

降雨와 植生の 相互作用이 樹冠通過雨 및 樹幹流의 化學的 性質變化에 미치는 影響^{1*}

朱榮特² · 陳鉉五³ · 孫堯丸⁴ · 吳鍾敏⁵ · 鄭德永⁶

The Effects of the Interaction between Precipitation and Tree Species on the Chemical Properties of Throughfall and Stemflow^{1*}

Yeong-Teuk Joo², Hyun-O Jin³, Yo-Hwan Son⁴, Jong-Min Oh⁵ and Duk-Young Jung⁶

요 약

본 연구는 산성우 정화능 및 수관통과우, 수간류의 화학적 성질변화에 미치는 수종간 차이의 영향정도를 비교하기 위하여 경기도 광주군 경희대학교 연습림 내의 잣나무림, 낙엽송림 및 참나무림을 대상으로 임외우, 수관통과우 및 수간류를 조사, 분석하였다.

수관통과우 pH는 참나무림, 낙엽송림, 잣나무림에서 각각 pH 5.00~6.30, pH 3.96~6.41, pH 4.11~6.36, 또한 수간류 pH는 각각 pH 4.33~6.05, pH 3.59~6.09, pH 3.60~6.13의 범위에 분포하고 있어 수종에 따른 임외우에 대한 수관통과우 및 수간류의 pH 변화는 참나무림이 낙엽송림과 잣나무림에 비하여 pH 값이 높으면서 분포 범위의 폭이 작았다. 따라서, 수종간 차이에 따른 임외우에 대한 완충능은 참나무림이 낙엽송림과 잣나무림에 비하여 큰 경향을 나타내었다.

대부분의 용존 원소의 농도에 있어서는 임외우 ≤ 수관통과우 ≤ 수간류로 나타났으며, 수관통과우 및 수간류의 양이온은 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , 음이온에서는 Cl^- , NO_3^- 의 농도가 임외우보다 증가하였는데, 특히 Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Cl^- 에서 현저하였다. 그리고, 수관통과우의 용존원소 농도를 수종간 비교하면 Ca^{2+} 의 농도는 참나무림 < 잣나무림 = 낙엽송림의 경향이였으며, NH_4^+ 에서 용존원소 농도의 수종간 차이는 참나무림 < 잣나무림 < 낙엽송림의 경향을 보였다.

ABSTRACT

This research was carried out to investigate the effects of the different tree species (*Q. spp.*, *L. leptolepis* and *P. koraiensis*) about the chemical properties of throughfall and stemflow, to purify the acid rain at Kyung Hee Univ. experimental forest, Gwangju-gun, Kyunggi-do. The water quality of the precipitation, throughfall and stemflow in each forest stands were analyzed chemically. The throughfall pH ranges were *Q. spp.*(pH 4.96-6.34), *L. leptolepis*(pH 3.96-6.41) and *P. koraiensis*(pH 4.11-6.36), and the stemflow pH ranged *Q. spp.*(pH 4.33-6.05), *L. leptolepis*(pH 3.59-6.09) and *P. koraiensis*(pH 3.60-6.13). pH values of throughfall and stemflow to the precipitation were *Q. spp.* higher than *L. leptolepis* and *P. koraiensis*, while distribution range was small. Therefore, buffering capacity about the precipitation in the tree species trended *Q. spp.* bigger than *L. leptolepis* and *P. koraiensis*.

¹ 接受 1998年 12月 11日 Received on December 11, 1998.

² 강원대학교 산림자원보호학과 Dept. of Forest Resources Protection, Kangwon Nat'l Univ., Chunchon 220-701, Korea.

³ 경희대학교 임학과, Dept. of Forestry, Kyunghee Univ., Yongin 449-701, Korea.

⁴ 고려대학교 산림자원학과, Dept. of Forest Resources, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea.

⁵ 경희대학교 환경학과 Dept. of Environmental Science, Kyunghee Univ. Yongin 449-701, Korea.

⁶ 충남대학교 농화학과 Dept. of Agricultural Chemistry, Chungnam Nat'l Univ. Taejon 305-764, Korea.

* 본 연구는 1996~1999년도 한국과학재단 특정연구과제(과제번호 96-0402-07-01)에 의하여 수행된 연구결과의 일부임.

Nearly all concentration of dissolved elements were precipitation \leq throughfall \leq stemflow. The cation (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and NH_4^+), and anion (Cl^- and NO_3^-) were increased. Especially the concentration of Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ and Cl^- were noticeable. In comparing concentration of dissolved elements of throughfall with each tree species, Ca^{2+} concentration was $Q. \text{ spp.} < P. \text{ koraiensis} = L. \text{ leptolepis}$ and NH_4^+ was $Q. \text{ spp.} < P. \text{ koraiensis} < L. \text{ leptolepis}$.

Key words : precipitation, throughfall, stemflow, chemical properties, tree species

서론

산업문명으로 인한 공해의 산물들은 대기권 기상요인들과 상호 복합적으로 작용하여 산성우 및 산성강하물(acid deposition)을 생성하여 생태계를 교란시키고 있다(李壽煜과 閔一植, 1989). 대기오염으로 인한 영향은 임목의 생장저하, 해충의 피해 증가, 종다양성의 변화 등(Binkly 등, 1994)이며, 이로 인한 결과는 임목의 생육을 저하시켜 생산성이 낮아진다(김태욱 등, 1985). 또한, 김태욱(1980)이 대기오염에 의한 삼림피해 및 그 대책을 논술한 바 있으며, 오종환 등(1983)은 대기 중 아황산가스농도가 수목생장에 미치는 영향을 연구하면서 대기오염이 심한 지역에서 조림할 수 있는 수종을 선정할 바 있다. 그리고 禹鍾浩等(1998)은 7개 수종 잎의 pH 처리별 엽록소 함량 및 침출액 pH 변화를 연구하였으며, 박재주 등(1983)은 대기오염의 피해가 심한 지역일수록 총출현수, 총개체수, 종다양도가 감소하고 수목의 생장이 그렇지 않은 지역에서 보다 감소하거나 더디게 생장함을 보고하였다.

삼림의 경우, 강수(임외우: precipitation)가 삼림생태계로 유입되면 수관을 통과하는 것(수관통과우: throughfall)과 수간을 따라 유하하는 것(수간류: stemflow)으로 나누어지는데, 이 모두 강우의 이동과정에서 수관이나 수간과 접촉하여 부착물질(dry deposition)의 세탈 혹은 잎과 수피로부터 용출되는 성분에 의하여 그 성질이 변화하게 된다. 이 때문에 수관통과우나 수간류의 용존물질 농도는 임외우에 비하여 높아지며, 수관통과우의 pH도 임외우와 거의 비슷하거나 약간 높아지나, 수간류의 pH는 임외우에 비하여 매우 낮은 경향을 보이는데(Tiedemann 등, 1980; 脇等, 1990; Tajchman 등, 1991; Aron과 Lund, 1994; 仙石 등, 1994), 이러한 경향은 수종(Mahendrappa, 1990; Cappellato 등, 1993), 지리조건(Macdonald 등, 1992) 및 기후조건(Lovett과 Lindberg, 1984) 등의 요인에 따라 다르다. 이와 같이 강우의 성

질이 삼림생태계의 물질순환과 삼림의 환경형성에 미치는 영향에 대한 연구가 여러 외국에서는 활발하게 진행되고 있으나 우리 나라에 있어서는 일부 연구(오종환 등, 1987; 서강욱과 이돈구, 1988)를 제외하고 거의 없는 실정이며, 수종의 차이에 따른 산성우 정화 정도에 관한 연구(張寬淳과 李壽煜, 1995; 이현호, 1997; 韓心熙와 李景俊, 1997; 朴在鉉과 禹保命, 1997, 1998)는 적은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 서로 다른 수종이 산성우 정화능 및 수관통과우, 수간류의 화학적 성질에 미치는 수종간 차이의 영향정도를 파악하기 위하여 참나무림, 낙엽송림, 잣나무림을 대상으로 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 시험지 개황

본 연구를 위하여 경기도 광주군 퇴촌면 일대의 경희대학교 연습림 내에 있는 동일한 유역 내에 서로 인접하는 소집수역 내에 수종별(참나무림, 낙엽송림, 참나무림)로 시험지를 선정하였으며, 조사 임분의 개황은 Table 1, Fig. 1과 같다.

2. 시료채취

임외우: 잣나무림, 낙엽송림, 참나무림의 대표적인 곳을 선정, 약 5m×5m의 수관소개부 중심에 직경 3cm의 염화비닐성 funnel과 5 l 용량의 폴리

Table 1. Description of research stands.

| Species | Age (yr) | D.B.H (cm) | Height (m) | Density (trees/ha) | Aspect |
|-------------------------|----------|------------|------------|--------------------|--------|
| <i>Pinus koraiensis</i> | 27 | 15.6 | 10.2 | 1,560 | SW |
| <i>Larix leptolepis</i> | 27 | 21.1 | 20.4 | 1,470 | SW |
| <i>Quercus spp.</i> | 25 | 18.7 | 13.5 | 1,500 | SW |

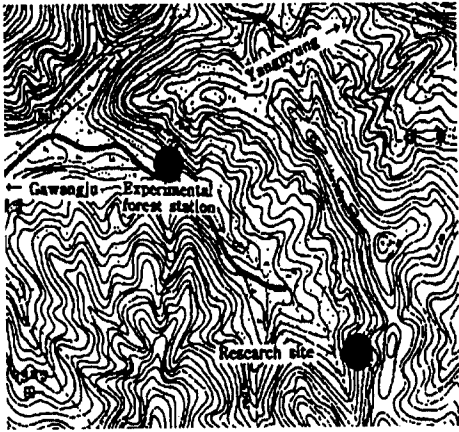


Fig. 1. The location map of experimental site.

탱크를 재료로 한 간이 강수 채취장치를 설치, 채취하였다. 또한 강수량의 측정은 전도형 우량계(직경 20cm, 1전도 0.5mm)를 이용하였다.

수관통과우: 대형 bulk sampler(20 l)를 임상 식생의 영향을 피하기 위하여 지상 1.2m 높이에 임분별 4개소를 random으로 배치하여 단위 강우 5mm 이상일 때마다 채취하였다.

수간류: 비닐 호스를 수간(임분별 수고별로 4

本 선정)에 나선형으로 부착시킨 후 하단을 폴리 탱크로 연결하여 단위 강우 5mm 이상일 때 채취 하였다.

시료 채취는 1997년 5월부터 1998년 5월까지 1 년간 실시하였으며, 결빙기(12월 초-3월 중순)는 시료채취가 불가능하였다.

3. 分析方法

채취한 시료는 Whatman #42 여과지로 여과하여 pH를 측정된 후, 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} , NH_4^+)과 음이온(NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-})을 분석하였는데, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} 등은 Atomic absorption spectrophotometer, NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} 등은 Ion chromatography, NH_4^+ 는 Auto ion analyzer, pH는 pH meter에 의해 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 임외우, 수관통과우 및 수간류 pH의 비교

임외우, 수관통과우 및 수간류 pH의 경시적 변화를 나타내면 Fig. 2와 같다. 임외우 pH의 계절 특성은 조사기간(97년 5월-98년 5월) 중 97년 7월,

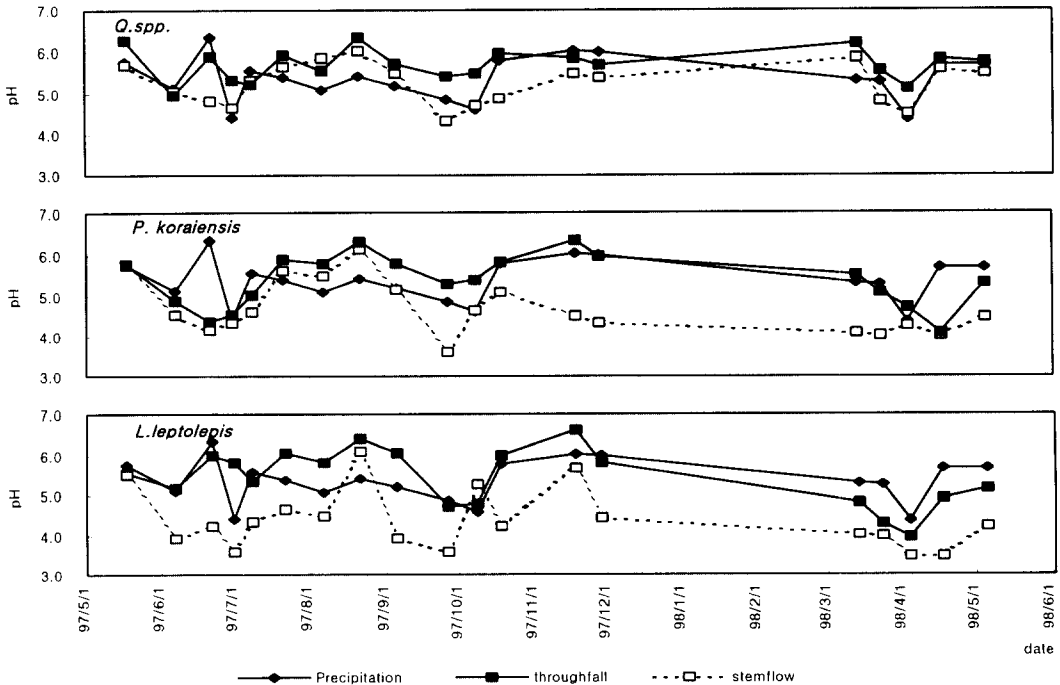


Fig. 2. Seasonal changes of pH of precipitation, throughfall and stemflow on the species.

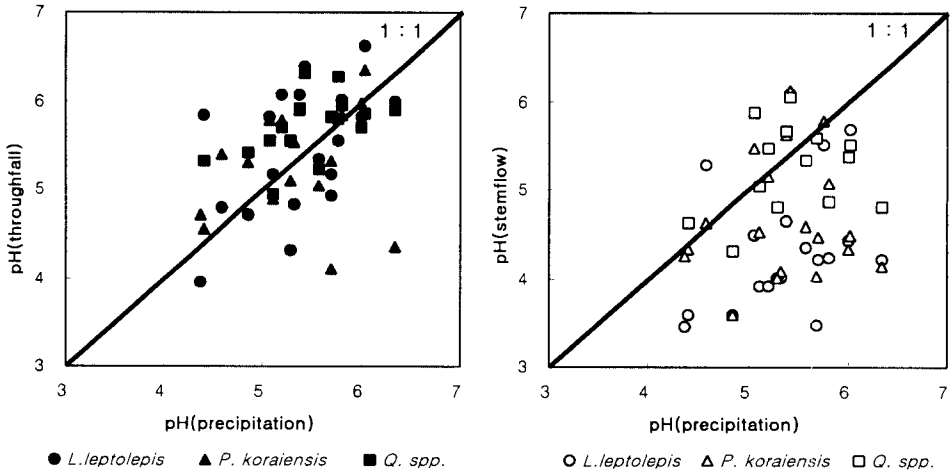


Fig. 3. Relationships between the pH of precipitation and throughfall, stemflow on the species (Oblique line indicates no net effect on precipitation pH).

10월과 98년 4월에 있어 pH 4.50 전후의 값을 나타내고 있는 반면, 그 외의 시기에 있어서는 pH 5.00~6.00의 범위 내에서 추이되고 있었다.

수관통과우 pH는 임외우에 비하여 비슷하거나 약간 낮은 값을 나타내고 있었으나, 수간류 pH에 있어서는 임외우와 수관통과우 농도와 비슷한 값을 보이는 참나무림을 제외하고는 낙엽송림, 잣나무림에서 임외우에 비하여 pH 1~2 낮은 값을 보이고 있었다. 따라서, 수관통과우 pH에 있어서는 수종간 차이는 뚜렷하지 않았으나, 수간류 pH의 값에 있어서는 수종간 차이(참나무림 > 낙엽송림 = 잣나무림)를 나타내고 있었다. 수관통과우, 수간류 pH의 경시적 변화는 일부 예외는 있으나 3개 수종 모두 임외우 pH의 경시적 변화와 유사한 경향을 보이고 있었다.

임외우의 pH와 수관통과우 및 수간류의 pH와의 관계(Fig. 3)를 보면, 임외우 pH가 증가하면 수관통과우 pH도 증가하는 경향을 보이고 있는데, 특히 참나무림 수관통과우의 pH는 타 임분에 비하여 즉, 침엽수림 임외우 pH값의 크기에 관계없이 pH 5.00~6.30의 일정한 범위였으며, 그 분포의 폭이 작게 나타나서 임외우 pH에 대한 수종차이 즉, 침엽수에 비하여 강우의 산성화에 대한 완충능의 수종특성이 존재하고 있음이 확인되었다. 이는 지금까지 연구 보고된 활엽수가 침엽수에 비하여 산성우에 대한 완충능에 크게 기여한다는 결과(Parker, 1990; 脇等, 1990; 佐佐等, 1991)와 일치하였다. 또한, 수간류 pH는 임외우 pH와 거의 비슷한 값을 나타내고 있

는 참나무림을 제외하고는 잣나무림, 낙엽송림에 있어서 임외우 pH 보다 pH 1~2 정도 낮은 값을 보이고 있었다. 이와 같이 수관, 가지 및 줄기를 따라 유하한 수간류 pH는 수관만을 통과한 수관통과우 pH에 비하여 낮았는데, 참나무림에 비하여 잣나무림, 낙엽송림에서 그 경향이 뚜렷하였다. 이러한 결과는 수중에 따라서 산성화 경향의 수간류와 알칼리화 경향의 수간류가 있어 수간류 pH가 수종 고유의 값을 나타내고 있다는 다른 연구 결과(佐佐等, 1991; 眞田等, 1992b; 野呂와 佐佐, 1992)와 유사한 경향을 보였다.

2. 임외우, 수관통과우 및 수간류의 용존원소 농도 비교

임외우, 수관통과우 및 수간류의 용존원소 농도의 경시적 변화를 나타내면 Fig. 4와 같다. 수관통과우, 수간류의 양이온 농도에 있어서는 원소에 따라 계절적 특성을 달리하고 있는데, 이는 주로 임외우 농도와 유사한 경향을 보여 수관통과우 및 수간류의 양이온 농도는 임외우의 농도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ 농도는 6월과 11월에 있어서 높은 증가경향을 보였는데, 특히 낙엽송림의 수관통과우 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ 농도는 11월에 있어 높은 값을 보였다. 이는 낙엽기에 있어서 현저한 양분 용탈 경향을 나타낸 것이라 추측할 수 있다. Ca²⁺은 6월과 11월 그리고 봄(3-5월)에 있어서 높은 증가 경향을 보였으며, 그 이외의 시기에 있어서는 1.0~1.5me/l의 범위에 분포하고

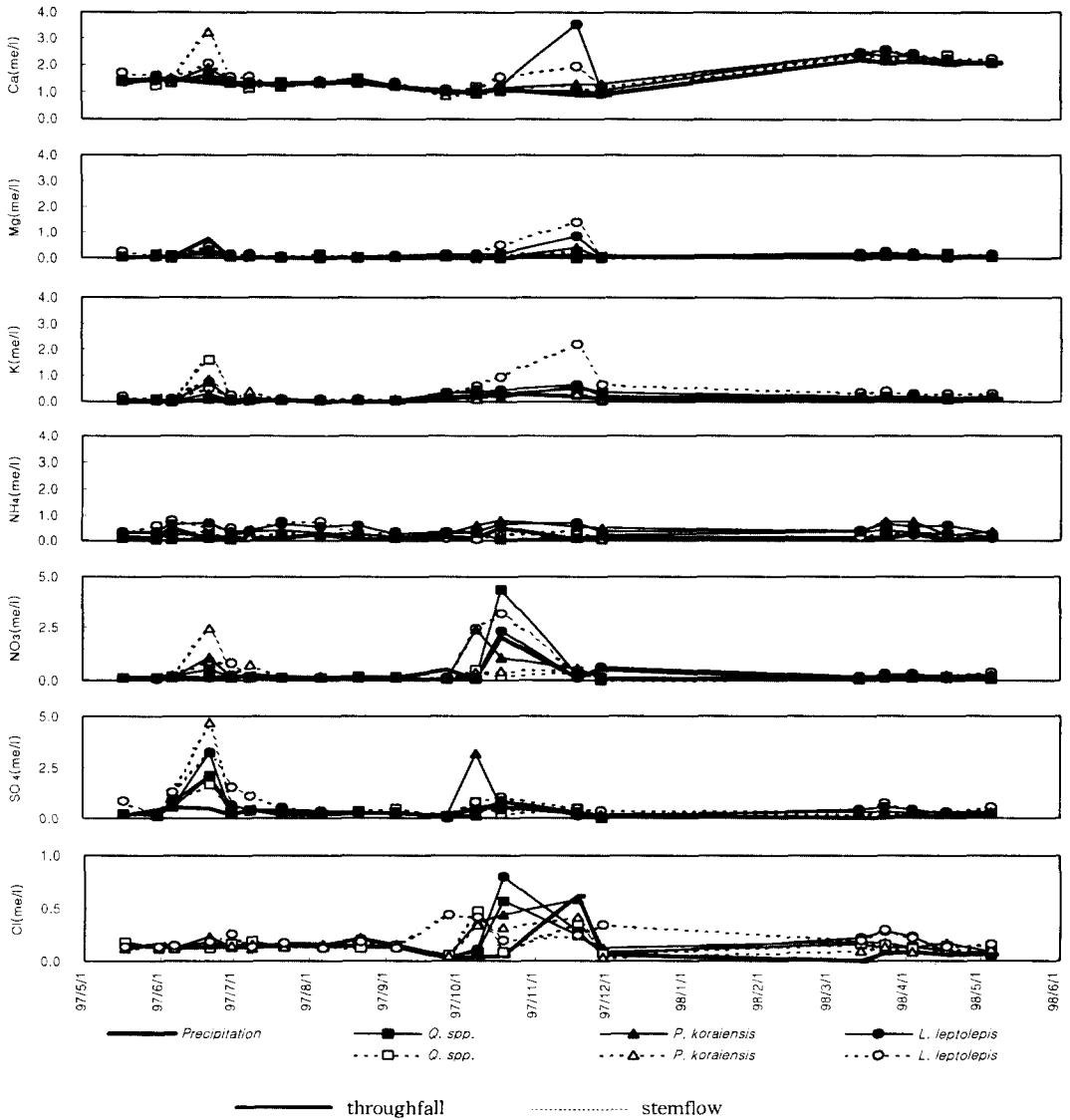


Fig. 4. Seasonal changes of the ion concentrations of precipitation, stemflow and throughfall on the species.

있었다. 특히 11월에 있어 낙엽송림 수관통과우의 농도가 3.5me/l의 값을 보였는데, 이러한 경향은 K^+ 와 Cl^- 에서도 현저하였다. 또한 6월에 증가 경향을 보이고 있는 Ca^{2+} , K^+ 는 조사기간 중 강우량이 적고 임외우 pH가 가장 낮은 값(pH 4.3)을 나타내는 것으로 보아 임외우의 H^+ 과 열중의 Ca^{2+} , K^+ 와 같은 양이온과의 ion 교환에 의한 용탈에 기인한 결과라 생각된다. 그 외의 용존원소에 있어서는 뚜렷한 계절특성은 인정되지 않았다.

앞서 설명한 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 와 유사한 계절적 특성을 보이고 있는 음이온은 NO_3^- , SO_4^{2-} 로서 6월과 11월에 있어서 증가 경향을 보이고 있었다. 특히 음이온 Cl^- 은 낙엽송림 수관통과우에서 낙엽기인 11월에 있어서 높은 증가 경향을 보이고 있었는데, 이는 낙엽기에 있어서 용탈의 현저한 증가에 기인한 결과(眞田等, 1992a)라 사료된다.

임외우와 수관통과우 및 수간류의 용존원소 비교(Fig. 5)에서는 수관통과우 농도가 임외우 농도에 비하여 증가 경향을 보였는데, 이는 주로

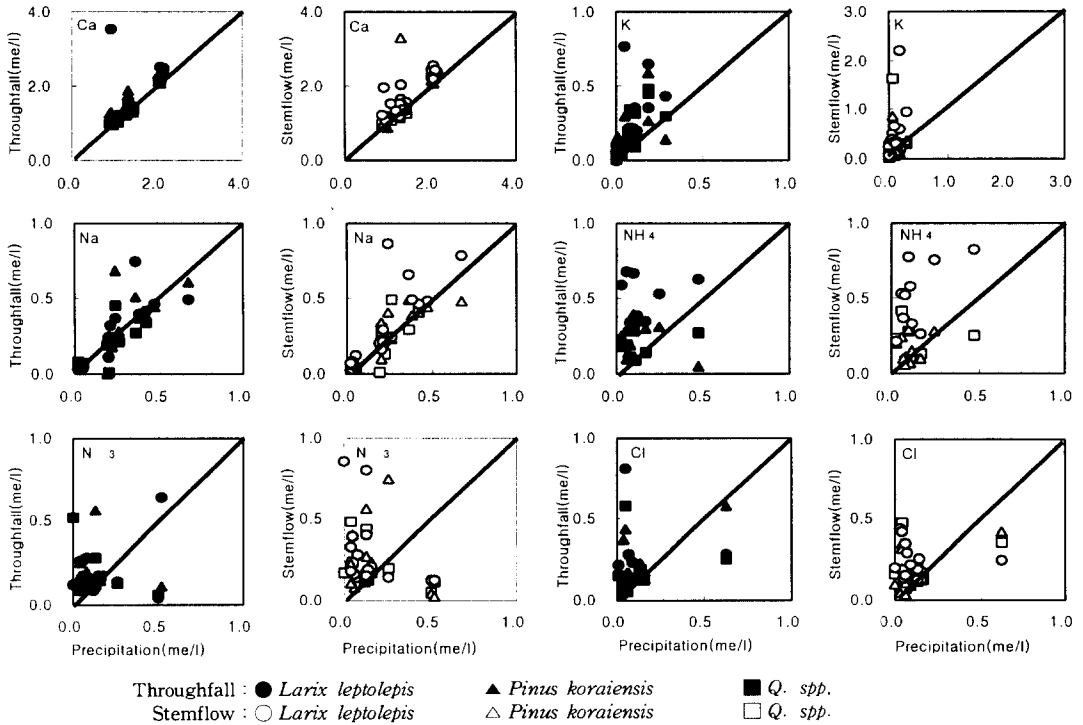


Fig. 5. Relationships between of the dissolved elements of precipitation, stemflow and throughfall on the species.

있으로부터의 용탈에 의한 것 이외에 건성침착의 세탈에 의한 것 등을 생각할 수 있다. 본 연구 결과에서는 임의우 농도에 비하여 수관 통과우 농도가 현저히 증가하는 즉, 용탈현상이 현저한 원소로는 Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Cl^- 을 들 수 있으며, 특히 Cl^- 농도는 수관 통과우 용존원소 중 K^+ 와 유사한 계절변화를 나타내고 있었는데, 이는 세포 내 양이온의 존재형태가 유사하기 때문에(Eaton 등, 1973) K^+ 와 함께 용탈되고 있음을 알 수 있었다. 염기이온 중 수관 통과우의 Ca^{2+} 농도는 임의우에 비하여 비슷하거나 약간 높은 경향을 보여 타 염기이온인 Mg^{2+} , K^+ 에 비하여 용탈에 의한 증가는 뚜렷하지 않았다. 수관 통과우와 수간류의 용존원소 농도에 있어서 수종간 차이는 수관 통과우 및 수간류의 Ca^{2+} 이 낙엽송림 > 잣나무림 > 참나무림의 경향을 보였으며, NH_4^+ 은 수관 통과우에서 낙엽송림 > 잣나무림 > 참나무림의 순이었고, 수간류에 있어서는 낙엽송림 > 잣나무림 = 참나무림의 경향을 보이는 것 이외에 타 용존원소에 있어서 뚜렷한 경향은 보이지 않았다.

이상의 결과를 종합적으로 판단하면, 수관 통과

우 및 수간류에 있어서 수종간 용탈 및 세탈 차이는 강우량, 강우강도와 임의우 pH외에 염량, 염의 착생시기(상록수, 낙엽수), 염의 양분농도, 수피조직, 잎과 수간에 따른 강우 및 건성 침착의 포착특성 등의 요인에 따라 달라진다고 생각되었다. 따라서, 금후 wet only sampler, sequential rain sampler 및 인조나무에 의한 순용탈량의 추정 등의 연구를 수행하여 수관 통과우 및 수간류의 농도 증가에 대한 용탈, 건성침착, 습성침착의 분리 동정을 행할 예정이다.

결론

본 연구는 산성우 정화능 및 수관 통과우, 수간류의 화학적 성질에 미치는 수종간 차이의 영향 정도를 비교하기 위하여 경기도 광주군 퇴촌면 소재 경희대학교 연습림 내의 참나무림, 낙엽송림 및 잣나무림 3개 임분을 대상으로 1997년 5월부터 1998년 5월까지 임의우, 임내우의 수질을 조사, 분석하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 각 수종별 수관통과우 pH의 변화는 참나무류가 pH 4.94-6.34의 범위를 보였으며, 낙엽송림은 pH 3.96-6.41, 잣나무림은 pH 4.11-6.36의 변화폭을 보였다. 또한, 수간류 pH는 참나무림이 pH 4.33-6.05, 낙엽송림이 pH 3.59-6.09였으며, 그리고 잣나무림이 pH 3.60-6.13의 범위를 보여 수간류가 수관통과우보다 pH의 값이 낮음을 알 수 있었다.
2. 각 수중에 따른 강우에 대한 수관통과우 및 수간류 pH의 변화는 참나무림이 pH 4.33-6.34로 낙엽송림(pH 3.59-6.41)과 잣나무림(pH 3.60-6.36)보다 pH의 값이 높으면서 일정한 범위로 분포하고 있었다. 따라서 수종간 차이에 의한 강우에 대한 완충능이 참나무림이 다른 2개 수종(낙엽송림, 잣나무림)보다 크게 나타났다.
3. 대부분의 원소 농도에 있어서는 임외우 ≤ 수관통과우 ≤ 수간류의 경향을 보였는데, 양이온에서는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , 음이온에서는 Cl^- , NO_3^- 의 농도가 증가하였으며, 특히 Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Cl^- 에서 현저하였다. 그리고 수관통과우 농도의 수종간 비교에서는 Ca^{2+} 농도에서 참나무림 < 잣나무림 = 낙엽송림의 경향이었으며, NH_4^+ 농도에 있어서는 전체적으로 참나무림 < 잣나무림 < 낙엽송림의 경향을 보였다.
4. Cl^- 농도가 수관통과우에서 뚜렷하게 증가한 것으로 나타났는데, 이는 Cl^- 이 K^+ , Mg^{2+} 과 같이 식물체로부터 용탈된 것에 의해 농도증가에 영향을 준 것으로 판단되었다

인용문헌

1. 김태욱. 1980. 대기오염에 의한 산림 피해와 그 대책. 한국임학회지 49 : 67-77.
2. 김태욱·이경재·박인협. 1985. 대기오염이 곰솔림의 물질생산에 미치는 영향. 한국임학회지 71 : 33-39.
3. 박재주·김재봉·배정오·김동한·오재기·강덕희·박인협·이경재. 1983. 공단지역의 환경오염물질의 축적과 수목생장의 상관관계에 대한 조사연구. 국립환경연구소보고 49pp.
4. 朴在鉉·禹保命. 1997. 山林流域內 降水로부터 溪流水質에 미치는 影響因子 分析 - pH 溶存酸素, 電氣傳導度 -. 韓國林學會誌 86(4) : 489-501.
5. 朴在鉉·禹保命. 1998. 山林流域內 降水, 樹冠通過雨, 土壤水 및 溪流水 水質의 化學的 特性. 韓國林學會誌 87(1) : 62-73.
6. 서강욱·이돈구. 1988. 경기도 광주지방의 신갈나무림과 잣나무림에서 수관통과우와 수간류의 질소량. 서울대연보 24 : 39-50.
7. 오중환·김영걸·채지석·이창근. 1987. 산성강우와 침엽수·참나무류림 통과에 의한 산도 및 그 성분에 관한 연구. 임시연보 34 : 159.
8. 오중환·채지석·이창근. 1983. 대기중 아황산가스 농도가 수목생장에 미치는 영향. 임시연보 30 : 243-258.
9. 禹鍾浩·安仁淑·朴龍求. 1998. 7個 樹種의 pH 水準別 處理에 따른 葉綠素 含量 및 浸出液 pH 變化. 韓國林學會誌 87(2) : 145-152.
10. 李壽煜·閔一植. 1989. 大氣汚染 및 酸性雨が 森林生態系의 土壤酸度 및 養料 分布에 미치는 影響. 韓國林學會誌 78(1) : 11-25.
11. 이현호. 1997. 山地 물循環 素過程에 있어서 水質變化的 追跡分布에 의한 山林의 環境의 淨化機能의 計量化 研究. 韓國林學會誌 86(1) : 56-68.
12. 張寬淳·李壽煜. 1995. 酸性雨에 대한 山林生態系의 敏感度 및 自淨機能(II) - 植生層과 土壤層 溶脫이온 分析을 중심으로 -. 韓國林學會誌 84(1) : 103-113.
13. 韓心熙·李景俊. 1997. 酸性雨에 依한 土壤酸性化에 대한 4個 樹種의 緩衝能力과 樹冠으로부터 養料 溶脫 變異. 韓國林學會誌 86(3) : 342-351.
14. 仙石鐵也·原光好·森澤猛·石塚和裕. 1994. 亞高山帶針葉樹林における酸性雨の觀測と實態 - pH, ECおよび化學性について -. 森林立地 36(2) : 64-72.
15. 野呂忠幸·佐佐朋幸. 1992. 主な落葉廣葉樹樹幹流の酸性度比較. 日林東北支誌. 44 : 137-140.
16. 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(2) : 43-58.

17. 眞田 勝・太田誠一・大友玲子・眞田悦子. 1992a. 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(1): 8-15.
18. 眞田 勝・大友玲子・眞田悦子・太田誠一. 1992b. 札幌郊外の造林地における林内外雨の樹種特性について. 103回 日林論: 257-258.
19. 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について. 101回 日林論: 253-254.
20. 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.
21. Binkly, D., Y.H. Son and Z.S. Kim. 1994. Impact of air pollution on forest: A summary of current situation. J. Kor. For. Soc. 83(2): 229-238.
22. Cappellato, R., N.E. Peters and H.L. Ragsdale. 1993. Acidic atmospheric deposition and canopy interaction of adjacent deciduous and coniferous forests in the Georgia Piedmont. Can. J. For. Res. 23: 1114-1124.
23. 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.
24. 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.
25. Macdonald, 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 forest ecosystem along Great Lakes air pollution gradient. J. Environ. Qual. 21: 614-623.
26. Mahendrappa, M.K. 1990. Partitioning of rainwater and chemicals into throughfall and stemflow in different forest stands. For. Ecol. Manage. 30: 65-72.
27. Parker, G.G. 1990. Evaluation of dry deposition pollutant damage, and forest health with throughfall studies. In mechanism of forest responses to acidic deposition. Luiser, A.A. and S.G. Haines(eds.), 245pp. Springer-Verlag, New York. 10-61.
28. Tajchman, S.J., R.N. Keys and S.R. Kosuri. 1991. Comparison of pH, sulfate and nitrate in throughfall and stemflow in yellow-poplar and oak stands in northern-central West Virginia. For. Ecol. Manage. 40: 137-144.
29. Tiedemann, A.R., J.D. Helvey and J.D. Anderson. 1980. Effects of chemical defoliation of an *Abies grandis* habitat on a mounts and chemistry of throughfall and stemflow. J. Environ. Qual. 9: 320-328.