

# 일본 칸사이 지방 타나카미 산지의 황폐지 복구 산림유역 내 황(黃)순환에 관한 연구

김수진\* · 오테 노부히토\*\* · 박종관\*\*\*

## Sulfur Cycle in the Rehabilitated Forest Catchment in Tanakami Mountain, Kansai District, Japan

Su-Jin Kim\* · Nobuhito Ohte\*\* · Jong-Kwan Park\*\*\*

**요약** : 본 연구는 일본 시가현(滋賀縣) 기류(桐生)수문시험지의 1차곡 소유역인 마쯔자와(マツ沢) 유역에서 유역 내 수문과정과 토양수, 지하수, 계류수의 수질 등의 관측을 실시, 산림유역 내 황(黃) 플럭스를 수문지형학적 관점에서 해석하여 온대 산림유역 내의 황순환 과정을 밝히고자 실시하였다. 유역 상부 교란 구역의 토양은  $SO_4^{2-}$ 의 공급원으로 작용하고 있었으며, 사면 수문과정을 통해 유역 중부와 하부의 침층토양 및 지하수대에  $SO_4^{2-}$ 가 저장되고 있었다. 계류수의  $SO_4^{2-}$  농도는 지하수위 변동과 음의 상관을 나타내고 있는 바, 이는 침층지하수에 저장된  $SO_4^{2-}$ 가 가뭄 등의 저수위시 혹은 평수위시에 유출되고 있음을 의미한다. 본 연구의 결과로부터 산림유역 내 각 수문과정이  $SO_4^{2-}$ 의 저장과 유출에 중요한 역할을 하고 있다는 것이 정량적으로 밝혀졌다.

주요어 :  $SO_4^{2-}$ , 황순환, 토양수, 지하수, 계류수, 산림유역

**Abstract** : To understand the sulfur flux and cycle in the forest catchment, the hydrological processes and chemical variation of soil solution, groundwater and stream water were analyzed at the Matsuzawa catchment located in the Kiryu Experimental Basin, Shiga Prefecture, central Japan. Unsaturated soil layer at the upper slope of catchment was the source area of  $SO_4^{2-}$ , and deep soil layer and groundwater were the sink zone of  $SO_4^{2-}$ . The vertical distribution of  $SO_4^{2-}$  concentrations in groundwater affected seasonal variation of  $SO_4^{2-}$  concentrations in stream water, as groundwater level changed. It is reasonable to assume that each hydrological processes in the forest catchment play an important roles in the retention and discharge of  $SO_4^{2-}$ .

Key Words :  $SO_4^{2-}$ , sulfur cycle, soil solution, groundwater, stream water, forest catchment

### 1. 서론

산림유역의 계류수 수질은 유역내 수문과정, 지형, 식생 등의 종합적인 환경을 반영해 형성된 것이다

(Campbell, 1985; Schlesinger, 1991; Likens *et al.*, 2002). 즉, 빗물에서 계류수까지 수문과정이 진행됨에 따라 유역 고유의 조건인 지형, 지질, 식생, 토양구조 등에 따라 강우 유출과정과 수질변화에 차이를 보인다

\* 연세대학교 지구환경연구소 전문연구원(Researcher, Global Environment Lab., Yonsei Univ.), sujin@hydrokorea.yonsei.ac.kr

\*\* 日本 東京大學 農學研究科 助教授(Associate Professor, Graduate School of Agriculture and Life Sciences, The Univ. of Tokyo, Japan), nobu@fr.a.u-tokyo.ac.jp

\*\*\* 건국대학교 이과대학 지리학과 교수(Professor, Dept. of Geography, College of Science, Konkuk Univ.), jkpark@konkuk.ac.kr

다. 따라서 계류수 수질 형성 과정을 파악하기 위해서는 강우 유출과정 해석이 선행되어야 한다.

1990년대 이후 유역 수준의 수질형성에 관한 연구는 내부 메커니즘의 해명과 그것에 의한 유출수의 수질형성 현상을 해석하는 연구가 주를 이루어 왔다(Band *et al.*, 2001; Ohte *et al.*, 2003; Kim, 2003; Kim *et al.*, 2003). 토양학 분야에서는 토양 생성과정의 공간적 불균질성이 중요시 되어 유역내 수문 소과정의 공간적 분포에 주목하는 연구가 진행되었으며(Allan *et al.*, 1993), 수문학 및 토양학 분야 모두 본질적으로 유역 수문화학의 지중수 수질형성 메커니즘 해명을 주된 연구 대상으로 하고 있다(김수진 등, 2004; 2005).

유역 고유 특성 이외에 계류수 수질을 형성하는 중요한 외적 요인은 산성강하물의 유입이다. 과거 수십 년 동안 화석연료의 연소로 인한 황산화물 배출로 세계 각지에서 산성비 피해가 보고되었다(Galloway, 1989; 2001). 1970년대부터 일본은 강력한 배기가스 규제로 황산화물의 배출을 저감했으며, 우리나라는 1990년대에 들어 배기가스 규제를 실시하였다. 이러한 노력에도 불구하고 중국 대륙의 급속한 경제 발전과 동반하여 동북아시아 지역 전체로 보았을 경우 황산화물의 배출량은 오히려 증가하고 있는 추세이다(Streets *et al.*, 2000).

황산화물의 과도한 유입은 육상생태계 식생과 토양 양분 동태의 교란을 유발할 수 있다고 알려져 있다(Blank *et al.*, 1988; Oren *et al.*, 1988; Schulze, 1989; Innes and Boswell, 1990; Johnson *et al.*, 1994; Hallett and Hornbeck, 1997). 산림생태계로부터 황의 유출은 산지 계류수와 지표수의 산성화에 중요한 역할을 한다. 산림유역 내 황 유출량의 증가는 황산염이온( $SO_4^{2-}$ )이 상대이온(counter ion)으로 작용하여 수소이온( $H^+$ ), 알루미늄( $Al^{3+}$ ), 칼슘( $Ca^{2+}$ ), 나트륨( $Na^+$ ), 칼륨( $K^+$ ) 등과 같은 양이온 물질의 플럭스에 큰 영향을 미친다(Johnson, 1984; Johnson and Mitchell, 1998).

한편 산림생태계로 과도하게 유입된 황산화물은 토양의 흡착과 식생에 의한 흡수를 통하여 저장된다(Likens *et al.*, 2002). 그러나 산림생태계 파괴와 교란이 발생할 때에는 산림생태계 내에 저장된 황산화물은 유역내 물의 이동과 함께 방출된다(Kim *et al.*, 2003).

최근 우리나라 남부 지방을 중심으로 '소나무 에이즈'라 불리는 재선충병(*Bursaphelenchus xylophilus*) (Steiner et Buhner) Nickle)이 대량 발생하고 있으며, 산림생태계 교란의 주요 원인으로 평가되고 있다. 소나무 재선충은 매개충인 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)에 의해 전염이 되며, 감염된 소나무의 경우 양분의 이동통로인 도관을 재선충이 막음으로 물과 양분의 이동이 되지 않아 1~2개월 이내에 고사하는 것으로 알려져 있다(Kishi, 1995). 이와 같은 소나무 재선충으로 인한 산림 피해 면적은 증가하고 있는 실정이나, 이로 인한 유역내 양분이동 및 계류수질 변화에 대한 연구는 우리나라뿐만 아니라 일본에서도 연구가 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라보다 앞서 소나무 재선충 피해가 발생한 일본 칸사이 지역 타나카미 산지의 황폐복구지를 대상으로 각 지형별 수문과정이 산림유역 내  $SO_4^{2-}$ 의 유출에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 유역내 수문과정별  $SO_4^{2-}$ 의 플럭스를 산출하여 향후 산림생태계 교란으로 인하여 발생할 계류수질 변화에 대한 기초자료 제공을 목적으로 실시하였다.

## 2. 연구지역

### 1) 연구지역의 일반 현황

본 연구는 일본 시가현(滋賀県) 오즈시(大津市) 타나카미(田上)산지 기류(桐生)수문시험지(5.99ha; 136° 00' E, 34° 58' N)의 원두부 소유역인 마쯔자와(マツ沢)유역(0.68ha)에서 실시하였다(그림 1). 일본 최대의 자연 담수호인 비와호(琵琶湖)의 남동부에 위치하고 있는 기류수문시험지는 원래 편백림으로 조성된 산림지역이었으나, 1200~1300년 전 인근의 교토(京都) 건설과 연료채취 목적으로 난벌되기 시작하여 메이지 초기(1870년대)까지 황폐지로 존재했다(그림 2(a)). 이 때문에 타나카미 산지로부터 유출된 토사에 의해 비와호-요도가와(淀川) 수계 하천은 토사 퇴적물이 증가하게 되어 물 이용과 수로 이용에 장애 요인으로 작용하게

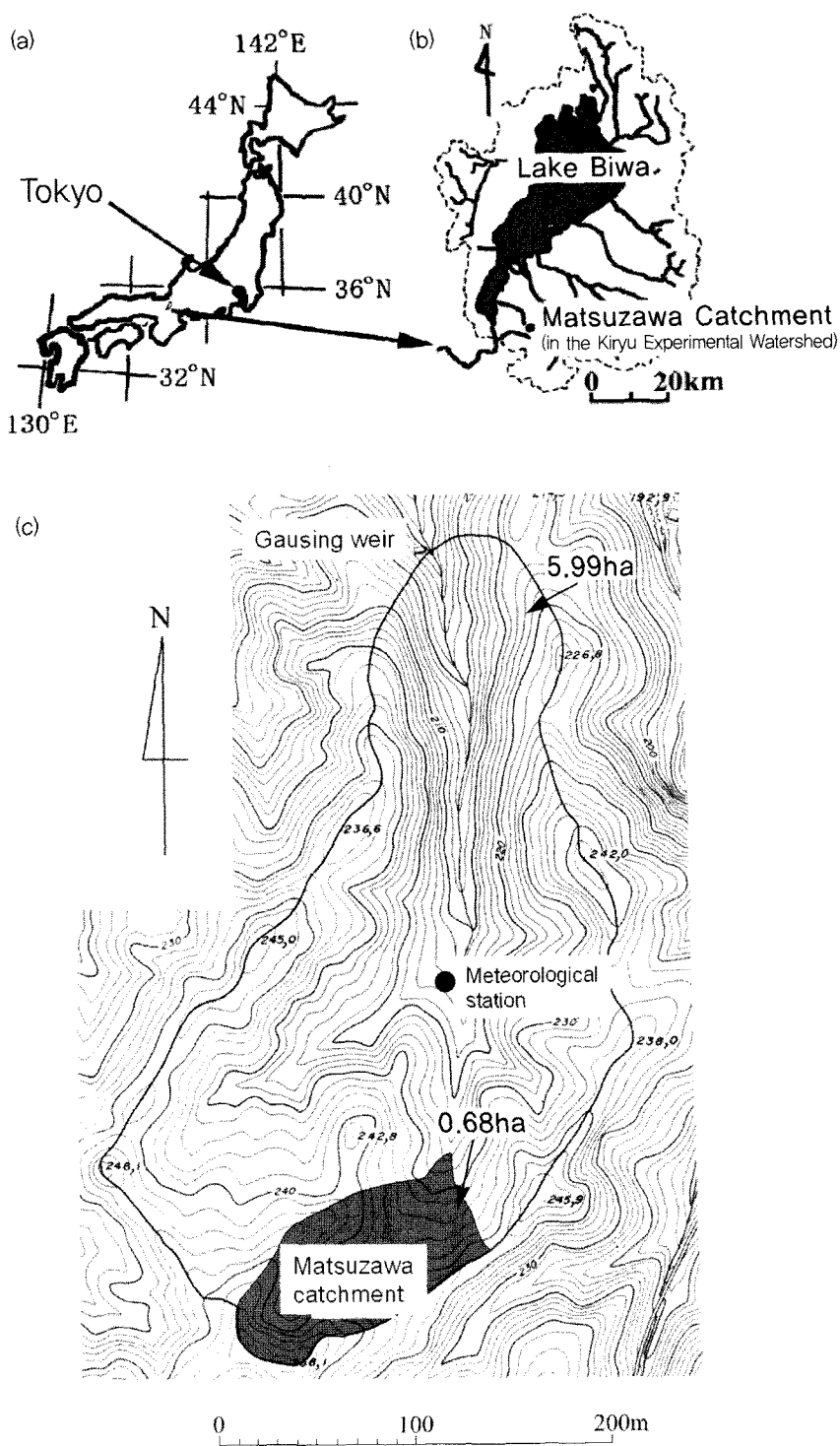


그림 1. 연구대상지의 위치(a, b)와 기류시험지 지형도(c)

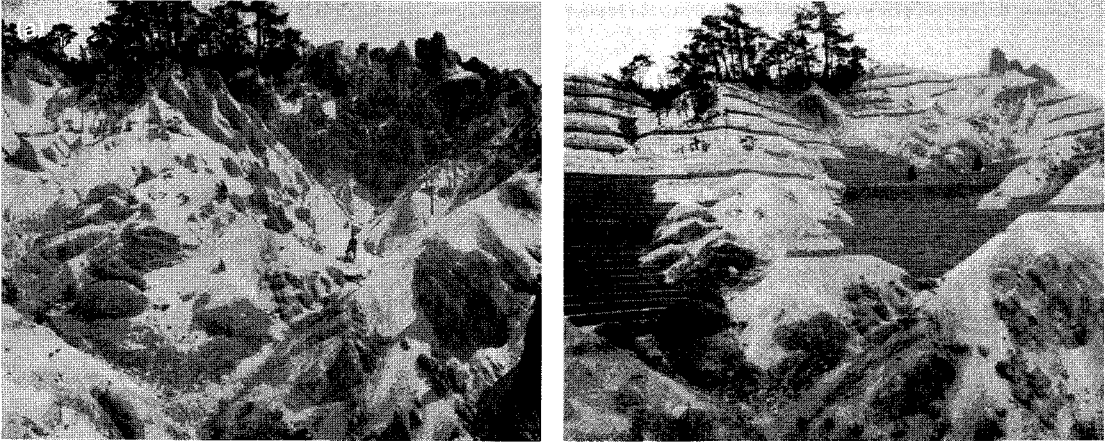


그림 2. 마쯔자와 유역 사방공사 전(a)과 후(b)의 모습  
(1915년 촬영, 저자 미상)

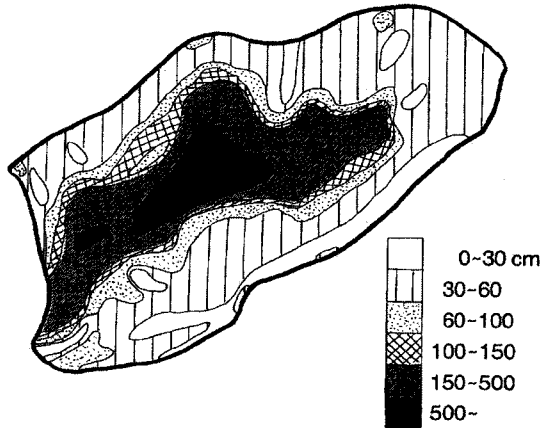


그림 3. 조사 대상지의 토양심도 공간 분포(Kim, 1990)

되었다. 이를 개선하기 위하여 메이지 정부에서는 토사침식 방지 목적으로 황폐지 녹화공사를 실시하였으며, 본 연구 대상지인 기류시험지는 1910년대에 녹화공사를 실시하였다(그림 2(b)). 기류시험지는 1967년부터 지형, 식생, 토양이 물 순환에 미치는 영향 해석을 위해 현재까지 일본 최장기간 수문 관측을 실시하고 있는 시험지이다.

## 2) 수문 특성

본 연구지역의 지질은 풍화화강암으로 쉽게 풍화되는 특성을 지니고 있다. 유역 사면의 상부 토양은 부식

층이 발달되어 있지 않고 A층은 2cm 이하의 토심을 나타내며, B층은 발달되지 않았다. 한편, 사면 하부의 A층은 약 7cm, B층은 약 30cm를 나타내고 있다. 유역의 중앙부와 하부는 상부로부터 침식된 토양이 퇴적되어 최대 8m 이상의 전체 토심을 나타내고 있다(그림 3).

Ohte *et al.*(1995)은 지하수 조건과 호우 발생시 지하수위 변동을 기반으로 유출을 제어하는 수문 기능의 공간 분포를 크게 세 가지로 분류하였다(그림 4). 이 분류를 상세히 살펴보면 ① 유역의 상부는 불포화대 호우시에만 일시적으로 포화되어 불투수성 기반암 상부의 측방류를 통해 하부로 유출되며, ② 유역의 중부

는 천이대로 호우시 포화대가 사면의 상부로 이동하는 지역이며, ③ 하부는 연중 포화되어 지하수대가 존재한다. 유역내 수문과정을 사면의 상부, 중부, 하부 순으로 보면 다음과 같다. 우선 유입된 강수는 불포화 침투로 연직하강을 하여 기반암에 도달하며(그림 4(b)의 A), 호우시 일시적으로 발생하는 기반암 상부의 측방류와 만나 지하수대에 도달한다(그림 4(b)의 B). 한편, 지하수대에 도달한 물은 기반암 상부에서 지하수류(그림 4(b)의 C)를 통해서 용출이 된다(그림 4(b)의 D). 본 조사 대상지의 경우 강수량과 지속시간에 따라서 지하수위의 변동이 심하며, 여름철 호우시 사면 하부의 SZ 지점 부근에서 지하수위 상승으로 일시적인 복귀류가

형성된다. 유역의 상부, 중부, 하부 평균 경사는 각각  $0.5\sim 21^\circ$ ,  $3\sim 30^\circ$ ,  $6\sim 26^\circ$ 이다(그림 4).

조사지의 연평균 기온(1997~2002년)은  $13.9^\circ\text{C}$ , 연평균 강수량(1990~2000년)은 1,679mm(그림 5), 연평균 유출량(1990~2000년, 5.99ha 기준)은 911mm이다(표 1). 조사지 주위 칸사이 지역은 전형적인 해양성 기후를 나타내며, 계절풍 기후대에 속하면서 비교적 온화하며 강수량이 많다. 조사지 유역 내 물의 최장 체류 시간은 8~9개월로 저류량이 적으며, 연강수량의 증감으로 인한 유출율의 변동이 크다(Kabeya *et al.*, 2007). 표 1의 수문 관측자료에서 보는 바와 같이 강수량이 상대적으로 적은 1996, 1999, 2000년에는 급격한 유출율

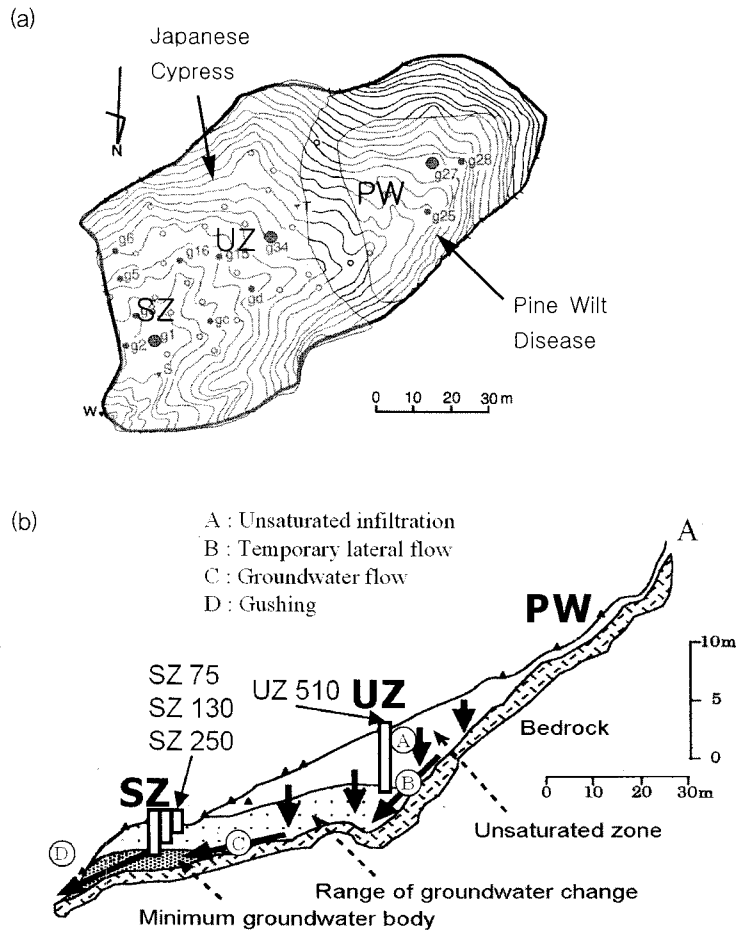


그림 4. 조사대상지의 지형도(a)와 종단면(b) 및 수문과정 모식도(Ohte *et al.*, 1995)  
(PW: Pine Wilt, UZ: Unsaturated Zone, SZ: Saturated Zone)

표 1. 기류시험지(5.99ha) 및 마쯔자와 유역(0.68ha)의 물수지

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	평균
강수량(mm)	1,892	1,859	1,645	2,034	1,030	1,777	1,501	1,704	2,032	1,591	1,403	1,679
기류시험지 유출량(mm)	1,098	1,110	854	1,314	411	978	697	872	1,300	832	551	911
기류시험지 유출율(%)	58	60	52	65	40	55	46	51	64	52	39	53
마쯔자와유역 유출량(mm)	-	-	-	-	-	998	554	830	1,084	527	335	721
마쯔자와유역 유출율(%)	-	-	-	-	-	56	37	49	53	33	24	42

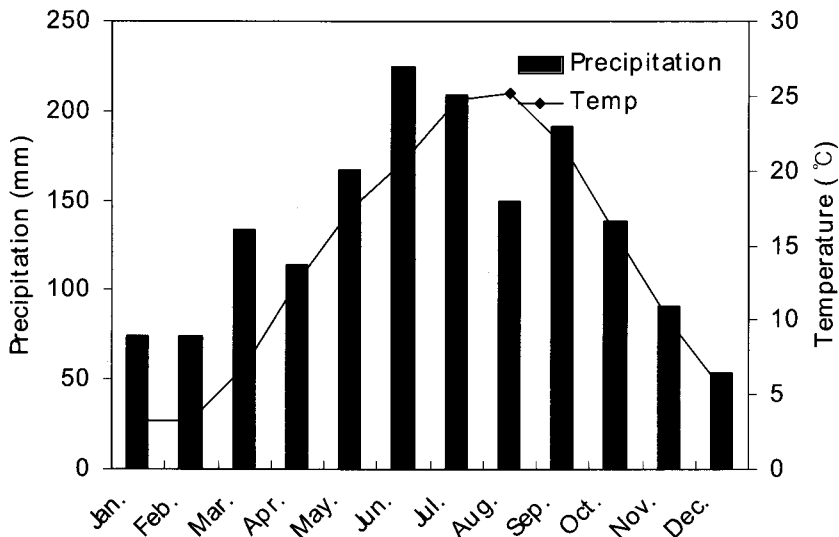


그림 5. 조사대상지의 월별 평균강수량 및 기온  
(강수는 1990~2000년, 기온은 1997~2002년 평균 자료)

의 감소를 보이고 있다.

### 3) 식생 분포

지난 100여년 동안 기류시험지는 토사유실 방지 목적으로 조림 후 관리되었다. 1960년대 마쯔자와 유역의 상부 사면과 유역 경계면에 분포하는 소나무와 기타 활엽수를 제외한 전체 유역 면적의 3분의 2는 편백이 식재되었다. 현재 유역의 상부는 소나무, 편백 및

활엽수가 분포하며, 그 이외의 구역은 일본 편백림이 우점종으로 분포하고 있다. 그러나 유역의 상부 소나무는 1990년대 초 일본에서 대규모로 발생한 소나무 재선충에 의한 피해로 대부분 고사하였으며, 1994년 가을 태풍으로 인하여 고사목의 대부분이 쓰러졌다(그림 6). 이로 인하여 소나무 임목 재적량은 1989년 18.6m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>에서 1998년 1.9m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>로 급감하였다(표 2).

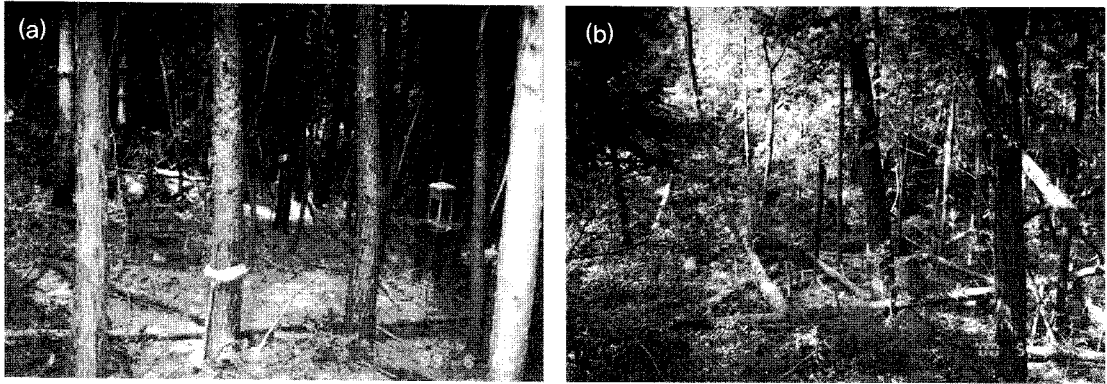


그림 6. 소나무 재선충 피해 전(a)과 후(b)의 모습

표 2. 각 관측지점 별 임목 재적량 변화(Hobara *et al.*, 2001)

(단위 :  $m^2 \cdot ha^{-1}$ )

Plot	편백		소나무		활엽수		합계	
	1989	1998	1989	1998	1989	1998	1989	1998
PW(상부)	2.5	5.1	18.6	1.9	7.9	9.0	29.0	15.9
UZ(중부)	-*	32.0	-*	0.6	-*	0.1	-*	32.7
SZ(하부)	23.1	35.1	7.5	1.3	0.0	0.3	30.6	36.6

\* 주: 자료 없음.

### 3. 재료 및 방법

#### 1) 수문 관측

관측지 강수량은 조사 대상지로부터 약 100m 하부에 위치한 기상관측소에서 전도식 강수계를 이용하여 1969년부터 관측을 실시하고 있다.

토양 수분 플럭스 계산을 위하여 3개 지점별로 5개 심도(10, 20, 30, 50, 100cm)의 토양수분 장력계를 1999년 6월 설치하였다. 토양수분 장력은 1시간 단위로 자료 집록기(CR-10X, Campbell Scientific, Inc.)를 이용하여 기록하였다.

지하수 관측을 위해서 유역의 중부와 하부에 직경 6cm의 PVC 관측공을 설치하였다. 각 관측공의 심도는 표 3과 같다. 지하수위 관측은 주 1회 이상 실시하였다.

유역 말단 유출부에 30° V노치와 부자식 수위계를

이용하여 1990년부터 10분 간격으로 유출량을 관측하였다.

#### 2) 수질 관측

유역내 3개 지점에서 토양수 샘플을 채취하기 위하여 세라믹 porous cup을 이용한 토양수 채취기를 5개 심도(10, 20, 30, 50, 100cm)로 4반복 설치하였다. 토양수 채취를 일정한 압력에서 채취하기 위하여 전자식 압력계를 이용하여 토양수 채취기내 압력이 -13.3kPa에서 작동이 되도록 하였다. 토양수는 2~3주 간격으로 채취하였다.

지하수 시료는 지하수위 관측시 수위 게이지에 부착된 컵을 이용하여 채취하였다. 임내우는 토양수 채취기로부터 10m 이내에 4반복 설치하였으며, 토양수 채취시 동시에 채수를 하였다. 계류수는 유출량 관측을 위한 위어의 상부에서 채수를 하였다.

관측지에서 채수된 물 시료(강수, 통과수, 토양수,

표 3. 마쯔자와 유역 임내우, 토양수, 지하수, 계류수내 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 연평균 농도\*

관측지점	심도	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 농도*(mmol/L)	자료분석기간	비고
PW	TF	0.04(.03)a	1997.8~2001.12	임내우
	10cm	0.12(.07)d	1997.8~2001.12	토양수
	20cm	0.09(.04)b	1997.8~2001.12	토양수
	30cm	0.12(.06)d	1997.8~2001.12	토양수
	50cm	0.11(.04)cd	1997.8~2001.12	토양수
	100cm	0.09(.03)bc	1997.8~2001.12	토양수
UZ	TF	0.07(.06)	1997.8~2001.12	임내우
	10cm	0.07(.04)	1997.8~2001.12	토양수
	20cm	0.07(.03)	1997.8~2001.12	토양수
	30cm	0.06(.02)	1997.8~2001.12	토양수
	50cm	0.08(.02)	1997.8~2001.12	토양수
	100cm	0.08(.02)	1997.8~2001.12	토양수
SZ	TF	0.07(.05)b	1997.8~2001.12	임내우
	10cm	0.05(.03)a	1997.8~2001.12	토양수
	20cm	0.05(.02)a	1997.8~2001.12	토양수
	30cm	0.07(.03)bc	1997.8~2001.12	토양수
	50cm	0.08(.04)c	1997.8~2001.12	토양수/지하수
	100cm	0.12(.03)d	1997.8~2001.12	지하수
UZ	510cm	0.11(.04)	1994.6~2002.7	지하수(토심 800cm)
SZ	75cm	0.11(.02)	1994.5~2002.8	지하수(토심 445cm)
SZ	250cm	0.15(.04)	2000.10~2001.10	지하수(토심 445cm)
Streamwater	-	0.14(.04)	1990.7~2001.12	계류수

\* Kim et al.(2003)을 수정. 괄호 내 값은 표준편차를 나타내고, 심도별로 다른 알파벳은 Fisher PLSD 테스트 결과 p<0.05에서 각 심도 별로 유의하게 차이가 있음을 나타냄.

지하수, 계류수)는 실험실로 운반한 후 분석 직전까지 냉장 보관한 후 이온 크로마토그래피(Shimadzu LC-10A)를 이용하여 이온분석을 실시하였다.

한편 본 연구에서 사용한 수문 및 수질 자료의 기간과 연평균 값은 표 3과 같다.

### 3) 토양 수분 플럭스 계산

일정한 부피를 가지는 비포화대 토양층에서 1차원의 연직 수분 이동식은 아래 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{in} = Q_{out} - E + \Delta W \quad (1)$$

여기에서,  $Q_{in}$ 은 토양층 내로 유입되는 물의 양,  $Q_{out}$ 은 토양 상자로 부터 유출되는 물의 양,  $E$ 는 증발산,  $\Delta$

$W$ 는 조사 기간 중 토양 상자 내의 수분의 변화량이다. 예를 들어, 0-10cm 토양층에서  $Q_{in}$ 은 통과우와  $\Delta W$ , 증발산 관측 값  $E$ 로부터 계산 할 수 있다. 이때 계산된  $Q_{out}$ 은 10-20cm 토양상자의 유입량( $Q_{in}$ )으로 산정되며, 동일한 방식을 중복하여 심도 100cm 토양층까지 토양수분 플럭스를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 토양수분장력을 관측하는 깊이를 기준으로 토양층을 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-100cm로 나누어 계산하였다.

토양층 내의 증발산  $E$ 는 증발산의 시간 변화로부터 계산하였다(식(2)).

$$E_{d1-d2} = cE \quad (2)$$

여기에서  $E_{d1-d2}$ 는 일정한 토양 심도  $d1$ 과  $d2$ 에서의



증발산,  $E$ 는 총증발산,  $c$ 는 총증발산 대비 비율이다. 예를 들어, 일정 시간( $t$ ) 동안 0-10cm 토양 상자내의 총증발산량 대비 증발산량 비율( $c$ )은 식(3)의 토양 수분 변화 식으로부터 계산할 수 있다.

$$c = (\theta_{0-10}^{t+\Delta t} - \theta_{0-10}^t) / (\theta_{0-10}^{t+\Delta t} - \theta_{0-10}^t) + (\theta_{10-20}^{t+\Delta t} - \theta_{10-20}^t) + (\theta_{20-30}^{t+\Delta t} - \theta_{20-30}^t) + (\theta_{30-40}^{t+\Delta t} - \theta_{30-40}^t) + (\theta_{40-50}^{t+\Delta t} - \theta_{40-50}^t) + (\theta_{50-100}^{t+\Delta t} - \theta_{50-100}^t) \quad (3)$$

한편,  $\Delta W$ 는  $\theta$ 과  $\psi$ 의 관계로부터 유도된 토양 수분 변화량으로부터 계산하였다(식(4): Kosugi, 1994; 1996).

$$\Delta W = (\theta_{(d1+d2)/2}^{t+\Delta t} - \theta_{(d1+d2)/2}^t) \cdot Z \quad (4)$$

여기에서  $\theta$ 는 일정 시간( $t$ ) 동안 토양 심도 ( $d1+d2$ )/2에서의 수분 함량,  $Z$ 는 토양층의 두께이다.

#### 4) $SO_4^{2-}$ 플럭스 계산

$SO_4^{2-}$ 와 같은 물질은 수분 침투 과정과 함께 이동한다. 따라서  $SO_4^{2-}$  플럭스는 토양수분 플럭스와  $SO_4^{2-}$  농도의 곱으로 계산할 수 있다. 그림 7에  $SO_4^{2-}$  플럭스 계산 방법을 모식화하였다. 토양수분 플럭스와 동일한 개념으로  $SO_4^{2-}$  플럭스도 토양층 내의  $SO_4^{2-}$  존재량 변화로 계산할 수 있다. 한편, 토양층 내로의 유입( $q_{in}$ )은

토양층으로 부터의 유출( $q_{out}$ ), 토양층 내의 변화량( $d\Omega$ ), 토양층으로 부터의 흡수/배출의 합과 같다. 여기에서 흡수/배출을 나타내는  $a$ 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a = d\Omega - (q_{in} - q_{out}) \quad (5)$$

식 (5)에서  $d\Omega$  은  $SO_4^{2-}$  농도 관측값과 토양수분으로부터 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$d\Omega = (\theta_{(d1+d2)/2}^{t+\Delta t} \cdot S_{(d1+d2)/2}^{t+\Delta t} - \theta_{(d1+d2)/2}^t \cdot S_{(d1+d2)/2}^t) \cdot Z \quad (6)$$

여기에서  $S_{(d1+d2)/2}^t$ 은 일정 시간( $t$ ) 동안 토양 심도 ( $d1+d2$ )/2에서의  $SO_4^{2-}$  농도이다. 식(5)는 일정 시간( $t$ ) 동안 토양층 내  $SO_4^{2-}$  존재량의 차이를 의미한다. 또한 심도  $d$ 에서  $q_{in}$ 과  $q_{out}$ 는 식(7), (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$q_{in} = (f_{d1}^t - f_{d1}^{t+\Delta t}) / 2 \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$q_{out} = (f_{d2}^t - f_{d2}^{t+\Delta t}) / 2 \cdot \Delta t \quad (8)$$

여기에서  $f_{d1}^t$ 는 일정 시간( $t$ ) 동안 토양 심도  $d1$ 에서의  $SO_4^{2-}$  플럭스이다.

지하수  $SO_4^{2-}$  플럭스는 지하수내  $SO_4^{2-}$  농도와 계류 유출량으로부터 계산을 하였다.

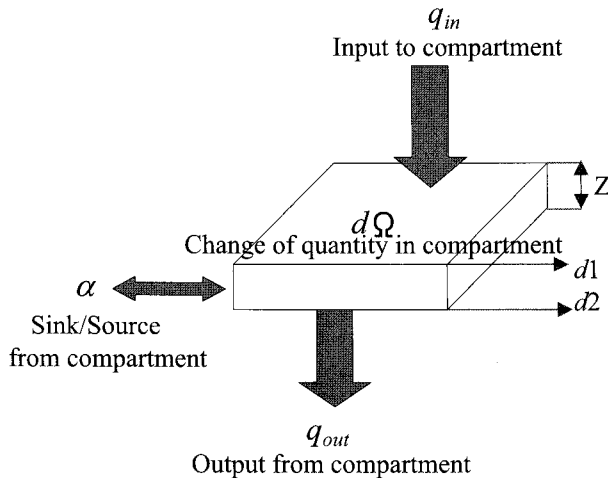


그림 7.  $SO_4^{2-}$  플럭스 계산 모식도

( $d1$ ,  $d2$ ,  $Z$ 는 각각 토양 상층의 심도, 토양하층의 심도, 토양두께를 의미함.)

## 4. 결과 및 고찰

### 1) 유역내 토양 수분 조건

그림 8은 2000년 조사 대상지의 강수, 압력수두와 수리수두를 나타내고 있다. 2000년 강수량은 1403mm로 1990~2000년 평균인 1679mm 보다 약 280mm가 적게 관측되었다(표 1 참조).

일반적으로 산지사면의 상부는 상대적으로 좁은 집수역과 경사 때문에 토양의 포화로 인하여 나타나는 지표유출과 복귀류 발생빈도가 낮으며, 지속시간도 짧게 나타난다(박종관 등, 2006). 본 연구에서도 박종관 등(2006)이 동구릉 산지사면 유역내에서 실시한 물의 이동경로를 추적한 선행 연구와 유사한 결과를 나타내었다. 유역 사면의 중간 지대인 UZ 100cm의 압력수두는 연중 불포화 상태를 나타내고 있으나, PW 100cm는 호우 발생 이후 일시적으로 포화 상태를 나타내었다(그림 8(b)). 이러한 현상은 불투수층 암반 위를 흐르는 포화 측방류로 인하여 일시적으로 지하수대가 생성된 결과이며, 불포화대의 지하수는 일시적인 포화 측방류를 형성하는 불포화침투류(토양수)의 영향을 받고 있다고 추측된다(Ohte *et al.*, 1995). 또한 UZ 100cm의 경우 토심이 8m로 지표 부근까지 지하수가 상승하지 못하는 것으로 판단된다.

여름철 건조기를 제외하고 PW와 UZ의 수리수두는 토양 심도의 증가와 동반하여 증가하는 경향을 나타내었다(그림 8(c-d)). 즉, 강수량이 많은 여름철에는 지표면의 토양수분이 높으며, 그 이외의 시기는 표층보다 심층의 토양수분이 높다는 것이다. 한편 SZ에서는 토양 심도 100cm가 표층 토양보다 높은 수리수두 값을 나타내었다(그림 8(d)). 이는 SZ 100cm에 연중 지하수대가 존재하기 때문에 나타난 현상이다.

### 2) 사면 상부(PW) 및 중부(UZ) 비포화대 토양층의 수분 플릭스

토양 수분 플릭스는 관측지점 중 비포화대 토양층이 존재하는 PW와 UZ를 대상으로 계산하였다. 표 4는

표 4. 2000년 조사 대상지 비포화대 토양의 수분 플릭스\*

	PW		UZ	
	플릭스 (mm)	증발산 (mm)	플릭스 (mm)	증발산 (mm)
강수량	1,402.6	-	1,402.6	316.5
통과우량	1,402.6**	390.7	1,086.1	70.4
10cm	1,011.9	44.2	1,015.7	40.5
20cm	967.7	86.1	975.2	109.3
30cm	881.6	67.5	865.9	120.7
50cm	814.1	129.6	745.2	99.5
100cm	684.5		645.7	

\* Kim(2003)

\*\* PW 통과우량은 강수량으로 산정하였음.

PW와 UZ의 연간 토양수분 플릭스와 증발산량을 나타내고 있다. PW 표층의 증발산량은 390.7mm로 상층 식생에 의한 차단효과가 없어 하부 식생과 지면에 직접 도달한 태양광의 영향으로 토양 증발이 높게 나타난 결과라고 생각된다. 한편 토양심도 20~50cm 토양에서의 수분플릭스는 PW보다 UZ가 높게 나타났다. 이는 UZ에 다수 존재하는 식생에 의한 증산 작용으로 토양중 수분이 소모되었기 때문이다. 이러한 원인으로 식생의 뿌리로부터 많은 수분이 소모되는 UZ 20~50cm 토양에서 수분 플릭스의 급격한 변화가 관측되었다. 그러나, PW의 심층 토양은 UZ보다 수분 플릭스가 높았다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 식생의 존재 유무에 기인한 것으로 상층 토양에서 증산작용으로 인한 물의 소비가 없이 하층으로 침투하였기 때문이다. 조사대상지의 주요 식생인 편백은 침엽수로 활엽수에 비해 증발산량이 통상 20~30% 높은 것으로 추정된다(AsiaFlux database). 따라서 이러한 식생의 분포 차이가 토양수분 및 물질의 이동과정에도 큰 영향을 미칠 것으로 사료되며, 향후 식생 분포에 따른 토양 수분 특성 차이에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 3) 유역내 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도 분포

표 3은 조사 대상지의 임내우, 토양수, 지하수, 계류

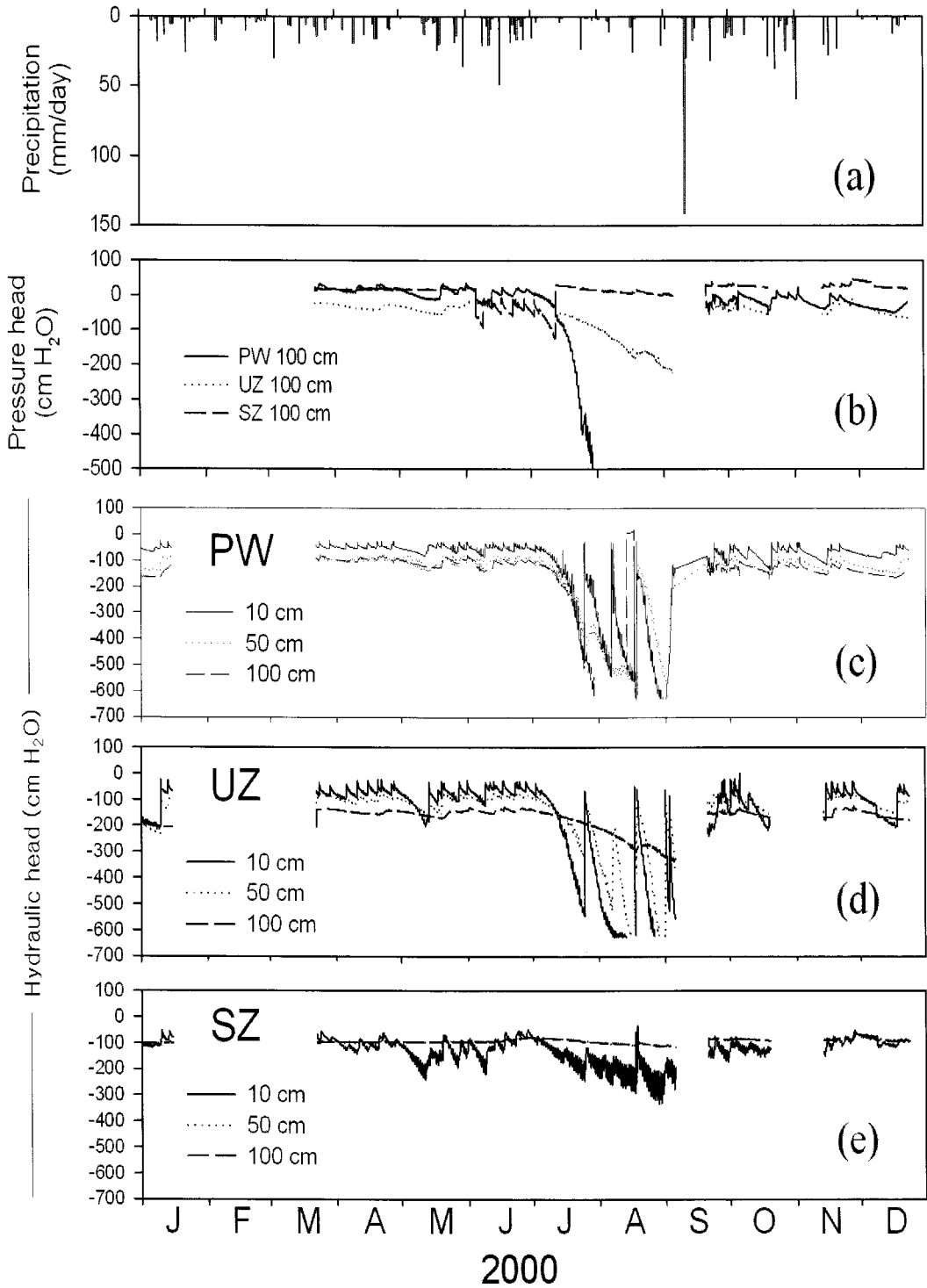


그림 8. 조사지의 강수량(a) 및 각 조사지점 토심 100cm의 압력수두(b), 각 조사지점 토심 10, 50, 100cm의 수리수두 연변화(c-e)(Kim, 2003)

수내  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 연평균 농도를 나타내고 있다. 소나무 재선충 피해를 입은 사면 상부인 PW 지점의 임내우  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 연평균 농도는 다른 두 지점에 비해  $0.03\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  정도 낮은 농도로 관측되었다. 산림생태계내의 임목은 대기로부터 유입되는 건성강하물은 잎과 가지 등에 일부분 부착이 되며, 강수 발생시 부착된 건성강하물과 식물이 분비하는 물질을 용해시켜 산림 토양내로 전달한다(Likens *et al.*, 2002). 본 연구의 경우 PW 지점 임내우  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 연평균 농도가 낮은 것은 UZ와 SZ 지점에서 강수가 산림유역내로 유입될 경우 1차적으로 임목의 잎과 가지 등과 접촉하면서 식생이 분비하는  $\text{SO}_4^{2-}$ 와 집적되어 있는 건성강하물의 용출에 기인한 것으로 판단된다.

토양수내  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도는 전체적으로 PW 지점에서 가장 높은 값을 나타내었다(표 3). 특히, PW의 10cm와 30cm 토양층에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 임목이 고사할 경우 곤충, 미생물 등에 의해 분해가 활발히 이루어지는데, 이는 지상부 뿐만 아니라 토양내의 뿌리에서도 동시에 일어난다(Kim *et al.*, 2003; Tokuchi *et al.*, 2004). 즉, PW 10cm는 지표 상부의 수

간, 가지 및 잎 등의 분해로부터 많은 양의  $\text{SO}_4^{2-}$  공급이 되고 있으며, 뿌리가 가장 넓게 분포하는 토양층인 30cm 부근에서는 소나무 고사목 뿌리의 분해에 의해서  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 공급이 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

지하수내  $\text{SO}_4^{2-}$  농도는 심도가 깊어질수록 높은 농도를 보였다. 이는 유역 상부 PW에서 일시적으로 발생하는 측방류에 의해 공급되는  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 기반암 상부의 지하수류의 이동과 함께 유역 하부까지 전달되고 있다는 것을 시사하고 있다. 한편 Kim *et al.*(2003)은 본 연구 대상지 하부 지점인 SZ에서 토양 심도별  $\text{SO}_4^{2-}$  농도 분포에 관해서 토양 표층에서 물과 함께 이동하는  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 침투과정에서 농축되기 때문에 심층에서 높은 농도를 나타내는 것이라고 보고하였다. 따라서 심층 지하수에서  $\text{SO}_4^{2-}$  농도가 높은 것은 유역 상부에서 공급되는  $\text{SO}_4^{2-}$ 와 연직 침투 과정에서의 농축이 결합된 현상으로 보아야할 것이다.

#### 4) 토양층과 지하수내 $\text{SO}_4^{2-}$ 플럭스

토양 수분 플럭스와 토양수내  $\text{SO}_4^{2-}$  농도로부터 계

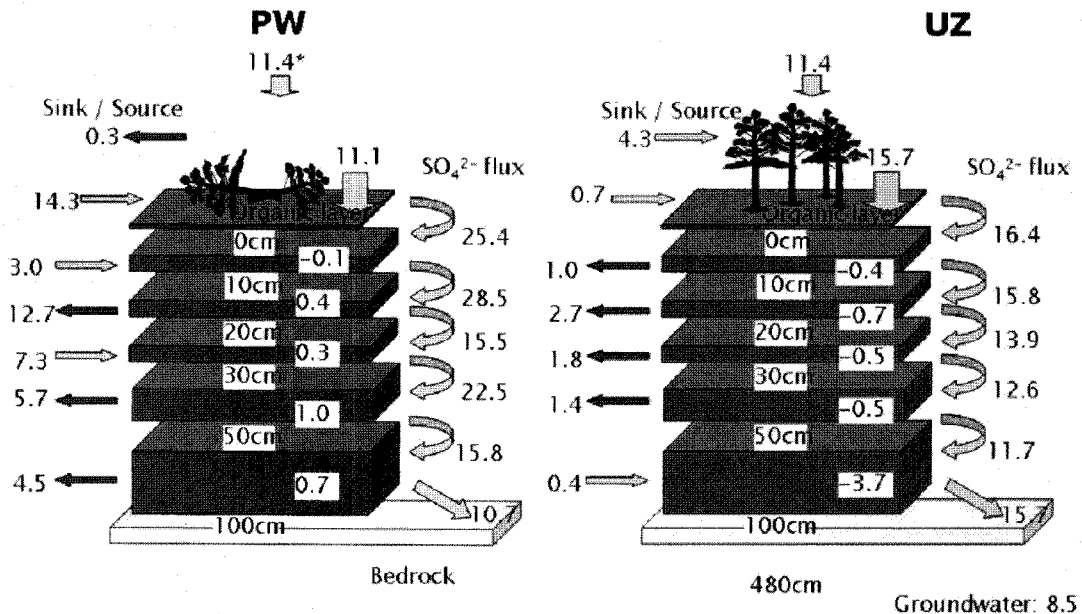


그림 9. 조사대상지 토양내  $\text{SO}_4^{2-}$  플럭스. 단위:  $\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (2000. 1~2000. 12)

\* 습성 및 건성 강하물은 각각  $6.9$ 와  $4.5\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (尾保手, 2003)

산된  $SO_4^{2-}$  플럭스 결과를 그림 9에 나타내었다. 2개의 분석 지점에서 모두 토양 표층의  $SO_4^{2-}$  플럭스가 심층보다 높게 나타났다. 특히 PW 표층 토양에서  $SO_4^{2-}$  플럭스가 높게 나타났는데, 이는 PW 지점의 고사목의 분해로 인하여 고농도의  $SO_4^{2-}$ 가 공급되었기 때문이다. 또한 PW 지점의 대부분 토층에서는 고사목의 뿌리 분해로 인하여  $SO_4^{2-}$ 의 공급원(source)으로 작용하고 있었다. 반면에 UZ에서는 50-100cm층의 토양 상에서  $SO_4^{2-}$  플럭스가 증가하였지만, 동일한 심도의 PW 지점은 감소하는 경향을 나타내었다. UZ 50-100cm 토양 층의  $SO_4^{2-}$  플럭스 증가는  $SO_4^{2-}$ 의 흡착/용탈 과정에 기인한 것으로 사료된다. 이 지점의 동일 토심에서 흡착태  $SO_4^{2-}$ 의 존재량이 표층 토양에 비해 높다(Kim, 2003). 이와 관련하여 우리나라 산림토양의  $SO_4^{2-}$  흡착에 관한 연구에서 산림토양의  $SO_4^{2-}$  흡착시 경합관계에 있는 유기물 함량이 높은 표층 토양보다 특정흡착에 기여하는 Al과 Fe산화물이 많은 심토층에  $SO_4^{2-}$  흡착이 크게 이루어진다고 보고하였다(이승우 등, 2004).

이에 반하여, PW 50-100cm 토양은  $SO_4^{2-}$ 의 낮은 보유력으로 인하여 지속적으로 유출이 되고 있다고 판단된다. 결론적으로 PW 지점의 낮은 양분 보유력은 토양의 낮은  $SO_4^{2-}$  흡착력과, 토양 수분 침투와 동반한 높은  $SO_4^{2-}$  이동의 영향으로 포화 측방류는 많은 양의  $SO_4^{2-}$ 를 운반했을 것으로 사료된다. 이러한 결과는 소

나무 재선충 피해 구역인 유역 상부 사면이  $SO_4^{2-}$ 의 공급원으로 작용했음을 지지하고 있다. 또한 PW로부터 운반된  $SO_4^{2-}$ 는 흡착을 통해 UZ 지하수가 보유하고 있을 것으로 추정되었다.

지하수내  $SO_4^{2-}$  플럭스의 최고값은 SZ 250에서  $11.0\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 관측되었다(그림 10). 이 값은 계류수  $SO_4^{2-}$  플럭스 값과 거의 일치하며, 계류수  $SO_4^{2-}$  플럭스는 S의 연간 유입량과 동일한 수준이었다.

우리나라의 경우 유영한 등(2002)이 광릉 산림유역을 대상으로 실시한  $SO_4^{2-}$ 의 물질수지 분석에서 강수를 통해 유입되는 습성 강하물은 약  $27.3\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 이며, 유출량은 침엽수림  $13.1\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ , 활엽수림  $18.5\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 보고하였다. 이상의 결과에서 우리나라 중부지방 광릉 산림의 습성강하물  $SO_4^{2-}$  연간 유입량이 본 연구 대상지(그림 9; 습성강하물  $6.9\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ )의 약 4배로 나타났으며, 광릉 산림내로 유입되는 건성강하물을 고려할 경우 전체  $SO_4^{2-}$ 의 유입량은 보다 증가할 것으로 생각된다. 이러한 유역단위의 물질 수지의 차이는 우리나라에서 환경규제와 석탄 연료 소비 감소로 인위기원  $SO_4^{2-}$  배출량이 감소한 현실정을 감안할 때, 지리적으로 일본보다 중국에 인접한 광릉 산림이 중국대륙 기원의  $SO_4^{2-}$ 의 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단된다. 이를 뒷받침할 근거로 Yu *et al.*(2007)은 춘천지역 강수의 안정동위원소 분석을 통해서 조사지역에서 방출되는  $SO_4^{2-}$  보다는 원거리의

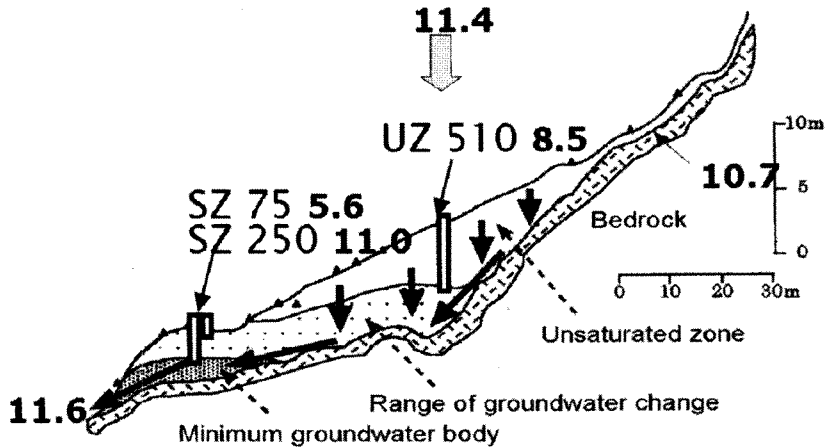


그림 10. 마쯔자와 유역 내  $SO_4^{2-}$  플럭스  
(단위:  $\text{kg}\cdot\text{S}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ (2000, 1~2000, 12))

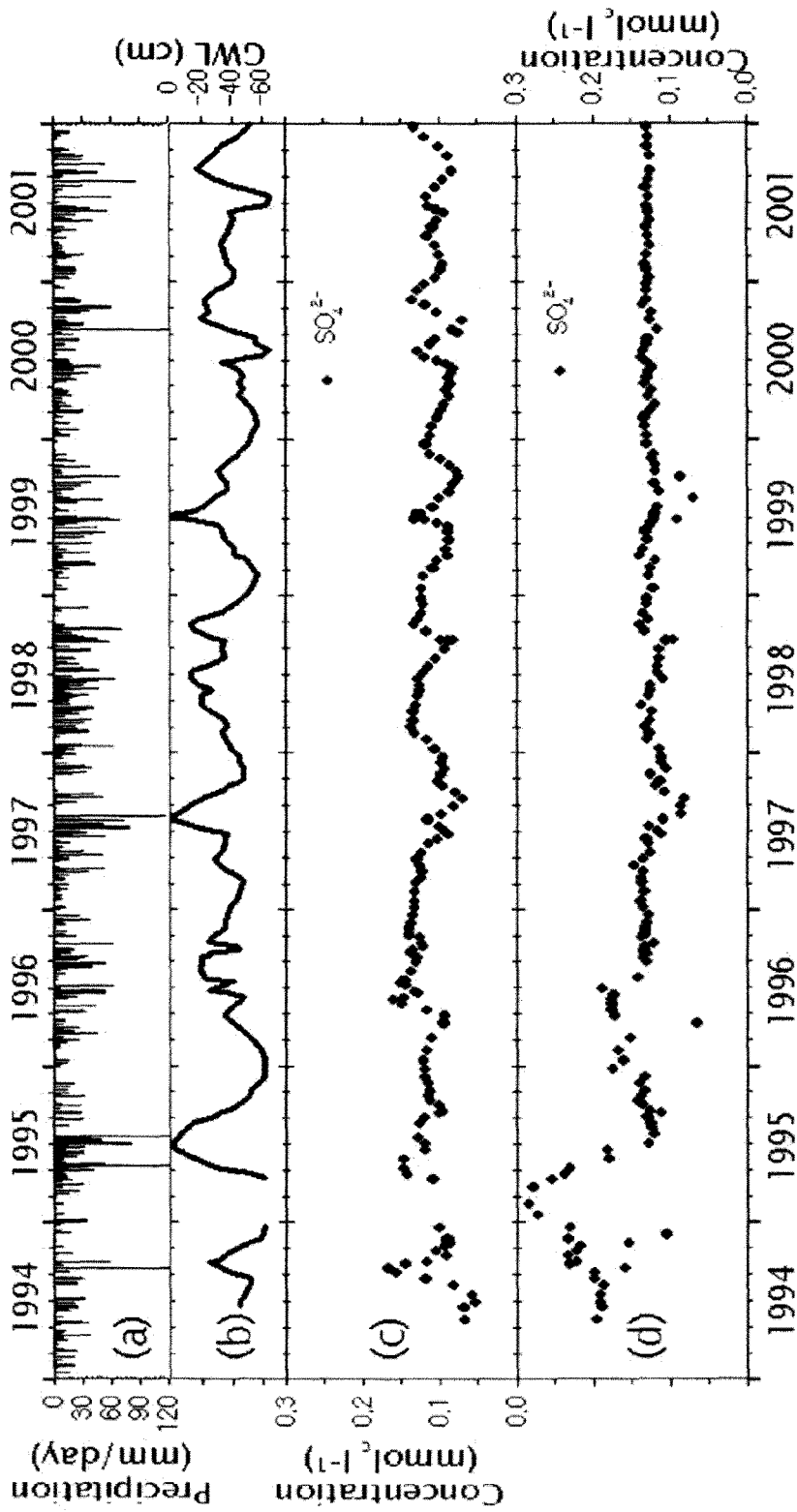


그림 11. 강수량(a), SZ 75 지하수위(b), SZ 75 지하수(c), 계류수  $SO_4^{2-}$  농도(d)의 장기변화

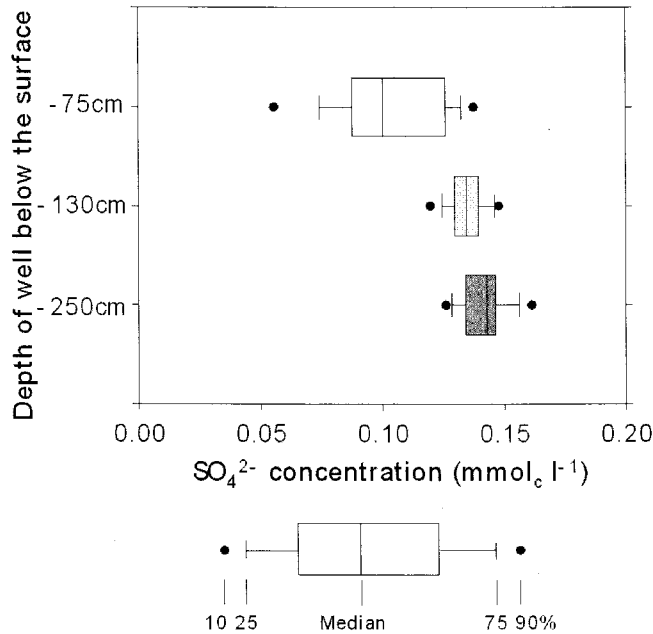


그림 12. SZ 지하수 심도별 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 분포(Kim et al.(2003)을 수정)

심도별 그래프 패턴 차이는 Fisher PLSD 테스트 결과 p<0.05에서 각 심도별로 유의하게 차이가 있음을 나타냄.

외부기원 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 대부분을 차지한다고 보고하였다.

### 5) 지하수위 변동이 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 유출에 미치는 영향

그림 11은 조사 대상지의 강수량, 지하수위, 지하수 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도, 계류수 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 장기 변화를 나타내고 있다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도는 지하수위의 변화에 따라서 증감을 하고 있으며(r=-0.43, p<0.01), 특히 1994~1996년에 뚜렷한 경향을 나타내고 있다. 이는 소나무 재선충 피해 이후 3~4년 이내에 계류수를 통해서 많은 양의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 배출된 것으로, 본 조사지의 토양이 화강암 풍화토로 구성이 되어 토양의 흡착에 의한 자정능력이 매우 낮기 때문에 나타난 현상으로 추측된다. 유명환 등(2002)은 광릉 산림의 경우 침엽수림 14.2kg-S·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>, 활엽수 8.9kg-S·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>의 자정능력을 가진 것으로 추정한 것에 비하면, 본 조사 대상지의 경우 자정능력이 거의 없는 것으로 사료된다.

한편, 연중 포화대가 존재하는 SZ 지점의 지하수 심도별 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 분포를 보면(그림 12), 지하수 심도가 증가할수록 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 증가하는 경향을 볼 수 있다.

전술한 바와 같이 Kim et al.(2003)은 조사대상지에서 심층 지하수에서는 상층으로부터의 농축된 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 침투로 인해 심층의 지하수가 상층의 지하수 보다 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 높다고 하였다. 즉, 지하수위가 낮아지면 상대적으로 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 높은 심층 지하수의 유출기여도가 상승하여 계류수 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 증가하는 것이다. 반대로 지하수위가 높아지면 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 낮은 천층 지하수의 유출기여도가 상승하여 계류수 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 감소하는 것이다. 이상의 결과에서 유역내 지하수위 변동이 계류수를 통해 유출되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 유출에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

산림유역내 수문과정이 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 순환에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실시한 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 유역의 상부에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이 수문과정을 통해 사면의

- 하부로 지속적으로 이동하는 것이 관측되었다.
- 2) 유역 중부의 심층 토양과 지하수는 상부에서 공급된  $SO_4^{2-}$ 의 저장소 역할을 하였다.
  - 3) 계류수내  $SO_4^{2-}$ 농도는 유역 하부 포화대의 지하수위 변동에 따라 반대로 증감하는 계절적 변동 특성을 나타내었다.
  - 4) 2000년 조사대상지의  $SO_4^{2-}$  유입량과 유출량은 각각 11.4와 11.6kg-S·ha<sup>-1</sup>·yr<sup>-1</sup>로 균형을 이루고 있었다.

우리나라 황폐 복구지의 경우에도 본 조사 대상지와 같이 산성강하물에 대한 자정능력이 약한 미성숙 토양이 다수 존재하고 있는 바, 향후 소나무 재선충 피해지에서 2차적으로 발생하는 물질의 교란과 계류수질 변화에 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다.

### 사사

본 논문은 김수진의 박사학위 논문 중 제4장과 제5장을 재구성한 것이다. 본 연구의 야외 조사와 자료 이용에 도움을 준 일본 교토대학 산림수문학연구실 스텝에게 감사드린다. 본 논문의 품위 향상을 위해 수고해 주신 세분의 심사위원께 감사드린다.

### 참고문헌

김수진 · 정용호 · 김경하 · 유재운 · 정창기 · 전재홍, 2005, "산림유역내 강우 발생시 계류수질변화와 지중유출수의 기여도," 한국농림기상학회지, 7(1), 51-56.

김수진 · 정용호 · 김경하 · 정창기 · 전재홍 · 유재운, 2004, "황폐복고지의 강우유출이 계류수의 전기전도도 및 주요 음이온의 단기변화에 미치는 영향," 한국임학회지, 93(7), 464-470.

박종관 · 조경민 · 양해근 · 마루이 아츠나오, 2006, "호우시 구릉지 완사면에 발달된 U자꼴 곡두부에서의 지중수 거동," 대한지리학회지, 41(6), 670-681.

유영한 · 김준호 · 문형태 · 이창석, 2002, "산림 소유역 생

태계에서 질소와 황의 유입량, 유출량과 물질수지," 한국생태학회지, 25(3), 189-195.

이승우 · 박관수 · 이충화 · 김은영, 2004, "황산이온의 흡착에 관여하는 산림토양의 물리화학적 특성," 한국토양비료학회지, 37(6), 371-377.

尾保手朋子, 2003, "森林における粒子状物質と微量ガスの乾性沈着に關する研究," 京都大學博士學位論文.

Allan, C. J., Roulet, N. T., and Hill, A. R., 1993, The biogeochemistry of pristine headwater Precambrian shield watersheds: an analysis of material transport within a heterogeneous landscape, *Biogeochemistry*, 22, 37-79.

Band, L. E., Tague, C. L., Groffman, P., and Belt, K., 2001, Forest ecosystem processes at the watershed scale: hydrological and ecological controls of nitrogen export, *Hydrological Processes*, 15, 2013-2028.

Blank, L. W., Roberts, T. M., and Skeffington, R. A., 1988, New perspectives on forest decline, *Nature*, 336, 27-30.

Campbell, G. S., 1985, *Soil Physics with Basic, Transport Models for Soil-Plant Systems*, Elsevier, 150pp.

Galloway, J. N., 1989, Atmospheric acidification: projections for the future, *Ambio*, 18, 161-166.

Galloway, J. N., 2001, Acidification of the world: natural and anthropogenic, *Water, Air, and Soil Pollution*, 130, 17-24.

Hallett, R. A. and Hornbeck, J. W., 1997, Foliar and soil nutrient relationships in red oak and white pine forests, *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 1233-1244.

Hobara, H., Tokuchi, N., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Kim, S. J., and Nakanishi, A., 2001, Mechanism of nitrate loss from a forested catchment following a small-scale, natural disturbance, *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1326-1335.

Innes, J. L. and Boswell, R. C., 1990, Reliability, presentation, and relationships among data from inventoried of forest condition, *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 790-799.

Johnson, A. H., Friedland, A. J., Miller, E. K., and



- Siccama, T. G., 1994, Acid rain and soils of the Adirondacks. III. Rates of soil acidification in a montane spruce-fir forest at Whiteface Mountain, New York, *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 663-669.
- Johnson, D. W., 1984, Sulfur cycling in forests, *Biogeochemistry*, 1, 29-43.
- Johnson, D. W. and Mitchell, M. J., 1998, Responses of forest ecosystems to changing sulfur inputs, in Maynard, D. G.(ed.), *Sulfur in the Environment*, 219-262, Marcel Dekker, INC., New York.
- Kabeya, N., Katsuyama, M., Kawasaki, M., Ohte, N., and Sugimoto, A., 2007, Estimation of mean residence times of subsurface waters using seasonal variation in deuterium excess in a small headwater catchment in Japan, *Hydrological Processes*, 21, 308-322.
- Kim, J. S., 1990, *Variations of Soil Moisture and Groundwater Table in a Small Catchment*, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Japan.
- Kim, S. J., 2003, *Hydro-biogeochemical Study on the Sulfur Dynamics in a Temperature Forest Catchment*, Ph. D. Dissertation. Kyoto University, Japan.
- Kim, S. J., Ohte, N., Kawasaki, M., Katsuyama, M., Tokuchi, N., and Hobara, S., 2003, Interactive responses of dissolved sulfate and nitrate to disturbance associated with pine wilt disease in a temperate forest, *Soil Science and Plant Nutrition*, 49, 539-550.
- Kishi, Y. 1995, *The Pind, Wood Nematode and the Japanese pine Sawyer*, Thomas Co. Ltd., 302pp.
- Kosugi, K., 1994, Three-parameter lognormal distribution model for soil water retain, *Water Resources Research*, 30, 891-901.
- Kosugi, K., 1996, Lognormal distribution model of unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 32, 2697-2703.
- Likens, G. E., Driscoll, C. T., Buso, D. C., Mitchell, M. J., Lovett, G. M., Bailey, S. W., Siccama, T. G., Reiners, W. A., and Alewell, C., 2002, The biogeochemistry of sulfur at Hubbard Brook, *Biogeochemistry*, 60, 235-316.
- Ohte, N., Tokuchi, N., and Suzuki, M., 1995, Biogeochemical influences on the determination of water chemistry in a temperate forest basin: Factors determining the pH value, *Water Resources Research*, 31, 2823-2834.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Katsuyama, M., Hobara, S., Asano, Y., and Koba, K., 2003, Episodic increases in nitrate concentrations in streamwater due to the partial dieback of a pine forest in Japan: runoff generation processes control seasonality, *Hydrological Processes*, 17, 237-249.
- Oren, R., Werk, K. S., Schulze, E. D., Meyer, J., Schneider, B. U., and Schramel, P., 1988, Performance of two *Picea abies*(L.) Karst. Stands at different stages of decline, *Oecologia*, 77, 151-162.
- Schlesinger, W. H., 1991, *Biogeochemistry: An Analysis of Global change*, Academic Press, 443pp.
- Schulze, E. D., 1989, Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest, *Science*, 244, 776-783.
- Streets, D. G., Tsai, N. Y., Akimoto, H., and Oka, K., 2000, Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985-1997, *Atmospheric Environment*, 34, 4413-4424.
- Tokuchi, N., Ohte, N., Hobara, S., Kim, S. J., and Katsuyama, M., 2004, Changes in biogeochemical cycling following forest defoliation by pine wilt disease in Kiryu experimental catchment in Japan, *Hydrological Processes*, 18, 2727-2736. DOI: 10.1002/hyp.5578
- Yu, J. -Y., Park, Y., Mielke, R. E., and Coleman, M. X., 2007, Sulfur and oxygen isotopic compositions of the dissolved sulphate in the meteoric water in Chuncheon, Korea, *Geoscience Journal*, 11, 357-367.
- <http://www.asiaflux.net>
- 교신: 김수진, 120-749, 서울특별시 서대문구 성산로 262 연세대학교 이과대학 지구환경연구소(이메일: suj@

김수진 · 오테 노부히토 · 박종관

hydrokorea.yonsei.ac.kr, 전화: 02-2123-3874, 팩스:  
02-312-5691)

Correspondence: Su-Jin Kim, Global Environment Lab.,  
Yonsei University, 262 Seongsanno, Seodaemun-gu,  
Seoul, 120-749, Korea(e-mail: sujin @hydrokorea.  
yonsei.ac.kr, phone: +82-2-2123-3874, fax: +82-2-312-  
5691)

최초투고일 09. 06. 17

수정일 09. 07. 24

최종접수일 09. 09. 07