

소나무속 식물에서 칼슘과 마그네슘에 의한 알루미늄 독성의 경감

류 훈 · 김 준 호
서울대학교 생물학과

Reduction of Aluminum Toxicity by Calcium and Magnesium in Pines

Ryu, Hoon and Joon-Ho Kim

Department of Biology, Seoul National University

ABSTRACT

Alleviation of Al toxicity by Ca and Mg was studied with seedlings of *Pinus densiflora*, *P. rigida* and *P. thunbergii* under the solution culture. The seedlings were cultivated in the enriched Ca and Mg nutrient solution with 2,000 μ M Al for three weeks. The highest total root lengths of *P. densiflora*, *P. rigida* and *P. thunbergii* increased by 21, 33 and 133% in Ca enriched solution, and 23, 44 and 107% in Mg enriched solution, respectively. Ratios of lateral root to main root length increased significantly in Mg enriched solution, and reduction of Al toxicity was more affected by enriched Mg than by enriched Ca. Al content in tissue was reduced by enriched Ca and Mg.

Key words: Acidic soil, Aluminum toxicity, Calcium, Magnesium, *Pinus*

서 론

장기간의 산성비 지역 토양은 산성화와 Ca 및 Mg와 같은 염기성 양이온의 세탈, 가용성 Al, Mn 및 Fe와 같은 산성금속 이온의 증가를 일으킨다 (Foy 1974, 1983, Andersson 1988). 산성 토양에서 식물의 생산성 감소는 식물체 내의 Ca과 Mg의 감소와 Al, Fe 및 Mn의 증가와 관계가 있다 (Keltjens and Dijkstra 1991). 따라서 산성토양의 개량제로서 석회(CaCO₃)와 돌로마이트(CaMg(CO₃)₂)가 이용되고 있다 (박 1995). 배양액 내의 Ca과 Mg의 강화는 Al의 독성을 감소시키고, 뿌리의 Al 결합부위를 좁히며, Ca과 Mg 결핍을 완화함으로써 뿌리 성장을 촉진한다 (Lee and Pritchard 1984, Keltjens and van Loenen 1989).

본 연구의 목적은 산성토양에서의 Ca과 Mg의 세탈과 관련하여, 수경재배한 소나무속 유식물의 Al 독성이 Ca과 Mg에 의하여 완화됨을 밝히는 데 있다.

재료 및 방법

재료식물은 소나무 (*Pinus densiflora*), 리기다소나무 (*P. rigida*) 및 곰솔 (*P. thunbergii*)의 발아 후 2주일 지난 유식물이었다. 유식물은 1/2 Steinberg 배양액에서 Ca과 Mg를 제거한 대신 CaCl₂와 MgSO₄로 각각 250 (대조구), 500, 1,000 및 2,000 μ M로 강화하되, Ca 강화배양액은 250 μ M Mg로, Mg 강화배양액은 250 μ M Ca로 조정하고, AlCl₃ · 6H₂O로 2,000 μ M Al을 첨가한 배양액에서 유식물을 3주일 길렀다. 배양액에서 Ca과 Mg 제거에 따른 NO₃⁻ 부족은 NH₄NO₃로 보충하였다.

유식물의 재배, 뿌리길이 측정, 건물생산량, 측근/주근 길이의 비, 경엽부/뿌리 건중량의 비 및 식물체의 무기이온 분석은 류 (1995)에 의하여 기술되었다.

결 과

Ca과 Mg의 강화에 의한 뿌리길이와 건물량 생장

2,000 μ M Al을 첨가한 1/2 Steinberg 배양액에서 세 소나무속 유식물의 측근과 주근의 길이

Table 1. Growth in root length and dry weight of *Pinus densiflora*, *P. rigida* and *P. thunbergii* seedlings grown in Ca and Mg enriched solutions with 2,000 μ M Al for three weeks

Ca or Mg conc. (μ M)	Growth in root length				Growth in dry weight			
	Lateral (mm/plant)	Main (mm/plant)	Total (mm/plant)	%	Shoot (mg/plant)	Root (mg/plant)	Total (mg/plant)	%
<i>Pinus densiflora</i>								
Ca 250	30 ^a	50 ^a	80 ^a	100	23.9 ^a	3.7 ^a	27.6 ^a	100
Ca 500	33 ^{ab}	53 ^{ab}	86 ^{ab}	108	27.5 ^a	4.1 ^{ab}	31.6 ^a	114
Ca 1,000	34 ^{ab}	63 ^d	97 ^b	121	27.2 ^a	4.3 ^{ab}	31.5 ^a	114
Ca 2,000	30 ^{ab}	62 ^{bd}	92 ^{ab}	115	24.7 ^a	4.0 ^{ab}	28.7 ^a	104
Mg 250	30 ^a	50 ^a	80 ^a	100	23.9 ^a	3.7 ^a	27.6 ^a	100
Mg 500	33 ^{ab}	53 ^{ab}	86 ^{ab}	108	27.1 ^a	4.1 ^b	31.2 ^a	113
Mg 1,000	40 ^c	55 ^{ac}	95 ^b	119	25.6 ^a	4.4 ^b	30.0 ^a	109
Mg 2,000	40 ^{bc}	58 ^{ac}	98 ^b	123	24.6 ^a	4.7 ^b	29.3 ^a	105
<i>Pinus rigida</i>								
Ca 250	56 ^a	49 ^a	105 ^a	100	21.3 ^a	4.3 ^a	25.6 ^a	100
Ca 500	67 ^{ab}	51 ^a	118 ^{ab}	112	22.0 ^{ab}	4.6 ^{ab}	26.6 ^{ab}	104
Ca 1,000	72 ^{bc}	68 ^c	140 ^{bc}	133	25.3 ^{ab}	5.5 ^{ab}	30.8 ^{ab}	120
Ca 2,000	66 ^{abc}	68 ^c	134 ^{bc}	128	23.7 ^{ab}	4.9 ^{ab}	28.6 ^{ab}	112
Mg 250	56 ^a	49 ^a	105 ^a	100	21.3 ^a	4.3 ^a	25.6 ^a	100
Mg 500	68 ^{abc}	53 ^{ab}	121 ^{ab}	115	22.6 ^{ab}	4.6 ^{ab}	27.2 ^{ab}	106
Mg 1,000	88 ^c	63 ^{ac}	151 ^c	144	24.2 ^{ab}	5.3 ^{ab}	29.5 ^{ab}	115
Mg 2,000	80 ^{bc}	66 ^{ac}	146 ^{bc}	139	26.2 ^b	5.8 ^b	32.0 ^b	125
<i>Pinus thunbergii</i>								
Ca 250	2 ^a	44 ^a	46 ^a	100	19.0 ^a	3.2 ^a	22.2 ^a	100
Ca 500	11 ^{ab}	49 ^{ab}	60 ^a	130	21.7 ^a	3.7 ^a	25.4 ^a	114
Ca 1,000	13 ^{bc}	48 ^{ab}	61 ^a	133	23.0 ^{ab}	3.6 ^a	26.6 ^a	120
Ca 2,000	8 ^{ab}	47 ^{ab}	55 ^a	120	19.6 ^{ab}	2.9 ^a	22.5 ^a	101
Mg 250	2 ^a	44 ^a	46 ^a	100	19.0 ^a	3.2 ^a	22.2 ^a	100
Mg 500	8 ^{ab}	45 ^{ab}	53 ^a	115	19.6 ^{ab}	3.4 ^a	23.0 ^a	104
Mg 1,000	23 ^c	51 ^b	74 ^b	161	26.2 ^b	4.7 ^b	30.9 ^b	139
Mg 2,000	35 ^d	60 ^c	95 ^c	207	29.7 ^c	5.8 ^c	35.5 ^b	160

* Numbers with the same superscripts indicate no significant difference at P<0.05 according to Tukey's HSD test.

는 1,000 μM ~2,000 μM Ca과 Mg 농도에서 대조구보다 많이 자랐고, 소나무와 리기다소나무의 측근 길이는 Ca보다 Mg 강화에 의하여 많이 자랐지만 주근은 그 반대의 경향이 있었다 (Table 1).

2,000 μM Al 배양액에서 전 유식물체의 건물생산량은 리기다소나무만 500 μM 이상의 Ca 강화에 의하여 대조구 (250 μM)보다 증가되었고 나머지 종류는 Ca 첨가농도 사이에 차이가 없었다. Mg 강화에 의한 유식물체의 건물생산량은 리기다소나무가 500 μM Mg 이상에서, 곰솔이 000 μM Mg 이상에서 촉진되었다 (Table 1).

측근/주근 길이의 비와 경엽부/뿌리 건조량의 비

2,000 μM Al 배양액에서 측근/주근 길이의 비는 세 유식물에서 500 내지 1,000 μM Ca 또는 Mg 강화에 의하여 높았고, Ca 강화보다 Mg 강화에 의하여 더 높았다 (Fig. 1). 경엽부/뿌리 건조량의 비는 곰솔의 Ca 강화를 제외하고, Ca과 Mg 농도가 높을수록 낮아졌고, 곰솔만이 Ca 농도가 높을수록 높아졌으며, Mg보다 Ca 강화에 의하여 높아졌다 (Fig. 2).

무기 이온함량

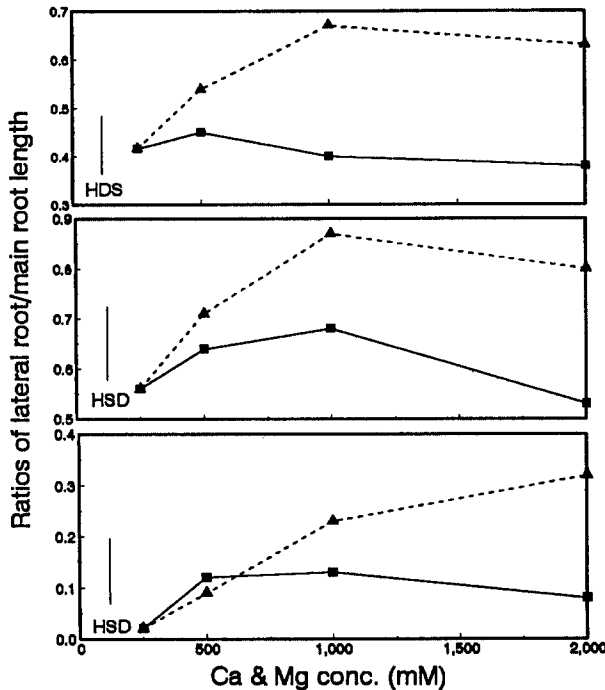


Fig. 1. Ratios of lateral root /main root length of *P. densiflora* (above), *P. rigida* (middle) and *P. thunbergii* (below) grown in 1/2 Steinberg solution enriched with Ca (■) and Mg (▲). Vertical bar indicates honestly significant difference (HSD).

세 유식물의 경엽부와 뿌리의 Al함량은 2,000 μM Al 배양액에서 Ca 또는 Mg 농도가 높을수록 감소하였다 (Fig. 3). 경엽부와 뿌리의 Ca 함량은 Ca 농도가 높을수록, 그리고 Mg 농도가 낮을수록 증가되었고, Mg 함량은 배양액의 Mg 농도가 높을수록 그리고 Ca 농도가 낮을수록 증가되었다 (Table 2). 경엽부와 뿌리의 총 P 함량은 배양액의 Ca과 Mg 농도가 높을수록 다같이 감소하는 경향이 있었다 (Table 2).

논 의

주근과 측근을 합한 뿌리의 총길이생장은 대조구 (250 μM Ca)보다 1,000 μM Ca 강화에 의하여 소나무, 리기다소나무 및 곰솔에서 각각 21, 33 및 33% 만큼 증가하였다 (Table 1). 뿌리의 길이생장이 1,000 μM

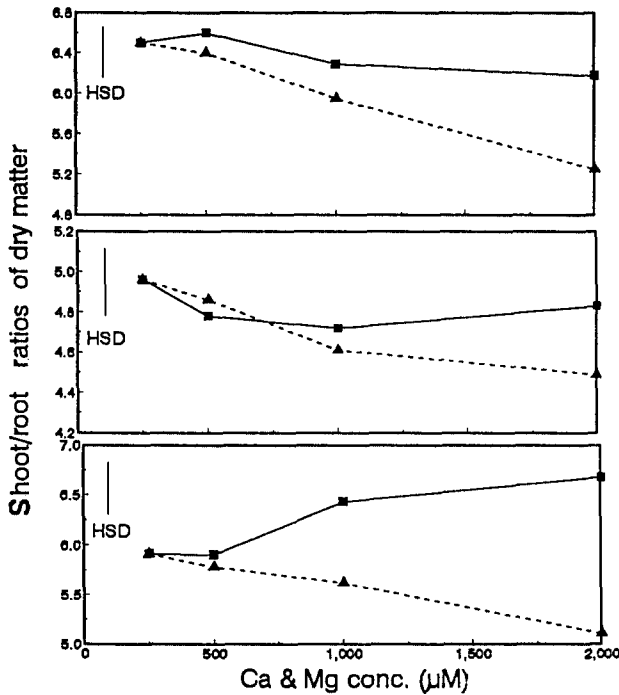


Fig. 2. Shoot /root ratios of dry matter for *Pinus densiflora* (above), *P. rigida* (middle) and *P. thunbergii* (below) in enriched Ca (■) and Mg (▲) solution. Vertical bar indicates honestly significant difference (HSD).

Ca 강화보다 2,000 μM Ca 강화에서 감소된 이유는 Ca 독성이 나타났기 때문으로 해석된다. Ca 과잉은 P와 결합하여 그의 흡수를 저해하고 Fe 결핍을 일으킨다 (Crawley 1987). 실제로 실험 기간에 유식물에 자주 색 색소가 나타나서 P 결핍 증상이 관찰되었다. 과량의 석회 시비는 토양 pH를 상승시켜 Al 독성을 완화하지만, P의 이용성을 떨어뜨린다 (Haynes and Ludeche 1982).

1,000~2,000 μM Mg 강화에 의하여 일어난 총뿌리길이의 최대생장은 대조구 (250 μM Mg) 보다 소나무, 리기다소나무 및 곰솔에서 각각 23, 44 및 107% 만큼 증가하였고, Ca 강화보다 Mg 강화에 의하여 더 증가되는 경향이 있었다 (Table 2). 측근 /주근 길이의 비는 배양액의 Ca 농도 사이에 유의한 차이가

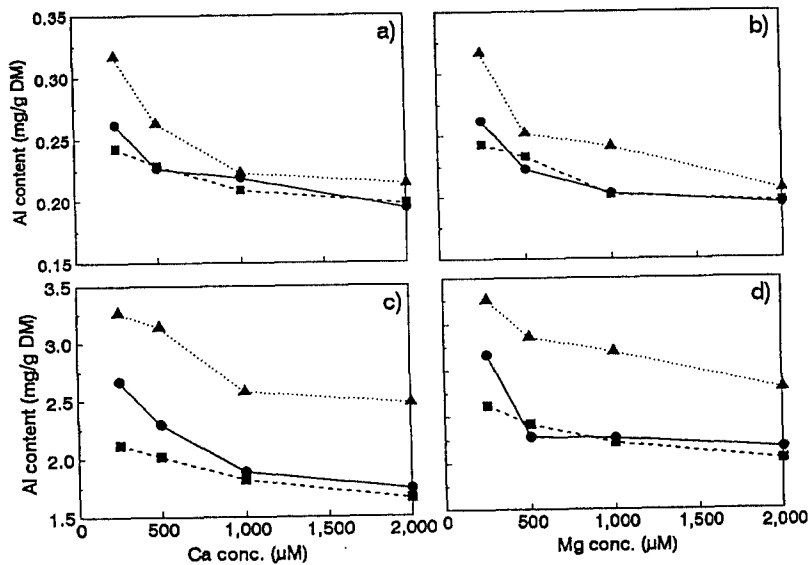


Fig. 3. Al content of shoots (a, b) and roots (c, d) of *Pinus densiflora* (●), *P. rigida* (■) and *P. thunbergii* (▲) grown in 1/2 Steinberg solution enriched with Ca (a, c) and Mg (b, d).

Table 2. Nutrient contents in shoots and roots of *Pinus densiflora*, *P. rigida* and *P. thunbergii* seedlings grown in enriched Ca and Mg solution with 2,000 μM Al for three weeks

Ca or Mg conc. (μM)	Shoot			Root		
	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	P (mg/g)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)	P (mg/g)
<i>Pinus densiflora</i>						
Ca 250	3.22	1.28	2.52	1.27	0.68	2.32
Ca 500	3.75	1.27	2.83	1.37	0.62	1.86
Ca 1000	4.33	1.27	2.59	1.73	0.61	1.62
Ca 2000	4.54	1.19	2.38	1.90	0.53	1.32
Mg 250	3.22	1.28	2.52	1.27	0.68	2.32
Mg 500	3.20	1.49	2.70	1.26	0.69	1.72
Mg 1000	2.91	1.55	2.59	1.15	0.81	1.64
Mg 2000	2.88	1.66	1.84	1.06	0.98	1.46
<i>Pinus rigida</i>						
Ca 250	3.34	1.29	2.23	1.51	0.68	2.40
Ca 500	3.86	1.23	2.24	1.63	0.63	1.94
Ca 1000	3.95	1.19	2.07	1.79	0.61	1.62
Ca 2000	3.97	1.17	2.06	1.92	0.59	1.50
Mg 250	3.34	1.29	2.23	1.51	0.68	2.40
Mg 500	3.25	1.37	2.48	1.43	0.70	2.06
Mg 1000	3.20	1.47	1.77	1.41	0.85	1.82
Mg 2000	2.90	1.53	1.64	1.39	1.07	1.58
<i>Pinus thunbergii</i>						
Ca 250	3.26	1.14	2.10	1.77	0.77	2.46
Ca 500	3.52	1.12	1.95	1.91	0.75	2.42
Ca 1000	3.56	1.12	1.83	1.97	0.70	2.30
Ca 2000	3.67	1.03	1.69	2.00	0.68	2.10
Mg 250	3.26	1.14	1.75	1.77	0.77	2.46
Mg 500	3.14	1.29	1.74	1.72	0.78	2.46
Mg 1000	2.98	1.42	1.48	1.71	1.01	2.28
Mg 2000	2.83	1.59	1.50	1.67	1.29	2.22

없었지만 Mg 농도 사이에 유의한 차이가 있었다 (Fig. 1). 그 이유는 Mg이 측근생장에, Ca이 주근 생장에 효과가 있었다고 해석된다 (Table 1).

전 식물체의 최대건물중량은 1,000 μM Ca 농도에서 나타났는데 그들은 대조구 (250 μM Ca) 보다 소나무, 리기다소나무 및 곰솔에서 각각 14, 20 및 20% 만큼 증가하였다. Mg 강화에 의한 건물중량의 증가는 소나무가 500 μM Mg에서, 리기다소나무와 곰솔이 2,000 μM Mg에서 나타났는데, 이 값들은 대조구 (250 μM Mg)보다 각각 13, 25 및 60% 만큼 증가하였다 (Table 1). 이 결과는 식물체의 건물량 증가에 Ca보다 Mg가 더 효과가 있었다고 해석된다. 경엽부/뿌리의 건물중량 비가 Mg 강화에 의하여 낮아진 이유는 Mg가 뿌리의 Al 독성을 완화시켰다고 해석된다 (Fig. 2). Tan 등 (1992)은 산성토양에 석회와 Mg를 첨가하여 뿌리 생장을 촉진시킨 바 있다.

Al 첨가가 소나무 유식물의 측근생장을 억제하였으나, Mg 강화는 Al 독성을 완화시키는 효과가 있었다. Keltjens와 Tan (1993)은 Ca과 Mg에 의한 Al 독성의 완화를 비교하여 단자엽식물이 Mg에, 쌍자엽식물이 Ca에 의하여 완화 효과를 더 가지며, Edmeades 등 (1991)은 Al독성

에 대한 예민종이 Ca과 Mg에 의하여 모두 완화 효과를 가지고, 그 내성종이 Mg에 의해서만 효과를 가지며, 그리고 Rengel과 Robinson (1990)은 Al독성이 Mg에 의하여 크게 완화됨을 밝히고 있다.

배양액에 Ca과 Mg을 강화하면 식물체 내의 그들 함량이 증가되지만, Al 함량은 감소되었다. Ca 강화는 Al과 Mg의 흡수를, Mg 강화는 Al과 Ca의 흡수를 감소시켰다. 즉 한 양이온의 강화는 다른 양이온의 흡수를 감소시키는 이른 바 길항작용 (antagonism)의 효과가 나타난 것이다 (Clarkson and Sanderson 1971). 배양액의 Ca과 Mg의 강화는 Al의 활성을 감소시키고, 뿌리의 Al 결합 부위를 좁히며, Ca과 Mg의 흡수를 촉진함으로써 뿌리 성장을 촉진할 것이다 (Lee and Pritchard 1984, Keltjens and van Loenen 1989). 산성토양의 개량제로서 석회(CaCO₃)와 돌로마이트(CaMg(CO₃)₂)가 사용되는데 Mg의 Al독성 완화를 고려하여 Ca과 Mg이 모두 포함된 후자의 사용을 권장할 수 있다.

적 요

소나무속 식물에 대한 Al 독성의 Ca과 Mg에 의한 완화를 실험하기 위하여 2,000 μ M Al 배양액에서 소나무, 리기다소나무 및 곰솔을 수경재배한 뿌리길이생장은 Ca 강화에 의하여 대조구보다 각각 21, 33 및 33% 증가하였고, Mg 강화에 의하여 각각 23, 44 및 107% 증가하였다. 측근/주근 길이의 비는 Ca 강화보다 Mg 강화에서 더 컸다. Ca과 Mg의 강화는 식물체 내의 Al 함량을 대조구보다 경엽부에서 19~35%, 뿌리에서 21~37% 감소시켰다.

인용문헌

- 류 훈 1995. 산성토양에 생육하는 수 종 목본식물의 Al 내성. 서울대학교 이학석사학위논문. 81p.
- 박병규. 1995. 산성 토양에서 토양 개량제 처리에 따른 식물의 성장과 주요 영양염류의 동태. 공주대학교 이학석사학위논문. 24p.
- Andersson, M. 1988. Toxicity and tolerance of aluminum in vascular plants. *Water, Air and Soil Pollution* 39: 439-462.
- Clarkson, D.T. and J. Sanderson. 1971. Inhibition of the uptake and long distance transport of calcium by aluminum and other polyvalent cations. *Journal of Experimental Botany* 22: 837-851.
- Crawley, M.J. 1986. Life history and environment. *In* M.J. Crawley (ed.), *Plant Ecology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. pp. 253-290.
- Dahlgren, R.A., K.A. Vogt. and F.C. Ugolini. 1991. The influence of soil chemistry on fine root dynamics in a subalpine Spodosol, Washington State, U.S.A. *Plant and Soil* 133: 117-129.
- Edmeades, D.C., D.M. Wheeler, F.P.C. Blamey and R.A. Christie. 1991. Calcium and magnesium amelioration of aluminum toxicity in Al-sensitive and Al-tolerant wheat. *In* R. J. Wright, V.C. Valigar and R.P. Murrmann (eds.), *Plant-Soil Interactions at Low pH*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 755-761.

- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plants growth. *In* E.W. Carson (ed.), The Plant Root and Their Environment. Univ. Press of Virginia. Charlottesville, Virginia. pp. 601-642.
- Foy, C.D. 1983. Plant adaptation to mineral stress in problem soils. *Iowa State Journal of Research* 57: 339-353.
- Haynes, R.J. and T.E. Ludeche. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soil. *Plant and Soil* 62: 241-254.
- Keltjens, W.G. and W.J. Dijkstra. 1991. The role of magnesium and calcium in alleviating aluminum toxicity in wheat plants. *In* R.J. Wright, V.C. Valigar and R.P. Murrmann (eds.), Plant-Soil Interactions at Low pH. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 763-768.
- Keltjens, W.G. and K. Tan. 1993. Interactions between aluminum, magnesium and calcium with different monocotyledonous and dicotyledonous plant species. *Plant and Soil* 155/156: 458-488.
- Keltjens, W.G. and E. van Loenen. 1989. Effects of aluminum and mineral nutrition on growth and chemical composition of hydroponically grown seedlings of five different forest tree species. *Plant and Soil* 119: 39-50.
- Lee, J. and M.V. Pritchard. 1984. Aluminum toxicity expression on nutrient uptake, growth and root morphology of *Trifolium repens* L. cv. "Grassland Huia". *Plant and Soil* 82: 101-116.
- Rengel, Z. and D.L. Robinson. 1990. Temperature and magnesium effects on aluminum toxicity in annual ryegrass (*Lolium multiflorum*). *In* M.L. van Beusichem (ed.), Plant Nutrition-Physiology and Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 413-417.
- Tan, K., W.G. Keltjens and G.R. Findenegg. 1992. Acid soil damage in sorghum genotypes: Role of magnesium deficiency and root impairment. *Plant and Soil* 139: 149-155.

(1995년 9월 28일 접수)