

## 산림 소유역 생태계에서 질소와 황의 유입량, 유출량과 물질수지

유영한<sup>†</sup> · 김준호\* · 문형태\*\* · 이창석\*\*\*

서울여자대학교 생태연구센터, 서울대학교 생물학과\*,  
공주대학교 생물학과\*\*, 서울여자대학교 환경생명학부\*\*\*

**적 요:** 생태계의 필수원소이고 대기오염의 주물질인 질소와 황의 유입량, 유출량과 연물질 수지를 밝히기 위하여 집수역의 특성이 알려지고, 수문학 연구시설이 구비된 산림청 임업연구원 중부시험장내 광릉시험림의 침엽수림과 활엽수림 소유역 생태계에서 강수량과 유출수량을 측정하고, 이 속에 있는 두 물질의 함량을 분석하고 이를 수문학적 자료와 통합하였다. 광릉의 연평균 강수량은  $12,916 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이었고, 연평균 유출량은 각각  $5,094$  (39%)와  $7,467 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ (59%)로서 침엽수림이 활엽수림보다 더 낮았다. 강수에 의한 N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ )와  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 연 평균 유입량은 각각  $12.50$ 과  $81.72 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이었다. 유출수를 통하여 생태계로부터 유출되는 N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ )과  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 유출량은 침엽수림소유역에서 각각  $0.06$ 과  $39.23 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이었고, 활엽수림소유역에서 각각  $0.15$ ,  $55.46 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로서 질소와 황은 생산성이 높은 천이초기 단계에 있는 침엽수림이 극상단계에 있는 활엽수림 소유역보다 적었는데 이는 물질생산에 의하여 이들 물질이 생물체의 조직에 축적되었음을 시사하였다. 이 결과로부터 계산한 N( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ )과  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 연수지는 침엽수림소유역에서 각각  $+12.46$ ,  $+42.49 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 활엽수림소유역에서 각각  $+11.35$ ,  $+26.26 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로서 두 생태계에 축적되었다.

**검색어:** 물질 수지, 산림, 소유역 생태계, 수문학, 질소, 황

### 서 론

육상생태계는 기체, 액체 및 고체상의 물질이 계속하여 출입하는 개방계이다 (Tansley 1935, Evans 1956, Schlesinger 1989). 물질은 바람이나 중력과 같은 기상학적 요인, 유동수나 중력의 지형학적 요인 및 동물과 같은 생물학적 요인에 의하여 계 사이를 이동한다. 생태계 내·외로 출입하는 물질은 대기를 통하여 비나 눈에 녹은 화학물질과, 지형적으로 지표나 지중배수 및 퇴적물질의 이동에 의한 가용성 또는 입자성이다. 이 중 대기를 통하여 생태계로 유입하는 물질의 양은 강수량과 강수 속의 물질의 양을 정량함으로써 알 수 있다 (Likens *et al.* 1981).

산지 소유역 생태계의 지형은 토양 층이 얇아서 표면분수령과 지중분수령이 거의 같다. 따라서 표면소유역과 지중소유역이 동일하므로 하나의 소유역은 뚜렷한 경계역을 갖는 단위 생태계이다(Aber and Melillo 1991). 이와 같이 지형과 분수령이 일치하면 인접 소유역으로부터 지형학적으로 물의 유입이 없기 때문에 생태계의 물질의 유입은 기상학적 요인과 생물학적 요인에 의해서만 일어난다. 그런데 생물(동물)에 의한 물질의 유입과 유출은 온대지방 생태계의 물질 순환에서 차지하는 비율이 낮기 때문에 무시할 수 있고 (Likens *et al.* 1977, Whittaker *et al.* 1979), 대기 중에는 침전형 물질이 적게 포함되어 있기 때문에

물에 포함된 물질의 유입과 유출의 수치로부터 계 내의 변화량을 알 수 있다.

이러한 소유역 생태계의 개념을 적용한 연구는 전에 불가능하던 생태계의 기능적 연구를 가능하게 하였다(Bormann and Likens 1979). 소유역 생태계의 개념을 적용한 체계적인 연구는 Bormann과 Likens(1967)에 의하여 산지 소유역인 Hubbard Brook Ecosystem Experiment에서 시작되어, 장기 생태계 변화와 기능이 주요 연구주제가 되고 있다(Edwards and Helvey 1991, Fuchrer and Huescr 1991).

국내에서 물질 순환에 대한 연구는 Mun 등 (1977), Kim과 Mun (1982)이 서로 다른 식생형에서 일어나는 순환을 연구하였고, 산림 소유역의 물수지에 대하여 1980년 대 중반부터 홍수기와 갈수기, 산림의 공익적 기능평가, 삼림 이수실험 등이 연구되었으며 (金 1987, 김 등 1992, 류 1986, 이 등 1989, 이 1991), 화강암지역과 석회암지역의 소유역에서 유출량과 그 유출수의 금속이온 농도 변화가 연구되었을 뿐이다 (이 1989, 박 1991).

본 연구는 수문학 연구시설이 구비된 산림청 임업연구원 중부임업시험장 광릉의 침엽수림 소유역과 활엽수림 소유역 생태계에서 소유역 접근법을 이용하여, 생태계의 필수원소이자 산성비의 주성분이 질소와 황의 수지를 밝히기 위하여 수문학적 연구와 물 속에 함유된 농도를 분석하고 이를 통합하였다.

<sup>†</sup> Author for correspondence; Phone: 82-32-560-7281, e-mail: you84327@hosanna.net

재료 및 방법

조사지개황

본 연구의 조사지는 경기도 남양주군, 포천군 및 의정부시의 경계에 위치한 산림청 임업연구원 중부임업시험장 광릉시험림 (37° 45'N, 127° 10'E) 내의 침엽수림과 활엽수림에 수문학 시설이 설치된 소유역이다. 이 곳은 광주산맥의 지맥으로 최고봉인 죽엽산 (600m), 소리봉 (536m) 및 용암산 (477m)으로 이루어져 있고, 왕숙천의 지류인 영대천이 흐르고 있다. 모암은 선캄브리아기 경기편마암 복합체 (한국동력자원연구소 1984)이며, 토양은 그 복합체에서 유래한 유기물이 많이 섞인 갈색삼림토양이다 (吳 1958). 기후는 계절풍의 영향을 주로 받는 중부내륙성 기후를 나타내며, 연평균기온이 11.3°C이고, 연평균강수량이 1,365 mm로 그 중에서 약 60%가 7월~9월 사이에 내린다 (박 1982). 토양 동결기간은 12월부터 3월까지이고, 토양 동결 최심 깊이는 45.7 cm이다 (민 등 1974).

본 조사지의 소유역에서 시설물은 삼림청 임업연구원 산림이수실에서 1980년부터 현재까지 삼림이수 및 유수유도량 시설지로 이용하고 있는 곳이다 (Table 1, 禹 1987). 활엽수림 소유역이 침엽수림 소유역보다 약 2배의 넓은 면적이고, 표고도 전자가 후자보다 200 m정도 높으나 하천의 특성을 나타내는 지수가 크지 않고, 최장하천폭이 3m 이내로 하천분류상 개천에 해당하는데 (김 등 1993), 이는 한국의 전형적인 산지하천의 특성을 나타

내는 것이다(마 1985).

강수량과 유출량 측정

강수량은 침엽수림 소유역 수위계실위에 자기우량계(직경 287.3 mm, 단면적 648.2 cm<sup>2</sup>)를 설치하여 매일 정량하고, 유출량은 저수조 (700×350×170 cm)의 대수면에 90°를 유지하는 철제 양수웨어를 넘쳐나오는 수량을 자기수위계로 측정한다. 산림청 임업연구원 중부시험장 광릉시험림 내의 삼림이수시설의 측정치를 이용하였다.

물의 채수와 물질분석

강수 분석을 위한 시료의 수집은 비가 그친 후 가능한 한 빨리 polyethylene 병 (1L)에 채수하여 실험실로 운반하였다. 유출수는 0.01% 황산으로 세척한 polyethylene 병 (1L)을 현장에서 유출수로 한 번 행군 후에 채수하였고, 2주 간격으로 수거하였다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 phenate법으로 발색하였으며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N는 하이드라진으로 환원시킨 다음 발색시켜 각각 630 nm와 543 nm에서 분광광도계로 비색정량하였다 (조 등 1991). SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 BaCl<sub>2</sub>로 침전시킨 후 420 nm에서 분광광도계 (Beckman 24)를 이용하여 탁도를 정량하였다 (APHA 1989).

수문과 물질수지 계산

강수량과 유출량은 4월~9월까지의 생육기와 10월~3월까지의 비생육기로 구분하고, 물질의 연수지는 분석한 물질의 월 평균농도에 수량을 곱하여 월수지를 구한 후 12개월의 합으로 연수지(kg/ha)를 계산하였다.

Table 1. Characteristics of topography and physical factors of top soil of deciduous and coniferous forested watersheds in Kwangnung

Item	Deciduous forest watershed	Coniferous forest watershed
Catchment area (ha)	22.0	13.6
Forest management unit	31, 33	41, 42, 37
Altitude (m)	280~477	160~290
Slope (°)	5~35	13~35
Aspect	SW, SE, NS	SW, SE, NS
Drainage pattern	Half dendrite	Half dendrite
Main stream length (m)	639	483
Largest stream width (m)	2.5	1.5
Circumference length (m)	2,185	1,580
Shape factor	0.88	0.70
Mean basin width (m)	566	339
Bed rock	gnesis	gnesis
Rock coverage (%)	2	4
Soil type	sand loam	sand loam
Soil depth (cm)	15~90	22~74
Soil organic matter (%)	3~15	5~13
Soil moisture content (%)	8~80	4~83
Soil pH	5.2~5.8	5.0~5.7
Litter depth (cm)	4~16	3~12

결 과

강수량과 유출량

광릉 분수계에서 1991년 7월부터 1993년 12월까지 30개월 사이에 측정된 월 강수량은 35~4,633 ton · ha<sup>-1</sup> · month<sup>-1</sup>의 범위로 크게 변하였으며, 6 - 9월에 연 강수량의 60% 이상이 내리는 전형적인 한국의 하계 집중형을 나타내었다 (Fig. 1). 특히 1 - 4월 동안의 강수량은 416 ton · ha<sup>-1</sup> · month<sup>-1</sup>으로서 연강수량의 3%로 적은 양이었다. 1992년과 1993년의 1월 - 12월의 연강수량은 12,817 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>과 13,016 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>으로서 연평균 12,917 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>이었다. 본 연구 중 2년 간의 강수량은 박 (1982)이 광릉에서 과거에 보고한 10년 (1972~1981)의 연평균 강수량 13,650 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup>보다 적은 값이다.

침엽수림 소유역의 월평균 유출량은 425 ton · ha<sup>-1</sup> · month<sup>-1</sup> (58~2,732 ton · ha<sup>-1</sup> · month<sup>-1</sup> 범위)이었다. 월평균 강수량에 대한 월평균 유출량의 비는 39%이며, 그 범위는 9%~494%의 넓은 변화를 나타내었다 (Fig. 1). 연 유출량은 1992년과 1993년 각각 4,418 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup> (연 강수량의 35%)과 5,771 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup> (44%)이었고, 연평균 5,094 ton · ha<sup>-1</sup> · yr<sup>-1</sup> (39%)이었다. 한편 월 강수량에 대한 월 유출량의 비는 월 평균 42%이었는데

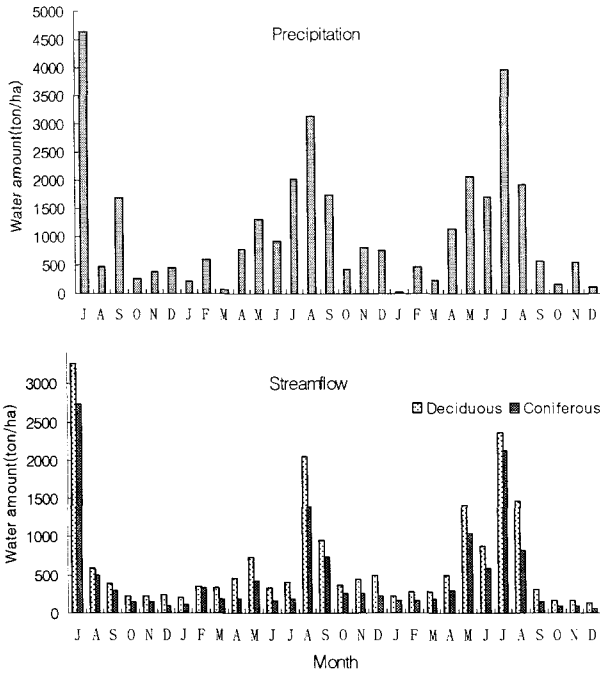


Fig. 1. Monthly amount(ton/ha) of precipitation and streamflow in deciduous and coniferous forest watershed ecosystems from July 1991 to December 1993.

생육기에는 25%로 낮았고, 비생육기에는 175%로 높았다.

활엽수림의 유출량은 월 평균  $637 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$  ( $122 - 3,268 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$  범위)이었고, 강수량에 대한 유출량의 비는 월 평균 59% (29% - 654%)이었다(Fig. 1). 연 유출량은 1992년과 1993년에 각각  $7,129 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (연 강수량의 56%)과  $8,165 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (63%)이었고, 연 평균  $7,647 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (59%)이었다 (Table 6). 한편 월 강수량과 월 유출량과의 비는 생육기에 26%, 비생육기에 74%이며, 월 평균 60%이었다.

**질소와 황 농도**

강수속의  $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$  농도는 생육기 ( $0.90 \text{ mg NO}_3^- + \text{NH}_4^+/\text{L}$ )가 비생육기 ( $1.22 \text{ mg NO}_3^- + \text{NH}_4^+/\text{L}$ )보다 적었다(Fig. 2). 이는 비생육기인 겨울철 동안에 난방을 위하여 사용된 화석연료의 증가로 해석된다 (김 1994). 유출수의  $\text{NO}_3^-$  농도는 침엽수림과 활엽수림에서 생육기 ( $0.011 \sim 0.0019 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ )보다 비생육기 ( $0.017 \sim 0.038 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ )에 약간 높고, 침엽수림 ( $0.011 \sim 0.017 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ )보다 활엽수림 ( $0.019 \sim 0.038 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ )이 약 2배 높았다. 유출수의  $\text{NO}_3^-$  농도는 강수 ( $0.44 \sim 0.51 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ )보다 낮았다.

생육기와 비생육기의  $\text{SO}_4^{2-}$  농도(100 : 122)는 모두 후자가 전자보다 많았다(Fig. 3). 특히 강수속의  $\text{SO}_4^{2-}$  농도는 봄에 증가하고 여름에 감소하는 경향을 나타냈다. 유출수의  $\text{SO}_4^{2-}$  농도는 침엽수림의 생육기와 비생육기에 각각  $8.61$ 과  $6.25 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ , 활

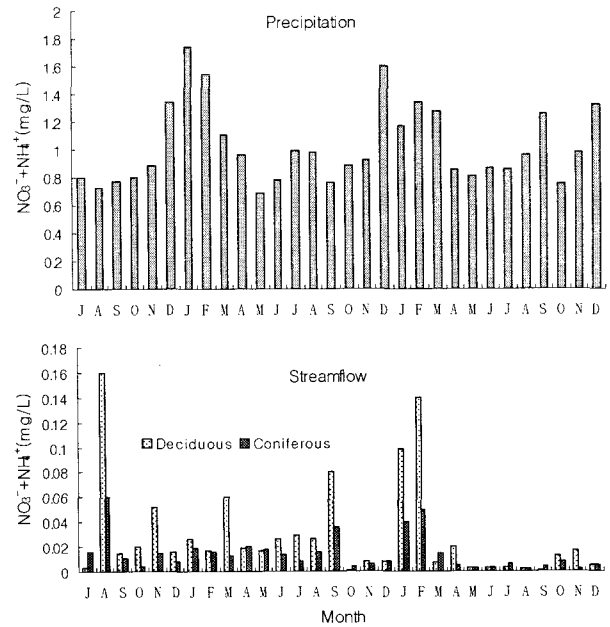


Fig. 2. Monthly concentration(mg/L) of  $\text{N}(\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+)$  in precipitation and streamflow in deciduous and coniferous forest watershed ecosystems from July 1991 to December 1993.

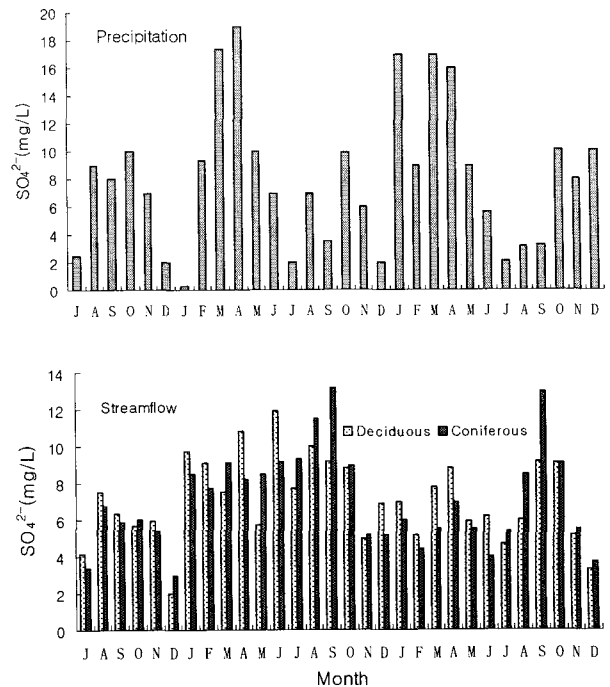


Fig. 3. Monthly concentration(mg/L) of  $\text{SO}_4^{2-}$  in precipitation and streamflow in deciduous and coniferous forest watershed ecosystems from July 1991 to December 1993.

엽수림에서 각각  $8.01$ 와  $6.71 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ 로서 생육기에 많았고, 강수 속의 그 것은 각각  $7.29$ 과  $8.90 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ 보다 생육기에

9~15%만큼 많았고, 비생육기에 25~30%만큼 적었다.

### 질소와 황의 유입량과 유출량

광릉에서 강수를 통하여 유입되는 질소( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ )과 황( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 양은 각각  $12.50$ 과  $81.72 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이었다(Table 2). 연간 강수로 유입되는 물질량은 김 (1994)이 서울 관악산에서 조사한 것 ( $\text{N } 19.55, \text{SO}_4^{2-} 129.44 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )보다 낮은 값이었다. 이는 아직 광릉이 서울의 오염지역에 비하여 덜 오염되었음을 의미하는 것으로 해석된다.

강수를 통한  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 유입량 ( $82 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )은 김 (1994)의 서울 관악산 ( $129 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ) 및 유 (1994)의 서울시의 것 ( $86 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )보다 적으나, 외국의 범위 16 (酸性雨調査委員會 1991) -  $85 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (Hantschel *et al.* 1990)의 상한치에 해당된다. 이와 같이 우리나라 생태계는  $\text{SO}_4^{2-}$ 이 과다로 유입되고 있는 것으로 판단된다.

유출수를 통한 연 질소( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ )량과 연 황( $\text{SO}_4^{2-}$ )량은 활엽수림소유역이 침엽수림소유역보다 각각 250%, 141% 많았다(Table 2). 그리고 유출수를 통한 질소( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ )유출량과 황( $\text{SO}_4^{2-}$ )유출량은 강수의 것보다 침엽수림소유역에서 각각 1%와 48%가 적고, 활엽수림소유역에서 각각 1%와, 68%가 적음으로써 이들은 생태계내에 축적되었다고 할 수 있다.

### 질소와 황의 연 물질수지

침엽수림과 활엽수림 소유역에서 강수를 통하여 유입되는 질소( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ ) 유입량은 침엽수림과 활엽수림에서 다같이  $12.1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이었는데 유출량이 전자 ( $0.1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )보다 후자 ( $0.2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )가 많기 때문에 그들의 축적량은 침엽수림 ( $12.5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )이 활엽수림 ( $11.4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )보다 많았다. 이러한 물질 유출의 경향성은 1992년과 1993년에 거의 같은 경향성을 나타냈다.

침엽수림소유역과 활엽수림소유역 내에 매년 축적된  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 양은 각각  $42.5$ 와  $26.7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 으로 연간 이 생태계가 저장할 수 있는 양으로 해석된다. 따라서 광릉의 삼림생태계에서는 유입되는  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 양은 이들 값보다 크므로 두 소유역의 생태계가 처리할 수 있는 양을 초과한 것으로 판단된다. 침엽수

림소유역과 활엽수림소유역에서 질소( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ )가 생태계 내에 축적되는 양은 거의 같았으나,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 침엽수림 소유역이 더 많았다.

이상의 유입량과 유출량을 기준으로 하여 물질의 연 수지를 판단하면, N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ )과  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 생태계에서 축적되었다(유입량>유출량). 이 수지를 근거로 판단해 볼 때 광릉에 유입되는 N의 양 ( $13 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )은 아직 삼림생태계에 영향을 주지 않을 정도이지만, 다른 나라의 결과와 비교해보면 그 양이 매우 많았다(Table 2).

### 고 찰

두 소유역생태계에서 강수량이 많은 달에 유출량이 적고, 강수량이 적은 달에 평균보다 유출량이 많은 것은 金 (1987) 및 金 등(1992) 등이 보고한 바와 같이 삼림이 홍수와 가뭄조절 및 수자원 함양의 공익적 기능을 나타내는 것이다. 연 평균 유출량은 활엽수림이 침엽수림 소유역보다  $2,553 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (100:67)만큼 많았다. 그 이유는 류 (1986)가 지적한 바와 같이 침엽수림이 성장단계에 있는 어린 삼림이므로 성숙한 활엽수림보다 증산량이 많은 데 있다고 해석된다. Waring과 Schlesinger (1985)는 온대림에서 유출량이 대부분 해빙기에 발생한다고 보고했으나 본 연구에서는 하절기에 나타났다(Fig. 1). 그 이유는 광릉에 강설량이 적고 우량이 하계에 집중하기 때문이라고 판단된다.

침엽수 소유역에서 연 강수량에 대한 연 평균 유출량의 비(39%)는 류 (1986) 및 김 (1987)이 이 지역에서 각각 1982~1984년과 1982~1986년에 조사한 42%와 49%보다 약간 낮았다. 활엽수림 소유역의 비(59%)는 류 (1986)와 김 (1987)에 의한 1982~1984년과 1982~1986년의 측정치인 50%와 62%의 범위에 들었다. 침엽수림과 활엽수림의 유출량 비는 Ovington (1962)이 보고한 침엽수림의 비(28%~58%)의 범위안에 속했으나 활엽수 혼효림(34%~49%)의 상한치보다 높았다.

본 소유역의 유출수의 농도는 李와 元(1994)의 전국의 유출수의  $\text{NO}_3^-$  (3.25 mg/L),  $\text{SO}_4^{2-}$  (4.68 mg/L)농도와 비교해 보면 전자는 매우 낮고 후자는 매우 높았다. 그러나 이 (1989)의 문경 카르스트 소유역의  $\text{SO}_4^{2-}$  (5.55 mg/L)과 비교하면 높은데 이는 문

Table 2. Bulk precipitation inputs, stream water outputs and net changes for Nitrogen and Sulfate for various areas of the world. Values are  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$

Location	$\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$			$\text{SO}_4^{2-}$			
	Input	Output	net changes	Input	Output	Net changes	
Korea <sup>1</sup>	Deciduous		0.2		55.5	+ 26.3	
	Coniferous	12.2	0.1	+12.1	81.7	39.2	+ 42.5
Canada <sup>2</sup>		3.7	0.6	+ 3.1	6.6	8.1	- 1.4
Newhampsire <sup>3</sup>		7.6	2.7	+ 4.9	14.8	17.8	- 3.0
North Carolina <sup>4</sup>		4.5	0.1	+ 4.4	9.7	1.4	+ 8.3

<sup>1</sup> This study, <sup>2</sup> Zeman(1975), <sup>3</sup> Borman and Likens(1977), <sup>4</sup> Swank and Crossley (1984)

경이 석회암지대로 용식이 빠르게 일어나기 때문으로 해석된다.

삼림에서 유출수의 물질의 농도가 강수의 것보다 변이가 적은 것은 삼림생태계에서 일반적으로 관찰되는 현상으로서 이는 토양입자나 식생 등의 생태계구성원의 높은 완충능에 의한 결과이다 (Likens *et al.* 1967, Bormann and Likens 1979, Whittaker *et al.* 1979).

소유역으로부터 나오는 유출수의 물질의 농도는 침엽수림생태계가 활엽수림보다 낮음으로써 1차 순생산량이 높고, 임령이 어린 삼림에서 물질이 더 활발하게 저장되고 있음을 나타냈다 (Table 1, Table 2). 이러한 결과는 생태계의 발달에 따른 영양소 보유기작에 대한 Odum (1969)의 가설과 상반되고, Vitousek (1977), Vitousek과 Matson (1984, 1985) 및 Vitousek과 Reiners (1975)의 식물체 축적설 (biomass accumulation hypothesis)과 일치하는 결과이다 (Gorham *et al.* 1979, Gosz *et al.* 1973). 즉 침엽수림은 1차 순생산량이 높기 때문에 물질대사가 활엽수림보다 더 활발하고, 그 결과 물질이 더 많이 필요함으로써 토양으로부터 더 많은 양을 흡수하여야 한다. 따라서 물질이 생물체에 축적되는 속도가 빠르기 때문에 유출수에 녹아 나오는 양은 침엽수림에서 1차 순생산량이 낮은 활엽수림보다 더 낮다고 할 수 있다 (Swank and crossley 1984).

1년 동안에 침엽수림과 활엽수림 생태계에서 정화되는  $SO_4^{2-}$ 의 양을 수지의 순변화량인  $42$ 과  $26 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로 추정할 때, 광릉에서 강수에 의한 S의 유입량은 이미 생태계가 정화할 수 있는 양을 초과했음을 의미한다. 이는 황의 유출량이 침엽수림과 활엽수림 소유역에서 각각  $39$ 와  $56 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 으로서 광릉과 같은 편마암을 가진 Hubbard Brook (Bormann and Likens 1979)의  $18 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (유입량  $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )보다 매우 높은 사실로부터 알 수 있다.

그러나 질소나 황이 생태계내로 입자상 형태로 유입되고, 이때 식생의 수관에 의하여 크게 변화하므로 보다 정밀한 물질수지를 밝히기 위해서는 수관통과수, 수간유하수 및 수관과 수간차 단량에 의한 유입량도 밝혀져야 하고(김 1994, 유 1994), 특히 질소의 경우 질소고정과 탈질과정에 의한 생태계내 변화량을 정량화하여야 할 것이다(Vitousek 1977).

#### 인용문헌

- 김경하, 이천용, 이원규. 1992. 유역의 입지조건이 갈수기 저수량에 미치는 영향. 임연연보 44:75-86.
- 김기대. 1994. 소나무와 신갈나무 숲에서 강수, 수관통과수 및 수간유하수에 의한 무기영양소의 이입량. 서울대학교 석사학위논문. 77p.
- 金載水. 1987. 山林이 洪水量에 미치는 影響과 小流域內 蒸發散量 推定. 林研研報 35:69-78.
- 류택규. 1986. 삼림에 있어서 물수지에 관한 시험연구. 강원대학교 박사학위논문. 29p.
- 마호섭. 1985. 야계의 특성에 관한 연구. 1985. 충북대학교 석사학위논문. 54p.
- 민경현, 고성하, 박태영. 1974. 산림기상에 관한 연구 (시험림의 산지기상 조사연구). 林業研報 21:231-242.
- 朴秀鎭. 1991. 小規模 花崗岩質 河川流域의 物質收支와 風化特性에 關한 研究. 서울대학교 碩士學位論文. 87p.
- 박태영. 1982. 광릉풍치림의 국지기상조사연구. 한국조경학회지 10:34-46.
- 酸性雨調査法委員會. 1991. 酸性雨調査法. 東京. 325p.
- 吳桂七. 1958. 光陵森林群落的 植物群落學的 研究 (一). 中央大學校 論文集 3:285-318.
- 禹保命. 1993. 森林環境이 水資源涵養에 미치는 影響에 關한 研究. 한국임학회지 82:283-291.
- 유영한. 1994. 광릉의 활엽수림과 침엽수림 소유역 생태계내 무기영양소의 유입과 유출. 서울대학교 박사학위논문. 140p.
- 유태철. 1994. 수도권 지역에서 산성 강하물에 의한 리기다소나무림 쇠퇴의 기구와 회복. 서울대학교 박사학위논문. 219p.
- 李天龍, 元亨圭. 1993. 山林流域內 溪流水質의 變化實態. 임업정보 34:21-23.
- 이태형. 1989. 문경 카르스트지역의 여름과 가을의 용식에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문. 64p.
- 李元圭, 李忠和, 姜昌浩, 李樹元, 具昌德. 1993. 林地的 養料循環 促進 (I). 林研研報 38:98-111.
- 李宗學, 李泰勛, 李元圭, 崔敬, 李天龍, 朱鎭順. 1989. 山林의 流出調節에 關한 研究. 林研研報 38:98-111.
- 조규송, 강인구, 권오길, 김범철, 나규환, 안태인, 이종범, 이찬기, 이혜금, 김상오, 최준길 (공역). 1991. 호소환경조사방법. 동화기술. 서울. 365p.
- 한국동력자원연구소. 1984. 전국사면 불안정 지역분포도. 서울편. 253p.
- Aber, J. and J. Mellilo. 1991. Terrestrial Ecosystems. Saunders College Pub., Philadelphia. 429p.
- APHA. 1989. Standard method for the examination of water and wastewater APHA, Baltimore. 1482p.
- Bormann, F.H. and G.E. Likens. 1967. Nutrient cycling. Science 155:424-429.
- Bormann, F.H. and G.E. Likens. 1979. Pattern and process in a forested ecosystem. Springer-verlag. New york. 253p.
- Edwards, P.J. and J.D. Helvey 1991. Long-term ionic increase from a central Appalachian forested watershed. J. of Environ. Qual. 20:250-255.
- Evans, F.C. 1956. Ecosystem as the basic unit in ecology. Science 123:1127-1128.
- Fuehrer, H.W. and R. Huescr. 1991. Output of bioelements from beech forest watersheds on the Krofdrof forest; time trends and effects of timber cutting. Forst-Wissenschaftliches Centralblatt 110:240-247.
- Gorham, E., P.M. Vitousek and W.R. Reiners. 1979. The relation of

- chemical budgets over the course of terrestrial ecosystem succession. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 10:53-84.
- Hantschel, R., M. Kaupenjohann, R. Horn and W. Zech. 1990. Water, nutrient and pollutant budgets in damaged Norway spruce stands in NE-Bavaria (F.R.G.) and their changes after different fertilization treatments. *Water, Air, and Soil Pollution* 49:272-297.
- Kim, J.H. and H.T. Mun. 1982. Ecological studies on the montane grassland of Mt. Soback in Korea. II. Production and nutrient cyclings. *Korean J. Ecol.* 5:204-210.
- Likens, G.E., F.H. Bormann, N.M. Johnson, and R.S. Pierce. 1967. The calcium, magnesium, potassium, and sodium budgets for a small forested ecosystem. *Ecology* 48:772-785.
- Likens, G.E. and F.H. Bormann., N.M. Johnson. 1981. Interactions between major biogeochemical cycles in terrestrial ecosystem. p.93-112. *In* Some perspectives of the major biogeochemical cycles. G.E. Likens (ed.). John Willey and Sons.
- Mun, H.T., C.M. Kim, and J.H. Kim. 1977. Distributions and cyclings of nitrogen, phosphorus and potassium in Korean alder and oak stands. *Korean J. Botany* 20:109-118.
- Odum, E.P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164:262-270.
- Ovington, J.D. 1962. Quantative ecology and the woodland ecosystem concept. *Advances in ecological research* 1:103-192.
- Schlesinger, W.H. 1989. Discussion: ecosystem and function. *In* I. Roughgarden, R.M. May, and S.A. Levin (eds.). *Perspectives in ecological theory*. pp. 268-274. Princeton Uni. press.
- Swank, W.T. and D.A. Crossley. 1984. Characterization of base line precipitation and stream chemistry and nutrient budget for control watersheds. *In* W.T. Swank and D.A. Crossley (eds.). *Forest hydrology and ecology at Coweeta*. p.76. Springer-Verlag.
- Tansley, A.G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 16:284-304.
- Vitousek, P.M. 1977. The regulation of element concentrations in mountain streams in the Northeastern United States. *Ecol. Monogr.* 47:65-87.
- Vitousek, P.M. and W.A. Reiners. 1975. Ecosystem succession and nutrient retention: a hypothesis. *Bioscience* 25:376-381.
- Vitousek, P.M. and P.A. Matson. 1984. Mechanisms of nitrogen retention in forest ecosystems: A field experiment. *Science* 225:51-52.
- Vitousek, P.M. and P.A. Matson. 1985. Disturbance, nitrogen availability, and nitrogen losses in an intensively managed loblolly pine plantation. *Ecology* 66:1360-1376.
- Waring, R.H. and W.H. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems: Concept and management*. Academic press. N.Y. p.145.
- Whittaker, R.H., G.E. Likens, F.H. Bormann, J.G. Eaton, and T.G. Siccama. 1979. The Hubbard Brook ecosystem study: forest nutrient cycling and element behavior. *Ecology* 60:203-220.
- Zeman, L.J. 1975. Hydrochemical balance of British columbian mountainous watershed. *Catena* 2:81-94.

(2002년 4월 28일 접수; 2002년 6월 4일 채택)

---

## Input, Output and Budget of Nitrogen and Sulphur in Forested Watershed Ecosystems

You, Young-Han<sup>†</sup>, Joon-Ho Kim<sup>\*</sup>, Hyeong-Tae Mun<sup>\*\*</sup> and Chang-Seok Lee<sup>\*\*\*</sup>

*Center for Ecological Research, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea*

*Department of Biology, Seoul National University, Seoul 152-742, Korea<sup>\*</sup>*

*Department of Biology, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea<sup>\*\*</sup>*

*Faculty of Environment and Life Science, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea<sup>\*\*\*</sup>*

**ABSTRACT** : In order to elucidate the budget and cycling of Nitrogen and Sulfur, essential elements and principal constituents of acid rain, their input through precipitation, and their output by streamflow were quantified in coniferous and deciduous forested watersheds, using combination of nutrient concentration and hydrological analysis, in Kwangnung Experimental Forest from July 1991 to December 1993. Amount of annual mean precipitation was  $12,916 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , annual mean runoff  $5,094 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (39%),  $7,647 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  (59%) in coniferous and deciduous forest watersheds, respectively. Amounts of annual input of N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) and  $\text{SO}_4^{2-}$  through precipitation were  $12.5, 81.7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , respectively. Annual output via runoff of N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) and  $\text{SO}_4^{2-}$  were  $0.06, 39.23 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  in the coniferous forest watershed ecosystem, and  $0.15, 55.46 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  in the deciduous one, respectively. On the basis of annual nutrient input and output, the annual budget of N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) and  $\text{SO}_4^{2-}$  were  $+12.46, +42.49 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  in the coniferous forest watershed, and  $+11.35, +26.26 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  in the deciduous one. Thus N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) and  $\text{SO}_4^{2-}$  were accumulated in both forested watershed ecosystems.

**Key words** : Forest, Hydrology, Nutrient budget, Watershed ecosystem

---