

人工酸性雨 處理가 5年後 몇 가지 造景樹種의 樹高生長, 土壤 酸도와 可溶性 알루미늄의 濃도에 미치는 影響 [I]

Effects of Acid Rain Treatment on Height Growth of Several Landscape Tree Species, pH Value and Al³⁺ Concentration in Soil: Comparison after 5 Years [I]

정 용 문 · 우 수 영¹⁾ · 김 판 기¹⁾

공주대학교 조경학과

¹⁾임복육종연구소 육종과

(1997년 2월 28일 접수, 1997년 7월 30일 채택)

Yong Moon Cheong, Su-Young Woo¹⁾, Pan-Gi Kim¹⁾

Department of Landscape Architecture Kongju National University

¹⁾ Forest Genetic Research Institute

(Received 28 February 1997; accepted 30 July 1997)

Abstract

To identify the long-term influence of acid rain treatment on tree growth, acid rain of various composition (pH 2.0, pH 4.0 and pH 5.6 as control) was applied to several landscape trees for five months (April through August, 1991). Tree height, pH values and Al³⁺ concentration in soil were investigated.

Acid rain treatments seemed to promote height growth in the first year (1991), but have become an inhibiting factor over five years. All of coniferous species and most broad-leaved species, except *Acer ginnala*, showed opposite trends in height responses to acid rain treatments between the first (1991) and last (1996) year. In contrast, *Acer ginnala* showed similar trends to acid rain treatments in the height growth between 1991 and 1996. This result suggested that *Acer ginnala* has a characteristic adaptability to acid rain stress. pH values of surface soil were lower than those of 30 cm soil depth. This fact suggested that acid rain treatments made surface soil acidic condition. In addition, physiological characteristics (photosynthesis, stomatal condition and biomass) have to be investigated to identify the relationship between long-term effects of Al³⁺ concentration and growth.

Key words : Acid rain, height growth, soil pH and Al³⁺ concentration

1. 서 론

산성우는 공장이나 자동차에서 배출된 황 산화물
이나 질소 산화물이 강우와 함께 녹아 내리는 wet

deposition의 일종으로써 pH 5.6 이하의 산도를 나타
내는 천연 강우를 말한다(McLaughlin *et al.*, 1985;
Rinallo *et al.*, 1986). 산성우가 식물에 장기간 접촉하
면 잎 표면의 epicuticular wax가 침식되어 대기오염
물질에 피해를 받기 쉬운 상태가 된다(Riding and

Percy, 1985; Baker and Hunt, 1986). 그리고 토양에서는 알루미늄과 결합하고 있는 양이온을 용탈시킴으로써 가용성 알루미늄(Al^{3+})의 농도가 증가되어 식물이 각종 생리적 장애를 일으키기도 한다(Ulrich *et al.*, 1980; 土居, 1991). 그렇기 때문에, 산성우의 식물에 대한 가해(加害) 작용은 산림 생태계를 파괴하는 주요 요인으로 작용하기도 한다(임업연구원, 1988, 1996). 우리 나라의 일부 공업지역(울산)에서는 pH 4.4~4.7의 강산성우가 관측되었고(임업연구원, 1996), 교통량이 많은 서울의 일부지역에서는 pH 3.5의 강산성우가 관측되기도 하였다(환경부, 1996). 따라서 산성우가 우리 나라 산림 생태계와 도심의 생활 환경됨에 미치는 영향을 규명하는 것은 매우 중요하다.

저자는 산성우에 대한 내성 수종을 규명하기 위하여 조경 공간에 흔히 식재되는 침·활엽수 12수종을 실험재료로 하여 산성우가 종자 발아, 생장 등에 미치는 영향을 조사하였다(정용문, 1988, 1991). 그 결과 산성우에 의하여 일부 활엽수의 종자 발아가 저해됨을 알 수 있었다. 그러나 수고 성장량은 산성우 처리구와 대조구간의 뚜렷한 차이를 볼 수 없었으며, 수종에 따라서는 오히려 산성우에 의하여 수고 생장이 촉진되는 경향을 나타내었다. 이러한 생장 촉진 현상은 산성우의 주요 성분인 질산이 토양에서 양료화되어 식물의 성장을 돕는 역할을 하였거나(Byres *et al.*, 1992; Dean and Johnson, 1992; 河野 등, 1995), 표층 토양의 염기(鹽基)가 산성우에 의하여 용탈되어 식물의 뿌리가 있는 하층 토양에 집적됨으로써 생육 환경을 개선하였기 때문이라는(石塚, 1993; 河野, 1995) 보고가 있으나, 정확한 규명은 아직 이루어져 있지 않다. 이를 규명하기 위해서는 식물에 독성 역할을 하는 Al^{3+} 의 농도 변화, 토양 pH의 변화 등을 장기적으로 관찰하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 산성우가 수목의 생장과 토양에 미치는 영향이 얼마나 지속되는가를 검토하기 위하여 5년전에 인공 산성우를 처리한 시험지를 대상으로 수목의 성장량과 토양의 가용성 알루미늄 농도 및 토양 pH를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험지 및 수종

본 연구는 공주대학교 구내의 묘포장에서 수행되었다. 실험에 사용한 수종은 1991년에 인공 산성우를 처리한 소나무(*Pinus densiflora*), 해송(*Pinus thunbergii*), 히말라야시다(*Cedrus deodara*), 신나무(*Acer ginnala*), 쪽동백(*Styrax obassia*), 목련(*Magnolia obovata*), 쥐똥나무(*Ligustrum obtusifolium*)이며, 이들 수종은 6년생 실생묘이다(정용문, 1991). 시험지의 토양은 사질양토이고 이화학적 성질은 표 1과 같다.

Table 1. The soil properties of the experimental nursery.

Elements	Concentration
pH	6.7
K^+ (me/100 g)	0.11
Na^+ (me/100 g)	0.03
Ca^{2+} (me/100 g)	2.93
Mg^{2+} (me/100 g)	0.59
Base Saturation (%)	132.20
C. E. C. (me/100 g)	4.84
SO_4^{2-} (ppm)	60.57
Al^{3+} (ppm)	26.25

2.2 인공 산성우 처리 (1991년)

인공 산성우는 황산과 질산을 3:2의 비율(N농도)로 혼합하고, 이것을 지하수에 희석하여 pH 4.0, pH 2.0으로 조제하였으며, 대조구용으로 사용하기 위한 pH 5.6의 수용액을 동일한 방법으로 조제하였다. 조제한 인공 산성우의 전기 전도도, 양이온 및 음이온의 함량은 표 2와 같다.

수목 및 토양에 대한 인공 산성우 처리는 1991년 4월부터 9월까지 5개월간 하였다. 처리 시기 및 양은 시험지역의 강우양식(김광식, 1982)에 따랐다(표 3).

인공 산성우 처리를 종료한 1991년 9월 하순부터는 vinyl tunnel을 제거하여 천연 강수(降水)가 시험 재료에 직접 접촉되도록 하였다. 우리나라 65개 지역의 강수 pH를 조사한 임업연구원(1996)의 연구보고에 의하면 시험지가 위치하는 예산지역은 강

Table 2. Conductivity, major cation and anion concentration of the simulated acid rain used in this study.

pH	Conductivity (μmhos)	Major Cation(ppm)					Major Anion (ppm)			
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	P ₂ O ₅ ⁻	Cl
pH 5.6	0.65	1.12	5.15	20.17	2.54	0.39	28.23	15.63	0.45	9.64
pH 4.0	3.57	2.45	9.89	38.18	7.88	0.95	430.48	45.72	0.91	14.28
pH 2.0	41.32	4.14	15.24	49.37	15.45	3.21	1976.24	865.28	0.49	24.27

Table 3. Climatological data in experimental area for past 30 years.

Kinds of Data	April	May	June	July	August
Precipitation (mm)	78.0	81.9	130.9	307.2	216.7
Number of Precipitation Days	6.0	7.0	9.0	13.0	11.0
Average Rainfall (mm)	13.0	11.7	14.5	23.6	19.7
pH of Rain (1995 mean)			5.8		

수의 연평균 pH가 5.8로써, 비교적 청정지역이라 할 수 있는 양평의 pH 5.6, 정선의 pH 5.4에 비하여 높고 65개 지역의 연평균치인 pH 5.6보다 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 1991년 이후에는 시험지 및 수종에 산성우가 접촉되지 않았다고 간주할 수 있다.

2.3 수고 생장량

인공 산성우를 처리하고 5년이 경과한 후의 성장 상태를 조사하기 위하여, 당년도 수고 생장이 정지 되었다고 생각되는 1991년 9월 30일과 1996년 10월 1일에 수종 및 처리구별로 3~5개체의 수고를 측정하고, 성장 속도가 서로 다른 수종간의 비교를 하기 위하여 상대 성장율(relative growth rate)을 아래와 같이 각각 산출하였다(Tjoelker *et al.*, 1993).

$$RGR = (\ln H_2 - \ln H_1) / (T_2 - T_1)$$

RGR : 상대 성장률 (cm/cm/year)
 H₂ : 종료시 (1996년)에 측정한 수고 (cm)
 H₁ : 초기 (1991년)에 측정한 수고 (cm)
 T₂ : 측정 종료 년도 (1996)
 T₁ : 측정 개시 년도 (1991)

2.4 토양 시료 및 수체 분석 시료 조제

토양 산도와 Al³⁺ 농도를 측정하기 위하여 인공 산성우 및 천연 강수가 직접적으로 접촉되는 표토와 수목의 뿌리가 가장 발달하여 있는 토심(土深) 30cm 지점의 토양(1~2kg)을 처리구별로 2개소에 서 채취하였다. 표토 채취는 표면의 유기물이 시료

에 섞이지 않도록 낙엽층을 제거한 다음 채취하였다. 토심 30cm 지점의 시료는 표토를 완전히 제거한 다음 채토기(採土器)를 사용하여 채취하였다. 채취한 시료는 통풍이 잘되는 음지에서 중량 변동이 없을 때까지 건조시킨 후, 40 mesh sieve를 사용하여 식물의 뿌리를 제거한 분말 상태의 토양만을 공시 재료로 하였다.

수체내의 Al³⁺ 농도를 측정하기 위한 시료는 수피(樹皮)를 제거한 수간(樹幹)을 85°C에서 중량 변동이 없을 때까지 건조시킨 다음, 분말 상태가 되도록 분쇄하였다. 이 때 알루미늄의 함량측정 오차를 줄이기 위해, 일정한 분말상태를 유지하였고 Repsch (Model MM2000) 분쇄기로 분쇄하였다.

2.5 토양 산도 측정

토양 산도(pH)의 측정은 입업연구원의 표준 입업 연구 실시 요령(1993)에 따라서 삼각 플라스크에 5g의 풍건세토(風乾細土)와 25ml의 1N KCl를 혼합하여 때때로 유리봉으로 저어 주면서 30분간 방치한 다음, pH meter (Mettler, Model Delta 320)를 사용하여 측정하였다.

2.6 토양 및 수체의 Al³⁺ 농도 측정

시료 1g을 100ml 삼각 flask에 넣고 1N KCl 50ml을 가하여 30분간 방치한 다음, 100ml mess flask에 여과(No. 2 여과지)하였다. 여과지 위의 잔류물에 1N KCl용액을 수회 첨가·여과하여 mess flask의 표시선까지 용액을 채운 다음 잘 혼합하였다. 추출

액 3 ml에 증류수 3 ml를 첨가하여 희석한 다음, 여기에 thioglycolic acid 2 ml와 aluminon 1 ml를 넣고 수욕상에서 16분간 가열하였다. 가열한 용액을 약 1.5시간 동안 자연 냉각시킨 다음 465 nm에서의 흡광도를 spectrophotometer (Kontron, Model Unikon 942)로 측정하여 수체와 토양의 Al³⁺ 농도를 산출하였다(농촌진흥청, 1988).

3. 결과 및 고찰

3.1 인공 산성우 처리 5년후의 수고 생장의 변화

인공 산성우를 처리한 1991년과 천연 강우하에서 5년간 경과한 1996년의 수고를 그림 1에 제시하였다. 인공 산성우(pH 4.0, pH 2.0)를 처리한 1991년의 수고는 쪽동백을 제외한 6수종이 대조구(pH 5.6)에 비하여 높은 경향을 나타냈다. 이것은 산성우의 주성분인 질산이 토양에서 양료화되어 식물의 생장을 돕는 역할을 하였거나(Byres *et al.*, 1992; Dean and Johnson, 1992; 河野 등, 1995), 인공 산성우에 의하여 표층 토양의 염기가 용탈되어 식물의 뿌리

가 있는 하층 토양에 집적됨으로써 생육 환경이 개선되었기 때문이라고(石塚, 1993) 생각된다. 그리고 산성우에 의하여 생장 촉진되는 현상은 *Pinus elliotii*, 삼나무, 전나무, 편백, 자작나무 등의 수종에서도 나타나고 있으며(伊豆田 등, 1990; 松本 등, 1992b), 이러한 현상은 시비(施肥)를 하지 않은 토양에서 보다 명확하게 나타난다(河野, 1995).

천연 강우하에서 5년간을 성장한 1996년의 수고는 산성우를 처리한 1991년의 결과와는 상반되게 인공 산성우 처리구가 대조구보다 낮은 경향이며, 처리한 인공 산성우의 pH가 낮을수록 수고가 낮다. 이것은 산성우에 의하여 일시적으로 생장 촉진 효과를 얻을 수 있다 할지라도 그 기간이 오랫동안 지속되지 못하며, 장기적으로는 생장 장애를 초래함을 보여준다. 그리고 인공 산성우를 처리한 1991년에 생장 저해가 나타나지 않고서 그 이후에 나타난다는 점으로 보아, 인공산성우가 지상부 보다 지하부에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이라고 생각된다. 이것은 산성우에 의해서 일시적으로 지상부의 생장이 촉진되는 반면 지하부의 생장이 저하된다는 電力中央研究所(1994)와 인공 산성우를 앞 표면에 처리

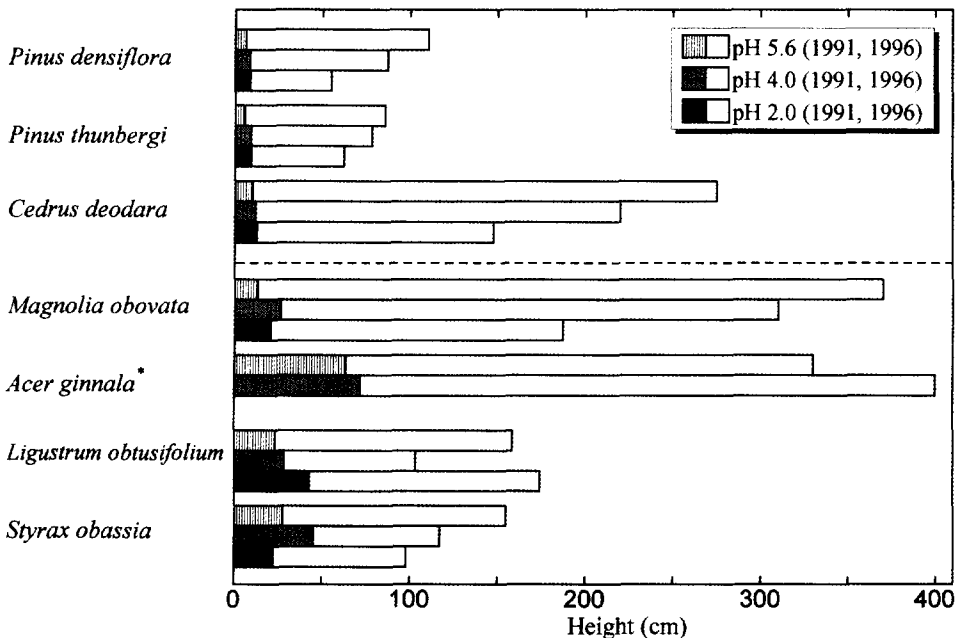


Fig. 1. Height growth comparison between the first year (1991) and last year (1996). *Acer ginnala** does not have height growth data for pH 2.0 acid rain treatment due to no germination.

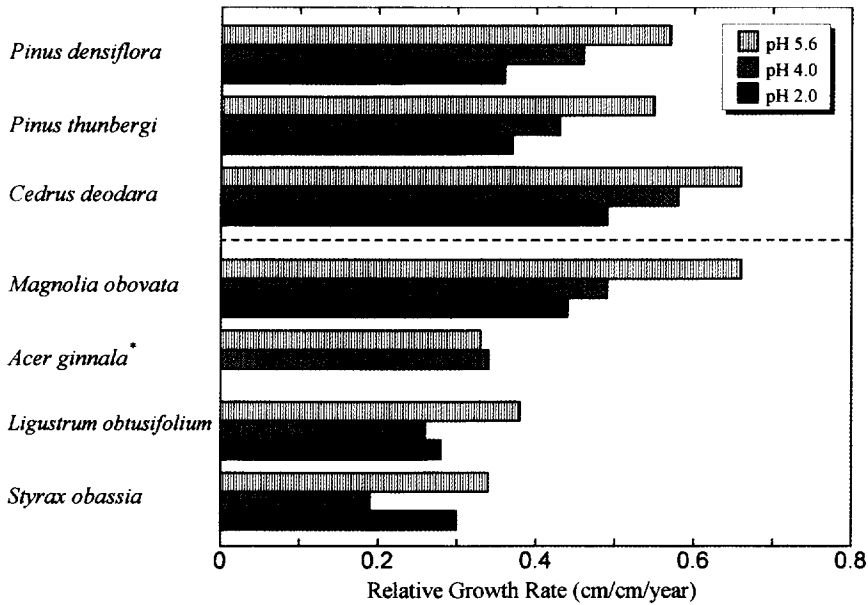


Fig. 2. Relative growth rate comparison over five years, 1991 through 1996. *Acer ginnala** dose not have height growth data for pH 2.0 acid rain treatment due to no germination.

하여도 광합성 속도의 저하가 없다는 松本 등 (1992a)과 Lee et al. (1990)의 보고가 이를 뒷받침한다.

수목은 지수 관수적(指數 關數的) 성장을 나타내는데, 이 성장 곡선에서는 상대 성장율이 일정하다(後藤, 1995). 본 연구에서는 인공 산성우 처리시의 성장 촉진 효과를 배제한 5년간의 성장량을 비교하기 위해서 1991년의 수고를 시점으로 하는 수고의 상대 성장율(cm/cm/year)을 산출하였다(그림 2). 수종별로 수고의 상대성장률을 비교하면, 일반적으로 침엽수의 수고 성장이 활엽수보다는 높고, 활엽수 중에는 특히 목련의 성장이 다른 활엽수종보다는 높았다. 인공 산성우처리별로 비교하면, 침엽수 중 모두, 대조구에서 자란 묘목이 인공산성우 처리구에서 자란 묘목보다 비교적 높은 상대 성장률을 보였다. 활엽수는 신나무를 제외한 3수종의 경우 침엽수와 마찬가지로 인공산성우 처리 가운데 대조구에서 수고의 상대 성장률이 다른 처리구보다 좋은 것으로 나타났다. 한편 신나무의 경우는 pH 2.0 처리구에서 발아하지 않은 개체가 많아서, 수고성장 자료를 얻을 수 없었지만 pH 4.0과 비교구간의 상대 성장률에서 5년후에도 큰 차이를 보이지 않았다.

산성우가 생장에 주는 영향을 평가하기 위해서는 보다 더 장기적인 관찰과 실험이 필요하다. 산성우 처리를 한 첫 해인 1991년에는 쪽동백과 목련을 제외하고 모든 수종에서 대조구보다 인공 산성우 처리를 한 실험구에서 수고 성장이 더 좋은 것으로 관찰되었다(그림 1). 그러나 산성우처리를 하고 5년이 지난 1996년에 조사한 수고의 상대 성장률은 신나무(pH 4.0 처리구)를 제외하고는 모든 처리구와 수종에서 대조구에서의 성장량보다 인공산성우 처리구의 성장률이 증가한 것을 보여주어고 있어서(그림 2) 산성우의 처리가 시간이 지남에 따라 수목의 수고성장을 억제하는 것으로 나타났다. 한편, 신나무는 5년이 흐르면서 인공산성우 처리가 수고성장을 억제 한 수종과는 상반되게, 오히려 대조구보다 좋은 수고성장을 보여 준다(그림 1과 2). 신나무의 pH 2.0 처리구에서 발아가 되지 않아서(정용문, 1991) 처리구별로 종합적으로 비교하기에 어려움이 있지만, 신나무는 초기의 산성우 stress로부터 성장을 극복하는 능력과 산성우때문에 나타나는 토양의 고농도 가용성 알루미늄을 완충하는 능력이 있는 것으로 추측된다. 위에서 언급한 여러 수종의 경우 시간이 흐르면서 산성우 처리를 한 처리구에서 생장이 저

해 된 것으로 나타나는데 이는 토양의 가용성 알루미늄의 집적이 수고생장을 저해하는 요인으로 작용했을 것으로 생각된다. 이것은 산성우가 토양의 알루미늄 농도를 증가시켜 수목 생장을 저해하는 부정적인 요인이다 (Ulrich *et al.*, 1980). 가용성 알루미늄이 산성우와 함께 토양에서 독성으로 작용한다는 것은 널리 알려진 사실이지만 신나무와 같이 가용성알루미늄이 갖는 독성을 완화하는 능력을 가진 수종도 있다 (Smith, 1992).

3.2 토심과 토양산도의 관계

인공 산성우 처리 5년후의 토양 산도는 표층보다 하층토양에서 높은 pH를 나타내며 (표 4), 처리한 산성우의 산도가 낮을수록 pH도 낮은 경향을 보여 준다. 초기의 산성우처리가 표토의 산성화를 촉진해 주기는 하였지만 토심이 깊어질수록 그 영향은 감소한다고 볼 수 있다. 그리고 산성우처리를 시작하기 전 토양의 산도는 pH 6.7이었는데, 5년후에 조사한 표토의 산도는 pH 5.5~4.3으로 나타났다. 이는 인공 산성우 처리로 인해서 토양이 산성화되었기 때문으로 생각된다. 일반적으로 토양 산도와 가용성알루미늄의 농도는 밀접한 관계가 있는데, 산성우로 인해서 토양산도가 내려가는 이유는 토양속의 양이온과 산이 결합하여 가용성알루미늄과 결합할 양이온을 용탈시키기 때문이다. 이렇게 가용성알루미늄이 토양에 과다하게 집적되면 독성이 증가하게 되는데 (Ulrich *et al.*, 1980), 이의 영향으로 인공 산성우 처리구의 수고 생장이 억제되었을 것으로 추측된다.

층위별 토양 pH와 가용성알루미늄 농도는 대체로 일치하는 것을 알 수 있다 (표 4, 그림 3). 모든 처리구에서 가용성알루미늄의 농도가 pH값이 높은 표토보다 토심 30cm에서 더 높은 농도를 보여준다. 이것은 토양산도가 산성에 가까워질수록 가용성알루미늄의 양이 토양속에 증가한다는 사실을 뒷받침해 주며, 이와 같은 결과는 다른 연구에서도 보고된다 (임업연구원, 1988, 1994). 한편 대조구에서 pH 2.0처리구로 갈수록 가용성알루미늄의 농도가 낮아지는 경향은 일반적으로 다른 문헌에서 관찰하기 힘든 경향이기도 하다. 그러나 산성우 처리를 한 토양의 독성을 평가할 때는 Al^{3+} 농도를 기준으로 하는데, 이와는 달리 (Ca+Mg+K)/Al의 비율을 비교

Table 4. Soil pH to different artificial acid rain treatment.

Treatment	Surface Soil	30 cm Depth
pH 5.6	5.40	5.69
pH 4.0	5.39	5.46
pH 2.0	4.74	5.14

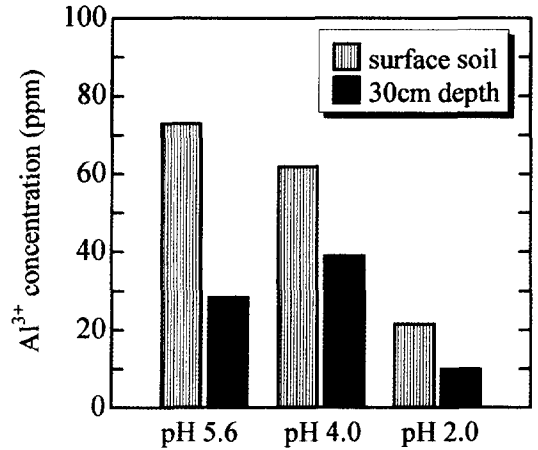


Fig. 3. Al³⁺ concentration (ppm) at different soil depth treated by acid rain had done in 1991.

하여 평가하기도 한다 (河野 等., 1996). 따라서 금후의 연구에 있어서는 이들 항목에 대한 조사가 필요하다.

3.3 수종별 가용성 알루미늄의 흡수능력

수체내의 알루미늄의 농도로 수종간의 흡수능력을 간접적으로 평가할 수 있으므로 본 연구에서는 이를 평가 기준으로 하였다 (그림 4). 처리한 인공 산성우의 pH에 따라서는 큰 차이가 없었다. 그러나 수종에 따라서는 목련이 히말라야시더나 신나무의 경우 보다 수체내의 알루미늄 농도가 높은 수치를 나타냈다. 이들 수종에 대한 biomass를 조사하지 않았기 때문에 개체당의 알루미늄 흡수량을 정량화하기는 어려우나, 목련이 흡수능력이 높다고 판단되며, 토양의 가용성 알루미늄 농도가 높은 지역의 조경 수종으로 목련을 고려해 볼 가치가 있다. 실제로 수목을 이용하여 폐기물 매립지에서 발생하는 독성 물질을 흡수하는데 이용하고 있으며 (구영본 등, 1997; Smith, 1992), 이는 수목을 이용한 환경 정화

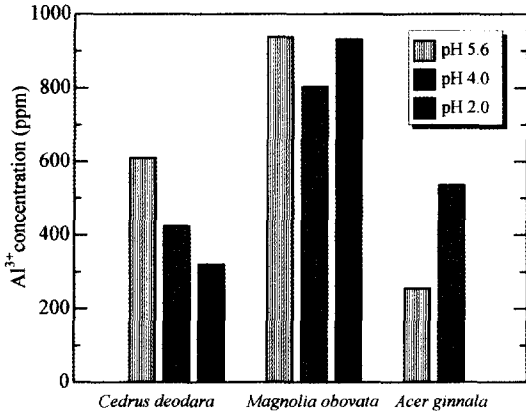


Fig. 4. Variations Al³⁺ concentration of different species to artificial acid rain treatment.

기능의 보완 차원에서 가치가 있다.

4. 결 론

인공 산성우를 pH 5.6(대조구), pH 4.0, pH 2.0 의 3수준으로 조제하여 1991년 4월부터 8월까지 5개월간 처리하였고 1996년 10월에 이 조경수종에 대하여 산성우 처리후 장기적인 측면에서 영향을 구명하기 위하여 수고생장, 토양 pH 그리고 Al³⁺의 수종별 흡수능력을 조사하였다.

인공 산성우를 처리한 1991년에는 비료효과를 나타내어 수고 생장이 촉진되었으나, 5년이 경과한 후에는 신나무를 제외하고 모든 수종에서 수고생장이 억제되었다. 신나무는 실험 5년후에도 수고의 생장률이 강한 산성우처리구(낮은 pH값)에서 감소하지 않은 것으로 나타나서 강산성우가 내리는 공단이나 도심지역의 조경수로서 활용가치가 클 것으로 추정된다.

토양 산도는 인공 산성우 처리에 의하여 pH가 낮아지고, 직접적인 영향을 받는 표층토양이 하층토양보다 영향이 크다. 그리고 목련은 알루미늄 흡수능력이 높은 수종으로 평가되어 가용성 알루미늄 농도가 높은 지역의 조경 수종으로 고려해 볼 가치가 있다. 그러나 토양속의 가용성 알루미늄의 농도와 생장과의 관계를 규명하기 위해서는 더 많은 시간에 걸친 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문을 심사하는 과정에서 값진 지적과 귀한 제안을 해 주신 익명의 심사위원님께 지면을 빌어 감사함을 전합니다

참 고 문 헌

구영분, 이성규, 김판기, 변광옥, 우수영 (1997) 난지도 폐기물 매립지의 포플러 생장 및 오염물질 흡수 가능성. 포플러 14, 25-32.

김광식 (1982) 한국의 기후. 일지사, 330-341.

농촌진흥청 (1988) 토양화학분석법(토양, 식물체, 토양미생물). 농업기술연구소, pp. 450.

임업연구원 (1996) 임업연구원 연구보고, 250-300.

임업연구원 (1994) 환경오염이 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처 특정연구 제2차년도 보고서, pp.161.

임업연구원 (1993) 임업 표준 연구 실시 요령. 임업연구원, pp.658.

임업연구원 (1988) 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처 특정연구 제2차년도 보고서, pp.171.

정용문 (1991) 인공산성우에 대한 조경수종의 내성비교. 한국대기보전학회지, 7(3), 208-218.

정용문 (1988) 인공산성우가 소나무 및 개나리분식묘 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 한국대기보전학회지, 5(1), 33-44.

환경부 (1996) 환경질 현황. 열린정부(중앙행정기관)환경부. computer 정보자료.

後藤雄佐 (1995) 作物の生長調査とその解析, in 植物生産農學實驗法マニュアル. 日向康吉, 羽柴輝良編著, pp.58-73.

電力中央研究所 (1994) 酸性雨の影響評價, 電中研レビュー- 31, 83-95.

土居晃郎 (1991) 酸性雨による土壤影響, 北方林業 43, 186-188.

松本陽介, 丸山 温, 森川 (1992a) 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して-, 森林立地, 34(1), 2-13.

松本陽介, 丸山 温, 森川, 井上敏雄 (1992b) 人工酸性雨(霧)およびオゾンがスギにおよぼす影響と近年の汚染需教の變動-樹木の衰退現象に關して-, 森林立地, 34(2), 85-97.

伊豆田猛, 三輪 誠, 三宅 博, 戸塚 續 (1990) スギ苗の生長に對する人工酸性雨の影響, 人間と環境,

- 16(2), 44-53.
- 石塚和裕 (1993) 酸性降下物が土壤にえる影響, in 森林衰退-酸性雨は問題になるか-, 林業科學技術振興所, 77-85.
- 河野吉久 (1995) 樹木衰退現象と酸性雨との關係-暴露實驗より-, 大氣環境學會シンポジウム『酸性雨と森林衰退』, pp.26-31.
- 河野吉久, 松村秀幸, 小林卓也 (1995) スギ, ヒノキ, サワラの生育におよぼす人工酸性雨の影響, 大氣環境學會誌, 30(3), 191-207.
- 河野吉久, 松村秀幸, 小林卓也 (1996) 人工酸性雨暴露に伴う土壤理化學性の變化とスギ, ヒノキ, サワラの根の生育, 大氣汚染學會誌, 31(5), 203-212.
- Baker, E.A. and G.M. Hunt (1986) Erosion of waxes from leaf surfaces by simulated rain, *New Phytol.* 102, 161-173.
- Byres, D., J.D. Johnson, and T.J. Dean (1992) Seasonal response of slash pine (*Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm.) photosynthesis to long-term exposure to ozone and acidic precipitation.
- Dean, T.J. and J.D. Johnson (1992) Growth response of young slash pine trees to simulated acid rain and ozone stress, *Canadian Journal of Forest Research*.
- Lee, W.S., B.I. Chevone and J.R. Seiler (1990) Growth and gas exchange of loblolly pine seedlings as influenced by drought and air pollutants, *Water, Air and Soil Pollution*, 51, 105-116.
- McLaughlin, S.B. (1985) Effects of air pollution on forest. a critical review, *Air Pollu. Control Associ.*, 35(5), 511-533.
- Rinallo, C., P. Raddi, and V. diLondardo (1986) Effects of simulated acid deposition on the surface structure of Norway spruce and silver fir needles, *European Journal of Forest Pathology*, 16, 440-446.
- Riding, R.T. and K.E. Percy (1985) Effect of SO₂ and other air pollutants on the morphology of epicuticular waxes on needles of *Pinus strobus* and *Pinus Banksiana*, *New Phytol.* 99, 55-563.
- Smith, W.H. (1992) Air pollution and forest; interaction between air contaminants and forest ecosystem, New York. Springer-Verlag, pp.618.
- Tjoelker, M.G., J.C. Volin, J. Oleksyn, and P.B. Reich (1993) Light environment alters response to ozone stress in seedlings of *Acer saccharum* Marsh. and hybrid *Populus L. l.* *In situ* net photosynthesis, dark respiration and growth, *New Phytologist*, 124, 627-636.
- Ulrich, R., R. Mayor, and T.K. Khanan (1980) Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in Central Europe, *Soil Sci.*, 130(4), 193-199.