

ORIGINAL ARTICLE

## 산림특성에 따른 강우유출수 유출특성 및 상관관계 분석

정우진 · 장순웅<sup>1)\*</sup>

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, <sup>1)</sup>경기대학교 환경에너지공학과

### Characteristics of Storm Runoff and Analysis of Its Correlation with Forest Properties

WooJin Chung, SoonWoong Chang<sup>1)\*</sup>

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon 16627, Korea

<sup>1)</sup>Department of Environmental Energy Engineering of Kyonggi University, Suwon 16627, Korea

#### Abstract

Environmental policy implementation has been strengthened to protect the source waters in Korea and to improve their water quality. Increasing of non-point source caused water quality problem continuously. Research on runoff from forests, which occupy over 65% of the land in Korea, is insufficient, and studies on the characteristics and influences of storm runoff are necessary. In this study, we chose to compare the effects of land use in the form of two types of forest distribution and then gathered data on storm characteristics and runoff properties during rainfall events in these areas. Furthermore, the significance and influences of the discharges were analyzed through correlation analysis, and multilateral runoff characteristics were examined by deducing a formula through COD<sub>Mn</sub> and TOC regression analysis. At two forest points, for which the basin areas differed from each other, flow changed according to storm quantity and intensity. The peak discharge at point A, where the basin area was big, was high, whereas water-quality fundamental items (BOD, COD<sub>Mn</sub>, and SS) and TOC density were high at point B where the slope and storm intensity were high. Effects of dissolved organic matter were determined through correlation analysis, and the regression formulas for COD<sub>Mn</sub> and TOC were deduced by regression analysis. It is expected that the data from this study could be useful as basic information in establishing forest management measures.

**Key words** : Forest runoff, Hydrological irrigation, Runoff characteristics, Event mean concentration, Correlation analysis

#### 1. 서론

비점오염원의 증가에 따라 국내 상수원의 보호 및 수질개선을 위한 노력이 증가되고 있다. 물 환경관리 기본계획에 따르면 한강유역의 점오염원이 차지하는 비중은 지속적으로 줄어들고 있는 추세이며, 비점오염원은 지속적으로 증가하고 있다(Chung et al., 2014). 비점오염원

은 점오염원과 달리 오염물질의 유출량 및 농도가 예측되지 않고, 하수종말처리장과 같은 집중처리가 불가능하여 상수원의 보호 및 수질개선에 어려움을 겪고 있다(Han and An, 2008). 이에 따라, 4대강 비점오염원관리 종합대책을 통해 환경기초시설을 확충하여 비점오염원을 관리하였지만 수질에 대한 우려는 지속되었다(Korean Ministry of Environment, 2006).

Received 31 May, 2016; Revised 7 July, 2016;

Accepted 8 July, 2016

\*Corresponding author : SoonWoong Chang, Dept. of Environmental Energy Engineering of Kyonggi University, Suwon 16627, Korea  
Phone : +82-31-249-9739  
E-mail : swchang@kyonggi.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근, 도시 및 포장지역 등 초기농도가 높은 오염물질에 대한 연구는 다양하게 연구가 되었지만, 산림지역의 강우유출수가 수계에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 산림은 우리나라 국토의 65% 이상을 차지하기 때문에 강우유출수의 유출특성 및 영향에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다(Kim and Kwon, 2005).

산림지역의 강우유출수는 수변의 지질·지리적 환경에 의존적이고 생성환경에 따라 고유의 특성을 갖는다. 따라서 강우 시 토양의 유실 및 낙지 등의 유출에 따라 그 양도 크게 달라질 수 있다(Kim et al., 2010). Michalzik et al.(2001)은 강우 시 Dissolved Organic Carbon은 높은 유기물 함량을 가진 유기물층과 토양 상층부에서 용존 과정을 통해 계류수 형태로 유출된다고 보고하고 있으며, 동아시아의 경우 여름철 연간 DOC 유출량의 60~80%, 미국 동부지역의 경우 강우기간 동안 연간 유출량의 86%의 DOC가 유출된다고 보고하였다(Kawasaki et al., 2005; Liu et al., 2003; Raymond et al., 2010; Tao, 1998; Zhang et al., 2009). Jeong(2011)은 DOC 유출량의 48%와 Particle Organic Carbon 유출량의 84%가 강우 시 유출 되었으며, 210 mm가 내린 한 번의 강우사상에 의한 POC의 유출량이 연간 유출량의 62%를 차지하여 극한 강우사상에 의한 토양침식이 수계 유출 경로가 될 수 있음을 시사하였다. 그러나, 산림지역의 강우유출수는 강우량 차이, 산림의 특성, 수변의 분포의 차이가 큰 만큼 정확한 유출특성을 파악하기 힘든 것으로 알려져 있다(Hur et al., 2007; Kalbitz et al., 2003). 이 같은 실정에 따라 국내에서도 기본수질항목, TOC 및 DOC 등의 평가를 통해 유기물질의 농도분포 및 생지화학적 특성에 대한 장기적이고 집중적인 연구가 필요한 실정이다(Kim et al., 2007; National Institute of Environmental Research, 2010).

본 논문은 산림지역의 강우유출수의 영향을 파악하기 위해 유역면적이 각기 다른 산림지역 2군대를 선정하였다. 선정된 산림지역에서 발생하는 유출특성을 파악하기 위해 총 4회의 모니터링을 실시하여, 기본수질항목(BOD, COD<sub>Mn</sub>, SS) 및 TOC를 분석하였다. 또한, 유출 특성 및 영향인자를 파악하기 위해 상관분석을 실시하였으며, 유기물 유입 분석을 위해 적용되고 있는 COD<sub>Mn</sub>의 적용성을 비교하기 위해 TOC와의 회귀분석을 실시하였

다. 이 결과를 통해 산림지역의 강우유출특성과 영향에 대한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 대상지점 및 강우 특성

산림지역의 강우유출수의 영향을 파악하기 위해 한강 수계 30개 중권역 중 산림의 영향을 반영 할 수 있으며, 충분한 유출 면적을 갖고, 비강우시에도 유출이 발생하는 3가지 기준을 중점으로 지점을 선정하였다. 선정 지역은 홍천강 중권역에 위치한 A 지점과 의암댐 중권역에 위치한 B지점을 선정하였다. 대상지점의 유역분석 결과 A지점의 유역면적은 2.937 km<sup>2</sup>이며 유역면적의 99.4%가 산림으로 형성된 산림지역이다. 더하여, 유역둘레는 7.8 km, 유역평균 표고는 469.1 m, 유로폭은 3.2 m 유역평균경사도는 31°로 조사되었다. A지점의 큰물줄기는 북북서에서 남남동 방향으로 산릉에 의해 형성된 하곡을 향하고 있다. 점으로 선택되어진 조사지점에서 모니터링을 실시하였으며 인공조림지가 형성되어 있지만, 출입이 통제되어 인위적 영향이 적은 상태로 보전되어있다. B지점의 유역면적은 0.227 km<sup>2</sup>이며 산림 91.7%와 초지 8.3%로 형성되어있다. 유역둘레는 1.9 km, 유역평균 표고는 300 m, 유로폭은 1.2 m 및 유역평균경사도는 37°로 조사되었다. B지점의 모니터링 지점은 점으로 표시하였으며 북서측의 270 m 산릉, 서북서측의 290 m 산릉 그리고 남서측의 340 m 산릉의 영향으로 동쪽하곡이 형성되어 큰 물줄기는 서에서 동으로 향한다. B지점은 조림지가 형성되어 있지 않고 천연림으로만 형성되어 인위적 영향이 극히 적은 상태로 보전되어있다. B지점은 A지점과 비교하여 약 13배 정도 작고 유로가 좁게 형성되어 있으며 경사가 높아 집중강우에 취약한 지점이다. 두 지점 모두 관이 매설되어있어 유량측정이 용이하며, 비강우시와 강우시의 유출유량이 집중되는 지점을 선정하여 유역에 대한 유출특성 해석에 있어 신뢰성을 확보하였다.

각 대상지점의 강우특성을 관찰하기 위해 A지역에서 거리가 가까운 홍천 관측소와 B지역에서 가까운 춘천관측소의 자료를 활용하였다. 2지역에 발생한 강우사상에 해당하는 선행강우일수, 총 강우량, 강우강도 및 강우지속시간을 통해 대상지점의 강우특성을 파악하였다.

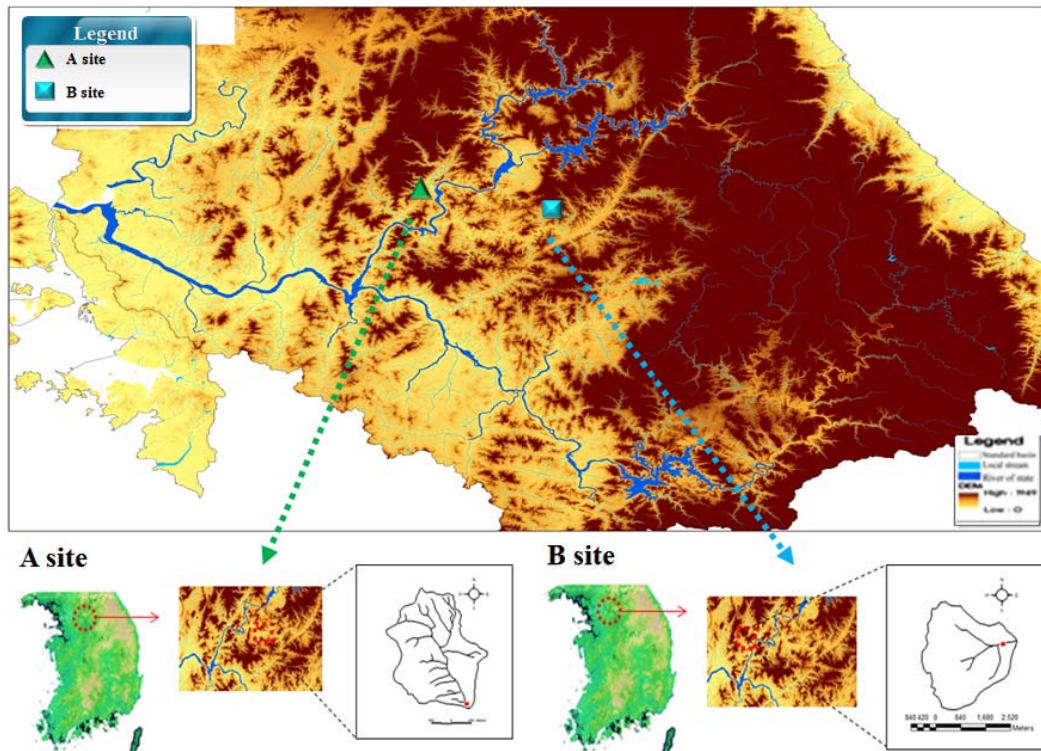


Fig. 1. Monitoring points.

2.2. 시료채취 및 분석방법

산림지역 강우유출수의 유출특성 및 경향을 파악하기 위해 대상지점의 유출수를 채취하였다. 시료 채취는 강우 시작부터 1시간까지 15분 간격으로 총 5회 이후로 1~2시간 간격으로 강우종료 시 까지 총 10회의 채수를 실시하였다. 채취한 시료는 아이스박스에 담아 실험실로 운반 후 실험을 실시하였다.

유출특성을 위해 분석한 항목은 수질기초항목(BOD, COD<sub>Mn</sub>, SS) 및 TOC이며 Table 1에 정리하였다.

2.3. 유량측정 및 유량기중평균농도(Event mean concentration, EMC) 산정

원형관의 자연유하에서는 Manning식을 사용하였다. 원형관(철근콘크리트관) Manning공식 적용 시 조도계

Table 1. Analysis method

Content	Analysis method	Ref.
BOD	BOD <sub>5</sub> method	Standard Method 5210B
CODMn	permanganometry	Water contamination process test method ES 04315.1a
SS	Weight Analysis	Standard Method 2540D
TOC, DOC, POC	Ultrasonic homogenizer	Ultrasonic homogenizer JY92-IN

수를 0.013을 표준으로 적용하였으며 산정식은 (1)과 (2)와 같다(Kim et al., 2002).

$$Q = A \times V \quad (1)$$

$$V = 1/n \times R^{2/3} \times I^{1/2} \quad (2)$$

여기서 Q:유량(m<sup>3</sup>/s), A:유수의 단면적(m<sup>2</sup>), V:유속(m/s), n=조도계수, R:경심(m) (=A/P), P:유수의 윤변(m) 와 I:동수경사(분수 또는 소수)

강우 시 유출되는 오염물은 시간대별로 배출되는 부하가 다르다. 따라서 일정한 시간 간격으로 오염물질의 농도를 측정하고, 이를 산술평균 할 경우에는 타당한 농도의 의미를 가질 수 있다. 그러나 비점오염원은 유출과 농도가 실시간으로 변하기 때문에 산술평균으로 특정강우를 대표하는 것은 다소 무리가 따른다. 따라서 강우 시 유출되는 오염물질의 부하량 산정시에는 유량기중평균 농도 (3)을 이용하였다.

$$EMC = \frac{\int_0^T C(t) \times Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt} \quad (3)$$

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1. 대상지점의 강우분석

A지점과 B지점의 수리수문을 분석하였으며 각 지점의 강우사상 선행건기일수(Advanced Dry Days), 총강우량, 평균강우강도와 강우지속시간을 Table 2, 3에 정리하였다. 선행건기일수는 event당 오염원의 충분한 축적을 위해 3일 이상의 간격을 기준으로 하였으며, 강우 event 모니터링은 강우시작부터 강우 종료까지 진행하였다. event 내 4회의 모니터링의 수리수문 분석결과 B지점은 50 mm이상의 높은 강우가 2회 이상 발생하였으며, 강우강도 또한 5.09와 8.9 mm/h으로 A지점에 비교하여 높게 발생하였다.

**Table 2.** The hydrologic analysis of A point

Event number	ADD (day)	Total rainfall (mm)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)
Event1 (11th on Mar.)	3	36.5	3.04	11
Event2 (22th on Jul.)	5	36	4.5	5
Event3 (3rd on Aug.)	3	10	1.1	5
Event4 (21th on Aug.)	3	37.5	3.75	7

**Table 3.** The hydrologic analysis of B point

Event number	ADD (day)	Total rainfall (mm)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)
Event1 (11th on Mar.)	3	56	5.09	7
Event2 (22th on Jul.)	5	23.5	2.61	9
Event3 (3rd on Aug.)	3	6	0.55	9
Event4 (21th on Aug.)	3	89	8.9	11

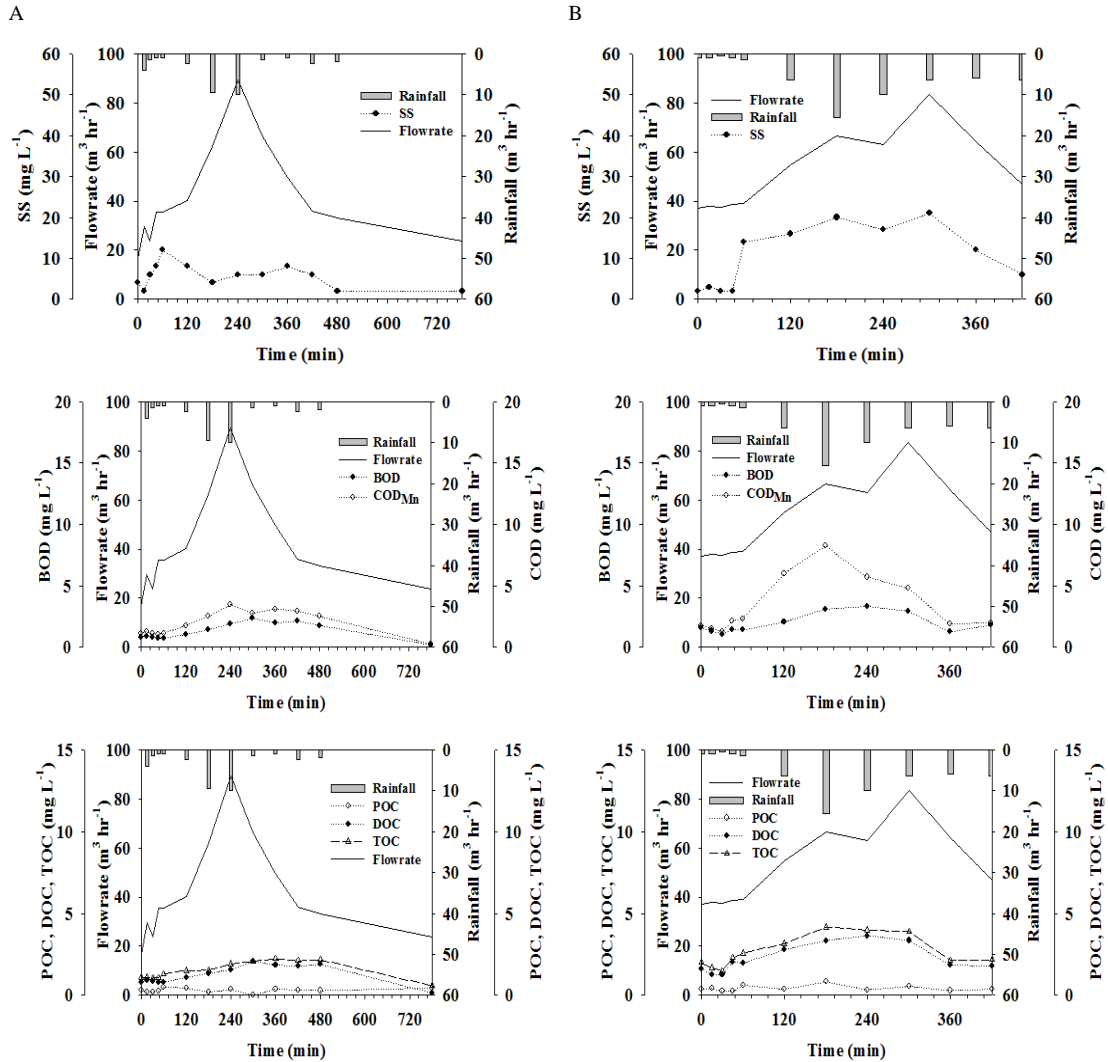


Fig. 2. Runoff characteristics of the point A and B point.

### 3.2. 대상지점의 유출특성

강우 시 발생하는 산림지역의 유출특성을 관찰하였으며, 4회의 event 중 30 mm 이상 강우가 발생된 event1을 기준으로 A와 B의 유출특성을 나타냈다(Fig. 2). A, B지점 모두 도시지역에 발생하는 초기세척효과는 나타나지 않았으며, 강우강도의 변화에 따라 유출유량 및 농도가 변화하는 경향을 나타냈다. 산림지역은 강우량 및 강우강도에 따라 유출유량의 상관관계가 높게 나타난다 (Lee et al., 2006). A지점과 B지점의 농도 유출특성을

비교한 결과 B지점의 유출 농도는 강우강도 및 유량의 유출경향이 비슷하게 나타났다. Choi et al.(2009)에 연구에 따르면 유역 표고가 40-310 m, 유역 경사가 5-36°, 유역면적이 0.29 km<sup>2</sup>의 산림특성 지점의 모니터링을 실시한 결과 강우강도 및 유량의 변화에 따라 농도유출이 비슷하게 변화됨을 보고하였다. 하지만 A지점은 B지점과 비교하여 강우강도 및 유량의 변화에 따라 SS 농도유출의 경향이 적은 것으로 관찰되었다. 이 결과는 임사면의 각도가 높고, 유로가 좁은 B지점에서 강우강도가 증

**Table 4.** Event mean concentration of A point

Event number	EMC(SS) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(BOD) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(COD <sub>Mn</sub> ) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(POC) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(DOC) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(TOC) mg·L <sup>-1</sup>
Event1 (11th on Mar.)	5.18	1.51	2.29	0.30	1.40	1.70
Event2 (22th on Jul.)	2.38	2.25	3.79	0.21	3.71	3.93
Event3 (3rd on Aug.)	0.60	1.19	1.62	0.03	2.63	2.66
Event4 (21th on Aug.)	5.17	1.92	3.00	1.09	4.08	5.17
EMC average	3.33	1.72	2.68	0.41	2.96	3.37

가함에 따라 많은 양의 토사가 유출된 것으로 사료된다. Kang et al.(2009)의 연구에 따르면 산림의 유출수 측정 시 강우강도에 따라 SS의 농도가 높게 유출되었으며, 강우강도와 유출농도와의 상관성이 높음을 보고하였다. 또한, 기저유량은 A지점 20 m<sup>3</sup>/h, B지점 37 m<sup>3</sup>/h으로 산출되었으며, 유역면적이 큰 A지점보다 B지점의 기저유량이 높게 나타났다. 반면, 강우가 시작되고 침투유량은 A지점이 B지점보다 높게 관찰되었으며, A지점은 침투유량에서 기저유량까지 도달하는 시간이 약 4시간이 걸리는 반면, B지점은 강우종료 2시간 전부터 점차 유량의 감소가 관찰되었다. 유역면적의 크기에 따라 모니터링 지점까지 강우유출수가 도달하는 유달시간에 의해 유출 특성이 나타났으며, 강우강도의 증가에 따라 유량의 변동폭도 증가할 것으로 사료된다.

A지점과 B지점의 유출농도경향을 파악하기 위해 4 event의 농도를 분석하였다. A지점의 BOD<sub>5</sub>의 EMC평균농도는 1.72 mg/L, COD<sub>Mn</sub>은 2.68 mg/L, SS는 3.33 mg/L, DOC는 2.96 mg/L POC는 0.41 mg/L 와 TOC는 3.37 mg/L로 분석되었다. B지점의 BOD<sub>5</sub>의 EMC평균농도는 3.81 mg/L, COD<sub>Mn</sub>은 6.46 mg/L, SS는 9.67 mg/L, DOC는 4.66 mg/L POC는 0.85 mg/L와 TOC는 5.51 mg/L로 나타났다(Table 4, 5). Kang et al.(2009)에 따르면 임야유역에서 발생하는 EMC 농도는 BOD 1.53 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 3.86 mg/L와 SS 31.7 mg/L로 보고하였으며, Yur and Kim(2005)의 연구 결과 또한 SS를 제외한 항목에서 비슷한 범위를 나타냈다. Kang et al.(2009)의 연구에 따르면 3영급 천연림에서의 모니터링을 실시하였으며, 9.75 mm/hr의 높은 강우강도 시 SS

**Table 5.** Event mean concentration of B point

Event number	EMC(SS) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(BOD) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(COD <sub>Mn</sub> ) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(POC) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(DOC) mg·L <sup>-1</sup>	EMC(TOC) mg·L <sup>-1</sup>
Event1 (11th on Mar.)	15.13	2.34	4.08	0.46	2.74	3.20
Event2 (22th on Jul.)	3.17	5.24	7.66	0.37	6.46	6.84
Event3 (3rd on Aug.)	1.20	2.48	3.09	0.06	3.17	3.23
Event4 (21th on Aug.)	19.16	5.17	11.00	2.51	6.27	8.78
EMC average	9.67	3.81	6.46	0.85	4.66	5.51

**Table 6.** Correlation analysis of A point

	Rainfall	Flowrate	SS	BOD	COD <sub>Mn</sub>	POC	DOC
Flowrate	0.762						
	0.000						
SS	0.125	0.389					
	0.502	0.031					
BOD	0.243	0.442	-0.161				
	0.188	0.013	0.388				
COD <sub>Mn</sub>	0.442	0.575	0.017	0.889			
	0.013	0.001	0.926	0.000			
POC	0.232	0.344	0.754	-0.214	0.024		
	0.208	0.058	0.000	0.247	0.898		
DOC	0.195	0.072	-0.534	0.708	0.669	-0.524	
	0.294	0.698	0.002	0.000	0.000	0.002	
TOC	0.243	0.129	-0.457	0.723	0.719	-0.409	0.991
	0.187	0.491	0.010	0.000	0.000	0.022	0.000

유출이 평균 31.7 mg/L로 나타났다고 보고하였다. A 지점과 B 지점 모두 다른 논문들과 비교하여 SS의 유출이 적게 나타났지만, B 지점은 강우강도가 8.9 mm/hr까지 증가할 시 평균 19.16 mg/L의 SS가 유출되어, 강우강도에 따라 SS의 값이 크게 유출되었다.

**3.3. EMC 및 강우특성과의 상관성**

총 4회의 모니터링을 통해 관찰된 A 지점과 B 지점의 농도 및 유량은 강우량과 강우강도의 변화와 유사하게 나타났다. Lyou et al.(2006)에 따르면 산림지역은 강우량 및 강우강도에 따른 영향이 크며, 강우량 및 강우강도

**Table 7.** Correlation analysis of B point

	Rainfall	Flowrate	SS	BOD	COD <sub>Mn</sub>	POC	DOC
Flowrate	-0.333						
	0.067						
SS	0.740	-0.467					
	0.000	0.008					
BOD	-0.015	0.576	-0.065				
	0.936	0.001	0.730				
COD <sub>Mn</sub>	0.315	0.489	0.183	0.878			
	0.084	0.005	0.326	0.000			
POC	0.339	-0.171	0.489	0.569	0.585		
	0.062	0.359	0.005	0.001	0.001		
DOC	-0.079	0.600	-0.125	0.931	0.825	0.540	
	0.674	0.000	0.503	0.000	0.000	0.002	
TOC	-0.038	0.545	-0.065	0.934	0.837	0.613	0.996
	0.841	0.002	0.728	0.000	0.000	0.000	0.000

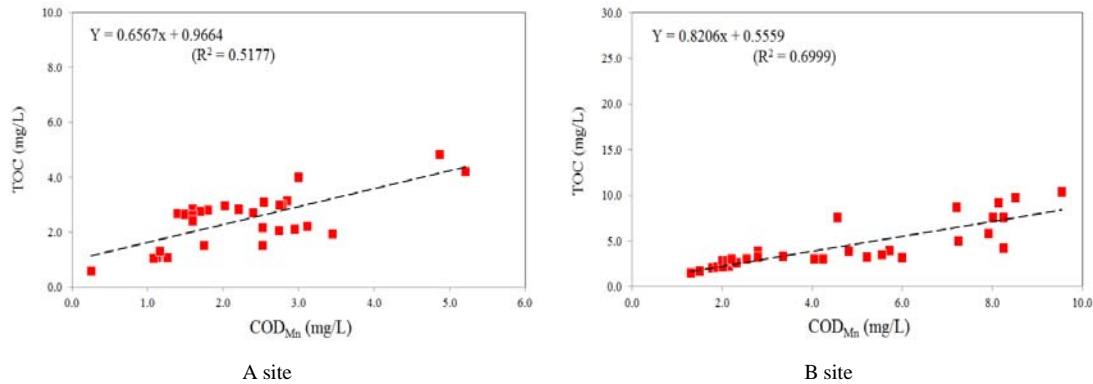


Fig. 3. Regression analysis of A and B point.

의 증가에 따라 유출농도가 증가되었음을 보고하였다. 유량 및 분석항목별 다각적인 해석을 위해 강우량, 유량 및 분석 항목간의 상관관계를 분석하였으며 결과는 Table 6과 Table 7에 나타났다. 상관분석은  $0 \leq P\text{-value} < 0.05$ 에서 유의성을 갖고  $1 \geq R\text{-value} > 0$ 에서 1에 가까울수록 영향이 크다(Kang et al., 2009). A지점은 유량과 BOD와 COD가 유의성이 관찰되었으며, BOD와 COD<sub>Mn</sub>, DOC 및 TOC가 유의성이 높게 나타났다. 특히, TOC-DOC의 상관관계가 유의성 0.991로 영향이 가장 높은 것으로 분석되었다. B지점은 BOD, COD<sub>Mn</sub>, DOC 및 TOC와 유량과 유의성을 띄며 R-value가 각각 0.576, 0.489, 0.600 및 0.545로 나타나 유량에 증가에 따라 유기물 농도의 변화가 관찰되었다. 또한, SS를 제외한 전반적인 항목별 농도의 증가가 총괄적 지표인 TOC와 유의성이 나타났으며, DOC의 유의성이 0.996으로 1에 가까워 B지점 또한 용존성 오염원의 영향이 큰 것으로 관찰되었다. 반면, A지점과 다르게 TOC-POC의 상관관계도 0.613으로 유의성을 나타냈다. 강우 시 산림유출수내 유기물 총괄적지표인 TOC 발생은 용존성 유기물이 큰영향을 끼치며, 유역평균경사도 및 유로의 폭 등의 산림특성에 따라 입자성의 유기물의 영향이 관찰되는 것으로 분석되었다.

### 3.4. COD<sub>Mn</sub> & TOC 농도의 상관관계

유기물 오염원 평가지표인 BOD와 COD는 오랜 측정 시간과 오염원의 발생 등의 문제로 대안 분석방법을 찾고 있다. 수계관리와 관련하여 유럽 및 선진국에서는

COD기반의 유기물 지표의 신뢰성을 보완하기 위해 TOC의 관리의 중요성이 부각되고 있다(Choi et al., 2012; Choi et al., 2000). 국내에서도 수계 유기물에 대한 수질항목을 COD<sub>Mn</sub>에서 TOC로 전환하는 단계에 있다. 두 항목의 상관관계 분석을 수행한 결과, 기존 수질항목인 COD<sub>Mn</sub>을 이용한 각각 예측 TOC 회귀식은 A지점  $TOC = 0.6567COD_{Mn} + 0.9664$  ( $R^2 = 0.5177$ ), B지점  $TOC = 0.8206COD_{Mn} + 0.5559$  ( $R^2 = 0.6999$ )로 산출되었다. 식은 COD<sub>Mn</sub> 농도값을 통해 TOC의 농도를 예측이 가능하다. Lee et al.(2016)에 연구에 따르면 5년 동안 강과 호소의 모니터링을 실시한 결과 COD<sub>Mn</sub>-TOC의 결정계수가 0.57~0.87의 범위에서 분석되었다. 3년 동안 오수천 유역의 COD-TOC의 회귀식 분석에서도 0.629~0.866으로 결정계수가 분석되었다. 결정계수를 높이기 위해 TOC와 상관성이 없는 인자들의 제외와 실험분석에 영향을 미치는 인자들의 영향에 대해서 보고하였다(Park et al., 2014). 본 연구에서도 다소 낮은 0.5177(A지점), 0.6999(B지점)의 결정계수가 분석되었으며, 다른 유역 등에 적용하기 위해서는 TOC와 상관성이 없는 인자들의 영향에 대한 추가적인 적용이 필요할 것으로 사료된다.

## 4. 결론

본 논문은 산림지역의 강우유출수의 특성을 파악하고, 강우특성이 다른 2지점의 유출특성을 분석하였다. 또한, 통계분석을 통해 강우특성과 EMC농도의 상관분석 및



COD<sub>Mn</sub>-TOC간의 회귀식을 도출하였다. 산림지역의 특성에 따라 유출수의 유출특성을 비교하기 위해, 유역면적, 유역평균경사도, 유역표고 및 유로의 폭이 다른 2지점에서 모니터링 하였다. A지점의 산림특성은 유역면적 2.937 km<sup>2</sup>, 유역평균경사도 31°, 유로 폭 3.2 m 및 유역표고 469 m이며 B지점은 유역면적 0.227 km<sup>2</sup>, 유역평균경사도 37° 유로 폭 1.2 m 및 유역표고 300 m으로 조사되었다.

A지점은 강우강도 및 유량의 변화에 따라 유출 농도 경향이 뚜렷하지 않지만, B지점은 유출강우강도 및 유량에 따라 유출농도의 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 임사면의 각도가 높고, 유로의 폭이 좁은 B지점에서 강우강도가 증가함에 따라 다량의 토사 및 오염원이 유출된 것으로 사료된다. 또한, 유출특성은 강우시작 4시간 후 첨두유량에 도달하였고, 첨두유량에서 기저유량까지 약 4시간 후 도달하였다. 반면 B지점은 강우시작 1시간 후 첨두유량에 도달하였으며, 강우종료 2시간 전부터 점차 유량의 감소되었다. 이 결과는 유역에서 모니터링 지점까지 도달하는 유달시간에 기인한 것으로 판단되며, 강우강도의 증가에 따라 유량의 변동폭도 증가할 것으로 사료된다.

A지점의 BOD<sub>5</sub> EMC평균농도는 1.72 mg/L, COD<sub>Mn</sub>은 2.68 mg/L, SS는 3.33 mg/L, DOC는 2.96 mg/L POC는 0.41 mg/L 와 TOC는 3.37 mg/L, B지점의 BOD<sub>5</sub>의 EMC평균농도는 3.81 mg/L, COD<sub>Mn</sub>은 6.46 mg/L, SS는 9.67 mg/L, DOC는 4.66 mg/L POC는 0.85 mg/L 와 TOC는 5.51 mg/L로 분석되었다. 분석된 EMC농도와 강우특성과의 상관분석을 통해 TOC와 DOC의 상관성이 각각 R-value 0.991, 0.996으로 가장 높게 산출되었다. 또한, B지점은 TOC-POC의 상관성이 0.613으로 나타나 POC의 영향도 함께 나타나는 것으로 분석되었다. 반면, A지점은 TOC-POC의 상관성이 -0.409로 TOC가 증가 시 POC의 영향이 적은 것으로 분석되었다. 강우 시 산림유출수 내 용존성 오염원이 TOC 발생에 큰 영향을 끼치며 유역평균경사도 및 유로의 폭 등의 산림특성에 따라 POC의 영향이 변화되는 것으로 사료된다.

회귀분석을 통해 두 지역의 COD<sub>Mn</sub>-TOC 상관식을 도출하였으며 A지점과 B지점 각각  $TOC=0.6567COD_{Mn}+0.9664$  ( $R^2:0.5177$ ),  $TOC=0.8206COD_{Mn}+0.5559$

( $R^2:0.6999$ )으로 산출되었다. 식을 통해 COD<sub>Mn</sub> 농도값을 통해 TOC의 농도를 예측할 수 있을 것이다. 다만, 다소 낮은 결정계수가 분석되어 TOC와 상관성이 없는 인자들의 대한 추가 적용이 필요할 것으로 판단된다. 본 논문은 산림지역 관리대책과 비점오염물질의 원단위 산정을 위한 기초자료로 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2013학년도 (2016년) 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

### REFERENCES

- Choi, D. H., Jung, J. W., Yoon, K. S., Lee, K. S., Choi, W. J., Lim, S. S., Park, H. N., Yim, B. J., Hwang, T. H., 2012, Estimation of TOC concentration using BOD, COD in runoff from paddy fields, J. Korean Soc. Water Environ., 28(6), 813-818.
- Choi, J. Y., Lee, S. Y., Kim, L. H., 2009, Wash-off characteristics of NPS pollutants from forest landuse, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 9(4), 129-134.
- Choi, K. S., Kim, B. C., Kim, H. B., Sa, S. H., 2000, Relationships between organic carbon and COD<sub>Mn</sub> in a deep reservoir, lake Soyang, Korea, Kor. J. Limnol., 33(4), 328-335.
- Chung, W. J., Lee, I. K., Lee, S. J., Chang, S. W., 2014, Assessment of constructed wetland of removal efficiency of non-point source pollution by rainfall characteristics in wolmun stream, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 14(1), 327-332.
- Han, J. H., An, K. K., 2008, Water quality variation dynamics between artificial reservoir and the effected downstream watershed: The Case study, Kor. J. Limnol., 41(3), 382-394.
- Hur, J., Chung, N. J., Shin, J. K., 2007, Spectroscopic distribution of dissolved organic matter in a dam reservoir affected by turbid storm runoff, Environ. Monit. Assess., 133(1-3), 53-67.
- Jeong, J. J., 2011, Hydrologic controls on the export of dissolved and particulate organic carbon in a forest stream investigated by high-frequency in-situ monitoring, Department of Forest Environment Protection Graduate School, Kangwon National University.

- Kalbitz, K., Schemerwitz, J., Schwesig, D., Matzner, E., 2003, Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties, *Geoderma*, 113 (3-4), 273-291.
- Kang, C. G., Lee, S. Y., Marla, C. M., Kim, L. H., 2009, Application of free water surface constructed wetland for treating the agricultural runoff, *J. Environ. Impact Assess.*, 25(1), 63-76.
- Kang, C. G., Lee, S. Y., Gorme, J. B., Lee, J. U., Kim, L. H., 2009, Determination of EMC and washoff characteristics of stormwater runoff from broad-leaved forest areas, *J. Environ. Impact Assess.*, 18(6), 393-399.
- Kawasaki, M., Ohte, N., Katsuyama, M., 2005, Biogeochemical and hydrological controls on carbon export from a forested catchment in central Japan, *Ecol. Res.*, 20(3), 347-358.
- Kim, G. H., Kwon, S. H., 2005, Estimation of BOD loading of diffuse pollution from agricultural-forestry watersheds, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 21(6), 617-623.
- Kim, J. G., Sin, M. S., Chang, C. W., Jung, S. M., Kim, B. C., Kim, J. G., 2007, Comparison of TOC and DOC distribution and the oxidation efficiency of BOD and COD in several reservoirs and rivers in the Han River system, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 23(1), 72-80.
- Kim, M. H., Ryu, H. J., Kim, M. S., Lee, W. H., 2002, *Hydraulics*, First ed, Dong Hwa Technology, Korea.
- Kim, S. J., Kim, J., Kim, K., 2010, Organic carbon efflux from a deciduous forest catchment in Korea, *Biogeo-science*, 7, 1323-1334.
- Korean Ministry of Environment, 2006, *Water Quality Management Plan*.
- Lee, H. H., Ha, S. K., Hur, S. O., Jung, K. H., Kim, W. T., Kim, K. H., 2006, Characteristics of runoff and percolation on sloping land with different soil textures, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 39(5), 268-273.
- Lee, J., Lee, S., Yu, S., Rhew, D., 2016, Relationships between water quality parameters in rivers and lakes : BOD5, COD, NBOPs, and TOC, *Environ. Monit. Assess.*, in progress.
- Liu, C. P., Sheu, B. H., 2003, Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, streamflow, soil solution, and stream water at the Guandaushi subtropical forest in taiwan, *Forest Ecol. Manag.*, 172, 315-325.
- Lyoo, C. W., Shin, Y. C., Heo, S. G., Lim, K. J., Choi, J. D., 2006, Characteristics of nonpoint source pollutant loads from forest watershed, *Korean Commit. Irrig. & drain.*, 13(1), 63-71.
- Michalzik, B., Kalbitz, K., Park, J. H., Solinger, S., Matzner, E., 2001, Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen - A synthesis for temperate forests, *Biogeochemistry*, 52(2), 173-205.
- National Institute of Environmental Research, 2010, *Analysis of water and non-point pollutants balance in the Keum river*.
- Park, J. H., Moon, M. J., Han, S. W., Lee, H. J., Jung, S. J., Hwang, K. S., Kim, K. S., 2014, Application of regression analysis model to TOC concentration estimation, *J. environ. Impact Assess.*, 23(3), 187-196.
- Raymond, P. A., Saiers, J. E., 2010, Event controlled DOC export from forested watersheds, *Biogeochemistry*, 100(1), 197-209.
- Tao, S., 1998, Spatial and temporal variation in DOC in the Yichun River, China, *Water Resour. Res.*, 32(7), 2205-2210.
- Yur, J. H., Kim, G. H., 2005, Comparison of discharge characteristics of NPS pollutant loads from urban, agricultural and forestry watersheds, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 23(2), 184-189.
- Zhang, S., Lu, X. X., Sun, H., Han, J., Higgitt, D. L., 2009, Geochemical characteristics and fluxes of organic carbon in a humandisturbed mountainous river (the Loudingjiang River) of the Zhujiang (Pearl River), China, *Sci. Total Environ.*, 407(2), 815-825.