

산성강하물과 산림토양 화학성의 관련성에 관한 연구¹

- 경상남도 지역을 중심으로 -

이충규²

Studies on the Relation between Acid Deposition and Soil Chemical Properties in Forest Areas¹

- Especially in Gyeongsangnam-Do Province -

Chong-Kyu Lee²

요 약

본 연구는 경남 산림지역의 산성강하물과 토양 화학적 특성의 관련성 조사를 위하여 수행하였다. 토양 pH는 평균 4.40이었으며, 가장 높은 조사구는 밀양 산내 조사구로 pH 5.02였고, 가장 낮은 조사구는 pH 4.08의 남해 서면이었다 ($p < 0.05$). 산림토양내 유기물, 유효인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 양이온치환용량(CEC)은 지역별 유의차가 있었다 ($p < 0.05$). 산림토양내 중금속 함량은 납이 평균 3.86mg/kg이었고, 거제 신현이 9.87mg/kg으로 가장 높았으며, 밀양 산내가 0.86mg/kg으로 가장 낮았다($p < 0.05$). 토양의 화학적 특성과 강우산도의 상관은 토양 pH($r=0.7826^{**}$), 칼슘($r=0.6278^*$), 마그네슘($r=0.5841^*$), 양이온치환용량($r=0.6341^{**}$), 카드뮴($r=0.5995^*$)과 정의 상관이었으며, 납($r=-0.5283^*$)은 부의 상관이었다. 대기 중의 SO₂ 농도와 상관은 토양 pH($r=-0.6796^{**}$), 칼슘($r=-0.5810^*$), 마그네슘($r=-0.5522^*$), 양이온치환용량($r=-0.5905^*$)과 부의 상관이었다. 대기 중의 NO₂ 농도와 상관은 유기물($r=0.6208^*$), 칼륨($r=0.5380^*$)과 정의 상관이었다. 따라서 강우산도 및 대기 중의 SO₂는 토양의 산성화에 영향을 미치는 것으로 사료되며, 그리고 토양 내 중금속 함량에 영향을 미치는 것은 Cd와 Pb함량과 관련성이 있으며, 그 외 중금속의 영향은 없었다.

주요어 : 토양 화학적 특성, 토양중금속, 이산화황, 이산화질소

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the relation between air depositions and soil properties in Gyeongsangnam province. Soil pH was average 4.40 in regions, and was the highest soil pH value in Miryang-sanne(pH 5.02), the lowest pH value in Namhae-seomyeon(pH4.08). Soil pH, soil organic matter content, avail phosphorus, K, Ca and cation exchange capacity(CEC) were significantly different among regions($p < 0.05$). Pb in Heavy metal content was 3.86 mg/kg average value, and was the highest in Keo-je region(9.87mg/kg), the lowest in Mryang-sanne (0.86mg/kg). Zn, Cd, Cr and Ni were significantly different among regions($p < 0.05$). Correlation between rainfall pH and soil properties were positive in soil pH($r=0.7826^{**}$), Ca($r=0.6278^*$), Mg($r=0.5841^*$), CEC($r=0.6341^{**}$) and Cd($r=0.5995^*$), and were negative in Pb($r=-0.5283^*$). Correlation between SO₂ concentration and soil properties was negative in soil pH($r=-0.6796^{**}$), Ca($r=-0.5810^*$), Mg($r=-0.5522^*$) and CEC($r=-0.5905^*$). Correlation between NO₂

1 접수 11월 24일 Received on Nov. 24, 2007

2 진주산업대학교 산림자원학과 Department of Forest Resources, Jinju National University, Jinju(660-758), Korea(이충규. suam7@jinju.ac.kr)

concentration and soil properties were positive in organic matter ($r=0.6208^*$), K($r=0.5380^*$). It was predicted that rainfall and SO_2 concentration would affect soil acidification, and soil heavy metal content related Cd and Pb. Others soil heavy metal were not related.

KEY WORDS : SOIL PROPERTY, SOIL HEAVY METAL, SO_2 , NO_2

서 론

최근 공업지역과 대도시지역에서 계속적으로 발생되고 있는 환경오염은 산성비 등에 의한 강하물이 주종을 이루고 있어 이로 인하여 주변의 산림생태계에 직접 또는 만성적인 산림피해를 일으키고 있으며, 이와 같은 산성강하물은 중화학공장의 가동에 의한 분진물이나 화력발전소에 의한 매연, 인구의 도시집중과 더불어 급증하고 있는 자동차 등의 매연이 그 주원인으로 되어 있다. 따라서 이와 같은 오염물질이 대기 중에 존재할 뿐만 아니라, 수목에 건성강하물의 형태로 부착되어 있다가 강우에 세탈되어 광대한 산림지역으로 확산, 유입되기 때문에 수목의 뿌리나 임내 토양까지도 그 성능을 저하시키는 등 많은 피해를 일으키고 있다.

이와 같은 산성비에 의한 산림쇠퇴 현상은 우리나라 뿐만 아니라(김재갑, 1992, 1997; 이충규 등, 1998), 세계적으로 발생하고 있으며(苗村, 1997; Georgii, 1986), 산성강하물에 의한 산림피해는 생리적, 생화학적 장애를 일으키고 있다(Nobel, 1991). 산성비에 의한 산림쇠퇴의 인과관계 구명은 산성강하물과 대기오염 물질에 의한 직접영향과 2차적으로 토양 양료의 변화를 초래하여 토양을 산성화시키므로 간접영향을 주고, 토양산성화를 가속시켜 토양건조의 변화로 인한 식물의 피해를 유발하며(Cape and Fowler, 1981), 환경오염을 인한 병해충의 발생에 영향을 미치고 있다(岸, 1988). 식생에 피해를 주는 대기오염 물질은 Gas형 물질과 입자 형 오염물질로 나누고 그 중 SO_2 , NO_2 화합물에 의한 산성비가 대표적인 습성의 산성강하물이며(高橋, 1991), 산성비의 농도와 용존 물질의 성분은 조사지역에 따라서 다를 뿐만 아니라 임내와 임외 및 오염원과 근접관계의 많은 요인이 작용하므로 조사지역과 산림특성에 따른 비교, 조사 연구는 산림 내에서 양료 변화의 구명 및 산림의 오염원 흡착능력의 파악에 매우 중요하며 이에 관련된 연구 보고(脇, 1989; 下原, 1993; 井川, 1992)가 있다. 산림내의 강우는 수관 및 수간에 부착되어 있는 건성강하물의 영향을 받는다. 임목의 수관에 산성물질의 부착은 잎과 줄기에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 강우에 의한 침착물질의 유출은 수관 바로 아래의 토양에 큰 영향을 미치고 있다(Mahendreappa, 1982). Ulrich(1980)는 유황산화물, 질소

산화물 등에 의한 산성비가 토양의 양료를 용탈시키며 토양을 산성화시켜 중금속 등이 집적되어 활력을 약화시킨다는 토양의 산성화설을 주장하였고, 산성토양에서 식물의 생육이 저하되는 원인이 산성비 중 수소이온(H^+)의 직접적인 영향 뿐만 아니라 토양에 생성된 중금속 성분은 식물체내에서 과도한 흡수를 한 것이 생육저하의 원인이며, 그리고 토양이 산성화되면 토양 내 존재하는 식물생장에 유해한 중금속이 용출되며, 그것은 식물에 흡수가 좋은 형태로 변화된다고 보고(伊豆田, 1992; 이충규와 김종갑, 1988)하였다. 또한 洗 등(1988)은 실제로 식물에 흡수되는 중금속은 산성비에 의한 토양 pH가 낮은 경우에 많이 나타나며, 식물체내의 중금속 함량과 토양중의 교환성 중금속 농도 사이에는 높은 상관성이 있다고 보고하였다.

따라서 대기오염 및 산성비로 인해 산림생태계에 미치는 영향을 파악하고 산림지역의 토양을 분석하여 산성비가 산림토양에 미치는 영향을 구명하여 산림생태계 피해에 대한 방지 대책을 수립하기 위한 기초적 자료를 제공하고자 하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사지선정

조사지역 선정은 경상남도 전 지역을 $40km \times 40km$ 메시한 후 대각선과 교차점의 산림지역에 조사구를 선정하여 2000년부터 2006년까지 매월 산성강하물을 측정하여 모니터링을 실시하였다. 토양채취 조사구는 기존 조사구와 1km 이내 산림에서 산림의 토양특성을 대표 할 수 있는 지역을 토양채취구로 선정하여 산성강하물과 토양성분의 관련성을 구명하기 위한 대상지로 하였다(Table 1).

2. 조사방법

산성강하물과 토양특성 상호간의 관련성을 구명하기 위하여 조사구로 선정된 산림에서 2007년 10월에 토양시료를 채취하였다. 토양채취 방법은 산림의 토양특성을 대표할 수 있는 대표지점을 선정한 뒤 중간지점과 약 5m 거리로 동서

Table 1. General characteristics of study regions

Acid deposition sites			Soil property sites			
Regions		Elevation(m)	Regions	Elevation(m)	Slope(°)	Aspect
Sacheonshi	E 128°06'01"	60	E 128°06'09"	65	16	ES
Hyangchon	N 34°55'33"		N 34°55'28"			
Sacheonshi	E 128°04'58"	60	E 128°05'28"	108	20	WS
Joaryng	N 34°56'60"		N 34°57'16"			
Jinjushi	E 128°10'59"	63	E 128°10'54"	65	20	ES
kungok	N 35°05'07"		N 35°05'22"			
Jinjushi	E 128°17'50"	50	E 128°18'18"	60	20	EN
Daecheon	N 35°09'30"		N 35°09'52"			
Hamangun	E 128°27'10"	55	E 128°27'30"	62	16	ES
Daesan	N 35°21'15"		N 35°21'02"			
Gimhaeshi	E 128°55'20"	140	E 128°55'19"	147	22	ES
sangdong	N 35°07'17"		N 35°07'18"			
Changnunggun	E 128°30'42"	66	E 128°30'51"	75	18	NW
Koam	N 35°34'34"		N 35°34'31"			
Miryangshi	E 128°52'53"	124	E 128°53'17"	156	18	ES
sannae	N 35°35'07"		N 35°35'21"			
Hapcheongun	E 128°08'44"	41	E 128°08'38"	62	16	ES
seosan	N 35°34'19"		N 35°34'17"			
Kerjeshi	E 128°39'03"	68	E 128°39'05"	89	20	WS
shinhyeon	N 34°51'19"		N 35°51'18"			
Sancheonggun	E 127°50'45"	212	E 127°50'46"	229	22	WS
Honggye	N 35°21'25"		N 35°21'32"			
Hadonggun	E 127°50'04"	47	E 127°50'03"	50	15	S
kumnam	N 34°58'57"		N 34°58'57"			
Namhaegun	E 127°49'11"	65	E 127°49'27"	108	20	WS
seomyean	N 34°51'04"		N 34°51'03"			
Hodonggun	E 127°52'34"	105	E 127°52'23"	129	20	WS
bukcheon	N 35°06'31"		N 35°06'30"			

남북 각 방향에서 토양채취기를 이용하여 토양 깊이 20cm 까지 토양 시료를 총 5개의 부 시료를 채취하여 하나의 혼합 시료로 하는 방법(환경부, 2005)을 이용하였다.

토양시료는 14개조사구에서 5곳을 선정하여 70개의 부 시료를 채취하였으며, 분석시료는 70개 부시료에서 14개조사구의 혼합시료 14개를 3반복으로 만들었다. 토양분석(농업과학기술원, 2000)에 의하여 토양산도, 양이온치환용량, 유효인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 유기물함량을 분석하였다.

토양특성 중에서 토양 내 중금속 함량 분석은 0.1N-HCl로 침출하여 6개 원소(Zn, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni)를 유도결합플라즈마 분광계(Inductively Coupled Plasma, Atomscan 25, USA)로 측정하였다(농업과학기술원, 2000).

산림토양의 화학적 특성과 산성강하물의 관련성을 구명하기 위하여 2000년부터 설치하여 강우산도, SO₂, NO₂의 측정하였다. 이러한 데이터를 수집하기 위한 조사방법은 월별로 14개 조사구에서 강우시 자동으로 개폐되어 강우가

포집되는 강우자동채취기(SL-12001)를 사용하여 강우를 채취하였다. 수거한 강우를 pH meter(Dms-880)로 측정하였고, SO₂, NO₂는 Passive sampler 법에 의하여 조사구에 1개월간 흡착된 포집기를 실험실로 옮겨 Ion Chromatography (Sykam s-134)로 분석하였다. 본 연구에서 데이터 상호관련성의 분석을 위하여 2000년부터 2006년까지 7년간의 데이터를 이용하였다.

3. 통계적 분석

채취한 토양시료를 분석하여 토양의 화학적 특성, 토양 중금속을 함량과 산성강하물의 관련성을 알아보기 위하여 먼저 ANOVA를 실시하였고 통계적으로 유의한 경우 Duncan's 검정을 실시하여 지역간의 차이를 비교하였다. 따라서 이러한 결과로서 산성강하물과 상관분석을 실시하였다(SAS, 1989).

결과 및 고찰

1. 지역별 토양특성

산림지역 14개 조사구 토양의 화학적 특성은 Table 2와 같다. 토양 pH는 14개 지역 평균 4.40이었으며, 가장 높은 조사구는 밀양 산내로서 pH 5.02였고, 가장 낮은 조사구는 pH 4.08의 남해 서면이었는데, 지역별 유의차가 있었다 ($p < 0.05$). 이러한 분석결과는 우리나라 갈색산림토양의 평균 pH 5.3~5.5(김종갑, 1992) 보다 산성산성화된 토양으로 분석되었다. 토양 유기물 함량의 경우 사천 좌룡 조사구로서 71g/kg로 가장 높았고, 조사지역 평균이 33.78g/kg으로 적절한 범위에 있었다. 유효인산의 경우 평균 8.83mg/kg으로 유효인산의 적정기준치(김춘식, 2007)는 밤나무 임지에서 평균 100mg/kg에 크게 미치지 못하므로 결핍상태로 사료된다. 토양의 칼륨 함량은 평균 0.22cmolc/kg로 사천 좌

룡 조사구가 0.49cmolc/kg로 가장 높았고, 합천 서산이 0.11cmolc/kg로 가장 낮았다. 칼슘의 함량은 평균 2.44cmolc/kg이었고, 밀양 산내가 0.29cmolc/kg로 가장 높았고, 남해 김해 상동이 0.11cmolc/kg로 가장 낮았는데 94배 차이가 있어 지역별의 차이 매우 심하였다. 토양의 마그네슘 함량은 평균 1.15cmolc/kg로 밀양 산내가 4.42cmolc/kg로 가장 높았고, 김해 상동이 0.11cmolc/kg로 가장 낮았으며 지역별 차이가 비교적 크게 나타났다. 토양의 양이온치환용량은 가장 높은 지역은 밀양 산내로 18.53cmolc/kg이었고, 거제 신현이 1.28cmolc/kg로 가장 낮아 14배 차이가 있었다.

2. 토양의 중금속 함량

산림지역 14개 조사구 토양의 중금속 함량은 Table 3과 같다. 아연은 평균 61.39mg/kg로 가장 높은 지역은 하동

Table 2. Soil chemical properties of investigated forest sites in Gyeongnam province

Region	Soil pH	Organic matter (%)	Avail. P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	CEC
Sacheonsi hyangchon	4.39 ^d (0.02)	3.38 ^c (1.86)	7.04 ^{cde} (0.62)	0.20 ^c (0.01)	1.85 ^{fg} (0.63)	0.76 ^f (0.15)	4.43 ^{ef} (0.02)
Sacheonsi joaryong	4.37 ^d (0.02)	7.09 ^a (2.95)	6.34 ^{cdef} (0.53)	0.49 ^a (0.02)	3.18 ^d (0.88)	0.86 ^e (0.12)	8.82 ^c (0.02)
Jinjushi kumgok	4.37 ^d (0.02)	2.76 ^g (1.01)	6.00 ^{cdef} (0.51)	0.26 ^c (0.01)	2.59 ^{de} (0.72)	1.21 ^d (0.42)	5.40 ^{de} (0.02)
Jinjushi daecheon	4.30 ^d (0.02)	2.84 ^g (1.06)	7.64 ^c (0.87)	0.23 ^d (0.02)	1.34 ^{gh} (0.65)	0.52 ^g (0.11)	3.49 ^{ef} (0.02)
Hamangun daesan	4.64 ^e (0.03)	2.71 ^{gh} (1.09)	8.17 ^{cd} (0.97)	0.23 ^d (0.02)	5.03 ^b (0.72)	4.36 ^b (1.03)	12.99 ^b (0.02)
Gimhaeshi sangdong	4.32 ^e (0.02)	4.21 ^c (1.92)	4.70 ^{ef} (0.33)	0.15 ^h (0.01)	0.70 ^{hi} (0.11)	0.11 ^j (0.00)	4.35 ^{ef} (0.02)
Changnunggun koam	4.63 ^d (0.03)	1.96 ⁱ (0.12)	6.26 ^{cdef} (0.48)	0.16 ^{gh} (0.01)	3.95 ^c (0.01)	2.19 ^c (0.88)	7.01 ^{cd} (0.02)
Miryangshi sannae	5.02 ^a (0.04)	2.63 ^h (1.02)	27.97 ^a (2.02)	0.40 ^b (0.05)	10.29 ^a (1.03)	4.42 ^a (1.04)	18.53 ^a (0.02)
Hapcheongun seosan	4.31 ^e (0.04)	1.54 ^j (1.04)	5.80 ^{def} (0.08)	0.11 ⁱ (0.00)	0.77 ^{hi} (0.72)	0.24 ⁱ (0.02)	4.01 ^{ef} (0.02)
Kerjeshi shinhyeon	4.14 ^f (0.04)	3.89 ^d (1.52)	11.57 ^b (0.95)	0.14 ^{hi} (0.01)	0.18 ⁱ (0.01)	0.14 ^j (0.01)	1.28 ^g (0.02)
Sancheonggun honggye	4.32 ^c (0.04)	5.32 ^b (2.02)	11.99 ^b (0.87)	0.18 ^{ef} (0.01)	0.58 ^{hi} (0.22)	0.13 ^j (0.01)	5.39 ^{fg} (0.02)
Hadonggun kumnam	4.15 ^f (0.03)	2.98 ^f (1.02)	7.38 ^{cde} (0.52)	0.15 ^{gh} (0.01)	0.67 ^{hi} (0.34)	0.26 ⁱ (0.03)	3.37 ^{efg} (0.02)
Namhaegun seomyean	4.08 ^g (0.03)	1.75 ⁱ (1.01)	3.63 ^f (0.02)	0.12 ^{ij} (0.01)	0.22 ⁱ (0.02)	0.12 ^j (0.01)	3.38 ^{efg} (0.02)
Hodonggun bukcheon	4.55 ^c (0.04)	4.23 ^c (1.83)	7.30 ^{cd} (0.53)	0.18 ^{fg} (0.01)	2.22 ^{ef} (0.57)	0.45 ^h (0.08)	4.89 ^c (0.02)

note: Same letters within each column indicate no significance at $p=0.05$ (DMRT,SAS), Standard error is given parentheses

금남이 110.95mg/kg이었고, 가장 낮은 지역은 합천 서산이 20.74mg/kg이었다. 모든 조사구의 아연함량은 토양환경보전법상의 우려기준치(300mg/kg)보다 낮아 기준치에 미달하였다(환경부, 2005). 카드뮴은 평균 0.05mg/kg로 대기오염 및 산성비의 피해가 극심한 지역인 온산공단 카드뮴 함량이 평균 0.6mg/kg(김종갑, 2007)의 결과 보다 낮았으며, 토양환경보전법 우려기준(1.5mg/kg)보다 낮아 기준치에 미달하였다. 크롬 함량 평균은 0.08mg/kg이었고, 밀양 산내가 0.15mg/kg 가장 높았으며, 합천 서산이 0.01mg/kg으로서 가장 낮았다. 구리는 평균 0.17mg/kg이었으며, 밀양 산내로서 0.84mg/kg로 가장 높았고, 산청 삼장이 0.053mg/kg로 가장 낮았다. 납은 평균 3.86mg/kg이었고, 거제 신현이 9.87mg/kg으로 가장 높았고, 밀양 산내가 0.86 mg/kg으로 가장 낮았다. 지역간에는 유의차가 있었고($p<0.05$), 거제 신현은 밀양 산내 보다 11.5배 정도 높았다. 이러한 결과는

토양환경보전법의 우려기준치에는 크게 미달하였으며, 또한 김종갑(2007)의 보고에 의하면 오염지역인 온산공단의 경우 57.0mg/kg에 비하여 매우 낮은 결과였다. 따라서 지역간의 차이는 조선소와 공장, 그리고 도시의 도로가 연결된 거제조사구의 경우 납과 화력발전소가 연결된 사천 좌룡 조사구에서 카드뮴이 지역간의 차이가 있는 것으로 사료된다. 또한 광양제철소가 근접한 하동지역에서 아연의 함량이 높은 것이 영향이 있는 것으로 생각되며, 토양 중 치환성의 중금속 함량 증가원인은 주로 특정 중금속의 비산 및 강우, 강설에 의한 이동과 산성강하물의 유입에 의한 중금속의 활성 증가가 주원인으로 된다. Smith(1981)는 도로변 산림 토양의 Pb함량은 교통량에 비례한다고 보고하였으며, Tatsumi *et al.*(1983)도 Pb오염은 자동차의 증가에 따른 영향이 매우 크며, 토양 중 중금속 함량은 공단주변이 다른 지역에 비해 높은 이유는 기계, 비료, 제련소 등 생산제조업

Table. 3 Soil heavy metal of investigated forest sites in Gyeongnam province

Regions	Zn	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni
	mg/kg					
Sacheonshi	46.89 ⁱ	0.08 ^{ab}	0.07 ^{cd}	0.10 ^f	3.29 ^f	24.62 ^f
hyangchon	(2.10)	(0.02)	(0.03)	(0.06)	(0.20)	(3.10)
Sacheonshi	54.57 ^g	0.09 ^a	0.08 ^{bc}	0.09 ^{fg}	2.17 ^h	37.02 ^d
joaryong	(2.20)	(0.02)	(0.04)	(0.07)	(0.32)	(5.18)
Jinjushi	36.40 ^j	0.04 ^{de}	0.02 ^{fg}	0.07 ^{gh}	1.76 ⁱ	23.28 ^f
kumgok	(2.13)	(0.01)	(0.01)	(0.03)	(0.13)	(3.04)
Jinjushi	52.33 ^h	0.01 ^f	0.07 ^{cd}	0.17 ^{cd}	2.89 ^g	37.21 ^d
dacheon	(5.27)	(0.001)	(0.04)	(0.08)	(0.42)	(5.12)
Hamangun	95.64 ^c	0.08 ^{ab}	0.03 ^f	0.20 ^c	3.84 ^g	71.83 ^b
daesan	(9.31)	(0.05)	(0.01)	(0.11)	(0.35)	(7.23)
Gimhaeshi	30.09 ^l	0.06 ^{bc}	0.08 ^{cd}	0.13 ^c	5.77 ^c	9.03 ⁱ
sangdong	(2.35)	(0.06)	(0.02)	(0.07)	(0.66)	(0.78)
Changnunggun	68.45 ^f	0.09 ^{ab}	0.06 ^{de}	0.07 ^{gh}	2.46 ^h	40.62 ^c
koam	(5.38)	(0.07)	(0.03)	(0.03)	(0.21)	(5.66)
Miryangshi	102.65 ^b	0.08 ^{ab}	0.15 ^a	0.84 ^a	0.87 ^j	90.61 ^a
sannac	(12.37)	(0.06)	(0.07)	(0.87)	(0.02)	(9.15)
Hapcheongun	20.74 ^m	0.04 ^{de}	0.01 ^g	0.09 ^{fg}	5.27 ^d	23.73 ^f
seosan	(2.70)	(0.04)	(0.01)	(0.05)	(0.75)	(3.15)
Kerjeshi	72.74 ^e	0.04 ^{de}	0.04 ^{ef}	0.30 ^b	9.88 ^a	15.42 ^h
shinhyeon	(5.10)	(0.04)	(0.01)	(0.82)	(0.87)	(2.56)
Sancheonggun	110.95 ^a	0.07 ^{ab}	0.10 ^b	0.05 ^h	1.71 ⁱ	35.68 ^d
honggye	(13.17)	(0.04)	(0.06)	(0.02)	(0.07)	(4.22)
Hadonggun	88.71 ^d	0.04 ^{de}	0.10 ^{bc}	0.14 ^{de}	6.28 ^b	70.59 ^b
kumnam	(6.18)	(0.03)	(0.06)	(0.28)	(0.55)	(7.31)
Namhaegun	33.34 ^k	0.02 ^{ef}	0.15 ^a	0.07 ^{gh}	4.51 ^c	18.58 ^g
seomyean	(2.14)	(0.01)	(0.07)	(0.05)	(0.42)	(1.89)
Hodonggun	31.53 ^{kl}	0.06 ^{bcd}	0.15 ^a	0.05 ^{gh}	2.80 ^g	28.92 ^c
bukcheon	(2.01)	(0.04)	(0.06)	(0.04)	(0.21)	(2.88)

note: Same letters within each column indicate no significance at $p=0.05$ (DMRT,SAS), Standard error is given parentheses

Table 4. Rainfall pH by years in Gyeongsangnam-do province

Regions	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Sacheonshi hyangchon	5.14	5.01	5.51	4.98	5.49	5.58	5.77
Sacheonshi joaryong	5.27	5.65	5.58	5.35	5.43	5.5	5.70
Jinjushi kumgok	5.12	5.57	5.45	5.00	5.60	5.3	5.50
Jinjushi daecheon	5.64	5.40	5.09	4.95	5.67	5.51	5.68
Hamangun daesan	5.65	5.56	5.74	5.18	5.50	5.58	5.77
Gimhaeshi sangdong	5.78	5.41	5.61	4.99	5.65	5.53	5.64
Changnunggun koam	5.64	5.69	6.05	5.55	5.93	5.81	6.13
Miryangshi sannae	5.89	5.53	5.94	5.25	5.80	5.67	6.06
Hapcheongun seosan	5.57	5.46	5.14	5.21	5.85	5.77	6.30
Kerjeshi shinhyeon	5.05	5.10	5.01	5.01	5.06	5.34	5.48
Sancheonggun honggye	5.96	5.55	5.18	5.33	5.70	5.27	5.58
Hadonggun kumnam	5.02	5.02	5.05	5.08	5.04	5.4	5.61
Namhaegun seomyean	4.97	4.97	4.98	4.95	4.95	5.3	5.39
Hodonggun bukcheon	5.18	5.33	5.57	5.33	5.57	5.5	5.46
mean	5.42	5.38	5.42	5.15	5.52	5.50	5.72

note: Data were derived from the Gyeongsangnam-do Forest Environment Research Institute

체들의 특성에 따른 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 산성강하물의 배출이 높은 지역에서 토양의 분석결과 산성화가 진행되고 있는 것으로 사료된다.

3. 산성강하물과 토양특성의 상관

2000년부터 2006년까지 측정된 강우산도(Table 4), 대기 중 SO₂농도(Table 5) 그리고 대기 중 NO₂농도(Table 6)는 월별 측정값을 평균한 측정결과이다. 이 측정값과 토양의

화학성과 중금속의 상관관계를 분석하였다(Table 7).

토양요인과 강우산도의 상관은 토양 pH($r=0.7826^{**}$), 칼슘($r=0.6278^*$), 마그네슘($r=0.5841^*$), 양이온치환용량($r=0.6341^{**}$), 카드뮴($r=0.5995^*$)과 정의 상관이었으며, 납($r=0.5283^*$)은 부의 상관이었다. 대기 중의 SO₂ 농도와 상관은 토양 pH($r=-0.6796^{**}$), 칼슘($r=-0.5810^*$), 마그네슘($r=-0.5522^*$), 양이온치환용량($r=-0.5905^*$)과 부의 상관이었다. 대기 중의 NO₂ 농도와 상관은 유기물($r=0.6208^*$), 칼륨($r=0.5380^*$)과 정의 상관이었다.

Table 5. SO₂ by years in Gyeongsangnam-do province

Regions	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Sacheonshi hyangchon	0.007	0.007	0.005	0.006	0.013	0.008	0.011
Sacheonshi joaryong	0.004	0.007	0.004	0.016	0.006	0.006	0.011
Jinjushi kumgok	0.003	0.005	0.004	0.004	0.006	0.004	0.005
Jinjushi daecheon	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.005	0.005
Hamangun daesan	0.006	0.006	0.005	0.004	0.005	0.004	0.007
Gimhaeshi sangdong	0.005	0.007	0.004	0.005	0.006	0.004	0.007
Changnunggun koam	0.006	0.007	0.005	0.000	0.001	0.002	0.006
Miryangshi sannae	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.006
Hapcheongun seosan	0.005	0.006	0.004	0.001	0.003	0.003	0.003
Kerjeshi shinhyeon	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.004	0.009
Sancheonggun honggye	0.004	0.005	0.004	0.001	0.005	0.004	0.008
Hadonggun kumnam	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.006	0.010
Namhaegun seomyean	0.008	0.005	0.004	0.005	0.012	0.011	0.016
Hodonggun bukcheon	0.003	0.006	0.004	0.008	0.006	0.006	0.017
Mean	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.009

note: Data were derived from the Gyeongsangnam-do Forest Environment Research Institute

Table 6. NO₂ by years in Gyeongsangnam-do province

Regions	2003	2004	2005	2006
Sacheonshi hyangchon	0.006	0.001	0.002	0.005
Sacheonshi joaryong	0.016	0.001	0.001	0.004
Jinjushi kumgok	0.004	0.000	0.001	0.003
Jinjushi daecheon	0.004	0.001	0.001	0.003
Hamangun daesan	0.004	0.001	0.001	0.004
Gimhaeshi sangdong	0.005	0.001	0.002	0.003
Changnunggun koam	0.000	0.000	0.000	0.004
Miryangshi sannae	0.003	0.000	0.001	0.004
Hapcheongun seosan	0.001	0.000	0.001	0.003
Kerjeshi shinhyeon	0.006	0.001	0.001	0.004
Sancheonggun honggye	0.001	0.000	0.001	0.003
Hadonggun kumnam	0.003	0.001	0.001	0.003
Namhaegun seomyean	0.005	0.001	0.002	0.005
Hodonggun bukcheon	0.008	0.000	0.001	0.003
Mean	0.005	0.001	0.001	0.004

note: Data were derived from the Gyeongsangnam-do Forest Environment Research Institute

강우산도 및 대기 중의 SO₂는 토양의 산성화에 영향을 미치는 것으로 사료되며, 토양 내 중금속 함량에 영향을 미치는 것은 Cd와 Pb함량이 관련성이 있으며, 그 외 중금속은 영향이 없는 것으로 분석되었다.

산림생태계에 집적된 대부분의 중금속은 유기화합물의 형태로 부식층에 축적되는데, 이때 토양 산성화는 축적된 중금속의 이동을 촉진시켜 토양 생물과 식물체 뿌리는 물론 지하 수질에도 영향을 미친다(Huettl, 1988)고 보고하였는데, 산성강하물의 집적은 토양의 양료와 중금속의 함량에

영향을 미치고 있는 것으로 사료되며, 산성강하물에 의한 토양의 화학성 변화는 토양의 양료의 악화로 이어지며 수목의 뿌리 발달과 수목의 쇠퇴에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한 지속적인 산성강하물의 토양내로 유입은 지하 수질에도 영향을 미칠 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 경상남도산림환경연구원 “대기오염고정조사

Table 7. Correlation coefficient between soil properties and acid depositions

Soil properties	Mean	S.E	Rainfall(pH)	SO ₂ concentration(ppm)	NO ₂ concentration(ppm)
			Pr>r		
Soil pH	4.40	0.25	0.7826**	-0.6796**	-0.1084
Organic matter	33.79	1.49	-0.0272	0.2207	0.6208*
Avail. P ₂ O ₅	8.71	0.61	0.3223	-0.4965	-0.1881
K	0.21	0.11	0.3133	-0.1410	0.5380*
Ca	2.40	0.27	0.6278*	-0.5810*	0.0061
Mg	1.13	0.15	0.5841*	-0.5522*	-0.0549
CEC	6.24	0.45	0.6341**	-0.5905*	0.0595
Zn	60.36	2.97	0.2067	-0.2881	-0.2072
Cd	0.06	0.03	0.5995*	-0.3202	0.3627
Cr	0.08	0.05	-0.1347	-0.1569	0.1327
Cu	0.17	0.21	0.2674	-0.4090	-0.0743
Pb	3.82	0.23	-0.5283*	0.4362	0.0494
Ni	37.65	2.38	0.3440	-0.3424	-0.1445

note: ** p<0.01, * p<0.05

구 주변 산림지역 토양조사분석”과제 중의 일부로서 연구비를 지원하여 주신 경상남도산림환경연구원에 감사드립니다.

인용문헌

- 김종갑(1992) 溫山工團周邊의 山林植生에 關한 調査. 韓國生態學會誌 15(3): 231-246.
- 김종갑(1997) 지구환경변동과 농임업. 서경문화사. 237쪽.
- 김종갑(2007) 환경오염지역의 식생복원을 위한 환경 스트레스 내성 종 선발. 농림부. 191쪽.
- 김춘식(2007) 경상남도 밤나무임지의 지역별 토양특성. 한국임학회지 96(1): 89-95.
- 농업과학기술원(2000) 토양 및 식물체 분석법. 202쪽.
- 이충규, 김종갑, 조현서(1998) 수목피해와 산성강하물의 관련성에 관한 연구. 환경생태학회지 12(2): 131-137.
- 이충규, 김종갑(1998) 山林內 降雨 및 土壤 重金屬의 關聯性에 關한 研究. 韓國林學會誌 87(4): 584-89.
- 환경부(2005) 토양환경보전법. 89쪽.
- 伊豆田 孟(1992) 酸性雨等による植物衰退現象實態/足尾銅山被害跡地土壤汚染. 資 源環境對策. 28(14): 1321-1327.
- 岸 洋一(1988) マツ材線蟲-松くい虫-. トーマスカンパニー. 298pp.
- 脇 孝介(1989) 酸性降下物等の土壤中の動態とスギ林への影響豫測. 日本化學會誌 25(5): 434-437.
- 苗村 晶彦(1997) 瀬戸内海沿岸部大氣汚染物質動態森林衰退關研究. 廣島大學博士論文. 50pp.
- 高橋 邦秀(1991) 酸性降下物森林環境問題研究會報告. 北方林業. 43(5): 1-24.
- 洗 幸夫, 本間 慎, 久野 勝治(1988) 土壤中交換性重金屬濃度吸收重金屬量の關係. 日菫雜. 57: 481-488.
- 下原 孝章(1993) 大氣中の酸性降下物の動態沈着評價(1). 大氣汚染學會誌 28(5): 295-307.
- 井川 學(1992) 日本氣象學會春季大會シンポジウ 「酸性雨-地球環境問題として」報告. 271-275.
- Cape, J. N. and D. Fowler(1981) Changes in epicuticular wax of *Pinus sylvestris* exposed to polluted air. *Silva Fennica*. 15: 57-458.
- Georgii, H. W.(1986) Atmospheric pollutants in forest areas. Reidel Publishing Co., Dordrecht. Holland, 287pp.
- Huettl, R. F.(1988) New Type forest declines and restabilization /revitalization strategies. *Water Air Soil Pollution* 41: 95-111.
- Mahendreappa, M. K.(1982) Prediction of throughfall quantities under different forest ecosystems. 227: 981-985.
- Nobel, P. S.(1991) Physicochemical and environmental plant physiology Academic press, INC. San Diego. 248-262.
- SAS Institution.(1989). SAS/SAT User's Guide, Version 9.11 Cary, NC U.S.A. pp. 18.
- Smith, W.H.(1981) Air Pollution and Forests - Interaction between Air Contaminants and Forest Ecosystems Springer - Verlag, New York. 379pp.
- Tatsumi, Y., K. Yoda and A. Ikeda(1983) Effects of soil pollution by heavy metals on annual plants in Sakai city. *Japan J. Ecol.* 33: 293-303.
- Ulrich, R.(1980) Chemical changes due to acid precipitation. in a loss derived soil in central Europe. *Soil Soci.* 130(4): 193-199.