

침엽수 인공림 계류수 수질의 계절변화 특성¹

김재훈² · 최형태^{3*} · 유재윤⁴

Seasonal Change Characteristics of Stream Water Quality in Planted Coniferous Forest¹

Jaehoon Kim², Hyung Tae Choi^{3*}, Jae Yun Yoo⁴

요 약

본 연구는 침엽수 인공림에서 산림 유역내 및 유역출구점에서 용존물질 농도의 특성을 밝혀보고자, 2005년부터 2007년까지 경기도 국립수목원 소재의 침엽수 시험림에서 pH, EC, 양이온, 음이온, 산중화능을 조사하였다. pH는 평균 6.87로 봄에 낮은 경향을 나타내는데, 수관층에 포집된 강하물의 영향으로 판단된다. EC는 평균 58.4 μ S/cm으로 강수량이 적은 봄에 이온의 양이 상대적으로 많아 계류수에서 높을 값을 나타냈다. 양이온과 음이온은 강우로 인해 봄과 가을철에 높게 나타났다. 다른 유역과의 수질 비교에서 EC는 강우량이 많은 여름철에 낮게 나타나는 경향을 보였으며, NO₃⁻는 강하물 및 시업의 영향으로 계류수에서 높게 나타나는 것으로 판단된다. 본 연구대상유역의 경우, 계류수내 pH와 ANC가 일정 수준으로 유지되는 것으로 나타났다.

주요어: pH, EC, 용존이온농도, 산림유역

ABSTRACT

This study was carried out to investigate pH, EC, solutes concentration and ANC characteristics in coniferous forest experiment watershed in Gyeonggi-do, Korea from 2005 to 2007. The average pH value was 6.87 and low at spring season due to deposition in crown. The average EC was 58.4 μ S/cm and was high at spring season due to high concentration of solutes. The cation and anion concentration was high at spring and fall season with low rainfall. When stream water quality was compared to different watershed, EC was relatively low due to high rainfall and NO₃⁻ was high due to deposition and forest practice. pH and ANC was relatively constant at stream water

KEY WORDS: pH, ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SOLUTES CONCENTRATION, FOREST WATERSHED

서 론

강수에 의해 유역에 유입된 물질은 지형과 지질, 식생,

토양 그리고 지하수와 접촉하면서 계류로 유출되기까지 물을 양적으로 또는 질적으로 변환시키고 있다. 우리나라는 건기와 우기의 강수량 변동이 뚜렷한 계절풍의 영향을 받고 있다. 이러한 몬순기후에서는 수자원의 근원이 되는 산림유

1 접수 2015년 10월 20일, 수정 (1차: 2015년 11월 11일, 2차: 2015년 11월 24일), 게재확정 2015년 11월 25일

Received 20 October 2015; Revised (1st: 11 November 2015, 2nd: 24 November 2015); Accepted 25 November 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

역으로부터의 물과 물질의 순환과 유출정보는 매우 중요하다. 산림유역에서의 물질순환과 여기서 유출되는 용존물질 등의 모니터링 자료는 유출수의 수질발생 기작을 모델링하고 수질을 예측하는데 기초자료로 활용된다(Ohte, 2006).

Quinn and Stroud(2002)는 뉴질랜드에서 토지이용에 따른 계류수질 특성에 관한 연구에서, 소나무(*Pinus radiata*) 인공림 유역과 목초지 유역의 계류수 내 무기질소 ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$)의 농도는 자연유역에 비해 각각 2.1배, 4.0배 정도 높았으며, 부유물질의 농도는 각각 4.6배, 2.6배 높았다고 보고하였다. 이것은 계류 인근의 토지이용이 용존물질의 유출에 큰 영향을 미친다는 분명한 증거를 제공하며, 산림경영에 있어서 수자원과 수질에 대한 영향을 평가하는 기초자료를 제공하였다. Likens and Bormann(1995)은 1964부터 1992년까지 HBEF W6 유역에서 강수에서 질소의 연평균 대기강하량은 492 mol/ha/year, 계류수에서 연평균 NO_3^- flux는 200 mol/ha/year으로 보고한 바 있다. Kendall *et al.*(1999)은 1996년 미국 버몬트의 Sleepers 유역에서 용설기 동안 유출량과 수질을 조사하여 계류수의 화학성이 유출량과 강하게 연계되어 있음을 규명하였다. 염기양이온의 농도는 유량이 증가하면서 희석되었으며, 기저유출로부터 침투유출까지 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 는 50%까지, Na^+ 는 40%까지 희석되어 유출량과 높은 관련성이 있음을 보고한 바 있다.

한편, Lee(1997)는 경북 경산시 두 개 유역을 대상으로 월별 수질변화 특성에 관한 연구에서, pH는 가을 및 겨울철에 높다가 봄철에 큰 폭으로 낮아지는 경향을 나타냈는데, 이는 계절에 따른 식생의 이온흡수나 치환량 등의 차이로 판단했다. 양이온의 경우, 여름철에 높은 값을 나타냈는데, 이는 수온에 따른 용존이온량의 차이로 판단했다. Park and Woo(1997)은 1년간 강수, 임내우, 토양수, 계류수의 수질을 분석한 결과 강수량과 용존이온의 농도가 부의 상관관계를 나타내어, 여름철 강우가 영향을 미치는 것으로 판단했다.

이와 같이 산림유역을 대상으로 한 연구들은 대기로부터 임상, 토지이용 등에 따른 계류수의 수질변화 연구는 수행되어 왔지만, 산림유역에서 계류수의 월별 변화 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 월별 또는 연간 계류수의 화학적 수질 특성을 분석하고자 한다.

연구방법

1. 연구대상지

연구대상지는 경기도 포천시 소흘읍 직동리 국립수목원 내에 위치한 산림 소유역으로 좌표는 북위 37° 45' 48.23" ,

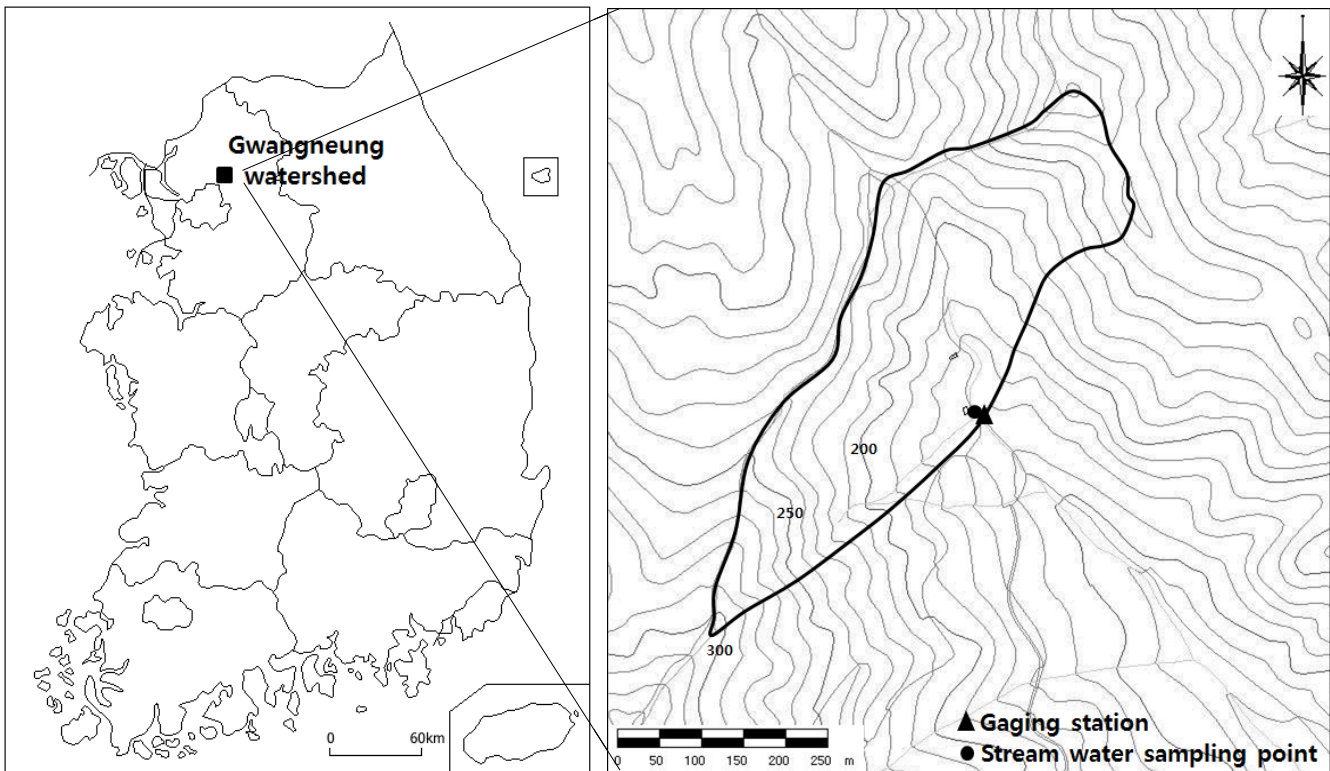


Figure 1. The location of study site and sampling points

동경 127° 09′ 23.40″ 이다. 유역면적은 13.6ha로 표고가 160-290m이며, 평균경사가 25.2%이다. 이 지역의 평년강수량은 1,502.9mm, 평년기온은 11.2°C 이며, 모암은 화강편마암으로 토성은 사질양토이다. 이 지역의 식생은 4명급의 인공림으로 잣나무와 전나무가 주요 수종을 이루고 있다. 연구대상지의 위치는 Figure 1과 같다.

2. 용존물질 측정

강수를 통한 용존물질의 월유입량은 해당 월에 채취되어 분석한 강수시료 내 용존물질의 농도를 가중평균한 후 부피로 환산한 월강수량을 곱하여 계산하였다. 또한 유역으로부터 유출되는 용존물질의 손실량은 정기적으로 채수한 계류수 시료 내 용존물질의 농도를 채수일의 부피로 환산한 일유출량을 적용하여 가중평균한 후 부피로 환산한 월유출량을 곱하여 계산하였다.

계류수 시료는 평상시에 1~2주 간격으로 Figure 1에 도시된 각 지점에서 무균채수병을 이용하여 채수하였으며, 강수량이 많은 여름철 장마기에는 채수빈도를 증가시켰다.

채취된 수질시료는 실험실로 운반하여 먼저 수소이온농도(pH)와 전기전도도(EC)를 측정한 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⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)과 양이온 (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)의 ppm (mg/l) 농도를 각각 분석하였다(Holloway and Dahlgren, 2001). 시린지 필터에 잔존된 물질에 대해서는 별도의 분석을 수행하지 않았다. 산중화능 (Acid Neutralizing Capacity, ANC)은 이온크로마토그래피로 분석된 ppm (mg/l) 농도를 당량으로 환산한 다음, 그 농도를 아래의 식에 대입하여 계산하였다(Malek and Astel, 2008).

$$ANC = [Na^+] + [NH_4^+] + [K^+] + 2[Mg^{2+}] + 2[Ca^{2+}] - [Cl^-] - [NO_3^-] - 2[SO_4^{2-}]$$

3. 분석방법

유역으로부터 유출되는 용존물질의 손실량은 정기적으로 채수한 계류수 시료 내 용존물질의 농도를 채수일의 부피로 환산한 일유출량을 적용하여 가중평균한 후 부피로 환산한 월유출량을 곱하여 계산하였다.

유역출구에서 관측기간 동안 계류수질의 시간적인 변화에 대해서는 회귀분석을 실시하였다. 계류수의 월별, 채수지점별 이온농도의 차이를 분석하기 위하여 분산분석을 실

시하였다. 통계적으로 차이가 유의한 경우 Tukey's test를 이용하여 평균값을 비교하였으며, 모든 통계처리는 SAS 8.02 소프트웨어를 사용하였다 (SAS, 1999).

결과 및 고찰

1. 유역 출구점에서 수질특성

Figure 2는 2005년 1월부터 2007년 10월까지 유역 출구에서의 계류수 내 용존물질의 농도 분포를 나타낸 것이다. 음이온에서는 NO₃⁻ 이온과 SO₄²⁻ 이온이, 양이온에서는 Na⁺ 이온과 Ca²⁺ 이온이 지배적인 이온이었다.

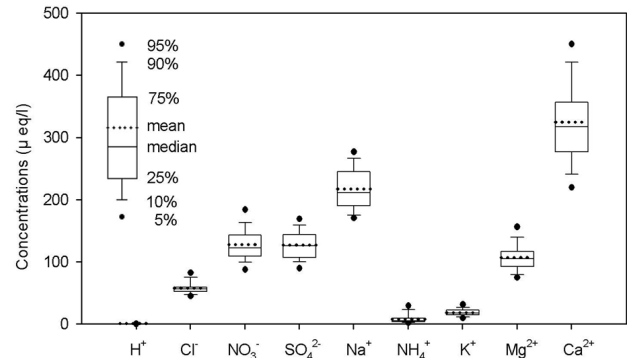


Figure 2. Box plots of solute concentrations in stream water at the catchment outlet (Jan. 2005~Oct. 2007)

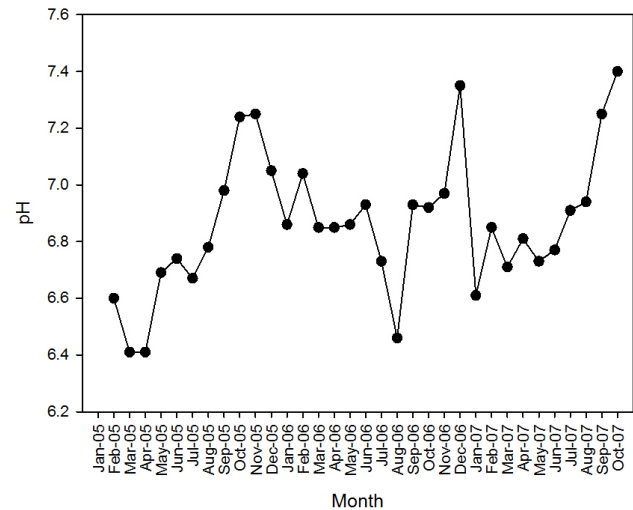


Figure 3. Monthly pH change from 2005 to 2007

유역출구에서 관측된 pH의 월별 변화를 Figure 3에 나타냈다. 관측기간 동안 월별 pH는 6.41~7.40의 범위로 평균

6.87을 나타냈다. pH는 계절에 따라 주기적인 현상을 보이는데 주로 봄, 여름철 보다는 가을, 겨울철에 높은 값을 나타냈다. Park and Woo(1997)은 활엽수림 보다 침엽수림에서 강수 pH가 낮게 나타났으며, 이는 엽면적지수 차이로 인한 대기오염물질 포집양으로 판단하였다. 2005년에서 2007년 사이 강수량도 봄철에 낮아, 겨울동안 수관층에 포집되었던 강하물의 영향으로 봄에 낮은 pH를 나타내는 것으로 판단된다. 관측기간 중 월별 강우량이 910mm로 가장 많았던 2006년 7월에 pH값이 가장 낮게 나타나는데, 이는 최대강수량 발생후 pH의 일시적 저하가 관측되었다는 Kim *et al.*(2005)의 연구결과와 일치하는 것으로 강우의 영향으로 인해 낮은 값을 나타낸 것으로 판단된다.

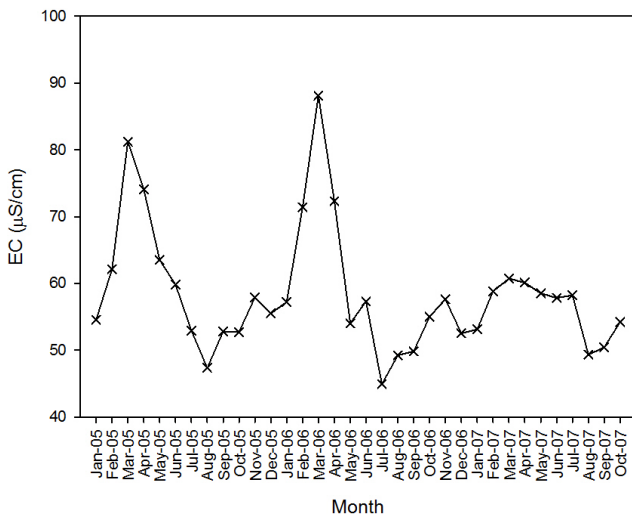


Figure 4. Monthly EC change from 2005 to 2007

월별 EC변화(Figure 4)는 44.9~88.1µS/cm의 범위로서 평균 58.4µS/cm를 나타냈다. 2005년 3월과 2006년 3월에 각각 가장 81.2, 88.1µS/cm를 나타내 가장 높은 값을 보였다. 강우 많았던 여름철에는 낮은 값을 나타냈는데, Jo *et al.*(2010)은 건-우기의 지표수 수질 비교에서 건기보다 우기에 EC와 Cl⁻의 농도가 낮았다는 연구결과와 일치하는 것으로, 이는 여름철 상대적으로 많은 강우 사상에 의해 용존이온이 희석된 것으로 판단된다. Park and Woo(1997)는 산림유역을 대상으로 강수, 임내우, 토양수, 계류수에서 EC에 유의한 인자를 밝히기 위해 다중회귀분석을 실시했으며, Mg²⁺, Na⁺, 양이온 총량, 음이온총량, 선행무강우일수 등 5개 인자가 영향을 미친다고 하였다. 각 이온과 월별강우량을 검토하였다. 양이온의 경우 Ca²⁺, Na⁺ 이온이 봄철에 높게 나타났으며, 음이온의 경우, Cl⁻ 과 SO₄²⁻ 이온의 경우 76.7, 162.5µeq/l로 봄철에 높고 7월부터 9월까지의 기간

동안 농도가 희석되는 경향을 나타내어 월별 농도 차이에 대한 유의성이 있는 것으로 분석되어(*p*<0.05), 봄철에 양이온 및 음이온량에 의해서 EC의 값이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

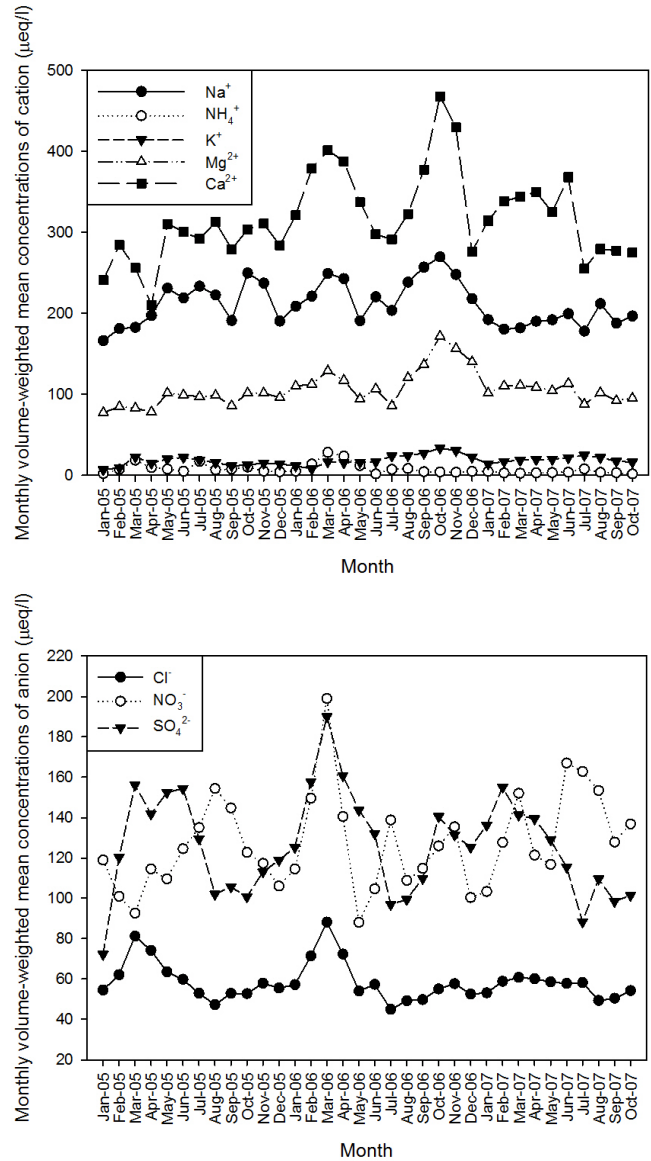


Figure 5. Monthly cation and anion change from 2005 to 2007

계류에서 분석된 양이온 및 음이온의 월별 변화를 Figure 5에 나타냈다. 양이온, 음이온 모두 봄과 가을철에 높은 경향을 나타냈다. Park and Woo(1997)는 EC와 강수량의 상관분석에서 강수량이 증가할수록 물에 용존된 이온의 농도가 낮아진다고 했으며, Shin(2004)는 대관령 지역 산림소유역과 농경지 수질비교에서 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ 이온이 유량과

부의 상관성을 산림 토양의 높은 이온교환능력으로 나타내어, 여름철 보다는 상대적으로 강우량이 낮은 봄과 가을철에 양이온, 음이온 모두 높은 값을 나타내는 것으로 판단된다.

2. 다른 유역과의 수질 특성 비교

Lee(1997)은 경상북도 경산시 소재 팔공산 소유역 및 용성유역을 대상으로 pH, EC, 양이온에 대한 계절별 수질을 분석했다. pH의 경우, 봄철인 5월에는 7.2-7.3, 여름철인 7월과 8월에 각각 6.7-7.0, 6.8-7.6, 가을철인 9월에 7.6-8.0, 그리고 겨울철인 12월에 7.7-8.0의 범위를 나타내어 본 연구대상유역과 여름철에 매우 유사한 경향을 나타냈다. 또한, 경상북도 소재 2 유역과 본 연구대상유역의 pH 값은 연중 일정한 수준으로 유지되고 있었다. EC의 경우, 팔공산 소유역에서 봄철에 30 μ S/cm의 범위에서 일정하게 유지되다가 여름철에 80 μ S/cm범위로 약 2.6배 증가하였다. 계절에 따른 EC의 변화를 알아보기 위해, 3년간 연평균 강우량과 EC 값을 Figure 6에 나타냈다.

본 연구대상유역의 경우 월평균 EC는 3월과 10월에 각각 67.6, 70.3 μ S/cm를, 7월과 8월에 각각 60.3, 59.0 μ S/cm로 여름철이 낮았다. 3월과 10월의 연평균 강우량은 각각 45.6,

39.9mm를 7월과 8월에 525.0, 355.2mm로 나타나 강우와 EC가 대조를 보이는데 이는 모든 강우사상에서 계류수 EC 변화는 침투유출량시에 최저치를 나타낸다는 Jun *et al.*(2007)의 연구결과와 일치하는 것으로 여름철 월평균 강우가 많을 때 낮은 EC 값을 보이는 것으로 판단된다.

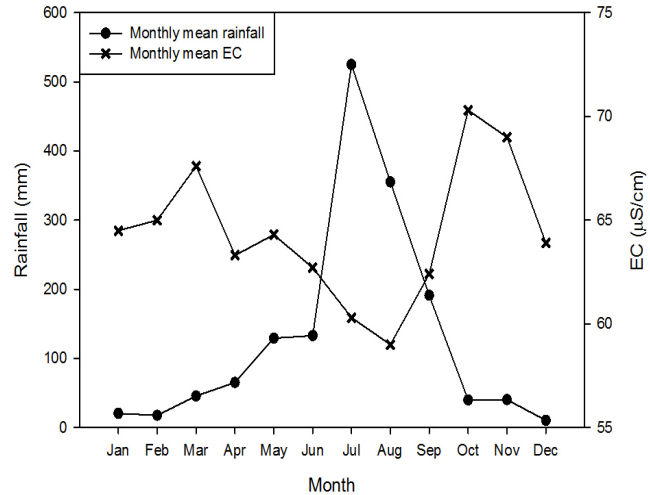


Figure 6. Monthly EC properties with rainfall

Table 1. Monthly chemical properties in the streamwater at the catchment outlet from Jan. 2005 to Oct. 2007

	pH	EC (μ S/cm)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	ANC
Jan	6.74a (0.18)	64.5a (2.5)	54.9b (2.1)	112.2a (8.0)	111.2ba (34.2)	189.0a (21.3)	3.9a (1.6)	10.9a (3.6)	96.3a (17.0)	292.3a (44.5)	591.5a (87.8)
Feb	6.83a (0.22)	65.0a (5.9)	64.1ba (6.5)	126.1a (24.4)	144.4ba (20.8)	194.2a (23.4)	8.0a (5.6)	11.4a (4.9)	102.6a (15.5)	334.0a (47.2)	608.1a (78.6)
Mar	6.66a (0.22)	67.6a (5.0)	76.7a (14.3)	147.9a (53.3)	162.5a (25.0)	204.6a (38.7)	16.5a (13.0)	19.4a (3.1)	107.7a (23.2)	334.0a (72.9)	574.2a (140.8)
Apr	6.69a (0.24)	63.3a (12.0)	68.8a (7.6)	125.5a (13.5)	147.3ba (11.7)	210.2a (28.6)	12.1a (10.5)	16.7a (2.4)	101.4a (20.6)	316.0a (93.5)	584.8a (227.9)
May	6.76a (0.09)	64.3a (3.6)	58.7b (4.8)	104.8a (15.0)	141.7ba (11.9)	204.6a (22.9)	7.7a (4.3)	18.7a (2.3)	99.9a (5.3)	324.4a (13.6)	632.8a (25.0)
Jun	6.81a (0.10)	62.7a (0.7)	58.3b (1.3)	132.0a (31.9)	134.0ba (19.5)	213.0a (11.6)	3.6a (1.7)	20.2a (3.0)	106.5a (7.3)	322.3a (39.8)	636.2a (90.6)
Jul	6.77a (0.12)	60.3a (9.0)	52.0b (6.7)	145.5a (15.1)	104.9b (21.7)	205.0a (27.8)	10.9a (5.4)	22.6a (3.2)	90.2a (6.1)	279.7a (21.1)	571.0a (62.2)
Aug	6.73a (0.24)	59.0a (6.6)	48.6b (1.1)	138.9a (26.0)	103.7b (5.3)	224.3a (13.4)	6.2a (2.4)	20.8a (4.5)	107.0a (11.8)	305.1a (22.5)	680.6a (112.5)
Sep	7.05a (0.17)	62.4a (2.2)	51.0b (1.6)	129.1a (15.0)	104.7b (5.8)	212.1a (39.1)	5.2a (2.3)	18.8a (7.9)	104.9a (27.7)	311.3a (57.2)	678.9a (220.4)
Oct	7.19a (0.24)	70.3a (4.7)	54.0b (1.2)	128.5a (7.4)	114.2ba (22.8)	238.7a (37.8)	5.4a (4.3)	20.9a (11.2)	122.8a (42.4)	348.9a (104.1)	797.7a (292.5)
Nov	7.11a (0.20)	69.0a (2.8)	57.8b (0.2)	126.4a (12.8)	122.3ba (12.9)	242.7a (7.5)	4.5a (1.0)	22.9a (10.8)	129.0a (38.8)	370.2a (84.0)	839.9a (224.5)
Dec	7.20a (0.21)	63.9a (2.1)	54.0b (2.1)	103.2a (4.0)	122.1ba (4.5)	204.2a (19.4)	4.6a (0.3)	18.3a (6.0)	118.0a (31.1)	280.1a (5.5)	622.0a (74.0)

Values in parentheses represent standard deviation. Values with the same letter do not differ among months by Tukey's studentized range test at p=0.05.

Table 2. Annual input and output budgets from 2005 to 2007

		H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(g/ha/year)	(kg/ha/year)							
Mean	Input	132.8*	5.5	6.0	13.7	13.3	7.8	8.4	3.4	12.1
	Output	1.4*	15.9	16.5	15.5	42.0	0.9	6.7	10.2	51.9
	Budget	131.4*	-10.4	-10.5	-1.8	-28.7	6.8	1.8	-6.8	-39.8

Shin(2004)은 강원도 도암호 유역 내 산림소유역에서 NO₃⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺의 농도를 모니터링한 결과 각각 7.3, 62.2, 4.1, 6.9, 36.2, 75.8µeq/l를 나타내었으며, 농경지 유역의 경우 각각 119.3, 295.8, 5.4, 140.7, 724.0, 1422.2µeq/l로서 토지이용상태에 따른 차이가 큰 것으로 보고하였다. Table 1에서 본 연구대상유역의 경우 NO₃⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺의 연 가중평균농도는 각각 126.7, 211.9, 7.4, 18.5, 107.2, 318.2µeq/l로서 상기 산림소유역보다 약 2배 이상 높은 값을 보였으며 농경지 유역과 비교하면 무기질소를 제외하고는 상당히 낮은 경향이였다. 특히 NO₃⁻의 경우 계류내 월 산림소유역에 비하여 18배 이상 높고 농경지 유역과는 서로 유사한 농도를 나타냈다. 이러한 값의 차이에 대해, NO₃⁻는 유기물 분해과정에서 빠르게 유출되고 토양흡착능력도 약해 쉽게 계류로 유출되는 경향과 (Kim *et al.*, 2005), 2004년에 간벌에 의한 일시적 토양교란으로 인해 강우시 계류로 유출되었던 것으로 판단된다. 음이온 중에서는 유역내 질소 유출을 확인하기 위해 연간 강수를 통한 용존물질의 유입량과 계류를 통해 유역 외부로 손실되는 용존물질의 유출량을 Table 2에 나타냈다.

Table 2에서 NO₃⁻-N은 유역에서 손실되는 경향을 보였으며, 이는 유역에 유입되는 질소강하량이 10kg/ha/year 이상일 경우 성숙한 산림에서는 NO₃⁻가 유역으로부터 손실되어 지하수와 계류수에도 영향을 미치게 된다는(Diese and Wright, 1995; Gundersen, 1995; Williams and Melack, 1997; Fenn and Poth, 1999) 연구결과와 일치하는 것으로 유역에서 질소유출은 강수로 유입된 질소강하의 영향인 것으로 판단된다.

본 연구대상유역의 계류수 내 높은 산성이온 농도에도 불구하고 연도별 pH와 ANC는 일정 수준으로 유지되고 있다. 계류수의 pH와 ANC의 변화는 계류수의 산성화에 대한 민감성을 나타내는 최적의 지표라고 할 수 있는데(Williams and Melack, 1997), 본 연구대상유역의 경우 계류수의 산성물질 유입에 대한 완충능력이 매우 높다는 것을 제시한다.

REFERENCES

- Diese, N.B. and R.F. Wright(1995) Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management* 71: 153-161.
- Fenn, E.F. and M.A. Poth(1999) Temporal and spatial trends in streamwater nitrate concentrations in the San Bernardino mountains, southern California. *Journal of Environmental Quality* 28: 822-836.
- Gundersen, P.(1995) Nitrogen deposition and leaching in European forest - Preliminary results from a data compilation. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 1179-1184.
- 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.
- Jo, K.W., H.J. Lee, J.H. Park and J.S. Owen(2010) Effects of monsoon rainfalls on surface water quality in a mountainous watershed under mixed land use. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(3): 197-206.
- Jun, J., K. Kim, J. Yoo, H.T. Choi and Y. Jeong(2007) Variation of suspended solid 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., J.B. Shanley 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.
- Kim, S.J., Y. Jeong, K. Kim, J. Yoo, C. Jeong and J. Jun(2005) Change of streamwater chemistry and contribution of subsurface discharge in forest catchment during storm events. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 7(1): 51-56. (in Korean with English abstract)
- Likens, G.E. and F.H. Bormann(1995) *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Second edition, Springer-Verlag New York Inc. pp. 159.
- Lee, H.H.(1997) Estimation on the water purification of forest by analyzing water quality variations in forest hydrological processes. *Journal of Korean Forest Society* 86(1): 56-68. (in Korean with English abstract)
- Malek, S and A. Astel(2008) Throughfall chemistry in a spruce chronosequence in southern Poland. *Environmental Pollution* 155: 517-527.
- Ohte, N(2006) Necessity to consider hydrological controls of bio-

- geochemical cycling when developing a catchment-scale ecosystem model. *Japanese Journal of Limnology* 67: 259-266.
- Park, J.H. and B.M. Woo(1997) Analysis of influential factors from rainfall to stream water quality in small forested watershed. *Journal of Korean Forest Society* 86(4): 489-501.(in Korean with English abstract)
- SAS(1999) SAS/STAT User's Guide, Version 8, SAS Publishing, Cary, NC, 1464pp.
- Shin, Y.K.(2004) Comparison of the characteristics of water quality and runoff pollutant loads due to diverse land uses in Daegwallyeong area. Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, 210pp. (in Korean with English abstract)
- Quinn, J.M. and M.J. Stroud(2002) Water quality and sediment and nutrient export from New Zealand hill-land catchments of contrasting land use. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 36: 409-429.
- 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.