

잣나무 임분에 있어서 강우수질의 이동 특성*

진현오¹ · 정덕영² · 이충화³

¹경희대학교 임학과, ²충남대학교 농화학과, ³임업연구원
(1999년 11월 17일 접수)

Water Chemistry Profiles under Korean White Pine (*Pinus koraiensis* S. et Z.) Stand*

Hyun-O Jin¹, Doug-Young Chung² and Choong-Hwa Lee³

¹Department of Forestry, Kyunghee University, Suwon 449-701, Korea

²Department of Agricultural Chemistry, Chungnam University, Taejon 305-764, Korea

³Korea Forest Research Institute, Seoul 130-012, Korea

(Manuscript received 17 November 1999)

ABSTRACT

This experiment was conducted to characterize the vertical transport trend of dissolved elements through throughfall, stemflow, effluent from Ao layer, and leachate out of soil profile on *Pinus koraiensis* stand in Experimental Forest of Kyunghee University, located in Kwangju, Kyunggi province for 12 months from July, 1998 to Jun, 1999. In addition, we investigated the content of dissolved elements and the factors influencing the water chemistry concentrations separately collected from the field. Water movement in the process of throughfall and stemflow from precipitation, and rainfall leached from Ao layer into soil water was governed by concentration of throughfall, precipitation, rainfall intensity, seasonal variation, and other factors. Also, smaller changes of pH in soil water than that of dissolved elements in soil water could contribute buffer capacity, as well as balancing the concentration between cations and anions.

Key words : *Pinus koraiensis* stand, water chemistry, precipitation, throughfall, stemflow, forest soil

I. 서 언

삼림생태계에서 물질의 이동은 대부분 수분을 통하여 일어나는데, 이러한 물질의 수직적 이동은 강우에 의해 크게 지배를 받는다. 강수(임외우)가 삼림생태계 내로 유입되면 여러 층의 임관을 통과하면서 지엽과 수피로부터의 용출 및 세탈되는 성분에 의하여 임내우(수관통과우, 수간류)의 용존원소가 증가 혹은 감소하게 되는데(生原와 相場, 1982; Bellot and Escarre, 1991; Aron and Lund, 1994; 仙石 등, 1994), 이러한 경향은 수중(Cappellato *et al.*, 1993), 수령(Binkley *et al.*, 1982), 지위(Tsutsumi and Nishitani, 1984),

지리조건(Macdonald *et al.*, 1992) 및 기후조건(Lovett and Lindberg, 1984) 등의 요인에 따라 다르다.

또한, 임외우로부터 양적·질적으로 변화된 임내우가 임상으로 도달하면, 미생물 활동이 활발한 A₀층을 통과하여 수질이 변화하게 되며, 최종에는 토양수가 되어 식물에 의한 흡수, 토양 colloid와의 흡착 및 치환, 모재의 풍화, 계류수로의 유출 등의 과정을 통하여 그 성질이 변화하게 된다(高橋 등, 1996). 이 결과, 삼림토양을 통과한 수분(토양수)은 대기 중에서의 강수와 매우 다른 성질을 가지게 되는데 이러한 여러 과정들은 식생의 종류와 계절, 토양의 성질 등에 따라 달라지게 된다(Bringmark, 1980; Helmisaari and Mal-

Corresponding Author : Hyun O Jin(hojin@nms.kyunghee.ac.kr)

*본 연구는 1996-1999년도 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 96-0402-07-01-3) 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부임.

konen, 1989; 이현호와 전재홍, 1996; 정용호 등, 1999).

이와 같이 임내우 및 토양수의 성질은 삼림생태계내의 많은 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 기후변화, 삼림쇠퇴, 그리고 제반시업에 따른 삼림의 변화에 대한 지표로 사용될 수 있다(Fernandez et al., 1995). 최근 강우의 산성화가 진행됨에 따라 삼림생태계에서의 물질순환 연구측면에서 뿐 만 아니라 산성강하물의 유입에 의한 삼림쇠퇴의 예측을 위하여 토양수를 연구한 결과들이 많이 보고되고 있다(Cronan et al., 1978; Berger and Glatzel, 1994; Maynard, 1997; Emmett et al., 1998). 따라서, 삼림생태계의 물질순환 규명뿐만 아니라 삼림환경 변화를 예측하기 위해서는 강수→식생→토양에 이르기까지 각 단계에 있어서 강우 혹은 토양수에 포함되어 있는 용존원소의 이동특성을 구명할 필요가 있다.

본 연구는 경기도 광주지역의 잣나무 임분에 있어서 용존원소의 수직적인 이동특성을 구명하기 위하여 「임외우→임내우→A₀층 통과우→토양수」라는 강우에 따른 pH 및 용존원소 농도뿐 만 아니라 각 단계별 강우를 용량별로 분할 채취하여 강우성분 농도의 변화에 영향을 미치는 영향인자에 대해서도 조사를 행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 시험지 개황

본 연구는 경기도 광주군 퇴촌면 소재 경희대학교 연습림 7임반에 위치한 인공조림된 25년생 잣나무 임분에서 1998년 7월부터 1999년 6월까지 1년간 수행되었다. 연구대상 임분의 위치 및 특성을 나타내면 Fig. 1, Table 1과 같다.

표고는 약 200 m, 사면방향은 북서, 경사는 약 5~10°이며, 연평균 기온은 10.2°C, 연 강수량은 1,760 mm이다. 조사기간 중 월평균 강수량은 Table 2와 같다.

2.2. 시료채취(단위강우 전량 채취)

임외우 : 조사임분에 인접해 있는 소개된 나지 중심부에 직경 20 cm 염화비닐성 funnel과 20 l용량의 poly-bucket을 재료로 이용하여 제작된 간이 강수 채취장치를 설치 하여 채취하였다. 또한, 강수량의 측정에는 전도형 우량계(수수구 직경 20 cm, 1전도 0.5 mm)를 이용하였다. 이 자동기록 우량계는 매시간별 강우

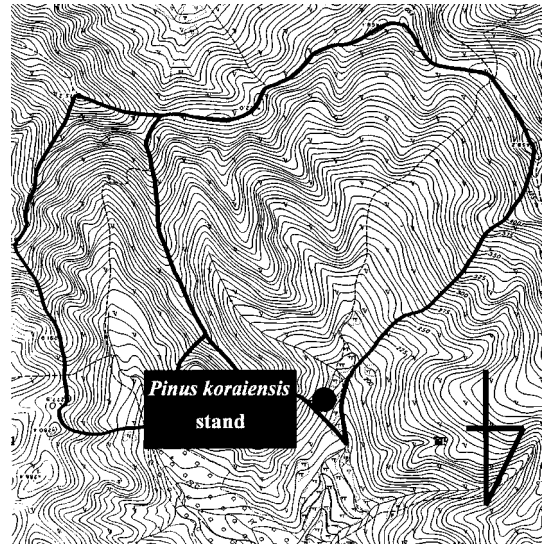


Fig. 1. Location map of experimental stand.

Table 1. Site characteristics of study area

Stand	<i>P. koraiensis</i>
Area of plot(m ²)	225
Age(yr)	25
Trees(No. ha ⁻¹)	1,560
Mean height(m)	10.2
Mean DBH(cm)	15.6
Basal area(m ² · ha ⁻¹)	30.3
Altitude(m)	200
Aspect	NW
Slop(°)	5-10

Table 2. Monthly precipitation in the study site

Month (1998)	Precipitation (mm)	Month (1999)	Precipitation (mm)
Jul.	278.0	Jan.	5.2
Aug.	956.6	Feb.	4.7
Sep.	118.0	Mar.	48.7
Oct.	25.0	Apr.	89.7
Nov.	31.1	May	110.5
Dec.	4.2	Jun.	88.5

량과 단위강우의 강우강도를 측정할 수 있는 장점이 있다.

수관통과우 : 임외우와 같은 채취장치를 임상식생의 영향을 피하기 위하여 지상 1.2 m 높이에 표준목 수

관의 줄기쪽, 중간, 인접목 수관과의 경계부분 계 3개소에 배치하여 채취하였다.

수간류 : 매목조사 결과, 수고·흉고직경을 측정하여 이를 기초로 각각 우세목, 준우세목, 열세목에 해당하는 조사목을 1본씩 계 3본을 선정하여 각 조사목의 흉고위치(지상 1.2 m) 수간에 외경 50 mm polyhose를 부착시키고 수피와의 틈을 접착제로 봉하여 수간을 유하하는 강우를 2개로 연결된 55 l polybucket으로 유도, 채취하였다.

토양수 : 토양수 시료는 Zero-tension lysimeter를 이용하여 채취하였다. 토양수를 채취하는 장치로서 현재 여러 종류의 lysimeter가 사용되고 있는데(Arthur and Fahey, 1993), Zero-tension lysimeter가 다른 lysimeter(tension meter)에 비하여 설치 비용이 많고 토양수의 채취효율이 낮다는 단점은 있으나 토양층을 통과하는 용탈수의 양과 질을 동시에 측정할 수 있는 장점을 감안한 것이다(Jemison and Fox, 1992). lysimeter는 토양층위별, 즉 A₀, A, B층의 3개층 바로 밑에 1개씩 설치하여 토양수를 채취하였다.

2.3. 시료채취(용량별 분할 채취)

강우의 용량별 분할 채취는 강수성분의 변동이나 낮은 pH의 출현상황 등의 파악에 유효한 수단이라 할 수 있다(酸性雨調査研究會, 1993). 이 채취방법은 최초의 빗물이 첫번째 poly병을 채우면 Y자형 connector의 한쪽으로 overflow하여 다음의 poly병으로 유입되는 원리를 이용하였는데 실내에서 분리채수된 빗물이 그 다음의 빗물에 의해 희석되지 않은 것을 확인하기 위하여 색소법을 이용하여 확인하였다. 이와 같은 장

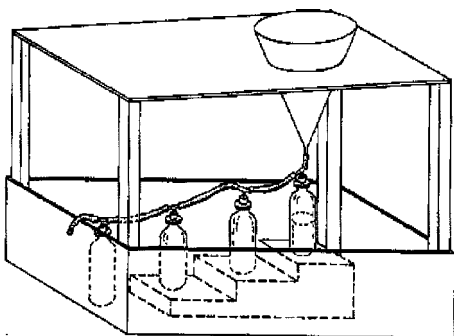


Fig. 2. Apparatus for sequential rain collection.

치를 이용하여 임외우, 수관통과우, 수간류 및 A₀층 통과우 및 A, B층의 토양수에 대하여 용량별로 분할 채취하였다(Fig. 2).

2.4. 시료분석

수질분석용 시료(임외우, 수관통과우, A₀층 통과우, 토양수)는 시료채취가 불가능하였던 결빙기를 제외한 5 mm이상의 단위 강우 종료후 1~2일 내에 채취하였다. 채취한 시료는 곧바로 여과를 거쳐 pH를 측정하고 분석시까지 냉동고에 보관한 다음 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺등의 양이온은 Atomic Absorption Spectrophotometer(AAS), NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻등은 Ion Chromatography(IC), 또한 NH₄⁺는 Auto ion analyzer에 의해 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 임외우 및 임내우의 수질 특성

임외우, 임내우 중 pH 및 용존원소 농도의 경시적 변화를 나타내면 Fig. 3과 같다.

조사기간 중('98. 7~'99. 6) 임외우의 pH는 강수량이 많은 여름에 비하여 낙엽기와 개엽기인 가을과 봄에 있어서 높은 값을 나타내고 있었다. 특히, 여름에 있어서 대부분의 임외우에서 산성우의 기준치인 pH 5.6 이하의 값을 보이고 있었다. 수관통과우의 pH는 개엽기인 4월과 낙엽기인 11월에 있어서 임외우에 비하여 높은 값을 보인 것 이외에는 거의 임외우의 pH와 비슷한 값을 나타내고 있었는데, 이는 활엽수에 비하여 침엽수가 산성우에 대한 완충이 낮다는 선행연구 결과(Parker, 1990; 脇 등, 1990; 佐佐 등, 1991)와 일치하였다. 수간류의 pH는 예외는 있으나 임외우와 수관통과우에 비하여 대략 0.5~1.0 단위 낮은 값을 보였는데, 특히 이러한 경향은 11월과 4월에 있어서 현저하였다. 이것은 임외우 pH의 영향 뿐 만 아니라 수피형태, 수피자체의 구성성분이나 그 용출의 정도가 관여하고 있다고 추정되며, 따라서 이러한 산성화 경향의 수간류가 장기적으로 임상으로 유입됨에 따른 토양의 산성화가 진행될 것이라 추측된다(眞田 등, 1991).

수관통과우, 수간류 중 양이온 농도의 경시적 변화를 보면 임외우에 비하여 높은 값으로 추이하고 있었

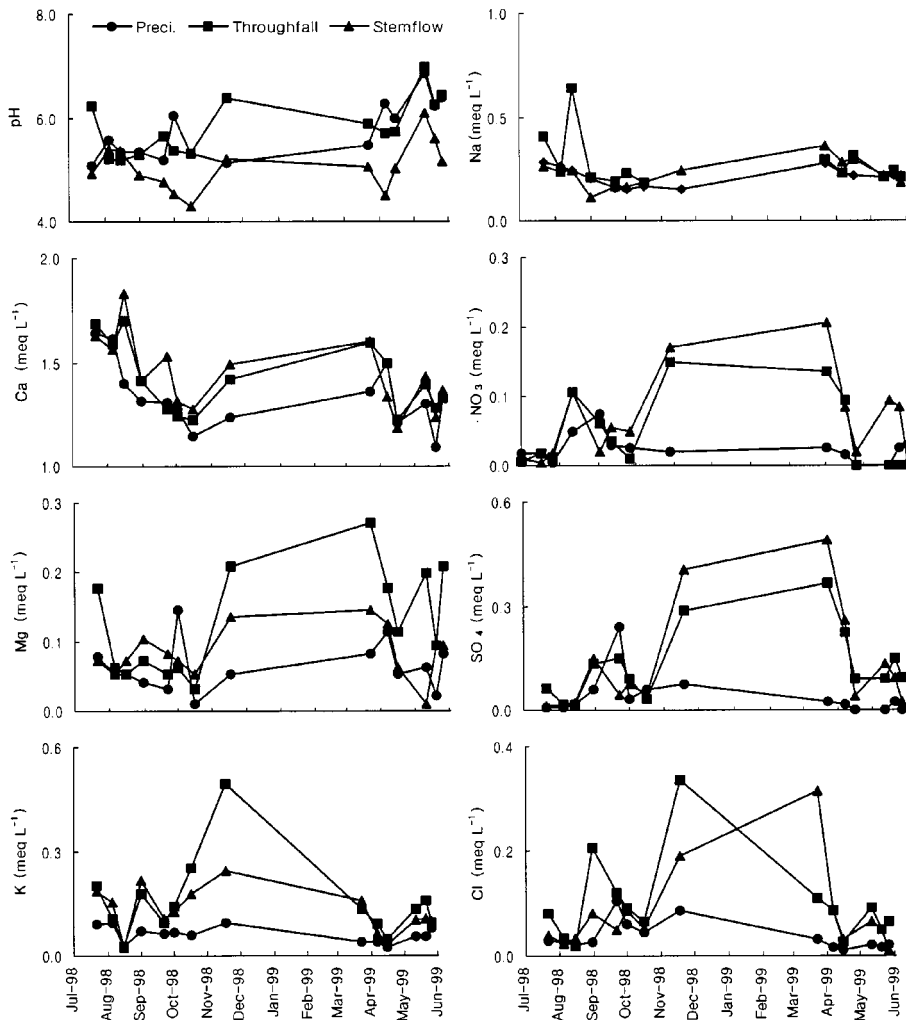
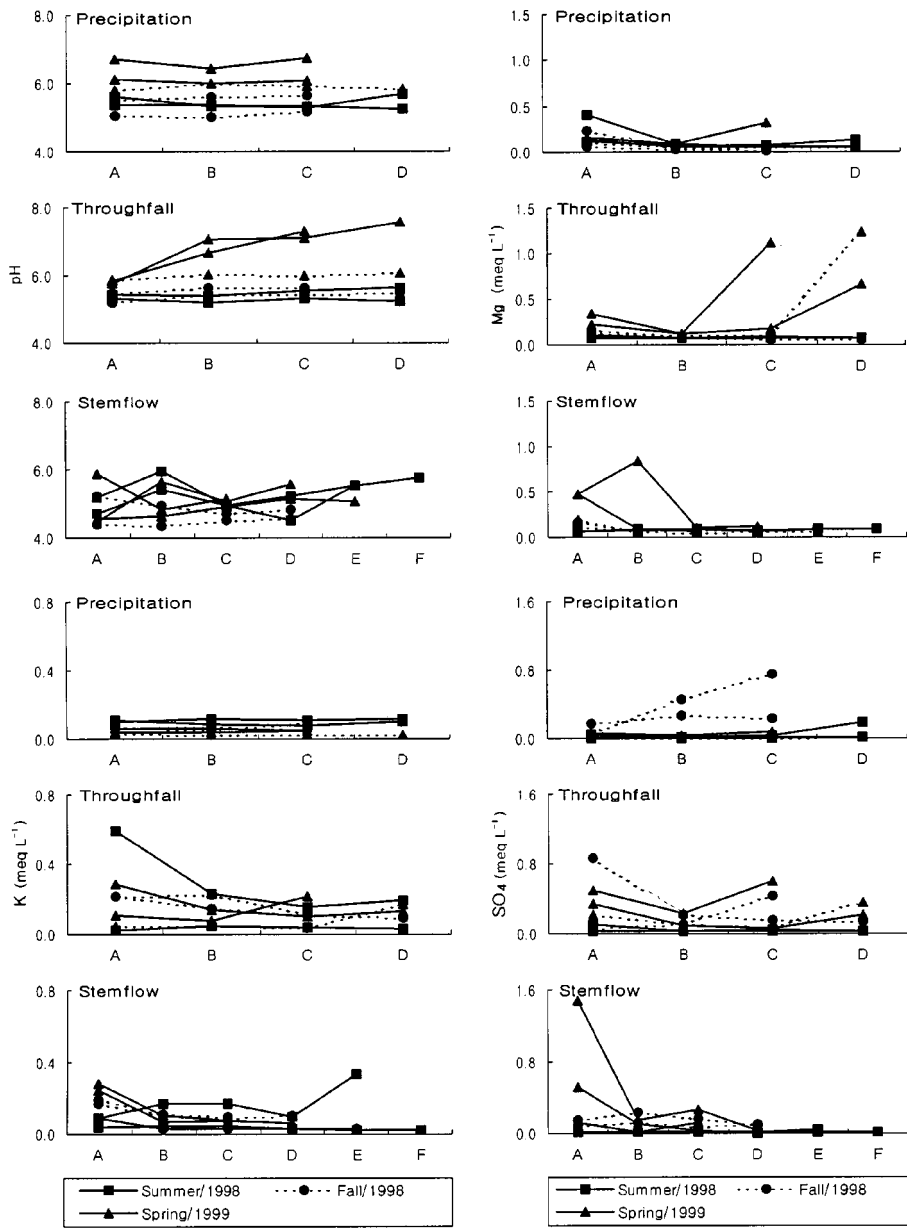


Fig. 3. Seasonal changes in pH and concentrations of dissolved elements in throughfall and stemflow.

는데, 이는 수관 및 수간으로부터의 성분용탈 및 건성 침착의 세탈에 기인한 것이라 사료된다(Feller, 1977; Edmond *et al.*, 1991). 특히, 수관통과수에 있어서는 Ca^{2+} 은 강수량이 많은 7~8월에, Mg^{2+} 은 낙엽기인 11월과 개엽기인 3~4월에, K^+ 은 낙엽기인 11월에 농도 최대치를 보여 원소에 따라 계절 특성을 달리하고 있었는데, 眞田 등(1992)도 침엽수에 있어서 수관으로부터 용탈이 현저한 시기로서 낙엽기 이외에도 개엽기를 보고하였다. 수관으로부터의 용탈은 강수량이 적고 강우강도가 약할 때 엽면과의 접촉시간이 길어지기 때문에 촉진된다고 일반적으로 지적되고 있는데(Parker, 1990), 본 연구에 있어서는 Mg^{2+} , K^+ 모두 7~10월에

있어서 다량의 강수로 수관통과수가 희석된 결과와 더불어 강우강도가 강한 강수가 많았기 때문에 이 시기에 수관통과수와 임내수의 농도에 큰 차이가 없었던 것으로 추정된다. 수관통과수, 수간류 중 음이온 농도의 경시적 변화는 전술한 바와 같이 용탈이 현저한 낙엽기와 개엽기를 제외한 전 기간에 있어서 임외수 농도와 유사한 경향을 보여 음이온 농도가 임외수 농도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 수관통과수의 음이온 중 Cl^- 농도는 K^+ 농도와 유사한 경시적 변화를 나타내었을 뿐 만 아니라 낙엽기인 11월에 농도 최고치를 보였는데, 이는 K^+ 과 Cl^- 은 세포내 양원소의 존재형태가 비슷하기 때문에 K^+ 과 함께 용탈



Rainfall intensity >3mm/hr : ———— , 3mm/hr > Rainfall intensity : - - - - -
 Precipitation, Throughfall(mm) : 0<A<8, 8<B<24, 24<C<56, 56<D<215
 Stemflow(mm) : 5<A<8, 8<B<16, 16<C<30, 30<D<43, 43<E<190, 190<F<338

Fig. 4. Sequential changes in pH and concentrations of dissolved elements in throughfall and stemflow.

하고 있음을 알 수 있었다(Eaton *et al.*, 1973; 熊田 등, 1988).

용량별 분리 채취한 임외우 및 임내우의 농도변화를 나타내면 Fig. 4와 같다. 강우강도가 3 mm/hr이상은 실

선, 3 mm/hr이하는 점선으로 나타내었으며, A, B, ..., F는 분리 채취한 각 단계에서의 강수량으로 표시하였다. 임외우의 pH에 있어서 용량별 변화는 계절, 강수량 및 강우강도에 관계없이 pH 5.0~6.0 사이에서 일정한 값으

로 추이하는 경향을 보이고 있었다. 그러나 수관통과우의 pH는 3 mm/hr이상의 강우강도를 나타낸 99년 봄에 있어서 강우초기에서 강우 종료시에 걸쳐 증가하는 경향을 보이고 있었는데, 이는 개엽기의 현저한 용탈 및 다량의 강수에 의한 희석작용에 기인한 결과로 판단된다. 그 외의 시기에 있어서는 임외우 pH의 농도변화와 유사한 농도변화를 나타내고 있었다. pH와 같은 농도변화는 Mg^{2+} 과 SO_4^{2-} 에 있어서 유사한 경향을 나타내고 있어 수관통과우의 pH증가에는 양이온 중 Mg^{2+} 농도가 크게 관여하고 있다고 판단되었다.

수간류의 용량별 원소농도 변화에 있어서는 pH를 제외한 모든 원소에서 개엽기인 99년 봄에 있어서 강우초기에서 높은 농도를 보이다 강우종료 시점으로 갈수록 점차 감소하기 시작하여 강우종료 시점에서 가장

낮은 값을 나타내었다. 이러한 경향은 강우초기에서는 수간으로부터 용탈이나 건성침착의 세탈에 의해 일시적으로 농도가 증가하였으나 강우종료로 갈수록 강우량의 증가에 의한 희석작용으로 인하여 농도가 감소한 것으로 사료된다. 따라서 수관통과우나 수간류의 pH 및 용존원소 농도는 임외우 농도, 강수량, 강우강도 및 계절특성 등의 복합적인 요인에 의해 지배되고 있음을 추측할 수 있었다.

3.2. A₀층 통과우 및 토양수의 수질 특성

A₀층 통과우, 토양수 중 pH 및 용존원소의 경시적 변화를 나타내면 Fig. 5와 같다. A₀층에서 H⁺은 탄산물질과의 반응(Joergensen and Meyer, 1990)이나, 비교적 신선한 litter로부터의 용탈에 따른 ion교환(Me-

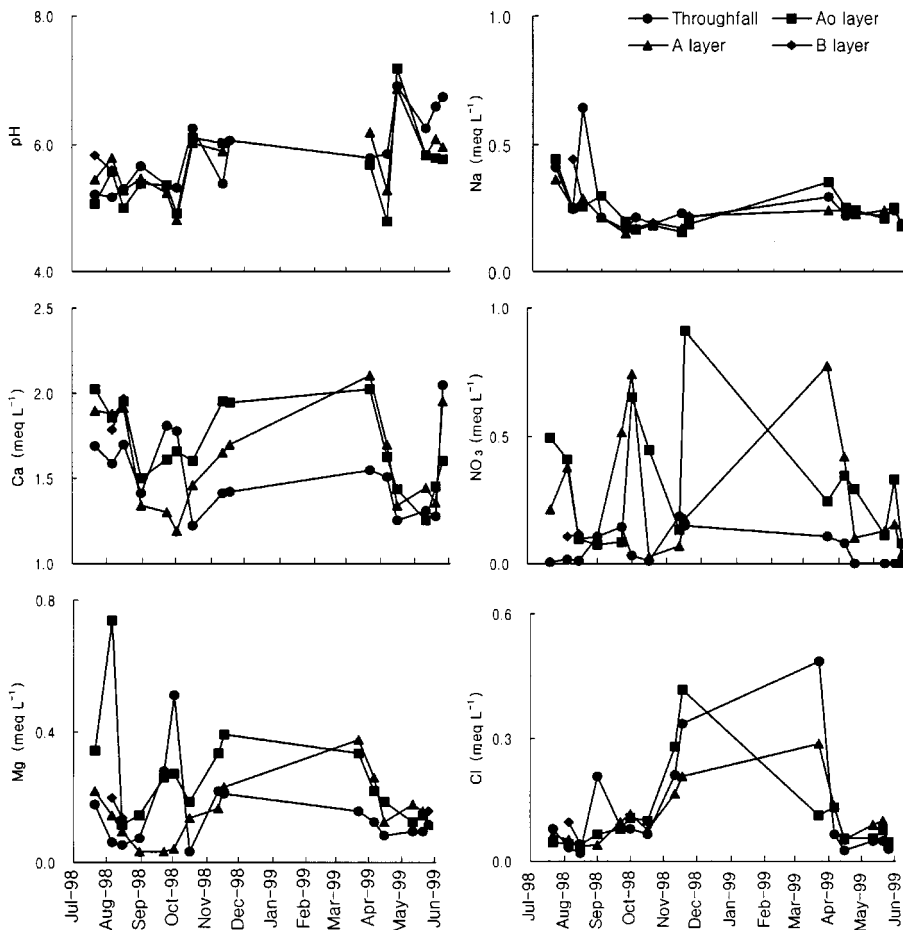


Fig. 5. Seasonal changes in pH and concentrations of dissolved elements in soil water.

cklenberg *et al.*, 1966; Wood and Bormann, 1975)에 의해 소비되는 것이 일반적 경향이다. 그러나, 본 연구에 있어서는 A₀층 통과우의 pH는 수관통과우에 비하여 약간 낮거나 비슷한 값을 나타내고 있었다. 이는 잣나무 임분이 건조한 토양조건에서 성립된 관계로 부식층이 두껍게 퇴적되어 유기물 분해가 불량하여 유기산의 방출 및 질산화에 의한 H⁺의 생성에 의해 큰 차이가 없었던 것으로 사료된다.

또한, 조사기간 중 A₀층 통과우, A, B층 토양수의 pH는 같은 시기의 수관통과우의 pH와 유사한 경시적 변화를 보일 뿐 만 아니라 H⁺농도에 큰 차이가 없었던 것으로 보아 수관통과우의 pH에 의해 크게 좌우되고 있음을 알 수 있었다. 특히 11월과 4월의 pH의 현저한 증가는 낙엽기와 개엽기에 있어 현저한 용탈의 영향에 기인한 현상이라 생각할 수 있다. A₀층 통과우의 용존원소는 일부 예외는 있으나 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺등

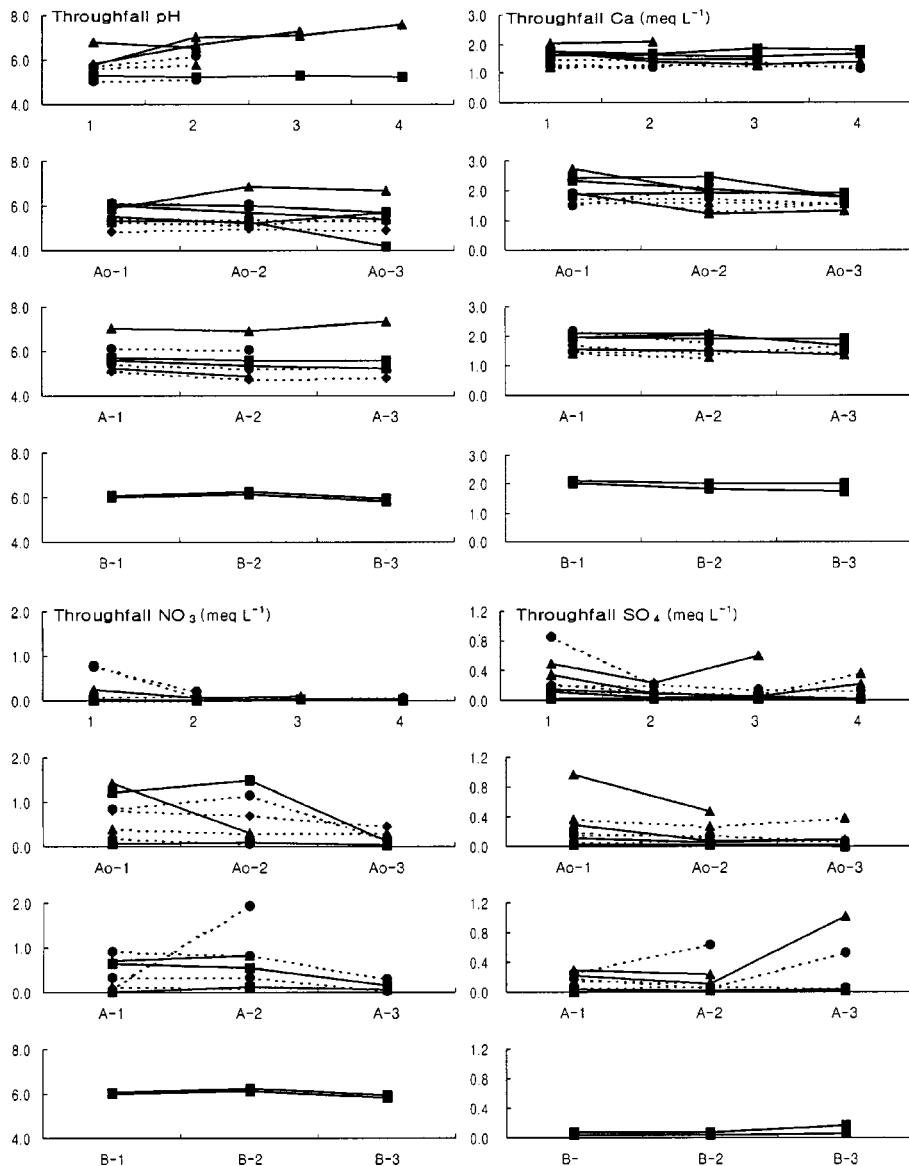


Fig. 6. Sequential changes in pH and concentrations of dissolved elements in soil water (Legend is the same as Fig. 4).

의 양이온과 NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 의 음이온에서 11월의 낙엽기에 있어서 농도 최고치를 나타내고 있었는데 이는 수관통과우의 농도 증가와 더불어 신선한 litter로부터의 현저한 용탈에 의한 결과라고 할 수 있다. 또한, Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 7~8월에 있어서도 높은 농도를 나타내고 있었는데 이와 같은 여름철 Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도의 상승에는 A₀층에 있어서의 무기화에 따른 무기 ion의 방출 및 질산화 작용에 의해 생성된 H^+ 과 A₀층에 흡착되어 있던 Exch. Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 교환 등에 의해 영향을 받은 것이라 판단된다.

A₀층 토양수 농도는 A₀층 통과우에 비하여 대부분의 원소에서 유사한 경시적 변화경향을 보이며 낮은 농도로 추이하고 있었다. 그러나, A₀층 토양수의 Na^+ 과 Cl^- 은 타원소에 비하여 A₀층 통과우, 수관통과우와 거의 같은 농도로 추이하고 있었는데 이는 수관통과우의 A₀층 및 A₀층 통과에 따른 부가, 흡착에 의한 영향은 거의 없었던 것으로 추측된다. 토양수의 NO_3^- 와 Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 조사기간중 경시적 변화에 있어서 매우 유사한 경향을 보였는데, 이는 NH_4^+ 의 질산화 작용에 의해 생성된 H^+ 이 토양 colloid에 흡착된 cation과 교환되었기 때문에 NO_3^- 농도와 Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도가 같은 경향을 보인 것이라 사료된다. 그러나, Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 같은 cation인 K^+ 와 Na^+ 의 농도에 있어서는 NO_3^- 농도와 다른 경향을 보였는데, 그 이유로서는 K^+ 는 흡착강도가 다른 3종의 負荷電에 흡착되어 있기 때문에 (諸遊, 1979) 단순한 전기적 이온교환 반응이 일어나지 않았으며, Na^+ 은 수화반경이 크기 때문에 토양고상의 負荷電으로의 교환침입력이 약하고 흡착보유하고 있는 치환성 Na^+ 양이 적은 것에 기인한 것이라 사료된다.

용량별 분리 채취한 A₀층 통과우 및 토양수의 농도 변화를 나타내면 Fig. 6과 같다. A₀층 통과우의 pH에서 3 mm/hr 이상의 강우 강도를 나타낸 봄에 강우 초기에서 강우종료에 이르기까지 즉 강우량이 증가함에 따라 pH값이 증가하고 있음을 알 수 있었는데, 이는 다량의 강우에 의한 희석작용 및 하층으로의 토양수 이동에 따른 H^+ 의 감소에 기인한 것이라 판단된다. 그러나, 하층의 A, B층에서는 강우량의 증가에 따른 변화는 뚜렷하지 않았으며 일정한 pH값을 유지하고 있었다. Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 SO_4^{2-} 는 강우량의 증가에 따라 농도가 감소하는 경향을 보였는데 이러한 경향은

개엽기인 봄에 있어서 현저하였다. NO_3^- 는 낙엽기인 가을에 있어서 강수량 증가에 의한 농도 감소를 보여 수관통과우에서의 NO_3^- 농도변화와 유사한 경향을 보이고 있었다. 그 외의 원소에 있어서는 강수량의 증가에 따른 농도 변화는 일정한 경향을 찾아볼 수 없었다.

이상과 같이 토양수 중에서의 대부분의 용존원소의 농도변화에 비하여 토양수의 pH는 변동이 작음으로 보아 잣나무 임분의 토양은 어느 정도 pH를 일정하게 유지하는 완충능을 가지고 있음을 알 수 있었는데 여기에는 토양수 내 양이온과 음이온의 균형유지가 중요한 역할을 하고 있다고 사료된다.

IV. 결 론

본 연구는 경기도 광주군에 위치하는 경희대학교 부속 연습림내 25년생 잣나무 임분에 있어서 용존원소의 수직적인 이동특성을 구명하기 위하여 임외우→임내우→A₀층통과우→토양수에 이르기까지의 강우의 이동에 따른 용존원소 농도를 조사함과 동시에 용량별 분할 채취한 각 강우성분의 농도변화에 미치는 영향인자에 대하여 해석을 행하였다.

본 연구결과, 잣나무 임분에서 임외우가 임내우, A₀층 통과우, 토양수로 변화하는 과정에서의 수질 이동특성은 임외우 농도, 강수량, 강우강도 및 계절특성 등의 복합적인 요인에 의해 지배되고 있음을 알 수 있었다. 또한 토양수 중의 용존원소 농도 변이에 비하여 토양수의 pH는 변동이 작음으로 보아 토양의 pH를 일정하게 유지하는 완충능을 확인할 수 있었는데 여기에는 토양수내 양이온과 음이온의 균형유지가 관여하고 있는 것으로 사료된다.

인용문헌

- 이현호, 전재홍, 1996: 산지 물 순환과정에 있어서 산도, 전기전도도 및 용존산소량의 변화. 한국임학회지, **85**(4), 634-646.
- 정용호, 박재현, 김경하, 이봉수, 1999: 전나무림, 잣나무림 유역에서 산림사업이 산림의 수질 정화기능에 미치는 영향(I). 한국임학회지, **88**(3), 364-373.
- 生原喜久雄, 相場芳憲, 1982: スギ・ヒノキ壯齡林小流域における養分の循環とその收支. 日本林學會誌, **64**(1), 8-14.
- 熊田 淳, 川名 明, 片岡寛純, 1988: クヌギ枝葉中の生育相別無機成分含有率の變化. 日本林學會誌, **70**(11), 465-471.

- 諸遊英行, 1979: 土壤の養分状態と作物の營養診断 -肥料作物のカリ吸収を例として-. 日本土壤肥料學會誌, **50**, 368-378.
- 酸性雨調査研究會, 1993: 酸性雨調査法. ぎょうせい, 401pp.
- 佐佐朋幸, 後藤和秋, 長谷川浩一, 池田重人, 1991: 盛岡市周邊の代表的森林における林外雨, 林内雨, 樹幹流の酸性度ならびに溶存成分 -樹種による樹幹流のpH固有値-. 森林立地 **32**, 43-58.
- 眞田 勝, 太田誠一, 大友玲子, 眞田悦子, 1991: トドマツ・エゾマツ人工林における樹幹流および林内雨の 基特性. 102回 日林論, 341-342.
- 眞田 勝, 太田誠一, 大友玲子, 眞田悦子, 1992: 札幌近郊におけるトドマツ, エゾマツ人工林の 樹幹流. 林内雨および林外雨について. 森林立地, **33**, 8-15.
- 仙石鐵也, 原 光好, 森澤 猛, 石塚和裕, 1994: 亞高山帯針葉樹林における酸性雨の観測と實態 -pH, ECおよび化学性について-. 森林立地, **36**, 64-72.
- 高橋輝昌, 添谷 稔, 戸田浩人, 1996: スギおよびヒノキ壯齡人工林における元素の垂直的な移動特性. 日本林學會誌, **78**(2), 127-133.
- 脇 孝介, 車戸憲二, 松橋達也, 1990: 山地地域における雨水の酸性化の實態. 101回 日林論, 253-254.
- Aron, D. B. and L. J. Lund, 1994: Factors controlling throughfall characteristics of a high elevation Sierra Nevada site, California. *J. Environ. Qual.*, **23**, 844-850.
- Arthur, M. A. and T. J. Fahey, 1993: Controls on soil solution chemistry in a subalpine forest in north-central Colorado. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 1122-1130.
- Bellot, J. and A. Escarre, 1991: Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in Mediterranean holm oak forest. *Forest Ecol. and Management.*, **41**, 125-135.
- Berger, T. W. and G. Glatzel, 1994: Deposition of atmospheric constituents and its impact on nutrient budgets of oak forests (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) in lower Austria. *Forest Ecol. and Management.*, **70**, 183-193.
- Binkley, D., J. P. Kimmins and M. C. Feller, 1982: Water chemistry profiles in an early-and mid successional forest in coastal British Columbia. *Can. J. For. Res.*, **12**, 240-248.
- Bringmark, L., 1980: Ion leaching through a podsol in a Scots pine stand. In; Persson T. (ed.) Structure and Function of Northern Coniferous Forest: A Ecosystem Study. *Ecol. Bull.*, **32**, 341-361.
- Cappellato, R., N. E. Peters and H. L. Ragsdale, 1993: Acidic atmospheric deposition and canopy interactions of adjacent deciduous and coniferous forests in the Georgia Piedmont. *Can. J. For. Res.*, **23**, 1114-1124.
- Cronan, C. S., R. C. Reynolds, Jr. and G. E. Lang, 1978: Forest floor leaching: contribution from mineral, organic, and carbonic acids in New Hampshire subalpine forests. *Science.*, **200**, 309-311.
- Eaton, J. S., G. E. Likens and F. H. Bormann, 1973: Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. *J. Ecol.*, **61**, 495-508.
- Edmond, R. L., T. B. Thomas and J. J. Rhodes, 1991: Canopy and soil modification of precipitation chemistry in a temperate rain forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**, 1685-1693.
- Emmett, B. A., B. Reynolds, M. Silgram, T. H. Sparks and C. Woods, 1998: The consequences of chronic nitrogen additions on N cycling and soil water chemistry in a sitka spruce stand, north Wales. *Forest Ecol. and Management.*, **101**, 165-175.
- Feller, M. C., 1977: Nutrient movement through western hemlock-western redcedar ecosystems in southwestern British Columbia. *Ecology*, **58**, 1269-1283.
- Fernandez, I. J., G. B. Lawrence and Y. Son, 1995: Soil-solution chemistry in a low-elevation spruce-fir ecosystem, Howland, Maine. *Water, Air, Soil Poll.*, **84**, 129-145.
- Helmisaari, H. S. and E. Malkonen, 1989: Acidity and nutrient content of throughfall and soil leachate in three *Pinus sylvestris* stands. *Scand. J. For. Res.*, **4**, 13-28.
- Jemison, J. M. and R. H. Fox, 1992: Estimation of zero-tension lysimeter collection efficiency. *Soil Sci.*, **154**, 85-94.
- Joergensen, R. G. and B. Meyer, 1990: Nutrient change in decomposing beech leaf litter assessed using a solution flux approach. *Soil Sci.*, **41**, 279-293.
- Lovett, G. M. and S. E. Lindberg, 1984: Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall. *J. Appl. Ecol.*, **21**, 1013-1027.
- McDonald, N. W., A. J. Burton, H. O. Liechty, J. A. Witter, K. S. Pregitzer, G. D. Mroz and D. D. Richter, 1992: Ion leaching in forests ecosystem along a Great Lakes air pollution gradient. *J. Environ. Qual.*, **21**, 614-623.
- Mecklen, R. A., H. B. Tucky and J. V. Morgan, 1966: A mechanism for the leaching of calcium from foriage. *Plant Physiol.*, **41**, 610-613.
- Maynard, D. G., 1997: Soil nutrient dynamics in a boreal mixedwood cutover following the application of hexazinone. *Ecol. Appl.*, **7**, 416-430.
- Parker, G. G., 1990: Evaluation of dry deposition pollutant damage, and forest health with throughfall studies. In Mechanism of Forest Response to Acidic Deposition. Luister, A. A. and S. G. Haines (eds.). Springer-verlag, 10-61.
- Tsutsumi, T. and Y. Nishitani, 1984: On the effects of soil fertility on the throughfall chemicals in a forest. *Jap. J. Ecol.*, **34**, 321-330.
- Wood, T. and F. H. Bormann, 1975: Increases in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. *Ambio*, **4**, 169-171.