

수생식물을 이용한 담수 순환여과식 양식용수내의 무기영양염 처리 효율

마진석 · 오승용¹ · 조재윤*

부경대학교 양식학과, ¹한국해양연구원 자원연구본부

Inorganic Nutrient Removal Efficiency of Aquatic Plants from Recirculating Aquaculture System

Jin-Seok Ma, Sung-Yong Oh¹ and Jae-Yoon Jo*

Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
¹Marine Resources Laboratory, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Inorganic nutrients such as nitrogen and phosphate compounds accumulate in recirculating aquaculture systems. These nutrients must be removed from the system before they affect pH and fish health. For this purpose, aquatic plants are a simple and inexpensive method of removal. There are four commonly used aquatic plants: *Eichhornia crassipes* (water hyacinth), *Pistia stratiotes* (water lettuce), *Hygrophila angustifolia*, and *Hydrocotyle leucocephala* in freshwater recirculating aquaculture systems in Korea, but their efficiencies are not known. Therefore, removal efficiencies of inorganic nutrients from a freshwater recirculating aquaculture water with four commonly used aquatic plants were tested. Removing efficiencies of TAN, NO_2^- -N, and NO_3^- -N of the plants in 210 L aquaria for 48-hour period were tested. The removing efficiencies of TAN, NO_3^- -N, and PO_4^{3-} -P of the two most effective plants, water hyacinth and water lettuce, were also tested in 690 L (surface area of 1.55 m²) tanks under 2 different initial stocking densities, 4 kg and 6 kg, for 22 days. Proximate analysis major nutrients and N and P contents of the all plants were analyzed for calculating net removal weight of N and P by the plants. Water lettuce was the most effective for removing TAN, NO_2^- -N, and NO_3^- -N from the water for 48-hour period tested followed by water hyacinth and *Hygrophila angustifolia*. Water lettuce reduced TAN, NO_2^- -N, and NO_3^- -N concentration from 2.3 mg/L, 0.197 mg/L, and 21.4 mg/L to 0.4 mg/L, 0.024 mg/L and 17.4 mg/L, respectively while water hyacinth reduced them down to 0.6 mg/L, 0.029 mg/L and 17.9 mg/L, respectively. The concentrations of TAN, NO_2^- -N, and NO_3^- -N in *Hydrocotyle leucocephala* group were rather increased up to 3.7 mg/L, 5.7 mg/L and 48.2 mg/L, respectively. This is because the creeping stem of *Hydrocotyle leucocephala* had to be cut to meet stocking weight resulting in decaying of the stem in the aquaria during experiment. The net growth in weight of water hycinth and water lettuce of 4 kg each in the 1.55 m² tanks for 22 days were 9.768 kg and 10.803 kg respectively, and those at initial weight of 6 kg each were 8.393 kg and 9.433 kg, respectively. The reason of lower net growth in the later group was restricted growth space. Nitrogen and phosphorus contents in water hyacinth were 2.89% and 0.27%, and those in water lettuce were 3.87% and 0.36%, respectively. Average quantities of removed N and P from 1.55 m² tanks by water hyacinth for 22 days were 18.9 g and 1.75 g, while those by water lettuce were 36.8 g and 3.5 g, respectively. Therefore water lettuce showed much higher efficiencies for removing both N and P from recirculating aquaculture water than water hyacinth.

Keywords: Recirculating system, Water treatment, Nutrients removal, *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*

서 론

소량의 물 사용과 적절한 수처리 기술을 이용한 순환여과식 양식 방법은 전 세계적으로 관심을 받고 있으며, 환경 단체나 정부 및 지역 단체의 지지를 받고 있는 미래지향적 양식 방법

이다. 그러나 순환여과식 사육 시스템은 1일에 총 시설 내 물 수량의 10% 미만을 환수하기 때문에 산소부족과 유기물, 암모니아 등의 무기질소 및 CO₂의 축적 등으로 인하여 수질 오염이 용이하기 때문에 수질 관리를 잘하지 않으면 성장 저해, 질병 발생 등으로 어류를 건강하게 키울 수 없다. 특히, 어류의 대사작용과 소비되지 않고 남은 사료 등에 의해 발생하는 암모니아성 질소와 아질산성 질소는 어류에게 독성을 나타내기 때

*Corresponding author: jyjo@pknu.ac.kr

문에 비교적 무해한 질산염으로 산화를 유도하는 생물학적 여과 과정이 필수적이다.

그러나 질산염 역시 농도가 높아지면 pH를 낮추고 어류 성장에도 영향을 주게되므로 환수(Hrubec et al., 1996)와 탈질산화(van Rijn, 1996) 및 수생식물 등을 이용하여 농도를 낮추어야만 한다. 이 중 환수는 유입수와 사육수의 수온 차이가 클 때는 에너지가 많이 들어가며, 자연수계에 영양염을 배출하기 때문에 환경 오염의 관점에서 적절하지 않으며, 탈질산화 과정은 탈질산화조와 같은 시설이 필요하고 탈질 미생물의 에너지원으로 알콜이나 글루코즈 등의 외부 탄소원이 필요하기 때문에 양식시스템에 적용하는 것은 아직 일반화되고 있지 않다. 수생식물은 현재 우리나라의 담수 순환여과식 양식장에서 질산염 제거에 가장 많이 사용하고 있는 방법이며, 사용되는 대표적인 수생식물로는 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)을 들 수 있다. 부레옥잠 외에 water lettuce(물상치)라는 이름의 *Pistia stratiotes*와 포복지로 뻗어나가 번식하는 *Hydrocotyle leucocephala* 그리고 뿌리를 가진 식물인 *Hygrophila angustifolia*가 열대 관상어와 함께 들어와서 우리나라의 담수 순환여과식 양어장의 탈질화에 이용되고 있다.

부레옥잠은 굵은 근경 조직(root system)을 가지며, 줄기 및 뿌리들은 물리적인 여과 및 박테리아의 부착 매질 역할을 하고 (Weber and Tchobanoglous, 1984; Polprasert, 1989), 근부에 부착해 있는 미생물들은 뿌리를 통해 확산되는 산소를 공급받는다(Stowell et al., 1980). 이런 식물 뿌리에 번식하고 있는 미생물로서는 bacteria, fungi, predator, filter feeder, detritivores 등이 있는 것으로 보고되고 있다(Reed et al., 1988). 또한 양어장 외에서도 생활하수나 축산 폐수의 처리에도 부레옥잠 등의 수생식물을 이용한 보고가 있고(Wolverton and McDonald., 1979; Reddy, 1983), 이러한 수초는 수확하여 토양 첨가제, 깔개 짚, 개량제, 가축의 사료 등으로 널리 쓰이고 있다 (Roger and Davis, 1972; Wolverton and McDonald, 1978).

이들 식물들은 모두 온도가 최저 20°C 이하로 떨어지지 않는 열대성 어류를 사육하는 순환여과식 양식장이라면 항상 성장이 가능하며 질소 제거를 위한 추가 에너지 사용이나(Reed et al., 1988), 다른 부대 시설이 필요하지 않을 뿐만 아니라, 사육생물의 대사산물이나 사료 찌꺼기에 의한 인 제거 역시 수생식물을 이용한 환경친화적 방법이 이용되고 있지만 어떤 종류의 수생식물이 가장 좋은 여과 능력을 보이는지에 대한 비교가 없기 때문에 양식어민들은 종류에 상관없이 무작정 이용하고 있다.

따라서 본 실험에서는 우리나라 담수 순환여과 양식장에서 일반적으로 쓰이고 있는 부레옥잠(*E. crassipes*) 외에 water lettuce(물상치)라는 이름의 *P. stratiotes*와 *Hydrocotyle leucocephala* 및 *Hygrophila angustifolia* 등 4종류 수초를 대상으로 수중 질소 및 인의 흡수에 가장 적합한 식물과 이들의 탈질 및 영양염의 흡수 효율을 구명하였다.

재료 및 방법

실험수초

실험에 이용한 4종의 수초는 부경대학교 순환여과식 양식장에서 여과 재료로 사용하고 있는 *E. crassipes*(부레옥잠), *H. leucocephala*, *H. angustifolia* 및 *P. stratiotes*(물상치)를 사용하였다.

실험방법

4종의 수초 중 무기질소 제거 효율이 가장 좋은 종을 조사하기 위해 부경대학교 순환여과식 양식장 내에 가로 91 cm, 세로 29 cm, 높이 80 cm(용적 210 L)인 유리 수조를 설치하고 양식장 사육수를 50 L 채운 뒤, 4종의 수초를 각각 500 g씩 동일량을 수용하여 수용 전과 24시간 및 48시간 경과 후 총암모니아성 질소(total ammonia nitrogen; TAN), 아질산성 질소(NO_2^- -N), 질산성 질소(NO_3^- -N) 농도 변화를 조사하여 수초 4종의 여과 효율을 조사하였다.

위 실험에서 가장 효율이 좋았던 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*를 대상으로 생체량의 변화에 따른 성장과 성장에 따른 수초의 질소, 인 제거 양을 측정하기 위해 가로 184 cm, 세로 84 cm, 높이 45 cm(용적 690 L)의 직육면체 나무수조에 이들 두 식물의 생체량을 각각 4 kg 및 6 kg씩 이식하여 24 시간의 수리학적 체류시간(hydraulic residence time; HRT) 조건하에서 22일 동안 3일 간격으로 유입수와 유출수의 TAN, NO_2^- -N, NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P를 측정하였다. 양식장 사육수의 유입은 순환펌프를 이용하여 수조 내로 유입시켰으며, 수조 내 수량은 541 ± 1.5 L를 유지하였다.

또한 부경대학교 담수 순환여과 양식장에서 재배되고 있는 *E. crassipes*, *H. angustifolia*, *H. leucocephala*, 그리고 *P. stratiotes*이 가지고 있는 식물체내 질소, 인의 양을 측정하기 위해 각각의 수생식물을 습중량으로 1.5 kg씩 수확하여 일반 성분 분석을 실시하였다(AOAC, 1995).

모든 실험은 3반복으로 이루어졌으며, 수생식물 4종의 무기질소 화합물 제거 및 수생식물 생체량 변화에 따른 여과 효율 실험은 수초를 수용하지 않은 대조구와 연계하여 제거량을 산정하였다.

분석방법

4종의 수생식물의 일반성분 분석은 AOAC (1995) 방법을 따랐으며, 수분은 상압 가열 건조법, 조단백질은 Kjeldal 질소정량법(N \times 6.25), 조지방은 Soxtec System 1046(Tecator AB, Sweden), 조회분은 직접회화법 그리고 인은 분광광도계로 각각 분석하였다. 모든 수질 분석은 standard method (APHA et al., 1992)에 따라 수행하였으며, 이에 따른 TAN 분석은 NH_3 선택전극(Orion Research Inc., 9512BN)이 부착된 ion meter (Orion Research Inc., Model 720A)를 이용하여 이온선택성 전극법에 의해 분석하였다. 수온은 DO meter (KRK, KDO-5151, Japan)

Table 1. Instruments used to estimate the efficiency of nutrient removal by selected aquatic plants from recirculating aquaculture system

Parameter	Unit	Experimental method	Analytical instrument
TAN*	mg/L	Standard method	Ion Meter (Orion Reserch Inc, Model 720A)
NO ₂ ⁻ -N	mg/L	Standard method	Spectrophotometer (DR 2000, Hach Co. USA)
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	Standard method	Ion Chromatography (Dionex Model DX-100)
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	Standard method	Ion Chromatography (Dionex Model DX-100)
Temp.	°C	Standard method	DO-meter (KRR, KDO-5151, Japan)

*TAN: total ammonia nitrogen

를 이용하였으며, NO₂⁻-N 분석은 분광광도계(DR 2000, HACK Co., USA)로, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P는 ion chromatography를 이용하여 측정하였다(Table 1).

통계 처리

HRT 변화에 따른 수생식물의 TAN, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N 그리고 PO₄³⁻-P 제거 효율을 STATISTIX 4.0(Analytical Software, USA) 통계 프로그램을 이용하여 ANOVA test를 실시하고, 최소 유의차(LSD) 검증으로 유의성(P<0.05)을 검증하였다.

결과 및 논의

수생식물 4종의 무기질소 제거

수생식물 4종을 대상으로 48시간 동안의 무기질소 화합물 제거 실험 결과를 Table 2에 나타내었다. *E. crassipes*의 경우, 48시간 후 TAN 농도는 대조구에 비해 3.3배, NO₂⁻-N 농도는 6.9배, NO₃⁻-N농도는 1.2배 감소하였고 이에 따른 각 무기질소 화합물의 제거량은 각각 70, 8.5 및 355 mg으로 나타났다. *P. stratiotes*의 경우, TAN은 5.0배, NO₂⁻-N는 8.3배, NO₃⁻-N는 1.4배 농도가 감소하였으며, 제거량은 각각 80, 8.8, 380 mg으로 나타났다. *H. angustifolia*의 경우, TAN은 1.3배, NO₂⁻-N는 1.3배, NO₃⁻-N는 1.2배 농도가 감소하였으며, 제거량은 각각 20, 2.5, 245 mg으로 나타난 반면, *H. leucocephala*의 경우 TAN 농

도는 오히려 1.9배, NO₂⁻-N는 28.6배, NO₃⁻-N는 1.9배 농도가 증가하였다.

이 실험에서 수생식물 4종 중 *P. stratiotes*를 이용한 무기질소 화합물 제거 효율은 *H. angustifolia*와 *H. leucocephala*에 비해서는 유의적으로 높았으나(P<0.05), *E. crassipes*와는 유의적인 차이를 보이지 않았다(P>0.05). *H. leucocephala*의 경우 48시간 후 TAN, NO₂⁻-N 그리고 NO₃⁻-N 값이 오히려 각각 1.9, 28.6, 1.9배 증가하는 결과는 이 종이 줄기의 마디마다 싹을 내어 포복지를 형성하여 모든 줄기가 연결된 상태로 증식하는 특성을 갖고 있어 나머지 3종의 수생식물과 동일한 증량을 수조에 수용하기 위해 줄기를 잘라서 넣었기 때문에 이 잘려진 부분에서부터 부패가 일어나 수중에 거품이 일고 악취가 발생하였으며 이러한 부패작용으로 인해 수중의 TAN, NO₂⁻-N 그리고 NO₃⁻-N 값이 증가된 것으로 추정된다. 수초를 넣지 않은 대조구의 경우 TAN 농도는 감소하고, NO₂⁻-N와 NO₃⁻-N 값이 약간 증가하였는데 이는 순환수 또는 수조 벽에 부착한 질산화세균에 의해 TAN이 아질산성 질소 및 질산성 질소로 전환된 것으로 생각된다.

수생식물은 성장하는 장소에 따라 물 밑 땅에 고착하지 않고 물 속에 떠서 생활하는 식물인 부수식물(浮水植物, floating plant)과 뿌리는 진흙 속에 있고, 줄기와 잎의 일부 또는 대부분이 물 위로 뻗어 있는 식물인 정수식물(挺水植物, emerged plant)로 나눌 수 있으며, 실험 결과 나타난 무기 영양염류의 흡수 정도는 부수식물인 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*가 정수식물인 *Hygrophila angustifolia* 및 포복지를 내어 번식하는 *Hydrocotyle leucocephala*에 비해 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 습지에서 부수식물인 부레옥잠, 개구리밥 등이 정수 식물인 미나리, 꽃창포 등에 비해 흡수 능력이 높다는 보고와 일치하였다(Hwang and Kong, 1999).

Lee (1993)는 부레옥잠을 축산폐수 처리에 적용하여 1.36 kg/m²의 밀도로 수용한 결과 유입수 암모니아 농도가 79 mg/L 일 때 배출수의 암모니아 농도가 67.4 mg/L 로 14.7% 감소하였다고 보고한 바 있다. 본 실험의 경우 부레옥잠을 1.92 kg/m²의 밀도로 수용한 결과 유입수의 암모니아 농도 2.3 mg/L일 때 배출수의 농도가 0.6 mg/L로 대조구의 농도 감소를 감안하면 70% 제거 효율을 나타내었다. 이와 같은 차이는 처리하고자 하는 폐수가 농도 범위가 다르고 밀도 역시 차이를 보였기 때문으로

Table 2. Effect of 48 hour residence of selected aquatic plants on inorganic nitrogen concentration in recirculating aquaculture water.

Species	TAN (mg/L)			NO ₂ ⁻ -N (mg/L)			NO ₃ ⁻ -N (mg/L)		
	0 h	24h	48 h	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
<i>Eichhornia crassipes</i>	2.3±0.0	1.4±0.1	0.6±0.1	0.197±0.001	0.057±0.003	0.029±0.002	21.4±0.2	20.8±0.3	17.9±0.7
<i>Pistia stratiotes</i>	2.3±0.0	1.1±0.1	0.4±0.1	0.197±0.001	0.029±0.002	0.024±0.002	21.4±0.2	20.1±0.5	17.4±0.9
<i>Hygrophila angustifolia</i>	2.3±0.0	1.7±0.1	1.6±0.1	0.197±0.001	0.170±0.001	0.150±0.001	21.4±0.2	20.1±0.4	20.1±0.3
<i>Hydrocotyle leucocephala</i>	2.3±0.0	2.6±0.1	3.7±0.1	0.197±0.001	2.91±0.150	5.7±0.532	21.4±0.2	28.4±1.2	48.2±3.5
Control	2.3±0.0	2.2±0.0	2.0±0.1	0.197±0.089	0.199±0.2	0.199±23.6	21.4±25.0	23.6±0.5	25.0±0.4

생각되지만, 제거된 절대량은 축산 폐수의 경우 11.6 mg/L이고 양식장 내에서는 1.4 mg/L 밖에 되지 않아 부레옥잠이 고농도의 암모니아 폐수에서도 더 많은 양을 흡수 제거할 수 있을 것으로 생각되었다.

아질산성 질소는 식물에 의해 흡수되지 않고 뿌리나 수중에 있는 질산화 세균들에 의해 아질산성 질소에서 질산성 질소로 전환되어진다. 본 실험에서 나타난 아질산성 질소 농도의 차이는 식물이 가지고 있는 근부의 특성에 따라 나타나는 현상으로 볼 수 있는데 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*는 많은 뿌리와 잔털을 가지고 있어 질산화 세균들이 부착할 수 있는 기질이 더 넓기 때문에 이 곳에 부착한 미생물에 의해 아질산성 질소가 질산성 질소로 전환된 것으로 생각되어지며, *E. crassipes*보다 더 많은 뿌리와 잔털을 가지고 있는 *P. stratiotes*가 미생물이 서식할 수 있는 기질이 더 넓어 아질산성 질소가 더 많이 제거된 것으로 생각된다.

수조 내에 질산성 질소의 제거에 있어서 정수식물인 *H. angustifolia*와 포복줄기로 번식하는 *H. leucocephala* 보다 부수식물인 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*가 제거 효율이 높았다. Lee (1993)에 의하면 식물은 질산성 질소를 흡수할 뿐만 아니라 식물의 기공을 통하여 산소가 뿌리로 가고 이 뿌리 부분에서 산소가 확산되면서 뿌리 부분에 호기성 지역과 혐기성 지역이 존재하며, 이곳에서 탈질산화 반응을 통하여 기체 형태로 질소가 제거된다고 보고하고 있는데 본 실험에서도 뿌리가 많은 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*가 질산성 질소를 제거하는데 이러한 기작도 함께 일어난 것으로 추측된다.

수생식물 이식 생체량에 따른 여과 효율

수생식물 이식 생체량에 따른 TAN 제거

*E. crassipes*와 *P. stratiotes* 생체량을 각각 4 kg과 6 kg으로 달리하여 이식하였을 때 22일 동안의 TAN의 농도 변화 및 제거 효율을 Table 3에 나타내었다.

실험 기간 동안 유입수의 TAN 농도는 0.43~1.15 mg/L 범위였으며, 두 수초의 이식한 생체량이 각각 4 kg인 경우 실험 초기 13일까지 수초에 의해 여과된 배출수의 TAN 농도와 제거 효율은 *E. crassipes*의 경우 0.25~0.33 mg/L와 32.6~62.6%의 범위를 보였고, *P. stratiotes*의 경우 0.24~0.34 mg/L와 32.6~61.7%의 범위를 보였다. 13일 이후에는 배출수의 TAN 농도가 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*에서 각각 0.08~0.15 mg/L와 0.06~0.13 mg/L 범위로서 실험 초기보다 낮게 유지되었고, TAN 제거 효율은 각각 49.4~56.3%와 51.9~60.6%로서 거의 일정한 효율을 보였다.

두 수초의 생체량을 각각 6 kg 이식한 경우, TAN 농도와 제거 효율은 생체량 4 kg을 이식한 경우와 유사한 경향을 보였다. 실험 초기 13일까지 배출수의 TAN 농도와 제거 효율은 *E. crassipes*의 경우 각각 0.22~0.37 mg/L와 36.7~61.7%의 범위였고, *P. stratiotes*의 경우 각각 0.16~0.33 mg/L와 43.3~63.6%의 범위를 보였다. 13일 이후에는 배출수의 TAN 농도가 *E. crassipes*와 *P. stratiotes*가 각각 0.06~0.13 mg/L와 0.05~0.11 mg/L 범위로서 실험 초기보다 낮게 유지되었고, TAN 제거 효율은 각각 57.1~71.7%와 61.2~73.6%로 나타났다.

이식한 생체량이 6 kg인 실험구에서 4 kg인 실험구보다 배출수의 전반적인 TAN 농도는 낮게 유지되었으며, TAN 제거 효

Table 3. Effect of initial plant biomass on TAN removal efficiency in recirculating aquaculture tanks after 22 days residence of *E. crassipes* and *P. stratiotes*.

Weight (kg)	Day	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)			Removal Efficiency (%)	
			<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	Control	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>
4	1	0.43±0.00	0.28±0.02	0.28±0.01	0.42±0.00	32.6±4.7	32.6±1.0
	4	0.53±0.00	0.33±0.01	0.33±0.01	0.52±0.01	35.8±1.9	35.8±1.0
	7	0.47±0.01	0.26±0.01	0.24±0.01	0.45±0.01	40.4±2.1	44.7±2.1
	10	1.15±0.01	0.33±0.01	0.34±0.01	1.05±0.01	62.6±0.9	61.7±0.9
	13	0.87±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.76±0.01	58.6±1.5	59.8±1.5
	16	0.79±0.01	0.15±0.01	0.13±0.01	0.54±0.01	49.4±1.0	51.9±1.3
	19	0.66±0.01	0.13±0.01	0.10±0.01	0.50±0.01	56.1±1.5	60.6±1.5
	22	0.64±0.01	0.08±0.00	0.06±0.01	0.44±0.01	56.3±0.0	59.4±1.0
6	1	0.60±0.00	0.37±0.02	0.33±0.01	0.59±0.00	36.7±3.4	43.3±1.7
	4	0.45±0.00	0.24±0.00	0.20±0.01	0.44±0.00	44.4±0.0	53.3±4.4
	7	0.45±0.01	0.23±0.01	0.22±0.01	0.44±0.00	46.7±4.4	48.9±4.4
	10	0.60±0.00	0.22±0.01	0.26±0.01	0.59±0.01	61.7±1.5	55.0±1.0
	13	0.66±0.01	0.22±0.01	0.16±0.00	0.58±0.02	54.5±1.0	63.6±2.0
	16	0.49±0.01	0.13±0.01	0.11±0.00	0.41±0.00	57.1±1.0	61.2±1.9
	19	0.53±0.00	0.07±0.01	0.06±0.01	0.45±0.02	71.7±1.0	73.6±1.6
	22	0.48±0.01	0.06±0.01	0.05±0.00	0.36±0.01	62.5±2.1	64.6±1.0

Table 4. Effect of initial plant biomass on NO_3^- -N removal efficiency in recirculating aquaculture tanks after 22 days residence of *E. crassipes* and *Pistia stratiotes*.

Weight (kg)	Day	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)			Removal Efficiency (%)	
			<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	Control	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>
4	1	14.73±0.01	11.39±0.03	10.94±0.08	14.15±0.02	18.7±0.2	21.8±0.5
	4	13.58±0.00	10.44±0.11	10.02±0.04	13.08±0.01	19.4±0.8	22.5±2.9
	7	12.87±0.00	9.76±0.09	9.29±0.05	12.43±0.01	20.7±0.1	24.4±0.4
	10	9.67±0.02	5.82±0.07	5.51±0.02	9.09±0.03	33.8±0.4	37.0±0.2
	13	10.69±0.01	7.43±0.16	7.16±0.09	10.05±0.02	24.5±1.5	27.0±0.8
	16	11.47±0.01	7.45±0.09	7.22±0.03	10.68±0.02	28.2±0.8	30.2±0.3
	19	12.69±0.01	8.46±0.09	8.12±0.10	11.87±0.03	26.9±0.7	30.0±0.8
	22	13.27±0.01	8.54±0.08	8.04±0.08	12.20±0.04	27.6±0.2	31.4±2.2
6	1	17.68±0.01	14.72±0.03	13.99±0.07	17.35±0.01	14.9±0.2	19.0±0.4
	4	14.00±0.01	10.54±0.11	10.06±0.18	13.55±0.04	21.5±0.8	24.9±1.3
	7	13.31±0.01	9.95±0.11	9.24±0.22	12.85±0.01	21.8±0.8	27.1±1.7
	10	13.55±0.02	9.56±0.07	9.25±0.09	13.12±0.01	26.3±0.5	28.6±0.7
	13	12.59±0.01	8.59±0.03	8.05±0.08	12.06±0.01	27.6±0.2	31.9±0.6
	16	12.36±0.01	8.00±0.12	7.50±0.14	11.63±0.05	29.4±1.0	33.4±1.1
	19	14.84±0.02	10.41±0.08	10.18±0.14	14.08±0.02	24.7±0.1	26.3±0.4
	22	13.84±0.02	9.36±0.10	9.30±0.06	12.81±0.01	24.9±0.4	25.4±0.4

을 역시 높게 나타나 수초의 양에 따라 정화 능력이 향상되는 것을 알 수 있다. 그러나 두 종류 수초의 이식 생체량에 관계없이 *P. stratiotes*를 수용한 수조에서 대체로 TAN 농도는 낮게 그리고 제거 효율은 높게 나타나 *P. stratiotes*의 성장력이 *E. crassipes* 보다 높은 것으로 생각된다. 그리고 수초의 이식량과 종류에 관계없이 실험기간이 경과함에 따라 TAN 농도와 제거 효율이 일정해지는 것은 수초의 성장에 따라 이용할 수 있는 공간의 부족 현상으로 인해 성장률이 저하되면서 TAN의 제거율이 일정해지는 것으로 생각된다.

수생식물 이식 생체량에 따른 NO_3^- -N 제거

두 종류 수초의 이식한 생체량 변화에 따른 NO_3^- -N의 농도 변화 및 제거 효율을 Table 4에 나타내었다. 두 수초의 이식 생체량이 각각 4 kg인 경우, *E. crassipes* 실험구의 NO_3^- -N의 농도와 제거 효율은 각각 5.82~11.39 mg/L와 18.7~33.8%의 범위를 보였고 *P. stratiotes* 실험구는 각각 5.51~10.94 mg/L와 21.8~37.1%의 범위로서 첫째 날을 제외하고는 농도와 제거 효율이 거의 일정하였다. 생체량이 6 kg인 경우, *E. crassipes* 실험구의 NO_3^- -N의 농도와 제거 효율은 각각 8.00~14.72 mg/L와 14.9~29.4%의 범위를 보였고 *P. stratiotes* 실험구는 각각 7.50~13.99 mg/L와 19.0~33.4%의 범위로서 생체량 4 kg인 경우와 유사하게 첫째 날을 제외하고는 농도와 제거 효율이 거의 일정하였다.

TAN 농도 변화와는 다르게 NO_3^- -N의 농도 변화는 이식 생체량이 6 kg인 실험구에서 대체로 높게 나타났다. 이것은 생체량 4 kg인 실험구에 비해 생체량 6 kg의 실험구 유입수의 NO_3^-

-N 농도가 높았기 때문으로 생각된다. 사육수 중의 NO_3^- -N는 질산화세균의 질산화 작용에 따라 그 양이 달라지게 된다. 이식 생체량 6 kg인 실험구의 경우 4 kg인 실험구에 비해 TAN 제거 효율이 높았는데, 여기에는 수초에 의한 제거뿐만 아니라 물 속에 부유해 있거나 수조 면과 수초 뿌리에 부착해 있는 질산화 세균에 의한 질산화 작용에 의한 TAN 제거가 함께 일어나기 때문으로 생체량 6 kg인 실험구가 4 kg인 실험구에 비해 높은 TAN 제거에 의한 질산화 유도로 더 많은 양의 NO_3^- -N를 축적한 결과로 생각된다. 또한 TAN 제거 효율에 비해 NO_3^- -N 제거 효율이 낮은 이유 역시 이와 같은 질산화 작용에 의한 것으로 생각되지만 제거량 측면에서는 NO_3^- -N 제거에 의한 질소 제거가 월등히 많음을 알 수 있다.

그리고 TAN 변화와 마찬가지로 두 종류 수초의 이식량에 관계없이 *P. stratiotes*를 수용한 수조에서 NO_3^- -N 농도는 낮게 그리고 제거 효율은 높게 나타난 결과는 *P. stratiotes*와 *E. crassipes*의 성장력 차이에 의한 것으로 사료되었다.

수생식물 이식 생체량에 따른 PO_4^{3-} -P 제거

두 종류 수초의 이식 생체량의 변화에 따른 PO_4^{3-} -P의 농도 변화 및 제거 효율을 Table 5에 나타내었다. 두 수초의 생체량이 각각 4 kg인 경우, *E. crassipes* 실험구의 PO_4^{3-} -P 농도와 제거 효율은 각각 0.52~0.69 mg/L와 16.3~31.3%의 범위를 보였고 *P. stratiotes* 실험구는 각각 0.48~0.61 mg/L와 21.1~38.5%의 범위였다. 생체량이 6 kg인 경우, *E. crassipes* 실험구의 PO_4^{3-} -P의 농도와 제거 효율은 각각 0.37~0.74 mg/L와 14.40~32.80%의 범위를 보였고 *P. stratiotes* 실험구는 각각 0.35~0.72 mg/L

Table 5. Effect of initial plant biomass on $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal efficiency in recirculating aquaculture tanks after 22 days residence of *E. crassipes* and *P. stratiotes*.

Weight (kg)	Day	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)			Removal Efficiency (%)	
			<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	Control	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>
4	1	0.71±0.01	0.57±0.00	0.54±0.00	0.69±0.00	16.9±0.0	21.1±0.0
	4	0.69±0.00	0.52±0.00	0.50±0.00	0.67±0.00	21.7±0.0	24.6±0.0
	7	0.71±0.01	0.54±0.01	0.51±0.01	0.69±0.01	21.1±1.4	25.4±1.5
	10	1.09±0.02	0.69±0.01	0.61±0.01	1.03±0.01	31.2±0.9	38.5±0.9
	13	0.99±0.02	0.63±0.01	0.59±0.01	0.94±0.01	31.3±1.0	35.4±1.0
	16	0.84±0.01	0.62±0.01	0.58±0.01	0.79±0.01	20.2±1.1	25.0±1.2
	19	0.80±0.00	0.6 ±0.01	0.56±0.01	0.73±0.01	16.3±1.3	21.3±1.3
	22	0.76±0.01	0.54±0.01	0.48±0.01	0.68±0.01	18.4±1.3	26.3±1.3
6	1	0.82±0.00	0.65±0.00	0.64±0.01	0.80±0.00	18.3±0.0	19.5±1.2
	4	0.78±0.01	0.60±0.01	0.58±0.01	0.76±0.00	20.5±1.3	23.1±1.3
	7	0.75±0.00	0.57±0.00	0.53±0.00	0.73±0.00	21.3±0.0	26.7±1.3
	10	0.80±0.01	0.6 ±0.01	0.54±0.01	0.77±0.01	21.3±1.3	28.8±1.3
	13	0.61±0.02	0.37±0.01	0.35±0.01	0.57±0.01	32.8±1.6	36.1±1.6
	16	0.81±0.01	0.56±0.01	0.53±0.01	0.75±0.01	23.5±1.2	27.2±1.2
	19	0.84±0.01	0.63±0.01	0.59±0.01	0.76±0.00	15.5±1.2	20.2±1.2
	22	0.97±0.02	0.74±0.01	0.72±0.01	0.88±0.00	14.4±1.0	16.5±1.0

와 16.50~36.10%의 범위로써 생체량 4 kg와 6 kg 모두 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거 효율과 유사하게 나타났다.

이식 생체량에 관계없이 두 종류 수초에 의한 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 제거는 실험기간이 경과함에 따라 제거 효율이 감소하는 경향을 보였다. 이것은 앞서 TAN과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 결과에서도 나타난 바와 같이 두 수초의 생장에 의한 공간 부족 현상으로 생각되어지며, 이와 같이 현상은 식물이 번식, 성장을 하는 중에 생체량이 동일 면적 내에서 포화가 되면 증식 속도가 늦어지면서 영양염류 흡수능력이 떨어지게 된다고 한 Hwang and Kong (1999)의 보고와 일치하였다.

이식 생체량 4 kg 실험구에서 실험시작 후 10일째와 13일째에 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도가 갑자기 증가한 것은 부경대학교 순환여과식 양식장 내 순환수를 유입수로 이용하였기 때문에 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도가 평소보다 높아졌고 이에 따라 제거 효율도 약 10% 이상 증가하는 현상이 나타났다. Lee (1993)에 의하면 *E. crassipes*을 이용한 실험에서 유입되는 인의 농도가 1.1 mg/L 및 2.3 mg/L 일 때 HRT 2.4일에서 각각 15% 및 55%의 제거 효율의 차이를 나타내었다고 한다. 그리고 Bolier et al. (1992)는 식물이나 조류는 식물체가 필요로 하는 인량의 5~50배 정도의 잉여분을

흡수하여 체내에 축적한다고 보고하고 있어, 높은 농도에서 식물이 더 많은 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 를 흡수한 것으로 보인다.

*E. crassipes*와 *P. stratiotes*에 의한 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 제거효율 역시 TAN과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 결과에서도 나타난 바와 같이 *P. stratiotes*에 의한 제거 효율이 높게 나타나 *P. stratiotes*가 생장력 및 정화 효율이 높은 것으로 사료되었다.

수생식물 이식 생체량 증가에 따른 식물체내 질소, 인 흡수 수생식물 4종의 일반 성분 분석

수생식물이 수중의 영양염을 흡수하여 성장함에 따라 체내에 축적되는 영양염류의 양을 분석하기 위해 충분히 성장한 4종의 수생식물을 각각 1.5 kg씩 수확하여, 동결건조 한 후 무게를 측정하고 일반성분을 분석한 결과를 Table 6에 나타내었다.

조단백질 함량은 *P. stratiotes*가 가장 높아 24.18%이었으며 그 다음이 *E. crassipes*으로 18.1%를 나타내었고 가장 낮은 것은 *H. angustifolia*로 12.71%이었다. Reed et al. (1988)에 의하면 가정 하수 처리 장치에서 성장한 부레옥잠의 건물중량 중 조단백질 함량이 18.1%로 보고하여 본 실험의 분석 값과 일치하였다. 조지방 함량은 *E. crassipes*와 *P. stratiotes* 그리고 *H.*

Table 6. Composition of proximate analysis of aquatic plants tested for estimation of nutrient removal efficiency from recirculating aquaculture system (% dry matter basis)

Species	Moisture (%)	Crude Fat (%)	Crude Ash (%)	Crude Protein (%)	N (%)	P (%)
<i>E. crassipes</i>	92.8	4.75	15.48	18.10	2.89	0.27
<i>P. stratiotes</i>	90.6	4.61	22.44	24.18	3.87	0.36
<i>H. angustifolia</i>	80.8	2.62	15.40	12.71	2.03	0.20
<i>H. leucocephala</i>	89.9	4.85	22.86	17.99	2.88	0.26

Table 7. Nitrogen and phosphorous contents of selected aquatic plants grown with different initial biomass for 22 days with 24-hour hydraulic residential time

Item	<i>E. crassipes</i>		<i>P. stratiotes</i>	
	4,000	6,000	4,000	6,000
Transplanted weight (g)				
Harvested weight (g)	13,772±132	14,401±163	14,807±77	15,439±67
Produced biomass (g)	9,768±138	8,393±168	10,803±84	9,433±75
Dry matter (g)	703±10	604±12.1	1,015±7.9	887±7.1
Removed N (g)*	20.3±0.3c	17.5±0.4d	39.3±0.3a	34.3±0.3b
Removed P (g)*	1.9±0.03c	1.6±0.02d	3.7±0.02a	3.2±0.05b

* Values within the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$)

*leucocephala*의 경우 4.61~4.85%로 범위로 유사하였으나 *H. angustifolia*는 가장 낮은 2.62%로 나타났다. 조희분은 *P. stratiotes*와 *H. leucocephala*가 높아 22% 이상이었고 *E. crassipes*과 *H. angustifolia*가 약 15% 정도로 나타났다. 수분함량은 *E. crassipes*이 가장 높아 92.8%이고 가장 낮은 것은 *H. angustifolia*로 80.8%이었다. 인의 함량은 *P. stratiotes*가 가장 높은 0.36%이었고 *E. crassipes*, *H. leucocephala* 그리고 *H. angustifolia*의 순서로 각각 0.27%, 0.26% 및 0.20%이었다. Reed et al. (1988)이 보고한 부레옥잠의 0.6% 인의 함량과는 다소 차이를 보였지만 *E. crassipes*이 성장한 환경 등의 차이에 의한 결과로 추정된다. Hwang and Kong (1999)도 *E. crassipes*이 재배되는 환경이나 장소 그리고 영양염류의 양에 따라 식물체내 질소나 인의 함량이 달라진다고 보고한 바 있다. 즉 본 실험이 이루어진 부경대학교 순환여과식 양식장 순환수내 용존 인은 1 mg/L 이하이지만, Reed et al. (1988)은 생활 하수내 인이 18 mg/L 로 양식장 순환수내 용존 인보다 상당히 높았기 때문에 *E. crassipes* 내 인의 함량에 차이가 난 것으로 판단된다. 이들 수초의 일반성분 분석 결과 *P. stratiotes*가 다른 식물들에 비해 조단백질과 인의 함량이 높아 이 식물이 수중의 무기 영양염류를 제거하는데 가장 적절할 것으로 사료된다.

*E. crassipes*와 *P. stratiotes* 두 수초의 22일간의 성장 실험 후 증가한 생체량에 의한 질소 및 인 제거량을 Table 7에 나타내었다. *E. crassipes*의 생체량을 각각 4 kg과 6 kg 이식했을 경우, 22일 후에 이들의 생체량은 각각 13.772 kg과 14.401 kg으로 증가하였고, *P. stratiotes*의 경우, 각각 14.807 kg과 15.439 kg으로 증가하였다. 생체량의 증가는 두 수초 모두 각각 4 kg을 이식한 실험구가 6 kg을 이식한 실험구 보다 높은 증가량을 보여 순 증가량은 4 kg의 생체량을 이식한 구에서 *E. crassipes*은 9.768 kg, *P. stratiotes*는 10.803 kg인 반면, 6 kg 생체량을 이식한 구에서는 각각 8.393 kg과 9.433 kg으로 나타났다. 이 결과로 보아 초기 이식 생체량 차이에 따른 순 생체량 증가는 수초가 성장하면서 6 kg을 이식한 수초의 공간이 부족하게 되어 생장률이 둔화된 현상에 의한 것으로 판단된다. 그리고 초기 생체량에 관계없이 *P. stratiotes*가 *E. crassipes*보다 더 많은 성장을 하였으며 이것은 *P. stratiotes*가 *E. crassipes*에 비해 성장이

더 빠르다는 Lee (1993)의 보고와 일치하였다.

생체량 증가에 따른 질소 및 인 제거량은 초기 이식량 4 kg인 경우, *E. crassipes*에서 각각 20.3 g과 1.9 g, *P. stratiotes*에서 각각 39.3 g과 3.7 g으로 나타났고, 초기 이식량 6 kg인 경우, *E. crassipes*에서 각각 17.5 g과 1.6 g, *P. stratiotes*에서 각각 34.3 g과 3.2 g으로 *P. stratiotes*의 질소 및 인 제거량이 유의적으로 높은 것으로 나타났다($P<0.05$). 이 때 *E. crassipes*의 평균 일간 질소 및 인 제거량은 각각 1.7 g/day과 0.16 g/day였고, *P. stratiotes*는 평균 3.4 g/day과 0.31 g/day였다. 만약 두 수초에 대한 공간 부족 현상이 없었다면 생체량은 더 증가하여 더 많은 양의 질소를 제거할 수 있었을 것으로 생각되며, 또한 양어장 사육수가 아닌 고농도의 폐수의 경우에도 제거량이 증가할 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

고밀도로 어류를 양식하는 순환여과식 양식시스템에서는 질소 대사산물인 암모니아를 줄이기 위하여 생물학적인 여과방법을 사용하며 이 과정에서 질산염이 축적되므로 이와 같은 무기질소 화합물을 제거하기 위한 여러 가지 방법 중 우리나라에서는 수초를 이용하여 흡수하는 경우가 많고 *E. crassipes*, *H. leucocephala*, *H. angustifolia*, 및 *P. stratiotes* 등이 일반적으로 재배되고 있다. 그러나 이들 수초의 무기 영양염류 제거 효율에 대한 정보가 없어, 최적의 효율을 보이는 종을 찾기 위해 본 실험을 실시하였다.

무기질소 화합물의 제거 효율이 가장 높은 종을 찾기 위하여 유리수조에 일정양의 수초를 이식하고 48시간 동안 무기질소 화합물(TAN, NO₂-N, NO₃-N) 농도 변화를 조사한 결과, *E. crassipes*의 경우 TAN 농도는 2.3 mg/L에서 0.6 mg/L, NO₂-N은 0.197 mg/L에서 0.029 mg/L, NO₃-N은 21.4 mg/L에서 17.9 mg/L로 농도가 낮아졌으며, *P. stratiotes*의 경우 TAN 농도는 2.3 mg/L에서 0.4 mg/L, NO₂-N은 0.197 mg/L에서 0.024 mg/L, NO₃-N은 21.4 mg/L에서 17.4 mg/L로 농도가 낮아졌다. *H. angustifolia*의 경우 TAN 농도는 2.3 mg/L에서 1.6 mg/L, NO₂-N은 0.197 mg/L에서 0.150 mg/L, NO₃-N은

21.4 mg/L에서 20.1 mg/L로 농도 변화를 보여 *P. stratiotes*의 제거 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그러나 줄기의 부패 현상에 의해 *H. leucocephala*의 경우 TAN 농도는 2.3 mg/L에서 3.7 mg/L, NO_2^- -N는 0.197 mg/L에서 5.7 mg/L, NO_3^- -N는 21.4 mg/L에서 48.2 mg/L로 농도가 증가하는 결과를 보였다.

효율이 좋은 두 수초, *E. crassipes*와 *P. stratiotes* 두 종류를 표면적 1.55 m²인 수조에 이식 생체량을 각각 4 kg과 6 kg 수용한 뒤 22일 동안의 농도 변화, 생장률 및 증식한 수초에 의한 질소와 인 제거량을 조사한 결과 이식 생체량에 관계없이 *E. crassipes*에 비해 *P. stratiotes*의 제거 효율이 좋은 것으로 나타났다. 생체량 변화에서도 이식량이 적었던 4 kg 실험구가 6 kg의 실험구보다 생체량의 순 증가가 더 많았으며, 4 kg 구에서 *P. stratiotes*와 *E. crassipes*가 각각 10.803 kg과 9.768 kg이었으며, 6 kg 구에서는 각각 9.433 kg과 8.393 kg으로 증가하였다. 그리고 4 kg 및 6 kg 실험구 모두에서 *P. stratiotes*가 *E. crassipes*보다 생체량 증가가 더 많았다.

*P. stratiotes*와 *E. crassipes*의 식물체 내 포함된 질소와 인의 양은 *P. stratiotes*에서 각각 3.87%와 0.36%였고, *E. crassipes*에서는 각각 2.89%와 0.27%로 분석되었다. 따라서 면적 1.55 m²의 실험구에서 22일간 제거된 평균 질소와 인의 양은 *P. stratiotes*에서 각각 36.8 g과 3.5 g이었고, *E. crassipes*는 각각 18.9 g과 1.75 g이었다.

사 사

본 연구는 부경대학교 발전기금재단 학술연구비 지원에 의해 수행되었으므로 이에 감사드립니다. 그리고 실험 기간 중 도움을 아끼지 않은 부경대학교 양어장 박정환, 김수광, 이두진, 손지형 및 팽뢰 학우들에게도 감사드리는 바입니다.

참고문헌

- AOAC, 1995. Official Method of Analysis. 19th ed. Association of Official Analytical Chemists International. Arlington, Virginia, USA.
- APHA, AWWA and WEF, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., EPS Group, pp. (4): 122-124.
- Bolier, G., M. C. J. de Koningh, J. C. Schmale, and M. Donze, 1992. Differential luxury phosphate response of planktonic algae to phosphorus removal. *Hydrobiologia*, **243/244**: 113-118.
- Hrubec, T. C., S. A. Smith and J. L. Robertson, 1996. Nitrate Toxicity: A Potential Problem of Recirculating System. pp. 41-48. (in) Proceedings from the Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture Conference. July 19-21, 1996. Roanoke, Virginia.
- Hwang, S. J., and D. S. Kong, 1999. Biological factors affecting the wetland function of phosphorus sink. *J. Limnology*, **32**(2): 79-91. (in Korean).
- Lee, N. H., 1993. A Swine Waste Water Treatment by Using Water Hyacinth System. MS Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea. 94 pp. (in Korean).
- Polprasert, C. 1989. Aquatic Weeds and Their Utilization (in) Organic Waste Recycling. John Wiley & Sons Inc., New York. 357 pp.
- Reed, S. C., E. J. Middlebrooks and R. W. Crites, 1988. Natural Systems for Waste Management and Treatment. New York, McGraw-Hill. New York. 308 pp.
- Reddy, K. R., 1983. Fate of nitrogen and phosphorus in a wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes. *J. Environmental Quality*, **12**: 137-141.
- Roger, H. H. and D. E. Davis, 1972. Nutrient removal by water hyacinth. *Weeds Science*, **20**(5): 423-428.
- Stowell, R., R. Ludwig, J. Colt, and G. Tchobanoglous, 1980. Towards the rational design of aquatic treatment systems. Paper presented at the ASCE Convention, 14-18 April, Portland, Oregon. Department of Civil Engineering, University of California, Davis, California.
- van Rijn, J., 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture. - A review. *Aquaculture*, **139**: 181-201.
- Weber, A. S and G. Tchobanoglous, 1984. Nitrification in water hyacinth treatment system. *J. Environmental Engineering Division, ASCE*. **111**(5): 699-713.
- Wolverton, B. C. and R. C. McDonald, 1978. Nutritional composition of water hyacinth grown on domestic sewage. *Economic Botany*. **32**(4): 363-370.
- Wolverton, B. C. and R. C. McDonald, 1979. Upgrading facultative waste water lagoons with vascular aquatic plants. *J. Water Pollut. Control Fed.* **51**(2): 305-313.

원고접수 : 2003년 6월 23일

수정본 수리 : 2003년 7월 16일

책임편집위원 : 이정열