

# 생장단계와 체류시간에 따른 창포의 질소와 인 제거효과<sup>1a</sup>

서병수<sup>2</sup> · 박종민<sup>2\*</sup>

## Removal Effect of Nitrogen and Phosphorus of *Acorus calamus* var. *angustatus* on Its Growth Stage and Water-storage Time<sup>1a</sup>

Byung-Soo Seo<sup>2</sup>, Chong-Min Park<sup>2\*</sup>

### 요 약

창포를 이용하여 질소와 인의 농도별, 식물의 성장단계별, 오염수의 체류시간별로 질소와 인의 제거효과를 분석하였던 바, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 체류 1시간 후에 수중의 질소와 인의 함량을 현저히 감소시켰으나, 2~4시간 후에는 감소율이 극히 낮았다. 이러한 현상은 식물의 성장초기, 성장기, 성장최성기에서 동일하였다. 수중에 질소와 인의 함량이 많을수록 제거율이 높았고, 인보다는 질소의 제거효과가 크게 나타났다. 성장최성기에 가장 많은 질소와 인을 제거하였고 다음으로 성장기, 성장초기의 순이었으나, 성장단계간의 차이는 극히 작았다. 동일 포트에 4일 동안 체류시킨 것보다 2일 체류 후에 다른 포트에 시험수를 옮긴 것이 질소와 인의 제거율이 약간 높았다.

주요어 : 질소와 인의 농도, 식물성장단계

### ABSTRACT

The removal affect of nitrogen and phosphorus were analyzed using a *Acorus calamus* var. *angustatus*. The nutrient concentration, growth stage of plants and the storage time of polluted water were considered. The results of this study were as follows: after an hour the content of nitrogen and phosphorus were considerably reduced in the *Acorus calamus* var. *angustatus*, while after two-four hours the rate of reduction was extremely low. This situation was the same in the early growth stage, growing stage and highest growth stage of the plant. The removal rate of nitrogen and phosphorus with the *Acorus calamus* var. *angustatus* was higher, when these two minerals remained in high levels of water. The *Acorus calamus* var. *angustatus* was more effective to remove nitrogen than that of phosphorus. The plant removed the most nitrogen and phosphorus when in the highest growth stage, but this was not clear in the growth stages. The removal rate was higher, in the case of moving polluted water to other plants after two days, than in the case of four days of growth in the same plants.

**KEY WORDS : NUTRIENT CONCENTRATION, GROWTH STAGE OF PLANT**

1 접수 11월 15일 Received on Nov. 15, 2004

2 전북대학교 산림과학부 농업과학기술연구소 Faculty of Forest Science, Chonbuk National University, Chonju, Chollabukdo (561-756), Korea(cmpark@chonbuk.ac.kr)

a 이 연구는 2001년 농림기술센터의 학술연구비에 의해 수행되었음.

\* 교신저자, Corresponding author

## 서론

산업화와 인구증가에 따라서 강 유역(watershed)과 연안 해역의 소택지에 형성된 농경지 등은 자정능력을 상실하여 급격한 수질오염이 진행되고 있으며, 하천의 주요 오염원인 생활하수·공단폐수·축산폐수 등은 질소와 인을 다량 함유하고 있어 하천의 부영양화(entrophication)를 유발시키고 있다.

하천수의 부영양화를 방지하기 위한 친환경적인 수질 정화법으로 수생식물을 활용하는 방법에 대해 연구가 시작되었는데(Grant and Patrick, 1970; 김윤태, 1999), 수생식물은 질산염, 인산염, 중금속 등 각종 수질 오염물질을 섭취하여 제거하는 수질정화능력을 지니고 있을 뿐 아니라 대기로부터 수중으로 산소를 공급하고 수생미생물의 수질정화능력을 증가시킨다고 보고된 바 있다(Ghosh and Sen, 1987; 함용규, 1996).

이러한 수생식물의 수질정화능력에 관한 연구로서 Rogers와 Davis(1972)는 1 ha의 부레옥잠이 800명의 사람이 하루에 배출하는 질소와 인을 함유한 폐수를 정화할 수 있다고 하였고, Sato와 Kando(1981)는 영양염류의 농도변화에 따른 부레옥잠의 질소와 인의 흡수량에 관한 연구에서 최대 흡수량이 각각 1.31, 0.27g/m<sup>2</sup>/day 임을 밝혔다. Reddy와 Debusk(1987)는 식물에 의해서 암모니아와 NO<sub>3</sub>-N의 일부가 흡수·제거될 수 있는데, 계절에 따라서 0.3~7.0 kg/ha·day 정도까지 흡수가 가능하다고 하였다.

국내에서 수생식물을 이용한 수질정화에 관한 연구는 1980년대 이후에 시작되어 1990년대부터 수생식물의 질소와 인의 제거능력에 관한 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 이 분야의 연구는 부레옥잠을 이용한 오폐수 처리(변중영 등, 1985; 김규식 등, 1988; 김복영 등, 1991), 물옥잠·줄·부들·꽃창포 등을 이용한 축산폐수 처리시험(김복영 등, 1988), 호수에서 대형 수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환에 관한 연구(조강현, 1992), 소형장치에서 생이가래를 이용한 하수 내 질소와 인 제거효과에 관한 시험(안윤주와 공동수, 1996), 미나리를 이용한 하수의 수질정화효과에 관한 연구(권성환 등, 1996), 수생식물 7종을 이용한 질소와 인 및 기타 오염물질의 정화효과에 관한 연구(이옥주, 1999), 갈대·흑삼릉·택사·자라풀 등을 이용한 수질정화효과에 관한 연구(이옥주, 2003) 등이 있다.

또한 최근에는 도시하천의 생태적 복원과 수질환경 보전에 관한 관심이 높아지면서, 생태하천을 조성하거나 하천과 호소 등의 수질개선을 위하여 인공습지와 인공섬 등을 조성하고 그곳에 정화능력이 큰 식물을 집단

적으로 식재하는 사례가 많아지고 있다(최정권, 1995; 김귀곤과 조동일, 1999; 심우경과 백경중, 2000; 이은희와 장하경, 2000). 이때에는 주로 하천 주변에 자라는 갯버들, 부들, 갈대, 달뿌리풀, 미나리 등의 내습성 식물과 부레옥잠 등의 수생식물들이 주로 이용되고 있다(최규창과 김남춘, 1999).

수질정화를 목적으로 조성하는 인공습지는 그 내부로 유입되는 오염수의 양에 따라 규모와 오염수의 체류시간이 결정되어야 한다. 특히 오염수가 계속적으로 또는 주기적으로 발생하는 경우에 체류시간을 결정하기 위해서는 인공습지에 어떤 식물을 어느 정도의 밀도로 식재하고, 식물의 생장기에 따라 얼마 동안 오염수를 체류시킴으로써 적절한 정화효과를 거둘 수 있는지에 대한 구체적인 연구가 필요하다. 이 분야에 대한 연구로는 부레옥잠과 미나리를 이용한 유입수의 농도 및 체류시간에 따른 유기물질 및 영양염류의 처리효율을 조사한 박진식(2002)의 연구 등이 있지만, 우리나라에서 이 분야에 대한 연구는 대단히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 우리나라의 습지와 하천에 자생하는 창포를 이용하여 질소와 인의 농도별, 창포의 성장단계별, 오염수의 체류시간별로 하천수의 질소와 인 제거효과를 분석하여 식물정화시설과 인공습지의 효율적인 운용을 위한 기초자료를 제공하기 위한 목적으로 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시식물

본 연구에서 사용한 식물재료는 창포(*Acorus calamus* var. *angustatus*)이다. 창포는 천남성과에 속하며 연못가와 도랑가에 자라는 다년생초로서 근엽은 굽고 옆으로 뻗으며 마디가 많고 밑 부분에서 수염뿌리가 돋는다. 잎은 근경 끝에서 양생하며 길이 70cm, 나비 1~2cm이다. 관련된 선행연구들(권성환 등, 1996; 양홍모, 2002; 이은희 등, 2004)에 의하면, 창포는 수중의 질소와 인의 농도 감소에 효과가 있는 식물로 이미 밝혀진 바 있다. 공시식물 재료는 2003년 3월 전문 농장에서 재배한 pot묘를 구입하여 사용하였다.

### 2. 질소, 인의 농도조절

질소의 농도는 5ppm, 10ppm, 20ppm의 3수준으로 조절하였고, 인의 농도는 0.5ppm, 1ppm, 2ppm의 3수준으로 조절하였다. 이는 각각 전라북도의 동진강, 만경강,

전주시내 세천인 연화천에서 2000년부터 2002년 사이에 측정된 질소와 인의 최고농도를 선택한 것이다(문영희 등, 2001; 이성영, 2003). 농도조절에 사용한 시약은 질소는  $KNO_3$ 이고, 인산은  $K_2HPO_4$ 이다.

### 3. 생장시기 구분

창포의 생장시기를 3단계로 구분하여 시험을 실시하였다. 즉 생장초기단계인 4월 20일, 생장단계인 5월 20일, 생장최성기인 6월 10일에 각각 시험을 실시하였다. 창포의 생장초기단계도 Table 1에 나타난 바와 같이, 싹이 트는 시기가 아니고, pot에 심어져 잎이 평균 3.4개이고 잎 길이가 46cm 정도 자란 상태이다. 즉 그 이후에 식물이 자라는 과정에 따라 처리 효율을 비교한 것으로서, 공시식물의 생육단계별 초장과 분얼포기수, 엽수는 Table 1과 같다.

Table 1. The size of *Acorus calamus* var. *angustatus* used in this experiment on its growth stage

Growth stage	Plant length(cm)	No. of plant per hill	No. of leaf
Early growth stage	46.1	1.4	3.4
Growing stage	55.6	3.2	5.3
Highest growth stage	63.8	5.3	7.1

### 4. 체류시간 구분

오염수의 체류시간은 1시간, 2시간, 3시간, 4시간의 4단계로 구분하여 질소와 인의 농도를 측정하였다. 또한 장시간 체류효과를 측정하기 위하여, 4일간 오염수를 체류시킨 시험구와 2일간 체류시킨 다음 그 시험수를 생장상태가 비슷한 다른 식물체 재배 포트에 옮겨 2일간 체류시킨 시험구를 배치하였다. 이 시험은 생장최성기를 대상으로 질소는 20ppm 처리구만을 배치하였고, 인은 2ppm 처리구만을 배치하였다.

### 5. 공시식물의 재배조건

포트에 유기물이 없는 모래를 10kg씩 일정하게 담은 후 pot당 3본씩 공시식물을 식재하여 전북대학교 묘포장의 비닐하우스에서 재배하였다. pot는 창포의 생장초기단계는 높이 12cm, 직경 40cm인 구멍이 없는 플라스틱 대야를 사용하였고, 생장기와 최성기단계는 높이 35cm, 직경 30cm인 구멍이 없는 고무통을 사용하였다.

시험시 농도조절이 된 물은 포트당 5ℓ씩 동일하게 관수하였다. 시험의 반복은 각 요인당 3반복으로 배치하였다.

### 6. 질소, 인 분석방법

설계한 체류시간이 경과한 직후에 각 pot에서 50ml의 분석용 시료를 채수하여 실험실로 운반한 후 최단시간 내에 분석하였다. 시료에 잔류한  $NO_3-N$ 과  $PO_4$ 의 함량은 환경오염공정시험법의 수질편에 준하여 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 체류시간에 따른 창포의 질소·인 제거효과

#### 1) 질소 제거효과

창포를 생장기 별로 나누어 질소의 함량을 5ppm, 10ppm, 20ppm으로 조절하여 체류시간(1시간, 2시간, 3시간, 4시간) 경과에 따른 수중 질소함량을 분석한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다.

생장초기의 경우, 5ppm 처리구에서는 체류시간별로 각각 18.8%, 23.0%, 25.8%, 26.2%가 감소하였고, 10ppm 처리구에서는 각각 36.7%, 38.5%, 38.9%, 39.9%가 감소하였으며, 20ppm 처리구에서는 각각 52.4%, 55.1%, 55.15%, 55.30%가 감소하였다. 생장기의 경우, 5ppm 처리구에서는 체류시간별로 각각 19.8%, 23.2%, 25.6%, 26.2%가 감소하였고, 10ppm 처리구에서는 각각 37.3%, 39.0%, 39.5%, 39.8%가 감소하였으며, 20ppm 처리구에서는 각각 52.8%, 56.3%, 56.5%, 56.9%가 감소하였다. 생장최성기의 경우, 5ppm 처리구에서는 체류시간별로 각각 22.0%, 24.6%, 26.6%, 27.2%가 감소하였고, 10ppm 처리구에서는 각각 38.0%, 39.5%, 40.1%, 40.3%가 감소하였으며, 20ppm 처리구에서는 각각 53.6%, 56.8%, 57.85%, 58.1%가 감소하였다.

이상의 결과를 종합하면, 체류시간 경과에 따른 수중 질소는 모든 농도와 생장시기에서 체류 1시간 후에 가장 많은 감소율을 나타내었고 2시간, 3시간, 4시간이 경과하면서 감소율은 극히 조금씩 증가하였다. 그리고 3가지 처리농도 가운데서 가장 고농도인 20ppm 처리구에서 감소율이 가장 높았다. 가장 많은 감소율을 나타낸 시험구는 생장최성기의 20ppm 처리구이었다.

#### 2) 인 제거효과

창포를 생장기별로 나누어 인의 함량을 0.5ppm,

Table 2. Nitrogen removal amount of *Acorus calamus* var. *angustatus* on its growth stage and water-storage time

W.S.T (hr)	G.S	NO <sub>3</sub> -N 5ppm	R.R (%)	NO <sub>3</sub> -N 10ppm	R.R (%)	NO <sub>3</sub> -N 20ppm	R.R (%)
1	E.G.S	4.06±0.81	18.80	6.33±2.13	36.70	9.52±3.24	52.40
	G.S	4.01±1.14	19.80	6.27±1.86	37.30	9.43±2.93	52.85
	H.G.S	3.90±0.62	22.00	6.20±1.72	38.00	9.28±2.42	53.60
2	E.G.S	3.85±0.57	23.00	6.15±2.31	38.50	8.98±1.70	55.10
	G.S	3.84±0.72	23.20	6.10±1.92	39.00	8.75±2.45	56.25
	H.G.S	3.77±1.43	24.60	6.05±1.87	39.50	8.64±1.92	56.80
3	E.G.S	3.71±0.52	25.80	6.11±1.54	38.90	8.97±1.95	55.15
	G.S	3.72±0.71	25.60	6.05±1.67	39.50	8.71±2.03	56.45
	H.G.S	3.67±0.47	26.60	5.99±1.43	40.10	8.44±1.65	57.80
4	E.G.S	3.69±0.45	26.20	6.01±1.56	39.90	8.94±2.36	55.30
	G.S	3.69±0.61	26.20	6.02±1.81	39.80	8.63±2.07	56.85
	H.G.S	3.64±0.78	27.20	5.97±1.74	40.30	8.39±2.87	58.05

W.S.T : Water-storage time, G.S : Growth stage, R.R : Removal rate E.G.S : Early growth stage, G.S : Growing stage, H.G.S : Highest growth stage

1ppm, 2ppm으로 조절하여 체류시간(1시간, 2시간, 3시간, 4시간) 경과에 따라 수중 인 함량을 분석한 결과는 Table 3에 나타난 바와 같다.

생장초기의 경우, 0.5ppm 처리구에서는 체류시간별로 각각 10.0%, 12.2%, 13.6%, 14.0%가 감소하였고, 1ppm 처리구에서는 각각 10.3%, 12.5%, 13.1%, 14.1%가 감소하였으며, 2ppm 처리구에서는 각각 10.5%, 14.4%, 14.5%, 14.7%가 감소하였다. 생장기의 경우,

0.5ppm 처리구에서는 체류시간별로 각각 11.8%, 14.0%, 15.0%, 15.8%가 감소하였고, 1ppm 처리구에서는 각각 15.1%, 17.6%, 18.1%, 18.5%가 감소하였으며, 2ppm 처리구에서는 각각 14.1%, 18.9%, 20.6%, 24.7%로 감소하였다. 생장최성기의 경우, 0.5ppm 처리구에서는 체류시간별로 각각 14.2%, 15.8%, 16.8%, 17.8%가 감소하였고, 1ppm 처리구에서는 각각 16.5%, 18.3%, 19.5%, 19.9%가 감소하였으며, 2ppm 처리구에서는 각

Table 3. Phosphorus removal amount of *Acorus calamus* var. *angustatus* on its growth stage and water-storage time

W.S.T (hr)	G.S	PO <sub>4</sub> 0.5ppm	R.R (%)	PO <sub>4</sub> 1ppm	R.R (%)	PO <sub>4</sub> 2ppm	R.R (%)
1	E.G.S	0.45±0.14	10.00	0.90±0.25	10.30	1.79±0.38	10.45
	G.S	0.44±0.08	11.00	0.85±0.31	15.10	1.72±0.31	14.05
	H.G.S	0.43±0.05	14.20	0.84±0.14	16.50	1.77±0.28	11.75
2	E.G.S	0.44±0.16	12.20	0.88±0.18	12.50	1.71±0.32	14.40
	G.S	0.43±0.09	14.00	0.82±0.25	17.60	1.62±0.36	18.85
	H.G.S	0.42±0.12	15.80	0.82±0.17	18.30	1.66±0.24	17.05
3	E.G.S	0.43±0.05	13.60	0.87±0.08	13.10	1.71±0.35	14.50
	G.S	0.43±0.13	15.00	0.82±0.13	18.10	1.59±0.31	20.55
	H.G.S	0.42±0.10	16.80	0.81±0.27	19.50	1.54±0.32	22.90
4	E.G.S	0.43±0.07	14.00	0.86±0.15	14.10	1.71±0.31	14.70
	G.S	0.42±0.12	15.80	0.82±0.27	18.50	1.51±0.22	24.70
	H.G.S	0.41±0.08	17.80	0.80±0.16	19.90	1.50±0.27	25.05

W.S.T : Water-storage time, G.S : Growth stage, R.R : Removal rate E.G.S : Early growth stage, G.S : Growing stage, H.G.S : Highest growth stage

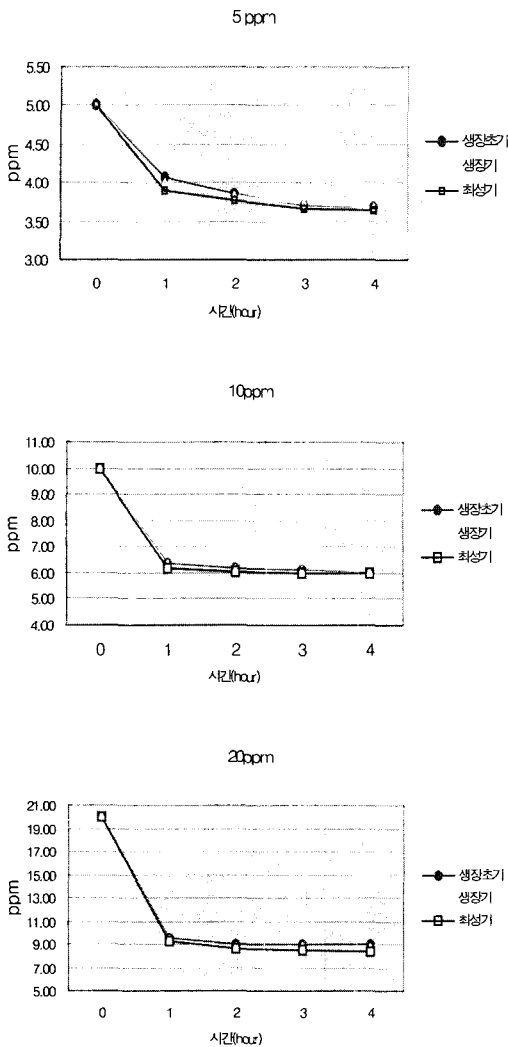


Figure 1. Nitrogen removal amount of *Acorus calamus* var. *angustatus* on its water-storage time by growth stage

각 11.8%, 17.1%, 22.9%, 25.1%가 감소하였다.

이상의 결과를 종합하면, 체류시간 경과에 따른 수중 인은 모든 농도와 생장단계에서 체류 1시간 후에 가장 많은 감소율을 나타내었고 2시간, 3시간, 4시간이 경과하면서 감소율은 극히 조금씩 증가하였다. 그리고 3가지 처리농도 가운데서 가장 고농도인 2ppm 처리구에서 감소율이 가장 높았다. 즉 생장최성기의 2ppm 처리구에서 4시간 체류 후에 25.1%가 가장 많은 감소율을 나타내었다. 이러한 경향은 질소의 감소율에서와 같은 것이지

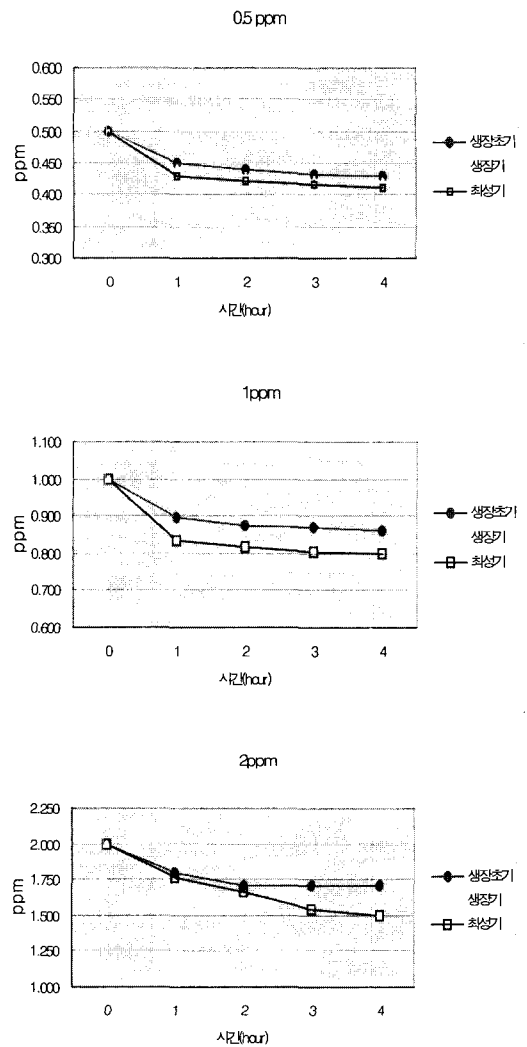


Figure 2. Phosphorus removal amount of *Acorus calamus* var. *angustatus* on its water-storage time by growth stage

만, 질소의 경우 최소 19.8%에서 최고 58.1%까지 제거한 것에 비하면, 인은 최소 10%에서 최고 25.1%까지 제거하여 인보다는 질소의 제거효과가 크게 나타났다.

## 2. 생장단계에 따른 창포의 질소·인 제거효과 비교

### 1) 질소 제거효과

동일한 질소농도에서 창포의 생장단계에 따른 질소

의 제거효과를 비교분석한 결과는 Figure 1에 나타난 바와 같다. 5ppm, 10ppm, 20ppm의 3가지 질소농도 처리구에서 창포의 성장단계별 질소의 감소율을 보면, 모두 성장초기에서 생장기, 생장최성기로 갈수록 감소율은 증가하고 있으며, 4시간이 경과한 후 수중 잔류질소량은 최성기로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 생장이 계속될수록 초장과 엽수, 그리고 분얼포기수가 증가하여 개체 전체의 엽면적이 증가하므로, 질소를 흡수할 수 있는 능력이 커지기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 성장단계에 따른 질소 저거량 사이에 통계적 유의차는 인정되지 않았다. 또한 질소 함량이 가장 많은 20ppm 처리구에서 생장최성기 때의 제거효과가 큰 것으로 나타났다.

## 2) 인 제거효과

동일한 인농도에서 창포의 성장단계에 따른 인의 제거효과를 비교분석한 결과는 Figure 2에 나타난 바와 같다. 0.5ppm, 1ppm, 2ppm의 3가지 인농도 처리구에서 창포의 성장단계별 인의 감소율을 보면, 모두 성장초기에서 생장기, 생장최성기로 갈수록 감소율은 증가하고 있으며, 4시간이 경과한 후 수중 인 잔류량은 최성기로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 질소 감소량에서와 마찬가지로 생장이 계속될수록 초장과 엽수, 그리고 분얼포기수가 증가하여 개체 전체의 엽면적이 증가하므로, 인을 흡수할 수 있는 능력이 커지기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 성장단계에 따른 인 제거량 사이에 통계적 유의차는 인정되지 않았다. 또한, 인 함량이 가장 많은 2ppm 처리구에서 생장최성기 때의 제거효과가 큰 것으로 나타났다.

## 3. 장기체류에 의한 창포의 질소·인 제거 효과

창포의 생장최성기에 질소 20ppm과 인 2ppm을 각각 처리하여, 한 포트에서 4일간 오염수를 체류시킨 시험구와 2일간 체류시킨 후 시험수를 다른 식물체 포트에 옮겨 2일간 체류시킨 시험구를 배치하여 질소와 인 제거

효과를 비교분석한 결과는 Table 4에 나타난 바와 같다.

질소의 경우 오염수를 한 포트에 4일간 체류시켰을 때 20ppm에서 6.36ppm으로 감소하여 68.2%의 제거율을 보인 반면, 2일 후에 시험수를 다른 포트에 옮긴 것은 4.25ppm으로 감소하여 78.8%의 제거율을 보였다. 즉 4일간 계속 체류시킨 것보다 2일 체류 후에 시험수를 다른 포트에 옮긴 것이 10.6% 더 많은 제거효과를 나타내었다.

인의 경우 오염수를 한 포트에 4일간 체류시켰을 때 2ppm에서 1.27ppm으로 36.54%의 제거율을 보인 반면, 2일 후에 시험수를 다른 포트에 옮긴 것은 1.09ppm으로 45.50%의 제거율을 보였다. 즉, 질소와 마찬가지로 4일간 계속 체류시킨 것보다 2일 체류 후에 시험수를 다른 포트에 옮긴 것이 약 9% 더 많은 제거효과를 나타내었다.

이것은 오염수를 한 곳에 장시간 체류시키는 것보다는, 단계적 처리를 하거나 일정 기간마다 정화시설의 식물을 교체하는 것이 수질정화효과를 높일 수 있다는 것을 증명하는 결과라고 할 수 있겠다.

## 종합고찰

질소는 식물과 부착미생물에 의한 흡수, 암모니아의 휘발, 질산화-탈질화 등에 의해 자연상태에서 40~90% 까지 제거될 수 있다. 그 중 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ 로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 준다. 본 연구에서 사용한 질산이온은 주로 식물에 섭취되거나 탈질작용에 의해 제거되고 남은 질산은 지하수에 침투되거나 스며든다.

인의 주요 제거기작은 화학적 흡착과 식물에 의한 흡수이지만, 질소와는 달리 인은 기체상태로 변형되지 않고 식물과 부착미생물의 흡수에 의해서 제거된다. 식물이 제거할 수 있는 인은  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ 의 형태이

Table 4. Removal amount of nitrogen and phosphorus of *Acorus calamus* var. *angustatus* by longtime water-storage

Treatment	$\text{NO}_3\text{-N}$		$\text{PO}_4$	
	Residue(ppm)	Removal rate(%)	Residue(ppm)	Removal rate(%)
Concentration	20.0		2.0	39.54
W.S 4*	6.36	68.20	1.27	36.54
W.S 2-2**	4.25	78.75	1.09	45.50

W.S 4\* : water-storage for 4 days in same pot, W.S 2-2\*\* : storage for 2 days in another pot after 2 days stored water

며 부착미생물이 유기인을 분해하여 식물이 흡수할 수 있는 형태로 만들고 미생물의 세포합성에 의해 용존성이 제거된다. 자연처리법에 의한 인의 제거는 부하율과 체류시간에 의존하며 식물 중의 영양염류의 함량, 식물체의 증식속도와 물의 영양염류 구성에 의해 좌우되며, 식물이 최대한으로 인을 흡수하기 위해서는 식물조직내 영양염류 함량의 균형을 맞추어야 하므로 일정량의 질소와 공존하여야 한다(Reddy and Busk, 1987).

본 연구결과 창포의 성장초기, 생장기, 성장최성기 모두 오염수의 체류시간이 1시간 경과했을 때 제거율이 현저히 높았고, 그 후에는 시간경과에 따라 큰 차이는 없지만 체류시간이 경과할수록 제거율이 많았다. 일반적으로 수생식물을 이용한 수질정화시스템에서 체류시간과 처리효율의 관계를 보면, 체류시간이 길수록 처리효율은 높게 나타난다. 일본의 가스미가우라호 상류천의 습지와 국내의 충남 아산시 신정호 인공습지의 경우는 처리효율보다 처리수량을 많게 하여 호수 수질을 개선하고자 체류시간을 0.5~10시간 정도로 짧게 운영하고 있고, 이들 습지의 총질소 처리효율은 15~32% 정도이다. 이은희 등(2004)은 갈대를 식재한 제1 인공습지, 노랑꽃창포/창포를 식재한 제2 인공습지, 연못(옥잠화·줄·창포·털부처꽃·세모고랭이·물억새 등 식재)의 3단계 식물정화조를 조성하여 1일 동안 단계적으로 오염수를 유출시킨 결과 총질소는 평균 64.3%, NO<sub>3</sub>-N는 평균 74%, 총인은 평균 84.5%가 제거되었다고 보고하였다. 그러나 식물정화조에 체류시간을 4일 이상의 장기간으로 운영하는 미국의 경우에 총질소의 처리효율이 60% 이상이라고 한 것(이옥주, 2003)과 비교하면, 이은희 등의 연구결과는 1일 동안의 처리로 그보다 높은 처리효율을 나타내고 있다. 본 연구에서도 NO<sub>3</sub>-N 20ppm 처리구에서 4시간 체류 후에 55~58%가 제거되었고, 4일간 체류 후에는 79%가 제거되어, 이은희 등의 연구결과와 비교하면 단일 식물 식재에 의해 상당히 높은 처리효율을 나타낸 것이라고 할 수 있다.

본 연구에서 창포의 성장초기에서 생장기를 거쳐 성장최성기로 갈수록 질소와 인의 제거효과가 높게 나타났다. 이러한 결과는 수생식물은 생장기에 질소와 인을 흡수하고 고사한 다음 분해를 통해 수체로 유리되는 무기영양소의 공급원이 된다는 조강현(1992)의 보고, 그리고 질소와 인 및 기타 성분에서 식물의 생장과 비례하여 수질정화효과가 높아진 것은 수생식물 이식 후에 활착하는 기간에는 수질정화능력이 다소 떨어지고 활착 후 본격적으로 생장하면서부터 수질정화효과가 점진적으로 증진되기 때문이라는 분석(이옥주, 1999)과 같은 경향이었다.

본 연구에서 창포는 4일간 같은 포트에 체류시켰을 때 질소는 72%가 감소하였고, 인은 40%가 감소하였다. 이옥주(1999)는 7종의 수생식물을 이용한 수질정화효과에 관한 연구에서 식물을 20일 동안 재배하면서 5일간격으로 수질을 분석한 결과, 꽃창포의 경우 질소는 5일 경과 후에 25.64ppm에서 11.47ppm으로 55%, 10일 후에는 2.17ppm으로 92%까지 급격히 감소하였고, 그 이후에는 감소율이 둔화되었다고 하였다. 또 인은 5일 경과 후에 2.35ppm에서 1.06ppm으로 55%, 10일 경과 후에는 0.37ppm으로 84%까지 감소하였고, 그 이후에는 감소율이 둔화되었다고 보고한 바 있다. 이는 질소와 인의 시험농도가 각각 20ppm과 2ppm으로 이옥주의 연구와 비슷한 것을 고려한다면, 창포의 질소 제거효과는 꽃창포보다 우수하고, 인의 제거효과는 꽃창포와 비슷한 수준이라고 할 수 있다. 이러한 차이는 7종의 수생식물을 대상으로 한 시험에서 질소와 인의 흡수율이 10일까지는 식물들 사이에 많은 차이를 나타내어 식물의 생장 및 생활형에 따른 수질정화효과의 차이가 있음을 시사한 이옥주의 연구와 같은 경향이라고 할 수 있다. 이러한 식물간의 차이를 고려하여 환경관리공단은 주암호 인공습지 처리시스템을 위한 식물의 선정에서 습지 3개 단계와 연못으로 나누어 적정식물을 선발한 바 있는데, 초기의 높은 처리효율을 요구하는 습지 1단계에는 미나리와 고마리를 선정하였고, 습지 2단계에는 갈대와 애기부들을 중점적으로 식재하였으며, 하천형 자연습지인 습지 3단계에는 달뿌리풀을 선정하였고, 생태연못 부분에서는 어리연꽃·고마리·노랑꽃창포·금불초를 선정하여 단계적으로 식물에 의한 수질정화효과를 증진코자 하였다(이옥주, 2003).

결국 식물을 이용하여 수질오염의 개선코자 하는 많은 시험연구에서 그 처리효율이 다르게 나타난 것은 이용하는 식물의 종류·성장특성·영양소의 선택성, 단위면적당 식재수량, 유입수의 오염도와 양 등에 기인한 것이라고 할 수 있다.

또한 본 연구에서 질소는 성장최성기의 20ppm에서 4시간 체류 후에 58%의 제거율을 나타내었고 4일 동안 체류 후에는 79%의 제거율을 나타낸 반면, 인은 성장최성기 2ppm에서 4시간 체류 후에 25%와 4일 동안 체류 후에 약 40%의 제거율을 나타내어 질소의 약 절반 수준에 그쳤다. 이러한 결과는 4종의 수생식물에서 40일 경과 후에 질소는 90% 정도 제거하였고 인은 60% 정도 제거하였다는 이옥주(2003)의 연구결과와 비슷한 경향이었다. 이와 같이 질소에 비해 인의 제거효율이 낮은 이유는 식물체에 영양분으로 질소의 요구도가 더 높고(전만식과 김범철, 1998), 일반적으로 식물은 인보다 질소를 약

5~10배 빠른 속도로 흡수하기 때문이다(Boyd, 1969).

한편 본 연구는 제한된 범위 안에서 식물을 이용한 수질정화시설을 운용할 경우에 식물의 생육단계에 따라 유기물 제거효과에 어떤 차이가 있는지, 식물의 생육상태가 같은 조건에서 오염수를 체류시키는 시간에 따라 유기물의 제거효과가 어떻게 나타나는지의 경향을 구명하고자 한 것이기 때문에, 다양한 형태(시설의 규모, 식물의 식재량, 오염수의 유입량과 체류시간 등)의 실제 시설에서는 유기물 처리효과가 다양하게 도출될 수 있다고 사료된다. 즉 본 연구에서는 제한된 범위에서의 결과와 실제 시설에서의 결과 사이의 오차를 어느 정도로 예측할 것인지, 또 그 오차를 어떻게 보정할 것인지 등의 문제를 고려하지 못하였다. 따라서 이러한 문제는 앞으로 다양한 조건의 실제 정화시설을 만들어 비교하는 연구로 발전시켜야 할 과제라고 사료된다.

## 인용 문헌

- 권성환, 나규환, 이장훈(1996) 수생식물을 이용한 수질정화에 관한 연구. 한국위생학회지 22(3): 49-55.
- 김귀곤, 조동길(1999) 인공습지 조성 후 생물다양성 증진효과에 관한 연구(서울공고 생태연못을 중심으로). 한국조경학회지 27(3): 1-17.
- 김규식, 김복영, 조일환, 우기대, 박영대(1988) 축산폐수 정화를 위한 부레옥잠 이용 연구. 농시논문집 30: 39-45.
- 김복영, 김규식, 박영대(1988) 축산폐수의 오염물질 제거를 위한 수초선발 이용 연구. 한국환경농학회지 7: 111-116.
- 김복영, 이상규, 권장식, 소규호, 윤은호(1991) 부레옥잠에 의한 생활오수의 정화효과. 한국환경농학회지 10: 51-57.
- 김윤태(1999) 수생식물을 이용한 영양염류 제거에 관한 연구. 창원대학교 산업대학원 석사학위논문, 1-11쪽.
- 문영희, 박종민, 손재권, 김계환(2001) 만경강 상류지역 수질의 시기별 변화. 한국환경농학회지 20(4): 252-257.
- 박진식(2002) 부레옥잠과 미나리를 이용한 연속식 하수처리에서 COD, N 및 P의 제거. 한국환경농학회지 21: 144-148.
- 변종영, 김문규, 이종식(1985) 수생식물을 이용한 수질오염원 제거에 관한 연구. 제1부 부레옥잠의 유기물 제거효과 및 생장에 미치는 제요인. 한국잡초학회지 5: 143-148.
- 심우경, 백경종(2000) 하천 저수로 호안의 친환경적 조성기법의 개발(용인시 수지읍 정평천을 중심으로). 한국조경학회지 28(1): 83-91.
- 안윤주, 공동수(1995) 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. 대한환경공학회지 17: 593-603.
- 양홍모(2002) 하천수정화 근자연형 인공습지의 질소 및 인 초기처리수준. 환경친화적 댐건설 방향에 관한 심포지엄 및 추계 학술발표회, 98~101쪽.
- 이성영(2003) 동진강 상류지역의 수질조사연구. 전북대학교 농업개발대학원 석사학위논문, 30-33쪽.
- 이옥주(1999) 수생식물의 수질정화 효과에 관한 연구(꽃창포, 박하, 이삭물수세미, 큰피막이, 부들, 노랑어리꽃, 생이가래에 대하여). 한양대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 이옥주(2003) 자생 수생식물에 의한 수질정화효과-갈대, 흑삼릉, 백사, 자라풀을 중심으로-. 상명대학교 대학원 박사학위논문, 62-73쪽.
- 이은희, 이인숙, 정동선(2004) 친환경 식물 정화조 시스템 개발. 한국환경복원녹화기술학회지 7(4): 61-68.
- 이은희, 장하경(2000) 생태연못 조성을 위한 이론적 고찰 및 사례연못 평가. 한국환경복원녹화기술학회지 3(2): 10-23.
- 전만식, 김법철(1998) 부레옥잠의 수중 영양염 제거 잠재력에 관한 고찰. 한국환경생물학회지 17: 117-124.
- 조강현(1992) 팔당호에서 대형 수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환. 서울대 박사학위 논문, 165-233쪽.
- 최규창, 김남춘(1999) 자연형 하천 식생복원을 위한 달뿌리풀, 물억새, 솔새, 수크령의 녹화방법에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 2(2): 70-77.
- 최정권(1995) 도시 하천환경의 생태적 재생(하천의 미지형형성과정을 중심으로). 한국조경학회지 22(4): 191-197.
- 함용규(1996) 수생식물의 증식속 흡수능에 관한 연구. 순천향대학교 석사학위논문, 24-27쪽.
- Boyd, C. E. (1969) Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted water. *Economic Botany* 23: 95-103.
- Ghosh, D. and S. Sen. (1987) Ecological history of Calcutta's wetland conversion. *Environmental conservation* 14: 219-226.
- Grant, R. R. and R. Patrick(1970) In Two studies of *Tinicum Marsh*. *Tinicum marsh as a water purifier*. 105-123. The Conservation Foundation. Washington, D.C.
- Reddy, K. R. and W. F. Debusk(1987) Nutrient Storage Capabilities of Aquatic and Wetland Plants. *Magnolia Pub., Inc., Orlando, Fla.*
- Rogers, H. H. and D. E. Davis(1972) Nutrient Removal by Water hyacinth. *WeedScience* 20: 423.
- Sato, H. and T. Kando(1981) Biomass production of water hyacinth and its ability to remove inorganic minerals from water I. Effect of the concentration of culture solution on the rates of plant growth and nutrient uptake. *Jpn. J. Eol.* 31: 257-267.