

자생수생식물의 수질 정화에 따른 생리활성 변화

한승원* · 방광자** · 이육주**

*한양대학교 건축학과 · **상명대학교 환경조경식물산업학부

The Change of Physiological Characteristics as Water Purification Capability by Native Aquatic Plants

Han, Seung Won* · Bang, Kwang Ja** · Lee, Wouk Ju**

*Dept of Architectural Engineering, Hanyang University

**Division of Plant Science & Technology, Sangmyung University

ABSTRACT

This study looked into the water quality improvement effect of reed (*Phragmites communis*), bur reed (*Sparaganium stoloniferum*), *Alisma canaliculatum*, and *Hydrocharis dubia* in order to develop native hydrophytes suitable to natural-type wetlands for ecological restoration. The result confirms that the concentration of wastewater was lowered in most plants indicating a possibility in wastewater treatment.

Among four species, reed (*Phragmites communis*) and bur reed (*Sparaganium stoloniferum*) were most effective in removing a majority of contaminants. Considering that reed (*Phragmites communis*) is a species that has been used most often among hydrophytes, bur reed (*Sparaganium stoloniferum*), which is a native species in Korea, showed equivalent level of outstanding effect. In the physiological and growing activity and its relations to water quality improvement effect, each species appeared differently. Reed (*Phragmites communis*) and bur reed (*Sparaganium stoloniferum*) were best also in physiological and growing activity. In the case of *Hydrocharis dubia*, growth was strong in polluted water environment but its physiological activity was poor, indicating that it was under stress. The growth and physiological activity of *Alisma canaliculatum* were also poor, indicating that it too is being stressed. However, measuring organic contents in the plants of each species shows that the organic contents of *Alisma canaliculatum* was high. *Alisma canaliculatum* is a species effective in removing pollutants in water, although it is under stress.

A unique phenomenon in removing water pollution with plants is that each species removed different

pollutants. In the case of *Alisma canaliculatum*, which was relatively poor in removing pollution, it was remarkable in reducing nitrogen and phosphorus. *Hydrocharis dubia* was also effective in eliminating floating matter.

Key Words : *Physiological Characteristics, Photosynthetic Rate, Reeds, Emerged Hydrophyte, Floating Leaved Hydrophyte*

I. 서론

수질 개선을 위한 생물학적 방법으로는 주로 플랑크톤, 조류 및 미생물 등과 같은 소형식물을 이용한 방법이 시도된 바 있지만, 생육과정에 있는 대형 수생식물은 무기영양소를 수체에서 제거하는 기능과 고사체의 분해과정에는 수체에 영양소를 가하는 기능을 담당함에 따른 수질 정화의 가능성이 제시되고 있다(김준호, 1990). 많은 연구가들이 질소와 인의 제거능력에 중점을 두고 연구하는 가운데(Reddy et al., 1983; Busk and Dierberg, 1989), 영양염류로서의 오염물질을 흡수하는 대형 수생식물을 이용한 수질개선 실험이 진행됨에 따라(Cornwell et al., 1977; McDonaled and Wolverton, 1980; Reddy et al., 1982, 1983; Busk and Dierberg, 1989), 수생식물의 정화능력에 관한 연구는 생물학적 수질개선방법으로서 최근에 많은 관심을 집중시켜오고 있다.

대형 수초 등을 이용할 경우 그 성장률, 영양염류의 섭취속도도 밝혀지고 있기 때문에 처리 목표수질을 달성하기 위한 처리수량과 필요면적 등의 관계를 어느 정도 사전에 추정해 놓는 것이 필요하고 또한 갈대속과 억새속 식물을 수생식물로 도입하고자 할 때, 우리나라에서는 생육적인 특성에 따라 뿌리의 활착을 고려하여 시공하는 것이 바람직하다. 우리나라의 경우는 하천의 하상계수가 크고, 연간 강수량이 65%가 하기에 집중되는(이상호 등, 1996) 환경조건으로 인하여 시공 후 식재 재료들이 활착하기 전에 많은 강우에 의해 대부분이 유실되고 있는 실정이다. 그러나 현재 국내의 하천공사 지침서와 시공방법은 식물을 수변녹화에 도입하는 소재개발에 대하여 구체적으로 제시하지 못하고 있으며, 외국의 시행방법을 그대로 답습하고 있다.

이에 본 연구를 통하여 우리나라의 습지와 하천에서 쉽게 볼 수 있는 일부 수생식물들의 오염된 생활하수에서의 성장반응과 질소와 인의 제거 능력을 측정, 분석함으로써 이들이 수질개선에 기여하는 정도를 밝히고, 이 때 관계하는 식물 자체 내의 생리적 활성을 측정함으로써 자생식물을 이용한 수질개선 방안으로 최적 수생식물 개발에 기초 자료를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

실험 대상 식물은 번식력이 뛰어나 뿌리가 수변 습지 수면으로 왕성하게 뻗어가는 식물로 연못 하천·습지 생태복원 조경 사업시 소재로서의 개발 가능성이 있는 식물로 3종의 정수식물(挺水植物, emerged hydrophyte)인 갈대(*Phragmites communis*), 흑삼릉(*Sparganium stoloniferum*), 택사(*Alisma canaliculatum*)와 부엽식물(浮葉植物, floating leaved hydrophyte)인 자라풀(*Hydrocharis dubia*)을 선정하여 2003년 8월 30일 경기도 용인시 지역 일대의 자생지에서 휴면상태로 들입하기 직전에 채집하였다. 식물의 활착 정도를 측정하기 위해 모든 종 공히 근부 3.0cm, 초장 15.0cm로 일정하게 하였는데, 자라풀은 형태적인 특성상 초장 3.0cm로 정리하였고, 각 실험구별 종의 포기당 중량은 100g, 20포기씩 조제하였다.

실험구는 자연형 인공습지 조성 방식을 사용하였는데, 실험구는 90cm×140cm의 크기로 하부와 측면의 토양은 양토, 모래, 토탄 등을 사용하였고 점토를 물과 혼합하여 하부와 측면에 40cm 두께의 진흙 다짐하여 방수처리 하였다. 빗물의 유입을 막기 위하여 비닐하우스 내에 실험구를 설치하였고 실내 기온의 상승을 막기 위하

여 전·후·좌·우 지면에서 100cm 위치에 통풍구를 설치하였다. 진흙으로 방수처리 된 각 실험구에 배양토를 10cm 띄고 선별 전처리 된 각 시료 품종을 각 실험구에 15cm 간격으로 열식하였다. 시료 이식 후 2003년 9월 5일 경기도 용인시 양지천의 3개 지역에서 80ℓ씩 240ℓ를 채수하여 실험구에 50ℓ씩 유입시켰다. 채수 당시 지역별 pH는 각각 7.1, 8.2, 7.3 이었고 수온은 19℃, 20℃, 20.5℃ 이었다.

수생식물에 의한 수질의 정화 정도는 각 수질성분들을 환경오염공정시험법 수질편(제6항, 14항, 15항, 16항, 18항)에 의거하여 입수 전 수질을 분석하고 실험개시 후 10일 간격으로 수질의 변화를 측정하였는데 측정항목은 pH, COD(chemical oxygen demand), BOD(biochemical oxygen demand), SS(suspended solide), 총질소합량(total-nitrogen, T-N), 그리고 총인합량(total-phosphorus, T-P)을 측정하여 식물종마다 그 차이점을 비교하였고 각 식물체에 의한 수질의 정화능은 실험 전·후의 농도차에 의거하여 산출하였다(임병선 등, 1995).

처리 40일 후 식물체의 생리활성을 조사하기 위하여 가스 무처리 식물체의 광합성 활성을 광합성 측정장치(LI-6200, LI-COR, USA)를 사용하여 측정하였고, 측정 시간은 식물체의 광합성 주기를 고려하여 오전 11시부터 3시 사이에 각 식물당 3엽 이상씩을 측정하였다. 챔버 내의 조건은 기온 25℃, 상대습도 50%, CO₂ 농도 350±30μg ℓ⁻¹, 광도 200±50μmol m⁻² s⁻¹의 조건에서 수행하였고, 모든 종에 대한 광합성량 측정은 5회 반복 수행하였다. 분석항목은 광합성량(Pn), CO₂ 흡수율(CO₂), 세포내 CO₂ 농도(Ci), 대기 중 CO₂ 농도(Ca), 기공전도도(Cs), 증산량(Tr)로서 모두 가스 처리 직전에 측정하였다. 수분이용효율(water use efficiency: WUE)은 Malmstrom(1997)의 방법에 따라 (Ca-Ci)/Tr(mmol mol⁻¹)의 식으로 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수생식물에 의한 수질개선

수생식물에 의한 수질정화효과를 알아보기 위해 폐

수를 유입시켜 식물에 의한 수질의 변화를 알아본 결과 각 실험 수생식물들이 성장하고 있는 배양액에서 10일 간격의 시간경과에 따라서 측정된 배양액의 수질을 pH, COD, BOD, Suspended Solide(SS), Total-Nitrogen(T-N), Total-Phosphorus(T-P)의 항목별 변화를 분석한 결과 수생식물에 의한 폐수 정화 효과는 식물종별로 상이한 제거 양상을 보였다.

각 종별 pH 정화능을 알아본 결과로서 생리활성이 가장 활발했던 갈대와 흑삼릉의 pH 중화능이 가장 높았고 택사가 가장 저조하였다(그림 1 참조). 배양 초기부터 pH의 가장 급격한 변화를 보인 것은 갈대였는데 처리 10일 후에 pH 9.27에서 pH 7.47까지 떨어뜨림으로 기질의 중화작용이 활발히 일어났으며 이후 pH 8.5 정도를 유지하였다. 흑삼릉도 초기 높은 알칼리성 수질을 pH 9.98까지 떨어뜨리고 40일 경과 시에는 pH 8.64를 유지하였다. 갈대와 흑삼릉은 광합성 효율이 높았던 것으로 보아 높은 산성이나 알칼리성 수질에서 활발한 생리적 활성에 의한 수질을 중화시키는 종임을 알 수 있었다. 자라풀의 경우에는 초기의 급격한 pH 저감효과는 아니었으나 40일 경과 후 pH 8.20까지 떨어뜨려 가장 높은 pH 중화능을 보여 서서히 수질의 산도를 중성으로 유지시킬 수 있는 종임을 알 수 있었다. 수생식물의 pH 중화능력이 높은 것은 뿌리부분에 존재하는 탈수소 효소에 의해 수소를 제거하고 전자수용체로 작용해서 기질을 중화시키는 기능을 갖고 있기 때문임을 고려해 볼 때, 실험식물들이 pH값에 차이를 보이는 것

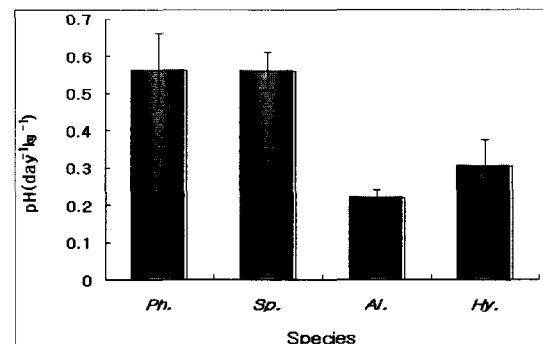


Figure 1. The pH purification rate of the aquatic plants. ±SE of 6 sets of 5 samples. (Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canabiculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

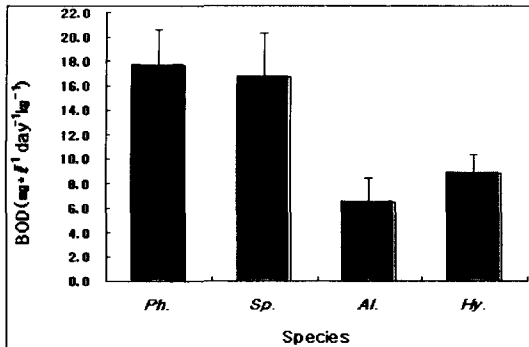


Figure 2. The BOD purification rate of the aquatic plants. \pm SE of 6 sets of 5 samples. (Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canaliculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

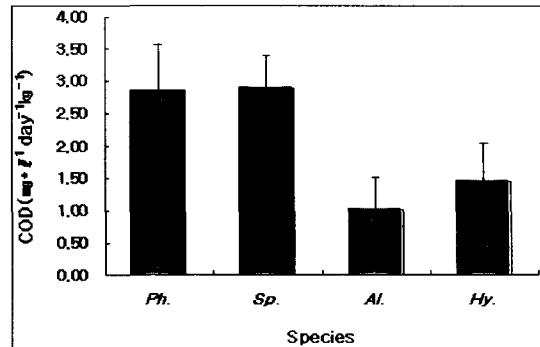


Figure 3. The COD purification rate of the aquatic plants. \pm SE of 6 sets of 5 samples. (Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canaliculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

은 식물 자체의 생리적 특성에 기인되는 것으로 볼 수 있다.

광합성 결과 유리된 산소에 의해 유기물을 분해한 정도를 나타내는 BOD는 본 실험 결과 실험 수생식물 모두에서 그 효율이 뛰어났으며 큰 격차 없이 재배기간이 경과될수록 점진적으로 효율이 증가하였다(그림 2 참조). 갈대, 흑삼릉, 택사, 그리고 자라풀은 처리 종료인 40일 경과 후에는 초기농도의 96.51%에서 98.11%까지 처리효율을 보여 갈대 234.88mg/l, 흑삼릉 238.73 mg/l, 택사 234.84mg/l, 그리고 자라풀 236.10mg/l를 저감하는 효과를 보였다. 높은 BOD 농도는 산소부족으로 인한 미생물 발효의 결과 생성되는 CO₂, H⁺, CH₄ 등은 식물생장에 독성을 유발하며, 질화작용의 억제로 인한 NH₄⁺-N의 축적으로 근권 및 세포 내부를 산성화시키고(Raven, 1979) 이에 따른 근권의 산화는 식물 생존에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 이러한 환경에 적응하기 위해 식물은 통기조직(aerenchyma)의 발달과 같은 해부학적 생화학적 특성을 나타내어(Justin and Armstrong, 1987) 식물의 생리적 요인에 관계하게 된다.

수생식물의 산소방출에 따른 유기물의 산화 분해 효과를 알아볼 수 있는 COD 분석 결과 모든 실험대상 식물에서 고르게 저감효과가 나타났다. 갈대, 흑삼릉, 택사, 그리고 자라풀 공히 BOD 농도의 초기 저감율보다 낮은 저감효과를 나타내었는데 이는 초기의 높은 pH 농도의 영향을 받은 것이거나 COD 분석 과정에서 산

화력이 낮은 과망간산칼륨과 수산화나트륨 용액을 시료로 사용하였기 때문으로 사료되었다. 갈대와 함께 완만한 COD 저감을 나타낸 것은 자라풀로서 처리 20일 경과부터는 초기농도의 51.06%, 73.96%를 저감하였으며 처리종료 시점인 40일 경과 후에는 38.66mg/l인 76.33%의 저감율을 나타내었다(그림 4 참조). 흑삼릉과 택사는 초기농도 저감율이 각각 46.73%와 27.66%로 비교적 높았던 종이였으며 BOD 저감효과가 가장 좋았던 흑삼릉의 COD 저감율도 가장 좋아 초기농도 50.65mg/l에서 10일 경과시마다 23.67mg/l, 31.33mg/l, 40.99mg/l, 그리고 41.41mg/l의 농도 저하를 나타내어 흑삼릉에 의한 COD 농도 저감율은 처리 종료시에 초기농도의 81.76%까지 떨어지는 결과를 보였다. 이덕배 등(1994)의 연구에 의하면 갈대의 생육이 왕성한 여름의 COD 제거율이 53%이었고 갈대 근부의 미생물에 의한 유기물 분해는 물표면에서 1.5cm 깊이 사이에서 주로 일어나는데 그 이유는 이 층에서 반응기질과 산소가 풍부하여 박테리아의 성장과 활력이 가장 좋기 때문이다. 각 종별 COD 정화능은 BOD 정화능보다는 종간의 차이가 뚜렷하지 않았지만 양상은 같아 갈대와 흑삼릉이 좋았고 자라풀, 택사 순의 경향을 보였다.

식물의 근계는 입자상 물질을 전기적 혹은 기계적으로 흡착시켜 미생물의 먹이원을 제공한다. 물질의 화학적 개선뿐만이 아닌 물리적 개선 효과는 부유물질(SS)의 농도에 의해 알 수 있는데 본 실험에서는 전체적으로 재배기간이 길수록 SS 농도가 낮아졌다(그림 4 참

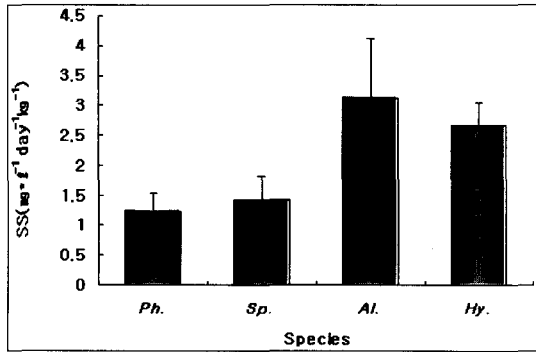


Figure 4. The SS purification rate of the aquatic plants. \pm SE of 6 sets of 5 samples(Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canabiculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

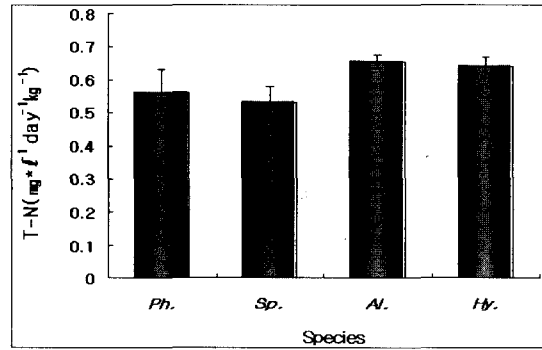


Figure 5. The T-N purification rate of the aquatic plants. \pm SE of 6 sets of 5 samples(Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canabiculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

조). SS 농도는 재배기간이 오래될수록 낮아졌는데, SS 농도의 감소가 가장 높았던 종은 흑삼릉과 자라풀로 40 일 동안 두 종 공히 초기농도 170mg/l의 93.53%인 159mg/l를 떨어뜨렸다. 단 근부의 형태적 차이로 흑삼릉보다 자라풀이 보다 완만한 저감을 보였다. 택사는 SS 농도 저감율이 가장 낮은 종으로 170mg/l에서 137 mg/l로 초기농도의 80.53%의 SS 농도를 감소시켰다. 다른 오염원에 대한 제거율이 가장 좋았던 갈대는 처리 20일 경과까지는 초기농도에 대한 저감율이 가장 완만 했으나 30일 경과 후에는 SS 초기농도를 141mg/l 떨어뜨렸으며 40일 경과시에는 86.47%인 147mg/l 저감을 보였다. 이는 왕성한 성장에 따른 밀식 현상으로 수 중에서 겹치는 줄기와 잎이 침전되고 고사되는 현상에서 나타난 것으로 사료된다. 각 종간의 부유물질 정화능을 알아본 결과 택사와 자라풀의 부유물질 제거가 가장 활발함을 확인할 수 있었다.

식물체 내의 유기물의 흡수를 알아보기 위하여 수질 내 총질소 함량의 변화를 측정된 결과 자라풀은 입수 후 10일 경과 후부터 그 효과를 볼 수 있었는데 이는 초기 BOD와 COD 농도가 높은 조건에서 식물은 O₂의 부족에 따라 정상적인 호흡을 막음으로써 유기물 흡수에 영향을 미치게 된 것으로 사료되었다. 이후 20일 경과시에는 81.7%의 질소함량의 감소를 보였으며 40일 경과 후에는 93.5% 제거하여 거의 모든 질소 성분을 제거함을 볼 수 있었다(그림 5 참조). 조강현(1992)의

보고에 따르면 수생식물은 생장기에 질소와 인을 흡수 하고, 고사한 다음 분해를 통하여 수체로 유리하는 무기양소의 공급원 기능을 하게 되며, 수생식물 조직의 질소와 인의 농도는 침수식물, 부엽식물, 정수식물의 순이라고 하였던 결과와 같은 결과였다. 택사는 생장에서 더딘 성장을 보였던 반면 질소 제거에는 탁월한 효과를 나타내었는데 20일 경과 후 78.98%를 제거하였고 40일 경과 후엔 초기농도의 95.96%인 26.18mg/l를 제거하여 4종의 식물 중 가장 높은 질소 제거율을 보였다. 일반적으로 질소 제거율이 비교적 높은 편으로 이미 수질정화용 식재에 가장 많이 사용되고 있는 갈대의 경우 본 실험을 통해서도 양호한 제거효과를 볼 수 있었는데 처리 40일 경과 후에는 초기농도의 82.31%인 22.46mg/l의 질소를 제거하였다. 흑삼릉은 비교적 완만한 제거율을 나타내어 40일 경과 후 초기농도의 77.53%인 21.15mg/l를 제거하여 공시 식물 중 가장 저조한 제거율을 나타내었다.

총 인의 함량은 활착기간이 끝나고 본격적인 생장을 하면서 효율이 뚜렷해졌고 재배기간이 지날수록 수치가 낮아지는 경향을 보였으며 모든 종이 90% 정도의 질소 제거율을 보였던 것에 비해 인의 제거율은 40일 경과 후 60% 정도 제거하였다(그림 6 참조). 본 실험에서는 유입초기부터 pH가 높은 양상을 계속 보였기 때문에 다른 수질에서보다 식물에 의한 인의 제거 속도가 느렸던 것으로 사료되었다. 총 인의 함량을 가장 낮

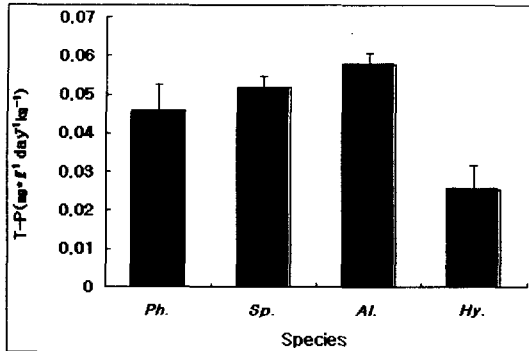


Figure 6. The T-P purification rate of the aquatic plants, \pm SE of 6 sets of 5 samples (Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canabiculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

춘 중은 택사로 질소의 제거에서와 같은 결과를 보였다. 택사는 배양 10일 경과부터 다른 종에 비해 많은 양을 제거하였는데 40일 경과 후 81.41%의 제거율을 보였다. 후삼릉에 의한 처리구에서 주목할만한 결과는 질소 제거에는 가장 효과가 낮았으나 인의 제거에는 탁월한 효과를 볼 수 있었는데 활착 후 40일 경과 후에는 2.07mg/l을 제거하여 초기 인함량의 72.85%의 감소 효과를 보였다. 갈대에 의한 인의 제거도 기대할 만한 결과를 보였는데 실험 종료 40일 경과 후 갈대에 의한 인함량은 초기농도의 64.51%의 저감효과를 볼 수 있었다. 질소 제거에 탁월한 효과를 보였던 자라풀은 인 제

거에 있어서는 상당히 저조한 효과를 나타내어 40일 경과 후에 초기농도의 36.06%를 제거하는 결과를 보였다. 질소와 인의 제거를 통해 식물 종 별로 제거하는 유기물의 종류도 다르다는 결과를 알아내었고 이는 각 오염수질에 따른 식재 종의 선택에 활용할 부분이라고 사료되었다. 본 연구를 통해서도 자라풀은 다른 오염성분보다 물리적 오염원인 부유물질의 제거에 탁월하였으므로 물리적인 오염인 부유물질의 오염 농도가 높은 곳에 식재함으로써 많은 효과를 볼 수 있을 것이다. 또한 택사는 비교적 낮은 수질 정화율을 보였으나 총질소함량과 총인함량의 저감효과가 좋았던 결과를 통해 실제 이용에 사용할 수 있을 것으로 사료되었다.

2. 수생식물의 오염수질 내에서의 생리적 변화

오염물질의 환경에 대한 식물체 내의 생리적 활성 변화를 알아보기 위하여 수생식물의 광합성, 기공전도도, 증산율, 세포 내·외 CO₂ 농도, 그리고 수분에 대한 이용으로 수분이용효율을 측정한 결과는 표 1과 같다. 물과 같은 환경요인이 식물의 생장에 영향을 미칠 수 있는 유일한 방법은 생리적 과정과 조건에 대한 영향을 통해서이다. 거의 모든 식물의 대사과정은 직·간접적으로 수분공급의 영향을 받는다. 수분함량의 감소는 광합성을 억제하고, 호흡율과 기타 효소관련 대사속도를

Table 1. Changes of photosynthetic rate(Pn), stomatal conductance(Cs), CO₂ absorption rate(Ca) inner cellular CO₂ concentration(Ci), and transpiration rate(Tr) on native aquatic plants treated pollution water until 40 days.

Species		Pn ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Cs (s cm^{-1})	Ca ($\mu\text{g cm}^{-2}\text{min}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Tr ($\mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
<i>Phragmites communis</i>	Cont.	3.4 \pm 0.7 ²	0.08 \pm 0.02	4.8 \pm 0.7	315.3 \pm 3.1	1.6 \pm 0.2
	Treat.	6.3 \pm 0.8	0.34 \pm 0.02	10.1 \pm 0.9	347.6 \pm 4.9	5.3 \pm 0.2
<i>Sparganium stoloniferum</i>	Cont.	1.2 \pm 0.7	0.15 \pm 0.07	2.7 \pm 1.2	372.5 \pm 9.8	2.6 \pm 0.9
	Treat.	4.0 \pm 0.9	0.32 \pm 0.05	7.2 \pm 1.1	359.8 \pm 9.7	5.1 \pm 0.5
<i>Alisma canabiculatum</i>	Cont.	2.5 \pm 0.8	0.17 \pm 0.06	4.3 \pm 1.1	359.3 \pm 9.2	2.7 \pm 0.7
	Treat.	3.7 \pm 0.8	0.10 \pm 0.01	5.5 \pm 0.9	321.8 \pm 17.3	2.1 \pm 0.1
<i>Hydrocharis dubia</i>	Cont.	3.7 \pm 0.4	3.41 \pm 0.25	8.9 \pm 0.5	383.9 \pm 1.3	9.3 \pm 0.1
	Treat.	3.5 \pm 0.5	2.79 \pm 0.58	8.3 \pm 0.7	384.3 \pm 1.2	8.5 \pm 0.2

²Means \pm SE of 6 sets of 5 samples.

감소시킨다. 즉, 수분함량의 감소는 팽압의 소실과 위조, 세포생장의 중지, 기공폐쇄, 광합성량의 감소 및 여러 가지 기초대사활동의 감소를 수반한다.

각 종별 생리적 변화는 성장율과 비교적 정 상관성을 나타내었으며(data not shown), 모든 종에서 폐수처리에 따른 광합성 활성은 상승하는 결과를 보였다. 특히 뿌리의 신장이 월등히 좋았던 갈대와 흑삼릉의 광합성율의 변화는 52.8%, 30.6%로 증가율이 높아 전체적인 성장과 비례하였다(표 1 참조). 식물 종마다 광포화점 등의 요인에 따라 달라지는 경향이 있으나(Ackerson, 1980) 대부분의 식물은 광합성량이 높은 종은 증산량도 높아지게 되는데 본 실험에서도 갈대는 $1.6 \pm 0.2 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 $5.3 \pm 0.2 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로, 흑삼릉은 $2.6 \pm 0.2 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 $5.1 \pm 0.2 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 증산량이 증가하였다. 그러나 광합성의 변화를 보이지 않았던 택사는 $2.7 \pm 0.7 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 $2.1 \pm 0.1 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 증산량의 변화가 미미했고 자라풀은 $9.3 \pm 0.1 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 $8.5 \pm 0.2 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 감소하는 결과를 보여 종 간의 차이를 나타내었다. 식물은 외부 스트레스에 대한 첫 번째 방어 기작으로 기공을 닫게 되고 그 결과 광합성량의 감소를 가져오게 된다. 광합성량과 증산량의 증가를 보였던 갈대는 기공 전도도는 $315.3 \pm 3.1 \mu\text{g l}^{-1}$ 에서 $347.6 \pm 4.9 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 증가하였으나, 흑삼릉은 $372.5 \pm 9.8 \mu\text{g l}^{-1}$ 에서 $359.8 \pm 9.7 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 감소하여 오염스트레스에 대한 생리적 반응을 보였다. 광합성과 증산량의 활성 변화가 미미했던 택사와 자라풀은 기공 전도도에서도 각각 $359.3 \pm 9.2 \mu\text{g l}^{-1}$ 에서 $321.8 \pm 17.3 \mu\text{g l}^{-1}$ 로, $383.9 \pm 1.3 \mu\text{g l}^{-1}$ 에서 $384.3 \pm 1.2 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 그 변화의 유의성을 보이지 않았다.

증산량이 높은 종이라고 해도 체내수분이용효율(WUE)이 모두 낮은 것은 아니고 스트레스에 대한 방어기작으로 그 피해를 최소화하기 위하여 체내 WUE 활성을 높임으로써 총 활성을 유지시켜 피해를 최소화한다. 따라서 WUE가 높은 종일수록 스트레스에 의해 나타날 수 있는 회복 불가능한 피해 시점이 늦추어지게 된다(Rogers et al., 1984). 본 실험에서도 체내수분이용효율 관계를 분석하여 수분 스트레스에 대한 영향을 알아본 결과는 그림 7과 같다. 모든 생리활성이 좋았던 갈대는 수분이용효율은 $58.09 \pm 24.66 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$ 에서 $9.98 \pm 1.10 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$ 으로 많은 감소를 보여 오

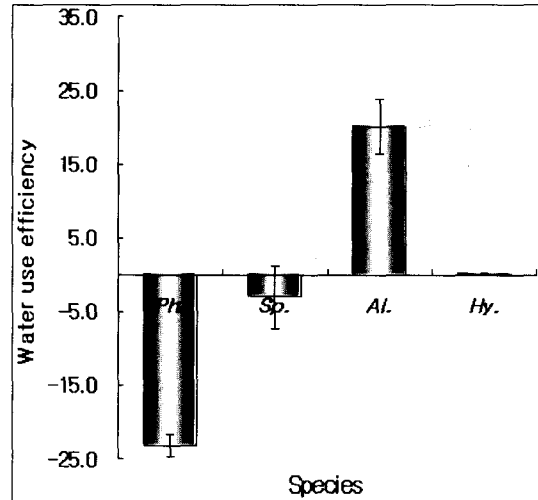


Figure 7. Changes of water use efficiency on native aquatic plants treated pollution water. \pm SE of 6 sets of 5 samples (Ph.: *Phragmites communis*, Sp.: *Sparganium stoloniferum*, Al.: *Alisma canabiculatum*, and Hy.: *Hydrocharis dubia*).

염스트레스에 대한 수분이용효율은 둔감한 반응을 나타내었다. 흑삼릉과 자라풀의 수분이용효율은 스트레스 전·후의 변화가 미미하였으나 여러 생리적 요인에서의 감소를 보였던 택사의 $12.59 \pm 2.90 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$ 에서 $32.73 \pm 4.33 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$ 로 수분이용효율은 스트레스 방어기작으로 작용함을 알 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 생태적 복원을 위한 자연형 습지에 적합한 자생수생식물을 개발하기 위하여 갈대, 흑삼릉, 택사, 자라풀의 수질개선효과를 알아본 결과, 대부분의 식물에서 폐수의 농도가 저감되었던 것을 확인하여 폐수처리에 가능성을 시사하였다.

식물의 생리·생육적인 활성과 수질개선효과와의 관계에 있어서는 각 종마다 다른 양상을 보였는데 갈대와 흑삼릉은 생리·생육적인 활성도 가장 뛰어났다. 자라풀의 경우는 오염수질 환경에서는 생장은 좋았으나 생리활성이 떨어져 스트레스를 받고 있음을 알 수 있었고, 택사의 생육·생리활성 모두 저조하여 스트레스 상

황임을 알 수 있었다.

식물에 의한 수질오염 제거에 있어서 특이한 현상은 각 증별 제거 오염원의 종류가 달랐던 것을 볼 수 있었는데 비교적 오염 제거율이 낮았던 택사의 질소와 인의 저감효과는 뛰어났고 자라플은 부유물질의 제거가 탁월했다.

수질개선과 식물 근부에 의한 토양으로의 오염물질 흡수에서도 상관관계를 보였는데 토양의 질소 함량은 식물의 생리활성과 정의 상관성을 보였던 반면 토양에 의한 인의 제거는 흑삼릉과 택사에서 높은 효과를 볼 수 있었다.

이와 같은 결과에 따라 각 오염원별 수질정화 수종을 개발하고 또는 단기효과를 위한 종이나 장기효과를 위한 종을 구분하여 보다 탄력적인 이용 방안을 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

인용문헌

1. 김준호(1990) 팔당호에서 대형수생식물을 이용한 수질정화의 전망. 자연보존 70: 28-35.
2. 서울시정개발연구원(1996) 자연형 하천으로의 정비방안 연구.
3. 이덕배, 김종구, 강종국, 김선환, 소재돈, 이경수(1994) 갈대상 처리법을 이용한 축산폐수정화. 한국환경농학회지 13: 231-239.
4. 임병선, 이점숙, 조승원, 양효식, 김명화, 박애경(1995) 남창천과 삼향천에 분포한 주요 수생식물의 수질 정화능. 목포대학교 연안환경연구 12: 49-58.
5. 조강현(1992) 팔당호에서 대형 수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환. 서울대 박사학위 논문.
6. Ackerson, R. C.(1980) Stomatal response of cotton to water stress and abscisic acid as affected by water stress history. Plant Physiol. 65: 455-459.
7. Busk, T. A., and F. E. Dierberg(1989) Effects of nutrient availability on water-hyacinth standing crop and detritus deposition. Hydrobiologia 174: 151-159.
8. Cornwell, D. A., J. Zotteck, J. R. Patrinely, C. D. Furman, T. Des, and J. I. Kim(1977) Nutrient removed by water-hyacinth. J. Water Pollut. Control Fed. 49: 57-65.
9. Justin, S. H. F. W. and W. Armstrong(1987) The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. New Phytol. 106: 465-495.
10. Malmstrom, C. M., and C. B. Field(1997) Virus-induced differences in the response of oat plants to elevated carbon dioxide. Plant, Cell, and Environment 20: 178-188.
11. McDonald, R. C., and B. C. Wolverton(1980) Comparative study of wastewater lagoon with and without water-hyacinth. Econ. Bot. 34: 101-110.
12. Raven, J. A.(1979) Intercellular pH and its regulation. Annu. Rev. Plant. Physiol. 30: 289-311.
13. Reddy, K. R., D. L. Sutton, and G. E. Bowes(1983) Biomass production of fresh water aquatic plant in Florida. Proc. Soil Crop Sci. Soc. 42: 28-40.
14. Reddy, K. R., K. L. Campbell, D. A. Craetz, and K. M. Portier(1982) Use of biological filters for agricultural drainage waste treatment. J. Environ. Qual. 11: 591-595.
15. Rogers, H. H., N. Siont, J. D. Cure, J. M. Smith, and G. E. Bingham(1984) Influence of elevated carbon dioxide on water relations of soybeans. Plant Physiol. 74: 233-238.

원고 접수: 2004년 2월 24일

최종수정본 접수: 2004년 4월 13일

3인익명 심사필