

酸性雨에 대한 山林生態系の 敏感度 및 自淨機能(II)^{1*}

— 植生層과 土壤層 溶脫이온 分析을 중심으로 —
張寬淳² · 李壽煜²

Sensitivity and Self-purification Function of Forest Ecosystem to Acid Precipitation(II)^{1*}

— Ion Balance in Vegetation and Soil Leachate —
Kwan Soon Chang² and Soo Wook Lee²

要 約

山林生態系の 酸性雨에 대한 緩衝能과 敏感性을 분석하기 위해서 리기다소나무林과 굴참나무林的 樹冠通過水, 樹幹流 및 토양층 溶脫溶液과 林外降雨의 成分을 각각 분석하였고, GIS의 IDRISI system을 이용하여 土壤圖와 植生圖를 映像 變換시킨 후 중첩시켜 土壤 및 母岩에 따른 林相의 분포를 분석하였다. 母岩 및 土壤은 酸性岩 堆積岩, 變成岩으로 구분하고 酸性, 中性, 鹽基性, 變成殘積土로 세분하였다. 植生層을 통과한 강우의 평균 pH는 굴참나무林보다 리기다소나무林에서 낮았으며, 두 수종 모두 林外降雨보다 樹冠通過水에서는 높은 반면에 樹幹流에서 낮았다. 植生層을 통과한 降雨내 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 의 양은 樹冠通過水보다 樹幹流에서 높았고, 토양으로 투입되는 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 양은 林外보다 리기다소나무林에서 각각 7.2, 4.3 및 2.5배, 굴참나무林에서 각각 4.4, 2 및 2.5배 많았으며 굴참나무林보다 리기다소나무林에서 많았으나, 置換性 양이온의 농도는 리기다소나무林에서 4.1배, 굴참나무林에서 4.6배로 굴참나무林에서 높았다. 土壤層 溶脫溶液의 평균 pH는 樹冠通過水 pH보다는 낮은 반면에, 樹幹流보다 높은 경향을 보였으며, 樹種別로는 리기다소나무林 지역에서 낮았다. 酸性物質에 의해서 土壤層으로부터 용달되는 養料과 Al^{3+} 量은 闊葉樹林보다 針葉樹林이 많았고, 이들 양은 土壤 溶脫溶液내 酸性物質이 증가함에 따라 유의적으로 증가하였다. 山林生態系中 리기다소나무林은 식생층 용탈용액에 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 양이 많은 것으로 보아 酸性物質의 沈積量과 遮斷量이 많은 것으로 인정되는 동시에 토양으로부터 양료손실이 많았고 반면 굴참나무林은 樹冠層에서 陽이온置換과 H^+ 소비가 많았고, 토양에서 養料損失이 적어 식생과 토양층의 緩衝力이 우수했다. 대전지역의 산림토양은 산성암산적토가 69%, 퇴적 및 변성암산적토가 25%, 중성 및 열기성암산적토는 6%를 차지하고 있는데, 양이온 置換容量이 부족한 酸性岩에서 풍화된 土壤이 가장 많은 면적을 차지하고 있었고, 酸性雨에 대해서 가장 敏感性을 나타내는 산성암이면서 동시에 針葉樹林으로 구성된 임지는 소나무林과 리기다소나무林으로 전체 면적중 50%를 차지하고 있었다.

ABSTRACT

To estimate buffer capacity and sensitivity of forest ecosystem to acid rain in Taejon, ionic components of

¹ 接受 1995年 1月 10日 Received on January 10, 1995.

² 忠南대학교 농과대학 산림자원학과 Department of Forest Resources, College of Agriculture, Chungnam National University, Taejon, Korea.

* 본 연구는 1992년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성에 의해서 수행된 것임

throughfall, stemflow, soil leachate, and open rain in *Pinus rigida* and *Quercus variabilis* forest were analyzed. The spatial sensitivity based on parent rock and forest type was given by IDRISI of GIS which created imagery conversion from soil and vegetation map. Parent rocks and soils were classified into acidic, sedimentary, metamorphic rock and then subdivided based on SiO_2 content. Average pH of vegetation leachate was higher in throughfall but lower in stemflow than open rain and higher in *Quercus variabilis* forest than in *Pinus rigida* forest. The flow of SO_4^{2-} , NO_3^- and Cl^- through vegetation leaching (throughfall plus stemflow) into soil were 7.2, 4.3, and 2.5 times, respectively, higher in *Pinus rigida* forest and 4.4, 2, and 2.5 times, respectively, higher in *Quercus variabilis* forest than in open field. But the concentration of exchangeable cations was 4.1 times higher in *Pinus rigida* forest and 4.6 times higher in *Quercus variabilis* forest than in open field. Average pH of soil leachate was lower than that of throughfall, but higher than that of stemflow. The concentration of exchangeable cations and Al^{3+} in soil leachate were more in *Pinus rigida* forest than in *Quercus variabilis* forest and increase significantly with the increase of acidic deposits. *Pinus* forest had more deposition and canopy interception of acidic pollutants and more nutrient loss than *Quercus* forest, and *Quercus* forest had more cation exchange and proton consumption and than consequently had less nutrient loss and better buffer capacity than *Pinus* forest. The 69% of forest soils was distributed on acidic rock, 25% of it on metamorphic rock, and 6% of it on intermediate and basic rock. Acidic rock residuals which had low very cation exchange capacity and high sensitivity to acid rain occupied a half of total forest land in Taejon area. Therefore forests in Taejon showed high vulnerability to acid rain and will receive much more stress with the increase of acid rain precursors.

Key words : Buffer capacity, Sensitivity, Throughfall, Stemflow, Soil leachates, Acid deposits, *Pinus rigida*, *Quercus variabilis*.

緒 論

최근 人口, 産業施設 및 車輛增加는 다양한 오염원을 형성하고 그중에서도 대기중으로 酸性雨 원인물질들을 대량 방출하고 있다. 방출된 大氣汚染物質은 주변지역으로 이동된후 Gas상태로 또는 미세립자들과 결합하여 응축된 상태의 미스트 및 에어로졸로 대기중에 浮遊하게 되는데, 이들은 氣像條件에 따라 乾性堆積(Dry deposition) 또는 濕性堆積(Wet deposition) 형태로 지상으로 강하한다.

山林生態系의 植生層과 土壤層은 여러가지 오염물질들을 정화시키고 固定하는 능력을 가지고 있다. 산림은 여러가지 식물로 피복되어 있기 때문에 산성물질은 土壤表面에 직접 강하되기 전에 주로 植生層에 접촉하게 되면서 식생층에 沈着되고 토양으로 투입된다. 植生層에 침착된 산성물질들은 Cation exchange 또는 Bronsted base leaching에 의한 置換反應에 의해서 식물조직의 양료를 세탈시킨다. 대기오염물질이 대기에서 생

태계로 유입되는 이러한 과정을 통해서 樹木 葉面의 表皮層를 파괴시키며 영양염류의 缺乏을 일으키고, 파괴된 cuticular층을 통해 침투된 산성물질은 내부세포에 장해를 주어 물질대사 과정을 방해한다(Cape, 1986; Evans and Curry, 1979; Gaber and Hutchinson, 1988; Guderian, 1985; Hutchinson 등, 1986; Karhu and Huttunen, 1986; Kelly and Strickland, 1986; Smith, 1981; Wood and Bormann, 1975). 그리고 토양으로 투입된 산성물질은 土壤養料를 용탈시켜 토양을 酸性化시키며, 알루미늄 등의 重金屬이 溶出되어 식물생육에 영향을 주는 사실이 山林衰退 徵候를 보이고 있는 지역에서의 실험적 연구에서 보고된 바 있다(Hutchinson, 1986).

山林生態系는 植生層과 土壤層 사이에 끊임없이 지속되는 力動的 物質循環과정을 통하여 외부로부터 공급되거나 내생적으로 생성되는 각종 독성물질들의 Flux balance를 조절함으로써 그 충격을 緩衝시키는 淨化能力을 행사한다. 따라서 산성우의 영향도 수직적으로 구성되어 있는 植生層과 土壤層의 완충능에 따라서 다르게 나타난

다. 이를 분석 평가하기 위한 방법으로 植生層을 대상으로 林內와 林外의 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 量의 흐름을 비교하거나 樹冠通過水, 樹幹流內 이온收支(Ion balance)들을 측정하는 연구들이 이루어지고 있다.

토양은 모암의 종류에 따라 酸性堆積物에 대한 緩衝能이 또한 다르게 나타나는데 石灰岩, 頁岩, 砂岩 등의 퇴적암류가 풍화된 土壤이나 水河堆土層이 매우 깊은 지역에서는 酸性堆積物을 中和, 置換시키는 물질들이 풍부하여 陽이온 置換容量이 높아 수소이온을 다량 치환시킬 수 있는 반면 火成岩 중에서 SiO_2 의 함량이 65% 이상인 酸性岩(Acidic rock)인 花岡岩, 花岡片麻岩을 母岩으로 하는 土壤일 경우 True alkalies(K, Na)나 Sub alkalies(Ca, Mg)의 양이 적어 酸性堆積物에 대한 緩衝能이 빈약하게 나타난다(李壽煜과 閔一植, 1989).

본 연구의 목적은 식생층의 樹冠通過水(Throughfall), 樹幹流(Stemflow) 및 土壤層을 통과하는 용탈용액내 이온들의 흐름을 분석함으로써 Ion flux 함께 모암과 식생층을 종합하여 산성우에 대한 완충능과 민감성을 분석하는 것이다.

材料 및 方法

1. 調查區 選定

實驗地域으로는 대전의 北東部에 위치해 있는 鷄足山을 선정하였는데 시내 중심에서 東北으로 大和洞 공업단지와 인접해 있다. 調查區는 植生과 土壤을 조사한 후 植生分布가 균일하고 경사가 완만하며 土壤 浸蝕 흔적이 없고 토양이 비교적 안정되어 있는 계족산의 山麓部에 설치하였다.

2. 植生層 溶脫溶液 이온 分析

植生層은 闊葉樹林과 針葉樹林으로 구분하고 수종은 天然林으로 樹齡이 45-50년된 굴참나무林(*Quercus variabilis*)과 人工林으로 樹齡이 35-40년된 리기다소나무林(*Pinus rigida*)을 선정하였다. 樹冠通過水는 수관밑에 직경 5cm, 길이 50cm의 반원통 시료 채취기를 지상 1.5m 위치에 양쪽으로 2개 설치하여 시료를 수집하고, 樹幹流는 수간에 내려오는 강우만 채취하기 위해서 넓

이 5mm, 길이 2m의 C자형 Polyvinyl line을 수간에 S자로 밀착시켰다. 수집된 시료에 대하여 수소이온 외에 음이온으로 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- (Ion chromatography)을 양이온으로는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ (Atomic Absorption Spectrophotometer)을 분석하였다.

3. 土壤層 溶脫溶液 이온 分析

토심 20cm와 40cm 깊이에 직경 20cm 길이 30cm의 Polyvinyl column를 설치하고 토양 용탈용액을 채취하였다. Column설치 지점은 樹冠通過水 및 樹幹流를 채취하는 지점에서 樹幹內 위치하도록 하였으며, 분석 이온들은 植生層에서와 같고 Al^{3+} (Atomic Absorption Spectrophotometer)을 추가 분석하였다.

4. 土壤試料 分析

실험실로 운반된 試料를 自然乾燥시켜 40 mesh sieve로 친후 土壤 層位別로 土性(Pipett법), 土壤 pH, 有機物含量(Tyurin법), 全窒素含量(Kjeldahl법), 置換性陽이온[Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , H^+ (1N-초산 ammonium법)], 有效黃(비색법), 치환성 알루미늄(비색법)을 측정, 분석하였다.

5. 母岩 및 山林植生圖 變換

IDRISI system을 이용하여 山林植生은 1989년 환경청에서 제작한 1/50,000의 現存 植生圖에서 각각 林相을 수치화하여 입력한 후 래스터 변환을 통해서 Image file을 생성하였고 1990년 林業研究院에서 발행한 林相圖를 이용하여 보완하였다. 모암 및 토양 분류는 1/50,000 土壤圖에서 58개 土壤群을 수치화하여 입력하였고 酸性岩, 堆積岩, 變成岩으로 분류한 후 酸性, 中性, 鹽基性, 變成殘積土로 세분하였다.

結果 및 考察

1. 植生層 緩衝能力

汚染된 降雨가 地表面에 도달하기 전에 피복되어 있는 植生層을 통과하면서 식생층에 이미 침착되어 있는 酸性物質이나 植物組織으로부터의 무기물질과 치환반응에 의해서 그 조성성분이 변하게 된다. 그 변화정도 역시 植生層에 침착되어

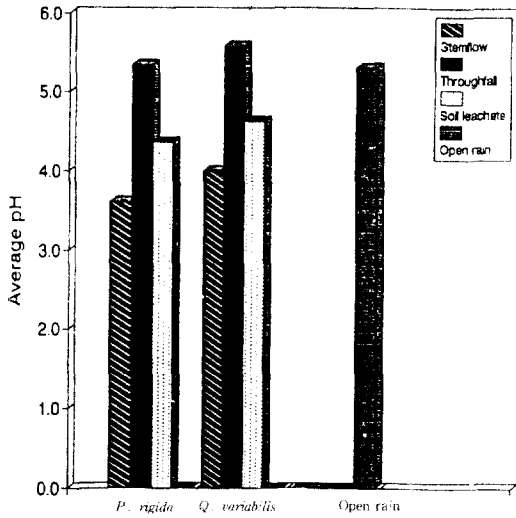


Fig. 1. Proton blance along the vertical strata in *Pinus rigida* and *Quercus variabilis* forest ecosystem in Taejeon.

있는 酸性物質의 量과 降雨가 통과할 때 植生層의 緩衝能力에 따라 다르다.

우선 강우의 특성을 보면 93년 4월에서 7월사이의 林外降雨의 pH 범위는 4.90-6.61로 평균치는 pH 5.31이었고 이온들의 평균 농도는 SO_4^{2-} 가 3.34mg/l, NO_3^- 는 1.72mg/l, Cl^- 은 0.74 mg/l이었으며, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 및 Na^+ 이 각각 0.43, 0.27, 0.87 및 0.76mg/l이었다. 이러한 林外降雨의 성분조성은 91-93년 사이의 대전의 광지역(덕명동, 이사동, 직동, 세천, 안영동) 강우성분 조성(SO_4^{2-} : 5.10mg/l, NO_3^- : 1.74mg/l, Cl^- : 1.94mg/l)과 비슷한 것으로 보아 근래에 대전지역의 대기오염 수준은 큰 변화가 없는 것으로 사료된다.

리기다소나무林과 굴참나무林의 樹冠通過水 및 樹幹流의 성분을 분석한 결과를 보면 우선 pH는 리기다소나무林에서 각각 pH 5.35 및 pH 3.61이었고 굴참나무林에서는 pH 5.58 및 pH 4.00이었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 pH값은 두스중 모두 林外降雨 보다 樹冠通過水에서 높았고, 樹幹流에서는 낮게 나타났다. H^+ 농도로 보면 리기다소나무林의 경우 樹冠通過水에서 0.4배 감소되어 林外降雨와 거의 유사하였으나, 樹幹流에서는 17배 증가하였다. 그리고 굴참나무林的 경우 樹冠通過水에서는 2.7배 감소한 반면에 樹幹流에서 13배 증가하였다. 樹冠通過水の H^+ 농

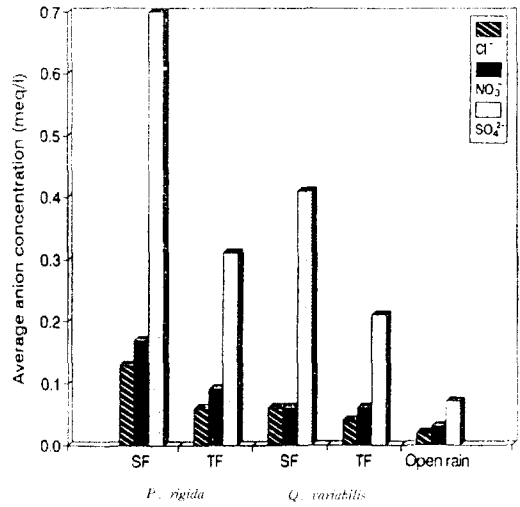


Fig. 2. Average anion concentration of stemflow (SF) and throughfall (TF) in *Pinus rigida* and *Quercus variabilis* forest ecosystem in Taejeon.

도가 林外降雨보다 낮은 것은 강우가 수관층을 통과할 때 앞에서 Cation exchange 또는 Bronsted base leaching에 의한 치환 및 용탈반응에 의해서 식물조직에서 분리된 양이온(K^+)들에 의해 치환되기 때문이다. 樹幹流의 영향을 받는 임목의 근주부는 타부분에 비해서 集水量이 많은데 이것은 수관이 逆根狀으로 강수를 모으는 특성이 있기 때문이며 樹幹流의 pH가 낮은 것은 오래동안 수피부분에 축적된 오염물질이 강우와 함께 수관을 타고 내려오는 것과 수피부분이 풍화하면서 수소이온을 생성하기 때문이다. 安田洋(1989)는 강우가 樹冠을 통과하여 직접 지표에 도달하는 부분과 樹幹을 흘러내려와 지표에 도달하는 樹幹流로 나눈다면 후자의 pH는 전자의 pH보다 낮음을 지적하였다. 강우의 pH를 좌우하는 H^+ 농도는 음이온인 SO_4^{2-} ($r^2=0.73$)과 NO_3^- ($r^2=0.52$)의 농도와 고도의 상관관계가 있고 특히 闊葉樹의 수관을 통과하는 강우는 林外降雨에 비해서 H^+ 농도를 37-86% 저하시킬 만큼 강우의 산도를 중화시킨다고 했다(大喜多敏一, 1988). 결과적으로 식생층을 통과한 강우 pH는 굴참나무림보다 리기다소나무林에서 더 낮게 나타났다.

樹冠通過水와 樹幹流내 음이온들의 농도는 그림 2와 같다. 리기다소나무林에서 樹冠通過水내

SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻의 농도는 각각 0.31, 0.09 및 0.06meq/l이었고, 樹幹流에서는 각각 0.7, 0.17 및 0.13meq/l이었다. 굴참나무林的 樹冠通過水에서는 각각 0.21, 0.06 및 0.04meq/l이었고, 樹幹流에서는 각각 0.41, 0.06 및 0.06meq/l이었다. 음이온 농도는 林外降雨에서보다 상당히 증가하였는데 SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻이 리기다소나무林的 樹冠通過水에서는 각각 4.4, 3 및 3배, 樹幹流에서는 각각 10, 5.7 및 6.5배에 이른다. 굴참나무林的 경우는 樹冠通過水에서 각각 3, 2 및 2배 樹幹流에서는 6, 2 및 3배 많았다. 植生層을 통과하여 토양으로 투입되는 酸性物質의 量은 樹冠通過水+樹幹流로 침엽수림인 리기다소나무林中에서 SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻이 각각 7.2, 4.3 및 2.5배이었고, 활엽수림인 굴참나무林中에서는 각각 4.4, 2 및 2.5배 많았다. 山林生態系에서 植生層에 沈着되어 있는 汚染物質의 量은 樹冠通過水보다 樹幹流에서 역시 많았고, 수종별로는 굴참나무보다 리기다소나무林이 많았다. Skeffington(1981)이 영국 Tillingbourne Catchment에서 Oak(*Quercus robur* L.), Birch(*Betula pendula* Roth), Pine(*Pinus sylvestris* L.)을 대상으로 樹冠通過水내 SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻과 NH₄⁺을 측정하 결과 NO₃⁻는 수종별로 유사하였으나 SO₄²⁻과 Cl⁻이 Oak林中에서 2,31 및

1,57keq ha⁻¹, Birch林中에서는 2.24 및 1.79keq ha⁻¹, 소나무林中에서는 6.19 및 3.98keq ha⁻¹로 소나무林이 다른 樹種林보다 많음을 보고하였다.

또한 樹冠通過水 및 樹幹流내 置換性 陽이온의 농도는 그림 3과 같다. 리기다소나무林的 樹冠通過水에서 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ 및 Na⁺의 농도는 각각 0.04, 0.03, 0.29 및 0.05meq/l이었고, 樹幹流에서는 각각 0.04, 0.1, 0.37 및 0.09meq/l이었다. 굴참나무林的 樹冠通過水에서는 각각 0.05, 0.03, 0.42 및 0.05meq/l이었고, 樹幹流에서는 각각 0.04, 0.09, 0.63 및 0.06meq/l이었다. 林外降雨와 비교하면 리기다소나무林的 樹冠通過水는 1.3-4.4배, 樹幹流는 2.3-10배 많았고, 굴참나무林은 각각 1.5-9배, 1.3-6배 많았다. 樹冠通過水+樹幹流로 보면 針葉樹林인 리기다소나무林中에서 평균 4.1배, 闊葉樹林인 굴참나무林中은 4.6배로 리기다소나무林보다 굴참나무林中에서 많았다. 植生層 용탈용액내에 가장 양이 많은 양이온은 두 수종 모두에서 K⁺이었고, 그 다음으로 리기다소나무에서는 Ca²⁺, Mg²⁺가 비슷했고 굴참나무에서는 Ca²⁺, Mg²⁺ 순이었으며, 두 수종에서 Na⁺가 가장 적었다.

山林生態系에서 植生層의 大氣中 汚染物質 捕集力과 酸性降雨에 대한 緩衝能力을 보면 굴참나무林 보다 리기다소나무林中에서 용탈용액내 SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻ 양이 더 많아 酸性物質의 捕集力이 높으며, 리기다소나무林 보다 굴참나무林中은 수관에서 H⁺의 치환이 많았고 식생층 용탈용액내 置換性 陽이온들을 많이 함유하고 있어 酸性 降雨에 대한 緩衝力이 우수한 것으로 생각된다. 한편 樹冠通過水는 H⁺을 감소시키는 반면에 樹幹流는 强酸性을 나타내므로서 土壤酸性化에 미치는 영향이 매우 크다.

2. 土壤層 緩衝能力

大氣汚染物質은 토양으로 유입되면서 여러가지 토양 구성요소들에 영향을 주어 토양환경을 변화시키는데 土壤에 積적된 大氣汚染物質은 토양 pH를 저하시키고 식물성장에 필수요소인 營養鹽類를 溶脫시키며 각종 毒性 重金屬을 溶出시킨다. 표 1은 조사지역의 토양 理化學的 토양특성으로 闊葉樹林과 針葉樹林 지역의 평균 pH는 각각 4.70과 4.52, 염기포화도는 각각 35.7%와 23.7%이었고, 置換性 알루미늄의 농도는 각각

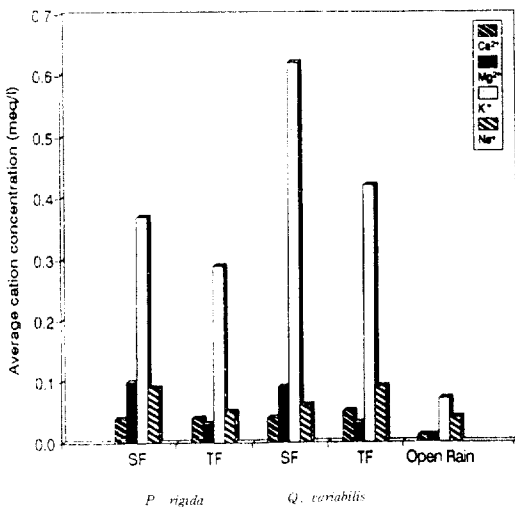
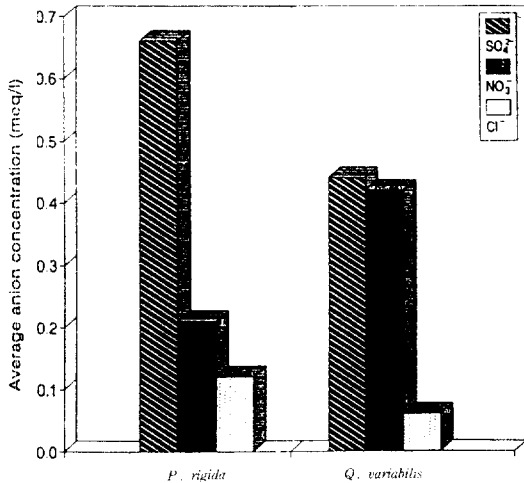


Fig. 3. Average cation concentration of stemflow (SF) and throughfall(TF) in *Pinus rigida* and *Quercus variabilis* forest ecosystem in Taejon.

Table 1. Physical and chemical properties of forest soils in Taejon.

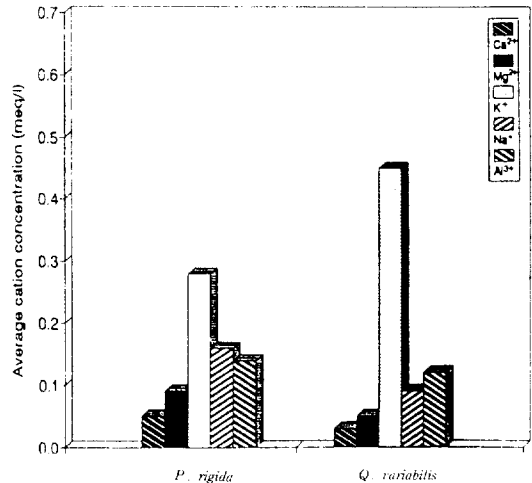
Site	Soil horizon	Soil Depth (cm)	Soil Texture	pH (1:5)	Organic matter (%)	N (%)	CEC (me/100g)	Exchangeable cation (me/100g)				S (ppm)	Al (ppm)
								K	Ca	Mg	Na		
Deciduous	A1	0-30	LS	4.78	4.15	0.14	7.29	0.06	1.55	0.83	0.13	0.44	43.14
	B	30-60	LS	4.63	1.39	0.07	6.71	0.06	1.20	1.04	0.13	0.43	69.19
Coniferous	A1	0-30	LS	4.44	3.30	0.10	4.53	0.04	0.78	0.63	0.02	0.42	69.19
	B	30-60	LS	4.61	1.12	0.03	3.16	0.04	0.43	0.25	0.03	0.49	86.46

**Fig. 4.** Average anion concentration of soil leachates under *Pinus rigida* and *Quercus variabilis* forest ecosystem in Taejon.

56.17ppm과 77.83ppm이었다.

土壤層 溶脫溶液의 평균 pH는 굴참나무림이 pH 4.63, 리기다소나무림은 pH 4.36으로 그림 1에서와 같이 樹冠通過水와 토양 pH보다는 낮고 樹幹流보다는 높은 경향을 나타냈다. 또한 리기다소나무림 지역의 溶脫溶液의 pH는 굴참나무림 지역보다 유의적으로 낮았다. 그리고 溶脫溶液중의 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 농도는 굴참나무림에서는 각각 0.44, 0.42 및 0.06meq/l이었고 리기다소나무림에서 0.66, 0.21 및 0.12meq/l이었다. 그림 4에서 보면 土壤 溶脫溶液중에서 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 농도는 전체적으로 樹幹流중에 함유되어 있는 농도와 매우 비슷하였는데, 이는 土壤이 樹幹流의 영향을 많이 받고 있는 것으로 보이며 樹幹流가 土壤酸性화에 상당히 기여하고 있음을 알 수 있다.

따라서 대기 오염지역에서는 植生層에 침착되어 있는 酸性物質이 토양에 투입되면서 根系에 여러가지로 영향을 미치고 있을 것으로 사료된다.

**Fig. 5.** Average cation concentration of soil leachates under *Pinus rigida* and *Quercus variabilis* forest ecosystem in Taejon.

다. Okizara(1991)는 편백과 졸참나무 임지에서 土壤 溶脫溶液을 분석한 결과 針葉樹林 樹幹주위에서 火山灰土(Andisol)의 산성화는 건설퇴적으로 흡착되어 있는 酸性物質이 樹幹流와 함께 토양으로 유입되었기 때문이며, 土壤溶液중 SO_4^{2-} 과 Cl^- 의 함량은 針葉樹林 지역이 많았고 반면에 闊葉樹林의 土壤溶液에서는 NO_3^- 의 농도가 증가했는데 이는 낮은 pH에서의 경우 耐酸性 窒化細菌에 의한 NO_3^- 의 생성 촉진에 의한 것으로 설명하고 있다.

土壤 溶脫溶液중 置換性 陽이온들의 농도는 그림 5와 같다. 溶脫量은 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 및 Na^+ 이 굴참나무 지역에서 각각 30.2, 49.6, 454.4 및 87.8 μ eq/l이었으며, 리기다소나무 지역은 52.4, 88.7, 276 및 162.2 μ eq/l이었다. 토양으로부터 K^+ 의 溶脫量은 굴참나무림 지역이 많았으나 전체 양이온 溶脫量은 闊葉樹林 지역보다 針葉樹林 지역에서 많이 일어나고 있었다. 溶脫量 순위는 K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 순이었다.

土壤중에서 Cl^- , NO_3^- 과 SO_4^{2-} 은 土壤溶液이 pH 6을 넘지 않는 한 土壤膠質粒子에 吸着되나 Cl^- 이나 NO_3^- 은 SO_4^{2-} 에 의해 土壤 膠質粒子에 吸着이 억제된다. 그리고 酸性化가 진행되면 이들 이온은 鹽基와 結合하여 溶脫되므로 土壤은 더욱 酸性化 된다. 그림 6, 7 및 8은 土壤溶液에 있어서 pH와 SO_4^{2-} 의 관계 그리고 酸性化에 따른 養料溶脫 정도를 나타내고 있는데 土壤溶脫溶液에서 pH와 NO_3^- 및 Cl^- 그리고 NO_3^- 및 Cl^-

과 置換性 陽이온과는 유의적 관계가 인정되지 않았으나, pH와 SO_4^{2-} 및 置換性 陽이온 사이에서는 음의 상관관계를 보였고, 置換性 陽이온의 농도는 SO_4^{2-} 의 농도 증가와 함께 유의적으로 증가하였다. 植生層 溶脫溶液중에서는 다른 이온들보다 SO_4^{2-} 이 아직도 가장 많이 포함되어 있는 것으로 미루어 보아 大氣汚染物質 중 주로 SO_x 가 植生층에서 捕集되어 토양환경으로 유입된 후 토양 양료를 대량 유실시키는 주요 산성화 原因物質로 작용하는 것으로 생각된다.

한편 土壤酸性化가 진행되면서 알루미늄 등의 重金屬이 溶出되는데 溶출된 重金屬 이온중 특히 Al^{3+} 은 식물에 각종 有害作用을 할뿐 아니라 용탈되어 호수와 같은 水樓生態系의 각종 생물에게 까지 해를 미치게 된다. 土壤 溶脫溶液 중 알루미늄의 농도는 그림 5에서 보는 바와 같이 굴참나무林에서 $118.9\mu eq/l$, 리기다소나무林 지역에서는 $137.78\mu eq/l$ 로 후자가 다소 많았다. 그림 9는 土壤 溶脫溶液중 pH와 Al^{3+} 의 관계를 나타낸 것으로 대체적으로 pH가 감소함에 따라 Al^{3+} 이 유의적으로 증가함을 보이고 있다. 알루미늄의 水和作用은 pH변화와 밀접한 관계가 있는데 Al^{3+} 은 pH 4.7이하에서 주로 생성되고 pH가 낮아질수록 그양은 증가하게 되는데 Molliter와 Raynal(1982)는 뉴욕주의 闊葉樹林 지역에서 土

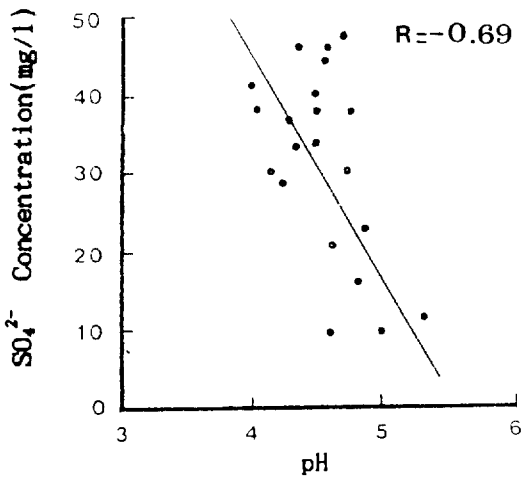


Fig. 6. Correlation between pH and SO_4^{2-} in soil leachate.

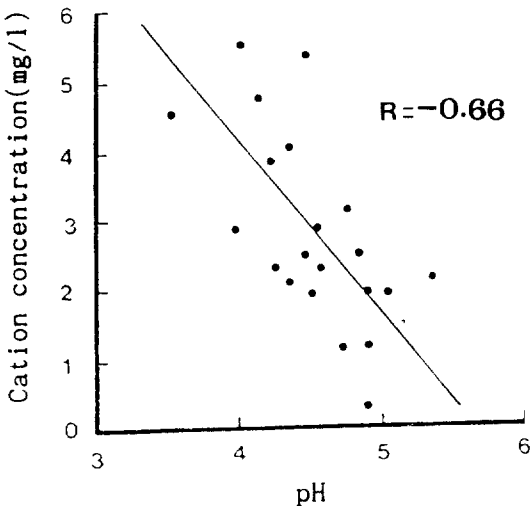


Fig. 7. Correlation between pH and cations in soil leachate.

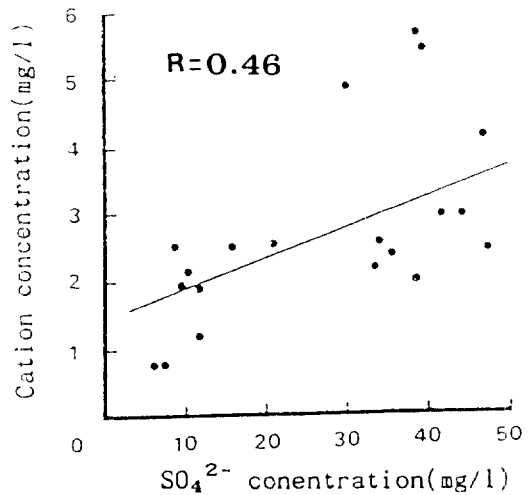


Fig. 8. Correlation between SO_4^{2-} and cations in soil leachate.

壤水의 총 알루미늄의 농도는 A층과 B층에서 각각 229 μ eq/l와 182 μ eq/l이었고 針葉樹林에서는 각각 401 μ eq/l와 301 μ eq/l이었으며 溶液 pH는 針葉樹林 土壤의 A층에서 3.6에 달했다고 보고하였다. 土壤 溶脫溶液내 성분을 수종별로 비교해 보면 굴참나무林 지역보다 리기다소나무林 지역에서 酸性物質의 양과 토양으로부터의 영료손실량이 많았는데 이는 土壤酸性化가 闊葉樹林 지역보다 針葉樹林 지역에서 더욱 크게 진행되고 있

는 것으로 생각된다.

3. 母岩과 植生の 酸性堆積에 대한 민감도

대기중 酸性物質에 대한 敏感度는 土壤과 植生에 따라 매우 다르게 나타나는데 토양의 경우 陽이온 置換容量이 높을수록 酸性堆積物을 中和, 置換시키는 緩衝能이 우수하게 나타난다. SiO₂의 함량이 65% 이상인 酸性岩이 母岩인 토양에서는 True alkalies나 Sub alkalies의 양이 적어 緩衝能이 빈약하여 堆積岩類보다 산성물질에 대한 敏感度가 높게 나타난다(李壽煜와 閔一植, 1989). 우리나라 山林土壤의 경우 전체 토양중 약 70%가 酸性岩인 花岡岩 및 花岡片麻岩으로 되어 있고 토심이 매우 얇아 山林生態계의 완충능력은 비교적 낮은 것으로 보고되어 있다.

이상에서 조사 분석된 植生層과 土壤層의 酸性堆積에 대한 緩衝能을 근거로 大田地域의 전 山林生態계에 대하여 GIS를 이용해서 민감도를 임상별로 평가해 보니 표 2와 같았다. 즉 한 畫素의 크기를 30m×30m 크기로 植生圖와 土壤圖를 래스터 變換을 통해서 모두 330,735 畫素를 얻은 것이다. 寫眞 1은 대전지역의 現存植生圖 상에서 입력된 임상을 출력시킨 영상이다. 寫眞 2는 土壤圖 상에서 입력된 58개 土壤群을 16color로 출력시킨 영상이다. 構成植生이 針葉樹인 경우 闊葉樹보다 산성물질에 대한 敏感度가 높은 것으로 파악되었다. 土壤 및 母岩別로 山林植生을 분석

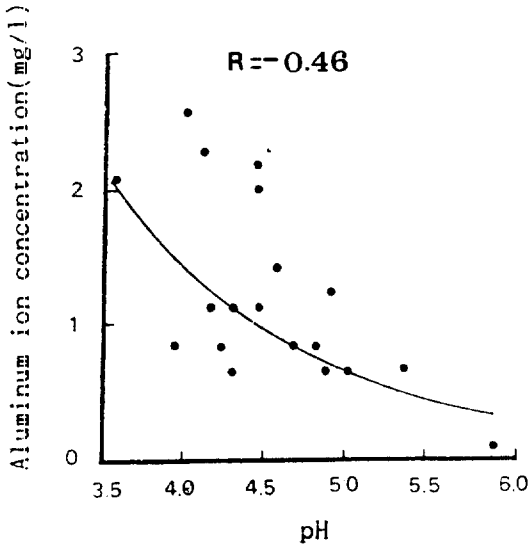


Fig. 9. Correlation between pH and Al³⁺ in soil leachate.

Table 2. Analysis of sensitivity to acid deposition of forest ecosystem by parent rocks and forest types in Taejon.

Forest Type	Total pixels	Area (Km ²)	Parent Rock (pixels)		
			AR	IR-BR	MR
<i>Quercus serrata</i>	19,833	17.85	11,633	756	7,444
<i>Quercus variabilis</i>	44,092	39.68	22,993	5,857	15,242
<i>Quercus variabilis-Pinus densiflora</i>	487	0.44	175	312	-
<i>Quercus acutissima</i>	24,815	22.33	20,152	747	3,916
<i>Pinus densiflora</i>	122,518	110.27	87,888	5,494	29,136
<i>Pinus densiflora-Quercus serrata</i>	15,608	14.05	7,317	264	8,027
<i>Pinus densiflora-Quercus variabilis</i>	9,574	8.62	6,783	304	2,487
<i>Larix leptolepis</i>	6,725	6.05	2,459	-	4,266
<i>Pinus rigida</i>	81,531	73.38	64,158	5,673	11,700
<i>Pinus densiflora-Quercus acutissima</i>	3,105	2.79	2,072	381	652
<i>Quercus acutissima-Pinus densiflora</i>	2,447	2.20	2,348	79	20

AR : Acidic rock residuals.
 IR : Intermediate rock residuals.
 BR : Basic rock residuals.
 MR : Metamorphic rock residuals.

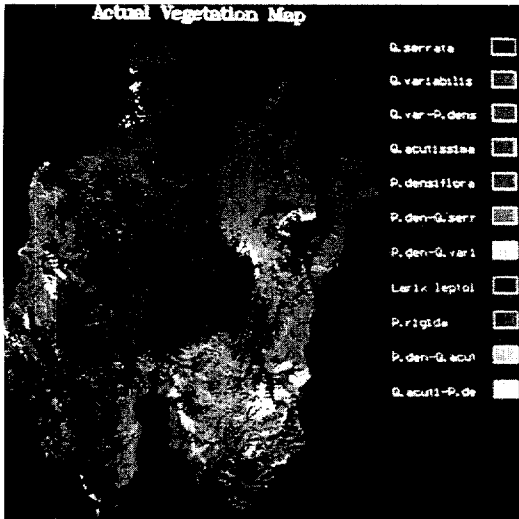


Photo. 1. Actual vegetation map in Taejeon.

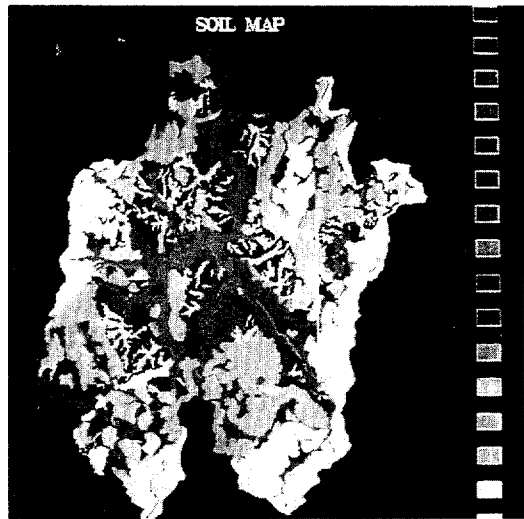


Photo. 2. Soil map in Taejeon.

하여 산성우에 대한 민감성을 파악한 것은 표 2에서 보는 바와 같이 토양에서 AR 227,978 畫素로 69%, IR-BR 19,867 畫素로 6%, MR 82,890 畫素로 25%이었으나 緩衝能이 가장 빈약한 AR의 면적이 가장 많았다. 樹種은 소나무 122,518 畫素, 리기다소나무 81,531 畫素로 굴참나무 44,092 畫素로 소나무가 다른 수종보다 비교적 많은 면적을 차지하고 있다. 酸性雨에 대해서 가장 민감한 지역은 酸性암이면서 동시에 針葉樹林으로 조성된 지역으로 針葉樹林중 가장 많은 畫素로 구성된 소나무림과 리기다소나무림은 각각 87,888과 64,158 畫素로 전체 면적중 50%를 차지하고 있다. 결국 대전지역의 山林生態系는 土壤과 植生分布로 볼 때 酸性雨에 대한 敏感性이 매우 높은 것으로 나타났다. 이러한 산림생태계 구성비율은 대전지역 뿐만 아니고 우리나라 대부분 지역이 유사하여 한국 山林生態系가 전반적으로 酸性雨에 대하여 취약할 것으로 사료된다.

結 論

山林生態系의 酸性雨에 대한 緩衝能과 敏感性을 분석하기 위해서 대전지역을 중심으로 植生層의 樹冠通過水 및 樹幹流와 土壤層 溶脫溶液중 成分을 樹種別로 비교하고 또한 土壤圖와 植生圖를 Image 變換하여 酸性物質에 대한 緩衝能을 GIS를 이용하여 분석하였으며 그 결과는 다음과

같다.

1. 植生層의 樹冠通過水와 樹幹流의 平均 pH는 리기다소나무림은 각각 pH 5.35, 3.61이었고 굴참나무림은 각각 pH 5.58, 4.00으로 林外降雨 平均 pH 5.31보다 樹冠通過水는 높았고 樹幹流는 낮았으며 闊葉樹林보다 針葉樹林에서 낮았다.
2. 리기다소나무림에서 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 농도는 樹冠通過水의 경우 각각 0.31, 0.09, 0.06 meq/l이었고 樹幹流의 경우 각각 0.7, 0.17, 0.13 meq/l이었으며, 굴참나무림에서 수관 통과수의 경우 각각 0.21, 0.06, 0.04 meq/l이었고 수간류의 경우 각각 0.41, 0.06, 0.06 meq/l이었다. 산림생태계중의 植生층에서 조절되는 산성물질의 양은 樹冠通過水보다 樹幹流에서 많았고, 굴참나무림보다 리기다소나무림이 많았다.
3. 土壤으로 투입되는 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 은 樹冠과 樹幹를 통과할 때 林外降雨에서 보다 리기다소나무림에서 각각 7.2, 4.3, 2.5배 그리고 굴참나무림에서 각각 4.4, 2, 2.5배로 전자에서 많았으나, 置換性 陽이온의 농도를 보면 리기다소나무림이 4.1배, 굴참나무림이 4.6배로서 후자에서 많았다.
4. 土壤 溶脫溶液중 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 量은 굴참나무림에서 각각 432.5, 415.6 및 62.6 $\mu eq/l$ 이었고, 리기다소나무림에서 663.1,

- 206.9 및 117.3 $\mu\text{eq/l}$ 으로 후자에서 높았으며, 土壤 溶脫溶液중 置換性 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} 및 Na^{+} 量은 굴참나무林中에서 각각 30.2, 49.6, 454.4 및 87.8 $\mu\text{eq/l}$ 이었으며, 리기다소나무林中에서는 각각 52.4, 88.7, 276 및 162.2 $\mu\text{eq/l}$ 로 闊葉樹林보다 針葉樹林中에서 酸性物質에 의한 養料溶脫이 많이 일어나고 있음을 알 수 있었다.
5. 酸性物質에 의해 토양에서 용탈된 알루미늄 양은 針葉樹林中에서 173.78 $\mu\text{eq/l}$, 闊葉樹林中에서는 118 $\mu\text{eq/l}$ 로 전자보다 후자가 많았고, 土壤 溶脫溶液중 酸性物質의 양이 증가함에 따라 토양중 養料 및 Al^{3+} 溶脫은 有意的으로 증가하는 경향을 보였다.
6. 大田地域에서 대기중 酸性雨 原因物質의 증가는 緩衝能이 빈약한 산림에서의 경우 토양산성화를 촉진시킬 것이며 이와 함께 土壤에서 毒性的 Al^{3+} 은 지속적으로 용탈시킬 것으로 예상된다. 산림토양을 보면 산성토양이 227, 978 화소로 전체 면적의 69%를 차지하고 있고 한편 임상을 보면 酸性雨에 민감한 소나무林과 리기다소나무林이 각각 87,888과 64,158 畝素로 전체 면적중 50%를 차지하고 있어 대전지역은 산성우에 대한 민감성이 전반적으로 높은 것으로 판단된다.
- 參 考 文 獻**
1. 関一植. 1989. 大氣汚染 및 酸性雨が 森林生態系の 養料動態 및 土壤緩衝能에 미치는 影響. 博士學位 論文.
 2. 李壽煜·関一植. 1989. 大氣汚染 및 酸性雨が 森林生態系の 土壤酸度 및 養料分布에 미치는 影響. 韓國林學會誌 78-1 : 11-25.
 3. 大喜多 敏一. 1988. 酸性雨 - 自然土壤への酸性雨의 影響. 酸性雨 - 生態系に奇え 生態系に奇える 影響. コルファ - の(社) 緑化促進協力會. 193-203.
 4. 安田 洋. 1989. スギ林における酸性降下物質の動態解明と影響豫察に関する研究. 農水省技會. 林業總研. 昭和63年度推進會議資料.
 5. Cape, J.N. 1986. Effects of air pollution on the chemistry of surface waxes of Scots pine. *Water, Air, and Soil Pollution* 31 : 393-399.
 6. Eastman, J.R. 1990. IDRISI : A Grid-Based Geographic Analysis system. John Wiley & Sons. Ver. 3.20.
 7. Evans, L.S. and T.M. Curry. 1979. Differential responses of plant foliage to simulated acid rain. *Amer. J. Bot.* 66(8) : 953-962.
 8. Gaber, B.A. and T.C. Hutchinson. 1988. The neutralization of acid rain by the levels of four boreal forest species. *Can. J. Bot.* 66 : 1877-1882.
 9. Hutchinson, T.C. 1986. Responses of five species of conifer seedling to aluminum stress. *Water, Air, and Soil Pollution* 31 : 283-294.
 10. Hutchinson, T.C., C.M. Adams, and B. A. Gaber. 1986. Neutralization of acidic raindrops on levels of agricultural crop and boreal forest species. *Water, Air, and Soil Pollution* 31 : 475-484.
 11. Karhu, M. and S. Huttunen. 1986. Erosion effects of air pollution on needle surface. *Water, Air, and Soil Pollution* 31 : 417-423.
 12. Kelly, J.M. and R.C. Strickland. 1986. Throughfall and plant nutrient concentration response to simulated acid rain treatment. *Water, Air, and Soil pollution* 29 : 219-231.
 13. Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer. 1987. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, New York.
 14. Mollitor, A.V. and D.J. Raynal. 1982. Acid precipitation and ionic movements in Adirondak forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 : 137-141.
 15. Nihlgard, B. 1970. Precipitation, its chemical composition and effect on soil water in a beech and spruce forest in South Sweden. *Oikos* 21 : 208.
 16. Okizara, Baba. 1991. Acid deposition and its effect on Andisols in the Tama Hill region. In Proceedings of International Symposium. Impacts of Salinization and

- Acidification on Terrestrial Ecosystem and Its Rehabilitaton. 201-210.
17. Skeffington R.A. 1981. Soil properties under three species of tree in southern England in relation to acid deposition in through-fall.- B. Ulrich and J Pankrath(eds) 1983. Effects of accumulation of air pollution in forest ecosystem, 219-231.
 18. Smith, W.H. 1981. Air Pollution and Forests.- Interactions between air contaminants and forest ecosystems. Springer-Verlag. p.379.
 19. Wood, T. and F.H. Bormann. 1975. Increases in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. AMBIO 4 : 169-171.
 20. Wood, T. and F.H. Bormann b. 1975. Short-term effects of a simulated acid rain upon the growth and nutrient relation of *Pinus strobus*. Water, Air and Soil pollution 7 : 479-488.