

# 토지이용 특성을 고려한 소규모 농촌유역의 비점오염물질 유출특성 해석

배상호 · 김원재\*<sup>†</sup> · 윤영한\* · 임현만\* · 김은주\* · 박재로\*

과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

\*한국건설기술연구원 건설환경연구실

## Characterization of Runoff Properties of Non-point Pollutant at a Small Rural Area considering Landuse Types

Sang-ho Bae · Weon-jae Kim\*<sup>†</sup> · Young H. Yoon\* · Hyun-man Lim\* · Eun-ju Kim\* · Jae-roh Park\*

Division of Construction Environment Engineering, University of Science & Technology

\*Construction Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

(Received 13 April 2010, Revised 26 May 2010, Accepted 1 June 2010)

### Abstract

Attention has increasingly focused on the pollutant load discharged from rural area since the enforcement of total maximum daily loads (TMDLs) in Korea. As one of the methods to control the inflow of pollutant load during wet weather events, local governments are attempting to apply non-point source control facility. To design those facilities appropriately, it is essential to understand the runoff characteristics of pollutants such as TSS, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP and TN. In the paper, the quantitative analyses for pollutant runoff characteristics were examined in a small rural watershed with the area of about 53 hectares. For a dry weather day and wet weather events, variation patterns of dry weather flow and runoff characteristics of wet weather flows were monitored and investigated. The runoff model using XP-SWMM reflecting the landuse types of the watershed in detail was simulated to perform the sensitivity analyses for several factors influencing on their hydrograph and pollutographs. As a result, for the case of medium and small rainfall events (i. e. total rainfall of 35.8 and 17.5 mm), the impervious area including green house, roof and road which covers relatively low portion of total area (i. e. 16%) caused substantial first flush and the majority of total runoff load. Therefore, it has been concluded that the runoff characteristics of each pollutant and distribution of impervious area should be considered for the establishment of the control strategy of non-point pollutant runoff at a rural area.

**keywords** : First flush, Landuse type, Non-point pollutant, Rural area, XP-SWMM

## 1. 서론

최근 수질오염총량관리제도가 도입됨에 따라 농촌유역에서 배출되는 오염물질에 대한 관심이 증대되고 있다. 이에 대한 대책의 일환으로 강우시 하천으로 유입되는 오염부하를 저감하기 위하여 여러 지자체에서 비점오염 저감시설의 도입을 추진하고 있다. 비점오염 저감시설을 적정하게 설계하기 위해서는 강우사상에 따른 대상유역의 오염물질 유출특성에 대한 정확한 이해가 필수적이다.

국내 농촌유역의 하수도 보급률은 전국 평균 83.5%에 훨씬 못 미치는 35.8%로서(농림부, 2007), 농촌유역에서는 미처리된 생활하수가 정화조를 거쳐 마을하수도를 통해 인접한 하천으로 배출된다는 점이 전형적인 특징이라고 할 수 있다. 배요섭과 남귀숙(2009)은 농촌유역에서의 비점오염물질 유출은 주로 강우와 재배형태(시비, 토양관리 등)에 따

라 변동하고, 계절에 따라 오염부하 유출특성이 변화하게 되며, 넓은 투수성 지역을 가지는 농촌에서의 비점오염물질 유출은 수문과 밀접한 관련이 있어 상당부분 강우시 발생하며, 포장면이 많은 도시지역의 강우유출수와는 달리 농촌유역의 비점오염물질 배출 패턴에는 초기유출 현상(first flush phenomenon)이 거의 나타나지 않거나 완만하게 나타난다고 하였다. 이병수 등(2008)은 농촌유역에서는 초기유출 현상이 나타나지 않으므로 초기유출 현상을 고려한 접근방법은 옳지 않으며, 유역, 강우, 유량특성 등의 인자를 활용하여 연구해야 한다고 하였다. 반면에 김건하 등(2003)은 수문곡선의 관찰 결과 강우 초기에 초기유출 효과가 나타난다고 하였으며, 원철희 등(2009)은 산림과 밭의 모니터링 자료를 분석한 결과, SS, BOD, COD, TN 및 TP 항목에서 초기유출 현상이 발생한다고 보고하였다. 김이형과 강주현(2004), Deletic(1998) 및 Bertrand-Krajewski 등(1998) 많은 연구자들이 도시에서는 전형적인 초기유출 현상이 발생한다는 사실을 확인하였지만, 농촌에서의 초기유출에 대한 연구결과에서는 연구자마다 큰 차이를 보이고 있다. 초

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
wjkim1@kict.re.kr

기유출 현상의 발생특성에 따라 비점오염 저감시설의 종류, 형태, 설계기법 및 관리방안 등이 달라지기 때문에 농촌유역에서 초기유출 현상의 발생과 이에 영향을 미치는 인자들과의 상관성에 대한 정량적 분석이 필수적이다.

한편, 농촌유역의 유출특성에 대한 연구들은 대부분 강우 유출수(wet weather flow, WWF)만을 대상으로 하고 있으며, 상대적으로 건기유출수(dry weather flow, DWF)에 대한 연구의 중요성은 간과되고 있다. 하수관거는 부분적으로 정비되어 있으나 하수미처리구역에 해당하는 국내의 일반적인 농촌유역의 경우에는 강우유출수와 함께 생활하수 및 소규모 축산농가에서 유래하는 건기유출수의 오염부하에 대해서도 고려해야 한다.

따라서 본 연구에서는 소규모 농촌유역을 대상으로 오염물질 유출특성의 정량적 해석을 시도하였다. 약 53 ha의 유역면적을 갖는 농촌유역을 선정하여 토지이용 특성을 상세하게 조사하는 한편, 건기유출수 및 강우규모별로 강우유출수의 유출특성을 해석하였다. 또한, XP-SWMM을 활용하여 토지이용 특성을 상세하게 반영한 유출모형을 구축하여 농촌유역의 오염물질 유출특성에 영향을 미치는 인자들을 검토하고, 중·소규모 강우시 토지이용 특성이 유출특성에 미치는 영향을 모의하였다. 본 연구결과는 소규모 농촌유역에서 중·소규모의 강우를 대상으로 각 오염물질의 기원 및 유출특성을 반영한 비점오염 저감시설의 설계시 유의미한 시사점을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 대상유역 및 토지이용 현황

본 연구의 모니터링 대상유역으로 한강수계의 지류인 대장천 유역내 경기도 고양시 덕양구 주교동의 농촌유역을 선정하였다. 서울외곽순환고속도로 고양 IC와 대장천(지방2급하천)으로 흐르는 소하천인 '독곶천'의 상류 소유역으로, 표고가 상대적으로 높은 임야 지역과 경의선 철길 사이에 형성되어 있다. 대상유역은 농촌유역에서 일반적으로 볼 수 있는 논, 밭, 비닐하우스, 임야, 택지, 도로 등 다양한 토지이용 형태가 복합적으로 나타나고 있고, 하수관거가 도입되어 있으나 미처리구역으로서 발생하수 및 강우유출수가 하천으로 직접 방류된다는 점 등이 우리나라 농촌유역의 특징을 전형적으로 반영하고 있는 것으로 판단된다. 농가에서 발생하는 생활하수는 정화조를 경유하여 하수관거로 유입된 이후, 건기시에는 직접 배출되고, 강우시에는 강우유출수와 혼합되어 별도의 처리없이 독곶천으로 배출된다.

본 연구에서는 대상유역의 말단지점에서 유출수를 채수하여 농촌유역의 건기 및 강우시 유출특성을 해석하였다.

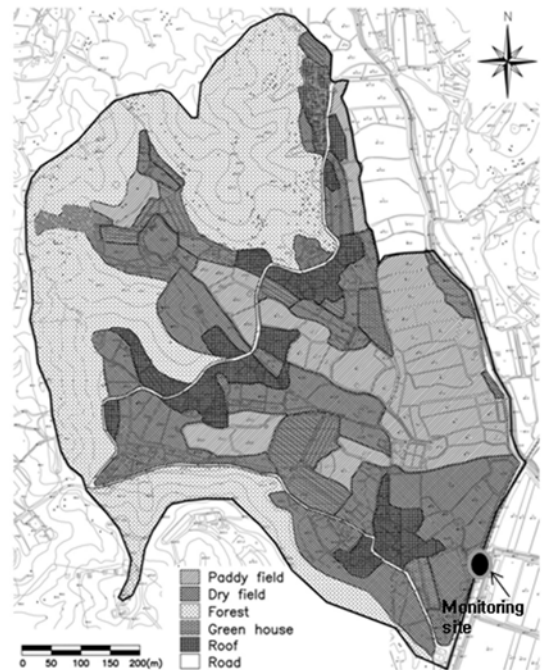


Fig. 1. Landuse status of study watershed.

Table 1에 유역의 토지이용 현황을 정리하였으며, 논, 밭, 임야 및 내대지 등 투수지역이 전체 면적의 84%, 비닐하우스, 도로 및 지붕 등 불투수지역이 16%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 국지적으로 합류식 관거가 매설되어 있고, 관의 형태로는 일부 직사각형 관거를 포함하여 원형관이 대부분을 차지하고 있다. 관거 총연장은 1,382 m이며, 관경은 400~1200 mm의 범위로 구성되어 있다. 유역내에는 농가 46가구가 산재하고 있는 것으로 조사되었다. 건기시에 배출되는 오염원으로는 각 가정에서 배출되는 생활하수 및 소규모 축사 배출수 등이 있다.

토지이용 현황은 고양시 물환경보전과의 시설계획평면도 (Fig. 1)를 활용하여, 논, 밭, 비닐하우스, 임야, 도로, 택지 및 내대지로 토지이용 체계를 분류하였으며, 위성사진 정보와 현장조사를 통해 토지이용도를 확인하고, 지목별 면적을 산정하였다. 전체 유역면적 52.8 ha에서 토지이용 형태별 면적을 산정하는 과정에서 발생한 일부 오차는 전체 유역 면적에 맞도록 보정하였다.

### 2.2. 현장 모니터링 및 수질분석 방법

유량 및 수질 모니터링은 오염물질의 유출특성을 파악하는데 가장 중요한 과정이다. 대상유역내에서 발생하는 모든 유출수가 집수되는 최종 배출구를 모니터링 지점으로 선정하였다. 유출특성을 상세히 분석하기 위하여 건기시 1회

Table 1. Landuse types of study watershed

(unit : ha)

Total area	Landuse types						
	Paddy field	Dry field	Green house	Forest	Road	Roof	Grass land
52.8	11.6	13.1	3.5	17.4	2.6	2.3	2.3
(100%)	(22%)	(25%)	(7%)	(33%)	(5%)	(4%)	(4%)

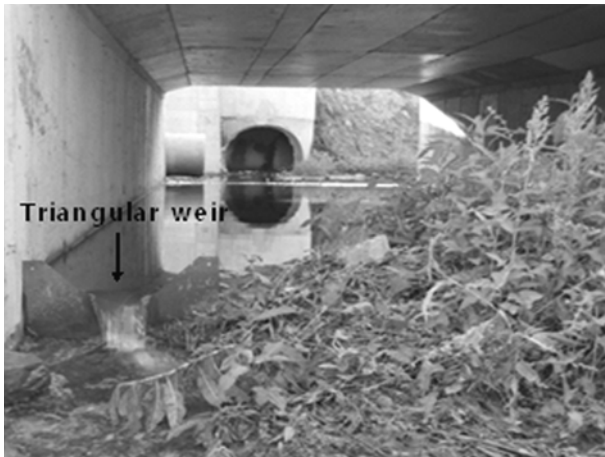


Fig. 2. Monitoring site and triangular weir set of study watershed.

(2009. 6. 22(월)) 및 강우시 3회(1차 : 2009. 7. 9(목), 2차 : 2009. 8. 26(수), 3차 : 2009. 10. 17(토)) 등 총 4회에 걸쳐서 유량 및 수질을 모니터링하였다. Fig. 2는 유역 최종 말단에 위치한 유량 및 수질 모니터링 지점의 사진이다.

건기시 유량은 분단위로, 수질 모니터링은 2시간 간격으로 24시간동안 연속 실시하였으며, 총 13개 시료를 채수하여 수질을 분석하였다. 건기시에는 직각삼각웨이(triangular weir)를 이용하여 유량을 측정하였다. 월류수위는 압력식 수위계(Schlumberger社, MiniDiver, Canada)를 삼각웨이 전단에 설치하여 측정하였으며, 실측자료를 이용하여 수위를 보정하였다.

강우시 시료는 강우발생 직후를 포함하여, 강우강도가 증가하여 본격적으로 유출이 시작되면 10분 간격으로 1시간 동안 채수하였으며, 강우가 지속되면서 30분, 1시간 및 2시간 간격으로 조절하여 최종 시료 개수가 15개 전후가 되도록 채수하였다. 총강우량, 강우강도, 강우지속시간 등은 0.2 mm의 해상도를 갖는 전도식 강우량계(HOBO社, Data Logging Rain Gauge Onset Model No. RG2M, USA)를 사용하여 측정하였다. 유량은 강우 초기의 저수위 조건에서는 직각삼각웨이를 사용하여 측정하였으며, 강우가 본격화되는 고수위에서는 웨어 전단부 콘크리트 암거의 폭을 측정하고 압력식 수위계(MiniDiver)와 전자유속계(ALEC Electronics社, AEM1-D, Japan)를 사용하여 수위 및 평균유속을 측정 한 후, 수위-유량 관계곡선(H-Q Curve)을 산출하여 환산하였다. 수위는 분단위로 측정하였으며, 실측자료를 이용하여 보정하였다.

수질분석 항목은 입자성물질(Total suspended solid, TSS), 유기물(Biochemical oxygen demand, BOD<sub>5</sub>; Chemical oxygen demand, COD<sub>cr</sub>; Total organic carbon, TOC), 영양염류(Total phosphorus, TP; Total nitrogen, TN), 총대장균군(Total coliforms, TC), 중금속류(Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn) 등을 분석하였다. TSS, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP 및 TN 항목은 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였다(환경부, 1998). TOC는 연소산화법(combustion oxidation method)을 사용하는 Shimadzu社(Japan)의 TOC-VCPH를 사용하여

NPOC(Non-purgeable organic carbon) 모드에서 분석하였다. 중금속 항목들은 Standard Method 3120B에 의거하여 ICP-AES(Thermo社, IRIS Intrepid II XDL, USA)를 사용하여 측정하였다(APHA et al., 1998). TC는 3M社의 Petrifilm™(Japan)을 사용하여 35±2°C에서 24시간동안 배양한 다음 형성된 colony를 계수하여 분석하였다.

### 2.3. 초기유출 현상 해석

초기유출 현상은 mass-based first flush(MFF)로 정량화가 가능하며, 본 연구에서는 아래의 식들을 이용한 무차원  $M(V)$  curve를 이용하여 해석하였다.  $\Delta(L-F)$ 는 무차원화된 누적부하량과 누적유량의 차로서 이 값이 양의 값을 나타내면 초기유출 현상이 발생하는 것으로 정의하였다. 이 값이 크다는 것은 유량에 비해서 오염부하량의 유출률이 크다는 것을 나타내며, 값이 클수록 뚜렷한 초기유출 현상을 의미한다(Bertrand-Krajewski et al., 1998).

$$L = m(t) / M \quad (1)$$

$$F = v(t) / V \quad (2)$$

$$\Delta = L - F \quad (3)$$

여기서,  $L$  : 무차원 오염물질 누적부하량,  $m(t)$  : 시간  $t$  까지 이송된 오염물질 부하량(g),  $M$  : 총유출부하량(g),  $F$  : 무차원 누적유출유량,  $v(t)$  : 시간  $t$  까지 유출된 유량(m<sup>3</sup>),  $V$  : 총유출유량(m<sup>3</sup>)을 나타낸다.

### 2.4. XP-SWMM(XP-Storm Water Management Model) 모형

XP-SWMM은 미국 EPA에서 개발한 SWMM 엔진을 기반으로 하여 하수 및 우수의 유출특성을 모의하는 상용 프로그램으로서, 수문현상과 지표면 오염물질의 buildup 및 washoff에 관련되는 runoff mode, 하수의 처리 및 저류에 관련되는 sanitary mode, 관로 내에서의 수리학적 거동을 모의하는 hydraulics mode 등 세 가지 mode로 구성되어 있다. XP-SWMM은 대표적인 분포형 모형(distributed model)으로 상세한 토지이용 특성을 고려할 수 있어서, 도시유역은 물론 농촌유역에도 다양한 모의목적에 대응하여 적용이 가능하다. 유역내에서 발생하는 강우유출과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적과 저류량 산정 등을 모의할 수 있으며, 단일강우 및 연속강우에 대한 모의가 가능한 장점을 가지고 있다. 입력자료로서 유역면적, 불투수면의 비율, 경사, 조도계수, 요면저류량, 침투율 등이 필요하며, 수로 및 관로에 대한 입력자료로는 단면형태, 관경, 관길이, 관경사, 조도계수 등이 있다. 일반적으로 도시유역에 많은 적용사례가 있으며, 농촌 소유역에 대한 적용 사례가 점차 증가하고 있다(김유리, 2003; 유세진, 2001; 이용진, 2009; Campbell and Sullivan, 2002; Gautam et al., 2006).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 건기시 24시간 유출특성

건기시 발생하는 유출수의 유량 및 수질 특성에 대해서 분석하였다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 건기유출량은 1.3 ~ 4.3 L/sec(평균유량 : 2.4 L/sec)의 범위로 유출되고 있으며, 최소유출은 오전 8시 30분경, 첨두유출은 오전 11시 30분경에 나타났다. 새벽 시간대에 나타나는 생활하수의 최소 유출과 오전 8시를 전후하여 발생하는 침투유출이 3~4시간의 유달시간에 의해 지연되어 나타나고 있다는 사실로부터 이와 같은 건기 유출량의 일변동은 유역내 거주민의 생활하수 배출패턴을 반영하는 것으로 판단할 수 있다.

Table 2에 TSS, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP 및 TN 등의 오염물질에 대한 기술통계 분석결과를 정리하였다. 각 오염물질의 평균농도는 TSS는 7.0 mg/L, BOD<sub>5</sub>는 3.2 mg/L, COD<sub>cr</sub>은 21.6 mg/L, TP는 0.1 mg/L 및 TN은 6.9 mg/L로 나타났다. COD<sub>cr</sub> 항목을 제외하면 하천생활환경기준 III등급에 준하는 보통수질로 유출되었다(환경부, 2009). 특히, Fig. 4의 총대장균군 항목에서 3,000 CFU/mL 전후의 농도로 지속적으로 유출되고 있다는 점에서 미처리된 생활하수가 유입되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 대상유역과 같은 하수미처리구역에서는 강우시 합류식 관거내 퇴적물질이 일시에

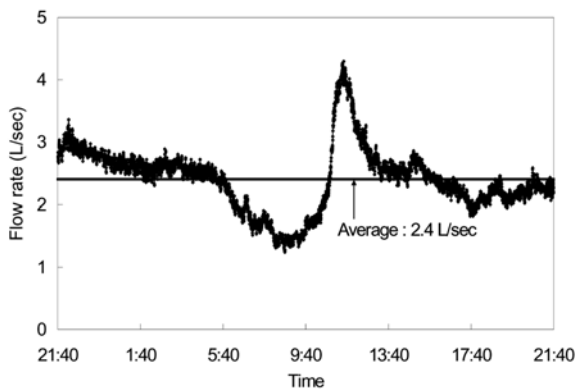


Fig. 3. Diurnal variation of flow rate in DWF.

유출되어 초기 유출부하가 급증할 가능성이 높기 때문에 이에 대한 유의가 필요할 것으로 판단된다.

#### 3.2. 강우사상별 유출특성

##### 3.2.1. 강우특성 및 유출률 분석

강우사상을 선행건기일수(Antecedent dry weather period, ADWP), 총강우량(Total rainfall), 평균강우강도(Average rainfall intensity), 강우지속시간(Rainfall duration), 강우유출량(Total runoff), 유출률(Runoff rate) 등의 지표로 Table 3에 정리하였다. 총강우량 100 mm 이상(Event a), 30~100 mm(Event b), 30 mm 이하(Event c)의 다양한 강우사상을 선별하여 채수를 실시하였고, 본 연구에서는 Event a, b 및 c를 각각 대·중·소규모 강우로 정의하였다. Event a(총강우량 179.0 mm)는 15.7 mm/hr의 높은 평균강우강도와 15시간의 긴 강우지속시간으로 인해 도시유역에 준하는 0.74의 높은 유출률을 나타내었다. Event c(총강우량 17.5 mm)는 Event b(총강우량 35.8 mm)에 비해 총강우량은 적지만, 상대적으로 짧은 6.5시간의 강우지속시간동안 5.83 mm/hr의 상대적으로 강한 강우강도로 인해 유출률이 Event b보다 다소 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 중·소규모 강우에서는 강우량뿐만 아니라 강우강도와 강우지속시간이 유출률에 큰 영향을 미치는 인자임을 의미한다. 또한 대상유역

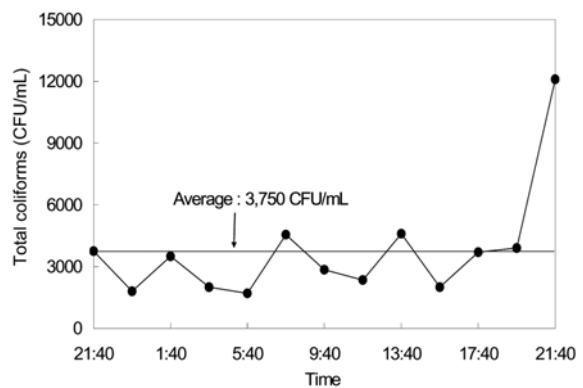


Fig. 4. Diurnal variation of total coliforms in DWF.

Table 2. Descriptive statistics of DWF

Constituent	No. of sample	Min.	Max.	FWMCs <sup>1)</sup>	Average	SD <sup>2)</sup>	SE <sup>3)</sup>
TSS	13	5.1	10.7	7.0	7.0	1.9	0.5
BOD <sub>5</sub>		2.2	5.7	3.2	3.2	1.0	0.3
COD <sub>cr</sub>		5.6	41.1	21.6	21.6	10.2	2.8
Total coliforms (CFU/mL)		1,700	12,100	3,310	3,750	2,710	750
TP		0.02	0.25	0.09	0.10	0.10	0.02
TN		4.1	9.3	6.9	6.9	1.4	0.4

<sup>1)</sup>flow-weighted mean concentrations, <sup>2)</sup>standard deviation, <sup>3)</sup>standard error

Table 3. Description of rainfall events at study watershed

Event	ADWP (hr)	Antecedent rainfall (mm)	Total rainfall (mm)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)	Total runoff (m <sup>3</sup> /ha)	Runoff rate
Event a	152	3.0	179.0	15.7	15.0	1,316.9	0.74
Event b	146	9.5	35.8	5.1	19.5	29.3	0.08
Event c	69	5.5	17.5	5.8	6.5	20.5	0.12

인 농촌유역에서 임야, 논, 밭 등의 투수지역은 지표면의 큰 요면저류 효과 및 높은 침투율로 인해 소규모 강우에서는 유출 기여도가 낮기 때문에 Event a(0.74)에 비해 Event b와 c(0.08, 0.12)에서 현저히 낮은 유출률을 나타내었다.

### 3.2.2. 강우사상별 오염물질의 유출특성

대상유역에서 채수한 시료의 모니터링 결과를 바탕으로 Table 4에 TSS, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP 및 TN에 대한 최소 및 최고농도, EMC(Event mean concentration), 평균농도, 표준편차 및 표준오차 등 기술통계 분석결과를 나타내었다. 강우가 발생하여 유출이 시작되면 오염물질의 유출농도는 건기유출수에 비해 급격히 증가한다. TSS의 최소 및 최고농도는 3.0 mg/L 및 3,106 mg/L, BOD<sub>5</sub>는 1.6 mg/L 및 126.9 mg/L, COD<sub>cr</sub>는 3.7 mg/L 및 142.8 mg/L, TP는 0.02 mg/L 및 1.77 mg/L, TN은 1.9 mg/L 및 32.3 mg/L로서 강우사상에 따라 유출농도가 매우 큰 범위에서 변동하는 것으로 나타났다. 오염물질별 표준오차 범위를 비교하면, TSS는 72.2 ~ 243 mg/L, BOD<sub>5</sub>는 0.8 ~ 8.0 mg/L, COD<sub>cr</sub>는 3.6 ~ 9.4 mg/L, TP는 0.06 ~ 0.13 mg/L 및 TN은 0.7 ~ 1.8 mg/L로 나타났다. 임야 및 밭의 토지이용이 대부분을 차지하는 유역 특성과 강우강도에 민감하게 변동하는 특성에 따라 TSS가 가장 큰 표준오차를 나타내었다.

Event c의 소규모 강우에서도 강우유출이 발생하였으며, TSS와 BOD<sub>5</sub>는 EMC 기준으로 249 mg/L 및 9.1 mg/L의 농도로 각각 유출되었다. 이와 같은 결과는 원철희 등(2009)이 연구한 50.9 mm와 24.0 mm의 강우사상에서 유출이 발생하지 않았다는 결과와는 차이가 있다. 따라서, 본 연구와 같이 복합적인 토지이용 특성을 갖는 농촌유역 전체를 대상으로 하여 모니터링을 실시한 연구에서는 소규모일지라도 산재하는 불투수면의 존재가 강우유출 특성에 미치는 영향

이 크기 때문에 유의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5(a), (b) 및 (c)에 강우사상별 TSS, BOD<sub>5</sub>, TP 및 TN 등 일부 오염물질에 대한 유출특성을 도시하였다. 대부분의 오염물질에서 강우강도에 따라 유출농도가 증감하는 경향이 관찰되었으며, 특히 TSS와 TP가 민감하게 대응하여 유출되는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)에서 Event a는 홍수에 준하는 유출량으로 인해 일부 희석현상이 발생하지만, 강우 후반에 강우강도가 다시 증가함에 따라 추가로 오염물질이 고농도로 재유출되는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)에서는 유출이 시작되는 강우초기에 BOD<sub>5</sub>, TP 및 TN이 최고 17 mg/L, 1.33 mg/L 및 13.5 mg/L의 농도로 유출되었으며, Fig. 5(c)에서는 BOD<sub>5</sub>, TP 및 TN이 최고 126.9 mg/L, 1.77 mg/L 및 19.1 mg/L의 농도로 유출되었다. 도시유역에서는 지표면에 축적된 오염물질이 강우초기에 고농도로 유출된 후 점차 희석현상이 뚜렷하게 발생하지만, 농촌유역에서는 상대적으로 희석현상이 약하게 나타나며 강우후반이라도 강우강도가 다시 커지면 일부 오염물질이 지속적으로 유출되는 특성을 나타내었다.

Fig. 6(a), (b) 및 (c)에 강우사상별 총대장균군의 유출특성을 나타내었다. Fig. 6(a)에서는 최고 4,900 CFU/mL의 농도로 유출되었지만, Fig. 6(b), (c)의 Event b와 Event c의 중·소규모 강우사상에서는 10,000 CFU/mL 전후의 고농도 유출이 나타났다. 위와 같은 결과는 미처리된 하수 유래의 오염물질이 건기시 유속이 느린 관저에 퇴적되어 있다가 중·소규모 강우시 강우강도의 증가에 따라 일시에 유출되기 때문인 것으로 판단된다.

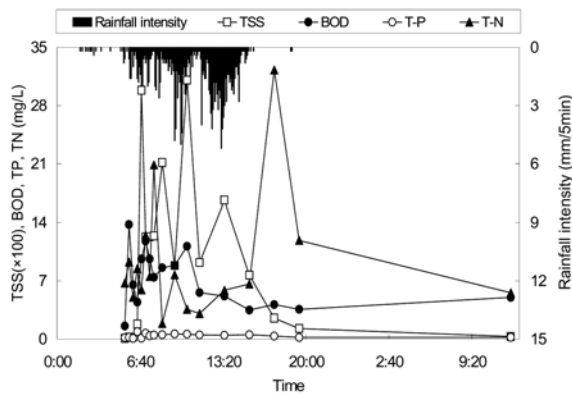
중금속류(Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn)에 대한 분석결과는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(b)에서 특히, Fe과 Al이 최고 51.5 mg/L 및 34.7 mg/L의 고농도로 유출되었으며, 유해 중금속인 Cr, Pb 및 Zn은 0.02 mg/L, 0.02 mg/L

Table 4. Descriptive statistics of runoff pollutants at study watershed

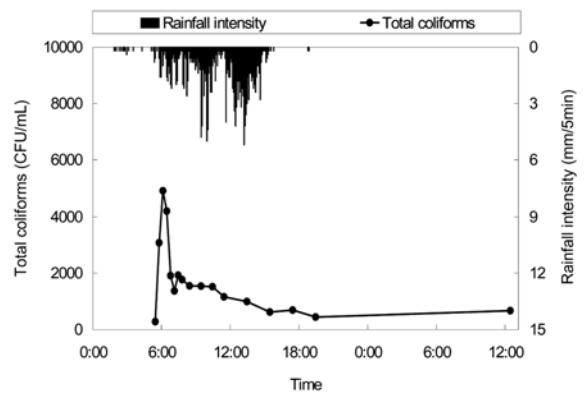
(unit : mg/L)

Constituent	No. of sample	Min.	Max.	EMC <sup>1)</sup>	Average	SD <sup>2)</sup>	SE <sup>3)</sup>	
TSS	Event a	17	7.3	3,106	1,393	986	1,003	243
	Event b	16	13.0	2,406	208	391	618	154
	Event c	15	3.0	990	249	238	279	72.2
BOD <sub>5</sub>	Event a	17	1.6	13.8	5.7	7.1	3.4	0.8
	Event b	16	5.3	17.0	10.6	11.9	3.6	0.9
	Event c	15	2.2	126.9	9.1	16.5	30.9	8.0
COD <sub>cr</sub>	Event a	17	8.1	142.8	71.1	58.9	38.7	9.4
	Event b	16	3.7	133.6	13.2	26.3	36.6	9.2
	Event c	15	10.5	59.1	23.0	25.8	14.0	3.6
Total coliforms (CFU/mL)	Event a	17	280	4,900	1,000	1,680	1,280	310
	Event b	16	50	25,500	4,700	6,580	6,210	1,550
	Event c	15	1,750	42,000	7,210	12,100	10,600	2,730
TP	Event a	17	0.08	0.89	0.48	0.41	0.23	0.06
	Event b	16	0.03	1.33	0.12	0.22	0.31	0.08
	Event c	15	0.02	1.77	0.15	0.44	0.51	0.13
TN	Event a	17	1.9	32.3	6.9	9.1	7.4	1.8
	Event b	16	3.8	13.5	4.8	5.9	2.7	0.7
	Event c	15	2.6	19.1	6.5	7.3	4.4	1.1

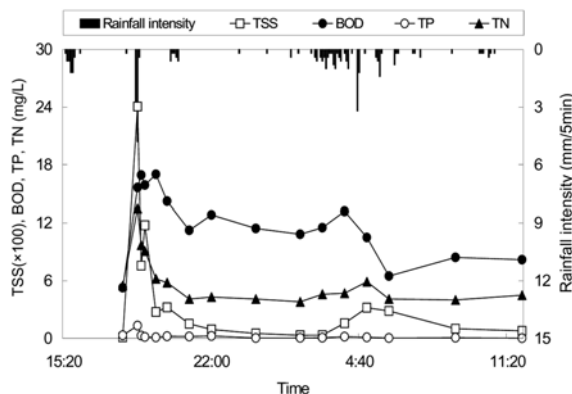
<sup>1)</sup>event mean concentration, <sup>2)</sup>standard deviation, <sup>3)</sup>standard error



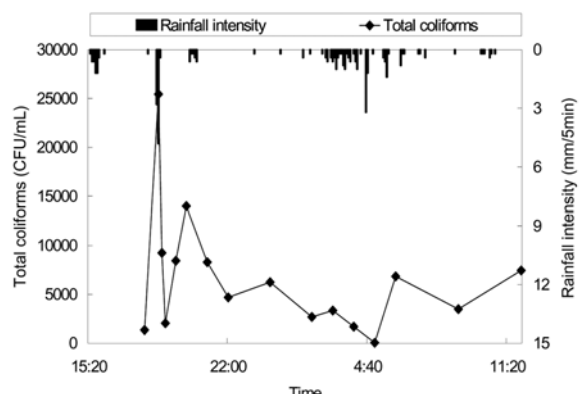
(a) Event a



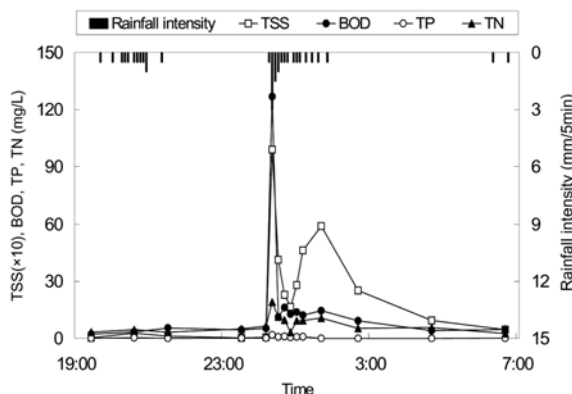
(a) Event a



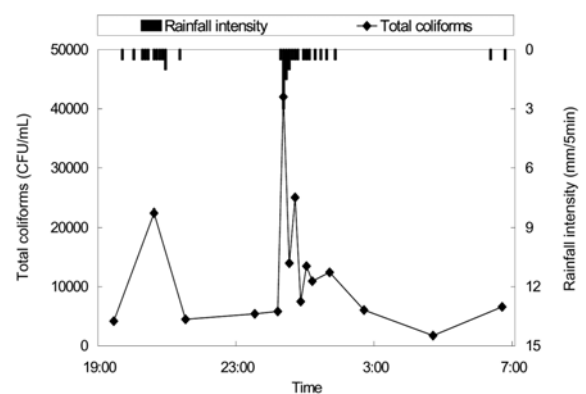
(b) Event b



(b) Event b



(c) Event c



(c) Event c

Fig. 5. Variation of runoff pollutant concentration.

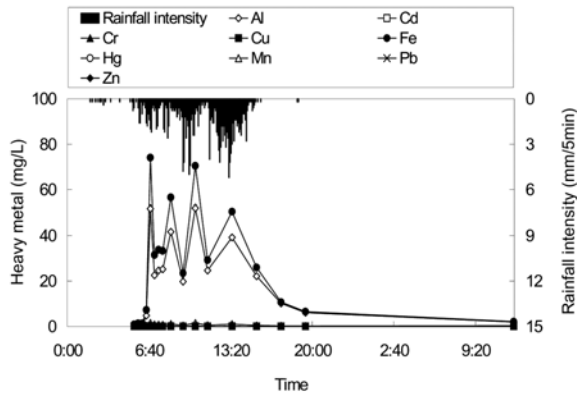
Fig. 6. Variation of total coliform concentration.

및 0.08 mg/L의 평균농도로 각각 유출되었다. Event a와 Event c에서도 이에 준하는 농도로 유출되었다. 농촌지역에서 증급속은 주로 농약 및 불투수면 퇴적물(입자성 오염물질에 흡착된 형태) 등에서 유래하는 것으로 보고되고 있는데, 도시지역에 비해 상대적으로 낮은 농도로 유출되고 있음에도 위해성을 고려한 체계적인 관리가 필요한 것으로 판단된다.

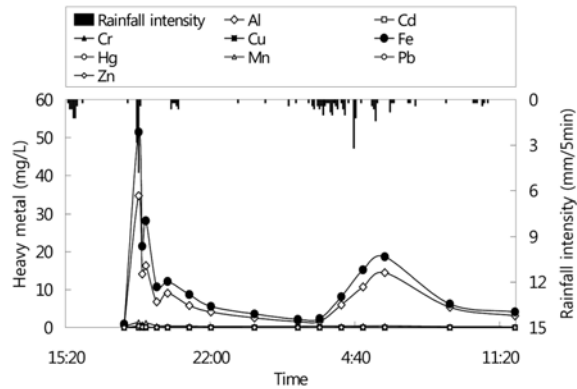
### 3.3. 강우사상별 초기유출 특성 분석

초기유출 현상에 대한 이해는 비점오염 저감시설 설계시 매우 중요한 요소로서, 어떤 처리대상물질을 어느 수준까지

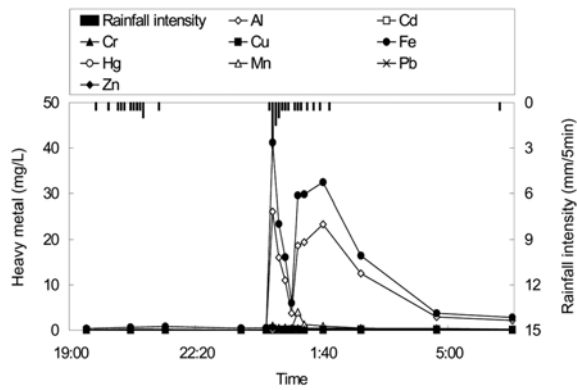
처리할 것인지, 전체 강우지속시간 중 어느 시점까지 처리할 것인지 등을 결정하는 데 핵심적인 요소가 된다. Bertrand-Krajewski 등(1998)은 전체 강우유출수 중 30%가 유출될 때까지 전체 오염물질 부하량 중 80% 이상이 유출되는 조건을 초기유출의 기준으로 제안하였다. 한편, Sansalone and Buchberger(1997)는 초기강우에 대해 제한적인 기준 설정은 필요하지 않으며, 무차원 오염물질 누적부하량이 무차원 누적유량보다 클 경우 초기유출이라고 단순히 정의하였다. 본 연구에서는 농촌지역에서 발생하는 오염물질의 초기유출 현상에 대해서 정량적으로 분석하기 위해  $M(V)$  curve를 이용하였다. 무차원 누적부하량 곡선이 무차원 누적유량



(a) Event a



(b) Event b

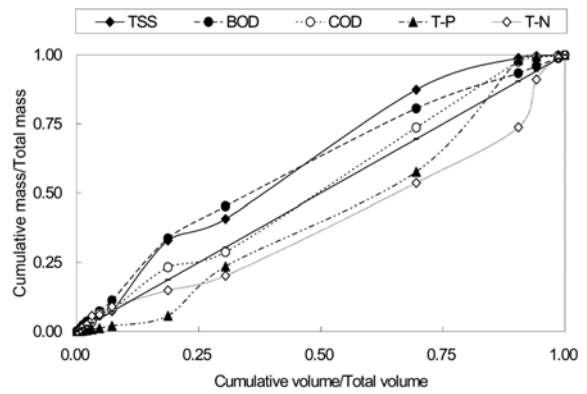


(c) Event c

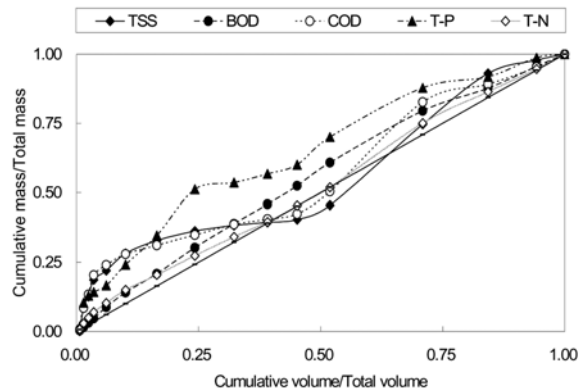
Fig. 7. Variation of heavy metal concentration.

곡선보다 상위에 존재하면 초기유출이 발생하는 것으로 정의하였으며, 그 정도가 클수록 뚜렷한 초기유출이 발생하는 것으로 해석하였다.

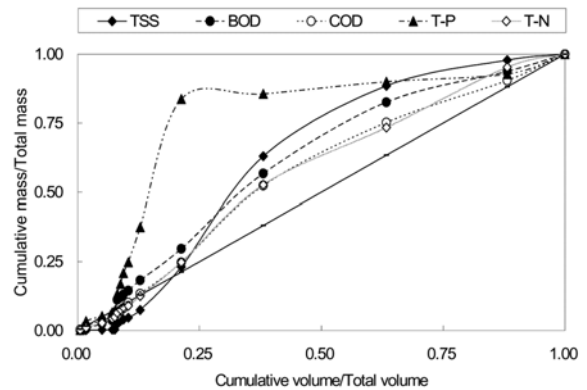
강우사상과 오염물질의 종류에 따라 초기유출 현상의 발생특성이 상이한 것으로 나타났다. Fig. 8의 Event a의 강우사상에서는 강우가 시작된 5시간 이후부터 본격적으로 TSS와 BOD<sub>5</sub> 등에서 뚜렷한 초기유출이 발생하는 것으로 나타났다. Event b의 중규모 강우사상에서는 TSS, COD<sub>cr</sub> 및 TP 등에서 초기유출이 발생하였으며, 그 외의 오염물질에서는 유출이 지연되는 것으로 나타났다. 강우가 지속되면서 TSS, COD<sub>cr</sub> 등에서는 희석효과가 발생하지만, TP의 경우에는 강우 후반에도 초기유출 현상이 지속되는 차이를



(a) Event a



(b) Event b



(c) Event c

Fig. 8.  $M(V)$  curve.

보였다. Event c의 소규모 강우에서는 대부분의 오염물질에서 뚜렷한 초기유출 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 Event c의 경우에, 짧은 6.5시간의 강우지속시간동안 상대적으로 강한 강도로 강우가 지속된 결과가 초기유출 현상에 반영된 것이라 할 수 있다. 특히, TSS와 TP가 비슷한 유출 거동을 보이는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과는 일반적으로 농촌유역에서는 도시유역에 비해 뚜렷한 초기유출 현상이 나타나지 않는다는 결과와 상반된다. 농촌유역은 강우사상에 따라 초기유출 특성을 보이는 수질항목, 초기유출 강도 및 발생 시간대 등에서 차이를 보였다. 따라서, 농촌유역에서 발생하는 초기유출 현상의 제어방법과 관리대상 강우사상의 규모 결정이

비점오염 저감시설의 설계에서 핵심적인 부분으로 고려되어야 할 것이다.

**3.4. 중·소규모 강우시 건기유출수의 영향**

건기유출수(DWF)는 건기시는 물론 강우시에도 지속적으로 발생하며, 농촌유역의 주발생원으로는 각 가정에서 나오는 생활하수, 화장실 오·폐수 그리고 축산폐수 등이 있다. 본 연구에서는 대상유역에서 건기유출수가 강우유출수(WWF)에 미치는 영향을 파악하기 위하여 유출유량과 농도로부터 오염부하량(kg)을 환산한 다음, 건기유출 부하량에 대한 강우유출 부하량의 비(WWF load / DWF load(24))를 산출하여 비교하였다. WWF load는 강우유출이 지속되는 시간동안 유출된 총오염부하량으로 정의하였고, DWF load(24)는 모니터링이 실시된 24시간동안 해당 유역에서 유출된 건기유출수의 오염부하량으로 정의하였다(모니터링 일시 : 2009. 6. 22(월)). 하절기 1회의 모니터링 결과로서 DWF의 계절적 변동특성이 반영되어 있지 않으므로 해석에 유의할 필요가 있다. 일반적인 중·소규모 강우의 지속시간은 24시간에 미치지 못하지만 농촌유역에서의 강우유출은 강우 종료 후에도 상당한 시간동안 지속되기 때문에 DWF load(24)에 대한 강우유출 부하의 비를 활용하여 건기유출수의 영향을 파악하는 것은 타당성이 높은 것으로 판단된다.

Table 5에 강우사상별 WWF load / DWF load(24)의 산출결과를 정리하였다. 총강우량이 감소함에 따라 건기유출수의 영향이 점차 증가하고 있다. TSS는 강우 규모에 관계없이 건기유출수의 영향이 미미하지만, 중·소규모 강우에서는 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP 및 TN에서 그 영향이 점차 커지고 있다. 본 대상유역에는 총 46가구가 저밀도로 분포하고 있기 때문에 건기유출수의 영향이 과대하지 않으나 농가 밀도가 높거나 축산농가가 집중적으로 분포하는 경우에는 건기유출수의 영향에 대해서 유의할 필요가 있는 것으로 판단된다.

**Table 5.** WWF Load / DWF Load (24) ratio

Constituent	Event a	Event b	Event c
TSS	68,674	346	177
BOD <sub>5</sub>	621	39.1	14.2
COD <sub>cr</sub>	1,113	7.0	5.2
TP	1,710	14.5	8.0
TN	353	8.4	4.8

**3.5. 중·소규모 강우시 토지이용 특성의 중요성**

본 연구에서는 분포형 모형인 XP-SWMM을 활용하여 토지이용 특성을 상세하게 반영한 유출모형을 구축하고, 농촌

유역의 오염물질 유출특성에 영향을 미치는 주요인자들에 대해서 검토하였다. 특히 중·소규모 강우시 토지이용 특성이 유출특성에 미치는 영향을 모의하기 위하여, 4회에 걸친 유출특성 상세 모니터링 결과를 활용하여 모형을 구축·검증하였다(건기시 1회 및 강우시 3회). 건기유출수는 24시간 주기의 패턴을 갖는 기저유출로 가정하여 반영하였다. 모형의 검보정에는 Event a와 c의 결과를 순차적으로 사용하였다. 투수지역으로는 논, 밭, 임야 및 나대지, 불투수지역으로는 비닐하우스, 도로 및 택지 등으로 토지이용 특성을 분류하였다. 각 입력변수로서 유역면적, 불투수율, 관중, 관경, 관길이 등의 매개변수는 실측 또는 조사한 값을 사용하여 고정된 변수로 활용하였고, 조도계수, 유역 경사, 침투율, 요면저류량 등과 같은 변수는 초기 설정값에서 시행착오법을 통해 적절한 범위 내에서 최적화를 시도하였다. 분포형 모형을 농촌유역에 적용하면 상세한 토지이용 특성을 반영할 수 있고, 분단위의 유출 결과를 얻을 수 있는 등 많은 장점이 있다. 한편, 유역 및 관거 특성에 대한 상세한 입력자료가 요구될 뿐만 아니라 선행건기일수에 따른 오염물질의 축적과 강우시의 유출(buildup과 washoff)을 결정하는 매개변수들의 체계적인 산정방법이 없기 때문에 수질항목에 대한 검보정이 어렵다는 점에 대해서 충분히 유의해야 한다.

모의결과로서, Event a, b 및 c에 대해 유출모의를 수행한 결과는 다음과 같다. 수문곡선 모의시 179.0 mm 강우사상에서는 침투율이, 35.8 mm 및 17.5 mm 강우사상에서는 불투수율과 요면저류량이 핵심적인 매개변수인 것으로 나타났다. 모형의 정확성을 판단하는 지표로 root mean square error(RMSE)와 Reproduction(simulated value / measured value)을 사용하였으며, Event a, b 및 c에서 RMSE는 각각 0.19, 0.05 및 0.03, Reproduction은 0.95, 1.53 및 0.85로 나타났다. Event b의 Reproduction이 상대적으로 높게 나타났으나, RMSE 값과 본 연구가 진행된 대상유역의 면적(52.8 ha) 및 유출률(0.08)이 작다는 점을 고려하여 유의미한 수준의 정확성이 확보된 것으로 판단하였다.

일반적으로 강우는 지표면의 요면저류량이 충족되어 완전히 습윤 상태에 도달한 후에 지표면의 투수층을 스며들거나 불투수층 위로 흘러 유출이 발생하게 되며, 요면저류량은 유출에 기여하지 못한다. 본 모의에서는 투수지역의 요면저류량을 20 mm로 설정하였다. 침투율과 요면저류량에 대한 입력자료는 Table 6과 같이 구성하였다.

Fig. 9에 유역의 전체유출량 중 투수면과 불투수면에서 나오는 유출량을 각각 비교하여 도시하였다. 불투수면에서는 강우초기부터 유출이 발생하기 시작하여, 초기 유출부하의 전체가 이에 기인하고, 강우가 소강되면서 유출량이 급

**Table 6.** Value of infiltration and depression storage

Constituent	Paddy field	Dry field	Forest	Grass land	Green house	Road	Roof
	Pervious area				Impervious area		
Horton's infiltration	F <sub>0</sub> : 15 mm/hr, F <sub>c</sub> : 1 mm/hr, K : 0.0001 sec <sup>-1</sup>				-		
Depression storage (mm)	20	20	20	10	5	5	5

F<sub>0</sub> : initial infiltration rate, F<sub>c</sub> : ultimate infiltration rate, K : decay constant



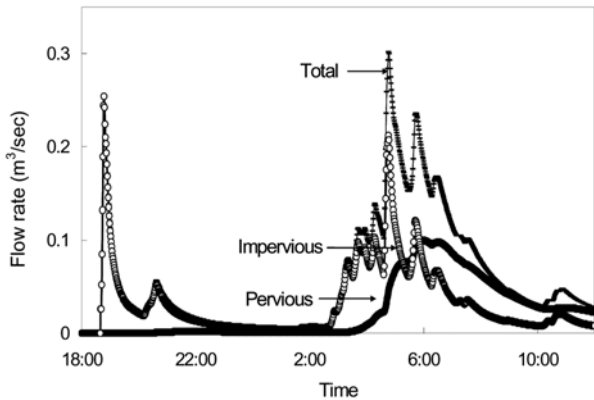


Fig. 9. Comparison of runoff flow rate derived from pervious and impervious area.

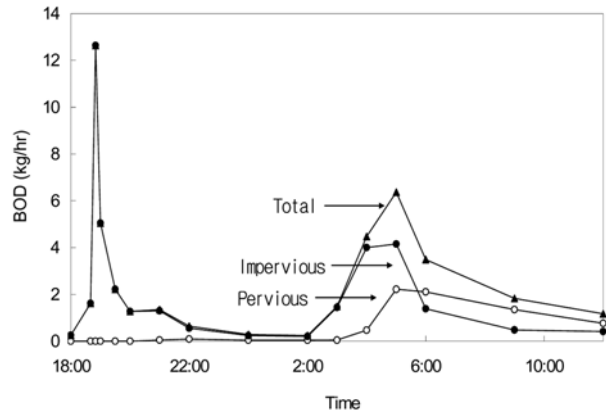


Fig. 10. Comparison of runoff BOD load derived from pervious and impervious area.

격히 줄어드는 특성을 보였다. 투수면에서는 요면저류량과 침투율을 만족시킨 후 유출이 발생하기 시작하며(4시 이후), 강우가 소강된 이후에도 유출감소가 지연되는 것으로 나타났다. Fig. 10에는 BOD<sub>5</sub> 유출부하량의 변동을 도시하고 있으며, 유량에 비례해서 부하량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 강우초기에는 불투수면에서 대부분의 오염물질이 유출되지만 강우후반에는 투수면에서 다량의 오염물질이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 농촌유역의 경우에는 강우 규모가 중·소규모로 작고, 강우강도가 크며, 해당유역에서 불투수면적의 비율이 커질수록 초기유출 현상이 강해질 것으로 판단된다. 농촌유역에서 초기유출 현상에 대한 이해의 불명확성은 강우사상의 영향도 있지만, 불투수면의 분포 여부가 큰 영향을 끼치는 것으로 사료된다. 전체 유역이 논, 밭, 임야 등의 토지이용으로 구성된 농촌유역에서는 초기유출 현상이 미미하지만, 불투수면이 일부라도 분포하고 있는 경우에는 초기유출이 발생할 수 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

Event b에 대한 모의결과는 Table 7에 정리하였다. 오염물질별로 다소의 차이는 있으나 투수지역과 불투수지역의 오염물질 유출부하는 대체로 약 3 : 7의 비율인 것으로 나타났다. 대상유역에서 불투수면의 비율은 약 16%로 전체유역면적에서 차지하는 면적은 작지만 70% 이상의 오염물질이 불투수면에서 발생하고 있기 때문에 농촌유역에서도 불투수면에 대한 고려가 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 소규모 강우의 경우에는 불투수지역 유출부하의 비율이 더욱 높아질 것으로 판단된다.

Table 7. Comparison of runoff pollutant load from pervious and impervious area (Event b)

Constituent	Pervious area		Impervious area	
	Load (kg)	%	Load (kg)	%
TSS	320.6	31.0	712.9	69.0
BOD <sub>5</sub>	12.5	34.2	24.0	65.8
COD <sub>cr</sub>	15.1	24.8	45.7	75.2
TP	0.1	24.2	0.3	75.8
TN	6.8	36.5	11.8	63.5

### 3.6. 비점오염 저감시설 도입시 고려사항

비점오염 저감시설의 도입시 가장 중요한 절차는 설계강우를 설정하고, 저감시설의 처리규모 및 용량을 결정하는 것이다. 고양시의 2007~2008년 강우자료를 자체 분석한 결과에 따르면, 총강우량이 30 mm 이하인 강우가 전체 강우사상의 90% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 농촌유역의 소유역을 처리대상구역으로 하는 비점오염 저감시설의 도입시 설계강우를 총강우량 기준으로 30 mm 이하로 한다면 본 연구에서 수행한 소규모 강우의 유출특성으로부터 여러 시사점을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

국내 농촌유역에는 하수미처리구역이 광범위하게 존재하고, 미처리된 하수는 건기시 및 강우시 지속적으로 하천으로 유입됨으로써 주요한 오염원으로 작용한다. 또한, 본 연구결과에 의하면, 농촌유역에서 30 mm 미만의 소규모 강우에서는 전체면적에서 차지하는 비율이 낮은 불투수면에서 대부분의 오염부하 유출이 발생할 뿐만 아니라, 초기유출에도 크게 기여하는 것으로 나타났다. 따라서, 농촌유역에서 비점오염 저감시설의 도입시에는 (i) 건기유출수의 발생특성 및 그에 수반되는 강우초기 관개내 퇴적물의 유출현상과 더불어, (ii) 불투수면의 분포, 불투수면에서의 오염물질 축적 및 유출과정, 불투수면을 고려한 발생원 관리대책 및 불투수면에 기인하는 오염물질의 초기유출 현상 등을 종합적으로 고려한 비점오염 저감시설의 도입 및 운영에 대해서 중점적으로 검토해야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 약 53 ha의 유역면적을 갖는 소규모 농촌유역을 선정하여 건기시 및 강우규모별로 강우유출수의 유출특성을 해석하였다. 또한, XP-SWMM을 활용하여 토지이용 특성을 상세하게 반영한 유출모형을 구축하고 모의를 수행하여 농촌유역의 오염물질 유출특성에 영향을 미치는 주요인자들에 대해서 검토하였다. 본 대상 농촌유역의 유출특성에 대해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 건기유출수(DWF)의 발생특성을 24시간동안 모니터링한

결과(2009. 6. 22(월)~23(화)), 평균유량은 2.4 L/sec, TSS, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP 및 TN의 평균 유출농도는 7.0 mg/L, 3.2 mg/L, 21.6 mg/L, 0.1 mg/L 및 6.9 mg/L 등으로 나타났다.

- 2) 강우사상별 초기유출 현상을 분석한 결과, Event a(총강우량 179.0 mm)에서는 TSS 및 BOD<sub>5</sub> 등의 항목에서, Event b(총강우량 35.8 mm)에서는 TSS 및 COD<sub>cr</sub> 등의 항목에서, Event c(총강우량 17.5 mm)에서는 TSS, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub>, TP 및 TN 등 여러 수질항목에서 뚜렷한 초기유출 현상이 관찰되었다.
- 3) 총강우량이 감소함에 따라 강우유출수(WWF)에 미치는 건기유출수(DWF)의 영향이 점차 증가하여, 소규모 강우에서는 이에 대한 고려가 필요한 것으로 나타났다.
- 4) 분포형 모형인 XP-SWMM을 사용하여 Event b(총강우량 35.8 mm)의 유출특성을 모의한 결과, 대상 농촌지역에서 불투수면이 차지하는 비율은 16%로 작지만, 전체 오염부하의 약 70%가 불투수면에서 발생하는 것으로 나타났다. 비점오염 저감시설의 주요 고려대상이 되는 중·소규모 강우사상에서 비닐하우스, 택지, 도로 등의 불투수면은 구성 비율이 낮음에도 불구하고 뚜렷한 초기유출 현상을 유발하는 원인이 될 뿐만 아니라 오염부하의 대부분이 이에 기인하는 것으로 나타났다.
- 5) 따라서, 100 ha 이하의 소유역을 갖는 농촌지역에서 비점오염 저감대책을 수립하는 경우에는 건기유출수(DWF)의 발생특성, 불투수면의 분포 및 이에 기인하는 오염물질의 유출특성을 고려하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 에코리버21연구단(과제번호 : 06, 건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현(2003). 우리나라 농

- 지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정. *대한환경공학회지*, **25**(6), pp. 760-770.
- 김유리(2003). 경기도 안산천 유역에서 도시지역과 비도시 지역의 유출 및 비점오염원 특성분석을 위한 SWMM 적용. 석사학위논문, 서울대학교.
- 김이형, 강주현(2004). 강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기유출 특성 및 기준. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 641-646.
- 농림부(2007). *농촌지역 비점오염물질 관리방향 연구 및 기술개발*.
- 배요섭, 남귀숙(2009). 농촌지역 비점오염관리 기술. *농어촌 과학*, **102**, pp. 83-93.
- 원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최종대(2009). 산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(4), pp. 615-623.
- 유세진(2001). 강우시 비점오염원 유출특성과 약 및 총량관리를 위한 SWMM 모형의 적용. 석사학위논문, 단국대학교.
- 이병수, 정용준, 박무종, 길경익(2008). 경안천 유역 농촌지역의 비점오염원 배출 특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(2), pp. 169-173.
- 이용진(2009). SWMM을 이용한 조만강 유역의 비점오염 유출 모델링에 관한 연구. 석사학위논문, 경성대학교.
- 환경부(1998). *수질오염공정시험방법*.
- 환경부(2009). *수질 및 수생태계 보전에 관한 법률*.
- APHA, AWWA and WEF(1998). *Standard method for the examination of water and wastewater*. 20th edition, Washington D.C., U.S.A.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Chebbo, G., and Saget, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Wat. Res.*, **32**(8), pp. 2341-2356.
- Campbell, C. W. and Sullivan, S. M. (2002). Simulating time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model. *Engineering Geology*, **65**, pp. 133-139.
- Deletic, A. (1998). The first flush load of urban surface runoff. *Wat. Res.*, **32**(8), pp. 2462-2470.
- Gautam, B., Kasi, M., and Lin, W. (2006). Determination of fecal coliform loading and its impact on river water quality for TMDL development. *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2006*, pp. 3851-3874.
- Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *J. of Environ. Engineering*, **123**(2), pp. 134-143.