

## 구리 내성 식물에 관한 연구

김 성 현 · 이 인 숙\*

이화여자대학교 생명과학과

**적 요:** 본 연구는 구리 내성을 가진 식물을 선별하기 위한 기본 자료를 마련하기 위하여 피, 알팔파, 닭의장풀, 해바라기, 옥수수, 어저귀 등 6종 유식물의 토양 내 구리 농도별 생장을 및 구리 제거율 등을 조사하였다. 대조구 및 50, 100, 200, 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg 의 토양에 각 식물의 종자를 심어 14일 후 수거하여 발아율, 유식물의 생장 및 생체량, 구리 축적 및 제거력 등을 관찰하였다. 구리 농도에 따른 발아율 저해가 나타나지 않은 식물로는 피, 해바라기, 닭의장풀 등이었다. 그러나 해바라기의 경우 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서 유식물의 뿌리 및 지상부의 생장이 대조구의 약 7% 수준으로 큰 저해를 받았으며 생체량도 대조구의 약 35%에 불과해 구리에 의한 생체량 저해가 가장 심한 종으로 나타났다. 이에 반해 피와 닭의장풀은 고농도의 구리 오염 토양에서도 생장이 높아 구리에 대한 내성이 가장 뛰어난 식물로 나타났다. 특히 피의 경우, 토양 내 구리 제거율이 30% 이상이었으며, 토양 내 구리 농도가 증가할수록 축적량이 꾸준히 증가하여 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서 kg당 약 1020mg의 Cu를 축적하는 것으로 나타나 phytoremediation에 사용될 가능성 있는 종으로 사료된다.

**검색어:** 구리, 닭의장풀, 알팔파, 어저귀, 옥수수, 토양, 피, 해바라기, phytoremediation

### 서 론

구리는 미량 필수 원소로서 농업용 토양에는 미량의 구리가 함유되어 있으며 킬레이트를 첨가한 구리가 요구되어지기도 하나(Baker and Waker 1989), 토양 중에 그 함량이 많을 때에는 식물에 해를 끼치게 된다(Tomsett *et al.* 1988). 특히 토양 내 구리 오염은 생태계 피해를 초래하여 종다양성에 치명적인 영향을 미친다(이2000). 토양 중 구리의 자연 부존량은 평균 3~4 mg/kg 정도이며, 우리나라 토양환경보전법에 따르면 논 토양에서 50 mg/kg 이상 지역은 오염우려지역, 125 mg/kg 이상 지역은 오염대책지역으로 규정하고 있다. 또한 토양 용액의 구리 농도가 0.1mg/kg 미만일 때는 식물 생육이 불가능해진다고 알려져 있다(환경부 2000). 토양에서 구리는 유기물과 강하게 결합되어 있어 이 금속의 이동 조절은 구리-organic complex 작용에 의해 일어나게 된다(Mengel and Kirkby 1987).

구리를 비롯한 다른 중금속은 식물의 광합성 기작 및 생장을 억제하고 노화를 촉진시키는 것이 공통된 특성이다(Willmer 1983). 그 중에서 구리는 인체 내 축적이 어려우므로 만성 중독을 일으키는 어려우나 간·신장 손상, 중추신경 장애(우울증), 소화기계 장애 등을 유발한다.

중금속으로 오염된 토양의 복원을 위해 기존에 쓰이는 방법들로는 중금속의 토양 세척, 전기 정화 등 물리화학적 방법 등이 있다. 그러나 이러한 방법들은 높은 비용과 이차 오염 물질 유발 및 저 효율 등의 많은 문제점들로 인해 새로운 토양정화기술로

모색되고 있는 실정이다. 그 중에서 phytoremediation 기법은 식물을 이용해 오염물을 제거, 안정화, 무독화시키는 방법으로 매우 경제적인 환경친화적인 기법으로 최근 주목을 받고 있다(백 등 1999).

대부분의 식물이 구리를 축적할 수 있는 농도는 약 2~20ppm으로 낮은 편이나(Wallnofer and Engelhardt 1984), 축적종으로 알려진 식물들은 구리로 오염된 토양에서도 성장에 저해를 받지 않으며 높은 수준의 구리를 제거하는 것으로 알려져 있다(Antonovics *et al.* 1971). 구리에 내성을 가진 종으로 알려진 식물로는 *Silene cucubalus*(Jackson *et al.* 1990), *Mimulus guttatus* 등이 있다(Harper *et al.* 1997).

중금속에 대한 식물의 내성을 조사하기 위하여 발아현상을 이용하는데, 이는 발아되지 않은 종자는 불리한 환경에서도 잘 견딜 수 있지만 발아기간 중에는 외부의 환경 스트레스에 매우 민감하여 이 시기의 내성 현상이 그 식물의 내성 정도를 대표할 수 있기 때문이다(Wang 1991). 유식물의 시기 또한 외부의 환경에 매우 민감하기 때문에 이때의 생장을 내성의 지표로 사용할 수 있는 것이다(Turner *et al.* 1991). 이처럼 발아와 유식물의 성장조사는 비교적 간편하고 경제적이며 항상 이용 가능한 방법으로 널리 사용되고 있으나 아직도 단일화된 표준방법이 정립되지 못한 실정이다(Mohan and Hosetti 1991).

본 연구는 구리로 오염된 토양을 식물을 이용하여 정화하기 위한 기초 단계로, 그 동안 본 연구실에서 카드뮴 및 납 등 중금속 제거능이 있는 것으로 연구된 피, 알팔파, 닭의장풀, 해바라기, 옥수수, 어저귀 등 6종을 대상으로 수행하였다. 토양 내 구리

\* Corresponding author; Phone: 82-2-3277-2375, e-mail: islee@ewha.ac.kr

농도에 대한 발아율, 뿌리와 지상부의 생장을 및 생체량을 조사하여 구리 내성종을 선별했으며, 이를 토대로 phytoremediation의 기초를 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

식물의 종자

2003년 2월에 농촌진흥청(수원 소재)으로부터 어저귀, 피, 알팔파, 닭의장풀 등 4종의 국내산 종자를 분양 받았다. 옥수수와 해바라기는 종자 상회에서 구입하여 사용하였다(Table 1).

구리 내성실험

구리 용액은 CuCl<sub>2</sub>을 1 strength hoagland's 용액에 0, 50, 100, 200, 300 mg/L의 농도로 첨가하여 조제하였다. 농도별로 오염시킨 토양 150 g을 pot에 담은 뒤, 각 식물의 종자를 10개씩 심었다. 이 pot들은 온도 25°C, 습도 60%로 유지되는 생장실에서 명과 암조건을 각각 16시간과 8시간으로 하여, 각 식물의 발아상태를 확인하였다. 14일 후 농도별 종자 발아율과 최장 뿌리와 지상부의 길이 및 생체량을 측정하였고, 모든 실험은 3반복으로 수행하였다(David et al. 1995).

토양 분석

토양의 분석은 풍진한 토양 0.1 g에 왕수(aqua regia: 65% HCl 3 mL + 37% HNO<sub>3</sub> 1 mL)를 가하고 microwave에서 분해시킨 후 20 mL로 희석하였다. Flame AAS를 통하여 구리의 농도를 측정하였다. 중금속 분석 방법의 신뢰도는 캐나다의 NRS-CNRC (National Research Council of Canada)에서 공인된 표준물질인 MESS-2(Marine Sediment)의 분석을 통해 확인하였으며 표준물질과 blank도 시료와 같은 방법으로 분석하였다.

식물체 분석

식물은 증류수로 깨끗이 씻은 후, 60°C 건조기에서 항량이 될 때까지 건조한다. 이 시료 0.5 g에 37% HNO<sub>3</sub> 5 mL을 가하여 microwave에서 분해시킨 후, 10 mL로 희석하여 Flame-AAS를 이

용하여 구리의 농도를 측정하였다. 중금속 분석 방법의 신뢰도는 일본의 NIES(National Institute for Environmental Studies)에서 공인된 표준물질인 No.10-c(Rice Flour)의 분석을 통해 확인하였다.

결과 및 고찰

구리 내성식물

식물의 발아에 미치는 구리의 영향을 알아보기 위하여, 여러 농도 구배의 구리 오염 토양에 각 식물 종자를 심어 발아율을 조사하였다(Table 2).

구리농도에 따른 발아율의 저해가 크지 않은 종은 피, 해바라기, 닭의장풀이었다. 특히 대조구와 비교해서 모든 농도에서 해바라기와 피는 90% 이상의 높은 발아율을 나타냈으며, 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg의 고농도에서도 비슷한 발아율을 보였다. 이에 반해 알팔파와 옥수수는 구리 농도가 높아질수록 발아율이 크게 저해를 받는 것으로 나타났다. 특히 알팔파는 50 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서부터 저해가 뚜렷이 나타났다. 옥수수와 어저귀의 경우 200 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg까지는 대조구와 비슷한 발아율을 나타내었으나 그 이상에서는 발아율이 감소하였으며 어저귀는 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg의 농도일 때 31%의 낮은 발아율을 보였다. 어저귀는 60-80mg TNT/L 농도에서 종자의 발아에 영향을 미치지 않아 TNT에 내성을 지닌 것으로 나타난 반면(배 등 2001) 구리 오염에는 민감하게 반응하였다.

식물 생장에 대한 토양 내 구리의 영향을 살펴보기 위하여, 구리 노출 14일 후 각 유식물의 뿌리와 지상부의 길이를 측정된 결과(Fig. 1), 구리농도가 증가할수록 대체로 생장율이 감소한 것을 알 수 있었다. 특히, 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서 옥수수의 뿌리는 대조구의 약 4%, 해바라기는 약 7% 수준으로 큰 저해를 받았다. 반면, 피와 닭의장풀, 알팔파는 각각 대조구의 50%, 52%, 68%로 50% 이상의 생장율을 유지하였다. 또한 지상부 생장을 살펴보면, 어저귀와 해바라기, 옥수수의 지상부 길이는 각각 대조구의

Table 1. Plants for toxicological tests

Scientific name	Korean name	Family	Life form
<i>Commelina communis</i>	닭의장풀	Commelinaceae	Annual
<i>Medicago sativa</i>	알팔파	Leguminosae	Annual
<i>Echinochloa frumentacea</i>	피	Gramineae	Annual
<i>Zea mays</i>	옥수수	Gramineae	Annual
<i>Helianthus annuus</i>	해바라기	Compositae	Annual
<i>Abutilon avicennae</i>	어저귀	Malvaceae	Annual

Table 2. Seed germination rate(%) of plant species in Cu treatment soil after 14 days

Species	Concentration				
	0	50	100	200	300
	mgCu/kg				
<i>Medicago sativa</i>	100	60	60	57	64
<i>Abutilon avicennae</i>	80	98	93	91	31
<i>Commelina communis</i>	85	90	93	83	70
<i>Echinochloa frumentacea</i>	80	93	96	93	100
<i>Zea mays</i>	79	86	83	75	66
<i>Helianthus annuus</i>	100	93	100	93	90

15%, 16%, 19% 수준으로 큰 피해를 받는 반면, 피와 닭의장풀, 알팔파는 각각 61%, 96%, 86%로 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서도 높은 생장율을 보였다.

Fig. 2는 구리 농도 증가에 따른 유식물의 생체량을 조사한 것이다. 토양의 구리 농도가 증가할수록 대체적으로 생체량이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 해바라기는 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서 대조구 생체량의 약 35%에 불과해 구리에 의한 생체량 감소가 가장 큰 식물이었으며, 피와 닭의장풀은 각각 67%, 85%의 생체량을 유지하였다. 또한 알팔파와 어저귀는 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/L에서도 독성효과가 크게 나타나지 않았다.

이처럼 토양 내 구리에 의한 유식물 내 독성 효과를 살펴본 결과, 옥수수는 뿌리에서 구리에 의한 영향이 민감하게 나타났으며 어저귀의 경우는 상대적으로 지상부에서 민감한 반응이

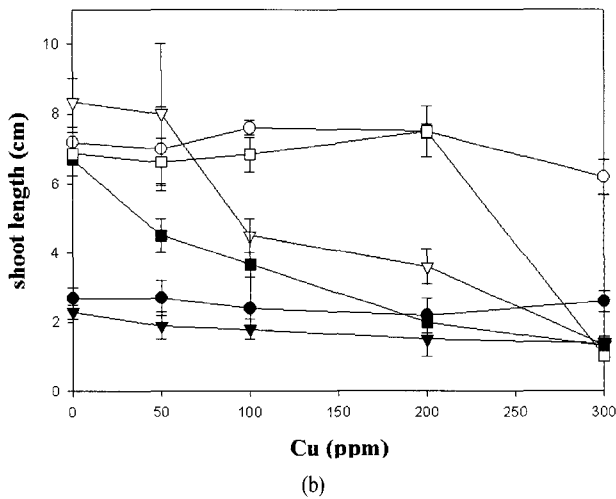
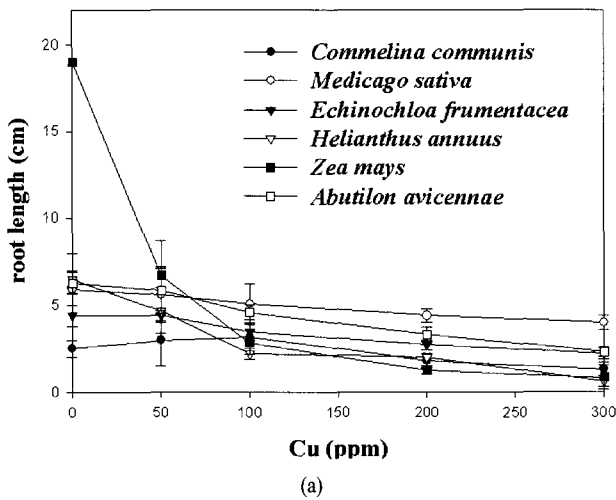


Fig. 1. Root length(cm) - (a) and shoot length(cm) - (b) of *Commelina communis*, *Medicago sativa*, *Echinochloa frumentacea*, *Zea mays*, *Helianthus annuus* and *Abutilon avicennae* grown in Cu-contaminated soil for 14 days.

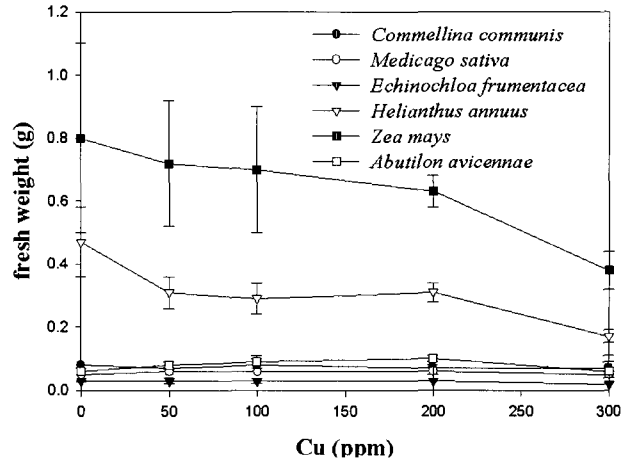


Fig. 2. The biomass(fresh weight) of *Commelina communis*, *Medicago sativa*, *Echinochloa frumentacea*, *Zea mays*, *Helianthus annuus* and *Abutilon avicennae* grown in Cu-contaminated soil for 14 days. Bars represent standard errors of mean.

나타났다. 반면에 해바라기는 뿌리와 지상부 모두에서 구리농도에 민감하게 반응하였으며, 닭의장풀 및 피는 뿌리와 지상부 모두 구리에 의한 피해를 가장 적게 받는 식물로 나타났다.

### 식물에 의한 토양 내 구리 흡수 능력

각 유식물의 토양 내 구리 제거 능력을 조사하기 위해, 각 오염 토양 및 식물체 내에서의 구리 농도 변화를 측정하였다. 토양 내 구리 함량을 조사하기 위하여 총 구리 함량 (Table 3) 및 exchangeable 구리를 측정하였다(Table 4). Ure(1995)의 연구에 의하면 토양 중금속의 생물체에 대한 독성 효과에 대한 가장 직접적인 척도로 사용될 수 있는 것 중 하나가 토양의 총 중금속 함량 중 exchangeable 부분이라고 제시한 바 있다. Table 3에서 보는 바와 같이, 각 식물이 식재된 토양의 중금속 함량은 초기 오염 농도에 비해 모든 식물 종의 경우에서 감소한 것을 확인할 수 있었다. 특히 닭의장풀, 옥수수, 피는 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서 각각 47%, 46%, 31% 이상의 구리 함량 감소를 볼 수 있었다. exchangeable 구리의 농도 또한 첨가시킨 구리 농도가 높을수록 그 양이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이처럼 생물 유용한(bioavailable) 구리 농도가 높아짐에 따른 각 식물이 흡수 및 축적한 양의 변화를 살펴보기 위하여 식물체 내에서의 구리 함량을 분석하였다(Table 5)

식물체가 축적한 구리의 양 또한 노출 농도가 높아짐에 따라 증가한 것을 확인할 수 있었다(Table 5). 특히 해바라기는 100 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg 이상에서 2,000mgCu/kg 이상의 높은 축적량을 보였다. 이로서 Kumar *et al.*(1995)에 의해 납과 우라늄 제거에 효과적으로 알려진 해바라기는 구리도 높은 양을 축적하는 것으로 나타났다. 피는 토양 내 구리 농도가 증가할수록 축적량이 꾸준히 늘어났으며, 300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg에서 kg당 약 1,020 mg의 Cu를 축적하는 것으로 나타났다.

Table 3. Total Cu concentration(mg/kg dry soil) at each soil

Species	Concentration				
	0	50	100	200	300
<i>Commelina communis</i>	13.4±2.0	37.6±5.0	108.5±0.2	132.2±1.2	158.5±1.5
<i>Medicago sativa</i>	15.7±1.4	70.5±2.5	201.2±5.0	180.1±7.0	251.4±2.2
<i>Echinochloa frumentancea</i>	12.9±2.7	69.2±4.0	120.1±7.5	160.2±1.0	206.7±8.0
<i>Helianthus annuus</i>	14.8±0.9	70.4±5.0	106.9±7.0	103.8±15	222.5±2.0
<i>Zea mays</i>	15.9±2.0	48.1±1.0	92.3±2.0	163.5±5.0	162.9±20

Table 4. Exchangeable Cu concentration(mg/kg dry soil) at each soil

Species	Concentration				
	0	50	100	200	300
<i>Commelina communis</i>	0.01	5.0±2.0	15.1±3.0	20.4±0.5	33.4± 0.5
<i>Medicago sativa</i>	0.01	0.02	20.7±0.4	34.6±2.0	74.2± 0.6
<i>Echinochloa Frumentancea</i>	0.01	19.6±2	43.2±0.3	97.9±0.2	120.6± 0.4
<i>Helianthus annuus</i>	3.3±0.4	7.7±0.7	22.6±0.6	29.1±0.4	86.1±12
<i>Zea mays</i>	3.6±0.1	8.3±0.3	16 ±1.5	48.8±6.0	73.3±10.2

Table 5. Cu concentrations(mg/kg dry weight) in plant species

Species	Concentration				
	0	50	100	200	300
<i>Commelina communis</i>	10±1	90±20	80±5	50±4	40±3
<i>Medicago sativa</i>	0	41.1±2	110±5	140±3	200±5
<i>Echinochloa frumentancea</i>	68±3	261±2	448.5±60	499±50	1019±100
<i>Helianthus annuus</i>	25.7±7	1151±300	2172±500	2183±200	2002±70
<i>Zea mays</i>	20±0.5	65±1	79.5±10	69±50	191.5±20

결 론

본 연구는 식물의 내성의 지표로 사용할 수 있는 발아 test 및 유식물의 성장 연구를 통해 구리에 내성을 가진 야초류를 선정하고자 하였으며, 이들 유식물의 토양 내 구리 제거율 연구를 통

해 구리로 오염된 지역에 phytoremediation을 적용하기 위한 기초 자료로 사용하고자 하였다.

1. 해바라기와 피, 닭의장풀의 발아율은 구리 농도(0-300 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg)에 크게 영향을 받지 않았다.
2. 어저귀와 알팔파는 토양 내 구리 농도가 높아질수록 발아에 저해를 받지만, 생체량 및 생장에는 크게 독성 효과를 받지 않았다.
3. 해바라기는 식물체 내 중금속 축적 능력이 뛰어나지만 고농도에서 생체량 및 생장에 저해를 심하게 받았다.
4. 피는 발아율과 생장에 크게 독성 효과를 받지 않았으며 50 mg-CuCl<sub>2</sub>/kg 이상에서는 중금속 축적 능력도 다른 식물에 비해 뛰어난 것으로 나타났다.
5. 이상의 연구를 통해 국내산 토착 야초류 중 피와 닭의장풀, 해바라기는 구리에 내성을 가진 종으로 판명되었다.
6. 유식물에서 토양 내 구리 제거율이 높은 피의 경우, phytoremediation 적용 가능성을 확인하기 위해 성체를 이용하여 구리 흡수실험을 수행중이다.

인용문헌

배범환, 김선영, 이인숙, 장운영. 2001. 2,4,6-trinitrotoluene에 대해 내성을 지닌 토착 식물종 선정에 대한 연구. 한국지하수 토양환경학회지 6: 3-11.

백승식, 장순응, 이시진. 1999. 식물학적 복원 공정. 산업기술종합연구소 논문집 18(1): 77-84.

이준상. 2000. 닭의장풀 내 Cd<sup>+</sup>의 분포와 생리적 독성, 환경생물학회지 18(1):63-67.

환경부. 2000. 환경백서 2000.

Antonovics, J., A.D. Bradshaw and R.G. Turner. 1971. Heavy metal tolerance in plants. Adv. Ecol. Res. 7:1-85.

Baker, A.J.M. and P.L. Walker. 1990. Heavy metal tolerance in plant. In A.J. Shaw(ed.), Evolutionary Aspects, CRC Press, Boca Raton. pp. 155-165.

David, J.H., B.A. Rattner, G.A. Burtor Jr and J. Cairns Jr. 1995. Handbook of Ecotoxicology.

Harper, F.A., S.E. Smith and M.R. Macnair. 1997. Where is the cost in copper tolerance in *Mimulus guttatus*: Testing the trade-off hypothesis. Funct. Ecol. 11: 764-774.

Jackson, P.J., P.J. Unkefer, E. Delhaize and N.J. Robinson. 1990. Mechanisms of trace metal tolerance in plants. In Katterman F(ed.) Environmental inquiry to plants, Academic Press, San Diego. pp. 231-258.

Kumar, P.B., A.N. Dushenkov, H.V. Motto and I. Raskin. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from environment using plants. Biotechnol. 13: 1332-1238.

Mengel, K. and E.A. Kirby. 1987. Principles of plant nutrition.

- International Potash Institute, Berne.
- Mohan, B.S. and B.B. Hosetti. 1991. Aquatic plants for toxicity assessment. *Environ. Res.* A.81: 259-274.
- Tomsett, A.B. and D.A. Thurman. 1988. Molecular biology of metal tolerances of plants. *Plant Cell Environ.* 11: 383-394.
- Turner, A.P., N.M. Dickinson and N.W. Lepp *et al.* 1991. Indices of metal tolerance in tress. *Water Air Soil Poll.* 57-58: 617-625.
- Ure, A.M. 1995. Methods of Analysis for Heavy Metals in Soils. *In* B.J. Alloway(ed.), *Heavy Metals in Soil*, 2nd Ed. Chapman and Hall, New York. pp. 58-60.
- Wallnofer, P.R. and G. Engelhardt. 1984. Schadstoffe, die aus dem Boden aufgenommen werden. *In* Hock B. and Elstner E. F.(eds.), *Pflanzentoxikologie*. BIWissenschaftsverlag, Mannheim. pp. 96-117.
- Wang, W. 1991. Literature review on higher plants for toxicity testing. *Water Air Soil Poll.* 59: 381-410.
- Willmer, C.M. 1983. *Stomata*, Longman Inc., New York.
- (2003년 10월 10일 접수; 2004년 1월 10일 채택)

---

## A Study on the Copper Tolerance of Herbaceous Plants

Kim, Sung-Hyun and In-Sook Lee\*

*Department of Life Science, Ewha Womans University, Seoul, Korea*

**ABSTRACT** : This research was investigated to prepare basic data in a study on the copper tolerance of herbaceous plants through the growth rate and the elimination rate dependent on Cu concentration of 6 species; *Commelina communis*, *Medicago sativa*, *Echinochloa frumentancea*, *Zea mays*, *Helianthus annuus* and *Abutilon avicennae*. We examined the germination rate, root and shoot growth of seedling and fresh biomass of 6 species (*Commelina communis*, *Medicago sativa*, *Echinochloa frumentancea*, *Zea mays*, *Helianthus annuus* and *Abutilon avicennae*) planted to Cu contaminated soil (50, 100, 200, 300-CuCl<sub>2</sub>/kg) and control for 14 days. The germination rate of *H. annuus*, *E. frumentancea* and *C. communis* were not affected by Cu concentration. However, root and shoot growth of *H. annuus* was about 7% of control and the biomass was 35% of control at 300mg-CuCl<sub>2</sub>/kg. *E. frumentancea* and *C. communis* that showed good growth rate at higher Cu contaminated soil (>200 -CuCl<sub>2</sub>/kg), were the most tolerant plant to Cu concentration. Especially, *E. frumentancea* eliminated over 30% of Cu in soil and the amount of Cu uptake increased with increasing Cu concentration; 1,020mg Cu per 1kg of soil at 300mg-CuCl<sub>2</sub>/kg. From these results, we concluded that *E. frumentancea* would be used for phytoremediation.

**Key words** : *Abutilon avicennae*, *Commelina communis*, Cu, *Echinochloa frumentancea*, *Helianthus annuus*, *Medicago sativa*, Soil, Phytoremediation, *Zea mays*

---