

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

김갑태²

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

Gab-Tae Kim²

요 약

인위적으로 산도를 조절한 인공산성우처리가 4수종의 종자발아와 생장, 잎의 피해, 묘목생장에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 혼합토양을 채운 pot에 종자를 파종하고, 황산을 지하수로 묽힌 pH 3.0, 4.0 및 5.0의 인공산성우를 처리하면서 종자발아율, 엽피해율, 토양산도 및 묘목생장을 측정하여 처리간 비교분석한 결과는 다음과 같다.

1. 곰솔은 pH 4.0 처리구에서, 독일가문비는 pH 3.0 처리구에서 각각 발아 및 득묘율이 가장 높았고, 소나무와 잣나무에서는 처리간 유의차가 없었다.
2. 묘고생장에 있어서 모든 수종에서 처리간 통계적 유의성이 인정되지 않았다.
3. 개체당 건중량에서 소나무에서는 처리간 통계적 유의차가 인정되었으나, 곰솔에서는 통계적 유의차가 인정되지 않았다.
4. 처리산성우의 pH 값이 작아질수록 피해엽수 및 피해개체수가 증가하는 경향이 있었다.
5. 토양산도는 대체로 모든 수종에서 처리간 통계적 유의차가 인정되었다.

ABSTRACT

Artificial acid rain (pH 3.0, 4.0 and 5.0) was treated on the seeded pots of 4 species to examine its effects on germination, leaf injury and seedling growth. 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 three times per week. About 5mm of artificial acid rain was treated each time from early April to early October, 1991. Germination, seedling establishment, leaf injury, soil acidity and seedling growth

1 접수 1992년 5월 20일 Received on May 20, 1992

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

* 이 연구는 한국과학기술재단의 1990년도 목적기초연구비의 지원으로 수행되었음

were measured and compared among the treatments. The results were summarized as follows:

1. Germination and seedling establishment rate of *Pinus thunbergiana* was highest on the pH 4.0 pot whereas that of *Picea abies* was highest on the pH 3.0 pot. Those of *Pinus densiflora* and *Abies holophylla* were not significantly differed among the treatments.
2. The differences in seedling height of all species were not significantly differed among the treatments.
3. Seedling dry weight of *Pinus densiflora* differed significantly among the treatments, but that of *Pinus thunbergiana* did not differ.
4. With decrease of pH value of artificial acid rain, the number of injured needle and injured individual tended to be increased.
5. The differences of soil acidity were significant among the treatments for all species.

Key-Words : Artificial acid rain, seed germination, seedling growth, leaf injury

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 산성우가 보고되는 등으로 대도시와 공단지역 주변에서의 대기오염문제는 커다란 난제로 떠올랐다. 이러한 산성우현상은 광범위한 지역에 걸쳐 영향을 미치며, 주로 산성의 대기오염물질들(SO_x, NO_x, Cl₂...)이 강수물에 녹아들어 이온화(SO₄²⁻, 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 가시적 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 선진공업국

들은 물론 광범위한 지역에서 삼림이 고사하고 있으며, 그 원인이 대기오염에 기인한 산성우나 산성연무에 있음이 밝혀졌다(Binns와 Redfern, 1983).

우리나라에서도 산성우에 대한 보고서가 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; 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 낙엽이 되는 경향), 3) 침엽의 수명 단축(2년생 잎이 없고 1년생 잎만 남음), 4) 뿌리의 비정상적 생장(뿌리가 산호상으로 굴곡함), 5) 년륜과 신초의 생장저하(년륜 폭이 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).

본 연구는 흔히 자라거나 조립되는 소나무, 곰솔, 잣나무 및 독일가문비를 대상으로 인위적으로 산도를 조절한 인공산성우를 처리하면서 수종별 종자발아율, 잎의 피해, 유묘의 생장을 조사·비교함으로써 수종별 인공산성우의 산도별 발아 및 득묘율, 유묘생장, 토양산도의 변화 및 엽피해를 정확히 파악하여, 몇 침엽 수종이 산성우에 의해 영향받는 것을 어느 정도 추정할 수 있으며, 아울러 그 대책을 수립하는 데 기초자료를 얻고자 시도하였다.

재료 및 방법

가. 식물재료

식물재료는 우리나라에서 흔히 자라거나 조림하는 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 조절한 인공산성우와 대조구로 지하수를 처리하였다. 대상수종의 종자산지를 Table 1에 보였다.

나. 처리 및 측정방법

인공산성우와 지하수의 처리는 4월 초순부터 10월 초순까지는 주 3회, 1회 5mm의 강우강도로, 10월 중순부터 3월 하순까지는 주 1회, 1회 5mm의 강도로 처리하며, 인공산성우는 황산을 지하수(pH6.5)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.

수종별로 발아개체수 및 잔존묘목수를 발아가 시작된 5월 20일 이후부터 격주로 조사하였으며, 선택된 개체들로부터 침엽의 피해율을 김(1991)과 동일한 방법으로 조사하였다. 묘목생장은 10월 중순에 묘목을 굴취하여 묘고 및 건중량을 측정한다. 측정·조사된 자료를 통계분석하여 수종 및 산도별로 비교·검토하였다.

결과 및 고찰

1. 수종별 시기별 묘목수

Table 2에 수종별 및 시기별 묘목수(발아개체수)의 평균치와 통계분석의 결과를 보였다. 소나무와 잣나무는 전 조사기간을 통해 처리간의 통계적 유의성이 인정되지 않았고, 곰솔과 독일가문비는 일부 조사기간에서 각각 유의차가 인정되었으나, 나머지 시기에서는 처리간에 통계적 유의성이 인정되지 않았다. 대체로 모든 수종이 7월 1일과 7월 15일 사이에서 최대발아개체수를 보였다가 감소하는 경향이었다. 곰솔에서는 pH 4.0, 독일가문비에서는 pH 3.0 처리구에서 각각 발아 및 득묘율이 가장 높았으며, 잣나무와

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

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

소나무의 발아 및 득묘율에서는 처리간 유의차가 없었다.

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 산성물질에 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

소나무와 곰솔에 대한 묘고, 건중량(지상부, 지하부 및 개체당건중량)과 T-R율의 평균과 분산비 등의 통계분석 결과를 Table 3에 보였다. 독일가문비와 잣나무는 발아 및 득묘본수가 적어서 계속적인 실험을 위하여 묘목을 굴취하여 행하는 생장형질을 조사하지 못하였다. 소나무에서는 지상부, 지하부 및 개체당 건중량에서 각각 처리간 통계적 유의차가 인정되었으나, 곰솔에서는 생장관련 형질에 대한 처리간 통계적 유의성이 인정되지 않았다.

묘고의 경우 처리간 통계적 유의차가 인정되지 않았으며, 소나무는 pH 5.0 처리구에서, 곰솔은 pH 3.0 처리구에서 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 김 등(1982), 이와 김(1986), 김(1991) 및 Lee와 Weber(1979)가 종자를 파종하고 산성우를 처리하여 묘고를

Table 2. Mean values of seedling numbers by the levels of pH for each species.

Tree Species	pH value of acid rain	Date										
		May. 20	Jun. 3	Jun. 17	Jul. 1	Jul. 15	Jul. 29	Aug. 12	Aug. 26	Sep. 9	Sep. 23	Oct. 7
<i>Pinus densiflora</i> (20) ⁺	Control(6.5)	8.8	17.5	18.8	18.5	18.5	18.5	18.3b	16.8	16.0	15.0	15.0
	5.0	6.5	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.5	16.3	15.5	15.3	15.0
	4.0	3.3	17.8	18.5	18.5	18.8	18.5	18.5	16.8	13.8	13.5	12.8
	3.0	6.5	18.5	19.0	19.0	19.0	18.8	18.8	17.8	15.3	13.3	12.8
	F-values	1.09	1.85	1.75	2.04	2.04	1.74	1.69	0.51	1.38	1.17	1.36
<i>Pinus thunbergiana</i> (20) ⁺	Control(6.5)	4.3	17.8	18.3	18.3	18.0a	18.0a	18.0	17.8	17.5	16.3a	16.3
	5.0	7.3	17.8	19.3	19.3	19.0ab	19.0ab	19.0	18.5	17.5	16.8a	16.8
	4.0	6.8	19.0	19.5	19.8	19.8b	19.8b	19.5	19.5	19.3	19.0b	18.8
	3.0	7.8	19.0	18.5	18.8	18.8ab	18.8ab	18.5	18.5	18.0	17.5ab	17.5
	F-values	1.10	2.17	1.26	1.81	3.33*	3.33*	2.00	2.54	3.05	3.73*	2.44
<i>Picea abies</i> (20) ⁺	Control(6.5)	1.7	1.7ab	1.7ab	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	5.0	1.0	1.0a	1.0a	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	4.0	2.0	2.0ab	2.0ab	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
	3.0	3.0	3.3b	3.5b	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
	F-values	2.84	3.39*	3.56*	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88
<i>Abies holophylla</i> (20) ⁺	Control(6.5)	1.5	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	5.0	2.3	1.8	1.8	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	4.0	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
	3.0	1.3	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	F-values	0.81	0.33	0.36	0.36	0.36	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

+ is the number of seeds

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

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

Table 3. Mean values of seedling growth (tree height: total, top and root dry weight: T-R ratio) 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	root	total	
<i>Pinus densiflora</i>	Control(6.5)	5.6	13.8a	1.8a	15.6a	7.7
	5.0	6.6	35.2ab	4.5a	39.8ab	8.1
	4.0	5.6	23.5ab	2.4a	25.9ab	10.1
	3.0	6.2	42.1b	8.5b	50.6b	6.0
	F-values	1.90	7.50**	9.38**	8.26**	2.45
<i>Pinus thunbergiana</i>	Control(6.5)	7.2	35.4	4.1	39.4	8.5
	5.0	8.3	39.4	4.2	43.6	9.2
	4.0	7.6	43.4	5.3	48.7	8.4
	3.0	8.8	49.3	6.2	55.5	8.4
	F-values	2.46	0.85	2.03	0.98	0.23

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

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

조사·보고한 것과, Evans(1984)의 작물종에 따른 상이한 성장반응을 설명한 것과 같은 경향으로 산성우처리가 묘고생장에 미치는 영향은 수중에 따라 차이가 심한 것으로 판단된다.

개체당 건중량의 경우, 소나무에서는 1% 유의수준에서 통계적 유의차가 인정되었으나, 곰솔에서는 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 소나무와 곰솔 모두 pH 3.0 처리구에서 최대건중량을 보였다. 이러한 결과는, Evans(1984)의 설명처럼 짧은 기간 동안의 산성우 처리시험에서는 극단적으로 낮은 pH의 산성우가 아니면 산성우 중의 sulfate나 nitrate 등이 양료로서의 효과가 해작용보다 크게 작용하여, 대체로 생장에 좋은 영향을 미친 것으로 생각된다. 그러나 장기간에 걸쳐 산성우와 대기오염에 노출된 임목의 성장감소에 대한 보고들(김, 1990, 1991; Binns & Redfern, 1983; Puckett, 1982; Zadaker, 1988)을 볼 때, 산성우가 임목생장에 미치는 영향을 쉽게 결론 내리기는 매우 어려우며 장기간에 걸친 야외실험이 절실히 필요하다고 판단된다.

조사된 T-R율은 대체로 1-0묘의 규격(권 등, 1989; 정, 1991)보다는 큰 값으로 나타났다. 이러한 결과는 분토가 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1:1:1, V/V)으로 보수력이 월등하고 산성우 처리로서의 관수량(3회/주; 5mm/회)이 충분하여 근계발육이 부진한데 기인된 것으로 보인다.

3. 엽피해율과 고사한 개체수

엽피해율은 피해엽의 수와 피해엽이 나타난 개체수로 나타내었으며, 고사한 개체수도 함께 조사하였다. 가시적 엽피해는 8월 중순경부터 소나무, 곰솔 등에서 나타나기 시작했다. 최대발아개체수를 보인 7월 초순 이후부터 묘목의 근원부가 약해지면서 고사하는 개체가 나타났으나, 그 원인이 산성우처리에만 의한 것이라고 보기는 어려웠다. Table 4에 수종별 및 측정시기

별로 피해엽의 수, 피해엽이 나타난 개체수 및 고사한 개체수의 평균을 보였다. 고사한 개체수는 누계치로 나타내었으며, 10월 7일의 자료는 그 이전에 발생한 누계치이다. 대체로 처리산성우의 pH값이 작아질수록 피해가 나타난 침엽의 수와 피해엽이 나타난 개체수는 증가하는 경향이 뚜렷하였다. 그러나 고사한 개체수의 경우는 일정한 경향이 없었다. 이러한 결과는 김(1991)이 낙엽송, 삼나무, 잣나무 및 종비나무에서의 결과와는 비슷한 경향이나, Kim(1986)이 pH 2.0-5.0의 인공산성우를 은행나무에 처리하여 보고한 것 보다는 월등히 높았다. 이는 실험의 대상수종들의 잎의 형태나 표피구조가 다르고 실험조건이 차이가 있기에 나타난 것이라 여겨진다.

4. 토양산도

7월 9일과 10월 20일에 채취된 토양산도의 평균치와 통계분석의 결과를 Table 5에 보였다. 독일가문비의 10월 측정을 제외한 모든 수종과 측정시기에서 처리산성우의 pH수준간에 통계적 유의성이 인정되었으며, 그 경향도 뚜렷이 나타났다. 그러나 대체로 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 경향이었다. 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 다르

Table 4. Mean values of the number of injured needles, injured individuals, and dead individuals measured on October 20, 1991 by the levels of pH for each species.

Tree species	Number of injured needles (injured individuals / dead individuals)			
	control	pH 5.0	pH 4.0	pH 3.0
<i>Pinus densiflora</i>	1.3 (0.3 / 5.0)	15.0 (6.5 / 5.0)	19.5 (4.5 / 7.2)	22.8 (6.5 / 7.2)
<i>Pinus thunbergiana</i>	1.0 (0.5 / 3.7)	2.9 (1.3 / 3.2)	11.0 (2.9 / 1.2)	19.9 (4.3 / 2.5)
<i>Picea abies</i>	0.0 (0.0 / 0.0)	0.0 (0.0 / 0.0)	0.0 (0.0 / 0.3)	0.0 (0.0 / 0.0)
<i>Abies holophylla</i>	0.0 (0.0 / 0.3)	0.0 (0.0 / 0.0)	0.0 (0.0 / 0.0)	0.0 (0.0 / 0.3)

Table 5. Mean values of soil pH measured on August 9 and October 20, 1990 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 holophylla</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)	7.37a	6.62a	7.11a	6.70a	7.44c	6.40	7.28a	6.50a
5.0	6.74b	6.20b	6.61ab	6.39b	6.79b	6.39	6.98a	6.37ab
4.0	6.49b	6.16b	6.45b	6.33b	6.54bc	6.28	6.64b	6.33b
3.0	6.20c	6.14b	6.34b	6.05c	6.34c	6.23	6.29c	6.10c
F-values	28.36**	25.30**	4.25**	21.94**	13.87**	2.87	16.06**	15.90**

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

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

고 양료이용의 유형이 다르기 때문이라 여겨진다.

5. 산성우처리에 대한 수종별 내성비교

산성우처리에 대한 반응을 발아 및 득묘율, 묘고생장, 개체당건중량, 침엽의 피해를 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 6).

독일가문비와 잣나무는 생장관련자료가 빠져있으나 나머지 항목들로 보아 곰솔과 독일가문비는 소나무와 잣나무에 비하여 비교적 내성이 강한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 단기간의 완충능이 큰 혼합 토양에 파종한 종자를 대상으로 실험한 것이며, 비교적 산성토양에 견디는 능력이 앞서기 때문이 아닌가 여겨진다. 동일한 소나무류이나 곰솔이 소나무보다

내성이 강할 것이라 판단된다. 독일 등의 유럽에서 산성우에 의한 쇠퇴징후로 논란이 되는 독일가문비는 다른 수종들에 비하여 발아 및 득묘율, 엽피해를 및 토양산도의 변화 등의 항목에서는 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 득묘율, 묘고생장 및 침엽의 피해율에 있어서는 감수성이며, 토양산도의 변화 항목에서는 내성이 중간인 것으로 나타나 산성우에 대한 내성이 가장 약한 것으로 나타났다. 조사항목에 따라서 수종별로 상이한 반응을 보였으나 종합적으로 판단할 때, 독일가문비가 상대적으로 산성우에 대한 내성이 크고, 곰솔, 잣나무의 순으로 산성우에 대한 내성이 작아지며, 소나무가 산성우에 대한 내성이 상대적으로 가장 약한 것으로 사료된다.

Table 6. Relative resistance of tree species to artificial acid rain.

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

T: tolerant, I: intermediate, S: susceptible, -: no data available

인용문헌

1. 권퇴택, 정윤수, 이상식. 1989. 임업종묘학. 서울, 학우사, 444-445pp.
2. 김갑태. 1986. 아황산이 은행나무와 현사시의 업 조직에 미치는 영향. 상지대 논문집 7 : 461-471
3. 김갑태. 1988. SO₂에 대한 내성수종의 선발을 위한 기초연구. 1. 업조직실험. 한국임학회지 77(2) : 223-238.
4. 김갑태. 1989. SO₂에 대한 내성수종의 선발을 위한 기초연구. 2. 인공산성우 및 산성 연무 처리시험. 한국임학회지 78(2) : 209-217.
5. 김갑태. 1991. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자 발아와 묘목생장에 미치는 영향(1). 한국임학회지 80(2) : 237-245.
6. 김갑태, 추갑철. 1992. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향(2). 상지대 자연과학논총 6 : 인쇄중
7. 김재봉, 김태욱, 이경재, 박인협, 김동한, 정연보. 1982. 공단지역의 녹지조성 및 회복에 관한 연구. 국립환경연구소, 64pp.
8. 김준호. 1985. 산성비의 실태와 인간생활에 미치는 영향. 자연보존 49 : 19-23.
9. 김준호. 1990. 환경오염에 대처하는 자연생태계 보존전략. Pages 93-118., "쾌적한 환경창조를 위한 생태계의 보존" 제18회 세계환경의 날 기념 심포지움, 1990. 6. 4. 국립환경연구원, 서울, 189pp.
10. 김준호. 1991. 환경오염에 의한 산림의 쇠퇴징후. Pages 3-25. , 도시·산림·환경심포 지움. 1991. 11. 26. 한국조경학회, 서울, 143pp.
11. 김정욱. 1983. 대기오염의 지구적인 영향. Page 49-54. , "선진환경을 향한 보전대책" 세계환경의 날 기념 세미나, 1983. 6. 4. 국립환경연구소, 서울.
12. 김태욱. 1985. 대기오염과 농림업. 한국환경농학회지 4 : 57-64.
13. 민일식, 이수욱. 1990. 인공산성우가 산림토양의 완충능에 미치는 영향. 한국임학회지 79(4) : 376-387.
14. 박봉규, 이인숙, 최형선. 1983. 서울시에서의 산성우강하에 관한 연구. 한국생활과학 연구원논총 32 : 137-142.
15. 이돈구, 김갑태. 1986. 인공산성우가 몇 수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향. 서울대 관악수목원연구보고 7 : 15-21.
16. 이창근. 1988. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처 연구보고서, 194pp.
17. 정용문. 1991. 인공산성우에 대한 조경수목의 내성 비교. 한국대기보전학회지 7(3) : 208-228.
18. 정용문. 1987. 인공산성우가 소나무유묘 및 개나리삽목묘의 생장, 식물체내 함유성 성분 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 동국대 박사학위 논문, 70pp.
19. Binns, W.O. and D.B. Refern. 1983. Acid rain and forest decline in West Germany. Forestry Commission Res. Dev. Paper 131. 13pp.
20. Bubenick, D.V. 1984. Acid Rain Information Book. Noyes Data Corp., N.J., 397pp.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Evans, L.S. 1984. Botanical aspects of acid precipitation. Bot. Rev. 50 : 449-490.
25. Galloway, J.N., G.E. Likens and E.S. Edger-ton. 1976. Acid precipitation in the United States: pH and acidity. Science 19 : 722-724.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
 29. 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.
 30. 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.* 2 : 393-398.
 31. 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.
 32. Puckett, L.J. 1982. Acid rain, air pollution, and tree growth in southeastern New York. *J. Environ. Qual.* 11 : 376-381.
 33. Scholz, F. 1988. Genetic research in forest decline implications for non-genetic 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.
 34. 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.
 35. Zedaker, S.M., Nicholas, N.S. and C. Eagar. 1988. Assessment of forest decline in the Southern Appalachian 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 Ecosystem. IUFRO, Switzerland.