

京畿道 廣州 地方 잣나무림, 낙엽송림, 참나무림에서
樹冠通過雨, 樹幹流, 土壤水內 養料動態^{1*}

朴榮大² · 李敦求² · 金東燁³

Nutrient Dynamics in the Throughfall, Stemflow and
Soil Solution of Korean Pine, Japanese Larch and
Hardwood Stands at Kwangju-Gun, Kyonggi-Do^{1*}

Yeong Dae Park², Don Koo Lee² and Dong Yeob Kim³

요 약

이 연구는 경기도 광주시에서 잣나무림, 낙엽송림, 참나무림 위주의 활엽수림을 대상으로 임분간 수관통과우, 수간류를 통한 양료유입 양상을 비교하고 수관통과우, 수간류, 토양수별로 양료동태 특성을 알아보려고 하였다. 조사기간동안 총 강우량은 1410.1mm였으며 수관통과우량은 낙엽송림에서 전체강우량의 85%, 잣나무 간벌림에서 84.5%, 잣나무 하예림에서 83.2%, 활엽수림에서 81.2%로 나타나 활엽수림 보다는 침엽수림에서 높게 유입되었다. 수간류량은 활엽수림에서 강우의 2.7%, 잣나무 하예림에서 1.3%, 잣나무 간벌림에서 1.2%, 낙엽송림에서 0.8%로 활엽수림이 침엽수림에 비하여 높았다.

강우, 수관통과우, 수간류내 평균 이온농도는 수간류가 가장 높았으며 임분별 평균 이온농도는 양이온, 음이온 모두 낙엽송림, 잣나무림, 활엽수림의 순으로, 활엽수림에 비하여 침엽수림에서 높았다. 수관통과우와 수간류내 양이온 농도는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 의 순으로 높았으며 음이온 농도는 SO_4^{2-} , $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Cl^- 의 순이었다.

강우가 수관층을 통과한 후 수관통과우와 수간류에서의 농도변화를 보면 활엽수림의 경우 가장 크게 증가한 이온이 K^+ 인 반면 잣나무림과 낙엽송림에선 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이온이 가장 크게 증가하여 수중에 따라 각기 다른 양상을 보였다.

토양수내 양이온 농도는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 의 순으로 높았고, 음이온 농도는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Cl^- , SO_4^{2-} 의 순으로 높았다. 이 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, K^+ 는 주로 대기로부터 유입되고 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 는 주로 모암의 풍화에 의하여 유입되었다.

ABSTRACT

The objectives of this study were to examine the amount of nutrient input by throughfall and stemflow, and the nutrient dynamics by throughfall, stemflow and soil solution among *Pinus koraiensis*, *Larix leptolepis* and hardwood forests including oaks at Kwangju-Gun, Kyonggi-Do. A total amount of rainfall during the study period was 1410.1mm. Of the total rainfall, 85% was from throughfall at the *L. leptolepis* stand, 84.5% at the thinned *P. koraiensis* stand, 83.2% at the unthinned *P. koraiensis* stand

¹ 接受 1999年 8月 17日 Received on August 17, 1999.

² 서울대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon, Kyonggi-Do 441-744, Korea

³ 성균관대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University Suwon, Kyonggi-Do 440-746, Korea

* 이 논문은 한국과학재단 특정과제 '조림작업에 의한 산림생태계의 물질순환 및 생물다양성 변화'(KOSEF 96-0402-0801-3) 연구결과의 일부임

and 81.2% at the hardwood stand, showing greater throughfall at the conifer stand than at the hardwood stand. Stemflow showed 2.7% of rainfall at the hardwood stand, 1.3% at the unthinned *P. koraiensis* stand, 1.2% at the thinned *P. koraiensis* stand and 0.8% at the *L. leptolepis* stand, showing greater stemflow at the hardwood stand than at the conifer stand. Ion concentration of stemflow was greater than those of rainfall and throughfall. The conifer stand showed higher ion concentration than the hardwood stand both for cation and anion. The ion concentrations of throughfall and stemflow were higher in the descending order : $\text{NH}_4^+\text{-N} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ for cations and $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-\text{-N} > \text{Cl}^-$ for anions. After the precipitation passed through the canopy, K^+ increased most at the hardwood stand, whereas $\text{NH}_4^+\text{-N}$ did most at the *P. koraiensis* and *L. leptolepis* stands. The ion concentration of soil solution was higher in the descending order : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ for cations and $\text{NO}_3^-\text{-N} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ for anions. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and K^+ seemed to be supplied primarily from atmospheric deposition while Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ from weathering.

Key words : *Pinus koraiensis*, *Larix leptolepis*, *hardwood stand*, *throughfall*, *stemflow*, *soil solution*, *nutrient input*, *nutrient dynamics*

서 론

산림생태계는 개방계로서 대기권, 수권, 지질권, 생물권과의 상호작용으로 양료가 유입되고 동시에 유출이 되는데, 이를 산림생태계내 물질순환이라고 한다. 대기먼지와 같은 전성강하물과 강우나 강설과 같은 습성강하물, 낙엽·낙지에 의한 양료환원 등이 유입요소가 되고 지표수나 토양수, 탈질작용 등이 유출요소가 된다. 이러한 양료순환은 기체상태의 이동도 포함하며 토양내 풍화작용과 같은 형태로도 이루어지지만 주로 수관통과우, 수간류, 토양수와 같은 물에 의해 양료순환이 이루어지는데, 이와 같이 생태계의 물의 순환은 양료순환 연구에 있어 중요한 도구가 된다(이돈구 등, 1997). 물은 에너지의 흐름에 따라 생태계간을 이동하게 되고 양료를 흡수할 수 있도록 화학적 촉매와 용매역할을 하기도하며 양료를 이동시키는 운반체의 역할도 한다(Likens와 Bormann, 1994).

생태계는 원래 자연의 현상에 의해 조절, 지배되어 왔으나 인류가 목재자원 확보를 목적으로 무분별하게 산림을 이용하면서 산림생태계가 파괴되어, 원래의 다목적적인 산림의 기능을 잃게 되었다. 이로인해 하층식생 파괴와 양료유출의 과다로 인한 문제점들이 제기되었으며(Johnson 등, 1982), 또한 산업화가 진전되면서 많은 오염물질이 배출되어 산성우, 중금속 오염, 양료교란 등의 문제들과 토양의 산성화에 따른 양료용탈의 문제를 가져왔다(Lindberg 등, 1982). 이에 대한 대책으로 지속적인 산림관리의 필요성이 강조되었다.

지속적인 산림관리는 생태계의 복원능력이 유지되는 한도, 곧 생태계의 물질순환 과정이 파괴되지 않는 한도 내에서 보속적인 이용이 이루어지는 것을 뜻한다. 이런 산림의 보속성은 그 임분의 안정성과 복구능력으로 인해 판단되는데(Larsen, 1995) 그 판단의 기초가 물질순환 과정을 이해하고 규명하는 것이다.

최근 각 중 공해문제가 대두되면서 산림의 환경기능이 전에 없이 크게 부각되고 있다. 산림생태계는 공해물질을 포함한 대기 강하물에 있어 여과기와 같은 기능을 하는데, 현재처럼 산업화된 환경에서 이는 생태학적으로 중요한 의미를 지닌다(Amezaga 등, 1997). 대규모의 산림훼손 문제들을 일찌기 접하였던 유럽, 북미의 나라들에서 부터 시작하여 현재까지 전 세계적으로, 장기적인 연구가 이루어지고 있으며(Lindberg 등, 1989; Likens와 Bormann, 1994), 현재 우리나라에서도 생태계내 물질순환에 관한 연구와 관련하여 산림의 환경기능 평가 및 이를 계량화하는 연구가 이루어지고 있다(장관순과 이수옥, 1994; 김동엽 등, 1996; 이현호, 1997). 이들 연구결과를 외국과 비교하면 우리나라 산림은 아직까지 외국과 같은 대규모의 피해를 입지 않고 있으나 오염물질의 유입을 없애는 것은 현실적으로 어려운 일이므로 친환경적 산림관리와 함께 산림생태계의 환경적 자정능력에 대해 지속적인 관찰과 연구가 필요하다.

이 연구의 목적은 경기도 광주지방에서 잣나무림, 낙엽송림, 활엽수림을 대상으로 임분간 수관통과우, 수간류를 통한 양료유입 양상을 비교하

고 수관통과우, 수간류, 토양수 별로 양료동태 특성을 알아보는데 있다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 지리적 위치상 우리나라의 중부 지방인 경기도 광주군 도척면에 위치한 서울대학교부속 중부연습림(795ha)이다(그림 1). 좌표상으로는 북위 38° 17' 16"~38° 19' 26", 동경 127° 16' 45"~127° 16' 45"에 위치하고 있다.

최근 5년간 연습림의 기상자료를 보면 연평균 최고온도 15.9℃, 연평균 최저온도 4.4℃, 연평균 강우량이 1,300mm이며 주요 수종은 산정부가 굴참나무, 갈참나무, 신갈나무등 참나무류 위주의 천연활엽수림 지대이고 산록부는 잣나무와 낙엽송 조림지로 이루어져 있다. 연구대상 임분은 굴참나무, 갈참나무 위주의 천연 활엽수 임분, 인공식재한 낙엽송 임분, 임분구조가 각기 다른 잣나무 두가지 임분 총 4개의 임분으로 하였다. 우선 참나무류 위주의 활엽수 임분은 우리나라 중부지방의 대표 식생이자 본 연구대상지의 천연 식생이기도 하고 낙엽송과 잣나무는 우리나라의

대표적인 조림수종이면서 같은 침엽수이지만 낙엽송의 경우, 한해에 수목의 낙엽이 다 지는 특성을 가지고 있어 침엽수라기 보다는 오히려 활엽수에 가까운 생활형을 지니고 있다. 또한 잣나무 임분을 2개로 선정한 이유는 조림 후 각각 간벌과 하예작업을 실시하여 임령은 같으나 임분밀도와 수관 율폐도 등 임분구조에서 각기 차이가 나기 때문이다. 각 연구대상 임분의 특성은 아래 표1에 나타냈다. 그리고 각 임분마다 수관통과우, 수간류, 토양수의 시료를 채취하기 위하여 20m×20m 조사구를 선정하였다.

2. 연구방법

1) 임외우, 수관통과우, 수간류 채취

1998년 5월에서 9월까지 5개월간 임외우, 수관통과우, 수간류의 양을 매 강우시마다 측정하였으며, 양료분석을 위한 시료채취는 2주에 한번씩, 한달에 두 번 실시하였다. 채취기간동안 시료가 오염되지 않도록 과산화수소수(H₂O₂) 한, 두 방울을 적정하였다. 임외우 채취기는 연구대상 임분과 인접한 연습림 사무실에 설치하였으며, 수관통과우와 수간류 채취기는 각 조사구에 5반복씩 설치하였다. 우선 수관통과우 채취기는 빗물이 땅에서 튀기는 것을 방지하기 위하여 지상에서 1.2m 이상의 높이로 설치하였고 지름이 216mm되는 원통을 10의 플라스틱 용기에 부착시켜 채취하였다. 수간류 채취기의 경우 각 조사구의 표준목을 5본씩 선정하여 각 표준목마다 알루미늄 칼라를 나선형으로 수간에 부착시켜 수간을 통해 흘러나온 빗물을 받도록 하였으며, 각각 지름이 1cm되는 호스를 55의 용기에 연결하여 수간류가 담기도록 하였다. 채취한 시료는 pH 측정 후 -18℃의 냉동 저장고에 보관하였다.

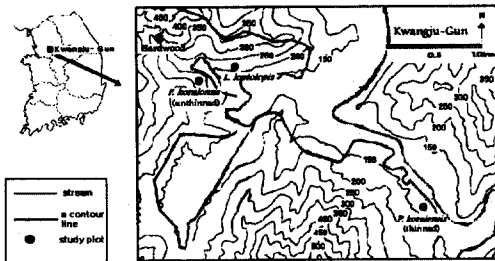


Fig 1. Map of the study area

Table 1. Stand characteristics of the study area

Stand composition	Age (yrs.)	Mean DBH (cm)	Mean height (m)	Tree density (trees/ha)	Basal area (m ² /ha)	Crown coverage (%)
Hardwood	15 - 30	9.9	9.3	2,350	19.7	77.8
<i>Pinus koraiensis</i> (thinned)	28	20.5	16.6	900	30.4	88.3
<i>Pinus koraiensis</i> (unthinned)	28	17.7	14.4	1,400	35.3	91.0
<i>Larix leptolepis</i> (thinned)	30	18.2	17.4	1,050	28.9	82.5

2) 토양수 채취

토양수를 채취하는 데는 여러 가지 도구와 방법이 사용되어 왔으나, lysimeter를 이용하는 방법이 비록 설치시 토양의 교란을 가져오는 단점이 있지만 시간의 경과에 따라 토양이 그 기능을 회복한다는 가정 하에 가장 일반적으로 쓰이고 있다(Lawrence와 David, 1996). 본 연구에서는 Tension lysimeter를 이용하여 토양수를 채취하였다. lysimeter 설치전 0.01N 염산용액으로 내부를 소독하였으며 lysimeter 설치시 최대한 토양의 교란을 줄이고자 하였고 조사구마다 토심 30cm부위와 50cm부위에 각각 3반복으로 설치하였다. Vacuum pump를 이용하여 lysimeter내 압력을 낮추고 호스를 핀치코크로 고정시켜 압력을 유지시켰다. 토양수 시료의 채취시기는 수관 통과우, 수간류 시료와 마찬가지로 2주에 한번씩 하였고 pH 측정후 냉동 저장하였다.

3) 수간류량 산출

Helvey와 Patric(1965)은 임내강우량을 산출하는 공식을 통해 산림생태계내 수문적 순환을 규정하였다. 그들은 임내 강우량을 수관통과우와 수간류, 수관에 의한 차단량으로 산출하였는데, 본 연구에서도 임분별로 강우유입 양상을 수관통과우, 수간류로 나누어서 알아보았다. 각 임분별로 수간류량은 매 강우시 측정된 자료를 토대로 수관 율폐도와 흉고 단면적을 측정하여 Killingbeck과 Wali(1978)의 방법에 따라 산출하였다.

$$S_r = 1/2 \{ (D_1 + D_2) / D_1 + (B_1 + B_2) / B_1 \} (V_c / A)$$

D₁: 총 임목분수

D₂: 수간류 채취기가 설치되지 않은 임목수

B₁: 총 흉고단면적 (m²)

B₂: 수간류 채취기가 설치되지 않은 임목의 흉고 단면적(m²)

V_c: 수간류 채취기에 모아진 물의 양(l)

A: 시험구의 면적(m²)

S_r: 수간류량(mm)

4) 양료분석

수관통과우, 수간류, 토양수내 양료분석 내용으로, 주요 양이온 Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺와 주요 음이온 NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻와 분석하였다. 분석방법은 먼저 채취한 시료를 Whatman #42 filter paper(>2.5μm)로 1차 여과시킨 후 0.45μm filter paper로 2차 여과시킨 다음 양이온, 음이온 모두 Ion Chromatography(Dionex DX-500, USA)를 이용하여 분석하였다. 그리고 수관통과우, 수간류, 토양수 시료에서 pH측정은 KCl glass electrode meter로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 수관통과우 및 수간류를 통한 양료유입 양상

1) 강우유입량

연구 대상지역에서 연구기간(1998년 5월에서 9월까지)내 유입된 강우량은 총 1410.1mm였다. 이는 같은 연구대상지에서 6년간(1989-1994) 조사한 평균 강우량 1316.9mm(이돈구 등, 1997)에 비해 많은 양으로, 특히 7월과 8월에 걸쳐 많은 강우가 유입되었다. 월별 강우의 분포는 아래 표 2에 나타났다. 월별 강우분포 양상을 볼 때 우리나라 기후의 특성대로 6월에서 8월에 걸쳐 강우가 집중적으로 유입된 것을 알 수 있다.

2) 수관통과우, 수간류 유입량

조사기간내 임분별로 유입된 수관통과우량과 수간류량은 표 3과 같다. 본 연구의 경우, 임분별 강우유입 양상의 차이는 기상인자의 영향이 지리적으로 각 임분이 가까운 곳에 서로 위치하기에 비교적 미세한 차이를 보인다고 가정하여, 주로 임분구조 인자에 따른 차이로 이해할 수 있다. 4개 임분별로 임내 강우유입량을 볼 때, 낙엽송림이 가장 많았으며 잣나무 간벌림, 잣나무 하예림, 활엽수림의 순이었다. 수관통과우량의 경우, 낙엽송림이 85%, 잣나무 간벌림이 84.5%, 잣나무 하예림이 83.2%, 활엽수림이 81.2%로 활엽수림보다는 침엽수림이 높았다.

Table 2. Monthly rainfall at the study area (May to September, 1998)

Month	May	June	July	August	September	Sum
Rainfall (mm)	91.2	256.3	321.4	601.6	139.6	1410.1

Table 3. Monthly distribution of rainfall, throughfall and stemflow at the study sites

Month	RF	<i>P. koraiensis</i> (thinned)		<i>P. koraiensis</i> (unthinned)		Hardwood		<i>L. leptolepis</i>	
		TF	SF	TF	SF	TF	SF	TF	SF
May	91.2 (100)	71.9 (78.9)	0.6 (0.7)	69.9 (76.6)	0.7 (0.8)	72.2 (79.2)	1.7 (1.8)	72.4 (79.4)	0.5 (0.5)
June	256.3 (100)	210.0 (82.0)	2.3 (0.9)	206.4 (80.5)	2.8 (1.1)	204.1 (79.6)	5.6 (2.2)	213.3 (83.2)	1.3 (0.5)
July	321.4 (100)	270.3 (84.1)	3.6 (1.1)	266.3 (82.8)	3.9 (1.2)	262.2 (81.6)	8.4 (2.6)	270.9 (84.3)	2.2 (0.7)
August	601.6 (100)	527.4 (87.7)	9.6 (1.6)	524.5 (87.2)	10.0 (1.7)	502.2 (83.5)	20.0 (3.3)	530.3 (88.1)	6.0 (1.0)
September	139.6 (100)	112.3 (80.4)	1.0 (0.7)	105.8 (75.8)	1.1 (0.8)	104.2 (74.7)	2.0 (1.4)	111.9 (80.1)	0.8 (0.6)
Total	1410.1 (100)	1191.8 (84.5)	17.1 (1.2)	1172.8 (83.2)	18.5 (1.3)	1145.0 (81.2)	37.6 (2.7)	1198.7 (85.0)	10.8 (0.8)

Note : RF - Rainfall, TF- Throughfall, SF- Stemflow.
The numbers in parentheses denote percentage.

침엽수와 활엽수 임상별 강우유입량의 차이는 주로 착엽시기의 차이에서 기인한다. 일반적으로 침엽수와 활엽수 임분에서 강우유입량을 보면 활엽수 임분이 침엽수 임분보다 더 높는데(김경하, 1993), 본 연구에서 이처럼 활엽수림내 강우유입량이 낮은 이유는 측정기간이 수목 생장기간으로, 활엽수의 엽면적 지수가 상대적으로 높은 시기에 이루어졌기 때문이며(김경하, 1993) 활엽수림의 경우, 비교적 넓은 잎의 구조를 가져 엽을 포화하는데 많은 양의 수분이 필요했기 때문으로 여겨진다(이돈구 등, 1997). 즉, 이에 대한 정확한 구명은 착엽시기와 비착엽시기 4계절의 조사가 모두 이루어져야 할 것이다.

임분별로 유입된 수간류량은 활엽수림(2.7%), 잣나무 하예림(1.3%), 잣나무 간벌림(1.2%), 낙엽송림(0.8%)의 순으로 나타났다. 잣나무와 낙엽송림에 비해 활엽수림에서 2배 이상 높게 나온 것은 수형과 수피구조의 차이에 따른 것으로 생각된다. 수형의 경우, 잣나무와 낙엽송의 가지분포가 수평적인데 반해 활엽수류는 전반적인 수형이 깔대기 모양으로 수간류 집적에 영향을 미쳤을 것으로 생각되고(이돈구 등, 1997) 수피구조에서도 낙엽송과 잣나무의 수피가 습적 포화도가 높은 반면에 연구대상지인 활엽수림에서 상층수종을 이루는 굴참나무는 수피표면에 코르크층이

발달하여 비교적 습적포화도가 낮고 수간류가 집적되기 좋은 수피구조를 가진 것으로 판단된다.

3) 수관통과우, 수간류내 이온농도

연구기간내 임분에 유입된 수관통과우와 수간류내 이온농도를 분석하였다(표 4). 표에서 보면 강우가 임분에 유입되면서 화학적 성분이 많이 변화된 것을 알 수 있다. 강우가 수관층을 통과하면서 어떤 성분은 수관층에서 흡수되고 엽내 양료가 용탈되기도 하며 엽 표면에 집적되어 있던 대기 강하물이 세탈되어 수관통과우와 수간류에서 화학적 조성이 변화게 된다. 본 연구에서는 강우, 수관통과우, 수간류의 농도를 각각 비교하였는데 수간류에서 가장 높게 나왔다.

강우의 강도나 경과시간 등 이와 관련한 연구에서 수관통과우내 양료농도는 강우량과 강한 음의 상관관을 보여준다. 그리고 시기별로 유입된 수관통과우와 수간류의 농도의 차이도 크게 났는데, 이는 강우량, 강우강도, 강우시기 등 강우특성의 영향을 강하게 받기 때문이다(Parker, 1983). 즉, 이러한 양료 농도는 시기별로 임분별로 큰 차이를 나타내며 특히 활엽수의 경우 착엽시기와 낙엽시기에 따라 많은 변이를 보이고 수관통과우와 수간류내 집적된 양료는 시간이나 공간에 따라 수문적, 양료 순환적으로 많은 변이를 가진다.

Table 4. Average ion concentrations in the throughfall and stemflow at the study sites

Month	Type	Na ⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
May	RF	0.30	1.79	2.14	0.00	1.35	3.97	1.04	4.86
	P1TF	0.31	2.25	2.58	0.06	0.55	1.95	3.74	4.94
	P1SF	1.03	4.85	3.42	0.50	2.92	3.59	3.84	6.20
	P2TF	0.34	2.62	2.01	0.10	0.80	2.12	3.61	5.34
	P2SF	0.80	4.86	2.52	0.43	2.75	3.43	4.49	5.38
	LTF	0.35	2.15	2.54	0.08	0.76	2.04	2.83	4.17
	LSF	1.10	5.58	3.21	0.40	1.60	3.31	3.84	7.11
	HTF	0.39	1.53	1.87	0.45	1.50	0.78	2.53	3.33
	HSF	0.43	1.89	2.25	0.40	1.84	3.42	4.89	6.08
June	RF	0.45	2.02	0.69	0.06	0.10	1.96	1.78	3.56
	P1TF	0.63	2.43	1.94	0.15	0.43	1.56	3.96	4.63
	P1SF	1.26	3.35	2.68	0.68	1.44	2.67	3.35	5.32
	P2TF	0.98	2.66	2.13	0.20	1.07	1.59	2.80	3.04
	P2SF	1.26	3.64	2.91	0.52	1.68	2.28	3.24	5.37
	LTF	1.01	2.29	1.83	0.29	0.83	2.54	2.85	3.29
	LSF	2.11	3.90	3.12	0.71	2.30	2.07	2.39	5.69
	HTF	0.69	2.32	1.86	0.36	0.83	1.20	2.91	4.93
	HSF	1.02	3.42	2.73	0.38	0.98	2.46	3.29	4.00
July	RF	0.60	1.97	0.78	0.12	0.35	1.84	2.02	3.38
	P1TF	0.80	2.83	0.77	0.01	0.39	1.27	2.09	3.67
	P1SF	0.77	2.95	1.70	0.07	0.71	1.75	2.38	3.63
	P2TF	0.80	2.33	0.77	0.01	0.65	1.08	2.05	3.05
	P2SF	0.72	3.04	1.34	0.04	1.21	1.44	2.71	4.64
	LTF	0.70	2.69	2.38	0.13	1.01	1.25	1.71	3.01
	LSF	1.04	2.87	3.23	0.23	1.45	2.27	2.46	4.15
	HTF	0.53	2.37	2.52	0.08	0.65	1.38	2.09	3.99
	HSF	0.91	3.00	4.03	0.57	1.35	1.93	3.07	4.95
August	RF	1.14	2.53	0.61	0.04	0.21	0.91	1.35	2.98
	P1TF	0.67	2.36	0.69	0.06	0.32	1.54	2.32	5.29
	P1SF	0.83	2.22	1.42	0.23	1.26	2.50	3.31	5.99
	P2TF	0.68	2.01	1.13	0.16	0.92	1.54	3.62	4.31
	P2SF	0.68	2.01	1.13	0.16	0.92	1.58	3.04	4.43
	LTF	0.95	2.87	1.86	0.08	0.30	1.37	3.62	4.58
	LSF	1.08	2.47	4.66	0.17	0.61	2.26	3.47	4.98
	HTF	1.00	1.75	1.00	0.10	0.42	1.22	1.86	3.90
	HSF	1.07	1.84	2.35	0.18	0.91	1.04	1.68	3.53
September	RF	1.17	2.58	0.78	0.04	0.20	2.41	3.42	5.41
	P1TF	0.80	2.76	0.98	0.06	0.64	3.58	6.84	5.90
	P1SF	1.30	3.65	2.05	0.27	3.02	4.27	8.16	4.89
	P2TF	1.14	3.24	1.13	0.06	0.55	1.26	2.41	4.30
	P2SF	0.72	2.12	1.52	0.15	1.69	2.09	3.99	6.45
	LTF	1.03	3.07	2.50	0.08	0.55	1.67	3.19	7.96
	LSF	0.16	0.50	0.72	0.03	0.16	2.53	4.84	6.51
	HTF	1.06	1.83	1.33	0.09	0.78	1.01	1.92	5.89
	HSF	0.95	1.63	1.66	0.14	0.33	1.02	1.94	3.71

Note : P1 : *P. koraiensis*(thinned), P2 : *P. koraiensis*(unthinned), L : *L. leptolepis*
H : Hardwood, RF : Rainfall, TF : Throughfall, SF : Stemflow

일반적으로 수관통과우와 수간류를 통한 시기별 양료유입동태에 영향을 미치는 주요 인자들로 는 강우량과 같은 기상인자와 임분구조의 차이가 있으며, 특히 활엽수의 경우 착엽시기에 따라 변이가 크다(Parker, 1983). 본 연구의 경우, 조사 시기가 대상임분 모두 착엽시기에 이루어졌으므로 시기별 양료유입은 특히 강우량의 분포가 많은 영향을 미쳤을 것으로 판단되며 그 결과 시기별 양료유입이 대체적으로 강우분포와 비슷한 경향을 나타냈다.

4) 임분별 양료유입량

임분별로 월 평균 수관통과우, 수간류를 통한 양료 유입량을 산출하였다(표 5). 수종간 양료유입에 관련한 연구를 보면 활엽수림이 침엽수림보다 양료 유입량이 높는데(Cole과 Rapp, 1981), 본 연구에서는 낙엽송림이 총 3.70g/m²/month, 잣나무 간벌림이 3.48g/m²/month, 잣나무 하예림이 3.27g/m²/month, 활엽수림이 3.04g/m²/month로, 낙엽송림에서 가장 높게 유입되었다. 이는 낙엽송림이 임분내 강우 유입량에서 타 임분에 비해 많고 수관통과우, 수간류내 양료농도가 높아서인 것으로 여겨진다. 동일한 연구대상지에서 수관통과우와 수간류를 통해 유입되는 질소의 양을 조사한 서강육과 이돈구(1988)의 연구결과와 비교해보면 잣나무 임분에서 암모늄태 질소의 경우 월별 약 2.64kg/ha가 유입됐다고 했는데 본 연구 결과에서는 약 2배 더 높게 유입된 것으로 나타났다. 이러한 유입량의 차이는 시료 분석에 있어서 방법의 차이도 있겠으나, 조사시기의 차이로 인해 유입되는 강우량과 전성강하물 집적량의 차이에 따른 결과로 생각된다.

이온별로 유입량을 살펴보면, SO₄²⁻이온 유입이 가장 컸고 N의 경우 질산태(NO₃⁻)가 암모늄태(NH₄⁺)에 비해 약간 높게 유입된 것으로 나타났다.

2. 수관통과우, 수간류내 양료동태 특성

1) 강우, 수관통과우, 수간류 pH 변이

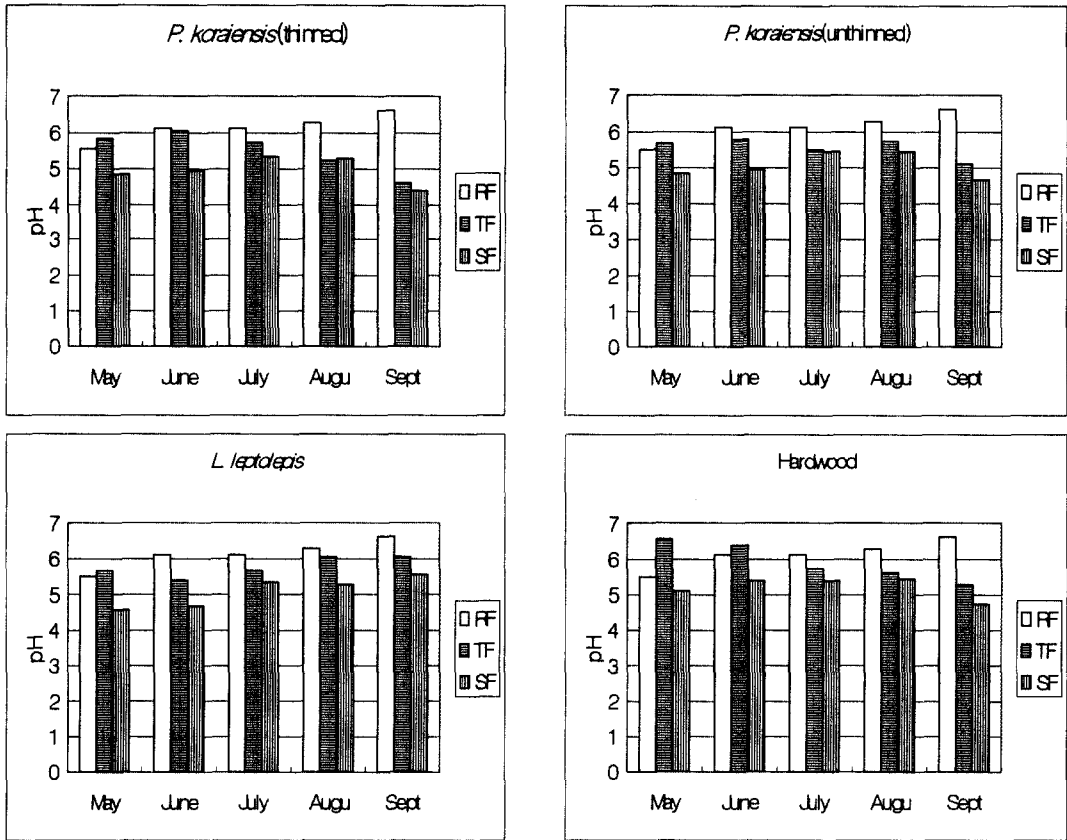
pH는 양료동태에 있어 직접적, 간접적으로 중요한 영향을 미친다. 그래서 임분간 강우, 수관통과우, 수간류의 pH변이를 월별로 알아보았다(그림 2). 강우, 수관통과우, 수간류 pH는 4임분 모두에서 수간류가 가장 낮게 나타났는데, 이는 오래동안 수피부분에 축적된 대기 강하물이 강우와 함께 수간을 타고 내려오는 것과 수피부분이 풍화되면서 수소이온을 생성하기 때문이다(장관순과 이수옥, 1995). 이런 수간류의 경우, 산도가 높은 채로 토양에 바로 흡수되기에, 토양내 양이온들을 용탈시키는 등 토양 산성화에 큰 원인이 된다(佐々朋幸 등, 1993). 또한 수용성으로 임상에 유입되기에 수목의 뿌리가 토양내 양료를 흡수하는데 있어 직접적인 영향을 미친다. 임분간 pH 비교에서는 일반적으로 침엽수에서 발생된 수관통과우가 동일지역의 활엽수보다 더 산성을 나타낸다(Parker, 1983). 일부 침엽수종의 경우 강우를 산성화 시키는 기능을 하고 이에 따라 토양 산성화에 영향을 미친다(Cronan과 Reiners, 1983). 대기 오염물질의 축적은 활엽수 임분보다는 침엽수 임분의 수관층에서 높으며 이러한 차이가 토양의 산성화에 영향을 미친다(Baker 등, 1977).

최근에도 산성우가 심한 지역에서 활엽수종의 산성 중화능력에 대한 연구가 많이 진행되고 있

Table 5. Average amount of ion input(g/m²/month) at the study sites

Type	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
P1TSF	0.17	0.61	0.26	0.02	0.10	0.41	0.74	1.17
P2TSF	0.19	0.56	0.31	0.03	0.20	0.35	0.72	0.92
LTSF	0.21	0.65	0.50	0.03	0.15	0.39	0.72	1.04
HTSF	0.19	0.47	0.38	0.04	0.16	0.29	0.51	1.00

Note - P1TSF : throughfall and stemflow in *P. koraiensis*(thinned)
 P2TSF : throughfall and stemflow in *P. koraiensis*(unthinned)
 LTSF : throughfall and stemflow in *L. leptolepis*
 HTSF : throughfall and stemflow in hardwood



RF : Rainfall, TF : Throughfall, SF : Stemflow

Fig. 2. The acidity of rainfall, throughfall and stemflow at the study sites

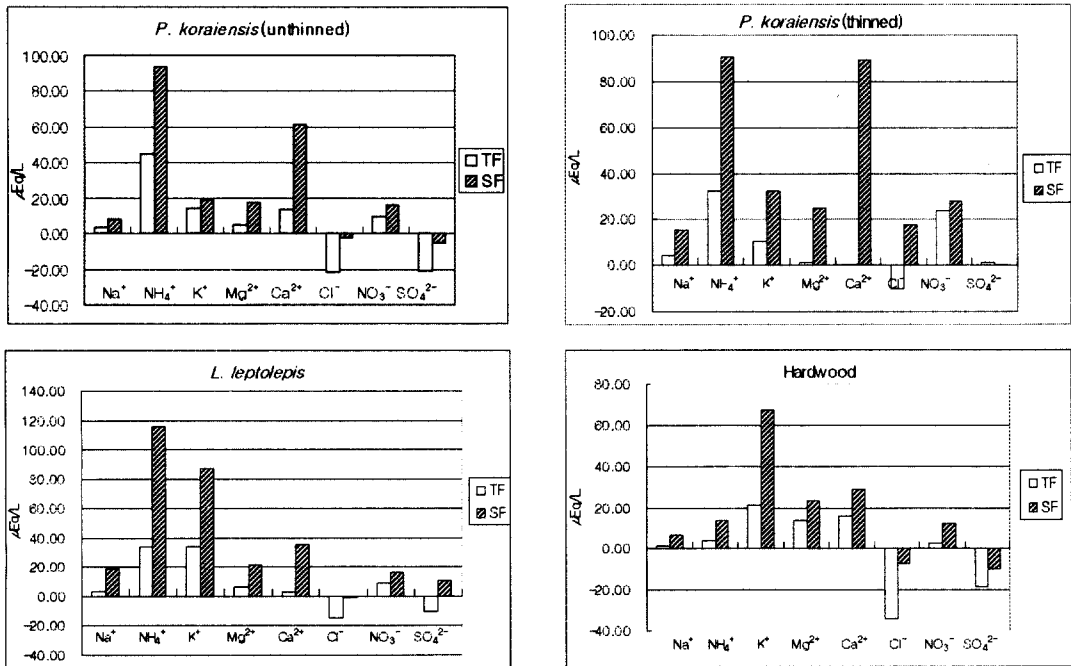
으나 본 연구에서는 그림 2에서 처럼 강우가 산성을 띠는 5월의 경우, 4개 임분 모두에서 정도의 차이는 있으나 수관통과수가 산성을 중화시키는 것을 볼 수 있지만 정상 강우가 내린 나머지 기간에는 그 차이를 알 수 없고 또한 임분별로 차이는 있으나 오히려 정상 강우보다 낮아진 경향을 볼 수 있다. 즉, 산성우가 내렸을 때 모든 임분에서 수관통과수의 pH가 강우에 비해 높았으나 정상 강우의 pH인 5.6 이상에서는 오히려 수관통과수의 pH가 낮아지는 것을 볼 수 있으며 이러한 현상은 4개 임분 모두에서 공통적으로 나타났다. 일반적으로 산성우 유입시, 강우내 수소이온이 엽내 양이온과의 치환작용으로 인해 산도가 높아진다는 연구결과(Lovett 등, 1985; Cappellato 등, 1993)는 이미 많이 발표되었는데, 본 연구의 결과에서 처럼 정상 강우의 pH가 오히려 낮아진

것은 적다. 대기에서 SO_4^{2-} , NO_3^- 같은 산성물질의 유입으로 인한 영향과 엽내 큐티클층의 산화로 인한 유기산의 용탈의 영향이라는 결과(Hoffman 등, 1980)도 있으나 이러한 pH변이가 모든 정상 강우에서 산성으로 변한 것은 아니기에 이에 대한 지속적인 관찰이 필요하다고 생각된다.

2) 임분별 수관통과수, 수간류 농도 변화

수관은 공해물질을 포함한 대기 강하물에 있어 여과기와 같은 기능을 하는데 현재처럼 산업화된 환경에 있어 이는 생태학적으로 중요한 의미를 지닌다(Amezaga 등, 1997). 또한 수관은 자체 조절능력을 지니고 있어 어떤 양료가 결핍시에 그 양료의 용탈을 최소화시키고 강우로부터 양료를 직접 흡수하는 기능을 한다.

임분별로 수관층을 통과한 후 수관통과수와 수간류의 농도 변화를 살펴보았다(그림 3).



TF : Throughfall, SF : Stemflow

Fig. 3. Changes in the ion concentrations of the throughfall and stemflow at the study sites

그림에서 처럼 거의 모든 이온이 증가하였고 Cl⁻이온은 감소한 현상을 보여주었다. 또 활엽수림의 경우 가장 크게 증가한 이온은 K⁺인 반면 잣나무림과 낙엽송림에서 NH₄⁺이온이 가장 크게 증가하였다. 활엽수의 경우, K⁺의 유입은 주로 수관층의 엽에서 용탈된 것들이 많았고(Lovett 등, 1985) 침엽수 임분에서 NH₄⁺이온이 크게 증가한 것은 K⁺와 같이 엽내 양료의 용탈이라기 보다 대기로부터 유입된 건성강하물이 수관과 수간부에 집적되어 있다가 강우와 함께 씻겨 내려간 것으로 여겨지며 활엽수는 한번의 강우에 이런 건성강하물이 일시에 씻겨 내려가기 쉬운 수관구조인 반면 침엽수는 건성강하물 집적에 있어 활엽수보다 유리한 수관구조를 지니고 있다(Lovett과 Lindberg, 1984). 즉, NH₄⁺이온이 침엽수 임분에서 크게 증가한 것은 수관구조의 형태적 차이에 따른 건성강하물 집적의 차이에 따른 결과로 판단된다.

강우가 수관층을 통과하여 용탈되는 양상은 강우의 화학적 성질과 수목의 구조와 생리적 특성에 따라 달라진다. 강우의 화학적 성분은 수관층

을 통과하면서 일반적으로 변화하게 된다. 여기에 기여하는 것은 건성강하물의 세탈, 수목의 흡수와 용탈, 미생물의 활동(Miller와 Miller, 1980) 등이 있다. 본 연구결과에서 낙엽송의 경우, 침엽수종 임에도 불구하고 K⁺의 유입이 활엽수림보다 더 크게 나타났는데, 이는 같은 침엽수종 일지라도 수중에 따라 양료유입 양상에 있어 차이가 있음을 보여주었다. 또한 토양에서 강한 산성을 유발하는 SO₄²⁻, NO₃⁻는 잣나무와 낙엽송 같은 침엽수 임분에서 활엽수림에 비해 많이 유입되는 경향을 보여주었다.

3. 토양수내 양료동태 특성

1) 토양수 pH 변이

각 임분별로 유출되는 토양수내 pH변이를 토심 30cm, 50cm 부위에서 알아보았다(그림 4).

토양수 중에서도 근계부에 있는 토양수의 경우, 뿌리의 양분 흡수에 직접적인 영향을 미치기에 매우 중요하다. 그러나 근계부에 있는 토양수의 양료함량은 일반적인 토양수내 양료와 다른데, 이는 뿌리의 삼투, 양료흡수, 근계부에 있는

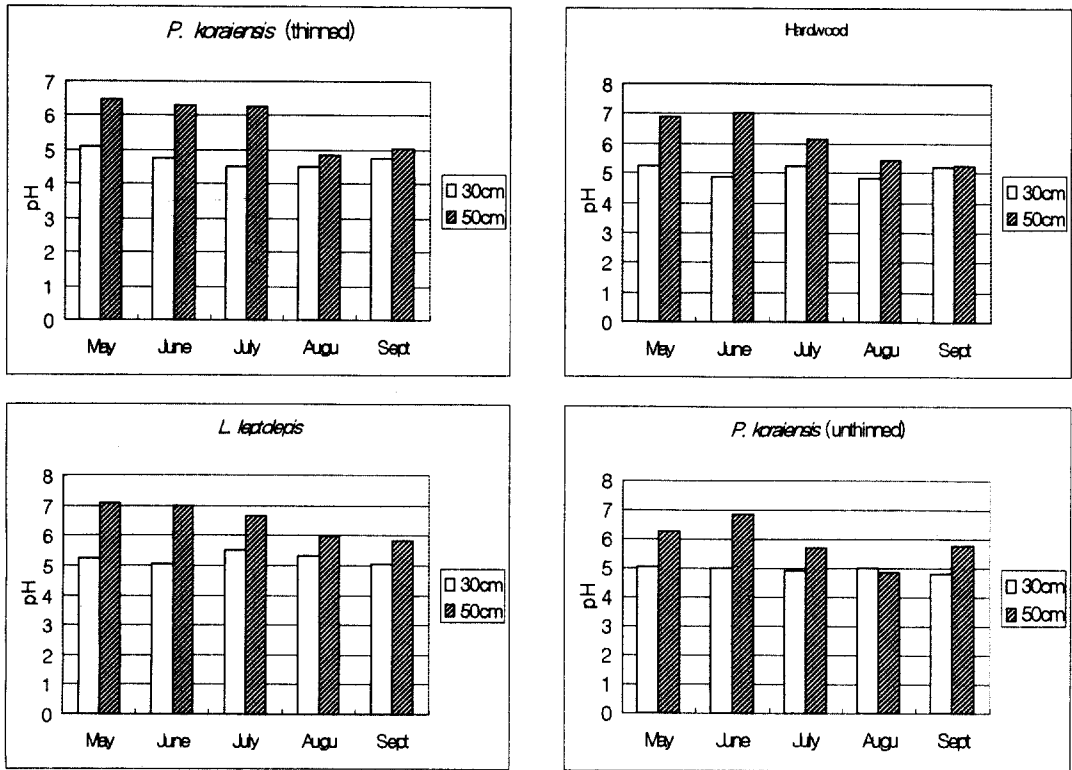


Fig. 4. Acidity of soil solution collected at two different depths of the study sites

미생물의 활동 때문이다. 수목의 뿌리는 주변토양의 산도를 H⁺와 OH⁻의 교환을 통해 완화시킬 수 있다. 그 기작은 수목뿌리의 경우, 양료를 흡수할 때 이온균형을 이루려고 하는데 있다. 즉, 뿌리가 음이온을 많이 흡수하게 되면 OH⁻가 토양으로 그 만큼 나오게 되고 양이온을 많이 흡수하게 되면, H⁺가 토양으로 나오게 된다. 이로 인해 뿌리 주변의 토양의 산도에 영향을 미치게 된다.

본 연구는 토심 30cm와 50cm에서 각각 조사하였는데, 토심 30cm부위에서 모든 임분이 산성을 보였으나, 50cm부위에서는 pH가 6~7사이로 증가하여 토심에 따른 산도 완충능력을 보여주었다. 이런 결과가 나온 것은 토심이 깊어질수록 토양 표면에 있던 양이온의 용탈과 알카리성 양료의 풍화에 따라 산성이 중화된 것으로 판단된다(Baumler와 Zech, 1998).

시기에 따른 pH변이를 볼 때, 토심 30cm부위에서는 시기별 변이가 보이지 않으나, 50cm부위에서는 7월을 기준으로 pH가 감소하였다.

2) 토양수내 이온농도

토양내 풍화 1차산물과 2차산물인 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)과 몇몇 음이온(PO₄³⁻, SO₄²⁻)의 경우 토양수를 통해 수목에게 공급되게 된다(Cole, 1995). 임분간 토심이 다른 두 지점에서 월별로 채취한 토양수의 이온 농도(표 6)를 보면, 수관통과수와 수간류내 양료농도와 비교하여 토양수내 양료 농도의 경우 공간별, 시기별로 변이가 크을 알 수 있다. Fernandez 등(1995)은 토양수내 이온별로 계절적인 양상이 있는지를 5년간 살펴보았는데 NO₃⁻이온이 겨울철 눈이 녹으면서 토양내 유입되는 것과 미량이나 임상에서의 흡수를 통한 유입으로 겨울철에 유입량이 증가하는 경향을 나타냈으나 그 외 Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, K⁺의 경우, 계절별로 경향이 확실히 보이지 않았다고 하였다. 즉, 본 연구결과에서처럼 변이가 큰 것은 토양내 양료 분포가 공간적으로 변이가 매우 크기때문으로 생각된다(Meredieu 등, 1996).

임분별 비교에서 활엽수림의 이온 농도가 다른

Table 6. Average ion concentrations in the soil solution at two different soil depths of the study sites

Month	Type	Na ⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
May	P1-30	5.06	3.51	3.82	7.78	13.39	17.47	25.95	19.75
	P1-50	13.56	3.14	1.15	6.10	4.64	13.42	24.04	13.04
	P2-30	6.72	2.16	3.12	4.72	13.15	19.72	26.16	13.86
	P2-50	6.09	2.77	2.56	7.92	16.82	23.19	28.76	14.29
	L-30	10.10	5.01	3.61	6.96	7.66	18.68	20.71	10.76
	L-50	4.09	3.16	1.50	5.26	12.55	8.51	23.01	7.59
	H-30	6.56	3.17	4.45	5.34	11.31	11.25	24.95	11.34
	H-50	5.53	2.38	7.77	3.92	9.10	11.05	11.17	11.06
June	P1-30	8.85	2.16	1.68	4.64	16.74	14.55	25.25	12.38
	P1-50	6.60	3.00	1.28	3.71	10.01	10.06	13.95	4.81
	P2-30	7.33	2.98	2.39	4.73	13.69	8.00	18.62	7.35
	P2-50	8.35	2.90	1.21	4.82	12.32	11.09	21.48	7.58
	L-30	5.77	2.21	2.61	5.20	15.55	9.40	22.12	11.67
	L-50	9.85	2.76	1.59	7.08	12.92	23.99	26.10	9.46
	H-30	5.46	1.92	3.66	8.05	15.92	7.72	34.36	9.86
	H-50	4.14	1.40	1.31	4.53	6.14	10.35	17.49	8.22
July	P1-30	3.68	1.18	0.81	2.00	9.82	4.87	24.54	6.46
	P1-50	3.93	1.24	0.83	2.29	9.92	2.70	10.70	5.45
	P2-30	4.03	2.50	1.54	2.94	14.80	4.35	11.25	8.13
	P2-50	2.69	1.61	1.49	2.52	11.26	4.25	9.30	6.74
	L-30	3.37	1.35	0.99	2.71	9.58	3.96	14.03	9.27
	L-50	3.78	1.95	1.17	2.50	10.31	4.46	14.36	9.31
	H-30	2.09	1.31	4.10	6.07	17.29	2.36	24.79	10.91
	H-50	3.02	1.41	1.71	5.46	11.57	3.60	20.63	4.15
August	P1-30	3.36	1.70	1.27	2.81	9.67	2.32	17.86	10.61
	P1-50	5.58	2.32	1.44	2.91	13.20	1.93	14.17	10.18
	P2-30	2.93	1.24	1.71	1.01	7.43	2.99	10.58	7.56
	P2-50	2.09	0.97	1.70	1.85	5.96	1.72	13.18	10.56
	L-30	3.76	2.25	2.72	2.23	6.57	2.61	11.07	8.21
	L-50	5.65	2.80	2.81	2.47	3.60	2.99	23.14	5.46
	H-30	4.13	2.06	3.51	3.34	10.60	3.22	9.70	10.37
	H-50	3.00	0.82	2.72	4.09	10.25	2.68	25.35	6.32
September	P1-30	3.74	1.79	1.26	2.50	10.44	3.19	18.96	10.13
	P1-50	5.58	2.32	1.44	2.91	13.20	4.84	13.51	11.00
	P2-30	2.93	1.24	1.71	1.01	7.43	1.92	5.89	5.77
	P2-50	2.09	0.97	1.70	1.85	5.96	1.94	3.71	4.09
	L-30	3.76	2.25	2.72	2.23	6.57	6.84	9.90	7.93
	L-50	5.65	2.80	2.81	2.47	7.38	8.16	10.89	10.45
	H-30	4.13	2.06	3.51	3.34	10.60	2.41	4.30	6.68
	H-50	3.00	0.82	2.72	4.09	10.25	3.99	13.45	8.57

Note - P1-30 : soil depth 30cm, P1-50 : soil depth 50cm in *P. koraiensis*(thinned)
 P2-30 : soil depth 30cm, P2-50 : soil depth 50cm in *P. koraiensis*(unthinned)
 L-30 : soil depth 30cm, L-50 : soil depth 50cm in *L. leptolepis*
 H-30 : soil depth 30cm, L-50 : soil depth 50cm in hardwood

침엽수 임분에 비해 조금 높게 나왔는데, 이러한 결과는 활엽수 임분이 침엽수 임분에 비해 수목의 양료 요구도가 상대적으로 높고 양료유입량, 유출량도 크기 때문으로 판단된다.

이온별 농도 비교에서는 수관통과수와 수간류의 경우와 달리 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 의 순으로 높게 나타났다. 이들 이온은 수관통과수나 수간류에서는 낮은 농도를 나타냈으므로, 이들 이온들의 주 유입원이 대기로부터의 유입보다는 토양의 풍화임을 알 수 있다. 음이온의 경우 NO_3^- 이온이 가장 높았으며 Cl^- , SO_4^{2-} 의 순이었다. 특히 SO_4^{2-} 이온은 수관통과수와 수간류를 통한 임내 유입량이 가장 높았음에도 불구하고 토양수내 농도는 가장 낮게 나타났다. 이를 통해 SO_4^{2-} 의 경우 대기로부터 유입이 주 유입원임을 알 수 있다. 또한 수관통과수와 수간류내 양료 농도에서는 NH_4^+ 이온과 NO_3^- 이온이 비슷하였으나 토양수에서는 NH_4^+ 이온에 비해 NO_3^- 이온이 많이 높았으며, 이렇게 NO_3^- 이온이 높은 것은 기본적으로 NO_3^- 이온 유출 뿐 아니라 암모늄태(NH_4^+)가 토양내로 유입되면서 상당량이 질산화작용에 의해 NO_3^- 의 형태로 전환된 것으로 판단된다(岡子光太郎 등, 1992). 임분내 산성우의 유입과 관련하여 음이온의 경우, NO_3^- , SO_4^{2-} 는 토양에 흡수되지 않거나 생물학적으로 불용화일 때 근계로부터 양이온의 용탈을 촉진시켜 토양 산성화에 영향을 미친다(Miegroet와 Cole, 1985). 이러한 NO_3^- , SO_4^{2-} 이온의 토양내 집적이 토양 산성화에 미치는 영향과 NO_3^- 이온 유출에 따른 하천오염 영향 등은 후속 연구에 의해 계속 밝혀져야 할 것이다.

결론

본 연구의 목적은 경기도 광주지방에서 잣나무림, 낙엽송림, 참나무류 위주의 활엽수림을 대상으로 임분간 수관통과수, 수간류를 통한 양료유입 양상을 비교하고 수관통과수, 수간류, 토양수별로 양료동태 특성을 알아보는데 있으며 그 결과는 다음과 같다.

임분별로 임내 강우량을 수관통과수와 수간류로 나누어서 살펴보았는데, 수관통과수량의 경우, 낙엽송림이 85%, 잣나무 간벌림이 84.5%, 잣나무 하예림이 83.2%, 활엽수림이 81.2%로 활엽수림보다는 침엽수림에서 높게 나타났다. 수간류의 경우, 활엽수림이 2.7%, 잣나무 하예림이 1.3%,

잣나무 간벌림이 1.2%, 낙엽송림이 0.8%로 활엽수림이 침엽수림에 비해 높게 나타났다. 총 임내 강우 유입량은 낙엽송림이 가장 많았으며 잣나무 간벌림, 잣나무 하예림, 활엽수림의 순이었다.

월별 양료유입 동태는 강우 분포와 유사한 경향을 나타냈으며, 임분별로 양료 유입량은 낙엽송림이 총 $3.70g/m^2/month$ 로, 4개 임분 중 가장 높았고 잣나무 간벌림 $3.48g/m^2/month$, 잣나무 하예림 $3.27g/m^2/month$, 활엽수림 $3.04g/m^2/month$ 의 순이었다.

강우, 수관통과수, 수간류의 pH 측정결과, 수간류가 가장 낮았으며, 토양수의 pH는 토심 30cm 부위에서 모든 임분이 산성을 보였으나, 50cm 부위에서는 pH가 6-7사이로 증가하여 토심이 증가함에 따라 산도가 낮아지는 경향이였다.

강우가 수관층을 통과한 후 수관통과수와 수간류의 농도 변화를 살펴보았는데, 활엽수림의 경우 가장 크게 증가한 이온이 K^+ 인 반면 잣나무림과 낙엽송림에서 NH_4^+ 이온이 가장 크게 증가하여 침엽수와 활엽수에 따라 각기 다른 양상을 나타냈다.

강우, 수관통과수, 수간류내 평균 이온농도는 수간류가 가장 높았으며 임분별로 평균 이온 농도는 양이온, 음이온 모두 낙엽송림, 잣나무림, 활엽수림의 순으로, 활엽수림에 비해 침엽수림에서 높게 나왔다. 이와 달리 임분별 토양수내 평균 이온 농도는 활엽수림이 침엽수림보다 높았다.

이온별로 농도의 비교결과, 수관통과수와 수간류내 양이온은 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 의 순으로 높게 나타났으며 음이온은 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 의 순으로 높게 나타났다. 토양수내 양이온은 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 의 순으로 높게 나타났고 음이온의 경우, NO_3^- 이온이 가장 높았으며 Cl^- , SO_4^{2-} 의 순으로 나타났다. 이 중 NH_4^+ , K^+ 는 수관통과수, 수간류로부터의 유입이 많았으며 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 는 토양내 풍화에 의한 유입이 많았다.

월별로 수관통과수, 수간류내 평균 이온농도는 강우 특성과 밀접한 연관이 있음을 시사했고 토양수내 평균 이온 농도는 수관통과수와 수간류에 비해 공간별, 시기별로 큰 변이를 보였다.

인용문헌

1. 김경하. 1993. 산림의 강우차단 손실량 추정 전산모형 개발에 관한 연구. 서울대학교 박

- 사학위 논문. 34-36 pp.
2. 김동엽 · 유정환 · 채지석 · 차순형. 1996. 대기 오염물질의 산림생태계내 유입과 토양의 화학적 특성 변화. 한국임학회지 85(1) : 84-95.
 3. 서강욱 · 이돈구. 1988. 경기도 광주지방의 신갈나무림과 잣나무림에서 수관통과류와 수간류의 질소량. 서울대 농생대 연습림 연구보고 24 : 39-50.
 4. 이돈구 · 김갑태 · 주광영 · 김영수. 1997. 경기도 광주지방 잣나무림, 낙엽송림 및 참나무림에서 수관통과류, 수간류 및 차단손실. 한국임학회지 86(2) : 200-207.
 5. 이현호. 1997. 산지 물순환 소과정에 있어서 수질변화의 추적분석에 의한 산림의 환경적 정화기능의 계량화 연구. 한국임학회지 86(1) : 56-68.
 6. 장관순 · 이수욱. 1994. 산성우에 대한 산림생태계의 민감도 및 자정기능(II) - 식생층과 토양층 용탈이온 분석을 중심으로 -. 한국임학회지 84(1) : 103-113.
 7. 凶子光太郎 · 生原喜久雄 · 相場芳憲. 1992. 2種の陰イオンを付加した森林土壤溶液における陽イオンの動態. 日林誌 74 : 185-193.
 8. 佐々朋辛 · 高橋忠辛 · 長谷川浩一. 1993. 特定樹種の樹幹流による土壤の酸性化抑制作用(II) 센ノキ, オニグルミについて. 日林誌 75 : 321-330.
 9. Amezaga, I., A. Gonzalez Arias, M. Domingo, A. Echeandia and M. Onaindia. 1997. Atmospheric deposition and canopy interactions for conifer and deciduous forests in northern Spain. Water, Air, Soil, Pollut. 97 : 303-313.
 10. Bäumler, R. and W. Zech. 1998. Soil solution chemistry and impact of forest thinning in mountain forests in the Bavarian Alps. For. Ecol. Manage. 108 : 231-238.
 11. Baker, J., D. Hocking and M. Nyborg. 1977. Acidity of open and intercepted precipitation in forests and effects on forest soils in Alberta, Canada. Water, Air, Soil, Pollut. 7 : 449-460.
 12. Cappellato, R., Norman E.P. and Harvey L.R. 1993. Acidic atmospheric deposition and canopy interactions of adjacent deciduous and coniferous forests in the Georgia Piedmont. Can. J. For. Res. 23 : 1114-1124.
 13. Cole, D.W. and M. Rapp. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. Pages 341-409 in D.E. Reichle ed. Dynamic Properties of Forest Ecosystems Cambridge Univ. Press, Cambridge.
 14. Cole, D.W. 1995. Soil nutrient supply in natural and managed forests. Plant and Soil. 168-169 : 43-53.
 15. Cronan, C.S. and W.A. Reiners. 1983. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. Oecologia. 59 : 216-223.
 16. Fernandez, I.J., G.B. Lawrence and Yowhan Son. 1995. Soil-solution chemistry in a low-elevation spruce-fir ecosystem, Howland, Maine. Water, Air, Soil, Pollut. 84 : 129-145.
 17. Helvey, J.D. and J.H. Patric. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. Water Resour. Res. 1(1) : 193-206.
 18. Hoffman, W.A., S.E. Lindberg and R. R. Turner. 1980. Precipitation acidity : the role of the forest canopy in acid exchange. J. Environ. Qual. 9 : 95-100.
 19. Johnson, D.W., D.C. West, D.E. Todd and L.K. Mann 1982. Effects of sawlog vs. whole-tree harvesting on the nitrogen, phosphorus, potassium and calcium budgets of an upland mixed oak forest. Soil Sci. Soc. Am. J. 46 : 1304-1309.
 20. Killingbeck, K.T. and M.K. Wali. 1978. Analysis of an North Dakota gallery forest, nutrient, trace element and productivity relations. Oikos 30 : 29-60.
 21. Larsen, J.B. 1995. Ecological stability of forests and sustainable silviculture. For. Ecol. Manage. 73 : 85-96.
 22. Lawrence, G.B. and M.B. David. 1996. Chemical evaluation of soil solution in acid forest soils. Soil Science. 161 : 298-313.
 23. Likens G.E. and F. Herbert Bormann. 1994. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag.
 24. Lindberg, S.E., R.C. Harriss and R.R. Turner. 1982. Atmospheric deposition of metals

- to forest vegetation. *Science* 215 : 1609-1611.
25. Lindberg, S.E., R.C. Harriss, W.A. Hoffman, Jr., G.H. Lovett and R.R. Turner. 1989. Atmospheric chemistry, deposition and canopy interactions. Pages 96-163 in D.W. Johnson and R.I. Van Hook, eds. *Analysis of Biogeochemical Cycling Processes in Walker Branch Watershed*. Springer-Verlag.
26. 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.
27. Lovett, G.M., S.E. Lindberg, D.D. Richter and D.W. Johnson. 1985. The effects of acidic deposition on cation leaching from three deciduous forest canopies. *Can. J. For. Res.* 15 : 1055-1060.
28. Meredieu, C., D. Arrouays, M. Goulard and D. Auclair. 1996. Short range soil variability and its effect on red oak growth(*Quercus Rubra* L.). *Soil Science* 161 : 29-38.
29. Miegroet, H.V. and D.W. Cole. 1985. Acidification sources in red alder and Douglas fir soils—importance of nitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 1274-1279.
30. Miller, H.G. and J.D. Miller. 1980. Collection and retention of atmospheric pollutants by vegetation. Pages 33-40 in D. Drablos and A. Tollan, eds. *Ecological Impact of Acid Precipitation*. SNSF Project, Oslo-As.
31. Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.* 13 : 58-121.