

산성비 식물에 미치는 영향 (연재 II)

김준호 / 서울대학교 식물학과

우리나라의 산성비 현황

대도시(서울)에서 측정된 빗물의 pH는 지난 10년간 연평균 pH 4.18-4.17의 범위로 변동하고 있으므로 정상 빗물(pH 5.6)보다 낮음을 알 수 있다. <Table 1> 지난 10년간의 빗물에서 특기할 일은 1987년 이후 낮아지는 경향이였다. 그리고 봄에 황사와 빗물이 섞여 내릴때 빗물의 pH가 상승하였는데 그것은 황사가 중국의 알칼리성 황토(loess)에서 유래하고 있는 것으로 해석된다. 또한 눈을 녹힌 물의 pH는 빗물보다 더 낮아지는 경향이였다. <Table 2>. 서울시의 산성비의 pH를 등급화하여 그 분포도를 작성한 결과는 종로구와

영등포구가 높았는데 그 이유는 교통량 및 공장의 밀도와 관계가 깊고 또 바람장미(Wind rose)와의 관계에서 편서풍의 영향을 받는 것으로 해석되었다.

빗물의 pH와 관련된 화학성분을 밝히기 위하여 서울의 빗물을 분석한 결과 SO_4^{2-} 를 79-240 μ eq, NO_3^- 를 1-26 μ eq 및 Cl $^-$ 를 6-29 μ eq를 함유하여, 교통량보다 화석원료의 소비량과 관계가 깊음을 시사하였다. <Table 3>.

1982년에 중도시(예: 청주), 소도시(공주) 및 농촌 지역(전남 해남군)에는 정상비가 내렸었다. 그러나 1990년에는 중도시(청주)와 소도시(공주)에도 산성비가 내리게 되었다. <Fig. 2>.

Table 1. Annual mean pH of rain water in Seoul during 1980 - 1989

| Years | '80 | '81 | '82 | '83 | '84 | '85 | '86 | '87 | '88 | '89 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Mean pH | 4.35 | 4.48 | 4.31 | 4.37 | 4.68 | 4.64 | 4.26 | 4.40 | 4.32 | 4.17 |
| No. of samples | 35 | 20 | 32 | 9 | 31 | 34 | 36 | 53 | 60 | 86 |

Table 2. Comparison of the pH value of rain, snow with yellow sand rain in Seoul during 1985-1989

| Kinds of precipitation | No. of Samples | pH |
|------------------------|----------------|------|
| Rain | 231 | 4.28 |
| Snow | 24 | 5.07 |
| Yellow sand rain | 4 | 6.23 |

Table 3. Mean anion concentrations in rain water in Seoul during 14 Apr. 1990 - 14 May 1990 (n = 9)

| pH | SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{eq/l}$) | NO ₃ ⁻ ($\mu\text{eq/l}$) | Cl ⁻ ($\mu\text{eq/l}$) |
|-----------------------|---|--|---|
| 4.53 (4.30 - 5.30) | 141.0 (240.0 - 79.2) | 10.3 (26.3 - 1.3) | 18.0 (28.7 - 5.9) |

산성비에 의한 삼림의 쇠퇴징후

이미 미국의 동북부와 Europe의 각국에서는 산성비에 의한 삼림의 쇠퇴징후(forest decline syndrome)가 밝혀지고 있다. 한국에서도 1988년에 서울 주변의 리기다소나무 조림지에서 잎의 황화현상(Chlorosis) 또는 양사현상(necrosis)이 관찰된 후 그 현상이 확대되고 있다. 이 현상은 황화현상과 함께 다음의 여러 증상이 나타나고 있다. (1)조기 또는 부정기 낙엽(삼림의 하부보다 정단부가 일찍 낙엽되는 경향이 있음), (2)침엽의 수명단축(2년생잎이 떨어지고 0-1년생잎만 남음), (3)줄기의 비대생장과 신기의 신장생장의 저하(잎의 황화현상이 관찰되기 5년전부터 년윤폭이 좁아지고 신기가 짧아짐), (4)산호장 뿌리의 형성(뿌리끝이 직선으로 자라지 못하고 산호모양으로 뭉침), (5)천근성 뿌리의 형성(뿌리가 토양 표면 가까이에 얽혀 있음), (6)순생산량의 감소(비대생장, 신장생장 및 낙엽으로 순생산량이 감소됨), (7)고사 등.

리기다소나무에서 일어나는 이러한 증상은 Europe

에서 1970년대 초부터 산성비와 대기오염에 의하여 나타난 전나무속(*Abies alba*), 노르웨이 가문 비나무(*Picea abies*) 및 구주소나무(*Pinus sylvestris*)의 쇠퇴징후와 비슷하였다(Krause et al 1986). 따라서 리기다소나무림에서 나타난 증상을 삼림의 쇠퇴징후로 간주할 수도 있을 것이다. 삼림의 쇠퇴징후는 산성비뿐만 아니라 SO₂, O₃와 같은 대기오염물질 및 병해충의 2차적 감염(예: 침엽수의 잎떨림병 *Lophodermium*, *Oligonychus*) 등 복합영향이라고 보아야 할 것이다(Krause et al 1986, Freeman, 1986, Lee, 1987).

다음에 산성비가 삼림의 쇠퇴징후를 일으키는 기작에 대하여 알아본다.

(1) 표피면에서 Epicuticular Wax의 침식

산성도가 높은 빗물(pH 2.5이하)에 적셔진 잎을 氣孔이나 毛의 가까이에 피사가 일어나는데 그 보다 앞서 표피를 덮고 있는 epicuticular wax가 침식되는 현상이 SEM으로 밝혀졌다(Karhu and Huttunen, 1986). Epicuticular wax 침식의 특징은 산성비의 정

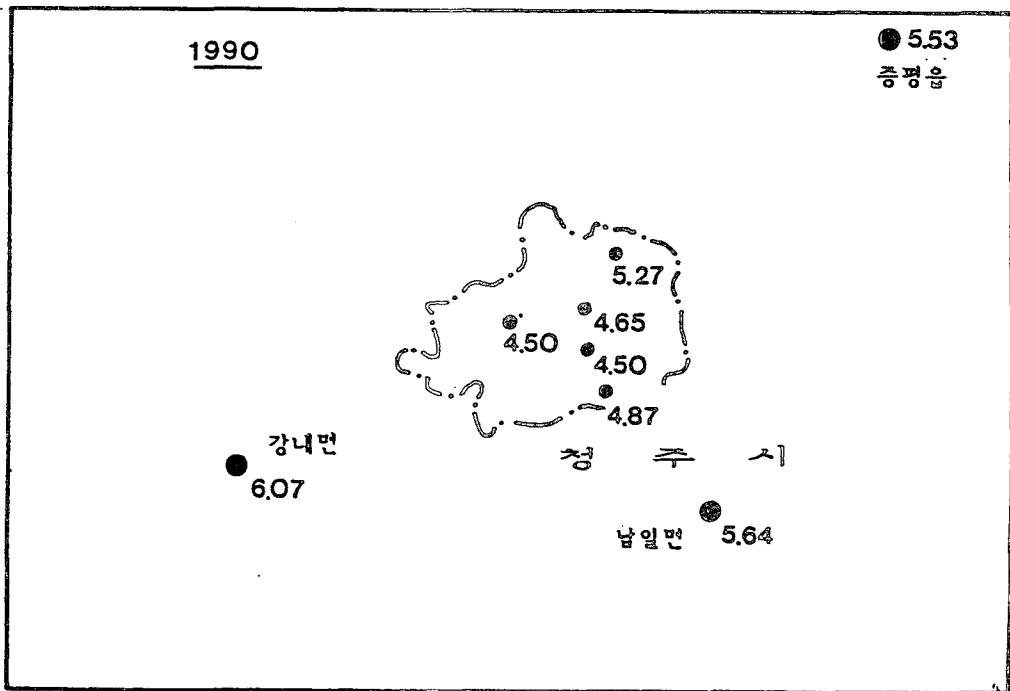
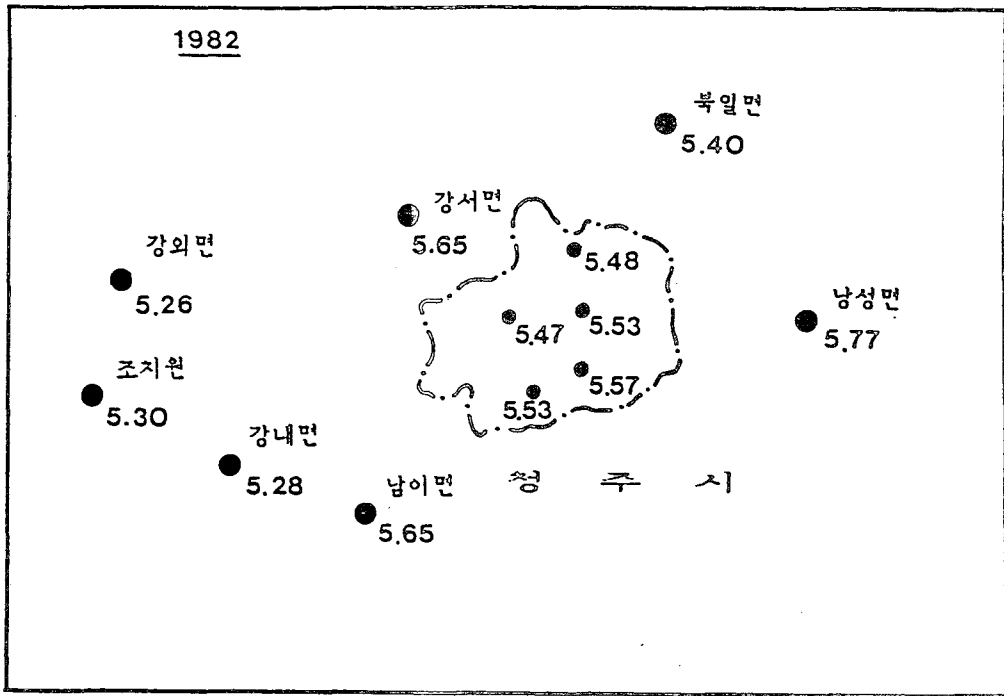


Fig. 2. Comparison of pH of the precipitation in Chungju district in 1982 with in 1990.
 (From data of Prof. H.S. Lee)

도와 오염물질의 종류에 따라 다르다. 잎 표피에서의 wax의 소실은 표피세포로부터 무기영양소와 대사물질이 세탈되는 직접적 원인이 된다(Kelly and Strickland, 1986). 잎 표면에 저 pH의 빗물이 묻으면 중화되어 고 pH로 되는데 두꺼운 wax성 잎은 중화능이 낮고, 털이 많은 잎은 중화능이 커진다(Hutchison et al. 1986; Gaber and Hutchison, 1988; 유, 1990). 그 이유는 wax가 두꺼운 잎에서 빗방울이 빨리 떨어지지만 털이 많은 잎에서 늦게 떨어지며 부착면적이 넓고, 또 이곳에 있는 잎세포로부터의 Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 빗물에 있는 H^+ 가 치환되는데 있다. 깨끗한 환경에서 잎의 표면의 단위면적당 wax량은 시간경과에 따라 변화하지 않는데 만상적으로 산성비를 맞는 잎의 wax에서는 Keton과 1, 2차 alcohol이 감소된다(Cape, 1986)

(2) 엽과 수관으로부터의 이온 세탈

인공산성빗물을 잎에 산포하면 양이온이 세탈되는데 pH가 낮을 수록, 또 빗물량이 많을 수록 많이 세탈된다. 유(1990)는 물에 H_2SO_4 를 섞어서 pH5.6(표준빗물), 4.0, 3.5, 3.0, 의 인공빗물을 만들어 콩, 청갈참, 및 리기다소나무의 잎에 100ml, 200ml, ...1000ml를 분무기로 산포한 후 그 세탈액의 K^+ 와 Ca^{2+} 량을 측정하였다. 그결과 콩잎에서는 100ml세탈액속의 K^+ 량이 빗물의 pH에 관계없이 일정하였지만, 300ml세탈액부터 pH가 낮을 수록 증가하였고, 특히 pH3.0에서 현저하게 증가하였다<Fig. 3>. 그러나 빗물량이 증가할수록 K^+ 의 세탈량은 감소되었다. 청갈참잎은 처음 100ml빗물에서 pH가 높을수록 K^+ 의 세탈량이 많았지만, 200ml부터 역전되었다. 그러나 리기다소나무잎은 처음 100ml빗물에서 pH가 낮을수록 K^+ 량이 증가되었고, 그 경향이 500ml까지 계속되었다.

한편, Ca^{2+} 의 세탈량은 콩, 청갈참 및 리기다소나무의 잎에서 다같이 pH가 낮을 수록 증가하였고, 그들의 경향은 1000ml까지 계속하여 나타났다<Fig. 4>.

pH가 다른 1000ml의 빗물을 잎에 산포하여 무기영양소를 세탈시킨 다음, 잎에 잔존하는 K^+ 와 Ca^{2+} 를 정량한 결과 pH가 낮을 수록 잔존량이 적었다<Table. 4>. 이상의 결과는 산성비에 의해 식물잎의 무기영양소가 세탈됨을 보여준다. 한편, 잎을 세척한 1000ml의 빗물을 모아서 그 속의 Ca/K비를 알아본 결과 pH가

낮을 수록 그 비가 높아졌다<Table 5>. 이 결과는 산성비가 잎속의 여러 무기영양소함량 사이의 평형을 깨뜨리고 있음을 시사한다(Hutchison et al. 1986).

이와 비슷한 인공산성빗물을 Quercus림에 30개월간 산포한 결과 수관관유액(Throughfall) 속의 Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} 및 총 N는 pH가 낮을 수록 증가하였다(Kelly and Strickland, 1986) <Fig. 5>.

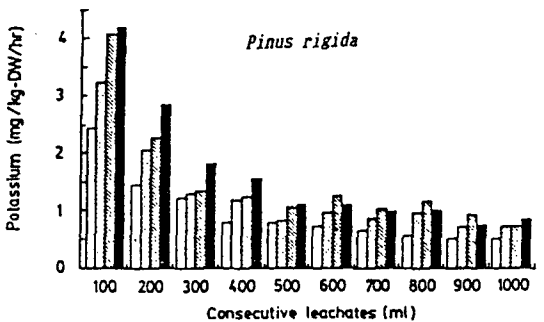
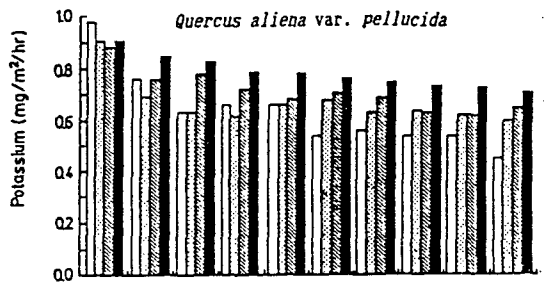
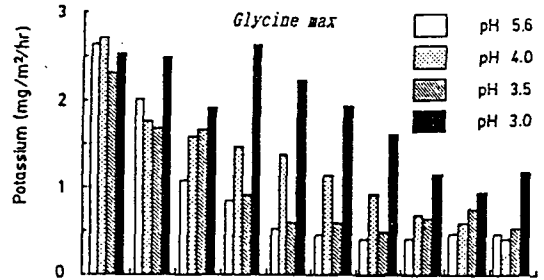


Fig. 3. Changes of potassium content in consecutive leachates from leaves sprayed with simulated acid rain.

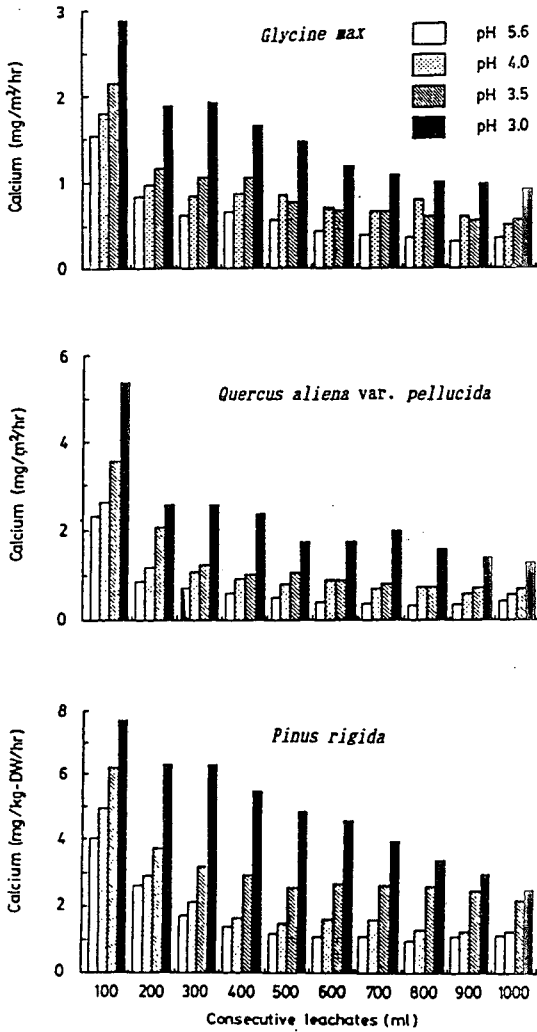


Fig. 4. Changes of calcium content in consecutive leachates from leaves sprayed with simulated acid rain.

토양으로부터의 세탈과 뿌리의 생장 억제

산성비는 토양으로부터 양이온을 세탈시킨다. 본래 토양표면은 陰電荷하고 있으므로 그 표면에 양이온이 결합되어 있는데 이들이 산성비물속의 H⁺와 치환되어 이탈된다.

(1) 양이온 세탈과 Aluminium 용출

유(1990)는 유리원통에 사토와 사양토및 유기물의 다소를 조합한 4종류의 pH가 다른 인공산성비물을 관류한 결과 일가양이온(K⁺, Na⁺)은 토양의 종류에 따른 차이가 적었지만, 2가 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺)은 사양토보다 사토가, 다유기물토보다 소유기물토가 더 많이 세탈됨을 밝혔다<Fig. 6>. 이처럼 산성비는 토양을 척박하게 만들고 있다.

한편, 토양의 Al은 pH3.0이하에서 용출되는데 소유기물사토에서는 소량의 빗물로 용출되지만 다유기물사토, 소유기물사양토, 다유기물사양토의 순으로 많은 빗물이 요구되었다. 토양속의 Al은 humic acid나 Fulvic acid와 같은 유기산과 결합하고 있다가 산성비물에 의하여 용해된다(Woolhouse, 1983). 이들 결과는 화강암토양에서 유래하여 사토가 많고 유기물이 적은 한국의 삼림토가 산성비물에 취약할 것임을 시사해준다.

한국에서의 토양의 Al함량은 강원도보다 대도시(서울)과 공업단지의 주변이 1.8-2.5배나 많고, Al함량을 pH와 관계가 있음이 밝혀지고 있다(삼림청 임업시험장, 1988) <Table 6>.

이 밖에도 산성비물에 의하여 토양으로 부터 음. 양이온의 세탈에 관한 연구결과가 많이 발표되었다.* (Abrahamsen and Stuanes, 1986; Forster et al. 1986; Freisleben and Rasmussen, 1986; Haynes and Swift, 1986; Klein and Alexander, 1986; Lee, 1985; Zoell and Huettl, 1986).

(다음호에 계속)

(이 자료는 한국생태학회 및 한국식물학회에서 주최한 '90 심포지움 자료에 수록했던것을 발췌 게재한 것입니다.)

Table 4. Nutrient content remaining in leaves after received simulated acid rain of 1000ml

| Plants | pH of rain | Remaining nutrient content | | | |
|--|------------|----------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | | K | | Ca | |
| | | Mean \pm SD (mg/g-DW) | % | Mean \pm SD (mg/g-DW) | % |
| <i>Glycine max</i> | 5.6 | 16.6 \pm 0.12 | 100.0 | 17.3 \pm 0.83 | 100.0 |
| | 4.0 | 16.5 \pm 1.40 | 99.4 | 17.2 \pm 1.19 | 99.4 |
| | 3.5 | 15.8 \pm 0.44 | 95.2 | 16.5 \pm 1.23 | 95.4 |
| | 3.0 | 13.4 \pm 1.35 | 80.7 | 14.2 \pm 1.34 | 82.1 |
| <i>Quercus aliena</i> <i>var. pellucida</i> | 5.6 | 10.2 \pm 1.06 | 100.0 | 11.7 \pm 0.47 | 100.0 |
| | 4.0 | 10.1 \pm 0.56 | 99.0 | 10.8 \pm 1.24 | 92.3 |
| | 3.5 | 10.1 \pm 1.14 | 99.0 | 10.7 \pm 1.02 | 91.5 |
| | 3.0 | 9.8 \pm 0.69 | 96.1 | 10.2 \pm 0.92 | 87.2 |
| <i>Pinus rigida</i> | 5.6 | 5.7 \pm 0.73 | 100.0 | 3.2 \pm 0.37 | 100.0 |
| | 4.0 | 5.6 \pm 1.72 | 98.2 | 3.2 \pm 0.44 | 100.0 |
| | 3.5 | 5.2 \pm 0.89 | 91.2 | 3.1 \pm 0.16 | 96.9 |
| | 3.0 | 4.9 \pm 0.78 | 86.0 | 2.9 \pm 0.17 | 90.6 |

Table 5. Ca/K ratio in 1000 ml leachate from leaves after spraying with simulated acid rain

| Plant | pH | Ca/K ration | % |
|--|-----|-------------|-------|
| <i>Glycine max</i> | 5.6 | 0.66 | 100.0 |
| | 4.0 | 0.60 | 95.5 |
| | 3.5 | 0.91 | 137.9 |
| | 3.0 | 0.80 | 121.2 |
| <i>Quercus aliena</i> <i>var. pellucida</i> | 5.6 | 1.10 | 100.0 |
| | 4.0 | 1.53 | 139.1 |
| | 3.5 | 1.82 | 165.5 |
| | 3.0 | 2.91 | 264.5 |
| <i>Pinus rigida</i> | 5.6 | 1.68 | 100.0 |
| | 4.0 | 1.56 | 92.9 |
| | 3.5 | 2.05 | 122.0 |
| | 3.0 | 2.98 | 176.0 |

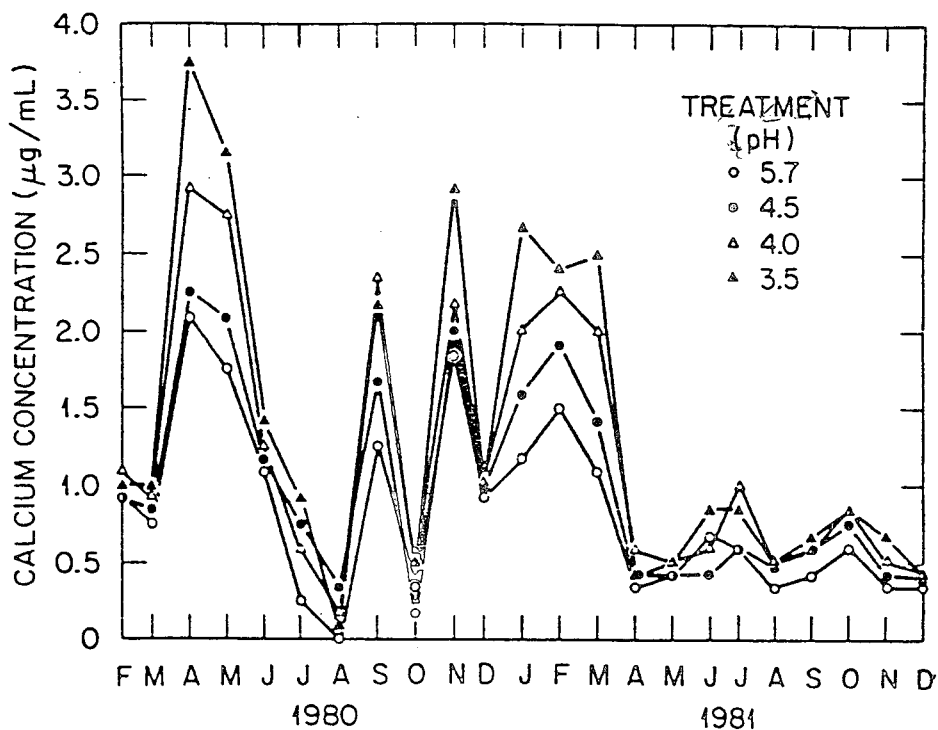


Fig. 5. Throughfall Ca concentration values over a 23-mo period as a function of pH treatment. (From Kelly and Strickland 1986)

| District | pH | Active aluminum (ppm) | No. of samples |
|-----------|-----|--------------------------|----------------|
| Kangwondo | 5.5 | 206.5 (+125.2) | 8 |
| Seoul | 4.5 | 365.3 (+103.4) | 9 |
| Ulsan | 4.8 | 430.0 (+137.2) | 12 |
| Yeochon | 4.5 | 508.0 (+24.0) | 5 |

Table 6. pH and active aluminum concentration in soils of four districts.
(From Forest Station, MOF 1988)