

## 여천공업단지 주변 토양의 알루미늄 함량에 따른 알루미늄 내성 수종의 식재

류 훈 · 이규송 · 이창석\* · 김준호

서울대학교 자연과학대학 생물학과, 서울여자대학교 자연과학대학 생물학과\*

### Reforestation with Aluminum Tolerant Trees along Aluminum Content in Soil around Yecheon Industrial Complex

Ryu, Hoon, Kyu Song Lee, Chang Suk Lee\* and Joon-Ho Kim

Department of Biology, Seoul National University,

Department of Biology, Seoul Women's University\*

#### ABSTRACT

Selection of Al tolerant woody plants, and possibility of reforestation with the Al tolerant plants in soil conditions with different Al content, topography and slope exposures were studied on the slopes around Yecheon Industrial Complex. Root growth in length of plants grown in 1/2 Steinberg solution decreased with increased Al concentrations of the solution. Relative root length showed that *Paulownia coreana*, *Celtis sinensis* and *Firmiana simplex* were sensitive to 500  $\mu\text{M}$  Al, *Pinus koraiensis*, *Alnus japonica* and *Ligustrum japonicum* were intermediate, and *Pinus rigida*, *P. densiflora* and *P. thunbergii* were tolerant to 1,000  $\mu\text{M}$  Al. Coniferous plants appeared to be more tolerant to Al than deciduous ones. Soil pH was 4.2 and Al content was 509 ppm in average around the Yecheon industrial complex. Al content and soil acidity were more deteriorated on the foot-hill and slope facing to the pollution source from the industrial complex than on the ridge and opposite slope.

**Key words:** Acidic soil, Aluminum tolerant plant, Reforestation, Soil Aluminum content

#### 서 론

산성토양의 주요한 특성은 가용성 Al 함량의 증가와 Ca과 Mg 같은 염기성 양이온의 감소에 있다 (박 1995). 토양 내 가용성 Al 함량의 증가는 식물의 성장을 제한하여 그 생산성을 감소시킨다 (Foy 1974, Andersson 1988).

---

본 연구는 '94 환경공학기술개발사업의 생태계 복원기술사업 중 대기오염 및 산성비에 대한 내성종과 Bioindicator의 선발·육종 개발에 대한 환경부 지원금의 일부로 수행되었음.

Al에 대한 농작물의 반응에 관한 연구는 많지만 (Andersson 1988), 삼림 식물의 반응에 대한 연구는 한정되어 있다 (Keltjens and van Loenen 1989). 단지 Al에 대한 삼림식물 종간의 내성과 성장차가 연구되었다 (McCormic and Steiner 1978, Tepper *et al.* 1989, Thornton *et al.* 1987).

대도시, 공업단지 및 폐광산 주변의 산성토양에서의 녹화 (greening)는 토양개량제의 개발, Al 내성종 또는 내성개체의 선발에 기대를 걸 수 있다.

본 연구는 수경재배한 유식물의 뿌리길이를 기준으로 대도시와 공업단지 주변의 산성토양에서 자생하는 수종의 Al 내성 순위를 결정하고, 여천공업단지 주변 토양의 Al 함량을 정량하여 지형과 사면 방향에 따라 식생을 복원할 수 있는 생육지를 정하는 데 목적이 있다.

## 재료 및 방법

### 수경재배

재료식물은 산성토양에서 자생하는 소나무 (*Pinus densiflora*), 리기다소나무 (*P. rigida*), 곰솔 (*P. thunbergii*), 잣나무 (*P. koraiensis*), 오리나무 (*Alnus japonica*), 팥나무 (*Ligustrum japonicum*), 오동 (*Paulownia coreana*), 팽나무 (*Celtis sinensis*) 및 벽오동 (*Firmiana simplex*)의 발아 후 2주 (침엽수) 또는 3~4주 (활엽수)된 유식물을 이용하였다.

유식물은 Foy 등 (1987)에 의하여 조제된 1/2 Steinberg 배양액을 넣은 3L 용기에서 띄워 3주간 수경재배하였다. Al은  $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 를 1/2 Steinberg 배양액에 0, 500, 1,000 및 2,000  $\mu M$  Al로 희석하였다. 유식물은 각 농도에서 15개체씩 2 반복으로 재배하였다 (5농도  $\times$  15개체  $\times$  2회 반복). 배양액의 pH 조정과 수경재배법은 류(1995)가 기술한 바와 같다. 뿌리길이는 수경재배 중에 새로 자란 주근과 측근의 길이를 합한 값으로 나타냈고, Al 내성은 다음의 상대뿌리길이 (RRL; relative root length)로 평가하였다.

$$RRL = \frac{\text{Al 첨가 배양액에서 새로 자란 뿌리길이 (mm)}}{\text{Al 무첨가 배양액에서 새로 자란 뿌리길이 (mm)}} \times 100$$

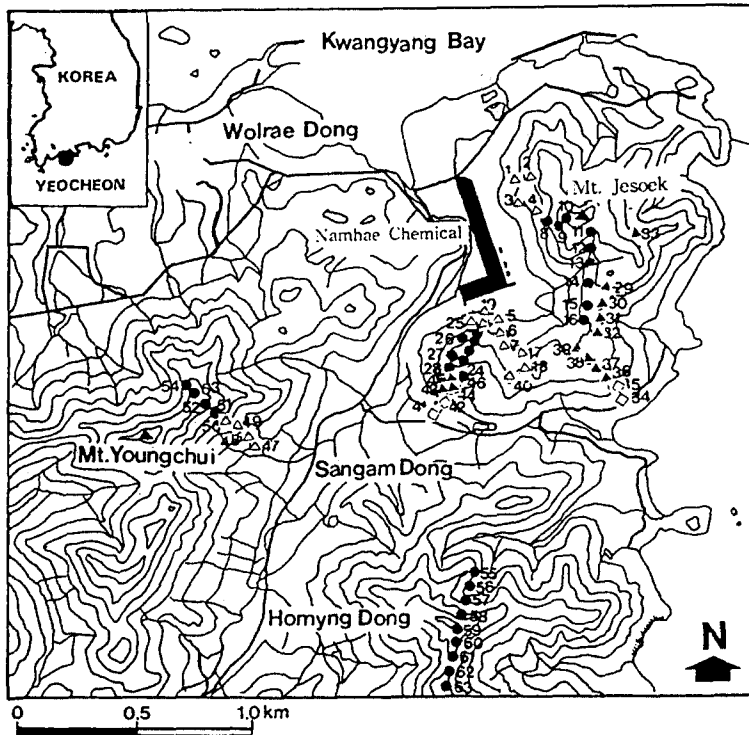
### 토양 채취 및 화학 성분의 분석

토양은 전남 여천공업단지의 남해화학을 중심으로 거리와 지형을 고려하여 63지소에서 플라 스틱 삽으로 낙엽층을 제거하고 5 cm 깊이의 표토에서 채토한 다음 4 군으로 구분하였다 (Fig. 1). 토양시료는 실험실에서 음건시킨 후 2 mm 체로 쳐서 화학분석에 이용하였다. 토양의 pH 및 Al 함량의 측정은 류 (1995)가 기술한 방법에 따랐다.

## 결 과

### 알루미늄 내성

모든 재료 식물의 상대뿌리길이 (RRL)는 Al 농도의 증가에 따라 감소되었다. 평균 RRL로 평가한 Al 내성은 리기다소나무, 소나무, 곰솔, 잣나무, 오리나무, 팥나무, 오동, 팽나무 및 벽오동의 순으로 낮았다 (Table 1). 이 결과는 높은 Al농도에서 침엽수는 내성이 있지만 활엽수는 없음을 보여준다. 리기다소나무, 소나무 및 곰솔은 500  $\mu M$  Al에서, 특히 전 2종은 1,000  $\mu M$  Al에



**Fig. 1.** A map showing the soil sampling sites. Collected soils were grouped by topography and distance from Namhae Chemical Factory in Yecheon Industrial Complex.  
 △: Zone I, ●: Zone II, ▲: Zone III, ◇ Zone IV.

**Table 1.** Relative root length (*RRL*) of selected woody plants grown in 1/2 Steinberg solution with different Al concentrations for three weeks

Species	Al concentration ( $\mu\text{M}$ )				Mean <i>RRL</i>
	0	500	1,000	2,000	
<i>Pinus rigida</i>	100	94	92	78	91
<i>Pinus densiflora</i>	100	97	97	68	90
<i>Pinus thunbergii</i>	100	98	69	49	79
<i>Pinus koraiensis</i>	100	56	47	26	57
<i>Alnus japonica</i>	100	29	14	2	36
<i>Ligustrum japonicum</i>	100	19	9	6	33
<i>Paulownia coreana</i>	100	20	3	0	31
<i>Celtis sinensis</i>	100	10	4	0	29
<i>Firmiana simplex</i>	100	3	1	0	26

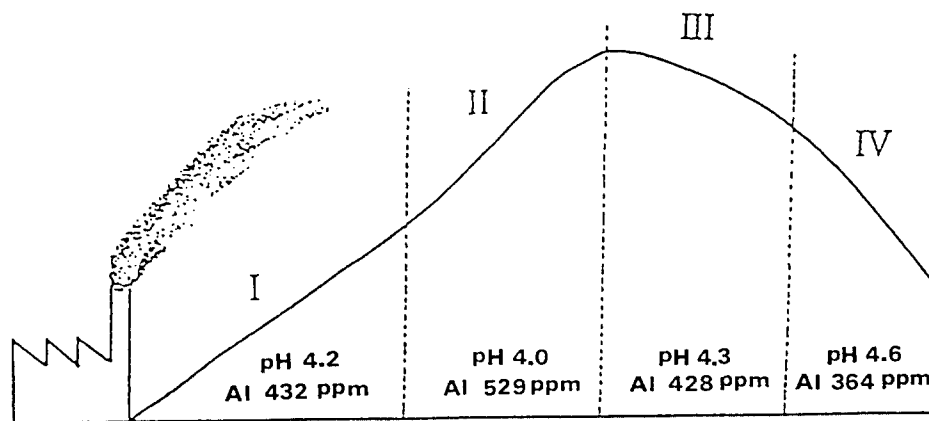
서 강한 내성을 가졌다 (Table 1). Al에 의하여 *RRL*가 낮은 이유는 Al가 근단분열조직의 세포 분열을 억제하기 때문이다 (Clarkson 1969).

**토양의 pH 값과 Al 함량**

여천공업단지에서 남해화학 주변의 토양은 pH 4.2 (pH 3.5~5.4 범위)의 산성토양이었고, Al

**Table 2.** pH and Al content of soils around the Namhae Chemical Factory

Site	pH	Al (ppm)	Site	pH	Al (ppm)	Site	pH	Al (ppm)	Site	pH	Al (ppm)
Zone I			Zone II								
1	4.3	358	8	4.2	374	57	3.9	425	39	4.1	264
2	5.2	550	9	4.2	833	58	4.3	474	43	3.6	440
3	4.3	304	10	4.3	326	59	3.8	512	44	4.0	637
4	4.1	356	11	3.8	399	60	4.2	502	45	4.1	343
5	4.4	269	12	4.0	551	61	4.0	659	46	4.0	404
6	4.5	496	13	3.9	446	62	3.7	833			
7	4.8	476	14	3.8	541	63	4.6	646	Mean	4.3	428
17	4.0	666	15	3.5	1013					±0.4	±144
18	4.3	607	16	3.7	653	Mean	4.0	529			
19	3.7	305	22	4.2	414		±0.2	±190	Zone IV		
20	3.7	506	23	3.7	427						
21	3.7	397	24	4.3	309	Zone III			34	5.2	266
25	3.8	340	26	4.0	563				35	5.4	194
40	3.7	425	27	4.0	533	29	4.6	631	41	3.7	475
47	4.2	514	28	4.1	550	30	4.6	607	42	4.1	519
48	4.0	602	51	3.9	729	31	4.5	409			
49	3.9	933	52	4.0	845	32	4.4	594	Mean	4.6	364
50	3.5	705	53	4.2	566	33	4.1	356		±0.8	±158
			54	3.5	1187	36	5.2	213			
Mean	4.2	432	55	3.9	446	37	4.3	306			
	±0.5	±121	56	3.7	447	38	4.2	366			

**Fig. 2.** The pH values and Al content of soils of the slope facing to pollution source from Namhae Chemical Factory and of the opposite slope.

함량은 평균 509 ppm (194~1,187 ppm 범위)이었다 (Table 2).

토양은 오염원인 남해화학 쪽 사면의 굴퓏보다 낮은 구역, 즉 구역 I이 pH 4.2 (pH 3.7~5.2)와 Al 함량 432 ppm (269~933 ppm), 남해화학 쪽 사면의 굴퓏보다 높은 구역, 즉 구역 II가

pH 4.0 (pH 3.5~4.6)와 Al 함량 529 ppm (309~1,187 ppm), 오염원 반대사면의 능선에서 산복부, 즉 구역 III이 pH 4.3 (pH 3.6~4.6)와 Al 함량 428 ppm (213~637 ppm), 그리고 오염원 반대사면의 산복부, 즉 구역 IV가 pH 4.6 (pH 3.7~5.4)과 Al 함량 364 ppm (194~519 ppm)이었다 (Table 2).

토양의 pH가 높고 Al 함량이 적은 토양군 IV는 바다로부터의 해풍을 적게 받고 오염원으로부터 거리가 먼 지역이었지만 Al 함량이 많은 토양군 II는 대기오염물질을 직접 받는 오염원 쪽 사면의 산복부로부터 능선부까지이다.

## 논 의

앞에서 언급한 결과는 1/2 Steinberg 배양액에서 재배한 유식물의 뿌리생장이 Al 농도가 짙을수록 감소함을 나타냈다 (Table 1). 평균 RRL을 기준으로 한 종간의 Al 내성은 리기다소나무 > 소나무 > 곰솔 > 잣나무 > 오리나무 > 팽나무 > 오동 > 팽나무 > 벽오동의 순으로 낮음으로서 종간의 차이를 보였다. 본 연구에서 Al 내성을 Schaedle 등 (1989)의 기준으로 분류하면 소나무와 리기다소나무는 내성종 (tolerant species)에, 곰솔, 잣나무, 오리나무 및 팽나무는 중간내성종 (intermediate species)에 그리고 오동, 팽나무 및 벽오동은 예민종 (sensitive species)에 속하였다.

삼림식물의 Al 내성은 생육지의 모암, 유기물함량, 양이온과 음이온 및 총 염류 함량, 개체의 유전 특성 등과 깊은 관계가 있다 (Cronan *et al.* 1989). Al 내성이 활엽수보다 침엽수가 높은 이유는 자생지의 토양과 깊은 관계가 있을 것이다. 침엽수림 토양은 낙엽 속의 염기함량이 적고 humus산이 많으므로 산성화가 심하여 Al 내성이 크다 (Hutchinson *et al.* 1986, Truman *et al.* 1986, Fitter and Hay 1987). 곰솔의 Al 내성이 작은 이유는 소나무보다 토양 pH가 높고 유기물 함량이 많으므로 Al 스트레스가 적은 생육지에 적응되어 있다고 해석된다 (김과 길 1983). Grime과 Hodgson (1969)은 산성 토양에서 사는 종이 석회암 토양 종보다 Al 내성이 큼을 밝혔다.

여천공업단지 내의 남해화학 주변 토양은 평균 pH 4.2로 심한 산성토양이었고, Al 함량은 평균 509 ppm으로 많았다. 이 결과는 류 (1995)가 지적한 바와 같이 토양 pH가 낮을수록 가용성 Al 함량이 증가됨을 나타낸다. 여천공업단지의 토양내 Al 함량 (509ppm)은 오염되지 않은 경기도 파주의 것 (평균 211 ppm, 범위 150~342 ppm)의 2.5배만큼 많은 양이다 (류 1994).

남해화학은 북쪽이 열리고 동서남쪽이 산으로 둘러싸인 분지내에 위치하고 있으므로 대기순환이 미약하고 방출하는 열로 말미암아 기온역전이 일어날 수 있다 (정과 이 1987). 남해화학 주변 지형의 사면을 고려하여 토양의 pH와 Al 함량을 오염원에 면한 사면과 반대사면으로 구분하여 Fig. 2에 배열하였다. 토양의 평균 pH와 평균 Al 함량은 구역 I이 각각 pH 4.2와 432 ppm, 구역 II가 각각 pH 4.0과 529 ppm, 구역 III이 각각 pH 4.3과 428 ppm, 구역 IV가 각각 pH 4.6과 364 ppm이었다 (Fig. 2). 이 결과는 오염원의 굴뚝 높이, 오염원이 위치한 지형과 사면방향 및 거리, 풍향 및 기온역전으로 설명될 수 있다. 구역 I은 굴뚝 높이보다 낮은 산복부이고, 구역 II는 굴뚝보다 높으며 기온역전의 영향을 받을 수 있고, 구역 III과 IV는 오염원의 반대 사면이고 거리가 멀며 대기순환의 영향을 적게 받는 지역이다.

토양의 Al 함량의 차이에 따른 복원이 가능한 식물종을 선정하면 다음과 같다. 구역 I과 구역 IV에는 Al 예민종인 오동, 팽나무 및 벽오동을 심을 수 있다 (Table 1). 실제로 남해화학 건물에

인접한 곳에 벽오동이 자라고, 제석산 남사면에 팽나무가 자라는 것이 관찰되었다. 구역 II에는 Al 내성종인 소나무류를, 구역 III에는 Al 중간내성종인 오리나무와 광나무를 심을 수 있다. 실제로 제석산의 남사면 산복부에 오리나무와 광나무가 건강하게 자라는 것이 관찰되었다. 그러나 토양에 있어서 Al 내성종인 소나무류는  $SO_2$ 에 대한 예민종임이 지적되고 있다 (황보 1995).

## 적 요

산성토양에서 자생하는 삼림식물 9종에 대하여 Al 내성을 수경재배로 판정하였다. 그들의 상대뿌리길이는 Al 농도가 증가할수록 감소하여 Al 내성 순위는 리기다소나무 > 소나무 > 곰솔 > 잣나무 > 오리나무 > 광나무 > 오동 > 팽나무 > 벽오동의 순이었다. Al 내성은 침엽수가 활엽수보다 강하였다. 여천공업단지 내 남해화학 주변 토양은 pH 4.2이고 Al 함량은 509 ppm이었다. 오염원에 면한 사면에서 표고가 높아질수록 Al 함량이 증가하고 pH가 낮아졌다. Al 내성 수종은 공업단지의 지형을 고려하여 심을 수 있음이 밝혀졌다.

## 인용문헌

- 김정언·길봉섭. 1983. 한반도 곰솔분포에 관한 연구. 한생태지 6: 45-54.
- 류태철. 1994. 수도권 지역에서 산성강하물에 의한 리기다소나무림 쇠퇴의 기구와 회복. 서울대학교 이학박사학위논문. 219p.
- 류 훈. 1995. 산성토양에 생육하는 수 종 목본식물의 Aluminum 내성. 서울대학교 이학석사학위논문. 81p.
- 박병규. 1995. 산성 토양에서 토양 개량제 처리에 따른 식물의 생장과 주요 영양염류의 동태. 공주대학교 이학석사학위논문. 24p.
- 정팔진·이종범. 1987. 환경과학. 동화기술, 서울. 329p.
- 황보준권. 1995. 이산화황에 대한 여천 공업단지 내에 생육하는 수종 목본식물의 반응. 서울대학교 이학석사학위논문. 69p.
- Andersson, M. 1988. Toxicity and tolerance of aluminum in vascular plants. *Water, Air and Soil Pollution* 39: 439-462.
- Clarkson, D.T. 1969. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanisms for resistance. *In* I.H. Rorison (ed.), *Ecological Aspects of the Mineral Nutrition of Plants*. Blackwell, Oxford and Edinburgh. pp. 381-397
- Cronan, C.S., R. April, R.J. Bartlett, P.R. Bloom, C.T. Driscoll, S.A. Gherini, G.S. Handerson, J.D. Joslin, J.M. Kelly, R.M. Newton, R.A. Parnell, H.H. Patterson, D.J. Raynal, M. Schaedle, C.L. Schofield, E.L. Sucoff, H.B. Tepper, and F.C. Thornton. 1989. Aluminum toxicity in forests exposed to acidic deposition: The ALBIOS Results. *Water, Air and Soil Pollution* 48: 181-192.
- 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. Charlottesville, Virginia. pp.

- 601-642.
- Foy, C.D., E.H. Lee and S.B. Wilding. 1987. Differential aluminum tolerances of two barley cultivars related to organic acids in their roots. *J. Plant Nutr.* 10: 1089-1101.
- Grime, J.P. and J.G. Hodgson. 1969. An investigation of the ecological significance of limechlorosis by means of large-scale comparative experiment. *In* I.H. Rorison (ed.), *Ecological Aspects of the Mineral Nutrition of Plants*. Blackwell, Oxford. pp. 67-69.
- Hutchinson, T.C., L. Bozic and G. Munoz-Vega. 1986. Response of five species of conifer seedlings to aluminum stress. *Water, Air and Soil Pollution* 31: 283-294.
- Keltjen, 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.
- McCormic, L.H. and K.C. Steiner. 1978. Variation in aluminum tolerance among six genera of trees. *Forest Sci.* 24: 565-568.
- Schaedle, M., F.C. Thornton, D.J. Raynal and H. Tepper. 1989. Response of tree seedlings to aluminum. *Tree Physiol.* 5: 337-356.
- Tepper, H.B., C.S. Yang and M. Schaedle. 1989. Effects 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.

(1995년 9월 28일 접수)