

강우에 의한 도로 비점오염원 유출 특성

김석구 · 김영임[†] · 강성원 · 윤상린 · 김소정

한국건설기술연구원 건설환경연구부

(2005년 10월 10일 접수, 2006년 1월 26일 채택)

Runoff Characteristics of Non-Point Sources on the Stormwater

Seog-Ku Kim · Young-Im Kim[†] · Sung-Won Kang · Sang-Leen Yun · So-Jung Kim

Korea Institute of Construction Technology, Construction Environment Research Department

ABSTRACT : Growth in population and urbanization has progressively increased the loadings of pollutants from non-point sources as well as point sources. Accordingly, release of contaminants from non-point sources, released with surface runoff of rainwater, is influenced by atmospheric phenomena, geology, and topography. This makes the control of non-point source difficult. Therefore, this study intends to reveal the characteristics of runoff and particle size distribution to observe the fundamental characteristics of runoff. Experiments were carried out at inner road of research center. Average concentration of runoff ranged from 26.8 to 126.4 mg/L for SS and COD_{Cr}, 15.3~117.7 mg/L, TN 0.07~5.16 mg/L, TP 0.06~0.49 mg/L and heavy metals 0.00~0.29 mg/L. First flush, indicated wash off of pollutant at first rain, was observed for all types of pollutants. Most pollutants revealed a very close correlation with SS ($R^2 = 0.93 \sim 0.99$). After analyzing characteristics of particle, particle was finer than that from previously examined data.

Key Words : Non-Point Source Pollutant, Particle Size Distribution, First Flush Effect, EMC

요약 : 도시화로 인해 증가하고 있는 불투수층은 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 비점오염물질의 유출량을 증가시킨다. 비점오염원은 인위적인 조절이 어려운 기상, 지형 등의 영향을 받는 특성을 지니고 있어 제어가 어렵다. 따라서 비점오염원에 대한 기초적인 조사는 오염물질 유출 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단되어 본 연구에서는 오염물질 유출특성과 유출입자의 입도분포를 조사하였다. 본 연구는 연구단지 내 주차장과 인접한 도로에서 진행되었으며, 오염물질의 평균 농도는 SS 26.8~126.4 mg/L, COD_{Cr} 15.3~117.7 mg/L, TN 0.07~5.16 mg/L, TP 0.06~0.49 mg/L, 중금속류 0.00~0.29 mg/L의 범위를 나타냈다. 또한 강우에 따라 차이를 보이나 오염물질의 초기 세척효과가 나타났으며, SS와 오염물질의 유출은 0.93~0.99의 높은 상관관계를 나타냈다. 도로면 유출수의 입도 특성을 살펴본 결과, 기존 자료보다 미세한 것으로 관찰되었다.

주제어 : 비점오염물질, 입도분포, 초기세척효과, EMC

1. 서론

비점오염물질은 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로서 일간, 계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건·지질·지형 등에 영향을 받는 특성을 지니고 있다. 비점오염물질은 다양한 오염물질을 포함하고 있으며, 유출오염부하는 하수처리장에 의한 것보다 매우 높은 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 따라서 안정적인 물관리를 위해서는 비점오염원의 관리가 필수적이다.

도시지역 불투수면은 도로, 주차장, 옥상 등으로서 도시지역 불투수성 표면의 합을 의미하며, 특히 도로는 도시지역 중 강우시 오염부하량이 높게 발생하는 토지이용지역이다. 이러한 불투수면적이 증가하게 되면 유출계수는 증가하여 강우량

의 대부분이 유출되게 된다. 또한, 교통관련 불투수면은 배수시스템과 직접적으로 연결되어 있기 때문에 수문학적 및 환경적으로 큰 영향을 나타낸다.

많은 연구자들에 의해 도로면을 비롯한 비점오염원에서 발생하는 오염물질이 계속해서 증가하고 있는 것으로 조사되고 있다.^{2,3)} 도시지역에서 발생하는 오염물질은 도시지역의 불투수성에 기인하는 것으로 개발이 확대됨에 따라 비례적으로 증가한다.^{4~6)} 특히 도시 내 도로노면 유출수의 경우, 차량 등의 이동으로 오염물질의 농도가 높은 것으로 알려져 있어,^{7,8)} 초기 유출 부하량이 수계 및 하수처리시설에 미치는 영향은 큰 것으로 판단된다. 도로면에서 발생하는 오염물질 중 자동차에 의한 것은 브레이크 라이닝에서 구리, 니켈 등과 같은 중금속 물질이 다량 함유되어 있고, 엔진의 연소과정에서 철, 망간, 크롬 등의 중금속이 도로에 배출되는 것으로 보고되었다.⁹⁾

불투수층이 증가함에 따라 도로노면에 축적된 오염물질은 강우 시작과 동시에 유출되는 현상이 나타나며, 이것은 오염

[†]Corresponding author
E-mail: yikim@kict.re.kr
Tel: 031-910-0621

Fax: 031-910-0291

물질 부하량을 집중시키는 효과를 발생시키므로 이에 대한 대비책을 모색하여야 한다. 비점오염물질에 대한 연구가 꾸준히 지속되어오는 과정에서 초기유출에 대한 효과적인 제어는 고려되어야 하는 상황이며 최근 발생현장에서 초기 유출뿐만 아니라 비점오염원에 대한 전반적인 처리를 수행하는 장치들이 개발되고 있다.

초기유출에 대한 효과적인 제어를 위한 기초자료로서 현재까지 비점오염물질에 대한 원단위 조사 등 양과 농도에 대한 조사는 꾸준히 진행되어 왔다. 그러나 비점오염물질의 특성상 발생지역, 발생상황 등 많은 요인에 따라 유출 현상이 달라지므로 지속적인 연구가 수행되어야 한다. 또한 오염물질의 유출에 영향을 미치는 인자들을 적절하게 선택할 수 있는 기초연구가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 강우시 도로면에서 발생하는 오염물질을 기초적으로 조사하였고, 유출 오염물질 중 가장 두드러지게 관찰되는 부유입자와 기타 오염물질의 상관관계를 도출하고자 하였다. 또한 입자들의 특성과 오염물질의 유출이 가지는 상관성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

불투수면 유출 오염물질의 성장과 유출현상을 파악하기 위하여 강우의 EMC(Event Mean Concentration)를 산정하였다. EMC 산정을 위한 시료채취를 연구원 내 도로에 위치한 우수받이에 시료채취기를 설치하여 진행하였으며, Fig. 1은 현장 그림이다. 연구원 내부에 위치해 있지만 주차장이 인접하여 내·외부 차량의 접근이 많은 곳으로 하루 평균 800대의 차량이 통과한다. Fig. 2는 현장 실험장치의 모식도로 강우가 시작되면 불투수면 유출 강우가 우수받이로 유입되고 일정수위가 되면 펌프를 이용하여 100 L 시료통으로 이동한다. 우수받이에 설치된 유출수 수집 장치는 용량이 20 L이므로 유출

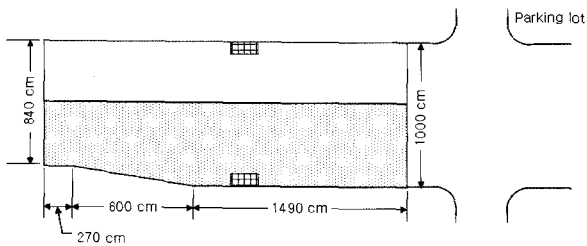


Fig. 1. Sampling site for EMC analysis.

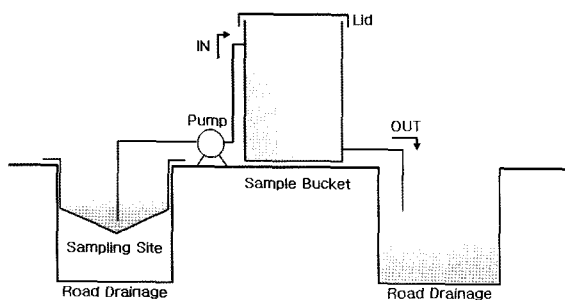


Fig. 2. The schematic diagram of sampling system.

수는 수집 즉시 100 L 시료통으로 이동하였다. 시료통에 수집된 강우는 일정 시간간격으로 시료를 채취한 후 주변에 위치한 다른 우수받이로 방류한다. 총 3회의 강우를 강우 전체 기간 동안 채수하였고, 채수량은 강우량에 따라 조절하였다.

강우량은 연구지점에서 2 km 떨어진 인근초등학교에 설치된 강우량 측정기를 이용하여 측정하였다. 강우량 측정기를 이용하여 측정된 강우강도를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3

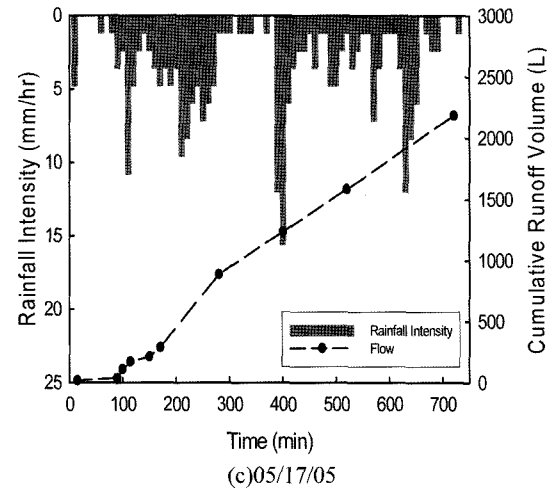
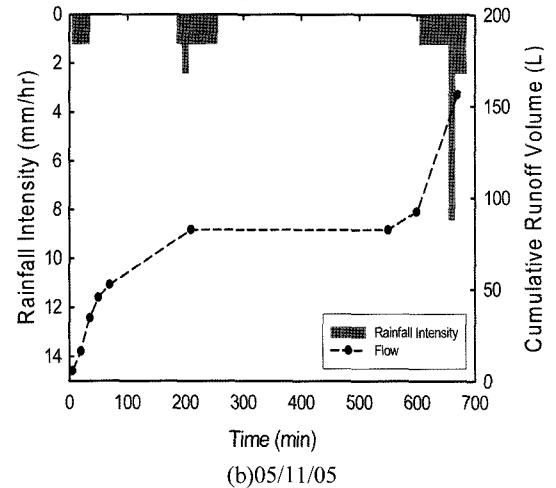
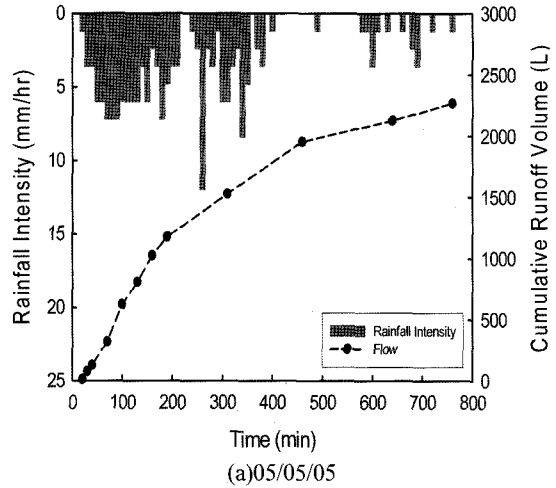


Fig. 3. Hydrologic results of sampling date.

Table 1. The characteristic of each rainfall event

Items	05/05/05	05/11/05	05/17/05
Rianfall(mm)	13.4	7.6	38.8
Duration time(hr/mm)	12 : 40	14 : 20	12 : 40
Rainfall intensity(mm/hr)	0.2 ~ 5.6	0.4 ~ 2.8	0.2 ~ 5.8

에 나타난 누적 유출 부피는 분석을 위하여 실제 현장에서 채수한 값을 나타내었다. 강우량 측정기의 10분 강우강도 데이터를 이용하여 계산한 강우량은 현장에서 채수한 강우 유출량과 동일한 값을 보였다. 실제 강우 유출량은 계산값보다 10% 이내로 적은 값을 나타내었으며, 이는 도로면의 유출 계수 0.9를 고려할 때 측정될 수 있는 값으로 판단된다. 따라서 EMC는 현장에서 채수한 강우 유출량을 이용하여 계산하였다. 수질분석 대상 오염물질은 불투수면에서 다량으로 발생하는 중금속(Cd, Cr, Cu, Pb, Zn), 부유물질 SS, COD_{Cr}, TN, TP 등이다. 채수한 강우의 특성은 Table 1에 나타내었다.

SS는 노면유출수를 여과하여 여지의 전·후 무게차를 측정하여 계산하였다. COD_{Cr}, TN, TP는 Hach vial, Hach reactor, DR4000 spectrophotometer를 이용하여 분석하였고, 중금속은 공정시험법에 의한 전처리 후 ICP(Thermo, IRIS intrepid II XDL)를 이용하여 분석하였다. 입도분석은 초음파 균질화기로 1시간 동안 분산 후 고액분리하여 고형분을 105℃에서 24시간 동안 건조하였다. 나뭇가지 등 입도분석이 곤란한 이물질 제거하고 증류수를 일정량 첨가하여 초음파 균질화기로 재분산 후 Malvern사의 Laser particle size analyzer를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 도로노면 유출수의 수질 특성

도로노면 유출수의 수질분석을 위해 SS, COD_{Cr}, TN, TP, 중금속을 분석하였다. 현재 국내에서 조사된 도로의 비점오염물질 평균 농도는 SS 126 mg/L, COD_{Cr} 67 mg/L, TN 7.5 mg/L, TP 0.48 mg/L, 중금속 0.03~0.14 mg/L를 나타낸다.¹⁰⁾ 본 연구에서 분석한 오염물질의 농도는 강우초기의 높은 값에서 강우 후반부의 낮은 값까지 넓은 범위를 나타내고 있으며 3회에 걸쳐 분석한 오염물질의 EMC가 Table 2에 나타났다.

강우 기간 동안 다양하게 변화하는 강우의 특성을 하나의 인자로 나타내기 위하여 EMC라는 단일화된 값을 사용하며¹¹⁾ 이는 식 (1)의 형태로 표현할 수 있다.

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{tr} q(t)c(t)dt}{\int_0^{tr} q(t)dt} \quad (1)$$

EMC : Event Mean Concentration (M/L³)

M : 강우기간 동안 유출된 총량

V : 강우 유출량 (L³)

Table 2. EMC values of the each rainfall event

Items	05/05/05	05/11/05	05/17/05
SS	26.8	123.4	36.7
COD _{Cr}	15.3	117.7	16.2
TN	0.07	5.16	1.12
TP	0.055	0.323	0.494
Cd	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.006	0.001
Cu	0.005	0.025	0.007
Pb	0.009	0.032	0.003
Zn	0.047	0.158	0.294

tr : 강우 지속 시간

q(t) : 강우 시작부터 강우종료 시간까지의 강우 유출량(L³/T)

c(t) : 강우 시작부터 강우종료 시간까지의 오염물질 농도 (M/L³)

식 (1)을 이용하여 본 연구에서 채수한 총 3회의 강우에 대하여 각 항목의 EMC를 계산하면 Table 2와 같다. EMC값은 강우 유출부피가 고려된 값으로 각 시간의 농도 값보다 낮은 수치를 나타낸다.

불투수면 유출 오염물질이 부피의 유출에 비례하여 발생한다고 가정할 때 초기유출현상은 유출부피에 대한 유출질량을 클 때라고 정의할 수 있다. 이러한 개념은 식 (2)와 같이 간단히 정리할 수 있으며 본 실험에서 측정된 강우에 대하여 초기유출현상을 분석하였다.¹²⁾

$$M(t) > V(t) \quad (2)$$

M(t) : 특정 시간 t 동안 유출된 오염물질량의 비율

V(t) : 특정 시간 t 동안 유출된 강우량의 비율

강우 유출수의 부피에 대한 오염물질의 유출 질량을 비교하기 위하여 유출부피를 정규화하여 나타내었다. 오염물질 유출은 질량 값으로 나타내었으며, 각 강우에 대한 비교를 위해 정규화하여 나타내었다. Fig. 4는 표준화된 부피에 따른 입자성 오염물질의 유출량 변화를 누적그래프로 나타낸 것이다. 5월 5일 강우와 5월 17일은 초기에 많은 양의 강우가 내려 오염물질의 성상별로 유출량이 크게 변화하는 것을 관찰하였다. 초기유출은 이전 연구자들에 의해 다양한 기준으로 제시되었고 본 연구에서는 기본적으로 식 (2)의 개념을 따른다. 각 경우에서 TN, COD 및 일부 중금속들은 초기세척 효과의 정의 중 하나로 제시되었던 초기 30% 유출량에 오염물질의 80%가 유출된다는 기준을 만족하였다.¹³⁾ 이 기준에 의하면 누적부피 0.0~0.3 구간은 강우 초기를 의미하며, 이 구간에서 오염물질 유출량이 급격히 증가하는 것은 초기세척 효과라고 판단할 수 있다. 5월 17일 강우는 13시간 동안 38 mm의 강우가 내린 경우로 5월 5일보다 많은 양의 강우가 강우 초기에 집중되어 오염물질이 다량 유출된 것으로 관찰되었다. 반면에 5월 11일 강우는 약한 강우가 지속적으로 내린

경우이며 강우에 의한 입자성 오염물질의 유출이 크게 변화하지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 강우에 의한 오염물질의 유출은 선행건기일수, 강우량, 강우강도 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며,^{4,14,15} 본 연구에서는 그 중 강우량 및 강우강도에 대한 영향을 관찰할 수 있었다.

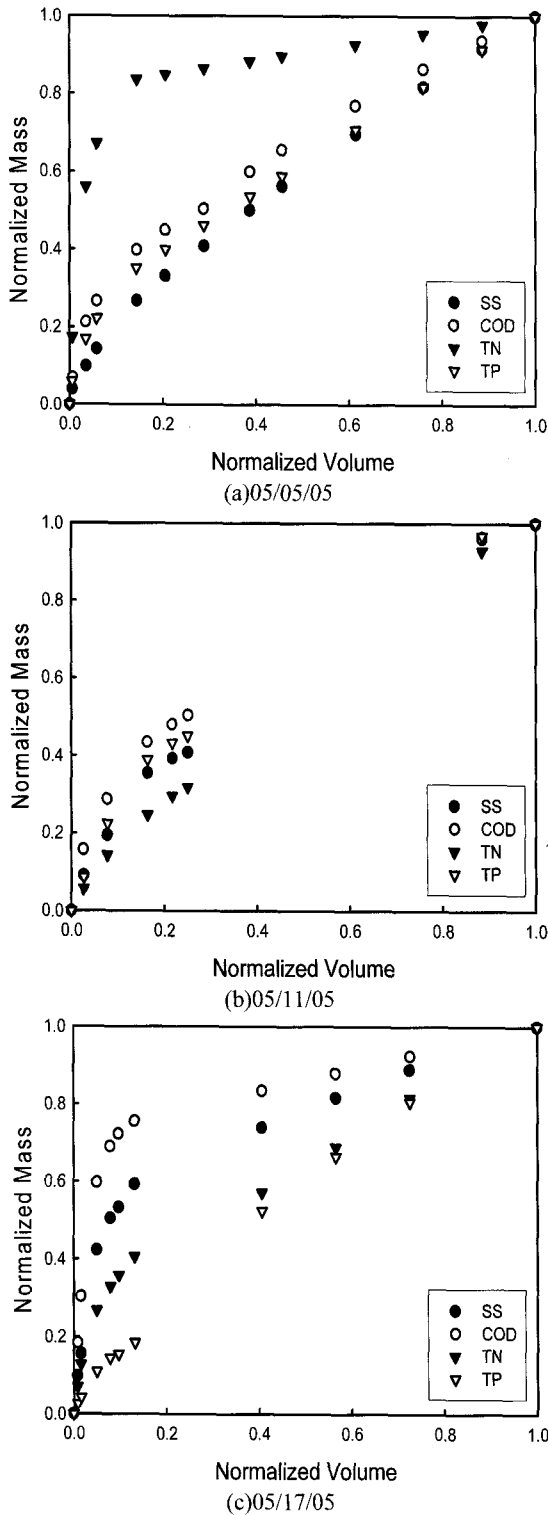


Fig. 4. Pollutant change of normalized mass on normalized rain volume.

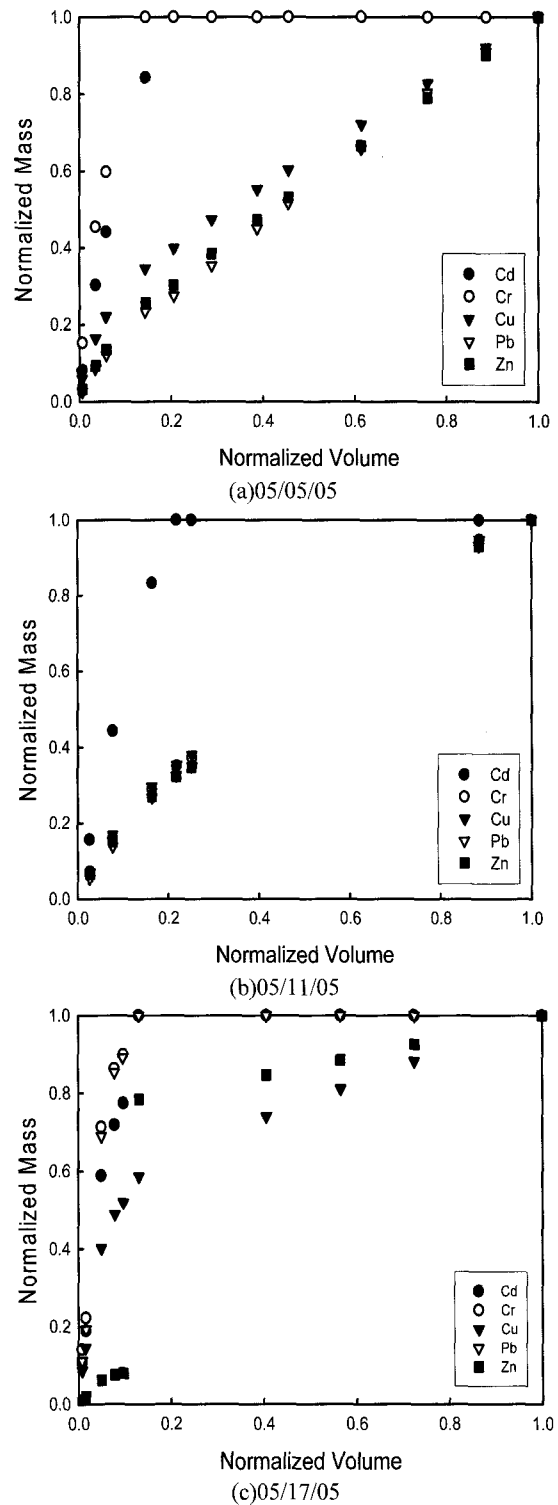


Fig. 5. Heavy metal change of normalized mass on normalized rain volume.

본 실험에서는 채수한 3회의 강우에 대하여 중금속의 농도를 분석하였고, 초기세척효과를 판단하기 위하여 부피와 질량에 대한 표준화를 하였다. Fig. 5는 표준화된 부피에 대한 각 중금속의 누적 질량을 나타낸 것이다. 중금속의 유출경향은 SS와 유사하게 나타났으며 이것은 중금속의 유출

이 입자에 흡착된 형태로 이루어진다는 것을 보여주는 결과이다. 또한 5월 5일, 5월 11일 경우에는 미약하게 나타나지만 5월 11일 강우의 경우 오염물질의 유출이 초기에 집중되는 현상을 볼 수 있다. 이전의 연구결과와 함께 오염물질의 유출은 강우량에 큰 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다.¹²⁾

SS와 다른 오염물질간의 유출 관계를 규명하기 위하여 유출 SS의 농도에 따른 오염물질의 유출농도를 Fig. 6에 나타내었다. 회귀직선을 이용하여 상관계수를 도출하였다. 각 강우마다 오염물질의 유출과 SS의 유출은 결정계수 0.93~0.99의 값을 가지며 밀접한 관련이 있음을 관찰하였다. 이것은 오염물질이 SS에 침착된 형태로 유출된다는 것을 증명하는 결과로 판단할 수 있다.^{8,16)}

3.2. 도로노면 유출 SS의 입도 특성

불투수면 오염물질의 유출현상을 살펴본 결과, 유출 초기에 다량의 오염물질이 배출되는 현상을 관찰하였다. 또한 대부분의 오염물질들이 SS에 부착된 형태로 배출되는 경향을 보이므로 강우초기 유출수의 SS를 효과적으로 관리하는 것으로 유출수의 수질을 제어할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강우유출수의 SS 입도를 분석함으로써 강우유출수의 입자특성, 경향 및 관리방향의 기준을 제시하고자 하였다. 이전 연구에 의해 알려진 바에 의하면 도로에서 유출되는 입자의 수는 강우량, 교통량과 이전전기일수 등에 큰 영향을 받는 것으로 보고되었고, 입자의 평균 지름에 영향을 미치는 것은 강우량인 것으로 보고되었다.¹²⁾

도로면에서 발생하는 입자 크기는 도로마다 다르게 나타나 일반적으로 조대입자에서 미세입자까지 넓게 분포되어 있다. 그러나 본 실험의 입자들은 연구원 내에 위치한 도로에서 채수한 것으로 차량의 이동에 의한 입자들만 유출되어 입자의 평균크기가 이전 연구들에 비해 다소 작은 것을 볼 수 있었다. 도로면 강우 유출수의 평균입자는 SS와 영양염류, 중금속등의 흡착 특성 및 유출 거동을 살펴보기 위하여 연구되었는데 그 분포범위는 50~1,000 μm, 40~2,000 μm, 20~10,000 μm으로 입자 범위가 거대 입자도 존재하는 것을 볼 수 있다.^{12,17,18)} Table 3은 본 실험에서 채수한 유출수의 입도를 분석한 것으로 평균 입경, 10, 50, 90% 통과입경을 제시하였다.

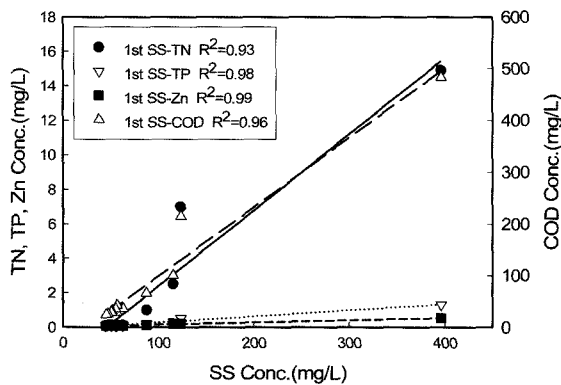
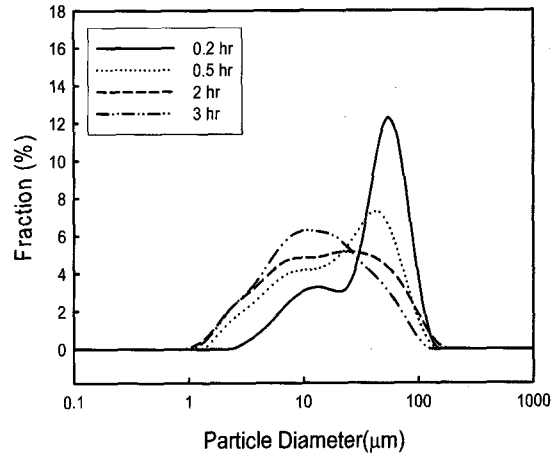


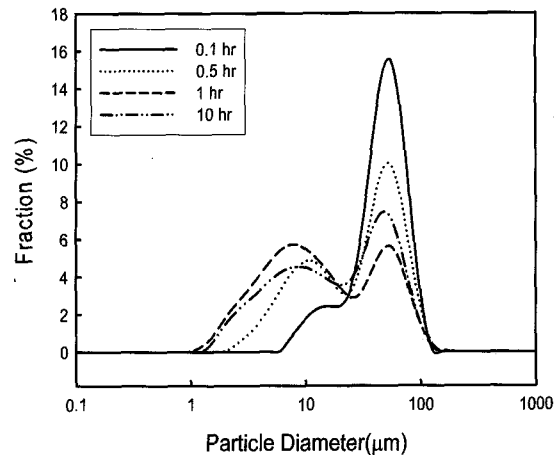
Fig. 6. The correlation of SS and pollutants.

Table 3. Summary of particle size distribution

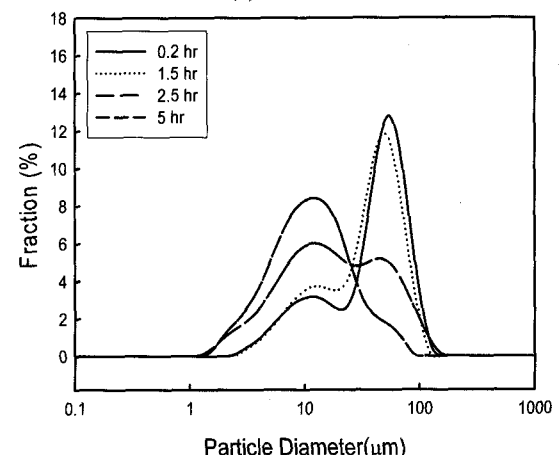
Items	05/05/05	05/11/05	05/17/05
Rainfall (mm/hr)	0.2~5.6	0.4~2.8	0.2~5.8
D _{Mean} (μm)	9.643~28.147	7.528~36.404	10.401~27.436
D ₁₀ (μm)	2.863~8.295	2.686~15.938	3.606~7.929
D ₅₀ (μm)	9.822~40.233	7.041~43.576	10.307~40.471
D ₉₀ (μm)	32.777~74.242	18.781~71.594	28.660~72.997



(a)05/05/05



(b)05/11/05



(c)05/17/05

Fig. 7. Particle size distribution of each rainfall event.

Fig. 7은 유출입자의 크기를 분석한 것으로 부피비로 나타낸 것이다. 채수할 때의 강우량에 따라 시료량을 조절하여 채수하였기 때문에 각 채수일자의 채수시간은 동일하지 않다. 강우가 지속될수록 유출입자의 크기가 작아지는 것으로 나타났으며 이것은 크기가 큰 입자들이 차지하는 부피비율이 상대적으로 높아 나타난 결과라 판단된다. 즉, 5월 11일 입도분포는 5월 5일, 5월 17일과 비교하였을 때 강우량과 강우강도가 현저히 적음에도 불구하고 큰 입자의 비율이 큰 것을 볼 수 있다. 이에 대한 자세한 분석은 입자수의 관점에서 접근이 필요할 것으로 생각된다. 입자수의 관점에서 볼 때 이전 연구들에 의하면 미세입자의 비율이 전체 유출입자에서 많은 양을 차지하는 것으로 보고되었고 입자의 유출은 입자의 이동력과 관련된 것으로 강우량이 유출 입자의 크기에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.^{12,19)}

강우에 의한 도로면 유출수는 SS의 유출과 유사한 성향을 보여 SS의 효과적인 관리로 오염물질을 제거할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 입도분석을 통한 미시적인 접근을 하였을 때 강우 후반으로 갈수록 조대입자의 유출이 감소하며 미세입자의 비율이 높아지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 이전 연구들에 의하면 영양염류, 중금속 등 오염물질들이 조대입자보다 미세입자에 부착되어 배출되는 것으로 보고되고 있으므로 입자수 및 입자 사이즈별 오염물질 등의 재검급을 통한 분석이 추후 진행되어야 할 것으로 판단된다.^{19,20)}

4. 결론

강우에 의한 도로면 유출수의 오염물질 유출특성과 입도 특성을 분석하기 위해 본 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구에서 각 강우의 EMC는 SS 26.8~123.4 mg/L, COD_{Cr} 15.3~117.7 mg/L, TN 0.06~5.16 mg/L, TP 0.05~0.49 mg/L, 중금속 0.0~0.29 mg/L 로 검출되었다. 강우량에 따라 오염물질의 초기 유출이 쉽게 발생하는 것으로 조사되어 초기세척효과가 미미하게 발견되었다. 대부분의 오염물질들이 SS와 유출상관계수가 0.93 이상으로 관찰되어 SS에 부착되어 유출되는 것으로 판단된다. 입도분석을 통한 결과, 강우초기 큰 입자가 유출되는 것으로 보이나 입자수의 관점에서 보면 미세입자가 차지하는 비중이 많을 것으로 판단된다. 미세입자의 경우 오염물질의 부착 가능성이 크므로 제거가 필요하다.

따라서 도로면 유출 오염물질의 효과적인 제어를 위해서 유출 오염물 중 SS의 적절한 제어가 필요할 것으로 판단되며, 특히 미세한 입자와 관련된 추가적인 분석연구가 선행된 후 입자사이즈에 따른 오염물질 분포 등이 연구되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2005년 공공기술연구회 일반사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sartor, J. D., Boyd, G. B., and Agardy, F. J., "Water pollution aspects of street surface contaminants," *Journal of WPCF*, **46**(3), 458~467(1974).
2. Peter, C. V. M., Barbara, J. M., and Edward, T. F., "Urban Sprawl Leaves Its PAH Signature," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(19), 4064~4070(2000).
3. 최지용, 신은성, "도시지역 비점오염원 관리방안 연구," 한국환경정책평가연구원, 서울(1997).
4. Michael, E. B., Lyn, B. I. Jr., Joseph, F. M. Jr., and Randall, J. C., "Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas Area," *J. of Environ. Eng.*, **124**(2), 131~137(1998).
5. Zhi-Qiang, D., Joao, L. M. P. L., and Vijay, P. S., "Fractional kinetic model for first of stormwater pollutants," *J. of Environ. Eng.*, **126**(4), 313~320(2005).
6. John, J. S. and Wteven, G. B., "Partitioning and first flush of metals in urban," *J. of Environ. Eng.*, **123**, 134~143(1997).
7. Rebecca, S. S., John, C. C., and David, R. A., "Treatment of Parking Lot Stormwater Using a StormTreat System," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 4441~4446(2002).
8. Robert, P., Richard, F., Melinda, L., and Michael, B., "Urban Stormwater Toxic Pollutants: Assessment, Sources, and Treatability," *Water Environ. Res.*, **67**, 260~275(1995).
9. Darren, D., Rodger, T., and Philip, W., "Pollutant concentrations in road runoff, Southeast queensland case study," *J. of Environ. Eng.*, **131**(2), 232~241(2000).
10. 최지용, 신창민, "비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안," 한국환경정책평가연구원, 서울(2002).
11. Sansalone, J. J., and Cristina, C. M., "First Flush Concepts for Suspended and Dissolved Solids in Small Impervious Watersheds," *J. of Environ. Eng.*, **130**(11), 1301~1314(2004).
12. Sansalone, J. J., Koran, J. M., Smithson, J. A., and Buchberger, S. G., "Physical Characteristics of Urban Roadway Solids Transported During Rain Events," *J. of Environ. Eng.*, **124**(5), 427~440(1998).
13. Saget, A., Chebbo, G., and Bertrand-Krajewski, J., "The first flush in sewer system. In Proc. Int. Conf. on Sewer Solids-Characteristics, Movement, Effects and Control," Dundee, U.K., 58~65(1995).
14. Deletic, A., "The first flush load of urban surface runoff," *Water Res.*, **32**(8), 2462~2470(1998).
15. Gupta, K. and Saul, A. J., "Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows," *Water Res.*, **30**, 1244~1252(1996).
16. William, W. Jr. and Joseph, V. H., "Settleability of Urban

- Runoff Pollution," *J. of WPCF*, **53**(12), 1726~1731(1981).
17. Lau, S. L. and Stenstrom, M. K., "Metals and PAHs adsorbed to street particles," *Water Res.*, **38**(19), 4083~4092(2005).
 18. Roger, S., Montrejaud-Vignoles, M., Andral, M. C., Herremans, L., and Fortune, J. P., "Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water," *Water Res.*, **32**(4), 1119~1125(1998).
 19. Vaze, J. and Chiew, F. H. S., "Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface," *Urban Water*, **4**, 379~389(2002).
 20. Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G., "Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater," *Water Sci. and Technol.*, **36**(8-9), 155~160(1998).