

일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무 임분 토양수 성질의 계절적 변이

류성렬¹⁾, 손요환^{2)*}, 주영특³⁾, 진현오⁴⁾, 오종민⁵⁾, 정덕영⁶⁾

¹⁾기초과학지원연구소 서울분소, ²⁾고려대학교 산림자원환경학과,
³⁾강원대학교 산림자원보호학과, ⁴⁾경희대학교 임학과, ⁵⁾경희대학교 환경학과, ⁶⁾충남대학교 농화학과

Seasonal Variations in Soil Solution Chemistry under *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis*, and *Quercus mongolica* stands

Soung-Ryoul Ryu¹⁾, Yowhan Son²⁾, Yeong-Teuk Joo³⁾, Hyun-O Jin⁴⁾, Jong-Min Oh⁵⁾, and Duk-Young Jung⁶⁾ (¹⁾KBSI Seoul Branch, ²⁾Department of Forest Resources and Environmental Sciences, Korea University, ³⁾Department of Forest Resources Protection, Kangwon National University, ⁴⁾Department of Forestry, Kyunghee University, ⁵⁾Department of Environmental Sciences, Kyunghee University, and ⁶⁾Department of Agricultural Chemistry, Chungnam National University, ²⁾e-mail : yson@kucrcx.korea.ac.kr

ABSTRACT : To investigate seasonal variations of soil solution chemistry, samples were collected from zero tension lysimeters in O, A, and B horizons of 26-year-old *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* stands in Kwangju, Kyunggi Province from September, 1996 through June, 1999. Potassium, Mg^{2+} , Cl^- , and NO_3^- concentrations increased in October and November concurrent with inputs of fresh litterfall and twigs. Sodium, Ca^{2+} , K^+ , and Mg^{2+} concentrations increased in March and April concurrent with the yellow sand effect. Potassium concentration showed the highest variation among ions, and Cl^- concentration showed positive correlations with K^+ and Mg^{2+} concentrations. Soil solution pH decreased while Al^{3+} and K^+ concentrations increased during the study period. If our data reflects long term trends, then Al^{3+} concentration in the O horizon will reach the toxic level (0.180 meq/l) within 10-20 years depending on species.

Key words: *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis*, *Quercus mongolica*, seasonal variation, soil solution

서론

산림생태계에서 수분의 이동은 물질의 분포와 순환에 직접적인 영향을 미친다. 강수가 산림에 도달한 후 식생, 낙엽, 그리고 토양층을 통과하면서 물리, 화학, 생물적 변화과정을 거치게 되어 산림생태계를 통과한 수분의 성질은 대기 중의 강수와는 현저한 차이를 나타내게 된다^{1,2)}. 산림의 토양수 성질은 식생과 토양의 종류에 따라 달라지며, 특히 식생이 낙엽층과 토양 발달에 미치는 효과 때문에 식생별 토양수 성질의 차이가 큰 것으로 보고되고 있다³⁾. 산림에서 식생은 연중 계절에 따라 활성도는 물론 생체량과 양분 함유량이 변화되며, 이 결과 식생을 통과하는 수분의 성질도 달라지게 된다. 특히 낙엽을 통한 유기물의 토양으로의 환원은 토양수 성질을 결정하는 주요한 인자로 작용하고 있다. 그간 산림생태계에서 토양수의 성질을 측정할 다수의 연구 결과가 있음에도 불구하고 아직까지 임분의 종류별로 수년에 걸친 토양수 성질의 계절적 변화를 측정하여 이의 변이를 구명하고 장기적인 변화를 예측한 결과는 극히 미미한 실정이다.

본 연구는 우리 나라 산림 면적의 상당 부분을 차지하고 있는 일본잎갈나무 (*Larix leptolepis* Gordon), 잣나무 (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.), 그리고 신갈나무 (*Quercus mongolica* Fisch.)를 대상으로 3년에 걸쳐 토양수 성질의 계절적 변이를 구명하고, 이를 토대로 장기적인 토양수 성질 변화를 예측하기 위한 목적으로 실행되었다. 이를 위하여 경기도 광주지방의 동일 유역내에서 임령이 유사한 임분을 설정하고, 각기 다른 토양 층위로부터 토양수를 채취, 분석하여 토양수 내 주요 양분 이온의 농도를 측정하였다. 본 연구 결과는 산림생태계에서 수분을 통한 양분의 순환 과정과 계류수 성질의 변화를 이해하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

본 연구는 경기도 광주군 퇴촌면에 위치한 경희대학교 연습림 내 26년생 일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무 임분에서 실행되었다. 3개 임분은 동일 유역에 위치하고 있으며, 임분간의 거리는 500m

이내이다. 일본잎갈나무와 잣나무는 참나무류 천연림의 벌채 후 조성된 인공림이며, 신갈나무는 벌채 후 맹아 갱신된 천연림으로 이들 임분에 대한 상세한 자료는 기 발표된 논문⁴⁾에 나타나 있다.

수종별로 임분의 상태가 유사한 3개 지점에서 낙엽과 토양층이 교란되지 않도록 주의하여 O, A, B층 밑에 각각 1개씩의 zero tension lysimeter를 설치하였다. 토양수는 1996년 9월부터 1999년 6월 말까지 약 3년 동안 동절기를 제외하고 연중 시료 채취가 가능한 양의 강우가 있는 후 1-2일 이내에 채취하였다. 토양수의 부피를 측정하고 시료를 여과하여 pH는 pH meter로, 토양수 내 K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} 등의 농도는 atomic absorption spectrophotometry로, NH_4^+ 농도는 auto ion analyzer로, 그리고 SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- 등의 농도는 ion chromatography로 각각 측정하였다.

토양수 내 이온의 월별 평균농도를 비교하여 연중 계절별 변화 상태를 파악하였으며, 이온 농도간의 상관관계는 Pearson correlation으로 분석하였다. 3년간 이온 농도의 변화는 단변량 시계열 분석을 통하여 조사하였는데, 이를 위하여 토양수 내 이온 농도의 측정값과 비올 이동평균법으로 구한 계절지수를 사용하여 계절변동의 영향을 제거한 분석값의 회귀모형을 이용하였다^{5,6)}. 모든 통계분석에 SAS를 사용하였다.

결과 및 고찰

연구기간 동안 모든 임분에서 O층 토양수 내 양이온 중 K^+ 과 Mg^{2+} 은 3월, 4월, 10월과 11월에 증가하고, Na^+ 와 Ca^{2+} 농도는 3월과 4월에 증가하는 반면 NH_4^+ 농도는 변화가 없었다 ($p < 0.05$). 그리고 토양수 내 음이온 가운데서 Cl^- 과 NO_3^- 은 가을철인 10월과 11월에 증가하였으나, PO_4^{3-} 와 SO_4^{2-} 의 농도는 일정한 계절적 변화 경향을 나타내지 않았다 (Figure 1, 2, 3; 다른 임분에서도 유사한 경향을 나타내므로 일본잎갈나무 임분만을 나타냄). 한편 A, B층의 토양수 내 이온의 농도 변화는 O층과 같은 경향을 보였다.

10월과 11월 토양수 내 K^+ 와 Mg^{2+} 의 농도가 증가하는 것은 가을철 낙엽 및 낙지의 유입과 관련이 있는 것으로 보인다 (Figure 1). 즉 가을철 낙엽층의 유기물 및 양분 함유량이 증가되고 이에 따라 낙엽층을 통과하는 토양수 내 이온의 농도가 증가하는데, 특히 수분에 의해 용탈되기 쉬운 이온이 낙엽층 토양수 내에서 농도가 높게 나타나는 것으로 사료된다^{7,8)}. 그리고 이러한 결과는 가을철에 토양수 내 Mg^{2+} 의 농도가 증가하고^{9,10)}, 낙엽과 낙지에 의한 K^+ 의 순환량이 크다는¹¹⁾ 이전의 연구 결과와도 유사한 것이다.

토양수 내 이온 가운데서 K^+ 농도가 연중 계절별로 가장 크게 변하는 것으로 나타나고 있다. 특히 3년간의 연구기간 중 계절적 변화가 가장 심하였던 1997년의 경우 일본잎갈나무 임분에서 K^+ 의 평균농도 (meq/l)는 생장기간 중에는 0.12-0.33을 보이나 가을철인 10월 0.78, 11월 1.26, 그리고 12월 0.61 등으로 연중 최저 농도에 비하여 거의 10배 이상 높은 농도를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 K^+ 이 낙엽기의 노쇠하여진 조직으로부터 용탈되어서

수관류나 수관통과구를 통하여 토양수에 유입되는 것과 관련이 있는 것이다. 일반적으로 산림의 토양수 내 양이온 가운데서 K^+ 과 Ca^{2+} 이 농도도 높고 계절적 변화도 크나, 임분을 이루고 있는 주 수종에 따라 차이가 있는 것으로 보고되고 있다¹²⁾.

3월과 4월에 토양수 내 K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} 등의 농도가 높게 나타나는 것은 이 시기에 주로 발생하는 황사현상과 관련이 있는 것으로 보인다 (Figure 1, 2). 황사에 주로 포함된 이온으로는 Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} 등이 알려져 있으며¹³⁾, 경기지역에서 봄철에 황사현상으로 인하여 강하분진 침착량이 많은 것으로 보고된 바 있다¹⁴⁾. 본 연구에서 이들 이온 농도가 황사 발생빈도가 가장 높았던 1998년 높고, 반대로 황사 발생 빈도가 가장 낮았던 1997년 낮은 것으로 나타나고 있다. 그러나 토양수 내 이온 농도와 황사와의 관계를 보다 명확히 밝히기 위해서는 장기간의 건성 및 습성 집적물과 토양수의 연구가 필요한 것으로 사료된다.

토양수 내 NO_3^- 농도도 일반적으로 10월과 11월에 증가하는 경향을 나타내고 있다 (Figure 3). 이는 가을철 새로운 낙엽과 낙지가 낙엽층에 도달한 후 유기물이 분해되어 질산화과정을 거친 결과 일어나는 현상으로 보인다. 다른 연구에서도 NO_3^- 의 농도가 가을에 증가하고 봄부터 초여름까지는 감소한다고 보고된 바 있다⁸⁾.

토양수 내 Cl^- 농도의 계절적 변화는 K^+ 및 Mg^{2+} 과 매우 유사하며 (Figure 1, 3), 이들 이온간에 유의한 상관관계를 보이고 있다 (Table 1). 이러한 결과는 토양 내에서 Cl^- 의 분포 및 이동과정이 K^+ , Mg^{2+} 과 유사함을 나타내는 것이다⁷⁾. 특히 토양수 내 Cl^- 의 농도는 같은 해염성 기원물질인 Na^+ 과 비슷하지만 (Figure 2, 3), 농도의 계절적 변화에 차이가 있는 것은 두 이온이 토양 내에서 이동하는 방법이 다르며 Cl^- 이 쉽게 용탈되기 때문인 것으로 보인다. 그러나 토양수 내 Na^+ 의 농도가 가을철에 급격히 감소하는 이유는 명확히 알 수 없었다.

단변량 회귀분석 결과 일반적으로 연구 대상 임분에서 3년간의 연구 기간 동안 토양수의 pH는 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며, Al^{3+} 과 K^+ 의 농도는 증가하는 경향을 나타내었다 (Table 2). 특히 신갈나무 임분에서는 pH, Al^{3+} , K^+ 등과 측정 개

Table 1. Pearson correlation coefficients between Cl^- concentration and K^+ and Mg^{2+} concentrations in soil solution.

| Ion | Horizon | <i>L. leptolepis</i> | <i>P. koraiensis</i> | <i>Q. mongolica</i> |
|-----------|---------|----------------------|----------------------|---------------------|
| K^+ | O | 0.214** | -0.051 | -0.047 |
| | A | 0.199* | 0.232** | 0.240** |
| | B | 0.142 | 0.317** | 0.052 |
| Mg^{2+} | O | 0.273** | 0.416** | 0.466** |
| | A | 0.089 | 0.229** | 0.371** |
| | B | 0.240** | 0.304** | 0.473** |

* indicates statistically significant at 5% level.

** indicates statistically significant at 1% level.

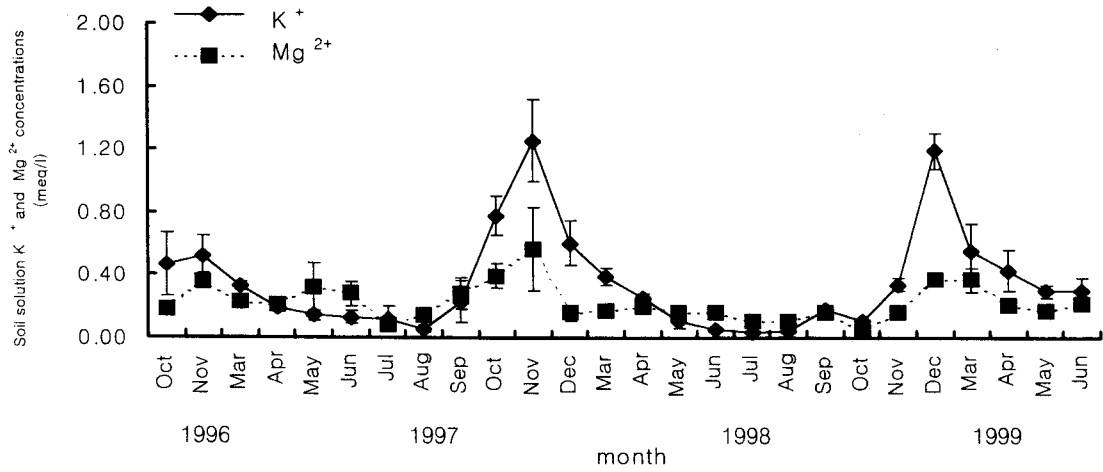


Figure 1. Monthly soil solution K^+ and Mg^{2+} concentrations in the O horizon of *Larix leptolepis*. Vertical bars represent one standard error.

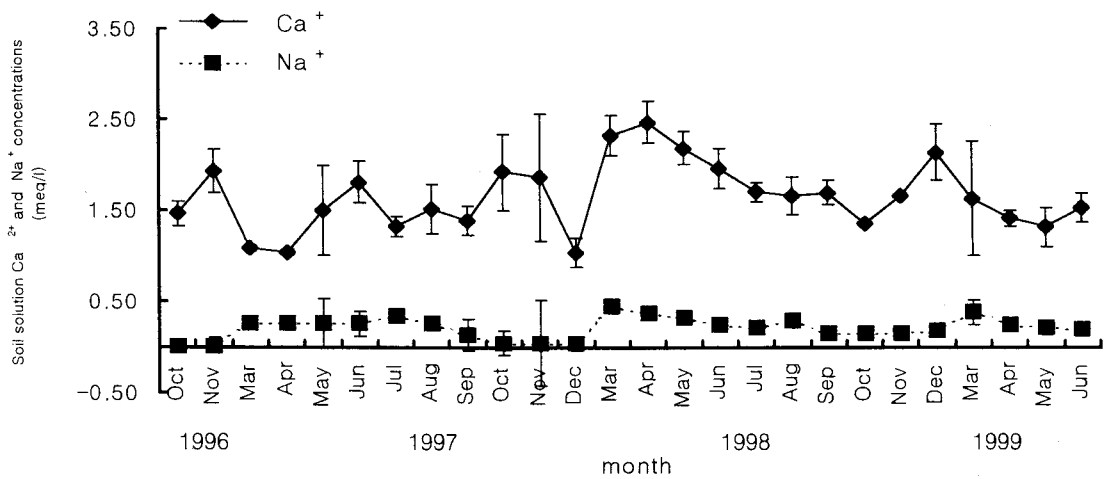


Figure 2. Monthly soil solution Ca^{2+} and Na^+ concentrations in the O horizon of *Larix leptolepis*. Vertical bars represent one standard error.

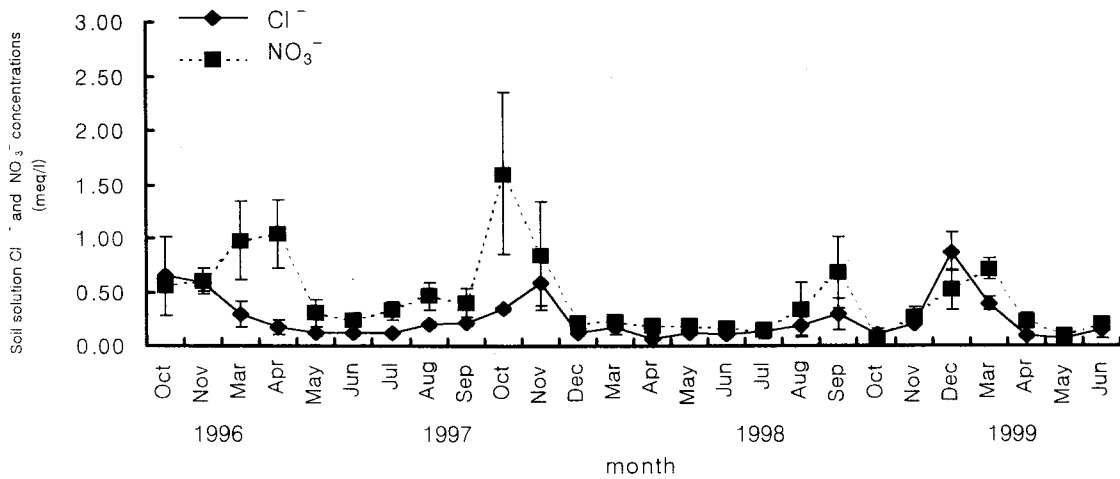


Figure 3. Monthly soil solution Cl^- and NO_3^- concentrations in the O horizon of *Larix leptolepis*. Vertical bars represent one standard error.

Table 2. Regression equations to estimate soil solution pH, Al^{3+} and K^+ concentrations in the O horizon for three study stands. X denotes the order of month.

| | <i>L. leptolepis</i> | <i>P. koraiensis</i> | <i>Q. mongolica</i> |
|-----------|--|--|---|
| pH | $Y = 5.25 - 2.16 \times 10^{-4} X$ ($r = -0.25$, $p = 0.028$) | $Y = 5.26 - 2.66 \times 10^{-4} X$ ($r = -0.37$, $p < 0.0001$) | $Y = 5.52 - 3.61 \times 10^{-4} X$ ($r = -0.44$, $p < 0.0001$) |
| Al^{3+} | $Y = 0.0284 + 5.46 \times 10^{-4} X$ ($r = 0.17$, $p = 0.145$) | $Y = 0.0343 + 5.85 \times 10^{-4} X$ ($r = 0.13$, $p = 0.265$) | $Y = 0.0111 + 1.45 \times 10^{-4} X$ ($r = 0.49$, $p < 0.0001$) |
| K^+ | $Y = 0.314 + 8.91 \times 10^{-3} X$ ($r = 0.25$, $p = 0.028$) | $Y = 0.148 + 6.27 \times 10^{-3} X$ ($r = 0.27$, $p = 0.017$) | $Y = 0.223 + 6.36 \times 10^{-3} X$ ($r = 0.26$, $p = 0.024$) |

월수 간의 회귀식이 모두 유의한 것으로 나타나고 있다 ($p < 0.05$). 그리고 계절지수를 사용하여 계절변동 요인을 제거하면 대부분의 경우 회귀식에서 상관계수가 높아지며, K^+ 의 경우 일본잎갈나무와 잣나무 임분에서 회귀식이 통계적으로 유의하게 나타나고 있다 ($p < 0.05$).

토양수 내 pH, Al^{3+} , K^+ 농도의 시계열 분석 결과 토양수의 pH 감소가 Al^{3+} 과 K^+ 이온 농도를 증가시키는 것으로 나타나고 있다. 본 연구 결과 현재 토양수 내 Al^{3+} 농도는 식물체에 피해를 나타낼 수 있는 최소농도로 알려진 0.180 meq/l에는 미치지 않는다¹⁵⁾. 그러나 시계열 분석 결과에서 나타난 이와 같은 경향이 앞으로 지속되면 수중에 따라 차이는 있으나, O층 토양수에서 이 농도에 도달하는데 10-20년이 소요될 것으로 추정되었다. 따라서 토양수 내 Al^{3+} 농도 증가 현상이 장기간 계속될 경우 Al^{3+} 독성에 의한 피해가 나타날 가능성이 있는 것으로 보인다. 또한 토양수 내 K^+ 농도의 증가경향이 지속되면 용탈에 의한 K^+ 등의 양이온 결핍증상도 나타날 수 있을 것으로 예상된다.

토양수 내 Mg^{2+} 농도 (meq/l)는 연구기간 중 일정한 변화경향을 나타내지 않았다 ($p > 0.05$). 그러나 O층과 B층간 농도의 차이가 일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무에서 각각 연구 1년차에는 -0.005, 0.001, 0.022 등이었으나, 2년차에는 0.037, -0.033, 0.013으로, 그리고 3년차에는 -0.015, -0.018, -0.083 등으로 감소하였다. 이러한 결과는 이전 연구에서 보고된 토양 내 Mg^{2+} 의 결핍현상이 연구대상 임분에서도 나타날 수 있음을 보이는 것이다^{16,17)}.

요 약

토양수 내 이온 농도의 계절적 변이를 구명하기 위하여 경기도 광주군 퇴촌면에 위치한 26년생 일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무 임분의 O층, A층, B층에 zero-tension lysimeter를 설치하고 1996년 9월부터 1999년 6월까지 토양수를 채취하여 분석하였다. 10월과 11월에 토양수 내 K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- 등의 농도가 증가하였는데, 이는 가을철 낙엽 및 낙지의 유입에 의한 것으로 보이며, 3월과 4월에 Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} 등의 농도가 증가하는 것은 봄철에 빈번하게 발생하는 황사현상에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 토양수 내 이온 가운데서 K^+ 의 농도가 연중 계절별로 가장

크게 변하는 것으로 나타났으며, 토양수 내 Cl^- 농도는 K^+ , Mg^{2+} 농도와 양의 상관관계를 나타내었다. 단변량 시계열 분석 결과 연구기간 동안 토양수 pH는 지속적으로 감소하는 반면 Al^{3+} 과 K^+ 농도는 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향이 지속될 경우 O층 토양수 내 Al^{3+} 농도가 식물체에 피해를 줄 수 있는 최소농도 (0.180 meq/l)에 도달하려면 수중에 따라 차이는 있으나 10-20년이 소요될 것으로 추정되었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제 (96-0402-07-01-3) 수행 결과의 일부임.

참 고 문 헌

- Helmisaari, H.S., and Malkonen, E. (1989) Acidity and nutrient content of throughfall and soil leachate in three *Pinus sylvestris* stands, Scand. J. For. Res. 4:13-28
- Lee, H., and Jun, J. (1996) Water quality variations of pH, electric conductivity, and dissolved oxygen in forest hydrological processes (in Korean with English abstract), J. Kor. For. Soc. 85:634-646
- Bringmark, L. (1980) Ion leaching through a podsol in a Scots pine stand, In T. Persson (ed.) Structure and Function of Northern Coniferous Forest: A Ecosystem Study, Ecol. Bull. 32:341-361
- Ryu, S., and Son, Y. (1998) Chemical properties of soil solution under *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis*, and *Quercus mongolica* stands (in Korean with English abstract), Kor. J. Environ. Agri. 17:341-345
- SAS (1988) SAS/STAT User's Guide, SAS Institute
- Choi, B. (1992) Monovariate Time-series Analysis I (in Korean), Se-Kyung Press
- Jin, H., Kim, H., and Joo, Y. (1998) Seasonal variations and chemical composition of bulk precipitation, throughfall and stemflow (in Korean), Proc. Kor. For. Soc. pp. 146-147.
- Tokuchi, N., Takeda, H., and Iwatsubo, G. (1993) Vertical changes in soil solution chemistry in soil profiles under coniferous forest, Geoderm. 59:57-73
- Fernandez, I.J., Lawrence, G.B., and Son, Y. (1995) Soil-solution chemistry in a low-elevation spruce-fir ecosystem, Howland, Maine, Water, Air, Soil Poll. 84:129-145
- Yin, X., Foster, N.W., and Arp, P.A. (1993) Solution concentrations of nutrient ions below the rooting zone of a

sugar maple stand: relations to soil moisture, temperature, and season, Can. J. For. Res. 23:617-624

11. Linberg, S.E., Lovett, G.M., Richter, D.D., and Johnson, D.W. (1986) Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest, Science 231:141-145
12. Chorover, J., Vitousek, P.M., Everson, D.A., Esperanza, A.M., and Turner, D. (1994) Solution chemistry profiles of mixed-conifer forests before and after fire, Biogeochem. 26:115-144
13. Chung, Y., and Yoon, M. (1996) On the yellow sand and a dust storm occurred in the spring of 1995 (in Korean with English abstract), Kor. J. Meteol. Res. 32:17-27
14. Kim, S., and Kim, D. (1996) Studies on estimating dry deposition velocities for atmospheric aerosol and metal elements in Korea (in Korean with English abstract) J. Kor. Air Pollut. Res. Assoc. 12:101-112
15. Miller, E.K., Huntington, T.G., Johnson, A.H. and Friedland, A.J. (1992) Aluminum in soil solution from an subalpine spruce-fir forest at Whiteface mountain, New York, J. Environ. Qual. 21:345-352
16. Berger, T.W., and Glatzel, G. (1994) Deposition of atmospheric constituents and its impact on nutrient budgets of oak forests (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) in lower Austria, For. Ecol. Manage. 70:183-193
17. Cronan, C.S. (1980) Solution chemistry of a New Hampshire subalpine ecosystem: a biogeochemical analysis, Oikos 34:272-281