

北漢山國立公園 北東斜面에서 凍結融解浸蝕 및 土砂流出이 溪流水質에 미치는 影響¹

朴 在 鉉^{2*}

Influences of Solifluction and Sediment Runoff on the Stream Water Qualities in the Northeastern Area of Bukhansan National Park¹

Jae Hyeon Park^{2*}

要 約

북한산국립공원 북동사면 일대에서 동결융해침식 및 토사유출이 계류수질에 미치는 영향을 파악함으로써 국립공원내 계류수질 보전을 위한 과학적 기초 자료를 제공하기 위하여 1998년 7월부터 2001년 5월 중 봄기간(3월에서 5월) 동안 동결융해침식 토사유출 및 계류수질 특성을 분석하였다. 조사기간 동안 계류변 비탈면에서 동결융해침식 되어 유출된 토사량은 하류유역이 상류유역에서 보다 약 1.3~2.7배 많았으며, 동결융해침식 토사의 평균 pH는 계류수의 pH 변동에 영향하는 것으로 분석되었다. 또한, 계류수에 용존된 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 량과 동결융해침식 토사에서의 평균 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 량과는 정의 상관관계를 나타내었다. 봄기간 동안 계류수의 평균 pH는 용존이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})의 증가로 하천수질환경기준 상수원수 1급수 기준보다 낮아지는 것으로 분석되었다. 계류수의 평균 전기전도도는 하류유역이 상류유역보다 2.3~3.3배 높았다. 또한, 계류수의 평균 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})량은 하류유역이 상류유역보다 각각 1.2~7.4배, 1.1~3.9배, 1.1~1.4배 높아 하류유역의 수질이 나빠지는 것으로 분석되었다. 한편, 계류수의 pH, 전기전도도와 유량과의 관계를 회귀분석한 결과, $\text{pH} = 1.7926 \times \text{유량} + 5.9577$ ($R^2 = 0.46$), $\text{전기전도도} = 34.417e^{3.6334 \times \text{유량}}$ ($R^2 = 0.44$)의 관계를 나타내었다.

ABSTRACT

This study was conducted to investigate influences of solifluction and sediment runoff on the stream water qualities during the spring season. The study sites were four points in the northeastern area of the Bukhansan National Park. And, field surveys were carried out in the spring of 1999, 2000 and 2001.

The results of this study were summarized as follows; During the investigation period, the amounts of sediment caused by solifluction on stream side slopes in the downstream were 1.3~1.7 times as large as those in the upstream. The pH of sediment caused by solifluction was a potential influence on the pH of stream water. Amounts of dissolved Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} in stream water were proportion to the average amounts of Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} in the sediment caused by solifluction. In the spring, the average pH of stream water was lower than the first class of the river water quality standard because of increasing chemical concentration as well as the contents of anions(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) in the spring season. Also, the average electrical conductivity of water in downstream was about 2.3~3.3 times

¹ 接受 2001年 5月 29日 Received on May 29, 2001.

審査完了 2001年 6月 30日 Accepted on June 30, 2001.

² 진주산업대학교 산림자원학과 Chinju National University, Chinju 660-758, Korea.

* 연락처 E-mail : pjh@chinju.ac.kr

higher than that in upstream. The amounts of anions(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) of water in downstream were about 1.2~7.4, 1.1~3.9, 1.1~1.4 times higher than those in upstream, respectively. Therefore, these results showed that the water quality of downstream was worse than that of upstream. As a result of regression analyses, the linear and exponential equation of pH and water quantity was $\text{pH} = 1.7926 \times \text{stream water quantity} + 5.9577 (R^2 = 0.46)$, and those of electrical conductivity and water quantity was $\text{EC} = 34.417e^{3.6334 \times \text{stream water quantity(m/sec)}} (R^2 = 0.44)$.

Key words : Solifluction, sediment runoff, electrical conductivity, stream water quality and quantity

緒 論

우리 나라에서 3월에서 5월에 해당하는 봄(기상청, 2001)에 계류수질의 변동특성에 관한 연구는 일부 현상적인 조사를 수행하는데 그치고 있다. 全宰弘(1995)과 朴宰澈(2000)은 융설에 의한 유량이 증가할수록 전기전도도는 높아지고, 유량이 감소할수록 전기전도도는 낮아지는 등 융설시와 강우시 유출수량의 증감이 계류수의 전기전도도에 미치는 영향은 다르다고 하였다. 朴在鉉(2001)은 북한산국립공원 북동사면 일대 계류수질을 분석한 결과 봄에는 여름과 다르게 계류수의 pH가 비교적 낮은 약산성을 나타내었다고 보고하였다.

志水 등(1987)은 유량이 증가할 수록 전기전도도는 낮아지며, 유량이 감소할 수록 전기전도도는 높아진다고 하여 全宰弘(1995)과 朴宰澈(2000)의 연구결과와는 상반되는 결과를 보고하였다. 또한, Warren(1985)은 융설수로 인하여 계류의 유출량이 증가한다고 하였다.

봄기간 동안 계류수에 용존된 이온에 대하여 McGlynn 등(1999)은 계류에서 Ca^{2+} 집적은 유기물 두께와 관계가 깊고 눈이 녹을 때 많이 발생한다고 하였고, 계류수질에는 표층토와 눈 녹은 물의 영향이 크다고 하였다. Stottlemeyer와 Toczydlowski(1999)는 봄에 눈 녹은 물이 토양에 축적되어 있는 다량의 NO_3^- 를 계류로 유출시킨다고 하였다. 또한, Williams와 Melack(1991), Jenkins 등(1993), 佐藤 등(1999)은 적설에 용존되어 있는 이온보다 눈 녹은 물에 용존된 이온이 많은데, 이는 전성 및 습성침착물질 그리고 눈 녹은 물과 표층토양, 암석의 접촉으로 인하여 용존되는 이온이 많기 때문이라고 하였다.

Murdoch 등(2000)도 봄에 온도 상승으로 인한 눈 녹은 물이 계류수질 저하의 원인이며, 이로 인해 수생태계에까지 좋지 않은 영향을 미친다고 하였다. 또한, Maeda 등(1994)은 눈 녹은 물은 하류

하천수질에 좋지 않은 영향을 미친다고 하였고, Margaret 등(1997)도 강우에 따른 눈 녹은 물이 직접적으로 계류수질에 영향한다고 하였다.

佐藤 등(1999)은 눈 녹은 물의 화학적 조성은 유럽과 북미지역에서 산림생태계에 심각한 영향을 미치고 있는데, 이는 이른 봄 동안 눈에 축적된 산성물질로 인하여 빠르고도 일시적으로 계류수가 산성화됨으로써 수생태계에 산 쇼크(acid shock) 현상이 나타나기 때문이라고 하였다. Heuer 등(1999)은, 토양은 봄에 질소의 유출과정에서 중요한 위치를 차지하며, alpine 토양은 계류에서의 주요한 질소공급원이라고 하였다. Jenkins 등(1993), 佐藤 등(1996a, 1996b)은 새롭게 내린 눈의 화학성분에는 표고보다는 지표의 식생조건이 더 크게 영향한다고 하였다. 佐藤 등(1997)은 북해도 지방의 적설 pH는 4.53이었으나, 눈 녹은 물의 pH는 3.59로 낮아졌고, 강설에 비해 눈 녹은 물에는 NH_4^+ , Ca^{2+} , NO_3^- 량이 많아졌다고 하였다.

이 연구는 북한산국립공원 북동사면 일대에서 봄기간(3월에서 5월) 동안에 동결융해침식 및 토사유출이 계류수질 변동에 미치는 영향을 파악함으로써 국립공원내 계류수질 보전을 위한 과학적 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

材料 및 方法

조사 구역의 대부분은 신갈나무 등 활엽수가 우점하고, 소나무가 혼재하며, 화강암을 모재로 한 갈색산림토양으로 구성되어 있다. 수질조사지점은 I 유역과 II 유역 공히 상시 계류가 흐르는 4개 지점으로 상류유역(site 1과 2)과 하류유역(site 3과 4)으로 구분된다(한국임학회지 88(1) 참조).

조사는 1998년 7월부터 2001년 5월까지 매월 1회(2001년 3월 1일부터 5월 6일까지는 매주 1회) 각 조사지점에서 계류수를 1ℓ씩 채수하여 수질을 분석하였다. 또한, 봄기간 동안 계류수질에 영향하는

(志水 등, 1987; 全宰弘, 1995; 朴宰澈, 2000; 朴在鉉, 2001) 유량은 유속과 계류가 유하하는 유로의 단면적을 기준(박종관, 1997)하여 조사하였다.

또한, 동결융해침식 토사와 계류수질과의 관계를 밝히기 위하여 적설량이 많고 계류수질 변동에 영향을 미치는 동결융해침식토사가 용설수에 쉽게 유출되는 2001년(적설량 : 71.6cm) 봄기간인 3월 11일, 3월 18일, 3월 25일 총 3회, 각 조사지점에서 계류수를 1ℓ씩 채수하여 수질 분석하였고, 용설수의 화학성에 영향을 큰 상주로 인해 토양이 떠 있는 상태 즉, 동결융해침식 된 계류변 토양(Heuer 등, 1999; Murdoch 등, 2000)의 화학적 특성을 분석하기 위하여 계류로부터 좌, 우측사면으로 구분하고, 산지사면의 경사가 변하는 지점까지의 거리를 평균하여 계류 유하 방향으로부터 좌, 우 각각 1m, 2m, 3m 되는 3개 지점에서 토양을 500gram씩 채취하여 원심 분리한 후 채취한 용액을 이온 분석하였다. 단, 봄기간 동안 계류수질 변동에 영향을 미치는 동결융해침식토사는 용설수와 밀접한 관계를 가지므로 전년 11월부터 전년 3월까지 적설심이 적고, 특히 겨울 기간 동안 적설일과 적설일의 간격이 8일 이상 되고 기온이 높아 눈이 쉽게 녹았던 1999년(적설량 : 16.7cm)과 2000년(적설량 : 24.8cm)에 동결융해침식토사의 조사는 제외하였다. 한편, 계류변에서 상주로 인한 동결융해침식 된 토사가 계류로 유출되는 유출토사량은 각각의 수질조사지점에서 채수된 물에 포함되어 있는 부유토사를 무게를 측정된 거름종이에 걸러 건조시킨 후 전자식 정밀저울로 무게를 측정하여 단위 ℓ당 평균유출토사량으로 계산하였다(朴在鉉과 禹保命, 1989; 朴在鉉, 1995).

수질조사는 한국인학회지 88(1)과 같다. 아울러 동결융해침식 토사와 계류수에 용존되어 있는 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 량 등 음이온 그리고 유량에 영향을

pH와 전기전도도는 spss/pc+를 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

4개 조사지점에서 계류변의 평균경사도는 21~30°이었으며, 주변의 상층식생울폐도는 23~45%로 낮았는데, 이는 겨울에 따른 활엽수의 낙엽 때문이었다. 또한, 적설심은 2001년 3월 1일 유역 I 과 II 모두 상류유역에서 공히 28cm로 하류유역의 적설심 27cm보다 높았고, 계류변의 평균 폭은 좌, 우측사면 모두 4.3~7.5m의 범위 내였다.

結果 및 考察

1. 봄기간 동안 계류수의 수질특성에 영향을 미치는 동결융해침식 토사 분석

1) 유출토사량

조사기간 동안 북한산국립공원 북동사면 일대 계류변에서 동결융해침식 되어 계류로 유출된 토사량은 Table 1과 같다.

Table 1. Amounts of average of sediment runoff from the study site watershed.

Site number	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Amounts of average of sediment runoff (kg/m ³)	0.32	0.25	0.43	0.67

조사기간 동안 계류변 비탈면에서 동결융해침식 되어 유출된 토사량은 상류유역은 0.25~0.32kg/m³이었으나, 하류유역에서는 0.43~0.67kg/m³으로 하류유역이 상류유역에서 보다 약 1.3~2.7배 많았는데, 이는 하류유역에서 용설수에 의한 유량이 많고 이로 인하여 계류변에서 동결융해침식 된 토

Table 2. Results of average of pH, amounts of average of Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} in sediment caused by solifluction of during the spring of 2001 northeastern area of Bukhansan National Park.

Site No.	Average of pH			Amount of average of $Cl^-(mg/\ell)$			Amount of average of $NO_3^-(mg/\ell)$			Amount of average of $SO_4^{2-}(mg/\ell)$		
	3, March	18, March	25, March	3, March	18, March	25, March	3, March	18, March	25, March	3, March	18, March	25, March
1	5.55	5.84	5.87	1.48	1.91	1.24	8.00	1.33	5.40	2.33	3.28	2.06
2	5.21	5.81	5.77	2.99	1.05	1.89	18.18	5.54	2.33	2.92	1.85	4.00
3	5.77	6.01	5.96	1.86	3.08	5.91	25.33	21.93	7.73	2.68	4.73	4.75
4	5.55	6.07	5.95	5.57	1.16	2.47	34.15	4.34	6.18	5.86	2.00	4.83

사가 계류로 쓸려 내려갔기 때문(朴在鉉, 1989)으로 생각된다.

2) 동결융해침식 토사가 계류수질에 미치는 영향

봄기간 동안 계류수의 수질특성 중 산성화에 영향을 미치는 동결융해침식 토사에 용존되어 있는 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} (Stottlemeyer and Toczydlowski, 1999; Heuer 등, 1999; Murdoch 등, 2000) 등 음이온량을 분석한 결과는 Table 2와 같다.

사면에서 동결융해침식 된 토사의 평균 pH는 상류유역과 하류유역에서 모두 5.21~6.07의 범위로 모두 약산성을 나타내었다. 또한, 하류유역의 평균 pH는 상류유역보다 비교적 높은 pH를 나타내었다. 이때 계류수의 pH는 5.61~6.69로 하류유역의 평균 pH가 상류유역의 평균 pH보다 높은 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 하류유역에서의 유량의 증가, Ca^{2+} , Mg^{2+} 등 용존 양이온의 상대적인 증가 등에 기인하는 결과 때문이라 생각된다.

이와 같이 봄기간 동안 계류수의 pH가 약산성을 나타내는 것은 동결융해침식 토사가 계류로 유출되면서 계류수의 pH에 영향함을 의미하는 것이다. 즉, Murdoch 등(2000), Maeda 등(1994)은 봄에 기온의 상승으로 인하여 유출된 용설수 및 동결융해침식토양이 계류로 유입되면 계류수질 저하에 영향을 미치고, 이로 인해 수생태계에까지 좋지 않은 영향을 미친다고 하였는데, 이 연구에서도 그와 같은 결과를 나타내었다.

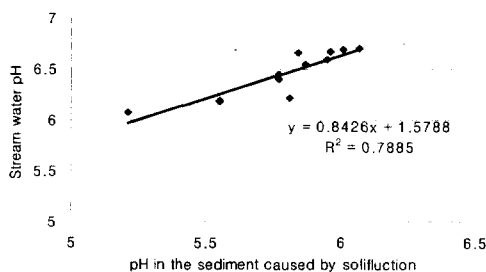


Figure 1. Linear equation for pH in the sediment caused by solifluction and stream water pH.

Figure 1과 같이 동결융해침식 토사의 평균 pH와 계류수의 pH를 직선회귀 분석한 결과 계류수의 pH는 동결융해침식 토사의 평균 pH와는 정의

상관관계를 나타내었고, 79%의 설명력을 나타내었다. 이를 직선회귀식으로 나타내면, 계류수의 $\text{pH} = 0.8426 \times \text{동결융해침식 토사의 평균 pH} + 1.5788$ ($R^2 = 0.79$)이었다.

한편, 사면에서 동결융해침식 된 토사의 평균 Cl^- 량은 상류유역과 하류유역에서 모두 1.05~5.91mg/l의 범위로 하류유역이 상류유역 보다 약 1~6배 많았다. 이는 하류유역이 상류유역에서 유입되는 유출토사량의 증가 등에 영향을 많이 받았음을 의미하는 것이다(Soulsby 등, 1997; Stottlemeyer and Toczydlowski, 1999).

또한, McGlynn 등(1999)은 봄기간 동안 계류수질의 변동은 동결융해침식 토사의 유출 등 눈이 녹을 때 많이 발생한다고 하였고, 계류수질에는 표층도와 눈 녹은 물의 영향이 크다고 하였는데, 이는 이 연구에서의 결과와 유사한 의미를 갖는 것이다. 즉, 계류수에 용존된 Cl^- 량과 동결융해침식 토사에서의 평균 Cl^- 량과의 관계를 직선회귀 분석한 결과(Figure 2), 계류수에 용존된 Cl^- 량과 동결융해침식 토사에서의 평균 Cl^- 량은 정의 상관관계를 가지며 57%의 설명력을 나타내었다. 이를 직선회귀식으로 나타내면, 계류수에 용존된 Cl^- 량 = $5.1719 \times \text{동결융해침식 토사에서의 평균 } \text{Cl}^- \text{량} - 5.1526$ ($R^2 = 0.57$)이었다.

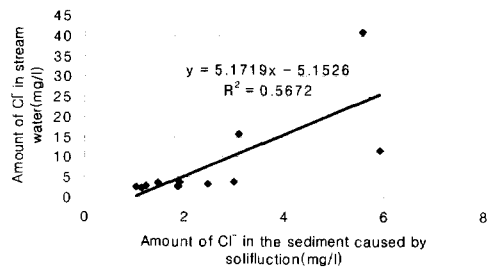


Figure 2. Linear equation for amount of Cl^- in the sediment caused by solifluction and amount of Cl^- in stream water.

사면에서 동결융해침식 된 토사의 평균 NO_3^- 량은 상류유역과 하류유역에서 모두 1.33~34.15mg/l의 범위로 하류유역이 상류유역 보다 약 6~26배 많았다. 이는 하류유역에서 동결융해침식 토사량이 많았고, 이러한 침식토사에 용존되어 있는 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 등 음이온이 용설수에 동반하여 계류로 유입되었음을 의미하는 결과이다(Peters and Leavesley, 1995; Soulsby 등, 1997; Stottl-

emyer and Toczydlowski, 1999). 즉, 계류수에 용존된 NO₃⁻량과 동결융해침식 토사에서의 평균 NO₃⁻량과의 관계를 직선회귀 분석한 결과(Figure 3), 계류수에 용존된 NO₃⁻량과 동결융해침식 토사에서의 평균 NO₃⁻량은 정의 상관관계를 가지며 73%의 설명역을 나타내었다. 이를 직선회귀식으로 나타내면, 계류수에 용존된 NO₃⁻량 = 0.198 × 동결융해침식 토사에서의 평균 NO₃⁻량 + 4.4823 (R² = 0.73)이었다. 이는 Robert 등(1997)이 보고한 봄기간 동안 계류수질 변동에 NO₃⁻량이 유의했다는 연구결과를 뒷받침하는 결과이다.

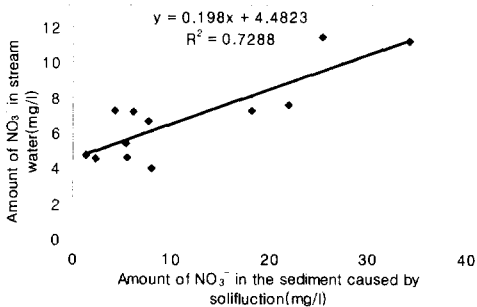


Figure 3. Linear equation for amount of NO₃⁻ in the sediment caused by solifluction and amount of NO₃⁻ in stream water.

또한, 사면에서 동결융해침식 된 토사의 평균 SO₄²⁻량은 상류유역과 하류유역에서 모두 1.85~5.86mg/l의 범위로 하류유역이 상류유역 보다 약 1.1~3배 많았다. 이는 하류유역에서 동결융해침식 토사량이 많았고, 상류유역의 계류수가 합류되는 등 침식토사에 용존되어 있는 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등의 음이온이 용설수에 동반하여 계류로 유입되었음을 의미하는 결과이다(Johannessen 등, 1980; Peters and Leavesley, 1995; Soulsby 등, 1997). 즉, Bain 등(1994), Soulsby 등(1998)은 기온의 상승에 따른 상주로 인한 동결융해침식의 증가는 눈이나 표층토양에 집적되어 있던 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등의 음이온을 계류로 유출시켜 계류수의 pH를 낮추고 계류수에 용존되는 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등의 양을 증가시킨다고 하였는데, 이 연구에서도 그와 같은 결과를 나타내었다. 아울러 Helliwell 등(1998)은 수생태계의 직접적인 영향요인은 SO₄²⁻라고 하였는데, 이는 본 연구결과를 뒷받침하는 결과라 생각된다.

따라서 계류수에 용존된 SO₄²⁻량과 동결융해침

식 토사에서의 평균 SO₄²⁻량과의 관계를 직선회귀 분석한 결과(Figure 4), 계류수에 용존된 SO₄²⁻량과 동결융해침식 토사에서의 평균 SO₄²⁻량은 정의 상관관계를 가지며 80%의 설명역을 나타내었다. 이를 직선회귀식으로 나타내면, 계류수에 용존된 SO₄²⁻량 = 0.5228 × 동결융해침식 토사에서의 평균 SO₄²⁻량 + 4.8454 (R² = 0.80)이었다.

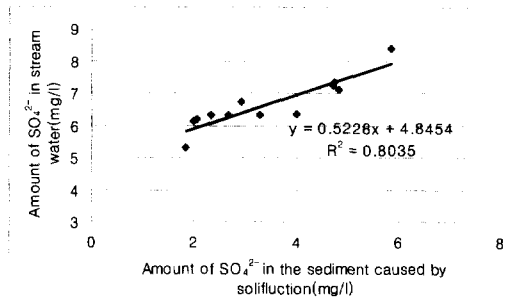


Figure 4. Linear equation for amount of SO₄²⁻ in the sediment caused by solifluction and amount of SO₄²⁻ in stream water pH.

2. 봄기간 동안 조사유역에서 계류수의 수질특성

1) pH

각 수질조사지점에서 계류수의 pH 변화는 Figure 5와 같다. I 유역과 II 유역 내 4개 수질조사지점에서의 수질분석 결과 여름기간(6월에서 8월)에 평균 pH는 1998년에 pH 6.93(6.75~7.0), 1999년에 pH 6.61(6.14~6.94), 2000년에 pH 6.56(6.54~6.59)으로 그 변화 폭이 적고 하천수질환경기준 상수원수 1급수에 포함되는 경향을 나타내었다. 그러나 봄기간 동안 평균 pH는 1999년에 pH 6.40(5.86~6.87), 2000년에 pH 6.44(5.80~6.65), 2001년에 pH 6.19(5.61~6.74)로 강우기인 여름

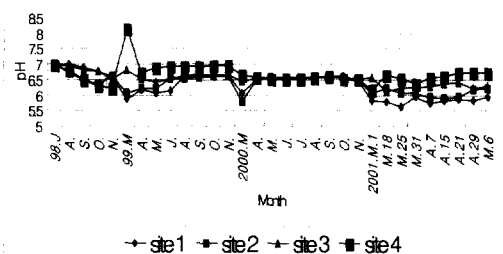


Figure 5. Variations of pH of stream water during the period of July of 1998 to May of 2001.

보다 낮아 약산성을 띠는 경향을 나타내었다.

특히 봄기간 동안 유량이 적고 고도가 높으며 음식점 등 인위적인 영향이 없는 상류유역에서의 평균 pH는 1999년에 pH 6.37(6.05~6.80), 2000년에 pH 6.39 (5.80~6.57), 2001년에 pH 5.95 (5.61~6.22)로, 인위적 영향이 있는 하류유역에서의 평균 pH의 값인 1999년에 pH 6.43(5.86~6.87), 2000년에 pH 6.50 (6.05~6.65), 2001년에 pH 6.44(6.14~6.74)보다 비교적 낮은 값을 나타내 봄기간 동안에는 유량이 적고 인위적 오염이 없는 상류유역 계류수의 pH는 유량이 많고 인위적 오염이 발생되는 하류유역에서의 pH와 다른 양상을 나타내는 것으로 분석되었다.

즉, 상류유역에서는 이러한 결과가 선행연구결과(Johannessen 등, 1980; Peters and Leavesley, 1995; Soulsby 등, 1997)와 같이 지하수의 유출 및 동결융해침식 토사와 접촉하여 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 등 음이온이 계류로 유출되어 계류수의 pH를 낮추는데 기인한 것으로 생각되나, 하류유역에서는 이러한 작용을 억제하는 Ca^{2+} , Na^+ 등 양이온이 인근 대형 음식점에서 배출하는 오폐수 등에 다량 포함되는 등 그에 따른 영향으로 계류수의 pH가 상승된 것으로 생각된다.

봄기간 동안 평균 Ca^{2+} 양(mg/l)은 하류유역에서 1999년에 6.63(371~11.32), 2000년에 11.20 (7.88~15.45), 2001년에 8.17(4.43~14.61)이, 상류유역에서는 1999년에 5.12(2.92~10.84), 2000년에 3.88(2.91~4.54), 2001년에 4.05(1.70~6.50)로 음식점 등에서의 유출수가 합류하는 하류유역에서의 평균 Ca^{2+} 양이 인위적 오염이 없는 상류유역에서 보다 1.3배~3.0배 많은 것으로 분석되었다. 평균 Na^+ 양(mg/l)도 하류유역에서는 1999년에 7.36(4.80~11.34), 2000년에 15.82(8.74~21.57), 2001년에 9.15(5.47~16.35)가, 상류유역에서는 1999년에 5.71(2.99~15.10), 2000년에 4.17(2.42~5.52), 2001년에 5.06(3.30~7.10)으로 음식점 등에서의 유출수가 합류하는 하류유역에서의 평균 Na^+ 양이 인위적 오염이 없는 상류유역에서 보다 1.3배~3.8배 많은 것으로 분석되었다.

2) 용존산소량

I 유역과 II 유역의 4개 수질조사지점에서 용존산소량(mg/l)의 변화는 Figure 6과 같다. 봄기간 동안 평균 용존산소량은 상류유역에서 1999년에

11.0(10.4~11.9), 2000년에 11.6(11.2~12.1), 2001년에 10.5(10.0~11.7)가, 하류유역에서는 1999년에 11.5(10.3~12.6), 2000년에 12.3(10.4~13.0), 2001년에 11.0(10.5~11.7)으로 상류유역보다는 하류유역에서 약 0.5~0.7 mg/l 높은 값을 나타내었는데, 이는 하류유역에서의 유량 증가에 따른 유속의 상승에 기인한 결과(박중관, 1997) 때문이라 생각된다. 그러나 여름을 포함한 전체 기간 동안에는 하류유역보다는 상류유역에서 평균 용존산소량이 높았는데(朴在鉉, 2001), 이는 상류유역이 하류유역보다 여름철 수온이 낮고 경사가 급해 유속이 빠른데 기인한 결과라 생각된다. 따라서 용존산소량은 계절간 차이가 있다고 생각되며, 유량, 수온, 유속에 따라 차이가 나타난다(박중관, 1997)고 생각된다.

그러나 봄기간 동안 상류유역이나 하류유역에서 용존산소량은 모두 하천수질환경기준 상수원수 1급수의 범위로 나타나 상류유역과 하류유역에서 용존산소량의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 또한, 이 값은 수중에서 생물 종의 균형을 유지하기 위한 용존산소량(吳英敏과 申錫奉, 1991), 상수원의 한계용존산소량(李海金, 1977) 5 mg/l 보다 높은 값이었다.

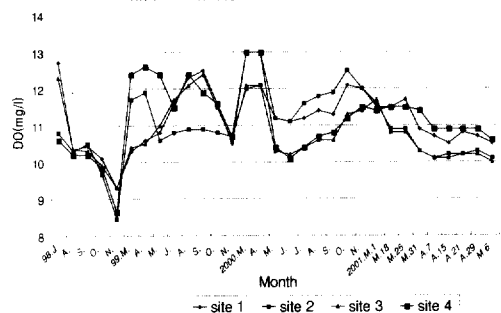


Figure 6. Variations of dissolved oxygen(mg/l) stream water during the period of July of 1998 to May of 2001.

봄기간 동안 평균 용존산소포화도(%)는 상류유역에서는 1999년에 86.9(79.1~93.8), 2000년에 99.5(92.2~109.0), 2001년에 82.3(79.5~92.1)이였으며, 하류유역에서는 1999년에 90.7(77.8~102.7), 2000년에 98.0(88.1~114.0), 2001년에 87.3(83.5~92.2)으로 분석되었다. 이때 평균 용존산소포화도는 포화상태이었으며, 鄭英昊(1985), 洪思煥(1985)의 연구결과와 일치하는 결과이었다.

즉, 봄기간 동안 용존산소포화도는 상류유역과 하류유역에서 큰 차이가 나타나지 않았는데, 이는 봄기간 동안 수온의 차이가 크지 않은데 기인한 결과(박종관, 1997)로 생각된다. 따라서 봄기간 동안 용존산소량 및 용존산소포화도는 인위적 오염이 없는 산림내 상류유역과 산림과 인접한 인위적 오염이 나타나는 하류유역에서는 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 분석되어 산림내 그리고 산림과 인접한 유역에서의 용존산소량 및 용존산소포화도는 봄기간 동안 계류수질 변화 특성에 영향이 적은 것으로 생각된다.

3) 전기전도도

봄기간 동안 I 유역과 II 유역의 상류유역에서 계류수에 용존되어 있는 이온총량을 나타내는(朴在鉉, 1999) 평균 전기전도도($\mu\text{S/cm}$, Figure 7)는 1999년에 64.4(52.8~74.9), 2000년에 61.5(40.5~138.8), 2001년에 44.8(38.1~45.8)이었다. 그러나 하류유역에서는 1999년에 143.5(75.2~212.0), 2000년에 199.8(112.2~319.0), 2001년에 117.8(65.7~180.5)이었다. 즉, 평균 전기전도도는 음식점 및 사찰에서 배출하는 유출수가 유입되는 하류유역이 인위적 오염이 없는 상류유역 보다 약 2.3~3.3배 높은 값을 나타내어 계류의 상류보다 하류에서의 오염현상이 큰 것으로 나타났다.

특히 2000년 3월에 대형 음식점 하류인 수질조사지점 3에서의 전기전도도는 $319.0 \mu\text{S/cm}$ 로 청정한 산림내 계류수인 지리산 칠선계곡, 백무동계곡, 뱀사골계곡의 전기전도도 $19.7\sim 73.4 \mu\text{S/cm}$ (田祥麟과 黃鍾瑞, 1993), 소백산국립공원내 계류수의 전기전도도 $27\sim 40 \mu\text{S/cm}$ (田祥麟과 黃鍾瑞,

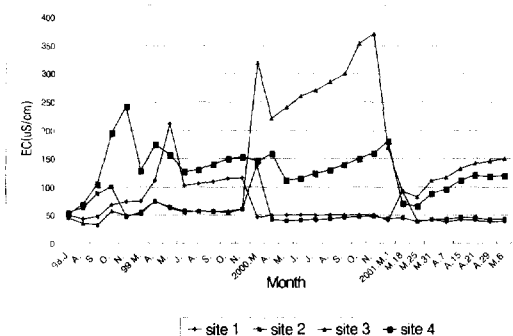


Figure 7. Variations of electrical conductivity($\mu\text{S/cm}$) stream water during the period of July of 1998 to May of 2001.

1995)보다 약 6.8~9.5배 많았다. 이는 사찰과 음식점 등에서 배출하는 물에 용존된 각종 이온의 증가에 따른 결과로 북한산국립공원 북동사면 일대 하류유역의 계류수는 오염이 진행되고 있음을 의미하는 것이다. 따라서 청정지역이라고 생각되는 국립공원에 대해서는 사찰 및 음식점에서 배출하는 유출수에 대한 정기적인 검사와 그에 따른 수질보전 대책을 강구할 필요가 있다고 생각된다(朴在鉉, 2001).

4) 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 함량

계류수가 오염되어 있는가를 평가할 수 있는 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})량(mg/l)에 대한 봄기간 동안의 변화는 Figure 8, Figure 9, Figure 10과 같다.

평균 Cl^- 량(mg/l)은 상류유역에서 1999년에 8.53(2.21~28.99), 2000년에 4.59(2.93~6.81), 2001년에 3.25(2.40~4.97)이었다. 그러나 하류유역에서는 1999년에 10.53(3.08~15.71), 2000년에 33.89(5.21~59.48), 2001년에 20.31(8.65~41.03)이었다. 즉, 평균 Cl^- 량은 하류유역이 상류유역에서 보다 약 1.2~7.4배 높았는데, 이는 동결융해 침식토사, 음식점 및 사찰 등에서 배출하는 유출수의 유입 등에 기인한 결과로 계류의 상류보다 하류에서의 오염현상이 큰 것으로 나타났다(權肅杓, 1989).

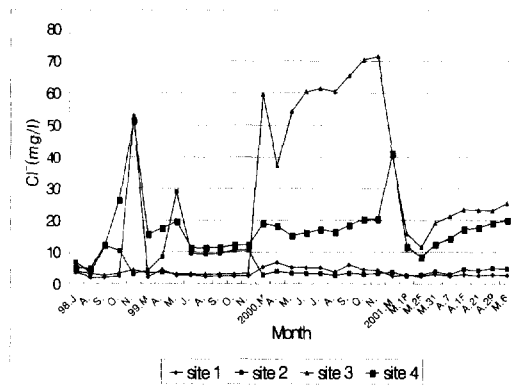


Figure 8. Variations of amount of Cl^- (mg/l) stream water during the period of July of 1998 to May of 2001.

평균 NO_3^- 량(mg/l)은 상류유역에서 1999년에 9.30(5.38~18.63), 2000년에 4.60(3.26~5.96), 2001년에 4.45(2.91~5.91)이었다. 그러나 하류유

역에서는 1999년에 10.0(5.87~13.04), 2000년에 17.95(9.11~42.23), 2001년에 9.07(6.59~11.42)이었다. 즉, 평균 NO_3^- 량(mg/ℓ)은 하류유역이 상류유역에서 보다 약 1.1~3.9배 높았는데, 이는 동결융해침식토사, 음식점 및 사찰 등에서 배출하는 유출수의 유입 등에 기인한 결과로 계류의 상류보다 하류에서의 오염현상이 큰 것으로 나타났다.

한편, 평균 NH_4^+ 량(mg/ℓ)은 상류유역에서 1999년에 0.46(0.11~0.75), 2000년에 0.29(0~0.81), 2001년에 0.1(0~1.81)이었다. 그러나 하류유역에서는 1999년에 0.72(0.15~2.26), 2000년에 0.81(0~2.35), 2001년에 0.1(0~0.42)로 하류유역의 평균 NO_3^- 량(mg/ℓ)보다 약 13.9~90.7배 작았다.

이와 같이 하류유역의 계류수에서 NO_3^- 량이 NH_4^+ 량에 비해 크게 높아진 결과는 봄에 눈이 녹은 물이 동결융해침식 토사에 축적되어 있는 다량의 NO_3^- 를 계류로 유출시키거나(Stottlemeyer and Toczydlowski, 1999), 지하수에 유입되어 복류되는 등 영향이 복합적으로 작용한 결과라 생각된다(Fernandez 등, 1995).

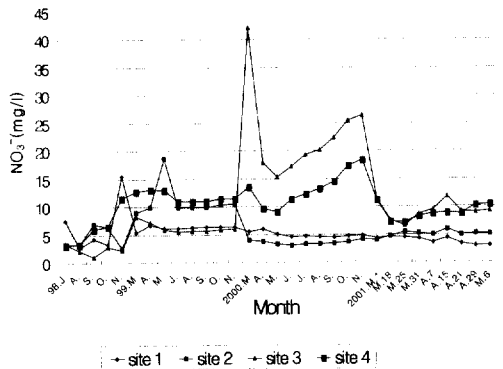


Figure 9. Variations of amount of NO_3^- (mg/ℓ) stream water during the period of July of 1998 to May of 2001.

평균 SO_4^{2-} 량(mg/ℓ)은 상류유역에서 1999년에 7.99(6.80~10.24), 2000년에 6.85(6.08~7.79), 2001년에 6.81(5.29~7.77)이었다. 그러나 하류유역에서는 1999년에 9.03(7.08~13.04), 2000년에 9.60(7.87~13.50), 2001년에 8.10(6.75~11.0)이었다. 즉, 평균 SO_4^{2-} 량은 하류유역이 상류유역에서 보다 약 1.1~1.4배 높았는데, 이는 동결융해침식토사, 음식점 및 사찰 등에서의 유출수 유입

등에 기인한 결과로 계류의 상류보다 하류에서의

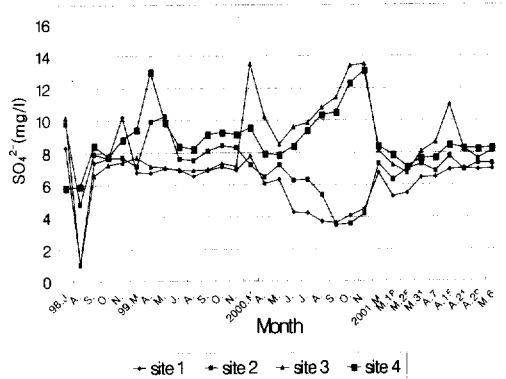


Figure 10. Variations of amount of SO_4^{2-} (mg/ℓ) stream water during the period of July of 1998 to May of 2001.

오염현상이 큰 것으로 나타났다. 또한, 봄기간 동안 상류유역보다 하류유역에서의 SO_4^{2-} 량 증가는 계류수에서 SO_4^{2-} 량의 계절변동이 적으므로(강병욱 등, 1996) 대기오염물질 및 모암 등에 의한 영향보다는 동결융해침식 토사의 유출 그리고 사찰, 대형음식점에서의 배출수에 의한 영향이 컸기 때문인 것으로 생각된다.

3. 봄기간 동안 계류수의 pH, 전기전도도와 유량과의 관계 분석

1) 계류수의 pH와 유량

봄기간 동안 계류수에서 pH와 유량과의 관계를 직선회귀 분석한 결과(Figure 11), 직선회귀식은, 계류수의 $\text{pH} = 1.7926 \times \text{유량} + 5.9577$ ($R^2 = 0.46$)이었다. 즉, 大類 등(1992)이 보고한 것처럼 계류수의 pH는 유량이 증가할 수록 농도가 하강하고, 유량감소시에는 농도가 상승하는 관계를 나타내었다. 이 결과는 Hiraki 등(1985), 平井 등(1990)의 보고와 일치하는 결과이었다. 그러나 朴宰澈과 李憲浩(2000)는 유량이 증가하면 pH가 낮아지다가 침두유량을 전환점으로 유출량이 감소하면 pH가 높아졌다고 보고하여 이 연구결과와는 상반되는 결과이었다. 따라서 이와 같은 결과는 입지적, 계절적 특성 등에 따른 차이에 기인하는 결과로 생각되며, 보다 장기적인 자료의 수집으로 계류수의 pH와 유량과의 관계를 구명할 필요가 있을 것으로 생각된다.

한편, 봄기간 동안 I 유역과 II 유역이 합류하는 수질조사지점 4에서의 평균 유량(m³/sec)은 1999년에 0.46, 2000년에 0.24, 2001년에 0.23으로 4개 수질조사지점 가운데 가장 많았으나, 연차적으로 유량이 감소하는 경향을 나타내어 2001년에 봄가뭄의 영향이 나타났음을 파악할 수 있었다.

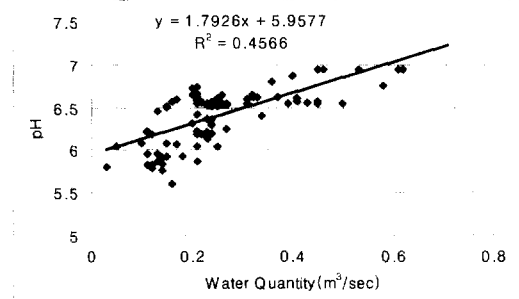


Figure 11. Linear equation for stream water quantity (m³/sec) and pH.

2) 계류수의 전기전도도와 유량

봄기간 동안 계류수에서 전기전도도와 유량과의 관계를 회귀분석한 결과(Figure 12), 회귀식은, 계류수의 전기전도도 = $34.417e^{3.6334 \times \text{유량}}$ ($R^2 = 0.44$)이었다. 즉, 大類 등(1992)이 보고한, 전기전도도는 유량의 증가와 함께 증가하였고, 유량감소 시에는 감소한 결과와 일치하였다. 또한, 朴宰澈(2000)이 보고한 유량이 증가할 수록 전기전도도는 높아지고, 유량이 감소할 수록 전기전도도는 낮아졌다는 결과와 일치하였다. 이와 같은 결과 전기전도도의 상승은 유량 증가에 따라 영향하며, 특히 봄기간 동안에는 동결융해침식 토사의 계류로의 유입에 의한 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등 음이온량의 증가에 기인하는 결과 때문이라 생각된다. 그러나 志水 등(1987)은 유량이 증가할 수록 전기전도도는 낮아진다고 하여 이 연구와는 다른 결과를 나타내었다. 또한, 李憲浩(1997)도 계류수의 pH, 용존산소량은 유출수량의 증가에 따라 값이 상승하나, 전기전도도는 값이 낮아졌다고 하였는데, 이는 모암 등 입지적 요인, 지역적 요인, 계절적 요인에 따른 차이에 기인한 결과로 생각된다. 따라서 봄기간 동안 유량 변동에 따른 계류수에서의 전기전도도의 변화에 관한 연구는 장기적이고도 지속적인 모니터링을 통한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

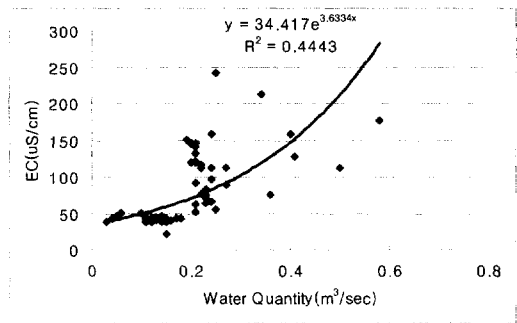


Figure 12. Regression analyses result for stream water quantity(m³/sec) and electrical conductivity(µ S/cm).

結 論

이 연구는 1998년부터 2001년까지 봄기간(3월에서 5월) 동안 북한산국립공원 북동사면 일대에서 동결융해침식 및 토사유출이 계류수질에 미치는 영향을 파악함으로써 국립공원내 계류수질 보전을 위한 과학적 기초 자료를 제공하기 위하여 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 조사기간 동안 계류면 비탈면에서 동결융해침식 되어 유출된 토사량은 하류유역이 상류유역에서 보다 약 1.3~2.7배 많았으며, 동결융해침식 토사의 평균 pH는 계류수의 pH 변동에 영향을 주는 것으로 분석되었다.
2. 계류수에 용존된 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻량과 동결융해침식 토사에서의 평균 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻량은 정의 상관관계를 가지며 각각 57%, 73%, 80%의 설명력을 나타내었다.
3. 봄기간 동안 계류수의 평균 pH는 1999년에 pH 6.40(5.86~6.87), 2000년에 pH 6.44(5.80~6.65), 2001년에 pH 6.19(5.61~6.74)로 하천수질환경기준 상수원수 1급수 기준보다 낮아지는 것으로 분석되었다.
4. 계류수의 평균 전기전도도는 하류유역이 상류유역보다 2.3~3.3배 높았으며, 평균 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)량은 상류유역보다 하류유역이 각각 1.2~7.4배, 1.1~3.9배, 1.1~1.4배 높아 동결융해침식토사, 사찰 및 음식점 등에서 배출하는 유출수가 합류하는 하류유역의 수질이 상류유역보다 나빠지는 것으로 분석되었다.
5. 계류수의 pH, 전기전도도와 유량과의 회귀분석 결과, 계류수의 pH = 1.7926 × 유량 + 5.9577($R^2 = 0.46$), 계류수의 전기전도도 =

34.417e^{-3.6334 3x 유량} (R² = 0.44)의 관계이었다.

引用文獻

1. 강병욱·이학성·김희강. 1996. 청주시 여름과 겨울철의 산성오염물질에 대한 특성 비교. *大韓環境工學會誌* 18(9): 1-8.
2. 權肅杓. 1989. 음료수의 수질. *自然保護* 12(6): 20-22.
3. 기상청. 2001. 적설통계자료. 기상청 <http://www.kma.go.kr>
4. 朴宰澈. 2000. 물循環모델에 의한 山地小流域의 流出特性 및 溪流水의 水質變化 分析. 嶺南大學校 大學院 碩士學位論文. 74p.
5. 朴宰澈·李憲浩. 2000. 流出量의 變化가 山地溪流水의 水質變化에 미치는 影響-八公山流域을 對象으로-. *韓國林學會誌* 89(3): 342-355.
6. 朴在鉉·禹保命. 1989. 비탈면의 凍結融解 浸蝕에 關한 研究. *서울大 農學研究* 14(1): 9-15.
7. 朴在鉉. 1995. 白雲山 成熟闊葉樹林 皆伐收穫地에서 伐出直後의 環境變化와 運材路 浸蝕에 關한 研究. *서울大學校 博士學位論文*. 137pp.
8. 朴在鉉. 1999. 北漢山國立公園 北東斜面 一帶 溪流水質 特性. *한국임학회지* 88(1): 101-110.
9. 朴在鉉. 2001. 北漢山國立公園 北東斜面 一帶 溪流水質 特性(IV) - 理化學的 特性의 季節別 變化를 中心으로 -. *한국임학회지* 90(1): 146-154.
10. 박종관. 1997. 물환경조사법. 청문각. 186pp.
11. 吳英敏, 申錫奉. 1991. 水質管理. 신광문화사. 311pp.
12. 李海金. 1977. 臨溪댐 豫定地域內 河川水 水質에 關한 理化學的 調查研究. *韓國自然保存協會 調查報告書* 第13號: 143-153.
13. 李憲浩. 1997. 山地 물循環 素過程에 있어서 水質變化의 追跡分析에 의한 山林의 環境의 淨化機能의 計量化 研究. *韓國林學會誌* 86(1): 56-68.
14. 田祥麟·黃鍾瑞. 1993. 智異山의 七仙溪谷, 白武洞溪谷 및 뱀사골溪谷의 水環境과 淡水魚類相. *韓國自然保存協會 調查報告書* 第31號: 141-151.
15. 田祥麟·黃鍾瑞. 1995. 小白山 國立公園 溪流의 水環境 및 淡水魚類相. *韓國自然保存協會 調查報告書* 第33號: 141-149.
16. 全宰弘. 1995. 산지물순환소과정에서 산도, 전기전도도, 용존산소 및 수량 측정에 의한 수질변화의 분석. *嶺南大學校 大學院 碩士學位論文*. 44p.
17. 鄭英昊. 1985. 溪流의 植物性 플랑크톤. *자연보존* 50: 12-15.
18. 洪思澳. 1985. 溪流水의 汚染과 對策. *자연보존* 50: 8-11.
19. 平井敬三·加藤正樹·岩川雄幸·吉田桂子. 1990. 樹幹流가 林地土壤에 與える 影響(II)-스ギ·ヒノキ林における 林外雨, 林內雨, 樹幹流, 土壤水의 pH-. *日林論* 101: 243-245.
20. 大類清和·生原喜久雄·相場芳憲. 1992. 降雨 이벤트의 溪流水의 溶存物質의 流出特性と 流出成分의 分離. *日本林學會誌* 74(3): 203-212.
21. 佐藤冬樹·笹架一郎·藤原滉一郎. 1996a. 北海道北部低地の新雪に含まれる化學成分의 空間變動-選擇的溶出と NH₄⁺沈着의 影響-. *北海道大學農學部演習林研究報告* 53(2): 205-218.
22. 佐藤冬樹·笹架一郎·藤原滉一郎. 1996b. 北海道北部山地의 積雪의 化學組成-森林의 影響と 有機物質收支解明への豫備調査-. *北海道大學農學部演習林研究報告* 53(2): 219-234.
23. 佐藤冬樹·笹架一郎·榎本浩志·藤原滉一郎. 1997. 北海道北部における 積雪底面融雪水의 이온組成. *北海道大學農學部演習林研究報告* 54(2): 175-187.
24. 佐藤冬樹·野村 陵·榎本浩志·芦谷大太郎·笹架一郎. 1999. 北海道北部における 春期融雪時期의 酸性積雪からの 이온溶出. *北海道大學農學部演習林研究報告* 56(2): 1-10.
25. 志水俊夫·藤枝基久·吉野昭一. 1987. 融雪期における 河川水質의 變動特性. *日林論* 98: 561-564.
26. Bain, D.C., A. Mellor, M.J. Wilson and D.M.L. Duthie. 1994. Chemical and mineralogical weathering rates and processes in an upland granitic till catchment in Scotland. *Water Soil Air Pollut* 73: 11-27.
27. Fernandez, I.J., G.B. Lawrence and Y. Son. 1995. Soil-Solution chemistry in a low-elevation spruce-fir ecosystem, Howland, Maine. *Water, Air, Soil Pollution* 84: 129-145.
28. Helliwell, R.C., C. Soulsby, R.C. Ferrier,

- A. Jenkins and R. Harriman. 1998. Influence of snow on the hydrology and hydrochemistry of the Allt a' Mharcidh, Cairngorm mountains, Scotland. *The Science of the Total Environment* 217 : 59-70.
29. Heuer, K., P.D. Brooks and K.A. Tonnessen. 1999. Nitrogen dynamics in two high elevation catchments during spring snowmelt 1996, Rocky Mountains, Colorado. *Hydrological Processes* 13 : 14-15.
30. Hiraki, T., M. H. Tamaki, M. and H. Watanabe. 1985. Estimation of Air Pollution by Rainwater Components. *Bulletin of Hyogo Prefectural Pollution* 17 : 6-11.
31. Jenkins, A., R. Ferrier and D. Waters. 1993. Meltwater chemistry and its impact on stream water quality. *Hydrology Process* 7 : 193-203.
32. Johannessen, M. A. Skartveit and R. F. Wright. 1980. Streamwater chemistry before, during and after snowmelt. *Proceeding of the International Conference on Ecology and the Impact on Acid Precipitation, Norway SNSF project.*
33. Maeda, T., S. Kinoshita, S. Sato and A. Ujiie. 1994. Design of a snow melting tank using treated wastewater. *Water Science and Technology* 29 : 1-2.
34. Margaret, N., N. Colin and B. Gerhard 1997. Stable oxygen isotope variations in rain, snow and streamwaters at the Schluchsee and Villingen sites in the Black Forest, SW Germany. *Journal of Hydrology* 190 : 102-110.
35. McGlynn, B.L., J.J. McDonnell, J.B. Shanley and C. Kendall. 1999. Riparian zone flow-path dynamics during snowmelt in a small headwater catchment. *Journal of Hydrology* 222 : 75-92.
36. Murdoch, P.S., J.S. Baron and T.L. Miller. 2000. Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. *Journal of the American Water Resources Association* 36 : 347-366.
37. Peters, N. and G.H. Leavesley. 1995. Biotic and abiotic processes controlling water chemistry during snowmelt at Rabbit Ears Pass, Rocky Mountains, USA. *Water, Air, and Soil Pollution* 79 : 171-190.
38. Robert S., A.T. Charles and M. Dan. 1997. Change in snowpack, soil water, and stream-water chemistry with elevation during 1990, Fraser Experimental Forest, Colorado. *Journal of Hydrology* 195 : 114-136.
39. Soulsby, C., R.C. Helliwell, R.C. Ferrier, A. Jenkin and Harriman, R. 1997. Seasonal snowpack influence on the hydrology of a subarctic catchment in Scotland. *Journal of Hydrology* 192 : 17-32.
40. Soulsby, C., M. Chen, R.C. Ferrier, R.C. Helliwell, A. Jenkins and Harriman, R. 1998. Hydrogeochemistry of shallow ground-water in an upland Scottish catchment. *Hydrology Proc.*; in press.
41. Stottlemyer, R. and D. Toczydlowski. 1999. Seasonal change in precipitation, snowpack, snowmelt, soil water and streamwater chemistry, northern Michigan. *Hydrological Processes* 13 : 14-15.
42. Warren, J.S. 1985. Hydrology of the River Dee and its tributaries. *The biology and management of the River Dee. Monks Wood* : 29-33.
43. Williams, J.M. and J.M. Melack. 1991. Solute chemistry of snowmelt and runoff in an alpine basin, Sierra Nevada. *Water Resources Research* 27 : 1575-1588.