KOR. J. ENVIRON. TOXICOL.
Vol. 11, No. 3~4, 23~32 (1996)

[報 文]

수생식물의 중금속 흡수능에 관한 연구

이 종 화 · 함 용 규 · 박 종 안

순천향대학교, 환경보건학과

Uptake Capacity of Heavy Metals by Water Plants

Jong-Wha Lee, Yong-Gyu Ham and Jong-An Park

Department of Environmental Health Science,
College of Natural Science, Soonchunhyang University

ABSTRACT

In this study, we investgated the uptake capacity of several water plants for heavy metals (lead and cadmium) in soil of rivers where are adjacent to a industrial complex in Chun-An city and in A-San city. We also examined the deposition pattern of heavy metal in plants.

The results are as follows:

1. The soil of river in Chun-An city was polluted more serious than that of A-San city. In Chun-An city, mean values of lead and cadmium contents in soil were 26.224±28.037 μg/g, and 0.854±1.127 μg/g, respectively.
2. Water plants examined in this study were *Sium suave* KITAGAWA, *Persicaria thunbergii* H. GROSS, *Phragmites japonica* STEUD, *Echinochloa crus-galli* var. *frumentacea* WIGHT and *Persicaria hydropiper* SPACH. Both metal contents of several water plants distributed in Chun-An city were higher than those in A-San city.

   In these plants, *Sium suave* showed the highest uptake capacity for lead and cadmium. The mean values of lead and cadmium contents in *Sium suave* were 40.957 ±29.577 μg/g and 1.930±1.076 μg/g, respectively. *Persicaria thunbergii* also showed a relatively high uptake capacity for both metal.
3. Correlation between metal contents in soil and water plants was high. In both cases of *Sium suave* and *Persicaria thunbergii* correlation coefficients were 0.605 and 0.549, respectively.
4. We analyzed lead and cadmium contents in root, stem and leaf of several water plants. Both metals were mostly deposited in root. Much of both metals were also deposited in leaf.

   From the results, we suggest that *Sium suave* KITAGAWA and *Persicaria thunbergii* H. GROSS can be used to reduce heavy metals from industrial waste water.

서 론

우리가 살고 있는 지구의 환경은 오염물질을 스스로 정화시킬 수 있는 자연정화(self purification) 능력을 지니고 있다.

지구 표면의 물, 식물, 미생물 그리고 대기의 상호

작용은 물리적, 화학적, 생물학적인 과정을 통하여 인간활동에 의해서 또는 자연적으로 발생되는 여러 가지 오염물질을 처리하여 정화시키고 있다.[1]

최근 산업화와 도시 인구집중화로 인해 각종 공장폐수와 생활하수가 하천 및 호소를 오염시키고 있다. 호소의 부영양화, 독성 유기물 및 중금속에 의한 하천의 오염 등으로 우리의 수자원이 오염되고 있어 이를 처리하기 위해서는 많은 처리비용이 요구되며 국민들 또한 수도물에 대한 불신이 가중되고 있다.[1]

현재 선진국에서는 zero discharge라는 목적하에 고도처리를 할 수 있는 기계적 처리시스템을 모색하여 왔으나 경제적 난점 때문에 기계적 폐수 및 하수 처리 시스템의 대체 방안으로 자연정화 방법이 많이 연구되고 있으며, 최근 국내·외에서 수생식물을 이용한 수처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2-6] 이는 물리·화학적 처리에 비해 그 소요경비가 저렴하고 미생물학적 처리에 비해 가시적이란 장점을 지니고 있다.[7] 지금까지 다양한 수생생물(바다조류, *Fucus serratus*, *Fucus spirilus*, *Laminaria digitata* 등); 수중식물 *Salvinia* sp., *Eichornia crassipes*, *Lemna* sp., *Eleocharia* 등)에 의한 부영양화 물질(N, P), 수중 유기물 및 중금속 흡수 등에 대한 연구가 진행되어 그것의 실용화의 가능성에 대한 방안들이 강구 중이다.[8] 또한 Reed 등[9]은 수질오염물질 제거에 이용되는 수생식물에는 부수식물, 정수식물, 침수식물의 3가지가 있으며, 이러한 식물이 처리 할 수 있는 오염물질로는 BOD, COD, SS, 영양염류(N, P, Ca, Na, K), 독성물질 등이 보고되고 있다. Tobin 등은 바다조류(*Fucus serratus*, *Fucus spirilis*, *Laminaria digitata*)를 이용한 수중의 중금속 흡수 등을 조사하여 수생조류에 의한 수처리 가능성을 제시했다.[10,11]

국내에서는 국립환경연구원,[12] 이종식[13] 등이 부레옥잠에 대하여 연구한 바가 있으며, 안유진[14]이 생이가래를 이용한 호소 부영양화의 주된 물질인 인과 질소의 제거효과에 대한 연구를 토대로 생이가래는 수질정화능이 있으며 하수처리장 및 농촌지역에 적용할 수 있다고 보고하고 있고, 노재수[15]는 오염된 지역에서 생장하는 다년생 식물의 중금속과 토양중 중금속 함량간의 상관관계를 알 수 있다고 보고하였다. 그러나 국내에서는 수생식물에 의한 독성 중금속의 수질정화능에 대한 연구는 부족한 상태이다. 중금속은 소량으로 인체에 치명적인 해를 입힐 수 있고 환경내에 잔류하여 농축된다는 사실이 알려지면서 커다란 문제로 부각되기 시작하였다.[16] 이러한 중금속은 주로 각종 공장의 폐수로부터 환경에 유입되는데 산업화의 진행과 더불어 폐수배출량도 증가하고 있는 실정이다.[16] 또한, 여러가지 환경오염물질과 달리 비분해성이므로 토양에 흡착될 경우 장기간 잔류, 축적되어 인간생활에 직접적인 문제를 야기시키고 있다.[17] 이에 우리나라에서도 폐수배출기준을 마련하여 수은, 납, 구리, 니켈, 크롬 등 대부분의 중금속이 환경중으로 유입되는 것을 규제하고 있으며, 이러한 규제대상물질을 배출하는 기업에서는 폐수처리 시설에 많은 비용을 투자하게 되었고, 이에 따라 기업에서는 이러한 폐수처리시설 설비에 따른 경제적인 부담을 갖게 되어 보다 경제적이며 효율적인 처리방법이 요구되게 되었다.[18,19]

이러한 인위적인 시설에 의한 처리법과 더불어 자연의 자정능력을 이용한 자연처리법이 함께 연구되어 왔는데, 토지를 이용한 자연처리법과 수생식물을 이용한 자연처리법이 이에 속한다. 그중 수생처리장치는 일반적으로 2차 또는 고도처리라 하며 유출수를 더욱 정화시키기 위한 처리에 사용되나, 일반적 수처리에도 사용이 가능하다. 자연처리법에서 사용되는 여러 공정에는 침강, 여과, 기체 전달, 흡착, 이온교환, 화학 침전, 화학적 산화, 생물학적 전환과 분해 및 자연생태계의 광합성, 광산화, 식물 섭취 등이 포함된다.[1] 자연처리법의 종류는 토지처리법과 수생처리법으로 크게 구분되며 토지처리법은 다시 저속법, 급속침투법, 지면관개법으로 세분되고 수생처리법은 인공습지법, 자연습지법, 수생식물처리법 등으로 세분된다.[20]

수생처리법은 설계, 운전 및 유지비가 저렴하고 고급 기술의 인력이 필요치 않으며 수확된 수초는 토양첨가제, 깔개짚개량제, 제지원료로 사용하기 위한 펄프, 가축사료, 퇴비화 등에 직접 이용되거나 또는 가공 후에 이용되는 장점이 있다. 그러나 넓은 토지가 필요하므로 도시보다는 강유역이나 광산폐수, 농촌지역에 적당하다.[21] 수처리에 이용되는 일반적인 식물로는 부들, 애기부들, 갈대, 사초 등이 있으며, 부레옥잠(water hyacinth), 부평초(duckweed) 등을 이용한 부유식물법과 algae, pondweed 등을 이용한 잠수식물법 및 부들, 애기부들, 갈대, 미나리 등을 이용한 창발성식물법 등으로 알려져 왔다.[20]

본 연구는 하·폐수처리에 대한 수생처리법 도입에

관한 연구의 일환으로 아산시 및 천안시에 소재하는 중금속 배출 공업단지의 인근 하천을 대상으로 하천의 중금속 오염도, 토양 및 본 연구 대상지역에 주로 서식하는 수생식물 중의 중금속 함량을 측정하고, 식물의 부위별 중금속 침착양상을 조사함으로써 수생식물을 이용한 각종 폐수중의 중금속 처리 가능성을 모색하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상 지역

본 연구에서 시료채취는 중금속 사용 사업장이 대단위로 위치한 천안시의 전자·금속제품 공단지역과 비교적 중금속 배출 공장이 적은 아산시의 공단지역에 인접한 하천 19곳에서 시료를 채취하였다. 천안시의 시료채취 지역의 주요 산업체 생산품은 반도체, 전자재료, 전기재료, 금속조립 제품, 파이프 등이었으며, 아산시의 경우는 화학약품, 섬유제품, 전자재료, 석재 등이다. 시료는 1996년 7월 1일부터 2개월 동안 채취하였다.

2. 시료채취 및 분석

시료는 수생식물, 토양, 하천수의 3종류로 나누어 채취하였으며, 각 시료중의 납과 카드뮴의 함량을 측정하였다.

1) 수생식물 중의 중금속 측정

수생식물중의 중금속 측정을 위한 시료채취는 각 지역에서 하천을 거슬러 올라가며 수생식물중 물띠(*Echinochloa crus-galli* var. *frumentacea* WIGHT), 개발나물(*Sium suave* KITAGAWA), 여뀌(*Persicaria hydropiper* SPACH), 고마리(*Persicaria thunbergii* H. GROSS), 달뿌리풀(*Phragmites japonica* STEUD) 5종류의 정수식물을 채취하여, 즉시 밀봉하여 실험실로 옮긴 후 증류수로 깨끗이 세척한 후 뿌리, 줄기 및 잎으로 나누어 105±5°C에서 4시간 건조 후 건중량(dry weight) 약 1g을 전자천평(Sartoris-A120s)으로 칭량하여 HNO_3와 $HClO_4$ (5:1)를 혼합한 혼합용액 10ml를 가한 후 시료가 2~3ml가 될 때까지 가열판 상에서 증발시키고, 반복하여 혼합용액 10ml를 가하여 상등액이 청명해질 때까지 회화한 후 산희석용액(HNO_3 5% : $HClO_4$ 1%)으로 최종 용액량을 10ml로 하여 원자흡수분광광도계(atomic absortionspectrophotometer, Shimadzu 6501-S)를 이용하여 불꽃법(flame method)으로 중금속(납과 카드뮴)을 측정하였다.

2) 토양 중의 중금속 측정

토양 중의 중금속 측정은 수생식물 채취시에 식물이 정착된 곳의 토양을 채취하여 밀봉한 후 실험실로 옮겨 2mm의 표준망체로 쳐서 풍건(風乾)하였다. 적당량(100~150g)을 취하여 환경오염공정시험법(1995)[24]에 따라 건조기에 넣고 105±5°C에서 4시간 건조시킨 후 건중량 약 10g을 전자천평(Sartoris A 120s)으로 칭량하여 식물중의 중금속 측정법과 동일하게 전처리한 후 원자흡수분광광도계로 측정하였다.

3) 하천수 중의 중금속 측정

하천수는 수생식물 채취지점에서 식물 채취 전에 300ml 채수병에 채수하여 밀폐한 후 자동주입장치(Shimadzu ASC-600)가 부착된 흑연로원자흡수분광광도계(Grafite Furnace AAS, Shimadzu 6501 S)를 이용하여 중금속을 측정하였다.

4) 원자흡수분광광도계의 분석조건

기기조건은 Table 1과 같으며, 하천수분석에 사용된 흑연로원자흡수분광광도계의 온도조건은 Table 2에 나타냈으며, 시료의 주입량은 10μl였다.

Table 1. Instrument setting condition for the determination of heavy metals in plants, soil and effluent by flame and graphite furnace AAS.

Instrument condition	Lead	Cadmium
Wavelength(nm)	283.3	228.8
Slit width(nm)	0.5	0.5
Background correction	D_2	D_2
Lamp current(mA)	10	8
Burner height(mm)	7	7

Table 2. Graphite furnace temperature program for determination of heavy metals in effluent.

Temperature	Lead	Cadmium
Drying Temp.(°C)	120~250	120~250
Ashing Temp.(°C)	400	300
Atomizing Temp.(°C)	1800	1700

Table 3. Lead and cadmium contents in soil and effluent.

	Lead		Cadmium	
	Chun-An	A-San	Chun-An	A-San
Effluent (ppb)	9.207±7.553	1.060±0.636	0.819±0.400	0.474±0.022
Soil (μg/g dry weight)	6.823±2.226	2.434±2.025	2.087±2.168	0.208±0.189

3. 시약 및 용기

1) 시 약

본 실험에 사용된 시약은 HNO_3 (동우반도체사, 70% 특급), $HClO_4$ (Merck, 70% 특급), 납과 카드뮴 표준용액 (Wako, 1000 ppm)이며, 기타 모든 시약은 특급시약을 사용하였다.

2) 용 기

용기 중 채수병은 polyethylene 재질의 300 ml병을 사용하였고, 표준용액 및 시약 조제에는 polyethylene 재질의 용량 플라스크를 사용하였으며, 사용된 모든 기구는 20% 묽은 질산에 24시간 담가두고 초순수에 24시간 담근 후 세척하여, 건조기에서 완전히 건조한 후 사용하였다.

4. 자료분석

결과치는 SAS (release 6.03)와 Microsoft-Excel (Microsoft社 Version 5.0)로 통계처리하였으며, 수생식물 각 종간에는 Kruskal-Wallis 검정을 하였고, 뿌리, 줄기, 잎간에는 ANOVA 검정을 하였다.

결 과

1. 하천수와 토양 중의 중금속 함량

천안천과 조목천의 하천수와 토양을 채취하여 중금속 함량을 분석한 결과를 Table 3에 나타냈다.

천안천 하천수의 납과 카드뮴 함량은 각각 9.207±7.553 ppb와 0.819±0.400 ppb였으며, 토양 중의 납과 카드뮴 함량은 각각 6.823±2.226 μg/g과 2.087±2.168 μg/g이었다. 아산시의 조목천 하천수의 경우 납과 카드뮴 함량은 각각 2.434±2.025 ppb와 0.474±0.022 ppb였으며, 토양 중의 납과 카드뮴 함량은 각각 1.060±0.636 μg/g과 0.208±0.189 μg/g이었다. 중금속을 함유한 폐수를 배출하는 공장이 많은 천안천은 조목천보다 중금속으로 심하게 오염된 것으로 나타났다.

납의 경우 하천수와 토양 중의 함량간에는 천안천이 r=0.903으로 높은 정상관도를 보였으나 조목천에서는 0.045로 낮은 상관성을 보였다. 카드뮴의 경우는

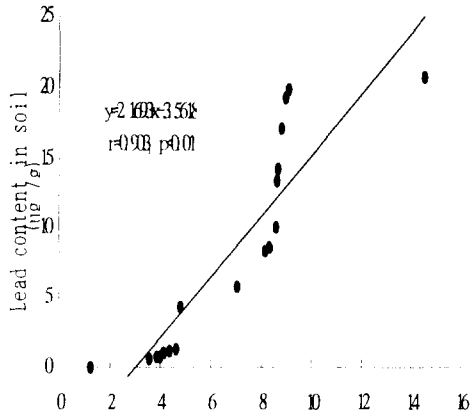


Fig. 1. Correlation between lead content in soil and effluent.

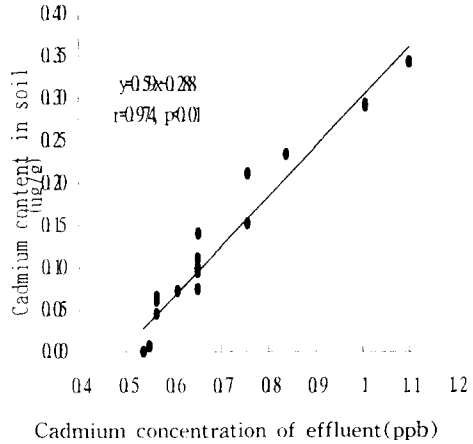


Fig. 2. Correlation between cadmium content in soil and effluent.

천안천이 r=0.974로 높은 상관성을 보인 반면, 조목천은 0.212로 낮은 상관성을 보였다(Fig. 1~2).

2. 수생식물 중의 중금속 함량

천안천 및 조목천에서 채취한 수생식물 뿌리 중의 중금속 함량을 측정하여 Table 4에 나타냈다. 조사한 모든 수생식물(개발나물, 고마리, 달뿌리풀, 물띠, 여뀌)에서 천안천에 서식하는 수생식물 중의 중금속 함량이 아산시의 조목천보다 4~5배 정도 높게 나타났다.

본 연구에서 조사한 5종의 수생식물 중에서 개발나물과 고마리가 중금속을 많이 흡수하였다. 특히 개발나물이 중금속을 가장 많이 흡수하였으며, 개발나물 뿌리 중의 납과 카드뮴의 함량은 각각 40.957±29.577과 1.930±1.076이었다(Fig. 3, 4).

수생식물을 뿌리, 줄기, 잎의 세부분으로 나누어 분석한 결과를 Table 5와 Table 6에 나타냈다. 수생식물 각 부위별 중금속 함량간에는 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 뿌리에 가장 많은 중금속이 침착되었으며, 잎에도 비교적 많은 양의 중금속이 존재하였다(Fig. 5).

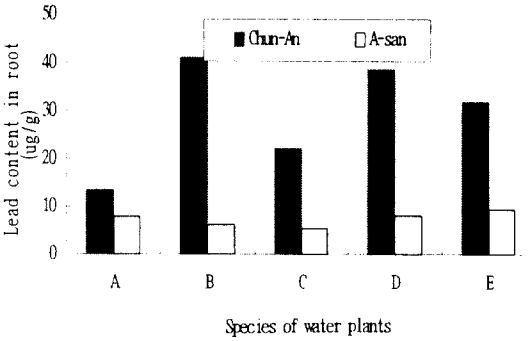
3. 토양과 수생식물 중의 중금속 함량의 상관성

중금속이 식물의 뿌리에 가장 많이 침착되는 것으로

Table 4. Lead and cadmium contents in root of water plants. (unit: μg/g dry weight)

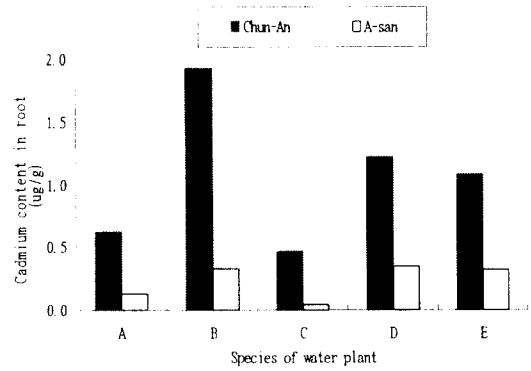
Plant sp.	Lead		Cadmium	
	Chun-An	A-San	Chun-An	A-San
A	13.418 ± 9.926	7.718 ±2.554	0.625 ±0.815	0.130 ±0.167
B	40.957 ±29.577	6.136 ±2.992	1.930 ±1.076	0.333 ±0.151
C	22.224 ±20.720	5.394 ±4.441	0.470 ±1.310	0.046 ±0.065
D	38.619 ±43.035	7.999 ±5.655	1.218 ±1.083	0.350 ±0.284
E	31.773 ±20.189	9.497 ±2.150	1.080 ±0.795	0.321 ±0.262
*	P<0.01	N.S.	N.S.	P<0.01

* : Kruskal-Wallis Analysis
A : *Echinochloa crus-galli* var. *frumentacea* WIGHT
B : *Sium suave* KITAGAWA
C : *Persicaria hydropiper* SPACH
D : *Persicaria thunbergii* H. GROSS
E : *Phragmites japonica* STEUD



A : *Echinochloa crus-galli* var.*frumentacea* WIGHT
B : *Sium suave* KITAGAWA
C : *Persicaria hydropiper* SPACH
D : *Persicaria thunbergii* H. GROSS
E : *Phragmites japonica* STEUD

Fig. 3. Lead contents in root of several water plants.



A : *Echinochloa crus-galli* var.*frumentacea* WIGHT
B : *Sium suave* KITAGAWA
C : *Persicaria hydropiper* SPACH
D : *Persicaria thunbergii* H. GROSS
E : *Phragmites japonica* STEUD

Fig. 4. Cadmium contents in root of several water plants.

관찰되었기 때문에 수생식물 중 뿌리와 토양간의 중금속 함량의 상관관계를 분석하여 Table 7과 Fig. 7~10에 나타냈다. 천안천에서 서식하는 식물 중 개발나물, 고마리와 달뿌리풀이 납을 가장 많이 흡수하였으며(각각 40.957±29.577, 38.619±43.035과 31.773±20.189), 개발나물, 고마리와 달뿌리풀이 카드뮴을 비슷한 수준으로 높게 흡수하였다(각각

Table 5. Heavy metals content in root, stem and leaf of water plants in Chun-An area.

(unit: μg/g dry weight)

Plant species	No. of Samples	Root		Stem		Leaf	
		Lead	Cadmium	Lead	Cadmium	Lead	Cadmium
A	21	13.418 ±9.926	0.625 ±0.815	5.247 ±3.642	0.150 ±0.212	11.675 ±11.252	0.439 ±0.536
B	21	40.957 ±29.577	1.930 ±1.076	2.836 ±2.194	1.109 ±0.140	8.084 ±8.625	0.955 ±0.762
C	12	22.224 ±20.720	0.470 ±1.310	4.845 ±0.424	0.237 ±0.419	9.541 ±2.726	0.253 ±0.844
D	24	38.619 ±22.29	1.218 ±1.083	7.187 ±4.239	0.577 ±0.293	19.759 ±16.850	0.908 ±0.054
E	12	31.773 ±20.819	1.080 ±0.795	8.642 ±3.608	0.533 ±0.192	11.395 ±2.608	0.477 ±0.146

Table 6. Heavy metals content in root, stem and leaf of water plants in A-San area.

(unit: μg/g dry weight)

Plant species	No. of Samples	Root		Stem		Leaf	
		Lead	Cadmium	Lead	Cadmium	Lead	Cadmium
A	12	7.718 ±2.554	0.130 ±0.167	1.972 ±0.921	0.036 ±0.051	3.375 ±1.090	0.076 ±0.107
B	13	6.136 ±2.992	0.333 ±0.151	3.130 ±1.596	0.133 ±0.092	5.123 ±1.310	0.250 ±0.112
C	6	5.394 ±4.440	0.046 ±0.065	1.574 ±0.778	0.073 ±0.103	3.300 ±3.237	0.079 ±0.112
D	16	7.999 ±5.655	0.350 ±0.284	2.546 ±0.505	0.030 ±0.042	4.758 ±0.359	0.124 ±0.107
E	5	9.497 ±2.150	0.321 ±0.262	6.077 ±3.310	0.008 ±0.011	5.380 ±2.854	0.112 ±0.020

A : *Echinochloa crus-galli* var.*frumentacea* WIGHT
B : *Sium suave* KITAGAWA
C : *Persicaria hydropiper* SPACH
D : *Persicaria thunbergii* H. GROSS
E : *Phragmites japonica* STEUD

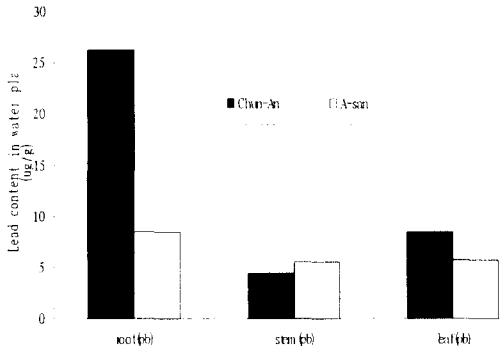


Fig. 5. Lead contents in root, stem and leaf.

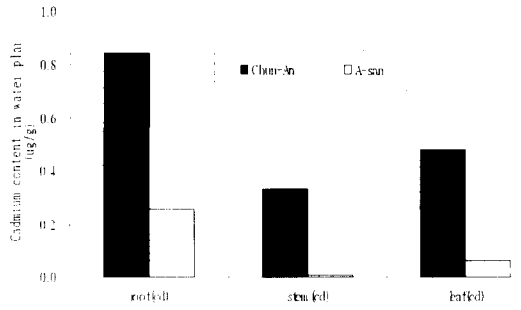


Fig. 6. Cadmium contents in root, stem and leaf.

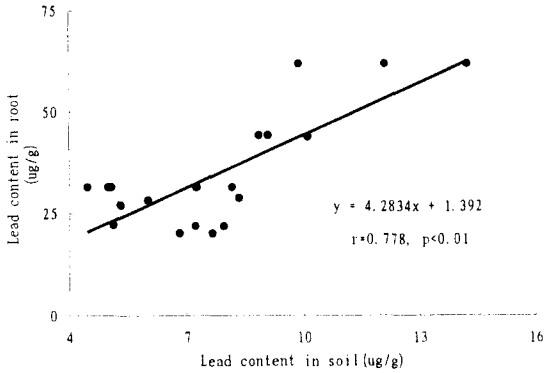


Fig. 7. Correlation between lead contents in soil and root of *Sium suave* KITAGAWA.

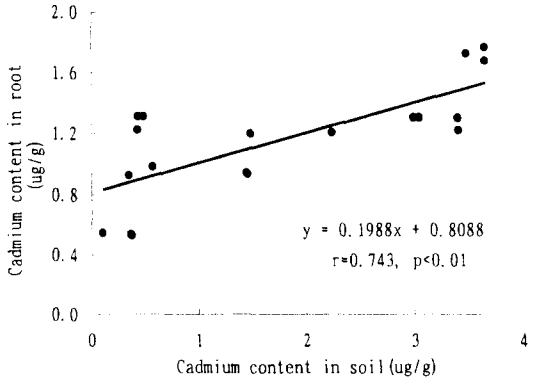


Fig. 9. Correlation between lead contents in soil and root of *Persicaria thunbergii* H. GROSS.

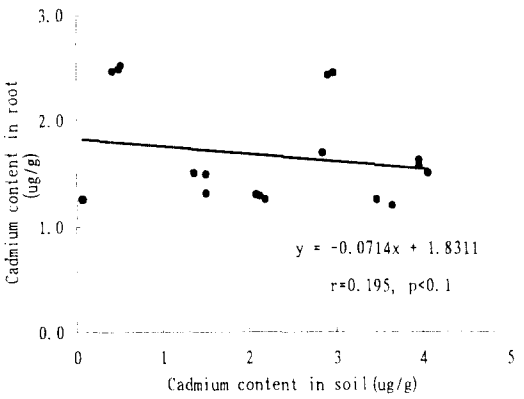


Fig. 8. Correlation between cadmium contents in soil and root of *Sium suave* KITAGAWA.

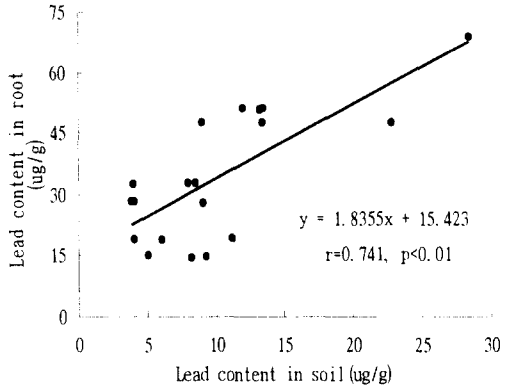


Fig. 10. Correlation between cadmium contents in soil and root of *Persicaria thunbergii* H. GROSS.

Table 7. Lead and Cadmium contents in soil and water plants. (unit: μg/g dry weight)

Plant species	Lead			Cadmium		
	Soil	Plant	Correlation	Soil	Plant	Correlation
A	6.692±2.411	13.418± 9.926	0.660	2.503±2.216	0.625±0.815	0.773**
B	5.975±1.199	40.957±29.577	0.778**	2.030±2.145	1.930±1.076	0.195
C	7.206±1.536	22.224±20.720	0.357	0.357±0.307	0.470±1.310	0.058
D	7.189±1.505	38.619±43.035	0.741**	2.110±2.181	1.218±1.083	0.743**
E	7.537±3.235	31.773±20.189	0.829**	0.308±0.348	1.080±0.795	0.923**

** : $p<0.01$

A : *Echinochloa crus-galli* var. *frumentacea* WIGHT

B : *Sium suave* KITAGAWA

C : *Persicaria hydropiper* SPACH

D : *Persicaria thunbergii* H. GROSS

E : *Phragmites japonica* STEUD

1.930±1.076, 1.218±1.083과 1.080±0.795). 전체 토양 중의 납과 카드뮴 함량은 각각 6.823±2.226과 2.087±2.168이었다. 식물과 토양간의 중금속 함량의 상관관계를 분석한 결과 납과 카드뮴 각각 r=0.558과 r=0.327로 나타났으며, 특히 납의 경우 고마리와 개발나물에서 각각 r=0.741, r=0.778로 매우 높은 상관도를 보였으며($p<0.01$), 카드뮴의 경우는 고마리와 달뿌리풀에서 각각 r=0.743과 r=0.923로 나타났다($p<0.01$).

고 찰

최근 산업화와 도시 인구집중화로 인해 각종 공장폐수와 생활하수가 하천 및 호소를 오염시키고 있다. 호소의 부영양화, 독성 유기물 및 중금속에 의한 하천의 오염 등으로 우리의 수자원이 오염되고 있어 이를 처리하기 위해서는 많은 처리비용이 요구되며, 국민들 또한 수도물에 대한 불신이 가중되고 있다.

현재 선진국에서는 zero discharge라는 목적하에 통상적인 2차 처리로 처리하지 못하는 부유물질이나 용존물질을 제거하기 위하여 고도적인 기계적 처리시스템을 모색하여 왔으나, 경제적 난점 때문에 기계적 폐수 및 하수 처리시스템의 대체 방안으로 자연정화방법이 많이 연구되고 있으며, 최근 국내·외에서 수생식물을 이용한 수처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[4~8]

수생식물과 매체를 이용하는 수처리 시스템은 root zone method (Luck *et al.*, 1991),[27] marsh bed, 습지 시스템 등으로 일컬어지는데 그 구성요소는 수생식물, 매체, 미생물이다.

수생식물은 각종 수질오염물(질산염, 인산염, 중금속 등)을 섭취하여 제거하는 수질정화능을 지니고 있을 뿐만 아니라 대기로부터 수중으로 산소를 공급하고 수리적 전도도를 증가시켜 수생 미생물의 수질 정화능을 증가시킨다. 즉, 수생식물에서 생성된 산소는 aerenchyma라고 부르는 가스교환조직를 통하여 잎에서부터 뿌리부분으로 확산되는데 뿌리에 부착된 호기성 미생물이 이를 이용한다. 또한, 수생식물은 매체의 수리적 전도도(media hydraulic conductivity)를 증가시킨다. 뿌리가 성장할수록 토양의 공극률이 증가되므로 수리적 전도도가 증가된다.

미생물은 매체와 식물뿌리에 부착되어 용존유기물을 직접 흡수하며 생물학적 분해작용도 한다.

이상과 같은 이유 때문에 최근 국내·외에서 수생식물을 이용한 수처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 실험실내에서 수처리능이 있는 것으로 여겨지는 몇가지 수생식물(부레옥잠, 물마름, 미나리 등)을 배양하여 각종 수질오염물의 제거능에 대한 연구를 통하여 긍정적인 결과를 얻었다. 그러나 중금속을 함유한 산업폐수를 배출하는 공단에 인접한 하천에 서식하는 수생식물의 중금속 섭취능과 토양, 하천수 및 수생식물 중의 중금속 함량간의 상관관계에 대한 연구는 많지않았다.

본 연구에서는 수생식물의 중금속 흡수능을 관찰하였으며, 수생식물이 서식하는 토양과 하천수 중의 중금속 함량을 측정하여 수생식물과의 상관관계를 분석하였고, 연구 결과를 토대로 수생식물을 이용한 각종 산업폐수 및 하수 중의 중금속 처리 가능성을 제시하고자 한다.

토양 중의 납 함량은 평균 6.827 μg/g로 김상구 등[23]이 보고한 3.905 μg/g (임야, 전답, 제방주변의 평균) 보다 약 2배 정도 높아 산업폐수에 의해 오염되었음을 보여주고 있다. 토양과 하천수간의 납 함량은 하천수의 함량이 9.207±7.553 ppb일 때 토양은 6.823±2.226 μg/g로 r=0.903인 높은 상관관계를 나타내 하천수의 함량이 높은 지역이 토양의 납함량도 높은 것을 알 수 있었다. 카드뮴의 경우는 하천수가 0.684±0.106 ppb일 때 토양이 2.087±2.168 μg/g로 r=0.045인 낮은 상관관계를 나타내 카드뮴의 경우는 하천수와 토양의 중금속 함량간에는 상관성이 적게 나타났다.

수종의 수생식물(개발나물, 고마리, 달뿌리풀, 물띠와 어뀌)을 뿌리, 줄기, 잎 세부분으로 나누어 중금속 함량을 측정한 결과 뿌리에서 가장 높게 나타났다. 잎의 중금속 함량이 줄기 보다 높게 조사되었다. 이는 뿌리로 흡수된 중금속이 줄기를 통하여 잎으로 이동되어 잎의 특이한 부위에 침착되거나 대기 중의 중금속이 잎으로 흡수됨으로서 나타나는 현상으로 사료되는데 이에 관해서는 앞으로 연구가 수행되어야 할 것이다. 뿌리에서의 중금속 평균 함량은 납의 경우 천안천이 26.224 μg/g으로 김상구 등[23]이 보고한 2.96 μg/g (쑥뿌리)보다 훨씬 높았으며, 카드뮴의 경우은 0.845 μg/g으로 김상구 등이 보고한 1.53 μg/g보다 낮은 것으로 보아 하천이 납으로 심하게 오염되었거나 조사한 수생식물이 납을 효과적으로 흡수하는 것으로 사료된다.

5종류의 수생식물 중에서 개발나물과 고마리가 납을 가장 많이 흡수하였으며(각각 40.957±29.577 μg/g과 38.619±43.035 μg/g), 개발나물과 고마리가 카드뮴을 비슷한 수준으로 높게 흡수하였다(각각 1.930±1.076 μg/g과 1.218±1.083 μg/g).

토양과 5종의 수생식물의 뿌리 중 중금속 함량간에 상관관계를 분석한 결과 납의 경우 r=0.558이며, 카드뮴의 경우는 r=0.327로 정상관도를 나타냈다. 이 결과에서 토양 중의 중금속 함량이 높아짐에 따라 수생식물중의 중금속 함량도 높아지는 것을 볼 수 있었다. 특히, 납의 경우 달뿌리풀과 개발나물이 각각 r=0.829와 r=0.778로 매우 높은 상관성을 보이고 있어 중금속이 함유된 각종 폐수와 하수의 자연정화법에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 카드뮴의 경우는 달뿌리풀, 물띠 및 개발고마리가 각각 r=0.923, r=0.773과 r=0.743으로 높은 상관성을 보였으며, 하천수 중의 카드뮴의 제거에는 고마리와 달뿌리풀이 이용 가능성을 나타냈다.

이상의 결과에서 조사된 공단지역에 인접한 하천의 토양은 중금속으로 심하게 오염되었으며, 서식하고 있는 수생식물 중의 중금속 함량도 매우 높았다. 조사한 5종의 수생식물 중에서 개발나물, 고마리와 달뿌리풀이 납과 카드뮴을 모두 효과적으로 흡수하였으며, 토양중의 중금속 함량과의 상관성도 매우 높아 수(水)중의 중금속처리에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 중금속 처리시의 자연정화법에 수생식물의 이용 가능성을 모색하고자, 천안시 공단지역과 아산시 공단 주변의 방류수, 토양, 수생식물 5종류를 채취하여 수생식물간, 하천수와 토양, 하천수와 수생식물, 토양과 수생식물간의 납과 카드뮴 농도를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수생식물 5종류를 뿌리, 줄기, 잎으로 나누어 중금속의 농도를 비교하여 본 결과 납의 경우 5종의 수생식물 모두 줄기, 잎, 뿌리 순으로 높게 나타났으며, 카드뮴의 경우도 비슷한 경향을 나타냈다.
2. 수생식물 중 개발나물, 고마리와 달뿌리풀이 납을 가장 많이 흡수하였으며(각각 40.957±29.577 μg/g, 38.619±43.035 μg/g과 31.773±20.189 μg/g), 개발나물, 고마리와 달뿌리풀이 카드뮴을 비슷한 수준으로 높게 흡수하였다(각각 1.930±1.076 μg/g, 1.218±1.083 μg/g과 1.080±0.795 μg/g).
3. 하천수와 토양간의 중금속 농도는 하천수의 농도가 높을수록 토양의 농도가 높아지는 경향이 나타났으며, 천안지역에서는 r=0.903, 아산지역에서는 r=0.045로 상관성이 나타났으며, 카드뮴의 경우는 천안지역이 r=0.974, 아산지역이 r=0.212로 나타났다.
4. 토양과 수생식물간의 중금속 농도 비교시 상관관계는 납의 경우 r=0.558이며, 카드뮴의 경우는 r=0.327로 높은 정상관도를 나타냈다. 이 결과에서 토양 중의 중금속 농도가 높아짐에 따라 수생식물중의 중금속 농도도 높아지는 것을 볼 수 있었다. 특히, 납의 경우 달뿌리풀, 개발나물 및 고마리는 각각 r=0.829, r=0.778과 r=0.741로 매우 높은 상관성을 보이고 있어, 중금속이 함유된 각종 폐수와 하수의 자연정화법에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 카드뮴의 경우는 달뿌리풀, 물띠 및 고마리가 각각 r=0.923, r=0.773과 r=0.743으로 높은 상관성을 보였으며, 하천수 중의 카드뮴의 제거에는 고마리와 달뿌리풀이 이용 가능성을 나타냈다.

본 연구에서 조사된 지역중 천안지역에 인접한 하천의 토양은 중금속으로 심하게 오염되었으며, 서식하고 있는 수생식물 중의 중금속 농도도 매우 높았다. 또한, 조사한 5종의 수생식물 중에서 개발나물과 고마리가 납과 카드뮴을 모두 효과적으로 흡수하고 토양중의 중금속 농도와의 상관성도 매우 높아 다른 종보다도 자연정화법을 이용한 중금속 처리에 이용될 수 있는 가능성이 나타났으며, 산업폐수중의 중금속처리에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 앞으로 남은 과제는 이용 가능성이 있는 개발나물과 고마리를 인공호소에 옮겨 재배시킨 후 중금속혼합물 첨가에 따른 중금속 제거효율을 관찰하여 폐수내의 중금속 처리에 실용화 될 수 있는 연구가 수행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Tchobanoglous G, Burton FL : *Natural treatment system waste water engineering; Treat-*

ment, disposal. McGraw-Hill Book Company, New York, 1991.
2. 과학기술처 : 호소 만입부에서의 조류대량 증식 제어기술 개발(2차년도 보고서). p.41, 1992.
3. Gorsuch TT : *The destruction of organic matter*. 1st ed., Pergemon Press, London, 1970.
4. Black LT : *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* **52**: 88, 1975.
5. Oron G, Porath D, Wildschut L : Wastewater treatment and renovation by different duckweed species. *J. Environ. Eng.* **112**:247, 1986.
6. Oron G, Willers H : Effect of waste quality on treatment efficiently with duckweed. *Water Sci. Technol.* **21**:639, 1989.
7. 과학기술처 : 호소 만입부에서의 조류대량 증식 제어기술 개발(1년도 보고서). p.83, 1991.
8. Boniardi N, Vatte G, Rota R, Nanoand G, Carra S : Removal of water pollutants by *Lemna gibba*. *Chemical Engineering Journal* **54**: B41-B46, 1990.
9. Reed SC et al. : *Natural systems for waste management and treatment*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
10. Wang HK et al : Bioaccumulation of nikel by algae. *Enviro. Sci. Technol.* **18**:106-109, 1984.
11. Tobin J et al. : Uptake of metal ions by *Rhizopus arrhizus* biomass. *Appl. Environ. Microbiol.* **47**:821-824.
12. 과학기술처, 상게서, 1991.
13. 이종식 : 부레옥잠의 수질오염원 제거에 관한 연구. 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 1986.
14. 안유진 : 생이가래를 이용한 수질오염물 제거연구. 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 1983.
15. 노재수, 금호강의 토양과 야생식물의 중금속 분석. 영남대학교 환경대학원 학위논문집, 1988.
16. 환경처 : 환경백서, 1993.
17. 송형달, 김두희 : 금호강유역의 수질·토양 및 무우의 중금속 함량. *경북대학교 산업개발연구소 연구보고* 12:131-144, 1984.
18. 과학기술처 : 산업폐수중 중금속처리기술에 관한 연구, pp.191-201, 1990.
19. 김동인, 김수생 : 폐수처리, 산업공해연구소, 서울, pp. 322-324, 1980.
20. 이병설, 정문호, 두옥주 : 미나리에 의한 수중 중금속 Cd과 Pb의 제거에 관한 연구. *한국환경위생학회지* **21**(1): 47-55, 1995.
21. EPA : Constructed wetland and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. *Design Manual*, EPA. 625. 1-88. 022. September, 1988.
22. 임성훈, 정문식, 박석환 : 커피찌꺼기를 이용한 폐수 중의 Pb, Cr, Cd의 제거에 관한 연구. *한국환경위생학회지* **21**(1):21-28, 1995.
23. 김상구, 장봉기, 이진우, 김두희 : 대구시내 및 인근지역의 토양과 쑥중의 중금속 함량. *경북대학교 환경과학연구소보* **7**:221-234, 1993.
24. 환경오염시험법 : 토양편, 1995.
25. 오혜정, 이종화, 박종안 : 흑연로원자흡수분광법에 의한 전혈중 카드뮴 분석. *한국산업위생학회지* **6**(2):301-312, 1996.
26. 이창복 : 대한식물도감. 향문사, 서울, 1985.
27. Metcalf & Eddy : *Wastewater engineering*, McGraw-Hill Company, New York, pp.692-293, 1979.
28. Conley LM, Dick RI, Lion LW : An assessment of the root zone method of wastewater treatment. *J WPCF* **63**(3), 1991.