

중금속 오염에 대한 Phytoremediation용 야생식물 연구

강병화 · 심상인 · 이상각 · 김광호¹⁾ · 정일민¹⁾
고려대학교 자연자원대학 식량자원학과²⁾ 건국대학교 농업생명과학대학 식량자원학과

Study on the Potential of Phytoremediation using Wild Plants for Heavy Metal Pollution

Byeung-Hoa Kang, Sang-In Shim, Sang-Gak Lee, Kwang-Ho, Kim Il-Min Chung (Dept. of Agronomy, College of Natural Resources, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea, ¹⁾Dept. of Crop Science, College of Agricultural and Life Science, Kon-Kuk Univ., Seoul 143-301, Korea)

Abstract : The potentials of some Korean wild plants as a phytoremediator for cleaning heavy metal pollution were measured. Several plant species, *Ambrosia trifida*, *Brassica juncea*, *Rumex crispus*, and *Abutilon theophrasti* screened previously for phytoremediator were treated with cadmium and copper solution. In order to know the growth response to heavy metal stress, the plants were cultivated in hydroponic system containing heavy metals with different concentration. To know the effects of heavy metals on emergence and seedling growth, seeds of 4 species were sown in the pot and watered with heavy metal solution adjusted pH to 6.5, 5.5, and 4.5. A proposed species as potential phytoremediator, *A. trifida*, showed tolerance to 20 μ mol/L Cd and 80 μ mol/L Cu in nutrient solution without apparent growth reduction, and up to 100 μ mol/L Cd and 400 μ mol/L Cu without critical visual injury. Up to 311mg/kg of Cd and 369mg/kg were accumulated in dried aerial part in *A. trifida*. In contrast, *A. theophrasti* showed injury at 400 μ mol/L Cu. Significant differences were shown in Cu accumulation among the four species. *A. trifida* had much higher concentrations of Cd in the shoot, whereas *R. crispus* accumulated higher concentrations of Cd in the shoot. Testing plant species showed reduced emergence rate with heavy metal treatment. When pH was lowered, the emergence and seedling growth were affected severely with heavy metal. We can suggested that *A. trifida* was the most proper species for phytoremediation in heavy metal-polluted regions.

Key words : Phytoremediation, *Ambrosia trifida*, Cadmium, Copper, Heavy metal

서론

환경은 오염되면 회복되기가 어려우며 직·간접적으로 인간에게 해를 준다. 농업생태계의 오염은 토양에 영향을 주어 농업생산성을 낮추거나, 농산물에 대한 오염을 일으켜 농업생태계로부터 나오는 농산물을 섭취하는 인간의 건강을 위협하게 된다¹⁾. 중금속에 의한 생태계의 오염은 작물의 경우도 벼, 옥수수과 같은 제한된 작물종에서 연구가 수행되어 왔는데^{2,3,4,5)} 토양내 중금속의 농도보다 훨씬 높은 수준으로 작물체내에 축적되는 것으로 보고되었다. 중금속은 생태계 특히, 인간의 먹이 사슬의 근간이 되는 농업생태계의 독성 중금속의 제거는 필수적인 문제이다.

물론 독성 금속에 의한 오염 이전에 오염을 미연에 방지하기 위하여 농자재나 토양 개량용 슬릿지^{6,7,8)} 등에 들어있는 독성금속의 수준에 대한 엄격한 규제가 선행되어야 하나, 대기로부터 유래되어 내려오는 중금속의 경우는 농자재에 대한 규제만으로 오염을 방지하기 어렵다.¹⁾ 토양은 화학물질에 대해 유기물 등이 자정작용을 어느 정도는 할 수 있으나, 과도한 양이 존재할 때는 문제가 발생한다. 이러한 이유로 토양의 정화법이 최근 소개되고 있다.

미국의 경우 중금속에 대한 정화비용으로 연간 70억불 이상 또한 중금속과 다른 유기 화합물이 복합적인 오염에 대한 정화 비용으로는 350억불 이상이 소요되는 것으로 추정하고 있다.⁹⁾ 토양정화에는 오염된 토양을 굴착하여 일정 장소에 오염토양을 매립하거나, 화학적으로 중금속을 부동

화 또는 불용화 시키는 방법, 산성 용액 등으로 용탈시키는 방법 등 기존에 여러 가지 방법이 개발 또는 연구중에 있다. 그러나 최근 중금속오염도양의 제거법으로는 환경친화적인 방법의 하나로 생물복원법(bioremediation)을 들 수 있으며, 이 중 식물을 이용한 식물복원(phytoremediation)은 대표적인 환경친화형 정화기술로 보여진다.⁹⁾ 이러한 장점에도 불구하고 식물 복원법의 실제적 이용에 있어서는 몇 가지 선행되어야 될 것들이 있는데, 첫째로 phytoremediation에 이용할 수 있는 식물자원의 탐색과 개발이다. 다른 보고¹⁰⁾에서처럼 식물종은 독성금속에 대한 종간의 큰 차이가 있으며, 금속의 흡수 및 축적 정도도 종에 따라 크게 다르므로 식물복원에 필요한 식물종의 개발이 필수적이다. 둘째로 식물복원법의 적용에 있어서 이용 대상 식물의 축적 양상 확인 외에 생리·생태적 특성의 확인이다. 셋째로 이들 종의 번식법 및 관리법에 대한 기술의 확립이다.

본 연구는 중금속 내성이 있는 것으로 보고^{8,10)}되어 있는 식물종을 대상으로 이들의 축적 능력 및 중금속에 의한 생리적 반응 등을 확인하여 식물복원법에 적합한 식물종을 제안하고자 실시하였다.

재료 및 방법

중금속이 phytoremediator 예비종의 출현과 초기 생육에 미치는 영향

실험에 이용된 식물종은 기존에 연구 결과¹⁰⁾를 토대로 하여 중금속에 대한 내성이 강하고 건물생산이 많은 종을 선택하였다. 예비종으로 선발된 식물종은 단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida*), 갯(*Brassica juncea*), 소리쟁이(*Rumex crispus*), 어저귀(*Abutilon theophrasti*) 등 4 종이었다. 자연 상태에서 생육하는 이들의 생태적 특성과 초장 등은 표 1과 같다. 이들 종을 깨끗이 씻은 모래가 담긴 사각 포트에 4월 6일에 Cd과 Cu를 토양내 위험 농도에 대한 연구 결과¹¹⁾를 고려하여 100 μ M과 2mM로 각각 처리하였다. 출현율은 파종 후 3일부터 15일간 조사하였고, 5월 21일 수확하여 초장, 지상부 및 지하부의 생체중을 조사하였고 건조 후 분석시료로 이용하였다. 포트의 수분 공급은 NaOH와 H₂SO₄를 이용하여 pH를 6.5, 5.5, 4.5로 조절한 후 공급하였고 비료는 하이포넥스로 영양분을 공급하였다.

Table 1. Ecological characteristics of the plants as potential phytoremediator.

| Species | Family | Life cycle | Plant height (m) | Flowering season (month) |
|-----------------------------|--------------|------------|------------------|--------------------------|
| <i>Ambrosia trifida</i> | Asteraceae | annual | 1.5~2.2 | 7~9 |
| <i>Brassica juncea</i> | Brassicaceae | biennial | 0.8~1.2 | 4~5 |
| <i>Rumex crispus</i> | Polygonaceae | perennial | 0.5~1 | 7~8 |
| <i>Abutilon theophrasti</i> | Malvaceae | annual | 1.2~2 | 8~9 |

양액내 중금속 농도에 따른 식물의 성장과 축적량 확인

공시 식물종을 유묘의 크기가 10cm 정도가 되도록 키운 후 Hoagland 용액의 조성을 달리한 양액¹⁰⁾(pH 6.5)을 이용한 수경재배로 생육시키다가 이식한 식물체가 안정되고 20cm 정도 자랐을 때 Cd(4, 20, 100 μ M)과 Cu(80, 400, 2000 μ M)를 처리하였다. 처리 3주 후에 식물체의 상대생장률과 엽록소함량, 엽록소형광 등을 측정하였다. 엽록소형광은 암조건에 엽을 방치한 후 chlorophyll fluorescence meter(FIM 1500, ADC, UK)를 이용하여 Fv/Fm 수치를 구하였다. 상대생장률(RGR)은 21일간의 성장량에 대하여 아래의 식에 의거하여 구하였다.

$$RGR = (lnW_2 - lnW_1) / (t_2 - t_1)$$

여기서 ln은 자연로그이고 W₂와 W₁은 t₂와 t₁의 건물중이다.

독성 금속에 대한 선발종의 생리적 특성 확인

독성금속 처리에 따른 생체내에 반응하는 생리적 특성을 평가하기 위하여 엽록소, 당 및 단백질 함량을 분석하였다. 단백질은 Bradford¹²⁾의 방법으로 BSA를 표준물질로 하여 정량하였고, 당은 Bernfeld¹³⁾의 방법으로 포도당을 표준물질로 하여 정량하였으며, 엽록소는 Arnon¹⁴⁾의 방법으로 정량하였다.

중금속 축적량 확인

식물체에 의해 흡수되고 축적된 중금속의 정량을 위해 식물체를 80℃의 건조기에서 48시간 건조 후 마쇄하여 ternary solution(HNO₃:H₂SO₄:HClO₄=10:1:4)으로 분해하여 여과한 후 원자흡광광도계(Hewlett Packard, model AA3280)를 사용하여 정량하였다.

모든 실험구의 배치는 온실 실험으로 완전임의배치 3반복으로 수행하였으며, 자료의 처리는 PC용 SAS package를 이용하여 분산분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

중금속이 공시 식물종의 출현과 초기 생육에 대한 영향

중금속에 의한 공시종들의 출현은 표 2와 같이 Cd처리에 따라서는 pH의 변화에 따라 대조구와 큰 차이는 없었으나 Cu처리에서는 공시초종 모두에서 출현율이 극히 불량하였다. 카드뮴과 구리는 임의 보고¹¹⁾와 같이 토양에서 오염 판단 기준이 각각 0.3mg/kg과 12mg/kg으로 구리가 높은데, 이들에 의한 출현율의 영향은 산성 토양에서 문제가 되며 특히 구리의 경우가 저해 정도가 심하였다. 토양의 산도와 중금속의 피해 정도는 밀접한 관계가 있다고 알려져 있는데^{15,16)} 본 연구의 결과도 산성일수록 피해가 크게 나타났다. 식물종에서는 소리쟁이가 가장 민감하여 2mM의

Table 2. Effects of heavy metals and soil pH on the emergence of testing plants.

| Species | Control | | | | Cd(100 μ M) | | | Cu(2mM) | |
|-----------------|---------|--------|---------|--------|-----------------|--------|--------|---------|--------|
| | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 |
| | (%) | | | | | | | | |
| A. trifida | 76.7a | 76.7a | 73.3a | 80.0a | 70.0a | 70.0a | 80.0a | 33.3b | 6.7c |
| B. juncea | 96.7a | 86.7b | 95.0a | 85.0bc | 85.0bc | 76.7c | 55.0d | 5.0e | 5.0e |
| R. crispus | 83.3a | 83.3a | 96.7a | 95.7a | 83.3a | 90.0a | 13.3b | 0.0c | 0.0c |
| A. theophrastil | 80.0bc | 93.3ab | 90.0abc | 100.0a | 83.3abc | 93.3ab | 76.7c | 30.0d | 20.0d |

The same letter in a row(a plant) are not significantly different by Duncan's multiple range test(P=0.05).

구리를 처리한 pH 5.5 이하에서는 전혀 출현을 하지 않았다.

그러나 어저귀는 구리에 의해 다소 저해는 받았으나 pH 4.5에서도 20% 정도의 출현율을 보여 비교적 산성화에 의한 피해는 다른 종에 비해 적었다. 단풍잎돼지풀은 pH 4.5에서 출현율이 작았으나 대체로 중금속에 의한 피해 정도는 적게 나타났다. 출현 후 초장의 경우는 표 3과 같이 토양내 중금속의 위해 농도에서 식물 유묘에 대한 피해는 카드뮴보다는 구리의 피해가 더 크게 나타났다. 카드뮴의 경우 단풍잎돼지풀이나 갯의 경우는 피해는 작았으나 소리쟁이와 어저귀는 카드뮴에 의한 초장의 저해 정도가 갯이나 단풍잎돼지풀에 비해 심하였다.

지상부 및 지하부의 생체중에 대한 피해도 표 4와 표 5와 같이 카드뮴에 의해서는 단풍잎돼지풀이나 갯의 경우 피해 정도가 약하였으나 소리쟁이나 어저귀는 다소 피해가 심하게 나타났다. 유묘의 출현이나 생장에 대한 영향은 카드뮴의 경우 단풍잎돼지풀이나 갯에서는 약하여 카드뮴에 대한 phyto remediation에 있어서 이들이 효과적인 기능을 할 수 있을 것으로 보여진다. 특히 알려진 바와 같이 중금속의 피해가 산성 조건에서 심하였는데, 카드뮴과 구리 공히 pH가 낮아질수록 피해가 컸고 카드뮴의 경우 뿌리 생장에 있어서는 단풍잎돼지풀이나 갯에 대해 pH의 영향이 거의 없었으며 갯의 경우는 도리어 pH가 낮아짐에 따라 뿌리의 생체중이 증가하였다. 갯은 기존에 다른 연구⁹⁾에서도 *Thlaspi caerulescens*¹⁷⁾와 더불어 phyto remediation용으로 효과적인 것으로 알려져 있는데, 카드뮴에 대한 피해는

적었으나 구리에 의해서는 피해가 심하게 나타났다. 유묘기 동안 단풍잎돼지풀이 공시한 식물종 중에서는 중금속에 대한 내성이 가장 높게 나타났다.

공시 식물종 중 가장 phyto remediation에 적합한 종으로 보여지는 단풍잎돼지풀의 중금속에 의한 유묘의 식물체내 물질의 변화는 표 6과 같다. 엽록소의 경우는 카드뮴에 의해서는 대조구와 비교해서 큰차이는 없었으나 구리에 의해서는 pH가 낮아질수록 엽록소 함량이 감소하는 경향이였다. 가용성 단백질 함량의 경우 대조구에서는 pH가 낮아짐에 따라 증가하였으나 Ca에서는 처리간의 차이가 없고 Cu에서는 단백질함량이 증가하였다. 가용성당은 대조구에 비해 Ca에서는 작았지만 Cu에서는 증가하는 경향으로 중금속처리에 따른 식물체내의 생리적인 특성은 정확한 변화의 양상은 보이지 않았다. 중금속에 대한 식물의 내성과 관련하여 phytochelatin, 유기산 등^{18,19,20)}의 기능은 비교적 잘 알려져 있는데 이러한 내성 관련 물질 외에 저장 물질의 변화도 중금속에 의해 어떠한 영향을 받는지는 추후의 연구가 요망된다.

양액내 중금속이 공시종의 생육에 미치는 영향

수경재배 조건하에서 공시 식물종들의 생육에 대한 중금속의 영향은 공시종 모두에서 Cd보다는 Cu의 영향이 크게 나타났는데, 상대생장율은 표 7과 같이 구리의 영향은 갯과 어저귀가 컸으며 미국돼지풀과 소리쟁이가 비교적 작았다. 특히 어저귀는 80 μ mol/L의 구리에 의해서도 급격한 감

Table 3. Effects of heavy metals and soil pH on the plant height of testing plants.

| Species | Control | | | | Cd(100 μ M) | | | Cu(2mM) | |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|---------|--------|
| | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 |
| | (%) | | | | | | | | |
| A. trifida | 33.4a | 29.3ab | 31.3a | 25.7bc | 23.9c | 24.4bc | 2.7d | 1.3d | 0.5d |
| B. juncea | 18.1b | 19.8ab | 21.0a | 19.8ab | 20.1ab | 18.7ab | 0.3c | 0.0c | 0.0c |
| R. crispus | 14.7b | 12.9c | 17.1a | 8.2d | 5.8e | 4.0f | 0.1g | 0.0g | 0.0g |
| A. theophrastil | 24.8b | 23.9b | 28.7a | 12.5d | 16.0c | 9.3e | 2.9f | 1.6f | 0.7f |

The same letter in a row(a plant) are not significantly different by Duncan's multiple range test(P=0.05).

소가 일어났으나 단풍잎돼지풀과 소리쟁이는 80 μ mol/L의 구리에 의한 상대생장률의 감소가 비교적 작았다. 카드뮴의 처리는 구리에 비하여 작았으나 어저귀의 경우 100 μ mol/L의 카드뮴에 의해 상대생장률이 급격히 감소하였다. 상대생장률을 근거로 phytoremediation용 식물종은 본 연구의 공시종 중에서 카드뮴에 대해서는 단풍잎돼지풀, 갯, 소리쟁이가 구리에 대해서는 단풍잎돼지풀, 소리쟁이가 비교적 적합한 것으로 나타났다.

표 8의 초장에 대한 중금속의 영향을 보면 카드뮴, 구리 처리에서 초장의 감소가 매우 미약하게 나타나 초장을 중금속에 의한 피해 정도를 판단하는 기준으로 적용하기에는 적합하지 않았다.

공시종 중 phytoremediation에 이용하기 적합한 종으로

사료되는 단풍잎돼지풀은 표 1과 같이 초장이 2m이상 되는 거대 초본 식물이다²⁰⁾. 이 종은 일년생 식물로서 번식과 제거가 쉬우며 쌍자엽 식물로서 현재의 잡초방제 기술로 제거가 비교적 손쉬운 종이라고 볼 수 있다. 더욱이 종자 크기가 5~10mm 정도로 매우 커 종자의 비산이 적어 식물체의 급격한 전파 가능성이 낮아 유리한 점이 있다. 이 단풍잎돼지풀은 그림 1과 같이 중금속에 의해 광합성의 척도가 되는 형광 수율(fluorescence yield)이 영향을 받았는데, 다른 연구 결과²¹⁾와 같이 중금속이 광합성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러나 앞의 결과와는 달리 구리에 비해 카드뮴의 영향이 더 크게 나타났다. 엽록소 형광의 척도인 Fv/Fm은 카드뮴에 의해 많이 줄어들었는데, 20 μ mol/L로 양액에 처리하였을 경우 무처리의 약 50% 정도

Table 4. Effects of heavy metals and soil pH on the shoot fresh weight of testing plants.

| Species | Control | | | | Cd(100 μ M) | | Cu(2mM) | | |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|-----------------|--------|---------|--------|--------|
| | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 |
| | (g) | | | | | | | | |
| A. trifida | 10.4a | 8.1ab | 9.7a | 8.2ab | 6.5b | 6.5b | 0.7c | 0.4c | 0.1c |
| B. juncea | 18.1a | 16.8a | 23.5a | 21.2a | 29.8a | 26.9a | 0.1b | 0.0b | 0.0b |
| R. crispus | 6.9b | 6.0b | 8.7a | 4.1c | 2.6d | 2.4d | 0.0e | 0.0e | 0.0e |
| A. theophrastil | 5.1b | 5.1b | 6.7a | 3.4c | 2.4d | 1.9d | 0.2e | 0.1e | 0.1e |

The same letter in a row(a plant) are not significantly different by Duncan's multiple range test(P=0.05).

Table 5. Effects of heavy metals and soil pH on the root fresh weight of testing plants.plants.

| Species | Control | | | | Cd(100 μ M) | | Cu(2mM) | | |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|-----------------|--------|---------|--------|--------|
| | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 | pH 6.5 | pH 5.5 | pH 4.5 |
| | (g) | | | | | | | | |
| A. trifida | 3.31a | 2.54ab | 2.09b | 2.34ab | 2.53ab | 2.72ab | 0.47c | 0.16c | 0.02c |
| B. juncea | 1.15b | 2.09b | 1.52b | 2.03b | 2.16b | 3.66a | 0.01c | 0.00c | 0.00c |
| R. crispus | 0.55cd | 0.94ab | 1.02a | 0.75bc | 0.35d | 0.49d | 0.00e | 0.00e | 0.00e |
| A. theophrastil | 1.14b | 1.88a | 1.76b | 1.12b | 0.64c | 0.78bc | 0.13d | 0.02d | 0.01d |

The same letter in a row(a plant) are not significantly different by Duncan's multiple range test(P=0.05).

Table 6. Effects of cadmium and copper on the chlorophyll, soluble protein, and soluble sugar content of *Ambrosia trifida* seedling.

| Treatment metal/pH | Chlorophyll | | | Soluble protein | Soluble Suga |
|--------------------|-------------|--------|--------|-----------------|--------------|
| | a | b | total | | |
| | (mg/ g FW) | | | | |
| Cont/6.5 | 4.45cd | 1.43bc | 5.88cd | 5.13g | 21.5c |
| Cont/5.5 | 5.68a | 1.87a | 7.55a | 6.15f | 31.8b |
| Cont/4.5 | 5.08b | 1.52b | 6.59b | 9.84b | 23.3c |
| Cd 6.5 | 4.80bc | 1.46b | 6.26bc | 7.71d | 16.9d |
| Cd 5.5 | 4.64c | 1.42bc | 6.06c | 7.90c | 22.0c |
| Cd 4.5 | 4.19de | 1.34c | 5.53de | 6.73e | 23.1c |
| Cu 6.5 | 3.84e | 1.32c | 5.15e | 10.16a | 40.1a |
| Cu 5.5 | 2.23f | 0.89d | 3.13f | 8.10c | 32.8b |
| Cu 4.5 | -* | - | - | - | - |

The same letter in a row(a plant) are not significantly different by Duncan's multiple range test(P=0.05).

*) All plants were dead

로 감소되었다. 그러나 구리에 의해서는 처리간의 차이는 미약하였다. 엽록소 함량은 카드뮴 처리에 의해서는 감소하였으나 구리에 의해서는 함량이 증가하는 경향으로 의견상 엽색이 짙어지는 결과를 보였다.

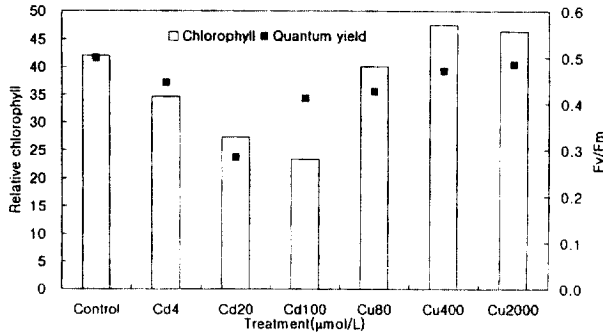


Fig.1. Effects of heavy metals(Cd and Cu) on the fluorescence yield and chlorophyll concentration of *Ambrosia trifida*, a proposed species for phytoremediation.

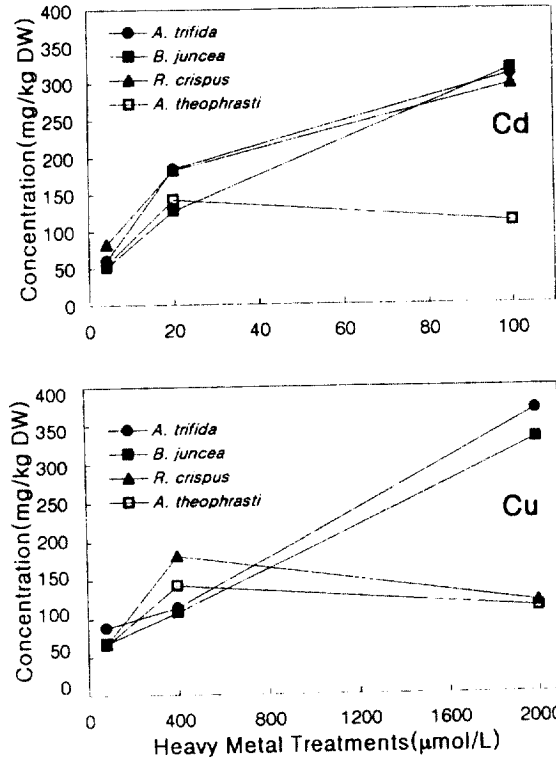


Fig. 2. Shoot cadmium(upper) and copper(lower) concentration in testing plants grown with different heavy metal concentrations in nutrient solution.

공시종의 중금속 축적도

공시종들의 중금속 축적은 그림 2와 같다. 양액의 pH가 6.5인 관계로 양액내 중금속의 용해도가 높지는 않았으나 축적되는 중금속의 양은 양액내 중금속의 농도가 높아질수록 늘어났다. 카드뮴의 경우 농도가 높아지더라도 공시 식물종의 생육이 비교적 양호하여 양액내 농도가 높아질수록

Table 7. Effect of Cd and Cu on relative growth rate of testing plants.

| Species | Control | Cd(μM) | | | | Cu(μM) | |
|---|---------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | 4 | 20 | 100 | 80 | 400 | 2000 |
| (g · g ⁻¹ · wk ⁻¹) | | | | | | | |
| <i>A. trifida</i> | 0.442 | 0.344 | 0.274 | 0.261 | 0.243 | 0.189 | 0.091 |
| <i>B. juncea</i> | 0.420 | 0.389 | 0.371 | 0.282 | 0.036 | 0.045 | 0.010 |
| <i>R. crispus</i> | 0.507 | 0.458 | 0.390 | 0.264 | 0.250 | 0.221 | 0.141 |
| <i>A. theophrastil</i> | 0.678 | 0.590 | 0.497 | 0.068 | 0.056 | 0.189 | 0.022 |

Table 8. Effect of Cd and Cu on plant height of testing plants.

| Species | Control | Cd(μM) | | | | Cu(μM) | |
|------------------------|---------|--------|------|------|------|--------|------|
| | | 4 | 20 | 100 | 80 | 400 | 2000 |
| (cm) | | | | | | | |
| <i>A. trifida</i> | 84.7 | 88.3 | 66.0 | 63.9 | 57.1 | 53.6 | 46.5 |
| <i>B. juncea</i> | 71.9 | 74.0 | 60.5 | 57.6 | 33.9 | 36.1 | 33.2 |
| <i>R. crispus</i> | 57.8 | 57.2 | 49.2 | 40.9 | 32.8 | 35.4 | 32.8 |
| <i>A. theophrastil</i> | 56.9 | 51.3 | 40.2 | 44.8 | 34.0 | 37.5 | 30.9 |

축적량이 많아졌으나, 구리는 농도가 높아짐에 따라 소리쟁이와 어저귀의 경우 생육이 불량해져 고농도(2000 μ mol/L)에서는 흡수 및 축적량이 감소하였다. 앞에서 phytoremediation에 적합한 종으로 추천한 단풍잎돼지풀의 경우 축적량이 Cd의 경우 311mg/kg이고 구리의 경우 368mg/kg 정도로 매우 높았는데, 이 수치는 Salt 등⁹⁾이 phytoremediation-용으로 이용이 가능하다고 보고한 것에서 지상부 축적량이 Cd는 175 μ g/g이고 Cu는 159 μ g/g며, *Thlaspi caerulescens*의 경우 Cd는 59 μ g/g이고 Cu는 623 μ g/g 이었다는 결과와 비교할 때 다소 높은 수치이다. 그러나 *Thlaspi caerulescens*는 축적량은 많으나 식물의 건물 생산량이 적어 비효율적인 종으로 사료된다. 본 연구는 지상부의 축적량만 확인하였고 지하부의 축적량은 확인하지 않았으나 지하부가 지상부에 비해 중금속이 축적이 많다는 다른 보고들²³⁾을 고려할 때 지하부의 축적량도 상당히 높을 것으로 사료된다.

요 약

중금속 오염에 대한 식물복원법(phytoremediation)에 적합한 식물종의 탐색과 확립에 필요한 기초자료를 얻기 위하여 본 연구를 수행하였다. 공시 식물은 단풍잎돼지풀, 갯, 소리쟁이, 어저귀와 같은 야생식물을 이용하였다. 이들 종에 중금속으로 카드뮴과 구리를 처리하여 유묘의 출현과 유묘시기의 생육의 변화 및 양액재배를 통해 중금속이 이들종에 미치는 영향과 축적되는 정도를 알아보았다. 공시종을 모래에 파종 후 중금속을 토양내 위험 수준으로 처리하고 pH를 6.5, 5.5, 4.5 조절하였을 때 pH가 낮아질수록 출현율 및 유묘의 생육은 저하되었으며 카드뮴에 비해 구리의 피해가 좀더 심하였다. 공시종 중 phy-toremediation에 가장 적합한 종은 단풍잎돼지풀이었으며 이종은 중금속에 의한 유묘의 출현과 초기 생육의 영향이 다른 종에 비해 적었으며, 양액 재배에 있어서도 20 μ mol/L Cd와 80 μ mol/L Cu 정도의 농도 처리에 의한 피해 정도가 미약하였다. 미국돼지풀은 중금속 축적량이 유묘의 카드뮴 311mg/kg, 구리 369mg/kg 정도가 축적되어 양호한 결과를 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 농업과학분야 거점연구소 육성사업에 의한 연구비 지원으로 수행된 연구결과의 일부임.

참고문헌

1. Allaway, W. H. (1968). Agronomic controls over the environmental cycling of trace elements. *Adv. Agro.* 20:235-274.
 2. Lee J. J., and J. Choi (1986) Investigation of heavy

metal(Zn, Cu, Cd, Pb) contents in the effluents, soils and plants at keumho riverside. *Kor. J. Environ. Agric.* 5:24-29.
 3. Kim S. J., and H. S. Ryang (1986). Heavy metals in paddy rice and soils in mangyeong river area. *Kor. J. Environ. Agric.* 5:11-23.
 4. Lee M. H., and B. Y. Kim (1985). The effect of Cd and Zn elements applied to soil on the growth and their uptake of corn plant. *Kor. J. Environ. Agric.* 4:11-17.
 5. Moon Y. H., Y. H. Kim and H. S. Ryang (1990). Effects of heavy metals Cr, Ni, Cd, Cu, Zn on growth radish and chinese cabbage in soils. *Kor. J. Environ. Agric.* 9:113-119.
 6. Heckman, J. R., J. S. Angel and R. L. Chaney (1987). Residual effects of sewage sludge on soybean: II. Accumulation of heavy metals. *J. Environ. Qual.* 16:113-117.
 7. Lamy, I., S. Bourgeois and A. Bermond (1993). Soil cadmium mobility as a consequence of sewage sludge disposal. *J. Environ. Qual.* 22:731-737.
 8. Chang, A. C., Granato, T. C. and A. L. Page (1992). A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges. *J. Environ. Qual.* 21:521-536
 9. Salt, D. E., M. Blaylock, N. P. B. A. Kumar, V. Dushenkov, B. D. Ensley, I. Chet and I. Raskin (1995). Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotech.* 13:468-474.
 10. Kang B. H., S. I. Shim and S. G. Lee (1996). Application of weed species as the diagnostic indicator plants of environmental pollution. *Kor. J. Environ. Agric.* 15:46-69.
 11. Lim S. K. (1994). *Environment quality criteria for national guidelines.*
 12. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72:248-254.
 13. Bernfeld, P. (1955). Amylase, *Methods in enzymology* 1:149-158.
 14. Arnon, D. I. (1949). Copper enzyme in isolated chloroplasts polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24:1-15.

15. Harter, R. D. (1983). Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:47-51.
16. Lim S. K., Y. J. Lee and H. J. Choi (1991). Effects of soil solution pH on adsorption and desorption of Cd, Cu and Zn by soils. *Kor. J. Environ. Agric.* 10:119-127.
17. Brown, S. L., R. L. Chaney, J. S. Angel and A. J. M. Baker (1995). Zinc and cadmium uptake of *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:125-133.
18. Foy, C. D., R. L. Chaney and M. C. White (1978). The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29:511-566.
19. Knecht, J.A., M. van Dillen, P.L. Koevoets, H. Schat, J.A.C. Verkleij and W.H.O. Ernst (1994). Phytochelatins in cadmium-sensitive and cadmium-tolerant *Silene vulgaris*: Chain length distribution and sulfide incorporation. *Plant Physiol.* 104:255-261.
20. Krotz, R.M., B.P. Evangelou and G.J. Wagner (1989). Relationships between cadmium, zinc, Cd-peptide, and organic acid in tobacco suspension cells. *Plant Physiol.* 91:780-787.
21. Lee Tc. B. (1982). *Illustrated flora of Korea*.
22. Atal, N., P.P. Saradhi and P. Mohanty (1991). Inhibition of the chloroplast photochemical reactions by treatment of wheat seedlings with low concentrations of cadmium: Analysis of electron transport activities and changes in fluorescence yield. *Plant Cell Physiol.* 32:943-951.
23. Mattioni, C., R. Gabbrielli, J. Vangronsveld and H. Clijsters (1997). Nickel and cadmium toxicity and enzymatic activity in Ni-tolerant and non-tolerant populations of *Silene italica* Pers. *J. Plant Physiol.* 150: 173-177