

수은과 비소가 애기장대의 생장에 미치는 영향

박 종 범
신라대학교 생물학과
(2005년 7월 14일 접수; 2006년 1월 26일 채택)

Effects of Mercury and Arsenic on Growth of *Arabidopsis thaliana*

Jong-Bum Park

Department of Biological Sciences, Silla University, Busan 617-736, Korea
(Manuscript received 14 July, 2005; accepted 26 January, 2006)

This experiment was carried out to investigate the effects of mercury and arsenic on the growth of *Arabidopsis thaliana* when treated with three different concentrations. When treated with mercury, there was no noticeable difference in the growth of the plant between the group treated with 0.5 $\mu\text{g/L}$ (the effluent standard established by the Ministry of Environment) and the group treated with the concentration 100 times higher. They both showed almost the same level of growth as that of the normal plant. But the group of the concentration 10 times higher showed significantly 10% more growth compared with the normal plant. When treated with arsenic, the three different groups all showed a little more growth compared with the normal plant. Interestingly, the group of the concentration 10 times higher than the official standard concentration of arsenic (50 $\mu\text{g/L}$) showed the highest level of growth, significantly 20% more than the normal plant. These results show that some amount of mercury and arsenic in the soil do not have much effect on the growth of *Arabidopsis thaliana*, and that optimum concentrations of mercury and arsenic can even stimulate the growth of the plant.

Key Words : *Arabidopsis thaliana*, Mercury, Arsenic, Growth

1. 서 론

급속한 산업발전에 따른 인구의 도시집중화와 함께 유해독성물질의 대량방출은 이미 자연생태계에 중대한 위협요소가 되고 있다. 특히 최근에는 고도의 산업화로 각종 중금속류가 함유된 폐기물과 폐수가 급속히 증가하여 자연생태계의 오염을 가중시키고 있다. 수질, 대기 및 토양 등의 중금속 오염은 유독한 수준으로 오염되어 있는데, 중금속에 의한 이러한 환경오염이 위협한 것은 미량이라도 체내에 축적되면 잘 배설되지 않고 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내기 때문이다¹⁾.

중금속은 비중이 4~5 이상인 금속을 말하는데,

인간생존에 필요한 필수 금속과 그렇지 않은 금속으로 구분한다. 아연, 철, 구리 및 코발트 등과 같이 생물체가 정상적인 생리 기능을 유지하기 위해 꼭 필요로 하는 금속을 필수중금속이라 하고, 수은, 납, 카드뮴 등과 같이 환경오염물질로서 생체에 해로운 영향을 미치는 금속을 유해중금속이라 한다. 중금속은 생체내로 흡수되면 생체내 물질과 결합하여 잘 분해 되지 않는 유기복합체를 형성하기 때문에 몸 밖으로 빨리 배출되지 않고 간장, 신장 등의 실질장기나 뼈에 축적된다. 특히 비소(As), 수은(Hg), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr) 등은 낮은 농도에서도 건강장해를 유발할 가능성이 있는 물질이다²⁾.

수은은 다른 중금속과 마찬가지로 한 번 인간의 몸 안에 들어오면 빠져나가지 않고 계속 누적된다. 이것이 인체 안에 축적되어 총 수은량이 30 ppm 이상이 되면 수은 중독 현상을 일으키게 된다. 수은중

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

독은 직접적인 접촉 외에 수은을 함유한 폐전지 등의 부적절한 처리로 환경에 노출돼 금속수은이 녹아 나와 자연생태계에서 유기 수은화되어 토양오염, 수질오염의 원인이 되고 농산물, 어패류에 농축되어 2차로 인간의 몸에 유입된다. 수은의 축적에 의한 중독은 만성 신경계의 질환으로 인해 운동장애, 언어장애, 난청, 심하면 사지가 마비되어 죽음에 까지 이른다³⁾.

비소는 지각과 물, 공기, 식물, 동물 등에서 모두 발견되는 물질로 비소오염의 원인은 인위적 기원과 자연적 기원으로 구분할 수 있다. 비소오염의 인위적 요인은 반도체, 염료 생산 과정의 폐수, 광산 및 제련 활동, 제초제 살포의 농경 활동 등이 주 원인이며, 화산활동, 지열, 암석의 침식 등과 관련한 자연적 요인에 의한 비소오염이 전세계적으로 광범위하게 나타나고 있다. 비소에 오랫동안 노출된 식수를 섭취할 경우 방광을 비롯해 폐와 피부, 신장, 비강, 간, 전립선 등에 암이 유발될 수 있다. 이같은 현상들은 비소가 정상 세포에 작용하면 암을 유발하고 암세포에 작용하면 세포 사멸을 유도하기 때문에 나타난다.

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^{4,5)}. 최근에는 십자화과 식물 중 배추속(*Brassica*) 식물과 *Thlaspi caerulescens* 및 벼과 식물인 *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*을 이용하여 오염된 토양에서 카드뮴, 구리, 아연 등과 같은 중금속을 제거하려는 연구가 많이 이루어지고 있다^{6,7)}.

애기장대(*Arabidopsis thaliana*)는 십자화과 장대나물속의 일년생 초본식물로서 그 크기가 작아서 좁은 공간의 실험실내에서나 멸균된 배양 배지에서 배양이 가능하다. 또한 하나의 식물로부터 많은 (한 식물당 10,000개) 종자를 생산하며, 고등식물 중 작은 genome(70~150 Mb)을 가지고 있고, 식물체 전체의 유전자 지도가 완성된 최초의 고등식물이다. 또한 6-8주의 짧은 생활사를 가지고 있어서 식물학의 여러 분야에서 model plant로 광범위하게 이용되고 있다^{8,9)}. 애기장대 식물의 이런 장점을 이용하여 구리, 카드뮴, 크롬, 납을 처리한 애기장대의 성장상이 연구된 바 있는데, 크롬과 카드뮴은 애기장대 식물의 성장과 종자 발아에 큰 영향을 미치지 않았으며, 납과 구리는 식물 성장에 커다란 영향을 미쳐 종자는 발아되지 않았고 줄기 및 뿌리의 생장은 감

소된 것으로 보고되었다^{10,11)}.

본 연구는 중금속 중에서 유해성이 잘 알려진 수은과 비소를 애기장대에 처리하였을 때 나타나는 식물의 줄기와 뿌리 그리고 잎의 생장변화를 다양하게 조사하여 수은과 비소가 고등식물의 생장에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다. 이러한 연구는 수은과 비소에 오염된 애기장대의 생리적 현상을 이해함으로써 이에 내성을 가지는 식물의 연구와 오염된 환경으로부터 중금속을 제거하기 위한 기초적인 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

애기장대(*Arabidopsis thaliana*) 종자(Col-O)는 미국 Ohio State University의 Arabidopsis Biological Resource Center (ABRC)에서 분양받아 실험재료로 사용하였으며, 애기장대에 처리한 수은과 비소는 시판중인 표준용액(Kanto Chemical Co.)을 구입하여 사용하였다.

2.2. 실험방법

애기장대 종자를 시판중인 원예용상토(상품명; 만석꾼)가 담긴 육묘판에 파종한 후 랩을 씌워 2일 동안 4℃에서 저온처리한 다음 향온항습배양기에 옮겨서 재배하였다. 향온항습배양기내의 환경조건은 16시간의 명처리와 8시간의 암처리로 조정된 광주기하에서 온도는 22±1℃로, 습도는 50-80%로 유지되도록 조절하여 주었다. 배양 약 2주 후면 싹이 나오는데 이때 랩을 제거하고 적절한 습도가 유지되도록 2-3일 마다 수시로 수분상태를 점검하여 증류수를 공급하여 주었다¹⁰⁾.

향온항습배양기내에서 약 40일 성장한 애기장대에 수은과 비소를 각각 3가지 농도로 처리하여 60일 동안 재배하였다. 환경부에서 고시한 오염물질 배출 허용기준(수은 0.5 µg/L, 비소 50 µg/L) 및 이보다 10배, 100배 높은 농도를 실험구로 하였으며(Table 1), 대조구로는 수은과 비소가 첨가되지 않은 증류수만을 사용하였다. 수은과 비소의 처리는 애기장대에 습도를 유지시키기 위하여 공급하여 주는 증류수 400 ml에 수은과 비소 용액을 각각 농도별로 첨가하여 3일 간격으로 25개 식물이 들어있는 육묘판이 담긴 받침대(35 x 30 cm)에 공급하여 중금속용액이 토양을 통해 식물에 흡수되도록 하였다.

3가지 농도의 수은과 비소용액을 처리하여 60일간 향온항습배양기에서 재배한 애기장대 성체식물에서의 줄기 길이·직경·무게, 뿌리 길이·무게 및 잎 개수·형태를 측정하여 식물의 생장을 조사하였다. 실험에 사용한 줄기와 뿌리, 잎은 최소 50 개체

이상을 측정하였으며, 3번 반복 실험하여 평균치와 표준편차를 구하였다.

Table 1. Concentrations of mercury and arsenic

Heavy Metal	Concentration (mg/L)		
Hg	0.5	5	50
As	50	500	5000

3. 결과 및 고찰

3.1. 줄기 성장

3가지 농도의 수은과 비소용액을 애기장대에 처리하였을 때 각 농도별로 줄기 성장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 1, 2, 3과 같다.

수은용액을 각 농도별로 처리한 식물의 줄기 길이 생장은 환경부 고시 오염물질 배출허용기준과 이보다 100배 높은 농도에서는 수은을 처리하지 않은 정상식물의 줄기 길이와 거의 유사한 성장을 나타내었으나, 기준농도보다 10배 높은 농도에서는 정상식물보다 줄기 생장이 유의하게 증가되었다(Fig. 1). 3가지 농도의 비소용액을 처리한 식물의 줄기 길이는 비소를 처리하지 않은 정상식물의 줄기 길이보다 모두 증가하여 수은을 처리한 식물과는 다른 결과를 나타내었다. 특히 기준농도보다 10배 높은 농도의 비소를 처리한 식물의 줄기 길이가 정상식물보다 15% 유의하게 증가하였다(Fig. 1).

오염물질 배출허용기준보다 100배 높은 농도의 수은을 처리한 식물의 줄기 직경은 수은을 처리하지 않은 정상식물의 줄기 직경과 거의 비슷한 성장을 나타내었고, 기준농도보다 10배 높은 농도의 수은을 처리한 식물의 줄기 직경은 정상식물의 줄기 직경보다 유의하게 증가하였다(Fig. 2).

비소용액을 처리한 식물의 줄기 직경은 3가지 농도 모두에서 비소를 처리하지 않은 정상식물의 줄기 직경보다 모두 유의하게 증가하였다. 특히 기준농도보다 10배 높은 농도의 비소를 처리한 식물의 줄기 직경은 정상식물의 줄기 직경에 비하여 30% 유의하게 증가하였다(Fig. 2).

이러한 결과는 3가지 농도의 수은과 비소용액을 처리한 식물과 정상식물의 줄기 길이 생장을 비교한 실험과 거의 유사한 결과이다.

3가지 농도의 수은과 비소용액을 처리한 식물의 줄기 무게를 조사한 결과, 줄기 길이와 줄기 직경의 성장에서와 같이 수은과 비소 모두 기준농도보다 10배 높은 농도를 처리한 식물의 줄기 무게가 가장 증가하였다(Fig. 3). 특히 기준농도보다 10배 높은 농도의 수은을 처리한 식물에서의 줄기 무게는 정상식물의 줄기 무게보다 29% 유의하게 증가하였고,

기준농도보다 10배 높은 농도의 비소를 처리한 식물에서의 줄기 무게는 정상식물의 줄기 무게보다 33% 유의하게 증가하였다(Fig. 3).

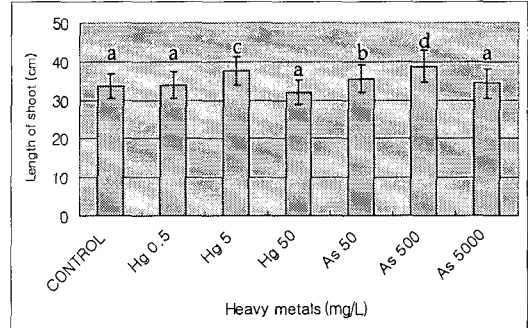


Fig. 1. Effects of mercury and arsenic on shoot growth of *Arabidopsis thaliana* after 60 days of mercury and arsenic treatments on soil. Different alphabets in bar show statistically difference at $\alpha = 0.05$ by two-tailed test.

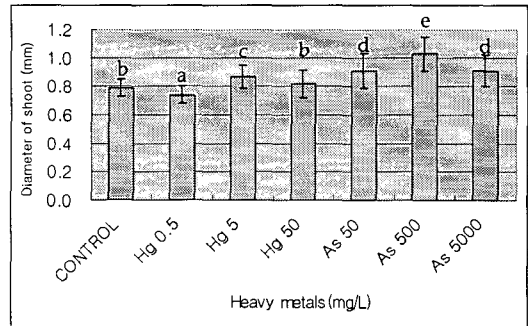


Fig. 2. Effects of mercury and arsenic on shoot diameter of *Arabidopsis thaliana* after 60 days of mercury and arsenic treatments on soil.

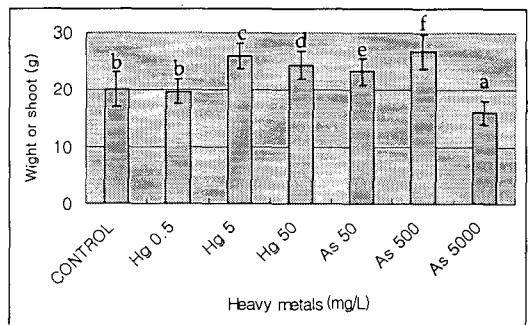


Fig. 3. Effects of mercury and arsenic on shoot weight of *Arabidopsis thaliana* after 60 days of mercury and arsenic treatments on soil.

이상의 실험결과를 종합하여 3가지 농도의 수은과 비소용액을 처리한 식물과 정상식물의 전체적인 줄기 성장을 비교해 본 결과, 오염물질 배출허용기준과 기준농도보다 100배 높은 농도의 수은을 처리한 식물에서의 줄기 생장은 정상식물의 줄기 생장과 거의 비슷하였다. 반면 기준농도보다 10배 높은 농도의 수은을 처리한 식물의 줄기 생장은 정상식물보다 유의하게 증가하였다. 비소를 각 농도별로 처리한 식물의 줄기 생장은 3가지 농도에서 모두 비소를 처리하지 않은 정상식물의 줄기 생장보다 증가하였는데, 특히 기준농도보다 10배 높은 농도의 비소를 처리한 식물의 줄기 생장은 유의하게 증가하였다. 이러한 결과는 수은이 보리 유식물의 생장에 대한 억제 효과가 있다는 연구 보고¹²⁾와 일치하지는 않는데, 이는 중금속을 처리한 시기 및 처리한 중금속의 양과 식물 자체의 중금속에 대한 내성의 차이라고 생각된다.

3.2. 뿌리 생장

3가지 농도의 수은과 비소용액을 애기장대에 처리하였을 때 각 농도별로 뿌리 생장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 4, 5와 같다.

수은용액을 각 농도별로 처리한 식물의 뿌리 길이를 비교한 결과, 오염물질 배출허용기준과 기준농도보다 100배 높은 농도에서는 정상식물의 뿌리 길이와 거의 유사한 생장을 나타내었으나, 기준농도보다 10배 높은 농도에서는 정상식물에 비해 뿌리 길이가 22% 유의하게 증가되었다(Fig. 4). 비소용액을 처리한 식물의 뿌리 길이는 수은을 처리한 식물과는 다른 결과를 나타내었다(Fig. 4). 기준농도와 기준농도보다 100배 높은 농도에서는 정상식물의 뿌리 길이보다 유의하게 약간 감소되었으나, 기준농도보다 10배 높은 농도에서는 식물의 뿌리 길이는 정상식물에 비해 뿌리 길이가 18% 유의하게 증가되었다(Fig. 4).

수은용액을 각 농도별로 처리한 식물의 뿌리 무게는 모든 농도에서 정상식물보다 유의하게 증가하였다. 특히 기준농도보다 10배 높은 농도의 수은을 처리한 식물의 뿌리 무게가 정상식물보다 127% 유의하게 증가하였다(Fig. 5). 비소용액을 처리한 식물의 뿌리 무게는 정상식물에 비하여 모든 농도에서 높은 비율로 유의하게 증가하였는데, 수은을 처리한 식물에서 증가한 뿌리 무게와는 비교가 되지 않을 정도로 매우 증가하였다(Fig. 5). 수은을 처리한 식물과 마찬가지로 기준농도보다 10배 높은 농도의 비소를 처리한 식물의 뿌리 무게는 정상식물보다 345% 유의하게 증가하였다(Fig. 5).

이상의 실험결과처럼 뿌리 생장을 뿌리 길이와 뿌리 무게의 측정치로 비교해 본 결과, 기준농도와 기준농도보다 100배 높은 농도의 수은을 처리한 식물의 뿌리 생장은 정상식물과 거의 비슷한 생장을 나타내었다. 반면 기준농도보다 10배 높은 농도의 수은을 처리한 식물의 뿌리 생장은 정상식물보다 유의하게 증가하였다. 이것은 애기장대에 처리한 카드뮴은 오염물질 배출허용기준과 이보다 10배 및 50배나 높은 농도에서도 애기장대의 뿌리 생장에 큰 영향을 미치지 않았다는 연구보고¹⁰⁾와 비교하면 수은 또한 카드뮴과 유사한 결과를 나타내었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 뿌리가 토양으로부터 영양분을 흡수하는 과정에서 뿌리표면은 영양분뿐만 아니라 많은 오염물과 결합하기 때문일 것이다. 인디안 겨자(*Brassica juncea*)는 뿌리조직 속에 카드뮴, 니켈, 납 등을 액체배지에서보다 0.5배 높은 농도까지 축적할 수 있다^{13,14)}. 해바라기 뿌리는 우라늄으로 오염된 물로부터 우라늄을 30,000배 농축하였으며¹⁵⁾, 담배 뿌리는 1-5 ppm 수은이 포함된 액체배지에 노출되었을 때 배지속의 수은 농도를 거의 100배 정도 감소시켰다¹⁶⁾. 한편 기준농도와 기준농도

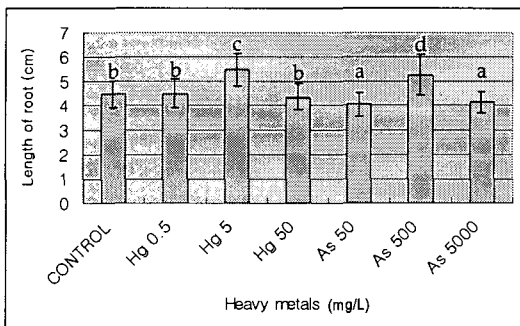


Fig. 4. Effects of mercury and arsenic on root length of *Arabidopsis thaliana* after 60 days of mercury and arsenic treatments on soil.

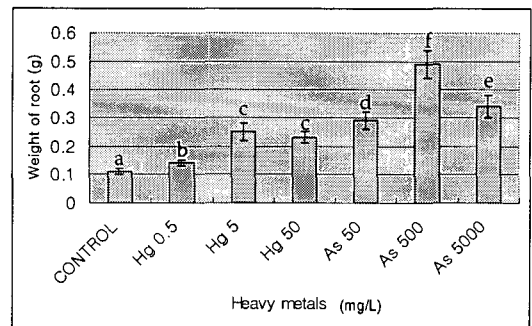


Fig. 5. Effects of mercury and arsenic on root weight of *Arabidopsis thaliana* after 60 days of mercury and arsenic treatments on soil.

보다 100배 높은 농도의 비소를 처리한 식물의 뿌리 길이는 정상식물보다 유의하게 감소되었으나, 뿌리 무게는 정상식물보다 매우 유의하게 증가하였다. 특히 기준농도보다 10배 높은 농도의 비소를 처리한 식물의 뿌리 무게는 정상식물보다 345% 유의하게 증가하였다. 이처럼 비소를 처리한 식물에서 뿌리 길이는 정상 식물보다 감소되었으나, 뿌리 무게는 증가한 것으로 미루어보아 비소는 뿌리의 길이 성장보다는 부피 성장에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.3. 잎 성장

3가지 농도의 수은과 비소용액을 애기장대에 처리하였을 때 각 농도별로 잎 성장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 6과 같다.

수은용액을 각 농도별로 처리한 식물의 잎 개수는 오염물질 배출허용기준에서는 정상식물보다 유의하게 감소하였고, 기준농도보다 10배 높은 농도와 100배 높은 농도에서는 각각 정상식물보다 12%, 13% 유의하게 증가하였다(Fig. 6). 이러한 결과는 오염물질 배출허용기준의 수은을 처리한 식물은 잎 생장이 억제되었으나, 이보다 10배, 100배 높은 농도의 수은을 처리한 식물에서는 잎 생장이 촉진되었음을 나타내고 있다. 비소용액을 처리한 식물의 잎 개수는 수은을 처리한 식물과는 다른 결과를 나타내었는데, 오염물질 배출허용기준에서는 정상식물과 비슷하였고, 기준농도보다 10배 및 100배 높은 농도에서는 정상식물보다 유의하게 증가하였다(Fig. 6). 특히 기준농도보다 10배 높은 농도를 처리한 식물의 잎 개수는 정상식물보다 16% 유의하게 증가하였다(Fig. 6). 이때 잎의 개수만 증가한 것이 아니라 잎의 색깔이 더 짙고, 엽신이 크며 잎 전체의 표면적도 증가하였음을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 애기장대에 납, 구리 크롬을 처리

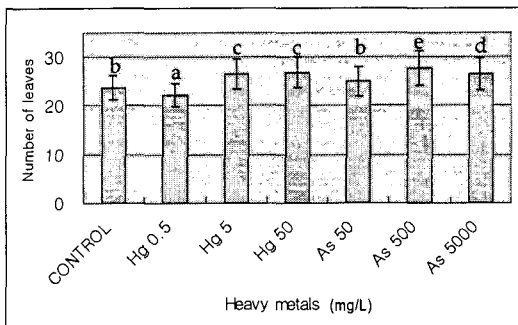


Fig. 6. Effects of mercury and arsenic on leaf number of *Arabidopsis thaliana* after 60 days of mercury and arsenic treatments on soil.

하였을 때는 잎 생장이 억제되었으나, 환경부고시 오염물질 배출허용기준의 10배 높은 농도의 카드뮴을 처리한 경우 식물의 잎 생장이 촉진되었다는 연구보고¹⁰⁾와 일치하는 결과로서 수은과 비소도 카드뮴처럼 애기장대의 잎 성장을 촉진시키는 것으로 판단된다. 어떤 식물은 토양으로부터 비교적 많은 양의 중금속을 흡수하여 조직내에 격리시키는데, 이러한 식물을 금속 hyperaccumulator라고 한다¹⁷⁾. 니켈 hyperaccumulator인 *Psychotria douarrei*의 잎은 nonaccumulator인 *Ficus webbianai* 잎보다 약 180배나 더 많은 니켈을 축적하고 있으며, 또한 아연, 크롬, 코발트, 납은 각각 2.5배, 1.5배, 1.3배, 6.5배 더 높은 농도를 가지고 있었다¹⁸⁾.

오염토양 조건하에서 몇몇 식물들은 불필요한 성장을 저해하는 독성이온들의 흡수를 억제하거나, 또는 다량으로 흡수하여도 원활한 체내활성을 유지하며 성장하는 내성이 강한 식물들이 있다⁹⁾. 또한 식물은 체내에 중금속이 축적되면 자체적으로 중금속 결합 단백질인 phytochelatin을 생합성시켜 유리 중금속의 농도를 낮추어 중금속에 대한 해독작용을 하고 있는데¹⁹⁾, 특히 카드뮴은 이들 중금속 결합 단백질의 합성을 가장 효과적으로 유도한다는 보고가 있다²⁰⁻²²⁾. 본 실험도 이와 유사한 결과를 나타내어 토양 속에 축적된 수은과 비소 중금속이 일정 농도 이하를 유지하면 수은과 비소도 중금속 결합 단백질의 합성을 효과적으로 유도하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

심자화과 초본식물인 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)에 수은과 비소용액을 3가지 농도로 처리하였을 때 식물의 성장에 미치는 영향을 조사하였다. 환경부고시 오염물질 배출허용기준(0.5 µg/L)과 그보다 100배 높은 수은농도를 처리한 식물의 줄기, 뿌리, 잎 등 전체적인 식물 생장은 정상식물과 거의 비슷하였다. 반면 오염물질 배출허용기준보다 10배 높은 수은농도를 처리한 식물의 전체적인 식물 생장은 정상식물과 비교하여 10% 유의하게 증가하였다. 비소용액을 처리한 식물의 생장은 정상식물보다 모든 농도에서 생장이 약간 증가하였다. 특히 오염물질 배출허용기준농도(50 µg/L)보다 10배 높은 비소농도를 처리한 식물의 줄기, 뿌리, 잎 등 전체적인 식물 생장은 정상식물보다 20% 유의하게 증가하였다. 이러한 결과는 토양 속에 침적된 수은과 비소는 어느 정도 농도가 되더라도 애기장대의 성장에 큰 영향을 미치지 않으며, 적정농도의 수은과 비소는 오히려 식물생장을 촉진하는 효과가 있는 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) Nriagu, J. O. and J. M. Panyina, 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) Rugh, C. L., H. D. Wilde, N. M. Stack, D. M. Thompson, A. O. Summers and R. B. Meagher, 1996, Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 93, 3182-3189
- 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), 1427-1433.
- 5) Cunningham, S. D. and D. W. Ow, 1996, Promises and prospects of phyto-remediation, *Plant Physiol.*, 110, 15-719.
- 6) Meagher, R. B., 2000, Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants, *Curr. Opin. Plant Biol.*, 3, 153-162.
- 7) Ebbs, S. D. and L. V. Kochian, 1997, Toxicity of zinc and copper to *Brassica* species: Implications for phytoremediation, *J. Environ. Qual.*, 26, 776-781.
- 8) Pyke, K., 1994, *Arabidopsis*-its use in the genetic and molecular analysis of plant morphogenesis, *New Phytol.*, 128, 19-37.
- 9) Langridge, J., 1994, *Arabidopsis thaliana*, a plant *Drosophila*, *BioEssays*, 16, 775-778.
- 10) Park, Y. S. and J. B. Park, 2002, Effects of heavy metals on growth and seed germination of *Arabidopsis thaliana*, *J. Environmental Science*, 11, 319-325.
- 11) Park, J. B., 2004, Effects of cadmium on growth of *Arabidopsis thaliana*, *J. Environmental Science*, 12, 1103-1108.
- 12) Moon, B. Y., H. S. Chun, C. H. Lee and C. B. Lee, 1992, Mercury-specific effects on photosynthetic apparatus of barley chloroplasts compared with copper and zinc ions, *J. Environmental Science*, 1, 1-11.
- 13) Salt, D. E., R. C. Prince, I. J. Pickering and I. Raskin, 1995, Mechanism of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard, *Plant Physiol.*, 109, 1427-1433.
- 14) Salt, D. E. and U. Kramer, 1999, Mechanism of metal hyperaccumulation in plant, *In Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean-up the Environment*, Raskin, I. and B. D. Ensley (ed.), New York, John Wiley and Sons, pp. 231-246.
- 15) Dushenkof, S., D. Vasudev, Y. Kapulnik, D. Gleba, D. Fleisher, K. C. Ting and B. Ensley, 1997, Removal of uranium from water using terrestrial plants, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 3468-3474.
- 16) Heaton, A. C. P., C. L. Rugh, N. J. Wang, R. B. Meagher, 1998, Phytoremediation of mercury and methylmercury polluted soils using genetically engineered plants, *J. Soil Contam.*, 7, 497-509.
- 17) Brooks, R. R., J. Lee, R. D. Reeves and T. Jaffre, 1977, Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants, *J. Geochem. Explor.*, 7, 49-58
- 18) Davis, M. A., S. G. Pritchard, R. S. Boyd and S. A. Prior, 2001, Developmental and induced responses of nickel-based and organic defences of the nickel-hyperaccumulating shrub, *Psychotria douarrei*, *New Phytologist*, 150, 49-58.
- 19) Vilet, C., C. R. Anderson and C. S. Cobbett, 1995, Copper-sensitive mutant of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 109, 871-878.
- 20) Grill, E., E. L. Winnacker and M. H. Zenk, 1985, Phytochelatins: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants, *Science*, 230, 674-676.
- 21) 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.
- 22) Steffens, J. C., 1990, The heavy-metal binding peptides of plants, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 41, 553-575.