

일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무 임분 토양의 층위별 토양수의 화학적 특성

류성렬 · 손요환
고려대학교 산림자원학과

Chemical Properties of Soil Solution under *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis*, and *Quercus mongolica* Stands

Soung-Ryoul Ryu and Yowhan Son (Department of Forest Resources, Korea University, Seoul, Korea, 136-701)

Abstract : Soil solutions were collected by zero-tension lysimeters at Kwangju, Kyunggi Province to estimate differences in ion concentration among species and horizons. Zero-tension lysimeters were installed in O, A, and B horizons in *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis*, and *Quercus mongolica* stands. Soil solution samples were collected from September 1996 through August 1998 and analyzed for K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , and PO_4^{3-} . The experimental site had high nitrogen loading from the atmosphere, and NO_3^- was positively correlated with K^+ and Mg^{2+} . However, NO_3^- and NH_4^+ showed a positive correlation only in the O horizon of *Q. mongolica* stand. Mg^{2+} deficit in the soil was predicted owing to the positive relationship of Mg^{2+} with NO_3^- . Concentrations of K^+ and Ca^{2+} in soil solution were estimated higher in *L. leptolepis* than in other stands because of high leaching from the plant. Concentration of Al^{3+} in soil solution was negatively correlated with soil solution pH. Mean soil solution pH of A and B horizons in *P. koraiensis* was lower than 4.7, however the Al^{3+} concentration was lower than the toxic level to plants.

Key words : *Larix leptolepis*, *Pinus koraiensis*, *Quercus mongolica*, soil solution, zero-tension lysimeter

서 론

강수가 산림에 도달하면 여러 층의 임관을 통과하여 그 성질이 대기중의 강수와 달라지게 된다. 토양으로 유입된 강수는 토양에서 흡수, 흡착과 용탈 등의 과정을 거쳐 토양수가 되며^{1,2)}, 이때 토양수는 통과하는 식생이나 토양의 종류에 따라 각기 다른 성질을 갖게 된다³⁾. 토양수는 산림 생태계에서 여러 인자들의 영향을 받기 때문에 산림식피, 기후 변화와 산림 완충능력을 나타내는 지표로 사용되기도 한다⁴⁾. 뿐만 아니라 토양수에 대한 연구는 산림 내 물질이동과 관련한 중요한 자료를 제공하여 합리적인 산림경영에도 기여한다^{1,5)}. 본 연구는 우리 나라 산림면적의 대부분을 차지하고 있는 일본잎갈나무 (*Larix leptolepis*), 잣나무

(*Pinus koraiensis*), 신갈나무 (*Quercus mongolica*)를 대상으로 동일한 지역의 임령이 유사한 임분에서 2년에 걸쳐 각기 다른 토양층위로부터 토양수를 채취 분석하여 토양수 내 양분의 수종 및 토양층위간 차이를 비교하기 위하여 수행하였다. 본 연구 결과 토양 내 양분의 수분을 통한 이동 상태를 파악할 수 있으며, 또한 토양수의 화학적 성질은 계류수의 수질과 밀접한 관계가 있으므로 얻어진 자료는 계류수 관리의 기초자료로서도 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

본 연구는 경기도 광주군 퇴촌면에 위치한 경희대학교 연

Table 1. Characteristics of the three study stands

Area	<i>L. leptolepis</i>	<i>P. koraiensis</i>	<i>Q. mongolica</i>
Slope (°)	22-30	13-17	32-45
Mean DBH (cm)	18.6	19.0	18.7
Basal area (m ²)	13.8	21.6	12.6
No. of stems/ha	950	1,500	1,500

Table 2. Soil characteristics of the three study stands

Horizon	<i>L. leptolepis</i>		<i>P. koraiensis</i>		<i>Q. mongolica</i>	
	A	B	A	B	A	B
Depth (cm)	7.6	18.3	13.3	23.3	6.7	16.7
Sand (%)	46	44	28	45	43	49
Silt (%)	30	28	28	28	24	8
Clay (%)	24	28	44	28	33	42
Soil texture	L	CL	C	CL	CL	SC
pH	4.45	4.78	4.68	4.97	4.72	4.75
Total N (%)	0.203	0.137	0.268	0.023	0.406	0.146
Carbon (%)	3.43	1.69	2.69	1.74	3.84	1.83
Exchangeable (cmol(+)/kg)						
K ⁺	0.376	0.250	0.261	0.110	0.297	0.176
Ca ²⁺	3.758	2.799	1.584	1.306	1.988	1.223
Mg ²⁺	0.850	0.630	0.196	0.110	0.548	0.215
CEC (cmol(+)/kg)	23.1	18.8	14.1	14.6	19.7	17.1

습림 내 일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무 임분을 대상으로 1996년 9월부터 1998년 8월까지 2년간 수행되었다. 일본잎갈나무와 잣나무는 1973년에 인공조림 된 25년생 임분이며, 신갈나무는 동일한 시기에 벌채 후 맹아에 의해 천연갱신 된 25년생 임분이다. 일본잎갈나무와 신갈나무 임분은 동사면에 그리고 잣나무 임분은 서사면에 위치하고 있으며, 3개 임분간의 거리는 500m 이내였다. 연구대상 임분의 주요 특성은 Table 1에 나타나 있다. 연구대상지의 연평균 기온은 10.2°C, 연평균 강수량은 1307.6mm였다⁶⁾.

연구대상 임분에서 매 임분별 3개 지점으로부터 A층과 B층의 토양을 채취하여 풍건시킨 후, 토성, pH, 유기탄소, 총질소, 치환성양이온, CEC 등을 측정하였다⁷⁾ (Table 2). 또한 임분별 3개 지점에서 유기물층으로부터 시료를 채취하여 건조시킨 다음 분쇄하여 질소, 인, 그리고 양이온의

Table 3. O horizon characteristics of the three study stands

Area	<i>L. leptolepis</i>	<i>P. koraiensis</i>	<i>Q. mongolica</i>
Depth (cm)	2.8	3.3	1.7
N (%)	1.105	1.025	0.993
P (%)	0.032	0.037	0.011
K (%)	0.641	0.430	0.465
Ca (%)	0.950	0.772	1.048
Mg (%)	0.264	0.238	0.233
Na (%)	0.129	0.132	0.124
Al (ppm)	28.5	36.6	10.8

농도를 측정하였다 (Table 3). 임분별 3개 지점에서 O, A, B층에 유기물과 토양이 교란되지 않도록 주의하여 zero-tension lysimeter를 설치하고 이로부터 토양수를 1996년 9월부터 1998년 8월까지 동결기를 제외하고 연중으로 강우 직후에 채취하였다. 채취한 토양수의 부피를 측정하고, 이 가운데 250ml를 분석용으로 실험실로 운반하여 pH를 측정하고, 양이온은 Atomic Absorption Spectrophotometry로, 음이온은 Ion Chromatography로 농도를 측정하였다. 토양수 내 이온 농도의 수종별, 층위별 차이를 General Linear Model을 이용하여 분석하였으며, 토양수 내 이온간의 상관관계도 분석하였다.

결과 및 고찰

토양수 내 이온의 2년간 평균 농도는 Table 4에 나타내었다. 토양수 내 이온 농도 (meq/l)는 Ca²⁺ 1.590-1.764, K⁺ 0.117-0.312, Na⁺ 0.217-0.241, Mg²⁺ 0.136-0.240, Al³⁺ 0.026-0.082, SO₄²⁻ 0.270-0.452, 그리고 Cl⁻ 0.188-0.263 등의 범위를 나타내었다. 이러한 수치는 유령임분을 대상으로 토양수 내 양분 농도를 측정된 기존의 다른 연구들^{8,9)}에서의 결과와 유사한 것이나, 천연림 또는 노령림에서의 측정치¹⁰⁻¹³⁾와 비교하면 높은 수준이다. 특히 NH₄⁺과 NO₃⁻의 농도 (meq/l)는 각각 0.084-0.191, 0.333-0.619로 여러 연구결과⁸⁻¹³⁾에서 보고된 수치보다는 매우 높는데, 이는 연구대상 지역이 서울에 인접하여 대기오염에 의한 질소 유입량이 많은 때문인 것으로 보인다¹⁴⁻¹⁵⁾. 이러한 결과는 대기로부터의 질소강하물이 많으면 토양수 내에 NO₃⁻의 농도가 NH₄⁺의 농도에 비하여 높다는 연구 결과⁴⁾와도 일치한다.

O층 토양수의 pH는 신갈나무에서 잣나무와 일본잎갈나무에 비해 높게 나타났는데, 이는 신갈나무의 임내우가 잣나무와 일본잎갈나무의 임내우에 비하여 pH가 높은 것에 기인한 것 (주영특 등, 미발표자료)으로 사료되며 활엽수가 산성강하물에 대한 완충능력이 우수하다는 이제까지의 연구 결과¹⁶⁾와 일치한다. 토양수 내 양이온 중에서는 Ca²⁺의 농도가 가장 높았고, 음이온 중에서는 수종이나 층위에 따라 NO₃⁻ 또는 SO₄²⁻가 높게 나타났다. O층 토양수 내 양이온의 농도는 일본잎갈나무에서 Ca²⁺ > K⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > NH₄⁺의 순으로, 잣나무와 신갈나무에서는 Ca²⁺ > Na⁺ > K⁺ > NH₄⁺ > Mg²⁺의 순으로 나타나 수종마다 약간 다른 경향을 보였다.

질소는 식물체의 생장에 필수적인 양분이며, 특히 NO₃⁻는 토양에서 중요한 질소의 이동형태이다. 질산태 질소는 토양 내에서 다른 염기성 양이온과 같이 이동을 하는데, 연구결과 K⁺, Mg²⁺과는 높은 양의 상관관계를 갖는 반면 Na⁺과는 음의 상관관계를 보였다 (Table 5). 본 연구에서 수종과 층위별로 NO₃⁻와 양의 상관관계를 갖는 양이온의

Table 4. Mean concentration (meq/l) of ions in soil solution at the three study stands for two years*

Stand	Horizons	pH	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Al ³⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻ b	Cl ⁻
<i>L. leptolepis</i>	O	4.98	1.764A ^c (0.093)	0.312A (0.034)a	0.217 (0.007)	0.240A (0.035)	0.147 (0.060)	0.037 (0.018)	0.405A (0.017)a	0.432 (0.131)	0.010 (0.002)a	0.253 (0.036)
	A	4.85	1.712 (0.143)	0.182 (0.046)b	0.222 (0.009)	0.220A (0.029)	0.084B (0.026)	0.058 (0.023)	0.409 (0.021)a	0.366 (0.035)	0.005 (0.003)b	0.228B (0.013)
	B	4.97	1.723 (0.104)	0.155AB (0.006)b	0.230 (0.013)	0.219A (0.028)	0.086B (0.020)	0.042B (0.013)	0.270 (0.034)b	0.333B (0.007)	0.004 (0.001)b	0.222 (0.033)
<i>P. koraiensis</i>	O	5.05	1.681AB (0.017)	0.151B (0.023)	0.229 (0.015)	0.136B (0.014)	0.138 (0.010)	0.037 (0.006)	0.331B (0.028)	0.335 (0.074)	0.009 (0.005)	0.204 (0.017)
	A	4.54	1.743 (0.067)	0.148 (0.006)	0.219 (0.004)	0.152B (0.034)	0.107B (0.017)	0.057 (0.021)	0.438 (0.092)	0.525 (0.064)	0.006 (0.001)	0.191C (0.009)
	B	4.55	1.707 (0.148)	0.117B (0.030)	0.232 (0.025)	0.155B (0.029)	0.164AB (0.064)	0.057AB (0.022)	0.387 (0.123)	0.512A (0.134)	0.008 (0.006)	0.188 (0.010)
<i>Q. mongolica</i>	O	5.27	1.605B (0.071)	0.196B (0.038)	0.231 (0.012)	0.148B (0.028)	0.178 (0.030)	0.026 (0.006)c	0.320B (0.011)b	0.410 (0.077)	0.008 (0.003)	0.203 (0.019)b
	A	4.98	1.682 (0.031)	0.176 (0.024)	0.222 (0.011)	0.177AB (0.001)	0.175A (0.015)	0.057 (0.011)b	0.452 (0.063)a	0.619 (0.213)	0.004 (0.003)	0.263A (0.007)a
	B	4.54	1.590 (0.028)	0.158A (0.015)	0.241 (0.023)	0.151B (0.009)	0.191A (0.017)	0.082A (0.017)a	0.372 (0.044)ab	0.362AB (0.059)	0.008 (0.005)	0.216 (0.019)b

*: Standard error of the mean is in parenthesis.

^b: PO₄³⁻ was analyzed after Mar. 1997.

^c: Values with the different letter are significantly different at the p=0.05 level. Capital letters indicate significant differences among species in the same horizon, and small letters indicate significant differences among horizons within a species.

종류가 각기 다르게 나타났다. 즉 NO₃⁻와 K⁺는 일본잎갈나무의 세 층위 모두에서, 잣나무의 O층과 B층에서, 신갈나무의 A층과 B층에서는 양의 상관관계를 나타내었으며, 다른 층위에서는 유의성이 없었다. 또한 NO₃⁻와 Mg²⁺는 일본잎갈나무의 3개 층위 모두에서, 잣나무의 O층과 A층, 신갈나무의 A층에서 높은 양의 상관관계를 나타내었다. 한편 신갈나무 O층에서는 NO₃⁻와 NH₄⁺가 높은 양의 상관관계 (R=0.44, P<0.05)를 보였다. 다른 연구¹⁷⁾에서 NO₃⁻와 Na⁺과의 사이에는 상관관계가 나타나지 않는다고 하였으나, 본 연구에서 대부분 음의 상관관계를 보였는데 그 이유는 명확하지 않았다.

Table 5. Correlation coefficients between NO₃⁻ and cations

Cation	Horizon	<i>L. leptolepis</i>	<i>P. koraiensis</i>	<i>Q. mongolica</i>
K ⁺	O	0.473**	0.486**	0.113
	A	0.206*	0.148	0.281**
	B	0.305**	0.334**	0.285**
Mg ²⁺	O	0.461**	0.383**	0.137
	A	0.515**	0.197*	0.313**
	B	0.411**	0.201	0.176
Na ⁺	O	-0.232*	-0.348**	-0.188*
	A	-0.454**	-0.084	-0.191*
	B	-0.543**	-0.206	-0.171

*: p<0.05 and **: p<0.01.

칼륨은 식물체의 잎이나 줄기로부터 쉽게 용탈되어 수간류나 수관통과우를 통해 토양으로 유입되어 토양수 내 K⁺의 농도를 변화시킨다^{18,19)}. 본 연구에서 토양수 내 K⁺ 농도는 일본잎갈나무의 모든 층위에서 다른 수종에 비하여 높게 나타났다. 이는 다른 임분에서보다 수간류, 수관통과우, 그리고 토양 내 K⁺ 농도가 높은데서 기인한 것으로 생각된다. 동일한 지역에서 측정된 강수 내 K⁺의 농도 (meq/l)는 임외우 0.075, 수간류는 일본잎갈나무 0.401, 잣나무 0.303, 신갈나무 0.193, 그리고 수관통과우는 일본잎갈나무 0.289, 잣나무 0.149, 신갈나무 0.145 등으로 나타나고 있다 (진현오 등, 미발표자료). 또한 유기물층의 K 함량도 일본잎갈나무에서 잣나무와, 신갈나무보다 높게 나타났고 (Table 3), A층과 B층의 토양 내 치환성 K⁺의 양도 일본잎갈나무에서 잣나무와 신갈나무보다 높은 수치를 나타내었다 (Table 2). 그리고 전술한 바와 같이 토양수 내에서 NO₃⁻과 Mg²⁺이 높은 양의 상관관계를 나타내며, 토양수 내 Mg²⁺ 농도가 높은 것은 산성강하물의 영향 때문에 잎이나 가지로부터 용탈된 Mg²⁺이 NO₃⁻과 함께 산림생태계 외부로 유출될 수 있음을 나타내며 이에 따라 토양 내 Mg²⁺ 결핍현상을 초래할 가능성을 보이고 있다⁸⁾.

토양수 내 pH와 Al³⁺과의 관계는 모든 수종과 층위를 종합할 때 음의 상관관계 (R=-0.53, P<0.001)를 나타내었고, 수종과 층위에 따라 유의성이 있는 경우는 잣나무 A층

($R=-0.76$)과 B층 ($R=-0.58$), 일본잎갈나무 A층 ($R=-0.75$)과 신갈나무 B층 ($R=-0.60$) 등이었다. 이러한 연구 결과는 pH가 낮아지면 토양수 내 Al^{3+} 농도가 증가한다는 이전의 연구 결과²⁰⁾와 일치한다. 또한 pH 4.0-4.7에서 식물체에 Al^{3+} 의 독성이 나타날 수 있는데, 본 연구 결과 잣나무임분의 무기광물토양층 (A, B층)에서 채취한 토양수 내 pH가 다른 임분에 비해 낮게 나타났으며 토양 내 pH도 모두 4.6 이하로 나타났다. 그러나 토양수 내 Al^{3+} 농도는 잣나무에서 0.030-0.060meq/l로 다른 연구²¹⁾에서 식물체에 독성을 나타낼 수 있는 최소 농도로 보고한 0.180-0.250meq/l에 비하여 낮았다.

토양수 내 Al^{3+} 과 SO_4^{2-} 와의 관계에서는 음의 상관관계를 나타내었지만 유의성을 보이지는 않았다. 두 이온간의 음의 상관관계는 토양으로 SO_4^{2-} 가 흡착될 때, pH의 감소가 일어나고 이 결과 Al^{3+} 농도가 증가된다는 연구^{22,23)}와 일치하였는데, 토양 내 Al과 Fe이 토양으로의 SO_4^{2-} 흡착에 밀접하게 관련되어 있기 때문으로 보인다²⁴⁾. O층에서 A층으로 유입되는 토양수 내 Ca^{2+} 농도 (meq/l)는 일본잎갈나무에서 1.764로 가장 높고 신갈나무에서 1.605로 가장 낮으며, 이들간의 차이는 통계적으로 유의하였다. 이러한 차이는 수종간 유기물층 내 Ca의 함량이나 유기물층의 두께와 관련이 있는 것으로 보인다 (Table 3).

참고문헌

- 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.
- 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.H., and Jun, J.H. (1996), Water Quality variations of pH, Electrical conductivity and dissolved oxygen in forest hydrological processes, *J. Kor. For. Soc.*, 85: 634-646.
- 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.
- Marques, R., and Ranger, J. (1997), Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands on the Beaujolais Mounts (France). 1: qualitative approach, *For. Ecol. Manage.*, 91: 255-277.
- Korea meteorological administration (1997), *Annual Report*, Korea meteorological administration.
- Rural Research Institute (1988), *Method in Soil Chemistry*, Rural Development Administration.
- 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.
- Bockheim, J.G., and Langley-Turnbaugh S. (1997), Biogeochemical cycling in coniferous ecosystems on different aged marine terraces in costal Oregon, *J. Environ. Quality*, 26: 292-301.
- Cronan, C.S. (1980), Solution chemistry of a New Hampshire subalpine ecosystem: a biogeochemical analysis, *Oikos*, 34: 272-281.
- Johnson, D.W., Richter, D.D., Lovertt, G.M., and Lindberg, S.E. (1985), The effects of atmospheric deposition on potassium, calcium, and magnesium cycling in two deciduous forests, *Can. J. For. Res.*, 15: 773-782.
- Fernandez, I.J., and Rustad, L.E. (1990), Soil response to S and N treatments in a northern New England low elevation coniferous forest, *Water, Air, Soil Poll.*, 52: 23-39.
- Arthur, M.A., and Fahey, T.J. (1993), Controls on soil solution chemistry in a subalpine forest in north-central Colorado, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 1122-1130
- Emmett, B.A., Reynolds, B., Silgram, M., Sparks, T.H., and Woods, C. (1998), The consequences of chronic nitrogen additions on N cycling and soilwater chemistry in a Sitka spruce stand, north Wales, *For. Ecol. Manage.*, 101:165-175.
- Emmer, I.M., and Tietema, A. (1990), Temperature-dependent nitrogen transformations in acid oak-beech forest litter in the Netherlands, *Plant Soil*, 122:193-196.
- Kim, D.Y., Ryu, J.H., Chae, J.S., and Cha, S.H. (1996), Deposition of atmospheric pollutants in forest ecosystems and changes in soil chemical properties, *J. Kor. For. Soc.*, 85: 84-95.
- Homann, P.S., Cole, D.W., Van Miegroet, H., and Compton, J.E. (1994), Relationships between cation and nitrate concentrations in soil solutions from mature and harvested red alder stands, *Can. J. For. Res.*, 24: 1646-1652.

18. Binkley, D (1986), *Forest Nutrition Management*, John Willey and Sons.
19. Kozlowski, T.T., and Pallardy, S.G. (1997), *Physiology of Woody Plants*, Academic Press.
20. Chang, K.S., and Lee, S.W. (1995), Sensitivity and self-purification function of forest ecosystem to acid precipitation (Ⅰ): Ion balance in vegetation and soil leachate, *J. Kor. For. Soc.*, 84:103-113.
21. Miller, E.K., Huntington, T.G., Johnson, A.H., and Friendland, A.J. (1992), Aluminum in soil solutions from a subalpine spruce-fir forest at Whiteface mountain, New York, *J. Environ. Quality*, 21:345-352.
22. Cronan, C.S., and Schofield, C.L. (1979), Aluminum leaching response to acid precipitation: effects on high-elevation watersheds in the Northeast, *Sci.*, 204:304-305.
23. Rustad, L.E., Fernandez, I.J., Fuller, R.D., David, M.D., Nodvin, S.C., and Halteman, W.A. (1993), Soil solution response to acidic deposition in a northern hardwood forest, *Agr. Ecosys. Environ.*, 47: 117-134.
24. Johnson, D.W., and Todd, D.E. (1983), Relation among iron, aluminium, carbon, and sulfate in a variety of forest soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:792-800.