

## 중부 지역 도시 자연녹지 토양중 $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 및 중금속 분포

김계훈\* · 박순남

서울시립대학교 환경원예학과

### Distribution of $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ and Heavy Metals in Some Urban-forest Soils of Central Korea

Kye-Hoon Kim\* · Soon-Nam Park (Dept. of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea, E-mail: johnkim@uoscc.uos.ac.kr)

**ABSTRACT** : This study was carried out to find out characteristics and contamination status of the urban-forest soils. Both topsoil (0-20 cm) and subsoil (40-60 cm) samples were collected from Namsan, Changdeok-palace, Seongjusan and Odaesan (control). The samples were analyzed for physicochemical properties, heavy metal (Cd, Cu, Pb, Zn) and anion ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) contents. Soil pH of Odaesan was the highest followed by Namsan, Changdeok-palace and Seongjusan. The anion concentrations of the soil samples were in the order of Namsan, Seongjusan > Changdeok-palace > Odaesan. The relationships between soil pH and the anion concentrations showed highly significant negative correlation, which indicated acidification of soil due to air pollutants such as  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  was going on. The heavy metal contents of the soils of urban-forest were higher than those of control. Heavy metal contents in the topsoil were higher than those in the subsoil. Since urban-forest soils were quite vulnerable to acidification and heavy metal accumulation due to chronic exposure to air pollutants such as automobile exhaust, a comprehensive countermeasure not to deteriorate urban-forest ecology must be prepared in the near future.

**Key-words:** Soil acidification, Acid deposition, Soil contamination, Heavy metals

## 서론

토양은 인간뿐만 아니라 동·식물 등 생명체의 생존기반으로서 생태환경 중 가장 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 인구 증가, 산업화 및 도시화에 따라 환경에 배출된 매연, 분진, 산성강하물, 도시하수, 공장폐수, 폐기물 등 각종 유해물질은 최종적으로 토양에 잔류되어 토양오염을 유발한다.

환경에 배출된 황산화물( $\text{SO}_x$ )과 질소산화물( $\text{NO}_x$ ) 등 대기오염물질은 대기중의 수분과 반응하여  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  등과 같은 강산을 생성한다. 이러한 산성물질은 구름에 섞여 기상상태에 따라 수백, 수천 km까지 이동하여 산성우로 강하하여 대기오염 발생지역은 물론 대기오염과 전혀 상관없는 지역까지 피해를 입힌다. 중금속은 휴·폐광산, 금속공장의 폐수, 폐기물 매립지의 침출수 등으로부터 주로 발생되어 산림의 쇠퇴나 식물생육 감소를 초래할 수 있으나<sup>1)</sup> 도시지역 또한 자동차의 배기가스, 타이어 마모 등 여러 가지 중금속의 유입경로를 통해 문제를 일으킬 수 있다<sup>2)</sup>. 일단 토양에 유입된 중금속은 이동성이 적어 장기간 축적되고 식물의 피해와 먹이사슬을 통해 연속적인 피해를 가져 오기도 한다<sup>3)</sup>.

산림생태계는 오염물질의 여과·원충, 오염물질의 흡착 및 산성 퇴적물에 대한 정화기능을 수행한다<sup>4)</sup>. 그러나 대기오염에 의해 발생된 산성강하물은 토양산성화와 이로 인한 양분유실을 촉진하고, 토양내 알루미늄이나 중금속 이온의 가용성증가, 식물뿌리의 활력저하, 토양미생물의 활동 둔화 등을 유발하여 산림생태계의 전반적인 생산성 저하를 초래한다<sup>4)5)</sup>. 토양오염은 쉽게 확산되지는 않지만 지하수 오염으로 이어지며 국소적인 오염현상의 심화는 만성적으로 토양생태계에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

대기오염 물질에 의한 생태계 피해는 1980년 이전에는 몇몇 나라에서 국지적으로 발생·보고되었으나 1980년대 초 독일 Schwartzwald의 피해로 생태계 피해에 관한 종합적인 연구계획이 수립되는 계기가 되었다. 우리나라에서도 1980년대에 들어서서 주로 수도권지역과 공단지역을 대상으로 대기오염물질이 생태계에 미치는 영향에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>6)7)8)9)</sup>. 이 등<sup>10)</sup>은 1986년부터 남산자연공원과 창덕궁 후원 참나무림의 모니터링을 통해 대기오염에 의한 산림생태계 쇠퇴현상에 관한 연구를 수행한 결과 우점종인 참나무의 세력이 쇠퇴하고 생태적 천이가 이루어지지 못하고 있으며 대기오염물질과 산성우에 의한 생태계 피해가 광범위하게 확산되고 있다고 보고하였다.

따라서, 본 연구는 대기오염에 의해 산림생태계가 쇠퇴하고 있는 남산, 창덕궁 후원 및 부천 성주산을 대상으로 하고 강원도 오대산을 대조구로 선정하여 토양 중 대기오염물질과 중금속 및 이화학적 성분 분석을 통해 도시자연녹지 토양의 오염여부 및 특성을 구명하고자 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 대상지역 선정

조사지역은 대기오염물질에 의한 산림생태계가 파괴되고 있는 것으로 알려진 중부지방의 남산, 창덕궁, 부천 성주산을 선정하였고, 대조구는 비교적 오염물질의 유입이 적은 오대산을 선정하였다. 대상수종은 각 지역의 우점을 이루고 있는 남산의 신갈나무, 창덕궁 후원의 갈참나무, 부천 성주산의 신갈나무, 오대산의 신갈나무류으로 하였다(Fig. 1).

### 토양시료 채취 및 토양의 이화학적 성분 분석

1998년 9월부터 1999년 9월까지 각 지역마다 대상 수종별로 10m×10m의 조사구를 5-7개씩 지정하여 표토(0-20cm)와 심토(20-40cm)를 채취하였다. 채취한 토양시료는 풍건시키고 2mm 체를 통과한 시료를 분석용 시료로 이용하였다. 토양시료의 pH(1:5)는 유리전극법<sup>11)</sup>, 유기물 함량은 Walkley-Black법<sup>12)</sup>, 양이온 교환용량은 1N 초산 암모니아법<sup>13)</sup>, 치환성 양이온인 Ca, Mg, K 함량은 1N 초산 암모니아법<sup>14)</sup>으로 각각 분석하였다. 중금속인 Cd, Cu, Pb, Zn은 공정시험법<sup>15)</sup>, 음이온인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(1:2) 함량은 ion chromatography<sup>16)</sup>로, 전질소는 Kjeldahl 분해법<sup>17)</sup>, 입경분석은 micro-pepette법<sup>18)</sup>으로 각각 분석하였다.

### 통계처리

조사된 자료의 통계처리는 통계 package SAS system(Ver. 6.12)을 이용하여 조사자료의 유의성 검정을 위하여 ANOVA를 실시하고 유의차가 인정되면 각 조사지 평균값의 차이를 Alpha=0.05의 범주에서 Duncan's multiple range test로 비교하였다. 각 성분간의 상관관계분석은 유의차(P<0.05)가 인정되면 독립변수(x)와 종속변수(y)로 놓고 회귀분석을 실시하여 회귀식을 추정하였다.

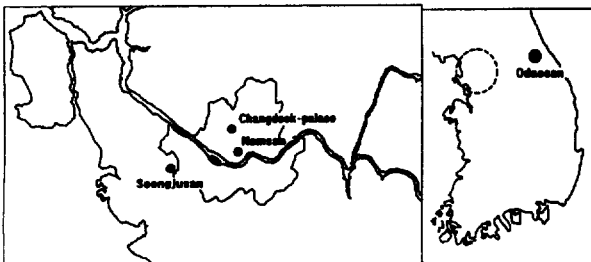


Fig. 1. The study area.

## 결과 및 고찰

### pH 및 대기오염 물질 분석

조사지별 토양의 pH는 3.7~5.2범위로 우리나라 산림토양의 pH 범위인 3.7~7.3<sup>19)</sup>과 유사했다. 산림토양은 토양 상층부에 쌓인 낙엽이 분해될 때 발생하는 유기산 또는 토양내 CO<sub>2</sub>가 물과 반응할 때 생성되는 탄산에 의하여 자연발생적으로 산성화가 진행되나 오염으로 인해 유입되는 산성물질은 토양산성화를 더욱 가속화시킨다<sup>20,21,22)</sup>. 산성비의 발생원은 주로 자동차 배기가스나 화석 연료의 연소 등으로 대기 중에 방출된 황산화물과 질소산화물로서<sup>23)</sup> 인간의 활동에 의해 발생된다. 질소산화물질의 방출량은 연간 증가추세이며, 비오염지역 또한 오염물질이 빠르게 퍼질 수 있다. 산성비는 직접적으로 식물에게 피해를 입힐 수 있을 뿐만 아니라 간접적으로 토양의 산성화를 가중시키며 치환성 이온과 수소이온의 교환으로 인하여 치환성 양이온을 용탈시킨다<sup>24)</sup>.

조사지점 토양의 pH와 음이온 함량은 각각 Fig. 2에 나타내었다. 토양 pH는 심토가 표토에 비해 높게 나타났으며 표토, 심토 모두 오대산>남산>창덕궁>성주산 순으로 높게 나타났다. 성주산의 pH는 오대산에 비해 표토와 심토 모두 1정도 낮아 토양 산성화 진행이 가장 심한 것으로 나타났다. 조사지의 음이온 함량을 비교해 본 결과 표토와 심토에서 모두 남산, 성주산>창덕궁>오대산 순으로 나타났다. 최<sup>25)</sup>는 도시가로수 토양에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>함량이 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>함량보다 높다고 보고하였으나 본 연구에서는 이와반대로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>함량이 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>함량보다 높게 나타났다. 이는 난방을 위한 화석연료의 사용감소로 인하여 황산화물은 감소한 반면 자동차 배기가스등에서 방출되는 질소산화물이 증가했기 때문으로 생각된다. 산성강하물인 음이온은 심토보다 표토에 집적이 심하였으나 창덕궁과 성주산의 경우 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>함량이 표토보다 심토에 더 많아 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>에 비해 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 토양내 이동성이 더 큰 것으로 나타났다. 토양의 특성과 종류에 따라 차이가 있으나 황산화물의 이동성은 매우 높고<sup>24,25)</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 이동성이 클수록 양이온 용탈이 심하며 토양의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>흡착은 떨어진다고 한다<sup>24)</sup>.

토양 pH와 음이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 함량과의 상관분석을 실시한 결과 토양 pH는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 합한 값과 강한 부의 상관(Fig. 3)을 나타내었으며 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>보다 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 더 큰 상관관계를 이루고 있음을 보여주었다(Table 1). 따라서, 토양의 pH는 토양중 음이온 함량과 강한 상관관계를 이루고 있으므로 산성비로 인한 대기오염물질의 지속적인 토양내 유입으로 인한 토양산성화는 더욱 가중될 것으로 보인다.

산림토양의 치환성 양이온은 용탈과 식물흡수 등에 의해 자연적으로 손실되지만 토양내 산성강하물 유입 증가에 따른 토양산성화 진행은 치환성 양이온 용탈 증가와 밀접한 상관관계가 있다. 이러한 변화는 주로 표토에서 일어나며 pH 3이하의 강 산성물질 유입이 있을 경우 주로 발생한다<sup>26)</sup>. 또한, 양이온 함량과 토양완충능력은 도심지역이 외곽지역에 비해 토양 산성화가 진행됨에

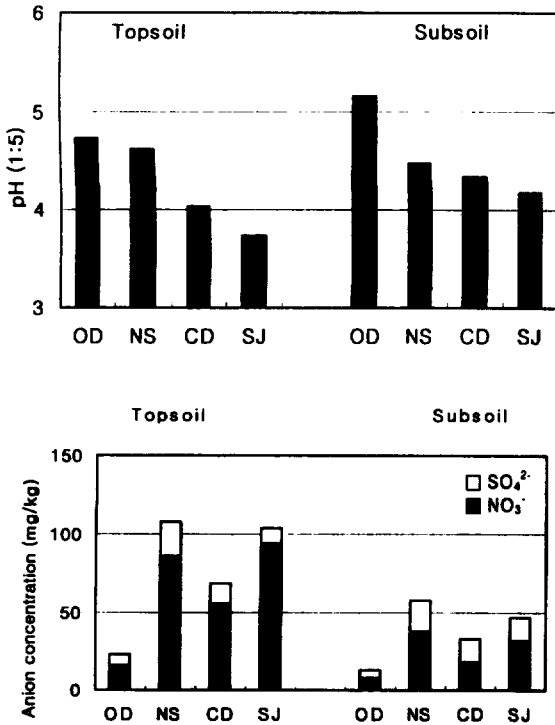


Fig. 2. pH and anion concentrations of the soils from study area. OD: Odaesan, NS: Namsan, CD: Changdeok-palace, SJ: Seongjusan.

Table 1. Simple linear regression equations between pH and anion concentration of the soils from study area

Concentration	Equation	r
Sum of anions	$y = -54.77x + 300.89$	-0.6611**
Nitrate	$y = -48.249x + 258.2$	-0.6449**
Sulfate	$y = -6.5211x + 42.691$	-0.4552**

\*\* Significant at P<0.01.

Table 2. Chemical properties of the soils from study area

Area	Soil depth (cm)	OM (%)	CEC (cmol <sup>+</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	Exch.-cation (cmol <sup>+</sup> ·kg <sup>-1</sup> )			T-N (%)	Soil texture
				Ca	Mg	K		
Odaesan	0-20	12.25a <sup>2</sup>	34.26a	1.46b	2.50ab	0.57ab	0.64a	Loam
	40-60	3.93de	23.46b	0.18d	2.53ab	0.38cd	0.44ab	Loam
Namsan	0-20	7.56bc	22.10b	2.52a	2.96a	0.65a	0.38ab	Sand Loam
	40-60	1.40e	12.63c	0.18d	1.93b	0.43bcd	0.06b	Sand Loam
Changdeok -palace	0-20	6.47cd	15.23c	0.79bcd	0.15c	0.52abc	0.20b	Sand Loam
	40-60	2.28e	12.49c	0.40cd	0.13c	0.36d	0.08b	Sand Loam
Seongjusan	0-20	10.65ab	33.18a	1.14bc	0.30c	0.65a	0.46ab	Silt Loam
	40-60	6.27cd	26.59b	0.52cd	0.09c	0.64a	0.28ab	Silt Loam

<sup>2</sup> The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P<0.05).

따라 급격히 감소한다<sup>27),28)</sup>. 그러나 조사지 토양의 양이온함량을

조사해본 결과(Table 2) 토양산성화의 진행에 따른 양이온 용탈 정도는 크게 나타나지 않았으나 계속 진행될 것이다.

중금속 분석

중금속은 토양과 식물에 상대적으로 낮은 함량으로 존재하며 아연과 구리는 식물의 필수원소로도 이용되지만 카드뮴과 납은 토양과 식물에 축적되어 독성을 발현한다<sup>21)</sup>. 아연과 카드뮴은 자동차 타이어가 마모되면서 발생하며, 디젤연료로부터 카드뮴이, 가솔린 연소로부터 납이 방출되어 토양에 집적된다<sup>29)</sup>. 중금속은 이동성이 적어 유기물층과 표토에 집적이 잘 되며<sup>30)</sup> 토양 유기물은 여러 작용기를 포함하여 중금속의 흡착이나 흡착, 교환장소로 이용될 수 있다<sup>21),31)</sup>. 변 등<sup>32)</sup>은 pH와 유기물 함량이 중금속함량과 상관관계가 있으며, B층에 비해 A층이 더 큰 상관을 보였는데 이는 A층이 B층에 비해 여러 가지 오염물에 노출이 심하기 때문이라고 보고하였다. 또한, Johnson과 Petras<sup>31)</sup>는 중금속 fraction에 영향을 미치는 요인을 pH, 유기물, CEC로 보고하였는데 유기물과 CEC가 상관이 있는 것은 유기물이 교환장소로 이용되기 때문이다. 유기물 함량과 CEC, 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn)간의 상관관계를 분석한 결과 강한 정의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다(Table 3). 심토에 비하여 표토에 중금속 함량이 높은 것은 중금속의 토양중 이동이 어렵기 때문이다(Fig. 4).

카드뮴은 주로 아연광산, 금속공장 및 각종 폐기물에서 유입되고 농경지의 카드뮴오염은 아연과 복합적으로 나타난다. 조사지의 카드뮴함량을 비교한 결과 성주산>남산>오대산>창덕궁 순으로 나타났다.

구리는 토양중 함량이 높을 경우 식물 미량요소의 흡수과정에 영향을 주며 질소대사 및 뿌리의 생육을 저해한다. 조사지별 구리함량은 남산>성주산>창덕궁>오대산 순으로 나타났으며 남산표토는 김 등<sup>19)</sup>이 조사한 우리나라 산림토양의 평균 구리함량(1.98mg·kg<sup>-1</sup>)의 3.2배 정도 높게 나타났다.

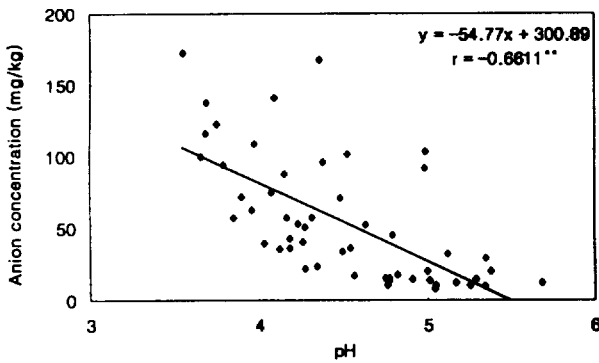


Fig. 3. Correlation between pH and anion concentrations of the soils from study area.

Table 3. Simple linear regression equations between organic matter and chemical properties of the soils from study area

Chemical property	Equation	r
CEC	$y=1.5749x+10.619$	0.8232**
Cd	$y=0.0041x-0.0026$	0.5341**
Cu	$y=0.385x+0.1533$	0.4973**
Pb	$y=1.0329x+2.8685$	0.4247**
Zn	$y=0.659x+1.546$	0.5627**

\*\* Significant at P<0.01.

납은 자동차 매연, 광산 폐수 및 제련소 분진, 페인트 등에서 주로 발생된다<sup>21)</sup>. 대기중 납 농도는 자동차 연료로 무연휘발유의 사용을 적극 권장하기 시작한 1988년 이전까지는 자동차 수요에 따른 배기가스의 증가에 따라 증가했다. 대기중 납의 농도는 계절에 따른 변이도 보인다. 일반적으로 겨울철에 대기중 납농도가 증가하는 이유는 겨울철의 건조한 기후와 비교적 높은 농도의 납을 함유한 석탄이 연소시 다량의 납을 방출하기 때문이다<sup>33)</sup>. 조사지별 납함량은 남산>창덕궁>성주산>오대산 순으로 나타났으며 남산은 우리나라 산림토양의 평균 납함량인 6.11mg·kg<sup>-1</sup><sup>19)</sup>의 3.4배정도 높게 나타났으며, 서울시 산림토양(복악산과 인왕산을 중심으로 함)의 평균 납함량인 9.09mg·kg<sup>-1</sup><sup>34)</sup>의 2.3배 정도 높게 나타났다. 창덕궁의 경우 표토와 심토의 납함량이 비슷한 정도로 나타나 심토의 납 집적이 심한 것을 보여주었다.

아연은 식물생육의 필수원소로 이용되지만 다량 존재할 경우에는 독성을 유발한다. 조사지별 아연함량은 성주산>남산>창덕궁>오대산 순으로 나타났다. 우리나라 평균 아연함량은 4.08mg·kg<sup>-1</sup><sup>19)</sup>으로 남산과 성주산은 각각 3.3배, 3.7배정도 높게 나타났다.

조사대상 지역의 중금속 함량은 토양환경보전법상 토양오염 우려기준치<sup>35)</sup> 이하로 나타났으나 우리나라 전국 평균 중금속 함량<sup>19)</sup>보다 높은 수준이었으며 함량별로는 Pb>Zn>Cu>Cd 순이었다. 중금속 함량은 산업지대나 도시토양보다 도시로부터 떨어진 외곽지역의 토양이 더 낮다고 보고되고 있다<sup>31,36)</sup>. 본 연구에서도

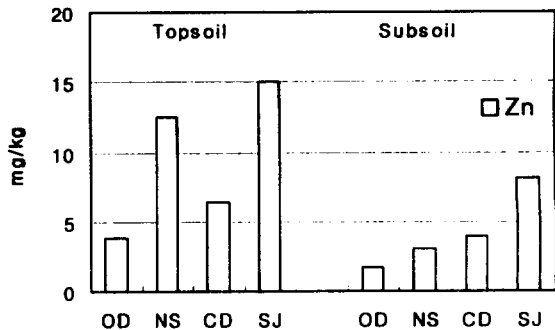
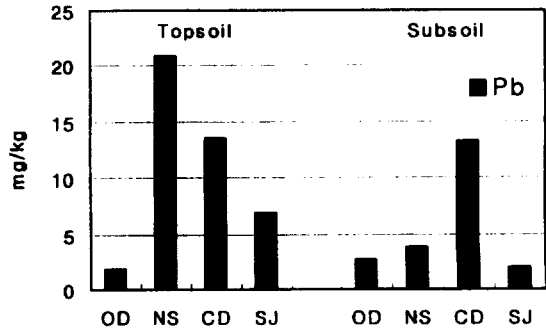
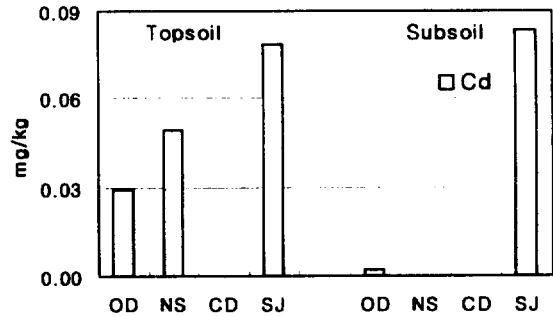
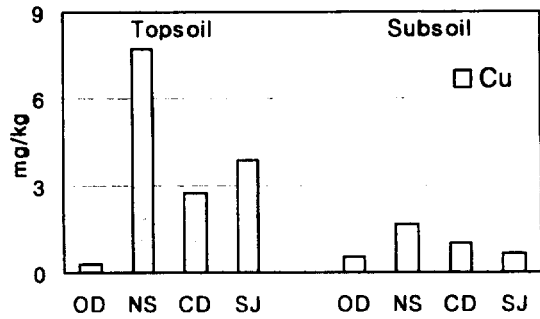


Fig. 4. Heavy metal concentrations of the soils from study area.

OD: Odaesan, NS: Namsan, CD: Changdeok-palace, SJ: Seongjusan.

이와 같은 결과를 보였는데 도시지역의 산림토양이 대조구인 오대산지역에 비해 중금속 함량이 높게 나타났다. 이는 도시자연독지 토양이 자동차 및 도시 폐기물 등 오염원에 대한 노출이 심하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한, 강우에 의한 중금속의 토양내 유입은 토양내 중금속 축적을 촉진하여 토양오염을 가중시킨다<sup>37)</sup>.

Table 4. Simple linear regression equations between nitrate and heavy metal concentration of the soils from study area

Concentration	Equation	r
Cd	$y=0.0004x+0.0077$	0.4907**
Cu	$y=0.0655x+0.0557$	0.7589**
Pb	$y=0.1737x+2.6886$	0.6408**
Zn	$y=0.0987x+1.9233$	0.7564**

\*\* Significant at P&lt;0.01.

Table 5. Simple linear regression equations between sulfate and heavy metal concentration of the soils from study area

Concentration	Equation	r
Cd	$y=0.0013x+0.0084$	0.2764*
Cu	$y=0.3074x-1.365$	0.6821**
Pb	$y=0.8813x-1.9559$	0.6224**
Zn	$y=0.3288x+1.5726$	0.4822**

\*, \*\* Significant at P&lt;0.05 and P&lt;0.01, respectively.

중금속의 생체이용도는 용해도에 따라 달라지는데 일반적으로 양이온인 중금속은 pH가 낮아짐에 따라 용해도가 증가해서 생체 이용도가 증가한다<sup>21),29)</sup>. 따라서, 토양 산성화가 진행됨에 따라 중금속의 활동도가 증가하게 되는데, 산성강하물질인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 중금속간의 상관관계를 비교분석해 본결과 Cd, Cu, Pb, Zn(Table 4)과 높은 상관관계를 이루고 있었다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 중금속 간의 상관관계를 비교분석해본 결과 Cu, Pb, Zn도 높은 상관관계를 보이고 있어 (Table 5) Cu, Pb, Zn의 활동도는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>활동도가 증가할수록 증가한다<sup>29)</sup>는 것을 알 수 있었다. 그러나, 토양중 중금속은 pH와 마찬가지로 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>보다 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 더 높은 상관관계를 이루고 있었다.

남산과 성주산의 중금속함량이 높은 것은 산성강하물인 음이온의 토양내 유입으로 인해 pH가 감소되고 이에 따라 중금속의 활동도가 증가함으로써 산림생태계 악화가 가속화된 것으로 생각된다.

## 요 약

본 연구는 도시자연녹지토양의 오염여부와 특성을 구명하기 위해 강원도 오대산을 대조구로 하여 남산, 창덕궁 후원 및 부천 성주산의 도시자연녹지 토양의 대기오염물질과 중금속 및 이화학적 성분을 비교·분석하였다. 토양 pH는 표토, 심토 모두 오대산 > 남산 > 창덕궁 > 성주산 순으로 나타났으며 대기오염물질인 음이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 함량은 남산, 성주산 > 창덕궁 > 오대산 순으로 나타났다. pH와 대기오염물질과의 상관관계를 분석해본 결과 강한 부의상관을 보여 대기오염물질에 의한 토양산성화가 진행되고 있음

을 보였다. 토양산성화에 따른 양이온 용탈 정도는 크게 나타나지 않았으나 계속 진행될 것으로 보인다. 남산, 부천 성주산, 창덕궁 후원 도시자연녹지 토양의 중금속 함량은 오대산에 비해 높게 나타났으며 표토가 심토에 비해 집적이 심하였다. 따라서 도시자연녹지 토양은 자동차 배기가스 등의 대기오염물질의 만성적인 노출로 토양산성화와 중금속 축적 등에 의한 산림생태계 악화가 우려된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제 연구비 지원에 의해 수행되었음.

## 참고 문헌

- Han, S.H., J.O. Hyun, K.J. Lee, and D.H. Cho (1988) Accumulation of heavy metals (Cd, Cu, Zn and Pb) in five tree species in relation to contamination of soil near two closed zinc-mining sites. *Jour. Korean For. Soc.* 87(3):466-474.
- Pouyat, R.V., M.J. McDonnell, and S.T.A. Pickett (1995) Soil characteristics of oak stands along an urban-rural land use gradient. *J. Environ. Qual.* 24:516-526.
- Holmgren, G.G.S., M.W. Meyer, R.L. Chaney, and R.B. Daniels (1993) Cadmium, lead, zinc, copper, sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.* 25:1025-1032.
- Vlrich, B., R. Mayer, P.K. Khanna (1980) Chemical change due to acid precipitation in a loess-derived soil in Central Europe. *Soil Science* 130(4):193-199.
- Kim, D.Y., J.H. Ryu, J.S. Chae, and S.H. Cha (1996) Deposition of atmospheric pollutants in forest ecosystems and changes in soil chemical properties. *Jour. Korean For. Soc.* 85(1): 84-95.
- Oh, J.H., Y.K. Kim, J.S. Chae, and C.K. Yi (1989) Alteration of pH and chemical contents of precipitation in forest area of Hongreung (urban), Ulsan (industrial) and Pyongchang (mountain) district. *Res. Rep. For. Res. Inst.* No. 38.
- Byun, J.K., W.K. Lee, J.T. Kim, T.H. Kim, and T.O. Kim (1994) Damage characteristics of forest soils by simulated acid rain treatment (I). *Res. Rep. For. Res. Inst.* No. 49.
- Lee, S.W., and S.W. Lee (1995) The effect of soil acidification on the distribution of nutrients and heavy metals in forest ecosystem near Ulsan industrial estate. *Jour. Korean For. Soc.* 84(3):286-298.

9. Chang, K.S., and S.W. Lee (1995) Sensitivity and self-purification function of forest ecosystem to acid precipitation (II). *Jour. Korean For. Soc.* 84(1):103-113.
10. Lee, K.J., K.T. Kim, and Y.B. Lee (1993) Early diagnosis of injuries on the forest by acid rain and airborne pollutants. KOSEF 90-0701-01. Korea Science and Engineering Foundation.
11. Thomas, G.W. (1996) Soil pH and soil acidity. p.475-490. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis part 3: chemical methods*. SSSA book series 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
12. Nelson, D.W., and L.E. Sommers (1996) Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A.L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2*. 2nd ed. *Agronomy* 9:961-1110
13. Sumner, M.E., and W.P. Miller (1996) Cation exchange capacity and exchange coefficients. p.1201-1230. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis part 3: chemical methods*. SSSA book series 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
14. Helmke, P.A., and D.L. Sparks (1996) Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. p.551-574. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis part 3: chemical methods*. SSSA book series 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
15. Ministry of Environment. 1996. Standard methods of soil analysis. Manual for soil environment conservation service. Government Reg. No. 12000-67630-67-9613. Ministry of Environment, Seoul.
16. Tabatabai, M.A., and W.T. Frankenberger (1996) Liquid chromatography. p.225-246. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis part 3: chemical methods*. SSSA book series 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
17. Bremner, J.M.(1996) Nitrogen-total. p.1085-1122. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis part 3: chemical methods*. SSSA book series 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
18. Miller, W.P., and D.M. Miller (1987) A micro pipette method for soil mechanical analysis. *Communications in soil science and plant analysis*. 18:1-15.
19. Kim, K.H., J.Y. Yun, and S.H. Yoo (1995) Distribution of Cs-137 and K-40 in Korean soils. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28(1):33-40.
20. Kennedy, I.R. (1986) Acid soil and acid rain. Research Studies Press LTD. Hertfordshire, England.
21. Pierzynski, G.M., J.T. Sims, and G.F. Vance (1994) Soils and environmental quality. Lewis Publishers, Florida, USA. p.47-55.
22. Brady, N.C., and R.R. Weil (1999) Elements of the nature and properties of soils. Prentice-Hall Inc., New Jersey. p.260-263.
23. Cho, H.D. (1999) The absorption and purification of air pollutants and heavy metals by selected trees in Kwangju. *Jour. Korean For. Soc.* 88(4):510-522.
24. Singh, B.R., G. Abrahamsen, and A. Stuanes (1980) Effect of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:75-80.
25. Mollitor, A.V., and D.J. Raynal (1982) Acid precipitation and ionic movements in Adirondack forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:137-141.
26. Joslin, J.D., and H. Van Miegroet (1992) Soil chemistry and nutrition of north spruce-fir stands: Evidence for recent changes. *J. Environ. Qual.* 21:12-30.
27. Yoo, J.H., C.S. Kim, J.K. Byun, K.S. Koo, J.S. Chae, S.H. Cha, and W.K. Lee (1997) A comparison in soil chemical properties between urban and rural forest areas. *FRI. J. For. Sci.* 55:19-24.
28. Kim, D.Y., and I.C. Hwang (1988) Soil acidification and soil buffer capacity change in urban forests of Seoul area. *Jour. Korean For. Soc.* 87(2): 188-193.
29. Lindsay, W.L. (1979) Chemical equilibria in soils. A Wiley-Interscience Publication. New York, USA.
30. Parker, G.R., W.W. McFee, and J.M. Kelly (1978) Metal distribution in forested ecosystems in urban and rural northwestern Indiana. *J. Environ. Qual.* 12(1):29-33.
31. Johnson, C.E., and R.J. Petras (1998) Distribution of zinc and lead fractions within forest spodosol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:782-789.
32. Byun, J.K., J.H. Yoo, C.S. Kim, J.H. Jeong, and B.S. Lee (1999) Estimation of heavy metal concentrations by soil property of forest soils in Seoul. *FRI. J. For. Sci.* 61:97-101.
33. Lee, D.S., Y.K. Lee, J.W. Huh, S.I. Lee, D.H. Sohn, and M.G. Kim (1994) Annual variation of atmospheric lead concentration in Seoul (1984-1993). *J. KAPRA.* 10(3):170-174.
34. Kim, C.K., J.H. Yoo, J.K. Byun, J.H. Jeong, and B.S. Lee (1999) Distribution of heavy metals within forest soils in Seoul. *Jour. Korean For Soc.* 88(1):111-116.
35. Ministry of Environment (1999) Annual report of operation of soil contamination monitoring network in 1998. Government Reg. No. 38000-67630-66-64.

36. Miller, W.P., and W.W. McFee (1983). Distribution of cadmium, zinc, copper, and lead in soils of industrial northwestern Indiana. *J. Environ. Qual.* 12(1):29-33.
37. Lee, C.K., and J.K. Kim (1998). Studies on the relation of heavy metals between rainfall and soil in the forest. *Jour. Korean For. Soc.* 87(4):584-589.