

돼지풀, 단풍잎돼지풀, 소리쟁이를 이용한 중금속오염토양의 식물복원법(phytoremediation)에 관한 연구

강병화* · 심상인* · 이상각* · 김광호** · 정일민**

Evaluation of *Ambrosia artemisiifolia* var. *elatior*, *Ambrosia trifida*, *Rumex crispus* for phytoremediation of Cu and Cd contaminated soil.

Byeung-Hoa Kang*, Sang-In Shim*, Sang-Gak Lee*, Kwang-Ho Kim** and Ill-Min Chung**

ABSTRACT

We evaluated *Ambrosia artemisiifolia* var. *elatior*, *Ambrosia trifida*, *Rumex crispus* which were reported to have good phytoremediability in different concentrations of Cu and Cd. Different growth responses were found in different heavy metal concentrations. Good growth rate for *A. trifida* and *A. artemisiifolia* var. *elatior* in Cu and Cd treatments and poor growth for *R. crispus* in Cd treatment were found. Although growth was retarded in all tested weeds up to 200ppm for Cu and 50ppm for Cd, the high amount of heavy metal uptake indicated that these weeds could be used as phytoremediation. The choice of proper plant for bioremediation in different sources of heavy metal pollution seems important. In this regard, *A. trifida* which showed little variation in Cu accumulation in shoot under different Cu concentrations could be used for phytoremediation and phytostabilization.

Key words : *Ambrosia trifida*, *Ambrosia artemisiifolia* var. *elatior*, *Rumex crispus*, phytoremediation, Cu, Cd, heavy metal.

서 언

중금속은 주로 금속광산의 채광 및 선광·제련과정 등의 광산활동으로 인하여 배출되는 광산폐기물, 자동차배기가스를 포함하는 화석연료의 소각, 비료와 살충제 및 각종 산업폐수와

폐기물에서 배출된다^{17,21)}. 토양환경이 완충능력 이상으로 중금속물질이 부하될 때 연쇄적 또는 직접적으로 피해를 야기시켜 농작물의 수확량 감소는 물론이고 인간의 생존권위협 및 광범위한 생태계를 파괴시키는 것으로 보고^{5,17,21)}되었다.

중금속은 식물체가 흡수할 수 있는 가용상

* 고려대학교 자연자원대학(Dept. of Agronomy, Coll. of Natural Resources, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea)

** 건국대학교 농업생명과학대학(Dept. of Crop Science, Coll. of Agricultural and Life Science, Kon-Kuk Univ., Seoul 143 -301, Korea)

('98. 6. 18 접수)

재료 및 방법

태와 불가용상태가 있으며 토양중 식물이 흡수할 수 있는 가용성중금속은 식물의 뿌리를 통하여 대부분 흡수되며, 토양의 산도, 토양의 산화력, 양이온치환능력, 점토와 유기물의 함량에 따라 차이가 크다^{1,2,15,16,21}).

중금속의 오염원 제거방법에는 처리방법의 특성에 따라 화학적, 물리적, 생물적 방법과 제거되는 원리에 따라 중화법, 산화처리법, 환원처리법 등이 있다. 현재에 이용되고 있는 억제 및 정화방법을 크게 구분하면 기계적·화학적 처리방식으로 대표되는 적극적 처리방법과 자연정화를 이용한 소극적 처리방법으로 구분할 수 있다^{1,2,4,17,21}.

중금속은 먹이사슬을 따라 농작물과 생태계에 유해한 영향을 미치게 되며 일단 오염이 되면 자연계의 자정능력으로는 복구가 거의 불가능하며 인위적인 복구를 위해서는 화학물질의 첨가, 운영비 및 유지비가 많이 들어가는 실정이다. 그러나 오염토양조건하에서 몇몇의 식물들은 불필요한 성장을 저해하는 독성이온들의 흡수를 억제하거나, 또는 다량으로 흡수하여도 원활한 체내활성을 유지하며 성장하는 내성이 강한 식물들이 있다^{3,5,10,18}). 이러한 오염된 토양에서 자라는 식물들은 균형있는 신진대사가 일어나 다량의 유해원소를 흡수하는 정도가 커 환경친화적인 생물복원법(bioremediation)^{3,18,21})의 가능성을 제시하고 있다. 이 중 제거속도는 느리나 비용이 저렴한 식물을 이용한 식물복원법(phytoremediation)^{3,18,21})은 대표적인 환경친화형 정화기술로 보여진다.

본 실험은 환경친화적인 중금속 정화방법의 하나인 식물복원법에 가장 적합한 잡초종을 공시하여, 중금속농도별 생육양상에 따른 흡수범위와 정화차이능을 구명하여 식물복원법적용의 타당성을 제안하고자 실시하였다.

본 실험은 고려대학교 자연자원대학 부속은실에서 1998년 4월 19일부터 6월 19일까지 포트재배로 실시하였다. 실험에 이용된 잡초종은 기존의 연구결과^{10,19})를 토대로 하여 중금속에 내성이 강하고 건물생산이 많은 단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida*), 돼지풀(*Ambrosia artemisiifolia* var. *elatior*), 소리쟁이(*Rumex crispus*)를 공시하였다. 파종후 5~6매의 잎이 전개된 균일한 묘를 선발하여 포트당 Cd, Cu의 소요량과 원예용복합비료(25 : 14 : 13/10a)를 충분히 혼합하여 포트당 700g씩 평량하여 진충 후 이식하였다. 시험에 사용한 토양은 한강변의 표토를 사용하였으며 그의 이화학적 성질은 Table 1과 같다.

토양분석은 농촌진흥청 농업기술연구소 토양분석법²⁰)에 준하여 분석하였으며 Table 1과 같이 이화학적 성질은 일반 밭토양과 비슷하였으나 Cd, Cu는 임¹⁴)의 토양의 중금속오염판단기준보다 낮아 전전하였으며, P₂O₅, K, O.M.이 약간 높고, CEC는 낮은 경향이였다. Cu와 Cd의 처리는 공시토양의 20kg에 Cu와 Cd을 중량비로 Cu는 0, 100, 200, 400, 800ppm, Cd는 0, 12.5, 25, 50, 100ppm이 되도록 CuSO₄와 CdCl₂의 염으로 처리하였다. 시험구는 완전임의배치법 3반복으로 실시하였으며 건물중은 80℃의 건조기에서 48시간 건조 후 측정하였다. Cu와 Cd 함량의 분석은 건조시료는 시료 1g을 삼각후라스크에 넣고 conc. HNO₃ 2.5ml를 가하여 180~200℃로 서서히 가열한 후, ternary solution (HNO₃ : H₂SO₄ : HClO₄ = 10 : 1 : 4) 10ml를 넣고 200℃의 전열판에서 완전히 분해하여 여과하였고, 토양시료는 10ml의 N-NH₄OAC용액을 가하여 24시간 진탕 후 여과하여, 각각을 원자흡광광도계(Hewlett Packard, Model AA3280)를

Table 1. Physico-chemical properties of soil used.

pH	T-N (%)	P ₂ O ₅ ppm	Ex- Cat(ml/100g)				Cu ppm	Cd	CEC (me/100g)	O.M (%)
			K	Ca	Mg	Na				
6.8	0.10	415.4	0.76	2.88	0.57	0.52	0.64	0.21	4.89	2.22

사용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

토양중 중금속이 식물에 영향을 미치는 생육반응은 토양조건과 성장단계에 따라 저해정도가 다른 것으로 연구^{1,5,16,21)}되어 왔다. Table 2와 3은 Cu, Cd농도에 따른 단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida*), 돼지풀(*Ambrosia artemisiifolia* var. *elatior*)과 소리쟁이(*Rumex crispus*)의 지상부 및 지하부건물중을 나타내고 있다. 지상부생장에 따른 중금속의 영향은 처리농도가 높아질수록 성장 감소현상은 뚜렷하였으며, 단풍잎돼지풀과 돼지풀은 Cu와 Cd처리간 성장량의 차이는 없었으나 소리쟁이는 Cu보다는 Cd에서 생육저하가 크게 나타났다. 단풍잎돼지풀은 Cu의 200ppm까지는 생육이 향상되었지만 농도가 높아질수록 공시초종 모두에서 생육이 크게 억제되었다. 특히 Cu처리에 따른 생육반응은 200ppm까

지는 성장감소는 작았으나 400ppm이상에서 생육장해가 크게 일어났다. Cd처리에서 50ppm까지는 단풍잎돼지풀과 돼지풀에서는 대조구의 60~70%까지 생장이 이루어졌으나 소리쟁이는 Cd처리에 따라 저농도부터 생육이 극히 부진하여 Cd에 내성이 약한 것으로 나타났다. 지하부의 생장은 중금속과 직접적인 접촉에 의해 농도가 높아질수록 지상부와는 달리 성장감소가 클 것으로 예상하였으나 처리농도가 증가해도 뿌리의 발달에는 민감하게 반응하지는 않았다. 공시초종간 중금속의 성장저해는 단풍잎돼지풀은 Cu처리구에서 뿌리발달이 억제되었으나 Cd처리구에서는 고농도까지도 성장감소폭이 작았다.

중금속이 오염된 토양에서 자라는 식물은 중금속이온 흡수의 억제뿐만 아니라 세포소기관에 분리하여 저장하거나 조직에 축적시키는 것으로 연구^{1,4,5,9,17,19,21)}되었다. Table 4와 5는 Cu, Cd 농도에 따른 지상부 및 지하부의 흡수

Table 2. Shoot and root dry weight of weeds grown in the soil of different concentrations of Cu.

Species	shoot (g/plant)					root (g/plant)				
	control	100	200	400	800	control	100	200	400	800
<i>A. trifida</i>	4.41 ^a	4.75 ^a	4.68 ^a	1.23 ^b	0.45 ^c	2.33 ^a	2.54 ^a	2.82 ^a	0.44 ^b	0.12 ^b
<i>A. artemisiifolia</i>	2.00 ^a	2.06 ^a	1.94 ^a	0.86 ^b	0.27 ^b	1.35 ^a	1.44 ^a	1.14 ^a	0.48 ^b	0.09 ^c
<i>R. crispus</i>	1.36 ^a	1.07 ^{ab}	0.78 ^b	0.08 ^c	0.07 ^c	3.52 ^a	2.16 ^b	1.51 ^b	0.15 ^c	0.08 ^c

Table 3. Shoot and root dry weight of weeds grown in the soil of different concentrations of Cd.

Species	shoot (g)					root (g)				
	control	12.5	25	50	100	control	12.5	25	50	100
<i>A. trifida</i>	4.41 ^a	3.77 ^{ab}	2.24 ^{bc}	2.69 ^{bc}	1.87 ^c	2.33 ^{ab}	3.16 ^a	2.08 ^{ab}	1.51 ^b	1.62 ^b
<i>A. artemisiifolia</i>	2.00 ^a	1.57 ^{ab}	1.11 ^b	1.78 ^a	0.11 ^c	1.35 ^a	1.34 ^a	0.99 ^{ab}	0.87 ^b	0.03 ^c
<i>R. crispus</i>	1.36 ^a	0.55 ^b	0.23 ^c	0.04 ^c	0.02 ^c	3.52 ^a	1.21 ^b	0.47 ^c	0.06 ^c	0.05 ^c

Table 4. Cu uptake of weeds grown in the soil of different concentrations of Cu.

Conc. (ppm)	<i>A. trifida</i>			<i>A. artemisiifolia</i>			<i>R. crispus</i>		
	shoot	root	soil	shoot	root	soil	shoot	root	soil
control	1.03 ^b	2.59 ^c	0.21 ^c	0.95 ^c	3.32 ^c	0.62 ^c	1.47 ^c	1.56 ^c	0.29 ^c
100	85 ^a	143 ^d	3 ^d	66 ^d	144 ^d	5 ^d	80 ^d	92 ^d	3 ^d
200	80 ^a	232 ^c	7 ^c	69 ^c	194 ^c	8 ^c	89 ^c	121 ^c	7 ^c
400	80 ^a	388 ^b	20 ^b	85 ^b	327 ^b	19 ^b	147 ^b	142 ^b	19 ^b
800	85 ^a	537 ^a	63 ^a	111 ^a	105 ^a	74 ^a	219 ^a	205 ^a	61 ^a

Table 5. Cd uptake of weeds grown in the soil of different concentrations of Cd.

Conc. (ppm)	<i>A. trifida</i>			<i>A. artemisiifolia</i>			<i>R. crispus</i>		
	shoot	root	soil	shoot	root	soil	shoot	root	soil
control	2.88 ^c	3.69 ^c	0.21 ^c	2.63 ^c	7.95 ^c	0.19 ^d	4.63 ^c	1.94 ^d	0.19 ^c
12.5	88 ^d	141 ^d	12 ^d	82 ^d	116 ^d	9 ^{cd}	90 ^d	94 ^c	8 ^d
25	133 ^c	249 ^c	24 ^c	110 ^c	197 ^c	23 ^{bc}	104 ^c	143 ^b	22 ^c
50	254 ^b	569 ^b	59 ^b	153 ^b	233 ^b	40 ^b	148 ^b	144 ^b	49 ^b
100	463 ^a	862 ^a	89 ^a	314 ^a	554 ^a	87 ^a	452 ^a	257 ^a	85 ^a

량과 토양의 잔류량을 나타내고 있다. 단풍잎 돼지풀, 돼지풀, 소리쟁이의 각 초종에서 Cu, Cd농도가 높아질수록 지상부와 지하부의 흡수량은 증가하였고, 토양의 잔류량은 각 처리농도에서 비슷한 경향을 보였다. 공시초종의 중금속 흡수는 소리쟁이의 Cd를 제외하고는 지상부보다는 지하부에서 흡수량이 많았다. 대조구의 중금속함량은 공시초종간의 차이는 있지만 지상부에서 Cu 0.95~1.47ppm, Cd 2.28~4.63ppm, 지하부에서 Cu 1.56~3.32ppm, Cd 1.94~3.69ppm, 토양에서 Cu 0.29~0.62ppm, Cd 0.19~0.21ppm이었다. 이미 보고^{6,7,8,12,13}된 몇 가지 야생식물의 천연부존량은 Cu 15.2ppm, Cd 0.3ppm이고, 한강변 토양의 중금속함량은 Cu 4~13ppm, Cd 0.01~0.09ppm와 비교하면, Cu에서는 식물체와 토양의 함량은 낮았으나 Cd에서 식물체의 약 10배 토양의 약 20배의 높은 수치를 보였지만 식물체는 물론이고 토양에서도 중금속오염판단기준^{12,14} Cd 0.3ppm 훨씬 못 미치는 수준으로 건전하였다. 공시초종간 Cu의 지상부·지하부의 흡수량상은 처리농도가 높아질수록 돼지풀, 소리쟁이에서는 증가하였고, 단풍잎돼지풀은 농도가 높아져도 축적량의 차이는 없었다. 처리간 토양의 Cu잔류량은 Cd보다 작았다. Cu처리에 따른 외형적인 변화는 높은 농도의 상위엽에서 황화현상이 나타났는데, 이는 고농도에서 sulfhydryl그룹의 높은 친화력과 엽록체막지질이 과산화물의 분해에 의해 일어나는 생리적인 장애현상^{2,5,21}이라고 하였다. 단풍잎돼지풀은 Cu처리구에서 처리농도가 높아질수록 지하부의 흡수량은 증가하여도 지상부의 축적량변화가 없는 특이한 내성기작을 보였는데 이는 흡수된 Cu가 뿌리

에서 이온간의 킬레이트화⁴⁾에 의해 지상부로 수송을 억제시키는 것인지 또는 흡수보다는 뿌리흡착에 의해 내성을 나타내는지는 좀더 연구를 통해 밝혀야 될 것으로 사료된다. Cd흡수는 토양 pH와 농도에 크게 영향하며 흡수된 Cd는 뿌리와 잎의 세포질에 저장되며 지상부로 수송된 Cd는 과실이나 종자보다는 잎에 축적되는 양이 많다고 하였다^{2,5,21}. Cd처리에 따른 지상부·지하부의 흡수량(Table 5)은 처리농도가 높아질수록 많았고, 독성에 의한 부분적인 반점과 엽색이 진하게 되는 생리적 장애현상이 나타났다. 단풍잎돼지풀과 돼지풀은 지상부보다는 지하부의 축적이 많았지만 소리쟁이에서는 100ppm을 제외하고는 지상부와 지하부의 흡수량의 차이는 작았다.

중금속의 흡수량상은 식물이 이용 가능한 형태의 용해도와 용출량에 의해 결정된다^{4,5,15,21}. Fig. 1과 2는 Cu, Cd의 처리농도에 따른 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 소리쟁이의 주당 축적량을 나타낸 결과이다. 공시초종간의 중금속의 축적

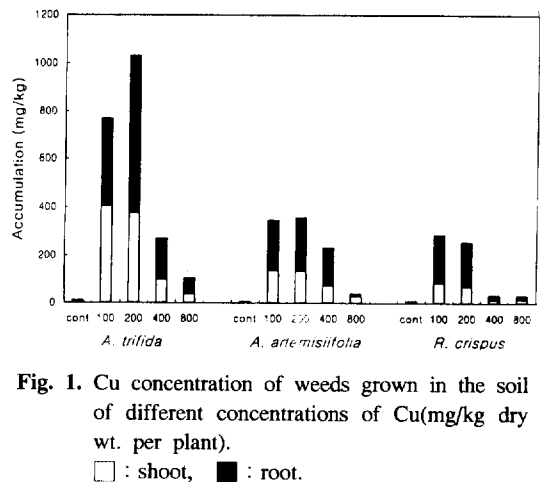


Fig. 1. Cu concentration of weeds grown in the soil of different concentrations of Cu(mg/kg dry wt. per plant).

□ : shoot, ■ : root.

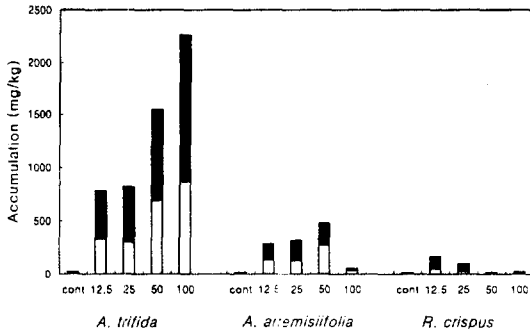


Fig. 2. Cd concentration of weeds grown in the soil of different concentrations of Cd(mg/kg dry wt. per plant).

□ : shoot, ■ : root.

량은 단풍잎돼지풀에서 가장 높았으며 중금속의 오염원에 따라 처리 농도별 축적량은 상이하였다. Cu처리에 따라 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 소리쟁이에서는 200ppm까지는 생육이 비교적 양호하여 축적량이 증가하였고 고농도로 가면서 생육이 불량해지므로 축적량이 감소하였다. 축적량이 큰 것은 Table 4에서 언급한 것과 같이 지상부로의 수송보다는 지하부의 축적이 큰것이 전반적인 축적량의 증가로 사료된다. Cd처리구는 Cu처리구와 상이한 양상을 보였는데 단풍잎돼지풀과 돼지풀에서는 처리농도가 높아질수록 증가하였지만, Cd처리구에서 소리쟁이는 생육이 불량하여 축적량이 가장 작았다. 중금속 오염지역의 phytoremediation로서 중요한 요인은 내성정도에 따른 건물중의 크기에 좌우되지만 2~3m이상 자라는 단풍잎돼지풀과 1~1.5m정도로 자라는 돼지풀 또는 초장은 약간 작지만 습한지역에서 잘 자라는 소리쟁이의 각각의 생육특성¹¹⁾을 비교한다면 지역적인 환경과 오염원의 종류가 고려되어야 될 것으로 사료된다.

적 요

본 실험은 환경친화적인 중금속 정화방법의 하나인 식물복원법(phytoremediation)에 가장 적합하다고 생각되는 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 소리쟁이를 선발하여, Cu, Cd농도에 따른 생육양

상, 흡수범위 및 정화차이능을 구명하여 식물복원법적용의 타당성을 제안하고자 실시한 결과는 다음과 같다. 중금속처리에 따른 공시초종의 생육반응은 상이하였으며, 특히 Cu, Cd처리에서 단풍잎돼지풀, 돼지풀이 생육이 좋았으며 소리쟁이는 Cd처리에서 생육이 불량하였다. 처리농도에 따라 지상부와 지하부발달은 Cu의 200ppm, Cd의 50ppm까지는 생육저해는 일어나지만 중금속의 흡수량은 공시초종 모두에서 양호하여 식물복원법(phytoremediation)의 가능성을 보여주었다. 특히 환경친화적인 중금속정화방법은 오염원에 따라 초종선택이 중요하며, Cu오염지역에서는 지상부의 축적량은 처리농도가 높아지더라도 변화가 작은 단풍잎돼지풀은 phytoremediation뿐만 아니라 phytostabilization(식물안정화)을 위한 피복식물로서도 가능성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 농업과학분야 거점연구소 육성사업에 의한 연구비 지원으로 수행된 연구결과와 일부임.

인 용 문 헌

1. Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutri. 3 : 643-654.
2. Baker, A.J.M. 1987. Metal tolerance. New Phytol. 106 : 93-111.
3. 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.
4. Grill, E., E.L. Winnacker, and M.H. Zenk. 1985. Phytochelatins : The principal heavy metal complexing peptides of high plants. Sci. 230 : 674-676.
5. Jackson, P.J., P.J. Unkefer, E. Dmmanuel, and N.J. Robinson. 1990. Mechanisms of

- trace metal tolerance in plants. In F. Katterman(ed.) Environmental injury to plants. Academic Press, Inc. New York. 232-255.
6. 정기체 · 김복진 · 한상국. 1993. 아연광산 인근지역 야생식물중의 중금속함량조사. 한국환경농학회지. 12(2) : 105-111.
 7. 김복진. 1995. 토양중 중금속함량이 파, 상치의 중금속흡수 및 생육에 미치는 영향. 한국환경농학회지. 14(3) : 253-262.
 8. 김재봉 · 김동한 · 정연보 · 오재기 · 장성기 · 최광수 · 강덕희. 1980. 중금속에 의한 토양오염과 농작물내 함량의 상관관계에 의한 연구. 국립환경연구보고서. 2 : 203.
 9. Knight, B., F.J. Zhao, S.P. McGrath, and Z.G. Shen. 1997. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution. Plant and Soil. 197 : 71-78.
 10. 강병화 · 심상인 · 이상각. 1996. 환경오염 지표식물로서 잡초종의 활용에 관한 연구. 한국환경농학회지. 15 : 46-69.
 11. 이창복. 1982. 대한식물도감. 향문사.
 12. 이민효 · 조재현 · 김규식. 1983. 야생나물류 중 Cd, Cu, pb, Zn의 천연부존량에 관한 조사 연구. 농시 보고. 25 : 69.
 13. 이민효 · 김복영. 1985. 토양중 중금속(Cd, Zn)의 처리가 옥수수의 생육 및 흡수에 미치는 영향. 한국환경농학회지. 4(1) : 11-17.
 14. 임수길. 1994. 토양질 기준의 설정에 관한 연구. 한국환경과학협의회.
 15. 임수길 · 이영준 · 최호진. 1991. 토양중에서 Cd, Cu 및 Zn의 흡착 및 용탈에 미치는 토양용액의 pH의 변화. 한국환경농학회지. 10(2) : 119-127.
 16. Moustakas, M., G. Ouzounidou, L. Symeonidis, and S. Karataglis. 1997. Field study of the effects of excess copper on wheat photosynthesis and productivity. Soil Sci. Plant Nutr. 43(3) : 531-539.
 17. Raven, K.P. and R.H. Loeppert. 1997. Heavy metals in the environment : Trace element composition of fertilizers and soil amendments. J. Environ. Qual. 26 : 551-557.
 18. 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 : 468-471.
 19. Tilstone, G.H. and M.R. Macnair. 1997. The consequence of selection for copper tolerance on the uptake and accumulation of copper in *Mimulus guttatus*. Ann. Bot. 80 : 747-751.
 20. 토양분석법. 1988. 농촌진흥청. 농업기술연구소.
 21. Wild, A. 1993. Soils and the environment : An interoduction. Cambridge University Press. Cambridge. 189-210.