

소규모 산림-농경지에서 비점오염물질의 유출특성 - 상사천을 중심으로 -

문형부[†]

전남대학교 환경시스템공학과

Characterization of Pollutants Runoff in Small Forest-Agricultural Watershed - focused on Sang-sa Creek -

Hyoung-Bu Moon[†]

Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University

Abstract

This study presented the discharges of non-point and creek sources using natural stream data in the rainfall runoff fields. The rural (agricultural) watershed of Sang-sa River, approximately 51.68 km² in size, was investigated as a target region, which is developed into forest, farm land and a little residential area. During the rainy season in 1997-2008, twelve storm events were monitored, and the grab samples were collected at irregular intervals as well as the rainfall runoff samples were collected from the river. The water table, water velocity, discharge, suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) were measured and a pollutograph and a load-graph were illustrated for water characteristics. In addition, the pollutant mass for each storm was calculated and the correlations of event mean concentration (EMC) and hydrological parameters were investigated to understand the hydrological properties which related to the non-point sources runoff. The overall results showed that significant amounts of non-point sources runoff from the I-sa River were intruded to the Sang-sa Creek watershed during wet weather flow, and the first flush phenomenon was not detected in the Sang-sa River. The objective of study is to characterize the quality of storm water runoff in order to analyze the cumulative curve of runoff and mass as well as determining of the first flush. It is also required to analyze the water quality volume (WQV), which presented by a volume based on the first flush concept causing by the first runoff, to design the watershed controls and to draw a hydrograph for the pollutant flux proportion.

Keywords : Non-point sources, Rural runoff, Stormwater runoff, Cumulative curve, First flush

1. 서론

어떤 유역에서 강우와 유출의 상관관계는 전통적인 수문학적 과제로 다루어왔다. 비점

[†]Corresponding author E-mail: moonhb@jnu.ac.kr

오염원의 유출부하와 관련되어, 유역을 대상으로 강우와 유출 및 수질의 관계가 새로운 주제로 제시되었다. 시험 유역을 선정하여, 강우의 유출과 수질과의 상관관계를 밝히고자 하는 수많은 연구들이 진행되어왔다. 이런 연구들은 도시에서 집수면적이 작은 불투수지역의 유출에 대한 분석이 대부분이다.

강우 시작점에 어떤 유역에 존재하는 누적된 오염물질들은 강우지속기간 동안의 세척과 잔존량, 배수시스템의 수리학적 특성, 유역의 수문학적 특성에 의해 변화하며, 하류로 유송된다. 이렇게 유하하는 오염물질들은 강우-유출 흐름에서 시간에 따라 변화하는 농도로 발현할 것이다.

비점오염원의 유출 부하와 관련한 연구에서 중요한 변수들은 강우에 의해 유송되는, 지표면 위의 누적된 오염물질의 상대적 비율로 정의된다. EPA에서는 수많은 보고서들을 검토하여, 도시에서 중요한 변수들로 기후, 계절, 토지이용, 인구밀도, 불투수성 면적비율, 일일 교통량, 도로표면의 형태와 종류, 도로표면의 길이, 선행강우시간, 도로의 청소빈도 등을 열거했다. 또한, 농촌지역에서의 비점오염원으로는 유기물질, 침전물, 가축폐수, 염류와 잔류 농약을 주된 오염물질로 분류하였다.

비점오염원의 유출부하에 관한 연구는 도시지역에 집중되어 왔으며, 농촌지역에 대한 연구는 상대적으로 작은 것 같다. 좀 더, 최근 연구들은 유역과 수질과의 관계를 분명하게 하는 시도로 진전되었다. Haith¹⁾는 통계적 상관성과 회귀분석을 이용하여 토지이용과 수질과의 관계를 검토하였다. Bedient 등²⁾은 농업지역인 유역에서 토지이용, 배수밀도, 질소부하율을 측정하였다. 도시지역에서 최적수질관리를 위한 초기유출량의 포집계획이 정량적으로 검토되고 있다.

이 연구에서는 전형적인 농촌지역을 선정하여, 비점오염원의 유출부하를 측정하였다. 여러 강우사상에 대한 수문곡선, 오염곡선, 유출부하곡선 및 무차원누적곡선에 의해 유

출특성을 분석하고자 한다. 또한, 유출부하량과 수문학적 인자, 즉 강우량, 강우강도, 지속기간, 선행무강우시간 등과의 상관성을 분석하였다. 초기세척(first flush)의 발현 유무를 판단할 수 있는 일반적 검토 방법에 의해, 도시의 불투수지역에서 발생 가능한 초기세척 효과가 농촌지역에서도 발생할 수 있는가를 검토하고자 한다.

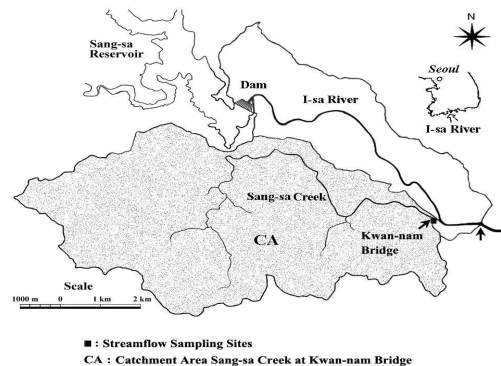


Fig. 1. Catchment area of study site and Sang-sa River Basin.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험유역

선정된 실험유역은 전남에 위치한 상사천 유역이다. 상사천은 이사천의 지류이며 이사천은 전남 순천시 승주읍 서흥리의 서지산(해발 530 m)에서 발원하여 남동방향으로 흐른 다음, 동천과 합류하여 순천만으로 유입한다. 이사천의 유역면적은 206.3 km²이며, 유역연평균강우량은 1,620 mm이다.

이사천 유역 내의 상사댐 상류를 제외한 상사천 유역을 Fig. 1에 표시하였다. 상사천 유역의 집수면적은 51.68 km²이다. 상류에 상사댐(주암주절지댐)이 위치해있으며, 이사천 본류는 삼천교 하류 지점에서 상사천과 합류하고, 이사천의 본류는 다시 하류에서 동천과 합류한다. Fig. 1에 표시한 관남교 상류의 집수면적(Fig. 1의 CA)은 37.14 km²이다.

Table 1. Description of the watersheds

Site	Outlet	Area (km ²)	Land use(%)
CA	Kwan-nam Bridge	37.14	Forest(林野) 75.31
			Rice paddy(畓) 12.22
			Row crops(田) 5.09
			Others 7.38

전형적인 농촌지역인 상사천 유역을 실험 유역으로 선정하여 비점오염원의 유출량을 측정하고 그 특성을 분석하고자 한다. 이 유역은 산림지역, 농업지역 및 약간의 주거지역이 혼재되어 있으며 토지이용현황을 Table 1에 나타냈다. 전체 면적 중 임야가 75.31%로 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 논이 12.22%, 밭이 5.09%, 기타 면적이 7.38%로 나타났다. Fig. 1의 CA에서의 인구밀도는 55.95 인/km²이다.

2.2. 강우사상, 수위 및 유량

1997년부터 2008년 사이에 12개의 호우에 대해 측정하였으며, 측정된 호우의 발생시기는 Tabel 2에 나타났다. 호우는 수자원공사 주암조절지댐 관리소에서 운영하고 있는 강우관측자료³⁾를 활용하였다. Fig. 1의 관남교에서 수위와 유속을 측정하였으며 이곳에서 수질시료를 채취하였다. 관남교 아래, 하천의 횡단면을 Fig. 2에 나타냈다. 수로의 횡단면적은 비가 내리기 전에 현장에서 측정하였다.

관남교에서 과거 15개의 강우사상에 대한 수위와 유속을 측정하고 Fig. 3에 수위유량관계곡선을 나타냈다. 30 cm 이하의 수위에서는 유속계로 측정한 유속 값들을 이용하여 유량을 산정하였으며 30 cm 이상, 89 cm이하의 수위에서는 수위유량관계곡선을 이용하여 유량을 산정하였다. 흐름의 유량은 수로의 횡단면적과 유속의 곱으로 측정하였다.

측정은 하천의 흐름이 기저유출에서 시작

하여, 강우유출을 거치고, 다시 기저유출로 되돌아오는 기간까지 지속되었다. 수위와 유속은 호우의 발생기간에 일정 시간간격으로 연속 측정하였다. 유속은 유속계를 하천수로의 역방향으로 침수, 고정시키고 측정하였다. 수위의 변화는 교량의 교각에 표척을 부착시키고 1시간 간격으로 목측하였다.

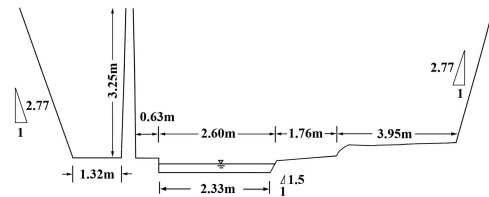


Fig. 2. Cross-section view of observation site (Kwan-nam Bridge).

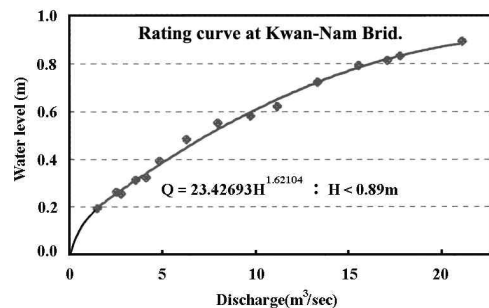


Fig. 3. Relationship of water level and discharge in the Kwan-Nam Bridge.

2.3. 수질시료 및 분석

1977년 5월부터 2008년까지 8월 사이에 12개의 호우에 대해 시료를 채취하였으며 Table 2에 관측한 강우사상을 정리하였다. 1997년부터 2002년까지, 시료채취는 1시간 간격으로 진행되었다. 이 기간에 측정된 수위, 유속, 유량 및 수질지표 값들을 비교 검토한 결과, 강우유출 전기간에 걸쳐 반드시 같은 시간간격으로 시료를 채취할 필요는 없었다는 것을 확인할 수 있었다. 유량과 수질이 급변하는 수문곡선의 초기 전반부에서는

Table 2. Storm event and hydrological condition

Event measured	Hydrological condition			
	Rainfall depth (mm)	Rainfall duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Previous dry hours (hr)
1997. 5. 7	28	7	4.0	371
1998. 6.12	41	10	4.1	84
1999. 9.10	20	6	3.33	34
2000. 8.20	40	10	4.0	84
2001. 9.14	14	8	1.75	91
2002. 9.22	10	2	5.0	146
2003. 3. 1	17	11	1.55	117
2004. 4. 1	31	8	3.88	62
2005. 6.28	26	10	2.6	20
2006.10.22	49	6	8.17	639
2007. 2. 8	17	6	2.83	303
2008. 8.22	22	7	3.14	142

비교적 짧은 시간 간격으로 측정하고, 침투유량이 나타난 이후에는 유량이 완만하게 감소하므로 비교적 긴 시간간격으로 측정하였다. 유량과 수질의 시간적 급변기간에는 채취 횟수를 증가시키고 완변기간에는 채취의 시간간격을 길게 취할 수 있었다. 그러나 수문곡선의 감수곡선이 나타나는 기간, 즉 기저유출 상태로 되돌아가는 기간에서도 Fig. 5의 오염곡선에서 볼 수 있는 것과 같이 수질의 변동성(fluctuation)은 지속되고 있었다. 2003년부터 2008년까지는 수문곡선의 상승부에서 침투유량 발생시간까지는 30분 간격으로, 침투유량 발생시간부터 8시간 이후까지는 1시간 간격으로, 다음부터 종료시간까지는 2시간 간격으로 채취하였다.

수집된 이후에, 시료들은 봉인된 유리 용기에 담아 얼음상자에 보관하여 실험실로 운반하였다. 시료들은 standard methods에 의해 수질을 분석하였으며 이 연구에서 활용한 수질지표는 TN, TP, SS, COD이다.

2.4. 측정값의 분석

호우사상 내에서, 오염물질들의 시간적 변

동성을 오염곡선(pollutograph)으로 작성하였다. 또한 호우사상 내에서, 부하량은 측정된 오염물질의 시간적 변동성을 시간-농도 계열에 의해 계산하였으며 수문곡선과의 관계를 이용하여 부하곡선(Load-graph)을 작성하였다. 이 두 방법은 시계열에 의한 누적비율을 가시화한 방법이라고 할 수 있다.

12개의 강우사상에 대해 관측한 유량을 12개의 수문곡선(hydrograph)으로, 측정된 수질(TN, TP, SS, COD)을 48개의 오염곡선으로 작성하였으며 각 수질에 대한 부하를 48개의 부하곡선으로 작성하였다. 그들 중, 강우량이 가장 적은 2002년 9월 22일의 강우사상과 가장 큰 2006년 10월 22일의 강우사상에 대한 수문곡선을 Fig. 4, 오염곡선을 Fig. 5, 부하곡선을 Fig. 6에 예시하였다.

부하량은 전반적으로 유출유량의 변화에 비례하고 있으며, 크기는 SS, COD, TN, TP 순이었다. SS, COD, TN, TP의 시간적 변화는 유출유량의 변화에 크게 비례하고 있다. 그러나 유량이 비교적 안정적인 감수곡선이 그려지는 기간에서도 수질의 변화는 지속되고 있었다. 변화폭은 SS와 COD에 비해 TN과 TP가 적었다.

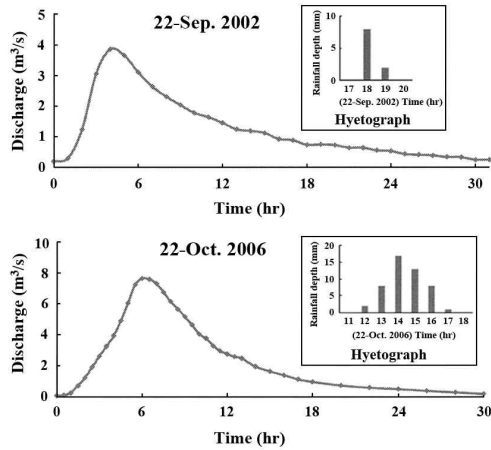


Fig. 4. Hydrograph in the Sang-sa River basin.

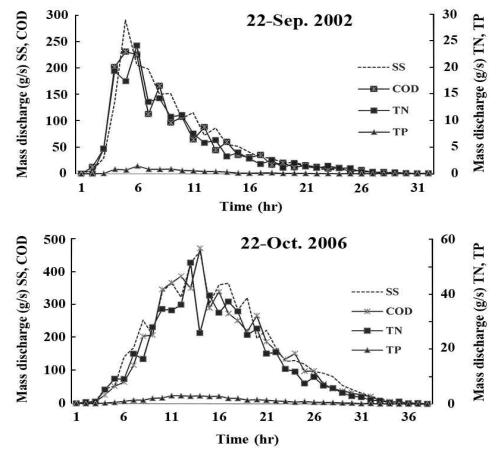


Fig. 6. Load-graph in the Sang-sa River basin.

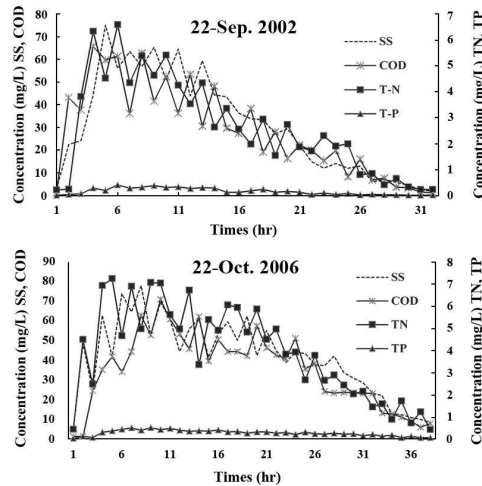


Fig. 5. Pollutograph in the Sang-sa River basin.

3. 결과 및 토의

비점원의 수질관리는 강우유출수의 수질관리와 동등하게 취급할 수 있다. 강우유출수 전체를 포집하여 처리하는 것은 그 막대한량 때문에 거의 불가능하다. 발생 강우사상으로 인한 오염물질의 유출과정은 강우유출의 전반부에 집중된다는 관측결과에 착안하여 수질이 전 유출기간동안 동등하지 않고 전반부에 많은 양이 유출된다는 실험결과들에 근거하여 전반부의 수량과 수질을 관리하고자 하는 계획들이 제안되었다.

3.1. 사상평균농도

U.S. Geological Survey에서는 부하와 집수구역의 사상평균농도 (EMC, Event Mean Concentration), 인구통계 및 수문학적 특성과의 관계를 회귀방정식(Regression equations)으로 발표하였다⁴⁾. 또한 EPA에서는 어떤 유역의 수질관리를 목적으로 오염물질을 수용하는 수체에 대한 오염부하량을 산정하는데 모델을 활용할 수 있다는 것을 지적하였다⁵⁾. 이런 모델에서 일반적으로 필요한 자료는 수량변수, 수질변수, 보정/검증변수로 구분하였으며 수질변수 중 하나로 EMC를 열거하였다. 해석에 활용되는 EMC는 계절 및 유역의 토지이용형태에 따라 폭넓게 변화하므로 통계적 유의성이 검증된 최소 1년, 때로는 2년 이상 현장 검증된 값이 필요하다고 부언하였다.

EMC의 분석은 이 등⁶⁾의 비점오염물질별 EMC와 강우특성 간의 상관분석, 이와 이⁷⁾의 중소도시지역에서 초기강우기준을 설정하기 위한 EMC와 초기세척의 분석, 김 등⁸⁾의 도로노면 유출수의 수질특성을 분석하기 위한 EMC의 해석, 김 등⁹⁾의 EMC와 유출부하량과의 관계를 해석, 최 등¹⁰⁾의 오염부하량을 산정하기 위한 EMC의 해석 등, 많은 연구가 보고되었으며 유역의 최적수질관리(BMP, Best Management Program)를 입안하기 위한 초기

세척과 EMC에 대한 해석이 주로 도시의 소유역을 대상으로 많은 연구 성과가 보고되었다.

강우사상의 발생기간에 유출되는 오염물질들의 농도는 폭넓게 변화하므로 사상에 기초한 오염농도의 특성, 즉 사상평균농도로 알려진 단일변수를 활용하고 있다. 어떤 유출사상에 대한 오염물질의 EMC는 강우발생기간 동안 유출된 오염물질의 유량가중 평균농도로 정의된다¹¹⁾. 발생한 강우사상 기간에 유송된 총질량을 유송된 총유량으로 나눈 값을 의미하므로 EMC는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$EMC = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int_{t_0}^{t_c} q(t)c(t)dt}{\int_{t_0}^{t_c} q(t)dt} \quad (1)$$

여기서 사상평균농도, 오염물질의 평균농도, 강우의 발생기간에 유송된 총질량, 유량의 전체 체적, 유출을 시간의 함수로 표현한 유량, 시간의 함수로 표현한 오염물질의 농도이다. 시간(유출의 초기) 및 시간(유출의 종료)로 표현한 적분구간은 시간(t)단위이다.

3.2. 사상평균농도와 수문학적 인자

지금까지 대다수의 연구에서는 몇 개의 유역과 여러 강우사상을 비교한 연구이었다. 이런 여러 지역에 대한 해석에서는 수문-지형적 요인들의 변화, 즉 유역의 크기, 형상, 경사, 지표면의 토지이용형태, 불투수 면적비율 등을 변수로 동시에 고려해야 하지만 한 유역으로 국한한다면 이런 변화 요인을 제거할 수 있으며 수문학적 인자만을 변수로 고려할 수 있다.

강우사상별, 수질지표들의 EMC와 수문학적 인자 즉, 강우량, 강우지속기간, 강우강도, 선행무강우시간을 비교하였다. 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 4가지 수문학적 인자들과 EMC와의 특별한 상관성을 확인할 수는 없었으나, 4가지 수문학적 인자 중 선행무강우시간과 EMC가 가장 높은 상관성을 나타냈다.

3.3. 초기세척

3.3.1. 무차원 누적해석

강우 유출은 받아들이는 수체의 수질을 저하시키는 주된 원인의 하나로 분류되었다. 일반적으로 초기세척이란 어떤 유역에서 강우-유출 사상의 초기에 오염물질이 불균형적으로 높게 배출되는 현상을 지칭한다. 많은 연

Table 3. Rainfall event and EMC

Rainfall event	EMC(mg/L)			
	TN	TP	SS	COD
1997. 5. 7	4.913	0.412	49.257	44.111
1998. 6.12	3.089	0.283	45.624	36.267
1999. 9.10	3.002	0.232	34.061	25.181
2000. 8.20	3.595	0.224	36.342	35.816
2001. 9.14	3.651	0.294	45.589	36.852
2002. 9.22	4.051	0.244	47.005	42.387
2003. 3. 1	3.963	0.264	46.556	38.856
2004. 4. 1	3.214	0.308	45.620	37.298
2005. 6.28	2.838	0.257	29.996	32.722
2006.10.22	4.938	0.351	51.141	46.432
2007. 2. 8	4.874	0.444	47.352	44.944
2008. 8.22	4.681	0.498	46.858	32.174

Table 4. Correlation of EMC and hydrological condition

Quality index	Rainfall depth	Rainfall duration	Rainfall intensity	Previous dry hours
	Correlation coefficient			
TN	0.0017	0.4161	0.3454	0.8058
TP	0.0265	0.2107	0.0510	0.4830
SS	0.0332	0.3362	0.3362	0.6348
COD	0.1487	0.2897	0.4462	0.7579

구자들은 초기세척을 강우사상의 시작부분에서 발현하는 높은 농도에 원인이 있는 것으로 전제하였으며¹²⁾, 초기세척을 평가하는 많은 연구가 제안되었다.

시계열(time series) 값으로 측정된 유량과 수질을 시간적 변수로 취급하여 동일한 좌표에 그 양적 변화비율로 표시한다면 초기세척에 대해 좋은 판단 근거가 제시될 것이다. 이런 의도에서 일정한 강우사상에 의해 발생한 유출의 전기간 동안, 전체 유량과 각 시간마다 유출된 유량의 비, 유출된 전 질량과 각 시간마다 유출된 질량의 비로 정규화(normalized)한 방법이 제시되었다. 일반적으로 초기세척을 계량화하여 표시하는 방법으로 오염물질을 농도 또는 질량으로 표현하는 방법이 활용되고 있는데, 개념적으로나 수학적으로 동등한 방법이라고 할 수 있다.

연구자들은 대체로 누적질량곡선과 누적유출곡선 간의 관계에 기초하였으며, 초기세척은 누적부하곡선이 누적유출곡선보다 위쪽에 위치했을 때 발생한다고 판단하였다. Sansalone과 Buchberger¹³⁾는 누적유출곡선면적에 대한 누적부하곡선면적의 비율은 초기세척의 강도에 기초하여 측정된다는 것을 제안하였다. 대각선(45° 선)과 누적오염부하곡선의 편차비율이 초기세척의 강도를 측정하는데 이용되었다¹⁴⁾. 대부분의 연구는 초기세척의 출현 유무와 그 강도에 초점이 맞추어있다.

농도기본 초기세척은 강우사상의 변화에 대해 관측되었으며, Forster¹⁵⁾의 건물 옥상으로부터 중금속의 제거를 실험한 연구,

Stenstrom 등¹⁶⁾의 도로 표면으로부터 유분과 기름의 제거에 대한 연구, Cordery¹⁷⁾와 Barrett 등¹⁸⁾의 도로표면으로부터 질소의 세정, 미립자의 제거에 대한 Deletic¹⁹⁾, Wu 등²⁰⁾, Farm²¹⁾ 등이 보고되었다. 농도기본 초기세척의 정의가 처음 제안되었을 때, 초기세척의 정의뿐만 아니라 상당기간 폭넓게 활용되었다.

한편, 질량기본 초기세척은 Bedient 등²²⁾의 Tex. Houston에서 오염부하와 유출과의 해석, Sansalone과 Buchberger¹³⁾의 고속도로 표면의 중금속 유출, Sansalone 등²³⁾의 고속도로 표면에서 고형물의 유출특성, Larsen 등²⁴⁾의 도시에서의 초기세척, Barbosa와 Hvitved-Jacobsen²⁵⁾의 고속도로 유출수의 침투조에 의한 중금속 제거 등이 보고되었다.

Sansalone과 Cristina²⁶⁾는 보고된 초기세척의 정의와 개념 및 그 계량화 방법, 3가지를 정리하였으며, 3가지 방법 모두 초기세척의 출현 유무를 판단하는데 활용될 수 있다는 것을 보였다. Fig. 7과 같이 측정결과를 나타낸다면, 이런 그림에서 대각선 1:1은 누적유출질량과 누적유출체적이 같다는 것을 의미한다. 따라서 누적질량이 누적체적보다 위쪽에 그려졌다면, 즉 1:1선보다 위쪽에 그려졌다면, 강우유출기간 중 배출된 질량이 배출된 유량에 비해 높다는 것을 의미한다.

첫 번째 방법으로, 상사천 유역의 측정 결과를 Fig. 7과 같이 무차원 누적유량과 무차원 누적질량곡선으로 정리하였다. 이 연구에서는 전반적으로 1:1선에 근접하고 있으며 높

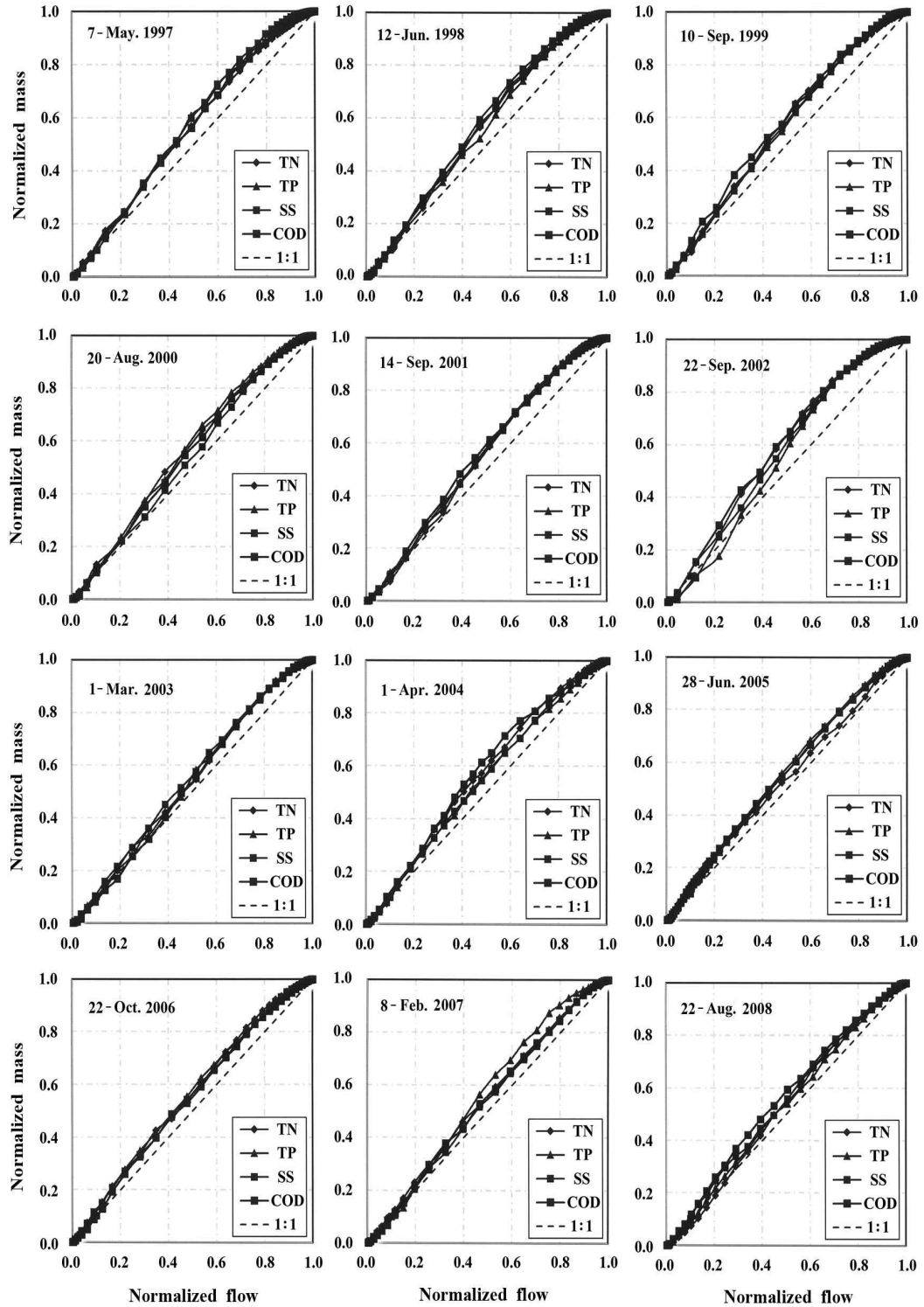


Fig. 7. Dimensionless cumulative plots of normalized flow and mass in the Sang-sa River basin.

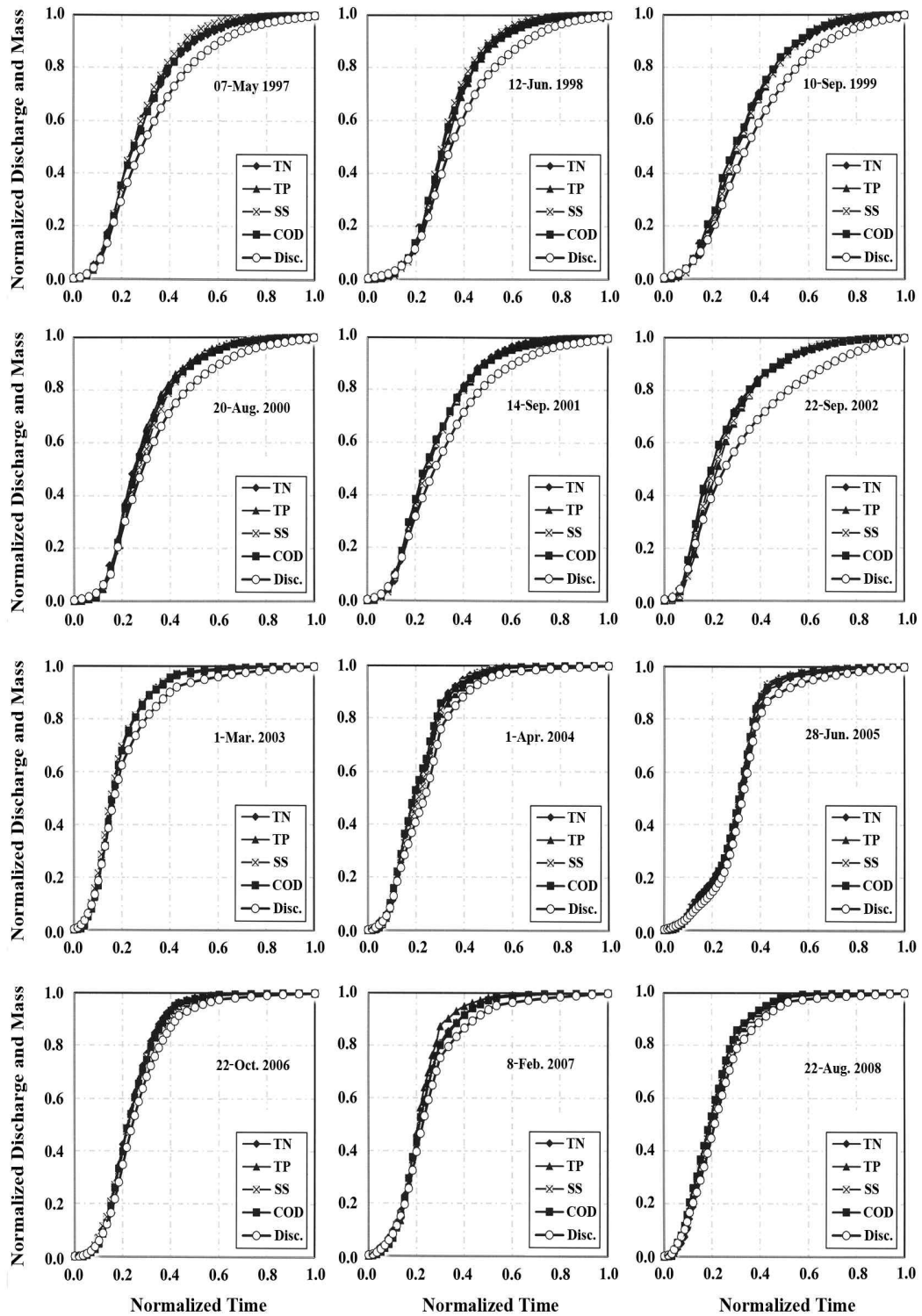


Fig. 8. Dimensionless cumulative plots of normalized time and flow, mass in the Sang-sa River basin.

은 편차를 보이지 않았다. 이는 누적유출질량과 누적유출체적의 편차가 높지 않다는 의미이며 두 가지 누적량의 비율이 비슷한 경향을 보이고 있었다. 따라서 초기세척의 발생유무를 판단하기가 어려웠다. 또한 누적질량이 강우유출의 전반부에 집중되는지 또는 후반부에 집중되는지를 판단할 수 있는 명확하게 구분할 수가 없었다. Fig. 7에서는 오염물질들의 유출질량 대비 유출유량을 나타내고 있었으나 수문곡선의 전반부에서, 즉 유출질량과 강우-유출 사상의 초기에 오염물질이 불균형적으로 높게 배출되는 초기세척을 판단하기에는 부족한 것 같다.

두 번째 방법은 무차원 누적시간을 도입하는 방법이다. 즉, 종축에 무차원 누적질량과 무차원 누적유량을, 횡축에 무차원 누적시간을 나타낸다. 측정된 유량과 수질이 시계열 값이므로 실험유역에서의 측정결과를 무차원 시간누적곡선으로 정리하여 Fig. 8에 예시하였다. 이 그림에서 유출질량들은 유출유량에 높게 비례한다는 것과 유출질량들은 유출의 후반부에 누적비율이 높다는 것을 보여주고 있다. 이 방법에서도 강우유출의 전반부에 유출질량이 집중되어 있다고 판단할 수 있는 근거가 보이지 않고 있다. 이런 두 가지 방법도 누적 값들의 집중 성향은 예시할 수 있었으나, 판단근거의 계량적 관계를 제시할 수는 없었다. 따라서 또 다른 검토 방법이 필요하였다.

3.3.2. 시간누적기준의 설정

초기세척은 BMP에서 적정 포집량, 즉 WQV(water quality volume)를 산정하기 위한 기초 개념을 제공하였다. 강우유출사상의 전반부에 오염물질이 불균형적으로 집중되어 배출된다면 유출유량의 전반부에서 일정량만 포집하여도 전체 배출질량의 대부분을 포집하는 효과를 얻을 수 있으며, 나머지 부분은 우회시켜 처리장을 거치지 않아도 된다는 전략이다. 물론 이는 초기세척이 존재하는 경우에

한한다. 최근, 초기세척이 발생하는 초기유출을 체적으로 표현하는 WQV이 활용되었다²⁷⁻²⁹⁾.

이와 같은 부분적인 포집계획은 부분적인 배출질량을 산정해야할 필요가 있다. 강우의 부분지속시간 대비 부분누적량을 산정한다면 누적유량 대비 누적부하질량을 산정할 수 있게 된다. 이런 의도로 부분사상 평균농도(PEMC, Partial Event Mean Concentration)를 고려하게 되었으며 부분배출질량은 부분사상 평균농도를 활용하여 산정할 수 있다.

전 유출기간보다 작은 기간에 대한 농도의 합이 필요하다면, 개념적으로 (1)식과 동일한 다음 (2)식을 이용해서 산정할 수 있다. 어떤 방법이든지, 계산에서 사상전체를 고려하지 않는다면, 그 값은 부분사상평균농도가 된다¹³⁾.

$$PEMC = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int_{t_0}^{t_{WQV}} q(t) c(t) dt}{\int_{t_0}^{t_{WQV}} q(t) dt} \quad (2)$$

이 식에서 t_{WQV} 는, BMP 또는 오염제어전략은 포집에 대한 설계와 WQV만 처리하고 유출의 잔여분은 처리 system으로부터 우회(bypass)시킨다는 가정이 전제되어 있으며, WQV가 충족되었을 때의 시간이다. 따라서 유출사상의 초기(시작)시간에 적분이 시작되고, 유출의 중간시간에서 적분이 끝난다.

각 개별 호우사상으로부터, 침투유량에 앞서 침투농도가 나타났을 때로 정의한 초기세척은 작은 도시유역에서 관측되었다³⁰⁻³¹⁾. 이것은 단일 호우사상 기간에 누적배출질량 대비 누적체적유량을 좌표에 점철(plots)하는 방법으로 누적유량을 이용한 계량화이다. 이 값은 Fig. 7과 같은 무차원 누적곡선에서 누적유량좌표 값에 대한 누적질량좌표 값을 읽는 것과 동등하다.

한편, Bertrand 등¹²⁾은 오염물질 부하의 최소 80%가 유출체적의 전반부 30%에 의해 유

Table 5. Rainfall event and EMC

Rainfall event	Mass discharge		Flow ratio(%)		
			20	25	30
1997. 5. 7	Flux ratio(%)	TN	22	29	36
		TP	23	30	36
		SS	23	30	34
		COD	22	29	31
1998. 6.12	Flux ratio(%)	TN	24	28	37
		TP	24	30	34
		SS	23	30	37
		COD	25	32	36
1999. 9.10	Flux ratio(%)	TN	23	30	36
		TP	23	30	36
		SS	23	29	35
		COD	25	33	40
2000. 8.20	Flux ratio(%)	TN	22	29	37
		TP	23	30	37
		SS	22	26	31
		COD	22	29	36
2001. 9.14	Flux ratio(%)	TN	21	27	32
		TP	22	29	34
		SS	22	29	35
		COD	24	31	36
2002. 9.22	Flux ratio(%)	TN	24	31	40
		TP	16	23	32
		SS	23	29	35
		COD	27	34	42
2003. 3. 1	Flux ratio(%)	TN	21	26	34
		TP	22	29	32
		SS	24	29	35
		COD	19	26	31
2004. 4. 1	Flux ratio(%)	TN	23	30	37
		TP	24	28	35
		SS	23	30	35
		COD	24	32	39
2005. 6.28	Flux ratio(%)	TN	25	30	35
		TP	23	30	35
		SS	24	30	35
		COD	25	31	36
2006.10.22	Flux ratio(%)	TN	25	30	36
		TP	25	32	37
		SS	25	30	35
		COD	24	30	35
2007. 2. 8	Flux ratio(%)	TN	24	30	34
		TP	21	27	33
		SS	21	28	32
		COD	22	29	35

송된다는 것에 근거하여 First flush의 정의를 제안하였다. 또 다른 접근방법으로 Stahre와 Urbanas³²⁾는 전체 흐름체적의 전반부 20%에 의해 전달된 전체 오염부하의 80%로 정의하였다. 그러나 이런 강우유출사상을 도시의 소구역에서도 찾기 어려운 초기세척이라고 판단된다.

이 연구에서는 유출체적의 전반부 20% 이내에서 75%(배출질량 $\geq$ 75%) 이상의 질량이 배출될 때 강한 초기세척이 존재한다고 전제한다. 유출체적의 전반부 25% 이내에서 질량배출이 30%보다 크고 75%(70% $\geq$ 배출질량 $\geq$ 50%)보다 작은 범위에 있을 때 중간정도의 초기세척, 유출체적의 전반부 30% 이내에서 질량배출이 50%보다 작을 때($\leq$ 50%) 초기세척은 존재하지 않는다고 전제한다.

이 연구에서 관측한 12개의 강우사상에 대한 유출누적질량과 유출누적유량을 Table 5에 정리하였다. 유출체적의 전반부 20% 이내에서 가장 큰 배출 질량은 2002년 9월 22일 강우사상의 27%로, 유출체적의 전반부 25% 이내에서 가장 큰 배출 질량은 2002년 9월 22일 강우사상의 34%로, 유출체적의 전반부 30% 이내에서 가장 큰 배출 질량은 2002년 9월 22일 강우사상의 42%로 나타났다. 이와 같이, 계량적 판단기준으로 설정한 시간누적한계에서도 초기세척은 나타나지 않았다.

4. 결 론

전형적인 농촌지역으로 선정된 실험구역에서 수위-유량 관계곡선을 작성하고, 비점오염원의 오염곡선과 부하곡선을 작성하였다. 각 강우사상에 대한 오염물질들의 부하곡선은 유출유량곡선에 비례하였다.

각 오염물질들의 EMC와 수문학적 인자들과의 상관성을 분석하였다. 검토한 수문학적 인자 중 선행무강우시간과 EMC와의 상관성이 가장 높게 나타났다.

초기세척의 발현 유무를 검토하기 위해,

무차원누적곡선을 작성하고 누적질량과 누적유량의 비율을 분석하였다. 그 결과, 실험구역에서 모든 강우사상에 대해 초기세척이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

최적수질관리를 위한 포집계획에서, 초기세척이 발생하는 초기유출을 체적으로 표현하는 WQV를 활용할 때는 부하량의 수문곡선에 대한 강한 비례성을 심도 있게 분석할 필요가 있다.

References

1. Haith, D. A.(1976), Land use and water quality in New York Rivers, Journal of Environmental Engineering Division, 102, No. EE1, Proc. Paper 11902, Feb., pp. 1-15.
2. Bedient, P. B., and Characklis, W. G.(1976), Water quality aspects of agricultural and urban drainage, ASCE, pp. 374-393.
3. 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System), http://www.wamis.go.kr/WKW/RF_DUBRFOBS.ASPX.
4. Driver, N.E., and G.D. Tasker(1990), Techniques for Estimation of Storm-Runoff Loads, Volumes, and Selected Constituent Concentrations in Urban Watersheds in the United States. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
5. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)(2002), National Management Measures Guidance to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas. www.epa.gov/owow/nps. Accessed August 25. (Environmental Protection Agency, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, Washington, DC.)
6. 이정호, 박수영, 김동호, 이영준, 박무중 (2012), 금강유역 비점오염원 모니터링을

- 통한 토지 이용별 강우-EMC 상관분석, 한국방재학회 논문집, 12(6), pp. 351-358.
7. 이홍신, 이승환(2009), 국내 중소 도시지역 강우유출수의 유출 특성, 대한환경공학회지, 31(3), pp. 193-202.
8. 김석구, 김영임, 강성원, 윤상린, 김소정 (2006), 강우에 의한 도로 비점오염원 유출 특성, 대한환경공학회지, 28(1), pp. 104-110.
9. 정성민, 엄재성, 장창원, 최영순, 김범철 (2012), 강우시 한강유역에서의 비점오염원 유출 특성과 토지 이용도와의 관계, 한국물환경학회지, 28(2), pp. 255-268.
10. 최정현, 이혜원, 최남희, 이용석(2011), 강우강도와 토지이용을 고려한 비점오염물질 부하량 산정에 관한 연구, 대한환경공학회지, 33(8), pp. 572-577.
11. U.S. Environmental Protection Agency USEPA.(1982), The results of the nationwide urban runoff program, Vol II, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
12. Bertrant-Krajewski. J., Chebbo. G., and Saget. A. (1998), Distribution of pollutant mass verses volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon, Water Research, 32(8), pp. 2341-2356.
13. Sansalone J. J., and Buchberger S. G. (1997), Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water, Journal of Environmental Engineering Division, 123(2), pp. 134-143.
14. Gupta, K., and Saul, A. J.(1996), Specific relationship for the first flush load in combined sewer flows, Water Research, 30(5), pp. 1244-1252.
15. Forster, J.(1996), Patterns of roof runoff concentration and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration, Water Science and Technology, 33(6), pp. 39-48.
16. Stenstrom, M. K., Silverman, G. S., and Buraztynsky, T. A.(1984), Oil and grease in urban stormwaters, Journal of Environmental Engineering, 110(1), pp. 58-72.
17. Cordery, I.(1977), Quality characteristics of urban storm water in Sydney, Australia, Water Resources Research, 13(1), pp. 197-202.
18. Barrett, M. E., Irish, L. B., Malina, J. F., and Charbeneau, R. J.(1997), Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area, Journal of Environmental Engineering, 124(2), pp. 131-137.
19. Deletic, A.(1998), The first flush load of urban surface runoff, Water Research, 32(8), pp. 2462-2470.
20. Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, W. L., and Evett, J. B.(1998), Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff, Journal of Environmental Engineering, 124(7), pp. 584-592.
21. Farm, C.(2002), Evaluation of the accumulation of sediment and heavy metals in a storm-water detention pond, Water Science and Technology, 45(7), pp. 105-112.
22. Bedient P. B., Harned D. A., and Characklis W. G.(1978), Stormwater analysis and prediction in Houston, Journal of Environmental Engineering Division, EE6, pp. 1087-1100.
23. Sansalone J. J., Joseph M. K., Smithson J. A., Buchberger S. G.(1998), Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events, Journal of Environmental Engineering Division, 124(5), pp. 427-440.
24. Larsen T., Broch K., and Anderson, M. R.

- (1998), First flush effects in an urban catchment area in Aalborg, *Water Science and Technology*, 37(1), pp. 251-257.
25. Barbosa A. E., and Hvitved-Jacobsen T. (1999), Highway runoff and potential for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal, *The science of the total environment*, 235, pp. 151-159.
26. Sansalone J. J., and Cristina C. M.(2004), First flush concepts for suspended and dissolved Solids in small impervious watersheds, *Journal of Environmental Engineering Division*, 130(11), pp. 1301-1314.
27. City of Boise.(1998), Boise storm water management design manual, (http://www.cityofboise.org/public_works/services/storm_water/manual.pdf).
28. Barret, M. E.(1999). Complying with the Edwards aquifer rules: Technical guidance on best management practices, (<http://www.tnrcc.state.tx.us/admin/topdoc/rg/348.pdf>)
29. State of Idaho.(2001), Catalog of stormwater best management practices for Idaho cities and counties, (http://www.deq.state.id.us/water/stormwater_catalog/doc_bmp50.asp).
30. Strein, E. D., Tiefenthaler, L. L., and Schiff, K. C.(2006), Watershed based sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban storm water, *Environmental Toxicology and Chemistry* , 25(2), pp. 373-385.
31. Tiefenthaler, L. L., Strein, E. D., and Schiff, K. C.(2008), Watershed and land use-based sources of trace metals in urban storm water. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(2), pp. 277-287.
32. Stahre, P., and Urbonas, B.(1990), Stormwater detention for drainage, water quality and CSO management, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.