 2차 처리된 후 3차 혐기성조 처리수에서 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 96, 95, 86 및 92%이었다.

이와 같이 활성슬러지조를 전처리조로 활용한다면 실제 축산폐수처리장에 축산폐수를 1차 여과한 후 일부분의 질소 및 인 등의 영양성분들이 제거된 1차 처리수를 소형 축산폐수처리장치에 유입시킬 수 있어 질소 및 인 처리효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 활성슬러지조에 의해 전처리된 축산폐수는 질소와 인 등의 영양염류의 농도가 크게 줄어들어 축산폐수처리장에서 오염물질 부하량을 감소시키는 효과가 있어 축산폐수처리장의 수명연장에도 도움이 될 것으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수처리장치에서 수생식물여과조와 활성슬러지조를 동시에 활용한다면 축산폐수를 보다 안정적으로 처리할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 현장에 설계 및 시공될 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장은 자연정화공법의 전처리와 자원의 재활용을 위해서 수생식물여과조와 활성슬러지조를 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

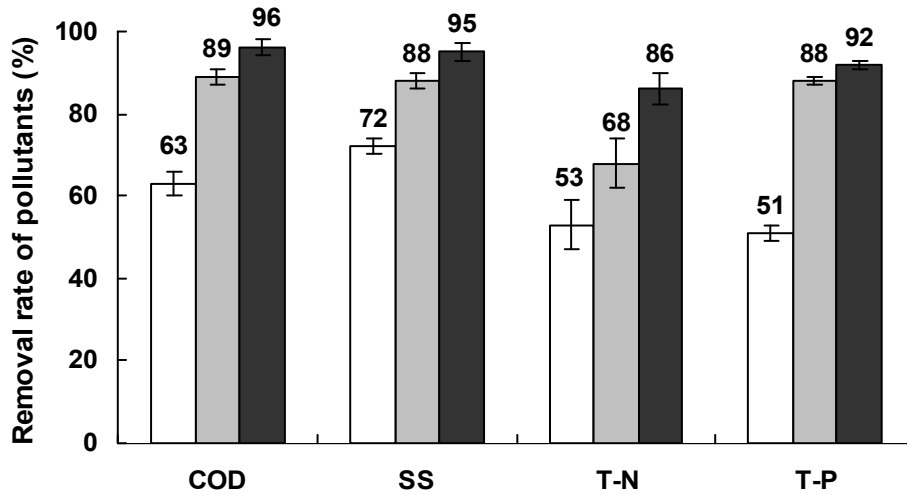


Fig. 3-97. 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치의 처리효율.

- : 1<sup>st</sup> treatment (Activated sludge bed),
- (light) : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment (Aerobic bed),
- (dark) : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment (Anaerobic bed).

## 2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율

가) 축산폐수 처리시일에 따른 수처리 효율

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD의 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-98에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 COD는 10,246~12,101 mg L<sup>-1</sup>범위로 처리시일에 따라 다소 편차가 있었으나 큰 차이는 없었다. 이러한 편차는 현장 축산폐수처리장의 집수조 내 부유물질 및 침전물 등의 유입에 의한 것으로 판단된다.

본 수생식물여과조-활성슬러지조-인공습지 조합형 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD 처리효율은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 안정화되는 경향으로서 축산폐수처리장 운전 1~2개월까지는 초기 안정화를 위해 적은 양의 축산폐수를 유입시켰으며, 이로 인해 안정적인 COD 처리가 가능하였으나 운전 3개월 후에 많은 양의 축산폐수를 유입시켰으며, 이로 인하여 1차 및 2차 처리조에서의 COD가 다소 높게 배출되었으나 3차 처리조 이후부터는 다시 안정적으로 처리되었다. 현장 축산폐수처리장 운전 4개월 이후부터는 모든 조건에서 축산폐수처리장내 미생물과 수생식물의 활착으로 인해 안정적인 COD 처리가 가능하였다.

현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 수생식물여과조 처리수의 COD는 5,798~9,451 mg L<sup>-1</sup> 범위로 축산폐수 원수에 비해 약간 감소하는 경향이었고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 활성슬러지조 처리수의 COD는 1,012~2,201 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 처리수에 비해 COD가 급격히 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 호기성조 처리수의 COD는 212~791 mg L<sup>-1</sup>범위로 COD가 급격히 감소하였고, 3차 처리된 다음 4차 처리인 혐기성조 I 처리수의 COD는

101~346 mg L<sup>-1</sup>범위로 3차 처리수에 비해 COD가 약간 감소하였으며, 4차 처리된 다음 5차 처리인 혐기성조 II 처리수의 COD는 26.4~346 mg L<sup>-1</sup>범위로 최종방류수에서 안정적으로 COD가 처리되었다. 특히 COD는 2차 처리인 활성슬러지조와 3차 처리인 호기성조를 통과하면서 급격하게 감소되었다. 이는 활성슬러지조에서 폭기시설과 호기성조의 통기관에 의한 산소공급으로 인해 이들 조 전체에서 호기성 미생물에 충분한 산소를 공급함으로써 대부분의 유기물이 분해되었기 때문으로 사료된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD 처리 효율을 조사한 결과 COD가 처리장내에 유입되는 축산폐수가 고농도임에도 불구하고 전반적으로 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 COD를 매우 안정적으로 처리하였다. 따라서 본 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 축산농가에서 배출되는 고농도 COD를 함유한 축산폐수 처리가 가능할 것으로 판단된다.

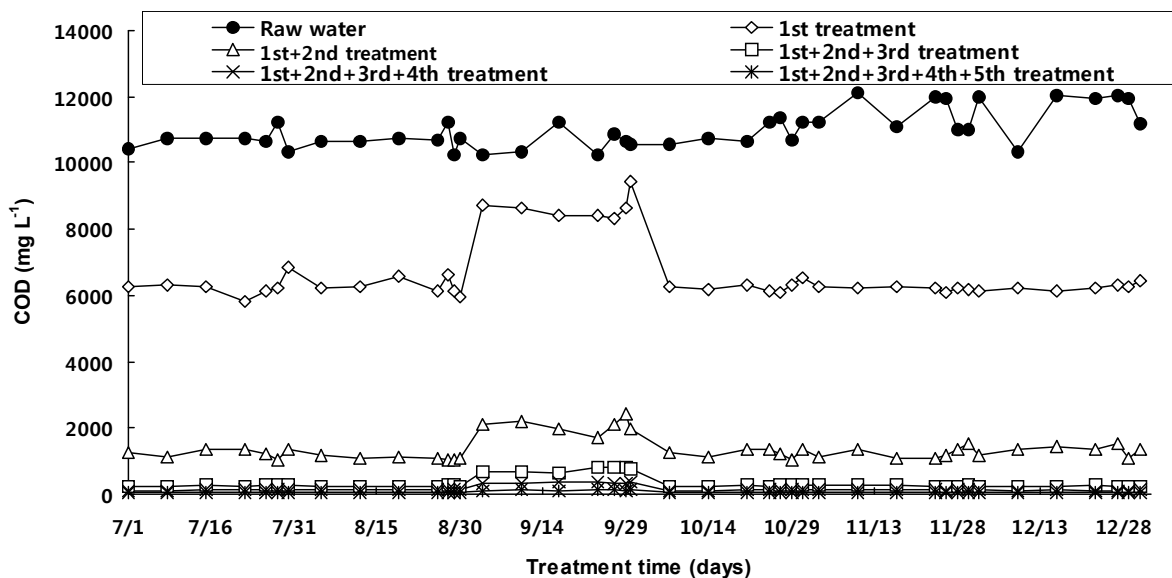


Fig. 3-98. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD 함량변화.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 SS의 함량변화를 조사한 결과는 Fig. 3-99에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 SS 함량은 10,324~13,240 mg L<sup>-1</sup>범위로 처리시일에 따라 다소 편차가 있었으나 큰 차이는 없었다. 이러한 편차는 축산폐수 중 축분의 함량차이에 의한 것으로 판단된다.

본 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수의 처리시일에 따른 SS 처리효율은 축산폐수의 처리시일에 따라 별 차이 없이 안정적으로 처리되는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 수생식물여과조 처리수의 SS 함량은 4,153~6,845 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 약간 감소하는 경향이였고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 활성슬러지조 처리수의 SS 함량은 897~2,301 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 처리수에 비해 SS 함

량이 급격히 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 호기성조 처리수의 SS 함량은 212~987 mg L<sup>-1</sup>으로 2차 처리조인 활성슬러지조 이후 더욱 낮게 처리되었고, 3차 처리된 다음 4차 처리인 혐기성조 I 처리수의 SS 함량은 101~346 mg L<sup>-1</sup>범위로 3차 처리수에 비해 SS 함량이 약간 감소하였으며, 4차 처리된 다음 5차 처리인 혐기성조 II 처리수의 SS 함량은 21.8~125 mg L<sup>-1</sup>범위로 안정적인 SS 처리가 가능하였다. 특히 SS는 모든 조에서 안정적인 처리효율을 보였는데, 이는 현장 축산폐수처리장에서 SS는 인공습지내에서는 주로 수생식물 및 여재에 의한 여과가 주된 처리이기 때문이다. 그러나 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리되는 것으로 알려져 있다 (Kim, 2000; Jo, 2003).

이상의 결과를 미루어 볼 때 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 고농도의 SS가 처리장내에 유입됨에도 불구하고 전반적으로 매우 안정적으로 처리되었다. 따라서 본 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 축산농가에서 배출되는 고농도의 SS가 함유된 축산폐수 처리가 가능할 것으로 판단된다.

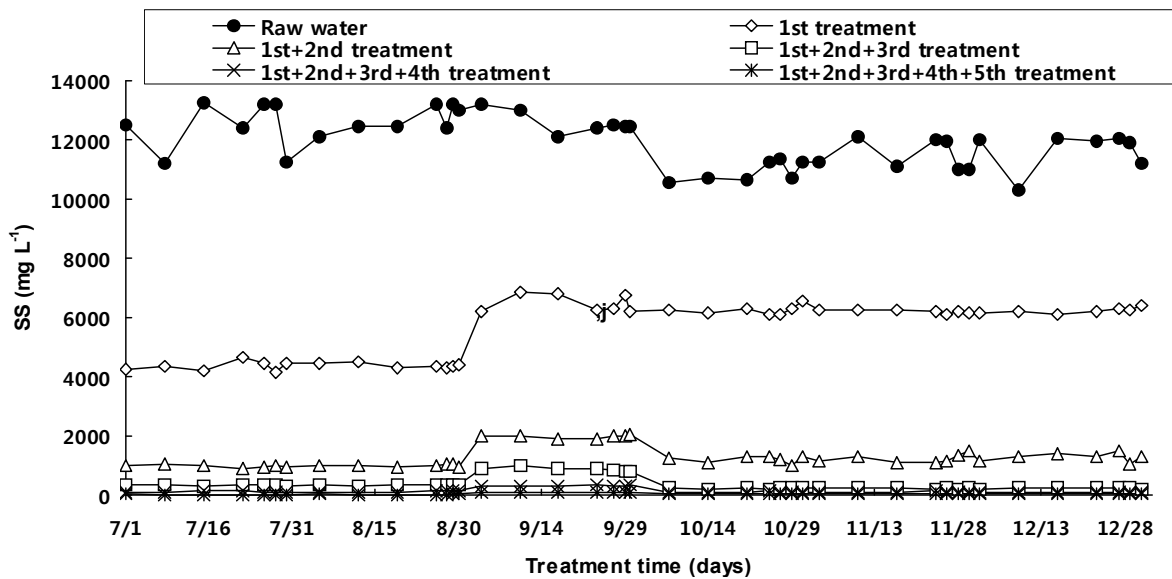


Fig. 3-99. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 SS 함량변화.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 함량변화를 조사한 결과는 Fig. 3-100에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에 유입된 축산폐수 원수의 T-N 함량은 4,987~6,500 mg L<sup>-1</sup>로 처리시일에 따라 다소 편차가 있었다. 이러한 편차는 현장 축산폐수처리장에 유입되는 축산폐수 중 부유물질의 함량 차이에 의한 것으로 판단된다.

본 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 처리효율은 축산폐수 처리시일



이 경과할수록 점점 안정화되는 경향으로서 축산폐수처리장 운전 초기 낮은 부하량으로 인해 안정적인 T-N 처리가 가능하였으나, 운전 3개월 후에 높은 부하량으로 인하여 일시적으로 1차 및 2차 처리조에서의 T-N 함량이 다소 높았으나, 3차 처리조 이후부터는 다시 안정적인 T-N 처리가 가능하였다. 현장 축산폐수처리장에서 운전 4개월 이후부터는 축산폐수처리장내 수생식물의 활착으로 인해 안정적인 T-N 처리가 가능하였으며, 처리장내에서 미생물에 의한 질산화와 탈질에 의해 질소가 안정적으로 처리되었다.

현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 수생식물여과조 처리수의 T-N 함량은 3,015~4,651 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 약간 감소하였고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-N 함량은 587~1,545 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 처리수에 비해 T-N 함량이 급격히 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 호기성조 처리수의 T-N 함량은 136~865 mg L<sup>-1</sup>범위로 이전 처리에 비해 더욱더 낮게 처리되었다. 3차 처리된 다음 4차 처리인 혐기성조 I 처리수의 T-N 함량은 62~342 mg L<sup>-1</sup>범위로 3차 처리수에 비해 T-N 함량이 더욱더 감소하였으며, 4차 처리된 다음 5차 처리인 혐기성조 II 처리수의 T-N 함량은 31.2~165 mg L<sup>-1</sup>범위로 최종방류수에서 안정적인 T-N 처리가 가능하였다. 특히 T-N은 3차, 4차 및 5차 처리조를 통과하면서 안정적인 처리가 가능하였다. 일반적으로 축산폐수 중 대부분의 질소는 NH<sub>4</sub>-N의 형태로서 인공습지에서 생물학적 탈질에 의해 질소가 처리되기 위해서는 호기성조에서 암모니아성 질소를 질산화시키는 기작이 필요하고, 이를 다시 혐기성조에서 N<sub>2</sub>O와 N<sub>2</sub>로 탈질시키는 기작이 필요한 것으로 알려져 있다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 고농도의 T-N이 함유된 축산폐수를 안정적으로 처리할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 축산농가에서 배출되는 고농도의 T-N이 함유된 축산폐수를 처리하기에 적합한 것으로 사료된다.

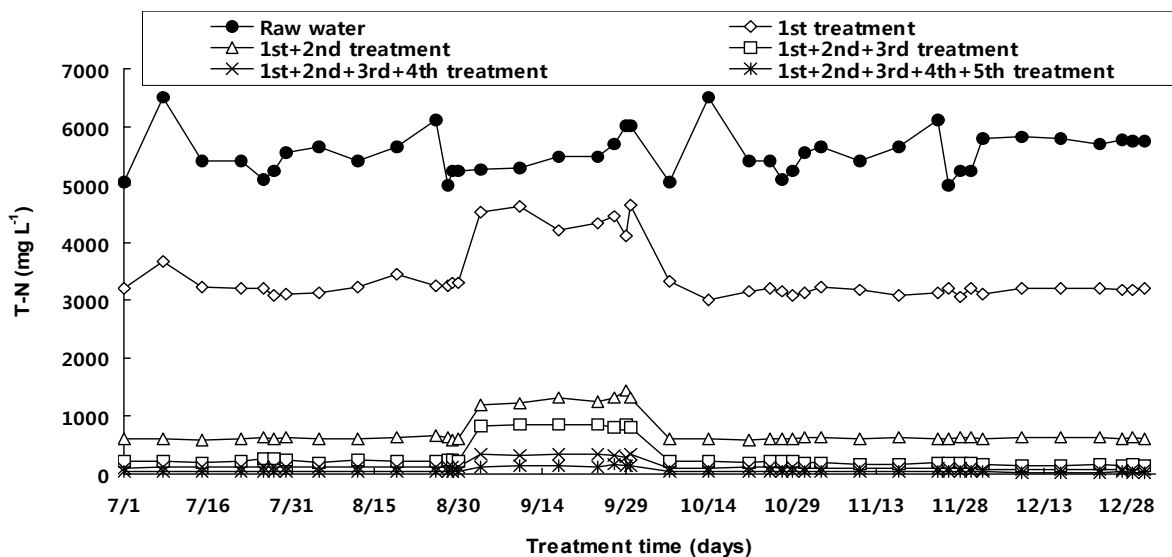


Fig. 3-100. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 함량변화.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 함량변화를 조사한 결과는 Fig. 3-101에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 T-P 함량은 694~843 mg L<sup>-1</sup>로 처리시일에 따라 부유물질이나 혐잡물의 유입으로 인해 다소 편차가 있었으나 큰 차이는 없었다.

본 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수처리 시일에 따른 T-P 처리효율은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 점점 높은 처리효율을 보이면서 안정적인 처리가 가능하였다. 축산폐수처리장은 운전 초기에는 낮은 부하량 유입시 안정적인 T-P 처리가 가능하였으나, 높은 부하량 유입시 1차 및 2차 처리조에서의 T-P 함량이 다소 높았으나, 3차 처리조 이후부터는 다시 안정적인 처리가 가능하였다. 현장 축산폐수처리장에서 운전 4개월 이후부터는 축산폐수처리장내 미생물과 수생식물의 활착으로 인해 안정적인 T-P 처리가 가능하였다.

현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 수생식물여과조 처리수의 T-P 함량은 210~461 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 약간 감소하는 경향이었고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-P 함량은 71~197 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 처리수에 비해 T-P 함량이 급격히 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 호기성조 처리수의 T-P 함량은 11~101 mg L<sup>-1</sup>범위로 유입원수에 비해 큰 폭으로 감소되었고, 3차 처리된 다음 4차 처리인 혐기성조 I 처리수의 T-P 함량은 2~27 mg L<sup>-1</sup>범위로 3차 처리수에 비해 T-P 함량이 더욱더 낮게 배출되었으며, 4차 처리된 다음 5차 처리인 혐기성조 II 처리수의 T-P 함량은 0.2~13.1 mg L<sup>-1</sup> 범위로 안정적인 T-P 처리가 가능하였다. 특히 본 처리장에서 2차 처리인 활성슬러지조에서 매우 높은 처리효율로 T-P가 처리되었다.

따라서 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 처리효율을 조사한 결과 본 현장 축산폐수처리장은 고농도의 T-P 처리가 가능하였고, 최종방류수는 유입원수 함량에 따라 큰 차이 없이 안정적인 처리가 가능하였다.

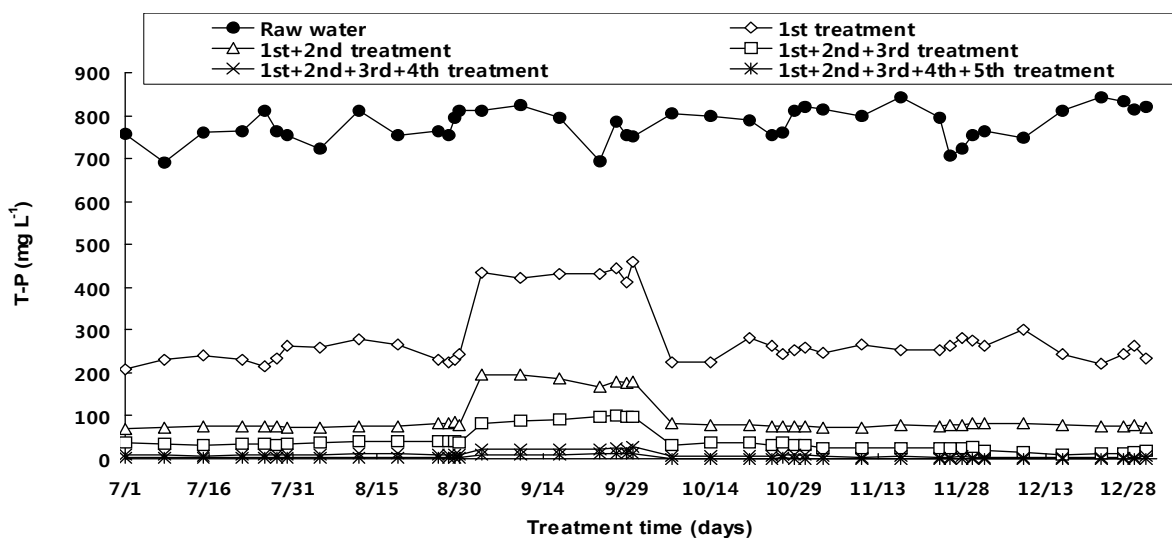


Fig. 3-101. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 함량변화.

## 나) 축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율

축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 1차년도에 최적조건을 적용한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 부하량을 300, 600 및 900 L day<sup>-1</sup> 각각 달리하여 오염물질의 처리효율을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음에서 보는 바와 같다.

자연정화공법에 의한 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 수생식물여과조 (1차조), 활성슬러지조 (2차조), 호기성조 (3차조), 혐기성조 I (4차조) 및 혐기성조 II (5차조)를 통과한 처리수 중의 pH, EC 및 DO 함량을 조사한 결과는 Table 3-61에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 pH는 약 6.8로 중성에 가까웠으며, 축산폐수처리장의 1차 처리인 수생식물여과조 처리수의 pH는 부하량에 따라 별 차이가 없었으며, 2차 처리인 활성슬러지조 처리수의 pH는 모든 부하량에서 축산폐수 원수에 비해 약간 증가하는 경향이였다. 이는 활성슬러지조를 통과하면서 미생물에 의해 축산폐수의 유기물이 분해되어 그 대사산물로 CO<sub>2</sub>와 유기산이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

활성슬러지조에서 2차 처리된 후 호기성조, 혐기성조 I 및 혐기성조 II를 통과한 방류수 중의 pH는 부하량에 따라 별 차이 없이 약 7.0~7.4 범위이였다. 이와 같이 호기성조와 혐기성조 모두에서 부하량별 pH가 별 차이가 없는 것은 처리장에 사용된 여재가 가지고 있는 탄산염의 완충작용 때문으로 판단된다.

축산폐수 원수의 EC는 약 2.49 dS m<sup>-1</sup>이였으며, 축산폐수처리장에서 전기전도도는 부하량에 따라 별 차이 없이 모든 조건에서 비슷한 결과를 보였다. 수생식물여과조 및 활성슬러지조의 처리수중의 EC는 1.95~2.18 dS m<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비하여 약간 감소하였다.

수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리 후 자연정화공법의 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II를 통과한 방류수의 EC는 전반적으로 부하량에 따라 별 차이가 없이 1.62~1.74 dS m<sup>-1</sup>범위 이였다. 일반적으로 EC는 물 중에 함유되어 있는 양이온, 음이온의 합계와 관계가 있다. 동일한 오폐수에서는 pH 5~9의 범위에서 용해성 물질의 양에 비례하여 전기전도율과 용해성 물질과의 비는 1 : 0.8~1.5의 범위에 있다.

축산폐수 원수의 DO 함량은 4.3 mg L<sup>-1</sup>로 약간 낮았고, 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리수의 DO 함량은 전반적으로 부하량에 따라 큰 차이 없이 4.9~5.7 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 약간 증가하는 경향이였으며, 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리 후 자연정화공법의 호기성조, 혐기성 I 및 혐기성조 II를 거친 방류수 중의 DO 함량은 전반적으로 4.6~5.0 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리수 중의 DO 함량에 비하여 약간 감소하는 경향이였다. 일반적으로 집수조에 있는 축산폐수는 재폭기가 없이 고여 있는 혐기성상태가 유지되므로 집수조로부터 채취된 축산폐수의 DO는 약간 낮은 경향을 보이는 것으로 알려져 있다.

Table 3-61. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량별 축산폐수 중 pH, EC 및 DO 함량 변화

Items	Stage	Raw Water	Livestock wastewater loading (L day <sup>-1</sup> )		
			300	600	900
pH	1 <sup>st</sup> treatment	6.8	6.8	6.7	6.7
	2 <sup>nd</sup> treatment		7.0	6.9	7.1
	3 <sup>rd</sup> treatment		7.1	7.1	7.2
	4 <sup>th</sup> treatment		7.1	7.0	7.4
	5 <sup>th</sup> treatment		7.2	7.0	7.3
EC (dS m <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment	2.49	2.14	2.31	2.37
	2 <sup>nd</sup> treatment		1.95	2.14	2.18
	3 <sup>rd</sup> treatment		1.77	2.06	1.93
	4 <sup>th</sup> treatment		1.68	1.84	1.88
	5 <sup>th</sup> treatment		1.62	1.77	1.74
DO (mg L <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment	4.3	5.1	4.8	4.6
	2 <sup>nd</sup> treatment		5.7	5.2	4.9
	3 <sup>rd</sup> treatment		5.8	5.4	5.0
	4 <sup>th</sup> treatment		5.1	4.9	4.8
	5 <sup>th</sup> treatment		5.0	4.8	4.6

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 COD의 처리효율은 Fig. 3-102 및 3-106에서 보는 바와 같다. 축산폐수 원수의 COD는 10,707 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 처리인 수생식물여과조 및 2차 처리인 활성슬러지조를 통과하면서 1,076~2,079 mg L<sup>-1</sup>정도로 처리되어 COD 처리효율이 80.4~89.9%정도이었고, 전반적으로 1차 및 2차 처리수의 경우 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 COD 처리효율이 점점 감소되는 경향이였다. 특히, 축산폐수 부하량 300~600 L day<sup>-1</sup>의 경우 COD 처리효율은 86.6~89.9%정도이였으나, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup>의 경우 COD 처리효율이 약 80.4%정도로 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>이상 부터 처리효율이 약간씩 감소하는 경향이였다.

1차부터 5차 처리를 거쳐서 배출된 방류수 중의 축산폐수 부하량별 COD 처리효율은 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>까지는 부하량에 따라 별 차이 없이 유사하거나 미미하게 감소하였으나, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup>이상에서는 600 L day<sup>-1</sup>에 비해 약간 감소하였다. 따라서 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량별 COD 처리효율은 300 L day<sup>-1</sup> ≒ 600 L day<sup>-1</sup> > 900 L day<sup>-1</sup> 순이었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 효과적인 COD 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 600 L day<sup>-1</sup>이하인 것으로 판단된다. 하지만 축산폐수의 경우 사육두수, 배출량 및 분뇨 분리과정 등에서 축산폐수의 특성이 다른 경우가 많아 최적 축산폐수

부하량 산정을 위해서는 다양한 축산폐수를 처리장에 적용하여 최적조건의 표준화가 필요할 것으로 판단된다.

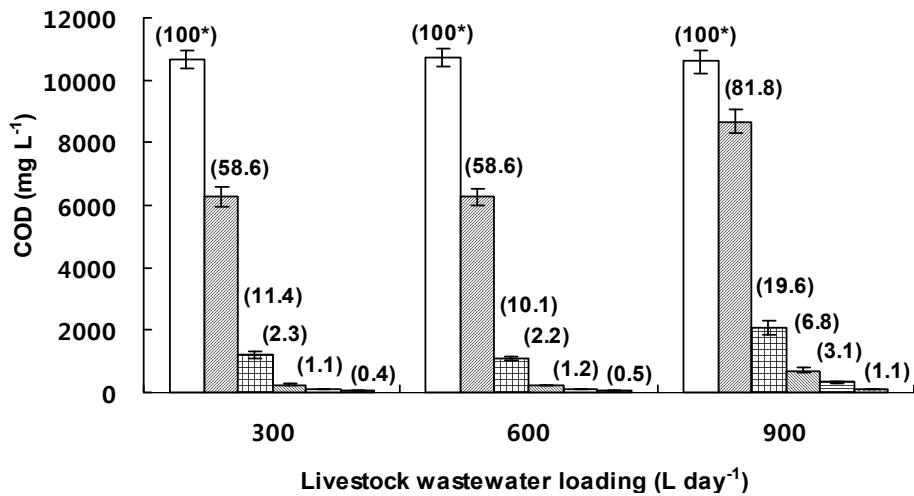


Fig. 3-102. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 COD 함량변화.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- ▧ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 SS 처리효율은 3-103 및 3-106에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 SS 함량은 12,688 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 및 2차 처리인 수생식물여과조와 활성슬러지조를 통과하면서 1,972~2,244 mg L<sup>-1</sup>범위로 유출되어 SS 처리효율이 82.2~84.2%이었다. SS 처리효율은 COD 처리효율과 달리 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없었다. 이와 같이 축산폐수 부하량에 따라 SS 처리효율이 별 차이 없는 것은 본 축산폐수처리장은 수생식물여과조에 의해 대부분의 SS가 여과되는 시스템이기 때문이다. 여과된 대부분의 부유물질은 자원순환을 위해 퇴비화 하여 최종적으로 처리된다.

1차 및 2차조에서 미처 처리되지 못한 유기물질은 3~5차의 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리장에서 처리하게 된다. 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁 입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Kim, 2000; Jo, 2003).

현장 축산폐수처리장에서 최종방류수 중의 축산폐수 부하량별 SS 처리효율은 99.6~99.7%정도로 매우 높게 처리되었으며, 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 유사한 처리효율을 보였다. 따라서 축산폐수 부하량별 SS 처리효율은 300 L day<sup>-1</sup> ≒ 600 L day<sup>-1</sup> ≒ 900 L day<sup>-1</sup> 순

으로 유사하게 나타났다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 효과적인 SS 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 900 L day<sup>-1</sup> 정도로 SS 처리만을 위해서는 그 이상의 부하량도 가능할 것으로 판단된다. 하지만 축산폐수 부하량별 COD 처리효율에서 부하량 600 L day<sup>-1</sup> 이상 처리시 처리효율이 감소되어 600 L day<sup>-1</sup> 이상 처리가 어려울 것으로 판단된다.

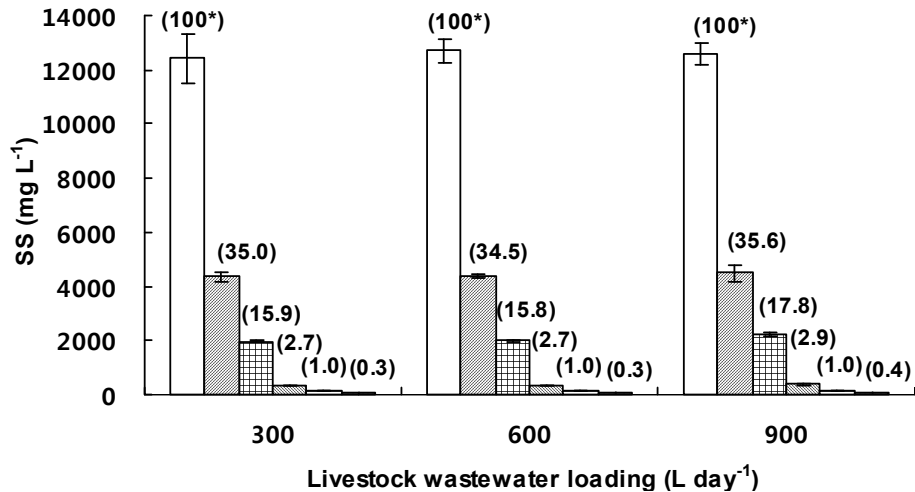


Fig. 3-103. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 SS 함량변화.

□ : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,  
 ▪ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▭ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,  
 ▮ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 T-N의 처리효율은 Fig. 3-104 및 3-106에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 T-N 함량은 5,467 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 및 2차 처리인 수생식물여과조와 활성슬러지조를 통과하면서 619~1,298 mg L<sup>-1</sup> 정도로 유출되어 T-N 처리효율이 76.9~88.7% 정도이었고, 전반적으로 1차 및 2차 처리수의 경우 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 T-N 처리효율이 점점 감소되는 경향이였다. 특히, 축산폐수 부하량 300~600 L day<sup>-1</sup>의 경우 T-N 처리효율은 88.6~88.7%정도이었으나, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup>의 경우 T-N 처리효율이 76.9% 정도로 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup> 이상부터 처리효율이 감소하는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 최종방류수 중의 T-N 처리효율은 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>까지는 별 차이 없이 비슷하거나 미미하게 감소하였으며, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup> 이상에서는 600 L day<sup>-1</sup>에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 따라서 축산폐수 부하량별 T-N 처리효율은 300 L day<sup>-1</sup> ≒ 600 L day<sup>-1</sup> > 900 L day<sup>-1</sup> 순이었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 현장 축산폐수처리장에서 효과적인 T-N 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 600 L day<sup>-1</sup> 정도이었다.

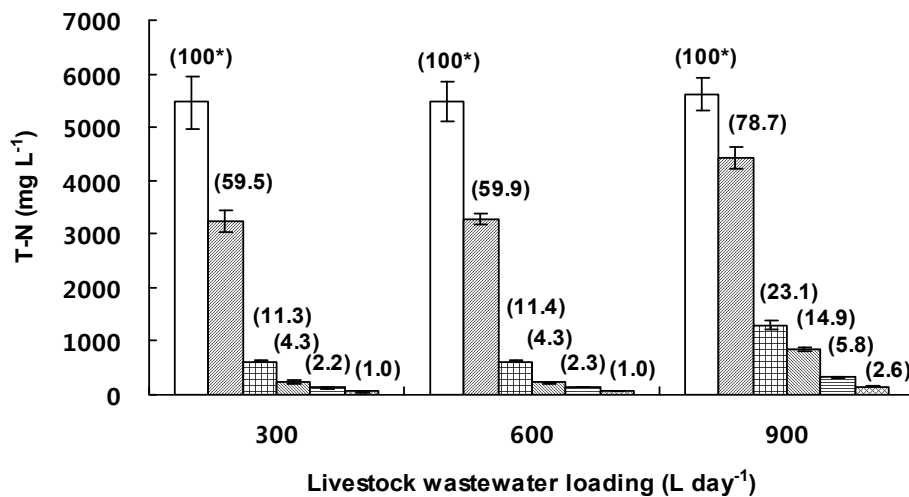


Fig. 3-104. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 T-N 함량변화.

□ : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,  
 ▤ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▥ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,  
 ▦ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 T-P의 처리효율은 Fig. 3-105 및 3-106에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 T-P 함량은 774.14 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 및 2차 처리인 수생식물여과조와 활성슬러지를 통과하면서 74.14~184.7 mg L<sup>-1</sup>정도로 처리되어 T-P 처리효율이 76.1~90.2% 정도이었고, 전반적으로 1차 및 2차 처리수의 경우 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 T-P 처리효율이 점점 감소되는 경향이였다. 특히, 축산폐수 부하량 300~600 L day<sup>-1</sup>의 경우 T-P 처리효율은 89.9~90.2%정도이었으나, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup>의 경우 T-P 처리효율이 76.9% 정도로 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>이상부터 처리효율이 감소하는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서 부하량에 따른 방류수 중의 부하량별 T-P 처리효율은 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>까지는 별 차이 없이 비슷하거나 미미하게 감소하였으며, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup>이상에서는 600 L day<sup>-1</sup>에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 따라서 축산폐수 부하량별 T-P 처리효율은 300 L day<sup>-1</sup> ≒ 600 L day<sup>-1</sup> > 900 L day<sup>-1</sup> 순이였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 효과적인 T-P 처리를 위한 최적 축산폐수 부하량은 600 L day<sup>-1</sup>이였다.

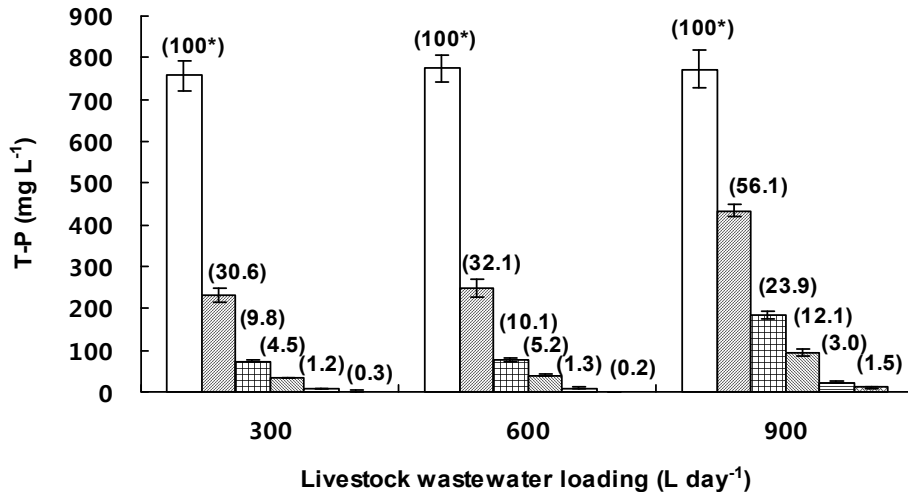


Fig. 3-105. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 T-P 함량변화.

□ : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,  
 ▤ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▥ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,  
 ▦ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

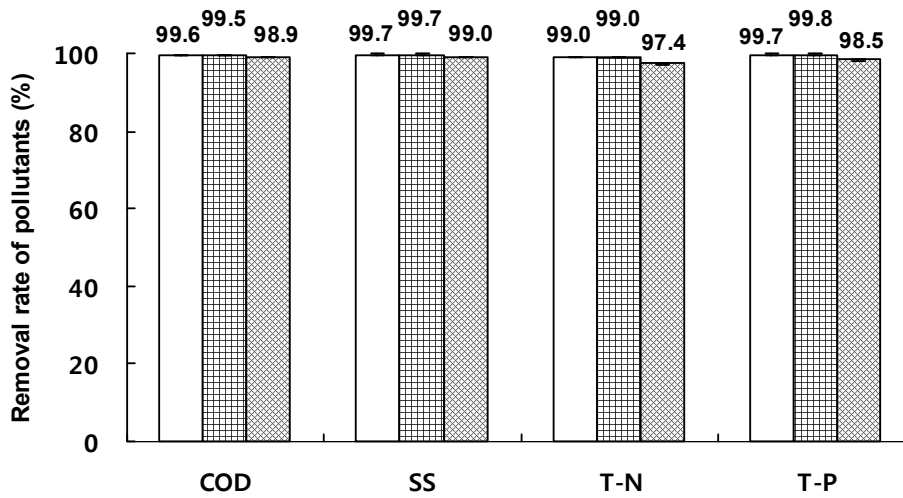


Fig. 3-106. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 오염물질의 처리효율.

□ : 300 L day<sup>-1</sup>, ▩ : 600 L day<sup>-1</sup>, ▦ : 900 L day<sup>-1</sup>.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 부하량에 따른 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P 함량변화를 조사한 결과는 Table 3-62에서 보는 바와 같다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 원수 중 NH<sub>4</sub>-N 함량은 4,824 mg L<sup>-1</sup>이었으며, NH<sub>4</sub>-N 함량은 축산폐수 부하량 300 및 600 L day<sup>-1</sup>에서는 별 차이 없이 비슷하였으나, 900 L day<sup>-1</sup>에서는 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 NH<sub>4</sub>-N 함량이 증가하는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 원수 중 NO<sub>3</sub>-N 함량은 163.7 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 수생식물여과조 및 활성슬러지를 통과한 처리수 중의 NO<sub>3</sub>-N 함량은 모든 부하량에서 큰 차이 없이



18.3~25.5 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 급격히 감소되었으며, 3차 처리인 호기성조를 통과한 방류수 중의 NO<sub>3</sub>-N 함량은 모든 부하량에서 큰 차이 없이 60.4~62.6 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리수에 비해 약간 증가되었다. 또한 호기성조를 통과한 다음 혐기성조 I, II를 통과한 방류수 중의 NO<sub>3</sub>-N 함량은 3.2~5.1 mg L<sup>-1</sup>범위로 호기성조 처리수에 비해 감소하였다. 이와 같이 호기성조 처리수에서 NO<sub>3</sub>-N 함량이 약간 증가하는 것은 호기성조에서 여재에 부착된 호기성 미생물이 축산폐수 중의 NH<sub>4</sub>-N을 질산화시켜 NO<sub>3</sub>-N으로 전환시켰기 때문으로 판단된다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수 중 NO<sub>2</sub>-N 함량은 131 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 자원순환형 축산폐수처리장 방류수 중의 NO<sub>2</sub>-N 함량은 부하량에 따라 별 차이 없이 각각 1.1~2.4 mg L<sup>-1</sup>이었다.

현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 원수 중 PO<sub>4</sub>-P 함량은 718 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 수생식물여과조 및 활성슬러지조를 통과한 처리수 중의 PO<sub>4</sub>-P 함량은 모든 부하량에서 큰 차이 없이 71.8~80.4 mg L<sup>-1</sup>범위로 축산폐수 원수에 비해 급격히 감소되었으며, 최종방류수 중의 PO<sub>4</sub>-P 함량도 모든 부하량에 따라 큰 차이 없이 1.4~2.4 mg L<sup>-1</sup>범위로 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리수에 비해 더욱더 감소되는 경향이였다.

Table 3-62. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량별 축산폐수 중 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P 함량 변화

Items	Stage	Raw Water	Livestock wastewater loading (L day <sup>-1</sup> )		
			300	600	900
NH <sub>4</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment	4,824	3,072	3,069	3,451
	2 <sup>nd</sup> treatment		598	612	684
	3 <sup>rd</sup> treatment		161	171	213
	4 <sup>th</sup> treatment		118	114	147
	5 <sup>th</sup> treatment		49	51	62
NO <sub>3</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment	512	163.7	166.4	171.1
	2 <sup>nd</sup> treatment		18.3	20.7	25.5
	3 <sup>rd</sup> treatment		60.4	61.9	62.6
	4 <sup>th</sup> treatment		7.3	9.4	10.1
	5 <sup>th</sup> treatment		3.2	4.1	5.1
NO <sub>2</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment	131	40.7	42.8	51.1
	2 <sup>nd</sup> treatment		7.4	8.4	11.0
	3 <sup>rd</sup> treatment		12.1	12.4	17.7
	4 <sup>th</sup> treatment		2.2	1.6	4.5
	5 <sup>th</sup> treatment		1.1	1.3	2.4
PO <sub>4</sub> -P (mg L <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment	718	224.4	228.2	241.4
	2 <sup>nd</sup> treatment		72.5	71.8	80.4
	3 <sup>rd</sup> treatment		36.1	37.1	41.2
	4 <sup>th</sup> treatment		8.2	8.7	9.1
	5 <sup>th</sup> treatment		1.4	1.7	2.4

#### 다) 축산폐수 중 고농도 질소 및 인 처리효율 극대화 방안

자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 질소 및 인 처리효율을 극대화하기 위해 축산폐수 재주입 비율별, 축산폐수 전처리 시간별 및 축산폐수 주입방법별 수처리 효율을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

##### (1) 축산폐수 재주입 비율별 수처리 효율

축산폐수 재주입 비율에 따른 수처리 효율 조사는 현장 축산폐수처리장에서 최적 부하량인  $600 \text{ L day}^{-1}$  조건하에서 최종 배출되는  $600 \text{ L day}^{-1}$ 의 방류수를 호기성조에 각각 30%인  $180 \text{ L day}^{-1}$ , 70%인  $420 \text{ L day}^{-1}$  및 100%인  $600 \text{ L day}^{-1}$ 로 달리하여 재주입한 후 수처리 효율을 각각 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 3-107~3-108에서 보는 바와 같다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수를 재주입하지 않은 경우 최종방류수 중 COD 함량은  $50.25 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 방류수를 3차 처리조인 호기성조에 30%, 70% 및 100% 재주입하였을 때 방류수 중 COD의 함량은 각각 46.25, 38.43 및  $34.45 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 방류수의 재주입 비율이 증가함에 따라 방류수의 농도는 점점 감소하였다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수를 재주입하지 않은 경우 최종방류수 중 SS 함량은  $38.25 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 방류수를 호기성조에 30%, 70% 및 100% 재주입하였을 때 방류수 중 SS 함량은 각각 32.98, 26.83 및  $23.91 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 방류수의 재주입 비율이 증가함에 따라 방류수의 농도는 점점 감소하는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수를 재주입하지 않은 최종방류수 중 T-N 함량은  $55.60 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 방류수를 호기성조에 30%, 70% 및 100% 재주입하였을 때 방류수 중 T-N의 함량은 COD 및 SS와 유사한 경향으로 각각 49.88, 41.93 및  $37.45 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 방류수의 재주입 비율이 증가함에 따라 방류수의 농도는 감소하였다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수를 재주입하지 않은 경우 최종방류수 중 T-P 함량은  $1.95 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 재주입 비율을 30%, 70% 및 100%로 하였을 때 방류수 중 T-P의 함량은 각각 1.49, 0.85 및  $0.55 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 방류수의 재주입 비율이 증가함에 따라 방류수의 농도는 미세하게 감소하였다.

따라서 자원순환형 축산폐수처리장에서 최종방류수를 호기성조에 재주입하는 방법은 고농도의 질소 및 인 처리효율을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

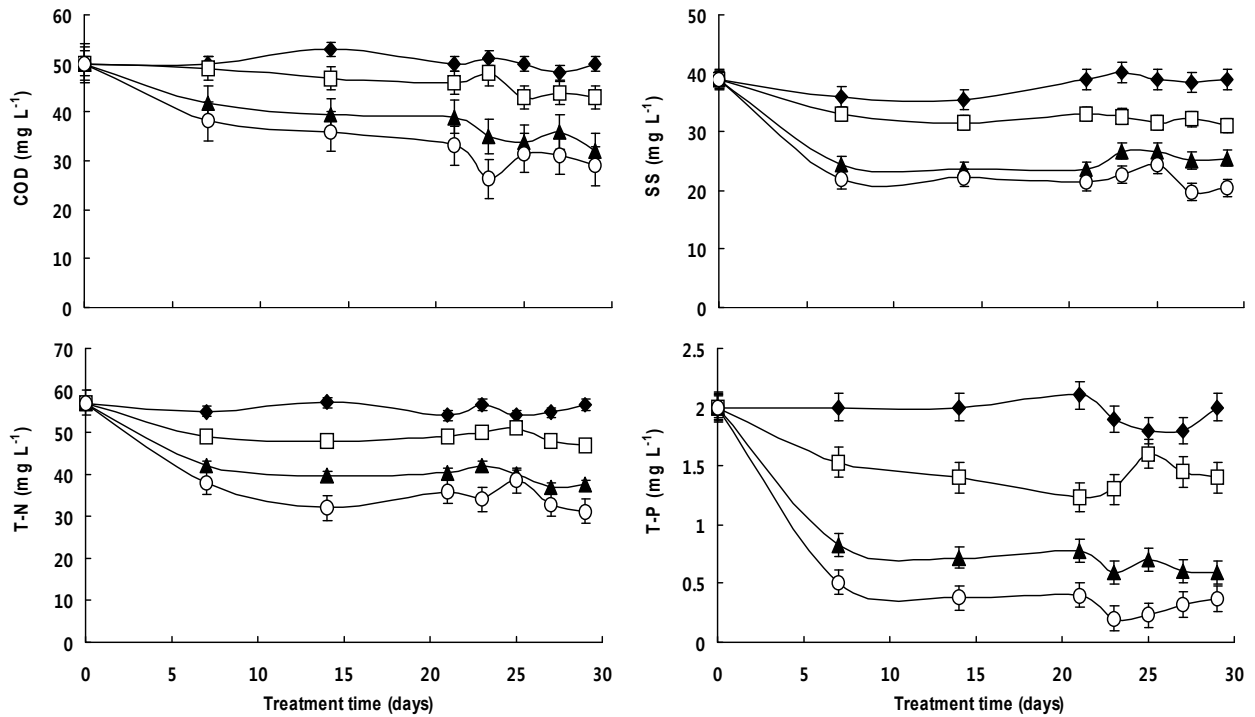


Fig. 3-107. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 재주입 비율별 오염물질의 농도변화.

◆ : Control, □ : 30% of re-injection rate,  
 ▲ : 70% of re-injection rate, ○ : 100% of re-injection rate.

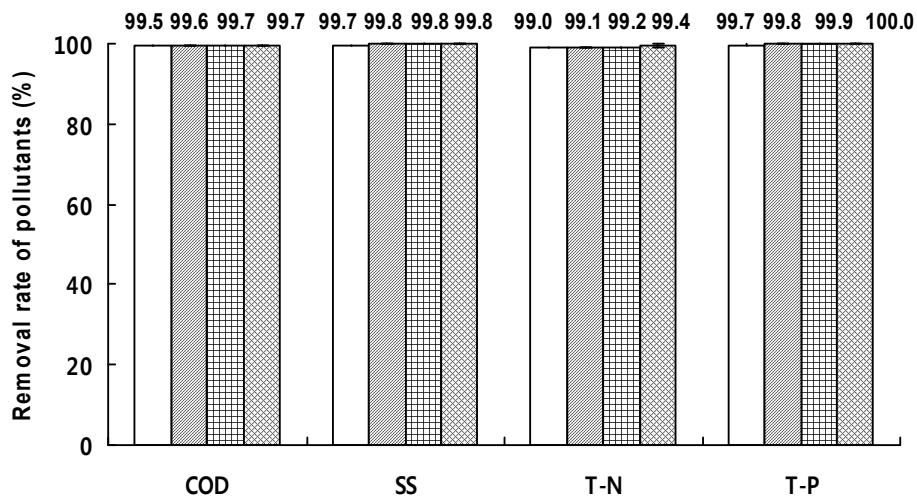


Fig. 3-108. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 재주입 비율별 오염물질의 처리효율.

□ : Control, ▨ : 30% of re-injection rate,  
 ▤ : 70% of re-injection rate, ▩ : 100% of re-injection rate.

(2) 축산폐수 전처리 시간에 따른 수처리 효율

축산폐수의 전처리 시간에 따른 수처리 효율 조사는 수생식물여과조-활성슬러지조-자연정화

공법을 연계한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간별 및 활성슬러지조 체류시간별 수처리 효율을 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(가) 수생식물 여과시간에 따른 수처리 효율

현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 COD 처리효율은 Fig. 3-109에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 COD는 10,246~12,101 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 11,036 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 하수나 오수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

수생식물 여과시간을 30분, 60분 및 90분으로 조절한 수생식물여과조 처리수의 처리효율은 각각 41.4, 42.1 및 45.0%으로 여과시간이 길어짐에 따라 증가하는 경향이였다. 이는 수생식물 여과조의 여과시간이 길어짐에 따라 상대적으로 수생식물이 축산폐수를 흡수할 수 있는 시간이 길어졌기 때문으로 사료된다. 수생식물 여과시간에 따른 COD 처리효율은 여과시간에 관계없이 99.5%이상이었다.

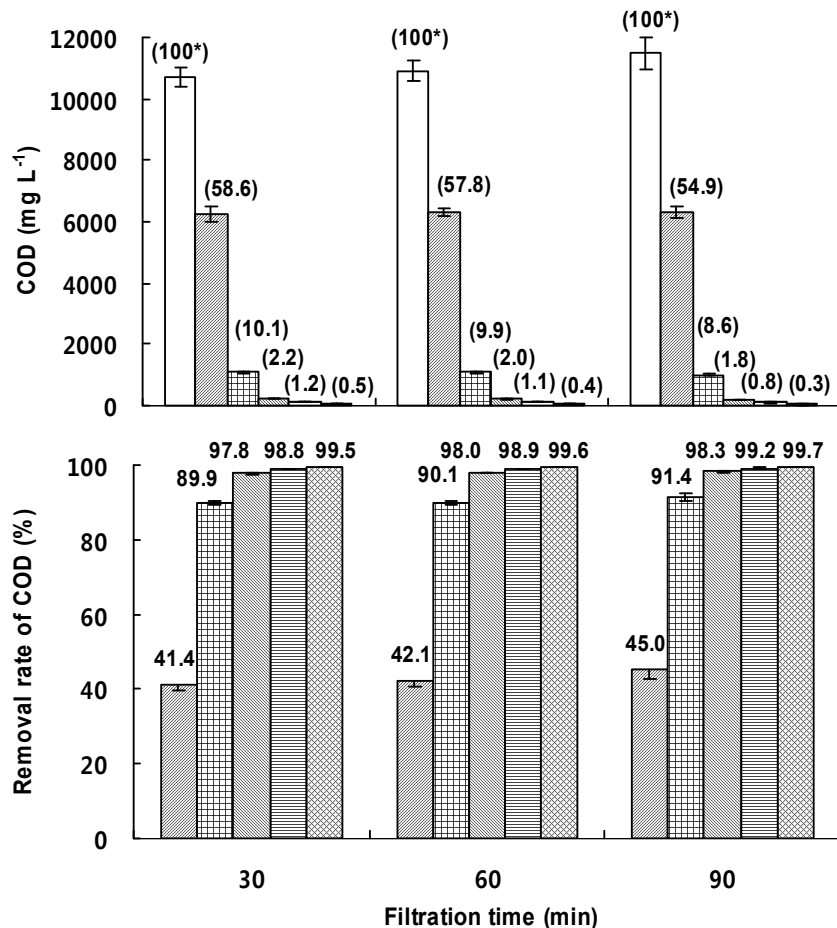


Fig. 3-109. 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 COD 처리효율.

□ : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,  
 ▪ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▫ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,  
 ⊞ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 SS 처리효율은 Fig. 3-110에서 보는 바와 같이 자원순환형 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 SS 함량은 11,249~13,210 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 12,410 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 하수나 오수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

수생식물 여과시간을 30분, 60분 및 90분으로 조절한 수생식물여과조 처리수의 처리효율은 각각 65.4, 68 및 70.4%로 여과시간이 길어짐에 따라 증가하는 경향이였다. 수생식물여과조는 축산농가로부터 유입되는 고형물 분리가 제대로 이루어지지 축산폐수의 유기물을 제거하는데 효과적일 것으로 판단된다. 수생식물 여과시간에 따른 최종 방류수 중의 SS 처리효율은 여과시간에 상관없이 99.8% 이상이었다. 이는 본 축산폐수처리장의 경우 5단계의 처리시스템으로 1차 수생식물여과조에서 처리된 처리수는 각 처리조를 거치면서 안정적으로 처리되었기 때문으로 사료된다.

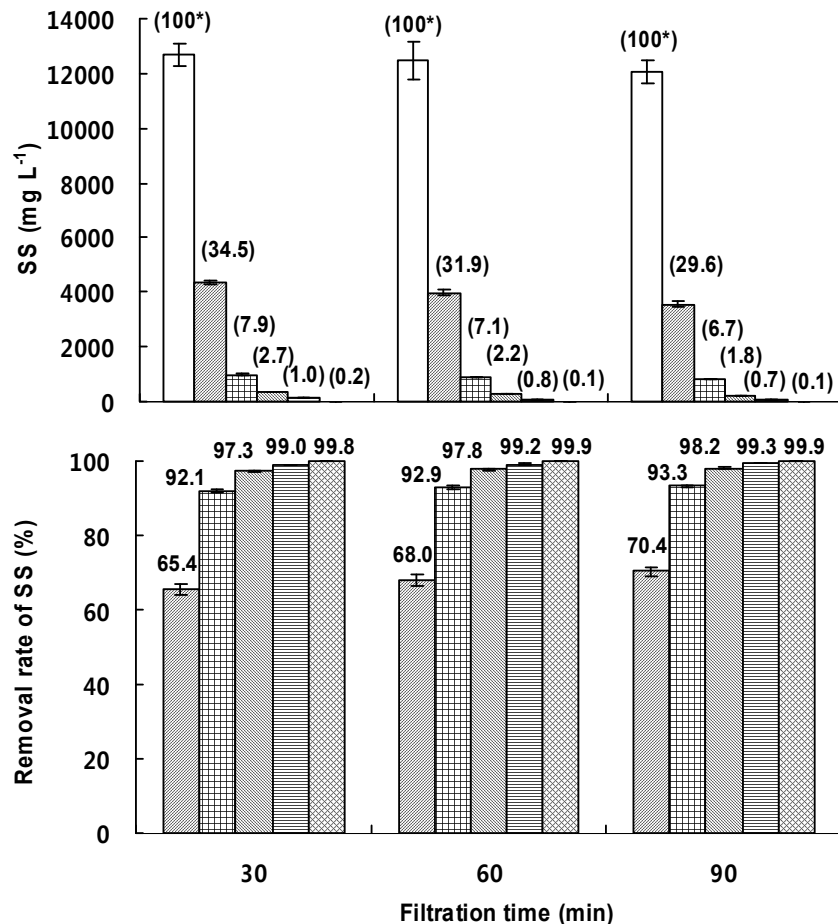


Fig. 3-110. 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 SS 처리 효율.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- ▤ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▥ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ▦ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 T-N 처리효율은 Fig. 3-111과 같다. 현장 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 T-N 함량은 4,187~6,500 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 5,466 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 오·폐수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

수생식물 여과시간을 30분, 60분 및 90분으로 조절했을 경우 수생식물여과조의 처리수 중의 T-N 처리효율은 각각 39.9, 42.8 및 44%로 여과시간이 길어짐에 따라 처리효율도 증가하는 경향이였다. 본 축산폐수 처리장이 시공된 소규모 축산농가의 경우 여과나 고형물 분리과정 없이 집수조로 차집되기 때문에 고형물 함량이 상대적으로 많이 포함되어 있어 여과시간이 늘어남에 따라 유기물 형태의 질소가 많이 여과되고 일부는 식물에 흡수되면서 처리효율이 증가한 것으로 사료된다. 수생식물 여과시간에 따른 최종 방류수 중의 T-N의 처리효율은 수생식물 여과시간에 따라 차이없이 99%이상이었다.

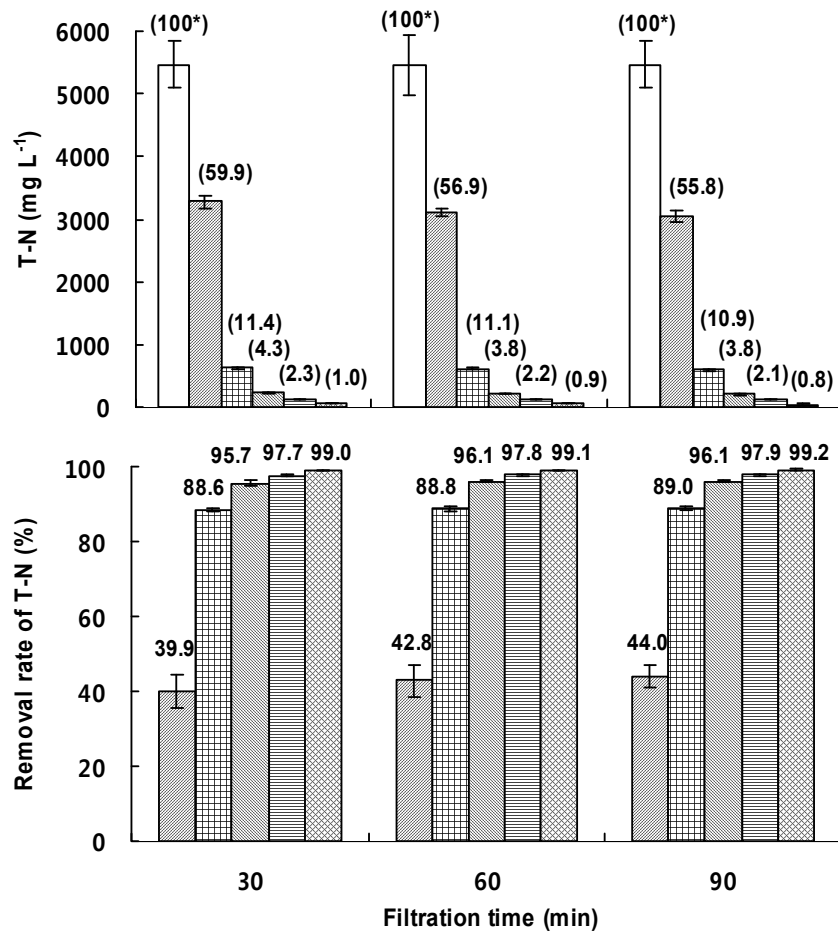


Fig. 3-111. 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 T-N 처리 효율.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- ▧ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▦ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ⊞ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 T-P 처리효율은 Fig. 3-112에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 T-P 함량은 708~842 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 781 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 오·폐수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

수생식물 여과시간을 30분, 60분 및 90분으로 조절했을 경우 수생식물여과조 처리수 중의 T-P 처리효율은 각각 67.9, 74.5 및 77.3%으로 여과시간이 길어짐에 따라 증가하는 경향이있다. 이는 T-N과 동일한 경향으로 다량의 유기물이 수생식물여과조에 의해 제거된 결과라고 판단된다. 최종 방류수 중의 T-P의 처리효율은 수생식물 여과시간에 상관없이 99.8%이상으로 처리되었다.

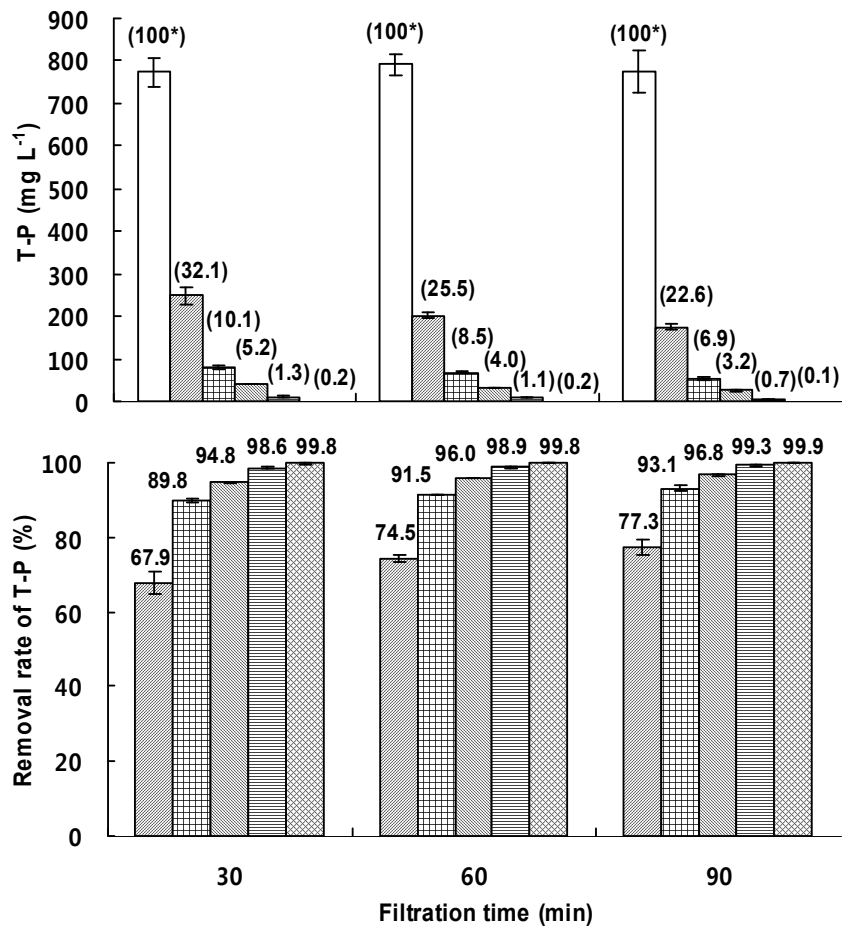


Fig. 3-112. 현장 축산폐수처리장에서 수생식물 여과시간에 따른 T-P 처리 효율.

□ : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,  
 ▪ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▭ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,  
 ▮ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

(나) 활성슬러지 체류시간에 따른 수처리 효율

현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 COD 처리효율은 Fig. 3-113에서

보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 COD는 10,248~12,084 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 10,952 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 하수나 오수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

활성슬러지조 체류시간을 8시간, 16시간 및 24시간으로 조절했을 경우 2차 활성슬러지조의 처리수의 COD 처리효율은 각각 89.4, 89.9 및 90.2%으로 활성슬러지조 체류시간이 길어짐에 따라 증가하는 경향이였다. 활성슬러지 체류시간에 따른 최종 방류수 중 COD 처리효율은 각각 99.5%이상이었다. 하지만 본 처리장에 유입되는 폐수의 농도는 매우 불규칙한 실정으로 활성슬러지조의 최적 체류시간이라고 보기는 어려울 것으로 판단된다.

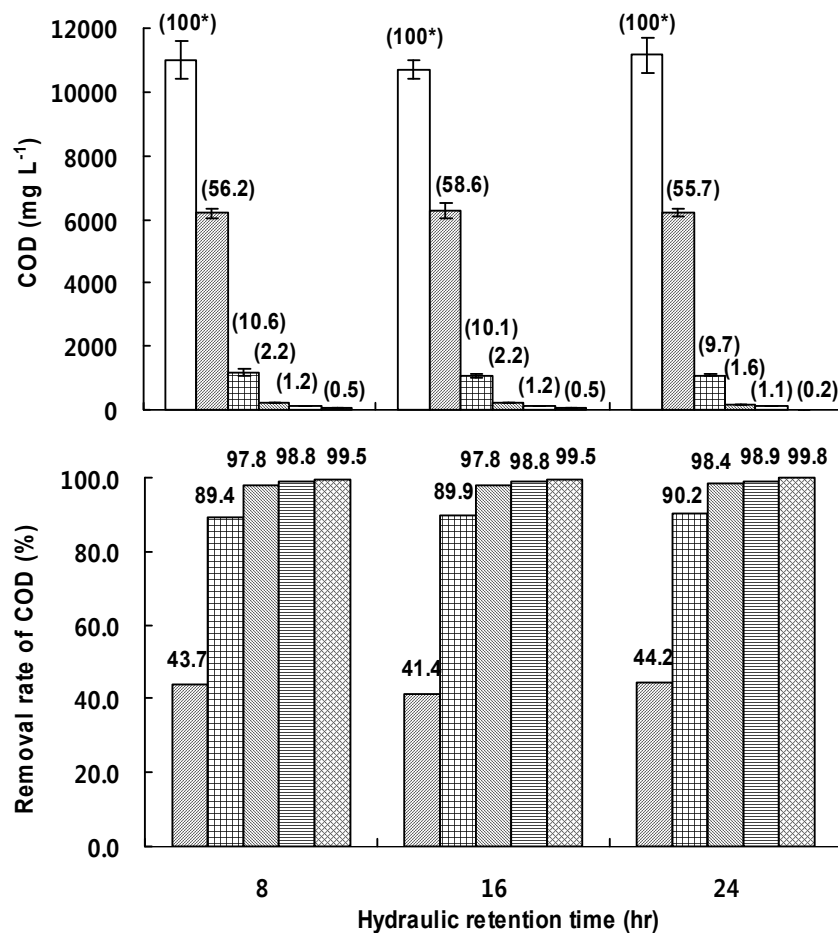


Fig. 3-113. 현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 COD 처리효율.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▭ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ⊞ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 SS 처리효율은 Fig. 3-114와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 SS 함량은 11,240~13,210 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 12,297 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 오·폐수에 비해 높은 농도로 유입되었다.

활성슬러지조 체류시간을 8시간, 16시간 및 24시간으로 조절했을 경우 2차 활성슬러지조 처



리수의 SS 처리효율은 각각 91.3, 92.1 및 87.2%로 COD의 처리효율과는 달리 16시간에서 가장 높았고 24시간에서는 처리효율이 감소하였다. 이는 활성슬러지조에 의해 유기물이 분해되지만 유기물로 인해 활성슬러지조의 미생물 생육이 증가로 인한 것으로 판단된다. 활성슬러지조 체류시간에 따른 최종방류수 중의 SS 처리효율은 99.3%이상이었다.

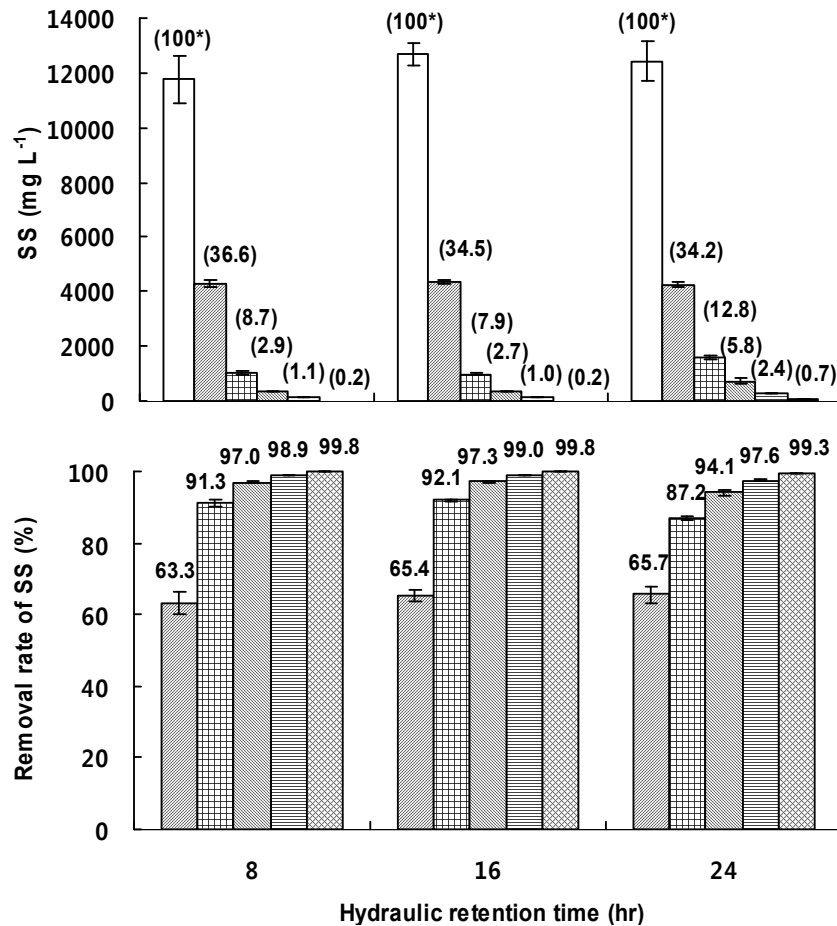


Fig. 3-114. 현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 SS 처리 효율.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- ▤ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▥ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ▦ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 T-N 처리효율은 Fig. 3-115에서 보는 바와 같다. 자원순환형 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 T-N 함량은 4,987~6,124 mg L<sup>-1</sup>범위로 평균 5,522 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 오·폐수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

활성슬러지조 체류시간을 8시간, 16시간 및 24시간으로 조절했을 경우 2차 활성슬러지조 처리수 중의 T-N의 처리효율은 각각 89.1, 88.6 및 88.2%으로 체류시간이 길어짐에 따라 감소하

는 경향이였다. 이는 활성슬러지조의 체류시간이 증가함에 따라 미생물의 생육이 증가하고, 그에 따라 슬러지 bulking 현상이 일어나 처리수 중에 일부의 유기물들이 포함되어 배출된 것으로 사료된다. 활성슬러지 체류시간에 따른 최종방류수 중의 T-N 처리효율은 각각 98.5% 이상 이었다.

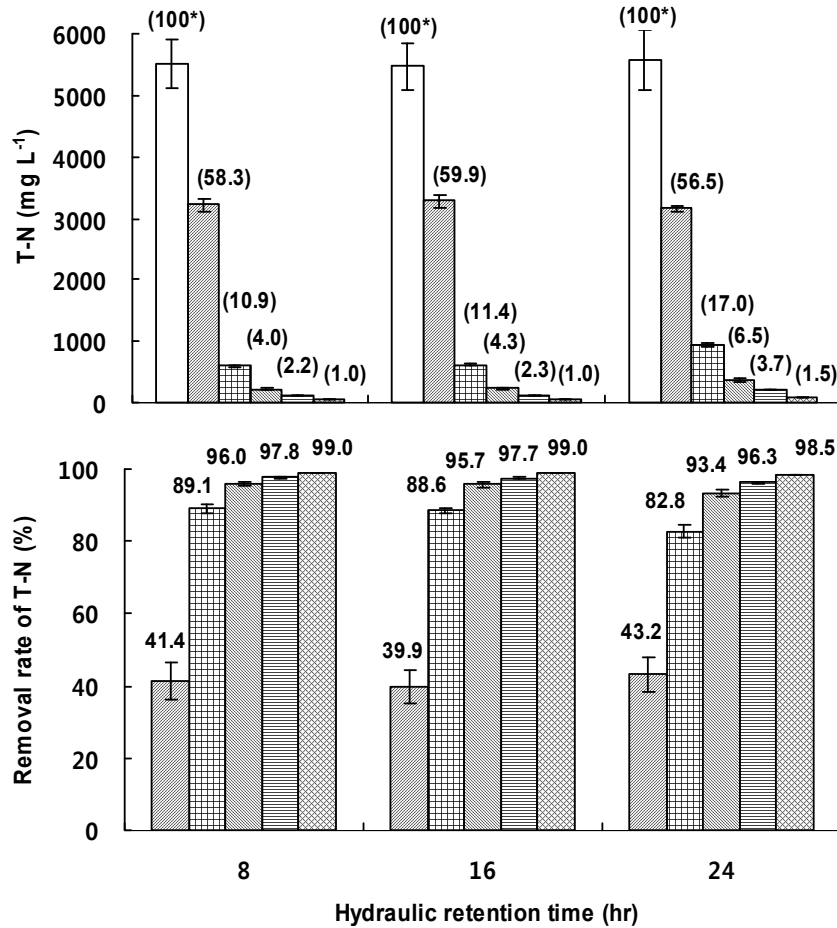


Fig. 3-115. 현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 T-N 처리 효율.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▭ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ⊠ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 T-P 처리효율은 Fig. 3-116과 같다. 자원순환형 축산폐수처리장에서 유입된 축산폐수 원수의 T-N 함량은 712~814 mg L<sup>-1</sup> 범위로 평균 769 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 일반적인 하수에 비해 매우 높은 농도로 유입되었다.

활성슬러지조 체류시간을 8시간, 16시간 및 24시간으로 조절했을 경우 2차 활성슬러지조 처리수 중의 T-P의 처리효율은 각각 89.8, 89.8 및 82.8%으로 16시간 이후에는 처리효율이 감소하는 경향이였다. 이는 T-N의 경우와 동일한 경향으로 체류시간이 길어짐에 따라 미생물의 과다 증식으로 인한 영향으로 판단된다. 활성슬러지조 체류시간에 따른 최종 방류수 중의 T-P

의 처리효율은 99.3% 이상이었다.

하지만 본 처리장에서의 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율 결과는 단기간 실험의 결과이며, 축산농가의 폐수의 특성을 고려할 때 정확한 활성슬러지조 운전인자를 결정하기 위해서는 장기간의 처리효율 및 활성슬러지의 상태를 정밀 모니터링 하여 최적인자를 산정해야 할 것으로 판단된다.

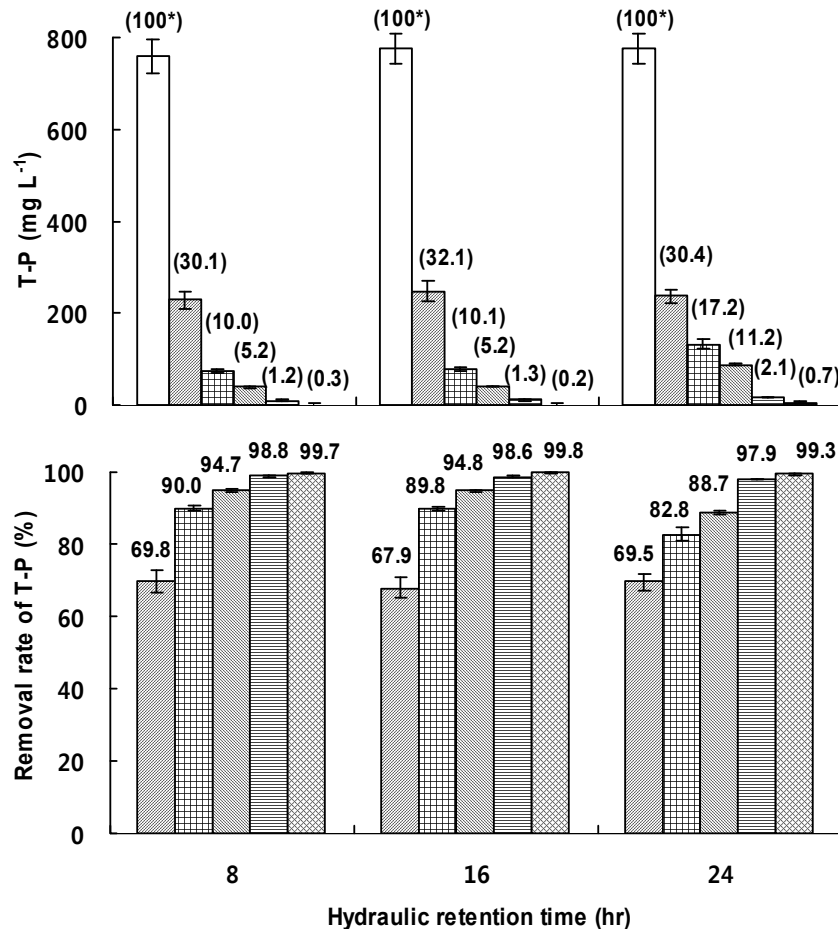


Fig. 3-116. 현장 축산폐수처리장에서 활성슬러지조 체류시간에 따른 T-P 처리 효율.

- : Raw water, ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment,
- : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment, ▭ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup> treatment,
- ⊞ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup>+4<sup>th</sup>+5<sup>th</sup> treatment.

라) 축산폐수 주입방법에 따른 수처리 효율

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수의 주입방법에 따른 수처리 효율 조사는 축산폐수 유입량 변화에 대한 대응성을 조사하기 위해 축산폐수의 주입방법을 연속주입 및 간헐주입 나누어 수처리 효율을 조사하였고, 그 결과는 다음에서 보는 바와 같다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 COD는 Fig. 3-117과 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 COD는 1차와 2차 처리수까지는 연속주입방법이 간헐주입방법에 비해 낮았으나 이후에는 주입방법에 따라 별 차이 없이 비슷한 농도를 보였다. 축산폐수 주입방법에 따른

COD 처리효율은 Fig. 3-118에서 보는 바와 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 COD 처리효율은 1차 처리시 연속주입방법이 41.4%로 간헐주입방법의 25.7%에 비해 15.7%정도 높았고, 2차 처리시도 1차 처리와 유사한 경향으로 연속주입방법이 89.9%로 간헐주입방법에 비해 약간 높았다. 하지만 2차 처리 이후의 COD 처리효율은 축산폐수 주입방법에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다. 이는 본 축산폐수처리장의 경우 여러 단계를 거치면서 오염부하를 분산시켜 처리하기 때문으로 판단된다.

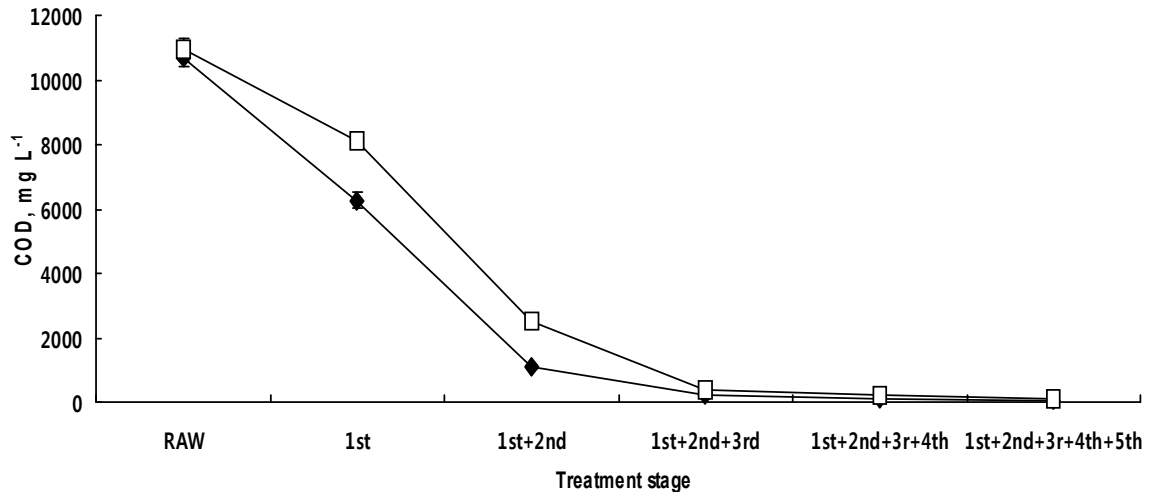


Fig. 3-117. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 COD 처리농도.

◆ : Continuous injection, □ : Intermittent injection.

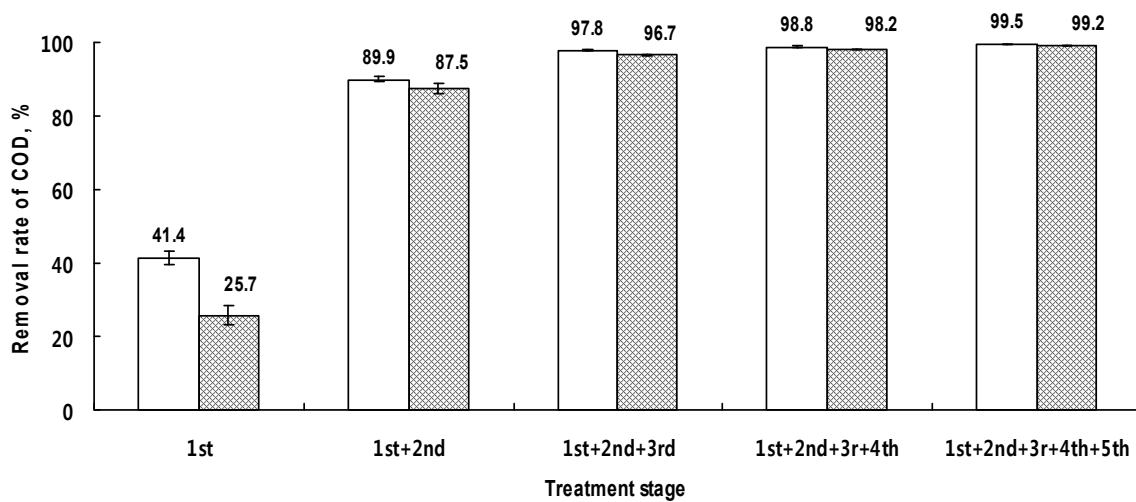


Fig. 3-118. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 COD 처리 효율.

□ : Continuous injection, ▨ : Intermittent injection.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 SS 함량은 Fig. 3-119와 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 SS 함량은 1차와 2차 처리수까지는 연속주입방법이 간헐주입방법에 비해 낮았으나 이후에는 주입방법에 따라 별 차이 없이 비슷한 농도를 보였다. 축산폐수 주입방법에 따른 SS 처리효율은 Fig. 3-120에서 보는 바와 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 SS 처리효율

은 1차 처리시 연속주입방법이 65.4%로 간헐주입방법의 49.6%에 비해 5.8%정도 높았고, 2차 처리시도 1차 처리와 유사한 경향으로 연속주입방법이 92.1%로 간헐주입방법에 비해 약간 높았다. 하지만 2차 처리 이후의 SS 처리효율은 축산폐수 주입방법에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다. 이와 같은 결과는 본 축산폐수처리장의 경우 여러 단계를 거치면서 오염부하를 분산시켜 처리하기 때문으로 판단된다.

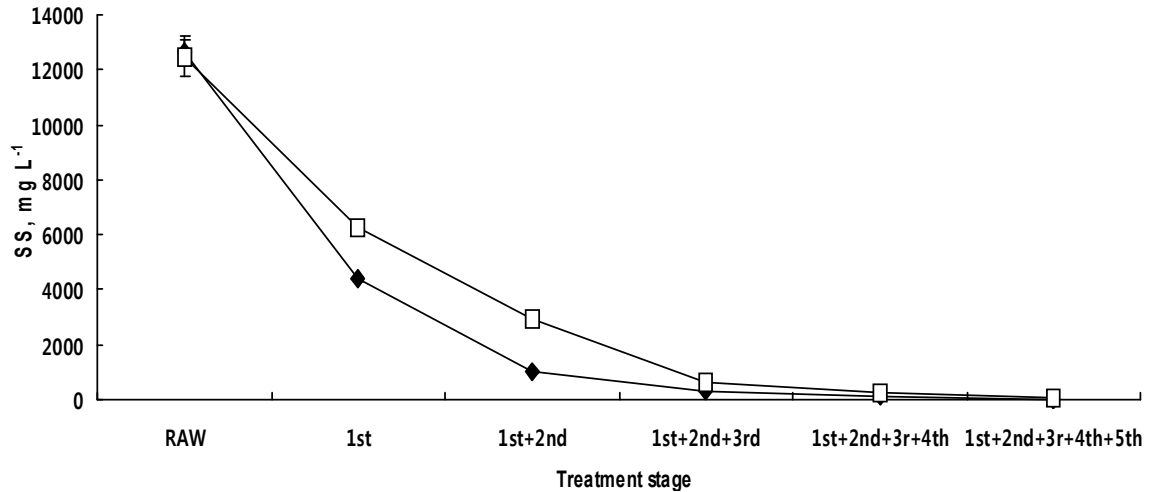


Fig. 3-119. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 SS 처리농도.  
 ◆ : Continuous injection, □ : Intermittent injection.

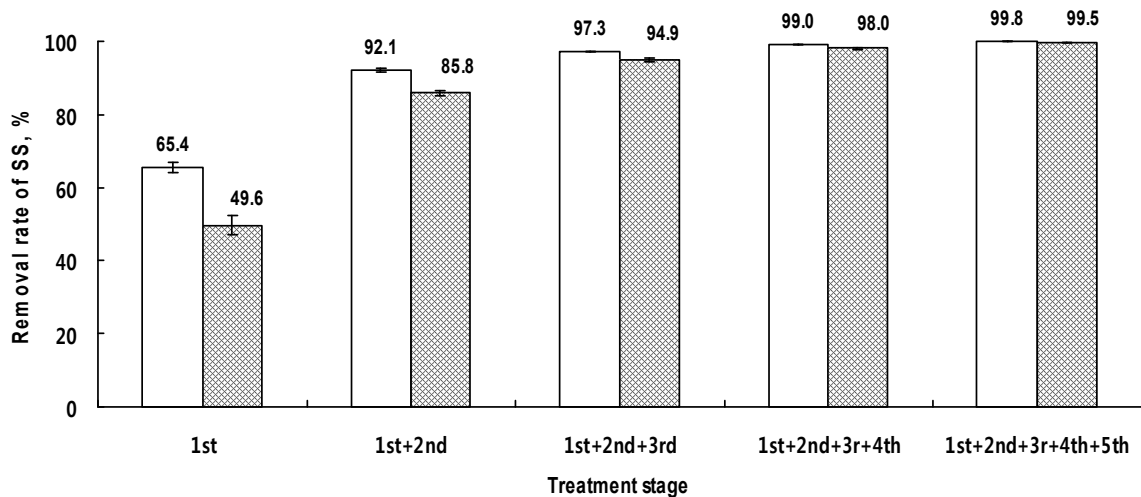


Fig. 3-120. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 SS 처리 효율.  
 □ : Continuous injection, ▨ : Intermittent injection.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 T-N 함량은 Fig. 3-121과 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 T-N 함량은 1차와 2차 처리수까지는 연속주입방법이 간헐주입방법에 비해 낮았으나 이후에는 주입방법에 따라 별 차이 없이 비슷한 농도를 보였다. 축산폐수 주입방법에 따른 T-N 처리효율은 Fig. 3-122에서 보는 바와 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 T-N

처리효율은 1차 처리시 연속주입방법이 39.9%로 간헐주입방법의 28.0%에 비해 11.9%정도 높았고, 2차 처리시도 1차 처리와 유사한 경향으로 연속주입방법이 88.6%로 간헐주입방법에 비해 약간 높았다. 하지만 2차 처리 이후의 T-N 처리효율은 축산폐수 주입방법에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다. 이는 본 축산폐수처리장의 경우 5단계를 거치면서 오염부하를 여러조로 분산시켜 처리하기 때문으로 판단된다.

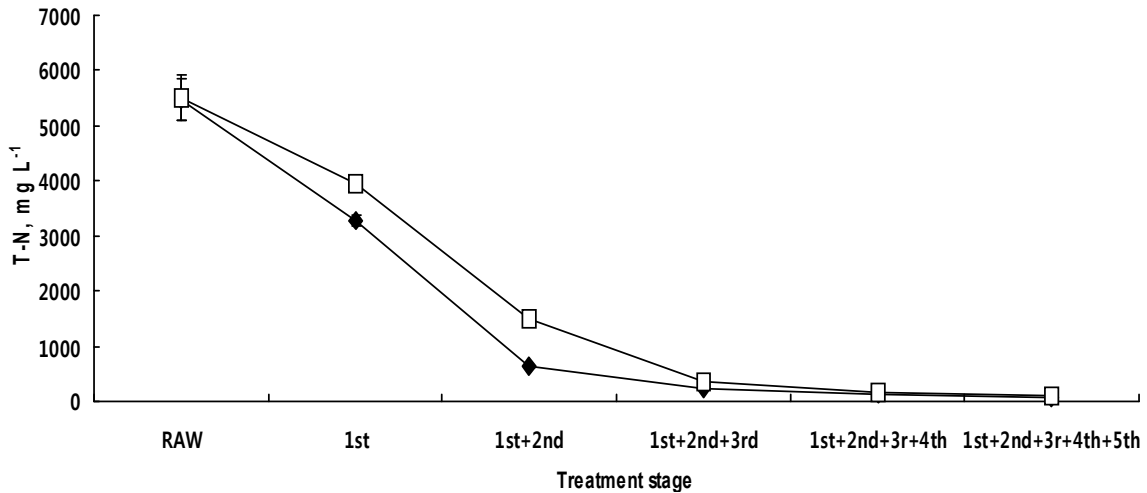


Fig. 3-121. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 T-N 처리농도.  
 ◆ : Continuous injection, □ : Intermittent injection.

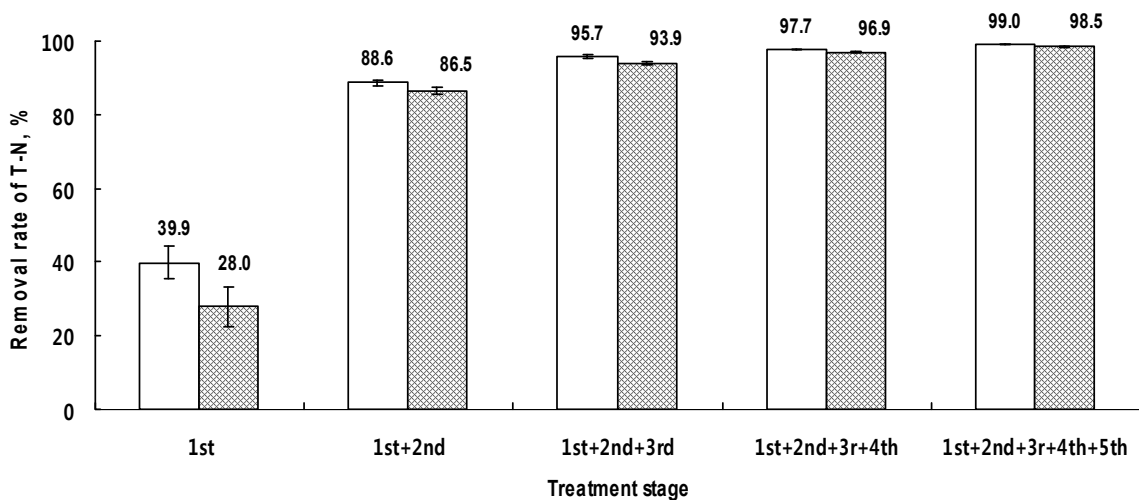


Fig. 3-122. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 T-N 처리 효율.  
 □ : Continuous injection, ▨ : Intermittent injection.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 T-P 함량은 Fig. 3-123과 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 T-P 함량은 1차와 2차 처리수까지는 연속주입방법이 간헐주입방법에 비해 낮았으나 이후에는 주입방법에 따라 별 차이 없이 비슷한 농도를 보였다. 축산폐수 주입방법에 따른 T-P 처리효율은 Fig. 3-124에서 보는 바와 같다. 축산폐수 주입방법에 따른 T-P

처리효율은 1차 처리시 연속주입방법이 67.9%로 간헐주입방법의 55.5%에 비해 12.4%정도 높았고, 2차 처리시도 1차 처리와 유사한 경향으로 연속주입방법이 89.8%로 간헐주입방법에 비해 약간 높았다. 하지만 2차 처리 이후의 T-P 처리효율은 축산폐수 주입방법에 따라 별 차이 없이 유사한 경향이였다. 이와 같은 결과는 본 축산폐수처리장의 경우 여러 단계를 거치면서 오염부하를 분산시켜 처리하기 때문으로 판단된다.

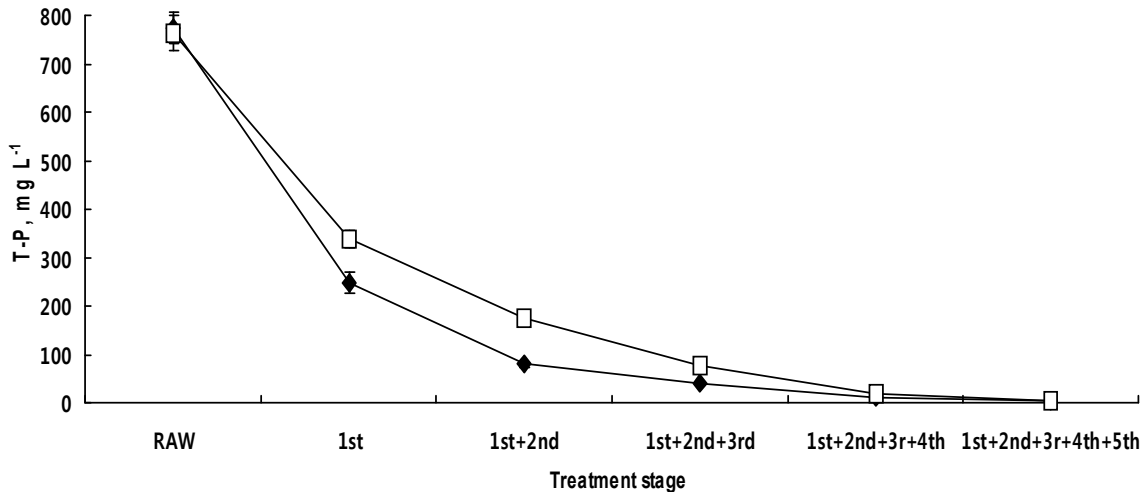


Fig. 3-123. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 T-P 처리농도.

◆ : Continuous injection, □ : Intermittent injection.

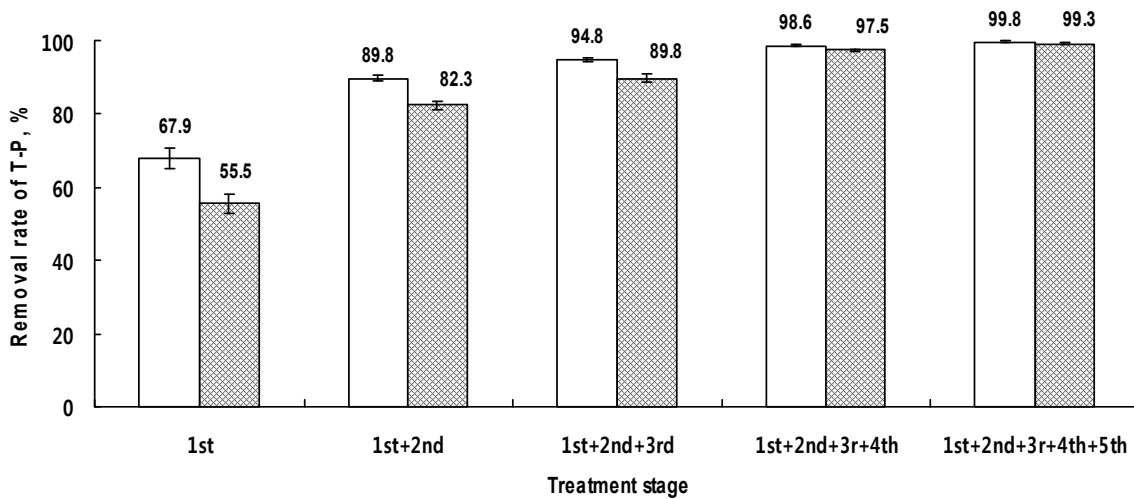


Fig. 3-124. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 T-P 처리 효율.

□ : Continuous injection, ▨ : Intermittent injection.

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수 주입방법에 따른 방류수 중 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 연속주입방법이 각각 99.5, 99.8, 99.0 및 99.8%로 간헐주입에 비해 약간 높았다. 이와 같은 결과는 간헐적 주입의 경우 축산폐수의 일일 총 주입량은 동일하지만 유입시 순간 부하량이 많아지고 이로 인해 축산폐수의 순간 체류시간이 감소하는 것이 주원인인 것으로 판

단된다. 하지만 축산폐수처리장의 최종방류수에서 오염물질 처리효율은 두 주입방법에서 큰 차이가 나지 않았는데, 이는 본 자원순환형 현장 축산폐수처리장은 안정적인 처리를 위해 5단계 처리과정으로 구성되어 있어 초기단계의 고부하도 여러단계를 거쳐서 오염부하를 분산시키기 때문으로 판단된다. 따라서 축산폐수처리장의 최종단계에서는 축산폐수의 주입방법에 따라 별 차이 없이 항상 안정적인 처리가 가능하였다. 이들 결과를 미루어 볼 때, 본 현장 축산폐수처리장은 축산폐수 유입 부하량 변동과 순간 부하량에 대한 대응성이 우수한 것으로 판단된다.

마) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 오염물질의 분해속도

현장 축산폐수처리장에서 COD의 분해속도는 Fig. 3-125 및 Table 3-63에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 연속적 주입의 경우 1차 처리조인 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0) = -0.377 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0) = -0.129 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.351$  ( $r=1^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0) = -0.174 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.377$  ( $r=0.993^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0) = -0.052 \times \text{HRT}(\text{day}) + 2.556$  ( $r=0.978^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0) = -0.169 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.552$  ( $r=0.982^{**}$ )으로 모든 처리조의 방정식은 고도의 부의 상관을 보였다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 간헐적 주입의 경우 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0) = -0.210 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0) = -0.086 \times \text{HRT}(\text{day}) - 0.176$  ( $r=1^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0) = -0.222 \times \text{HRT}(\text{day}) + 1.968$  ( $r=0.983^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0) = -0.053 \times \text{HRT}(\text{day}) + 2.151$  ( $r=0.998^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0) = -0.137 \times \text{HRT}(\text{day}) + 0.863$  ( $r=0.958^{**}$ )으로 연속적 주입한 경우와 동일한 경향으로 고도의 부의 상관을 보였다. 분해속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.377, 0.129, 0.174, 0.052 및 0.169  $\text{d}^{-1}$ 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.210, 0.086, 0.222, 0.053 및 0.137  $\text{d}^{-1}$ 였으며, 분해속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다.

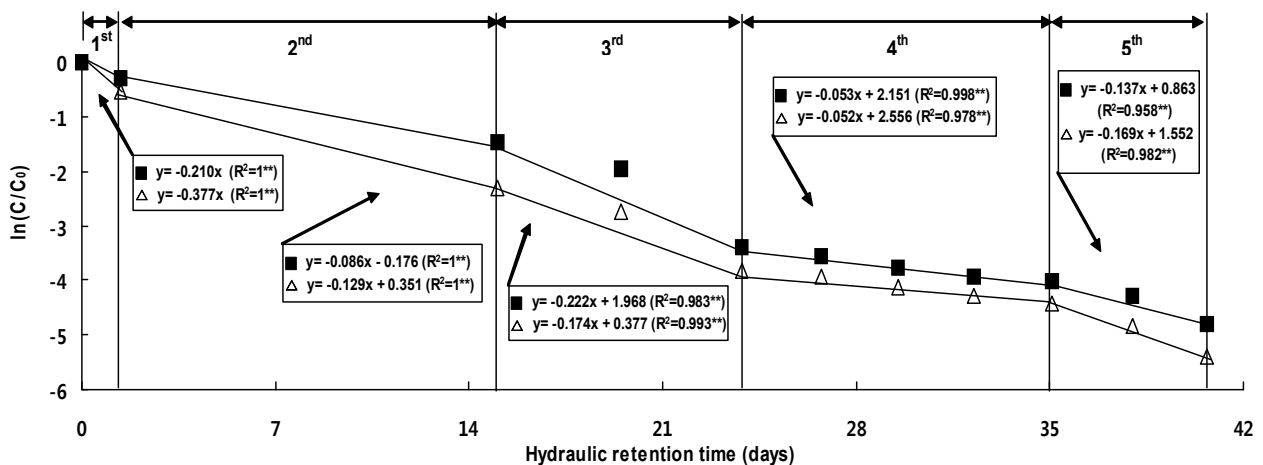


Fig. 3-125. 현장 축산폐수처리장에서 COD의 분해속도.

△ : Continuous injection, ■ : Intermittent injection.



현장 축산폐수처리장에서 SS의 분해속도는 Fig. 3-126 및 Table 3-63에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 연속적 주입의 경우 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0)=-0.750 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0)=-0.108 \times \text{HRT}(\text{day})-0.910$  ( $r=1^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0)=-0.120 \times \text{HRT}(\text{day})-0.710$  ( $r=0.962^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0)=-0.086 \times \text{HRT}(\text{day})-1.463$  ( $r=0.968^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0)=-0.292 \times \text{HRT}(\text{day})+5.714$  ( $r=0.979^{**}$ )으로 모든 처리조의 방정식은 고도의 부의 상관관을 보였다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 간헐적 주입의 경우 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0)=-0.485 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0)=-0.056 \times \text{HRT}(\text{day})-0.607$  ( $r=0.962^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0)=-0.174 \times \text{HRT}(\text{day})+1.227$  ( $r=0.990^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0)=-0.081 \times \text{HRT}(\text{day})-1.024$  ( $r=0.993^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0)=-0.227 \times \text{HRT}(\text{day})+4.130$  ( $r=0.970^{**}$ )으로 고도의 부의 상관관을 보였다. 분해속도는 연속적 주입한 경우가 간헐적 주입한 경우에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다. 분해속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.750, 0.108, 0.120, 0.086 및  $0.292\text{d}^{-1}$ 이였고, 간헐적 주입의 경우 0.485, 0.056, 0.174, 0.081 및  $0.227\text{d}^{-1}$ 였으며, 분해속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다.

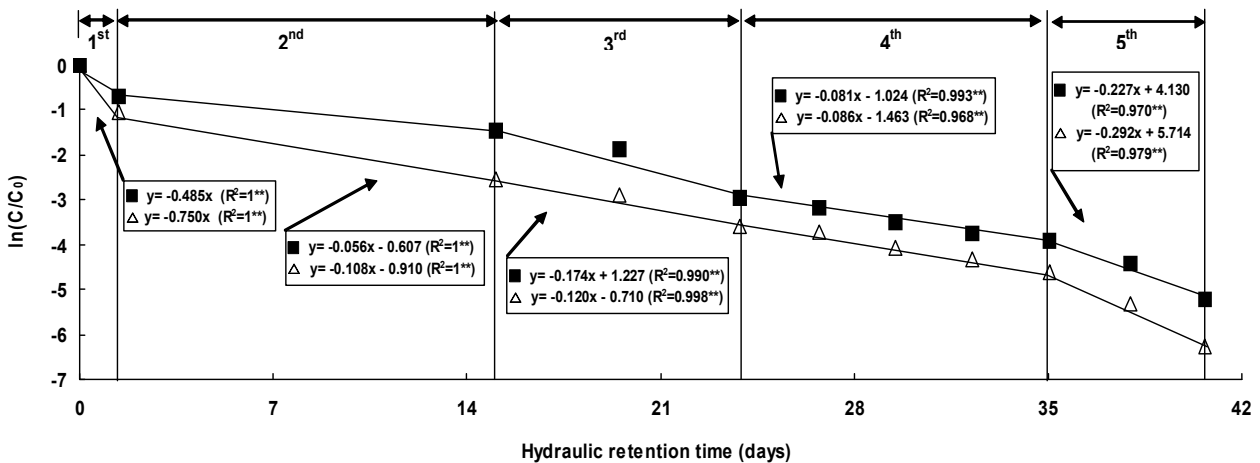


Fig. 3-126. 현장 축산폐수처리장에서 SS의 분해속도.

△ : continuous injection, ■ : intermittent injection.

현장 축산폐수처리장에서 T-N의 분해속도는 Fig. 3-127 및 Table 3-63에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 연속적 주입한 경우 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0)=-0.301 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1.000^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0)=-0.121 \times \text{HRT}(\text{day})-0.340$  ( $r=1.000^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0)=-0.109 \times \text{HRT}(\text{day})-0.553$  ( $r=0.991^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0)=-0.047 \times \text{HRT}(\text{day})-2.053$  ( $r=0.949^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0)=-0.155 \times \text{HRT}(\text{day})+1.707$  ( $r=0.993^{**}$ )으로 모든 처리조에서 고도의 부의 상관관을 보였다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 간헐적 주입한 경우 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0)=-0.235 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1.000^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0)=-0.071 \times \text{HRT}(\text{day})-0.232$  ( $r=1.000^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0)=-0.171 \times$

HRT(day)+1.317 ( $r=0.992^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0)=-0.058 \times \text{HRT}(\text{day})-1.388$  ( $r=0.968^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0)=-0.126 \times \text{HRT}(\text{day})+1.004$  ( $r=0.957^{**}$ )으로 부의 상관을 보였다. 분해속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.361, 0.121, 0.109, 0.047 및 0.155  $\text{d}^{-1}$ 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.235, 0.071, 0.171, 0.058 및 0.126  $\text{d}^{-1}$ 였으며, 분해속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다.

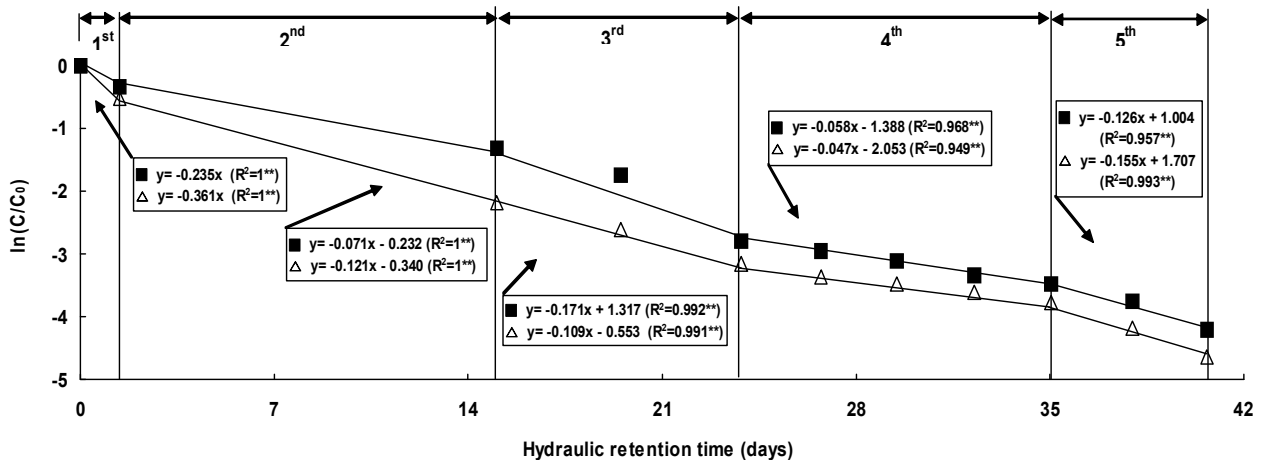


Fig. 3-127. 현장 축산폐수처리장에서 T-N의 분해속도.

△ : continuous injection, ■ : intermittent injection.

자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 T-P의 분해속도는 Fig. 3-128 및 Table 3-63에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 분해속도 방정식은 연속적 주입한 경우 유입에서 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0)=-0.803 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1.000^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0)=-0.084 \times \text{HRT}(\text{day})-1.108$  ( $r=0.939^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0)=-0.076 \times \text{HRT}(\text{day})-1.119$  ( $r=0.994^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0)=-0.118 \times \text{HRT}(\text{day})-0.057$  ( $r=0.939^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0)=-0.301 \times \text{HRT}(\text{day})+6.838$  ( $r=0.929^{**}$ )으로 모든 처리조의 방정식은 고도의 부의 상관을 보였으며, 간헐적 주입한 경우 수생식물여과조는  $\ln(C/C_0)=-0.572 \times \text{HRT}(\text{day})$  ( $r=1^{**}$ ), 2차 활성슬러지조는  $\ln(C/C_0)=-0.049 \times \text{HRT}(\text{day})-0.741$  ( $r=1.000^{**}$ ), 3차 호기성조는  $\ln(C/C_0)=-0.090 \times \text{HRT}(\text{day})-0.154$  ( $r=0.984^{**}$ ), 4차 혐기성조 I는  $\ln(C/C_0)=-0.112 \times \text{HRT}(\text{day})+0.527$  ( $r=0.835^{**}$ ) 및 혐기성조 II는  $\ln(C/C_0)=-0.222 \times \text{HRT}(\text{day})+4.145$  ( $r=0.984^{**}$ )으로 연속 주입한 경우와 동일한 경향으로 고도의 부의 상관을 보였다. 분해속도 상수(K)는 연속적 주입의 경우 1차, 2차, 3차, 4차 및 5차 처리조에서 각각 0.803, 0.084, 0.076, 0.118 및 0.301  $\text{d}^{-1}$ 이었고, 간헐적 주입의 경우 0.572, 0.049, 0.090, 0.112 및 0.222  $\text{d}^{-1}$ 였으며, 분해속도는 연속주입이 간헐적 주입에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이였다. 현장 축산폐수처리장의 T-P의 분해속도는 연속적 주입방법이 간헐적 주입방법에 비해 약간 빨랐다.

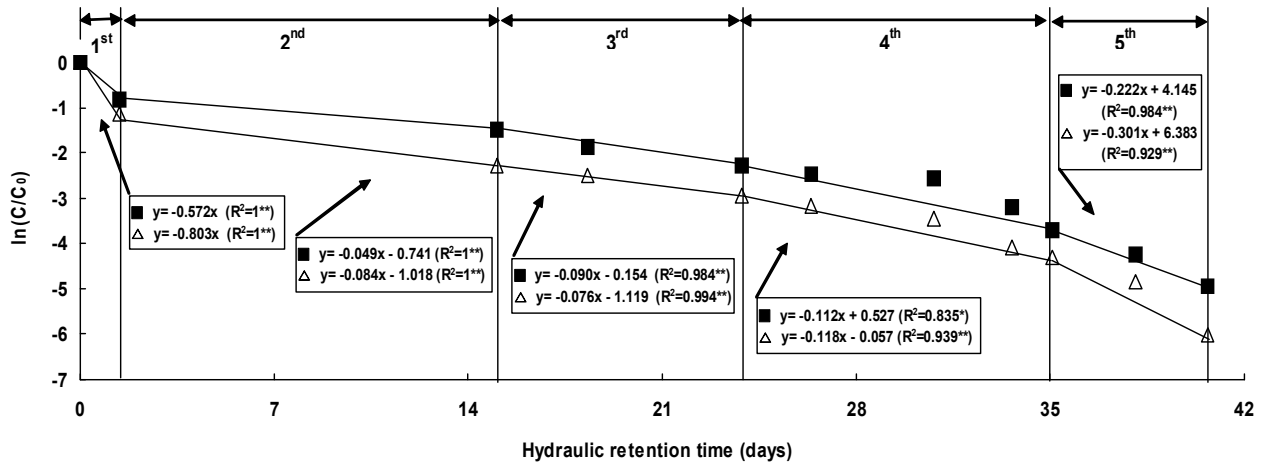


Fig. 3-128. 현장 축산폐수처리장에서 T-P의 분해속도.

△ : Continuous injection, ■ : Intermittent injection.

Table 3-63. 현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 분해속도(K) 및 상관계수(r)

Items	Stage	Continuous injection		Intermittent injection	
		K (day <sup>-1</sup> )	Correlation coefficient (r)	K (day <sup>-1</sup> )	Correlation coefficient (r)
COD	1 <sup>st</sup> bed	0.377	1.000**	0.210	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	0.129	1.000**	0.086	1.000**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.174	0.993**	0.222	0.983**
	4 <sup>th</sup> bed	0.052	0.978**	0.053	0.998**
	5 <sup>th</sup> bed	0.169	0.982**	0.137	0.958**
SS	1 <sup>st</sup> bed	0.750	1.000**	0.485	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	0.108	1.000**	0.056	1.000**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.120	0.998**	0.174	0.990**
	4 <sup>th</sup> bed	0.086	0.968**	0.081	0.993**
	5 <sup>th</sup> bed	0.292	0.979**	0.227	0.970**
T-N	1 <sup>st</sup> bed	0.361	1.000**	0.235	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	0.121	1.000**	0.071	1.000**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.109	0.991**	0.171	0.992**
	4 <sup>th</sup> bed	0.047	0.949**	0.058	0.968**
	5 <sup>th</sup> bed	0.155	0.993**	0.126	0.957**
T-P	1 <sup>st</sup> bed	0.803	1.000**	0.572	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	0.084	1.000**	0.049	1.000**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.076	0.994**	0.090	0.984**
	4 <sup>th</sup> bed	0.118	0.939**	0.112	0.835**
	5 <sup>th</sup> bed	0.301	0.929**	0.222	0.984**

(\* and \*\* denote significance at 5.0 and 1.0% levels, respectively).

## 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성

### 가) 여재의 이화학적 특성

현장 축산폐수처리장 3차 처리조 (호기성조), 4차 처리조 (혐기성조 I) 및 5차 처리조 (혐기성조 II) 사용한 여재의 축산폐수 처리시일별 이화학적 특성은 표층과 심층으로 구분하여 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 pH를 조사한 결과는 Table 3-64에서 보는 바와 같다. 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 pH는 호기성조의 경우 8.03이었고, 혐기성조의 경우 7.5이었다. 3차 처리인 호기성조 여재의 pH는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 낮아지는 경향이었고, 특히, 여재의 표층이 심층에 비해 낮았다. 이와 같이 축산폐수 처리가 진행됨에 따라 pH가 전반적으로 약간씩 낮아진 것은 축산폐수 중의 유기물질 등 오염물질이 처리되는 과정에서 수생식물이나 미생물에 의해 발생하는 이산화탄소나 유기산 등에 의한 결과로 판단되었다.

4차 및 5차 처리조인 혐기성조 I 및 혐기성조 II의 pH는 전반적으로 1차 처리조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과할수록 감소하였고, 처리조내 처리수의 유하거리가 증가할수록 약간씩 감소하는 경향이였다. 또한 모든조에서 pH는 표층이 심층에 비해 약간 낮은 경향이였으며, 그 차이는 미미하였다. 이와 같이 pH가 감소하는 것은 3차 처리인 호기성조와 비슷한 결과로 주로 미생물과 식물에 의한 이산화탄소나 유기산에 의한 결과로 판단된다. 축산폐수 처리 5개월 후인 12월에는 pH가 약간 높았는데, 이는 겨울철 수생식물의 잎과 줄기가 고사되고 이로 인해 수생식물의 생육은 일시적으로 중단되어 수생식물에 의한 유기산 분비가 적어지고, 또한 겨울철 미생물의 생육이 부진하기 때문인 것으로 판단된다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용된 여재의 EC를 조사한 결과는 Table 3-64에서 보는 바와 같다. 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 EC는 3차 처리인 호기성조의 경우  $0.06 \text{ dS m}^{-1}$ 이었고, 4차 및 5차 처리인 혐기성조 I 및 II의 경우는  $0.05 \text{ dS m}^{-1}$ 이었다. 3차, 4차 및 5차 처리조에서 여재의 EC는 전반적으로 축산폐수 처리시일에 따라 별 차이 없이  $0.05 \sim 0.08 \text{ dS m}^{-1}$ 로 비슷한 결과를 보였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 3차, 4차 및 5차 처리조에서 축산폐수 처리시일별 여재의 유기물함량을 조사한 결과는 Table 3-64에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 유기물함량은 0.59~0.69%범위 이었다. 3차 처리조에서 여재의 유기물함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 특히, 3차 처리조에서 표층의 유기물함량은 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수처리 5개월 후 여재 표층의 유기물함량은 2.65%로 가장 높은 결과를 보였다.

이와 같이 3차 처리조 표층에서 유기물함량이 높은 것은 2차 처리인 활성슬러지의 처리수가 3차 처리인 호기성조 표면부터 여과되기 때문으로 3차 처리조 표층에 유기물이 집적되었기 때문으로 사료된다. 4차 및 5차 처리조의 여재 중 유기물 함량도 3차 처리조와 비슷한 경향으로 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였다. 특히, 4차 및

5차 처리조의 유기물함량은 전반적으로 3차 처리조에 비해 약간 낮은 경향을 보였다.

Table 3-64. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 pH, EC 및 O.M의 함량조사

Bed	Section	Layer	pH (1:5H <sub>2</sub> O)			EC(dS m <sup>-1</sup> )			Organic matter (%)			
			At months after livestock wastewater treatment									
			1	3	5	1	3	5	1	3	5	
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		Surface	8.11	8.00	8.04	0.06	0.08	0.08	2.23	2.45	2.65	
		Subsurface	8.14	8.08	8.10	0.06	0.07	0.08	1.61	1.70	1.84	
	Inflow	Surface	7.53	7.49	7.51	0.05	0.06	0.06	1.54	1.68	1.72	
		Subsurface	7.58	7.51	7.6	0.05	0.06	0.06	1.41	1.43	1.56	
	4 m	Surface	7.52	7.49	7.52	0.05	0.05	0.06	1.20	1.31	1.29	
		Subsurface	7.60	7.51	7.52	0.06	0.05	0.06	0.98	1.12	1.13	
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	8 m	Surface	7.52	7.50	7.51	0.05	0.06	0.05	0.94	0.97	1.01	
		Subsurface	7.53	7.51	7.53	0.05	0.06	0.05	0.86	0.88	0.96	
	12 m	Surface	7.51	7.50	7.51	0.06	0.05	0.06	0.84	0.86	0.91	
		Subsurface	7.50	7.48	7.52	0.05	0.05	0.06	0.78	0.80	0.85	
	16 m	Surface	7.49	7.48	7.50	0.05	0.05	0.05	0.77	0.78	0.79	
		Subsurface	7.50	7.51	7.50	0.06	0.06	0.05	0.77	0.78	0.78	
	Outflow	Surface	7.51	7.50	7.52	0.06	0.05	0.06	0.74	0.75	0.76	
		Subsurface	7.52	7.54	7.52	0.06	0.06	0.06	0.74	0.74	0.75	
	5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	Inflow	Surface	7.51	7.53	7.51	0.05	0.06	0.06	0.71	0.72	0.73
			Subsurface	7.52	7.52	7.51	0.06	0.06	0.06	0.70	0.71	0.72
		Outflow	Surface	7.52	7.50	7.51	0.06	0.05	0.06	0.69	0.71	0.71
			Subsurface	7.51	7.49	7.51	0.05	0.06	0.06	0.69	0.70	0.70

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일별 여재의 T-N의 함량을 조사한 결과는 Table 3-65에서 보는 바와 같다. 사용된 원 여재의 T-N의 함량은 3차 처리인 호기성조의 경우 11.1 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 처리조의 경우는 1,272 mg kg<sup>-1</sup>이었다.

3차 처리조에서 여재 중 T-N의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 특히, 3차 처리조 표층의 여재 중 T-N 함량은 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수 처리 5개월 후에는 표층의 T-N의 함량이 134 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높은 결과를 보였다. 이와 같이 3차 처리조 표층에서 T-N의 함량이 높은 것은 상기 여재 중 유기물의 함량과 유사한 경향으로 3차 처리조 표면에 T-N이 집적되었기 때문으로 판단된다.

4차 및 5차 처리조 여재의 T-N의 함량은 3차 처리조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였고, 처리조내 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다. 전반적으로 4차 및 5차 처리조내 T-N의 함량은 표층과 심층에서

별 차이 없었다. 이는 3차 처리조에서 대부분의 질소가 처리되어 4차 및 5차 처리조에서 T-N 집적되지 않았기 때문으로 판단된다.

현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 T-P의 함량은 3차 호기성조의 경우  $30.5 \text{ mg kg}^{-1}$  이었고, 4차 및 5차 혐기성의 경우는  $51.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었다. 3차 처리조 여재 중 T-P의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 3차 처리조에서 여재 중 T-P의 함량은 표층이 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수 처리 5개월 후에는 표층 내 T-P의 함량이  $48.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았다. 이와 같이 1차 처리조 표층에서 T-P의 함량이 높은 것은 상기 유기물의 함량과 유사한 경향이였다.

4차 및 5차 혐기성조 여재의 T-P 함량은 3차 처리조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였고, 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였으며 그 차이는 미미하였다.

일반적으로 인은 기체 상태로 휘산 처리되는 기작이 없으므로 축산폐수처리장에서 인의 처리는 식물 및 미생물에 의한 흡수, 여재의 여과 및 흡착 그리고 침전 등이 주된 처리 기작이다. 특히 인공습지에서는 여재에 의한 인의 처리는 여과와 흡착이 주된 처리 과정이며, 인의 부하량이 여재의 흡착능력을 초과할 경우에는 누적되었던 인 성분이 세척이나 용출되어 오히려 유출수의 농도가 높게 나타날 수 있다 (Yang, 1999; Ministry of Home Affairs, 1995).

Table 3-65. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 T-N 및 T-P 함량

(Unit :  $\text{mg kg}^{-1}$ )

Bed	Section	Layer	T-N			T-P		
			At months after livestock wastewater treatment					
			1	3	5	1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		Surface	42	87	134	38.2	42.4	48.6
		Subsurface	38	51	72	32.5	37.1	40.2
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	Inflow	Surface	1,282	1,293	1,303	52.6	53.5	54.3
		Subsurface	1,277	1,283	1,295	52.1	52.7	53.2
	4 m	Surface	1,281	1,292	1,301	52.4	53.3	54.2
		Subsurface	1,279	1,281	1,292	52.0	52.2	52.9
	8 m	Surface	1,279	1,289	1,298	52.3	53.1	54.0
		Subsurface	1,277	1,286	1,294	51.9	52.1	52.7
	12 m	Surface	1,278	1,287	1,296	52.3	53.1	53.9
		Subsurface	1,274	1,282	1,291	51.9	52.2	52.6
	16 m	Surface	1,276	1,283	1,292	52.1	52.7	53.6
		Subsurface	1,271	1,279	1,288	51.7	52.3	52.7
	Outflow	Surface	1,274	1,279	1,287	52.9	52.6	53.1
		Subsurface	1,271	1,274	1,279	51.8	52.3	52.8
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	Inflow	Surface	1,269	1,273	1,281	51.9	52.3	52.8
		Subsurface	1,271	1,274	1,279	51.5	51.9	52.4
	Outflow	Surface	1,269	1,273	1,279	51.4	52.1	52.7
		Subsurface	1,268	1,272	1,275	51.2	51.8	52.4

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일별 여재의 K, Ca, Mg 및 Na 함량을 조사한 결과는 Table 3-66~3-67에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장에 사용된 원 여재중 K 함량은 3차 처리인 호기성조의 경우 15,688 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 혐기성조의 경우는 1,643 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차 처리조 여재의 K 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이었고, 3차 처리조 여재 중 K 함량은 표층이 다른 지점에 비해 증가폭이 큰 경향이였다. 4차 및 5차 처리조내 여재 중 K 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만 원 여재에 비해 증가하는 경향이였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Ca 함량은 3차 처리인 호기성조의 경우 69,373 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 처리인 혐기성조 경우는 1,451 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차, 4차 및 5차 처리조내 여재의 Ca 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점차 증가하였고, 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Mg 함량은 3차 처리인 호기성조의 경우 2,484 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 혐기성조 경우는 1,009 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차, 4차 및 5차 처리조 모두에서 여재 중 Mg 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Na 함량은 K, Ca 및 Mg 함량과 유사한 경향이였다.

Table 3-66. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 K 및 Ca 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Section	Layer	K			Ca		
			At months after livestock wastewater treatment					
			1	3	5	1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		Surface	15,841	16,002	16,117	69,841	69,941	70,124
		Subsurface	15,781	15,885	15,903	69,665	69,771	69,879
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	Inflow	Surface	1,685	1,741	1,812	1,529	1,575	1,673
		Subsurface	1,672	1,693	1,741	1,489	1,521	1,541
	4 m	Surface	1,668	1,688	1,694	1,481	1,494	1,513
		Subsurface	1,661	1,679	1,683	1,466	1,480	1,491
	8 m	Surface	1,666	1,672	1,681	1,458	1,463	1,471
		Subsurface	1,649	1,660	1,671	1,455	1,459	1,468
	12 m	Surface	1,659	1,667	1,676	1,457	1,463	1,469
		Subsurface	1,646	1,651	1,668	1,455	1,459	1,465
	16 m	Surface	1,651	1,658	1,667	1,457	1,462	1,468
		Subsurface	1,645	1,652	1,659	1,454	1,458	1,464
	Outflow	Surface	1,648	1,655	1,663	1,456	1,462	1,466
		Subsurface	1,644	1,651	1,658	1,453	1,458	1,462
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	Inflow	Surface	1,645	1,651	1,659	1,456	1,461	1,465
		Subsurface	1,644	1,649	1,658	1,453	1,457	1,461
	Outflow	Surface	1,643	1,650	1,657	1,453	1,457	1,461
		Subsurface	1,641	1,648	1,657	1,449	1,453	1,455

Table 3-67. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Mg 및 Na 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Section	Layer	Mg			Na		
			At months after livestock wastewater treatment					
			1	3	5	1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		Surface	2,494	2,498	2,511	321.6	330.2	331.4
		Subsurface	2,487	2,491	2,502	316.4	321.6	322.4
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	Inflow	Surface	1,023	1,032	1,038	325.7	326.4	327.7
		Subsurface	1,018	1,028	1,034	325.2	326.1	326.9
	4 m	Surface	1,021	1,029	1,037	325.6	326.2	327.5
		Subsurface	1,017	1,026	1,031	325.4	325.9	326.4
	8 m	Surface	1,018	1,025	1,035	325.4	326.1	327.3
		Subsurface	1,017	1,024	1,028	325.2	325.8	326.1
	12 m	Surface	1,017	1,022	1,031	325.1	325.7	327.1
		Subsurface	1,016	1,024	1,027	324.9	325.6	325.9
	16 m	Surface	1,015	1,021	1,029	324.8	325.5	326.8
		Subsurface	1,014	1,021	1,025	324.7	325.4	325.7
	Outflow	Surface	1,014	1,019	1,028	324.6	325.4	326.4
		Subsurface	1,012	1,017	1,021	324.4	325.1	325.4
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	Inflow	Surface	1,013	1,018	1,026	324.6	325.2	326.1
		Subsurface	1,011	1,015	1,017	324.2	324.8	325.3
	Outflow	Surface	1,012	1,016	1,024	324.5	325.2	325.9
		Subsurface	1,009	1,013	1,016	324.3	325.1	325.3

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일별 여재의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 함량을 조사한 결과는 Table 3-68~3-69에서 보는 바와 같다. 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 Fe 함량은 3차 호기성조의 경우 3,741 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 처리인 혐기성조 I, II의 경우는 2,972 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차, 4차 및 5차 처리조내 여재의 Fe 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만 전반적으로 모든 지점에서 점점 증가하는 경향이었고, 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Mn 함량은 3차 처리인 호기성조의 경우 149.2 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 처리인 혐기성조 I, II의 경우는 114.6 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차 처리인 호기성조 여재의 Mn 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 원 여재에 비해 약간 증가하였으며, 특히 표층의 경우 다른 지점에 비해 증가폭이 약간 큰 경향이였다. 3차, 4차 및 5차 처리조 심층에서 여재의 Mn 함량은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 다소 차이는 있었으나 전반적으로 미미하게 증가하는 경향이였고, 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Cu 함량은 3차 호기성조의 경우 1.34 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 혐기성조 I, II의 경우는 11.4 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차, 4차 및 5차 처리인 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조II 여재의 Cu 함량은 Fe 함량과 유사한 경향으로



축산폐수 처리시일에 따라 다소 차이는 있었지만 미미하게 증가하는 경향이었고, 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.

현장 축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Zn 함량은 3차 처리인 호기성조의 경우 85.5 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 4차 및 5차 처리인 혐기성조 I, II의 경우는 5.2 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 3차, 4차 및 5차 처리조내 여재의 Zn 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 표층과 심층에 구별 없이 모든 처리조에서 원 여재에 비해 약간 증가하는 경향이었고, 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.

Table 3-68. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Fe 및 Mn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Section	Layer	Fe			Mn		
			At months after livestock wastewater treatment					
			1	3	5	1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		Surface	3,773	3,755	3,764	149.8	150.2	151.2
		Subsurface	3,741	3,748	3,758	149.4	149.7	151.4
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	Inflow	Surface	2,984	2,992	2,999	115.6	116.3	116.8
		Subsurface	2,977	2,984	2,991	115.2	115.8	116.4
	4 m	Surface	2,983	2,990	2,997	115.4	116.1	116.5
		Subsurface	2,977	2,981	2,988	115.1	115.7	116.2
	8 m	Surface	2,981	2,988	2,994	115.3	115.8	116.3
		Subsurface	2,976	2,980	2,989	114.8	115.5	115.9
	12 m	Surface	2,979	2,984	2,991	115.1	115.7	116.1
		Subsurface	2,974	2,980	2,986	114.7	115.2	115.7
	16 m	Surface	2,976	2,981	2,988	115.0	115.4	115.8
		Subsurface	2,973	2,979	2,984	114.6	115.1	115.5
	Outflow	Surface	2,975	2,981	2,987	114.9	115.3	115.7
		Subsurface	2,972	2,977	2,983	114.6	114.9	115.4
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	Inflow	Surface	2,973	2,976	2,981	114.9	115.2	115.6
		Subsurface	2,972	2,970	2,972	114.6	114.8	115.3
	Outflow	Surface	2,972	2,973	2,974	114.6	114.9	115.3
		Subsurface	2,972	2,973	2,973	114.3	114.5	115.1

Table 3-69. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Cu 및 Zn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

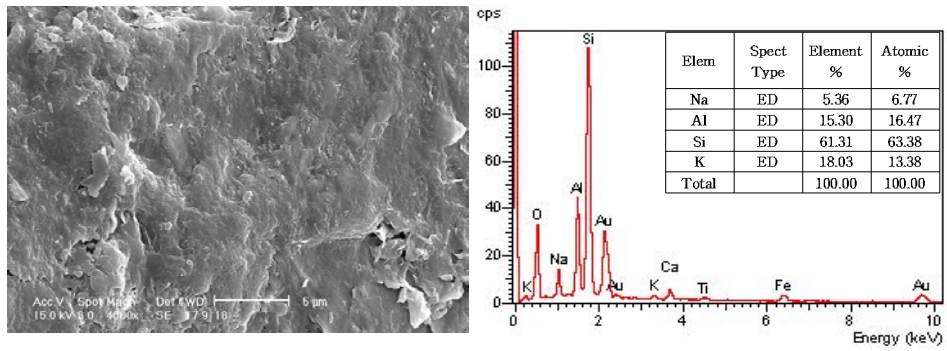
Bed	Section	Layer	Cu			Zn		
			At months after livestock wastewater treatment					
			1	3	5	1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		Surface	1.39	1.43	1.48	85.8	86.3	86.9
		Subsurface	1.37	1.38	1.44	85.9	86.3	86.3
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	Inflow	Surface	12.2	12.8	13.6	6.3	6.8	7.4
		Subsurface	11.8	12.4	12.8	6.1	6.6	7.1
	4 m	Surface	12.0	12.6	13.4	6.2	6.6	7.3
		Subsurface	11.7	12.3	12.7	6.1	6.5	7.0
	8 m	Surface	11.9	12.4	13.1	6.1	6.4	7.3
		Subsurface	11.6	12.1	12.6	5.9	6.2	6.9
	12 m	Surface	11.8	12.1	12.8	6.0	6.3	7.1
		Subsurface	11.6	12.0	12.4	5.8	6.1	6.8
	16 m	Surface	11.8	11.9	12.6	6.0	6.3	7.0
		Subsurface	11.5	11.9	12.3	5.6	5.9	6.6
	Outflow	Surface	11.6	11.9	12.4	5.9	6.2	6.9
		Subsurface	11.5	11.7	12.3	5.4	5.7	6.4
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	Inflow	Surface	11.6	11.8	12.3	5.8	6.2	6.9
		Subsurface	11.5	11.7	12.1	5.3	5.6	6.3
	Outflow	Surface	11.3	11.6	12.1	5.7	6.1	6.9
		Subsurface	11.4	11.5	11.8	5.2	5.6	6.2

나) 여재 표면의 무기성분 흡착특성

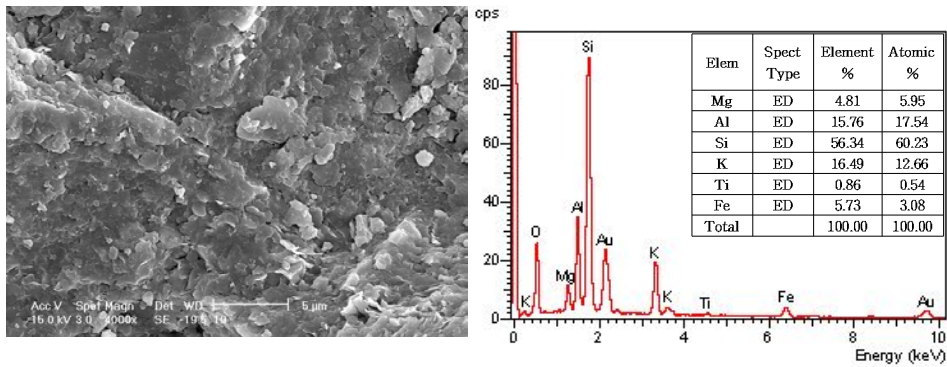
자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 원 여재와 축산폐수처리 5개월 후 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II 여재 표면을 SEM과 EDS로 분석한 결과는 Fig. 3-129~3-130에서 보는 바와 같다.

3차, 4차 및 5차 처리조내 여재표면의 전자현미경 사진을 보면 원 여재에 비해 호기성조, 혐기성조 I 및 혐기성조 II에서 축산폐수 처리시일이 경과됨에 따라 미생물이 급격히 증가되는 경향이였다. 또한 여재별 미생물 흡착은 전반적으로 별 차이 없었으나, 호기성조가 혐기성조 I, II에 비해 약간 많이 관찰되였다. 이는 호기성조에 2차 활성슬러지 처리수가 직접 유입되어 여과 처리됨으로서 대부분의 유기물들이 호기성조에 집적되었기 때문으로 사료된다.

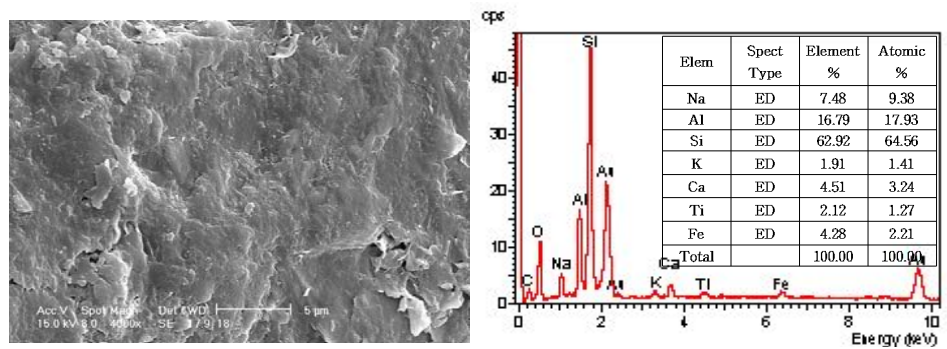
여재의 시기별 EDS 분석결과 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 여재 표면의 무기성분들은 원 여재에 비하여 함량이 증가하거나 원 여재에 없었던 새로운 원소들이 흡착되었고, 여재별 무기성분 흡착량은 별 차이 없었다. 특히, 호기성조 여재 표면의 무기성분은 혐기성조 I, II 여재 표면에 비해 흡착종류와 흡착량이 많았다. 이는 호기성조에는 2차 활성슬러지 처리수가 직접 유입되어 여과 처리됨으로서 대부분의 유기물들이 호기성조에 집적되었기 때문으로 사료된다.



호기성조 원 여재

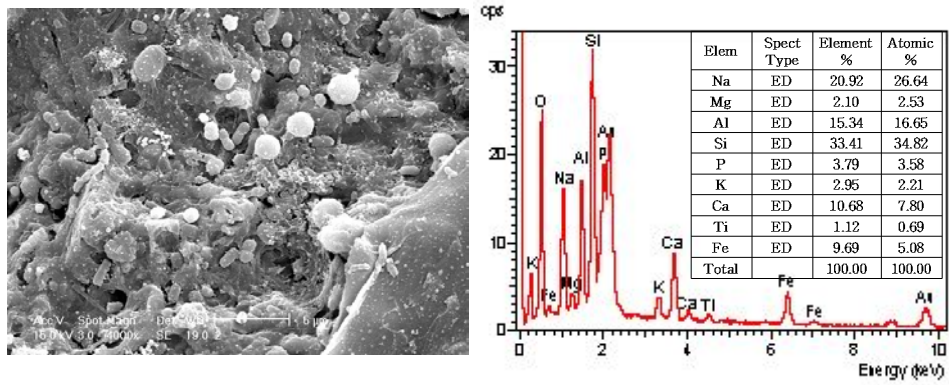


혐기성조 I 원 여재

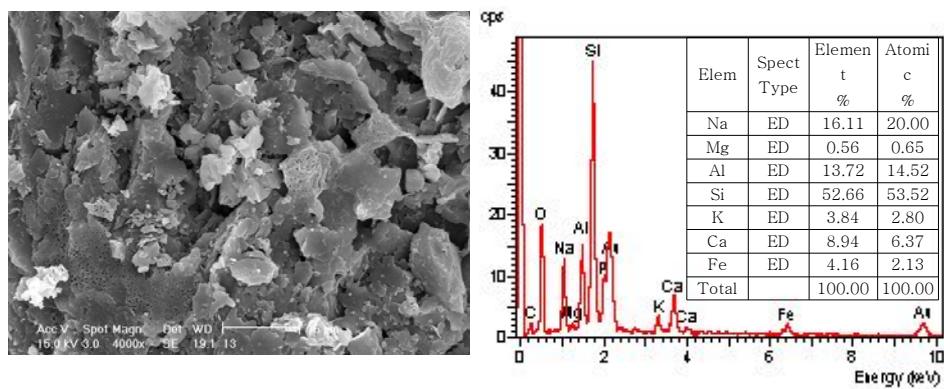


혐기성조 II 원 여재

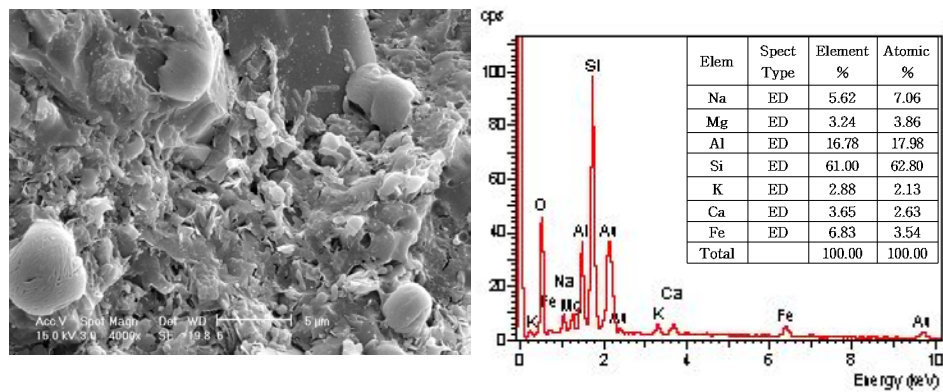
Fig. 3-129. 현장 축산폐수처리장에 사용된 여재의 SEM사진과 EDS 분석결과.



호기성조 5개월 후



혐기성조 I 5개월 후



혐기성조 II 5개월 후

Fig. 3-130. 현장 축산폐수처리장에 사용된 여재의 처리 5개월 후 SEM사진과 EDS 분석결과.

3) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량  
자연정화공법에 의한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 역할은 여재층의 유기물함량을 증가시켜 여재표면의 미생물의 생육을 촉진시키며, 여재의 입단형성이 촉진되어 여재 중 축산폐수의 투수속도를 증가시킬 뿐만 아니라 오염물질 처리효율을 증가시키는 것으로 알려져 있으며, 또한 자원순환형 현장 축산폐수처리장내에 수생식물이 생육함에 따라 여재층의 공극폐쇄현상을 크게 줄일 수 있고, 수생식물이 질소, 인 그리고 무기성분 등의 오염물질들을 흡수하는 역할을 한다. 따라서 수생식물의 생육상황은 축산폐수처리장의 수처리 효율과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 악취를 줄이고 미관상 혐오감을 크게 줄일 수 있는 등 자연정화공법에 의한 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 중요한 역할을 한다 (Green and Martin, 1996).

본 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대, 노랑꽃창포 및 부들 등 3종이었으며, 갈대, 노랑꽃창포 및 부들은 야외 노지에서 성장한 수생식물을 분주하여 이식하였다. 수생식물의 이식은 3차, 4차 및 5차 처리조에 갈대, 노랑꽃창포 및 부들을 재식거리가 30 cm가 되게 각각 이식하였다. 이식한 수생식물들은 생육시기에 따라 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

#### 가) 수생식물의 생육상황

자원순환형 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황은 Fig. 3-131~3-132에서 보는 바와 같이 2010년 7월에 수생식물을 이식하여 1, 3 및 5개월 후에 각각 조사하였다. 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 3차, 4차 및 5차 처리조 모두 축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물의 생육은 이식 후부터 3개월 동안 왕성하게 생육하였으며, 5개월 후에는 생육이 저조하였다.

수생식물의 생육 1개월 후인 2010년 8월의 생육상황을 조사한 결과 3차, 4차 및 5차 처리조내의 갈대, 노랑꽃창포 및 부들은 초기생육이 전반적으로 양호한 편이었다.

수생식물의 생육 3개월 후인 2010년 10월의 생육상황을 조사한 결과 수생식물의 생육 1개월에 비해 수생식물의 성장보다는 조 전체에 수생식물이 무성하게 퍼졌다. 특히 노랑꽃창포의 경우 타 수생식물에 비해 생육이 매우 좋았다. 처리조 내의 갈대도 수생식물의 생육 2개월에 비해 수생식물의 성장보다는 조 전체에 수생식물이 무성하게 퍼졌고, 생체중 및 잎수 등 생육발달이 양호하였다. 또한 4차 및 5차 처리인 혐기성조 I, II내의 노랑꽃창포는 노란꽃을 피워 타 수생식물의 푸른색과 조화를 이루어 축산농가와의 주위경관을 아름답게 조성하였다.

수생식물의 생육 5개월 후인 2010년 12월의 3차, 4차 및 5차 처리조내 각 수생식물의 생육상황을 조사한 결과 3차, 4차 및 5차 처리조 내의 모든 수생식물은 생육이 저조하였다. 이는 겨울철 식물의 고사로 인한 것으로 판단된다.



(호기성조 갈대 이식)



(혐기성조 I 창포 이식)



(혐기성조 II 부들 이식)



(각 조 이식 직후)

Fig. 3-131. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물 이식사진.



(이식 1개월 후)



(이식 2개월 후)



(이식 3개월 후)



(이식 5개월 후)

Fig. 3-132. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물 생육사진.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 처리조에 이식한 수생식물의 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 건물중량을 조사한 결과는 Table 3-70에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장 3차, 4차 및 5차 처리조내 갈대, 노랑꽃창포 및 부들의 건물중량은 수생식물 이식 3개월 후인 10월까지 서서히 증가하였다. 특히 노랑꽃창포의 건물중은 갈대 및 부들에 비해 월등히 높았다.

Table 3-70. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 건물중

Bed	Bayer code	Dry weight (g plant <sup>-1</sup> )		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	21.4	36.4	28.4
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	78.1	264.4	186.4
	PHRCO	15.82	31.47	17.24
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	65.48	204.8	175.4
	TYHOR	34.21	103.4	86.24

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

#### 나) 수생식물의 무기성분 함량

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 3차, 4차 및 5차 처리조에 수생식물 이식 후 1, 3 및 5개월 동안 수생식물의 생육시기별 식물체 중 무기성분 함량은 Table 3-71~3-80에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장의 3차, 4차 및 5차 처리조에 이식한 수생식물의 T-N 및 T-P의 함량은 수생식물 이식 후 미미하게 감소하기 시작하여 3개월 후인 2010년 10월경에 가장 낮았다. 현장 축산폐수처리장의 3차, 4차 및 5차 처리조에 이식한 수생식물의 K, Ca, Mg 및 Na 함량도 T-N과 T-P 함량과 비슷한 경향으로 수생식물이 이식한 7월부터 10월까지 축산폐수 처리시일이 경과할수록 약간씩 감소하였다.

축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물내의 중금속인 Fe, Cu, Mn 및 Zn 함량도 K, Ca, Mg 및 Na의 함량과 비슷한 경향이였다.

이와 같이 여름부터 가을까지 축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물내 무기성분과 중금속 함량이 약간씩 감소하였는데, 이는 수생식물이 성장함에 따라서 생체중이 급격히 증가하였지만 수생식물내의 무기성분 및 중금속함량 증가는 상대적으로 작았기 때문으로 생각되었으며, 겨울에는 수생식물내 무기성분과 중금속 함량이 약간씩 증가되었는데, 이는 수생식물이 고사하면서 생체중이 급격히 감소하여 수생식물내의 무기성분 및 중금속 함량이 상대적으로 증가되었기 때문으로 판단된다.

Table 3-71. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-N 함량

(Unit : %)

Bed	Bayer code	T-N		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.42	0.40	0.44
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	1.36	1.28	1.38
	PHRCO	0.38	0.36	0.38
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	1.25	1.22	1.23
	TYHOR	1.74	1.64	2.04

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-72. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-P 함량

(Unit : %)

Bed	Bayer code	T-P		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.13	0.16	0.19
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	0.25	0.24	0.25
	PHRCO	0.14	0.13	0.16
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	0.28	0.27	0.31
	TYHOR	0.14	0.16	0.21

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-73. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 K 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	K		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	2,321	2,812	3,852
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	54,254	49,125	52,312
	PHRCO	2,641	2,754	2,614
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	49,210	42,210	47,215
	TYHOR	4,826	4,258	4,652

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.



Table 3-74. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Ca의 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Ca		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	1,120	1,104	1,482
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	7,682	6,184	8,375
	PHRCO	980	876	1,054
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	5,690	5,287	5,847
	TYHOR	2,015	1,897	2,154

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-75. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mg 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Mg		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	702.4	695.4	1,154
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	2,425	2,357	2,561
	PHRCO	856.5	788.3	912.4
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	1,954	1,859	1,903
	TYHOR	2,241	2,571	2,452

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-76. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Na 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Na		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	432.4	372.5	298.5
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	106.5	131.2	346.5
	PHRCO	395.4	351.1	402.4
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	98.6	84.7	91.4
	TYHOR	264.3	216.4	301.2

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-77. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Fe 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Fe		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	115.6	106.4	123.5
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	103.6	104.4	111.5
	PHRCO	121.3	114.3	117.2
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	98.4	91.2	94.2
	TYHOR	108.5	104.8	119.2

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-78. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Mn		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	32.4	30.4	47.8
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	76.4	72.5	89.0
	PHRCO	29.4	29.1	31.4
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	70.2	68.4	71.4
	TYHOR	41.3	44.6	48.5

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-79. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Cu 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Cu		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	2.12	1.92	2.32
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	3.01	3.32	3.26
	PHRCO	2.45	2.21	2.46
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	3.42	3.40	3.62
	TYHOR	1.41	1.21	1.33

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-80. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Zn 함량

(Unit : mg kg<sup>-1</sup>)

Bed	Bayer code	Zn		
		At months after transplanting of plant		
		1	3	5
3 <sup>rd</sup> Aerobic bed	PHRCO	7.32	7.02	7.25
4 <sup>th</sup> Anaerobic bed I	IRIPS	8.74	8.51	9.12
	PHRCO	8.12	8.00	8.68
5 <sup>th</sup> Anaerobic bed II	IRIPS	9.26	8.45	9.12
	TYHOR	10.9	12.0	11.7

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

#### 다) 무기성분 흡수량

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II에 2010년 7월 이식한 수생식물을 1, 3 및 5개월 후에 각각 채취하여 식물체 중 무기성분 함량을 분석하고 건물생산량을 고려하여 무기성분 흡수량을 산출한 결과는 다음과 같다.

수생식물 생육시일에 따른 질소 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-133에서 보는 바와 같다. 질소 흡수량은 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II 모두에서 수생식물 이식 후 1개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 질소 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 질소 흡수량이 다시 감소하였다.

질소 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 3개월인 2010년 10월에 각 수생식물의 질소 흡수량은 호기성조에 이식한 갈대가 0.146 g plant<sup>-1</sup>, 혐기성조 I에 이식한 노랑꽃창포가 3.38 g plant<sup>-1</sup> 및 혐기성조 II에 이식한 부들이 1.70 g plant<sup>-1</sup>으로 노랑꽃창포 ≫ 부들 > 갈대 순이었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 질소 흡수량이 매우 높았다.

1차 수생식물여과조 및 2차 활성슬러지조에서 처리된 처리수 중의 질소는 대부분 토양입자 중의 점토 입자에 흡착되어 수생식물에 의해서 흡수되든지 혹은 미생물에 의해 분해 및 탈질됨으로서 제거되는 것으로 알려져 있으며 (Park et al., 1996), 유기태 질소는 침전과 여과로 제거되며, 이 유기태 질소는 더욱 분해되어 암모니아 이온을 방출하는 용존성 아미노산으로 가수분해되기도 한다. 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기 용이하고, 호기성 조건에서 생물학적 질산화에 의하여 질산태 질소로 전환되기도 한다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 암모니아태 질소와 질산태 질소로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기태 질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로서 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 되는 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 1999).

수생식물 생육시일에 따른 인 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-134에서 보는 바와 같다. 수생식물 이식 후 인 흡수량은 질소의 흡수량과 비슷한 경향으로 갈대, 노랑꽃창포 및 부들에서 수

생식물 이식 후 3개월까지 인 흡수량이 점점 증가하였다. 수생식물 이식 후 5개월 후인 12월에는 겨울철 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 수생식물의 인 흡수량이 다시 감소하였다.

인 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 3개월 후인 2010년 10월에 각 수생식물의 인 흡수량은 호기성조에 이식한 갈대가  $0.058 \text{ g plant}^{-1}$ 이었고, 혐기성조 I에 이식한 노랑꽃창포가  $0.634 \text{ g plant}^{-1}$ 이며, 혐기성조 II에 이식한 부들이  $0.16 \text{ g plant}^{-1}$ 으로 노랑꽃창포  $\gg$  부들  $>$  갈대 순이었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 월등히 높은 흡수량을 보였다.

식물이 흡수할 수 있는 인은  $\text{PO}_4$ ,  $\text{HPO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$ 의 형태이며, 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다 (Lee et al., 1999). Lee et al. (1994)은 인이 갈대 뿌리부의 산화층에서 식물에 의한 흡수가 활발한 반면 환원층에서는 인의 방출이 진행되고, 체류일수가 길어질수록 갈대에 의한 인의 흡수량이 많아져 인의 처리율이 향상되었다고 하였다. 습지식물로 흡수되는 인의 양은 질소에 비하여 매우 적으며, 인이 습지에 연간  $0.005 \text{ g plant}^{-1}$ 이 유입될 경우 약 65~95%가 식물에 의하여 제거되나  $0.001 \sim 0.015 \text{ g plant}^{-1}$ 이 유입될 경우는 식물에 의한 처리율이 30~40%로 낮아지는 경향으로서 인의 흡수량은 습지로 유입되는 인의 농도에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다 (Yang, 1999).

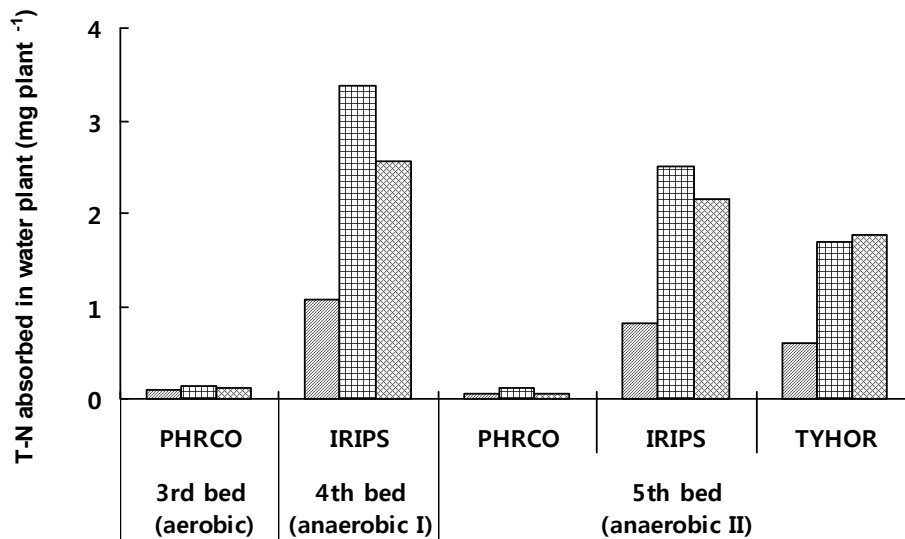


Fig. 3-133. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-N 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

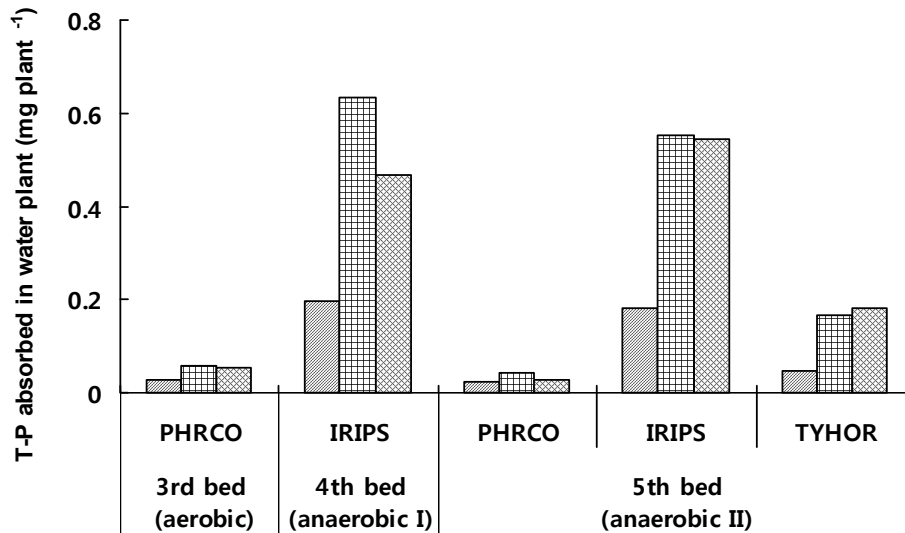


Fig. 3-134. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-P 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

수생식물 생육시기에 따른 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-135~3-138에서 보는 바와 같다. 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II 모두에서 수생식물 이식 후 축산폐수 처리 경과일수가 증가함에 따라 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 점점 증가하였다.

K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 호기성조와 혐기성조 모두에서 수생식물 이식 후 1개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 다시 감소하였다.

호기성조의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후인 2010년 10월에 갈대가 각각 0.102, 0.040, 0.025 및 0.013 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 또한 혐기성조 I의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후에 노랑꽃창포의 경우 12.99, 1.64, 0.62 및 0.03 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았고, 혐기성조 II 부들의 경우 0.44, 0.20, 0.27 및 0.02 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 따라서 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 전반적으로 노랑꽃창포 ≫ 부들 ≥ 갈대 순이었다.

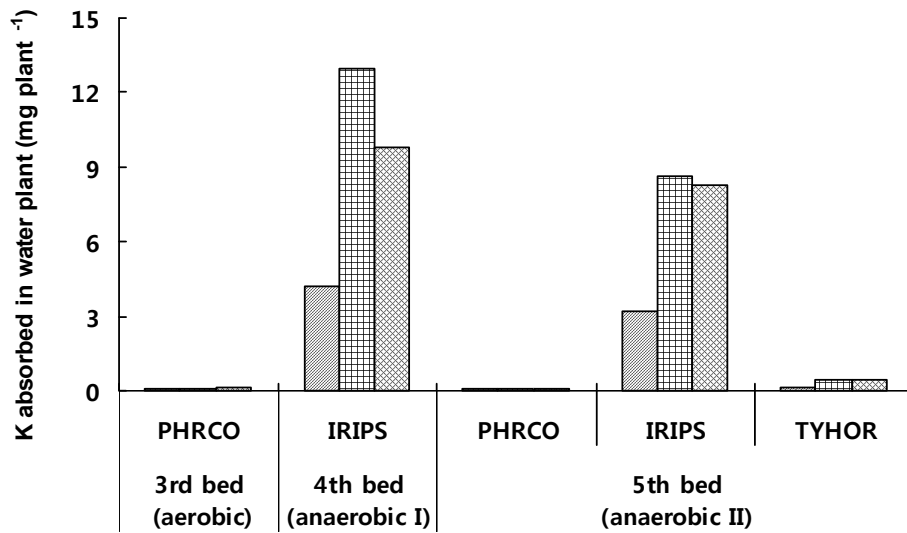


Fig. 3-135. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 K 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

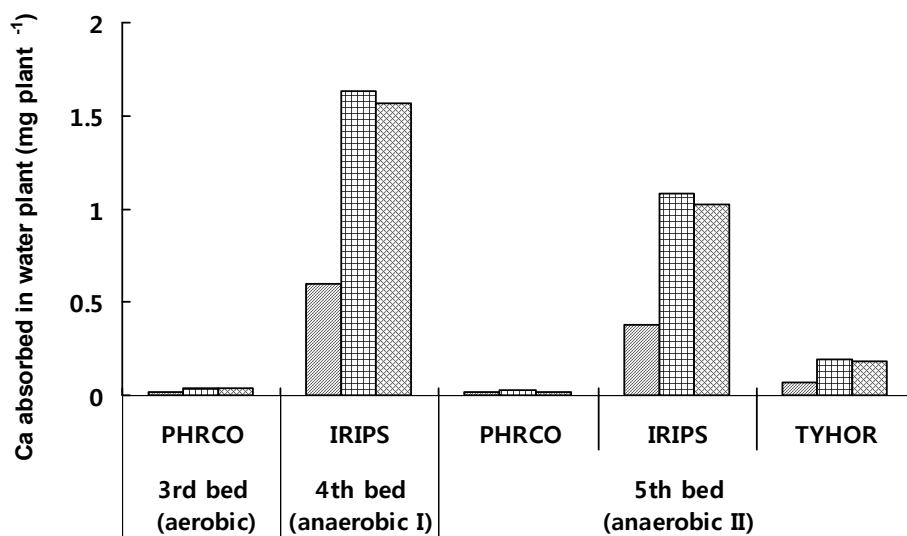


Fig. 3-136. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Ca 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

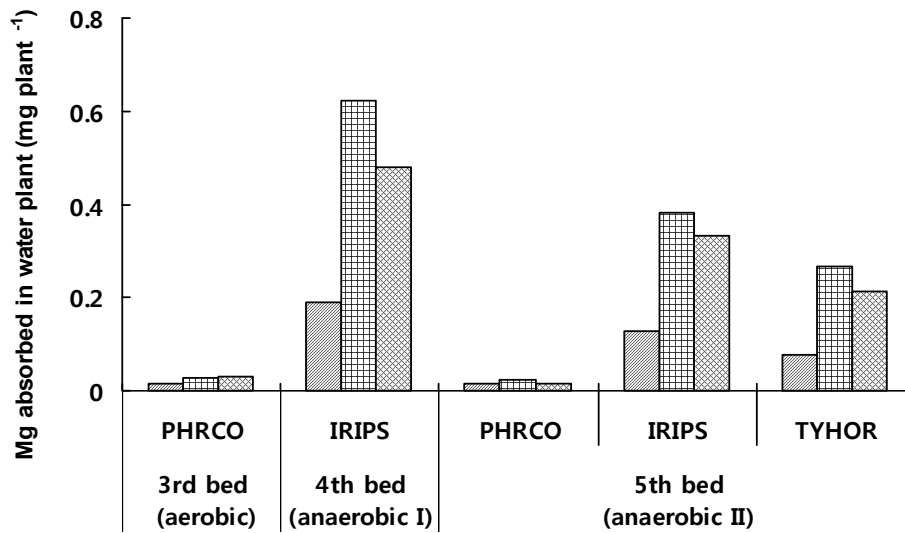


Fig. 3-137. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mg 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

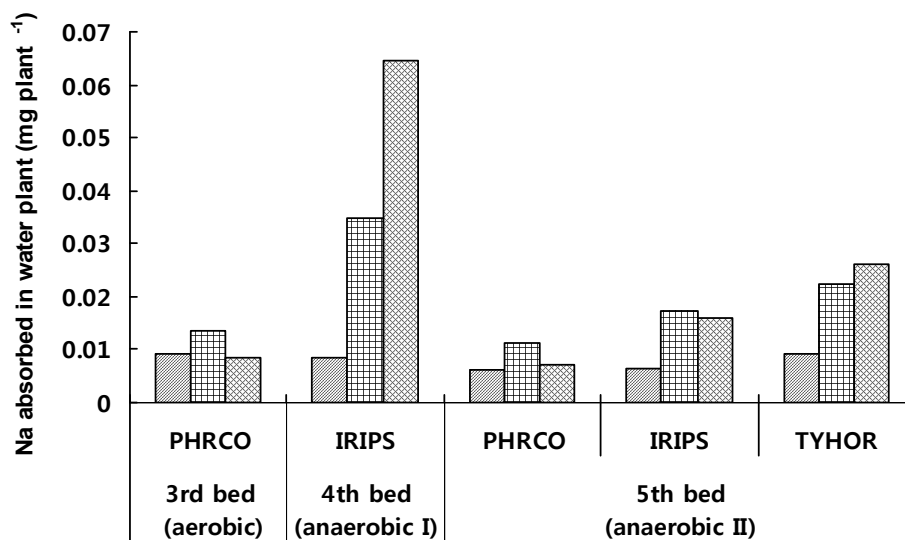


Fig. 3-138. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Na 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

수생식물 생육시기에 따른 Fe, Cu, Mn 및 Zn 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-139~3-142에서 보는 바와 같다. 호기성조, 혐기성조 I 및 혐기성조 II 모두에서 수생식물 이식 후 축산폐수처리 경과일수가 증가함에 따라 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 점점 증가하였다.

Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 호기성조, 혐기성조 I 및 혐기성조 II 모두에서 수생식물 이식 후 1~2개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 3개월 후인 가을철에는 수생식물의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 다시 감소하였다.

호기성조의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후인 2010년 10월에 갈대가 각각 0.003, 0.027, 0.070 및 0.0003 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 또한 혐기성조 I의 Fe, Cu, Mn 및 Zn 흡수량은 수생식물 이식 후 3개월 후에 노랑꽃창포의 경우 0.028, 0.019, 0.879 및 0.002 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았고, 혐기성조 II에 부들의 경우 0.010, 0.005, 0.126 및 0.001 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 따라서 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 전반적으로 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이었다.

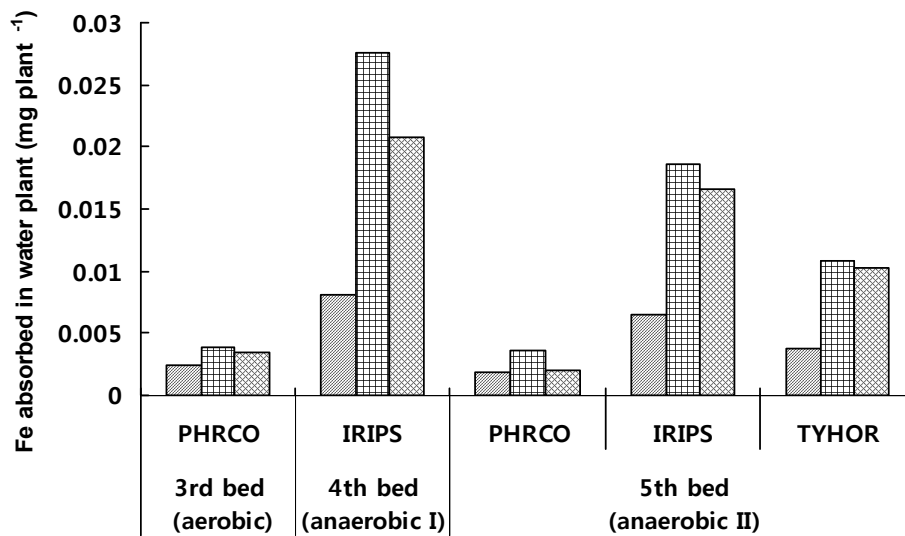


Fig. 3-139. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Fe 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.



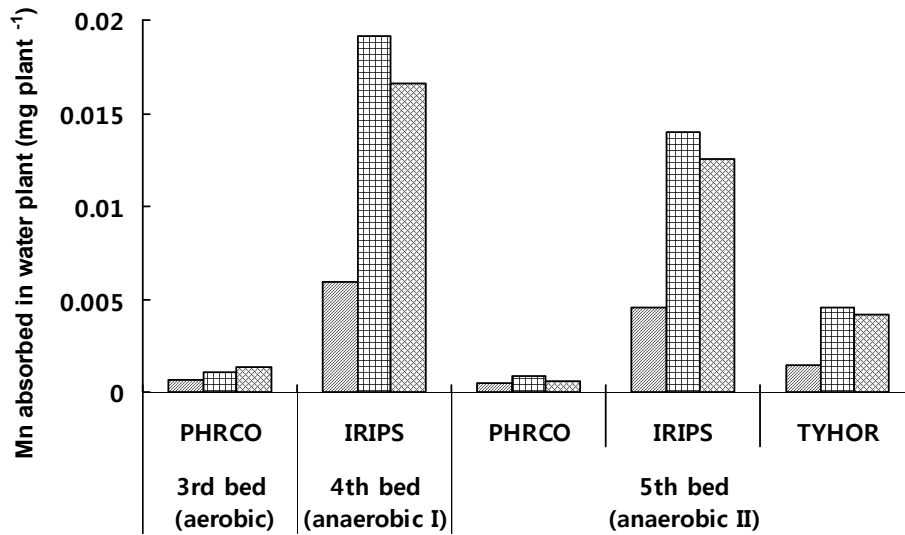


Fig. 3-140. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mn 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

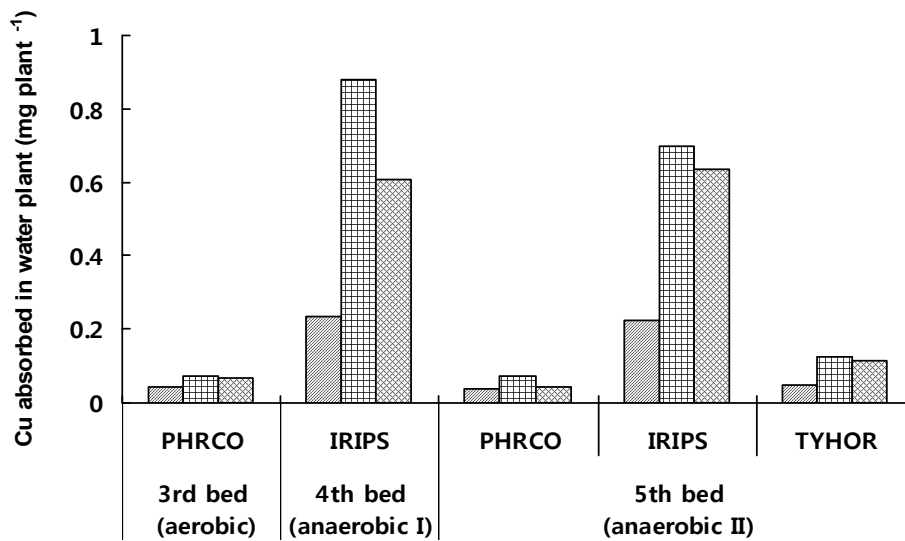


Fig. 3-141. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Cu 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

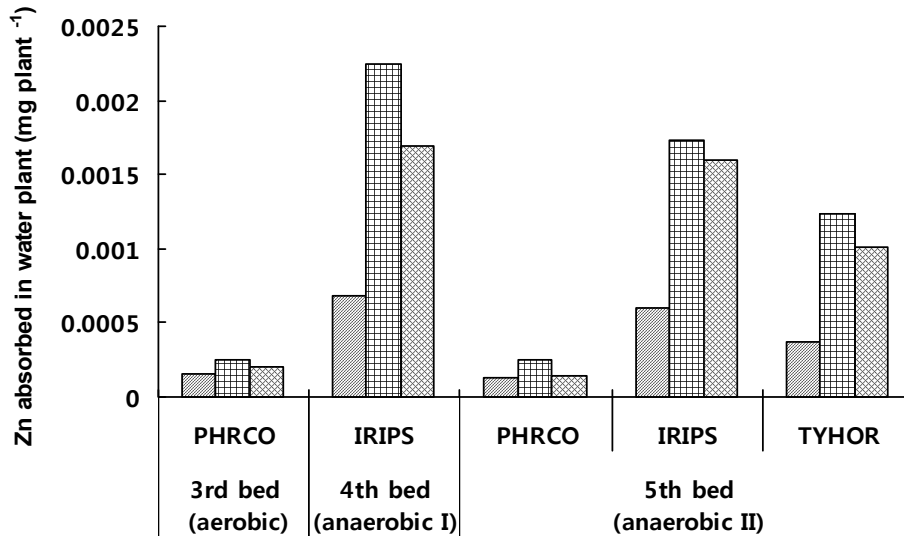


Fig. 3-142. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Zn 흡수량.

▨ : 1 month, ▩ : 3 month, ▤ : 5 month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

#### 4) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상

##### 가) 여재 표면의 미생물상

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 사용한 여재표면의 미생물상은 축산폐수 처리 1, 3 및 5개월 후에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 분석용 여재는 3차, 4차 및 5차 처리인 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II에서 각각 깊이별로 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 전반적인 미생물상의 밀도 분포는 총세균수가 가장 많았고 그 다음으로 일반세균, 셀룰로오스 분해균 및 사상균 순이었다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일별 총세균은 Table 81에서 보는 바와 같이 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만, 전반적으로 약간씩 증가하는 경향이였다. 특히 총세균은 3차 처리조가 4차 및 5차 처리조에 비해 약간 많았고, 전반적으로 표층이 심층에 비해 많았다. 이와 같이 3차 처리조의 총세균수가 많은 이유는 2차 처리인 활성슬러지조의 처리수가 3차 처리조에 먼저 여과되어 대부분의 유기물이 3차 처리조에서 가장 많기 때문으로 사료된다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일별 일반세균은 총세균과 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 모든 처리조에서 다소 차이는 있었으나 점점 증가하는 경향이였고, 전반적으로 표층이 심층에 비해 약간 높았다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일에 따른 3차, 4차 및 5차 처리조의 셀

플로오스 분해균 및 사상균은 총세균과 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었으나 점점 많아지는 경향이었고, 전반적으로 표층이 심층에 비해 많은 경향이 있었다. 특히, 셀룰로오스 분해균 및 사상균은 3차 처리조 표층이 다른 지점에 비해 많았고, 3차 처리조에서 4차 및 5차 처리조로 가면서 점점 낮아지는 경향이었다. 이는 3차 처리조의 경우 셀룰로오스 분해균 및 사상균이 생육할 수 있는 영양원 등의 생육조건이 좋았기 때문인 것으로 사료되며, 4차 및 5차 처리조의 경우 3차 처리조에서 대부분의 축산폐수가 처리됨으로서 셀룰로오스 분해균 및 사상균의 생육조건이 3차조에 비해 불리하기 때문으로 사료된다.

Table 3-81. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재표면의 총세균 변화

(Unit : CFU g<sup>-1</sup>)

	Months after treatment	3 <sup>rd</sup> Aerobic bed		4 <sup>th</sup> Anaerobic bed		5 <sup>th</sup> Anaerobic bed	
		Surface	Subsurface	Surface	Subsurface	Surface	Subsurface
총세균	1	4.54×10 <sup>5</sup>	3.89×10 <sup>5</sup>	3.91×10 <sup>5</sup>	3.63×10 <sup>5</sup>	2.96×10 <sup>5</sup>	2.74×10 <sup>5</sup>
	3	4.51×10 <sup>5</sup>	4.36×10 <sup>5</sup>	4.33×10 <sup>5</sup>	3.94×10 <sup>5</sup>	3.25×10 <sup>5</sup>	3.06×10 <sup>5</sup>
	5	4.98×10 <sup>5</sup>	4.47×10 <sup>5</sup>	4.46×10 <sup>5</sup>	4.35×10 <sup>5</sup>	3.48×10 <sup>5</sup>	3.22×10 <sup>5</sup>
일반세균	1	3.85×10 <sup>5</sup>	3.41×10 <sup>5</sup>	3.47×10 <sup>5</sup>	3.10×10 <sup>5</sup>	2.96×10 <sup>5</sup>	2.74×10 <sup>5</sup>
	3	4.12×10 <sup>5</sup>	3.71×10 <sup>5</sup>	3.83×10 <sup>5</sup>	3.42×10 <sup>5</sup>	3.25×10 <sup>5</sup>	3.06×10 <sup>5</sup>
	5	4.48×10 <sup>5</sup>	3.98×10 <sup>5</sup>	4.03×10 <sup>5</sup>	3.70×10 <sup>5</sup>	3.48×10 <sup>5</sup>	3.22×10 <sup>5</sup>
셀룰로오스 분해균	1	3.47×10 <sup>5</sup>	3.12×10 <sup>5</sup>	2.56×10 <sup>5</sup>	2.40×10 <sup>5</sup>	2.07×10 <sup>5</sup>	1.91×10 <sup>5</sup>
	3	3.57×10 <sup>5</sup>	3.38×10 <sup>5</sup>	2.75×10 <sup>5</sup>	2.57×10 <sup>5</sup>	2.05×10 <sup>5</sup>	1.95×10 <sup>5</sup>
	5	3.93×10 <sup>5</sup>	3.55×10 <sup>5</sup>	3.08×10 <sup>5</sup>	2.76×10 <sup>5</sup>	2.14×10 <sup>5</sup>	2.12×10 <sup>5</sup>
사상균	1	2.82×10 <sup>5</sup>	2.65×10 <sup>5</sup>	2.42×10 <sup>5</sup>	2.18×10 <sup>5</sup>	1.92×10 <sup>5</sup>	1.84×10 <sup>5</sup>
	3	2.99×10 <sup>5</sup>	2.79×10 <sup>5</sup>	2.81×10 <sup>5</sup>	2.43×10 <sup>5</sup>	2.10×10 <sup>5</sup>	1.97×10 <sup>5</sup>
	5	3.23×10 <sup>5</sup>	3.16×10 <sup>5</sup>	2.89×10 <sup>5</sup>	2.74×10 <sup>5</sup>	2.21×10 <sup>5</sup>	2.04×10 <sup>5</sup>

축산폐수 원수로 유입된 질소는 대부분이 NH<sub>4</sub>-N이고 이들은 호기성조에서 질산화되어 혐기성조에서 질산환원균과 탈질균에 의해 탈질이 일어나면서 질소와 아산화질소로 전환되어 이들이 대기 중으로 이동하여 질소가 처리되는 것으로 알려져 있다 (Yang, 1999).

본 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일별 암모니아산화균은 Fig. 3-143에서 보는 바와 같다. 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 3차, 4차 및 5차 처리조의 암모니아 산화균은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 전반적으로 미미하게 증가하는 경향이었다.

자원순환형 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일별 아질산산화균은 Fig. 3-144에서 보는 바와 같이 자원순환형 축산폐수처리장치에서 축산폐수의 처리시일이 경과함에 따라 전반적으로

증가하는 경향이었으며, 표층이 심층에 비해 약간 많았다.

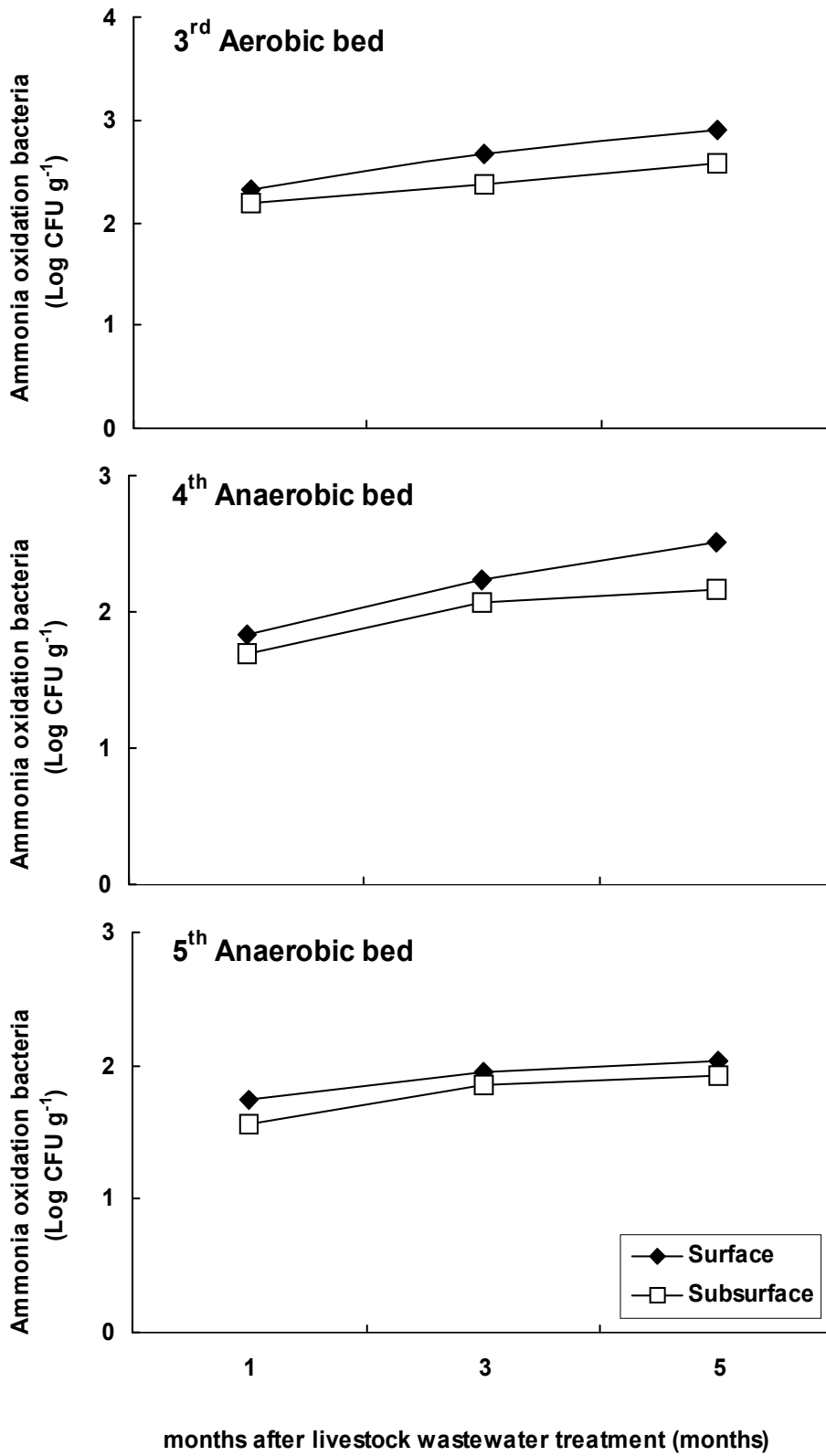


Fig. 3-143. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 암모니아산화균 변화.

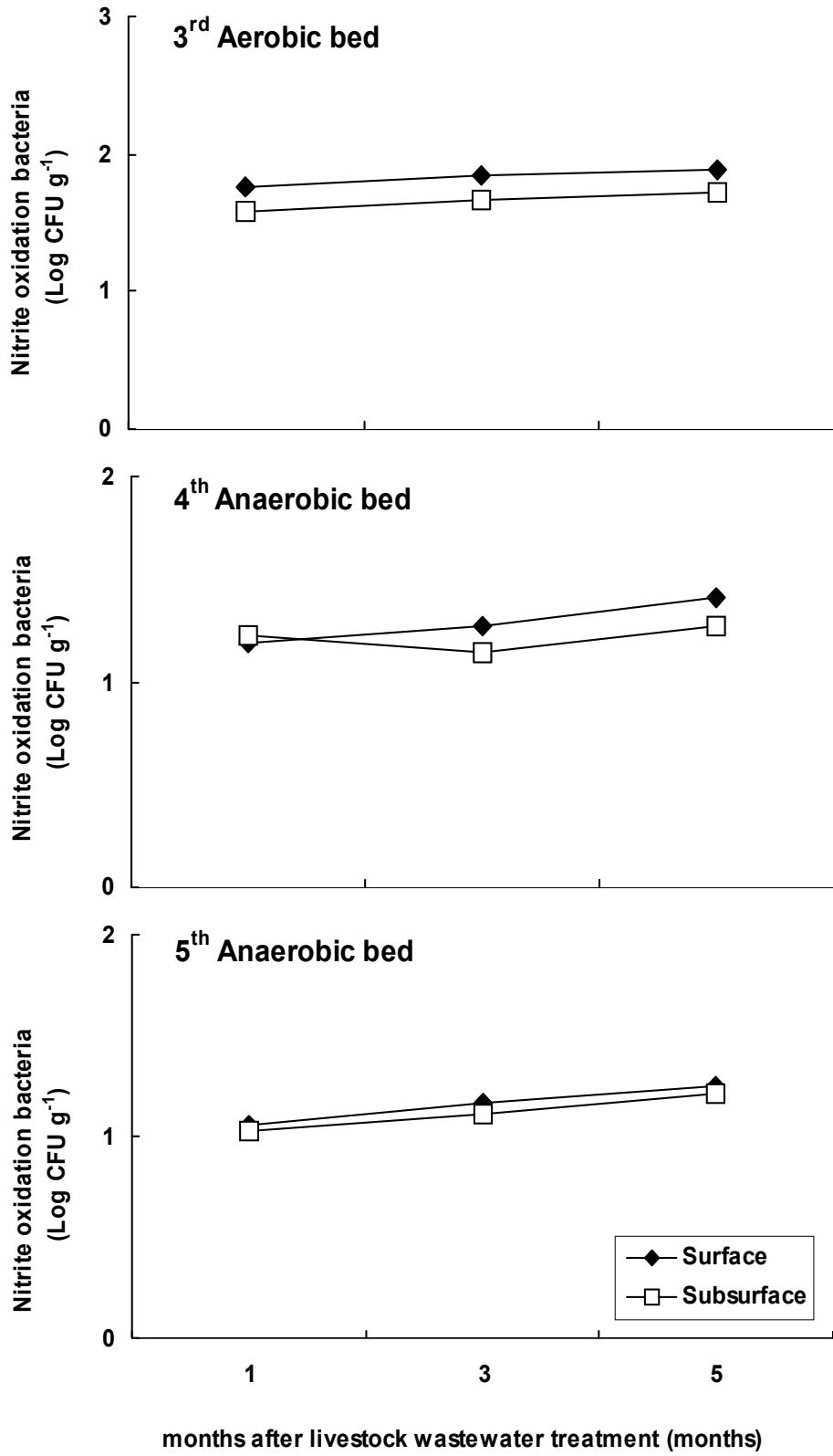


Fig. 3-144. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 아질산산화균 변화.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일별 질산환원균은 Fig. 3-145에서 보는 바와 같다. 3차, 4차 및 5차 처리인 호기성조, 혐기성조 I, 혐기성조 II의 질산환원균은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 전반적으로 미미하게 증가하는 경향이었고, 심층이 표층에 비해 많이 분포하였다. 특히 3차, 4차 및 5차 처리조의 표층은 겨울철 기온저하로 인해 질산환원균의 활성이 약간 감소되는 경향이었으나, 심층은 지온으로 인해 일정하게 유지되었다. 이와 같이 심층이 표층에 비해 질산환원균의 생육이 좋은 것은 혐기성조 심층에서 산소의 공급이 표층에 비해 원활하지 못하기 때문에 질산환원균의 생육에 오히려 적합하기 때문으로 사료된다. 특히 혐기성조의 표층의 경우 겨울철의 기온저하로 질산환원균이 적어지는 경향이였다.

자원순환형 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일별 탈질균은 Fig. 3-146에서 보는 바와 같이 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 전반적으로 미미하게 증가하였고, 심층이 표층에 비해 많았다. 이와 같이 심층이 표층에 비해 탈질균의 생육이 좋은 것은 질산환원균과 비슷한 경향으로 혐기성조 심층은 산소의 공급이 표층에 비해 원활하지 못하기 때문에 탈질균의 생육에 오히려 적합하기 때문으로 사료된다. 3차, 4차 및 5차 처리조의 탈질균은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 전반적으로 심층이 표층보다 많이 분포하였다.

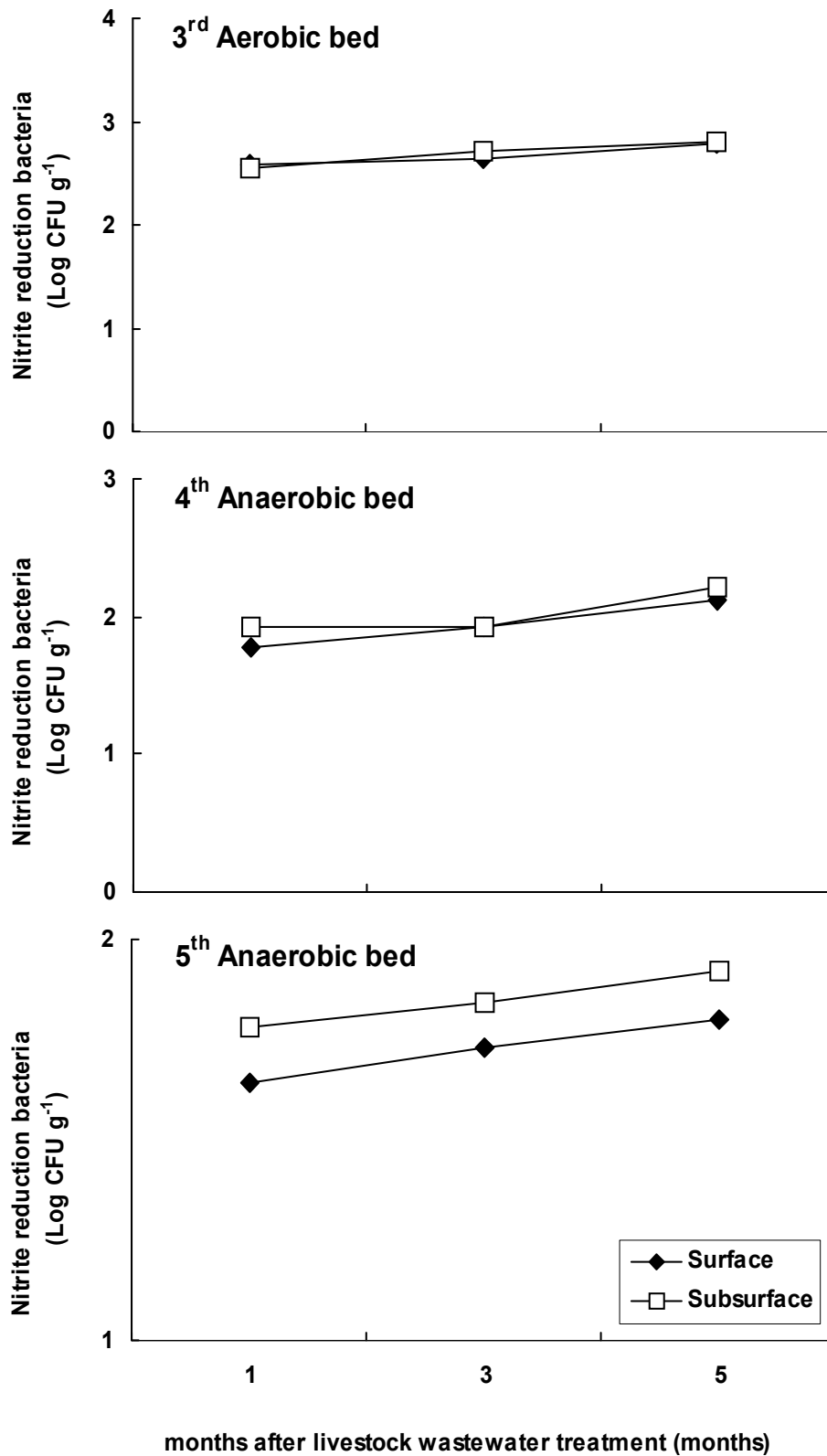


Fig. 3-145. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 질산환원균 변화.

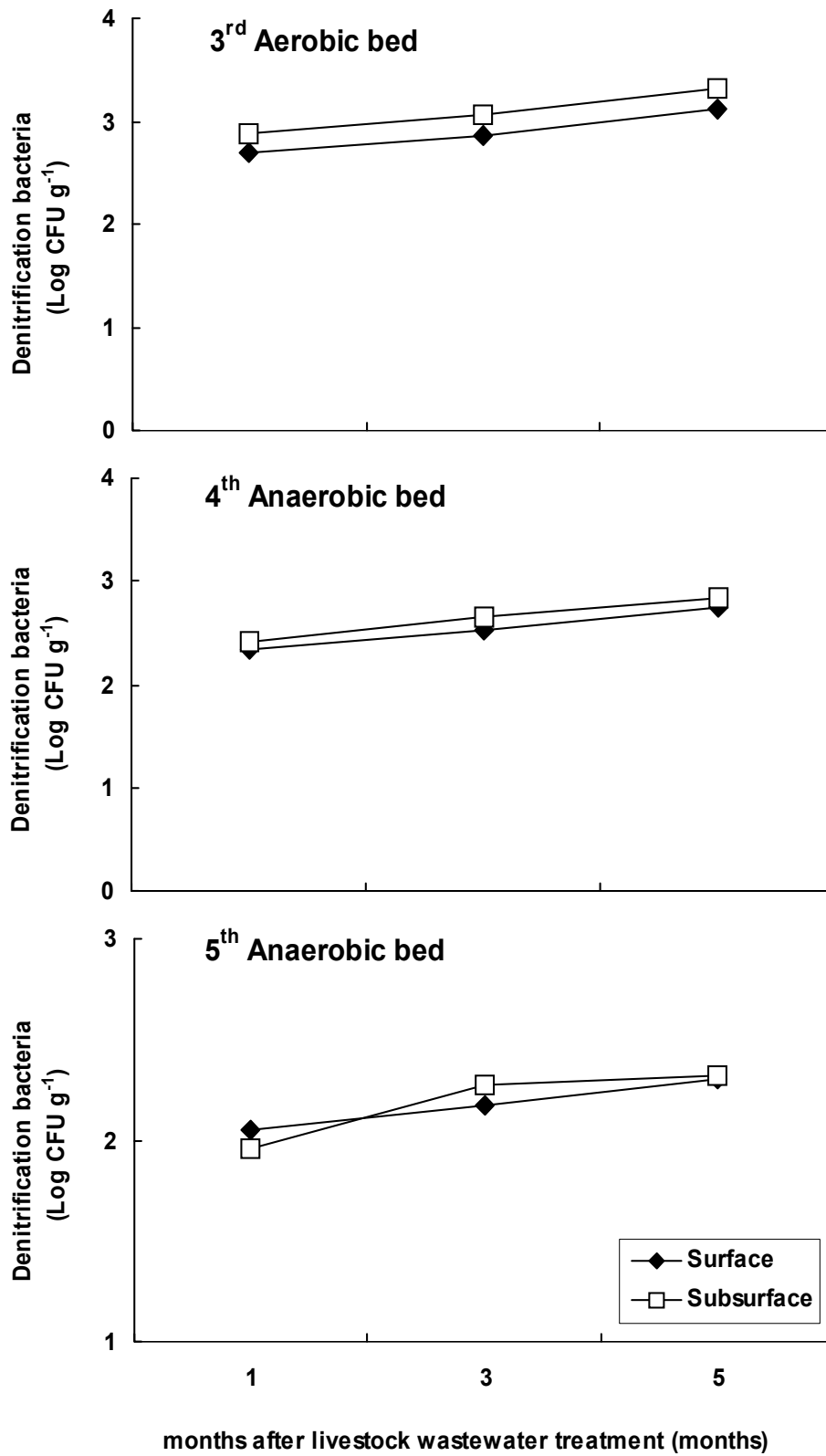


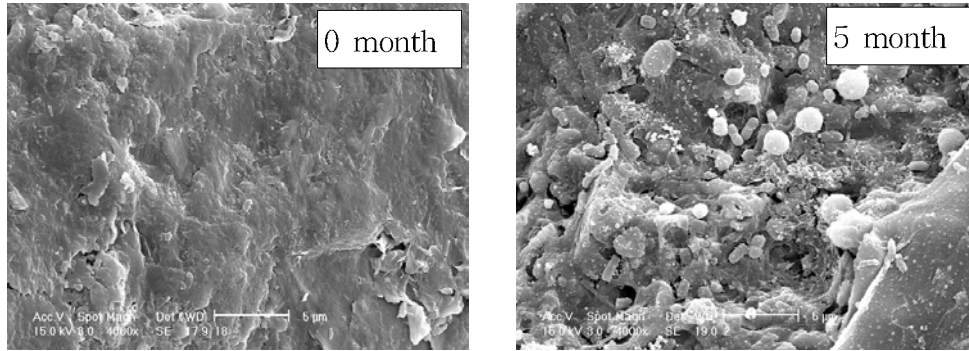
Fig. 3-146. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 탈질균 변화.



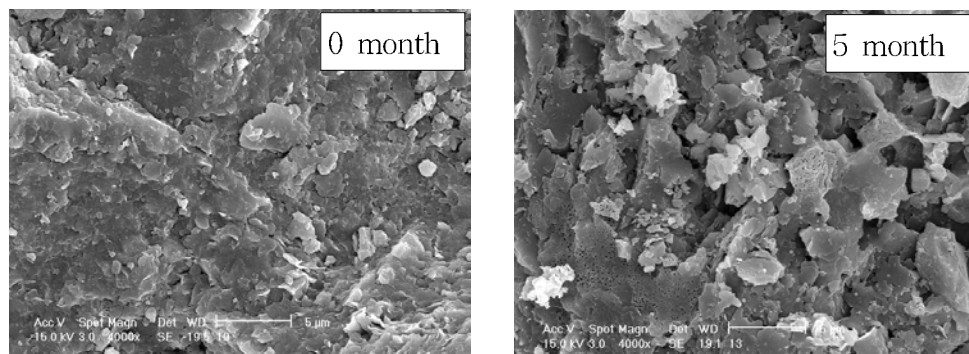
나) 여재 표면의 생물막 부착상태

현장 축산폐수처리장에서 원 여재와 축산폐수처리 5개월 후 여재 표면을 SEM으로 관찰한 결과는 Fig. 3-147에서 보는 바와 같다.

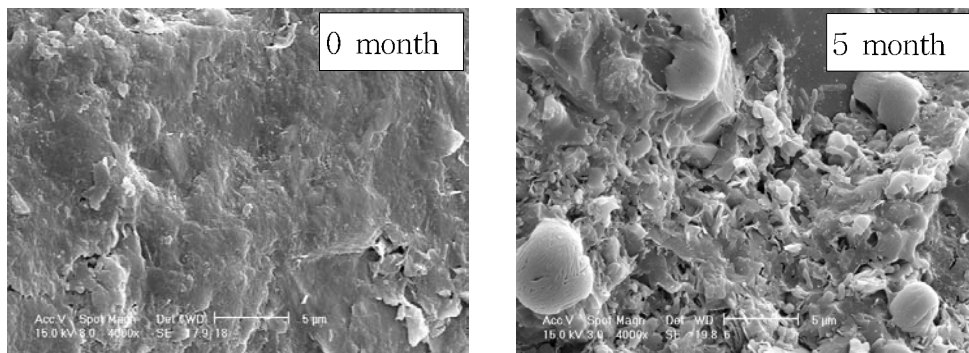
전자현미경 사진을 보면 축산폐수 처리 5월 후 여재 표면이 원 여재에 비해 미생물이 많이 분포되어 있었다. 또한 미생물 흡착은 호기성조 및 혐기성조에 전반적으로 별 차이 없었다.



호기성조 원 여재



혐기성조 I 원 여재



혐기성조 II 원 여재

Fig. 3-147. 현장 축산폐수처리장에 사용된 여재 표면의 생물막 부착상태.

다) 축산폐수 중 미생물상 변화

자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 처리수중의 일반세균 및 대장균을 조사한 결과로 Table 3-82에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 일반세균은 평균 약 1,285,000 CFU mL<sup>-1</sup>이었으며, 1차 및 2차 처리된 처리수 중의 일반세균은 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 축산폐수 처리시일이 증가함에 따라 점점 많아지는 경향이였다. 3차, 4차 및 5차 처리된 방류수 중의 일반세균은 1차 및 2차 처리수 중의 일반세균에 비하여 다시 큰 폭으로 감소하였고, 축산폐수 처리시일 증가함에 따라 별 차이 없었다.

축산폐수의 대장균군은 평균 약 247,000 CFU mL<sup>-1</sup>이었으며, 1차 및 2차 처리된 처리수 중의 대장균군은 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 점점 많아지는 경향이였다. 3차, 4차 및 5차 처리된 방류수 중의 대장균군은 1차 및 2차 처리수 중의 대장균군에 비하여 다시 큰 폭으로 감소하였고, 축산폐수 처리시일이 증가함에 따라 별 차이 없었다.

Table 3-82. 현장 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리시일에 따른 축산폐수 중 미생물상 변화 (Unit : CFU mL<sup>-1</sup>)

Items	Treatment	Raw Water	At months after livestock wastewater treatment		
			1	3	5
General bacteria	1 <sup>st</sup> treatment		624,000	689,000	712,000
	2 <sup>nd</sup> treatment		8,320	9,540	11,300
	3 <sup>rd</sup> treatment	1,285,000	4,210	4,820	5,400
	4 <sup>th</sup> treatment		1,880	2,150	2,750
	5 <sup>th</sup> treatment		540	860	1,020
<i>E.coli</i>	1 <sup>st</sup> treatment		137,000	151,000	178,000
	2 <sup>nd</sup> treatment		32,400	43,200	59,200
	3 <sup>rd</sup> treatment	247,000	4,250	5,640	7,250
	4 <sup>th</sup> treatment		1,980	2,560	3,020
	5 <sup>th</sup> treatment		860	1350	1,750

5) 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링

CXTFIT모델을 적용한 여재종류별 대조구인 브롬의 흡착/이동 특성을 조사한 결과는 Fig. 3-148과 같이 췌석, 방해석, 왕사 및 제올라이트의 반응비는 초기 일정농도의 pore volume 까지는 낮은 반응비를 나타냈으며, 이후 급격히 증가하는 경향이였다. 췌석은 초기 0.5 pore volume까지 반응비가 매우 낮았으며, 0.5 pore volume부터는 반응비가 급격히 증가하여 2.2 pore volume에서 반응비가 1이었으며, 이후 약 5 pore volume까지 반응비는 급격히 감소하였다. 방해석은 초기 0.25 pore volume까지는 반응비가 매우 낮았으며, 이후 반응비가 급격히 증가하여 1.2 pore volume에서 반응비가 1이었다. 왕사는 췌석과 유사한 경향으로 초기 0.6 pore volume까지는 반응비가 매우 낮았으며 0.6 pore volume부터는 반응비가 급격히 증가하여 약 1.7 pore volume에서 반응비가 1이었고, 이후 반응비는 급격히 감소하여 약 5 pore volume부터 0에 가까운 반응비를 나타내었다. 제올라이트는 초기 0.25 pore volume까지는 반응비가 매우 낮았으며, 이후 반응비가 급격히 증가하여 약 1.2 pore volume에서 반응비가 1이었다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 CXTFIT모델을 이용한 예측결과는 실제 분석치와 거의 일치하였다. 따라서 향후 CXTFIT모델을 활용한다면 여재종류별로 정확한 흡착량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 브롬은 여재와의 어떠한 흡착반응도 일어나지 않는다고 하였는데, 본 실험의 결과도 동일한 경향으로 일정시간이 경과함에 따라 모든 여재에서 반응비가 1에 도달하는 것을 확인할 수가 있었고, 여재종류별 반응비 1에 도달하는 pore volume의 차이는 여재입경 차이로 인한 투수속도의 차이로 판단된다.

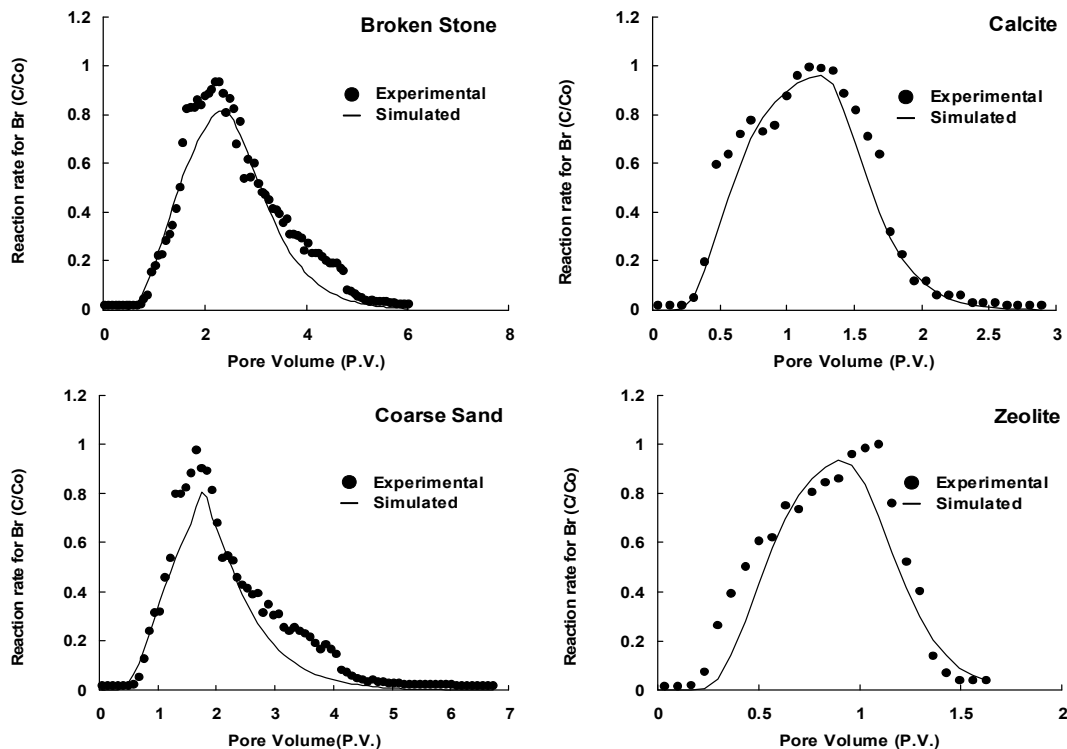


Fig. 3-148. Reaction rate ( $C/C_0$ ) of Br in effluent at different filter media in column.

CXTFIT모형을 적용한 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착/이동 특성은 Fig. 3-149와 같이 설택은 초기 0.3 pore volume까지 반응비가 0이었으며, 이후 서서히 증가하여 약 1.5 pore volume에서 가장 높은 0.15의 반응비를 나타내었다. 방해석은 초기 1.2 pore volume까지 0보다 낮은 반응비를 나타냈으며, 약 1.5 pore volume에서 반응비가 0.16으로 최고 반응비를 보였다. 이후 방해석의 반응비는 서서히 감소하여 4 pore volume부터는 매우 낮은 반응비를 나타내었다. 왕사는 초기 0.3 pore volume까지는 반응비가 낮았으며, 이후 반응비가 급격히 증가하여 1.1 pore volume에서 0.32로 최고 반응비를 나타냈다. 제올라이트는 pore volume이 증가함에 따른 반응비의 변화는 큰 차이 없이 0 이하로 유지되었다. 이와 같이 제올라이트는 설택, 방해석 및 왕사와 달리 암모니아성 질소의 흡착능력이 우수하였기 때문으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 설택, 방해석 및 왕사의 반응비는 유사한 경향으로 변화하였으며, 제올라이트의 반응비의 변화는 큰 차이 없이 조사되었다. 또한 이들의 결과를 이용하여 CXTFIT모형으로 실제 분석치와 비교해본 결과 유사함을 알 수 있었다.

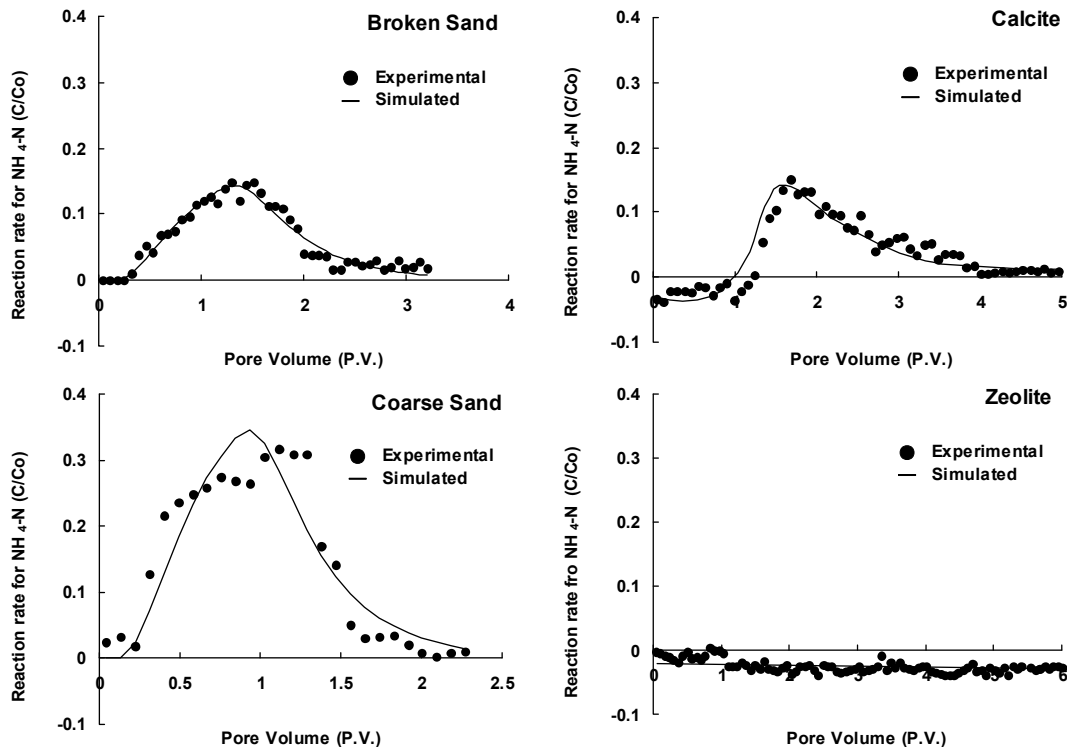


Fig. 3-149. Reaction rate ( $C/C_0$ ) of  $\text{NH}_4\text{-N}$  in effluent at different filter media in column.

CXTFIT 모형을 적용한 여재종류별 질산성 질소의 흡착/이동 특성은 Fig. 3-150을 보는 바와 같이 설택, 방해석, 왕사 및 제올라이트의 반응비는 전반적으로 초기 낮은 농도의 pore volume부터 서서히 증가하여 일정농도의 pore volume에서 최고 반응비를 나타냈으며, 이후 감소하는 경향이였다. 또한 CXTFIT모형을 실제 분석치와 비교해본 결과 유사함을 알 수 있었다. 설택은 0 pore volume부터 꾸준히 증가하여 1.3 pore volume에서 최고 반응비인 0.43를 나

타냈으며, 이후 pore volume의 농도가 증가할수록 반응비가 감소하였다. 방해석은 초기 1.2 pore volume까지는 반응비가 낮게 유지 된 후 1.2 pore volume부터 반응비가 증가하여 1.6~2.0 pore volume 범위에서 최고 반응비를 보였다. 왕사는 초기 0.2 pore volume까지는 반응비가 매우 낮았고, 0.2 pore volume부터는 반응비가 급격히 증가하여 1 pore volume에서 반응비가 0.48로 가장 높았으며, 이후 반응비는 급격히 감소하여 1.4 pore volume부터는 0.6~0.8 범위의 반응비를 유지하였다. 제올라이트는 초기 0 pore volume부터 반응비가 꾸준히 증가하여 약 1.1 pore volume에서 반응비가 0.4로 가장 높았다.

질산성 질소는 암모니아성 질소와는 달리 음전하이기 때문에 (-)하전인 토양입자에 부동화되지 않으므로 훨씬 더 이동성이 크며, 침투수와 함께 잘 이동하는 특징이 있다. 따라서 효과적인 질산성 질소의 처리를 위해서는 여재의 흡착에 의한 처리보다는 생물학적 탈질에 의해 처리해야 할 것으로 사료된다.

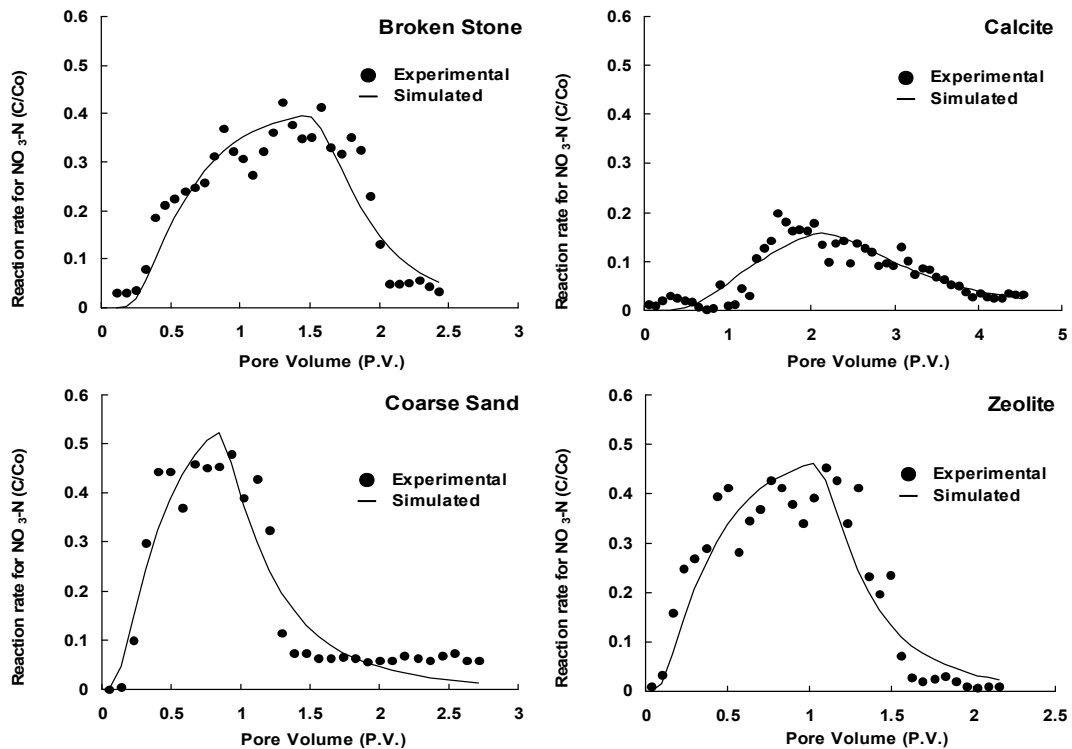


Fig. 3-150. Reaction rate (C/C<sub>0</sub>) of NO<sub>3</sub>-N in effluent at different filter media in column.

CXTFIT모형을 적용한 여재 종류별 인의 흡착/이동 특성은 Fig. 3-151에서 보는 바와 같이 쇠석은 초기 0 pore volume부터 반응비가 급격히 증가하여 약 1.5 pore volume에서 가장 높은 0.33의 반응비를 나타내었다. 방해석은 초기 1.2 pore volume까지 0보다 낮은 반응비를 나타냈으며, 약 1.5 pore volume에서 반응비가 0.16으로 최고 반응비를 보였고, 이후 방해석의 반응비는 서서히 감소하여 4.2 pore volume부터는 매우 낮은 반응비를 나타내었다. 왕사는 쇠석과 유사한 경향으로 초기 0 pore volume부터 급격히 증가하여 0.5~1.3 pore volume범위에서 최고

반응비를 보였으며, 이후 급격히 감소하였다. 제올라이트는 초기 0 pore volume부터 반응비가 꾸준히 증가하여 1.8 pore volume에서 0.19로 최고 반응비를 나타냈으며, 이후 감소하는 경향이였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 쇄석과 왕사, 방해석과 제올라이트는 서로 유사한 경향의 반응비 변화를 나타냈으며, 이들의 결과를 CXTFIT모델로 실제 분석치와 비교해본 결과 유사함을 알 수 있었다.

따라서 인을 가장 효과적으로 처리할 수 있는 여재는 방해석임을 알 수 있었다.

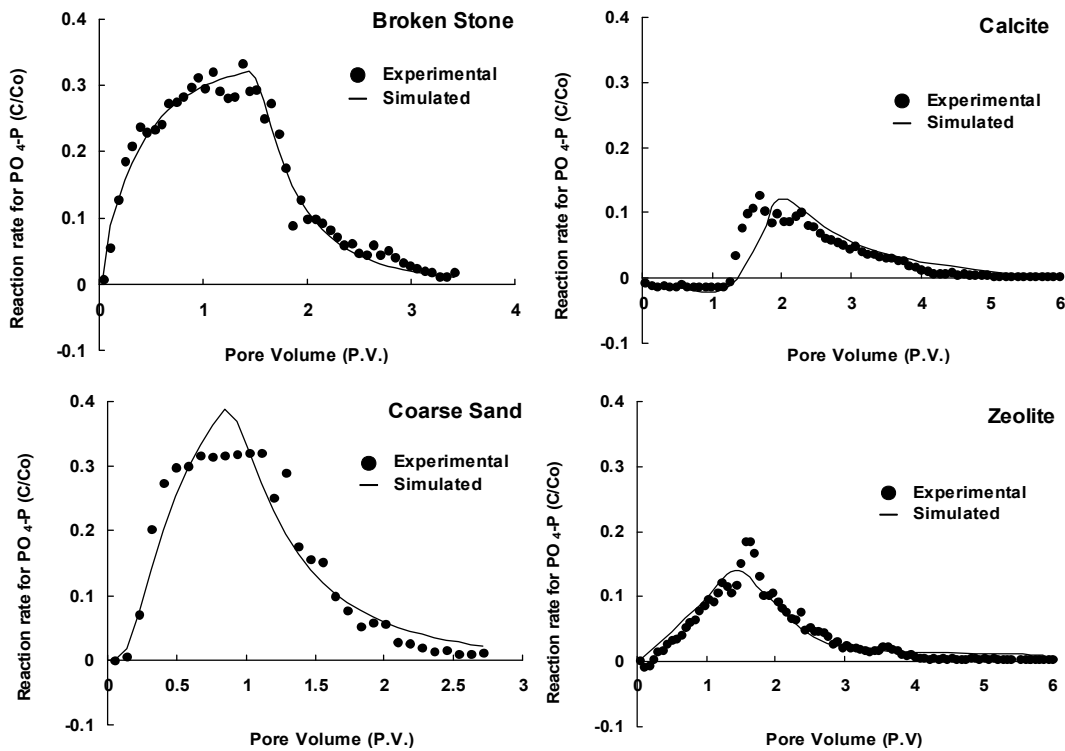


Fig. 3-151. Reaction rate( $C/C_0$ ) of  $PO_4\text{-P}$  in effluent at different filter media in column.

나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발

1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율조사

가) 수생식물별 퇴비화 (composting) 기간 결정

(1) 온도변화

수생식물별 퇴비화 과정 중 온도 변화 결과는 Fig. 3-152에서 보는 바와 같다. 퇴비화 기간 중 최고온도는 모든 수생식물에서 퇴비화 후 5일째에 나타났다. 대조구인 톱밥을 사용한 경우의 최고온도는 75°C였고, 갈대, 부들 및 줄의 처리구에서는 65~70°C로 부들이 다른 수생식물에 비해 70°C로 가장 높았다. 모든 처리구에서 퇴비화 기간 중 최고점을 지난 이후 퇴비내 온도가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이 후 갈대는 퇴비화 25일째, 부들과 줄은 톱밥과 비슷하게 40일째부터 퇴비내 온도가 40°C내외로 안정한 상태를 유지 하였다.

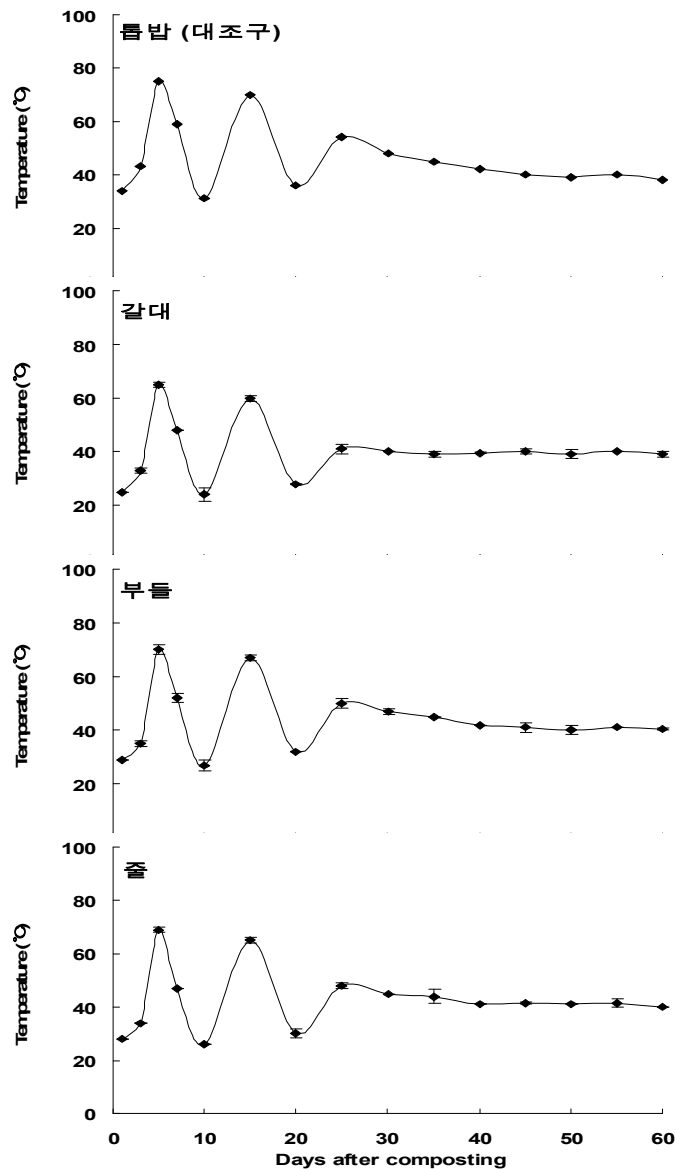


Fig. 3-152. 수생식물별 돈분 퇴비화 과정 중 온도 변화.

(2) pH 변화

수생식물별 퇴비화 과정 중 pH 변화는 Fig. 3-153과 같이 초기 pH는 6.67~6.71로 큰 차이가 없었다. 퇴비화가 진행될수록 암모니아 발생량이 증가하여 모든 처리구에서 20일째까지는 pH가 꾸준히 증가하였으며 이후에는 pH가 7.77~7.95의 상태로 큰 차이 없이 일정한 값을 유지하였다.

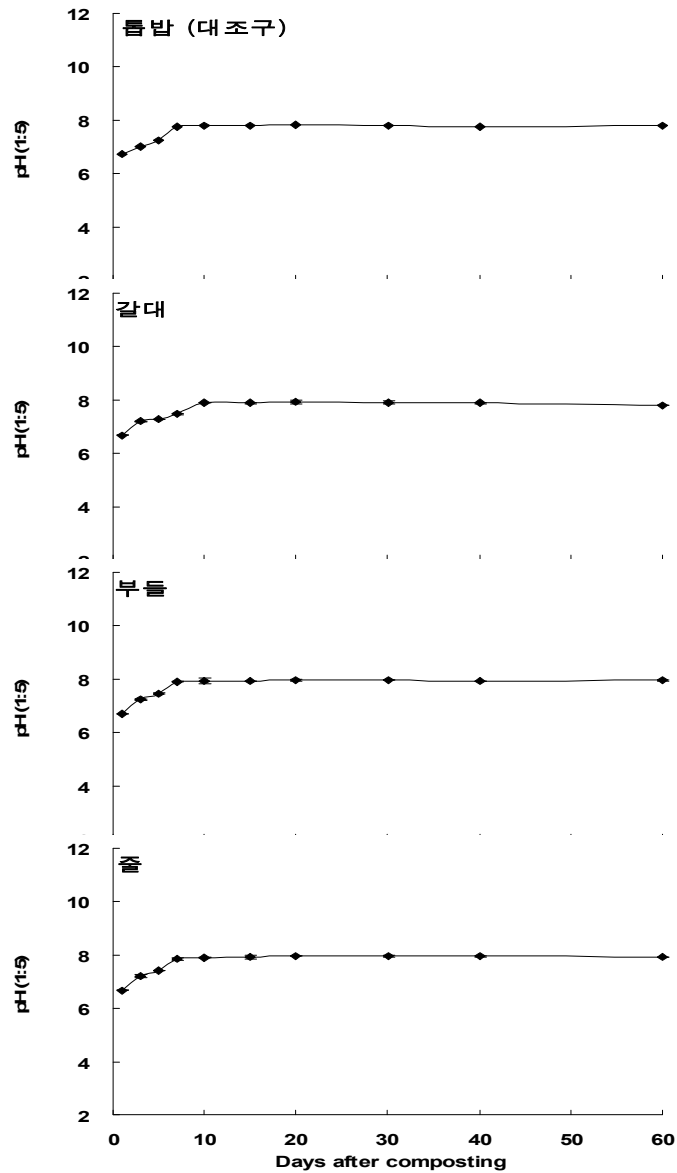


Fig. 3-153. 수생식물별 퇴비화 과정 중 pH 변화.



### (3) 총 질소

수생식물별 퇴비화 과정 중 T-N 함량 변화는 Fig. 3-154에서 보는 바와 같다. 각 처리구별 초기 T-N 함량은 1.21~1.86%범위로 갈대의 T-N 함량이 1.86%로 가장 높았으며, 수생식물의 퇴비화 시작부터 퇴비화가 완료된 60일째까지 각 처리구의 T-N 함량은 수생식물에 따라 별 차이 없이 1.64~2.30%로 계속 증가하는 경향이였다.

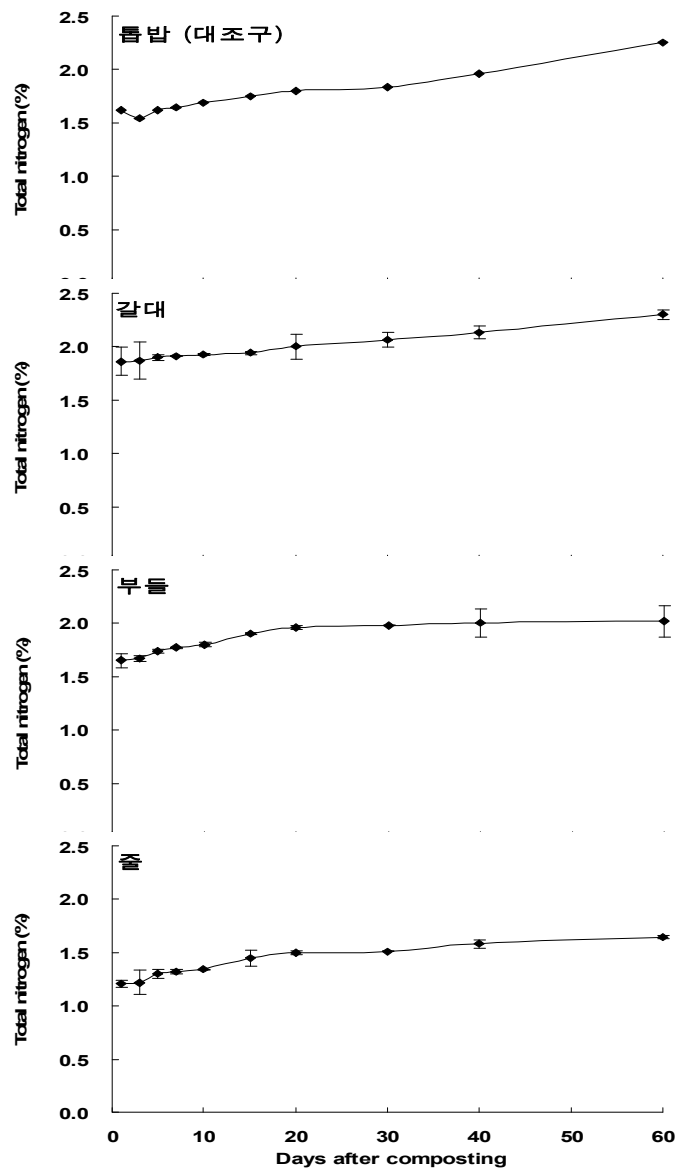


Fig. 3-154. 수생식물별 퇴비화 과정 중 총 질소 함량 변화.

#### (4) 총 탄소

수생식물별 퇴비화 과정 중 T-C 함량 변화는 Fig. 3-155에서 보는 바와 같이 부들과 줄의 T-C 함량이 55.2~55.6%로 톱밥과 갈대의 비해 높았으며, T-N 함량 변화와는 달리 T-C 함량은 60일째까지 서서히 감소하는 경향으로 60일째에 각 처리구별 T-C 함량은 41.7~50.9%로 나타났다.

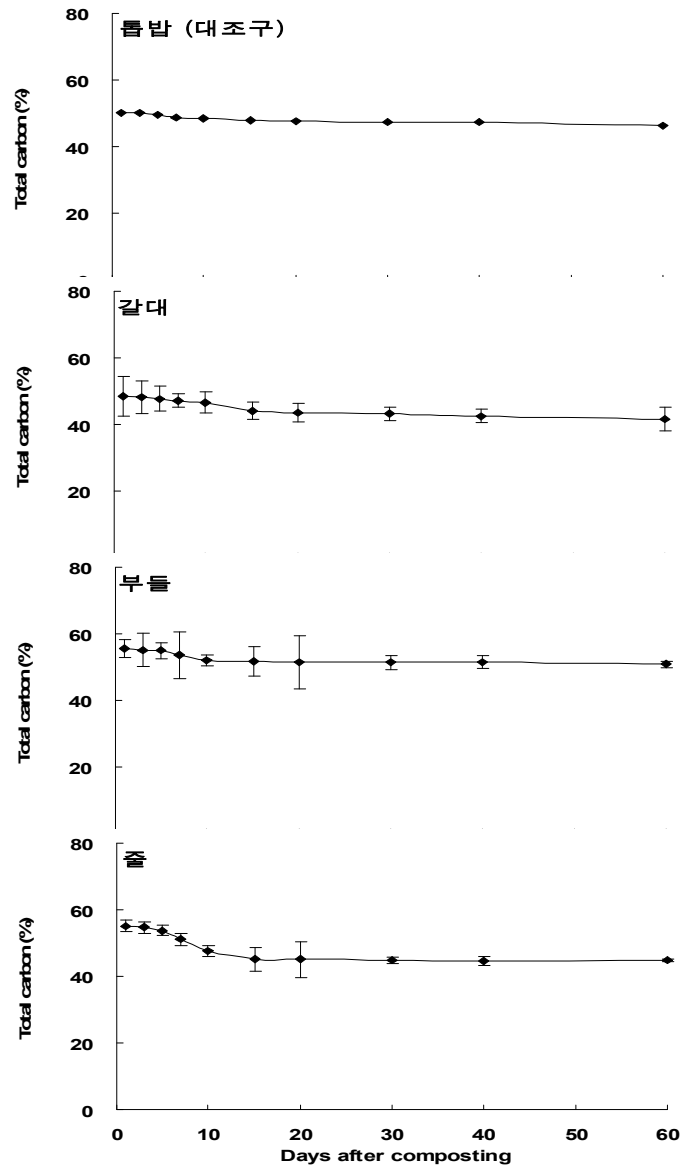


Fig. 3-155. 수생식물별 퇴비화 과정 중 총 탄소 함량 변화.

(5) C/N율 변화

퇴비가 부숙 되기 위해서는 미생물의 에너지원으로 이용되는 탄소와 미생물의 증식과 분열에 필요한 단백질 구성성분인 질소의 비율이 적합해야 하기 때문에 C/N율은 퇴비화에 있어서 중요한 인자 중의 하나이다. Fig. 3-156과 같이 초기 C/N율은 톱밥이 31정도 이었으며, 총 질소 함량이 낮은 줄 처리구의 C/N율이 45.6정도로 가장 높았다. 퇴비의 C/N율 적정 범위 (25~30)가 톱밥의 경우 7일째부터 퇴비화가 안정이 되어가는 30일째까지 유효범위내에 포함 되었고, 부들 처리구에서는 10일째부터 60일째, 줄 처리구에서는 30일째부터 60일째까지 포함이 되었다. 갈대의 경우에는 초기 5일째까지는 적정범위 안에 들었지만 이후에는 적정 C/N율 범위에 들지 못하였다.

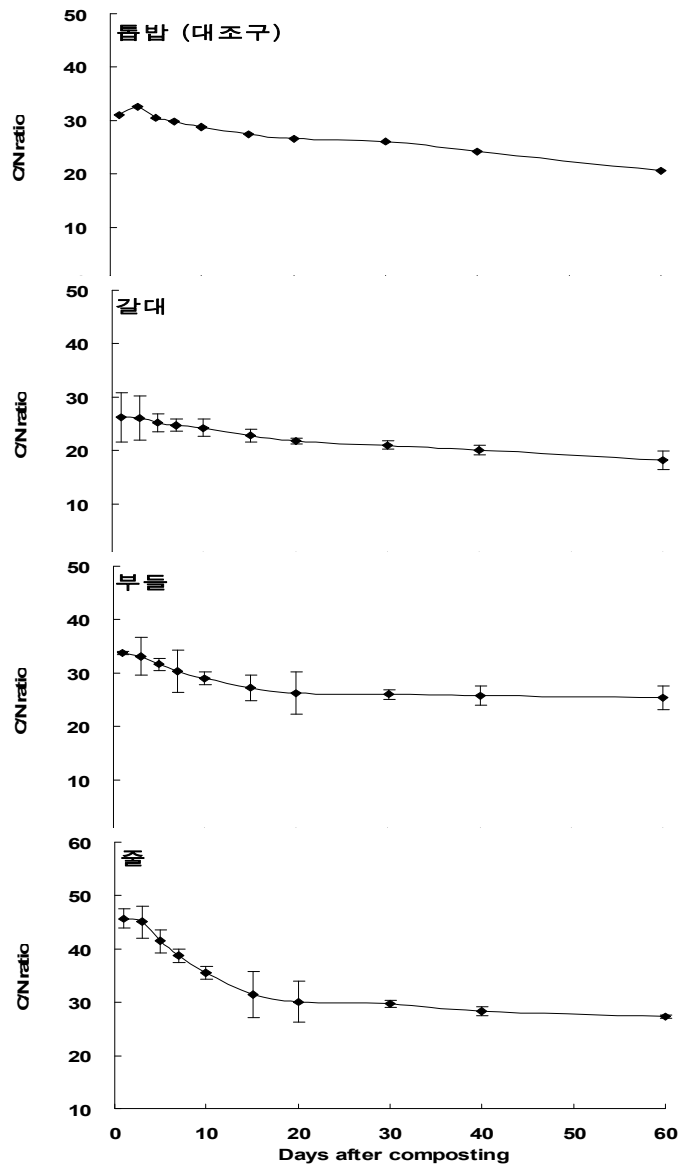


Fig. 3-156. 수생식물별 퇴비화 과정 중 C/N율 변화.

(6) 수생식물별 퇴비화 과정 중 분해특성

수생식물별 퇴비화 과정 중 분해특성은 Fig. 3-157~3-159에서 보는 바와 같다. 퇴비화 과정 중 최고 온도를 보였던 퇴비화 5일째의 수생식물은 전반적으로 공시 시료와 비슷한 형상을 확인할 수 있었다. 퇴비화 30일 후 갈대의 퇴비화 과정 중 분해특성을 조사한 결과 갈대의 형상이 서서히 분해되어가는 것을 확인할 수 있었고, 퇴비화 60일후에는 갈대의 형상을 거의 알아볼 수 없을 정도로 퇴비화가 진행되었다. 부들과 줄의 퇴비화 과정 중 분해특성은 퇴비화 20일 후에 수생식물이 서서히 분해되어 가는 것을 확인할 수 있었고, 60일째에는 갈대와 마찬가지로 형상을 거의 알아 볼 수 없었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 부들과 줄의 경우 갈대에 비해 퇴비화를 통한 식물체 분해가 용이한 것으로 판단된다.



<공시 갈대>



<갈대 5일째>



<갈대 30일째>



<갈대 60일째>

Fig. 3-157. 퇴비화 과정 중 갈대의 분해특성.



<공시 부들>



<부들 5일째>



<부들 20일째>



<부들 60일째>

Fig. 3-158. 퇴비화 과정 중 부들의 분해특성.



<공시 줄>



<줄 5일째>



<줄 20일째>



<줄 60일째>

Fig. 3-159. 퇴비화 과정 중 줄의 분해특성.

나) 수생식물별 부숙도 판정

부숙도를 파악하는 방법은 화학적인 방법, 생물학적인 방법 및 관능적인 방법이 있으나, 본 실험에서는 이 중 관능적인 방법을 통해 수생식물별 부숙도를 판정하였다. 관능적인 방법에 의한 수생식물별 부숙도 판정은 현장에서 다양한 관능적인 조건을 고려하기 위해 부숙도 종합 판정법을 적용하였고, 부숙도 종합판정 항목은 색, 형상, 냄새, 수분, 퇴적중 최고 온도, 퇴적기간, 뒤집기 횟수 및 강제통기 유무 등으로 정하고, 각 인자별로 점수를 환산하여 총점을 기준으로 하여 종합적으로 부숙도를 판정 (판정기준: 미숙은 30점이하, 중숙은 31~80점, 완숙은 80점 이상)하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

갈대, 부들 및 줄의 부숙도 판정 결과는 Table 3-83에서 보는 바와 같이 여러 관능인자를 점수로 환산한 결과 총 합계가 각각 75, 80 및 75점으로 갈대 및 줄은 중숙 퇴비에 속하였고, 부들은 완숙 퇴비에 속하였다.

Table 3-83. 갈대, 부들 및 줄의 부숙도 판정

부숙도 판정 기준		갈대	부들	줄
색	황~황갈색 (2), 갈색 (5), 흑갈색~흑색 (10)	10	10	10
형상	현물의 형상 (2), 상당히 붕괴 (5), 거의 형상을 볼 수 없음 (10)	10	10	10
냄새	분뇨냄새가 강함 (2), 분뇨냄새가 약함 (5), 퇴비냄새 (10)	10	10	10
수분	강하게 쥐면 손가락사이로 물이 스며 나옴 (2) 강하게 쥐면 물이 비치는 정도 (5) 강하게 쥐어도 물기를 거의 느낄 수 없는 상태 (10)	5	5	5
퇴적중 최고 온도	50℃이하 (2), 50~60℃ (10), 60~70℃ (15), 70℃이상 (20)	15	20	15
퇴적기간	가축분뇨만이 퇴적 : 20일 이내 (2), 20일~2개월 (10), 2개월 이상 (20) 작물잔사와의 혼합 : 20일 이내 (2), 20일~3개월 (10), 3개월 이상 (30) 목질물과의 혼합 : 20일 이내 (2), 20일~6개월 (10), 6개월 이상 (30)	20	20	20
뒤집기 횟수	2회 이하 (2), 3~6회 (5), 7회 이상 (10)	5	5	5
강제통기	없음 (0), 있음 (10)	0	0	0
총 합계		75	80	75

다) 수생식물별 퇴비화 효율 검토

(1) 퇴비 무게 및 부피 감소율

퇴비의 무게 감소율은 Fig. 3-160에서 보는 바와 같다. 톱밥의 퇴비화 이전에 50 kg이었으며, 60일에 38% 감소한 31 kg이었다. 본 실험에 사용된 갈대, 부들 및 줄 역시 퇴비화 이전에 50 kg으로 시작하여 퇴비화 후 60일에 28~33%의 무게 감소율을 보였으며, 갈대가 가장 적은 양의 감소폭을 보였다. 퇴비의 부피 감소율은 Fig. 3-161과 같이 톱밥의 퇴비화 이전에 65 L이었으며, 퇴비화 후 60일에 35.8 L로 45%의 부피 감소율을 보였다. 갈대, 부들 및 줄의 부피는 퇴비화 이전인 0일에 70 L로 시작하여 퇴비화 후 60일에 64~71%의 부피 감소율을 보였으며, 부들의 부피 감소율이 71%인 20.3 L로 가장 많았다.

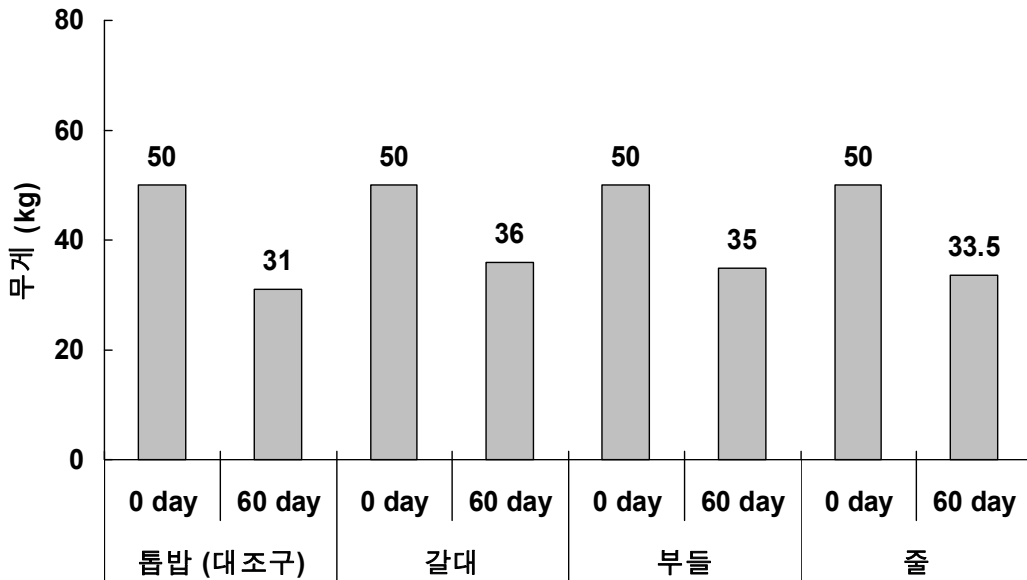


Fig. 3-160. 수생식물을 이용한 퇴비의 무게 감소율.

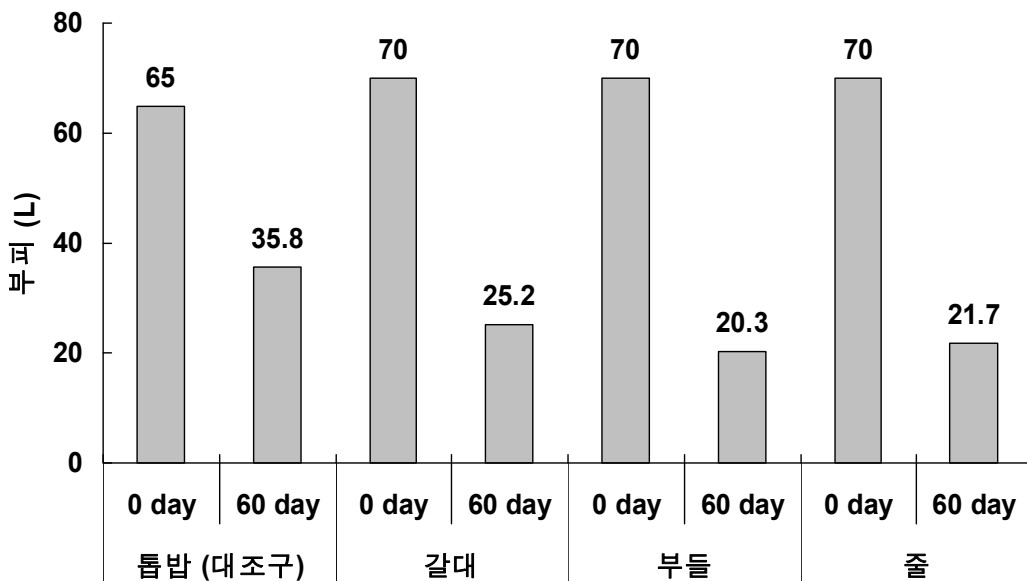


Fig. 3-161. 수생식물을 이용한 퇴비의 부피 감소율.

## (2) 퇴비 생산량

본 실험에 사용된 갈대, 부들 및 줄의 단위 면적당 퇴비 생산량은 Fig. 3-162에서 보는 바와 같다. 퇴비화 이전의 인공습지에서 채취한 갈대, 부들 및 줄의 단위 면적당 무게는 각각 0.981, 1.101 및 2.002 kg m<sup>-2</sup>였으며, 퇴비화 후 무게는 0.706~1.341 kg m<sup>-2</sup>로 단위 면적당 무게가 가장 많은 줄의 퇴비 생산량이 1.341 kg m<sup>-2</sup>로 가장 높았다.

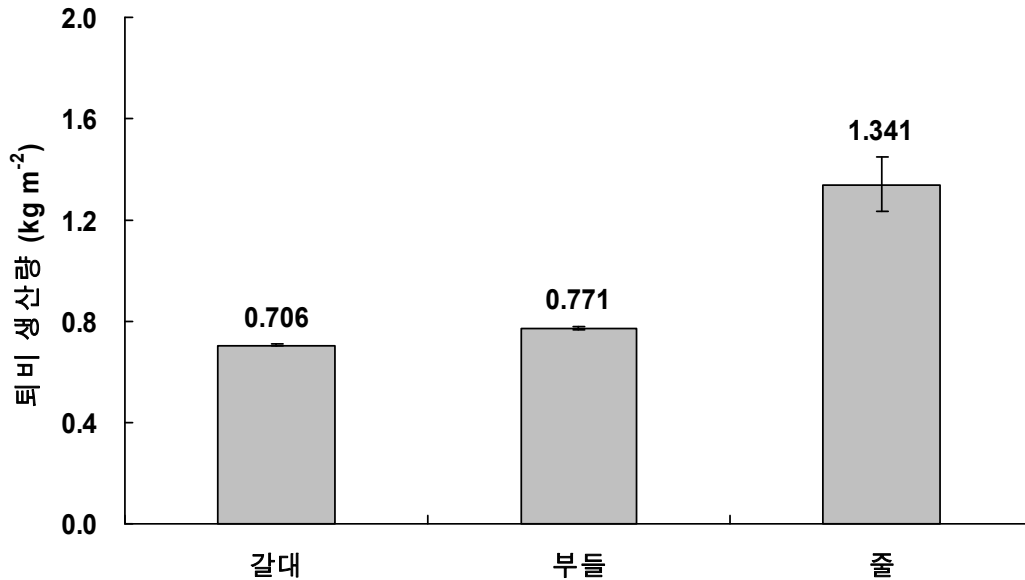


Fig. 3-162. 수생식물의 단위 면적당 퇴비 생산량.

### 라) 수생식물별 퇴비화 과정 중 물질변화

#### (1) 수생식물별 퇴비화 과정 중 온도 변화

수생식물별 퇴비화 과정 중 온도 변화는 Fig. 3-163과 같이 약 25~29℃로 나타났고, 초기 이후 모든 처리구에서 온도가 급격히 상승하였다. 퇴비화 5일째에는 약 65~70℃로 최고온도를 나타냈으며, 부들 처리구에서 약 70℃로 가장 높은 결과를 보였다. 퇴비화 10일째에 공기주입을 한 후 온도가 다시 상승하였다가 20일째에 감소하였으며, 갈대 처리구는 25일째부터 40℃내외로 안정적이었고, 부들, 줄 처리구에서는 40일째부터 40℃내외로 안정적인 단계로 접어들었다.



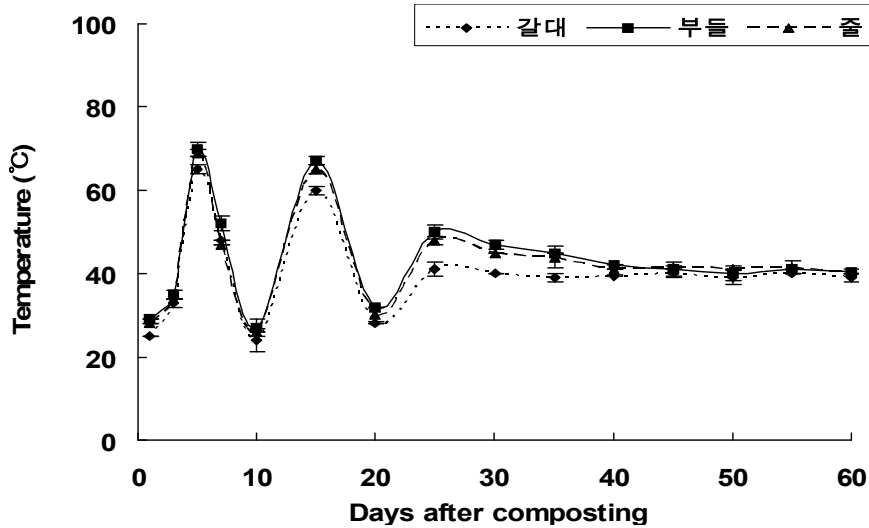


Fig. 3-163. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 온도 변화.

(2) 수생식물별 퇴비화 과정 중 pH 변화

수생식물별 퇴비화 과정 중 pH는 Fig. 3-164에서 보는 바와 같이 퇴비화 초기의 pH는 약 6.67~6.69로 각 처리구별 큰 차이 없었다. 퇴비화가 진행될수록 모든 처리구에서 pH가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 암모니아 발생량 증가가 그 원인이라고 볼 수 있었다. 퇴비화 20일째부터 pH는 모든 처리구에서 거의 증가하지 않았으며, 퇴비화 과정이 완료되는 시기인 60일째에 모든 처리구에서 pH가 약 7.79~7.95로 비슷한 결과를 보였다.

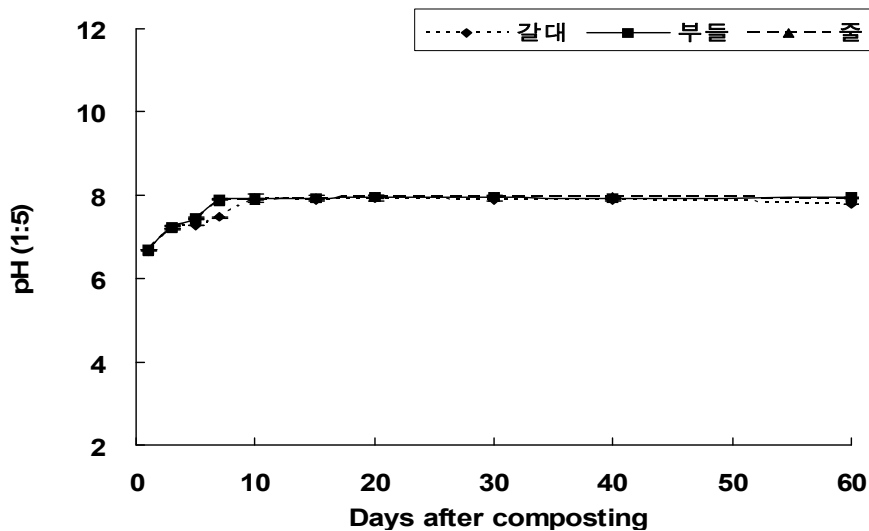


Fig. 3-164. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 pH 변화.

(3) 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 총 질소 함량 변화

수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 T-N 함량 변화는 Fig. 3-165에서 보는 바와 같다. 각 처리구의 초기 T-N 함량은 약 1.21~1.86%로 조사되었다. 전체적으로 퇴비화가 진행될수록 천천히 증가하는 경향이였으며, 60일째의 돈분퇴비의 T-N 함량은 약 1.64~2.30% 정도이었고, 갈대 처리구의 T-N 함량이 약 2.30%로 가장 높았다.

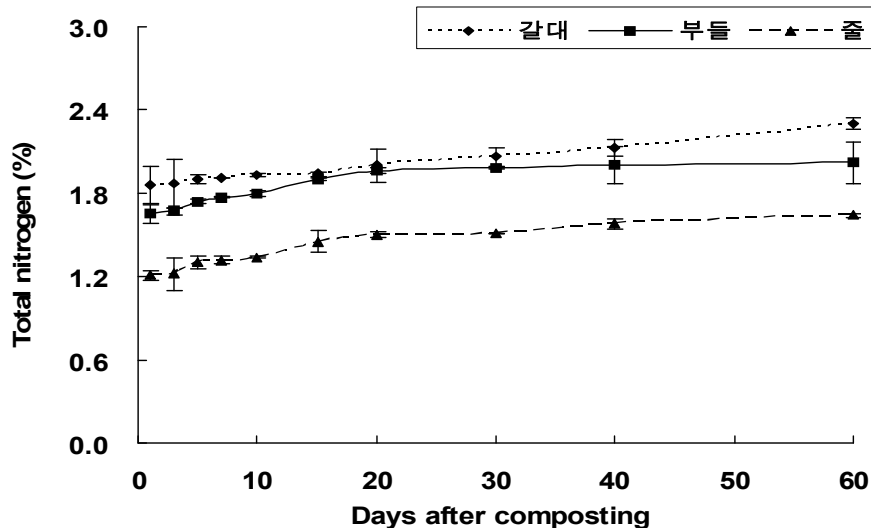


Fig. 3-165. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 총 질소 함량 변화.

(4) 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 총 탄소 함량 변화

수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 T-C 함량 변화는 Fig. 3-166에서 보는 바와 같이 T-N 함량 변화와는 다르게 퇴비화가 진행될수록 감소하는 경향이였다. 초기 T-C 함량은 약 48.5~55.6%로 나타났으며, 갈대 처리구의 T-C 함량은 약 48.5%로 부들과 줄의 처리구에 비해 약간 낮았다. 3일과 5일째에 부들과 줄의 처리구에서 총탄소 함량은 갈대 처리구에 비해 많이 감소하였고, 이후 더욱 감소하여 60일째에 모든 처리구의 T-C 함량은 약 41.7~50.9%범위로 부들 처리구의 T-C 함량이 약 50.9%로 가장 높았다.

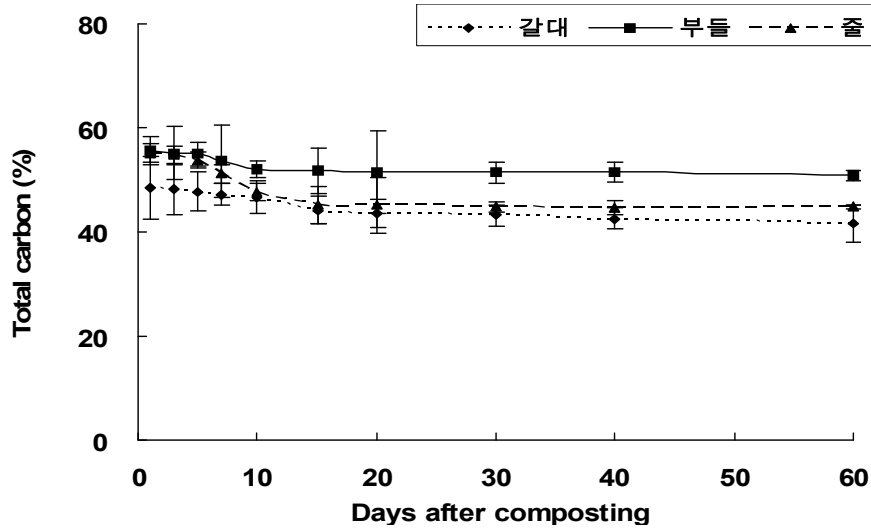


Fig. 3-166. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 총 탄소 함량 변화.

(5) 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 C/N율 변화

수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 퇴비화 과정 중 C/N율 변화는 Fig. 3-167과 같이 T-N 함량이 낮고 T-C 함량이 높은 줄 처리구에서 초기 C/N율이 약 45.6으로 가장 높았으며, 모든 처리구의 C/N율은 약 26.1~45.6의 범위이었다. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 C/N율은 퇴비화 3일~10일째까지 급격히 감소하는 경향이였으며, 이후 더욱 감소하여 60일째에 약 18.1~27.3의 범위이었다. C/N율이 점점 감소하는 이유는 T-N 함량은 점점 증가하는 경향을 보이고, T-C 함량은 점점 감소하는 경향을 보였기 때문이다.

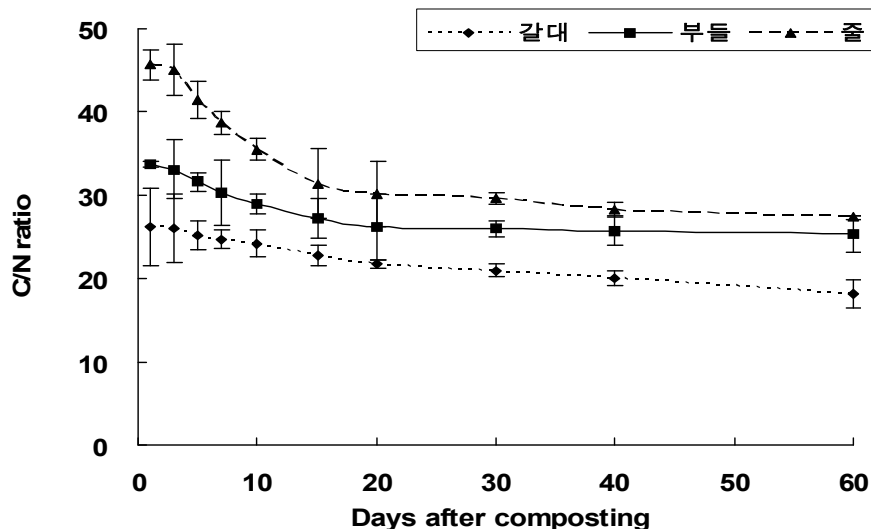


Fig. 3-167. 돈분퇴비의 C/N율 변화.

(6) 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 중금속 (As, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn) 함량 변화

수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 중금속 (As, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn) 함량 변화는 Fig. 3-168에서 보는 바와 같다. 중금속 (As, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn) 함량은 부들 및 줄 처리구에서 퇴비화 초기부터 20일째까지 급격히 감소하여 20일째 이후부터 60일째까지는 거의 변화가 없는 특성을 보였다. 또한 갈대 처리구에서 중금속 함량도 부들 및 줄과 유사한 경향이었다.

As의 초기 함량은 1.35~1.44 mg kg<sup>-1</sup>로 각 처리구가 별 차이 없이 비슷하게 나타났으며, 퇴비화 20~30일째까지의 각 처리구별 As 함량은 0.699~1.002 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 이 후 농도 변화가 거의 없었으며 퇴비화 종료후인 60일째의 As 함량은 약 0.690~0.740 mg kg<sup>-1</sup>로 조사되었다.

Cr의 초기 함량은 약 6.09~7.93 mg kg<sup>-1</sup>범위이었으며, 부들 처리구의 Cr 함량이 약 6.09 mg kg<sup>-1</sup>로 다른 처리구에 비해 약간 낮았다. 퇴비화 20~30일째에 각 처리구의 Cr 농도는 약 3.23~7.33 mg kg<sup>-1</sup>로 조사되었으며, 퇴비화 60일째에 각 처리구별 Cr 농도는 3.23~5.18 mg kg<sup>-1</sup>로 조사되었다.

Cu의 초기 농도는 약 62.0~63.5 mg kg<sup>-1</sup>로 각 처리구별로 농도 차이가 없었으며, 퇴비화 60일째까지 Cu의 함량이 감소하여 각 처리구의 Cu 함량은 약 42.5~48.3 mg kg<sup>-1</sup>로 조사되었다.

Ni 함량은 Cu 함량과 마찬가지로 각 처리구별 농도 차이가 없었으며 초기 농도는 약 5.09~5.65 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 30일째에 Ni 농도가 약 3.07~3.27 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 퇴비화 60일째에는 30일째와 큰 차이 없이 약 3.05~3.26 mg kg<sup>-1</sup>의 결과를 보였다.

Pb의 초기 농도는 약 0.462~0.726 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, 부들 처리구가 약 0.726 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높았다. 퇴비화 60일째에는 Pb의 함량이 약 0.323~0.411 mg kg<sup>-1</sup>로 조사되었다.

Zn 함량은 초기 농도가 약 215~221 mg kg<sup>-1</sup>로 각 처리구별로 차이가 크지 않았으며 퇴비화 30일째까지 급격히 감소하여 각 처리구별 Zn 농도는 약 143~165 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 퇴비화 60일째에는 각 처리구별 Zn 농도는 30일째와 큰 차이 없었다. 퇴비화 기간동안 Cd, Hg 함량은 조사결과 검출되지 않아서 제외시켰다.

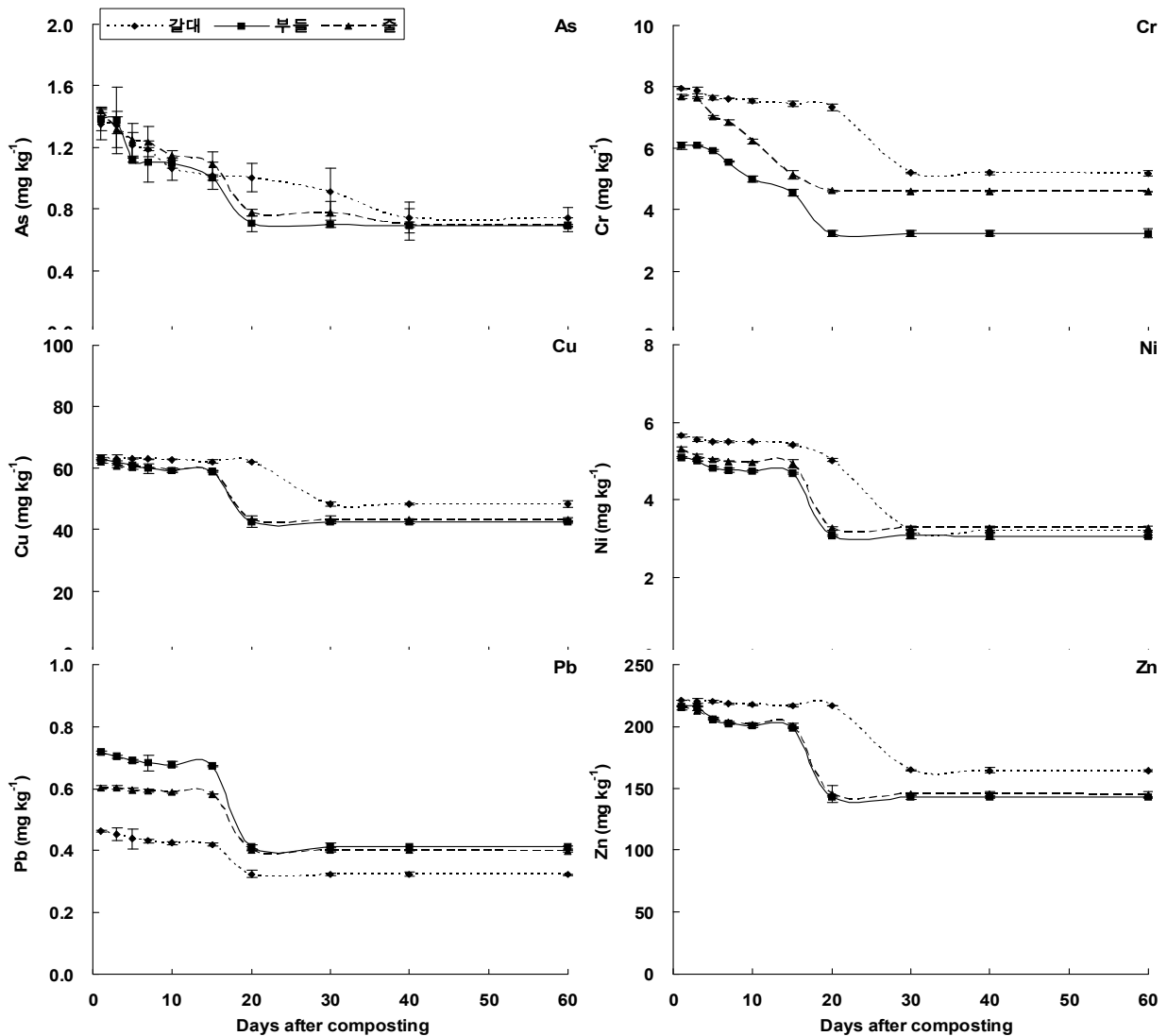


Fig. 3-168. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 중금속 (As, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn) 함량 변화.

(7) 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 미량원소 (Al, Fe, Mn 및 Mo) 함량 변화

수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 미량원소 (Al, Fe, Mn 및 Mo) 함량 변화는 Fig. 3-169에서 보는 바와 같다. Al, Fe 및 Ti 함량은 퇴비화 초기부터 20일째까지 급격히 감소하여 20일째 이후부터 60일째까지는 거의 변화가 없었다. Mn 함량은 초기부터 60일째까지 서서히 감소하는 경향을 나타냈으며, Mo 함량은 20일째까지 급격히 감소하다 30일째 이후부터는 검출되지 않았다.

Al의 초기 농도는 1691~1731 mg kg<sup>-1</sup>로 각 처리구가 별 차이 없이 비슷하게 나타났으며, 퇴비화 20일째이후 모든 처리구에서 Al 농도 변화는 거의 없었고, 퇴비화 60일째에 Al 함량은 약 796~943 mg kg<sup>-1</sup>로 부들 처리구가 약 796 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 낮은 농도를 보였다.

Fe 함량은 퇴비화 초기에 약 1,712~1,807 mg kg<sup>-1</sup>로 갈대 처리구에서 약 1,712 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 퇴비화 20일째까지 각 처리구의 Fe 농도가 약 936~1036 mg kg<sup>-1</sup>로 급격히 감

소하였다. 퇴비화 60일째에 각 처리구별 Fe 농도는 20일째에 비해 큰 차이 없었으며, 갈대 처리구가 약 887 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 낮게 조사되었다.

Mn 함량은 퇴비화 초기에 약 260~1,068 mg kg<sup>-1</sup>이었으며 부들 처리구가 약 1,068 mg kg<sup>-1</sup>로 다른 처리구에 비해 상당히 높았다. 퇴비화 20일째까지 Mn 함량이 급격히 감소하였으며, 퇴비화 60일째에 각 처리구별 Mn 농도는 약 195~844 mg kg<sup>-1</sup>로 부들 처리구가 약 844 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높은 결과를 나타냈다.

Mo의 초기 농도는 줄 처리구에서만 약 0.252 mg kg<sup>-1</sup>로 조사되었으며 갈대와 부들 처리구에서는 검출되지 않았다. 줄 처리구에서는 퇴비화 20일째까지 점점 감소하여 30일째 이후부터는 갈대와 부들 처리구와 같이 Mo 함량은 검출되지 않았다.

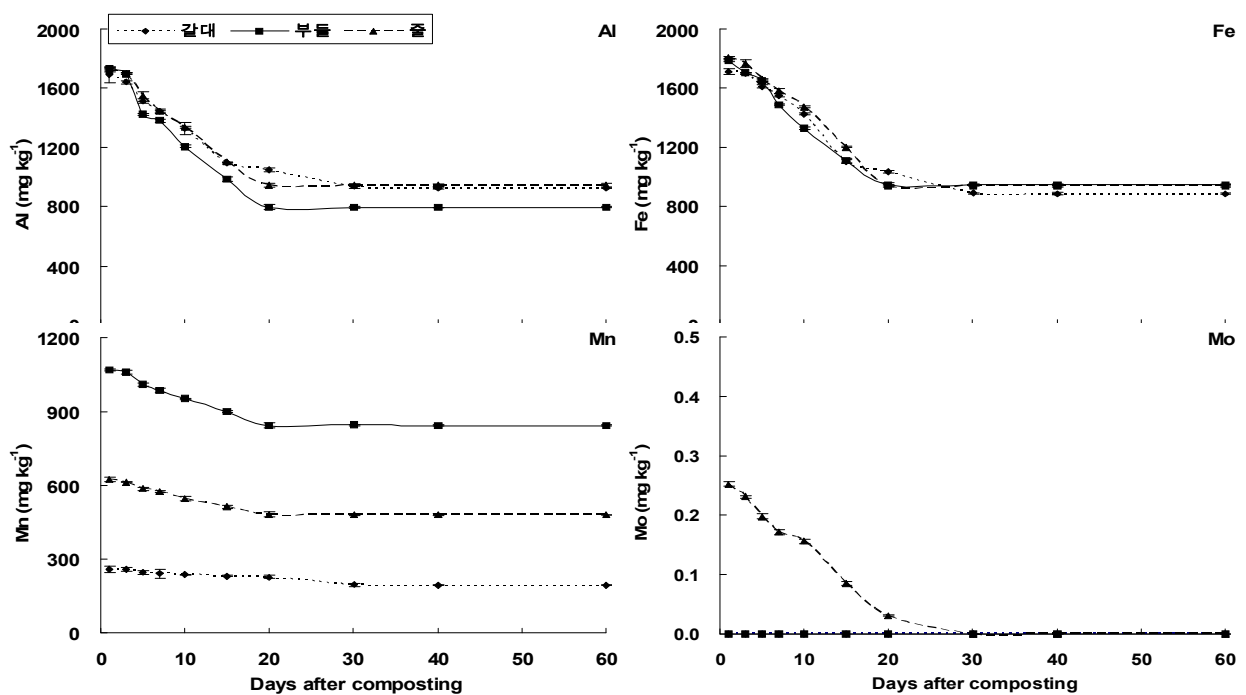


Fig. 3-169. 수생식물 종류별 퇴비화 과정 중 미량원소 (Al, Fe, Mn 및 Mo) 함량 변화.

#### 마) 수생식물별 퇴비화 최적 조건

##### (1) 갈대

본 실험에 사용된 갈대의 최적 퇴비화 조건은 Table 3-84에서 보는 바와 같다. 갈대의 최적 온도와 pH는 톱밥과 비슷한 조건이었으나, 갈대의 경우 식물조직이 다른 수생식물체에 비해 단단하게 이루어져 있기 때문에 함수율을 톱밥보다 더 높게 올려줘야 할 것으로 판단된다. 그리고 최적 C/N율은 갈대가 톱밥보다 T-N 함량이 높기 때문에 15~25 정도가 적합한 것으로 판단된다.

Table 3-84. 갈대의 퇴비화를 위한 최적 조건

	온도	pH	함수율	C/N
	---- (°C) ----	-- (1:5H <sub>2</sub> O) --	---- (%) ----	
대조구 (톱밥)	60~70	6.5~8.5	57 전후	20~30
갈대	60~70	6.5~8.5	60 전후	15~25

(2) 부들

본 실험에 사용된 부들을 톱밥과 비교하여 얻은 퇴비화 최적 조건은 Table 3-85와 같다. 부들의 최적 온도와 pH는 톱밥과 동일한 조건으로 판단되며, 특히 부들은 갈대에 비해 조직이 연하기 때문에 톱밥과 비슷한 함수율인 55~60%이었을때 퇴비화가 잘 진행되었고, C/N율은 부들의 T-N 함량 증가폭이 높지 않기 때문에 25~30일때 적합할 것으로 판단된다.

Table 3-85. 부들의 퇴비화를 위한 최적 조건

	온도	pH	함수율	C/N
	---- (°C) ----	-- (1:5H <sub>2</sub> O) --	---- (%) ----	
대조구 (톱밥)	60~70	6.5~8.5	57 전후	20~30
부들	60~70	6.5~8.5	55~60	25~30

(3) 줄

본 실험에 사용된 줄을 톱밥과 비교하여 얻은 퇴비화 최적 조건은 Table 3-86에서 보는 바와 같다. 줄의 퇴비화 최적조건은 부들과 비슷한 경향으로 온도는 60~70°C, pH는 6.5~8.5, 함수율은 55~60%, C/N율은 25~30일 조건이었다.

Table 3-86. 줄의 퇴비화를 위한 최적 조건

	온도	pH	함수율	C/N
	---- (°C) ----	-- (1:5H <sub>2</sub> O) --	---- (%) ----	
대조구 (톱밥)	60~70	6.5~8.5	57 전후	20~30
줄	60~70	6.5~8.5	55~60	25~30

바) 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 품질비교

(1) 유기물

수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 유기물 품질 비교는 Fig. 3-170에서 보는 바와 같이 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 유기물함량은 72.0~87.8%로 퇴비화공정규격내 일반퇴비의 유기물 함량 기준에 비해 약 3배 가량 높았다. 이는 퇴비 재료로 쓰인 돈분뇨와 수생식물의 유기물 비율이 높았기 때문이다.

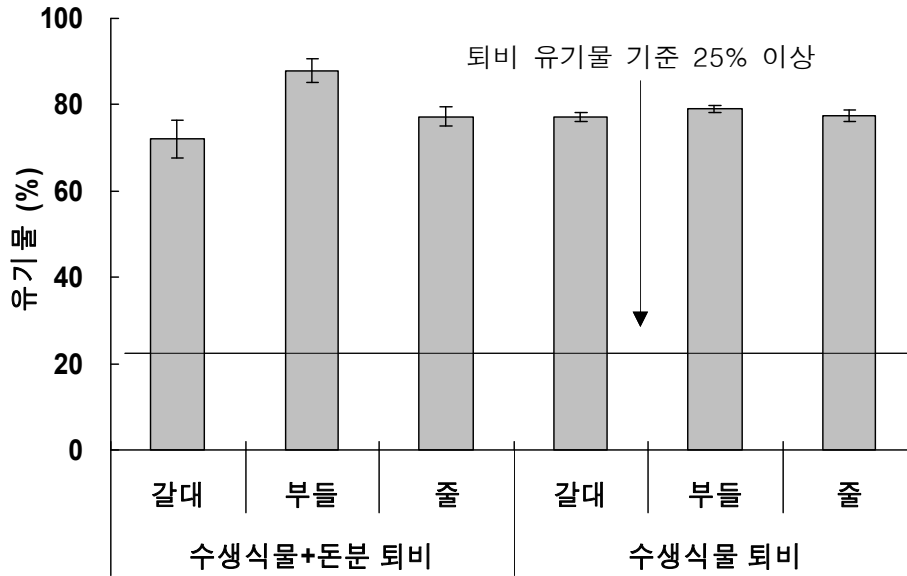


Fig. 3-170. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 유기물 품질 비교.

(2) 수분

수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 수분함량 품질 비교는 Fig. 3-171에서 보는 바와 같다. 수생식물+돈분 퇴비의 수분함량은 51.8~54.2%였고, 수생식물 퇴비의 수분함량은 46.5~48.7%로 일반퇴비의 수분함량 규격 기준인 55% 이하를 모두 만족하였다. 또한 수분함량은 돈분뇨를 첨가한 수생식물 퇴비가 돈분뇨를 첨가하지 않은 수생식물 퇴비에 비해 약 5%정도 높게 나타났다.



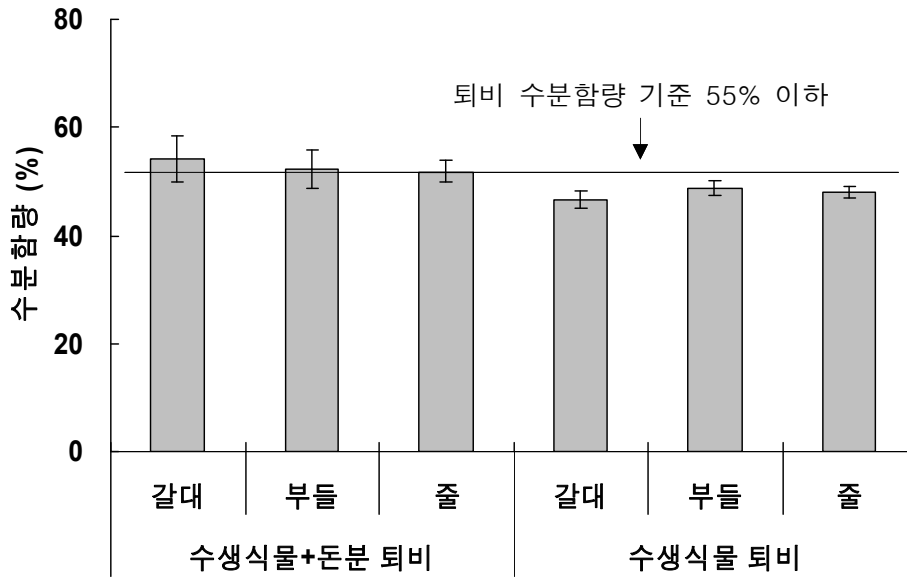


Fig. 3-171. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 수분함량 품질 비교.

### (3) C/N율

수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 C/N율 품질 비교는 Fig. 3-172와 같이 모든 퇴비에 서 C/N율 품질 규격 기준인 50이하를 만족하였다. 수생식물+돈분 퇴비의 C/N율은 18.2~27.3 범위였고, 수생식물 퇴비의 C/N율은 31.4~42.8이었다. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 T-C 함량은 차이가 크지 않았지만, T-N 함량의 증가 폭이 수생식물+돈분 퇴비가 더 크게 나타나 C/N율이 수생식물 퇴비에서 약간 높게 측정되었다.

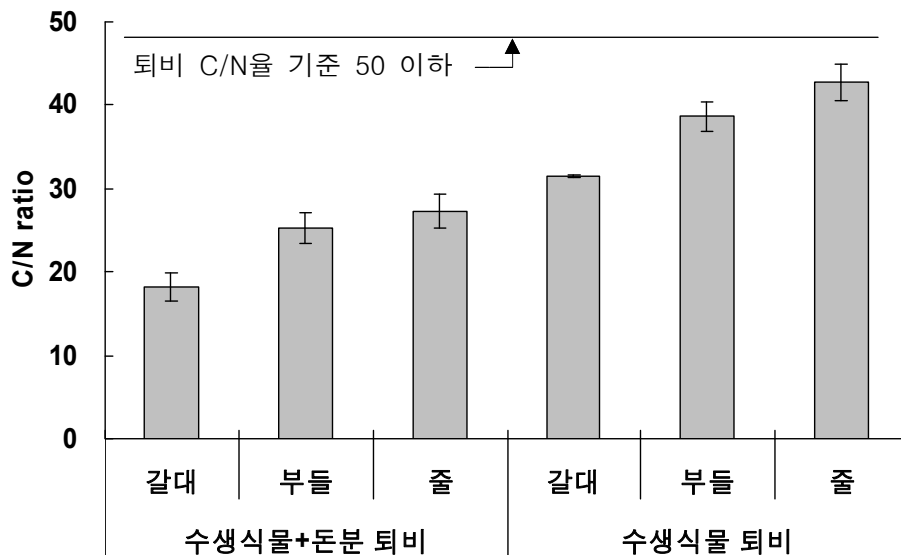


Fig. 3-172. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 C/N율 품질 비교.

#### (4) 중금속

수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 중금속 품질 비교는 Table 3-87에서 보는 바와 같다. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비 모두 중금속 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb 및 Zn)의 함유할 수 있는 유해 성분의 최대량보다 낮게 나타났음을 확인 할 수 있다. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 중금속 함량은 퇴비화가 진행될수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 퇴비화 재료인 돈분뇨와 수생식물로만 퇴비화를 시켰기 때문에 중금속 함량이 증가하지 않은 것으로 판단된다.

Table 3-87. 수생식물+돈분 퇴비와 수생식물 퇴비의 중금속 품질 비교

	품질규격 (mg kg <sup>-1</sup> )	수생식물+돈분 퇴비 (mg kg <sup>-1</sup> )			수생식물 퇴비 (mg kg <sup>-1</sup> )		
		갈대	부들	줄	갈대	부들	줄
As	111	0.74	0.69	0.694	0.031	0.058	0.119
Cd	11	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	667	5.18	3.23	4.60	2.14	0.297	1.88
Cu	667	48.3	42.5	43.2	1.64	1.17	0.192
Hg	4	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	111	3.18	3.05	3.26	0.985	0.426	0.631
Pb	333	0.323	0.411	0.399	ND	ND	ND
Zn	2000	164	143	145	12.4	8.35	6.97

#### 사) 퇴비화를 위한 최적 수생식물 선정

퇴비화를 위한 최적 수생식물 선정은 Table 3-88에서 보는 바와 같다. 퇴비화 중 최고 온도는 부들이 70℃ 이상으로 다른 수생식물에 비해 가장 높았고, 무게 감소율은 줄이 다른 수생식물에 비해 33%로 가장 높았으며, 부피 감소율은 부들이 다른 수생식물에 비해 71%로 가장 높았다. 유기물함량은 갈대, 부들 및 줄이 모두 일반퇴비의 유기물 공정규격 기준인 25%를 만족하였고, C/N율과 함수율에서는 갈대, 부들 및 줄이 모두 일반퇴비의 공정규격 기준을 만족하였다. 이상의 결과를 미루어 볼 때, 퇴비화를 위한 최적 수생식물은 부들로 판단된다.

Table 3-88. 퇴비화를 위한 최적 수생식물 선정

		선정 조건	갈대	부들	줄
퇴적중 최고 온도		50~60℃ (1), 60~70℃ (3), 70℃ 이상 (5)	3	5	3
무게 감소율		25~30% (1), 30~35% (3), 35~40% (5)	1	1	3
부피 감소율		60~65% (1), 65~70% (3), 70% 이상 (5)	1	5	3
	유기물	25% 이상 (5), 25% 미만 (0)	5	5	5
품질	C/N율	50 이하 (5), 50 초과 (0)	5	5	5
	함수율	55% 이하 (5), 55% 초과 (0)	5	5	5
총 합계			20	26	24

2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석

가) 수생식물별 생육특성 및 화학적 성분 특성

(1) 수생식물별 생육특성

수생식물 종류별 단위면적당 biomass 생산량을 비교 검토하기 위하여 자연형 축산폐수처리 습지시스템에서 성장하고 있는 수생식물별 단위면적당 평균 개체수와 biomass 함량, 그리고 식물 개체당 평균중량을 조사한 결과는 Table 3-89에서 보는 바와 같다.

식물체별 단위면적 (m<sup>2</sup>)당 biomass 건중량은 단위면적내 식생의 개체수와 식생의 외형적인 형태 및 건체중량과 생체중량의 비율에 따라 차이가 크게 났으며 전체적으로 8월에 비하여 11월에 단위면적당 biomass 생산량이 증가하였다. 수생식물별 단위면적 (m<sup>2</sup>)당 biomass 생산량은 11월의 경우 창포가 약 1.579 kg으로 가장 많았고, 다음으로 갈대, 부들 및 줄이 약 0.155~0.776 kg 범위였으며, 갈대가 약 0.155 kg으로 가장 작았다.

Table 3-89. 축산폐수처리장내 수생식물별 생육특성 및 단위면적 (m<sup>2</sup>)당 biomass 생산량

조사시기	식생	개체수 (no. m <sup>-2</sup> )	중량 (g plant <sup>-1</sup> )	Biomass (kg m <sup>-2</sup> )
8월	갈대	9	15.82	0.142
	부들	9	34.21	0.308
	줄	9	15.02	0.135
	창포	9	65.48	0.589
11월	갈대	9	17.24	0.155
	부들	9	86.24	0.776
	줄	9	28.90	0.260
	창포	9	175.4	1.579

## (2) 인공습지에서 수생식물체의 주요 구성 성분 함량

인공습지에서 수생식물체내 주요 구성성분들인 T-N, T-P 및 K, Ca, Mg, Na 등의 양이온들의 함량을 생육이 가장 왕성한 8월과 생육이 저조한 11월의 2회에 걸쳐 인공습지별 및 수생식물별로 조사한 결과는 Table 3-90에서 보는 바와 같다.

수생식물체내 구성성분 함량은 전체적으로 수생식물 종류별로 차이가 많았으며 생육시기에 따라서 차이가 있었다. 수생식물 종류별 식물체내 수분함량은 갈대가 생육이 왕성한 8월에 50.3~56.9% 범위로 평균이 약 54.3%이었으며, 생육이 저조한 11월에는 48.7~52.5% 범위로 평균이 약 50.2%로 가장 작았다. 부들의 수분함량은 8월에 78.3~80.9% 범위로 평균 약 79.8%이었고, 11월에 70.3~78.6% 범위로 평균 약 74.4%로 감소되었다. 줄의 수분함량은 8월에 66.4~78.4% 범위로 평균이 약 69.3%이었고 11월에는 60.3~65.9% 범위이었다.

유기물 함량은 전반적으로 수생식물 종류에 따라서 큰 차이 없이 비슷하였고, 생육시기에 따른 유기물의 함량은 다소 차이는 있지만 전반적으로 8월에 비하여 11월에 평균 약 1% 정도 많았다. 이와 같은 결과는 T-C 함량과 비슷한 경향을 나타내었다.

수생식물체내 T-N 함량은 유입원수 중 질소의 농도가 높을수록 수생식물체내의 T-N 함량이 높은 경향이었고, 축산폐수와 생활하수 처리수가 유입되는 습지에서 일반적으로 다른 습지에 비해 높은 T-N 함량을 나타내었다. 수생식물 종류별 T-N 함량은 동일습지에서도 수생식물 종류별로 차이가 많았으며 인공습지 조성시 가장 많이 식재하는 갈대, 부들, 줄 및 창포의 각각 평균은 약 1.86~1.91, 1.35~1.57, 1.62~1.79 및 1.45~1.65%로 비교적 많이 함유되어 있었다. 계절별 T-N 함량은 전반적으로 생육이 왕성한 8월에 비하여 생육이 저조한 11월에 약간씩 감소하는 경향이였다.

수생식물체내 T-P 함량도 일반 하천수가 유입되는 습지에 비하여 축산폐수와 생활하수 처리수가 유입되는 습지에서 높았으며, 계절별 식물체내 T-P함량은 전체적으로 생육이 왕성한 8월에 비하여 생육이 저조한 11월에는 약간씩 감소되는 경향이였다. 수생식물 종류별 식물체내 T-P 함량은 갈대, 부들, 줄 및 창포는 약 0.355~0.645% 범위였다.

양이온인 K, Ca, Mg 및 Na 함량도 인산과 마찬가지로 일반 하천수가 유입되는 습지에 비하여 축산폐수와 생활하수 처리수가 유입되는 습지에서 높았으며, 생육시기별로는 뚜렷한 차이가 없었다. 수생식물 종류별 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 각각 1.41~1.94, 0.212~0.709, 0.093~0.159 및 0.108~0.340% 범위였다.

Table 3-90. 인공습지별 및 수생식물 종류별 식물체 구성성분 함량

수생식물	시기	수분	유기물	T-C	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na	C/N	
		----- (%) -----										
북내 바이오 파크	부들	8월	80.59	89.92	52.15	2.57	0.85	1.49	0.57	0.12	0.32	20.29
		11월	73.66	92.03	53.38	2.07	0.86	1.66	0.51	0.15	0.44	25.83
	갈대	8월	50.26	92.28	53.52	2.28	0.75	1.66	0.20	0.07	0.10	23.53
		11월	48.69	92.99	53.93	2.15	0.80	1.82	0.21	0.12	0.11	25.09
	줄	8월	65.98	87.63	50.83	2.33	0.63	1.12	0.26	0.08	0.15	21.86
		11월	60.27	89.85	52.11	2.22	0.61	1.41	0.30	0.09	0.15	23.53
용암 습지	부들	8월	80.31	89.53	51.93	0.68	0.36	0.70	0.57	0.09	0.64	76.36
		11월	78.64	90.22	52.33	0.54	0.23	0.74	0.74	0.10	0.70	96.90
죽산 습지	창포	8월	78.62	89.12	51.69	2.23	0.31	0.74	0.76	0.11	0.31	23.18
		11월	71.32	90.23	52.33	1.33	0.26	0.74	0.56	0.08	0.06	39.35
내북 습지	창포	8월	75.68	89.55	51.94	1.47	0.51	1.03	0.20	0.15	0.26	35.33
		11월	71.29	89.68	52.01	1.40	0.43	1.67	0.63	0.13	0.29	37.15
	줄	8월	67.51	87.65	50.84	1.93	0.48	1.18	0.19	0.10	0.41	26.34
		11월	63.20	88.39	51.27	1.72	0.46	1.26	0.19	0.09	0.46	29.81
신평 습지	갈대	8월	53.21	90.01	52.21	1.27	0.35	1.31	0.12	0.06	0.17	41.11
		10월	49.22	89.27	51.78	1.06	0.30	2.52	0.23	0.10	0.04	48.85
	부들	8월	78.33	88.26	51.19	1.53	0.42	1.20	0.37	0.07	0.40	33.57
		11월	70.26	89.25	51.77	1.27	0.32	1.24	0.50	0.07	0.18	40.76
동북 습지	부들	8월	80.05	89.99	52.19	1.49	0.84	1.55	1.03	0.19	0.46	35.03
		11월	74.62	90.27	52.36	1.22	0.86	1.55	1.23	0.18	0.56	42.92
이서 습지	창포	8월	72.33	90.51	52.50	1.44	0.19	1.00	0.42	0.11	0.04	36.46
		11월	68.88	89.68	52.01	1.33	0.06	2.52	0.65	0.13	0.10	39.11
	줄	8월	70.44	87.49	50.74	1.83	0.39	1.12	0.29	0.08	0.04	27.73
		11월	64.29	88.88	51.55	1.71	0.38	1.67	0.16	0.08	0.08	30.15
	부들	8월	79.24	88.36	51.25	1.73	0.44	0.88	0.54	0.14	0.04	29.62
		11월	71.26	89.67	52.01	1.44	0.31	0.93	0.39	0.12	0.02	36.12
북내 습지	창포	8월	71.96	88.92	51.57	1.56	0.59	2.35	0.52	0.18	0.18	33.06
		11월	64.03	91.12	52.85	1.55	0.49	2.29	0.51	0.17	0.21	34.10
삼청 습지	갈대	8월	56.72	92.35	53.56	2.18	0.72	2.25	0.14	0.09	0.06	24.57
		11월	50.36	91.91	53.31	2.25	0.83	2.22	0.15	0.08	0.12	23.69
	줄	8월	78.35	88.25	51.19	1.99	0.79	2.28	0.24	0.13	0.12	25.72
		11월	65.89	90.44	52.46	2.01	0.84	1.95	0.27	0.09	0.18	26.10
봉산 습지	갈대	8월	56.88	93.28	54.10	2.32	0.62	2.15	0.26	0.16	0.12	23.32
		11월	51.29	93.55	54.26	2.42	0.58	2.22	0.29	0.15	0.13	22.42
	부들	8월	80.85	90.23	52.33	1.97	0.59	2.98	1.11	0.12	0.13	26.57
		11월	77.60	92.51	53.66	2.01	0.63	1.99	0.95	0.11	0.19	26.69
현장 축산폐수 처리습지	갈대	8월	53.2	91.26	52.93	2.32	0.72	1.45	0.21	0.18	0.12	22.81
		11월	49.4	92.03	53.38	2.46	0.78	1.76	0.31	0.16	0.11	21.78
	창포	8월	83.6	90.13	52.23	2.47	0.82	0.87	1.13	0.31	0.43	21.15
		11월	78.3	92.31	53.54	2.76	0.69	0.95	1.92	0.22	0.33	19.40

(3) 유입원수의 T-N 및 T-P 농도 범위별 영양염류 함량

수생식물체내 T-N, T-P 및 K, Ca, Mg 등의 영양염류 함량은 습지내 유입수 중의 영양염류 농도에 따라 차이가 있을 수 있으므로 기존의 주암호 상류 인공습지 13개소에서 생육한 수생식물체 중의 함량과 본 연구에서 설치 운영중인 축산폐수처리장내에서 생육한 식물체 간의 영양염류 함량을 비교 검토 하였다. 인공습지는 유입수의 T-N 및 T-P 농도가 낮은 저농도 습지군 (T-N 3 mg L<sup>-1</sup> 이하, T-P 0.1 mg L<sup>-1</sup>이하), 비교적 높은 농도 습지군 (T-N 10~15 mg L<sup>-1</sup>, T-P 2~5 mg L<sup>-1</sup>), 고농도 축산폐수처리장 습지 (T-N 5,024 mg L<sup>-1</sup>, T-P 725 mg L<sup>-1</sup>)에서 생장한 갈대, 부들, 줄 및 창포의 영양염류 함량을 비교한 결과는 Table 3-91에서 보는 바와 같다. 식물체내 T-N, T-P, K, Ca 및 Mg 등의 함량은 전체식물에서 저농도 및 고농도 습지에서 생장한 식물체에 비교적 높은 농도 습지군에서 생장한 식물체들이 높았으며, 고농도 습지의 유입수 중 T-N 및 T-P 농도는 저농도 및 비교적 높은 농도의 습지에 비하여 훨씬 높았으나 식물체내 함량은 작게 나타났다.

이와 같이 식물체내 물질구성 성분함량은 인공습지에 유입되는 유입수 중의 영양물질 함량에 따라 어느 정도는 영향을 받았으며 수생식물종류에 따른 함량은 식물의 생육적인 특성과 식물조직 특성에 따른 영향이 큰 것으로 보였다.

Table 3-91. 유입원수의 T-N 및 T-P 농도 범위별 식물체내 영양염류 흡수량 비교

구 분	수생식물	T-N	T-P	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O
		----- (%) -----					
저농도 습지 (T-N 3 mg L <sup>-1</sup> 이하, T-P 0.1 mg L <sup>-1</sup> 이하)	갈대	1.57	0.402	1.21	0.198	0.203	0.387
	부들	1.47	0.413	1.23	0.798	0.158	0.270
	줄	1.77	0.385	1.40	0.225	0.080	0.060
	창포	1.27	0.485	1.97	0.843	0.153	0.075
비교적 높은 농도 습지 (T-N 10~15 mg L <sup>-1</sup> , T-P 2~5 mg L <sup>-1</sup> )	갈대	2.29	0.688	1.96	0.240	0.125	0.115
	부들	2.16	0.733	2.03	0.785	0.125	0.270
	줄	2.28	0.620	1.27	0.280	0.085	0.150
	창포	2.00	0.768	2.11	0.906	0.118	0.161
고농도 습지 (축산폐수처리장) (T-N 5,024 mg L <sup>-1</sup> , T-P 725 mg L <sup>-1</sup> )	갈대	0.373	0.143	0.317	0.143	0.148	0.054
	부들	1.89	0.175	0.572	0.292	0.390	0.039
	줄	1.92	0.245	0.496	0.101	0.237	0.011
	창포	1.24	0.295	5.81	0.808	0.320	0.013

#### (4) 수생식물 종류별 T-N 및 T-P 흡수량 평가

유입원수 특성별 13개 인공습지와 축산폐수처리장내 습지에서 생장한 수생식물 종류별로 2010년 8월과 11월의 생육시기별 지상부의 건물생산량과 지상부에 흡수된 T-N 및 T-P 함량을 조사한 결과를 이용하여 수생식물 종류별 개체당, biomass 중량당 및 습지 단위면적당 평균 T-N 및 T-P 흡수량을 산출한 결과는 Table 3-92에서 보는 바와 같다.

수생식물 종류별 개체당 평균 총 질소 및 총 인 흡수량은 식물종류에 따라 차이가 있었으며, 동일 식물에서도 전반적으로 8월과 11월에 차이를 보였다. 인공습지에서 수생식물별 개체당 총 질소 흡수량은 8월의 경우 부들이 0.799 g으로 가장 많았으며, 나머지 갈대, 줄 및 창포는 0.696~0.705 g으로 큰 차이 없이 비슷하였다. 11월의 수생식물별 개체당 총 질소 흡수량은 생육이 왕성한 8월에 비해 약간 감소한 경향이었으며, 수생식물의 종류에 상관없이 총 질소 흡수량은 0.494~0.563 g 범위이었다. 이와는 대조적으로 축산폐수처리장내 습지의 수생식물별 개체당 총 질소 흡수량은 8월에 비해 11월에 총 질소 흡수량이 높았다. 갈대의 개체당 총 질소 흡수량은 8월 및 11월에 각각 0.060 및 0.066 g으로 인공습지의 갈대의 개체당 총 질소 흡수량보다 현저히 적었지만, 나머지 식물체인 부들, 줄 및 창포는 전반적으로 개체당 총 질소 흡수량이 높은 것을 확인 할 수 있었다. 단위면적당 ( $m^2$ ) 총 질소 흡수량은 인공습지에서 8월에 줄이 48.8 g으로 가장 높았으며, 갈대, 부들 및 창포는 14.7~23.5 g으로 창포가 14.7 g으로 가장 작았다. 11월에도 마찬가지로 줄이 36.2 g으로 가장 높았으며, 갈대, 부들 및 창포는 8월에 비해 큰 차이 없이 각각 18.5, 14.8 및 15.2 g이었다. 축산폐수처리장내 습지의 단위면적당 ( $m^2$ ) 총 질소 흡수량은 전반적으로 인공습지의 단위면적당 ( $m^2$ ) 총 질소 흡수량에 비해 작았으며, 창포가 8월 및 11월에 각각 7.37 및 19.4 g으로 가장 많았다.

일반적으로 습지에 유입되는 유입수 중의 질소는 대부분 인공습지내 토양 및 퇴적물 입자 중의 점토 입자에 흡착되어 수생식물에 의해서 흡수되거나 혹은 미생물에 의해 분해 및 탈질됨으로서 제거되는 것으로 알려져 있다. 또한 유기성 질소는 침전과 여과로 제거된 후 미생물에 의해 서서히 분해되어 암모니아 이온을 방출하는 용존성 아미노산으로 가수분해 되기도 한다. 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기 용이하고, 호기성 조건에서 생물학적 질산화에 의하여  $NO_3-N$ 로 전환되기도 한다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는  $NH_4-N$ 과  $NO_3-N$ 로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기성 질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로서 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 되는 것으로 알려져 있다.

인공습지의 수생식물별 개체당 총 인 흡수량은 8월에 수생식물별로 0.152~2.11 g으로 큰 차이 없었으며, 11월에는 개체당 총 인 흡수량이 감소하였지만 수생식물간 총 인 흡수량은 0.122~0.187 g으로 큰 차이 없었다. 축산폐수처리장 습지에서의 수생식물별 개체당 총 인 흡수량은 전반적으로 인공습지의 총 인 흡수량보다 낮았으며, 11월에 창포의 개체당 총 인 흡수량은 0.544 g으로 가장 높았다. 단위면적당 ( $m^2$ ) 총 인 흡수량은 인공습지에서는 생육이 왕성한 8월에 줄이 13.0 g으로 가장 높았고, 축산폐수처리장 습지에서는 창포가 11월에 4.90 g으로 가장 높았으며, 전반적으로 인공습지의 단위면적당 ( $m^2$ ) 총 인 흡수량이 더 높은 것을 확인 할 수

있었다.

식물이 흡수할 수 있는 인은  $PO_4$ ,  $HPO_4$  및  $H_2PO_4$ 의 형태이며, 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다. 인은 식물 뿌리부의 산화층에서 식물에 의한 흡수가 활발한 반면 환원층에서는 인의 방출이 진행되고, 체류일수가 길어질수록 식물에 의한 인의 흡수량이 많아져 인의 처리효율이 향상된다. 습지식물로 흡수되는 인의 양은 질소에 비하여 매우 적으며, 인이 습지에 연간  $0.005 \text{ g plant}^{-1}$ 이 유입될 경우 약 65~95%가 식물에 의하여 제거되나  $0.001 \sim 0.015 \text{ g plant}^{-1}$ 이 유입될 경우는 식물에 의한 처리효율이 30~40%로 낮아지는 경향으로서 인의 흡수량은 습지로 유입되는 인의 농도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

이와 같이 식물체내 영양염류 함량은 단위면적당 개체수, biomass 중량단위, 습지 단위면적당 흡수량 등 환산방법에 따라 크게 달라질 수 있으므로 수처리와 수생식물의 퇴비화를 모두 고려하여 습지 조성시에 수생식물의 선정에 주의해야 한다. 일반적으로 인공습지 조성시 수생식물 선정은 수생식물 biomass 중량당 흡수량을 조사한 연구결과들을 토대로 해서 주로 선정하고 있다. 그러나 인공습지내 수생식물에 의한 오염물질 제거량은 단위면적당 biomass 생산량과 수생식물 개체별 오염물질 흡수능력에 크게 영향을 받으며 본 연구결과에서도 수생식물 개체수별 흡수량과 습지 단위면적당 수생식물 biomass 생산량이 중요한 요인으로 나타났다. 따라서 축산폐수 처리를 위한 인공습지 시공시 축산폐수처리 효율을 최대화하기 위해서는 유입원수의 특성과 수생식물 개체별 흡수능력 및 단위면적당 biomass 생산력과 흡수량을 모두 고려해서 수생식물을 선정하는 것이 중요할 것으로 생각된다.



Table 3-92. 수생식물별 개체당, biomass 중량당, 단위면적당 T-N 및 T-P 흡수량

지역	식생	식물체 개체당 흡수량 (g plant <sup>-1</sup> )	T-N 흡수량			T-P 흡수량			
			Biomass kg 당 흡수량 (g kg <sup>-1</sup> )	단위면적당 흡수량 (g m <sup>-2</sup> )	식물체 개체당 흡수량 (g plant <sup>-1</sup> )	Biomass kg 당 흡수량 (g kg <sup>-1</sup> )	단위면적당 흡수량 (g m <sup>-2</sup> )		
인공습지	갈대	8월	0.705	18.8	23.5	0.152	4.06	5.08	
		11월	0.544	18.5	18.1	0.122	4.16	4.08	
	부들	8월	0.799	16.0	23.1	0.184	3.68	5.32	
		11월	0.563	14.8	16.3	0.130	3.41	3.75	
	줄	8월	0.704	19.2	48.8	0.187	5.10	13.0	
		11월	0.523	18.1	36.2	0.143	4.93	9.88	
	노랑꽃	8월	0.696	17.6	14.7	0.211	5.36	4.48	
	창포	11월	0.494	15.2	10.5	0.145	4.47	3.07	
	축산폐수 처리장내 습지	갈대	8월	0.060	3.80	0.540	0.022	1.40	0.198
			11월	0.066	3.80	0.594	0.025	1.60	0.225
부들		8월	0.595	17.4	5.36	0.048	1.40	0.432	
		11월	1.76	20.4	15.8	0.181	2.10	1.63	
줄		8월	0.285	19.0	2.57	0.036	2.41	0.324	
		11월	0.561	19.4	5.05	0.072	2.49	0.648	
노랑꽃		8월	0.819	12.5	7.37	0.183	2.80	1.65	
창포		11월	2.16	12.3	19.4	0.544	3.10	4.90	

(5) 식물체내 중금속 함량

수생식물 종류별 및 시기별 식물체내 중금속 농도를 비교 검토한 결과는 Table 3-93과 같다. 식물체 중금속 함량은 동일 식물이라도 유입수 특성에 따른 차이가 있었고 중금속 종류별로도 농도 차이가 많이 났다. 계절별 중금속 농도는 전체적으로 8월에 비하여 11월에 약간씩 증가되는 경향이었고, 중금속 종류별 전반적인 농도범위는 비교적 낮은 편이었다. 수생식물 종류별 중금속 함량은 식물종류에 따라 차이가 있었고 인공습지의 식물종류별 전체적인 평균 농도범위는 Fe는 673~1,399 mg L<sup>-1</sup> 범위로 높았고, Mn은 230~435 mg L<sup>-1</sup> 범위였고 나머지는 Cd, Hg, Ni 및 Pb는 검출되지 않았다. 축산폐수처리장내 습지에서 식물종류별 유해 중금속 8종의 전체적인 평균함량은 As, Cr, Cu 및 Zn의 함량은 각각 1.16~1.57, 7.46~10.9, 1,331~3,620 및 6.52~11.7 mg L<sup>-1</sup> 범위이었으며, Cd, Hg, Ni 및 Pb의 함량은 검출되지 않았다.

하수나 산업폐수 슬러지, 가축분뇨 등의 산업부산물을 퇴비화 할 때 최종 산물인 퇴비중에 함유되는 중금속의 함량 초과로 인한 문제점이 많이 발생된다. 현재 우리나라의 농림수산물 부에서 정하고 있는 퇴비부산물 비료 공정규격에는 유해성 기준으로 8종의 중금속에 대하여 기준을 정해 놓고 있으며 양질의 퇴비인 그린퇴비의 경우 As 46 mg kg<sup>-1</sup> 이하, Cd 5 mg

kg-1 이하, Hg 2 mg kg-1 이하, Pb 136 mg kg-1 이하, Cu 364 mg kg-1 이하, Cr 272 mg kg-1 이하, Ni 46 mg kg-1 이하, Zn 909 mg kg-1 이하이며, 일반퇴비의 경우에는 As 111 mg kg-1 이하, Cd 11 mg kg-1 이하, Hg 4 mg kg-1 이하, Pb 333 mg kg-1 이하, Cu 667 mg kg-1 이하, Cr 667 mg kg-1 이하, Ni 111 mg kg-1 이하, Zn 2,000 mg kg-1 이하로 정해 놓고 있다. 본 연구에서 조사한 유입원수 특성별 14개 인공습지에서 생장한 수생식물들의 As, Cd, Hg, Pb, Cu, Cr의 함량은 퇴비 부산물 비료공정 기준보다 훨씬 낮거나 검출되지 않았으며, 이러한 식물체들을 퇴비화시켜 농경지에 재활용해도 중금속과 관련된 문제는 없을 것으로 생각된다.

Table 3-93. 수생식물 종류별 식물체내 중금속 평균 함량

수생 식물	수생 식물	시기	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	
			------(mg kg <sup>-1</sup> )-----										
인공습지	갈대	8월	1.25	-	8.43	37.0	1061	-	356	-	-	46.2	
		11월	1.13	-	8.96	39.6	1399	-	390	-	-	44.6	
	부들	8월	1.52	-	9.30	39.8	781	-	406	-	-	44.7	
		11월	1.47	-	12.1	43.0	673	-	393	-	-	41.9	
	줄	8월	1.65	-	6.93	42.2	1154	-	230	-	-	24.0	
		11월	1.77	-	8.33	46.3	1232	-	336	-	-	22.3	
	창포	8월	1.74	-	8.56	52.4	1304	-	428	-	-	36.3	
		11월	2.07	-	11.4	56.4	768	-	435	-	-	36.6	
	축산폐수 처리장내 습지	갈대	8월	1.16	-	7.46	2451	121	-	29.4	-	-	8.12
			11월	1.34	-	7.57	2462	117	-	71.4	-	-	8.68
		부들	8월	1.25	-	8.02	1412	109	-	41.3	-	-	10.9
			11월	1.39	-	8.11	1331	119	-	48.5	-	-	11.7
줄		8월	1.33	-	9.56	1425	143	-	35.7	-	-	6.52	
		11월	1.51	-	10.9	1467	151	-	38.2	-	-	6.13	
창포		8월	1.32	-	8.25	3421	98.4	-	70.2	-	-	9.26	
		11월	1.57	-	9.38	3620	94.2	-	71.4	-	-	9.12	

## 나) 축산폐수처리장내 수생식물 종류별 비료적 가치 분석

### (1) 축산폐수처리장내 수생식물별 퇴비 재료 활용 가능성 검토

축산폐수처리장내 인공습지에서 생산되는 수생식물체의 퇴비화 재료로서의 활용 가능성을 검토하기 위하여 퇴비화의 중요한 인자인 수분함량, 유기물함량 및 C/N율을 비교 검토한 결과는 Table 3-94에서 보는 바와 같다.

인공습지 축산폐수처리장에서 수생식물 종류별 식물체내 수분함량은 식물종류에 따라 차이가 크게 났고, 동일 식물체에서 시기별로도 차이가 있었으며, 전반적으로 11월에 비하여 8월에 제거한 식물체 중의 수분함량이 높았다. 식물종별 수분함량은 갈대, 부들, 줄 및 창포가 8월에 약 52.7~77.2% 범위, 11월에 약 49.5~73.6% 범위로 부들이 가장 높았다. 인공습지 설치시 정수식물로서 가장 많이 이용되는 갈대, 부들, 줄 및 창포는 수질오염물질 흡수능력이 우수할 뿐만 아니라 단위 면적당 biomass 생산량도 다른 식물에 비하여 많으므로 퇴비화 재료물질로서의 이용가능성이 높은 수생식물이다. 퇴비화 적정 수분함량 기준은 50~60%로 축산폐수처리장내 인공습지에서 조사한 수분함량의 범위는 전반적으로 높게 나타났으나 수분조절제의 첨가없이 약간의 자연식 건조과정을 통하면 퇴비화를 위한 초기 수분함량 유지에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

퇴비화 과정 중 퇴비화 미생물의 유기물 분해과정에서 미생물 세포는 생리학적으로 수분을 필요로 하며 물리적으로도 기질의 용액과 염류, 가스 교환 시의 수분함량 등에 의한 영향을 받는다. 미생물의 대사에 필요한 영양분은 대부분 체외 가수분해효소를 분비하여 영양분을 흡수하기 좋은 상태로 분해후 수용액 상태에서 흡수하므로 수분함량은 미생물의 에너지 대사 및 세포증식에 매우 중요한 역할을 한다. 일반적으로 미생물활성과 퇴비화를 위한 적정수분함량은 50~60%인 것으로 알려져 있으며, 수분 함유율이 전체 퇴비질량의 30% 이하일 때는 생물반응이 저해되며 20% 이하일 때는 반응이 불가능해지게 된다. 또한 너무 높은 함수율 하에서는 입자표면으로의 산소전달에 문제가 생기기 때문에 반응이 저해된다. 그리고 퇴비화 과정 중 미생물에 의한 유기물의 분해가 진행된다면 고온이 되어 증발하기 쉬우나 동시에 유기물 분해에서 수분이 생기기 때문에 시작할 때 조절이 중요하다.

식물체내 C/N율은 미생물의 분해대상인 유기물의 특성으로 효과적으로 퇴비화를 진행시키기 위한 가장 중요한 직접적인 영향인자이며 주로 반응속도론적인 면과 퇴비화 후 생성된 퇴비의 질적인 면에 영향을 준다. 탄소는 미생물이 성장하기 위한 에너지원으로, 질소는 세포증식을 위한 단백질 합성에 이용되는데 보통 미생물 세포의 탄질비가 5~15로 퇴비화는 이 수준에 도달할 때까지 지속된다.

본 연구에서 조사한 수생식물 종류별 C/N율은 식물종류에 따라 차이가 크게 났으며 동일 식물체에서 시기별로는 큰 차이는 없었다. 축산폐수처리장내 인공습지의 수생식물종별 C/N율은 질소함량이 매우 낮은 갈대가 C/N율이 134로 가장 높았으며, 줄의 C/N율이 8월 및 11월에 각각 27.6 및 27.1로 조사되었다.

일반적으로 퇴비화 물질내에 분해하기 어려운 유기물이 많고 그 유기탄소가 미생물의 영양

원이 되기 어려운 경우에는 초기 탄질율을 30~50범위로 높게 선택하여야 한다. 그러나 음식물 쓰레기나 가축분뇨와 같은 일반적인 물질의 퇴비화에 적합한 초기 탄질율은 25~40범위 정도이다. 일반적으로 수생식물체내의 유기물은 다른 퇴비화물질들에 비하여 비교적 분해되기 쉬운 유기물로 구성되어 있으며, 퇴비화 반응속도도 빠르므로 수생식물만을 퇴비화물질로 할 경우에는 초기 C/N율을 25~35정도가 적당할 것으로 생각된다. 본 연구에서 조사된 갈대, 부들, 줄, 창포의 C/N율로 볼 때 부들과 줄이 적정 C/N율에 포함되었다.

미생물분해에 C/N율이 35보다 높으면 질소부족현상이 나타나기 시작하여 미생물의 증식이 억제되고 따라서 퇴비화의 속도가 늦어진다. 또 탄소가 많으므로 이것에 의해 생긴 유기산 등이 퇴비의 pH를 낮추고 역시 미생물의 성장과 활동도 억제된다. C/N율이 너무 낮으면 질소가 암모니아로 변하여 pH를 증가시키고, 이것으로 인하여 암모니아 가스가 발생되어 퇴비화 과정 중 악취를 유발시킨다. 그러나 이러한 C/N율은 대상폐기물의 유형, 성상에 따라 각각 다르게 나타날 수 있으며 운전중 pH 조절을 통하여 질소성분의 유실을 방지하고 최종 퇴비 내에 많은 양의 질소성분이 함유하는 것이 좋다. 일반적으로 축산분뇨의 경우는 C/N율이 15~25로 낮은 편인데 돈분의 경우는 5~6정도로 아주 낮아 탄소분이 풍부한 bulking agent의 첨가가 필요하다.

Table 3-94. 수생식물별 퇴비화과정 영향 인자 분석 검토

수생식물	시기	수분	유기물	T-C	C/N
		(%)			
갈대	8월	52.7	87.6	50.8	134
	11월	49.5	87.9	51.0	134
부들	8월	77.2	88.5	51.3	29.5
	11월	73.6	89.1	51.7	25.3
줄	8월	68.1	90.3	52.4	27.6
	11월	64.8	90.6	52.5	27.1
창포	8월	74.9	89.4	51.9	41.5
	11월	69.1	90.1	52.3	42.5

#### (2) 수생식물체의 bulking agent 활용 가능성 검토

일반적으로 창포, 갈대, 부들, 줄 등 수생식물의 섬유조직은 모세관흡수현상 (capillary effect) 을 촉진시키는 최적의 구조로 되어 있으며, 또한 흡수된 액체와 공기를 최대한 저장할 수 있는 형태를 가지고 있다. 또한 퇴비화 공정 중 수생식물체를 이용하면 섬유조직에서 용출되는 물질은 탄소원을 공급하는 역할을 하게 되며, 수생식물체 섬유조직내에 있는 산소는 퇴비화에 적합한 혐기성 조건을 만드는 역할을 하는 등 기존의 톱밥, 왕겨, 볏짚 등의 수분조절제와는 다른 특성을 갖고 있다.

(3) 수생식물체내 유해성 중금속 함량 기준 관련 검토

축산폐수 처리 인공습지에서 생산되는 수생식물체의 퇴비화 재료로서 활용시 생산된 퇴비의 유해성 중금속 8종에 대한 함량을 검토한 결과는 Table 3-95에서 보는 바와 같다.

현재 우리나라에서는 퇴비화 관련해서 농림수산식품부의 비료 공정 규격의 부산물비료에서 퇴비를 그린퇴비와 일반퇴비의 두 개의 등급으로 구분하고 유기물함량, C/N율, 염분함량, 수분 함량과 유해성분으로서 8종의 중금속에 대하여 기준을 정해 놓고 있다.

수생식물 종류별 유해 중금속 8종의 함량은 동일 식물이라도 중금속 종류별로 농도 차이가 많았으며, 계절별 중금속 농도는 전반적으로 8월에 비하여 11월에 약간씩 증가되는 경향이였다. 전체적으로 수생식물체내 8종의 중금속 농도는 비교적 낮은 편이었다. 식물종류별 유해 중금속 8종의 전체적인 평균 농도범위는 As는 1.16~1.57 mg kg<sup>-1</sup> 범위였고, Cr은 7.46~10.9 mg kg<sup>-1</sup> 범위, Cu는 1331~3620 mg kg<sup>-1</sup> 범위, Zn은 6.52~11.7 mg kg<sup>-1</sup> 범위였으며 Cd, Hg, Ni 및 Pb는 검출되지 않았다.

따라서 본 연구에서 축산폐수처리장내 인공습지에서 성장한 수생식물들의 Cu 함량을 기준치 보다 높게 나왔고, 나머지 As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb 및 Zn은 퇴비 부산물 비료공정의 그린퇴비의 기준보다 훨씬 낮거나 검출되지 않았으므로 이러한 식물체들을 효율적으로 퇴비화시켜 양질의 퇴비로서 농경지에 재활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3-95. 축산폐수처리장내 수생식물의 종류별 식물체내 중금속 평균 함량

수생 식물	시기	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
		(mg kg <sup>-1</sup> )							
갈대	8월	1.16	-	7.46	2451	-	-	-	8.12
	11월	1.34	-	7.57	2462	-	-	-	8.68
부들	8월	1.25	-	8.02	1412	-	-	-	10.9
	11월	1.39	-	8.11	1331	-	-	-	11.7
줄	8월	1.33	-	9.56	1425	-	-	-	6.52
	11월	1.51	-	10.9	1467	-	-	-	6.13
창포	8월	1.32	-	8.25	3421	-	-	-	9.26
	11월	1.57	-	9.38	3620	-	-	-	9.12

(4) 축산폐수처리장내 수생식물 종류별 비료적 가치 분석 검토

축산폐수처리장 인공습지에서 발생하는 수생식물체의 비료학적 가치를 비교 검토하기 위하여 식물체를 대상으로 작물생육에 중요한 질소, 인산, 칼리, 칼슘 및 고토 등의 식물 영양성분들의 함량을 비교 검토하였으며, 그 결과는 Table 3-96에서 보는 바와 같다.

일반적으로 식물체 중에 포함되어 있는 비료 성분은 질소 (N), 인산 ( $P_2O_5$ ), 칼리 ( $K_2O$ ), 칼슘 (CaO) 및 고토 (MgO)이며, 토양환경적인 측면에서 중요 요인은 EC, 유기물함량 및 C/N을 이라고 볼 수 있다.

본 연구에서 조사한 축산폐수처리장내 인공습지에서 성장한 식물체의 주요 비료성분의 평균 함량을 수생식물별로 보면, 질소함량은 줄 (1.92%) > 부들 (1.89%) > 창포 (1.24%) > 갈대 (0.38%)로 줄이 가장 높았다. 식물체별 인산 ( $P_2O_5$ ) 평균함량은 창포 (0.295%) > 줄 (0.245%) > 부들, 갈대 (0.15~0.21%)로 창포에서 가장 높았다. 식물체별 칼리 ( $K_2O$ ) 평균함량은 창포에서 5.81%로 다른 식물체에 비해 상당히 높았고, 식물체별 칼슘 (CaO) 평균함량 역시 창포가 0.808%로 가장 높았으며, 갈대, 부들 및 줄에서 0.101~0.292%의 범위를 보였다. 식물체별 고토 (MgO) 평균함량은 부들이 0.390%로 가장 높았으며, 갈대가 0.148%로 다른 식물체들에 비해 낮았다. 이와 같이 수생식물별 비료성분 함량은 식물별로 차이가 많았으며 전반적으로 줄과 창포에서 높았고 갈대는 모든 성분에서 매우 낮았다. 본 연구에서 사용한 수생식물체내 각 비료 성분 함량으로 보아 축산폐수처리장내 수생식물을 퇴비화시켜 토양에 시비할 경우 토양의 물리화학적 특성 개량과 식물영양성분으로서의 활용가치는 충분히 있다고 생각된다.

Table 3-96. 축산폐수처리장내 수생식물의 종류별 작물 비료성분 함량

수생식물	시기	T-N	$P_2O_5$	$K_2O$	CaO	MgO	$Na_2O$
		----- (%) -----					
갈대	8월	0.38	0.14	0.318	0.137	0.144	0.053
	11월	0.38	0.16	0.315	0.148	0.151	0.054
	평 균	0.38	0.15	0.317	0.143	0.148	0.054
부들	8월	1.74	0.14	0.582	0.282	0.372	0.036
	11월	2.04	0.21	0.561	0.302	0.407	0.041
	평 균	1.89	0.175	0.572	0.292	0.390	0.039
줄	8월	1.90	0.24	0.493	0.098	0.224	0.009
	11월	1.94	0.25	0.499	0.104	0.250	0.013
	평 균	1.92	0.245	0.496	0.101	0.237	0.011
창포	8월	1.25	0.28	5.93	0.797	0.324	0.013
	11월	1.23	0.31	5.69	0.819	0.316	0.012
	평 균	1.24	0.295	5.81	0.808	0.320	0.013

3) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토

복내 바이오파크 인공습지의 퇴적층내 화학적 특성은 Table 3-97과 같고, 유해 중금속의 특성은 Table 3-98에서 보는 바와 같다. 퇴적층내 pH 및 EC는 1, 2 및 3처리구에서 각각 6.17~6.20 및 4.04~4.07 dS m<sup>-1</sup> 범위로 큰 차이 없이 비슷하였다. 복내 바이오파크 인공습지에서 조사된 퇴적물의 유해 중금속 중 As의 함량은 0.82~0.94 mg kg<sup>-1</sup>, Cd의 함량은 0.91~1.14 mg kg<sup>-1</sup>, Cr<sup>6+</sup>의 함량은 1.31~3.66 mg kg<sup>-1</sup>, Cu의 함량은 24.94~31.33 mg kg<sup>-1</sup>, Ni의 함량은 24.32~29.54 mg kg<sup>-1</sup>, Pb의 함량은 14.80~22.03 mg kg<sup>-1</sup> 및 Zn의 함량은 72.07~91.93 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사되었으며 Hg의 함량은 검출되지 않았다. 퇴적층에서 조사된 중금속의 함량은 유해 중금속 허용치보다 낮은 결과로 조사되어 토양개량제로서 이용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3-97. 복내 바이오파크 인공습지 퇴적층내 화학적 특성

처리구	pH	EC	T-N	유기물	T-C	C/N	T-P	K	Ca	Mg	Na
	(1:5)	(dS m <sup>-1</sup> )	-----	(%)	-----		-----	(mg kg <sup>-1</sup> )			
1	6.17	4.04	0.562	21.6	12.6	22.3	739	7599	1451	3974	842
2	6.20	4.06	0.605	23.9	13.9	22.9	547	7057	1426	3712	835
3	6.20	4.07	0.638	23.3	13.5	21.2	629	7449	1548	3978	978

Table 3-98. 복내 바이오파크 인공습지 퇴적층내 유해중금속 특성

항목	처리구			일반퇴비기준치	유해 중금속 허용치	
	1	2	3		우려기준	대책기준
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----					
As	0.94	0.85	0.82	111	25	75
Cd	1.14	0.91	1.05	11	4	12
Cr <sup>6+</sup>	1.99	1.31	3.66	667	5	15
Cu	24.94	31.33	27.96	667	150	450
Hg	ND	ND	ND	4	4	12
Ni	24.32	29.54	26.27	111	100	300
Pb	22.03	17.38	14.80	333	200	600
Zn	72.07	91.93	87.67	2000	300	900

### 3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화

#### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화

##### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 장기간 수처리 효율

현장 축산폐수처리장에서 공법개선에 따른 수처리 효율을 조사하기 위해 부하량별 수처리 효율, 시기별 수처리 효율, 계절별 수처리 효율, 이상기후에서의 수처리 효율, 오염물질 분해속도, 용존형태별 수처리 효율 등을 각각 조사하였다.

##### 가) 부하량별 수처리 효율

축산폐수 부하량에 따른 수처리 효율조사는 공정개선된 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 부하량을 400, 800, 1200 및 1600 L day<sup>-1</sup> 각각 달리하여 오염물질의 처리효율을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음에서 보는 바와 같다.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 1차 활성슬러지조, 2차 호기성조 및 3차 혐기성조를 통과한 처리수 중의 pH, EC 및 DO 함량을 각각 조사한 결과는 Table 3-99에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 pH는 6.8이었으며, 처리수의 pH는 처리조 및 부하량에 따라 별 차이 없이 6.9~7.5범위였다. 축산폐수 원수의 EC의 경우는 4.21 dS m<sup>-1</sup>로 아주 높았으나, 각조별 처리수를 거치면서 농도가 감소하는 것을 알수가 있었고, 부하량에 따라서는 별 다른 차이는 없었다. 축산폐수 원수의 DO의 농도는 3.8 mg L<sup>-1</sup>였고, 처리단계가 증가할 수록 DO의 함량도 증가하는 경향이였다. 특히 활성슬러지조를 거치면서 DO의 농도가 급격히 증가하였는데 이는 활성슬러지조에 설치된 공기 유입장치로 인한 결과라 판단된다. 호기성조도 이와 마찬가지로 통기관을 통하여 외부의 공기가 안으로 유입되면서 DO의 농도는 약간 증가하는 경향이였다. 혐기성조에서는 이와 반대로 DO의 농도는 약간 감소하였다.

Table 3-99. 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량별 축산폐수 중 pH, EC 및 DO 함량 변화

Items	Stage	Raw Water	Livestock wastewater loading (L day <sup>-1</sup> )			
			400	800	1200	1600
pH	1 <sup>st</sup> treatment		7.3	7.5	7.4	7.2
	2 <sup>nd</sup> treatment	6.8	7.2	6.9	7.2	7.1
	3 <sup>rd</sup> treatment		7.1	7.2	7.2	7.3
EC (dS m <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment		2.21	2.42	2.51	2.32
	2 <sup>nd</sup> treatment	4.21	1.65	1.84	2.01	1.94
	3 <sup>rd</sup> treatment		0.94	1.24	1.51	1.61
DO (mg L <sup>-1</sup> )	1 <sup>st</sup> treatment		6.8	5.4	6.2	6.1
	2 <sup>nd</sup> treatment	3.8	8.4	8.6	7.6	7.3
	3 <sup>rd</sup> treatment		6.8	6.2	7.1	7.2



공정개선된 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 축산폐수 중 COD의 처리효율은 Fig. 3-173에서 보는 바와 같다.

공정개선된 현장 축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 COD 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소하는 경향으로서, 특히, 축산폐수 부하량이  $1200 \text{ L day}^{-1}$  이상에서부터 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소되는 경향이였다. 현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 혐기성조의 COD 처리효율은 축산폐수 부하량이  $400 \sim 800 \text{ L day}^{-1}$ 에서  $87.0 \sim 92.4\%$ 이었으며, 축산폐수 부하량이  $1200 \text{ L day}^{-1}$  이상에서  $74.8 \sim 81.8\%$ 이었다.

1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 COD 처리효율은 전반적으로 1차 활성슬러지에 비해 처리효율은 더욱 증가하는 경향이였으나 부하량이 증가함에 따라 감소하는 경향이였다. 이는 1차 처리인 활성슬러지조에서 미처 처리되지 못한 COD성 유기물을 2차 처리인 호기성조에서 처리하기 때문으로 사료된다. 특히, 호기성조에서는 이중통기관의 자연통풍과 수생식물에 의한 뿌리 주위의 산소공급으로 인해 호기성조 전체에서 미생물에 충분한 산소를 공급함으로써 대부분의 유기물이 호기성조에서 처리되기 때문에 더욱 안정적으로 처리되는 것으로 사료되었다. 하지만 축산폐수 많은 부하량을 처리하기에는 상대적인 체류시간이 짧기 때문에 부하량에 대한 영향은 클 것으로 판단된다.

2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 COD 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이  $99.5 \sim 99.8\%$ 로 매우 안정적으로 처리되었다. 이는 1차 및 2차 처리인 활성슬러지 및 호기성조에서 대부분의 COD성 유기물을 처리하기 때문에 3차 처리인 혐기성조에서는 COD부하가 감소하여 더욱 안정적으로 처리할 수 있었다. 이와 같이 활성슬러지 및 호기성조의 처리효율이 높은 것은 대부분 축산폐수 중 유기물은 식물이나 미생물에 의해 분해가 용이한 유기물이 많이 포함되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 본 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장은 유량 변동이 심한 축산폐수 중 COD 처리에 적합한 공정으로 사료되며, 고부하의 COD가 함유된 오염원에도 충분히 적용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 본 실험은 각 조건당 1개월간의 단기간의 실험의 결과로서  $800 \text{ L day}^{-1}$  이후에 활성슬러지조의 처리효율이 급격하게 감소하였으며, 장기간 운영한다면 호기성조 및 혐기성조의 오염물질 부하로 인하여 최종 방류수의 농도가 더욱 증가할 것으로 판단된다. 이에 부하량에 대한 실험은 장기적인 연구가 더욱더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

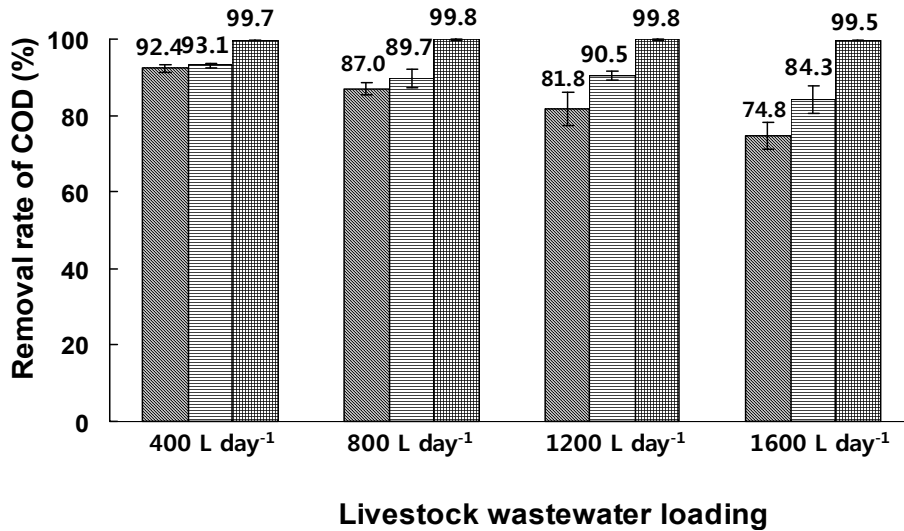


Fig. 3-173. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 COD 함량변화.  
 ▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▪ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 SS의 수처리 효율을 조사한 결과는 Fig. 3-174와 같다.

축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 SS 처리효율은 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 감소하는 경향이었으며 1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 SS 처리효율은 1차 처리인 활성슬러지와 동일한 경향으로 부하량에 증가함에 따라 감소하는 경향이였다. 이는 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 활성슬러지조 및 호기성의 체류시간이 짧아지므로 미생물에 의한 유기물 분해가 제대로 이루어지지 못했기 때문으로 사료된다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 COD 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 99.3~99.9%로 매우 안정적으로 처리되었다.

이와 같이 혐기성조에서 안정적인 SS처리가 가능한 것은 본 공법이 주로 여재에 의한 여과가 주된 처리이기 때문이다. 그러나 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁 입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Yoon et al., 1998; Seo et al., 2002).

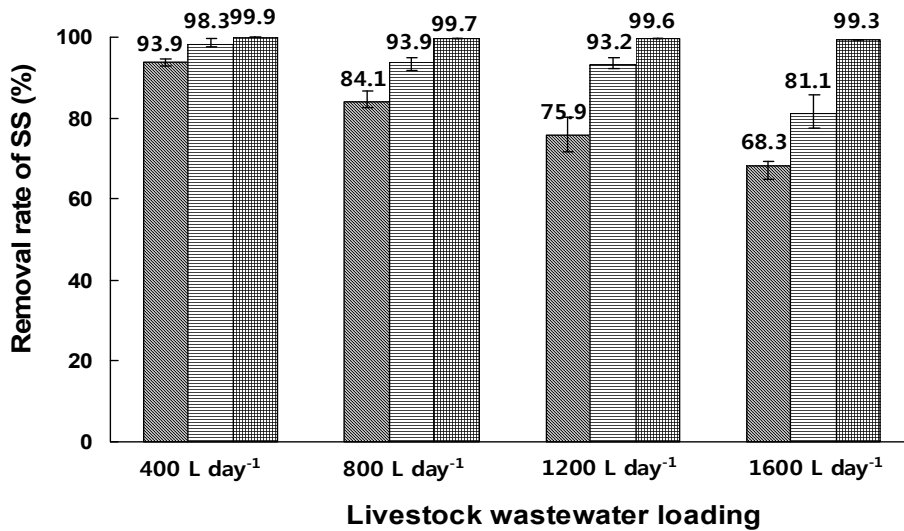


Fig. 3-174. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 SS 함량변화.

▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 T-N의 수처리 효율을 조사한 결과는 Fig. 3-175에서 보는 바와 같다.

축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-N 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소하는 경향으로서 특히, 축산폐수 부하량이 1200 L day<sup>-1</sup> 이상에서부터 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소되는 경향이 있었다. 현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 활성슬러지조의 T-N 처리효율은 축산폐수 부하량이 400~800 L day<sup>-1</sup>에서 85.2~88.9%이었으며, 축산폐수 부하량이 800 L day<sup>-1</sup>이상에서 77.6~81.0%로 축산폐수 부하량이 400~800 L day<sup>-1</sup>의 처리효율에 비해 약간 감소되는 경향을 보였다.

1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 T-N 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 84.8~91.1%로 안정적으로 처리되었다. 이는 1차 처리인 혐기성조에서 미처 처리되지 못한 T-N을 2차 처리인 호기성조에서 처리하기 때문으로 사료된다.

2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 T-N 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 99.1~99.8%로 매우 안정적으로 처리되었다.

이와 같이 T-N 처리효율은 전처리를 제외한 혐기성조에서 대부분 처리되었는데, 이는 호기성조를 통과한 처리수는 NO<sub>3</sub>-N의 형태로 존재하기 때문으로 혐기성조에서는 질산화과정이 필요 없이 유입되는 NO<sub>3</sub>-N를 생물학적인 탈질과정에 의해 직접적인 처리가 가능하기 때문으로 사료된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수처리장의 T-N은 1차 및 3차 처리인 활성슬러지조 및 혐기성조에서 대부분 처리됨을 알 수 있었고, 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 축산폐수처리장의 3차 처리 과정을 통해 안정적인 T-N처리가 가능하였다.

일반적인 질소는 NH<sub>4</sub>-N와 NO<sub>3</sub>-N로서 구분할 수 있지만 NO<sub>3</sub>-N는 NH<sub>4</sub>-N와는 달리 음전

하이기 때문에 (-)하전인 토양입자에 부동화 되지 않으므로 훨씬 더 유동성이 크며, 식물이나 미생물에 잘 흡수되지 않고, 침투수와 함께 잘 이동하는 특징이 있다 (Yang et al., 2001). 따라서 현장 축산폐수처리장의 경우 T-N의 처리는 여재의 흡착에 의한 처리보다는 호기, 혐기 조건에 따른 미생물의 산화, 환원 작용에 의한 생물학적 탈질에 의해 처리해야 할 것으로 사료된다.

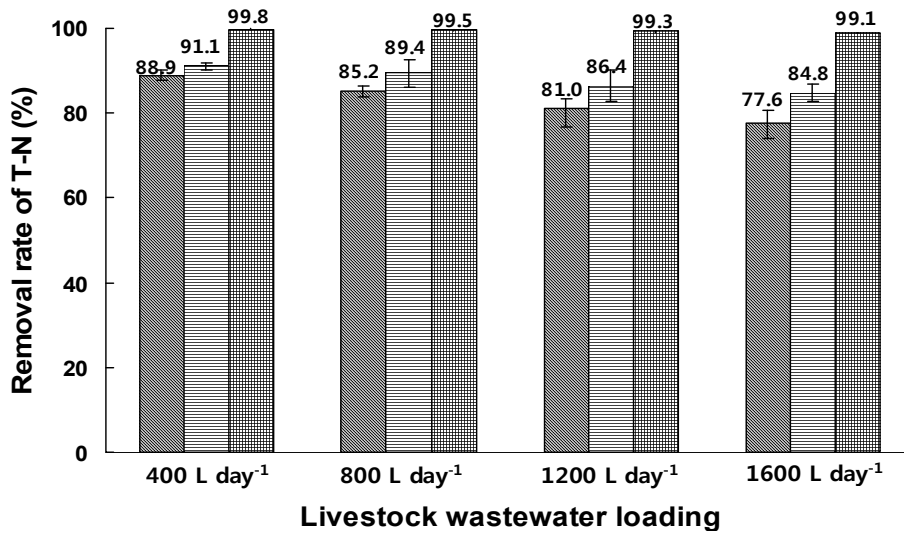


Fig. 3-175. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 T-N 함량변화.

▣ : 1<sup>st</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 T-P의 수처리 효율을 조사한 결과는 Fig. 3-176에서 보는 바와 같다.

축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-P 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소하는 경향으로서, 특히, 축산폐수 부하량이 800 L day<sup>-1</sup>이상에서부터 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 급격히 감소되는 경향이 있었다. 현장 축산폐수처리장에서 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-P 처리효율은 축산폐수 부하량이 400~800 L day<sup>-1</sup>에서 89.0~94%이었으며, 축산폐수 부하량이 800 L day<sup>-1</sup>이상에서 71.9~76.1%로 축산폐수 부하량이 400~800 L day<sup>-1</sup>의 처리효율에 비해 급격히 감소되는 경향을 보였다.

1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 T-P 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량에 증가함에 따라 1차 활성슬러지와 동일한 경향으로 약간 감소하는 경향이었지만 그 폭은 크지 않았다. 이는 2차 호기성조의 경우 인의 흡착 능력이 우수한 방해석을 사용함으로써 활성슬러지에서 미처 처리되지 못한 인이 제거 될 수 있는 것으로 판단된다. 방해석의 주성분이 대부분 CaCO<sub>3</sub>형태로 이루어져 있으므로 정석법에 의해 인이 처리되기 때문으로 사료된다. 정석 탈인법을 이용한 인 처리는 인을 함유하는 물에 인산칼슘으로 되는 동종동계종의 화합물과 접촉시키면 탈인제인 방해석 위에 인산칼슘이 생성, 정석하는 현상을 이용한 정석 탈인법으로 수중의 인은 Ca이온과 반응하여 난용성인 hydroxyapatite [Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]로 처리되는 것으로 알

려져 있다 (Heyman, 1998; Lahmann, 1989).

2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 T-P 처리효율은 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 99.8% 이상으로 매우 안정적으로 처리되었다. 이는 2차 처리인 호기성조에서 대부분의 T-P를 처리하기 때문에 3차 처리인 혐기성조에서는 T-P 부하가 감소하여 더욱 안정적으로 처리할 수 있기 때문이며, 혐기성조의 체류시간 상대적으로 길고, 물 흐르막을 통과하면서 인이 흡착될 수 있는 면적이나 시간이 충분하기 때문으로 사료된다. 이상의 결과를 미루어 볼 때, 본 현장 축산폐수처리장의 활성슬러지조-호기성조-혐기성조의 조합은 부하량에 증가에 따른 영향없이 비교적 안정적인 수처리 효율을 보였으나, 이 실험의 경우 각 조건별 1개월이라는 짧은 시간동안에 이루어지고, 혐기성조의 체류시간이 상대적으로 길기 때문에 정확한 수처리 효율이라고 보기는 어려울 것으로 판단된다. 보다 구체적인 결과를 위해서는 장기적인 실험을 계획하여 진행되어야 할 것으로 판단된다.

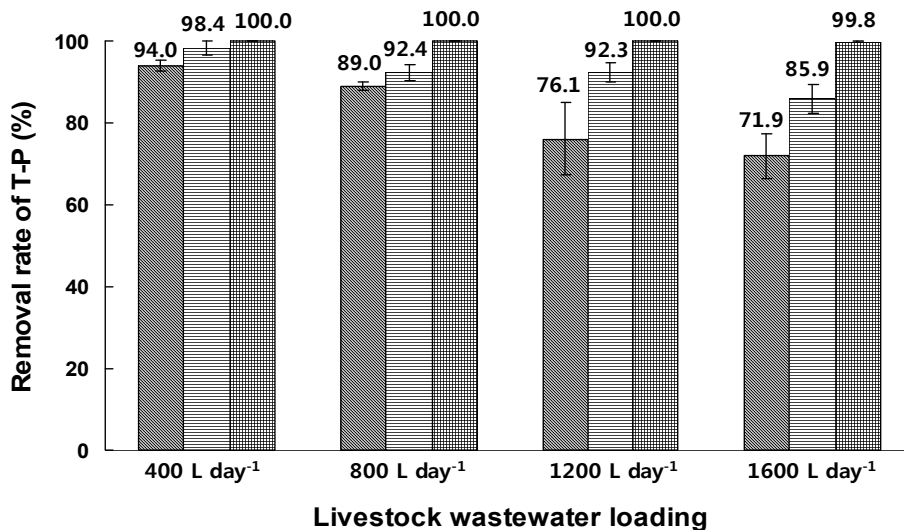


Fig. 3-176. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 T-P 함량변화.

▣ : 1<sup>st</sup> treatment, ▤ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▥ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 부하량에 따른 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N 및 PO<sub>4</sub>-P 함량변화를 조사한 결과는 Table 3-100에서 보는 바와 같다.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 원수 중 NH<sub>4</sub>-N 함량은 6,224 mg L<sup>-1</sup>이었으며, NH<sub>4</sub>-N 함량은 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 NH<sub>4</sub>-N 함량이 증가하는 경향이었고, 처리단계가 증가할수록 NH<sub>4</sub>-N함량은 감소하였다.

공정개선된 축산폐수처리장에서의 축산폐수 원수 중 NO<sub>3</sub>-N 함량은 400.6 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 활성슬러지를 통과한 처리수 중의 NO<sub>3</sub>-N 함량은 원수에 비해 급격히 감소되었으며, 호기성조를 통과한 처리수 중의 NO<sub>3</sub>-N은 활성슬러지조에 비해 약간 증가하는 경향이였다. 이와 같이 호기성조 처리수에서 NO<sub>3</sub>-N 함량이 약간 증가하는 것은 호기성조에서 여재에 부착된 호기성 미생물이 축산폐수 중의 NH<sub>4</sub>-N을 질산화시켜 NO<sub>3</sub>-N으로 전환시켰기 때문으로 판단된다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수 중  $\text{NO}_2\text{-N}$  함량은  $48 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 현장 축산폐수처리장 방류수 중의  $\text{NO}_2\text{-N}$  함량은 부하량에 따라 별 차이 없이 각각  $0.05\sim 0.07 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다.

현장 축산폐수처리장에서의 축산폐수 원수 중  $\text{PO}_4\text{-P}$  함량은  $724.6 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 활성슬러지조를 통과한 처리수 중의  $\text{PO}_4\text{-P}$  함량은 축산폐수 원수에 비해 급격히 감소되었으며, 최종 방류수 중의  $\text{PO}_4\text{-P}$  함량도 모든 부하량에 따라 약간 증가하는 경향이었으나 큰 차이 없이  $0.02\sim 1.10 \text{ mg L}^{-1}$ 범위였다.

Table 3-100. 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량별 축산폐수 중  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  및  $\text{PO}_4\text{-P}$  함량 변화

(Unit :  $\text{mg L}^{-1}$ )

Items	Stage	Raw Water	Livestock wastewater loading ( $\text{L day}^{-1}$ )			
			400	800	1200	1600
$\text{NH}_4\text{-N}$	1 <sup>st</sup> treatment		667	874	1194	1365
	2 <sup>nd</sup> treatment	6,224	584	634	751	912
	3 <sup>rd</sup> treatment		10	18	32	51
$\text{NO}_3\text{-N}$	1 <sup>st</sup> treatment		84.6	102.1	119.1	129.3
	2 <sup>nd</sup> treatment	400.6	85.4	111.3	121.6	134.2
	3 <sup>rd</sup> treatment		1.23	2.25	5.12	6.47
$\text{NO}_2\text{-N}$	1 <sup>st</sup> treatment		4.2	4.5	5.1	5.2
	2 <sup>nd</sup> treatment	48	4.3	4.5	5.2	5.4
	3 <sup>rd</sup> treatment		0.05	0.07	0.05	0.05
$\text{PO}_4\text{-P}$	1 <sup>st</sup> treatment		45.3	84.7	150.6	184.1
	2 <sup>nd</sup> treatment	724.6	9.42	60.7	56.3	96.2
	3 <sup>rd</sup> treatment		0.02	0.12	0.27	1.10

#### 나) 시기별 수처리 효율

공정개선된 현장 축산폐수처리장의 처리시일에 따른 수처리 효율 조사는 2011년 6월 13일부터 2012년 3월 19까지 축산농가로부터 배출되는 축산폐수를 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 수처리 효율의 장기간 변화를 조사하기 위해 축산폐수처리장의 공정개선 후부터 연구종료 시점인 3월 까지 총 10개월간 주 1회 원수, 1차 처리인 활성슬러지조 처리수, 2차 처리인 호기성조 처리수 및 3차 처리인 혐기성조 처리수 (방류수)를 각각 채취하여 COD, SS, T-N 및 T-P의 함량을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD의 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-177에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 COD는  $9,753\sim 20,833 \text{ mg L}^{-1}$  범위로 불규칙하게 축산폐수처리장에 유입되었는데, 이는 축산농가로부터 배출되는 축

산폐수를 집수조로부터 펌프 이용하여 주입하는 과정에서 고형물 분리가 제대로 이루어지지 않아 원수의 COD 농도가 불규칙한 것으로 사료된다. 특히 1월부터 2월까지 축산폐수 농도는 축산농가의 폭기시설에서 미생물에 의한 분해가 저하되면서 다른 시기에 비해 상대적으로 높았던 것으로 판단된다.

본 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 축산폐수처리장에서 축산폐수처리 시일에 따른 COD 처리효율은 상기에서 기술한 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 축산폐수 처리시일이 경과할수록 점점 안정화되는 경향으로서 축산폐수처리장 운전 1~2개월 후부터는 거의 안정적인 COD 처리가 가능하였다. 이는 축산폐수처리장 운전 4개월 후부터는 미생물의 활착과 수생식물의 왕성한 생육으로 인해 안정적인 자연정화시스템의 운전이 가능하기 때문으로 사료된다.

축산폐수처리장에서 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 COD는 939~4,167 mg L<sup>-1</sup>으로 축산폐수 원수에 비해 매우 큰 폭으로 감소하는 경향이었고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 COD는 831~3,546 mg L<sup>-1</sup>으로 활성슬러지조 처리수에 비해 COD가 더욱 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 COD는 8.3~278 mg L<sup>-1</sup>으로 매우 안정적으로 처리되었으며, 특히 1차 처리인 활성슬러지조를 통과하면서 매우 높은 처리효율을 보였으며, 3차 처리인 혐기성조를 거치면서 더욱 안정적으로 처리되었다. 하지만 배출되는 농도는 부하량과 유입농도에 따라 불규칙한 경향이였다. 이는 소규모 축산농가의 경우 분과 뇨를 분리할 수 있는 시설이 제대로 갖추어지지 않기 때문에 유기성 오염물질에 의한 영향으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수 처리시일에 따른 COD 처리는 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 비교적 안정적인 농도를 보였으나 부하량에 따라 큰 차이가 있는 것을 고려할 때 규칙적으로 폐수를 주입할 수 있는 방안이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

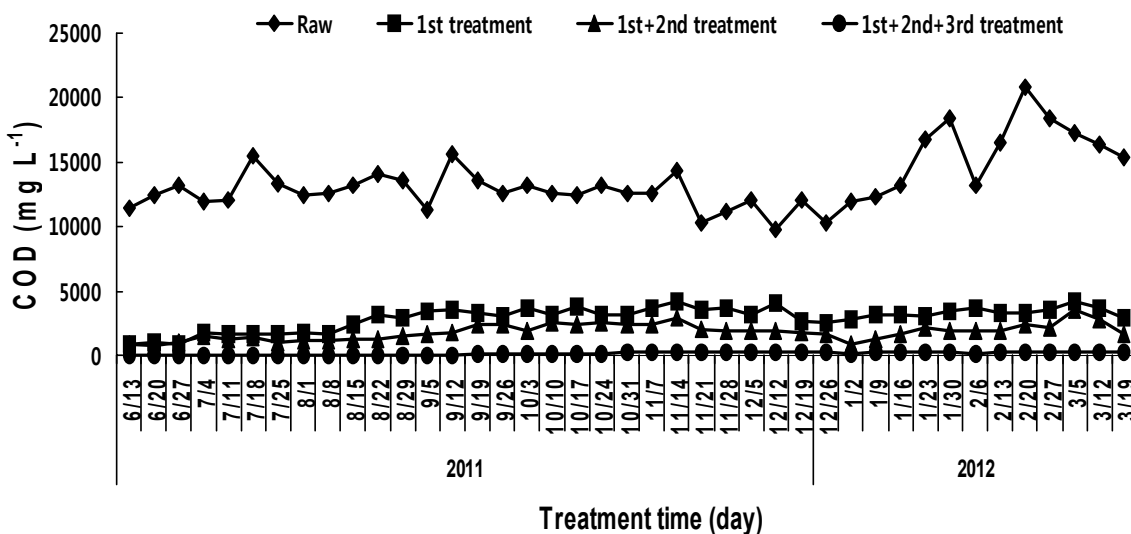


Fig. 3-177. 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD 함량변화.

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 SS 함량 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-178에서 보는 바와 같다.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 SS 함량은 9,600~27,133 mg L<sup>-1</sup>으로 COD에 비해 매우 불규칙적으로 유입하는 경향이였다. 본 처리장이 설치된 축산농가의 경우 단순한 폭기 시설 및 집수조만을 갖추고 있고, 하루에 배출되는 축산폐수의 차집되는 집수조가 2곳으로 분리되어 있어 차집되는 과정에서 SS 농도가 불규칙하게 유입된 것으로 판단된다. 특히 12월부터 1월까지의 SS 함량이 급격히 감소하였는데, 이는 소규모 축산농가의 경우 겨울철에는 폭기 시설의 미생물의 활성이 떨어지기 때문에 계속해서 축산폐수를 폭기시설에 주입하지 않고 장시간 폭기시킨 후 배출되기 때문으로 다른 시기에 비해 상대적으로 SS 함량이 감소한 것으로 사료된다.

본 활성슬러지-호기성조-혐기성조 조합형 축산폐수처리장에서 축산폐수처리 시일에 따른 SS 처리효율은 상기에서 기술한 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 축산폐수처리장 운전 초기부터 안정적인 처리가 가능하였지만, 부하량 실험의 결과에서도 알 수 있었듯이 축산폐수 부하량이 1,200 L day<sup>-1</sup>이었던 8월 1일 부터는 부하량에 따라 활성슬러지조의 농도가 증가하는 경향이었고, 그에 따라 호기성조의 농도도 같이 증가하는 경향이였다. 그러나 부하량을 800 L day<sup>-1</sup>로 조절한 11월 7일부터는 다시 안정적으로 처리되는 경향이였다.

축산폐수처리장에서 1차 처리인 활성슬러지 처리수의 SS 함량은 1,435~13,427 mg L<sup>-1</sup>으로 축산폐수 원수에 비해 급격히 감소하는 경향이였고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 SS 함량은 35.4~5,320 mg L<sup>-1</sup>으로 활성슬러지조 처리수에 비해 SS가 약간 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 SS 함량은 3~243 mg L<sup>-1</sup>으로 대부분의 SS를 제거함으로써 매우 안정적으로 처리되었으며 특히, 대부분의 SS는 활성슬러지조에서 처리가 되었으며, 또한 자연정화공법의 혐기성조를 통과하면서 매우 안정적으로 SS가 처리되었는데, 이는 본 자연정화공법이 주로 여재에 의한 여과가 주된 처리이기 때문에 높은 수처리 효율을 보인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁 입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Yun et al., 1998; Seo, 2002).

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수 처리시일에 따른 SS 처리는 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 전반적으로 축산폐수처리장 방류수는 운전 초기부터 매우 안정적으로 처리되었다. 하지만 부하량 실험의 결과에서도 알 수 있듯이 본 축산폐수처리장은 부하량 및 환경적인 영향에 의해 처리효율이 불규칙하게 변하였으며, 혐기성조를 통과하면서 안정적으로 SS를 제거 할 수 있었지만, 이는 단기간의 연구 결과로서 보다 정밀한 처리효율의 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.



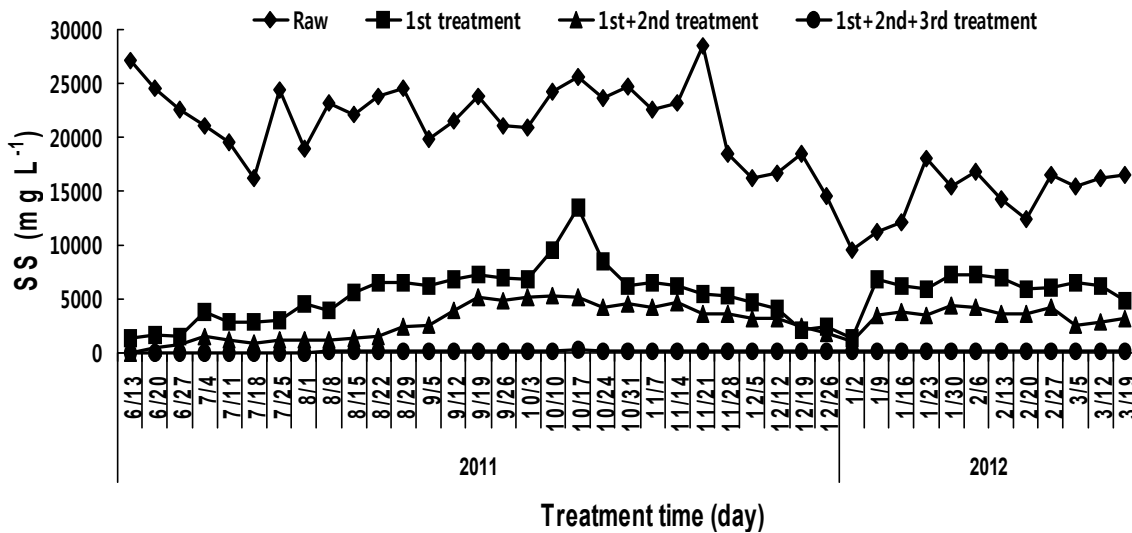


Fig. 3-178. 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 SS 함량변화.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 함량변화를 조사한 결과는 Fig. 3-179와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 T-N 함량은 4,290~7,225 mg L<sup>-1</sup>으로 전반적으로 여름부터 가을까지가 높은 경향이였으며, 비교적 겨울이 다른 시기에 비해 약간 낮은 경향이였다. 이와 같이 여름철에 축산폐수 원수 중 T-N 함량이 가장 높은 것은 축산농가에서 온도증가로 인한 폐사와 병원균 증가를 방지하기 위해 세척수를 이용하므로서 축사의 온도 조절 및 세척함으로서 축사에서 발생하는 폐수와 혼합되어 집수조로 유입되기 때문으로 사료된다.

본 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 처리효율은 상기에서 기술한 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 축산폐수 처리시일이 경과할수록 비교적 안정적인 T-N 처리가 가능하였다. 이는 활성슬러지조는 비교적 부하량 및 환경적인 영향을 많이 받지만 자연정화공법인 호기성조 및 혐기성조의 경우는 운전 2개월 후부터는 미생물의 활착과 수생식물의 왕성한 생육으로 인해 안정적인 자연정화시스템의 운전이 가능하기 때문으로 사료된다.

축산폐수처리장에서 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-N 함량은 187~1,711 mg L<sup>-1</sup>으로 축산폐수 원수에 비해 급격히 감소하는 경향이였고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의 T-N 함량은 571~1,324 mg L<sup>-1</sup>으로 혐기성조 처리수에 비해 T-N이 약간 감소하였다. 2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 T-N 함량은 8~118 mg L<sup>-1</sup>으로 매우 안정적으로 처리되었으며, 특히 T-N 처리는 1차 처리 및 3차 처리인 활성슬러지조 및 혐기성조를 통과하면서 매우 안정적으로 처리되었다. 이는 활성슬러지조는 폭기기능과 침전 기능을 병행하여 설치한 하상류식 방식으로 일부 유기물은 폭기기능에 의해 분해가 되고 난분해성 유기물의 경우는 침전되므로 T-N의 처리효율이 증가한 것으로 사료되며, 혐기성조의 경우 활성슬러지조 및 호기성조에서 질소의 형태가 NO<sub>3</sub>-N의 형태로 혐기성조에 유입되므로서 생물학적인 탈질에 의해 처리가 가능하기 때문으로 사료된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 처리는 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 전반적으로 축산폐수처리장은 운전초기에 시일이 경과함에 따라 방류수 중 T-N의 농도는 약간 증가하는 경향이었으나 비교적 안정적으로 처리되었다. 따라서 본 축산폐수처리장은 소규모 축산농가로부터 배출되는 축산폐수 처리에 적합한 것으로 사료된다.

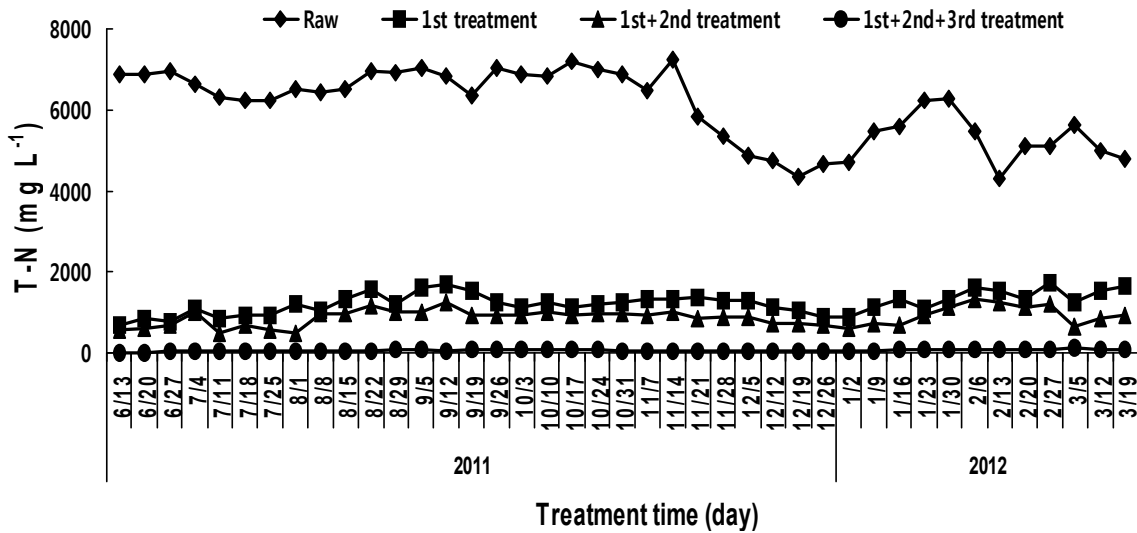


Fig. 3-179. 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-N 함량변화.

현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 함량변화를 조사한 결과는 Fig. 3-180과 같다. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 원수의 T-P 함량은 461~895 mg L<sup>-1</sup>으로 매우 불규칙하게 유입되었다. 축산폐수 원수 중 T-P 함량은 T-N과 비슷한 경향으로 전반적으로 봄부터 가을까지가 높은 경향으로 특히 여름이 가장 높았고, 비교적 겨울이 다른 시기에 비해 약간 낮은 경향이였다. 이와 같이 여름철에 축산폐수 원수 중 T-P 함량이 가장 높은 것은 축산농가에서 온도증가로 인한 폐사와 병원균 증가를 방지하기 위해 세척수를 이용하므로서 축사의 온도 조절 및 세척함으로써 축사에서 발생하는 폐수와 혼합되어 집수조로 유입되기 때문으로 사료된다.

본 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 처리효율은 상기에서 기술한 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 축산폐수처리장 운전 초기부터 안정적인 처리가 가능하였다. 이와 같이 축산폐수처리장 운전초기부터 안정적인 T-P 처리가 가능한 것은 T-P 처리의 경우 미생물이나 수초의 영향보다 여재에 의한 흡착 및 침전이 주된 처리이기 때문이다. 특히 본 축산폐수처리장에는 여재중 인 흡착능이 높은 방해석이 혼합되어 있기 때문에 이들 방해석에 의해 대부분의 인이 Ca-P의 형태로 흡착 및 침전되기 때문으로 사료된다 (Geisler, 1965).

축산폐수처리장에서 1차 처리인 활성슬러지조 처리수의 T-P는 413~461 mg L<sup>-1</sup>으로 축산폐수 원수에 비해 크게 감소하는 경향이었고, 1차 처리된 다음 2차 처리인 호기성조 처리수의

T-P는 0.2~134.7 mg L<sup>-1</sup>으로 혐기성조 처리수에 비해 T-P가 안정적으로 처리되었으며, 2차 처리된 다음 3차 처리인 혐기성조 처리수의 T-P는 0.01~11.8 mg L<sup>-1</sup>으로 매우 안정적으로 처리되었다. 특히, T-P처리는 각 처리조를 통과하면서 처리효율이 점차 증가하였으며, 3차 처리인 혐기성조를 통과하면서 매우 안정적으로 처리되었다. 이와 같이 T-P 처리효율이 높은 것은 혼합여재 중 혼합되어 있는 방해석 때문으로 이들 방해석의 주성분이 대부분 CaCO<sub>3</sub>형태로 이루어져 있으므로 정석탈인법에 의해 인이 처리되기 때문으로 사료된다. 정석탈인법을 이용한 인 처리는 인을 함유하는 물에 인산칼슘으로 되는 동종동계종의 화합물과 접촉시키면 탈인제인 방해석 위에 인산칼슘이 생성, 정석하는 현상을 이용한 정석 탈인법으로 수중의 인은 Ca이온과 반응하여 난용성인 hydroxyapatite [Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]로 처리되는 것으로 알려져 있다 (Heyman, 1998; Lahmann, 1989).

이상의 결과를 미루어 볼 때 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 처리는 불규칙한 축산폐수의 유입에도 불구하고 전반적으로 축산폐수처리장 운전 초기부터 매우 안정적으로 처리되었다. 따라서 본 축산폐수처리장은 소규모 축사농가로부터 배출되는 축산폐수 처리에 적합한 것으로 사료된다. 하지만 이와 같은 결과는 8개월간의 단기간의 연구결과로서 오염물질의 처리경향을 단정하기에는 어려움이 있으며, 장기간의 정밀 모니터링을 통한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

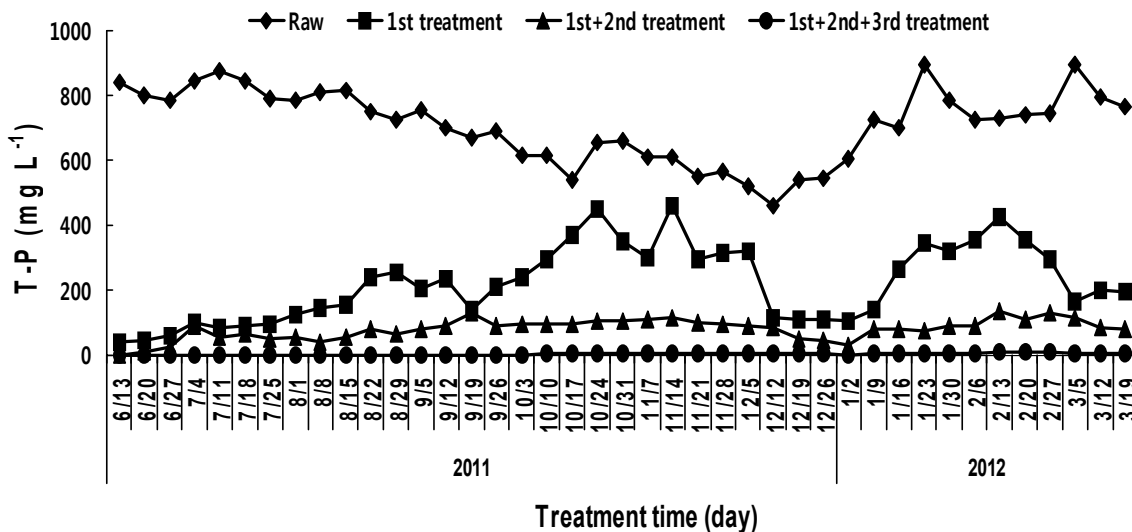


Fig. 3-180. 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 T-P 함량변화.

#### 다) 계절별 수처리 효율

계절별 수처리 효율 조사는 우리나라 계절별 수처리 효율 특성을 조사하기 위해 축산폐수처리장에서 공정개선에 따른 수처리 효율에서의 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 처리장에서 2011년 6월부터 2012년 3월까지의 총 수처리 결과를 봄, 여름, 가을 및 겨울로 구분하여 각 계절별 평균 축산폐수 처리효율을 조사하였고, 그 결과는 다음과 같다.

공정개선된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장에서 10개월간 계절별 COD의

처리효율을 조사한 결과는 Fig. 3-181과 같다. 계절별 최종 방류수의 처리효율 비교한 결과 98%이상으로 계절에 따라 별 다른 차이 없이 유사한 경향이였다. 이는 혐기성조의 경우 상대적으로 다른 조에 비해 체류시간이 길게 시공되었기 때문에 2차 호기성조에서 처리되지 못한 처리수의 농도가 높다 할지라도 혐기성조를 거치면서 대부분의 COD가 제거되기 때문에 2차 혐기조로부터 배출되는 방류수로 계절에 따른 처리효율의 직접적인 비교는 유의성이 없을 것으로 판단된다.

가을철에 특히 처리효율이 낮은 것은 이 시기에 공정개선된 축산폐수처리장에서 최적부하량을 산정하기 위해 축산폐수의 부하량을 1600 L day<sup>-1</sup>까지 주입함으로써 여름철에 비해 상대적으로 처리효율이 감소하였으며, 겨울철부터 축산폐수 부하량을 800 L day<sup>-1</sup>으로 주입함으로써 처리효율이 다시 증가하는 경향이였다. 또한 Seo (2006) 및 Heo (2007)에 따르면 일반적인 자연정화공법에 의한 오폐수 처리장에서 COD 처리 기작은 여재에 의한 여과 및 흡착과 미생물의 상호작용으로 이루어졌으며, 특히 미생물의 작용이 겨울철에도 크게 떨어지지 않은 이유는 고사한 수생식물들이 폐수처리장의 표면을 덮어서 생성되는 보온효과와 폐수처리장 주변의 지온으로 미생물의 활성이 크게 떨어지지 않았기 때문이라고 보고하였는데, 본 처리장의 COD의 처리효율은 계절적인 영향보다는 축산폐수 부하량에 따른 영향이 지배적이였다.

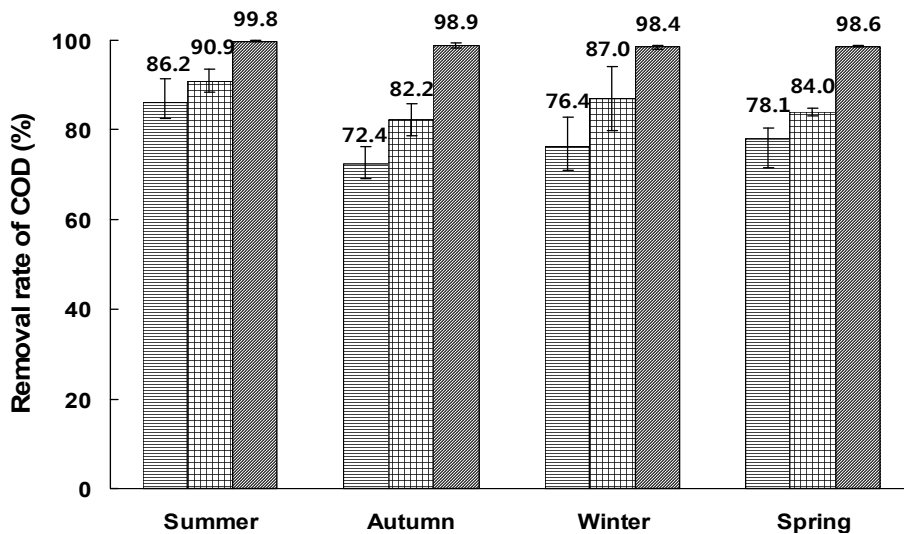


Fig. 3-181. 공정개선된 현장 축산폐수처리장의 계절별 COD 처리효율.

▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▧ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

공정개선된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장에서 10개월간 계절별 SS의 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 3-182에서 보는 바와 같다. 계절별 SS 처리효율은 COD와 동일한 경향으로 여름철에 처리효율이 가장 높았고, 가을부터는 높은 부하량으로 인해 처리효율이 감소되는 경향이였다. 하지만 높은 부하량 실험에도 불구하고 계절에 상관없이 99%이상으로 높은 처리효율을 보였는데 본 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장은 주로 여재에 의한 여과에 의해 처리되므로 계절이나 온도에 관계없이 일정한 처리효율을 나타내었다.

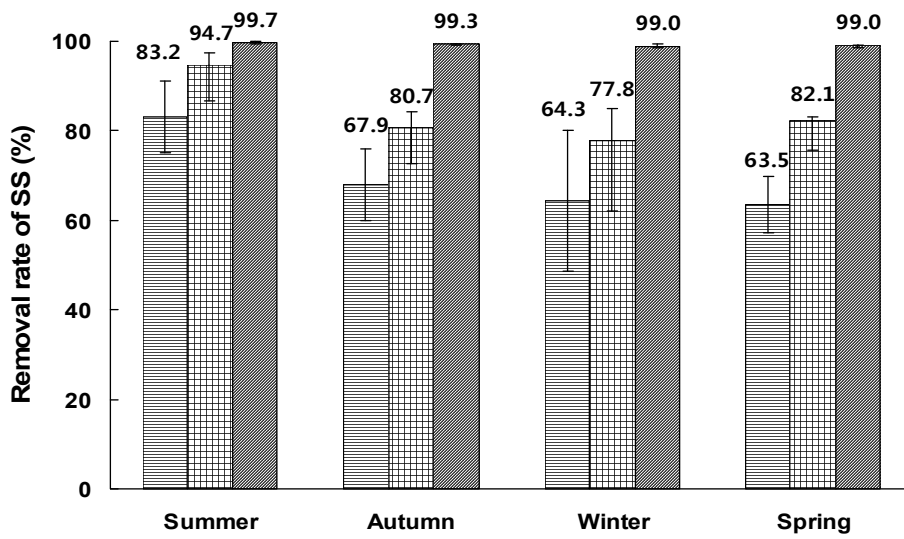


Fig. 3-182. 공정개선된 현장 축산폐수처리장의 계절별 SS 처리효율.

☐ : 1<sup>st</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

공정개선된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장에서 10개월간 계절별 T-N의 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 3-183에서 보는 바와 같이 축산폐수처리장에서 계절에 따른 T-N 처리효율은 여름 및 가을에 처리효율은 99.5% 및 99.1% 높은 처리효율을 보인 것에 비해 겨울과 봄에는 98.7 및 98.2%로 상대적으로 낮은 처리효율을 보였다. 이는 겨울철에는 다른 계절에 비해 활성슬러지 및 호기성조의 미생물 생육이 저조하기 때문에 질소화합물을 질산화하여 NO<sub>3</sub>-N의 형태로 전환하지 못함으로써 혐기성조의 탈질이 일어나지 않은 것으로 사료된다.

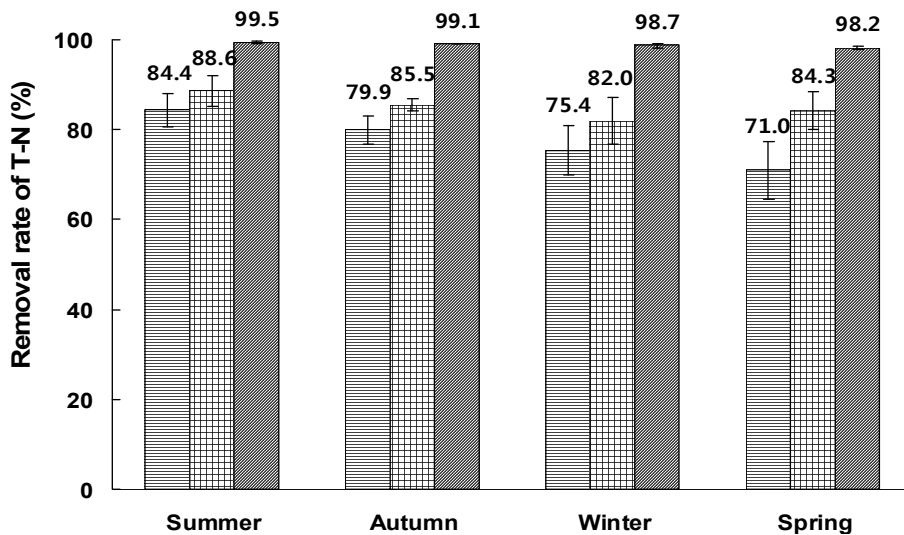


Fig. 3-183. 공정개선된 현장 축산폐수처리장의 계절별 T-N 처리효율.

☐ : 1<sup>st</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

공정개선된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장에서 10개월간 계절별 T-P의 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 3-184에서 보는 바와 같다. 계절에 따른 T-P 처리효율은 운전 초기 및 축산폐수 부하량을  $400 \text{ L day}^{-1}$ 로 주입했던 여름에 가장 높은 처리효율을 보였다. COD 및 SS와 달리 가을에 비교적 안정적인 처리효율을 보였는데, 이는 가을이 수생식물의 생육이 가장 왕성하여 이 시기에 인의 흡수가 가장 많이 되었기 때문으로 판단되며, 겨울철에는 99.2%로 가장 낮은 처리효율을 보였는데, 이는 겨울철에 미생물 생육이 저조하여 유기태 인산의 형태를 무기태 인산으로 전환하지 못함으로써 호기성조 및 혐기성조에서 체류되어 있다가 여재에 흡착되지 못한 상태로 배출되기 때문으로 사료된다.

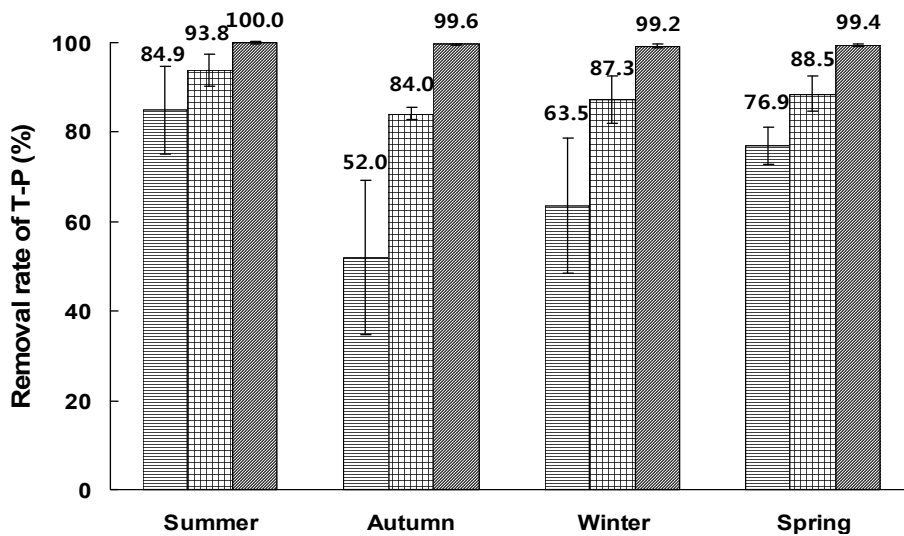


Fig. 3-184. 공정개선된 현장 축산폐수처리장의 계절별 T-P 처리효율.

▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▧ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

#### 라) 이상기후에서의 수처리 효율

현장 축산폐수처리장은 외부환경에 그대로 노출되어 있기 때문에 우리나라의 기후 특성상 정상적인 환경이 아닌 장마기나 혹한기의 이상기후에 처할 경우가 매년 발생되기 쉽다. 따라서 이상기후에서의 수처리 효율을 조사함으로써 환경변화에 대한 적응성을 검토하고 그 대처방안을 마련하기 위하여 본 실험 기간동안 발생된 이상기후에서의 수처리 효율을 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 3-185~3-188에서 보는 바와 같다.

이상기후에서 방류수의 COD 처리효율은 장마기에 가장 높은 처리효율을 보였는데, 이는 본 축산폐수처리장의 경우 야외에 노출되어 있기 때문에 직접적인 강우의 영향을 받으며, 장마기의 많은 강우량으로 인하여 각 유입농도가 희석됨으로 축산폐수의 처리효율이 증가한 것으로 사료된다. 가뭄기에는 축산폐수 처리효율이 가장 낮았는데, 이는 본 실험을 수행한 진주지역의 최대 가뭄기는 12월로 기온이 급격히 저하되는 시기와의 동일하여 주요 처리조인 활성슬러지조의 미생물의 활성 감소로 인한 영향으로 판단된다. 또한 2차 및 3차 처리인 호기성조 및 혐기성조에서는 가뭄으로 인하여 미생물의 생육이 저하되고, 다량의 유기물이 분해되지 않는 상

태로 존재하기 때문에 축산폐수 처리효율이 감소한 것으로 사료된다.

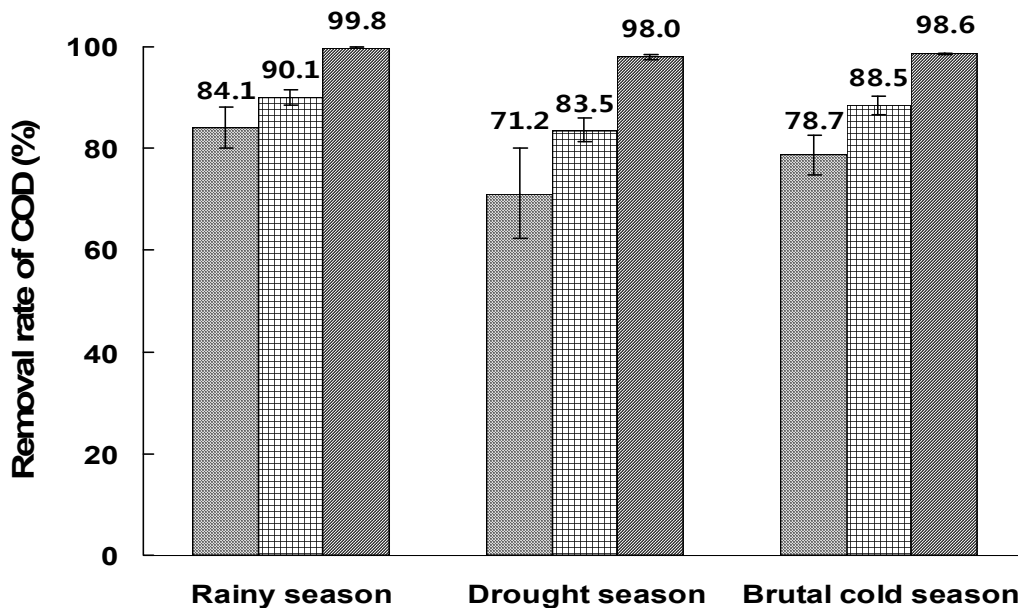


Fig. 3-185. 공정개선된 현장 하수처리장의 이상기후에서의 COD 처리효율.

▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▪ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

이상기후에서의 SS 처리효율은 기후에 영향을 가장 많이 받는 1차 처리인 활성슬러지조의 경우 혹한기에서 처리효율이 가장 낮았다. 이는 활성슬러지조의 경우 온도가 적정하게 유지되어야 하는데 본 처리장의 경우는 야외에 노출되어 있기 때문에 혹한기에 기온이 급격히 저하되어 미생물의 생육하는 적정온도를 유지하기 어렵기 때문으로 사료된다. 최종 방류수의 SS 처리효율을 보면 이상기후에도 상관없이 98.8%의 높은 처리효율을 보였는데, 이는 혐기성조의 총 용량은 50 m<sup>3</sup>으로서 오염물질의 체류시간이 길어 활성슬러지조 및 호기성조에 미처 처리하지 못한 SS를 제거하기 때문으로 사료된다. 하지만 여재에 의한 SS의 처리는 제거기작인 아닌 물리적인 분리의 형태로서 유기물이 집적될 가능성이 있으며, 장기간 사용으로 인하여 미생물의 활발한 분해로 인하여 제거 될 수 있지만 난분해성 유기물의 형태의 경우는 그대로 집적되면서 공극폐쇄현상을 유발 할 수도 있기 때문에 SS를 보다 효과적으로 처리 할 수 있는 다양한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

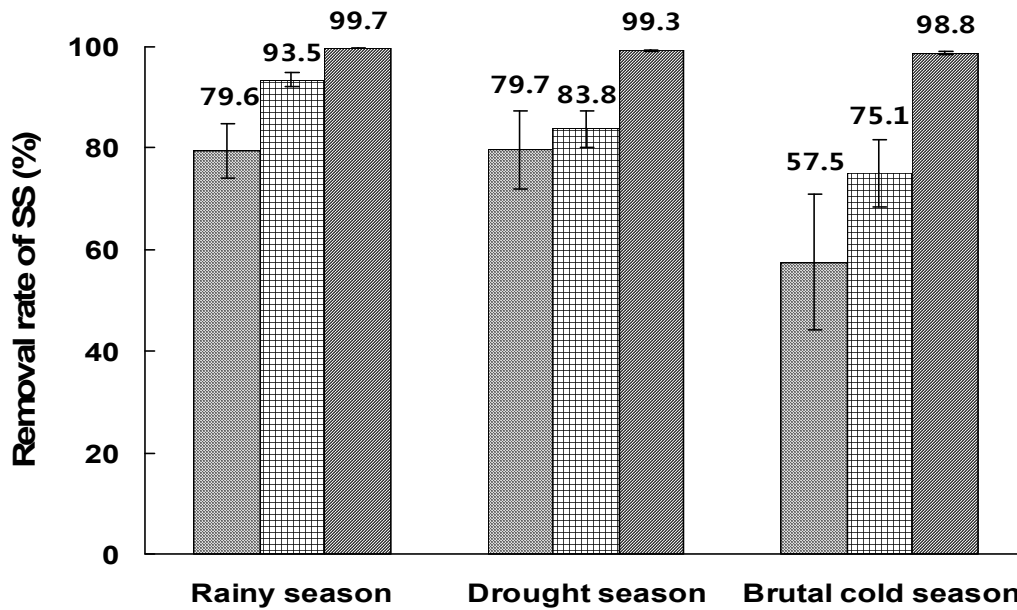


Fig. 3-186. 공정개선된 현장 하수처리장의 이상기후에서의 SS 처리효율.

☐ : 1<sup>st</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

이상기후에서의 T-N 처리효율은 혹한기에 약간 감소하는 경향이었으나 그 차이는 미미하였고, 모든 조건에서 큰 차이 없이 98.5~99.4%로 안정적인 처리효율을 보였다. 따라서 T-N은 이상기후에 상관없이 일정한 처리효율을 나타내므로 연중 안정적인 처리가 가능할 것으로 판단된다.

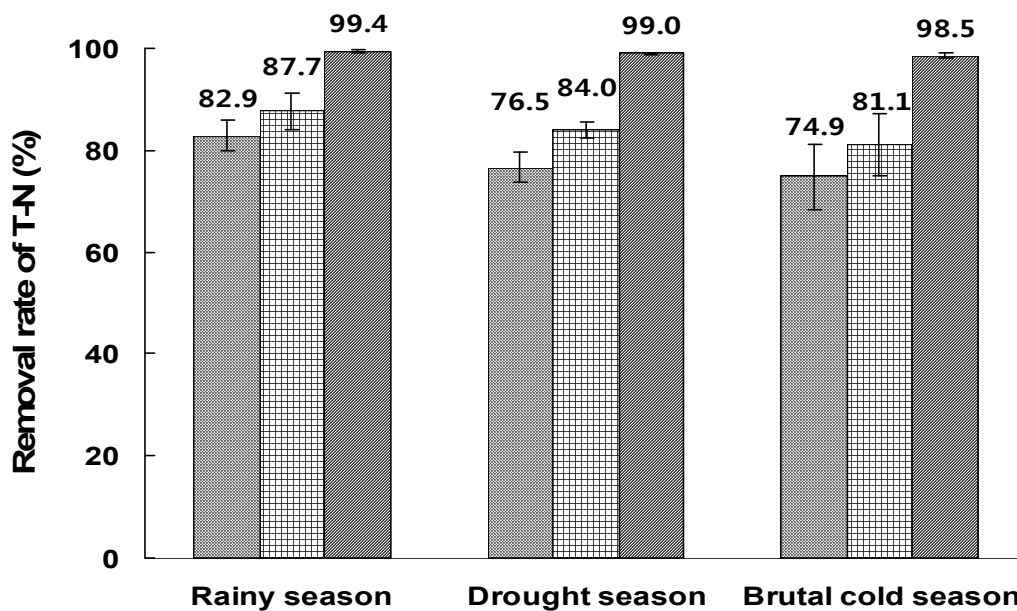


Fig. 3-187. 공정개선된 현장 하수처리장의 이상기후에서의 T-N 처리효율.

☐ : 1<sup>st</sup> treatment, ▨ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment



이상기후에서 T-P 처리효율은 장마기에 가장 높은 처리효율을 보였다. 이는 많은 강우량으로 인해 각조에 유입된 축산폐수의 농도가 희석됨으로 상대적인 오염물질의 농도를 저감한 것으로 사료된다. 또한 장마기에는 공정개선된 처리장의 운전초기의 단계로서 여재에 흡착능이 가장 높은 시기이다. 또한 자연정화공법 처리장에서 인의 주요 처리기작인 수생식물의 흡수를 들 수 있는데, 가뭄기 및 혹한기에는 상대적으로 수생식물이 고사되는 시기로서 장마기에 비해 인의 흡수량이 저하되기 때문에 처리효율이 낮아진 것으로 판단된다. 최종 처리조의 이상기후별 처리효율을 보면 99.2%의 처리효율을 보였지만 여재에 의한 인의 흡착은 포화상태가 되면 더 이상 인을 흡착하지 못하고 방류수 중에 높은 농도로 존재한다고 보고한바 있다 (Seo, 2006 : Kim, 2012). 이에 따라 여재 교체라는 문제점이 발생할 수 있으며, 이를 극복할 수 있는 대처방안에 대한 연구도 현재 본 연구팀은 진행 중에 있다.

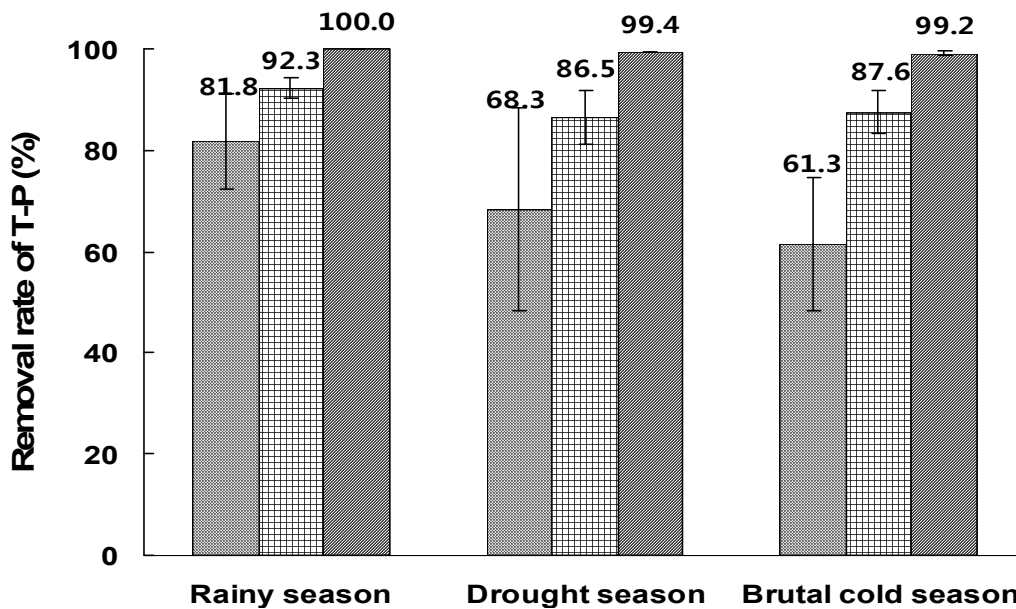


Fig. 3-188. 공정개선된 현장 하수처리장의 이상기후에서의 T-P 처리효율.

▨ : 1<sup>st</sup> treatment, ▩ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment, ▤ : 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment

#### 마) 오염물질의 분해속도

축산폐수처리장에서 COD의 분해속도는 Fig. 3-189 및 Table 3-101에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조에서 COD의 분해속도 상수는  $0.210 \text{ day}^{-1}$ 이었고, 2차 처리인 호기성조에서 COD의 분해속도 상수는  $5.837 \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 최종 처리인 3차 처리인 혐기성조의 COD의 분해속도 상수는  $0.088 \text{ day}^{-1}$ 이었다.

따라서 분해속도는 2차 처리인 호기성조가 1차 및 3차 처리인 활성슬러지조 및 혐기성조에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향이었는데 이는 호기성조에서는 체류시간은 짧지만 이중통풍형 구조로 인해 원활한 산소가 공급됨으로서 분해속도가 빠른 호기성 미생물에 의해 COD성 오염물질들이 많이 처리되었기 때문으로 사료되었다.

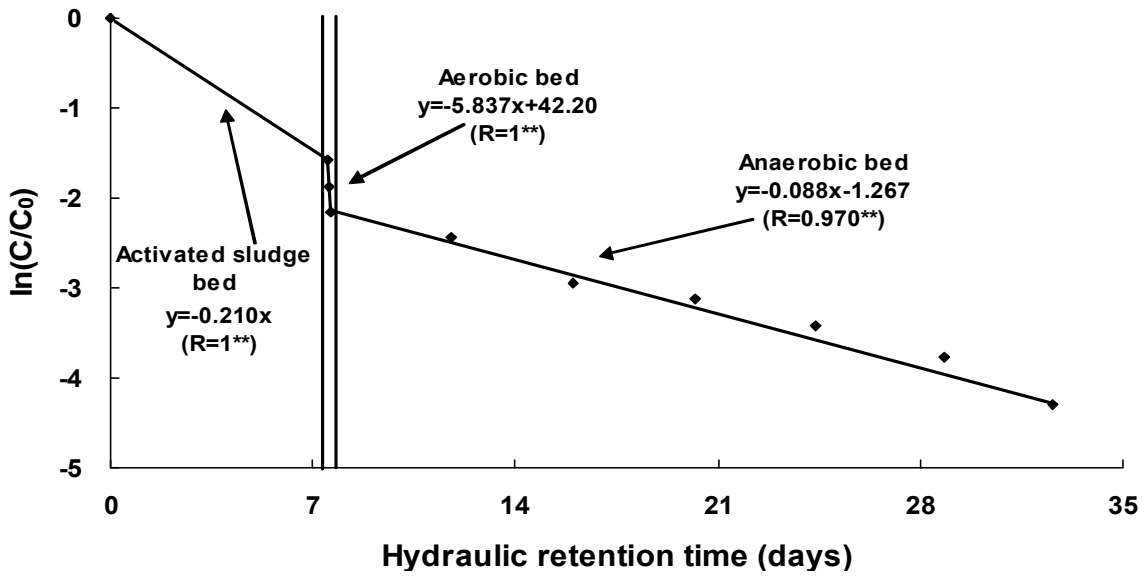


Fig. 3-189. 축산폐수처리장에서 축산폐수 체류시간에 따른 COD 분해속도.

축산폐수처리장에서 SS의 분해속도는 Fig. 3-190 및 Table 3-101에서 보는 바와 같이 축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조에서 SS의 분해속도 상수는  $0.114 \text{ day}^{-1}$ 이었고, 2차 처리인 호기성조에서 SS의 분해속도 상수는  $5.304 \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 최종 처리인 3차 처리인 혐기성조의 SS의 분해속도 상수는  $0.126 \text{ day}^{-1}$ 이었다.

따라서 분해속도는 2차 처리인 호기성조가 1차 및 3차 처리인 활성슬러지 및 혐기성조에 비해 전반적으로 매우 빠른 경향으로 이는 호기성조에서는 혐기성조에 비해 체류시간이 길지 않기 때문에 제거 속도가 빠른 것으로 판단된다.

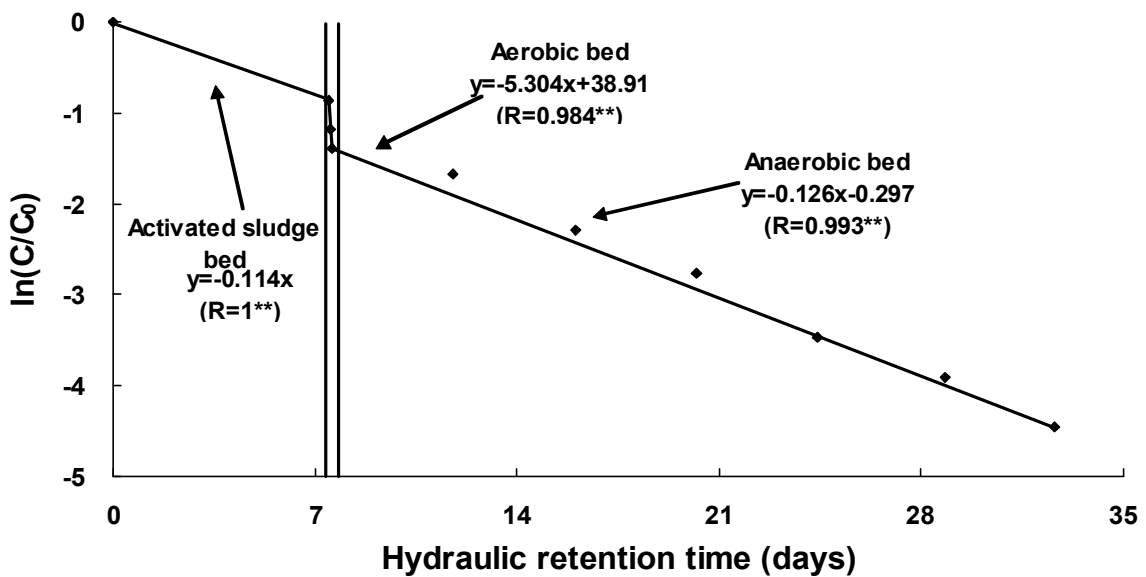


Fig. 3-190. 축산폐수처리장에서 축산폐수 체류시간에 따른 SS 분해속도.

축산폐수처리장에서 T-N의 분해속도를 조사한 결과는 Fig. 3-191 및 Table 3-101과 같이 축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-N의 분해속도 상수는  $0.186 \text{ day}^{-1}$ 이었고, 2차 처리인 호기성조에서 T-N의 분해속도 상수는  $2.831 \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 최종처리인 3차 처리인 혐기성조의 T-N의 분해속도 상수는  $0.105 \text{ day}^{-1}$ 이었다. T-N의 분해속도는 전반적으로 COD 및 SS와 비슷한 경향으로 호기성조가 혐기성조에 비해 빨랐다. 이는 질소의 경우 호기성조의 질산화와 혐기성조의 탈질이 동시에 수행되어야 탈질에 의한 질소의 처리가 가능하기 때문으로 판단되었다.

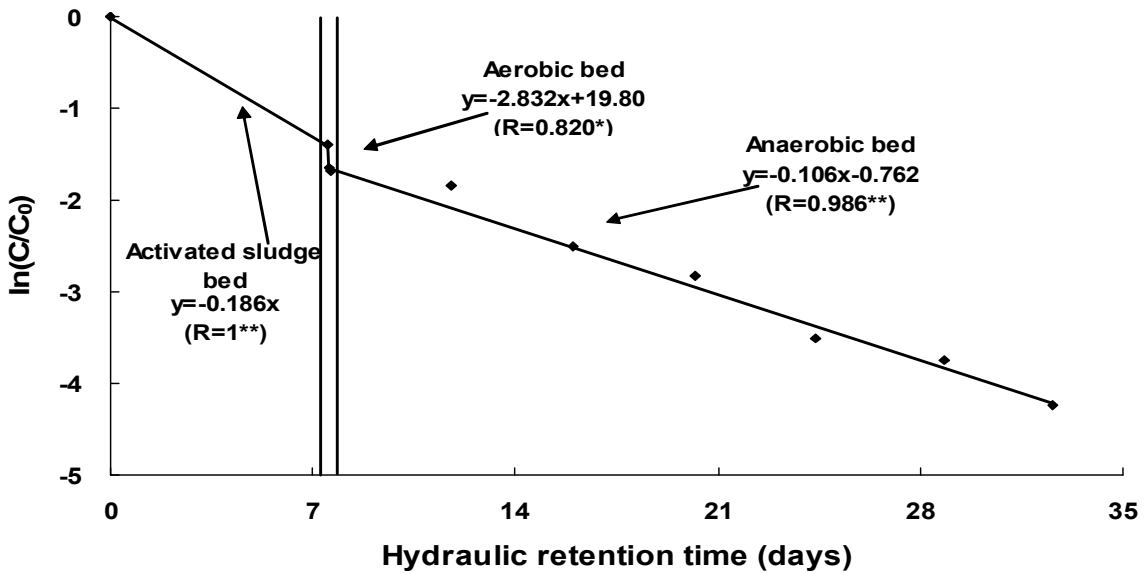


Fig. 3-191. 축산폐수처리장에서 축산폐수 체류시간에 따른 T-N 분해속도.

축산폐수처리장에서 T-P의 분해속도를 조사한 결과는 Fig. 3-192 및 Table 3-101에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장의 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-P의 분해속도 상수는  $0.125 \text{ day}^{-1}$ 이었고, 2차 처리인 호기성조에서 T-P의 분해속도 상수는  $11.44 \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 최종처리인 3차 처리인 혐기성조의 T-P의 분해속도 상수는  $0.122 \text{ day}^{-1}$ 이었다. T-P의 분해속도는 전반적으로 2차 처리인 호기성조가 1차 및 3차 처리인 활성슬러지조 및 혐기성조에 비해 빨랐다. 이와 같이 호기성조에서 분해속도가 혐기성조에 비해 빠른 것은 여재에 의한 흡착과 함께 호기성 상태에서 미생물은 인을 흡수하기 때문으로 판단되었다. 하지만 혐기성조에서 분해속도가 호기성조에 비해 느린 것은 여재에 의한 흡착은 일어나지만 미생물의 경우 혐기적인 조건에서 인을 방출하기 때문으로 판단되었다.

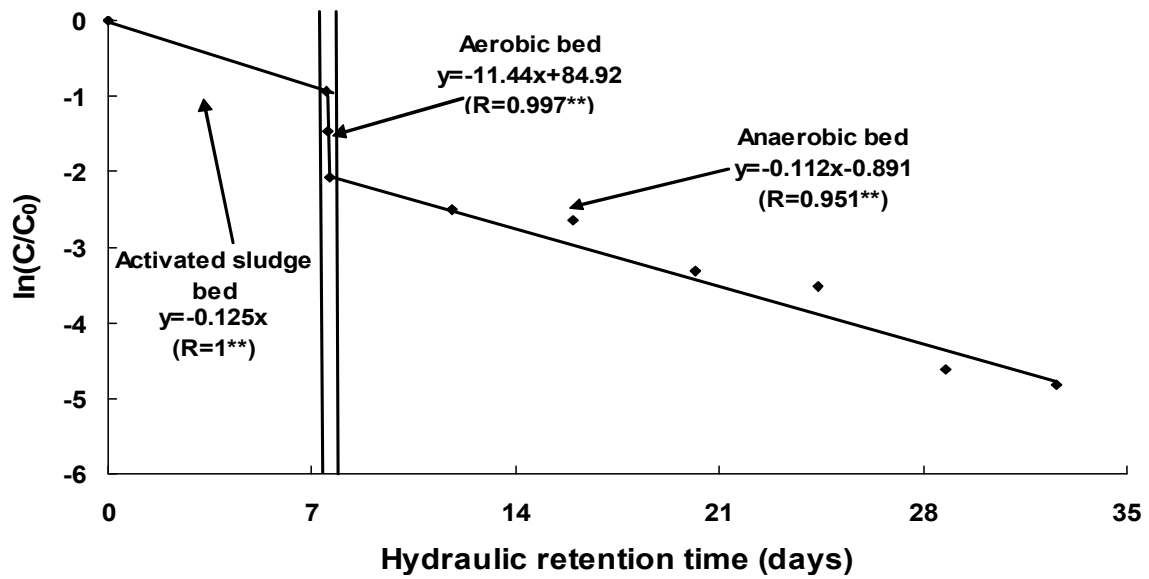


Fig. 3-192. 축산폐수처리장에서 축산폐수 체류시간에 따른 T-P 분해속도.

Table 3-101. 현장 축산폐수처리장에서 오염물질의 분해속도 (K) 및 상관계수 (r)

Items	Stage	Continuous injection	
		K (day <sup>-1</sup> )	Correlation coefficient (r)
COD	1 <sup>st</sup> bed	0.210	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	5.837	1.000**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.088	0.970**
SS	1 <sup>st</sup> bed	0.114	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	5.304	0.984**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.126	0.993**
T-N	1 <sup>st</sup> bed	0.186	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	2.832	0.820*
	3 <sup>rd</sup> bed	0.106	0.986**
T-P	1 <sup>st</sup> bed	0.125	1.000**
	2 <sup>nd</sup> bed	11.44	0.997**
	3 <sup>rd</sup> bed	0.112	0.951**

(\* and \*\* denote significance at 5.0 and 1.0% levels, respectively).

#### 바) 용존형태별 수처리 효율

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 용존형태별 수처리 효율 조사는 축산폐수 원수, 활성슬러지조 처리수, 호기성조 처리수 및 혐기성조 처리수 중의 COD의 존재형태별 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-193에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 COD는  $11,002 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 soluble형태가  $4,131 \text{ mg L}^{-1}$ , insoluble형태가  $6,781 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 비교적 insoluble형태가 높게 유입되었다. 활성슬러지조 처리수의 COD는  $3,119 \text{ mg L}^{-1}$ 로 활성슬러지조에서 대부분이 처리되었고, 그 중 soluble형태가  $1,187$ , insoluble 형태가  $1,923$ 으로 유입원수에 비해 활성슬러지조 처리수에 insoluble형태가 높게 처리되었다. 이는 활성슬러지조에서 호기성 미생물들에 의해 대부분의 유기물이 분해됨으로써 insoluble형태 COD가 감소한 것으로 판단된다. 호기성조 처리수의 COD는  $1,793 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 soluble형태가  $786 \text{ mg L}^{-1}$ , insoluble형태가  $1,026 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었으며, 혐기성조를 통과한 방류수의 COD는  $213.5 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 soluble형태가  $71.5 \text{ mg L}^{-1}$ , insoluble형태가  $142 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다.

따라서 축산폐수처리장의 COD 존재형태별 처리효율은 전반적으로 insoluble형태가 soluble 형태에 비해 높았다. 이와 같은 결과는 본 축산폐수처리장은 주로 여재에 의한 여과가 주된 처리이기 때문이다.

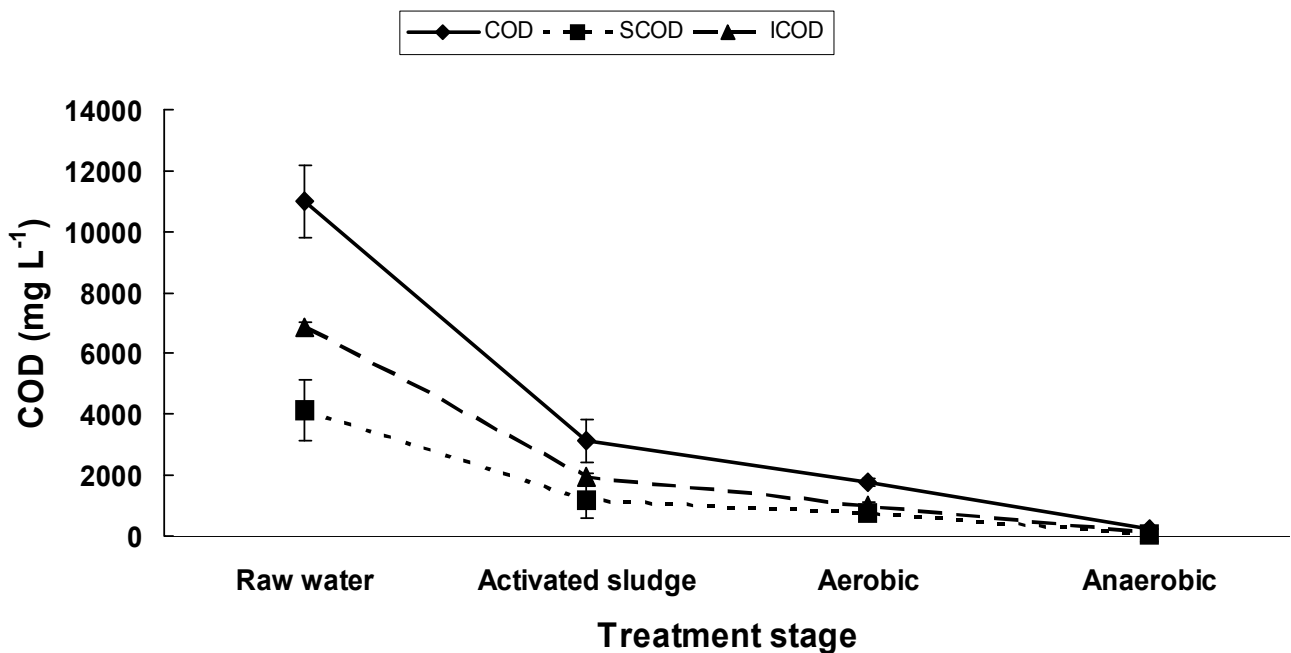


Fig. 3-193. 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 중 COD의 존재형태 변화.

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 용존형태별 SS의 존재형태별 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-194에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 SS은  $16,488 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 volatile형태가  $12,013 \text{ mg L}^{-1}$ , fixed형태가  $4,475 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 SS의 대부분은 volatile 형태였다. 활성슬러지조 처리수의 SS은  $3,316 \text{ mg L}^{-1}$ 로 활성슬러지조에서 대부분이 처리되었으며, 호기성조 처리수의 SS은  $2,668 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 volatile형태가  $2,412 \text{ mg L}^{-1}$ , fixed형태가  $255 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다. 활성슬러지조 및 호기성조의 처리수 농도는 별 차이 없이 유사한 경향이었는데, 이는 호기성조의 경우 체류시간이 짧고 수직여과 방식에 따라 여재에 여과되지 않기 때문으로 사료된다. 혐기성조를 통과한 방류수의

SS는  $118 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 volatile 형태가  $102 \text{ mg L}^{-1}$ , fixed 형태가  $15.5 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다.

따라서 축산폐수처리장에서의 SS 존재형태별 처리효율은 전반적으로 volatile 형태가 fixed 형태에 비해 높았다.

일반적으로 인공습지에 의한 SS의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 부유물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 그리고 기타 화학반응 등을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Kim, 2000; Jo, 2003).

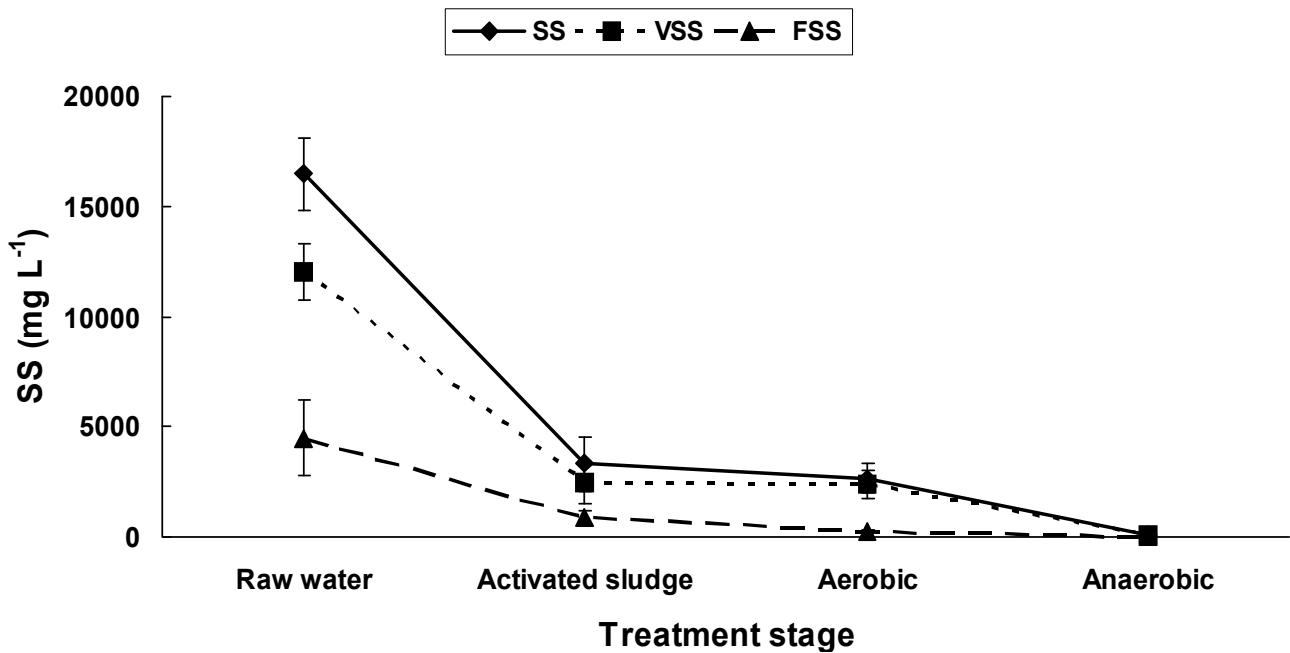


Fig. 3-194. 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 중 SS의 존재형태 변화.

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 용존형태별 T-N의 존재형태 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-195에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 T-N은  $4,641 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 dissolved 형태가  $840 \text{ mg L}^{-1}$ , suspended 형태가  $3,081 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 suspended 형태가 대부분이었다. 활성슬러지조 처리수의 T-N은  $1,089 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었으며, 호기성조 처리수의 T-N은  $743 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 dissolved 형태가  $196 \text{ mg L}^{-1}$ , suspended 형태가  $547 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다. 혐기성조를 통과한 방류수의 T-N은  $47.8 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 dissolved 형태가  $12.8 \text{ mg L}^{-1}$ , suspended 형태가  $35.0 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다.

따라서 축산폐수처리장의 T-N 존재형태별 처리효율은 전반적으로 dissolved 형태에 비해 suspended 형태가 높았다.

자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장에서 T-N의 제거는 식물에 의한 흡수보다 질산화와 탈질에 의한 생물학적 처리가 주된 처리과정이다. 유입수의 유기태 질소 (organic-N)와 암모니아태 질소가 호기성 미생물에 의한 질산화 (nitrification) 작용으로 질산태 질소 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )

로 전환되며, 질산태 질소는 혐기상태인 습지의 토양으로 확산되어 혐기성 미생물에 의하여 탈질화 (denitrification)가 일어나면서 질소 ( $N_2$ )와 아산화질소 ( $N_2O$ )로 전환되어 이들이 대기 중으로 이동하여 질소가 제거된다 (Jeong et al., 1994; Brock et al., 1991). 습지식물의 근권 (rhizosphere)도 질소제거에 상당한 역할을 한다. 정수식물은 대기 중의 산소를 뿌리로 전달하고 토양에서 발생하는 질소와 아산화질소를 대기 중으로 이동시키는 통기조직이 발달되어 있다. 산소가 뿌리로 전달되면 뿌리주변에 옅은 호기상태의 근권이 형성된다. 근권에서는 암모니아화와 질산화가 일어나며, 근권을 둘러싸고 있는 혐기상태의 심토층에서는 탈질화로 질소와 아산화질소가 발생하며, 습지식물의 통기조직을 통하여 대기 중으로 이동한다 (Oh, 1999).

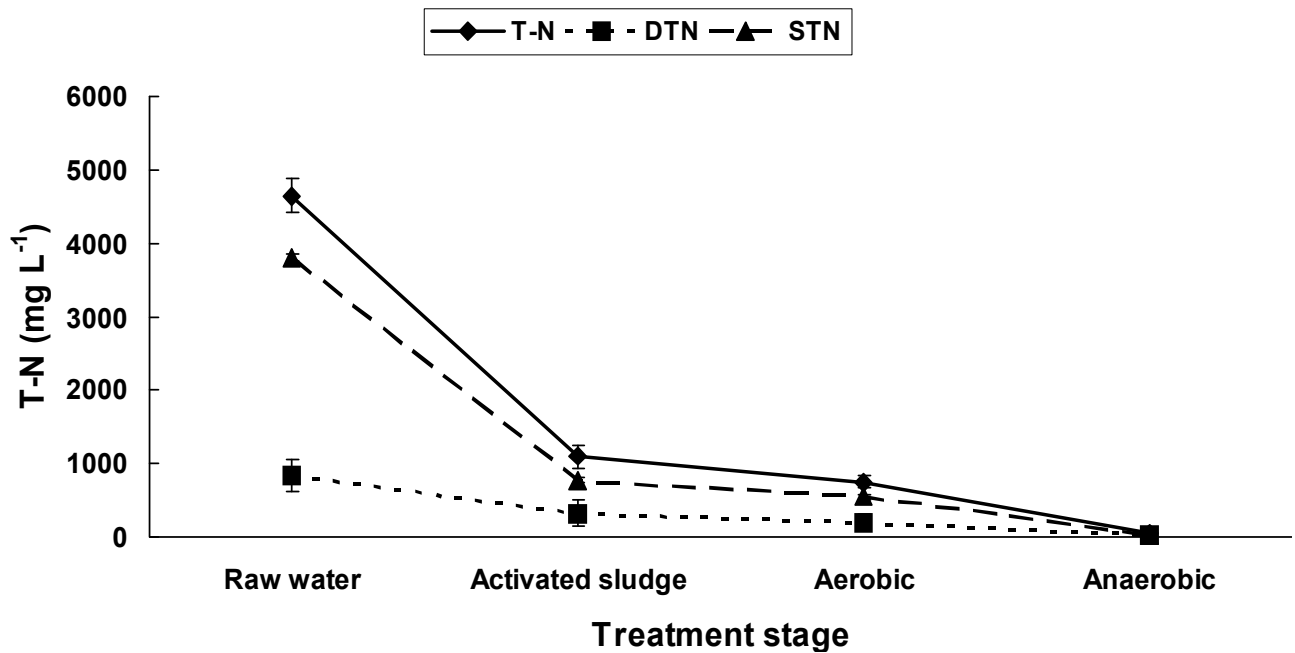


Fig. 3-195. 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 중 T-N의 존재형태 변화.

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 용존형태별 T-P의 존재형태 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-196에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 T-P는  $518 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 dissolved 형태가  $221 \text{ mg L}^{-1}$ , suspended 형태가  $297 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다. 활성슬러지조 처리수의 T-P는  $164 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었으며, 호기성조 처리수의 T-P는  $68.6 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 dissolved 형태가  $17.8 \text{ mg L}^{-1}$ , suspended 형태가  $50.8 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다. 혐기성조를 통과한 방류수의 T-P는  $3.05 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 dissolved 형태가  $1.13 \text{ mg L}^{-1}$ , suspended 형태가  $1.93 \text{ mg L}^{-1}$  정도이었다.

따라서 축산폐수처리장의 T-P 존재형태별 처리효율은 전반적으로 dissolved 형태에 비해 suspended 형태가 높았다. 이는 유입농도에서 suspended 형태가 높았기 때문으로 사료된다.

인은 질소와 더불어 식물생장에 필수요소로서 자연계에서는 주로 인산으로 존재하며 인산은 질소와는 달리 물에 용해가 잘 안되고 토양에 견고하게 부착되어 광물질이나 유기물질들과 복합화합물의 형태를 이루고 있다 (Yun et al., 1998). 폐·하수처리에 적용 가능한 인 처리 방법

은 칼슘, 알루미늄, 철 등의 금속염을 투입하고 생성되는 불용성 침전물을 걸러내는 화학적 방법, 고형입자에 흡착되어 있는 성분의 여과, 용해상태의 성분은 여재입자나 기타 다른 입자에 의 흡착 (Tanner et al., 1998; Kadlec, 1997), 그리고 식물에 의한 흡수 (Greenway et al., 1999), 미생물에 의한 분해 (Newbold et al., 1983; Reddy et al., 1999) 등을 이용하는 생물학적 처리방법이 있다. 인공습지를 이용한 축산폐수처리장에서 인 처리의 주요기능은 미생물의 분해, 여과와 흡착인데 부하량이 처리조의 용량을 초과할 경우에 누적되었던 인 성분이 세척에 의해서 또는 용출되어 오히려 유출수의 농도가 높게 나타날 수 있다 (Gerrites, 1993). 따라서 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 인의 안정적인 처리를 위해서는 인의 흡착능력이 높은 여재가 필요할 것으로 판단된다.

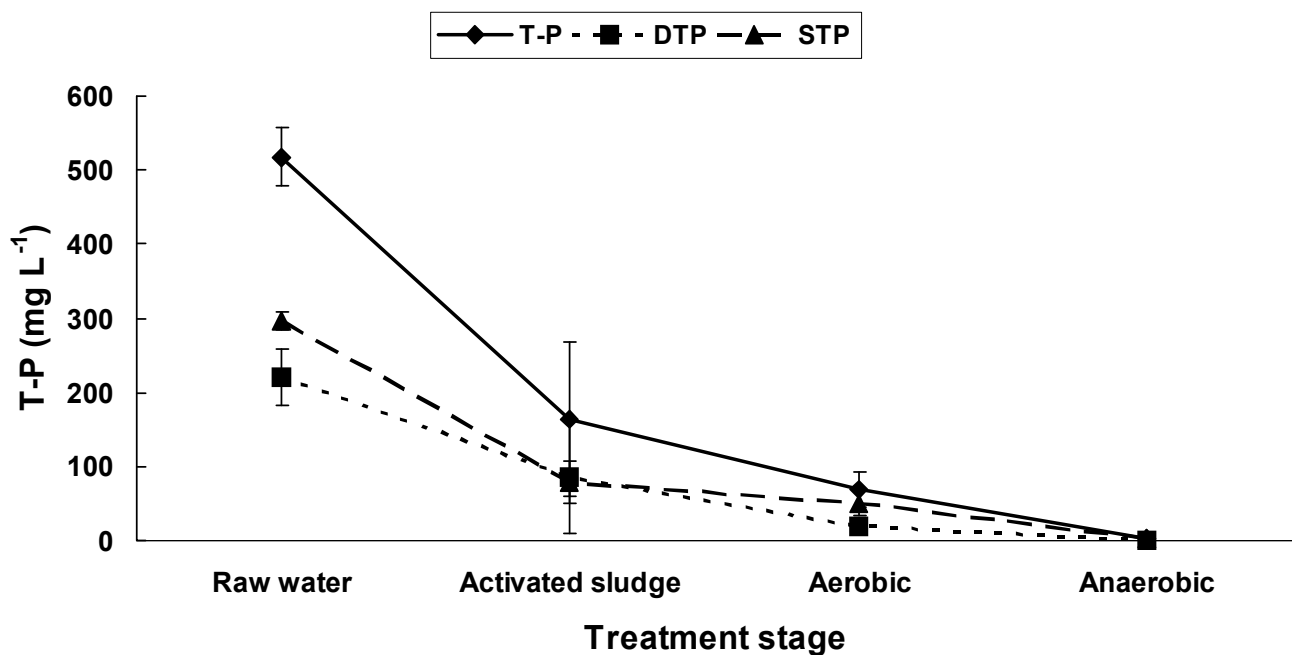


Fig. 3-196. 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 중 T-P의 존재형태 변화.



2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성

가) 장기간 여재의 이화학적 특성

공정개선된 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에 사용한 여재의 축산폐수처리 경과시일별 이화학적 특성 변화를 축산폐수처리장 호기성조 및 혐기성조에서 표층과 심층으로 구분하여 각각 조사하였으며, 혐기성조의 경우 상대적으로 면적이 크기 때문에 유하거리를 4, 8, 12, 16 m로 구분하여 조사하였다.

공정개선된 축산폐수처리장에 사용한 여재의 pH를 조사한 결과는 Table 3-102에서 보는 바와 같다. 공정개선된 축산폐수처리장에 사용된 여재는 2차년도와 동일한 여재를 사용하였으며, 호기성조의 원 여재의 pH는 8.03 이었고, 혐기성조의 경우 7.50이었다. 호기성조 여재의 pH는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 낮아지는 경향이었고, 특히, 여재의 표층이 심층에 비해 낮았다. 이와 같이 축산폐수 처리가 진행됨에 따라 pH가 전반적으로 약간씩 낮아진 것은 축산폐수 중의 유기물질 등 오염물질이 처리되는 과정에서 수생식물이나 미생물에 의해 발생되는 이산화탄소나 유기산 등에 의한 결과로 판단되었다. 또한 축산폐수 처리 7개월 후인 1월에는 pH가 약간 높았는데, 이는 겨울철 수생식물의 잎과 줄기가 고사되고 이로 인해 수생식물의 생육은 일시적으로 중단되어 수생식물에 의한 유기산 분비가 적어지고, 또한 겨울철 미생물의 생육이 부진하기 때문인 것으로 판단된다.

혐기성조의 pH는 유하거리 및 시기에 별 다른 차이 없이 평균 pH 7.25로 유지되었으며, 유하거리간의 차이는 미미하였다. 이는 대부분의 유기물들이 활성슬러지조 및 호기성조에서 처리되어 혐기성조로 유입되는 유기물이 상대적으로 부족하기 때문으로 판단된다.

Table 3-102. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 pH 변화

Bed	Section	Layer	pH (1:5H <sub>2</sub> O)				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	8.11	8.00	7.84	8.12	8.22
		Subsurface	8.14	7.98	7.56	7.58	7.98
	Inflow	Surface	7.48	7.53	7.38	7.56	7.77
		Subsurface	7.51	7.62	7.33	7.45	7.24
	4 m	Surface	7.24	7.31	7.29	7.58	7.23
		Subsurface	7.24	7.61	7.25	7.33	7.42
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	8 m	Surface	7.61	7.51	7.22	7.31	7.22
		Subsurface	7.45	7.66	7.42	7.55	7.12
	12 m	Surface	7.61	7.26	7.55	7.21	7.23
		Subsurface	7.61	7.22	7.36	7.41	7.55
	16 m	Surface	7.23	7.22	7.23	7.42	7.19
		Subsurface	7.62	7.24	7.56	7.34	7.22
Outflow	Surface	7.51	7.30	7.34	7.34	7.26	
	Subsurface	7.61	7.61	7.54	7.20	7.18	

현장 축산폐수처리장에 사용된 여재의 EC를 조사한 결과는 Table 3-103에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 EC는 호기성조는  $0.06 \text{ dS m}^{-1}$ 이었고, 혐기성조는  $0.05 \text{ dS m}^{-1}$ 이었다. 호기성조 및 혐기성조에서 여재의 EC는 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 별 다른 차이 없이 비슷한 경향이였다. 그리고 호기성조의 EC는 혐기성조에 비해 약간 높은 경향이였고, 혐기성조에서는 유하거리간 별 다른 차이 없었다. 또한 표층 및 심층의 EC도 별다른 차이 없이 비슷한 경향이였다,

Table 3-103. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 EC의 변화

Bed	Section	Layer	EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07
		Subsurface	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06
		Subsurface	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05
	4 m	Surface	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04
		Subsurface	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
	8 m	Surface	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
		Subsurface	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04
	12 m	Surface	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
		Subsurface	0.03	0.06	0.05	0.04	0.05
	16 m	Surface	0.04	0.05	0.04	0.06	0.03
		Subsurface	0.05	0.03	0.04	0.02	0.05
	Outflow	Surface	0.06	0.04	0.05	0.04	0.03
		Subsurface	0.05	0.04	0.06	0.04	0.07

축산폐수처리장의 1차 처리인 호기성조 및 2차 처리인 혐기성조의 축산폐수처리 경과시일별 여재의 유기물함량을 조사한 결과는 Table 3-104와 같다. 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 유기물함량은 0.59-0.69%이었고, 1차 처리인 호기성 여재의 유기물함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 특히, 1차 처리인 호기성조 표층의 여재 중 유기물함량은 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수처리 7개월 후에는 표층의 유기물함량이 3.22%로 가장 높은 결과를 보였다. 이와 같이 1차 처리인 호기성조 표층에서 유기물의 함량이 높은 것은 축산폐수 원수가 1차 처리인 호기성조 표면부터 여과되기 때문에 표층에 유기물이 집적되었기 때문으로 사료된다.

2차 처리인 혐기성조의 여재 중 유기물함량은 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향으로 전반적으로 표층이 심층에 비해 약간 높았다. 또한 유하거리간 유기물의 함량은 유입지점으로 거리가 늘어남에 따라 감소하는 경향으로서 유하거리 조절로 인하여 축산폐수 중 SS 처리효율을 극대화 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3-104. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 O.M의 함량조사

Bed	Section	Layer	O.M (%)				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	2.84	2.92	3.01	3.22	3.12
		Subsurface	2.49	2.53	2.55	2.55	2.61
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	2.32	2.34	2.51	2.79	2.55
		Subsurface	2.22	2.23	2.31	2.35	2.42
	4 m	Surface	2.22	2.32	2.42	2.51	2.21
		Subsurface	2.31	2.22	2.31	2.23	2.22
	8 m	Surface	2.04	2.14	2.12	2.13	2.11
		Subsurface	1.94	1.92	1.94	1.99	2.06
	12 m	Surface	2.00	1.84	2.32	2.01	2.10
		Subsurface	1.72	1.84	1.86	1.91	1.84
	16 m	Surface	1.34	1.51	1.55	1.48	1.62
		Subsurface	1.25	1.63	1.29	1.33	1.52
	Outflow	Surface	1.21	1.31	1.22	1.42	1.53
		Subsurface	1.19	1.14	1.19	1.20	1.23

축산폐수처리장의 2차 처리인 호기성조 및 혐기성조의 축산폐수처리 경과시일별 여재의 T-N의 함량을 조사한 결과는 Table 3-105에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 T-N의 함량은 호기성조의 경우 11.1 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우는 1,272 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, 2차 처리인 호기성조 여재의 T-N의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 특히, 2차 처리인 호기성조 표층의 여재 중 T-N 함량은 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수처리 7개월 후에는 표층의 T-N의 함량이 111 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높은 결과를 보였다. 이와 같이 2차 처리인 호기성조 표층에서 T-N의 함량이 높은 것은 상기 유기물의 함량과 유사한 경향으로 축산폐수 원수가 1차 처리인 혐기성조 표면부터 여과되기 때문에 표층에 유기물이 집적되었고, 이들 집적된 유기물내에 함유된 T-N 때문으로 사료된다.

3차 처리인 혐기성조 여재의 T-N의 함량은 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 증가하는 경향으로 전반적으로 표층이 심층에 비해 약간 높았으며, 2차 처리인 호기성의 증가폭과 유사한 경향이였다. 호기성조에서는 체류시간이 짧아 미처 처리되지 못한 유기물이 혐기성조에서 분해되어 상대적으로 여재에 대한 흡착량이 증가한 것으로 사료된다. 또한 유하거리가 증가함에 따라 질소의 함량은 감소하는 경향이였다.

또한 시기별 축산폐수 처리 7개월 후에 여재의 T-N의 약간 증가하는 경향이었는데, 이는 겨울철 수생식물의 고사로 인하여 여재 표면을 덮어 서서히 분해되어 여재에 흡착되면서 T-N의 함량이 증가한 것으로 사료된다.

Table 3-105. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 T-N 함량

Bed	Section	Layer	T-N ( $\text{mg kg}^{-1}$ )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	84	91	103	111	102
		Subsurface	72	75	81	85	88
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	1,321	1,325	1,332	1,333	1,348
		Subsurface	1,291	1,293	1,304	1,302	1,306
	4 m	Surface	1,320	1,322	1,321	1,342	1,321
		Subsurface	1,281	1,294	1,293	1,289	1,291
	8 m	Surface	1,314	1,316	1,321	1,324	1,326
		Subsurface	1,281	1,281	1,284	1,289	1,291
	12 m	Surface	1,299	1,304	1,306	1,321	1,331
		Subsurface	1,280	1,281	1,281	1,280	1,284
	16 m	Surface	1,289	1,298	1,306	1,322	1,321
		Subsurface	1,281	1,281	1,283	1,289	1,284
	Outflow	Surface	1,284	1,286	1,284	1,301	1,306
		Subsurface	1,279	1,281	1,278	1,284	1,274

축산폐수처리장의 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조의 축산폐수처리 경과시일별 여재의 T-P의 함량을 조사한 결과는 Table 3-106에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 T-P의 함량은 호기성조의 경우  $30.5 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었고, 혐기성조의 경우  $51.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었다. 2차 처리인 호기성조 여재의 T-P의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 특히 2차 처리인 호기성조 표층의 여재 중 T-P의 함량은 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수처리 9개월 후에는 표층의 T-P의 함량이  $319.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높은 결과를 보였다. 이와 같이 2차 처리인 호기성조 표층에서 T-P의 함량이 높은 것은 상기 유기물의 함량과 유사한 경향으로 축산폐수 원수가 2차 처리인 호기성조 표면부터 여과되기 때문에 표층에 유기물이 집적되었고, 본 처리장 호기성조에 사용한 여재는 방해석이 혼합된 혼합여재로서 유기물이 분해되어 배출된  $\text{PO}_4\text{-P}$  형태의 인과 흡착함으로써 여재 표면의 인의 함량이 증가한 것으로 사료된다,

3차 처리인 혐기성조 여재의 T-P의 함량은 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향으로 전반적으로 표층이 심층에 비해 약간 높았으나, 2차 처리인 호기성조와 유사한 증가폭을 보였다. 하지만 유하거리가 증가함에 따라 여재의 인의 함량은 감소하는 경향이였다. 이는 인의 경우 여재에 의한 흡착과 침전에 의해 대부분의 처리되고 축산폐수와 여재의 접촉시간에 의해 처리수 중의 인이 여재에 계속적으로 흡착 및 침전되기 때문으로 사료된다.

Table 3-106. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 T-P 함량

Bed	Section	Layer	T-P (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	43.6	51.4	62.9	67.9	79.2
		Subsurface	36.2	37.4	37.6	46	48.2
	Inflow	Surface	64.2	68.9	79.6	84.2	88.6
		Subsurface	54.6	56.2	54.5	57.2	58.1
	4 m	Surface	61.3	62.9	62.4	64.5	62.4
		Subsurface	56.4	55.6	58.4	53.2	54.6
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	8 m	Surface	60.0	61.2	62.4	68.1	64.2
		Subsurface	56.0	56.4	57.9	54.2	53.8
	12 m	Surface	55.6	60.6	61.1	72.4	61.5
		Subsurface	54.2	54.4	55.1	54.9	56.1
	16 m	Surface	54.4	56.2	55.2	59.1	54.6
		Subsurface	53.4	53.9	52.7	54.1	52.6
	Outflow	Surface	53.9	54.6	54.3	54.5	55.7
		Subsurface	53.0	52.9	53.1	53.9	54.2

축산폐수처리장의 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조의 축산폐수처리 경과시일별 여재의 K, Ca, Mg 및 Na 함량을 조사한 결과는 Table 3-107~3-110에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 K 함량은 호기성조의 경우 15,688 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우는 1,643 mg kg<sup>-1</sup>으로 두 처리조 간의 함량차이는 아주 높았다. 본 처리장의 호기성조 및 혐기성조에 사용된 여재는 혼합여재로서 호기성조는 방해석, 혐기성조에는 제올라이트가 혼합되어 있으므로 방해석의 K 함량이 높아 호기성조 여재의 K의 함량이 높은 것으로 사료된다. 2차 처리인 호기성조에서 여재의 K 함량은 축산폐수처리 시기가 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이었고, 특히 2차 처리인 호기성조의 K 함량은 표층이 다른 지점에 비해 증가폭이 큰 경향이였다. 3차 처리인 혐기성조 여재의 K 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만 원 여재에 비해 증가하는 경향이였다.

축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Ca 함량은 호기성조의 경우 69,373 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우는 1,451mg kg<sup>-1</sup>이였다. 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 여재의 Ca 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점차 증가하였으며, 전반적으로 2차 처리인 호기성조 표층에서 Ca가 집적됨을 알 수 있었다. 혐기성조에서는 유입부분에서는 비교적 Ca함량이 높았으나 유하거리가 증가함에 따라 점점 감소되는 경향이였으며, 유하거리 4 m 부터는 별 차이 없이 유사한 경향이였다.

축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Mg 함량은 호기성조의 경우 2,484 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우 1,009 mg kg<sup>-1</sup>이였다. 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 여재의 Mg 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 차이는 있었으나 점점 증가하는 경향이였고, 특히 여재 중 Mg 함량은 2차 처리인 호기성조가 3차 처리인 혐기성조에 비해 높았다. 또한 여재 중

Mg 함량은 여재의 층위에 따라서는 별 차이 없이 모든 층위에 골고루 증가하는 경향이였다.

축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Na 함량은 251 mg kg<sup>-1</sup>이였고, 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 여재의 Na 함량은 Mg와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하였으며, 특히 여재 중 Na 함량은 2차 처리인 호기성조가 3차 처리인 혐기성조에 비해 높았다. 또한 여재 중 Na 함량은 여재의 층위에 따라서는 별 차이 없이 모든 층위에 골고루 증가하는 경향이였다. 이는 Na의 경우 일반적으로 여재 내에서 이행성이 좋기 때문으로 사료된다.

Table 3-107. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 K 함량

Bed	Section	Layer	K (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	16,124	16,185	16,065	16,245	17,241
		Subsurface	16,084	15,984	16,142	16,213	16,198
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	1,784	1,823	1,865	1,796	1,822
		Subsurface	1,741	1,841	1,725	1,696	1,721
	4 m	Surface	1,724	1,765	1,821	1,721	1,811
		Subsurface	1,712	1,742	1,725	1,754	1,701
	8 m	Surface	1,711	1,721	1,719	1,731	1,729
		Subsurface	1,696	1,701	1,746	1,721	1,693
	12 m	Surface	1,716	1,709	1,711	1,723	1,754
		Subsurface	1,684	1,694	1,842	1,671	1,694
	16 m	Surface	1,702	1,700	1,711	1,723	1,709
		Subsurface	1,684	1,694	1,684	1,688	1,694
	Outflow	Surface	1,708	1,712	1,709	1,679	1,701
		Subsurface	1,694	1,684	1,691	1,681	1,693

Table 3-108. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Ca 함량

Bed	Section	Layer	Ca (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	69,489	70,241	69,589	69,847	69,894
		Subsurface	69,432	69,842	69,912	69,984	69,849
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	1,661	1,694	1,721	1,741	1,705
		Subsurface	1,523	1,621	1,619	1,612	1,611
	4 m	Surface	1,622	1,643	1,626	1,646	1,642
		Subsurface	1,598	1,611	1,621	1,600	1,621
	8 m	Surface	1,610	1,609	1,621	1,622	1,634
		Subsurface	1,601	1,598	1,602	1,604	1,622
	12 m	Surface	1,574	1,581	1,584	1,597	1,610
		Subsurface	1,569	1,583	1,571	1,597	1,593
	16 m	Surface	1,567	1,572	1,579	1,584	1,599
		Subsurface	1,542	1,538	1,588	1,579	1,584
	Outflow	Surface	1,512	1,534	1,523	1,522	1,541
		Subsurface	1,501	1,506	1,509	1,504	1,511

Table 3-109. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Mg 함량

Bed	Section	Layer	Mg (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	1009	Surface	1,624	1,634	1,648	1,657	1,655
		Subsurface	1,595	1,600	1,599	1,611	1,584
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	1,069	1,071	1,042	1,062	1,079
		Subsurface	1,060	1,084	1,061	1,045	1,072
	4 m	Surface	1,034	1,054	1,054	1,069	1,071
		Subsurface	1,042	1,025	1,026	1,043	1,046
	8 m	Surface	1,051	1,032	1,045	1,061	1,042
		Subsurface	1,034	1,022	1,041	1,045	1,051
	12 m	Surface	1,041	1,043	1,051	1,049	1,059
		Subsurface	1,036	1,036	1,029	1,034	1,049
	16 m	Surface	1,038	1,034	1,042	1,031	1,042
		Subsurface	1,036	1,032	1,040	1,029	1,038
	Outflow	Surface	1,040	1,036	1,028	1,031	1,039
		Subsurface	1,021	1,032	1,029	1,028	1,020

Table 3-110. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Na 함량

Bed	Section	Layer	Na ( mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	251	Surface	251	243	261	245	256
		Subsurface	222	261	215	211	254
	Inflow	Surface	216	262	242	213	225
		Subsurface	262	241	253	262	262
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	4 m	Surface	236	234	264	231	265
		Subsurface	264	225	224	261	265
	8 m	Surface	213	247	259	254	217
		Subsurface	239	223	214	258	294
12 m	Surface	210	198	241	269	247	
	Subsurface	211	256	244	263	254	
16 m	Surface	191	216	234	261	244	
	Subsurface	213	261	211	254	231	
Outflow	Surface	294	265	246	226	263	
	Subsurface	217	229	231	248	231	

축산폐수처리장의 2차 처리인 호기성조, 3차 처리인 혐기성조의 축산폐수처리 경과시일별 여재의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 함량을 조사한 결과는 Table 3-111~3-114에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 Fe 함량은 호기성조의 경우 3,714 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조는 2,972 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 여재의 Fe 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만 전반적으로 모든 지점에서 점점 증가하는 경향이였다. 또한 원 여재의 Mn 함량은 호기성조의 경우 149.2 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우 114.6 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 여재의 Mn 함량은 Fe 함량과 유사한 경향으로 축산폐수 처리시일에 따라 다소 차이는 있었지만 미미하게 증가하는 경향이였다.

축산폐수처리장에서 사용된 원 여재의 Cu 함량은 호기성조의 경우 1.34 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우 11.4 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 2차 처리인 호기성조 여재의 Cu 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 원 여재에 비해 약간 증가하였으며, 특히 표층의 경우 다른 지점에 비해 증가폭이 약간 큰 경향이였다. 또한 원 여재의 Zn 함량은 호기성조의 경우 85.5 mg kg<sup>-1</sup>이었고, 혐기성조의 경우 5.2 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 2차 및 3차 처리조에서 여재의 Zn 함량은 축산폐수 처리시기가 경과함에 따라 표층과 심층에 구별 없이 모든 처리조에서 원 여재에 비해 약간 증가하는 경향이였다.



Table 3-111. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Fe 함량

Bed	Section	Layer	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	3,824	3,826	3,794	3,812	3,846
		Subsurface	3,769	3,719	3,811	3,712	3,797
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	3,121	3,098	3,146	3,159	3,191
		Subsurface	3,100	3,048	3,094	3,124	3,133
	4 m	Surface	3,094	3,028	3,065	3,051	3,151
		Subsurface	3,121	3,021	3,054	3,095	3,049
	8 m	Surface	3,012	3,046	3,056	3,098	3,120
		Subsurface	3,009	3,012	3,046	3,041	3,094
	12 m	Surface	3,024	3,021	3,019	3,024	3,025
		Subsurface	3,020	3,009	3,021	3,022	3,045
	16 m	Surface	3,002	3,019	3,028	3,008	3,012
		Subsurface	2,994	2,984	3,012	3,022	3,000
	Outflow	Surface	2,944	2,981	2,999	3,011	3,009
		Subsurface	2,911	2,919	2,984	3,011	3,021

Table 3-112. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Mn 함량

Bed	Section	Layer	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	161.2	165.2	154.2	164.4	159.1
		Subsurface	151.9	162.2	160.1	159.2	152.6
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	131.9	132.4	132.2	129.8	135.6
		Subsurface	129.1	132.8	130.8	130.2	129.8
	4 m	Surface	129.8	123.1	125.4	125.6	129.2
		Subsurface	129.1	124.5	129.5	124.8	125.6
	8 m	Surface	124.2	123.6	129.5	131.1	129.8
		Subsurface	124.2	125.1	124.1	126.2	124.2
	12 m	Surface	125.1	123.1	121.6	123.6	124.9
		Subsurface	125.3	121.2	131.2	124.2	121.9
	16 m	Surface	120.2	121.1	120.9	122.6	124.2
		Subsurface	121.1	121.6	119.2	120.6	120.0
	Outflow	Surface	121.2	120.9	122.2	120.6	120.9
		Subsurface	120.0	119.2	118.6	119.1	120.3

Table 3-113. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Cu 함량

Bed	Section	Layer	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	1.42	1.36	1.59	1.34	1.65
		Subsurface	1.29	1.56	1.61	1.21	1.35
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	11.4	12.1	11.9	12.3	12.1
		Subsurface	13.2	12.2	11.8	11.6	12.0
	4 m	Surface	12.2	12.0	13.1	12.0	12.9
		Subsurface	12.6	11.9	11.7	12.1	13.2
	8 m	Surface	11.6	11.3	13.6	12.9	11.9
		Subsurface	11.4	11.9	12.1	12.9	12.8
	12 m	Surface	11.6	12.1	12.6	11.9	12.0
		Subsurface	12.1	12.0	11.4	12.1	11.1
	16 m	Surface	12.1	12.4	12.0	12.9	12.4
		Subsurface	11.4	12.0	12.6	11.9	12.4
	Outflow	Surface	12.1	12.0	12.1	11.9	11.1
		Subsurface	12.1	11.4	11.7	11.3	11.7

Table 3-114. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재의 Zn 함량

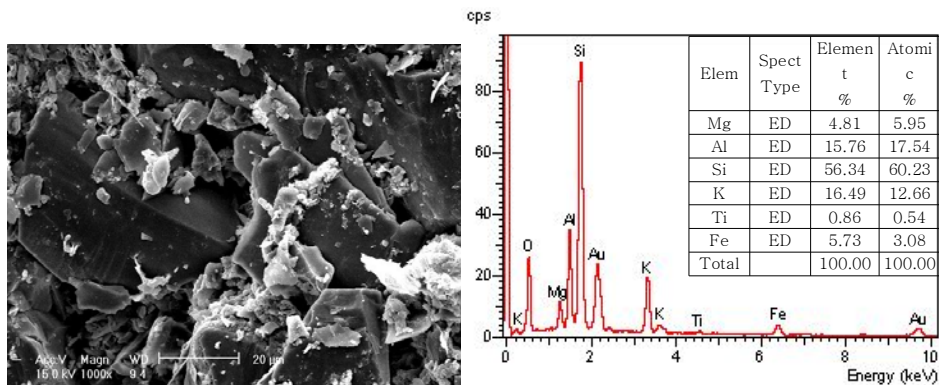
Bed	Section	Layer	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )				
			At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		Surface	86.9	87.1	86.9	87.0	87.2
		Subsurface	85.9	85.8	86.0	85.9	86.2
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	Inflow	Surface	5.6	5.7	5.9	6.1	5.4
		Subsurface	5.2	5.3	5.1	5.2	5.3
	4 m	Surface	4.9	5.1	5.2	5.0	5.2
		Subsurface	5.0	5.0	5.1	5.2	5.2
	8 m	Surface	5.0	5.1	5.1	5.2	5.0
		Subsurface	5.3	5.2	5.1	5.3	5.0
	12 m	Surface	5.1	5.0	5.6	5.1	5.2
		Subsurface	5.1	5.2	5.6	5.2	5.0
	16 m	Surface	5.0	5.1	5.2	5.4	5.2
		Subsurface	5.1	5.2	5.6	5.4	5.1
	Outflow	Surface	5.2	5.1	5.3	5.2	5.2
		Subsurface	5.3	5.2	5.0	5.0	5.0

나) 여재 표면의 무기성분 흡착특성

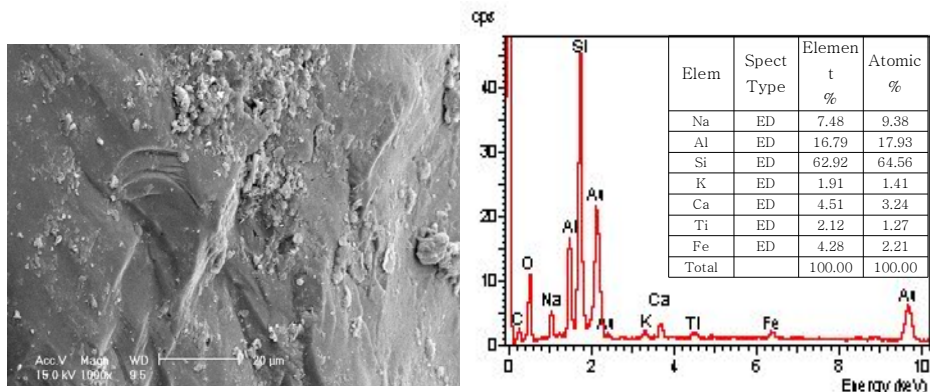
공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 원 여재와 축산폐수처리 9개월 후 호기성조 및 혐기성조 여재 표면을 SEM과 EDS로 분석한 결과는 Fig. 3-197 및 3-198에서 보는 바와 같다.

호기성조 및 혐기성조 여재표면의 전자현미경 사진을 보면 원 여재에 비해 호기성조 및 혐기성조에서 축산폐수 처리시일이 경과됨에 따라 미생물이 급격히 증가되는 경향이였다. 또한 처리조별 미생물 흡착은 전반적으로 별 차이 없었으나, 호기성조가 혐기성조에 비해 약간 많이 관찰되였다. 이는 호기성조에 1차 활성슬러지 처리수가 직접 유입되어 여과 처리됨으로서 대부분의 유기물들이 호기성조에 집적되었기 때문으로 사료된다.

여재의 시기별 EDS 분석결과 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 여재 표면의 무기성분들은 원 여재에 비하여 함량이 증가하거나 원 여재에 없었던 새로운 원소들이 흡착되었고, 여재별 무기성분 흡착량은 별 차이 없었다. 특히, 호기성조 여재 표면의 무기성분은 혐기성조 여재 표면에 비해 흡착종류와 흡착량이 많았다. 이는 호기성조에는 1차 활성슬러지 처리수가 직접 유입되어 여과 처리됨으로서 대부분의 유기물들이 호기성조에 집적되었기 때문으로 사료된다.

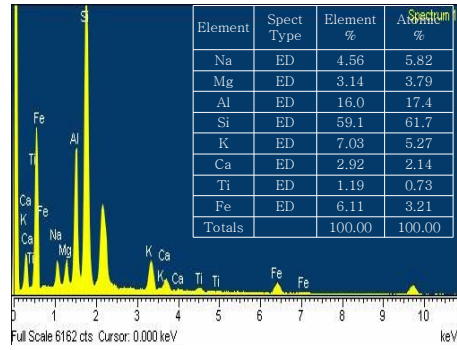
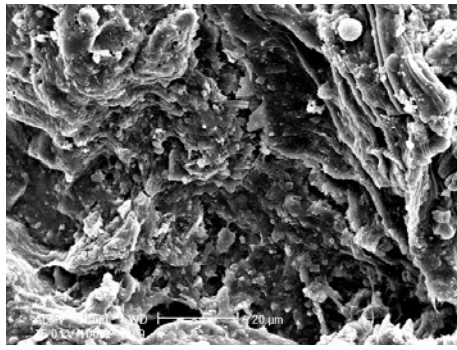


호기성조내 원 여재

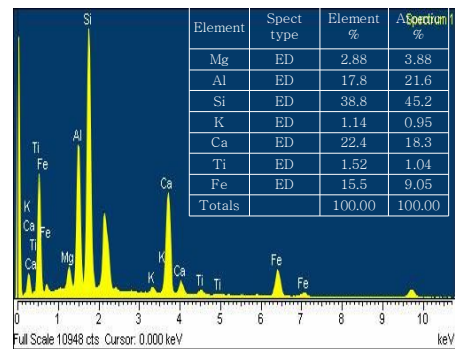
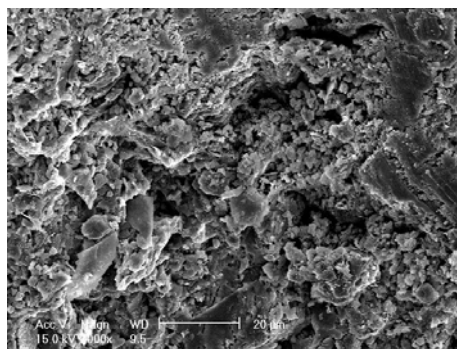


혐기성조내 원 여재

Fig. 3-197. 현장 축산폐수처리장에 사용된 원여재의 SEM과 EDS 분석결과.



호기성조의 9개월 후 여재



혐기성조의 9개월 후 여재

Fig. 3-198. 현장 축산폐수처리장에 사용된 여재의 처리 9개월 후 SEM과 EDS 분석결과.

### 3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안

자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 역할은 여재층의 유기물함량을 증가시켜 여재표면의 미생물의 생육을 촉진시키며, 여재의 입단형성이 촉진되어 여재 중 축산폐수의 투수속도를 증가시킬 뿐만 아니라 오염물질 처리 효율을 증가시키는 것으로 알려져 있으며, 또한 축산폐수처리장내에 수생식물이 생육함에 따라 여재층의 공극폐쇄현상을 크게 줄일 수 있고, 수생식물이 질소, 인 그리고 무기성분 등의 오염물질들을 흡수하는 역할을 한다. 따라서 수생식물의 생육상황은 축산폐수처리장의 수처리 효율과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 악취를 줄이고 미관상 혐오감을 크게 줄일 수 있는 등 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 중요한 역할을 한다 (Green and Martin, 1996).

본 공정개선 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대, 노랑꽃창포 및 부들 등 3종이었으며, 갈대, 노랑꽃창포 및 부들은 2차년도 본 처리장에서 생육한 수생식물을 이식하였으며, 부족한 곳은 야외노지에서 성장한 수생식물을 분주하여 이식하였다. 수생식물의 이식은 호기성조에는 처리조에 갈대, 혐기성조에는 노랑꽃창포 및 부들을 각각 재식거리 30 cm가 되게 이식하였다. 이식한 각 수생식물들은 생육시기에 따라 생육상황, 무기성분 함량

및 흡수량을 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

#### 가) 수생식물 생육특성

현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황은 Fig. 3-199에서 보는 바와 같이 2011년 6월에 수생식물을 이식하여 1, 3, 5, 7 및 9개월 후에 각각 조사하였다. 현장 축산폐수처리장에서 호기성조 및 혐기성조 모두 축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물의 생육은 이식 후부터 5개월 동안 왕성하게 생육하였으며, 7개월 이후 계절적인 영향에 의해 줄기와 잎은 고사하였으며 생육이 저조하였다.

수생식물의 생육 1개월 후인 2011년 7월의 생육상황을 조사한 결과 호기성조 및 혐기성조의 갈대, 노랑꽃창포 및 부들은 초기생육이 전반적으로 양호한 편이었다. 특히 노랑꽃창포의 경우 타 수생식물에 비해 생육이 매우 좋았다.

수생식물의 생육 3개월 후인 2011년 9월의 생육상황을 조사한 결과 수생식물의 생육 1개월에 비해 수생식물의 성장보다는 조 전체에 수생식물이 무성하게 퍼졌다. 처리조 내의 갈대도 수생식물의 생육 2개월에 비해 수생식물의 성장보다는 조 전체에 수생식물이 무성하게 퍼졌고, 생체중 및 잎수 등 생육발달이 양호하였다.

수생식물의 생육 5개월 후인 2011년 11월의 호기성 및 혐기성조의 각 수생식물의 생육상황은 기온이 감소함에 따라 수생식물은 생육이 저조하였으며, 수생식물 생육 7개월 후인 2012년 1월의 생육상황을 조사한 결과 호기성조 및 혐기성조 내의 모든 수생식물은 심하게 고사되었다. 호기성의 갈대 및 혐기성조의 창포 및 부들은 잎의 색이 옅어지고 황백화현상이 전체적으로 일어나고 있었다.

수생식물의 생육 7개월 후인 2011년 1월의 호기성 및 혐기성조의 각 수생식물의 생육상황은 기온이 감소함에 따라 고사된 식물체가 쓰러져 여재표면을 덮고 있었다.

수생식물 생육 9개월 후인 2012년 3월의 호기성 및 혐기성조의 각 수생식물의 생육상황은 외관의 경우는 2012년 1월과 비교했을때 별다른 차이가 없지만 처리조 내 경관을 보면 완전히 잎과 줄기가 고사된 수생식물들이 사이로 새싹이 올라와서 성장하기 시작하였다.



(호기성조 갈대 이식)



(혐기성조 부들 이식)



(이식 1개월 후)



(이식 2개월 후)



(이식 3개월 후)



(이식 5개월 후)



(이식 7개월 후)



(이식 9개월 후)

Fig. 3-199. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물 생육사진.

공정개선된 현장 축산폐수처리장의 처리조에 이식한 수생식물의 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 건물중량을 조사한 결과는 Table 3-115에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장 호기성조 및 혐기성조의 갈대, 노랑꽃창포 및 부들의 건물중량은 수생식물 이식 3개월 후인 11월까지 서서히 증가하였다. 특히 노랑꽃창포의 건물중은 갈대 및 부들에 비해 월등히 높았다. 또한 본 공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 건물중량은 2차년도에 비해 월등히 높았는데, 이는 2차년도의 현장 축산폐수처리장에서 생육한 수생식물을 다시 재이식함으로써 야외노지에서 생육한 수생식물에 비해 수생식물 뿌리의 활착시간이 상대적으로 감소함에 따른 것으로 사료된다.

Table 3-115. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 건물중

Bed	Bayer code	Dry weight (g plant <sup>-1</sup> )				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	62.5	72.5	75.5	54.2	52.1
	IRIPS	201.6	321.2	384.6	295.6	186.1
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	TYHOR	101.3	121.7	131.6	103.4	70.6

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* Presel.

#### 나) 수생식물의 무기성분 함량

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 호기성조 및 혐기성조에 수생식물 이식 후 1, 3, 5, 7 및 9개월 동안 수생식물의 생육시기별 식물체 중 무기성분 함량은 Table 3-116~3-125에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장의 호기성조 및 혐기성조 이식한 수생식물의 T-N 및 T-P의 함량은 수생식물 이식 후 미미하게 감소하기 시작하여 5개월 후인 2011년 11월경에 가장 낮았다. 수생식물 이식후 7개월 후인 2012년 1월경에는 T-N 및 T-P의 함량은 다시 약간씩 증가하는 경향이였다. 현장 축산폐수처리장의 호기성조 및 혐기성조 이식한 수생식물의 K, Ca, Mg 및 Na 함량도 T-N과 T-P 함량과 비슷한 경향으로 수생식물이 이식한 6월부터 11월까지 축산폐수 처리시일이 경과할수록 약간씩 감소하였으며, 1월에는 다시 약간씩 증가하는 경향이였다.

축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물내의 중금속인 Fe, Cu, Mn 및 Zn 함량도 K, Ca, Mg 및 Na의 함량과 비슷한 경향이였다.

이와 같이 여름에서 가을까지 축산폐수 처리시일이 경과할수록 수생식물내의 무기성분과 중금속 함량이 약간씩 감소하였는데, 이는 수생식물이 성장함에 따라 생체중이 급격히 증가하였지만 수생식물내의 무기성분 및 중금속함량 증가는 상대적으로 작았기 때문으로 생각되었으며,

겨울에는 수생식물 내 무기성분과 중금속 함량이 약간씩 증가되었는데, 이는 수생식물이 고사하면서 생체중이 급격히 감소하여 수생식물내의 무기성분 및 중금속 함량이 상대적으로 증가되었기 때문으로 판단된다.

Table 3-116. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-N 함량

Bed	Bayer code	T-N (%)				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.72	0.68	0.64	0.69	0.70
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	2.02	1.94	1.76	1.79	1.83
	TYHOR	1.04	0.98	0.87	0.91	0.91

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-117. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-P 함량

Bed	Bayer code	T-P (%)				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5		
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.79	0.75	0.72	0.71	0.72
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	0.42	0.42	0.38	0.39	0.41
	TYHOR	0.51	0.53	0.48	0.49	0.49

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-118. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 K 함량

Bed	Bayer code	K (%)				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5		
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	1.36	1.24	1.20	1.21	1.23
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	2.51	2.32	2.12	2.26	2.22
	TYHOR	1.59	1.23	1.61	1.51	1.24

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.



Table 3-119. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Ca의 함량

Bed	Bayer code	Ca (%)				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.36	0.34	0.28	0.31	0.31
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	1.21	1.12	0.94	0.97	1.04
	TYHOR	0.64	0.48	0.45	0.46	0.50

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-120. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mg 함량

Bed	Bayer code	Mg (%)				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	0.42	0.41	0.39	0.38	0.40
	TYHOR	0.12	0.12	0.10	0.11	0.13

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-121. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Na 함량

Bed	Bayer code	Na (%)				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	0.42	0.43	0.36	0.38	0.38
	TYHOR	0.15	0.16	0.12	0.13	0.11

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-122. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Fe 함량

Bed	Bayer code	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	444	262	254	312	356
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	384	421	368	298	310
	TYHOR	609	584	595	612	641

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-123. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mn 함량

Bed	Bayer code	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	320	342	294	302	311
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	412	389	314	351	401
	TYHOR	277	289	312	294	304

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-124. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Cu 함량

Bed	Bayer code	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	3.70	3.31	2.91	3.01	3.01
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	3.71	3.69	3.10	3.50	3.91
	TYHOR	5.49	4.94	4.58	5.24	5.14

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

Table 3-125. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Zn 함량

Bed	Bayer code	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )				
		At months after transplanting of plant				
		1	3	5	7	9
2 <sup>nd</sup> Aerobic bed	PHRCO	22.4	19.6	20.1	21.6	22.8
3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed	IRIPS	31.6	32.2	24.5	27.2	28.1
	TYHOR	17.8	16.4	13.2	19.1	20.5

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS., IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

다) 무기성분 흡수량

공정개선된 현장 축산폐수처리장 호기성조 및 혐기성조에서 2011년 6월에 이식한 수생식물을 1, 3, 5, 7 및 9개월 후에 각각 채취하여 식물체 중 무기성분 함량을 분석하고 건물생산량을 고려하여 무기성분 흡수량을 산출한 결과는 다음과 같다.

수생식물 생육시기에 따른 질소 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-200에서 보는 바와 같다. 질소 흡수량은 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 모두에서 수생식물 이식 후 5개월 까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 6개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 질소 흡수량이 다시 감소하였다. 수생식물 중 혐기성조의 노랑꽃창포는 부들에 비해 많은 질소흡수량을 보였다. 이는 혐기조에 이식된 노랑꽃창포가 호기성조로부터 처리된 처리수가 유입되는 유입지점에 이식되어 부들에 비해 양분흡수가 용이하여 노랑꽃창포가 부들에 비해 질소를 많이 흡수한 것으로 판단된다. 또한 모든 수생식물은 2차년도의 동일한 시기에 비해 질소흡수량이 급격히 증가하였는데, 이와 같이 수생식물의 질소 흡수량이 전년도에 비해 급격히 증가한 것은 수생식물들의 뿌리가 1년 동안 생육하면서 여재에 완전히 활착하였기 때문으로 사료되었다.

질소 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 5개월인 2011년 11월에 각 수생식물의 질소 흡수량은 1차 처리인 호기성조에 이식한 갈대의 경우는 0.45 g plant<sup>-1</sup> 이었고, 혐기조에 이식한 창포 및 부들은 6.75 g plant<sup>-1</sup> 및 1.14 g plant<sup>-1</sup> 이었다. 이상의 결과로 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 T-N 흡수량은 노랑꽃창포 ≫ 부들 > 갈대 순이었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 질소 흡수량이 매우 높았다.

축산폐수 중의 질소는 대부분 토양입자 중의 점토 입자에 흡착되어 수생식물에 의해서 흡수 되든지 혹은 미생물에 의해 분해 및 탈질 됨으로서 제거되는 것으로 알려져 있으며 (Park et al., 1996), 유기성 질소는 침전과 여과로 제거되며, 이 유기성 질소는 더욱 분해되어 암모니아 이온을 방출하는 용존성 아미노산으로 가수분해 되기도 한다. 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기 용이하고, 호기성 조건에서 생물학적 질산화에 의하여 NO<sub>3</sub>-N로 전환되기도 한다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 NH<sub>4</sub>-N와 NO<sub>3</sub>-N로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기

성 질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로서 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 되는 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 1999).

수생식물 생육시기에 따른 인 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-201에서 보는 바와 같다. 수생식물 이식 후 인 흡수량은 질소의 흡수량과 비슷한 경향으로 노랑꽃창포, 부들 및 갈대에서 수생식물 이식 후 5개월 까지 인 흡수량이 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 노랑꽃창포의 인 흡수량은 갈대와 부들에 비해 수생식물 이식 후 3개월부터 급격히 증가하였다. 수생식물 이식 후 7개월 후인 2012년 1월에는 겨울철 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 수생식물의 인 흡수량이 다시 감소하였다. .

인 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 5개월 후인 2011년 11월에 각 수생식물의 인 흡수량은 호기성조에 이식한 갈대는  $0.54 \text{ g plant}^{-1}$ 이었고 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포 및 부들은  $1.47$  및  $0.63 \text{ g plant}^{-1}$ 으로 노랑꽃창포  $\gg$  부들  $>$  갈대 순이었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 월등히 높은 인 흡수량을 보였다. 식물이 흡수할 수 있는 인은  $\text{PO}_4$ ,  $\text{HPO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$ 의 형태이며, 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다 (Lee et al, 1999). Lee et al. (2004)는 인이 갈대 뿌리부의 산화층에서 식물에 의한 흡수가 활발한 반면 환원층에서는 인의 방출이 진행되고, 체류일수가 길어질수록 갈대에 의한 인의 흡수량이 많아져 인의 처리효율이 향상되었다고 하였다. 습지식물로 흡수되는 인의 양은 질소에 비하여 매우 적으며, 인이 습지에 연간  $0.005 \text{ g plant}^{-1}$ 이 유입될 경우 약 65~95%가 식물에 의하여 제거되나  $0.001 \sim 0.015 \text{ g plant}^{-1}$ 이 유입될 경우는 식물에 의한 처리효율이 30-40%로 낮아지는 경향으로서 인의 흡수량은 습지로 유입되는 인의 농도에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다 (Yang, 1999).

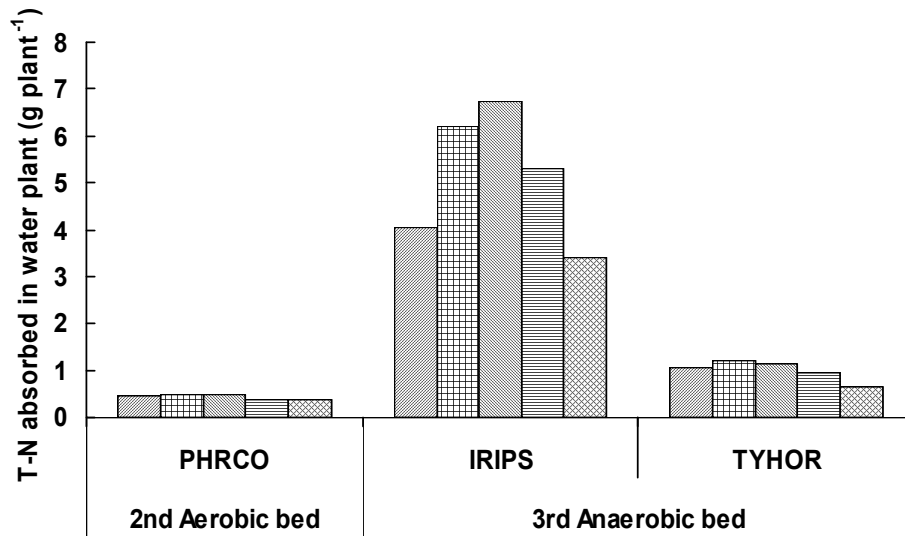


Fig. 3-200. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-N 흡수량.  
 □ : 1month, ▨ : 3month, ▩ : 5month, ▪ : 7month, ▫ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

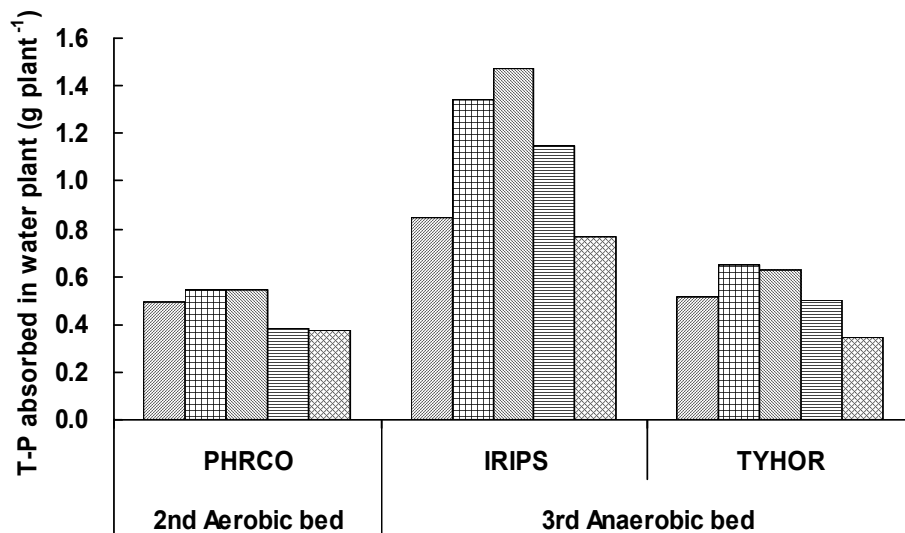


Fig. 3-201. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 T-P 흡수량.  
 □ : 1month, ▨ : 3month, ▩ : 5month, ▪ : 7month, ▫ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris pseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

수생식물 생육시기에 따른 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-202~3-205에서 보는 바와 같다. 호기성조 및 혐기성조 모두에서 수생식물 이식 후 축산폐수 처리 경과일수가 증가함에 따라 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 5개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 5개월 후인 11월에는 수생식물의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철부터는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량이 다시 감소하였다.

호기성조 갈대의 경우 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 5개월 후인 2011년 11월에 0.906, 0.214, 0.055 및 0.077 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 또한 혐기성조 노랑꽃창포의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 5개월 후에 8.137, 3.629, 1.510 및 1.378 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았고, 부들의 경우 2.113, 0.595, 0.135 및 0.159 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 따라서 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 전반적으로 노랑꽃창포 >> 부들 ≥ 갈대 순이었다.

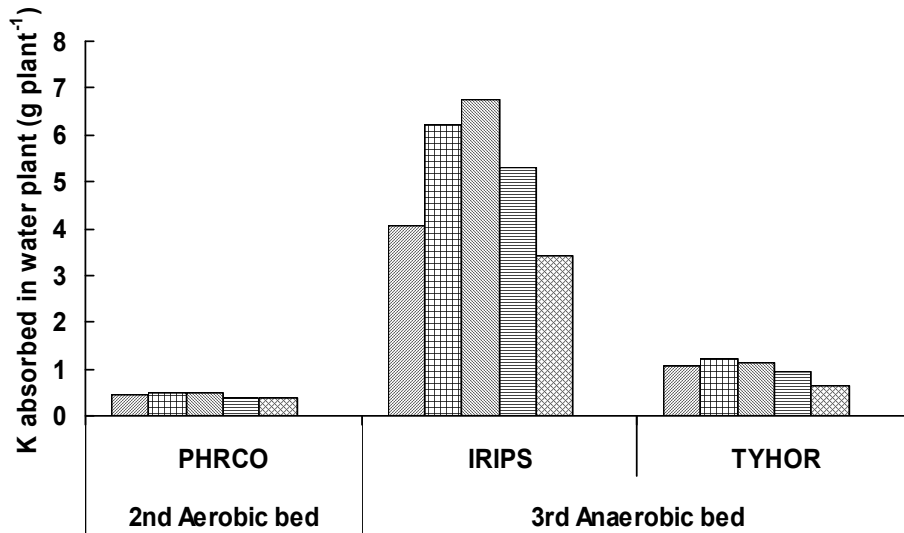


Fig. 3-202. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 K 흡수량.

▨ : 1month, ▩ : 3month, ▪ : 5month, ▭ : 7month, ▮ : 9month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

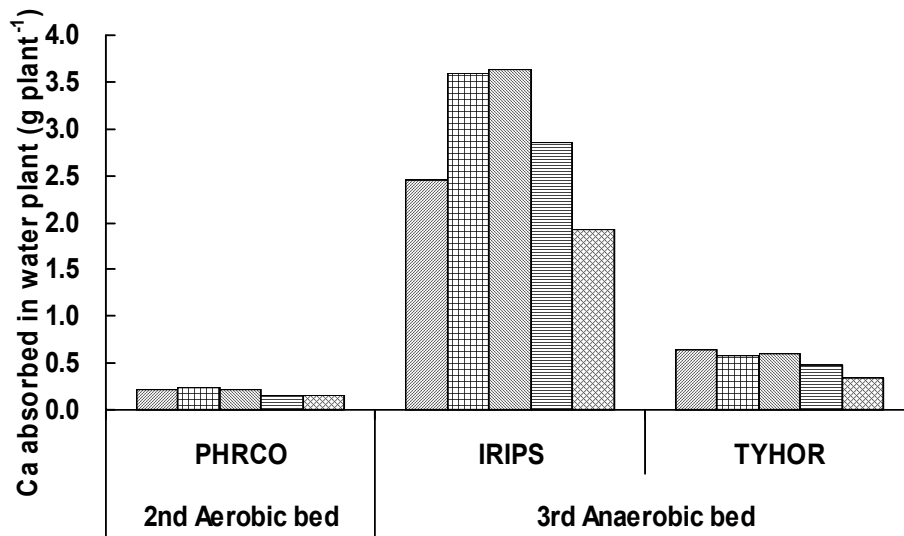


Fig. 3-203. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Ca 흡수량.  
 ▨ : 1month, ▩ : 3month, ▧ : 5month, ▨ : 7month, ▩ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

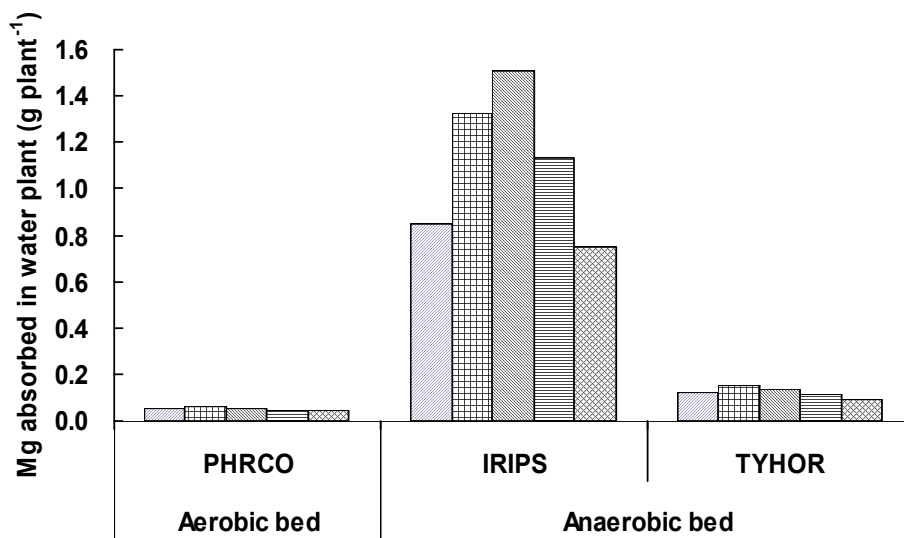


Fig. 3-204. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mg 흡수량.  
 ▨ : 1month, ▩ : 3month, ▧ : 5month, ▨ : 7month, ▩ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

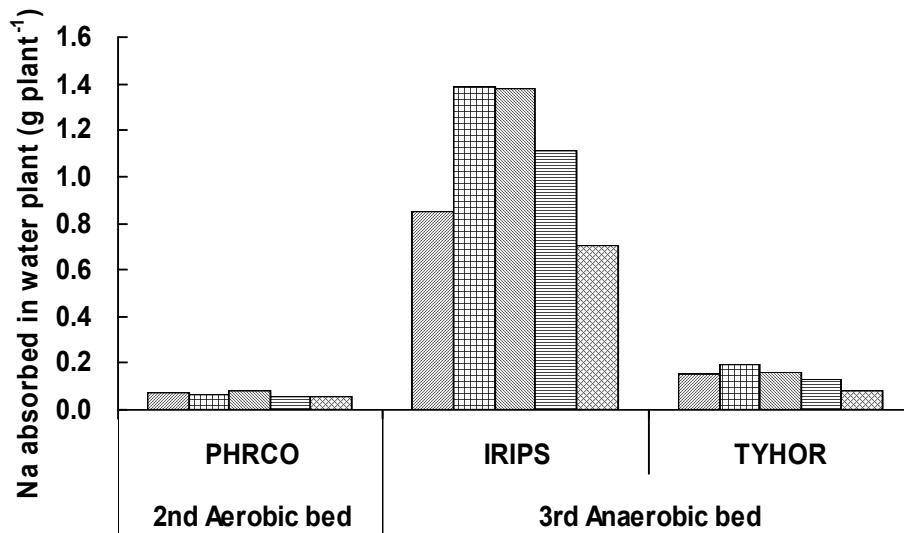


Fig. 3-205. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Na 흡수량.

▨ : 1month, ▩ : 3month, ▪ : 5month, ▭ : 7month, ▮ : 9month.

PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,

IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,

TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

수생식물 생육시기에 따른 Fe, Cu, Mn 및 Zn 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3-206~3-209에서 보는 바와 같다. 호기성조 및 혐기성조 모두에서 수생식물 이식 후 축산폐수 처리 경과일수가 증가함에 따라 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 수생식물 이식 후 5개월까지 점점 증가하였으나 증가폭이 크지 않았고, 수생식물 이식 후 5개월 후인 11월에는 수생식물의 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 최대가 되었다. 그러나 수생식물 이식 후 5개월 후인 겨울철에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량이 다시 감소하였다.

호기성조 갈대의 경우 Fe, Mn, Cu 및 Zn 흡수량은 수생식물 이식 후 5개월 후인 2011년 11월에 0.019, 0.022, 0.0002 및 0.006 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 또한 혐기성조 노랑꽃창포의 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 수생식물 이식 후 5개월 후에 0.142, 0.121, 0.0012 및 0.009 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았고, 부들의 경우 0.078, 0.041, 0.0006 및 0.0001 g plant<sup>-1</sup>으로 연중 가장 높았다. 따라서 K, Ca, Mg 및 Na 흡수량은 전반적으로 노랑꽃창포 >> 부들 ≥ 갈대 순이었다.



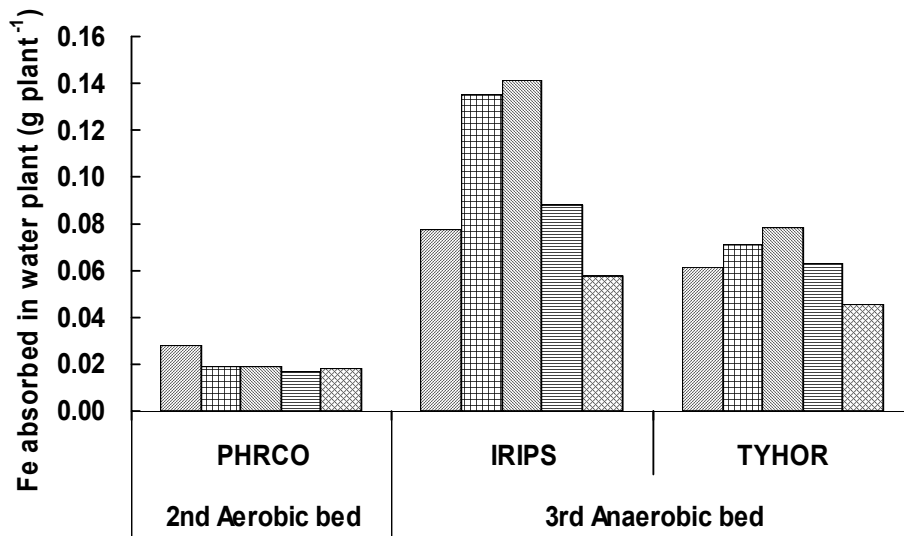


Fig. 3-206. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Fe 흡수량.  
 □ : 1month, ▣ : 3month, ▤ : 5month, ▥ : 7month, ▦ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

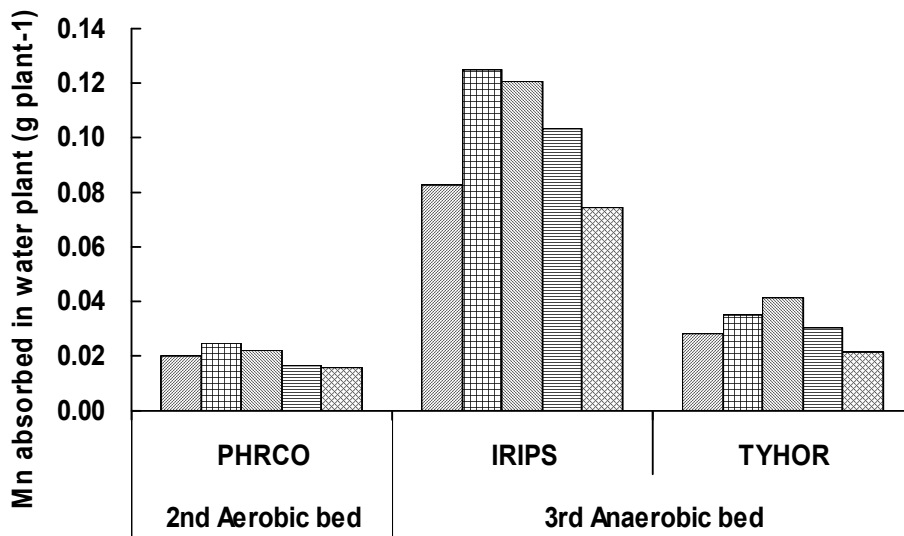


Fig. 3-207. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Mn 흡수량.  
 □ : 1month, ▣ : 3month, ▤ : 5month, ▥ : 7month, ▦ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

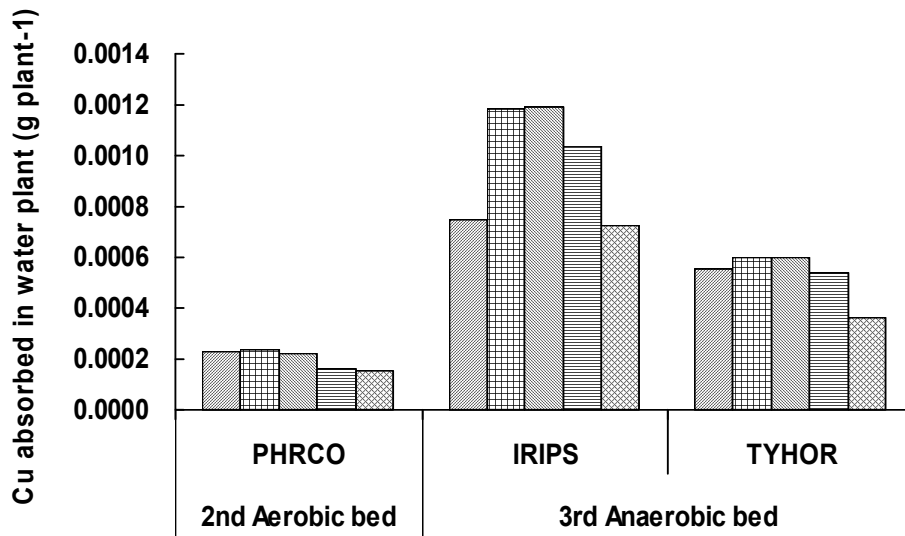


Fig. 3-208. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Cu 흡수량.  
 ▨ : 1month, ▩ : 3month, ▪ : 5month, ▭ : 7month, ▮ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

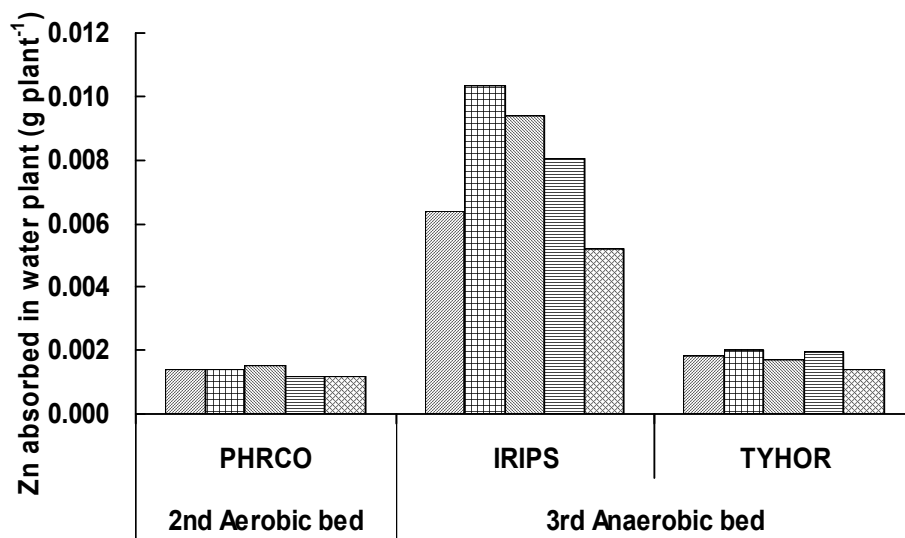


Fig. 3-209. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 수생식물의 Zn 흡수량.  
 ▨ : 1month, ▩ : 3month, ▪ : 5month, ▭ : 7month, ▮ : 9month.  
 PHRCO : *Phragmites communis* TRINUS.,  
 IRIPS : *Iris peseudoacorus* L.,  
 TYHOR : *Typha orientalis* PRESEL.

4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 미생물상 변화

가) 생물막 구성 및 미생물 분포

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 사용한 여재표면의 미생물상은 축산폐수처리 1, 5 및 9개월 후에 본 축산폐수처리장의 여재를 채취하여 조사하였다. 그리고 분석용 여재는 호기성조 및 혐기성조에서 각각 깊이별로 표층 (5 cm)과 심층 (50 cm)으로 구분하여 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

현장 축산폐수처리장의 전반적인 미생물상의 밀도 분포는 총세균수가 가장 많았고 그 다음으로 일반세균, 셀룰로오스 분해균 및 사상균 순이었다.

현장 축산폐수처리장의 축산폐수처리 경과시일별 총세균, 일반세균, 셀룰로오스 분해균 및 사상균은 Table 3-126에서 보는 바와 같이 모든 조에서 축산폐수처리 5개월 후에는 급격히 증가하다가 9개월 후인 2012년 3월 겨울철에는 그 수가 약간 줄어들었으며, 그 이후에는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만, 전반적으로 약간씩 증가하는 경향이었다. 특히 총세균은 2차 처리인 호기성조가 3차 처리인 혐기성조에 비해 약간 많았고, 전반적으로 표층이 심층에 비해 많았다. 이와 같이 2차 처리인 호기성조의 총세균수가 많은 이유는 1차 처리인 활성슬러지조의 처리수가 2차 처리인 호기성조에 먼저 여과되어 대부분의 유기물이 2차 처리인 호기성조에서 집적되기 때문으로 사료된다.

Table 3-126. 현장 축산폐수처리장에서 처리시일에 따른 여재표면의 총세균, 일반세균, 셀룰로오스 분해균 및 사상균 변화

(Unit : CFU g<sup>-1</sup>)

Months after treatment	2 <sup>nd</sup> Aerobic bed		3 <sup>rd</sup> Anaerobic bed		
	Surface	Subsurface	Surface	Subsurface	
총세균	1	4.26×10 <sup>5</sup>	3.58×10 <sup>5</sup>	3.25×10 <sup>5</sup>	3.01×10 <sup>5</sup>
	5	5.84×10 <sup>5</sup>	5.11×10 <sup>5</sup>	4.25×10 <sup>5</sup>	3.89×10 <sup>5</sup>
	9	3.42×10 <sup>5</sup>	3.12×10 <sup>5</sup>	3.04×10 <sup>5</sup>	2.84×10 <sup>5</sup>
일반세균	1	3.57×10 <sup>5</sup>	3.12×10 <sup>5</sup>	3.51×10 <sup>5</sup>	2.98×10 <sup>5</sup>
	5	4.12×10 <sup>5</sup>	3.56×10 <sup>5</sup>	3.89×10 <sup>5</sup>	3.12×10 <sup>5</sup>
	9	2.22×10 <sup>5</sup>	2.56×10 <sup>5</sup>	1.96×10 <sup>5</sup>	1.66×10 <sup>5</sup>
셀룰로오스 분해균	1	1.54×10 <sup>5</sup>	1.34×10 <sup>5</sup>	1.12×10 <sup>5</sup>	1.10×10 <sup>5</sup>
	5	2.54×10 <sup>5</sup>	2.44×10 <sup>5</sup>	2.15×10 <sup>5</sup>	2.32×10 <sup>5</sup>
	9	1.84×10 <sup>5</sup>	1.75×10 <sup>5</sup>	1.35	1.58×10 <sup>5</sup>
사상균	1	1.21×10 <sup>5</sup>	1.01×10 <sup>5</sup>	0.84×10 <sup>5</sup>	0.82×10 <sup>5</sup>
	5	2.84×10 <sup>5</sup>	2.74×10 <sup>5</sup>	2.24×10 <sup>5</sup>	2.11×10 <sup>5</sup>
	9	1.95×10 <sup>5</sup>	1.94×10 <sup>5</sup>	1.34×10 <sup>5</sup>	1.19×10 <sup>5</sup>

축산폐수 중 질소는 대부분이 암모니아태 질소이고, 이들은 호기성조에서 여과, 침전, 흡착 및 암모니아 휘산에 의해 일부가 처리되고, 대부분은 암모니아산화균과 이질산산화균에 의해 암모니아태 질소가 질산태 질소로 전환되고, 전환된 질산태 질소는 혐기성조에서 질산환원균과 탈질균에 의해 탈질이 일어나면서 질소와 아산화질소로 전환되어 이들이 대기중으로 탈질되어 질소가 처리되는 것으로 알려져 있다 (Yang, 1999).

본 축산폐수처리장의 축산폐수처리 경과시일별 암모니아산화균은 Fig. 3-210에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장의 2차 처리인 호기성조의 암모니아산화균은 축산폐수 처리시기가 경과함에 따라 혐기성조에 비해 증식이 가장 왕성하였고, 전반적으로 2차 처리인 호기성조 표층이 심층에 비해 많았으나 큰 차이는 없었다. 이와 같이 2차 처리인 호기성조 전체에 암모니아 산화균이 분포하는 것은 2차 처리인 호기성조 표층은 대기 중의 산소의 공급이 가장 용이하고, 또한 2차 처리인 호기성조의 심층은 중간과 하부에 자연통풍관이 연결되어 있어 산소의 공급이 원활하기 때문인 것으로 생각된다. 3차 처리 혐기성조의 암모니아산화균은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 전반적으로 미미하게 증가하는 경향이였다.

축산폐수처리장의 축산폐수처리 경과시일별 아질산산화균은 Fig. 3-211에서 보는 바와 같이 현장 축산폐수처리장의 2차 처리인 호기성조에서 다른 처리조에 비해 증식이 가장 왕성하였고, 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 전반적으로 증가하는 경향이였으며, 표층이 심층에 비해 약간 많았다.

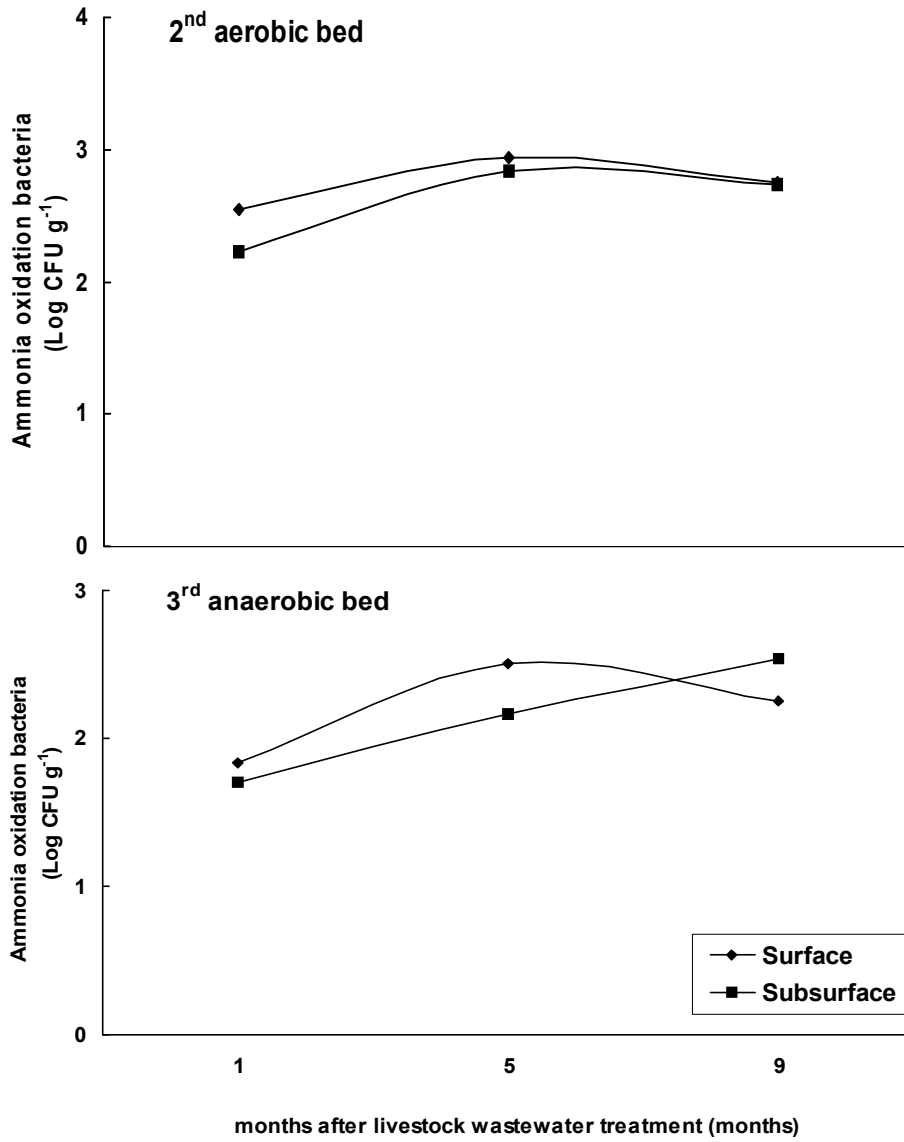


Fig. 3-210. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 암모니아산화균 변화.

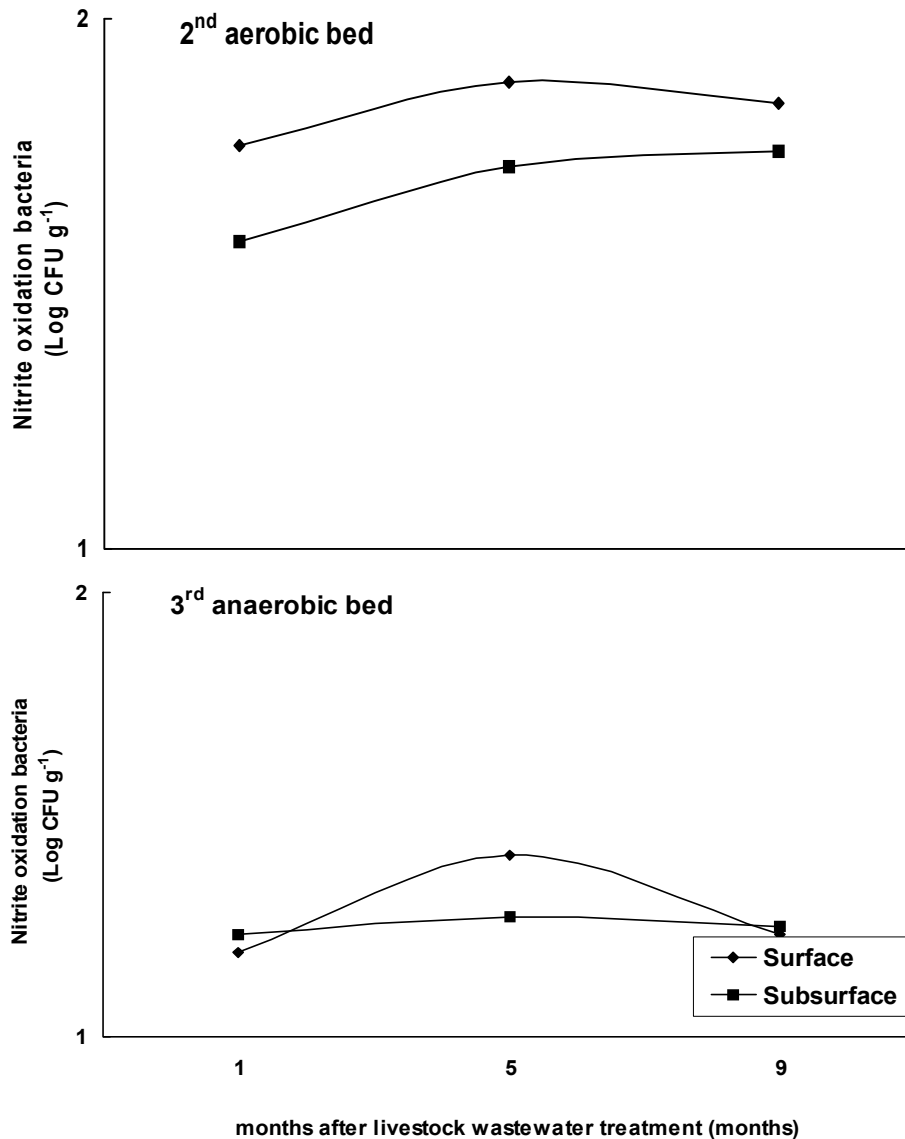


Fig. 3-211. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 아질산산화균 변화.

축산폐수처리장의 축산폐수처리 경과시일별 질산환원균은 Fig. 3-212에서 보는 바와 같다. 3차 처리인 혐기성조의 질산환원균은 축산폐수처리 초기에서 5개월 후까지 증가하는 경향이 있었으나 9개월 이후부터는 기온저하로 인하여 표층 및 심층의 질산환원균의 활성이 약간 감소하는 경향이였다. Seo, (2006) 연구결과에 따르면 자연정화공법에 하수처리시스템에서 혐기성조 심층의 질산환원균은 지온으로 인해 일정하게 유지된다고 보고하였는데, 본 처리장의 경우 산으로 둘러쌓여 햇빛이 거의 들지 않고 다른 지역에 비해 기온의 차이가 특히 심한 지역으로서 질산환원균이 심층도 영향을 받은 것으로 사료된다. 이와 같이 심층이 표층에 비해 탈질균의 생육이 좋은 것은 3차 처리인 혐기성조 심층은 산소의 공급이 표층에 비해 원활하지 못하기 때문에 탈질균의 생육에 오히려 적합하기 때문으로 사료된다.

축산폐수처리장의 축산폐수처리 경과시일별 탈질균은 Fig. 3-213에서 보는 바와 같이 축산

폐수 처리시일이 경과함에 따라 다소 차이는 있었지만 전반적으로 미미하게 증가하였고, 심층이 표층에 비해 많았다. 특히 3차 처리인 혐기성조의 표층은 겨울철 기온저하로 인해 탈질균의 활성이 약간 감소되는 경향이였다. 이와 같이 심층이 표층에 비해 탈질균의 생육이 좋은 것은 질산환원균과 비슷한 경향으로 3차 처리인 혐기성조 심층은 산소의 공급이 표층에 비해 원활하지 못하기 때문에 탈질균의 생육에 오히려 적합하기 때문으로 사료된다.

2차 처리인 호기성조의 탈질균은 3차 처리인 혐기성조에 비해 비슷하거나 미미하게 적은 경향이였다. 이는 호기성조는 혐기성조에 비해 산소 공급이 원활하기 때문에 혐기성 미생물인 탈질균이 성장하기에는 부적합하기 때문으로 사료된다.

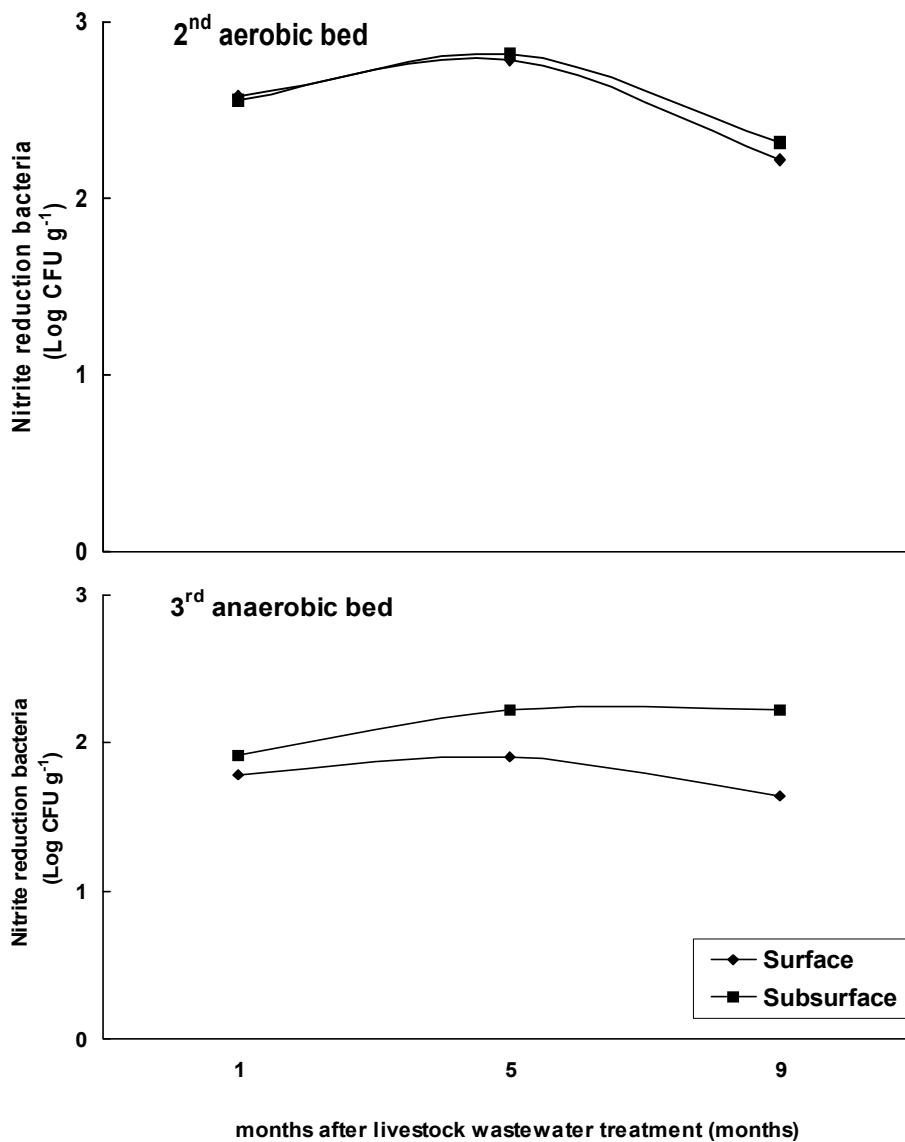


Fig. 3-212. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 질산환원균 변화.

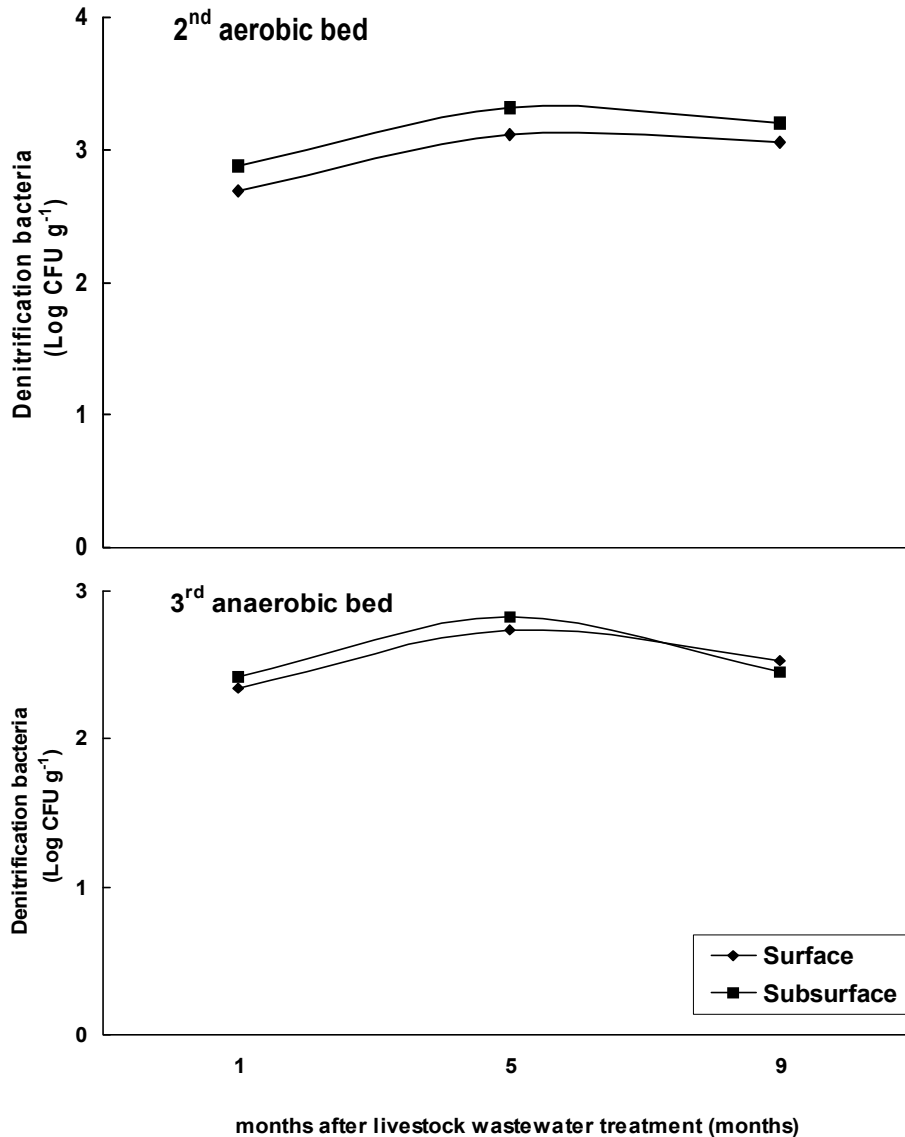


Fig. 3-213. 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 탈질균 변화.

나) 여재 및 식물부착 생물막의 전자현미경 조사

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 원 여재와 축산폐수처리 9개월 후 호기성조 및 혐기성조 여재 표면을 SEM분석한 결과는 Fig. 3-214에서 보는 바와 같다.

호기성조 및 혐기성조 여재표면의 전자현미경 사진을 보면 원 여재에 비해 호기성조 및 혐기성조에서 축산폐수 처리시일이 경과됨에 따라 미생물이 급격히 증가되는 경향이였다. 또한 처리조별 미생물 흡착은 전반적으로 별 차이 없었으나, 호기성조가 혐기성조에 비해 약간 많이 관찰되였다. 이는 호기성조에 1차 활성슬러지 처리수가 직접 유입되어 여과 처리됨으로서 대부분의 유기물들이 호기성조에 집적되었기 때문으로 사료된다.



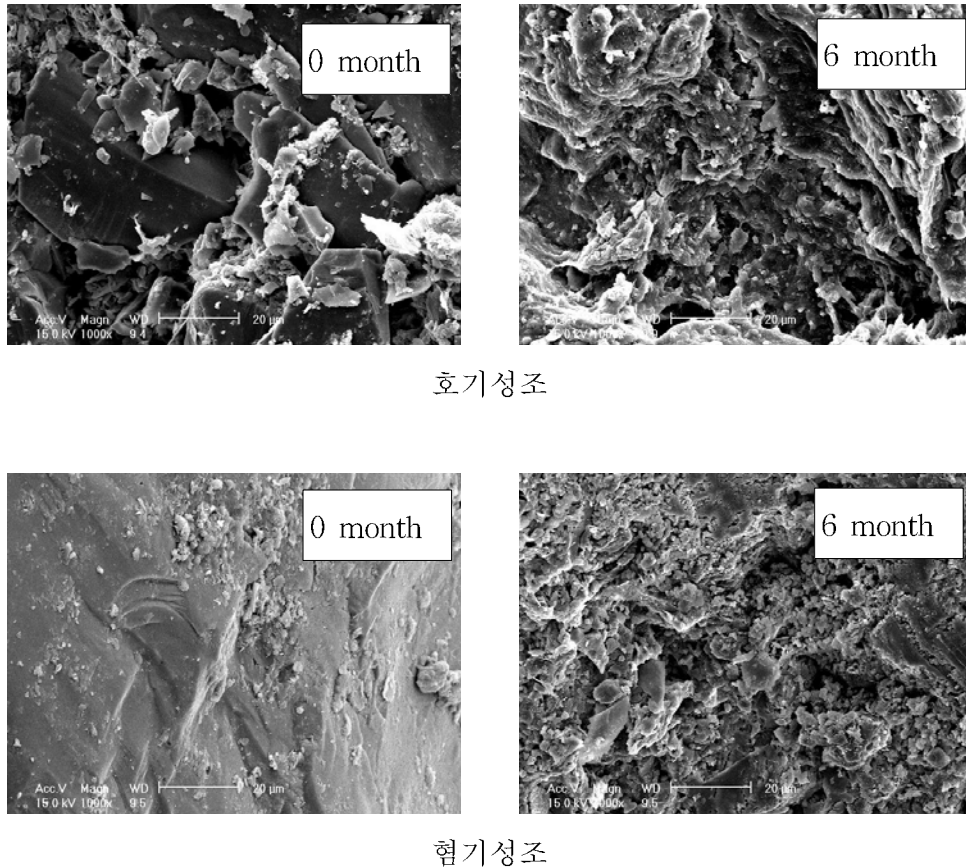


Fig. 3-214. 현장 축산폐수처리장에 사용된 여재의 표면의 미생물 부착상태.

#### 다) 축산폐수 중 미생물상 변화

공정개선된 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 처리수 중의 일반세균 및 대장균군을 조사한 결과로 Table 3-127에서 보는 바와 같다.

축산폐수 원수의 일반세균은 평균 약  $1,450,000 \text{ CFU mL}^{-1}$ 이었으며, 1차 활성슬러지조에서 처리된 처리수 중의 일반세균은 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 축산폐수 처리시일이 증가함에 따라 점점 많아지는 경향이였다. 2차 호기성조 및 3차 혐기성조의 일반세균은 1차 처리수 보다 더 감소하는 경향이였으며, 처리단계가 증가할수록 감소하는 경향이였고, 특히 혐기성조에서 일반세균은 급격히 줄어들었다. 이는 대부분의 일반세균은 호기성 세균으로서 혐기성조로 유입되어 산소부족으로 인한 발효상태로 분해되어 사멸된 것으로 사료된다. 또한 본 처리공법의 특성상 여재가 필터 작용을 하여 여재표면에 미생물 들이 부착하여 감소할 수 있는데, 혐기성조의 경우는 면적이 넓고 체류시간이 길게 시공됨에 따라 감소한 것으로 사료된다. 또한 일반세균은 처리 7개월 후인 겨울철에는 급격히 감소하는 경향이였으나 처리 9개월 후 2012년 3월에는 기온이 약간 상승함에 따라 약간씩 증가하는 경향이였다.

축산폐수의 대장균군은 평균 약  $320,000 \text{ CFU mL}^{-1}$ 이었으며, 일반세균과 동일한 경향이였다. 대장균의 함량은 본 축사의 경우 사료와 음식물 잔재를 수거하여 돼지의 사료로 하면서 일반

적인 돈분뇨의 대장균에 비해 증가한 것으로 사료된다.

Table 3-127. 현장 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리시일에 따른 축산폐수 중 미생물상 변화  
(Unit : CFU mL<sup>-1</sup>)

Items	Treatment	Raw Water	At months after livestock wastewater treatment				
			1	3	5	7	9
General bacteria	1 <sup>st</sup> treatment		650,000	840,000	780,000	430,000	450,000
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> treatment	1,450,000	420,000	480,000	220,000	109,000	98,000
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> +3 <sup>rd</sup> treatment		3,500	2,800	4,200	2,200	2,400
<i>E.coli</i>	1 <sup>st</sup> treatment		150,000	172,000	186,000	120,000	10,200
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> treatment	320,000	72,000	59,000	64,000	42,000	31,000
	1 <sup>st</sup> +2 <sup>nd</sup> +3 <sup>rd</sup> treatment		2,800	2,000	3,100	2,100	2,200

#### 5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치

본 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 오염물질의 처리효율은 수리수문학적인 특성에 따라 많은 차이가 있으므로 이들 오염물질의 처리량을 규격화하고 표준화하기 위해 오염물질 수치를 조사하였다. 우선 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치를 조사하기 이전에 처리장의 물수치를 조사하기 위해 현장 축산폐수처리장 운전 10개월 동안 축산폐수 유입량, 유출량 및 증발산량을 조사하였다. 그리고 본 축산폐수처리장에서 오염물질 수치를 조사하기 위해 유입되는 축산폐수 중의 COD, SS, T-N 및 T-P의 총 부하량과 총 유출량을 알아보고, 각 처리조별로 처리되는 처리량을 오염물질별로 각각 조사하였다. 또한 질소와 인의 경우 2차 처리인 호기성조, 3차 처리인 혐기성조에서는 각 오염물질의 처리경향을 여재의 흡착에 의한 처리량과 수생식물에 의한 흡수량 및 기타처리 (여재흡착과 수생식물의 흡수를 제외한 처리)에 의한 처리량으로 세분화하여 각각 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

#### 가) 총유입량, 총유출량 및 증발산량

현장 축산폐수처리장에서 운전 10개월 동안 축산폐수유입량과 유출량 및 증발산량을 조사한 결과는 Fig. 3-215에서 보는 바와 같다. 축산폐수처리장 운전 10개월 동안 축산폐수의 유입량은 평균 0.9 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 정도였으며, 2차 처리인 호기성조와 3차처리인 혐기성조를 통과하면서 총 유입량의 17% 정도인 0.153 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 정도가 증발산되어 최종 방류되는 축산폐수는 평균 0.747 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> 정도였다.

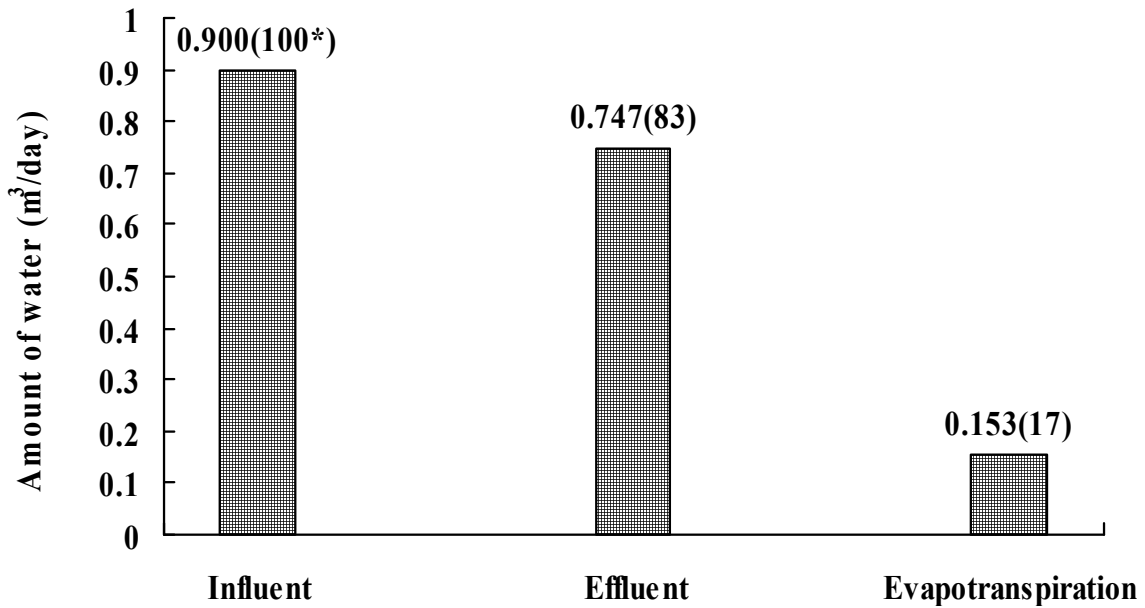


Fig. 3-215. 현장 축산폐수처리장에서 10개월간 축산폐수 총 유입량, 총 유출량 및 증발산량.

#### 나) 오염물질의 물질수지

현장 축산폐수처리장에서의 오염물질의 수지는 유입되는 오염물질의 부하량, 1차 처리인 활성슬러지조 처리량, 2차 처리인 호기성조 처리량, 3차 처리인 혐기성조 처리량 및 방류량으로 구분 조사하였다. 오염물질 중 질소 및 인은 2차 처리인 호기성조와 3차 처리인 혐기성조에서 처리되는 양을 수생식물의 흡수량, 여재에 의한 흡착 또는 침전, 그리고 기타 처리량으로 세분화하였다.

#### (1) COD 및 SS 물질수지

현장 축산폐수처리장에서 운전 10개월 동안 유입된 축산폐수의 COD의 총 부하량, 1차 처리인 활성슬러지조 처리량, 2차 처리인 호기성조 처리량 및 3차 처리인 혐기성조 처리량 및 총 방류량 등 COD 수지를 계산한 결과는 Table 3-128에서 보는 바와 같다.

현장 축산폐수처리장에 유입된 축산폐수 중 COD 총 부하량은 연간 3293.4 kg정도였으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서의 COD 처리량은 연간 2585.5 kg정도로서 COD 부하량의 78.5%이었으며, 2차 처리인 호기성조에서의 COD처리량은 연간 263.8 kg정도로서 COD 총 부하량의 8%이었고, 3차 처리인 혐기성조에서의 COD 처리량은 연간 416.6 kg정도로서 COD 총 부하량의 12.5%이상이었다. COD 총 방류량은 연간 27.6 kg으로서 COD 총 부하량의 1%였다.

본 축산폐수처리장에서 처리된 COD는 대부분이 1차 처리인 활성슬러지조에서 처리가 되었으며 방류되는 COD의 양이 축산폐수처리 시일이 경과될수록 꾸준히 감소하였다. 이는 호기성조 및 혐기성조의 미생물이 시간이 지나면서 토착화되고 활성이 증가하였기 때문이라 생각된다.

현장 축산폐수처리장에서 운전 10개월 동안 유입된 축산폐수의 SS의 총 부하량, 1차 처리인 활성슬러지조 처리량, 2차 처리인 호기성조 처리량 및 3차 처리인 혐기성조 처리량 및 총 방류

량 등 COD 수지를 계산한 결과는 Table 3-128에서 보는 바와 같다. 현장 축산폐수처리장에서 SS 총 부하량은 연간 4,779.5 kg 정도로서 1차 처리인 활성슬러지조에서의 SS 처리량은 연간 3,449.9 kg 정도로서 SS 총 부하량의 72.2%이었으며, 2차 처리인 호기성조에서의 SS 처리량은 연간 607.9 kg 정도로서 SS 총 부하량의 12.7%이었고, 3차 처리인 혐기성조에서의 SS 처리량은 연간 696.1 kg 정도로서 SS 총 부하량의 14.5%이상이었고, SS 총 방류량은 연간 0.15 kg으로 SS 총 부하량의 0.6%였다. SS도 COD와 마찬가지로 대부분이 1차 처리인 활성슬러지조에서 처리되었으며, 미비한 처리는 호기성조 및 혐기성조에 유입됨에 따라 처리되었다. 축산폐수는 고농도의 분해성 및 난분해성 유기물로 배출이 되며 본 공법에서는 분해성 유기물의 경우는 활성슬러지조에서 미생물의 반응에 의해 분해가 되게 되고, 난분해성 유기물의 경우는 호기성조 및 혐기성조의 여재에 의한 물리화학적 여과 및 침전으로 처리되는 것으로 판단된다.

자연정화공법에 의한 SS의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응 등을 거치면서 궁극적으로 처리된다 (Howes et al, 1981).

Table 3-128. 현장 축산폐수처리장에서 COD 및 SS의 물질수지

(Unit : kg year<sup>-1</sup>)

Treatment stage		2011~2012 year (270 day)
COD	Influent	3293.4 (100*)
	1 <sup>st</sup> activated sludge bed	2585.5 (78.5)
	2 <sup>nd</sup> aerobic bed	263.8 (8.0)
	3rd anaerobic bed	416.6 (12.5)
	Effluent	27.6 (1.0)
SS	Influent	4779.5 (100*)
	1 <sup>st</sup> activated sludge bed	3449.9 (72.2)
	2 <sup>nd</sup> aerobic bed	607.9(12.7)
	3rd anaerobic bed	696.1(14.5)
	Effluent	0.15 (0.6)

(\*) : Index

## (2) T-N 및 T-P 물질수지

현장 축산폐수처리장 운전 10개월 동안 유입된 축산폐수의 T-N의 총 부하량, 1차 처리인 활성슬러지조 처리량, 2차 처리인 호기성조 처리량 및 3차 처리인 혐기성조 처리량 및 총 방류량 등 T-N 수지를 계산한 결과는 Table 3-129에서 보는 바와 같다.

현장 축산폐수처리장 운전 10개월 동안 유입된 T-N의 총 부하량은 연간 1,473.3 kg 이었으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-N 총 부하량의 79.7% 처리되었다. 2차 처리인 호기성조에서 T-N 총 부하량의 5.8% 처리되었으며, T-N 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-N 총 부하량의 0.0024%이었으며, 여재의 흡착량은 T-N 총 부하량의 0.46% 이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리는 T-N 총 부하량의 5.34%이었다. 3차 처리인 혐기성조에서 T-N 총 부하량의 13.5% 처리되었으며, T-N 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-N 총 부하량의 0.033%이었으며, 여재의 흡착량은 T-N 총 부하량의 0.96% 이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리는 T-N 총 부하량의 12.51%이었다. T-N 총 방류량은 연간 11.7 kg으로 T-N 총 부하량의 1.0% 이었다. 이상의 결과를 미루어 볼때, 대부분의 T-N은 활성슬러지조에서 제거가 되어 호기성조 및 혐기성조의 수생식물에 의해 흡수된 T-N의 양은 적었지만, 장기적인 처리시 수초의 분얼수와 건물중이 증가하여 수초에 의한 T-N 흡수량도 증가할 것으로 판단된다.

일반적인 자연정화공법 오폐수처리장의 질소 처리는 식물에 의한 흡수보다 질산화와 탈질화가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 유입수의 유기태 질소가 호기성 미생물에 의한 질산화 작용 (nitrification)으로 질산태 질소로 전환되며,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 혐기상태인 혐기성조의 여재층으로 확산되어 혐기성 미생물에 의하여 탈질작용 (denitrification)이 일어나면서 질소와 아산화질소로 전환되어 이들이 대기 중으로 이동하여 질소가 처리된다 (Yun et al., 1997). 수초의 근권도 질소처리에 상당한 역할을 하는 것으로 알려지고 있다. 수생식물은 대기중의 산소를 잎으로부터 흡수하여 줄기를 통하여 뿌리로 전달하고, 여재층에서 발생하는 질소와 아산화질소를 대기중으로 이동시키는 통기조직이 잘 발달되어 있다. 산소가 뿌리로 전달되며, 뿌리주변에 얽은 호기상태의 근권이 형성된다. 근권에서는 암모니아화와 질산화가 일어나며, 근권을 둘러싸고 있는 혐기상태의 심층에서는 탈질화로 질소와 아산화질소가 발생하여, 수초의 통기조직을 통하여 대기중으로 이동하는 것으로 보고되고 있다 (Delaune et al, 1981).

현장 축산폐수처리장 운전 10개월 동안 유입된 축산폐수 중 T-P의 총 부하량, 1차 처리인 활성슬러지조 처리량, 2차 처리인 호기성조 처리량 및 3차 처리인 혐기성조 처리량 및 총 방류량 등 T-P 수지를 계산한 결과는 Table 3-129에서 보는 바와 같다.

현장 축산폐수처리장 운전 10개월 동안 유입된 T-P의 총 부하량은 연간 172.2 kg정도이며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-P 총 부하량의 68.6% 처리되었다. 2차 처리인 호기성조에서 T-P 총 부하량의 20.1% 처리되었으며, T-P 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-P 총 부하량의 0.022%이었으며, 여재의 흡착량은 T-P 총 부하량의 1.57%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리는 T-P 총 부하량의 18.51% 이었다. 3차 처리인 혐기성조에서 T-P 총 부하량의 10.9% 처리되었으며, T-P 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-P 총 부하량의 0.13% 이었으며, 여재의 흡착

량은 T-P 총 부하량의 3.32%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리는 T-P 총 부하량의 7.5%이었다. T-P 총 방류량은 연간 0.57 kg으로 T-P 총 부하량의 0.4%이하였다.

수생식물에 의해 흡수된 T-P의 양은 수생식물 이식 후 1년 동안 매우 적었으나, 그 후 수생식물의 분얼수와 건물중이 증가함으로서 수생식물에 의한 T-P의 흡수량도 증가하였다. 여재에 흡착된 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 모두 축산폐수처리 경과시일에 따라 꾸준히 증가하는 경향을 나타내었다.

2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조에서 수생식물과 여재에 의한 처리 이외의 부분은 식물 표면에 흡착, 불용성 화합물과의 결합, 침전 또는 미생물의 작용 등에 의해 처리된 것으로 생각된다.

일반적인 자연정화공법에 의한 오폐수처리장에서 인은 이온과 결합한 인산염 (Ca-P, Fe-P, Al-P)의 상태로 침전되며, 수생식물에 의해 일부는 흡수된다 (Jeong, 1999). 인은 유기물의 침전과 죽은 수생식물의 잔재물이 침전되어 형성된 습지바닥의 침전-잔재물층 (sediment-litter layer)에 흡착되어 95%이상 존재하는 것으로도 보고되고 있다 (Sim and Han, 1998). Nichols에 의하면 인은 흡착과 침전에 의해 주로 처리되며, 습지 바닥에의 흡착을 통해서도 처리된다고 하였다 (Amstrong 1979). Corbitt과 Browen에 의하면 습지에서 인의 처리는 인산염의 침전, 기질에의 흡착, 수생식물에 의한 흡수, 조류와 세균에 의한 흡수 등이며, 이중 식물흡수에 의한 처리가 전체의 5~10% 정도에 불과하다고 하였다 (Krasovskil and Chaschchukhin, 1974).

Table 3-129. 현장 축산폐수처리장에서 T-N 및 T-P의 물질수지

(Unit : kg year<sup>-1</sup>)

Treatment stage		T-N	T-P
Influent		1473.3 (100 <sup>*</sup> )	172.2 (100 <sup>*</sup> )
Removal in activated sludge bed (1 <sup>st</sup> treatment)	Total	1174.5 (79.7)	118.2 (68.6)
	Microbial	1174.5 (79.7)	118.2 (68.6)
Removal in aerobic bed (2 <sup>nd</sup> treatment)	Total	85.3 (5.8)	34.6 (20.1)
	Plants	0.035 (0.0024)	0.038 (0.022)
	Filter media	6.80 (0.46)	2.70 (1.57)
	Others	78.47 (5.34)	31.86 (18.51)
Removal in aerobic bed (3 <sup>rd</sup> treatment)	Total	201.8 (13.5)	18.9 (10.9)
	Plants	0.491 (0.033)	0.131 (0.08)
	Filter media	14.41 (0.96)	5.75 (3.32)
	Others	186.9 (12.51)	13.02 (7.5)
Effluent		11.7 (1.0)	0.57 (0.4)

( \* ) : Index

6) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 효율 비교

가) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 수처리 효율 비교

본 자원순환형 축산폐수 처리공법과 현재 보급되어 사용되고 있는 기계식 처리공법간의 처리효율을 비교하였다. 비교에 사용된 기계식 축산폐수 처리공법은 호기성소화법과 RABC (Rotating Activated Bacillus Contactor)공법이었다.

개발된 자원순환형 축산폐수 처리공법과 기계식 축산폐수 처리공법간 최종방류수질 비교결과는 Fig. 3-216과 같다. 자원순환형 축산폐수 처리공법은 유기물, 질소 및 인 모두에서 호기성 소화법과 RABC 공법에 비해 높은 처리효율을 보였다. 본 연구에서 개발된 자원순환형 축산폐수 처리공법은 전처리조 (활성슬러지조)-인공습지 (호기성조-혐기성조)로 구성되어 있어 대부분의 유기성 오염물질들은 활성슬러지조와 호기성조에서 처리가 되고, 미처리된 오염물질들은 혐기성조에서 식물체, 여재, 미생물의 수생태적 상호작용을 통해 오염물질이 처리가 되기 때문에 처리효율이 높은 것으로 판단된다. 본 처리공법과 달리 호기성소화법은 체류시간이 짧아 다량의 폐수를 처리할 수 있는 장점이 있으나, 대부분 하수와 같은 저농도의 기질을 대상으로 처리하는데 적합한 공법으로 축산폐수와 같은 고농도의 기질을 처리할 경우 짧은 체류시간으로 인해 처리효율이 낮아지는 것으로 판단된다.

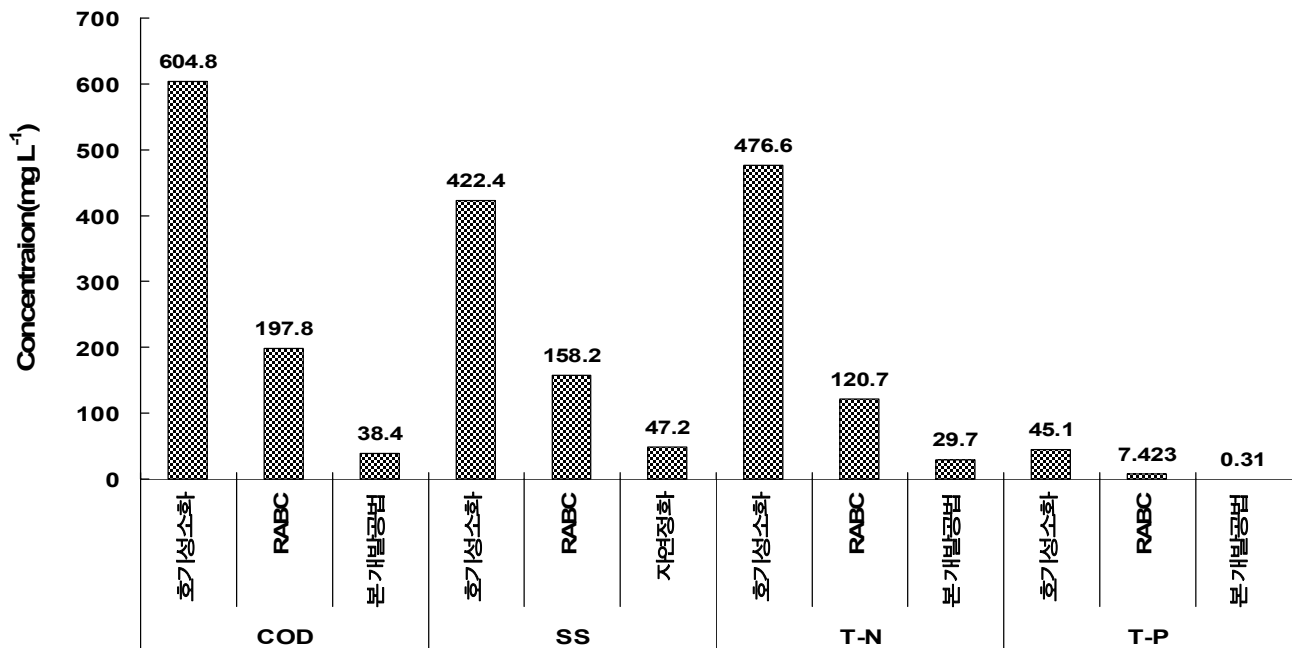


Fig. 3-216. 본 처리공법과 기존공법의 방류수 중 오염물질 함량 비교.

하지만 이와 같은 축산폐수 처리공법간 비교결과는 운전기간, 유입농도, 유입량, 전처리 과정 및 체류시간 등의 운전인자들을 고려하지 않고 단지 방류수 중의 오염물질 농도만 비교하여 각 공법간의 직접적인 비교를 통한 본 공법의 우수성과 효율성을 제시하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 자원순환 축산폐수처리공법을 현재 운전중인 공법과 비교를 위해서는 장기간 운전을 통해 안전성과 산업성이 검토된 이후에 진행되어야 할

것으로 판단된다.

#### 나) 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 경제성 비교

본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간의 경제성 비교 결과는 Table 3-130에서 보는 바와 같다. 본 개발 공법과 타 기계식 공법간의 경제성을 명확하게 비교하기 위해서는 유입수 성상, 설계용량 및 처리방식 등을 동일한 수준으로 놓고 비교해야 하나 본 개발공법의 경우 실제 축산농가에 보급되기 이전으로 용량 증대를 통한 표준화 연구가 좀 더 진행되어야하기 때문에 정확한 비교는 불가능하였다. 따라서 본 처리공법과 타 공법간 경제성 비교는 단순하게 2006년 환경부 “축산폐수 처리통계” 자료 및 2000년 한국농촌경제연구원 “가축분뇨처리시설의 시설비 및 운영비 조사연구” 자료를 근거로 하였다. 비교대상 공법은 크게 축산농가에서 배출되는 축산자원을 재활용하기 위한 시설과 정화시설로 구분하여 비교하였고, 축산자원의 재활용 기술은 퇴비화, 퇴비화+정화, 액비화로 구분하였고, 축산폐수처리공법은 BCS/SBR, 호기성소화, RABC 및 액상부식법으로 구분하였다.

자원순환형 축산폐수처리공법과 축산분뇨의 재활용 공법은 시설비 측면에서 처리시설 규모와 목적이 달라 사실상 비교가 불가능하였지만 운영비 측면에서 자원순환형 축산폐수처리공법의 경우 연간 30만원 미만으로 재활용 공법에 비해 오히려 유지관리비가 더 적게 소요되었다.

자원순환형 축산폐수처리공법과 가축분뇨 공공처리시설로 사용되고 있는 기계식공법의 시설비를 비교해 본 결과 기계식 공법의 시설비는 평균 3,050~8,892천원/톤 정도로 본 자원순환형 축산폐수처리공법의 시설비와 큰 차이가 없었다. 그러나 자원순환형 축산폐수처리공법은 용량 증대를 통한 산업화가 되지 않은 기술개발과정에서 소요된 시설비로 향후 산업화가 될 경우 현재 소요된 시설비보다 감소할 것으로 예상된다. 하지만 자원순환형 축산폐수처리공법의 경우 타 기계식 공법에 비해 부지면적이 상대적으로 많이 소요되기 때문에 장소나 규모에 따라 다소 시설비의 차이가 날 수 있을 것으로 판단된다. 유지관리비 측면에서 본 자원순환형 축산폐수처리공법은 타 기계식 공법에 비해 매우 낮은 비용이 소요되었는데, 이와 같은 이유는 본 자원순환형 축산폐수처리공법의 경우 자원의 재활용을 통한 경비절감효과가 있으며, 또한 운영 및 유지관리상에 에너지가 거의 필요 없기 때문으로 판단된다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 본 연구를 통해 개발된 자원순환형 축산폐수처리장은 현재 운영중인 기계식 공법과 비교해서 시설비의 경우 큰 차이 없었으며, 유지관리비의 경우 타 공법에 비해 적게 소요되어 경제성면에서 우수한 것으로 판단되나, 결과의 활용시 다양한 운영관리적인 인자를 고려한 심도 있는 검토가 필요하며 절대 확대 해석되어서는 안될 것으로 판단된다. 특히, 본 보고서에 제시한 자원순환형 축산폐수처리공법의 경제성 비교결과는 용량증대, 표준화, 규격화, 운전기간 등이 전혀 고려되지 않아 실용화사례와 운영관리적인 측면에서의 면밀한 검토가 이루어진 뒤에 경제성 평가가 다시 이루어져야 할 것으로 판단된다.



Table 3-130. 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 경제성 비교

처리시설	규모 (두)	용량 (m <sup>3</sup> )	시설비(천원)				유지관리비(천원/년)				
			시설	기계	운반	계	감가 상각비	인건비	경상비 등 기타	계	
퇴비화	534	-	16	16	6	38	3.4	6.9	7.3	17.6	
재활용 공법 <sup>†</sup> (천원/두)	퇴비+정화	2,260	-	24	14	2	40	1.6	2.3	6.5	10.4
	액비화	1,733	-	19	3	2	24	2.2	1.5	3.2	6.9
	BCS/SBR	-	130	-	-	-	8,892	215	508	1,354	2,077
축산폐수 처리공법 <sup>‡</sup> (천원/톤)	호기성소화	-	100	-	-	-	3,050	<10	570	700	1,280
	RABC	-	100	-	-	-	4,680	20	820	510	1,350
	액상부식법	-	150	-	-	-	8,173	207	1,593	587	2,386
자원순환형 축산폐수처리공법 (천원/톤)		330	1	5,000	500	1,000	6,500	-	-	300	300

† : 가축분뇨처리시설의 시설비 및 운영비 조사연구 (한국농촌경제연구원, 2000년)

‡ : 축산폐수처리통계(환경부, 2006년)

7) 현장 자원순환형 축산폐수 처리장의 설계규격화 및 관리지침 제시

가) 자원순환형 축산폐수처리장 설계규격화

(1) 사육 가축에 따른 설계규격화

사육가축에 따른 자원순환형 축산폐수처리장의 설계규격화는 현재 시공된 축산폐수처리장을 기준으로 하여 제시되었다. 현재 축산농가에 사육되는 돼지는 1,000두로서 가축분뇨, 생활오수 및 돈사 세척수 등을 포함해 총 일일 폐수 배출량은 3 ton 미만이었다. 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리장에서 돼지 1두당 필요한 처리면적을 계산한 결과는 Table 3-131과 같다.

현재 시공된 축산폐수처리장에서 일일 처리할 수 있는 안전처리 용량은 250 L이었으며, 전처리조, 호기성조 및 혐기성조 처리면적은 16, 18 및 50 m<sup>2</sup>이하로 설계되어야 할 것으로 판단된다. 안전처리 용량을 고려한 돼지 1마리당 필요한 인공습지 면적은 전처리조, 호기성조 및 혐기성조의 처리면적인 1.02 m<sup>2</sup> 이다. 하지만 개발된 축산폐수처리장의 실용화 및 산업화를 위한 체계적인 설계 규격화는 장시간의 모니터링을 통하여 안정성을 검토한 뒤 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3-131. 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장에서 돼지 1두당 사용되는 처리조 면적

구분	시공된 축산폐수처리장 면적 (m <sup>2</sup> ) 250L day <sup>-1</sup> 기준	발생되는 전체 폐수처리장 (m <sup>2</sup> ) 3000 L day <sup>-1</sup> 기준	돼지 1두당 처리 면적 (m <sup>2</sup> )
전처리조	16	192	0.20
호기성조	18	216	0.22
혐기성조	50	600	0.60

(2) 시설규모 및 비용을 고려한 설계 규격화

본 연구에서 개발된 자원순환형 축산폐수처리장을 시설규모 및 비용을 고려하여 설계 규격화한 결과는 Table 3-132에서 보는 바와 같다. 축산농가 규모에 따라 허가대상 및 신고대상으로 구분하였고, 신고대상 중 중규모 및 소규모로 구분하여 각 축산규모에 따른 자연정화공법에 의한 축산폐수처리장을 설계 규격화 하였다. 허가대상 규모 축산농가에서 필요한 시설의 부지면적을 산출한 결과 소의 경우는 76.5 m<sup>2</sup> 이상의 습지면적이 필요하며, 돼지의 경우는 729 m<sup>2</sup> 이상의 습지면적이 필요할 것으로 예상된다. 신고대상 규모 중 중규모 축산농가에서 필요한 시설의 부지면적을 산출한 결과 소의 경우는 17.3~76.5 m<sup>2</sup> 이상의 면적이 필요하며, 돼지의 경우는 102~729 m<sup>2</sup>의 습지 면적이 필요할 것으로 산출되었다. 또한 소규모 축산농가의 경우 소는 8.2~16.3 m<sup>2</sup>의 습지면적이 필요하고, 돼지의 경우는 36.7~102 m<sup>2</sup>의 습지면적이 필요하다. 하지만 상기결과는 시공된 처리장의 안전처리 용량을 기준으로 산출되어 축산농가별 폐수의 성상 및 농도가 다르기 때문에 실제 축산농가에 설계 및 시공시 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3-132. 사육두수에 따른 시설규모

구분	허가대상	신고대상		
		중규모	소규모	
축사 면적 (m <sup>2</sup> )	소	900 이상(75두)	200~900(17~75두)	100~200(8~16두)
	돼지	1,000이상(715두)	140~1,000(100~715두)	50~140(36~100두)
습지 면적 (m <sup>2</sup> )	소	76.5이상	17.3~76.5	8.2~16.3
	돼지	729이상	102~729	36.7~102

나) 자원순환형 축산폐수 처리시스템의 관리지침

자원순환형 축산폐수 처리시스템의 관리지침은 본 처리공법을 효과적으로 관리 및 유지 할 수 있는 방안을 검토하여 작성하였으며, 세부내용은 다음과 같다.

● 유지관리의 목적

○ 유지관리의 목적

- 자원순환형 축산폐수 처리시스템의 상태를 체계적이고, 주기적으로 기록하며, 안정성을 확보하고, 설계목적에 부합 되도록 보장
- 손상을 조기에 발견하고, 향후 발생한 손상을 예측 및 보수, 보강, 개축 등의 의사결정에 필요한 자료 제공
- 점검결과의 전산관리를 통해 합리적인 유지관리 계획수립 및 예산의 최적분배 실현
- 축적된 점검결과의 분석을 통한 향후 설계, 시공 개선

● 유지관리 업무

유지관리 업무에는 점검, 판정, 조치 및 기록 등을 포함한다.

○ 유지관리 업무

- 점검업무는 일상점검, 정기점검, 특별점검, 정밀진단, 안전진단, 추적조사를 의미한다. 본 지침서에서는 주로 일상점검, 정기점검, 특별점검을 대상으로 작성되었기 때문에 정밀 안전진단 및 추적조사는 해당 요령이나 지침을 참조해야 한다.
- 점검결과 발생한 손상에 대한 판정이 필요하다. 손상상태는 발생부위와 그 심각도에 따라 상태등급을 이용하여 판정한다.
- 판정결과 보수가 필요하다고 판단된 손상에 대해서는 적합한 조치를 취해야 한다. 손상

에 대한 조치로는 해당 손상에 대한 보수와 보강 및 개축이 있으며, 이런 종류의 보수 및 보강 조치이외에 발생한 손상에 관계없이 주기적으로 조치가 필요한 부위에 대해서는 일상조치로 관리한다.

- 점검결과와 보수 필요성 및 조치결과는 적합한 형식에 따라 기록되어야 한다. 이 기록은 전산관리 시스템의 입력 자료로써 활용될 수 있다.

● 유지관리 흐름도 및 작업계획

○ 유지관리 흐름도

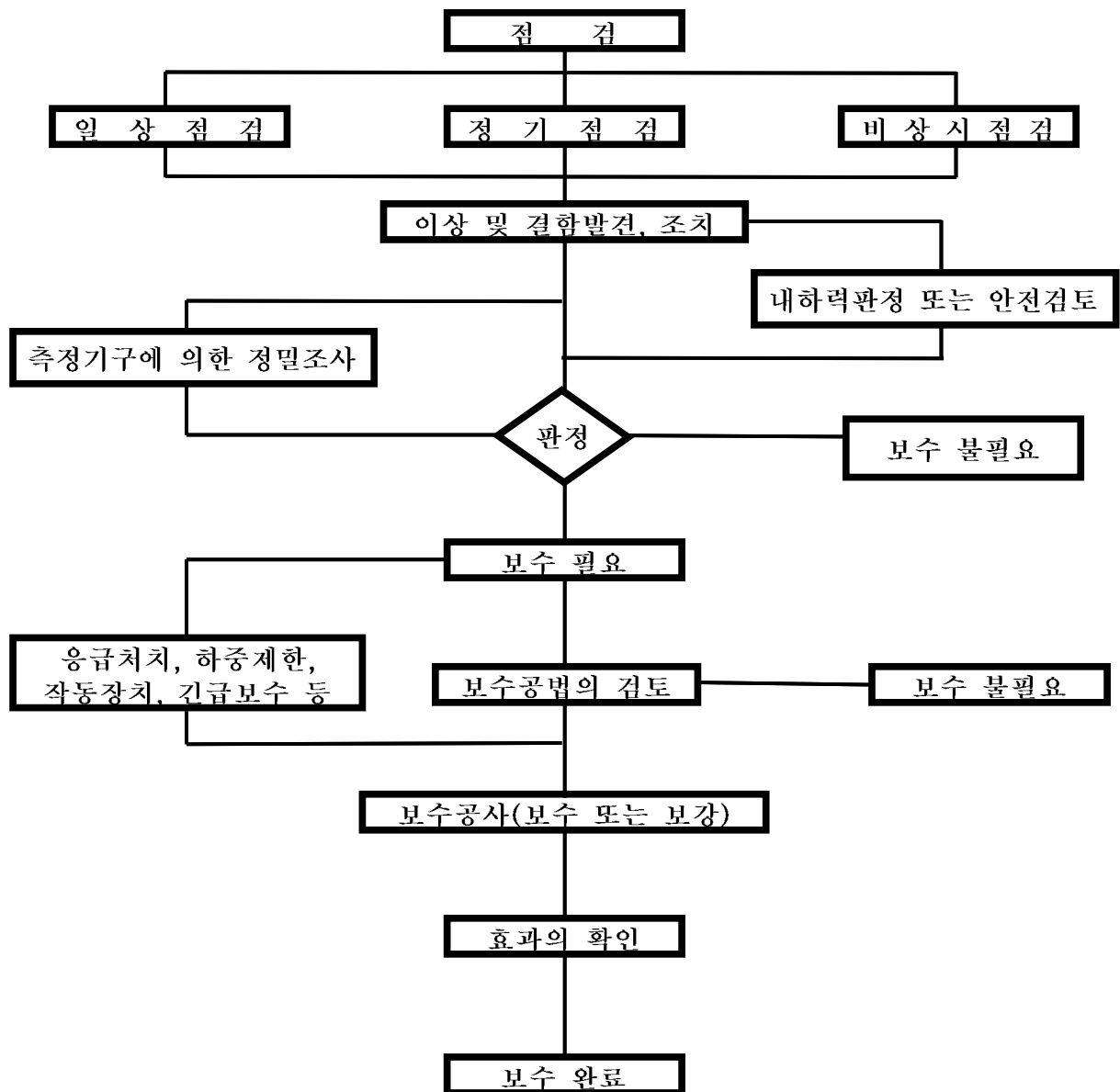


Fig. 3-217. 자원순환형 축산폐수 처리시스템의 유지관리 흐름도.

○ 유지관리 작업계획

작업을 원활하게 하고 능률적으로 실시하기 위해서는 작업계획을 합리적으로 수립하고 작업 실시는 계획에 따라 면밀한 준비와 세심한 주의를 하면서 작업이 실시되어야 하며 그 결과는 기록유지 되도록 자료를 정리하여야 한다.

• 연간 작업계획

축산폐수 처리시스템 상태를 일제히 조사하여 유지보수 대상 작업량을 확정하고 작업 시기, 투입인원, 소요자재, 소요예산을 판단하여 연간 유지보수 작업계획을 수립하여야 한다.

• 분기 작업계획

연간 수립된 작업계획과 분기에 지시된 사업을 종합하여 유지보수 작업계획을 확정 작업시기, 투입인원, 소요자재, 소요예산을 판단하여 분기간 유지보수 작업계획을 수립하여야 한다.

• 주간작업계획

연간 작업계획과 분기 작업계획 및 지시된 사업을 종합하여 유지 보수 작업계획을 세분화 작성하고 작업시기, 투입인원, 소요자재, 소요예산을 판단하여 주간 유지보수 작업계획을 수립 시행되도록 하여야 한다.

• 일일작업계획

주간 작업계획과 지시된 사항을 토대로하여 일일작업 계획을 전일에 작업반별로 위치, 작업내용, 작업량, 인원, 자재소요량을 세밀히 판단 적정한 규모와 경제적인 방법으로 시행되도록 일일 작업계획을 수립 운영할 것이며 일일 작업계획에는 악천후를 고려한 대체작업 계획을 동시에 수립 운영 되도록 하여야 한다.

● 축산폐수 처리시스템 유지 및 관리

시스템	구성시스템 특성 및 상태	시설물 적정관리 방안
전처리조	<ul style="list-style-type: none"> <li>○부하량에 따른 미생물 활성 감소</li> <li>○산소공급장치 및 교반장치 성능저하</li> <li>○침전물에 의한 배수관 막힘현상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○주입량을 조절하여 미생물의 활성을 촉진</li> <li>○일시적인 점검으로 산소공급장치 및 교반장치 점검</li> <li>○침전물의 양을 주기적으로 모니터링하여 침전물 제거 필요</li> <li>○2단 활성슬러지 시스템의 원활한 운영 필요</li> <li>○필요시 활성슬러지 재주입 필요</li> </ul>
호기성조	<ul style="list-style-type: none"> <li>○체류시간 짧음</li> <li>○활성슬러지조에 미처리된 유기물 표층에 집적</li> <li>○수분부족으로 인한 수생 식물 활착 저하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○체류시간 조절 필요</li> <li>○활성슬러지 처리수 분배를 위한 분배장치 설치</li> </ul>
혐기성조	<ul style="list-style-type: none"> <li>○상부에 잠풀 생육</li> <li>○불균일한 수질흐름</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○균일한 수질흐름 유도방안 강구</li> <li>○정화식물 대체 (재이식) 방안 강구</li> </ul>

○ 수생식물체의 관리

호기성조 및 혐기성조 내부의 수생식물은 인공습지의 특성상 크게 두 가지로 분류하여 관리한다. 인위적으로 식재하여 분포하는 종과 자연적인 천이에 의해 도입된 종을 구분하여 식물종 특성에 맞게, 습지설계 시스템에 알맞게 유지·관리하여야 한다.

호기성조 및 혐기성조의 수생식물 식재는 다년간의 연구결과로 오염물질을 최대 흡수할 수 있는 식물을 이식해야 하며, 대표적인 식물종은 정수식물인 갈대, 물억새, 달뿌리풀, 노란꽃창포, 부들 등이 적합할 것이다.

인위적으로 식재한 수생식물의 적절한 관리방안은 수위조절과 제거작업에 있다고 볼 수 있다. 수심이 너무 낮으면 외부로부터 자연천이종의 침투가 쉽고, 수심이 깊으면 식재된 정수식물의 성장이 어렵다. 적절한 수심 조절만이 인공습지에서 정수식물체의 생육을 위해 필요한 유지관리 조치라고 판단된다. 그리고 인위적으로 식재한 지역에 식물분포가 조밀하여 웃자람이 생기는 경우는 적절한 제거작업을 통해 분포밀도를 부분적으로 조절할 필요가 있다.

본 자연정화공법 축산폐수처리장은 유입유량과 체류시간, 유입수의 특성, 퇴적물의 퇴적상태, 수생식물의 성장상태 등을 종합적으로 고려할 때, 정기적으로 년 1회 이상 지상부 제거 작업을 실시하는 것이 바람직하다. 특히, 갈대 및 부들 등 대형식물의 경우 장마철 이후 쓰러짐과 동시에 오염부하량을 증가시킬 수 있기 때문에 2차 오염방지가 필요하다. 또한, 웃자람이 심하고 쓰러짐이 예상되는 정수식물체에 한하여 여름철 제거작업이 병행되어야 할 것으로 보인다.

○ 퇴적물 관리

자연정화공법에 의한 축산폐수처리장의 유입수 특성상 축산폐수 주입량에 따라 오염물질의 농도는 차이가 클 것으로 판단된다. 따라서 활성슬러지조 침전물을 주기적으로 제거해야 할 것

으로 판단된다.

전처리조의 경우는 3분기로 구분하여 연간 3회 정도 침전량을 고려하여 제거해야 할 것으로 판단되며, 호기성조 및 혐기성조는 연간 2회 정도의 주기적인 조사를 통해 퇴적량을 모니터링하여 관리해야 한다.

다) 자원순환형 축산폐수 처리장의 실용화 (농가형, 공장형, 공동이용 등) 모델 제시

축산폐수처리장의 실용화를 위한 농가형 모델의 경우는 돈사 1000두 이하의 농가에 적합한 모델로서 1000두에서의 발생하는 축산폐수 발생량은  $3 \text{ m}^3$  이하로 소규모 축산농가의 고�형물분리기에서 고�형물을 완벽하게 분리한 후 Fig. 3-218과 같은 모델을 제시할 수 있다.

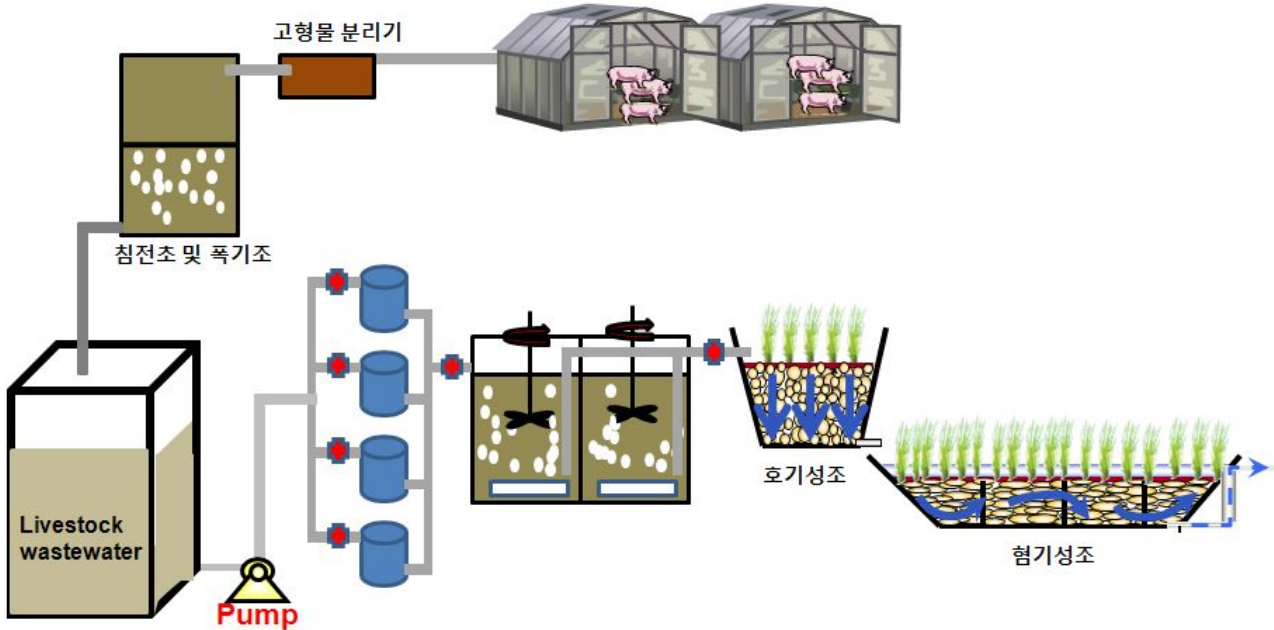


Fig. 3-218. 자연정화공법에 의한 농가형 축산폐수처리장 모델.

공장형의 경우 축산폐수의 부하량이 상대적으로 높을 것으로 예상되며, 본 개발공법을 이용하여 단독으로 처리할 경우 많은 부지면적과 이에 상응하는 비용이 들 것으로 생각되며, 처리장의 수명도 단축되기 때문에 Fig. 3-219와 같은 공장형 처리모델을 제시할 수 있다.

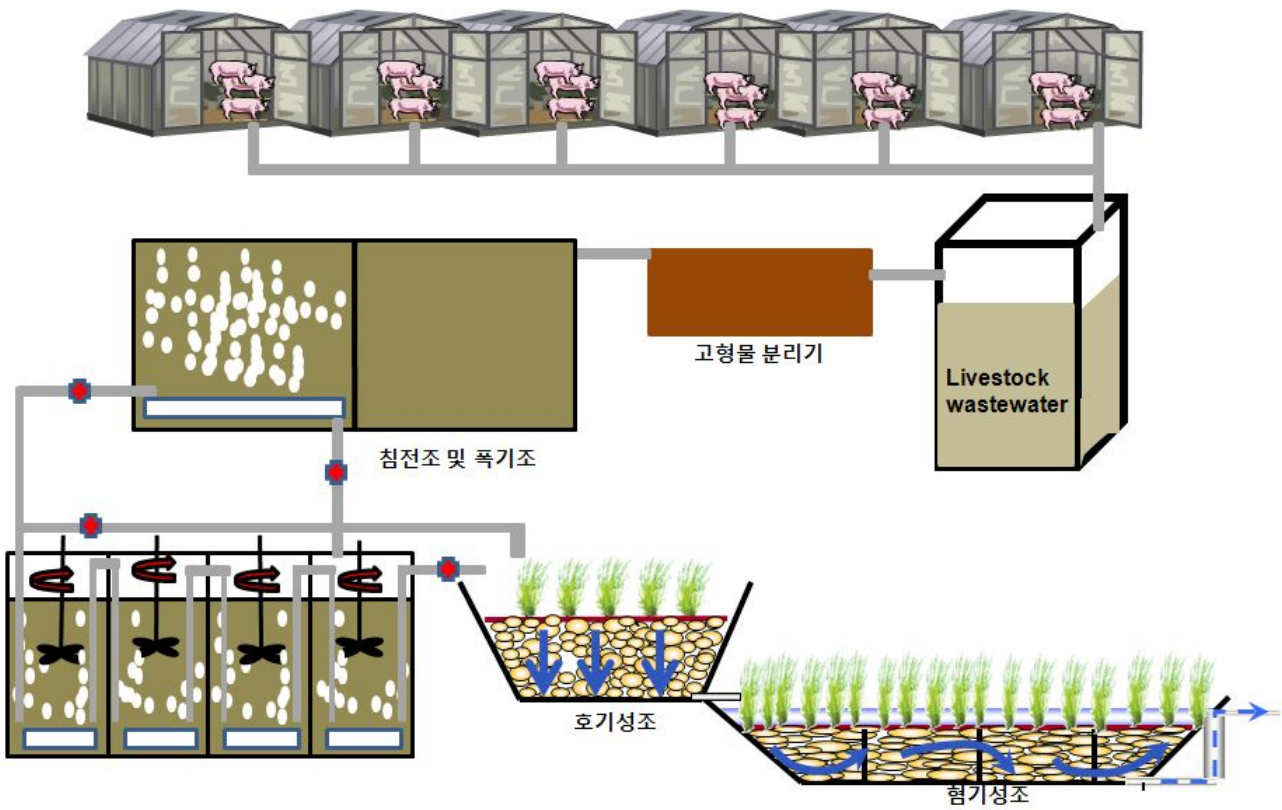
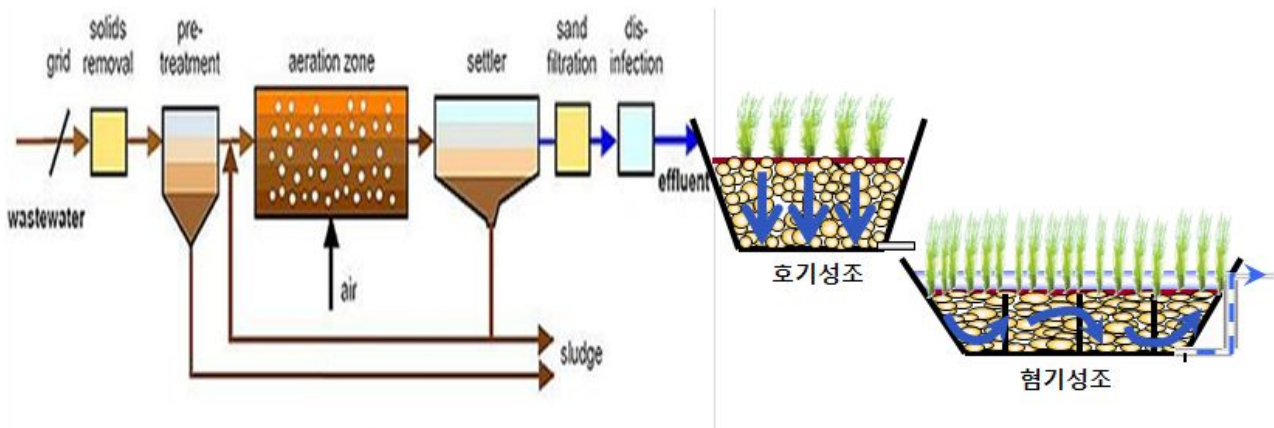


Fig. 3-219. 자연정화공법에 의한 공장형 축산폐수처리장 모델.

공동이용형 축산폐수 처리장은 축산농가에서 배출되는 축산폐수의 농도가 농가마다 서로 달라 정확한 농도를 예측하기가 어려우며, 고형물분리 및 축산폐수 배출량과 배출시간이 서로 달라 설계 시공시 상당한 부지면적과 고비용이 소요되므로 본 개발공법을 기존 축산폐수공공처리시설의 후처리 공정으로 도입하여 이들 문제점을 보완하면서 안정적인 축산폐수처리가 가능한 모델을 Fig. 3-220과 같이 제시할 수 있다.





기계식 축산폐수처리시설

Fig. 3-220. 자연정화공법에 의한 공동이용형 축산폐수처리장 모델.

나. 자원순환형 수생식물 퇴비화기술 실용화

1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산

가) 수생식물별 연간 퇴비 생산량

우리나라에서 재활용을 위해 매년 절취되는 수생식물의 생산량을 파악하기에는 무리가 있기 때문에 본 연구에서는 공시 재료를 채취한 전남 보성군 복내면 복내 바이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄의 연간 생산량을 조사하였다. 복내 바이오파크 인공습지에서 2011년 8월 기준으로 조사된 식물체의 면적은 Table 3-133과 같다.

자원순환형 축산폐수 처리장 퇴비화조에서 조사된 수생식물별 연간 퇴비 생산량은 Table 3-133에서 보는 바와 같다. 갈대, 부들 및 줄의 퇴비화시 평균 무게 감소율은 각각 28, 30 및 33%로 조사되었고, 수생식물별 단위면적당 ( $m^2$ ) 퇴비 생산량은 갈대가  $1.908 \text{ kg m}^{-2}$ , 부들이  $4.711 \text{ kg m}^{-2}$  및 줄이  $2.450 \text{ kg m}^{-2}$ 이었다. 식물체 면적과 단위면적당 ( $m^2$ ) 퇴비 생산량을 대상으로 복내 바이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄의 연간 퇴비 생산량은 각각 3,854, 11,693 및  $2,940 \text{ kg year}^{-1}$ 으로 조사되었다.

Table 3-133. 수생식물별 연간 퇴비 생산량

Aquatic plants	건물 biomass	식물체 면적	퇴비 생산량	
	( $\text{kg m}^{-2}$ )		( $\text{kg m}^{-2}$ )	( $\text{kg year}^{-1}$ )
<i>Phragmites communis</i>	2.65	2,020	1.908	3,854
<i>Typha orientalis</i>	6.73	2,482	4.711	11,693
<i>Zizania latifolia</i>	3.66	1,200	2.450	2,940

나) 퇴비 시제품의 품질조사

수생식물별 퇴비 시제품의 특성은 Table 3-134에서 보는 바와 같다. 유기물의 함량은 갈대, 부들 및 줄이 74.6~86.9%로 부들의 유기물함량이 가장 높았으며, T-N의 함량은 갈대, 부들 및 줄이 각각 2.41, 2.13 및 1.89%로 조사되었다. T-P의 함량은 식물체 종류에 상관없이 4,512~4,736 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사되었으며, K, Ca 및 Mg의 함량도 T-P의 함량과 비슷한 경향으로 식물체별 큰 차이 없이 조사되었다.

미량원소의 경우 갈대, 부들 및 줄의 Al 함량은 각각 1,571~1,762 mg kg<sup>-1</sup> 범위로 비슷하였으며, 수생식물별 Fe의 함량은 식물체 종류에 상관없이 1,626~1,754 mg kg<sup>-1</sup>으로 큰 차이 없이 조사되었다. Mn의 함량은 갈대가 326 mg kg<sup>-1</sup>, 부들이 716 mg kg<sup>-1</sup> 및 줄이 642 mg kg<sup>-1</sup> 이었고, Mo의 함량은 갈대, 부들 및 줄에서 검출되지 않았다.

중금속 중 As, Cd 및 Hg의 함량은 갈대, 부들 및 줄에서 검출되지 않았으며, Cr, Ni 및 Pb는 낮은 함량을 보였다. 갈대, 부들 및 줄의 Zn 함량은 각각 186.6, 202.6 및 141.8 mg kg<sup>-1</sup>이었다.

Table 3-134. 수생식물별 퇴비 시제품 특성

Aquatic plants	O.M	T-N	T-P	K	Ca	Mg
	--- (%)	---	-----	(mg kg <sup>-1</sup> ) -----		
<i>Phragmites communis</i>	74.6	2.41	4,512	4,154	3,913	1,366
<i>Typha orientalis</i>	86.9	2.13	4,736	4,287	4,156	1,334
<i>Zizania latifolia</i>	77.9	1.89	4,717	4,357	3,997	1,418

Aquatic plants	Al	Fe	Mn	Mo
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----			
<i>Phragmites communis</i>	1,736	1,685	326	ND
<i>Typha orientalis</i>	1,571	1,626	716	ND
<i>Zizania latifolia</i>	1,762	1,754	642	ND

Aquatic plants	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----							
<i>Phragmites communis</i>	ND	ND	4.18	54.69	ND	1.05	0.24	186.6
<i>Typha orientalis</i>	ND	ND	2.12	52.34	ND	2.06	0.63	202.6
<i>Zizania latifolia</i>	ND	ND	6.97	47.15	ND	1.48	0.41	141.8

## 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정

### 가) 농촌진흥청 퇴비규격에 따른 퇴비 품질검정

우리나라의 퇴비 부산물 비료 공정규격 및 수생식물별 부들+돈분 퇴비를 비교한 결과는 Table 3-135에서 보는 바와 같다. 유기물함량의 기준은 25% 이상으로 갈대, 부들 및 줄의 유기물함량이 각각 74.6, 86.9 및 77.9%로 퇴비 기준에 만족하였다. C/N비의 기준은 50 이하로 갈대, 부들 및 줄의 C/N비는 18.0~23.9로 기준에 적합하였고, 염분 및 수분함량 역시 퇴비 기준에 적합하였다. 갈대, 부들 및 줄의 중금속 함량은 퇴비 기준에 적합하게 조사되어 본 실험에서 제조한 수생식물별 부들+돈분 퇴비는 비료 공정규격에 모두 포함된 함량으로 조사되었다.

Table 3-135. 우리나라의 퇴비 부산물 비료 공정규격과 수생식물 퇴비의 비교

항 목	일반퇴비 기준	갈대	부들	줄
유기물 함량	% 25 이상	74.6	86.9	77.9
C/N비	50 이하	18.0	23.7	23.9
염분	% 2.0 이하	0.1 <	0.1 <	0.1 <
수분함량	55 이하	53.2	49.4	51.2
As	111 이하	ND	ND	ND
Cd	11 이하	ND	ND	ND
Cr	667 이하	4.18	2.12	6.97
Cu	667 이하	54.69	52.34	47.15
Hg	4 이하	ND	ND	ND
Ni	111 이하	1.05	2.06	1.48
Pb	333 이하	0.24	0.63	0.41
Zn	2000 이하	186.6	202.6	141.8

### 나) 수생식물별 품질검정 및 주성분 함량보정

수생식물별 주성분의 함량을 조사한 결과 갈대, 부들 및 줄의 T-N 함량은 각각 2.41, 2.13 및 1.89%이었고, T-P의 함량은 각각 4,512, 4,736 및 4,717 mg kg<sup>-1</sup>이었다. K의 함량은 갈대가 4,154 mg kg<sup>-1</sup>, 부들이 4,287 mg kg<sup>-1</sup> 및 줄이 4,357 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사되었다. 본 연구에서 조사된 수생식물 퇴비는 비료공정규격의 주성분 함량 기준에 적합하였다.

## 3) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험

### 가) 수생식물 퇴비를 이용한 포트 재배시험

#### (1) 토양의 이화학적 특성

##### (가) 작물 및 퇴비 종류별 토양의 이화학적 특성

##### ① 배추

포트 재배시험 중 배추 수확기에 퇴비 종류별 시용에 따른 토양의 이화학적 특성을 조사한

결과는 Table 3-136과 같다. BA 처리구에서 pH 및 EC의 함량을 제외한 T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, O.M, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg, Na 및 CEC의 함량에서 다른 처리구보다 전반적으로 높게 나타났다.

퇴비 종류별 사용에 따른 수확기 배추 토양의 pH는 처리구에 상관없이 6.63~7.28 범위로 큰 차이 없이 조사되었으며, 대부분 중성을 나타내었다. 수확기 배추 토양에서 조사된 EC의 평균은 약 0.96 dS m<sup>-1</sup>이었으며, BA 및 BC 처리구의 EC는 각각 1.19 및 1.36 dS m<sup>-1</sup>으로 평균 EC에 비해 높았다. O.M의 함량은 부들+돈분 퇴비 + NPK를 사용한 BA 처리구에서 2.21%로 가장 높게 조사되었고, BN 처리구에서 1.78%로 가장 낮았다. 나머지 처리구에서 O.M의 함량은 1.82~2.12%로 큰 차이 없다.

T-N의 함량은 O.M의 함량과 유사한 경향으로 BA 처리구에서 0.159%로 가장 높았으며, BN 처리구에서 가장 낮았다. Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량은 BA ≥ BC ≍ BB ≍ BD ≥ BF ≍ BE ≍ BG ≥ BN 처리구 순으로 부들+돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 가장 높았다. SiO<sub>2</sub>의 함량의 경우는 BA 처리구의 함량이 350 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 수생식물인 BB 처리구의 함량이 251 mg kg<sup>-1</sup>으로 다른 수생식물인 BC, BD, BE 및 BF 처리구의 함량보다 낮았다.

양이온인 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 전반적으로 부들+돈분 퇴비를 사용한 BA 처리구 토양에서 전반적으로 많은 함량을 보였지만, 처리구간 큰 차이는 없었다.

Table 3-136. 퇴비 종류별 수확기 배추 토양의 이화학적 특성 (9월 16일)

처리구	pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M ----- (%) -----	T-N -----	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----	SiO <sub>2</sub> -----
BN <sup>†</sup>	7.02	0.92	1.78	0.122	120	297
BA	6.72	1.19	2.21	0.159	172	350
BB	7.28	0.94	1.92	0.138	142	251
BC	7.16	1.36	2.02	0.142	148	331
BD	6.82	0.72	1.82	0.144	140	329
BE	6.97	0.92	2.12	0.125	131	322
BF	7.16	0.82	2.01	0.135	132	315
BG	6.63	0.82	1.98	0.125	129	302

처리구	K	Ca	Mg ----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----	Na	CEC
BN <sup>†</sup>	8.16	56.20	15.81	5.72	91.52
BA	14.59	73.02	24.13	6.81	112.60
BB	12.82	60.51	18.20	6.02	95.81
BC	13.19	57.52	20.53	6.25	99.65
BD	12.55	61.51	19.52	6.22	100.20
BE	11.56	58.17	19.20	5.92	95.65
BF	9.63	57.16	18.17	6.00	86.69
BG	8.52	55.55	17.96	5.82	92.20

(<sup>†</sup>: N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G, NPK)

② 상추

포트 재배시험 중 퇴비 종류별 시용에 따른 수확기 상추 토양의 이화학적 특성을 조사한 결과는 Table 3-137에서 보는 바와 같다. 상추 수확기에 퇴비 종류별 시용에 따른 토양의 pH는 6.52~7.19의 범위로 평균 6.90이었으며, 퇴비를 시용한 대부분의 토양에서 중성을 나타내었다. EC의 경우 SC 처리구에서 1.39 dS m<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, 수생식물을 혼합한 혼합퇴비가 0.60 dS m<sup>-1</sup>으로 가장 낮았다. O.M의 함량은 SE가 2.24%로 가장 많은 유기물함량을 보였고, SD 처리구의 토양에서 O.M의 함량이 1.75%로 가장 낮은 함량을 나타내었다.

T-N의 함량은 0.115~0.161% 범위로 큰 차이 없이 비슷하였고, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량은 T-N의 함량과 유사한 경향으로 SA 처리구에서 160 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았으며, SF 처리구에서 108 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 낮은 함량을 나타내었다. SiO<sub>2</sub>의 함량 SD 처리구에서 398 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, SB 처리구에서 SiO<sub>2</sub>의 함량이 278 mg kg<sup>-1</sup>으로 다른 수생식물 퇴비의 함량보다 낮았다.

수확기 상추 토양내 K의 함량은 SC > SE > SD > SB > SA ≍ SN > SG > SF 처리구의 순으로 높았으며, Mg 및 Na의 함량은 처리구간에 따른 차이는 있지만 전반적으로 부들+돈분 퇴비를 시용한 SA 처리구에서 Mg 및 Na의 함량이 높은 경향을 보였다.

Table 3-137. 퇴비 종류별 수확기 상추 토양의 이화학적 특성 (9월 16일)

처리구	pH	EC	O.M	T-N	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS m <sup>-1</sup> )	----- (%) -----	-----	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----	-----
SN <sup>†</sup>	6.98	0.84	1.96	0.142	152	325
SA	6.84	1.07	2.17	0.161	160	337
SB	7.19	0.88	1.98	0.147	138	278
SC	7.10	1.39	1.84	0.136	128	311
SD	6.99	0.65	1.75	0.145	126	398
SE	6.85	1.01	2.24	0.115	125	334
SF	6.71	0.60	1.96	0.115	108	329
SG	6.52	0.72	1.96	0.142	125	356

처리구	K	Ca	Mg	Na	CEC
	----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----				
SN <sup>†</sup>	10.25	69.00	20.03	6.26	103.19
SA	10.56	68.00	22.41	6.66	106.11
SB	11.25	59.50	19.15	5.83	93.78
SC	13.64	59.33	19.62	6.00	96.57
SD	12.19	62.66	19.73	5.81	99.00
SE	12.88	63.33	19.62	6.03	100.28
SF	6.31	60.16	16.61	5.63	87.09
SG	7.21	66.83	19.35	6.14	97.89

(<sup>†</sup>: N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G, NPK)

③ 무

포트 재배시험에서 무 수확기에 퇴비 종류별 토양의 이화학적 특성을 조사한 결과는 Table 3-138과 같이 NA 처리구에서 T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, O.M, SiO<sub>2</sub>, K, Ca, Mg 및 Na의 함량이 다른 처리구에 비해 전반적으로 높았다.

퇴비 종류별 시용에 따른 수확기 무 토양의 pH는 6.52~7.10의 범위이었고, EC의 경우는 평균 약 0.94 dS m<sup>-1</sup>로 처리구별 큰 차이 없이 조사되었다.

O.M의 함량은 부들+돈분 퇴비를 시용한 NA 처리구가 2.38%로 가장 많은 유기물함량을 보였고, control인 NN 처리구의 토양에서 O.M의 함량이 1.76%로 가장 낮은 함량을 나타내었다.

T-N의 함량은 0.110~0.187% 범위로 NA > NB > ND ≒ NC > NE > NF ≒ NG ≒ NN 순으로 높았으며, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량도 T-N의 함량과 비슷하게 NA의 함량이 170 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았으며, NN 처리구의 함량이 123 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 낮은 함량을 나타내었다.

SiO<sub>2</sub>의 함량은 NA 처리구의 함량이 362 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, N, P 및 K만 시용한 NG 처리구의 함량이 302 mg kg<sup>-1</sup>로 다른 처리구의 SiO<sub>2</sub> 함량에 비해 낮았다.

양이온인 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 전반적으로 부들+돈분 퇴비를 시용한 토양인 NA 처리구에서 전반적으로 가장 많은 함량을 보였지만, 처리구별 큰 차이는 없었다.

Table 3-138. 퇴비 종류별 수확기 무 토양의 이화학적 특성 (9월 16일)

처리구	pH	EC	O.M	T-N	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS m <sup>-1</sup> )	----- (%) -----	-----	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----	-----
NN <sup>†</sup>	6.58	0.83	1.76	0.110	123	300
NA	6.73	1.16	2.38	0.187	170	362
NB	7.10	0.90	2.05	0.150	140	323
NC	6.96	1.27	1.87	0.139	138	313
ND	6.75	0.83	1.95	0.142	142	329
NE	6.87	0.92	2.15	0.126	131	313
NF	6.66	0.79	1.82	0.115	133	307
NG	6.52	0.80	1.81	0.112	129	302

처리구	K	Ca	Mg	Na	CEC
	----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----				
NN <sup>†</sup>	7.57	56.39	16.20	5.91	91.52
NA	13.19	70.17	22.98	6.80	110.20
NB	12.46	63.62	19.20	6.19	99.15
NC	12.00	60.19	21.20	6.35	100.25
ND	12.09	61.79	19.82	6.40	97.20
NE	11.82	59.65	17.17	6.10	95.17
NF	11.59	60.19	18.57	5.95	96.54
NG	8.20	58.95	18.17	6.10	100.65

(<sup>†</sup>: N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 +

NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G, NPK)

(나) 수생식물+돈분 퇴비 시용량별 토양의 이화학적 특성

① 배추

포트 재배시험에서 부들+돈분 퇴비 시용량에 따른 수확기 배추 토양의 이화학적 특성을 조사한 결과는 Table 3-139와 같이 pH는 처리구에 상관없이 6.62~7.25 범위로 평균 6.86이었다. EC는 BA 15, 30 및 45 처리구에서 각각 1.26, 1.19 및 1.33 dS m<sup>-1</sup>이었으며, O.M의 함량은 BA 45 처리구에서 2.40%로 가장 높았다. T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub>의 함량은 O.M의 함량과 비슷한 경향으로 BA 45 ≥ BA 30 ≥ BA 15 순으로 높았다. CEC의 함량은 BA 15, 30 및 45 처리구에서 각각 100.2, 112.6 및 120.2 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 부들+돈분 퇴비를 45 g 시용한 처리구에서 가장 높은 함량을 나타내었다.

Table 3-139. 부들+돈분 퇴비 시용량별 수확기 배추 토양의 이화학적 특성 (9월 16일)

처리구	pH	EC	O.M	T-N	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS m <sup>-1</sup> )	----- (%) -----	-----	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----	-----
BA 15 <sup>†</sup>	6.62	1.26	1.92	0.142	137	321
BA 30	6.72	1.19	2.21	0.159	172	350
BA 45	7.25	1.33	2.40	0.166	190	362

처리구	K	Ca	Mg	Na	CEC
	----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----				
BA 15 <sup>†</sup>	9.55	62.85	20.20	6.05	100.2
BA 30	14.59	73.02	24.13	6.81	112.6
BA 45	15.20	77.20	25.17	6.92	120.2

(<sup>†</sup>: BA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; BA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; BA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

② 상추

포트 재배시험에서 부들+돈분 퇴비 시용량에 따른 수확기 상추 토양의 이화학적 특성을 나타낸 결과는 Table 3-140과 같다. 수확기 상추 토양내 pH는 처리구에 상관없이 6.84~7.08 범위로 중성이었으며, EC는 SA 15, 30 및 45 g 시용시 각각 1.67, 1.07 및 1.28 dS m<sup>-1</sup>이었다. O.M의 함량은 1.92~2.17% 범위로 큰 차이 없이 조사되었다. SA 30 처리구에서 T-N의 함량은 0.161%로 SA 15 및 45 처리구에 비해 약간 높았다. Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub>의 함량은 SA 45 > SA 30 > SA 15 순으로 높았다. K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 전반적으로 SA 30 처리구에서 SA 15 및 45 처리구에 비해 높게 조사되었다.

Table 3-140. 부들+돈분 퇴비 시용량별 수확기 상추 토양의 이화학적 특성 (9월 16일)

처리구	pH	EC	O.M	T-N	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS m <sup>-1</sup> )	----- (%) -----	-----	---- (mg kg <sup>-1</sup> ) ----	----
SA 15 <sup>†</sup>	6.98	1.67	1.92	0.149	148	399
SA 30	6.84	1.07	2.17	0.161	160	337
SA 45	7.08	1.28	2.00	0.147	186	423

처리구	K	Ca	Mg	Na	CEC
	----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----				
SA 15 <sup>†</sup>	6.71	72.66	21.15	6.34	104.86
SA 30	10.56	68.00	22.41	6.66	106.11
SA 45	9.53	66.00	19.95	6.12	99.50

(<sup>†</sup>: SA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; SA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; SA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

③ 무

무의 포트 재배시험에서 부들+돈분 퇴비 시용량별 토양의 이화학적 특성을 나타낸 결과는 Table 3-141에서 보는 바와 같다. pH는 6.73~6.96 범위로 평균 6.83이었으며, EC는 NA 15, 30 및 45 처리구에서 각각 0.93, 1.16 및 0.94 dS m<sup>-1</sup>이었다. O.M의 함량은 NA 45 처리구에서 2.42%로 가장 많았으며, 부들+돈분 퇴비 시용량이 많을수록 유기물의 함량이 높은 경향이었다. 또한 T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub>의 함량도 부들+돈분 퇴비 시용량이 많을수록 높은 경향이었다. CEC는 NA 15, 30 및 45 처리구에서 각각 99.53, 110.20 및 115.17 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 부들+돈분 퇴비의 시용량이 많아질수록 토양의 이화학적 성분의 함량이 높아졌다.

Table 3-141. 부들+돈분 퇴비 시용량별 수확기 무 토양의 이화학적 특성 (9월 16일)

처리구	pH	EC	O.M	T-N	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
	(1:5H <sub>2</sub> O)	(dS m <sup>-1</sup> )	----- (%) -----	-----	---- (mg kg <sup>-1</sup> ) ----	----
NA 15 <sup>†</sup>	6.96	0.93	1.86	.0130	139	320
NA 30	6.73	1.16	2.38	0.187	170	362
NA 45	6.82	0.94	2.42	0.195	175	375

처리구	K	Ca	Mg	Na	CEC
	----- (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----				
NA 15 <sup>†</sup>	9.56	66.56	19.20	6.25	99.53
NA 30	13.19	70.17	22.98	6.80	110.20
NA 45	15.16	71.20	24.20	6.92	115.17

(<sup>†</sup>: NA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; NA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; NA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)



## (2) 식물체 무기성분 함량 변화

### (가) 작물 및 퇴비 종류별 식물체 무기성분 함량 변화

#### ① 배추

포트 재배시험 중 배추 수확기에 시기별 및 퇴비 종류별 식물체의 무기성분 함량을 나타낸 결과는 Fig. 3-221과 같다. 각각의 퇴비 처리구 중 BA 처리구가 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO의 함량에서 다른 퇴비 처리구에 비해 전반적으로 높게 조사되었으며, 시간이 지남에 따라 모든 처리구에서 무기성분의 함량이 증가하였다. 배추 수확기에 퇴비 종류별 식물체의 T-N 함량은 퇴비 처리구별로 대부분 큰 차이를 보이지 않았으나 BA와 BG 처리구가 각각 평균 1.07% 및 1.15%로 처리구들 중에서 높은 함량을 나타내었다. T-P 함량도 역시 퇴비 처리구별로 큰 차이를 보이지 않았으나 BA, BB 및 BG 처리구가 각각 평균 0.314%, 0.312% 및 0.310%로 퇴비 처리구들 중에서 높은 함량을 나타내었다. K<sub>2</sub>O 함량은 시기가 지남에 따라 약간 증가하였고 BA (0.85%)와 BG (0.82%) 처리구가 다른 처리구에 비해 함량이 높았다. CaO 함량은 시기별로 차이가 컸으며, 특히 BF와 BG 처리구에서는 시기간 함량의 격차가 약 0.25% 이상이었다. 퇴비처리구별로는 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 함량을 나타냈다. MgO 함량은 시기별로 함량의 격차가 매우 컸으나 함량이 매우 작기 때문에 양적인 측면에서는 큰 차이를 나타내진 않았다. 퇴비 처리구별로는 BA, BB, BD 및 BG 처리구가 평균 0.005%로 가장 높은 함량을 나타내었다.

#### ② 상추

포트 재배시험 중 상추 수확기에 퇴비종류별 식물체의 무기성분 함량을 나타낸 결과는 Fig. 3-222와 같다. 각각의 퇴비 처리구들 중 SG 처리구가 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO의 함량에서 다른 퇴비들보다 전반적으로 높게 나타났지만 함량의 격차는 매우 적었다. 상추 수확기에 퇴비종류별 식물체의 T-N, T-P 및 K<sub>2</sub>O 함량은 시기별로 큰 차이가 나지 않았으며 퇴비 처리구간에도 함량이 매우 비슷하였다. CaO 함량도 시기별로 큰 차이가 나지 않았으며 퇴비 처리구간에는 SG (0.123%) ≍ SD (0.119%) ≍ SA (0.117%) ≍ SC (0.116%) ≍ SB (0.110%) ≍ SF (0.106%) ≍ SE (0.106%) ≍ SN (0.092%) 순이었다. MgO 함량은 시기별로 함량의 격차가 매우 컸으며, 처리구 별로는 SG와 SD 처리구가 각각 평균 0.030% 및 0.027%로 다른 퇴비 처리구들에 비해 높은 함량을 나타내었다.

#### ③ 무

포트 재배시험 중 무 수확기에 시기별 및 퇴비종류별 식물체의 무기성분 함량을 나타낸 결과는 Fig. 3-223과 같다. 각각의 퇴비 처리구들 중 NG 처리구가 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO의 함량에서 다른 퇴비들보다 전반적으로 높게 나타났으며, 시간이 지남에 따라 모든 처리구에서 무기성분의 함량이 증가하였다. 무 수확기에 시기별 및 퇴비종류별 식물체의 T-N 함량은 대부분 큰 차이를 보이지 않았으나 NA와 NG 처리구가 각각 평균 0.62% 및 0.63%로

처리구들 중에서 높은 함량을 나타내었다. T-P 함량도 역시 시기별 및 처리구별로 큰 차이를 보이지 않았으나 NA 및 NG 처리구가 각각 평균 0.17% 및 0.18%로 퇴비 처리구들 중에서 높은 함량을 나타내었다. K<sub>2</sub>O 함량은 시기가 지남에 따라 약간 증가하였고 NA (0.416%)와 NG (0.421%) 처리구가 다른 처리구에 비해 함량이 높았다. CaO 함량은 시기별 차이가 모든 처리구에서 비슷하였으며 퇴비처리구별로도 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 함량을 나타냈다. MgO 함량은 시기별로 함량의 격차가 매우 컸으나 함량이 매우 작았기 때문에 양적인 측면에서 차이는 미미하였다. 퇴비 처리구별로는 NG (0.027) ≧ NA (0.025) ≧ NB (0.023) ≧ NC (0.023) ≧ ND (0.021) ≧ NE (0.019) ≧ NF (0.019) ≧ NN (0.017) 순으로 함량을 나타냈다.

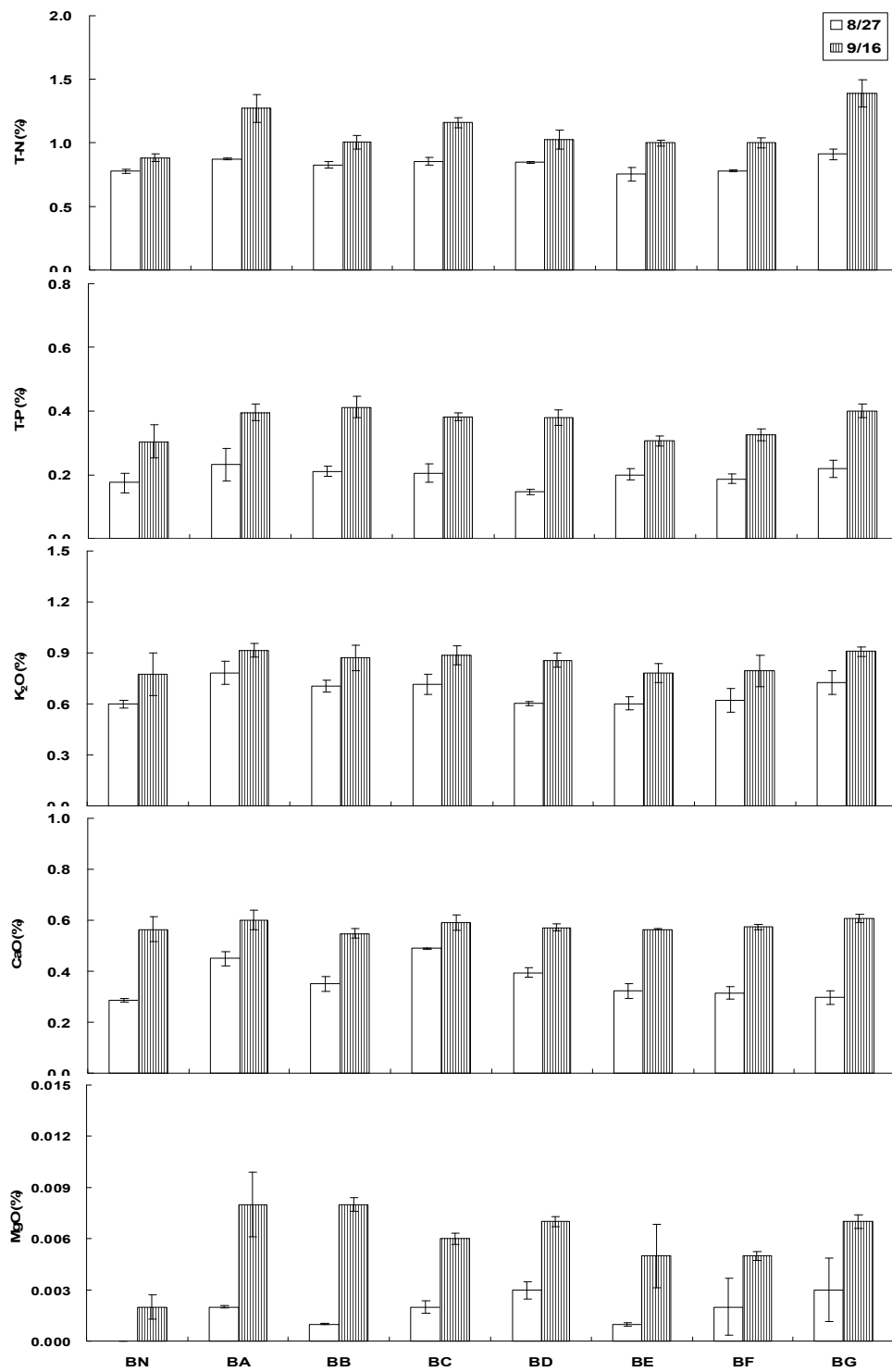


Fig. 221. 퇴비 종류별 시용에 따른 배추의 무기성분 함량 변화. (N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G: NPK)

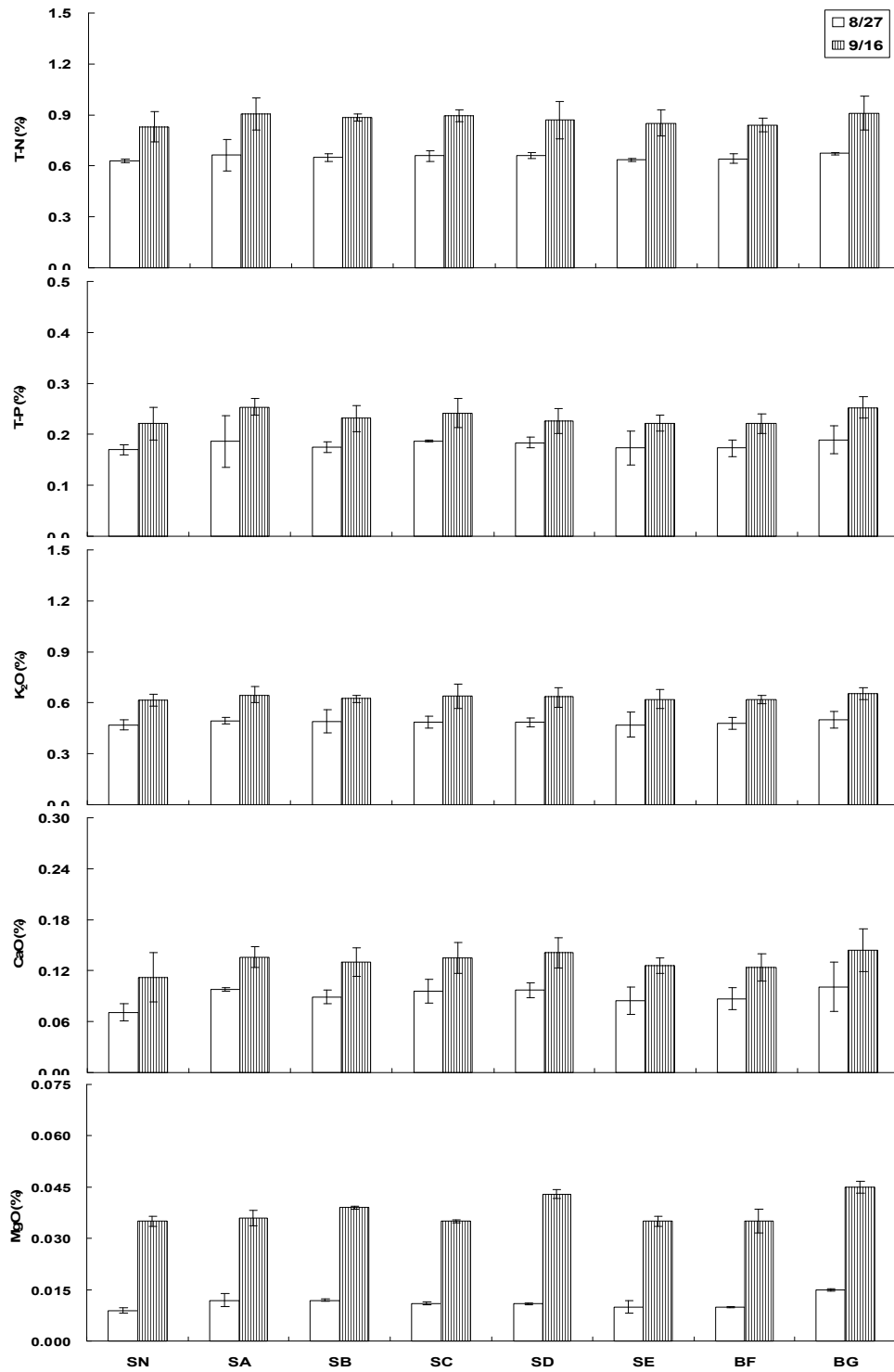


Fig. 3-222. 퇴비 종류별 시용에 따른 상추의 무기성분 함량 변화. (N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G: NPK)

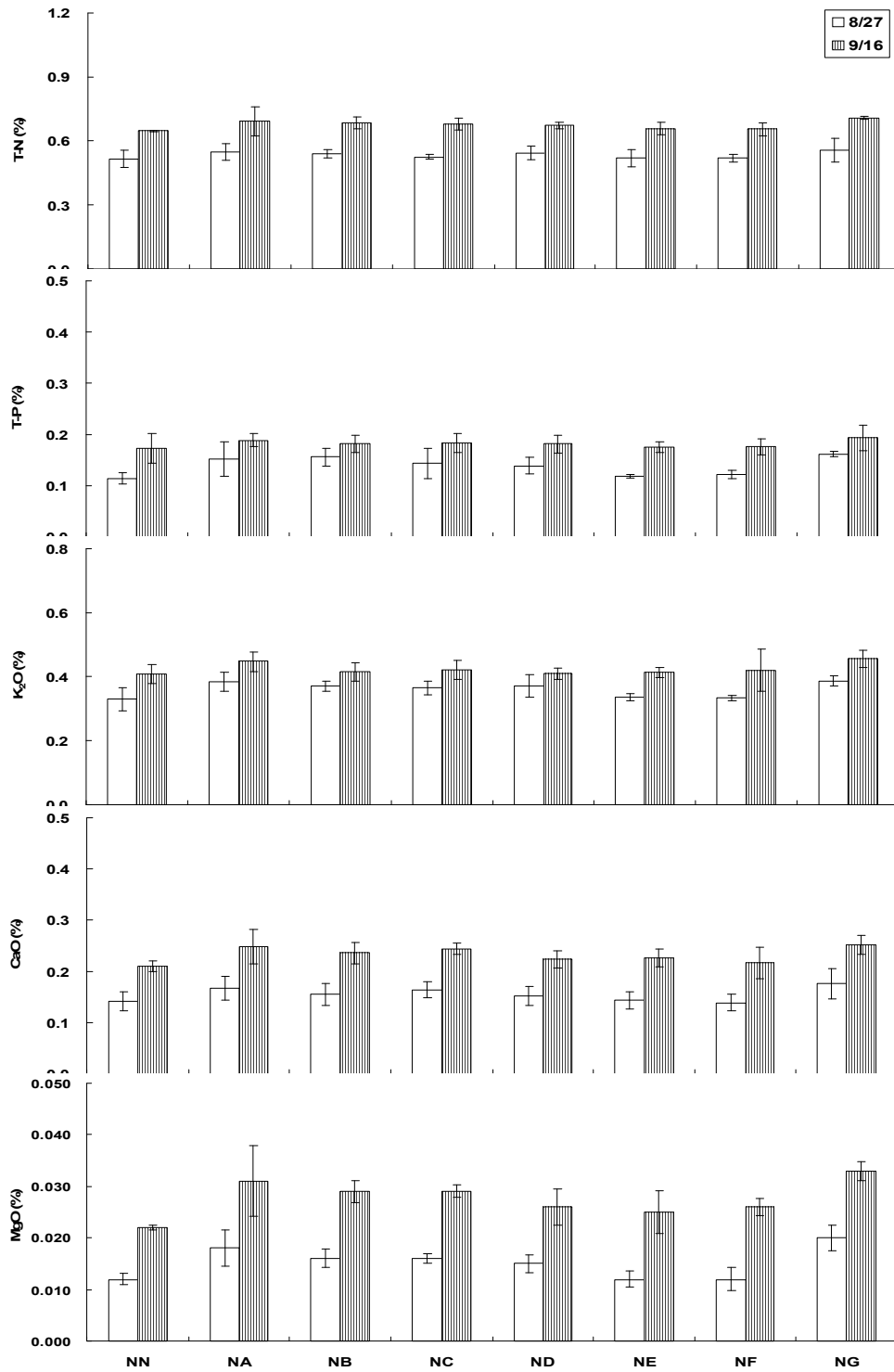


Fig. 3-223. 퇴비 종류별 시용에 따른 무의 무기성분 함량 변화. (N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G: NPK)

## (나) 부들+돈분 퇴비 시용량별 식물체 무기성분 함량 변화

### ① 배추

포트 재배시험 중 8월 27일과 9월 16일에 각각 조사된 배추 수확기에 부들+돈분 퇴비 시용량별 배추의 무기성분 함량을 나타낸 결과는 Fig. 3-224와 같다. BA 15, BA 30 및 BA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 T-N 함량은 각각 0.872, 0.875 및 0.881%이었고, 9월 16일에 조사된 T-N 함량은 각각 1.208, 1.272 및 1.313%이었다. BA 45 처리구에서 평균 1.097%로 가장 많은 함량을 나타냈으며, 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 T-N 함량도 증가하는 경향이 있었다. BA 15, BA 30 및 BA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 T-P 함량은 각각 0.235, 0.232 및 0.221%이었고, 9월 16일에 조사된 T-P 함량은 각각 0.391, 0.396 및 0.409%이었다. 전반적으로 처리구별 함량 차이가 적었으며, 8월 27일에 조사된 T-P 함량에서는 부들+돈분 퇴비 시용량에 따른 함량 변화의 유의성도 없었다. BA 15, BA 30 및 BA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 0.719, 0.781 및 0.775%이었고, 9월 16일에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 0.911, 0.915 및 0.908%이었다. 전반적으로 BA 30 처리구에서 함량이 가장 높았으며, 부들+돈분 퇴비 시용량에 따른 함량 변화의 유의성도 없었다. BA 15, BA 30 및 BA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 CaO 함량은 각각 0.442, 0.449 및 0.501%이었고, 9월 16일에 조사된 CaO 함량은 각각 0.588, 0.601 및 0.602%이었다. 전반적으로 처리구별 함량 차이가 적었으며, 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 CaO 함량도 증가하였으나 큰 폭으로 증가하지는 않았다. BA 15, BA 30 및 BA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 MgO 함량은 각각 0.001, 0.002 및 0.002%이었고, 9월 16일에 조사된 MgO 함량은 각각 0.008, 0.008 및 0.009%이었다. 전반적으로 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 MgO 함량도 증가하였으나, 식물체 내에 MgO 함량이 전체적으로 매우 작기 때문에 양적인 측면에서는 큰 변화가 없었다.

### ② 상추

포트 재배시험 중 8월 27일과 9월 16일에 각각 조사된 상추 수확기에 부들+돈분 퇴비 시용량별 상추의 무기성분 함량을 나타낸 결과는 Fig. 3-225에서 보는 바와 같다. SA 15, SA 30 및 SA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 T-N 함량은 각각 0.659, 0.664 및 0.666%이었고, 9월 16일에 조사된 T-N 함량은 각각 0.889, 0.905 및 0.931%이었다. SA 45 처리구에서 평균 0.799%로 가장 많은 함량을 나타냈으며 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 T-N 함량도 증가하는 경향이 있었다. SA 15, SA 30 및 SA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 T-P 함량은 각각 0.181, 0.186 및 0.187%이었고, 9월 16일에 조사된 T-P 함량은 각각 0.241, 0.254 및 0.267%이었다. SA 45 처리구에서 평균 0.227%로 가장 많은 함량을 나타냈으며, 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 T-P 함량도 증가하는 경향이 있었지만 처리구간에 함량 격차가 크지는 않았다. SA 15, SA 30 및 SA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 0.495, 0.496 및 0.506%이었고, 9월 16일에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 0.632, 0.647 및 0.679%이었다. SA 45 처리구에서 평균 함량이 0.593%로 가장 높았으며, 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 K<sub>2</sub>O

함량도 증가하였다. SA 15, SA 30 및 SA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 CaO 함량은 각각 0.086, 0.098 및 0.110%이었고, 9월 16에 조사된 CaO 함량은 각각 0.118, 0.136 및 0.157%이었다. SA 45 처리구에서 평균 함량이 0.134%로 가장 높았으며, 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따라 CaO 함량도 증가하였다. SA 15, SA 30 및 SA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 MgO 함량은 각각 0.011, 0.012 및 0.011%이었고, 9월 16에 조사된 MgO 함량은 각각 0.036, 0.036 및 0.039%이었다. 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따른 함량의 유의성이 없었으며, 식물체 내에 MgO 함량이 전체적으로 매우 적었기 때문에 양적인 측면에서는 큰 변화가 없었다.

### ③ 무

포트 재배시험 중 8월 27일과 9월 16일에 각각 조사된 무 수확기에 부들+돈분 퇴비 시용량 별 무의 무기성분 함량을 나타낸 결과는 Fig. 3-226과 같다. NA 15, NA 30 및 NA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 T-N 함량은 각각 0.547, 0.548 및 0.548%이었고, 9월 16에 조사된 T-N 함량은 각각 0.693, 0.692 및 0.701%이었다. 전반적으로 처리구간별로 큰 격차를 보이지 않았고 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따른 함량 변화의 유의성도 나타나지 않았다. NA 15, NA 30 및 NA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 T-P 함량은 각각 0.152, 0.151 및 0.155%이었고, 9월 16에 조사된 T-P 함량은 각각 0.182, 0.189 및 0.191%이었다. NA 45 처리구에서 평균 0.173 %로 가장 많은 함량을 나타냈지만 처리구간별로 큰 격차를 보이지 않았으며 8월 27일에 조사된 T-P 함량에선 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따른 함량 변화의 유의성도 나타나지 않았다. NA 15, NA 30 및 NA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 0.371, 0.384 및 0.376%이었고, 9월 16에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 0.439, 0.447 및 0.448%이었다. 전반적으로 처리구간별로 큰 격차를 보이지 않았으며 8월 27일에 조사된 K<sub>2</sub>O 함량에선 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따른 함량 변화의 유의성도 나타나지 않았다. NA 15, NA 30 및 NA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 CaO 함량은 각각 0.164, 0.167 및 0.167%이었고, 9월 16에 조사된 CaO 함량은 각각 0.247, 0.248 및 0.242%이었다. 전반적으로 처리구간별로 큰 격차를 보이지 않았으며 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따른 함량 변화의 유의성도 나타나지 않았다. NA 15, NA 30 및 NA 45 처리구에서 8월 27일에 조사된 MgO 함량은 각각 0.018, 0.018 및 0.017%이었고, 9월 16에 조사된 MgO 함량은 각각 0.023, 0.025 및 0.024%이었다. 전반적으로 부들+돈분 퇴비 시용량이 증가함에 따른 함량 변화의 유의성이 없었으며 식물체 내에 MgO 함량이 전체적으로 매우 적었기 때문에 양적인 측면에서는 거의 변화가 없었다.

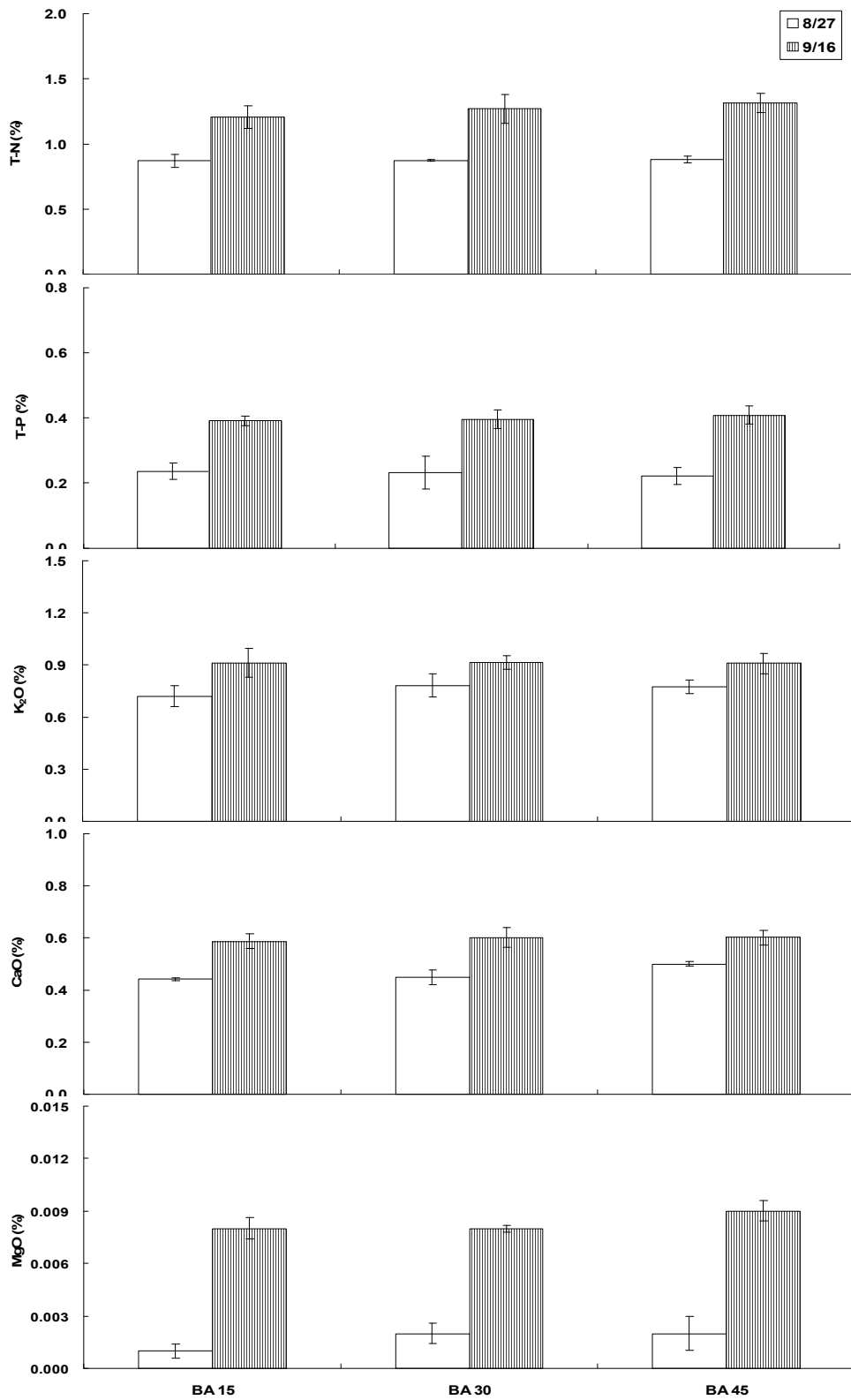


Fig. 3-224. 부들+돈분 퇴비 시용량별 배추의 무기성분 함량 변화. (BA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; BA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; BA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)



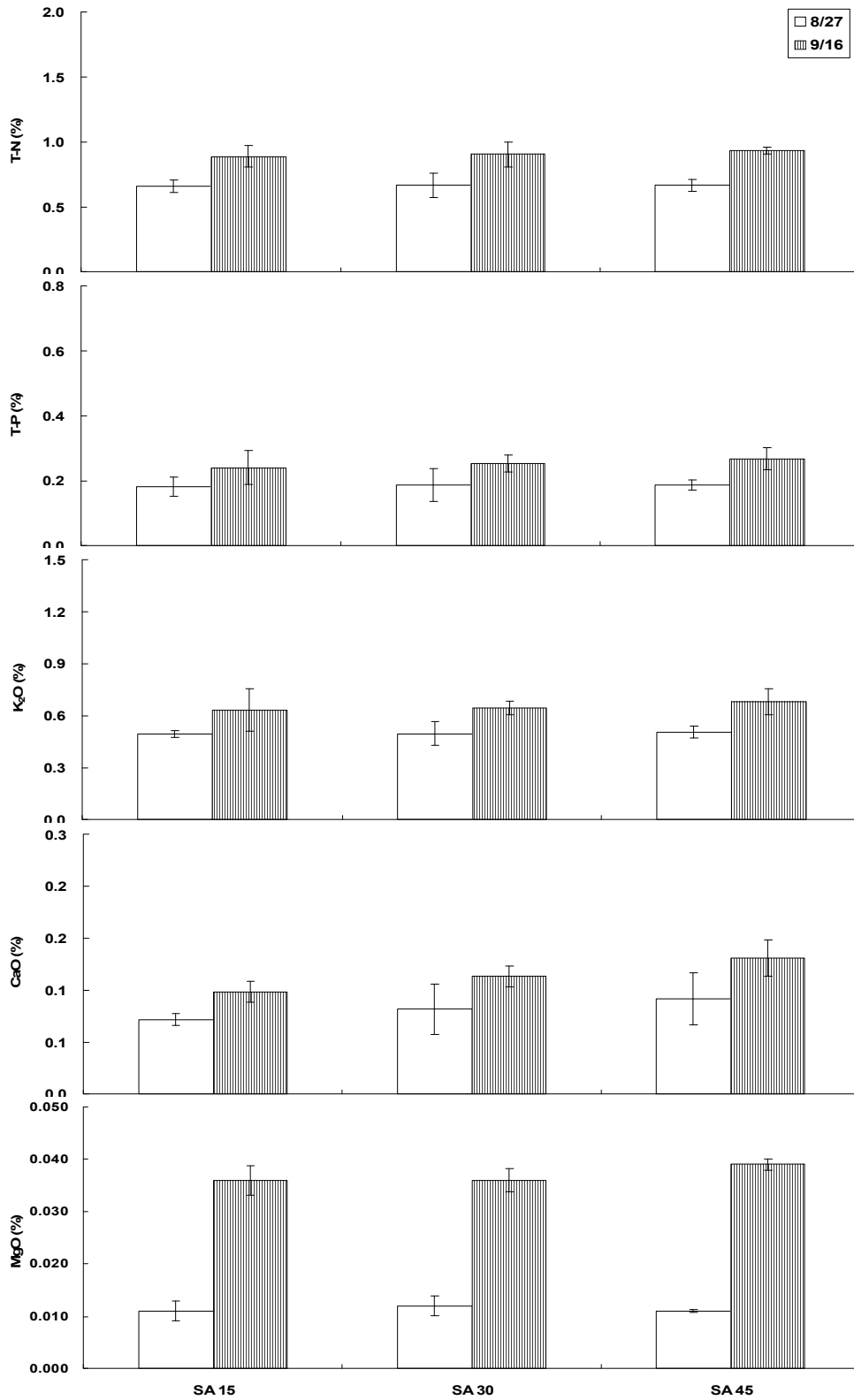


Fig. 3-225. 부들+돈분 퇴비 시용량별 상추의 무기성분 함량 변화. (SA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; SA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; SA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

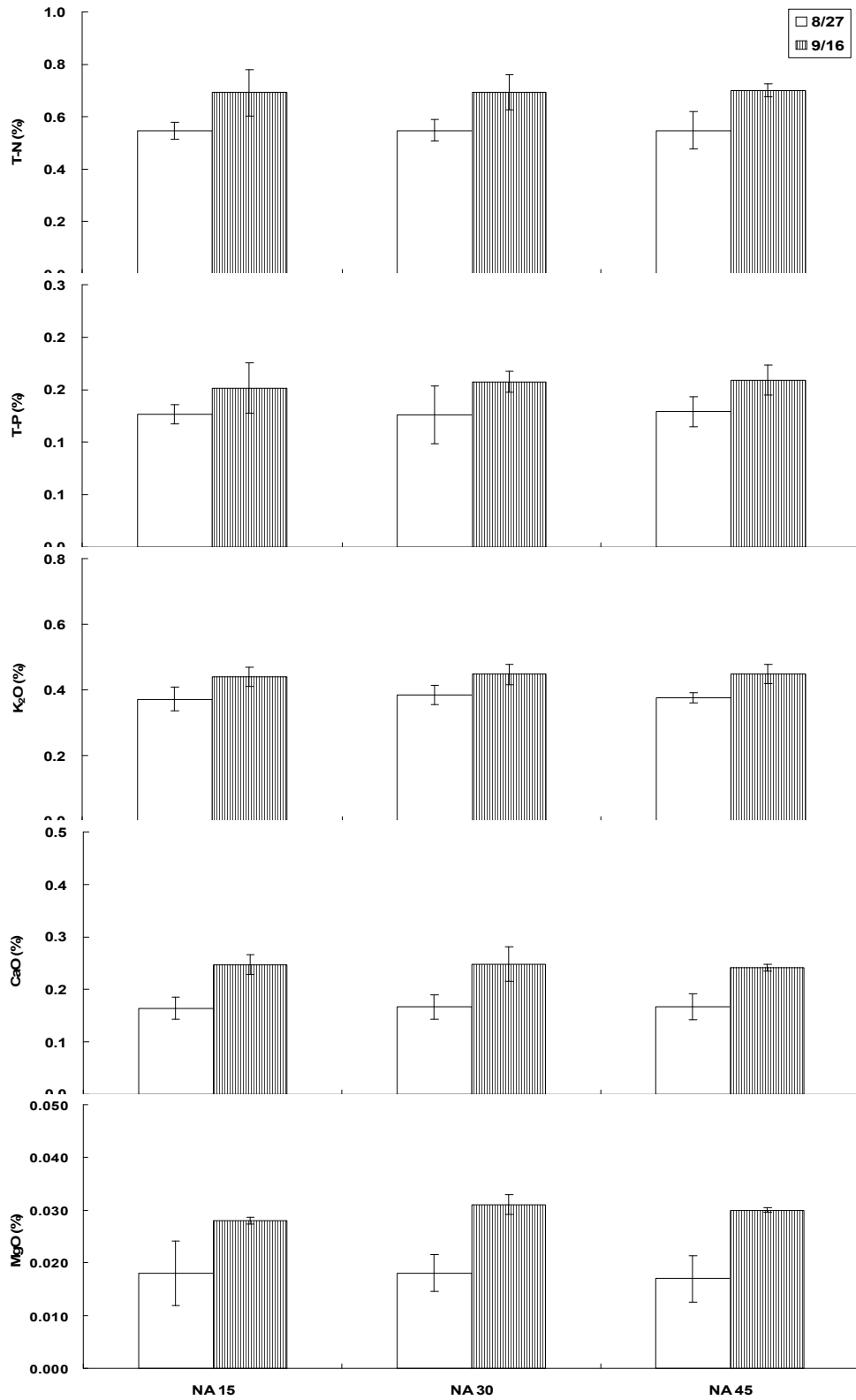


Fig. 3-226. 부들+돈분 퇴비 시용량별 무의 무기성분 함량 변화. (NA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; NA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; NA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

(3) 작물의 생육상황 및 수량

(가) 작물 및 퇴비 종류별 식물체 생육상황

① 배추

포트 재배시험 중 퇴비 종류에 따른 배추의 지상부 길이의 변화를 조사한 결과는 Fig. 3-227과 같다. 배추는 포트에 이식 후 8월 27일부터 빠른 성장을 보이며 9월 16일에 배추 지상부의 길이는 처리구에 상관없이 17.83~28.85 cm로 부들+돈분 퇴비를 사용한 BA 처리구에서 가장 길었다. 높은 생육을 보였다. 부들+돈분 퇴비를 사용한 BA 처리구에서 파종 후 15일 및 35일에 각각 16.0 및 28.9 cm로 수생식물과 혼합식물 퇴비를 사용한 처리구에 비해 가장 높았고, BB, BC 및 BD 처리구가 BE, BF 및 BG 처리구보다 생육이 더 성장했다.

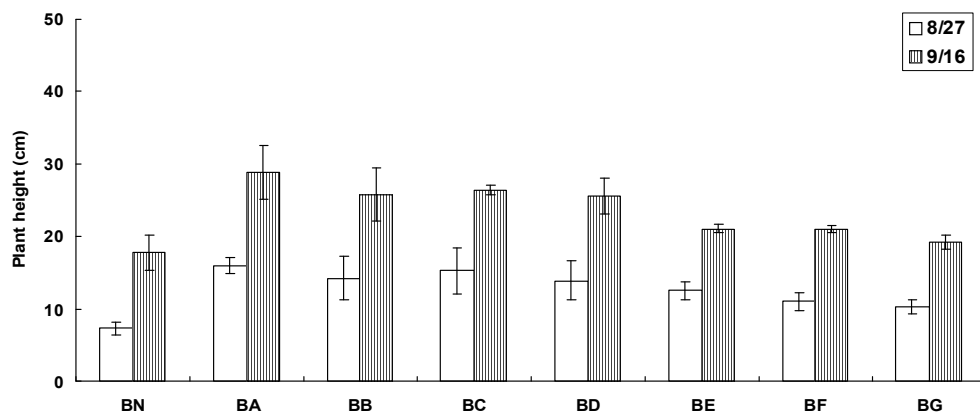


Fig. 3-227. 퇴비 종류별 시용에 따른 배추 길이 변화. (N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G: NPK)

② 상추

포트 재배시험 중 퇴비 종류에 따른 상추의 지상부 길이를 조사한 결과는 Fig. 3-228에서 보는 바와 같다. 상추는 파종 후 8월 27일부터 빠른 성장을 보이며 9월 16일에 높은 생육을 보였다. 상추의 생육은 배추의 생육과 달리 퇴비종류별로 큰 차이가 없었다. 최대 생육을 보인 SA 처리구에서는 8월 27일 및 9월 16일에 각각 11.1 및 23.6 cm이었고, 최저 생육을 보인 SN의 상추 길이는 작물 이식 후 15일 및 35일에 각각 7.8 및 19.9 cm이었다.

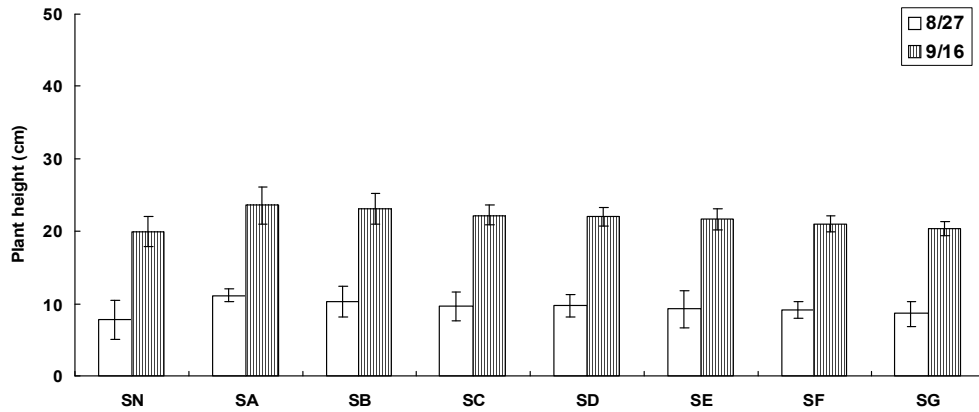


Fig. 3-228. 퇴비 종류별 시용에 따른 상추 길이 변화. (N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G: NPK)

### ③ 무

포트 재배시험 중 퇴비 종류에 따른 무의 지상부 길이를 조사한 결과는 Fig. 3-229와 같다. 무는 이식 후 8월 27일부터 빠른 성장을 보이며 9월 16일에 높은 생육을 보였다. 부들+돈분 퇴비를 시용한 NA 처리구에서 파종 후 15일 및 35일에 각각 16.8 및 34.6 cm로 수생식물과 혼합식물 퇴비를 시용한 처리구에 비해 가장 높았다. 퇴비 종류에 따른 무의 생육은 NA > NC > NB > NE > NF > NG > NN의 처리 순으로 높았다.

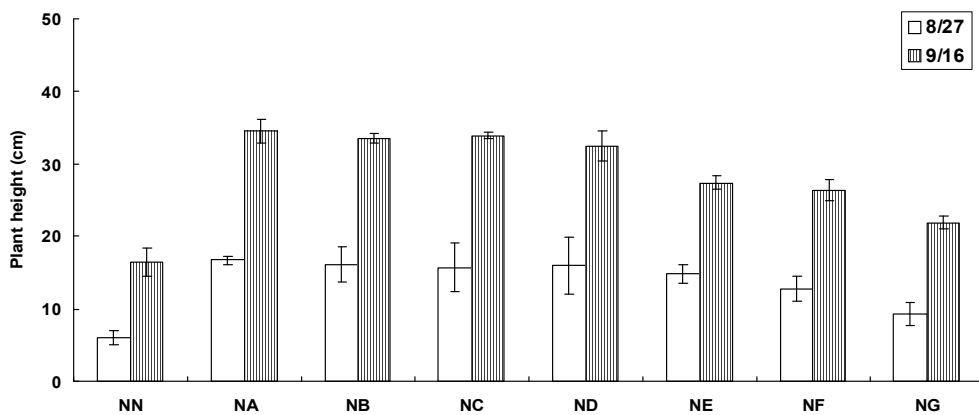


Fig. 3-229. 퇴비 종류별 시용에 따른 무 길이 변화. (N: control; A: 부들+돈분 퇴비 + NPK; B: 갈대퇴비 + NPK; C: 부들퇴비 + NPK; D: 줄퇴비 + NPK; E: 혼합퇴비 1 + NPK; F: 혼합퇴비 2 + NPK; G: NPK)

(나) 부들+돈분 퇴비 사용량별 식물체 생육상황

① 배추

포트 재배시험 중 배추의 부들+돈분 퇴비 사용량에 따른 배추의 지상부 길이를 조사한 결과는 Fig. 3-230과 같다. 배추의 생육은 부들+돈분 퇴비를 더 많이 사용할수록 생장이 좋았으며, 9월 16일에 배추의 생육은 부들+돈분 퇴비 15, 30 및 45 g 사용하였을 때 각각 26.3, 28.9 및 29.9 cm이었다.

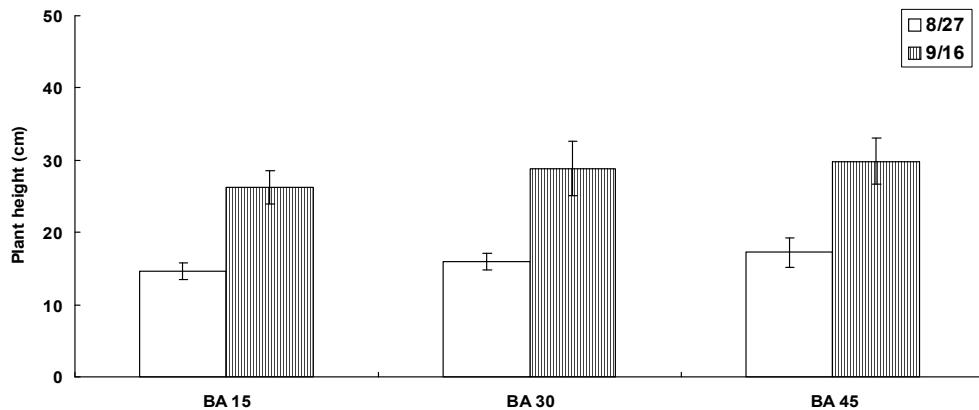


Fig. 3-230. 부들+돈분 퇴비 사용량별 배추 길이 변화. (BA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; BA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; BA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

② 상추

포트 재배시험 중 상추의 부들+돈분 퇴비 사용량별 상추의 길이를 결과는 Fig. 3-231과 같이 상추의 생육은 이식 후 15일에 부들+돈분 퇴비를 15, 30 및 45 g 사용시 각각 9.7, 11.1 및 12.9 cm로 부들+돈분 퇴비의 사용량이 많아질수록 생육이 좋았다. 또한 파종 후 35일에는 15일과 비슷하게 45 g > 30 g > 15 g 순으로 상추의 길이가 길었다.

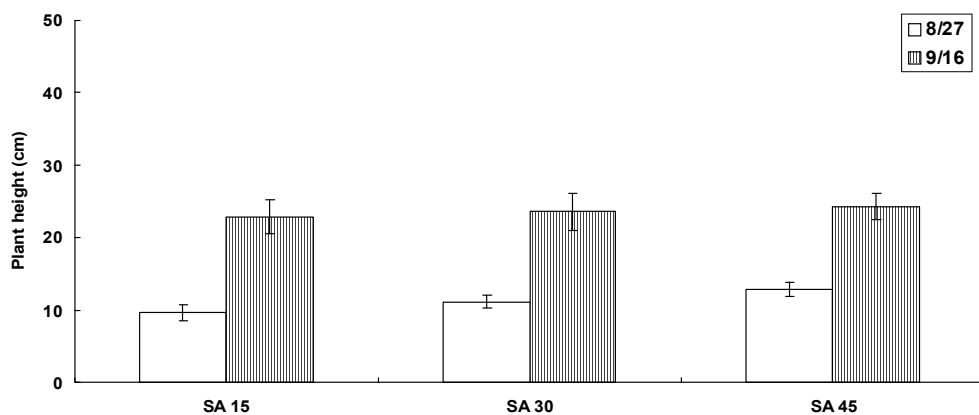


Fig. 3-231. 부들+돈분 퇴비 사용량별 상추 길이 변화. (SA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; SA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; SA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

### ③ 무

포트 재배시험 중 무의 부들+돈분 퇴비 시용량별 식물체의 생육 특성을 나타낸 결과는 Fig. 3-232와 같다. 무의 생육은 부들+돈분 퇴비의 시용량이 많아질수록 생장이 좋았으며, 9월 16일에 무의 초장 길이는 부들+돈분 퇴비를 15, 30 및 45 g 시용하였을 때 각각 32.2, 34.6 및 36.0 cm이었다.

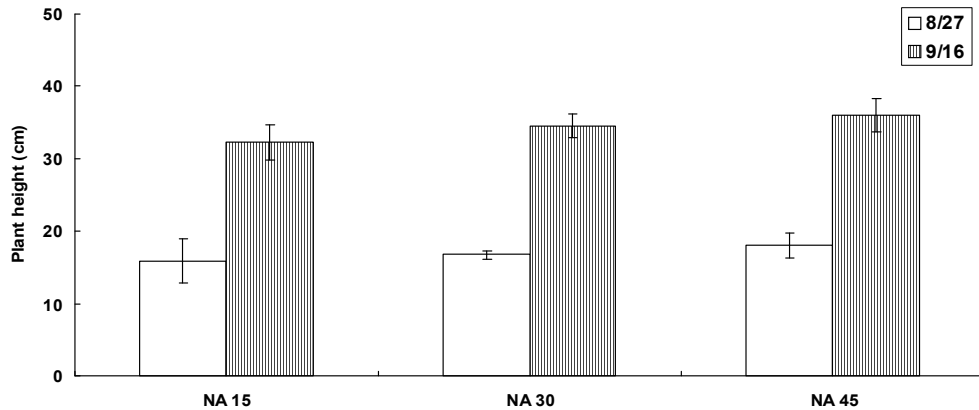


Fig. 3-232. 부들+돈분 퇴비 시용량별 무 길이 변화. (NA 15: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; NA 30: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; NA 45: 부들+돈분 퇴비 4500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

#### 나) 수생식물 퇴비를 이용한 필드 재배시험

##### (1) 토양의 이화학적 특성 변화

##### (가) 배추

필드 재배시험 중 시기 및 퇴비의 시용량에 따른 배추의 이화학적 특성을 조사한 결과는 Fig. 3-233 및 3-234에서 보는 바와 같다. 배추를 재배한 토양의 pH는 시기 및 퇴비의 시용량에 상관없이 7.07~7.42 범위로 큰 차이 없이 비슷하였고, EC는 0.09~0.45 dS m<sup>-1</sup> 범위로 평균 0.31 dS m<sup>-1</sup>이었다. O.M의 함량은 10월 1일에 퇴비의 시용량에 상관없이 2.55~3.00% 범위에서 시기가 지날수록 O.M의 함량은 점점 감소하여 12월 10일에 토양내 O.M의 함량은 2.15~2.71% 범위로 조사되었다. 배추 토양내 T-N의 함량은 전반적으로 퇴비의 시용량이 많을수록 T-N의 함량이 높은 경향으로 control을 제외한 처리구에서 0.21~0.26% 범위를 나타내었으며, 이후 토양내 T-N의 함량은 작물의 배추 생육함에 따라 감소하였다. 토양내 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량은 BB 처리구가 10월 1일, 11월 5일 및 12월 10일에 각각 286, 271 및 261 mg kg<sup>-1</sup>로 BA, BC, BD 및 BE 처리구보다 높은 함량을 보였으며, 모든 처리구에서 작물의 생육이 증가함에 따라 토양내 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량이 감소하는 경향이였다. SiO<sub>2</sub>의 경우는 N, P 및 K 비료를 사용한 BC, BD 및 BE 처리구가 N, P 및 K 비료를 사용하지 않은 BN, BA 및 BB 처리구의 토양내 SiO<sub>2</sub>의 함량이 약간 높았다. 토양내 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 퇴비 시용량에 따라 큰 차

이 없이 비슷하였고, T-N 및 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 시기별 변화와 비슷한 경향으로 작물의 생육이 증가할수록 K, Ca, Mg 및 Na의 함량이 감소하였다.

#### (나) 양배추

필드 재배시험 중 시기 및 퇴비의 시용량에 따른 양배추 토양의 이화학적 특성을 조사한 결과는 Fig. 3-235 및 3-236과 같다. 양배추를 재배한 토양의 pH는 시기별 및 퇴비의 시용량에 상관없이 7.43~7.82 범위로 큰 차이 없이 조사되었으며, EC의 경우에도 0.18~0.27 dS m<sup>-1</sup> 범위로 큰 차이 없었다. 토양내 O.M의 함량은 YB처리구에서 10월 1일에 3.52%, 11월 5일에 3.46% 및 12월 10일에 3.35%로 가장 높았으며, 전반적으로 모든 처리구에서 시기가 지남에 따라 O.M의 함량이 감소하는 경향이였다. 토양내 T-N의 함량은 10월 1일에 처리구에 상관없이 0.03~0.11% 범위로 큰 차이 없이 비슷하였으며, 시기가 지날수록 토양내 T-N의 함량은 모든 처리구에서 감소하였다. 이는 작물이 생육하면서 필요한 N 성분을 토양에서 흡수 및 이용한 것으로 판단된다. 부들+돈분 퇴비 시용량에 따른 처리구별 토양의 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량은 YE 처리구에서 10월 1일, 11월 5일 및 12월 10일에 각각 78.2, 68.9 및 55.8 mg kg<sup>-1</sup>으로 YN, YA, YB, YC 및 YD 처리구에 비해 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량이 높았다. 토양내 양이온인 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 시간이 경과함에 따라 양이온 함량이 모두 감소하는 경향이였다. CEC의 함량은 YB 처리구에서 10월 1일, 11월 5일 및 12월 10일에 각각 92.19, 88.3 및 77.9 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, YC 처리구에서 10월 1일, 11월 5일 및 12월 10일에 각각 52.20, 43.20 및 37.51 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>로 가장 낮았다.

#### (다) 브로콜리

필드 재배시험 중 시기별 및 퇴비의 시용량에 따른 브로콜리 토양의 이화학적 특성을 조사한 결과는 Fig. 3-237 및 3-238에서 보는 바와 같다. 브로콜리를 재배한 토양의 pH는 시기별 및 퇴비 시용량에 상관없이 7.35~7.82 범위로 큰 차이 없었으며, EC는 0.21~0.32 dS m<sup>-1</sup> 범위이었다. O.M의 함량은 10월 1일에 KB 처리구에서 2.88%로 가장 높았고, 이후 12월 10일까지 점점 감소하여 2.42%이었다. T-N의 함량은 10월 1일에 부들+돈분 퇴비 + NPK 비료를 처리한 KD 및 KE 처리구에서 각각 0.19 및 0.20%로 높았으며, 이후 모든 처리구에서 시기가 지날수록 T-N의 함량은 감소하는 경향이였다. 부들+돈분 퇴비 시용량에 따른 처리구별 토양내 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량은 10월 1일에 46.52~103.98 mg kg<sup>-1</sup> 범위로 조사되었으며 KB 처리구에서 103.98 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았다. 이후 T-N의 함량과 비슷한 경향으로 시기가 지날수록 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량은 모든 처리구에서 감소하여 31.58~90.94 mg kg<sup>-1</sup> 범위로 조사되었다. SiO<sub>2</sub>의 함량은 10월 1일에 처리구에 상관없이 249~323 mg kg<sup>-1</sup> 범위로 큰 차이 없이 비슷하였으며, 이후 시기가 지남에 따라 감소하여 12월 10일에 SiO<sub>2</sub>의 함량은 200~298 mg kg<sup>-1</sup>으로 조사되었다. CEC의 함량은 KE 처리구가 10월 1일에 118 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, 11월 5일에 112 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> 및 12월 10일에 107 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 처리구 중 가장 높았다.

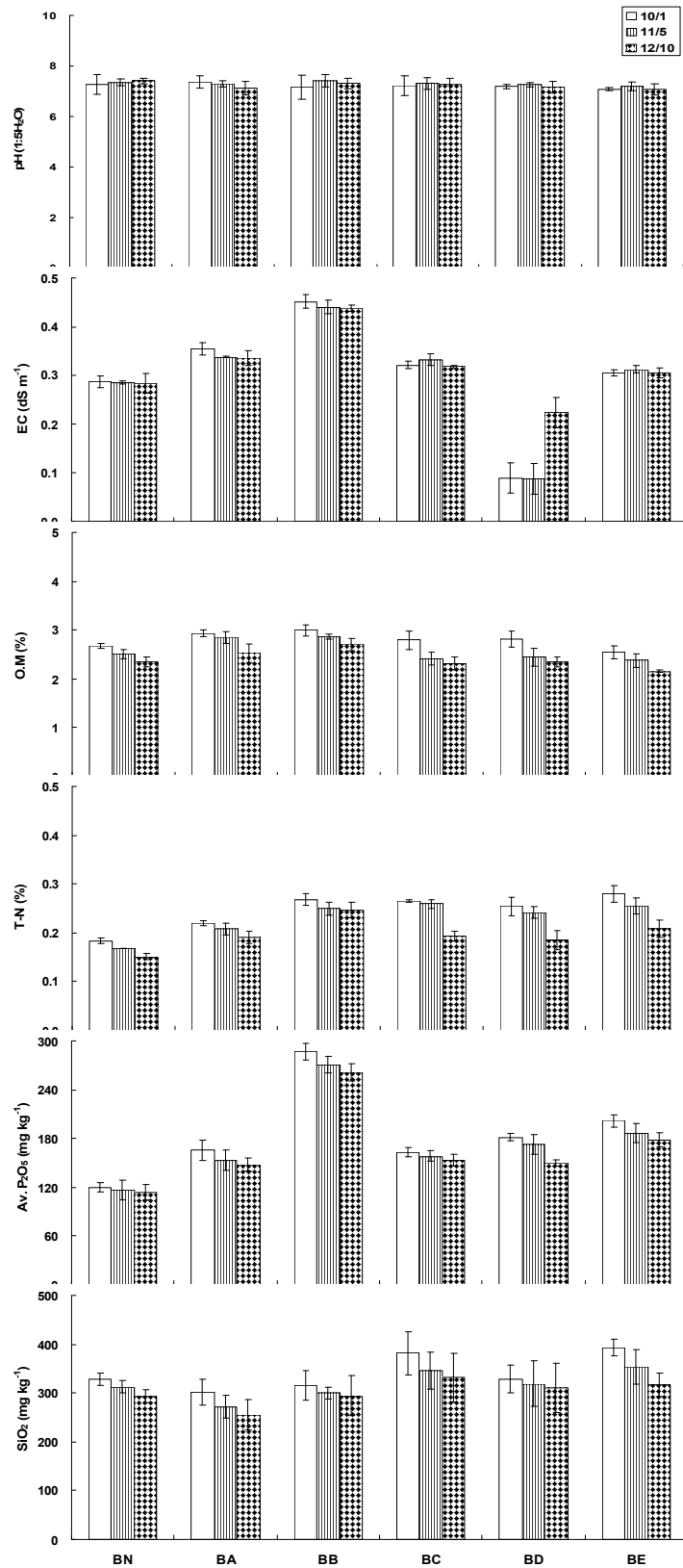


Fig. 3-233. 퇴비 주입량별 배추 재배지에서 토양의 pH, EC, O.M, T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)



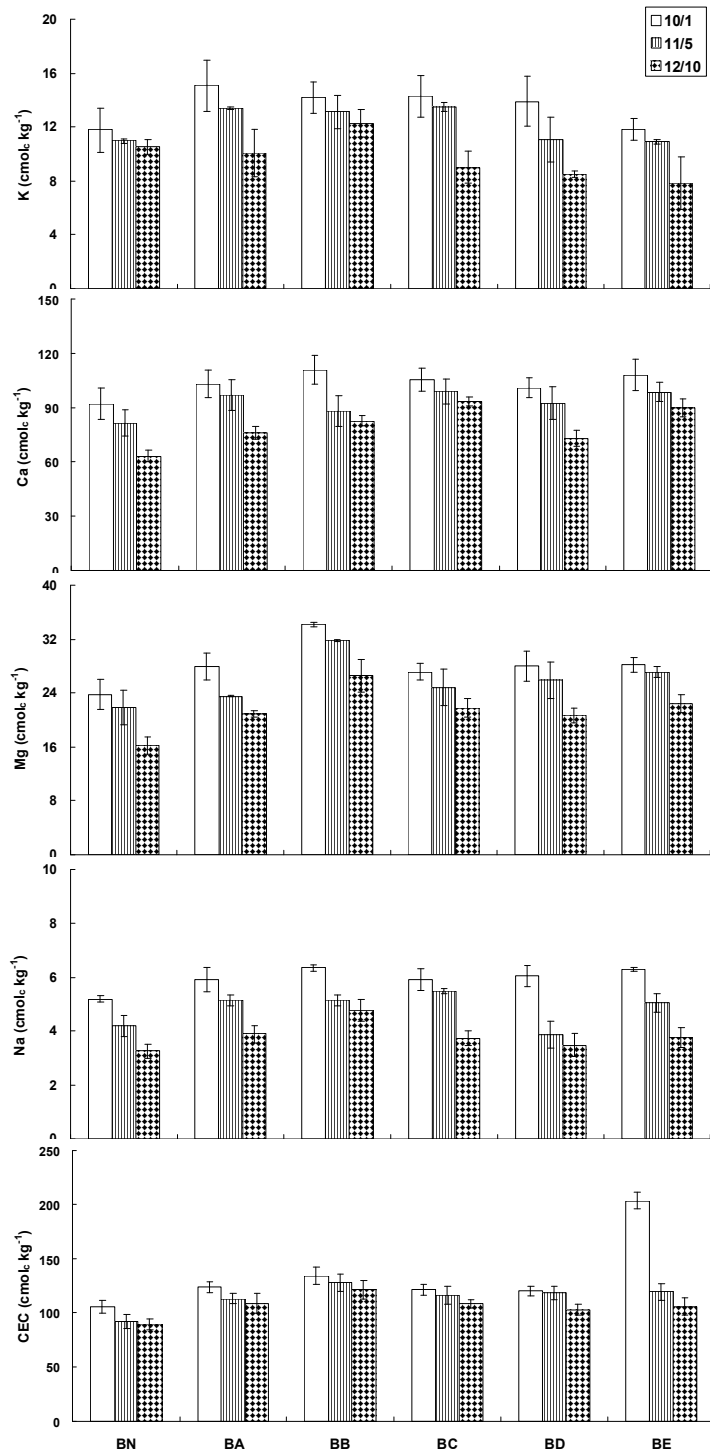


Fig. 3-234. 퇴비 주입량별 배추 재배지에서 토양의 K, Ca, Mg, Na 및 CEC 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

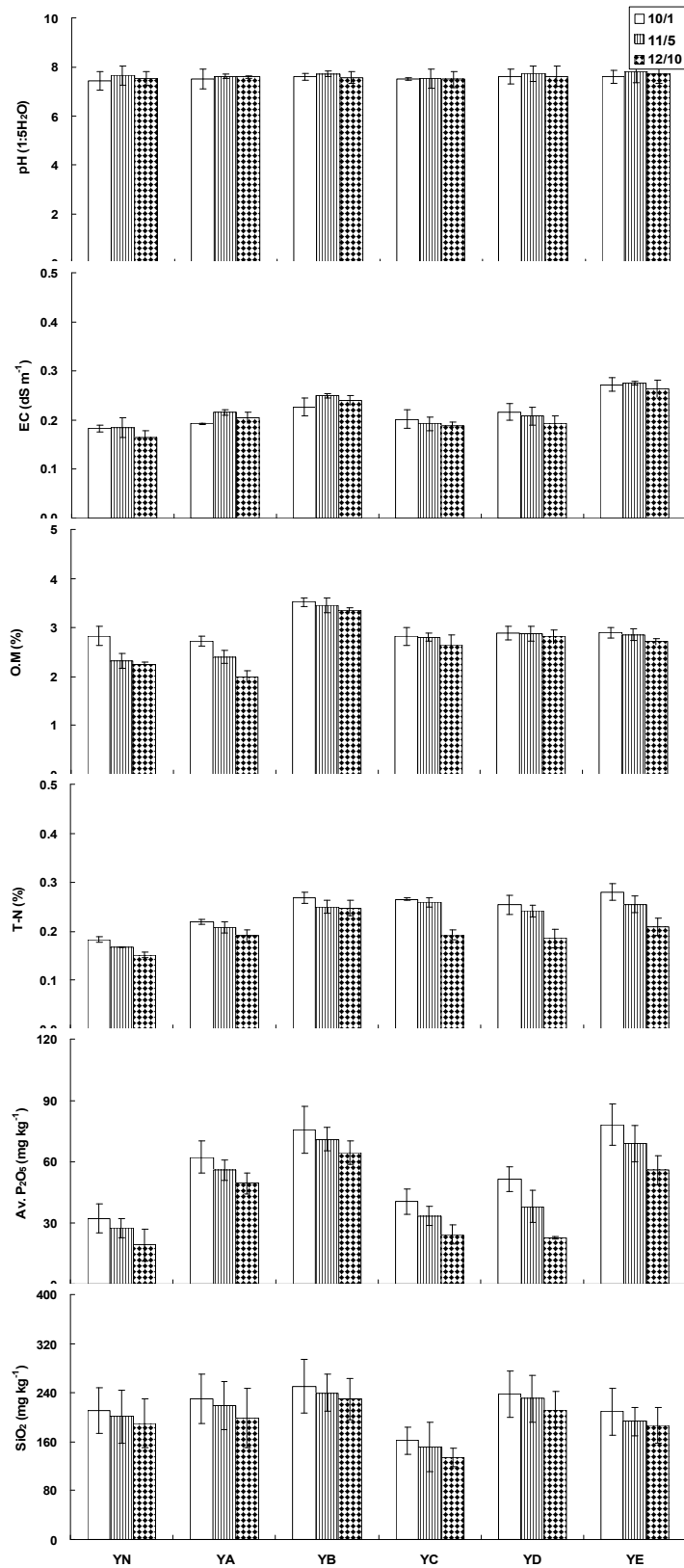


Fig. 3-235. 퇴비 주입량별 양배추 재배지에서 토양의 pH, EC, O.M, T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

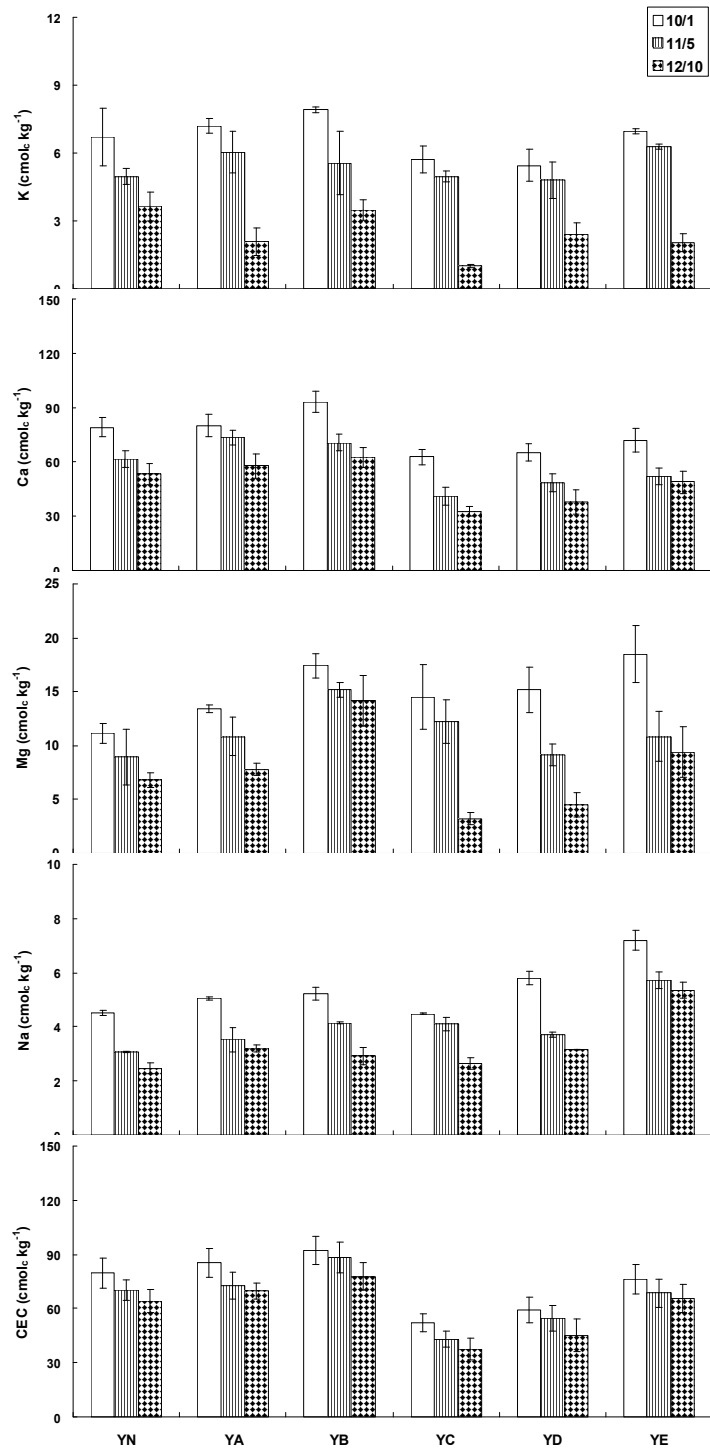


Fig. 3-236. 퇴비 주입량별 양배추 재배지에서 토양의 K, Ca, Mg, Na 및 CEC 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

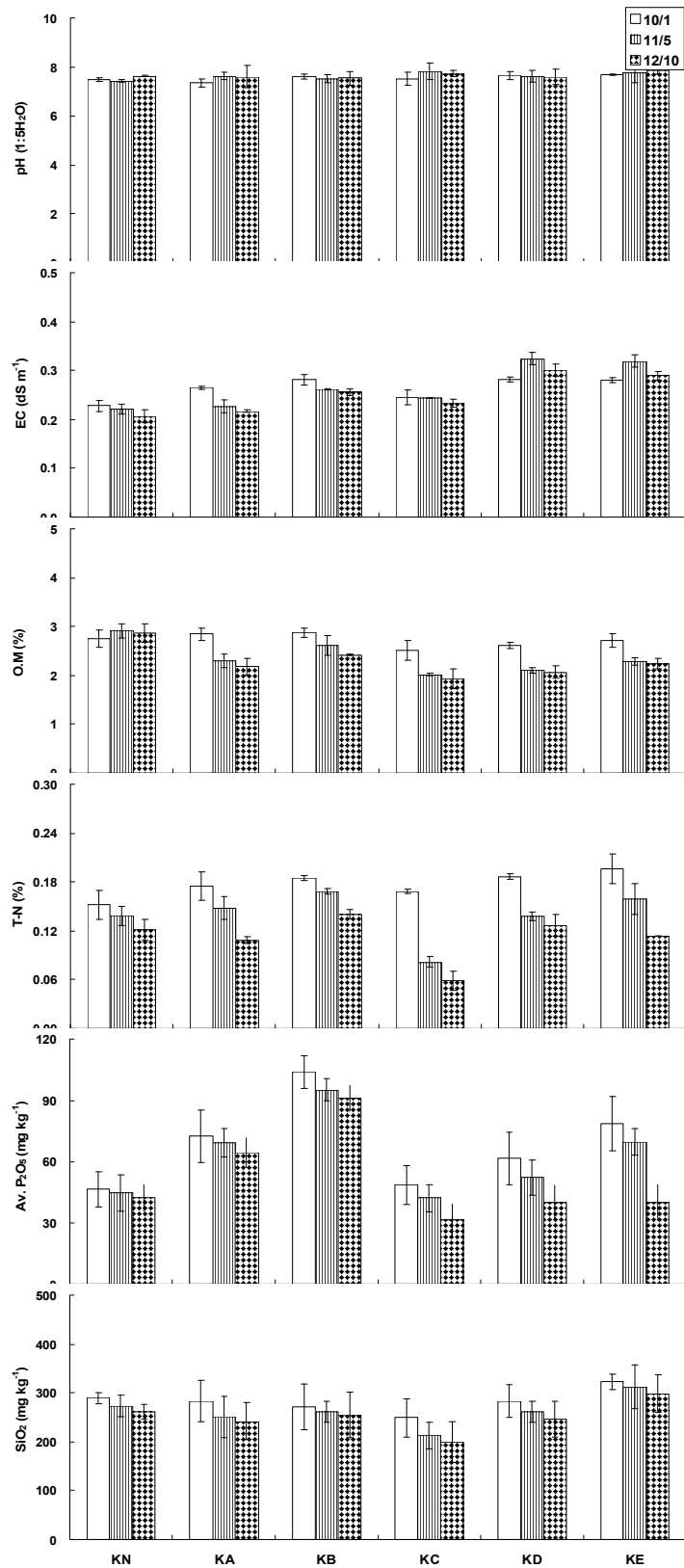


Fig. 3-237. 퇴비 주입량별 브로콜리 재배지에서 토양의 pH, EC, O.M, T-N, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

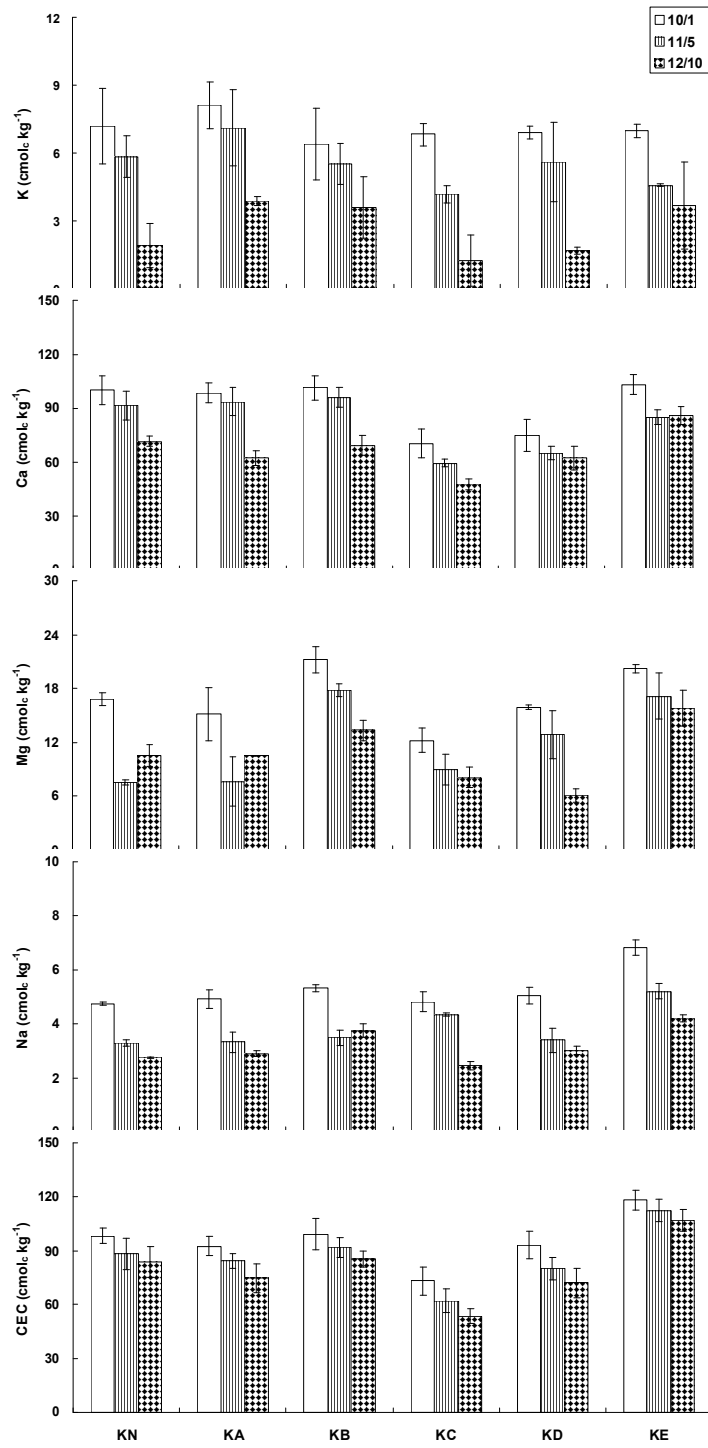


Fig. 3-238. 퇴비 주입량별 브로콜리 재배지에서 토양의 K, Ca, Mg, Na 및 CEC 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비  $1500 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ ; B: 부들+돈분 퇴비  $3000 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ ; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비  $1500 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  + NPK; E: 부들+돈분 퇴비  $3000 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  + NPK)

(2) 식물체 무기성분 함량 변화

(가) 배추

필드 재배 시험 중 퇴비 시용량에 따른 배추 체내의 T-N 함량은 Fig. 3-239와 같다. 배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 배추 체내의 T-N 함량을 분석하였다. 그리고 배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 T-N의 함량 변화를 비교하였다.

퇴비 처리조건 및 시기에 따른 T-N의 함량은 전반적으로 부들+돈분 퇴비를 시용한 처리구에서 높게 나타났다. 지상부의 경우 모종이식 후 35일째 처리구에 상관없이 1.62~1.73% 범위로 나타났고 지하부의 경우에는 1.08~1.20% 범위로 조사되었다. 모종이식 후 70일째 지상부의 T-N 함량은 3.05~3.12% 범위이었고, 지하부의 경우에는 2.63~2.80% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 T-N 함량은 2.25~2.74% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 1.71~1.84% 범위로 큰 차이 없이 비슷하였다.

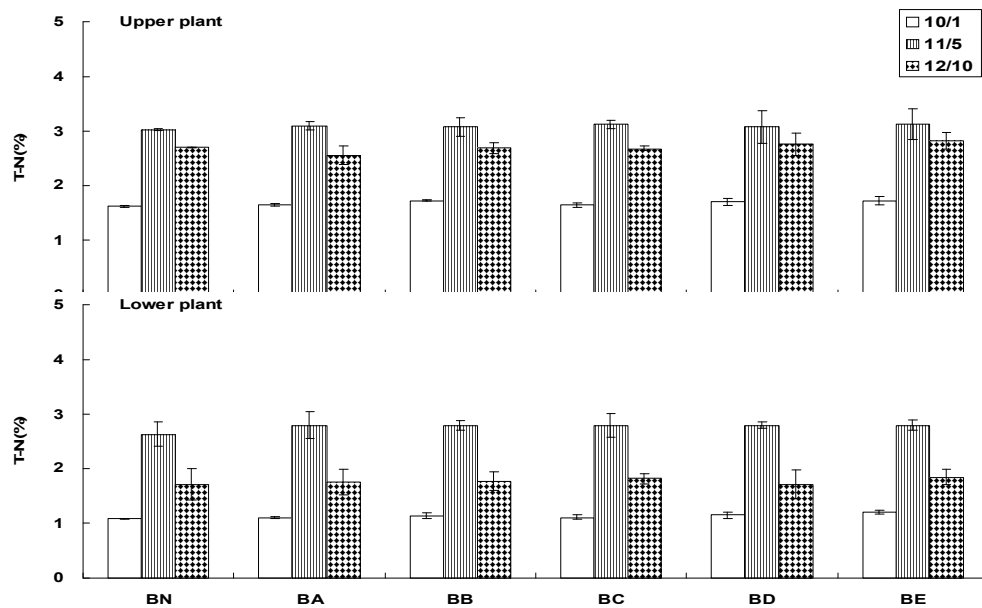


Fig. 3-239. 배추의 지상부 및 지하부 T-N 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 시용량에 따른 배추의 T-P 함량은 Fig. 3-240에서 보는 바와 같다. 퇴비 처리조건에 따른 T-P의 함량은 BN 처리구에 비해서 BA 처리구 및 BB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, BC 처리구에 비하여 BD 처리구와 BE 처리구의 T-P 함량이 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이 없이 비슷하였다. 생육시기별 T-P의 함량은 모종이식 후

35일째 지상부의 경우에는 0.46~0.67% 범위이었고, 지하부의 경우에는 0.71~0.81% 범위로 부들+돈분 퇴비의 시용과 NPK 비료를 시용한 처리구에서 전반적으로 높은 함량을 보였다. 모종 이식 후 70일째 지상부의 경우에는 1.43~1.63% 범위이었으며, 지하부의 경우에는 1.69~1.85% 범위로 조사되었다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우에는 0.80~0.95% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 1.36~1.42% 범위로 나타났다. 생육시기에 따른 T-P의 함량 차이는 지상부의 경우 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 T-P의 함량이 약 2배가량 증가하였고, 모종이식 후 105일째에는 다시 낮아져서 30일째에 비해 약간 높은 함량을 나타내었다. 지하부의 경우에는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째 상당히 높은 함량을 나타내었고, 105일째에는 70일째에 비해서 약간 낮아지는 경향을 나타내었다.

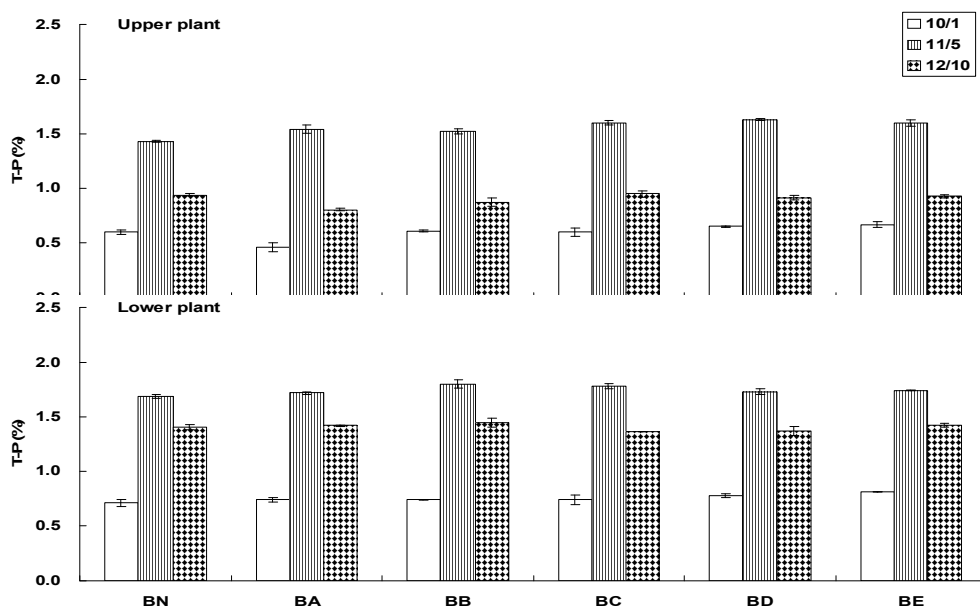


Fig. 3-240. 배추의 지상부 및 지하부 T-P 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 시용량에 따른 배추 체내의 K<sub>2</sub>O 함량은 Fig. 3-241과 같다. 배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 비교하였다.

처리조건에 따른 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 보면 BN 처리구에 비해서 BA 처리구 및 BB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, BC 처리구에 비하여 BD 처리구와 BE 처리구의 K<sub>2</sub>O 함량이 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이 없었다. 생육시기별 K<sub>2</sub>O의 함량 변화를 보면 모종이식

후 35일째 지상부의 경우에는 0.46~0.67% 범위이었으며, 지하부의 경우에는 0.71~0.81% 범위로 큰 차이 없었다. 70일째 지상부의 경우에는 1.43~1.63% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 1.69~1.80% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우 0.80~0.95% 범위이었으며, 지하부의 경우에는 1.36~1.42% 범위이었다. 생육시기에 따른 K<sub>2</sub>O 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째 K<sub>2</sub>O 함량이 증가하였고, 105일째에는 다시 낮아지는 경향을 나타내었다.

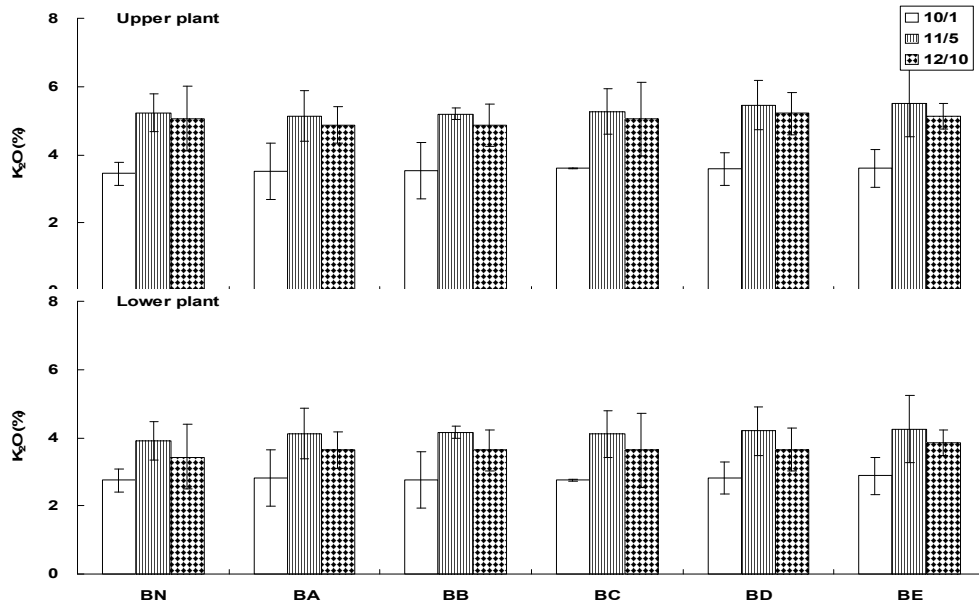


Fig. 3-241. 배추의 지상부 및 지하부 K<sub>2</sub>O 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 배추 체내의 CaO 함량은 Fig. 3-242에 나타내었다. 각각의 퇴비 처리조건에 따른 지상부의 CaO 함량 변화는 모종이식 후 35일째와 70일째의 CaO 함량은 처리구별로 비슷한 수준이었으나, 모종이식 후 105일째의 CaO의 함량은 BN > BA > BB > BC > BD > BE 처리구 순으로 높게 나타났다. 생육시기별 CaO의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 1.84~2.17% 범위이었으며, 지하부의 경우에는 0.37~0.44% 범위이었다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우에는 2.92~3.58% 범위로 부들+돈분 퇴비와 NPK 비료를 사용한 처리구에서 control 처리구에 비해 높게 조사되었으며, 지하부의 경우에는 1.10~1.43% 범위로 지상부와 비슷한 경향으로 조사되었다. 모종이식 후 105일째 지상부에서 2.10~3.95% 범위로 다소 차이가 컸으며, 지하부의 경우에는 0.83~1.10% 범위이었다. 생육시기에 따른 CaO 함량 변화는 지상부의 경우 전반적으로 모든 처리구에서 모종이식 후 35일째에 비해 70일째 급격히 증가하였고, 이후 105일째에는 다시 감소하는 경향이었다. 처



리조건에 따른 지하부 CaO의 함량 변화는 모든 처리구에서 모종이식 후 35일째에 비해서 70일째 급격히 증가하였고, 이후 105일째에는 다시 감소하는 경향이였다.

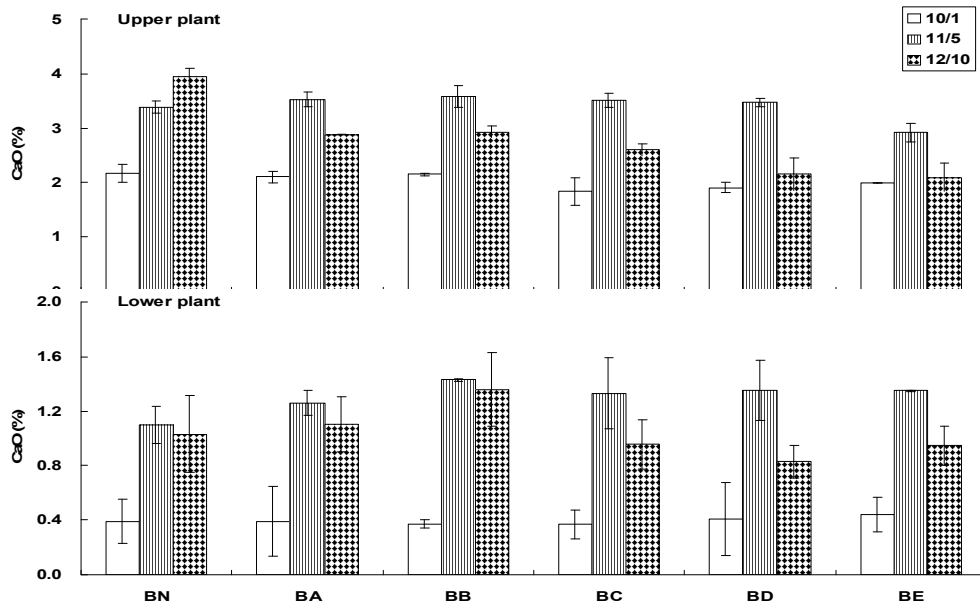


Fig. 3-242. 배추의 지상부 및 지하부 CaO 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배시험 중 퇴비 시용량에 따른 배추의 MgO 함량은 Fig. 3-243에 나타내었다. 각각의 퇴비 처리조건에 따른 MgO의 함량 변화를 보면 BN 처리구에 비해서 BA 처리구 및 BB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, BC 처리구에 비하여 BD 처리구와 BE 처리구에서 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이 없이 비슷하였다. 생육시기별 MgO의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 0.014~0.016% 범위이었고, 지하부의 경우에는 0.016~0.019% 범위로 큰 차이 없었다. 모종이식 후 70일째 MgO 함량은 모든 처리구에서 증가하여 지상부 및 지하부에서 각각 0.033~0.040 및 0.038~0.048% 범위이었다. 모종이식 후 105일째 MgO 함량은 전반적으로 모든 처리구에서 감소하여 지상부의 경우에는 0.027~0.034% 범위, 지하부의 경우에는 0.028~0.039% 범위이었다. 생육시기에 따른 MgO 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 함량이 약 2배가량 증가하였고, 105일째에는 70일째에 비해서 약간 낮은 함량을 나타내었다.

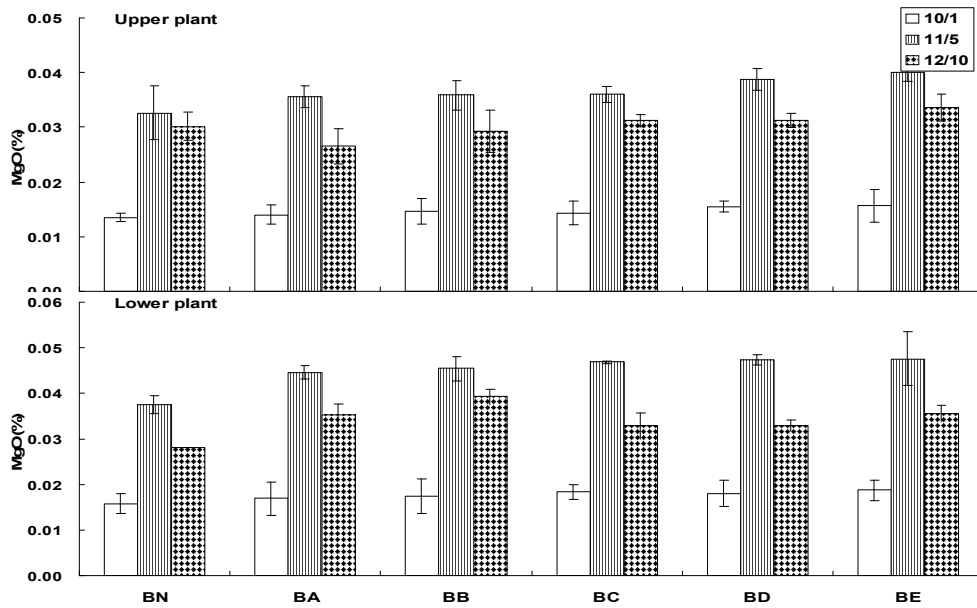


Fig. 3-243. 배추의 지상부 및 지하부 MgO 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

#### (나) 양배추

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 양배추의 T-N 함량은 Fig. 3-244에 나타내었다. 양배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 T-N 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 양배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 양배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 T-N 함량 변화를 비교하였다.

처리조건에 따른 T-N의 함량은 BN 처리구에 비해서 BA 처리구 및 BB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, BC 처리구에 비하여 BD 처리구와 BE 처리구에서 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이 없이 비슷하였다. 모종이식 후 35일째 지상부 T-N은 0.76~1.06% 범위였고, 지하부 T-N의 경우에는 0.67~0.71% 범위이었다. 모종이식 후 70일째 지상부 및 지하부의 T-N 함량은 각각 1.71~1.88 및 1.42~1.78% 범위로 큰 차이 없었다. 모종이식 후 105일째 지상부의 T-N 함량은 1.20~1.71% 범위로 나타났고, 지하부의 T-N 함량은 0.91~1.35% 범위로 조사되었다. 생체부위별 T-N의 함량을 보면 지상부가 지하부에 비해서 높게 나타났다. 생육시기에 따른 T-N의 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 약 2배가량 증가하는 경향이였으나, 105일째에는 70일째에 비해서 T-N의 함량이 약간 낮아졌다.

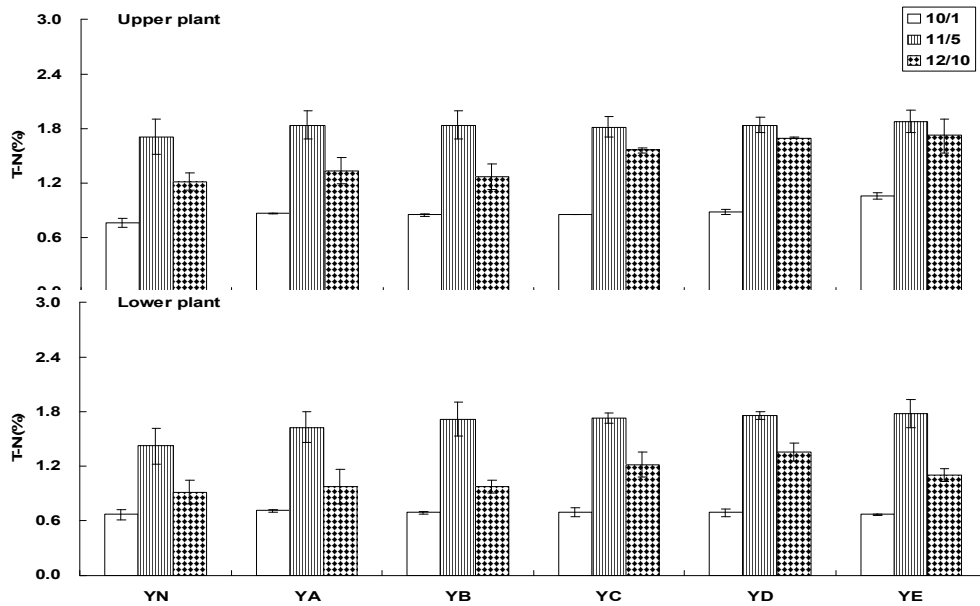


Fig. 3-244. 양배추의 지상부 및 지하부 T-N 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 시용량에 따른 양배추 체내의 T-P 함량은 Fig. 3-245에 나타내었다. 배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 T-P의 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종 이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 양배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 양배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 T-P의 함량 변화를 비교하였다.

퇴비 처리조건에 따른 T-P의 함량 변화를 보면 YN 처리구에 비해서 YA 처리구 및 YB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, YC 처리구에 비하여 YD 처리구와 YE 처리구에서 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이 없었다. 생육시기별 T-P의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 0.19~0.26% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.33~0.37% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우에는 0.84~1.10% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.68~0.84% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우에는 0.35~0.57% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.49~0.59% 범위이었다. 생육시기에 따른 T-P의 함량의 차이는 지상부의 경우 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 약 2배가량 증가하였고, 105일째에는 다시 낮아져서 30일째에 비해서 약간 높은 함량을 나타내었다. 지하부의 경우에는 생육 30일째에 비해서 생육 70일째 상당히 높은 함량을 나타내었고 모종이식 후 105일째에는 70일째에 비해서 약간 낮아지는 경향을 나타내었다.

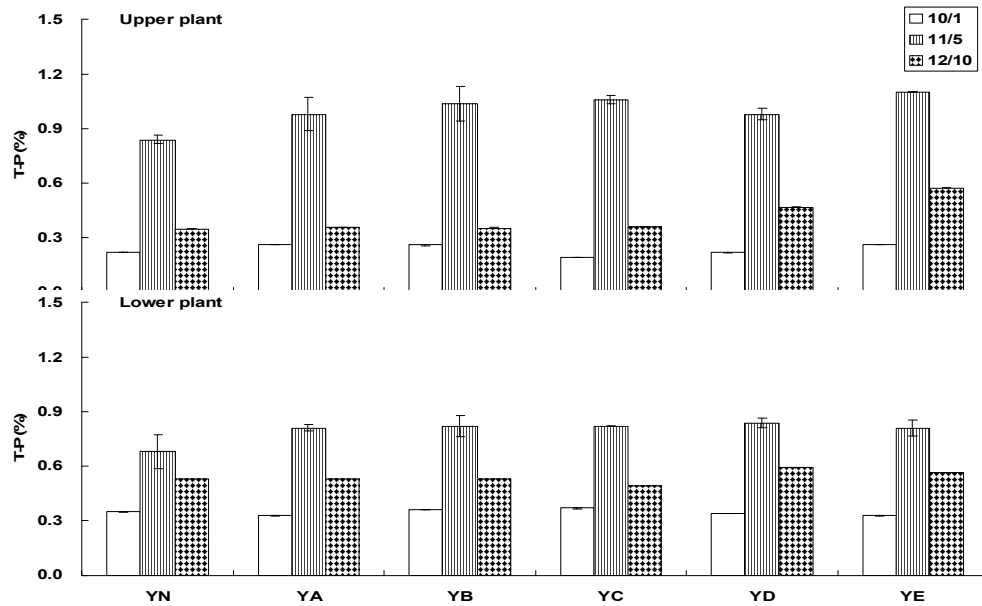


Fig. 3-245. 양배추의 지상부 및 지하부 T-P 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 양배추 내의 K<sub>2</sub>O 함량은 Fig. 3-246에서 보는 바와 같다. 배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종 이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 비교하였다.

퇴비 처리조건에 따른 K<sub>2</sub>O 함량은 YN 처리구에 비해서 YA 처리구 및 YB 처리구가 조금 높게 나타났고, YC 처리구에 비하여 YD 처리구와 YE 처리구가 전반적으로 큰 차이는 나타나지 않았다. 생육시기별 K<sub>2</sub>O의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 K<sub>2</sub>O 함량은 1.47~1.65% 범위로 나타났고, 지하부의 K<sub>2</sub>O 함량은 1.29~1.40% 범위이었다. 모종이식 후 70일째 지상부 및 지하부의 K<sub>2</sub>O 함량은 각각 3.49~3.69 및 2.52~2.70% 범위이었다. 모종이식 후 105일째 지상부의 K<sub>2</sub>O 함량은 2.46~2.75% 범위이었고, 지하부의 K<sub>2</sub>O 함량은 1.74~1.93% 범위이었다. 생육시기에 따른 K<sub>2</sub>O 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 증가하였고, 105일째에는 다시 낮아지는 경향을 나타내었다.

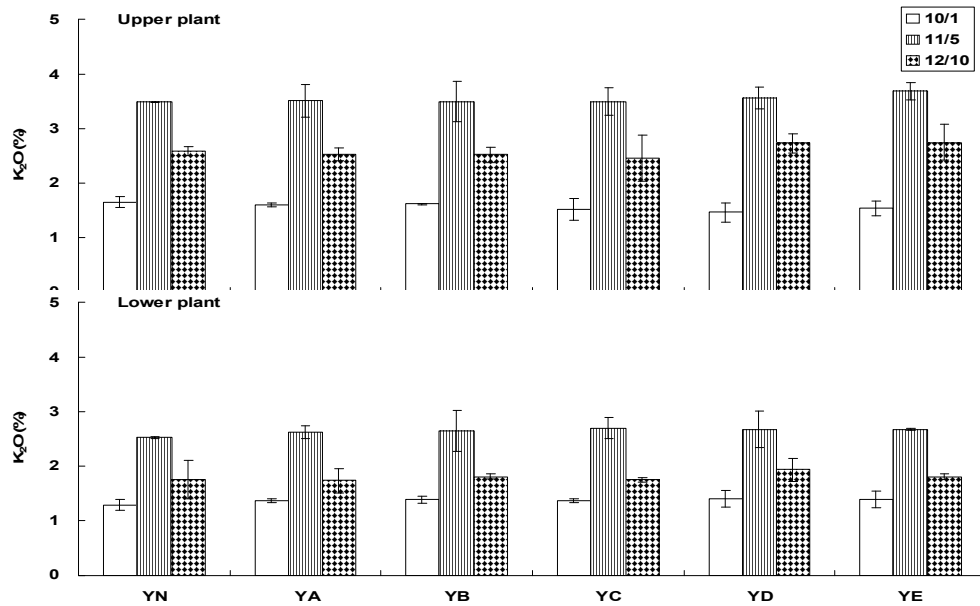


Fig. 3-246. 양배추의 지상부 및 지하부 K<sub>2</sub>O 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 양배추의 CaO 함량은 Fig. 3-247에 나타내었다. 양배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 CaO의 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 양배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 양배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 CaO 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 지상부의 CaO 함량 변화는 모종이식 후 35일째와 70일째의 CaO 함량은 처리구별로 비슷한 수준의 농도를 나타내었으나, 모종이식 후 105일째의 CaO의 함량은 YN > YA > YB > YC > YD > YE 처리구 순으로 높게 나타났으나, 그 차이가 크지 않았다. 생육시기별 CaO의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우 1.08~1.26% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.25~0.30% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우 2.92~3.10% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.53~0.66% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우 1.83~2.13% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.43~0.48% 범위로 나타났다. 생육시기에 따른 CaO의 함량 변화를 보면 모든 처리구에서 모종이식 후 35일째에 비해서 70일째 급격히 증가하였고, 이후 105일째에는 다시 감소하는 경향이였다.

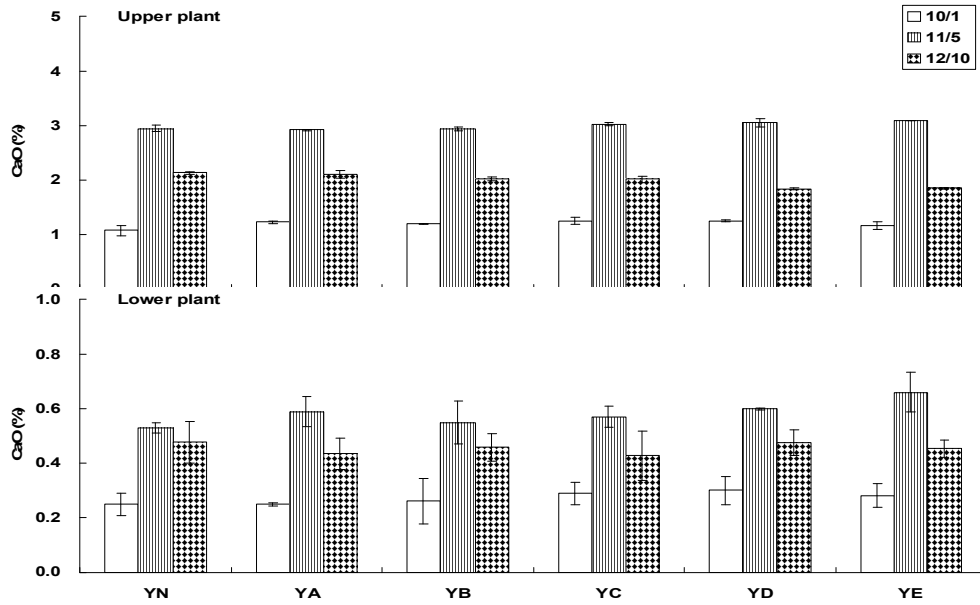


Fig. 3-247. 양배추의 지상부 및 지하부 CaO 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 양배추의 MgO 함량은 Fig. 3-248에 나타내었다. 양배추의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 MgO 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 분석하였다. 그리고 양배추의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 양배추를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 MgO 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 MgO 함량 변화를 보면 YN 처리구에 비해서 YA 및 YB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, YC 처리구에 비하여 YD 처리구와 YE 처리구에서 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이 없었다. 생육시기별 MgO의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우 0.011~0.013% 범위로 나타났고 지하부의 경우에는 0.010~0.014% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우 0.025~0.027% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.033~0.038% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우에는 0.019~0.022% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.020~0.025% 범위로 나타났다. 생육시기에 따른 MgO함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 급격히 증가하였고, 105일째에는 70일째에 비해서 1/2가량 낮은 함량을 나타내었다.

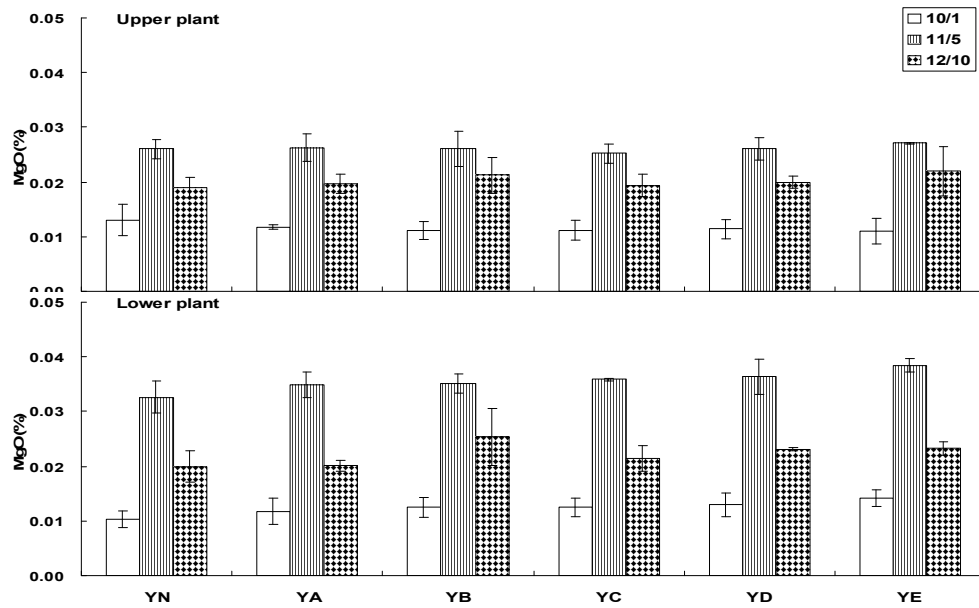


Fig. 3-248. 양배추의 지상부 및 지하부 MgO 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

(다) 브로콜리

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 브로콜리의 T-N 함량은 Fig. 3-249에서 보는 바와 같다. 브로콜리의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 T-N 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 브로콜리의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 브로콜리를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 T-N의 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 T-N의 함량 변화를 보면 KN 처리구에 비해서 KA 처리구 및 KB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, KC 처리구에 비하여 KD 처리구와 KE 처리구에서 약간 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이는 나타나지 않았다. 생육시기별 T-N의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우 0.93~1.56%로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.55~0.70% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우에는 1.75~2.20%로 나타났고, 지하부의 경우에는 1.46~1.58% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우에는 1.55~2.10% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.79~1.16% 범위로 나타났다. 생체부위별 T-N의 함량을 보면 지상부가 지하부에 비해서 높게 나타났다. 생육시기에 따른 T-N의 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 약 2배가량 증가하는 경향이었으나, 105일째에는 70일째에 비해서 T-N의 함량이 약간 낮아졌다.

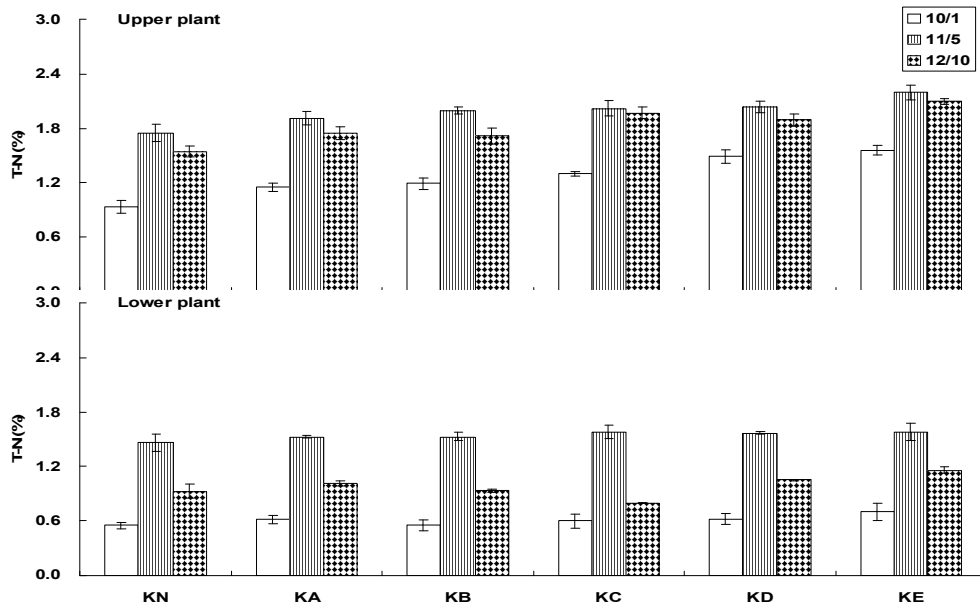


Fig. 3-249. 브로콜리의 지상부 및 지하부 T-N 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 시용량에 따른 브로콜리의 T-P 함량은 Fig. 3-250에서 보는 바와 같다. 브로콜리의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 T-P 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 측정하였다. 그리고 브로콜리의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 브로콜리를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 T-P의 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 T-P의 함량 변화를 보면 KN 처리구에 비해서 KA, KB 및 KC 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, KC 처리구에 비하여 KD 처리구와 KE 처리구에서 약간 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이는 없었다. 생육시기별 T-P의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 0.32~0.48% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.26~0.37% 범위로 나타났다. 70일째 지상부의 경우에는 0.89~1.08% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.71~0.87% 범위로 나타났다. 105일째 지상부의 경우 0.51~0.63% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.49~0.54% 범위로 나타났다. 생체부위별 T-P의 함량을 보면 지상부가 지하부에 비해서 높게 나타났다. 생육시기에 따른 T-P의 함량 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 약 2배가량 증가하는 경향이었으나, 105일째에는 70일째에 비해서 T-P 함량이 약간 낮아졌다.



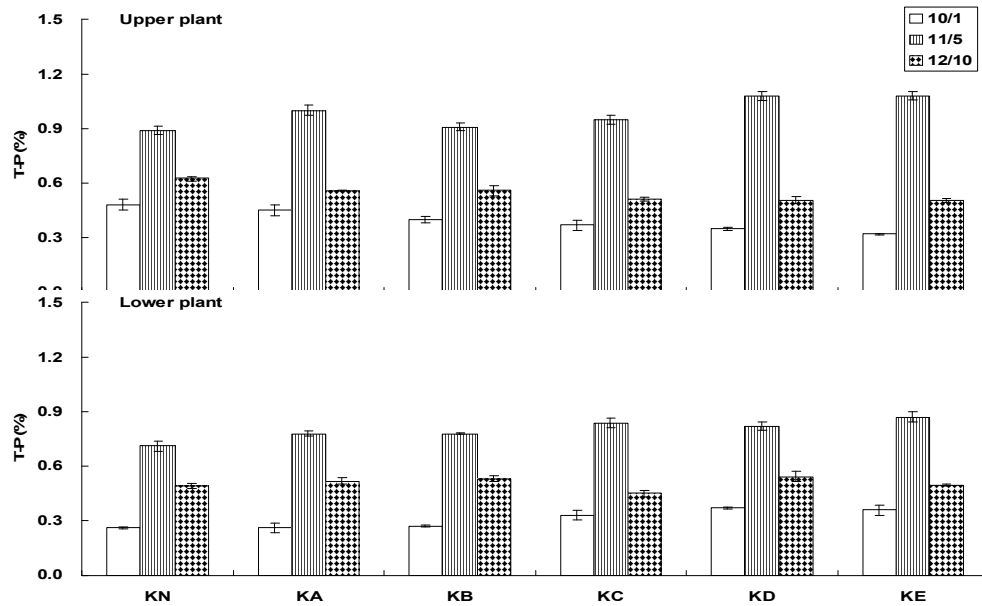


Fig. 3-250. 브로콜리의 지상부 및 지하부 T-P 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 브로콜리의 K<sub>2</sub>O 함량은 Fig. 3-251에 나타내었다. 브로콜리의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 분석하였다. 그리고 브로콜리의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 브로콜리를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 K<sub>2</sub>O 함량 변화를 보면 KN 처리구에 비해서 KA 처리구 및 KB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, KC 처리구에 비하여 KD 처리구와 KE 처리구에서 조금 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이는 나타나지 않았다. 생육시기별 K<sub>2</sub>O의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 1.47~1.89% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 1.44~1.67% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우에는 3.36~3.45% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 2.32~2.93% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우 2.59~2.96% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 2.02~2.59% 범위로 나타났다. 생육시기에 따른 K<sub>2</sub>O 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 증가하였고, 105일째에는 다시 낮아지는 경향을 나타내었다.

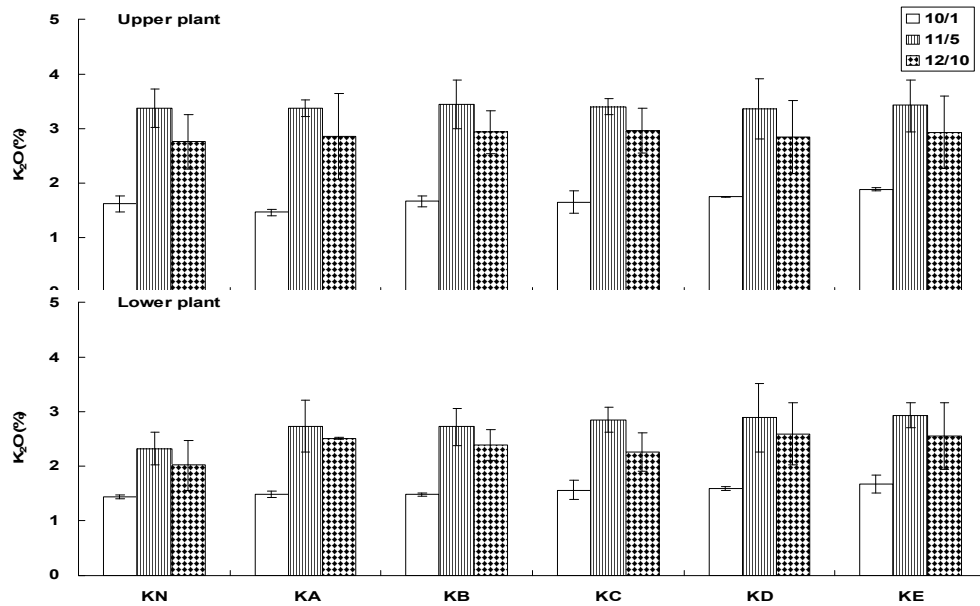


Fig. 3-251. 브로콜리의 지상부 및 지하부 K<sub>2</sub>O 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 사용량에 따른 브로콜리의 CaO 함량은 Fig. 3-252에 나타내었다. 브로콜리의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 CaO 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종이식 후 35일째인 10월 1일, 70일째인 11월 5일 및 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 분석하였다. 그리고 브로콜리의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 브로콜리를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 CaO의 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 지상부의 CaO 함량 변화는 모종이식 후 35일째와 70일째의 CaO의 함량에서 처리구별로 비슷한 수준의 농도를 나타내었으나, 모종이식 후 105일째의 CaO의 함량은 KN > KA > KB 처리구 순으로 높게 나타났고, N, P 및 K를 시비한 KC, KD 및 KE 처리구에서는 KD > KC > KE 처리구 순으로 높게 나타났으나, 그 차이가 크지 않았다. 생육시기별 CaO의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 1.11~1.41% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.25~0.28% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우에는 2.25~2.38% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.49~0.64% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우에는 1.53~1.99% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.39~0.49% 범위로 나타났다. 생육시기에 따른 CaO 함량 변화를 보면 모든 처리구에서 모종이식 후 35일째에 비해서 70일째 증가하였고, 이후 105일째에는 다시 감소하는 경향이였다.

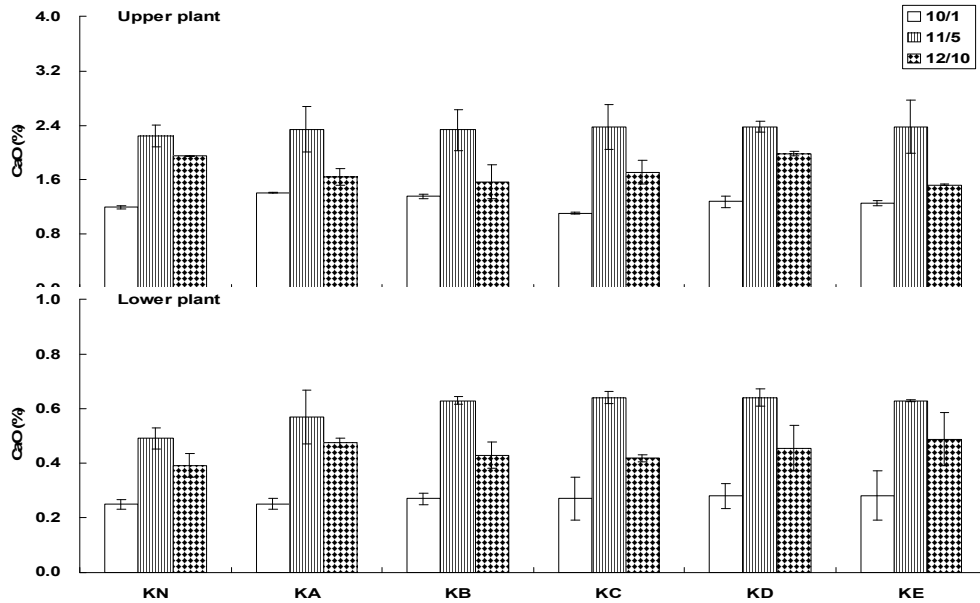


Fig. 3-252. 브로콜리의 지상부 및 지하부 CaO 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

필드 재배 시험 중 퇴비 시용량에 따른 브로콜리의 MgO 함량은 Fig. 3-253에 나타내었다. 브로콜리의 필드 재배 시험에서는 생육시기에 따른 MgO의 함량 변화를 관찰하기 위해서 모종 이식 후 35일째인 10월 1일, 생육 70일째인 11월 5일 및 생육 105일째인 12월 10일에 3회에 걸쳐서 분석하였다. 그리고 브로콜리의 각 부위별 흡수특성을 구명하기 위하여 브로콜리를 지상부와 지하부로 구분하여 각 부위별 MgO의 함량 변화를 비교하였다.

각각의 퇴비 처리조건에 따른 MgO의 함량 변화를 보면 KN 처리구에 비해서 KA 및 KB 처리구의 함량이 조금 높게 나타났고, KC 처리구에 비하여 KD 처리구와 KE 처리구에서 약간 높게 나타났으나, 전반적으로 큰 차이는 나타나지 않았다. 생육시기별 MgO의 함량 변화를 보면 모종이식 후 35일째 지상부의 경우에는 0.013~0.015% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.027~0.033% 범위로 나타났다. 모종이식 후 70일째 지상부의 경우에는 0.024~0.025% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.047~0.059% 범위로 나타났다. 모종이식 후 105일째 지상부의 경우에는 0.018~0.026% 범위로 나타났고, 지하부의 경우에는 0.037~0.050% 범위로 나타났다. 생육시기에 따른 MgO의 함량의 차이는 모종이식 후 30일째에 비해서 70일째에 급격히 증가하였고, 모종이식 후 105일째에는 70일째에 비해서 1/2가량 낮은 함량을 나타내었다.

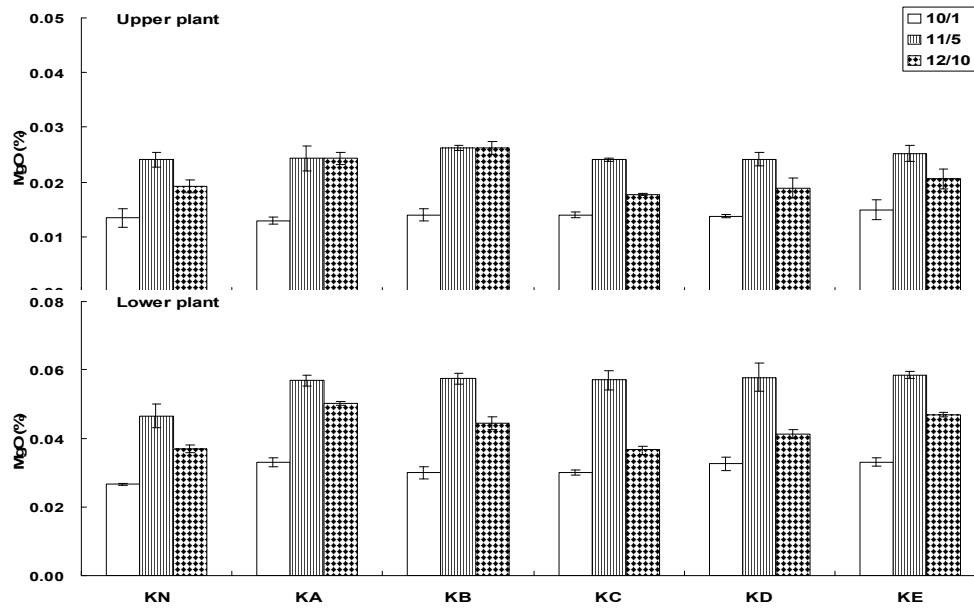


Fig. 3-253. 브로콜리의 지상부 및 지하부 MgO 함량 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

### (3) 작물의 생육상황 및 수량

#### (가) 배추

필드 재배시험 중 배추의 생육 전경과 시기별 및 처리구별 배추의 길이를 나타낸 결과는 Fig. 3-254 및 3-255와 같다. 전체 처리구에서 배추의 길이는 10월 1일에서 11월 5일 사이에 평균 8.76 cm가 성장하였으며 이 기간에 최대생육을 나타내었다. 10월 1일부터 12월 10일까지 조사된 BN, BA, BB, BC, BD 및 BE 처리구의 배추 길이는 각각 18.3~29.0, 21.9~31.0, 24.6~33.1, 20.0~32.1, 21.2~34.0 및 24.2~34.8 cm 범위이었다. 최종 조사 시기인 12월 10일에 전체 처리구 중에서 BE 처리구의 배추 길이가 34.8 cm로 가장 길었다.

필드 재배시험 중 배추 수확기에 시기별 및 처리구간별 배추의 잎수를 나타낸 결과는 Fig. 3-256과 같다. 배추의 잎수는 11월 5일에서 12월 10일 사이에 평균 22.88개로 이 시기에 가장 많이 잎수가 증가하였다. 10월 1일부터 12월 10일까지 조사된 BN, BA, BB, BC, BD 및 BE 처리구의 배추 잎수는 각각 15.0~54.6, 15.7~57, 18~57, 14.3~54.6, 17.3~56.8 및 18.7~60개 범위이었다. 최종 조사 시기인 12월 10일에 전체 처리구중에서 BE 처리구의 잎수가 60개로 가장 많았다.

필드 재배시험 중 배추 수확기에 지상부 및 지하부의 건물중과 엽폭을 조사한 결과는 Table 3-142에서 보는 바와 같다. BN, BA, BB, BC, BD 및 BE 처리구에 따른 배추 지상부의 건물중은 각각 43.8, 45.3, 49.8, 47.9, 52.8 및 53.7 g plant<sup>-1</sup>이었고, 지하부의 건물중은 각각 4.3, 6.9, 8.4, 6.8, 5.3 및 7.3 g plant<sup>-1</sup>이었다. 전체 처리구 중 BE 처리구에서 지상부 및 지하부 건물중

은 각각 53.7 및 7.3 g plant<sup>-1</sup>로 처리구 중 가장 높았으며, 옆쪽은 무처리구인 BN 처리구에서 12.1 cm로 가장 길었다.



Fig. 3-254. 필드 재배시험 중 배추의 시기별 생육상황 전경.

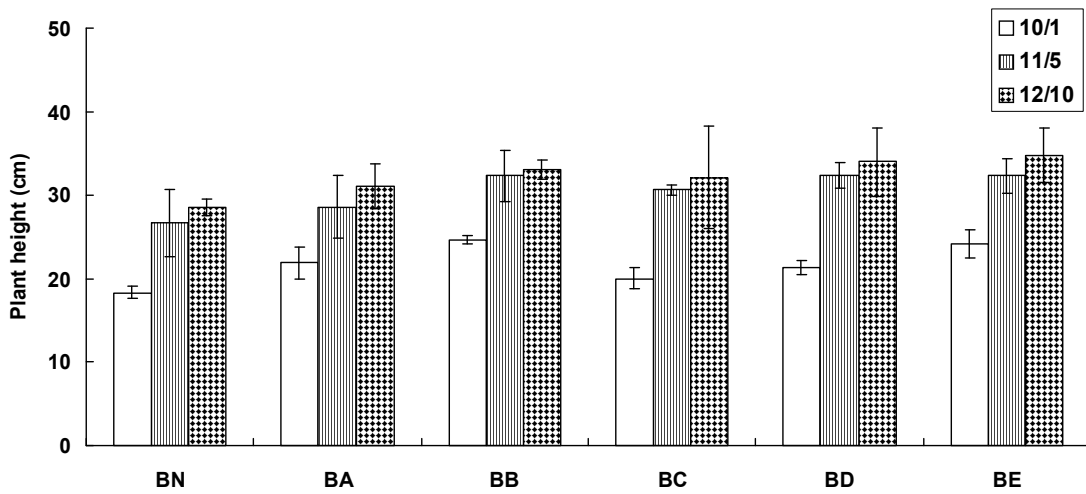


Fig. 3-255. 시기별 배추 초장 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

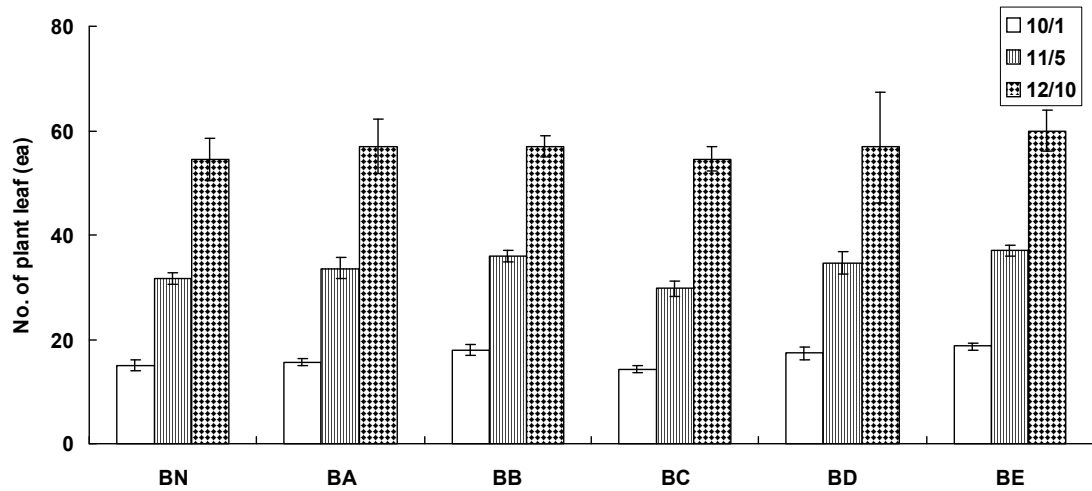


Fig. 3-256. 시기별 배추 잎수 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

Table 3-142. 수확기 배추 생육 특성.

처리구	지상 (g plant <sup>-1</sup> )	지하부 (g plant <sup>-1</sup> )	옆폭 (cm)
BN <sup>†</sup>	43.8	4.3	12.1
BA	45.3	6.9	12.0
BB	49.8	8.4	12.0
BC	47.9	6.8	11.1
BD	52.8	5.3	10.4
BE	53.7	7.3	10.5

(<sup>†</sup>: N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

(나) 양배추

필드 재배시험 중 양배추 수확기 전경과 시기별 및 처리구간별 양배추의 길이를 나타낸 결과는 Fig. 3-257 및 3-258과 같다. 전체 처리구에서 양배추의 길이는 10월 1일에서 11월 5일 사이에 평균 5.54 cm가 성장하였으며 이 기간에 최대생육을 나타내었다. 10월 1일부터 12월 10일까지 조사된 YN, YA, YB, YC, YD 및 YE 처리구의 양배추 길이는 각각 21.9~25.6, 22.2~30.6, 25.0~31.4, 22.5~30.6, 25~34.4 및 25.8~34.9 cm 범위이었다. 최종 조사 시기인 12월 10일에 전체 처리구 중에서 YE 처리구의 양배추 길이가 34.9 cm로 가장 길었다.

필드 재배시험 중 양배추 수확기에 시기별 및 처리구간별 양배추의 잎수를 나타낸 결과는 Fig. 3-259와 같다. 양배추의 잎수는 11월 5일에서 12월 10일 사이에 평균 12.44개로 이 시기에 가장 많이 잎수가 증가하였다. 10월 1일부터 12월 10일까지 조사된 YN, YA, YB, YC, YD

및 YE 처리구의 양배추 잎수는 각각 11.3~25.1, 12.3~26.8, 12.7~24.7, 10.7~28, 12~26.4 및 12.7~32.7개 범위이었다. 최종 조사 시기인 12월 10일에 전체 처리구중에서 YE 처리구의 잎수가 32.7개로 가장 많았다.

필드 재배시험 중 양배추 수확기에 지상부 및 지하부의 건물중과 옆폭을 조사한 결과는 Table 3-143과 같다. YN, YA, YB, YC, YD 및 YE 처리구에 따른 양배추 지상부의 건물중은 각각 47.5, 48.3, 52.2, 51.9, 54.8 및 55.7 g plant<sup>-1</sup>이었고, 지하부의 건물중은 각각 5.8, 5.4, 5.8, 5.6, 5.0 및 6.3 g plant<sup>-1</sup>이었다. 전체 처리구 중 YE 처리구에서 지상부 및 지하부 건물중은 각각 55.7 및 6.3 g plant<sup>-1</sup>로 처리구 중 가장 높았으며, 옆폭도 역시 YE 처리구에서 17.5 cm로 가장 길었다.



10월 1일 (35일 후)

11월 5일 (70일 후)

Fig. 3-257. 필드 재배시험 중 양배추의 시기별 생육상황 전경.

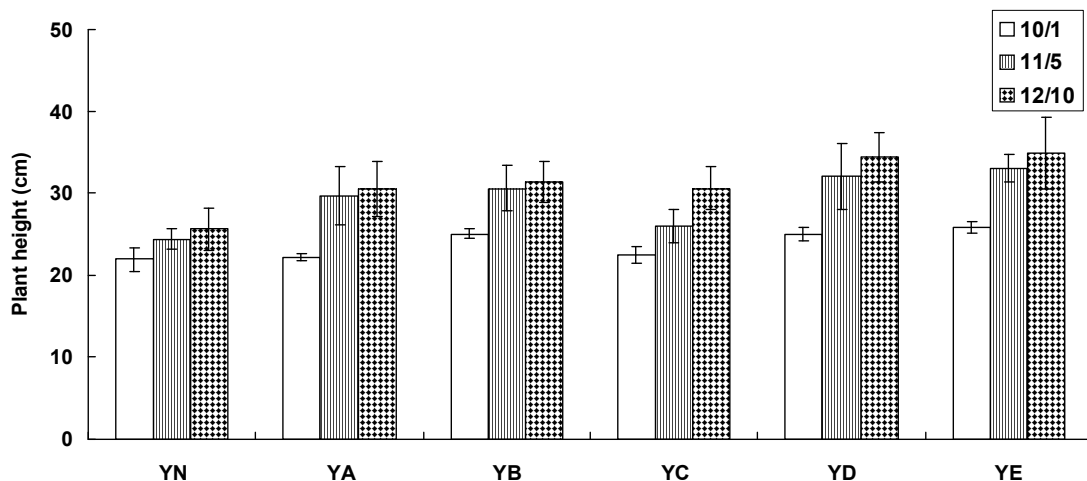


Fig. 3-258. 시기별 양배추 초장 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

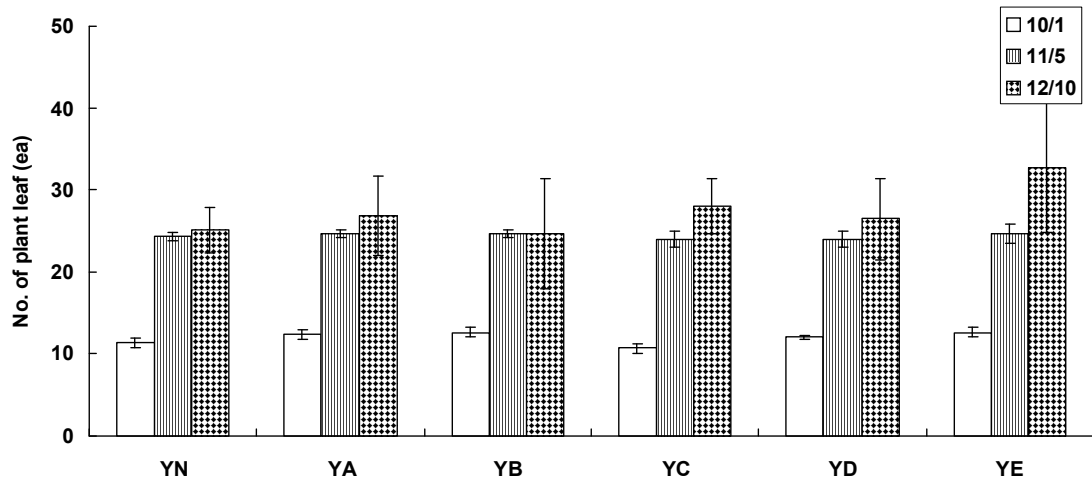


Fig. 3-259. 시기별 양배추 잎수 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

Table 3-143. 수확기 양배추 생육 특성

처리구	지상 (g plant <sup>-1</sup> )	지하부 (g plant <sup>-1</sup> )	옆폭 (cm)
YN <sup>†</sup>	47.5	5.8	14.4
YA	48.3	5.4	12.6
YB	52.2	5.8	14.9
YC	51.9	5.6	14.1
YD	54.8	5.0	16.7
YE	55.7	6.3	17.5

(<sup>†</sup>: N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

(다) 브로콜리

필드 재배시험 중 브로콜리 수확기에 시기별 및 처리구간별 브로콜리의 길이를 나타낸 결과는 Fig. 3-260 및 3-261에서 보는 바와 같다. 전체 처리구에서 브로콜리의 길이는 10월 1일에서 11월 5일 사이에 평균 13.1 cm가 성장하였으며 이 기간에 최대생육을 나타내었다. 10월 1일부터 12월 10일까지 조사된 KN, KA, KB, KC, KD 및 KE 처리구의 브로콜리 길이는 각각 22.5~37.8, 32.9~46.1, 37.4~46, 36.8~51.8, 24.5~52.4 및 34.2~55.8 cm 범위였다. 최종 조사시기인 12월 10일에 전체 처리구 중에서 KE 처리구의 브로콜리 길이가 55.8 cm로 가장 길었다.

필드 재배시험 중 브로콜리 수확기에 시기별 및 처리구간별 브로콜리의 잎수를 나타낸 결과는 Fig. 3-262와 같다. 브로콜리의 잎수는 11월 5일에서 12월 10일 사이에 평균 7.67개로 이 시기에 가장 많이 잎수가 증가하였다. 10월 1일부터 12월 10일까지 조사된 KN, KA, KB, KC, KD 및 KE 처리구의 브로콜리 잎수는 각각 8.3~15.3, 9~15.3, 9.7~16.4, 9.3~18, 9~18.1 및



7.7~18.7개 범위이었다. 최종 조사 시기인 12월 10일에 전체 처리구 중에서 KE 처리구의 잎수가 18.7개로 가장 많았다.

포트 재배시험 중 브로콜리 수확기에 지상부 및 지하부의 건물중과 옆폭을 조사한 결과는 Table 3-144와 같이 KN, KA, KB, KC, KD 및 KE 처리구에 따른 브로콜리 지상부의 건물중은 각각 43.6, 45.6, 46.3, 51.3, 52.9 및 54.3 g plant<sup>-1</sup>이었고, 지하부의 건물중은 각각 3.9, 4.6, 5.2, 6.3, 6.0 및 7.1 g plant<sup>-1</sup>이었다. 전체 처리구 중 KE 처리구에서 지상부 및 지하부 건물중은 각각 54.3 및 7.1 g plant<sup>-1</sup>로 처리구 중 가장 높았으며, 옆폭은 KC 및 KD 처리구에서 10.2 cm로 가장 길었다.



10월 1일 (35일 후)

11월 5일 (70일 후)

Fig. 3-260. 필드 재배시험 중 브로콜리의 시기별 생육상황 전경.

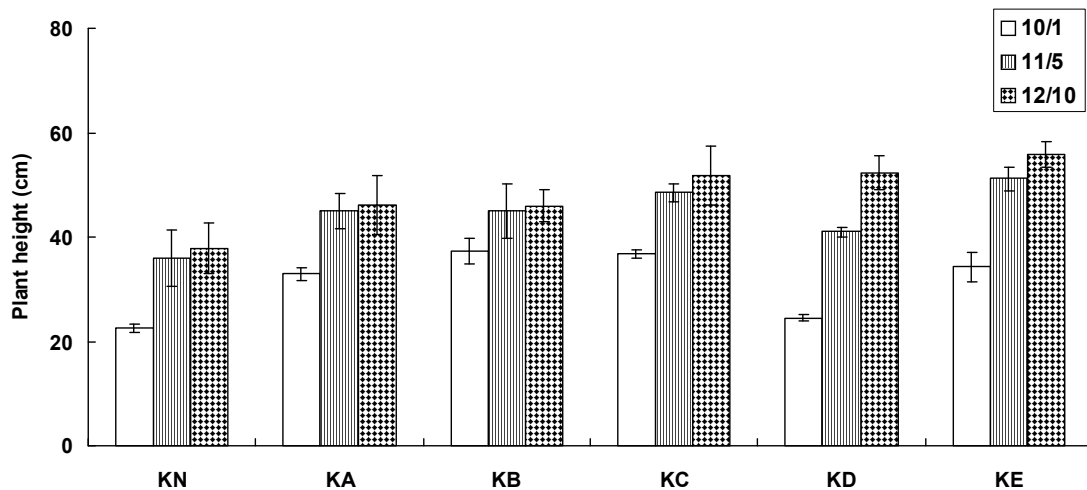


Fig. 3-261. 시기별 브로콜리 초장 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

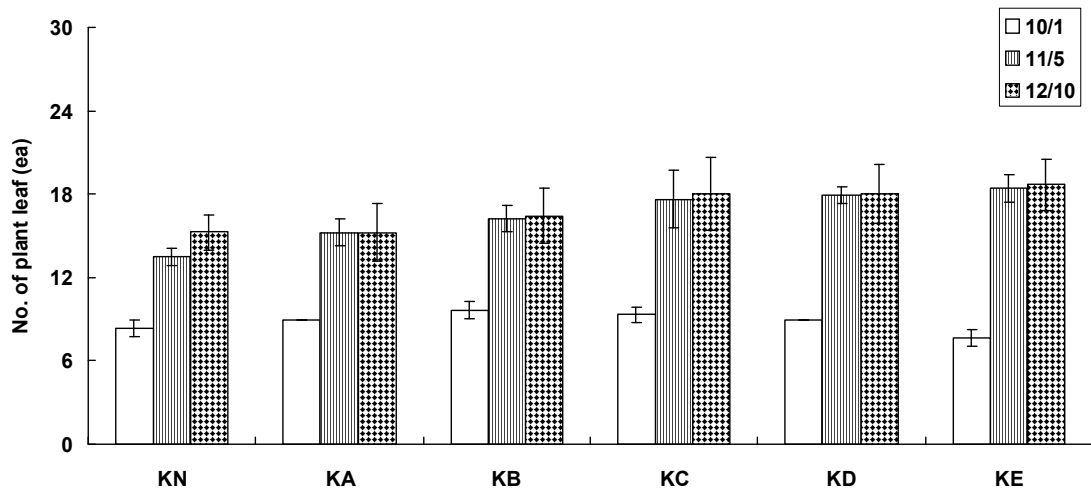


Fig. 3-262. 시기별 브로콜리 잎수 변화. (N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

Table 3-144. 수확기 브로콜리 생육 특성.

처리구	지상 (g plant <sup>-1</sup> )	지하부 (g plant <sup>-1</sup> )	옆폭 (cm)
KN <sup>†</sup>	43.6	3.9	6.9
KA	45.6	4.6	8.6
KB	46.3	5.2	7.4
KC	51.3	6.3	10.2
KD	52.9	6.0	10.2
KE	54.3	7.1	8.4

(<sup>†</sup>: N: Control; A: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup>; B: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup>; C: NPK; D: 부들+돈분 퇴비 1500 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK; E: 부들+돈분 퇴비 3000 kg 10a<sup>-1</sup> + NPK)

#### (4) 수생식물 퇴비와 일반 퇴비의 경제성, 효율성

수생식물 퇴비와 일반퇴비의 경제성 및 효율성을 비교하기 위해 Table 3-145에서 보는 바와 같이 부피, 휴대 및 운반 등의 항목으로 구분하여 비교하였다. 부피, 휴대, 운반 및 보관의 경우 모두 동일하게 조사되었고, 냄새의 경우 수생식물 + 돈분 퇴비의 경우에는 돈분뇨의 투입으로 인해 악취가 발생하고, 일반 퇴비의 경우에는 재료에 따라 약간의 차이는 있겠지만 대부분 퇴비의 재료로 농림부산물, 수산부산물 및 음식물류 폐기물 등으로 공정을 거친 후 제조하기 때문에 악취의 발생이 많다. 수생식물 퇴비의 경우에는 다른 첨가제의 투입이 없기 때문에 부숙과정에서 악취는 발생하지 않기 때문에 주위 민원이 들어올 확률이 매우 낮고, 미관을 훼손

시키지 않는다. 또한 수생식물 퇴비와 수생식물 + 돈분 퇴비에 사용되는 재료는 인공습지에서 매년 절취되는 수생식물을 사용하고 돈사의 저장고에 있는 돈분뇨를 사용하여 퇴비화에 필요한 재료비의 비용은 들지 않기 때문에 경제성 부분에서 일반퇴비에 비해 비교적 높은 것으로 판단된다. 효율성의 경우 일반퇴비에 비해 돈분뇨가 투입되어 양질의 퇴비를 생산하는 수생식물 + 돈분 퇴비의 효율성이 높다고 판단된다. 또한 일반 퇴비의 경우에는 퇴비 사용량이 수생식물 + 돈분 퇴비에 비해 많기 때문에 비교적 효율성 면에서 수생식물 + 돈분 퇴비에 비해 약간 낮은 것으로 판단된다.

Table 3-145. 수생식물 퇴비와 일반퇴비의 비교

항목	수생식물 퇴비	수생식물 + 돈분 퇴비	일반 퇴비
부피	크다	크다	크다
휴대	불편	불편	불편
운반	불편	불편	불편
보관	불편	불편	불편
냄새	거의 없음	많음	많음
성분	고정성분	고정성분	고정성분
성분유실	많음	많음	많음
환경오염	발생가능	발생가능	발생가능
작업성	간편	간편	간편
제조과정	간편	간편	복잡
민원문제	없음	발생가능	발생가능
미관훼손	없음	약간 있음	약간 있음
도시사용	불편	불편	불편
경제성	크다	크다	작다
효율성	미미함	좋음	보통

4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화시 퇴비조건 규격화

- 갈대의 줄기는 마디가 있고 속이 비었으며, 높이는 3 m 정도 자란다. 잎은 가늘고 긴 바소꼴이며 끝이 뾰족하고 잎집은 줄기를 둘러싸고 털이 있다. 갈대는 표면조직이 다른 식물체에 비해 단단한 편이다. 따라서 부숙화가 쉽게 진행되지 않으며 약 1~3 cm 간격으로 다른 수분조절제 보다 더 잘게 절단하여 사용하는 것이 좋다. 퇴비화 기간은 약 25~30일 정도 소요된다.

- 부들은 평균 높이는 1.5 m 정도로 여러해살이풀로서 줄기는 둥근 기둥 모양으로 털이 없고 밋밋하며, 땅속줄기는 길게 옆으로 뻗으며 근락을 이룬다. 부들은 표면조직이 다른 식물체에 비해 부드러운 편이다. 따라서 비교적 쉽게 부숙이 되기 때문에 약 10 cm 간격으로 절단하여 사용하는 것이 좋다. 퇴비화 기간은 약 20~25일 정도 소요된다.
- 줄은 연못이나 냇가에서 자라며, 굵은 뿌리줄기가 진흙 속으로 뻗어가며 잎이 무더기로 나오고 높이는 1~2 m 정도 자란다. 잎은 길이 50~100 cm, 나비 2~4 cm 정도이며 분홍색이고 밑이 좁아지며 주맥이 굵다. 줄은 표면조직이 부드러운 편이기 때문에 퇴비화 시 10 cm 간격으로 절단하여 사용하고 퇴비화 기간은 약 20~25일 정도 소요된다.
- 퇴비제품은 수분함량 조절이 중요하다. 너무 건조시킬 경우 퇴비제품의 효과와 판매에 지장을 가져오므로 주의하여야 하며, 고속 퇴비화 후 습기가 부족하면 미생물의 활동이 저하되어 안정화가 끝나지 않은 상태에서 온도가 떨어지게 된다. 따라서 수분함량은 35% 내외로 조절하여야 한다.
- 돈분뇨를 이용하여 고품질의 수생식물 퇴비를 생산하기 위해서는 원료의 선택에서 최적의 퇴비화 조건을 유지 시켜줄 수 있는 적정 환경조건 유지, 부숙, 후숙 과정 및 이물질의 선별 및 포장에 관계된 일련의 공정과 지속적인 품질검사가 필요하다.
- 퇴비화 과정은 여러 가지 환경적인 조절에 의해서 같은 원료를 사용한다고 하여도 최종 제품인 퇴비의 상태가 다르게 나타날 수 있다. 현재 대부분의 축분 퇴비 공장들이 비슷한 기계교반방식을 적용하고 있으나, 퇴비화 초기의 수분함량 (moisture content), 영양분 균형 (C/N율) 및 통기량 (aeration)에는 공장 마다 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 퇴비화 공정에서는 발효조의 재원에 따라 적정 공기를 공급하는 것과 함께 통기성을 높이기 위해 파쇄목이나 수피 같은 공극조절제를 원료 투입 초기에 축분과 함께 혼합하여 주고, 퇴비화가 안정이 된 후숙공정에서는 단순하게 적재시키는 것 보다 교반이나 공기주입을 통해 호기성 조건을 형성하여 미 발효된 퇴비를 완전하게 안정화시킴으로서 퇴비의 품질을 향상시킬 수 있을 것이다.

#### 5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화 시스템 관리지침

##### 가) 수분조절 관리

- 수분조절은 미생물들의 활발한 활동에 필요하며, 무게비는 45%에서 60% 이내에서 조절되어진다.
- 수분함량은 45% 미만이거나 60%를 넘을 경우 미생물들의 활동이 저하되어 분해속도가 느려지게 되며, 수분함량이 60%를 초과할 경우 침출수 문제를 야기 시킬 수 있다.
- 원료인 돈분뇨에 수분을 골고루 공급할 수 있는 시설이 필수적이며 이러한 수분공급을 통하여 고속퇴비화 과정과 안정화과정에서의 건조 현상을 방지할 수 있다.

#### 나) 공기공급 관리

- 공기공급은 호기성 미생물 분해공정에 매우 중요하다.
- 산소공급은 퇴비화 공정의 안정성을 유지시켜주고 온도조절을 가능하게 한다.
- 부족한 공기공급은 온도상승을 가;저와 미생물의 활동을 떨어뜨리게 된다.
- 또한, 산소부족으로 인해 악취와 유독성 물질이 생성되어 혐기성 분해현상이 나타나게 된다.
- 공기공급이 많을 경우 온도저하와 증발현상을 가속시켜 분해속도를 저하시키기 때문에 공기조절이 필요하다.

#### 다) 기계적 혼합 관리

- 기계적 혼합은 수분의 균일한 공급을 위하여 반드시 필요하다.
- 기계적 혼합은 미생물의 분해속도를 일정하게 유지시켜준다.
- 뭉쳐진 곳을 부숴주고 공기공급을 용이한다.
- 기계적 혼합은 상하로 골고루 섞어주게 되어 균일한 품질의 재생퇴비를 생산한다.

#### 라) 멸균과정 관리

- 멸균과정은 온도 상승에 필요한 충분한 에너지와 돈분뇨가 균일한 미생물적 분해가 가능하도록 잘 섞어야한다.
- 커다란 용기 내에서 퇴비화가 진행되거나 15 cm에서 30 cm 정도의 표면층으로 이루어진 고정층 퇴비화의 경우에는 완전 멸균을 위하여 적어도 3일 이상 55℃ 이상을 유지시켜주어야 한다.
- 모든 부분에서 55℃ 이상을 유지시켜야 하며 그 사이 5번 이상 뒤집어 주어야 한다.
- 멸균과정은 미국 연방코드 40-257의 멸균법 (PERP)에 명시된 미국 환경청 기준에따라 인체 및 동물 그리고 식물에 관계된 모든 병원체를 완전히 파괴시킬 수 있도록 하는 것이다. 이 규정은 또한 재생퇴비를 농업용으로 쓰기 위한 전제조건이 된다.

#### 마) 조업조건과 분석관리

- 정확한 조업조건과 분석관리를 위해서는 퇴비화 시설내에 최소한 수분, 온도 및 악취측정을 위한 실험시설이 갖춰져 있어야 한다.
- 퇴비화 공정을 최적으로 운전하기 위해서는 온도, 습도, 악취, 산소 및 이산화탄소 등의 자료를 정확히 측정하고 기록해야 한다.
- 자료의 정확한 측정과 기록은 미생물에 의한 고속분해를 유도하는 동시에 바람직하지 못한 불완전 분해를 예방할 수 있다.
- 재생퇴비의 산도, 입자규모, 용융염, 유기질, 무기질, 안정도 등의 측정을 위해서는 가능하면 퇴비화시설 내나 인근지역에 실험시설을 갖추고 있어야 한다.

바) 환경 관리

- 분진배출에 대한 제반규정을 충족시키기 위해 먼지가 발생하는 원료수집 장소나 전처리 및 공정 설비에 벽을 설치하여야 하며, 배출공기의 분진도 집진기로 제거하여야 한다.
- 먼지 발생을 억제하기 위하여 포장도로를 청결하게 유지하며 원료를 운반한 차량을 수시로 물청소 하여야 한다.
- 퇴비를 지역사회에 좋은 인상으로 심어주기 위해 분쇄기 등에서 발생하는 소음을 차단하여 소음배출기준을 만족시켜야 한다.
- 작업원의 안전을 위해 보호 장구 및 설비를 마련해야 한다.
- 빗물은 기준에 따라 안전하게 모아 사용하거나 처리해야 한다.
- 만일 침출수가 생겼을 경우에는 원료 돈분뇨의 수분공급에 사용하거나 따로 처리해야 하며 멸균이 끝난 상태에서는 절대로 침출수를 사용해서는 안될 뿐만 아니라 지하수의 수질을 수시로 점검해야 한다.
- 퇴비화 시설내에는 이산화탄소, 암모니아 및 안개의 축적을 방지하고 신선한 공기를 공급하기 위해 환풍장치를 설치해야 한다.
- 이산화탄소, 암모니아 등의 기체들이 건물천장 부분에 응축되는 것을 방지하거나 억제할 수 있도록 특별히 처리되어야 한다.
- 작업원의 안전과 건물의 부식 예방 및 악취발생을 억제하기 위하여 배출공기를 수시로 분석하여야 한다.

## 제 4 절 요약

### 1. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

가. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발을 위해 서부경남 인근 지역의 축산농가에서 배출되는 축산폐수의 종류별 이화학적 특성을 각각 조사하였고, batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성과 column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리능력을 조사하여 축산폐수처리기술 개발을 위한 기초연구를 수행하였다. 이들 기초연구결과를 이용하여 자원순환형 축산폐수처리기술을 개발하기 위해 소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별, 처리공법의 조합방법별 및 축산폐수 부하량별로 구분하여 최적조건을 조사한 후 이들 최적조건하에서 자원순환형 축산폐수처리기술 개발을 위한 기반연구로 축산폐수 종류별, 특수여재 투입별 및 수생식물을 이용한 전처리방법별로 구분하여 수처리 효율을 각각 조사하였다. 또한 축산폐수처리장치에서 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량, 여재의 이화학적 특성 및 미생물상 변화 등을 조사하였다.

#### 1) 축산폐수 종류별 이화학적 특성

- 서부경남 축산농가에서 배출되는 축산폐수 종류별 BOD : N : P의 비율은 계분뇨의 경우 7.9 : 1.7 : 1이었다.
- 우분뇨의 경우 BOD : N : P의 비율은 26.1 : 4.3 : 1이었다.
- 돈분뇨의 경우 BOD : N : P의 비율은 28.5 : 4.0 : 1이었다.
- 계분뇨는 생물학적 오폐수처리의 최적 조건인 BOD : N : P = 100 : 5 : 1에 비해 질소와 유기물의 함량이 매우 부족한 편이었고, 우분뇨와 돈분뇨는 유기물의 함량이 매우 부족하였다.

#### 2) Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착 특성

- Batch 실험에서 여재종류별 암모니아성 질소의 흡착능은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 모두에서 제올라이트가 다른 여재에 비해 높았다.
- 여재종류별 인의 흡착능은 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식 모두에서 방해석이 다른 여재에 비해 높았다.

#### 3) Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리

- 제올라이트는 암모니아성 질소의 처리효율이 가장 높았으며, 방해석은 인의 처리효율이 가장 높았다.

#### 4) 소형 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험

- 소형 축산폐수처리장치에서 여재종류별, 처리공법의 조합방법별 및 축산폐수 부하량별로 구분하여 최적조건을 조사한 결과 최적 여재는 왕사이었고, 최적 조합방법은 호기-혐기 조합형이었으며, 최적 축산폐수 부하량은  $100 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이었다.
- 축산폐수 종류별 수처리 효율은 COD 및 SS의 처리효율은 축산폐수 종류에 따라 큰 차이 없이 높은 처리효율을 보였다.
- 축산폐수 종류별 T-N 및 T-P의 처리효율은 계분뇨를 제외한 우분뇨와 돈분뇨에서 대조구인 축산폐수와 별 차이 없이 비슷한 처리효율을 보였으나, 계분뇨의 경우 처리효율이 약간 낮았다.
- 특수여재를 주입한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 84, 94, 65 및 98%로 특수여재를 주입하지 않은 대조구에 비해 질소 및 인 처리효율이 각각 15% 및 7% 향상되었다.
- 소형 축산폐수처리장치의 호기성조에 이식한 갈대의 수분흡수율은 213%로 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 톱밥과 벚짚의 수분흡수율과 유사하였다.
- 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포의 수분흡수율은 467%로 기존의 톱밥과 벚짚의 수분흡수량인 267% 및 222%에 비해 월등히 높아 수분조절제로서의 가치가 충분한 것으로 판단된다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 축산폐수 전처리 효율을 조사한 결과 호기성조에 사용된 갈대를 건조/분쇄하여 축산폐수를 전처리한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 57, 62, 48 및 29%이었다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 수생식물의 축산폐수 전처리 효율을 조사한 결과 혐기성조에 사용된 노랑꽃창포를 건조/분쇄하여 축산폐수를 전처리한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 67%, 85%, 54% 및 36%로 노랑꽃창포가 갈대에 비해 전반적으로 높은 전처리 효율을 보였으며, 특히 노랑꽃창포의 SS 전처리효율은 갈대에 비해 23%정도 높았다.
- 수생식물을 이용한 전처리 방법에 따른 오염물질의 수처리 효율을 조사한 결과 전처리를 하지 않은 대조구에 비해 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 87, 94, 50 및 91%이었다.
- 수생식물을 이용하여 전처리를 한 경우 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 95, 99, 95 및 97%로 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율이 각각 8, 5, 45 및 6%가 향상되었다.
- 특히, 수생식물을 이용하여 전처리한 경우의 최종방류수 중 COD, SS, T-N 및 T-P의 함량은 각각 47, 29, 58 및  $2.24 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 모든 오염물질에서 현행 “가축분뇨 관리 및 이용에 관한 법률”에서 가축분뇨 방류수 수질기준인 SS  $150 \text{ mg L}^{-1}$ , T-N  $850 \text{ mg L}^{-1}$  및 T-P  $200 \text{ mg L}^{-1}$ 을 만족하였다.



- 소형 축산폐수처리장치에서 호기성조 및 혐기성조에 이식한 수생식물의 생육시기별 식물체 중 T-N 및 T-P 함량은 왕사와 쇠석의 경우 수생식물의 생육 시일이 경과함에 따라 약간씩 증가하거나 별 차이 없었다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 여재의 유기물, T-N 및 T-P의 함량을 조사한 결과 모든 조에서 축산폐수 처리 시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.
- 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리시기별 여재 표면의 미생물상 변화를 조사한 결과 1차 처리인 호기성조 및 2차 처리인 혐기성조 모두에서 총세균이 가장 많았다.
- 질소대사에 관련하는 미생물의 밀도분포는 호기성조에서는 암모니아 산화세균이 많았으며, 혐기성조에서는 탈질균과 질산환원균이 많았다.
- 축산폐수 원수의 일반세균 및 대장균군은 호기성조 처리수에서 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였으며, 방류수가 호기성조 처리수에 비하여 다시 큰 폭으로 감소하였다.

#### 나. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구

자원순환형 축산폐수처리장에서 생산되는 수생식물의 퇴비화 기술을 개발하기 위해 축산폐수 및 수생식물체 종류별 비료적 가치를 분석하였고, 수생식물체별 퇴비화 과정중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴을 조사하였다. 또한 소형퇴비화조를 이용하여 수생식물을 퇴비화 하였고 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성을 검토하여 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화를 실시하였다.

##### 1) 축산폐수 종류별 비료 가치 분석

- 축산폐수 종류별 비료적 가치를 평가하기 위해 한육우 축산폐수의 물리화학적 특성 및 중금속 함량을 조사한 결과 pH는 7.5~9.2로 축산폐수 종류별 차이가 약간 있었다.
- 한육우 축산폐수 내 비료의 주성분인 T-N 및 T-P의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 0.310~0.490% 및 22.67~63.21 mg L<sup>-1</sup> 범위로 조사되었다.
- 한육우 축산폐수 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 K의 함량은 1,983~6,891 mg L<sup>-1</sup> 범위이었고, Ca의 함량은 26.1~89.6 mg L<sup>-1</sup> 범위, Mg의 함량은 236.8~693.6 mg L<sup>-1</sup> 범위이었으며, Na의 함량은 298.6~789.5 mg L<sup>-1</sup> 범위이었다.
- 돼지 축산폐수의 경우 T-N의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 0.21~1.25% 범위로 평균 0.61%이었으며, 한육우 폐수의 평균 T-N 함량에 비해 높았다.
- 돼지 축산폐수 내 T-P의 함량은 종류 및 계절에 상관없이 49.4~2,745 mg L<sup>-1</sup> 범위로 평균 약 733 mg L<sup>-1</sup>으로 T-N의 함량과 비슷하게 한육우 축산폐수의 평균 T-P 함량에 비해 높았다.
- 돼지 축산폐수 내 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 각각 512~4,562, 67.5~2,309, 34.7~1,334 및 88.5~1,048 mg L<sup>-1</sup> 범위로 조사되었다.

- 한육우 및 돼지 축산폐수의 중금속 함량은 여름철에 낮고, 겨울철에 높은 경향이였다.

#### 2) 수생식물 종류별 비료적 가치 분석

- 수생식물 종류별 비료적 가치를 분석하기 위한 수생식물은 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대, 줄, 물잔디, 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포, 사초류, 미나리 및 백련으로 총 11종이였다.
- 수생식물별 및 시기에 상관없이 수분함량은 50.2~87.9% 범위로 미나리의 수분함량이 가장 높았다.
- 수생식물별 유기물의 함량은 전반적으로 8월에 비해 11월에 높았으며 평균 90% 이상의 함량을 나타냈다.
- 수생식물별 C/N율은 유기물 함량과 비슷한 경향으로 8월에 비해 11월에 높았으며, 시기별 및 수생식물 종류에 상관없이 17.3~38.9로 조사되였다.

#### 3) 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴

- 갈대, 줄 및 부들의 경우 수확 시기별 식물체 퇴비화 과정 동안의 산소 소비량은 전반적으로 8월에 수확한 식물체가 11월에 수확한 식물체에 비하여 많았다.
- 퇴비화 최적온도는 갈대의 경우 55°C이였고, 줄, 부들 및 혼합식물체의 경우 55~65°C이였다.
- 소형 퇴비화조를 이용하여 수생식물별 퇴비화한 결과 수확시기에 상관없이 갈대, 부들, 줄 및 혼합식물체에서 각각 퇴비화 6일째 (69.6°C), 4일째 (75.0°C), 10일째 (75.4°C) 및 10일째 (73.7°C)에 최고온도를 기록하였다.
- 최고온도 도달시까지 발생된 CO<sub>2</sub>량은 수확시기에 상관없이 갈대에서 약 465 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>, 부들은 510 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>, 줄에서 약 747 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup> 및 혼합식물체에서는 약 644 g CO<sub>2</sub> 30 kg<sup>-1</sup>으로 각각 최고 CO<sub>2</sub>량을 나타내었다.

#### 4) 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토

- 퇴비화 기간 중 NH<sub>3</sub> 발생량을 나타내는 누적 NH<sub>3</sub> 발생곡선 및 단계별 NH<sub>3</sub> 발생 패턴은 NH<sub>3</sub>는 퇴비화 후기에 발생되기 시작하였다.
- 퇴비화 40일 동안 NH<sub>3</sub> 총 발생량은 톱밥에서 약 31.1 mg NH<sub>3</sub>/30 kg, 혼합식물체에서 약 61 mg NH<sub>3</sub>/30 kg으로 톱밥보다 혼합식물체를 사용한 퇴비화조에서 많았다.
- 퇴비화 단계별로는 부숙기인 26~40일 사이에 톱밥은 전체 발생량의 약 82%, 혼합식물체에서는 약 63%가 발생되였다.

#### 5) 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화

- 현장 퇴비화를 뒤집기 공법을 이용하여 수생식물체 퇴비화를 조사한 결과 퇴비 부숙기준에 맞게 조사되였다.

다. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계방법 연구

- 수생식물여과조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치에서 최종방류수 중의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 83, 89, 63 및 87%이었다.
- 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 소형 축산폐수처리장치에서 최종방류수의 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 96, 95, 86 및 92%이었다.
- 수생식물여과조 및 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 처리공법은 자연정화공법의 전처리로서 질소와 인 처리효율을 향상시킬 수 있어 고농도의 축산폐수를 자연정화공법으로 처리하기 위해 필요할 것으로 판단된다.

## 2. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발

가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 개발

본 연구는 1차년도 연구결과의 최적조건을 이용하여 진주시 이반성면에 소재한 실제 축산농가에 자원순환형 축산폐수처리장을 설계 및 시공한 후 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리기술을 개발하기 위해 축산폐수 처리시기별, 부하량별, 주입방법별 및 질소 및 인 처리효율 극대화 방안 연구를 수행하였다.

1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서의 수처리 효율

- 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율은 전반적으로 처리시일이 경과함에 따라 안정적인 처리가 가능하였다.
- 특히 고농도의 오염물질이 처리장내에 유입됨에도 불구하고 최종방류수에서는 축산폐수 배출허용기준을 만족하였다.
- 축산폐수 부하량에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 축산폐수 부하량 600 L day<sup>-1</sup>까지는 안정적인 수처리 효율을 보였으나, 축산폐수 부하량 900 L day<sup>-1</sup> 주입시 수처리 효율이 약간 감소하는 경향이었다.
- 자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 주입방법에 따른 COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 연속적 주입의 경우 각각 99.5, 99.8, 99.0 및 99.8%이었고, 간헐적 주입의 경우 각각 99.2, 99.5, 98.5 및 99.3%로서 두 주입방법 모두 별 차이 없었다.
- 현장 축산폐수처리장에서 질소 및 인의 처리효율 극대화 방안을 구명하기 위하여 최종방류수의 호기성조 재주입 비율별, 수생식물여과조의 여과시간별 및 활성슬러지조 체류시간별로 수처리 효율을 조사한 결과 질소 및 인 처리효율이 향상이 가능한 공법개선은 축산폐수 재주입방법의 경우 재주입 비율 100%조건이었고, 수생식물여과조의 여과시간의 경우 여과시간 90분이었으며, 활성슬러지조 체류시간의 경우 체류시간 24시간이었다.

## 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성

- 3차 처리인 호기성조 여재의 pH는 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 낮아지는 경향이었고, 특히, 여재의 표층이 심층에 비해 낮았다.
- 4차 및 5차 처리조인 혐기성조 I 및 혐기성조 II의 pH는 전반적으로 1차 처리조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과할수록 감소하였고, 처리조내 처리수의 유하거리가 증가할수록 약간씩 감소하는 경향이였다.
- 현장 축산폐수처리장에 사용된 원 여재의 유기물 함량은 0.59~0.69% 범위이였다. 3차 처리조에서 여재의 유기물 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다.
- 4차 및 5차 혐기성조의 여재 중 유기물 함량도 3차 호기성조와 비슷한 경향으로 전반적으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였다.
- 3차 처리조인 호기성조에서 여재 중 T-N의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 높아지는 경향이였다. 4차 및 5차 혐기성조 여재의 T-N의 함량은 3차 호기성조와 비슷한 경향으로 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이였고, 처리조내 처리수의 유하거리가 증가함에 따라 감소하는 경향이였다.
- 3차 호기성조에서 여재 중 T-P의 함량은 표층이 심층에 비해 증가폭이 매우 큰 경향으로 축산폐수 처리 5개월 후에는 표층내 T-P의 함량이  $48.6 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았다. 이와 같이 3차 호기성조 표층에서 T-P의 함량이 높은 것은 상기 유기물의 함량과 유사한 경향이였다.
- 여재 중 K, Ca, Mg 및 Na의 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.

## 3) 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량

- 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 3차 호기성조 및 4차, 5차 혐기성조 I, II에 이식한 수생식물의 생육시기별 식물체 중 T-N 및 T-P 함량은 수생식물의 생육 시일이 경과함에 따라 약간씩 증가하거나 별 차이 없었으며, 다른 무기성분 및 중금속도 유사한 경향이였다.
- 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시일이 경과함에 따른 여재의 유기물, T-N 및 T-P의 함량을 조사한 결과 모든 조에서 축산폐수 처리 시일이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향이였다.
- 특히, 3차 처리인 호기성조는 표층이 다른 지점에 비해 약간 높은 경향이였으며, 다른 무기성분 및 중금속도 유사한 경향이였다.

## 4) 자원순환형 축산폐수처리장에서의 미생물상

- 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 처리시기별 여재 표면의 미생물상 변화를

조사한 결과 3차 처리인 호기성조 및 4차 및 5차 처리인 혐기성조 모두에서 총세균이 가장 많았다.

- 특히 모든 미생물은 전반적으로 호기성조가 혐기성조에 비해 많이 분포하였다.
- 질소대사에 관련하는 미생물의 밀도분포는 호기성조에서는 암모니아 산화세균이 많았으며, 혐기성조에서는 탈질균과 질산환원균이 많았다.
- 축산폐수 원수의 일반세균 및 대장균군은 수생식물여과조 및 활성슬러지조 처리수에서 축산폐수 원수에 비해 큰 폭으로 감소하였다.

#### 나. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화기술 개발

자연정화공법을 이용하여 자원순환형 퇴비화 기술 개발을 위해 축산폐수 처리장내에 퇴비화조를 설치하여 퇴비화 기간 동안 수생식물별 온도, pH, 총 질소, 총 탄소 및 C/N을 변화와 수생식물별 퇴비화 과정 중 분해특성을 각각 조사하였다. 또한 축산폐수처리장에서 생육중인 수생식물체의 퇴비재료 및 비료적 가치를 평가하였으며, 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성을 검토하였다.

##### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율

- 수생식물별 퇴비화 과정 중 온도 변화는 갈대, 부들 및 줄 처리구에서 최고 온도는 65~70°C 범위로 부들이 70°C로 가장 높았으며, 이후 모든 처리구의 온도는 퇴비화 25일 후부터 40°C내외로 안정한 상태를 유지하였다.
- pH는 처리구에 상관없이 퇴비화 20일째까지는 pH가 꾸준히 증가하였으며 이후 7.77~7.95의 범위로 유지하였다.
- 총 질소의 함량은 모든 처리구에서 퇴비화가 진행됨에 따라 점점 증가하는 경향이였다.
- 총 탄소의 함량은 총 질소의 함량과 대조적으로 퇴비화가 진행될수록 점점 감소하는 경향으로 조사되어, 갈대, 부들 및 줄 처리구에서 C/N율은 점점 감소하는 경향이였다.
- 수생식물별 퇴비의 부숙도를 판정한 결과 갈대는 중숙 퇴비, 부들은 완숙 퇴비 및 줄은 중숙 퇴비로 조사되었다.
- 수생식물별 퇴비의 무게 감소율은 갈대, 부들 및 줄이 각각 28, 30 및 33%이었으며, 부피 감소율은 64~71% 범위로 부들의 부피 감소율이 가장 높았다.
- 퇴비 생산량은 퇴비화 이전의 인공습지에서 채취한 갈대, 부들 및 줄의 단위 면적당 무게는 각각 0.981, 1.101 및 2.002 kg m<sup>-2</sup>였으며, 퇴비화 후 무게는 0.706~1.341 kg m<sup>-2</sup>로 단위 면적당 무게가 가장 많은 줄의 퇴비 생산량이 1.341 kg m<sup>-2</sup>로 가장 높았다.
- 돈분 퇴비와 자연퇴비의 품질을 비교한 결과 유기물 및 수분 함량은 퇴비화 공정규격내 일반퇴비의 유기물 및 수분 함량 기준에 적합하였다.
- 돈분 퇴비의 C/N율은 18.2~27.3 범위였고, 자연퇴비의 C/N율은 31.4~42.8이었다. 돈분퇴비와 자연퇴비의 T-C 함량은 차이가 크지 않았지만, T-N 함량의 증가 폭이 돈분 퇴비

가 더 크게 나타나 C/N율이 자연퇴비에서 약간 높게 측정되었다. 중금속의 경우 퇴비화는 돈분뇨와 수생식물로만 퇴비화를 시켰기 때문에 중금속의 함량이 함유할 수 있는 유해 성분의 최대량보다 낮게 조사되었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 퇴비화를 위한 최적 수생식물은 부들이라고 판단된다.

### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석

- 식물체별 단위면적 ( $m^2$ )당 biomass 건중량은 단위면적내 식생의 개체수와 식생의 외형적인 형태 및 건체중량과 생체중량의 비율에 따라 차이가 크게 났으며 전체적으로 8월에 비하여 11월에 단위면적당 biomass 생산량이 증가하였다.
- 수생식물별 단위면적 ( $m^2$ )당 biomass 생산량은 11월의 경우 창포가 약 1.579 kg으로 가장 많았고, 다음으로 갈대, 부들 및 줄이 약 0.155~0.776 kg 범위였으며, 갈대가 약 0.155 kg으로 가장 작았다.
- 축산폐수처리장내 인공습지에서 생장한 식물체의 주요 비료성분의 평균 함량을 수생식물별로 조사한 결과 질소의 함량은 줄 (1.92%) > 부들 (1.89%) > 창포 (1.24%) > 갈대 (0.38%)로 줄이 가장 높았다.
- 식물체별 인산 ( $P_2O_5$ )의 평균 함량은 창포 (0.295%) > 줄 (0.245%) > 부들, 갈대 (0.15~0.21%)로 창포에서 가장 높았다.
- 식물체별 칼리 및 칼슘의 평균 함량은 각각 5.81 및 0.808% 다른 식물체들에 비해 높았다.
- 마그네슘의 ( $MgO$ ) 평균 함량은 부들이 0.39%로 가장 높았으며, 갈대가 0.148%로 다른 식물체들에 비해 낮았다.
- 수생식물별 비료성분 함량은 다소 차이는 있지만 전반적으로 줄과 창포에서 높았고 갈대는 모든 성분에서 비교적 낮은 편이었다.

### 3) 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토

- 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토를 위해 복내 바이오파크 인공습지의 퇴적층내 화학적 특성을 조사하였다.
- 복내바이오파크 인공습지 퇴적층내 pH 및 EC는 1, 2 및 3처리구에서 각각 6.17~6.20 및 4.04~4.07  $dS\ m^{-1}$  범위로 큰 차이 없이 비슷하였다.
- 복내 바이오파크 인공습지에서 조사된 퇴적물의 유해중금속의 함량은 유해 중금속 허용치보다 낮은 결과로 조사되어 토양개량제로서 이용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화

#### 가. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 실용화

2차년도의 자연정화공법에 의한 현장 축산폐수처리장의 최적조건을 활용하여 현장 축산폐수처리장의 실용화하기 위한 설계 규격화 및 관리지침을 제시하기 위해 2차년도의 설계 모델에서 불필요한 요소를 제외하고 수정 및 보완하여 공법개선된 현장 축산폐수처리장을 설계 및 시공하였다.

공법개선된 축산폐수처리장의 수처리 효율 조사는 축산폐수 부하량별, 축산폐수 처리시일별, 계절별, 이상기후 시, 오염물질의 반응비 및 분해속도 및 용존형태별 수처리 효율을 각각 조사하였다. 그리고 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량을 조사하였고, 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 및 여재의 무기성분 흡착특성을 조사하였으며, 축산폐수처리장의 미생물상을 조사하였다. 이들 결과를 통해 실제 축산농가의 여러 환경요인하에서 다양한 적용성 조사와 함께 실제 국내 다양한 규모의 축산농가에서 실용화를 위한 적합성과 효율성을 모두 검증하였다. 또한 이들 수질, 수생식물, 여재 및 미생물 결과를 이용하여 본 축산폐수처리장에서 오염물질 수지를 조사하여 향후 국내 축산농가에 배출되는 축산폐수를 효과적으로 처리하기 위한 축산폐수처리장의 설계 및 시공을 규격화하고 축산폐수처리장의 관리 및 운영지침을 제시하였다.

#### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 수처리 효율

- 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수 부하량에 따른 처리 효율을 조사한 결과 축산폐수처리장의 COD, T-N 및 T-P 처리효율은 1차 처리인 활성슬러지조 처리수 및 2차 처리조인 호기성조의 경우 전반적으로 축산폐수 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 점점 감소하는 경향이었다.
- 3차 처리인 혐기성조 처리수의 경우 전반적으로 축산폐수 부하량에 따라 별 차이 없이 안정적으로 처리되었다.
- 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장에서 축산폐수처리 처리시일에 따른 수처리 효율을 조사한 결과 축산폐수 원수의 COD, SS, T-N 및 T-P 함량은 각각 9,753~20,833, 9,600~27,113, 4,290~7,225 및 461~895 mg L<sup>-1</sup>범위로서 시기에 따라 매우 불규칙하였으며, 축산폐수 처리시일이 경과할수록 축산폐수처리장의 COD, SS, T-N 및 T-P 처리효율이 점점 안정화되는 경향이었으며, 방류수 중 COD, SS, T-N 및 T-P 함량은 각각 8.3~278.5, 3.1~243, 8.6~118.4 및 0.01~11.8 mg L<sup>-1</sup>로 안정적인 처리가 되었다. 하지만 본 자원순환형 축산폐수처리장은 고농도 축산폐수가 유입되기 때문에 5년 이상의 장기간 정화효율을 검토한 후 안정성과 효율성을 확보한 뒤 실용화 되어야 할 것으로 판단된다.
- 공법개선된 현장 축산폐수처리장에서 각 처리조별 오염물질의 분해속도는 전반적으로 1차 처리인 활성슬러지조는 COD > T-N > T-P > SS 순이었고, 2차 처리인 호기성조는

T-P > COD > SS > T-N 순이었으며, 3차 처리인 혐기성조는 SS > T-P > T-N > COD 순이었다.

- 활성슬러지조-호기성조-혐기성조 조합형 현장 축산폐수처리장에서 계절별 수처리 효율을 조사한 결과 COD, SS, T-N 및 T-P 모두 겨울철에는 약간 감소하는 경향이었으며, 여름철에는 가장 높은 처리효율을 보였다.
- 공법개선된 현장 축산폐수처리장에서 운전 10개월 동안의 이상기후에서의 수처리 효율을 조사한 결과 방류수 중의 COD 처리효율은 장마기가 99.8%로 가뭄기와 흑한기의 98.1% 및 89.6%에 비해 높은 처리효율을 보였고, 방류수 중의 SS 처리효율은 흑한기에 98.8%로 장마기와 가뭄기에 비해 낮았다. T-N 처리효율은 SS와 동일한 경향으로 흑한기에 98.5%로 가장 낮은 처리효율을 보였고, T-P의 처리효율은 이상기후와 상관없이 99%이상의 높은 처리효율을 보였다. 하지만 본 연구는 단기간의 실험의 결과로 보다 안정적인 수처리효율의 결과는 장기간의 정밀 모니터링을 통하여 도출되어야 할 것으로 판단된다.

## 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성

- 공법개선된 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성은 pH, EC, 유기물, T-N, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, T-P 및 기타 무기성분 함량은 축산폐수 처리시일이 경과함에 따라 미미하게 증가하는 경향이었다.
- 유기물 및 T-N 함량은 축산폐수처리장 2차 처리인 호기성조의 표층이 다른 층위에 비해 약간 높았다.
- 여재의 무기성분 흡착특성을 조사한 결과 축산폐수 처리 9개월 후의 여재 표면은 원 여재의 표면에 비해 무기성분 함량이 증가하였다.

## 3) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안

- 현장 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 전반적으로 왕성하게 성장하였으며, 겨울철에는 모든 수생식물이 고사하였다.
- 무기성분 함량은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 비슷하거나 약간씩 감소하는 경향이었다.
- 수생식물의 생육시기에 따른 질소 흡수량은 2차 처리인 호기성조 및 3차 처리인 혐기성조 모두 수생식물의 이식 후 시일이 경과함에 따라 점점 증가하였고, 질소 흡수량이 최대인 수생식물이식 후 5개월인 2011년 9월에 각 수생식물의 질소 흡수량은 2차 처리인 호기성조에 이식한 갈대가 0.15 g plant<sup>-1</sup>이었으며, 3차 처리인 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포 및 부들이 6.75 및 1.14 g plant<sup>-1</sup>로 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 질소 흡수량이 매우 높았다.
- 인 흡수량이 최대인 수생식물 이식 후 5개월 후인 2011년 9월에 각 수생식물의 인 흡수량은 2차 처리인 호기성조에 이식한 갈대가 0.54 g plant<sup>-1</sup>이며, 3차 처리인 혐기성조에 이식한 노랑꽃창포 및 부들이 1.47 및 0.63 g plant<sup>-1</sup>로 노랑꽃창포 >> 부들 > 갈대 순이



었고, 특히 노랑꽃창포가 다른 수생식물에 비해 월등히 높은 흡수량을 보였다.

4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화

- 여재 표면의 생물막은 2차 처리인 호기성조 모두에서 총세균수가 가장 많았다.
- 모든 미생물은 전반적으로 2차 처리인 호기성조에서 3차 처리인 혐기성조보다 많이 분포하였고, 모든 미생물상은 축산폐수 처리시일이 경과할수록 점차 증가하였다.
- 공법개선된 현장 축산폐수처리장의 축산폐수 처리시일에 따른 여재 표면의 생물막은 총세균수가 가장 많았고 그 다음으로 일반세균, 셀룰로오스 분해균, 사상균 순이었다.
- 암모니아산화균 및 아질산산화균은 2차 처리인 호기성조가 3차 처리인 혐기성 처리조에 비해 많았다. 질산화원균 및 탈질균은 전반적으로 혐기성조가 호기성조에 비해 많았고, 깊이에 따라서는 전반적으로 심층이 표층에 비해 많이 분포하였다.

5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수치

- COD 총 부하량은 연간 3293.4 kg이었으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 COD 총 부하량의 78.5% 처리되었으며, 2차 처리인 호기성조에서 COD 총 부하량의 8% 처리되었고, 3차 처리인 혐기성조에서 COD 총 부하량의 12.5%가 처리되어 총 COD 방류량은 COD 총 부하량의 1%이하로 방류되었다.
- SS 총 부하량은 연간 4779.5 kg정도였으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 SS 총 부하량의 72.2% 처리되었으며, 2차 처리인 호기성조에서 SS 총 부하량의 12.7% 처리되었고, 3차 처리인 혐기성조에서 SS 총 부하량의 14.5% 처리되었다. SS 총 방류량은 연간 0.15 kg으로 SS 총 부하량의 0.6%이하였다.
- T-N의 총 부하량은 연간 1473.3 kg정도였으며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-N 총 부하량의 79.7% 처리되었다. 2차 처리인 호기성조에서 T-N 총 부하량의 5.8% 처리되었으며, T-N 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-N 총 부하량의 0.0024%이었으며, 여재의 흡착량은 T-N 총 부하량의 0.46%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-N 총 부하량의 12.5%이었다. 3차 처리인 혐기성조에서 T-N 총 부하량의 13.5% 처리되었으며, T-N 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-N 총 부하량의 0.033%이었으며, 여재의 흡착량은 T-N 총 부하량의 0.96%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-N 총 부하량의 12.51%이었다. T-N 총 방류량은 연간 11.7 kg으로 T-N 총 부하량의 1.0%이하였다.
- T-P의 총 부하량은 연간 172.2 kg정도이며, 1차 처리인 활성슬러지조에서 T-P 총 부하량의 68.6% 처리되었다. 2차 처리인 호기성조에서 T-P 총 부하량의 20.1% 처리되었으며, T-P 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-P 총 부하량의 0.022%이었으며, 여재의 흡착량은 T-P 총 부하량의 1.57%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리되는 T-P 총 부하량의 18.51%이었다. 3차 처리인 혐기성조에서 T-P 총 부하량의 10.9% 처리

되었으며, T-P 처리량 중 수생식물의 흡수량은 T-P 총 부하량의 0.13%이었으며, 여재의 흡착량은 T-P 총 부하량의 3.32%이었고, 수생식물과 여재에 의한 처리 외의 기타처리는 T-P 총 부하량의 17.5%이었다. T-P 총 방류량은 연간 0.57 kg으로 T-P 총 부하량의 0.4%이하였다.

#### 나. 자원순환형 수생식물 퇴비화기술 실용화

1, 2차년도 연구 결과를 바탕으로 보완 및 개선한 퇴비화조는 송풍형 정치 더미식 퇴비화 공법으로 실시하였고, 폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산 및 품질검정을 하였으며, 퇴비화조 설계 규격화 및 관리지침을 제시하였다. 또한 생산된 퇴비의 작물에 대한 시용효과 시험을 하였다.

##### 1) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산

- 수생식물별 연간 퇴비 생산량을 조사하기 위한 수생식물은 전남 보성군 복내면 복내 바이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄의 연간 생산량을 조사하였으며, 식물체별 단위면적당 ( $m^2$ ) 퇴비 생산량은 갈대가  $1.908 \text{ kg m}^{-2}$ , 부들이  $4.711 \text{ kg m}^{-2}$  및 줄이  $2.450 \text{ kg m}^{-2}$ 이었다.
- 식물체 면적과 단위면적당 ( $m^2$ ) 퇴비 생산량을 대상으로 복내 바이오파크 인공습지에서 갈대, 부들 및 줄의 연간 퇴비 생산량은 각각 3,854, 11,693 및 2,940  $\text{kg year}^{-1}$ 으로 조사되었다.

##### 2) 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 품질검정

- 퇴비 시제품의 이화학적 특성을 우리나라의 퇴비 부산물 비료 공정규격 및 수생식물별 돈분 퇴비를 비교한 결과 유기물 함량의 기준은 25%이상으로 갈대, 부들 및 줄의 유기물 함량이 각각 74.6, 86.9 및 77.9%로 퇴비 기준에 만족하였다. C/N비의 기준은 50 이하로 갈대, 부들 및 줄의 C/N비는 18.0~23.9로 기준에 적합하였고, 염분 및 수분함량 역시 퇴비 기준에 적합하였다.
- 갈대, 부들 및 줄의 중금속 함량 역시 퇴비 기준에 적합하게 조사되어 본 실험에서 제조한 수생식물별 돈분 퇴비는 비료 공정규격에 모두 적합하였다.

##### 3) 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험

- 수생식물 퇴비를 이용한 포트 재배시험에서 배추, 상추 및 무 토양의 이화학적 특성은 돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 다소 차이는 있지만 T-N, Av.  $P_2O_5$ , O.M,  $SiO_2$ , K, Ca, Mg, Na 및 CEC의 함량이 전반적으로 다른 처리구에 비해 높게 나타났다.
- 배추의 T-N, T-P,  $K_2O$ , CaO 및 MgO의 함량은 돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 가장 높게 조사되었으며, 상추 및 무의 T-N, T-P,  $K_2O$ , CaO 및 MgO의 함량도 배추의 결과와 유사한 경향이였다.

- 배추, 상추 및 무의 지상부 길이는 9월 16일에 최대 생육을 보였으며, 돈분 퇴비를 사용한 처리구에서 배추, 상추 및 무의 지상부 길이가 다른 처리구에 비해 길었다.
- 포트 재배시험에서 돈분 퇴비 시용량에 따른 식물체의 무기성분 함량은 작물의 종류에 상관없이 돈분 퇴비의 시용량이 많을수록 무기성분의 함량이 높았으며, 지상부의 길이도 돈분 퇴비의 시용량이 많을수록 길었다.
- 수생식물 퇴비를 이용한 필드 재배시험에서 배추, 양배추 및 브로콜리 토양의 T-N 및 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량은 돈분 퇴비와 함께 NPK를 사용한 처리구에서 높은 함량을 보였으며, K, Ca, Mg 및 Na의 함량도 작물의 종류에 상관없이 T-N 및 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량과 유사한 경향이였다.
- 필드 재배시험에서 배추, 양배추 및 브로콜리의 무기성분을 지상부와 지하부로 나누어 시기별로 조사한 결과 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO의 함량은 11월 5일에 최대 함량을 나타냈으며, 이후 12월 10일까지 감소하는 경향이였다.
- 배추, 양배추 및 브로콜리의 최대 함량을 나타낸 11월 5일에 T-N, T-P, K<sub>2</sub>O, CaO 및 MgO 함량은 다소 차이는 있지만 전반적으로 NPK를 사용한 처리구에서 높은 함량을 나타내었다.
- 필드 재배시험 중 배추, 양배추 및 브로콜리의 생육은 8월 27일부터 12월 10일까지 꾸준히 증가하는 경향이였다. 12월 10일에 조사된 배추 지상부의 길이는 BE 처리구에서 34.8 cm로 가장 길었으며, 잎수도 BE 처리구에 60개로 가장 많았다.
- 수확기 배추 지상부의 건물중은 BE 처리구에서 53.7 g plant<sup>-1</sup>으로 가장 많았고, 지하부의 건물중은 BB 처리구에서 8.4 g plant<sup>-1</sup>으로 가장 많았으며, 옆폭은 BN 처리구에서 12.1 cm로 가장 넓었다.
- 수확기 양배추의 지상부 길이 및 잎수는 배추의 길이 및 잎수와 유사한 경향으로 YE 처리구에서 각각 34.9 cm 및 32.7개이었다. 지상부 및 지하부 건물중과 옆폭은 YE 처리가 다른 처리구에 비해 많았으며, 전반적으로 NPK를 사용한 처리구에서 높았다.
- 수확기 브로콜리의 KN, KA, KB, KC, KD 및 KE 처리구의 지상부 길이는 각각 37.8, 46.1, 46.0, 51.8, 52.4 및 55.8 cm 이었으며, 잎수는 각각 15.3, 15.3, 16.4, 18.0, 18.1 및 18.7개로 YE 처리구에서 높은 생육을 나타내었다. 수확기 브로콜리의 지상부 및 지하부의 건물중은 배추 및 양배추의 건물중과 비슷한 경향으로 조사되었다.

#### 4) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 설계 규격화

- 자원순환형 축산폐수 처리장내 퇴비화조 설계 규격화 및 관리지침 제시를 위한 수생식물 별 설계 규격은 갈대의 경우 줄기가 단단하여 부숙화가 쉽게 진행되지 않기 때문에 1~3 cm 간격으로 다른 수생식물 보다 더 잘게 절단해야 하며, 부들 및 줄의 경우 줄기와 잎의 표면이 부드러워 벗겨의 퇴비화 과정과 비슷하게 3~5 cm 정도로 절단하여 퇴비화를 진행해야한다.

- 돈분뇨 : 수생식물의 혼합 비율은 1 : 1로 혼합하여야 양질의 퇴비를 생산할 수 있다.
- 수생식물 퇴비의 비료효율을 증진하기 위해서는 수분함량을 35% 내외로 조절하여야 하고, 선별과정을 통하여 이물질 제거하여야 양질의 퇴비를 생산 및 이용할 수 있다.
- 고품질 비료생산을 위해 퇴비화 초기의 수분함량, 영양분 균형 (C/N율) 및 통기량의 조건을 맞춰주어야 한다.

5) 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리지침 제시

- 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조의 관리는 수분조절, 공기공급, 기계적 혼합, 멸균과정, 조업조건, 분석 및 환경 부분을 적절히 조합하여 관리하여야 한다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리기술 개발을 위한 기초연구를 통해 최적 축산폐수처리 조건과 수생식물 퇴비화 조건을 구명하였으며, 이들 연구결과로부터 실제 축산농가에서 배출되는 축산폐수를 인공습지에서 처리시 효과적인 오염물질 처리방안과 수생식물의 자원화를 동시에 만족할 수 있는 자원순환형 축산폐수처리 기술개발을 위한 기반을 확보하였다.

자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리기술을 개발하기 위해 최적 축산폐수처리 조건과 수생식물 퇴비화 조건을 활용하여 실제 규모로 scale-up하여 수질, 수생식물, 여재 및 미생물 등의 인공습지구성인자를 정밀 모니터링하고 다양한 조건하에서 수처리효율을 조사하여 국내환경에 적합한 축산폐수처리 기술을 개발하였고, 시공한 인공습지로부터 발생하는 수생식물을 자원으로 재활용하기 위해 수생식물별 퇴비화 조건을 확립하고 생산된 퇴비의 품질을 조사하여 수생식물 퇴비화 기술을 확립하였다.

개발된 자원순환형 축산폐수처리장을 실용화하고 현장적용성을 검토하기 위해 실제 규모로 scale-up된 인공습지를 수정 및 개선하여 축산폐수처리 효율향상 방안을 구명하고 축산폐수처리장에서 오염물질 수지를 조사하였고, 인공습지로부터 생산되는 수생식물의 퇴비화기술을 실용화하기 위해 퇴비화장치 보완 및 개선을 통해 퇴비 시제품 생산과 퇴비품질을 검정하였다. 또한 실제 축산농가의 여러 환경요인하에서 다양한 적용성 조사와 함께 실제 국내 축산농가에서 실용화를 위한 적합성과 효율성을 모두 검정한 후 향후 국내 축산농가에서 배출되는 축산폐수를 효과적으로 처리하기 위한 자원순환형 축산폐수처리장의 설계 및 시공을 규격화하고 축산폐수처리장에서 인공습지 및 퇴비화 관리 및 운영지침을 제시하여 Table 4-1에서 보는 바와 같이 계획된 연구목표를 달성하여 농업환경 관련분야에 기여하였다.

Table 4-1. 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

구분	연구개발 목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차년도 (2009.4.10 ~ 2010.4.9)	<b>자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리기술 개발을 위한 기초연구</b>		
	<b>I. 자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초연구</b>		
	○ 축산폐수 종류별 이화학적 특성조사	100	○ 축산폐수의 기초현황 및 특성 파악
	○ Batch실험에서 여재 종류별 오염물질의 흡착특성	100	○ 여재종류별 흡착능력 구명 및 흡착경향 비교
	○ Column실험에서 여재종류별 축산폐수 중 오염물질 처리	100	○ 자원순환형 축산폐수처리장에 사용될 국내환경에 적합한 최적여재 선정
	○ 소형 축산폐수처리장치에서 축산폐수 처리기술 개발을 위한 기초실험	100	○ 소형 축산폐수처리장치에서 수질, 여재, 수생식물 및 미생물 특성 구명
	- 소형 축산폐수처리장치 설계 및 제작	100	○ 소형 축산폐수처리장치 제작
	- 소형 축산폐수처리장치에서의 수처리 효율	100	○ 축산폐수 중 질소 및 인 등 고농도 오염물질별 처리기술 확립
	- 소형 축산폐수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성	100	○ 시기별 여재중 무기성분의 함량변화와 흡착 특성 구명
	- 소형 축산폐수처리장치에 이식한 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량	100	○ 수생식물의 활착시기 및 축산폐수처리시 역할 구명
	- 소형 축산폐수처리장치에서의 미생물상	100	○ 시기별 여재중 미생물상 변화와 생물막 부착상태 관찰
	<b>II. 수생식물의 퇴비화기술 개발을 위한 기초연구</b>		
	○ 문헌조사를 통한 수생식물 퇴비화 조건 도출	100	○ 수생식물 퇴비화 문헌조사 및 기본 퇴비화 조건 도출
	○ 축산폐수 종류별 비료 가치 분석	100	○ 우분, 돈분의 비료학적 가치 평가
	○ 수생식물 종류별 비료적 가치 분석	100	○ 수생식물별 비료학적 가치 평가
	○ 수생식물체별 퇴비화 과정 중 산소 소비량 및 산소 소비 패턴	100	○ 퇴비화과정 중 산소 소비 경향 파악
	○ 소형 퇴비화조를 이용한 수생식물 퇴비화	100	○ 수생식물 퇴비화 효율 구명
	○ 수생식물 혼합 식물체의 수분조절제 이용 가능성 검토	100	○ 혼합 수생식물의 수분조절제 역할평가
	○ 뒤집기 퇴비단공법을 이용한 수생식물체 현장 퇴비화	100	○ 현장 뒤집기 퇴비단 공법 활용 및 평가

(계속)

구분	연구개발 목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
	<b>III. 축산폐수 처리기술과 퇴비화 기술 연계 방법 연구</b> ○ 수생식물여과조와 연계된 자연정화공법의 수처리효율 조사 ○ 활성슬러지조와 자연정화공법을 연계한 수처리효율 조사	100 100	○ 축산폐수처리장과 수생식물여과조의 병합 방법 구명 ○ 축산폐수처리장과 활성슬러지조의 병합 방법 구명
2차년도 (2010.4.10 ~ 2011.4.9)	<b>자연정화공법을 이용한 축산폐수 처리기술 개발</b>  <b>I. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 개발</b> ○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장 설계 및 시공 ○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수처리 효율 ○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에 사용한 여재의 이화학적 특성 ○ 자원순환형 축산폐수처리장에 이식한 수생식물의 생육상황, 무기성분 함량 및 흡수량 ○ 자원순환형 축산폐수처리장에서 미생물상 ○ 자원순환형 축산폐수처리장에서 오염물질 흡착/이동 모델링  <b>II. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 퇴비화 기술개발</b> ○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조 설치 및 시운전 ○ 현장 자원순환형 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율 ○ 자원순환형 축산폐수처리장 생육 수생식물의 퇴비재료 및 비료적 가치 분석 ○ 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수처리장 습지 퇴적층의 토양개량제 이용가능성 검토	100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 최적 모델 제시 ○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 안정적인 수처리 효율 평가 ○ 현장 축산폐수처리장에서 무기성분의 함량변화와 흡착 특성 구명 ○ 자원순환형 축산폐수처리장에 적합한 수생식물의 선정 및 오염물질 흡수량 평가 ○ 자원순환형 축산폐수처리장에서 미생물상 변화와 부착형태 ○ 각 여재별 자원순환형 축산폐수처리장의 적용성 검토  ○ 축산폐수처리장에서 퇴비화 최적 모델 제시 ○ 축산폐수처리장에서 퇴비화 효율평가 ○ 축산폐수처리장 생육 수생식물의 비료적 가치평가 ○ 습지 퇴적층의 토양개량제 이용성 가능성 평가

(계속)

구 분	연구개발목표	달성도 (%)	관련분야의 기여도
3차년도 (2011.4.9 ~ 2012.4.10)	<b>자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술 실용화</b>		
	<b>I. 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리장 실용화</b>		
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 공정개선	100	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 실용화를 위한 최적모델 제시
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 장기간 수처리 효율	100	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 오염물질별 장기간 처리효율 평가
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 여재의 이화학적 특성	100	○ 시기별 여재중 무기성분의 함량변화와 흡착특성 구명
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 수생식물의 관리방안	100	○ 수생식물의 축산폐수처리시 역할 구명 및 관리방안 제시
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 장기간 미생물상 변화	100	○ 시기별 여재중 미생물상 장기간 변화와 생물막 부착상태 비교
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 오염물질 수지	100	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 각 조별 오염물질 처리특성 평가
	○ 본 자원순환형 축산폐수처리공법과 타 공법간 효율 비교	100	○ 자원순환형 축산폐수처리장의 정화효율 비교와 산업화 가능성 검토
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 설계규격화 및 관리지침 제시	100	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장의 운명 및 관리를 위한 설계규격화 및 관리지침서 제시
	<b>II. 자원순환형 퇴비화 기술 실용화</b>		
	○ 자원순환형 현장 퇴비화조의 보완 및 개선	100	○ 퇴비화기술 실용화를 위한 퇴비화 공정개선
	○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장에서 퇴비 시제품 생산 및 품질 검정	100	○ 퇴비 생산시스템 구축 및 생산된 퇴비의 품질 검정
	○ 개발된 퇴비의 작물 시용효과 시험	100	○ 포트 및 필드에서 퇴비의 작물 시용효과
○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조 설계 규격화	100	○ 퇴비화 기술 실용화를 위한 설계 규격화 제시	
○ 자원순환형 현장 축산폐수처리장내 퇴비화조 관리지침 제시	100	○ 퇴비화조 운영 및 관리를 위한 관리지침서 제시	
총 합	o. 연구계획대 진행 여부	100	자연정화공법에 의한 축산폐수 처리와 퇴비화를 통한 자원화를 동시에 수행할 수 있는 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술을 개발함
	o. 결과도출의 타당성	100	
	o. 연구목적 달성 여부	100	
	o. 사회 기여도	100	



## 제 2 절 평가 착안점

근래 축산업의 고도성장으로 인한 집약화, 대규모화에 따라 가축분뇨의 발생량은 급격히 증가한 반면에 분뇨를 환원시킬 수 있는 초지나 경지면적은 증가율이 제자리 또는 감소하는 추세이기 때문에 가축분뇨가 환경에 미치는 영향에 대해서는 국내에는 물론 세계적으로 첨예의 관심사가 되고 있다. 현행 농촌의 축산폐수를 처리하는 물리·화학·생물학적인 정화공법은 폐수의 처리효율이 낮아 시설의 개선과 고차처리가 필요하고, 다양한 자원화공법들은 2차오염과 경제성부분에서 많은 문제점이 있으며, 특히 질소와 인의 처리는 현행 공법만으로 방류수 수질기준을 만족하기가 매우 어려워 축산폐수를 효과적으로 처리하기 위한 체계적인 기술 확보가 시급한 실정이다. 특히 본 연구에서 3년동안 수행한 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리기술은 축산폐수의 정화효율과 퇴비화를 통한 자원화를 동시에 가능하게 만든 자원순환시스템으로 국내에는 유사한 처리기술이 없다. 따라서 본 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술은 유지관리비가 거의 소요되지 않고, 고급기술인력이 필요하지 않고, 슬러지 발생이 없으며, 폐수처리장에 성장한 수생식물을 퇴비화하여 자원화가 가능하며, 특히 질소와 인의 처리가 안정적으로 되면서 방류수 수질기준을 만족할 수 있는 우리나라 농촌환경 실정에 적합한 공법으로써 축산, 경종 및 폐수처리가 함께하는 자원순환형 친환경 축산 폐수처리 시스템으로 Table 4-2와 같은 평가착안점에 따라 평가하였다.

상기 평가착안점 결과를 미루어 볼 때 본 과제에 의해 개발된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리 기술은 축산폐수의 효율적인 처리와 자원화를 동시에 수행할 수 있는 우수한 축산폐수처리공법으로 판단된다.

Table 4-2. 연구개발과제의 평가 착안점

평가의 착안사항	척 도 (점수)				평가
	A	B	C	D	
자원순환형 축산폐수처리장에서 정화효율	10	8	6	4	10
계절별 축산폐수처리 효율의 안정성	10	8	6	4	10
축산폐수처리장의 축산폐수 부하량에 대한 대응성	10	8	6	4	10
가뭄시 축산폐수처리 효율의 안정성	5	4	3	2	5
장마시 축산폐수처리 효율의 안정성	5	4	3	2	5
혹한기 축산폐수처리 효율의 안정성	5	4	3	2	5
이상기후로 인한 축산폐수처리의 안전성	5	4	3	2	5
2차 오염원 발생유무	5	4	3	2	5
자원순환형 축산폐수처리장의 시설비	5	4	3	2	5
축산폐수처리장의 유지관리비	5	4	3	2	5
축산폐수처리장의 수명	5	4	3	2	5
축산농가의 자체적인 운영관리 가능여부	5	4	3	2	5
고급기술관리 인력 소요유무	5	4	3	2	5
자원순환형 축산폐수처리장의 실용화여부	5	4	3	2	5
주변환경과의 조화	5	4	3	2	5
수생식물의 퇴비화 조건 및 퇴비의 품질	5	4	3	2	5
수생식물 퇴비화조 실용화 여부	5	4	3	2	5
평가 총점	100				100

## 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

### 제 1 절 연구개발 성과

#### 1. 연구성과

##### 가. 논문게재

게재 연도	논 문 명	교신저 자	학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
2011	Optimum Configuration Method and Livestock Wastewater Loading for Treating Livestock Wastewater in Constructed Wetlands by Natural Purification Method	허종수	한국토양비료 학회지	44(2)	국내	
2011	Selection of Optimum Filter Media in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus by Natural Purification Method	허종수	한국토양비료 학회지	44(2)	국내	
2011	A Study on the Improvement of Treatment Efficiency for Nitrogen and Phosphorus in Livestock Treatment System Using Constructed Wetlands	허종수	한국토양비료 학회지	44(3)	국내	
2011	Optimum Pre-treatment Method in Constructed Wetlands by Natural Purification Method for Treating Livestock Wastewater	허종수	한국토양비료 학회지	44(3)	국내	
2012	Evaluation of Possibility of Water Plant Wastes in Composting for Agricultural Recycling	조주식	한국토양비료 학회지	45(2)	국내	
2012	Removal Velocities of Pollutants under Different Wastewater Injection Methods in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허종수	한국토양비료 학회지	45(2)	국내	
2012	Effect of Sawdust Mixing Ratio on Composting of Animal Cadaver Residue Using Rendering Treatment method	조주식	한국토양비료 학회지	45(3)	국내	

나. 학술회의 논문발표

발표 연도	논 문 명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2010	Optimum Combination Method of Livestock Wastewater Treatment Apparatus Using Natural Purification Mehtod	허중수	한국환경농학회	2010.7	한국
2010	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater in Constructed Wetland by Natural Purification Method under Different Filter Media	허중수	한국환경농학회	2010.7	한국
2011	자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산 폐수 처리기술 개발	허중수	녹색기술포럼	2011.2	한국
2011	Optimum Conditions in Small-scale Livestock Wastewater Treatment Apparatus by Natural Purification Method for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국응용생명화학회	2011.4	한국
2011	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater in Small-scale Livestock Wastewater Constructed Wetlands with Water Plant Filtration Bed for Establishing Resource Cycling System	허중수	한국토양비료학회	2011.5	한국
2011	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater under Different Livestock Wastewater Loads and Types in Small-scale Livestock Wastewater Apparatus by Natural Purification Method	허중수	한국토양비료학회	2011.5	한국
2011	Treatment Efficiencies of Pollutants in Full-scale Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater under Different Wastewater Injection Methods	허중수	한국환경농학회	2011.7	한국
2011	Treatment Efficiencies of Pollutants in Full-scale Livestock Wastewater Plant by Natural Purification Method under Different Livestock Wastewater Loads	허중수	한국환경농학회	2011.7	한국

(계속)

발표 연도	논문명	교신저자	학술회의명	발표일	장소
2011	Optimum Pre-treatment Conditions Using Water Plant Filtration and Activated Sludge Beds in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국환경농학회	2011.7	한국
2011	Decomposition Velocities of Pollutants under Different Injection Methods in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater (우수 포스터 발표상 수상)	허중수	한국토양비료학회	2011.10	한국
2011	Characteristics of Nutrient Uptake by Water Plants in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국토양비료학회	2011.10	한국
2011	Evaluation of Purification Efficiency in Constructed Wetlands for Treating Livestock wastewater	허중수	ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings	2011.10	미국
2012	자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술 개발	허중수	녹색기술포럼	2012.4	한국
2012	축산자원의 자원화를 위한 환경·축산·경종이 연계된 자원순환시스템 개발 (학술상 수상)	서동철	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Evaluation of Livestock Wastewater Treatment Efficiency in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater Containing High Nitrogen and Phosphorus	허중수	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Composting Efficiency of Compost by Water Plant and Effect of Compost on Growth Status of Crop	조주식	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Effect of Pig Manure Compost Using Water Plants on Growth Status of Various Crops	조주식	한국토양비료학회	2012.6	한국
2012	Treatment Efficiency of Livestock Wastewater in Constructed Wetlands under Different Livestock Wastewater Loads	허중수	한국환경농학회	2012.7	한국
2012	Characteristics of Nutrient Uptake by Water Plants in Constructed Wetlands for Treating Livestock Wastewater	허중수	한국환경농학회	2012.7	한국
2012	Treatment Efficiency of Existing Forms of Pollutants in Livestock Wastewater Treatment Plant by Natural Purification Method	허중수	한국환경농학회	2012.7	한국

다. 특허 성과

- 현재 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리 기술은 특허출원 준비중에 있음.

라. 기술료 징수 현황

- 본 연구과제의 연구성과물은 자연정화공법을 이용한 축산폐수처리장과 수생식물 퇴비화 기술에 관련된 것이므로 기업체를 통한 사업화 보다는 축산영농법인이나 축산농가에 무상기술이전 예정임.
- 현재 함안군 산인면 축산농가 1개소, 사천시 실안동 축산농가 3개소, 고성군 영오면 축산농가 1개소에 무상기술이전을 하고 기술지도 중에 있으며, 추가로 무상기술이전을 위해 서부경남지역 주변 축산영농법인, 축산농가와 협의 중에 있음.

마. 사업화 현황

- 본 연구과제에서 개발된 축산폐수처리기술을 실제 축산농가에 보급할 예정임.
- 본 연구과제에서 개발된 축산폐수처리기술 및 수생식물 퇴비화 기술은 시장조사 및 정밀 사업성 분석을 실시한 후 사업화를 진행할 예정임.
- 축산영농법인이나 축산농가에서 본 개발기술의 사업화를 희망할 경우 적극적으로 기술을 지도할 예정임.

바. 인력활용/양성 성과

(1) 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
22	0	6	16	-	11	11	-	-	22

(2) 장·단기 연수지원 성과

해당사항 없음.

(3) 산업기술인력 양성 성과

해당사항 없음.

사. 경제사회 파급효과

산업지원 성과 (단위 : 건)				고용창출 성과 (단위 : 명)		
기술지도	기술이전	기술평가	합계	창업	사업체 확장	합계
14	5		19			

- 현재 함안군 산인면 축산농가 1개소, 사천시 실안동 축산농가 3개소, 고성군 영오면 축산농가 1개소 등 총 5개소에 무상기술이전을 하고 기술지도 중에 있음.
- 실제 축산농가에 축산폐수처리 기술지도 : 2건
  - 경남지역의 축산폐수공공처리시설, 축산농가 및 축산영농법인으로부터 축산폐수처리와 관련한 문의가 많이 오고 있으며 축산폐수처리에 대한 올바른 이해와 처리기술 등을 지도하고 있음.
- 축산폐수처리장 분석지원 : 10건
  - 축산폐수처리장에서 정화효율과 중금속 함량 등 축산폐수처리 공정관리와 처리기술 보완을 위한 분석 지도.
- 축산농가에서 축산폐수처리관련 애로사항 지원 : 2건
  - 현재 운영중인 축산농가의 축산폐수처리와 관련된 애로사항을 축산폐수처리와 퇴비화에 의한 자원화로 유도하였고, 정기적으로 축산농가의 축산폐수 관리방안을 지도하였음.

## 제 2 절 연구성과 활용계획

### 1. 기대효과

본 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리기술은 축산폐수 처리와 자원화 문제의 해결뿐만 아니라 퇴비의 생산에 따른 농업 발전 및 축산 농가와 경종농가 모두에게 비전을 제시할 것이며, 향후 축산 농가와 경종 농가간에 지역순환형농업 시스템 구축에 일익을 담당할 것으로 판단되며, 자연정화공법을 이용한 자원순환형 축산폐수 처리장을 축산농가 인근에 설치함으로써 농촌지역 주변환경과 부합하여 환경친화적인 농촌환경 개선에 이바지 할 수 있으며, 지속적인 축산업 발전을 위한 토대가 마련될 수 있을 것임.

#### 가. 기술적 측면

- 본 처리장은 가축별 폐수 성상 변화에 쉽게 적응할 수 있을 뿐만 아니라 고농도의 무기성분을 함유한 폐수에도 쉽게 적응할 수 있을 것임.
- 본 처리장내에 성장한 수생식물은 퇴비화시 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용할 수 있어 자원화의 처리비용을 경감할 수 있을 것임.
- 본 자원순환형 축산폐수 처리기술은 축산폐수 처리와 퇴·액비화를 통한 자원화를 자원순환 방법으로 동시 수행할 수 있을 것임.
- 본 처리장은 축산폐수 처리 과정에서 수질의 부영양화의 주원인인 질소 및 인을 효과적으로 처리할 수 있을 것임.
- 본 공법은 인근 농가의 하수와 축산폐수의 병합처리에 광범위하게 적용할 수도 있을 것으로 판단되며, 이를 활용하면 산간지역이나 외딴 독립농가의 축산폐수 뿐만 아니라 하수까지 처리할 수 있어서 농촌지역의 다양한 수질오염원에 광범위하게 적용할 수 있을 것으로 기대됨.
- 현행 축산폐수 처리시 발생하는 대량의 슬러지가 본 공법에는 거의 발생되지 않으므로 별도의 침전지가 필요 없음.

#### 나. 경제·산업적 측면

- 자원순환형 축산폐수 처리장은 한번 설치로 반영구적으로 사용할 수 있으며, 고장이 없고, 운전시 고급기술인력을 요하지 않아 누구나 쉽게 운전이 가능함.
- 운전시 전기 등 에너지 소비가 없고, 유지관리비가 소요되지 않음.
- 본 자원순환형 축산폐수 처리기술은 축산농가에서 배출되는 고농도의 다양한 성상의 폐수에 전처리과정 없이 동시에 처리할 수 있는 처리공법으로 실용화시 경제적, 산업적 효율이 높음.

- 소규모 축산농가의 축산폐수 처리에 대한 부담을 덜어주고 수질도 개선할 수 있으며, 공공처리시설로 운영할 수 있을 것임.
- 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리장은 시설비용이 기계식 하수처리장 시설비용에 비해 상당히 감소할 것으로 판단됨.
- 현행 활성슬러지법 등의 기계식 축산폐수 처리장은 전문기술인력이 최소한 4~5명이 필요하나, 본 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수 처리장은 인근 지역 3~4곳을 1명으로 처리할 수 있어 인건비가 약 80%이상 절감됨.
- 자연정화공법에 의한 축산폐수 처리장은 농촌뿐만 아니라 비교적 폐수 발생량이 적은 소규모 비신고 대상시설에 설치시 주변환경에 대한 오염원을 줄일 수 있을 것으로 판단됨.
- 본 처리장은 마을, 산 및 하천 둔치 등의 주변환경과 잘 부합되는 곳에 설치할 수 있으므로 주변환경과 잘 부합되어 하수로 인한 환경오염을 방지할 뿐만 아니라 처리장 주변은 철새, 잠자리, 개구리 등의 서식지로 이용되어 생태계 환원 및 복원에 크게 기여할 것임.
- 성장하는 수생식물을 톱밥, 왕겨 등의 수분조절제로 대체 사용하므로 경제성측면에서 축산농가의 채산성 문제를 해결 할 수 있을 것으로 판단됨.
- 비료산업을 위하여 국내 수입원자재가 연간 800~1,000천 톤인 100~150백만불을 수입에 의존하고 있으나, 본 처리장내의 수생식물을 퇴비화의 원자재로 사용함으로써 연간 10%이상의 비료 원자재 수입 대체 효과를 올릴 수 있을 것임.

## 2. 활용방안

- 자연정화공법에 의한 축산폐수처리를 실용화함으로써 규격화하고 사업화 할 수 있을 것임
- 자원순환형 축산폐수 처리 기술을 축산단지 및 청정에너지 생산에 활용
- 자원순환형 축산폐수 처리 기술을 축산, 경종의 자원순환형 친환경 축산단지의 기반기술로 활용
- 수생식물을 활용한 퇴비화기술을 농가에 보급
- 고농도의 축산폐수를 방류수질기준에 부합시킴으로서 환경오염 방지
- 소규모로 발생하는 축산폐수 농가에 직접 활용
- 비신고대상의 축산폐수 농가에 직접 활용
- 돈분, 우분, 계분 및 인분 처리에도 활용
- 각종 하수, 오폐수 및 소규모 연수원, 관광단지, 휴양지, 국립공원 내의 외딴 화장실에 직접 활용



### 제 3 절 추가연구의 필요성

본 과제에 의해 개발된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술은 축산폐수처리와 퇴비화를 통한 수생식물의 자원화를 동시에 수행할 수 있는 경제성과 효율성을 갖춘 우수한 공법으로 판단되며, 현행 축산폐수 배출 허용기준인 질소  $60 \text{ mg L}^{-1}$ 과 인  $8 \text{ mg L}^{-1}$ 은 만족시켰으나 장기간 운영시 배출허용기준을 만족시키기 위해서는 장기간 모니터링이 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 자원순환형 축산폐수처리장에서 장기간 모니터링을 통해 축산폐수처리장의 수명을 예측하여 축산농가에 맞게 처리시설을 규격화하는 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리장에서 수생식물의 퇴비화를 통한 자원화방안 이외에 수생식물과 든분을 활용한 액비화 연구가 추가적으로 필요하며, 향후 추가연구를 통해 그 활용성과 적용성의 범위를 넓힐 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 제 4 절 타연구에의 응용 및 기업화 추진방안

본 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리기술은 현재까지 연구된 기술로도 타 공법과 비교하여 기술적인 경쟁력을 충분히 갖고 있다. 현재까지 개발된 고농도의 유기성 오염물질, 질소 및 인 처리기술은 다양한 고농도의 오·폐수의 처리에도 적용이 가능할 것으로 판단되어 다양한 폐수처리에 적용할 계획이다. 향후 본 개발기술을 난분해성 폐수처리에도 적용할 계획을 하고 있으나 적용이전에 난분해성 오염물질 분해능력 증대와 질소 및 인의 처리기술의 개선 및 보완이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구과제에 의해 개발된 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리 기술은 축산현장에 직접 적용시켜 개발되었기 때문에 축산영농법인과 축산농가에 무상기술이전을 통해 실용화 및 산업화할 계획이다. 또한, 본 개발 기술과 관련된 기술지도를 통해 축산농가나 중·소규모의 축산단지의 애로사항을 해결할 수 있게 지도할 계획이다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 자연정화공법에 의한 자원순환형 축산폐수처리 기술 연구와 관련하여 축산폐수 처리를 위해 그동안 다양한 기계식 공법을 이용한 연구가 진행되었지만 고농도로 인해 효율성이 높지 않았고, 자연정화공법인 인공습지에서의 적용연구는 전세계적으로 수행된 경우가 많지 않고 체계적인 연구가 진행되지 못했다.

선진기술 보유국 중 인공습지에 의한 폐수처리 연구에 가장 앞서 있는 독일은 학문적, 기술적인 문제를 종합적으로 연구하기 위해 독일환경연방재단에서 여러 연구기관과 공동으로 연구를 수행중에 있으며, 핵심 연구내용은 탈질, 인처리, 여재의 오염과 공극폐쇄, 토양여과의 생태, 미생물상 변화 등이다.

또한 전세계적으로 인공습지에서 다양한 폐수에서 질소와 인의 처리기술을 개발하기 위한 기초연구가 진행되고 있다. 인공습지에서 질소에 관한 연구로는 소형 장치에서 탈질을 이용하여 질소처리효율을 향상시키는 연구가 수행 중에 있으며, 이 외에도 여러 조건하에서 질소처리를 위한 연구가 수행중에 있다. 인에 관한 연구로는 인의 여재종류에 따른 인 흡착능 연구가 몇몇 연구자에 의해 진행되고 있으며, 또한 electric arc furnace(EAF) steel slag 등과 같은 여러 종류의 여재를 사용하여 인 흡착능 향상을 위한 연구가 기초연구수준에서 꾸준히 연구되고 있으며, 이를 토대로 축산폐수처리장에서 인의 포화로 인한 하수처리장의 수명예측을 위한 연구를 수행할 계획에 있다.

그러나 본 과제와 유사한 자원순환형 축산폐수처리장에서의 질소와 인의 처리와 동시에 자원화하는 연구는 전무하다. 특히, 국내에서 축산폐수처리기술은 대부분 기계식 공법에 의존하여 자연정화공법인 인공습지에서 정화효율과 자원화에 대한 구체적이고 체계적인 연구가 필요하며, 해외에서의 축산폐수와 같은 고농도의 질소와 인 처리기술과 관련된 연구는 국내의 환경에 적합하지 않아 국내 환경에 적합한 질소와 인 처리기술의 체계적인 연구가 추후 필요할 것이다.

## 제 7 장   참고문헌

- Adamus, P. R. and Stockwell. L. T., 1983, A method for wetland functional assessment, Vol. I. Critical review and evaluation concepts US Dept. Transportation, Federal highway administration, Report FHWA IP, 82-83. Washington, DC., 176.
- Addiscott, T. M. and Thomas, M., 2000, Tillage, materialization and leaching:phosphate, Soil&Tillage Res., 53, 255-273.
- ATV-Regelwerk Anwasser-Abfall, 1989, Behandlung vonhaeushichen Abwasser in Pflanzenbeeten, ATV-Hinweisblatt H, 262, Gesellschaft zur Foederung der Abwassertechnik e.V..
- Bailey, G. W., White, J. L. and Rothberg, T., 1968, Adsorption of Organic Hebicides by Montmorillonite, Role of pH and Chemical Charactered Adsorbate, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32, 222-234.
- Bartlett, M. S., Brown, L. C., Hanes, N. B. and Nickerson, N. H., 1979, Denitrification in freshwater wetland soil, J. Environ. Qual., 8, 460-464.
- Bergstrom, L., 1987, Nitrite leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters, J. Environ. Qual., 16, 11-18.
- Bhamidmarri, R., Shilton, A. and Armstrong, I., 1991, Constructed wetlands for wastewater treatment-The new zealand experience, Wat. Sci. Tech., 24, 247-253.
- Brix, H. and Schierup, H., 1989, The use of aquatic macrophytes in water-pollution control, Ambio., 18, 100-107.
- Brix. H., 1993, Wastewater treatment in constructed wetlands, system design, removal processes, and treatment performance, 9~22 In , Moshiri. G. A.(ed.), Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, Lewis publishers, Boca Raton, FL.
- Brodrick, S. J., Cullen, P. and Maher, W., 1987, Denitrification in a natural wetland receiving secondary treated effluent, Water Res., 65, 432-439.
- Chen, Y. S., Butler, N. J. and Stumm, J. N., 1973, Kinetic study of phosphate reaction with aluminum oxide and kaolinite. Environ. Sci. Technol., 7, 327-332.
- Cho, H. G., 2000, A Survey of the Emergent Plants' Growth and Development Aspect in the Sewage Disposal Water Plant and Pebbles, Kore National University of Education, Master's thesis.
- Cole, C. V., Olsen, S. R. and Scott, C. O., 1953, The nature of phosphorus sorption by calcium carbonate, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 17, 352-356.
- Cooke, J. G., 1994, Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment, Water Sci. Technol., 29, 209-217.

- Corbitt, R. A. and Bowen, P. T., 1994, Constructed wetlands for wastewater treatment, in Applied Wetlands science and technology, Kent, D. M. (ed.), Publishers Lewis, 221-241.
- Delaune, R. D., Reddy, C. N. and Patrick, Jr., W. H., 1981, Organic matter decomposition in soil as influenced by and redox conditions, *Soil Biol, Biochem*, 13, 533-534.
- Delgado, J., 1986, Perspectivas economicas de los parques nacionales Venezolanos, 60-65 In, E. Cardich(ed.). conservando el patrimonio natural de la region meotropical, IUCN, Gland, Switzerland, 142.
- Dubin, M. M., 1966, Chemistry and physics of Carbon, 2, 51, Dekker.
- EPA, 1997, Clean Water into the 21st Century, 800-F-97-004.
- Fox, R. and Kamprath, E. H. 1970, Phosphate sorption isotherm for evaluation the phosphate requirements of soils, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24, 902-909.
- Freeman, J. S. and Rowell, D. L., 1981, The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite. *J. Soil Sci.*, 32, 75-84.
- Geisler, G., 1965, The morphogenetic effect of oxygen on root, *Plant Physiol*, 40, 85-88.
- Gerrits, R. G., 1993, Prediction of travel times of phosphate on soils at a disposal site for wastewater, *Water Res*, 27, 263-267.
- Geuenich, E., 1989, Untersuchungen über die umsetzung und Entfernung von Stickstoffverbindungen in der "Wurzelraumkaranlage Bünde", Diplomarbeit im Fachbereich Chemie, 4-22.
- Green, M. B. and Martin, J. R., 1996, Constructed reed beds clean up storm overflows on small wastewater treatment works, *Wat. Environ. Res.*, 68, 1,054-1,060.
- Ham, J. H., Yoon, C. G., Koo, W. S., Kim, H. C. and Shin, H. B., 2005, Analysis of stream water quality improvement using surface-flow wetlands, *J. of KSAE*, 47(1), 79-91.
- Harter, R. D., 1969, Phosphorus adsorption site in soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 33, 630-631.
- Heyman, A. M., 1988, Self-Financed Resource, A direct approach to maintaining marine biological diversity, Paper presented at workshop on economics, IUCN General assembly, Costa Rica, 234-235.
- Howes, B. L., Howarth, R. W., Teal, J. M. and Valiela, I., 1981, Oxidation-reduction potentials in a salt marsh, Spatial patterns and interactions with primary production, *Limnol. Oceanogr*, 28, 350-360.
- Huang. J., Reneau. Jr., R. B. and Hagedorn. C., 2000, Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater, *Wat. Res.*, 34(9), 2,582-2,588.
- Ichiki, A. and Yamada, K., 1999, Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Japan, *Wat. Sci. Technol.*, 39(12), 17-25.

- Jung, G. B., Lee, J. S. and Kim, B. Y., 1996, Survey on ground water quality under plastic film house cultivation areas in southern part of Gyeonggi province, Korean J. Soil Sci. Fert., 29, 389-395.
- Jung, Y. J., Nam, K. H. and Min, K. S., 2004, Generation and Discharge Characteristics of Non-point Pollutants from Farmlands of Small Watershed for Nak-dong River, Journal of Korean Society on Water Quality, 20(4), 333-338.
- Kang, H., Freeman, C., Lee, D. and Mitsch, W. J., 1998, Enzyme activities on constructed wetland, Implication for water quality amelioration, Hydrobiologia, 368, 231-235.
- Kern, J., and Idler, C., 1999, Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed system, Ecological Engineering, 12, 13~25.
- Kessler, F. L. and Jansson, E. M., eds. 1994. Wetlands and lakes as nitrogen traps, Special Issue of Ambio., 23, 319-386.
- Kim, J. H., Lee, J. S. and Ahn, S. K., 1997, Major factors affecting of ground water quality characters for agriculture in Kyonggi area, J. Korea Soc. Water Qual., 15, 353-361.
- Kim, J. H., Lee, J. S. and Ahn, S. K., 1997, Major factors affecting of ground water quality characters for agriculture in Kyonggi area, J. Korea Soc. Water Qual., 15, 353-361.
- Krasovskil, L. I. and Chaschchukhin, V. A., 1974, Oxygen regime of the rootstocks of common reed, Soviet plant physiology, 21(2), 255-259.
- Kwak, N. W., 2005, Treatment of Polluted livestock wastewater by Natural Purification Method, Gyeongsang National University, Master's thesis.
- Kwun, S. K., 1998, Management Improvement and Perspective on Nonpoint Sources of Water Pollution in Korea, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 20(11), 1,497-1,510.
- Lahmann, E., 1989, Formulacion de un proyecto de conservacion de los recursos naturales Para la Zona de manglaves de Estero Real, Nicaragua. Mineographeol report, IUCN, San Joes, Costa Rich, 25.
- Lee, H. D., Ahn, J. H., Bae, C. H. and Kim, W. J., 2001, Estimation of the Unit Loading and Total Loading of Nonpoint Source in Paldang Watershed by Runoff Loading during the Rainfall, J. of Korean Society on water quality, 17(3), 313-326.
- Lee, H. D. and Bae, C. H., 2002, Runoff Characteristics and Strategies for Nonpoint Source Reduction, J. of Korean Society on water quality, 18(6), 569-576.
- Lee, T. G., 2004, A Bibliographical Study on Realities and Counterplan for Non-Point Source, J. of NERI, 9(1), 1-10.
- Mengel, K., 1997, Agronomic Measures for better utilization of soil and fertilizer phosphate. European Journal of Agronomy., 7, 221-233.

- Ministry of Agriculture and Forestry, 2001, Agriculture and Forestry Statistical Yearbook.
- Mokwunye, U., 1975, The influence of pH on the adsorption of phosphate by soils from the Guinea and Sudan Savannah Zones of Nigeria, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 1,100–1,102.
- National Research Council, Committee on Long-Range Soil and Water Conservation, 1993, *Soil and Water Quality*, Washington, D.C., USA, 237–312.
- Oh, B. G., 1999, A Study of the nitrification and denitrification process on the sewage disposal water plants and pebbles, *Korea National University of Education, Master's thesis*.
- Olsen, S. R. and Watanabe F. S., 1957, A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by langmuir isotherm, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21, 144–149.
- Parfitt, R. L, 1978, Anion adsorption by soils and soil materials, *Adv. Agron.*, 30, 1–50.
- Park, D. G., 1999, Development of Environment of friendly cropping systems to be reduce the soil-sickness in the cultivation of fruit vegetables, *Symposium on the improvement of environment and reducing of physiological disorders in the green housed horticulture*, Yeongnam Agricultural Experiment Station.
- Reed, S. C., Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W., 1988, *Natural System for Waste Management and Treatment*. McGraw-Hill, New York, 173–283.
- Reedy, K. R. and Graetz, D. A., 1988, Carbon and nitrogen dynamics in wetland soils, *The Ecology and Management of Wetlands*, 1, 307–318.
- Richardson, C. J. and Marshall, P. E., 1986, Processes controlling movement, storage, and export of phosphorus in a fen peatland, *Ecological Monographs*, 56, 279–302.
- Saenger, P., Hegerl, E. J. and Pavie, J. P. S. (eds.), 1983, *Global status of Mangrove ecosystems*, IUCN Commission on ecology papers No. 3. Gland, Switzerland, *The environment list 3*, Supplement No. 3, 100.
- Shin, C. W., Kim, J. J., 1988, Studies on the Characteristics of Phosphorus in the Upland Soil, *J. of Korean Society of Soil Science*, 12(2), 195–201.
- Shukla, S. S., Syers, J. K., Williams, J. D. H., Armstrong, D. E. and Harris, R. F., 1971, Sorption of inorganic phosphate by lake sediments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 224–249.
- Sikora, F. J., Zhu, T., Behrends, L. L., Steinberg, S. L. and Coornod, H. S., 1995, Ammonium removal in constructed wetlands with recipulating subsurface flow, removal rates mechani, *Water Sci. Technol.*, 32(3), 193–202.

- Stein, O. R., Hook, P. B., Biederman, J. A., Allen, W. C. and Borden, D. J., 2003, Does Batch operation enhance oxidation in subsurface constructed wetlands *Water Sci. Technol.*, 48(5), 149-156.
- Stengel, E., Carduck, W. and Jebsen, C., 1987, Evidence for denitrification in artificial wetlands. In: Reddy, K. R. and Smith, W. H. Editors, 1987, *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery* Magnolia Publishing, Orlando, FL., 543-550.
- Stevenson, R. J. and Stoermer, E. F., 1982, Luxury consumption of phosphorus by five *Cladophora* epiphytes in Lake Huron, *Trans. Am. Microsc.*, 101, 151-161.
- Syers, J. D., Evans, T. D., Williams, J. D. H., and Murdock, J. T., 1971, Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brazil, *Soil Sci.*, 112, 267-275.
- Tate, R. L., 1979, Effect of flooding on microbial activities in organic Soil, *Carbon metabolism, Soil Science*, 128, 267-272.
- Taylor, R. W. and Ellis, B.G., 1978, A mechanism of phosphate adsorption and anion exchange resin surface, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 432-436.
- U.S.E.P.A., 1989, Nonpoint sources, Agenda for the Future, U.S., Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington.
- Von Felde, K. and Kunst, S. 1996, N- und CSB-Abbau in vertikal durchströmten Bodenfiltern, *gwf-Wasser/Abwasser*, 137(8), 401-408.
- Vrhovsek, D., Kukanja, V. and Bulc, T., 1996, Constructed wet-land (CW) for industrial waste water treatment, *Wat. Res.*, 30, 2,287-2,292.
- White, G. N. and Zelazny, L.W., 1986, Charge properties of soil colloids, In *Soil Physical Chemistry*(ed. Sparks DL), CRC Press, Inc. Florida, 39-81.
- Yang, H. M., 2002, Nitrate Removal Rate in Reed Wetland Cells of a Pond-Wetland Stream Water Treatment System, *Korean J. of Environmental Agriculture*, 21(4), 274-278
- Yang, L., Chang, H. T. and Huang, M. L., 2001, Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosmos with and without vegetation, *Ecological Engineering*, 18, 91-105.
- Yoon, C. G. and Chung, J. C., 1996, A Study on the Design Criteria of Wastewater Treatment by Constructed Wetland, *J. of KORRA*, 4(1), 61-72.
- Yun, S. G. and Too, S. H., 1993, Behavior of NO<sub>3</sub>-N in soil and groundwater quality, *Korean J. of Environ Agric.*, 12, 281-297.
- 건설교통부, 1996, 수자원장기종합계획, 건설교통부.
- 곽내운, 2005, 자연정화공법에 의한 오염 농업용수의 처리, 경상대학교 석사학위논문.
- 關係部處合同(國務調整室, 行政自治部, 農林部, 産業資源部, 環境部, 建設交通部, 山林廳), 2004, 「물管理 綜合對策」의 推進強化를 위한 4大江 非點汚染源管理 綜合對策, 환경부, 1-181.

- 국무총리, 1997, 물관리 종합대책, 수질개선기획단.
- 김진중, 2000, 갈대습지를 이용한 군부대 오수정화 효율의 향상, 대전대학교 석사학위논문.
- 김동수 외, 1998, 토양화학분석법-토양, 식물체, 토양미생물, 농촌진흥청 농업기술연구소.
- 김명화, 1996, 수중 습지식물에 의한 질소와 인의 제거능에 관한 연구, 목포대학교 석사학위논문.
- 김성진, 2002, 토양 중 인의 흡착 거동에 관한 연구, 순천 대학교, 석사학위논문.
- 김영철, 정하영, 이래범, 임경은, 2002, 산화지와 수생식물 처리지를 결합한 통합 처리 시스템의 살균효율에 관한 연구, 한국습지학회지, 4(2), 23-41.
- 김종택, 문경환, 김진우, 2001, 수질오염공정시험방법해설(하·폐수, 하천수, 호소), 신광출판사.
- 김태웅, 2000, 사상성 조류매트를 이용한 농촌 소하천수의 영양소 제거에 관한 연구, 대전대학교 박사학위 논문.
- 농림부, 1997, 농업용수 수질조사 보고서, 644.
- 농림부, 1997, 통계연보, 농림부.
- 농림부, 농업기반공사, 1998, 수질개선을 위한 수처리조 배열기법연구 (2차년도 보고서), 38-60.
- 박광진, 1998, 자연토의 pH와 입경분포가 오염물질 저감에 미치는 영향, 울산대학교 공학석사학위논문.
- 山田淳, 1997, Diffuse pollution 研究の現状と今後の展開, 水環境學會誌, 20(12).
- 서동철, 2002, 자연정화공법에 의한 소형 하수처리장치 개발, 경상대학교 석사학위논문.
- 손상목, 김진형, 1991, 폴리에틸렌필름 멀칭처리에 따른 토양의 NO<sub>3</sub>-N 함량 및 Okra 생육 및 수량의 차이, 국제농업개발학회지, 2(1), 79-92.
- 신철우, 김정재, 1988, 경작지 밭토양에서의 인산특성에 관한연구, II. 토양인산함량과 몇 가지 토양 화학성과의 관계, 한국토양비료학회지, 12(2), 195-201.
- 심우섭, 한인섭, 1998, 울산지역에 자생하는 갈대, 부들, 갈풀을 이용한 Reed-Bed의 생활하수 정화능력 연구, 7(2), 117-121.
- 안신환, 1998, 탈질 기능이 있는 인제거 미생물을 이용한 하수의 질소 및 인제거, 서울대학교 석사학위논문.
- 양홍모, 1999, 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, 한국수자원학회지, 32(5), 111-123.
- 윤춘경, 권순국, 권태영, 1998, 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구, 한국농공학회지, 40(3), 83-93.
- 윤춘경, 권순국, 우선호, 권태영, 1999, 농촌지역 수질개선을 위한 인공습지실험시설의 3년간 실험결과 검토, 한국물환경학회지, 15(4), 581-589.
- 윤춘경, 임용호, 김형중, 1997, 인공습지에 의한 농공단지 폐수처리, 한국환경농학회지, 16(2), 170-174.



- 윤준경, 정재춘, 1996, 축조된 습지(wetland)를 이용한 폐수처리의 설계기준에 관한 연구, 유기성폐기물자원화학회지, 4(1), 61-72.
- 이덕배, 김종구, 강종국, 김선보, 소재숙, 이경주, 1994, 갈대 사상여과법을 이용한 축산폐수정화, 한국환경농학회지, 13(2), 231-239.
- 이도원, 송동하, 임경수, 박은진, 강호정, 1999, 식생을 이용한 수질 관리-생태구, 경관, 유역 규모에서 생태학적 접근, 한국수자원학회지, 32(5), 134-147.
- 이용두, 김현희, 1999, 식물을 이용한 오수의 고도처리에 관한 연구, 한국환경과학회지, 8(1), 75-81.
- 이창복, 1979, 대한식물도감, 향문사, 68-230.
- 이현동, 배철호, 2002, 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안, 한국물환경학회지, 18(6), 569-576.
- 이현동, 안재환, 배철호, 김운지, 2001, 강우시 유출 부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정, 한국물환경학회지, 17(3), 313-326.
- 장정렬, 2004, 농업유역 비점오염 저감을 위한 인공습지 설계인자 평가, 서울대학교 대학원 박사학위논문 1-6.
- 정용준, 남광현, 민경석, 2004, 낙동강 소유역 경지에서의 비점오염원 물질 발생 및 특성, Journal of Korean Society on Water Quality, 20(4), 333-338.
- 정우용 외, 1998, 수질오염, 폐기물, 토양오염 공정시험방법, (주)동화기술.
- 정재춘, 정영륜, 1994, 환경미생물학, 자유아카데미, 490-495.
- 조인재, 2007, 자연정화공법에 의한 오염 농업용수의 처리, 경상대학교 석사학위논문.
- 조홍규, 2000, 수초·골재 하수처리장에서 정수식물의 생육 상태 조사, 한국교원대학교 석사학위논문.
- 첨단환경기술, 1996, 정석법에 의한 하·폐수중의 인제거, 첨단환경기술.
- 최근준, 1997, 패각을 이용한 수중의 인 제거 연구, 충남대학교 석사학위논문.
- 최근준, 왕창근, 1999, 패각을 이용한 수중의 인제거 기술 개발, Res. Rep. Env. Sci. Tech, Chungnam Nat'l Univ. Korea, 17, 37-49.
- 최지용, 이기중, 이지현, 2005, 유역관리를 통한 다목적댐 저수지의 효율적인 탁수관리방안.
- 환경부, 1995, 비점오염원 조사연구.
- 환경부, 1998, 팔당호 등 상수원수질개선특별종합대책(안).
- 환경부, 2000, 비점오염원 관리요령.
- 환경부, 2001, 비점오염원관리요령.
- 환경부, 2005, 환경백서, 환경부, 462-464.
- 황길순, 남귀숙, 문형태, 1998, 수생식물에 의한 수질개선기법연구(II), 농림부·농업기반공사.
- 황순진, 공동수, 1999, 습지의 인 Sink 기능에 영향을 미치는 생물학적 요인들, Korean J. Limnol, 32(2), 79-91.

## 주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.