

산성토양 개량제 처리에 따른 식물의 성장반응과 토양 성질의 변화

문형태 · 박병규 · 김준호*

공주대학교 생물학과, 서울대학교 생물학과*

Response of Plants and Changes of Soil Properties to Added Acid-Soil Ameliorants

Mun, Hyeong-Tae, Beung-Kyu Park and Joon-Ho Kim*

Department of Biology, Kongju National University

Department of Biology, Seoul National University*

ABSTRACT

Effects of addition of soil ameliorants on the growth and nutrient absorption of *Zea mays*, *Miscanthus sinensis* and *Phytolacca americana* were investigated. Acid soil from Yecheon Industrial Complex were used for the control plot (AS). We made two treatment plots, acid soil + lime (AS+L) and acid soil + dolomite (AS+D). Ratio of acid soil : soil ameliorants in treatment plot was 50 : 1(V:V). Acid soil and soil ameliorants were mixed thoroughly before use. Shoot length of corn in AS+L and AS+D was considerably increased by 141% and 137%, respectively, compared with that in AS. Pokeweed in AS+L and AS+D also increased by 183% and 152%, respectively, compared with that in AS. However, growth of *Miscanthus sinensis* showed slight difference between the control and the treatment plots. Biomass of corn and pokeweed in the treatment plots were also greater than those in the control plots. During the growth experiment with corn, concentrations of Ca and Mg in soil were increased and Al decreased with increased soil pH in the treatment plots. Amount of aluminum absorbed by corn in the control plot was greater than that in the treatment plots. In case of *Miscanthus sinensis*, however, aluminum absorption in the control plot was lower than those in the treatment plots.

Key words: Acid-soil, Ameliorants, Aluminum, Dolomite, Lime, *Miscanthus sinensis*, *Phytolacca americana*, *Zea mays*.

서 론

대기오염 물질이 식생에 미치는 영향은 오래 전부터 연구되어 왔다(Murphy and Sigmon 1990). 대기오염 물질 중 초기에는 주로 이산화황이 식물에 미치는 영향에 관심이 집중되었지

만, 최근에는 질소산화물에 의한 영향에 더 많은 관심이 집중되고 있다(Bell 1994). 이들 오염물질들은 대기중의 수증기와 반응하여 강산인 황산과 질산을 형성한 다음 빗물에 섞여 내리게 된다. 이러한 산성강하물에 의한 생태계의 변화는 육상과 수중을 막론하고 전 세계적으로 큰 관심을 불러 일으키고 있다(Fernandez 1989). 산성강하물은 토양의 산성화와 부영양화를

* 이 연구는 G-7 생태계 복원기술 개발사업의 지원으로 이루어졌음.

축진시키기 때문에 육상생태계의 구조와 기능에 큰 변화를 초래하고 있다(Johnson and Lindberg 1989, Johnson et al. 1993, Abrahamsen et al. 1989).

산성토양에서 식물의 생장을 제한하는 가장 중요한 요인은 알루미늄에 의한 독성이다(Foy 1974, 1984, Hutchinson et al. 1986, Keltjens and Dijkstra 1991). 이 밖에도 산성토양에서는 가용성 인과 칼슘, 그리고 마그네슘의 세탈이 심하고(Wolt 1990), 토양세균의 활성이 감소되어 질소고정 또는 질산화 작용도 부진하게 된다(Francis 1989).

우리 나라는 1960년대 중반부터 시작된 경제개발 5개년 계획을 여러 차례에 걸쳐 수행하는 과정에서 대규모 공업단지를 중심으로 환경오염이 점진적으로 누적되어 왔고(서 등 1981, 김 등 1988, 김 1992a, b, 김과 김 1991, 이 1993), 늘어나는 인구와 교통량은 대도시의 대기오염을 가속화시켰다. 따라서 거의 전지역에서 산성비가 내리고 있고(류 1994), 그로 인한 토양의 산성화가 점진적으로 누적, 확산되고 있는 실정이다. 토양의 산성화 뿐만 아니라 질소와 황 함량이 증가하여 토양의 부영양화가 진행되고 있다(Mun 1997).

본 연구는 산성토양에 토양 개량제를 처리한 후 식물의 생장과 영양염류 흡수, 토양의 영양염류와 가용성 알루미늄의 변동을 조사하여 이들 토양 개량제의 효과를 파악하고, 이러한 연구결과를 이용하여 파괴된 공단주변 식생의 복원에 필요한 기초자료를 얻는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

토양 특성

본 연구에 사용한 토양은 전남 여천시 여천공단의 남해화학 주변에 위치한 제석산의 산록에서 표면으로부터 깊이 10 cm까지의 표층토를 채취한 것이다. 제석산은 해발 336 m로 남해화학의 동쪽에 위치하고 있으며, 대기오염으로 원식생이 대부분 파괴되고 지소에 따라 참억새군락과 때죽나무군락이 우점하고 있다. 1993년 3월에 제석산의 하부에 형성되어 있는 때죽나무군락 부근의 공터에서 약 2,000 kg의 토양을 채취하여 공주대학교로 운반한 다음 실험에 사용하였다.

이 지역 토양의 이화학적 성질은, 토양 pH는 대부분이 4.0~4.4 범위이고, 지소에 따라 약간 차이가 있었지만 제석산 사면의 아래쪽에 비해 능선부의 토양 pH가 낮은 것으로 보고되었다. 또한 질소와 인 함량이 비오염지역에 비해 현저히 높았으며, 유기물 함량도 높은 것으로 나타났다. 그러나 칼슘과 마그네슘 함량은 비오염지역에 비해 현저히 낮은 것으로 나타났다(표 등 1994). 특히 토양의 황함량은 비오염지역인 공주 지방

의 토양에 비해 10배 이상 많은 것으로 나타나 황의 축적에 의한 토양 산성화를 암시하고 있다(표 등 1994).

생장 실험

본 실험에 사용한 식물은 옥수수(*Zea mays*), 미국자리공(*Phytolacca americana*), 참억새(*Miscanthus sinensis*) 이었다. 옥수수는 종묘상에서 구입한 골든 크로스 반탐을 사용하였는데, 이 품종은 60일 정도면 생장이 완결된다. 참억새와 미국자리공은 1992년 가을에 여천공단 주변에서 채취한 종자를 실험에 사용하였다.

실험에 사용한 화분은 내경 27 cm, 높이 40 cm인 길쭉한 형태이었다. 토양 개량제로는 비료상에서 구입할 수 있는 석회와 고토석회를 이용하였다. 대조구로는 공단 주변에서 채취한 산성토양을 그대로 사용하였고 실험구는 산성토양 : 개량제를 50:1(v/v)로 혼합하여 사용하였다. 옥수수, 참억새, 미국자리공의 종자를 발아시킨 후 한 화분에 각각 5개체씩 심었으며, 3종의 식물에 대해 대조구, 석회 처리구, 고토석회 처리구를 각각 10반복으로 하였다. 식물의 생장 실험은 1994년 6월 초순에 화분에 이식한 후 옥수수는 8월 중순까지, 참억새와 미국자리공은 10월 초순까지 실시하였으며, 빗물의 영향을 배제하기 위하여 비닐하우스 내에서 수행하였고, 대조구와 실험구에 매일 같은 양의 물을 충분히 공급하였다.

식물의 길이생장 측정은 옥수수의 경우 이식 후 2주부터 7주까지, 참억새와 미국자리공은 5주 후부터 15주까지 실시하였다. 생장 실험이 끝난 후 식물체를 잎, 줄기, 뿌리 등 각 부위별로 구분하여 건량을 측정하고 지상부/지하부의 비를 구하였다. 건량 측정이 끝난 식물체는 각 부위별로 마쇄하여 가용성 알루미늄, 인, 황, 전질소, 칼슘, 마그네슘의 분석에 사용하였다.

옥수수의 대조구와 석회 및 고토석회 처리구에서 식물생장에 따른 토양 성질의 변화를 조사하였다. 대조구와 처리구 화분에서 이식 후 4주째인 7월 1일부터 2주 간격으로 3회에 걸쳐 토양을 채취하였다. 토양은 직경 1.5 cm의 플라스틱 파이프를 이용하여 채취하였으며, 1개의 화분에서 1회에 약 10 g을 채취하여 각 구별로 10개의 화분의 것을 합하였다. 채취한 토양은 음건시킨 후 2 mm 체로 쳐서 토양 pH, 알루미늄, 칼슘, 마그네슘을 정량하였다.

토양 및 식물체 분석 방법

토양의 pH는 토양:증류수를 1:5로 하여 1시간 동안 진탕시킨 후 상등액의 pH를 pH meter로 측정하였고, 칼슘과 마그네슘은, 식물체의 경우 습식으로 분해한 뒤 atomic absorption

spectrophotometer(Perkin-Elmer 3110)를 사용하여 정량하였으며, 토양은 1 M ammonium acetate로 추출한 뒤 식물체와 같은 방법으로 정량하였다(Wilde *et al.* 1979). 가용성 알루미늄은 Allen *et al.* (1974)에 따라 정량하였다.

결과 및 고찰

식물의 길이생장 및 건물생산

옥수수의 경우 대조구인 산성토양에 비해 석회나 고토석회를 처리한 실험구에서 줄기의 길이생장이 현저히 증가하였다 (Fig. 1A). 그러나 석회 처리구와 고토석회 처리구 간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 7주가 지난 후 석회 처리구와 고토석회 처리구의 옥수수 길이생장은 대조구에 비해 각각 141%와 137%의 증가를 보였다.

미국자리공 줄기의 길이생장도 석회 처리구와 고토석회 처리구에서 대조구에 비해 뚜렷한 증가를 보였다(Fig. 1B). 15주가 경과된 후 석회 처리구와 고토석회 처리구의 길이 생장은 대조구에 비해 각각 183%와 152%의 증가를 보였다. 그러나 15주 이전에는 대조구와 처리구 간의 길이 생장의 차이가 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다(Fig. 1B).

옥수수와 미국자리공과는 대조적으로 참억새의 경우에는 실험구와 대조구 사이에 길이생장의 차이가 현저하지 않았다(Fig. 1C). 15주가 경과한 후 석회 처리구와 고토석회 처리구의 길이 생장은 대조구에 비해 각각 123%와 120%의 증가를 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 10주 이전에는 대조구의 길이생장이 석회 처리구에 비해 양호한 것을 알 수 있다.

각 식물의 전체 건량과 지상부/지하부의 건량비를 Table 1에 정리하였다. 옥수수는 7주간의 생육이 끝난 후 대조구 한 개체의 건량이 39.2 g/개체인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구는 각각 110.3 g/개체, 112.5 g/개체로 대조구에 비해 각각 282%, 287%가 증가되었다. 본 실험에서 지하부의 건량은 대조구가 약 11 g/개체인데 비해 처리구에서는 20 g/개체로 약 2배 정도 증가하였다. 이러한 결과는 산성토양에서 식물의 뿌리 생장이 저해된다는 다른 연구 결과와 일치한다(Ritchey *et al.* 1980, Caires and Rosolem 1991). 지상부/지하부의 비는 대조구가 2.57인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구에서는 각각 4.91, 3.95로 그 비가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 석회 처리구나 고토석회 처리구에서 뿌리의 생장도 증가하지만 지상부 생산량의 증가가 더욱 뚜렷하기 때문이다.

미국자리공의 경우에도 석회 처리구와 고토석회 처리구에서 건물 생산량이 증가되었다. 대조구의 미국자리공의 건량은 2.6 g/개체인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구에서는 개체당

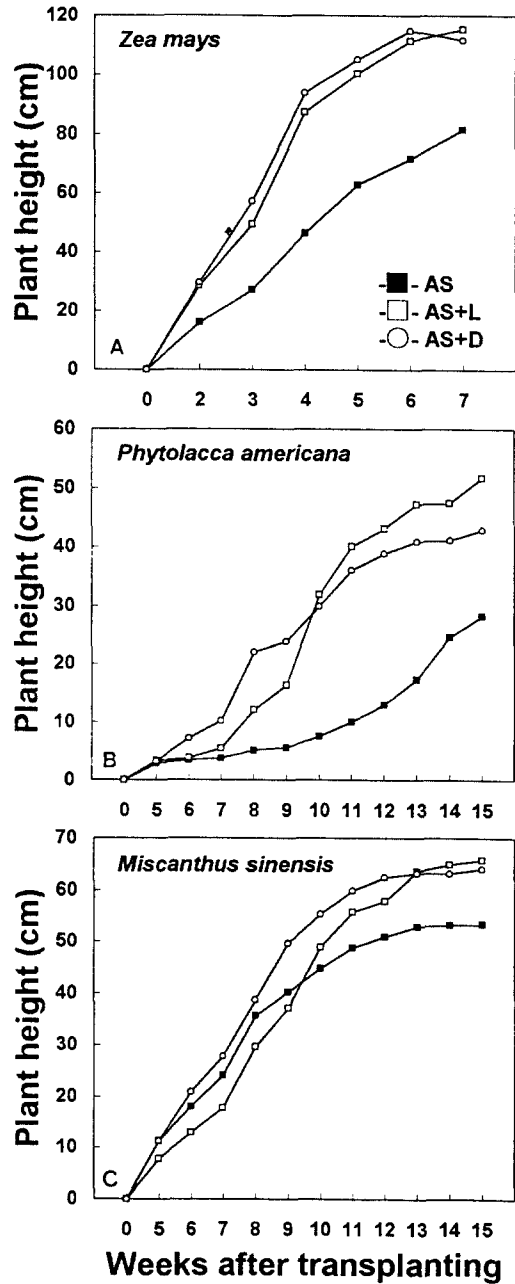


Fig. 1. Changes of plant height of *Zea mays*(A), *Phytolacca americana*(B) and *Miscanthus sinensis*(C) in response to soil conditions.

각각 6.4 g과 5.3 g으로 대조구에 비해 각각 271%, 206%의 증가를 나타냈다. 지상부/지하부의 비도 대조구에서는 1.87인데 비해 석회 처리구는 3.88, 고토석회 처리구는 2.52로 그 비가 증가하는 것을 알 수 있다.

참억새는 줄기의 길이생장에서 그 차이가 옥수수나 미국자

Table 1. Standing crops of *Zea mays*, *Phytolacca americana* and *Miscanthus sinensis*, and ratios of above-ground biomass/root(A/B) in experimental plots (g/plant, mean±SD)

Plots	<i>Zea mays</i>		<i>Phytolacca americana</i>		<i>Miscanthus sinensis</i>	
	Total	A/B	Total	A/B	Total	A/B
AS	39.2±4.22	2.57	2.6±0.57	1.87	7.6±0.83	0.73
AS+L	110.3±4.49	4.91	6.4±1.73	3.88	10.6±2.43	1.12
AS+D	112.5±8.41	3.95	6.3±2.18	2.52	9.2±1.61	0.79

AS: acid soil, AS+L: acid soil+lime, AS+D: acid soil+dolomite

리공에 비하여 뚜렷하지 않았는데 건량에서도 대조구 개체의 평균 건량이 7.6 g인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구에서는 개체당 10.6 g과 9.2 g으로 대조구에 비해 각각 139 %, 122 %가 증가되어 옥수수나 미국자리공에 비해 그 차이가 뚜렷하지 않았다. 지상부/지하부의 건물량의 비도 대조구가 0.73인데 비해 석회 처리구는 1.12, 고토석회 처리구는 0.79로 그 차이가 뚜렷하지 않았다. 이것은 산성 토양에서 참억새의 생장이 큰 저해를 받지 않는다는 것을 의미한다. 여천공업단지 주변 지역 중 원식생이 파괴된 지역에는 대부분 참억새가 우점하고 있는데, 그 생장이 매우 왕성한 것으로 관찰되었다.

이상의 결과를 종합하면 산성토양에 개량제인 석회와 고토석회를 처리할 경우 식물의 생장이 개선되지만 그 효과는 식물의 종에 따라 다르게 나타날 수 있음을 알 수 있다 (Fageria et al. 1991). Fageria 등 (1991)은 토양 개량제 처리시 벼와 덩굴강남콩의 건물 생산량 증가율이 다름을 보고한 바 있다.

식물 생장에 따른 토양 성질의 변화

옥수수 생장에 따른 토양 성질의 변화를 Table 2에 나타내었다. 초기 토양의 pH는 대조구가 4.4로 산성인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구는 각각 8.0과 7.5로 약알칼리성이었다. Table 2에서 보는 바와 같이 각 실험구 토양의 pH는 생장실험을 하는 동안 초기값과 큰 변화가 없었다. 가장 두드러진 차이는 알루미늄에서 볼 수 있었다. 대조구의 경우 처음에는 알루미늄의 함량이 0.34 mg/g이던 것이 0.43 mg/g으로 증가하였으나, 석회 처리구와 고토석회 처리구는 초기 값이 대조구에 비해 낮았을 뿐만 아니라 식물의 생장이 계속됨에 따라 그 값이 감소되는 것을 알 수 있다. 특히 고토석회 처리구에서 현저한 감소가 있었다. Shamshuddin 등 (1991)은 산성토양에 석회를 첨가하면 토양용액 중의 Al 농도가 330 μM에서 16 μM로 감소됨을 보고한 바 있다.

토양의 칼슘과 마그네슘 함량은 처리구와 대조구 간에 현저한 차이가 있었다. 칼슘의 경우 대조구는 1.98 μg/g인데 비해 처리구에서는 7~8 μg/g으로 높았으며, 고토석회 처리구에 비해 석회 처리구에서 그 값이 높았다. 마그네슘도 처리구가 대

Table 2. Changes of soil properties during the growth experiments with corn

Items	Plots	Initial	Jul. 1	Jul. 16	Jul. 28
pH	AS	4.39	4.49	4.69	4.60
	AS+L	8.02	7.66	7.63	7.68
	AS+D	7.52	7.47	7.37	7.43
Al (mg/g)	AS	0.34	0.41	0.43	0.43
	AS+L	0.18	0.11	0.12	0.12
	AS+D	0.25	0.08	0.08	0.08
P (μg/g)	AS	13.36	10.02	8.51	11.19
	AS+L	9.42	4.29	5.69	5.00
	AS+D	11.75	10.41	12.54	11.15
Ca (μg/g)	AS	1.98	1.54	2.11	1.38
	AS+L	8.53	8.21	8.22	8.47
	AS+D	7.32	7.67	7.86	7.40
Mg (μg/g)	AS	0.82	0.59	0.84	0.63
	AS+L	1.14	1.18	1.19	1.12
	AS+D	1.06	1.16	1.17	1.16

AS: acid soil, AS+L: acid soil+Lime, AS+D: acid soil+dolomite

조구에 비해 높았는데, 처리구간에는 그 값이 유사하였다. 처리구에서 칼슘과 마그네슘 함량이 높은 것은 토양 개량제가 산성토양을 중화시키는 역할 이외에 산성토양에서 부족되기 쉬운 칼슘과 마그네슘을 공급하는 기능도 있음을 알 수 있다.

식물이 흡수한 알루미늄, 칼슘 및 마그네슘

Table 3에서 보는 바와 같이 옥수수와 미국자리공의 단위 건량 당 알루미늄의 함량은 처리구에 비해 대조구에서 높은 것으로 나타났다. 옥수수 지상부의 알루미늄 함량은 대조구가 0.30 mg/g인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구에서는 각각 0.23, 0.12 mg/g이었다. 뿌리의 알루미늄 함량은 대조구에서 18.14 mg/g인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구에서는 각각 7.91, 6.07 mg/g 이었다. 그러나 참억새의 지상부 알루미늄 함량은 대조구가 0.01 mg/g인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구에서는 0.11, 0.16 mg/g으로 높았으며, 뿌리에서는 대조구가 1.79 mg/g인데 비해 처리구는 각각 3.24, 3.67

Table 3. Concentrations of Al, Ca and Mg in plant materials of *Zea mays*, *Phytolacca americana* and *Miscanthus sinensis* (mean±SD)

Items	Tissue	AS	AS+L	AS+D
<i>Zea Mays</i>				
Al(mg /g)	Leaf+Stem	0.30 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.12 ± 0.02
	Root	18.14 ± 1.53	7.91 ± 1.14	6.07 ± 2.36
Ca(μg /g)	Leaf+Stem	14.81 ± 1.28	22.96 ± 1.46	21.02 ± 1.39
	Root	5.43 ± 1.02	11.39 ± 0.99	8.21 ± 0.65
Mg(μg /g)	Leaf+Stem	16.22 ± 1.34	26.69 ± 2.32	27.33 ± 1.75
	Root	13.05 ± 2.13	27.16 ± 2.67	25.63 ± 2.43
<i>Phytolacca americana</i>				
Al(mg /g)	Leaf+Stem	2.13 ± 0.08	0.42 ± 0.01	1.22 ± 0.04
	Root	7.10 ± 0.53	3.93 ± 0.26	5.90 ± 0.51
Ca(μg /g)	Leaf+Stem	25.29 ± 2.36	29.95 ± 2.57	25.09 ± 2.49
	Root	21.12 ± 3.14	49.90 ± 5.47	29.85 ± 5.35
Mg(μg /g)	Leaf+Stem	26.49 ± 2.32	28.41 ± 3.11	27.63 ± 2.94
	Root	24.83 ± 3.14	26.97 ± 3.22	26.26 ± 2.71
<i>Miscanthus sinensis</i>				
Al(mg /g)	Leaf+Stem	0.01 ± 0.00	0.11 ± 0.01	0.16 ± 0.04
	Root	1.79 ± 0.23	3.24 ± 0.26	3.67 ± 0.31
Ca(μg /g)	Leaf+Stem	11.19 ± 1.12	18.24 ± 1.27	15.76 ± 0.92
	Root	5.53 ± 1.00	13.28 ± 2.12	7.02 ± 1.01
Mg(μg /g)	Leaf+Stem	17.87 ± 2.14	23.63 ± 2.49	27.09 ± 2.23
	Root	8.52 ± 2.33	25.29 ± 4.27	26.47 ± 3.56

AS: acid soil, AS+L: acid soil+lime, AS+D: acid soil+dolomite

mg/g이었다.

산성토양에서 식물의 생장을 제한하는 요인으로 Al의 독성을 들 수 있는데(Foy 1974, 1984, Hutchinson *et al.* 1986, Keltjens and Dijkstra 1991), 참억새의 경우에는 옥수수나 미국자리공과는 달리 Al 흡수량이 처리구보다 대조구에서 낮은 것으로 나타났다. 여천공단 주변 지역 중 원식생이 파괴된 지역에는 대부분 참억새가 대규모의 군락을 이루고 있는데, 본 실험의 결과에 의하면 산성토양에서 참억새가 Al의 흡수량을 감소시키는 기작을 가지고 있는 것으로 판단되나 이에 관해서는 좀더 깊은 생리·생태적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

칼슘과 마그네슘은 옥수수와 참억새의 경우 대조구에 비해 처리구에서 그 값이 더 높았으나 미국자리공은 대조구와 처리구 간에 차이가 없었다. 옥수수의 경우 지상부의 칼슘 함량은 대조구가 14.81 μg/g인데 비해 석회 처리구와 고토석회 처리구는 각각 22.96, 21.02 μg/g이었고 뿌리도 대조구에 비해 처리구에서 높았다. 마그네슘도 그 경향이 칼슘과 유사하였다.

적 요

산성토양(대조구, AS)에 토양 개량제를 처리한 석회 처리구(AS+L)와 고토석회 처리구(AS+D)를 설정한 후, 발아시킨

옥수수, 미국자리공, 참억새를 이식하여 이들의 길이생장과 건량 및 Al, Ca, Mg 흡수량, 그리고 옥수수 재배 토양의 화학적 변화를 조사하였다. 옥수수의 길이생장은 대조구에 비해 AS+L과 AS+D에서 각각 141 %와 137 %의 증가를 보였고, 미국자리공의 경우에도 AS+L과 AS+D에서의 길이 생장이 AS에 비해 각각 183 %, 152 %의 증가를 보였다. 그러나 참억새의 경우는 대조구와 처리구 간의 차이가 옥수수나 미국자리공에 비해 뚜렷하지 않았다. 건물량에서도 옥수수와 미국자리공은 처리구가 대조구에 비해 높았지만 참억새는 그 차이가 크지 않았다. 식물생장 중 토양의 화학적 성질의 변화는, 처리구에서 토양의 pH가 높아짐에 따라 칼슘과 마그네슘의 함량이 증가하고 알루미늄의 함량은 감소하였다. 식물의 단위 건량 당 칼슘과 마그네슘 함량은 옥수수와 참억새에서는 대조구에 비해 처리구에서 그 양이 많았으나 미국자리공은 대조구와 처리구 간에 차이가 없었다. 알루미늄의 경우 옥수수와 미국자리공은 대조구 식물에서, 참억새는 처리구에서 그 함량이 많은 것으로 나타났다.

인 용 문 헌

김재봉, 한상욱, 배정오, 고강석, 김정규, 황경섭, 김준선,

- 박인협, 서정근. 1988. 오염지역 생태계의 경시적 변화에 관한 연구. 국립환경연구원. NIER No. 8803-228.
- 김종갑, 김점수. 1991. 대기오염지역 주변 삼림토양의 오염농도 분석. 한국환경농학회지 10: 158-166.
- 김종갑, 1992a. 온산공단 주변의 삼림식생에 관한 조사. 한국생태학회지 15(3): 231-246.
- 김종갑. 1992b. 온산공단 주변 해송림의 초본식생에 관한 조사. 한국생태학회지 15(3): 247-255.
- 류태철. 1994. 수도권 지역에서 산성 강하물에 의한 리기다소나무림 쇠퇴의 기구와 회복. 서울대학교 이학박사논문. 219 p.
- 서정현, 정인명, 김재봉, 김동환, 정연보, 오재기, 강덕희, 강인구, 김태욱, 심재우, 김준호, 조경제, 유병태. 1981. 공단주변의 생태계에 관한 조사연구. 국립환경연구소. 167 p.
- 이창석. 1993. 대기오염으로 교란된 여천공단 주변 소나무군락의 재생. 한국생태학회지 16(3): 305-316.
- 표재훈, 문형태, 김준호. 1994. 여천공단 주변 삼림토양의 이화학적 특성. 한국생물과학협회 학술발표대회, 발표논문초록집 126 p.
- Abrahamsen, G., H.M. Seip and A. Semb. 1989. Long-term acidic precipitation studies in Norway. *In* D.C. Adriano and M. Havas (eds.). *Acidic precipitation : Case studies*. Springer-Verlag. London. pp. 137-180.
- Allen, S.E., J.A. Parkinson, H.M. Grimshaw and C. Quarmby. 1974. *Chemical analysis of ecological materials*. Blackwell Sci. Publication. Oxford.
- Bell, N. 1994. The ecological effects of increased aerial deposition of nitrogen. *Ecological Issues* No. 5. British Ecological Society. 36 p.
- Caires, E.F. and C.A. Rosolem. 1991. Root growth of peanut cultivars and soil acidity. *In* R.J. Wright, V.C. Baligar and R.P. Murrmann (eds.). *Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 239-244.
- Fageria, N.K., R.J. Wright, V.C. Baligar and J.R.P. Carvalho. 1991. Response of upland rice and common bean to liming on an oxisol. *In* R.J. Wright, V.C. Baligar and R.P. Murrmann (eds.). *Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 519-526.
- Fernandez, I.J. 1989. Effects of acidic precipitation on soil productivity. *In* D.C. Adriano and A.H. Johnson (eds.). *Acidic precipitation : Biological and ecological effects*. Springer-Verlag. London. pp. 61-83.
- Francis, A.J. 1989. Effects of acidic deposition on soil microorganisms. *In* D.C. Adriano and A.H. Johnson (eds.). *Acidic precipitation : Biological and ecological effects*. Springer-Verlag. London. pp. 305-326.
- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. *In* E.W. Carson. (ed.). *The plant root and its environment*. University Press of Virginia. Charlottesville. pp. 601-642.
- Foy, C.D. 1984. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil. *In* F. Adams. (ed.). *Soil acidity and liming*. Agronomy Monograph 12. pp. 57-97.
- Hutchinson, T.C., L. Bozic and G. Munoz-Vega. 1986. Responses of five species of conifer seedlings to aluminum stress. *Water, Air, Soil Pollution* 31: 283-294.
- Johnson, D.W. and S.E. Lindberg. 1989. Acidic deposition on Walker Branch watershed. *In* D.C. Adriano and M. Havas (eds.). *Acidic precipitation : Case studies*. Springer-Verlag. London. pp. 1-38.
- Johnson, A.H., T.G. Siccama, W.L. Silver and J.J. Battles. 1993. Decline of red spruce in high-elevation forests of New York and New England. *In* D.C. Adriano and M. Havas (eds.). *Acidic precipitation : Case studies*. Springer-Verlag. London. pp. 85-112.
- Keltjens, W.G. and W.J. Dijkstra. 1991. The role of magnesium and calcium in alleviating aluminum toxicity in wheat plants. *In* R.J. Wright, V.C. Baligar and R.P. Murrmann (eds.). *Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 763-768.
- Mun, H.T. 1997. Effects of group breeding of herons on soil properties and herb layer composition in pine forest. Submitted to *Plant and Soil*.
- Murphy, C.E., Jr. and J.T. Sigmon. 1990. Dry deposition of sulfur and nitrogen oxide gases to forest vegetation. *In* S.E. Lindberg, A.L. Page and S.A. Norton (eds.). *Acidic precipitation : Sources, depo-*

- sition, and canopy interactions. Springer-Verlag. London. pp. 217-240.
- Ritchey, K.D., D.M.G. Souza, E. Lobato and O. Correa. 1980. Calcium leaching to increase rooting depth in a savannah oxisol. *Agron. J.* 72: 40-44.
- Shamshuddin, J., C. Fauziah and H.A.H. Sharifuddin. 1991. Effects of limestone and gypsum application to a Malaysian ultisol on soil solution composition and yields of maize and groundnut. *In* R.J. Wright, V.C. Baligar and R.P. Murrmann (eds.). *Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 501-508.
- Wilds, S.A., R.B. Corey, J.G. Iyer and G.K. Voigt. 1979. *Soil and plant analysis for tree culture*. Oxford and IBH Publishing, New Delhi. 224 p.
- Wolt, J.D. 1990. Effects of acidic deposition on the chemical form and bioavailability of soil aluminum and manganese. *In* A.A. Lucier and S.G. Haines. (eds.). *Mechanisms of forest response to acidic deposition*. Springer-Verlag. London. pp. 62-107.

(1997년 2월 14일 접수)