

# 인공식물섬을 이용한 저수지 수질개선

Water quality improvement by the floating islands in a reservoir

박 병 혼\* · 권 순 국(서울대) · 장 정 렬(농진공)

Park, Byung Heun · Kwun, Soon Kuk · Jang, Jeong Ryul

## Abstract

Three floating islands have been constructed for water quality improvement for a polluted irrigation reservoir. *Phragmites australis* was considered as the suitable aquatic macrophyte of the floating island. From April to August in 1999, the net primary productivity of *Phragmites australis* was 3,530gDM/m<sup>2</sup>. Uptake rates of nitrogen and phosphorus by *Phragmites australis* planted in the floating island could be estimated to 10.2kg/d/ha and 0.8kg/d/ha, respectively. The floating islands worked well as a habitat of fish and prawns. Therefore, the floating islands could be evaluated a good measure of water quality improvement for a irrigation reservoir.

## I. 서 론

최근 저수지 유역에서 생산활동의 증대에 따라 폐쇄성 정체수역인 저수지에 오염물질이 크게 증가하여 저수지의 수질이 크게 악화되는 경향을 보이고 있다. '97년 농업용수 수질측정망 중에서' 저수지 수질을 분석한 결과 농업용수로 오염된 것으로 간주할 수 있는 PI지수의 "나쁨" 등급 및 "아주나쁨" 등급이 155개 저수지중 4.5%이며, 환경정책기본법의 호소수질 환경기준 IV등급(농업용수 해당)을 초과하는 저수지 시설은 47개소로 30.3%를 차지하고 있어<sup>1)</sup> 저수지에 대한 수질개선과 보전대책이 필요하다.

수생식물에 의한 수처리 기술은 1960년 대 중반 미국의 NASA와 독일의 MAX Plank 연구소에 의해 유기물처리를 목적으로 부상되었다. NASA에 의한 일련의 연구는 폐쇄 생태학적 생명부양계 프로젝트(CELSS, Closed Ecological Life Support Systems)를 통하여 위성의 수질과 대기질의 개선을 위한 부수식물 처리시스템(floating plant treatment system)을 고안하면서 시작되었으며, 국내에서 수생식물을 이용한 수처리 연구는 1980년대 이후 시작되었으며, 주로 쯔남미 원산의 부레옥잠(water hyacinth)이 활용되어 왔다<sup>2)</sup>. 부레옥잠 이외에는 생이가래에 의한 하수내 질소와 인의 제거, 미나리에 의한 영양염류 제거 및 카드뮴과 납의 제거, 물옥잠, 즐, 부들, 꽃창포, 토란에 의한 축산폐수처리, 애기부들, 꽃창포, 미나리에 의한 하수처리가 진행된 바 있으나 전반적으로 수종의 평가는 물론 현장적용규모의 연구가 빈약한 상태이다<sup>3)</sup>

최근 호수의 수질관리에 있어 습지의 역할과 기능에 대한 생물학자, 자원관리자와 일반대중들의 관심이 점차 증가되어 왔으나 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<sup>4,15)</sup>.

본 연구에서는 부도(floating islands)를 일반인이 이해하기 쉽게 “인공부채위에 수생식물을 식재하고 식물의 영양염류 섭취를 통해 호수의 수질을 개선하고 호수의 경관을 창출하는 수질 개선공법”을 “인공식물섬”이라 정의하고<sup>2)</sup>, 우리나라 대표적인 농업용 저수지에 설치된 인공식물섬의 구조의 안정성, 식물의 성장가능성, 생태계의 변화, 유지관리의 문제점을 분석하고 식물의 성장량분석을 통해 저수지 수질개선에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

인공식물섬은 충남 아산시에 위치한 마산저수지에 조성하였다. 마산저수지는 관개면적이 566ha, 저수량이 3,037천m<sup>3</sup>인 중규모 농업용 저수지이며, 저수지의 수질은 COD 7.4~13.7mg/ℓ, T-N 1.55~3.83mg/ℓ, T-P 0.17~0.27mg/ℓ 로서 환경정책기본법의 호소수질 환경기준 IV등급을 초과하고 있다.<sup>6)</sup>

인공식물섬은 마산저수지에 3개를 설치하였으며, 각 인공식물섬은 10개의 부채(floating platforms)를 세로 방향 2개, 가로 방향 5개로 서로 연결하였다. 부채는 인공식물섬에서 가장 중요한 요소로 식물을 물 속에 잠기지 않고 뜨게 하는 기능을 하며, 목재틀(wood frame)과 스티로폼(polystyrene foam)으로 구성하였다. 부채의 크기는 순수 식물재배면적이 16m<sup>2</sup>(4.0×4.0m)이며, 목재틀 위에는 사람이 올라가서 식물을 유지관리할 수 있는 구조로 하였다. 수생식물을 지지하기 위해 사각형의 부채 안에 PVC pipe를 가로와 세로방향으로 각각 40cm 간격으로 설치하고 그 위에 나일론망(net)을 포설하였다. PVC 파이프 속에 나일론 줄을 넣고 나일론 줄의 양쪽을 목재틀에 묶었다. 인공식물섬에는 다년초 수생식물인 애기부들, 출, 갈대플 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 쥘트(마)포트에 다시 담아 식물매트에 심었다. 식물매트는 야자섬유로 제작된 것이며, 뿌리를 고정시켜 파랑이나 바람에 의해 식물이 넘어지지 않도록 지지하는 기능을 한다. 식물매트의 가장자리는 PVC 파이프에 배어 파랑에 의해 식물매트 전체가 움직이지 않도록 하였다. 식물의 식재시기는 '98. 6. 24일이며, 식물종류별로 4×4m의 부채 10개에 25×25cm 간격으로 식재하였다.

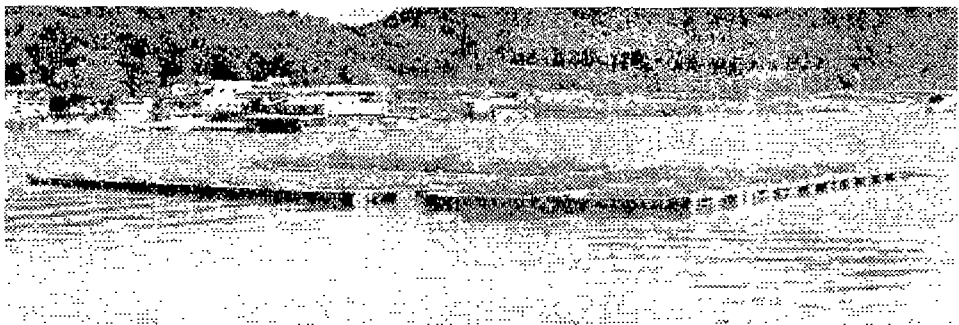


Fig.1 Floating islands in Masan Reservoir

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 수생식물의 생존가능성

포장에서 발아하여 비닐포트에서 재배된 식물을 저수지로 옮겨 비닐포트를 벗기고 쥬트(마)포트에 다시 담아 식물매트에 식배한 결과 고사된 식물은 없었다. 식물의 식재후 인공식물섬의 각 부속자재의 기능과 상태를 검토한 결과 초기에는 식재된 식물의 뿌리는 잘 발달하여 쥬트포트를 나와 식물매트와 나이론망으로 뺀어 나갔으며, 식물매트와 나이론망은 식물의 지상부를 지지하는 중요한 역할을 하고 있었다. 식물의 지상부가 크게 성장하고 호수내에서 파랑이 계속됨에 따라 갈대와 줄은 안정성을 유지하고 있었으나, 애기부들은 뿌리의 발달이 부진하여 인공식물섬의 부속자재(PVC 파이프, 나이론 망, 식물매트)와의 일체성이 미흡한 결과 파랑에 의해 애기부들이 한 방향으로 밀리거나 유실되었다. Dykyjova와 Veber<sup>17)</sup>는 몇가지 수생식물의 수경재배를 통해 지하부와 지상부의 양을 비교하였는데, 3년된 갈대의 경우 2.61, 부들의 경우는 0.68로 발표한 바 있어 애기부들의 경우는 지상부에 비해 뿌리의 발달이 크지 않아 인공식물섬의 수생식물로서는 부적당한 것으로 분석된다.

#### 2. 수생식물의 성장특성

인공식물섬에 식재된 애기부들, 줄 갈대의 식재 당시 지상부 크기는 각각 평균 45cm, 59cm, 31cm였으나, '98. 9월말에는 각각 166cm, 145cm, 110cm로 성장하였다.<sup>15)</sup> 식재후 2년차인 '99. 7월에는 Fig.2와 같이 갈대와 줄의 지상부 크기가 각각 193cm, 211cm로 줄이 더 컸으며, '98년에 비해 크게 자랐다. 갈대의 경우 '99. 8월에는 195cm로 7월과는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 충남 웅천읍의 농경배수로에서 자란 갈대의 경우<sup>7)</sup> 7월에 240~260cm로 자란 후 키는 정체현상을 보인 것으로 조사되었다. 인공식물섬의 경우 육지에 비해 바람이 많고 파랑의 영향으로 키는 육지에 비해 크지 않는 것으로 보여진다.

인공식물섬의 '98. 9월의 지상부의 건중량은 애기부들, 줄, 갈대가 각각 962g/m<sup>2</sup>, 1,115g/m<sup>2</sup>, 523g/m<sup>2</sup>으로 식재 당시에 비해 33, 44, 56배 성장한 것으로 나타났다.<sup>15)</sup> '99년 7월의 경우 갈대와 줄의 지상부 건조중량은 각각 2,820g/m<sup>2</sup>, 2,470g/m<sup>2</sup>으로 '98. 9월에 비해 높게 나타났으며, 갈대가 약간 크게 나타났다. 충남 웅천읍의 농경배수로에서 자란 갈대와 줄의 지상부 최대 현존량은 9월에 각각 3,500g/m<sup>2</sup>, 3,200g/m<sup>2</sup>으로 조사된 바 있어<sup>7)</sup> 갈대가 줄보다는 지상부 현존량이 큰 것으로 보여진다. '99. 8월말 인공식물섬의 갈대 현존량은 3,530g/m<sup>2</sup>으로 조사되었다. 이는 충남 웅천읍의 농경배수로와 비슷한 분포이고, 낙동강 하구지역에서의 상한 값(3,500g/m<sup>2</sup>)<sup>8,9)</sup>과 비슷하며, 영산강 유역에서의 조사치인 670~4,650g/m<sup>2</sup>의 최대치<sup>10)</sup>보다는 낮으나, 서해안 염습지에서의 조사 결과치<sup>11)</sup> 2,980g/m<sup>2</sup>, 팔당호 인안대의 조사치<sup>12)</sup> 800~2,210g/m<sup>2</sup>, 섬진강 하구의 염습지에서의 조사치<sup>13)</sup> 1,120g/m<sup>2</sup>보다는 높은 값을 나타냈다. 이와 같은 현존량의 차이는 식물이 이용할 수 있는 영양염류의 양과 지상부의 밀도가 다르기 때문으로 판단된다.

인공식물섬에서 자란 줄과 갈대의 '99. 7월의 지상부 밀도는 각각 1,441개체/m<sup>2</sup>, 220개체/m<sup>2</sup>로 충남 웅천읍의 농경배수로에서 갈대와 줄의 지상부 밀도 142개체/m<sup>2</sup>, 54개체/m<sup>2</sup>에 비해 현저히 높다. 이는 육지에서 자생하는 수생식물의 경우 뿌리의 각 마디에서 새로운 순이 토양을 통과하여 지상부로 나오게되나, 인공식물섬에서는 뿌리가 물에 노출된 상태로 있으므로 새로운

순이 나올 수 있는 유리한 조건을 갖추었기 때문으로 판단된다.

따라서 인공식물섬에서 자라는 수생식물의 특성은 육지에서 자라는 수생식물에 비해 줄기부의 현존량은 많은 편에 속하지만 지상부의 크기는 작고, 단위면적당 줄기수는 많은 것으로 나타나 한 줄기당 생체량은 육지에서 자라는 것에 비해 적은 것으로 조사되었다.

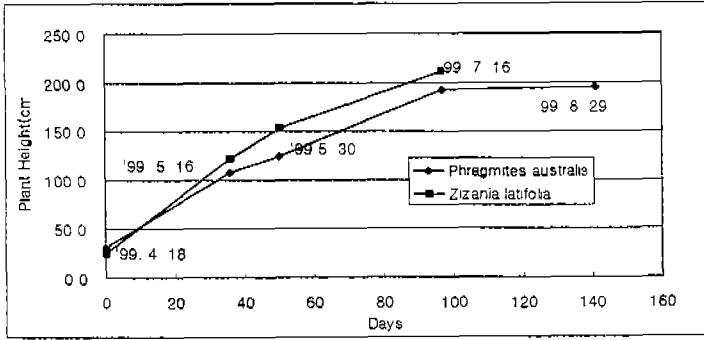


Fig.2 Plant height of the floating islands in Masan Reservoir

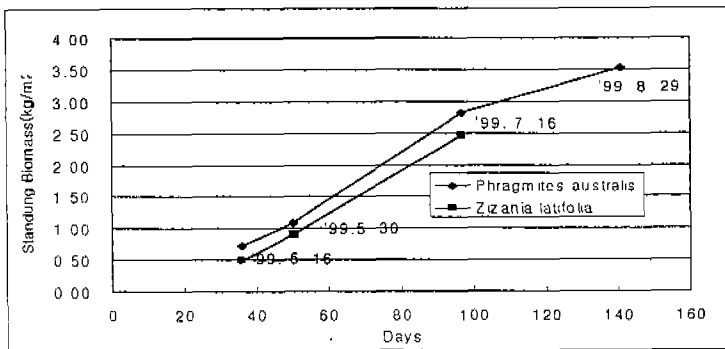


Fig.3 Above-ground standing biomass changes of Phragmites australis in 1999

### 3. 수질개선효과

수중 생태계에서 대형 수생식물의 생물량은 흡수한 영양소를 동화하여 고정하는 저장고의 역할을 수행하므로 저수지의 수질개선에 기여할 수 있다. 갈대의 지하부/지상부의 비를 연구한 결과를 보면 Dykyjova와 Veber<sup>17)</sup>의 경우 2.61, Fiala등<sup>18)</sup>의 경우 2.76으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 Dykyjova와 Veber<sup>17)</sup>의 지하부/지상부의 비 2.61를 이용하여 '99. 8월말에 인공식물섬 갈대의 뿌리와 줄기부의 건조중량을 계산하면 12.74kg/m<sup>2</sup>로 추정된다. 갈대의 뿌리와 줄기부의 건조중량과 Table-1에 제시된 수생식물의 영양물질 흡수율 자료<sup>14)</sup>를 이용하여 '99. 8월말에 인공식물섬 갈대의 영양물질 흡수율을 계산한 결과 질소 152.9g/m<sup>2</sup>, 인 11.5g/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, '99. 4월~8월까지의 평균 영양염류 흡수율은 질소 10.2kg/d/ha, 인 0.8kg/d/ha로 계산된다. 저수용량 3,037천m<sup>3</sup>, 만수면적 92ha인 마산저수지에 만수면적의 5%인 4.6ha의 인공식물섬을 조성할 경우 저수지의 저수율이 90%이고 1개월간 유출입이 없다면 T-N 2.73mg/ℓ, T-P

0.245mg/ℓ 인 저수지 수질은 1개월 후에는 T-N 2.21mg/ℓ, T-P 0.205mg/ℓ 로 개선될 수 있으며, 환경정책기본법의 호소수질환경기준 IV등급을 유지하기 위한 삭감부하량의 T-N 30%, T-P 28%에 해당된다.

Table-1 Uptake estimation of N and P by macrophytes(*Phragmites australis*) in the floating island

Nutrients	N	P	Remarks
Concentrations of N and P in macrophytes(mg/g) <sup>b)</sup>	12	0.9	
Uptake per unit area(g/m <sup>2</sup> )	152.9	11.5	
Estimation of uptake rates(kg/d/ha)	10.2	0.8	'99.4~'99.8

#### 4. 생태계변화

마산저수지에서 서식하고 있는 어류는 청문조사한 결과 붕어, 잉어, 피라미, 메기, 가물치, 새우, 모래무지 등으로 조사되었다. 인공식물섬 설치에 따른 어류의 변화상을 조사하기 위해 인공식물섬 아래(直下)부분과 주변에 수심 1m, 3m에 통발을 설치한 결과 인공식물섬 주변에는 새우 3개체만 채집되었으나, 인공식물섬 직하에는 새우 10개체, 피라미 5개체가 채집되었으며, 육안으로도 많은 어류들이 인공식물섬에 서식하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 인공식물섬에서 식재된 식물의 뿌리와 뿌리에 붙어 있는 부착생물이 붕어, 잉어, 피라미, 새우 등의 좋은 섭이장이 되기 때문이다. 이와 같이 인공식물섬 설치는 생태계 새로운 먹이연쇄의 형성으로 수질 개선효과를 가져와 수질정화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 인공식물섬에는 줄, 갈대, 애기부들을 심었으나, 시간이 지남에 따라 현재는 이들 3개종과 함께 속속이풀 외 13종이 자라고 있다. 새로 유입된 종은 식재된 식물의 농장에서 온 경우가 3종이며 11종은 저수지 주변에서 씨가 유입되어 자란 것으로 조사되었다. 현재는 식재된 식물이 우점하고 있으나 이들의 생육조건에 따라 주변식물에 의해 천이될 수 있음을 보여주고 있다.<sup>15)</sup>

#### IV. 요약 및 결론

관개용 저수지에 설치된 인공식물섬이 수질개선에 미치는 영향을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 포장에서 비닐포트로 재배된 식물을 뿌리에 붙어 있는 토양과 함께 쥬트(마)포트에 넣어 인공식물섬의 식물매트에 심은 결과 식물은 고사하지 않고 잘 자랐다. 식물의 지상부기 크게 성장하고 호수내에서 파랑이 계속됨에 따라 갈대와 줄은 안정성을 유지하고 있었으나, 애기부들은 뿌리의 발달이 부진하여 인공식물섬의 부속자재와의 일체성이 미흡한 결과 파랑에 의해 애기부들이 한 방향으로 밀리거나 유실되었다.
3. 인공식물섬에서 자라는 갈대의 현존량, 개체의 밀도, 신장을 조사한 결과 습지에서 자라는 갈대에 비해 현존량은 많은 편에 속하지만 개체의 밀도는 높으며, 키는 작고 줄기는 매우 가는 것으로 평가되었다.
4. '99. 4월~8월의 평균 영양염류 흡수율은 계산한 결과 질소 10.2kg/d/ha, 인 0.8kg/d/ha로 나

타나 인공식물섬이 저수지의 수질을 개선시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 본 연구에서는 인공식물섬이 저수지 수질에 미치는 영향에 대해 연구한 바, 향후 인공식물섬을 저수지 수질개선공법으로 도입되기 위해서는 부채를 가볍고, 강하고, 내구성이 있는 재료로 구축할 수 있는 방안, 수중 생태계변화에 의한 수질개선효과 등에 대해 깊은 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. 농림부·농어촌진흥공사(1998), 농업용수 수질조사 보고서, p.20-35
2. 공동수(1998), 대형수생식물을 이용한 생태공학적인 수질개선방안, p.117-127
3. 최인선(1998), 수생식물을 이용한 수질정화기술, 현대(8월호), p. 40-41
4. 과학기술정책연구소·강원대학교, 1996, 강원도-나가노현간 생태공학적인 호수수질개선 공법의 비교연구, p.29-89
5. 농림부·농어촌진흥공사(1997), 농업용수 수질개선 시험사업 보고서, p.105-196
6. 농림부·농어촌진흥공사(1998), 농업용수 수질개선 시험사업 보고서, p.89-100
7. 농림부·농어촌진흥공사, 1998, 수생식물에 의한 수질개선기법 연구(II), pp.43-44
8. 김준호·문형태·민병미·조경재, 1989, 낙동강하구 염습지 식물군락의 질소 및 인의 동태, 한국생태학회지 12, pp.1-7
9. 문형태, 1984, 낙동강 하구의 사주식생 천이에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, pp.102
- 10) 김철수, 1975, 갈대군락의 현존량과 환경요인에 관한 연구, 한국식물학회지 18, pp.129-134
- 11) 김준호·민병미, 1983, 해안 염생식물군집에 대한 생태학적 연구( III), 인천간척지의 토양환경, 종의 다양성 및 염류순환에 대하여, 한국생태학회지 26, pp.53-71
- 12) 조강현, 1992, 팔당호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환, 서울대학교 박사학위논문, pp. 233-234
- 13) 오경환·임병선, 1983, 섬진강 하 염습지 갈대군락의 생산성과 토양양분의 계절적 변화, 한국생태학회지 6, 90-97
14. 조강현(1997), 수질환경보존을 위한 수변부 생태계의 생태공학적 이용, 서울여자대학교 생태연구소 설립기념 심포지엄, p.68-81
15. 이광식·장정렬·김영경·박병훈, 저수지 수질개선을 위한 인공식물섬 조성에 관한 연구, 한국환경농학회지 18(1), pp.77-82
16. Gordon Mueller, Jim Sartoris, Kelgo Nakamura and John Boutwell(1996. 11), Ukishima, Floating islands, Schwimmkampen?, LAKELINE, p.18-26
17. 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
18. 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