

서울地域 都市林 土壤의 酸性化와 緩衝能力 變化^{1*}

金東燁² · 黃仁贊²

Soil Acidification and Soil Buffer Capacity Change in Urban Forests of Seoul Area^{1*}

Dong Yeob Kim² and In Chan Hwang²

요 약

토양의 pH 변화는 토양의 화학적 특성을 결정하는 중요한 요인이며 도시의 환경오염이 토양과 식물생장에 미치는 영향을 평가할 수 있는 지표가 되기도 한다. 서울지역의 대기오염이 도시림 토양에 미치는 영향을 파악하기 위하여 조사지역을 도심에서 외곽방향으로 5km 간격의 동심원으로 구분하고 도시 외곽지역에서 토양산성화에 차이가 있는지 조사하였다. 각 구역의 도시림에서 토양시료를 A, B 층에서 채취하여 토양 pH, 토양완충능력, 양이온치환능력 및 염기포화도를 측정하였다. 토양 pH는 A층에서 3.96~5.08, B층에서 4.10~5.25의 분포를 나타냈다. 도심에서 외곽방향으로 구역간 토양 pH 차이에는 통계적인 유의성이 없었으나 외곽 구역에 비하여 도심 구역에서 토양 pH가 비교적 낮은 경향을 보였다. 토양완충능력은 도심 구역(0-5km와 5-10km)이 외곽 구역(10-15km와 15-20km)에 비하여 현저히 낮은 값을 나타내었다. 양이온치환능력과 이와 관련있는 염기포화도는 구역간 차이에 유의성이 없었다. 대기오염물질의 도시의 외곽 방향으로의 확산을 따라 서울지역 도시림의 토양 산성화가 유사한 진행을 보이고 있는 것으로 나타났다. 토양완충능력이 도심 구역에서 낮은 것은 서울지역에서 대기 중 산성강하물의 유입에 대하여 나타난 토양 반응의 척도로 볼 수 있다.

ABSTRACT

Soil pH change is an important factor which determines soil chemical properties. It is an indicator of the effect of urban environmental pollution on soils and plant growth. The objective of this study was to assess the effect of air pollution on the soil of Seoul urban forests during the course of the air pollution being dispersed toward suburb area. Study sites were divided into four sections of concentric circles with 5km interval. Soil samples were collected from A and B horizons in the urban forests, and analyzed for soil pH, soil buffer capacity, cation exchange capacity, and base saturation. Soil pH ranged from 3.96 to 5.08 for A horizon and from 4.10 to 5.25 for B horizon, which were not significantly different among the sections. However, there was a trend of soil pH lowered at the sections close to the urban center. Soil buffer capacity was lower at 0-5km and 5-10km sections compared to that at the outer sections. Cation exchange capacity and base saturation were not different significantly among the sections. Following the pattern of air pollutants being dispersed from urban center to suburb, soil acidification was observed at the urban forests in Seoul area. Low level of soil buffer capacity toward the urban center was an indicator of soil acidification at the urban forests.

Key words : soil acidification, soil pH, soil buffer capacity, cation exchange capacity, base saturation, urban forest

¹ 接受 1997年 12月 24日 Received on December 24, 1997.

² 성균관대학교 조경학과 Department of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University.

* 이 논문은 한국학술진흥재단 자유공모과제 연구비 지원에 의하여 이루어진 것임.

서 론

대기오염 물질의 자연생태계 유입에 따른 환경 피해는 오염원인 도시와 도시 주변지역은 물론 최근에는 산림지역에까지 나타나고 있다. 대기 중 산성강하물로부터 생성되는 산성우는 토양산성화의 주원인이 되는데, 대도시와 공업지역의 평균 강우산도는 pH 4.5-5.5의 분포를 보였으며 산악지역보다 pH가 1가량 낮은 것으로 나타났다(김동엽 등, 1996). 침엽수림의 토양산도는 도시 지역인 서울이 pH 4.45로 가장 낮았고 공단지역인 울산이 pH 4.81, 강원도의 평창, 광성, 운두령이 평균 pH 6.03으로 측정되었다(이수옥과 민일식, 1988). 토양산성화는 도시 및 공단지역의 녹지환경 및 식물생장에 변화를 가져오게 된다(김갑태, 1995; 김태욱 등, 1994; Shortle 등, 1997; McLaughlin, 1985; Ulrich 등, 1980). 환경오염에 의한 도시림의 쇠퇴 징후가 우리 나라의 수도권지역에서도 나타나고 있는 것으로 보고되었다(김준호, 1991; 이경재 등, 1993). 이와 같은 대기오염의 영향은 급성적인 원인보다는 광역적으로 나타나는 오염물질에 의한 만성적인 결과로 나타나는 것으로 볼 수 있다(박원규와 정성호, 1994).

대기오염물질 가운데 황산화물은 토양을 산성화시키고 토양내 유리 Al 이온과 중금속 농도를 증가시킬 뿐 아니라 각종 영양염류의 용탈을 증가시켜 식물생장에 지장을 일으킨다(Cresser 등, 1993). 식물영양염류의 용탈은 산림쇠퇴를 일으키는 대표적인 원인 가운데 하나이기도 하다(Kandler와 Miller, 1990). 산성물질이 토양에 유입되는 과정에서 토양의 완충능력은 토양의 급격한 화학적 변화를 막는 역할을 한다. 이러한 토양완충능력은 양이온치환능력과 토양에 흡착되어 있는 염기성 양이온의 양에 의해 결정된다(주영특과 김영재, 1994). 토양산도와 토양완충능력은 환경 요인에 의한 식물생장환경의 변화를 파악할 수 있는 중요한 요소이다. 토양산성화는 토양산도의 변화를 측정함으로써 그 정도를 판정할 수 있다. 그러나 토양산도는 토양의 완충작용의 결과로 나타나는 것이기 때문에 토양내에서 일어나는 완충 과정의 구명을 통하여 토양산성화를 보다 근원적으로 파악할 수 있는 근거를 마련할 수 있을 것이다. 토양완충능력은 자연상태에서 쉽게 변화되지 않으며 환경 영향에 대한 토양 반응을

예측케 하기 때문에 환경 보전과 관리를 위한 기초자료로서 활용 가치가 높다.

서울지역에서 대기오염이 장기간 지속되었고 이로 인하여 토양산성화가 가속된 것으로 나타난 기존의 연구 결과를 토대로 본 연구에서는 도시림 토양이 산성화된 상태를 토양완충능력을 비롯한 토양의 화학적 특성 변화를 통하여 파악하고자 하였다. 또한 대기오염의 영향에 의한 토양산성화 여부를 확인하기 위하여 도시 내부에서와 오염 농도가 낮아지는 도시 외곽지역에서의 토양의 화학적 특성 차이를 비교하였다.

재료 및 방법

연구 대상지인 서울시와 주변의 도시림 중 근린공원, 묘지공원, 도시자연공원 및 그린벨트로 구분되는 지역에서 28개 조사 지점을 선정하였다(그림 1). 조사지는 서울시청 지역을 중심으로 하는 4개의 동심원으로 구분되었다. 대기오염이 토양산성화에 영향을 미친다고 가정하면 외곽으로 갈수록 낮아지는 대기오염 농도로 인하여 도시외곽에서는 토양산성화 변화에 차이가 나타날 것으로 예상되었다. 각 구역별로 얻은 결과는 분산분석에 의하여 평균값들의 유의성을 판정하였다.

토양시료는 조사지역 중 훼손되지 않은 3지점에서 A, B층을 구분하여 채취하였다. 조사지역에 따라 A층의 깊이에 차이가 있기 때문에 토양 깊이보다는 층위에 따라 구분하였다. 시료는 실험실 내에서 풍건시킨 다음 2mm 체로 쳐서 보관하였다. 토양의 화학적 특성을 파악하기 위하여 물과 토양을 2:1 비율로 섞어 3반복으로 토양 pH를 측정하였다. 치환성양이온은 토양시료를 1 N NH₄OAc 용액으로 추출하여 Ca, Mg, K, Na에 대하여 원자흡광스펙트로미터로 분석하였으며, 양이온치환능력은 NH₄OAc 치환법으로 측정하였다(한기학 등, 1988). 염기포화도는 양이온치환능력에 대한 치환성양이온의 백분율로 계산하였다.

토양완충능력은 산성우를 토양에 투입하고 여기에서 나오는 용출수의 화학 특성을 분석하는 것으로 측정되어 왔다(민일식과 이수옥, 1990). 이 방법은 시간이 오래 걸릴 뿐 아니라 실험오차의 발생 확률이 커서 만족스러운 결과를 얻기가 어려웠다. 본 연구에서는 토양완충능력을 연속 토양 pH 측정장치를 이용하여 측정하였다(石塚

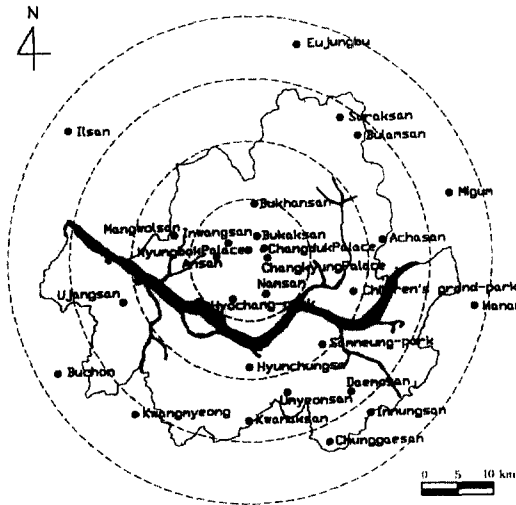


Fig. 1. Location of study sites in each section of Seoul area.

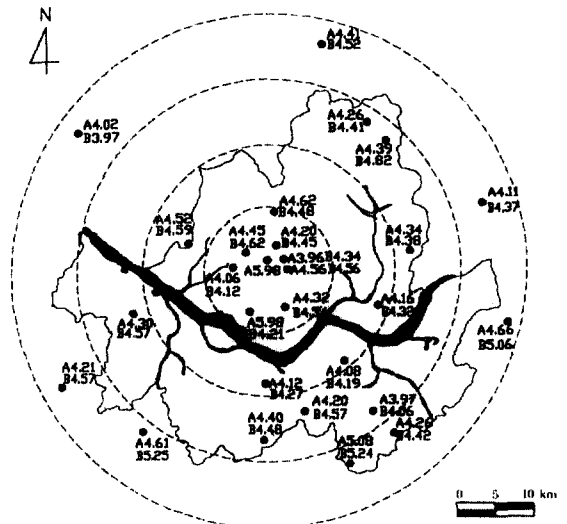


Fig. 2. Soil pH values at the study sites (A : A horizon, B : B horizon).

등, 1990, 1991; 石塚 1992). 토양시료를 직경 4cm, 높이 5cm의 유리 부호너갈대기에 4cm 높이까지 채우고 증류수를 90ml/hr 속도로 2시간 동안 가하여 안정시켰다. 여기에 황산을 희석한 산성용액(H^+ 20meq/L, pH 1.9)을 27ml/hr 속도로 유입시켰다. 갈대기를 통과한 유출액의 pH는 20분마다 기록되었고 pH 변화가 안정될 때까지 약 24시간 동안 연속 측정되었다. 유입된 H^+ 의 양에 대한 토양 pH의 변화는 표면적 $1m^2$, 깊이 4cm의 토양 체적 단위 기준으로 토양완충능력을 산출하였다.

결과 및 고찰

서울 지역의 토양 pH는 15-20km 구역에서 A층 4.40, B층 4.68의 평균값을 보여 네 구역중 가장 높았고 전반적으로 도심구역에서 비교적 낮은 값을 보였다(그림 2, 3). 조사지역내 대부분의 토양 pH는 3.96~5.25의 분포를 보여 산성토양에 내성이 강한 식물이라도 생육하기에 비교적 열악한 환경인 것으로 생각된다. 식물은 토양 pH가 5.6~7.0일 때 필요한 양분을 가장 잘 흡수하며 pH 4.9 이하가 되면 생육에 지장을 받는 것으로 알려져 있다(Wilkinson, 1994). 본 연구에서 측정된 토양 pH는 다른 연구의 결과와 비슷한 분포를 보였으나 약 10년전에 비해서는 토양 pH가 현저히 낮아진 것으로 나타났다(이수옥

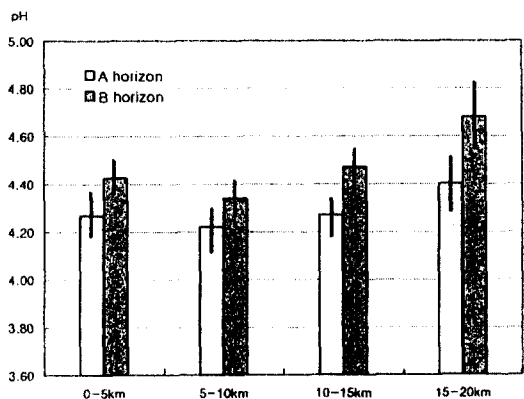


Fig. 3. Soil pH in each section of Seoul area.

과 민일식, 1988). 또한 그리고 서울지역의 도시 녹지는 공업단지 등 다른 대기오염지역보다도 토양 pH가 0.5 정도 낮은 것으로 나타났다. 도심인 0-5km 구역의 녹지 중 경복궁, 창경궁, 효창공원과 같은 근린공원에서는 녹지 관리를 위하여 시비와 석회시비를 해왔기 때문에 예외적으로 높은 토양 pH를 보였고 따라서 이 지역들은 분석대상에서 제외되었다. 토양의 치환성양이온(K, Na, Mg, Ca) 함량은 전 구역에서 유의성 있는 차이를 보이지 않았다(Table 1).

양이온치환능력은 15-20km 구역에서 A층 11.6 meq/100g, B층 9.6meq/100g으로 가장 높은 것으로 나타났으나 통계적 유의성은 없었다(그림 4).

Table 1. Exchangeable cations at the study sites.

Distance from Urban Center	Site	A horizon				B horizon			
		Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na
..... meq/100g									
0- 5 km	Namsan	2.92	0.46	2.24	0.44	1.35	0.15	1.89	0.52
	Ansan	2.94	0.84	2.87	0.66	1.11	0.36	1.32	0.37
	Inwangsan	2.55	0.27	1.78	0.41	0.37	0.18	1.64	0.47
	Bukaksan	1.29	0.21	1.22	0.40	0.30	0.08	1.58	0.85
	Bukhansan	2.68	0.42	1.63	0.50	0.65	0.20	1.58	0.41
	Changduk Palace	1.59	0.42	1.18	0.46	0.40	0.14	0.21	0.51
5-10 km	Mangwolsan	1.85	0.21	2.11	0.39	0.67	0.10	2.22	0.41
	Samneung Park	1.73	0.45	1.23	0.49	0.88	0.19	1.52	0.44
	Children's Grand Park	4.40	0.92	2.85	0.49	1.08	0.26	2.35	0.67
	Hyunchungsa	1.80	0.30	1.78	0.35	1.58	0.27	1.94	0.41
10-15 km	Ujangsan	0.73	0.30	1.78	0.42	0.33	0.08	1.45	0.55
	Kwanaksan	1.93	0.25	1.82	0.58	0.39	0.16	1.52	0.43
	Umyeonsan	1.29	0.20	1.69	0.70	0.63	0.11	1.48	0.42
	Daemosan	1.15	0.24	1.44	0.51	0.71	0.09	1.21	0.37
	Achasan	1.60	0.30	2.31	1.14	0.79	0.20	1.46	0.57
	Bulamsan	1.35	0.23	1.37	0.57	0.50	0.07	1.29	0.40
	Suraksan	5.05	0.28	1.44	0.39	0.60	0.10	1.97	0.83
15-20 km	Chunggyesan	0.81	0.21	1.99	0.64	2.32	0.27	1.60	0.41
	Inneungsan	1.15	0.40	2.24	0.39	0.66	0.09	1.75	0.34
	Eujungbu	1.79	0.24	1.76	0.40	1.58	0.28	1.69	0.41
	Migum	2.15	0.38	2.06	0.39	1.53	0.22	2.20	0.43
	Hanam	3.89	0.88	1.91	0.48	3.29	0.63	1.43	0.61
	Kwangmyeong	6.16	0.73	1.57	0.45	4.96	2.57	1.09	0.46
	Buchon	1.59	0.28	1.57	0.05	0.63	0.13	1.40	0.40
	Ilsan	4.28	0.99	1.77	0.73	0.83	0.25	1.33	0.37

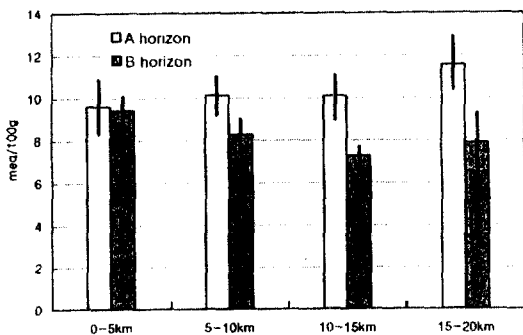


Fig. 4. Average cation exchange capacity in each section of Seoul area.

조사지역내 도시립 토양의 대부분은 표토층이 얇았으며 B층의 발달이 미약한 경우가 많았다. 양이온치환능력은 A층에서 높은 것으로 나타났다. 염기포화도는 A, B층 모두 구역간 변이가 심하였고 구역별 토양산도의 변화 경향과는 일치하지 않았다(그림 5). 위 결과는 서울지역에서 대기오염 영향으로 인한 토양산성화의 흔적을 나타내기는 했으나 토양 양분의 심각한 유실까지는 이루어지지 않은 것으로 볼 수 있다.

토양완충능력은 A, B층에서 모두 구역간 통계적 유의성은 없었으나 외곽구역에서 비교적 높은 값을 보였다. 토양완충능력은 도심으로 갈수록

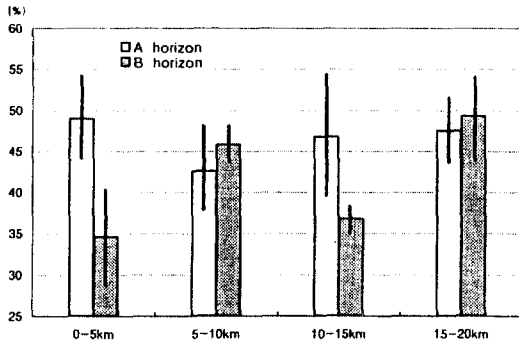


Fig. 5. Average base saturation in each section of Seoul area.

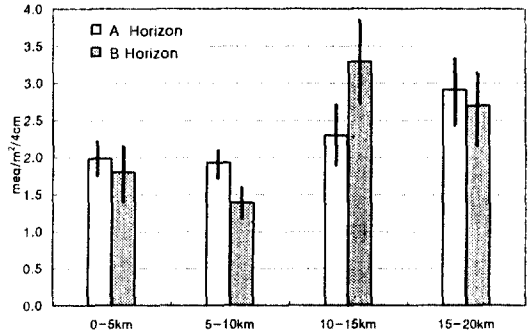


Fig. 7. Average soil buffer capacity in each section of Seoul area.

낮아져 구역별 토양산도 변화 경향과 비슷한 경향을 보였다(그림 6, 7). 조사지역내 표토층의 토양완충능력은 토양 pH와 정의 상관을 나타내었다(그림 8). 토양완충능력과 토양 pH의 관계는 변이 폭이 커서 결정계수가 낮게 나타났으나 조사지점의 수가 증가하면 결정계수도 증가할 것으로 보인다.

조사지역은 지질학적으로 흑운모화강암과 호상 흑운모편마암 등으로 구성되어 있으며 식생과 지형이 같지 않기 때문에 화학적 특성을 서로 비교하기에는 어려움이 있었으나 구역별 토양산성화의 경향은 대체적으로 파악할 수 있었으며 토양형에 따른 토양 특성 변화는 추후 연구에 의하여

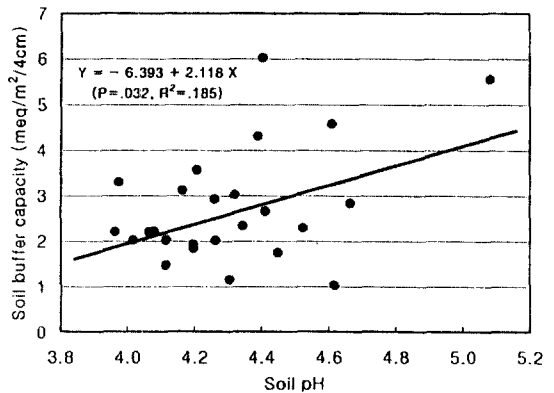


Fig. 8. The relationship between soil buffer capacity and soil pH of the study sites.

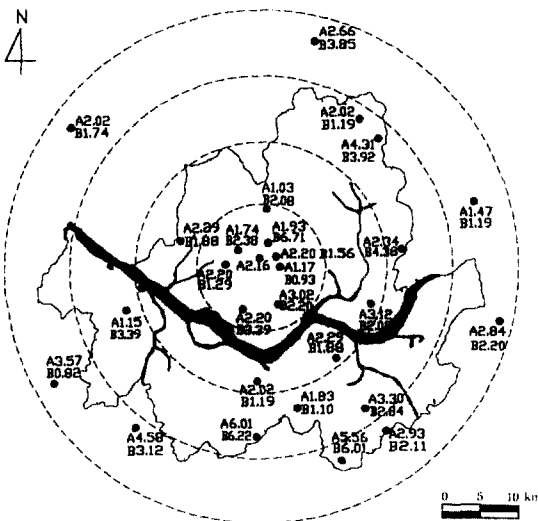


Fig. 6. Soil buffer capacity values at the study sites(A : A horizon, B : B horizon, Unit : meq H⁺/m²/4cm).

결론

밝혀져야 할 과제로 생각된다. 또한 대기오염물질의 유입으로 인한 토양산성화 현상은 국부적으로 한정되는 것이 아니라 광범위하게 적용되기 때문에 서울지역에서 대기오염물질이 토양에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 조사 면적을 확대하여 연구할 필요가 있을 것으로 생각된다.

서울지역 도시림의 토양 pH는 전반적으로 낮은 경향을 보였다. 이와 같은 토양 pH의 변화 정도는 식물의 생육에 지장을 초래할 수 있는 수준까지 도달했으며 이에 따른 식물생장 변화와 도시림의 건전도는 차후의 연구에서 밝혀져야 할 것으로 생각된다. 치환성양이온, 양이온치환능력 및 염기포화도는 전구역에서 특별한 차이를 나타내지 않았으며 변이폭이 커서 대기오염에 의한 토양산성화를 판단하는데 적합한 자료가 되지 않

았다. 토양완충능력은 도심구역에서 낮은 것으로 나타났다. 토양완충능력은 토양산성화의 진행 상태를 보여주는 지표이기 때문에 도시림의 산성화 및 오염정도를 알 수 있는 중요한 자료로 생각된다. 서울시 도시림의 산성화는 외곽지역으로 갈수록 그 정도가 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 토양완충능력의 차이를 통해서도 확인할 수 있었다. 토양완충능력은 환경 변화에 대한 토양반응의 척도일 뿐 아니라 앞으로의 환경반응에 대한 예측을 가능케 하므로 오염의 영향을 심하게 받는 도시림의 관리를 위하여 주목해야 할 요소인 것으로 생각된다.

인 용 문 헌

1. 김갑태, 1995. 인공산성우가 몇 침엽수종의 종자발아, 생장 및 침엽에 미치는 영향(1). 응용생태연구 6(1) : 1-821.
2. 김동엽 · 유정환 · 채지석 · 차순형, 1996. 대기오염물질의 산림생태계내 유입과 토양의 화학적 특성변화. 한국임학회지 85(1) : 84-95.
3. 김준호, 1991. 환경오염에 의한 도시림의 쇠퇴징후. pages 3-25. 도시 · 산림 · 환경. 임업연구원 연구자료 제62호.
4. 김태욱 · 차순형 · 채지석 · 유정환 · 김동엽 · 변재경 · 김정환 · 양병국, 1994. 대기오염에 의한 산림토양 양료 및 독성물질 동태. pages 55-91. 과학기술처 특정과제 연구보고서. 산림청 임업연구원.
5. 민일식 · 이수옥, 1990. 인공산성우가 삼림토양의 완충능에 미치는 영향. 한국임학회지 79(4) : 376-387.
6. 박원규 · 정성호, 1994. 연륜연대학적 기법을 응용한 산림쇠퇴도 평가. pages 31-53. 과학기술처특정과제 연구보고서. 산림청 임업연구원.
7. 이경재 · 김갑태 · 이용범, 1993. 산성우 및 대기오염물질이 삼림에 미치는 피해의 조기 판단에 관한 연구. pages 138-145. 한국과학재단 특정기초연구보고서.
8. 이수옥 · 민일식, 1988. 산림생태계와 토양의 양료순환과 분포조사. pages 49-89. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 임업연구원. 과학기술처 특정연구 제 1차년도 보고서.
9. 주영특 · 김영채, 1994. 인공산성우가 삼림토양의 화학적 특성에 미치는 영향. 한국임학회지 83(3) : 280-285.
10. 한기학 외 6인, 1988. 토양화학분석법 - 토양 · 식물체 · 토양미생물. 농촌진흥청 농업기술연구소. 450pp.
11. 石塚和裕, 1992. 산성강하물에 대한 토양완충능 실태 평가. 山林立地 34(1) : 26-35.
12. 石塚和裕 · 高橋正通 · 高橋美代子, 1990. 인공산성우에 의한 토양의 pH 완충능. 日林論 101 : 249-252.
13. 石塚和裕 · 松浦陽次郎 · 的場節子, 1991. 산림의 표층토양의 산성화와 pH 완충능. 日林論 102 : 343-346.
14. Cresser, M., K. Killham and T. Edwards, 1993. Soil Chemistry and Its Applications. Cambridge University Press. New York. 192pp.
15. Kandler, O. and W. Miller, 1990. Dynamics of "acute yellowing" in spruce connected with Mg deficiency. Water, Air, and Soil Pollution 54 : 21-34.
16. McLaughlin, S.B. 1985. Effects of air pollution on forests, a critical review. Journal of the Air Pollution Control Association. 35(5) : 512-534.
17. Shortle, W.C., K.T. Smith, R. Minocha, G.B. Lawrence and M.B. David, 1997. Acidic deposition, cation mobilization, and biochemical indicators of stress in healthy red spruce. Journal of Environmental Quality 26 : 871-876.
18. Ulrich, B., R. Mayer and P.K. Khanna, 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe. Soil Science 130 : 193-199.
19. Wilkinson, R.E. 1994. Acid soil stress and plant growth. pages 125-148. in R.E. Wilkinson ed. Plant-Environment Interactions. Marcel Dekker, Inc. New York.