

## 국내 중소 도시지역 강우유출수의 유출특성

이홍신 · 이승환<sup>†</sup>

금오공과대학교 토목환경공학부 환경공학전공

(2009년 1월 30일 접수, 2009년 3월 23일 채택)

## Runoff Characteristics of Stormwater in Small City Urban Area

Hongshin Lee · Seunghwan Lee<sup>†</sup>

School of Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**ABSTRACT** : This study was conducted to identify the magnitude of first flush in small city urban area and to provide the basic information on the criteria of stormwater runoff management. Monitoring site was surrounded by residential area in Gumi city near to national industrial complex and the monitoring period was three months. Total watershed area was 24.9 ha, where 80% of the area is impervious (asphalt of pavement type). Periodic monitoring of conventional water quality parameters were conducted with six times of rainfall period. Event mean and site mean concentrations for all the parameters were calculated based on the analytical results. Particle size distribution was 9.82  $\mu\text{m}$  for  $D_{0.1}$ , 38.99  $\mu\text{m}$  for  $D_{0.5}$  and 159.61  $\mu\text{m}$  for  $D_{0.9}$  respectively. First flush phenomenon was detected highly in particulate solids than dissolved ones. The first flush criteria results by mass first flush contained between 44.4% to 58.5% pollutant mass during the first 30% of runoff volume. Mass first flush ratio and particle size distribution obtained in this study are expected to provide the basic information for the design and operation of non-point source treatment facility.

**Key Words** : Event Mean Concentrations Site Mean Concentration, Particle Size Distribution, First Flush

**요약** : 본 연구는 국내 중소 도시지역에서 강우 시 발생하는 강우유출수의 유출경향을 분석하고 초기강우기준을 산정하기 위하여 수행되었다. 연구지역은 국가산업단지가 소속되어 있는 구미시 원평동의 주거지역으로 선정 되었으며 모니터링 기간은 3개월에 걸쳐 시행되었다. 연구지역의 유역면적은 24.9 ha이고, 토지이용형태는 주거지역으로 대상유역의 80%가 불투수 면적(포장의 형태: 아스팔트)인 것으로 나타났다. 모니터링은 총 6회의 강우사상에 대하여 실시하였으며 모든 수질항목에 대해 EMC (Event Mean Concentration)와 SMC (Site Mean Concentration)를 산정하였다. 또한 강우지속시간에 따른 입경크기분포의 변화와 초기세척 현상을 관찰하였는데, 입경크기분포는 10%입경( $D_{0.1}$ ), 50%입경( $D_{0.5}$ ), 90%입경( $D_{0.9}$ )이 각각 9.82  $\mu\text{m}$ , 38.99  $\mu\text{m}$ , 159.61  $\mu\text{m}$ 로 나타났고, 초기세척 현상은 용존성 물질보다 입자성 물질이 더 강하게 나타났다. MFF<sub>n</sub> (Mass first flush)을 이용하여 초기강우기준을 검토한 결과 초기우수유출수의 부피 30%에 오염물질부하량의 부피 44.4~58.5%를 포함하고 있는 것으로 나타났다. MFF<sub>n</sub>과 입경크기분포는 자연형, 장치형 시설과 같은 다양한 비점오염저감시설의 설계 및 운전과 초기강우기준 결정을 위한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

**주제어** : 유량가중평균농도, 지역평균농도, 입경크기분포, 초기세척비율

### 1. 서론

공공수역으로 유입되는 오염물질의 발생원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있으며, 점오염원은 주로 가정하수와 공장폐수로 구성된다. 점오염원의 배출특성은 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생되어 강우시나 비강우시 배출량에 큰 변동이 없다. 이에 비해 비점오염원이란 오염물질이 주로 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로서 도시지역의 먼지와 쓰레기, 농지에 살포된 비료 및 농약, 토양침식물, 축사유출물, 자연동식물의 잔여물, 대기오염물질의 강하물 등을 말한다.<sup>1)</sup> 일반적으로 비점오염원은 배출지역에 따라 도시지역, 농

촌지역, 자연지역, 수계지역으로 구분 할 수 있다. 도시지역은 주거, 상업, 공업지역으로 다시 세분화되며, 농촌 지역은 논, 밭, 과수원으로, 자연지역은 산림, 초원지역으로 세분된다.<sup>2)</sup> 이와 같은 비점오염원의 구분은 유역 및 지역의 토지이용 형태별로 강우유출수의 유출특성이 다양하고, 특히 강우 시 지표면에 쌓여있던 각종 오염물질들이 강우와 함께 단시간 내에 방류선 수체로 유입되어 도시하천의 수질에 심각한 영향을 미치고 있다. 현재 비점오염원으로 인한 오염부하량이 4대강 수계에서 22~40% 정도 차지하고 있으며, 2020년에는 54.3%까지 증가할 것으로 예측하고 있다. 이에 따라 정부에서는 2004년 3월에 4대강 수계의 비점오염원관리 종합대책을 마련하고 4대강 수계에서 비점오염원관리 시범설치사업을 추진하여 다양한 유형의 비점오염저감시설의 시설별 적용 가능성을 평가하고 있다. 비점오염원의 경우, 토지이용 형태 및 강우유출수의

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: dlee@kumoh.ac.kr  
Tel: 054-478-7632

Fax: 054-478-7629

유출특성에 따라 관리기법이 상이하므로 비점오염원의 영향이 큰 토지이용을 선정한 뒤, 토지이용 형태에 따른 기초적인 자료를 조사하여 분석할 필요성이 제기되고 있다. 비점오염원의 영향이 큰 토지이용형태를 가지고 있는 도시지역은 주차장 및 광장 등의 확대에 따라 불투수층의 증가가 심한지역이며, 이에 따라 강우 발생 시 주변 환경에 다양한 환경수리학적 문제를 야기시킨다. 불투수층의 증가는 강우유출계수의 상승을 유발하게 되며 강우 유출수의 증가로 이어진다. 특히 강우초기에 고농도의 비점오염물질이 유출되는 초기강우현상을 일으키고, 다른 토지이용에 비해 동일 면적 당 오염물질 유출부하량이 높으며 많은 차량의 활동으로 인하여 다량의 입자상, 중금속 및 유해 화학물질 등의 유출이 많은 지역이다. 이러한 포장된 도시지역에서의 비점오염물질 유출저감은 오염총량관리제에서 중요한 관리 대상으로 인식되고 있으나, 현재 국내의 상황은 모니터링을 통한 기초조사 자료의 부족으로 인하여 관리방안 수립에 큰 애로점을 가지고 있다.<sup>3)</sup> 최근 환경부에서는 산업단지 조성시 비점오염물질을 저감시킬 수 있는 시설을 의무화 하고 있으며 도로에서의 비점오염물질 유출저감방안에 관한 법적 규제 방안도 구체화 하고 있다. 이와 같이 국내에서도 최근 들어 비점오염원에 대한 중요성을 인식하고 다양한 저감방안을 모색하고 있으나 다양한 토지이용형태에 따른 비점오염물질의 유출특성에 대한 기초자료는 부족한 실정이다.<sup>4)</sup> 본 연구는 국내에서 최근에 시행되고 있는 오염총량관리제에 부합하는 조사 자료를 제공하기 위해서 국내 중소 도시지역에서 강우 시 발생하는 비점오염원의 유출경향을 분석하고 초기강우기 준를 산정하여, 적절하게 비점오염원의 관리방안을 마련하기 위한 기초자료를 제공하기 위해 수행되었다. 이러한 기초조사 결과는 향후, 비점오염원관리방안 수립 시 비점오염원의 유출부하량산정 및 최적관리방안수립에 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 대상유역의 선정

비점오염원에 대한 유량 및 수질 모니터링은 강우 및 유역특성에 의해 오염물질 유출에 영향을 받는 비점오염원 연구 시 가장 중요한 연구과정으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 비점오염원의 특성인 자료의 불확실성을 최대한 줄이기 위하여 강우량 및 유량을 5분 단위로 측정하였다.<sup>5)</sup> 또한 수질시료는 강우초기 1시간 동안은 5-15분 간격으로 7개의 시료를 채취하였으며, 이후 1시간 간격으로 3개의 시료를 채취하였다. 대상유역은 유역내 토지이용형태가 균일하고, 한 지점으로 유역내 강우유출수가 집수되는 지점이어야 한다.<sup>6)</sup> 본 연구에서는 대상지역을 선정할 때 이러한 유역특성을 고려하기 위해서 연구지역의 하수관망도, 토지이용도와 현장조사를 통해 강우시 유역내 유출수가 한 지점으로 집수되는 유역을 선정하였다. 대상유역으로 선정



Fig. 1. Watershed and location of sampling site.

Table 1. Overview of selected watershed

Watershed (ha)	Land Use	Land Slope (%)	Impervious Area (%)	Pavement Type	Pipe Type
24.9	Residential	0.027	80	Asphalt	Separate Sewer System

한 소유역은 Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 경북 구미시 원평동에 위치하고 있다. 대상유역의 토지이용형태, 유역면적, 유역경사, 불투수면적, 포장형태 및 관거의 형태는 Table 1에 요약된 바와 같다.

본 연구지역의 유역면적은 24.9 ha이고, 토지이용 형태는 주거지역으로 조사되었다. 이 지역은 시가지의 중심부로서 전유역이 포장되어 있고 교통량과 사람의 통행이 매우 빈잡한 도로와 시가지로 구성되어 있어 비점오염원의 유출이 많은 곳으로 예상된다. 조사 지점의 배수유역에서 발생한 강우유출수는 구미천변을 따라 설치된 합류식 우수관거를 통해 본 조사지점으로 유입된다. 환경부는 2001년부터 2006년 말까지 실시한 ‘전국 하수관거 정비 타당성 조사’ 결과 하수관거는 평균 8.6 m당 한 곳이 불량이며, 전체 하수량의 31%가 외부 침입수인 것으로 보고하였다.<sup>7)</sup> 본 연구지역 또한 건기시에도 원인이 명확히 밝혀지지 않은 몇 가지 요인들로 인해 본 조사지점의 관거 내에서는 불명수가 침입하여 건기시 기저유량을 형성하고 있었으며, 조사 결과 본 조사지점의 건기 평균 기저유량은 22.4 m<sup>3</sup>/h였고 관내 평균유속은 0.025 m/s로 나타났다.

### 2.2. 이벤트 기간의 강우사상

본 연구는 2008년 5월부터 2008년 7월까지 3개월에 걸쳐 수행되었으며 총 6회에 걸쳐서 모니터링 된 강우사상은 Table 2에서 보여주고 있는 바와 같다. 강우자료는 기상청의 5분 강우자료를 활용하였다. 모니터링 기간 동안의 총 강우량은 4.5-25.5 mm의 범위였으며, 평균강우강도는 1.6-15.9 mm/hr 범위로 나타났다. 또한, 선행건기일수는 4차 이벤트의 9일이 가장 길었으며, 총 유출량은 188.2~2826.9 m<sup>3</sup> 범위이고, 침투유량은 0.032-0.744 m<sup>3</sup>/s 범위

**Table 2.** Summary of watershed at various events

Event No.	Event Date (y/m/d)	Antecedent Dry Day (Day)	Total Rainfall (mm)	Storm Duration (hr)	Ave. Rainfall Intensity (mm/hr)	Peak Runoff Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Runoff Coefficient	Total Volume of Runoff (m <sup>3</sup> )
1	08/05/13	8.0	4.5	2.5	1.8	0.032	0.26	188.2
2	08/05/18	3.0	14.0	2.3	6.1	0.236	0.56	478.9
3	08/06/05	6.0	8.0	5.0	1.6	0.036	0.33	195.8
4	08/06/18	9.0	16.0	4.2	3.8	0.094	0.36	369.0
5	08/07/19	5.0	10.5	0.8	13.1	0.338	0.37	664.2
6	08/07/25	2.0	25.5	1.6	15.9	0.744	0.68	2826.9
Mean		5.5	13.1	2.7	7.1	0.247	0.43	787.2
Median		5.5	12.3	2.4	5.0	0.165	0.37	424.0
Maximum		9.0	25.5	5	15.9	0.744	0.68	2826.9
Minimum		2.0	4.5	0.8	1.6	0.032	0.26	188.2
Standard Deviation		2.7	7.3	1.6	6.1	0.272	0.16	1015.3

로 나타났다. 합리식을 이용하여 계산한 유출계수는 0.26~0.68 범위로 나타났다.

2.3. 수질분석 및 조사방법

유량조사는 자동측정 유량계를 이용하여 5분 간격으로 연속 측정하여 이루어졌으며, 조사에 사용된 유량계는 자동측정 및 데이터저장이 가능한 전자식(FLO-TOTE III)유량계를 사용하였다. 건기 시 수질분석은 하수의 시간별 특성을 반영하기 위하여 4시간 간격으로 1일 6회 시료를 채취하여 이루어졌다. 또한 강우 시에는 강우 개시 직전부터 시작하여 강우 초반부에는 높은 빈도로 측정하였으며, 중반부와 후반부로 갈수록 시료 채취 간격을 낮은 빈도로 조정하였다. Table 3에는 건기시와 강우시에 시행된 구체적인 수질조사 빈도 및 방법이 요약되어 있다.

**Table 3.** Monitored sampling time at dry and wet Seasons

	Sampling Frequency
Dry Season	0, 4 hr, 8 hr, 12 hr, 16 hr, 20 hr
Wet Season	0, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 1 hr, 2 hr, 3 hr, 4 hr

수질 조사는 현장조사 기간 동안 유량측정과 동일한 지점에서 강우유출수의 유출특성을 파악하기 위하여 BOD<sub>5</sub>를 포함한 12개 항목에 대하여 수행되었으며, 수질오염공정시험법과 Standard method에 의하여 분석하였다.<sup>8)</sup> 또한 강우 시 경과시간에 따른 입경크기분포를 측정하기 위해 Malvern Instruments사의 Mastersizer 2000을 사용하였다. Table 4에는 구체적인 수질조사 항목과 항목별 분석방법을 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우유출수의 수질 및 유출경향

2008년 5월 13일 부터 2008년 7월 25일까지 총 6회 이벤트의 강우사상에 대해서 측정된 유량 및 오염물질농도는 Table 5에 요약되어 있고, 강우유출수의 유출경향은 Fig. 2에 나타나 있다. 강우유출수의 수질농도를 확인해보면, 전체이벤트 기간 동안의 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, TN, TP 그리고 n-Hexane Extracts의 수질농도는 각각 2.3~79.5 mg/L, 5.0~365.8 mg/L, 4.0~339.0 mg/L, 1.9~21.8 mg/L, 0.2~

**Table 4.** Analytical parameter and methods

Parameter	Method
Flowrate	FLO-TOTE III, Marsh-McBirney
Particle Size Distribution	Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd
Turbidity (Turb.)	Orion AQ2010, Thermo
Biochemical oxygen demand (BOD <sub>5</sub> )	Winkler Method Azide Modification(5 day BOD Test)
Chemical oxygen demand (COD <sub>Cr</sub> )	Photometrically Method (Potassium Dichromate Method)
Dissolved Organic Carbon (DOC)	Filtration, (TOC-5000A, Shimadzu)
Total suspended solids (SS)	Filtration, Gravimetric Method, Electric Dry Oven (103~105 °C)
Nitrogen (TN)	Ultraviolet Spectrophotometric Method
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	Digestion, Distillation using Kjeldahl Flask
Phosphorus (TP)	Persulfate Digestion and Ascorbic Acid Method
N-Hexane Extracts (n-h)	N-Hexane Extraction followed by Weighing
Heavy meta l(Cd, Pb, Zn)	Inductively Coupled Plasma (Varian 720-OES, Varian)

**Table 5.** Summary of storm runoff and water quality at various events

Parameter \ Event		Event					
		Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
Event Date (y/m/d)		08/05/13	08/05/18	08/06/05	08/06/18	08/07/19	08/07/25
Total Rainfall (mm)		4.5	14.0	8.0	16.0	10.5	25.5
Storm Duration (hr)		2.5	2.3	5.0	4.2	0.8	1.6
Runoff (m <sup>3</sup> /min)	Mean	0.8	2.4	1.1	2.1	2.6	6.8
	Median	0.7	0.8	0.9	2.4	0.8	0.3
	Maximum	1.9	14.2	2.1	5.6	20.3	44.6
	Minimum	0.5	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1
	S/D	0.4	3.7	0.5	1.7	5.2	13.4
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	Mean	41.8	13.2	13.8	24.2	15.0	8.1
	Median	49.8	10.9	3.8	14.7	6.8	5.7
	Maximum	74.7	42.5	57.6	79.5	47.8	18.6
	Minimum	5.8	2.8	2.8	2.3	6.2	3.4
	S/D	30.3	11.8	18.4	25.5	14.3	5.5
CODCr (mg/L)	Mean	184.3	38.9	40.5	60.9	53.4	33.2
	Median	161.9	27.6	8.2	32.4	24.0	22.7
	Maximum	365.8	136.4	190.7	201.1	154.2	62.9
	Minimum	28.1	6.8	5.0	5.2	18.3	18.0
	S/D	134.9	40.2	61.3	71.1	51.3	17.3
SS (mg/L)	Mean	41.9	90.8	16.5	36.1	50.1	20.5
	Median	28.0	20.0	6.6	22.0	23.8	11.0
	Maximum	104.0	339.0	60.0	121.0	181.0	53.6
	Minimum	6.8	8.0	4.0	4.4	21.5	7.0
	S/D	34.7	115.1	19.1	40.4	52.5	17.0
DOC (mg/L)	Mean	32.9	13.6	11.3	15.7	11.9	7.3
	Median	38.0	12.2	3.0	10.1	5.6	5.4
	Maximum	58.4	35.7	41.1	52.1	37.5	15.4
	Minimum	4.9	2.9	2.7	2.7	4.0	3.9
	S/D	22.1	11.3	14.0	17.1	11.8	4.1
TN (mg/L)	Mean	13.6	6.3	7.0	6.9	3.7	3.3
	Median	14.3	5.4	5.4	5.7	3.5	2.6
	Maximum	21.8	10.0	17.5	12.4	5.4	5.6
	Minimum	5.4	4.9	2.6	4.1	2.9	1.9
	S/D	5.9	1.6	4.9	2.8	0.9	1.4
TKN (mg/L)	Mean	8.5	4.5	3.6	3.5	1.8	1.9
	Median	8.5	4.2	2.9	3.0	1.7	1.3
	Maximum	15.0	7.6	10.4	7.2	2.8	3.8
	Minimum	2.2	2.7	0.5	1.8	1.1	0.8
	S/D	4.3	1.7	3.3	1.6	0.6	1.3
TP (mg/L)	Mean	2.1	0.7	1.2	0.8	1.1	1.0
	Median	2.5	0.6	0.7	0.4	0.5	0.6
	Maximum	3.7	1.3	3.2	2.1	2.9	1.9
	Minimum	0.6	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3
	S/D	1.2	0.2	1.1	0.7	1.0	0.7
N-Hexane Extracts (mg/L)	Mean	1.7	3.3	2.5	5.8	2.4	0.46
	Median	2.4	3.3	2.4	5.8	1.9	0.45
	Maximum	5.4	5.2	3.2	7.5	4.9	0.70
	Minimum	0.2	0.2	1.2	2.0	4.0	0.80
	S/D	1.9	1.5	0.61	2.47	1.8	0.23

S/D: Standard Deviation

**Table 5.** Summary of storm runoff and water quality at various events(Continue)

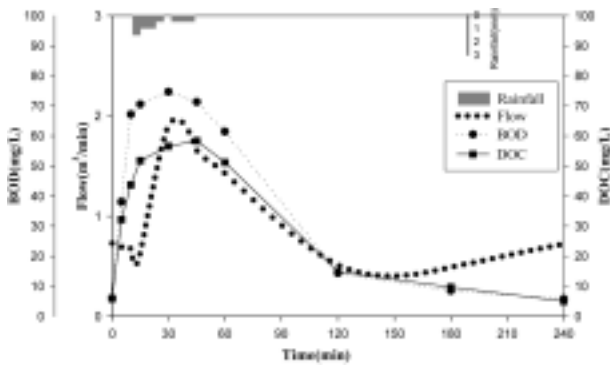
Event		Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
Parameter	Event Date (y/m/d)	08/05/13	08/05/18	08/06/05	08/06/18	08/07/19	08/07/25
	Total Rainfall (mm)	4.5	14.0	8.0	16.0	10.5	25.5
	Storm Duration (hr)	2.5	2.3	5.0	4.2	0.8	1.6
Turbidity (NTU)	Mean	44.6	51.4	21.1	30.9	57.4	15.2
	Median	30.0	22.0	15.3	23.5	35.0	12.7
	Maximum	106.0	141.0	59.0	85.0	149.0	32.0
	Minimum	6.4	13.7	11.3	9.0	21.0	5.6
	S/D	38.1	46.2	14.8	24.2	46.2	10.0
Cd (mg/L)	Mean	0.01	0.1	0.05	0.11	0.10	0.03
	Median	0.02	0.11	0.05	0.12	0.10	0.03
	Maximum	0.04	0.15	0.06	0.15	0.14	0.04
	Minimum	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02
	S/D	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.01
Pb (mg/L)	-	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Zn (mg/L)	Mean	0.075	0.18	0.12	0.60	0.25	0.14
	Median	0.05	0.20	0.13	0.60	0.30	0.14
	Maximum	0.18	0.28	0.18	0.94	0.37	0.18
	Minimum	0.02	0.05	0.02	0.24	0.03	0.08
	S/D	0.06	0.10	0.07	0.34	0.15	0.04

S/D: Standard Deviation, N/D: Not Detective

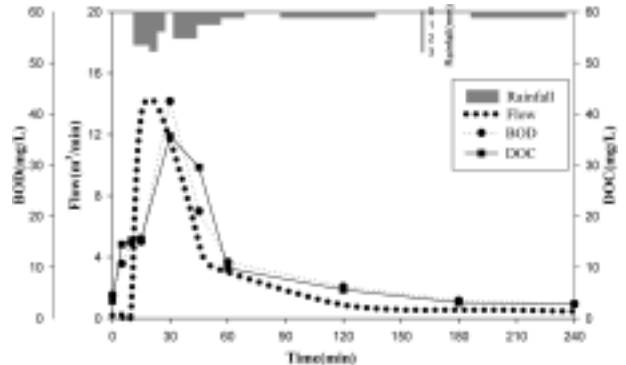
3.7 mg/L, 0.2–7.5 mg/L로 나타났다. 중금속 항목인 Cd, Pb 그리고 Zn의 경우에는 각각 0.01–0.15 mg/L, 불검출, 0.02–0.94 mg/L로 나타났다. 중금속 항목인 Pb의 농도가

검출한계 이하로 나타난 것은 건기 시에도 존재하는 기저유량으로 인해 희석되었기 때문인 것으로 보인다.

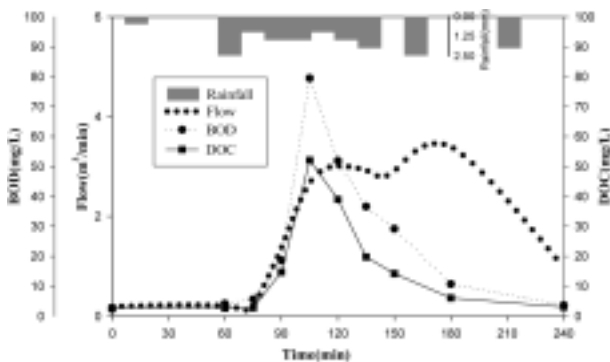
Fig. 2는 강우 시 도시유역에서 측정된 유량과 BOD, DOC



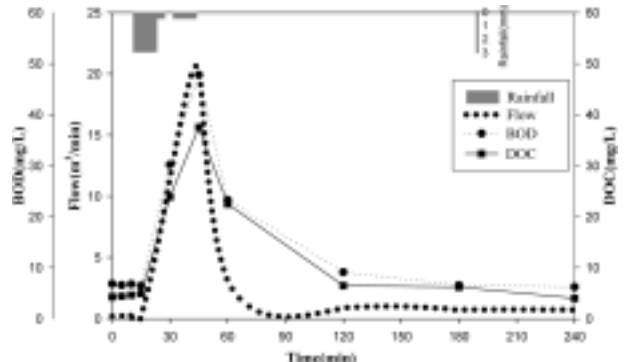
(a) Event 1 (Date: 08/05/13, Rainfall: 4.5 mm, Duration: 2.5 hr)



(b) Event 2 (Date: 08/05/18, Rainfall: 14.0 mm, Duration: 2.3 hr)



(c) Event 4 (Date: 08/06/18, Rainfall: 16.0 mm, Duration: 4.2 hr)



(d) Event 5 (Date: 08/07/19, Rainfall: 10.5mm, Duration: 0.8 hr)

**Fig. 2.** Hydro-graphs and polluto-graphs.

의 유출경향을 도시한 것이다. 강우유출수의 유출패턴은 다양하게 나타나고 있는데, 침투유출과 침투농도가 유사한 시점에서 나타나며, 유량이 감소하면서 수질농도도 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이전의 연구에 의하면 강우 초기에 침투농도는 침투유출 이전 시점에 발생하는 경향을 보인다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 강우유출수의 유출경향이 이전의 연구결과<sup>9)</sup>와 상당히 다르게 나타났는데, 이러한 결과는 건기 시에도 관거 내에 존재하는 불명수로 인해서 초기 유출된 오염물질농도가 불명수에 의해 희석되었기 때문인 것으로 보인다.

### 3.2. EMCs와 SMCs 의 결정

강우유출수는 강우사상에 따라 유출유량 및 농도의 변화가 민감하게 나타나기 때문에 강우 초기 빈번하게 채수된 강우유출수의 오염물질농도와 측정되어진 유량이 함께 고려되어야한다. 이를 나타내는 지표가 바로 유량가중평균농도(EMC: Event Mean Concentration)로 볼 수 있다.<sup>10)</sup> 유량가중평균농도는 식 (1)에서 보여주고 있는 바와 같이 강우 시 대상유역에서 발생한 오염물질의 총량을 강우유출수의 양으로 나눈 값으로 정의된다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^T C(t) \cdot q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^T q_{run}(t)} \quad (1)$$

여기서,  $q_{run}(t)$ 와  $C(t)$ 는  $t$ 시간에서의 유출량과 오염물질의 유출농도를 각각 의미한다. 이러한 EMC는 대상지역으로부터 유출되는 비점오염물질의 부하량 산정에 이용된다. 또한 비점오염물질 부하량은 수질 오염총량관리제의 시행

을 위하여 매우 긴요한 기초자료로 활용되고 있다.

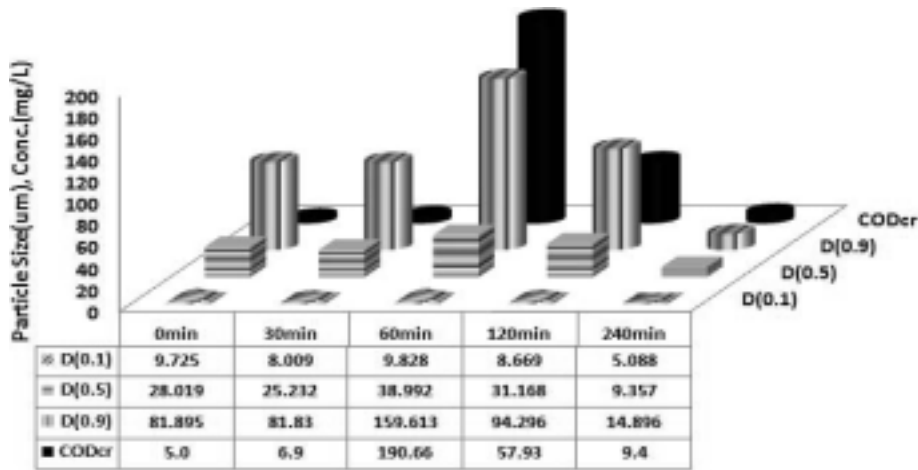
$$SMC(mg/L) = \text{특정지역 EMC값의 평균(산술확률분포)} \\ = \text{Log-normal분포에서 중앙값} \quad (2)$$

식 (2)에서 보여주고 있는 바와 같이 지역평균농도(SMC: Site Mean Concentration)는 특정지역 EMC값의 평균(산술확률분포에서) 또는 Log-normal 분포에서 중앙값으로 정의된다. 이벤트 기간 동안에 조사대상 지역 강우유출수의 SMC와 EMC는 Table 6에 요약되어 있다. 강우유출수의 EMC를 확인해 보면, 전체 이벤트 기간 동안의 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, TN, TP 그리고 n-Hexane Extracts의 EMC 범위는 각각 11.5~35.9 mg/L, 49.4~176.5 mg/L, 23.4~190.9 mg/L, 4.0~12.0 mg/L, 0.7~2.3 mg/L, 0.7~3.5 mg/L로 나타났다. 중금속 항목인 Cd, Pb 그리고 Zn의 경우에는 각각 0.01~0.104mg/L, 불검출, 0.06~0.28mg/L로 나타났다. 6차 이벤트는 다른 이벤트에 비해 큰 강우가 내렸기 때문에 대부분의 수질항목에서 적은 EMC값을 나타내고 있다. 이는 큰 강우일수록 오염물질의 희석효과가 크기 때문인 것으로 판단된다.<sup>5)</sup> 강우유출수의 SMC를 확인해보면, BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, TN, TP 그리고 n-Hexane Extracts의 SMC는 각각 24.6 mg/L, 89.5 mg/L, 77.0 mg/L, 6.8 mg/L, 1.4 mg/L, 1.9 mg/L로 나타났다. 중금속 항목인 Cd 그리고 Zn의 경우에는 각각 0.06 mg/L, 0.17 mg/L로 나타났다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 전반적으로 강우유출수내 오염물질의 농도가 높은 것으로 조사되었다. 한편, SMC는 지역적, 계절적 특성을 반영할 수 있지만 본 연구의 조사기간이 5~7월로 한정되었기 때문에 본 연구결과는 계절적 특성을 반영하기 어려운 것으로 판단된다.

**Table 6.** SMC and EMC for stormwater events

Parameter	Event	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6	Storm Events
	EMC							SMC
Event Date (y/m/d)		08/05/13	08/05/18	08/06/05	08/06/18	08/07/19	08/07/25	08/05/13 ~ 07/25
Total Rainfall (mm)		4.5	14.0	8.0	16.0	10.5	25.5	4.5 ~ 25.5
Storm Duration (hr)		2.5	2.3	5.0	4.2	0.8	1.6	0.8 ~ 5.0
BOD5 (mg/L)		35.9	23.1	17.3	27.5	32.2	11.5	24.6
COD <sub>Cr</sub> (mg/L)		176.5	73.1	51.1	74.0	113.0	49.4	89.5
SS (mg/L)		43.0	190.9	23.4	42.6	110.8	51.6	77.0
DOC (mg/L)		29.5	21.8	17.1	17.6	26.1	9.0	20.2
TN (mg/L)		12.0	7.3	5.9	6.8	4.7	4.0	6.8
TKN (mg/L)		7.3	5.5	2.2	3.6	2.3	2.7	3.9
TP (mg/L)		1.7	0.7	1.1	0.8	2.3	1.6	1.4
n-H (mg/L)		1.5	3.5	1.1	1.4	3.0	0.7	1.9
Turbidity (NTU)		48.9	84.5	26.2	36.9	113.1	27.1	56.1
Cd (mg/L)		0.01	0.104	0.047	0.057	0.104	0.029	0.06
Pb (mg/L)		N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Zn (mg/L)		0.06	0.19	0.07	0.25	0.28	0.17	0.17

N/D: Not Detective, n-H: n-Hexane Extracts



(a) Event 3 (Date: 08/06/05, Rainfall: 8.0 mm , Duration: 5.0 hr)

Fig. 3. Particle size distribution and COD<sub>Cr</sub> for selected storm events

### 3.3. PSDs와 EMCs의 비교

입경크기분포(PSD: Particle Size Distribution)는 대상지역의 토지이용형태, 강우사상 등의 여러 가지 요인에 의해 다양하게 나타난다. 이와 같은 입경크기분포의 변화특성은 강우유출량 증가에 따라 유역내 맨홀, 하수관거, 도로면, 지표면 등에서 유실되는(Washoff) 오염물질의 유출경향을 나타낼 수 있다.<sup>4)</sup> Fig. 3은 강우지속시간에 따른 입경크기분포의 변화와 COD<sub>Cr</sub> 농도의 변화를 채수한 시간별로 비교한 그림으로 유출경향이 유사한 시점에서 나타났다. 강우유출수 침투농도에서의 입경크기분포를 분석한 결과 10%입경 (D<sub>0.1</sub>), 50%입경 (D<sub>0.5</sub>), 90%입경 (D<sub>0.9</sub>)이 각각 9.82 μm, 38.99 μm, 159.61 μm로 나타났다. 또한 강우초기에는 침투입경이 159.61 μm까지 증가하였고, 초기 강우유출이 일어난 이후에는 입경이 크게 감소하는 경향을 보였다. 강우유출수내 부유물질의 입도분석에 관한 기존 연구사례에 의하면 교량도로 유출수는 10~20 μm 입경을 가진 입자가 대부분이며 하수관 월류수의 경우 100 μm 입경 전후의 입경을 가진 입자가 상당량 존재한다고 보고하였다.<sup>4)</sup> 다양한 물 환경에서 공통적으로 2~6 μm범위의 입자수가 가장 많은 것으로 나타나고 있으며, 40~50μm 크기 이상의 입자는 부유상태로 많지 않은 것으로 보인다. 이는 입자의 직경과 침강속도의 관계에 의하여 큰 플록으로 성장한 입자는 자연계의 물에 존재하더라도 오래 있지 못하고 침강하기 때문인 것으로 보인다.<sup>11)</sup> 본 연구결과의 강우유출수 침투농도에서의 입경크기분포가 9.8~159.6 μm로 교량도로 유출수보다는 크게 하수관 월류수보다는 작은 범위에 있는 것으로 조사되었다. 강우유출수내의 입자성 물질에 대한 입경크기분포는 자연형, 장치형 시설과 같은 다양한 비점오염저감시설의 설계 및 운전이 있어 중요한 인자로 이용될 수 있을 것이다.

### 3.4. 초기세척현상

누적부하곡선은 강우초기에 발생하는 강우유출수내에 포

함된 다양한 오염물질의 초기세척효과를 분석하기 위해 이용되고 있다. 하지만 모든 오염물질의 유출경향을 표현할 수 있는 것은 아니다.<sup>12)</sup> 식 (3)과 (4)는 각각 초기세척이 있을 때와 없을 때의 정도를 표현한 것이다.<sup>13)</sup>

$$[P_i/\sum P_i]/[Q_i/\sum Q_i] > 1 : \text{Flushing} \quad (3)$$

$$[P_i/\sum P_i]/[Q_i/\sum Q_i] \leq 1 : \text{No flushing} \quad (4)$$

여기서,  $[P_i/\sum P_i]$ 와  $[Q_i/\sum Q_i]$ 는 강우유출수의 누적 유출 오염물질 부하량과 누적유출 유량부피를 각각 의미한다. 유출오염물질 부하량의 증가비율이 유출유량의 증가비율보다 클 경우, 즉 기울기가 1보다 크면 초기세척현상이 강한 것이며, 기울기가 1보다 작을 경우 그 반대의 현상이 발생한다고 볼 수 있다. 또한, 누적유출 오염물질 부하량 곡선이 누적유출 부피곡선 위에 위치할 때 초기 세척현상이 발생한다.<sup>9)</sup> Fig. 4는 강우유출수내에 포함된 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, DOC, TN, TKN 그리고 TP에 대하여 초기세척현상을 표현하기위해 누적곡선으로 비교한 것이다. Fig. 4의 결과를 비교해보면, 초기세척현상의 강도는 강우강도와 선행건기일수가 증가할수록 명확히 증가한다. 또한, 입자성 물질에 대한 초기세척현상은 용존성 물질보다 더 크게 나타난다. 이를 요약하면 이벤트기간동안의 초기세척현상의 강도는 유기물질이 영양염류보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.<sup>9)</sup>

### 3.5. 초기세척 비율

초기세척의 비율은 MFF (Mass First Flush Ratio)를 이용함으로써 각 수질항목과 강우에 대해서 수량화 할 수 있다.<sup>14,15)</sup> 이렇게 수량화된 값은 누적강우량기준과 강우지속 시간기준으로 표현할 수 있으며 초기강우기준을 의미한다. MFF<sub>n</sub>는 식 (5)에서 보여주고 있는 바와 같이 강우지속 시간에 따라 다양하게 변하는 강우유출수의 유출오염

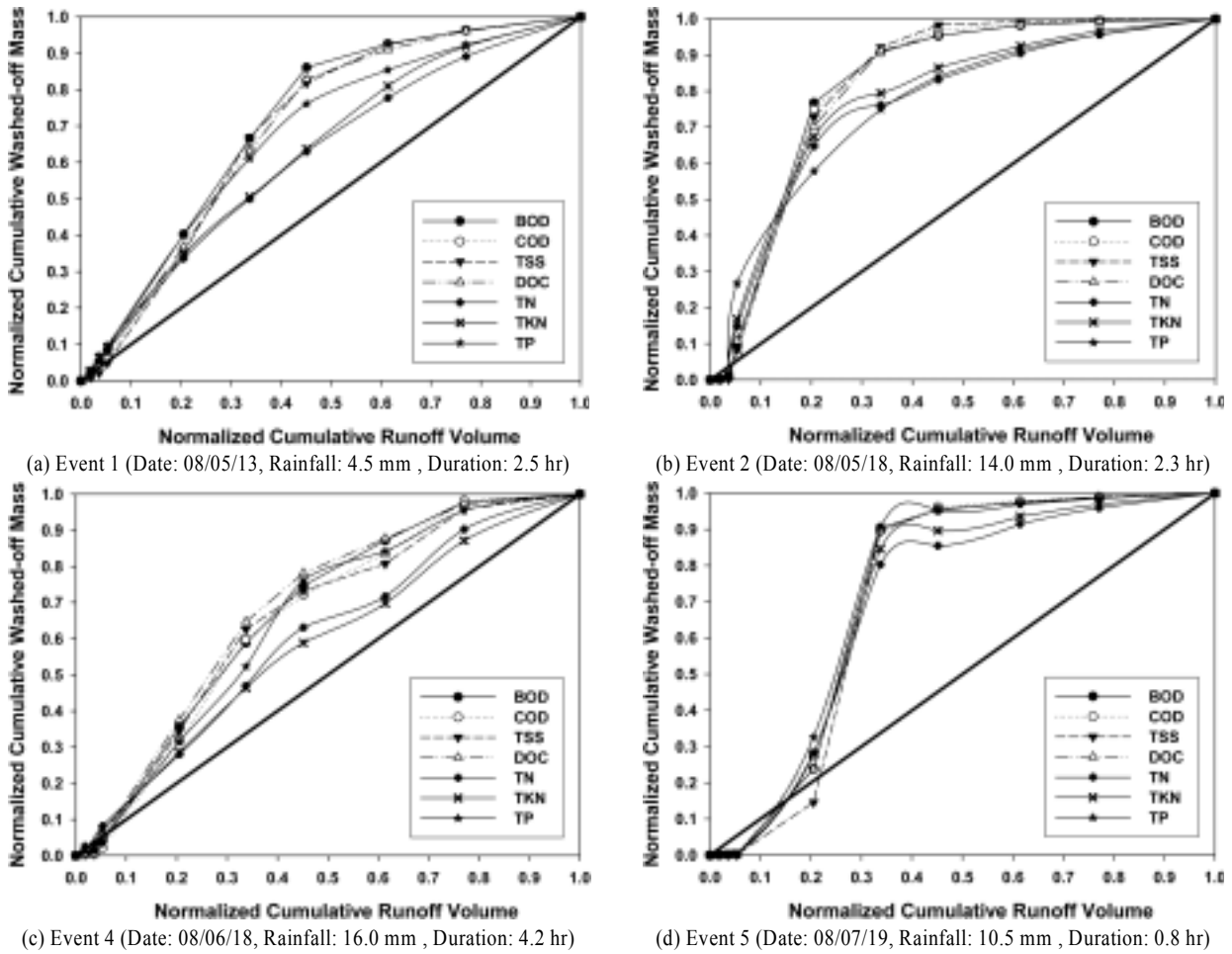


Fig. 4. Dimensionless normalized cumulative curve for variation storm events.

물질 부하량과 유출유량의 부피를 일정시점에서 강우유출율과 오염물질 유출율로 계산할 수 있다.<sup>16)</sup>

$$MFF_n = \frac{\int_0^{T_1} c(t)q(t)dt}{\int_0^{T_1} q(t)dt} \quad (5)$$

여기서, n은 강우지속시간 동안에 일정시점에서의 유출유량부피를 의미하고, 범위는 0%에서 100%이다. 또한,  $q_{run}(t)$ 와  $C(t)$ 는 각각 t시간에서의 유출량과 오염물질의 유출농도, M과 V는 각각 유출오염물질 부하량과 유출유량 부피를 의미한다. 한 예로,  $MFF_{20}$ 의 평균값이 2.5라고 한다면 초기우수유출수의 부피 20%에 오염물질 부하량의 부피 50%를 포함하는 것을 의미한다. Table 7은 다양한 이벤트와 각

Table 7.  $MFF_{30}$  for stormwater events at various quality parameters

	Event Date (y/m/d)	Total Rainfall (mm)	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Cr</sub>	SS	DOC	TN	TKN	TP	n-H	Turb.	Cd	Zn	Elapsed Time (min)	Cumulative Rainfall Depth (mm)
Event 1	08/05/13	4.5	1.40	1.34	1.49	1.32	1.26	1.26	1.40	2.03	1.24	1.22	1.32	45	4.5
Event 3	08/06/05	8.0	1.91	1.89	1.50	1.44	1.85	2.36	1.84	1.60	1.44	0.73	1.35	25	3.0
Event 4	08/06/18	16.0	2.01	1.91	1.96	2.17	1.56	1.46	1.99	3.05	1.54	2.76	3.29	85	4.5
Event 5	08/07/19	10.5	1.14	1.17	0.98	1.12	1.11	1.15	1.27	1.12	1.30	1.31	1.25	40	10.5
Mean		9.8	1.62	1.58	1.48	1.51	1.45	1.56	1.63	1.95	1.38	1.51	1.80	48.8	5.6
Median		9.3	1.66	1.62	1.50	1.38	1.41	1.36	1.62	1.82	1.37	1.27	1.34	42.5	4.5
Maximum		16.0	2.01	1.91	1.96	2.17	1.85	2.36	1.99	3.05	1.54	2.76	3.29	85	10.5
Minimum		4.5	1.14	1.17	0.98	1.12	1.11	1.15	1.27	1.12	1.24	0.73	1.25	25	3
Standard Deviation		4.8	0.41	0.38	0.40	0.46	0.33	0.55	0.34	0.82	0.14	0.87	0.99	25.6	3.3

n-H: n-Hexane Extracts, Turb: Turbidity



Table 8. Comparison of first flush criteria with previous study

		This Study	Janet et al., 2008	Kim et al., 2005a	Kim et al., 2007		Kim et al., 2005
Land Use		Urban Area (Residential)	Urban Area (Residential)	Railway Station	Highway, Parking Lot and Bridge		Parking Lot and Bridge
Method		MF <sub>F30</sub>	MF <sub>F20</sub>	MF <sub>F30</sub>	MF <sub>F30</sub>	Dynamic EMC	Dynamic EMC
First Flush Criteria	Runoff Volume(%)	30	20	30	30	-	-
	Pollutant Mass(%)	38~48	40	80	35~80	-	-
	Elapsed Time (min)	25~175	-	60	-	30~36	-
	Cumulative Rainfall Depth (mm)	3.0~24.0	-	5.0	6~12.0	6.7~7.9	4.5~10.0

수질항목에 대하여 계산된 MF<sub>F30</sub>을 보여주고 있다. MF<sub>F30</sub>의 평균값은 1.48~1.95 범위로 나타났다. 이러한 결과는 초기우수 유출수의 부피 30%에 오염물질 부하량의 44.4~58.5%를 포함하는 것을 의미한다. 초기강우기준을 산정할 결과 누적강우량기준으로 초기강우기준은 3.0~10.5 mm (평균 = 5.6 mm), 강우지속시간 기준으로는 25~85분(평균 = 48.8분)으로 분석되었다.

Table 8은 여러 선행 연구와 본 연구결과를 비교한 것으로 초기강우기준은 토지이용 형태별로 다양하게 나타남을 알 수 있다. 고속도로의 강우유출수에 대해서 기존의 연구한 결과에 의하면 누적강우량기준으로 초기강우기준은 6.7~7.9 mm (평균 = 7.4 mm), 강우지속시간 기준으로는 30~36분(평균 = 33분)으로 산정되었다.<sup>17)</sup> 초기강우기준은 토지이용 형태별로 다양하게 나타남을 알 수 있다. 본 초기강우기준은 향후 비점오염원 저감방안 수립 시 경제적 처리용량 산정에 긴요하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.<sup>17)</sup>

Table 9는 이벤트 3의 각 수질항목에 대하여 계산된 MF<sub>F<sub>n</sub></sub>을 보여주고 있다. MF<sub>F<sub>n</sub></sub>에서 n의 범위는 10~90%로 조

절하였다. 그 결과 경과시간에 따른 MF<sub>F<sub>n</sub></sub>의 평균값은 MF<sub>F30</sub>을 기준으로 증가되었다가 감소되는 것을 알 수 있다. 따라서 초기강우기준의 선정시점은 MF<sub>F<sub>n</sub></sub>의 평균값이 변화되는 시점인 MF<sub>F30</sub>으로 선정해야 할 것이다. 또한 이 시점에서의 경과시간과 누적강우량은 강우지속시간기준과 초기강우기준으로 각각 결정 할 수 있다. 이전의 연구에 의하면 MF<sub>F<sub>n</sub></sub>의 평균값은 MF<sub>F10</sub>이 최고치를 나타낸 이후에 MF<sub>F90</sub>까지 지속적으로 감소된다.<sup>16)</sup> 본 연구에서는 경과시간에 따른 MF<sub>F<sub>n</sub></sub>의 평균값이 이전의 연구결과<sup>16)</sup>와 다르게 나타났는데, 이러한 결과는 전술한 바와 같이 건기시에도 관거내에 존재하는 불명수로 인해서 초기 유출된 오염물질농도가 불명수에 의해 희석되었기 때문인 것으로 보인다. MF<sub>F<sub>n</sub></sub>의 평균값을 분석하여 Pb와 Zn의 강우시 유출경향을 비교한 결과 Pb는 입자상물질에 대한 친화도가 크기 때문에 유출경향이 SS와 비슷하지만, Zn은 대부분 액체상(liquid phase)에 대한 친화도가 커서, 이벤트 회수와 관계없이 유출경향이 비슷하게 나타났다.<sup>15,16)</sup> 본 연구에서 Zn의 강우시 유출경향은 이전의 연구결과<sup>16)</sup>와 비슷하게 나타났다지만, Pb의 농도는 검출한계 이하로 나타났기 때문에

Table 9. MF<sub>F<sub>n</sub></sub> for stormwater event no. 3 at various quality parameters

(Date: 08/06/05, Rainfall: 8.0 mm, Duration: 5.0 hr)

	MF <sub>F10</sub>	MF <sub>F20</sub>	MF <sub>F30</sub>	MF <sub>F40</sub>	MF <sub>F50</sub>	MF <sub>F60</sub>	MF <sub>F70</sub>	MF <sub>F80</sub>	MF <sub>F90</sub>
BOD <sub>5</sub>	0.89	1.63	1.91	1.71	1.53	1.42	1.34	1.19	1.09
COD <sub>Cr</sub>	0.82	1.59	1.89	1.84	1.60	1.46	1.37	1.20	1.09
SS	0.69	1.27	1.50	1.51	1.44	1.39	1.36	1.20	1.09
DOC	0.66	1.22	1.44	1.46	1.41	1.38	1.36	1.20	1.09
TN	1.25	1.68	1.85	1.76	1.52	1.37	1.26	1.15	1.07
TKN	1.57	2.14	2.36	2.20	1.78	1.53	1.36	1.20	1.09
TP	1.20	1.66	1.84	1.77	1.55	1.41	1.32	1.18	1.08
N-Hexane Extracts	0.76	1.36	1.60	1.60	1.53	1.48	1.45	1.25	1.11
Turbidity	0.73	1.24	1.44	1.43	1.34	1.28	1.24	1.13	1.06
Cd	0.45	0.65	0.73	0.78	0.84	0.88	0.91	0.96	1.00
Zn	0.83	1.20	1.35	1.37	1.37	1.37	1.37	1.21	1.10
Average	0.90	1.42	1.63	1.58	1.45	1.36	1.30	1.17	1.08
Elapsed Time (min)	0	55	70	85	95	115	135	150	175
Cumulative Rainfall Depth (mm)	0.5	4.0	7.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

유출경향을 확인 할 수 없었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 도시지역에서 발생된 강우유출수의 유출 특성을 다양한 방법으로 분석하였으며, 조사 및 분석결과 의 기초자료를 이용하여 EMC, SMC, COD<sub>Cr</sub>와 PSD의 관계, 강우유출수의 입경크기분포, 초기세척현상의 강도 그리고 MFF<sub>n</sub>방법을 이용하여 초기강우기준을 제시하였는데 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 여섯 차례에 걸친 이벤트 기간 동안의 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, TN, TP 그리고 n-Hexane Extracts의 EMC 범위는 각각 11.5~35.9 mg/L, 49.4~176.5 mg/L, 23.4~190.9 mg/L, 4.0~12.0 mg/L, 0.7~2.3 mg/L, 0.7~3.5 mg/L로 나타났다. 중금속 항목인 Cd, Pb 그리고 Zn의 경우에는 각각 0.01~0.104 mg/L, 불검출, 0.06~0.28 mg/L로 나타났다. 또한, 이벤트 기간 동안의 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, TN, TP 그리고 n-Hexane Extracts의 SMC는 각각 24.6 mg/L, 89.5 mg/L, 77.0 mg/L, 6.8 mg/L, 1.4 mg/L, 1.9 mg/L로 나타났다. 중금속 항목인 Cd 그리고 Zn의 경우에는 각각 0.06 mg/L, 0.17 mg/L로 나타났다. 강우유출수의 강우사상에 따라 EMC와 SMC의 변화는 민감하게 나타났고, 강우초기에 고농도의 오염물질이 유출되는 것으로 나타났다.

2) 강우지속시간에 따른 입경크기분포의 변화와 COD<sub>Cr</sub> 농도의 변화를 시간별로 비교한 결과 유출경향이 유사하게 나타났다. 강우유출수의 침투농도에서의 입경크기분포를 분석한 결과 10%입경(D<sub>0.1</sub>), 50%입경(D<sub>0.5</sub>), 90%입경(D<sub>0.9</sub>)이 각각 9.82 μm, 38.99 μm, 159.61 μm로 나타났다. 또한 강우초기에는 침투입경이 159.61 μm까지 증가하였고, 초기 강우유출이 일어난 이후에는 입경이 크게 감소하는 경향을 보였다.

3) 초기세척현상의 강도는 강우강도와 선행건기일수가 증가할수록 증가하였다. 입자성 물질에 대한 초기세척현상은 용존성 물질보다 더 크게 나타났으며, 초기세척현상의 강도는 유기물질이 영양염류 보다 높게 나타났다.

4) 이벤트 기간 동안에 각 수질항목에 대하여 계산된 MFF<sub>30</sub>의 평균값은 1.48~1.95 범위로 나타났는데, 이러한 결과는 초기우수 유출수의 부피 30%에 오염물질부하량의 44.4~58.5%를 포함하고 있는 것을 의미한다.

5) MFF<sub>n</sub>방법을 이용하여 초기강우기준을 산정한 결과 누적강우량 기준으로는 평균 = 5.6 mm, 강우지속시간 기준으로는 평균 = 48.8분으로 나타났다. 이러한 초기강우기준은 자연형, 장치형시설과 같은 다양한 비점오염저감시설의 설계 및 운전이 있어 중요한 인자로 이용될 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

1. 최지용, 신창민, “비점오염원 저감을 위한 우수유출수 관리방안,” 한국환경정책평가연구원(2002).
2. 이인선, 신상철, 정동일, “비점오염원 배출원단위 산정방법에 관한연구,” 대한환경공학회 학술대회(1993).
3. 김이형, 이선하, “주차장 및 교량 유출수의 중금속 오염물 질특성과 동적 EMCs,” 한국물환경학회지, **21**(4), 385~392(2005).
4. 이준호, 조용진, 방기웅, 최창수, “교량도로 유출수 수질 및 입경분포,” 대한상하수도·물환경학회, 2007공동 추계학술발표회 논문집, pp. 135(2007).
5. 김이형, 강주현, “강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기우수 특성 및 기준,” 한국물환경학회지, **20**(6), (2004).
6. 방기웅, 이중호, 유명진, “도시 소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한연구,” 한국수질보전학회지, **13**(1), 79~99(1997).
7. 환경부, “전국 하수관거 정비 타당성 조사,” (2007).
8. APHA, AMMA, WPCF, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,” 20th ed. New York, USA(1999).
9. Lee, J. H. and Bang, K. W., “Characterization of Urban Stormwater Runoff,” *Water Res.*, **34**(6), 1773~1780(2000).
10. Vladimir Novotny, “Nonpoint Pollution and Urban Stormwater Management,” Pennsylvania, U.S.A(1995).
11. 임윤정, 이두곤, “입자크기분포 측정을 통한 물환경 탐구 (하천수, 호소수, 해수를 중심으로),” 대한상하수도·물환경학회, 2007공동 추계 학술발표회 논문집(2007).
12. Choe, J. S., Bang, K. W., and Lee, J. H., “Characterization of Surface Runoff in Urban areas,” *Water Sci. Technol.*, **45**(9), 249~254(2002).
13. Bedient, P. B., Harned, D. A., and Characklis, W. G., “Stormwater analysis and prediction in Houston,” *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, **104**(EE6), 1087~1100(1978).
14. Ma, J. S., Khan, S., Li, Y. X., Kim, L. H., Ha, S., Lau, S.-L., Kayhanian, M., Stenstrom, M. K., “First flush phenomena for highways: how it can be meaningfully defined,” *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (ICUD)*, Portland, Oregon(2002).
15. Han, Y.-H. Han, S.-L. Lau, M. Kayhanian and Stenstrom, M. K., “Correlation analysis among highway stormwater pollutants and characteristics,” *Water Sci. Technol.*, **53**(2), 235~243(2006).
16. Janet Barco, Sergio Papiri, Michael K, Stenstrom, “First flush in a combined sewer system,” *Chemosphere*, **71**, 827~833(2008).
17. 김이형, “비점오염원의 현황 및 적정처리용량산정을 위한 초기강우기준산정,” 한국도로학회, **9**(2), (2007).