



## 산림논복합 소유역에서의 비점부하 강우유출 특성 및 EMC 산정

### Characteristics and EMCs of NPS Pollutants Runoff from a Forest-Paddy Composite Watershed

송인홍\* · 강문성\*\*,\* · 황순호\*\* · 송정현\*\*

Song, Inhong · Kang, Moon-Seong · Hwang, Soon-Ho · Song, Jung-Hun

#### ABSTRACT

This study was aimed to characterize non-point source (NPS) pollutant runoff and estimate event mean concentrations (EMCs) from a small rural watershed located at the headwater area of the Gyeongan stream. The study watershed consists of the two major landuse, forest (72 %) and paddy field (28 %). The nine rainfall events ranging from 18.5 to 192.6 mm in amount were monitored in this study. Stream flow was measured at the watershed outlet using a water level gauge, while a number of water samples for each event were collected and analysed for water quality. Event pollutant loads varied greatly depending on rainfall events varying from 22.6 to 3,134.2 mg/L, 0.32 to 24.56 mg/L, 0.090 to 1.320 mg/L, and 2.3 to 149.8 mg/L for SS, TN, TP, and COD, correspondently. The respective mean EMCs were estimated by 104.2, 1.00, 0.168, and 7.9 mg/L. The Pearson correlation analysis showed that COD EMC was significantly correlated with those of SS, TN, and TP. Rainfall runoff ratio appeared to be negatively correlated with EMCs of SS, TP, and COD, although not statistically significant. The event loads from the largest rainfall was greater than the sum of those from the remaining eight events. The study results suggest that the appropriate management of intensified storm events are of greater importance in curbing NPS loads, while the estimated EMCs provide base data for the unit pollutant loads determination for the forest-paddy composite upstream watershed.

**Keywords:** EMC; NPS; pollutant; rural watershed; forest; paddy

## 1. 서 론

지난 수십 년 동안 하수처리장 보급, 배출기준 강화, 수처리 기술 발전으로 점원 부하량은 지속적으로 감소되어 온 반면, 토지이용 증가에 따른 비점오염부하는 꾸준히 증가해 왔다. ME (2006)의 물환경기본계획에 따르면, 전체 오염부하 중 비점오염 부하 비중은 '03년 기준 42~69 %를 차지하고, '15년에는 그 비중이 지속적인 증가 추세에 있다. 비점오염부하 배출은 강우특성, 토지이용, 토양, 오염원 종류 등에 따라 매우 다양한 배출특성을 보여 배출부하량 산정 및 특성 파악이 어려운 특징이 있다. 농촌유역에서 배출되는 비점오염부하의 경우 점오염원에 비해 농도가 낮지만 유출량이 커서 유역 오염부하에 큰 비중을 차지하고, 하천 및 호수의 부영양화에 영향을 미칠 수 있다 (Yoon et

al., 2002). 오염총량관리제도의 확대시행에 따른 비점부하 산정의 정확도 개선에 대한 지속적인 요구에 부응하여 합리적인 배출부하 산정을 위해서는 토지이용형태 및 강우조건별 비점오염 부하 자료의 장기적인 축적이 필요하다 (Shin, 2007).

유역에서 발생한 오염부하가 하천의 특정지점에 도달하기까지는 다양한 기작을 거쳐 저감하게 되는데, 유역 특성에 따른 유출 오염부하 특성 및 정량화는 오염총량관리제에서 목표수질 설정하고 부하량을 할당하는데 중요한 자료가 된다. 유역의 토지이용과 강우특성은 비점오염부하에 영향을 미치는 중요한 인자들이다. 비점오염물질 농도는 일반적으로 강우초기에 높고 후반기 갈수록 낮아지는 특성이 있다 (Shin et al., 2004). 또한 비점오염원은 발생량, 배출시기 등 배출특성을 파악하는 것이 어려워 효과적인 관리를 위해서는 기상 및 수문 특성에 따른 토지이용별 현장 모니터링을 통한 실측자료의 확보가 매우 중요하다 (HRERC, 2009; Yoon et al., 2002).

국내의 농촌비점 연구는 초기에 논 및 소규모 농촌유역을 중심으로 진행되다가, 2000년대 들어 4대강 수질개선부담금을 이용한 환경기초조사사업으로 대유역 단위 장기 비점 모니터링 사업이 진행되어 왔다. Koo (1988)는 유역 내 토지이용상태가 수

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농업생명과학연구원  
 \*\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부·농업생명과학연구원 겸임연구원  
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582  
 Fax: +82-873-2087  
 E-mail: mskang@snu.ac.kr

2012년 2월 1일 투고  
 2012년 3월 19일 심사완료  
 2012년 3월 20일 게재확정

질에 미치는 영향에 대해 조사하였고, Shin and Kwun (1990)은 논에서 질소와 인의 유입 및 유출량에 대해 조사한 바 있다. Yoon et al. (2003)은 논에서의 영양물질 수지를 분석한 바 있고, Noh et al. (2006)은 황성호 유역을 대상으로 강우/비강우시 오염물질 유출특성을 조사한 바 있다. Jin et al. (2010)은 논 유출수의 BOD EMC의 확률분포에 관한 연구를 수행한 바 있고, Lee et al. (2009)은 주차장을 대상으로 강우계급별 EMC를 산정한 바 있다.

지금까지의 비점연구는 주로 장기적 유출 모니터링 위주로 이루어졌고, 일부 강우사상별로 수행된 연구도 논이나 도심지역을 대상으로 이루어져 왔다. 반면, 유역 단위로 산림 및 농경지 복합 유역으로부터의 강우 사상별 EMC산정에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. Kim (2008)는 농지-임야로부터의 발생하는 유출특성을 조사한 바 있으나 지표미생물을 대상으로 하였고, Kang et al. (2009)는 활엽수 산림유역을 대상으로 비점 강우 유출 특성 및 EMC를 산정한 바 있다. 산림농경지 복합유역으로부터의 비점 유출은 그 농도에 있어서 농경지나 도심지역에 비해 낮지만, 농촌 상류지역에 광범위하게 분포함으로써 수체로의 오염부하 총량에 대한 기여는 매우 크다. 따라서 농촌 상류의 전형인 산림 및 논 복합 유역으로부터의 비점 유출 연구는 농촌 비점의 효과적인 저감을 위해 필수적이며, 특히 강우 사상별 유출 조사를 통한 EMC 산정은 산림농 복합유역의 비점 원단위 산정의 기초자료를 제공한다는 측면에서 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 산림과 논으로 구성된 소유역을 대상으로 비

점부하 유출 특성을 조사하고, 강우사상별 EMC를 산정하여 강우량, 강우강도 등 강우특성과 상관분석하고, 또한 강우사상별 비점오염 부하량을 산정하는데 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상유역

본 연구에서는 토지이용이 산림과 논이 우점하고 있는 유역인 경안천 상류에 위치한 경기도 광주시 도척면 방도리에 소재한 소유역을 연구대상지로 선정하였다. 연구 대상 유역은 경안천 최상류에 위치하여 개발이 거의 진행되지 않아 하천수질도 매우 양호한 수준이다. 산림농 복합유역은 농촌상류의 전형적 형태의 하나로써 단위 면적당 오염부하는 상대적으로 작으나 그 광범위한 분포 특성상 전체 오염부하 기여도는 크기 때문에 이로부터의 강우 유출 특성 파악이 중요하기 때문에 대상유역으로 선정하였다. Fig. 1은 환경부 중분류 토지피복지도를 이용하여 대상 유역의 토지피복상태를 분류하여 보여주고 있다. 대상유역의 주요 토지 이용은 산림과 논으로 각각 18 ha (72 %)와 7 ha (28 %)의 면적을 차지하고, 총 유역면적은 25.1 ha인 전형적인 논 우점 산지농촌 소유역이다. 대상 유역에 가장 근접한 이천 기상대 30년 평균 기후자료 (1971~2000년)에 따르면 연 평균 강수량 및 기온은 각각 약 1,300 mm과 11.2 °C로 나타났다 (기상청, [http://www.kma.go.kr/weather/climate/average\\_30years.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_30years.jsp)).

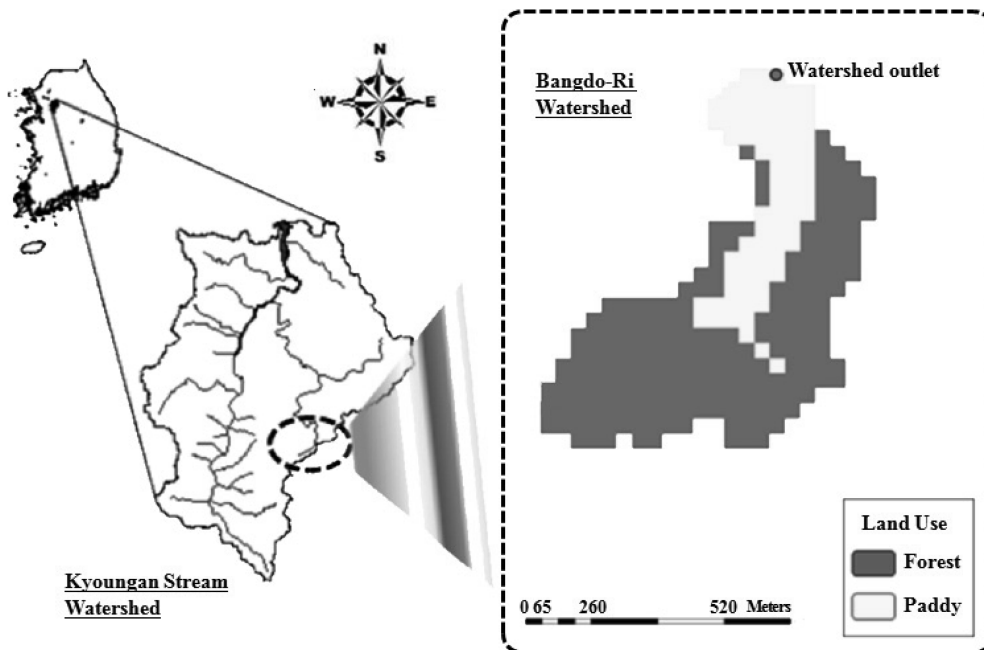


Fig. 1 Location and land use of the study watershed

## 2. 수문 및 수질 모니터링

### 가. 수문 모니터링

시험유역에서의 강우에 따른 유출량을 측정하기 위하여 시험 유역의 말단에 수문관측소를 설치하여 운영하였으며, 강우량과 하천 유출량을 연속 측정하였다.

시험유역의 강우량을 측정하기 위해 0.1 mm 단위로 측정이 이루어지는 Tipping bucket형 강우계 (Isco 674 Rain Gauge, Teledyne Isco, Inc., USA)를 수문관측소에 설치하여 이용하였다. 강우계 자료 수집 및 기기 점검은 격주단위로 실시하였으며, 강우자료 결측시 인근 이천관측소 강우자료를 이용하여 보완하였다.

시험유역으로부터의 강우 유출량 측정을 위해 유역말단에 수위관측장비를 설치하였다. 부자식 수위계 (Thalimedes, OTT Hydrometrie, Germany)를 이용하여 하천의 수위를 10분 단위로 연속 측정하였으며, 이를 수위-유량관계식을 이용하여 하천 유량으로 환산하였다. 하천의 수위-유량관계곡선을 도출하기 위해 강우시 및 평상시 현장 유량 조사를 통해 다양한 하천 수위에 대한 유량을 측정하여 수위-유량 관계식을 유도하는데 활용하였다. 유량조사는 평시에는 주 1회 단위로 실시하였고, 강우시에는 하천 수위를 기준으로 중·고수위 자료를 포함하도록 하천 유량을 측정하였다. 현장 유량 측정은 하천횡단면의 변화를 고려하고 프로펠러형 및 마그네틱 유속계를 이용하여 수심에 따라 1점 및 2점 유속측정법을 적용하여 측정하였다.

강우시 조사를 위하여 총 강우량이 2.54 mm 이상인 강우사상을 대상으로 선행건기일수를 고려하여 조사대상 강우사상을 선정하여 조사를 실시하였다. 이는 미국 환경청 (USEPA)의 청정수법 (Clean Water Act, CWA)에 의거한 NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System)에서의 강우사상에 대한 정의에 따른 것이다 (USEPA, 1993). 선행건기일수를 고려한 이유는 연속강우 사상시 비점오염 부하가 감소되는 특성이 있기 때문에 강우 사상별 비점부하 산정에 있어서 연속강우의 영향을 배제하기 위해서였다.

### 나. 수질 모니터링

강우시 대상 유역으로부터의 유출수 수질 모니터링을 위하여 하천 수위 측정지점과 동일 지점에 수질측정지점을 운영하였다. 수질측정지점에서 하천 유출수 시료 채취를 위하여 자동채수기

(ISCO 6712 Portable Sampler, Telydyne Isco, Inc., USA)를 설치하였다. 자동채수기는 강우계와 연계하여, 15분에 1 mm 이상의 강우사상 발생시 자동 채수가 시작되도록 설정하여 운영하였다. 하천수 시료 채취 간격은 비점오염물질 유출 특성상 강우 초기 오염물질 농도가 높은 점을 고려하여, 강우 초기에는 10분 간격으로 1시간 동안 하천수 시료를 채취하고, 이후 강우유출이 종료시점까지 시간 간격을 1시간~2시간 사이로 탄력적으로 운영하여 수질 시료를 채취하였다. 현장에서 수집된 수질시료는 실험실에 운반되어 수질분석이 이루어질 때까지 얼음이 채워진 아이스박스에 냉장 보관하였다.

### 다. 수질 분석 방법

수질분석은 서울대학교 농업생명과학공동기기원 (NICEM)에 위탁하여 실시하였다. 수질 시료의 분석은 환경부 수질오염공정시험법 (ME, 2002)에 따라 총 8개 항목에 대해 실시하였으며, 주요 수질항목인 부유물질 (suspended solid, SS), 총질소 (total nitrogen, TN), 총인 (total phosphorus, TP), 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand, COD)에 대한 수질 분석 방법은 Table 1에서와 같다.

## 3. EMC 산정 및 통계분석

### 가. EMC 산정

강우 사상별로 유출되는 비점오염 부하는 하천 유량에 오염물질 농도를 곱하여 산정하였다. 총 강우사상 유출부하를 총 유출량으로 나누면 유량가중평균농도, 즉 EMC (Event Mean Concentration)를 산정할 수 있으며, 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다 (Sansalone and Cristina, 2004). EMC는 강우 사상에 따른 유출 오염물질 농도를 나타내는 대표적인 방법으로 유량을 가중평균하는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 산술평균농도보다 높게 나타나는데, 이는 강우 발생초기의 농도가 높게 나타나는 초기세척효과 (first flush effect) 때문인 것으로 알려져 있다 (Sansalone and Cristina, 2004).

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} q(t) \cdot c(t)}{\int_0^{t_r} q(t)} \quad (1)$$

Table 1 Analytical methods for each water quality parameter

Item	Analytical method	Equipment
SS	Glass-fiber filter	Standard methods for water quality analysis (Ministry of Environment)
TN	Kjeldahl method	Kjeltec auto 1035/1038 system, Tecator AB, Sweden
TP	ICP-Atomic Emission Spectroscopy	ICPS-100IV, Shimadzu, Japan
COD	COD <sub>MN</sub>	Standard methods for water quality analysis (Ministry of Environment)

여기서, EMC는 강우사상 유량가중평균농도 (mg/L), M은 유출 부하량, V는 유출량, q (t)는 시간 t에서의 유출량 (m<sup>3</sup>/day), c (t)는 시간 t (hr)에서의 오염물질 유출농도 (mg/L), 그리고 t<sub>r</sub>은 유출 종료시간 (hr)이다.

나. 통계분석

본 연구에서 수집된 수질자료를 Box 그래프로 생성하고, 강우 특성과 수질항목간의 Pearson 상관관계 분석을 위해 PASW Statistics 18 (IBM® SPSS® software, USA) 통계 프로그램을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 2008년 7월에서 10월까지 약 4개월 동안 발생한 강우 사상을 대상으로 비점부하 모니터링을 수행하고, 강우 특성 분석 및 강우 사상별 EMC를 산정하였다. 선행무강수일수 (Antecedent Non-Rainy Days, ANRD)와 강우량을 고려하여 총 9개 강우사상에 대해 현장 수문 및 수질 조사를 실시하였고, 강우사상별로 비점 부하 및 유량가중평균농도를 산정하였다.

1. 수문 모니터링

가. 관측 강우사상의 강우 특성

조사된 9개 강우사상의 강우량, 지속시간 등 강우 특성을 요약

Table 2 Rainfall characteristics of the observed rainfall events

Event ID	Date	ANRD <sup>1</sup> (days)	Total rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Runoff ratio
E1	2008/07/16	3	28.5	8.8	3.2	0.225
E2	2008/07/19	2	131.5	49.8	2.6	0.365
E3	2008/07/24	3	192.6	77.0	2.5	0.360
E4	2008/07/30	3	21.5	8.8	2.4	0.058
E5	2008/08/12	9	18.5	9.8	1.9	0.085
E6	2008/08/18	2	41.2	13.2	3.1	0.169
E7	2008/08/22	3	69.0	26.7	2.6	0.411
E8	2008/09/01	8	50.1	25.2	2.0	0.129
E9	2008/09/20	17	31.3	10.8	2.9	0.214
Overall statistics for the observed 9 rainfall events						
Average		5.7	64.9	25.6	2.6	0.224
Max		17	192.6	77.0	3.2	0.411
Min		2	18.5	8.8	1.9	0.058
STDEV		4.9	59.2	23.5	0.4	0.129

<sup>1</sup>ANRD represents Antecedent Non-Rainy Days.

하면 Table 2와 같다. 조사대상 강우사상의강우량은 18.5 mm에서 192.6 mm의 범위였고, 평균 강수량은 56.6 mm이었다. 선행무강수일수는 2일에서 17일의 범위를 보였다. 강우지속시간은 8.8시간에서 77시간의 범위였고, 강우강도는 1.9 mm/hr에서 3.23 mm/hr의 범위를 보였다. 강우사상별 유출율은 평균 22.4 %로 최소 5.8 %에서 최고 41.1 % 범위였고, 강우량 및 강우강도 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.

나. 수위-유량 관계 및 수문곡선

유출량 산정은 유역 말단에서 하천의 수위를 연속 측정하여 수행하였고, 이를 수위-유량 관계식을 이용하여 하천 유량으로 환산하였다. 수위-유량 관계식은 하천의 수위별 현장 측정된 하천 유량과 수위 사이의 관계곡선으로부터 유도하였다. Fig. 2는 수위-유량 관계곡선을 보여주고 있으며, 수위-유량 관계식의 결정계수는 0.93이었다.

Fig. 3은 조사기간 동안의 강우분포와 수위-유량관계식을 이

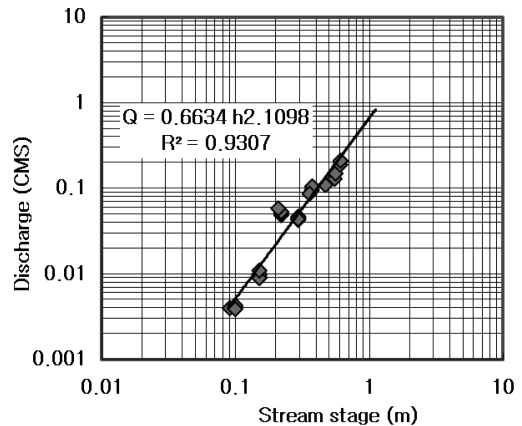


Fig. 2 Relationship between stream stage and discharge

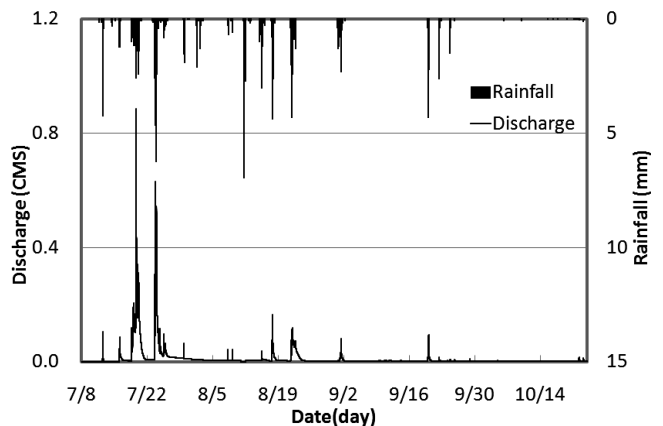


Fig. 3 Rainfall distribution and runoff hydrograph during the study period

용하여 하천 수위를 유량으로 환산한 수문곡선을 보여주고 있다. 이 기간 동안 수문곡선에 반응을 나타낸 강우사상은 총 12회 관찰되었으며, 총 강우량은 713.8 mm이었다. 7월 말에 집중호우로 상대적으로 큰 강우사상이 2회 조사되었고, 중·소규모 강우사상은 7월에서 9월 사이에 전반적으로 분포하고 있다.

## 2. 수질 모니터링

Table 3은 조사 대상 9개 강우사상에 대한 수질 조사 자료를 바탕으로 수질 특성을 통계량으로 보여주고 있다. 강우 유출수의 주요 수질항목은 강우유출 초기에 농도가 매우 높은 값을 보였으며, 이후 농도가 급격하게 감소하는 형태를 보였다. 이는 비점 오염물질의 초기세척효과로써 비점 유출에서 일반적으로 발생하는 현상이다. 따라서 비점 부하 산정시에 이러한 효과를 고려하기 위해서는 수질 농도의 단순평균이 아닌 유량가중평균을 통한 EMC 산정이 필요하다 (Sansalone and Cristina, 2004; Kim et al., 2009).

강우 유출수의 SS 농도는 평균 111.6 mg/L로 강우사상별 평균값은 31.1-317.8 mg/L의 범위를 보였고, 최고 농도는 1,147.5 mg/L로 강우에 따라 농도변화가 큰 것으로 나타났다. 영양물질

농도는 TN이 평균 0.97 mg/L (0.12 mg/L-4.48 mg/L), TP가 평균 0.084 mg/L (0.016 mg/L-0.303 mg/L)로 전반적으로 낮았고 변화의 범위도 상대적으로 좁았다. 이는 연구대상 유역이 경안천 최상류에 위치하여 토지이용이 대부분이 산림으로 오염원이 거의 없고, 일부 농경지로부터의 영양물질 유출의 기여가 크지 않았기 때문인 것으로 판단된다. COD 농도는 2.0-47.4 mg/L의 범위로 평균 7.3 mg/L이었으며, SS 농도 변화와 유사한 경향을 보였다.

## 3. 강우사상별 비점 부하 및 EMC 산정

### 가. 강우사상 비점 부하 산정

비점부하는 하천 유량에 수질농도 측정값을 곱하여 계산하였고, 이를 강우사상 유출기간 동안 합산하여 강우사상 비점부하를 산정하였다. 다만, TP의 경우 E5~E9 강우사상에 대해 부득이하게 결측이 발생하였다. 이들 강우 사상에 대한 오염 부하량을 산정하기 위해 Gunnerson (1967)이 처음 제안한 유량-부하량 관계를 적용하였다. 유량-부하량 관계식은 강우사상 E1~E4로부터 실측한 유량 및 TP 농도자료를 회귀분석하였고, 유도된 유량-부하량 관계식,  $TP = 0.0201Q^{0.5652}$  (부하량 TP: kg/sec,

Table 3 Statistics of water quality over the nine observed rainfall events

Event ID	Water quality parameter						Event ID	Water quality parameter							
	pH	EC (μS/cm)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)		pH	EC (μS/cm)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)		
E1	Mean	6.8	71.0	35.0	1.43	0.107	6.6	E6	Mean	6.6	59.3	50.7	0.55	-	6.0
	SD <sup>1</sup>	0.2	13.1	59.4	0.30	0.050	3.3		SD	0.1	11.3	53.8	0.10	-	1.4
	Max	7.0	90.5	234.0	1.86	0.142	18.2		Max	6.8	71.1	170.7	0.71	-	8.4
	Min	6.5	48.8	5.0	0.84	0.071	4.1		Min	6.4	44.7	7.3	0.44	-	4.1
E2	Mean	6.5	36.0	79.2	1.32	0.055	7.4	E7	Mean	5.7	49.4	31.1	0.57	-	5.5
	SD	0.3	2.5	39.5	0.14	-	2.4		SD	0.2	9.7	31.1	0.20	-	2.2
	Max	6.7	41.2	147.0	1.50	0.055	12.2		Max	6.1	67.2	126.7	1.03	-	10.5
	Min	5.9	33.6	29.0	1.13	0.055	4.4		Min	5.4	38.4	5.3	0.25	-	2.3
E3	Mean	6.5	40.4	180.5	1.34	0.050	9.5	E8	Mean	6.8	59.2	32.8	0.54	-	5.5
	SD	0.2	8.3	183.4	0.34	0.019	5.4		SD	0.2	9.3	30.0	0.39	-	1.9
	Max	6.9	56.8	789.0	1.86	0.077	25.9		Max	7.1	82.0	97.5	1.37	-	9.0
	Min	5.9	28.5	9.0	0.84	0.038	3.6		Min	6.4	49.4	6.0	0.13	-	2.3
E4	Mean	7.0	55.0	317.8	1.38	0.110	14.7	E9	Mean	6.5	72.6	217.0	1.13	-	7.7
	SD	0.1	12.2	380.4	0.39	0.112	9.2		SD	0.1	14.8	332.5	1.39	-	1.3
	Max	7.3	84.2	1,043.0	1.89	0.303	35.0		Max	6.7	110.7	1,147.5	4.48	-	10.3
	Min	6.9	38.4	16.5	0.83	0.016	4.7		Min	6.3	60.0	7.5	0.12	-	4.9
E5	Mean	6.9	70.6	198.4	0.86	-	9.2	Overall	Mean	6.6	58.8	111.6	0.97	0.084	7.3
	SD	0.1	11.0	341.9	0.63	-	11.8		SD	0.5	15.7	204.0	0.65	0.078	5.5
	Max	7.0	107.1	1,133.0	2.43	-	47.4		Max	7.7	110.7	1,147.5	4.48	0.303	47.4
	Min	6.7	57.9	3.7	0.31	-	2.0		Min	5.4	28.5	3.7	0.12	0.016	2.0

<sup>1</sup>SD stands for Standard Deviation.

유량 Q: m<sup>3</sup>/sec)이었다. 이 식에 강우사상 E5~E9로부터 실측된 유량 자료를 적용하여 부하량을 산정하였다.

각 강우사상에 대한 수질 항목별 비점 부하량을 산정한 결과는 Table 4와 같다. 강우사상별 오염부하는 SS가 22.7-3,134.1 kg, TN이 0.32-24.56 kg, TP가 0.09-2.08 kg, COD가 2.3-149.8 kg의 범위를 보였다. 강우량이 가장 많았던 E3 강우사상으로 발생한 유출 부하량은 SS가 3,134.1 kg, TN이 24.56 kg, TP가 2.08 kg, COD가 149.8 kg으로서, 나머지 조사대상 강우

사상 전체 부하량의 합보다 큰 것으로 산정되었으며, 이는 집중호우 사상이 비점부하 유출에 미치는 영향이 크다는 것을 나타내었다.

강우사상별 강우량과 유출 오염 부하량과의 관계는 Fig. 4와 같다. 강우 사상별 오염 부하량은 강우량에 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 강우량과 부하량의 관계는 2차 방정식으로 표현할 수 있으며, 이는 강우량이 증가함에 따라 부하량 증가폭이 변화하는 비선형성을 의미한다. SS의 경우 강우량이 증가함에 따라 부하량 증가폭 또한 커지는 비선형성이 상대적으로 크게 나타났고, TN, TP, COD의 경우는 강우량과 부하량 관계가 선형적으로 변하는 것으로 나타났다. 이는 수질 농도에서도 나타났듯이 본 연구의 대상 유역이 최상류에 위치함으로써 오염원이 상대적으로 적게 분포하기 때문에 영양물질의 농도는 변화의 폭이 작은 반면, 강우량에 따른 SS의 농도는 큰 폭으로 변화했기 때문인 것으로 판단된다. TP의 경우 흡착성이 강해 입자에 부착하여 거동하는 특성으로 인해 SS와 유사한 경향을 보이는 것이 일반적인 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서는 강우량 증가에 따른 TP 부하량의 변화의 폭이 일정하게 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 토지이용이 대부분 산림과 일부 농경지로 구성되어 오염원이 작아 토립자에 부착된 인의 농도 또한 상대적으로 낮은 것이 한 원인으로 사료된다. 또한 TP 농도의 결측, 특히 고수위 TP 농도 자료의 부족은 고유량에서의 TP 부하량의 과소산정에 영향을 미친 것으로 보인다.

Table 4 NPS pollutant loads for each rainfall event

Event ID	Rainfall (mm)	Event pollutant loads (kg)			
		SS	TN	TP	COD
E1	28.5	81.4	2.30	0.20	12.4
E2	131.5	1,026.0	20.16	1.23	99.8
E3	192.6	3,134.1	24.56	2.08	149.8
E4	21.5	57.4	0.42	0.45	4.1
E5	18.5	22.6	0.32	0.18	2.3
E6	41.2	179.5	0.85	0.09	12.9
E7	69.0	172.9	3.97	0.26	38.1
E8	50.1	69.4	0.58	0.60	10.1
E9	31.3	355.9	1.50	0.24	14.6
Mean	64.9	566.6	6.07	0.419	38.2
Max	18.5	22.6	0.32	0.090	2.3
Min	192.6	3,134.1	24.56	1.320	149.8

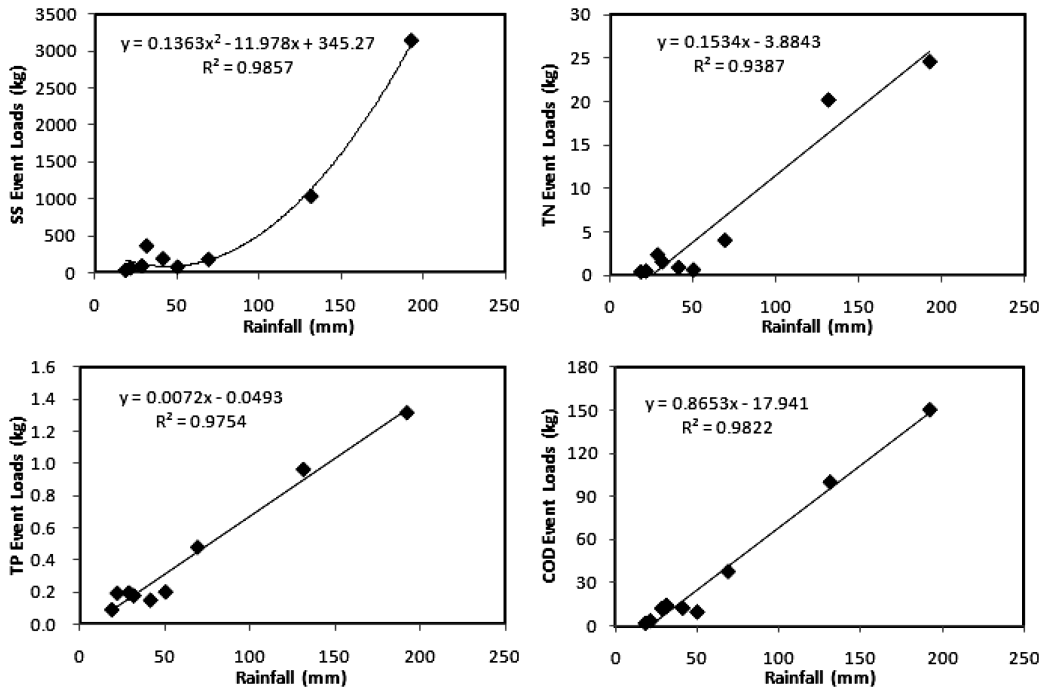


Fig. 4 Relationship between event rainfall amount and pollutant loads

나. EMC 산정

강우사상별 유량가중평균농도의 산정 결과는 Table 5와 같다. 총 9개 강우사상에 대한 각 수질항목의 평균 EMC는 SS, TN, TP, COD 순으로 각각 104.2, 1.00, 0.168, 7.9 mg/L이었다. 변화 범위는 EMC<sub>SS</sub>는 24.3~211.9 mg/L, EMC<sub>TN</sub>은 0.36~1.67 mg/L, EMC<sub>TP</sub>는 0.080~0.620 mg/L, EMC<sub>COD</sub>는 5.4~13.1 mg/L로 나타났다. Kang et al. (2009)은 산림 활엽수 지역을 대상으로 4월에서 8월까지 총 18회 강우사상에 대한 비점 평균 EMC가 SS, TN, TP, COD에 대해서 각각 31.7 (3.1~291.8), 2.00 (0.94~3.91), 0.202 (0.01~0.78), 3.86 (1.70~13.40) mg/L로 보고한 바 있다. 이 연구는 산림 100 %인 27 ha 면적의 유역을 대상으로 한 것으로, 유역면적이 유사하고 산림 73 %, 논 27 %로 구성된 본 연구 대상유역과 비교해 보았다. 전체적으로 강우에 따른 EMC의 변화 폭이 어느 정도 차이는 있으나 전

반적으로 유사한 범위를 나타내었다. 다만, 평균 EMC의 경우 SS와 COD는 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 조사 대상 강우 범위의 차이에 기인한 것으로 보이며, 본 연구 조사 대상 최대 강우 사상은 192 mm로 산림대상의 95 mm 보다 커 폭우 사상에 의한 유사나 오염물질의 유출이 컸을 개연성이 있을 것으로 추정된다.

각 수질항목에 대한 EMC 평균값의 95 % 신뢰구간을 살펴보면, SS가 63.4~150.0 mg/L, TN이 0.71~1.27 mg/L, TP가 0.090~0.289 mg/L, COD가 6.7~9.5 mg/L로 산정되었다 (Table 5). EMC 평균값의 신뢰구간은 Bootstrap 통계기법을 이용하여 산정하였다. 본 연구의 대상유역은 산림이 주요 토지이용이고, 농경지 중 논이 일부 우점하는 형태로 우리나라 농촌하천 상류 지역의 전형적인 모습이다. 따라서 본 연구에서 산정된 EMC는 산림이 넓게 차지하고 논이 우점하는 농촌 상류 유역의 비점유출 부하 추정을 위한 원단위를 산정하는 데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 5 EMCs for each of the nine observed rainfall events

Event ID	Rainfall (mm)	Event Mean Concentration (mg/L)			
		SS	TN	TP	COD
E1	28.5	50.6	1.43	0.122	7.7
E2	131.5	85.1	1.67	0.080	8.3
E3	192.6	180.1	1.41	0.076	8.6
E4	21.5	184.3	1.34	0.620	13.1
E5	18.5	57.6	0.83	0.230	5.8
E6	41.2	102.3	0.48	0.086	7.3
E7	69.0	24.3	0.56	0.067	5.4
E8	50.1	42.9	0.36	0.124	6.3
E9	31.3	211.9	0.89	0.106	8.7
Overall Statistics					
Mean		104.3	1.00	0.168	7.9
Min		24.3	0.36	0.067	5.4
Max		211.9	1.67	0.620	13.1
95 % UCL <sup>1</sup>		63.4	0.71	0.090	6.7
95 % LCL <sup>2</sup>		150.0	1.27	0.289	9.5

<sup>1,2</sup>UCL and LCL represent Upper and Lower Confidence Limit, respectively.

다. Pearson 상관분석: 강우특성 vs EMC

강우사상의 강우 특성과 산정한 EMC 사이의 상관성을 알아보기 위해 Pearson 이변량 상관분석을 실시하였다. 유의성 검정은 90 % 및 95 % 신뢰수준에서 분석하였으며, 그 결과는 Table 6에 나타내었다.

전반적으로 수질 항목사이에는 양의 상관성을 보였고, 특히 COD의 경우 SS 및 TP와는 95 % 신뢰수준에서, TN과는 90 % 수준에서 유의한 상관성을 나타내었다. 반면 강우 특성과 EMC 사이의 특별한 상관관계를 보이지 않고 있다. 연구대상 강우사상의 강우강도, 선행강우일수, 유출율 등 강우특성이 상대적으로 좁은 범위에 편중되어 비점유출에 대한 영향분석에 한계가 있었을 것으로 사료된다. 따라서 강우특성과 EMC 사이의 상관관계 구명을 위해서는 보다 폭넓은 강우사상에 대한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

한 가지 특기할 점은 강우유출율과 TP, SS, COD 수질항목 사

Table 6 Pearson correlation between EMCs and rainfall characteristics

	EMC <sub>SS</sub>	EMC <sub>TN</sub>	EMC <sub>TP</sub>	EMC <sub>COD</sub>	Rainfall	Rainfall Intensity	ANRD	Runoff Ratio
EMC <sub>SS</sub>	1							
EMC <sub>TN</sub>	0.350	1						
EMC <sub>TP</sub>	0.351	0.220	1					
EMC <sub>COD</sub>	<b>0.744**</b>	<b>0.564*</b>	<b>0.759**</b>	1				
Rainfall	0.183	0.433	-0.409	-0.004	1			
Rainfall Intensity	0.180	0.210	-0.294	0.140	-0.031	1		
ANRD	0.333	-0.274	-0.091	-0.101	-0.343	-0.169	1	
Runoff Ratio	-0.129	0.256	<b>-0.651**</b>	-0.301	<b>0.725**</b>	0.313	-0.275	1

The symbols of \* and \*\* represent statistical significance at the confidence levels of 0.90 and 0.95, respectively.

이에 와도 음의 상관관계를 보인다는 것이다. TP의 경우는 자료 결측에 의한 TP 유출부하의 과소산정효과가 일부 반영되었을 것으로 사료된다. 비점부하 유출은 초기세척효과에 의해 강우초기 유출수의 오염물질 농도가 높아 비점의 초기 유출이 크고 이후 상대적으로 낮아지는 형태를 나타낸다 (Sansalone and Cristina, 2004; Kang et al., 2006). EMC는 강우평균농도로써 유출율이 커질수록 총 강우에 대한 초기강우 비중이 상대적으로 적어지고, 이에 따른 희석효과의 영향으로 EMC가 낮아지는 경향이 있는 것으로 보인다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 경안천 상류지역에 위치한 산림과 논으로 구성된 소유역을 대상으로 9개 강우사상에 대한 강우유출 조사를 통해 강우사상별 비점 유출 특성을 분석하고, EMC 산정하였으며, 강우인자와의 상관성 분석을 실시하였다.

1. 강우 EMC는 SS, COD, TN, TP에 대해 각각 31.1-317.8 (평균 104.2 mg/L), 2.0-47.4 (평균 7.9), 0.12-4.48 (평균 1.00), 0.016-0.303 (평균 0.168) mg/L로 강우 사상별로 편차가 있지만 전반적으로 낮았다. 이는 활엽수 산림 유역을 대상 결과와 유사한 범위로, 이는 본 대상 유역이 산림 위주로 일부 농지를 포함하지만 그 영향이 작아 산림유역과 유사한 비점 유출 경향이 나타내는 것으로 생각된다.

2. 강우사상별 비점 부하량은 강우량의 증가에 선형 또는 비선형적으로 증가하였다. 특히 조사 대상 강우 중 가장 큰 강우사상에서 발생한 유출 부하가 기타 군소 강우사상들에 의한 비점 유출 총량보다 크게 나타났다. 이는 집중호우에 의한 비점 유출이 전체 비점 유출에서 차지하는 비중이 크고, 따라서 집중호우시 비점 대책이 비점 오염원 관리에서 매우 중요함을 의미한다.

3. 수질 및 강우 인자와 EMC의 Pearson 상관분석 결과, 수질 인자인 COD가 SS, TN, TP와 통계적으로 유의미한 상관관계를 나타내었다. 다만, 강우특성과 EMC 사이의 통계적 유의성은 없었으나, 강우 유출율이 TP, SS, COD와 부의 상관성을 보였는데, 이는 초기 강우의 비점 기여율이 큰 초기세척효과를 고려하면, 유출율이 커질수록 총 강우 대비 초기강우 비중이 감소하는 희석효과에 의해 EMC가 낮아지는 것으로 사료된다.

결론적으로 본 연구에서 산정된 산림복합 유역의 강우 비점 부하는 산림이 지배적 토지이용 형태인 농촌 상류유역의 비점부하 산정에 유용한 자료를 제공하고, 또한 수질항목별 EMC는 산림지역 및 산림농지 복합 유역의 비점 부하 원단위 산정시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

1. ME (Ministry of Environment), 2006. Manual for the management of non-point source pollution (in Korean).
2. Choi, Y. Y., S. Y. Jung, and J. W. Choi, 2011. Nonpoint pollutants sources characteristics of initial surface runoff on the land use types. *Journal of the Environmental Sciences* 20(3): 417-426 (in Korean).
3. Gunnerson, C. G., 1967. Stream flow and quality in the Columbia river basin. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, *Journal of Sanitary Engineering Division* 93(SA6): 1-16.
4. HRERC (Han River Environment Research Center), 2009. Monitoring and evaluation report of non-point source pollution for the So-Yang and Do-Am Lake watersheds (in Korean).
5. Jang, S. H., and J. S. Park, 2005a. A study on the runoff characteristics of non-point source in urban watershed. *Journal of the Environmental Sciences* 14 (12): 1171-1176 (in Korean).
6. Jang, S. H., and J. S. Park, 2005b. Runoff characteristics of non-point source according to rainfall in Nam watershed. *Korean Journal of Environmental Health* 31(1): 1-6 (in Korean).
7. Jin, S. H. J. W. Jung, K. S. Yoon, W. J. Choi, D. H. Choi, S. D. Kim, J. H. Kang, and Y. J. Choi, 2010. Probability distribution of BOD EMC from paddy fields. *Journal of the Environmental Sciences* 19(9): 1153-1159 (in Korean).
8. Kang, C. G., S. Lee, J. B. Gorme, J. U. Lee, and L. Y. Kim, 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).
9. Kim, L. H., S. O, Koh, B. S, Lee, and S. Kim, 2006. Estimation of pollutant EMCs and loadings in highway runoff. *KSCE Journal of Civil Engineering* 26(2B): 225-231 (in Korean).
10. Kim, G., 2008. Discharge characteristics of indicator microorganisms from agricultural-forestry watersheds. *KSCE Journal of Civil Engineering* 28(1B): 153-160 (in Korean).



11. Koo, B. K., 1988. A study on the analysis of land use and water quality relationships: Case study of Lake Euiam watershed. MS Thesis, Seoul National University: 14-28 (in Korean).
12. Kwak, D. H., S. J. Yoo, J. H. Kim, I. H. Lim, J. Y. Kwon, and P. G. Chung, 2008. Characteristics of non-point pollutant discharge from upper watershed of Seomjin Dam during rainy season. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* 22(1): 39-48 (in Korean).
13. Lee, S. Y., M. C. Maniquiz, J. Y. Choi, and L. H. Kim, 2009. Determination of EMCs for rainfall ranges from transportation landuses. *Journal of Korean Wetlands Society* 11(2): 67-76 (in Korean).
14. Roh, S. D., J. H. Kim, D. K. Lee, S. J. Kim, B. Y. Sohn, and Y. K. Chun, 2006. Characteristics of pollutants discharge from Hoengseong watershed during the dry and rainy seasons. *Journal of Korean Society on Water Quality* 22(4): 695-705 (in Korean).
15. Sansalone, J. J., and C. M. Cristina, 2004. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. *Journal of Environmental Engineering* 130(11): 1301-1314.
16. Shin, D. S., and S. K. Kwun, 1990. The concentration and input/output of nitrogen and phosphorus in paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 9(2): 133-141 (in Korean).
17. Shin, C. M., J. Y. Choi, and C. H. Park, 2004. Characteristics of non-point pollution discharge with land use in urban area. *Journal of KSEE* 26(7): 729-735 (in Korean).
18. Shin, D. S., 2007. Basic monitoring concept for revised unit-load on NPS. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(4): 429-433 (in Korean).
19. USEPA, 1992, NPDES storm water sampling guidance document. Office of Water, EPA 833-8-92-001.
20. Yoon, C. G., B. H. Kim, J. H. Jeon, and H. S. Hwang, 2002. Characteristics of pollutant runoff from groundwater-irrigated paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 41(2): 116-126 (in Korean).
21. Yoon, C. G., H. Hwang, J. Jeon, and J. H. Ham, 2003. Analysis of nutrients balance during paddy rice cultivation. *Korean Journal of Limnology* 36(1): 66-73 (in Korean).