

산림소유역 유출수의 비강우일 비점오염물질 농도 변화 및 유출 특성 분석

유현주¹⁾ · 최형태²⁾ · 김재훈³⁾ · 임홍근¹⁾ · 양현제¹⁾

¹⁾ 국립산림과학원 산림보전연구부 석·박사 연구원 · ²⁾ 국립산림과학원 산림보전연구부 연구관 ·

³⁾ 국립산림과학원 산림보전연구부 연구사

Changes in temporal and spatial stream water concentrations and analysis on nonpoint source runoff in forested watersheds on non rainfall days

Yoo, Hyeon-Ju¹⁾ · Choi, Hyung-Tae²⁾ · Kim, Jae-Hoon³⁾ · Lim, Hong-Geun¹⁾ and Yang, Hyun-Je¹⁾

¹⁾ Forest Conservation Department, National Institute of Forest Science, Research Fellow,

²⁾ Forest Conservation Department, National Institute of Forest Science, Senior Researcher,

³⁾ Forest Conservation Department, National Institute of Forest Science, Researcher.

ABSTRACT

This study was carried out to analyze the monthly runoff concentration on non rainfall days in order to prepare basic data to compare the runoff concentration on rainfall days in 7 forest watersheds in the Republic of Korea. Forest stream water has been collected through 15 times of sampling in each watershed and analyzed based on the changes in concentration of Biochemical Oxygen Demand(BOD), Chemical Oxygen Demand(COD), Total Organic Carbon(TOC), Total Nitrogen(TN), and Total Phosphorus(TP). The average concentration was 0.8 mg/L for BOD, 1.4 mg/L for COD, 0.8 mg/L for TOC, 1.85 mg/L for TN and 0.002 mg/L for TP during non rainfall days. Coniferous forested watersheds showed higher value of TN and TP concentration. Concentrations of BOD and TP in early March ($p<0.01$) were affected by melt water flow input in spring season. Significant differences ($p<0.01$) in concentrations were observed in BOD and TOC, indicating seasonal rainfall and vegetation growth impacts on forest stream quality. Concentration of TN and TP showed significant positive

First author : Yoo, Hyeon-Ju, Forest Conservation Department, National Institute of Forest Science, Research Fellow, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Korea.

Tel : +82-2-961-2932, E-mail : hyeonjuy@korea.kr

Corresponding author : Choi, Hyung-Tae, Forest Conservation Department, National Institute of Forest Science, Senior Researcher, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Korea.

Tel : +82-2-961-2643, E-mail : choiht@korea.kr

Received : 10 November, 2020. **Revised** : 17 December, 2020. **Accepted** : 14 December, 2020.

correlation, and weak negative correlation was found in the concentration of BOD and TOC. It is expected that result of forest stream water on non rainfall days could be basic information in managing non-point source from forest watersheds.

Key Words: *Non-point source, stream water, water quality, forest watershed, Non rainfall days*

I. 서 론

전 국토의 64%를 차지하는 산림은 우리나라 하류 유역의 수질에 많은 영향을 미치므로 안전하고 지속 가능한 수자원 확보를 위해서 산림유역의 오염원 관리가 필수적이다. 비점오염원은 강수에 의해 유출수와 함께 배출되는 오염물질로, 유출 경로가 명확하게 구분되지 않으며 유역의 지질, 지형, 기상 조건 등 환경 요인에 따라 배출 경향이 달라지므로 관리가 어렵다. 국내에서는 도심, 하천, 농지 등 유역별 비점오염원 특성을 파악하고 면적당 정확한 오염부하량을 산정하는 연구가 진행되었다(Kim et al, 2006; Choi et al, 2009; Lee et al, 2012; Kwak et al, 2012; Hwang et al, 2016). 산림유역은 배출되는 오염물질의 농도는 낮으나 차지하는 면적이 넓어 섬세한 관리가 요구됨에도 불구하고 산림기원 비점오염물질에 관한 충분한 연구가 이루어지지 않았다.

국내에서 산림 계류수의 수질에 관한 연구는 주로 숲 가꾸기에 따른 수질 변화와 용존성 이온 변화 중심으로 이루어졌다. Jung et al.(1999)은 전나무림과 잣나무림 유역에서 간벌과 가지치기 등 적절한 산림 시업이 수질 정화능력 향상에 필요함을 밝혔다. Park and Ma(1999)는 다중 회귀분석을 통해 탐방객 수나 계류수의 수온 등이 계류수 수질 변화와 유의한 관계를 보임을 제시하였다. Ma and Goo(2002)는 소나무림과 밤 재배지로 이용되는 밤나무 재배지, 밤나무림 휴경지의 수질 변화를 관측하여 임지 이용에 따른 오염원 유입 방지 대책의 필요성을 제시하였

으며, Lee(2007)는 지리적 조건이 서로 다른 8개 시험지의 토양 용출액, 계류수를 조사하여 식생에 따라 산림유역 유출수의 특성이 달라질 수 있음을 확인하였다. 이 외에도 Kim et al. (2005), Ma et al.(2011)은 계류수의 용존성 이온을 중심으로 임상과 강우 강도에 따라 계류수 수질이 크게 변화함을 보고하였다. 상기 연구는 산림 수질이 산림 시업, 임상, 이용현황 등 해당 유역의 특징에 따라 다양하기에 오염부하량 산정 과정에서 산림유역의 특성을 필수적으로 고려해야 함을 제시하였다.

한편, 현행 수질 관리 기준이 수질 오염 지표 중심으로 제시되어 있으므로 산림유역 강우 유출수의 오염물 농도 변화에 관한 연구 필요성이 대두되었다. 2000년대 초반부터 산림 계류수의 TN(총질소), TP(총인), BOD(생화학적 산소 요구량), COD(화학적 산소 요구량)에 관한 연구가 진행되어왔다. Yur and Kim(2005)은 모니터링을 통해 산림유역과 농지, 도시 유역의 오염물 유출 특성을 비교한 바 있으며, Kim et al. (2003)은 산림 유출수의 TN과 TP, COD의 유출 부하를 조사하였다. 이 외에도 임상 및 입지, 강우 사상에 따른 유출수 농도 변화 경향을 분석한 연구가 진행되어 유역별 비점오염연구에 산림유역의 다양성을 반영할 수 있는 기반이 마련되었다(Lyou et al, 2006; Shin et al, 2007; Choi et al, 2009; Kang et al, 2009; Yoon, 2010).

비강우일의 유출수 농도는 산림유역의 비점오염원 연구 시 배경농도 자료로 활용할 수 있기에 산림지역의 배출량에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다(Kim et al, 2005). 그러나 국내

에서 비 강우 시 배출되는 산림 계류수 오염물질에 관한 연구 및 자료는 미비한 실정이다. 또한, 하천 및 호소 수질 생활환경 기준에 TOC(총 유기 탄소) 항목이 추가됨에 따라 산림유역 비점오염물질 관리를 위한 새로운 기준의 필요성이 제기되고 있다. 따라서, 본 연구는 국내 7개 산림유역 유출수의 BOD, COD, TOC, TN, TP 등 수질 지표를 기준으로 비강우일 유출수 내 오염물 농도 변화 특성을 파악함으로써 향후 강우 일의 유출수 농도와 비교하여 산림 비점오염원 평가에 활용할 수 있는 기초자료를 마련하고자 수행하였다.

II. 연구방법

1. 연구지역

산림 유출수의 오염물질 변동 경향을 살펴보

기 위해 포천시, 양평군, 광주시에 있는 7개 산림유역을 선정하였다. 각 유역은 국립산림과학원에서 운영 중인 유역시험지이다. 국유림 지역으로 외부인의 접근이 차단되어 있고 산림 외 다른 토지이용이 없어 외부 요인에 의한 인위적 영향이 배제된 산림 유출수의 특성을 보일 것으로 생각된다. 유량 관측시설을 통해 장기적인 모니터링이 진행되고 있어 안정적인 채수가 가능하며 지속적인 관측에 용이하다. 본 연구에서는 동일지역 내 입상에 따른 유출 차이를 확인하기 위해 포천 지역에서 침엽수림 및 활엽수림 각 1개소, 양평 지역에서 침엽수림 및 활엽수림 각 2개소를 선정하였다. 7개 유역의 위치와 유역 형상을 Figure 1에 나타내었다.

Po1 및 Po2 유역은 경기도 포천시 소흘읍 직동리에 위치한다. 포천 지역의 연평균 기온은 11.2℃이며 연평균강수량은 1,502.9mm이다. 모

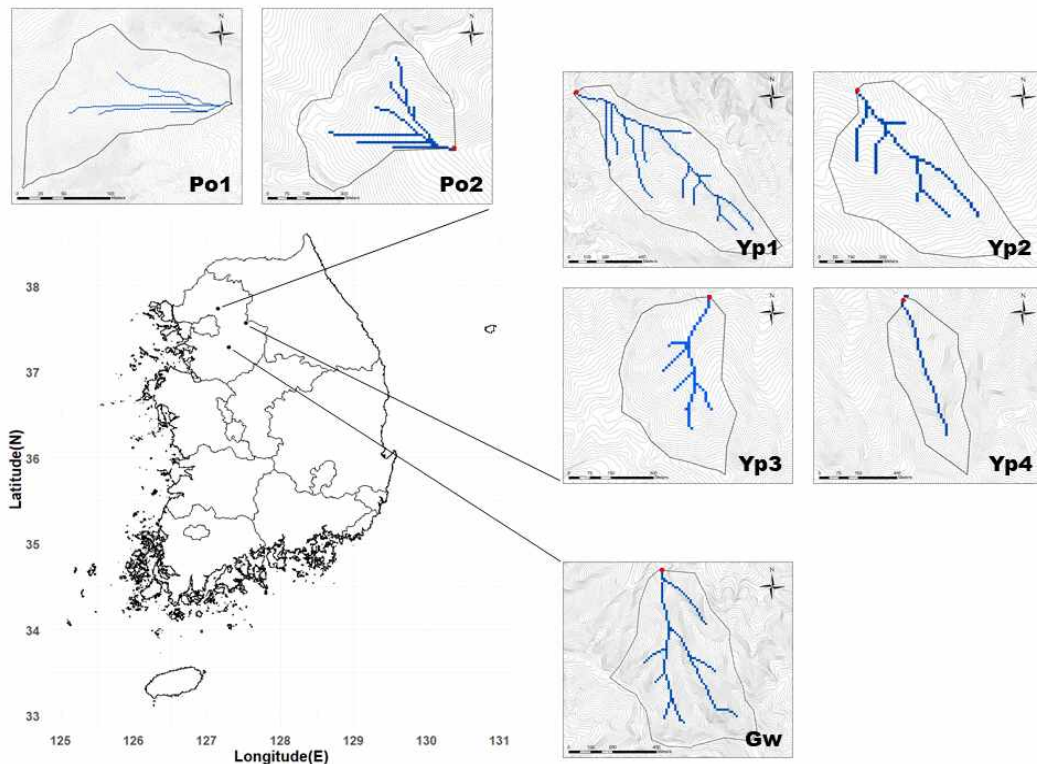


Figure 1. Location and detailed map of forest watersheds investigated in this study. All watersheds are located in Gyeonggi-do, Republic of Korea. Red dots indicate outlet of each site.

Table 1. Location coordinates and characteristics of investigated forest watersheds. Forest is the only land use of all investigated area.

Region	Location	Watershed Code	Area (ha)	Elevation (m)	Average Annual Temperature (°C)	Average Annual Precipitation (mm)	Parent Rock	Soil Texture	Forest Type	Tree age class
Pocheon	37° 44' 56.02" N 127° 08' 56.14" E	Po1	13.6	160 ~ 290	11.2	1502.9	Granite Gneiss	Sandy Loam	Coniferous Planted	IV
	37° 45' 48.23" N 127° 09' 23.40" E	Po2	22.0	280 ~ 470					Deciduous Natural	VI
Yang pyeong	37° 34' 35.20" N 127° 31' 29.20" E	Yp1	45.4	560 ~ 920	11.5	1438.2	Metamorphic	Loam and Sandy Clay Loam	Coniferous Planted	IV
	37° 34' 21.03" N 127° 31' 55.95" E	Yp2	18.9	700 ~ 920					Loam	Deciduous Natural
	37° 34' 19.06" N 127° 32' 30.82" E	Yp3	18.3	700 ~ 960				Loam		Deciduous Natural
	37° 34' 20.99" N 127° 32' 46.51" E	Yp4	17.7	660 ~ 1100						
Gwangju	37° 17' 31.20" N 127° 17' 20.40" E	Gw	34.0	260 ~ 640	11.6	1330.2	Metamorphic	Sandy Loam	Deciduous Natural	V

암은 화강편마암이며 토성은 사질양토, 토심은 30~60cm이다. Po1 유역은 유역면적 13.6ha에 임상은 침엽수 인공림으로 잣나무와 전나무가 70%를 점하고 있다. 표고는 160~290m이며 유출된 계류수는 포천천 상류로 유입된다. Po2 유역은 유역면적 22.0ha에 임상은 활엽수 천연림이며 참나무류와 서어나무가 주로 분포하고 있다. 표고는 280~470m에 달하며 유출수는 왕숙천으로 유입된다.

Yp1, Yp2, Yp3, Yp4 유역이 위치한 곳은 경기도 양평군 옥천면 용천리이다. 양평 지역의 연평균 기온은 11.5°C이며 연평균강수량은 1,438.2mm이다. 모암은 변성암이며 주로 양토로 구성되어있고 Yp2 유역에는 사질식 양토가 일부 포함되어있다. Yp1 유역의 면적은 45.4ha이며, 표고는 560~920m이고 임상은 잣나무가 주로 분포하는 침엽수 인공림이다. Yp2 유역의 면적은 18.9ha에, 표고는 700~920m이고 임상은 잣나무가 주로 분포하는 침엽수 인공림이다. Yp3 유역의 면적은 18.3ha에, 표고는 700~960m이고 임상은 참나무가 주로 분포하는 활엽수 천연림이다. Yp4 유역의 면적은 17.7ha에,

표고는 660~1100m이고 임상은 낙엽수와 참나무류가 주로 분포하는 천연 혼효림이다. 네 개 유역에서 유출된 계류수는 청평댐 하류 북한강으로 유입된다. Gw 유역은 경기도 광주시 도척면 상림리에 있다. 광주 지역 연평균 기온은 11.6°C, 연평균강수량은 1330.2mm이다. 유역면적 34.0ha에 활엽수 천연림으로 피복되어있으며 표고는 260~640m이다. 유출수는 곤지암천으로 유입된다.

2. 수질 시료 채취 및 분석

수질 시료 채취는 2018년 9월 10일부터 2019년 9월 25일까지 1년에 걸쳐 7개 유역에서 월 1회 이상 15회씩 진행되었다. 각 유역에 설치된 유량 관측시설을 통과해 유출되는 계류수를 멸균 채수병(2L)에 담은 방식으로 이루어졌으며, 채취 전 계류수로 두 번 이상 행군 후 채수하였다. 채취한 시료는 수질 변화를 방지하기 위해 분석 전까지 4°C 이하를 유지하여 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)에 수질분석을 의뢰하였다. 「환경정책기본법 시행령」(2020. 5. 12. 개정)에 따라 하천 및 호소의 수질 환경지표 항목인 BOD,

Table 2. The maximum, minimum, median, average and standard deviation of concentrations in all watersheds.

	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Min.	0.0	0.6	0.0	0.45	0.000*
Max.	2.0	2.5	2.7	5.40	0.023
Med.	0.7	1.4	0.7	1.54	0.000
Average	0.8	1.4	0.8	1.85	0.002
SD	0.5	0.4	0.4	1.2	0.003

*Undetected

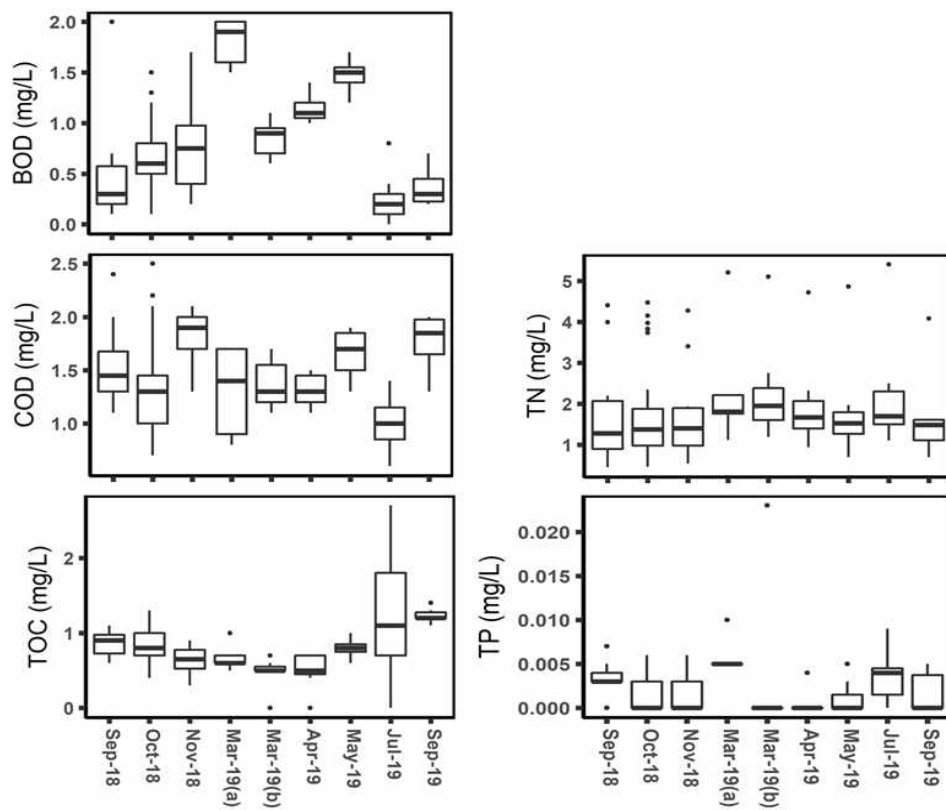


Figure 2. Monthly variation of organic matter concentration in forest stream water. BOD and TP showed higher concentration ($p < 0.01$) in early March 2019.

COD, TOC, TN, TP를 선정하였다.

2018년 9월과 11월, 2019년 3월에는 두 차례, 2018년 10월에는 일주일 간격으로 다섯 차례, 2019년 4월, 5월, 7월, 9월에는 각 한 차례씩 시료 채취가 진행되었다. 유역별로 최소 22시간, 최대 10일 이상 강우 현상이 관측되지 않은 무

강우일에 채수하였다. 혹한기인 2018년 12월부터 2019년 2월까지는 시료 수집이 진행되지 않았으며 2019년 3월 8일 Yp3, Yp4 유역에서는 추운 날씨로 인해 계류수가 유출되지 않았다. 2019년 9월 25일 Gw 유역에서는 계류수 채취가 진행되지 않았다.

유역별 유출수 분석 자료의 월별, 임상별 상관관계를 파악하고자 다변량통계프로그램 R (ver. 4.0.2)을 활용하여 인자간 Pearson 상관관계 분석을 시행하였다. 한 달 이내 여러 회 측정이 이루어진 경우, 해당 월에 측정된 모든 자료를 모집단으로 하여 월별 특성을 분석하였다. 측정 자료가 유역별 15개이므로 이상치의 영향을 판단하고자 자료의 정규성 검정을 시행하였다. 각 항목에 대하여 Shapiro-Wilk normality test를 실시한 결과, 자료 분포가 정규성을 보이지 않았으므로 집단 간 유의성 검증 시 비모수 검정방법을 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 산지 계류수 유출수 농도

2018년 9월부터 2019년 9월까지 수집된 산림 유출수의 월별 유기물 농도 분석 결과와 변화 경향은 Table 2, Figure 2에 나타난 바와 같다.

2019년 6월과 8월은 시료 수집이 진행되지 않았다. 7개 산림유역에서 채취된 계류수의 각 수질 항목 측정 범위(평균값)는 BOD 0.0~2.0(0.8) mg/L, COD 0.6~2.5(1.4) mg/L, TOC 0.0~2.7(0.8) mg/L, TN 0.45~5.40(1.85) mg/L, TP는 0.000~0.023(0.002) mg/L의 분포를 보였다.

산림유역을 비롯해 우리나라에서 비강우일에 측정된 수질 농도(Table 3)와 비교하여 볼 때, 본 연구에서 측정한 BOD 값은 Shin(2004), Jung et al.(2004)에서 보고한 산림유출수 값과 유사하며 국내의 하천, 강, 호수에서 측정된 농도보다 낮다. 이를 통해 산림유역으로부터 유입되는 유기물의 양이 더 적음을 추정할 수 있다. COD는 국내 다른 산림유역에서 보고된 유출수 농도보다 낮았으며 TP도 비슷한 경향을 보였다. 연구 지역인 7개 산림유역은 농업, 축산업, 거주 등 인위적 요인이 배제되어 타 유역보다 COD와 TP 값이 낮은 것으로 보인다. TN의 경우 국내 및 국외에서 보고된 산림유출수보다 큰 값을

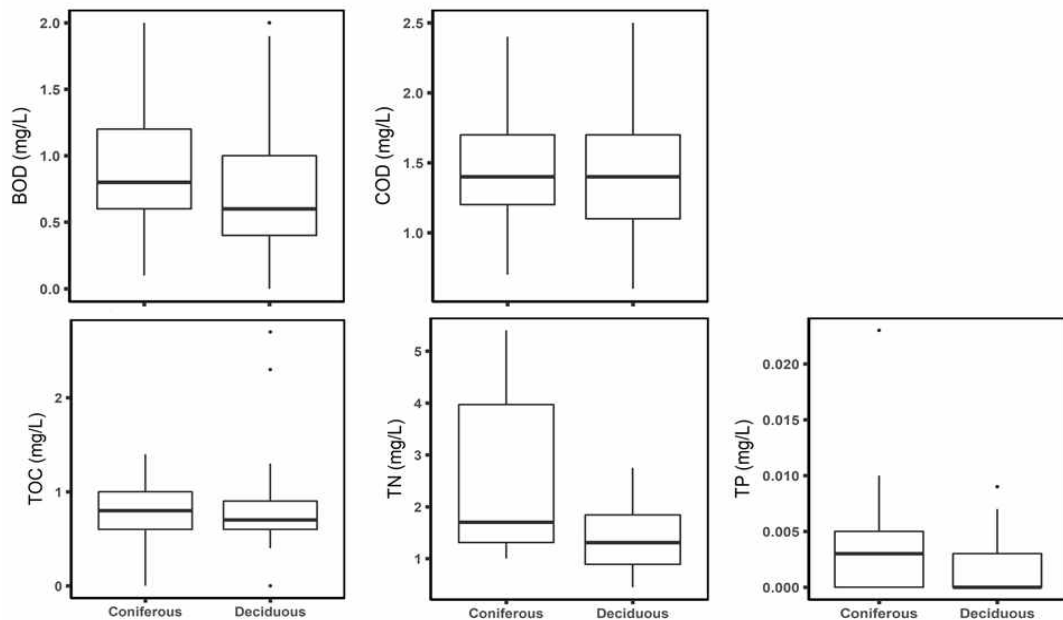


Figure 3. Stream water concentration of each forest types. Po1, Yp1 and Yp2 are coniferous (*Pinus koraiensis*) forest watersheds and Gw, Po2, Yp3 and Yp4 are deciduous forest watersheds. Significant differences ($p < 0.01$) were shown in TN and TP.

Table 3. Measured concentration range and averaged value of other watersheds.

Region	Landuse	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Reference
Pyeongchang	Agriculture	0.3-2.6 (0.81)	0.9-18.3 (3.88)		5.1-18.5 (8.26)	0.009-0.891 (0.0925)	Shin(2004)
	Forest	0.3-1.2 (0.56)	0.5-6.2 (2.61)		0.4-3.9 (0.77)	0.002-0.070 (0.0116)	
Samcheok	Forest	0.0-2.62 (0.69)	0.60-6.91 (3.07)		0.05-3.82 (0.91)	0.00-0.06 (0.02)	Jung et al.(2004)
Cheongju	Forest(M) [*]		0.05-6.55 (2.18)		0.06-1.57 (0.57)	0.001-0.044 (0.017)	Kim et al.(2003)
Pyeongchang	Agriculture + Forest		3.5		4.436	0.102	Kwak et al.(2012)
			4.3		6.3	0.223	
Gyeonggi	River	1.3	2.9				Cho et al.(2012)
Jinju	River	2.6	4.6	5.2	2.369	0.066	Lee et al.(2017)
Cheongju	River		2.7-3.7	1.3-2.3			Kim et al.(2020)
Cheongju	River		2.1-3.9	0.7-2.4			
Gwangju	River	0.5-5.5 (2.3)	2.9-9.0 (5.8)		1.49-5.89 (3.08)	0.009-0.147 (0.043)	Hwang et al.(2016)
Southern Han-River	River	0.05-3.69 (1.57)	0.6-3.8 (2.12)		1.94-19.48 (4.20)	0.004-0.067 (0.020)	Park and Shin(2011)
Han-River	River	1.3-6.9	2.9-8.1				Cho et al.(2012)
Han, Geum, Nakdong, Youngsan River	River	1.7	5.7	5.7			Kim et al.(2007)
Cheongju	Lake	1.0-1.8	2.8-4.7				Kim et al.(2020)
Scotland	Forest				0.152-0.715	0.004-0.013	Edwards et al.(2000)
Finland	Forest			10.0-55.6 (19.2)			Vuorenmaa et al.(2006)
				3.6-18.6 (9.8)			
	Forest(C) ^{**}			9.7	0.205	5.3	Palviainen et al. (2014)

Forest(M): Mixed forest **Forest(C): Coniferous forest

보였다. 임상에 따라 침엽수림과 활엽수림으로 나누어 분석한 결과, 침엽수림에서 TN 농도가 높게 관측되었다($P < 0.01$).

국내에 보고된 산림유출수의 TOC 분포에 관한 연구는 Chung and Chang(2016)이 유량농도 가중평균(Event Mean Concentration) 방법으로 강우 시 유출수의 농도를 추정하여, 두 개 유역에서 각각 1.70~5.17(3.37) mg/L, 3.20~8.78(5.51) mg/L의 분포를 보였다. 국외의 경우 Vuorenmaa et al.(2006)의 연구결과에서 10.0~55.6(19.2) mg/L, 3.6~18.6(9.8) mg/L의 범위를 보였으며 Palviainen et al.(2014)이 9.7 mg/L의 값을 보고하였다(Table 3). 본 연구에서 7개 산

림유역 유출수에서 측정된 비강우일 TOC 농도는 평균값 기준 국내의 강우 시 산림유출수 및 국외의 비강우일 산림유출수 농도에 비해 4~24% 수준의 낮은 농도를 보였다. 따라서 산림 지역에서 유래된 난분해성 유기오염물질의 양이 다른 유역에 비해 적은 것으로 판단된다.

2. 유역 및 임상별 유출 특성

수질분석 결과를 임상별로 나누어 Figure 3과 같이 나타내었다. BOD, COD, TOC은 임상별 농도 차이가 크게 나타나지 않았으나 TN, TP는 침엽수림의 농도가 활엽수림보다 높게 나타났다($p < 0.01$). 이 결과는 산림유역 계류수의 용존 질

Table 4. Correlation coefficient and p-values of water quality indicators.

	BOD	COD	TOC	TN	TP	Flow
BOD	1	0.13	-0.26**	0.21*	0.04	0.11
COD		1	0.12	-0.11	-0.04	0.12
TOC			1	-0.28**	-0.11	0.09
TN				1	0.52**	-0.27*
TP					1	-0.17
Flow						1

* Significant at the $p < 0.05$ level ** Significant at the $p < 0.01$ level

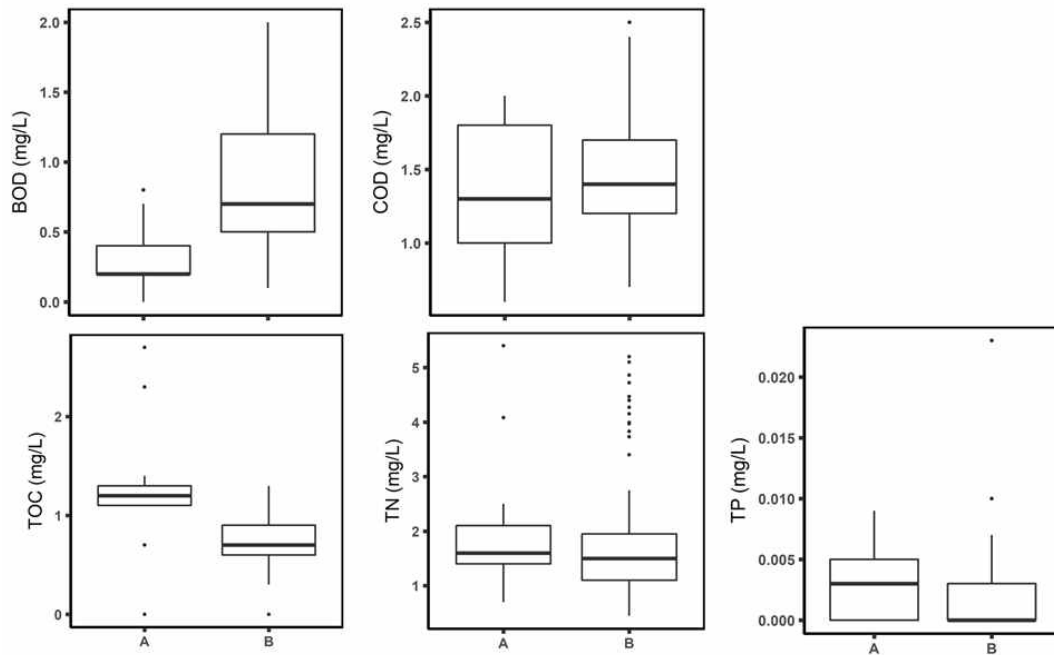


Figure 4. The concentrations of BOD, COD, TOC, TN, TP (mg/L) in rainy season (A) and dry season (B). Significant differences ($p < 0.01$) were shown in BOD and TOC.

소와 질산이온의 농도가 활엽수림보다 침엽수림에서 높다는 Zhang et al.(2008)의 연구결과와 비슷한 경향을 나타냈다. 특히, Po1 유역의 TN과 TP 농도의 평균값은 각각 4.37 mg/L, 0.006 mg/L로 다른 유역에 비해 3배, 6배 높게($p < 0.01$) 측정되었다. Kim et al.(2018)이 전국 24개 산림유역의 지역별 계류수질을 분석한 결과 잣나무림의 질산성 이온 및 TN 농도가 일본잎갈나무, 소나무, 편백나무, 활엽수림, 혼효림에 비해 높다고

보고하였다. 이는 잣나무로만 구성된 Po1 유역이 다른 6개 유역보다 잣나무림의 수관유효도가 높고 낙엽층이 두꺼워 낙엽분해량이 많아 TN 농도가 높았던 것으로 판단된다.

Ice and Brinkley(2003)는 산림계류수 내 TP 농도와 모암의 높은 연관성을 제시하였으며, 미국 전역을 대상으로 실시한 조사에서 화성암을 모암으로 둔 지역의 계류수는 TP 농도가 낮았고 모암이 퇴적암인 지역에서는 TP 농도가

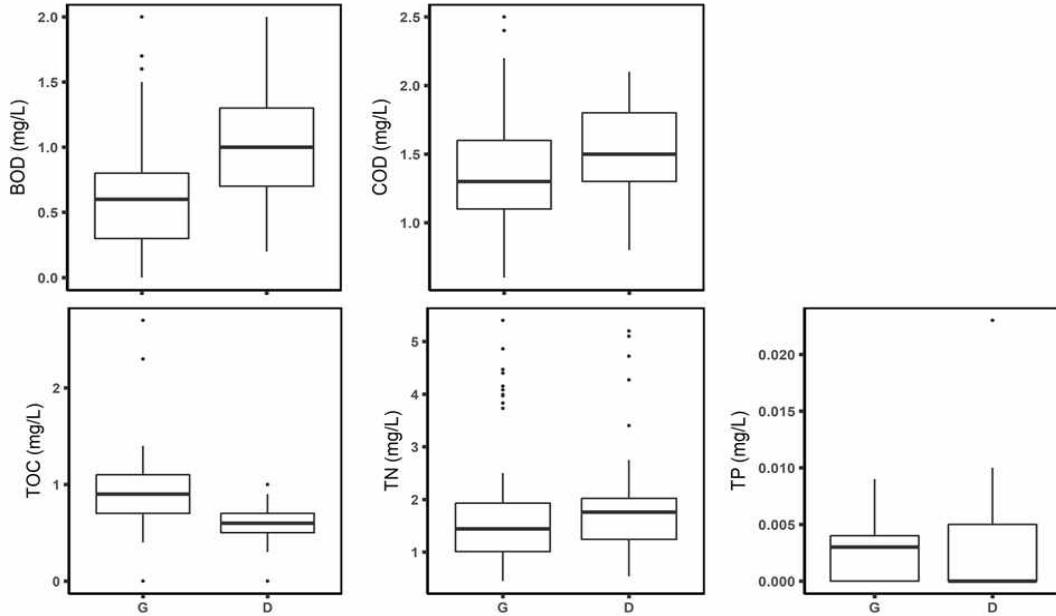


Figure 5. Box and whisker plots summarising the concentrations (mg/L) of BOD, COD, TOC, TN, TP in vegetation growing season (G) and vegetation dormant season (D).

높게 나타났다(ODF, 1994). 침엽수림 유역의 모암은 화강편마암과 변성암으로 활엽수림과 유사하므로 모암 특성에 의해 TP 농도가 증가했다고 보기는 어려운 것으로 판단된다.

3. 시기별 유출 특성

3월에는 3월 8일과 3월 25일 두 회에 걸쳐 시료 채취가 진행되었으나, 두 시기의 유출 농도에 큰 차이를 보여 3월 초와 3월 말로 나누어 해석하였다. 3월 초 BOD, TP의 평균 농도는 1.5 mg/L, 0.006 mg/L로 3월 말을 포함한 다른 시기보다 높았으며, BOD와 TP 각 항목에 대하여 유의적인 수준($p < 0.01$)에서 농도 차가 인정되었다. 이는 해빙기(3월 초)에 토양 속에 누적된 물질이 일시에 배출되었기 때문으로 생각된다. Turner et al.(2003)은 용설기에 토양 용액의 질소, 인 농도가 타 시기에 비해 높으며 그중에서도 유기성 질소와 인이 차지하는 비율이 높음을 보고한 바 있다.

강수량에 따른 유출 특성을 비교하고자 일 강수 자료를 바탕으로 강수기(A)와 갈수기(B)로 나누어 분석하였다(Figure 4). 이 기간 강수기와 갈수기의 월평균 강수량은 각각 200.6 mm, 55.6 mm이다. 강수기와 비교하여 갈수기의 BOD 농도가 더 높았으며, TOC는 반대로 더 낮게 나타났다($p < 0.01$). 다른 지표는 유의미한 차이를 나타내지 않았다. 측정 일을 전후하여 수원함양에 관여한 강수의 강도, 강수량 및 선행무강우일수 등이 산림유출수 수질에 영향을 주므로 강수 특성에 따른 수질 변화에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

Kim et al.(2003)은 산지 계류수의 TN, TP, COD의 유출 부하를 식생 성장 시기에 따라 나누어 보고한 바 있는데, 본 연구에서도 계류 수질 농도를 식생 생육기(G, 5~10월)와 식생 휴지기(D, 11~4월)로 나누어 분석하였다(Figure 5). 시기별로 식생 생육조건에 따라 BOD와 TOC에서 유의적인 수준($p < 0.01$)의 농도 차를 확인하

였다. TN의 식생 생육기 농도 감소는 식생에 의한 영양 염류 흡수에 의한 것으로 생각되며, Kim et al.(2003)에서 나타난 식생 생육기 TN 농도 감소와 일치한다. TP는 식생 생육기의 평균 농도가 식생 휴지기보다 낮았으나 시기별 차이가 크지 않았다.

4. 수질 항목 간 상관관계

각 수질 항목 간의 Pearson 상관관계 분석 결과는 Table 4와 같다. TN을 제외한 4개 수질 항목에서 평상시 유량과 농도 사이의 유의적인 상관관계가 인정되지 않았으며, TN에서는 약한 부의 상관관계를 보였다. Shin(2004)은 산림소유역에서 강우 시 지면이나 수관에 부착되어 있던 건성강하물이 용탈되며 유량과 TN 간 양의 상관관계를 나타낸다고 하였으나, Kim et al. (2003)은 평상시에 TN, TP, COD의 농도와 비유량 사이에서 유의적인 상관관계가 인정되지 않음을 보고하였다.

TOC는 용존성 및 입자 상태의 유기 탄소 총량을 반영하는 수중 유기물 지표로 일반적으로 BOD와 정의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(Constable and McBean, 1979; Choi and Han, 2011). 산림유역 소하천에서도 TOC와 COD가 강한 정의 상관관계를 가지며, BOD보다 COD가 상관성이 더 높다는 연구가 보고된 바 있다(Kim et al, 2020). 한편, 본 연구에서는 BOD와 TOC이 약한 부의 상관관계를 보였다. BOD와 TOC는 임상별, 시기별 영향요인을 분석하는 장기적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

TN과 TP는 정의 상관관계를 보였으며, 이는 국내에서는 Shin(2004)에서 제시한 산림소유역 수질변수 간 상관관계와 유사하다. TOC와 TN은 약한 부의 상관관계를 보였다. Lyu and Lee(2007)는 금강 지류 미호천에서 TOC와 TN이 높은 정의 상관관계를 보임을 보고하였는데, 이는 토지이용이 다양한 하천유역의 특성으로 산림유역과 결과가 다르게 나타난 것으로 판단된다. 본 연구에서

는 산림유역에서 상대적으로 높은 TN 농도의 영향으로 TOC와 TN 사이에 정의 상관관계가 형성되지 않은 것으로 판단된다.

IV. 결 론

2018년 9월부터 2019년 9월까지 1년 동안 총 15회에 걸쳐 경기도 포천, 양평, 광주에 있는 7개 산림유역을 대상으로 산림 유출수를 측정하고 BOD, COD, TOC, TN, TP의 농도 변화를 바탕으로 산림 유출수 농도 특성을 분석하였다. 산림 유출수의 평균 수질 농도는 BOD 0.8 mg/L, COD 1.4 mg/L, TOC 0.8 mg/L, TN 1.85 mg/L, TP 0.002 mg/L로 나타났다.

국내외 산림 및 하천, 강에서 수집된 수질 농도와 비교한 결과 BOD, COD, TOC, TP의 값이 국내 산림유역의 비강우일 수질 농도와 비슷하거나 더 적은 것으로 나타났으며 이는 인위적인 요인으로부터 기원한 유기물의 유입이 이루어지지 않았기 때문으로 추정된다. 한편 TN의 경우 국내외 산림 유출수보다 높게 나타났다.

임상별로는 침엽수림에서 TN과 TP 농도가 높게 나타났으며 특히, 잣나무로만 구성된 Po1 유역의 TN, TP 농도는 다른 유역에 비해 3배, 6배 높게 측정되었다. 모암의 특성이 유출수의 TP 농도와 연관성이 높다고 알려져 있으나 본 연구 지역은 해당 특성과 거리가 멀었다. 침엽수림 유역의 유기물 유출 특성에 영향을 미치는 요인에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

3월 초 BOD, TN, TP의 농도는 다른 시기에 비해 큰 값을 보였으며, 이는 해빙기에 토양 내 축적되어있던 물질이 배출된 것으로 생각된다. 강수 시기에 따른 분석 결과 갈수기와 비교해 강수기의 BOD 농도 감소, TOC 농도 증가가 나타났으며, 측정 시기 전후 강수 현상의 특성에 따른 연구가 후속되어야 할 것으로 보인다. 식생 조건별 수질 항목 분석 결과 BOD, TOC에서 농도 차이가 관측되었으며, 식생 변화에 따라 산림소유역 수질

항목 변화가 있음을 제시하였다.

수질 항목 간 상관관계 분석 결과 각 수질 항목과 유량은 상관관계가 성립하지 않았으며, TN과 TP는 유의미한 정의 상관관계를 보였다. 한편 BOD와 TOC 사이에 약한 부의 상관관계가 나타났다. 이는 일반적인 하천 수질 경향과 다른 것으로, 산림소유역에서 비강우일에 배출되는 계류 수질에 대해 장기적인 모니터링과 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Champman P.J., Edwards A.C. and Cresser M.S. 2001. The nitrogen composition of streams in upland Scotland: some regional and seasonal differences. *The Science of the Total Environment*. 265 : 65-83.
- Cho H.S., Kim K.R., Lim G.C., Bae K.S. and Lee M.H. 2012. A study on long-term variation of BOD and COD as indicator of organic matter pollution in the Han River. *Korean Journal of Limnology*. 45(4) : 474-481.(in Korean)
- Choi J. and Han D. 2011. Development of water quality standard for TOC as organic matter index. *Seoul Studies*. 12(3) : 173-184.(in Korean)
- Choi J.Y., Lee S.Y. and Kim L.H. 2009. Wash-off characteristics of NPS pollutants from forest landuse. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 9(4) : 129-134.(in Korean)
- Choi Y., Won C., Seo J., Shin M.H., Yang H., Lim K. and Choi J. 2009. Analysis and comparison about NPS of plane field and alpine field. *Journal of Korean Society of Water Quality*. 25(5) : 682-688.(in Korean)
- Chung W.J. and Chang S.W. 2016. Characteristics of storm runoff and analysis of its correlation with forest properties. *Journal of Environmental Science International*. 25(7) : 1007-1016.(in Korean)
- Constable T.W. and McBean E.A. 1979. BOD/TOC correlations and their application to water quality evaluation. *Water Air and Soil Pollution*. 11 : 363-375.
- Edwards A. C., Cook Y., Smart R., and Wade A. J. 2000. Concentrations of nitrogen and phosphorus in streams draining the mixed land-use Dee Catchment north-east Scotland. *Journal of Applied Ecology*. 37 : 159-170.
- Hwang S.J., Kim K., Park C., Seo W., Choi B.G., Eum H.S., Park M.H., Noh H.R., Sim Y.B. and Shin J.K. 2016. Hydro-meteorological effects on water quality variability in Paldang Reservoir, confluent area of the South-Han River-North-Han River-Gyeongan Stream Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 49(4) : 354-374. (in Korean)
- Ice G. and Binkley D. 2003. Forest streamwater concentrations of nitrogen and phosphorus. *Journal of Forestry*. 101(1) : 21-28.
- Jeong Y., Park J.H., Kim K.H., Youn H.J. and Won H.K. 1999. Influence of forest management on the Facilitation of purifying water quality in *Abies holophylla* and *Pinus koraiensis* watershed(2). *Journal of Korean Forest Society*. 88(4) : 498-509.(in Korean)
- Jung Y., Kim K., Chung C., Jun J. and Yoo J. 2004. Effects of forest fire on the quantities and qualities of the streamwater in small forest catchments. *Journal of Korean Forest Society*. 93(7) : 446-452.(in Korean)
- Kang C.G., Lee S., Gorme J.B., Lee J.U. and Kim L. 2009. Determination of EMC and washoff characteristics of stormwater runoff from broad-leaved forest areas. *Journal of*

- Environmental Impact Assessment. 18(6) : 393-399.(in Korean)
- Kim B., Jung S., Jang C. and Kim J.K. 2007. Comparison of BOD COD and TOC as the indicator of organic matter pollution in streams and reservoirs of Korea. Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 29(6) : 640-643.(in Korean)
- Kim G., Kim Y., Lee D., Jung H. and Yur J. 2003. Analysis and estimation of EMC loads of rainfall runoff from agricultural-forestry in Korea. Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 25(6) : 760-770. (in Korean)
- Kim J.S., Kim S.J., Oh K.Y., Oh S.Y., Kim J.S. and Jung Y.H. 2003. Outflow loads of total nitrogen, total phosphorus, and COD in mountain stream water. Journal of Korea Water Resource Association. 36(5) : 787-797.(in Korean)
- Kim L., Ko S., Lee B. and Kim S. 2006. Estimation of pollutant EMCs and loadings in highway runoff. Korean Society of Civil Engineers. 26(2B) : 225-231.(in Korean)
- Kim S., Choi H., Park K., Cho J., Kim C. and Park C. 2018. Development of forest stream water purifying function enhancement technology. National Institute of Forest Science. (in Korean)
- Kim S., Jeong Y., Kim K., Yoo J., Jeong C. and Jun J. 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)
- Kim S.W., Cho Y.H., Chae M.H., Kil G.B. and Seok K.S. 2020. Characteristics of organic matters in small streams into the Daecheong Reservoir. Journal of Environmental Analysis Health and Toxicology. 23(3) : 155-164.(in Korean)
- Kwak S., Bal Dev B., Kim E., Lee C., Lee H. and Heo W. 2012. Characteristics of non-point pollution discharge on stormwater runoff from lake Doam watershed. Korean Journal of Limnology. 45(1) : 62-71.(in Korean)
- Lee C.S., Im T. and Kwon H. 2017. A study of calculation of nonpoint sources load in the Panmuncheon by precipitation. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 17(3) : 399-408.(in Korean)
- Lee H.B., Park C.O. and Shin D.Y. 2007. The characteristics of runoff from a forest watershed with different vegetation. Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 29(3) : 311-316.(in Korean)
- Lee J., Park S., Kim D., Lee Y.J. and Park M.J. 2012. Long-term monitoring and analysis for discharge characteristics of nonpoint source pollution by land use types in Geum River basin. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 12(6) : 343-350.(in Korean)
- Lyou C., Shin Y.C., Heo S.G., Lim K.J. and Choi J.D. 2006. Characteristics of nonpoint source pollutant loads from forest watershed. The KCID Journal. 13(1) : 63-71.(in Korean)
- Lyu J.H. and Lee D.G. 2007. Inquiry of water environment in Mihocheon(Stream) - water quality monitoring focused on TOC. Journal of Korean Society of Water Quality. 23(5) : 731-739.(in Korean)
- Ma H. and Goo S. 2002. A change of the stream water quality by forest land use. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 23(5) : 43-48.(in

- Korean)
- Ma H., Kang W. and Kang E. 2011. A change of stream water quality by forest type. *Journal of Korean Forest Society*. 100(2) : 142-148.(in Korean)
- Nieminen M. 2004. Export of dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus following clear-cutting of three Norway spruce forests growing on drained peatlands in southern Finland. *Silva Fennica* 38(2) : 123-132
- Oregon Department of Forestry (ODF). 1994. Oregon Department of Forestry 1993 annual status report on implementation of water quality management in the Tualatin River Basin. Salem.
- Palviainen M., Finer L., Lauren A., Launiainen S., Piirainen S., Mattsson T. and Starr M. 2013. Nitrogen, phosphorus, carbon and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: long-term paired catchment studies from eastern Finland. *AMBIO*. 43 : 218-233.
- Park J. and Ma H. 1999. Stream water quality monitoring in closed valley areas for preserving stream water quality of Puk'ansan National Park. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 2(2) : 88-96.(in Korean)
- Park S.M. and Shin Y.K. 2011. The impact of onsoon rainfall on the water quality in the upstream watershed of Southern Han River. *Korean Journal of Limnology*. 44(4) : 373-384.(in Korean)
- Shin M.H., Lee Y.J., Choi J.W., Shin D.S., Cheon S.U. and Choi J. 2007. Analysis of flow-weighted mean concentration (FWMC) characteristics from rural watersheds. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*. 49(6) : 3-9.(in Korean)
- Shin Y. 2004. Comparison of water quality between forested and agricultural subcatchments in Daegwallyong Area. *The Korean Geographical Society*. 39(4) : 544-561.(in Korean)
- Turner B.L., Baxter R. and Whitton B.A. 2003. Nitrogen and phosphorus in soil solutions and drainage streams in Upper Teesdale, northern England: implications of organic compounds for biological nutrient limitation. *The Science of the Total Environment*. 314-316 : 153-170.
- Vuorenmaa J., Forsius M. and Mannio J. 2006. Increasing trends of total organic carbon concentrations in small forest lakes in Finland from 1987 to 2003. *Science of Total Environment*. 365 : 47-65.
- Yoon S.W., Chung S.W., Oh D.G. and Lee J.W. 2010. Monitoring of non-point source pollutant load from a mixed forest land use. *Journal of Environmental Sciences*. 22(6) : 801-805.
- Yur J. and Kim G. 2005. Comparison of discharge characteristics of NPS pollutant loads from urban agricultural and forestry watersheds. *Journal of Korean Society of Water Quality*. 21(2) : 184-189.(in Korean)
- Zhao Zhang, Takehiko Fukushima, Peijun Shi, Fulu Tao, Yuichi Onda, Takashi Gomi, Shigeru Mizugaki, Yuko Asano, Ken'ichirou Kosugi, Shinya Hiramatsu, Hikaru Kitahara, Koichiro Kuraji, Tomomi Terajima and Kazuo Matsushige. 2008. Baseflow concentrations of nitrogen and phosphorus in forested headwaters in Japan. *Science of The Total Environment*, 402(1) : 113-122.