

부레옥잠의 수중영양염 제거 잠재력에 관한 고찰

전 만 식 · 김 범 철

(강원대학교 자연과학대학 환경과학과)

적 요 - 부레옥잠을 이용한 수처리 시설의 설계에 활용될 수 있는 기초자료를 얻고자 인공배지를 이용하여 인, 질소농도와 부레옥잠의 현존량에 따른 인, 질소의 제거량을 예측하였다. 또한 돈사폐수에도 적용하여 인, 질소의 제거율을 검토하였다. 부레옥잠 조직내의 인, 질소함량은 배양수의 인, 질소농도에 따라 각각 0.22~1.02%, 1.4~4.1%의 범위를 보였으나, 배양수의 인, 질소농도가 각각 1.0mgP/l 이상, 3.0mgN/l 이상에서는 각각 0.8%, 3.5%로 거의 일정한 함량을 보였다. 부레옥잠의 수분함량도 인, 질소 농도에 따라 다르게 나타났으나 평균 92.3%이었다. 부레옥잠의 최대 현존량은 25 kg/m²로 나타났으며, 최대의 증식량을 보이는 현존량은 약 15 kg/m²으로 하루에 0.9 kg/m² 증식하였다. 배양수의 인 제거율은 배양수중의 인농도가 높수록 현존량의 영향을 크게 받아 현존량이 약 15 kg/m²까지 증가할수록 제거율도 높아지지만 그 이상의 현존량에서는 제거율이 급격히 낮아졌다. 배양수의 인 농도가 약 1.2mgP/l까지는 인의 농도가 높아짐에 따라 제거율도 비례적으로 증가하였으나 그 이상의 농도에서는 큰 차이 없이 약 500 mgP/m²/day의 제거율을 보였다. 질소의 제거율도 질소농도 3.2mgN/l까지는 배양수의 질소농도가 높을수록 비례적으로 높아지지만 그 이상의 농도에서는 비슷하여 약 2,500 mgN/m²/day의 제거율을 보였다. 돈사 배양수의 무기인, 질소의 농도는 각각 22~79 mgP/l, 82~121 mgN/l의 범위를 보였으며 원수를 이용한 연속배양에서는 처리의 효과를 얻을 수 없었다. 돈사폐수의 인, 질소 제거율은 10배 희석한 배양수에서 가장 높게 나타나 각각 211 mgP/m²/day, 2.3 gN/m²/day의 처리효율을 보였다. 다음으로 5배, 20배, 2배의 순으로 희석한 배양조에서 제거율이 높았다.

서 론

국내 하수처리 시설은 주로 유기오염물질(BOD)의 제거를 위한 처리시스템으로 무기영양염류의 제거에는 큰 효과를 볼 수 없다. 따라서 부영양화의 원인물질인 인, 질소 등의 영양염류 제거를 위해 화학적 처리방법이 이용되고 있지만 일반적으로 많은 비용이 소요되고, 또한 투여된 약품을 회수하여야 하는 등의 경제적, 기술적인 문제점이 있다. 이에 대응하는 방법의 하나로 화학적 처리보다 경제적이고 운영이 간편한 자연정화 방법이 대두되었다. 자연정화 방법은 크게 토지에 직접 시비하는 방법과 수생식물을 이용하는 방법이 있으며, 수생식물을 이용하는 방법에는 인공 습지법, 자연 습지법 그리고 부유성 수생식물을 이용하는 수질정화 시스템(floating aquatic macrophyte based treatment system)으로 나눌 수 있다(George & Burton 1991). 인공 습지법과 자연 습지법은 수질정화와 각종 생물들의 서식처를 제공한다는 측면에서 주목받는 방법이지만 토지의 확보와 위치적

선정에 어려움이 있다. 또한 영양염의 처리효율 면에서도 부유성 수생식물보다는 현저히 낮은 것으로 보고되어 있다(Reddy & DeBusk 1987).

기후가 온난한 지역에서는 세계 3대 수생식물로 알려진 부레옥잠(*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)과 개구리밥류(Lemnaceae, Salviniaceae)를 주로 수처리에 이용하였다(Boyd 1970; Dinges 1979; Duffer 1982; DeBusk et al. 1981; Hauser 1984; Reddy et al. 1985). DeBusk 등(1983)은 South Florida 지방의 폐수량이 314 ton/day인 폐수처리장에서 부레옥잠을 이용하여 영양염류 제거효율을 실험한 결과 질소는 70~80%, 인은 40~50%의 제거효율을 보여 하루에 질소와 인이 각각 600 mgN/m²과 200 mgP/m² 정도가 제거되는 것으로 보고하였다. Polprasert 등(1992)은 부레옥잠을 이용한 돈사폐수처리 실험에서 유입수의 분변성 대장균군과 연쇄상구균, bacteriophage의 세포수가 각각 1/3 이하로 감소하여 영양염류의 제거 이외의 효과도 있는 것으로 나타났다. 우리 나라와 기후가 비슷한 일본에서도 수심이 낮은 부영양호에 부레옥잠을 배양함으로써 호수내 투명도 증가,

인과 엽록소 a 농도 감소, pH 감소, 식물플랑크톤의 광합성저해 및 남조류의 bloom이 없어지는 등의 변화가 있는 것으로 보고되었다(Otsuki 1984). 국내에서도 1990년 대부터 수생식물을 이용한 수처리 방법에 많은 관심을 가지게 되었으며, 특히 부레옥잠을 이용한 연구가 진행되었고(이 1993; 전 1994), 과학기술처(1992)는 팔당호의 오염하천수 유입부에 부레옥잠을 배양하여 질소와 인이 각각 1,717 kgN/ha/yr와 317 kgP/ha/yr 제거된다는 보고를 하여 부레옥잠을 이용한 수처리의 가능성이 시사되었다.

부레옥잠은 남아메리카의 열대 저습지가 원산지인 다년생 부유식물로 열대, 아열대지방에서 생육하지만 온대지방인 우리나라에도 유입되어 위도가 낮은 일부 지역에서 자연적 생육이 가능하게 되었다. 그러나 대부분의 지역에서 자연적 생육은 못하며 기온이 높은 시기에만 산화지나 수로에 부레옥잠을 배양하여 각종 하수처리에 이용하고 있다. 부레옥잠을 이용한 수처리 시설을 설계하기 위해서는 부레옥잠의 단위면적당 최대 증식량과 조직내 인, 질소함량을 알아야 제거율의 예측이 가능하다. 부레옥잠의 성장과 영양염 제거능력은 배양수의 영양염 농도, 기온, 일사량 등에 따라 변하므로 이들 요인의 영향이 정량적으로 평가되어야만 된다. 본 연구에서는 부레옥잠을 이용한 수처리 시설의 설계에 활용될 수 있는 기초자료를 얻고자 인, 질소농도에 따른 인, 질소 제거량을 예측하였으며, 또한 돈사폐수에도 적용하여 제거율을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 인공배지에서의 영양염 제거율

인과 질소농도에 따른 부레옥잠의 인, 질소 및 수분함량 변화를 조사하기 위해 인공배지를 이용하여 반연속배양(semicontinuous culture)을 하였다. 반연속배양의 실험은 표면적이 0.32 m²이고 수심이 30 cm인 원형 플라스틱 용기에 REM 배양수(Veerkamp *et al.* 1980) 50 리터를 넣고 부레옥잠을 배양하였다. 본 배지에서 인과 질소농도만을 각각 9단계(0, 0.06, 0.12, 0.24, 0.31, 0.62, 1.24, 3.10, 6.20 mgP/l)와 6단계(0.7, 1.6, 3.2, 6.5, 12.4, 20.1 mgN/l)로 희석하여 배양수로 사용하였다. 질소농도의 경우 6.5 mgN/l까지는 REM 배양수를 희석하였고 12.4 mgN/l의 경우는 암모니아성질소만을 첨가하였으며 20.1 mgN/l는 질산성질소만을 첨가하였다. 배양에 이용한 부레옥잠 무게는 각 수조마다 1.0 ± 0.2 kg으로 넣고 1993년 6월 12일부터 7월 25일까지 실시하였다.

배양은 강원도 춘천시 강원대학교의 건물 옥상에서

Table 1. Nutrients composition in the modified REM medium for water hyacinth culture (Veerkamp *et al.* 1980)

Chemicals	Elements (mg/l)
1. Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	P : 6.2
2. KNO ₃	NO ₃ -N : 20.1
3. MgSO ₄	NH ₃ -N : 12.4
4. NH ₄ Cl	Ca : 27.7
5. K ₂ SO ₄	Mg : 24.6
6. FeNaEDTA	K : 72.2
7. MnCl ₂ 4H ₂ O	S : 68.8
8. H ₃ BO ₃	Mn : 0.50
9. Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O	Mo : 0.06
10. ZnCl ₂	Zn : 0.05
11. CuCl ₂ 2H ₂ O	Cu : 0.02
12. K ₂ HPO ₄	Fe : 4.60
13. Solid extract (5%)	B : 0.60

이루어졌으며, 배양수를 교환할 때 수온의 변화를 줄이기 위해 하루동안 상온에서 방치하였던 배양수를 이용하였다. 수조의 배양수는 매일 전량 교체하였으며 배양조 내에는 수중 펌프를 설치하였다. 부레옥잠의 습중량은 5분 동안 체반위에서 물을 제거한 후에 무게를 측정하였으며 초기현존량을 남겨두고 증식한 양은 제거하였다. 증식한 부레옥잠의 건조중량은 105°C에서 3시간 건조 후 측정을 하였으며, 조직내의 인, 질소 함량을 분석할 때까지 테시케이터 내에서 보관을 하였다. 또한 부레옥잠의 현존량당 증식량 조사를 위해 매일 REM 배양수를 교환해주며 부레옥잠의 무게를 측정하였다. 현존량이 10 kg/m² 이상부터는 영양염이 제한되지 않도록 수시로 배양수를 교환하여 주었으며, 6월 25일부터 40일간 배양을 실시하였다.

2. 돈사폐수에서의 영양염 제거율

부레옥잠을 이용한 돈사폐수의 처리효율 실험은 춘천시 남면에 위치한 약 700두 정도를 사육하는 양돈장에서 2개월간(8~9월) 실시하였다. 돈사폐수는 돈사청소수가 주종을 이루고 있는 폐수로 부패조, 침전조, 폭기조, 침전조를 거친 배출수로 배출수의 인, 질소농도를 Table 2에 제시하였다. 본 실험은 연속배양과 반연속배양을 하였다. 연속배양의 실험은 7월 15일부터 8월 3일까지 실시하였다. 부레옥잠의 배양수조는 길이, 폭 및 높이가 각각 2.0, 0.5, 0.4 m이었으며 부레옥잠이 폐수와 잘 접촉할 수 있도록 위, 아래로 순환되게 설치하였다. 배양초기의 부레옥잠은 총 7.5 kg을 넣었으며 수조내의 배양액 체류시간은 5.7일이었다. 무기영양염류 분석용 시료는 배양조의 유입부와 유출부에서 채수를 하였다. 채수한 시료는 실험실로 운반하여 GF/C filter로 여과 후 시료

Table 2. Ranges of nutrient concentrations of the swinery wastewater during the study period (August to September 1993). TP: Total phosphorus, DIP: Dissolved inorganic phosphorus, TN: Total nitrogen

Item	Concentration (mg/l)
TP	47~102
DIP	22~79
TN	97~213
NH ₃ -N	30~63
NO ₃ -N	48~75

100 ml에 황산 20 N 0.1 ml를 첨가하여 영양염의 분석을 할 때까지 보관하였다. 반연속배양은 인공배지를 이용한 방법과 동일한 방법으로 하였으나 지하수를 이용하여 폐수를 각각 2, 5, 10, 20배로 희석하여 부레옥잠을 배양하였다. 부레옥잠은 수조별로 각각 1.5 kg씩 넣고 2일마다 배양수를 교체해 주었으며, 이때 성장량은 제거를 하였고 초기의 현존량과 같게 유지하였다. 무기영양염류 분석을 위한 시료는 배양 시작 2주일후부터 8일간 배양수 교체 전후에 채취하였다.

3. 이화학적 수질 분석 및 자료분석

배양수의 총인 농도는 persulfate digestion법으로 분해한 후 ascorbic acid법으로, 총질소 농도는 persulfate digestion법으로 분해한 후 cadmium reduction법으로 측정하였다. 무기인은 ascorbic acid법으로 분석하였고 질산성질소는 cadmium reduction법, 암모니아성질소는 Phenate법을 사용하였으며 분석기는 모두 autoanalyzer를 이용하였다. 부레옥잠의 조직내 인함량 분석은 건조한 시료를 막자사발로 곱게 분쇄한 후 황산-질산 분해법으로 분해한 후 무기인 측정과 같은 방법으로 측정하였다. 질소함량 분석은 Kjeldahl법(titmetric method)으로 분석하였다. 모든 수질분석은 Standard Methods를 이용하였다(AHPA 1989). 강원도 춘천지역의 일사량과 기온은 기상청의 자료를 이용하였다.

기질의 농도에 따른 최대 인, 질소함량과 반포화 상수(Ks)값을 구하는 방법은 모노의 이론(Monod's theory)을 이용하였으며(Rhodes & Fletcher 1966), 계산은 Sigma-plot(Jandel Scientific)의 non-linear regression을 이용하여 계산하였다. 부레옥잠의 성장곡선은 Odum이 제시한 시그모이드(sigmoid)형을 이용하여 최대 현존량과 성장율을 계산하였다(Odum 1983). 성장곡선과 현존량에 따른 성장율 곡선은 모두 Sigma-plot의 non-linear regression을 이용하였다.

결 과

본 연구를 수행한 6월부터 9월까지 춘천지역의 일평균 온도와 일사량을 Fig. 1에 제시하였다. 평균 기온은 21.4°C로 나타났고, 6월 중순부터 8월말까지는 대부분 20°C 이상을 유지하였으나 9월 중순부터 현저히 낮아졌다. 일사량의 평균, 최대 및 최소는 각각 15.8, 28.5, 3.0 MJ/m²/day이었고, 운량의 유무와 강우에 따라 큰 변동을 보였다.

부레옥잠 조직내의 인 함량은 배양수의 인 농도에 따라 큰 변동(0.22~1.02%)을 보였다. 현존량이 약 3 kg/m²에서 배양수의 인 농도가 약 1.0 mgP/l 이하에서 조직내의 인 함량이 현저히 낮아졌다. 조직내의 인 함량은 최대 0.9%로 나타났고 반포화상수(Kp)의 인 농도는 0.2 mgP/l로 계산되었다(Fig. 2). 본 그림에는 제시하지 않았지만 배양수의 인 농도가 낮을 경우 뿌리와 줄기(뿌리 이외의 부분)의 인 함량은 비슷하였으나 인 농도가 높을 경우(0.62 mgP/l 이상)에는 줄기부분이 뿌리보다 20~30% 높게 나타났다. 질소의 함량은 배양수의 질소 농도에 따라 1.4~4.1%의 범위를 보였으며, 질소농도 3.1 mgN/l 이하에서 현저히 감소하였다(Fig. 3). 그림에서의 non-linear regression은 질산성질소만을 첨가한 20.1 mgN/l의 값은 제외하고 계산하였다. 질산성질소만을 첨가하였을 경우의 질소함량은 3.1%로 낮은 값을 보였다. 부레옥잠의 최대질소함량과 반포화상수의 질소 농도는 각각 4.1%와 1.12 mgN/l로 나타났다. 부레옥잠의 수분함량은 배양수의 인, 질소 농도가 높아질수록 높아지는 것으로 나타났다(Fig. 4). 그러나 무기인농도가 약 0.5 mgP/l 이상, 무기질소농도가 약 4 mgN/l 이상에서는 거의 일정하여 평균 수분함량은 각각 92.6%와 92.0%로 나타났다. 질산성질소만을 첨가한 20.1 mgN/l에서는 암모니아성질소가 첨가된 경우보다 낮은 수분 함량을 보였다.

Fig. 5는 반연속배양에서 배양시간에 따른 부레옥잠의 현존량과 단위면적당 1일에 증식한 양을 나타낸 것이다. 배양초기의 현존량 0.86 kg/m²에서 40일 후에 22 kg/m²로 증가를 하였으며 최대 현존량은 50일후 25 kg/m²로 계산되었다. 하루에 증식하는 양은 현존량이 약 15 kg/m²일 때까지 현존량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타나 하루에 최대 0.9 kg까지 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 현존량이 18 kg/m² 이상에서는 증식량이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 하루에 0.5 kg 이상 증가하는 현존량은 약 7~20 kg/m²의 범위를 보였다. 배양수의 인농도와 부레옥잠의 현존량에 따른 무기인 제거의 잠재력을 Fig. 6에 제시하였다. 본 결과는 배양수의

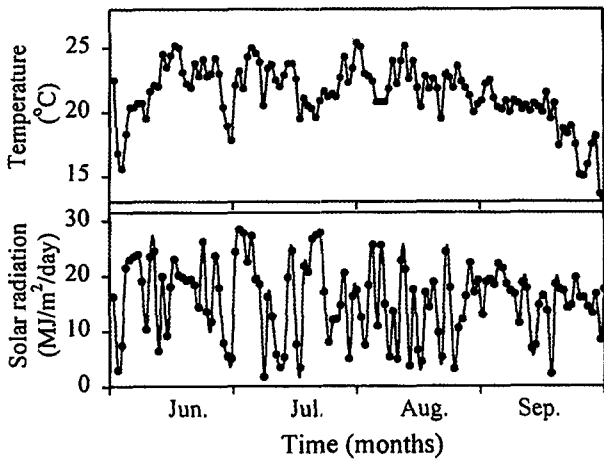


Fig. 1. Average ambient air temperature and solar radiation during the study period.

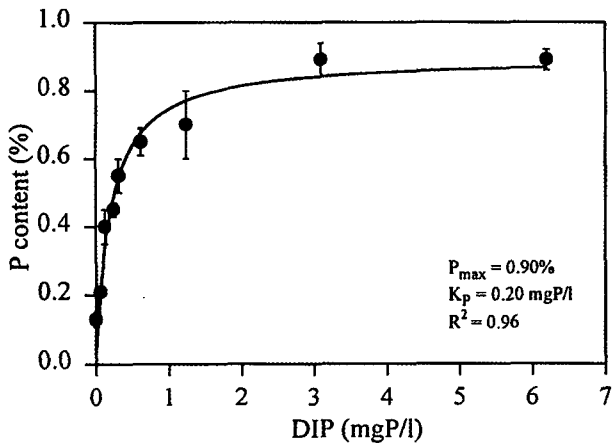


Fig. 2. Changes in phosphorus content of water hyacinth with the dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentration of culture medium. Vertical lines represent standard deviations.

인농도에 따른 부레옥잠의 조직내 인함량과 현존량에 따른 성장량을 이용하여 계산한 것이다. 최대의 제거율을 보이는 현존량은 약 15 kg/m²로 나타났으며, 인의 제거율은 배양수중의 인농도가 높수록 현존량의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 제거율은 현존량이 약 15 kg/m²까지 현존량이 높을수록 높은 제거율을 보이지만 그 이상의 현존량에서는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 인 농도가 1.24 mgP/l 까지는 인의 농도가 높아짐에 따라 제거율도 비례적으로 증가하였으나 그 이상의 농도에서는 큰 차이를 볼 수 없었다. 질소농도에 따른 질소 제거율은 인농도에 따른 인 제거율과 비슷한 경향을 보였다(Fig. 7). 배양수의 질소농도 3.2 mgN/l

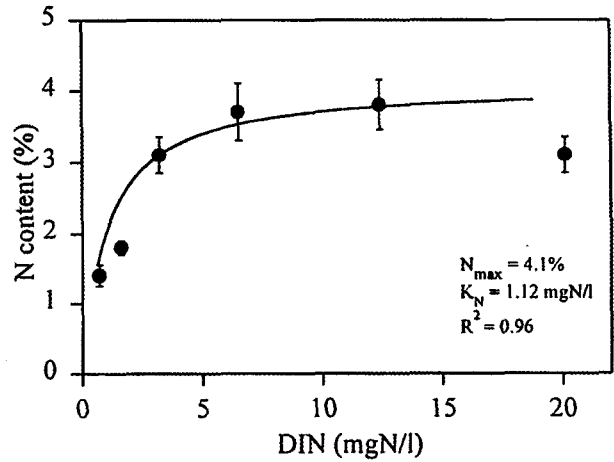


Fig. 3. Changes in nitrogen content of water hyacinth with the dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentration of culture medium. Vertical lines represent standard deviations. The non-linear regression was represented all data but 20.1 mgN/l.

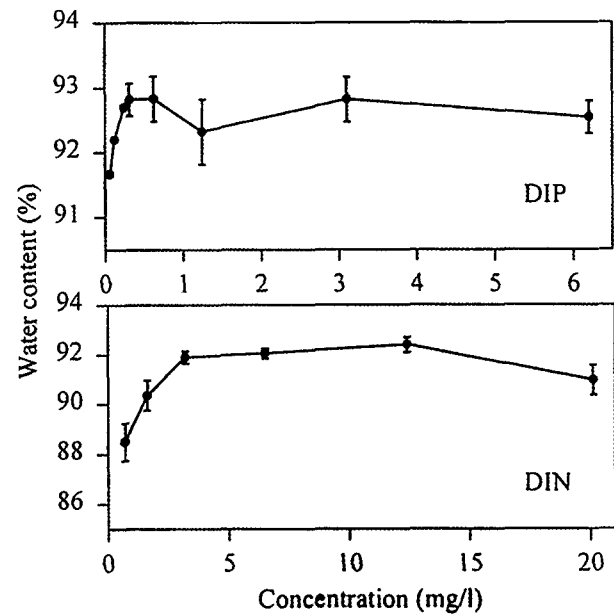


Fig. 4. Changes in water content of water hyacinth with the concentrations of inorganic phosphorus (DIP) and nitrogen (DIN).

지는 제거율도 비례적으로 높아졌으나 그 이상의 농도에서는 큰 차이를 볼 수 없었다. 질소 제거율은 현존량 15 kg/m², 질소농도 3.2 mgN/l 이상에서 약 2.5 gN/m²/day 제거되는 것으로 나타났다.

돈사 배출수의 무기인, 질소의 농도는 각각 22~79 mgP/l, 82~121 mgN/l의 범위를 보여 무기질소/인 무게비는 1.4~2.1로 나타났다(Table 2). 돈사 배출수의 인,

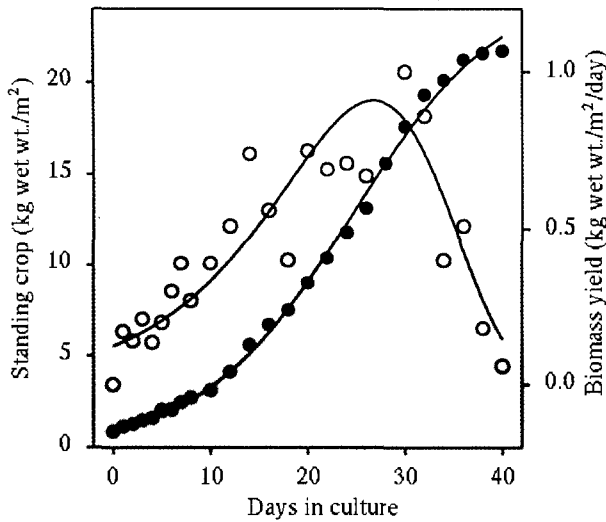


Fig. 5. Changes in standing crop (●) and biomass yield (○) of water hyacinth during the culture period in outdoor cultivation using REM medium.

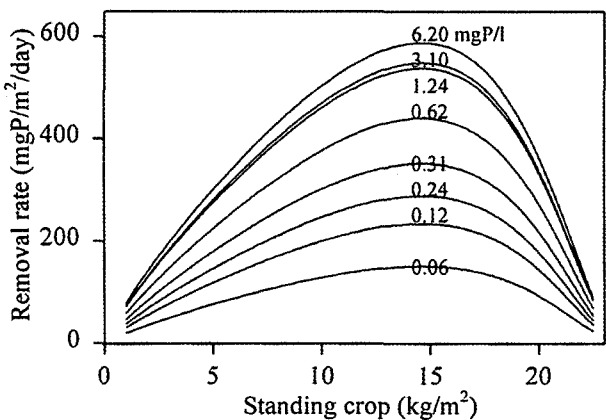


Fig. 6. Potential phosphorus removal rate by water hyacinth with the DIP concentrations of culture medium. Each line was calculated using the growth rate in the non-linear phase of the biomass yield curve and average tissue P contents.

질소농도는 일정하게 배출되지는 않았으나 큰 차이는 없었다. 특히 무기질소농도는 거의 일정하였으며 질산성 질소와 암모니아성질소가 비슷한 비율로 배출되는 것으로 나타났다. 돈사 배출수의 원액을 이용한 연속배양의 실험에서는 부레옥잠의 뿌리가 썩고 고사하여 영양염의 제거효과를 전혀 얻을 수 없었다(data 제시하지 않았음). 또한 배양조 내에서는 혐기성가스와 같은 심한 악취가 발생하였다. Fig. 8은 돈사 배출수를 지하수로 2, 5, 10 및 20배로 희석하여 반연속배양한 결과로서 무기인과 질소의 제거율을 나타낸 것이다. 인과 질소의 제거율

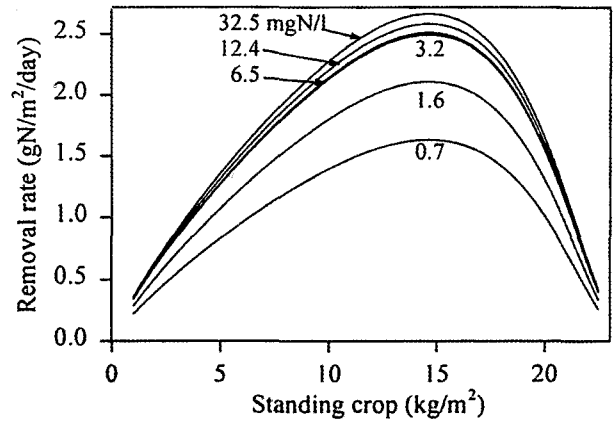


Fig. 7. Potential nitrogen removal rate by water hyacinth with the DIN concentrations of culture medium. Each line was calculated using the growth rate in the non-linear phase of the biomass yield curve and average tissue N contents.

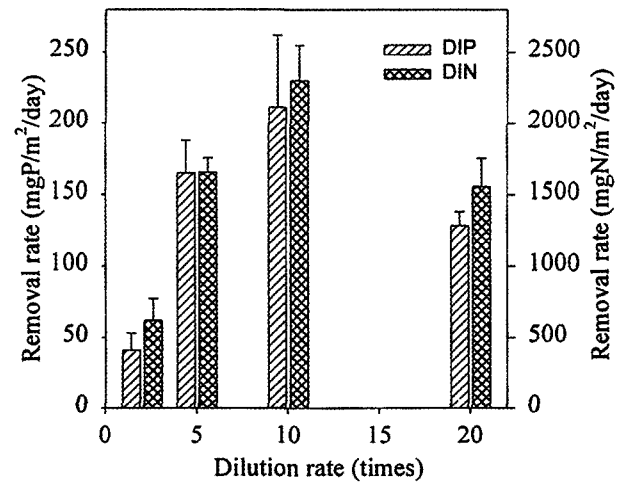


Fig. 8. Changes in removal rates of DIP and DIN with the dilution rates of swinery wastewater. Vertical lines represent standard deviations.

은 10배 희석한 배양수에서 가장 높게 나타났으며 각각 211 mgP/m²/day, 2,300 mgN/m²/day의 처리효율을 보였다. 다음으로 5배, 20배, 2배의 순으로 제거율이 높았다. 2배 희석한 배양조에서 처리효율이 가장 낮았는데 부레옥잠의 뿌리가 검게 변하면서 활성이 없는 것을 관찰할 수 있었다.

고 찰

부레옥잠의 생장에 영향을 주는 환경요인 중에 기온

은 중요하게 작용하여 기온이 10°C 이하가 되면 생장이 멈추고 0°C에서는 죽게된다(Dinges 1982). 본 연구를 수행한 6~9월의 평균 기온은 21.4°C로 나타나 부레옥잠의 성장에 온도의 제한은 적었을 것으로 사료되지만, 사계절이 뚜렷한 우리나라에서는 온도에 따른 부레옥잠의 성장 특성과 영양염 흡수능력 등이 명확하게 밝혀져 있지 않다. 예를 들어 강원도 춘천지역의 경우 1년 중 절반인 6개월간의 평균 기온이 10°C 이하로 최저 15°C 이상은 유지해야 영양염의 제거효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 일사량도 부레옥잠의 성장에 중요한 환경요인 중의 하나로 사료된다. 필자는 겨울철(1992년 12월~1993년 2월)에 20°C의 온실에서 부레옥잠을 배양하였는데 증식하지 못하는 것을 관찰했다(전 1994). 이때의 일사량은 평균 6.5 MJ/m²/day이었다. 또한 실내에서 70~130 E/m²/sec 범위의 광조건에서 부레옥잠의 현존량이 5 kg/m²일때 성장율은 110~120 g/m²/day를 보임으로써 doubling time이 29일로 낮은 성장율을 보였다. 본 연구 기간인 6월에서 9월까지의 평균 일사량은 15.8 MJ/m²/day이었으나 기상조건에 따라 매일매일 큰 차이를 보여 5 MJ/m²/day 이하로 낮은 날이 15일 이었다. 이것은 부레옥잠의 성장에 일사량이 제한환경요인으로 작용됨을 시사하므로 일사량이 낮은 시기에는 배양 시스템에 고려를 해주어야 할 것이다.

최대의 증식량을 보이는 현존량은 약 15 kg/m²로 하루에 약 0.9 kg까지 증가를 하였다. Debusk 등(1981)과 Reddy와 Debusk(1984)는 영양염의 제한이 없는 배양에서 최대 증식량을 보이는 현존량은 약 20 kg/m²로 보고하였고, 또한 Sato와 Kondo(1981)는 현존량이 7~11 kg/m²의 범위에서 약 0.7 kg 증가하는 것으로 보고하여 본 연구와 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 Wooten 등(1971)과 Penfound(1956)는 최적 현존량에서 건조중량으로 각각 29, 14.6 g/m²/day 증식하는 것으로 보고하여 본 연구보다 적은 증식율을 보였다. 이것은 배양시의 주어진 환경이 다르고 본 연구에서는 인공배지에서 배양하여 폐수에서보다 높은 증식율을 보인 것으로 사료된다. 인, 질소 제거율은 배양수의 인, 질소 농도에 따라 큰 차이를 보였으나 어느 농도 이상에서는 제거율이 비슷하여 인의 경우 약 500 mgP/m²/day, 질소의 경우 2,500 mgN/m²/day 제거되는 것으로 나타났다. Reddy와 DeBusk(1985)에 의하면 최대 인, 질소 제거율은 여름에 각각 371 mgP/m²/day, 3,300 mgN/m²/day로 나타나 국내에서도 기온이 높은 여름에는 아열대 지방에서의 제거율과 비슷한 처리효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

박(1992)에 의하면 식물체의 질소/인 요구비는 대부분 4~5라고 하였으나, 본 실험에 이용된 돈사폐수의 질

소/인 무게비는 1.4~2.1로 부레옥잠의 성장에 질소가 제한영양소로 작용된다. 대부분의 가축폐수나 가정하수에서 이와 같이 낮은 질소/인 무게비를 보인다(Polprasert et al. 1992). 그러나 호수나 하천에서의 일차제한 영양염은 대부분 인이므로, 폐수내의 인을 효율적으로 처리하기 위해서는 폐수에 질소를 첨가하여 부레옥잠을 배양하는 방법도 고려 해볼 필요성이 있고, 또한 질소 고정을 하는 남조류와 공생 관계를 갖는 양치류(Azolla)과 같은 수생식물을 함께 배양하는 연구가 필요할 것이다. 돈사 배출수의 원액을 이용한 부레옥잠의 배양에서는 영양염의 제거효과를 전혀 얻을 수 없었다. 영양염이 낮은 배양수에서 부레옥잠의 성장은 제한영양염의 농도가 높을수록 성장율도 높지만 필요이상의 높은 농도에서는 오히려 성장에 저해를 주게 된다(Reddy and DeBusk 1987). 높은 영양염의 영향도 있겠지만 배양조 내에서는 심한 악취가 발생하는 것으로 보아 수중의 용존산소의 부족에 따른 뿌리부분의 활성이 없어진 것으로 사료된다. 이것은 배양조 유입수의 악취가 적었던 것으로 보아 잔존했던 유기물이 배양조내에 체류하면서 분해된 원인으로 사료된다. 따라서 고농도의 유기물과 영양염류를 함유한 가축폐수를 처리할 때는 배양조의 설계 이전에 폐수의 특성 파악과 부레옥잠의 성장에 대한 영향 등의 충분한 연구가 필요하다.

폐수를 지하수로 2, 5, 10, 20배 희석하여 부레옥잠을 배양하였다. 2배 희석한 배양조 내에서의 인, 질소 제거율은 각각 42 mgP/m²/day, 580 mgN/m²/day으로 나타났으나 부레옥잠의 뿌리는 검게 변하였고 생장은 거의 못하였다. 생장은 없었으나 인, 질소가 제거된 것은 수중의 박테리아에 의한 영향으로 사료된다. 희석율이 가장 높은 20배의 경우는 농도가 너무 낮아 처리효율이 떨어졌던 것으로 사료된다. 인, 질소의 제거율은 10배 희석한 배양수에서 각각 211 mgP/m²/day, 2,300 mgN/m²/day의 처리효율을 보여 제거된 질소/인 무게비가 약 11로 나타나 수생식물 생체내의 질소/인 무게비를 고려해 볼때 질소의 제거율이 인에 비하여 높게 나타났다. 질소의 제거율은 인공배지를 이용한 제거 잠재력과 비슷한 값을 얻었다. 이것은 배양수내의 무기질소의 탈질소 반응에 의해 제거된 것으로 사료된다. 그러나 인의 제거율은 인공배지에서 계산된 잠재력보다 2.5배 낮게 나타났지만 DeBusk 등(1983)의 200 mgP/m²/day과 비슷한 결과를 얻었다. 이(1993)는 돈사폐수를 2배 희석하여 부레옥잠을 배양한 결과 인은 최대 70 mgP/m²/day, 질소는 950 mgN/m²/day의 제거율을 보였다. 또한 Boyd(1970)는 322 kgP/ha/yr와 1,980 kgN/ha/yr, Reddy와 Tucker(1983)는 1,987 kgP/ha/yr와 7,887 kgN/ha/yr의 제거율을

얻었다. 이렇게 연구자마다 제거율에 상당한 차이가 있는 것은 배양한 지역이 다르고 배양시의 기후조건 그리고 재배조건, 즉 폐수의 특성, 부레옥잠의 현존량, 수심 배양수의 체류시간 등이 다르기 때문이다. 이러한 대부분의 연구결과를 종합해보면 부레옥잠을 이용한 각종폐수 처리는 효과가 큰 것으로 보인다. 하지만 현 시점에서 각종 폐수중의 영양염 제거를 위한 부레옥잠의 배양조를 설계하는데는 많은 문제점이 있다. 먼저 열대 다년생식물인 부레옥잠은 온대지방으로 유입되어 적응이 되었다고 하지만 온도와 일사량의 변화에 따라 어느 정도의 증식을 하는지 명백히 밝혀져 있지 않다. 또한 인과 질소 흡수 능력에 대해서는 양적인 개념과 흡수속도 모두가 중요한 요인이 된다. 따라서 상기의 기초조사가 이루어진 후에 배양조의 표면적, 깊이, 체류시간 및 부레옥잠 현존량 등의 설계가 가능하리라 사료된다. 특히 기온과 일사량이 낮은 시기에는 어느 식물도 생장이 저하되므로 큰 효과를 얻을 수 없다는 것을 인식해 둘 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 과학기술처(1992) 호소 만입부에서의 조류대량증식 제어기술 개발. 과학기술처. pp. 41-71.
- 박상근, 김광용(1992) 수경재배. 오성출판사. pp. 118-131.
- 이남희(1993) 수생식물(부레옥잠)을 이용한 돈사 폐수의 처리. 공학석사학위논문, 부산수산대학교.
- 전만식(1994) 부레옥잠을 이용한 수중의 영양염 제거에 관한 연구. 이학석사학위논문, 강원대학교.
- APHA, AWWA, WPCF(1989) Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th ed. American Public Health Association. Washington.
- Boyd CE(1970) Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted water. *Ecol. Bot.* **30** : 51-56.
- DeBusk TA, JH Ryther, MD Hanisak & LD Williams (1981) Effects of seasonality and plant density on the productivity of some freshwater macrophytes. *Aquat. Bot.* **10** : 133-142.
- DeBusk TA, LD Williams & JH Ryther(1983) Removal of nitrogen and phosphorus from waste water in a Water hyacinth-based treatment system. *J. Environ. Qual.* **12** : 257-262.
- Dinges R(1979) Development of hyacinth wastewater treatment systems in Texas. In aquaculture systems for wastewater treatment. seminar Proc. and Eng. Assessment. U.S. Envir. Protection Agency, Washington, D. C. pp. 193-231.
- Dinges R(1982) Natural systems for water pollution control. Van Nostrand reinhold Environmental Cop. pp. 71-101.
- Duffer WR(1982) Assessment of Aquaculture for reclamation of wastewater. In Water Reuse (Middlebrooks, EJ ed). Ann Arbor Science. MI. pp. 349-367.
- George T & FL Burton(1991) Natural treatment system. Wastewater Engineering-Treatment. McGraw-Hill.
- Hauser JR(1984) Use of water hyacinth aquatic treatment systems for ammonia control and effluent polishing. *J. Water Pollut. Control Fed.* **56** : 219-225.
- Odum EP(1983) Basic Ecology. Saunders college publishing USA. pp. 319-328.
- Otsuki A(1984) Changes in water quality and plankton during the growth of waterhyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, after the transplantation (in Japanese with English summary).
- Penfound WT(1956) Primary production of aquatic plants. *Limnol. Oceanogr.* **1** : 92-101.
- Polprasert C, S Kessomboon & W Karjanaprapin(1992) Pig wastewater in water hyacinth ponds. *Wat. Sci. Tech.* **26** : 2381-2384.
- Reddy KR, FM Hueston & T McKim(1985) Biomass production and nutrient removal potential of waterhyacinth cultured in sewage effluent. *J. Solar Ener. Engineering.* **107** : 128-135.
- Reddy KR & JC Tucker(1983) Productivity and nutrient uptake of waterhyacinth, *Eichhornia crassipes*. I. Effect of nitrogen source. *Econ. Bot.* **37** : 237-247.
- Reddy KR & WF DeBusk(1984) Growth characteristics of aquatic macrophytes cultured in nutrient-enriched water : I. Water hyacinth, Water Lettuce, and Pennywort. *Econ. Bot.* **38** : 229-239.
- Reddy KR & WF DeBusk(1985) Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes. *J. Environ. Qual.* **14** : 459-462.
- Reddy KR & WF DeBusk(1987) Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants. Aquatic plants for water treatment and resource recovery (Eds.: KR Reddy & WH Smith), Magnolia Publishing Inc. pp. 337-357.
- Rhodes A & DL Fletcher(1966) Principles of industrial microbiology. Pergamon Press. pp. 282-297.
- Sato H & T Kondo(1981) Biomass production of waterhyacinth and its ability to remove inorganic minerals water: 1. Effect of the concentration of culture solution on the rates of plant growth and nutrient uptake. *Jap. J. Ecol.* **31** : 257-267.
- Veerkamp MT, WJ Corre, BJ Atwell & PJC Kuiper(1980) Growth rate and phosphate utilization of some *Carex* species from a range of oligotrophic to eutrophic swmp habitats. *Physiol. Plant* **50** : 237-240.
- Wooton J & J Dodd(1976) Growth of waterhyacinth in treated sewage effluent. *Econ. Bot.* **30** : 29-37.

Nutrient Removal Potential of Water Hyacinth Cultured in Nutrient-enriched Water and Swinery Wastewater

Man-Sig Jun and Bomchul Kim

(Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea)

Abstract - Nutrients removal by water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms from nutrient enriched waters and swinery wastewater were evaluated. The contents of nitrogen and phosphorus of dried water hyacinth increased from 1.4 to 3.3% and 0.21 to 0.80% when water hyacinth available N and P in the culture medium were increased from 0.7 to 5.0 mgN/l and 0.06 to 1.5 mgP/l, respectively. Maximum N and P contents were found to be 4.1 and 0.90%, respectively. The significant relationship was observed between the standing crop of water hyacinth and the biomass yield per unit area and time. Biomass yield increased gradually until standing crop reached 15 kg wet wt./m², and then rapidly decreased. The high biomass yield of up to 0.5 kg/m²/day was obtained in the range of 7 to 20 kg/m² of standing crop. The potential removal rates of N and P by the water hyacinth during summer were found to be 2,250 to 2,710 mgN/m²/day and 570 to 595 mgP/m²/day, respectively, when 15 kg/m² in standing crop and nutrient concentrations of culture medium were ranged from 1.24 to 6.2 mgP/l and 3.2 to 32.5 mgN/l, respectively. Inorganic N and P concentrations of swinery wastewater were in the range of 82 to 121 mgN/l and 22 to 79 mgP/l, respectively. Nitrogen and P removal rates of water hyacinth cultured in swinery wastewater were found to be in the ranges of 2,000 to 2,600 mgN/m²/day and 157 to 254 mgP/m²/day, respectively, at 10 times diluted water of swinery wastewater. [Nutrient removal, swinery wastewater, water hyacinth, water treatment].