

실험실 조건에서 붕어마름의 수질개선 효과 분석 - 영양염류 제거 효율을 중심으로 Analysis of Water Quality Improvement of *Ceratophyllum demersum* under Laboratory Condition - by Nutrients Removal Efficiency

안창혁 · 주진철 · 주원정* · 안호상 · 이새로미 · 오주현 · 송호면[†]
Chang Hyuk Ahn · Jin Chul Joo · Won Jung Joo* · Hosang Ahn
Saeromi Lee · Ju Hyun Oh · Ho Myeon Song[†]

한국건설기술연구원 환경연구실 · *서울대학교 건설환경공학부
Construction Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology
*Department of Civil & Environmental Engineering Seoul National University

(2012년 11월 21일 접수, 2013년 4월 26일 채택)

Abstract : To evaluate the ability of the submerged plant, *Ceratophyllum demersum*'s (*C. demersum*) to remove nutrients and to inhibit growth of cyanobacteria, a total of 6 mesocosms were conducted in a batch reactor for 9 days. From the 84 hr of the experiment, *C. demersum* was stabilized and showed daily cycle trends according to changes in pH and DO levels. The concentration of nutrients, NH_3^+ , NO_3^- and PO_4^3 continuously decreased until 9 days of the experiment, with the rapid decrease in nutrient concentration for the first 24 hours. High correlation coefficient ($r^2 \geq 0.96$, $p < 0.001$) between the amount of *C. demersum*'s biomass per unit area and the nutrients removal level were derived, and greater *C. demersum*'s biomass per unit area showed higher removal efficiency of nutrients. However, there were differences in the *C. demersum*'s activity level between batch reactors with higher and similar density of the *C. demersum*, but nonetheless water purification effect appears to have a significant influence due to attached algae and microorganisms. The growth rate of harmful cyanobacteria, *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*) with *C. demersum*'s density of 2,500 g fw/m² (100% of cover degree) was 0.31 /day, compared to the growth rate of 0.47 /day for the control group (0% of cover degree). In terms of number of cells, the control group had 1.7 times higher number of cells than the experimental group, proving that *C. demersum* has the ability to inhibit the growth of harmful cyanobacteria.

Key Words : Submerged Plant, *Ceratophyllum Demersum*, Nutrients Removal, *Microcystis Aeruginosa*, Water Quality Improvement

요약 : 침수식물인 *Ceratophyllum demersum* (*C. demersum*)의 영양염류 제거 효율과 남조류 성장 억제 능력을 평가하기 위해 총 6개의 반응조에서 9일간 회분식 실험을 실시하였다. 실험이 시작되고 약 84 hr 후 *C. demersum*는 pH, DO에 대한 안정적인 일주기 경향을 보였다. 영양염류인 NH_3^+ , NO_3^- , PO_4^3 를 대상으로 저감률을 검토한 결과 실험초기부터 9일간 지속적인 감소를 보였고 특히 24 hr 이내에서 빠른 감소를 나타내었다. *C. demersum*의 단위면적당 생체량과 영양염류 제거율 사이에 높은 상관관계($r^2 \geq 0.96$, $p < 0.001$)가 도출되었으며, 피복도가 높을수록 오염물 저감 효율이 큰 것으로 나타났다. 하지만 높은 밀도의 반응조에서는 *C. demersum*의 활성화 차이가 있었으며, 그럼에도 불구하고 수질정화 효과가 나타난 것은 침수식물에 존재하는 부착조류나 미생물의 영향이 큰 것으로 여겨진다. *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*)는 *C. demersum*의 생장밀도 2,500 g fw/m² (피복도 100%) 조건에서 성장률 0.31 /day를 보였으나 대조구는 0.47 /day을 나타내었다. 세포수 비교에서는 실험구보다 대조구가 약 1.7배 높게 나타나 *C. demersum*의 남조류 성장 억제 능력을 시사하였다.

주제어 : 침수식물, *Ceratophyllum demersum*, 영양염류 저감, *Microcystis aeruginosa*, 수질정화

1. 서론

침수식물(submerged plant)은 식물체가 수중에 잠긴 상태로 서식하는 특성을 가지며 식물체 전체로 광합성을 하고, 수중 무기물을 직접 흡수하며, 수체에 산소를 공급하여 미생물 분해 효율을 증가시키는 등 수질정화에 다양한 순기능을 가진다.^{1,2)} 이러한 특징들로 인해 침수식물이 우점한 수체의 경우 광합성과 호흡이 활발하고 이로 인해 pH, DO 변화가 나타나 각종 영양염류의 효율적인 제거가 이루어진다.³⁻⁵⁾ 이러한 기작은 유평층(euphotic layer) 범위인 얇은 저수지나 호수 등에서 더 활발하며 때로는 부착조류(attached algae)의 서식장소를 제공하여 보다 효과적인 수질정화가 가능하다.^{2,6,7)}

영양염류는 수중에서 질소(N), 인(P), 규소(Si) 등의 염류를 총칭한다. 영양염류의 증가는 식물의 생체량(biomass) 변화와 관련이 있으며, 특히 담수생태계에서는 영양염류 농도 구배에 따라 조류(algae)의 종조성 및 현존량이 크게 달라진다고 보고되고 있다.⁸⁾ 따라서 영양염류가 풍부한 수체의 경우 지속적으로 조류가 대발생(bloom)하여 수질이 악화될 가능성이 많다. 침수식물은 수중에서 직접 영양염류를 흡수하여 성장하기에, 이를 활용한 수질정화는 다양한 수환경에 적용 가능한 대표적인 방법으로 인식되고 있으며 관련 연구가 활발히 진행 중이다.⁹⁻¹¹⁾

국내·외에 적용된 수질정화용 습지의 경우 주로 갈대(*Phragmites communis*), 부들(*Typha orientalis*), 연(*Nelumbo nu-*

[†] Corresponding author E-mail: hmsong@kict.re.kr Tel: 031-910-0293 Fax: 031-910-0291

cfiera) 등의 정수식물(emerged plant)이 주로 활용되고 있다.^{3,11)} 반면에 침수식물은 관련 연구의 부족, 적응성 및 유지관리의 어려움 등의 이유로 현장적용 사례가 상대적으로 적다. 하지만 높은 처리효율, 수체 공간의 활용성 이외에도 생물 서식처 확보와 같은 장점이 많으므로 이와 관련한 추가 연구가 필요하다.

침수식물의 수질정화 기작은 영양염류의 직접 흡수, 영양염류 경쟁관계에 의한 간접적인 효과, 타감작용(allelopathy)에 의한 효과 등으로 크게 구분된다. 타감작용의 경우 polyphenols와 같은 화학물질을 배출하여 조류 성장을 저해한다고 알려져 있으며 *Ceratophyllum demersum* (*C. demersum*), *Myriophyllum spicatum* (*M. spicatum*) 등을 대상으로 연구가 수행된 바 있다.¹²⁾

본 연구는 침수식물의 주요 특징 중 하나인 영양염류 제거 효율을 파악하기 위해 이루어졌으며 향후 자연습지의 복원 또는 인공습지 설계 등의 연구에 기초 자료로 활용하기 위해 검토되었다. 본 연구에서는 우리나라에 서식하는 대표적인 침수식물 중 하나인 *C. demersum*을 대상으로 수질정화 측면에서 검토하였으며, 특히 *C. demersum*의 서식밀도에 따른 영양염류 제거율을 분석하였다. 또한, 추가적으로 침수식물의 남조류 성장 억제 효과에 대한 가능성을 파악하기 위해 유해 남조류로 알려진 *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*)를 실험군으로 사용하여 결과를 도출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치 설치

본 연구를 수행하기 위해 실험용 반응조(mesocosm)를 제작하였다. 반응조는 가로 40 cm, 세로 20 cm, 높이 35 cm로 총 6개 제작하였으며 재질은 투명아크릴을 활용하였다. 반응조는 W1~W6으로 구분되며, W1~W4는 침수식물인 *C. demersum*의 서식 밀도에 따른 수질 정화 효율을 평가하기 위하여, W5, W6은 침수식물의 조류 성장 억제 능력을 평가하기 위해 각각 준비하였다(Table 1).

550°C에서 1시간 건조된 모래(지름 2 mm)를 반응조에 5

Table 1. Experimental condition of this study

Description		Experimental condition
	W1	Blank
Nutrient removal	W2	<i>Ceratophyllum demersum</i> (850 g/m ² , covering 10%) + sand (5 cm)
	W3	<i>Ceratophyllum demersum</i> (1,850 g/m ² , covering 50%) + sand (5 cm)
	W4	<i>Ceratophyllum demersum</i> (2,500 g/m ² , covering 100%) + sand (5 cm)
	Algal removal	W5
W6		W4 + <i>Microcystis aeruginosa</i> (1,500 cells/mL)
Medium	W1~W6	Natural water + Polluted water ((NH ₄) ₂ SO ₄ , KH ₂ PO ₄)

cm 도입하고 길이 약 30 cm의 종묘생산된 *C. demersum* 20 g, 100 g, 200 g을 증류수에 수차례 행구어 낸 후 W1~W4에 식재하여 습식증량으로 각각 blank, 850 g fw/m², 1,850 g fw/m², 2,500 g fw/m²이 되도록 하였다. 이때 피복도는 각각 0%, 10%, 50%, 100%이었다. W5, W6은 *C. demersum*이 각각 blank, 2,500 g fw/m² 식재된 공간에 유해 남조류로 알려진 *M. aeruginosa* 단일종을 투입하였으며, 남조류의 채집은 낙동강 하류(제2 왜관교)에서 대발생한 균체를 현장에서 채집하여 계대배양 후 활용하였다. 집종은 남조류를 P-saturation 시킨 후 반응조 내 샘플링 지점에서 초기 농도가 1,500 cells/mL이 되게끔 실시하였다.¹³⁻¹⁶⁾

실험에 활용한 배양수는 여과된(망목 60 μm) 자연수 19.5 L에 제조된 오염수 0.5 L를 투입하여 총 20 L가 되도록 제조한 후 시간에 따른 농도변화를 조사하였다. 자연수는 한국건설기술연구원 커뮤니티 생태연못 용수를 활용하였으며, 오염수는 (NH₄)₂SO₄, KH₂PO₄를 이용하여 NH₃⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻ 초기 농도가 약 5.0 mg N/L, 5.0 mg N/L, 4.5 mg P/L가 되도록 조절하였다.³⁾

배양은 일정한 온도(25°C) 및 조도(100 μmol/m²/s) 하에 14 (light) : 10 (dark)의 광주기로 조절된 미생물 배양기(LMI. 2004A)를 활용하여 동일한 조건에서 동시에 수행되었다.¹⁷⁾

2.2. 수질분석 및 모니터링

수질분석을 위해 반응조에 설치된 밸브(하단에서 10 cm 지점)를 통해 매일 12시간 간격으로 시료를 샘플링하였다. pH, DO 변화는 pH meter (LAB-215), DO meter (YSI-5100)를 활용하여 측정하였다. *C. demersum*에 의한 영양염류 제거능력을 확인하기 위해 NH₃⁺는 Nessler Method으로 DR 5000을 사용하여 분석하였고, NO₃⁻와 PO₄³⁻는 IC (ICS-3000)를 이용하여 측정하였으며, 수중 용존 유기물 농도를 가늠하기 위해 membrane filter (0.45 μm)에 의해 여과된 시료를 분광광도계(GENESUS 10 VIS)로 UV₂₅₄ 파장에서 흡광도를 측정하였다. 선행연구 결과, *C. demersum*은 약 9일 이내에 대부분의 영양염류의 제거가 이루어졌기에, 이를 참고하여 실험을 진행한 후 결과를 도출하였다.^{18,19)}

W5, W6의 경우 남조류 *M. aeruginosa*의 성장 정도를 파악하기 위해 micropipette을 활용하여 상층 1 cm 지점의 시료를 10 mL를 채수한 후, 포르말린 용액으로 고정하여 S-R 격자슬라이드에서 광학현미경(Zeiss Axioplan)으로 검경하였다. 동정은 관련 문헌을 참고하였으며 *M. aeruginosa* 균체 크기 및 세포수를 고려하여 ×100~×1,000의 배율 하에 구별하였다.^{13,20-22)}

3. 실험결과

3.1. pH, DO

조사된 pH는 6.9~9.0의 범위로 약산성~약알칼리의 범위를 나타내었다(Fig. 1(a)). 모든 반응조에서 9일 동안 pH가 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었으며 특히 *C. demersum*

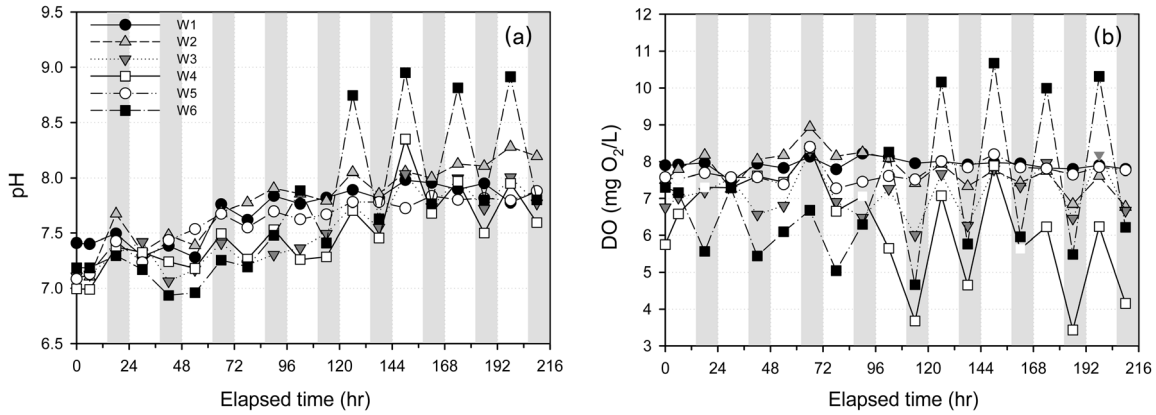


Fig. 1. Fluctuations of pH (a) and DO (b) concentration in different mesocosms (white area: light condition, grey area: dark condition).

의 서식밀도가 클수록 최대값이 높았다. pH 일주기는 초기부터 84 hr까지 뚜렷한 경향 없이 복잡한 양상을 보이다가 84 hr 이후부터 일정한 패턴을 보였다. 주로 광조건에서 높고 암조건에서 낮았으며 *C. demersum* 피복도 증가에 따라 변화폭이 크게 나타났다. 84 hr 후부터 대조구인 W1, W5의 pH는 각각 7.9 ± 0.1 , 7.8 ± 0.1 였으나 *C. demersum* 밀도가 가장 높은 W4, W6은 각각 7.8 ± 0.3 , 8.3 ± 0.6 을 나타내어 침수 식물 밀도가 증가할수록 큰 pH 변화폭을 나타내었다.

DO는 3.4-10.7 mg O₂/L의 범위를 나타내었으며 대조군마다 큰 차이를 보였다(Fig. 1(b)). DO도 pH와 마찬가지로 84 hr 이후부터 일주기 경향을 나타냈으며 그 이전에는 일정한

지 않았다. 5일 이후의 DO 농도 편차는 대조구 W1, W5에서 각각 0.1 mg O₂/L, 0.2 mg O₂/L로 큰 변화가 없었으나, *C. demersum*의 피복도가 클수록 높아져 W2 0.4 mg O₂/L, W3 0.7 mg O₂/L, W4 1.5 mg O₂/L, W6 2.4 mg O₂/L를 보였다. 하지만 W4 실험구의 경우 DO 평균 농도(5.7 mg O₂/L)가 대조구(7.9 mg O₂/L)에 비해 낮았는데 이는 실험 조건에 대한 적응력이 떨어진 결과로 사료된다.

pH와 DO 농도는 광주기에 따라 변화하였으며, 이는 침수 식물이 광합성을 통해 수중 pH, DO 변화에 영향을 준 것으로 여겨진다.³⁾ 본 연구에서는 *C. demersum*의 피복도가 높을 때 pH, DO의 변화 폭이 큰 경향을 보였다.

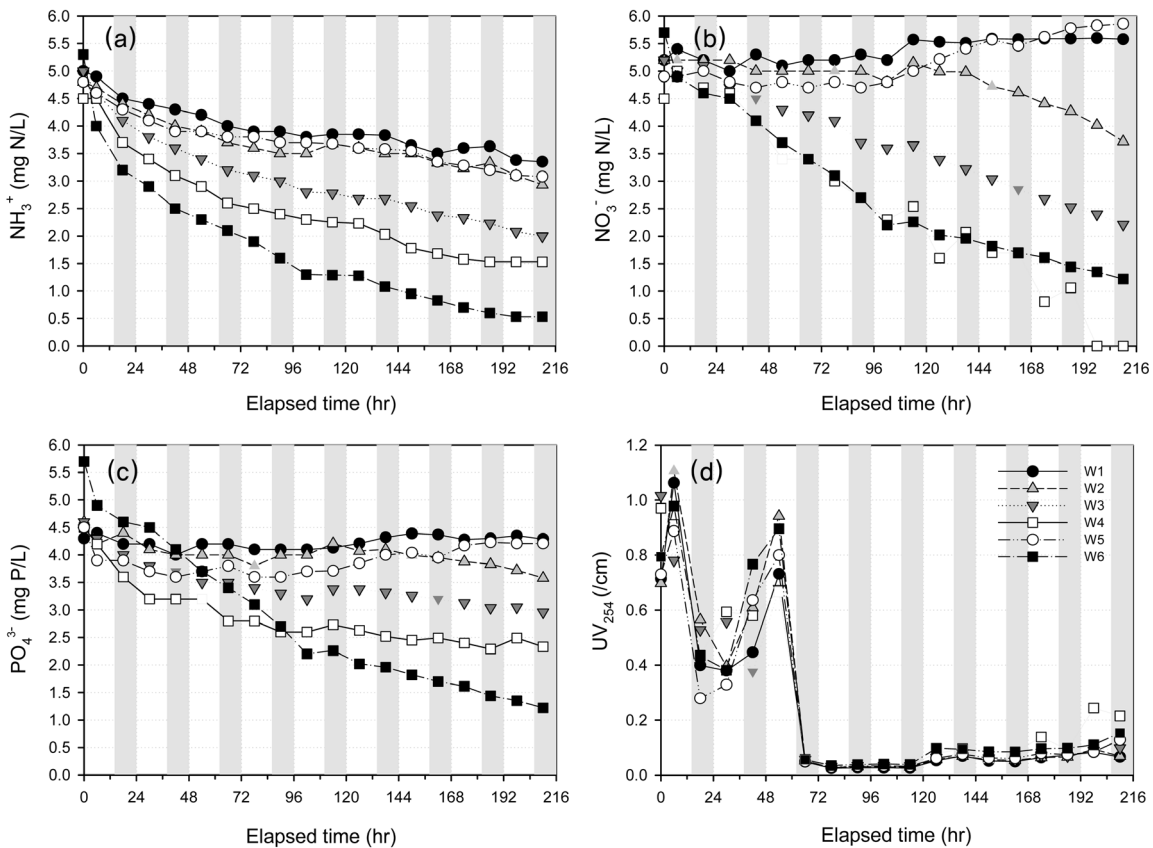


Fig. 2. Nutrients and UV₂₅₄ removal results in different mesocosms.

3.2. 영양염류 농도 변화

침수식물에 의한 오염물질 제거능을 평가하기 위해 반응조 내에 영양염류(NH_3^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) 농도 변화를 모니터링하여 Fig. 2에 나타내었다.

NH_3^+ 은 모든 반응조에서 점차적으로 감소하는 경향을 보였으며 *C. demersum*의 피복도가 높을수록 크게 감소하였다 (Fig. 2(a)). 대조구인 W1는 초기농도 5.0 mg N/L에서 9일 후에 3.4 mg N/L를 나타내어 34.0%의 저감 효과를 나타내었다. 하지만 W6의 경우 9일 동안 5.3 mg N/L에서 0.5 mg N/L까지 감소하여 총 90.6% 저감효과를 보였다.

NO_3^- 도 NH_3^+ 와 같이 피복도가 높을수록 제거율이 높았다 (Fig. 2(b)). 하지만 대조구에서 NO_3^- 농도는 약간 증가(7.3~19.6%)하였는데, 이는 반응조 내의 NH_3^+ 감소에 따른 호기성 미생물에 의한 질산화(nitrification)에 의한 것으로 여겨진다. W2, W3의 경우 120 hr 이후에 상대적으로 NO_3^- 저감 속도가 빨라졌고 이 현상은 *C. demersum*이 충분히 착생되어 광합성 및 호흡이 활성화 된 이후에 나타났다.

PO_4^{3-} 는 대조구를 제외하고 모두 지속적으로 감소하였다 (Fig. 2(c)). *C. demersum*의 피복도가 높을수록 PO_4^{3-} 의 농도는 초기에(24 hr 이내) 크게 저감했으며, 그 이후에는 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 120 hr을 기준으로 영양염류 농도 감소 기울기를 비교한 결과, 주로 전반부에서 급격한 감소가 있었으며(W4: -0.36 → -0.01, W6: -0.69 → -0.24) 피복도가 높은 W4, W6에서 높게 나타났다($R^2 = 0.82\sim 0.97$, $p < 0.001$). 반면에 W2, W3의 전·후반부 감소기울기는 각각 -0.08 → -0.14, -0.25 → -0.12로 변화하여 상대적으로 그 영향이 미미했다. W5에서 72 hr 이후 나타난 PO_4^{3-} 농도 증가는 침수식물의 피복도가 낮은 조건에서 UV_{254} 농도 변화와 관련 있는 것으로 사료된다($R^2 = 0.73$, $p < 0.001$).

UV_{254} 는 NOM (Natural Organic Mater)을 가늠하기 위한 인자로서 COD 등과 같은 유기물 항목과 상관관계가 높다고 알려져 있으며,²³⁾ 본 실험에서는 유기물 농도 변화를 파악하기 위해 측정하였다. 실험결과 UV_{254} 는 두차례 크게 감소하였다(Fig. 2(d)). 대체적으로 광조건에서 값이 상승하고 암조건에서 하락하였는데 UV_{254} 값이 높은 후에(0.8 /cm 이

상) 나타나는 감소의 폭이 더욱 컸다. 유기물질의 제거율은 77.9~90.8%의 범위를 보였으며 주요 제거 기작은 자연수에 부유하거나 *C. demersum*에 부착하여 서식하는 미생물에 의한 분해로 사료된다.²³⁾

3.3. 영양염 및 남조류 제거 효율

Fig. 2에서 제시된 결과에 따라 *C. demersum*의 서식 밀도에 따른 영양염 저감률을 Table 2와 Fig. 3(a)에 제시하였다. 대조구의 조건을 제외한 순제거율(net-removal rate)을 비교한 결과 *C. demersum*의 식생 밀도가 높아질수록 영양염 제거율이 증가하였으며 모두 유의한 선형의 상관관계를 보였다($r^2 \geq 0.96$, $p < 0.001$). 침수식물 밀도가 가장 높은 W4 (2,500 g fw/m²)에서 NH_3^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} 의 최종 제거율은 각각 33.0%, 100.0%, 48.0%이었으며 *M. aeruginosa*가 포함된 W6에서는 NH_3^+ 54.2%, NO_3^- 98.2%, PO_4^{3-} 57.9%가 각각 제거되었다.

W5, W6에서 *C. demersum* 유무에 따른 유해 남조류인 *M. aeruginosa*에 대한 성장저해 결과를 나타내었다(Fig. 3(b)). 총 9일간 모니터링 한 결과, 최대성장점은 W5, W6에서 각각 120 hr, 144 hr 시점에 나타났다. 초기 세포수는 W5, W6 모두 1,500 cells/mL이었으며 최대값은 대조구인 W5에서 14,000 cells/mL, 실험구인 W6에서 9,000 cells/mL를 나타내었다. 전체 실험기간 동안 *C. demersum*가 밀생한 실험구에서 대조구에 비해 남조류가 억제되는 경향을 보였고 세포수 비교에서 최대 약 1.7배 차이를 보였다. Monod 모델에 따른 남조류 성장률(μ)로 각 반응조를 비교한 결과 W5는 0.47 /day인 반면 W6는 0.31 /day를 나타내어 *C. demersum*에 의한 남조류 성장 억제가 가능함을 파악하였다.

Table 2. Nutrients net-removal rate in different mesocosms during 9 days

Description	Removal factors	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Nutrients	NH_3^+ (%)	0,0	6,0	27,0	33,0	2,8	54,2
	NO_3^- (%)	0,0	35,8	64,8	100,0	-12,3	98,2
	PO_4^{3-} (%)	0,0	21,9	35,4	48,0	6,2	57,9

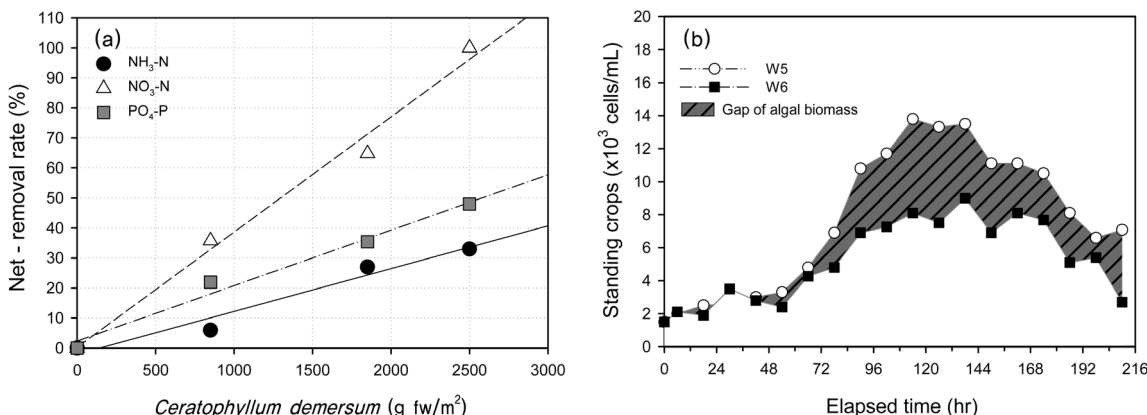


Fig. 3. Net-removal rate for various nutrients (data from (Fig. 2)) by different density of *C. demersum* (a), and gap of algal biomass results from W5 and W6 mesocosms (b).

4. Discussion

*C. demersum*과 같은 침수식물은 광합성을 통하여 수중과 저토에 산소를 공급함으로써 식물체에 부착하거나 토양에 서식하는 미생물의 유기물 분해 효율을 높여 수질정화에 도움을 준다고 알려져 있다.^{1,24)} 하지만 수체에 직접적인 순기능을 위해서는 침수식물이 착생하여 충분히 안정화 되어야 하며 본 연구에서는 DO 농도 변화를 고려했을 때 그 기간이 최소 84 hr(약 3.5일)로 측정되었다. 안정화 된 후에 명·암조건에 따라 *C. demersum*의 pH 및 DO 포화도가 변동했으며 특히 산소포화도는 42.4~130.1%의 다양한 구배를 보였다. 실제 침수식물이 밀집하여 서식하는 자연 및 인공습지의 수체에서는 때와 장소에 따라서 주기적인 호기성과 혐기성 조건이 반복된다. 이러한 조건에 따라 질산화(nitrification) 및 탈질(denitrification) 반응에 적합한 수환경이 제공되므로 지속적인 수질정화에 기여할 수 있음이 선행연구에서 보고된 바 있다.^{3,25)}

침수식물의 영양염류 제거와 관련된 기존 유사 사례들에서는 주로 24시간 이내에 빠른 제거율을 보이며 약 70% 내외의 제거효율을 나타내었다고 보고하였다.^{3,23)} 본 연구도 이와 유사한 결과를 얻었으며, 앞서 제시한 바와 같이 *C. demersum*이 2,500 g fw/m² (피복도 100%)의 조건에서 순제거율이 NH₃⁺ 33.0%, NO₃⁻ 100.0%, PO₄³⁻ 48.0%였고, 남조류가 접종된 반응조에서는 NH₃⁺ 54.2%, NO₃⁻ 98.2%, PO₄³⁻ 57.9%를 나타내어 다양한 영양염류를 대상으로 33.0~100.0% 범위의 효과를 보였다. 자연조건에서 침수식물이 장기간 조성되어 있는 경우 식물체에 의한 흡수뿐만 아니라 부착조류 성장을 위한 넓은 표면을 제공하여 수질정화를 더욱 촉진시킬 수도 있다.²⁾ 이러한 사례를 미루어 볼 때, 본 연구에서는 *C. demersum*의 존재 하에 상당량의 영양염류의 제거가 이루어졌으나, 실험 과정에서 식생에 대한 멸균이 완전히 이루어진 것은 아니므로 부착조류를 포함한 기타 미생물의 증식이 수질 정화에 관련되었을 수 있을 것으로 여겨진다.

본 실험에서는 *C. demersum*의 서식 밀도가 높을 때 영양염류 제거와 남조류 성장 억제효과가 있는 것으로 나타났지만, 이와 관련된 추가적인 고찰이 필요하다. 첫째, 남조류의 수직 분포이다. *M. aeruginosa*는 세포 내 gas vesicles를 활용한 부유 특성이 있어 광량이 풍부한 표층에 집중 분포하는 경향을 보인다.²⁶⁾ 육안 조사결과, *M. aeruginosa*가 W5, W6의 표층 약 10%지점 이내에 밀집하여 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, *M. aeruginosa*는 반응조 표층에 불균일하게 증식하였고, 반면에 침수식물은 그 아래층에 존재하여 서식 공간의 차이가 발생하였다. 또한, 본 실험에서 측정된 남조류 세포수는 일정수심(1 cm)에서 동일하게 계수되었으나 총 수체(20 L)를 고려하면 다소 낮은 수치를 보였다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때, W5에서 *M. aeruginosa*가 존재함에도 불구하고 수중의 N, P 농도가 크게 감소하지 않았던 것으로 사료된다.

동일한 중량의 *C. demersum*이 식재된 W4와 W6의 경우

에 상대적인 제거율 차이를 보였다. 두 반응조의 NH₃⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻제거율에 대해서 각각 21.2%, 1.8%, 9.9% 차이가 있었으며, 그 원인으로는 W6에서 *M. aeruginosa*를 동시에 배양하였기 때문에 기초 대사 및 영양염류 제거가 추가로 일어난 결과로 여겨진다. DO 포화도 범위의 차이를 비교했을 때, W4 (42.2~98.1%)는 W6 (61.7~130.1%)보다 평균 25.7% 낮은 포화도를 나타내었고, pH, DO, UV₂₅₄ 결과를 미루어 볼 때, W4는 W6보다 *C. demersum*의 활성화 정도가 낮았던 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 W4가 높은 수질 정화율을 보인 이유는 침수식물에 부착된 부착조류나 미생물의 영향을 우선적으로 고려해 볼 수 있을 것이다.

결과적으로 침수식물의 존재는 수중 영양염류 및 남조류 억제에 효과를 나타내지만, 적극적인 활용을 위해서는 침수식물의 착생 후 활성화를 위한 효율적인 관리가 필요하며 이와 관련된 심도 있는 추가 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

5. 결론

침수식물인 *C. demersum*의 영양염류 제거 효율과 남조류 성장 억제 능력을 평가하기 위해 총 6개의 반응조에서 회분식 실험을 실시하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 침수식물인 *C. demersum*를 식재하여 인공 조제된 오염수를 대상으로 수질 정화능력을 평가한 결과 최소 84 hr(약 3.5일) 이후부터 안정된 일주기 경향을 나타내었고 그에 따라 pH, DO가 규칙적인 증감을 나타내었다.

2) 영양염류인 NH₃⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻ 농도는 실험초기부터 9일 동안 지속적으로 감소하였으며 초기 24 hr 이내에서 대체적으로 빨리 저감되었다.

3) *C. demersum*의 밀도가 높을수록 영양염류 제거율은 일정한 상관관계를 보였으며, NH₃⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻의 최종 제거율은 W4에서 각각 33.0%, 100.0%, 48.0%이었으며 W6에서는 54.2%, 98.2%, 57.9%이었다.

4) *C. demersum*가 밀생한 실험구에서 남조류 성장 저해 현상이 관찰되었다. *M. aeruginosa* 성장률(μ)은 각각 W5 0.47 /day, W6 0.31 /day를 보였고 세포수는 최대 1.7배 차이를 보여 침수식물에 의한 남조류 억제 가능성이 시사했다.

사 사

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 “자연공생 하천습지(호소) 기술개발”의 연구지원과 국토해양부 건설기술혁신사업인 “자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술개발 연구단(GREEN RIVER) (12기술혁신C02)”의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- Kadlec, R. H. and Knight, R. L., "Treatment Wetlands," CRC Press/Lewis Publishers, BocaRaton, FL, p. 893(1996).
- Knight, R. L., Gu, B., Clarke, R. A. and Newman, J. M., "Long term phosphorus removal in Florida aquatic systems dominated by submerged aquatic vegetation," *Ecol. Eng.*, **20**, 45~63(2003).
- Yi, Y. M., Lee, S. M. and Sung, K., "Effect of submerged plants on water environment and nutrient reduction in a wetland," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **26**(1), 19~27(2010).
- Shin, H., Kim, Y., Cho, K. H. and Choi, H. K., "Relationship between the distribution of hydrophytes and water quality in asan city, Korea with special reference to submerged hydrophytes," *Kor. Soc. Limnol.*, **30**(4), 423~429(1997).
- Horn, A. and J. Goldman, C. R., "Limnology," 2nd edition, ISBN 0-07-113359-3(1994).
- Bal, K., Struyf, E., and Vereecken, H., "How do macrophyte distribution patterns affect hydraulic resistances?," *Ecol. Eng.*, **37**, 529~533(2011).
- Scheffer, M., Houser, S. H., Meijer, M. L., Jeppesen, E. and Moss, B., "Alternative equi-libria in shallow Lakes Trends," *Ecol. Evol.*, **8**, 275~279(1993).
- Van Donj, E. and Kilham, S. S., "Temperature effects on silicon and phosphorus-limited growth and competitive interactions among tree diatoms," *J. Phycol.*, **26**, 40~50(1990).
- Dai, Y., Jia, C., Liang, W., Hu, S. and Wu, Z., "Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage," *Ecol. Eng.*, **40**, 113~116(2012).
- Farve, M., Harriss, W., Dierberg, F. and Portier, K., "Association between phosphorus and suspended silids in Everglades treatment wetland dominated by submerged aquatic vegetation," *Wetl. Ecol. Manage.*, **12**, 365~375(2004).
- Kanabkaew, T. and Puetpaiboon, U., "Aquatic plants for domestic wastewater treatment: Lotus (*Nelumbo nucifera*) and Hydrilla (*Hydrilla verticillata*) systems," *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, **26**(5), 749~756(2004).
- Nakai, S., Inoue, Y., Hosomi, M. and Murakami, A., "Myriophyllum spicatum-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa*," *Water Res.*, **34**, 3026~3032(2000).
- Shin, J. K. and Cho, K. J., "Distribution and population dynamics of *Microcystis* (Cyanophyta) in the Nakdong River," *Algae*, **12**(4), 283~2903(1997).
- Shin, J. K. and Cho, K. J., "Water quality assessment by algal growth potential (AGP) in the Naktong River," *Kor. Soc. Limnol.*, **32**(4), 349~357(1999).
- APHA, AWWA, WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC(1992).
- Claesson, A. and A. Forsberg., "Algal assay procedure with one or five species," *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **21**, 21~30(1978).
- Seo, S. K., Joo, J. C., Song, H. M. and Oh, H. J., "Evaluation of feasibility for recreation water usage based on algal growth potential test for effluent from various wastewater reclamation and reuse plants," *J. Kor. Soc. Water Sci. Technol.*, **18**(2), 93~103(2010).
- Gaoa, J., Xionga, Z., Zhangb, J., Zhanga, W. and Mbaa, F. O., "Phosphorus removal from water of eutrophic Lake ong-hu by five submerged macrophytes," *Desalination*, **242**, 193~204(2009).
- Dierberga, F. E., DeBuska, T. A., Jacksona, S. D., Chimneyb, M. J. and Pietrob, K., "Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading," *Water Res.*, **36**, 1409~1422(2002).
- Shin, J. K. and Cho, K. J., "The impact on water quality from blue-green algae *Microcystis* of natural phytoplankton by algal assay," *J. Kor. Environ.*, **9**(3), 267~273(2000).
- Komárek, J., "A review of water-bloom forming *Microcystis* species, with regard to populations from Japan," *Algological Studies*, **64**, 115~127(1991).
- Watanabe, M., "Isolation, cultivation and classification of bloom-forming *Microcystis* in Japan," CRC Press, Boca Raton, London, 13~34(1996).
- Wu, Y., Hec, J., Hu, Z., Yanga, L. and Zhangd, N., "Removal of UV_{254nm} matter and nutrients from a photobioreactor-wetland system," *J. Hazard. Mater.*, **194**, 1~6(2011).
- Choi, M. J., Byeon, M. S., Park, H. K., Jeon, N. H., Yoon, S. H. and Kong, D. S., "The growth and nutrient removal efficiency of hydrophytes at an artificial vegetation island, Lake Paldang," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **23**(3), 348~355(2007).
- Lee, G. J. and Sung, K., "Evaluation of the nutrient uptakes of floating and submerged plants under experimental conditions," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **28**(1), 71~77(2012).
- Herdman, M., Castenholz, R. W., Iteman I. and Rippka, R., "Form-genus X. *Microcystis*. In Bergey's Manual of Systematic Bacteriology," 2nd edition, Vol. 1, New York: Springer-Verlag(2001).