

# 침엽수 인공림에서 강우사상별 계류수 수질의 유출특성 변화<sup>1</sup>

김재훈<sup>2</sup> · 최형태<sup>3\*</sup> · 유재윤<sup>4</sup>

## Short Term Runoff Characteristics Change of Stream Water Quality with Different Rainfall Events in Planted Coniferous Forest<sup>1</sup>

Jaehoon Kim<sup>2</sup>, Hyung Tae Choi<sup>3\*</sup>, Jae Yun Yoo<sup>4</sup>

### 요 약

본 연구는 침엽수 인공림에서 강우와 유출에 따른 계류수 용존이온의 특성 밝혀보고자, 경기도 국립수목원 소재의 침엽수 시험림에서 강우, 유량, 용존이온을 조사하였다. 2005년 6월부터 2008년 9월까지 총 23개의 강우사상별 수질시료를 채수하여 분석한 결과 API 값이 낮을수록 유출량이 적었다. 유량변화에 따른 용존이온 특성으로는,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온은 시계 방향,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  이온은 반시계 방향의 이력곡선을 나타냈으며,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  이온은 이력현상을 보이지 않았다.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ 는 지하수의 영향으로 강수 이전 수준으로 농도가 유지되는 것으로,  $\text{NO}_3^-$ 는 토양수의 영향으로 강수 이전 보다 높은 농도는 나타내는 것으로 판단된다.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온은 유출량 증가에 따라 강한 희석반응을 보였고,  $\text{NO}_3^-$  이온은 유출초기 희석 후 농도가 증가하였다.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  이온은 강수 초기에 세탈효과를 나타냈다. 유출량 변화에 따른 이러한 농도변화 특성은 선행강수, 유출량, 지하수 등의 영향으로 판단된다.

주요어: 유량, 용존이온농도, 이력곡선, 선행강수지수, 산림유역

### ABSTRACT

This study was carried out to investigate solutes concentration change with respect to discharge change in coniferous forest experiment watershed in Gyeonggi-do, Korea. From 2005 to 2008. Precipitation, discharge, solutes has been analyzed from 23 precipitation events. The results showed that low API induced low discharge.  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$  were indicated by clockwise and  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$  were represented by counterclockwise hysteresis loop.  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  showed no hysteresis loop pattern.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  was relatively constant due to groundwater during precipitation,  $\text{NO}_3^-$  was increased due to soil water compared to early precipitation.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  was diluted with respect to increased discharge and  $\text{NO}_3^-$  was diluted in early precipitation and then increased in the end.  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$  eluviated in early precipitation. This characteristics was presumed by the effect of API, discharge and ground water.

**KEY WORDS:** DISCHARGE, SOLUTES CONCENTRATION, HYSTERESIS LOOP, ANTECEDENT PRECIPITATION INDEX, FOREST WATERSHED

1 접수 2015년 10월 20일, 수정 (1차: 2015년 11월 25일, 2차: 2015년 11월 30일), 게재확정 2015년 12월 1일

Received 20 October 2015; Revised (1st: 25 November 2015, 2nd: 30 November 2015); Accepted 1 December 2015

2 국립산림과학원 산림복원연구과, Dept. of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute, Seoul 02455, Korea

3 국립산림과학원 산림복원연구과, Dept. of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute, Seoul 02455, Korea

4 한국환경공단 수생태시설처, Dept. of Aquatic Ecosystem facilities, Korea Environment Corporation, Incheon 22689, Korea

\* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-2-961-2643, Fax: +82-2-961-2649, E-mail: choiht@korea.kr

## 서론

우리나라는 여름철에 집중된 많은 양의 빗물이 지표 유출을 통해 하천으로 유출되기 때문에 하천 및 댐을 이용한 상수원의 수질에 큰 영향을 미치게 된다. 산림유역에서 공급되는 수자원은 우리나라 수자원 총량의 65% 가량을 차지하고 있기 때문에 물의 이용 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다(Jun *et al.*, 2007). 1990년대 이후 우리나라의 연간 계절성 강수의 변화는 건조한 기간이 늘어나고 집중호우가 내리는 특성이 더욱 뚜렷해지고 있다. 특히 6월과 7월에 집중되던 강수가 최근에는 8월과 9월에 집중되고 있으며 10월에도 강수가 집중되는 현상을 보이는 것으로 보고되고 있다(Yoon *et al.*, 2006).

강수에 의해 계류의 유출량이 변화되면 유출수의 수질은 평상시의 수질과는 다른 특성을 나타내기 때문에 강우사상에 따른 단기 유출시의 수질변화를 파악할 필요가 있다. 강우사상에 기초한 수질 모니터링은 계류수 내 용존물질의 농도와 유량간의 관계를 이해하는데 유용한 접근방법을 제공한다(Drewry *et al.*, 2009). Williams and Melack(1997)은 계류에서 주요 양이온의 농도는 주로 유출량과 반비례하는 경향이었으며 이들 용존물질의 이동성은 무기광물의 풍화와 이온교환 비율에 의해 제어된다고 하였다. 이와 반대로  $SO_4^{2-}$ 의 경우 유출량이 증가하면서 양의 상관관계를 보였는데 이것은 대기로부터 강하된  $SO_4^{2-}$ 가 유역에 일시적으로 저장되었다가 토양수로부터 용탈되어 유출되기 때문이라고 하였다. Grimaldi *et al.*(2004)은 강우시 유역으로부터 유출되는 일부 양이온의 약 30% 가량이 지상류를 통하여 계류로 유출된다고 하였다. Johnson *et al.*(1969)은 계류수 화학성의 일시적인 변화는 높은 유출량과 함께 농도가 희석되는 형태, 높은 유출량과 함께 농도가 증가하는 형태, 유출량에 따라 비교적 농도 변화가 적은 형태의 3가지 유형을 보고한 바 있다. 반면 Muraoka and Hirata(1988)는 강우시 계류수의 반응특성을 수질이 강우 이전 값으로 회복하는 형태와 강우 이전 보다 높아지는 형태로 구분하였다. 전자는 표층 토양수보다 지하수에서 농도가 높고, 후자는 지하수에 비해 표층 토양수 내에서 농도가 높다는 것을 의미한다.

강우시 유출량의 증수부에서 일시적으로 나타나는 농도 증가는 계류 주변을 따라 지하수 유출이 증가하면서 발생할 수 있다고 하였다(Sklash and Farvolden, 1979). Mitchell *et al.*(2006)은 연속적인 강우에 따른 계류수 내 용존물질의 농도 변화를 분석하여 강우가 지속되면서 pH, 염기양이온 등이 뚜렷이 변화하였으며, 강우 지속으로 유역의 수분이 증가된 조건에서 지하수의 기여도가 감소하면서 계류수 내 용존물질의 농도 변화가 발생하였음을 보고하였다. Hood

*et al.*(2002)은 유출량에 따라 계류수 내 C, N, P 농도가 모두 짧은 기간 상당한 변화를 보이며, 시간과 유출량에 따른 농도의 그래프는 반시계방향의 궤적을 나타내는데, 이러한 이력현상은 수문곡선의 증수부에서 토양수 내 용존물질이 세탈되면서 발생한다고 보고한 바 있다.

산림 소유역으로부터 강우시 발생하는 계류수의 수질변화, 특히 강우시 단기 유출 변화에 따른 계류수질 동태에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 강수 특성 및 시간변화에 따른 유출수 내 용존물질의 동태를 파악하고 단기 유출시 용존물질의 부하 특성을 분석하고자 한다.

## 연구방법

### 1. 연구대상지

연구대상지는 경기도 포천시 소흘읍 직동리 국립수목원 내에 위치한 산림 소유역으로 좌표는 위도  $37^{\circ} 45' 48.23''$  N, 경도  $127^{\circ} 09' 23.40''$  E 이다. 유역면적은 13.6ha로 표고가 160-290m이며, 평균경사가 25.2%이다. 이 지역의 평년강수량은 1,502.9mm, 평년기온은 11.2°C 이며, 모양은 화강편마암으로 토성은 사질양토이다. 이 지역의 식생은 4영급의 인공림으로 잣나무와 전나무가 주요 수종을 이루고 있다. 연구대상지의 위치는 Figure 1과 같다.

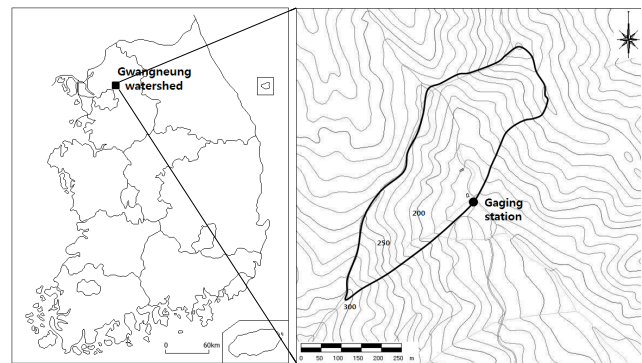


Figure 1. The location map of study site

### 2. 수질시료의 측정 및 분석

강수량은 중량측정형 강우계 (OTT, PLUVIO)를 이용하여 2005년 1월부터 2008년 12월까지 10분 간격으로 측정하였다. 시간단위, 일단위, 월단위, 연단위의 강수량은 10분 간격으로 측정된 강수량을 각 단위별로 누적하여 계산하였다. 유출량은 동일한 기간에 양수땀의 V-notch를 통과하는 수위를 부자-엔코더 수위계 (OTT, Thalimedes)를 이용하여

10분 간격으로 측정된 다음 유출량으로 환산하였다.

강수시 계류수의 채취는 2005년 6월부터 2008년 9월까지 총 23개의 강우사상별 수질시료를 무균채수병을 이용하여 채수하였다. 채취된 수질시료는 실험실로 운반하여 먼저 수소이온농도(pH)와 전기전도도(EC)를 측정된 후 여분의 시료는 수질오염공정시험법으로 이온분석 하였다. 여분의 시료는 시린지 필터 (pore size 0.45µm, PALL)를 이용하여 5ml로 여과한 다음 이온크로마토그래피 (음이온, Sykam, DE/S-135; 양이온, Dionex, DX-320 IC System)로 이용하여 음이온 (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)과 양이온 (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)의 ppm (mg/l) 농도를 각각 분석하였다(Holloway and Dahlgren, 2001). 시린지 필터에 잔존된 물질에 대해서는 별도의 분석을 수행하지 않았다. 강우사상별 채수기간 및 분석항목은 Table 1과 같다.

선행강수지수(Antecedent Precipitation Index, API)는 n 일 전의 선행강수량을 표현한 지수로서 아래의 식을 이용하여 분석하였다.

$$API_n = \sum K^n \times P_n$$

여기서, K는 감소상수를 나타내며 약 0.85에서 0.98의 범위를 갖는다(Viessman *et al.*, 1977). 본 연구에서 감소상수는 Yoon(2003)의 0.92를 채택하였다. n은 일 (day)을 나타내며, P<sub>n</sub>은 n일 전의 강수량을 의미한다.

## 결과 및 고찰

### 1. 강우사상별 강수량과 유출량

Table 2는 강우사상별 API, 강수량, 최대 강수강도, 유출량 그리고 침투유출량을 나타낸 것이다. 해당 강우사상은 관측된 모든 강우사상 중에서 API와 강수량에 따라 유출량의 차이가 큰 8개의 강우사상을 선정하였다. 유출량은 API 및 강수량과 관련이 높은데, 총 강우량에 대한 유출량의 비의 값이 낮을수록 낮은 API 값을 보였다. TP/TR비가 0.12와 0.11을 나타낸 E050725와 E070914에서 가장 적은 유출량을 보인 반면, TP/TR비가 0.61로 가장 높은 E080724에서는 가장 많은 유출량을 나타내었다. E050626의 경우

Table 1. Sampling period and analysis items at each storm event

No.	Event (period)		Analysis items		
			pH	EC	ion
1	E050615	(15~17, Jun. 2005)	○	○	○
2	E050626	(26~28, Jun. 2005)	○	○	○
3	E050629	(29~30, Jun. 2005)	○	○	○
4	E050701	( 1~ 2, Jul. 2005)	○	○	○
5	E050703	( 3~ 5, Jul. 2005)	○	○	○
6	E050709	( 9~10, Jul. 2005)	○	○	○
7	E050725	(25~27, Jul. 2005)	-*	-*	-*
8	E050728	(28~30, Jul. 2005)	-*	-*	-*
9	E050807	( 7~ 9, Aug. 2005)	-*	-*	-*
10	E050824	(24~26, Aug. 2005)	○	○	○
11	E050913	(13~15, Sep. 2005)	○	○	○
12	E060527	(27~29, May 2006)	○	○	○
13	E060625	(25~27, Jun. 2006)	○	○	○
14	E061022	(22~24, Oct. 2006)	○	○	○
15	E070711	(11~13, Jul. 2007)	○	○	○
16	E070914	(14~16, Sep. 2007)	○	○	○
17	E070918	(18~20, Sep. 2007)	○	○	○
18	E070921	(21~22, Sep. 2007)	○	○	○
19	E080719	(19~21, Jul. 2008)	○	○	○
20	E080724	(24~25, Jul. 2008)	○	○	○
21	E080802	( 2~4, Aug. 2008)	○	○	○
22	E080812	(12~14, Aug. 2008)	○	○	○
23	E080901	( 1~3, Sep. 2008)	○	○	○

\* not analysis.

Table 2. Hydrological characteristics during the storm events

Event	API <sub>1</sub> <sup>*</sup>	API <sub>3</sub> <sup>*</sup>	API <sub>5</sub> <sup>*</sup>	API <sub>7</sub> <sup>*</sup>	TP <sup>**</sup> (mm)	MP <sup>***</sup> intensity (mm/10min)	TR <sup>****</sup> (mm)	Peak flow (mm/10min)	TP/TR
E050626	0.0	0.0	0.0	0.0	147.2	11.1	14.9	0.16	0.10
E050701	3.7	16.0	117.4	112.8	105.6	17.7	51.0	1.28	0.48
E050725	0.0	0.0	0.0	0.0	47.5	14.7	5.5	0.12	0.12
E050728	0.9	37.9	37.9	37.9	139.0	11.0	69.2	0.92	0.50
E050807	1.4	2.2	66.9	87.6	56.0	13.5	13.2	0.12	0.24
E050824	0.0	0.8	10.1	12.5	83.5	4.5	16.8	0.10	0.20
E050913	0.0	0.0	2.1	2.0	85.5	7.5	14.1	0.11	0.16
E070914	0.6	1.7	2.7	3.2	63.0	1.9	7.1	0.05	0.11
E070918	0.5	21.2	48.7	47.2	127.8	4.3	25.9	0.20	0.20
E080719	1.0	11.9	13.5	43.9	210.3	7.1	58.0	1.04	0.28
E080724	1.3	10.2	152.7	144.8	248.2	11.9	151.7	3.19	0.61

\* day, \*\* Total precipitation, \*\*\* Maximum precipitation, \*\*\*\* Total runoff

TP/TR비가 0.10이지만 비슷한 비율을 가지는 강 수사상보다 총강수량이 많아 유출량도 영향을 미친 것으로 보였다. 또한 E050824와 E050913의 경우 API가 높고 최대 강수량도 클수록 반대의 조건에 비해 침투유출량이 증가하는

경향을 나타내었다.

Inamdar *et al.*(2008)은 dissolved organic carbon(DOC) and dissolved organic nitrogen(DON)을 이용한 강우사상의 계류수 반응 연구에서 토양이 건조할 때 DOC가 가장 높았으며, 토양이 습윤할 때 DON이 높아, 선행토양함수조건이 DOC에 큰 영향을 미친다고 했다. Biron *et al.*(1999)은 유출량과 계류수질의 상관분석 결과, 토양이 건조한 상태일 때 강우기간동안 DOC, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> 이온이 증가한다고 하였다. 따라서, 본 연구대상지의 선행강수조건도 특이온의 증감에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 2. 유출량과 용존이온의 농도

선행강수 조건에 따라서 강우시의 유출량은 큰 차이를 나타내고 있는데(Table 2), API<sub>7</sub> 0.0과 112.8의 값으로서 선행강수량의 차이가 컸던 E050626과 E050701을 대상으로 유출량 변화에 따른 용존이온의 농도 변화를 Figure 2에 도시하였다. 두 강수사상 모두 Cl<sup>-</sup> 과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온은 반시계 방향의 이력현상을 보였으며 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 이온은 시계방향의 이력현상을 나타내었다. 그러나 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>의 경우 강수 초기 높은 농도를 제외하고 이력현상은 미미하였다. E050626에서 Cl<sup>-</sup> 이온은 유출량의 증수부와 감수부에서 서로 대칭적인 농도 경향을 보였다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온의 농도는 침투유출량까지 급격히 증가한 후 유출량의 감소와 함께 서서히 감소하였다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 이온은 강수 초기 일시적으로 증가하였다가 침투유출량에서 원래의 농도수준으로 회복되었다. 한편 Ca<sup>2+</sup> 이온은 강수초기 최대 농도에서 이후 급격히 감소하여 침투유출량 이전에 일정한 농도 수준을 유지하였다. 각 이온들의 경향은 E050701에서도 유사하게 나타났으며 농도의 변화폭만 감소되었다. 계류수 내 용존물질의

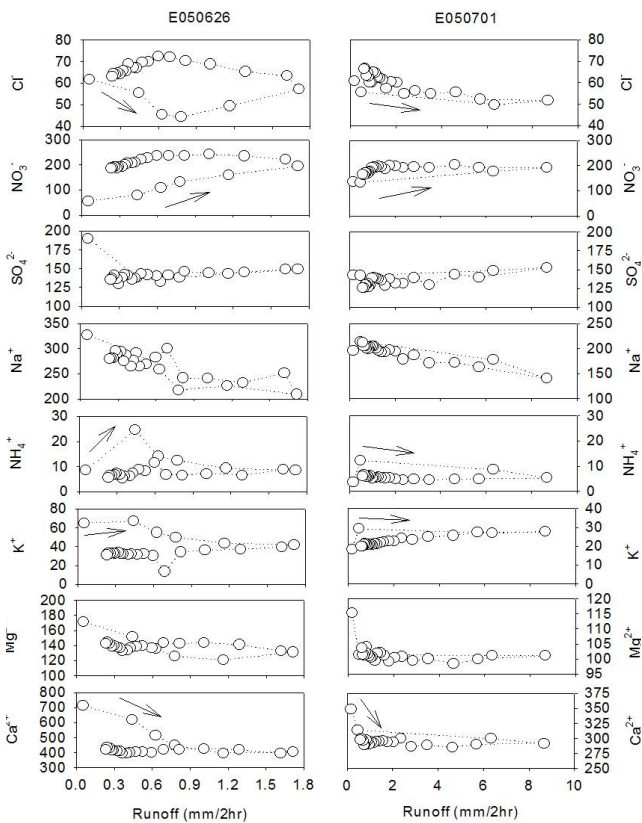


Figure 2. Hysteresis between runoff and solute concentration (µeq/l) in the stream water during E050626 and E050701

반응을 분류하면 E050626과 E050701에서  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  이온은 강수 이전 수준으로 농도가 유지되는 형태를 나타내었으며,  $NO_3^-$  이온은 강수 이전보다 높은 농도를 유지하였다.  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  이온의 경우 강수 이전보다 낮은 수준으로 농도가 유지되는 경향이였다.

유출량과 용존물질농도의 관계에 있어서 강우사상별 계류수의 증수부에서 용존물질이 높은 농도를 보이는 현상은 유출량이 증가하는 동안 계류로 지하수의 세탈 효과에 기인하는 것으로 보고되고 있다 (Sklash and Farvolden, 1979; Caissie *et al.*, 1996). Figure 2에서와 같이 강수 이전 수준으로 농도가 유지되는  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  이온과 강수 이전보다 높은 농도를 나타내는  $NO_3^-$  이온의 경우 Muraoka and Hirata(1988)의 연구와 유사한 경향으로 전자는 지하수에서 농도가 높으면서 기인하고, 후자는 토양수에서 농도가 높기 때문에 발생하는 현상이라고 하였다. 하지만  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  이온의 경우 후자의 경향을 보여야 함에도 다소 차이를 나타내었다. Evans and Davies(1998)의 농도/유출량 이력곡선에서 본 연구의  $K^+$ 의 농도변화 경향은 C1의 형태로 지표수>지중수>토양수 순서로 영향을 미친다. 따라서, 지표물질의 교환이 더 크게 작용하는 것으로 판단된다.  $Ca^{2+}$ 와  $Mg^{2+}$  이온의 경우, Ohrui and Mitchell(1998)는 산림유역의 토양수와 계류수 농도를 비교하였다. 토양수에 비해 계류수가  $Ca^{2+}$ 는 0.8배,  $Mg^{2+}$ 는 1.4배로 차이로 나타나 토양수와 함께 계류수에서도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한 Ladouche *et al.*(2001)는 강우시 유출량과 계류수 내 용존이온농도의 유형을 다음과 같이 분류하였다.  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ 와 같이 유출량이 증가하면서 강한 희석반응을 보이는 유형, pH,  $K^+$ 와 같이 약한 희석반응을 보이는 유형,  $NO_3^-$ 와 같이 유출 초기에 희석되었다가 다시 증가하여 높은 농도를 보이는 유형 등이다. 본 연구에서도 유사한 경향이였으며  $NO_3^-$ 의 경우 연속된 강우사상이 발생하였을 경우에 유출 초기에 약한 희석반응을 나타낸 후 농도가 증가하는 경향을 보였다. Kendall *et al.* (1999)은 염기 양이온의 경우 유출량이 증가하면서 농도가 희석되었으며, 기저유출로부터 침두유출까지  $Mg^{2+}$ 와  $Ca^{2+}$ 는 50%까지,  $Na^+$ 는 40%까지 희석되어 유출량과 높은 관련이 있음을 보고한 바 있다. 본 연구에서도 유출량 증가에 따른 농도 희석으로 판단된다.

Tsujimura *et al.*(2001)은 계류수의  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  농도가 유출량과 음의 상관관계를 나타내었음을 보고하였는데 본 연구에서는  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  이온만이 유사한 결과를 보였다. 도시 소유역의 경우 계류수 내 SS, TP, TN의 농도는 강수 초기 지면의 세탈로 인하여 증수부에서 두드러진 농도 증가를 보이며, 연속된 강수가 발생할 경우 선

행 강수의 세탈 효과로 인하여 농도가 감소한다고 하였다 (Mitchell *et al.*, 2006). 본 연구에서도 E050626 이후 E050701 강수 초기에  $NO_3^-$ 와  $Ca^{2+}$  이온의 농도변화폭이 선행 강우사상에 비하여 작은 것으로 나타나 강수초기 지면 세탈의 효과로 판단된다.

따라서, 강우량 및 선행강우조건에 따라 유출량의 차이가 발생하였으며, 이러한 변화는 계류수 내 용존물질의 농도에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- Biron, P.M., Roy, A.G., Courschesne, F., Hendershot, W.H., Cote, B. and J. Fyles(1999) The effects of antecedent moisture conditions on the relationship of hydrology to hydrochemistry in a small forested watershed. *Hydrological Processes* 13: 1541-1555.
- Caissie D., Pollock, T.L. and R.A. Cunjak(1996) Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin. *Journal of Hydrology* 178: 137-157.
- Evans, C. and T.D. Davies(1998) Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resources Research* 34(1): 129-137.
- Drewry, J.J., Newham, L.T.H. and B.F.W. Croke(2009) Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm-events to the Tuross estuary, Australia. *Journal of Environmental Management* 90: 879-887.
- Grimaldi, C., Grimaldi, M., Millet, A., Bariac, T. and J. Boul'egue(2004) Behaviour of chemical solutes during a storm in a rainforested headwater catchment. *Hydrological Processes* 18: 93-106.
- Holloway, J.M. and R.A. Dahlgren(2001) Seasonal and event-scale variations in solute chemistry for four Sierra Nevada catchments. *Journal of Hydrology* 250: 106-121.
- Hood, E.W., Williams, M.W. and N. Caine(2002) Yields of dissolved organic C, N, and P from three high-elevation catchments, Colorado front range, U.S.A. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 2: 165-180.
- Inamdar, S., Rupp, J. and M. Mitchell(2008) Differences in dissolved organic carbon and nitrogen responses to storm-event and ground-water conditions in forested, glaciated watershed in western New York. *Journal of the American Water Resources Association*: 44(6): 1458-1473.
- Johnson, N.M., Likens, G.E., Bormann, F.H., Fisher, D.W. and R.S. Pierce(1969) A working model for the variation in stream water chemistry at the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire. *Water Resources Research* 5: 1353-1363.
- Jun, J., Kim, K., Yoo, J., Choi, H.T. and Y. Jeong(2007) Variation

- of suspended soil concentration, electrical conductivity and pH of stream water in the regrowth and rehabilitation forested catchments, South Korea. *Journal of Korean Forest Society* 96(1): 21-28. (in Korean with English abstract)
- Kendall, K.A., Shanley, J.B. and J.J. McDonnell(1999) A hydro-metric and geochemical approach to test the transmissivity feedback hypothesis during snowmelt. *Journal of Hydrology* 219: 188-205.
- Ladouche B., Probst, A., Viville, D., Idir, S., Bauqe, D., Loubet, M., Probst, J.L. and T. Bariac(2001) Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology* 242: 255-274.
- Mitchell, M.J., Piatek, K.B., Christopher, S., Mayer, B., Kendall, C. and P. McHale(2006) Solute sources in stream water during consecutive fall storms in a northern hardwood forest watershed: a combined hydrological, chemical and isotopic approach. *Biogeochemistry* 78: 217-246.
- Muraoka, K. and T. Hirata(1988) Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin. *Journal of Hydrology* 102: 235-253.
- Ohru, K. and M.J. Mitchell(1998) Streamwater chemistry in Japanese forested watersheds and its variability on a small regional scale. *Water Resources Research* 34(6): 1553-1561.
- Sklash, M.G. and R.N. Farvolden(1979) The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology* 43: 45-65.
- Tsujimura, M., Onda, Y. and J. Ito(2001) Stream water chemistry in a steep headwater basin with high relief. *Hydrological Processes* 15: 1847-1858.
- Viessman, W. Jr., Knapp, J.W., Lewis, G.L. and T.E. Harbaugh (1977) *Introduction to hydrology*. Harper & Row Publisher Inc., New York, 704pp.
- Williams, M.R. and J.M. Melack(1997) Atmospheric deposition, mass balances, and processes regulation streamwater solute concentrations in mixed-conifer catchments of the Sierra Nevada, California. *Biogeochemistry* 37: 111-144.
- Yoon, Y.N.(2003) *Engineering Hydrology*. Cheongmungak, Seoul, 660pp. (in Korean)
- Yoon, H.J., Kim, H.J. and I.H. Yoon(2006) On the study of the seasonality precipitation over South Korea. *Journal of Earth Science Society* 27(2): 149-158. (in Korean with English abstract)