

## 우리나라 참나무 천연림에 있어서 임내우의 수량변화 및 양분동태

진현오<sup>1</sup> · 손요환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 생태시스템공학과, <sup>2</sup>고려대학교 환경생태공학부  
(2007년 2월 22일 접수; 2007년 3월 9일 수락)

### Nutrient Dynamics and Water Quantity of Throughfall and Stemflow in Natural Oak Stands in Korea

Hyun-O Jin<sup>1</sup> and Yowhan Son<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Suwon, Korea

<sup>2</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

(Received February 22, 2007; Accepted March 9, 2007)

#### ABSTRACT

This study was conducted to investigate nutrient dynamics and water quantity of throughfall and stemflow in natural oak stands in Korea. The ratio of the total throughfall and stemflow to the amount of precipitation varied with locations. It was considered that the ratio was affected not only by the characteristics of tree species but also by regional, weather and other environmental conditions. It was, therefore, necessary to set up a water control system to launch a tending project for natural oak stands. Comparisons of nutrient amount in throughfall among regions reflected regional characteristics.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{K}^{+}$  ions were leached from the canopy and yellow sand accumulation.  $\text{Na}^{+}$  and  $\text{Cl}^{-}$  were marine-borne.  $\text{NO}_3^{-}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  resulted from dry deposition of air pollutants. Nutrient amount in the stemflow was as low as about 10% of that in the total throughfall and stemflow. The pH of stemflow in natural oak stands in urban areas ranged from 3 to 5. Influx of the acidic stemflow to soil could, in the long term, affect pH in soil solution and nutrient dynamics around root zones.

**Key words:** Nutrient dynamics, Water quantity, Throughfall, Stemflow, Nature oak stands

#### I. 서 론

산림생태계에 있어서 물질순환은 대부분 물을 통하여 이루어지게 된다. 이러한 물의 순환은 산림생태계 내에서 물질 및 양료순환의 주요한 매개체 역할을 하며, 이들 물질의 수직적 이동은 강우에 의해 크게 영향을 받는다(Likens and Bormann, 1994). 이 과정에서 산림은 수관의 차단에 의하여 지표면에 도달하는 강우량을 감소시키는 수량조절 기능 등의 물 수지 환경에 큰 영향을 준다. 또한, 산림생태계로 유입된 강우는 계 내부로부터 다양한 생물학적, 화학적, 물리적

작용을 받아 그 성질이 변화한다. 이러한 변화는 강우 자체의 이온성분과 대기로부터 유입된 건성강하물이 침착된 수체를 통과하면서 발생하는 이온의 흡수와 용탈, 세탈, 교환작용에 기인한다. 산림생태계에서의 강우의 수량 및 농도의 변화는 수종(Cappellato *et al.*, 1993), 지리조건(Macdonald *et al.*, 1992) 및 기후조건(Lovett and Lindberg, 1984) 등 여러 생태환경에 따라 크게 달라진다. 이와 같이, 산림생태계 내에서의 강우이동에 따른 양분동태는 기후변화, 산림쇠퇴, 그리고 제반 산림사업에 따른 다양한 산림생태계 변화에 대한 지표로 사용될 수 있다(Fernandez *et al.*, 1995). 최

근 우리나라에 있어서 산성우의 원인물질인 황산화물이나 질소산화물의 배출량이 급속히 증가하고 있으며 (Lee *et al.*, 2005), 이러한 산성우 및 산성강하물이 산림생태계에 미치는 영향이 우려되고 있다. 따라서, 강우이동에 따른 양분동태에 관한 연구는 단순히 물질순환 연구의 측면에서 뿐만 아니라 지구환경 변화에 따른 산림생태계의 피해 예측을 위하여 중요하다고 할 수 있다(Emmett *et al.*, 1998).

본 연구는 국내에 넓은 분포면적을 가지고 있는 유용 활엽수종으로 굴참나무(*Quercus variabilis*)와 신갈나무(*Q. mongolica*)가 주종을 이루는 우리나라 전역(북부, 중부, 남부, 대도시)의 참나무 천연림을 대상으로 물질순환의 과정뿐 아니라 향후 산림환경 변화를 예측하기 위하여 강우의 이동에 따른 입내우(수관통과 우와 수간류)의 수량변화 및 양분동태를 구명할 목적으로 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지 개황

조사지는 우리나라 북부(강원), 중부(경기), 남부(전남) 그리고 도시(서울) 지역에 분포하는 신갈나무와 굴참나무가 주종을 이루는 참나무 천연림을 조사 대상으로 선정하였다. 북부지역의 산림은 강원도 춘천시, 중부지역은 경기도 광주시, 남부지역은 전라남도 광양시에 위치하는 참나무 천연림을 각각 선정하였으며, 도

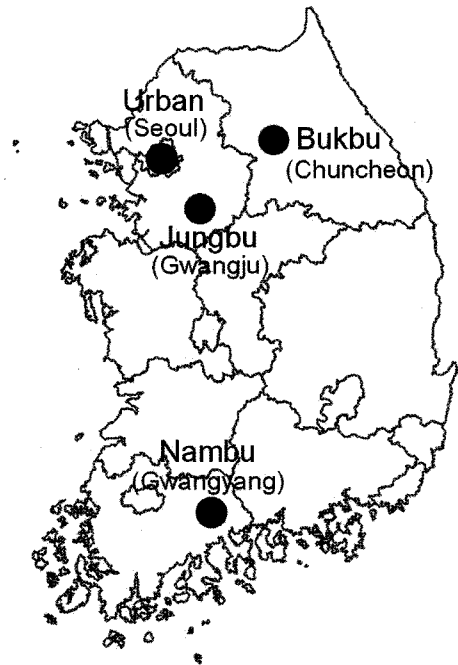


Fig. 1. Location map of the study sites.

시지역의 산림으로는 서울 남산에 분포하고 있는 참나무 천연림을 그 대상으로 선정하였다. 조사지의 위치 및 임분개황은 각각 Fig. 1, Table 1과 같다.

### 2.2. 조사방법

각 지역에 있어서 신갈나무와 굴참나무가 우점종인 참나무림에 400 m<sup>2</sup>(20m×20m)크기의 방형구를 설치

Table 1. The characteristics of the *Quercus* stands

Region	Stand	Dominant Species	Stand age	Stand density	Tree height	Average DBH	Basal area	Crown coverage
			(yr)	(No./ha)	(m)	(cm)	(m <sup>2</sup> /ha)	(%)
Bukbu	1	<i>Q. variabilis</i>	44	1,050	18.9	18.3	33.0	95
	2	<i>Q. mongolica</i>	50	650	26.8	26.9	39.0	95
	3	<i>Q. variabilis</i>	49	825	18.1	21.4	33.6	95
Jungbu	1	<i>Q. variabilis</i>	34	525	17.7	16.6	12.2	90
	2	<i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	31	1,425	18.7	12.1	20.5	70
	3	<i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	33	1,475	18.3	13.7	24.6	70
Nambu	1	<i>Q. variabilis</i>	37	2,450	10.3	9.2	18.8	80
	2	<i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	36	3,175	12.7	9.0	23.5	90
	3	<i>Q. variabilis</i>	38	2,900	14.3	10.2	26.6	85
Urban	1	<i>Q. mongolica</i>	46	775	14.0	16.2	25.3	95
	2	<i>Q. mongolica</i>	46	900	15.3	14.7	18.1	90
	3	<i>Q. mongolica</i>	52	1,050	14.3	13.4	18.4	90

하였다. 조사임분 내에 수관통과우, 수간류 채취장치를 3개씩 설치하였다. 수관통과우 채취장치는, 수간에 가까운 수관부, 수관중앙부 및 수관과 수관사이 하부의 지표면에 설치하였다. 그리고 수간류채취는 각 임분의 흉고직경 매목조사 결과 상, 중, 하에 해당하는 임목을 대상으로 하였다. 조사임분에 근접한 소개지에 임외우 채취장치 1개를 설치하였다. 임외우 및 수관통과우 채취장치는 25L 플라스틱 용기에 직경 200 mm 깔대기를 부착하여 제작하였으며, 채취장치의 깔대기에 망을 설치하여 이물질이 용기 내부로 들어가지 않게 하였다. 수간류 채취장치는 주름호스를 흉고위치의 수간에 부착한 후 PVC 호스를 통해서 185L의 플라스틱 용기에 집수되도록 제작하였다.

조사기간은 북부(2000. 9~2002. 8), 중부(2001. 3~2002. 11), 남부(2002. 3~2003. 11), 도시(2003. 3~2004. 11) 모든 지역에서 동결기를 포함하여 2년간이었다. 시료는 강우채취가 어려운 결빙기를 제외하고 2주 간격으로 채취하였다. 채취한 시료는 부피를 측정하고 filter paper(Toyo Co., No. 5B)로 여과한 후 pH, 양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ) 및 음이온( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ )의 농도를 측정하였다. pH 측정은 pH meter(Mettler-Toledo AG. CH-8603), 양이온 농도는 Atomic absorption spectro-photometer(Hitachi CO., Z-8230), 그리고 음이온 농도는 Ion chromatography

(SYKAM)를 이용하였다. 각 지역의 임외우와 수관통과우 및 수간류의 농도를 측정하여 각각 채수된 강우량을 이용하여 임분에 유입된 양분량을 계산하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수량변화

각 조사지 별로 임외우량에 대한 수관통과우량 비율을 보면(Table 2), 북부지역이 82.5%(79.1~85.4%), 중부지역이 92.2%(88.6~92.9%), 남부지역이 80.1%(75.7~82.6%), 그리고 도시지역이 71.9%(57.0~85.5%)로 나타나 중부지역이 타지역에 비하여 높은 값을, 도시지역은 타 지역에 비하여 낮은 값을 나타내었다. 경기도 광주지역의 굴참나무와 갈참나무가 주종을 이루는 참나무림의 수관통과우량 비율이 72.2%(Lee *et al.*, 1997), 81.2%(Park *et al.*, 1999)였다는 연구결과와 일본의 낙엽활엽수림의 수관통과우량 비율인 60~80%(Katagiri *et al.*, 1977)와 비교하면 본 연구의 경우 중부지역을 제외하고는 임외우량에 대한 수관통과우량의 비율이 72~83%로 거의 비슷한 값을 보였다. 각 조사지역 내 수종구성이 다른 임분간에 있어서 수관통과우량의 비율은 강원지역의 굴참나무 임분이 신갈나무 임분에 비하여 4~6% 높은 값을 나타내는 것 이외에는 다른 지역에 있어서 임분간 차이는 뚜렷하지

Table 2. Amounts of water in precipitation, throughfall and stemflow

Region	Stand	Species	Precipitation (mm)	Throughfall (mm)	Stemflow (mm)	Period
Bukbu	1	<i>Q. variabilis</i>	2,206	1,831 (83.0)*	78 (3.5)	2000. 9 ~2002. 8
	2	<i>Q. mongolica</i>		1,745 (79.1)	65 (2.9)	
	3	<i>Q. variabilis</i>		1,884 (85.4)	79 (3.6)	
		Average		1,820 (82.5)	74 (3.4)	
Jungbu	1	<i>Q. variabilis</i>	2,417	2,246 (92.9)	70 (2.9)	2001. 3 ~2002. 11
	2	<i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>		2,141 (88.6)	115 (4.8)	
	3	<i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>		2,180 (90.2)	119 (4.9)	
		Average		2,229 (92.2)	102 (4.2)	
Nambu	1	<i>Q. variabilis</i>	4,783	3,953 (82.6)	396 (8.3)	2002. 3 ~2003. 11
	2	<i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>		3,912 (81.8)	553 (11.6)	
	3	<i>Q. variabilis</i>		3,621 (75.7)	507 (10.6)	
		Average		3,829 (80.1)	485 (10.1)	
Urban	1	<i>Q. mongolica</i>	3,734	3,194 (85.5)	401 (10.7)	2003. 3 ~2004. 11
	2	<i>Q. mongolica</i>		2,130 (57.0)	350 (9.4)	
	3	<i>Q. mongolica</i>		2,726 (73.0)	538 (14.4)	
		Average		2,683 (71.9)	430 (11.5)	

\* : The numbers in parentheses denote percentage.

않았다.

수중간, 동일수중간에 있어서 수관통과우량 비율은 선형연구(Hancock and Crowther, 1979; Herwitz, 1985)에서 밝혀졌듯이 수관올폐도, 임목밀도, 엽면적지수, 흉고단면적 등의 임분구조 인자에 큰 영향을 받는다고 보고되고 있다. 따라서 본 연구 결과와 같이 지역간, 또는 동일지역간에 있어서 수관통과우량 비율에서 큰 차이를 보이는 원인은 분명하지 않으나, 입지조건에 따른 임분구조나, 같은 입지내의 성장차이 등의 요인에 크게 지배를 받는다고 생각된다.

임외우량에 대한 수간류량 비율은 북부지역, 중부지역, 남부지역, 그리고 도시지역이 각각 3.4%, 4.2%, 10.1%, 11.5% 로 나타내어, 북부지역과 중부지역에서

낮은 값을 남부지역과 도시지역에서 높은 값을 나타냈다. 이 값을 경기도 광주지역의 참나무림의 수간류량 비율인 2.7%(Park *et al.*, 1999)와 3.9%(Lee *et al.*, 1997)와 비교하면, 북부지역과 중부지역에서는 비슷한 값을 보인 반면 남부지역과 도시지역에서는 3배 이상의 값을 나타내고 있으나, 일본에 있어서 낙엽활엽수의 값인 6-18%에 비교하면 비슷하거나 약간 낮은 값을 나타내고 있었다(Inoue *et al.*, 1993). 각 조사지역내 수중간 수간류량의 차이에 있어서는 북부지역의 굴참나무 임분이 신갈나무 임분에 비하여, 중부지역과 남부지역에서는 굴참나무+신갈나무 임분이 굴참나무 임분에 비하여 약간 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 임분을 구성하는 수종의 특성으로 설명하기 어

**Table 3.** Annual nutrient concentrations of dissolved elements in precipitation (Pr), throughfall (Th) and stemflow (St)

Region (Period)	Stand	Species	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
Bukbu (1st)	Pr		6.01	0.028	0.008	0.004	0.009	0.093	0.137	0.058
	Th	1 <i>Q. variabilis</i>	6.12	0.074	0.015	0.024	0.027	0.219	0.207	0.074
		2 <i>Q. mongolica</i>	6.27	0.067	0.022	0.025	0.024	0.112	0.236	0.087
		3 <i>Q. variabilis</i>	5.95	0.068	0.016	0.028	0.022	0.186	0.199	0.085
	St	1 <i>Q. variabilis</i>	4.63a	0.127	0.037	0.042	0.037	1.121	0.842	0.199
		2 <i>Q. mongolica</i>	5.41b	0.110	0.054	0.048	0.035	0.796	0.784	0.237
3 <i>Q. variabilis</i>		4.83a	0.086	0.023	0.021	0.030	0.654	0.418	0.177	
Jungbu (1st)	Pr		6.66	0.037	0.008	0.007	0.011	0.044	0.129	0.053
	Th	1 <i>Q. variabilis</i>	6.23	0.086	0.019	0.047	0.027	0.107	0.198	0.126
		2 <i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	5.85	0.093	0.024	0.036	0.026	0.158	0.277	0.112
		3 <i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	6.04	0.086	0.021	0.054	0.026	0.121	0.237	0.150
	St	1 <i>Q. variabilis</i>	5.29	0.095	0.059a	0.041	0.029a	0.452	0.483	0.220
		2 <i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	5.21	0.096	0.046ab	0.045	0.027b	0.452	0.447	0.205
3 <i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>		5.35	0.092	0.018b	0.023	0.028ab	0.385	0.376	0.182	
Nambu (1st)	Pr		6.07	0.049	0.002	0.002	0.011	0.028	0.070	0.033
	Th	1 <i>Q. variabilis</i>	6.14	0.133	0.006	0.012	0.025	0.035	0.083	0.056
		2 <i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	6.21	0.133	0.006	0.013	0.024	0.036	0.085	0.044
		3 <i>Q. variabilis</i>	6.36	0.135	0.007	0.016	0.025	0.039	0.103	0.052
	St	1 <i>Q. variabilis</i>	6.21	0.137	0.008	0.014	0.028	0.064	0.106	0.077
		2 <i>Q. variabilis</i> + <i>Q. mongolica</i>	6.07	0.135	0.007	0.014	0.025	0.059	0.105	0.060
3 <i>Q. variabilis</i>		5.92	0.135	0.006	0.011	0.026	0.039	0.075	0.044	
Urban (1st)	Pr	<i>Q. mongolica</i>	6.20	0.134	0.009	0.062	0.031	0.085	0.095	0.035
	Th	1 <i>Q. mongolica</i>	5.25	0.394	0.029	0.195	0.113	0.254	0.146	0.059
		2 <i>Q. mongolica</i>	5.15	0.398	0.027	0.216	0.115	0.337	0.194	0.083
		3 <i>Q. mongolica</i>	5.03	0.388	0.027	0.168	0.118	0.299	0.154	0.055
	St	1 <i>Q. mongolica</i>	4.97	0.146	0.016	0.247	0.032	0.303	0.346	0.072
		2 <i>Q. mongolica</i>	5.32	0.149	0.021	0.238	0.033	0.481	0.361	0.131
3 <i>Q. mongolica</i>		5.20	0.139	0.019	0.215	0.033	0.275	0.255	0.067	

Values with the different small letter demonstrate significant differences among stands at the p=0.05 level

려우나, 수관통과우량에 비하여 수간류량은 수형, 직경, 수피구조, 지장각도, 강우량 등의 요인에 의해 큰 영향을 받은 것으로 보아(Hutchinson and Roberts, 1981; Min and Woo, 1995), 수목의 생장, 형태 및 기상조건 등의 복합적인 요인에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

**3.2. 임외우, 임내우의 화학적 특성**

**3.2.1. 임외우, 임내우의 pH 및 평균 용존원소 농도**

임외우 pH는 중부(6.39), 북부(6.10), 도시(5.92), 남부(5.83)지역 순으로 나타나어 도시지역(도시, 중부)과 산악지역(북부, 남부)의 지역간 차이는 보이지 않았다(Table 3).

임외우 pH와 수관통과우 pH의 관계를 보면(Fig. 2), 도시지역과 중부지역에 있어서는 예외는 있으나 대부분의 수관통과우 pH가 임외우 pH보다 낮은 값을 보였는데, 이는 도시에서 발생하는 건설산성물질의 영향으로 추측된다. 반면, 북부지역과 남부지역에서는 pH 6.0이하의 임외우에서는 수관통과우 pH가 높은 값을, pH 6.0이상의 임외우에서는 수관통과우 pH가 낮은 값을 나타내었다.

일반적으로 활엽수림에 있어서 수관통과우의 pH는 임외우 pH보다 높은 값을 나타내어 산성물질에 대한 완충능이 높다는 연구결과(Parker, 1990; Aron and Lund, 1994)가 일반적인 경향인데, 본 조사지역인 도시지역과 중부지역에서는 이와는 상반된 결과를 보였다. 임외우에 비하여 수관통과우의 pH가 높아지는 원인으로서는 산을 중화하는 건설침착물의 용존, 엽내의 양이온과의 치환작용으로 인한 H<sup>+</sup>의 소비를 들 수 있으며(Cappellato *et al.*, 1993), 반대로 수관통과우 pH가 낮아지는 원인으로서는 수목표면에 집적한 건설물질의 세탈과 수관으로 부터의 유기산의 용탈(Hoffman *et al.*, 1980)을 생각할 수 있다. 따라서, 같은 수종으로 구성되어 있는 참나무 천연림이라도 지역에 따라 다른 경향을 보이고 있으므로, 산성물질에 대한 완충능의 차이를 구명하기 위해서는 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

수간류의 평균 pH는 남부(5.85), 중부(5.60), 북부(5.39), 그리고 도시(5.03)지역 순으로 도시지역에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 4개 조사지역 모두 임외우, 수관통과우 pH에 비하여 낮은 값을 나타내었으며, 이는 선행연구 결과와 유사하였다(Joo *et al.*, 1999;

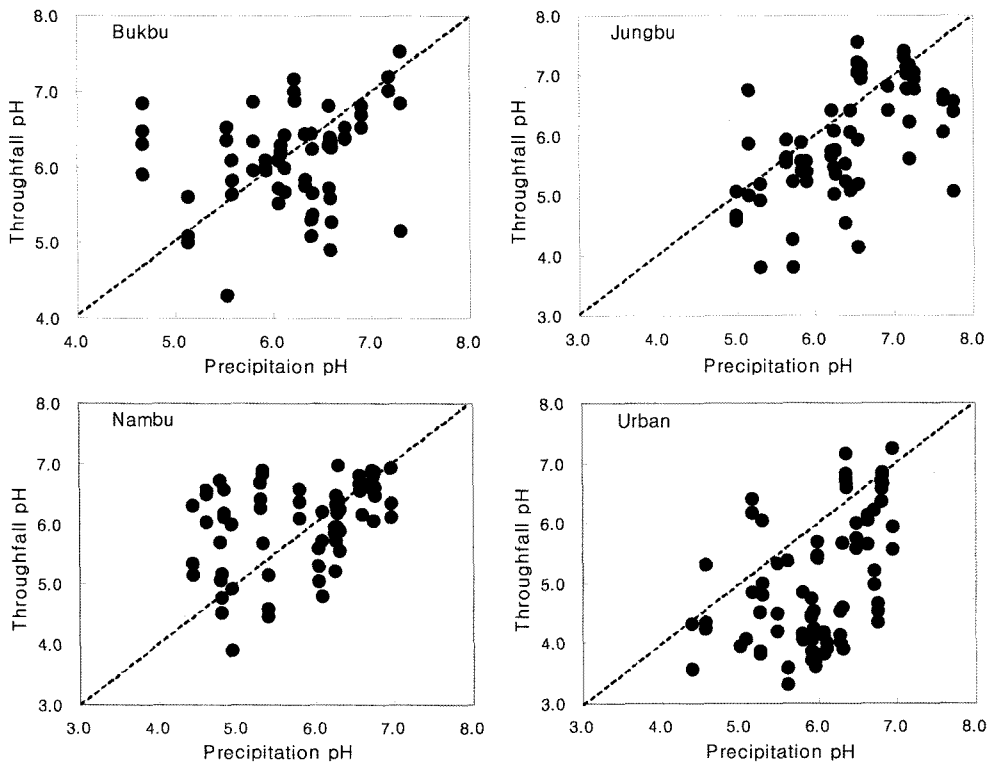


Fig. 2. Relationship between precipitation pH and throughfall pH.

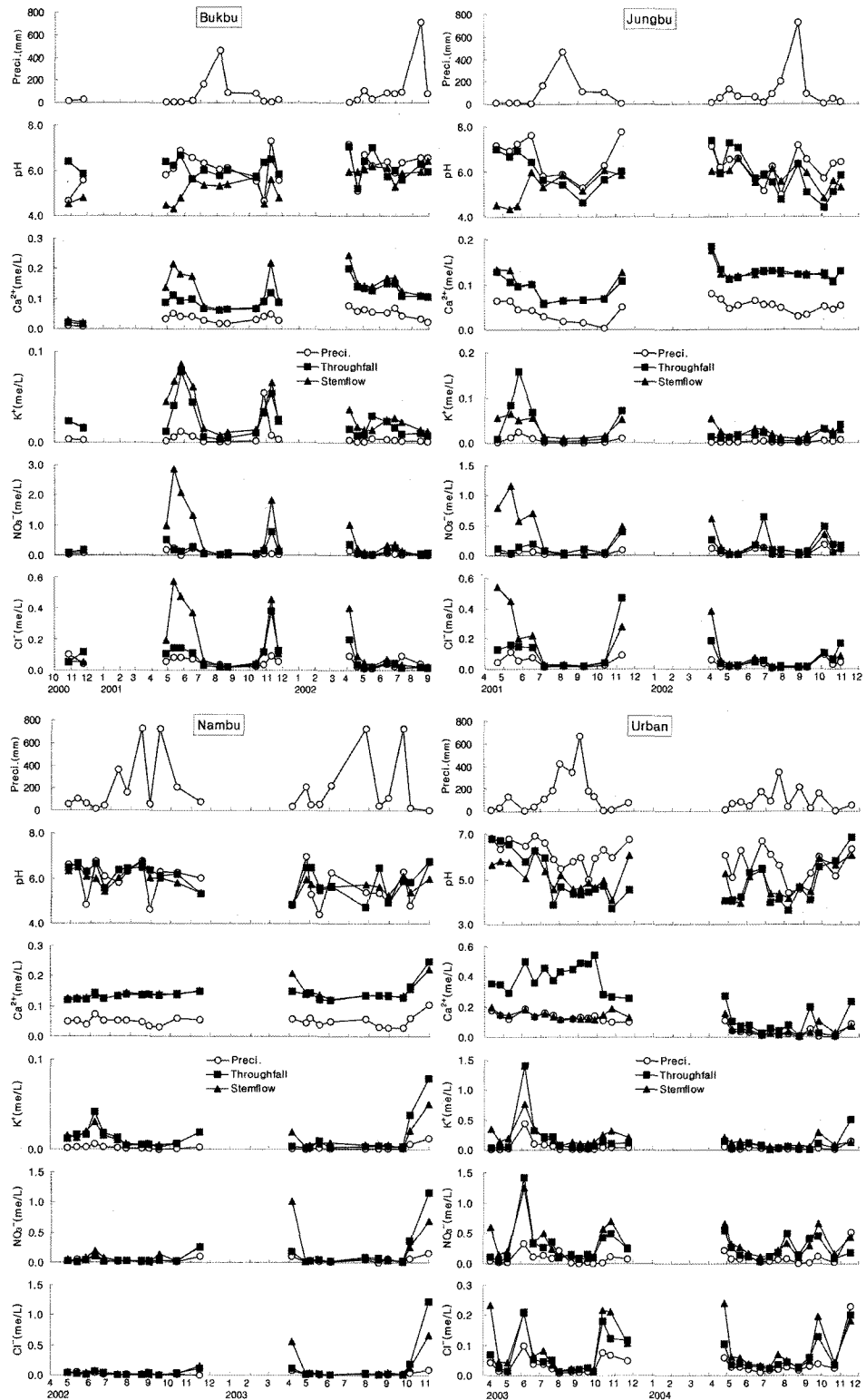


Fig. 3. Seasonal variations of dissolved element concentrations in the precipitation, throughfall and stemflow.

Houle *et al.*, 1999). 특히, 대기오염 물질의 영향을 많이 받고 있는 도시지역의 참나무림에 있어서는 전술한 바와 같이 수관통과우 pH가 임외우 pH보다 낮은 연구결과와 대부분의 수간류가 pH 3~5의 범위에 분포되어 있는 것으로 보아 수간류의 토양유입은 장기적으로는 근계주변토양 및 토양수의 pH 및 양분동태에 크게 영향을 미칠 것이라 생각된다(Beniamino *et al.*, 1991; Sanada *et al.*, 1991).

조사기간 중 임외우의 용존원소 평균농도(mg/L)는 양이온은 모든 지역에서  $\text{Ca}^{2+}$ 가 가장 높았으며, 그 다음으로  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ 의 순이었고, 또한 음이온은 모든 지역에서  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 가장 높았으며, 그 다음으로  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ 의 순으로 나타났다. 도시지역은 다른 조사지역에 비하여  $\text{Ca}^{2+}$ 에서 2배,  $\text{NO}_3^-$ 에서 1.5배 높은 값을 나타내어 도시 내에서 발생하는 분진과 자동차 배기가스 내 질소산화물에 의한 영향을 많이 받은 것으로 추측되었다.

수관통과우의  $\text{K}^+$ 농도는 임외우에 비하여 약 4~7배로 가장 크게 증가하였으며 그 외의 용존원소 농도는 모든 지역에서 2~3배 증가하였다. 이러한 결과는 선행 연구보고를 종합한 Parker(1983)의 보고와 일치하고 있는데, 이는 다른 원소에 비하여  $\text{K}^+$ 가 수관층의 잎으로부터 용탈이 가장 많으며, 엽내 이온교환 등의 영향을 받기 때문이라 생각된다. 수간류의 용존원소 농도는 수관통과우에 비하여, 북부지역과 중부지역에서  $\text{Ca}^{2+}$ , 남부지역을 제외한 모든 지역에서 음이온 농도가 증가하였는데, 이와 같이 수간류의 농도 증가는 수간에 침적된 건성강하물의 세탈에 기인한 것으로 판단된다(Cappellato *et al.*, 1993).

같은 지역 내 구성수종이 다른 임분에 있어서 통계적으로 유의한 차이를 나타낸 것은( $P < 0.05$ ), 북부지역의 조사 1차 년도의 수간류 pH에 있어서 신갈나무 임분(pH 5.41)과 굴참나무 임분(pH 4.63, 4.83)에서 인정되었을 뿐 그 외의 pH 및 용존원소 농도에 있어서 유의차는 인정되지 않았다. 북부지역의 조사 2차 년도의 수간류 pH에 있어서 통계적 유의차는 인정되지 않았으나 신갈나무 임분(pH 5.90)이 굴참나무 임분(pH 5.60, 5.68)에 비하여 높은 값을 보여 북부지역에서의 수간류 pH의 수종간 차이를 알 수 있었다. 동일 수종간에 있어서 수관통과우의 pH는 임령, 양분 결핍 등에 의해 영향을 받는다는 보고(Miller, 1984)가 있는데, 본 연구에 있어서 동일지역 내 임령에서 큰 차

이가 없는 것으로 보아 토양의 비옥도 및 임목의 양분 흡수 특성과 관련된 연구가 필요하다고 생각된다.

### 3.2.2. 임외우, 임내우의 pH 및 용존원소 농도의 경시적 변화

임외우, 수관통과우 및 수간류의 pH 및 용존원소 농도의 경시적 변화를 나타내면 Fig. 3과 같다. 임외우 pH는 산악지역인 강원지역과 남부지역에 비하여 도시지역 및 도시에 인접한 중부지역에 있어서 그 변이가 크게 나타나 임외우 pH는 계절에 따라 대기오염물질과 염기성 이온이 포함된 건성강하물의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다(Kim *et al.*, 1996). 특히, 도시지역과 중부지역에 있어서는 4~6월에 임외우 pH가 7.0전후로 관측되었는데, 이러한 현상은 이 시기에 주로 발생하는 황사현상에 기인하는 것으로 사료된다. Chung and Yoon(1996)은 황사에 포함된 주된 이온은 양이온이라 하였으며, Kim and Kim(1996)은 경기지역에서 봄철에 많은 황사 발생량을 보인다고 보고하고 있다.

수관통과우의 pH는 중부지역에 있어서 다른 시기에 비하여 4~5월에 가장 높은 값을 나타내었으며, 도시지역에 있어서는 4~5월과 10~11월에 가장 높은 값을 나타내었다. 그러나 그 외의 지역에 있어서는 계절에 따른 뚜렷한 경향은 보이지 않았다. 일부지역의 봄과 가을에 있어서 수관통과우 pH의 증가는 앞에서 설명한 봄철에 공급된 다량의 황사에 의한 양이온의 공급과 더불어 개엽기와 낙엽기에 있어서 수관으로부터의 용탈이 활발하게 이루어져 많은 양의 염기가 강우에 공급되었기 때문이라 생각된다(掘田, 1991).

수간류 pH는 중부지역에 있어서 pH 4.5 전후의 가장 낮은 값을 나타내고 있는 4~5월과 북부지역의 일부기간을 제외하고는 모든 지역에서 임외우, 수관통과우 pH와 유사한 계절적 변이를 보이고 있어 수간류 pH는 임외우, 수관통과우 pH의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 북부지역의 수간류 pH는 다른 지역과 달리 임외우 pH의 영향은 작고, 수피로부터 발생하는 물질의 양적, 질적 차이에 의한 것이라 추측된다.

수관통과우, 수간류의 용존원소 농도는  $\text{Na}^+$ 를 제외한 모든 원소에서 증가 경향을 보이고 있었는데, 특히 이러한 경향은 임외우에 비하여 수관통과우와 수간류에서 현저하였다. 이러한 경향은 선행 연구결과로부터 추측하면, 수관으로부터의 용탈은 우량이 적고 강우강도가 약한 시기에 엽면과의 접촉시간이 길기 때문에

**Table 4.** Annual mean nutrient amounts(kg/ha) in precipitation, throughfall and stemflow

Region (Period)		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		(kg/ha)					
Bukbu (1st)	Precipitation	0.40	0.172	0.201	2.43	2.05	0.59
	Throughfall	1.02	0.372	1.116	2.67	2.35	0.83
	Stemflow	0.04	0.041	0.093	0.43	0.27	0.07
Bukbu (2nd)	Precipitation	0.87	0.252	0.525	2.94	1.19	0.50
	Throughfall	1.93	0.510	2.076	3.78	2.49	0.84
	Stemflow	0.07	0.031	0.111	0.26	0.21	0.06
Jungbu (1st)	Precipitation	0.42	0.037	0.284	1.23	2.27	0.87
	Throughfall	1.30	0.112	1.794	3.87	3.27	1.22
	Stemflow	0.04	0.008	0.096	0.22	0.21	0.08
Jungbu (2nd)	Precipitation	0.94	0.043	0.264	1.46	1.86	0.63
	Throughfall	2.73	0.146	1.810	4.82	2.84	0.98
	Stemflow	0.14	0.012	0.183	0.18	0.21	0.06
Nambu (1st)	Precipitation	1.93	0.033	0.915	1.40	2.92	2.00
	Throughfall	4.26	0.064	4.371	1.35	2.51	1.68
	Stemflow	0.51	0.012	0.605	0.26	0.46	0.34
Nambu (2nd)	Precipitation	1.75	0.217	0.467	1.66	3.89	1.55
	Throughfall	4.42	0.206	2.447	1.91	3.53	1.42
	Stemflow	0.65	0.030	0.405	0.60	0.52	0.25
Urban (1st)	Precipitation	2.08	0.152	0.781	2.22	3.90	0.91
	Throughfall	4.94	0.415	1.807	3.51	3.85	1.10
	Stemflow	0.41	0.026	0.467	0.58	1.23	0.24
Urban (2nd)	Precipitation	2.24	0.131	0.920	1.68	4.00	1.22
	Throughfall	4.20	0.281	1.911	2.99	5.59	1.34
	Stemflow	0.12	0.016	0.551	0.82	1.62	0.42

축진된다(Parker, 1990)는 것과, 수관으로부터 용탈이 활발한 시기로서 개엽기와 낙엽기라는(Sanada *et al.*, 1991) 임목생장조건과 강우량, 강우강도 등의 기상조건에 기인한 결과라 추측된다. 수관통과수와 수간류의 용존원소 농도는 모든 지역에서 임외우 농도의 경시적 변화와 거의 비슷한 경향을 보여, pH와 같이 임외우의 영향을 받고 있다고 생각된다. 같은 지역이라도 조사년도에 따라 다른 경향을 보였는데 특히 타 지역에 비하여 도시지역에서는 1차년도에서, 남부지역에서는 2차년도에서 그 증가 경향이 뚜렷하였다.

### 3.2.3. 임내우의 연간 평균 양분 유입량

수관통과수는 임외우에 비하여 남부지역에서의 음이온을 제외하고는 대부분의 양분 유입량이 증가하였는데, 특히 양이온에서 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup>가, 음이온에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 비교적 뚜렷한 경향을 보였다(Table 4). 조사지

역에 따라 차이는 있으나, 임외우에 비하여 수관통과수의 K<sup>+</sup>에서 4~7배, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 및 Na<sup>+</sup>에서 2~3배의 값을 나타내었다. 또한 전술한 바와 같이 임외우보다 작은 값을 보인 남부지역의 음이온을 제외하고는 Cl<sup>-</sup>에서 1.1~1.7배, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에서 1.1~1.6배, 그리고 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>에서 1.1~3.3배의 값을 나타내었다. 이와 같이, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup>는 H<sup>+</sup>와의 이온교환에 의해 수체로부터의 용탈이 크게 작용하였다고 사료된다(Wood and Bormann, 1975). 임외우와 수관통과수의 양이온 중 Ca<sup>2+</sup>는 남부지역과 도시지역에서, Mg<sup>2+</sup>는 북부지역과 도시지역에서, K<sup>+</sup>와 Na<sup>+</sup>는 남부지역에서, 그리고 음이온 중 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 도시와 중부지역에서, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 도시지역에서, 그리고 Cl<sup>-</sup>은 남부지역에서 가장 많은 값을 나타내었다. 따라서, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 및 K<sup>+</sup>는 수체로부터의 용탈, 황사의 이동에 따른 양이온 집적, Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup>은 해염성 기원물질, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 대기오염물질의 건성침착 등



의 영향에 의한 지역적 특성에 크게 영향을 받는 용존 원소라 추측할 수 있었다.

수간류의 양분 유입량은 임외우와 수관통과우에 비하여 작은 값을 나타냈는데, 이는 입상으로 도달하는 입내우(수관통과우+수간류)물질량의 10%전후로 다른 경우에 수간류량이 비하여 현저하게 적었기 때문이라고 판단된다. 수간류량이 증가하면 수간류의 이온농도가 감소하는 경향(Gao *et al.*, 2001)으로 볼 때, 강우유입량의 증가로 수간류량이 증가하여도 물질량에 있어서는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 추정된다.

## 적 요

본 연구는 우리나라에 분포하고 있는 참나무 천연림을 대상으로 강우의 이동에 따른 입내우(수관통과우 및 수간류)의 수량변화 및 양분동태를 분석하였다.

임외우량에 대한 입내우량의 비율은 지역에 따라 차이를 보였는데 이는 수종특성 외에 입지조건이나 기상 조건 등의 복합적인 요인에 크게 영향을 받고 있다고 판단된다. 따라서, 앞으로 참나무 천연림의 보육사업을 실시하는데 있어서 지역별 수자원 관리 체계를 수립할 필요가 있다고 생각된다.

지역에 따른 수관통과우의 양분 유입량을 비교한 결과,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  및  $K^+$ 는 수체로부터의 용탈과 황사 발생에 의한 집적,  $Na^+$ 와  $Cl^-$ 은 해염성 기원물질,  $NO_3^-$ 와  $SO_4^{2-}$ 는 대기오염물질의 건성침착 등의 영향에 의한 지역적 특성을 크게 반영하고 있었다.

수간류의 양분물질량은 입내우(수관통과우+수간류)물질량의 10% 전후의 작은 값을 나타내었다. 그러나 도시지역 참나무 천연림에 있어서는 수간류의 pH가 3~5의 범위에 분포하고 있어 이러한 수간류의 토양유입은 장기적으로는 근계 주변 토양 및 토양수의 pH와 양분동태에 크게 영향을 미칠 것이라 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 “특정기초연구(과제번호 : R01-2000-000-00206-0)”의 지원에 의해 수행되었다.

## REFERENCES

Aron, D. B., and L. J. Lund, 1994: Factors controlling

throughfall characteristics of high elevation Sierra Nevada site, California. *Journal of Environmental Quality* **23**, 844-850.

Beniamino, F., J. F. Ponge, and P. Arpin, 1991: Soil acidification under the crown of oak trees. I. Spatial distribution. *Forest Ecology and Management* **40**, 221-232.

Cappellato, R., E. P. Norman, and L. R. Harvey, 1993: Acidic atmospheric deposition and canopy interactions of adjacent deciduous and coniferous forests in the Georgia Piedmont. *Canadian Journal of Forest Research* **23**, 1114-1124.

Chung, Y. S., and M. B. Yoon, 1996: On the yellow sand and a dust storm occurred in the spring of 1995. *Journal of the Korean Meteorological Society* **32**(1), 17-27. (in Korean with English abstract)

Emmett, B. A., B. Reynold, 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 Ecology and Management* **101**, 165-175.

Fernandez, I. J., G. B. Lawrence, and Y. Son, 1995: Soil-solution chemistry in a low-elevation spruce-fir ecosystem, Howland, Maine. *Water, Air and Soil Pollution* **84**, 129-145.

Gao, H., H. Toda, and K. Haibara, 2001: Element amounts of throughfall, stemflow and Ao-percolation in a deciduous broad-leaved forest dominated by Mizunara Oak (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*). *Forest Resources and Environment* **39**, 19-30.

Hancock, N. A., and J. M. Crowther, 1979: A technique for the direct measurement of water storage on a forest canopy. *Journal of Hydrology* **41**, 105-122.

Herwitz, S. R., 1985: Interception storage capacities of tropical rainforest canopy tree. *Journal of Hydrology* **77**, 237-252.

Hoffman, W. A. Jr., S. E. Lindberg, and R. R. Turner, 1980: Precipitation acidity : The role of the forest canopy in acid exchange. *Journal of Environmental Quality* **9**, 95-100.

Houle, D., R. Quimet, R. Paquin, and J. G. Laflamme, 1999: Interactions of atmospheric deposition with a mixed hardwood and a coniferous forest canopy at the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Quebec). *Canadian Journal of Forest Research* **29**, 1944-1957.

Hutchinson, I., and M. C. Roberts, 1981: Vertical variation in stemflow generation. *Journal of Applied Ecology* **18**, 521-527.

Inoue, K., N. Yokota, H. Murai, N. Kumagai, and J. Mochizuki, 1993: Rain and percolation waters of beech and japanese cypress forest in the foot of Mt. Fuji and neutralization of acid rain by a beech tree. *Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition* **64**, 265-274.

Joo, Y. T., H. O. Jin, Y. H. Son, J. M. Oh, and D. Y. Jung, 1999: The effects of the interaction between precipitation

- and tree species on the chemical properties of throughfall and stemflow. *Journal of Korean Forestry Society* **88**(2), 149-156. (in Korean with English abstract)
- Katagiri, S., H. Ishii, and N. Miyake, 1977: Studies on mineral cycling in a deciduous broad-leaved forest at Sanbe Forest of Shimane University(V): Rain fall and its nutrients in a forest. *Bulletin of the Faculty of Agriculture, Shimane University* **11**, 73-80.
- Kim, D. Y., J. H. Ryu, J. S. Chae, and S. H. Cha, 1996: Deposition of atmospheric pollutants in forest ecosystems and changes in soil chemical properties. *Journal of Korean Forestry Society* **85**(1), 84-95. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. C., and D. S. Kim, 1996: Studies on estimating dry deposition velocities for atmospheric aerosol and metal elements in Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **12**(1), 101-112. (in Korean with English abstract)
- Lee, C. H., S. W. Lee, E. Y. Kim, Y. K. Kim, J. K. Byun, H. G. Won, and H. O. Jin, 2005: Growth of *Pinus densiflora* seedlings in Acidified soil. *Korea Journal of Ecology* **28**(6), 389-393. (in Korean with English abstract)
- Lee, D. K., G. T. Gab, K. Y. Joo, and Y. S. Kim, 1997: Throughfall, stemflow and rainfall interception loss in *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc., *Larix leptolepis* (Sieb. et Zucc.) Gordon and *Quercus* species stand at Kwangju-Gun, Kyunggi-Do. *Journal of Korean Forestry Society* **86**(2), 200-207. (in Korean with English abstract)
- Likens, G. E., and F. H. Bormann, 1994: *Biogeochemistry of Forested Ecosystem*(2nd ed.). Springer-Verlag. 159pp.
- Lovett, G. M., and S. E. Lindberg, 1984: Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall. *Journal of Applied Ecology* **21**, 1013-1027.
- Macdonald, N. W., A. J. Burton, H. O. Liechty, J. A. Witter, K. S. Pregitzer, G. D. Morz, and D. D. Richter, 1992: Ion leaching in forests ecosystem along great lakes air pollution gradient. *Journal of Environmental Quality* **21**, 614-623.
- Miller, H. G., 1984: Deposition-plant-soil interactions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* **305**: 339-352.
- Min, H. J., and B. M. Woo, 1995: Throughfall, stemflow and interception loss at *Pinus taeda* and *Pinus densiflora* stands. *Journal of Korean Forestry Society* **84**(4), 502-516. (in Korean with English abstract)
- Park, Y. D., D. K. Lee, and D. Y. Kim, 1999: Nutrient dynamics in the throughfall, stemflow and soil solution of Korean Pine, Japanese Larch and hardwood stands at Kwangju-Gun, Kyonggi-Do. *Journal of Korean Forestry Society* **88**(4), 541-554. (in Korean with English abstract)
- Parker, G. G., 1983: Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research* **13**, 57-120.
- Parker, G. G., 1990: Evaluation of dry deposition pollutant damage and forest health with throughfall studies. *Mechanisms of forest responses to acidic deposition*, Springer-Verlag, New York, 10-61.
- Sanada M., S. Otha, R. Ootomo, and E. Sanada, 1991: Stemflow and throughfall in the plantation of *Abies sachalinensis* and *Picea jezoensis* in the suburbs of Sapporo. *Japanese Journal of Forest Environment* **33**, 8-15.
- Wood, T., and F. H. Bormann, 1975: Increase in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. *Ambio* **4**, 169-171.
- 掘田 庸. 1991: 酸性雨と關東地方のスギの衰退. 森林科學 **1**. 11-18.