

人工酸性雨가 잣나무 苗木의 生長, 賦養狀態 및 土壤酸性化에 미치는 影響¹

陳鉉五² · 金恩英² · 李忠和³

Effects of Simulated Acid Rain on the Growth, Nutrient Status of Korean Pine(*Pinus koraiensis*) Seedlings and Soil Acidification¹

Hyun-O Jin², Eun-Young Kim² and Choong Hwa Lee³

要 約

화강암 모재의 갈색산림토양에 3년생 잣나무(*Pinus koraiensis*) 묘목을 이식하여 1999년 4월 21일부터 11월 17일까지 210일간 pH 5.6(대조구), 4.0, 3.0, 2.5 및 2.0의 인공산성우를 조제하여 살포한 결과, 잣나무 묘목의 가시장해는 pH 2.5 및 pH 2.0 처리구에서 관찰되었다. 잎과 뿌리 그리고 개체 건중량은 대조구에 비해 pH 2.0 처리구에서 유의적으로 감소하였으며, T/R비는 타 처리구에 비해 pH 2.0 처리구에서 현저히 증가하였다. 잣나무 묘목의 각 기관내 원소성분을 분석한 결과, 잎의 Ca, P농도 및 chlorophyll함량은 대조구에 비해 pH 2.0 처리구에서 증가하는 경향을 보였으며, N농도는 모든 기관에 있어서 처리구 pH가 감소함에 따라 증가하였다. 잣나무 묘목을 육성한 토양을 분석한 결과, 처리구의 pH가 감소함에 따라 토양 pH가 저하되고 Ca, Mg, Al 및 Mn 농도가 증가하였는데, 특히 토양 pH 4.4 전후에서 급격한 증가를 보였다. 한편, 잣나무 묘목의 개체건중량과 토양의 pH 및 Al농도와의 사이에 각각 높은 상관($r=0.90$, $p<0.05$; $r=-0.94$, $p<0.01$)이 인정되었다. 이 결과는 토양의 pH 및 Al농도는 산림수종의 생장에 미치는 산성우의 영향평가에 있어 중요한 지표가 될 것으로 사료된다.

ABSTRACT

Three-year-old *Pinus koraiensis* seedlings, transplanted in brown forest soils originating from granite were treated with simulated acid rain of pH concentrations 5.6(control), 4.0, 3.0, 2.5 and 2.0 for 210 days from April 21 to November 17, 1999. Visible injury of the seedlings were observed at the pH 2.0 and pH 2.5 treatments. The total dry weight of the seedlings decreased at pH 2.0 treatment compared with that of the control, and T/R ratio increased at pH 2.0 treatment compared with others. The elements in each part of the seedlings, concentrations of Ca, P and content of chlorophyll in needles increased at the pH 2.0 treatment compared with the control. The concentration of N in the needles of the seedlings increased as the soil pH decreased. As the treated pH was lowered, soil pH has decreased, and concentrations of Ca, Mg, Al, and Mn increased, especially at pH 4.4. In addition, there was a strong correlation($r=0.90$, $p<0.05$; $r=-0.94$, $p<0.01$) between the dry weight of the seedlings and the pH and Al concentration of the soils. Therefore, the pH and Al concentration in the soil may be useful indicator for assessing the effect of acid rain on the growth of woody plants.

Key words : simulated acid rain, *Pinus koraiensis* seedlings, dry weight, nutrient status, soil acidification

¹ 接受 2000年 6月 19日 Received on June 19, 2000.

² 慶熙大學校 林學科 Dept. of Forestry, Kyunghee Univ., Yongin 449-701, Korea.

³ 林業研究院 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-012, Korea.

緒論

材料 및 方法

최근, 유럽 각지 및 미국 북동부지역에서는 산림쇠퇴가 급속히 확대되어 심각한 사회문제로 대두되고 있다(Mohnen, 1988). 산림쇠퇴의 원인에 관해서는 여러 가지 가설이 제기되어지고 있으나, 현재 그 원인은 명확하게 밝혀져 있지 않다. 현재 까지 생각되어지는 원인은 산성우 등의 산성강하물과 오존 등의 대기오염물질의 직접영향(Krause 등, 1986; Prinz 등, 1987; 梨本와 高橋, 1991; 高橋 등, 1986), 토양으로부터의 염기의 용탈과 이에 따른 양분결핍 및 토양으로부터의 AI 용출 등에 따른 토양산성화(Ulrich, 1989), N과잉에 의한 토양양분의 불균형과 내동성(耐凍性)의 저하(Nihlgärd, 1985; Schütt와 Cowling, 1985), 온난화와 건조화 등의 기상영향(松本 등, 1992) 등이다. 이중 일부의 원인에 병충해 따위로 겹쳐진 복합스트레스에 의한 쇠퇴도 생각되고 있다(Likens, 1989; Tesche 등, 1993; 北島, 1988).

우리 나라에서는 1960년대 후반부터 일부 공장지대와 도시지역을 중심으로 대기오염물질에 의한 식물피해가 발견되기 시작했다. 또한 인구증가, 화학공장 등을 대형 집단화 및 자동차 교통량의 급속한 증가에 의하여 산성우의 원인물질인 유황산화물과 질소산화물의 배출량이 급속히 증가하고 있다. 이 때문에 산성강하물과 가스상의 대기오염물질이 산림생태계에 미치는 영향이 우려되고 있다(이창근 등, 1988). 현재 산성강하물에 의한 대규모의 산림피해는 아직 보고되고 있지 않으나, 산성우 등의 산성강하물이 토양에 부하되면 장래에 토양이 산성화하여 산림수종에 악영향을 미칠 가능성이 우려되고 있다(김태훈 등, 1994; 이수옥과 민일식, 1989).

본 연구는 우리 나라 중부지방의 주요한 조림수종인 잣나무 묘목에 인공산성우를 살포하여 육성시킨 묘목의 생장 및 영양상태에 미치는 직접영향과 토양산성화의 간접영향을 조사하여 산성우가 산림생태계에 미치는 직·간접영향을 구명하고, 산성강하물에 의한 산림쇠퇴를 미연에 방지할 임계부하량 산정기준을 설정하는데 기초자료를 제공하고자 실시하였다.

1. 공시재료 및 인공산성우 조제

식물재료로서는 경기도 양평군에 위치한 산림청 북부지방산림관리청 수원관리소 용문양묘사업소 묘포장의 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.) 3년생 실생묘를 사용하였다. 또한 공시토양은 경기도 광주군 퇴촌면 소재 경희대학교 부속 연습림 내 25년생 잣나무 임분에서 채취한 화강암 모재의 갈색산림토양을 낙엽층을 제거하고 표토 약 0~10cm까지의 A층 토양을 채취하였다. 채취 후 토양은 5mm 체로 쳐서 石礫이나 식물뿌리 등을 제거하여 공시토양으로 하였다.

본 연구에 사용한 인공산성우는 공시토양 채취지역인 광주군의 1년간(1998. 7~1999. 6) 평균 강수의 음이온 함량비율(진현오 등, 1999)인 $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 5 : 3 : 2$ (당량비)의 혼합액을 탈이온수로 회석하여 pH를 조정하였으며, 종류수는 原水의 수돗물을 이용 교환수지를 통과시켜 pH가 5.6 ± 0.5, 전기전도도(EC)가 $2\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 이하로 조정된 것을 사용하였다.

2. 잣나무 묘목 육성

1999년 4월 10일에 잣나무 묘목을 재배용기(상부직경 20cm, 높이 18cm, 하부직경 14cm)에 이식하여, 경기도 용인시에 위치한 경희대학교 농장 온실 내에서 각 처리구당 25개체씩 육성하였다. 이때 온실의 조건은 자연강우만 차단하고 통풍이 잘 되는 상태로 유지하였다.

1999년 4월 21일부터 11월 17일까지 210일 동안 1주일에 2일 간격 씩 3회(매회 14:00~17:00)에 걸쳐 pH 5.6을 대조구로 하고 pH 4.0, 3.0, 2.5 및 2.0의 처리구에 인공산성우를 살포하였으며, 이때 물줄기가 가는 물뿌리개를 사용하였다.

각 처리구당 인공산성우의 살포량은 토양채취지역인 경기도 광주군 지역의 10년간 평균 연강수량을 1,300mm를 기준으로 하여(기상청, 1992), 실험기간 210일에 해당하는 강수량 750mm의 강우처리를 하기 위하여 인공산성우를 1회에 8.3mm씩 식물체의 지상부에 살포하였다.

3. 생장분석

재배용기에 잣나무 묘목을 이식하기 전, 임의로 20개체를 선정하여 표본추출하였으며, 또한 실험중간시(1999년 8월 20일) 및 실험종료시(1999

년 11월 17일)에는 각 처리구당 7개체의 묘목을 선정하여 표본추출하였다. 표본추출한 묘목은 각 식물기관별(잎, 수간+가지, 뿌리)로 생중량을 측정하여, 60~70°C에서 7일간 전조기에 전조한 후 건중량을 측정하였다. 한편, 실험중간시에 잣나무 묘목의 건중량은 각 처리구간 유의차가 인정되지 않았기 때문에 본 연구에서는 실험개시시 및 실험종료시의 성적만을 이용하여 이하의 분석에 사용하였다.

실험개시시(t_1) 및 종료시(t_2)의 잣나무 묘목의 전중량을 기초로 하여 210일간의 육성기간중의 개체건물생장의 상대생장율(relative growth rate : RGR), 순동화율(net assimilation rate : NAR), 잎전중비(leaf dry weight ratio : LWR) 및 지상부와 지하부의 전중비인 T/R비를 이하의 식에 의해 산출하였다(Hunt, 1978).

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

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

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

$$\text{T/R比} = \text{T/R}$$

단, W_i : 시간 t_i 에 있어서의 개체전중량(g)

F_i : 시간 t_i 에 있어서의 잎전중량(g)

T : 실험종료시(t_2)에 있어서의 지상부 전중량(g)

R : 실험종료시(t_2)에 있어서의 지하부 전중량(g)

$t_2 - t_1$: 210日

4. 식물체내의 성분분석

각 식물기관별로 전중량을 측정한 시료는 분쇄기로 분쇄시켜 습식분해하여 식물체내 원소농도 Ca, Mg, K는 원자흡광광도계(Hitachi Co., Z-8230)에 의해, P는 분광광도계(Hitachi Co., U-1100)에 의해 분석하였다. 식물기관별 C는 Tyurin법, N는 황산분해법으로 측정하였다.

잎의 chlorophyll함량은, 각 처리구당 임의의 5개체의 선단부 침엽을 2~3mm씩 자른 각각의 시료 0.1g과 아세톤(CH_3COCH_3) : 에탄올($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) : 증류수(H_2O)=45:45:10의 혼합액 10mL를 시험관에 침적하여 25°C의 항온기에 1주일간 방치하여 chlorophyll을 추출하였다. 추출액은 645 및 663nm의 흡광도를 분광광도계(Hitachi Co., U-1100)로 측정하여, 아래의 식에 의하여 chlorophyll함량을 산출하였다(Amon, 1949). 한편, chlorophyll함량은 잎의 생중량 단위로 환산하였다.

$$\text{Chl. } a(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = (12.70 \times A663) - (2.69 \times A645)$$

$$\text{Chl. } b(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = (22.90 \times A645) - (4.68 \times A663)$$

$$\text{Chl. } a+b(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = (20.21 \times A645) + (8.02 \times A663)$$

단, A645 : 파장 645nm에 있어서의 흡광도

A663 : 파장 663nm에 있어서의 흡광도

5. 토양분석

실험개시전의 공시토양(Initial Sampling) 및 실험종료시(Final Sampling)에 각 처리구의 토양을 채취하여 풍진시킨 후, 2mm체를 통과한 세토에 대하여 분석하였다.

토양 pH는 세토 20g을 100mL용 비이커에 넣어 증류수 50mL를 첨가하여 혼합한 후, 20분에 1회씩 유리봉으로 저으면서 1시간 방치한 토양현탁액의 pH(H_2O)를 pH미터(Orion Co., model 210A)로 측정하였다. 한편, 수용성 Ca, Mg, K, Al 및 Mn농도는 세토 10g을 100mL용 비이커에 넣어 증류수 50mL를 첨가하여 혼합한 후, 25°C로 설정한 항온실내 진탕배양기에서 1시간 동안 진탕하여 여과지(Tokyo Co., No. 5B)를 통과시킨 추출물을 원자흡광광도계(Hitachi Co., Z-8230)로 분석하였다. 또한 토양의 C는 Tyurin법, N는 황산분해법으로 측정하였으며 CEC는 Peech법에 의해 추출한 후 측정하였다.

結果 및 考察

1. 인공산성우 처리에 의한 잣나무 묘목의 생장

잣나무 묘목에 대하여 210일 동안 인공산성우를 처리한 결과, 직접피해로서의 가시장해는 pH 2.0 처리구에서 15회 살포후(실험개시 5주후)부터, pH 2.5 처리구에서는 24회 살포후(실험개시 8주후)부터 잎에 가시장해가 나타났다. 그러나 대조구인 pH 5.6, pH 4.0 및 pH 3.0 처리구에서는 가시장해가 관찰되지 않았다. pH 2.5 및 pH 2.0 처리구에서는 주로 1년생 잎의 선단부에서 적갈색의 가시장해가 관찰되었으며 그 피해면적은 살포하는 횟수가 증가함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보였다.

비교적 낮은 pH의 산성우 피해를 받은 식물의 엽면에는 산성우의 직접영향으로서 가시장해가 관찰된다고 보고되고 있다(Jacobson 등, 1985). 가시장해 발현에 대한 산성우의 한계 pH는 식물의 종에 의하여 약간 다르게 나타나고 있으나, 많은 식물에서 공통적으로 pH 3.0 이하에서 엽면에 피

사반점의 가시장해가 나타난다(Lee 등, 1981; Percy와 Baker, 1987). 본 연구에서도 pH 2.5 및 pH 2.0 처리구의 1년생 잎에 적갈색의 가시장해가 관찰되었다. 이 결과는 식물의 종류에 따라 약간 상이한 결과를 나타내고 있으나, 기본적으로 산성우의 pH가 가시장해를 나타내는 한계 pH를 결정하는 주요한 지표가 될 것으로 생각된다.

210일간의 육성기간 후, 잣나무 묘목의 각 기관 및 개체 건중량과 지상부와 지하부의 건중비인 T/R비를 Table 1에 나타내었다. 실험종료시 잎과 뿌리 그리고 개체건중량의 경우, 대조구인 pH 5.6에 비해 pH 2.0 처리구에서 유의적으로 감소하였으나, 줄기에서는 대조구에 비해 모든 처리구에 있어서 유의차를 인정할 수 없었다. 또한 pH 3.0 처리구에서 줄기를 제외하고 모든 기관의 건중량이 증가하는 경향을 나타내었으나, 대조구에 비하여 통계적인 유의차는 인정할 수 없었다. 이 결과는 인공산성우 조제시 사용된 NO_3^- 의 N가 처리구 pH가 감소함에 따라 증가한 것에서 비롯된 결과(MacDonald 등, 1986; Tveite, 1980)

이며, pH 2.0 처리구에서는 N가 영양원으로서의 영향보다도 토양산성화에 따른 Al 등의 유해원소의 용출이 잣나무의 생장에 더 크게 영향을 미친 것으로 사료된다. 한편, T/R비는 타 처리구에 비해 pH 2.0 처리구에서 현저한 차이를 나타내었다.

Table 2에 실험개시 210일 후의 잣나무 묘목의 상대생장율(RGR), 순동화율(NAR) 및 개체건중량에 대한 잎 건중량의 비(LWR)를 나타내었다. 상대생장율 및 순동화율은 대조구에 비해 pH 3.0 처리구에서 약간 증가하였으나 pH 2.0 처리구에서 현저하게 저하되었다. 그러나 LWR은 인공산성우의 영향을 거의 받지 않았다. 이와 같은 결과는 잣나무 묘목의 전물생산효율이 pH 2.0 처리에 의하여 저하되었다는 것을 나타내고 있으며, 그 원인으로서는 산성우에 의한 광합성속도의 저하 등을 생각할 수 있다. 산성우에 의한 광합성속도의 저하는 삼나무(松本 등, 1992) 등에서 보고되고 있다. 따라서 금후 광합성이거나 호흡 등과 같은 식물생장에 직접 관여하는 생리기능에 대한 산성

Table 1. Effects of simulated acid rain(SAR) on the dry weight and top/root(T/R) ratio of Korean pine seedlings after the growing period of 210 days

Sampling	SAR treatment	Dry weight(g)				T/R
		Needle	Stem	Root	Whole-plant	
Initial		5.99	4.13	3.38	13.49	2.99
Final	pH 5.6	12.89ab	7.08a	9.92ab	29.89ab	2.04b
	pH 4.0	12.82ab	6.11a	9.52b	28.45b	2.00b
	pH 3.0	14.65a	7.41a	11.77a	33.83a	1.91b
	pH 2.5	10.41b	7.23a	9.29b	26.93b	1.92b
	pH 2.0	7.67c	5.70a	5.45c	18.82c	2.45a

Values followed by the different letters within a column are significantly different according to the Duncan's new multiple range test($p<0.05$). Each value is the mean of 7 determinations. SAR treatment were applied from the top of the seedlings three times a week for 210 days in a natural light greenhouse.

Table 2. Effect of simulated acid rain(SAR) on relative growth rate(RGR) of whole-plant dry weight, net assimilation rate(NAR) and leaf dry weight ratio(LWR) of Korean pine seedlings

Sampling	SAR treatment	RGR ($\times 10^{-2} \cdot \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$)		LWR(%)
		NAR		
Final	pH 5.6	0.38(100%)	0.87(100%)	43.68(100%)
	pH 4.0	0.36(94%)	0.79(91%)	44.77(103%)
	pH 3.0	0.44(116%)	1.00(115%)	43.77(100%)
	pH 2.5	0.33(87%)	0.80(92%)	41.14(94%)
	pH 2.0	0.16(42%)	0.37(43%)	42.44(97%)

Value in parenthesis shows percentage of pH 5.6(control) simulated acid rain treatment. Each value is the mean of 7 determinations.

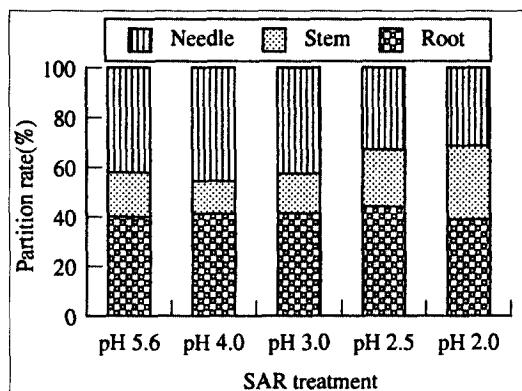


Fig. 1. Effects of simulation acid rain on partition rate of assimilates(%) of Korean pine seedlings after the growing period of 210 days

우의 영향을 상세히 조사할 필요가 있다.

또한, 인공산성우 처리에 따른 잣나무 묘목의 각 기관별 동화산물 분배율을 Fig. 1에 나타내었다. pH 2.0 처리구에서는 타 처리구에 비해 잎과 뿌리의 분배율에 비해 상대적으로 수간의 분배율이 증가하였다. 이와 같이 식물체내 동화산물의 분배패턴 변화는 지상부에 있어서 산성우에 대한 방어 및 피해수복과정에 광합성 산물이 사용됨으로서 나타난 결과라고 사료된다(野內, 1989). 따라서 금후 식물체내에 있어서 동화산물의 전류에 대한 산성우의 영향도 상세히 조사할 필요가 있다고 생각된다.

이들의 결과를 종합하면, pH 2.0 처리구의 개체에서는 산성우의 직접영향에 의하여 잣나무 침엽에서 합성되는 광합성산물의 절대량이 감소하였으며, 더욱이 뿌리의 분배율도 감소하였기 때문에 최종적으로 뿌리의 생장이 억제되었다고 사료된다.

2. 식물체의 각 기관별 성분 변화

인공산성우 처리 후 잣나무 묘목의 각 기관별 무기원소 및 C, N농도를 Table 3에 나타내었다. 실험종료시 잎의 Ca농도는 대조구인 pH 5.6 처리구에 비하여 모든 처리구에서 증가하는 경향을 나타내었으며, P농도는 대조구에 비해 pH 2.5 및 pH 2.0 처리구에서 유의적으로 증가하였으나 Mg, K농도는 각 처리구간에 유의성이 인정되지 않았다. C농도 또한 각 처리구간에 유의차가 인정되지 않았으나, N농도는 처리구 pH가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 C/N율은 대

조구인 pH 5.6에 비해 감소하는 경향을 나타내었다.

실험개시 210일 후 줄기의 체내원소 함량은 N농도가 잎의 경우처럼 대조구에 비해 처리구 pH가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, C/N율은 처리구 pH가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그 외의 원소농도는 대조구와 각 처리구간에 유의차가 인정되지 않았다.

뿌리의 체내원소 함량은 Ca, Mg, K 및 P농도는 각 처리구간에 유의적인 차가 인정되지 않았으나, C농도는 대조구인 pH 5.6에 비해 pH 3.0 처리구에서 높은 값을 보였고 C/N율은 대조구에 비해 처리구간에 유의성이 인정되지 않았다. 한편 N농도는 잎, 줄기의 경우와 같이 처리구 pH가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 MacDonald 등(1986)과 Tveite(1980)가 보고한 바와 같이, 인공산성우 조제시 사용된 NO_3^- 의 N가 처리구 pH가 감소함에 따라 증가한 것에서 비롯된 결과라 사료된다.

Table 4와 같이, 실험종료시 측정한 잎의 chlorophyll a, b, a+b함량은 대조구인 pH 5.6에 비해 pH 2.0 처리구에서 현저하게 증가하였다. 한편, 실험종료시 인공산성우 처리에 의하여 육성한 잣나무 묘목의 잎의 N함량과 chlorophylla+b 함량과의 상관관계를 분석한 결과(Fig. 2), 높은 정의 상관이 인정되었다($r=0.88$, $p<0.05$). 이 결과는 인공산성우처리에 의한 잎의 N함량이 증가함에 따라서 chlorophyll의 생성량이 증대되었다는 것을 시사하고 있다(渡邊 등, 1999 ; Evans, 1987).

3. 토양의 화학적 성질 변화

잣나무 묘목을 육성한 토양의 pH 및 원소농도를 Table 5에 나타내었다. 토양 pH(H_2O)는 실험종료시, 대조구에 비해 pH 2.0 처리구에서 현저히 저하하였다. Ca, Mg, Al 및 Mn의 농도는 대조구에 비해서 인공산성우 처리구에서 유의적으로 증가하였으며, N농도, C/N율 및 CEC는 각 처리구간의 유의성이 인정되지 않았다. 한편, 토양 pH변화에 따른 Ca 및 Al농도 변화는 토양의 pH가 저하됨에 따라 Ca 및 Al농도가 증가하였으며, 특히 토양 pH 4.4 전후에서 Ca 및 Al농도가 급격한 증가를 보였다.

일반적으로 산성토양에 있어서 식물생장 감소 원인은 토양 pH저하와 토양내 용출되는 Al 등과

Table 3. Element concentrations of Korean pine seedlings after the growing period of 210 days. Values are expressed on the basis of dry weight

Plant organ	SAR treatment	Ca ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	Mg ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	K ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	P ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	C ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	N ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	C/N ratio
Needle	pH 5.6	4.81b	1.43a	5.10a	1.03b	0.532a	9.34d	58.35a
	pH 4.0	6.72a	1.50a	4.96a	0.97b	0.532a	10.97cd	48.82b
	pH 3.0	7.23a	1.49a	5.02a	1.02b	0.537a	11.44c	47.11b
	pH 2.5	7.38a	1.48a	5.54a	1.59a	0.534a	13.19b	41.04bc
	pH 2.0	7.60a	1.46a	5.38a	1.64a	0.553a	15.03a	37.76c
Stem	pH 5.6	11.64a	1.09a	4.55ab	0.85a	0.585ab	4.27c	137.46a
	pH 4.0	10.06a	0.96a	3.71b	0.73a	0.589ab	5.71bc	103.64b
	pH 3.0	9.07a	1.36a	4.53ab	0.96a	0.634a	6.75ab	95.77b
	pH 2.5	8.63a	1.03a	4.46ab	0.98a	0.627a	6.53ab	97.77b
	pH 2.0	7.26a	1.14a	5.71a	1.21a	0.552b	8.08a	73.63c
Root	pH 5.6	6.04a	2.25ab	4.66a	1.20a	0.484bc	7.72b	63.18ab
	pH 4.0	6.08a	2.20ab	4.36a	0.86a	0.497ab	8.22ab	60.80ab
	pH 3.0	6.02a	2.64a	4.59a	1.05a	0.539a	8.22ab	65.83a
	pH 2.5	6.01a	1.76b	3.95a	1.21a	0.440c	8.56ab	53.15b
	pH 2.0	6.82a	2.42ab	4.17a	1.15a	0.474bc	9.36a	52.19b

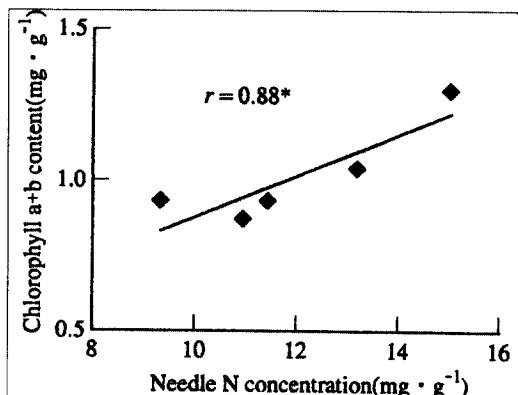
Values followed by the different letters within a column are significantly different according to the Duncan's new multiple range test ($p<0.05$). Each value is the mean of 7 determinations.

Table 4. Effects of simulated acid rain(SAR) on chlorophyll content of current year needle of Korean pine seedlings after the growing period of 210 days. Values are expressed on the basis of fresh weight

Date (1999)	SAR treatment	chlorophyll a ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ F.W.)	chlorophyll b ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ F.W.)	chlorophyll a+b ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ F.W.)
Nov. 17	pH 5.6	0.70b	0.22b	0.93b
	pH 4.0	0.65b	0.22b	0.87b
	pH 3.0	0.70b	0.23ab	0.93b
	pH 2.5	0.79ab	0.25ab	1.04ab
	pH 2.0	0.95a	0.34a	1.30a

Values followed by the different letters within a column are significantly different according to the Duncan's new multiple range test ($p<0.05$). Each value is the mean of 5 determinations.

같은 식물유해금속의 영향을 생각할 수 있다(橋本, 1992). 본 연구에서도 인공산성우 처리에 의한 잣나무 묘목의 생장저하에 관여하는 주요한 토양요인을 검토하기 위하여, 토양의 pH 및 Al농도와 실험종묘시의 각 처리구 개체건중량의 상관관계를 분석한 결과(Fig. 3, 4), 잣나무 묘목의 개체건중량과 토양의 pH 및 Al농도와의 사이에 각각 높은 상관($r=0.90$, $p<0.05$; $r=-0.94$, $p<0.01$)이 인정되었다. 이 결과는 인공산성우 처리

**Fig. 2.** The relationship between nitrogen concentration and chlorophyll content in the needles of Korean pine seedlings treated with simulated acid rain or control(pH 5.6) for 210 days

The correlation coefficient (r) between two variables is shown in the figure.

* shows the significant correlation at 5% level.

에 의하여 토양산성화를 초래한 토양에서 육성한 잣나무 묘목의 생장감소 원인에 대하여 토양 pH의 저하뿐만 아니라, 토양 pH저하에 따른 토양 Al농도의 증가가 매우 밀접하게 관여하고 있음을 시사하고 있다.

Table 5. The results of pH(H₂O) and element concentrations of soil planted with Korean pine seedlings

Sampling	SAR treatment	pH (H ₂ O)	Water soluble element concentration(μg · g ⁻¹)					C/N ratio	CEC (me/100g)		
			Ca	Mg	K	Al	Mn				
Initial		4.78	12.12	0.48	3.77	0.49	0.74	0.047	0.27	17.62	17.40
Final	pH 5.6	4.61a	11.35c	0.94c	5.94ab	0.40e	0.54e	0.038d	0.28a	13.81a	21.39a
	pH 4.0	4.65a	11.99c	0.97c	5.64ab	0.51d	0.72d	0.039cd	0.27a	14.64a	21.55a
	pH 3.0	4.69a	13.15bc	1.19bc	3.81b	0.66c	1.01c	0.041bc	0.24a	18.56a	19.03a
	pH 2.5	4.32b	15.87b	1.90b	4.69ab	1.11b	1.99b	0.044ab	0.31a	15.00a	22.30a
	pH 2.0	4.17c	19.08a	2.98a	6.49a	2.39a	5.06a	0.046a	0.32a	14.79a	19.98a

Values followed by the different letters within a column are significantly different according to the Duncan's new multiple range test($p<0.05$). Each value is the mean of 5 determinations.

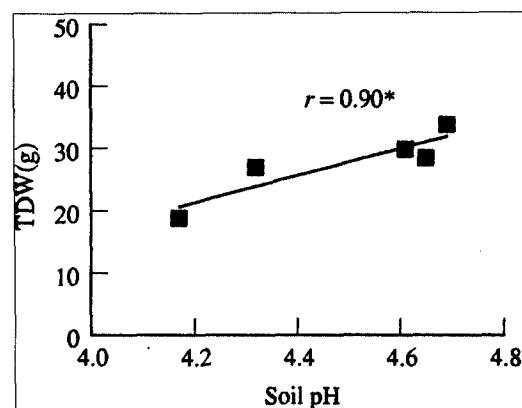


Fig. 3. The relationship between total dry weight (TDW) of Korean pine seedlings and pH (H₂O) of the soil

The correlation coefficient(r) between two variables is shown in the figure.

* shows significant correlation at the 5% level.

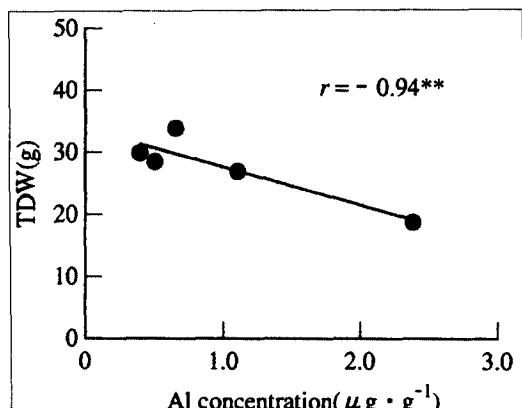


Fig. 4. The relationship between total dry weight (TDW) of Korean pine seedlings and Al concentration of the soil

The correlation coefficient(r) between two variables is shown in the figure.

** show significant correlation at the 1% level.

結論

인공산성우가 잣나무 묘목의 생장, 영양상태 및 토양산성화에 미치는 영향을 구명하기 위하여 자연강우를 차단하고 갈색산림토양에 이식한 3년생 묘목에, $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 5 : 3 : 2$ 로 혼합하여 종류수로 회석한 pH 5.6, pH 4.0, pH 3.0, pH 2.5 및 pH 2.0의 인공산성우를 육성기간(1999년 4월 21일~11월 17일)에 주 3회, 매회 8.3mm씩 처리하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

인공산성우 처리에 의한 잣나무 묘목의 가시장애가 관찰되었으며, 잣나무 묘목의 전증량은 대조구에 비하여 pH 2.0 처리구에서 유의적으로 감소하였으나, T/R비는 증가하였다. 한편, 생장해석

결과, RGR과 NAR은 대조구에 비해 pH 2.0 처리구에서 감소하는 경향을 보였으나 LWR은 SAR에 영향을 받지 않았으며, 동화산물의 분배율에 있어서도 pH 2.0 처리구에서 잎과 뿌리의 분배율이 감소하였으나, 상대적으로 수간의 분배율이 증가하였다. 이들의 결과는 인공산성우의 직접영향에 의하여 광합성산물의 절대량이 감소하였으며, 또한 뿌리의 분배율도 감소되어 최종적으로 뿌리의 생장이 억제되었다고 사료된다.

식물체의 각 기관별 성분을 분석한 결과, 잎의 경우 인공산성우 처리에 의하여 Ca 및 P 농도는 증가하는 경향을 보였으나, 타 기관의 원소들은 각 처리구간에 유의성을 인정할 수 없었다. N 농도는 모든 기관에 있어서 처리구 pH가 감소함에

따라 증가하였으며, 잎의 chlorophyll 함량은 대조 구에 비해 pH 2.0 처리구에서 현저하게 증가하였다.

잣나무 묘목을 육성한 토양을 분석한 결과, 처리구 pH가 감소함에 따라 토양 pH가 저하되고 Ca, Mg, Al 및 Mn 농도가 증가하였으며, 특히 토양 pH 4.4 전후에서 급격한 증가를 보였다. 한편, 잣나무 묘목의 개체전중량과 토양 pH 및 Al 농도와의 상관관계를 분석한 결과 전중량과 토양 pH에 있어서는 정의 상관, 개체전중량과 Al 농도에 있어서는 부의 상관이 인정되었다.

이상과 같이, 잣나무 묘목에 대한 인공산성우의 영향은 묘목의 생장억제 및 토양 pH의 저하뿐만 아니라 Al을 용출시켜 토양산성화를 초래하여, 토양의 Ca, Mg 등과 같은 식물필수영양원소의 용탈로 인하여 묘목 생장에 직·간접적으로 악영향을 미친 것으로 밝혀졌다. 현재, 우리나라에 생육하고 있는 산림수종의 생장에 대한 인공산성우 등과 같은 산성강하물의 유입으로 인한 토양산성화 및 토양중의 식물필수 영양원소와 Al, Mn 등의 식물유해금속의 영향에 대해서 거의 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 앞으로 산림생태계내 산성강하물의 한계부하량 평가를 정확히 실시하기 위해서 주요 수종의 생장, 생리기능 및 영양상태 등에 미치는 토양산성화나 Al, Mn 등의 영향을 자세히 조사할 필요가 있다.

引用文獻

1. 기상청. 1992. 한국누년기후극값. 관측소편. pp.357.
2. 김태훈 외 13人. 1994. 환경오염이 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처. pp.161.
3. 이수욱·민일식. 1989. 대기오염 및 산성우가 산림생태계의 토양산도 및 양료분포에 미치는 영향. 한국임학회지 78 : 11-25.
4. 이창근·오종환·김영걸·채지석. 1988. 대기 오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처특정연구보고서. pp.194.
5. 진현오·정덕영·이충화. 1999. 잣나무 임분에 있어서 강우수질의 이동 특성. 한국농림기상학회지 1 : 110-118.
6. 高橋啓二·沖律進·植田洋匡. 1986. 關東地方におけるスギの衰退と酸性降下物による可能性. 森林立地 28 : 11-17.
7. 橋本 武. 1992. 酸性土壤と作物生育. 養賢堂. pp.40-51.
8. 渡邊 司・伊豆田 猛・横山政昭・戸塚 繢. 1999. シラビソ苗の成長, ガス交換速度および營養状態に及ぼす人工酸性雨の影響. 大氣環境學會誌 34 : 407-421.
9. 梨本 真・高橋啓二. 1991. 關東甲信・瀬戸内地方におけるスギの衰退現象. 森林立地 32 : 70-78.
10. 北島 薫. 1988. 中央ヨーロッパ森林衰退の現状と研究状況. 日本生態學會誌 38 : 269-277.
11. 松本陽介・丸山 溫・森川 靖. 1992. スギの水分生理特性と關東平野における近年の氣象變動 -樹木の衰退現象に關連して-. 森林立地 34 : 2-13.
12. 野内 勇. 1989. 酸性雨の農作物への影響 -生態系に與える影響-. ゴルファーの綠化促進協力會. pp.261-313.
13. Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Phyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiol. 24 : 1-15.
14. Evans, J.R. 1987. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat(*Triticum aestivum* L.). Plant Physiol. 14 : 69-79.
15. Hunt, R. 1978. Plant Growth Analysis. Edward Arnold Publishers Ltd.. pp.8-22.
16. Jacobson, J.S., J. Troiano and L. Heller. 1985. Stage of development response and recovery of radish plants from episodic exposure to simulated acid rain. J. Exp. Bot. 36 : 159-167.
17. Krause, G.H.M., U. Arndt, G.J. Brandt, J. Bucher, G. Kenk and E. Matzner. 1986. Forest decline in Europe : Development and possible causes. Water, Air and Soil Pollution 31 : 647-668.
18. Lee, J.J., G.E. Neely, S.C. Perrijean and L.C. Grothaus. 1981. Effects of simulated sulfuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops. Environ. Exp. Bot. 21 : 171-185.
19. Likens, G.E. 1989. Some aspects of air pollutant effects on terrestrial ecosystems and prospects for the future. Ambio 18 : 172-178.
20. MacDonald, N.W., J.B.J. Hart and P.V.

- Nguyen. 1986. Simulated acid rain effects on jack pine seedling establishment and nutrition. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50 : 219-225.
21. Mohnen, V.A. 1988. The challenge of acid rain. *Sci. Am.* 259 : 14-22.
22. Nihlgård, B. 1985. The ammonium hypothesis : An additional explanation to the forest die back in Europe. *Ambio* 14 : 2-8.
23. Percy, K.E. and E.A. Baker. 1987. Effects of simulated acid rain on production, morphology and composition of epicuticular wax and on cuticular membrane development. *New Phytol.* 107 : 577-589.
24. Prinz, B., G.H.M. Krause and K.D. Jung. 1987. Development and causes of novel forest decline in Germany. In Hutchinson, T.C. and K.M. Meeda(eds.), *Effects of atmospheric pollutants in forests. Wetland and Agricultural Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin. 1-24.
25. Schütt, P. and E.B. Cowling. 1985. Waldsterben, a general decline of forest in central in Europe : Symptoms, development and possible causes. *Plant Disease* 69 : 548-558.
26. Tesche, M., O. Wienhaus, St. Codzik and J. Materna. 1993. Stress and decline in air-polluted forest ecosystems of some countries in the eastern parts of central Europe. XV. International Botanical Congress(Tokyo).
27. Tveite, B. 1980. Effects of acid precipitation on soil and forest : 8. Foliar nutrient concentrations in field experiment. Pages 204-205 in Drablos, D. and A. Tolland(eds.), *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precipitation*, Norway.
28. Ulrich, B. 1989. Effect of acidic precipitation on forest ecosystems in Europe. In Adriano, D.C. and A.H. Johnson(eds.), *Acid Precipitation Vol. 2 : Biological and Ecological Effects*. Springer-Verlag. 189-272.