*Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 23, No. 3, pp.348-355 (2007)*

# 팔당호 인공 수초재배섬에서 수생식물의 생장 및 영양염류 제거 효율

최명재 · 변명섭 · 박혜경† · 전남희 · 윤석환 · 공동수

국립환경과학원 한강물환경연구소

# The Growth and Nutrient Removal Efficiency of Hydrophytes at an Artificial Vegetation Island, Lake Paldang

Myeong-Jae Choi · Myeong-Seop Byeon · Hae-Kyung Park† · Nam-Hui Jeon · Suk-Hwan Yoon · Dong-Soo Kong

*Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research*

***(Received 23 Feburary 2007, Accepted 10 April 2007)***

**Abstract**

We investigated temporal changes of composition, habitat area, growth rate and elements content of hydrophytes at the artificial vegetation island (AVI) in Kyungan Stream within Lake Paldang. We also assessed nutrient removal rate through cutting off the emergent part of hydrophytes. The kinds of hydrophytes have increased from four species (*P. australis, P. japonica, T. angustifolia* and the *Z. latifolia*) at initial stage of installation to more than 29 species for 6-year operation. *P. japonica* was most dominant species at the AVI in 2006. The habitat area of *P. japonica* have increased about 2.5 times compared to the initial planting area, occupying 63% of AVI's vegetation area. The incoming species of *S. fluviatilis* and *B. frondosa* have adapted successively and expanded habitat area in the AVI. The relative growth rate of *P. japonica* and *P. australis* was highest in spring sprouting period. Their hights and weights have increased until summer, by the time they were cutting off the emergent part. They started regrowth immediately after cutting and continued to grow until September and withered away in November. The carbon contents of *P. japonica* and *P. australis* have increased during growth phase, on the contrary, the nitrogen and phosphorus contents have decreased. By cutting off and removing the emergent part (leaves and branches) of hydrophytes twice from AVI, 17.6 $gN/m^2/y$ of nitrogen and 1.3 $gP/m^2/y$ of phosphorus was removed from AVI in 2006.

**keywords** : Artificial vegetation island, Hydrophyte, Lake Paldang, Nutrients removal

## 1. 서 론

인공수초재배섬(Artificial vegetation island: AVI)은 갈대 등의 수초를 인공의 부유틀에 재배하여 수중의 영양염류 제거를 통한 수질정화, 어류와 동 · 식물플랑크톤 등 각종 수생생물의 산란 및 서식공간 제공, 생태계의 먹이 사슬을 이용한 조류 증식 억제 등 쾌적한 수변환경 조성 및 자연환경 기능 향상을 도모하기 위한 생태공학적 기술이다. 인공수초재배섬은 현재 국내의 대형 인공호나 저수지에서 수질개선, 수중생태계 복원 및 경관 향상의 목적으로 인공식물섬, 인공식재섬, 수초뜬섬, 어류산란시설 등의 다양한 명칭으로 설치되고 있다(안 등, 2001; 박 등, 2006). 수초재배섬은 크게 수생식물과 식생기반재, 수초재배섬을 수면에 띄우는 부력재의 3가지로 구성되어 있으며, 수생식물은 수초재배섬에서 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 수질개선을 목적으로 설치된 수초재배섬에서는 지상부(잎, 줄기 등 수면 위에 노출되는 부분)의 생체량이 크고 성장속도가 빠른 수생식물을 식재하는 것이 적당하며, 어류의 산란처 제공이 주 목적이라면 수면 아래의 뿌리 발달이 왕성한 수생식물을 선택해야한다. 또한 경관 향상을 목적으로 설치한 수초재배섬에는 개화기가 길고 꽃의 색이 선명한 수생식물이 주로 사용된다.

수초재배섬에서 수질개선의 효과를 가시적으로 확인할 수 있는 것은 성장한 수생식물 지상부를 수역 외로 제거하면서 얻어지는 수중 영양물질의 제거이다. 수초재배섬 내부에 식재된 수생식물은 수중의 질소, 인 등의 영양물질을 섭취 또는 흡착하게 되고, 흡수된 영양물질은 식물체로 고정된다(공 등, 1999; 심 등, 1998). 이 때 성장한 수생식물을 수역 외로 제거함에 따라 수중의 영양물질(부영양화 물질)을 제거하게 되므로 수질개선을 목적으로 하는 수초재배섬에서는 제거하는 식물체량이 많을수록 수중의 영양물질 제거에 유리하기 때문에 많은 양의 물질제거량을 얻기 위해서는 수초재배섬에서 수생식물의 생장에 관한 지속적인 연구와 관리가 필요하다. 그중에서도 특히 수초재배섬에서 재배하기 적합한 수생식물 종의 선택과 수생식물이 성장하면서부터 고사하기 전까지 성장시기에 따른 수생식물의 적당한 제거 시기의 선택이 중요하다. 하지만 현재까지

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

많은 호수에 인공 수초재배섬이 설치되어 운영되고 있지만 설치 이후 식재된 수초의 성장상태, 영양물질 흡수량 파악 등 수초재배섬에 대한 지속적인 관리와 연구가 제대로 이루어지지 않아 수초재배섬의 설치 목적성을 잃거나 제 기능을 하지 못하고 있는 실정이다(박 등, 2006).

본 연구에서는 수질개선을 목적으로 팔당호 경안천 수역에 인공 설치된 수초재배섬에서 수초재배섬 조성 이후 식재된 수생식물의 서식면적 및 종의 변화를 조사하고 수생식물의 성장속도와 성장시기에 따른 영양물질 함량 변동 그리고 수생식물 지상부 제거에 따른 영양물질 제거량을 조사하여 수중 영양물질 제거효율을 높이기 위한 적절한 수초재배섬의 관리 방안을 고찰하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지점 및 기간

팔당호 경안천 수역에 인공 조성된 수초재배섬(시설면적: 41.5 m × 64.8 m)에서 초기 식재 종인 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*), 줄(*Z. latifolia*) 및 애기부들(*T. angustifolia*)을 포함하여 현재 수초재배섬에서 서식하고 있는 수생식물을 대상으로 종별 서식면적, 성장속도, 영양물질 함량 등을 조사하였다. 본 연구는 2006년 4월부터 2006년 11월까지 매주 또는 격주로 조사하였다(Fig. 1).

### 2.2. 조사방법

수온, 용존산소농도(DO), pH는 현장에서 현장측정기(YSI-6600)을 이용하여 측정하였다. 총질소와 암모니아성 질소, 총인과 인산염 인은 수질오염공정시험방법(환경부, 2004)에 준하여 분석하였다. 수생식물의 종별 서식면적은 100 m 줄자를 이용하여 측정하였으며, 수초재배섬에서 서식면적이 가장 넓고 지상부 생체량이 가장 많은 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*)를 대상으로 각각 10주(株)를 선택하여 표지(標指)하고 매주 또는 격주로 성장 길이를 측정하였다. 또한 각각 20주(株)의 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*)의 지상부를 절취하여 실험실로 옮겨와 탄소(C), 질소(N)와 인(P)의 성분분석을 실시하였다. 7월 21일 1차 지상부 절취 작업과 11월 30일에 2차 절취 작업 시 서식범위가 넓은 갈대(*P. australis*), 달뿌리풀(*P. japonica*), 미나리(*O. javanica*), 줄(*Z. latifolia*), 고마리(*P. thunbergii*), 미국가막사리(*B. frondosa*), 골풀(*J. effusus*), 노랑꽃창포(*I. pseudoacorus*), 질경이택사(*A. plantago-aquatica*), 매자기(*S. fluviatilis*) 등 10종에 대하여 절취된 지상부의 총 습중량과 건중량을 측정하고 탄소, 질소, 인의 함량을 분석하여 절취 작업에 의한 수초재배섬의 물질제거량을 구하였다. 수생식물의 영양물질 성분분석은 습중량을 측정한 후 80℃에서 5일간 건조하여 건중량을 측정하고 건조된 식물체 일부를 분쇄기로 갈아 미세분말화하여 탄소(C), 질소(N), 인(P)의 함량분석을 실시하였다. 식물체의 인 함량은 과황산칼륨을 이용한 흡광광도법(환경부, 2004)으로 분석하였고 탄소와 질소 함량 분석은 원소분석기(CHN analyzer ; Elementar, Vario-EL)를 사용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 조사수역의 이화학적 특성

수초재배섬이 설치된 경안천의 강우량과 유입량을 2006년 1월부터 11월 말까지 조사하였다(국가수자원관리종합정보시스템, 2007). 1월부터 3월까지 강우가 거의 없었으며, 이에 따라 경안천의 유입유량도 매우 적었다. 7월 중순부터 7월말까지는 120 mm 이상의 집중호우가 여러 차례 있었다. 이때 강우량의 증가에 따라서 경안천에 유입되는 유량도 급격히 증가하였다. 8월말 3차례의 큰 강우를 제외하고는 11월 말까지 2 mm 이상의 강우는 없었으며, 유입되는 유량 역시 감소하였다. 2006년 경안천 유역의 총 강우량은 1,451 mm였고, 평균유입량은 33CMS이었다.

경안천 수역의 연중 수온 변화는 7.6~29.9°C이었고 우리나라 계절변화에 따라 여름철까지 점차 수온이 증가한 후 8월말 이후 다시 감소하였다. 연중 pH 변화는 7.3~9.4이었으며 평균 pH는 8.2이었다. 용존산소농도의 연중변화

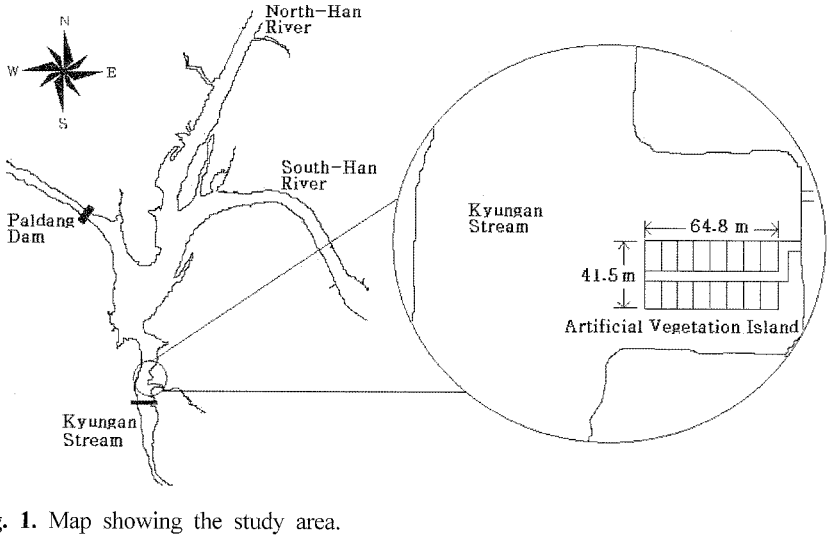


**Fig. 1.** Map showing the study area.

는 6.1~18.2 mg/L이었으며, 평균 11.5 mg/L이었다. 수초재배섬이 위치한 팔당호 경안천 수역의 영양염류 농도는 TN이 연평균 농도로 3.654 mg/L, $NH_4$-N이 0.035 mg/L, TP가 0.144 mg/L, $PO_4$-P가 0.043 mg/L이었다(박 등, 2006). 본 연구의 조사기간인 2006년 4월부터 11월까지 조사대상 수역의 이화학적 및 기상학적 환경 인자들을 볼 때, 수초재배섬이 설치된 경안천 수역의 수질은 이미 알려진 바와 같이 과영양상태를 보였으며 수온과 영양염류 농도 등의 이화학적 조건이 수초재배섬에서 수생식물이 성장하는데는 충분한 상태인 것으로 나타났다.

### 3.2. 수초재배섬 수생식물의 종별 서식 특성

2000년 5월 수초재배섬 설치 초기에 식재한 수생식물은 달뿌리풀(*P. japonica*), 갈대(*P. australis*), 애기부들(*T. angustifolia*)과 줄(*Z. latifolia*), 4종의 대형수생식물이었다(환경관리공단, 2000). 이 수생식물 종들은 영양염류 흡수 능력이 높으면서 팔당호 유역에 많이 분포하고 있다. 각 수생식물의 초기 식재면적은 달뿌리풀(*P. japonica*), 갈대(*P. australis*), 줄(*Z. latifolia*), 애기부들(*T. angustifolia*)이 각각 640 $m^2$이었다(환경관리공단, 2000). 수초재배섬에 서식하는 수초종을 조사한 결과 초기 식재 후 6년 동안 외부 주변수역에서 다양한 초본류가 유입되어 2006년 현재 수초재배섬의 서식하는 수생식물은 약 29종의 수생식물이 분포하고 있었다(Table. 1).

수초재배섬에서 서식하는 수생식물 중 달뿌리풀(*P. japonica*)이 1,611 $m^2$로 가장 넓은 서식면적을 보였으며 총 식재면적의 63%를 차지하고 있었다. 초기 식재면적이 640 $m^2$이었던 것과 비교하면 서식면적이 초기에 비해 2.5배 증가하였다. 다음으로는 갈대(*P. australis*)가 넓은 서식면적을 보였지만 141 $m^2$로 초기 식재면적에 비해 오히려 감소하였다. 갈대(*P. australis*), 달뿌리풀(*P. japonica*)과 함께 초기 식재종인 줄(*Z. latifolia*)은 서식면적이 많이 감소하여 일부에만 서식하고 있었고 애기부들(*T. angustifolia*)은 소멸된 상태였다. 그리고 외부 이입종인 매자기(*S. fluviatilis*)와 미나리(*O. javanica*), 미국가막사리(*B. frondosa*) 등은 점차 서식면적을 넓혀가고 있었다(Fig. 2).

수초재배섬의 수생식물이 서식면적의 차이를 보이는 것은 수생식물의 성장특성 때문인 것으로 판단된다. 두 종의 이식체 식물간의 경쟁과정을 조사한 연구(농림부 · 농어촌진흥공사, 1999)를 보면 갈대(*P. australis*)와 애기부들(*T. angustifolia*)이 수평생장의 경쟁에서 갈대(*P. australis*)의 분주체(ramet) 생산능력이 월등하기 때문에 갈대(*P. australis*)에 의한 애기부들(*T. angustifolia*)의 사망률도 높았으며, 시간이 지남에 따라 갈대는 애기부들(*T. angustifolia*)을 경쟁적으로 배타하는 것으로 보여 장기간 동일지소에서 두 종이 공존하는 것이 어려울 것으로 판단되며 갈대(*P. australis*)와 애기부들(*T. angustifolia*)을 혼재하여 식재하지 말고 각 종의 block을 별도로 설치하여야한다고 설명하고 있다. 팔당호 수초재배섬의 경우 식재된 수생식물 상호간의 보호 장치가 없었기 때문에 애기부들(*T. angustifolia*)은 위와 같은 결과로 경쟁에서 밀려 결국 소멸한 것으로 판단된다. 서식면적을 가장 넓힌 달뿌리풀(*P. japonica*)의 경우에

**Table 1.** Kinds of hydrophytes found in artificial vegetation island of Lake Paldang

| Scientific name | Korean name |
|---|---|
| **Salviniaceae** | **생이가래과** |
| *Salvinia natans* | 생이가래 |
| **Salicaceae** | **버드나무과** |
| *Salix gracilistyla* | 갯버들 |
| **Polygonaceae** | **마디풀과** |
| *Rumex crispus* | 소리쟁이 |
| *Persicaria thunbergii* | 고마리 |
| *Persicaria blumei* | 개여뀌 |
| **Brassicaceae** | **배추과** |
| *Barbarea orthoceras* | 나도냉이 |
| **Ranunculaceae** | **미나리아재비과** |
| *Ranunculus sceleratus* | 개구리자리 |
| **Lythraceae** | **부처꽃과** |
| *Lythrum anceps* | 부처꽃 |
| **Trapaceae** | **마름과** |
| *Trapa japonica* | 마름 |
| **Onagraceae** | **바늘꽃과** |
| *Ludwigia prostrata* | 여뀌바늘 |
| **Apiaceae** | **미나리과** |
| *Oenanthe javanica* | 미나리 |
| *Sium suave* | 개발나물 |
| **Cucurbitaceae** | **박과** |
| *Actinostemma lobatum* | 뚜껑덩굴 |
| **Asteraceae** | **국화과** |
| *Bidens frondosa* | 미국가막사리 |
| **Alismataceae** | **택사과** |
| *Alisma plantago-aquatica var. orientale* | 질경이택사 |
| **Poaceae** | **벼과** |
| *Alopecurus aequalis var. amurensis* | 뚝새풀 |
| *Beckmannia syzigachne* | 개피 |
| *Zizania latifolia* | 줄 |
| *Phragmites japonica* | 달뿌리풀 |
| *Phragmites australis* | 갈대 |
| **Cyperaceae** | **방동사니과** |
| *Carex neurocarpa* | 괭이사초 |
| *Scirpus fluviatilis* | 매자기 |
| **Araceae** | **천남성과** |
| *Acorus calamus var. angustatus* | 창포 |
| **Lemnaceae** | **개구리밥과** |
| *Spirodela polyrhiza* | 개구리밥 |
| *Lemna paucicostata* | 좀개구리밥 |
| **Eriocaulaceae** | **곡정초과** |
| *Eriocaulon miquelianum* | 개수염 |
| **Juncaceae** | **골풀과** |
| *Juncus effusus var. decipiens* | 골풀 |
| **Iridaceae** | **붓꽃과** |
| *Iris pseudoacorus* | 노랑꽃창포 |
| *Iris ensata var. spontanea* | 꽃창포 |
| 19 family 26 genus 29 species | |

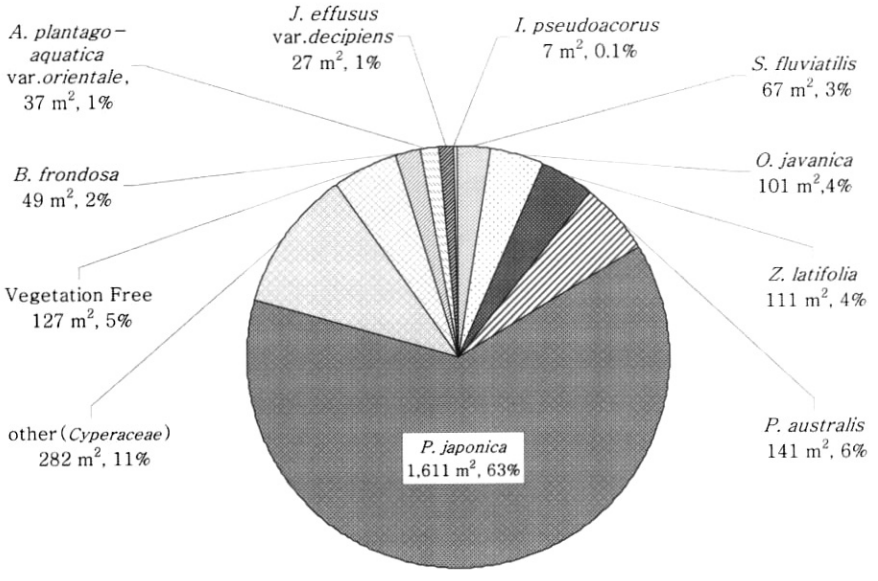


**Fig. 2.** The habitat areas and ratios of dominant hydrophytes in AVI.

는 수평생장시 지하경을 이용하는 다른 수생식물과 달리 지하경과 함께 지상의 줄기가 바닥을 기면서 아래로는 뿌리를 내리고 위로는 새싹을 발아하는 형태의 유리한 생태 특성을 가지고 있어 같은 속의 갈대(*P. australis*)보다도 서식면적이 확대된 것으로 판단된다. 지금까지와 같이 앞으로도 수초재배섬 식재 수생식물에 대한 관리가 이루어지지 않는다면 차후 이입종의 수가 더 늘어날 것으로 판단되며, 현재 넓은 서식면적을 갖거나 점차 넓혀가는 수생식물로 우점종이 바뀔 것으로 판단된다. 따라서 수질개선 또는 수변생태 복원 등 수초재배섬 설치 초기의 목적을 달성하기 위해서는 수초재배섬 운영 중 이입된 식물이 이미 식재되어진 수생식물의 성장에 교란을 일으키거나 저해하지 못하도록 적절한 시기에 제거를 해 주어야 하며 또한 이미 식재되어진 수생식물 간에도 다른 식재틀로 침범을 하여 경쟁을 하게 되면서 식재된 식물 간에 불균형을 이루는 것을 방지하기 위해 식재틀 사이에 펜스나 block 등을 설치해 주거나 단순한 종으로 구성하는 것이 바람직할 것이다.

### 3.3. 수초재배섬 수생식물의 성장속도

현재 수초재배섬에 초기 식재된 수생식물 중 가장 활발한 성장을 보이고 있는 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)을 대상으로 성장 속도를 조사하였다. 먼저 개체당 길이 성장 속도를 보면 갈대는 4월 19일 조사초기에 35.9 cm이었던 길이가 지상부 절취작업 전까지 지속적으로 성장하였으며 7월 12일에는 179.4 cm까지 성장하였다. 달뿌리풀(*P. japonica*)도 유사한 결과를 보였다(Fig. 3(a)). 7월 21일 지상부의 절취 작업 이후 재성장하기 시작한 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)은 봄철 성장기와 같이

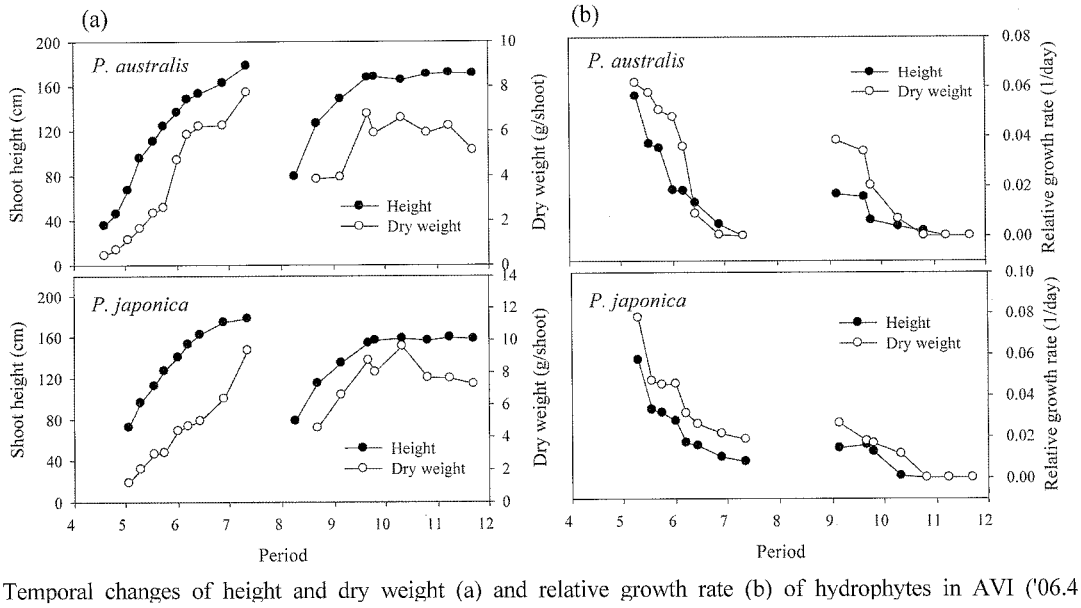


**Fig. 3.** Temporal changes of height and dry weight (a) and relative growth rate (b) of hydrophytes in AVI ('06.4~11).

지속적인 성장을 보였다. 9월 하순 이후 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)의 길이는 더 이상 증가하지 않고 11월 8일 조사까지 일정하게 유지되었고 9월 하순의 최종 성장 길이는 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)이 각각 173.5 cm, 159.3 cm까지로 7월 21일 제초작업 직전 길이의 80~90%까지 성장하였다. 다만 지상부 절취 작업 후 재성장시 갈대(*P. australis*)의 성장이 달뿌리풀(*P. japonica*)보다 좋게 나타났다. 개체당 건중량으로 본 무게성장 결과를 보면 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)은 조사 초기부터 7월 지상부 절취 작업 전까지 건중량이 꾸준히 증가하여 길이성장과 유사한 결과를 보였다. 그러나 7월 지상부 절취 작업 이후 재성장하기 시작한 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)은 봄철 성장기와 같이 건중량이 증가하였으나, 9월 21일 이후에는 뚜렷한 증가를 보이지 않았고 오히려 감소하였다(Fig. 3(a)). 이런 결과로 볼 때 가을철인 9월 하순 이후에는 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)이 모두 증식이 멈추고 고사되는 단계인 것으로 추정된다.

위 결과를 바탕으로 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)의 건중량으로 비증식률을 조사하였다. 비증식률 계산은 식 (1)을 이용하여 계산하였다(안 등, 1995).

$$\text{비증식률, RGR(Relative growth rate)} = \frac{ln\,W_2 - ln\,W_1}{t_2 - t_1}(d^{-1}) \quad (1)$$

$W_1$ : 시간 $t_1$에서 생체량
$W_2$ : 시간 $t_2$에서 생체량

갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)의 성장 초기에는 비증식률이 높은 값을 나타내었다(Fig. 3(b)). 초기 달뿌리풀(*P. japonica*)의 비증식률은 0.078 $d^{-1}$이었으며 갈대(*P. australis*)는 0.065 $d^{-1}$이었다. 이 후 두 식물의 성장이 둔화되면서 비증식률이 점차 감소하였고, 최고 성장점에 도달했을 때에는 달뿌리풀(*P. japonica*) 0.019 $d^{-1}$, 갈대(*P. australis*) 0 $d^{-1}$로 나타났다. 1차 지상부 절취 이후 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*)이 재성장하면서 0.026 $d^{-1}$, 0.038 $d^{-1}$로 비증식률이 증가하였지만 봄철 초기 성장에 비해 2배 이상 낮은 결과를 나타냈으며 10월 26일부터는 두 식물 모두 0 $d^{-1}$로 더 이상 성장을 하지 않는 것으로 나타났다. 이런 결과를 볼 때, 수초재배섬에서 식물은 봄철 초기 성장시에 가장 높은 비성장률을 보이며 성장하나 성장이 진행될수록 성장속도는 서서히 감소하고 여름철 지상부 절취 이후에는 재성장이 이루어지나 이것은 겨울철 고사 이후의 봄철 초기 성장과는 달리 절취 전 여름철 성장 속도와 유사한 성장 속도로 성장하며 이후 그 속도는 지속적으로 감소하여 가을 이후에는 식물의 성장이 둔화되고 성장이 멈추는 것을 알 수 있다. 따라서 수초재배섬에서 수생식물은 초기 성장 속도가 가장 빠르며 이후 지속적으로 감소하고, 또 지상부 절단 이후에도 빠른 속도로 재성장하고 그 최종 성장량도 절단 전 성장량의 80~90%에 달하므로 수초재배섬에서 수질 개선을 위해 수생식물의 지상부 수확량을 늘리기 위해서는 초기 성장이후 성장이 둔화된 시기를 적절히 선택하여 제초 횟수를 늘림으로써 결과적으로 수확량의 증가를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.4. 수생식물 성장 단계별 영양염류 흡수 함량

수생식물의 성장단계별로 식물체내 주요 원소의 함량을 조사한 결과(Fig. 4), 수생식물이 성장하면서 단위 건중량당 탄소의 함량은 서서히 증가하였으나 영양염류인 질소와 인의 함량은 점차 감소하였다. 탄소는 식물체의 골격을 이루는 구성요소 중 가장 많은 원소일 뿐만 아니라 에너지원으로 축적되기 때문에 수생식물이 성장하면서 탄소의 함량도 함께 증가한 것으로 판단된다.

여름철 수생식물 지상부의 1차 제거 후 재성장하면서 봄철 성장기와 마찬가지로 식물체에 포함된 질소와 인의 함량은 성장이 계속될수록 감소하였고 탄소 함량은 약간의 증감을 반복하였으나 큰 변동은 없는 것으로 조사되었다. 또한 여름철 지상부 절취 후에 바로 성장이 시작된 시기의 원소 함량은 탄소(C), 질소(N), 인(P)이 모두 절취 직전보다 약간 높은 수준을 보여 겨울 이후 새로 싹이 났던 봄철과는 다른 결과를 보였다. 이런 결과로 볼 때 여름철 지상부 절취 이후의 성장은 봄철과 같이 뿌리에서 줄기가 새롭게 성장이 시작되는 단계가 아닌 지속적인 줄기 성장과정 중인 것으로 추정되었다. 대부분의 수생식물은 생장기 동안 뿌리를 통해 흡수한 질소, 인 등의 영양염류를 잎과 줄기

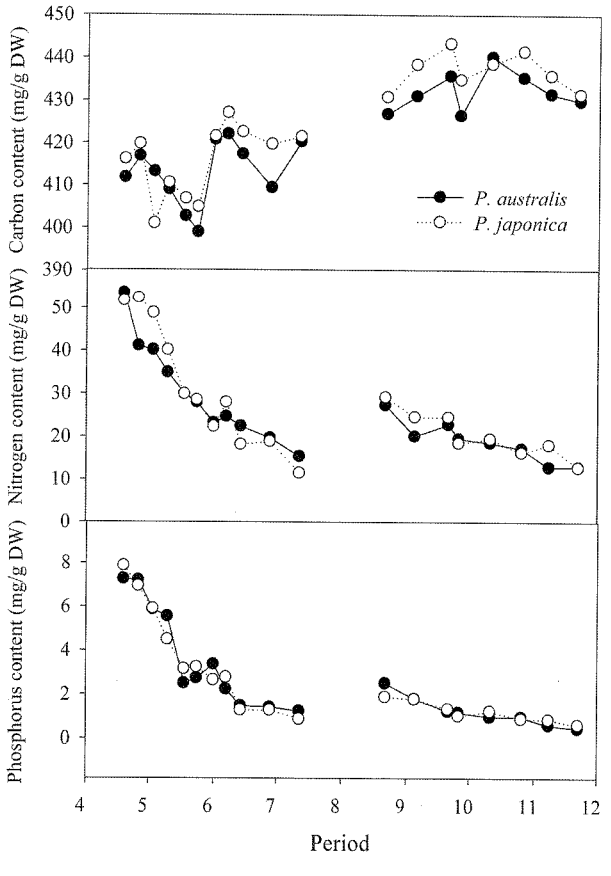


**Fig. 4.** Temporal changes of elements content of hydrophytes in AVI ('06.4~11).

등에 저장하고 있다가 기온이 하강되어 지상부가 고사하기 전 다음해 생장을 위해 영양염류를 뿌리로 전이시키는데(농림부 · 농어촌진흥공사, 1999), 부들(*T. orientalis*)은 질소와 인 흡수량의 22~61%를 지하부로 전이하며(Gophal et al., 1984; Morris et al., 1986; 함 등, 2005), 갈대(*P. australis*)는 흡수량의 25~50%(Van der Linden, 1986), 매자기(*S. fluviatilis*)와 고랭이(*S. lacustris*)는 12~38%(Klopatek, 1978; 함 등, 2005)를 전이하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 봄철 수생식물의 새싹이 나오기 전인 3월에 고사된 상태로 겨울을 지난 갈대(*P. australis*)와 달뿌리풀(*P. japonica*) 지상부의 물질함량을 조사한 결과 갈대(*P. australis*)의 탄소(C), 질소(N), 인(P) 함량은 387.7 mg/g DW, 13.5 mg/g DW, 1.0 mg/g DW이었고 달뿌리풀(*P. japonica*)은 389.0 mg/g DW, 8.3 mg/g DW, 0.7 mg/g DW으로 조사되어 가을철 고사기의 물질함량과 거의 유사한 값을 보였다. 이런 결과로 볼 때 수생식물의 성장초기에 비해서 가을철 고사기에 식물체당 인과 질소의 함량이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 수중 영양물질의 제거를 위해 수초재배섬 수생식물의 지상부를 제거할 때는 고사기가 시작되어 줄기나 잎의 영양염류가 지하부로 전이되기 전에 절취해 주어야 하는 것으로 나타났다.

### 3.5. 수초재배섬 수생식물에 의한 수중의 영양물질 제거

수중 영양염류 제거를 위해 수초재배섬 수생식물의 길이 성장이 최대에 이른 7월 21일에 1차로 지상부 절취 작업을 실시하였고 11월 30일에 2차로 절취하였다. 서식면적당 물질제거량을 산정하기 위하여 절취된 수생식물의 서식면적당 습중량과 건중량을 구하였다. 조사결과 1차 제초시 갈대(*P. australis*)가 서식면적당 5.9 kg의 습중량과 1.5 kg의 건중량으로 가장 높은 생체량을 나타내었고 외부 이입종인 매자기(*S. fluviatilis*)가 서식면적당 4.7 kg의 습중량과 1.0 kg의 건중량으로 그 다음을 차지하였다. 서식면적에서 우위를 차지하던 달뿌리풀(*P. japonica*)과 미나리(*O. javanica*), 줄(*Z. latifolia*)은 상대적으로 낮은 생체량을 보였다(Table 2). 2차 제초시에는 전체적으로 2~2.5배 낮은 양으로 조사되었으며 약간의 순위 변화가 있었다. 미국가막사리(*B. frondosa*)가 서식면적당 3.1 kg의 습중량과 1.6 kg의 건중량으로 우위를 차지하고 있었고 1차 절취 시 우위를 점하던 갈대(*P. australis*)는 서식면적당 2.8 kg의 습중량과 1.2 kg의 건중량을 나타내었으며 다음으로 노랑꽃창포(*I. pseudoacorus*), 매자기(*S. fluviatilis*) 순이었다. 2차 절취 시에도 달뿌리풀(*P. japonica*)은 서식면적에 비해 낮은 생체량을 나타내었다. 달뿌리풀(*P. japonica*)과 미나리(*O. javanica*), 줄(*Z. latifolia*)은 서식면적에서 우위를 차지하고 있었지만, 넓은 서식면적에 비해 단위면적당 생체량은 낮았으며 갈대(*P. australis*)와 매자기(*S. fluviatilis*), 미국가막사리(*B. frondosa*), 노랑꽃창포(*I. pseudoacorus*) 등은 단위면적당 생체량이 높은 것으로 조사되었다.

지상부 절취 과정에서 절취된 수생식물의 질소, 인 함량을 조사한 결과(Fig. 5) 1차 절취 시 미국가막사리(*B. frondosa*)가 33.2 mgN/g으로 가장 높은 질소 함량을 보여주었고 갈대(*P. australis*), 미나리(*O. javanica*), 달뿌리풀(*P. japonica*) 순이었다. 인 함량의 경우 갈대(*I. pseudoacorus*)가 2.9 mgP/g으로 높은 함량을 보여주었으며 미나리(*O. javanica*)와 달뿌리풀(*P. japonica*), 매자기(*S. fluviatilis*) 순이었다. 2차 절취 시에는 노랑꽃창포(*I. pseudoacorus*)가 25.2 mgN/g과 2.2 mgP/g으로 질소와 인 모두 가장 높은 함량을 보여주었으며, 질소의 경우 질경이택사(*A. plantago-aquatica*), 달뿌리풀(*P. japonica*), 갈대(*I. pseudoacorus*) 순이었고, 인의 경우 질경이택사(*A. plantago-aquatica*), 달뿌리풀(*P. japonica*), 줄(*Z. latifolia*) 순이었다. 1차 절취 때보다 2차 절취 때 단위 건중량당 성분함량이 줄어든 것은 앞서 언급한 바와 같이 2차 절취가 성장이 멈춘 고사기 이후에 실시되어 이미 지상부의 성분이 뿌리로 전이되었기 때문으로 판단된다.

절취된 수생식물 지상부의 생체량과 물질 함량을 이용하여 수초재배섬의 총 물질제거량을 산정하였다(Table 3). 7월 21일 1차 절취 결과 서식면적이 가장 넓었던 달뿌리풀(*P. japonica*)이 690.9 kg으로 가장 많은 건중량을 나타냈고, 다음으로는 갈대(*P. australis*)가 275.9 kg의 건중량을 나타냈다. 줄(*Z. latifolia*)과 미나리(*O. javanica*)는 매자기(*S. fluviatilis*)에 비해 높은 서식면적을 차지하고 있었으나 적은 건중량을 나타냈고, 이입종인 매자기(*S. fluviatilis*)는

**Table 2.** Biomass of hydrophytes which were cut off from the AVI in summer (21 July) and late autumn (30 November)

| Species | Summer | | Late autumn | |
|---|---|---|---|---|
| | Wet weight ($kg/m^2$) | Dry weight ($g/m^2$) | Wet weight ($kg/m^2$) | Dry weight ($g/m^2$) |
| *P. japonica* | 1.4 | 359.7 | 0.5 | 175.8 |
| *P. australis* | 5.9 | 1541.5 | 2.8 | 1181.3 |
| *B. frondosa* | 3.5 | 567.5 | 3.1 | 1592.0 |
| *Z. latifolia* | 1.4 | 369.9 | — | — |
| *O. javanica* | 0.1 | 16.3 | — | — |
| *A. plantago-aquatica* | 2.0 | 234.3 | 1.0 | 314.3 |
| *I. pseudoacorus* | 5.0 | 709.6 | 1.8 | 863.4 |
| *J. effusus* | 1.9 | 415.6 | 2.9 | 498.4 |
| *S. fluviatilis* | 4.7 | 1024.2 | 1.5 | 369.6 |

**Table 3.** The amount of dry weight and nutrients which were removed from AVI at each cutting off

| Species | Summer | | | Late autumn | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dry weight (kg) | Nitrogen (g) | Phosphorus (g) | Dry weight (kg) | Nitrogen (g) | Phosphorus (g) |
| *P. japonica* | 690.9 | 17,521.7 | 1,560.6 | 283.2 | 4,835.4 | 282.3 |
| *P. australis* | 275.9 | 6,917.5 | 620.0 | 166.6 | 2,202.4 | 51.1 |
| *B. frondosa* | 27.8 | 923.6 | 48.7 | 78.0 | 712.2 | 32.9 |
| *Z. latifolia* | 41.1 | 794.4 | 67.3 | 31.7 | 361.2 | 12.0 |
| *P. thunbergii* | 15.3 | 290.8 | 17.5 | — | — | — |
| *O. javanica* | 1.6 | 51.9 | 4.6 | — | — | — |
| *A. plantago-aquatica* | 8.7 | 199.8 | 17.5 | 31.9 | 589.6 | 40.4 |
| *I. pseudoacorus* | 5.0 | 92.7 | 6.4 | 3.5 | 87.8 | 7.8 |
| *J. effusus* | 11.2 | 147.0 | 11.3 | 10.0 | 104.8 | 3.8 |
| *S. fluviatilis* | 68.6 | 1,541.5 | 147.9 | 35.3 | 410.5 | 17.5 |
| *Others* | 328.7 | 6,810.0 | 457.3 | 45.8 | 668.1 | 37.1 |
| Total | 1,474.7 | 35,290.9 | 2,959.0 | 686.0 | 9,971.9 | 485.0 |

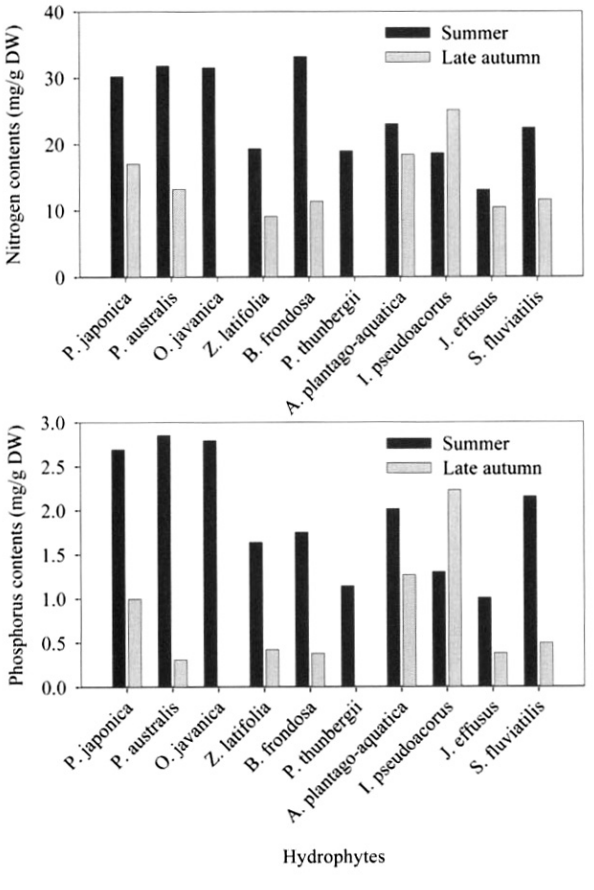


**Fig. 5.** Nitrogen and phosphorus contents of dominant hydrophytes at each cutting off in AVI.

68.6 kg으로 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*)에 이어 많은 건중량을 보였다. 특히 미나리(*O. javanica*)의 경우 갈대(*P. australis*), 달뿌리풀(*P. japonica*)과 달리 성장 길이가 짧기 때문에 서식면적은 넓었지만 매우 적은 건중량을 나타냈다. 질소 및 인의 제거량은 생체량이 많았던 달뿌리풀(*P. japonica*)이 질소 17.5 kg, 인 1.5 kg을 제거하는 것으로 나타냈으며, 다음으로 생체량이 많았던 갈대(*P. australis*)가 질소 6.9 kg, 인 0.6 kg을 제거한 것으로 나타났다. 이밖에 이입종으로 많은 건중량을 나타내었던 매자기(*S. fluviatilis*)의 경우 다른 수생식물에 비해 높게 나타났는데 질소 1.5 kg, 인 147 g이었다. 이런 결과로 볼 때 일반적으로 수초재배섬에서 식재되는 종 이외에 수초재배섬에서 잘 서식하고 생체량도 많은 매자기(*S. fluviatilis*)와 같은 이입종도 식재식물로의 가능성을 고려해볼 필요가 있을 것이다.

7월 절취 이후 수생식물이 재성장하여 고사기에 접어든 수생식물의 지상부를 11월 30일에 2차로 절취하였다. 7월 절취 때와 마찬가지로 달뿌리풀(*P. japonica*)이 가장 많은 건중량을 보였고 다음이 갈대(*P. australis*)였으며, 1차 절취 때와는 달리 미국가막사리(*B. frondosa*)가 매자기(*S. fluviatilis*)보다 높은 건중량을 보였다. 이 때 고마리(*P. thunbergii*)와 미나리(*O. javanica*)는 이미 고사되어 11월 절취 시에는 보이지 않았다. 11월 절취된 수생식물의 질소와 인 제거량 결과 달뿌리풀이 가장 많은 제거량을 보였으며 다음으로는 갈대(*P. australis*), 미국가막사리(*B. frondosa*), 질경이택사(*A. plantago-aquatica*) 순이었다.

7월 절취를 통해 제거된 물질제거량의 총량은 약 질소가 35.3 kg, 인이 3 kg이었으며 11월의 물질 제거량은 질소가 9.9 kg, 인이 0.5 kg으로 7월에 비해 각 항목별로 약 4~6배 적었다. 2006년 여름과 가을 각 1회씩 연간 2회 수초재배섬에 서식하는 수생식물의 지상부 제거를 통해 제거된 총 물질제거량은 질소가 45.2 kg, 인이 3.5 kg으로 조사되어, 팔당호 경안천 수역에 설치된 수초재배섬에서 2006년도 연간 단위면적당 물질제거량은 질소가 17.6 gN/m$^2$/yr, 인이 1.3 gP/m$^2$/yr이었다. 2006년 팔당호의 연평균 총인농도는 0.055 mg/L로 (물환경정보시스템, 2007) 이를 팔당호 총저수량으로 환산하면 팔당호의 수중 인 존재량은 연평균값으로 약 13.4 ton이다. 또한 2004년 팔당호의 인 수지를 보면 약 2000 ton이 유입, 유출된다(한강물환경연구소, 2006). 따라서 현재 규모(2,560 m$^2$)의 수초재배섬으로 36.5 km$^2$의 수표면적을 가진 팔당호 수중의 인을 제거하여 가시

적인 수질개선 효과를 기대하기는 어려울 것으로 판단된다.

수초재배섬을 이용하여 수중 부영양화 물질을 제거하기 위해서는 수초재배섬에서 수생식물의 성장은 봄철 성장하기 시작하면서 1~2개월만에 최대성장에 이르는 것으로 나타났으므로 연간 지상부 절취 회수를 늘려 지상부 제거량을 늘리고, 고사기에는 지상부의 인, 질소 성분이 뿌리로 전이되므로 성장이 완료된 시점보다는 인, 질소 성분이 뿌리로 전이되기 전에 절취를 하는 것이 유리할 것을 판단된다. 뿐만 아니라 식재식물 선정시 건중량당 질소, 인 등의 성분함량이 높고 서식면적당 지상부 생산량이 높은 수생식물을 선정하여 식재하는 것이 수초재배섬에 의한 물질제거량을 높일 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

팔당호 경안천 수역에 인공 조성된 수초재배섬에서 수생식물 서식 종 및 서식면적 변화, 연중 생장속도 및 수생식물에 의한 수중영양염류 제거량 조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수초재배섬 조성 이후 수생식물은 초기 4종에서 2006년 현재 29종으로 다양해졌고 초기 식재종 중 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*)가 우점하고 있었으며 특히 달뿌리풀(*P. japonica*)은 서식면적이 2.5배 증가되었다. 한편 외부 이입종인 매자기(*S. fluviatilis*)와 미국가막사리(*B. frondosa*) 등의 서식면적이 점차 증가하고 있었다.
2) 수초재배섬에서 가장 우점하는 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*)의 성장 속도를 조사한 결과, 길이 및 무게 성장이 모두 봄철에 매우 빠르게 진행되었고 여름철 제초 전까지 지속적인 성장을 보였다. 여름철 지상부 절취 이후에도 9월 하순까지 지속적인 성장을 보였으나 그 이후에는 성장이 멈추고 고사되는 것으로 나타났다. 달뿌리풀(*P. japonica*)과 갈대(*P. australis*)의 비증식률 조사결과 봄철에 가장 높은 비증식률을 보였고 이후 감소하였다.
3) 수생식물이 성장하면서 단위 건중량당 탄소의 함량은 점차 증가하였으나 영양염류인 질소와 인의 함량은 점차 감소하였다. 지상부 1차 제거 후 수생식물이 재성장하면서 봄철 성장기와 마찬가지로 질소와 인의 함량은 성장할수록 감소하였고 탄소 함량은 증감을 반복하였으나 큰 변동은 없었다. 성장이 멈춘 9월 하순 이후 식물체 지상부의 인과 질소의 함량이 크게 감소하여 고사기 동안 인과 질소가 지상부에서 뿌리로 전이된 것으로 나타났다.
4) 2006년 여름과 가을 각 1회씩 연간 2회 수초재배섬에 서식하는 수생식물의 지상부 제거를 통해 제거된 총 물질제거량은 질소가 45.2 kg, 인이 3.5 kg으로 팔당호 경안천 수역에 설치된 수초재배섬에서 2006년도 연간 단위면적당 물질제거량은 질소가 17.6 $gN/m^2/yr$, 인이 1.3 $gP/m^2/yr$이었다.

## 사 사

본 연구는 2006년도 팔당호 수질개선사업 「수초재배섬 운영·관리사업」의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

고경식, 전의식, *한국의 야생식물*, 일진사, pp. 70-736 (2003).

공동수, 정원화, 전선옥, 생활형 및 생육환경에 따른 대형수생식물의 생산성과 영양물질 제거 능력, *한국육수학회지*, **32**(3), pp. 216-228 (1999).

국가수자원관리종합정보시스템, http://www.wamis.co.kr (accessed Jan. 2007).

김태정, *쉽게 찾는 수생식물*, 현암사, pp. 26-142 (2004).

농림부·농어촌진흥공사, 수생식물에 의한 수질개선기법 연구, pp. 91-115 (1999).

물환경정보시스템, http://water.nier.go.kr (accessed Feb. 2007).

박혜경, 공동수, 변명섭, 전남희, 최명재, 윤석환, 유경아, 강필구, 수초재배섬 운영·관리사업 보고서, 한강수계 팔당호 수질개선사업, 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회, pp. 1-36 (2006).

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

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

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

한강물환경연구소, 한강수계관리위원회, 수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름 조사, pp. 203-204 (2006).

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

환경관리공단, 수초재배섬 운영결과보고서, pp. 3-24 (2000).

환경부, 수질오염공정시험법 (2004).

Gophal, B. and Sharma, K. P., Seasonal changes in concentration of major nutrient elements in the rhizomes and leaves of *Typha elephantina Roxb, A quat, bot.*, **20**, pp. 65-73 (1984).

Klopatek, J. M., Nutrient dynamic of freshwater riverine marshes and the role of emergent, Academic Press, New York (1978).

Morris, J. T. and Lajeha, K. L., Decomposition and nutrient dynamic of liter from four species of fresh water emergent macrophytes, *Hydribiologia*, **131**, pp. 215-223 (1986).

van der Linden, M. J. H. A., Phosphorus econoby of reed vegetation in the Suidelijk Flevolard Polder (The Netherlands) : Seasonal distribution of phosphorus among shoot and rhizomes and availability of soil phosphorus, *Acta Oecologia Oecol Plant*, **7**, pp. 397-405 (1986).