

수종 초본식물의 중금속 내성에 대한 연구

조도순·김준호*

가톨릭대학교 자연과학대학 생물학과, 서울대학교 자연과학대학 생물학과*

A Study on the Heavy Metal Tolerance in Several Herbaceous Plants

Cho, Do-Soon and Joon-Ho Kim*

Department of Biology, College of Natural Sciences, Catholic University

Department of Biology, College of Natural Sciences, Seoul National University*

ABSTRACT

Restoration of ecosystems degraded by heavy metal pollution can be accomplished by soil amendment and selection and utilization of plants tolerant to heavy metals. Two former zinc mine sites, Sambo Mine in Hwasung, Kyonggi-do and the Second Yonhwa Mine in Samchuk, Kangwon-do, were selected for collection of plant samples and for determination of heavy metal tolerant species. Dominant species on mine waste deposits in Hwasung site were *Panicum bisulcatum* and *Echinochloa crus-galli*, while those in Samchuk site were *Aster yomena*, *Setaria viridis*, *Artemisia lavandulaefolia* and *Oenothera odorata*. Mean contents of zinc, lead and cadmium in Hwasung soil were 103, 117 and 1 ppm, respectively, while those in Samchuk soil were 23, 6 and 4 ppm, respectively. Zinc contents were higher in *Echinochloa crus-galli* from Hwasung and in *Artemisia lavandulaefolia* from Samchuk, while lead contents were higher in *Panicum bisulcatum* and *Echinochloa crus-galli* from Hwasung and *Lactuca sonchifolia* and *Pinus densifolia* from Samchuk. Plant species with higher cadmium contents were *Panicum bisulcatum* and *Lactuca sonchifolia*. Comparison of metal contents between roots and shoots showed that *Echinochloa crus-galli* was a zinc accumulator, while *Panicum bisulcatum*, *Persicaria hydropiper*, *Pinus densiflora* and *Lactuca sonchifolia* were zinc excluders. In addition, *Panicum bisulcatum* and *Persicaria hydropiper* were proved to be lead excluders. When both heavy metal contents in plant tissues and biomass of individual plants are considered, it can be concluded that *Echinochloa crus-galli* and *Panicum bisulcatum* from Hwasung and *Artemisia lavandulaefolia* and *Aster yomena* are heavy metal absorbing plants. The effect of heavy metals on seed germination showed that *Artemisia princeps* var. *orientalis* had higher germination rates, but no significant difference in concomitant decrease of germination rates among the species investigated were found by increasing heavy metal contents.

Key words: Ecosystem restoration, Heavy metal tolerance, Herbaceous plants, Seed germination, Seedling growth

서 론

폐광 주변 및 공업단지 주변의 토양에는 높은 함량의 중금속이 함유되어 있으며 그 독성때문에 식생이 제대로 형성되지 못하고 있다. 그러나 일부의 식물은 중금속에 대하여 높은 내성을 가지고 있거나 중금속에 대한 내성이 유발되기도 한다 (Baker *et al.* 1986, Outridge and Hutchinson 1991).

중금속은 일반적으로 식물에 스트레스(stress)의 요인으로 작용하여 식물의 활력을 떨어뜨리거나 생장을 억제하게 된다. 중금속에 대한 반응은 예민성(sensitivity)과 저항성(resistance)으로 나눌 수 있는데 예민성은 스트레스가 식물에 상해를 입히거나 죽게하는 효과를 말하며 반면에 저항성은 식물이 중금속의 스트레스에 반응하여 얼마나 잘 생존하고 생식하는가를 말한다 (Larcher 1980).

저항성에는 두가지의 전략, 즉 회피(avoidance)와 내성(tolerance)이 있다. 회피는 식물이 스트레스의 영향으로 부터 외적으로 보호되는 것이고, 반면에 내성은 내적 스트레스의 영향으로 부터 생존할 수 있는 능력이라고 할 수 있다. 즉 내성은 높은 농도의 독성물질에도 불구하고 정상적인 대사활동을 영위할 수 있는 특수한 생리적 기작을 가지는 것을 말한다 (Levitt 1980).

중금속에 오염된 토양에 자라는 식물은 다음과 같이 3가지로 나눌 수 있다: 1. metallophyte (중금속내성식물)는 중금속에 오염된 장소에서만 나타나며, 2. pseudometallophyte(유사중금속내성식물)는 중금속에 오염된 장소뿐만 아니라 같은 지역내의 정상적인 토양에서도 함께 나타나고, 3. accidental metallophyte(우연중금속내성식물)는 중금속으로 오염된 장소에 간헐적으로 나타나거나 활력이 떨어지는 1년생식물과 ruderal(교란된 지역에만 사는 종)이 여기에 해당된다.

일반적으로 알려진 중금속 내성식물로서는 벼과 (Poaceae), 석죽과 (Caryophyllaceae), 꿀풀과 (Lamiaceae), 콩과 (Fabaceae) 등의 식물이 많이 알려져 있고 중금속의 종류에 따라서는 $Zn < Pb < Cu, Cd$ 의 순서로 독성이 강하다.

발아되지 않은 종자는 불리한 환경에서도 잘 견딜 수 있지만 발아기간 중에는 외부의 환경 스트레스에 매우 민감하여 발아 현상은 중금속에 대한 내성을 조사하는데 사용된다 (Wang 1991). 이러한 조사는 흔히 암소에서 이루어진다. 또한 어린 유식물(seedling)의 시기에도 발아시와 마찬가지로 외부의 환경에 매우 민감하기 때문에 유식물의 뿌리나 줄기의 생장을 내성의 지표로 사용할 수 있다 (Wilkins 1957, Turner *et al.* 1991).

중금속 중에서 가장 흔히 나타나는 것은 납과 아연인데 이 두 금속은 서로 함께 높게 존재하는 경우가 많다. 카드뮴은 납과 아연에 비해서 환경내의 농도는 낮지만 같은 농도에서는 훨씬 강한 독성을 나타낸다. 이 세가지 중금속 중 아연은 생물에 필수인 원소이지만 납과 카드뮴은 전혀 필요치 않는 독성 중금속이다. 중금속에 대한 연구는 이 3가지 원소에 관한 것들이 많이 있다.

근래에 우리의 자연환경은 산업의 발달에 따라 많이 파괴되었는데 현재 많은 생태학자들은 파괴된 생태계의 복원에 관심을 가지고 있다. 생태계의 복원에는 파괴된 토양의 회복 (Covert 1988, Sabey *et al.* 1990, Sheaker 1991) 뿐만 아니라 내성식물의 개발과 이용을 통해서도 이루어질 수 있다(Farago 1981). 이러한 내성식물은 높은 중금속 농도에도 견딜 뿐만 아니라 낮은 유기물 함량에도 강하기 때문에 특히 중금속 폐기물지대의 복원에 이용할 수 있다. 이 연구는 중금속으로 오염된 장소에 흔히 나타나는 초본 식물을 대상으로 중금속에 대한 내성을 조사하여

높은 중금속 농도로 인하여 식피가 불량한 중금속오염지역의 식생회복을 위한 중금속내성식물을 선발하는데 그 목적이 있다.

조사지소의 개황

본 실험에서는 광산지역으로 경기도 화성군 봉담면의 삼보광산과 강원도 삼척군 원덕면의 제2연화광산, 그리고 비광산지역으로 경기도 부천시 원미구 역곡동을 선택하였다.

삼보광산은 해방이전부터 납, 아연, 월정석을 채취해 왔는데 (박과 김 1983) 지금은 폐광되었으며 채광, 선광하고 남은 폐광석은 인공적으로 막은 두개의 독 안에 쌓여있다. 폐광석이 쌓인 곳에는 목본식물은 전혀 출현하고 있지 않으며 몇 종의 초본 식물만이 장소에 따라서 우세하게 나타나고 있다. 상부의 독 안쪽에는 비교적 여러 종의 초본이 나타나나 하부에 위치한 독 안의 폐광석 위에는 단지 수 종의 식물이 단일군집을 이루고 있다.

제2연화광산도 아연광이었으나 지금은 폐광되었으며 폐광석이 폐광부근의 계곡에 거대한 무더기로 쌓여 있는데 높은 중금속 함량과 수분부족으로 식물이 거의 자라지 못하고 있다. 폐광석 지대는 주위의 산림식생의 영향을 많이 받고 있어서 그 가장자리에는 숲가장자리에 흔히 나타나는 식물들을 볼 수 있어 출현 종수가 비교적 다양하다. 그러나 폐광석집하장의 가운데에는 낮은 수분함량으로 식물이 전혀 자라지 못하고 있다.

화성의 삼보광산의 폐광석 집적지에서 가장 흔히 나타나는 종은 미국개기장(*Panicum bisulcatum*) (중요치 34%)과 돌피(*Echinochloa crus-galli*) (중요치 33%)였으며 여뀌(*Persicaria hydropiper*) (중요치 13%)와 바랭이(*Digitaria sanguinalis*) (중요치 9%)도 비교적 많았다. 이곳은 폐광석이 작은 입자로 되어 있고 상부 독 안쪽의 저지대에는 물이 고여있어 수분함량의 경사가 잘 이루어져 있다. 식물의 피도는 매우 낮은 편이고 출현종수도 적다. 식물은 괴상분포를 이루고 있으며 하나의 방형구에서는 대체로 한 종이 집중적으로 우세한 경우가 대부분이다. 하부의 독 안에서는 식물의 종류가 더 단순하여 바랭이, 미국개기장, 돌피의 3종이 대부분을 차지하고 있다.

삼척의 제2연화광산의 폐광석 집적지의 가장자리에는 숲가장자리에 흔히 나타나는 식물들을 볼 수 있는데 이곳의 우점종은 쑥부쟁이(*Aster yomena*) (중요치 14%), 강아지풀(*Setaria viridis*) (중요치 12%), 참쑥(*Artemisia lavandulaefolia*) (중요치 10%), 달맞이꽃(*Oenothera odorata*) (중요치 8%) 등이다. 이곳에는 소나무, 사위질빵, 산딸기, 병꽃나무 등의 목본식물도 많이 나타난다. 이중에서도 소나무는 많은 수의 유식물이 자라고 있어서 폐광석 집하장의 가장자리는 소나무와 같은 건조에 비교적 강한 종의 목본이 점차 침입할 것으로 예상된다. 이곳의 초본은 화성의 삼보광산에 비해서 생산량이 높은 식물이 많이 나타나는데 이들로서는 쑥부쟁이, 참쑥, 산쑥, 달맞이꽃 등을 들 수 있다.

연구방법

식물의 종자 수집

1992년 10~12월에 강원도 삼척군 제2연화광산과 경기도 화성군 삼보광산의 폐광석 위에서 자라고 있는 식물의 종자를 채취하였다. 이들은 강아지풀, 미국개기장, 달맞이꽃, 새, 명아주, 억새, 참쑥, 산쑥, 등이다. 이들 종자는 발아에 대한 중금속의 영향조사와 발아후의 실생에 대한 생

장억제효과의 조사에 사용되었다.

중금속 함량의 측정

각 조사지소에서 우점하고 있는 식물을 1993년 8월에 채취하여 각 부위별 건조중량을 측정하였으며 건조된 시료의 식물체 부위별 중금속 함량을 아연, 납, 카드뮴에 대하여 측정하였다. 각 조사지소의 여러 장소에서 토양을 채취하여 식물체와의 함량관계를 살펴보았다. 토양은 음건시킨 후 1 g을 취하여 삼각플라스크에 넣고 25 ml의 1 N ammonium acetate 용액을 첨가한 후 30 분간 진탕시키고 Whatman No. 44 filter paper로 여과시켜 추출하였다 (Jackson 1967). 식물체는 각 부위별로 나눈 다음 80°C 항온기에서 24시간 건조시킨 후 0.2 g을 100 ml의 Kjeldahl flask에 넣고 1 ml의 진한 황산, 1 ml의 perchloric acid, 및 5 ml의 진한 질산을 넣어 습식분해시켰다. 분해된 시료는 Whatman No. 44 filter paper로 여과시킨 후 3차 증류수로 100 ml로 정용하였다. 추출된 토양과 식물체의 시료는 Schimadzu AA-680 atomic absorption spectrophotometer로 아연, 납 및 카드뮴을 정량하였다.

밭아와 유식물생장에 대한 중금속의 영향

폐광 주변 또는 공업단지 주변의 심하게 오염된 하천변 토양에도 높은 함량의 중금속이 함유되어 있는데 이곳에는 비교적 소수의 식물종이 우점하고 있다. 이들 우세하게 자라는 초본 식물을 대상으로 종자밭아 시험과 중금속 처리에 의한 유식물(seedlings)의 지하부 및 지상부 신장생장에 대한 영향을 측정함으로써 중금속내성식물을 선발할 수 있다. 밭아실험에서는 선정된 종의 종자를 15개씩 세어 filter paper를 깔아놓은 petri dish에 넣은 다음 중금속용액을 7ml씩 첨가한 후 25 ~ 26°C의 growth chamber에서 dark에서 5일간 밭아시켰다. 중금속으로서 아연, 납, 카드뮴을 처리하였으며 각 중금속에 대하여 0, 0.1, 1, 10, 30, 100 ppm의 6농도의 용액을 준비하였다. 각 실험은 4개의 반복으로 이루어졌다.

중금속에 의한 유식물의 신장생장을 조사하기 위하여 일주일간 growth chamber에서 배양한 유식물의 길이를 측정한 다음 petri dish에 옮겨고 3가지의 중금속을 0, 0.1, 1, 10, 100, 1000 ppm의 6농도로 처리하여 일주일간의 생장을 다시 측정한 후 종별 내성을 비교하였다.

결과 및 고찰

토양과 식물체의 중금속 함량

토양의 아연, 납 및 카드뮴의 함량은 Table 1과 같다. 아연과 납 함량은 화성의 삼보광산에서 함량이 매우 높게 나타났는데 특히 아연은 대부분이 40 ppm 이상이었고 장소에 따라 160 ppm

Table 1. Zinc, lead and cadmium concentrations in the soils of Puchon, Hwasung and Samchuk. Data represent mean \pm a standard deviation in ppm

Soil	Zinc	Lead	Cadmium
Puchon (n=5)	1.35 \pm 0.34	ND*	ND
Hwasung (n=8)	102.76 \pm 39.17	116.84 \pm 48.40	1.32 \pm 0.22
Samchuk (n=5)	22.62 \pm 10.77	6.07 \pm 3.32	4.11 \pm 1.07

* ND: not detectable

까지 나타났으며 납함량도 많게는 200 ppm 까지 나타났다. 한편 삼척의 제2연화광산의 토양은 아연의 함량은 비교적 높았지만 이는 화성의 삼보광산에 비하여 5배 정도 낮은 편이었다. 이에 비하여 대조구인 경기도 부천시 역곡동의 산림토양에서는 납과 카드뮴은 검출되지 않았으며 아연만이 미량으로 함유되어 있었다.

한편 화성과 삼척의 중금속 토양에서 자라는 식물의 아연 함량은 대체로 높게 나타났는데 여뀌 과실의 50 ppm에서부터 명아주 잎의 1800 ppm까지 변화가 많았다. 화성에서 아연의 함량이 높은 종은 돌피이었고 삼척에서는 참죽을 들 수 있다 (Table 2). 한편 납의 함량은 종과 식물체 부위에 따라 함량의 변화가 심하였는데 대체로 화성에서는 미국개기장과 돌피가 높게 나타났다. 삼척에서 납의 식물체 함량이 높은 종은 고들빼기와 소나무였다 (Table 3). 카드뮴의 함량은 화성의 식물이 삼척의 식물보다 높았고 두 지소에서 그 함량이 높은 종은 화성에서는 미국개기장, 삼척에서는 고들빼기였다 (Table 4).

중금속의 흡수와 식물체 부위간의 전이 및 축적은 중금속의 종류와 식물종에 따라서 달라진다. 토양속의 중금속에 대한 식물의 반응은 3가지로 나눌 수 있는데 이중 축적식물(accumulu-

Table 2. Zinc concentrations in some plant species in Hwasung and Samchuk. Data represent mean concentrations in ppm

	Root	Shoot	Stem	Leaf	Fruit
Hwasung					
<i>Panicum bisulcatum</i>	423.48	234.45	—	—	—
<i>Persicaria hydropiper</i>	649.78	—	237.64	548.16	113.03
<i>Chenopodium album</i>	345.73	—	306.24	1655.60	—
<i>Echinochloa crus-galli</i>	536.19	886.45	—	—	297.37
Samchuk					
<i>Artemisia montana</i>	207.14	287.30	—	—	—
<i>Artemisia capillaris</i>	186.97	336.81	—	—	—
<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	663.18	307.40	—	—	—
<i>Lactuca sonchifolia</i>	503.92	238.72	—	—	—
<i>Pinus densiflora</i>	742.64	217.64	—	—	—

Table 3. Lead concentrations in some plant species in Hwasung and Samchuk. Data represent mean concentrations in ppm

	Root	Shoot	Stem	Leaf	Fruit
Hwasung					
<i>Panicum bisulcatum</i>	126.03	51.27	—	—	—
<i>Persicaria hydropiper</i>	69.78	—	11.49	0.00	144.82
<i>Chenopodium album</i>	0.11	—	5.81	0.00	—
<i>Echinochloa crus-galli</i>	33.89	40.79	—	—	29.43
Samchuk					
<i>Artemisia montana</i>	10.92	0.00	—	—	—
<i>Artemisia capillaris</i>	0.00	4.65	—	—	—
<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	0.67	23.56	—	—	—
<i>Lactuca sonchifolia</i>	95.70	48.56	—	—	—
<i>Pinus densiflora</i>	50.49	68.16	—	—	—

Table 4. Cadmium concentrations in some plant species in Hwasung and Samchuk. Data represent mean concentrations in ppm

	Root	Shoot	Stem	Leaf	Fruit
Hwasung					
<i>Panicum bisulcatum</i>	24.22	15.80	—	—	—
<i>Persicaria hydropiper</i>	23.60	—	6.72	10.66	6.11
<i>Chenopodium album</i>	2.56	—	1.97	16.23	—
<i>Echinochloa crus-galli</i>	16.06	10.38	—	—	6.99
Samchuk					
<i>Artemisia montana</i>	2.45	9.26	—	—	—
<i>Artemisia capillaris</i>	1.52	3.77	—	—	—
<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	2.01	0.00	—	—	—
<i>Lactuca sonchifolia</i>	8.87	9.36	—	—	—
<i>Pinus densiflora</i>	4.93	0.00	—	—	—

tors)은 지상부가 높은 중금속함량을 가지는 경우이고 지시식물(indicators)은 지상부의 중금속함량이 토양속의 중금속함량에 비례하는 경우이며 차단식물(excluders)은 토양의 중금속함량이 다양하더라도 지상부의 함량은 일정하게 낮은 식물이다 (Baker 1981, Punz and Sieghardt 1993). 이 연구에서 화성의 돌피는 아연의 축적식물로 나타났으며 반면에 화성의 미국개기장, 여뀌 및 삼척의 소나무와 고들빼기, 참쑥 등은 아연의 차단식물로 나타났다 (Table 2). 한편 화성의 미국개기장과 여뀌는 남에 대해서도 차단식물로 판명되었다 (Table 3).

Chang and Mok (1977)은 삼척 제2연화광산 지대의 아연의 지표종을 *Sedum* sp. 와 패랭이꽃 (*Dianthus sinensis*)으로 밝히고 있는데 이들은 식물체에 1300 ~ 14000 ppm의 아연을 축적하고 있다고 보고하고 있다. 그러나 이 종들은 조사된 폐광석지대에서는 발견되지 않았으며 있다고 하더라도 생물량이 작기 때문에 이 지역의 생태계 복원에는 도움이 되지 않을 것으로 생각된다.

식물의 지하부/지상부 비율

식물은 일반적으로 환경이 불리할수록 지하부에 많은 에너지를 분배한다. 따라서 지상부/지하부의 비율(root/shoot ratio)은 종의 특성 뿐만 아니라 환경조건에 따라서도 달라진다. 화성과 삼척의 중금속지역에서 몇 종의 개체별 식물체 부위별 평균 건량과 지상부/지하부의 비율은 Table 5와 같다. 화성의 여뀌는 많은 토양수분을 필요로 하므로 지하경을 깊게 땅속에 묻고 있어서 지하부의 건물량(dry mass)이 같은 장소에 우점하고 있는 돌피나 미국개기장에 비하여 비교적 컸다.

한편 삼척의 제2연화광산에서의 폐광석 집적지에서는 폐광석의 입자가 크기 때문에 배수가 빨리 일어나 수분부족에 처하게 된다. 그러므로 이곳의 식물은 대체로 지하부의 건물량이 높아서 지상부/지하부 비율이 컸다.

식물체내의 중금속의 함량이 높을 수록 중금속에 대한 내성이 크다고 볼 수 있지만 종에 따라서 식물체 부위별로 함량의 변화가 많기 때문에 중금속을 많이 흡수하는 식물은 대체로 생물량이 큰 종으로 볼 수 있고 이들은 Table 5에서 보는 바와 같이 화성에서는 돌피, 미국개기장, 그리고 삼척에서는 참쑥, 산쑥, 쑥부쟁이 등이 여기에 해당될 것이다.

Table 5. Mean dry mass and root /shoot ratio in several species in Hwasung and Samchuk. Data are mean \pm a standard deviation

	Root (g /individual)	Shoot (g /individual)	Root /Shoot Ratio
Hwasung			
<i>Persicaria hydropiper</i>	1.626 \pm 0.602	7.676 \pm 3.354	0.240 \pm 0.118
<i>Echinochloa crus-galli</i>	1.364 \pm 0.465	13.831 \pm 5.079	0.103 \pm 0.028
<i>Panicum bisulcatum</i>	0.610 \pm 0.454	6.021 \pm 4.369	0.132 \pm 0.035
Samchuk			
<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	3.457 \pm 3.619	8.591 \pm 7.984	0.319 \pm 0.102
<i>Aster yomena</i>	2.106 \pm 1.966	8.809 \pm 7.639	0.237 \pm 0.039
<i>Artemisia capillaris</i>	0.928 \pm 0.486	5.502 \pm 2.917	0.180 \pm 0.035

Table 6. Effect of zinc on seed germination. Data represent mean \pm a standard deviation of the number of seeds germinated in a petri dish. Each petri dish contained 15 seeds. All the populations were from Hwasung site except the evening primrose (*Oenothera odorata*) population from a normal soil of Kyongan-chon, Yongin-gun, Kyonggi-do

Species	Zn concentration (ppm)					
	Control	0.1	1	10	30	100
<i>Chenopodium album</i>	0.50 \pm 0.87	0.50 \pm 0.50	0.75 \pm 0.83	0.50 \pm 0.87	0.25 \pm 0.43	ND*
<i>Panicum bisulcatum</i>	1.25 \pm 1.30	1.25 \pm 1.09	1.00 \pm 1.00	0.75 \pm 0.43	0.25 \pm 0.43	0.25 \pm 0.43
<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orinetalis</i>	8.75 \pm 1.09	8.75 \pm 1.79	8.50 \pm 1.50	9.75 \pm 1.43	8.50 \pm 1.80	8.00 \pm 2.12
<i>Oenothera odorata</i> (Hwasung)	3.00 \pm 1.41	0.25 \pm 0.43	1.00 \pm 0.71	1.75 \pm 0.83	0.50 \pm 0.50	1.00 \pm 1.22
<i>Oenothera odorata</i> (Yongin)	8.25 \pm 0.83	3.75 \pm 1.79	3.25 \pm 1.09	3.25 \pm 1.09	4.25 \pm 1.09	3.75 \pm 1.48

* ND; not detectable

Table 7. Effect of lead on seed germination. Data represent mean \pm a standard deviation of the number of seeds germinated in a petri dish. Each petri dish contained 15 seeds. All the populations were from Hwasung site except the evening primrose (*Oenothera odorata*) population from a normal soil of Kyongan-chon, Yongin-gun, Kyonggi-do

Species	Pb concentration (ppm)					
	Control	0.1	1	10	30	100
<i>Chenopodium album</i>	0.50 \pm 0.87	1.50 \pm 1.12	ND*	1.00 \pm 0.00	ND	1.50 \pm 0.87
<i>Panicum bisulcatum</i>	1.25 \pm 1.30	0.75 \pm 0.83	ND	1.00 \pm 0.71	0.75 \pm 0.83	1.25 \pm 0.43
<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>	8.75 \pm 1.09	7.50 \pm 0.50	8.50 \pm 1.50	8.75 \pm 0.83	10.00 \pm 1.58	9.00 \pm 1.58
<i>Oenothera odorata</i> (Hwasung)	3.00 \pm 1.41	0.50 \pm 0.50	0.25 \pm 0.43	0.25 \pm 0.43	0.50 \pm 0.50	0.75 \pm 0.43
<i>Oenothera odorata</i> (Yongin)	8.25 \pm 0.83	3.25 \pm 1.48	4.50 \pm 1.12	2.25 \pm 1.30	3.00 \pm 0.00	4.25 \pm 1.79

* ND; not detectable

발아에 미치는 중금속의 영향

Table 6~8은 아연과 납 및 카드뮴이 몇 종 식물의 발아에 미치는 영향을 보여주고 있다. 쑥은 조사된 5가지 중 중 발아에 있어서 중금속에 의한 영향을 가장 적게 받았다. 달맞이꽃의 경우 정상토양의 개체군은 아연과 납 처리구에서 중금속 토양에서 자라던 개체군에 비해서 발아율이 더 높았다 (Table 6, Table 7). 그러나 정상 개체군은 높은 카드뮴농도에서 발아율이 크게 떨어졌다 (Table 8). 같은 개체군의 경우 아연, 납, 카드뮴 중 동일한 농도 처리시 카드뮴이 발아를 가장 크게 억제하였고 그 다음이 납이었다. 아연은 모든 처리구간에서 농도에 관계없이 비슷한 영향을 보여주고 있었다 (Table 6).

유식물의 생장에 미치는 중금속의 영향

Table 9는 화성의 달맞이꽃 개체군의 생장에 미치는 아연, 납, 카드뮴의 영향을 조사한 것이다. 이 달맞이꽃 개체군에서는 어느정도 자란 유식물은 뿌리의 길이 생장이 뚜렷하지 않았다. 그리고 중금속의 종류나 농도에 따른 차이도 거의 찾아볼 수 없었다. 줄기는 뿌리보다 길이 생장이 활발하였는데 특히 대조구와 저농도처리구에서 생장이 왕성하였다.

Table 8. Effect of cadmium on the seed germination. Data represent mean \pm a standard deviation of the number of seeds germinated in a petri dish. Each petri dish contained 15 seeds. All the populations were from Hwasung site except the evening primrose (*Oenothera odorata*) population from a normal soil of Kyongan-chon, Yongin-gun, Kyonggi-do

Species	Cd concentration (ppm)					
	Control	0.1	1	10	30	100
<i>Chenopodium album</i>	50 \pm 0.87	ND*	0.25 \pm 0.43	ND		
<i>Panicum bisulcatum</i>	1.25 \pm 1.30	0.75 \pm 0.43	0.50 \pm 0.50	0.25 \pm 0.53	0.75 \pm 0.83	ND
<i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i>	8.75 \pm 1.09	8.00 \pm 2.35	9.00 \pm 2.45	10.25 \pm 0.83	9.25 \pm 2.87	5.25 \pm 1.48
<i>Oenothera odorata</i> (Hwasung)	3.00 \pm 1.41	1.00 \pm 0.71	0.75 \pm 0.83	1.00 \pm 0.71	1.00 \pm 0.71	0.50 \pm 0.50
<i>Oenothera odorata</i> (Yongin)	8.25 \pm 0.83	2.75 \pm 2.05	2.50 \pm 0.50	2.50 \pm 1.12	0.75 \pm 1.30	1.00 \pm 1.22

* ND: not detectable

Table 9. Effects of zinc, lead and cadmium on the root and shoot growth of seedlings of evening primrose (*Oenothera odorata*) population from the metal-contaminated soil of Hwasung. Data represent the ratio of mean length after treatment to that before treatment

Metal	Parts	Concentration (ppm)					
		Control	0.1	1	10	100	1000
Zinc	Root	1.05	1.00	1.06	1.04	1.06	1.04
	Shoot	1.57	1.20	1.08	1.16	1.21	0.98
Lead	Root	1.05	0.97	1.03	1.07	1.03	1.01
	Shoot	1.57	1.40	1.32	1.22	1.15	1.04
Cadmium	Root	1.05	1.04	0.89	1.03	0.93	0.99
	Shoot	1.57	1.20	1.03	1.34	1.13	1.00

Table 10. Effects of zinc, lead and cadmium on the root and shoot growth of seedlings of evening primrose (*Oenothera odorata*) population from the normal soil of Puchon. Data represent the ratio of mean length after treatment to that before treatment

Metal	Parts	Concentration (ppm)					
		Control	0.1	1	10	100	1000
Zinc	Root	1.01	0.92	1.07	1.02	0.96	0.92
	Shoot	1.12	1.19	0.98	1.22	1.10	1.00
Lead	Root	1.01	0.93	0.95	1.01	1.04	0.95
	Shoot	1.12	1.02	1.59	1.48	1.11	0.94
Cadmium	Root	1.01	0.95	0.83	0.99	0.86	0.96
	Shoot	1.12	1.59	1.22	1.00	1.13	0.81

Table 10은 부천의 달맞이꽃 개체군의 생장에 미치는 아연, 납, 카드뮴의 영향을 조사한 것인데 여기서도 유식물 뿌리의 길이 생장이 뚜렷하지 않았다. 줄기의 신장생장은 처리 중금속 농도 간에 변이가 심하였는데 고농도의 납과 카드뮴 처리구에서는 감소현상이 뚜렷이 나타났다.

유식물은 흔히 뿌리신장법(root elongation method) 등의 방법으로 선발한다. 뿌리신장법에서는 내성지수(tolerance index: 대조구의 뿌리신장 생장에 대한 처리구의 뿌리신장의 비율)를 산출하는데 본 조사에서는 뿌리의 생장이 미미하였으므로 줄기의 신장생장을 주로 살펴보았다.

화성과 부천과 두 달맞이꽃 개체군을 비교해보면 중금속내성에 대한 차이가 뚜렷이 나타나지 않는다. 이것은 아마도 달맞이꽃의 생리적 순응(acclimation) 능력이 크기 때문이라 볼 수 있고 뿐만 아니라 이 종은 많은 종자생산을 통해서 불리한 성장환경에서도 살아나갈 수 있는 것으로 여겨진다.

적 요

중금속으로 파괴된 생태계의 복원은 파괴된 토양의 회복과 중금속에 대한 내성식물의 개발과 이용을 통해서 이루어질 수 있다. 중금속 내성식물을 선발하기 위하여 경기도 화성군 봉담면의 삼보광산과 강원도 삼척군 원덕면의 제2연화광산에서 식물을 채취하였다. 화성 삼보광산의 폐광석 집적장의 우점종은 미국개기장과 돌피였고 삼척 제2연화광산의 폐광석 집적장의 우점종은 쑥부쟁이, 강아지풀, 참쑥, 달맞이꽃이었다. 화성의 토양은 아연, 납, 카드뮴의 함량이 각각 103, 117, 1 ppm으로 나타났고 삼척의 토양은 각각 23, 6, 4 ppm으로 나타났다. 식물체의 아연 함량은 화성의 돌피와 삼척의 참쑥이 높았고, 납은 화성의 미국개기장과 돌피 및 삼척의 고들빼기와 소나무가, 카드뮴은 화성의 미국개기장, 삼척의 고들빼기가 높았다. 식물체 지하부와 지상부의 중금속 함량을 비교한 결과 화성의 돌피는 아연의 축적식물로, 나타났고 화성의 미국개기장, 여뀌, 삼척의 소나무와 고들빼기, 참쑥은 아연의 차단식물로 판명되었다. 한편 화성의 미국개기장과 여뀌는 납에 대해서도 차단식물로 나타났다. 식물체의 중금속 함량과 생물량을 종합해보면 화성에서는 돌피와 미국개기장, 삼척에서는 참쑥, 산쑥, 쑥부쟁이가 중금속 흡수식물로 생각된다. 중금속에 대한 발아실험에서는 화성의 쑥이 발아율이 가장 높았지만 조사된 종 사이에 중금속 함량 증가에 따른 차이는 나타나지 않았다.

인용문헌

- 박봉규 · 김옥경. 1983. 식물체에 미치는 연, 아연(Pb, Zn)의 영향. 한국생태학회지 6: 98-105.
- Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. J. Pl. Nutr. 3: 643-654.
- Baker, A.J.M., C.R. Grant, M.H. Martin, S.C. Shaw and J. Whitebrook. 1986. Induction and loss of cadmium tolerance in *Holcus lanatus* L. and other grasses. New Phytol. 102: 575-587.
- Chang, N.K. and C.S. Mok. 1977. Physiological and ecological studies of the vegetation on ore deposits. 1. Zinc flora and indicator plants on the 2nd Yunhwa Mine. Korean J. Bot. 20: 45-52.
- Covert, C.J. 1988. Revegetation of abandoned acid coal mine spoil in south central Iowa. In J.J. Berger (ed.). Environmental Restoration. Island Press, Washington, D.C. pp. 128-136.
- Jackson, M.L. 1967. Soil chemical analysis. Prentice-Hall. 498p.
- Larcher, W. 1980. Physiological plant ecology (second edition). Springer, New York.
- Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stress (second edition). Academic Press, New York.
- Outridge, P.M. and T.C. Hutchinson. 1991. Induction of cadmium tolerance by acclimation transferred between ramets of the clonal fern *Salvinia minima* Baker. New Phytol. 117: 597-605.
- Punz, W.F. and H. Sieghardt. 1993. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. Environmental and Experimental Botany 33: 85-98.
- Sabey, B.R., R.L. Pendleton and B.L. Webb. 1990. Effect of municipal sewage sludge application on growth of two reclamation shrub species in copper mine spoils. J. Environ. Qual. 19: 580-586.
- Sheaker, E.M. 1991. Zinc, copper, cadmium, and lead in minespoil, water, and plants from reclaimed mine land amended with sewage sludge. Water, Air, and Soil Pollution 57-58: 849-859.
- Turner, A.P., N.M. Dickinson and N.W. Lepp. 1991. Indices of metal tolerance in trees. Water, Air, and Soil Pollution 57-58: 617-625.
- Wang, W. 1991. Literature review on higher plants for toxicity testing. Water, Air, and Soil Pollution 59: 381-400.
- Wilkins, D.A. 1957. A technique for the measurement of lead tolerance in plants. Nature 180: 37-38.

(1995년 1월 20일 접수)