



포장지역 강우유출수에서의 입자성물질의 입도 분포 및 중금속 특성에 관한 연구

Characteristics of Particle Size Distribution and Heavy Metal Concentration in Pavement Road Runoff

박 해 미* 김 영 준** 고 석 오***
Park, Hai Mi Kim, Young Jun Ko, Seok Oh

Abstract

Objective of this study was to characterize the particle size distribution(PSD) and quantify the pollutant concentration in highway runoff. Runoff samples during two rainfall events at four road sites in Gyunggi-Do were collected and PSD and associated pollutant distribution was quantified. Also, rainfall amount, flow rate, and other pollutants in samples were analyzed. PSDs in each sample were analyzed and compared with temporal trends of other pollutants. High partial event mean concentrations(PEMC) of particulates were observed at the beginning of runoff and rapid decrease thereafter. Other pollution parameters such as turbidity, TSS, BOD, TN, and TP also have similar temporal runoff trend with the PEMC. Especially PEMC was well correlated with total suspended solids(TSS) and turbidity. Cu, Pb, Zn had high concentration both runoff and sediment. Heavy metals in sediment were strongly bound to fine particles that have the large surface area-to-volume ratios.

Keywords : non-point source, particle size distribution, partial event mean concentration, storm runoff, heavy metal

요 지

본 연구는 고속도로 강우 유출수에서 입도 크기 분포 특성(PSD)을 이해하기 위하여 수행하였다. 경기도내 4곳의 포장도로 지역에서 2번의 강우사상동안 강우유출수 샘플 모니터링을 수행하였고, 시료내 입자의 크기분포를 분석하였다. 또한, 강우량, 유량 및 각 오염물질들을 분석하였다. 시료내 입자의 시간별 변화농도는 강우유출수의 시작 시 높은 값을 보였다가 급속히 감소하였으며 탁도, 총부유물질, BOD, 총질소 및 총인과 같은 오염물질과 유사한 유출경향을 보여주었다. 특히 총부유물질과 탁도와 높은 상관성을 보여주었다. 강우유출수와 퇴적물내에 포함된 중금속에 있어서 구리, 납, 아연은 높은 농도를 보였으며 대부분의 중금속은 넓이에 대한 부피의 비율이 큰 세립입자에 강하게 결합된 형태로 존재한다.

핵심용어 : 비점오염원, 입도 크기 분포, 입자별 유량 가중 평균 농도, 강우유출수, 중금속

* 정회원 · (주)동호 상하수도부(E-mail: phm419@gmail.com)
** 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정(E-mail: yj2435@khu.ac.kr)
*** 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: soko@khu.ac.kr)



1. 서론

도시 지역이 발전함에 있어 비점오염원은 산업폐수나 하수발생원과 같은 점오염원과 함께 주요 오염원 중의 하나로서 오염물질의 다양한 이동과 변형, 자연으로 유출되는 현상을 정량적으로 예측하기가 어렵기 때문에 이에 대한 관리대책 수립 및 적용이 쉽지 않다(Draper et al., 2000; Aryal et al., 2005). 비점오염원중에서 도시지역의 도로나 고속도로에서는 다량의 중금속과 탄화수소, 연료 첨가제 등이 차량연료, 브레이크 패드나 타이어의 마모에 의하여 발생되고 강우 시 유출계수가 큰 표면에서의 유출수에 포함되어 하천을 오염시키는 역할을 한다(Furumai et al., 2002). 이러한 오염물들은 유출수에 용해된 상태로 유출되기도 하지만 강우유출수에 포함된 입자에 흡착되어 배출된다. 입자의 경우 크기에 따라 총부유물질 농도에 미치는 영향이나 오염물을 흡착하는 능력에 있어서 큰 차이가 나게 된다. 현장조사의 결과, 50 μm 이하의 직경의 입자는 70~80%의 부유물질 비율을 차지하게 된다(Andral et al., 1999). 일반적으로 미세입자의 경우 부유물질 외에 다량의 오염물을 포함한다고 알려져 있어 20 μm 이하의 입자에 30~60%의 질소와 30~50%의 총인이 포함되어 존재하며 입자가 작을수록 흡착된 농도가 높다고 보고되고 있다(Vaze and Chiew, 2004). 또한 도로유출수의 경우 높은 중금속의 농도를 가진다(Roger et al., 1998, 김부길과 이병철, 2006). Viklander(1996)는 미세 입자들에서 높은 중금속의 농도가 나타나고 입자가 75, 125, 250, 500, 1000, 2000 μm 로 증가함에 따라 중금속의 농도는 감소함을 보고하였다. Sansalone and Buchberger(1997a)도 아연, 구리, 납의 농도가 비표면적이 증가함에 따라 증가하고 입자가 커짐에 따라 감소함을 보고하였다. Krein and Schorer(2000) 역시 도로유출수에서 높은 분자량을 가진 다환방향족탄화수소 오염물들이 미세 입자들에 더 많이 흡착되어 있음을 연구하였다. 따

라서 도로에서의 강우 유출수내 중금속과 같은 오염물의 제거를 위하여 미세입자에 대한 제거는 필수적으로 이루어져야 한다. 즉, 많은 도로포장 지역에서의 비점오염원 대책을 위한 저감시설은 입자의 제거를 위한 시설을 우선적으로 고려하게 된다(Li et al., 2005; Li et al., 2006). 일반적으로 강우유출수내 입자의 경우 침전현상을 통하여 제거하게 되나 미세 입자의 경우 침전특성이 큰 입자와 많이 다르게 되어 침전시설의 용량산정에 어려움을 주게 된다. 따라서 강우 유출수내 입자들이 어떠한 크기분포를 나타내는가에 대한 연구가 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 실제 도로에서 강우 시 발생하는 입자들에 대하여 강우유출수의 입자별 크기 분포에 따른 특성을 연구하였다. 또한 강우유출수 내에 존재하는 중금속과 침전물에 존재하는 중금속을 측정하여 일반적 침전을 통한 중금속의 제거효과를 평가하였다. 본 연구 결과는 비점오염원 대책시설에 있어서, 특히 침전지의 설계를 위한 설계인자로서 제거효율 평가에 기초 자료로 제공할 수 있다고 판단된다.

2. 연구방법

2.1 조사 지역 현황

본 연구의 대상지역은 그림 1에 나타내었으며, Site 1은 45번 국도상에 위치하는 용인 $\triangle\triangle$ 지점으로 배수면적이 3,000 m^2 이고, Site 2는 45번 국도상의 용인 $\circ\circ$ 지점으로 배수면적이 7,700 m^2 이며 Site 3은 고속도로상에 위치한 휴게소로 진입하는 도로지점으로서 배수면적이 1,000 m^2 인곳을 선정하였으며 Site 4는 휴게소 지점으로서 배수면적이 9,522 m^2 이다. Site 1~3은 모두 아스팔트 포장지역이며, Site 4는 휴게소에 설치한 일부 아스팔트포장과 일부 블록으로 이루어진 지역이다.

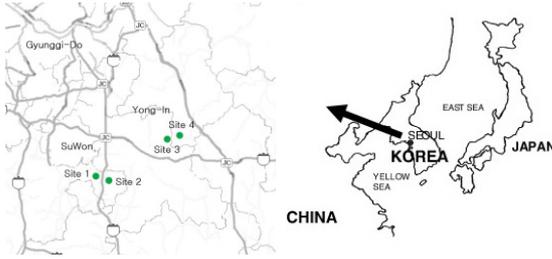


그림 1. Monitoring locations

2.2 시료채취 및 조사방법

강우 시 시료채취는 환경부의 한강수계 비점오염원 관리 시범사업과 미국 EPA에서 많이 사용되는 방법을 사용하였다. 대상지역에 강우가 발생되어 유출되는 시기부터 시작되어 초기 15분 동안은 5분 간격으로 1시간까지는 15분 간격으로 시료를 수동방식으로 채취하였으며, 이후 강우가 종료되어 유출이 멈출 때까지는 1시간 간격으로 수행하였다. 이렇게 채취한 샘플은 실험실로 옮겨 중금속, COD, DOC, TN, TP 및 TSS 농도를 분석하였다. 강우유출수 내에 존재하는 중금속의 측정항목은 Cu(구리), Pb(납), Zn(아연), Cd(카드뮴), Cr(크롬), Fe(철), Ni(니켈) 항목이다. 또한, 입자의 크기 분포 분석을 위해 Marvern Size Mastersizer S(300RF lens)를 사용하였다. 본 연구에서는 측정된 Number %값과 Volume %값을 이용하여 아래의 식을 이용하여 Volume 대표입경(D_v), Number 대표입경(D_n)을 구했다.

$$D_n = \sum(n_i \times d_i) \quad \text{식 (1)}$$

여기서, n_i 는 i 번째 입자의 Number %값이고, d_i 는 i 번째 입자의 입경을 나타낸다.

또한 입자수의 농도를 이용해 오염물의 농도와의 상관관계를 평가하는 방법을 적용하였다. 이는 Sansalone과 Buchberger(1997a)가 사용한 Partial Event Mean Concentration(PEMC)을

이용한 방법으로써 PEMC는 입자의 농도를 유량가중평균농도(Event Mean Concentrations, EMC)를 산정하는 것과 비슷한 방식으로 입자의 농도 대신 입자수의 농도를 넣음으로써 입자별 유량가중 평균농도(Partial Event Mean Concentration, PEMC)를 사용하여 나타낸 것이다(Sansalone and Buchberger 1997b, Lee et al. 2002). 입자의 PEMC를 구하는 방법은 아래의 식 (2)와 같다.

$$PEMC = \frac{n(t)}{v(t)} = \frac{\int_0^t c_1 q_1 dt}{\int_0^t q_1 dt} \quad \text{식 (2)}$$

여기서, $n(t)$ 은 t 시간까지의 입자의 개수를 나타내며, $v(t)$ 는 t 시간까지의 부피(m^3), c_1 는 t 시간의 입자의 농도(number/ m^3), q_1 는 t 시간의 유량(m^3/s), t 는 시간(s)을 의미한다.

또한, 강우시 침전되어 축적되어 있는 침전물들을 채취하여 중금속의 농도를 분석하였다. 침전물은 2007년 휴게소 지점에 설치된 저감시설인 침전지에서 채취 후 21℃ 실험실에서 건조후 체를 이용하여 #10~#400 이하까지 분류하였다. #10의 경우 고속도로에서 배출되는 쓰레기와 이물질들만이 포함되어 있기 때문에 중금속 측정 시 제외되었다. 중금속 측정항목은 강우유출수 측정항목에 알루미늄(Al)을 추가시켜 8가지 항목으로 모두 ICP-AES (LEEMAN ABS. INC., U.S.A)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우사상 개요

표 1은 강우사상에 따른 모니터링 수행 결과이며, 날짜(Date), 건기일수(Antecedent Dry Days, ADD), 총 강우량(Precipitation), 강우 지속시간



(Runoff duration), 평균 강우강도(Average rainfall intensity), 유출계수(Runoff coefficient) 등을 나타내었다. 각 Event의 건기일수는 2~15일이며, 총 강우량은 3~76mm, 평균 강우강도는 2.19~6.91mm/hr, 유출계수는 0.38~1.00의 범위로 각각 나타났다.

3.2 오염물 농도

오염물 항목별로 유량가중평균농도(Event Mean Concentrations, EMC) 값들을 표 2에 나타내었다. BOD의 EMC 값은 4.11~26.9의 범위를 나타

내었고CODmg/L는14.5~52mg/L, TSS는 57.1~168.5mg/L의 범위를 나타내고 있으며 일반 국도에 비하여 고속도로의 농도가 높게 나타나고 있다. T-N과 T-P의 경우에는 각각 1.8~23.3과 0.02~0.19mg/L의 범위를 나타내고 있으며 국도의 경우가 고속도로보다 높은 값을 보여주고 있다. 전체적으로 도로에서의 오염물 EMC 값은 타 연구 Lee et al.(2008)와 유사한 값을 나타내고 있다. 일반적으로 EMC 값은 광범위한 값을 나타내고 있으며 주로 희석효과에 큰 영향을 주는 강우강도에 좌우되는 경우가 많다. 대개, 큰 강우강도나 짧은 선행건기일수인 경우 낮은 EMC 값을 보인다.

표 1. Monitored event table

Site	Event	Date	Area (m ²)	ADD (days)	Precipitation (mm)	Runoff duration (hr)	Avg. rainfall intensity (mm/hr)	Runoff coefficient
Site 1	E-1	07/06/21	3,000	6	28.5	13	2.19	0.76
	E-2	07/07/29	3,000	2	3.0	1	3.00	0.76
Site 2	E-3	07/06/21	7,700	6	28.5	13	2.19	0.38
	E-4	07/07/29	7,700	2	3.0	1	3.00	1.00
Site 3	E-5	07/09/14	1,000	4	76.0	11	6.91	0.49
	E-6	07/10/19	1,000	15	6.5	2.5	3.25	0.66
Site 4	E-7	07/09/14	9,522	4	76.0	11	6.91	1.00
	E-8	07/10/19	9,522	15	6.5	2.5	2.60	0.81

표 2. EMC of Various pollutants from road and highway

Site	Event	TSS (mg/L)	BOD (mg/L)	CODMn (mg/L)	DOC (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Site 1	E-1	60.2	13.5	23.4	15.2	8.3	0.04
	E-2	64.8	26.9	52.0	28.7	21.9	0.19
Site 2	E-1	58.0	12.2	27.2	12.5	12.1	0.03
	E-2	57.1	15.6	14.5	12.2	23.3	0.20
Site 3	E-1	68.2	4.25	58.07*	5.2	3.6	0.02
	E-2	142.0	16.19	130.8*	20.5	7.3	0.05
Site 4	E-1	61.7	4.11	49.8*	3.2	1.8	0.02
	E-2	168.5	16.84	71.3*	19.4	8.9	0.06

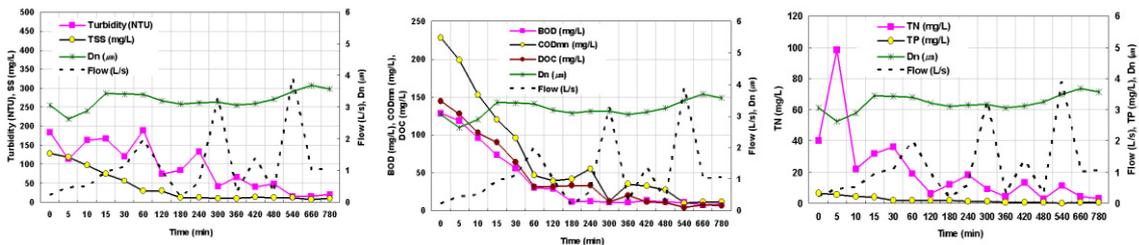
* COD_{Cr}

3.3 대표입경과 오염물 농도와의 관계

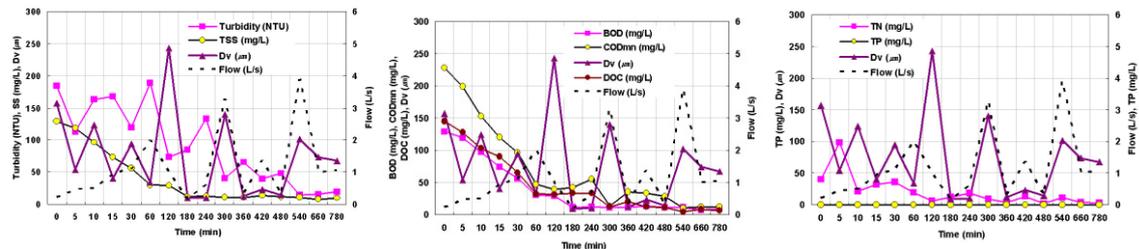
식 (1)을 이용하여 계산되어진 대표입경 D_n , D_v 와 각 지점에서의 시간별 오염물 유출농도와의 상관관계를 그림 2에 나타내었다.

그림 1에 나타난 Site 1뿐만 아니라 모든 샘플링지역에서 측정된 오염물의 농도는 대표입경 D_n , D_v 모두 특정한 상관관계가 없음을 보여 주었다. 특히, 대표

입경 D_n 의 경우 미세입자의 개수가 상대적으로 모든 시간에 걸쳐 지배적으로 많게 나타나기 때문에 시간별로 변동이 적은 경향을 보여주고 있다. 즉, 샘플링 시간과 상관없이 약 $3\mu\text{m}$ 정도로 일괄적인 값을 나타내고 있다. 대표입경 D_v 의 경우 샘플링 시간에 따라 값은 변화하나 오염물의 농도와의 연관성이 다소 작게 나타남을 알 수 있고 전체 유출되는 입자의 체적은 유출수의 유량에 어느정도 상관관계가 있음을 나타내고 있다.



(a) Site 1



(b) Event 1

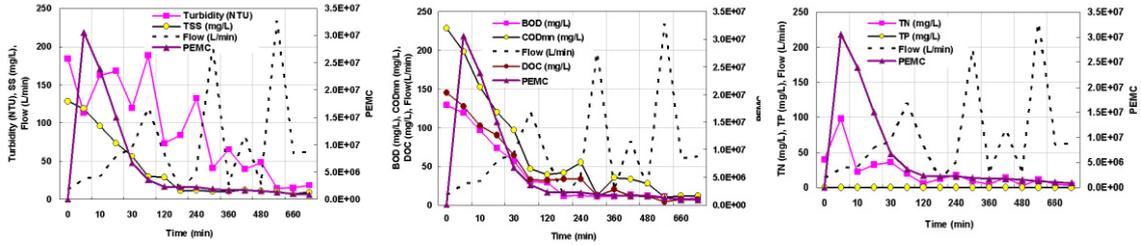
그림 2. Correlation of pollutant concentration with D_n , D_v

3.4 PEMC와 오염물 농도와의 관계

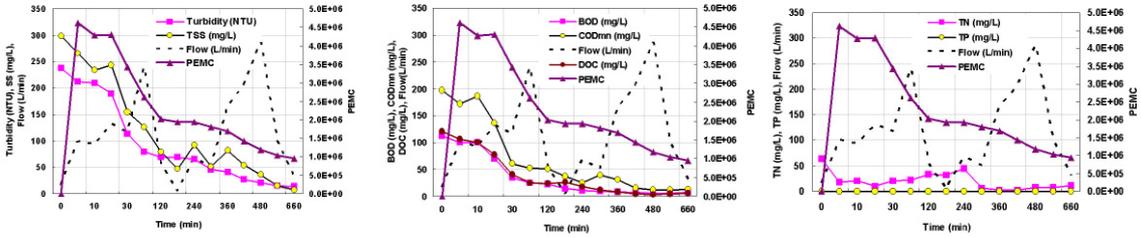
그림 3은 Site 1에서의 강우사상 1과 2에 대하여 시간에 따른 입자별 유량가중 평균농도(Partial Event Mean Concentration, PEMC)와 오염물질의 농도와의 상관관계를 나타낸 그래프다. 입자별 유량가중 PEMC는 그림 2에 나타낸 대표입경 D_n , 대표입경 D_v 와 오염물 농도와의 상관관계와는 다르게 오염물의 시간에 따른 변화와 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 도로유출수가 발생되었을 때 오염물질들의 농도 변화는 입자수의 변화와

연계하여 예측할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 오염물의 초기강우현상 (first-flush effect)과 유사하게 입자의 경우에도 강우초기에 많은 개수의 입자가 유출하게 되므로 비점저감시설에 있어서 초기유출수에 대한 대책이 필요함을 나타내고 있다.

그림 4에는 대표적인 연계성을 보이는 총 부유물질(TSS), 탁도와 PEMC와의 관계를 전체 6개의 강우사상에 따른 시료 총 89개 결과를 이용하여 나타낸 것이다. PEMC와 TSS, 탁도와 상관관계가 각각 R^2 값이 0.38, 0.58을 보여 입자의 수와 탁도나 TSS와의 어느정도 상관성을 보여주고 있다. 하지만

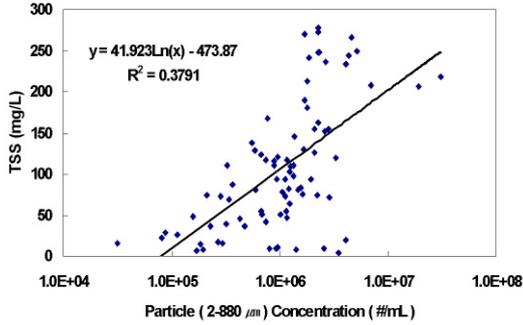


(a) Event 1

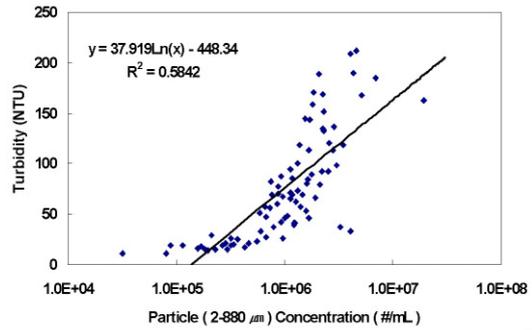


(b) Event 2

그림 3. Correlation of pollutant concentration with PEMC



(a) TSS



(b) Turbidity

그림 4. Correlation of TSS and Turbidity with PEMC

본 결과는 도로지역의 경우로서 다른 토지이용에 대하여 이와 같은 상관관계가 똑같이 나타난다고 판단하기에는 무리가 있다고 판단된다(Li et al., 2006).

3.5 강우유출수와 침전물의 중금속 분석

강우유출수에 존재하는 중금속은 유량가중 평균농도(Event Mean Concentrations, EMC)를 산정하여 평균농도로 사용하였다(Sansalone and

Buchberger, 1997a; Barretti et al., 1998). 각 지점에 대한 강우사상별 중금속 EMC 산정 결과를 표 3에 나타내었다. 그 결과 Site 3과 Site 4에서 Cu, Pb, Zn가 비교적 높은 농도로 유출되는 중금속으로 Cu의 경우 Site 4에서 298.11 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 가장 높은 값을 나타내었으며, Site 1 지점에서 59.47 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 가장 낮은 값을 나타내고 있다. Pb의 경우에는 Site 4지점에서 930.64 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 가장 높은 값을 나타냈으며, Site 2 지점에서는 140.52 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 낮은 값



으로 나타났다. 또한 Zn의 경우에는 Site 3 지점에서 있다. 전체적으로 국도보다는 고속도로에서의 유출
 서 804.56 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 다른 지점보다 높은 값을 보이며, 수에 다소 높은 중금속이 포함됨을 알 수 있다. 그러
 Site 4 지점에서는 247.96 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 낮은 값을 보이고 나 국도의 경우 교통량이 상대적으로 적은 점을 감안

표 3. Event mean concentrations of heavy metal in runoff

Site	Event	Total Cd ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Total Cr ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Total Cu ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Total Fe ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Total Ni ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Total Pb ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Total Zn ($\mu\text{g}/\text{L}$)
Site 1	E-1	3.34	7.65	11.81	171.51	0	4.02	27.92
	E-2	4.61	52.89	107.13	2676.36	183.66	853.79	708.75
	평균	3.98	30.27	59.47	1423.94	91.83	428.91	368.34
Site 2	E-3	4.99	11.86	19.35	120.50	0	41.00	18.73
	E-4	23.76	41.53	129.08	3990.55	70.39	240.03	518.81
	평균	14.38	26.70	74.22	2055.53	35.20	140.52	268.77
Site 3	E-5	99.01	277.20	313.11	1024.68	73.45	687.74	491.98
	E-6	57.48	152.68	186.94	1115.43	186.59	835.52	1117.13
	평균	78.25	214.94	250.03	2140.11	130.02	757.13	804.56
Site 4	E-7	156.32	155.53	514.72	305.60	201.06	1059.24	399.67
	E-8	42.71	92.44	81.50	625.95	191.78	802.03	96.25
	평균	99.52	123.99	298.11	465.78	196.42	930.64	247.96

표 4. Concentrations of heavy metal in sediment size distribution

Size	Cu (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Al (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)
#16	56	51	1.5	20	399	62	6465	15750
#20	102	75	4.5	26	645	68	7350	26700
#30	123	86	1.5	26	608	135	5730	17400
#40	182	51	3.0	20	450	116	3495	15750
#60	107	68	3.0	27	629	101	6555	22650
#100	116	54	1.5	21	599	84	6000	18750
#140	123	59	3.0	30	672	98	8175	22350
#170	158	78	3.0	35	830	110	11550	29850
#200	194	99	4.5	45	1115	179	15150	36300
#400	237	87	4.5	39	1268	195	12870	30300
> #400	261	92	4.5	44	1250	204	13560	32100

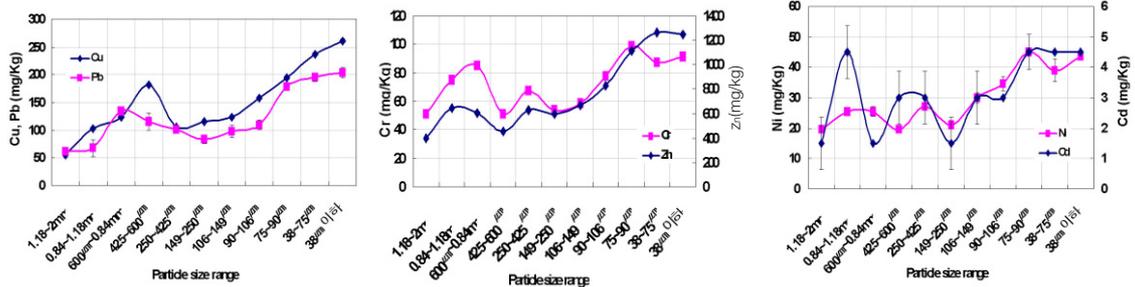


그림 5. Concentrations of heavy metal in sediment size distribution



할 때 당연한 결과라 판단되며 항우 차량 통행량 대비 발생량을 비교할 필요가 있다.

표 4와 그림 5는 각 입자 크기별 침전물에서 측정된 중금속 값을 1kg당 mg으로 나타낸 것으로 입자가 작아질수록 중금속의 함량을 증가함을 볼 수 있다.

그림 5에서 보면 중금속 중 철(Fe)과 알루미늄(Al)을 제외한 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn)의 함량이 다른 중금속들에 비해 많은 것으로 나타난다. 이는 표 3의 중금속 값과 같은 결과 값이다. 표 4에서 보면 구리(Cu)는 56mg/Kg에서 261mg/Kg, 납(Pb)은 62mg/Kg에서 204mg/Kg, 아연(Zn)은 399mg/Kg에서 1268mg/Kg이다. 대부분의 중금속들은 입자의 크기가 작아질수록 그 값이 증가하는 것으로 나타나 타 문헌과 유사한 결과를 보여주고 있다 (Lee et al., 1997). 이는 입자가 작아질수록 비표면적이 커져 많은 중금속들을 흡착하기 때문이다. 그러나 지역과 강우특성 및 중금속 성분에 따라 입자크기에 따른 농도가 불규칙한 경우도 있다(김부길과 이병철, 2006).

4. 결론

본 연구에서는 입자크기분포 분석을 통해 고속도로 강우유출수의 입자별 크기 분포에 따른 특성을 연구하고, 강우유출수 내에 존재하는 중금속과 침전물에 존재하는 중금속을 측정하였다.

- 1) 입자크기분포 분석을 통해 계산된 대표입경 D_n 의 경우 샘플링 시간과 상관없이 약 $3\mu m$ 정도로 일괄적인 값이 나타나며, 대표입경 D_n 의 경우 샘플링 시간에 따라 값은 변화하나 오염물의 농도와는 특정한 연관성이 없는 결과를 보여주고 있다.
- 2) PEMC는 오염물의 시간에 따른 변화와 비슷한 양상을 보인다. 도로유출수가 발생되었을 때 오염물질들의 농도 변화는 입자수의 변화와 연계하여 예측할 수 있음을 알 수 있다. 특히 TSS와 탁도는 대표적인 연계성을 보인다.

- 3) 강우유출수 내 중금속은 Cu, Pb, Zn가 비교적 높은 농도로 유출되며 Cu의 경우 $298.11\mu g/L$, Pb의 경우 $930.64\mu g/L$, Zn의 경우 $804.56\mu g/L$ 로 나타났다. 침전물은 Fe와 Al을 제외한 Cu, Pb, Zn에서 다른 중금속들에 비해 높은 농도로 나타났다. 또한 침전물의 경우 입자가 작아질수록 중금속의 함량이 증가함을 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 경희대학교 대학원의 2007학년도 우수연구 논문 장학금으로 지원받은 과제이며, 국토해양부 U-Eco City 사업단 3핵심 4세부과제에 의해 수행되었기에 감사드립니다.

참고 문헌

김부길, 이병철(2006) "노면퇴적물의 입자 크기에 따른 중금속 오염에 관한 연구", 한국환경과학회지, 제 15권, 제12호, pp. 1171~1175.

Aryal, R.K., Furumai, H., Nakajima, F. and Boller, M. (2005) "Dynamic behavior of fractional suspended solids and particle bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff", *Water Res.*, Vol. 39, pp. 5126~5134.

Andral, M.C., Roger, S., Montrejaud-Vignoles, M., Herremans, L. (1999) "Particle size distribution and hydrodynamic characteristics of solid matter carried by runoff from motorways", *Water Environ. Res.*, Vol. 71, pp. 398~407.

Barretti, M.E., Irich Jr., L.B. and Charbeeneau, R.J. (1998) "Characterization of highway runoff in Austin, Texas Area", *J. Environ. Eng.*, Vol. 124, No. 2, pp. 131~137.

Drapper, D., Tomlinson, R. and Williams, P. (2000) "Pollutant concentrations in road runoff: southeast queenland case study", *J. Environ. Eng.*, Vol. 126, No. 4, pp. 313~320.

- Furumai, H., Balmer, H., and Boller, M. (2002) "Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff", *Water Sci. Technol.*, Vol. 46, No. 11-12, pp. 413~419.
- Krein, A. and Schorer, M. (2000), "Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediment", *Water Res.*, Vol. 34, No. 16, pp. 4110~4115.
- Lee, J.H., Bang, K.W., Ketchum, Jr., L.H., Choe, J.S. and Yu, M.J. (2002) "First flush analysis of urban storm runoff", *Sci. Total Environ.*, Vol. 293, No. 1, pp. 163~175.
- Lee, C.S., Seo, G.T., Lee, J.H., Yoon, Y.S., You, J.J., and Sin, C.K. (2008). "Long term monitoring of storm surface runoff from urban pavement road in Korea." *Environ. Eng. Res.* 13(4), pp.184~191.
- Li, Y., Lau, S.-L., Kayhanian, M., and Stenstrom, M. K. (2005). "Particle size distribution in highway runoff." *J. Environ. Eng.*, 131(9), pp. 1267~1276.
- Li, Y., Lau, S.-L., Kayhanian, M.M., and Stenstrom, M.K. (2006). "Dynamic characteristics of particle size distribution in highway runoff: implications for settling tank design", *J. Environ. Eng.*, 132(8), pp. 852~861.
- Roger, S., Montrejaud-Vignoles, M., Andral, M.C., Herremans, L. and Fortune, J.P. (1998) "Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water", *Water Res.*, Vol. 32, No. 4, pp. 1119~1125.
- Sansalone, J.J. and Buchberger, S.G. (1997a) "Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water", *J. Environ. Eng.*, Vol. 123, No. 2, pp. 134~143.
- Sansalone, J.J. and Buchberger, S.G. (1997b) "Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater", *Water Sci. Technol.*, 36(8), pp. 155~160.
- Vaze, J., and Chiew, F. H. S. (2004). "Nutrient loads associated with different sediment sizes in urban stormwater and surface pollutants." *J. Environ. Eng.*, 130(4), pp. 391~396.
- Viklander, M. (1996) "Particle size distribution and metal content in street sediments" *J. Environ. Eng.*, Vol. 124, No. 8, pp. 761~766.

접 수 일: 2009. 7. 1
심 사 일: 2009. 7. 2
심사완료일: 2009. 7. 23