

人工酸性雨が 소나무 및 개나리 盆植苗土壤의 化學的 性質에 미치는 影響

Effects of Simulated Acid Rain on Chemical Properties of the Experimental Soil of *pinus densiflora* S. et Z. and *Forsythia Koreana* Nak. Seedlings

鄭 龍 文*

Yong-Moon Cheong

ABSTRACT

For the purpose of examining the effects of simulated acid rain on the chemical properties of the experimental soil in *Pinus densiflora* seedlings and *Forsythia koreana* rooted cuttings, the experimental design of randomized block arrangement with three replications was implemented in the experimental field of Yesan National Agricultural Junior College.

One-year-old *Pinus densiflora* seedlings and *Forsythia koreana* cuttings were planted in the pots filled the mixed soils (nursery soil: forest soil of siliceous sandy loam = 1:1 V/V) in the early spring of 1985.

The regime of artificial acid rain, in terms of spray frequency per monthly and spray amount at single treatment per plot, was simulated on the basis of climatological data averaged from 30 years records. Simulated acid rain (pH 2.0, pH 4.0, and pH 5.5 as control) containing sulfuric and nitric acid in the ratio of 3:2 (chemical equivalent basis) diluted ground water, were treated on the experimental plants under condition of cutting off the natural precipitation with vinyl tunnel, during the growing season (May 1 to August 31) in 1985. The results obtained in this study were as follows;

1. Soil acidity was dropped, and exchangeable aluminum contents in the soil was dramatically increased in both species, with decreasing pH levels of acid rain.
2. Exchangeable potassium, calcium, magnesium contents, and base saturation degree of the soil were highly decreased in two species as the pH levels of acid rain decreased.
3. In two species, sulfate concentrations in the soil were decreased of pH 4.0 treatment, and remarkably increased at pH 2.0 treatment of acid rain in comparison with control.
4. Total nitrogen and available phosphate contents of the soil were not affected by acid rain treatment in the both species, and Fe contents at pH 2.0 treatment were highest among three acid rain treatments.

* 禮山農業專門大學 (Yesan National Agricultural Junior College)

1. 서 론

최근 선진국을 비롯한 개발도상국에 이르기까지 인구의 도시집중화와 산업의 발달은 대기오염을 불러 일으켜, 이로 인한 산도 높은 강수물이 관측되고 그 피해가 증가되고 있어, 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 인간의 산업활동을 통해 대기중에 방출된 황산화물과 질소산화물 등으로 야기된 산성우는 대기오염이 심한 도시에만 국한되지 않고, 지역간, 국가간, 대륙내, 더 나아가 전지구적 규모의 환경문제가 되고 있다.⁶³⁾⁶⁵⁾⁶⁶⁾

산성우가 인간생활에 미치는 영향으로는 눈(雪)과 피부에 자극을 주고, 석재 및 콘크리트 구조물과 금속제품의 부식을 들 수 있으며,¹²⁾¹³⁾ 陸水 생태계에서는 하천이나 호수의 물이 산성화됨으로써 동·식물성 플랑크톤이나 底棲생물군과 無脊椎동물 개체군이 감소되어 어류의 먹이연쇄에 위협을 주고 있으며, 또한 직접적인 치사작용이나 생식불능을 초래하여 어류개체군을 멸종시키는 경우도 있다.¹⁾¹⁰⁾¹⁶⁾²⁸⁾

산성우가 육상 생태계에 미치는 영향은 기존 토양의 양분상태와 강하한 산성물질 침착의 지속 시간에 따라 상이하며, 농작물과 삼림의 생산성에 있어서도 증가 또는 감소한다는 엇갈리는 연구결과로 아직 확실한 결론을 내리지 못하고 있다.¹⁸⁾³³⁾ 제어된 환경하에서의 여러 시험연구에서는 질소 및 유황의 유효성 증대에 따른 단기 성장 증가 사례가 있는 것으로 보이나, PH 3.0 및 그 이하의 인공산성우 처리에 앞의 손상이나 식물체 조직으로부터의 유용한 양분용출이 야기되고 있으며, 토양중의 염기감소와 유독한 Al 집적에 기인하는 장기적으로 본 성장감퇴의 가능성이 큰 것으로 집약되고 있다.²²⁾

산성우가 토양에 미치는 영향은 주로 H^+ , SO_4^{2-} 및 NO_3^- 와 관계되며, H^+ 와 Al^{3+} 을 갖는 낮은 토양산도에서는 K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ 이 용탈되고 있으며, 산성우의 PH값이 낮아질수록 토양의 양이온은 용탈이 더 심해진다.²⁾⁸⁾¹⁷⁾²¹⁾ Lysimeter 시험을 한 Lee와 Weber²⁷⁾는 인공산성우가 토양의 K^+ , Ca^{++} 및 Mg^{++} 을 용탈시키고 있음을 관찰하였으며, Kim²⁴⁾, 鄭⁴⁹⁾ 및 吳⁵⁶⁾도 그와 비슷한 결과를 보여주었다.

Mollitor와 Raynal³¹⁾은 New York 주 중앙 Adirondack 지역의 활엽수와 침엽수림에서 산침전의 잠재적 영향을 시험한 결과, 토양내의 NO_3^- , H^+ 및 K^+ 의 농도에는 변화가 없었으나 Ca^{++} , Mg^{++} 및 Na^+ 함량은 용탈되었으며, 그 용탈정도와 Sulfate 및 유기 음이온 농도에 있어서는 침엽수림이 활엽수림에 비해 크게 나타났음을 밝히면서, 산성우에 의한 산성화와 자연적 과정에 의한 산성화가 이 지역에서의 생산력을 종국적으로 감소시킬 것이라고 하였다.

본 연구는 일반적인 자연조건하에서 인공산성우가 산림토양에 미치는 영향을 조사하여 기초자료를 제시할 목적으로 시도하였는데, 우리나라 산림의 주요 수종인 소나무와 도시에서의 주요 조경수종인 개나리를 택하여 盆植苗 토양의 화학적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료 및 인공산성우

본 연구에 사용된 수종은 소나무 (*Pinus densiflora*)와 개나리 (*Forsythia Koreana*)로서, 소나무 묘목은 경기도 수원시 소재 임목육종 연구소내 채종원의 동일 클론 개체로부터 채종되어, 동 연구소 시험포지에서 양묘된 1년생묘를 공급받은 것이며, 개나리는 충남 예산군 예산읍 소재 예산농업전문대학 구내에 생육하고 있는 동일 모체 (ortet) 가지로부터 삼수를 채취, 이를 삼목에 이용하였다.

소나무 묘목의 식재와 개나리 삼목은 두 수종 모두 묘목 및 삼수의 중량, 직경, 그리고 간장 등 균일한 재료를 선택하여 1985년 3월 25일 예산농업전문대학 시험포지에서 실시하였다.

상토는 묘포토양과 유기질이 없는 산림토양을 1:1(V/V)로 혼합하여 만든 토양으로, 그 화학적 성질은 표 1의 내용과 같았다. 혼합토양은 2.0 mm의 그물체로 이물질을 제거하고, Plastic pot (소나무 pot : 상부직경 13.6 cm, 높이 12 cm, 하부직경 10 cm, 개나리 pot : 상부직경 23 cm, 높이 30 cm, 하부직경 20 cm)에 충전시킨 후, 소나무는 pot 당 1본씩 식재하였으며, 개나리는 pot 당 2본씩 삼목하였다. 소나

Table 1. The soil properties of the experimental nursery

Texture	Sandy loam	Total Base	5.20 me · 100g ⁻¹
pH(H ₂ O, 1:5)	6.2	Base sat.	73.86 %
Al ⁺⁺	.56 ppm	C.E.C	7.04 me · 100g ⁻¹
K ⁺	.16me.100 g ⁻¹	T.N	.06 %
Na ⁺	.28me.100g ⁻¹	Avail, P ₂ O ₅	60.97 ppm
Ca ⁺⁺	3.78me.100g ⁻¹	SO ₄	61.44 ppm
Mg ⁺⁺	.98me.100g ⁻¹	Fe	.712%

무와 개나리 pot 에 충전된 토양의 무게는 각각 1.35kg 및 13.83 kg으로 일정하게 유지하였다. 산성우 조제는 NV=N' V' 식에 의거, 황산 (H₂SO₄) 과 질산(HNO₃)을 3:2의 비율로 혼합하고 이것을 지하수로 희석하여 pH5.5, pH

4.0 그리고 pH 2.0의 3 수준으로 조제한 다음, pH 미터기로 정확한 산도를 조정하였다. 이때 pH 5.5라는 것은 대조용으로 사용된 것이다. 조제된 인공산성우의 산도수준별 전기전도도, 주요 양이온 및 음이온의 함량은 표 2의 내용과 같았다.

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

pH values	Conduc-tivity (μ mhos)	Major anions (ppm)				Major cations (ppm)				
		SO ₄ -S	NO ₃ -N	P ₂ O ₅	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺
Control (pH 5.5)	.65	30.44	14.93	.41	11.34	1.32	6.16	19.75	2.61	0.45
pH 4.0	2.54	250.17	30.28	.83	15.03	2.45	10.08	35.20	8.93	0.83
PH 2.0	36.27	2036.19	745.81	.63	23.06	3.96	16.27	44.04	14.00	3.24

2.2 방법

시험설계는 난괴법 3 반복이었으며, 총 pot 수는 두 수종 모두 plot 당 50개의 pot 로 총 당되어 3 처리 × 3 반복 × 50 pot × 2 수종 = 900 pot 가 소요되었다. 각 pot 는 토양온도의 변화를 고려하여 포지에 묻어 포지면과 pot 표면의 높이를 같게 하였다. 식재 이후의 묘목의 관리는 일반 양묘법에 준하였으며, 외부인자에 의한 묘목 생육상의 stress가 없도록 세심한 주의를 기울였다.

산성우의 살포회수와 plot 당 1회 살포량의 결정에 있어서는 본 시험이 실시된 포지의 가장 가까운 위치에 있는 홍성에서 측정된 30년간의 강우양식⁵⁴⁾에 모의 (Simulation) 하였다. 이 내용이 표 3에 제공되었으며 표에 30년간의 월평균 강우량, 월평균 강우회수 (1 mm 이상 시의

강우회수), 1회 평균 강우량, 그리고 이를 근거로 한 수종별 plot 당 1회 살포량이 주어지고 있다. Plot 당 강우 수용면적은 양 수종 모두 plot 당 50개의 pot 가 배치되어 소나무의 경우에는 0.9248 m²로, 개나리는 2.6450 m²로 계산되었다. 산성우 살포는 묘목이 식재 또는 삼목되어 활착된 1개월 후인 5월 1일부터 8월 31일까지 4개월간, 표 3에 제시된 월별 살포회수 (월평균 강우회수)와 plot 당 1회 살포량에 따라, 지렛대식 분무기를 사용하여 실시하였다. 천연강수는 그때마다 vinyl tunnel로 차단되었다.

2.3 토양 분석

묘목의 생장이 멈추어졌다고 생각되는 1985년 10월 31일 전 묘목을 굴취한 후 pot 내의 토

Table 3. Basic records of spray frequency and amount averaged from 30 years climatological data used for simulation in this study

Item	Month			
	May	Jun.	Jul.	Aug.
Precipitation density (mm)		81.9	130.9	216.7
Precipitation frequency		7	9	11
Average rainfall (mm)		11.7	14.5	19.7
Spray amount at single treatment per plot (mm)				
<i>Pinus densiflora</i>		10.82	13.41	18.22
<i>Forsythia koreana</i>		30.95	38.35	52.11

양을 채취하여 분석하였다.

입도분석은 Hydrometer 포, 토양 산도는 Fisher Digital pH meter 로 측정하였으며, 치환성 Al 함량은 UV-Spectrophotometer 를 이용하여 Aluminon 法으로 비색 측정하였다. 치환성 양이온인 칼륨과 나트륨 함량은 flame photometer 로 칼슘과 마그네슘은 0.005N-EDTA 적정법으로 측정하였다. 염기총량을 치환성 양이온 함량을 합산한 값이며 염기포화도는 치환성 염기량을 양이온 치환용량으로 나누어 준 값을 백분율한 값이다. 양이온 치환용량은 치환성 염기총량에 치환성 수도의 양을 합산하여 구하였다. 전질소함량은 Kjeldahl 분해적정법으로, 유효인산함량은 Lancaster 법으로 각각 정량하였으며, 황산염 농도는 Calcium monophosphate 침출비탁법에 의해, 활성철은 O-phenanthroline 비색법에 의해 그 함량을 측정하였다. 토양분석은 처리당(plot 당) 1점씩 3회 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

1985년 10월 31일, 토양을 채취하여 토양 산도 치환성 Al, 치환성 양이온, 염기포화율, 양이온 치환용량, 전질소, 유효인산, sulfate 및 활성 철에 대한 화학적 성질을 산성우의 pH 수준별로 측정된 결과가 표 4와 표 5에 주어지고 있다.

3.1 토양산도 및 치환성 Al 함량

산성우의 pH 값이 낮아짐에 따라 양수층에 대한 토양의 pH 값은 모두 감소하고, 치환성 Al 함량은 크게 증가하여, 토양의 pH 값이 감소함에 따라 치환성 Al 함량은 증가되는 반응을 나타내고 있었다. 이들은 분산분석의 결과에 있어서도 고도의 유의성을 보였다.

그림 1에 보이는 바와 같이 토양산도에 있어서 소나무의 토양은 개나리의 그것에 비해 민감한 반응을 보였으며, 치환성 Al 함량에 있어서는 수종간 차이가 발견되지 않았다.

이와 같이 산성우에 의한 토양 pH 값의 저하는 Ulrich 등⁴⁵⁾을 비롯한 여러 연구자¹⁵⁾²⁴⁾²⁹⁾⁴¹⁾⁴⁹⁾⁵⁶⁾의 연구결과와 일치하고 있었으며, SO₂ 혼연시험에서도 같은 결과를 나타내고 있었다.²⁶⁾ Ulrich 등⁴⁵⁾은 1966년부터 1979년 사이에 유럽 중부지역의 삼림토양 pH 값이 산성우에 의해 저하되었으며, 치환성 Al 함량이 식생에 해를 미칠만큼 증가되었다고 하였으며, Heagle 등¹⁵⁾은 콩을 대상으로 한 야외시험에서 인공산성우의 pH 값이 낮아짐에 따라 토양의 pH 값이 감소됨을 관찰하였다. 이와같은 토양 pH 값의 저하는 산성우에 기인되며²⁹⁾, 그 감소정도는 산성우에 들어 있는 H⁺ 농도와 토양교질입자인 Al 과 Fe 에 부착되어 있는 수산기와의 중화 및 양이온 치환용량 등 토양의 완충력에 달려 있다.³⁴⁾⁴⁰⁾⁴⁶⁾ Peterson³⁶⁾은 entisols, inceptisols, ultisols, spodosols 및 oxisols와 같은 토양은 산성우에 비교적 민감하다고 하였다.

Table 4. Mean values of soil chemical properties of *pinus densiflora* seedlings by treatments of simulated acid rain(Oct. 31, 1985).

Chemical properties	Before treatment	pH levels			Total mean	Significance levels ^a
		Control (pH 5.5)	pH 4.0	pH 2.0		
pH(H ₂ O, 1:5)	6.2	6.2	5.7	4.1	5.36	.01
Al ³⁺ (ppm)	.56	.72	3.31	135.22	64.42	.01
K ⁺ (me·100g ⁻¹)	.16	.18	.16	.08	.14	.01
Na ⁺ (me·100g ⁻¹)	.28	.24	.24	.24	.24	NS
Ca ²⁺ (me·100g ⁻¹)	3.78	3.45	2.87	.48	2.27	.01
Mg ²⁺ (me·100g ⁻¹)	.98	1.17	1.24	.24	.89	.01
Total base(me·100g ⁻¹)	5.20	5.04	4.51	1.04	3.53	.01
Base sat.(%)	73.86	70.10	70.69	13.25	51.35	.01
C. E. C(me·100 ⁻¹)	7.04	7.19	6.38	7.85	7.14	.05
SO ₄ ²⁻ (ppm)	61.44	70.83	59.34	116.64	82.27	.01
T. N (%)	.06	.06	.07	.06	.63	NS
Avail, P ₂ O ₅ (ppm)	60.97	61.74	62.66	65.39	63.62	NS
Fe (%)	.712	.701	.632	.713	.68	.01

^aAs determined from F-test.

Table 5. Mean values of soil chemical properties of *Forsythia koreana* rooted cuttings by treatments of simulated acid rain(Oct. 31, 1985).

Chemical properties	Before treatment	pH levels			Total mean	Significance levels ^a
		Control (pH 5.5)	pH 4.0	pH 2.0		
pH(H ₂ O, 1:5)	6.2	6.2	6.0	4.6	5.6	.01
Al ³⁺ (ppm)	.56	.61	4.47	131.45	45.51	.01
K ⁺ (me·100g ⁻¹)	.16	.16	.14	.07	.12	.01
Na ⁺ (me·100g ⁻¹)	.28	.26	.24	.24	.25	NS
Ca ²⁺ (me·100g ⁻¹)	3.78	3.17	2.02	.58	1.92	.01
Mg ²⁺ (me·100g ⁻¹)	.98	.92	.78	.32	.67	.01
Total base(me·100g ⁻¹)	5.20	4.51	3.18	1.21	2.97	.01
Base sat.(%)	73.86	63.61	46.83	15.47	41.97	.01
C. E. C(me·100 ⁻¹)	7.04	7.09	6.79	7.82	7.23	MS
SO ₄ ²⁻ (ppm)	61.44	63.03	59.21	107.16	76.47	.01
T. N (%)	.06	.05	.06	.07	.06	NS
Avail, P ₂ O ₅ (ppm)	60.97	60.73	62.04	67.14	53.31	NS
Fe (%)	.712	.54	.63	.70	.62	.01

^aAs determined from F-test

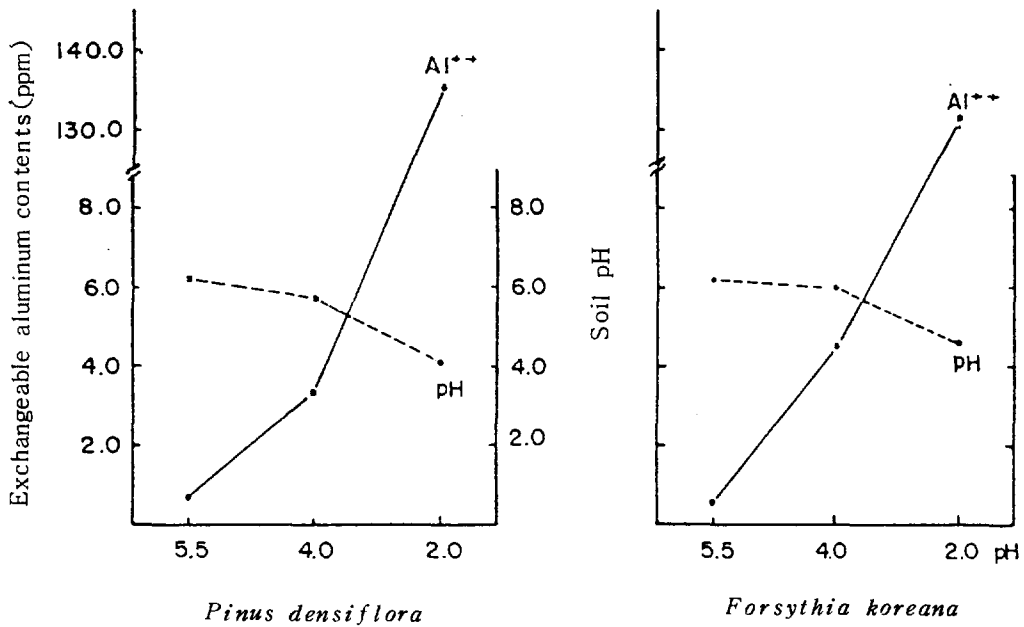


Fig. 1 Soil pH and exchangeable aluminum contents in experimental soil by pH levels of acid rain

본 연구에 있어서 산성우 처리에 의한 치환성 Al 함량의 증가는 Cronan 및 Schofield⁹⁾, Kim²⁴⁾, Ulrich 등⁴⁵⁾, 鄭⁴⁹⁾의 연구결과와 일치하였으며, 치환성 Al 함량은 토양의 산도수준 또는 토양의 유기물 함량과 밀접한 상호관계가 있다는 여러 연구자³⁷⁾⁶⁰⁾⁶¹⁾의 연구보고와 유사하였다. Cronan 과 Schofield⁹⁾는 미국 동북부의 White Mountain과 Adirondack 지역의 비석회성 고지대 유역에서 표면수와 지하수의 유리 Al 농도가 증가되었음을 발견하고, 이러한 현상은 최근 황산과 질산 등의 대기오염물질이 침전되어 토양에서 Al 이 심하게 용출된 데에서 기인된 것이라고 하였다.

치환성 Al 은 토양의 양이온을 용탈시키는데, 이로 인해 뿌리조직의 중요한 영양소 결핍을 가져와, 결국은 수목의 생장에 심각한 영향을 끼치고²⁾⁸⁾¹⁷⁾²¹⁾⁴⁸⁾ Al⁴⁺ 이 토양수 속에서 가수분해됨으로서 생기는 산성화는 더욱 심해져서 식물에 해작용을 초래하며, 토양중에 있는 Ca, Zn, Pb, Hg, Fe, Mn 과 같은 금속물질을 용해시켜 임지의 생산력 감소는 물론 생태계의 교란을 야기시

킨다.⁵³⁾⁶⁶⁾

이와 같이 산성우에 의한 토양 pH 값의 저하는 삼림토양이 부식층과 비교적 많은 양의 유기질을 함유하고 있음을 고려할 때, 다소 완만한 속도로 감소되리라 예측되지만, 우리나라의 경우, 삼림 토양이 산성을 띠고 있고,⁵⁰⁾ 부식층이 빈약하므로 산성우가 장기화되면 토양 pH 값은 더욱 감소되고 치환성 Al 함량의 증가 및 치환성 양이온의 부족으로 생산력이 감소될 것으로 생각된다.

3.2 치환성 양이온, 양이온 치환용량 및 염기 포화도

그림 2 에 산성우의 산도수준에 따라 토양에서의 치환성 양이온 함량과 양이온 치환용량을 나타냈으며, 염기포화도는 그림 3 에 나타냈다.

치환성 K의 함량은 산성우의 pH 값이 낮아짐에 따라 소나무와 개나리 모두 함량의 감소가 초래되었으며, 처리간에 1%의 유의성을 보였다. 특히 pH 2.0 처리에서 급격히 감소되어, 강산성 처리에서 치환성 K의 함량이 크게 용탈되고 있음을 알수 있었다.

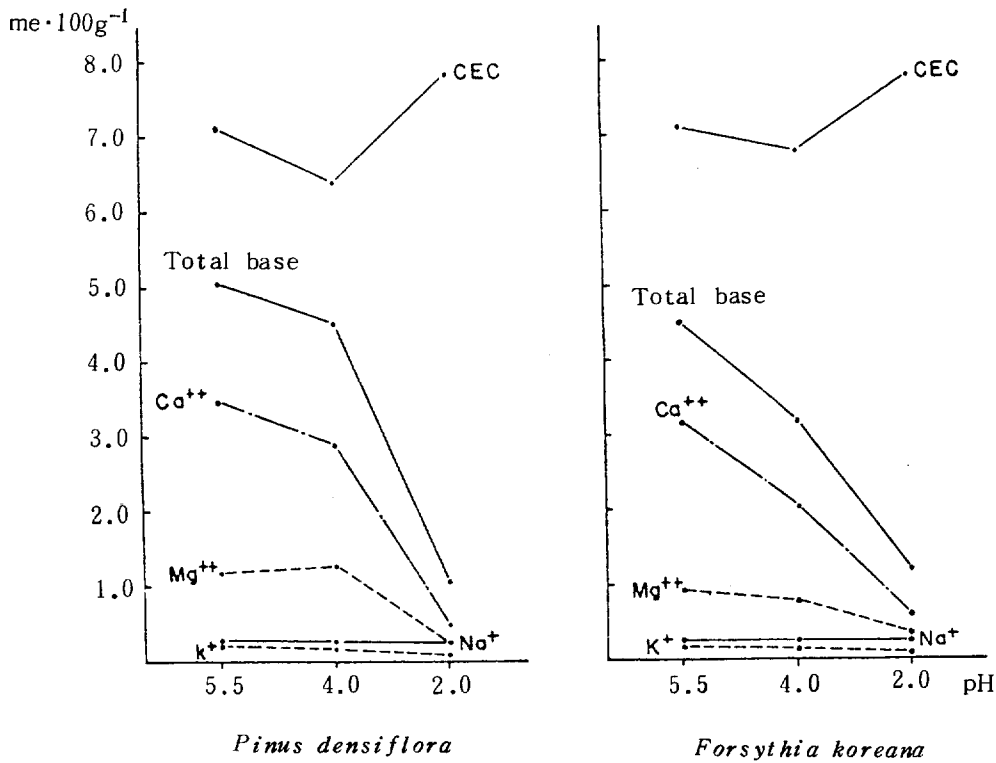


Fig.2 Exchangeable cations and C.E.C in experimental soil by pH levels of acid rain.

치환성 Na의 함량에 있어서는, 산성우의 pH수 준별, 그리고 양 수종간에 함량의 차이가 거의 없었다. 이는 치환성 Na이 산성우에 영향을 크게 받지 않는다는 사실을 입증하고 있는 것이다. 토양에서의 치환성 Ca의 함량은 두수종 모두 산성우 처리에 크게 감소하였으며, 처리간에 1%의 유의성을 나타내었다. 특히 pH 2.0 처리에서 크게 감소되었는데, 이는 강산성 처리에서 치환성 Ca의 함량이 크게 용탈되고 있음을 설명해 주고 있는 것이다. 치환성 Mg의 함량은 수종간에 약간의 차이를 보이고 있었다. 소나무는 pH 5.5인 대조구와 pH 4.0 처리에서 산성우의 pH값이 낮아짐에 따라 감소하고 있었다. 이와같은 상이한 반응은 수종간의 생리적 특성의 차에 따른 것으로 생각된다.

치환성염기량은 처리간에 1%의 유의성이 나타났으며, pH 2.0 처리에서 크게 감소되었다. 이는 강산성 처리에서 치환성 양이온의 용탈량의 크게 증가되고 있는 것을 입증한 것이었으며, 수종간에

는 차이가 없었다.

토양에서의 양이온 치환용량은 두 수종 모두 pH 4.0 처리에서 일단 감소하다가 pH 2.0 처리에서는 대조구보다 증가하는 경로를 밟았으며, 소나무에서만 5%의 유의성을 보였다. 토양의 염기포화도는 pH 2.0 처리에서 크게 감소하였으며, 두 수종 모두 처리간에 1%의 유의성을 보여주었다. 이것은 치환성 양이온의 함량이 pH 2.0 처리에서 크게 감소된 반면, 양이온 치환용량은 오히려 증가되었기 때문이다. 이상과 같은 결과는 balsam 전나무림에서 K⁺, Ca⁺⁺ 및 Mg⁺⁺이 산성우로 인해 용탈되고 있음을 관찰한 Cronan⁷⁾ 과 Cronan⁸⁾의 보고와 은행나무, 전나무, 소나무 및 잣나무 묘목의 시험결과, Na⁺을 제외한 K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ 및 염기포화도가 강산성 처리에서 크게 감소되고 있음을 관찰한 Kim²⁴⁾, 鄭⁴⁹⁾, 吳⁵⁶⁾의 연구결과 그리고 lysimeter 시험을 한 Lee와 Weber²⁷⁾콩에 대한 산성우의 영향을 시험한 Heagle¹⁵⁾의

연구결과와 일치하고 있었다. 산성우에 의한 토양 양분의 손실과 염기포화도의 감소는 여러 연구자들^{2),11),17),21),30),35)}이 공통적으로 지적하고 있는 현상이며, 토양의 완충력, 토양의 양분상태 및 Sulfate의 흡착등에 의해 양분용탈의 차이가 나타나고 있다.^{32),39)}

본 연구에서 치환성 Ca이 수증과 산도수준에 불구하고 양이온 중에서 가장 높은 함량을 보였는데 치환성 Ca은 토양의 산도를 변화시켜 산성, 중성 혹은 알칼리성 토양으로 발달시키며, H⁺의 해독을 중화시키는 등 토양의 여러가지 성질을 결정하는데 주요한 역할을 한다.⁵³⁾ 따라서 본 연구의 Ca 함량 감소는 토양의 pH값을 감소시키고 염기포화도를 낮추는데 결정적인 역할을 한 것으로 보인다. 우리나라의 경우, 환경오염으로 인해 식물 생육환경이 악화된 도시녹지^{52),57),58)}나, 토양양료와 CEC가 비교적 낮은 입지에 있어서, 산성우의 초기 단계에서는 모암의 풍화와 토양유기물의 분해에 의해 토양의 화학적 성질은 일시적으로 개선될 것이지만, 완충력이 낮고 시비와 석회시용이 없는 토양에서는 장기간의 산침적이 실제화되면, 치환성 K, Ca 및 Mg은 용탈되고 염기포화도도 감소되리라 사료된다.

3.3 Sulfate 함량

토양에서의 sulfate 농도는 두 수증 모두 pH 4.0 처리에서 약간 감소되었다가 pH 2.0 처리에서 크게 증가되었다(그림 3) 이와같이 결과는 잣나무 파종묘에서의 鄭⁴⁰⁾의 연구결과와 은나무, 전나무 및 소나무에서의 강산성 처리(pH 2.5 ~ 2.0)에 토양의 sulfate 농도가 크게 증가한 Kim²⁴⁾과 뚝⁵⁶⁾의 연구결과와 일치하고 있었다. 그러나 pH 4.0 처리에서 대조구보다 감소된 결과는, Reuss와 Johnson⁴⁰⁾ 및 Singh 등⁴³⁾의 연구결과와 일치하지 않았으며, 그 원인에 대해서는 명확하지 않았다. 한편, 침엽수인 소나무가 활엽수인 개나리에 비해 각 산도수준별로 토양의 sulfate 농도가 더 높았는데, 이러한 결과는 sulfate 농도가 활엽수림 아래보다 침엽수림 아래에서 더 더 높게 나타난 Molliter와 Raynal³¹⁾의 연구결과 일치하고 있었다.

토양에서의 sulfate 흡착능은 치환성 양이온 함량과 관련되며⁴⁷⁾ 그 능력은 토양의 pH값이 낮아질 때 증가되는 것으로 보여진다.^{19),42),62)} 토양의 pH값이 낮아짐에 따라 sulfate 농도가 증가되는

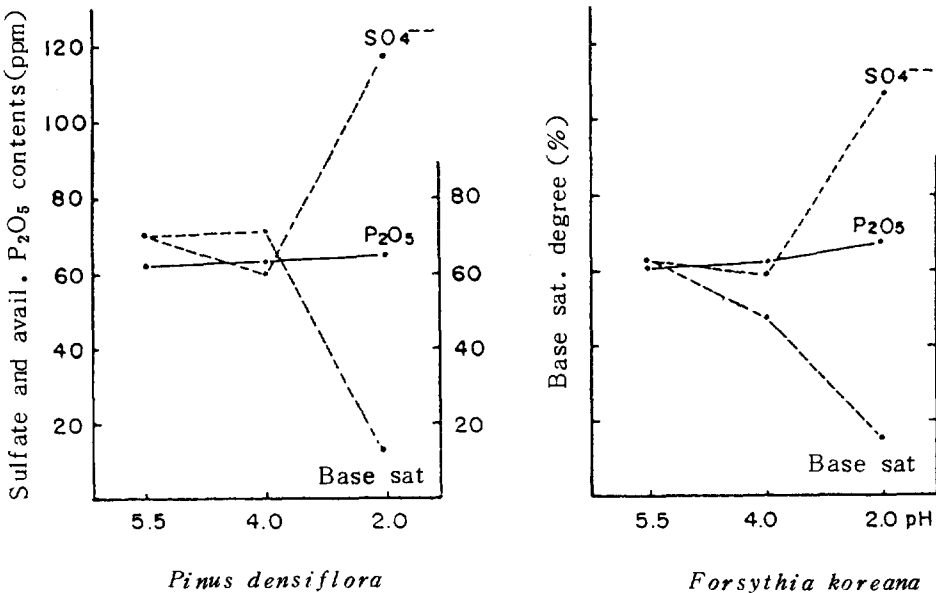


Fig.3 Sulfate and available P₂O₅ concentrations and base saturation degree in experimental soil by pH levels of acid rain.

현상은 sulfate와 토양교질입자인 Al과 Fe로 결합된 수산기 사이에서 이온교환반응으로 발생하며,⁴⁾¹³⁾³⁸⁾ sulfate 흡착능은 토양에서의 치환성 Al 농도가 증가함에 따라 증가되었다.⁵⁾²⁰⁾⁴³⁾⁶²⁾

토양의 sulfate가 주요 양분으로서 식물에 흡수 이용되고, 토양미생물에 의해 환원된다 하더라도 산성우에 의한 토양의 sulfate는 무기양분이 적고 산성을 띠고 있는 우리나라의 임지와 도시녹지에 중대한 영향을 미칠 것이다.

3.4 전질소, 유효인산 및 활성 Fe 함량

토양에서의 전질소 함량은 산성우의 pH 수준과 수종간에 차이가 나타나지 않았다 이와같은 결과는 잣나무 파종묘에서의 鄭⁴⁰⁾의 연구결과와 일치하고 있었으나, 산성우가 임목에 유용한 질소를 감소시키며 C/N율을 증가시킨 Tam⁴⁴⁾의 연구와는 일치하지 않았다. Kim²⁴⁾은 은행나무에 대한 산성우 시험에서 질산염 농도가 7월에 크게 증가되었다가 10월에 약간 감소된 것을 관찰하고, 이는 산성우에 포함된 질산염에서 기인된 것으로, 산성우 속의 질산염은 식물생장에 유익할 것이라고 하였다. 본 연구에 있어서 산성우 속의 다량의 질산염이 함유되고, 또 식물체내의 질소 함량이 산성우의 pH수준이 낮아짐에 따라 증가하고 있었음에도 불구하고 토양내의 질소함량에 변화가 나타나지 않은 것이 특이하였다.

산성우 처리에 의한 토양의 유효인산 농도는 소나무와 개나리 모두 증가하는 경향을 보였으며, 통계적 유의성은 없었다 (그림 3) 이와같은 결과는 산성우 처리후 유효인산이 증가한 Haynes¹⁴⁾와 Kunishi²⁵⁾의 연구결과와 일치하고 있었으며, 이들은 산성우에 의해 토양의 유효인산이 증가된 원인은 토양의 유기물과 치환성 Ca의 함량이 비교적 많았기 때문이라고 하였다. 토양의 유용성은 토양 조건에 따라 상이하며, 그 조건중에서 가장 중요한 것이 토양산도로³³⁾ 토양의 pH값이 7 이상이면 인산은 PO_4^{3-} 로 되어 식물이 흡수하기 어려운 형태가 되나, pH값이 5.6~6.5이면 $H_2PO_4^-$ 와 HPO_4^{2-} 가 많아져 식물이 흡수하기 용이해진다. 그러나 토양이 더욱 산성화되면 Al과 Fe 이온이 토양용액과 교질입자 표면에서 증가되므로 이들과 결합하면 불용성의 인산화합물이 되어 인산의 유용성이 저하

된다.³⁾⁶⁾³⁶⁾⁵¹⁾⁵³⁾⁵⁹⁾

활성 Fe의 함량은 수종에 따라 반응이 다르게 나타났으며, 분산분석의 결과 두 수종 모두 고도의 유의성을 보이고 있었다. 소나무에서는 pH 4.0처리에서 크게 감소하였다가 pH 2.0 처리에서는 증가하여 대조구의 함량보다도 높았다. 개나리의 경우는 산성우의 pH값이 감소함에 따라 증가하였다. 이와같은 결과는 토양의 pH값이 낮아짐에 따라 활성 Fe이 크게 증가한 Peterson³⁶⁾의 연구결과와 일치하고 있었다. 토양에서의 과다한 치환성 Al과 활성 Fe의 함량은 식물에 해를 끼친다.^{51),53)} 본 연구에서의 활성 Fe 함량의 증가는 산성우 처리로 토양의 pH값이 저하됨에 따라 발생된 것으로 보인다.

4. 결 론

인공산성우가 소나무 유묘와 개나리 삼목묘를 盆植한 토양의 화학적 성질에 미치는 영향을 분석하였다. 1985년 3월 25일 묘포토양과 사양질의 산립토양을 1:1 (v/v)로 혼합하여 채운 pot에 소나무와 개나리를 식재하고, 해당지역의 30년간의 강우양식에 모의 (simulation) 해서, 황산과 질산의 비율을 3:2 (N농도)로 혼합하여 지하수로 희석한 pH 2.0, pH 4.0 및 pH 5.5 (대조용)의 산성우를 난괴법 3반복 시험구에 천연강수를 차단한 가운데, 동년 5월 1일부터 8월 31일까지 4개월에 걸쳐 살포하고, 묘목의 생장이 멈춘 10월 31일 토양시료를 채취하여 분석한 결과는 다음과 같았다.

1. 산성우의 pH값이 낮아짐에 따라 두 수종 모두 토양의 pH값은 감소하였으며, 치환성 Al 함량은 크게 증가하였다.

2. 토양의 치환성 K, Ca 및 Mg의 함량과 염기포화도는 산성우의 pH이 낮아짐에 따라 두 수종 모두 크게 감소하였다.

3. 토양의 sulfate 함량은 두 수종 모두 pH 4.0 처리에서 감소하다가 pH 2.0 처리에서 대조구보다 크게 증가하였다.

4. 토양의 전질소 및 유효인산 함량은 두 수종 모두 처리간에 차이가 없었으며, 활성 철 함량은 pH 2.0 처리에서 가장 높았다. (原稿接受 '88. 3. 24)

參 考 文 獻

1. Almer, B., W. Dickson, C. Ekstroem, E. Hoernstroem and U. Miller (1974), Effects of acidification of Swedish lakes. *Ambio* 3:30-36.
2. Bache, B.W. (1980), The acidification of soils. Pages 183-202 in Hutchinson, T.C. and M. Havas (eds.) *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum Press.
3. Breemen, N. (1973), Dissolved aluminum in acid sulfate soils and in acid mine waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:694-697.
4. Chao, T.T., M.E. Harward and S.C. Fang (1965), Exchange reactions between hydroxyl and sulfate ions in soils. *Soil. Sci.* 99: 104-108.
5. Chao, T.T., M.E. Harward and S.C. Fang (1962), Movement of S^{35} tagged sulfate through soil columns. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26:27-32.
6. Cole, C.V. and J.W.B. Stewart (1983), Impact of acid deposition on P cycling. *Environ. Exp. Bot.* 23: 235-241.
7. Cronan, C.S. (1980), Solution chemistry of a New Hampshire subalpine ecosystem: A biogeochemical analysis. *Oikos* 34: 272-281.
8. Cronan, C.S. and R.C. Reynolds and G.E. Lang (1978), Forest floor leaching: Contributions from mineral, organic, and carbonic acids in New Hampshire subalpine forests. *Science* 200:309-311.
9. Cronan, C.S. and C.L. Schofield (1979), Aluminum leaching response to acid precipitation: Effects on high-elevation watersheds in the Northeast. *Science* 204: 304-306.
10. Deland, M.R. (1980), Acid rain. *Environ. Sci. Tech.* 14(6): 657 pp.
11. Frink, C.R. and G.K. Voigt (1977), Potential effects of acid precipitation on soils in the humid temperature zone. *Water, Air, and Soil Pollution* 7(3) 371-388.
12. Gauri, K.L. (1980), Deterioration of architectural structures and monuments. Pages 125-145 in Toribara, T.Y., M.W. Miller and P.E. Morrow (eds.) *Polluted Rain*. Plenum Press.
13. Haque, I. and D. Welmsley (1974), Movement of sulphate in two Caribbean soils. *Plant and Soil* 40: 145-152.
14. Haynes, R.J. (1984), Effect of lime, silicate, and phosphate applications on the concentrations of extractable aluminum and phosphate in a spodosol. *Soil Sci.* 138: 8-14.
15. Heagle, A.S., R.B. Philbeck, P.F. Brewer and R.E. Ferrell (1983), Responses of soybeans to simulated acid rain in the field. *J. Environ. Qual.* 12: 538-543.
16. Hileman, B. (1981), Acid precipitation. *Environ. Sci. Tech.* 15: 1119-1124.
17. Hutchinson, T.C. (1980), Effects of acid leaching on cation loss from soils. Pages 481-497 in Hutchinson, T.C. and M. Havas(eds.) *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum Press.
18. Johnson, D.W. (1981), Acid rain and forest productivity. *Proc. XVII IUFRO World Congress. Div. 1:* 73-89.
19. Johnson, D.W. (1980), Site susceptibility to leaching by H_2SO_4 in acid rainfall. Pages 525-536 in Hutchinson, T.C. and M. Havas (eds.) *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum Press.
20. Johnson, D.W., D.W. Cole and S.P. Gessel (1979), Acid precipitation and soil sulfate adsorption properties in a tropical and in a temperate forest soil. *Biotropica* 11:38-42.
21. Johnson, D.W., D.D. Richter, H.V. Miegroet and D.W. Cole (1983), Contributions of acid deposition and natural processes to cation leaching from forest soils: A review. *J. J.A.P.C.A.* 33: 1036-1041.
22. Johnson, D.W., J. Turner and T.M. Kelly (1982), The effects of acid rain on forest nutrient status. *Water Resources Research*

- 18: 449-461.
23. Johanson, N.M., R.C. Reynolds and G.E. Likens (1972), Atmospheric sulfur: Its effect on the chemical weathering of New England. *Science* 177:514-516.
 24. 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. Ph. D. Dissertation. Seoul National Univ.
 25. Kunishi, H.M. (1982), Combined effects of lime, phosphate fertilizer, and aluminum on plant yield from an acid soil of the southeastern United States. *Soil Sci.* 134: 233-238
 26. Lee, E.H., H.E. Heggstad and J.H. Bennett (1982), Effects of sulfur dioxide fumigation in open-top field chambers on soil acidification and exchangeable aluminum. *J. Environ. Qual.* 11:99-102.
 27. Lee, J.J. and D.E. 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. Leivestad, H. and I.P. Muniz (1976), Fish kill at low pH in a Norwegian river. *Nature* 259: 391-392.
 29. Malmer, N. (1976), Acid precipitation: Chemical changes in the soil. *Ambio* 5: 231-234.
 30. McFee, W.W., J.M. Kelly and R.H. Beck (1977), Acid precipitation effects on soil pH and base saturation of exchange sites. *Water, Air, and Soil Pollution* 7(3) 401-408.
 31. Mollitor, A.V. and D.J. Raynal (1983), Atmospheric deposition and ionic input in Adirondack Forests. *J.A.P.C.A.* 33(11): 1032-1036.
 32. Mollitor, A.V. and D.J. Raynal (1982), Acid precipitation and ionic movements in Adirondack forest soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 46 (1): 137-141.
 33. Morrison, I.K. (1984), Acid rain: A review of literature on acid deposition effects in forest ecosystems. *Forestry Abstracts* 45(8): 483-506.
 34. Mortvedt, J.J. (1983), Impacts of acid deposition on micronutrient cycling in agroecosystems. *Environ. Exp. Bot.* 23: 243-249.
 35. Overrein, I.N. (1972), Sulphur pollution patterns observed: Leaching of calcium in forest soil determined. *Ambio* 1(4): 145-147
 36. Peterson, L. (1980), Sensitivity of different soils to acid precipitation. Pages 573-577 in Hutchinson, T.C. and M. Havas (eds.) *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum press.
 37. Pionke, H.B. and R.B. Corey (1967), Relations between acidic aluminum and soil pH, clay and organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 749-752.
 38. Rajan, S.S.S. (1978), Sulfate adsorbed on hydrous alumina, ligands displaced, and changes in surface charge. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42: 39-44.
 39. Reuss, J.O. (1978), Simulation nutrients loss from soils due to rainfall acidity. *Corvallis Environ. Res. Lab. EPA 600/3-78-053.* 44 pp.
 40. Reuss, J.O. and D.W. Johnson (1985), Effect of soil processes on the acidification of water by acid deposition. *J. Environ. Qual.* 14: 26-31.
 41. Rippon, J.E. (1980), Studies of acid rain on soils and catchments. Pages 499-524 in Hutchinson, T.C. and M. Havas (eds.) *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum Press.
 42. Singh, B.R. (1984), Sulfate sorption by acid forest soils: 1. Sulfate adsorption iso herms and comparison of different adsorption equations in describing sulfate adsorption. *Soil Sci.* 138: 189-197.
 43. Singh, B.R., G. Abrahamsen and A. Stuanes

- (1980), Effect of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils, *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44: 75-80.
44. Tamm, C.O. (1976), Acid precipitation; Biological effects in soil and forest vegetation. *Ambio* 5: 235-238.
 45. Ulrich, B., R. Mayer and P.K. Khanna (1980), Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe. *Soil Sci.* 130: 193-200.
 46. Wiklander, L. (1980), The sensitivity of soils to acid precipitation. Pages 553-568 in Hutchinson, T C. and M. Havas (eds.) *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Plenum Press.
 47. Wiklander, L. (1975), The role of neutral salts in the ion exchange between acid precipitation and soil. *Geoderma* 14: 93-105.
 48. 邊雨嫻, 河濱(1985), 獨逸의 森林危機와 酸性비 자연보존 49:3-10.
 49. 鄭龍文(1987), 人工酸性雨が 잣나무 幼苗의 生長, 葉內含有成分 및 土壤의 化學的性質에 미치는 影響, 韓國林學會誌 76 : 25-32
 50. 黃慶善(1973), 우리나라 代表土壤의 反應 (PH)에 關한 調查研究, 韓土肥誌 6 : 153-158
 51. 金樟洙 外(1983), 生態學과 森林. 卿文社 pp. 71.
 52. 金在鳳 外(1982), 工團地域의 綠地造成 및 回復에 關한 研究 國立環境研究所報 4: 275-297
 53. 金遵敏(1985), 土壤에 미치는 酸性雨의 影響, 자연보존 49:15-18.
 54. 金光植 外(1982), 韓國의 氣候. 一志社, pp. 130, 141.
 55. 李壽煜(1981), 韓國의 森林土壤에 關한 研究(II). 韓國林學會誌 54 : 25-35.
 56. 吳宗煥(1986), 人工酸性雨が 樹木의 生長과 土壤에 미치는 影響. 慶熙大學校 大學院 碩士學位論文
 57. 任慶彬, 金泰旭, 權琦遠, 李景宰(1979), 環境汚染이 都市樹木의 生育에 미치는 影響(II), 서울大 農大 演習林報告 15:103-124.
 58. 任慶彬, 金泰旭, 權琦遠, 鄭永浩, 李重吉(1979), 環境汚染이 都市樹木의 生育에 미치는 影響(I). 서울大 農大 演習林報告 15 : 80-102.
 59. 柳寅秀(1978), 山地土壤의 特性과 改良 韓土肥誌. 11 : 247-262.
 60. 柳寅秀, 趙成鎮, 陸昌洙(1974), 置換性 Al 含量에 따른 石灰所要量 決定에 關한 研究. 韓土肥誌 . 7 : 185-191.
 61. 柳順昊, 宋寬哲(1984), 濟州道 土壤의 化學的 特性調查研究 : III. 柑橘園 土壤에서의 알루미늄 特性. 韓土肥誌 17:167-172.
 62. 尹淳康(1986), Gibbsite 와 有機物處理 및 PH變化가 土壤의 SO_4 吸着에 미치는 影響. 서울大學校 碩士學位論文
 63. 古明地 哲人(1980), 酸性雨, その生成と 影響. 現代科學 7: 61-65.
 64. 牧野 宏 外(1983), 酸性雨に關する調査研報(第一報), 神奈川縣におする 酸性雨成分の實態について. 神奈川縣公害センタ-研究報告 5:27-38.
 65. 吉本國春(1983), 酸性雨の現況について(2) 環技協ニユース 14 : 13-14.
 66. 吉本國春(1982), 酸性雨の現況について. 環技協ニユース 11 : 13-14.