Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 26, No. 1, pp.52-60 (2010)

인공수초재배섬 식생기반재 종류에 따른 물질 흡착량 및 생물상, 식재식물 성장 비교

최명재 · 박혜경† · 변명섭* · 전남희 · 윤석환

국립환경과학원 한강물환경연구소
*국립환경과학원 물환경연구부

Comparison of the Growth of Hydrophytes, Aquatic Biota and Absorption of Nutrient depending on the Planting Mat Type of Artificial Vegetation Island

Myung-Jae Choi · Hae-Kyung Park† · Myeong-Seop Byeon* · Nam-Hui Jeon · Seok-Hwan Yun

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research
**Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research*
(Received 31 August 2009, Revised 6 October 2009, Accepted 28 October 2009)

Abstract

We investigated temporal changes of growth of hydrophytes, aquatic biota and absorption of nutrient depending on planting mat type (synthetic fiber, coconut fiber) of artificial vegetation island (AVI) through pilot test using AVI miniatures in Kyungan Stream area of Lake Paldang. There were not significant differences of the water quality parameters (DO, pH, conductivity, turbidity, temperature), phytoplankton and zooplankton abundance among AVI miniatures and control station. The benthic macroinvertebrates showed most individual numbers in the miniature which was made by synthetic fiber and planted with *Phragmites australis*. The average and maximum height of hydrophytes in AVI miniatures was similar except one miniature where *Phragmites australis* was planted in synthetic fiber mat and grew more slowly. The adsorbed amount of nutrients and microbes in coconut fiber mat were larger than those in synthetic fiber mat regardless of trophic state of installed waterbody. The continuous increase of adsorbed amount of nutrients and microbes of coconut fiber mat for 8 months in an oligotrophic lake indicates that coconut fiber mat is suitable for the planting mat of AVI in an oligotrophic lake where nutrients are limited for growth of hydrophytes.

keywords : Adsorbed amount, Artificial vegetation island, Hydrophytes, Planting mat

1. 서 론

수생식물을 이용한 수처리 효과는 이미 잘 알려져 있으며 수생식물을 이용한 생물학적 처리 기법으로 인공습지와 인공수초재배섬이 국외는 물론 국내에서도 최근 널리 적용되고 있다(박선구 등, 2008; 심우섭과 한인섭, 1998; 함종화 등, 2005; Ahn and Kong, 1998). 이 중 인공수초재배섬은 갈대 등의 수초를 인공의 부유틀에 재배하여 수중의 영양염류 제거를 통한 수질정화, 어류와 동·식물플랑크톤 등 각종 수생생물의 산란 및 서식공간 제공, 생태계의 먹이사슬을 이용한 조류 증식 억제 등 쾌적한 수변환경 조성 및 자연환경 기능 향상을 도모하기 위한 생태공학적 기술이다(안태석과 박현진, 2001).

인공수초재배섬은 현재 국내의 대형 인공호나 저수지에서 수질개선, 수중생태계 복원 및 경관 향상을 목적으로 인공식물섬, 인공식재섬, 수초뜬섬, 어류산란시설 등의 다양한 명칭으로 설치되고 있다(박혜경 등, 2006). 인공수초재배섬은 크게 수생생물의 서식처를 제공하거나 영양염류를 제거하는 수생식물과 토양의 역할을 대신하여 수생식물이 뿌리를 내려 고정하는 역할을 하며 수생식물이 이용하는 영양염류나 미생물 등을 흡수하거나 흡착하는 등의 부가기능을 수행하는 식생기반재(Mat), 그리고 인공수초재배섬을 수면에 띄우는 부력재의 3가지로 구성되어 있는데(박혜경 등, 2006; 선용춘, 2005), 수역 특성 및 설치 목적에 맞는 수생식물을 선정하는 것만큼 신중하게 고려되어야 할 사항이 식생기반재의 선택이라고 할 수 있다. 수생식물 종에 따른 수처리 능력에 관한 연구는 생이가래를 이용한 수질오염물질 제거의 관한 연구(안윤주와 공동수, 1995)와 습지식물을 이용한 연구(심우섭과 한인섭, 1998; 정연숙 등, 1999; 최명재, 2007; 한국수자원공사, 1993; 함종화 등, 2005) 등 많이 이루어져 온 반면 식생기반재 종류에 대한 연구는 미흡하다.

현재 국내에서 식생기반재로 사용되고 있는 매트의 재질은 크게 2가지로 합성섬유와 코코넛섬유를 들 수 있다. 각 매트가 가진 특성이 다르므로 인공수초재배섬을 설치하고자 할 때는 각 매트의 특성을 이해하고 수계 특성에 맞는 매트 선정이 중요하다. 하지만 국내 인공수초재배섬의 설치

† To whom correspondence should be addressed.
parkhk@me.go.kr

및 운영현황을 조사한 결과, 그 목적의 달성도는 그리 높지 않은 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 인공수초재배섬 설치가 계속 확대되고 있으나 설치 목적이 불분명하고, 인공수초재배섬 설치 시 사용되는 자재 자체에 대한 가이드라인이 없으며, 설치 후 효과 분석이 없는 등 관리가 미비한 것으로 나타났다(박혜경 등, 2006). 이런 결과는 설치 대상 수역의 특성에 대한 이해가 없이 인공수초재배섬이 설치되거나 설치 목적에 부합하지 않는 형태의 수초재배섬이 설치되었기 때문이다.

본 연구에서는 국내에서 주로 사용되고 있는 두 종류의 식생기반재(매트)를 사용하여 제작한 인공수초재배섬 모형(Miniature) 조사를 통하여 식생기반재 재질에 따라 식재된 수생식물의 성장특성 및 미생물, 저서성대형무척추동물 등 생물상 구조를 비교하고 식생기반재 종류별 영양염류 흡착량에 대해 조사하여, 현재 주로 사용되고 있는 식생기반재의 종류에 따른 인공수초재배섬의 수질개선, 생물상 복원 기능 등의 차이를 평가하고 수역특성(빈, 부영양수역)에 맞는 식생기반재를 제안하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사대상 및 조사기간

인공수초재배섬에 적합한 식생기반재의 재질과 식재 수생식물 종을 평가하기 위해 팔당호 경안천 수역에 조성된 인공수초재배섬 주변에 2종류의 식생기반재를 사용하여 200 cm × 200 cm의 정사각형의 인공수초재배섬 모형(Miniature)을 4구 설치하고 각각의 모형에 수생식물을 식재하여 식재재질에 따른 수생식물 성장속도 및 수질, 생물상의 차이를 조사하였다(Fig. 1). 식생기반재 재질의 종류는 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 합성섬유재질과 코코넛섬유재질의 2종류를 선정하여 모형을 제작하였고 수생식물 종도 국내에서 가장 많이 식재되고 있고 인공수초재배섬에 가장 잘 적응한다고 알려져 있는 갈대(*Phragmites australis*)와 노랑꽃창포(*Iris pseudoacorus*)를 선정하여(농림부·농어촌진흥공사, 1999) 좌우 25 cm 간격으로 총 64개의 식물포트를 식재하였다. 설치된 인공수초재배섬 모형별 특성을 Table 1에 나타내었다. 각 모형의 수질 및 생물상 조사는 2007년 3월 20일부터 2007년 11월 21일까지 격주로 조사하였다.

Table 1. The mat type and planting hydrophyte of AVI miniatures

Item	Mat type	Mat color	Planting hydrophyte
Miniature 1	Synthetic fiber	White	*Phragmites australis*
Miniature 2	Coconut fiber	Brown	*Phragmites australis*
Miniature 3	Synthetic fiber	White	*Iris pseudoacorus*
Miniature 4	Coconut fiber	Brown	*Iris pseudoacorus*

한편 설치수역의 영양상태에 따른 식생기반재 자체의 영양염류, 유기물 및 미생물 흡착량 차이를 조사하기 위해 인공수초재배섬 모형에 사용된 식생기반재를 30 cm × 30 cm의 정사각형 조각으로 만들어 부영양 수역인 팔당호와 빈영양 수역인 파로호에(한강물환경연구소, 2007; 한강수계관리위원회, 2007) 부유시킨 후 1개월, 2개월, 4개월, 6개월, 8개월의 간격으로 회수하여 흡착된 영양염류, 유기물, 세균 현존량을 조사하였다.

2.2. 조사방법

인공수초재배섬 설치에 따른 하부 수체의 수질 및 생물상 발달을 조사하기 위하여 인공수초재배섬 모형의 중심부에 지름 약 15 cm 가량의 구멍을 뚫어 하부의 표층수를 채취하였다. 비교 지점(Control)으로 인공수초재배섬 모형 2와 3 사이의 호소수에서 동일한 항목을 조사하였다. 인공수초재배섬 모형의 크기가 설치 수역 면적에 비해 작고 설치기간이 짧기 때문에 하부 수체의 영양염류 농도와 유기물 농도에 영향을 주기는 어렵다고 판단하여 수질조사항목은 현장측정수질항목만 조사하였으며, 생물상은 총세균수, 활성세균수, 클로로필 a, 동물플랑크톤 그리고 대형무척추동물을 조사하였다. 수질항목과 생물상 항목 중에서 총세균수, 활성세균수, 클로로필 a 그리고 동물플랑크톤은 모형을 설

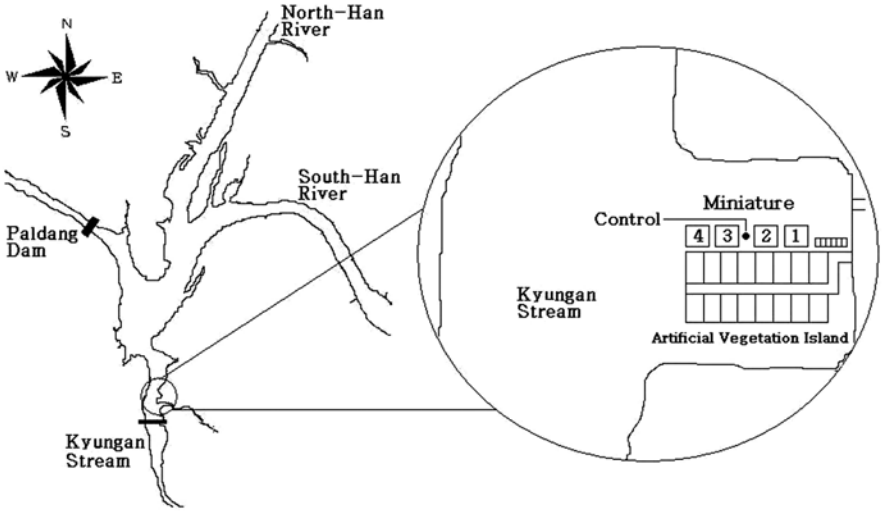

Fig. 1. Map showing the study area.

치한 시점부터 11월까지 격주로 조사하였으며, 대형무척추동물은 분기 1회 조사하였다. 한편 팔당호와 파로호에 부유시킨 매트 조각의 흡착량 조사를 위해 회수한 매트 조각을 초음파 처리하여 매트에 부착된 물질을 멸균증류수에 탈리시켜 분석하였다.

항목별 분석방법은 클로로필 a, 영양염류(N, P)와 수생식물 내 인 함량은 수질오염공정시험방법(환경부, 2007)에 의거해 분석하였으며 수생식물 내 탄소(C)와 질소(N) 함량은 원소분석기(Elementar, Vario EL III)를 이용하였다. 총세균수와 활성세균수는 김미리 등(2006)에 의거하여 AODC와 qDVC 방법으로 분석하였으며, 동물플랑크톤은 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣고 광학현미경하에서 10~100배 배율로 계수하였다. 또한 저서성대형무척추동물은 정성 조사를 위하여 stainless scoop net(mesh 1 mm)를 이용하여 채집하였고 채집한 표본은 Kahl's solution에 넣어 실험실로 옮겼다. 동정은 한국동식물도감(수서곤충편, 동물편-새우류, 동물편-연체동물 1, 2), 권오길(1990), 김훈수(1977), 윤일병(1988), 최병래(1992)와 Kawai(1985) 등에 준하여 해부현미경 ×40, ×80 하에서 분류하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질

인공수초재배섬 모형 설치 후 3월부터 11월까지 격주로 각 모형 내부와 비교지점의 이화학적 수질의 경시적 변동을 조사한 결과, 수온은 연 중 11월말에 6.5°C로 최저 수온을 보였고 8월 하순에 모형에서는 26.2°C 사이의 수온을 보였으며 비교지점에서는 27.1°C로 최고 수온을 나타냈다. 모형간의 그리고 비교되는 호수 지점간의 수온차이는 거의 없었다. pH도 모형 간에 그리고 비교지점과의 차이는 없었으며 3월에 pH 9.3으로 가장 높았고 이후 지속적으로 감소하여 9월 중순에 가장 낮은 값인 pH 6.6~6.7을 보인 후 다시 서서히 증가하였다. 전기전도도는 3월말 가장 높은 값을 보였고 이후 증감을 반복하였으나 9월 중순에 가장 낮은 값을 나타낸 후 다시 증가하였으며 모형간의 차이는 전혀 없었다. 용존 산소 농도는 4월 중순에 모든 모형과 비교지점에서 17.0 mg/L 이상의 최고값을 보인 후 5월부터 급격히 감소하여 7월부터 10월초까지 인공수초재배섬 모형과 비교지점에서 모두 3.0 mg/L 미만의 빈산소상태를 보였고 비교지점에서 모형보다 약간 더 높았다. pH, 전기전도도 그리고 용존산소농도가 모두 유사한 경시적 변동 패턴을 보였으며 모형 간에 그리고 비교지점과의 차이는 거의 보이지 않았다. 탁도는 시기에 따른 특정한 경향성 없이 증감을 반복하였으며 집중강우기에 팔당호 경안천 수역 본류의 탁수 영향으로 높은 탁도를 보였고 모형 간에 그리고 비교지점과의 차이는 거의 없었다(Table 2).

인공수초재배섬 모형 하부의 수질과 비교지점인 주변 호소수의 수질이 큰 차이를 보이지 않았는데 실제 현장에서 적용되고 있는 인공수초재배섬(식재면적 : 2,560 m^2)을 대상으로 조사한 기존의 연구(박혜경 등, 2006; 환경관리공단, 2000)에서는 식재된 식물에 의한 광차단 효과로 주변 호수역에 비해 인공수초재배섬 내부의 수온이 낮았고 조류증식이 억제되었으며, 그로 인해 pH도 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다. 용존산소도 인공수초재배섬 구조물에 의해 바람에 의한 수표면에서의 재폭기를 감소시켜 외부에 비해 내부지점이 낮은 결과를 나타내어 본 연구와는 다른 결과를 보였다. 본 연구에서 모형하부 수질과 주변 호수역의 수질이 거의 차이가 나타나지 않았던 이유는 본 연구에 사용된 모형의 경우 크기가 4 m^2로 주변 수역의 면적에 비해 모형의 크기가 작아 모형 하부의 수온 등에 영향을 주기는 어려웠기 때문으로 보이며 또한 식재식물도 본 연구 종료까지 성장한 길이가 약 100 cm 가량으로 수년간 증식과 고사를 반복하여 뿌리가 완전히 활착되어 있는 기존의 인공수초재배섬에 비해 1년생의 어린 개체를 식재하여 식재식물이 활착하여 효과를 나타내기까지는 기간이 짧고 수초단위면적당 피도도 높지 않았기 때문에 모형 하부의 수질이 주변 호소수와 뚜렷한 차이를 보이지 않았던 것으로 판단된다.

3.2. 생물상 비교

총세균수는 인공수초재배섬 모형에서 2.2~17.0×10^6 cells/mL, 비교 호소수에서 2.5~13.0×10^6 cells/mL의 범위로 조사되었으며 네 모형에서 모두 유사한 경시적 변동을 보였다. 설치초기부터 6월말까지는 수온증가와 함께 점진적으로 그 수가 증가추세를 보였고 여름철 집중강우가 시작된 6월말에 모형 1은 급격한 증가를 보인 후 바로 감소하였으며 모형 2, 3 그리고 비교 수역은 7월 중순까지 증감 없이 유사

Table 2. The range and average value of environmental parameters in AVI miniatures during studying period

Item		Temperature (°C)	pH	Conductivity (uS/cm)	DO (mg/L)	Turbidity (NTU)
Miniature 1	Range	6.5 ~ 26.2	6.8 ~ 8.6	142 ~ 361	1.0 ~ 17.0	1.6 ~ 60.6
	Average	18.9 ± 5.7	7.3 ± 0.5	233.2 ± 57.2	6.0 ± 4.5	17.8 ± 13.7
Miniature 2	Range	6.5 ~ 26.3	6.8 ~ 9.3	141 ~ 361	1.0 ~ 17.2	1.4 ~ 53.4
	Average	18.4 ± 6.0	7.4 ± 0.6	234.3 ± 55.6	6.6 ± 4.8	15.8 ± 11.8
Miniature 3	Range	6.8 ~ 26.3	6.7 ~ 8.9	140 ~ 360	1.0 ~ 18.1	2.3 ~ 63.2
	Average	19.0 ± 5.7	7.3 ± 0.5	231.8 ± 57.7	6.8 ± 4.6	20.2 ± 15.4
Miniature 4	Range	6.3 ~ 26.3	6.6 ~ 9.3	141 ~ 360	1.3 ~ 19.8	3.3 ~ 48.4
	Average	18.5 ± 6.1	7.4 ± 0.7	234.4 ± 54.9	7.1 ± 5.1	15.6 ± 10.5
Control	Range	6.5 ~ 27.1	6.7 ~ 9.0	141 ~ 360	1.3 ~ 17.8	2.3 ~ 54.3
	Average	19.2 ± 6.0	7.4 ± 0.6	233.1 ± 56.7	7.1 ± 4.6	14.9 ± 12.3

한 값을 보인 후 7월말에 급격히 감소하였다. 강우현상은 수생세균의 현존량에 큰 영향을 미치고 일시적인 강우현상은 외부 유기물의 공급 등으로 수계의 총세균수를 증가시키지만, 집중강우현상이 발생하면 희석효과는 물론 유입된 토양 입자에 의한 공침현상으로 수중의 총세균수는 급격하게 감소되는 현상이 발생된다고 알려져 있다(김용전 등, 2008; 박혜경 등, 2006). 본 조사에서 7월말 총세균수의 급격한 감소는 여름철 집중강우로 인한 희석 효과 때문으로 판단된다. 조사기간 평균값으로 보면 모형 1, 2, 3은 6.2~6.4×10^6 cells/mL로 거의 같았으나 코코넛섬유 재질의 매트에 노랑꽃창포가 식재된 모형 4에서만 5.8×10^6 cells/mL으로 다른 모형에 비해 낮은 값을 보였고 비교 지점에서는 모형 1, 2, 3에 비해서는 낮은 6.0×10^6 cells/mL이었으나 모형 4에 비해서는 높았다(Fig. 2).

활성세균수도 총세균수와 유사한 경시적 변동을 보였으며 모형에서는 0.7~14.6×10^6 cells/mL, 비교 지점에서 0.8~9.3×10^6 cells/mL의 범위로 나타났고, 매트재질과 식재종의 차이에 따른 활성세균수의 차이는 두드러지지 않았으나 총세균수와 마찬가지로 모형 3이 가장 많았고 모형 4가 다른 모형에 비해 적은 수를 나타내었다. 각 모형에서의 세균활성도를 보기 위해 총세균수에 대한 활성세균수의 비를 조사한 결과 모형에서는 21.6~88.9%의 범위를, 비교 지점에서는 25.2~83.5%의 범위를 보여 거의 차이는 없었다. 그러나 모형 간에는 조사기간 평균값으로 볼 때 모형 3이 65.3%로 가장 높은 활성도를 보였고, 그 다음으로 모형 2, 1. 4의 순으로 코코넛 섬유재질의 매트에 노랑꽃창포가 식재된 모형 4가 59.2%로 가장 낮은 활성도를 보여 세균수도 적었을 뿐만 아니라 활성도도 낮은 것으로 조사되었다(김미리 등, 2006; 전남희 등, 2007; Fig. 2).

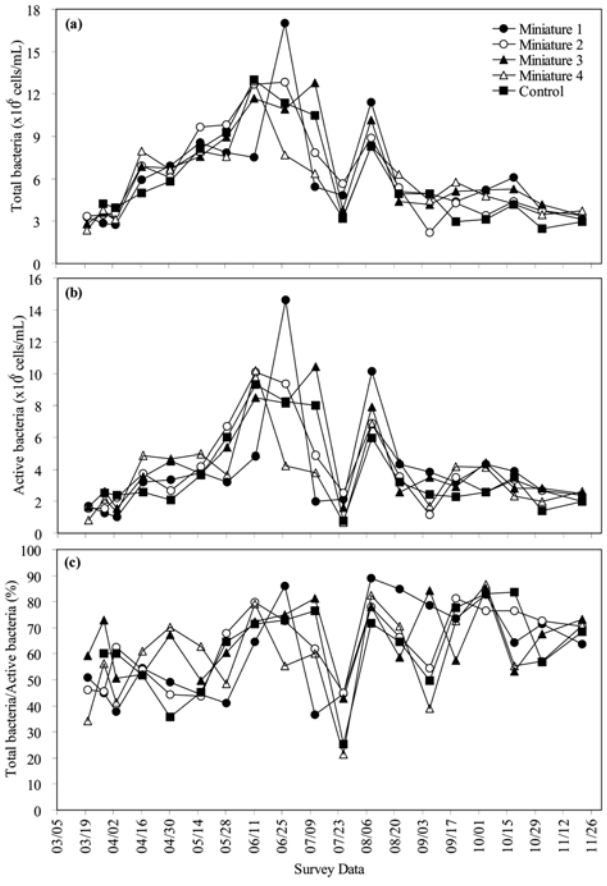

Fig. 2. Temporal changes of total bacterial numbers in AVI miniatures. (a) total bacteria, (b) active bacteria, (c) total bacteria/active bacteria

식물플랑크톤 현존량을 나타내는 지표인 클로로필 a 농도는 모형 설치 초기에는 경안천 수역에서 대량 발생한 식물플랑크톤의 영향으로 모두 높은 농도를 보였으나 설치 2주 후부터 크게 감소하였고 이런 변화는 모형 사이에 위치한 비교지점에서도 마찬가지로 나타났다. 식재식물의 성장이 시작된 4월부터 각 모형별 클로로필 a 농도는 큰 차이를 보였고 또한 비교 지점인 호소수와도 많은 차이를 보였다. 코코넛 섬유재질의 모형 2와 4는 5월말까지 유사한 경향을 보였으며 다른 모형에 비해 클로로필 a 농도가 높았고 모형 1과 3은 5월 말에 매우 높은 농도를 보였으며 6월부터 감소하였다. 7월 중순에는 모든 모형에서 클로로필 a 농도가 감소하였으나 7월말부터 모형 2를 제외한 나머지 모형에서는 다시 증가하였다. 9월 중순까지 약간 감소한 후 10월 중순에 전 모형에서 크게 증가하였으며 이후에는 조사가 종료될 때까지 감소하였다. 비교지점에서는 전 시기동안 모형에 비해 훨씬 낮은 클로로필 a 농도를 보였다. 한편 동물플랑크톤 현존량 변화는 클로로필 a와는 전혀 다른 패턴을 보였다. 모형 중에는 모형 4가 다른 모형에 비해 높은 현존량을 보였으며 모형에 비해 클로로필 a 농도가 전반적으로 낮았던 비교지점의 호소수에서 동물플랑크톤은 훨씬 높은 현존량을 보였고 특히 봄철에는 클로로필 a 농도와 동물플랑크톤 개체수가 서로 상반된 변동을 보였다(Fig. 3).

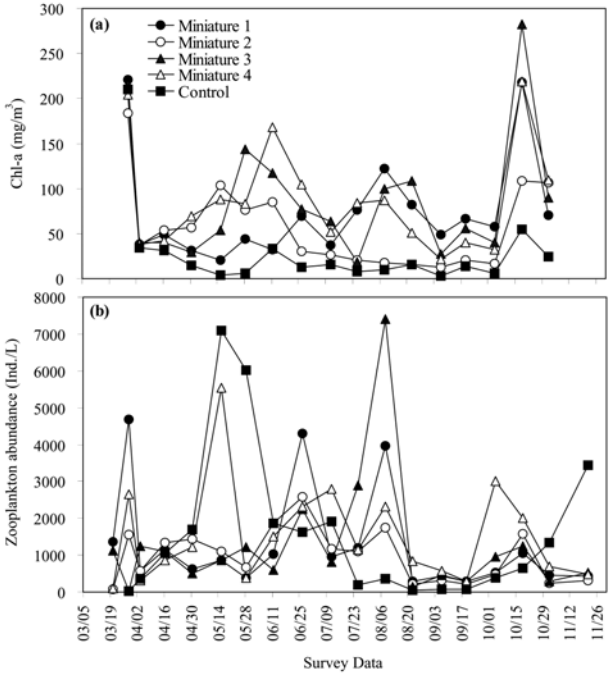

Fig. 3. Temporal changes of (a) chlorophyll a concentration and (b) zooplankton abundance in AVI miniatures.

비교지점에서 모형들에 비해 식물플랑크톤 현존량이 적었던 이유는 비교지점에서 동물플랑크톤 현존량이 많아 식물플랑크톤에 대한 포식압이 높았기 때문이다. 설치 후 6년간 운영되고 있는 기존 인공수초재배섬에서 조사한 결과 주변의 호수역에 비해 식물뿌리가 발달되어 있는 인공수초재배섬 하부 수중에 동물플랑크톤 현존량이 매우 많고 이에 따라 식물플랑크톤 현존량이 매우 적은 것으로 나타났다(유경아 등, 2007). 이런 결과로 볼 때 운영기간이 짧아 하부에 수초뿌리 등의 발달이 미약하여 동물플랑크톤의 서식, 피난처를 제공하지 못한 인공수초재배섬 모형들에 비해 기존 인공수초재배섬과 근접해 있는 비교 수역에서 동물플랑크톤의 현존량이 많아 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미친 것으로 판단된다.

인공수초재배섬 모형에 서식하는 생물상 중에서 수생식물 뿌리와 식생기반재에서 서식하는 대형무척추동물의 출현종 및 개체수를 모형 설치 후부터 분기별로 조사한 결과, 합성섬유 재질인 모형 1과 3에서 코코넛섬유 재질의 모형 2와 4보다 많은 출현종 및 개체수가 채집되었다(Table 3). 식재 수생식물 종에 따라서도 차이를 보였는데 갈대가 식재된 모형 1과 2에서 노랑꽃창포가 식재된 모형 3과 4보다 더 많은 개체수를 보였다. 합성섬유에 갈대를 식재한 모형 1이 다른 모형에 비해 전 시기동안 총 4문 5강 8목 14과 18종으로 가장 많은 종수가 출현하였고 개체수로도 가장 많았으며 코코넛 섬유에 노랑꽃창포를 식재한 모형 4가 2문 3강 7목 9과 12종으로 출현 종수도 적었고 개체수도 가장 적은 것으로 조사되었다. 각 모형별 우점종은 모형 1에서 새뱅이(*Caridina denticulata*)와 깔따구과(Chironomidae)가 우점하였고 모형 2에서는 왼돌이물달팽이(*Physa acuta*)와 새뱅이가 우점하였으며, 모형 3과 4에서는 새뱅이가 우점하였다. 각 모형별로 채집된 종을 보면 갑각강(Crustacea)의 새뱅이가 모든 모형에서 우점하고 있었지만 전체 채집종수의 비를 보면 66~84%가 곤충강으로 나타났다.

Table 4. ANOVA results of abiotic and biotic environmental parameters among AVI miniatures

Parameter		No. of sample	Sig. of ANOVA result
pH		18	0.998
DO		18	0.940
Turbidity		18	0.772
Total bacteria		18	0.949
Active bacteria		18	0.913
Total bacteria / Active bacteria		18	0.747
Chl-a		18	0.247
Zooplankton abundance		18	0.439
Benthic macroinvertebrates	No. of species	4	0.031*
	No. of individuals	4	0.032*

*: $p < 0.05$

설치된 모형 간의 생물상 차이를 종합해 보면 세균현존량과 세균활성도, 식물플랑크톤 현존량(클로로필 a), 동물플랑크톤 현존량 모두 전체 조사기간으로 볼 때 시기에 따라 모형간의 차이를 나타냈지만 통계학적으로 유의한 범위의 차이는 아니었다(Table 4). 대형무척추동물의 출현종 및 개체수는 모형에 따라 통계적으로 유의한 차이를 나타내어 합성섬유 재질에 갈대가 식재된 모형에서 많은 출현종 및 개체수가 채집되었는데 특히 모형 1은 설치 후 6년간 운영되어 온 팔당호 경안천의 기존 인공수초재배섬에서 조사된 2문 5목 7과 7종 30개체(박혜경 등, 2007)와 비교해서도 유사한 출현종수를 보이는 것으로 나타났다. 그런데 설치된 모형 중 합성섬유 재질의 식재매트에는 수중에서 수생식물의 뿌리를 대신해 어류의 산란이나 생물의 서식처로 사용될 수 있는 산란 메디아가 부착되어 있어 생물이 부착하기

Table 3. Kinds of macroinvertebrates found in AVI miniatures

Scientific name	Miniature 1	Miniature 2	Miniature 3	Miniature 4
MOLLUSCA				
Gastropoda	11	19	4	2
PHYLUM ASCHELMIMTHES				
Class Nematoda	3			
ANNELIDA				
Hirudinea	2			
ATHROPODA				
Crustacea	24	19	12	5
Insecta	45	34	17	11
Phylum	4	2	2	2
Class	5	3	3	3
Order	8	6	7	7
Family	12	9	9	9
Species	18	13	11	12
No. of Individual	85	72	33	18

에 용이한 형태이었다. 따라서 어린 수생식물이 식재되어 수생식물의 뿌리가 식재매트 바닥에 활착되어 수중으로 충분히 뻗지 못한 코코넛 섬유 재질의 모형에 비해 인공 산란 메디아가 부착된 합성섬유 재질의 식재 매트에 노랑꽃창포를 식재한 모형에 비해 뿌리발달이 활발한 갈대를 식재한 모형에서 대형무척추동물의 서식이 더 활발했던 것으로 판단된다. 따라서 대형무척추동물의 경우 매트재질의 차이보다는 산란처나 서식처를 제공할 수 있는 식물뿌리와 인공메디아의 존재에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.3. 수생식물의 생장

수생식물 생장에 미치는 식생기반재의 영향을 보기 위해 각 모형에 식재된 수생식물(갈대와 노랑꽃창포) 종별로 성장 길이를 측정한 결과, 갈대를 식재한 모형 1, 2의 경우 코코넛섬유인 모형 2에서 높은 성장을 보였으며, 노랑꽃창포를 식재한 모형 3, 4에서는 매트별 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 모형 2, 3, 4는 거의 유사한 속도로 성장하였으며 최대 성장 길이도 유사하였으나 합성섬유에 갈대가 식재된 모형 1에서 성장속도도 가장 느렸고 최대 성장 길이도 가장 짧았다(Fig. 4).

식재식물 종별 영양염류 흡수량을 비교하기 위해 10월 25일에 최대로 성장한 식재식물의 지상부를 모두 절취하여 영양염류 흡수량을 조사한 결과, 수확된 건중량의 경우 갈대보다는 노랑꽃창포가 식재된 모형이 더 많은 양을 나타냈으며 수생식물 종별 영양염류 흡수량 비교에서는 갈대에 비해 노랑꽃창포가 질소와 인 모두 더 많은 흡수량을 보였고, 식생기반재 재질에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았다(Table 6).

3.4. 매트재질별 영양염류 및 미생물 흡착능력

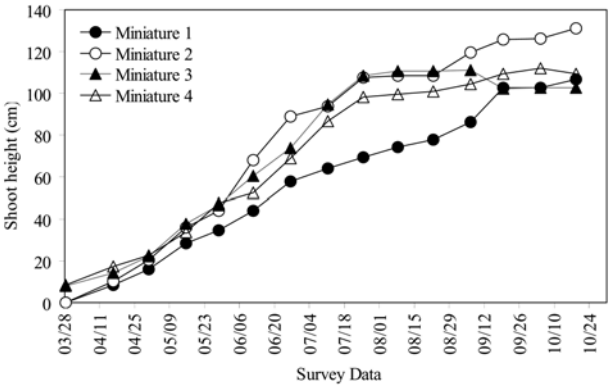

Fig. 4. Temporal changes of height of hydrophytes in AVI miniatures.

Table 5. Biomass of *Bidens frondosa* which were cut off from the miniature in autumn

Item	Miniature 1	Miniature 2	Miniature 3	Miniature 4
Wet weight (kg)	9.0	7.4	4.0	5.9
Dry weight (kg)	2.4	2.0	1.1	1.6

수질 상태가 다른 두 수역에서 식생기반재 종류별 영양염류 및 세균 흡착량의 차이를 조사하기 위해서 부영양수역인 팔당호와 빈영양수역인 파로호에서 식생기반재 조각을 수표면에 4개월간 부유시켜 영양염류 및 세균 흡착량을 비교한 결과, 팔당호와 파로호에서 모두 영양염류 및 세균의 흡착량이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 매트를 방치한 곳의 수중 영양염류 농도와 비교하면 팔당호의 경우 총질소는 합성섬유 매트가 12.3배, 코코넛섬유 매트가 17.1배의 높은 농도로 흡착하였고, 총인은 합성섬유 매트가 38.8배, 코코넛섬유 매트가 88.6배 높은 농도를 흡착하였다.

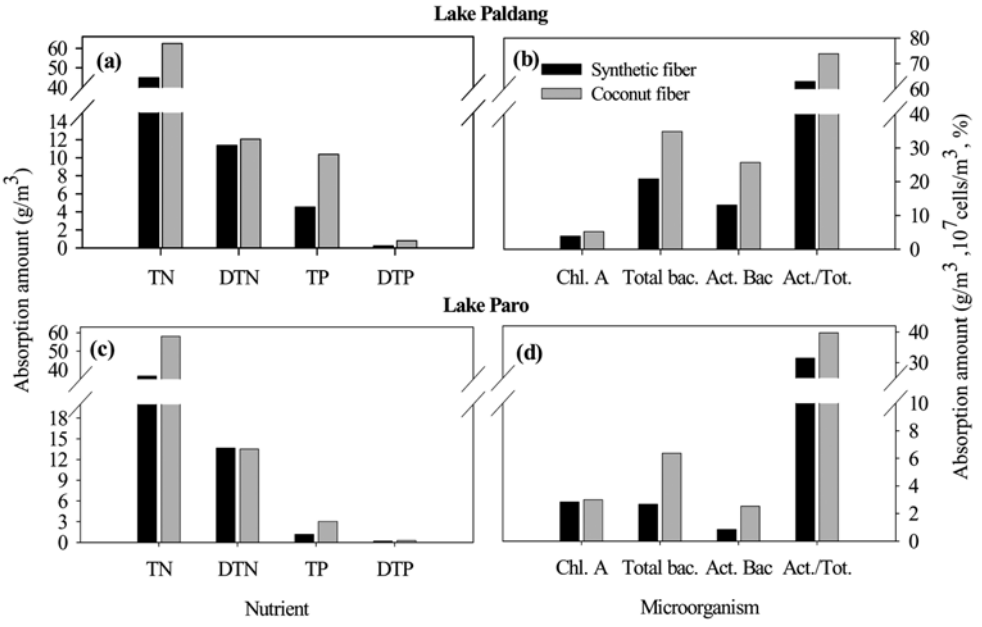

Fig. 5. Comparison of adsorbed amount of (a, c) nutrients and (b, d) microbes depending on the mats in Lake Paldang and Lake Paro.

수중 영양염류 농도가 팔당호에 비해 훨씬 낮은 파로호에서는 수중 농도에 비해 총질소는 합성섬유 매트가 25.9배, 코코넛섬유 매트가 41.0배로 흡착하였고, 총인은 합성섬유 매트가 95.7배, 코코넛섬유 매트가 248.3배를 흡착한 것으로 조사되어 수중 영양염류 농도가 낮아도 매트로 흡착되는 양은 많은 것으로 나타났다.

팔당호와 파로호에서 4개월 방치 후 회수하여 매트에 따른 영양염류 및 세균의 흡착량을 비교한 결과 용존성 총질소를 제외한 모든 영양염류 및 미생물 항목에서 코코넛 섬유재질 매트가 합성섬유재질의 매트보다 더 많은 흡착량을 보였으며 용존성 총질소의 경우 두 매트재질에서 유사한 흡착량을 보였다. 부영양 수역인 팔당호에서는 코코넛섬유재질의 매트가 합성섬유 재질의 매트에 비해 총질소는 1.4배, 용존총질소는 1.1배, 총인은 2.3배, 용존총인은 3.2배 더 많이 흡착하였고, 파로호에서는 총질소, 용존총질소, 총인, 용존총인을 코코넛섬유 재질 매트가 1.6배, 1.0배, 2.6배, 1.5배 각각 더 많이 흡착한 것으로 조사되었다. 두 호수에서 매트별 세균 흡착량을 보면 모두 코코넛섬유 재질의 매트가 많았는데 팔당호에서 총세균수는 1.7배, 활성세균수는 2.0배 더 많았고, 파로호에서는 총세균수가 2.4배, 활성세균수가 3.0배 더 많았다.

한편 두 호수에서 매트별 영양염류 및 세균 흡착량의 경시적 변동은 다른 경향을 보여 수중영양염류 농도가 높은 팔당호에서는 1, 2개월 동안 매트의 영양염류 흡착량이 급격하게 증가한 후 이후부터는 증가속도가 느려지거나 감소하는 경향을 보였으나 수중영양염류 농도가 낮은 파로호에서는 8개월 동안 꾸준히 영양염류 흡착량이 증가하는 것으로 나타났다. 세균 흡착량의 경우 이런 경향은 더욱 두드러지게 나타나 팔당호에서는 4개월까지 흡착량이 증가한 후 코코넛섬유재질 및 합성섬유재질 매트 모두에서 감소하였으나 파로호에서는 4개월까지는 서서히 증가하다가 이후 급격히 증가하는 패턴을 보였고 이런 현상은 코코넛섬유재질의 매트에서만 나타났다(Fig. 6).

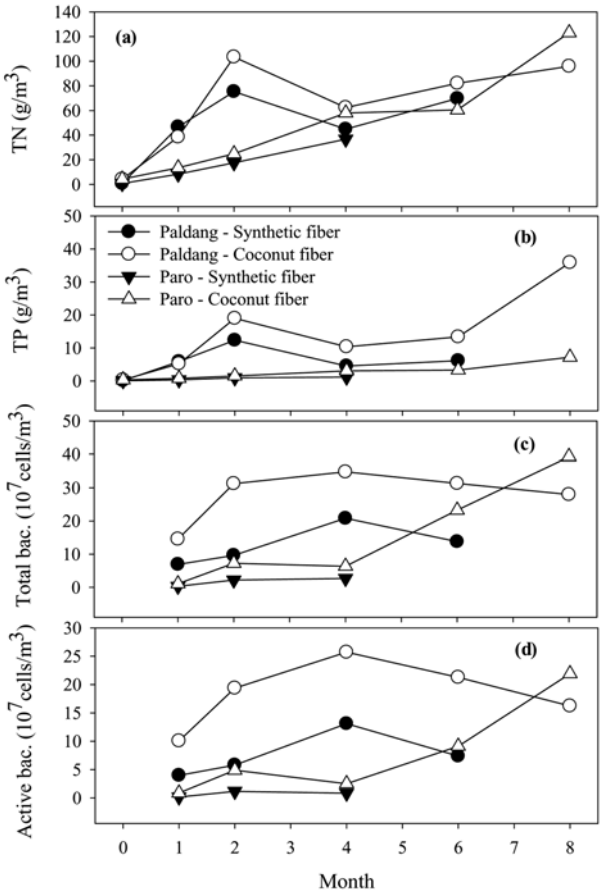

Fig. 6. Temporal changes of adsorbed amount of (a, b) nutrients and (c, d) microbes depending on the mats in Lake Paldang and Lake Paro.

3.5. 식생기반재 종류별 수질, 생물상 비교 검토 및 적용성 평가

모형실험을 통해 조사한 인공수초재배섬 식생기반재 종류나 식재식물 종에 의한 하부 수질 및 생물상의 차이는 거의 나타나지 않았는데, 부영양수역인 경안천에서는 수체 내에 영양염류가 풍부하기 때문에 매트에 의해 흡착된 영양염류를 이용하지 않더라도 수체 내의 물질을 이용하기 쉽고, 인근 수변에도 수생식물이 널리 서식하고 있어서 생물들이 서식하기 좋은 여건을 가지고 있기 때문에 인공수초재배섬에 대한 생물의 선호도가 낮아 식재 매트 재질에 따른 차이가 뚜렷이 나타나지 않았던 것으로 판단되며, 따라서 경안천과 같은 부영양 수역에서는 합성섬유나 코코넛섬유 재질의 매트 어느 쪽을 사용하든 인공수초재배섬의 식생기반재의 기능을 충족할 수 있을 것으로 예상된다.

수생식물의 생장의 경우, 합성섬유 재질에 식재한 갈대가 다른 모형에 비해 최대 성장길이가 가장 짧았으며, 성장속도도 가장 느려서 다른 모형과 차이를 나타내었다. 이런 결과의 원인으로는 갈대의 성장속도, 합성섬유 재질의 영양염류 흡착능, 타감작용 등을 들 수 있다. 그런데 모형의 설치 3개월 후부터 미국가막사리(*Bidens frondosa*)가 외부로부터 침입하여 무성하게 자라는 것이 관찰되었다. 미국가막사리는 인공수초재배섬 환경에서 매우 적응력이 빠른 수생식물 종이며(박혜경 등, 2006), 10월 25일 각 모형의 수생식물 지상부 제거시 식재식물과 미국가막사리의 총량을 비교했을 때 모형 1에서 가장 많은 미국가막사리가 수확되었다. 따라서 모형 1에서 갈대의 성장속도가 가장 느리게 나타난 것은 코코넛 섬유 재질의 매트에 비해 합성섬유 재질의 매트가 영양염류 흡착량이 적었던 점과 더불어 외부로부터 이입된 미국가막사리의 타감작용(Mulderij et al., 2007)이 모형 1에 식재된 갈대의 생장에 영향을 주었기 때문으로 판단된다(Table 5). 수생식물 종별 매트 종류에 따른 성장길이에 대해 t-검정을 실시한 결과 갈대의 경우 매트 종류에 따라 성장 길이가 다른 것으로 나타나 갈대를 식재할 인공수초재배섬에서는 합성섬유 재질 보다는 코코넛섬유 재질의 매트를 사용하는 것이 더 바람직한 것으로 나타났다(Table 6). 노랑꽃창포의 경우 식재매트 재질에 따른 성장 길이의 차이는 거의 없었다.

한편 식재식물 종별 영양염류 흡수량을 조사한 결과 건중

Table 6. The shoot hight of hydrophytes and the amount of nutrients which were removed through cutting off the hydrophytes in AVI miniatures

Hydrophyte	Mat	Average shoot height	Maximum shoot height	Sig. of t-test	Material removal	
					Nitrogen (g/m^2)	Phosphorus (g/m^2)
P. australis	Synthetic fiber	58.2	106.6	<0.000	3.3	0.1
	Coconut fiber	79.3	131.3		3.5	0.2
I. pseudoacorus	Synthetic fiber	73.7	110.9	0.215	6.0	0.5
	Coconut fiber	71.4	111.9		5.6	0.5

량 및 영양염류 흡수량 모두 노랑꽃창포가 더 많았다. 수초재배섬에 이용되는 수생식물의 특성을 보면 노랑꽃창포가 갈대보다 높은 영양염류 흡수량을 나타내는 것으로 알려져 있는데(최명재 등, 2007) 본 연구와 일치된 결과를 보였다. 이런 결과로 볼 때 설치 초기부터 식재 식물의 빠른 활착과 성장 그리고 수중영양염류 제거효과를 보기 위해서는 갈대보다 노랑꽃창포가 수초재배섬 식재 종으로 더 적당할 것으로 판단된다. 그러나 갈대는 단위면적 당 피도가 높고 최대 성장 길이도 길기 때문에 장기간 운영하는 수초재배섬의 경우에는 다른 결과가 나타날 수 있는 가능성을 배제할 수 없다.

수역별 매트 흡착량을 조사한 결과, 부영양수역인 팔당호와 빈영양수역인 파로호에서 모두 매트 재질에 상관없이 영양염류 및 미생물 흡착량이 매우 많았다. 이런 현상은 식생기반재(매트) 안에서 농도 차이로 인한 확산에 의해 외부로 빠져 나가는 힘보다 더 강한 힘이 작용하여 식생기반재 내부에 높은 농도의 영양염류가 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 김용전 등(2008)의 연구에 의하면 이러한 현상은 세균에 의한 현상이라고 설명하고 있으며, 세균은 저농도의 영양염을 흡수하여 체내에 높은 농도로 전환시킬 수 있는 능력을 가지고 있다고 알려져 있다(Chróst and Rai, 1994). 또한 안태석(2003)의 연구에서 세균은 빈영양호인 파로호에서도 질소와 인을 농축시켜 식물 성장에 충분한 농도의 영양염류를 제공하고 있음을 나타내었다. 본 연구에서도 두 수역에 수개월간 방치한 매트 조각의 총세균수와 활성세균수를 확인한 결과, 설치된 수역과 매트 재질에 따라 차이는 있지만 주변 호소수에 비해 총세균수는 약 13.4~142.1배 정도 높았고 활성세균수는 약 11.9~128.5배 높은 결과를 나타내어 앞의 결과를 뒷받침해 주었다. 매트 재질에 따른 흡착량의 차이를 보면 수역의 구분 없이 모두 코코넛 섬유 재질의 매트에서 영양염류의 흡착량이 높았으며, 이 영양염류를 이용하는 식물플랑크톤이나 세균의 흡착량 또한 코코넛 섬유 재질의 매트에서 더 많았다. 이런 결과로 볼 때 코코넛 섬유가 합성섬유에 비해 물질 흡착능이 더 큰 것으로 판단된다. 따라서 파로호와 같이 영양염류 농도가 낮아 수생식물 성장이 제한될 가능성이 높은 빈영양 수역에 인공수초재배섬을 설치할 경우에는 합성섬유보다 코코넛 섬유 재질의 식생기반재를 사용하는 것이 식재된 수생식물의 생장을 위한 영양염류 및 미생물 흡착에 더 유리할 것으로 판단된다.

4. 결 론

인공수초재배섬에 적합한 식생기반재의 재질과 식재 수생식물종을 평가하기 위해 현재 가장 일반적으로 사용되는 식생기반재 2 종류와 수생식물 2 종류를 사용하여 4 종류의 인공수초재배섬 모형을 제작하였다. 부영양 수역인 팔당호에서 각 인공수초재배섬 모형별 수질변화, 수중생물상 발달을 비교한 결과, 하부 수질, 수생식물 성장 및 수중생물상 발달에는 큰 차이를 보이지 않았으며, 수생식물 종으로는 노랑꽃창포가 성장속도와 영양염류 흡수량이 더 우수한 것으로 나타났다. 부영양수역인 팔당호와 빈영양수역인 파로호에서 식생기반재의 물질흡착능을 조사한 결과, 수역의 수질상태와 상관없이 코코넛섬유 재질의 식생기반재가 합성섬유 재질의 식생기반재에 비해 영양염류 흡착능과 미생물 흡착능이 더 양호한 것으로 조사되었다. 이런 결과로 볼 때 팔당호와 같은 부영양 수역에서는 식생기반재 재질의 종류에 따라 인공수초재배섬의 기능과 수중생물상 발달에는 큰 영향이 없으나 파로호와 같은 빈영양 수역에서는 영양염류나 세균의 흡착량이 많은 코코넛 섬유 재질의 매트를 식생기반재로 사용하는 것이 식재된 수생식물의 생장에 유리할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2007년도 팔당호 수질개선사업 「인공수초재배섬 운영·관리사업」의 일환으로 수행되었습니다. 대형무척추동물상 분석에 도움을 주신 자연환경연구센터의 박정호 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

권오길(1990). *한국동식물도감, 동물편(연체동물 I)*, **32**, 문교부.

김미리, 서은영, 최승익, 안태석(2006). 호수 생태계에서 살아있는 세균을 측정하기 위한 qDVC 방법의 적용. *한국미생물학회지*, **42**(3), pp. 205-209.

김용전, 최승익, 안태석(2008). 팔당호 인공식물섬 공극수에서 미생물 개체수와 체외효소활성도. *한국하천호수학회지*, **41**(1), pp. 19-25.

김훈수(1977). *한국동식물도감, 동물편(새우류)*, **19**, 삼화서적주식회사.

농림부·농어촌진흥공사(1999). *수생식물에 의한 수질개선기법 연구*.

박선구, 조인기, 권오병, 문정수, 엄한용, 황순진(2008). 인공식물섬에 의한 조류(Algae) 및 영양염류의 제거. *한국하천호수학회지*, **41**(Special issue), pp. 93-98.

박혜경, 공동수, 변명섭, 전남희, 최명재, 윤석환, 유경아, 강필구(2006). *인공수초재배섬 운영·관리사업 보고서*. 한

강수계 팔당호 수질개선사업, 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회.

박혜경, 공동수, 변명섭, 전남희, 최명재, 윤석환, 반병오, 신동명(2007). *인공수초재배섬 운영·관리사업 보고서*. 한강수계 팔당호 수질개선사업, 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회.

선용춘(2005). 인공식물섬의 영양염류 제거 및 정수식물 생장에 관한 연구. 조경학석사학위논문, 전남대학교.

심우섭, 한인섭(1998). 울산지역에서 자생하는 갈대, 부들, 갈풀을 이용한 Reed-Bed의 생활하수 정화능력연구. *한국환경과학회지*, **7**(2), pp. 117-121.

안윤주, 공동수(1995). 생이가래를 이용한 영양오염물질 제거방안연구. *대한환경공학회지*, **17**(6), pp. 593-603.

안태석(2003). 여재를 이용한 자연순환방식의 수질정화시스템 개발. 강원지역환경기술개발센터.

안태석, 박현진(2001). 21세기의 새로운 환경기술-생태기술. *국제심포지움 호수연안복원과 인공식물섬 발표논문집*, pp. 129-141.

유경아, 박혜경, 변명섭, 전남희, 최명재, 윤석환. 공동수(2007). 팔당호에서 인공수초재배섬 설치에 따른 동물플랑크톤 군집 변화. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 339-347.

윤일병(1988). *한국동식물도감, 동물편(수서곤충류)*, **30**, 문교부.

전남희, 박혜경, 변명섭, 최명재(2007). 인공수초재배섬에서 세균의 활성과 세균 군집 구조. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 676-682.

정연숙, 오현경 , 노찬호 , 황길순(1999). 습지식물의 지상부 제거가 생산력과 영양염류 제거량에 미치는 효과. *한국환경생물학회지*, **17**(4), pp. 459-465.

최명재, 변명섭, 박혜경, 전남희, 윤석환, 공동수(2007). 팔당호 인공수초재배섬에서 수생식물 생장 및 영양염류 제거 효율. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 348-355.

최병래(1992). *한국동식물도감, 동물편(연체동물II)*, **33**, 교육부.

한강물환경연구소(2007). *남한강 수계 호소의 생태계 구조조사*. 한강수계관리위원회.

한강수계관리위원회(2007). *북한강 수계 호소의 생태계 구조조사*.

한국수자원공사(1993). *수생식물 재배를 통한 댐저수지 유입수 수질개선 타당성 조사연구*.

함종화, 윤춘경, 김형철, 구원석, 신현범(2005). 식생피도가 인공습지의 질소 및 인 처리 효율에 미치는 영향과 습지조성 및 관리. *한국육수학회지*, **38**(3), pp. 393-402.

환경관리공단(2000). *수초재배섬 운영 결과 보고서*.

환경부(2007). *수질오염공정시험법*.

Ahn, T. S. and Kong, D. S. (1998). Application of ecotechnology for nutrient removal. Frontier in biology : The challenges of Biodiversity, Biotechnology and Sustainable Agriculture. C. H. Chou and K. T. Shao (eds.), Academia Sinica, Taipei. pp. 209-216.

Chróst, R. J. and Rai, H. (1994). *Bacterial secondary production*. In: J. Overbeck and R. J. Chróst (eds.), Microbial ecology of Lake Plussee. Springer-Verlag, New York, pp. 92-117.

Kawai, T. (1985). An illustrated book of aquatic insects of Japen. 東海大學出版會.

Mulderij, G., van Nes, E. H., and van Donk, E. (2007). Macrophyte‐phytoplankton interactions: The relative importance of allelopathy versus other factors. *Ecological Modelling*, **204**, pp. 85-92.