

人工酸性雨が 몇 樹種의 種子發芽, 幼根生長 및 苗木生長에 미치는 影響^{1*}

金 甲 泰²

Effects of Artificial Acid Rain on Seed Germination, Radicle Growth and Seedling Growth of Several Woody Species^{1*}

Gab-Tae Kim²

要 約

인위적으로 농도를 조절한 Al용액과 인공산성우처리가 4수종의 종자발아와 유근의 성장, 잎의 피해, 묘목생장에 미치는 영향을 알아 보고자, 혼합토양을 채운 pot와 발아 시험기에 종자를 파종하였다. 황산을 지하수로 묽힌 pH3.0, 4.0 및 5.0의 인공산성우와 지하수 및 Al용액(0.5, 1.0 및 2.5 mM aluminum ammoniumsulfate)을 처리하면서 종자발아율, 유근생장, 엽피해율 및 묘목생장을 측정하여 처리간 비교분석한 결과는 다음과 같다.

1. 소나무는 pH5.0 처리구에서, 가중나무는 대조구에서, 함박꽃나무는 pH3.0 처리구에서 각각 발아 및 득묘율이 가장 높았다.
2. 묘목생장에 있어서 소나무와 리기다소나무에서는 처리간 통계적 유의차가 인정되었으나, 함박꽃나무와 가중나무에서는 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 소나무와 리기다소나무는 pH3.0 처리구에서, 함박꽃나무는 pH4.0 처리구에서, 가중나무는 대조구에서 각각 묘고가 가장 크게 나타났다.
3. 개체당 건중량에서 소나무, 리기다소나무 및 가중나무에서는 처리간 통계적 유의차가 인정되었으나, 함박꽃나무에서는 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 함박꽃나무와 가중나무는 pH4.0 처리구에서, 소나무는 pH3.0 처리구에서, 리기다소나무는 pH5.0 처리구에서 각각 최대건중량을 보였다.
4. 처리산성우의 pH값이 작아질수록 피해엽수 및 피해개체수가 증가하는 경향이였다.
5. 토양산도는 모든 수종에서 처리간 고도의 통계적 유의차가 인정되었다.
6. 소나무의 유근생장은 용액의 산도와 Al농도간에 통계적 유의차가 인정되었다.

ABSTRACT

Artificial acid rain(pH2.0, 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. Aluminum ammonium sulfate solution(0.5, 1.0 and 2.5mM) and artificial acid rain(pH3.0, 4.0 and 5.0) were treated on the seeded germinators of 3 species to examine its effects on germination and radicle growth. Artificial acid rain was prepared by diluting sulfuric acid with ground water and ground water(pH6.5) was used as control. Artificial acid rain was sprayed to

¹ 接受 1992年 1月 3日 Recieved on January 3, 1992.

² 尙志大學校 農科大學 College of Agriculture, Sangji University, Wonju 220-702, Korea.

* 이 연구는 문교부 학술진흥재단의 1990년도 지방대학육성연구비의 지원으로 수행 되었음.

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, radicle growth, leaf injury and seedling growth were measured and compared among the treatments. The results were summarized as follows :

1. Germination, seedling establishment rate of *Pinus densiflora* were highest on the pH5.0 pot whereas those of *Ailanthus altissima* was highest on the control pot, and those of *Magnolia sieboldii* showed the highest value on the pH3.0 pot.
2. The differences in seedling height of *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* were significant among the treatment levels of acid rain, whereas those of *Magnolia sieboldii* and *Ailanthus altissima* were not significant. Seedling heights of *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* were highest on the pH3.0 pot, and that of *Magnolia sieboldii* was highest on the pH4.0 pot, and that of *Ailanthus altissima* was highest on the control pot.
3. Seedling dry weights of *Pinus densiflora*, *Pinus rigida*, and *Ailanthus altissima* differed significantly among the treatments, but that of *Magnolia sieboldii* did not differ. Highest seedling dry weights of *Magnolia sieboldii* and *Ailanthus altissima* were observed on the pH4.0 pot, and that of *Pinus densiflora* was observed on the pH3.0 pot, and that of *Pinus rigida* was observed on the pH5.0 pot.
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 in effects of soil acidity were highly significant among the treatments for all species.
6. Radicle growth of *Pinus densiflora* differed significantly among pH levels and aluminum concentrations.

Key words : Artificial acid rain, seed germination, seedling growth, radicle growth.

緒 論

화석연료의 대량소비를 발생시킨 대기오염물질이 산성기류나 꿀뜩을 높임으로 하여 광범위한 지역으로 확산되고, 이들이 강수물에 녹아들거나 씻겨내려 pH5.65 미만의 높은 산도를 보이는 것을 산성우(acid precipitation 또는 acid rain)라 한다. 우리나라에서도 1960년대 공업화를 시작한 이후 대기오염은 점차 심해져 왔으며, 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(SO₄⁻, NO₃⁻, Cl⁻...)하기 때문인 것으로 알려졌다(Cowling & Dochinger, 1987; 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 피해를 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 있음이 밝혀졌다.

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 있다(김 등, 1982; 이와 김, 1986; 정, 1987; 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 성장저하(년륜폭이 좁아지고 신초가 짧아짐으로 순생산량이 감소됨), 6) 고사의 순으로 나타난다고 밝혔으며(김, 1990), 서울시를 중심으로 외곽으로 갈수록 토양산도가 높아지고 토양중의 Ca 함량은 낮아지고 Al함량은 상대적으로 높아짐도 밝혀졌다(김, 1991).

본 연구는 흔히 식재되는 소나무, 리기다소나무, 함박꽃나무, 가중나무를 대상으로 인위적으로 농도를 조절한 Al용액과 인공산성우를 처리하면서 수종별 종자발아율과 유근의 생장, 잎의 피해, 유근의 생장을 조사, 비교함으로써 삼림의 쇠퇴징후인 뿌리의 비정상적 생장의 원인구명, 수종별 Al농도와 산도별 뿌리의 생장반응, 수종별 인공산성우의 산도별 생장 및 엽피해율을 정확히 파악하여, 삼림의 산성우에 의한 영향을 어느정도 추정할 수 있으며, 아울러 그 대책을 수립하는데 기초자료를 얻고자 하였다.

材料 및 方法

1. 공시재료

1990년 가을에 채취하여 기건보관(氣乾保管)하던 소나무, 리기다소나무, 함박꽃나무, 가중나무 등의 정선된 종자를 1991년 3월에 노천매장(露天埋藏)하였다. 1991년 4월 초순에 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1 : 1 : 1, V/V)을 채운 plastic pot(상부직경 15, 하부직경 10, 높이 11cm)에 이들 종자를 각각 20립씩 파종하고 상지대학 구내의 포장에 천연강우를 차단한 파종상에 배치하여 시험하였다. 이와 함께 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1 : 1 : 1, V/V)을 채운 발아시험기에 20립씩의 종자를 파종하여 incubator (25°C)에 배열하고 주 2-3회 농도를 조절한 Al용액과 인공산성우를 처리하면서 수종별 종자발아율과 유근의 생장을 조사하였다. 소나무, 리기다소나무, 함박꽃나무, 가중나무 등의 종자는 강원도 춘성군, 충청북도 제원군, 강원도 치악산, 강원도 원주시에서 각각 1990년 가을에

채종하였다.

2. 處理 및 測定方法

2-1. 실험시법

파종 당일인 1991년 4월 초순부터 10월 초순까지 주 3회, 1회 5mm씩의 인공산성우와 대조구로 지하수를 spray하였다. 인공산성우는 황산을 지하수로 묽혀 pH2.0 3.0, 4.0 및 5.0이 되도록 만들었으며, 대조구로 지하수(pH6.5)를 이용하였다. 처리산도 5수준, 4수종, 3반복의 난괴법(亂塊法)으로 실험설계하였으며, 각 plot 당 3개씩의 plastic pot를 배치하였다. 각 pot 당 20립의 종자를 파종하였다.

수종별로 발아한 개체수 및 잔존묘목수를 발아가 시작된 이후부터 격주로 조사하였으며, 선택된 개체들로부터 엽피해율(피해가 나타난 침엽의 수, 피해가 나타난 개체수 및 고사한 개체수)을 Gumpertz 등(1982)의 방법에 준하여 조사하였다. 묘목생장은 처리가 종료된 10월 중순에 묘목을 굴취하여 묘고 및 건중량을 측정하였다. 분토의 산도는 처리가 진행중인 7월 초순과 처리가 끝난 10월 초순에 각각 토양을 채취하여 pH-meter로 측정하였다. 측정, 조사된 자료를 통계분석하여 수종 및 처리별로 비교, 검토하였다.

2-2. 기내발아시험

1991년 4월 초순에 혼합토양(perlite : vermiculite : sand, 1 : 1 : 1, V/V)을 채운 발아시험기에 소나무, 함박꽃나무 및 가중나무의 종자를 20립씩 파종하여 incubator (25°C)에 배열하고 주 2-3회 농도를 조절한 Al용액과 인공산성우를 처리하면서 수종별 종자발아율과 유근의 생장을 조사하였다. Al용액은 aluminum ammonium sulfate를 지하수에 녹혀 0.5, 1.0 및 2.5mM이 되도록 만들었으며, 인공산성우는 황산을 지하수로 묽혀 pH3.0, 4.0 및 5.0이 되도록 만들었으며, 대조구로 지하수(pH 6.5)를 이용하였다. Al용액과 인공산성우를 주 2-3회 교환해 주면서, 수종별 발아개체수와 유근의 길이를 측정비교하였다.

결과 및 고찰

1. 수종별 시기별 묘목수

Table 1에 수종별 및 시기별 묘목수(발아개체

Table 1. 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)	8.0	16.0	16.7	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	16.3	15.7
	pH5.0	10.0	17.7	18.3	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	18.3	16.7	16.7
	pH4.0	4.7	15.7	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	16.0	14.7	13.7
	pH3.0	12.0	16.0	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.0	16.0	13.0
	pH2.0	10.7	18.0	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	17.3	15.7	12.7
	F-values	2.04	2.02	2.14	1.50	1.31	1.31	1.31	1.31	0.72	0.62	2.05
<i>Pinus rigida</i> (20)*	Control(6.5)	0.3a	14.0	16.0	15.7	15.7	16.0	16.3	16.0	14.7	12.7	12.0
	pH5.0	2.3ab	14.7	15.3	16.0	16.0	16.0	15.7	15.7	15.0	12.7	12.0
	pH4.0	0.3a	12.0	14.3	14.0	12.0	12.0	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
	pH3.0	1.0a	14.7	17.0	17.0	17.0	17.0	16.0	16.0	14.7	12.7	12.0
	pH2.0	3.3b	17.0	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.3	13.3	9.7	9.3
	F-values	4.94*	0.82	1.09	1.43	2.29	1.85	2.25	2.07	0.82	0.78	0.87
<i>Magnolia sieboldii</i> (20)*	Control(6.5)	-	-	3.0	3.0	3.3	3.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
	pH5.0	-	-	3.0	3.7	3.7	3.7	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	pH4.0	-	-	3.7	3.7	4.0	4.0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	pH3.0	-	-	3.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	pH2.0	-	-	1.3	3.0	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	F-values	-	-	1.48	0.60	0.80	0.80	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
<i>Ailanthus altissima</i> (20)*	Control(6.5)	-	1.0	5.3a	5.3	5.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	pH5.0	-	2.0	2.7ab	3.0	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	pH4.0	-	1.0	1.0b	1.0	2.7	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	pH3.0	-	1.0	2.0ab	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	pH2.0	-	1.0	1.7b	1.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	F-values	-	1.00	3.29*	2.64	2.29	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14

- 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.

수)의 평균치와 통계분석의 결과를 보였다. 소나무와 함박꽃나무는 전 조사기간을 통해 처리간의 통계적 유의차가 인정되지 않았고, 리기다소나무와 가중나무는 5월 20일과 6월 17일 측정치에서만 각각 유의차가 인정되었으나, 나머지 시기에서는 처리간에 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 대체로 모든 수종이 7월 1일과 7월 15일 사이에서 최대발아개체수를 보였다가 감소하는 경향이였다. 가중나무에 있어서는 7월 29일경 pH2.0 처리구에서는 모두 고사하였으며, 대조구에서 발아 및 득묘율이 가장 높았다. 소나무에서는 pH5.0, 함박꽃나무에서는 pH3.0 처리구에서 각각 발아 및 득묘율이 가장 높았으며 리기다소나무에서는 pH2.0 처리구를 제외하고는 발아 및 득묘율에서 처리간 차이가 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 pH3.0-5.7의 산성우를 처리하여 발아율을 조사, 보고한 수종간의 반응차와 비슷한 경향이며, 김(1986), Scholz & Reck(1977), Eckert(1988), Siwecki & Rachwal(1988), Oleksyn(1988), Scholz(1988) 등이 대기오염과 산성물질에 대한 수종간 및 영양제간의 내성차를 밝힌 결과와도 부합되는 것이라 판단된다. 그러나, 김 등(1982)이 사방오리와 아까시나무의 종자에 pH2.0, 4.0 및 6.0의 sulfuric acid와 수도물을 처리하여 처리용액의 pH값이 작을수록 발아율이 감소했다는 보고와는 조금은 다른 경향이다. 이는 대상수

종과 실험방법의 차이에 의한 것으로 보여진다.

2. 수종별 묘목생장

수종별 묘고, 건중량(지상부, 지하부 및 개체당 건중량)과 T-R율의 평균과 분산비 등의 통계 분석 결과를 Table 2에 보였다. 소나무와 리기다소나무에서는 모든 생장관련 형질에서, 가중나무에서는 지하부 건중량과 개체당 건중량에서 각각 처리간 통계적 유의차가 인정되었으나, 함박꽃나무에서는 생장관련 형질에 대한 처리간 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 한편 대상수종들의 생장관련 형질들이 대체로 포장에서 양묘한 묘목에 비하여 부진하였다. 이는 포트실험으로 개체간의 경쟁과 제한된 토양의 양과 불리한 환경조건에서 기인된다고 여겨진다.

묘고의 경우, 소나무와 리기다소나무에서 각각 1%와 5% 유의수준에서 통계적 유의차가 인정되

었으며, pH3.0 처리구에서 가장 크게 나타났다. 함박꽃나무에서는 pH4.0 처리구에서, 가중나무에서는 대조구에서 각각 묘고가 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 김 등(1982), 이와 김(1986), 김(1991) 및 Lee와 Weber(1979)가 종자를 파종하고 산성우를 처리하여 묘고를 조사, 보고한 것과, Evans(1984)의 작물종에 따른 상이한 성장반응을 설명한 것과 같은 경향으로 산성우처리가 묘고생장에 미치는 영향은 수종에 따라 차이가 심한 것으로 판단된다.

개체당 건중량의 경우, 소나무와 리기다소나무에서는 1%, 가중나무에서는 5% 유의수준에서 통계적 유의차가 인정되었으나, 함박꽃나무에서는 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 리기다소나무는 pH5.0 처리구에서, 소나무는 pH3.0 처리구에서, 함박꽃나무와 가중나무는 pH4.0 처리구에서 각각 최대건중량을 보였다. 수종간의

Table 2. 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)	5.5a	13.73a	1.62a	15.35a	8.44bc
	pH5.0	6.5bc	33.32b	6.53b	39.85b	7.61a
	pH4.0	5.2a	21.64a	2.25a	23.89a	10.73c
	pH3.0	6.8c	54.80c	13.09c	67.89c	4.17a
	pH2.0	6.4b	39.78b	6.08b	45.87b	6.93a
	F-values	4.7**	19.2**	13.4**	20.6**	4.6**
<i>Pinus rigida</i>	Control (6.5)	5.3ab	37.39b	5.99b	43.38b	6.57b
	pH5.0	5.6ab	44.92c	8.35b	53.28c	5.46b
	pH4.0	6.7bc	41.13c	8.06b	49.19c	5.10b
	pH3.0	7.0c	41.68c	7.79b	49.46c	5.73b
	pH2.0	4.9a	17.84a	1.83a	19.68a	11.68a
	F-values	3.0*	5.2**	9.1**	6.1**	9.5**
<i>Magnolia sieboldii</i>	Control (6.5)	6.8	261.30	139.50	400.80	1.95
	pH5.0	6.7	215.67	117.53	333.20	2.06
	pH4.0	7.1	342.33	350.53	692.87	1.00
	pH3.0	5.8	200.17	182.70	382.87	1.23
	pH2.0	6.3	81.40	45.30	126.70	2.08
	F-values	0.3	1.3	2.1	1.6	0.9
<i>Ailanthus altissima</i>	Control (6.5)	15.67	240.98	193.78a	434.75a	1.38
	pH 5.0	14.05	200.33	186.08a	386.40a	1.29
	pH4.0	14.20	235.60	284.37a	519.97a	0.80
	pH3.0	12.68	108.93	71.95b	180.88b	1.62
	pH2.0	-	-	-	-	-
	F-values	3.3	3.1	4.1*	4.8*	1.3

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

이러한 차이는 산성물질에 대한 엽조직의 완충능 차이를 밝힌 보고(김, 1986)와도 부합되는 결과라 사료된다. 소나무와 리기다소나무에서는 대체로 산성우 처리구가 대조구보다 높은 개체당 건중량을 보였다. 이러한 결과는 이와 김(1986)이 5개 수종, 김(1991)이 5개 수종, Lee와 Weber(1979)가 11개 수종의 종자를 과중하고 산성우를 처리하여 성장량을 조사, 보고한 수종간의 성장 반응차와 같은 경향이며, 김(1986), Eckert(1988), Siwecki & Rachwal(1988), Oleksyn(1988), Scholz(1988) 등의 대기오염과 산성물질에 대한 수종간 및 영양제간의 내성차를 밝힌 보고들과, 김 등(1982)이 5종의 식물체의 종자에 pH2.0, 4.0 및 6.0의 sulfuric acid와 수도물을 처리하여 식물종에 따른 상이한 성장반응을 밝힌 보고와도 부합되는 것이라 판단된다. 소나무에서는 다른 수종들과는 달리 pH2.0 처리구에서도 대조구보다 높은 개체당 건중량을 보였다.

이와 같이 짧은 기간 동안의 산성우 처리시험에서는 극단적으로 낮은 pH의 산성우가 아니면 Evans(1984)의 설명처럼 산성우 중의 sulfate나 nitrate 등이 양료로서의 효과가 해작용보다 크게

작용하여, 대체로 성장에 좋은 영향을 미칠 것으로 생각된다. 그러나 장기간에 걸쳐 산성우와 대기오염에 노출된 임목의 성장감소에 대한 보고들(김, 1990, 1991; Binns & Redfern, 1983; McLaughlin 등, 1983; Puckett, 1982; Zadaker, 1988)을 볼때, 산성우가 임목생장에 미치는 영향을 쉽게 결론내리기는 매우 어려우며 이를 위해 장기간에 걸친 야외실험이 필요하다고 판단된다.

3. 엽피해율과 고사한 개체수

엽피해율은 피해엽의 수와 피해엽이 나타난 개체수로 나타내었으며, 고사한 개체수도 함께 조사하였다. 가시적 엽피해는 8월 중순경부터 나타나기 시작했으며, 그 이전에도 일부 산성우 처리구에서 엽신이 오그라지거나 뒤틀리는 등으로 기형의 잎이 나타났으나, 정량화시킬 수가 없었다. 최대발아개체수를 보인 7월 초순 이후부터 묘목의 근원부가 약해지면서 고사하는 개체가 나타났으나, 그 원인이 산성우치리에만 의한 것이라고 보기는 어려웠다. Table 3에 수종별 및 측정시기별로 피해엽의 수, 피해엽이 나타난 개체수 및

Table 3. Mean values of the number of injured leaves, injured, and dead individuals

Tree species	pH value of acid rain	Sampling date					Index of leaf injury
		Aug. 12	Aug. 26	Sep. 9	Sep. 23	Oct. 7	
		No. of Injured leaves (injured individual/dead individual)					
<i>Pinus densiflora</i>	Control	0.0(0.0/0.7)	0.3(0.3/0.7)	0.3(0.3/0.7)	4.3(2.0/1.3)	4.0(3.0/2.0)	32.0
	pH5.0	0.0(0.0/0.7)	1.3(1.3/0.0)	1.3(1.3/0.7)	1.3(1.3/2.3)	6.7(3.3/2.3)	45.1
	pH4.0	0.0(0.0/0.0)	5.3(2.7/0.0)	2.3(1.3/1.3)	5.7(3.0/2.7)	12.7(4.0/3.7)	87.8
	pH3.0	0.0(0.0/0.0)	5.3(2.7/0.0)	6.7(2.7/0.3)	3.7(1.7/1.3)	13.7(4.0/2.3)	77.8
	pH2.0	0.3(0.3/0.3)	0.7(0.7/0.7)	0.7(0.7/1.7)	4.7(2.3/3.3)	10.0(3.0/6.3)	93.0
<i>Pinus rigida</i>	Control	0.0(0.0/0.7)	1.0(0.7/1.0)	4.0(1.0/2.3)	5.0(2.0/4.3)	6.3(2.7/5.0)	67.0
	pH5.0	0.0(0.0/0.7)	8.0(2.7/0.7)	9.0(3.0/2.3)	10.7(3.7/5.0)	22.7(6.0/5.7)	193.2
	pH4.0	0.0(0.0/2.7)	3.7(0.7/2.7)	7.0(1.7/2.7)	10.0(2.3/2.7)	11.7(3.0/2.7)	62.1
	pH3.0	0.0(0.0/1.3)	5.3(2.0/1.3)	6.0(2.0/2.7)	8.3(2.3/4.7)	14.0(4.0/5.3)	109.0
	pH2.0	4.0(1.0/0.0)	14.7(2.7/0.3)	15.0(4.3/4.3)	16.0(4.0/8.0)	37.7(6.7/7.0)	322.6
<i>Magnolia sieboldii</i>	Control	0.3(0.3/1.0)	0.3(0.3/1.0)	0.3(0.3/1.0)	0.3(0.3/1.0)	0.3(0.3/1.0)	3.1
	pH5.0	0.3(0.3/0.3)	0.3(0.3/0.3)	0.3(0.3/0.3)	0.3(0.3/0.3)	0.3(0.3/0.3)	1.0
	pH4.0	0.3(0.3/1.0)	0.3(0.3/1.0)	0.3(0.3/1.0)	1.7(1.3/1.0)	1.7(1.3/1.0)	5.2
	pH3.0	1.0(1.0/1.0)	1.0(1.0/1.0)	1.0(1.0/1.0)	2.3(2.0/1.0)	2.3(2.0/1.0)	7.6
	pH2.0	2.3(1.0/0.3)	2.3(1.0/0.3)	3.0(1.0/0.3)	7.0(1.0/0.3)	7.0(1.7/0.3)	12.8
<i>Ailanthus altissima</i>	Control	0.0(0.0/1.0)	0.0(0.0/1.0)	0.0(0.0/1.0)	0.0(0.0/1.0)	0.0(0.0/1.0)	3.0
	pH5.0	0.0(0.0/0.3)	0.0(0.0/0.7)	0.0(0.0/0.7)	0.0(0.0/0.7)	0.0(0.0/0.7)	2.1
	pH4.0	0.3(0.3/0.0)	0.3(0.3/0.0)	0.3(0.3/0.0)	0.3(0.3/0.0)	0.3(0.3/0.0)	0.1
	pH3.0	0.3(0.3/0.3)	0.3(0.3/0.3)	1.7(1.0/0.3)	1.7(1.0/0.3)	1.7(1.0/0.3)	2.6
	pH2.0	0.0(0.0/1.7)	0.0(0.0/1.7)	0.0(0.0/1.7)	0.0(0.0/1.7)	0.0(0.0/1.7)	5.1

고사한 개체수의 평균을 보였다. 고사한 개체수는 누계치로 나타내었으며, 8월 12일의 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. 엽피해율은 피해엽의 수와 피해엽이 나타난 개체수로 나타내었으나, 조사기간 중에 고사하는 개체로 말미암아 피해엽의 수와 피해엽이 나타난 개체수가 감소하는 결과를 얻게된다. 이러한 문제를 극복하고자 엽피해지수를 10월 7일 측정치로 산정해 보았다. "엽피해지수 = 피해엽수의 평균 × 피해개체수의 평균 + 3 또는 10 × 고사한 개체수의 평균"이라는 식을 이용하였다. 함박꽃나무와 가중나무에서는 잎이 3개 이상 피해를 입는 경우 대부분이 고사하였기에 3을 계수로 이용하였고, 소나무와 리기다소나무에서는 잎이 10개 이상 피해를 입는 경우 대부분이 고사하였기에 10을 계수로 이용하였다.

함박꽃나무와 가중나무에서 엽피해지수가 낮았으며, 소나무와 리기다소나무에서는 엽피해율이 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 Kim (1986)이 pH2.0-5.0의 인공산성우를 은행나무에 처리하여 보고한 것과 비슷한 경향이나, 김 (1991)이 낙엽송, 삼나무, 잣나무 및 종비나무에서의 결과보다는 월등히 높았다. 이는 실험의 대상수종들의 잎의 형태나 표피구조가 다르고 실험조건이 차이가 있기에 나타난 것이라 여겨진다.

4. 토양산도

7월 20일과 10월 20일에 채취된 토양산도의 평균치와 통계분석의 결과를 Table 4에 보였다. 모든 수종과 측정시기에서 처리산성우의 pH수준 간에 통계적 유의차가 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 염기포화도(鹽基飽和度)가 클수록 완충능이 크다고 설명한 것처럼 공시토양이 vermiculite, perlite 등으로 상당히 염기포화도(鹽基飽和度)가 컸기 때문에 토양산도의 변화가 작았던 것으로 판단된다. 이는 동일한 재료로 실험한 김(1991)의 결과와 같은 경향이었다. pH2.0 처리구에서는 모든 수종에서 토양산도가 현저하게 높아졌으며, pH3.0 처리구에서의 토양산도의 변화는 리기다소나무와 가중나무에서는 소나무와 함박꽃나무에서보다 조금 더 토양산도가 높게 나타났다. 이처럼 토양산도의 변화가 수종별로 조금씩 다른 경향을 나타내는 것은 수종별로 묘목의 크기도 다르고 양료이용의 양상(pattern)도 다르기 때문이라 여겨진다.

5. AI용액과 산성우처리에 의한 발아율과 유근생장(기내실험)

인위적으로 농도를 조절한 AI용액과 인공산성우를 처리하면서 조사된 수종별 종자발아율의 평균과 분산비(F)값을 Table 5에 보였다. 가중나무의 경우에는 발아개체수가 극소수로 통계분석

Table 4. Mean values of soil pH measured on July 20 and October 20, 1990 by pH levels for each species

pH value of acid rain	Tree species							
	<i>Pinus densiflora</i>		<i>Pinus rigida</i>		<i>Magnolia sieboldii</i>		<i>Ailanthus altissima</i>	
	Jul.20	Oct.20	Jul.20	Oct.20	Jul.20	Oct.20	Jul.20	Oct.20
Before treatment	7.47		7.47		7.47		7.47	
After treatment								
Control(6.5)	7.73a	6.29a	7.58a	6.41a	7.63a	6.50a	7.58a	6.36a
pH5.0	7.52b	6.28a	7.51a	6.35a	7.53a	6.21b	7.43a	6.34a
pH4.0	7.25c	6.23a	7.28a	6.30a	7.28b	6.17b	6.85b	6.07b
pH3.0	6.82d	6.08b	6.92b	5.96b	6.73c	6.07b	6.43b	5.95b
pH2.0	6.22e	4.43c	6.42c	4.98c	6.32d	4.33c	5.84c	4.49c
F-values	52.1**	48.8**	18.8**	19.36**	49.9**	33.9**	22.4**	40.9**

* 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 germinated seed numbers by pH levels and aluminum concentrations for each species

Tree species	<i>Pinus densiflora</i> (20) ⁺	<i>Magnolia sieboldii</i> (20) ⁻		
Date	May 8	May 23	May 8	Jun. 3
Treatment (Sulfuric acid solution)				
Control (6.5)	6.5	14.0	2.0	2.0
pH5.0	6.0	12.5	3.5	4.5
pH4.0	11.5	14.0	2.0	2.0
pH3.0	9.0	15.0	3.5	3.5
F-values	1.46	0.17	0.67	0.78
Treatment (Aluminum ammonium sulfate solution)				
Control	6.5	14.0	2.0	2.0
0.5mM	9.5	14.0	2.5	3.0
1.0mM	8.5	14.5	2.0	2.0
2.5mM	8.5	16.5	2.5	2.5
F-values	0.42	0.18	0.11	0.41

⁺ is the number of seeds

에서 제외시켰다. 수종과 조사시기에 관계없이 종자발아율은 처리간에 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 이는 발아시험기에 채운 혼합토양의 완충능이 커서 처리한 Al의 농도수준과 인공산성우의 pH수준이 충분히 종자발아율에 영향하지 못했기 때문이라 사료되며, 조직배양이나 수경삼목 등의 방법으로 검정하는 실험이 필요하리라 생각된다.

수종별 유근의 길이 평균과 분산비값을 Table 6에 보였다. 가중나무의 경우에는 발아개체수가 극소수라 통계분석에서 제외시켰다. 소나무의 5월 8일 측정치에서는 Al용액의 농도수준과 인공산성우의 pH수준간에 5%유의수준에서 통계적 유의차가 인정되었으며, Al용액의 농도나 산도가 높을수록 유근생장이 억제됨을 보였다. 함박꽃나무의 경우에는 조사시기에 관계없이 처리간에 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 이는 함박꽃나무가 소나무에 비하여 토양산도나 aluminum에 대한 내성이 강함을 나타내는 것이라 판단된다.

Table 6. Mean values of radicle length(mm) of the germinated seed by pH levels and aluminum concentration for each species

Tree species	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Magnolia sieboldii</i>		
Date	May 8	May 23	May 8	Jun. 3
Treatment (Sulfuric acid solution)				
Control (6.5)	18.8a	20.3	13.5	33.5
pH5.0	13.3ab	22.2	20.2	41.0
pH4.0	9.7b	18.2	36.0	46.0
pH3.0	9.8b	16.6	12.5	34.5
F-values	5.32*	2.00	1.51	0.31
Treatment (Aluminum ammonium sulfate solution)				
Control	18.8a	20.3	13.5	33.5
0.5 mM	9.9b	19.0	21.0	56.7
1.0 mM	13.2b	19.9	9.5	18.0
2.5 mM	12.2b	16.6	16.3	36.3
F-values	3.56*	0.86	0.15	3.53

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

6. 산성우처리에 대한 수종별 내성비교

산성우처리와 기내발아시험에 대한 반응을 발아 및 득묘율, 묘고생장, 개체당 건중량, 침엽의 피해율 및 토양산도의 변화, 유근생장 등의 항목별로 나누어, 감수성(S; susceptible) 중용성(I; intermediate) 및 내성(T; tolerant)의 3수준으로 구분하여 수종별 상대적인 내성의 크기를 종합하여 비교하였다(Table 7).

소나무와 리기다소나무는 함박꽃나무나 가중나무에 비하여 비교적 내성이 강한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 단기간의 산성우처리에 대한 완충능이 큰 혼합토양에 파종한 종자를 대상으로 실험한 것이며, 비교적 산성토양에 견디는 능력이 앞서기 때문이 아닌가 여겨진다. 동일한 침엽수이지만 소나무가 리기다소나무보다 내성이 강할 것으로 판단된다. 서울시 주변에서는 소나무와 잣나무보다 먼저 리기다소나무의 쇠퇴 징후가 관찰되었다는 김(1990, 1991)의 설명과

Table 7. Relative resistance of tree species to artificial acid rain

Tree species	Germination rate	Seedling height	Dry weight	Needle injury	Change of soil pH	Root growth
<i>Pinus densiflora</i>	S	T	T	S	S	S
<i>Pinus rigida</i>	I	I	I	S	T	-
<i>Magnolia sieboldii</i>	T	I	S	S	S	T
<i>Ailanthus altissima</i>	S	S	I	I	I	-

T: tolerant, I: intermediate, S: susceptible

부합되는 결과로 여겨진다. 비교적 내공해성이 강하다고 분류되던 가중나무는 발아 및 득묘율, 묘고생장 등의 항목에서는 상대적으로 내성이 약한 것으로, 개체당 건중량, 엽피해율 및 토양산도의 변화 등의 항목에서는 내성이 중간인 것으로 나타나 실험대상 수종들 중에서 산성우에 대한 내성이 상대적으로 약한 것으로 나타났다. 한편 함박꽃나무는 발아 및 득묘율, 묘고생장에 있어서는 감수성이며, 개체당 건중량, 침엽의 피해율 및 토양 산도의 변화 등의 항목에서는 내성 강한 것으로 나타나 상대적으로 산성우에 대한 내성이 강할 것으로 판단된다. 조사항목에 따라서 수종별로 상이한 반응을 보였으나 종합적으로 판단할때, 소나무가 상대적으로 산성우에 대한 내성이 크고, 리기다소나무, 함박꽃나무의 순으로 산성우에 대한 내성이 작아지며, 가중나무가 산성우에 대한 내성이 상대적으로 가장 약한 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

1. 김갑태. 1991. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향(1). 한국임학회지 80(2) : 237-245.
2. 김갑태. 1989. SO₂에 대한 내성수종의 선발을 위한 기초연구. 2. 인공산성우 및 산성연두 처리시험. 한국임학회지 78(2) : 209-217.
3. 김갑태. 1988. SO₂에 대한 내성수종의 선발을 위한 기초연구. 1. 엽조직실험. 한국임학회지 77(2) : 223-238.
4. 김갑태. 1986. 아황산이 은행나무와 현사지의 엽조직에 미치는 영향. 상지대 논문집 7 : 461-471.
5. 김재봉 · 김태욱 · 이경재 · 박인협 · 김동한 · 정연보. 1982. 공단지역의 녹지조성 및 회복에 관한 연구. 국립환경연구소. 64pp.
6. 김준호. 1991. 환경오염에 의한 산림의 쇠퇴 징후. Pages 3-25., 도시. 산림. 환경심포지움. 1991. 11. 26. 한국조경학회, 서울. 143 pp.
7. 김준호. 1990. 환경오염에 대처하는 자연생태계 보존전략. Pages 93-118., "쾌적한 환경 창조를 위한 생태계의 보존" 제 18 회 세계환경의날 기념 심포지움, 1990. 6. 4. 국립환경연구원, 서울. 189pp.
8. 김준호. 1985. 산성비의 실태와 인간생활에 미치는 영향. 자연보존 49 : 19-23.
9. 김정욱. 1983. 대기오염의 지구적인 영향. Pages 49-54., "선진환경을 향한 보전대책" 세계환경의 날 기념 세미나, 1983. 6. 4. 국립환경연구소, 서울.
10. 김태욱. 1985. 대기오염과 농림업. 한국환경농학회지 4 : 57-64.
11. 민일식 · 이수욱. 1990. 인공산성우가 산림토양의 완충능에 미치는 영향. 한국임학회지 79(4) : 376-387.
12. 박봉규 · 이인숙 · 최형선. 1983. 서울시에서의 산성우강하에 관한 연구. 한국생활과학연구원은총 32 : 137-142.
13. 이돈구 · 김갑태. 1986. 인공산성우가 몇 수종의 종자발아와 묘목생장에 미치는 영향. 서울대 관악수목원연구보고 7 : 15-21.
14. 이창근. 1988. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처 연구보고서. 194pp.
15. 정용문. 1987. 인공산성우가 소나무유묘 및 개나리삼목묘의 생장, 식물체내 함유성분 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 동국대 박사학위논문. 70pp.
16. Binns, W. O. and D. B. Refern. 1983. Acid rain and forest decline in West Germany. Forestry Commission Res. Dev. Paper 131.13pp.
17. Bubenick, D. V. 1984. Acid Rain Information Book. Noyes Data Corp., N. J., 397pp.
18. 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
19. 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.
20. 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.
21. Evans, L. S. 1984. Botanical aspects of acid precipitation. *Bot. Rev.* 50 : 449-490.
 22. Galloway, J. N., G. E. Likens and E. S. Edgerton. 1976. Acid precipitation in the United States : pH and acidity. *Science* 194 : 722-724.
 23. Gumperz, M. L., D. T. Tingey and W. E. Hogsett. 1982. Precision and accuracy of visual foliar injury assessments. *J. Environ. Qual.* 11 : 549-553.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. 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.
 30. Puckett, L. J. 1982. Acid rain, air pollution, and tree growth in southeastern New York. *J. Environ. Qual.* 11 : 376-381.
 31. 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.
 32. Siwecki, R. and L. Rachwał. 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.
 33. 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.