

碩士學位論文

식물을 이용한 오수의
고도처리에 관한 연구



濟州大學校 大學院
環境工學科

金 賢 姬

1998年 12月

식물을 이용한 오수의 고도처리에 관한 연구

指導教授 李 容 斗

金 賢 姬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金賢姬의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 許 木 印

委 員 李 起 浩 印

委 員 李 容 斗 印

濟州大學校 大學院

1998年 12月

A Study on the advanced treatment of wastewater by plants

Hyun-Hee Kim

(Supervised by Professor Yong-Doo Lee)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER
OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNVERSITY

1998. 12.

목 차

Summary	1
I. 서론	3
II. 이론적 고찰	5
1. 연구동향	5
2. 습지 식물을 이용한 오수처리의 개념	10
3. Root zone(RZ) system에서의 구성요소	14
4. 제거속도상수	16
III. 재료 및 방법	18
1. 실험장치	18
2. 실험방법	19
IV. 결과 및 고찰	20
1. 식물종에 따른 제거특성	20
2. 체류시간에 따른 제거특성	28
3. 제거속도 상수	31
IV. 결 론	34
V. 참고문헌	36

Summary

In recent years increasing the disposal of wastewater has caused the acceleration of the eutrophication of receiving waters. To alleviate the detrimental import of wastewater discharge, removing the major nutrients and organic matters contained in the wastewater is a pressing need.

The several conventional methods have been effectively applying to treat and dispose these substances. However, the operating costs and energy consumption in these methods are relatively high. Especially rural community, the various situations of local community have to be considered in development of wastewater treatment system. The objective of this study is to estimate the purification potential of the subsurface flow wetland system.

For this purpose, the laboratory scale wetland system are designed. Activated carbon (A/C) is used as this bottom of the system and two species of plants, *Amaryllis* and *Reed*, are planted on the A/C bottom, respectively. So three types of systems, that is, A/C only system, *Amaryllis*+A/C system and *Reed*+A/C system are used in this study.

The results obtained by this study are as follows:

1. In the early stage of experimental period, BOD removal rates of all systems are 20%. In the later stage, the rate is 35% for A/C only system, 65% for *Amaryllis*+A/C system and 50% for *Reed*+A/C system. For TS, the removal rates are 20%, 40% and 30% respectively. This is due to the microbial assimilation, anaerobic and aerobic decomposition.

2. The average removal quantity of T-N is $2.6\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ for *Amaryllis* and $1.76\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ for *Reed*. For T-P, these numbers are $0.27\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ and $0.25\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ respectively.

3. Removal rate constant with the retention time is $1.4494(1/\text{day})$ for BOD, $0.5428(1/\text{day})$ for T-N and $0.5287(1/\text{day})$ for T-P.



I. 서론

인구의 집중화와 생활수준의 향상, 산업의 발달 등으로 생활용수 및 공업용수의 수요량이 계속적으로 증가하고 있다. 이에 따른 하폐수 발생량의 증가로 하천의 오염이 가중되고 있다. 도시지역에서는 고효율의 하수처리 시스템이 도입되고 있지만, 인구밀도가 낮은 농산촌 지역에서는 도시지역에서 이용되어지고 있는 에너지 과소비형의 수질정화기술을 사용하는 것은 적절하지 못하다. (尾崎 등, 1995 ; 尾崎 등, 1996 ; Hans, 1986)

또한 재래식 오수 및 하수처리법은 유기물의 처리효율이 높은 장점은 있으나 건설비용이나 설비투자, 유지관리 측면에서 매우 높은 비용이 요구되고 있고, 특히 질소나 인에 대한 처리효율은 매우 낮아 이러한 방류수가 상수원에 유입되었을 때 수원의 부영양화를 일으키는 원인이 되고 있다.

질소와 인은 부영양화의 주요한 원인물질로서 생각되고 있지만 이것들은 고등식물에게 없어서는 안되는 필수 영양원이다. 이 때문에 고등식물을 이용하여 하수를 처리하는 연구가 다양하게 행해지고 있다(이, 1993 ; 尾崎, 1995).

그 주요한 이유로는 종래의 활성오니법을 위주로한 미생물처리법에 비해 처리법이 간단하고, 수처리에 요구되는 에너지 소비량이 적기 때문에 처리 과정에 있어서 지구온난화의 주요 원인 물질인 탄산가스 등의 대기오염물질의 발생이 적고, 사용한 식물을 자원으로 유효이용이 가능한 것들을 들 수 있다.(平野, 1994)

수질정화에 이용되고 있는 식물로는 부유식물인 부레옥잠이 가장 역사가 오래되었고, 부레옥잠의 수처리에 관한 연구 보고도 많다(木原, 1994 ; 전과 김, 1994 ; 김 등, 1991). 또한 창발성 식물(Emerged plant)인 갈대, 부들, 파피루스 등이 수로나 인공습지대 등에 심어져 오수정화연구가 행해지고 있다(戶田 등, 1995 ; 尾崎 등, 1996).

그 결과 Root zone(RZ) system(Hans, 1986 ; Lucy 등, 1991), 유용식물과 천연광물여재를 함께 이용한 Biogeofilter channel(尾崎 등, 1995 ; 尾崎

등, 1993)등과 Free water surface flow wetlands와 Subsurface flow wetland등과 같은 습지형태들이 개발되었고 (Sherwood 등, 1995 ; 안, 1995), 자료의 축적이 이루어지고 있다.

한편, 하수관거가 정비되지 않은 지역이나 인구밀도가 낮은 농촌지역에서는 지역특성에 적합한 수질정화 시스템의 개발이 요구되어지고, 특히 방류수역이 상수원 상류이거나 지하수 함양 지역인 경우 오수의 고도처리가 요구되어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 유지관리가 간편하고, 저 동력형이며, 오수의 처리와 동시에 자원순환을 고려할 수 있는 식물을 이용하여 체류시간 및 식물종에 따른 처리효율과 경과시간에 따른 처리특성을 파악하여 실 설계시의 기초 자료를 도출하는 데 그 목적을 두었다.



II. 이론적 고찰

1. 연구동향

수질 정화를 위한 습지의 이용은 오래되었다. 오랫동안 사람들은 하수나 폐수를 습지에 배출하였을 때, 습지에 의해 어느 정도 정화됨을 경험적으로 알고 있었다.

습지의 이용은 매우 오래되었다 할지라도 다소 새로운 연구이다. 고대 중국과 이집트에서는 오랫동안 폐수 처리를 위해 습지를 이용했다. 인공 습지를 이용했던 가장 오래된 증거를 찾을 수 있는 것은 Brian Mackney에 의해 소개되었다. 이들은 15~18인치(inch) 깊이로 땅을 판 후 가장 높은 지면을 부엌과 화장실로 수로를 향하게끔 파고, 그 수로에 오수를 배수시킨다. 그리고, *Arum Lilies*와 같은 식물을 심어 오수를 정화시켰다 (Hans, 1994).

Hans(1986)는 Root zone(이하 RZ로 표기) system이라고 불리는 습지 system에서 식물 뿌리부근에서의 폐수처리의 이론적 기초를 설명하고 있다. 습지 식물은 갈대가 이용되고 있는 데, 갈대는 단위면적당 활동적인 뿌리지역이 깊고(1m 아래 이상) 영양물 흡수량이 높다. 습지식물의 역할은 뿌리부근에서 종속영양 미생물에 산소를 공급하고, 토양의 투수계수를 증가시키거나 안정화시킨다. 토양은 미생물 부착을 위한 안정된 표면적과 식물성장을 위한 확실한 기질을 이용한 물리·화학적 과정에 의해 폐수 정화에 직접적인 작용을 한다고 한다.

Boutin(1987)은 1982년 가을부터 3년간 갈대를 심은 탱크에서 가정폐수를 처리한 결과 유기물 부하의 감소는 85~90%, 총질소의 제거율은 50%였다고 보고하였다.

Conley 등(1991)은 서독일에 있는 13개의 시스템, 덴마크의 15개 시스템, 영국의 7개, 미국에 있는 5개의 시스템에서 이용된 RZ system 습지 장치

에서 폐수처리 성능을 평가를 하였다. RZ system 폐수처리 장치는 지하 흐름을 가진 습지로 구성된 폐수처리 기술이다. 유럽에서 이용되는 습지 식물은 갈대이고, 미국에서는 파피루스와 부들이 일반적으로 이용되고 있다. RZ system에서의 BOD 제거는 높은 부하에서도 높은 분해율을 보였는데, 64~96%로 다양하였다. 총 부유물질의 제거율은 71~98%였고, 모든 시스템에서 유출 TSS는 30mg/l이하였다. 질소 제거는 24~64%, 암모니아성 질소 제거는 57~94%로 다양하였는데, 식물 뿌리부근에는 호기와 통기지역이 존재하고, 이로 인해 질화-탈질에 의해 질소가 제거된다고 하였다. 인산염의 제거는 13~68%로 주요 제거메커니즘은 흡착과 침전 과정에 의해 제거되므로, 실트나 점토와 같은 표면적이 넓은 여재를 이용할 때 제거율이 높아진다고 한다.

Hans(1994)는 습지식물에 의한 가스 이동 메커니즘을 설명하고 있는데, 습지식물에서 산소의 내부 이송은 산소 농도 경사에 따른 수동적인 분자확산과 식물의 내부 기공을 통한 공기전달 흐름에 의해 발생한다고 한다. 죽은 식물조직의 기공과 물 주위의 가스교환은 식물안으로 공기 전달 흐름을 이끌어낼 수 있다고 한다. 뿌리에서의 산소방출율은 식물 내부 산소농도에 의존하고, 산소는 주위 매개체와 뿌리벽의 투수성을 요구한다. 습지 식물은 내부 산소를 하피와 바깥 외피의 코르크질층, 목질층 때문에 보존한다. 이것은 외부 방사 기관으로 산소 방출을 하지 않도록 하고, 분열조직에 더 많은 산소를 공급한다고 한다.

Adcock와 Ganf(1994)는 습지에서 성장하는 세가지 식물 *Baumea*, *Phragmites*, *Trigochin*의 질소와 인의 효율에 대해 실험을 행하였는데, 질소와 인의 제거율은 *Baumea*나 *Phragmites*보다 *Trigochin*이 5배 높았다고 보고하였다.

Kadlee(1994)는 네 개의 플로리다 습지에서 영양염 흡수 특성을 평가하였다. 오랜기간동안(1987년 9월부터 1991년 12월)의 데이터를 기초로 영양염의 흡수는 일차식이라는 것이 밝혀졌다.

Oostrom과 Russell(1994)은 $T \cdot N_{ox}(NO_2+NO_3)$ 제거를 위한 생물학적 메커니즘은 탈질화, 암모니아로의 환원, 식물흡수, 미생물에 의한 동화인데, 이 중에서 탈질이 중요 메커니즘이라고 하였고, 최고의 탈질율은 실험 시

작 5일~15일 사이에 발생하였고, 35일 후에는 탈질이 정지하였다고 하였다.

Reed와 Brown(1995)은 미국에서 현재 이용되고 있는 Subsurface flow (이하 SF로 표기) 시스템과 Free water surface(이하 FWS로 표기) 시스템의 처리특성을 평가하였다. BOD 제거속도는 SF 시스템이 FWS 시스템보다 높은 데, 이는 SF 시스템에서 충전재가 미생물이 성장하기 위한 더 많은 표면적을 제공하기 때문이라고 하였다. 시스템의 대부분에서 암모니아는 체류시간이 증가함에 따라 증가하고 있는 데, 이는 유기질소의 혐기 분해 때문이라고 추정하였다. 그러나 식물의 뿌리가 충분히 발달한 지역에서는 식물이 산소를 뿌리 부근까지 이송시켜서 질산화를 지속시키기 때문에 암모니아가 감소하였는 데, *Typha*가 심어진 시스템에서 암모니아 제거는 HRT 3.9일에서 80%에 달했다. 인의 제거는 30~60%였다.

일본에서는, 本部 등(1990)은 콩과 식물을 이용하여 수중의 질소와 인의 제거를 연구하였다. 저농도에서 높은 제거율을 나타내었고, 재배 사이클을 12일로 하여 실험을 행하였는 데, 초기 4일간은 어두운 곳에서, 중·후기는 비교적 낮은 조사강도에서 잘 흡수된다고 한다.

宗宮 등(1990)은 하수 이차처리수를 이용해서 화훼식물의 수경재배를 실시하여 질소와 인의 제거 가능성을 파악하였다. 실험은 부레옥잠, 물냉이 (*Rorippa nasturtium Beck*) 및 화훼식물(*Bellis perennis*, *Lathyrus Odoratus*, *Calendula officinalis*)을 대상으로 하였는 데, 부레옥잠은 11월 하순에서 생장이 정지하였고, 물냉이도 일부 생장이 저하하였는 데 비해 화훼식물은 생장이 양호하였다. 이는 도시하수 이차처리수에서도 충분히 화훼식물을 재배하는 것이 가능하다는 것을 보였다. 화훼식물의 비성장 속도는 0.03~0.06 l/day였다고 한다.

平野(1994)는 정화조 처리수에 의한 각종 화훼식물들의 수경재배와 영양염 제거특성에 대한 연구를 실시하였다. 이 결과 T-N 제거율은 임파첸스 (*Impatiens sulatnii*)가 98%로 가장 높았고, 페튜니아(*Petunia hybrida*)는 42%로 가장 낮았고, T-P는 임파첸스가 99%였고, 24시간 동안에 대부분 흡수하였다. 반면에 베고니아(*Begonia president-carnot Hort*), 제라늄 (*Pelargonium inquinans*)등은 제거율이 62% 이하였다고 한다.

戶田 등(1995)은 고농도 질산성질소를 함유한 지하수를 유입시킨 갈대습지에서 탈질속도를 실측하였다. 실험결과 탈질속도는 깊이 0~5cm에서 $106\text{ngN}/\text{cm}^3 \cdot \text{hr}$, 깊이 40cm에서 $11\text{ngN}/\text{cm}^3 \cdot \text{hr}$ 이 되었다.

細井 등(1995)은 갈대에 의한 영양염 제거 기능에 관한 연구를 행하였다. 갈대의 질소, 인 흡수속도는 질소가 최대 $1440\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ (초기질소 농도 $1.95\text{mg}/\ell$)에서 $692\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ (초기질소농도 $0.48\text{mg}/\ell$)였고, 인은 최대 $246\text{mg}/\ell$ (초기 인농도 $0.5\text{mg}/\ell$)에서 $85.4\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ (초기 인농도 $0.48\text{mg}/\ell$)였다.

田畑(1996) 등은 갈대를 심은 수로에서의 질소와 인 제거효과에 관한 연구를 행하였다. T-N 및 T-P의 제거는 30% 및 20% 전후의 제거율을 보였고, COD 및 BOD의 제거는 10% 전후로 나타났다. 수로에 의한 제거효과를 보면 인은 부유성의 인 침강, 질소에서는 부유성 질소의 침강과 암모니아성질소의 산화, 탈질이 주요원인이라고 추정하였고, 이 때 갈대는 부유미립자의 침강을 촉진하는 필터의 역할과 미생물 군에 의한 유기성 화합물의 분해나 산화가 행하여지는 중요한 장소로 제공되고 있다고 한다.

국내에서는, 김 등(1991)이 부레옥잠에 의한 생활오수의 정화효과에 대한 실험에서 부레옥잠 뿌리의 표면을 알코올로 살균한 경우와 살균하지 않은 경우를 비교하는 실험을 행하였다. 실험결과를 보면 체류시간 16hr일 때 L.A.S(Sodium linear dodecylbenzene sulfonate)농도는 뿌리를 살균하지 않은 경우는 7→1ppm, 살균한 경우 7→3.5ppm, 부레옥잠을 심지 않은 경우는 L.A.S가 거의 제거되지 않았다. 또한 부레옥잠을 심은 경우 COD가 107→32.0ppm, $\text{NH}_4\text{-N}$ 가 32.7→16.3ppm으로 감소되었고, P, Na 및 Cl 함량도 감소되었다고 보고하였다.

김 등(1988)은 부레옥잠(*Water hyacinth*), 줄(*Zizania caduciflora*), 부들(*Typha orientalis*), 물옥잠(*Monochoria korsakowii Regel et maack*), 창포(*Acorus asiaticus*), 토란(*Colocasia antiquorum var*)을 심어 축산폐수의 오염물 제거 실험을 행한 결과 질소, 인 제거량은 부레옥잠이 가장 높게 나타났다고 보고하였다.

진 등(1994)은 영양염류 농도에 따른 부레옥잠의 성장특성에 관한 연구를 실시한 결과 체류시간이 5.7day, 부레옥잠의 현존량 $3.8\text{kg}/\text{m}^2$ 일 때 인

은 $2.45\text{mg}/\ell$ 에서 $0.26\text{mg}/\ell$ 로 감소하여 90%의 제거율을 보였고, 질소는 $34.2\text{mg}/\ell$ 에서 $9.8\text{mg}/\ell$ 로 71%의 제거율을 보였다고 보고하였다.

안 등(1995)은 생이가래(*Salvinia natans*)를 이용한 영양물질의 제거에 대한 연구에서 생이가래의 비증식률은 0.135day^{-1} 이었고, 체류시간 7일에서의 제거율은 60.8~77.5%로 나타났고, 생이가래의 pH 상한임계치는 9이며, 저농도의 영양염 조건에서도 생장율이 좋다고 보고하였다.

이 등(1994)은 갈대모래여과법을 이용한 축산폐수정화에 대한 연구에서 갈대의 건물생산량은 7일 처리가 가장 높았고, 갈대가 없는 모래여과조보다 오염물질 제거율은 T-N이 30%, PO_4^{3-} 는 37%, COD는 42%, 부유물은 30% 더 높은 정화율을 나타낸다고 하였다.



2. 습지 식물을 이용한 오수처리의 개념

식물을 이용한 오수처리는 인공습지와 자연습지를 이용하는 경우가 있다.

인공습지는 폐수나 강우 처리의 단독 목적을 위해 습지가 아닌 곳에서 인위적으로 만들어진 습지이다. 그러므로 인공적인 습지는 자연적 환경을 대신하기 위해 습지가 없는 곳에 만들어지며, 이용되는 수생식물의 형태에 따라 부유 식물법(Floating plant systems), 잠수 식물법(Submerged plant systems) 및 창발성 식물법(Emerged plant systems)으로 구분할 수 있다(이, 1993).

1) 부유 식물법

부유식물의 뿌리는 토양에 부착하지 않고, 수중에 부유하며, 잎과 줄기는 수표면 위에 있어서 햇빛을 직접 받는다. 잠수되어 있는 뿌리 및 줄기는 폐수의 안정화를 위하여 박테리아의 적절한 서식처로 제공된다. 부유식물은 수표면에 자유롭게 부유하므로 바람의 방향 및 물의 흐름 방향을 따라 유동하게 된다(이, 1993).

부유 수생식물을 이용한 습지의 발달은 영양물 제거와 재래식 안정화지의 성능을 향상시키기 위한 것으로 시스템의 디자인, 성능, 작동에 관해 발표되고 있다(木原, 1994).

2) 잠수 식물법

잠수 식물은 수표면 아래에 빛이 충분히 투과되는 곳에서 자란다. 탁도가 있는 물이거나 조류가 번식할 때에는 수중으로 빛의 투과가 감소되기 때문에 이는 잠수 형태의 수초 성장에 억제 요인이 된다. 따라서 잠수 형태의 수초들은 수처리에 있어서 효과적이지 못하다(이, 1993).

3) 창발성 식물법

창발성 식물은 수표면에 넓게 뻗는 근채류로서 비교적 수리학적으로 안

정한 얇은 수심에서 잘 자란다.

창발성 식물법은 수표면 흐름 습지법(Free water surface flow wetland:FWS wetland), 수면하 흐름 습지법(Subsurface flow wetland:SF wetland), 수직적 흐름 습지법(Vertical flow wetland:VF wetland)으로 나눌 수 있다.

오염물질은 침전, 토양 입자에 의한 흡착, 식물 조직에 의한 동화, 미생물에 의한 변형을 포함하는 물리적, 화학적, 생물학적 과정의 결합을 통해 제거된다.

(1) 수표면 흐름 습지

가장 일반적으로 사용되고 있는 형태의 인공습지로서 자연 습지를 가장 가깝게 모방하고 있다. Fig. 1은 일반적인 수표면 흐름 습지를 나타낸 것이다. 일반적으로 불투수층의 토양바닥이나 지하의 차단벽, 정수식물, 얇은 수심을 갖춘 평행한 웅덩이나 수로로 구성되어 있다(이, 1993).

대부분의 분해공정은 물에 잠긴 줄기와 물사이에 형성된 생물막에서 일어난다. 폐수는 토양위로 얇은 깊이를 가지고 흐르게 된다. 산소 전달은 수면에서 재포기 되어 생물막으로 이동한다(안, 1995).

폐수 처리를 위한 수표면법은 25년 전에 구성된 Holland에 있는 도랑 시스템(Ditch system)으로부터 유럽에서 매우 천천히 발전되었다. 프랑스에서의 연구는 못에 부들을 심어 폐수 안정을 향상시키려고 하였지만 성공하지는 못했다. 최근 스웨덴에서는 폐수처리 장치에서 유출되는 유출수에서 질소를 제거하기 위해 22ha의 자유 수면 습지를 구성하여 가동하고 있다.

북 아메리카에서 자유 수면 흐름 습지는 폐수처리를 위해 구성된 습지형태이다. 북아메리카에 습지 처리 시스템은 약 200개이고, 그 가운데 2/3는 자유 수면 흐름 습지이고, 이 가운데 1/2은 자연적 습지이다(Hans, 1994).

(2) 수면하 흐름 습지

수면하 흐름 습지는 2차 처리 또는 고도 처리의 목적으로 설계된다. Fig. 2는 수면하 흐름 습지 장치를 나타낸 것이다. 이 장치는 플라스틱으로 방수처리된 표면위에 사력이나 점토로 채우고 식물을 심은 시스템이다. 산소

는 식물줄기 및 뿌리를 통하여 전달되며 뿌리표면에서의 생물막에 의한 생분해가 일어난다. 미생물은 충전매체와 식물뿌리에 부착되어 있는 데, 이들은 용존 유기물을 직접 흡수하며 생물학적 분해작용도 한다.

Hans(1986)에 의해 수면하 흐름을 갖는 인공습지에 의한 폐수처리 방법으로 RZ system이 제안된 이후, 유럽에서는 토양과 자갈을 충전한 수면하 흐름 습지가 구성되고 있다. 덴마크, 독일, 영국에서는 약 200개의 시스템이 현재 작동중이고, 동유럽의 몇 개의 나라에서는 빠른 속도로 퍼지고 있다. 대부분의 시스템은 일반적으로 갈대가 심어져 있지만 몇 개의 시스템은 다른 습지 식물 종을 심고 있다. 덴마크와 독일 시스템에서 여층은 대부분 토양이다. 토양을 여층으로 한 시스템에서는 막힘 현상이 일어나 표면 유출 문제가 발생하여 영국과 북아메리카에서는 자갈 여층으로 구성되었다. 오스트리아와 남아프리카에서 수면하 흐름 습지는 많은 종류의 폐수를 처리하는 데 이용되고 있다(Donald 등, 1994 ; Hans, 1994).

(3) 수직적 흐름 습지

위의 두가지 형태의 인공습지를 결합한 것이다. 이 공정에서는 물이 표면에 유지되어 기질을 통해 하부배수로로 수직적 흐름이 일어난다. 이 형태는 토양과 폐수의 충분한 접촉시간을 제공한다는 장점이 있으나 아직 실험단계에 있다.

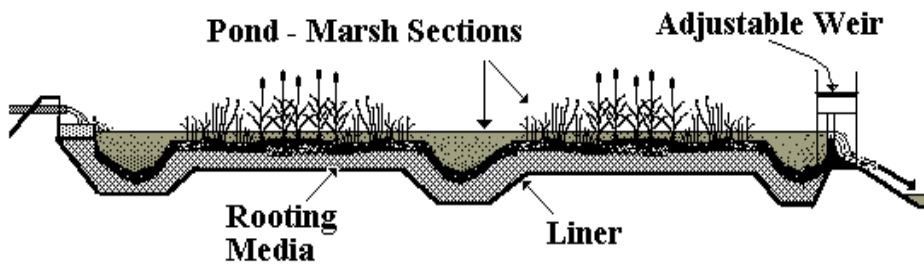


Fig. 1. Free water surface wetland design.

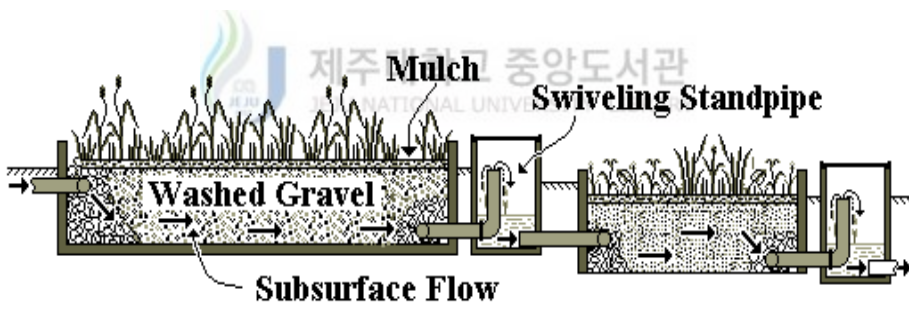


Fig. 2. Subsurface flow wetland design.

3. Root zone(RZ) system 에서의 구성요소

충진재, 습지식물 및 미생물은 RZ system을 움직이는 구성 시스템이다.

1) 충진재

충진재는 직접적인 물리적, 화학적 상호작용과 간접적으로 습지식물의 성장을 위한 기질을 제공하고, 미생물을 부착시키기는 것에 의해 폐수를 정화시키는 역할을 한다.

직접적인 오염물질 제거 메커니즘을 보면 여과에 의한 SS의 제거, 충진재에 부착되어 있는 미생물의 성장에 의한 병원균 제거, 공극에 의한 토양의 침강, 분해된 유기물, 병원균, 질소, 인산염, 중금속의 흡착, 충진재와 생물막으로의 난용성물질과 인산염과 중금속의 침강을 포함한다. 표면에 흡착되거나 용해된 유기오염물은 호기적, 통기적, 혐기적 미생물에 의해 생물학적으로 분해될 수 있다.

여러 가지 충진재가 RZ system에서 이용되고 있다. Kickuth는 모든 종류의 토양이 이용될 수 있다는 것을 주장하고 있다(Conley 등, 1991). 생물막의 존재는 충진재의 특성을 변경시키기는 하지만 여과와 흡착 메커니즘은 사용된 충진재에 따라 다르다.

충진재의 수리학적 전도율은 뿌리와 뿌리줄기의 발달, 생물막의 성장, 침전의 형성, 폐수 입자의 축적에 의해 결정된다. 자연토양을 이용하는 이들은 식물 성장에 따라 수리학적 전도율이 증가된다 한다(Hans, 1994 ; Conley 등, 1991).

2) 습지 식물

RZ system에서 이용되고 있는 습지 식물은 창발성 수생식물과 부유 수생식물이다. 이런 식물들은 성장하는 잎, 꽃, 침수된 뿌리와 뿌리줄기를 가지고 있는 데, 창발성 수생식물 중에서 특히 갈대, 파피루스, 부들과 같은 식물이 일반적으로 이용되고 있다.

습지 식물의 첫 번째 기능은 뿌리와 뿌리줄기는 폐수 분해를 촉진시키

고, 뿌리 부근에 호기적 미생물이 성장을 할 수 있도록 산소를 공급한다.

습지식물의 뿌리 부근에서의 산소의 존재는 식물의 호흡작용, 성장, 식물에 독성을 미치는 물질로부터 보호하기 위해 지상부에서 뿌리와 뿌리줄기로의 전달을 통해 공급시킨다.

산소는 식물의 통기부분으로 들어오고, 가스 전달 세포를 통한 확산으로 뿌리와 뿌리줄기로 산소를 공급한다. 이를 aerenchyma라고 불린다. 많은 연구자들은 산소는 인접한 토양으로 식물 뿌리와 뿌리줄기로부터 방출되어 뿌리 부근에 호기적 영역을 만든다고 한다. Armstrong은 산소 확산 실험을 통하여 이 이론을 증명하였다. 산소확산실험은 습지식물의 뿌리로부터 확산되는 산소의 양을 측정된 것으로 호기적 영역이 형성되었다고 한다 (Conley 등, 1991).

습지식물의 두 번째 기능은 충전재의 수리학적 전도율을 증가시키는 것이다.

뿌리와 뿌리줄기가 성장할 때 그들은 토양을 깨뜨리고, 느슨하게 하여 토양의 공극을 증가시킨다. 식물 뿌리와 뿌리줄기의 성장에 따라 충전재 사이로 더 효과적인 폐수의 움직임을 가져온다고 한다(Hans, 1984 ; Reed 등, 1995).

Kickuth는 토양의 수리학적 전도율은 식물 성장과 함께 증가한다는 것을 보고하였다(Conley 등, 1991).

3) 미생물

충전재와 습지식물의 뿌리와 뿌리줄기는 미생물이 부착 성장을 위한 넓은 표면적을 제공한다. 만일 미생물이 식물의 뿌리에 부착한다면 식물의 산소 공급에 의해 호기적, 통기적, 혐기적 미생물의 성장이 가능하다.

호기와 통기적 미생물의 존재는 질산화와 탈질화에 의해 질소를 제거한다. 질소, 인산염, 중금속, 다른 폐수 성분의 미생물 고정화가 발생할 수 있지만, 생체 부패에 따라 재용해가 발생할 수 있다.

4. 제거속도상수

습지 시스템에서 영양염 제거 모델은 하천에서의 BOD 자정작용과 같은 형태의 일차식에 가깝다는 것이 阿部 등의 조사결과에 의해 밝혀졌다(尾崎 등, 1995 ; Hans, 1995).

$$-\frac{dC}{dt} = kC = -\gamma \quad (2-1)$$

여기에서 $\frac{dC}{dt}$: BOD, T-N 및 T-P 제거속도(mg/ℓ · day)

C : BOD, T-N 및 T-P 농도(mg/ℓ)

k : BOD, T-N 및 T-P 제거속도상수(1/day)

식 2-1을 정리하여 구간 C_o 와 C_t , 0과 t사이에서 적분하면 다음과 같다.

$$\int_{C_o}^{C_t} \frac{dC}{C} = -k \int_0^t dt \quad (2-2)$$

C_o : 유입되는 BOD, T-N 및 T-P 농도(mg/ℓ)

C_t : t 시간 후 유출되는 BOD, T-N 및 T-P 농도(mg/ℓ)

t : 체류시간(day)

식 2-2를 정적분하여 정리하면 다음 식이 된다.

$$\ln C_t - \ln C_o = -k t \quad (2-3)$$

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp(-kt) \quad (2-4)$$

위의 식을 이용하여 본 연구에서 제거속도상수를 결정하였다.



III. 재료 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 3과 같다. 장치는 투명 아크릴을 이용하여 가로 180cm, 세로 30cm, 높이 30cm로 제작하였고, 반응조내에 높이 20cm로 Activated carbon(이하 A/C로 표기)을 채워 실험을 실시하였다.

A/C는 비표면적이 넓어 미생물 부착능력이 높기 때문에 다른 충전재에 비하여 부지 소요면적을 줄일 수 있다고 판단되어 이용하였다. 본 실험에 사용된 A/C는 입상활성탄(Coconut shell coal)으로써 입경분포는 2.36~4.75mm, 표면적은 900~1100m²/g인 것을 이용하였다. 식물은 37본/m²으로 식재하여 실험을 행하였다.

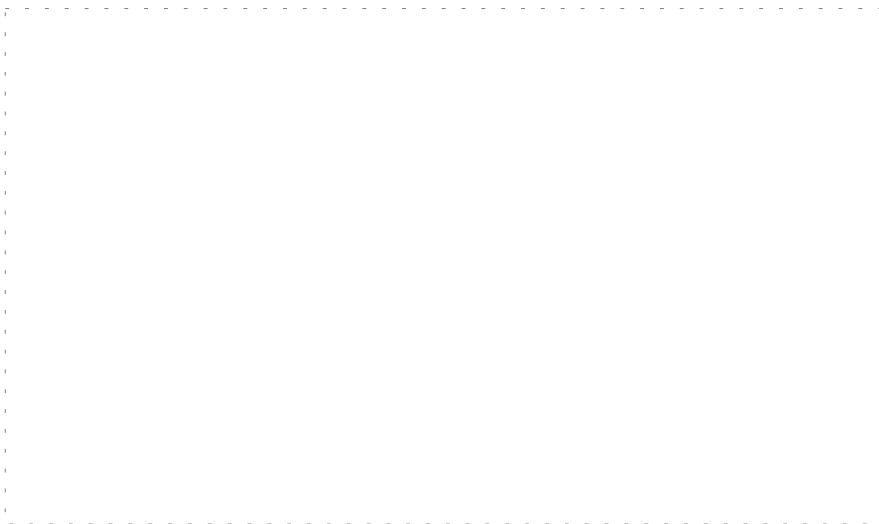
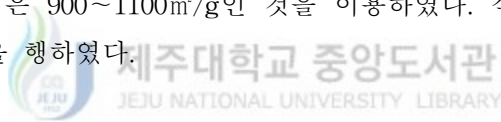


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험방법

실험에 이용된 원수는 제주대학교 해양과학대학의 오수처리장 방류수(2차 처리수)를 이용하였고, 실험은 2단계로 실시하였다.

1단계(1998년 3월 1일~1998년 6월 3일)는 식물종에 따른 처리수의 수질 특성을 파악하고자 유량을 75ml/min으로 고정하여 실험을 실시하였고, 2단계(1998년 6월 3일~1998년 7월 10일)는 체류시간 따른 처리특성을 파악하고자 각 재배조에 *Amaryllis*를 심고, 체류시간을 24hr, 12hr, 6hr, 3hr으로 하여 실험을 실시하였다.

본 실험에서의 A/C system은 대조구(Blank)로서 실험을 행하였다.

본 실험에 이용된 유입수의 수질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 살펴보면 유입 원수인 오수처리장 방류수의 평균농도는 BOD 68.4mg/l, COD 63.4mg/l, TS 730mg/l, VS 320mg/l, TSS 27.0mg/l, T-N 78.5mg/l, NH₃-N 45.2mg/l, NO₃-N 16.7mg/l, T-P 8.1mg/l로 나타났다.

실험기간 동안의 수질분석은 수질오염 공정시험방법에 따라 측정하였다.

Table 1. Water quality characteristics of used raw wastewater

Parameter	Unit	Water quality(mean)	
Temp.	℃	17~18	
pH	-	7.03~7.41	(7.35)
BOD	mg/l	53.6~76.5	(68.4)
COD _{Mn}	mg/l	48.0~76.0	(63.4)
TS	mg/l	570~950	(730)
VS	mg/l	180~480	(320)
TSS	mg/l	12.3~48.3	(27.0)
T-N	mg/l	62~89	(78.5)
NH ₃ -N	mg/l	31.8~68.7	(45.2)
NO ₃ -N	mg/l	13.6~21.1	(16.7)
T-P	mg/l	6.6~9.9	(8.1)

IV. 결과 및 고찰

1. 식물종에 따른 제거특성

1) BOD

Fig. 4는 실험기간 중 각 system에서의 BOD 제거율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 BOD 제거율은 초기에 각 system의 제거율이 20% 전후로 나타나고 있지만, 실험 종료시 제거율은 A/C system에서 35% 나타났고, *Amaryllis*+A/C system에서는 65%, *Reed*+A/C system에서는 50%로 나타났다.

습지에서는 수생식물과 충전재에 부착되어 있는 미생물이 용해성 BOD를 제거한다(Lucy 등, 1991 ; Metcalf 등, 1996). BOD 부하가 높을 경우 산소의 농도에 따라 BOD의 생물분해가 제한될 수 있다고 하였다(Lucy 등, 1991).

폐수처리와 관련하여 수생식물의 가장 중요한 영향은 식물 조직이 가지는 물리적 영향(여과작용, 미생물이 부착할 수 있는 표면적 제공 등)과 기공을 통한 뿌리 지역의 산소공급을 들 수 있는 데(Hans, 1994 ; Donald 등, 1994), 수생식물의 뿌리로부터의 산소방출은 뿌리지역에 산화지역을 만든다. 폐수에서 대부분의 유기성분은 이 지역에서 산소를 이용하여 이산화탄소와 물로 분해된다. 뿌리표면으로부터 약간의 거리에서는 무산소 지역이 생성된다. 혐기지역에서 유기물질은 발효과정에 의해 이산화탄소와 메탄으로 혐기적 분해를 한다(Hans, 1986 ; 李 등, 1994 ; Lucy 등, 1991).

따라서 각 system별 제거율은 식재 식물들이 각 실험조건에 적응을 하면서 또, 식물과 미생물이 성장을 하면서 제거율이 높게 나타나고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 A/C system에서는 폭기장치를 이용하여 폭기를 행하고 있지 않기 때문에 주로 미생물의 혐기적 분해에 의해 BOD가 제거되었

고, *Amaryllis*+A/C system와 *Reed*+A/C system에서는 식물에 의한 산소 공급에 의해 호기와 혐기 분해가 동시에 일어나 BOD가 제거될 수 있었다고 판단된다. 이는 본 system들에서의 반응조내 DO를 측정해본 결과 1ppm 이하의 범위였기 때문에 간접적인 추정이 가능하다고 판단된다.

또한, *Amaryllis*+A/C system가 *Reed*+A/C system보다 BOD 제거율이 높은 이유는 육안으로 판단한 결과 *Amaryllis*의 뿌리 및 줄기가 *Reed* 보다는 많이 성장되어 미생물의 부착량 및 분해산물의 식물 흡수가 많았기 때문이라 판단된다.

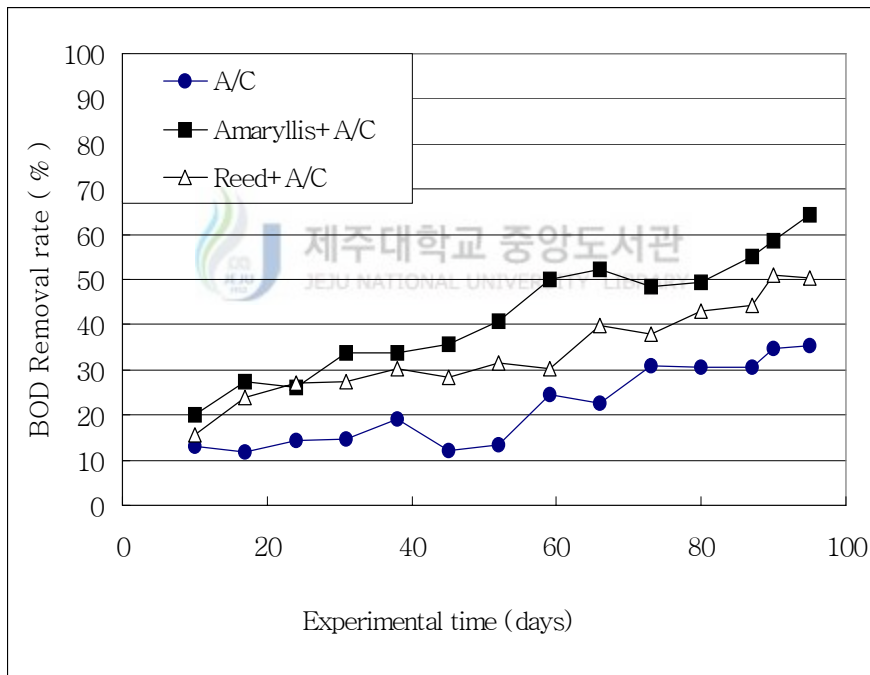


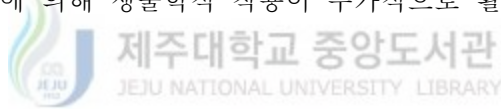
Fig. 4. Removal rate of BOD on each advanced wastewater treatment systems.

2) TS 및 VS

Fig. 5는 각 system별 TS 및 VS의 농도와 제거율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 TS 제거율은 A/C system, *Amaryllis*+A/C system, *Reed*+A/C system에서 각각 20%, 40%, 35%로 나타났고, VS 제거율은 각각 20%, 55%, 50%로 나타났고, 각 system별 VS 감소율은 *Amaryllis*+A/C system과 *Reed*+A/C system이 A/C system보다 크게 나타나고 있다.

수생식물을 이용한 처리장치에서 오염물질은 침전, 토양입자에 의한 흡착, 식물조직에 의한 동화, 미생물에 의한 변형을 포함하는 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 통해 제거된다고 하였다(Hans, 1994 ; Lucy 등, 1991).

따라서, 식물을 심은 장치들에서 VS 제거율이 A/C system에서보다 높게 나타나고 있는 이유는 A/C system에서는 충전재의 여과작용에 의해서만 TS가 제거되었지만, 식물을 심은 system들에서는 식재 식물들에 의한 산소의 공급 등에 의해 생물학적 작용이 부가적으로 활발하였기 때문이라 판단된다.



3) T-N

Fig. 6은 각 system별 T-N 제거율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 초기에는 T-N 제거율이 각 system별로 큰 차이가 없이 각각 10% 전후로 나타나고 있지만, 실험을 종료할 때의 T-N 제거율은 A/C system이 15%, *Amaryllis*+A/C system과 *Reed*+A/C system이 각각 40%, 25% 정도의 제거율을 나타내고 있다.

폐수 중 유기질소는 침전과 여과로 제거되며, 유기질소는 더욱 분해되어 암모니아 이온을 방출하는 용존성 아미노산으로 가수분해 되어진다. 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기 용이하고, 호기성 조건에서 생물학적 질산화에 의하여 질산성 질소로 전환되는 데 사용된다(Metcalf 등, 1996).

그리고, 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 NH_4^+ 와 NO_3^- 로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로써 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 되는 것이다. 그

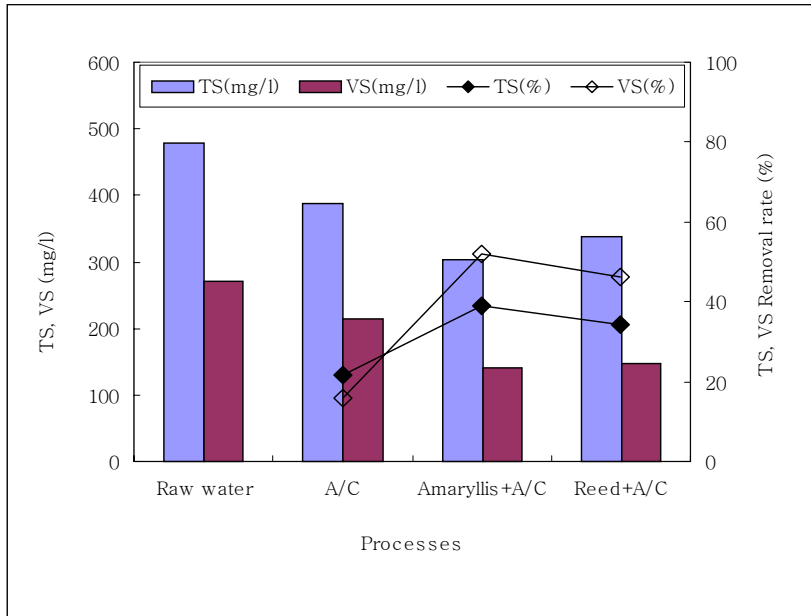


Fig. 5. Removal rate of TS and VS on each advanced wastewater treatment systems.

외에도 질화와 탈질화는 질소제거에 중요한 역할을 한다(안 등, 1995 ; Hans, 1986 ; Sherwood, 1995).

이 때, 질화를 위해 요구되는 산소는 대기로부터 직접 확산되거나 식물 뿌리로부터의 방출에 의해 제공되며, 질소는 식물에 의해 흡수되고, 미생물로 전환된다고 하였다(Hans, 1994).

따라서 본 연구에서, *Amaryllis*+A/C와 *Reed*+A/C system에서 초기에는 T-N 제거율이 낮았으나 식재 식물이 각 실험조건에 순응하여 성장을 하면서 이들 식물의 흡수에 의해 그 제거율이 점차 증가되었으며, A/C system에서는 활성탄의 표면에 부착된 부착 미생물의 성장에 의해 T-N이 부분적으로 제거되었다고 판단된다.

Table 2는 이미 보고된 식물종들에 따른 T-N의 단위제거량을 나타낸 것이다. 표에서 살펴보면 부레옥잠은 평균 $1.73\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$, 파피루스는 평균 $1.48\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 등으로 보고되고 있다(尾崎 등, 1993).

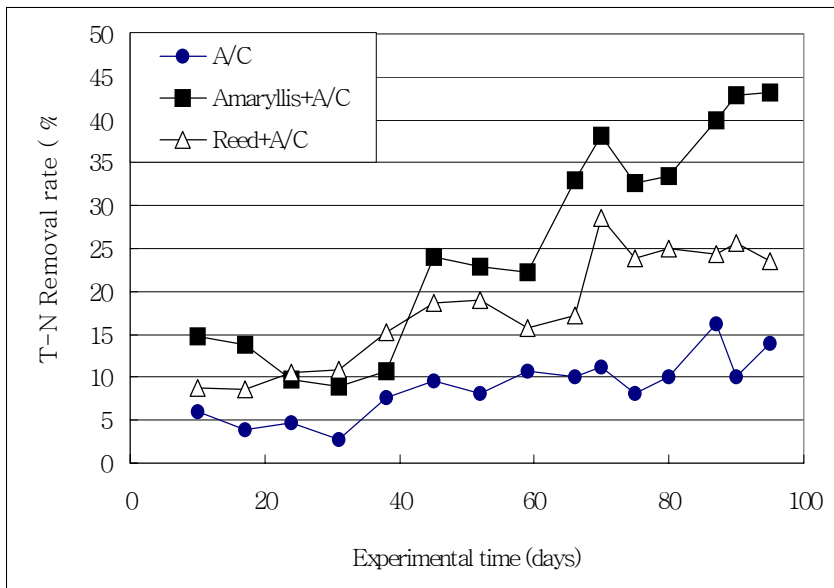


Fig. 6. Removal rate of T-N on each advanced wastewater treatment systems.

Table 2. Unit removal rate of T-N with respect to plant species (Ozaki et al., 1993)

Species	Unit removal rate (g-N/m ² · day)
Water hyacinth	0.7~1.73
Marigold	0.48~0.61
Sorghum	0.96~1.27
Papyrus	0.66~1.48

본 실험에서의 *Amaryllis*에 의한 T-N 단위제거량은 초기에는 $1.08\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$, 최대 단위제거량은 $3.48\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 평균 $2.6\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 였고, *Reed*에 의한 T-N 단위제거량은 초기에는 $0.48\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$, 최대 $2.03\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 평균 $1.76\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 계산되었다.

이와 같은 실험결과는 Table 2에서의 각 종 식물보다도 본 실험에 이용된 *Amaryllis*와 *Reed*가 질소제거 효과가 높다는 것을 알 수 있었으며, 특히 *Amaryllis*는 *Reed*보다도 약 1.5배 더 그 단위 제거량이 크다는 것을 알 수 있었다. 이것은 또한 BOD 제거에 관한 고찰에서도 설명된 바와 같이 *Amaryllis*가 *Reed*보다도 미생물의 부착량과 분해산물의 식물흡수가 많았기 때문이라 사려된다.

4) T-P

Fig. 7은 system별 T-P 제거율을 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 T-P의 제거율은 초기에는 10% 전후로 나타나고 있지만, 실험을 종료할 때에는 A/C system, A/C+*Amaryllis* system, A/C+*Reed* system에서 각각 15%, 30%, 25%전후로 나타나고 있다.

폐수처리에 적용 가능한 인제거 방법은 칼슘, 알루미늄, 철등의 금속염을 투입하고 생성되는 불용성 침전물을 걸러내는 화학적 방법과 미생물, 식물 등을 이용하는 생물학적 처리법이 있다(Metcalf 등, 1996).

특히 식물이 흡수할 수 있는 인은 PO_4^{3-} , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} 의 형태이며 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다(안 등, 1994).

따라서, A/C system에서의 T-P 제거는 A/C 표면에 부착된 부착미생물의 생물학적 수탁에 의한 제거로 생각되며, 다른 system에서는 미생물에 의한 제거와 함께 식물의 흡수에 의한 제거가 함께 이루어지고 있다고 판단된다.

Table 3은 이미 보고된 식물중에 따른 T-P 단위제거량을 나타낸 것이다. 표에서 살펴보면 부레옥잠은 평균 $0.384\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$, 파피루스는 평균 $0.22\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ 등으로 보고되고 있다(尾崎 등, 1993).

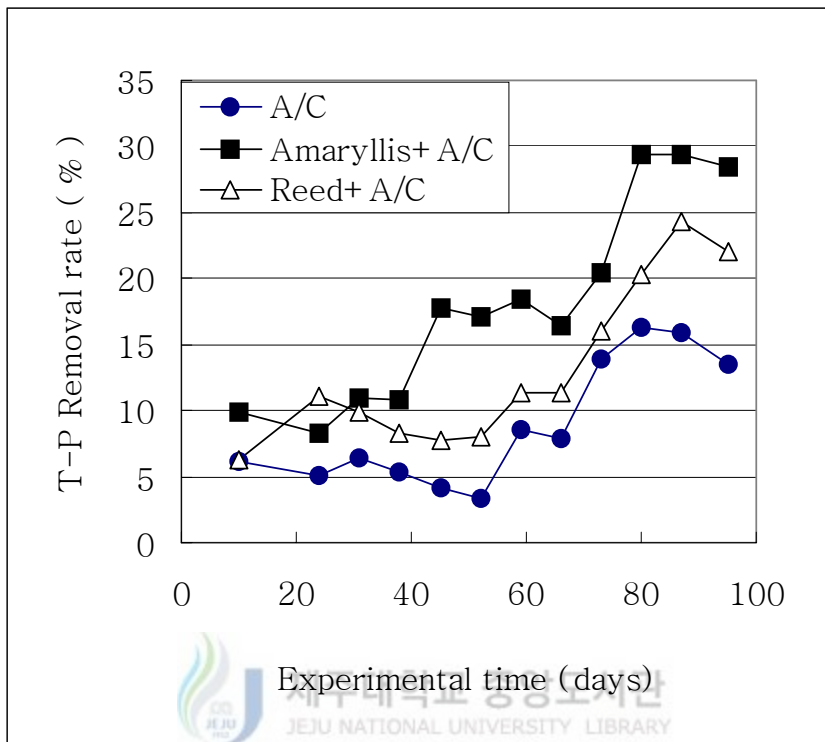


Fig. 7. Removal rate of T-P on each advanced wastewater treatmental systems.

Table 3. Unit removal rate of T-P with respect to plant species (Ozaki et al., 1993)

Species	Unit removal rate (g-P/m ² · day)
Water hyacinth	0.155~0.384
Marigold	0.16~0.171
Sorghum	0.15~0.26
Papyrus	0.1~0.22

본 실험에서의 *Amaryllis*에 의한 T-P 단위제거량은 초기에는 $0.19\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$, 최대 단위제거량은 $0.55\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 평균 $0.27\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ 이었고, *Reed*에 의한 T-P 단위제거량은 초기에는 $0.13\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$, 최대 $0.44\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 평균 $0.25\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 나타났다.

Table 3에서 살펴보면 본 실험에 이용된 *Amaryllis*와 *Reed*가 다른 식물에 비해 T-P의 단위제거량이 높게 나타나고 있다는 것을 알 수 있는데, 이것은 *Amaryllis*와 *Reed*가 다른 식물에 비해 T-P의 식물 흡수가 많았기 때문이라 판단된다.



2. 체류시간에 따른 제거특성

Table 4는 각 유량별 *Amaryllis*를 심은 system에서의 제거율을 종합한 것이다.

1) BOD 제거

시험기간 중 처리수의 BOD 농도는 24hr에서는 16.5~55.5mg/ℓ로 평균 23.5mg/ℓ로 나타났고, 12hr에서는 21.6~35mg/ℓ로 평균 33.4mg/ℓ로 나타났고, 6hr에서는 25.5~37.2mg/ℓ로 평균 35.7mg/ℓ, 3hr에서는 유출수 농도가 26.9~42.2mg/ℓ로 평균 41.1mg/ℓ로 나타났다. 각 체류시간에 따른 평균 제거율은 각각 65.0%, 52.9%, 49.6%, 42.0%로 나타났으며, 체류일수가 길어질수록 BOD 제거율은 증가되었다.

시험기간 중 COD 제거효율도 체류시간에 따라 증가되고 있었다. 식물 생존은 지상부의 내부통기 조직과 연결된 뿌리에서 근권으로의 산소 방출을 한다고 하였는데, 이와 같은 산소공급의 결과 근권내 혐기-호기층의 공존이 배출수의 질화작용과 탈질작용을 촉진시키며, 한편, 혐기층에서 폐수중 유기물을 이산화탄소와 메탄으로 분해시켜 그 결과 BOD가 낮아진다고 하였다(李 등, 1994).

따라서 체류시간이 길수록 제거율이 높게 나타나고 있는 이유는 폐수와 여재의 접촉시간이 길어 여재에 부착된 미생물이 BOD와 COD를 분해할 수 있는 시간이 길었기 때문이라 판단된다.

2) T-N 제거

체류시간에 따른 T-N 농도 변화를 살펴보면, 24hr에서는 평균 45.66mg/ℓ, 12hr에서는 평균 61.3mg/ℓ로 나타났고, 6hr에서는 평균 66.5mg/ℓ, 3hr에서는 평균 69.2mg/ℓ로 나타났고, 각각의 제거율은 40.0, 22.1, 15.5, 12.1%로 나타났다.

NH₃-N 제거는 질화-탈질에 의한 과정과 미생물에 의한 흡수, 식물에 의

Table 4. Experimental results obtained by *Amaryllis*+A/C system
(unit : mg/l)

		24hr	12hr	6hr	3hr
BOD	Influent	67	70.9	70.9	70.9
	Effluent	23.5	33.4	35.7	41.1
	Removal rate (%)	65.0	52.9	49.6	42.0
COD	Influent	74.7	63.4	63.4	63.4
	Effluent	24.6	22.9	35.5	39.7
	Removal rate (%)	67.1	63.9	44.0	37.4
TS	Influent	480	730	730	730
	Effluent	288	460	515	530
	Removal rate (%)	40.0	37.0	29.5	27.4
VS	Influent	235	319	319	319
	Effluent	106	155	202	239
	Removal rate (%)	54.9	51.4	36.7	25.1
T-N	Influent	76.1	78.7	78.7	78.7
	Effluent	45.66	61.3	66.5	69.2
	Removal rate (%)	40.0	22.1	15.5	12.1
NH ₃	Influent	30.4	27.6	27.6	27.6
	Effluent	24.8	24.4	26.1	27.6
	Removal rate (%)	18.4	13.1	5.4	0
T-P	Influent	9.62	9.09	9.09	9.09
	Effluent	7.22	7.73	8.17	8.37
	Removal rate (%)	25.0	15.0	10.1	7.96

한 흡수 등으로 이루어진다. 질화에 필요한 산소는 대기로부터 액체표면으로 확산되거나 식물의 통기조직과 뿌리를 통해 장치로 들어온다(Oostrom 등, 1994).

용존성 암모니아는 암모니아 가스와 같이 휘발하여 대기중으로 직접 제거할 수 있으나 긴 체류시간과 pH 변화폭이 커서 휘발의 경로로 제거되는 경우는 적다(10% 미만). 자연적 처리 장치에서 대부분의 유입수내의 암모니아와 전환된 암모니아는 토양입자와 유기입자에서 이온교환 반응을 통해 일시적으로 흡수되고, 흡수된 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기에 용이하고, 호기적 상황에서 생물학적 질산화에 의하여 질산성 질소로 전환된다. 질소는 또한 생물학적 탈질에 의해 제거되기도 한다. 탈질화는 anoxic 상태 하에서 혐의성 박테리아에 의해서 일어난다(Metacly 등, 1997).

식물의 근권은 광합성 과정중 광화학적 작용에 의해 생성된 산소가 뿌리를 통해 방출되어 호기성층, 준호기성층, 혐기성층이 형성되고, 호기성층에서는 암모니아가 질산이온으로 되고, 준혐기성층에서는 질소가스로 휘산되는 데, 체류일수가 길어질수록 질소 제거율이 향상된다.(李 등, 1994)

따라서 체류시간이 길수록 제거율이 증가되는 이유는 호기성 미생물에 의한 질화작용과 혐기성 미생물에 의한 탈질 작용과 함께 식물이 질소를 흡수할 수 있는 시간이 길었기 때문이라 판단된다.

3. 제거속도 상수

반응조에 *Amaryllis*를 심고, 체류시간 3hr, 6hr, 12hr, 24hr의 실험조건으로 각 반응조의 방류지점에서 취한 시료의 수질분석 결과를 토대로 반응조 내에서 체류시간(hydraulic retention time : HRT)에 따른 BOD, T-N, T-P 농도의 관계를 Fig. 8 ~ Fig. 11에 각각 나타내었다.

그림에서 보면, 반응조 내의 체류시간에 따라 BOD, T-N, T-P의 농도가 감소되는 것을 알 수 있다. 또한, BOD, T-N, T-P의 제거속도식은 1차 반응식으로 표현이 가능하고, 식(3-1)에 근사하였다(尾崎 등, 1995 ; 江成 등, 1996).

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp(-k \cdot t) \quad (3-1)$$

여기서 C_t : t시간 후의 영양염 농도(mg/ℓ)

C_0 : 유입수의 영양염 농도(mg/ℓ)

t : 체류시간(day)

k : 영양염 제거속도상수(1/day)

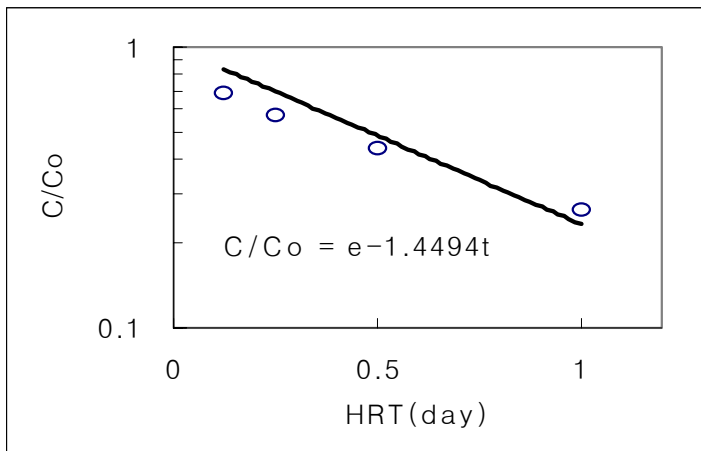


Fig. 8. BOD removal with hydraulic retention time.

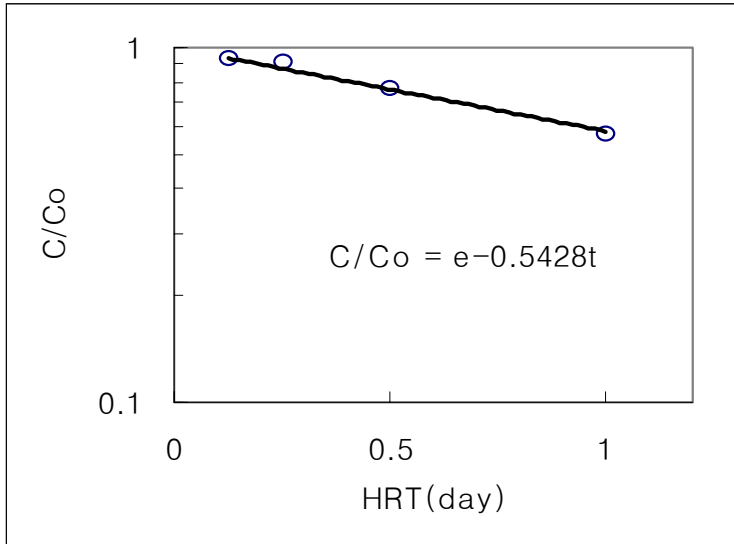


Fig. 9. T-N removal with hydraulic retention time.

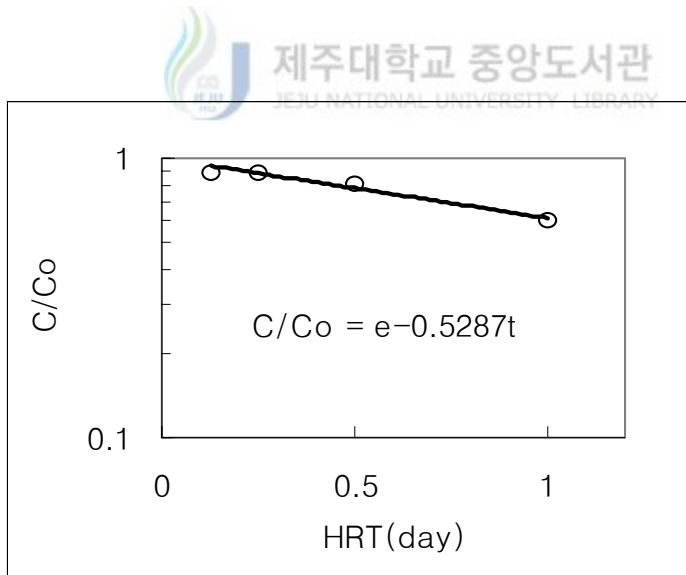


Fig. 10. T-P removal with hydraulic retention time.

본 실험에서 얻어진 BOD 제거속도 상수는 1.4494(1/day)로 나타나고 있다.

江成(1996) 등은 줄을 이용한 수질개선의 시험에서 T-N 제거속도는 $0.258 \sim 2.41 \times 10^{-2}$ (1/day)였다고 보고하고 있고, 尾崎(1995) 등은 화훼(*Tagetes spp.*, *Impatiens sulatnii*)와 자원식물(*Papyrus*)등을 이용한 실험에서 T-N 제거속도상수는 화훼식물에서는 0.350(1/day), 자원식물에서는 1.221(1/day)로 보고하고 있다.

본 실험에서 T-N 제거속도상수는 0.5428(1/day)로 나타나고 있다.

江成(1996) 등은 줄을 이용한 수질개선의 시험에서 T-P 제거속도는 3.0×10^{-2} (1/day)였다고 보고하고 있다.

본 실험에서 T-P 제거속도상수는 0.5287(1/day)로 나타나고 있다.

이상과 같이 다른 이유는 기상조건, 식물의 종류, 생육시기 및 수심 등이 다르기 때문이라 판단된다.



IV. 결 론

식물을 이용한 오수의 고도처리를 위해서 수면하 흐름(Subsurface flow) 방식에 의한 실험실적 오수처리 실험을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. A/C system, *Amaryllis*+A/C system 및 *Reed*+A/C system에서 BOD 제거율은 초기에 모두가 20% 전후로 나타났지만, 최종 제거율은 각각 35%, 65%, 50% 전후로 나타났고, TS 제거율은 각각 20%, 40%, 35%로 나타났다.

대조구(Blank)인 A/C system에서의 BOD 제거는 A/C 표면의 부착 미생물들에 의한 혐기성 분해가 주요인이 될 것이지만 *Amaryllis*+A/C system과 *Reed*+A/C system에서는 식물의 산소공급에 의한 호기 및 혐기성 생물학적 분해가 가능하였기 때문이라 판단된다.

2. A/C system, *Amaryllis*+A/C system 및 *Reed*+A/C system에서 T-N 제거율은 각각 15%, 40%, 25%로 나타났고, *Amaryllis*에 의한 평균 단위제거량은 $2.6\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$, *Reed*에 의한 평균 단위제거량은 $1.76\text{g-N/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 *Amaryllis*가 *Reed*보다 단위제거량이 약 1.5배 정도 크다는 것을 알 수 있었는데, 이는 *Amaryllis*가 *Reed*보다도 미생물의 부착량과 분해산물의 식물 흡수가 많았기 때문이라 사려된다.

3. A/C system, *Amaryllis*+A/C system 및 *Reed*+A/C system에서 T-P 제거율은 각각 15%, 30%, 25%로 나타났고, *Amaryllis*에 의한 평균 단위제거량은 $0.27\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$, *Reed*에 의한 평균 단위제거량은 $0.25\text{g-P/m}^2 \cdot \text{day}$ 으로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

4. 본 실험에서 3, 6, 12, 24hr의 체류시간 증가와 BOD, T-N, T-P의 제거효과는 서로 양의 상관관계를 나타냄을 확인할 수 있었으며, 체류시간 24hr에서의 최대 제거효율은 BOD 65%, T-N 40%, T-P 25%로 나타났다.
5. *Amaryllis*에 의한 BOD, T-N 및 T-P의 제거반응은 체류시간에 따라 1차식으로 나타낼 수 있었고, 제거속도 상수는 각각 1.4494(1/day), 0.5428(1/day), 0.5287(1/day)로 산출되었다.

V. 참고문헌

- Adocock, P.W. and G.G. Ganf. 1994, Growth characteristics of three macrophyte species growing in a natural and constructed wetland system. *Wat. Sci. Tech.*, 29(4). 95~102.
- 相崎守弘, 中里廣幸. 1997, 富栄養化湖水の浄化のための水耕生物濾過法を用いた人工湿地の開発. *水環境學會誌*, 20(9). 622~628.
- 안창우. 1995, 습지를 이용한 수처리의 이론적 고찰. *첨단환경기술*, 3(4). 60~69
- 안윤주, 공동수. 1995, 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. *大韓環境工學會誌*, 17(6). 593~603
- Boustany, R.G., C.R. Crozier, J.M. Rybczyk and R.R. Twilley. 1997, Denitrification in a South Louisiana wetland forest receiving treated sewage effluent. *wetlands Ecology and Management*, 4. 273~283
- Boutin, C. 1987, Domestic wastewater treatment in tanks planted with rooted macrophytes : Case study ; Description of the system ; Design criteria; and efficiency. *Wat. Sci. Tech.*, 19(10). 29~40.
- Brix, Hans. 1986, Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants - The Root zone Method. *Wat. Sci. Tech.*, 19(10). 107~118.
- Brix, Hans. 1994, Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 29(4). 71~78.
- Brix, Hans. 1994, Use of constructed wetlands in water pollution control ; Historical development, present status, and future perspectives. *Wat. Sci. Tech.*, 30(8). 209~223.
- Brown, D.S. and S.C. Reed. 1994, Inventory of constructed wetlands in the united states. *Wat. Sci. Tech.*, 29(4). 309~318
- Brown, D.S. 1994, Constructed wetlands in the USA, *Water Quality*

- International. 24~29.
- Conhley, L.M., R.I. Dick and Leonard Lion. An assessment of the root zone method of wastewater treatment. Research Jormal WPCF, 63(3). 239~247.
- 江成敬次郎, 鈴木淳. 1995, 水生植物(マコモ)による水質浄化. 環境技術, 24(4). 32~36.
- 江成敬次郎, 鈴木淳, 杉山智洋, 柴崎徹, 佐々木久雄. 1996, 水生植物(マコモ)を利用した水質改善の試み. 用水と廃水, 38(80). 15~23.
- Green, M.B. and J.Upton. 1994, Constructed reed beds: A cost-effective way to polish wastewater effluents for small communities. Wat. Env. Res., 66(3). 188~192.
- 平野浩二. 1994, 圃地浄化槽処理水による花卉の水耕栽培と栄養塩除去. 用水と廃水, 36(7). 19~28.
- 本部廣哲, 新納正也, 上田耕三郎. 1990, ブラックマップを用いた植物フィルターによる水中の窒素・リンの除去. 用水と廃水, 32(6). 16~20.
- 細井由彦, 城戸由能, 橋本一郎, 今嶋美幸. 1995, ヨシによる栄養塩除去機能に関する研究. 環境技術, 24(4). 27~31.
- 細見正明, 須藤隆一. 1991, 湿地による生活排水の浄化. 水質汚濁研究, 14(10). 674~681
- 古川憲治, 藤田正憲, 重村浩之. 1998, 水生植物の栽培を組み入れた接觸酸化法による汚濁都市河川の浄化. 用水と廃水, 40(3). 29~37.
- 전만식, 김범철. 1994, 영양염류 농도에 따른 부레옥잠(Water hyacinth)의 성장특성에 관한 연구. J.KSWQ, 10(2). 128~135.
- Kadlee, R.H. 1994, Phosphorus uptake in florida marshes. Wat. Sci. Tech., 30(8). 225~ 234.
- 木原敏. 1994, 水路中におけるホテイアオイ根毛による脱窒効果について. 環境技術, 23(6). 63~69.
- 金福榮, 金奉植, 朴永大. 1988, 畜産廢水の 汚染物質除去를 위한 水草選擇利用研究. 한국환경농학회지, 7(2). 111~116.
- 金福榮, 李相奎, 權章軾, 尹銀鎬. 1991, 부레옥잠에 의한生活污水의 淨化効

- 果. 한국환경농학회지, 10(1). 51~57.
- 李德培, 金鍾九, 姜鍾國, 金善寬, 蘇在敦, 李景洙. 1994, 갈대砂床濾過法을 이용한 畜産廢水淨化. 한국환경농학회지, 13(2). 231~239.
- 이남희. 1993, 수생식물(부레옥잠)을 이용한 돈사 폐수의 처리. pp.4~10.
- 이용두, 김현희. 1998, 식물을 이용한 오수중의 영양염류 제거특성. 한국환경과학회 1988년도 봄학술발표회 초록집, pp.171~175.
- Metcalf and Deey. 1997, Wastewater engineering treatment. disposal and Reuse, pp.901~983.
- Oostrom, A.J.van and J.M. Russell. 1994, Denitrification in constructed wastewater wetlands receiving high concentrations of nitrate. Wat. Sci. Tech., 29(4). 7~14.
- Oostrom, A.J.Van. 1995, Nitrogen removal in constructed wetlands treating nitrified meat processing effluent. Wat. Env. Res., 32(3). pp.137~147.
- 尾崎保夫, 阿部薰. 1993. 植物の活用した資源循環型水質淨化技術の課題と展望. 用水と廢水, 35(9). 5~17.
- 尾崎保夫, 尾崎秀子, 阿部薰, 雨谷惠夫. 1995, 資源循環・花卉植物を利用した生活排水の高度處理. 用水と廢水, 37(2). 111~118
- 尾崎保夫, 尾崎秀子, 阿部薰, 前田守弘. 1996, 有用植物を用いた生活排水の資源循環型淨化システムの開發. 用水と廢水, 38(12). 48~53
- Reed, S.C. and Donald Brown. 1995, Subsurface flow wetlands-A performance evaluation. Wat. Env. Res., 67(2). 244~248.
- Sikora, F.J., Zhu Tong, L.L. Behrends, S.L. Steinberg and H.S. Coonrod. 1995, Ammonium removal in constructed wetlands with recirculating subsurface flow:Removal rates and mechanisms. Wat. Sci. Tech., 32(3). 193~202.
- 宗宮功, 津野洋, 池田建志, 神村正樹. 1990, 下水二次處理水による花卉植物の水耕栽培に關する研究. 下水道協會誌論文集, 27(316). 45~52.
- 田畑眞佐子, 加藤聰子, 川村晶, 鈴木潤三, 鈴木靜夫. 1996, ヨシ植物水路における河川中の窒素・リンの除去効果. 水環境學會誌, 19(4). 331~338.

- 戸田任重, 楊宗興, 日高伸. 1995, 高濃度硝酸態窒素含有地下水の流入るアシ
濕地における脱窒速度の實測. 水環境會誌, 18(5). 419~423.
- 津野洋, 宗宮功, 占部章次郎, 宮林哲司, 神村正樹. 1991, 下水二次處理水によ
る花卉植物の水耕栽培と榮養塩除去. 用水と廢水, 33(3). 23~31.
- 津野洋, 宗宮功, 深尾忠可, 神村正樹. 1990, 花卉植物の水耕栽培による下水
二次處理水からのりん及び窒素の除去に關する研究. 下水道協會誌論
文集, 27(316). 53~60



감사의 글

본 논문이 완성되기까지 따뜻한 조언과 아낌없는 충고로 부족함이 많은 저를 끊임없는 사랑으로 지도해 주신 이용두 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 심사를 위하여 면민한 검토로 부족한 부분을 지도해주신 허목 교수님, 이기호 교수님께 감사를 드립니다. 또한, 항상 걱정해주시고 많은 이해와 관심을 갖고 지켜봐 주신 오운근 교수님, 허철구 교수님, 감상규 교수님, 조은일 교수님, 원예학과 소인섭 교수님, 해양토목공학과 이병걸 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

많은 실험에도 불구하고, 항상 함께해 준 상하수도공학 실험실 후배들과 항상 격려와 아낌없는 조언을 해주신 선배님들에게도 고마운 마음을 전하며, 언제나 위로와 격려를 해주던 김경훈, 오희부, 류성필, 이명훈, 김승건, 한지용, 고민철, 안이선 학형에게도 고마움을 전합니다. 또한, 여러모로 도움과 관심을 보여준 대학원 후배님들과 그 밖에 모든 분들에게도 고마움을 전합니다.

오늘이 있기까지 아낌없는 사랑과 정성으로 늘 걱정하며 헌신적으로 뒷바라지 해주신 부모님, 언제나 믿고 따르던 동생들에게도 고마운 마음을 전하며, 이 조그마한 결실을 바칩니다.