

인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아, 생장 및 침엽에 미치는 영향(2)¹

김갑태² · 추갑철³

Effects of Artificial Acin Rain on Seed Germination, Growth and Needle of Several Conifers(2)¹

Gab-Tae Kim², Gab-Cheul Choo³

요 약

소나무, 곰솔, 잣나무 및 독일가문비를 대상으로 인위적으로 산도를 조절한 인공산성우(pH 3.0, 4.0 및 5.0)와 지하수(pH 6.5)를 1991년 4월부터 1993년 8월까지, 생육기간 중에는 주 2~3회, 겨울철은 주 1회 1회 5mm의 강도로 처리하였다. 인공산성우를 처리하면서 수종별 발아 및 득묘율, 토양산도, 유묘의 생장 및 접촉각(contact angle)을 조사·비교하여 얻은 결과는 다음과 같다.

묘목의 생장관련 형질(묘고, 지하부, 엽량 및 개체당 건중량)의 경우에는 산성우처리 초기에는 산성우 처리가 양료로서의 효과를 가지는 것으로 판단되며, 수종별로 상이한 반응을 보였다. 그러나 처리가 2년 이상 지속된 3차년도에서는 처리산성우의 산도수준이 높을수록 모든 수종에서 생장관련 형질들이 감소되는 경향을 보였으며, 이는 토양완충력의 한계 이상으로 투하되는 산집적에 의한 결과로 판단된다.

엽피해율이나 엽량(낙엽율) 등의 자료는 처리산성우의 산도수준과 관련지어져 있는 것으로 나타나 산성우 피해의 조기판단 기준으로 사용가치가 높을 것으로 판단된다. 토양산도는 처리간 고도의 통계적 유의차가 인정되었다.

침엽의 표면과 물방울이 이루는 접촉각을 측정된 결과, 처리산성우의 산도수준이 높을수록 엽령이 높을수록 접촉각의 크기는 낮아졌다. 접촉각을 측정비교하는 방법은 야외에서 침엽수류에 대한 산성우 피해의 조기판단을 위한 알맞고 훌륭한 기준이라 판단된다.

주요어 : 인공산성우, 유묘생장, 토양산도, 접촉각

ABSTRACT

Artificial acid rain (pH 3.0, 4.0 and 5.0) and ground water was treated on the seeded pots of 4 species to examine its effects on germination and survival rate, seedling growth and contact angles on needle surface. Artificial acid rain was prepared by diluting sulfuric acid with ground water and ground water (pH 6.5) was used as control. Artificial acid rain was sprayed to seeded pots two or three times per week for

* 이 연구는 한국과학기술재단의 1990년도 목적기초연구비의 지원으로 수행되었음.

1 접수 7월 15일 Received on Jul., 15, 1993

2 상지대학교 농과대학 College of Agri., Sangji Univ., Wonju, 220-702, Korea

3 진주산업대학교 Chinju Natl. Univ., Chinju, 660-280, Korea

growing season, one times per week for winter seasons. About 5mm of artificial acid rain was treated each time from early April, 1991 to early October, 1993. Germination and survival rate, soil acidity, seedling growth and contact angles on the needle surface were measured and compared among the treatments. The results were summarized as follows:

Artificial acid rain might have positive effects on growth-related characteristics of the seedlings in the first and second year of acid rain treatment, and the effects were differed among four species. All growth-related characteristics of the seedlings in third year, however, decreased with decrease of pH values of artificial acid rain. This was considered to the results of acidic accumulation over soil buffer capacity.

Needle injury and biomass(defoliation)was correlated with the pH values of artificial acid rain, and this character might be a good criteria for early diagnosis of acid rain injury. The differences of soil acidity were significant among the treatments for all species.

Contact angles between needle surface and water droplet decreased with decrease of pH values of artificial acid rain. Measuring and comparing contact angles might be very good criteria for early diagnosis of acid rain injury.

Key Words : Artificial Acid Rain, Seedling Growth, Soil Acidity, Contact Angle

서 론

화석연료의 대량소비로 발생한 대기오염물질이 상승기류나 굴뚝을 높임으로 하여 광범위한 지역으로 확산되고 이들이 강수물에 녹아들거나 씻겨내려 pH 5.65 미만의 높은 산도를 보이는 것을 산성우(acid precipitation 또는 acid rain)라 한다. 우리나라에서도 1960년대 공업화를 시작한 이후 대기오염은 점차 심해져 왔으며, 최근에는 대도시와 공단지역 주변에서부터 내륙으로 확산되어 광범위한 지역에서 산성우가 측정되는 등으로 대기오염문제는 커다란 난제로 떠올랐다. 이러한 산성우현상은 광범위한 지역에 걸쳐 영향을 미치며, 주로 산성의 대기오염물질들(SO_x, NO_x, Cl₂...) 이 강수물에 녹아들어 이온화(SO₄⁻, NO₃⁻, Cl⁻...)하기 때문인 것으로 알려졌다(Cowling & Dochinger, 1987; Bubenick, 1984; Galloway 등, 1976), 최근 환경문제의 가장 큰 과제로 등장했다.

산성우가 생태계에 미치는 영향은 토양과 식생에 양료를 공급한다는 유익한 측면도 있으나(Evans, 1984), 토양산도를 높이고(Kim, 1986; 정, 1987; 이, 1988), 토양의 양료를 용탈시키며(Johnson 등, 1983; Kim, 1986; 정, 1987; 이, 1988), 식물체로부터의 양료용탈(Cole & Johnson, 1977; Lee & Weber, 1982; Johnson 등, 1983) 및 가지적 피해의 유발(Kim, 1986; 이, 1988), 양료순환체계를 교란시키는 등의 유해한 측면도 보고되었으며, 식물종간 또는 영양계간에 산성우, 산성물질 및 대기오염에 대한 내성차가 있음이 밝혀졌다(김 등, 1982; 김, 1986; Lee

& Weber, 1979; Scholz, 1988; Scholz & Reck, 1977; Eckert, 1988; Siewecki & Rachwal, 1988; Oleksyn, 1988). 최근에는 독일을 비롯한 선진공업국들은 물론 광범위한 지역에서 삼림이 고사하고 있으며, 그 원인이 대기오염에 기인한 산성우나 산성연무에 있다고 설명하고 있음을(Puckett, 1982; Binns와 Redfern, 1983) 감안할 때, 산성우가 우리나라의 삼림생태계에 미칠 영향도 우려되는 바이다.

우리나라에서도 산성우에 대한 보고가 있었으며(김, 1983, 1985, 1990; 박 등, 1983) 이에 대한 대책의 필요성을 역설하고(김, 1985; 김, 1985), 산성우가 식물생장이나 삼림생태계에 미치는 영향에 관한 연구를 수행한 바가 있으며(김 등, 1982; 이와 김, 1986; 김과 추, 1992; 정, 1987, 1991; 이, 1988; 김, 1988, 1989, 1991), 최근 우리나라에서도 서울을 비롯한 대도시 주변에서 리기다소나무를 비롯한 잣나무, 소나무 등에서 쇠퇴징후가 관찰되며, 리기다소나무의 쇠퇴징후는 1) 침엽의 황화(잎 끝으로부터 황화가 시작됨), 2)조기 또는 부정기 낙엽(나무의 정단이 하부보다 일찍 낙엽되는 경향) 3)침엽의 수명 단축(2년생 잎이 없고 1년생 잎만 남음), 4)뿌리의 비정상적 생장(뿌리가 산호상으로 굴곡함), 5)년륜과 신초의 생장저하(년륜폭이 좁아지고 신초가 짧아짐으로 순생산량이 감소됨), 6)고사의 순으로 나타난다고 밝혔으며(김, 1990), 서울시를 중심으로 외곽으로 갈수록 토양산도가 높아지고 토양중의 Ca함량은 낮아지고 Al함량은 상대적으로 높아짐도 밝혀졌다(김, 1991).

야외에서 생장하는 수목에 대한 산성우에 의한 피해

현상만을 구명하는 것은 여러가지의 환경요인이 복합적으로 작용하기에 매우 곤란하다. 또한 강우마다 산도가 다르며 강우량, 강우강도, 강우지속시간 및 강우 특성 또한 일정하지 않아 산성우에 의한 피해현상만을 구별하기가 매우 힘들다. 그러므로 인공강우를 산도별로 조절하여 일정한 조건 하에서 처리한 후 발생하는 피해상태를 관찰하게 된다. 이러한 연구는 일찌기 구미 등지에서 수행되어 생장조절실 내에 수목의 묘목을 키워 일정농도의 산성우를 처리하여 침엽의 조직변화(Rinalls 등, 1986), wax의 구조변화(Riding과 Perdy, 1985), 묘목의 생장에 대한 영향(Lee와 Weber, 1979), 기공에 대한 영향 등에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 국내에서도 김(1991, 1989, 1988, 1986), 김과 추(1992), 이와 김(1986), 정(1991, 1987) 등이 인공산성우가 수목의 종자발아, 엽록소함량, 식물체 구성성분 및 생장에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하여 왔는데, 본 연구에서는 국내에서 연구되지 않았던 산성우에 의한 침엽의 생리적 변화에 대한 연구를 수행하려 한다. 이는 이(1993)와 Cape(1981, 1983)의 접촉각 측정방법에 준하여 조절된 조건에서 인공산성우를 처리한 침엽을 대상으로 침엽 표면의 접촉각을 측정하는 것으로, 1.0 μ l의 이차중류수를 주사기(micro syringe)로 침엽의 adaxial면(복면)에 떨어뜨려 침엽표면의 wax층과 물방울이 이루는 각도를 광학현미경($\times 40$)을 이용하여 graticules로 측정하는 것이다. 측정이 힘들고 조건에 따라 접촉각이 달라지나 비교적 손쉬운 방법이라고 평가되고 있다.

본 연구는 흔히 자라거나 조립되는 소나무, 곰솔, 잣나무 및 독일가문비를 대상으로 인위적으로 산도를 조절한 인공산성우를 1991년 4월 부터 1993년 8월까지 처리하면서 수종별 종자발아율, 잎의 피해, 유묘의 생장 및 접촉각(contact angle)을 조사·비교함으로써 몇 침엽수종이 산성우에 의해 영향받는 것을 어느 정도 추정하며, 조기피해의 판단기준으로서의 접촉각(contact angle)을 측정하는 것의 타당성을 검토하여 그 대책을 수립하는 데 기초자료를 얻고자 시도하였다.

재료 및 방법

1. 식물재료

식물재료는 우리나라에서 흔히 자라거나 조립하는 소나무(*Pinus densiflora*), 곰솔(*Pinus thunbergiana*), 잣나무(*Abies holophylla*) 및 독일가문비(*Picea abies*)

등의 4수종의 정선된 종자이며, 기건보관하다가 약 1개월간 노천매장 후 1991년 4월 14일에 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1:1:1, V/V)을 채운 plastic pot(상부직경 15, 하부직경 11, 높이 12cm)에 파종하여 천연강우를 차단시킨 상에 배열하고 산도를 조절된 인공산성우와 대조구로 지하수를 처리하였다. 대상수종의 종자산지를 Table 1에 보였다.

Table 1. Tree species and seed sources used in this study.

Tree species	Seed sources
<i>Pinus densiflora</i>	Chungung-gun, Kwangwon-do
<i>Pinus thunbergiana</i>	Anmyun island, Chungcheongnam-do
<i>Picea abies</i>	Muju-gun, jeonlabuk-do
<i>Abies holophylla</i>	Wonju-gun, Kwangwon-do

2. 처리 및 측정방법

2-1 인공산성우 처리

인공산성우와 지하수의 처리는 1991년 4월 부터 1993년 8월 초순까지 처리하였다. 1991년 4월 초순부터 10월 초순까지는 주 3회, 1회 5mm의 강우강도로, 10월 중순부터 3월 하순까지는 주 1회, 1회 5mm의 강도로 처리하였으며, 1992년 4월 초순부터 10월 초순까지는 주 2회, 1회 5mm의 강우강도로, 10월 중순부터 3월 하순까지는 주 1회, 1회 5mm의 강도로, 1993년 4월 초순부터 8월 초순까지는 주 2회, 1회 5mm의 강우강도로 처리하였다. 인공산성우는 황산을 지하수(pH 6.5)로 묽혀 pH 5.0, 4.0 및 3.0 이 되도록 제조하였다. 처리산성우의 산도 4수준, 4수종, 6반복의 난괴법으로 실험설계하였으며, 각 plot당 6개씩의 plastic pot을 배치시켰으며, pot당 20립씩의 종자를 파종하였다.

2-2 득묘율 및 생장량 조사

수종별 발아한 개체수 및 잔존묘목수를 1차년도에서는 발아가 시작된 이후부터 격주로 조사하며 2차년도 이후에는 고사한 묘목수를 조사하였다. 엽피해율은 선택된 개체들로부터 엽피해율을 김(1991a)과 동일한 방법으로 조사하였다. 묘목생장은 1991년과 1992년도에는 10월 중순, 1993년도에는 8월 상순에 묘목을 굴취하여 묘고 및 건중량(지상부, 엽량, 지하부)을 측정한다. 측정·조사된 자료를 통계분석하여 수종 및 산도별로 비교검토 하였다.

2-3 접촉각(contact angle)의 측정

이(1993)와 Cape(1981, 1983)의 방법에 준하여,

수종별, 연령별로 20개의 침엽을 채취한뒤, 1.0 μ l의 이차증류수를 주사기(micro syringe)로 침엽의 adaxial 면(복면)에 떨어뜨려 침엽표면의 wax와 물방울이 이루는 각도를 광학현미경($\times 40$)을 이용하여 graticules로 측정하였다. 측정조건을 달리하여 1992년 10월에 채취한 소나무와 곰솔의 엽시료는 풍건시킨 후에 접촉각을 측정하였으며, 1993년 8월에 채취한 전체수종에 대한 엽시료는 생엽에 대하여 접촉각을 측정하였다.

2-4 토양산도의 측정

토양산도는 1991년 7월과 10월, 1992년 7월과 10월 및 1993년 8월 초순에 수종별 및 처리별로 각각 토양을 채취하여 pH-meter로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 수종별 시기별 묘목수

Figure 1에 산성우 처리가 경과함에 따른 잔존묘목수의 처리별 변화를 수종별로 나타내었다. 1991년 7월의 경우는 대부분의 수종들에서 최대발아율을 보였을 때이며, 1991년과 1992년 10월의 경우에는 성장량 조

사 시기였으며, 1993년 8월은 처리를 종료했을 때이다. 인공산성우 처리가 진행되면서 일부 처리구에서 고사하는 개체들이 나타나 잔존 묘목수는 감소하였으며, 특히 발아율이 높은 소나무와 곰솔에서 고사목이 많이 발생하였다. 모든 수종에서 인공산성우의 처리가 진행될수록 강우의 산도가 높을수록 많은 개체가 고사하는 경향을 보였다. 소나무, 곰솔, 독일가문비에서는 대조구에서 잔존묘목수가 가장 많았으며, 잣나무에서는 pH 5.0처리구에서 가장 많은 것으로 나타났다. 소나무와 독일가문비에서는 산성우 처리 초기에는 강우 강도가 높을수록 발아율이 높은 경향이나 산성우 처리가 진행됨에 따라 고사하는 개체가 증가하여 잔존묘목수가 감소하는 경향이 뚜렷하였다.

이상의 결과와 같이 산성우처리에 의한 발아 및 득묘율이 수종간 조금씩 다른 경향으로 나타난 것은 수종간 산성우에 대한 반응차가 있음을 보여주는 것으로 판단되며, 이와 김(1986)이 5개 수종, 김(1991)이 5개 수종, Lee와 Weber(1979)가 11개 수종의 종자를 파종하고 pH 3.0~5.7의 산성우를 처리하여 발아율을 조사, 보고한 수종간의 반응차와 비슷한 경향이며, 김(1986), Eckert(1988), Siwecki & Rachwal(1988), Oleksyn(1988), Scholz(1988) 등이 대기오염과 산성

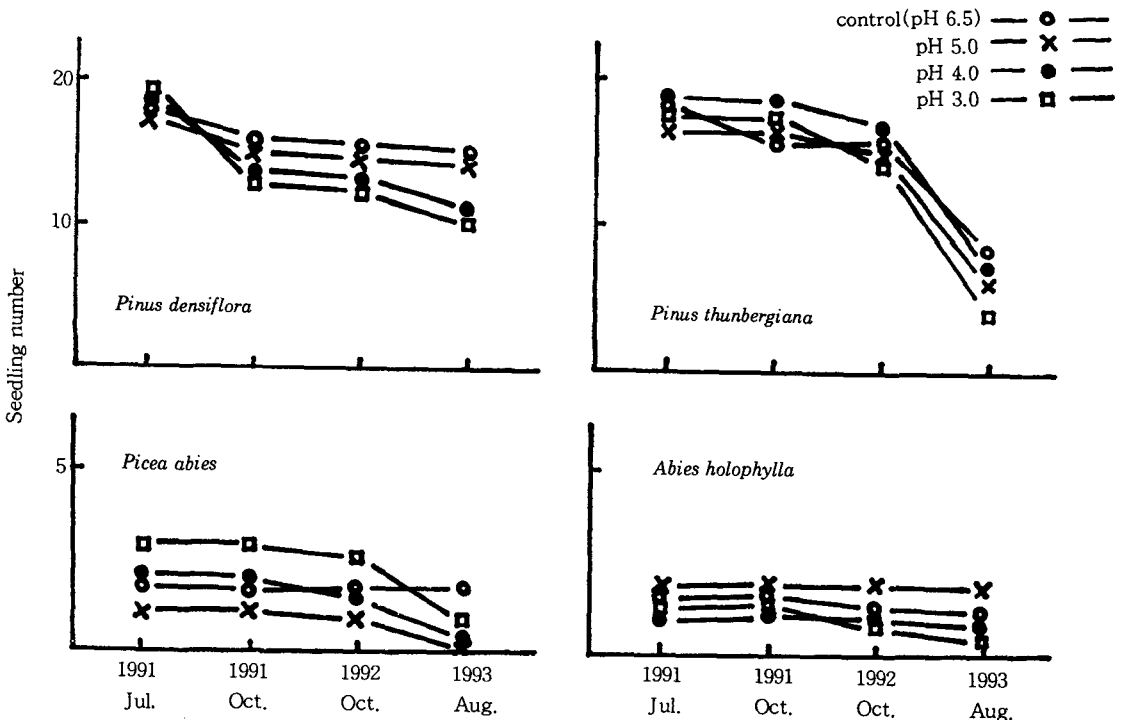


Figure 1. Changes of seedling numbers by the levels of pH for each species.

물질에 대한 수종간 및 영양계간의 내성차를 밝힌 결과와도 부합되는 것이라 판단된다. 그러나, 김 등(1982)이 사방오리와 아까시나무의 종자에 pH 2.0, 4.0 및 6.0의 sulfuric acid와 수도물을 처리하여 처리용액의 pH값이 작을수록 발아율이 감소했다는 보고와는 조금은 다른 경향이다. 이는 대상수종의 종자가 갖는 크기, 생리적 활력, 전처리 등의 조건들과 기상요인, 분토양의 조건, 관수 등의 실험방법의 차이에 의한 것으로 보여진다.

2. 수종별 묘목생장

1993년 8월 초순에 굴취하여 수종별 성장량(묘고, 지상부, 지하부 및 개체당건중량, 개체당 엽량과 T-R율)을 측정하여 분석한 결과를 Table 2에 보였다. 소나무에서는 묘고, 침엽 및 지하부건중량에서, 곰솔에서는 묘고, 잣나무에서는 지상부, 지하부 및 개체당 건중량 각각 처리간 통계적 유의차가 인정되었으나, 독일가문비에서는 모든 성장관련 형질에 대한 처리간 통

계적 유의성이 인정되지 않았다. 묘고, 지상부, 지하부 및 개체당 건중량 등의 성장관련 형질의 경우 독일가문비를 제외하고는 pH 5.0 및 4.0 처리구에서 대조구보다 높게 나타났다.

Figure 2에 산성우 처리가 경과함에 따른 묘고의 처리별 변화를 수종별로 나타내었다. 산성우 처리 초기에는 수종간에 묘고생장에 대한 산성우 처리효과가 일정하지 않았으나 3년생의 묘목에서는 독일가문비를 제외하고는 pH 5.0 처리구에서 묘고생장이 가장 높게 나타났다.

묘고의 경우 산성우 처리 초기에는 독일가문비를 제외하고는 처리구가 대체로 대조구보다 높은 경향이나 3차년도 측정에서는 pH 5.0 처리구에서 가장 높았다(Figure 2). 이러한 결과로 보아 묘고생장에 미치는 산성우 처리효과는 수종별로 상이할 것으로 판단되나, 처리된 산성용액 중의 각종 이온들이 묘목생장에 유의한 측면도 있음을 것으로 기대된다. 이러한 결과는 김 등(1982), 이와 김(1986), 김(1991) 및 Lee와 Weber(1979)가 종자를 파종하고 산성우를 처리하여 묘

Table 2. Mean values of seedling growth(tree height ; total, top and root dry weight : T-R ratio) measured on August, 1993 by the levels of pH for each species.

Tree species	pH value of acid rain	Tree height(cm)	Dry weight(mg)				T-R ratio
			top	(needle)	root	total	
<i>Pinus densiflora</i>	Control(6.5)	10.66 b	683	557 ab	243 b	926	3.00
	5.0	12.47 a	844	699 a	281 ab	1125	3.19
	4.0	10.80 b	743	555 ab	285 ab	1027	2.73
	3.0	10.64 b	626	493 b	201 c	827	3.37
	F-values	4.19 **	2.47	2.90 *	2.81 *	2.23	1.69
<i>Pinus thunbergiana</i>	Control(6.5)	11.25 b	941	752	239	1179	4.22
	5.0	14.61 a	945	659	218	1164	4.56
	4.0	12.76 ab	932	656	209	1141	4.84
	3.0	11.16 b	782	624	156	939	5.48
	F-values	4.12 **	0.53	0.48	1.75	0.80	0.84
<i>Picea abies</i>	Control(6.5)	8.93	443	232	213	656	2.29
	5.0	-	-	-	-	-	-
	4.0	7.66	311	198	200	511	2.08
	3.0	6.67	260	158	214	474	1.60
	F-values	2.56	1.46	0.46	1.01	0.37	0.52
<i>Abies hollophylla</i>	Control(6.5)	8.03	832 a	353	312 b	1144 b	2.66
	5.0	8.90	1311 b	203	670 a	1992 a	2.12
	4.0	8.70	1174 b	176	564 ab	1731 ab	2.20
	3.0	7.58	742 a	143	271 b	744 b	3.18
	F-values	0.49	6.77 **	3.60	3.97 **	5.79 *	0.46

* and** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

Differences in letters in vertical columns indicate difference at 5% level for Duncan test

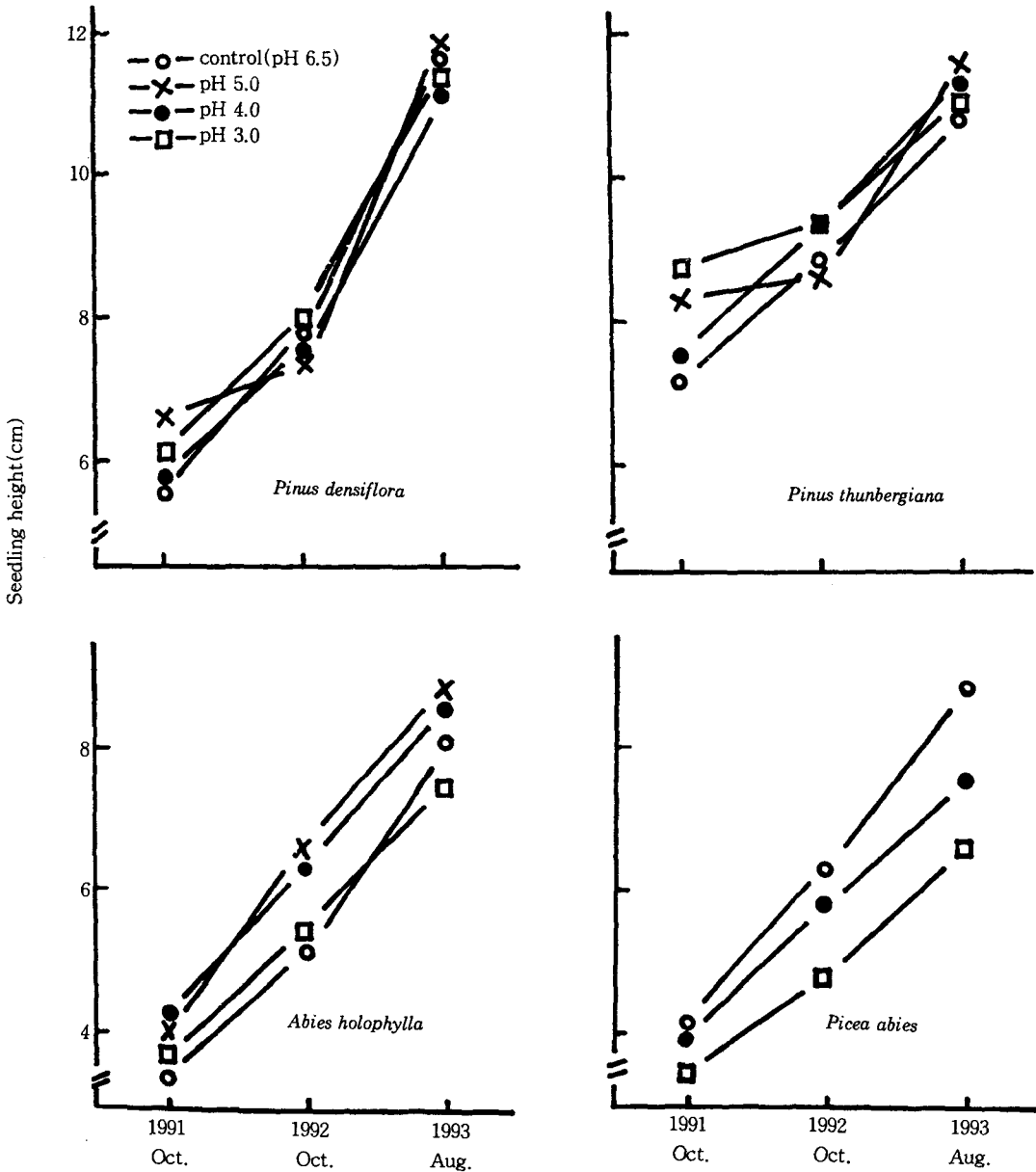


Figure 2. Changes of seedling height by the levels of pH for each species.

고를 조사, 보고한 것과, Evans(1984)의 작물종에 따른 상이한 성장반응을 설명한 것과 같은 경향으로 산성우처리가 묘고생장에 미치는 영향은 수종에 따라 차이가 심한 것으로 판단된다. 또한 소나무와 곰솔의 경우처럼 처리초기에 높은 묘고를 보였던 pH 3.0 처리구가 3차년에 와서는 통계적 유의성이 인정되면서 (Table 2) 낮아진 것은 산성우 처리가 계속되면서 토양산도 (Table 6)를 비롯한 환경조건의 악화와 관련되

어 있을 것으로 판단된다.

지하부 및 개체당 건중량의 경우, 산성우처리 초기인 1991년 10월에는 소나무와 곰솔 모두 pH 3.0 처리구에서 최대건중량을 보였다가 산성우 처리가 진행됨에 따라 점차 감소하여 1993년 8월에는 최하위로 떨어지고, 소나무와 곰솔은 pH 5.0 및 대조구에서 각각 지하부 및 개체당 건중량에서 최대치를 보였다 (Figure 3). 이러한 결과는, Evans(1984)의 설명처럼 짧은 기

간 동안의 산성우 처리시험에서는 극단적으로 낮은 pH의 산성우가 아니면 산성우 중의 sulfate나 nitrate 등이 양료로서의 효과가 해작용보다 크게 작용한다는 설명에 부합된다고 판단된다. 산성우나 대기오염이 장기화하여 토양에 산집적이 일어나는 경우에는 이 실험

에서와 같이 pH 3.0보다 훨씬 낮은 산도수준에서도 임목생장에 나쁜 영향을 미칠 것으로 생각된다.

지하부 건중량에서는 소나무와 잣나무의 경우는 pH 3.0 및 4.0 처리구에서의 값이 대조구 보다 높게 나타나 소나무나 독일가문비 보다는 산성우에 견디는

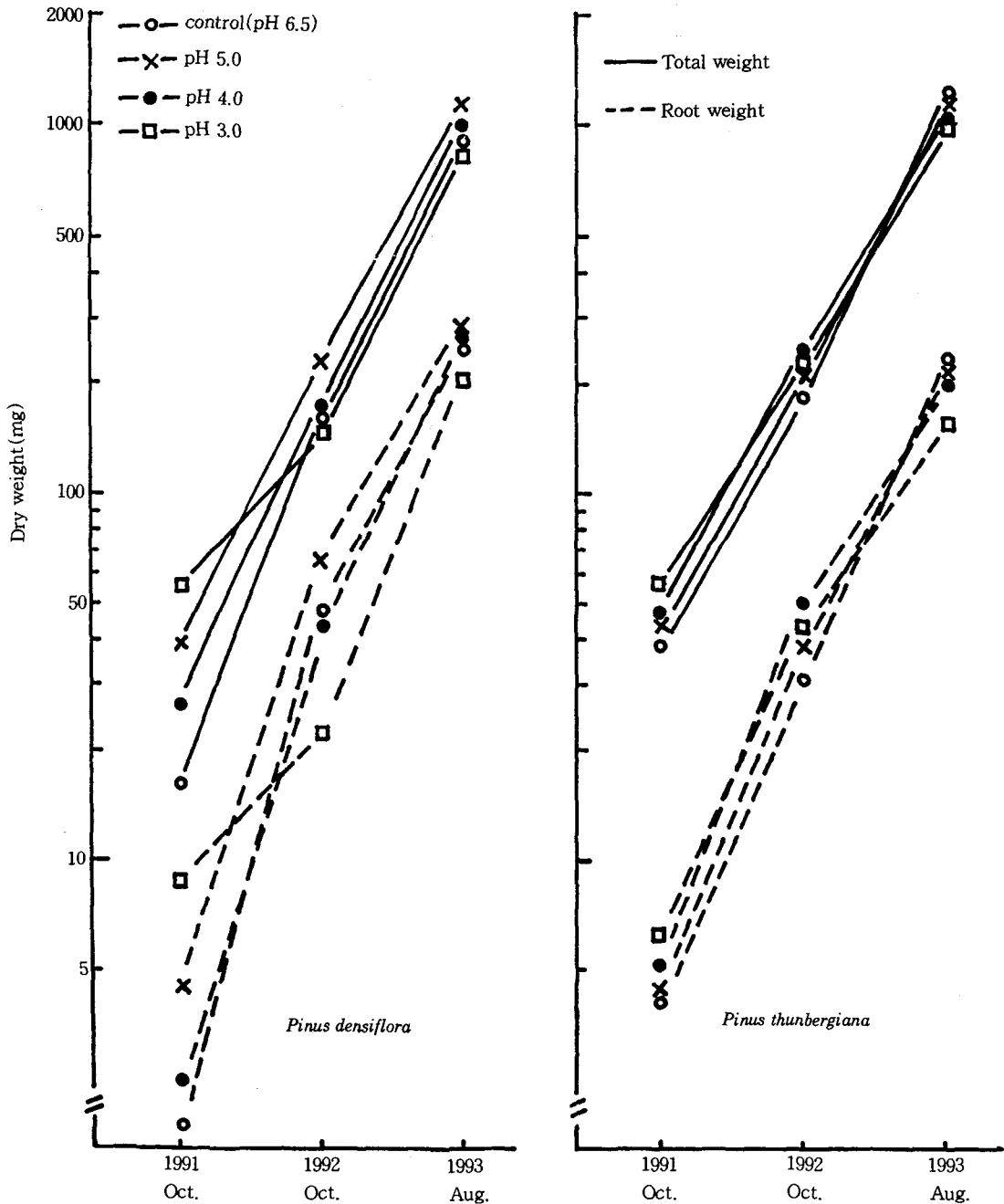


Figure 3. Changes of seedling dry weight(total and root) by the levels of pH for each species.

능력이 앞설 것으로 기대된다. 조사된 엽량은 대체로 모든 수종에서 처리산성우의 산도가 높아질수록 감소하는 경향으로 나타나 산성우가 임목의 엽량감소에 영향을 것으로 생각된다. 조사된 T-R율은 대체로 3년생 묘목의 규격(권 등, 1989; 정, 1991)보다는 약간 큰 값으로 나타났다. 이러한 결과는 분토가 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1:1:1, V/V)으로 보수력이 월등하고 산성우처리로서의 관수량이 충분하여 근계발육이 부진한 데 기인된 것으로 보인다.

이 실험에서의 결과처럼 산성우 처리 초기에는 산성우의 양료로서의 효과가 어느정도 인정되는 부분도 있으나 처리가 진행됨에 따라 처리산성우의 산도가 높을수록 성장관련형질들의 값이 떨어진다. 물론 수종간에 근소한 차이는 있을지언정 계속 산성우가 처리된다면 낮은 산도의 처리구들에서도 생장에 대한 억제효과가 나타날 것으로 판단된다. 또한 장기간에 걸쳐 산성우와 대기오염에 노출된 임목의 성장감소에 대한 보고들(김, 1990, 1991b; Binns & Redfern, 1983; Puckett, 1982; Zadaker, 1988)을 볼 때, 산성우가 임목 생장에 미치는 영향을 쉽게 결론내리기는 매우 어려우며 장기간에 걸친 토양특성과 임목의 성장특성에 관한 야외조사가 절실히 필요하다고 판단된다.

3. 엽량

Table 3에 1993년 8월에 굴취한 묘목들에서 측정된 연령별 엽량의 평균치를 보였다. 대체로 처리산성우의 산도가 높을수록 엽량이 감소하는 경향이나, 곰솔의 경우에는 pH 5.0처리구에서 최대 엽량을 보였으며, 엽령이 어릴수록 엽량이 많았다. 처리산성우의 산도가 높을수록 엽량이 감소하는 경향이 나타나 엽량도 산성우 피해를 야외에서 조사하는 데 필요한 하나의 항목

Table 3. Needle dry weight(mg) by the levels of pH and needle age for each species.

Tree species	Needle-age	control	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
<i>Pinus densiflora</i>	1-year-old	352	441	346	298
	2-year-old	205	259	209	195
<i>Pinus thunbergiana</i>	1-year-old	480	492	465	374
	2-year-old	273	285	192	132
<i>Picea abies</i>	1-year-old	113	—	107	96
	2-year-old	64	—	56	45
	3-year-old	56	—	35	17
<i>Abies holophylla</i>	1-year-old	201	147	104	94
	2-year-old	102	42	52	44
	3-year-old	51	14	20	5

이 되어야 할 것으로 판단된다.

4. 접촉각(contact angle)

1992년 10월에 채취한 소나무와 곰솔의 건조된 엽 시료를 대상으로 측정된 처리별 접촉각의 평균과 통계처리 결과를 Table 4에, 1993년 8월에 채취한 생엽 시료를 대상으로 측정된 처리별 접촉각의 평균과 통계처리 결과를 Table 5에 각각 보였다.

1992년 10월에 채취한 소나무와 곰솔의 건조된 엽 시료를 대상으로 접촉각을 실험한 결과, 엽령에 무관하게 모든 수종에서 처리간 통계적 유의차가 인정되었다. 처리산성우의 pH 값이 낮아질수록 접촉각의 크기는 감소하였다. 1년생의 속생엽(본엽)보다는 2년생의 단엽(자엽)에서 부분적으로 접촉각이 조금 크게 나타났다.

1993년 8월에 채취한 생엽시료를 대상으로 측정된 처리별 접촉각의 평균과 통계처리 결과, 엽령에 무관하게 모든 수종에서 처리간 통계적 유의차가 인정되었다. 처리산성우의 pH 값이 낮아질수록 접촉각의 크기는 감소하는 경향이 뚜렷하였다. 또한 엽령이 증가할수록 뚜렷하게 접촉각이 감소하였다. 대체로 독일가문비, 소나무, 곰솔, 잣나무의 순으로 접촉각이 큰 경향을 보였다.

시료의 조건이나 측정조건 등에 따라 조금씩 차이는 있으나, 처리산성우의 산도수준 간에는 고도의 통계적 유의성이 인정되었다. 이는 접촉각의 측정이 야외에서 침엽수류에 대한 산성우 피해를 조기판단하는 데 필요한 훌륭한 기준이 된다고 사료된다. 이러한 결과는 Cape(1981, 1983)와 국내에서 대도시와 공단지역을 대상으로 조사하여 피해도지수와 접촉각의 높은 상관성을 밝힌 이(1993)의 결과와도 부합되어, 국내의 산

Table 4. Mean values of contact angles by the levels of pH for each species.

Tree species Treatment \needle age	<i>Pinus densiflora</i>		<i>Pinus thunbergiana</i>	
	1-year-old	2-year-old	1-year-old	2-year-old
Control(6.5)	100.3 a	107.9 a	88.1 a	97.0 a
pH 5.0	83.3 b	82.9 b	81.2 b	91.8 ab
pH 4.0	75.0 c	81.4 b	80.2 b	87.5 b
pH 3.0	73.7 c	65.8 c	73.7 c	86.8 b
F-values	71.98**	25.89**	18.23**	2.70*

* and** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

Differences in letters in vertical columns indicate difference at 5% level for Duncan test.

Table 5. Mean values of contact angles by the levels of pH for each species.

Tree species	<i>Pinus densiflora</i>		<i>Pinus thunbergiana</i>		<i>Picea abies</i>			<i>Abies hollophylla</i>		
	1-year	2-year	1-year	2-year	1-year	2-year	3-year	1-year	2-year	3-year
Needle age										
Treatment										
Control(6.5)	90.7 a	77.7 a	86.3 a	81.5 a	93.6 a	87.7 a	82.2 a	82.8 a	77.0 a	69.8 a
pH 5.0	91.9 a	78.1 a	86.1 a	77.6 ab	—	—	—ND	76.3 b	73.0 a	58.8 b
pH 4.0	89.8 a	75.5 a	82.6 a	75.5 b	93.2 ab	88.6 a	78.2 b	65.3 c	68.2 b	55.8 bc
pH 3.0	85.2 b	71.5 b	75.0 b	67.7 c	88.9 b	83.4 b	75.0 b	68.2 c	62.4 b	52.9 c
F-values	7.18**	4.46**	15.17**	19.25**	2.78*	3.96**	6.46**	24.69**	18.88**	23.15**

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively
 Differences in letters in vertical columns indicate difference at 5% level for Duncan test
 —ND mean No data available

Table 6. Mean values of soil pH measured on August 9 and October 20, 1992 by the levels of pH for each species.

pH value of acid rain	Tree species							
	<i>Pinus densiflora</i>		<i>Pinus thunbergiana</i>		<i>Picea abies</i>		<i>Abies hollophylla</i>	
	Jul. 9	Oct. 20	Jul. 9	Oct. 20	Jul. 9	Oct. 20	Jul. 9	Oct. 20
Before treatment	7.47		7.47		7.47		7.47	
After treatment								
Control(6.5)	6.59 a	6.19 a	6.60 a	6.32 a	6.49 a	6.13 a	7.26 a	6.29 a
5.0	6.53 ab	6.07 a	6.48 b	6.12 a	6.45 a	6.11 a	6.37 b	6.19 ab
4.0	6.48 b	6.07 a	6.47 b	6.11 a	6.42 a	6.05 a	6.24 b	6.07 b
3.0	6.47 b	5.81 b	6.41 b	5.86 b	6.30 b	5.76 b	6.12 b	5.87 c
F-values	5.24 *	9.61 **	6.09 *	8.58 **	9.24 **	12.90 **	7.06 *	18.01 **

* and** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively
 Differences in letters in vertical columns indicate difference at 5% level for Duncan test.

성우 피해의 조기판단 기준으로 적합하다는 증거가 될 것이다.

5. 토양산도

1992년 7월과 10월에 채취된 토양산도의 평균치와 통계분석의 결과를 Table 6에 보였다. 모든 수종과 측정시기에서 처리산성우의 pH수준간에 통계적 유의성이 인정되었으며, 그 경향도 뚜렷하였다. 공시토양이 pH 7.47인 좋은 상태의 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1:1:1, V/V)인 때문인지 pH 3.0 처리구를 제외하고는 묘목생장에 직접적으로 영향을 미칠 만큼의 토양산성화는 일어나지 않았다.

비교적 높은 산도(pH 4.0 및 3.0)의 산성우 처리가 진행됨에 따른 각 수종별 토양산도를 Table 7에 보였다. pH 4.0 이상의 처리구들에서는 모든 수종에서 대체로 토양산도가 측정시기에 따라 조금씩 변동을 보이면서 산성화되는 정도는 매우 느리거나 더 이상 산성

Table 7. Change of soil acidity by the levels of pH for each species.

Tree species	Treatment	1991	1991	1992	1992	1993
		Jul.	Oct.	Jul.	Oct.	Aug.
<i>Pinus densiflora</i>	pH 4.0	6.49	6.16	6.48	6.07	6.55
	pH 3.0	6.20	6.14	6.47	6.81	5.07
<i>Pinus thunbergiana</i>	pH 4.0	6.45	6.33	6.47	6.11	6.27
	pH 3.0	6.34	6.05	6.41	5.86	5.35
<i>Picea abies</i>	pH 4.0	6.54	6.28	6.42	6.05	5.62
	pH 3.0	6.34	6.23	6.30	5.76	5.20
<i>Abies hollophylla</i>	pH 4.0	6.64	6.33	6.24	6.07	5.46
	pH 3.0	6.29	6.10	6.12	5.87	4.45

화되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 pH 3.0 처리구에서는 1992년 10월 측정부터 모든 수종에서 토양산도가 급격히 높아지는 경향이며, 이러한 경향은 잣나무와 독일가문비에서 더욱 심하고 곰솔과 소나무에서는 비교적 덜하였다.

Table 8. Relative resistance of tree species to artificial acid rain.

Tree species	Germination & survival rate	Seedling height	Dry weight			Needle injury	Change of soil pH
			Root	Needle	Total		
<i>Pinus densiflora</i>	S	I	T	T	T	S	I
<i>Pinus thunbergiana</i>	S	I	S	T	S	S	T
<i>Picea abies</i>	T	S	I	I	I	T	S
<i>Abies holophylla</i>	T	T	T	S	T	T	S

T ; tolerant, I ; intermediate, S ; susceptible

산성우처리에 따른 토양 pH의 감소는 Kim(1986)과 정(1987)의 보고들에 비하여 훨씬 작았다. 이러한 결과는 민과 이(1990)의 산성우에 의한 토양산도의 변화는 토양조건에 따라 다르며 치환성양이온함량이나 염기포화도가 클수록 완충능이 크다고 설명한 것처럼 공시토양이 vermiculite, perlite 등으로 상당히 치환성양이온함량이나 염기포화도가 컸기 때문에 토양산도의 변화가 작았던 것으로 판단되며, 동일한 재료로 실험한 김(1991)의 결과와 비슷한 경향이였다. pH 3.0 처리구에서는 모든 수종에서 토양산도가 현저하게 높아졌으며, 토양산도의 변화는 곰솔과 잣나무에서는 소나무와 독일가문비에서보다 조금 더 심하였다. 이처럼 토양산도의 변화가 수종별로 조금씩 다른 경향을 나타내는 것은 수종별로 묘목의 크기도 다르고 양묘이용의 유형이 다르기 때문이라 여겨진다. pH 4.0이상의 처리구들에서는 모든 수종에서 대체로 토양산도가 측정시기에 따라 조금씩 변동을 보이면서 산성화되는 정도는 매우 느리거나 더 이상 산성화되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 pH 3.0처리구에서는 1992년 10월 측정부터 모든 수종에서 토양산도가 급격히 높아지는 경향이며, 토양산도의 급격한 변화와 동시에 생장관련 형질들의 변화가 나타났다(Figure 2와 3). 이러한 결과로 보아 산성우의 직접적 피해로 나타나는 침엽의 가지적 피해는 일시적으로 일어날 수도 있으나 보다 근본적이고 광범위한 삼림쇠퇴의 문제는 토양에의 산집적으로 인하여 나타나게 되므로 토양별 완충능력이나 수종별 내성 등의 문제가 복합적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

6. 산성우 처리에 대한 수종별 내성비교

산성우 처리에 대한 반응을 발아 및 득묘율, 묘고생장, 지하부, 엽량 및 개체당 건중량 및 토양산도의 변화 등의 항목별로, 주관적이나 감수성(S ; susceptible), 중용성(I ; intermediate) 및 내성(T ; tolerant)의 3 수준으로 나누어 수종별로 상대적인 내성의 크기를 종합하여 비교하였다(Table 8).

잣나무는 엽량과 토양산도의 변화항목을 제외한 나머지 항목들로 보아 독일가문비, 곰솔 및 소나무에 비하여 비교적 산성우 처리에 대한 내성이 강한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 단기간의 완충능이 큰 혼합토양에 파종한 종자를 대상으로 실험한 것이며, 비교적 산성토양에 견디는 능력이 앞서기 때문이 아닌가 여겨진다. 동일한 소나무류이나 소나무가 곰솔보다는 산성우에 보다 잘 견뎌낼 것으로 보인다. 독일 등의 유럽에서 산성우에 의한 쇠퇴징후로 논란이 되는 독일가문비는 다른 수종들에 비하여 발아 및 득묘율, 엽량 등의 항목에서는 상대적으로 내성이 강한 것으로 나타났다. 한편, 김과 추(1992)는 소나무를 활엽수와 리기다소나무에 비하여 산성우에 대한 내성이 강한 것으로 보고하였으나, 다른 침엽수들과 비교할 때, 발아 및 득묘율에 있어서는 감수성이며, 묘고생장, 토양산도의 변화 항목에서는 내성이 중간인 것으로 나타나 산성우에 대한 내성이 가장 약한 편으로 나타났다. 조사항목에 따라서 수종별로 상이한 반응을 보였으나 종합적으로 판단할 때, 잣나무가 상대적으로 산성우에 대한 내성이 크고, 소나무, 독일가문비의 순으로 산성우에 대한 내성이 작아지며, 곰솔이 산성우 처리에 대한 내성이 상대적으로 가장 약한 것으로 사료된다.

인용 문헌

1. 권희택, 정윤수, 이상식. 1989. 임업종묘학. 서울, 학우사. p 444-445.
2. 김갑태. 1992. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아, 생장 및 침엽에 미치는 영향(1). 응용생태연구 6(1):1-8.
3. 김갑태. 1991. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향(1). 한국임학회지 80(2):237-245.
4. 김갑태. 1988. SO₂에 대한 내성수종의 선발을 위한 기초연구. 1. 엽조직실험. 한국임학회지 77(2):223-238.
5. 김갑태. 1989. SO₂에 대한 내성수종의 선발을 위

- 한 기초연구. 2. 인공산성우 및 산성연무 처리시험. 한국임학회지 78(2):209-217.
6. 김갑태. 1986. 아황산이 은행나무와 현사시의 엽조직에 미치는 영향. 상지대 논문집 7:461-471
 7. 김갑태, 추갑철. 1992. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향(2). 상지대 논문집 13:317-330.
 8. 김재봉, 김태욱, 이경재, 박인협, 김동한, 정연보. 1982. 공단지역의 녹지조성 및 회복에 관한 연구. 국립환경연구소. 64pp.
 9. 김준호. 1991b. 환경오염에 의한 산림의 쇠퇴징후. Pages 3-25., 도시·산림·환경심포지움. 1991. 11. 26. 한국조경학회, 서울. 143pp.
 10. 김준호. 1990. 환경오염에 대처하는 자연생태계 보존전략. Pages 93-118., "폭적인 환경창조를 위한 생태계의 보존" 제 18회 세계환경의 날 기념 심포지움, 1990. 6. 4. 국립환경연구원, 서울. 189pp.
 11. 김준호. 1985. 산성비의 실태와 인간생활에 미치는 영향. 자연보존 49:19-23.
 12. 김정욱. 1983. 대기오염의 지구적인 영향. Pages 49-54., "선진환경을 향한 보전대책" 세계환경의 날 기념 세미나, 1983. 6. 4. 국립환경연구소, 서울.
 13. 김태욱. 1985. 대기오염과 농림업. 한국환경농학회지 4:57-64.
 14. 민일식, 이수욱. 1990. 인공산성우가 산림토양의 완충능에 미치는 영향. 한국임학회지 79(4):376-387.
 15. 박봉규, 이인숙, 최형선. 1983. 서울시에서의 산성우강하에 관한 연구. 한국생활과학연구원논총 32: 137-142.
 16. 이경재. 1993. 산성우 및 대기오염물질에 의한 수목의 생리적인 변화. Pages 49-150, "산성우 및 대기오염물질이 삼림에 미치는 피해의 조기판단에 관한 연구" 과학재단 연구보고서 KOSEF 90-0701-01. 205 pp.
 17. 이돈구, 김갑태. 1986. 인공산성우가 몇 수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향. 서울대 관악수목원연구보고 7:15-21.
 18. 이창근. 1988. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처 연구보고서. 194pp.
 19. 정용문. 1987. 인공산성우가 소나무유묘 및 개나리삼목묘의 생장, 식물체내 함유성 성분 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 동국대 박사학위논문. 70pp.
 20. 정용문. 1991. 인공산성우에 대한 조경수목의 내성 비교. 한국대기보전학회지 7(3):208-228.
 21. Binns, W. O. and D. B. Refern. 1983. Acid rain and forest decline in West Germany. Forestry Commission Res. Dev. Paper 131. 13pp.
 22. Bubenick, D. V. 1984. Acid Rain Information Book. Noyes Data Corp., N, J., 397pp.
 23. Cape, J. N. and D. Fowler. 1981. Changes of epicuticular wax of *Pinus sylvestris* exposed to polluted air. Silva Fennica 5(4):457-458.
 24. Cape, J. N. 1983. Contact angles of water droplets on the needles of Scots pine(*Pinus sylvestris*) growing in polluted atmospheres. New Phytol. 93:263-299.
 25. Cape, J. N., Paterson, I. S., Wellburn, A. R., Wolfenden, J., Mekhorn, H., Freer-Smith, P. H. and S. Fink. 1988. Early Diagnosis of Forest Decline. Institutes of Terrestrial Ecology. 68pp.
 26. Cole, D. W. and D. W. Johnson. 1977. Atmospheric sulfate additions and cation leaching in a Douglas fir ecosystem. Water Resource Research 13(2):313-317
 27. Cowling, E. B. and L. S. Dochinger. 1978. The changing chemistry of precipitation and its effects on vegetation and materials. Amer. Inst. Chem. Eng. 74(175):134-142.
 28. Eckert, R. T. 1988. Genetic variation in red spruce and its relation to forest decline in the Northeastern United States. Pages 319-324 in "Air Pollution and Forest Decline" edited by Bucher, J. B. & I. Bucher-Wallin. Proc. Int. Meet. for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystem. IUFRO. Switzerland.
 29. Evans, L. S. 1984. Botanical aspects of acid precipitation. Bot. Rev. 50:449-490.
 30. Galloway, J. N., G. E. Likens and E. S. Edgerton. 1976. Acid precipitation in the United States ; pH and acidity. Science 194:722-724.
 31. Johnson, D. W., D. D. Richter, H. V. Miegroet and D. W. Cole. 1983. Contribution of acid deposition and natural processes at cation leaching from forest soils:A review. J. A. P. C. A. 33:1036-1041.
 32. Karnosky, D. F. 1988. Air pollution induced

- population change in North American forests. Pages 315-318 in "Air Pollution and Forest Decline" edited by Bucher, J. B. & I. Bucher-Wallin. Proc. Int. Meet. for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystem. IUFRO. Switzerland.
33. Kim, G. T. 1986. Effects of Simulated Acid Rain on Growth and Physiological Characteristics of *Ginkgo biloba* L. Seedlings and on Chemical Properties of the Tested Soil. Seoul National Univ. Ph. D. Paper. 46pp.
 34. Lee, J. J. and D. W. Weber. 1982. Effects of sulfuric acid rain on major cation and sulfate concentrations of water percolating through two model hardwood forests. J. Environ. Qual. 11:57-64.
 35. Lee, J. J. and D. W. Weber. 1979. The effects of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species. Forest Sci. 25:393-398.
 36. Oleksyn, J. 1988. Provenance differentiation as a factor in susceptibility of Scots pine to air pollution. Pages 329-335 in "Air Pollution and Forest Decline" edited by Bucher, J. B. & I. Bucher-Wallin. Proc. Int. Meet. for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystem. IUFRO. Switzerland.
 37. Puckett, L. J. 1982. Acid rain, air pollution and tree growth in southeastern New York. J. Environ. Qual. 11:376-381.
 38. Riding, R. T. and K. E. Percy. 1985. Effects of SO₂ and other air pollutants on the morphology of epicuticular waxes on the needles of *Pinus strobus* and *Pinus banksiana*. New Phytol. 99:555-563.
 39. Rinalls, C., Raddi, P. and V. de Lonards. 1986. Effects of simulated acid deposition on the surface structure of Norway spruce and silver fir needles. Europ. J. For. Path. 16: 440-446.
 40. Scholz, F. 1988. Genetic research in forest decline implications for non-gen-etic investigations. Pages 325-328 in "Air Pollution and Forest Decline" edited by Bucher, J. B. & I. Bucher-Wallin. Proc. Int. Meet. for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystem. IUFRO. Switzerland.
 41. Scholz, F. and S. Reck. 1977. Effects of acids on forest trees as measured by titration in Vitro, inheritance of buffering capacity in *Picea abies*. Water, Air and Soil Pollution 8:41-45.
 42. Siwecki, R. and L. Rachwal. 1988. Selection and conservation of forest tree genotypes more tolerant to industrial pollution. Pages 329-333 in "Air Pollution and Forest Decline" edited by Bucher, J. B. & I. Bucher-Wallin. Proc. Int. Meet. for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystem. IUFRO. Switzerland.
 43. Zedaker, S. M., Nicholas, N. S. and C. Eagar. 1988. Assessment of forest decline in the Southern Appalanchian spruce-fir forest, USA. Pages 334-338 in "Air Pollution and Forest Decline" edited by Bucher, J. B. & I. Bucher-Wallin. Proc. Int. Meet. for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Eco-system. IUFRO. Switzerland.