

## 山林土壤의 酸性化 敏感度에 對한 實驗的 評價( I )<sup>1</sup>

- 酸中和 反應 豫測模型의 活用 -

李承雨<sup>2\*</sup> · 朴寬洙<sup>3</sup>

## Experimental Assessment of Forest Soil Sensitivity to Acidification

- Application of Prediction Models for Acid Neutralization Responses -

Seung Woo Lee<sup>2\*</sup> and Gwan Soo Park<sup>3</sup>

### 요 약

토양의 산중화 반응 결과로 나타나는 염기성 양이온의 유실과 Al의 가동성 증가는 산림 쇠퇴정후가 나타난 대기오염 지역의 공통된 특징이다. 따라서 산림토양의 산성화 민감도를 결정짓는 산중화 반응을 보다 용이하게 평가하기 위하여 토양산성도 인자를 이용한 산중화 반응 예측모형을 개발하였다. 조사대상 지인 남산, 강화, 울산, 홍천의 토양산성도는 동일 지역순으로 높았으며( $p < 0.05$ ), 이는 토양칼럼 실험에서 추가 산유입( $16.7 \text{ mmolc/kg}$ )에 대한 지역별 총 산중화능( $\text{ANC}_H$ )과 상반된 결과였다. 모든 지역에서 염기치환과 Al 용해가 주된 산중화 기작이었으며, 총 산중화능이 낮은 지역일수록 염기치환 산중화능은 낮은 반면 Al 용해 산중화능이 높게 발휘되었다. 황산이온 흡착에 의한 산중화능은 대조지역인 홍천에서 가장 높았으나 산중화율은 6.4%로 매우 낮은 수준이었다. 토양산성도 인자를 이용하여 토양산중화 반응을 예측하기 위한 단순회귀모형과 다중회귀모형의 수정결정계수는 각각  $0.52 (p < 0.04)$ 와  $0.89 (p < 0.01)$  이상으로 이들 회귀모형이 토양산성도 민감도와 관련된 산중화 반응을 예측하는데 보다 용이하게 활용될 것으로 판단되었다.

### ABSTRACT

Increased base cation loss and Al mobilization, a consequence of soil acid neutralization responses, are common in air polluted areas showing forest decline. The prediction models of acid neutralization responses were developed by using indicators of soil acidification level(pH and base saturation) in order to assess the forest soil sensitivity to acidification.

The soil acidification level was greatest in Namsan followed by Kanghwa, Ulsan, and Hongcheon, being contrary to regional total  $\text{ANC}_H$  pattern through soil columns leached with additional acid ( $16.7 \text{ mmolc H}^+/\text{kg}$ ). Both base exchange and Al dissolution were main acid neutralization processes in all study regions. There were low base exchange and high Al dissolution in the regions of the low total  $\text{ANC}_H$ . The  $\text{ANC}_M$  by sulfate adsorption was greatest in Hongcheon compared with other regions even though the AN rate was very low as 6.4%.

Coefficients of adjusted determination of simple and multiple regression models between soil acidification level indicators and the acid neutralization responses were more than  $0.52 (p < 0.04)$  and  $0.89 (p < 0.01)$ , respectively. The result suggests that soil pH and base saturation are available indicators for predicting

<sup>1</sup> 接受 2000年 12月 8日 Received on December 8, 2000.

審査完了 2001年 3月 5日 Accepted on March 5, 2001.

<sup>2</sup> 임업연구원 Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea(email ; soilloverlee@hanmail.net).

<sup>3</sup> 충남대학교 산림자원학과 Dept. of Forest resources, Chungnam Nat'l Univ., Taejon 305-764, Korea.

\* 연락처자 E-mail : soilloverlee@hanmail.net

the acid neutralization responses. These prediction models could be used as an useful method to measure forest soil sensitivity to acidification.

*Key words* : forest soil, acidification sensitivity, acid neutralization response predicting models

## 서 론

최근 국내 대규모 공단과 대도시 산림지역에서는 과거 중부유럽과 북미지역에서와 유사한 임목 고사, 성장불량 및 비정상적 세균발달 등의 쇠퇴 징후가 관찰되고 있다(류태철과 김준호, 1994; 이창석 등, 1998). 산퇴적물의 장기적 유입이 그 직접적인 원인이었으며, 다른 환경인자에 대한 임목의 내성 저하를 야기시킨 토양산성화의 심화가 2차적인 원인이었다(Ulrich, 1989). 토양산성화의 생태적 악영향은 영양염류의 결핍과 Al stress를 동반하는데, 그 영향력은 토양의 고유한 산중화능에 의해 결정된다. 따라서 산부하량이 동일하다면 산림토양의 산성화 민감도는 산중화능과 그 반응 결과로 나타나는 염기성 양이온의 유실과 Al 가동성의 정도로 가늠할 수 있을 것이다.

토양의 산중화능(acid neutralization capacity; ANC)이란 유입된 수소이온을 중화 또는 소비시켜 본래의 토양 pH를 유지하려는 능력을 의미하며, 주로 염기성 양이온의 치환과 Al 수산화물의 용해 기작에 의해 이루어진다(吉田과 川畑, 1988; Ulrich, 1983). 이러한 점에서 산림토양의 수소이온 소비량(또는 산중화능)과 그에 기여한 토양내 중화물질에 대한 정량화는 아직까지 구체적인 정의와 표준화된 평가방법이 없는 토양산성화 민감도의 평가에 전제조건이 될 것이다. 이와 관련하여 Neilsen 등(1995)은 pH 완충곡선과 산성화 저항지수(acidification resistance index)를 통해 시비와 관수에 의해 신속히 산성화되는 과수원 토양의 산성화 민감도를 평가하였다. 그밖에 Clayton 등(1991)은 산림토양의 용탈수 화학성을 근거로 기작별 산중화능을 정량하므로써 산 유입에 대한 토양 반응과 그 영향을 예측하였다.

그러나 산성모양으로부터 발달한 국내 산림토양의 경우 토양산성화의 가속화와 그로 인한 산림피해의 가능성이 점차 증가하고 있음에도 불구하고 산림토양의 산성화 민감도에 관한 기술적 평가가 미흡한 실정이다. 더욱이 산림토양의 산성화 민감도의 척도가 될 수 있는 산중화 반응에 대한 정량화에는 상당한 시간과 경비가 소요되어 이를 추정

할 실험적 접근법이 요구되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 기존 산 유입량이 상이하였던 4개 지역을 대상으로 토양산성도 인자(pH와 염기포화도)와 추가적인 산 유입에 대한 산중화 반응인자(총 산중화능과 기작별 산중화능) 간의 선형회귀모형을 이용하여 산림토양의 산성화 민감도를 결정짓는 산중화 반응을 보다 용이하게 평가할 수 있는 실험적 방법을 제시하는 데 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 선정과 토양시료

대기오염과 산퇴적물 등 외적 산성화 영향에 따라 산림토양의 산성도가 상이할 것으로 예상되는 도시지역(서울 남산), 공업지역(울산 두왕) 및 서해안 지역(강화 마니산)과 대조지역(홍천 계방산)의 소나무(*Pinus densiflora* Siebold et Zuccarini) 임분을 조사 대상으로 하였다.

토양시료는 임분당 3개씩의 조사구(10×10m)에서 단순임의추출법에 따라 채취하였다. 이때 수간으로부터의 거리와 토양 화학성간의 상관성을 줄이기 위해 임목과 3m 이상 거리를 두고 실시하였다. 칼럼실험용 시료는 석력과 식물 뿌리에 의한 영향을 배제하고 균질성을 확보하기 위해 토양단면상에서 0-15cm와 15-30cm로 구분 채취하였다.

토양 pH, 유기물 및 토성 등 기초 이화학성은 토양화학분석법에 준하였다(농업기술연구소, 1988). 토양내 염기성 양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ )은 1M-Ammonium acetate 침출법에 따라 ICP-AES (Analytic instrument Inc, Spectro M)로 분석하였으며, 치환성 수소와  $Al^{3+}$ 은 1M-KCl 침출후 적정법과 ICP-AES로 각각 분석하였다. 염기성 양이온, 치환성 수소 및  $Al^{3+}$ 의 합을 양이온 치환 용량으로 하여 그에 대한 염기성 양이온의 비율을 염기포화도로 하였다. 공시토양에 대한 지역별 기초 이화학성의 분석 결과는 Table 1과 같다.

### 2. 토양칼럼 실험

산중화 반응을 정량하기 위한 토양 칼럼실험에는 polypropylene cylinder(D : 45mm, L : 100mm)에

**Table 1.** Physiochemical properties of soil 0-30cm depth in *Pinus densiflora* stand for four investigated regions.

Region	pH <sup>a</sup> (H <sub>2</sub> O)	pH <sup>b</sup> (CaCl <sub>2</sub> )	OM <sup>c</sup> (%)	ST <sup>d</sup>	Exchangeable cations (cmolc/kg)						BS <sup>f</sup> (%)	
					H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		(CEC <sub>e</sub> ) <sup>e</sup>
NS	4.24	3.86	2.67	SL	1.56	8.92	0.36	0.19	0.14	0.33	11.39	8.4
KH	4.71	4.17	4.45	SCL	0.99	9.22	0.48	0.16	0.17	0.32	11.32	9.5
US	4.79	4.26	2.92	L	1.12	13.26	0.96	0.45	0.14	0.38	16.45	11.7
HC	5.65	4.94	3.62	SiL	0.18	3.28	4.62	0.85	0.30	0.43	9.24	58.4

NS, KH, US and HC denote Namsan, Kanghwa, Ulsan and Hongcheon, respectively.  
<sup>a</sup> soil : distilled water(w : v, 1 : 5), <sup>b</sup> soil : 0.01M CaCl<sub>2</sub>(w : v, 1 : 2), <sup>c</sup> organic matter,  
<sup>d</sup> soil texture, <sup>e</sup> effective cation exchange capacity, <sup>f</sup> base saturation

토양시료(생토 30g, 건중량기준)를 토심별로 재배열하였다. 이때 토심 30cm까지의 평균 가밀도(남산 1.38, 강화 1.02, 울산 1.16, 홍천 1.16g/cm<sup>3</sup>)를 고려하여 칼럼내 토양층진 높이를 구하였다.

사용된 인공산성우는 pH 3.0(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : HNO<sub>3</sub> = 3 : 1)이었으며, 총 630mm를 한달간 63mm/일(6.3mm/hr)씩 3일 간격으로 나누어 유입시켰다. 총 수소이온(H<sup>+</sup>) 부하량은 16.7mmolc/kg이며, 황산이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)과 질산이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 부하량은 각각 12.5mmolc/kg와 4.2mmolc/kg이었다. 매회 채수된 토양용탈수는 pH를 측정된 후 염기성 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>; ICP-AES), 음이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; Ion chromatography) 및 활성 Al(8-hydroxyquinoline butyl acetate; James 등, 1983)의 정량분석에 이용하였다.

**3. 총 산중화능과 기작별 산중화능 산출**

산림토양의 총 산중화능(ANC<sub>H</sub>)은 총 수소이온 부하량과 토양 단위 중량당 수소이온 용탈량간의 차이로 산출하였다. 또한 염기치환, Al 용해 및 산성 음이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 흡착에 따른 기작별 산중화능(ANC<sub>M</sub>)은 토양 단위 중량당 중화 물질의 용탈량으로 산출하였으며, 이때 토양내 유기질 염으로부터 용탈된 용존 염기성 양이온의 용탈량을 제외하기 위해 pH 5.6 인공산성우에 의해 토양으로부터 용탈된 중화물질을 감하여 산출하였다. 그리고 총 산중화능과 각 기작별 산중화능의 합과의 차이는 다른 무기질 이온의 치환과 유기물의 양자화작용(protonation)에 의한 산중화능(ANC<sub>O</sub>)으로 간주하였다. 기작별 산중화율(AN rate)은 ANC<sub>H</sub>에 대한 각 ANC<sub>M</sub>와 ANC<sub>O</sub>의 백분율로 계산하였다(식 1~4).

$$ANC_H(\text{mmolc/kg}) = \text{Total input of } H^+ - \text{total output of } H^+ \dots\dots\dots(\text{Eq. 1})$$

$$ANC_M(\text{mmolc/kg}) = \text{TBC exchange} + \text{Al dissolution} + \text{Sulfate adsorption} + \text{Nitrate adsorption} \dots\dots\dots(\text{Eq. 2})$$

$$ANC_O(\text{mmolc/kg}) = ANC_H - ANC_M \dots\dots\dots(\text{Eq. 3})$$

$$\text{AN rate by each mechanism} = \frac{ANC_M}{ANC_H} \times 100 \dots\dots\dots(\text{Eq. 4})$$

H : hydrogen budget, M : main mechanisms,  
 O : other mechanisms  
 TBC : total base cations(sum of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup>)

**4. 선형회귀분석**

토양산성도 인자를 독립변수로 하고 칼럼실험에서의 산중화 반응 인자를 종속변수로 한 단순회귀와 다중회귀분석에는 SAS 통계프로그램(SAS Institute Inc., 1989)을 이용하였다. 독립변수의 수를 달리한 단순과 다중회귀모형간의 중요도를 비교하기 위하여 수정결정계수(adjusted determination coefficient)를 적용하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 토양산성도 인자**

토양 평균 pH(0-30cm)는 남산, 강화 및 울산에서 각각 4.24, 4.65 및 4.79로 대조지역인 홍천

(5.65)과 비교하여 강산성이었다(Table 1). 1986년 서울과 울산 산림지역의 평균 pH가 4.57과 5.05(이수욱과 민일식, 1989)이었던 것과 비교하면 남산과 울산의 토양산성도가 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

염기포화도는 남산, 강화, 울산 및 홍천에서 각각 7.9%, 9.5%, 11.7% 및 58.4%로 토양 pH의 지역간 경향과 일치하였으며( $p < 0.05$ ), 이는 토양산성도가 심화되는 과정에서 염기성 양이온이 다량 용탈되면서 토양내 양이온 치환소에 대한 수소이온의 점유율이 높아진 결과로 보여진다. 이상의 토양 pH와 염기포화도에 근거한 지역별 토양산성도는 남산, 강화, 울산, 홍천 순으로 높게 나타났다.

**2. 총 산중화능과 기작별 산중화능**

4개 지역 산림토양의 총 산중화능(ANC<sub>H</sub>)과 총 수소이온 소비율은 남산, 강화, 울산, 홍천 순으로 낮아 지역별 토양산성도와 상반된 결과를 보였다(Table 2).

기작별 산중화능에 있어서는 모든 지역에서 주로 염기치환과 Al 용해에 의해 산중화능이 발휘되었다. 지역별로는 남산과 강화에서 염기치환에 의한 산중화능(mmolc/kg)이 4.1(산중화율 26.9%)과 4.7(29.7%)였던 반면 Al 용해에 의한 중화능은 11.0(72.4%)과 10.7(67.5%)로써 이들 지역에서는 Al 용해에 의해 산중화능이 주도되었다. 또한 울산의 염기치환과 Al 용해에 의한 산중화능(mmolc/kg)은 각각 8.8(54.3%)과 5.3(32.5%)으로 염기치환에서 Al 용해로의 산중화 기작의 전

이성이 나타났다. 그러나 대조 지역인 홍천에서는 염기치환과 Al 용해에 의한 산중화능이 각각 12.6(75.6%)와 0.5(2.9%)로 염기치환에 의한 산중화능이 절대 우위로 발휘되었다. 이상의 결과를 통해 지역별 산중화대를 구분하면 남산과 강화는 Al 산중화대, 울산은 염기치환 산중화에서 Al 산중화로의 전이대 및 홍천은 염기치환 산중화대라 할 수 있다. 이러한 측면에서 남산, 강화, 울산지역에서는 토양산성도가 지속될 경우 유입된 산을 중화시키는 과정에서 영양염류의 다량 유실과 활성 Al의 용출 증가로 인해 임목피해의 잠재성이 매우 높을 것으로 판단된다.

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 흡착에 의한 산중화능은 홍천, 강화, 울산 및 남산 순으로 높았으며, 이러한 지역간 차이는 황산이온 흡착에 작용하는 토양내 Fe와 Al 산화물류의 지역별 함량과 황산이온 흡착능의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 황산이온 흡착량이 가장 높았던 홍천의 산중화율조차 6.4%로써 북미 Wyoming Inceptisol 토양의 25%에 비하면 매우 낮은 수준이었다(Clayton 등, 1991). NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 흡착에 의한 산중화율은 모든 지역에서 음(-)의 값을 보였는데, 이는 토양내 잔존 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 질산화작용에 의해 생성된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 산중화능에 부의 영향으로 작용하였음을 반영한다.

**3. 산중화 반응 예측모형**

토양 pH와 염기포화도를 독립변수로 하고 총 산중화능과 염기치환 및 Al 용해 산중화능을 종속변수로 한 단순회귀모형의 수정결정계수는 모두

**Table 2.** Quantification of total acid neutralization capacity(ANC<sub>H</sub>) and ANC<sub>M</sub> by each mechanism generated from soil 0-30cm depth under the simulated acidification condition in total 16.7mmol H<sup>+</sup>/kg input rate for four regions.

Region	Total ANC <sub>H</sub> <sup>a</sup> (mmolc/kg)	H <sup>+</sup> consumption rate(%) <sup>b</sup>	ANC <sub>M</sub> by each mechanism(mmolc/kg)				
			TBC exchange <sup>c</sup>	Al dissolution	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> adsorption <sup>d</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> adsorption	others <sup>e</sup>
NS	15.2d	91.1d	4.1(26.9)d	11.0(72.4)a	-1.2(-7.8)d	-1.0 (-6.8)ab	2.3(15.3)c
KH	15.9c	95.4c	4.7(29.7)c	10.7(67.5)b	0.3 (1.7)b	-1.7(-10.8)c	1.9(11.9)d
US	16.3b	97.5b	8.8(54.3)b	5.3(32.5)c	-0.7(-4.2)c	-1.4 (-8.4)b	5.2(21.8)a
HC	16.6a	99.7a	12.6(75.6)a	0.5 (2.9)d	1.1 (6.4)a	-0.7 (-4.2)a	3.2(19.2)b

Note : Results are mean of two replications and same letter are not significantly different at the ≤ 0.05 probability level.

Values in parenthesis are the AN rate meaning the proportion of ANC<sub>M</sub> by each mechanism to ANC<sub>H</sub>  
<sup>a</sup> total input - total output of H<sup>+</sup>, <sup>b</sup> (total output / total input of H<sup>+</sup>) × 100  
<sup>c</sup> TBC means total base cations(sum of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup>) leached by simulated acid rain  
<sup>d</sup> total input - total output of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> or NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
<sup>e</sup> ANC<sub>H</sub> - sum of ANC<sub>M</sub> by four main mechanism, which means other exchange or protonation reactions including the protonation of soluble weak acid anions

0.517 이상( $p < 0.04$ )으로써 산중화 반응에 이들 토양산성도 인자가 유의적으로 작용하였다(Table 3). 그러나 회귀모형들의 결정계수는 염기포화도에 비해 토양 pH에서 높게 나타나 토양산성도 인자별 중요도는 토양 pH에서 높았다.

전술한 단순회귀모형과 비교할 다중회귀분석의 결과는 Table 4와 같으며, 단순회귀모형과 다중회귀모형간의 예측치와 잔차검정 결과는 Table 5와 같다. 모든 산중화 반응에 대한 다중회귀모형의 수정결정계수는 모두 0.887 이상( $p < 0.01$ )으로 단순회귀모형보다 유의도가 높았다. 따라서 토양산성도 인자를 이용하여 산중화 반응을 예측할 때 다중회귀모형의 적용이 보다 신뢰도를 높일 것으로 판단되었다. 그러나 예측치와 관측치간의 차이로 산출된 외표준잔차에서 보면 전체 신뢰구간을 줄이는 단순과 다중회귀모형간의 효과 차이는 뚜렷하지 않았다.

이상에서 얻어진 다중회귀식을 이용하여 총 16.7mmolc/kg의 산 유입에 따른 전국 산림토양의 산중화 반응을 예측할 때, 평균 염기포화도 26.8% (김태훈 등, 1988)와 토양 pH 5.15(미발표자료)에

근거한 총 산중화능은 16.47mmolc/kg, 염기치환과 Al 용해 산중화능은 각각 9.76과 4.20mmolc/kg 이었다. 이는 pH 4.0 강수가 향후 10년간 지속될 경우 염기치환과 Al 용해에 의한 토양 산중화율이 각각 59%와 26%일 것임을 의미한다.

물론 회귀모형에 미치는 관측수의 영향과 그밖에 현지 산림토양의 산중화 작용에 영향을 하는 여러 자연적 인자 및 모암별 산중화 반응의 변이성 등이 복합적으로 작용할 것이다. 그러나 토양산성화로 인한 산림의 생태적 피해를 예측하고 방지하기 위한 최적 모형의 개발에 상당한 시간과 경비가 소요됨을 고려할 때, 다각적인 접근법의 모색은 평가기법의 부재에 따른 피해방지의 실기를 최소화하는데 필수적일 것이다. 따라서 보다 다양한 토양산성화 인자와 토양산성화로 인한 산림피해의 직·간접적 지표인자들을 개발하여 이상의 산중화 반응 예측모델에 접목한다면 향후 대기질 환경변화에 따른 토양산성화 진행 과정은 물론 그로 인한 산림피해 가능성을 보다 정확하고 용이하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

**Table 3.** Simple regression analysis of acidification indicators and acid neutralization responses(mmolc/kg) of forest soil to additional acid input(16.7mmolc H<sup>+</sup>/kg).

Variables	x	pH(H <sub>2</sub> O)	Base saturation
y	Simple regression model		
Total ANCH		$y = 0.949 x + 11.339$ (Adj-R <sup>2</sup> = .824, p = .0018)	$y = 0.018 x + 15.509$ (Adj-R <sup>2</sup> = .517, p = .0445)
ANC <sub>M</sub> by TBC exchange		$y = 6.294 x - 22.768$ (Adj-R <sup>2</sup> = .886, p = .0005)	$y = 0.142 x + 4.421$ (Adj-R <sup>2</sup> = .770, p = .0042)
ANC <sub>M</sub> by Al dissolution		$y = -7.908 x + 44.890$ (Adj-R <sup>2</sup> = .869, p = .0007)	$y = -0.181 x + 10.782$ (Adj-R <sup>2</sup> = .776, p = .0038)

ANC and TBC mean acid neutralization capacity and total base cations, respectively.

**Table 4.** Multiple regression analysis of acidification indicators and acid neutralization responses(mmolc/kg) of forest soil to additional acid input(16.7mmolc H<sup>+</sup>/kg).

Variables	Multiple regression model	Adj-R <sup>2</sup>	p value
Total ANCH	2.144pH - 0.031BS + 6.261	.887	.0043
ANC <sub>M</sub> by TBC exchange	6.818pH - 0.013BS - 24.996	.896	.0062
ANC <sub>M</sub> by Al dissolution	-7.691pH - 0.006BS + 43.965	.997	.0001

ANC and TBC mean acid neutralization capacity and total base cations, respectively.

**Table 5.** Predicted acid neutralization responses(mmol./kg) and externally studentized residuals from simple and multiple linear regression models for four regions.

Soil reponses	Regions	Predicted value from SRM		Predicted value from MRM
		pH	BS	
Total AN <sub>CH</sub>	NS	15.37(-0.86)	15.65(-1.29)	15.13( 1.03)
	KH	15.75( 0.58)	15.68( 0.52)	15.94(-0.57)
	US	15.89( 1.76)	15.72( 1.47)	16.17( 1.76)
	HC	16.70(-0.45)	16.57( 0.12)	16.58( 0.58)
AN <sub>CM</sub> by TBC exchange	NS	3.98( 0.09)	5.54(-0.83)	3.87( 0.18)
	KH	6.50(-1.64)	5.77(-0.58)	6.58(-1.73)
	US	7.38( 1.21)	6.08( 1.89)	7.50( 1.16)
	HC	12.79(-0.22)	12.71(-0.10)	12.74(-0.16)
AN <sub>CM</sub> by Al dissolution	NS	11.28(-0.17)	9.35( 0.74)	11.24(-0.14)
	KH	8.12( 1.84)	9.06( 0.75)	8.15( 1.78)
	US	7.01(-1.01)	8.67(-1.82)	7.06(-1.12)
	HC	0.21( 0.19)	0.22( 0.14)	0.19( 0.19)

NS, KH, US and HC denote Namsan, Kanghwa, Ulsan and Hongcheon, respectively.

SRM and MRM mean simple regression model and multiple regression model, respectively.

Note : Results are mean of two replications and values in parenthesis are externally studentized residuals.

### 인용 문헌

- 김태훈·정진현·구교상·김규현·차순형·김준섭·이충화·구창덕. 1988. 산림토양분류에 관한 연구. 임업연구원 연구보고 37 : 19-34.
- 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법. 농촌진흥청. pp. 145.
- 류태철·김준호. 1994. 수도권지역에서 토양의 산성화에 의한 리기다소나무의 생장 감소. 한국생태학회지 17(3) : 287-297.
- 임업연구원. 1999. 임업연구보고서(미발표자료).
- 이수옥·민일식. 1989. 대기오염 및 산성우가 산림생태계의 토양 산도 및 양료 분포에 미치는 영향. 한국임학회지 78 : 11-25.
- 이창석·길지현·유영환. 1998. Historical damage and growth inhibition of *Pinus densiflora* around the metropolitan area of Seoul. 한국생태학회지 21(2) : 125-131.
- 吉田 稔·川畑洋子. 1988. 酸性雨の土壤による中和機構. 日本土壤肥料學雜誌 59(4) : 413-415.
- Clayton, J.L., D.A. Kennedy and T. Nagel. 1991. Soil response to acid deposition, Wind River Mountains, Wyoming : II. column leaching studies. Soil Science Society of America Journal 55 : 1433-1439.
- James, B.R., C.J. Clark and S.J. Riha. 1983. An 8-hydroxyquinoline method for labile and total aluminum in soil extracts. Soil Science Society of America Journal 47 : 893-897.
- Neilsen, D., P.B. Hoyt, P. Parchomchuk, G.H. Neilsen, and E.J. Hogue. 1995. Measurement of the sensitivity of orchard soils to acidification. Canadian Journal of Soil Science 75 : 391-395.
- SAS Institute Inc.. 1989. SAS/STAT User's Guide, version 6, 4th edition, vol. 2. pp. 846.
- Ulrich, B. 1983. Soil acidity and its relationship to acid deposition. In : Ulrich, B. and J. Pankrath ed. Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. Proceedings of a workshop held at Gottingen, West Germany 1982. pp. 389.
- Ulrich, B. 1989. Forest decline in ecosystem perspective. In : Proceedings international congress on forest decline research. pp. 21-41.