

## 인위적인 토양 산성화가 소나무 묘목의 생장에 미치는 영향

이충화\* · 이승우 · 김은영 · 김영걸 · 변재경 · 원형규 · 진현오<sup>1</sup>국립산림과학원 산림환경부, <sup>1</sup>경희대학교 생명과학부Growth of *Pinus densiflora* Seedlings in Artificially Acidified SoilsLee, Choong-Hwa\*, Seung-Woo Lee, Eun-Young Kim, Young-Kul Kim,  
Jae-Kyoung Byun, Heong-Gyu Won and Hyun-O Jin<sup>1</sup>

Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

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

**ABSTRACT:** This study was carried out to investigate the effects of soil acidification on the growth of 3-year-old *Pinus densiflora* seedlings grown for 21 weeks in brown forest soils acidified with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. The concentrations of Al in the acidified soils were increased with increasing amount of H<sup>+</sup> added to the soil. The total dry weight of the seedlings was reduced by the addition of the H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. In addition, there was a strong positive correlation ( $r=0.97$ ,  $p<0.01$ ) between the dry weight of the seedlings and the molar (Ca+Mg+K)/Al ratio of the soil. The seedlings with the molar (Ca+Mg+K)/Al ratio of 1.0 resulted from approximately 50% growth reduction compared with the control value. The results suggest that the molar (Ca+Mg+K)/Al ratio of the soil may be a useful indicator for assessing the critical load of acid deposition.

**Key words:** Dry weight, Molar (Ca+Mg+K)/Al ratio, *Pinus densiflora*, Soil acidification

## 서 론

대기오염 물질의 삼림생태계내 유입은 삼림쇠퇴에 대한 우려와 함께 심각한 사회문제로 대두되고 있으며(Mohnen 1988, Rodhe *et al.* 2002), 특히 산성 강하물에 의한 토양 산성화는 삼림쇠퇴의 중요한 원인 중의 하나로 알려져 있다(Krause *et al.* 1986). 일본 삼나무림의 쇠퇴(Takahashi *et al.* 1986)와 중국 마미송림의 고사(Yu *et al.* 1990)는 토양 산성화와 연관이 있는 것으로 보고되고 있다. 우리나라는 1960년대 이후 대기오염물질 배출량의 증가로 인한 환경 오염과 pH 4.0 전후의 산성비가 곤란지대 및 대도시 주변에서 계속 관측되고 있어(Lee *et al.* 2003, 전 등 1994), 토양 산성화에 의한 삼림생태계에 영향을 미칠 가능성이 제기되고 있다(이와 민 1989, Lee *et al.* 2003).

산성 강하물이 토양에 유입되면 NO<sub>x</sub>나 SO<sub>x</sub>와 같은 음이온이 Ca, Mg 등의 양이온과 결합하여 식물 필수 무기영양원소인 Ca, Mg이 토양으로부터 용탈되며, 또한 Al, Mn과 같은 식물유해금속을 용출시켜(Ulrich *et al.* 1980) 식물의 세균 발생이나 신장 생장을 억제하여 식물의 무기영양소 흡수를 저해한다(Rengel 1992). 따라서 산성 강하물에 의해 산성화된 토양에 생육하고 있는 수목은 무기영양소의 용탈로 인한 식물영양상태의 악화와 Al 등과 같은 식물유해금속에 의한 성장저해의 복합적인

영향을 받을 것으로 보인다. 또한 유럽에서는 오염물질의 발생량을 규제하기 위한 지침을 마련하기 위하여, 삼림생태계가 악영향을 받지 않는 산성물질 부하의 허용 한계, 즉 한계부하량(critical load)을 추정하기 위한 연구가 활발하며(Brodin and Kuylenstierna 1992, Sverdrup *et al.* 1994), 임목 생장과 토양 용액 중의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비 사이에 밀접한 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구는 인위적으로 산성화시킨 삼림토양에서 자란 수목이 어떠한 성장반응을 나타내는지 또한 유럽에서 적용되고 있는 한계부하량 추정 변수인 (Ca+Mg+K)/Al 몰비가 우리나라 삼림토양에 적용이 가능한지를 알아보았다.

## 재료 및 방법

## 공시토양 및 토양 산성화

서울 국립산림과학원 구내에 있는 홍릉수목원의 소나무 임분에서 유기물층(organic layer)을 제거하고 0~10 cm 깊이에서 채취한 화강암 모재의 갈색 산림 토양을 공시토양으로 사용하였다. 채취된 토양은 5 mm체를 이용하여 석력 및 식물 뿌리 등을 제거하였으며 실내에서 2주 동안 건조하였다. 1998년 4월 1일 풍건토양 1 L당 0(대조구), 10, 30, 60 및 90 mmol이 되도록 황산용액(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 첨가하여 잘 혼합하였다.

\* Corresponding author; Phone: +82-2-961-2557, e-mail: hwa21@foa.go.kr

**소나무 묘목의 육성**

각 처리별로 황산용액 처리된 토양을 1,500 mL의 재배용기에 채워 2 L 소나무(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 묘목을 한 그루씩 이식하여 1998년 4월 29일부터 9월 22일까지 21주간 국립 산림과학원 온실 내에서 각 처리구당 20개체씩 생육시켰다. 생육기간 중 하루에 한 번 증류수(deionized water)를 각각의 재배용기에 일정한 양을 관수하였으며, 생육기간 중 온실 내의 일 평균 기온은 20~30℃, 평균 상대습도는 60~80%였다.

**생장량 조사**

공시묘목은 실험시작 전 무작위로 10개체, 실험종료시는 각 처리당 7개체를 선정하고 각 식물기관별(잎, 줄기+가지, 뿌리)로 생장량을 측정 한 후, 70℃에서 5일간 열풍건조하여 건중량을 측정하였다.

실험시작시( $t_1$ ) 및 종료시( $t_2$ )에 있어서 소나무 묘목의 건중량을 이용하여 21주의 생육기간 중 개체 건물 생장의 상대생장율(relative growth rate; RGR), 순동화율(net assimilation ratio; NAR) 및 엽건중비(leaf dry weight rate; LWR)를 다음 식에 의거하여 계산하였다(Hunt 1978).

$$RGR (g \cdot g^{-1} \cdot day^{-1}) = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

$$NAR (g \cdot g^{-1} \cdot day^{-1}) = [(W_2 - W_1)/(t_2 - t_1)] \times [\ln F_2 - \ln F_1]/(F_2 - F_1)$$

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

단,  $W_i$ : 시간  $t_i$ 에 있어서의 개체건중량(g),  
 $F_i$ : 시간  $t_i$ 에 있어서의 잎건중량(g),  
 $t_2 - t_1$ : 147일

**토양 pH 및 수용성 원소 분석**

토양 pH는 2 mm체로 선별한 풍건토양 10 g을 100 mL용 비이커에 넣어 증류수 50 mL를 첨가하고 잘 혼합하여 1시간 진탕한 후, pH 측정기(Toa Co, HM-5B)로 측정하였다. 또한 산성화된 토양에서 무기영양소 결핍을 초래할 가능성이 있는 Ca, Mg, K과 같은 무기영양소와 유해금속인 Al, Mn 농도는 풍건 세트 10 g을 100 mL용 비이커에 넣어 증류수 50 mL를 첨가하여 잘 혼합한 후, 25℃로 설정한 항온 실내에서 1시간 진탕하여 여과지(Toyo Co., No. 5B)를 통과시킨 추출물을 ICP-Spectrometer(Jobin Yvon

Co., JY24)로 분석하였다. 한편, 본 연구에서는 실험개시 및 실험 종료시 토양 pH의 차는 약 0.2 단위 미만이었으며, 또한 토양의 수용성 원소 농도도 큰 차이가 인정되지 않았기 때문에 이하의 해석에는 실험개시시의 토양분석 결과를 이용하였다.

**결 과**

소나무 묘목 생육전 토양 pH는 대조구 pH 4.15, 10 mmolH<sup>+</sup> 처리구 pH 3.70, 90 mmolH<sup>+</sup> 처리구 pH 3.17로서 토양 내에 H<sup>+</sup> 부하량이 증가함에 따라 토양 pH가 낮아지는 경향을 보였다(Table 1). 수용성 Al 및 Mn 농도는 토양 pH가 낮아짐에 따라 농도가 높아졌으며, Al 농도는 토양 pH가 약 3.2 범위에서 급격히 증가하였으나, Mn 농도는 토양 pH 저하에 따른 농도 변화가 Al에 비해 크지 않았다(Table 1). 또한 수용성 Ca, Mg 및 K 농도도 토양에 H<sup>+</sup> 부하량이 증가함에 따라 증가하였으며, Ca 및 Mg 농도는 토양 pH가 약 3.2 범위에서 급격히 증가하였으나, K 농도는 Ca 및 Mg 농도에 비해 증가 정도는 낮았다(Table 1).

21주 동안 생육한 소나무 묘목의 모든 기관 및 개체 전체의 건중량은 30 및 60 mmolH<sup>+</sup> 처리구에서 대조구 및 10 mmolH<sup>+</sup> 처리구에 비하여 유의적으로 감소하였다(Table 2). 그러나 90 mmolH<sup>+</sup> 처리구의 소나무 묘목은 육성시작 8~10주 사이에 전 개체가 고사하였다. 또한 지하부에 대한 지상부의 건중량비(T/R율)는 60 mmolH<sup>+</sup> 처리구에서 대조구, 10 및 30 mmolH<sup>+</sup> 처리구에 비하여 유의적으로 증가하였다(Table 2).

생장 해석 결과(Table 3), 소나무 묘목의 상대생장율(RGR) 및 순동화율(NAR)은 10 mmolH<sup>+</sup> 처리구에서 약간 증가하는 경향이 보였으나, 30 mmolH<sup>+</sup> 이상의 처리구에서는 토양에 H<sup>+</sup> 부하량이 증가함에 따라 저하하였다. 그러나 개체 건중량에 대한 엽건중량의 비(LWR)는 토양에 H<sup>+</sup> 부하에 따른 영향을 받지 않았다.

**고 찰**

황산용액을 첨가하여 인위적으로 산성화시킨 삼림토양에서 생육한 소나무 묘목은 건물생장량, 상대생장량(RGR), 순동화율(NAR) 등에 감소를 초래하였으나, 엽건중비(LWR)는 토양산성화의 영향을 거의 받지 않았다(Table 2, 3). 이는 주로 소나무 묘

Table 1. Initial pH and concentrations of water soluble elements in soil before transplanting *P. densiflora* seedlings (n=5, mean ± SD)

Soil treatment (mmolH <sup>+</sup> )	pH (H <sub>2</sub> O)	Water soluble element concentration (mg/L)				
		Ca	Mg	K	Al	Mn
Control	4.15 ± 0.01	27.13 ± 3.64	6.81 ± 0.64	12.18 ± 0.62	3.64 ± 0.17	1.75 ± 0.17
10	3.70 ± 0.01	75.50 ± 3.26	15.99 ± 1.29	17.21 ± 1.67	8.10 ± 0.57	5.40 ± 1.34
30	3.39 ± 0.01	135.20 ± 12.21	27.24 ± 1.14	22.52 ± 0.77	22.65 ± 1.50	6.64 ± 0.78
60	3.23 ± 0.01	228.55 ± 10.15	46.80 ± 2.88	31.10 ± 2.02	131.00 ± 8.51	8.57 ± 1.68
90	3.17 ± 0.01	230.45 ± 26.59	67.95 ± 1.88	38.60 ± 8.01	330.60 ± 15.06	11.10 ± 1.59

Table 2. Effects of soil acidification on dry weight and top/root (T/R) ratio of *P. densiflora* seedlings (n=7, mean±SD)

Soil treatment (mmolH <sup>+</sup> )	Dry weight (g/plant)				T/R ratio
	Needle	Shoot	Root	Whole-plant	
Initial	3.33 ± 0.42	2.63 ± 0.19	1.44 ± 0.21	7.09 ± 1.46	3.62 ± 0.44
Control	5.57 ± 0.09a	4.59 ± 0.63a	3.33 ± 0.34a	13.49 ± 1.49a	3.07 ± 0.46b
10	6.17 ± 1.12a	4.69 ± 0.46a	3.70 ± 0.76a	14.56 ± 1.72a	3.04 ± 0.66b
30	3.94 ± 0.61b	3.72 ± 0.50b	2.34 ± 0.44b	10.01 ± 1.26b	3.33 ± 0.45b
60	3.59 ± 0.41b	3.14 ± 0.19c	1.60 ± 0.21c	8.33 ± 0.33c	4.28 ± 0.75a
90	*	-	-	-	-

\*All seedlings died during the growing period of 21 weeks. Values followed by the different letters within a column are significantly different according to the Duncan's new multiple range test ( $p < 0.05$ ).

Table 3. Effect of soil acidification on relative growth rate of whole-plant dry weight (RGR), net assimilation rate (NAR) and leaf dry weight ratio (LWR) of *P. densiflora* seedlings after the growing period of 21 weeks

Soil treatment (mmolH <sup>+</sup> )	RGR (10 <sup>-2</sup> g · g <sup>-1</sup> · day <sup>-1</sup> )	NAR (10 <sup>-2</sup> g · g <sup>-1</sup> · day <sup>-1</sup> )	LWR (%)
Control	0.44 (100%)	1.00 (100%)	43.77 (100%)
10	0.49 (112%)	1.10 (110%)	44.35 (101%)
30	0.23 (54%)	0.55 (55%)	42.85 (98%)
60	0.11 (25%)	0.24 (24%)	44.95 (102%)
90	*	-	-

\*All seedlings died during the growing period of 21 weeks.

목의 건물 생산 효율이 토양 산성화에 의해 저하되었음을 시사하고 있다. 수목의 광합성 등의 생리기능에 대한 토양 산성화의 영향은 거의 명확히 밝혀져 있지 않지만, H<sup>+</sup>을 첨가한 토양에서 생육시킨 소나무 묘목은 NAR이 감소하고 광합성 속도가 저하하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.* 1998).

일반적으로 산성 토양에 있어서 식물 생장 감소 원인은 토양 pH 저하와 토양에서 용출되는 Al 및 Mn과 같은 식물유해금속의 영향을 생각할 수 있다(Izuta *et al.* 1996). 본 연구에서도 토양 산성화에 의한 소나무 묘목의 생장 저하에 관여하는 주요한 토양 요인을 검토하기 위하여, 토양의 pH, Al 및 Mn 농도와 실험 종료시의 각 처리구 개체 건중량 사이의 상관 관계를 분석한 결과, 소나무 묘목의 개체 건중량과 토양의 Al 농도 사이에 유의적 부의 상관( $r = -0.93$ ,  $p < 0.05$ )이 인정되었다(Fig. 1). 이에 반하여 소나무 묘목의 개체 건중량과 토양의 pH 및 Mn 농도 사이에는 유의적인 상관( $r = 0.81$ ,  $-0.76$ )이 인정되지 않았다. 이 결과는 토양 산성화에 의한 소나무 묘목의 생장 감소에 대하여 토양의 Al 농도가 강하게 관여하고 있음을 나타내고 있다.

구미에서는 독일가문비나무(*Picea abies*) 및 소나무류(*Pinus*

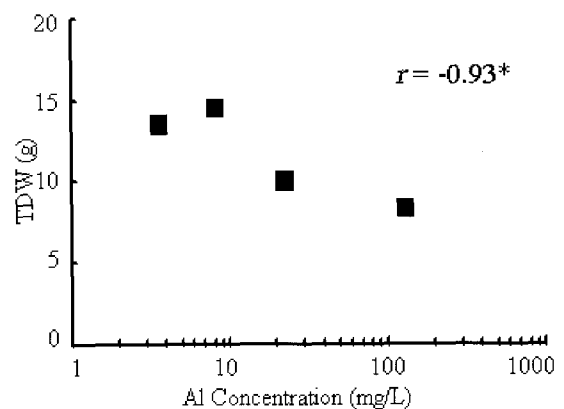


Fig. 1. The relationship between total dry weight (TDW) of *P. densiflora* seedlings and Al concentrations in the brown forest soils. \* indicates significant correlation at  $p < 0.05$ .

spp.)의 생장과 토양용액의 Ca/Al 및 (Ca+Mg+K)/Al 몰비가 수목의 생장이나 영양 상태와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다(Rengel 1992, Sverdrup *et al.* 1994, Cronan and Grigal 1995). 본 연구에서도 소나무 묘목의 개체 건중량의 상대치(relative total dry weight)와 토양의 수용성 원소 농도로부터 산출한 (Ca+Mg+K)/Al 몰비 사이의 관계를 분석한 결과(Fig. 2), 소나무 묘목의 개체 건중량의 상대치와 토양용액의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비 사이에 유의적인 정의 상관( $r = 0.97$ ,  $p < 0.01$ )이 인정되었다. 즉, 토양 산성화에 의한 소나무 묘목의 생장 감소 정도는 토양의 Al과 Ca, Mg 및 K과의 무기영양소 균형도의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 따라서 임목의 생장에 대한 토양 산성화의 영향을 평가할 때, 토양 중의 Al 농도뿐만 아니라 Ca, Mg과 같은 식물 필수 무기영양 원소도 함께 고려할 필요가 있다고 판단된다.

Sverdrup 등(1994)은 유럽의 독일가문비의 생장과 토양용액의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비 사이의 관계를 검토하여 이 몰비가 1.0을 기준으로 하여 삼림생태계에 대한 산성 강하물의 한계 부하량을 평가하고 있다. 그들의 독일가문비나무 묘목과 본 연구의 소나무 묘목의 결과를 비교하면, (Ca+Mg+K)/Al 몰비의 감소에 따

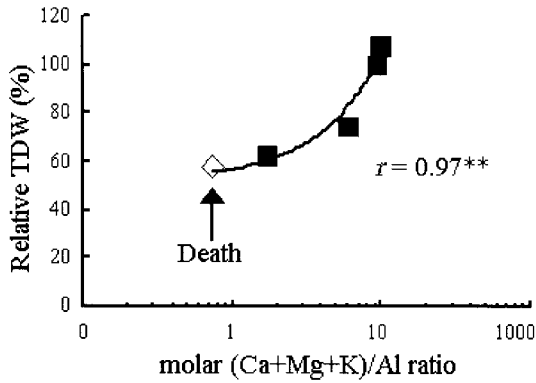


Fig. 2. The relationship between molar (Ca+Mg+K)/Al ratio in the brown forest soils and relative total dry weight (TDW) of *P. densiflora* seedlings. The relative TDW was calculated as follows; relative TDW(%) = (average TDW of the seedlings grown in the soil acidified with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution)/(average TDW of the seedlings grown in the control soil) × 100. \*\* indicates significant correlation at  $p=0.01$ .

라 두 수종 모두 건물 성장량은 감소하나 전자에 비하여 후자가 감수성이 더 높은 것으로 판단된다. 다시 말해 독일가문비나무의 건물 성장량은 (Ca+Mg+K)/Al 몰비가 1.0일 때 약 20% 감소하였으나 소나무는 약 50% 감소하였다(Fig. 2).

현재, 우리나라에서 생육하고 있는 수목의 성장에 대한 토양 산성화, 토양 중의 Ca, Mg과 같은 식물 필수 무기영양 원소 및 Al, Mn의 식물 유해 금속의 영향에 대해서 거의 밝혀지지 않고 있다. 또한 구미에서 생육하고 있는 수목은 Al에 대한 감수성이 수종 및 품종 사이에 차이가 인정되고 있기 때문에(Schaedle *et al.* 1989), 금후 삼림생태계내 산성 강하물의 한계 부하량 평가를 정확히 실시하기 위해서는 주요 수종의 성장, 생리기능 및 영양 상태 등에 대한 토양 산성화나 Al, Mn의 영향을 자세히 조사할 필요가 있다.

## 결 론

인위적으로 산성화시킨 삼림토양에서 생육한 소나무 묘목의 생장은 토양 pH나 Al 농도의 영향을 받고 있으나, Al에 의한 성장감소 정도는 토양내 Al과 Ca, Mg과 같은 영양원소와의 균형도에 의해서 크게 좌우되었다. 이는 산성 강하물에 의한 토양 산성화가 수목에 미치는 영향을 평가할 때 토양 내 Al 등과 같은 유해금속뿐만 아니라 식물 필수 무기영양 원소도 고려되어야 함을 시사하고 있는 것으로 결론지어졌다. 또한 본 연구에서 얻어진 Al과 식물 필수 무기영양 원소 사이의 몰비는 삼림생태계 피해 예측에 대한 산성 강하물의 한계 부하량의 평가에 있어 중요한 지표의 하나가 될 수 있다고 판단되었다.

## 적 요

황산용액을 첨가하여 인위적으로 산성화시킨 화강암 풍화

모재의 갈색 산림 토양에 2-1 소나무(*Pinus densiflora*) 묘목을 이식하고, 1998년 4월 29일부터 9월 22일까지 21주 동안 온실에서 생육시킨 후 건물성장량과 토양 pH, Al, Mn 농도 또는 염기성 양이온 몰비 사이의 관계를 조사한 결과, 토양내 H<sup>+</sup> 부하량의 증가는 토양중 Al 농도의 증가를 초래하였다. 소나무 묘목의 건물 성장량은 토양의 Al 농도가 높아짐에 따라 감소하였다. 토양의 (Ca+Mg+K)/Al 몰비와 건물 성장량 사이에는 유의적인 상관계수( $r=0.97, p<0.01$ )가 있었으며, 몰비가 1.0인 경우에 약 50%의 건물 성장량의 감소가 발생하였다. 이들의 결과는 산성 강하물에 의한 토양 산성화가 수목에 미치는 영향을 평가할 때, 토양의 Al과 같은 유해금속의 변화를 고려할 필요가 있으며, (Ca+Mg+K)/Al 몰비는 산성 강하물의 삼림생태계 피해예측을 위한 한계 부하량의 평가에 있어 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 인용문헌

- 이수옥, 민일식. 1989. 대기오염 및 산성우가 삼림생태계의 토양산도 및 양분분포에 미치는 영향. 한국임학회지 78: 11-25.
- 전영신, 조하만, 권원태. 1994. 한반도 중부 지방에서 관측된 1992~1993년 산성비의 특성과 공기 이동 경로 분석. 대기보전학회지 10: 175-182.
- Brodin, Y-W. and J.C.I. Kuylentierna. 1992. Acidification and critical loads in Nordic countries; A background. AMBIO 21: 332-338.
- Cronan, C.S. and D.F. Grigal. 1995. Use of calcium/aluminum ratio as indicators of stress in forest ecosystem. J. Environ. Qual. 24: 209-226.
- Hunt, R. 1978. Plant Growth Analysis. Edward Arnold Publishers Ltd. pp. 8-25.
- Izuta, T., T. Seki and T. Totsuka. 1996. Growth and nutrient status of *Betula platyphylla* seedlings grown in andosol or brown forest soil acidified by adding H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. Environmental Sciences 4: 233-247.
- Krause, G.H.M., U. Arndt, G.J. Brandt, J. Bucher, G. Kent and E. Matzner. 1986. Forest decline in Europe: Development and possible causes. Water Air Soil Poll. 31: 647-668.
- Lee, C.H., T. Izuta, M. Aoki, T. Totsuka and H. Kato. 1998. Growth and photosynthetic responses of red pine seedlings grown in brown forest soil acidified by adding H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr. 69: 53-61 (In Japanese).
- Lee, C.H., S.W. Lee, Y.K. Kim and J.H. Cho. 2003. Atmospheric quality, soil acidification and tree decline in three Korean red pine forest. Korean J. Ecol. 26: 87-89.
- Mohnen, V.A. 1988. The challenge of acid rain. Sci. Am. 259: 14-22.
- Rengel, Z. 1992. Role of calcium in aluminum toxicity. New Phytol. 121: 499-513.
- Rodhe, H., F. Dentener and M. Schulz. 2002. The global distribution of acidifying wet deposition. Environ. Sci. 2: 103-111.
- Schaedle, M., F.C. Thornton, D.J. Raynal and H.B. Tepper. 1989. Response of tree seedlings to aluminum. Tree Physiol. 5: 337-356.
- Sverdrup, H., P. Warfvinge and B. Nihlgård. 1994. Assessment of soil acidification on forest growth in Sweden. Water Air Soil Poll. 78:

- 1-36.
- Takahashi, K., S. Okitsu and H. Ueda. 1986. Acid deposition and Japanese cedar decline in Kanto, Japan. *Jap. J. For. Environ.* 28: 11-17 (In Japanese).
- Ulrich, B., R. Mayer and P.K. Khanna. 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a Loess-derived soil in Central Europe. *Soil Sci.* 130: 193-199.
- Yu, S.W., Y.M. Bian, G.J. Ma and J.J. Luo. 1990. Studies on the causes of forest decline in Nanshan, Chongqing. *Environ. Monit. Assess.* 14: 239-246.
- (2005년 8월 30일 접수; 2005년 11월 1일 채택)