

울산지역에서 자생하는 갈대, 부들, 갈풀을 이용한 Reed-Bed의 생활하수 정화능력 연구

심우섭·한인섭
울산대학교 생명과학부
(1997년 4월 6일 접수)

Effect of Reed-Bed using Ulsan-habitated *P. australis*, *T. orientalis*, and *P. aundinacea* L. on Removing Pollutants from Sewage

Woo-Seob Shim and In-Seob Han

Dept. of Biological Science, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea
(Manuscript received 6 April 1997)

We examined whether several reeds, which are found around Ulsan area, could be used for downflow reed-bed to remove pollutants of sewage. Three kinds of reed, such as *Phragmites australis*, *Typha orientalis*, and *Phalaris aundinacea* L., were collected from their habitats near the Taehwa River in Ulsan City. In the minimized model system of downflow reed-bed, *P. australis* appeared to reduce BOD more than others did but slightly increase total amount of nitrogen(N). When *P. australis* were placed in the sterilized water, total nitrogen was found to be significantly increased dependent on the number of experimental plant in the sterilized state, but it was rather decreased in the non-sterilized state. With these results, microorganisms attached to *P. australis* roots can be thought to work for removal of pollutants. Therefore, these microorganisms and their habitat, *P. australis* reed bed, together can be used for sewage treatment. It was suggested that oxygen is produced by photosynthesis reaction of *P. australis*. The increased oxygen may help microorganisms in their habitats to work on the removal of pollutants.

Key words : downflow reed-bed, *Phragmites australis*, sewage treatment, Ulsan

1. 서 론

울산은 공업도시로서의 급속한 성장으로 현격한 인구 팽창이 일어나고 있다. 이런 울산의 수생태계를 오염시키는 오염원은 다양하다. 비교적 그 피해의 심각성이 크게 인식되고 있는 것은 아니지만, 피해 정도가 산업폐수에 못지 않은 생활하수의 오염은 인구의 증가에 따라 계속적으로 증가되고 있다. 또한 생활 수준의 향상과 유기 화학 기술의 발달로 인하여 가정하수는 과거에 비해 전 체량도 훨씬 많아졌으며 난분해성 물질의 비율도 매우 높아졌다. 현재 울산시의 수생태계에 유입되는 유기물질의 70%는 생활하수에 의한 것으로 추정된다(이수식, 1997). 즉 거의 여과 과정 없이 하천으로 방류된 생활하수속의 유기물은 하천과 강의 생태학적인 기능과 휴양 공간의 기능을 상실시키고, 근처 해양으로 유입되어 부영양화로 인한 조류의 번성, 즉 적조 현상을 일으켜 어패류 폐사 등의 산업적인 피해 등을 주고 있다.

수생태계에 의한 자정작용의 한계를 넘지 않는 하수의 하천 유입을 위해서는 종말 하수처리장의 설치 가 시

급한 실정이나 하수처리장의 건설에도 많은 재원이 소요될 뿐 아니라 이들 시설을 가동하고 관리하는 인원과 재원의 투입 또한 불가피하여, 울산시 전체로 볼 때 아직까지 처리 시설이 불충분한 상태이다. 또한 단위 학교나 도시상수원 상류에 위치한 작은 자연 마을까지 이런 재원과 인원을 투입하는 것은 현재 불가능하다.

지난 10년동안 영국에서는 환경오염 원천 지역에서 오염원이 그대로 방출되는 것을 막기 위해 배출구에 인공습지를 만든다는 개념의 연구에 많은 관심을 보여 왔다(Hammer, 1989; Cooper and Findlater, 1990; Moshiri, 1993; Bavor and Mitchell, 1994). 중세 때에 이미 이용된 적이 있었던 이런 습지가 다시 관심을 갖게 된 것은 비용이 적게 든다는 경제적인 장점과 더불어 그 방법 자체가 자연 생태계의 일부분을 쓰고 있다는 점 때문이다.

Stedel(1973;1976)과 Kickuth(1984)는 갈대밭을 통과한 폐수 오염물질의 뚜렷한 감소를 보인다는 사실을 보고하였다. 보통 습지식물인 갈대와 부들은 뿌리줄기

(rhizome)라는 독특한 뿌리구조를 하고 있어 가느다란 뿌리털 사이에 공기 이동의 통로가 있다. 잎에서 만들어진 산소는 줄기를 타고 뿌리줄기에 내려와 가는 뿌리로 부터 방출되던 뿌리털 주위에 산소를 포함한 얇은 수막을 형성하게 된다. 이런 수막형성 부위는 일반 토양보다 호기성 미생물의 좋은 생육장소가 되고, 이런 수막들 사이의 산소가 없는 부위는 또한 혐기성 미생물의 생육장소가 되므로 결과적으로 갈대가 자라는 습지대 토양은 여러 가지 미생물이 군집을 이루기에 매우 적합한 곳이라 할 수 있다. 갈대(*Phragmites australis*)와 부들(*Typha latifolia*)을 심은 토양과 이들이 없는 대조군 토양에서의 박테리아, 방선균, 그리고 균류의 수를 비교하였을 때 2-3배가 넘는 미생물이 실험군에 존재한다는 사실이 보고되었다(Hatano et al., 1993).

본 연구는 축소되어 통제가 가능한 실험 모델을 통해 우리나라에 서식하는 갈대(*Phragmites communis*)와 부들(*Typha latifolia*)같은 습지식물도 생활하수에 대한 정화 능력을 가지고 있는지 알아보고자 하였다. 특히 습지식물의 뿌리에서 미생물을 제거한 후 행한 실험을 통하여 식물들의 유기물 정화능력이 뿌리에 서식하는 미생물과 협동작용이라는 사실을 증명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

연구에 사용된 갈대, 부들, 그리고 갈풀의 채집지는 다음과 같다.

구 분 (학 명)	
1	갈 대(<i>Phragmites communis</i>) 장소 : 울산시 울주군 언양읍 반천리(태화강중류)
2	부 들(<i>Typha orientalis</i>) 장소 : 울산시 울주군 언양읍 구수리(태화강중류)
3	갈 풀(<i>Phalaris aundinacea</i> L.) 장소 : 울산시 울주군 언양읍 구수리(태화강중류)

정화를 위한 생활하수 시료는 울산시 태화동 태화천(태화강 하류와 합류지점)에서 채취하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 재배상자 제작

직경 26 cm, 높이 1 m의 아크릴제 화분을 제작하고 같은 양의 자갈 모래를 Fig.1과 같이 채운 후 이중 3개의 화분에는 각각 갈대, 부들, 갈풀을 심었고 1개의 화분은 대조군으로 사용하였다.

2.2.2 식물 이식 및 관리

4월 초순에 갈대, 부들, 갈풀을 채집하여 흙모래층 5 cm 위에 뿌리가 토양을 완전히 덮도록 심고 다시 흙모래를 5 cm정도 두께로 덮었다. 매일 1회 충분히 물을 주었으며 필요하면 넘어지지 않도록 지지대를 세워 성장에 지장이 없게 하였다. 화분을 옥외 장소에 두어 자연광을 받게 하였다. 5월 중순이 되어 완전히 착근이 될

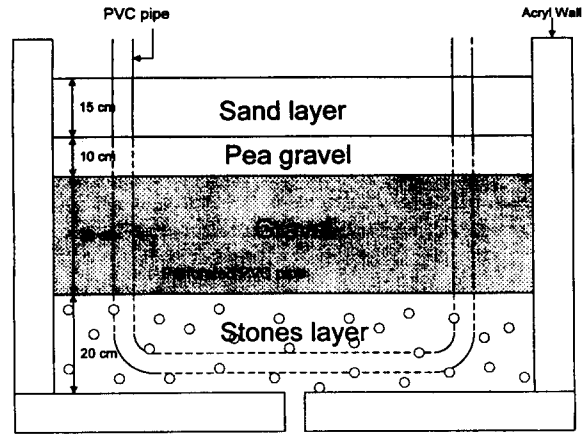


Fig. 1. Model system of downflow reed bed in a multi-layered matrix of various-sized aggregates. A system of perforated facilitates counter-current diffusion of oxygen into the bed and carbon dioxide out of it.

때까지 관리하였다.

2.2.3 생활하수 정화효과 분석

식물들이 완전히 착근된 후 2일 동안 물을 주지 않아 화분내의 토양을 거의 건조시킨 다음 5일 간격으로 하루 3회에 걸쳐 각 재배상자에 생활하수 시료를 붓고 재배상자의 배출구를 통해서 나온 배출물의 유기물, 질소, 인의 함량을 분석하였다. 분석방법은 수질오염 공정 시험법에 의하여 분석하였다(김석현, 고춘남, 1996).

2.2.4 일조량에 따른 DO 분석

생활하수 4L에 같은 수(80개체)의 갈대를 담아 햇빛이 잘 드는 곳에 두고 시간별로 DO 또는 BOD량을 수질오염 공정 실험법(김석현, 1996)에 따라 측정하였다. 대조군으로 멸균된 갈대를 만들기 위하여 하이포아염소 산나트륨(NaOCl) 0.6%에서 뿌리를 약 2시간 정도 담아 두었다가 사용하였다.

2.2.5 갈대뿌리에 서식하는 미생물에 의한 오염원 제거 효과

실험군으로는 0.6%의 하이포클로라이드로 살균한 생활하수 4L와 채집하여 뿌리를 같은 용액으로 멸균한 갈대들 0, 40, 80개 넣은 실험상자를 12시에서 15시까지 햇빛이 잘 드는 곳에 두었다가 BOD, 총 P, 총 N을 측정하였다. 대조군으로 살균하지 않은 4L의 생활하수를 각각 넣은 실험 상자 3개에 채집한 갈대를 0, 40, 80 개체수로 넣고 동일한 실험을 수행하였다.

3. 결 과

3.1 습지식물에 의한 생활하수 정화 효율성

미생물에 의한 정화작용은 미생물 효소작용을 위한 충분한 시간을 필요로 한다. 그러므로 습지 식물을 가능 하다면 긴 공간 구조(reed-bed)를 이루게 심는 것이 짧

Table 1. The residence time of sewage in three different reeds-planted downflow beds

Reed Name	<i>Phragmites communis</i> Trin	<i>Thpha latifolia</i> L.	<i>Phalaris arundinacea</i> L.	Control (w/o reed)
Residence Time (min.)	25	34	40	48

Table 2. Efficiency of reed beds to remove pollutants from sewage

Reed	B.O.D.(mg/L)	total-N(mg/L)	total-P(mg/L)
No reed	6.60±0.1	2.41±0.09	0.16±0.042
<i>Phragmites</i>	5.15±0.05	3.97±0.04	0.24±0.002
<i>Thpha</i>	5.75±0.05	2.08±0.06	0.16±0.003
<i>Phalaris</i>	6.80±0.1	1.35±0.03	0.11±0.001
Wastewater	136.00±1.0	16.78±0.05	1.64±0.044

지만 깊은 구조를 만드는 것 보다 유리하다. 복잡한 구조의 뿌리를 통과하는 생활하수의 속도가 감소되고 그로 인해 미생물 환경에서의 체류시간을 길게 하는 것이 정화효과를 더 높인다는 것이다(Gray et al., 1995). 본 연구에서는 울산주변 하천지역에서 채취한 갈대, 부들, 그리고 갈풀 등의 각 뿌리구조에 의한 통과 하수의 체류시간을 먼저 조사하고자 하였다. 완전 성숙한 3종류의 식물을 심어 놓은 재배상자를 통과하는 하수의 체류시간은 갈풀상자에서 가장 길었고 갈대는 가장 빨라 두 식물에서의 차이가 거의 2배에 달하였다(Table 1). 이때 사용한 생활하수 원수에서의 생물학적 산소요구량(BOD)은 136 ppm, 질소 16.82 ppm, 인 1.64 ppm였다. Table 2에서 볼 수 있는 것처럼 재료 식물을 심지 않은 경우에서도 상자를 통과한 하수의 유기물, N, P 모두 상당량이 줄어들었다. 갈대가 심어져 있는 상자에서는 재료 식물이 없는 경우보다 BOD의 감소는 보였지만 N과 P의 양은 오히려 증가하였다. 세 가지 재료식물중에서는 갈풀에서만 N과 P의 감소가 나타났다.

3.2 갈대와 갈대의 뿌리에 서식하는 미생물의 상호작용에 의한 BOD 변화 효과

습지식물의 뿌리에 서식하는 미생물만에 의한 유기물 분해 활성을 알아보기 위하여 습지식물중 갈대의 뿌리를 살균하여 미리 살균된 생활하수 원수에 담아 놓고, 식물과 생활하수 모두 살균하지 않은 대조군과 함께 3시간 후에 BOD를 측정하였다. 이 때 BOD가 1,620 mg/L 인 오염의 강도가 높은 원수를 사용하였다. 실험 식물(갈대)을 넣지 않아도 3시간이 경과한 후 BOD가 약 33% 정도 줄어든 것을 알 수 있었다. Fig.2A에서 보듯이 갈대가 들어간 경우는 갈대의 개체수가 0인 경우에 비하여 10-20%의 BOD 감소가 더 나타났다. 그러나 실험 식물의 개체수가 많을 수록 살균한 상황이란 아니든 거의 상관없이 BOD의 증가가 나타났다(Fig.2). 이와같은 효과가 갈대의 뿌리에 서식하는 미생물에 의한 효과인지 실험하기 위해 뿌리를 살균하여, 살균하지 않은 것과 비교하였다. 살균의 경우는 갈대 40개체와 80개체의 사이에 BOD의 변화폭이(13.6%) 살균하지 않은 경우(11.1%)보다 약간 크게 나타났다. 같은 방법의 실험에서 총 N과 P의 양을 측정한 결과는 Fig.2B,C에

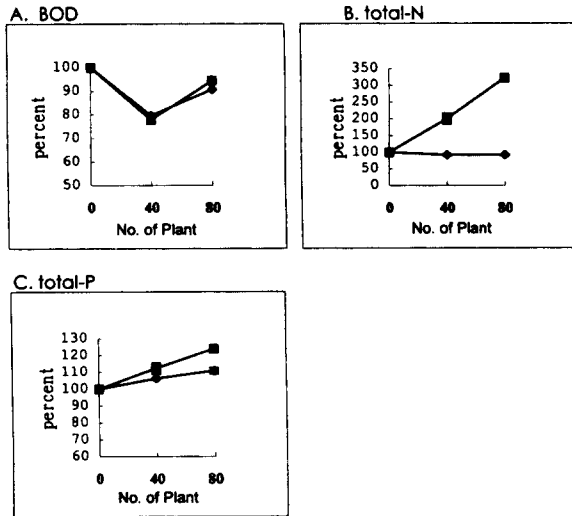


Fig. 2. Effect of microorganisms in *Phragmites communis* on BOD, P(phosphorus), and N (nitrogen) removal. For experimental sample(■), both *P.communis* roots and sewage were sterilized by 0.6% NaOCl solution and incubated from 1 to 3 PM before measuring the amount of either BOD (A), total-N(B), or total-P(C). For control(◆), both *P.communis* roots and sewage were not sterilized and incubated in the same way as experimental samples.

나타내었다. 살균된 생활하수에 미생물이 제거된 실험 식물을 사용한 경우, 총 N 양이 사용된 실험 식물의 개체수에 비례하여 증가하고 있다. 즉 N이 실험 식물에 의하여 생겨나는 것을 알 수 있었다. 그러나 미생물이 존재하며 생활하수를 원수로 쓴 경우에는 실험 식물에 의한 N의 증가가 있음에도 불구하고 총 N의 양이 약간 줄어드는 것으로 보아(Fig.2B) 미생물에 의한 N 제거 효과를 알 수 있었다. 총 P의 제거에 관한 미생물의 효과를 보기 위한 같은 실험에서는 N에 대한 것처럼 뚜렷한 효과가 없었지만 역시 비슷한 경향을 보여 P의 제거에 대한 효과도 증명되었다(Fig.2C).

3.3 일조량의 변화에 따른 DO의 변화

서론에서 이미 언급되었듯이 실험 재료로 사용한 식물들은 탄소 동화작용에 의하여 생겨난 산소를 뿌리로 보내어 가는 뿌리털 주위에 산소수막을 형성한다는 사실을 증명하고자 하루의 주기에 따라 갈대가 심겨진 실험상자의 DO양이 변화하는 것을 측정하였다. 먼저 다자란 갈대의 뿌리를 하이포아염소산나트륨(NaOCl) 0.6%로 뿌리에서 자라는 미생물을 제거하고 역시 멸균된 증류수에 80개체의 갈대를 넣었을 때[D.W.(Light)] 오후 1시경에만 DO의 양이 25% 정도 증가함을 관찰할 수 있었다(Fig.3). 그러나 빛을 차단한 곳에 두었을 때[D.W.(Dark)]는 시간대와 관계없이 일정한 DO를 보이고 있어, [D.W.(Light)] 시료가 1시경에 보여준 DO는 빛에 의한 것으로 생각할 수 있었다. 동일한 실험을 생활하수를 가지고 행하였을 때는 오히려 1시경에 급격한 감소를 보였다. 이는 활발한 광합성 작용으로 뿌리에서 산소 방출이 증가하였으나 오히려 감소한 시험수의 DO값은 생활하수에 이미 존재하던 호기성 미생물이 유기물 분해를 위하여 녹아 있던 산소의 사용으로 인해 일어난 현상으로 추측할 수 있다.

4. 고찰

울산 광역시 태화강 주변에서 많이 자라는 갈대, 부들, 갈풀을 가지고 reed-bed의 생활 하수 정화능에 대한 모형 실험을 한 결과, 세 가지 습지식물 모두에 의하여 BOD의 감소가 두드러졌고 이것은 주로 실험상자의 토양층 통과에 의한 효과로 생각된다. 다른 식물보다 가장 BOD의 감소가 많이 나타난 갈대의 경우(96%)는 Burka와 Lawrence(1990)의 실제 크기(깊이 5 M 정도)에 이종으로 된 시설물을 사용한 경우와 비교할 때 비슷한 정도(BOD 93% 제거)의 효과를 보였다. 갈대에서 오히려 N과 P는 증가하였으므로, BOD가 감소하는 결과와 같이 갈대의 뿌리에 서식하는 미생물에 의하여 하수 속의 유기물이 분해될 수 있다는 사실을 간접적으로 보여준다. 살균처리를 하지 않은 대조군이 살균처리로 미생물의 작용을 억제하였던 실험군과 BOD의 감소현상에 큰 차이를 보이지 않았다. 이런 결과는 갈대의 뿌리에 서식하면서 습지를 통과하는 생활하수의 정화를 주도하는 것으로 생각되는 미생물들은 토양이 아닌 조건에서는 식물에 의해 제공되는 호기성의 장점을 살리기 어렵다는 사실을 의미한다. 특히 흥미있는 결과는 미생물을 살균하고 수행한 같은 실험에서 총 질소(N)의 양은 실험 식물 개체수에 비례하여 증가하는 것이 매우 뚜렷하게 나타난다는 것이다. 이런 결과는 실험 식물에 의한 N의 생성 또는 배출이 있다는 사실을 의미하는 것이다. 그러나 살균하지 않은 실험군에서는 오히려 실험 식물수가 늘어나도 N의 변화가 나타나지 아니 하였으므로 갈대의 뿌리에 서식하는 미생물은 대사 작용에 의하여 N을 제거하는 어떤 역할을 할 수 있는 것으로 사료된다.

일조량에 따른 DO의 변화를 관찰한 실험에서, 가장 일조량이 증가하는 12시를 통과한 13시경 증류수에서 나타나는 DO의 증가는 갈대의 광합성 작용에 의한 뿌리에서의 산소 공급 증가가 원인임을 쉽게 알 수 있다. 그

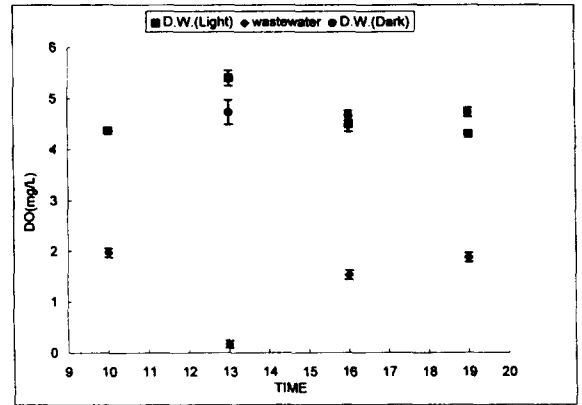


Fig. 3. Time-dependent effects of *Phragmites communis* to change DO in a sewage-contained box. DO was measured on 10, 13, 16, and 19 o'clock. Either distilled water(D.W.) or sewage was filled into the bed. For preventing oxygen production from the plants, one sample, D.W.(Dark), was placed inside of room away from sun-light.

러나 증류수 대신 생활하수를 가지고 행한 실험에서는 동일한 시간대에 오히려 DO의 양이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이 결과는 광합성 작용에 의해 뿌리에서 배출되는 초기의 산소는 호기성 미생물의 기능을 활성화 하게 되고, 결과적으로 생활하수의 유기물을 분해하게 되어 이와 같이 작은 모형 생태계 내의 DO를 빠르게 감소시킨 것으로 해석된다. 시간이 지남에 따라 활발했던 미생물의 유기물 분해작용은 포화상태를 넘게 되고 여전히 계속되는 광합성에 의한 산소의 공급 때문에 다시 DO의 양이 증가하는 사실도 또한 위의 해석을 뒷받침해 준다.

5. 결론

울산시 인근에 서식하는 갈대로 만든 downflow reed-bed를 가지고 수행한 실험에서 생활하수의 높은 BOD의 감소(96%)를 가져온 것으로 미루어 생활하수에 존재하는 유기물을 제거하기 위한 실제 정화시설에 이런 갈대 습지를 이용할 수 있을 것이다. 이와같은 정화 효과는 갈대의 뿌리에 서식하는 미생물과의 협동작용임을 알 수 있었다. 또한 갈대는 광합성 작용으로 산소를 생성, 뿌리에 공급하여 그 곳에 서식하는 미생물의 산소 요구 조건을 만족케 함으로써 호기성 미생물의 유기물 분해 작용이 활발할 수 있게 하는 것으로 본 연구에서도 보여주었다.

참고 문헌

김석현, 고춘남 편저, 1996, 환경오염 공정시험, 도서출판 창문각(서울)
 이수식, 이병호, 안승섭, 이철영, 1997, 태화강 환경조사 및 보전대책연구보고서, 울산광역시 발행
 Bavor, H.J. and D.S. Mitchell (eds), 1994, Wetland systems in water pollution control, Water Sci-

- ence and Technology, 29, 1-336.
- Burka, U. and P.C. Lawrence, 1990, in Constructed Wetlands in Water Pollution Control (Cooper, P.F. and Findlater, B.C., eds), pp 359-371, Pergamon Press
- Cooper, P.F., 1990, European Design and Operations Guidelines for Reed Bed Treatment Systems, Report U1 17, Water Research Centre, Swindon, UK SN5 8YR.
- Cooper, P.F., 1993, in Constructed Wetlands for Water Quality Improvement (Moshiri, G.A., ed.) pp203-217, Lewis Publishers.
- Gray, K.R. and A.J. Biddlestone, 1995, Engineered reed-bed systems for wastewater treatment., TIBTECH, 13, 248-252.
- Hammer, D.A.(ed.), 1989, Constructed wetlands for wastewater treatment:Municipal, Industrial and Agricultural, Lewis Publishers.
- Hatano, K., C.C. Trettin, C.H. House, and A.J. Wollum, 1993, in Constructed Wetlands for Water Quality Improvement(Moshiri, G.A., ed.), pp.541-547, Lewis Publishers.
- Moshiri,G.A.(ed.), 1993, Constructed wetlands for water quality improvement, Lewis Publishers.