

流出量の變化가 山地 溪流水의 水質變化에 미치는 影響¹

- 八公山流域을 對象으로 -

朴宰澈² · 李惠浩²

Variations of Stream Water Quality Caused by Discharge Change¹

- At a Watershed in Mt. Palgong -

Jae Chul Park² and Heon Ho Lee²

要 約

본 연구는 물순환모델을 이용하여 계류수의 유출성분을 직접유출과 기저유출로 분리한 각각의 유출 성분과 계류수질의 장·단기 수질 관측을 통해 얻어진 pH, EC 및 용존이온들과의 관계를 파악하여 유출량의 변화가 물질수지 및 계류수질에 미치는 영향을 밝히기 위하여 실시하였다. 팔공산 수문관측구역에서 1998년 1월부터 1999년 9월까지 관측한 수문 및 수질자료를 대상으로 유출량과 수질변화 특성과의 관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 계류수의 연평균 pH는 1998년에 6.48(6.22~6.89)로, 1999년에 6.52(5.75~7.18)로 나타나 대체로 일정한 값을 유지하고 있었으며, 시험구역에서 간벌이 실시된 이후 4개월 동안은 계속해서 pH가 낮아져 간벌이 영향을 미친 것으로 나타났다.

2. 계류수의 연평균 EC는 1998년에 26.69(17.95~33.5) μ S/cm로, 1999년에 25.19(17.5~33.8) μ S/cm로 나타나 시험구역에서 연중 일정한 값을 나타내었다.

3. 강우와 계류수의 평균 용존 물질량을 비교한 결과, 분석된 이온들 중 K^+ 를 제외한 나머지 이온 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 는 모두 마이너스 수치를 나타냈다. 그리고, 계류수의 용존원소 가운데 양이온은 Na^+ 가 가장 농도가 높았으며, 음이온은 NO_3^- 가 가장 많이 검출되었다.

4. 단위강우로부터 발생한 계류수 pH의 경시변화를 분석한 결과, 유량이 증가하면 pH가 낮아지다가 침투유량을 전환점으로 해서 유출량이 감소하면 다시 pH가 높아지는 것으로 나타났다.

5. 계류수 EC의 경시변화를 분석한 결과, 강우초기의 유량증가시에는 EC값이 감소하지만 침투유량을 전후로 해서 유량의 증감에 따라 EC값이 함께 변화하는 것으로 나타났다.

6. 계류수의 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , 양이온총량, Cl^- 및 SO_4^{2-} 는 유출량이 증가하면 농도가 낮아지지만, 유출량이 감소하면 농도가 높아지는 경향을 나타내었으며, NO_3^- 와 음이온총량은 그 반대의 경향을 나타내었다. 그리고, Mg^{2+} 는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

7. 물순환모델에 의해 분리된 직접유출, 기저유출 및 총유출 성분 중 pH, EC 그리고 양이온 및 음이온 농도에 가장 큰 영향을 미치는 유출성분은 기저유출로 나타났다.

ABSTRACT

This study was carried out to reveal the influence of discharge change on matters and stream water quality between pH, EC and dissolved matters obtained by observation of long-term and short-term on stream water quality and separated runoff components from stream water by using HCYMODEL. From January in 1998 to September in 1999, it was estimated by relationships of character of water quality and discharge for the experimental watershed in Mt. Palgong. The results were summarized as follows :

¹ 接受 2000年 3月 27日 Received on March 27, 2000.

² 영남대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Youngnam University, Kyongsan 712-749, Korea.

1. Annual average pH values of stream water in 1998 and in 1999 were 6.48(6.22~6.89) and 6.52(5.75~7.18), respectively. The observed annual average pH values were maintaining identical values in general, but pH values decreased continuously during the four months after thinning in the experimental watershed. So thinning is suspected of the major cause for the decrease.

2. Annual average EC values of stream water in 1998 and in 1999 were 26.69(17.95~33.5) μ S/cm and 25.19(17.5~33.8) μ S/cm, respectively. The observed annual average EC values were maintaining identical values in general.

3. As a result of the comparison of average dissolved ions of rainfall and stream water, Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-} showed minus values between incomings and outgoings. Na^+ and NO_3^- among the dissolved ions of stream water showed the highest concentration out of cations and anions respectively.

4. By the change of pH value in stream water due to rainfall events, pH value decreased with increasing runoff as pH value increased before and after peak flow.

5. By the change of EC value in stream water due to rainfall events, EC value decreased with increasing runoff of first rainfall as EC value changed with runoff before and after peak flow.

6. As the runoff increased, the concentration of Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , total cation, Cl^- , and SO_4^{2-} in stream water lowered. On the other hand, the runoff decreased, their concentration in stream water tended to get high. But in terms of NO_3^- and total anion, they turned out vice versa. Mg^{2+} produced no reaction.

7. The base flow among runoff components separated by using HCYMODEL influenced greatly on pH, EC, concentration of cation and anion.

Key words : HCYMODEL, amount of runoff, runoff component, dissolved matters, stream water quality, pH, EC, cation, anion, dissolved ions

縮 論

산지 유역에서의 계류수 수질은 일반적으로 하천수질기준에 의한 수질등급상 최상급인 1급수를 나타내고 있고, 하류의 하천이나 호수에 유입되어 수질을 향상시킨다. 그러나 고도로 공업화·산업화된 세계 각국의 토양과 하천수는 생활하수, 축산 오·폐수, 화학비료 및 여러 가지 농약들로 인해 심각하게 오염되고 있고, 임도개설과 골프장 및 스키장 건설 등으로 인해 수질 악화를 초래하고 있다. 이러한 상황에서 화학처리와 같은 고도 정수시설에 의해서 양질의 물을 공급할 수 있는 것은 제한적이며, 산림만이 무균질의 생수를 만들어 낼 수 있다는 인식이 확산되고 있다(Felix, 1994; Megahan, 1975). 따라서 국내외적으로 오래전부터 수행되어 온 산림의 수질정화능에 대한 정량적인 연구가 더욱 요구되고 있는 실정이고, 강우의 형태로 산림으로 강하한 대기오염 물질과 수질오염 물질이 산림 생태계를 거치면서 정화되는 메커니즘과 계류수에 용존되어 있는 물질들의 유출 경로를 밝히는 것이 중요하다.

계류수질은 지질, 기상과 같은 무기환경에 의해

크게 변화하고, 특히 산림지에서는 인위적인 영향을 크게 받는다. 계류수에 대한 용존원소의 동태나 산림벌채 등에 의한 용존원소의 변화 특성 또는 계류수질의 계절변화 등을 명확히 구명하기 위하여 유역을 단위로 많은 연구가 수행되고 있다(Johnson 등, 1969; Likens 등, 1970; Feller와 Kimmins, 1979).

계류수질에 영향을 미치는 인자에 대하여 오래전에 Hoover(1952)는 물리적 성분, 화학적 성분 그리고 미생물적 성분으로 구분하였고, Likens 등(1969)은 산림 소유역의 개별지역 계류수에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- -N 등의 이온이 급격하게 증가한다고 하였다. Brown과 Binkley(1994)는 NH_4^+ -N과 NO_3^- -N 및 계류수의 수온 등이 오염 유발원으로 작용하므로, 수질평가를 위해서는 미생물적 오염원인 대장균군의 검사도 중요하다고 하였다. 한편, Teller(1976)는 어류, 상업, 농업, 휴양, 심미적 요인과 수원의 공급 등에 의한 수질분류 체계의 정립에 대해 보고한 바 있다.

岩坪五郎 등(1982)은 산지유역의 모암과 산림상태에 따라 발생하는 양료 이동 및 축적이 계류수에 용존되어 있는 양료 함량을 변화시키는 중요한

인자이므로 계류수질 평가항목 선정시에는 임목, 토양, 암석 등이 함유하고 있는 화학물질에 대한 검토가 이루어져야 한다고 제안한 바 있고, 大類 濟和 등(1995)은 산지 물순환별로 수질을 분석한 결과, NH_4^+ 와 H^+ 를 제외한 K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 등의 용존물질 농도가 계류수에서 증가하였다고 하였다.

국내에서 계류수의 수질에 대한 연구로는 朴在 鉉(1996)이 산림내 계류수질 평가인자에 포함될 수 있는 것으로 양이온, 음이온, 토양특성인자 등에 관하여 보고하였다. 程龍鎬 등(1996)은 계류수와 토양수에서 수질 평가항목의 설정시 중요한 인자인 전기전도도에 유의한 영향을 미치는 인자는 Na^+ 와 Mg^{2+} 이온 등이며, 특히 이온총량과 유의한 정의 상관관계가 있다고 보고한 바 있으며, 金載基(1998)는 산림토양의 완충능과 완충능의 크기 발현 속도를 분석하여 산림의 수질정화기능을 평가하였다. 한편 산지유역내 계류수의 계절별 수질 변화에 대해 李天龍과 元亨圭(1994)는 여름에 pH와 용존산소 농도가 다른 계절에 비해 약간 낮고, 이온 함량은 가장 높다고 하였다. 그리고 양이온은 퇴적암 지역에서 가장 높게 나타나고, Na^+ 와 Cl^- 은 해안에 인접한 지역에서 많았으며, 음이온 중 SO_4^{2-} 는 산악지역보다 도시지역이 약 56% 더 많다고 하였다.

산림유역 수원지대에서 수문유출 현상과 물질유출 현상에 대한 유기적 관계를 구명하려는 연구는 근래에 많이 이루어지고 있다. 沖村 孝 등(1991)은 산지 소유역에서 유출량이 증가하면 HCO_3^- 는 감소한다고 하였고, 橋 治國(1993)은 홍수시의 수질 변화 특성을 無制限供給形, 一定量供給形, 環境一時蓄積形으로 구분한 바 있다. 多田明夫 등(1997)은 수질에 의한 유출성분 분리와 유출모델에 의한 유출성분 분리를 상호 비교하였으며, 木平英一 등(1997)은 강우에 따른 계류수의 NO_3^- -N 농도 상승은 계곡부 표층 토양으로 포화대가 확대되면서 발생하고, 토양수의 NO_3^- -N 농도 상승은 포화대가 표층까지 확대되었을 경우에 발생한다고 하였다. 李尙度(1995)는 중소하천의 유량과 수질 변동 특성에 관한 연구에서 유량과 BOD, COD, DO, SS, 수온 등의 수질항목들의 계절적 변동 특성을 분석한 결과, 가을철에 전체적으로 농도가 가장 높았고, 유량이 적고 농도의 변화가 적은 겨울철이 가장 낮았으며, 특히 BOD는 봄, COD와 SS는 여름, DO는 겨울에 가장 높은 농도가 나타

났다고 하였다.

계류수의 수질은 수량과 복합적으로 관련되어 있기 때문에 계류수의 수질보전 및 관리를 위해서는 수문유출 현상과 물질유출 현상을 각각 독립적으로 취급하기보다는 산지 유역에서의 유출수량과 계류수질과의 관련성을 밝히는 것이 더욱 중요하다.

따라서, 본 연구는 산지소유역에서 물순환모델에 의한 강우 및 유출수량의 변동이 계류수의 물질수지와 pH, EC 그리고 주요 용존이온농도의 증감에 미치는 영향을 밝히는 데 그 목적을 두고 있다.

材料 및 方法

1. 시험유역의 개황

본 연구는 경상북도 경산시 와촌면 대한리(동경 $128^\circ 44' 30'' \sim 128^\circ 45' 00''$, 북위 $35^\circ 58' 30'' \sim 35^\circ 59' 00''$)에 위치하고 있는 수문관측유역을 시험유역으로 선정하였다(Fig. 1). 시험유역의 모양은 화강암이고, 토양은 갈색산림토양(brown forest soils)으로 되어 있으며, 토성은 양질사토 또는 사질양토이다. 山中式 토양 경도계로 측정된 토양 경도(soil hardness)는 평균 $0.8 \sim 3.0 \text{kg/cm}^2$ 이었다.

Fig. 1. Geographical location map of the experimental watershed

● : station of rainfall gauging and stream water sampling

Table 1에 수문관측시험유역의 지형 및 유역 환경인자를 나타내었으며, 이 수치들은 1/5,000 지형도를 이용하여 도상에서 계측하였고 일부 인자들은 현지에서 실측하여 구한 값이다.

유역면적은 시험유역의 경계를 따라 컴퍼스 측량으로 실측하여 구하였다. 流域形狀係數(Form factor of basin)는 유역면적을 主流長(Main stream length)의 제곱으로, 水系密度(Drainage density)는 본류와 지류의 총연장을 유역면적으로 나누어서 구하였다. 起伏量比(Relief ratio)는 유로가 시작되는 지점에서 수위관측 지점까지의 표고차를 유로연장으로 나눈 값이고, 流域平均傾斜(Mean gradient of relief)와 流域平均高度(Mean altitude of basin)는 등고선을 이용하여 구하였으며, 流域平均幅(Mean basin width)은 유역면적을 주류장으로 나누어 구하였다.

시험유역의 식생은 소나무, 갈참나무, 물푸레나무, 당단풍, 생강나무 등으로 구성된 침활혼효의 천연림이다. 상층 식생은 주로 소나무와 갈참나무, 그리고 상수리나무로 평균 흉고직경은 13~28cm, 평균 수고는 8.5~11.5m이었다. 중층 식생은 당단풍, 울나무, 철쭉, 물푸레나무, 그리고 생강나무 등으로 평균 흉고직경은 2cm 미만이고, 평균 수고는 1~1.2m이었으며, 하층 식생은 고사리와 조릿대 등으로 구성되어 있었다.

Table 1. Topographic features of the experimental watershed

Factors	Unit	
Basin area(Thinning area)	ha	17.7 (1.7)
Form factor of basin	km/ha	0.348
Drainage density	%	0.038
Relief ratio	%	26
Mean gradient of relief	%	11.03
Altitude	m	489~700
Mean altitude of basin	m	645.6
Main stream length	km	0.509
Mean basin width	km	0.348
Soil hardness	kg/cm ²	0.8~3.0
Soil texture		sandy loam
Bed rock		granite

Table 2. Data on the different rainfall events at the experimental watershed

Rainfall event	Date	Rainfall (mm)	Elapsed time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Previous Rainfall (mm)
Rainfall 1	1999. 05. 03.	94.5	20	4.7	3.5(99. 04. 28.)
Rainfall 2	1999. 06. 16.	105.0	41	2.6	4.0(99. 06. 07.)
Rainfall 3	1999. 08. 21.	104.5	50	2.1	2.0(99. 08. 18.)

2. 재료 및 연구방법

시험유역에서 강우와 계류수를 대상으로 하여 1998년 1월부터 1999년 9월까지 약 1년 9개월 동안 수질을 조사하였다. 특히, 1998년 5월에서 1999년 9월 동안에 내린 강우량이 비슷한 3개의 단위강우를 별도로 선정하여 계류수의 유출수량과 수질과의 관계를 조사하였다. Table 2에 선정한 3개의 단위강우에 대한 강우개시일, 강우량, 강우지속시간, 강우강도, 전강우일 등을 표시하였다.

수질분석항목은 계류수질 평가인자라고 판단되는 수온, pH, EC와 양이온인 Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 및 음이온인 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻로 선정하였다(朴在鉉, 1995). 계류수질의 측정은 장기유출과 단기유출을 대상으로 각각 실시하였다. 장기유출에 대해서는 2주 간격으로 계류수의 월별 수온의 변화와 유출량의 변동에 따른 pH와 EC의 변화를 관측하여 계절별 수질변화의 특성을 분석하였으며, 이 가운데 pH는 Falcon tube에 계류수 50ml를 채수하여 실험실에서, 그리고 수온과 EC는 현장에서 직접 휴대용 측정기기로 측정하였다. 단기유출은 20% HNO₃로 세척한 polyethylene tube (50ml)에 강우개시 직후부터 강우종료 이후까지 일정 시간 간격으로 각각 100ml씩 계류수를 채수한 후 ice box에 냉장 보관하여 신속하게 실험실로 운반하여 측정하였다. 이때, 수온, pH, EC는 장기유출에서의 경우와 동일한 방법으로 측정하였고, 주요 양이온과 음이온은 채취한 시료를 여과한 후 HNO₃로 前處理하여 측정하였다. pH는 황이나 산화질소에 의해 증가하고 칼륨이나 마그네슘에 의한 오염의 지표로서 사용되기 때문에 강우 및 계류수의 pH측정은 pH meter(Consort C833)를 이용하여 3N HCl에 8시간 이상 전극을 넣어 안정화시킨 후에 측정하였으며, 일반적인 계류수는 대개 pH 6~8정도의 범위를 가진다. EC는 물속에 녹아있는 전해질의 양 또는 용존고체총량을 종합적으로 표시하는 지표이고, 유출량의 변화에 따른 전기전도도의 변화로 계류수의 혼탁 유무와 특정 염류의 증감을 알 수 있기 때문에(홍병호와 임병국, 1995) EC의 측정은 YSI사에서 제작한

Model 30 Handheld를 이용하여 측정하였으며, 이 기기는 0~499.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위까지 측정할 수 있다. 산지 계류수에 있어서 EC 값의 범위는 대체로 30~150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 알려져 있다(Whitehead 등, 1988). 양이온은 먼저 채수한 샘플용액 50ml를 여과하여 100ml flask에 1ml의 시료를 넣고 특급 HNO_3 으로 100배 묽힌 후 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)를 이용하여 측정하였으며, 음이온은 샘플용액을 여과판하여 IC(Ion Chromatography)로 측정하였다.

분석방법은 강우 및 계류수의 수질인자 측정값을 단순 비교하고, 그 절대값의 차이로 물질의 산림내 유입량과 유출량의 물질수지를 측정하여 산림의 수질정화능과의 관련을 분석하였다. 그리고, 유출량의 변동에 따른 계류수의 수질변화 특성을 밝히기 위하여 먼저, 물순환모델(福嶋와 鈴木, 1986)에 의해 유출량을 직접유출, 기저유출 및 총유출로 성분을 분리하였다. 이어서 이들 유출성분과 pH, EC, 양이온, 음이온 그리고 이온총량과의 상관성을 spss로 통계분석 하였으며, 동시에 유출량의 변화에 따른 수질인자들의 경시적 변화를 분석하였다.

結果 및 考察

1. 월별 pH와 EC의 변화

수문관측시험유역의 계류수를 대상으로 1년 9개월간 2주 단위로 측정된 pH 및 EC의 월별 변화 모습을 Fig. 2에 나타내었다.

계류수의 pH 변화는 주로 강우 pH 및 계절에 따른 식생의 이온흡수나 토양의 양이온 치환용량 등의 차이에 기인하는데(李憲浩, 1997), 1998년 계류수 pH는 7월에 6.22로 가장 낮게 나타난 반면, 9월에 6.89로 가장 높게 나타났다. 이는 장마기인 7월의 강우 pH가 낮았기 때문으로 추정되며, 李天龍과 元亨圭(1994)의 연구결과와도 비슷한 경향을 나타내었다. 한편, 9월에 가장 높은 값을 나타낸 것은 장기간의 무강우로 인해 강우가 거의 계류에 유입되지 않았기 때문으로 판단된다. 1999년 계류수 pH는 4월에 5.75로 가장 낮게 나타났으며, 9월에 7.18로 가장 높게 나타났다. 이 결과는 겨울동안 산림계내에 침착한 건성강하물의 세탈에 의한 영향과 1998년 가을에 실시된 간벌의 영향으로 추정된다.

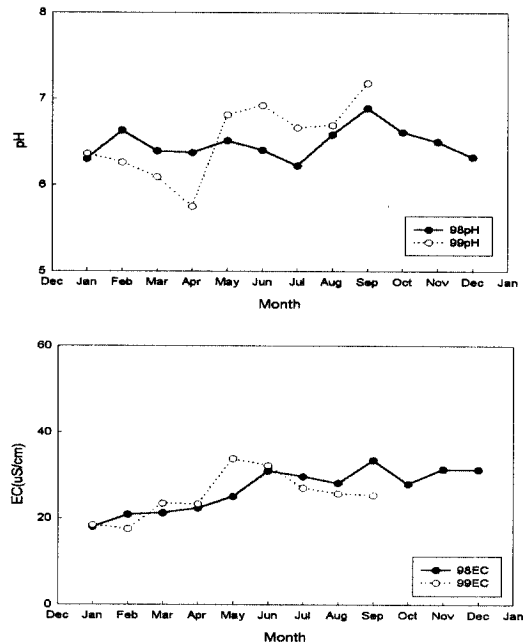


Fig. 2. Monthly change of pH and EC at the experimental watershed

1998년의 연평균 pH가 6.48(6.22~6.89)로 나타난 반면, 1999년에는 연평균 pH가 6.52(5.75~7.18)로 나타나 전체적으로는 pH가 약간 증가하였으나 측정오차를 감안한다면 시험유역에서는 연중 일정한 pH를 유지하고 있었고, 1998년도에 비해 1999년도의 pH 변동폭이 다소 크게 나타난 것은 간벌로 인한 임지사면에서의 직접유출량이 증가한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

1998년도의 계류수 EC는 1월에 17.95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 9월에 33.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 높게 나타났다. 1999년도 계류수 EC는 2월에 17.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 낮았으며, 5월에 33.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타나 가장 높았다. 그리고, 1998년도 연평균 EC는 26.69(17.95~33.5) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로, 1999년도 연평균 EC는 25.19(17.5~33.8) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 시험유역에서 연중 일정한 값을 유지하고 있었다.

또한, 이 결과는 EC값이 용설로 인한 유량증감에 반비례적으로 변화한다는 志水俊夫 등(1987)의 연구결과와는 반대의 경향을, 그리고 유량증감에 따라 EC는 비례적으로 변화한다는 전재홍(1995)의 연구결과와는 일치하여 용설시와 강우시 유출수량의 증감이 계류수 EC에 미치는 영향은 다른 것으로 나타났다.

2. 강우와 계류수의 물질수지 특성

산림 생태계내 물질의 유입과 유출의 수치변화를 평가하기 위하여 두 강우의 용존 원소량과 계류수의 용존 원소량을 측정하여 Table 3에 나타냈다.

단위강우 2에서는 유입이온들 가운데 양이온은 Ca^{2+} 의 농도가 4.3mg/l로 가장 높았고, 음이온은 SO_4^{2-} 의 농도가 2.44mg/l로 가장 높았으며, 단위강우 3에서는 Na^+ , Cl^- 의 농도가 각각 2.4mg/l, 7.93mg/l로 가장 높은 값을 나타냈다. 강우에 따라 용존 원소량도 다르지만 대체로 양이온은 Na^+ 및 Ca^{2+} 가 K^+ 및 Mg^{2+} 보다 많이 검출되었으며, 음이온은 Cl^- 와 SO_4^{2-} 가 NO_3^- 보다 약간 많이 검출되었다.

단위강우 2와 단위강우 3에 의해 발생한 계류수 용존원소를 분석한 결과, 둘다 양이온은 Na^+ 가 5.41mg/l, 9.54mg/l로 가장 농도가 높았으며, 음이온은 NO_3^- 의 농도가 5.53mg/l, 12.45mg/l로 가장 높았다. 이는 Johnson 등(1968)이 Ca^{2+} 와 Na^+ 의 물질수지를 이용하여 모암의 풍화량을 추정하는 연구에서처럼 일반적으로 Na^+ 는 모암에서 起源하는 용존물질이기 때문에 시험유역 모암의 풍화에 의해 Na^+ 의 유출량이 약 2배~4배 정도 큰 것으로 판단된다. 그리고 Likens 등(1970)의 미국 Hubbard Brook 시험림에서 이루어진 간벌이 수질에 미치는 영향에 대한 연구결과와 같이 NO_3^- 의 증가는 식생에 의한 물질흡수의 감소와 유기물의 분해 및 질산화작용이 촉진되어 발생한 것으로 판단된다.

강우와 계류수의 용존원소량을 비교하면, 단위강우 3의 K^+ 를 제외한 나머지 이온 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 가 강우보다 계류수에서 농도가 높았으며, 단위강우 2에 의한 계류수의 용존원소 총량보다 단위강우 3에 의한 용존원소 총량이 2배 이상 많았다. 이는 단위강우 2에 비해 단위강우 3의 강우지속시간이 9시간 길고, 간벌 및 모암의 풍화에 의해 산림 생태계 내에서 물질들의 용탈이 이루어진 것에 의한 것으로 판단된다.

3. 강우 및 유출량 변동에 의한 계류수질의 시계열 변화

1) pH와 EC의 변화 특성

강우 및 유출수량의 변동에 따른 계류수 pH 및 EC의 시계열변화를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다.

강우 pH는 강우개시부터 강우종료까지 다양한 변화를 보였으나 대체로 강우초기에 낮게 나타났다가 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 대기 중의 SO_x 와 NO_x 가 초기강우에 다량 함유되어 강하하기 때문으로 판단된다.

계류수의 pH는 강우특성에 따라 강우전의 상태로 회복하는 시간적인 차이는 있으나, 유량이 증가함에 따라 감소하다가 침투유량을 전환점으로 해서 다시 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 大類清和 등(1992)이 보고한 바 있는 유출수량의 증감에 따라 계류수 pH는 반대의 경향을 나타낸다는 연구결과와도 비슷한 경향을 나타내는 것으로 산림 생태계 내의 전성강하물이 강우에 의해 세탈되어 직접유출량의 증감에 따라 계류수의 pH

Table 3. Average concentration of ions in rainfall and stream water at the experimental watershed (Unit : mg/l)

Rainfall events	Date	Type	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Total cation	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Total anion	Total ion
Rainfall 2	1999.06.16.	Rainfall average concentration	2.51	1.61	1.30	4.30	9.72	1.88	1.67	2.44	5.99	15.71
		stream water average concentration	5.41	1.79	1.47	4.73	13.40	2.27	5.53	2.50	10.30	23.70
Rainfall 3	1999.08.21.	Rainfall average concentration	2.40	0.49	0.03	1.70	4.62	7.93	6.38	7.07	21.38	26.00
		stream water average concentration	9.54	0.39	0.46	3.69	14.08	9.50	12.45	10.95	32.90	46.98

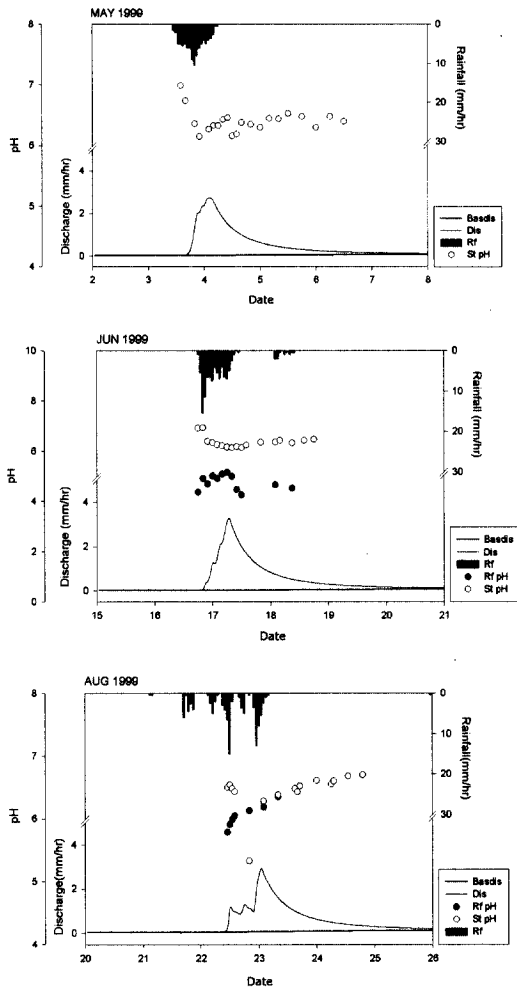


Fig. 3. Hourly change of pH by discharge in different rainfall events
 Basdis : Base discharge, Dis : Discharge, Rf pH : Rainfall pH, St pH : Stream pH, Rf : Rainfall

가 영향을 받는 것으로 추정된다. 특히, 임지사면의 유출량과 계류수의 pH는 상관계수가 -0.595 로 0.1% 유의수준에서 부의 상관관계를 나타내어, 직접유출 성분 중 유로면 유출보다는 임지사면의 유출에 의한 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

계류수의 EC는 Fig. 4에 표시한 것과 같이 강우초기에 높은 값을 유지하다가 다시 감소추세를 보인 후, 침투유량 부근에서 유량의 증가에 따라 EC값이 증가하였으며, 유량이 감소하면 EC값도 비례적으로 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 수관 및 수간에 부착된 건조퇴적물(dry deposition)

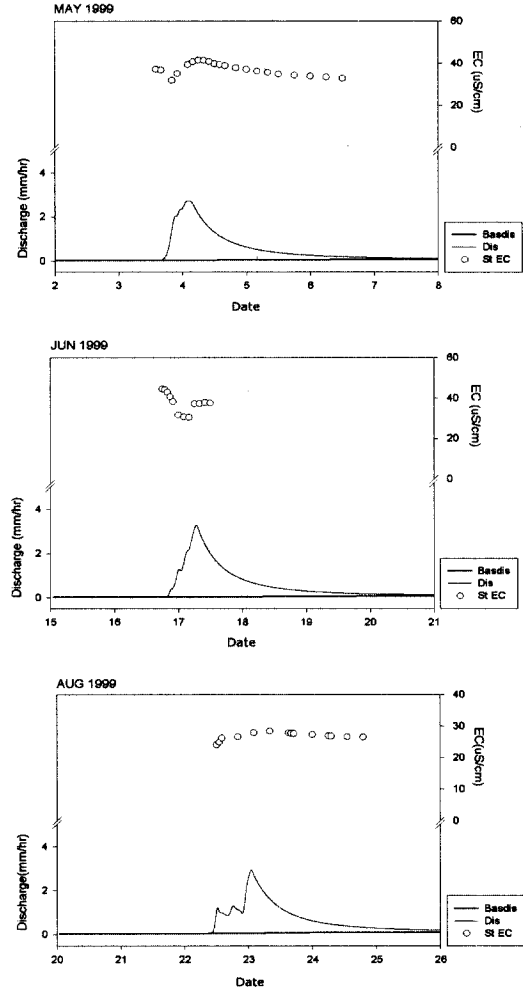


Fig. 4. Hourly change of EC by discharge in different rainfall events

의 세탈과 수목의 용탈이 초기 강우에 큰 영향을 받은 것으로 판단되며, 이현호(1997)가 보고한 EC 값이 유량의 증감에 따라 비례적으로 변화한다는 연구결과와 일치하였다. EC의 최대값 발생시점이 침투유량 발생시점보다 약간 늦게 나타났고 기저 유출량과 계류수 EC의 상관계수가 -0.712 로 0.1% 유의수준에서 부의 상관관계가 나타난 것은 pH와 마찬가지로 주로 기저유출량의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 이와 같이 강우초기에 유량이 증가할 때는 志水俊夫 등(1987)의 전기전도도는 유출수량이 증가하면 낮아지고, 반대로 유출수량이 감소하면 높아진다는 결과와 일치하였으나 침투유량의 전후에 있어서는 반대의 경향이 나타났다.

2) 양이온의 변화 특성

Na⁺의 시계열 변화는 유량이 증가함에 따라 감소하다가 침투유량 이후 유량이 감소하면서 증가하는 특성을 보였고, 강우 후의 농도가 강우 전의 상태로 회복하는 양상을 나타냈다(Fig. 5). 이는 모암으로부터 발생한 SiO₂와 Na⁺는 유출수량의 증가에 따라서 농도가 감소한다는 Johnson 등(1969)과 Feller와 Kimmins(1979)의 연구결과와 일치하였으며, 분석한 다른 양이온 K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺에 비해 계류수에 많이 용존되어 있었다. Mg²⁺는 계류수에서 농도가 낮았으며, 강우 및

유출특성에 따라 다양한 농도변화가 나타나 유출수량의 증감에 따른 변화 경향을 파악하기 곤란하였다(Fig. 6). K⁺는 유량의 증가에 따라 감소하다가 유량이 감소하면서 증가하는 경향을 보였고(Fig. 7), Ca²⁺도 대체로 K⁺와 마찬가지로 유량이 증가하면서 감소하다가 침투유량 이후 다시 증가하는 경향으로 나타났다(Fig. 8). 계류수에 함유된 양이온 총량의 시계열 농도변화 특성은 Na⁺와 K⁺의 영향을 가장 많이 받았으며, 유량의 증가에 따라 감소하다가 다시 유량이 감소하면 농도가 높아지는 시계열 특성을 나타냈다(Fig. 9).

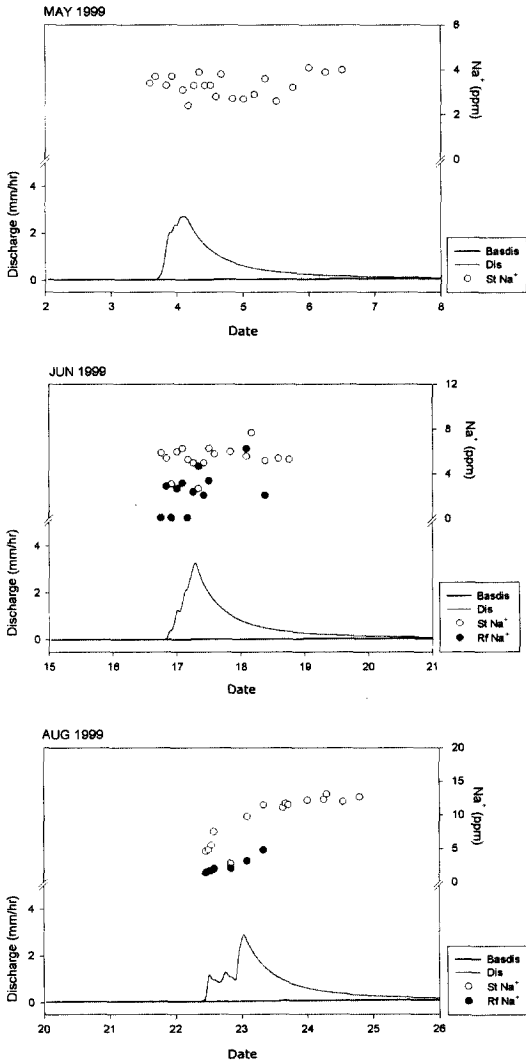


Fig. 5. Hourly change of Na⁺ by discharge in different rainfall events

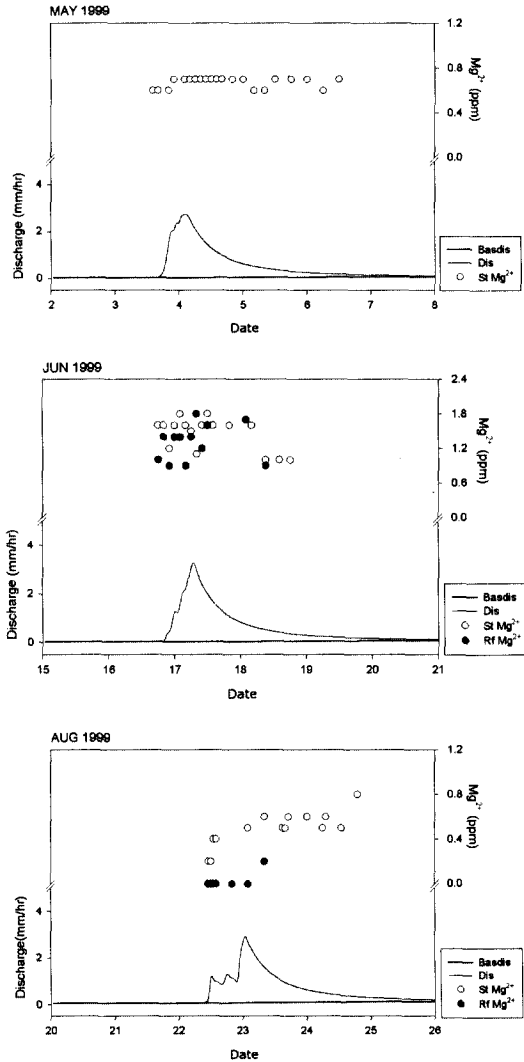


Fig. 6. Hourly change of Mg²⁺ by discharge in different rainfall events

이 결과는 수문관측 유역에 있어서 유출수량의 증감에 따른 양이온 용존원소들의 변동은 Mg^{2+} 를 제외하고는 Muscutt 등(1990)의 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 는 유출수량의 증감에 따라 비례적으로 변한다는 연구결과와 일치하였고, Kohji와 Tatemasa (1988)는 강우시에 유출수량의 증감에 따른 용존원소 농도를 연속측정한 결과 강우 후의 계류수의 용존원소 농도가 강우 전의 농도레벨로 회복하는 Type I (Si, Na, Cl)과 강우 후의 계류수의 용존원소 농도가 강우 전의 농도레벨을 상회하는 Type

II (NO_3-N , K, Mg, Ca)로 분류하기도 하였다. 강우에 의한 유출수량의 증감에 지하수가 관계하고 있어 수질변동을 예측하기 힘들다는 Sklash와 Farvolden(1979)의 연구결과와 같이 분석된 양이온들 중 Ca^{2+} 를 제외한 Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 와 양이온총량은 기저유출량과의 상관계수가 각각 0.79, -0.512, -0.548, 0.456으로 0.1%의 유의수준 내에서 상관관계가 나타나, 기저유출량이 양이온의 농도에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

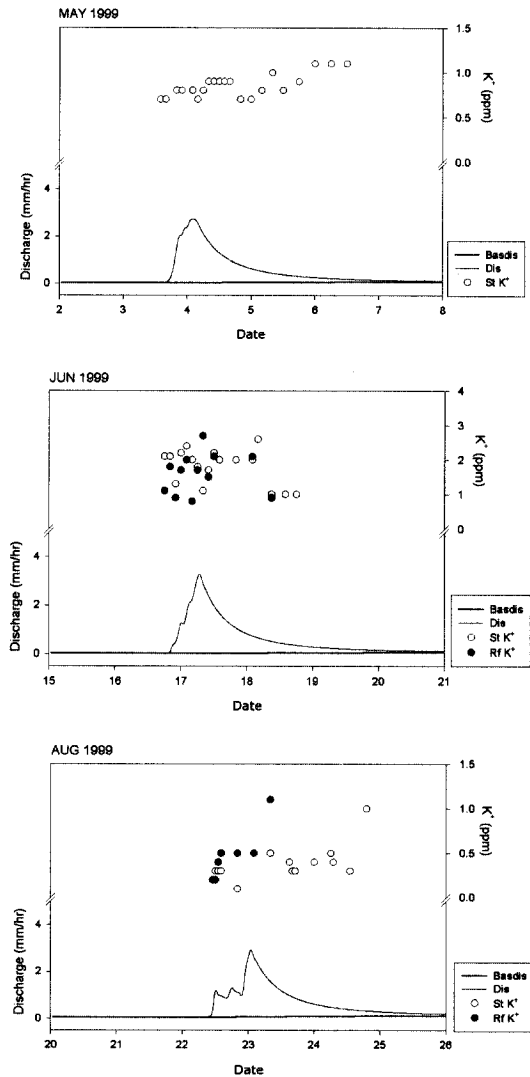


Fig. 7. Hourly change of K^+ by discharge in different rainfall events

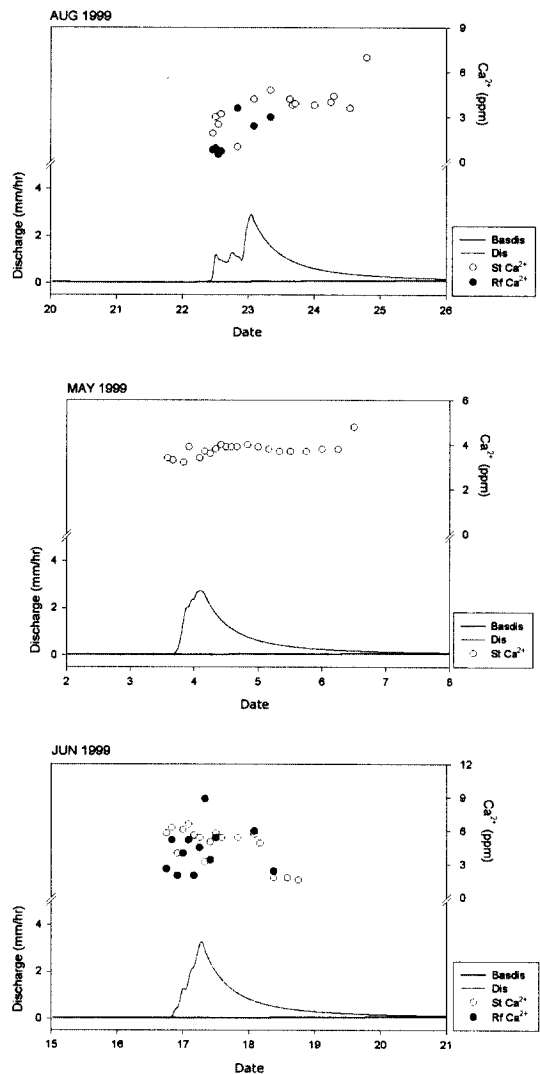


Fig. 8. Hourly change of Ca^{2+} by discharge in different rainfall events

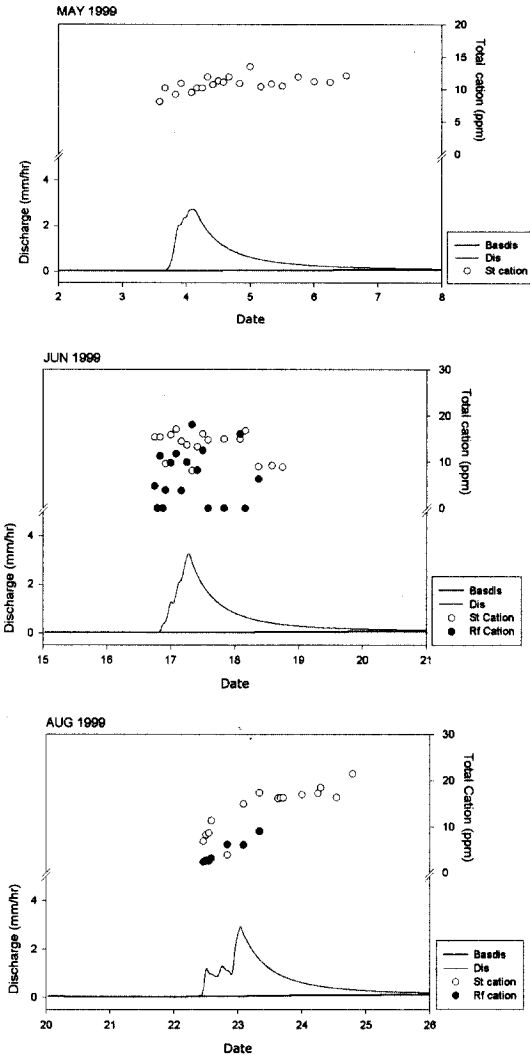


Fig. 9. Hourly change of cation by discharge in different rainfall events

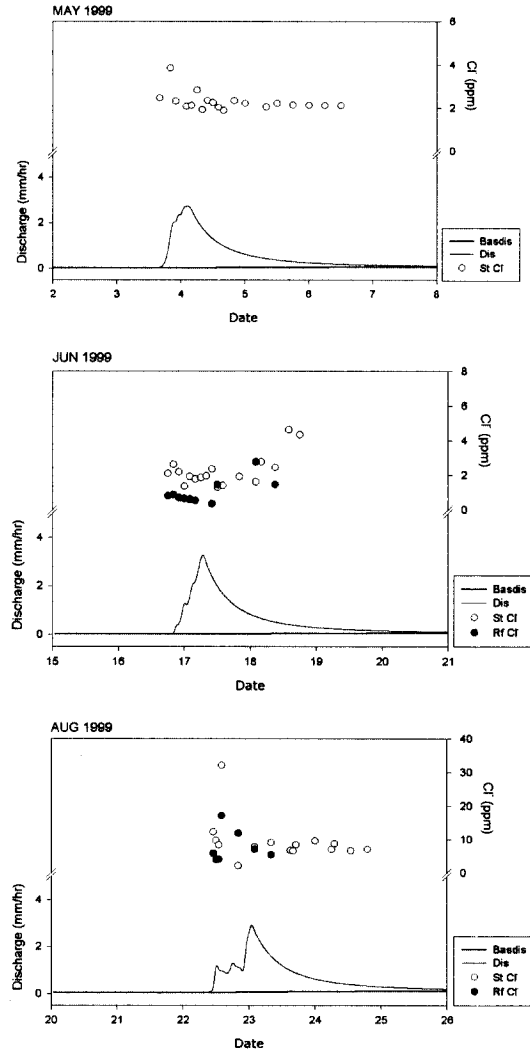


Fig. 10. Hourly change of Cl⁻ by discharge in different rainfall events

3) 음이온의 변화 특성

Cl⁻의 시계열 변화 특성은 유량의 증가에 따라 농도가 감소하다가 다시 유량이 감소하면 농도가 높아지는 독특한 경향을 나타냈다(Fig. 10). NO₃⁻는 유량의 증가에 따라 농도가 높아지다가 침두 유량 이후 유량이 감소하면 농도가 낮아지는 경향을 나타냈으나, 강우 전의 농도 값보다 아주 높게 나타나 빨리 회복되지 않는 경향이 있었다(Fig. 11). SO₄²⁻는 유량의 증가에 따라 농도가 낮아지다가 유량이 감소하면 다시 농도가 높아지는 경향을 나타냈으며, 강우종료 후 계류수의 농도 값이

강우 전의 계류수의 농도 값으로 거의 회복하는 것으로 나타났다(Fig. 12).

계류수에 함유된 음이온 총량의 시계열 농도변화는 Cl⁻의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났으며, 유량의 증가에 따라 음이온 농도가 높아지고, 다시 유량이 감소하면 음이온 농도가 감소하는 시계열 특성을 보여 양이온 총량의 시계열 농도 변화 특성과는 반대의 경향이 있었다(Fig. 13).

이 결과는 유기물에서 발생하는 물질인 NO₃⁻는 유출수량이 증가할수록 농도가 높아진다는 Johnson 등(1969)의 연구결과와 일치하였으며, 일우량이

100mm 이상일 경우의 계류수 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 는 유출량의 증가에 따라 증가하고 Cl^- 는 유출량의 증가에 따라 감소한다는 大類清和(1992)의 연구결과와 Cl^- 및 NO_3^- 는 일치하였으나, SO_4^{2-} 는 반대의 경향을 나타냈다. 또한 Ávila 등(1992)의 유량의 증감에 따라 Cl^- 와 NO_3^- 의 농도는 함께 증감한다는 연구결과와 NO_3^- 는 일치하였으나, Cl^- 는 반대의 경향을 나타냈다.

이러한 유출수량의 증감에 따른 용존물질의 농도변화는 유역특성, 식생, 기후 등에 따라 다양한 특성을 보이고 있는데, 이것은 이온물질이 표면

유출, 중간유출, 지하수유출의 각 유출성분에 의존되어 계류수질에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 또한, 분석된 음이온들 중 Cl^- 를 제외한 NO_3^- , SO_4^{2-} , 음이온총량과 기저유출량과의 상관계수는 각각 0.572, 0.7, 0.558로 0.1%의 유의수준에서 정의 상관관계가 나타났고, NO_3^- 는 유로면 유출량과의 상관계수가 -0.302로 0.1%의 유의수준에서 부의 상관관계가 나타나서 기저유출량이 음이온의 농도에도 크게 영향을 미치는 것으로 인정된다.

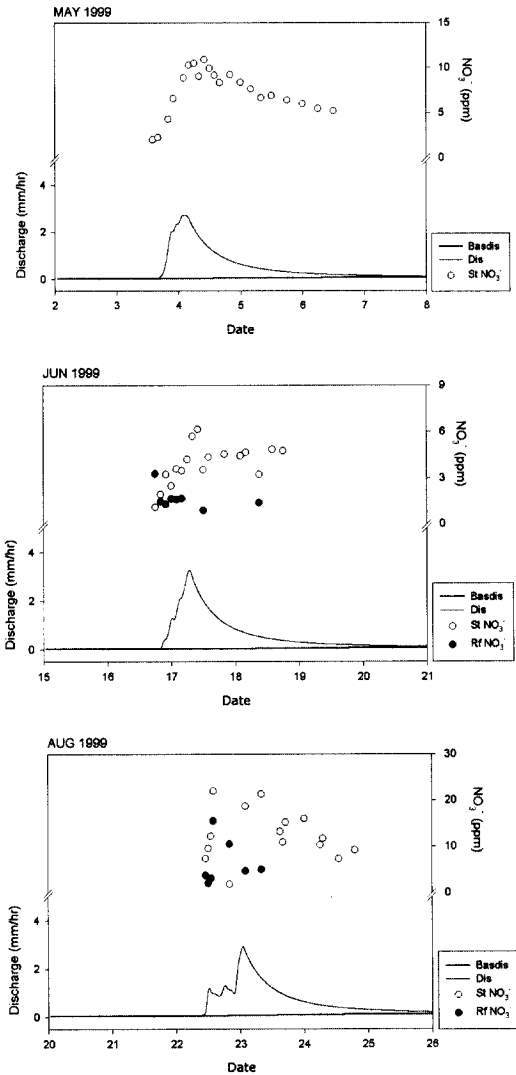


Fig. 11. Hourly change of NO_3^- by discharge in different rainfall events

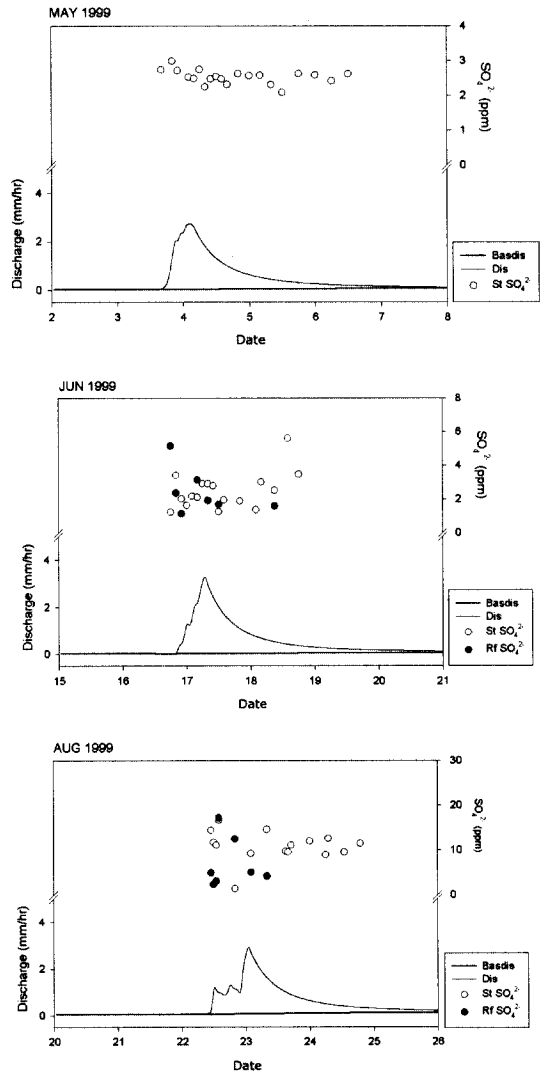


Fig. 12. Hourly change of SO_4^{2-} by discharge in different rainfall events

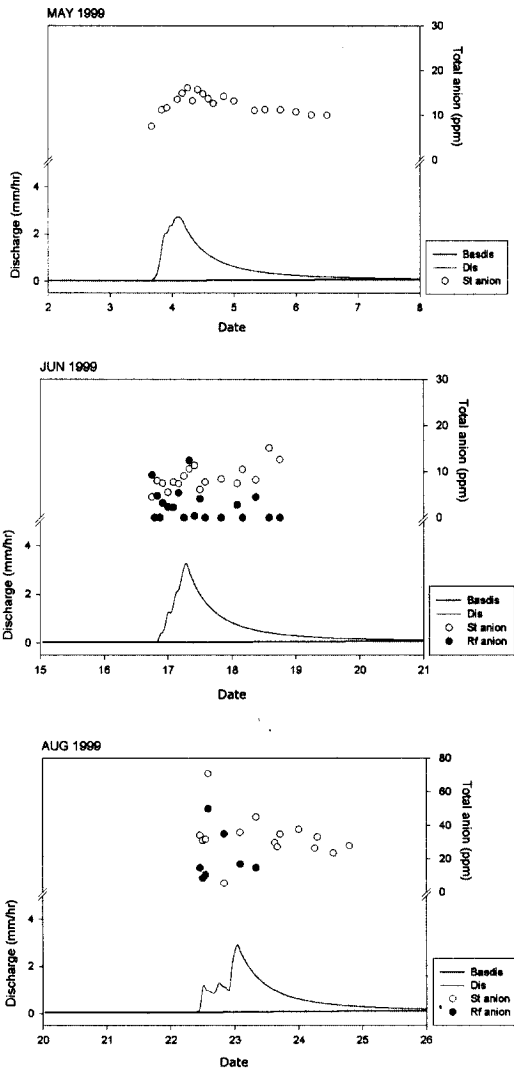


Fig. 13. Hourly change of anion by discharge in different rainfall events

結 論

본 연구는 팔공산 수문관측유역에 대해서 물순환모델을 이용하여 계류수의 유출성분을 직접유출과 기저유출로 분리한 각각의 유출성분과 계류수질의 장·단기 수질 관측을 통해 얻어진 pH, EC 및 용존이온들과의 관계를 파악하여 유출수량이 물질수지에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실시하였다. 시험유역에서 관측된 1998년 1월부터 1999년 9월까지의 수문 및 수질 자료를 대상으

로 유출수량이 계류수질에 미치는 영향을 구명한 결과를 아래에 요약하였다.

팔공산 계류수의 연평균 pH는 1998년에 6.48 (6.22~6.89)로, 1999년에 6.52(5.75~7.18)로 나타나 2년 동안 대체로 일정한 값을 유지하고 있었으나, 시험유역에서 간벌이 실시된 이후의 4개월 동안은 계속해서 pH가 낮아져 간벌이 영향을 미치는 것으로 추정하였다. 계류수의 연평균 EC는 1998년에 26.69(17.95~33.5) μ S/cm로, 1999년에 25.19(17.5~33.8) μ S/cm로 나타나 시험유역에서 2년에 걸쳐 연중 일정한 값을 나타내고 있었다. 이와 같이, 산지 계류수의 pH와 EC 값은 기존의 연구 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

강우와 계류수의 평균 용존 물질량을 비교하여 물질수지를 측정된 결과, 분석된 이온들 중 K^+ 를 제외한 나머지 이온 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 는 모두 마이너스 수치를 나타냈다. 한편, 계류수의 용존원소 가운데 양이온은 Na^+ 가 가장 농도가 높았으며, 음이온은 NO_3^- 가 가장 많이 검출되었다. 이러한 결과는 단위강우의 지속시간과 시험유역의 모암 구성, 그리고 간벌 등이 주로 영향을 미치는 것으로 생각된다.

계류수의 pH 경시변화를 분석한 결과, 유량의 증가에 따라 pH가 낮아지다가 첨두유량을 전환점으로 해서 다시 pH가 높아지는 것으로 나타났다. 이는 유출수량의 증감에 따라 pH는 반대 경향을 나타낸 것으로 이러한 결과는 산림 생태계 내의 건성 강하물이 강우에 의해 세탈되어 직접유출량의 증감에 따라 계류수 pH가 영향을 받는 것으로 추정되었다. 그리고 단위강우로부터 발생한 계류수의 EC 경시변화를 분석한 결과, 강우초기의 유량증가시에는 EC값이 감소하지만 첨두유량을 전후로 해서 유량의 증감에 따라 EC값이 함께 변화하는 것으로 나타났는데, 이 또한 수관 및 수간에 부착된 건성퇴적물의 세탈과 수목의 용탈이 초기 강우에 의해 큰 영향을 받은 것으로 생각된다.

계류수의 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , 양이온총량, Cl^- 및 SO_4^{2-} 는 유출량이 증가하면 농도가 낮아지고, 반대로 유출량이 감소하면 농도가 높아지는 경향이 나타났으나, NO_3^- 와 음이온총량은 그 반대의 경향이 있었다. 그리고, Mg^{2+} 는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았는데, 이러한 유출수량의 증감에 따른 용존물질의 농도변화는 유역특성, 식생, 기후 등에 따른 다양한 특성의 이온물질이 표면유출, 중간유출, 지하수유출의 각 유출성분에 용존되어

계류수질에 영향을 미치기 때문으로 추정된다. 또한, 물순환모델에 의해 분리된 직접유출, 기저유출 및 총유출 성분과 수질인자들과의 관계를 분석한 결과, pH, EC 그리고 양이온 및 음이온 농도에 가장 큰 영향을 미치는 유출성분은 기저유출로 나타났다.

앞으로 계류수 pH 및 EC의 계절성을 보다 명확하게 평가하기 위해서는 장기간의 실시간 수질 모니터링에 의한 무강우일과 강우개시 직전의 계류수의 수질 상태도 함께 고려할 필요가 있으며, 기저유출성분이 유출수량 증감시 계류수질에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났기 때문에 후속 연구에서는 산지소유역에 있어서 지중수와 지하수질의 변동에 대해서도 함께 분석할 필요가 있는 것으로 생각된다.

引用 文 獻

1. 金載基. 1998. 인공산성비 살포에 의한 산림 토양 토심별 산도, 전기전도도 및 주요 이온의 동태분석. 嶺南大 碩士學位論文. 22-40p.
2. 朴在鉉. 1995. 山地流域에 있어서 溪流水質 評價基準 定立에 關한 考察(I). 自然保存 92 : 23-38.
3. 朴在鉉. 1996. 山地流域에 있어서 溪流水質 評價基準 定立에 關한 考察(II). 自然保存 95 : 38-52.
4. 李尙度. 1995. 中小河川의 流量과 水質變動 特性에 關한 研究. 弘益大 碩士學位論文. 34-40p.
5. 李天龍·元亭圭. 1994. 山林流域內 溪流水의 季節別 水質變化. 林研報 49 : 81-86.
6. 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 環境的 淨化機能의 計量化 研究. 韓林誌 86(1) : 56 - 68.
7. 全宰弘. 1995. 산지물순환소과정에서 산도, 전기전도도, 용존산소 및 수량 측정에 의한 수질변화의 분석. 嶺南大 碩士學位論文. 44p.
8. 程龍鎬·元亭圭·朴在鉉·李天龍·李鳳洙. 1996. 鬱陵島와 桂芳山에서 山林內 溪流水質의 理化學的 特性. 山林科學論文集 53 : 173-185.
9. 홍병호·임병국. 1995. 센서 일렉트로닉스. 大光書林. 531p.
10. 橋 治國. 1993. 洪水時における水質と水質成分の流出特性. 水文·水資源學會誌 6(3) : 254-267.
11. 多田明夫·堀野治彦·丸山利輔·田中丸治哉·火田 武志. 1997. 水質により分離した流出成分と長短期流出兩用モデルによる流出成分の比較. 水文·水資源學會誌 10(2) : 133-143.
12. 大類清和·生原喜久雄·相場芳憲. 1992. 降雨イベントでの溪流水の溶存物質の流出特性と流出成分の分離. 日林誌 74(3) : 203-212.
13. 大類清和·相場芳憲·生原喜久雄. 1995. 森林小集水域での水質變化の過程. 水文·水資源學會誌 8(4) : 367-381.
14. 木平英一·窪田順平·塚本良則. 1997. 降雨に伴う谷部飽和帶の擴大と溪流水のNO₃⁻-N濃度の変動. 水文·水資源學會誌 10(2) : 154-160.
15. 福嶋義宏·鈴木雅一. 1986. 山地流域を對象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年連続日・時間記録への適用. 京大演報 57 : 162-185.
16. 岩坪五郎·平林ゆり·堤 利夫. 1982. On the spraying of sewage water in a forest(II) - Effect of the spraying on the runoff water chemicals and the nutrient budgets of the forest watershed. 日林誌 64(11) : 419-428.
17. 志水俊夫·藤枝基久·吉野昭一. 1987. 融雪期における河川水質の變動特性. 日林論 98 : 561-564.
18. 沖村 孝·吉岡龍馬·李 津. 1991. 流出水の水質からみた押し出し流の存在の推定. 水文·水資源學會誌 4(1) : 46-50.
19. Ávila, A., J. Piñol., F. Rodà, and C. Neal. 1992. Storm solute behaviour in a montane mediterranean forested catchment. J. Hydrology 140 : 143-161.
20. Brown, T.C. and D. Binkley. 1994. Effect of management on water quality in north American forests. United States Department of Agriculture Forest Service. General Technical Report RM-248 : 1-27.
21. Felix R. Paturi. 1994. Der Wald. 두술기획. 95-98p.
22. Feller, M. C. and J. P. Kimmins. 1979. Chemical characteristics of small streams near Haney in southwestern British Columbia. Water

- Resour. Res. 15 : 247-258.
23. Hoover, M.D. 1952. Water and timber management. *J. Soil and Water Conservation* 7 : 75-78.
24. Johnson, N.M., G.E. Likens., F.H. Bormann. and R.S. Pierce. 1968. Rate of chemical weathering of silicate minerals in New Hampshire. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 32 : 531-545.
25. Johnson, N.M., G.E. Likens., F.H. Bormann., D.W. Fisher, and R.S. Pierce. 1969. A working model for the variation in stream water chemistry at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Water Resour. Res.* 5 : 1353-1363.
26. Kohji, M. and H. Tatemasa. 1988. Stream water chemistry during rainfall events in a forested basin. *J. Hydrology* 102 : 235-253.
27. Likens, G.E., F.H. Bormann and N.M. Johnson. 1969. Nitrification : Importance to nutrient losses from a cutover forested ecosystem. *Science* 163 : 1205-1206.
28. Likens, G. E., F. H. Bormann., N. M. Johnson., D.W. Fisher. and R.S. Pierce. 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecology Monogr.* 40 : 23-47.
29. Megahan, W.F. 1975. Sedimentation in relation to logging activities in the mountains of central Idaho. *U.S.D.A.* : 74-82.
30. Muscutt, A. D., H. S. Wheater. and B. Reynolds. 1990. Stormflow hydrochemistry of a small welsh upland catchment. *J. Hydrology* 116 : 239-249.
31. Sklash, M.G. and R.N. Farvolden. 1979. The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrology* 43 : 45-65.
32. Teller, H.L. 1976. Environmental impact analysis and forest activities. *FAO Conservation Guide* : 15-26.
33. Whitehead, P.G., S. Bird., M. Hornung., J. Cosby., C. Neal. and P. Paricos. 1988. Stream acidification trends in the welsh uplands a modeling study of the Llyn Brianne catchments. *J. Hydrology* 101 : 191-212.