

수생식물에 의한 축산폐수의 오염물질 감소 효과

정광화, 김원호, 김맹중, 서 성, 최기춘, 조영무, 김영근

축산기술연구소

The Effect of Clarification by Aquatic Plant on Livestock Wastewater

K. H. Jeong, W. H. Kim, M. J. Kim, S. Seo, G. C. Choi, Y. M. Cho and Y. K. Kim

National livestock Research Institute, RDA, Suwon 441-350, Korea

Summary

In general, livestock wastewater consists of many pollutants such as nitrogen, phosphorus, carbonic compounds and inorganic substances. Most carbonic and organic compounds are sufficiently removed by conventional secondary processes, but nitrogen, phosphorus and soluble inorganic compounds are little removed by traditional clarification process. These remained substances in wastewater, for instances, phosphorus and nitrogen are efficiently eliminated by advanced wastewater treatment or botanical removing process. Concentrations of BOD₅, SS, T-N and T-P in influent livestock wastewater used in this study were 126mg/ℓ, 115mg/ℓ, 45mg/ℓ and 13mg/ℓ, respectively. The hydraulic retention time(HRT) of wastewater was about 10 days in the pond packed with aquatic plants. A water-hyacinth and a water-dropwort were used as an experimental stuff plant. The removal ratios of nitrogen was 44.3% for the water-hyacinth and 40.2% for the water-dropwort. The removal efficiency of phosphorus in experimental ponds reached by 57.9% for the water-hyacinth and 58.5% for the water-dropwort for 10 days, respectively. Removal ratios of BOD₅ and SS of livestock wastewater for 10 days were reached by 80.1%, 91.0% for the water-hyacinth, respectively. At the same condition, the removal ratios of BOD₅ and SS were reached by 75.0%, 87.6% for the water-dropwort, respectively.

(Key words : Phosphorus, Nitrogen, Water-dropwort, Water-hyacinth, Livestock wastewater)

서 론

급원으로서의 축산업은 1970년대 이후 양적, 질적인 면에서 급속한 증가추세를 보여 왔으나 축산업의 발전에 따른 가축 사육규모의 소득의 증대와 더불어 양질의 단백질 공급 증가는 가축분뇨의 발생량 증가라는 부차적

인 사회적 난제를 초래하였고, 이로 인해 1990년대에 들어서면서부터 축산업은 수질과 대기에 대한 주요오염원으로 지목되어 집중 관리 대상업종으로 분류되기에 이르렀다. 축산폐수는 다른 업종에서 발생하는 폐수에 비해 수질에 대한 오염부하가 크다고 인식되어 왔으므로 발생한 축산폐수의 부적절한 관리 및 처리로 인한 축산폐수에 의한 수질오염 발생은 축산분야 전반에 대한 사회적, 법적 규제강화의 구실이 되어 축산경영에 커다란 압박요인으로 작용될 것으로 예측된다. 특히, 축산폐수 중에 포함되어 있는 질소와 인은 축산폐수에 의한 수질오염 가능성의 주요인이 되어서 축산 폐수의 적정처리를 요구받게 하는 중요한 요인이 되고 있다. 유기탄소 화합물이나 부유물질 등은 기존의 2차 처리과정을 거치는 동안 90% 내외의 만족할 만한 제거효율을 얻을 수 있으나, 질소와 인은 기존의 공정으로는 많은 부분의 질소와 인이 제거되지 않고 수계에 방류되어지게 된다(R. sorm, 1996). 방류된 질소와 인은 부영양화를 발생시키는 조류번성의 직접적인 촉매작용을 하여 수질오염을 가속화하기 때문에 2차 처리와는 별도로 고도처리과정 등의 후차 처리를 통해 제거하여야 한다. 관련 법령의 규제 강화에 따라 질소, 인 제거 처리공정의 설치가 늘어나고 있는 추세이지만 시설의 설치 및 운용비용의 부담이 크고 운전이 어렵다는 단점으로 인해 대규모 공동처리장 위주로 보급되어지고 있어서 각 산업 분야에서의 질소, 인 제거 공정의 적용은 다소간의 시간이 필요할 것으로 보인다. 축산업 분야에 있어서 전체 축산분뇨 발생량과 오염부하의 가장 많은 비중을 차지하고 있는 한우와 양돈의 경우, 한우 사육규모 50두 미만의 중, 소규모 이하의 농가가 전체 한우농가의 98.8%에 이르고 있으며 1,000두 미만의 양돈농가가 전체 양돈농가의 90.7%를 차지하고 있는 현실에 비추어 볼 때, 폐수처리 능력과 시설이 상대

적으로 약한 이들 중, 소규모 농가에 의한 수계의 오염가능성이 매우 크기 때문에 이 들 중, 소규모 농가에서 발생하는 축산분뇨에 대한 효과적 처리의 필요성이 대두된다. 그러나 국내 중, 소규모 축산농가의 영세성을 고려한 다면 이들 축산농가에 대한 완전 무방류시설의 설치와 관리 특히, 고도처리방법의 적용은 비용과 운전기술 측면에서 현실적으로 어려움이 따르기 때문에 경제적이고 운전하기가 쉬운 실질적인 방법을 제시하여야 할 필요가 있다. 이를 위한 하나의 방안으로서, 최종 처리단계에서 수생식물의 염류제거 능력을 활용한 오염도 감소방법이 소규모 축산농가에서 최종 배출되는 축산폐수의 질소와 인 농도의 감소를 위한 방법으로 활용될 수 있는지의 여부를 구명하기 위한 시험을 실시하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

한우 사육시설에서 발생한 폐수를 공시 원 폐수로 하고 수생 정화식물로서 부레옥잠 (*Eichhornia crassipes*)과 미나리(*Oenanthe javanica* DC.)를 이용하였다. 정화식물은 유식물(幼植物)때부터 폐수에 적응시킨 후 공시하였다.

시험과정의 개략도는 그림 1과 같다.

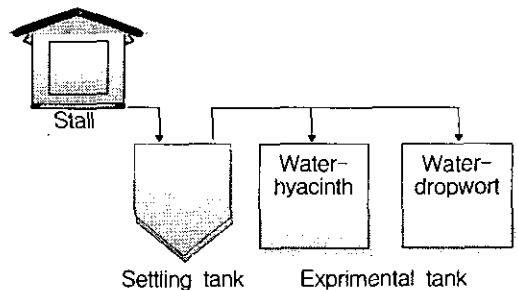


Fig. 1. A schematic diagram of experiment.

식물 정화조에 유입된 폐수의 성상은 표 1에 기록한 바와 같다.

Table 1. Characteristics of influent wastewater used in this trial

Classification	BOD ₅	T-N	T-P	SS	pH
Concentration	126.2 mg/ℓ	45.0 mg/ℓ	12.8 mg/ℓ	115.0 mg/ℓ	7.4

2. 시험방법

우사시설에서 발생된 원 폐수를 침전과정과 여과과정을 거친 후 수생식물이 식재된 정화조에 유입시켰다. 정화식물로서는 부레옥잠과 미나리를 이용하였고 오염성분 제거율은 6월과 8월 10월에 걸쳐서 고온기와 저온기로 대별하여 단위식물 중량당 각 성분의 제거율을 구분하여 조사를 실시하였다. 식물을 식재한 용기는 충분히 세척한 1톤 규모의 플라스틱 통을 사용하였고, 식물의 줄기와 뿌리는 유수(流水)에 세척한 후 공시하였다. 식물 식재방법은 표면 부유식으로 하였고 식물이 서로 겹치지 않게 하여 성장단계별로 폐수표면에 고르게 산포토록 식재밀도를 조절하였으며 부레옥잠은 자체부력으로, 미나리는 그물망과 가는 줄을 이용하여 식물뿌리가 폐수 중에 고르게 부유하도록 식재높이를 조절하였다. 유입수의 체류시간은 식물이외의 외부요인이 개입하는 경우를 방지하기 위해 평균 10일 내외로 하였고 유입 직후부터 폐수 중의 오염성분 변화량을 10일 간 조사하였다. 강수와 기타요인에 의한 농도변화를 예방하기 위하여 시험용 탱크를 하우스 내에 설치하고 지붕을 개폐하였다. 시료는 폐수표면으로부터 2cm와 40cm 부분에서 흡입관을 이용하여 흡입 채취 한 후 즉시 분석하였다. 증발과 기타 감소요인에 의한 시험용 폐수 중의 오염물의 절대농도 변화는 탱크의 측벽에 기

입된 수량측정용 눈금에 의해 수량변화를 고려, 산정하여 시험용 폐수량의 변화가 오염성분 분석치의 정확도에 미치는 영향을 최소화하였다. 식물정화 시험용 탱크 내부에 미생물 식종이나 폭기 등의 외부요인은 가해지지 않았고 원 폐수의 유입은 일괄 유입 후 일괄 배출하는 회분식 방법을 사용하여 식물에 의한 오염성분 변화를 측정하였다

3. 조사방법

가. BOD₅

시료를 희석하여 300ml 용량의 BOD병에 기포가 발생하지 않도록 조용히 채운 다음 인큐베이터에서 5일 동안 20℃ 항온배양한 후의 DO 농도와 순간산소요구량을 제외한 초기DO 농도와 차로 산소소모율을 계산하여 BOD₅를 산출하였으며 이 때 소모되는 산소의 양이 초기 DO농도의 40~70% 범위 내에 해당하도록 희석배율을 조절하였다 (APHA 19th, 1995).

나. T-N

시료 중의 질소화합물을 NaOH와 K₂S₂O₈ 혼액의 존재 하에 120℃, 고압으로 30분간 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화시킨 다음 GF/C(Whatman)에 여과한 뒤 염산(1+16)으로 pH를 2~3으로 하여 220nm서 흡광도를 측정하는 자외선 흡광광도법으로 질소를 정량하였다. (수질오염 공정시험법)

다. T-P

시료를 K₂S₂O₈ 존재 하에 120℃의 고온, 고압으로 분해하여 모든 인 화합물을 인산염(PO₄) 형태로 변환시키고 몰리브덴산 암모늄·아스콜빈산 혼액 으로 발색시켜 880nm에서

흡광도를 측정하는 아스콜빈산 환원법으로 인을 정량하였다.(수질오염 공정시험법)

라. 기 타

DO는 YSI 5000 DO meter를 이용하여 정량하였고, pH는 ORION 720A pH meter를 사용하여 측정하였으며 SS는 정제 항량으로 한 GF/C(Whatman)에 시료를 여과하여 105~110℃에서 건조하여 SS를 산출하는 유리섬유여지법을 이용하였다.(Clair N 등. 1994)

결과 및 고찰

1. 수생식물에 의한 오염도 감소

그림 1과 2는 수생식물이 식재된 시험용 탱크 내에서의 수중 오염물질의 농도가 체류시간의 경과에 따라 변화하는 정도를 각 성분별로 구분하여 도시한 내용이다.

부레옥잠이 식재된 시험조 내에서의 우사 시설 폐수의 오염농도 감소율을 그림 2에 도시하였다

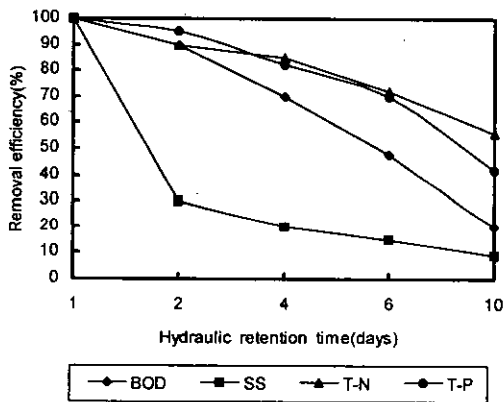


Fig. 2. Changes of concentration of pollutants in wastewater according to Hydraulic Retention Time in tank with water hyacinth.

부레옥잠이 식재된 시험조 내에서 10일간의 수리학적 체류시간 동안 오염물 농도변화는 80% 내외의 생물학적 5일간 산소요구량(BOD₅)의 감소를 나타냈고 부유물질(SS), T-N, T-P의 농도는 각각 91%, 44%, 58%의 감소를 나타냈다. BOD₅와 SS 농도의 감소가 높았는데, SS는 회분식 무복기 시험조의 특성상 침전속도가 빠르기 때문에 초기 감소가 높았고 BOD₅는 식물에 의한 흡수영향도 있겠지만 부유물질의 침전에 따른 유기 탄소화합물의 공침이 많은 영향을 미친 것으로 판단된다. 질소와 인의 감소는 상당부분이 수생 식물에 의한 것으로 판단되는데, 이는 시험조에 식재된 미생물(Inoculator)이 없었고, 수리학적 체류시간이 경과함에 따라 시험조 내부의 용존산소(DO) 농도가 희박해졌기 때문에 호기성 미생물의 활동에 의하여 이루어지는 질산화나 인의 과잉흡수 등이 발생할 여건이 조성되기 어렵다는 사실이 이러한 판단을 뒷받침 할 수 있는 근거가 된다.

미나리를 식재한 시험조에서의 오염물질의 농도 변화를 그림 3에 도시하였다

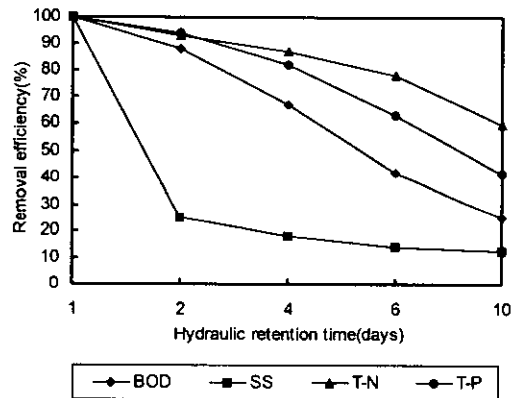


Fig. 3. Changes of concentration of pollutants in wastewater according to Hydraulic Retention Time in tank with water-dropwort.

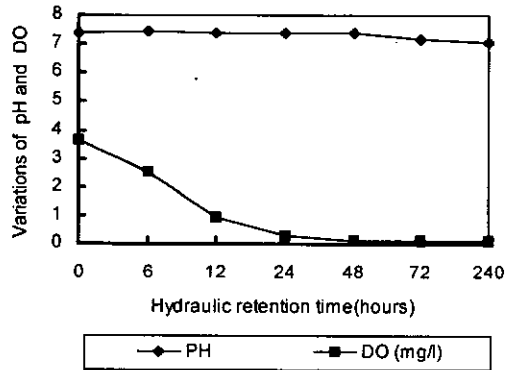
미나리가 식재된 시험조 내에서 10일간의 수리학적 체류기간 동안 생물학적 5일간 산소요구량(BOD₅)이 75%의 감소를 나타내었고 부유물질(SS)의 농도도 88%가 감소하여 부레옥잠보다 약간 낮은 감소효과를 얻었는데, 이는 주로 침전에 의해 제거되는 SS의 일부가 부레옥잠의 풍부한 사상형(絲狀形) 뿌리에 흡착되었는데 반해 미나리는 단순침전에 의한 제거가 주를 이루었기 때문으로 판단 할 수 있다. T-N, T-P의 농도는 각각 40%, 59%의 감소를 나타내어 인의 경우에는 미나리의 흡수에 의한 감소가 부레옥잠과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 체류시간에 따른 산소농도 변화

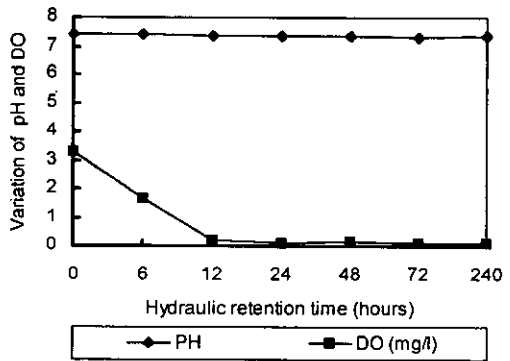
체류시간에 따른 수생식물에 의한 폐수중의 DO와 pH의 변화를 그림 4에 도시하였다.

체류시간이 경과함에 따라 부레옥잠과 미나리구 공히 용존산소(DO)의 농도는 감소하였으며 햇별이 드는 주간(晝間)에도 광합성에 의한 DO 변화가 없어서 수생식물에 의한 용존산소 공급능력은 없는 것으로 판단된다. 수소이온 농도(pH)는 두 처리구 공히 체류기간 동안 미소한 감소만을 나타내었는데, 이는 시험조 내에서의 오염물 감소의 상당부분이 식물에 의한 것임을 뒷받침하는 또 하나의 근거가 될 수 있다. 이 사실은 질소가 미생물학적 작용에 의해 제거되려면 혐기조건 하에서의 탈질과정과 호기상태에서의 질산화과정을 거치면서 감소되어지고, 호기적 조건하에서 질산화 과정을 거치는 경우에는 질산화 미생물이 폐수 중의 Alkalinity를 소모하는 과정에 의해 수소이온농도가 낮아지게 되는데 본 시험에서의 산도변화로는 활발한 질산화가 진행되었다고 보기는 어렵고, 인의 경우도 혐기 상태에서 용출되었던 인이 호기적조건 하에서 미생물의 과잉 흡수작용에 의해 제거되어 지는데 본 시험에서는 시험조내의 용존산소

농도가 낮게 유지되었기 때문에 호기성미생물의 인의 과잉섭취 기작에 의한 인 제거 공정은 사실상 진행되기 어려운 조건이라는 데에서 그 이유를 찾을 수 있다.



[a] Water hyacinth



[b] Water-dropwort

Fig. 4. Variations of DO and pH in wastewater by Water hyacinth [a] and water-dropwort [b] during experimental period.

3. 시험조에서의 수생식물 특성

시험조에 식재된 수생식물의 생체총량과 폐수 중에서 제거된 오염물과의 관계를 고려하여 산정한 수생식물의 단위 생체중량 당 오염물질 제거능력은 표 2에 나타난 바와 같다

Table 2. Performance of removing degrees of pollutants in wastewater by aquatic plant

Classification	Water hyacinth	Water-dropwort
T-N	1.5~4.2mgN/100g/day	1.9~4.1mgN/100g/day
T-P	0.7~2.3mgP/100g/day	0.8~2.6mgP/100g/day

수생식물에 의한 질소의 감소는 부레옥잠이 1.5~4.2mgN/100g/day를 나타내어 미나리의 1.9~4.1mgN/100g/day와 거의 비슷한 수준이었지만 6월과 8월 사이, 즉 25℃ 내외의 조건에서는 미나리보다 2배 정도의 제거효과를 보였다. 인의 경우도 마찬가지로 결과를 나타내어서 부레옥잠구에서는 0.7~2.3mgP/100g/day, 미나리구에서는 0.8~2.6mgP/100g/day의 비슷한 결과를 보였으나 하절기에는 부레옥잠이 미나리의 2배 이상의 제거능력을 보였다. 기온이 낮아질수록 부레옥잠구보다 미나리구에서의 제거효과가 높아졌고 15℃ 내외에서 미나리구의 오염물 제거능력이 최대가 되었다. 시험에 이용된 수생식물의 온도적응성은 그림 5에 나타난 바와 같다

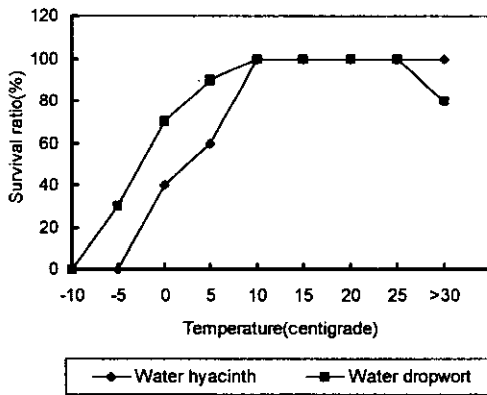


Fig. 5. Survival ratio of aquatic plants with change of temperature.

온도조건에 따른 수생식물의 생존율은 부레옥잠의 경우 봄과 여름동안의 온난기에는 거의 100% 생존하였으나 10월 이후 저온기에 접어듬에 따라 생존율과 번식률이 저하되기 시작하여 5℃ 근처에서 위축되고 기온이 방점에 도달하면서 급격한 사멸을 하여 조등(1999)이 보고한 탱크에 식재된 부레옥잠이 이듬해에는 발견되지 않았다는 내용과 일치하였다. 그러나 본 시험기간동안 실온조건하에서 생육한 부레옥잠의 월동이 가능한 것으로 보아 부레옥잠 사멸의 직접원인은 동절기의 저온인 것을 확인할 수 있었다. 미나리의 경우에는 저온에 견디는 능력이 강하여 방점 이하에서도 생존하였다. 이와 같은 사실로 미루어 볼 때 수생식물을 이용하여 수중의 오염물질을 제거할 경우, 우리나라의 기후조건에서 부레옥잠을 10월까지 이용한 이후 일괄 제거하고 미나리로 교체하는 방법이 바람직하다고 판단된다. Center. T. D(1981) 등은 영양원의 흡수여건에 따라 수생식물의 성장이 제한된다고 하였고 Ower. J(1981) 등은 부레옥잠이 질소와 인의 농도에 따라서 성장속도가 변하여 그 농도가 각각 40mg/l와 10mg/l 이상일 때는 성장률이 저하되기 시작한다고 하였다. Reddy 등(1987)은 부레옥잠의 질소 함량이 1.0~4.0% 정도, 인의 함량은 0.1~1.2% 정도가 된다고 보고하였다. 이처럼 질소와 인이 풍부하게 함유된 축산폐수의 정화에 이용되고 사멸 또는 제거되는 식물체의 처리문제가 수생식물의 이용에 대한 제한요인이 되어지는데 수생식물이 사멸되었을 경우 식물체의 잔존물이 처리조에서 분해되면서 수질에 대한 커다란 오염요인이 된다는 문제점이 있다. 잔존식물체의 타당성 있는 활용방안으로서 잔존식물의 사료화와 퇴비화가 가능할 것으로 판단된다. 본 시험에 이용된 수생식물에 함유된 주요 비료성분은 표 3에 나타난 바와 같다.

부레옥잠의 경우 질소가 4.0% 내외이고

인산이 1.5% 내외로 2.7 : 1의 질소와 인산의 비율을 가지고 있어서 부레옥잠 식물체가 비료로서의 가치가 있을 것으로 판단된다. 축산폐수 중의 오염물질 제거를 위한 수생식물의 활용도를 제고하기 위해서는 퇴비화와 사료화 및 기타 이용가능성 등 잔존식물체의 처리와 이용방안에 대한 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

안 미소한 감소가 있었다.

4. 수생식물에 의한 질소의 감소는 부레옥잠이 1.5~4.2mgN/100g/day를 나타내어 미나리의 1.9~4.1mgN/100g/day와 거의 비슷한 수준이었고, 인의 경우 부레옥잠구에서는 0.7~2.3mgP/100g/day의 감소를 보였고 미나리의 경우에는 0.8~2.6mgP/100g/day를 나타내었다.

인 용 문 헌

Table. 3. The content of macro fertilizer ingredients of aquatic plants.

(unit : %, DM basis)

Classification	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Water-hyacinth	4.0	1.5	5.4
Water-dropwort	3.2	1.8	3.8

적 요

본 연구는 영양물질 흡수능력이 큰 수생식물을 이용하여 축산폐수 중의 오염물 농도를 감소시키기 위한 타당성 여부를 검토하기 위하여 수행하였으며, 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 부레옥잠이 식재된 시험조 내에서 10일간의 수리학적 체류기간 동안 오염물의 농도 변화는 80% 내외의 생물학적 5일간 산소요구량(BOD₅)의 감소를 나타냈고 부유물질(SS), T-N, T-P의 농도는 각각 91%, 44%, 58%의 감소를 나타냈다.

2. 미나리가 식재된 시험조 내에서 10일간의 수리학적 체류기간 동안 생물학적 5일간 산소요구량(BOD₅)은 75% 감소하였고 부유물질(SS)의 농도도 88% 감소하였으며 T-N, T-P의 농도는 각각 40%, 59%가 감소하였다.

3. 체류시간이 경과함에 따라 부레옥잠과 미나리구 공히 용존산소(DO)의 농도는 감소하였는데, 처리기간 동안 수생식물에 의한 용존산소 공급능력은 발견되지 않았다. 수소이온 농도(pH)는 두 처리구 공히 체류기간 동

1. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater 19th ed. APHA, Washington, DC.
2. Center. T. D. and N. R. Spence. 1981. The phenology and growth of waterhyacinth in eutrophic northcentral Florida lake, Aquatic Botany, 10, 1-32.
3. Clair N. Sawyer, P. L. McCarty and G. F. Parkin. 1994 Chemistry for environmental engineering. 4th ed. McGraw-Hill International Editions. p. 73-79.
4. Ower. J., et al. The effects of varing culture nitrogen and phosphorous levels on nutrient uptake and stroage by the waterhyacinth, Hydrobiologia 85, 17~22, 1981.
5. Reddy, K. R. and W. F. Debusk. 1987. State of the art utilization of aquatic plants and water pollution control, Wat. Sci. Tech, 19(64).
6. Sorm, R., G. birtone, R. Saltarelli, P. Jenick, J. Wanner and A. Tilche. 1996 Phosphate uptake under anoxic conditions and fixed-film nitrification in nutrient removal activated sludge system. Wat. Res. Vol. 30, No 7. pp. 1573-1584.
7. 동화기술. 1996. 수질오염공정시험방법.
8. 조동길. 1999. 인공습지 조성 후 생물다양성 증진 효과에 관한 연구.