Korean J. Ecol. 19(1) : 39~46, 1996

소나무속 식물의 뿌리생장에 대한 알루미늄 내성

류 훈 · 김 준 호
서울대학교 생물학과

Aluminum Tolerance in Pine Root Growth

Ryu, Hoon and Joon-Ho Kim
Department of Biology, Seoul National University

ABSTRACT

Variation of Al tolerance in *Pinus densiflora*, *P. rigida* and *P. thunbergii* was investigated in a solution culture. Root length decreased as Al concentration increased, and decreased more in dilute culture media than in dense one. Aluminum tolerance based on relative root length was in the order of *P. rigida* > *P. densiflora* > *P. thunbergii*. Al content in tissue increased as Al concentration of the media increased, but the reverse was true for content of Ca and Mg. Al tolerance for root length showed intraspecific variation, even under the same Al concentration in the media.

Key words: Al tolerance, Intraspecific variation, *Pinus* seedling, Root growth

서 론

산성토양 속의 많은 가용성 Al은 식물의 생장을 감소시킨다 (Foy 1974, 1984, Andersson 1988). 가용성 Al은 세포분열의 억제, 세포막 투과성의 변화, 눈의 개아와 잎의 확장 지연, 뿌리 정단생장의 억제, 생물량과 세근량의 감소, 뿌리 호흡의 감소, Ca, Mg 및 수분 흡수의 감소, 조직 내 Al 함량의 증가를 가져온다 (Clarkson 1968, Foy *et al.* 1978, Roy *et al.* 1988, Arp and Strucel 1989).

식물의 Al 내성은 종간 및 종내 변이가 크다 (Foy 1984, Baligar *et al.* 1989, Duncan and Shuman 1990). Al 내성의 종내 변이는 Steiner 등 (1980)에 의하여 다른 장소에서 자란 자작나무 사이에 차이가 있음이 밝혀졌고, Wilkins와 Hodson (1989)에 의하여 독일가문비가 석회암토양보다 산성토양에서 자생하는 개체에서 큰 내성이 있음이 밝혀졌다.

Al 내성 식물의 선발은 농작물 품종과 Al 독성 토양에서 생존하는 수종에서 이루어졌다 (Wright 1976, Foy 1984, Duncan and Shuman 1990, 정과 이 1987). 특히 Al 내성 종과 내성

본 연구는 '93 환경공학기술개발사업의 생태계 복원기술사업 중 대기오염 및 산성비에 대한 내성종과 Bio-indicator의 선발 · 육종 개발에 대한 환경부 지원금의 일부로 수행되었음.

개체는 대도시, 공업단지 및 폐광산의 주변에 있는 산성토양의 식생을 복원하기 위하여 선발되고 있다.

본 연구의 목적은 산성비 지역에서 가용성 Al이 많은 산성토양에 식생을 복원하기 위하여 소나무속 식물 중에서 Al 내성종을 수경재배법에 의하여 선발하고 Al 농도에 대한 내성종의 반응을 밝히는 데 있다.

재료 및 방법

재료 식물은 여천공업단지 주변의 산성토양 (pH 4.2)에서 살아남은 소나무 (*Pinus densiflora*), 리기다소나무 (*P. rigida*) 및 곰솔 (*P. thunbergii*)에서 채종한 종자를 4℃에 저장하였다가 다음 해에 버미큘라이트를 넣은 포트에서 발아시켜 2주일 자란 유식물을 이용하였다. 유식물은 Steinberg 배양액에서 aeration시키면서 1주일간 예비재배하였다. 배양액은 초기에 pH 4.2로, Al 농도를 $AlCl_3 \cdot 6H_2O$를 용해하여 0, 200, 500, 1,000 및 2,000 μM로 조제하였다. 1/2 또는 1/5 Steinberg 배양액에서 3주간 수경재배하여 새로 자란 주근과 측근의 길이를 측정하였다. 내성개체의 선발에 이용한 개체수는 소나무 623개체, 리기다소나무 420개체 및 곰솔 470개체이었다. 수경재배와 뿌리길이의 측정 및 식물체의 무기이온 분석은 류 (1995)가 기술한 방법에 따랐다.

Al 내성의 종내변이는 500 μM Al의 1/2 Steinberg 배양액에서 유식물을 2일간 수경재배한 뿌리를 hematoxylin으로 염색한 다음 1주일 재배하여 새로 자란 뿌리길이를 측정하였다 (Polle *et al.* 1978, 류 1995). 새로 자란 뿌리길이는 개체별로 5 mm 간격으로 구분하여 빈도분포를 작성하여 개체변이를 비교하였다.

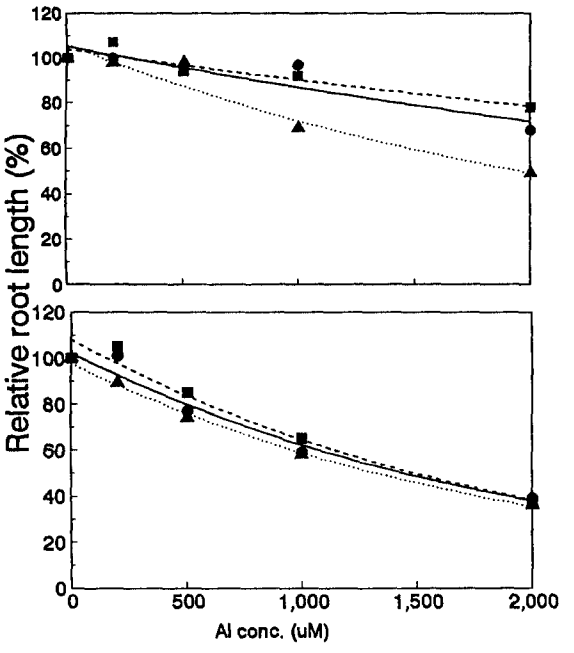

Fig. 1. Relative root length of seedlings of *Pinus densiflora* (●), *P. rigida* (■) and *P. thunbergii* (▲) grown in 1/2 Steinberg solution (above) and 1/5 one (below) with different Al concentrations.

결 과

Al에 의한 뿌리의 생장 억제

3주간 수경재배한 소나무속 식물의 총 뿌리길이는 0 (대조구), 200, 500, 1,000 및 2,000 μM Al의 배양액에서 농도가 증가함에 따라 감소되었는데, 2,000 μM Al, 1/2 Steinberg 배양액의 경우 대조구보다 22~51%, 1/5 배양액의 경우 61~64% 감소되었다 (Fig. 1). 각 Al 농도에서 측정한 소나무, 리기다소나무 및 곰솔의 평균 상대뿌리길이는 1/2 배양액보다 1/5 배양액에서 더 감소하였다. Al 농도 200~2,000 μM 사이의 평균상대뿌리길

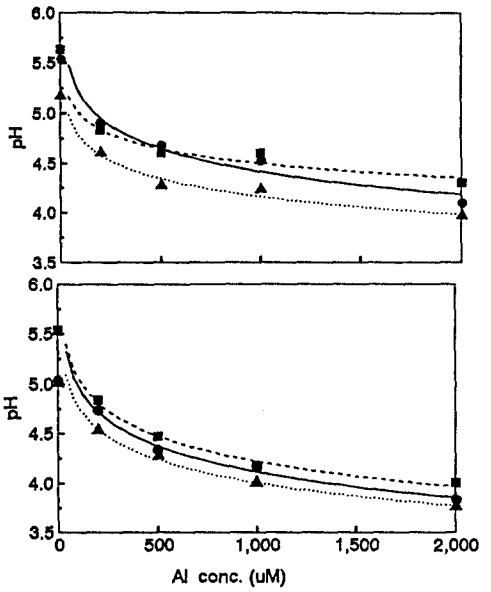

Fig. 2. Changes of pH value in 1/2 Steinberg solution (above) and 1/5 one (below) with different Al concentrations induced by *Pinus densiflora* (●), *P. rigida* (■) and *P. thunbergii* (▲) for 7 days. Initial pH value of solution was kept at pH 4.2.

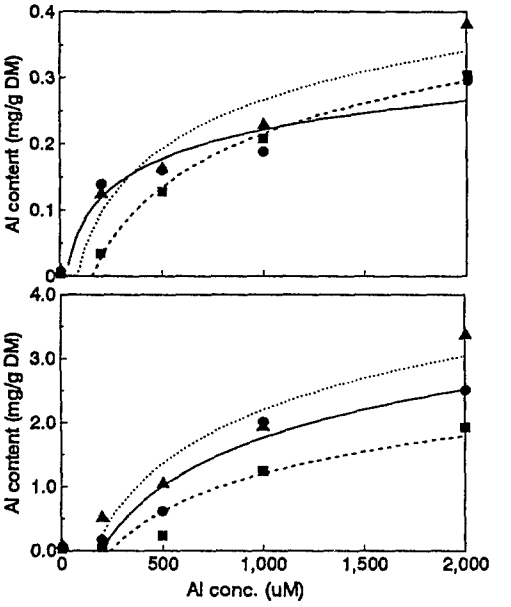

Fig. 3. Al content in shoots (above) and roots (below) of seedlings of *Pinus densiflora* (●), *Pinus rigida* (■) and *P. thunbergii* (▲) grown in 1/2 Steinberg solutions with different Al concentrations for 3 weeks.

이는 1/2 배양액에서 각각 91, 93 및 79%이었고, 1/5 배양액에서 각각 69, 73 및 64%로 두 배양액에서 리기다소나무가 가장 높고, 곰솔이 가장 낮았다 (Fig. 1).

배양액의 pH 변화

유식물을 1주일 재배한 후의 Steinberg 배양액의 pH는 Al 농도가 짙어짐에 따라 지수적으로 저하하였고, 그 저하는 1/2보다 1/5 배양액에서 더 크게 일어났다. 배양액의 pH 저하는 곰솔이 가장 크고, 소나무, 리기다소나무의 순으로 적었다 (Fig. 2).

이온 흡수의 변화

3주간 재배한 유식물의 경엽부와 뿌리의 Al 함량은 Al 농도가 짙어짐에 따라 증가하였다 (Fig. 3). Al 함량은 모든 농도에서 뿌리가 경엽부보다 약 10배 많았다. 2,000 μM Al에서 대조구에 대한 경엽부의 이온함량은 소나무, 리기다소나무 및 곰솔에서 Ca이 각각 56, 49 및 57%, Mg이 각각 65, 48 및 63% 그리고 총 P가 각각 83, 96 및 79%이고, 뿌리의 것은 Ca이 각각 45, 45 및 65%, Mg이 각각 57, 47 및 38% 그리고 총 P가 각각 92, 87 및 82%이었다 (Table 1). Ca과 Mg은 모든 처리구에서 대조구보다 낮았지만, 총 P는 높은 Al에서 낮았고 낮은 Al에서 높았다.

Table 1. Relative values (percentage of control) of nutrient concentration at Al treatment and control to zero Al treatment in shoots and roots of *Pinus densiflora*, *P. rigida* and *P. thunbergii* seedlings grown in 1/2 Steinberg solution for 3 weeks

Al conc.(μM)	Shoot			Root		
	Ca	Mg	P	Ca	Mg	P
			Pinus densiflora			
Control(mg/g)	3.6	2.1	2.3	3.2	1.3	3.6
0	100	100	100	100	100	100
200	96	95	108	89	78	109
500	94	78	104	87	74	107
1,000	84	70	92	62	65	96
2,000	56	65	83	45	57	92
			Pinus rigida			
Control(mg/g)	4.9	1.8	2.2	3.4	1.1	3.8
0	100	100	100	100	100	100
200	92	61	108	80	60	107
500	88	57	97	73	55	103
1,000	84	56	89	71	50	98
2,000	49	48	96	45	47	87
			Pinus thunbergii			
Control(mg/g)	3.6	1.4	1.8	3.3	1.1	3.4
0	100	100	100	100	100	100
200	88	84	102	97	71	198
500	86	80	98	94	70	95
1,000	80	71	84	87	67	90
2,000	57	63	79	65	38	82

Al에 대한 종내 변이

500 μM Al의 1/2 Steinberg 배양액에서 7일간 수경재배한 유식물의 최대뿌리길이는 소나무, 리기다소나무 및 곰솔이 각각 33, 58 및 32 mm이었고, 뿌리길이 빈도분포의 최빈치는 각각 5~10 mm (총 관찰 개체에 대한 최빈치 개체수의 백분율은 40%), 15~20 mm (24%) 그리고 5~10 mm (36%)이었다 (Fig. 4). 이 결과는 한 종내의 여러 개체들이 동일한 Al 농도에 대하여 다른 변이를 하고 있음을 나타낸다.

논 의

앞에서 기술한 결과는 소나무, 리기다소나무 및 곰솔의 상대뿌리길이가 Al 농도가 증가함에 따라 감소함을 보였다 (Fig. 1). 뿌리생장은 동일한 Al 농도에서 짙은 배양액 (1/2 Steinberg 배양액)보다 옅은 배양액 (1/5 배양액)에서 더 억제되었다 (Fig. 1). 이처럼 Al 독성은 배양액의 무기영양소 농도에 의하여 다르게 나타났다 (Thornton *et al.* 1987, Tepper *et al.* 1989). Pavan과 Bingham (1982)은 Al 독성이 배양액의 낮은 이온 농도와 높은 Al 활성에 의해 커짐을 밝혔고, Thornton 등 (1987)은 Al 활성이 완전 배양액보다 1/5 배양액에서 30%만큼 높아짐을 설명하였다. Al 독성에 대한 건물생산량의 감소는 뿌리길이 생장보다 뚜렷하지 않았다.

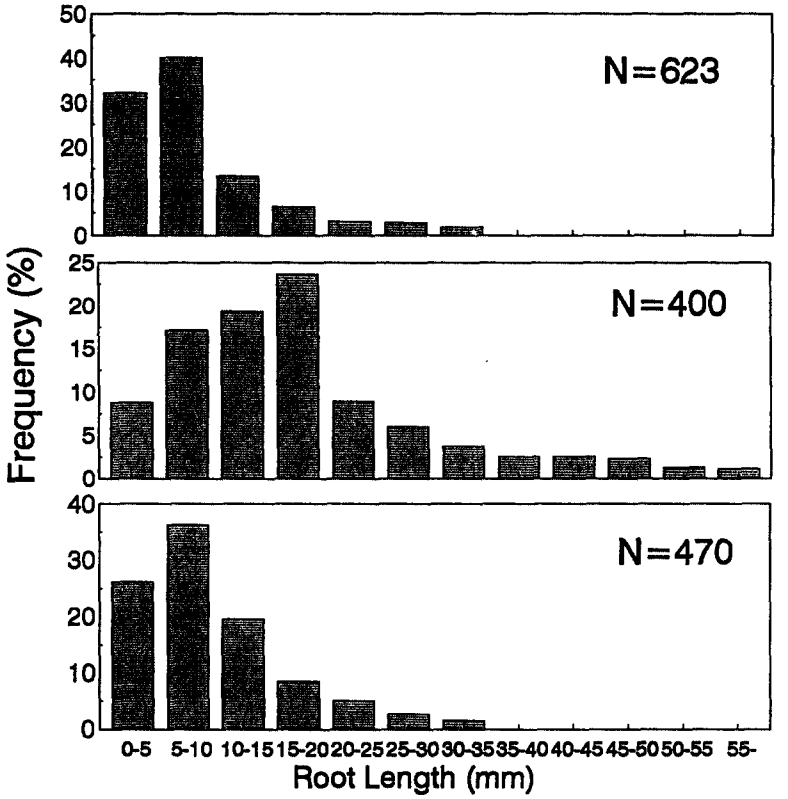

Fig. 4. Frequency distributions of root length of seedlings of *Pinus densiflora* (top), *P. rigida* (middle) and *P. thunbergii* (bottom) grown in 1/2 Steinberg solution with 500 μM Al for 7 days. Symbol N means the number of materials.

소나무와 리기다소나무의 뿌리생장은 200 μM Al의 1/5 배양액에서 대조구보다 오히려 증가하였다 (Fig. 1). 이와 같이 저농도 Al의 생장촉진효과는 많은 목본식물에서 밝혀졌다 (Foy 1974). Thornton 등 (1987)은 낮은 pH에서 Al이 H^+ 독성을 완화시키는 것이며, 높은 Al 농도에서 H^+ 독성완화보다 Al 독성이 더 크게 나타남을 설명하였다.

배양액의 pH는 Al 농도가 증가함에 따라 낮아졌는데, 대조구 (0 μM Al)에서 유식물을 재배하는 동안 초기 pH보다 7일 후에 pH 0.8~1.3 높아졌지만 Al 함유 배양액에서는 초기 pH와 유사하거나 오히려 낮아졌다 (Fig. 2). 배양액의 pH 저하는 1/5 배양액이 1/2 배양액보다 더 낮아졌다. 이러한 배양액의 pH 저하는 NO_3-N이 NH_4-N보다 많이 흡수되기 때문이다 (Foy *et al.* 1978).

식물의 Al에 대한 저항 기구는 뿌리에서 유기산과 같은 착화합물을 배출하여 근권의 pH를 높임으로써 Al 활성을 감소시키고, Ca, Mg 및 P 이온의 흡수능을 높이거나 이들의 요구량을 감소시키는 것으로 설명되고 있다. (Truman *et al.* 1986, Fitter and Hay 1987).

경엽부와 뿌리의 Al함량은 배양액의 Al 농도가 높아짐에 따라 지수적으로 증가하였다 (Asp *et al.* 1988) (Fig. 3). 특히, 뿌리가 경엽부보다 10배 만큼 많이 증가한 이유는 전자로부터 후자로의 Al 이동이 억제됨을 뜻한다. 식물체내의 Al 함량이 리기다소나무, 소나무 및 곰솔의 순으

로 많은 것으로 보아 Al 내성이 적은 곰솔이 많이 흡수하고 있음을 알 수 있다.

식물체내의 Al 함량은 배양액의 Al 농도에 비례하여 증가되고, Ca과 Mg 함량이 대조구보다 감소된 것으로 보아 Al이 식물체내의 양이온 흡수를 감소시켰다고 해석된다. 이처럼 Al은 양이온과 경쟁적으로 흡수되고, 뿌리의 막 투과성을 변화시켜 수분과 이온의 흡수능을 감소시킨다 (Arp and Strucel 1989). 식물체내의 총 P 함량이 낮은 Al 농도에서 오히려 증가한 이유는 Al과 P가 결합하여 뿌리의 피층에 축적되거나 Al이 세포막의 음전하 부위에 결합하여 P의 흡수를 촉진하였을 것이다 (Bengtsson *et al.* 1988).

본 연구에서 500 μM Al의 1/2 Steinberg 배양액에서 뿌리생장은 소나무, 리기다소나무 및 곰솔 사이에서 서로 다르게 나타났고, 한 종내의 개체 사이의 내성도 달랐다 (Fig. 4). 이처럼 Al 내성은 종간 또는 종내의 개체 사이에 다양한 차이가 나타난다 (Foy 1984, Fitter and Hay 1987, Baligar *et al.* 1989, Duncan and Shuman 1990). 한 종의 개체 사이의 Al 내성 차를 이용하여 산성토양에 생육하는 농작물의 품종 선발을 하고 있다 (Andersson 1988). 그러나 목본식물의 개체간 Al 내성 변이를 연구한 결과는 거의 없다. Steiner 등 (1980)은 다른 장소에서 채집한 자작나무 개체 사이에 Al 내성의 차이가 있으며, 내성이 강한 개체를 폐광산 주변의 식생 복원에 이용할 수 있다고 주장하였다. 따라서 Al 첨가 배양액에서 뿌리생장이 왕성한 1~2%의 개체를 Al 내성 개체로 선발하여 대도시, 공업단지 및 폐광산 주변의 훼손된 식생을 복원하는데 이용할 수 있을 것이다.

적 요

소나무, 리기다소나무 및 곰솔 유식물을 수경재배하여 Al 내성의 순위와 내성개체를 선발하였다. 뿌리길이는 배양액의 Al 농도가 증가함에 따라 감소하였고, 특히 옅은 무기영양소 배양액에서 더욱 감소하였다. Al 내성은 리기다소나무 > 소나무 > 곰솔의 순이었다. 배양액의 Al 농도가 증가함에 따라 식물체 내의 Al 함량은 증가하였으나 Ca과 Mg 함량은 오히려 감소하였다. 500 M Al 배양액에서 수경재배한 유식물의 뿌리길이는 한 종내의 개체 사이에 Al 내성 변이가 있음을 보였다.

인용문헌

류 훈. 1995. 산성토양에 생육하는 수 종 목본식물의 Aluminum 내성. 서울대학교 석사학위논문. 81p.

정희주 · 이인숙. 1987. 밀의 Aluminum 내성에 관한 연구. 한생태지 15: 157-172

Andersson, M. 1988. Toxicity and tolerance of aluminum in vascular plants. Water, Air, and Soil Pollution 39: 439-462.

Arp, P.A. and I. Strucel. 1989. Water uptake by black spruce seedling from rooting media (solution, sand, peat) treated with inorganic and oxalated aluminum. Water, Air, and Soil Pollution 44: 57-70.

Asp, H., B. Bengtsson and P. Jensen. 1988. Growth and cation uptake in spruce (*Picea abies* Karst.) grown in sand culture with various aluminum contents. Plant and Soil 111: 127-133.

Baligar, V.C., H.L. Dos-Santos, G.V.E. Pitta, E.C. Filho, C.A. Vasconcellos and A.F.C. Bahia-Filho. 1989. Aluminum effects on growth, grain yield and nutrient use efficiency ratios in sorghum genotypes. Plant and Soil 116: 257-264.

Bengtsson, B., H. Asp, P. Jennsen and D. Berggren. 1988. Influence of aluminum on phosphate and calcium uptake in beech (*Fagus sylvatica*) grown in nutrient solution and soil solution. Physiologia Plantarum 74: 299-305.

Clarkson, D.T. 1968. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanism for resistance. *In* I.H. Rorison (ed.), Ecological Aspects of the Mineral Nutrition of Plants. Blackwell Scientific Publications, Oxford. pp. 381-397.

Duncan, R.R. and L.M. Shuman. 1990. Level of acid soil field stress for sorghum (*Sorghum bicolor*) tolerance development; Comparison among locations. *In* M.L. van Beusichem (ed.), Plant Nutrition - Physiology and Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordecht. pp. 425-428.

Fitter, A.H. and R.K.M. Hay. 1987. Environmental physiology of plants. Academic Press, London. 423p.

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. Charlottesiville, Virginia. pp. 601-642.

Foy, C.D. 1984. Adaptation of plants to mineral stress in problem soils. *In* D. Evered and G.M. Collins (eds.), Origin and Development of Adaptation. Pitman Books, London. pp. 20-39.

Foy, C.D., R.W. Chaney and M.C. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 29: 511-566.

Pavan, M.A. and F.T. Bingham. 1982. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 993-997.

Polle, E., C.F. Konzack and J.A. Kittrick. 1978. Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. Crop Sci. 18: 823-827.

Roy, A.K., A. Sharma and G. Talukder. 1988. Some aspects of aluminum toxicity in plants. Botanical Review 54: 145-178.

Steiner, K.C., L.H. McCormic and D.S. Canavera. 1980. Differential response of paper birch provenances to aluminum in solution culture. Can. J. For. Res. 10: 25-29.

Tepper, H.B., C.S. Yang and M. Schaedle. 1989. Effecs of aluminum on growth of root tips of honey locust and loblolly pine. Environmental and Experimental Botany 29: 165-173.

Thornton, F.C., M. Schaedle and D.J. Raynal. 1987. Effects of aluminum on red spruce seedlings in solution culture. Environmental and Experimental Botany 27: 489-498.

Truman, R.A., F.R. Humphreys and P.J. Ryan. 1986. Effect of varying solution ratios of Al to Ca and Mg on the uptake of phosphorus by *Pinus radiata*. Plant and Soil 96: 109-123.

Wilkins, D.A. and M.J. Hodson. 1989. The effects of aluminium and *Paxillus involutus* Fr.

on the growth of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. New Phytol. 113: 225-232.
Wright, R.J. 1976. Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell Univ. Agric. Expt. Stn. Ithaca, New York. 420p.

(1995년 9월 28일 접수)