

# 산성강하물 조건하에서 활엽수림 생태계의 양료순환 양상<sup>1</sup>

장관순<sup>2</sup>

## Pattern of Nutrient Fluxes in Deciduous Forest Ecosystem Impacted by Acidic Deposition<sup>1</sup>

Kwan-Soon Chang<sup>2</sup>

### 요 약

본 연구는 일본 북해도 지방의 임해공업단지에 인접되어 있는 筍小牧지역 내 활엽수 천연림에서 주요 염기성 양이온에 대한 물질순환 수지를 파악하고자 강우(wet deposition), 임내우(throughfall), 수간류(stemflow) 그리고 토양침투수(soil leachate)에 대한 이온 flux를 정량화하였다. 조사 결과 강우는 평균 pH 4.3의 강한 산성우로 강우에 의한 H<sup>+</sup> flux는 0.34kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>이었고, 임내우와 수간류에 의한 염기성 양이온(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)의 flux는 1.6kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 강우의 0.49 kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>보다 3배 많았다. 수관층 용탈(canopy leaching)에 의한 염기성 양이온의 flux는 0.95kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 강우에 의한 H<sup>+</sup> flux보다 2.8배 높았으며, H<sup>+</sup>는 수관층에서 치환성 양이온들에 의해서 거의 소비되었다. 토양층에서 이온배출 flux는 토양특성에 의존되었으며, 토양 중 Ca은 proton 소비에 중요한 인자로 작용하였다. 생태계의 물질순환에 대한 수지에서 Na, Ca 및 Mg은 생태계 내부에서 외부로 방출되는 양보다 생태계로 유입되고 있는 양이 많아 생태계에 축적되고 있었으나, K의 경우는 부의 flux를 나타냈다.

주요어 : 임내우, 수간류, 토양침투수, 수관층 용탈, 물질수지

### ABSTRACT

The fluxes of wet deposition(WD), throughfall(TF), stemflow(SF) and soil leachates were measured to understand base cation budgets on deciduous ecosystem impacted by acidic deposition in the north-western part of Tomakomai in Hokkaido, Japan. The flux of H<sup>+</sup> for wet deposition was 0.34kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> and the flux of base cation, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>, for throughfall plus stemflow was 1.6 kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>, 3 times higher level than that for wet deposition. The flux of base cation for canopy leaching(LI) was 0.95 kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>, 2.8 times higher level than H<sup>+</sup> sources in wet deposition. The major mechanism of H<sup>+</sup> consumption closely related to acidic neutralizing capacity of canopy. The ionic flux for soil leachates from soil reservoir and proton consumption in soil was dependent on soil chemical states and exchangeable Ca in soil had a major factor of H<sup>+</sup> consumption. The base cation budgets on deciduous ecosystem showed positive balance for Na, Ca and

1 접수 9월 3일 Received on Sep. 3, 2001

2 대전보건대학 환경관리과 Dept. of Environment Management, Daejeon Health Sciences College, Daejeon, 300-711, Korea(kschang@djhealth.ac.kr)

Mg, while K was the negative value.

**KEY WORDS : WET DEPOSITION, THROUGHFALL, STEMFLOW, SOIL LEACHATE, CANOPY LEACHING, CATION BUDGET**

## 서 론

삼림생태계의 물질순환은 대기, 생물권, 토양 그리고 수권으로 이어지는 순환체제로 생태계 내, 외부로부터 지속적인 양료공급으로 물질생산량을 향상시키면서 환경 개선효과를 발휘한다. 물질순환 과정 중 강우는 생태계 외부로부터 내부로 물질을 투입시키는 중요한 flux로, 공급 경로에서 생태계 내부를 통과하면서 생태계 구성요소들과 화학적, 생물학적인 반응에 의해 이온조성은 변화를 받는다. 그 과정으로 강우의 일부는 수관에서 가지, 엽과 접촉되어 임내우(throughfall)로서 토양표면으로 떨어지게 되고, 일부는 수관을 따라 수간류(stemflow)로서 토양표면에 도달된다. 이때 수관은 토양으로 유입되는 물질 flux를 제어하는 중요한 역할을 한다(Matznere & Meiwes, 1994; Shibata & Sakuma, 1996; Draaijers *et al.*, 1997; Robertson *et al.*, 2000).

임내우와 수간류로 임상에 도달한 강우는 토양침투수(soil leachate)로 생태계 내부로부터 여러 종류의 이온들을 방출시킨다. 이때 부식층(O층), 또 토양 내에서 ① 토양 고상과 이온교환반응, ② 식생에 의한 이온흡수 고정, ③ 미생물에 의한 유기화, 무기화과정에서 수반되는 이온의 형태변환, ④ 토양 풍화작용 등은 토양침투수의 이온조성에 영향을 주게 되고 물질 배출 flux를 제어하는 중요한 부분이다(Arthur & Fahey, 1993). 산성퇴적물의 영향으로 삼림식생이 정후가 나타난 이후, 대기로부터 생태계로 물질유입과 외부로의 물질제거 과정의 매개체로서 산성강하물, 임내우(TF), 수간류(SF) 및 토양침투수의 이온 특성과 각 매개체에 대한 이온 flux의 정량화는 생태계의 물질순환 특성과 어떠한 외부의 영향에 의한 물질순환 변동을 규명하는 데 주요한 연구 대상이었다(Liechty *et al.*, 1993; Matznere & Meiwes, 1994; Draaijers *et al.*, 1997).

산성강하물로부터 생태계로 유입되는 proton flux가 생태계 외부로 배출되는 flux보다 크다면 proton은 토양 내에 축적하게 될 것이며 그 결과로 염기성 양이온들은 토양으로부터 제거되는 flux가 유입 flux

보다 크다면 토양산성화와  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$ 의 결핍현상이 발생하게 된다.

일본에도 여러 지역에서 강우의 pH와 proton의 부하량에 대해서 유럽의 관측치에 필적하는 값들이 보고되고 있으나, 그것이 토양의 산성화와 수목의 쇠퇴에 어느 정도 영향을 미치고 있는가에 대한 통일된 견해는 얻지 못하고 있다. 그 원인의 하나로서 다양한 생태계에서 조사되어 서로 비교할 수 있는 물질 flux에 관한 자료의 부족을 지적하고 있다(大喜多敏一과 村野健太郎, 1990). 본 연구 지역의 토양은 화산방출물미속토 지역으로 토양비료학회(1978)에 의하면 산성우에 대한 내성이 약한 그룹에 속한다. 주변에는 북해도 筈小牧지역 동부 임해공업단지에 위치하고 있으나 삼림은 건전하게 생육하고 있다. 이에 대해서 토양-식물계에서 어떠한 산 완충기능이 작용하고 있는 것으로 추정하고, 이를 분명하게 하기 위해서 강우(wet deposition), 임내우, 수간류 및 토양침투수의 이온변화 특성과 주요 염기성 양이온에 대한 이온 flux를 정량화하여 물질순환 수지를 파악하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지역

조사는 일본 北海道 筈小牧市에 위치해 있는 북해도 대학 농학부 부속 筈小牧연습림(북위  $42^{\circ}40'$ , 동경  $141^{\circ}36'$ )의 낙엽활엽수 천연림지역에서 이루어졌으며, 주요 수종은 물참나무(*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*), 단풍나무(*Acer palmatum* Thunb)로 입목밀도는  $1,340$ 본  $ha^{-1}$ , 평균수고  $10.8m$ , 평균흉고직경이  $13.4cm$ 이었고, 토양특성은 석영안산암질의 화산방출물미속토(Andic Regosol : Unesco, 1988), Typic Udipsamments(Soil Taxonomy, 1990)로, 토양 pH는  $5.3\sim 6.2$ , 가비중은  $0.56\sim 1.03g\ cm^{-3}$ , 토양의 일반적인 특성은 Table 1과 같이 토양단면은 화산방출물미속토 지역의 전형적인 토양특성을 갖고 있었으며, 치환성 양이온의 주체는  $Ca^{2+}$ 이다.

Table 1. Soil properties of deciduous forest in tomakomai of Hokkaido, Northern Japan

Horizon	Depth (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	Exchangeable cation				CEC	BS (%)
			Ca	Mg	K (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Na		
A	0~10	5.3	4.43	0.75	0.27	0.14	18.5	57
C	10~25	5.7	0.19	0.04	0.04	0.03	2.5	43
2AC	25~30	6.0	0.39	0.07	0.04	0.04	2.1	16
2C	30~72	6.2	0.12	0.03	0.04	0.04	1.2	22

CEC: Cation Exchange Capacity

BS: Base Saturation

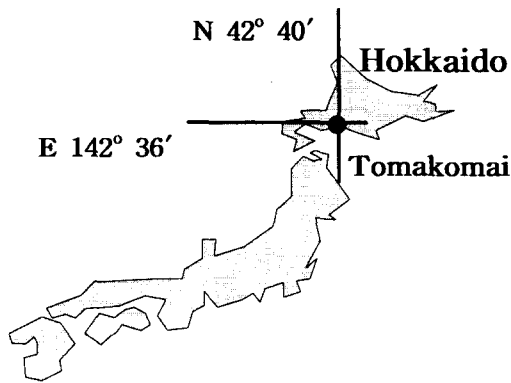


Figure 1. Location of study site

## 2. 조사방법

### (1) 시료채취방법

#### 1) 강우, 임내우, 수관류의 시료채취방법

강우는 180cm×10cm의 염화비닐제 강우통을 지상부로부터 1.2m 위치에 있도록 지지대와 함께 제작하여 임외에서 채집하였다. 임내우와 수관류의 채집방법으로는 대표 수종을 선택하여 수관 밑에서 강우에 같은 방법으로 임내우를, 내경 1cm의 염화비닐튜브를 반활해서 그것을 수피가 손상되지 않도록 수관에 나선형으로 부착하고 염화비닐튜브와 수관의 간극은 실리콘 충전제를 사용하여 틈새를 매운 후에 수관류의 시료를 모았다. 시료채취 지점은 조사지를 대표하는 동질의 3개 지점을 선정하였고, 2000년 5월부터 10월 까지 시료를 채취하였다.

#### 2) 토양 침투수 시료채취 방법

토양침투수는 토양생성학적 층위를 조사한 후 근계권을 고려하여 지점을 정하였고, 방법으로 토양단면

층에서 약 50cm 부근에 20×25cm의 프레트형 tension free lysimeter를 각각 3개 지점에 매설하여 시료를 얻었다. 프레트형 tension free lysimeter의 설치에는 토양단면층을 교란시키지 않기 위하여 수직면으로 절개한 후 프레스로 측방에서 밀어 넣었다.

### (2) 시료분석 방법

채집한 시료에 대하여 현지에서 전체 중량을 측정 한 후, 그 일부를 250ml병에 담아 실험실로 운반한 시료는 4℃ 정도에 보관하였다. pH는 전극법에 의해서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>은 0.45μm의 membrane filter로 여과한 후에 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>은 인도페놀법에 의해서, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>은 원자흡광광도법으로 측정하였다. Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 Pore size 0.2μm의 membrane filter로 여과 후 Ion chromatography(A020A047A; Toyo Roshi Kaisha Ltd)로 측정하였다. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 0.02 NH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>으로 pH 4.3까지 적정하여 첨가된 산의 양으로부터 계산되었다. 토양시료에 대해서 토양 pH는 1:5로 분석하고, 치환성 염기는 1N-초산암모늄(pH 7)으로 추출한 후 원자흡광광도법으로 측정하였다.

### (3) Flux 정량화(kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>)

강우(WD)에 의해서 생태계로 공급되는 각 이온 flux는 WD(TF, ) = Σ(Ci × P × 10<sup>-5</sup>)로 계산되었다. 여기서 Ci는 강우와 임내우에 용존되어 있는 i종의 농도(μmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>), P는 강수량(mm)이다. 임내우(TF)와 수관류(SF)에 의한 이온 flux도 강우와 같은 방법에 면적우량을 곱하여 계산되었다. 토양으로부터 이온 배출 flux 계산 방법으로 Johnson과 Lindberg(1992)에 의한 Cl 수치법을 사용하여 배출 수량이 추정되었고, 토양침투수의 수량에 이온농도(μmol L<sup>-1</sup>)를 곱하여 flux를 계산하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$\text{Flux(C)} = \text{C층 토양침투수 중 수량에 대한 가중 평균 이온농도}(\mu\text{mol}_e \text{ L}^{-1}) \times \text{토양의 배출수량}(\text{mm y}^{-1}) \times 10^{-5}$$

$$\text{토양 배출수량} = \{ \langle \text{Cl}^- \text{의 습성퇴적 flux}(\text{kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}) + \text{Cl}^- \text{의 건성퇴적 flux}(\text{kmol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}) \rangle / \text{C층 토양침투수 내 Cl}^- \text{의 가중평균 농도} \} \times 10^5$$

## 결과 및 고찰

### 1. WD, TF, 및 SF에 의한 이온 flux

일본 北海道의 筥小牧연습림에서 관측된 강우(WD), 임내우(TF)와 수간류(SF)의 pH와 이온조성에 대한 특성은 Table 2와 같으며, 강우 pH는 4.3으로 pH 5.6 이하의 산성우로 주요 이온은 H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> 및 Ca<sup>2+</sup>, 그리고 Cl<sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이다. H<sup>+</sup>은 54.3 μmol<sub>e</sub> L<sup>-1</sup>로 농도가 가장 높았으며, 다음으로 Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 순이었다. 강우와 임내우 및 수간류의 이온 특성을 비교하면 임내우와 수간류에서 pH는 각각 5.7과 5.1로 강우보다 높았으며, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 큰 변화가 없었으나, K<sup>+</sup>은 14-17, Ca<sup>2+</sup>이 4-2, Mg<sup>2+</sup>은 3, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이 2배 정도 역시 높았다. 임내우와 수간류의 이온특성으로는 H<sup>+</sup>는 현저하게 감소한 반면에 치환성 양이온이 모두 증가하여 강우는 수관층을 통과하면서 이온조성 특성에 큰 변화가 있었다.

일본 北海道의 筥小牧연습림 내 기상관측소에서 1982년부터 1993년까지 관측한 강우자료에서 연평균 강우량은 1,189mm, 연평균 변동량은 988~1,500mm이었으나 본 조사기간 중 강우량은 635mm로 연평균 변동량에 대하여 64~42%의 강우량이었다. Table 2의 이온 특성을 면적 강우량으로 환산하여 생태계로 공급되는 각 이온의 flux를 고찰한 결과는 Table 3으로 나타났다. 강우로 공급되는 이온 flux는 H<sup>+</sup>이 0.34kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup> 이었고, 양이온(K<sup>+</sup>,

Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)은 0.49kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup>, 음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)이 0.4kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup> 이었다. 양이온으로 Na<sup>+</sup>이 0.25kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup>, 음이온에서 Cl<sup>-</sup>이 0.28kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup>로 다른 이온들 보다 유입량에서 월등히 높았다. 조사지역에서 H<sup>+</sup> 부하량은 일본 전평균(1989~1992)인 0.24kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> 보다 높은 수치이었고, 인위적 오염원에서 유래하는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 부하량은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>보다 월등히 많은 것으로 나타났다. 그 비율은 5 : 1 이었다. 유입량에서 높게 나타난 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup>은 자연계에서 해수에 가장 많이 존재하기 때문에 조사지역은 해염의 영향하에 있는 특성을 나타냈다.

임내우와 수간류에 의해 토양으로 공급되는 양이온(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) flux 양은 1.6kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup>로 강우의 0.49kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup> 보다 3배 정도 높았고, 음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) flux 양은 0.48kmol<sub>e</sub> ha<sup>-1</sup>로 강우와 거의 동일하였다. 이들 이온에 대한 flux 양은 수간류보다 임내우가 높았다. 이는 우량의 차이에서 생긴 결과로 보인다. Table 3에 나타난 Δ는 수관을 통과한 다음 강우(WD)와 수관 사이(TF+SF)에서 이온교환반응의 결과를 반영한 것이다. Δ의 공급원은 ① 엽면에서 이온교환반응 및 엽 내부에서 이온용탈, ② 엽면에서 이온흡수, ③ 강우가 없는 기간 동안 엽면에 침착되어 있던 건성퇴적물이 강우에 의해 세탈된 물질로 구성된다. 따라서 Δ에서 -로 표시되는 이온은 엽면 또는 엽 내부에서 이온교환 반응에 의한 흡수를 +는 수관층으로부터 이온 증가량을 나타낸다. Table 3에서 H<sup>+</sup>은 음(-) flux, 다른 이온들은 모두 양(+)의 flux를 보이고 있는데, 이러한 결과는 수관층에 의한 H<sup>+</sup> 흡수량을 나타내고 있어 수관층으로부터 강우의 높은 산성이 중화되었음을 의미한다. 수관에서는 엽과 수간의 표면에 체류된 산성우적은 세포 내부로부터 표면으로 분비되어 완충계에 관여하고 있는 무기이온, 아미노산, 단백질 및 탄수화물 등의 용출을 증가시키는 한편 H<sup>+</sup>과 음이온을 흡수하고, 상대적으로 엽기성 양이온들의 용탈을 증가시키게 되는데 (Johnson & Lindberg, 1992), 조사지에서 수관층

Table 2. Weighted average pH and ion concentration of wet deposition(WD), throughfall(TF) and stem-flow(SF) during investigated period

	pH	H <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		(μmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup> )									
WD	4.3	54.3	4.6	39.0	25.7	8.2	16.7	43.6	3.1	15.8	14.7
TF	5.7	2.1	70.0	53.8	96.4	23.6	64.8	53.4	3.1	28.5	128.6
SF	5.1	8.3	82.7	41.4	55.0	19.5	16.0	40.2	4.7	37.4	39.8

Table 3. Fluxes of wet deposition(WD),throughfall(TF)and stemflow(SF) during sampling period

	Rain (mm)	H <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>
		(kmol <sub>c</sub> ha <sup>-1</sup> period <sup>-1</sup> )									
WD	635	0.34	0.03	0.25	0.16	0.05	0.11	0.28	0.02	0.10	0.09
TF	549	0.01	0.37	0.29	0.49	0.15	0.34	0.28	0.02	0.16	0.63
SF	20	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
△	-	-0.33	0.35	0.05	0.34	0.10	0.23	0.01	0.00	0.05	0.54

△ = (throughfall + stemflow) - wet deposition

의 완충계 작용에 의한 H<sup>+</sup>의 소비는 상당히 큰 것으로 나타났다. 이와 관련된 연구로 북해도 북부 위치가 다른 3개 지역(Nakanomine, Adachinosawa, Dorokawa)의 가문비나무림에서 조사한 임내우, 수간류의 H<sup>+</sup> flux는 각각 0.24, 0.28, 0.35kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 강우와 건성강하물의 H<sup>+</sup> flux 합계치인 0.59, 0.67, 1.04kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>와 수치적으로 볼 때 수관층에서 흡수된 H<sup>+</sup>은 각각 0.35, 0.39, 0.69 kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 조사되었는데(永田修와 波多野,1999). 이를 본 조사지와 비교하면, 비교지역들에서 H<sup>+</sup> flux 양은 높았던 반면에 수관층에서 H<sup>+</sup> 흡수율은 Tomakomai 활엽수림이 비교지역의 침엽수림보다 높았다.

## 2. Canopy leaching(LI) flux의 추정

임내우(TF)와 수간류(SF)는 습성퇴적물(WD), 건성퇴적물(DD) 및 수관층 용탈(LI)로 이루어지며, DD와 LI는 강우 이외의 물질 부과량(△)이 된다. 즉 식으로 표현하면 DD + LI = (TF + SF) - WD가 된다. 따라서 여기서 DD 양을 추정할 수 있으면 LI 양도 알게 되는데, DD를 추정하는 방법으로 Na이 지표로 이용되며 이것이 지표로 제시되는 것은 수관에서 용탈되는 Na 양은 무시할 정도로 식생 중의 Na 농도가 낮기 때문이고, DD는 ① 강우로서 관측된 이온 flux는 대부분이 습성퇴적이며, ② △ 내의 Na<sup>+</sup>는 거의 건성퇴적으로부터 유래하고, ③ 건성퇴적 내 이온 조성은 강우 내 이온조성과 거의 동일하다고 가정하

면, 다음 계산식으로 추정할 수 있다. 즉, DD = △ Na<sup>+</sup> × WD / WD<sub>Na</sub>이다. 식에서 WD / WD<sub>Na</sub>는 각 강우 내 Na 농도와 강우내 용존되어 있는 각 이온의 비율을 의미한다.

위와 같이 방법으로 추정한 DD의 flux 결과는 Table 4와 같으며, DD flux에 의한 양이온(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) 양은 0.1kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>, 음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 양은 0.12kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 WD와 비교해서 각각 5배와 3배 적은 양이었고, 양이온에서 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, 음이온에서 Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이 높아 강우 이온 특성은 강우와 거의 동일한 경향이였다.

위 식과 같이 DD가 추정되었기 때문에 수관층 용탈(LI)은 Table 3에서 표시되어 있는 △에서 DD 값을 제외시키면 얻을 수 있다. 그 결과는 Table 4와 같다. 수관층 용탈에서 양이온 flux 양은 0.95kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 강우의 양이온 flux와 비교해서 2배 높았고, 강우에 의한 H<sup>+</sup> 부하량 보다는 약 2.8배 높은 양이였다. K<sup>+</sup>와 Ca<sup>2+</sup>양은 각각 0.34, 0.31kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>로 양이온 flux의 68%를 차지하였다. - 경향을 보인 Cl<sup>-</sup>은 H<sup>+</sup>이온처럼 양이온과 치환되어 엽면에서 흡수가 일어난 경우이다.

## 3. 토양침투용액의 평균 pH 및 이온농도

자연조건하에서 O층에서 C층까지 채취한 토양침투수의 평균 pH와 이온농도는 Table 5와 같다. 토양침투수의 평균 pH는 O층(pH 5.4)으로부터 C층 (pH

Table 4. Fluxes of dry deposition(DD) and canopy leaching(LI)

	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	(kmol <sub>c</sub> ha <sup>-1</sup> period <sup>-1</sup> )							
DD	0.01	0.05	0.03	0.01	0.02	0.08	0.01	0.03
LI	0.34	0.00	0.31	0.09	0.21	-0.02	0.00	0.02

LI = △ - DD, △ = (throughfall + stemflow) - wet deposition

Table 5. Weighted average pH and ion concentration of O, A and C horizons

	pH	H <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
(μmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )												
O	5.4	4.1	103.5	63.8	280.1	361.7	33.0	58.1	60.2	40.5	71.2	3.7
A	5.8	7.9	67.2	115.5	146.2	45.3	3.4	35.0	32.5	39.3	80.6	0.6
C	6.1	0.8	87.6	191.9	159.5	47.3	3.8	40.1	31.9	43.8	160.0	0.8

6.1)으로까지 점진적으로 증가하였다. 이온농도에서 양이온의 경우 Na<sup>+</sup>를 제외한 모든 이온들은 O층에서 가장 높았고 A, C층에서 감소되었다. A와 C층간에는 C층이 다소 높았다. 음이온의 경우 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>를 제외한 모든 이온들도 양이온과 동일한 경향을 나타냈다. Na<sup>+</sup>와 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>은 O층보다 하층에서 증가하였다.

토양층간 이온농도의 다양한 변화에 대하여 토양침투수에 미치는 토양 내 치환성 염기의 영향을 고찰하기 위하여 토양침투수에 존재하는 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup>을 이온조성 100%로 하여 각각 층에 대한 토양침투수의 이온조성비를 Figure 2와 같이 비교 분석하였다. Figure 2에서 각층에 대한 이온조성비는 다르게 나타나 Mg<sup>2+</sup>은 O층에서 하층으로 가면서 낮아졌으며, Ca<sup>2+</sup>은 O층에서 Mg<sup>2+</sup>보다 다소 낮았으나 하층으로 가면서 증가하였다. K<sup>+</sup>의 경우 O층에서 가장 낮았고, A와 C층에서 Ca<sup>2+</sup>와 같이 증가하였으나, Ca<sup>2+</sup>과 비교해서 아주 낮은 증가율이었다. 따라서 각층에서 토양침투수의 이온조성과 Table 5에서 각 이온농도를 비교할 때 토양층에서 토양침투수 내로 교환되어 나오는 치환성 양이온의 주요한 성분은 Ca<sup>2+</sup>이었다. 이는 笹小牧의 삼림토양은 화산방출미숙토로서 Ca가 주성분으로 구성되어 있기 때문이며(Table 1), 화산방출미숙토에 다량 존재하고 있는 토양 중 Ca는 토양침투수의 이온조성에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 생태계 내로 유입되는 porton에 대한 Ca-치환용량은 상당히 클 것으로 판단된다.

4. 토양의 이온배출 flux 추정

토양침투수에 의한 이온 용탈은 생태계 물질순환의 계의 유실로서 생태계의 물질수지 균형에 대단히 중요한 요인 중 하나가 된다. 그 이유로 이온 용탈량이 대기로부터의 유입량보다 크다면 이온은 유입량에 유출량의 차이만큼 생태계로부터 감소되고, 반대인 경우 유입량에 유출량의 차이만큼 이온은 생태계에 축적되기 때문이다. 이러한 물질순환 수지를 이해하는 단계로 토양에서 용탈되는 이온 flux를 추정하게 되며, Johnson과 Lindberg(1992)의 Cl 수치법은 1년 기

간 동안에 토양-식물계 내의 Cl 현존량은 변화하지 않는다는 가정하에 배출수량을 추정하는 데 이용된다. 그 이용식은 토양 배출수량 = [(Cl<sup>-</sup>의 흡성퇴적 flux(kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) + Cl<sup>-</sup>의 건설퇴적 flux(kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>)] / C층 토양침투수 내 Cl<sup>-</sup>의 가중평균 농도 × 10<sup>5</sup> 과 같다. 본 연구에서도 이와 같이 배출수량을 추정한 후에 다음과 같이, C층 토양침투수 중 수량에 대한 가중평균 이온농도 (μmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) × 토양의 배출수량(mm y<sup>-1</sup>) × 10<sup>-5</sup>, 이온배출 flux를 추정하였다. 추정 결과는 Table 6과 같으며, 이에 대한 염기성 양이온 flux는 0.44kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>이었다. 그중 Na<sup>+</sup>이 0.17kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> 로 가장 높았으며, 그 다음 Ca<sup>2+</sup> 0.15kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>, K와 Mg는 각각 0.08과 0.04 kmol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup>이었다. Na<sup>+</sup>의 경우 WD와 DD로 생태계로 유입되는 양이 다른 용탈 이온들보다 월등히 높았고, 그 근원은 해염으로부터 유래한 것으로 토양구성 물질로부터 용탈한 것이라고 이해하기는 어렵다. Table 1에서 제시한 것과 같이 조사지의 토양 특성으로 치환성 양이온은 Na<sup>+</sup>가 가장 낮은 수준이기 때문에

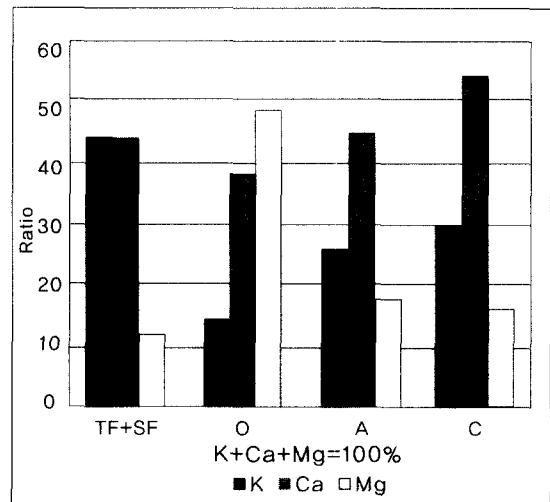


Figure 2. Composition of K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> in throughfall(TF)+stemflow(SF) and soil leachates(O, A and C horizons)

Table 6. Base cation budgets in soil-forest system

	K	Na	Ca	Mg
	(kmol <sub>c</sub> ha <sup>-1</sup> period <sup>-1</sup> )			
WD	0.03	0.25	0.16	0.05
DD	0.01	0.05	0.03	0.01
SL	0.08	0.17	0.15	0.04
△	-0.03	0.13	0.04	0.02

$$\Delta = (WD + DD) - SL$$

WD: Wet deposition, DD: Dry deposition, SL: Soil leachate from C horizon

토양의 이온배출 flux에서 가장 높은 수준을 보인 Na<sup>+</sup>는 생태계 외부의 원인으로 생각할 수 있다. 따라서 Na<sup>+</sup>를 제외하면 토양 내 치환성 양이온 중 Ca<sup>2+</sup>가 가장 높은 수준이다. Table 6에서 △는 생태계로 물질유입과 외부로의 물질제거 과정에 관한 매개체로서 생태계의 물질순환에 대한 수지균형을 나타낸다. 즉 △는 생태계로 유입되는 물질 flux와 생태계 내로부터 외부로 배출되는 flux의 차를 말하는 것으로 - 값은 생태계에서 물질손실을 + 값은 생태계에서 물질축적을 의미한다. 일본 北海道の 筥小牧연습림 내 낙엽활엽수 천연림에 대한 물질순환 수지를 보면 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup>은 생태계내부에서 외부로 방출되는 양보다 생태계로 유입되고 있는 양이 많아 축적되고 있는 것으로 나타났다. 반면에 K<sup>+</sup>는 생태계에서 외부로 방출되는 양이 생태계로 유입되고 있는 양보다 많아 - 수치를 나타냈다. 따라서 본 조사지는 Table 6에서 생태계의 물질순환에 대한 수지균형을 추정 한 것과 같이 산성퇴적물에 의한 proton 부하량에 대해서 일반적으로 나타나는 토양산성화와 함께 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>이 손실되는 현상이 발생하고 있지 않았으며, 조사기간 중 생태계로 유입되는 산성물질은 생태계의 물질순환에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 추정되었다.

## 인용문헌

- 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.
- Draaijers, G. P. *et al.*(1997) The impact of canopy exchange on differences observed between atmospheric deposition and throughfall fluxes, *Atmospheric Environment* 31(3): 387-397.
- Harkel Ten, M. J.(1997) The effects of particle-size distribution and chloride deposition of sea-salt aerosols on estimating atmospheric deposition at a coastal site. *Atmospheric Environment*, 31(3): 417-427.
- Shibata, H and H. Sakuma(1996) Canopy modification of precipitation chemistry in deciduous and coniferous forests affected by acidic deposition, *Soil Sci. Plant Nutr.* 42(1): 1-10.
- Johnson, D. W. and S. E. Lindberg(1992) *Atmosphere deposition and forest nutrient cycling*, Springer-Verlag, New York, pp. 707.
- Liechty, H. O., G. D. Morz, and D. D. Reed(1993) Cation and anion fluxes in northern hardwood throughfall along an acidic deposition gradient. *Can. J. For. Res.* 23: 457-467.
- Matzner, E. and K. J. Meiwe(1994) Long-term development of element fluxes with bulk precipitation and throughfall in two German forest, *J. Environ. Qual.* 23: 162-166.
- Roberston, S. M. C.(2000) Water chemical of throughfall and soil water under four tree species at Gisburn, northwest England, before and after felling, *Forest Ecology and Management* 129: 102-117.
- 일본토양비료학회(1978) 昭和62年度酸性雨による土壤影響調査, 昭和62年度環境廳委託業務結果報告.
- 大喜多敏一, 村野健太郎(1990) 大氣汚染物質降下量の評價, *人間環境系 研究報告書*, 1-13쪽
- 永田修, 波多野 隆介(1999) 地形と土壤の違いが樹冠の酸緩衝機能に及ぼす影響 - 農林地生態系の地球化學的物質循環速度調整機能とそのモデル化. 北海道大學 大學院, 35-42쪽.