

인공식물섬에 의한 조류(Algae) 및 영양염류의 제거

박선구* · 조인기 · 권오병 · 문정수¹ · 엄한용² · 황순진³

((주)아셈 호소생태연구소, ¹서울대학교 건설환경공학부,
²농촌공사 농어촌연구원, ³건국대학교 환경과학과)

Algae and Nutrient Removal by Vegetated Artificial Floating Island. Park, Sun-Koo*, In-Ki Cho, Oh-Byung Kwon, Jung-Soo Mun¹, Han-Yong Um² and Soon-Jin Hwang³ (Reserch of Limnology, ASSUM, Gyeonggi 427-070, Korea; ¹Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea; ²Rural Research Institute, Gyeonggi 426-908, Korea; ³Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

We investigated the effect on the removal of BOD, SS, TN and TP and algal growth inhibition of Vegetated Artificial Floating Island (VAFI), by examining microorganism activity and nutrient uptake in the batch test of various conditions: (1) Blank (Control group), (2) VAFI of 0.25 m², (3) AFI of 0.25 m² which has no vegetation, (4) buoyant plate of 0.25 m², (5) buoyant plate of 0.25 m² with linear media. The proportion of BOD removal in the VAFI, AFI, buoyant plate and buoyant plate with media were 82.7, 80.8, 45.2% and 59.6% respectively. TN removal in the VAFI, AFI and buoyant plate with media were 51.2, 31.7% and 25.1% respectively. TP removal in the VAFI, AFI, buoyant plate and buoyant plate with media were 23.3, 16.7, 10.0% and 13.3% respectively. Chlorophyll-*a* removal in the VAFI was 97.9%. The factors of chlorophyll-*a* removal in the VAFI accounted for the shading effect of 35.1%, microorganisms activity of 61%, and plant root of 1.8%.

Key words : artificial floating island, algae, nutrient, lake, water quality

서 론

조류(Algae)대발생은 수계에 영양염류가 유입되어 식물성플랑크톤이 비정상적 대량 증식함으로써 나타나며, 독성방출, 어폐류폐사 등 수생태계에 심각한 문제를 야기시킨다(경기개발연구원, 1998). 이러한 조류대발생과 영양염류 제거를 위한 공법으로 물리·화학적 방법이 사용되고 있지만 초기 투자비 및 운영비용이 많이 소요되고, 이들은 2차오염을 발생시키는 등의 문제점을 안고 있다(정 등, 1998; Tanner, 2001).

이에 따른 대안으로 운영비가 적고, 2차오염 없이 생태

계를 복원하는 생물학적인 방법이 다양하게 적용되고 있다(송 등, 2006). 최근, 이러한 생물학적 방법들 중 수생식물을 식재하여 호소수면에 부유시키는 인공식물섬이 적용되고 있는데, 인공식물섬은 수생식물이 수체에 부유하여 영양염류를 흡수 제거하고, 뿌리 및 식생기반재는 미생물 접촉여재로서의 기능을 수행하여 부착미생물에 의해 수중오염물이 흡착, 분해, 제거된다. 또한 햇빛을 차단하여 조류의 광합성을 억제하는 수질정화기작이 발생한다(권, 2007). 인공식물섬에 의한 수질관리방법은 수중의 생물상에 매우 긍정적인 영향을 주는 것으로 파악되었다(변, 2007).

인공식물섬은 주로 정수생태계인 호소를 대상으로 생

* Corresponding author: Tel: 02) 502-0724, Fax: 02) 502-0725, E-mail: sqfpp@hanmail.net

태복원, 경관창출, 어족자원보호 등의 목적으로 설치되어 운영되고 있어서 생태계복원에 관한 연구는 다양하게 진행되었으나 수질개선효과에 대한 자료는 부족한 실정이다(양, 2006). 이는 인공식물섬이 물과 접하는 체류시간이 짧거나 대형수체의 수면적과 비교한 인공식물섬의 면적이 작을 경우 단시간 내에 수질개선효과를 얻기 어렵기 때문이다. 하지만 수생태계에 대해 안전하며, 운영비용이 거의 소요되지 않고, 생물서식처를 제공할 수 있는 방법으로 인공식물섬의 활용도가 증가되고 있다. 대형수체뿐 아니라 중·소규모 호소나 오·폐수처리장 후단에 고도처리용도로 사용하거나 인공습지에 사용되는 등(농림부, 2004) 활용도가 다변화하고 있어 인공식물섬의 수질정화효과에 대한 다양한 data가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 폐쇄성 오염원이 지속적으로 유입되는 폐쇄수역에 인공식물섬을 설치하고 이들의 BOD, SS, T-N, T-P 제거효과와 조류의 성장억제 능력을 분석하였으며, 조류제어효과에 있어서 차광효과, 미생물 활성화, 식물의 영양염류 흡수에 대한 각각의 효과를 판단하기 위해 인공식물섬의 구성 요소 별 장치를 구분하여 실험하였다.

재료 및 방법

본 연구는 실험실 규모(Lab-scale)의 동일한 환경조건에서 5가지의 실험대상을 투입하여 진행하였다. 5가지 실험대상은 (1) 비교를 위한 Blank Test, (2) 차광, 미생물, 식물성장에 의해 오염물질을 제거하는 복합적 효과를 분석하기 위해 인공식물섬(VAFI) 0.25 m²를 투입, (3) 차광 및 미생물에 의한 효과를 분석하기 위해 식물을 식재하지 않은 인공식물섬(AFI) 0.25 m²을 투입, (4) 차광에 대한 효과를 분석하기 위해 인공식물섬을 수면위로 부유시키는 역할을 하고 있는 부력재 0.25 m²을 투입, (5) 인공식물섬 식생기반재의 미생물활성효과와 비교분석하기 위한 Media(부력재 0.25 m²에 50 cm 길이로 Media를 4줄 부착)를 투입하였다.

실험기간은 2007년 7월부터 9월까지 하절기에 실시하였으며 실험장소는 일조량 확보를 위해 (주)아썸 본사 옥상에서 실시하였다. 실험에서 사용된 인공식물섬은 코코넛 화이버(coconut fiber)로 구성된 기반재에 발포성 부력재(Poly Ethylene Form)를 부착하고 HDPE(High Density Poly Ethylene)망체로 감싸서 제작하였으며 식물은 1년생 노랑꽃창포(Iris pseudoacorus) 2~3분얼 4 pot를 식재하였다(권, 2007). 실험은 원형 수조(용량 300 L, 200 L 원수 투입 시 수면지름 0.8 m, 수면적 0.5 m², 수

심 0.4 m) 5개에 시수를 200 L씩 주입하고 실험조의 유량변동을 최소화하기 위해 고농도 인공원수(조성: BOD 약 10⁶ mg L⁻¹, T-N 약 5 × 10³ mg L⁻¹, T-P 약 10³ mg L⁻¹)를 1 mL 주입한 후 균질하게 교반하였다. 수조 5개에 각각 Blank, 인공식물섬(VAFI) 0.25 m², 식물 미식재 인공식물섬(AFI) 0.25 m², 부력재 0.25 m², Media의 조건으로 반응조를 구성하고 시료 채수 시 채수한 만큼 원수 및 시수를 보충해주는 방법으로 유입과 유출의 상태를 조성하였다. 조류를 인위적으로 발생시키기 위해 충남 보령에 위치한 신규저수지에서 조류대발생 되었다고 판단되는 시점에(2007년 7월 1일) 조류가 밀집해 있는 호안의 수표면에서 채수하여 각각의 반응조에 10 mL씩 주입하였다. 인공식물섬의 효과를 검증하기 위하여 1주당 2회 채수를 실시하였으며 각 항목의 분석방법으로 BOD₅는 YSI-58 Model로 DO농도를 측정하여 계산하였고 총인(T-P), 총질소(T-N), 엽록소-a는 흡광광도법을 이용하여 측정하였으며 부유물질(SS)은 유리섬유여지법으로 측정하였다(환경부, 2006). 모든 실험항목의 제거율은 월별 분석값 중 최종달(9월)에 산출된 값들의 평균을 Blank와 비교하여 계산하였다.

결과 및 고찰

1. BOD변화

실험초기에는 각 반응조별로 거의 차이가 없었으나 인공원수를 이용하여 실험한 결과 9월 평균 Blank에서 10.4 mg L⁻¹까지 농도가 증가하였다. 이에 비해 VAFI의 경우 BOD 농도가 1.8 mg L⁻¹로 감소하였으며 제거효율은 82.7%로 나타났다. AFI의 경우에도 2.0 mg L⁻¹까지 감소하였으며 제거효율은 80.8%로 나타났다(Table 1, Fig. 1). 이는 기반재의 구성이 코코넛화이버(coconut fiber)로써 다량의 미생물이 부착하여 BOD유발물질을 제거한 것으로 판단된다. 미생물 부착을 목적으로 하는 Media도 그 효과는 양호하였으나 AFI에 비해 약간 낮은 59.6%의 제거효율을 나타냈으며 9월평균 BOD가 4.2 mg L⁻¹로 인공식물섬보다 높은 수치를 나타내었다. 결과적으로 미생물부착기반에 미생물의 보유량에 따라 BOD제거효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 부력재의 경우도 5.7 mg L⁻¹이며 제거효율은 45.2%로 Blank보다 양호하였으며 이는 다공성 재료로 구성된 부력재에 미생물이 다량 부착되었기 때문인 것으로 판단된다. 권(2007)의 연구에 의하면 식물뿌리 등에 부착한 세균은 주위의 낮은 농도의 유기물, N, P를 흡수하여 증식하고 이 세균의 밀도가 높아지면 그만큼 이들 물질의 농도가 높아져 물질

Table 1. BOD concentration in the reactor (Unit: mg L⁻¹).

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
Jul.	Max.	7.2	7.4	7.8	6.9	7.2
	Average	5.7	5.3	5.8	5.6	5.4
	Min.	4.6	4.1	4.7	4.3	3.4
Aug.	Max.	5.4	4.4	3.7	4.8	3.4
	Average	4.4	2.3	2.1	4.3	2.4
	Min.	3.4	1.6	1.8	3.4	1.9
Sep.	Max.	13.0	2.1	2.4	5.9	4.7
	Average	10.4	1.8	2.0	5.7	4.2
	Min.	6.8	1.4	1.4	5.0	3.8

Table 2. SS concentration in the reactor (Unit: mg L⁻¹).

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
Jul.	Max.	3.8	3.5	3.7	5.8	3.8
	Average	2.0	2.7	2.6	4.0	2.4
	Min.	1.1	2.1	1.8	0.8	1.2
Aug.	Max.	5.9	4.2	5.2	16.4	8.7
	Average	4.5	3.0	3.6	8.0	5.4
	Min.	2.1	1.6	2.2	4.4	2.9
Sep.	Max.	48.2	5.2	6.7	29.3	9.2
	Average	37.1	3.0	5.0	24.8	7.7
	Min.	25.3	1.9	3.1	19.7	6.1

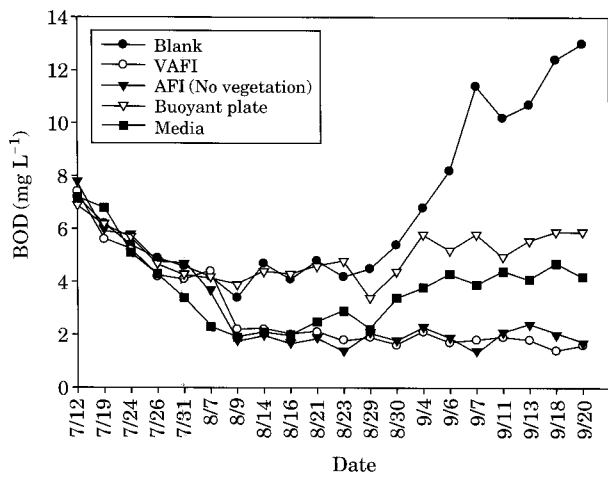


Fig. 1. The variation of BOD in the reactor.

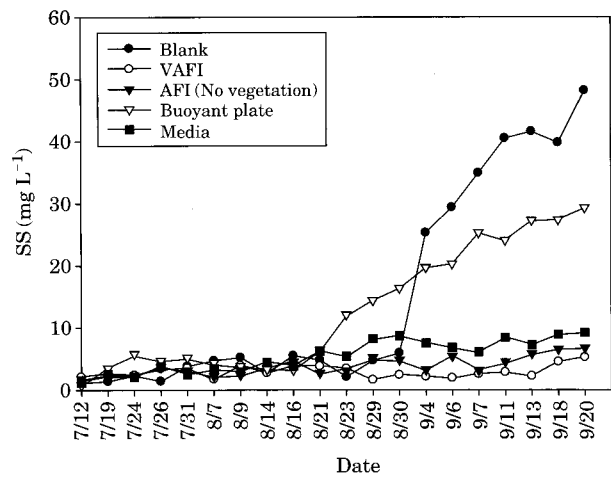


Fig. 2. The variation of SS in the reactor.

분해율, 미생물활성도가 증가한다. 이 과정에서 인공식물섬 내에서 생산성도 함께 높아져 동물성플랑크톤의 수적 증가, 어류의 증가도 함께 나타나는 것으로 확인되었다. Rheinheimer(1980)의 연구에 의하면 수중생태계에서 세균은 유기물분해 및 재합성 기능을 행하여 물질순환에 기여하며, 용존영양물질을 생체 내로 흡수하여 영양단계가 더 높은 생물에게 에너지를 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 안(2007)의 연구에 의하면 파로호에 설치된 인공식물섬에서 식생기반재의 공극수를 채수하고 인공식물섬이 설치되지 않은 호수물을 채수하여 총 세균수를 비교한 결과 5.4~18.1배 높았고, 활성세균수를 비교한 결과 5.7~42.9배 높았으며, β-glucosidase 활성도는 10.3~76.7배 높은 결과를 보였다.

2. SS변화

유입원수에 SS가 포함되어 있지 않으므로 SS 원인물

질은 대기강하분진이거나 조류이다. 9월 평균 Blank의 SS농도가 37.1 mg L⁻¹으로 단 시간 내에 상승한 것으로 볼 때 조류의 과다번식에 의해 농도가 증가한 것으로 판단된다. 반면에 VAFI의 경우는 3.0 mg L⁻¹이며 제거효율은 91.9%였고 AFI의 경우에도 5.0 mg L⁻¹이며 제거효율은 86.5%로 양호하게 유지되었다(Table 2, Fig. 2). 부력재의 경우 햇빛을 차단한 효과로 Blank보다 낮은 수치인 24.8 mg L⁻¹과 제거효율은 33.2%로 나타났으나 조류발생에 의한 농도상승이 관찰되었으며 Media의 경우 7.7 mg L⁻¹와 제거효율은 79.2%로 Blank보다 양호하나 VAFI보다 좋지 않은 수치를 나타내었다.

3. T-N변화

T-N은 Test 기간동안 큰 변화가 없었으나 9월평균 Blank농도는 4.5 mg L⁻¹였으며 VAFI에서 2.2 mg L⁻¹까지 농도가 저감되었고 제거효율은 51.1%를 나타냈다

Table 3. T-N concentration in the reactor (Unit: mg L⁻¹).

Month	Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media	
Jul.	Max.	3.5	2.8	2.9	3.2	2.9
	Average	2.8	2.4	2.7	2.7	2.6
	Min.	2.3	2.1	2.5	2.3	2.3
Aug.	Max.	3.9	2.6	3.2	3.6	3.6
	Average	3.8	2.3	2.9	3.5	3.3
	Min.	3.7	2.0	2.5	3.1	3.0
Sep.	Max.	4.9	2.5	3.2	4.7	3.5
	Average	4.5	2.2	3.1	4.4	3.4
	Min.	4.0	1.9	3.0	3.9	3.2

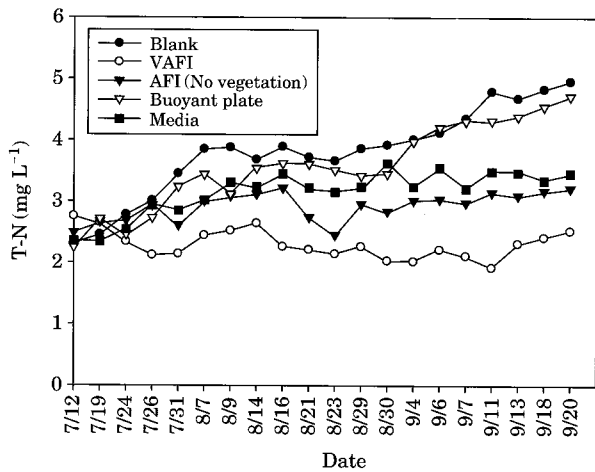


Fig. 3. The variation of T-N in the reactor.

(Table 3, Fig. 3). 이는 소형인공호수에서 인공식물섬의 수질개선효과를 Test하여 10월에 T-N제거효율 57%를 얻은(권과 박, 2002) 결과와 유사하다. 또한 AFI의 경우에도 3.1 mg L⁻¹까지 농도가 감소하였고 제거효율은 31.1%를 나타냈다. 이와 유사하게 Media에서 3.4 mg L⁻¹까지 농도가 감소하였고 제거효율은 24.4%의 결과를 보였으나 두 경우 모두 VAFI보다 농도가 높았다. 미생물에 의해 주요한 정화작용이 발생하는 AFI와 Media보다 VAFI의 T-N제거효율이 양호한 것은 비표면적인 넓은 식물뿌리부에 추가적으로 부착한 미생물작용과 식물자체흡수에 의한 효과인 것으로 판단된다. 양(2006)의 연구에 의하면 인공식물섬의 질소제거는 식물뿌리와 식생기반체에 부착된 미생물에 의해 질소가 흡수되어 제거되기도 하나, 식물에 의한 흡수로 대부분 이루어진다. 인공식물섬 아래의 T-N농도는 주변과 비교하여 비성장기에 2.4% 낮았으며, 성장기에는 11.0% 낮게 나타났다(양, 2006).

Table 4. T-P concentration in the reactor (Unit: mg L⁻¹).

Month	Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media	
Jul.	Max.	0.23	0.20	0.20	0.20	0.21
	Average	0.20	0.19	0.17	0.18	0.18
	Min.	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16
Aug.	Max.	0.31	0.24	0.27	0.26	0.28
	Average	0.28	0.21	0.24	0.24	0.25
	Min.	0.23	0.19	0.21	0.21	0.21
Sep.	Max.	0.33	0.26	0.29	0.29	0.29
	Average	0.30	0.23	0.25	0.27	0.26
	Min.	0.27	0.21	0.21	0.23	0.22

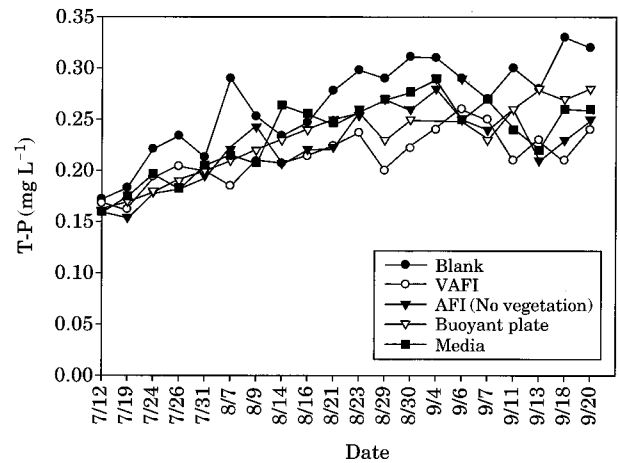


Fig. 4. The variation of T-P in the reactor.

4. T-P변화

T-P는 9월평균 Blank에서 0.3 mg L⁻¹였으며 VAFI에서 0.23 mg L⁻¹로 23.3%, AFI는 0.25 mg L⁻¹로 16.7%, 부력재는 0.27 mg L⁻¹로 10.0%, Media는 0.26 mg L⁻¹로 13.3%의 제거효율을 나타냈다(Table 4, Fig. 4). VAFI에서 제거효율이 가장 양호하였으나 다른 실험항목들과 달리 제거효율의 차이가 크지 않았다. 단기간에 실험이 진행되어서 식물의 활성도가 아직 낮아 T-P흡수, 제거속도가 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 양(2006)의 연구에 의하면 인공식물섬의 인 제거는 식물뿌리와 식생기반체에 부착된 미생물에 의해 흡수되어 제거되며 인공식물섬을 설치한 곳과 설치하지 않은 곳의 T-P농도차는 비성장기와 성장기의 경우 각각 2.1%와 9.1%였다.

5. Chlorophyll-a변화

초기 조류 seeding 및 지속적인 오염물질 강제주입을

Table 5. Chlorophyll-*a* concentration in the reactor (Unit: mg m⁻³).

Month		Blank	VAFI	AFI	Buoyant plate	Media
Jul.	Max.	1.4	0.7	1.2	1.8	1.4
	Average	0.5	0.1	0.2	0.9	0.6
	Min.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Aug.	Max.	45.2	4.9	4.2	40.3	7.3
	Average	11.2	2.7	3.3	9.4	3.5
	Min.	2.2	1.9	1.8	0.9	1.3
Sep.	Max.	110.2	2.4	4.0	73.2	20.4
	Average	92.4	1.9	3.6	60.0	17.7
	Min.	65.8	1.4	3.0	52.4	12.3

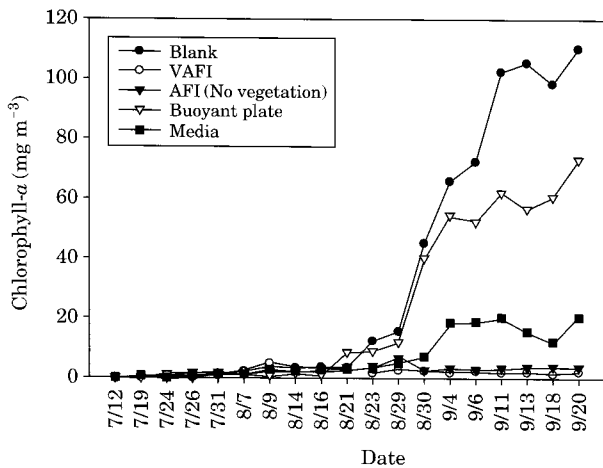


Fig. 5. The variation of chlorophyll-*a* in the reactor.

실시하였으며 8월 이후 수온이 상승하자 9월평균 Blank의 조류농도가 92.4 mg m⁻³으로 심각한 녹조현상이 발생되었으나 VAFI 및 AFI의 경우 조류농도가 1.9, 3.6 mg m⁻³로 조류성장이 억제되었다(Table 5, Fig. 5). 녹조제거 효과는 VAFI, AFI, Media, 부력재, Blank 순서인 것으로 볼 때 단순한 햇빛차단효과보다 미생물과 식물에 의한 상호작용의 영향이 주된 효과인 것으로 판단된다. 인공식물섬의 수질정화 기작으로 식물의 영양염류 흡수, 식물뿌리와 식생기반재 표면에 부착하는 미생물 및 부착조류에 의한 제거, 부유물의 침강, 햇빛의 차폐효과, 어류에 의한 섭취 등이 제시되고 있다(양, 2006). 단기간에 실험이 진행되었으며 반복적인 결과는 얻지 못하였으나 본 실험에 있어서 VAFI의 조류 총 제거효율은 97.9%를 나타냈다. VAFI의 구성요소별 제거효율로 분석해보면 총 97.9% 중 차광효과 35.1%, 식생기반재에 부착한 미생물의 복합작용에 의한 효과 61.0%, 식물과 뿌리에 의한 효과 1.8%인

것으로 나타났다. 식물과 뿌리에 의한 효과가 매우 낮게 나타났는데 이는 식물이 완전하게 성장하지 못했기 때문이라고 판단된다. 지속적으로 오염이 되고 이를 이용해 식물이 성장하여 영양염류의 흡수량이 증가하고 뿌리부가 발달하여 미생물의 보유량이 증가하면 인공식물섬의 한 부분으로써 조류제거에 차지하는 부분이 더욱 높아질 것이라 판단된다.

적 요

인공식물섬의 BOD, SS, T-N, T-P제거효율과 조류의 성장억제 능력을 분석하였으며 조류제거효과에 있어서 미생물보유활성화, 식물의 흡수효과에 대한 각각의 효과성을 판단하기 위해 구성요소별 장치를 구성하여 실험하였다. 구성요소별 장치는 (1) Blank Test, (2) 인공식물섬 (VAFI) 0.25 m², (3) 식물을 식재 하지 않은 인공식물섬 (AFI) 0.25 m², (4) 인공식물섬을 수면위로 부유시키기 위한 부력재 0.25 m², (5) Media(부력재 0.25 m²에 50 cm 길이로 Media를 4줄 부착)이다. BOD제거는 VAFI, AFI, 부력재, Media에서 각각 82.7, 80.8, 45.2, 59.6%로 나타났다. T-N제거는 VAFI, AFI, Media에서 각각 51.2, 31.7, 25.1%로 나타났다. T-P제거는 VAFI, AFI, 부력재, Media에서 각각 23.3, 16.7, 10.0, 13.3%로 나타났다. 엽록소-*a*는 VAFI에서 97.9%가 제거되었다. VAFI의 구성요소별 제거율은 차광효과 35.1%, 미생물의 복합작용에 의한 효과 61%, 식물과 뿌리에 의한 효과 1.8%인 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 “생물조절(먹이연체)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발”(306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

- 권애랑, 박철휘. 2003. 수생식물을 이용한 수질정화에 대한 연구. 대한환경공학회지 25(4): 415-420.
- 권오병. 2006. 인공식물섬 조성에 의한 수생태계 개선효과에 대한 연구. 강원대학교 이학박사학위논문.
- 경기개발연구원. 1998. 경기도 인공호수의수질개선과 효과적인 관리방안.

- 농업기반공사. 2004. 농업용수 수질개선 시험연구(최종).
- 변명섭. 2007. 수초재배법에 의한 수환경 개선효과에 관한 연구. 강원대학교 이학박사학위논문.
- 송호면, 김호열. 2006. 자연공생호소실험사업(4차년도). 건설기술연구원.
- 양홍모. 2006. 농업용 저수지에 설치한 인공식물섬에 의한 오염물질 농도의 변화. 한국환경복원녹화기술학회 **9**(2): 23-32.
- 환경부. 2006. 수질오염공정시험법.
- Rheinheimer, G. 1980. Aquatic microbiology 2nd ed. John Willy and Sons. NY, pp. 21-41.
- Tanner, C.C. 2001. Growth and nutrient dynamics of soft-stem bulrush in constructed wetlands treating nutrient-rich wastewaters. *Wetlands Ecology and Management* **9**: 49-73.

(Manuscript received 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)