

농촌지역 비점오염물질의 유출 특성

유광현 · 이건직 · 성진욱 · 김동섭¹ · 박제철*

(금오공과대학교 환경공학과, ¹한국수자원공사 K-water 연구원)

Runoff Characteristics of Non-point Pollutant Sources in an Agricultural Area Watershed. Ryu, Kwanghyun, GeonJik Lee, JinUk Seong, DongSup Kim¹ and JaeChul Park* (Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology; ¹K-water Institute, Korea Water Resources Corporation)

This study was conducted to investigate runoff characteristics of non-point pollutant sources in an agricultural area watershed in Boeun area, Chungbuk Province. The monitoring site represented 1.56 km², about 44.4% of which was covered with paddy fields. The monitoring was conducted for six events in a period of 5 month. Event Mean Concentration (EMC) and Site Mean Concentration (SMC) of suspended solids (SS), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (T-N) and total phosphorus (T-P) were calculated using the results of the water quality parameters. A comparison between arithmetic mean concentration and EMC revealed that nearly all EMCs were higher than the corresponding arithmetic mean concentrations. First-flushing effects were exhibited for SS, BOD, and T-P, with relatively high concentrations in early-stage storm events.

Key words : event mean concentration, first flush effect, mass first flush ratio, site mean concentration

서 론

경제발전과 더불어 인구의 증가, 도시화, 산업화에 따라 공공수역으로 유입되는 오염물질의 양이 수체의 자정능력을 초과하면서 수질오염이 심각해지고 있다. 공공수역으로 유입되는 오염물질은 크게 점오염원(point pollutants source)과 비점오염원(nonpoint pollutants source)으로 구분할 수 있다. 이 중 점오염원은 환경기초시설의 설치로 크게 감소하고 있으나 비점오염원은 오염 발생량 및 배출특성의 파악이 매우 어렵고, 발생량이 매우 불규칙하여 저감대책이 미흡한 실정이다. 비점오염원은 시간에 따른 부하량 변동폭이 크며, 강우초기에 오염물질의 농도가 매우 높다(Bedient *et al.*, 1980; Roh *et al.*, 2004). 특히 질소와 인 등의 영양물질이 많이 포함되어 있어 하천이나

호소의 부영양화를 일으키는 원인으로 알려져 있다(Ichiki and Yamada, 1999). 강우유출수내 오염물질의 농도는 기상조건, 수리조건, 지리조건과 토지이용특성에 따라 영향을 받는다. 배출량에 영향을 미치는 요소는 강우강도와 강우지속시간, 토지이용형태, 최종강우 후의 경과일수, 불법적인 오염물질 투입상태 등에 따라 변동된다(Sartor *et al.*, 1974). 최근에는 비점오염원 부하량을 추정하기 위해 주로 토지이용에 따른 원단위를 사용하였으나 강우시 비점오염부하량은 유역의 토지이용형태, 지표퇴적물량, 강우량 및 강우강도 등에 따라 상당한 차이가 발생하기 때문에 실측하지 않으면 오차는 상당히 커질 가능성이 있다(Lee *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2001; Oh *et al.*, 2004; Roh *et al.*, 2006). 이에 따라 정부에서는 2004년 3월에 4대강 수계의 비점오염원관리종합대책을 마련하고 4대강 수계에서 비점오염저감시설 시범설치사업을 추진하여 다양한

* Corresponding author: Tel: 054) 478-7633, Fax: 054) 478-7859, E-mail: pjc1963@kumoh.ac.kr

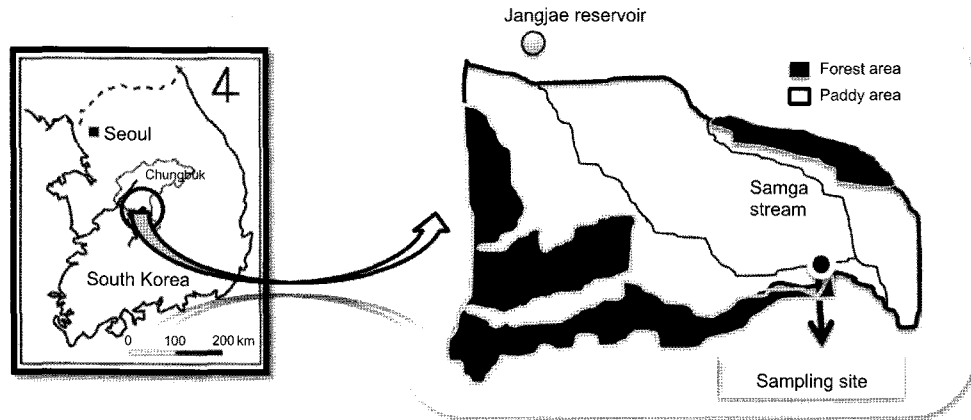


Fig. 1. Location of sampling site in the watershed of the side stream.

유형의 비점오염저감시설의 시설별 적용 가능성을 평가하고 있다. 이처럼 최근 들어 비점오염원에 의한 영향을 저감시키기 위한 투자와 연구가 많이 진행되고 있지만, 이에 대한 관심 및 체계적인 연구가 상대적으로 미흡하고, 강우유출수에 대한 관심은 주로 침투유출 저감 등의 치수대책에 편중되어 비점오염원에 의한 수질문제는 소홀히 다루어지는 측면이 있다.

따라서 본 연구에서는 유역으로부터 발생하는 비점오염원의 특성을 조사하기 위하여 보은군 외속리 농촌지역(유역면적 중 40% 이상이 논지역으로 구성)을 조사대상지로 선정하여 강우기간 동안 유량과 수질을 모니터링을 하였고, 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC), 지역평균농도(Site Mean Concentration, SMC), 초기세척비율(Mass First Flush Ratio, MFF)을 산정하여, 강우 사상에 따른 비점오염물질의 유출특성을 고찰하였다.

재료 및 방법

1 조사대상지의 개요

본 연구는 강우 시 농촌지역에서 강우유출수와 함께 하천으로 유입되는 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위해 수행되었으며 선정된 조사대상지는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 조사대상지는 충청북도 보은군 외속리면 향곡리 상주청원간 고속도로 입구에 위치하였고 상류지역의 장재 저수지로부터 삼가천으로 유입되기 직전인 소하천으로써 북위 36° 26' 33", 동경 127° 47' 41", 고도 154 m인 지점으로 선정되었다. 유역면적은 1.56 km²이고 논지역, 산림지역, 밭지역으로 대부분 이루어져 있어 농촌에서 발생

Table 1. Overview of the selected watershed.

Watershed (km ²)	Land use (%)		
	Paddy field	Forest field	Field
1.56	44.4	38.8	16.8

하는 비점오염물질 유출특성을 평가할 수 있는 유역특성을 보이고 있다(Table 1).

2. 각 이벤트 동안의 강우사상

본 연구는 강우 시 강우유출수의 유출 특성을 파악하기 위해 2008년 6월부터 2008년 10월까지 5개월에 걸쳐 수행되었으며 총 5회의 강우사상에 대하여 모니터링한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 모니터링 기간 동안의 총 강우량은 9.5~121.0 mm의 범위였고, 강우강도는 7.3~27.5 mm hr⁻¹의 범위를 나타냈다. 총 유출유량은 991~417,627 m³의 범위로 나타났고 침투유량은 0.02~10.65 CMS의 범위로 강우사상에 따라 큰 변화폭을 보였다. 선행무강우일수는 0.9~16.5일의 범위를 보였고, 5차 이벤트에서 16.5일로 가장 긴 것으로 나타났다. 조사시기의 강우사상특성, 선행무강우일 수의 차이에 따라 다양한 유출특성이 나타날 것으로 판단된다.

3. 유량조사 및 수질분석

유량은 회전식 유속계(Model 2100)를 이용하여 ISO 2425의 단일측정방법 중 하나인 유속면적법(Velocity-Area Method)에 의해 15분 간격으로 연속 측정되었고 기상관측자료는 기상청의 5분 강우자료를 이용하였다. 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위해 강우가 시작되고

Table 2. Summary of the watershed at the various event.

Event No.	Event date (y/m/d)	Rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Ave. rainfall intensity (mm hr ⁻¹)	Peak flow (CMS)	Antecedent dry day (Day)
1	08/06/17~19	65.5	3.9	16.8	1.90	9.2
2	08/06/28~30	37.5	3.9	9.6	1.26	1.3
3	08/08/15~16	121	4.4	27.5	10.65	0.9
4	08/08/22	34	2.2	15.5	2.02	1.4
5	08/10/22~23	9.5	1.3	7.3	0.02	16.5
Minimum		9.5	1.3	7.3	0.02	0.9
Median		37.5	3.9	15.5	1.90	1.4
Mean		53.5	3.1	15.3	3.17	5.9
Maximum		121	4.4	27.5	10.65	16.5
Standard deviation		42.6	1.3	7.9	4.26	6.9

유량이 증가하여 침투유량에 도달할 때까지 30분 간격으로 채수하다가 유량이 감소하면서부터는 1~2시간 간격으로 조절하여 채수를 하였으며 시료는 자동채수기(Sigma 900)에 의해 채수되었다. 채수된 시료는 4°C 이하로 보관하여 24시간 이내로 실험실로 즉시 운반하여 실험하였고 분석 항목은 SS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P로 수질오염공정시험방법과 Standard method (APHA, 1999)에 따라 분석하였다.

대상유역에서 발생한 오염물질의 총량을 강우유출수의 양으로 나눈 값인 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 이용하여 유출유량부피를 고려하였으며 이를 바탕으로 지역평균농도(Site Mean Concentration, SMC)를 산정하였다. 강우 시 강우유출수에 의해 발생된 비점오염물질의 초기유출특성을 분석하기 위해 누적유출유량에 따른 누적오염부하량 비를 산정하고 각각의 강우와 수질항목을 바탕으로 초기세척비율(Mass First Flush Ratio, MFF)을 산정하여 수치화함으로써 확인하였다(Ma *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2006).

결과 및 고찰

1. 강우유출수의 수질 분석

2008년 6월부터 2008년 10월까지 총 5회의 모니터링 기간 동안 조사된 유량과 수질농도는 Table 3에 요약되어 있고 유량에 따른 수질농도변화는 Fig. 2에 나타나 있다. Table 3과 Fig. 2에 나타난 바와 같이 SS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P의 농도 범위는 각각 0.5~530.0, 0.2~7.9, 1.1~13.0, 1.980~3.230, 0.010~0.317 mg L⁻¹로 나타났다. Table 4는 유량과 각 수질 항목사이의 상관관계를 나타내었다. 5차 이벤트의 경우 유량의 변화가 거의

없이 상관관계 분석에 의미가 없는 것으로 판단되어 제외하였다. 상관관계를 분석한 결과 SS>T-P>COD_{Mn}>BOD>T-N 순으로 상관성이 높은 것으로 나타났고, 특히 SS, T-P가 뚜렷하게 관찰되었다. 유량에 따른 SS와 T-P의 증가는 강우 시 토사유출 등에 의한 입자상물질(부유물질)유입 때문인 것으로 판단되며 특히 T-P의 경우 용존성 물질보다는 입자상 물질 또는 토양에 흡착된 형태로 유출되는 특징을 가지고 있다. 또한 T-P는 영농활동으로 인해 농약이나 비료가 시비되고 이것이 토양에 임시적으로 저장되었다가 강우 시 하천으로 유입되어 유량의 증감에 민감한 것으로 판단되기 때문에 이에 따른 적절한 관리방안을 모색해야 할 것으로 사료된다. 하지만 T-N은 모든 이벤트에서 기저, 최대, 최소농도는 비슷한 경향을 나타내었는데 이는 T-N의 경우 유출유량에 의해 희석된 것으로 사료된다. 1차와 4차 이벤트의 수질농도를 분석해 보면 강우강도는 비슷하나 강우량이 1차가 4차 이벤트에 비해 약 2배 많은 것을 볼 수 있는데 각 수질항목의 침투농도는 1차가 4차 이벤트에 비해 높다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 침투 농도는 강우 강도와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 2차와 4차 이벤트에서의 수질농도를 분석해 보면 강우량은 비슷하나 강우강도는 4차가 2차 이벤트에 비해 약 1.5배 많은데 SS 항목에서 침투 농도는 4차가 2차 이벤트보다 약 3.8배 높다는 것을 볼 수 있는데 이를 통해 높은 강우강도는 SS 항목과 밀접한 관련이 있다는 것을 확인할 수 있다. 1차 이벤트는 선행무강우일수가 9.2일로 비교적 길었으나 강우량이 많고 강우강도도 강했기 때문에 선행무강우일수에 의한 것인지는 확인할 수 없었다. 따라서 비점오염물질의 유출특성을 보다 면밀히 파악하기 위해서는 앞으로 지속적인 모니터링을 통해 다양한 데이터베이스를 구축하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 5차 이벤트의 경우 선행무강우일

Table 3. Summary of storm flowrate and water quality at the various events.

Parameter	Event					
	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	
Event date (y/m/d)	08/06/17~19	08/06/28~30	08/08/15~16	08/08/22	08/10/22~23	
Rainfall (mm)	65.5	37.5	121.0	34.0	9.5	
Ave. rainfall intensity (mm hr ⁻¹)	16.8	9.6	27.5	15.5	7.3	
Flowrate (CMS)	Minimum	0.02	0.03	0.77	0.40	<0.01
	Median	0.24	0.19	5.02	1.19	0.013
	Mean	0.48	0.29	5.11	1.24	0.015
	Maximum	1.90	1.26	10.65	2.02	0.019
	S · D	0.49	0.26	2.18	0.30	<0.01
SS (mg L ⁻¹)	Minimum	2.8	0.5	5.5	3.0	0.5
	Median	9.0	3.0	135.0	11.5	1.0
	Mean	19.9	5.9	198.1	26.0	1.4
	Maximum	120.5	24.3	530.0	92.0	2.5
	S · D	25.8	6.9	169.5	28.8	0.7
BOD (mg L ⁻¹)	Minimum	0.9	0.2	0.3	0.6	0.6
	Median	3.4	1.0	0.9	1.1	1.0
	Mean	3.5	1.1	1.0	1.2	1.0
	Maximum	7.9	3.3	2.7	2.3	1.5
	S · D	2.0	0.8	0.5	0.4	0.3
COD _{Mn} (mg L ⁻¹)	Minimum	1.6	1.5	3.4	2.6	1.1
	Median	8.3	4.6	8.3	4.1	1.2
	Mean	7.8	4.6	8.4	4.4	1.2
	Maximum	12.2	7.5	13.0	6.2	1.3
	S · D	3.2	1.8	2.3	0.9	0.1
T-N (mg L ⁻¹)	Minimum	2.100	2.110	1.980	2.170	2.160
	Median	2.340	2.390	2.335	2.400	2.240
	Mean	2.408	2.463	2.446	2.436	2.243
	Maximum	3.230	2.890	3.070	3.030	2.341
	S · D	0.248	0.240	0.292	0.214	0.052
T-P	Minimum	<0.01	<0.01	0.011	<0.01	<0.01
	Median	0.028	0.030	0.100	<0.01	0.012
	Mean	0.072	0.039	0.107	0.013	0.012
	Maximum	0.317	0.130	0.274	0.025	0.016
	S · D	0.095	0.032	0.074	0.005	0.002

Table 4. Correlation coefficients of between flowrate and water quality indices.

Event	Parameter				
	SS	BOD	COD _{Mn}	TN	TP
1	0.733**	0.418*	0.775**	0.043	0.692**
2	0.819**	0.873**	0.761**	0.081	0.823**
3	0.679**	0.359*	0.721**	0.394*	0.840**
4	0.729**	0.705**	0.628**	0.637**	0.563**
Mean	0.740	0.589	0.721	0.289	0.730

* : p < 0.05, ** : p < 0.01, p : significance level

수가 16.5일로 길었으나 강우량이 적어 유량의 변동이 적어 수질항목별 기저, 최대, 최소농도는 크게 다르지 않은

것으로 판단된다. 이를 통해 본 조사대상지는 유역면적 중 투수층이 대부분으로 투수율이 높고 논지역의 경우 논에 일시적으로 물을 가둬두는 역할을 하기 때문에 적은 강우량과 약한 강우강도는 본 조사대상지에 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었다.

2. EMCs와 SMC 분석

총 5회의 강우사상에 대해 모니터링 한 결과를 바탕으로 EMC, SMC를 산정한 결과는 Table 5에 나타난 바와 같다. 먼저, 강우유출수의 EMC 농도를 확인해 보면 SS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P의 농도는 각각 1.4~209.0, 1.0~4.3, 1.2~10.3, 2.235~2.526, 0.012~0.119 mg L⁻¹의 범

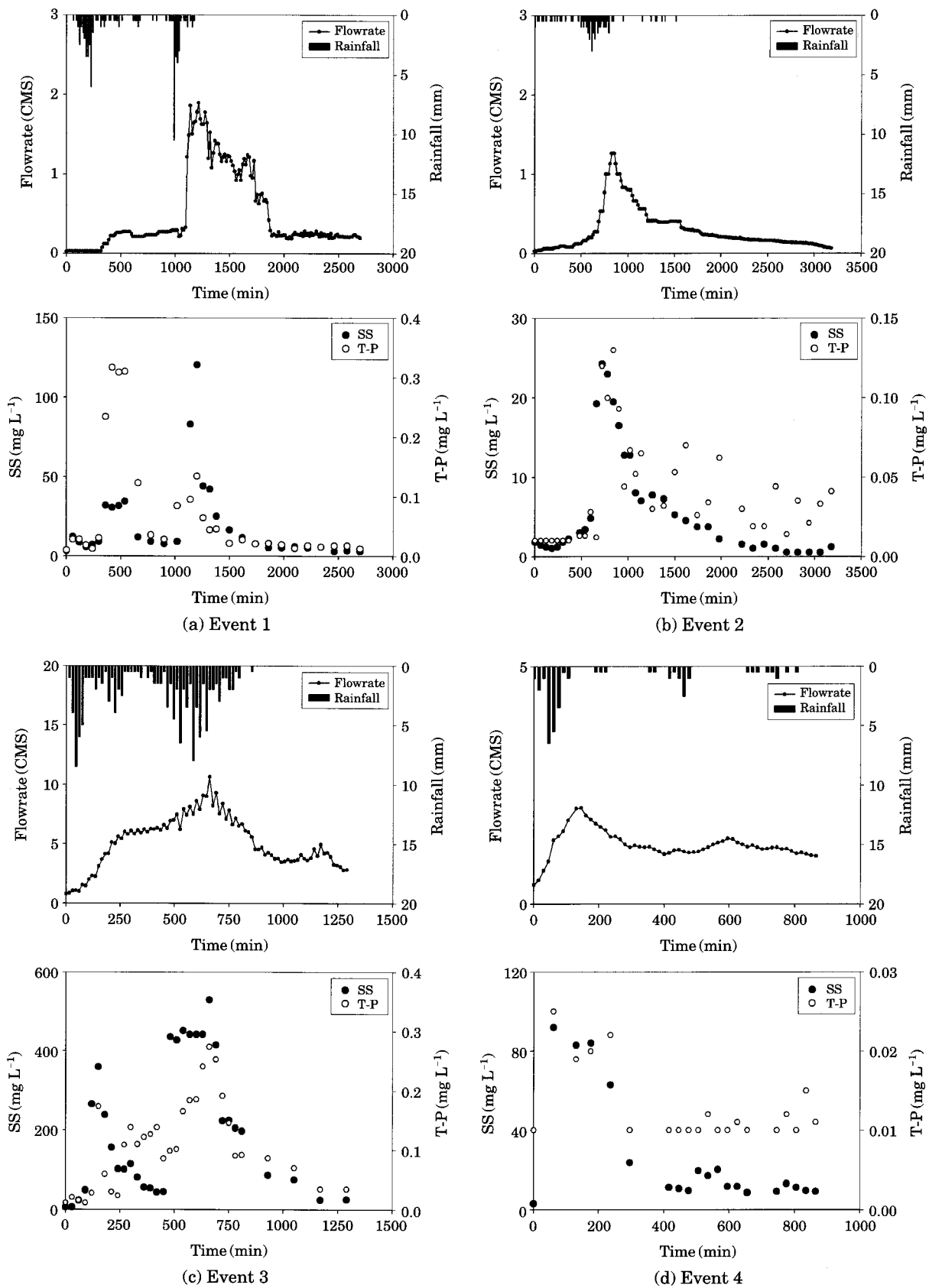


Fig. 2. Variation of SS and T-P concentration depending on the various storm events.

위로 나타났다. 그리고 SMC는 SS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P가 각각 58.5, 1.8, 6.1, 2.410, 0.053 mg L⁻¹로 나타났다. Yun and Cho (2005)와 Kim *et al.* (2008)은 각각 영랑호 유역과 금강수계의 중류부 지류인 정안천 유역에서 분석한 결과를 바탕으로 산술평균농도와 EMC를 비교하였다. EMC 농도가 산술평균농도보다 대체적으로 높은 농도

를 보였는데, 본 연구에서도 비슷한 결과로 조사되었다. 전반적으로 입자성 물질이 유입됨에 따라 SS, T-P가 높은 EMC 농도를 나타냈고 특히 강우량이 많고 강우강도도 강했던 1, 3차 이벤트에서 높게 나타났다. 그리고 강우강도가 강했던 4차 이벤트는 2차 이벤트에 비해 높은 EMC를 나타냈다. 하지만 BOD와 COD_{Mn}은 100 mm 이상의 강우가 발생할 경우 오히려 유출유량에 희석되는 것으로 보였다. 반면에 강우량이 적고 강우강도도 약했던 5차 이벤트의 항목별 EMC 농도는 기저농도와 비슷한 경향을 나타내었는데, 이것으로 보아 10 mm 이하의 적은 강우량과 약한 강우강도는 본 연구대상지에 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. T-N의 경우 모든 이벤트에서 비슷한 EMC 농도를 보였는데 이것은 T-N은 유량의 증감에 민감하지 않음을 의미한다. 본 연구 결과를 통해 나타난 EMC와 SMC를 분석해 보면 강우사상에 따른 강우유출수의 EMC와 SMC 농도는 다양하게 나타났는데 이는 같은 유역에서조차도 EMC를 예측하는 데 있어 용이하지 않음을 의미한다 (Kim and Kang, 2004).

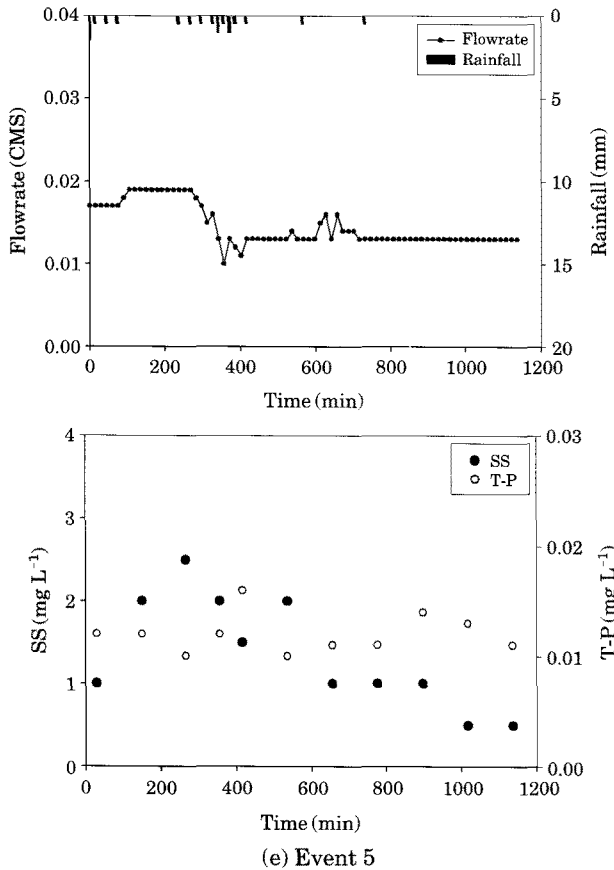


Fig. 2. Continued.

3. 초기세척효과 (First Flush Effect)

강우유출수에 포함된 SS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P의 초기유출특성을 표현한 그래프는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. SS, BOD, T-P의 초기세척효과가 뚜렷하게 관찰되었고, SS > T-P > BOD 순으로 나타났는데, 입자형태인 SS, T-P의 초기유출이 뚜렷한 것으로 보인다. 초기세척효과는 강우량이 많고 강우강도도 강했던 1차 이벤트의 경우 특히 뚜렷하게 나타났고 3차 이벤트의 경우 강우 후반부의 강한 강우강도로 더 많은 비점오염물질 부하가 발생하여 초기세척 개념을 적용시키기 힘들 것으로 판단된다. 강우량이 적고 강우가 간헐적으로 발생한 5차 이벤트는 SS를 제외하면 초기세척효과가 나타나지 않았는데, 이

Table 5. EMCs, AMC, and SMC for the storm events.

	Event 1		Event 2		Event 3		Event 4		Event 5		
Event date (y/m/d)	08/06/17~19		08/06/28~30		08/08/15~16		08/08/22		08/10/22~23		
Rainfall (mm)	65.5		37.5		121		34		9.5		
Ave. rainfall intensity (mm hr ⁻¹)	16.8		9.6		27.5		15.5		7.3		
	EMC	AMC	EMC	AMC	EMC	AMC	EMC	AMC	EMC	AMC	SMC (mg L ⁻¹)
SS	36.2	19.9	9.3	5.9	209.0	198.1	36.4	26.0	1.4	1.4	58.5
BOD	4.3	3.5	1.6	1.1	1.0	1.0	1.3	1.2	1.0	1.0	1.8
COD _{Mn}	10.3	7.8	5.7	4.6	8.8	8.4	4.5	4.4	1.2	1.2	6.1
T-N	2.369	2.408	2.448	2.463	2.472	2.446	2.526	2.436	2.235	2.243	2.410
T-P	0.062	0.072	0.057	0.039	0.119	0.107	0.014	0.013	0.012	0.012	0.053

*AMC: Arithmetic Mean Concentration

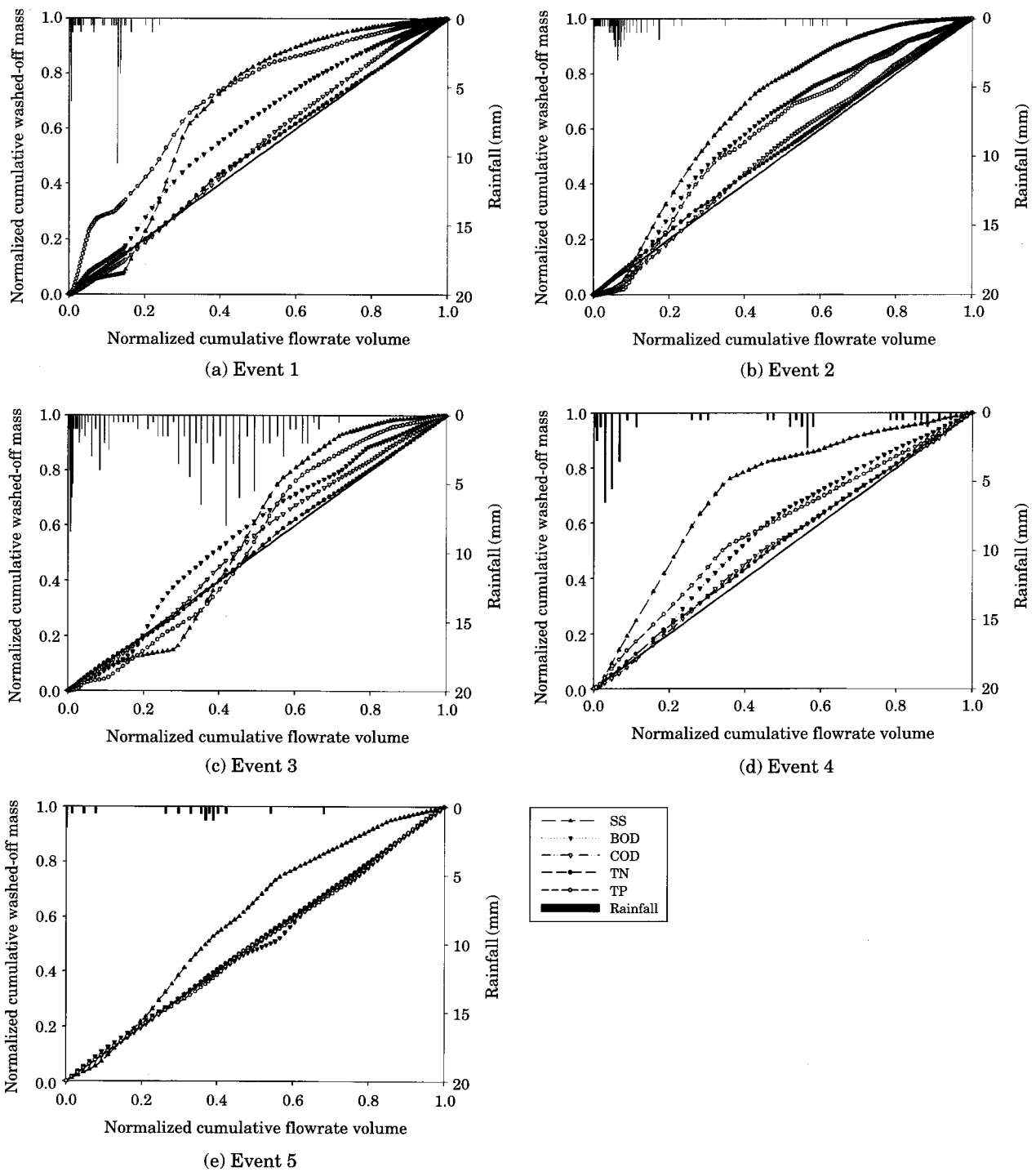


Fig. 3. Normalized cumulative curve on the various storm events.

것으로 보아 수질 항목 중 SS는 강우에 가장 민감한 것으로 사료된다. 또 유역면적 중 투수층이 대부분을 차지하기 때문에 투수율이 높고 논지역의 경우 논에 일시적으로 물을 가뒀두는 역할을 함으로써 적은 강우량과 약한

강우강도는 본 조사대상지에 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 반면에 대부분 COD_{Mn}, T-N은 기울기의 변화가 나타나지 않았는데, 이는 초기세척효과가 거의 없음을 의미한다. Kim *et al.*(2003)의 연구에서는 비점오염물질의

Table 6. Summary of peak MFF_n and Mass First Flush Ratio.

Parameter	Event					
	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	
Event date (y/m/d)	08/6/17~19	08/6/28~30	08/8/15~16	08/8/22	08/10/22~23	
Ave. rainfall intensity (mm hr ⁻¹)	16.8	9.6	27.5	15.5	7.3	
Peak flow (CMS)	1.90	1.26	10.65	2.02	0.02	
SS	Peak MFF_n	30	30	60	20	40
	Ratio	1.89	1.81	1.34	2.26	1.35
BOD	Peak MFF_n	30	30	30	40	10
	Ratio	1.47	1.55	1.34	1.32	1.15
COD _{Mn}	Peak MFF_n	50	40	50	40	30
	Ratio	1.08	1.10	1.14	1.13	1.01
T-N	Peak MFF_n	40	20	10	20	40
	Ratio	1.09	1.14	1.04	1.14	1.02
T-P	Peak MFF_n	10	30	60	10	10
	Ratio	3.00	1.49	1.26	1.58	1.01

유출특성을 파악하는 데 있어 유역특성, 강우특성, 유량 특성 등의 인자에 대한 연구가 필요할 것으로 판단하였다. 본 연구 결과를 통해서도 알 수 있듯이 비점오염물질의 유출특성은 유역특성, 강우특성, 유량특성 등의 인자에 의해 영향을 끼치므로 지속적인 모니터링을 통해 다양한 데이터베이스를 구축하여 비점오염물질 유출특성을 체계적으로 파악해야 할 것으로 사료된다.

4. 초기세척비율 (Mass First Flush Ratio)

Table 6에는 각 이벤트 별 Peak MFF_n 과 그 비율을 나타내었다. Table 6에 나타난 바와 같이, 초기세척의 개념을 적용하기 어려운 3차 이벤트를 제외하면, 전반적으로 초기세척비율(Mass First Flush Ratio)은 $MFF_{10} \sim MFF_{40}$ 에서 피크를 나타냈다. SS의 경우 4차 이벤트에서 MFF_{20} 의 비율이 2.26으로 나타났는데 이는 초기 20%의 강우유출수에 45%의 비점오염물질이 포함되어 있음을 의미한다. 그리고 BOD의 경우 2차 이벤트에서 MFF_{30} 의 비율이 1.15로 나타났는데 이는 초기 30%의 강우유출수에 47%의 비점오염물질이 포함되어 있었으며 T-P의 경우는 1차 이벤트에서 MFF_{10} 의 비율이 3.00으로 나타났는데 이는 초기 10%의 강우유출수에 30%의 비점오염물질이 포함되어 초기유출이 가장 큰 것으로 나타났다. COD_{Mn}, T-N의 경우 Peak MFF_n 의 비율은 각각 1.01~1.14, 1.02~1.14의 범위로 나타났는데 이것으로 비추어 볼 때, COD_{Mn}, T-N은 초기세척효과가 거의 없는 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 강우 시 농촌지역에서 강우유출수와 함께 하천으로 유입되는 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위해 수행되었다. 유량의 증감에 따른 수질항목의 상관관계는 SS, T-P, COD_{Mn}, BOD, TN의 순으로 상관성이 높은 것으로 나타났고, 강우량, 강우강도, 선행무강우일수에 따라 다양한 유출 특성을 보였다. 분석된 결과를 바탕으로 EMC와 SMC를 산정한 결과 SS, T-P는 강우사상에 따라 높은 EMC 농도변화를 보였고 산술평균농도와 EMC를 비교하였는데 대체적으로 EMC가 더 높은 것으로 나타나 유량의 증감에 영향이 있는 것으로 나타났으나 T-N의 경우 영향이 없는 것으로 보였다. 또 초기유출특성을 살펴보면 강우 후반부의 강한 강우강도로 인해 초기세척 개념을 적용시키기 어려운 3차 이벤트와 강우량이 적고 강우강도도 약했던 5차 이벤트를 제외한 다른 이벤트에서 초기세척효과가 관찰되었고 SS>T-P>BOD>COD_{Mn}>T-N 순으로 뚜렷하게 나타났다. 그리고 초기세척비율 계산 결과, 초기 유출수의 30%에 가장 많은 오염부하가 발생하고 대부분 입자형태 즉, SS, T-P의 유출이 뚜렷하므로 저류지를 통해 초기 강우유출수의 비점오염물질을 제거하는 것이 바람직하다고 판단된다. 본 연구를 통해 분석된 결과를 바탕으로 비점오염물질의 유출특성에 대한 다양한 데이터베이스를 구축하여 향후 비점오염원을 체계적으로 관리함으로써 하천 수질을 개선하려는 노력이 필요할 것으로 사료된다.

인용문헌

- APHA, AWWA and WPCF. 1999. Standard Method for Examination of water and wastewater. 20th edition, New York, USA.
- Bedient, P.B., J.L. Lambert and N.K. Springer. 1980. Stormwater pollution load-runoff relationship. *J. WPCF* **52**: 2396-2404.
- Han, Y.H., S.L. Lau, M. Kayhanian and M.K. Stenstrom. 2006. Correlation analysis among highway stormwater pollutants and characteristics. *Water SCI. Technol.* **53**: 235-243.
- Ichiki, A. and K. Yamada. 1999. Study on characteristics of pollutant runoff into Lake Biwa Japan. *Water Study. Technol.* **39**: 17-25.
- Kim, G.H., Y.C. Kim, D.R. Lee, H.Y. Jung and J.H. Yur. 2003. Analysis and estimation of EMC loads of rainfall runoff from agricultural-forestry in Korea. *Korean Society of Environmental Engineers* **25**(6): 760-770.
- Kim, J.H., K.H. Han and J.S. Lee. 2008. Characteristics of agricultural non-point source pollutant by rainfall events in rural watersheds. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**(1): 67-77.
- Kim, L.H. and J.H. Kang. 2004. Determination of event mean concentration and pollutant loading in highway storm runoff. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(6): 631-641.
- Lee, H.D., J.H. Ahn, C.H. Bae and W.J. Kim. 2001. Estimation of the unit loading of nonpoint source in Paldang watershed by runoff loading during the rainfall. *Journal of Korean Society on Water Quality* **17**(3): 313-326.
- Ma, J.S., S. Khan, Y.X. Li, L.H. Kim, S. Ha, S.-L. Lau, M. Kayhanian and M.K. Stenstrom. 2002. First flush phenomena for highways: how it can be meaningfully defined. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (ICUD). Portland, Oregon 1-11.
- Oh, Y.T., J.C. Park, D.S. Kim and J.K. Rhyu. 2004. Pollutant Characteristics of Nonpoint Source Runoff in Okcheon Stream. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(6): 657-663.
- Park, J.Y., J.M. Oh and Y.C. Kim. 2001. Runoff characteristics of major pollutants at the inflow stream to Lake Sap-Kyo in rainy periods. *Korean Journal of Limnology* **34**(1): 62-69.
- Roh, S.D., D.K. Lee and Y.K. Chun. 2004. A study on the early-stage storm runoff treatment for the reduction of non-point pollution materials on the road. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(5): 525-533.
- 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.
- Sartor, J.D., G.B. Body and F.J. Agardy. 1974. Water pollution aspects of street surface contaminants. *Journal of WPCF* **46**: 458-467.
- Yun, S.J. and J.H. Cho. 2005. Characteristics of pollutants discharge in Youngrang lake watershed. 2005 Proceeding the Korean Society of Water and Wastewater 442-448.

(Manuscript received 4 March 2011,
Revision accepted 11 May 2011)