

인공식물섬의 호소 수질개선 효과분석

Effect Analysis of Reservoir Water Quality Improvement with Floating Islands

박 병 훈*·권 순 국(서울대)·윤 경 섭(농기공)

Park, Byung Heun·Kwun, Soon Kuk·Yoon, Kyung Sup

Abstract

Three floating islands were constructed on the surface of the reservoir, each consisting of 10 16-m² (4×4 m) segments, made of wood frames and floats. Three species of aquatic macrophytes were planted in each island on June, 1998. *Phragmites australis* was considered as the suitable aquatic macrophyte for the floating islands since it maintained the most efficient root and shoot balance among the macrophytes. The net primary productivity of *P. Australis* was 3,604 g/m² based on dry weight in 1999, with uptake rates of nitrogen and phosphorus estimated at 77.4 g/m²/yr and 5.7 g/m²/yr, respectively. The result of water quality simulation for the floating islands showed that, through adsorption of nutrients and light screening, they could reduce the amount of phytoplankton, thereby decreasing COD concentration.

I. 서론

고도경제성장기 이전에는 생산활동 등으로 배출되는 오염부하량은 자연의 환경용량을 초과하는 경우가 적어 깨끗한 호소수의 이용과 쾌적한 친수공간을 유지할 수 있었으나, 최근에는 급격한 도시화, 생활양식의 다양화, 공업화, 화학비료 사용의 증가, 육류소비증가에 따른 축산규모의 증대 등으로 유기물과 영양염류(질소, 인)을 다량 함유한 잡배수가 하천, 호소에 유입되어 수역의 생태계 균형이 파괴되고, 그로 인해 수질환경이 현저히 악화되고 있다. 중앙 수질측정망에 포함된 관개용 저수지의 수질을 환경기준에 의해 수질을 평가해보면 '99년에는 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하는 시설은 111개소로 전체 측정망의 34.4%를 차지하고 있어⁴⁾ 저수지 수질개선대책이 필요한 실정이다.

최근 호수의 수질관리에 있어 습지의 역할과 기능에 대한 생물학자, 자원관리자와 일반대중들의 관심이 점차 증가되어 수질개선대책으로 그 이용에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나, 새로운 습지의 형성은 매우 많은 비용이 들며, 특히 조경과 인공적인 관개시스템이 필요할 경우 비용이 더 많이 들게 된다. 따라서 미국과 일본의 생물학자와 기술자들은 새로운 개념인 부도의 이용을 검토하게 되었다. 이러한 구조물을 미국에서는 floating islands, 독일은 Schwimmkampen, 그리고 일본에서는 Ukishima라 부른다. 일본에서는 10m×100m의 부도가 제작되어 현재 시험 중에 있다.²⁰⁾ 우리 나라에서도 농림부·농업기반공사에서 “인공부채위에 수생식물을 식재하여 식물의 영양염류 섭취를 통해 호수의 수질을 개선하고 호수의 경관을 창출

하는 수질개선공법"을 "인공식물섬"이라 정의하고⁸⁾, 농업용 저수지에 시험적으로 설치·운영하고 있다.

인공식물섬은 식물체에 의한 영양염류의 흡수 이외에 햇빛 차단에 의한 조류생성의 억제, 뿌리 부분에 부착된 미생물에 의한 오염물질의 제거 기능, 동물성 플랑크톤, 어류, 곤충류, 새들의 증가 등에 의한 생물종다양성의 증진, 호소 경관의 증진 등의 효과가 있는 것으로 나타났다.²⁰⁾ 지금까지 발표된 인공식물섬의 수질개선효과는 식물체의 제거시 나타나는 영양물질의 제거효과로 평가하였으나, 본 연구에서는 인공식물섬의 영양염류의 흡수효과 뿐만 아니라 차광효과에 의한 식물성 플랑크톤의 발생억제와 이에 따르는 유기물의 감소효과를 수질모형을 통해 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

인공식물섬은 충남 아산시에 위치한 마산저수지에 3조를 설치하였다. 1조는 10개의 부체(Floating platforms)를 세로 방향 2개, 가로 방향 5개로 서로 연결하였다. 부체는 인공식물섬에서 가장 중요한 요소로서 식물을 물 속에 잠기지 않고 뜨게 하는 기능을 하며, 목재틀(Wood frame)과 스티로폼(Styrofoam)으로 구성하였다. 부체의 크기는 순수 식물재배면적이 16 m²(4.0 × 4.0 m)이며, 목재틀 위에는 사람이 올라가서 식물을 유지관리를 할 수 있는 구조로 하였다. 수생식물을 지지하기 위해 사각형의 부체 안에 PVC 파이프를 가로와 세로방향으로 각각 40 cm 간격으로 설치하고 그 위에 나이론망(Net)을 포설하였다. PVC 파이프 속에 나이론 줄을 넣고 나이론 줄의 양쪽을 목재틀에 묶었다. 각 인공식물섬에는 다년초 수생식물인 애기부들(*Typha angustifolia*), 줄(*Zizania latifolia*), 갈대(*Phragmites australis*)를 선정하여 식재하였다. 수생식물은 포장에서 씨앗으로 발아되어 포트(Pot)에서 재배된 식물을 이용하였다. 식물의 식재방법은 식재시 잔뿌리의 손상을 방지하고 인공식물섬에서 활착 기간동안 토양의 유실을 막기 위해 비닐포트를 벗기고 쥬트(마)포트에 다시 담아 식물매트에 심었다.

인공식물섬의 식물매트는 야자섬유로 제작된 것이며, 뿌리를 고정시켜 파랑이나 바람에 의해 식물이 넘어지지 않도록 지지하는 기능을 한다. 식물매트의 가장자리는 PVC 파이프에 매어 파랑에 의해 식물매트 전체가 움직이지 않도록 하였다. 식물의 식재시기는 1998. 6. 24일이며, 식물종류별로 4×4 m의 부체 10개에 25×25 cm 간격으로 식재하였다.

수생식물의 성장량 조사는 식물성장기에 매월 1회 간격으로 줄기부를 채취하여 분석하였으며, 뿌리부는 10월에 채취하여 분석하였다. 식물의 성장량은 채취된 수생식물의 줄기와 뿌리부를 65 °C의 항온조에서 건조시킨 후 건조중량으로 측정하였다.

인공식물섬에 의한 저수지의 수질개선 효과분석은 수질모형을 이용하였다. 이용한 모형은 복잡한 생태계 모형을 단순화시켜 많은 계수들의 입력에 따른 부정확성을 피하고, 수질정화공법의 영향을 예측할 수 있도록 개발한 모형이다.¹⁰⁾ 모형의 보정은 인공식물섬이 설치된 마산저수지의 1998~1999년의 수문 및 수질자료를 이용하였으며, 모형의 검증은 전북 익산시 왕궁저수지의 자료를 이용하였다. 저수지의 수질분석은 수질오염공정시험방법¹⁷⁾에 따라 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수생식물의 성장특성

포장에서 발아시켜 비닐포트에서 재배된 식물을 1998년 6월에 저수지로 옮겨 비닐포트를 벗

기고 쥬트(마)포트에 다시 담아 식물매트에 식재한 결과 고사된 식물은 없었다. 식물의 줄기부가 크게 성장하고 호수 내에서 파랑이 계속됨에도 갈대와 줄은 안정성을 유지하고 있었으나, 애기부들은 뿌리의 발달이 부진하여 인공식물섬의 부속자재(PVC 파이프, 나이론 망, 식물매트)와의 일체가 되지 않아 저수지의 파랑에 의해 애기부들이 한 방향으로 밀리거나 유실되었다. Dykyjova and Veber(1978)는 몇 가지 수생식물의 수경재배를 통해 지하부와 지상부의 양을 비교하였는데, 3년 된 갈대의 경우 2.61, 부들의 경우는 0.68로 발표한 바 있어 애기부들의 경우는 지상부에 비해 뿌리의 발달이 왕성하지 않아 인공식물섬의 수생식물로서는 부적당한 것으로 파악되었다.

인공식물섬에서 정상적으로 자라고 있는 갈대의 1999년의 성장특성을 보면 최대길이는 9월에 202 cm로 최대에 이르는 것으로 조사되었다. 충남 웅천읍의 농경배수로에서 자란 갈대의 경우 줄기부가 7월에 240~260 cm로 자란 것으로 조사된 바 있어,¹⁶⁾ 인공식물섬의 경우는 육지에 비해 바람이 많고 파랑의 영향을 받아 육지에 비해 크지 않는 것으로 추정된다.

갈대의 줄기부 건조중량은 Fig. 1과 같이 9월에 3604 g/m²으로 최대치를 나타내었다. 충남 웅천읍의 농경배수로에서 자란 갈대의 줄기부 최대 현존량은 9월에 3,500 g/m²으로¹⁶⁾ 인공식물섬의 현존량과 비슷한 분포이다. 또한 낙동강 하구지역에서의 상한 값(3,500 g/m²)⁹⁾과도 비슷하며, 영산강 유역에서의 조사치인 670~4,650 g/m³)의 최대치보다는 낮으나, 서해안 염습지에서의 조사 결과치 2,980 g/m²,²⁾ 팔당호 연안대의 조사치 800~2,210 g/m²,¹⁵⁾ 섬진강 하구의 염습지에서의 조사치 1,120 g/m²¹¹⁾보다는 높은 값을 나타냈다.

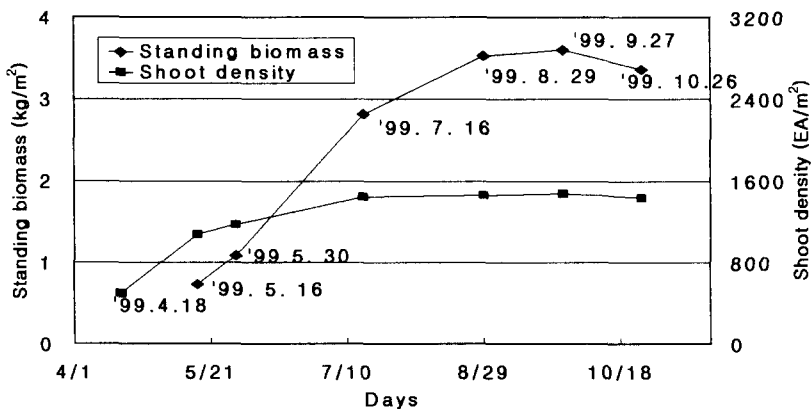


Fig. 1 Temporal change of above-ground standing biomass for *Phragmites australis* in the year of 1999

인공식물섬에서 자란 갈대의 줄기부 밀도는 9월에 1475 개체/m²로 최대치를 나타내었다. 인공식물섬에서 줄기부의 밀도는 충남 웅천읍의 농경배수로에서 갈대의 지상부 밀도 142 개체/m²¹⁶⁾에 비해 현저히 높다. 갈대의 뿌리부와 줄기부의 비율을 분석한 결과 식재 첫해인 1998년에는 0.77이며, 1999년에는 0.90으로 나타났으며, 1999년의 뿌리부 순성장량과 줄기부 성장량의 비율은 0.79이다. 이것은 Dykyjova and Veber(1978)의 2.61, Fiala et al.(1968)의 2.76에 비해 낮은 수치이다.

2. 인공식물섬의 광차단 효과

인공식물섬 설치에 따르는 빛에너지 차단효과를 알아보기 위해 인공식물섬이 설치된 수중과 설치되지 않은 수중에서 복사계(Radiometer)로 복사에너지를 측정하였다. 인공식물섬이 설치되지 않은 지역의 수중에서 복사열은 수심 0.2m에서 58~74 W/m²이었으나, 인공식물섬 밑의 수중 복사열은 0 W/m²로 나타나 인공식물섬은 빛에너지를 완전 차단하는 것으로 조사되었다.

3. 인공식물섬의 영양염류 흡수량 추정

수중 생태계에서 대형 수생식물의 생체량은 흡수한 영양소를 동화하여 고정하는 저장고의 역할을 수행하므로 수확하여 제거한다면 저수지의 수질개선에 기여할 수 있다. 갈대의 성장량 자료와 식물체 N, P 농도자료를¹⁵⁾ 이용하여 영양염류 흡수량을 추정하였다. Table 1과 같이 인공식물섬에서 갈대는 줄기부에서 질소 43.2 g/m²/yr, 인3.2 g/m²/yr을 흡수하고, 뿌리부에서는 질소와 인이 각각 34.1 g/m²/yr, 2.5 g/m²/yr이 흡수하여 전체적으로는 질소 77.4 g/m²/yr, 인 5.7 g/m²/yr을 흡수하는 것으로 추정되었다.

Table 1 Uptake estimation of N and P by *P. australis* in floating island

Nutrients	N	P
Concentrations of N and P in macrophytes (mg/g)	12	0.9
Nutrient uptake rate of shoots (g/m ² /yr)	43.2	3.2
Nutrient uptake rate of roots (g/m ² /yr)	34.1	2.5
Total nutrient uptake rate (g/m ² /yr)	77.4	5.7

4. 수질모형에 의한 인공식물섬 수질개선효과 분석

인공식물섬이 저수지 수질개선에 미치는 요인은 수생식물에 의한 영양염류의 흡수, 태양에너지 차단에 의한 식물성 플랑크톤의 발생억제, 식물성 플랑크톤의 발생억제에 의한 내부 생산 COD의 감소 등으로 볼 수 있다. 수질모형의 적용은 이들 요인에 해당되는 방정식을 수정하여 적용하였다.

식물에 의한 영양염류 흡수량 자료는 월별 줄기부의 순성장량(Fig. 1)에 줄기부에 대한 뿌리부의 비율을 고려하여 전체 식물순생산량을 계산한 후 식물체 속에 포함된 N과 P의 비율(Table 1)을 곱하고 이를 일별로 환산하였다. 식물에 의해 제거되는 수질성분은 PO₄-P와 NO₃-N로 하였다. 인공식물섬 밑의 수중은 태양복사열이 전달되지 않는 것으로 조사된 바 있어 수질모형에 이용된 방정식에서 수중에 전달되는 태양복사열과 재폭기되는 양은 저수지의 수표면에서 인공식물섬이 차지하는 면적의 비율만큼 감하도록 모형을 수정하여 적용하였다.

수정된 모형을 이용하여 인공식물섬의 면적이 증가에 따른 저수지 수질 개선효과를 분석한 결과, Table 5-10과 같이 연구 대상 저수지 만수면적(92 ha)의 10%인 9.2 ha 크기의 인공식물섬을 조성할 경우 COD는 설치전의 10.4 mg/L에서 설치 후에는 9.8 mg/L로 예측되어 COD 개선효과는 5.1%로 나타났다. T-N은 14.1%, T-P 13.1%, Chl-a 16.3%가 개선되는 것으로 분석되었다. COD의 개선효과는 인공식물섬의 식물에 의해 영양염류가 흡수되고, 인공식물섬에 의해 햇빛이 차단되어 조류의 성장이 억제되어 나타난 현상이다. 농업용 저수지의 목표수질인 COD 8 mg/L을 유지하기 위해서는 더 이상의 규모가 필요하지만 저수지의 수위변화에 따라 인공식물섬의 설치위치가 줄어들고, 보트놀이, 수상스키 등 저수지 수면 이용 등을 고려할 때 많은 면적의 인공식물섬 조성은 어려울 것으로 판단된다.

Table 2 Effect of the floating island on reservoir water quality improvement

Area (ha)	COD		T-N		T-P		Chl-a	
	① mg/L	② %	① mg/L	② %	① mg/L	② %	① μg/L	② %
0.0	10.4	0.0	2.420	0.0	0.125	0.0	25.3	0.0
4.6	10.1	2.0	2.230	7.8	0.116	7.0	24.1	9.7
9.2	9.8	5.1	2.078	14.1	0.108	13.1	22.4	16.3
18.4	9.3	10.4	1.826	24.5	0.097	21.7	19.7	26.2

① : Simulated concentration ② : Improvement for reservoir water quality

만수면적의 10%에 해당하는 인공식물섬을 저수지에 설치한 경우와 설치전의 수질변화를 Fig.2에 나타내었다. 수질개선효과는 5-7월 사이에 크게 나타나는 것은 이 시기는 일조량이 많고, 관개수의 공급으로 인한 저수지의 수위가 낮아 인공식물섬의 설치면적이 저수지의 수면적에 차지하는 비율이 높기 때문이다. Fig.2에서 수질이 급격하게 상승하는 시기는 강우에 의해 저수지 수질이 악화된 것을 나타내고 있다. 강우 전에는 인공식물섬의 설치전후 수질차이(수질개선효과)가 크게 나타나다가 강우 후에는 그 차이가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 오염도가 매우 높은 강우 유출수가 저수지에 유입되어 강우 전에 정화된 저수지의 물과 혼합되어 나타난 현상이다. 따라서 외국의 자연호수에 비해 체류시간이 짧은 우리 나라의 호소에서는 호소 내 수질정화공법의 효과가 낮아질 수 있음을 알 수 있다.

수질모형에 의한 인공식물섬의 수질개선효과는 지금 까지 밝혀진 호소에서 수질반응식을 기초로 예측한 것이다. 그러나 인공식물섬의 설치는 물 속에 있는 수생식물의 줄기부와 뿌리 부분에 많은 미생물과 부착성 조류가 서식하고 있고, 인공식물섬 아래 부분의 수중에는 동물성 플랑크톤이 증가되는 현상이 나타나므로^{12,20)} 이 부분의 수질정화기능도 정량적으로 밝혀지면 인공식물섬의 수질개선효과는 증가될 것으로 생각된다.

IV. 요약 및 결론

1. 저수지 내에 부력을 이용한 3개의 인공식물섬을 조성하여 다년생 수생식물인 갈대, 애기부들, 줄을 각각 식재한 결과 인위적인 영양분의 공급 없이도 성장이 가능한 것을 확인하였다. 그러나, 뿌리의 성장량이 지상부에 비해 불량한 애기부들의 경우 파랑과 바람에 의해 유실되는 것으로 나타나 인공식물섬의 조성에서는 수생식물의 종류 선정이 매우 중요한 것으로 생각되었다.
2. 인공식물섬에 식재된 지 2년째인 갈대의 줄기부 현존량은 3,604 g/m²으로 육상습지에서 자생하는 갈대 현존량의 최대치와 비슷한 수준이었다. 갈대의 지상부 제거로 나타날 수 있는 호소 내 영양염류의 제거량은 질소 77.4 g/m²/yr, 인 5.7 g/m²/yr으로 추정되었다.
3. 인공식물섬의 수생식물에 의한 영양염류 제거량과 광 에너지의 차단효과를 수질모형에 반영하여 저수지 수질개선효과를 분석한 결과 인공식물섬은 T-N과 T-P의 개선뿐만 아니라 조류의 발생을 크게 억제하여 COD도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 인공식물섬의 설치면적 증가에 따르는 저수지의 수질개선효과를 분석한 결과 인공식물섬만으로 오염된 저수지를 개선하려면 많은 면적이 소요될 것으로 판단되었다.
4. 따라서 인공식물섬은 저수지의 수질개선 뿐만 아니라 생물 종다양성 증진, 호소경관개선, 친수공간기능 등을 고려하여 저수지의 종합적 관리측면에서 도입되어야 할 것으로 생각된다.

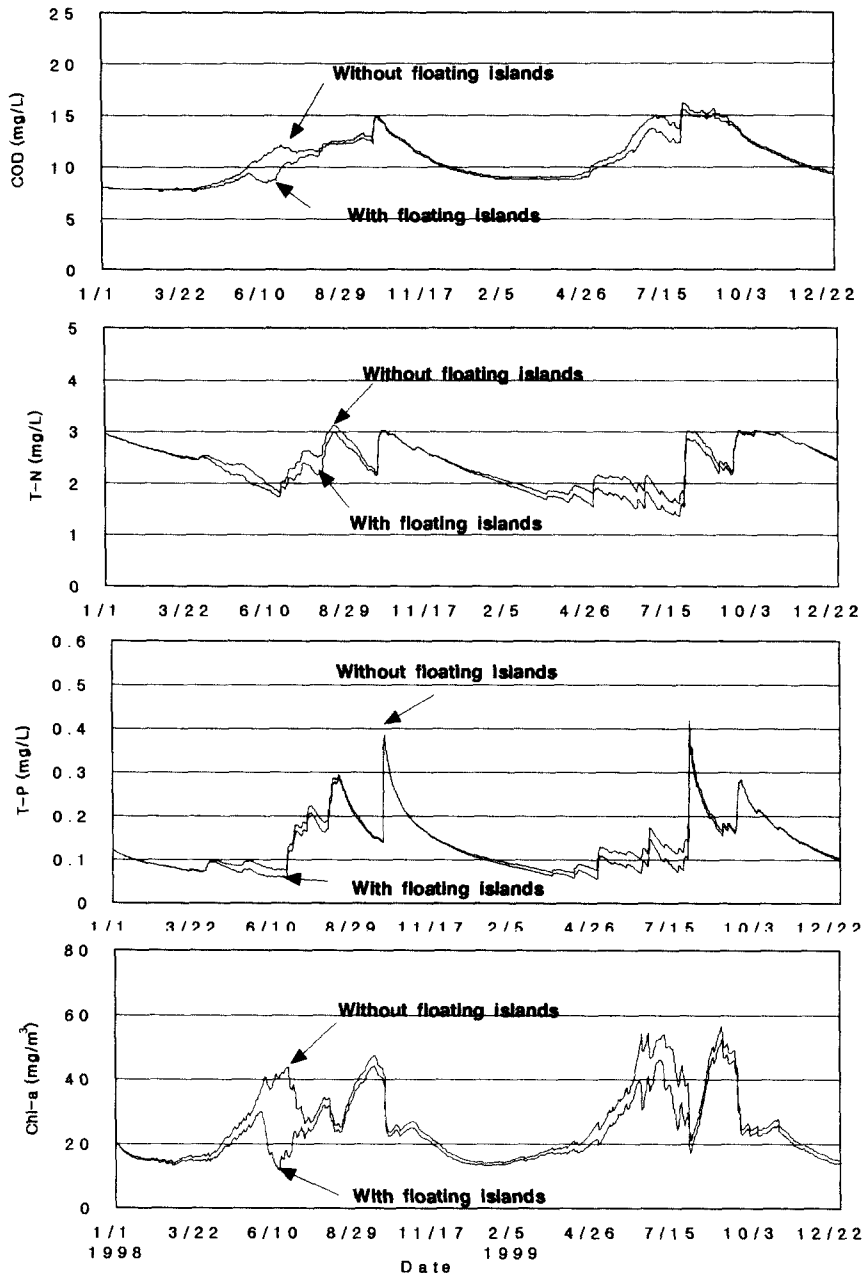


Fig.2 Effect of the floating islands on reservoir water quality improvement

참고문헌

1. 김준호·문형태·민병미·조경재, 1989, 낙동강하구 염습지 식물군락의 질소 및 인의 동태, 한국생태학회지 12, pp.1-7
2. 김준호·민병미, 1983, 해안 염생식물군집에 대한 생태학적 연구(III), 인천간척지의 토양환경, 종의 다양성 및 염류순환에 대하여, 한국생태학회지 26, pp.53-71
3. 김철수, 1975, 갈대군락의 현존량과 환경요인에 관한 연구, 한국식물학회지 18, pp.129-134
4. 농림부·농어촌진흥공사, 1999, 농업용수 수질조사 보고서
5. 농림부·농업기반공사, 1999, 왕궁저수지 농업용수 수질개선사업 기본계획(안)
6. 농림부·농업기반공사, 1999, 농업용수 수질개선 시험사업 보고서
7. 농림부·농업기반공사, 1998, 농업용수 수질개선 시험사업 보고서(II)
8. 농림부·농업기반공사, 1997, 농업용수 수질개선 시험사업 보고서(III)
9. 문형태, 1984, 낙동강 하구의 사주식생 천이에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문
10. 박병훈, 2000, 호소 수질정화공법의 효과분석과 수질모형에 의한 적용성 평가, 서울대학교 박사학위논문
11. 오경환·임병선, 1983, 섬진강 하 염습지 갈대군락의 생산성과 토양양분의 계절적 변화, 한국생태학회지 6, 90-97
12. 이광식·장정렬·김영경·박병훈, 저수지 수질개선을 위한 인공식물섬 구성에 관한 연구, 한국환경농학회지 18(1), pp.77-82
13. 이찬기, 안태석, 김범철, 김동섭, 1996, 강원도-나가노현간 생태공학적 호수수질개선 공법의 비교연구, 과학기술정책연구소·강원대학교, pp.29-89
14. 조강현, 1997, 수질환경보존을 위한 수변부 생태계의 생태공학적 이용, 서울여자대학교 생태연구소 설립기념 심포지엄, p.68-81
15. 조강현, 1992, 팔당호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환, 서울대학교 박사학위논문
16. 황길순, 남귀숙, 문형태, 1998, 수생식물에 의한 수질개선기법연구II, p.29
17. 환경부, 2000, 수질오염공정시험방법, 고시 제99-208호
18. Dykyjova, D and K. Veber, 1978, Experimental hydroponic cultivation of helophytes, In, Pond littoral ecosystems. (ed.), D. Dykyjova and J. Kvet, Springer-Verlag. N.Y., pp.181-192
19. Fiala, K., D. D. Dykyjova, J. Kvet and J. Svoboda, 1968, Methods of assessing rhizome and root production in reed-bed stands. In, Methods of productivity studies in root systems and rhizosphere organisms, Publishing House "NAUKA", Leningrad, p.238
20. Gordon Mueller, Jim Sartoris, Kelgo Nakamura and John Boutwell(1996. 11), Ukishima, Floating islands, Schwimkampen?, LAKELINE, p.18-26