

중금속이 애기장대의 생장과 종자발아에 미치는 영향

박 영 속 · 박 중 범
신라대학교 자연과학대학 생명과학과
(2001년 12월 26일 접수; 2002년 4월 20일 채택)

Effects of Heavy Metals on Growth and Seed Germination of *Arabidopsis thaliana*

Young-Suk Park and Jong-Bum Park
Department of Life Science, Silla University, Busan 617-736, Korea
(Manuscript received 26 December, 2001; accepted 20 April, 2002)

This experiment was carried out to investigate the effects of heavy metals (copper, cadmium, lead and chrome) on the growth of plant and seed germination of *Arabidopsis thaliana* treated with various concentrations of heavy metals. Cadmium and chrome among the 4 heavy metals had no effect on the growth of stem even in the concentration fifty times higher than the official standard concentration of pollutant exhaust notified by the Ministry of Environment. The official standard concentration of cadmium, however, stimulated the growth of stem in general, increasing leaf size and surface area, although it had no effect on the length of stem. But the growth of stem was decreased about 18% in the official standard concentration of pollutant exhaust of lead and copper. There was no growth of root in the concentration of lead and copper ten times higher than the official standard concentration. Cadmium and chrome had no effect on the seed germination, but lead and copper decreased the rate of seed germination. Seeds were not germinated in the concentration of copper ten times higher than the official standard concentration and in the concentration of lead fifty times higher than the official standard concentration. From this research three peculiar results were obtained. Chrome in the soil did not have much effect on the plant growth and seed germination of *Arabidopsis thaliana*. Cadmium stimulated the stem growth in an optimum concentration. But lead and copper reduced the plant growth and seed germination even in a small concentration, especially copper had the worse effect.

Key words : heavy metals, plant growth, root growth, seed germination, *Arabidopsis thaliana*

1. 서 론

오늘날 지구환경은 점점 오염되어 가고 있다. 날로 심해 가는 수질오염, 대기오염, 토양오염 등의 환경오염은 심각한 문제가 되고 있다. 특히 중금속은 물, 대기, 토양에서 유독한 수준으로 오염되어 있으며, 이러한 오염이 우리를 걱정하게 하는 것은 미량이라도 체내에 축적되면 잘 배설되지 않고 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내기 때문이다.¹⁾

중금속은 비중이 4.5이상인 모든 금속류를 말하며 일반적으로 생체 내로 흡수되면 생체 내 물질과

결합하여 잘 분해되지 않는 유기복합체를 형성하기 때문에 몸 밖으로 빨리 배출되지 않고 간장, 신장 등의 실질장기나 뼈에 축적되는 성질이 강한 물질이다. 중금속 중에서도 우리들이 특히 두려워하는 종류는 지각에 그 함량이 극히 적으면서 우리의 일상생활에 널리 쓰이고 있는 중금속들이다. 이런 이유로 수은, 구리, 아연, 카드뮴, 크롬 등은 독성이 강하고 자주 접할 수 있는 금속이기 때문에 중요한 환경오염 물질로 간주된다. 최근에는 대기오염에 의해 빗물의 산성화가 진행되어 여러 가지 문제점을 야기하고 있다. 빗물의 산성화는 토양이나 암석에서 중금속을 용출시켜 하천이나 호수의 중금속 농도를 높여 놓았고 중금속을 생물체가 이용하기 쉬운 형태로 변화시켜 먹이연쇄를 따라 중금속의

Corresponding Author ; Jong-Bum Park, Department of Life Science, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone : +82-51-309-5472
E-mail : jbpark@silla.ac.kr

농축이 용이하게 하였다.

중금속은 크게 아연, 철, 구리 및 코발트 등과 같이 생물체가 정상적인 생리 기능을 유지하기 위해 꼭 필요로 하는 필수중금속과 수은, 납, 카드뮴등과 같이 환경공해물질로서 생체에 해로운 영향을 미치는 유해중금속으로 구분된다.²⁾ 수은, 카드뮴, 납과 같은 유해중금속은 체내에 축적되는 성질이 강하기 때문에 오염된 토양 및 하천지역에서 자라나는 식물에서는 토양 및 하천에 오염되어 있는 중금속 양보다 500배정도 더 많은 양의 중금속이 검출되고 있다.

중금속이 식물의 생장에 미치는 영향은 다양하다. 카드뮴이 식물의 광합성 기능과 기공 기작에 손상을 주는 것과 같은 심각한 증상들이 나타남에 따라 이러한 중금속 오염을 감소시키거나 오염된 환경으로부터 중금속을 제거시키고자하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다.³⁻⁵⁾

십자화과 장대나물속의 일년생 초본식물인 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)는 그 크기가 작아서 좁은 공간의 실험실내에서나 멸균된 배양 배지에서 배양이 가능하다. 또한 하나의 식물로부터 많은 종자를 생산하며(한 식물당 10,000개), 고등식물 중 작은 genome을 가지고 있으며 (70~150 Mb), 식물체 전체의 유전자 지도가 완성된 최초의 고등식물이다. 또한 6-8주의 짧은 생활사를 가지고 있어서 유전학의 초파리나 미생물학에서의 대장균처럼 약 10여년전부터 식물학의 여러 분야에서 model plant로 광범위하게 이용되고 있는 실험재료이다.⁶⁻¹¹⁾

따라서 본 연구는 구리, 카드뮴, 크롬, 납과 같은 중금속 물질이 십자화과 초본식물인 애기장대의 생장과 발아에 미치는 영향을 조사하여 중금속이 고등식물의 생장에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다. 이러한 연구는 중금속에 오염된 식물의 생리적인 현상을 이해함으로써 이에 내성을 가지는 식물의 연구와 중금속의 제거에 대한 기초적인 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료식물

애기장대(*Arabidopsis thaliana*)의 생태형인 Col-O의 종자는 미국 Ohio State University의 Arabidopsis Biological Resource Center (ABRC)에서 분양받아 본 실험재료로 사용하였다.

2.2. 애기장대 식물의 배양

애기장대 종자를 peat moss와 질석, 펄라이트가 각각 1:1:1로 혼합된 인조 흙이 담긴 묘판에 파종한 후 랩을 씌워 2일 동안 4°C에서 저온처리한 다음

growth chamber에 옮겨서 배양하였다. Growth chamber내의 환경조건은 16 시간의 명처리와 8시간의 암처리로 조정된 광주기하에서 온도는 22±1°C로, 습도는 50-80%로 유지되도록 조절하여 주었다. 배양 약 2주 후면 싹이 나오는데 이때 랩을 제거하고 3-4일 마다 계속 수분상태를 점검하여 적절한 습도가 유지되도록 수시로 영양액(Table 1)을 공급하여 주었다.

Table 1. Compositions of the irrigation solution

Compound	ml/ℓ
1 M KNO ₃	5.0
1 M KH ₂ PO ₄	2.5
1 M MgSO ₄	2.0
1 M Ca(NO ₃) ₂	2.0
Fe-EDTA Stock*	2.5
Micronutrient Mix Stock**	1.0

* Fe-EDTA Stock; FeSO₄·7H₂O 5.5 mg/ℓ + NaEDTA 7.5 mg/ℓ

** Micronutrient Mix Stock; 70.0 mM H₃BO₃ + 14.0 mM MnCl₂ + 0.5 mM CuSO₄ + 1.0 mM ZnSO₄ + 0.2 mM NaMoO + 10.0 mM NaCl + 0.01 mM CoCl₂

2.3. 중금속 처리

애기장대 종자를 묘판에 파종한 후 growth chamber내에서 약 15일 정도 배양하여 어느 정도 성장한 애기장대에 구리, 납, 카드뮴, 크롬 4가지 종류의 중금속을 각각 3가지 농도로 처리하였다. 환경부에서 고시한 오염물질 배출기준치를 기준농도로 Cd, Cu, Cr, Pb를 각각 0.1, 3, 0.5, 1 mg/ℓ로 하였으며, 이보다 10배, 50배 높은 농도를 실험구로 하여 실험실에서 각 농도를 제조하여 1 L 영양액에 첨가하여 사용하였다(Table 2). 대조구로는 중금속 성분이 첨가되지 않은 영양액만을 사용하였다. 중금속 처리는 애기장대에 습도를 유지시키기 위하여 공급하여 주는 영양액에 각 중금속용액을 농도별로 첨가하여 애기장대에 공급하여 주었다.

Table 2. Concentrations of four kinds of heavy metals

Heavy Metal	Concentration (mg/ℓ)		
Cd	0.1	1	5
Cu	3	30	150
Cr	0.5	5	25
Pb	1	10	50

중금속이 애기장대의 성장과 종자발아에 미치는 영향

2.4. 식물생장 측정

(1) 줄기 성장 측정; 애기장대 종자를 묘판에 파종한 후 랩을 씌워 2일 동안 4°C에서 저온 처리한 다음 growth chamber에 옮겨서 배양하였다. Growth chamber에서 배양하는 동안 각각 다른 중금속 농도가 포함된 영양액과 중금속용액이 들어 있지 않은 영양액을 3~4일 간격으로 250 ml씩 공급하여 45일간 배양한 후 성체식물에서의 줄기의 길이를 측정하였다. 줄기의 길이는 최소 50 개체 이상을 측정하였으며 똑같은 실험을 2번 반복하여 평균치를 구하였다.

(2) 뿌리 성장 측정; 애기장대의 종자를 2% sodium hypochloride (NaOCl)용액으로 약 5분간 표면살균하고 멸균수로 5번 세척하였다. 세척된 종자는 각각 다른 중금속 농도가 포함된 고형 MS 배지¹²⁾와 중금속이 들어 있지 않은 고형 MS배지의 petri dish에 파종하여 2일 동안 4°C에서 저온 처리한 다음 growth chamber에서 배양하였다. 각 중금속 농도별로 3개의 petri dish를 준비하여 1개 petri dish에 20종자를 파종하였다. 파종 1주일 후 뿌리의 생장을 측정하였는데 똑같은 실험을 3번 반복하여 평균치를 구하였다.

고형 MS배지의 조성은 Murashige and Skoog 배지의 무기 영양소에 sucrose (30 g/L), myoinositol (100 g/L)의 유기영양소를 첨가하며, vitamine으로는 nicotinic acid (0.05 mg/l), pyridoxine-HCl (0.05 mg/l), thiamine-HCl (10 mg/l), glycine (0.2 mg/l)을 첨가하여 사용하였다(Table 3). 배지의 pH는 1N NaOH와 1N HCl을 사용하여 pH 5.7~5.8로 조절한 다음 Difco-bacto agar (10 g/L)를 첨가하여 녹인 뒤 121°C에서 15분간 고압멸균한 후 petri dish에 분주하였다.

2.5. 종자 발아율 측정

애기장대의 종자를 2% sodium hypochloride (NaOCl)용액으로 약 5분간 표면살균하고 멸균수로 5번 세척하였다. 세척된 종자는 각각 다른 농도의 중금속용액 8 ml으로 적셔진 여과지(5장)가 들어 있는 각각의 petri dish에 50 종자를 파종한 후 parafilm으로 밀봉하여 25±1°C로 유지된 incubator에서 배양하였다.

배양 3일 후부터 매일 발아율을 측정하였는데 똑같은 실험을 2번 반복하여 평균치를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 줄기와 잎의 성장상

애기장대를 growth chamber에서 배양하면서 습도유지를 위해 공급한 영양액속에 첨가한 4가지 중금속용액이 각 농도별로 식물의 줄기 성장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 1과 같다.

카드뮴을 각 농도별로 처리한 식물의 줄기 생장은 전체적으로 중금속을 처리하지 않은 정상식물 줄기와 비슷한 성장을 하였는데, 특히 오염물질 배출기준농도의 50배 높은 농도에서도 정상식물 줄기의 성장과 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 1). 이것은 카드뮴은 애기장대 식물의 줄기 성장에 별다른 영향을 미치지 않는다는 것을 나타내고 있다.

크롬은 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 높은 농도를 처리한 식물의 줄기 생장은 정상식물과 거의 비슷하였으나 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도에서는 줄기 생장이 약 18% 감소되었다. 이것은 크롬은 오염물질 배출기준농도의 10배까지는 줄기 성장에 아무런 영향을 미치지 않았으나 이보다 50배 높은 고농도는 줄기 성장을 어느정도 억제하였음을 나타내고 있다(Fig. 1).

Table 3. Compositions of the solidified MS media

Compound	mg/l	Compound	mg/l
(NH ₄)NO ₃	1,650	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.25
KNO ₃	1,900	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.025
CaCl ₂ ·2H ₂ O	440	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.025
MgSO ₄ ·6H ₂ O	370	glycine	0.2
KH ₂ PO ₄	170	nicotinic acid	0.05
Na ₂ EDTA	37.3	pyridoxine-HCl	0.05
FeSO ₄ ·7H ₂ O	27.8	thiamine-HCl	10
MnSO ₄ ·4H ₂ O	22.3	myo-inositol	100
ZnSO ₄ ·4H ₂ O	8.6	sucrose	30,000
H ₃ BO ₃	6.2	Agar	10,000
KI	0.83	pH	5.7~5.8

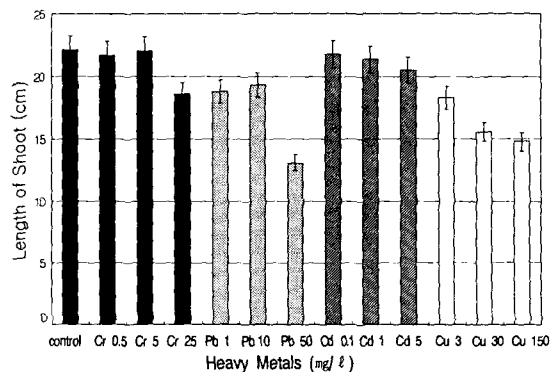


Fig. 1. Effects of heavy metals on shoot growth of *Arabidopsis thaliana* 45 days after heavy metal treatments on soil.

납의 경우, 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 높은 농도로 처리한 식물에서의 줄기 생장은 정상식물보다 약 18% 정도 감소되었으나, 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도로 처리한 식물에서는 줄기 생장이 약 41% 정도로 매우 감소되었다(Fig. 1). 이와 같은 결과는 납은 오염물질 배출기준농도만으로도 식물의 줄기 생장에 영향을 미쳐 생장을 감소시켰으며, 특히 50배 높은 고농도는 식물의 줄기 생장에 매우 치명적인 영향을 미쳤음을 나타내고 있다.

구리의 경우, 오염물질 배출기준농도로 처리한 식물에서의 줄기 생장이 정상식물보다 약 18% 정도 감소되었으나, 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도에서는 줄기 생장이 약 32% 정도로 매우 감소되었다(Fig. 1). 한편 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도에서도 줄기 생장이 정상식물보다 약 36% 정도 감소되어 10배 높은 농도와 거의 비슷한 줄기 생장 감소를 나타내었다. 이런 결과는 구리도 납과 같이 오염물질 배출기준농도만으로도 식물의 줄기 생장에 영향을 미쳐 생장을 감소시켰는데, 납과 달리 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도에서도 식물의 줄기 생장에 매우 치명적인 영향을 미쳤음을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 애기장대에 구리와 카드뮴을 처리하였을 때 구리는 애기장대의 생장에 매우 민감한 반응을 보였으나 카드뮴은 민감한 반응을 나타내지 않았다는 연구보고와 거의 유사한 결과로 생각된다.¹³⁻¹⁵⁾

각기 다른 농도의 4가지 중금속을 처리한 애기장대의 잎 생장을 비교한 결과, 납과 구리 및 크롬을 처리한 식물의 잎 생장은 중금속 각 농도별로 처리한 식물의 줄기 생장과 비례하여 유사한 결과를 나타내었으나 카드뮴은 그렇지 않았다. 즉, 카드뮴을 처리한 식물의 잎은 정상식물과 비교하여 생장이 촉진되었는데, 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도(1 mg/l)를 처리한 식물의 잎 생장이 가장 촉진되어 엽신이 매우 크고 잎 전체의 표면적도 증가하였다(Fig. 2). 그 다음으로 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/l)를 처리한 식물에서도 역시 잎 생장은 촉진되었으나 그 성장정도는 10배 높은 농도를 처리한 식물의 잎보다는 덜 촉진되었으며, 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도(5 mg/l)를 처리한 식물의 잎 생장은 거의 정상식물의 잎 생장과 비슷하거나 미미한 수준으로 촉진된 것으로 나타났다(Fig. 2).

이와 같은 결과는 중금속 중에서 카드뮴과 크롬은 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 높은 농도는 식물의 줄기와 잎 생장에 별다른 큰 영향을

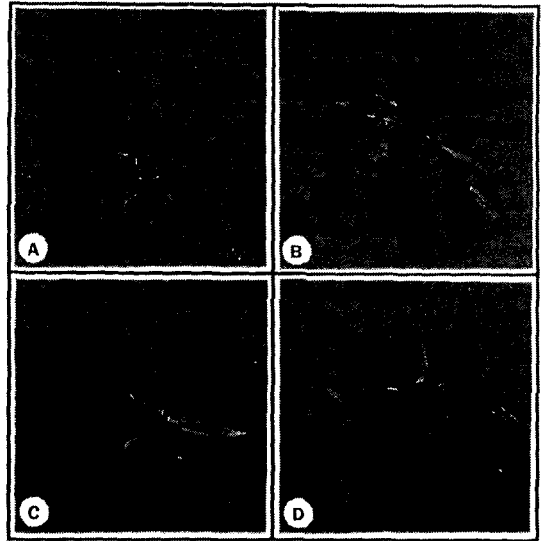


Fig. 2. Effects of cadmium on leaf morphology of *Arabidopsis thaliana* (Col-O) after cadmium treatments on soil. (A) Normal leaves, (B) Leaves treatments with 0.1 mg/l Cd, (C) Leaves treatments with 1.0 mg/l Cd, and (D) Leaves treatments with 5.0 mg/l Cd.

미치지 않았으나, 납과 구리는 오염물질 배출기준농도가 식물의 생장에 영향을 주어 줄기 생장이 감소되었음을 나타내고 있다. 특히 구리는 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도는 식물의 줄기 생장에 매우 치명적인 영향을 미쳤음을 알 수 있었다. 카드뮴은 줄기 생장에는 아무런 영향을 미치지 않았으나 잎 생장은 정상식물에 비하여 오히려 촉진되었다. 따라서 토양속에 침적된 중금속 중에서 카드뮴과 크롬은 어느 정도 농도가 되더라도 식물의 생장에 별다른 영향을 미치지 않으나 납과 구리는 소량일지라도 식물의 생장에 나쁜 영향을 미치는 것으로 생각되며 특히 구리는 식물의 생장에 매우 치명적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이것은 식물은 체내에 중금속이 축적되면 자체적으로 중금속 결합 단백질인 phytochelatin을 생합성시켜 유리 중금속의 농도를 낮추어 중금속에 대한 해독 작용을 하고 있는데¹³⁾, 특히 카드뮴은 이들 중금속 결합 단백질의 합성을 가장 효과적으로 유도한다는 보고와 일치하는 것이다.¹⁶⁻¹⁸⁾

3.2. 뿌리 생장

애기장대 종자를 각 중금속별로 농도를 달리하여 첨가한 고휘 MS배지와 중금속이 들어 있지 않은 고휘 MS배지에 파종한 1주일 후 뿌리의 생장을 측정 한 결과는 Fig. 3과 같은데, 종자발아율을 실험한

중금속이 애기장대의 성장과 종자발아에 미치는 영향

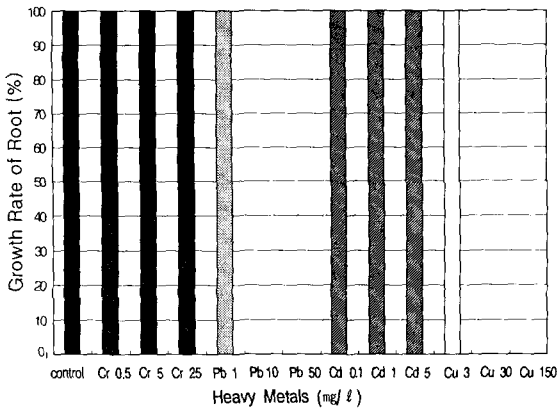


Fig. 3. Effects of heavy metals on root growth of *Arabidopsis thaliana* for 7 days after sowing.

결과와 거의 유사하였다. 크롬과 카드뮴은 농도에 관계없이 모든 농도에서 중금속이 첨가되지 않은 고형 MS배지에 파종한 대조구와 마찬가지로 거의 100%의 뿌리 성장을 나타내었다(Fig. 3). 한편 납의 경우에는 1 mg/l가 첨가된 고형 MS배지에서는 거의 100%의 성장을 나타내었으나 10 mg/l와 50 mg/l가 첨가된 고형 MS배지에서는 발아가 전혀 되지 않았다. 또한 구리에서는 3 mg/l가 첨가된 고형MS배지에서는 100% 발아되었으나, 30 mg/l과 150 mg/l의 농도가 첨가된 고형MS배지에서는 발아가 거의 되지 않았다(Fig. 3).

이러한 결과는 크롬과 카드뮴은 오염물질 배출기 준농도나 이보다 10배 및 50배나 높은 농도에서조차도 애기장대의 뿌리 성장에 아무런 영향을 미치지 않았음을 나타내고 있다. 그러나 납과 구리의 경우, 오염물질 배출기준농도에서는 뿌리 성장에 별 영향을 미치지 않았으나 이보다 10배 이상 높은 농도는 뿌리 성장에 치명적인 영향을 주었다. 특히 납의 경우 종자 발아에는 오염물질 배출기준의 50배가 되어야 영향을 주었으나 뿌리 성장에는 10배가 되어도 큰 영향을 주는 것으로 나타나 앞으로 이와 관련된 연구가 더욱 더 진행되어야 할 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 애기장대에 1 M 알루미늄을 처리하였을 때 뿌리 생장이 억제되었으며, 알루미늄의 농도가 증가함에 따라 뿌리 생장이 감소되었다는 연구보고와 거의 일치하는 것이다.^{19, 20)}

따라서 크롬, 카드뮴, 납, 구리의 4가지 중금속 중에서 식물의 뿌리생장과 밀접한 관련이 있는 것은 구리와 납이며, 구리와 납은 오염물질 배출기준 농도의 10배 이상이 되면 뿌리 성장에 치명적인 영향을 주어 생장이 전혀 되지 않았음을 알 수 있었다. 이와같은 결과는 중금속이 종자 발아에 미치는

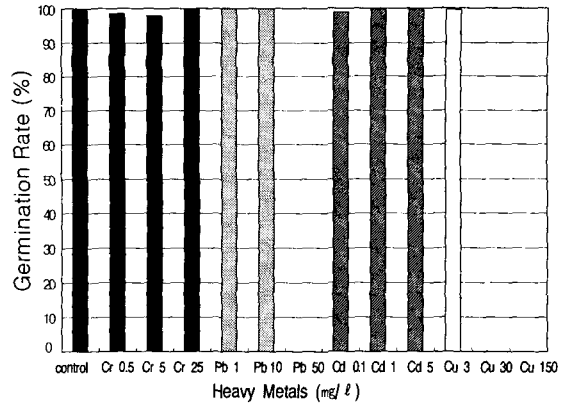


Fig. 4. Effects of heavy metals on seed germinations of *Arabidopsis thaliana* for 5 days after sowing.

영향과 뿌리생장에 미치는 영향이 거의 일치하는 것으로 생각된다.

3.3. 종자 발아율

애기장대 종자를 각 중금속별로 농도를 달리하여 적셔진 여과지가 들어 있는 petri dish에 파종하여 5일 후 발아율을 측정된 결과, 크롬과 카드뮴은 농도에 관계없이 모든 농도에서 중금속이 첨가되지 않은 영양액에 파종한 대조구와 마찬가지로 거의 100%의 발아율을 나타내었다(Fig. 4). 한편 납의 경우에는 1 mg/l과 10 mg/l에서는 거의 100%의 발아율을 나타내었으나 50 mg/l 농도에서는 발아가 전혀 되지 않았다(Fig. 4). 또한 구리에서는 3 mg/l 농도에서는 100% 발아되었으나, 30 mg/l과 150 mg/l 농도에서는 발아가 전혀 되지 않았다(Fig. 4). 이러한 결과는 크롬과 카드뮴은 환경부에서 고시한 오염물질 배출기준농도나 이보다 10배 및 50배나 높은 농도에서조차도 애기장대의 종자발아에 아무런 영향을 미치지 않았음을 나타내고 있다.

그러나 구리의 경우, 오염물질 배출기준농도는 종자 발아에 별 영향을 끼치지 않았으나 이보다 10배 이상 높은 농도는 종자 발아에 치명적인 영향을 주었으며, 납은 오염물질 배출기준농도의 50배 높은 농도가 종자발아에 치명적인 영향을 주었음을 나타내고 있다. 따라서 크롬, 카드뮴, 납, 구리의 4가지 중금속 중에서 식물의 종자 발아에 영향을 미치는 것은 구리와 납이며, 구리는 오염물질 배출기준농도의 10배 이상, 납은 50배 이상이 되면 종자 발아에 치명적인 영향을 주어 발아가 전혀 되지 않았음을 알 수 있었다. 이것은 애기장대 식물에는 중금속의 해독작용에 관여하는 중금속 결합 단백질인 phytochelatin이 크롬과 카드뮴에 의해 효과적으로 생합성되었으며, 구리와 납은 이들 중금속과 결

합하는 단백질의 생합성이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.^{21,22)}

4. 결 론

십자화과 초본식물인 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)에 구리, 납, 카드뮴, 크롬 4가지 중금속을 농도별로 처리하였을 때 식물의 성장과 종자 발아에 미치는 영향을 조사하였다. 4가지 중금속 중에서 크롬과 카드뮴은 환경부고시 오염물질 배출기준 농도의 50배 높은 농도에서도 식물의 줄기 성장에 아무런 영향을 미치지 않았으나 납과 구리는 오염물질 배출기준 농도에서 줄기 성장이 모두 18% 정도 감소되었다. 오염물질 배출기준 농도의 카드뮴을 처리한 식물의 줄기 길이는 정상식물과 거의 유사하였으나 엽신이 크고 표면적이 증가하는 등 전체적인 줄기 생장은 정상식물보다 오히려 촉진되었다. 식물의 뿌리생장에 있어서도 구리와 납은 오염물질 배출기준농도의 10배 이상이 되면 뿌리 생장이 전혀 되지 않았다. 4가지 중금속 중 크롬과 카드뮴은 종자 발아에 아무런 영향을 주지 않았으나 구리와 납을 처리한 종자는 발아율이 감소됨을 보여주었는데 구리는 오염물질 배출기준농도의 10배 이상, 납은 50배 이상이 되면 종자 발아가 전혀 되지 않았다. 이러한 결과는 토양 속에 침적된 크롬은 어느 정도 농도가 되더라도 애기장대의 성장과 종자발아 과정에 큰 영향을 미치지 않으며, 적정농도의 카드뮴은 오히려 줄기생장을 촉진하는 효과가 있는 반면, 납과 구리는 소량일지라도 영향을 미치어 식물의 성장과 종자 발아율이 감소됨을 알 수 있었고 그 중 특히 구리는 매우 치명적인 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이상의 연구 결과를 요약하면 본 실험에서 사용한 4가지 중금속 중 크롬과 카드뮴은 애기장대식물의 성장과 종자 발아에 큰 영향을 미치지 않았으며 납과 구리는 커다란 영향을 미치어 종자는 발아되지 않았고 줄기 및 뿌리의 생장은 감소되었음을 알 수 있었다.

이러한 연구 결과들은 어떤 중금속이 어떤 농도에서 고등식물의 종자 발아 및 성장에 큰 영향을 미치는지를 유추할 수 있으며 식물의 중금속 오염에 대한 생리적인 현상을 이해할 수 있는 연구와 중금속에 내성을 가지는 식물의 연구나 식물체를 이용한 중금속 제거에 대한 연구를 수행하는데 기초적인 자료를 제공하여 줄 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) Nriagu, J. O., and J. M. Pacyna, 1988, Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals, *Nature*, 333, 134-139.
- 2) Thornalley, P. J., and M. Vasak, 1985, Possible role for metallothionein in protection against radiation-induced oxidative stress: Kinetics and mechanism of its reaction with superoxide and hydroxyl radicals, *Biochem. Biophys. Acta.*, 827, 36-44.
- 3) Howden, R., and C. S. Cobbett, 1992, Cadmium-sensitive mutants of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 99, 100-107.
- 4) Salt, D. E., R. C. Prince, I. J. Pickering and I. Raskin, 1995, Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.*, 109(14), 27-1433.
- 5) Cunningham, S. D., and D. W. Ow, 1996, Promises and prospects of phytoremediation, *Plant Physiol.*, 110, 15-719.
- 6) Meyerowitz, E. M., and R. E. Pruitt, 1985, *Arabidopsis thaliana* and plant molecular genetics, *Science*, 229, 1214-1218.
- 7) Meyerowitz, E. M., 1989, *Arabidopsis*, a really useful weed, *Cell*, 56, 263-269.
- 8) Feldmann, K. A., 1991, T-DNA insertion mutagenesis in *Arabidopsis*: mutational spectrum, *The Plant Journal*, 1, 71-82.
- 9) Davis, K. R., 1992, Molecular signals in plant-microbe communications, *CRC Press Inc.* 393-406pp.
- 10) Pyke, K., 1994, *Arabidopsis*-its use in the genetic and molecular analysis of plant morphogenesis, *New Phytol.*, 128, 19-37.
- 11) Langridge, J., 1994, *Arabidopsis thaliana*, a plant *Drosophila*, *BioEssays*, 16, 775-778.
- 12) Murashige, T., and F. Skoog, 1962, A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures, *Physiol. Plant.*, 15, 473-497.
- 13) Vliet, C., C. R. Andersen and C. S. Cobbett, 1995, Copper-sensitive mutant of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 109, 871-878.
- 14) Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Goldsbrough and C. S. Cobbett, 1995a, A cadmium-sensitive, glutathione-deficient mutants of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 107, 1067-1073.
- 15) Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Golds-

- brough and C. S. Cobbett, 1995b, Cadmium-sensitive, *cad1* mutants of *Arabidopsis thaliana* are phytochelatin deficient, *Plant Physiol.*, 107, 1059-1066.
- 16) Grill, E., E. L. Winnacker and M. H. Zenk, 1985, Phytochelatins: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants, *Science*, 230, 674-676.
- 17) Grill, E., E. L. Winnacker and M. H. Zenk, 1987, Phytochelatins, a class of heavy-metal-binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 84, 439-443.
- 18) Steffens, J. C., 1990, The heavy-metal binding peptides of plants, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 41, 553-575.
- 19) Koyama, H., T. Toda, S. Yokota, Z. Dawair and T. Hara, 1995, Effects of aluminum and pH on root growth and cell viability in *Arabidopsis thaliana* strain landsberg in hydroponic culture, *Plant Cell Physiol.*, 36, 201-205.
- 20) Larsen, P. B., C. Y. Tai, L. V. Kochain and S. H. Howell, 1996, *Arabidopsis* mutants with increased sensitivity to aluminum, *Plant Physiol.*, 110, 743-751.
- 21) Rauser, W. E., 1995, Phytochelatins and related peptides, *Plant Physiol.*, 109, 1141-1149.
- 22) 박영일, 김희근, 김유영, 김인수, 1996, 미나리의 중금속 흡수량 및 중금속 결합단백질의 동정, *대산논총*, 4, 81-89.