

줄(*Zizania latifolia*)의 생장에 의한 저토에서 질소와 인의 형태 변화

민금숙* · 곽영세¹ · 김준호²

중세식물원, ¹포항산업과학연구원 광양환경연구실, ²서울대학교 생명과학부

Changes in Forms of Nitrogen and Phosphorus in Sediment by Growth of *Zizania latifolia*

Min, Keum-Sook*, Young-Se Kwak¹ and Joon-Ho Kim²

Jongse Botanical Garden, Korea

¹Department of Gwangyang Environmental Res., RIST, Korea

²Department of Biology, Seoul National University, Korea

ABSTRACT: The effects of the presence of a submerged plant, *Zizania latifolia*, on physico-chemical characteristics, including Eh, pH, and concentrations of nitrogen and phosphorus in the sediments were studied under pot culture condition. It was shown that Eh value at reduced layer of the sediments was higher in the planted pots than in the non-planted. It was also revealed that NH_4^+ -N concentration of the sediments in the planted pots was lower than that of the non-planted, which might be due to the uptake by the plants. In contrast, NO_3^- -N concentration in the sediment increased in the presence of the plants compared to the non-planted, which might be attributed to oxygen released from the roots to the reduced layer. The concentration of organic phosphorus in the sediments was much higher than that of NAIP at the beginning of the planting experiment. However, at the end of the experiment, it was reversed; NAIP concentration was much higher than that of organic phosphorus, possibly indicating the transformation of organic phosphorus to NAIP during the experimental period. Both concentrations of NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P in the overlying and percolated water were lower in the planted pots than in the non-planted. The concentration of NO_3^- -N in the percolated water, however, was higher in the planted pots than in the non-planted. The data was discussed with regard to the potential effects of a submerged plant on dynamics of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere of the sediment.

Key words: Nitrogen, Oxidation, Phosphorus rhizosphere, Sediment, *Zizania latifolia*

서론

공기 중의 산소 함량은 약 298 mg O₂/L이지만 자연수에서는 겨우 8 mg O₂/L로 수중생물의 생활에는 산소가 제한요인이 되고 있다. 그리고 토양 속의 산소는 뿌리, 토양소동물 및 호기성 미생물의 호흡에 의하여 소비되므로 대기중의 산소량보다 적다(Larcher 1980). 더구나 침수된 저토에서는 산소함량이 더욱 감소하여 혐기상태가 되기 쉽다(Patrick and Mahapatra 1968). 혐기상태의 저토에서는 혐기성 미생물이 존재하고, Fe²⁺, Mn²⁺, H₂S 및 CH₄와 같은 환원성 물질이 축적됨으로써 생물체에 해로운 영향을 준다(Larcher 1980). 저토의 산소농도가 감소하면 호흡률이 저하되고, 물과 무기영양소의 흡수가 감소하며 뿌리의 생장이 감소하므로, 뿌리호흡과 무기영양소의 흡수 능력에 따라서 수생식물의 분포가 결정된다(Armstrong 1964). 저토에 함유된 인의 존재형태를 Hietijes와 Lijklema(1980)는 저토의 입

자에 흡착되거나 간극수에 녹아있는 유동성 인(labile P), 철이나 알루미늄과 착화합물을 형성하여 침전된 착화합물 인(nonapetite inorganic phosphorus; NAI-P), 인석회의 결정구조 속에 들어있는 인회석 인(apatite P), 유기물에 함유되어 있는 유기 인(organic P)으로 나누었다. 유동성 인은 식물체가 즉시 이용할 수 있는 형태이다. 착화합물 인은 인의 형태 중에 가장 불안정하며 단기간에 많은 양이 생성되기도 하고 용출되기도 하기 때문에 호소의 저토와 수체간의 물질순환에서 가장 큰 관심이 되었는데(Williams *et al.* 1980), 이것은 철이나 알루미늄과 착화합물을 이루기 때문에 간극수나 수체의 pH와 Eh의 변화에 민감하게 반응한다. 즉, 착화합물 인은 유기 인이나 인회석 인보다도 Eh의 저하와 pH의 상승에 따라 다량의 인이 저토에서 수체로 용출할 가능성이 크다(Boström *et al.* 1988). 또한 유기물의 양이 많고 분해가 왕성하게 일어나는 저토에서는 이것의 분해에 따른 인의 용출이 문제가 되고 있다(Sonzogni *et al.* 1982). 이러한 인의 존재 형태는 정수식물에 의한 인의 흡수, Eh 및 pH

* Corresponding author; Phone: +82-11-9373-9012, e-mail: sojiyoung@postown.net

의 변화에 따라 그들의 비율이 바뀌게 된다(Graneli and Solander 1988). 질소에 관해서는 질소형간의 전환에 따른 각 질소형의 변화와 탈질화에 따른 질소의 소실에 관하여 많은 연구가 이루어졌다(Bowden 1986). 국내에서 저토의 인에 관한 연구는 소양호, 춘천호 및 의암호에서 저토에 함유된 인을 각 존재 형태별로 분석하고 그들에 의한 수체의 오염 가능성을 정성적으로 평가하였고(진 1988), 팔당호 연안대에서 대형수생식물과 비생물 환경의 상호작용을 연구하였으며, 수생식물에 의한 질소 및 인의 흡수기작연구 등이 이루어져왔다(이와 곽 2000, 노 등 2002, 배 등 2003). 국외에서는 호소와 하천의 저토에 함유된 인의 존재 형태와 저토와 수체간의 인 이동이 많이 연구되고 있다(Furumai and Ohgaki 1981, Borens *et al.* 1984, Pettersson and Insvanovics 1988). 그러나 식물체에 의한 인의 존재 형태의 비에 관한 연구는 아직 많지 않다. 따라서 줄의 생장에 따른 저토로부터 무기영양소 흡수와 저토의 Eh 및 pH와 같은 물리화학적 특성의 변화를 측정하고, 저토의 질소 및 인의 존재형태비가 어떻게 변하는가를 알아보고, 이러한 변화가 저토내외 수체간의 무기영양소 이동에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보는 데 있다.

재료 및 방법

재료 식물의 채집과 재배

화분재배 실험은 경기도 광주군 퇴촌면 경안천 하구 현장 조사지 주변에서 잎의 길이 15~25 cm인 줄을 근계와 함께 채집하여 Wagner pot에 심어 온실에서 이루어졌다. Wagner pot(높이 30 cm, 직경 25 cm)의 바닥에 돌을 깔고, 그 위에 나이론천으로 짠 플라스틱 망을 덮어 물이 바닥에 고이도록 하여 심었다. 줄 생육지에서 운반하여 온 저토를 화분의 높이 24 cm까지 넣었다. 8개의 Wagner pot 중에서 4개에는 10개체의 식물을 심었고(식물구), 나머지 4개에는 심지 않았다(무식물구). Pot 벽에는 저토 위의 5 cm 높이에 선을 긋고, 그 높이까지 항상 수위가 유지되도록 물을 공급하여 주었다. 공급하는 물은 미리 받아둔 수도물을 물뿌리개로 뿌려주되 저토의 산화층이 교란되지 않도록 조심하였다. Pot 밑 바닥에 뚫려있는 지름 1.5 cm의 구멍은 고무마개로 막았다가, 침출수를 채취할 때 열어서 밑바닥에 고여 있는 침출수를 채취한 다음 영양소를 분석하였다.

저토의 채취

Pot내 저토는 산화층과 환원층으로 구분하여 채토하였다. 산화층은 식물구와 무식물구에서 0~2 cm 깊이의 붉은색 저토를 채토하였고, 환원층은 무식물구에서 검정색을 띠는 5~10 cm 깊이, 식물구에서 근권의 저토를 채토하였다.

상층수와 침출수의 채수

식물구와 무식물구의 저토 위에 담수한 상층수에 식물이 왕성하게 성장하는 5월과 6월에 1/10 Hoagland 용액, 5 mg/ℓ의

$\text{NH}_4^+\text{-N}$, 5 mg/ℓ의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 및 2 mg/ℓ의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 을 3번에 걸쳐 첨가하였다. 이들 배양액을 첨가한 후 5일과 14일에 식물구와 무식물구의 상층수와 침출수의 일부를 채수하여 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 및 P의 농도를 측정하였다(APHA 1989).

저토의 물리·화학적 특성의 측정

저토를 채취한 즉시 공기와의 접촉을 피하기 위하여 폴리에틸렌 주머니에 넣은 다음 ORP meter (model RM-1K)의 전극을 저토에 직접 꽂아 30분간 안정시킨 후 Eh 값을 측정하였고, pH는 습윤 저토와 증류수를 1 : 2(W : L)의 비율로 섞어 30분간 진탕한 후 여과하여 Fisher 230A pH meter로 측정하였으며, 수분 함량은 습윤 저토 20 g의 저토를 105℃에서 48시간 건조시켜 무게를 측정 후 습윤 저토에 대한 백분율을 계산하여 표시하였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 채취한 습윤 저토 2 g을 6% KCl 20 ml로 추출한 다음 phenate법(APHA 1989)으로 발색시켜서 spectrophotometer 640 nm에서 비색 정량하였다. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 습윤 저토 3 g을 이차 증류수 20 ml로 추출한 다음 cadmium reduction법(Allen *et al.* 1986)으로 발색시킨 후 spectrophotometer 543 nm에서 비색 정량하였다. 총질소 함량은 음건 저토 0.5 g을 micro-Kjeldahl법으로 정량하였다(Allen *et al.* 1986). 저토속의 유동성 인은 Hietjes와 Lijklema(1980)의 방법에 따라 2 g의 습윤 저토에 1 M NH_4Cl 40 ml를 넣은 다음 2시간 진탕 후 IEC 원심분리기로 2,000 rpm에서 15분간씩 2회에 걸쳐 원심분리한 상등액을 취하였고, 착화합물 인은 Psenner 등(1984)의 방법에 따라 원심분리관에 남은 침전물에 1 M NaOH 40 ml를 섞어 17시간 진탕한 후 원심분리하여 상등액을 취하였으며, 인회석 인은 관에 남은 침전물에 다시 한번 0.5 M HCl 40 ml를 넣어 24시간 진탕한 후 원심분리하여 상등액을 취하였다. 총 인은 음건 저토 0.5 g과 1 ml의 진한 황산 및 5 ml의 진한 질산을 Kjeldahl flask에 넣고 섞어서 가열하여 분해시킨 다음 50 ml로 정용하였다. 위의 추출액들은 ascorbic acid 방법(APHA, 1989)에 따라 발색시킨 다음 spectrophotometer 700 nm에서 비색 정량하였다. 유기 인(organic-P)은 총 인과 무기 인(유동성 인 + 착화합물 인 + 인회석 인)의 차로서 계산하였다.

결 과

산화층과 환원층 저토의 물리·화학적 특성

1. 산화, 환원전위 및 pH

줄을 pot에 심었을 때의 경엽부 길이가 24 cm이었는데, 72일 후에 91 cm로 자랐고, 그 이후에 생장을 정지하였다. 줄을 심기 전의 저토의 Eh는 -170 mV이었다. 수심을 5 cm로 유지한 저토의 산화층은 수면 밑 0~2 cm 깊이의 저토에 형성되었다. 산화층의 Eh는 무식물구와 식물구에서 각각 +190과 +175 mV의 산화 상태이었고, 5~10 cm 깊이 환원층의 Eh는 -165 mV와 -125 mV의 환원상태이었으며, 전자가 후자보다 40 mV만큼 Eh가 낮았다.

Table 1. Redox potential(Eh), pH and nitrogen of oxidized and reduced layers sediments measured before and after transplanting of *Zizania latifolia* under pot culture

Treatment	Eh (mV)	pH	NH ₄ ⁺ -N (μg/g)	NO ₃ ⁻ -N (μg/g)	Total-N (mg/g)
Before transplanting					
Non-planted	-170 ± 13	5.7 ± 0.2	35.1 ± 3.2	0.26 ± 0.4	1.68 ± 0.3
Planted	-170 ± 14	5.7 ± 0.1	38.0 ± 4.7	0.28 ± 0.3	1.68 ± 0.3
After transplanting					
Oxidized layer					
Non-planted	190 ± 15	6.6 ± 0.2	30.8 ± 2.8	0.60 ± 0.2	1.81 ± 0.4
Planted	175 ± 20	6.6 ± 0.3	28.0 ± 2.2	0.56 ± 0.1	1.61 ± 0.3
Reduced layer					
Non-planted	-165 ± 15	5.8 ± 0.3	43.9 ± 5.8	0.16 ± 0.3	1.85 ± 0.4
Planted	-125 ± 10	5.9 ± 0.2	5.3 ± 2.3	0.28 ± 0.4	1.58 ± 0.3

또한 식재하기 전의 저토의 pH는 5.7이었는데, 식재 후에 산화층의 pH 6.6는 환원층의 pH 5.9보다 높았다. 그런데 산화층이나 환원층의 pH는 무식물구(pH 5.84)와 식물구(pH 5.89) 사이에 차이가 거의 없었다(Table 1).

2. 질소함량

식재 전 저토의 NH₄⁺-N 함량은 무식물구와 식물구에서 각각 35.1 N μg/g과 38.0 N μg/g 이었는데, 식재 후 7월 20일에 산화층의 것은 각각 30.8 N μg/g과 28.0 N μg/g으로 감소하였고, 환원저토는 각각 43.9 N μg/g과 25.3 N μg/g으로서 무식물구는 식재 전보다 증가하였으며, 식물구는 감소하였다(Table 1). NO₃⁻-N 함량은 식재 전에 무식물구와 식물구에서 각각 0.26 N μg/g과 0.28 N μg/g이었는데, 식재 후에 산화층에서는 각각 0.60 N μg/g과 0.56 N μg/g으로 증가하였고, 환원층에서 각각 0.16 N μg/g과 0.28 N μg/g으로 감소하였지만, 식물구가 무식물구보다 약 1.8배 만큼 많았다(Table 1).

3. 인의 함량

유동성 인함량은 식재 전의 무식물구와 식물구에서 각각 0.87 P μg/g과 1.00 P μg/g이었는데, 식재 후의 산화층에서는 각각 2.50 P μg/g과 2.60 P μg/g으로, 환원층에서는 각각 2.47 P μg/g과 2.04 P μg/g로 증가하였다(Table 2). 식재 후의 산화층에서는 무식물구와 식물구가 비슷하였지만 환원층에서는 전자보다 후자가 작았다. 착화합물 인은 식재 전의 무식물구와 식물구에서 각각 149 P μg/g과 146 P μg/g이었는데, 식재 후에 산화층에서는 각각 173 P μg/g과 172 P μg/g으로 증가하였고, 환원층에서는 각각 164 P μg/g과 144 P μg/g으로 증감이 일어났다(Table 2). 인회석 인은 식재 전과 후의 차이가 적었다. 그러나 유기 인 함량은 여러 존재 형태의 인 중에서 식재 전과 후에 가장 크게 변화하였다. 즉 유기 인은 식재 전의 무식물구와 식물구에서 각각

184 P μg/g과 173 P μg/g 이었는데, 식재 후에 산화층에서는 각각 120 P μg/g과 124 P μg/g으로, 환원층에서는 각각 145 P μg/g과 78 P μg/g으로 감소하여 식물구가 무식물구보다 더 많은 감소를 나타냈다(Table 2). 총 인함량은 식재 전의 무식물구와 식물구에서 각각 399 P μg/g과 392 P μg/g으로 비슷하였는데, 식재 후에 산화층에서는 각각 368 P μg/g과 370 P μg/g으로, 환원층에서는 각각 381 P μg/g과 292 P μg/g으로 감소하였다. 이처럼 총 인함량은 모든 저토에서 감소하였지만 환원층의 무식물구에서 적은 감소가, 식물구에 많은 감소가 일어났다. 형태별로 보면 식재 전의 유동성 인, 착화합물 인, 인회석 인 및 유기 인의 비율은, 무식물구와 식물구의 차이가 없이, 각각 0.24%, 37%, 17% 및 45%이었는데, 식재 후에 산화층의 비율은, 두 구 사이에 차이가 없이, 각각 0.7%, 47%, 19% 및 33%이었다. 환원층의 무식물구의 비율은 각각 0.6%, 44%, 18% 및 38%로, 식물구의 것은 각각 0.7%, 49%, 23% 및 27%로서 식재 전에 비해서 착화합물 인의 증가와 유기 인의 감소가 일어났다(Table 2).

3. 상층수와 침출수의 질소 및 인의 함량

상층수의 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 그리고 PO₄³⁻-P의 농도가 각각 5 mg/l, 5 mg/l 및 2 mg/l 가 되도록 무기이온을 첨가한 다음, 5일과 14일 후에 상층수와 침출수의 각 이온 농도를 측정된 결과, 상층수의 NH₄⁺-N은 5일 후에 무식물구와 식물구에서 각각 0.90 mg/l 와 0.55 mg/l 이었고, 14일 후에 각각 0.43 mg/l 와 0.17 mg/l 로 식물구의 농도가 무식물구의 농도보다 낮았다. 침출수의 NH₄⁺-N은 5일 후에 각각 0.30 mg/l 와 0.02 mg/l 이었고, 14일 후에 각각 0.33 mg/l 와 0.05 mg/l 로 상층수와 마찬가지로 식물구의 농도가 낮았다(Table 3). 상층수의 NO₃⁻-N은 5일 후에 무식물구와 식물구에서 각각 0.27 mg/l 와 0.18 mg/l 이었고, 14일 후에 각각 0.22 mg/l 와 0.18 mg/l 로 무식물구의 농도가 식물구의 농도보다 높았다. 침출수의 NO₃⁻-N은 5일 후에 각각

Table 2. The concentrations of labile-, NAI-, apatite- and organic-phosphorus, and their percentages as total phosphorus of sediments in pot culture of *Zizania latifolia*. Numbers in parentheses are percentages

	Concentrations ($\mu\text{g/g}$)				
	labile-P	NAI-P	Apatite-P	Organic-P	Total
Before transplanting					
Non-planted	0.9(0.2)	149(37)	66(16)	184(46)	399(100)
Planted	1.0(0.3)	146(37)	72(18)	173(44)	392(100)
After transplanting					
Oxidized layer					
Non-planted	2.5(0.7)	173(47)	72(20)	120(33)	368(100)
Planted	2.6(0.7)	172(46)	72(19)	124(33)	370(100)
Reduced layer					
Non-planted	2.5(0.6)	166(44)	67(18)	145(38)	381(100)
Planted	2.0(0.7)	144(49)	68(23)	78(27)	292(100)

Table 3. Concentrations (mg/ℓ) of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in overlying and percolated water on 5 and 14 days after the treatment of $5 \text{ mg}/\ell$ $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $5 \text{ mg}/\ell$ $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $2 \text{ mg}/\ell$ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

	$\text{NH}_4^+\text{-N}$		$\text{NO}_3^-\text{-N}$		$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	
	5 days	14 days	5 days	14 days	5 days	14 days
	Overlying water					
Non-planted	0.9	0.43	0.27	0.22	0.05	0.02
Planted	0.55	0.17	0.18	0.18	0.03	0.02
Percolated water						
Non-planted	0.3	0.33	0.01	0.04	0.01	0.02
Planted	0.02	0.05	0.02	0.05	0.01	0.02

0.01 mg/ℓ 와 0.02 mg/ℓ 이었고, 14일 후에 각각 0.04 mg/ℓ 와 0.05 mg/ℓ 로 상층수와는 반대로 식물구의 농도가 높았다(Table 3). 상층수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 은 5일 후에 무식물구와 식물구에서 각각 0.05 mg/ℓ 와 0.03 mg/ℓ 이었고, 14일 후에 각각 0.02 mg/ℓ 와 0.02 mg/ℓ 로 상층수와 마찬가지로 식물구의 농도가 낮았다 (Table 3).

고 찰

회분 재배 조건에서 산화층 저토의 산화환원전위(Eh)는 무식물구가 식물구보다 높았고, 환원층에서 무식물구보다 식물구

가 오히려 높았는데, 이는 산화층의 높은 Eh는 수심이 5 cm로 낮게 유지되어 산소가 저토에 공급되어 산화가 일어났기 때문이며, 환원층에서 식물구의 Eh가 높은 이유는 식물의 뿌리에서 산소가 공급되었기 때문일 것으로 판단되었다(Kikuchi *et al.* 1977, Howes *et al.* 1986).

무식물구와 식물구의 산화층의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 함량은 감소하였고, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량은 증가하였다. 반면에 무식물구 환원층의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 함량은 증가하였고, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량은 감소하였는데, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 함량이 환원층에서 증가한 것은 식재 전 저토에 있던 유기물이 분해되었기 때문이며, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량이 산화층에서 증가하고 환원층에서 감소한 것은 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 산화형 질소로서 저토의 산화 상태를 반영한 것으로 생각된다. 식물구의 환원층에서는 식물의 생장에 의해서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 함량이 감소하였고, 뿌리로부터 산소가 방출되어 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 증가하였음을 나타낸다(Iizumi *et al.* 1980, Kemp and Murray 1986). $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 함량의 비는 산화층에서 식물구와 무식물구가 각각 1 : 51과 1 : 50이었으며, 환원층에서 각각 1 : 274과 1 : 90이었다. 따라서 무기질소의 절대량은 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 정수식물의 질소공급 원인임을 나타내었다(Carignan 1985).

유동성 인의 함량은 무식물구와 식물구의 산화층에서 비슷하였으나, 환원층에서는 줄의 흡수에 의해서 식물구가 낮았다. 착화합물 인도 증가하였으나 식물구의 환원층에서 감소하여 식물이 흡수하였음을 보였다. 한편 유기 인은 모든 저토에서 감소하였으나, 식물구의 환원층에서 감소가 컸다. 총 인도 모든 저토에서 감소가 있었으나 식물구의 환원층에서의 감소가 가장 컸다. 이러한 것은 유기 인과 착화합물 인이 분해되어 유동성 인이 되면 식물구에서는 식물이 흡수하여 유기 인과 착화합물 인의 양이 감소하지만, 무식물구에서는 착화합물 인으로 전환되어 착화합물 인이 축적된 것으로 생각된다.

상층수에 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 및 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도를 각각 5 mg/ℓ , 5 mg/ℓ 및 2 mg/ℓ 가 되도록 첨가한 후 5일과 14일 후에 상층수와 침출수의 농도를 측정한 결과, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 무식물구에서 상층수가 5일과 14일 후에 감소하였는데, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 저토에 흡착되거나 NH_3 또는 N_2 의 형태로 공기 중으로 방출되었기 때문으로 판단되었다(Mikkelsen 1987). 그런데 식물구에서의 감소가 무식물구에 비해서 더 큰 까닭은 저토 위로 뻗은 일부의 뿌리가 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 을 흡수하는데 있었을 것이다. 침출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 낮은 원인은 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 뿌리에 흡수됨으로서 저토 밑으로 적은 유출에 기인된 것으로 판단되었다. 상층수의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 5일과 14일 후에 무식물구나 식물구에서 감소하였으며, 식물구에서 더 감소하였는데, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우와 마찬가지로, 대부분의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 저토에 흡착되거나 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, NH_3 또는 N_2 로 전환된데 있을 것이다(Reddy and Patrick 1976). 한편, 침출수의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 무식물구보다 식물구에서 높은 이유는 뿌리에 의한 산소공급으로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 으로 전환되고, 저토 밑으로 침출되었기 때문으로 판단되었다(Chen *et al.* 1972, Mikkelsen 1987). 상층수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 무식물구나 식물구에서 감소

하는데, 이러한 감소는 수체에 인이 많아지면 Fe이나 Al과 착화합물을 이루거나 저토 및 유기물에 흡착되어 침전하거나 저토내의 간극수로 되기 때문에 판단되며(Boström *et al.* 1988), 이와 반대로 인이 저토에 축적되면 수체로 용탈될 가능성도 있을 수 있다. 침출수의 PO_4^{3-} -P 농도는 무식물구가 식물구보다 높았는데, 식물이 흡수하였기 때문으로 판단된다. 그러나 그 차이는 질소의 차보다 작았는데, 그것은 식물의 인의 주요 공급원이 착화합물 인과 유기 인이기 때문일 것이다. 한편, 저토내 인 중에서 식물에 흡수되고 자유로이 이동할 수 있는 형태는 유동성 인이므로, 다른 형태의 인도 이 형태로 전환이 되어야만 식물이 이용할 수 있으며 또한 자유로이 이동할 수 있게 된다. 그러나 유동성 인은 총 인에서 차지하는 비가 작아(0.5% 이하), 이것보다는 착화합물 인 및 유기 인의 함량과 유동성 인으로 전환될 수 있는 환경 조건이 저토와 수체간의 인 이동에 중요한 요인이 된다. 그런데 식물의 생장이 완성한 시기에 착화합물 인이 유동성 인으로 전환이 되면 식물이 흡수함으로써 저토내의 착화합물 인의 함량이 감소하고, 산소가 공급되어 저토의 산화층이 두꺼워져서 유기 인이 유동성 인으로 빠르게 분해되면 그곳에 있는 뿌리로부터 흡수되거나 착화합물 인으로 전환되어 유기 인의 함량이 감소하게 된다. 이렇게 식물의 생장에 의해서 착화합물 인과 유기 인의 양이 감소하고, 한편으로는 근권 저토가 산화됨으로써 안정한 착화합물 인을 이룰 수 있으므로 유동성 인으로의 전환이 감소하게 되어 저토내와 저토에서 수체로 이동하는 인의 양을 줄일 수 있는 것으로 판단되었다.

적 요

정수식물인 줄(*Zizania latifolia*)의 생장에 따른 저토로부터의 무기영양소 흡수와 저토의 산화환원전위(Eh) 및 pH와 같은 물리, 화학적 특성과 NH_4^+ 와 NO_3^- 의 질소형 그리고 유동성 인(PO_4^{3-}), 착화합물 인, 인회석 인 및 유기 인의 변화를 화분 재 배실험을 통하여 조사하였다. 화분재 배 실험에서 저토의 Eh는 식재 후에 식물구의 환원층이 무식물구의 것보다 높았다. 환원층의 NH_4^+ -N 함량은 식물구가 무식물구보다 적었고, NO_3^- -N 함량은 그것과 반대의 양상으로 나타났다. 형태별 인의 비율은 식재 전에 유기 인이 높았고, 식재 후에 착화합물 인이 높음으로써, 전자가 분해되어 후자로 변형됨이 확인되었다. 상층수와 침출수의 NH_4^+ -N 및 PO_4^{3-} -P 농도는 무식물구보다 식물구에서 낮았다. 침출수의 NO_3^- -N 농도는 무식물구보다 식물구에서 높았고, 이는 뿌리로부터의 산소공급이 저토를 산화시켰기 때문인 것으로 판단되었다.

인용문헌

노희명, 최우정, 이은주, 윤석인, 최영대. 2002. 시화지구 입공습지에서 갈대에 의한 질소 및 인의 흡수. 한국생태학회지 25:

- 219-224.
- 배정진, 추연식, 송승달. 2003. 정족산 무제체습 식물의 무기이온, 질소 및 인의 양상. 한국생태학회지 26: 109-114.
- 이충일, 광영체. 2000. 정수식물의 내염성 및 NH_4^{3-} -N 흡수 제거기능 평가. 한국생태학회지 23: 45-49.
- 전상호. 1988. 춘천지역의 인공퇴적물에 함유된 인의 존재형태에 따른 수질오염의 가능성에 대하여. 한국수질보전학회지 4: 49-57.
- 조강현. 1992. 팔당호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환. 서울대학교 박사학위논문. 233 p.
- APHA. 1989. Standard method for the examination of water and wastewater(17th eds.). Baltimore. 1482 p.
- Allen, S.E., H.M. Grimshaw and A.P. Rowland. 1986. Chemical analysis. In P.D. Moore and S.B. Chapman (eds.). Methods in plant ecology. Blackwell Sci. Publ., Oxford. pp. 285-344.
- Armstrong, W. 1964. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants. Nature 204: 801-802.
- Bores, P.C.M., W.T. Bongers, A.G. Wisselo and T.E. Cappenberg. 1984. Loosdrecht lakes restoration project: sediment phosphorus distribution and release from the sediments. Verh. Int. Ver. Limnol. 22: 842-847.
- Bostrom, B., G. Persson and B.B. Broberg. 1988. Bio-availability of different phosphorus forms in freshwater systems. Hydrobiologia 170: 133-155.
- Bowden, W.B. 1986. Nitrification, nitrate reduction and nitrogen immobilization in a tidal freshwater marsh sediment. Ecology 67: 88-99.
- Carignan, R. 1985. Nutrient dynamics in a littoral sediment colonized by submersed macrophyte *Myriophyllum spicatum*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42: 1303-1311.
- Chen, R.L., D.R. Keeney and J.G. Konrad. 1972. Nitrification in sediments of selected Wisconsin lakes. J. Environ. Qual. 1: 151-154.
- Furumai, H. and S. Ohgaki. 1981. Fractional composition of phosphorus forms in sediments related to release. Discussion paper series No. 2 Dept. Urban Engineering Univ. Tokyo. 13 p.
- Graneli, W. and D. Solander. 1988. Influence of aquatic macrophytes on phosphorus cycling in lakes. Hydrobiologia 170: 245-266.
- Hieltjes, A.H.M. and L. Lijklema. 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. J. Environ. Qual. 9: 405-407.
- Howes, B.L., J.W.H. Dacey and D.D. Goehring. 1986. Factors controlling the growth form of *Spartina alterniflora*: Feedbacks between aboveground production, sediment oxidation, nitrogen and salinity. J. Ecol. 74: 881-898.
- Iizumi, H., A. Hattori and C.P. McRoy. 1980. Nitrate and nitrite in interstitial water of eelgrass beds in relation to the rhizosphere. J. Exp. Mar. Boil. Ecology 47: 191-201.
- Kemp, W.M. and L. Murray. 1986. Oxygen release from roots of the submersed macrophyte *Potamogeton perfoliatus* L.: regulating factors and ecological implications. Aquat. Bot. 26: 271-283.
- Kikuchi, E., C. Furusaka and Y. Kurihara. 1977. Effects of tubificides on the nature of a submersed soil ecosystem. Jap. J. Ecol. 27: 163-170.
- Larcher, W. 1980. Physiological plant ecology. 2nd (ed.). Springer-Verlag, Berlin, pp. 86-87.

- Mikkelsen, D.S. 1987. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plant Soil* 100: 71-97.
- Patrick, W.H.Jr. and I.C. Mahapatra. 1968. Transformations and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Adv. Agron.* 20: 323-359.
- Pettersson, K. and V. Istvanovics. 1988. Sediment phosphorus in lake Balaton-forms and mobility. *Arch. Hydrobiol., Beih. Ergebn. Limnol.* 30: 5-41.
- Psenner, R., R. Pucsko and M. Sager. 1984. Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 70: 111-155.
- Reddy, K.R. and W.H. Jr. Patrick. 1976. Yield and nitrogen utilization by rice as affected by method and time of application of labeled nitrogen. *Agron. J.* 68: 956-969.
- Smith, C.S. and M.S. Adams. 1986. Phosphorus transfer from sediments by *Myriophyllum spicatum*. *Limnol. Oceanogr.* 31: 1312-1321.
- Sonzogni, W.C., S.C. Chapra, D.E. Armstrong and T.J. Logan. 1982. Bioavailability of phosphorus inputs to lakes. *J. Environ. Qual.* 11: 555-563.
- Williams, J.D.H., H. Shear and R.L. Thomas. 1980. Availability to *Scenedesmus quadricauda* of different forms of phosphorus in sedimentary materials from the Great lakes. *Limnol. Oceanogr.* 25: 1-11.

(2005년 2월 24일 접수; 2005년 4월 14일 채택)