

미나리 재배에 의한 중금속 오염수의 식물정화

박종선 · 신중두^{1)*} · 한성수 · 윤덕중

상지대학교 생명자원과학대학 응용식물학부, ¹⁾농업과학기술원 환경생태과
(2002년 5월 6일 접수, 2002년 6월 10 수리)

Phytoremediation Technology with Using Water Celery (*Oenanthe stolonifer DC.*) to Clean up Heavy Metals in the Contaminated Wastewater

Jong-Sun Park, Joung-Du Shin^{1)*}, Sung-Su Han, and Duck-Joong Yoon (Dept. of Applied Plant Sci., Sangji University, Wonju 220-130, Korea; ¹⁾National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea)

ABSTRACT: The removal rate of heavy metals from the wastewater, the accumulation and translocation of heavy metals in plants after transplanting, and the responses of water celery growth with different wastewater treatments were investigated to determine the potential ability of green-remediation with hydroponic culture of water celery. The removal rate and translocation of Cd, Cu, Ni and Pb from different wastewater to plants were compared with cultivation periods after transplanting. The removal rate of heavy metals from wastewater was different with each treatment, but increased with growing periods of water celery plants. The removal rate of Cd, Cu, Ni and Pb in Artificial solution, Artificial solution+EDTA, Munmark industrial wastewater, Jungsun minewater is ranged from 22 to 73%, from 28 to 100%, from 13 to 92% and from 41 to 100% at 6 days after transplanting, respectively. The translocations of Cd, Cu, Ni and Pb from roots to shoots in Artificial solution, Artificial solution+EDTA, Munmark industrial wastewater, Jungsun minewater are ranged from 14 to 28%, 8 to 30%, from 28 to 45% and from 2 to 15% at 12 days after transplanting, respectively. In plant growth responses, it appears to be inhibited the plant growth over all treatments excepts for Munmark industrial wastewater in these growing periods. Therefore the water celery might play a useful role in phytoremediation to clean up wastewater contaminated with Cd, Cu, Ni or Pb.

Key words: phytoremediation, removal rate, translocation, *Oenanthe stolonifer DC.*, heavy metals.

서 론

최근 급속한 산업화, 인구증가 및 도시화로 각종 오염물질의 증가와 이로 인한 환경오염이 심각한 사회문제로 대두되고 있는 실정이다. 중금속으로 오염된 토양에서 생육한 식물들은 중금속 성분을 많이 함유할 뿐만 아니라 작물생육에 피해를 입으며¹⁾ 특히 중금속이 작물의 체내에 축적되어 식품 및 사료를 오염시킴으로써 사람과 가축에 간접 중독증상을 일으켜 피해를 주는 경우가 있다²⁾. 중금속의 오염과 피해는 주로 광산미사, 광산폐수, 공장폐수, 도시오수, 자동차 매연 및 농약 등이 있다. 이들 오염원에 의해 농경지와 하천이 오염되고 나아가 중금속에 의해 공해병이 발생하게 되며, 그 대표적인 예로 Cd에 의한 “이따이 이따이” 병이 발생된다는 연구결

과가 있다³⁾. 우리나라에도 휴·폐광산 주변의 토양과 하천이 상당한 수준의 중금속으로 오염되어 있다는 보고가 있으며^{4,5)} 이들 지역에 대한 전국적인 조사와 연구가 이루어지고 있다. 그러나 오염원에 대한 정화기술은 고난도의 기술과 고비용을 요구하고 있으며 오염된 토양을 통상적인 공학적 기법을 이용하여 정화하는 데 소요되는 비용은 토양 1톤당 약 50~500 달러가 소요되는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

이에 반해 오염된 토양, 지하수 및 폐수를 처리하기 위해 새로이 부각되고 있는 식물학적 정화기술 (Phytoremediation)은 저기술 및 저비용을 요하는 기술이다⁷⁾. 식물학적 정화기술 (Phytoremediation)이란 단엽성 및 광엽성 초본과 목본성 식물을 이용하여 환경을 복원하는 기술을 말하며, 식물의 근권 주변에 자생하는 미생물이나 식물에 의한 오염원의 흡수, 분리 및 분해를 조장하는 모든 생물학적, 화학적 및 물리적 과정을 포함한다. 국내에서도 최근 Phytoremediation에 관한 관심이 고조되고 있으며 몇몇 연구자들에 의해 야생식물 중의

*연락처자:

Tel: +82-31-290-0206 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: jdshin@rda.go.kr

중금속함량 조사와 아울러 내성식물 탐색 등의 연구가 수행되고 있다. 그러나 연구의 대부분은 단일중금속에 대한 조사가 국한되어 있는 것이 대부분이었다. 실제 휴·폐광 금속광산 인근의 중금속오염 토양 및 유출수의 경우 2~3종 이상의 중금속이 복합적으로 오염된 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구는 미나리를 이용한 오염수 중의 중금속 성분에 대한 정화효과, 식물체중의 축적 및 이행관계를 검토하고자 본 시험을 수행하였다.

재료 및 방법

본 시험은 2001년 12월 10~22일까지 상지대학교 생명자원과학대학 부설 유리온실에서 수행하였고 대상식물로 미나리 (*Oenanthe stolonifer* DC.)를 사용하였다. 미나리는 육묘상에 마디 삼목하여 균일한 식물체를 7일 후 선발하여, Fig. 1에서 보는 바와 같이 순환식 수경재배 시스템을 만들어 정식 하였다. 폭 10 cm, 길이 2 m의 PVC 플라스틱에 20개의 hole에 각각 미나리 1본을 정식 하였으며, 한 처리에 3개의 육묘상을 두었다. 재배상내에 항상 물이 흐르고 미나리 뿌리가 오염처리수에 닿을 수 있도록 2 L/min. 단위로 순환펌프 하였다. 온실이 건조한 관계로 총 20 L 오염처리수 중 중금속 농도 산출시 매일 5%의 증발산량을 보정해 주었다.

처리내용으로는 순수한 증류수에 중금속을 처리 조제한 Artificial solution, Artificial solution에 EDTA를 첨가한 Artificial solution+EDTA, 문막 공업단지 폐수 (Munmark Industrial wastewater) 및 정선 낙동광산수 (Jungsun mine wastewater)였으며, Artificial solution에 처리한 중금속은 Cd, Cu, Ni 및 Pb 이었다. 처리수 및 식물체 시료는 미나리 정식 후 3시간, 9시간 및 2일 간격으로 시료를 채취하였다. 식물체는 생체중을 조사한 후 지상부위와 지하부위로 나누어 증류수로 3회에 걸쳐 세척한 후 80°C dry oven에 3일 동안 건조시킨 뒤 미세하게 마세한 다음 냉장 보관하였다. 미나리를 정식하기 전 처리용액의 중금속 농도는 Table 1과 같다. 용액 및 식물체내 중금속함량은 미국 EPA 표준분석법인 Method 3050A에 준하여 전처리 한 후 이온크로마토그래피 (ICP)를 이용하여

ND : 0.001 mg/L 이하 분석하였다. 시험구배치는 완전임의배치법 3반복으로 하였으며, 통계처리방법은 표준오차 및 Duncan's Multiple Range Test (p>0.05)로 하였다.

결과 및 고찰

미나리의 중금속 정화효과

미나리 정식 후 처리구 별로 Cd의 정화효율에 대한 경시적인 변화는 Fig. 2와 같다. 최초 미나리 정식전 Artificial solution과 문막 공업폐수 처리구의 Cd 농도는 각각 0.73, 0.48 mg/L이었으며, 정식후 6일에 오염처리수중 Cd의 농도는 0.35, 0.13 mg/L으로 각각 53, 73%가 감소하였다. 문막 공업폐수 처리구에서 현저하게 Cd의 농도가 감소된 것은 문막 공업폐수에 자양분이 함유되어 미나리 생육이 좋았기 때문인 것으로 판단되며, 정식 후 10일에는 모든 처리구에서 Cd이 거의 검출되지 않았다. 환경부 수질환경보전법에 의하면 제1급수 청정지역의 오염물질 배출허용기준에 Cd 농도는 0.02 mg/L 이하로 규정하고 있다. 본 시험의 모든 처리구에서 10일 이후에는 환경부 배출허용기준 이하의 수치로 나타났다. 따라서 오염처리수내 Cd 농도가 미나리 식재 10일 이후에는 배출허용기준치 이하로 정화되고 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

미나리 정식전 Artificial solution의 Cu 농도는 5.25 mg/L 이었고, 정식 후 6일에는 2.99 mg/L로 43% 감소하였다(Fig. 3). 문막 공업폐수도 정식 후 6일에는 Cu 정화효율성이 거의 100%로 나타났다. 제1급수인 청정지역의 오염물질 배출허용 기준에서 Cu 농도는 0.5 mg/L 이하로 본 시험에서 기준이 하도달시키는 각각 미나리 식재 후 오염처리수별로 10일, 12일, 3시간 후로 관측되었다.

Table 1. Heavy metal concentrations in original wastewater before transplanting (Unit : mg/L)

Treatment	pH	Cd	Cu	Ni	Pb
Artificial solution	2.3	0.73	5.25	0.99	2.11
Artificial solution +EDTA	2.2	0.68	5.19	0.96	2.37
Munmark Industrial wastewater	5.4	0.48	1.14	0.72	0.11
Jungsun minewater	7.0	0.06	0.01	0.01	ND

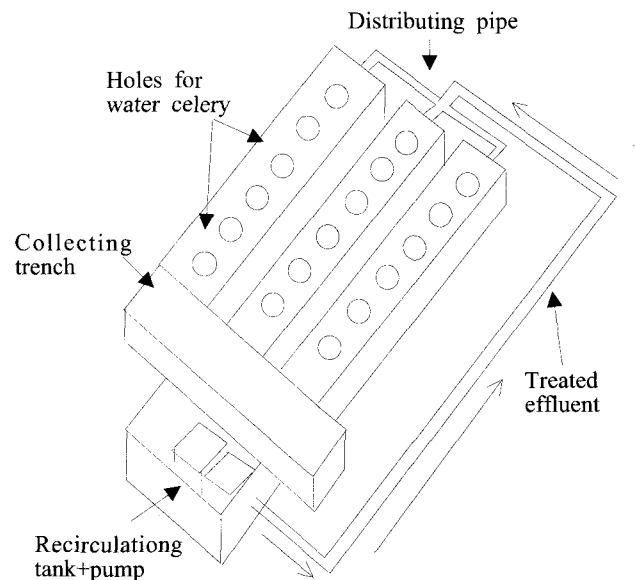


Fig. 1. Hydroponic culture system modified for this experiment.

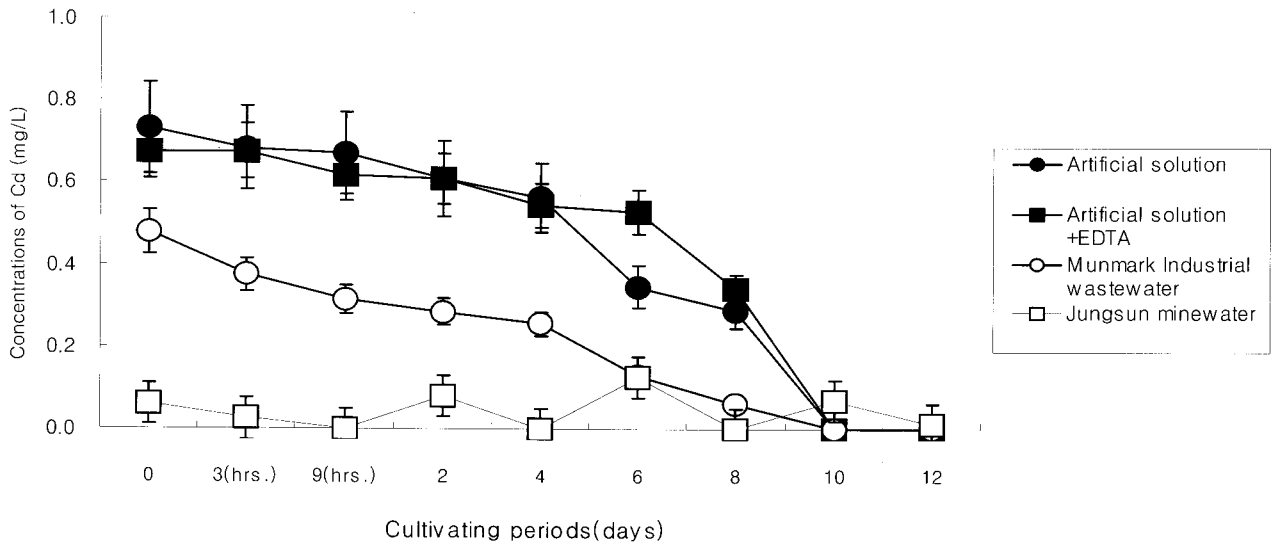


Fig. 2 Cd concentrations in the wastewaters with a different treatments after hydroponic culture with water celery. Vertical bars indicated the standard errors.

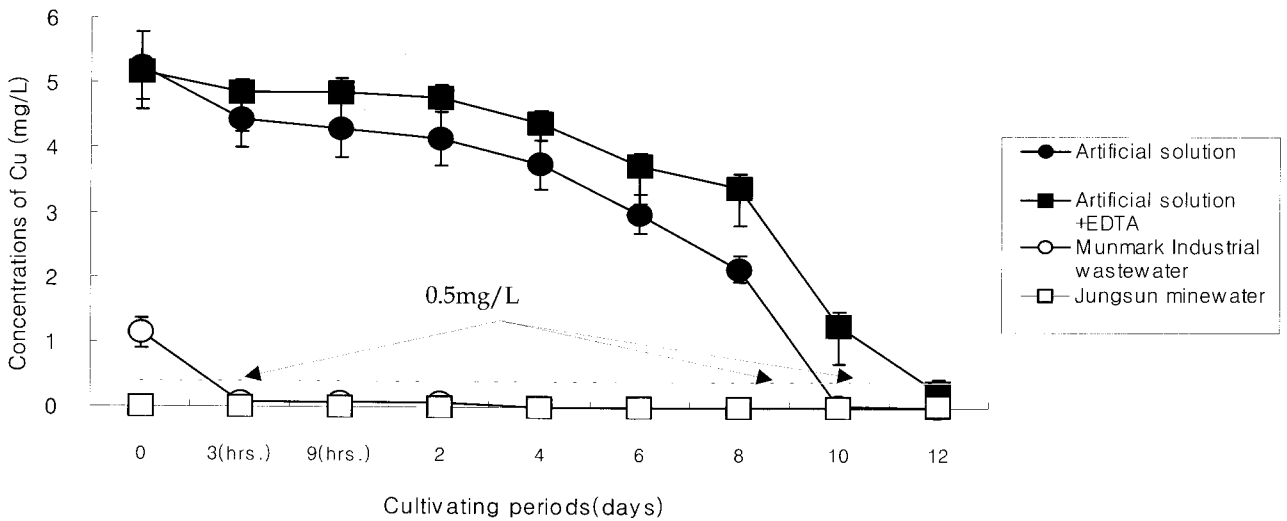


Fig. 3 Cu concentrations in the wastewaters with a different treatments after hydroponic culture with water celery. Vertical bars indicated the standard errors.

오염처리수 중의 Cd과 Cu에 대한 미나리의 정화효율을 비교해보면 Artificial solution + EDTA의 경우 정식 6일 후에 Cd 22%, Cu 28%로 감소하였다. 이러한 경향은 문막 공업폐수 처리구에서도 같은 경향이였다. 이러한 결과를 통해서 미나리는 Cd보다 Cu의 정화효율성이 높은 것을 알 수 있는데, 이는 토양 중에서 미나리의 중금속 정화효율성을 시험한 Lee 등⁹⁾도 비슷한 결과를 보고한 바 있다. 따라서 미나리는 Cd보다 Cu에 대한 제거효율이 높은 장점을 이용하면 Cu 오염지역에서 유용하게 적용할 수 있을 것으로 생각되었다. 오염처리수 중

Ni의 경우도 Cd, Cu와 마찬가지로 미나리 정식후 6일부터 중금속의 농도가 급격히 감소하는 경향이였다 (Fig. 4). 미나리 정식전 Artificial solution에서 오염처리수중 Ni의 농도는 0.99 mg/L였고 정식후 6일에는 0.79 mg/L으로 나타나 21% 감소하였다. Artificial solution+EDTA의 경우는 미나리 정식전 농도는 0.96 mg/L, 정식후 6일에는 0.84 mg/L로 나타나 13% 감소하였다. 따라서 본 실험에서 정식 후 6일까지의 미나리의 중금속 정화효율성은 Cu>Cd>Ni 순으로 나타났다. 오염처리수 중 Pb의 정화효율성에 대한 경시적인 변화는 Fig. 5와 같다.

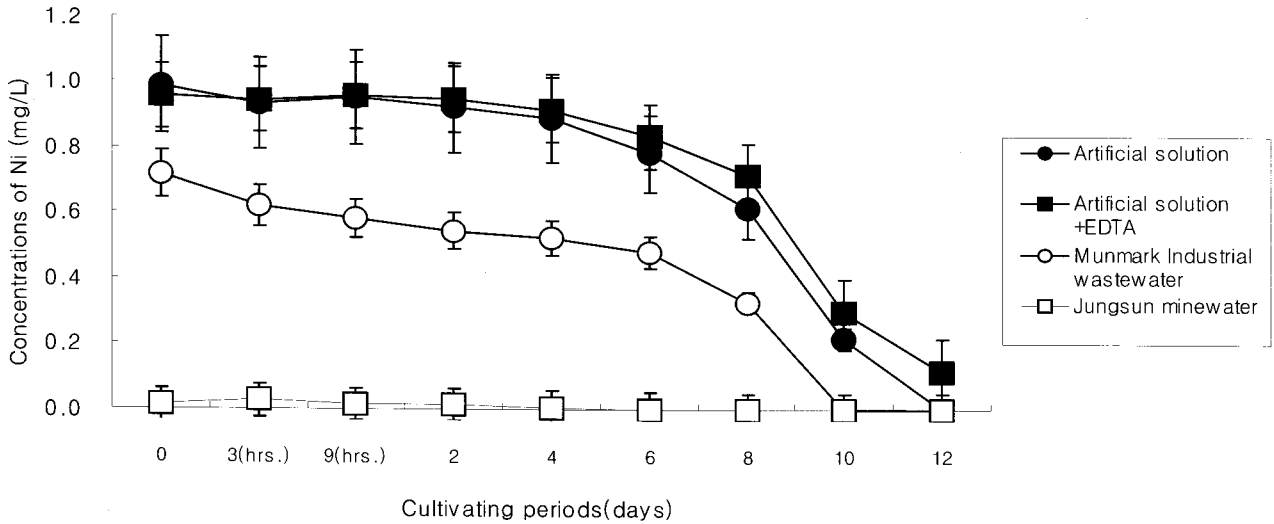


Fig. 4. Ni concentrations in the wastewaters with a different treatments after hydroponic culture with water celery. Vertical bars indicated the standard errors.

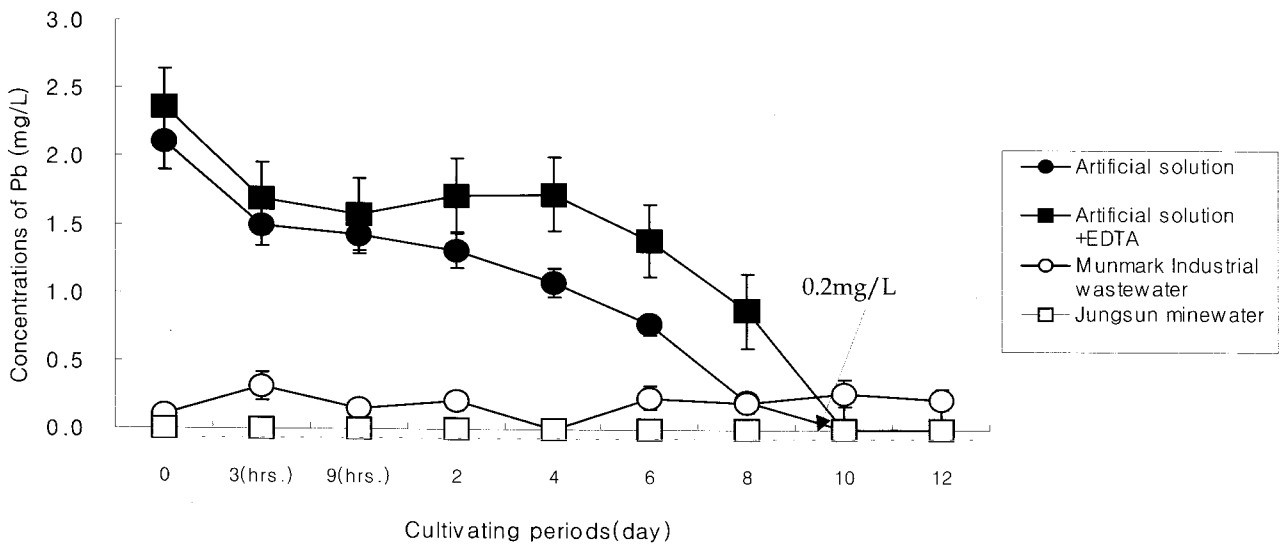


Fig. 5. Pb concentrations in the wastewaters with a different treatments after hydroponic culture with water celery. Vertical bars indicated the standard errors.

Artificial solution과 Artificial solution+EDTA에서 정식 전 Pb 농도는 2.11, 2.37 mg/L이었으며 정식 후 6일에는 각각 0.77 mg/L, 1.39 mg/L로 감소하였다.

이는 각각 63%, 41%로 Artificial solution 보다 Artificial solution+EDTA의 정화효율성이 낮게 나타났다. 이러한 정화 효율성의 경향은 Pb에서 뿐만 아니라 Cd, Cu 및 Ni 모두 같은 경향이었다. Huang and Cunningham⁸⁾은 Pb의 함량이 600 mg/kg을 함유하고 있는 토양에 EDTA를 처리하고 겨자 채의 일종인 Mustard (*Brassica juncea*)를 재배한 결과 채내

Pb 축적량을 1.5%까지 증가시킬 수 있으며, 다른 Cd, Cu 및 Ni에서도 비슷한 결과들을 관측하였다. 그렇지만 본 시험에서는 상반되는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 식물 종에 따라 EDTA의 반응이 다르게 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

환경부 수질환경보전법에 의하면 제 1급수 청정지역의 오염물질 배출허용기준에서 Pb 농도는 0.2 mg/L 이하로 규정하고 있는데, 시험결과 본 시험에서 환경부의 배출허용기준 이하 수치는 모든 처리구에서 10일 이후로 나타났다.

Table 2 Concentration of heavy metals in shoot and roots of water celery after transplanting

(Unit : mg/(kgDM))

Heavy metals	Treatments	Days after transplanting											
		Shoot						Roots					
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12
Cd	Artificial solution	0b	1a	1a	2a	7a	8a	20a	23b	20b	26b	26b	22c
	Artificial solution +EDTA	0b	0a	0a	0b	0b	4b	0c	15c	13c	31a	22c	24b
	Munmark Industrial wastewater	0b	0a	0a	0b	0b	1c	17b	62a	49a	27b	53a	0d
	Jungsun minewater	5a	0a	0a	0b	0b	0c	0c	14c	0d	0c	0d	98a
Cu	Artificial solution	45a	41a	39a	46a	60a	63a	319b	353c	367b	426c	551a	723a
	Artificial solution +EDTA	35b	33b	39a	41b	53c	43b	223c	382b	278c	448b	512b	483b
	Munmark Industrial wastewater	22c	19d	21c	19c	57b	19c	744a	952a	630a	549a	350c	48d
	Jungsun minewater	20d	21c	25b	17d	13d	44b	33d	35d	38d	29d	28d	112c
Ni	Artificial solution	9a	9a	10b	16a	15a	22a	36b	39b	39c	45c	38b	50a
	Artificial solution +EDTA	0b	7a	18a	13b	13b	19b	19c	33c	43b	47b	38b	49a
	Munmark Industrial wastewater	0b	2b	4c	5c	9c	10c	53a	84a	71a	64a	55a	12b
	Jungsun minewater	0b	1b	1d	0d	1d	1d	5d	14d	20d	2d	6c	50a
Pb	Artificial solution	9a	8a	6c	16c	11d	21b	128d	128d	71d	170c	145d	175c
	Artificial solution +EDTA	0c	3b	10b	22a	14c	4d	365a	179b	83c	145d	439a	194b
	Munmark Industrial wastewater	0c	0c	19a	20b	31a	33a	243b	139c	156b	175b	178c	223a
	Jungsun minewater	3b	2b	9b	5d	21b	19c	153c	255a	371a	340a	401b	110d

a-d : Within each cultivating periods, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level.

식물체내 중금속의 축적

Artificial solution 2개구, 공단폐수 및 광산침출수 등 4개 처리용액에 미나리를 정식한 후 식물체중 Cd, Cu, Ni 및 Pb 농도는 Table 2와 같다. Artificial solution에서 Cu 농도의 경우 지상부는 2일 경과 후에 44.5 mg/kg이었고, 12일 경과 후에도 63.0 mg/kg으로 나타났다. 뿌리에서는 2일, 12일에 각각 318.6 mg/kg, 722.9 mg/kg으로 생육기간이 지속될수록 식물

체중 중금속 함량이 증가하는 경향을 보였다. Cd, Ni 및 Pb도 같은 결과였다. 미나리 정식전 오염처리수의 중금속 농도에 비해 식물체 전체의 중금속 농도는 평균 90배, 최고 150배까지 높았다. 이러한 결과는 Yang and Lee¹⁰⁾의 연구에서도 상추 수경재배시 상추 잎에서만 중금속이 5~10배 식물체내에 축적된다는 보고와 일치하였다.

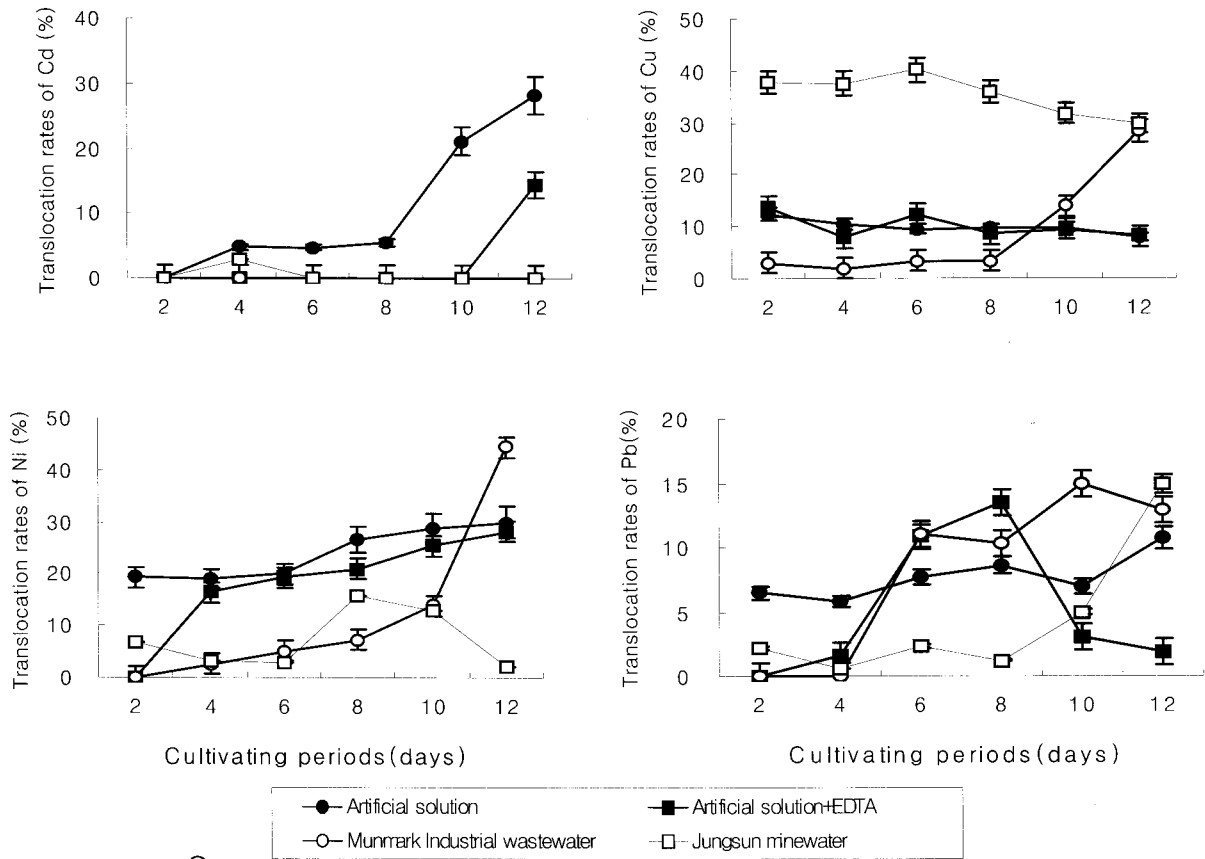


Fig. 6. Translocation rates of Cd, Cu, Ni and Pb from the roots to the shoots in water celery at different waste waters after transplanting into hydroponic system. Vertical bars indicated the standard errors.

식물체내 중금속의 이행

미나리 정식 후 처리내용별로 뿌리에서 지상부로 중금속의 이행관계를 지상부 농도에 뿌리농도의 비율로 나타낸 것이 Fig. 6과 같다. 정식 후 12일에 각 처리구에 대한 중금속의 이행율은 Cd의 경우 1~28%, Cu 10~32%, Ni 3~45%, Pb 3~15%로 나타났다. 이러한 결과는 Lee 등⁹⁾의 토양에서 미나리의 중금속 축적과 이행에 관한 보고와 비슷한 경향이었다. Yang and Lee¹⁰⁾은 상추의 수경재배시 Cd, Pb 및 Zn이 축적 이행된다고 하였고, Pb 농도 10 mg/L 처리의 경우 이행하는 이행율이 17%, Zn 농도 10 mg/L 처리는 이행율이 3%였다고 보고하였다.

EU는 채소류에 대한 카드뮴 잠정기준안¹¹⁾을 Cd의 경우 0.1 mg/kg, Pb의 경우는 0.5 mg/kg로 규정하고 있다. 또한 우리나라에서는 쌀에 대한 Cd 농도를 0.2 mg/kg로 규정하고 있고 식품오염기준 시안은 Pb 농도를 2.0 mg/kg로 규정하고 있다. 본 시험에서 문막 공업폐수 처리구의 경우 Cd는 미나리 정식 후 12일에 1 mg/kg이 뿌리에서 지상부로 이행되기 시작하였고 Pb의 경우 정식 후 6일에 0.5 mg/kg의 기준치 이상이 지상부위에서 검출되었다. 따라서 본 시험을 토대로 미나리를 이용한 오염수 정화시 미나리 4일 후부터 식용이 불가능하며,

따라서 4일 이상 오염처리수 정화처리에 오염된 식물체는 폐기물 처리법에 따라 폐기 또는 재활용에 대한 기술연구가 필요할 것으로 생각된다.

미나리의 생육반응

Table 3은 오염처리수 종류에 따른 미나리의 생육상태를 초장, 근장 및 건물중으로 나타낸 것이다. 초장에서 Artificial solution는 미나리 정식후 2일에 26.1 cm이고 12일에는 16.5 cm로 줄어드는 경향이지만 문막 공업폐수는 각각 24.4 cm, 30.7 cm로 늘어나는 경향이다. 근장에서도 Artificial solution는 미나리 정식후 2일에 23.8 cm이고 12일에 19.7 cm로 줄어드는 경향이지만 문막 공업폐수 처리구는 각각 11.6 cm, 14.8 cm로 늘어나는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 Artificial solution는 오염수 조제시 황산과 같은 산기 성분의 첨가로 인한 극 산성화 및 중류수내 양분결핍으로 인하여 미나리의 생육이 전반적으로 좋지 못한 것으로 생각된다. 이에 반해 문막 공업폐수는 낮은 중금속 농도로 인한 폐수의 약산성 및 폐수내 다량의 자양분 함유 등으로 인해서 생육이 향상된 것으로 판단된다 (Table 3). Yang and Lee¹⁰⁾는 중금속을 집중한 상추 수경재배에서 높은 중금속 농도일수록 상추 생육이

Table 3. Growth responses of water celery growth at different wastewater contaminated with heavy metals

Treatment	Days after transplanting						
	2	4	6	8	10	12	
Plant height (cm)	Artificial solution	26.1±3.4	26.7±2.3	22.3±3.0	22.1±1.2	24.7±2.4	16.5±2.2
	Artificial solution +EDTA	17.0±1.0	23.8±3.4	24.3±5.0	24.0±4.3	15.7±3.3	21.2±2.1
	Munmark Industrial wastewater	24.4±1.9	32.1±2.8	24.3±2.2	25.3±1.1	24.5±3.4	30.7±4.5
	Jungsun minewater	16.6±2.9	23.6±3.9	18.7±2.4	22.3±3.5	19.8±2.5	20.4±4.9
Root length (cm)	Artificial solution	23.8±2.2	29.5±4.5	29.0±3.3	27.6±6.4	25.7±4.1	19.7±2.4
	Artificial solution +EDTA	4.7±2.3	19.7±2.1	21.0±4.5	16.7±3.4	17.8±1.4	20.8±3.4
	Munmark Industrial wastewater	11.6±5.5	14.8±4.5	9.3±2.3	11.4±2.3	12.5±1.2	14.8±1.8
	Jungsun minewater	6.1±3.4	11.9±3.3	9.3±1.1	10.2±4.6	8.3±2.1	13.3±2.1
Dry weight (g/plant)	Artificial solution	0.4±0.21	0.5±0.10	1.0±0.01	0.4±0.1	0.3±0.09	0.3±0.19
	Artificial solution +EDTA	0.1±0.04	0.4±0.1	0.9±0.4	0.4±0.18	0.1±0.12	1.6±0.9
	Munmark Industrial wastewater	0.2±0.09	0.2±0.01	0.3±0.09	0.3±0.12	0.2±0.11	0.2±0.09
	Jungsun minewater	0.4±0.08	0.2±0.04	0.1±0.05	0.3±0.08	0.1±0.01	0.1±0.02

* : means ± standard error.

크게 억제되었다고 보고하였다.

요 약

중금속 오염원을 제거하는 기술을 개발하고자 미나리를 도입하여 중금속 종류에 따른 적정 농도별로 중금속 흡수, 정화효율성 및 식물체내에서 중금속 축적과 이행과정을 조사하였다. 미나리를 이용한 중금속 정화효율성은 Cd의 경우 미나리 정식 6일 후 Artificial solution 처리구와 문막 공업폐수 처리구는 각각 53%, 73%의 정화효율성을 보였으며, Cu의 경우에는 각각 28%, 100%의 정화효율성을 보였다. 환경부에서 규정한 Cd의 청정지역 배출허용기준인 0.02 mg/L은 모든 처

리구에서 10일 이후에 나타났으며, Cu의 기준농도인 0.5 mg/L은 Artificial solution 처리구의 경우 10일 이후, 문막 공업폐수 처리구는 3시간 이후에 나타났다. 또한 시간이 경과함에 따라 미나리내 중금속의 축적농도는 높아지는 경향을 보였으며, 처리구의 오염수 중금속 농도보다도 5~10배 이상 축적되었다. 미나리 식물체에 흡수된 중금속의 뿌리에서 지상부로의 이행율은 Artificial solution 처리구에서 Cd은 28%, 문막 공업폐수 처리구에서 Cu는 28% 이행하였다. 중금속에 대한 미나리의 생육반응은 문막 공업폐수 처리를 제외한 모든 처리구에서 미나리 생장이 억제되는 결과를 보였다. 따라서 본 연구결과 미나리는 중금속 오염수의 중금속 정화를 위한 식물정화기술에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 상지대학교 2001년도 교내연구비 지원에 의하여 수행하였다.

참고문헌

1. Kim, B. Y. (1995) Effect of heavy metal contents in upland soil on uptake by green onion and lettuce, and their growth, *Korean J. Environ. Agric.* 14, 253-262.
2. Jung, K. C., Kim, B. J. and Han, S. G. (1993) Survey on heavy metals contents in native plant near old zinc-mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 12, 105-111.
3. Study group on minamata disease (1968) Minamata disease, Kumamoto univ.
4. Kim, K. S., Kim, B. Y. and Park, Y. S. (1983) Effect of various cadmium compounds on the growth and cadmium uptake of rice paddy, *Korean J. Environ. Agric.* 2, 6-12.
5. Administration of environmental management in Wonju province (2000) Survey of contamination status to the abandoned metal mines.
6. Cunningham, S. D., Berti, W. R. and Huang, J. W. (1995) Phytoremediation of contaminated soils, *Trends Biotechnol.* 13, 393-397.
7. Kim, J. K. and Lee, S. W. (1999) Phytoremediation. Proceedings of the symposium on "Remediation Technology and Prospect" of the Korean society of Environ. Agric., p.57-88
8. Huang, J. W. and Cunningham, S. D. (1996) Lead phytoextraction: Species variation in lead uptake and translocation, *New Phytol.* 134, 75-84
9. Lee, M. S., Youn, S. Y., Yim, S. C., Park, H. J. and Shin, J. D. (1998) Bioremediation of heavy metals from the land application of industrial sewage sludge with water celery (*Oenanthe stolonifer* DC.) plant. *Plant Res.* 1, 53-59.
10. Yang, Y. J. and Lee, B. Y. (1990) Effect of heavy metal treatments on the growth and uptake in hydroponically cultured lettuce, *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 31, 37-41.
11. Council of Europe (1989) Joint FAO/WHO food standards programme codex committee on food additives and contaminants, 21st Session, p.337-350.