

카드뮴이 애기장대의 생장에 미치는 영향

박종범

신라대학교 자연과학대학 생물과학과

(2004년 7월 20일 접수; 2004년 12월 22일 채택)

Effects of Cadmium on Growth of *Arabidopsis thaliana*

Jong-Bum Park

Dept. of Biological Sciences, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 20 July, 2004; accepted 22 December, 2004)

This experiment was carried out to investigate the effects of cadmium on the growth of *Arabidopsis thaliana* when they were treated with different concentrations of cadmium. The growth of stem was stimulated in the concentrations up to fifty times higher than the official standard concentration of cadmium of pollutant exhaust notified by the Ministry of Environment, but it decreased in the concentration one hundred fifty times or more higher in proportion to the degree of concentration. The growth of root was similar to that of stem, except that the decrease was gradual in the concentration fifty times or more higher. The growth of leaf was almost the same as that of stem, that is, it was stimulated the increase of leaf surface area in the concentration fifty times higher, but decreased in the concentration one hundred fifty times or more higher in proportion to the degree of concentration. The fresh weights of the plants were increased in accord with the degree of growth of the stem and leaf. Concentration of cadmium accumulated in the plants was increased in proportion to the concentration of cadmium. These results show that the growth of plants was stimulated in the soil polluted by cadmium up to fifty times higher than the official standard concentration, but it was decreased in proportion to the degree of concentration in the plants grown in the presence of cadmium more than one hundred fifty times.

Key Words : *Arabidopsis thaliana*, Cadmium, Growth, Fresh weight

1. 서론

오늘날 급속한 산업발전과 도시인구의 집중화 현상, 날로 심각해지는 수질오염, 대기오염, 토양오염 등으로 지구환경의 오염은 심각한 문제가 되고 있다. 특히 최근에는 고도의 산업화로 인하여 공장에서 배출되는 각종 중금속류가 함유된 폐기물과 폐수가 급속히 증가하여 생태계의 오염을 가중시키고 있다. 수질, 대기 및 토양 등의 중금속 오염은 유독한 수준으로 오염되어 있는데, 중금속에 의한 이러한 환경오염은 중금속이 미량이라도 체내에 축적되면 잘 배출되지 않고 간장, 신장 등의 장기나 뼈에 축적되어 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내어 폐기종, 심폐기능부전증, 신장결석, 단백뇨 등 다양한 독성

을 나타낸다¹⁾.

지각 중의 카드뮴 농도는 평균 0.15 ppm 정도이지만 토양 중에는 암석의 풍화에 의해 생성된 카드뮴이 토양입자에 흡착하기 쉬우므로 0.5 ppm 정도 존재한다. 카드뮴은 인체 내에 섭취되면 소화관과 폐를 통해 흡수되는데, 소화관으로 들어온 카드뮴은 6% 정도가 흡수되고, 폐에서는 0.1 μm 입자는 50%, 2 μm 입자는 20%가 흡수된다. 혈액으로 들어온 카드뮴은 주로 간과 신장에 농축 저장되고, 생물학적 반감기는 13~38년으로 알려져 있다^{2,3)}.

카드뮴이 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 제거시키고자 하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다⁴⁻⁶⁾. 특히 최근에는 배추속 식물과 *Thlaspi caerulescens*, *Agrostis capillaris*, *Festuca*

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

rubra 등을 이용하여 오염된 토양에서 카드뮴, 구리, 아연 등과 같은 중금속을 제거하려는 연구가 많이 이루어지고 있다⁷⁻⁹⁾.

애기장대(*Arabidopsis thaliana*)는 식물체 전체의 유전자 지도가 완성된 최초의 고등식물이며, 6~8주의 짧은 생활사를 가지고 있어서 식물학의 여러 분야에서 모델식물로 광범위하게 이용되고 있다^{10,11)}. 애기장대의 이런 장점을 이용하여 중금속 중 구리, 납, 카드뮴, 크롬 등 4가지 중금속을 환경부고시 오염물질 배출기준농도로 처리한 것과 그 보다 10배, 50배 높은 농도를 처리하였을 때 식물의 성장과 종자 발아에 미치는 영향을 조사한 결과, 오염물질 배출기준농도의 50배 높은 농도의 카드뮴을 처리한 식물에서만 생장이 촉진되는 것으로 보고¹²⁾한 바 있다. 그러나 50배 이상 높은 카드뮴 농도를 처리한 실험을 수행하지 못하여 애기장대의 성장을 촉진시키는 카드뮴의 최고 농도와 식물의 성장을 저해시키는 카드뮴 최저 농도는 알 수 없었다.

본 연구는 카드뮴의 농도를 환경부고시 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)보다 높은 농도로 첨가한 토양에서 애기장대의 성장을 조사하여 카드뮴의 여러 농도가 고등식물의 성장에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다. 이러한 연구는 카드뮴에 오염된 식물의 생리적 현상을 조사하고 이에 내성을 가지는 식물에 대한 연구와 중금속 제거에 대한 기초적인 자료를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

애기장대의 생태형인 Col- O의 종자는 미국 Ohio 주립대학의 *Arabidopsis* Biological Resource Center (ABRC)에서 분양받아 본 실험재료로 사용하였다.

2.2. 재료식물의 재배

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 재배하였다. Growth chamber내의 환경조건은 16시간의 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 묘판이 담긴 받침대(35×30 cm)에 영양액을 공급하여 주었다¹²⁾.

2.3. 카드뮴 처리

Growth chamber에서 약 50일 정도 성장한 애기

장대에 카드뮴을 5가지 농도로 처리하였다. 환경부에서 고시한 오염물질 배출기준치 농도보다 10배(1 mg/L), 50배(5 mg/L), 150배(15 mg/L), 300배(30 mg/L), 500배(50 mg/L) 높은 농도로 제조한 용액을 1 L 영양액에 첨가하여 사용하였다. 대조구는 카드뮴 성분이 첨가되지 않은 영양액만을 사용하였다.

2.4. 식물성장 측정

애기장대를 growth chamber에서 재배하는 동안 여러 농도의 카드뮴이 포함된 영양액과 카드뮴이 들어 있지 않은 영양액을 매일 500 ml씩 묘판이 담긴 받침대에 공급하여 14일간 재배한 후 성체식물에서의 줄기의 길이를 측정하였으며, 줄기 직경은 미세한 직경을 측정할 수 있는 vernier caliper를 사용하여 측정하였다. 뿌리 길이는 묻어 있던 흙을 깨끗이 씻어낸 다음 주근의 길이를 측정하였다. 잎 개수는 각 개체의 모든 잎을 세어서 측정하였으며, 잎 면적은 각 개체의 모든 잎을 모눈종이에 옮겨 그린 다음 그 표면적을 계산하여 측정하였다. 생중량은 뿌리, 줄기, 잎의 흙을 깨끗하게 세척한 다음 물기를 여과지로 흡수시킨 후 무게를 측정하였다. 모든 실험은 최소 125개체 이상을 측정하였으며 5번 반복 실험하여 평균치와 표준편차를 구하였다.

2.5. 식물체내 카드뮴 측정

성체식물에 농축된 카드뮴의 농도는 원자흡광분광계를 사용하여 측정하였다. 식물에 묻어 있던 흙을 깨끗이 세척한 다음 물기를 말려서 약 48시간 동안 동결 건조시킨 식물을 1 g씩 100 ml의 질산에 녹여서 시료를 만든 후 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 줄기 성장

여러 가지 농도의 카드뮴 용액을 애기장대에 처리하였을 때 줄기 성장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 1 및 Fig. 2에서와 같다.

카드뮴을 각 농도별로 처리한 식물의 줄기 길이 생장은 오염물질 배출기준농도의 10배 높은 농도인 1 mg/L에서는 정상 식물의 줄기보다 오히려 생장이 13% 증가하였으며 50배 높은 농도인 5 mg/L에서는 정상식물 줄기와 비슷한 성장상을 나타내었다. 오염물질 배출기준농도의 150배 이상 높은 농도인 15 mg/L에서는 생장이 어느 정도 감소하는 경향을 보였으며 특히 500배 높은 농도인 50 mg/L에서는 줄기 생장이 26% 감소하였다(Fig. 1). 카드뮴을 각 농도별로 처리한 식물의 줄기 직경은 줄기 길이 성장과 유사한 결과를 나타냈으나 오염물질 배출기준농도의 50배 높은 농도인 5 mg/L에서는 줄기 길이 성장과는 달리 3% 정도 감소하는 경향을 나타내었

다(Fig. 2). 이러한 결과로 볼 때 카드뮴은 오염물질 배출기준농도의 10배와 50배 높은 농도에서는 줄기 생장이 촉진되었으나, 300배 이상의 높은 농도에서는 생장이 감소됨을 알 수 있었다.

이와 같은 결과는 애기장대에 오염물질 배출기준 농도의 카드뮴을 처리한 식물의 줄기 길이는 정상 식물과 거의 유사하였으나, 엽신이 크고 표면적이 증가하는 등 전체적인 줄기 생장은 정상식물보다 촉진되었다는 연구보고¹²⁾와, 저농도의 카드뮴은 식물의 생장을 억제하지 않았다는 연구보고^{2,3)} 등과 거의 유사한 결과로 생각된다.

3.2. 뿌리 성장

여러 가지 농도의 카드뮴 용액을 애기장대에 처리하였을 때 뿌리 생장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 3에서와 같다.

카드뮴을 처리한 식물의 뿌리 길이는 오염물질배출기준농도의 10배 높은 농도인 1 mg/L에서는 정상 식물에 비해 15% 생장이 촉진되었으나 50배 높은 농도에서는 정상식물의 뿌리 길이와 유사한 결과를 나타냈다. 오염물질 배출기준농도보다 150배 이상 높은 농도에서는 뿌리 생장이 정상식물에 비해 11~15% 감소하였다. 즉, 오염물질배출기준농도의 10배 높은 카드뮴농도에서는 뿌리 생장이 촉진되었지만 150배 이상의 높은 농도에서는 농도에 비례하여 점진적으로 뿌리 생장이 감소되었음을 알 수 있었다. 이것은 애기장대에 처리한 카드뮴은 오염물질 배출기준농도나 이보다 10배 및 50배나 높은 농도에서도 애기장대의 뿌리 생장에 아무런 영향을 미치지 않았다는 연구보고¹²⁾와 일치하는 결과이다. 이러한 결과는 뿌리가 토양으로부터 영양분을

흡수하는 과정에서 뿌리표면은 영양분뿐만 아니라 많은 오염물질과 결합하기 때문일 것이다⁷⁾. *Brassica juncea*는 뿌리조직 속에 카드뮴, 니켈, 납 등을 액체 배지에서서보다 500배 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 배지 속의 수은 농도를 거의 100배 정도 감소시켰다¹⁶⁾.

3.3. 잎 성장

여러 가지 농도의 카드뮴 용액을 애기장대에 처리하였을 때 잎 생장에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같다.

카드뮴을 각 농도별로 처리한 식물의 잎 개수는 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도인 1 mg/L에서는 정상 식물의 잎 개수에 비해 6% 증가하였으며 50배 높은 농도에서는 유사한 결과를 나타냈다. 오염물질 배출기준농도보다 150배 이상 높은 농도에서는 잎 개수가 약 8% 감소하였으며, 특히 500배 높은 농도에서는 27% 감소되었다(Fig. 4).

잎 면적은 잎 개수에서의 결과와 비슷한 경향을 나타냈으나 오염물질 배출기준농도보다 500배 높은 농도에서는 표면적이 37% 감소되어 잎 개수의 결과보다 더 현저한 감소를 나타내었다(Fig. 5). 이러한 결과는 줄기 성장상에서의 경향과 거의 유사하였다.

카드뮴을 처리한 애기장대 식물의 잎은 정상식물과 비교하여 생장이 촉진되었으며 특히 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은 농도를 처리한 식물의 잎 생장이 가장 촉진되었다. 이것은 애기장대에 납, 구리, 크롬 및 카드뮴을 처리하였을 때, 다른 중금속과는 달리 오염물질 배출기준농도보다 10배 높은

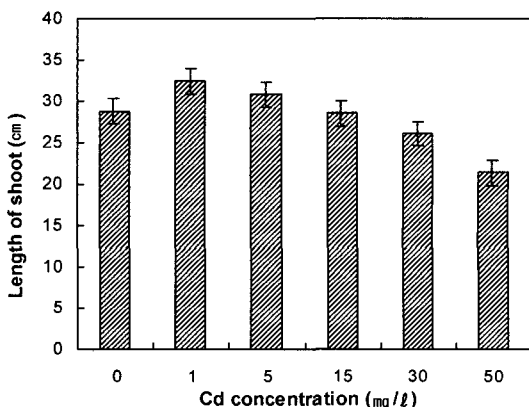


Fig. 1. Effects of cadmium on shoot growth of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

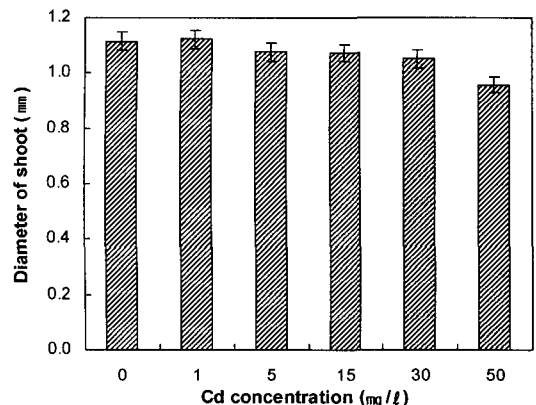


Fig. 2. Effects of cadmium on shoot diameter of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

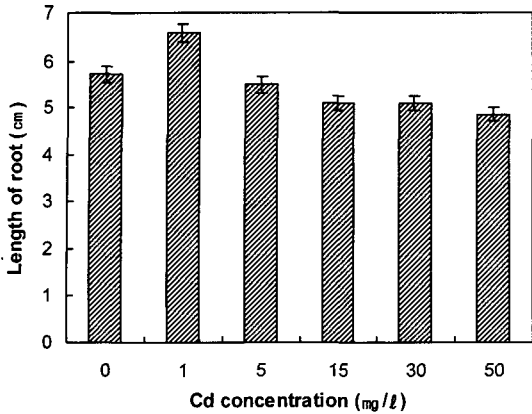


Fig. 3. Effects of cadmium on root growth of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

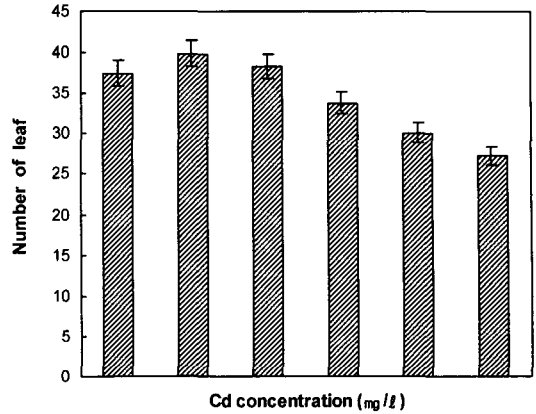


Fig. 4. Effects of cadmium on leaf number of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

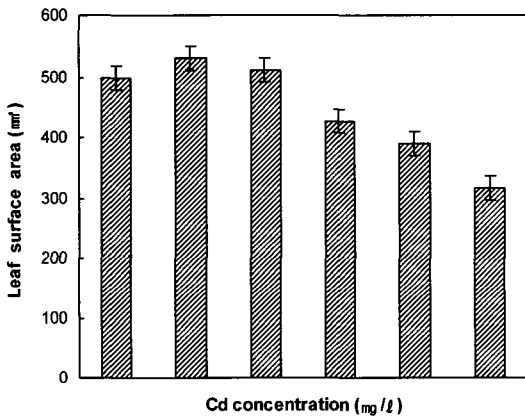


Fig. 5. Effects of cadmium on leaf area of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

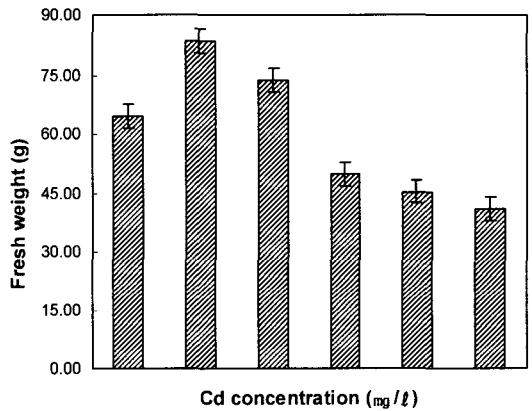


Fig. 6. Effects of cadmium on fresh weight of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

농도의 카드뮴을 처리한 식물의 엽신이 매우 크고 잎 전체의 면적도 증가하였다는 연구보고¹²⁾와 거의 일치하는 결과이다. 어떤 식물은 토양으로부터 비교적 많은 양의 중금속을 흡수하여 조직내에 격리시키는데, 이러한 식물을 금속 hyperaccumulator라고 한다¹⁷⁾. 니켈 hyperaccumulator인 *Psychotris douarrei*의 잎은 nonaccumulator인 *Ficus webbianai*보다 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⁾.

3.4. 생증량

여러 가지 농도의 카드뮴 용액을 애기장대에 처리하였을 때 생증량에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 6에서와 같다.

오염물질 배출기준농도보다 10배 및 50배 높은

농도에서는 정상 식물에 비해 생증량이 각각 29%, 14% 증가하였으며 150배, 300배 및 500배 높은 농도에서는 각각 23%, 30%, 36% 감소하였다. 이러한 결과는 오염물질 배출기준농도의 카드뮴을 처리한 애기장대의 줄기 길이는 정상식물과 거의 유사하였으나 엽신이 크고 잎 면적이 증가하는 등 전체적인 생장은 정상식물에 비해 촉진되었다는 연구보고¹²⁾와 거의 일치하는 결과이다. 십자화과 식물인 *Thlaspi caerulescens*은 토양속의 아연과 카드뮴농도보다 약 10배나 높은 아연과 카드뮴을 경엽부에 축적하고 있는 것으로 보고되었다¹⁹⁾. 최근에는 십자화과 배추속(*Brassica*) 식물인 *Brassica juncea*, *B. napus*, *B. rapa* 3종과 아연과 카드뮴 hyperaccumulator 식물인 *Thlaspi caerulescens*를 오염된 토양에서의 경엽부 생증량을 비교하였을 때, 배추속 3종의 경엽부

생증량이 *Thlaspi caerulescens*보다 10배 이상 생산되었기 때문에 배추속 3종 식물이 오염된 토양으로부터 아연제거에 더 효과적이었으며, 카드뮴 제거는 거의 비슷하였다고 보고되었다⁸⁾.

3.5. 식물체내 카드뮴 농도

영양액 속에 첨가한 여러 가지 농도의 카드뮴 용액이 각 식물체내에 어느 정도 축적되어있는지 각 농도별로 원자흡광분광계로 측정된 결과는 Fig. 7에서와 같다.

토양에 첨가한 카드뮴의 농도가 증가함에 따라 식물체내에 축적된 카드뮴의 농도도 함께 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 오염물질 배출기준농도보다 50배 및 150배 높은 농도에서 거의 4배로 많은 양이 축적되었다. 이와 같은 결과로 토양에 첨가된 카드뮴의 농도와 식물체 내에 축적된 카드뮴의 농도가 비례관계에 있음을 알 수 있었다.

이상의 연구 결과를 요약하면 환경부고시 오염물질 배출기준농도인 0.1 mg/L의 50배 높은 농도까지는 애기장대식물의 생장이 촉진되거나 정상식물과 거의 유사한 생장을 하였으나, 150배 이상의 높은 농도부터는 생장이 감소하는 경향을 나타내며 500배 높은 농도에서는 생장이 현저하게 감소되었음을 알 수 있었다. 이것은 식물이 체내에 중금속이 축적되면 자체적으로 중금속 결합 단백질인 phytochelatin을 생합성시켜 유리 중금속의 농도를 낮추어 중금속에 대한 해독작용을 하는데²⁰⁾, 특히 카드뮴은 이들 중금속 결합 단백질의 합성을 가장 효과적으로 유도하기 때문일 것으로 판단된다.^{21~23)}

유기산중에서 구연산은 중금속과 결합하여 비교적 안정된 금속복합체를 형성할 수 있는데, 물관부에서 많은 금속이 유기산과 복합체로 존재하는 것이 보고되었다^{24,25)}. 카드뮴과 칼슘 및 마그네슘이 토

마토 물관부 세포벽의 구연산 흡착에 영향을 미쳐 전체 구연산 흡착이 중금속 처리에 의해 정상보다 7배 증가하였다²⁶⁾. 구연산을 전처리한 토마토에서는 뿌리에 축적된 카드뮴양의 현저한 변화없이 전체 식물의 카드뮴 흡수량이 2배 증가하였으며, 뿌리를 통한 카드뮴의 경엽부 수송은 5~6배 증가하였고, 경엽부 조직과 물관부에서의 카드뮴 농도는 6~8배 증가하였다. 즉 물관부내 카드뮴의 일부분은 구연산과 결합하여 복합체로 되어 있는 것으로 보인다²⁶⁾.

4. 결 론

애기장대에 카드뮴을 5가지 농도(1, 5, 15, 30, 50 mg/L)로 처리하였을 때 식물의 생장에 미치는 영향을 조사하였다. 애기장대의 줄기 성장에서 환경부고시 오염물질 배출기준농도(0.1 mg/L)의 50배 높은 카드뮴농도로 처리한 식물의 줄기 생장은 정상식물보다 어느 정도 촉진되었으나, 오염물질 배출기준농도의 150배 이상의 높은 농도에서는 농도에 비례하여 생장이 감소되었다. 뿌리 성장에서는 줄기 성장과 유사한 경향을 나타냈지만 오염물질 배출기준농도의 50배 이상의 높은 카드뮴농도에서부터 뿌리생장이 점진적으로 감소하였다. 잎 성장에서는 줄기 성장과 비슷한 경향을 나타내어 오염물질 배출기준농도의 50배 높은 카드뮴농도까지는 엽신이 크고 표면적이 증가하여 생장이 정상식물보다 오히려 촉진되었으나 150배 이상의 높은 농도부터는 농도에 비례하여 생장이 감소되었다. 카드뮴을 처리한 식물들의 생증량은 줄기와 잎 생장의 결과와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 카드뮴을 처리한 식물체 내에 축적된 카드뮴 농도는 토양에 공급한 카드뮴의 농도에 따라 비례적으로 증가하였다. 이상과 같은 결과에서 토양에 첨가한 환경부고시 오염물질 배출기준농도의 50배 높은 농도까지의 카드뮴은 식물 성장을 촉진하는 효과가 있었으나 150배 이상의 농도에서는 농도에 비례하여 식물 생장이 감소하였음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 카드뮴 hyperaccumulator로 보고된 *Thlaspi caerulescens*나 배추속 3종(*Brassica juncea*, *B. napus*, *B. rapa*)에서와 같이 애기장대도 카드뮴 hyperaccumulator로 간주될 수 있는 가능성이 있음을 시사하고 있다.

참 고 문 헌

- 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) Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Goldsbrough and C. S. Cobbett, 1995a, A cadmium-sensitive,

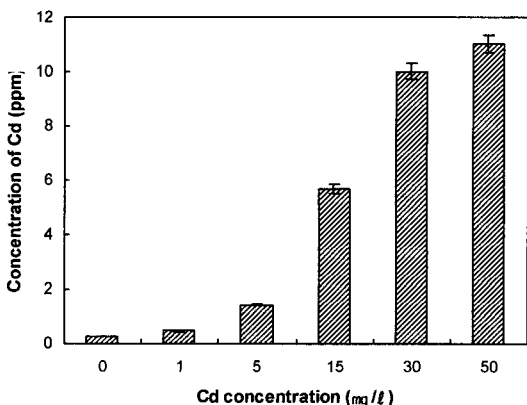


Fig. 7. Cadmium concentration of *Arabidopsis thaliana* treated with cadmium for 14 days.

- glutathione-deficient mutants of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 107, 1067-1073.
- 3) Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Goldsbrough and C. S. Cobbett, 1995b, Cadmium-sensitive, *cad1* mutants of *Arabidopsis thaliana* are phytochelatin deficient, *Plant Physiol.*, 107, 1059-1066.
 - 4) Howden, R. and C. S. Cobbett, 1992, Cadmium-sensitive mutants of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 99, 100-107.
 - 5) 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, 1427-1433.
 - 6) Cunningham, S. D. and D. W. Ow, 1996, Promises and prospects of phytoremediation, *Plant Physiol.*, 110, 15-719.
 - 7) Meagher, R. B., 2000, Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants, *Curr. Opin. plant Biol.*, 3, 153-162.
 - 8) Ebbs, S. D., M. M. Lasat, D. J. Brady, J. Cornish, R. Gordon and L. V. Kochian, 1997, Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil, *J. Environ. Qual.*, 26, 1424-1430.
 - 9) 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.
 - 10) Meyerowitz, E. M., 1989, *Arabidopsis*, a really useful weed, *Cell*, 56, 263-269.
 - 11) Langridge, J., 1994, *Arabidopsis thaliana*, a plant *Drosophila*. *BioEssays*, 16, 775-778.
 - 12) Park, Y. S and J. B. Park, 2002, Effects of heavy metals on growth and seed germination of *Arabidopsis thaliana*, *J. Environ. Sci.*, 11, 319-325.
 - 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, 231-246pp.
 - 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. Botd and S. A. Prior, 2001, Developmental and induced responses of nickel-based and organic defences of the nickel-hyperaccumulating shrub, *Psychotria douarrei*, 150, 49-58.
 - 19) Baker, A. J. M., S. P. McGrath, C. M. D. Sidoli and R. D. Reeves, 1994, The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants, *Res. Conserv. Rec.*, 11, 41-49.
 - 20) Vliet C., C. R. Andersen and C. S. Cobbett, 1995, Copper-sensitive mutant of *Arabidopsis thaliana*, *Plant Physiol.*, 109, 871-878.
 - 21) Grill, E., E. L. Winnacker and M. H. Zenk, 1985, Phytochelatin: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants, *Science*, 230, 674-676.
 - 22) Grill, E., E. L. Winnacker and M. H. Zenk, 1987, Phytochelatin, a class of heavy metal-binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 84, 439-443.
 - 23) Steffens, J. C., 1990, The heavy-metal binding peptides of plants, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 41, 553-575.
 - 24) McGrath, J. F. and A. D. Robson, 1984, The movement of zinc through excised stems of seedlings of *Pinus radiata* D. Don., *Ann. Bot.*, 54, 231-242.
 - 25) Senden, M. H. M. N., A. J. G. M. Van der Meer, J. Limborgh and H. Th Wolterbeek, 1992, Analysis of major tomato xylem organic acids and PITC-derivatives of amino acids by RP-HPLC and UV detection, *Plant and Soil*, 142, 81-89.
 - 26) Senden, M. H. M. N., A. J. G. M. Van der Meer, T. J. Verburg and H. Th Wolterbeek, 1994, Effects of cadmium on the behaviour of citric acid towards isolated tomato xylem cell walls, *J. Exp., Bot.*, 45, 597-606.