

## 토양산성화가 소나무, 상수리나무 묘목의 성장 및 영양상태에 미치는 영향

진현오<sup>1</sup> · 방선희<sup>1\*</sup> · 이충화<sup>2</sup> · 김세영<sup>1</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 생명과학대학, <sup>2</sup>국립산림과학원 산림환경부

### Effects of Artificially Acidified Soils on the Growth and Nutrient Status of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* Seedlings

Hyun-O Jin<sup>1</sup>, Sun-Hee Bang<sup>1\*</sup>, Choong-Hwa Lee<sup>2</sup> and Se-young Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Life Science, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul, 130-712, Korea

**요약:** 소나무, 상수리나무 묘목의 성장 및 영양상태에 미치는 토양산성화의 영향을 조사하고 묘목의 성장과 토양 용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와의 관계를 검토하였다. 인위적으로 산성화 시킨 산림토양에서 생육한 소나무, 상수리나무 묘목의 성장저해에는 토양용액 중의 pH 저하와 이에 따른 토양용액으로의 Al 용출 및 묘목의 지하부에 있어서 Al 농도의 증가에 따른 지상부의 Ca 등의 식물 필수원소의 감소 등이 관여하고 있음을 시사하였다. 토양산성화에 따른 묘목의 성장저하 수준은 토양의 Al 농도뿐만 아니라 Al과 Ca, Mg 및 K과의 무기영양소 균형도에 의해 결정되며, 두 수종 모두 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비가 6.0 이하가 되면 건물생장이 현저하게 저하하고 그 비가 0.8인 경우 건물생장이 대조구 값에 비하여 소나무 묘목에서 약 60%, 상수리나무 묘목에서 약 50% 저하하였다. 앞으로, 산성우 등의 산성강하물에 의한 토양산성화가 수목의 성장 및 영양상태에 미치는 영향을 평가할 경우, 토양 용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비는 삼림생태계 피해예측에 대한 산성강하물의 한계부하량의 평가에 있어 중요한 지표가 될 수 있다고 판단된다.

**Abstract:** The effects of soil acidification on the seedling growth and nutrition of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* were investigated. The relationship between the seedling growth and molar (Ca+Mg+K)/Al ratio of in soil solution was examined. The results suggested that growth inhibition of seedling *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* was due to the low pH of soil solution, which was followed by leach of Al into soil solution, and decrease of essential elements, such as Ca in aerial part of the seeding caused by the increase of Al concentration in subterranean part of the seedlings. The level of growth inhibition was determined not only by Al concentration, but also by the balance of inorganic elements, Al, Ca, Mg and K. The growths of two species in total dry weight were clearly inhibited when molar (Ca+Mg+K)/Al ratio of the soil was lower than 6.0. The growth in dry weight, in the condition of the molar ratio was 0.8, was decreased 60% or 50% for the seedling of *Pinus densiflora* or *Quercus acutissima* respectively. It was concluded that the molar (Ca+Mg+K)/Al ratio could be an important index for evaluation of the effects of soil acidification, due to acid deposition such as acid rain, on growth of trees and nutrition. And it might be a more useful indicator for evaluation of critical load of acid deposition on forest ecosystems.

**Key words :** molar (Ca+Mg+K)/Al ratio, nutrient status, pinus densiflora, quercus acutissima, soil acidification, total dry weight

## 서론

산업 선진지역인 유럽이나 북미에서 보고되고 있는 환경오염 및 수목의 피해현상은 화석연료 사용증가로 인한

대기오염물질 및 CO<sub>2</sub>의 농도증가가 그 원인으로 지적되고 있다(Larcher, 1995). 최근, 아시아, 아프리카 및 남미지역의 산업화로 인한 전 지구 규모적으로 방출되는 대기오염물질 및 CO<sub>2</sub>의 양이 증가되어 수목의 피해를 가속화하고 있다. 이러한 대기오염물질의 대기이동으로 인한 수목 피해는 전 지구적인 문제로 대두되고 있다(Mohnen, 1988;

\*Corresponding author  
E-mail: sunny@khu.ac.kr

Akimoto and Narita, 1994). 유럽 및 북미에서 현재까지 수행된 연구결과를 보면, 현재 관측되고 있는 pH4.0-5.0 전후의 산성우의 짧은 기간 직접적인 영향에 의한 수목피해 발현 가능성은 적다고 생각되지만, 이러한 산성우가 오랜 기간 지속적으로 토양으로 집적되어 토양산성화가 진행될 경우, 생태계에 미치는 영향이 우려된다(Krause *et al.*, 1986). 특히, 산성강하물에 의한 토양산성화는 수목피해의 중요한 원인 중 하나로 알려져 있다(Totsuka, 1993).

우리나라는 1960년대 이후 대기오염물질 배출량의 증가로 인한 환경오염과 pH4.0 전후의 산성비가 공단지대 및 대도시 주변에서 계속 관측되고 있으며(전영신 등, 1994; Lee *et al.*, 2003), 토양산성화가 전국 각지에서 관측되고 있다(이경재 등, 1996; 이종식과 이규승, 2000). 특히 최근에는 대기 오염물질의 급속한 증가와 함께 토양산성화가 빠르게 진행되고 있으며(조희두, 1999; 이승우와 박관수, 2001; 환경부, 2002), 비교적 대기오염이나 토양산성화에 내성이 강한 소나무류(Burns and Honkala, 1990)의 쇠퇴가 대도시와 공단지대 주변에서 관찰되고 있다(Lee *et al.*, 2003; 이충규 등, 2004).

산성강하물이 토양생태계로 유입되면  $\text{NO}_x$ 나  $\text{SO}_2$ 와 같은 음이온이 Ca, Mg 등과 같은 양이온과 결합하여 식물의 필수 영양원소(Ca, Mg 및 K)가 토양으로부터 용탈하게 되며(吉田와 川畑, 1998), 한층 더 산성화가 진행되면 식물 유해금속인 Al, Mn 등을 용출시켜 식물의 세근발생이나 신장생장을 억제하여 식물의 양분흡수를 저해한다(Ulrich *et al.*, 1980). 따라서, 건습성 산성강하물에 의해 산성화된 토양에 생육하고 있는 수목은 염기의 용탈로 인한 식물영양상태의 악화나 Al, Mn 등과 같은 식물 유해금속으로부터 성장저해의 복합적인 영향을 받을 것으로 예상되고 있다.

최근 유럽을 중심으로 오염물질의 발생량을 규제하기 위한 기초자료와 지침을 마련하기 위하여, 산림생태계가 악영향을 받지 않는 산성물질 부하의 허용한계, 즉 한계부하량(Critical load)을 추정하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며(Brodin and Kuylenstierna, 1992; Sverdrup *et al.*, 1994), 임목성장량과 토양용액 중의(Ca+Mg+K)/Al 몰비가 밀접한 상관관계가 있는 것으로 알려져 산성강하물의 한계부하량 평가에 대단히 중요한 요인으로 보고되고 있다. Sverdrup *et al.*(1994)은 유럽에서 생육하고 있는 독일가문비의 성장과 토양용액 중의(Ca+Mg+K)/Al 몰비와의 관계를 검토하여 이 몰비가 1.0을 기준으로 하여 산림생태계에 대한 산성강하물의 한계부하량을 평가하고 있다.

따라서 본 연구는 공시재료로서는 중부지방의 대표 조림수종인 소나무 및 국내 천연활엽수림의 주종을 이루는 상수리나무의 묘목을 사용하여 장래 우리나라에서 산성우에 의하여 실제로 발생할 수 있는 토양산성화를 예측하

여 수목의 성장 및 영양상태에 미치는 영향을 조사하고, 또한 유럽에서 기 개발된 한계부하량 추정변수인 (Ca+Mg+K)/Al 몰비가 우리나라 산림토양에도 적용이 가능한지를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시묘목 및 공시토양

공시묘목은 경기도 양평군에 위치한 북부지방산림청 용문양묘사업소 묘포장에서 생육시킨 소나무(*Pinus densiflora*) 3년생과 상수리나무(*Quercus acutissima*) 2년생 실생묘를 사용하였다. 공시토양은 경기도 광주시 소재하고 있는 경희대학교 연습림(N 37° 3', E 127° 1') 일대에 분포하는 침엽수와 활엽수 임분에서 임상으로부터 낙엽층을 제거하고 표층토 약 0-10 cm까지의 토양을 채취하였다. 시료 채취 후 토양은 5 mm 체로 자갈이나 식물뿌리 등을 제거하여 실내에서 2주 동안 건조 하였다. 풍건토양 1 L에  $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 5 : 3 : 2$ (당량비)의 비율이 되도록 조제한 산성용액을 첨가하였다. 각 처리구의 토양 1 L에 첨가된  $\text{H}^+$ 의 양이 각각 0(대조구), 10, 30, 60 및 90 meq가 되도록 조제하였다.

### 2. 성장량

공시묘목은 실험직전 무작위로 21개체 및 실험종료 시에 각 처리구당 5개체를 선정하여 각 식물기관별(잎, 줄기+가지, 뿌리)로 생중량을 측정 한 후, 70°C에서 5일간 열풍 건조하여 건중량을 측정하였다.

실험시작 시( $t_1$ ) 및 종료 시( $t_2$ )에 있어서 공시묘목의 건중량을 이용하여 생육기간 중 개체건물생장의 상대성장률(Relative Growth Rate: RGR), 순동화율(Net Assimilation Ratio: NAR), 엽건중비(Leaf Dry Weight Rate: LWR) 및 지하부에 대한 지상부의 건중비인 T/R율을 다음 식에 의해 계산하였다(Hunt, 1978).

$$\text{RGR}(\text{g g}^{-1} \text{ day}^{-1}) = (\ln W_2 - \ln w_1) / (t_2 - t_1)$$

$$\text{NAR}(\text{g g}^{-1} \text{ day}^{-1}) = [(W_2 - w_1) / (t_2 - t_1)] \times [(\ln F_2 - \ln f_1) / (F_2 - F_1)]$$

$$\text{LWR}(\%) = (\text{RGR} / \text{NAR}) \times 100$$

단,  $W_i$  : 시간  $t_i$ 에 있어서의 개체 건중량(g)

$F_i$  : 시간  $t_i$ 에 있어서의 잎 건중량(g)

$t_2 - t_1$  : 생육기간(일)

### 3. 토양의 pH 및 수용성 원소농도 분석

실험개시 전 공시토양의 각 처리구별 토양을 채취하여 풍건시킨 후, 1 mm체를 통과한 세토에 대하여 pH, 수용성 원소농도를 분석하였다. pH는 세토 20 g을 100 mL 비이커에 넣어 증류수 50 mL를 첨가하여 혼합한 후, 20분

에 1회씩 유리봉으로 저으면서 1시간 방치한 토양현탁액을 여과지(Toyo Co., No. 5A)를 통과시킨 후 pH meter (Orion Co., model 210A)로 측정하였다.

한편, 수용성 Ca, Mg, K, Al 및 Mn 농도는 세토 20 g 을 300 mL 삼각플라스크에 넣어 증류수 100 mL를 첨가하여 혼합한 후, 25°C로 설정한 항온실내 진탕배양기에서 1시간 동안 진탕하여 여과지를 통과시킨 추출액을 원자흡광광도계(Hitachi Co., Z-8230)로 분석하였다.

#### 4. 식물체 내 성분 분석

재배용기에 이식하기 전 임의로 표본 추출한 21개체의 묘목과 실험종료 시에 각 처리구당 5개체의 묘목을 선정 표본추출하였다. 표본추출한 소나무 묘목을 식물기관별로 1주일간 60~70°C로 건조시킨 후, 분쇄기(Hyunjin Co., IC-3000)를 사용하여 식물체를 분쇄시켜 습식분해(HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub>)한 후, 식물체내 원소농도 Ca, Mg, K, Al 및 Mn 은 원자흡광광도계(Hitachi Co., Z-8230)에 의해, N는 황산분해법으로 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 토양용액 중의 pH 및 원소농도

공시묘목의 육성개시 전 토양용액 중의 pH 및 원소농도는 Table 1과 같다. 소나무 및 상수리나무 묘목 모두 토양 내 H<sup>+</sup> 부하량이 증가함에 따라 토양 pH가 낮아지는 경향을 보였다. 특히, 그 경향은 상수리나무 묘목 토양에 비하여 소나무 묘목 토양에서 현저하게 낮은 경향을 보여 소나무 묘목 토양의 완충능이 낮음을 알 수 있었다.

토양용액 중의 Al 및 Mn 농도는 토양의 pH가 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 특히 Al 농도는 소나무 묘목과 상수리나무 묘목의 토양에서 각각 pH4.20, pH4.81에서 급격하게 증가하였으나, Mn 농도는 토양 pH가 낮아짐에 따른 변화는 Al에 비하여 크지 않았다.

이와 같은 결과는 H<sup>+</sup> 부하량의 증가에 따라 토양 pH는 저하하고, 이에 따라 Al 및 Mn 농도가 증가하였다는 연구 결과(이충화 등, 1999)와 일치하였다. 토양 내 H<sup>+</sup> 부하량이 증가할수록 수용성 Ca, Mg 및 K 농도도 증가하는데,

**Table 1. The results of soil analysis conducted immediately before transplantation of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings (n=5, mean ± SD).**

Tree species	Soil treatment	Element concentration of soil (µg·g <sup>-1</sup> )					
		pH(H <sub>2</sub> O)	Ca	Mg	K	Al	Mn
<i>Pinus densiflora</i>	Control	5.05(0.03)	41.27 (3.48)	4.02(0.28)	11.02(0.48)	2.48 (0.11)	1.14(0.19)
	10 meqH <sup>+</sup>	4.91(0.02)	80.18 (3.94)	12.12(0.49)	15.24(1.08)	9.30 (0.28)	5.32(0.74)
	30 meqH <sup>+</sup>	4.46(0.07)	132.02 (9.86)	21.32(0.60)	21.11(0.92)	21.14 (0.84)	10.98(0.88)
	60 meqH <sup>+</sup>	4.37(0.03)	230.82 (9.45)	31.11(1.82)	30.74(1.54)	128.48 (6.72)	21.63(1.79)
	90 meqH <sup>+</sup>	4.20(0.02)	243.24(19.02)	43.62(0.91)	36.20(4.14)	291.36(15.38)	33.42(1.93)
<i>Quercus acutissima</i>	Control	5.20(0.04)	44.23 (3.14)	5.77(0.38)	16.42(0.47)	2.94 (0.21)	2.14(0.21)
	10 meqH <sup>+</sup>	5.13(0.02)	83.76 (3.89)	13.24(0.54)	20.11(1.45)	10.43 (0.31)	7.23(0.89)
	30 meqH <sup>+</sup>	5.08(0.02)	137.29 (8.75)	24.89(0.71)	24.48(1.62)	20.31 (0.96)	12.23(1.21)
	60 meqH <sup>+</sup>	4.99(0.03)	245.31(11.25)	38.49(2.01)	37.45(1.93)	142.98 (5.48)	24.68(3.21)
	90 meqH <sup>+</sup>	4.81(0.09)	263.64(19.11)	45.24(2.23)	41.24(3.02)	320.31(20.24)	36.14(3.10)

**Table 2. Dry weights and top/root ratio (T/R) of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings (n=5).**

Tree species	Soil treatment	Dry weight (g)				T/R
		Leaf	Trunk	Root	Whole-plant	
<i>Pinus densiflora</i>	Initial	1.68	1.08	0.96	3.72	2.88
	Control	3.62 a	2.35 ab	3.61 a	9.58 a	1.65 a
	10 meqH <sup>+</sup>	4.01 a	2.61 a	3.89 a	10.51 a	1.70 a
	30 meqH <sup>+</sup>	2.93 b	2.33 ab	3.75 a	9.01 a	1.40 b
	60 meqH <sup>+</sup>	2.48 bc	1.92 ab	2.44 b	6.84 b	1.80 a
	90 meqH <sup>+</sup>	2.01 c	1.64 b	2.11 b	5.76 b	1.73 a
<i>Quercus acutissima</i>	Initial		1.93	4.91	6.84	0.39
	Control	1.07 a	4.82 a	11.68 b	16.43 b	0.41 b
	10 meqH <sup>+</sup>	1.22 a	3.68 b	14.89 a	20.94 a	0.41 b
	30 meqH <sup>+</sup>	0.60 b	3.07 c	9.47 c	13.14 c	0.39 b
	60 meqH <sup>+</sup>	0.49 b	2.83 c	7.29 d	10.61 d	0.45 a
	90 meqH <sup>+</sup>	0.36 b	2.35 d	5.77 e	8.48 e	0.47 a

Values with the different small letter demonstrate significant differences among stands at the p=0.05 level.

그 증가경향은 K에 비하여 Ca, Mg에서 현저하였다.

## 2. 묘목의 성장

공시묘목 육성개시 180일 후의 실험종료 시에 있어서 식물체의 기관별 건중량 및 T/R비를 나타내면 Table 2와 같다.

개체 건중량 및 각 식물기관별 건중량은 두 수종 모두 토양 내 H<sup>+</sup> 부하량의 증가에 따라 저하 하였는데, 이러한 경향은 소나무 묘목에 비하여 상수리나무 묘목의 앞에서 현저하였다. 이러한 건중량의 감소는 소나무 묘목과 상수리 묘목 모두 대조구에 비하여 60, 90 meqH<sup>+</sup> 처리구에서 통계적으로 유의한 차이가 인정되었다(P<0.05). 지상부와 지하부의 건중량의 비(T/R)는 토양 내 H<sup>+</sup> 부하량의 증가에 따라 높아지는 경향을 나타내고 있었다. 그 증가경향은 소나무 묘목에 비하여 상수리 묘목에서 뚜렷하였는데, 60, 90 meqH<sup>+</sup> 처리구에서 대조구에 비하여 통계적으로 유

**Table 3. Effect of soil acidification on relative growth rate of whole-plant dryweight (RGR), net assimilation rate (NAR) and leaf dry weight ratio (LWR) of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings.**

Tree species	Soil treatment	RGR	NAR	LWR (%)
		( $\times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ )		
<i>Pinus densiflora</i>	Control	0.13(100)	0.16(100)	79.6(100)
	10 meqH <sup>+</sup>	0.15(115)	0.17(106)	88.0(111)
	30 meqH <sup>+</sup>	0.08 (62)	0.12 (75)	65.5 (82)
	60 meqH <sup>+</sup>	0.06 (46)	0.09 (56)	59.4 (75)
	90 meqH <sup>+</sup>	0.03 (23)	0.05 (31)	58.7 (74)
<i>Quercus acutissima</i>	Control	0.12(100)	0.43(100)	28.4(100)
	10 meqH <sup>+</sup>	0.14(117)	0.49(115)	28.7(101)
	30 meqH <sup>+</sup>	0.08 (67)	0.35 (81)	22.5 (79)
	60 meqH <sup>+</sup>	0.05 (42)	0.27 (63)	20.1 (71)
	90 meqH <sup>+</sup>	0.04 (33)	0.19 (44)	20.1 (71)

**Table 4. Element concentrations in leaf, trunk and root of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings (n=5).**

Tree species	Plant organ	Soil treatment	Ca (mg·g <sup>-1</sup> )	Mg (mg·g <sup>-1</sup> )	K (mg·g <sup>-1</sup> )	Al (mg·g <sup>-1</sup> )	Mn (mg·g <sup>-1</sup> )	N (mg·g <sup>-1</sup> )
<i>Pinus densiflora</i>	Leaf	Control	7.57 a	2.05 a	11.04 a	0.13 d	0.41 e	20.23 a
		10 meqH <sup>+</sup>	6.91 b	1.81 b	9.05 b	0.32 c	0.49 d	23.69 b
		30 meqH <sup>+</sup>	5.77 c	1.61 c	8.61 bc	0.39 bc	0.62 c	19.88 b
		60 meqH <sup>+</sup>	5.28 cd	1.26 d	8.03 c	0.48 b	0.72 b	19.14 c
		90 meqH <sup>+</sup>	4.73 d	1.05 e	6.62 d	0.69 a	0.92 a	17.63 d
	Trunk	Control	6.36 a	1.41 a	8.38 a	0.79 e	0.18 d	7.79 a
		10 meqH <sup>+</sup>	5.21 b	1.30 b	8.06 b	1.10 d	0.21 c	8.87 b
		30 meqH <sup>+</sup>	4.85 bc	1.23 bc	7.71 c	1.36 c	0.23 bc	5.51 c
		60 meqH <sup>+</sup>	4.57 bc	1.16 cd	6.86 d	1.72 b	0.24 bc	4.96 c
		90 meqH <sup>+</sup>	4.07 c	1.09 d	6.43 e	1.94 a	0.27 a	3.87 d
	Root	Control	3.80 a	1.85 a	7.42 a	8.23 d	0.15 c	6.74 a
		10 meqH <sup>+</sup>	3.50 b	1.71 b	6.34 b	8.85 cd	0.18 bc	7.92 b
		30 meqH <sup>+</sup>	3.36 bc	1.54 c	5.78 c	9.06 cd	0.19 bc	5.93 c
		60 meqH <sup>+</sup>	3.28 bc	1.42 d	5.05 d	10.24 b	0.20 ab	5.75 c
		90 meqH <sup>+</sup>	3.11 c	1.30 e	4.57 d	12.27 a	0.22 a	5.35 c
<i>Quercus acutissima</i>	Leaf	Control	15.64 a	2.63 a	16.36 a	0.25 d	0.57 d	25.72 a
		10 meqH <sup>+</sup>	11.55 bc	2.11 b	15.05 b	0.34 cd	1.37 c	26.78 b
		30 meqH <sup>+</sup>	10.20 bc	1.83 c	13.34 c	0.43 cd	1.61 c	23.93 c
		60 meqH <sup>+</sup>	8.96 cd	1.59 c	12.69 c	0.60 b	2.25 b	21.51 d
		90 meqH <sup>+</sup>	7.88 d	0.97 d	10.78 d	1.14 a	2.97 a	19.80 e
	Trunk	Control	8.98 a	1.65 a	5.97 a	0.31 e	0.32 e	5.73 a
		10 meqH <sup>+</sup>	7.99 b	1.32 b	4.61 b	0.45 d	0.42 d	3.94 b
		30 meqH <sup>+</sup>	7.35 cd	1.15 c	4.33 bc	0.57 c	0.50 c	5.60 b
		60 meqH <sup>+</sup>	7.05 cd	1.04 d	4.03 c	0.68 b	0.55 b	4.96 c
		90 meqH <sup>+</sup>	6.65 d	0.88 e	3.51 d	0.92 a	0.73 a	4.33 d
	Root	Control	5.35 a	2.08 a	5.95 a	1.20 d	0.11 e	7.68 a
		10 meqH <sup>+</sup>	4.83 b	1.68 b	5.30 b	1.33 d	0.15 d	6.02 b
		30 meqH <sup>+</sup>	4.42 c	1.58 bc	4.82 c	1.64 c	0.17 c	5.20 c
		60 meqH <sup>+</sup>	3.98 d	1.46 c	4.41 d	2.09 b	0.20 b	6.26 d
		90 meqH <sup>+</sup>	3.54 e	1.20 d	3.94 e	2.78 a	0.24 a	7.79 e

Values with the different small letter demonstrate significant differences among stands at the p=0.05 level.

의한 차이를 보이고 있었다. 이상과 같이 토양 내  $H^+$  첨가 처리에 의한 토양산성화는 두 수종 모두에서 건물생장에 유의적인 영향을 주었다.

180일간의 육성기간 중에 있어서 묘목 개체의 상대생장율(RGR), 순동화율(NAR) 및 개체건중량에 대한 엽건중량의 비(LWR)를 Table 3에 나타내었다.

두 수종 모두 RGR 및 NAR은 대조구에 비하여 10 meqH<sup>+</sup> 처리구에서 증가하였으나, 그 외 처리구에서는 저하하였다. 이와 같은 결과는 산성화된 토양에서 120일간 생육한 소나무 묘목의 RGR, NAR 및 LWR에 있어서 RGR 및 NAR은 10 meqH<sup>+</sup> 처리구에서 약간 증가하였으나, 토양 내  $H^+$  부하량이 증가함에 따라 저하하였고, LWR은 거의 영향을 받지 않았다는 연구결과(이충화 등, 1999)와 같은 경향을 보였다.

이상의 결과를 종합하면, 30, 60, 90 meqH<sup>+</sup> 처리구의 개체에서는 토양산성화의 직접적인 영향으로 뿌리의 생장이 억제되고, 그로 인해 영양분의 흡수가 원활히 이루어지지 않고, 소나무, 상수리 잎에서 합성되는 광합성 산물의 절대량이 감소되었다고 사료된다.

### 3. 토양원소 농도와 식물체 내 원소농도와의 관계

육성개시 180일 후에 있어서 소나무, 상수리나무 묘목의 각 식물기관의 원소농도를 Table 4에 나타내었다. 잎과 줄기의 Ca, Mg 및 K 농도는 두 수종 모두 대조구에 비하여 토양내  $H^+$  부하량의 증가에 따라 저하 하였는데, 특히 그 경향은 다른 기관에 비하여 잎에서 현저하였다.

한편 N은 소나무 묘목의 모든 기관과 상수리나무 묘목의 잎에서 대조구에 비하여 10 meqH<sup>+</sup> 처리구에서 약간 증가하였다가 토양내  $H^+$  부하량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 Kim(1987)이 은향나무 묘목에 인공산성우를 처리한 결과 엽중 N은 pH2.0 처리구에서 가장 낮았다는 연구결과와 일치하였다.

일반적으로 산성토양에 있어서 식물생장 감소원인은 토양 pH의 저하, 토양 내 용출되는 Al과 같은 식물 유해금속의 영향(Rengel, 1992; 鈴木, 1992)과 지상부의 Mn 과잉축적으로 인한 광합성 저해(北尾 등, 1993; Kitao *et al.*, 1997)를 생각할 수 있다. 따라서 지하부의 Al 농도의 증가와 지상부의 Mn 농도의 증가가 묘목의 성장저하에 관여하고 있을 가능성이 있다. Al과 Mn 농도는 토양 내  $H^+$  부하량의 증가에 따라 대조구에 비하여 유의한 차이가 인정되었는데, 특히 Al은 소나무 묘목과 상수리나무 묘목의 뿌리에서 현저한 증가경향을 보였고, Mn은 잎에서 현저한 증가를 보였다. Al 농도는 소나무 묘목에서 뿌리가 잎에 비하여 20-30배 정도, 상수리나무 묘목에서 2-5배 정도 높은 값을, Mn 농도는 소나무 묘목에서 잎이 뿌리에 비하여 3-4배 정도, 상수리나무 묘목에서 9-11배 정도 높은 값을

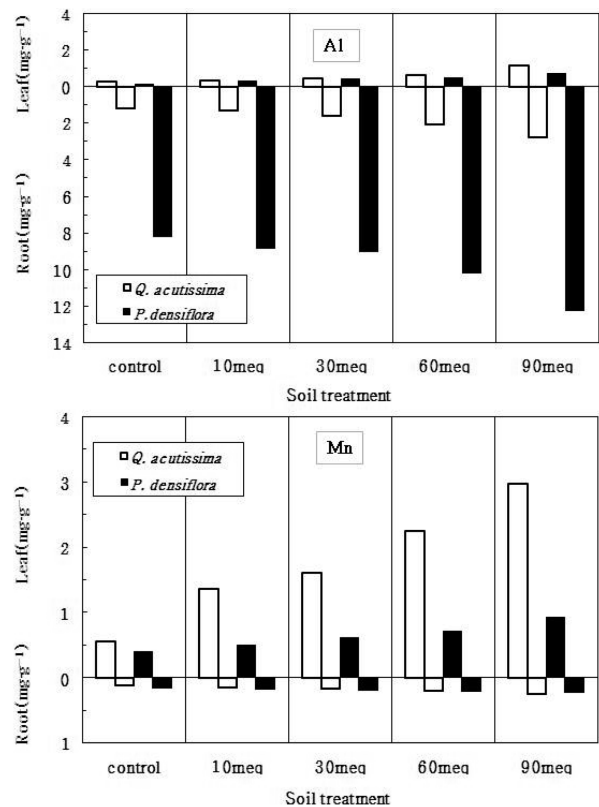


Figure 1. Effects of soil acidification on Al and Mn concentrations in leaf and root of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings.

나타내고 있었다(Fig. 1). 따라서 Al은 주로 뿌리(지하부)에 축적되어 잎이나 줄기 등의 지상부로의 이동이 비교적 적은 원소이고, Mn은 식물체내에 흡수되면 빠르게 잎(지상부)으로 이동하여 축적되는 원소라고 생각된다(Izuta *et al.*, 1995).

Fig. 1에 나타난 것과 같이, 토양용액 중의 Al과 Mn 농도의 증가에 따라 소나무, 상수리나무 묘목의 지상부 및 지하부의 Al, Mn 농도가 증가하였는데, 그 증가 경향은 Al은 소나무 묘목의 뿌리에서, Mn은 상수리나무 묘목의 잎에서 현저하였다.

이러한 현상은 수경액에서 육성시킨 삼나무 묘목에 있어서도 관찰되고 있으며(三宅 등, 1991; Izuta and Totsuka, 1996), Al에 의한 Ca 등의 식물 필수원소의 흡수 저해에 기인한 결과라 생각된다(Schaedle *et al.*, 1989; Rengel, 1992; 三輪 등, 1994). 또한 지상부의 Mn의 과잉 축적은 광합성 저해 등을 유발하여(北尾 등, 1993), 묘목의 건물생장의 감소를 초래하였을 것으로 판단된다.

Fig. 2에 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와 식물체 내의 몰비와의 관계를 나타냈다. 그 결과, 양자 사이에는 유의적인 정의 상관관계( $P < 0.05$ )가 인정되었다. 따라서, 산성화된 토양에서 육성시킨 소나무, 상수리나무 묘목의 영양상태도 토양용액 중에 있어서 Al과 Ca, Mg 및 K과의

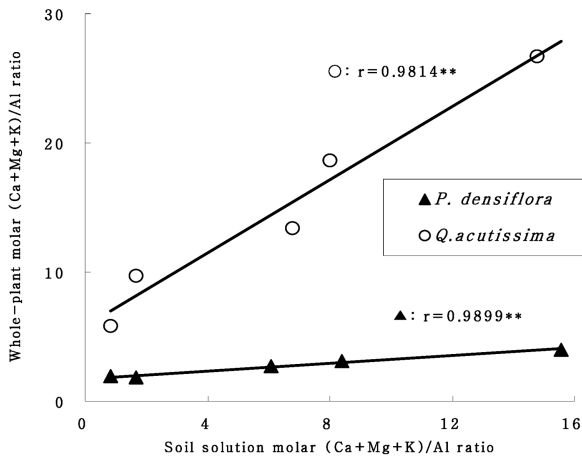


Figure 2. The relationship between soil solution and whole-plant in molar (Ca+Mg+K)/Al ratios.

무기영양소 균형도에 영향을 받고 있다고 생각된다.

이상의 결과를 종합하면, 산성화된 토양에서 육성한 소나무, 상수리나무 묘목의 성장저하는 토양용액 중의 pH 저하와 이에 따른 토양용액으로의 Al, Mn 용출 및 묘목의 지하부에 있어서 Al 농도의 증가에 따른 지상부의 N 및 Ca 등의 식물 필수원소의 감소 등이 관여하고 있음을 알 수 있었다.

따라서, 토양산성화에 의한 소나무, 상수리나무 묘목의 성장저하에 관여하는 주원인을 밝히기 위하여 토양용액 중의 pH, Al 및 Mn 농도와 실험종료 시에 있어서 토양산성화 처리구에서 생육한 소나무, 상수리나무 묘목의 개체건중량의 대조구 값에 대한 상대치와의 관계를 검토하였다(Fig. 3). 그 결과 소나무, 상수리나무 묘목 모두 개체건중량의 상대치와 토양용액 중의 pH, Al 및 Mn 농도와는 비교적 높은 상관관계가 인정되었다( $P < 0.05$ ). 이러한 결과는 토양산성화에 의한 소나무, 상수리나무 묘목의 성장저하에 있어서 토양 pH의 저하 이외에 토양용액 중의 Al, Mn도 관여하고 있음을 시사하고 있다.

#### 4. 묘목의 성장과 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와의 관계

대부분의 식물에 있어서 Al 처리에 의해 Ca 등의 식물 필수원소의 흡수나 식물체내에 있어서 이동이 저해된다는 연구결과가 보고되고 있다(Abrahamson, 1984; Schaedle *et al.*, 1989; Arovaara and Ilvesniemi, 1990; Goransson and Eldhuset, 1991). 또한 유럽과 미국에 있어서는 가문비나무류와 소나무류의 성장과 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와의 관계를 검토하여 산성강하물의 한계부하량을 평가하고 있다(Sverdrup *et al.*, 1994). 더욱이 토양용액이나 수경액에 있어서 Ca와 Al의 몰비(Ca/Al 비)는 수목의 성장이나 영양상태에 깊게 관계하고 있다는

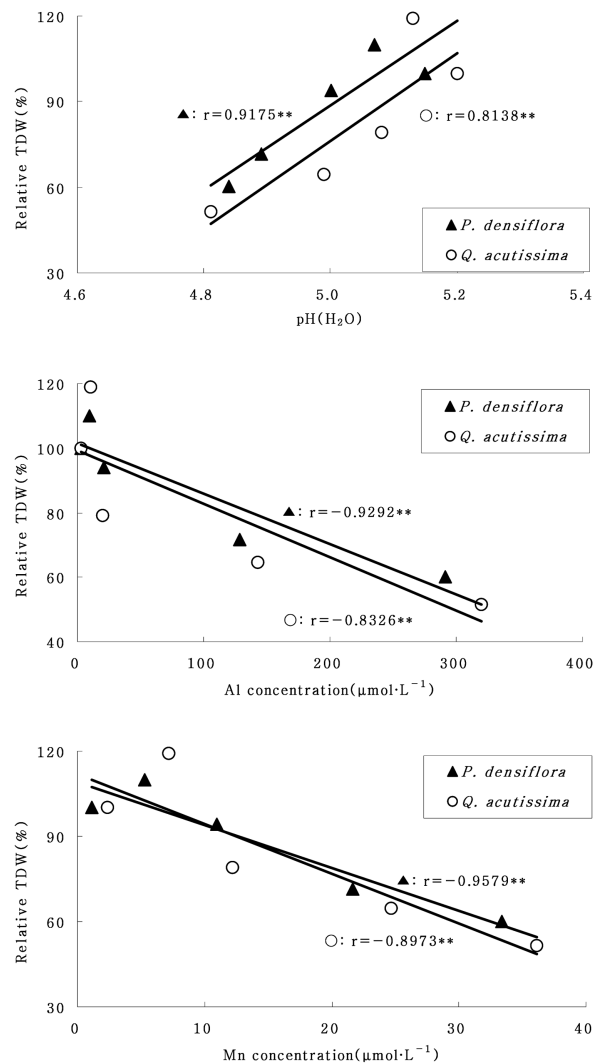


Figure 3. The relationship between total dry weight(TDW) of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings and pH(H<sub>2</sub>O), Al and Mn concentration of soil solution.

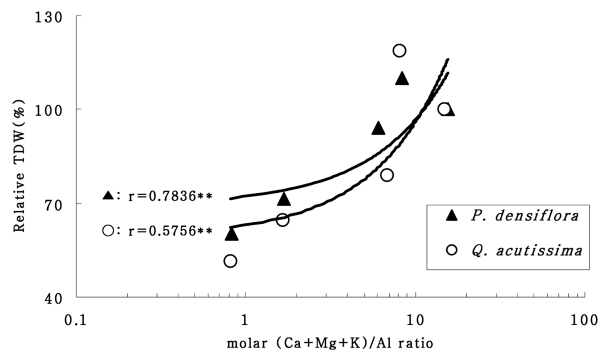


Figure 4. The relationship between total dry weight(TDW) of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* seedlings and molar (Ca+Mg+K)/Al ratio of soil solution.

것이 보고되고 있다(Cronan and Grigai, 1995).

Fig. 4에 실험종료 시에 있어서 소나무, 상수리나무 묘목의 개체건중량의 상대치와 실험개시 시에 있어서 토양용액 중의 원소농도로부터 산출한 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와

의 관계를 나타내었다.

소나무 묘목의 개체건중량의 상대치와 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와의 사이에는 높은 상관관계가 인정되었다. 즉, 소나무 묘목의 건물생장은 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비가 6.0 이하가 되면 현저하게 저하하기 시작하며, 그 비가 0.8인 경우 대조구의 값에 비해 약 60% 저하하였다. 상수리나무 묘목의 건물생장은 소나무 묘목과 비슷한 몰비가 6.0 이하에서 저하하기 시작하지만 그 비가 0.8인 경우 대조구의 값에 비하여 약 50% 저하하였다. 이러한 결과는, 토양산성화에 따른 묘목의 성장저하의 정도는 토양에 있어서 Al 농도뿐만 아니라 Al과 Ca, Mg 및 K과의 무기영양소 균형도에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

앞으로, 산성우 등의 산성강하물에 의한 토양산성화가 수목의 성장 및 영양상태에 미치는 영향을 평가할 경우, 토양용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비는 삼림생태계 피해예측에 대한 산성강하물의 한계부하량의 평가에 있어 중요한 지표가 될 수 있다고 판단된다. 따라서 삼림생태계내 산성강하물의 한계부하량 평가를 정확히 실시하기 위해서는 주요 수종의 성장, 생리기능 및 영양상태 등에 대한 토양 산성화나 Al, Mn의 영향을 자세히 조사할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 2006년도 경희대학교 연구비지원에 의한 결과임(KHU-20060542).

## 인용문헌

- 이경재, 조우, 한봉호. 1996. 서울 도시생태계 현황과 회복대책(I)-산림지역 식물군집구조-. 한국환경생태학회지 10(1): 113-127.
- 이승우, 박관수. 2001. 산림토양의 산성화 민감도에 대한 실험적 평가(I)-산중화 반응 예측모형의 활용-. 한국임학회지 90(1): 133-138.
- 이종식, 이규승. 2000. 우리나라 강우의 산성도 중화에 대한  $\text{NH}_4^+$  및  $\text{Ca}^{2+}$ 의 영향. 한국환경농학회지 19(1): 72-74.
- 이충규, 황진형, 김종갑. 2004. 산성강우에 의한 수목의 쇠퇴현상(I)-음이온을 중심으로-. 한국생태학회지 27(6): 347-353.
- 이충화, 유정환, 김영걸, 변재경, 김춘식, 이승우, 이봉수. 1999. 토양산성화가 소나무 묘목의 성장에 미치는 영향. 산림과학논문집 61: 90-96.
- 전영신, 조하만, 권원태. 1994. 한반도 중부지방에서 관측된 1992-1993년 산성비의 특성과 공기 이동 경로 분석. 대기보전학회지 10(3): 175-182.
- 조희두. 1999. 광주지역에서 주요 수목의 대기오염물질과 중금속 흡수 정화기능에 관한 연구. 한국임학회지 88(4): 510-522.
- 환경부. 2002. 환경통계연감 제 15호. 환경부. 서울. pp. 140-203.
- 吉田 稔, 川畑洋子. 1988. 酸性雨の土による中和機構. 日本土肥料誌 59: 413-415.
- 鈴木 清. 1992. 神奈川県大山のモミ林枯損緯とその周地域の年輪幅の化. 神奈川県林業試験場報告 19: 23-42.
- 北尾光俊, 田淵隆一, 藤村好子, 小池孝良. 1993. マンガン過剰がシラカンバ苗木の成長に及ぼす影響. 日本學會北海道論集 41: 214-216.
- 三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績. 1994. 母材が異なる3種類の土壌の酸性化がスギ苗木の成長に及ぼす影響. 大氣汚染學會誌 29: 254-263.
- 三宅 博, 龜井信一, 伊豆田 猛, 戸塚 績. 1991. 水耕栽培におけるスギ苗木の成長に対するアルミニウムの影響. 人間と環境 17: 10-16.
- Abrahamsen, G. 1984. Effect of acidic deposition on forest soil and vegetation. Philosophical Transactions of the Royal Society London B305: 369-382.
- Akimoto, H. and Narita, H. 1994. Distribution of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}_2$  emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with  $1^\circ \times 1^\circ$  resolution. Atmospheric Environment 28: 213-225.
- Arovaara, H. and Ilesniemi, H. 1990. Effect of soluble inorganic aluminum on the growth and nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. Scandinavian Journal of Forest Research 5: 49-57.
- Brodin, Y-W. and Kuylenstierna, J.C.I. 1992. Acidification and critical loads in Nordic countries: A background. AMBIO 21: 332-338.
- Burns, R.M. and Honkala, B.H. 1990. Silvics of North America: 1. Conifers. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. Vol. 1. pp. 456-462.
- Cronan, C.S. and Grigai, D.F. 1995. Use of calcium/aluminum ratio as indicators of stress in forest ecosystem. Journal of Environmental Quality 24: 209-226.
- Goransson, A. and Eldhuset, T.D. 1991. Effect of aluminum on growth and nutrient uptake of small *Picea abies* and *Pinus sylvestris* plant. Trees 5: 136-142.
- Hunt, R. 1978. Plant Growth Analysis. Edward Arnold Publishers Ltd. pp. 8-25.
- Izuta, T., Noguchi, K., Aoki, M. and Totsuka, T. 1995. Effects of excess manganese on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. Environmental Science 3: 209-220.
- Izuta, T. and Totsuka, T. 1996. Effect of soil acidification on growth of *Cryptomeria japonica* seedlings. Proceedings of the International Symposium on Acidic Deposition and its Impacts (Tsukuba, Japan) pp.157-164.
- Kim, G.T. 1987. Effects of simulated acid rain on growth and physiological characteristics of *Ginkgo biloba* L. seedlings and on chemical properties of the tested soil.

- Journal of Korean Forestry Society 76(3): 230-240.
25. Kitao, M., Lei, T.T. and Koike, T. 1997. Comparison of photosynthetic responses to manganese toxicity of deciduous broad-leaved trees in northern Japan. *Environmental Pollution* 97: 113-118.
26. Krause, G.H.M., Arndt, U., Brandt, G.J., Bucher, J., Kent, G. and Matzner, E. 1986. Forest decline in Europe: Development and possible causes. *Water, Air and Soil Pollution* 31: 647-668.
27. Larcher, W. 1995. *Physiological Plants Ecology 3rd ed.*: Springer-Verlag Berlin 506pp.
28. Lee, C.H., Lee, S.W., Kim, Y.K. and Cho, J.H. 2003. Atmospheric quality, soil acidification and tree decline in three Korean red pine forest. *Korean Journal of Ecology* 26(2): 87-89.
29. Mohnen, V.A. 1988. The challenge of acid rain. *Scientific American* 259: 14-22.
30. Rengel, Z. 1992. Role of calcium in aluminum toxicity. *New Phytologist* 121: 499-513.
31. Schaedle, M., Thornton, F.C., Raynal, D.J. and Tepper, H.B. 1989. Response of tree seedlings to aluminum. *Tree Physiology* 5: 337-356.
32. Sverdrup, H., Warfvinge, P. and Nihlgrd, B. 1994. Assessment of soil acidification on forest growth in Sweden. *Water, Air and Soil Pollution* 78: 1-36.
33. Totsuka, T. 1993. Present situation of forest decline by acid rain in China and Korea. *Journal of Environmental Research* 29: 15-18.
34. Ulrich, B., Mayer, R. and Khanna, P.K. 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a Loess-derived soil in central Europe. *Soil Science* 130: 193-199.

---

(2008년 3월 24일 접수; 2008년 4월 23일 채택)