大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 777~784. 2005.

강우시 도로유출수 수질특성 및 입경분포

이준호† · 조용진* · 방기웅**

청주과학대학 환경공업과 · *충주대학교 환경공학과 · **한밭대학교 토목 · 환경 · 도시공학부

(2005년 4월 19일 접수, 2005년 7월 26일 채택)

Water Quality and Particle Size Distributions of Road Runoff in Storm Event

Junho Lee† · Yongjin Cho* · Kiwoong Bang**

*Department of Environmental Engineering, Chongju National College of Science and Technology · *Department of Environmental Engineering, Chungju National University · **Division of Civil, Environment and Urban Engineering, Hanbat National University*

ABSTRACT : The first flush phenomenon is defined as the initial period of road runoff during which the concentration of pollutants was significantly high. Road runoff contains significant loads of micro-particles, heavy metals and organic constituents. There were two major objectives of this study. The first objective was to characterize the road runoff. The second objective was to measure and evaluate particle size distribution of the road runoff. Stormwater runoff was monitored on two sites of four lane road areas along with traffic volume. A total six storm events were monitored to characterize the road runoff. The quantity of road runoff and quality constituents, including chemical oxygen demand (COD_{Cr}), suspended solids (SS), total Kjeldahl nitrogen (TKN), ortho-phosphorus (PO_4-P), total phosphorus (TP), heavy metals and particle size distribution were analyzed. The results indicate that the concentration of SS, COD_{Cr}, TKN and TP ranges were 45~2,396 mg/L, 40~931 mg/L, 0.1~19.6 mg/L, and 0.2~25.1 mg/L, respectively. The results of the regression analysis between SS and the others constituents shows that COD_{Cr}, TP, Cu, Pb were highly correlated. And the results showed that the mean range of particle size and uniformity coefficient for road runoff were 6.7~23.4 μm and 6.4~10.2, respectively.

Key Words : *Road Runoff, Micro-Particle, First Flush, Particle Size Distribution*

요약 : 도시지역은 불투수층 면적비율이 높아 작은 강우에도 초기유출(first flush)이 강하게 발생하고 유출되는 오염물질 농도도 높다. 도로유출수에는 미세입자물질, 중금속, 유기물질 성분을 다량 함유하고 있다. 도로유출수의 수질과 입자의 유출특성을 파악하고자 교통량이 비교적 많은 도로 2개 지점을 대상으로 총 6회의 강우시료를 채수하여 분석하였다. 2개 조사 지점에서 분석된 도로유출수 수질농도범위는 SS 45~2,396 mg/L, COD_{Cr} 40~931 mg/L, TKN 0.1~19.6 mg/L, TP 0.2~25.1 mg/L, Fe 0.33~8.15 mg/L, Cr 0.06~0.50 mg/L, Pb 0.06~0.97 mg/L, Cr 0.01~0.12 mg/L으로 조사되었다. 강우초기의 농도는 극단적으로 높은 특성을 나타내었다. 도로유출수 SS와 상관계수가 높은 수질항목으로는 COD_{Cr}, TP, Cu, Pb이고, 상관계수가 가장 낮은 항목으로는 TKN으로 분석되었다. 도로유출수의 입경을 분석한 결과 평균 입경값의 범위는 6.7~23.4 μm이고 90% 입경의 범위는 36.2~105.2 μm로 분석되었다. 또한, 입경은 유출량에 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 균등계수를 분석한 결과 평균범위는 6.4~10.2로 입경 분포범위가 크게 나타났다.

주제어 : 도로유출수, 미세입자, 초기유출, 입경분포

1. 서 론

도시지역은 불투수층 면적비율이 높아 작은 강우에도 초기유출(first flush)이 강하게 발생하고 유출되는 오염물질 농도도 높다.[1,2] 특히 도로유출수는 유기물질, 부유물질, 자동차 배기가스 침착물질, 타이어 마모물질, 기름, 윤활유, 방향족 탄화수소화합물질, 중금속 등 다종 다량의 유해물질을 함유하고 있다.[3,4] 강우 시 도로유출수는 하천을 심각하게 오염시키는 비점오염원으로 알려져 있는데, 일반적으로 교통량이 많은 도시지역의 도로에서 오염물질 농도가 높게 나타난다.[5,6] 또한, 도로유출수는 강우초기에 부유물질 등 오염물질 농도가 극단적으로 높게 배출되는데 수질농도는 선행건기일수, 교통량, 강우강도에 영향을 받는 것으로 보고 되고 있다.[3] 봄철 하천유량이 적을 때 강우 시 하상도로유출수가 하천생태계에 치명적인 영향을 미치고 있는 사례는 많은 연구를 통하여 입증되었다.[7,8] 국내외에서 도로유출수와 관련된 연구사례를 정리하면 다음과 같다.

Vaze와 Chiew[4]는 도로청소는 미세물질을 만들어 강우 시 미세입자 배출의 원인이 된다고 하였다. 또한, 입경분포별 TN, TP 함량을 분석한 결과 이들 영양염류들은 미세한 퇴적물질에 부착되어 있다고 보고하였다. Characklis와 Wiesner 등[9]는 도로 유출수내 입자를 입자성과 용존성 크기로 구분하여 중금속 분포를 분석한 결과 TOC 농도와

† Corresponding author
E-mail: jlee@cjnc.ac.kr
Tel: 043-820-5274 Fax: 043-820-5272

Zn 농도와는 상관성이 높게 나타났으며 Fe는 주로 입자성에 부착하여 존재한다고 하였다. 이는 도로 유출수내 중금속은 미세입자에 흡착 또는 부착되어 거동하므로 입경이 큰 입자를 제거하는 단순 침전과정으로는 제거가 어렵다는 것을 의미한다. Deletic과 Maksimovic[5]은 불투수성 포장도로에서의 강우유출수를 10초 간격으로 모니터링 하였는데 선행건기일수가 강우유출수 수질농도에 미치는 영향은 적은 것으로 보고하였다. Sansalone과 Buchberger[10]는 교통량이 많은 도로에서 융설과 강우유출수의 입경과 입자 비표면적에 대한 연구를 수행하였다. 입경분석결과 Zn, Cd, Pb 함량은 입경에 반비례한다고 하였다. Davis 등[11]은 인공적으로 물을 분사시켜 자동차수리점, 타이어, 지붕 등에서 시료를 채수하여 중금속 등 수질성분을 분석하였다. 이평구 등[12]은 도로변 빗물받이 퇴적물질을 채취하여 분석한 결과 Zn, Cu, Pb, Cr 함량이 매우 높았다고 보고하였다. 최상용 등[13]은 교통량 차이가 있는 두 지점의 도로노면에서 강우유출수를 조사한 결과 교통량이 많은 조사지점에서의 수질농도가 2~5배 높다고 하였다. 최영화 등[14]은 한강 교량에서 강우시 배출되는 오염물질을 분석하였는데 COD, TN, Zn, Cu 성분이 초기유출이 강하게 발생하다고 하였다. 이주광 등[15]은 고속도로 청소폐수의 수질을 분석한 결과 수질이 극단적으로 고농도를 나타낸다고 하였다.

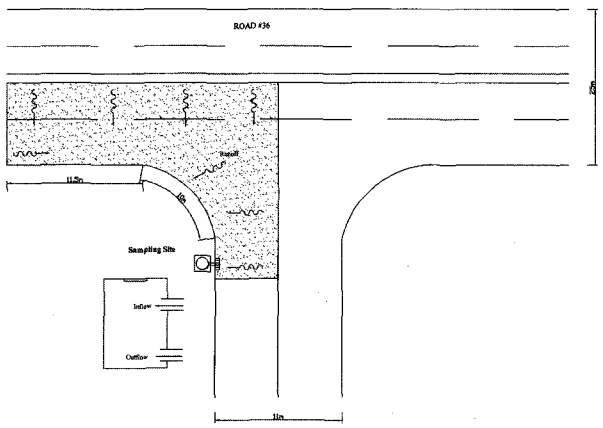
도로유출수에 의한 오염부하를 저감시키기 위한 시설을 설계 시 강우 유출형태와 수질특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 강우시 도로유출수를 채수하여 수질성분의 유출특성파악 및 입경분석을 통해 미세입자의 거동을 분석하여 처리기술 개발시 기초 자료를 제공하는 것이다.

2. 조사방법

2.1. 조사지점

교통량이 차이가 있는 36번국도 일부지점(이하 RDC)과 4차로 교량도로(이하 YPRD)를 본 연구의 조사대상으로 선정하였다. 본 연구 조사 지점중 RDC지점은 청주에서 충주를 연결하는 36번 국도중 증평읍을 통과하는 4차로의 일부 구간으로 일일 평균교통량은 약 30,000대이다. 집수면적인 510 m^2인 RDC지점에서 발생한 도로유출수는 도로노견을 통해 우수측구로 유입되는데 시료채수는 우수측구 맨홀에서 실시하였다. Fig. 1은 각각 RDC 시료채수 지점의 형상과 주변 환경을 나타낸 것이다.

YPRD 지점은 청주시 분평동과 용암동 사이의 무심천을 연결하는 4차로 용평교 도로로서 집수면적은 440 m^2이다.



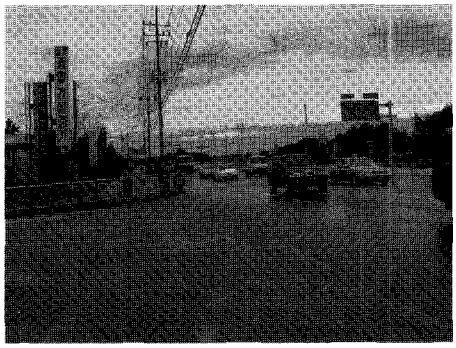
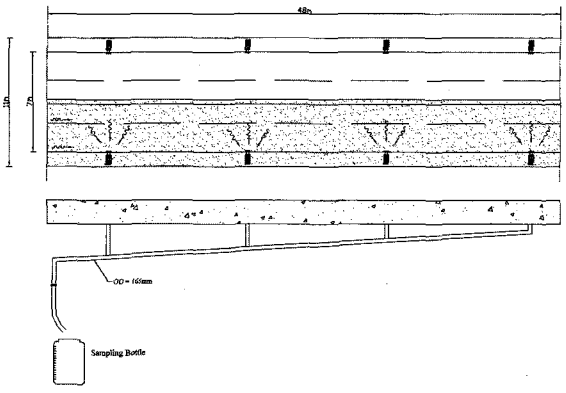


Fig. 1. Road runoff sampling site of RDC.



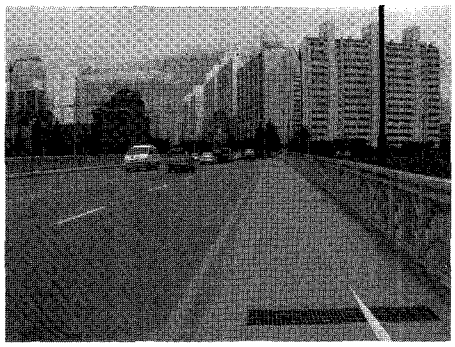


Fig. 2. Road runoff sampling site of YPRD.

YPRD지점은 4개의 우수측구에서 발생한 도로유출수는 직경 16.6 cm 원형강관으로 교량하부로 배출되며 시료채수를 위해 원형강관의 배관을 연장시켰다. Fig. 2는 조사지점 형상과 주변 환경으로 조사지점 인근에는 대규모 공동주택단지로 구성되어 있다. 일일 평균교통량은 약 14,000대로 보통 정도의 교통량을 가진 교량이다.

2.2. 조사일시 및 분석방법

강우시 RDC지점의 현장조사는 4회, YPRD지점은 2회 실시하였다. Table 1에 조사시점의 강우량, 강우지속시간, 첨두유출량 선행건기일수, 시료수 등의 수문특성을 나타내었다. 배수면적이 작고 불투수층포장인 도로에서는 강우가 시작되면 유출이 즉시 발생하기 때문에 강우 개시 상당시간 이전에 현장에서 대기하여 시료를 채수하였다. 시료채수 시간은 초기유출(first flush) 동안에는 1~2분 간격, 초기유출이 발생한 이후에는 3분~5분 간격으로 하였다. 분석항목은 BOD_5, COD_{Cr}, COD_{Mn}, SS, VSS, TKN, TN, PO_4-P, TP, 그리고 Cr, Cu, Pb, Fe 등의 중금속성분 등이다. 또한 강우지속시간에 따른 유출수내 입자의 입경을 분석하였다. 채수된 시료는 즉시 아이스박스에 보관하여 실험실로 이송하여 분석하였다. 각 항목별 분석방법으로 BOD_5는 용존산소측정기를 이용하였고, COD_{Cr}, COD_{Mn}은 각각 중크롬산칼륨산화법과 과망간산칼륨산화법 의한 전처리 및 적정법으로 분석하였고, SS와 VSS는 Whatman GF/C여지에 여과하여 건조(회화)전·후의 무게차이에 의하여 정량하였다. TKN은 킬달 분해, 증류후 0.01 N H_2SO_4로 적정에 의해, TN은 고압멸균기로 산화하여 Brucine법으로 분석하였다. PO_4-P는 ascorbic acid법에 의해 발색후 흡광광도계 (HACH DR4000)를 사용하여 정량하였다. TP는 여과하지 않은 시료를 황산과 과황산칼륨을 첨가한 후, 가열판에서 백연이 발생할 때까지 분해시켜 발색하여 흡광광도계로 분석하였다. 중금속 시료는 Microwave 전처리장치 (CEM 1200)를 이용하여 U.S. EPA 표준전처리방법을 적용하여 전처리 후 원자흡광광도계 (Pekin Elmer AAS300)을 이용하여 정량하였다. 입경분석은 Shimadzu사의 SALD-2101 입경분석기 (0.03~1,000 μm 입경범위)을 이용하여 분석하였다.

Table 1. Rainfall and runoff statistics of the rainfall events surveyed

Site	Date	Rainfall (mm)	Duration (hrs)	Peak runoff (m^3/hr)	Days since last storm	No. of samples taken
RDC	7/7/04	41.5	5.5	0.75	2	16
	8/9/04	15.0	4.5	2.03	11	23
	9/7/04	15.5	6.0	0.88	4	13
	11/10/04	25.2	12.0	0.24	19	14
YPRD	8/14/04	10.0	0.5	2.64	3	18
	8/16/04	40.0	4.5	0.57	2	19

3. 결과 및 고찰

3.1. 도로유출수 수질특성

3.1.1. RDC지점

RDC지점에서 4회 측정된 도로유출수의 강우지속시간에 따른 유출량과 수질항목 중 대표적인 항목인 SS, COD_{Cr}에 대한 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 2004년 7월 7일 RDC지점의 SS, COD_{Cr} 농도범위는 각각 117~267 mg/L, 320~720 mg/L를 보여주고 있다. 8월 9일 측정된 SS와 COD_{Cr}의 최대값은 각각 2,396 mg/L와 931 mg/L을 나타내어 조사기간 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 8월 9일 조사시점의 건기일수는 11일로 비교적 장기간 동안 강우가 없었고 기온이 35℃ 정도로 높아 강우 발생 직후 아스팔트 도로면은 흰색 거품이 많이 발생하며 유출되었고, 유출수 수온은 약 50℃로 상승하였다. Table 2는 RDC지점의 조사시점별 수질농도의 평균, 최대, 최소값을 나타낸 것이다. 일반적으로 배수면적이 작고 불투수층 면적비율이 높은 지점에서는 소규모 강우에도 오염물질의 초기유출이 강하게 발생하는데, 대체로 첨두유출량 발생시점 이전에 첨두농도가 발생한다.[2] 7월 7일의 경우는 첨두유출량과 SS의 첨두농도 발생시점이 일치하고 있고 그 이외 조사된 날의 결과는 대체로 첨두농도가 첨두유출량 발생시점 이전에 발생하는 전형적인 초기유출현상이 뚜렷이 나타나고 있고 강우지속시간에 따라 지속적으로 농도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 높은 강우강도와 유달시간이 짧은 경우에도 7월 7일 조사된 결과에서와 같은 현상이 나타나는 경향이 있다. 그러나, 7월 7일 조사시점을 제외하면 강우가 시작된 시점에서 유출량은 작으나 오염물질 농도는 고농도로서 강우가 지속하는 동안 점차 농도가 감소되는 경향을 나타내었다. RDC지점에서 측정된 도로유출수 평균수질농도범위는 SS 171~366 mg/L, COD_{Cr} 172~521 mg/L, TKN 2.4~16.0 mg/L, TP 0.6~6.5 mg/L, Fe 0.33~8.15 mg/L, Cr 0.06~0.50 mg/L, Pb 0.06~0.97 mg/L, Cr 0.01~0.12 mg/L으로 조사되었다.

3.1.2. YPRD지점

YPRD지점에서 2회 측정된 도로유출수의 강우지속시간에 따른 유출량과 SS, COD_{Cr} 농도변화를 Fig. 4에 나타내었다. 2004년 8월 14일과 8월 16일 측정시점 모두 첨두유출량 이전에 첨두농도가 발생하는 경향을 나타내었다. 강우초기에 오염물질농도가 곧바로 첨두농도로 증가하다가 강우지속시간에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 8월 16일의 지속시간이 0.4시간 경과후 유출량은 증가하였지만 SS, COD_{Cr} 농도는 지속적으로 감소하는 경향을 나타내는데 이는 도로면에서 초기유출 후의 유출 가능한 오염물질량이 적기 때문으로 해석된다. Table 3은 YPRD지점의 조사시점별 수질농도의 평균, 최대, 최소값을 나타낸 것이다. YPRD지점의 SS, CODCr 평균농도범위는 각각 141~150 mg/L, 195~209 mg/L를 보여주고 있다. YPRD조사지점에서 측정된 첨두농도의 발생시점은 첨두유출량 발생시점 이전에 나타나는 특성을 나타내었다.

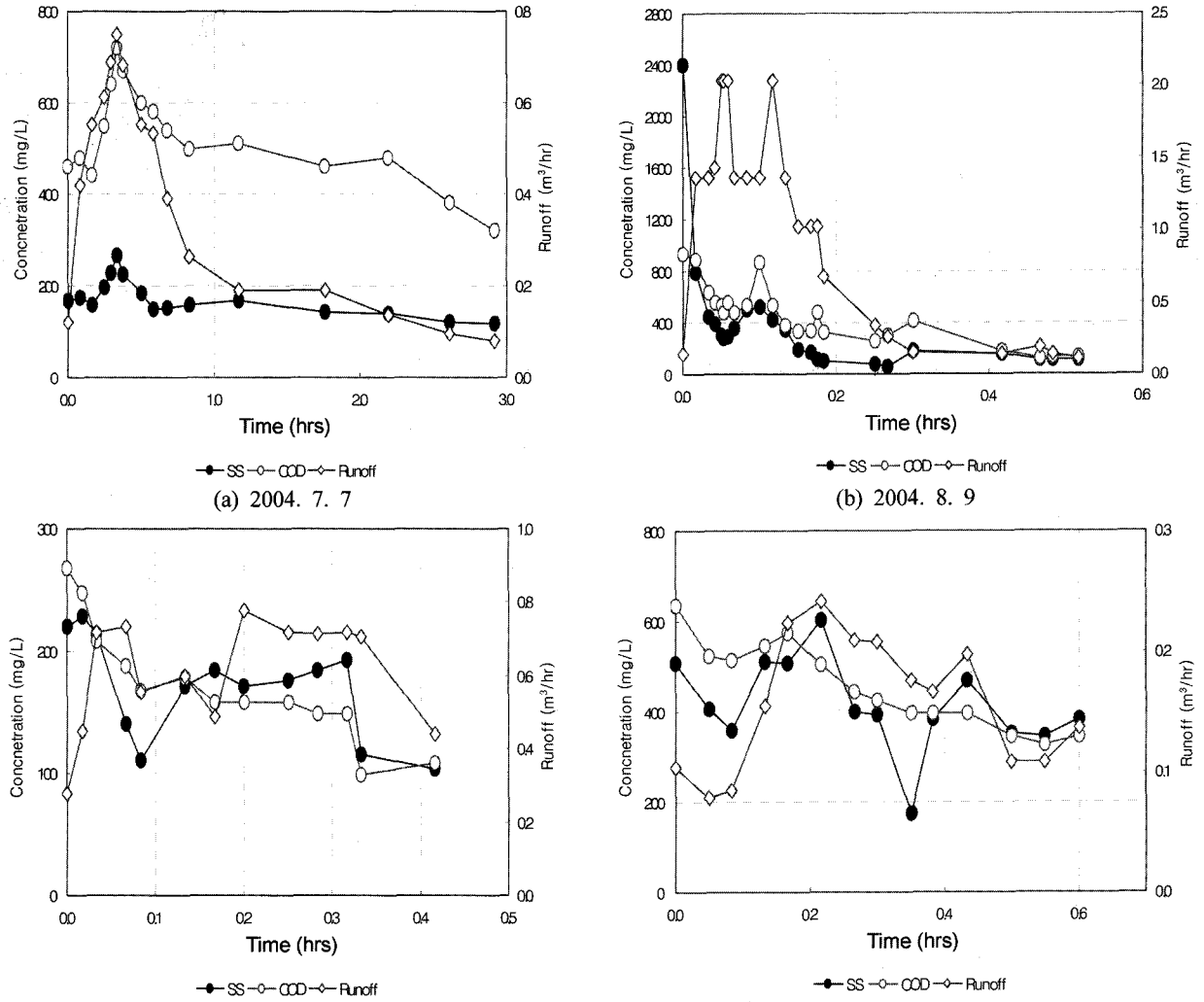
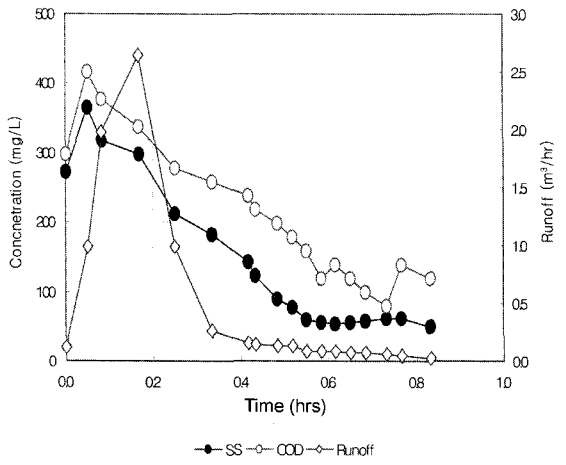


Fig. 3. Hydrograph and pollutograph of the road runoff at site RDC.

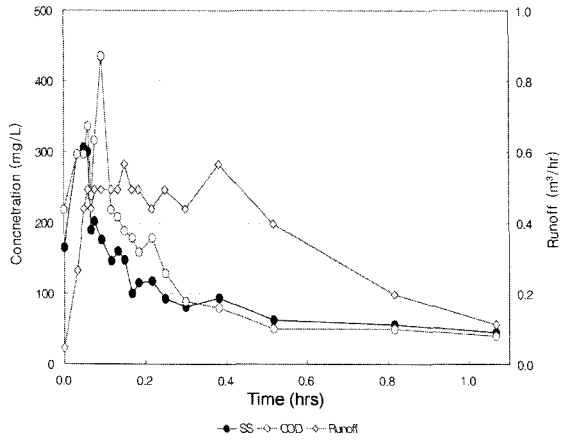
Table 2. Summary of road runoff and water quality at sampling site RDC

Constituents	Range and mean concentration for a given sampling date											
	7/7/04			8/9/04			9/7/04			11/10/04		
	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
Runoff (m^3/hr)	0.39	0.08	0.75	0.99	0.11	2.03	0.61	0.28	0.78	0.16	0.08	0.24
SS (mg/L)	172	117	267	366	60	2,396	170	104	228	415	176	604
VSS (mg/L)	51	21	96	103	32	437	-a	-	-	117	95	163
COD_{Mn} (mg/L)	96	28	117	144	107	283	-	-	-	152	129	178
COD_{Cr} (mg/L)	521	320	720	451	119	931	172	99	267	455	327	634
TKN (mg/L)	16.0	8.4	19.6	5.4	4.2	6.8	2.6	0.3	16.8	2.4	0.1	5.6
PO_4-P (mg/L)	-	-	-	0.47	0.20	1.04	0.12	0.07	0.19	0.14	0.06	0.27
TP (mg/L)	6.5	1.6	25.1	1.3	0.2	3.4	0.6	0.4	0.8	1.1	0.7	1.7
Fe (mg/L)	8.15	2.70	12.88	0.33	0.12	0.62	-	-	-	-	-	-
Cr (mg/L)	0.06	0.01	0.42	0.50	0.26	0.65	-	-	-	-	-	-
Pb (mg/L)	0.16	0.06	0.31	0.75	0.57	0.97	-	-	-	-	-	-
Cu (mg/L)	0.02	0.01	0.04	0.09	0.08	0.12	-	-	-	-	-	-

[a]No data.



(a) 2004. 8. 14



(b) 2004. 8. 16

Fig. 4. Hydrograph and pollutograph of the road runoff at site YPRD.

Table 3. Summary of road runoff and water quality at monitoring site YPRD

Constituent	Range and mean concentration for a given sampling date					
	8/14/04			8/16/04		
	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
Runoff (m^3/hr)	0.45	0.02	2.64	0.41	0.05	0.57
BOD (mg/L)	-	-	-	37	16	72
SS (mg/L)	141	49	366	150	45	307
VSS (mg/L)	61	28	142	40	17	82
COD_{Cr} (mg/L)	209	79	416	195	40	436
TKN (mg/L)	-	-	-	1.0	0.8	1.4
TN (mg/L)	3.7	1.4	8.0	6.8	3.4	10.2
PO_4-P (mg/L)	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.3
TP (mg/L)	0.7	0.3	1.9	0.6	0.4	1.0
Fe (mg/L)	-	-	-	9.6	3.0	20.8

RDC와 YPRD 조사지점에서 도로유출수 수질농도범위는 SS 45～2,396mg/L, COD_{Cr} 40 ～931 mg/L, TKN 0.1～19.6 mg/L, TP 0.2～25.1 mg/L로 강우초기의 농도가 매우 높은 특성을 나타내었다. 국내외 연구자들에 의해 제시된 도로유출수에 대한 수질농도범위와 비교하여 정리하면 Table 4와 같다. 연구대상지역은 모두 불투수성 아스팔트 포장도로이며 고속도로, 교량, 일반도로 등으로 구성되었다. Barrett 등[3]과 Sansalone 등[6]이 제시한 농도범위는 유량가중평균농도를 나타낸 것으로 농도범위가 낮게 제시된 것이다. 본 조사에 의하면 도로에 축적되어있는 유출 가능한 오염부하가 제한되어 도로유출수는 대체로 강우초기에 높고 강우지속시간에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 분류식하수관 월류수의 경우는 연속적으로 강우가 발생하여도 지표면, 맨홀 그리고 관로 등에 유출 가능한 오염물질량이 잔류함으로서 강우 유출수가 다시 증가하면 오염물질 유출농도가 다시 증가한다는 점에서 도로 유출수와는 다른 유출특성을 나타낸다.[2]

Table 4. Comparison of annual pollutant unit loading rates for road runoff

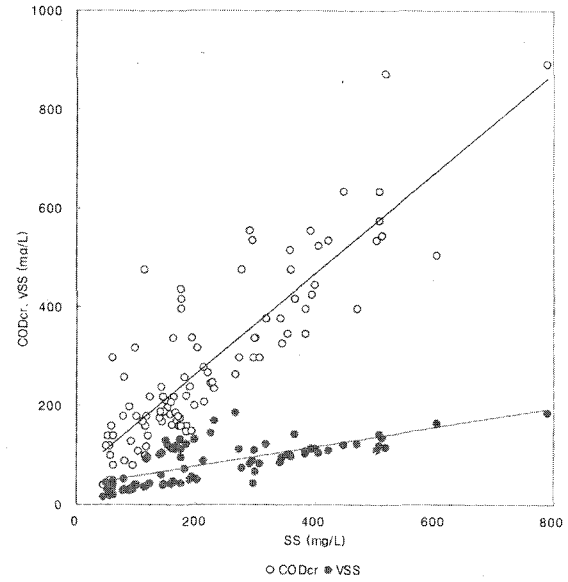
Constituent	Wu[19]	Barrett[3]	Berbee[1]	Sansalone[10]	Choi[13]	Park[17]	This study
SS (mg/L)	30-2,678	19-129	153-354	131	62-968	15-5,960	45-2,396
COD_{Cr} (mg/L)	22-603	37-130	143-149	230	85-1650	26-1,645	40-931
TKN (mg/L)	1.0-19.4	-	2-3	-	-	1.9-25.0	0.1-19.6
TP (mg/L)	0.3-9.1	0.1-0.3	-	-	-	0.2-13.0	0.2-25.1

3.2. SS농도와 수질성분간의 상관성

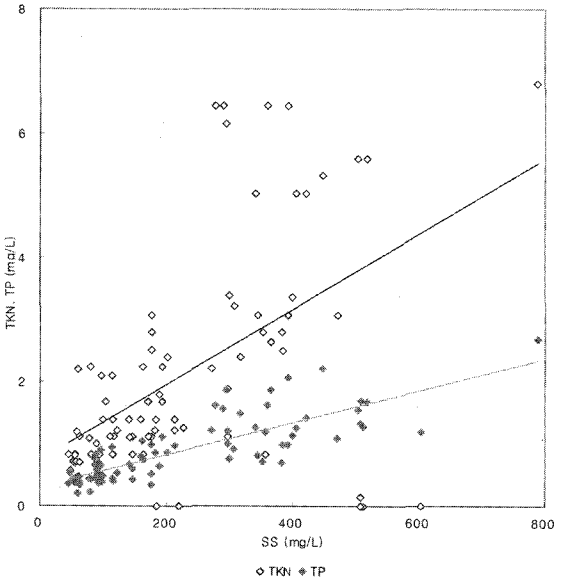
SS는 주로 입자물질을 대표하는 물질로서 도로 유출수의 유해성분들이 SS에 흡착 또는 부착되어 유사거동특성을 파악하고자, RDC지점과 YPRD지점에서 분석된 SS농도와 수질성분농도와의 상관성을 분석하였다. Fig. 5는 SS와 COD_{Cr}, VSS, TKN, TP, 그리고 Fe, Cu, Pb, Cr과의 상관관계를 도식한 것이며, Table 5는 회귀계수 및 상관계수를 정리한 것이다. SS와 상관계수(r^2)가 높은 수질항목으로는 COD_{Cr} 0.75, TP 0.70, Cu 0.92, Pb 0.71로 분석되었다. 상관계수가 가장 낮은 항목으로는 TKN 0.29로 분석되었다. 따라서 도로지표면 초기유출수내 SS의 제거는 COD_{Cr}, TP, Cu, Pb 등의 오염물질을 상당량 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 도로유출수 입경분포특성

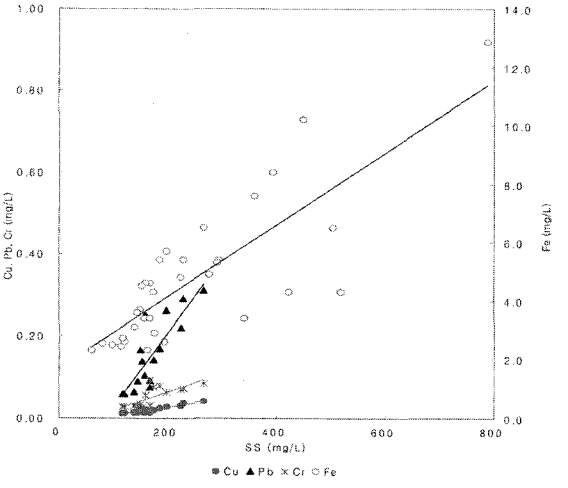
RDC지점과 YPRD지점의 도로유출수 시료에 대해 강우지속시간별 유출량과 평균입경(D_{Mean}), 90%통과입경(D_{90})의 입경분포를 Fig. 6에 나타내었다. RDC지점에서 D_{Mean}값의 범위는 6.7～23.4 μm이고 D90입경의 범위는 36.2～105.2 μm로 분석되었다. YPRD지점의 경우는 D_{Mean}값은 11.4 μm이고 D_{90}입경의 범위는 55.7 μm로 분석되었다. 유출량이 증가하면 D_{Mean}과 D_{90}입경은 비례적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 Sansalone 등[6]이 제시한 결과와 유사하게 나타난 것이다. RDC지점에서 분석된 입경분포와 유출량과의 관계를 도식하면 Fig. 7과 같다. D_{Mean}과 유출량(Q), 그리고 D_{90}과 유출량과의 관계는 식 (1)과 (2)와 같으며 각각의 상관계수는 0.76, 0.68로 분석되었다.



(a) COD_{Cr}, VSS



(b) TKN, TP



(c) Fe, Cu, Pb, Cr

Fig. 5. Relationship between SS and the other constituents.

Table 5. Summary of regression coefficient between SS and the other constituents

Item	VSS	COD_{Cr}	TKN	TP	Fe	Cr	Cu	Pb
a	0.197	1.02	0.006	0.0026	0.0123	0.0004	0.0002	0.0018
b	37.57	60.49	0.74	0.32	1.69	-0.0233	-0.0147	-0.151
r^2	0.50	0.75	0.29	0.70	0.65	0.51	0.92	0.71
N	99	99	86	86	26	13	13	13

Regression model: y = ax+b

$$D_{Mean} = 5.4e^{0.77Q} \qquad (r = 0.76, n = 43) \tag{1}$$

$$D_{90} = 27.2e^{0.81Q} \qquad (r = 0.68, n = 19) \tag{2}$$

본 논문에서는 제시하지는 않았지만 입경분포별 입자수를 분석한 결과 3 μm 입경 이하의 입자수는 전체입자수이 약 60%를 차지하고 있었다. 60% 통과입경(D_{60})을 10%통과입경, 즉 유효입경(effective size, D_{10})로 나눈값(D_{60}/D_{10})을 균등계수(uniformity coefficient, C_u)라 하며 입경분포를 나타내는 지수로 이 값이 크면 넓은 입경분포를 의미한다.[6,18] C_u값의 평균범위는 6.4～10.2로 입경분포범위가 크게 나타나고 있는데, 이는 Sansalone 등[6]이 제시한 값과 유사한 범위였다. 조사시점별 유출량, 중앙입경(D_{Median}), 최빈수입경(D_{Modal}), D_{Mean}, D_{10}, D_{60}, D_{90}, Cu 값의 범위를 Table 6에 나타내었다.

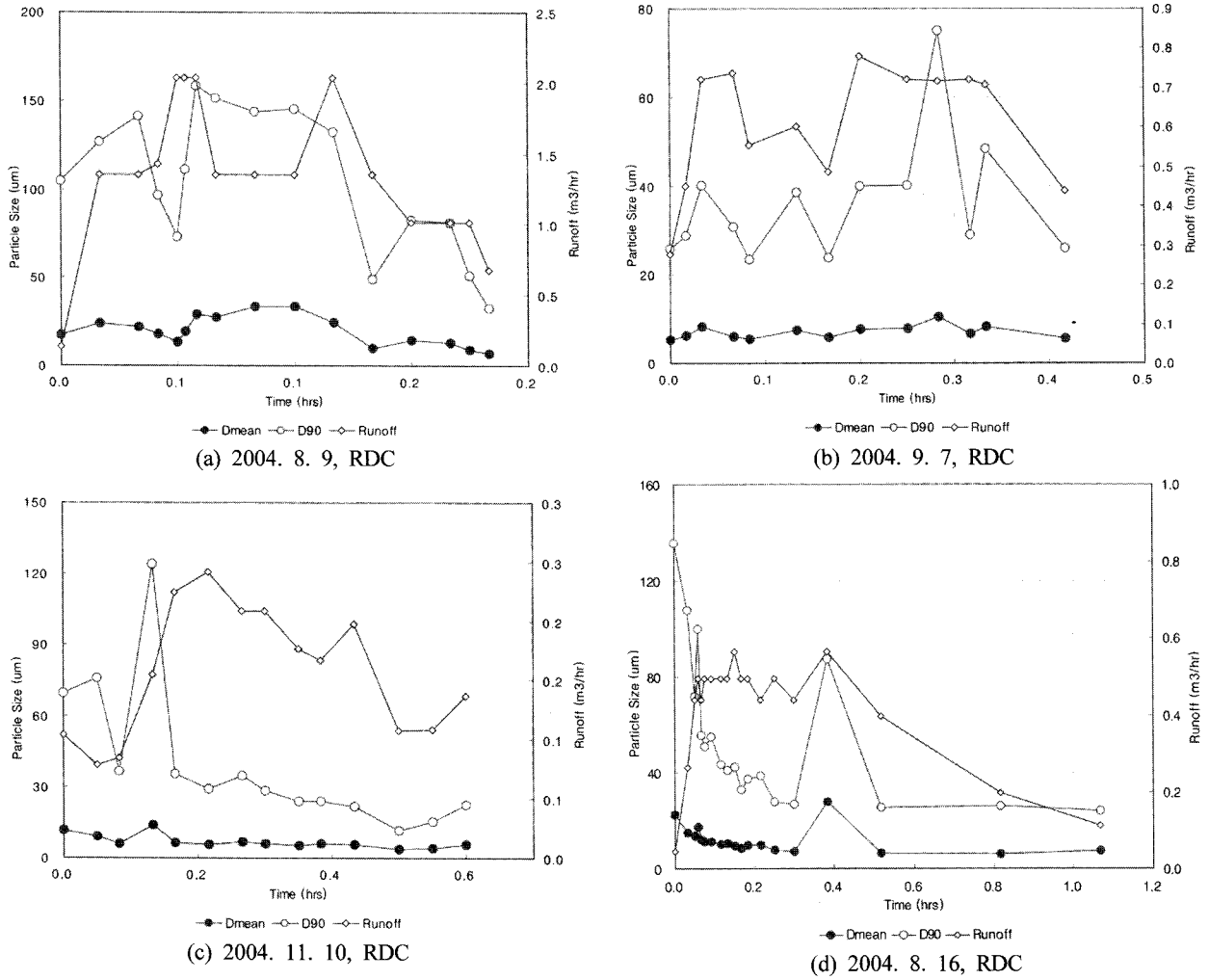
현장조사지점 중에서 YPRD지점의 인근에 분류식하수관 월류지점(BPSSO)에서 시료를 채수하여 입경을 분석한 결과 평균 D_{Mean} 값은 54 μm이고, 평균 D_{90} 입경은 200 μm로 분석되었다. Fig. 8은 RDC, YPRD, BPSSO지점에서의 입경분석한 결과를 나타낸 것이다. 도로유출수의 평균입경은 하수관 월류수평균입경과 비교하여 약 10%에 해당하는 20 μm의 범위를 나타내었다.

4. 결 론

도시비점오염원 중에서 중금속 등 유해물질의 유출이 높

Table 6. Summary of particle size distribution and particle counting indices

Items	RDC-8/9/04			RDC-9/7/04			RDC-11/10/04			YPRD-8/16/04		
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
Runoff (m^3/hr)	0.11	2.03	0.99	0.28	0.78	0.61	0.08	0.24	0.16	0.08	0.24	0.16
D_{Median} (μm)	7.1	46.0	23.4	5.0	9.5	6.8	3.8	14.2	6.7	6.5	23.3	11.6
D_{Modal} (μm)	4.9	138.2	55.4	4.0	7.5	6.8	4.0	21.2	6.0	7.5	17.2	13.4
D_{Mean} (μm)	7.2	33.7	19.8	5.2	10.3	6.9	3.6	14.0	6.8	6.5	22.4	11.4
D_{10} (μm)	1.5	5.0	3.1	1.2	1.8	1.4	1.1	1.7	1.3	1.7	3.6	2.4
D_{60} (μm)	9.8	63.9	33.4	6.7	13.9	9.3	4.7	23.2	9.6	8.4	36.3	16.0
D_{90} (μm)	32.6	158.4	105.2	23.4	75.0	36.2	11.6	124.2	39.5	25.6	135.4	55.7
Cu (D_{60}/D_{10})	6.4	15.5	10.2	5.3	7.9	6.4	4.4	14.4	7.1	5.0	10.1	6.5



(a) 2004. 8. 9, RDC

(b) 2004. 9. 7, RDC

(c) 2004. 11. 10, RDC

(d) 2004. 8. 16, RDC

Fig. 6. Variation of road runoff and particle size throughout storm events.

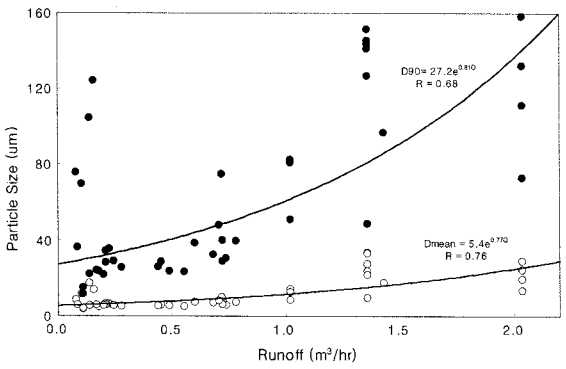


Fig. 7. Relationship between runoff and particle size.

은 것으로 알려진 도로유출수의 수질과 입자의 유출특성을 파악하고자 교통량이 비교적 많은 도로 2개 지점을 대상으로 총 6회의 강우시료를 채수하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 본 연구에서 조사된 2개 조사지점에서의 도로유출수 수질농도범위는 SS 45～2,396 mg/L, COD_{Cr} 40～931 mg/L, TKN 0.1～19.6 mg/L, TP 0.2～25.1 mg/L, Fe 0.33～8.15 mg/L, Cr 0.06～0.50 mg/L, Pb 0.06～0.97 mg/L, Cr 0.01～0.12 mg/L으로 강우초기에 농도가 매우 높고, 강우가 지속됨에 따라 감소하는 특성을 나타내었다. 전반적으로 도로유출수에서의 첨두농도 발생시점은 첨두유출 발생시점 이전에 발생하는 전형적인 초기유출현상을 나타내었다. 도로유출수의 SS와 다른 성분간의 상관관계를 분석한 결과 상관성이 높은 수질항목으로는 COD_{Cr}, TP, Cu, Pb이고, 상관성이 가장 낮은 항목으로는 TKN으로 분석되었다. 도로유출수의 입경을 분석한 결과 D_{Mean}값의 범위는 6.7～23.4 μm이고 D_{90}입경의 범위는 36.2～105.2 μm로 분석되었다. 또한, D_{Mean}과 D_{90}입경은 유출량에 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, C_u값의 평균범위는 6.4～10.2로 입경 분포범위가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 도로유출수의 평균입경은 약 20 μm로 분석되었다.

사 사

본 연구는 2004년 충북지역환경기술개발센터의 지원에 의하여 수행되었습니다. 연구비를 지원해주신 센터에 감사드립니다.

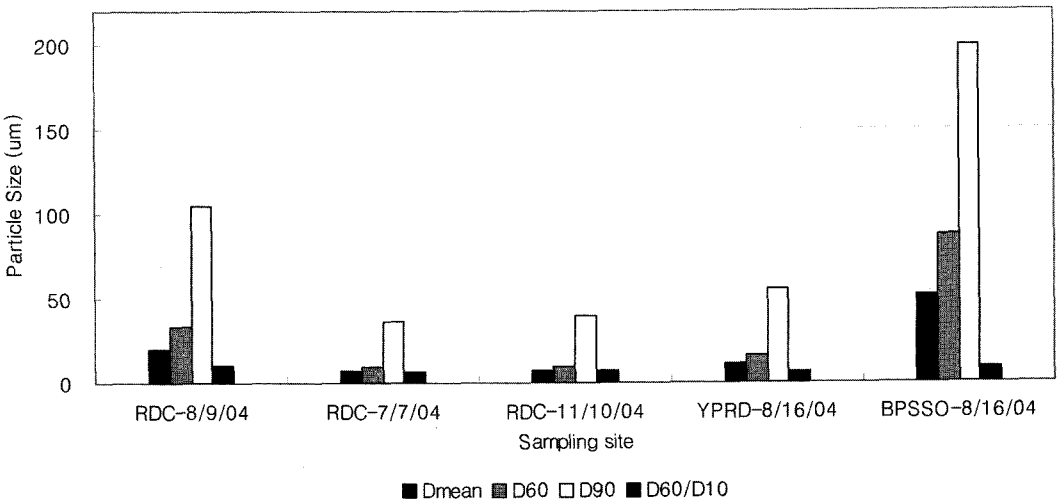


Fig. 8. Comparison of the particle size and indices.

참고문헌

1. Berbee, R., Rijs, G., Brouwer, R., and van Velzen, L., "Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt," *Water Environ. Res.*, **71**(2), 183~190(1999).
2. Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, Jr., L. H., Choe, J. S., and Yu, M. J., "First flush analysis of urban storm runoff," *Sci. Total Environ.*, **293**, 163~175(2002).
3. Barrett, M. E. Irish, Jr., L. B., Malina, Jr., J. F., and Charbeneau, R. J., "Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area," *J. Environ. Eng.*, ASCE, **124**(2), 131~137(1998).
4. Vaze, F., Chiew, F. H. S., "Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface," *Urban Water*, **4**, 379~389(2002).
5. Deletic, A. B., and Maksimovic, C. T., "Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas," *J. Environ. Eng.*, ASCE, **124**(9), 869~879(1998).
6. Sansalone, J. J., Koran, J. M., Smithson, J. A., and Buchberger, S. G., "Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events," *J. Environ. Eng.*, ASCE, **124**(5), 427~440(1998).
7. 민경섭, 홍성희, 이명숙, 김용혜, 박연준, 김종우, "초기 우수에 의한 하천수질변동이 물고기 생존에 미치는 영향," 1995년도 대한환경공학회 추계학술발표회, 영남대, pp. K-10~18(1995).
8. Novotny, V. and Olem, H., Water quality prevention, identification, and management of diffuse pollution, Van Nostrand Reinhold, NY, pp. 735~816(1994).
9. Characklis, G. W. and Wiesner, M. R, "Particles, metals, and water quality in runoff from large urban watershed," *J. Environ. Eng.*, ASCE, **123**(8), 753~759(1997).
10. Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G., "Characterization of solid and metal element distribution in urban highway stormwater," *Water Sci. Technol.*, **36**(8~9), 155~160(1997).
11. Davis, A. P., Shokouhian, M., and Ni, S., "Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources," *Chemosphere*, **44**, 997~1009(2001).
12. 이평구, 김성환, 윤성택, "도로변 우수관 퇴적물의 중금속 오염(I):서울시 동부지역," 한국지하수토양환경학회지, **6**(4), 25~40(2001).
13. 최상용, 고광백, 임세호, 오영기, "도심지역의 도로노면을 지나는 초기우수의 수질특성규명," 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2004공동추계학술발표회, 대전, pp. E-88~E-91(2004).
14. 최영화, 오재일, 황환구, 김종화, "교량부 비점오염원 배출특성분석: 1. 오염물질별 유출 거동분석," 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2004공동추계학술발표회, 대전, pp. P-765~772(2004).
15. 이주광, 장태순, 강희만, 강혜진, "고속도로에서의 청소 폐수 오염물질 특성," 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2004공동 추계학술발표회, 대전, pp. P-581~584(2004).
16. Butler, D. and Karunaratne, S. H. P. G., "The suspended solids trap efficiency of the roadside gully pot," *Water Res.*, **29**(2), 719~729(1995).
17. Park, J. Y., Jo, Y. M., and Oh, J. M., "Characterization of nonpoint sources from urban runoff," *Water Eng. Res.*, **1**(1), 39~48(2000).
18. Reynolds, T. D. and Richards, P. A., Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, PWS Publication Company, pp. 284~320(1996).
19. Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, W. L., and Evett, J. B., "Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff," *J. Environ. Eng.*, ASCE, **124**(7), 584~4592(1998).