

## 고속도로 영업소지역의 강우유출수내 중금속 유출 특성

이소영 · 이은주 · 김철민 · 손현근 · Marla C. Maniquiz · 손영규\* · 강희만\*\* · 김지형\* · 김이형†

공주대학교 건설환경공학부

\*고려대학교 건축사회환경공학과

\*\*한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹

## Characteristics of Wash-off Metal Pollutants from Highway Toll-Gate Area

Soyoung Lee · Eunju Lee · Chulmin Kim · Hyungun Son · Marla C. Maniquiz · Youngkyu Son\*  
Heeman Kang\*\* · Jechyeong Kim\* · Lee-Hyung Kim†

Department of Civil & Environment Engineering, Kongju National University

\*Department of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

\*\*Environmental & Material Research Lab., Highway & Transportation Technology Institute

(Received 3 November 2007, Accepted 12 November 2007)

### Abstract

The stormwater runoff from paved area are highly polluted because of particulate materials as well as metals from various vehicular activities. The Division of Road Maintenance in Ministry of Construction and Transportation was recently developed the Guidelines of Environment-kindly Road Maintenance. It is actually requiring the BMP construction to control the nonpoint source pollution as based on the TMDL program. This research is carried out in order to define the characteristics of stormwater runoff from the toll-gate of highways since 2006, which is actually one of the main pollutant sources of paved areas. This monitoring is the first phase work for establishing the treatment facilities in the toll-gates. The one of the main characteristics from toll-gate runoff is the first flush phenomenon containing lots of sediments and metal compounds at the beginning of a storm event. Usually it is used to determine the size of treatment facilities and to calculate the reduced pollutant mass in the facility. The research results shows that the mean EMC values for heavy metals are determined to 274.3  $\mu\text{g/L}$  for Cd, 1,273.4  $\mu\text{g/L}$  for Cr, 1,822.0  $\mu\text{g/L}$  for Cu, 6,504.9  $\mu\text{g/L}$  for Fe, 14,930.3  $\mu\text{g/L}$  for Pb, and 714.1  $\mu\text{g/L}$  for Zn. Also the metal mass loadings from the toll-gates are calculated using EMC, watershed area and storm duration.

**keywords** : EMC, Highway, Mass loading, Metals, Toll-gate

### 1. 서론

도시화의 확대는 불투수층인 포장지역의 확대를 의미하며, 다양한 인간의 활동과 차량의 운행을 야기하게 된다. 이러한 활동은 건조기간 동안 다량의 중금속과 입자상 물질의 축적을 유발시키며, 강우시 집중적으로 유출되어 인근의 하천과 호소의 수질을 악화시키게 된다(김 등, 2005). 이러한 포장지역에서 유출되는 강우유출수는 생물내 축적을 유발하는 다량의 중금속을 함유하고 있기에 비점오염물질로 분류되어 특별 관리를 요구하고 있다. 특히 중금속 중에서 Pb와 Zn은 일반적으로 차량의 타이어, 자동차의 차체 및 엔진파트에 다량 함유되어 있기에 포장지역에서 다량 검출되는 원인이 되고 있다. 또한 이러한 중금속은 건물의 부식, 대기 침적, 운송, 다양한 산업 활동과 더불어 의도적/고의적인 방출 등을 통해서도 유출되는 것으로 알

려져 있다(Bodo, 1989; Dong et al., 1984; Liebens, 2001; Sansalone et al., 1997; Ujevic et al., 2000; Wiber et al., 1979).

일반적으로 포장지역이란 일반국도, 주차장, 고속도로, 교량, toll-gate, 휴게소 등으로 분류되어 있으며, 도시내에서 넓은 면적을 차지하고 있으며 오염정도도 매우 높은 것으로 나타나 있다(김 등, 2004, 2005). 이러한 포장지역의 비점오염원 관리가 중요한 이유는 인간의 주 활동범위인 주거지역, 상업지역, 산업지역 및 각종 공공지역이 포장지역과 연계되어 강우시 유출된 비점오염물질이 최종적으로 포장지역을 통해 인근의 배수관거로 유출되기 때문이다. 따라서 이러한 인식하에 환경부는 [수질오염총량관리계획수립지침]에서 유역으로부터의 총부하량 산정시 이러한 모든 포장지역을 대지라는 항목으로 묶어서 관리하고 있으나, 오염총량관리제의 실시와 함께 학계와 전문가 집단으로부터 다양한 도전에 직면해 있다. 그 중에서 가장 도전을 받고 있는 부분은 토지이용별 원단위 중에서 대지 항목이다. 특히 토지이용별 원단위로 분류되어 있는 7가지

† To whom correspondence should be addressed.

leehyung@kongju.ac.kr

항목 중에서 대지는 BOD가 85.9 kg/km<sup>2</sup>-day, TN이 13.69 kg/km<sup>2</sup>-day, TP가 2.10 kg/km<sup>2</sup>-day로 나타나 일반적인 농업 지역인 논과 밭과 비교하여 수십배 이상 큰 값을 나타내고 있다. 다양한 토지이용 중에서 대지는 인간과 차량의 주 활동범위이기에 원단위 값이 높다는 것은 당연하다고 인식되고 있다. 그러나 이러한 토지이용별 원단위 중에서 대지의 항목이 도전받고 있는 이유는 다양한 토지이용 중에서 비점오염물질의 유출이 낮은 토지이용도 본 값에 포함되어 수질오염총량관리제 시행과 더불어 지자체에서 삭감량 달성이 어렵다는 원인이 있겠지만, 무엇보다 현재 적용되고 있는 토지이용별 원단위가 과학적으로 산정되지 않았다는 인식이 넓게 퍼져있기 때문이다. 따라서 환경부를 위시하여 이러한 원단위 개정을 위한 다양한 모니터링 연구가 계획되고 있으며, 학계에서도 2002년도 이후 다양한 토지이용에서 유출되는 비점오염물질을 과학적인 모니터링 기법을 통해 자료를 확보하는 중이다. 이러한 축적된 자료는 현재 7개의 토지이용 원단위를 더욱 세분화하여 현실적인 토지이용별 원단위를 과학적으로 제시할 수 있을 것으로 판단된다(환경부, 1999). 현재 세분화되지 않은 토지이용별 원단위와 더불어 많은 전문가 집단으로부터 연구의 대상이 되고 있는 원단위의 문제는 관리대상 오염물질 항목이다. 최근 들어 수행되고 있는 다양한 연구결과들을 살펴보면, 대부분 포장지역에서 집중적으로 유출되어 수계에 영향을 미치는 비점오염물질 항목은 전통적인 BOD, TN 및 TP가 아니라 입자상 물질과 각종 중금속, 기름성분 및 각종 유해화학물질들로 나타나 있기에 이에 대한 원단위 산정도 필요하다 하겠다. 다행히도 환경부 및 국립환경과학원에서는 이러한 다양한 문제점을 안고 있는 토지이용별 원단위의 세분화 및 개정과 더불어 비점오염물질 관리대상 항목 지정확대를 계획하고 있기에 바람직한 변화라 하겠다.

따라서 본 연구는 다양한 토지이용 중에서 차량의 급격한 정차로 인해 다량의 오염물질의 축적이 유발되는 고속도로 영업소에서의 비점오염물질의 유출경향을 연구하여 효율적인 비점오염물질 부하량 및 원단위 산정을 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 모니터링 지점 및 방법

고속도로 영업소 토지이용에서의 토지이용별 오염물질 발생원단위 산정을 위한 기초자료 조사를 위하여 경부고속도로 수원영업소(site 1)와 호남고속도로 계룡영업소(site 2)를 모니터링 지점으로 선정하여 연구를 수행하였다. 도로는 많은 차량의 운행으로 인하여 비점오염물질의 축적이 심한 토지이용으로 차량의 운행정도가 오염물질 유출에 중요한 인자이다. 따라서 차량의 운행이 높은 수원영업소와 차량의 운행이 낮은 계룡영업소를 대상으로 하여 비점오염물질의 유출특성을 비교하기 위하여 모니터링을 수행하였으며, 지점에 대한 현황이 Table 1과 Fig. 1에 나타나 있다. 모니터링이 수행된 유역면적은 Site 1이 82.2 m<sup>2</sup>이었고 Site 2는 661.5 m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 두 지점의 포장형태는 아스팔트 포장으로 이루어져 있다.

효율적인 유량측정 및 수질시료 채취를 위하여 모니터링 지점에는 웨어를 설치하였다. 유량 및 수질모니터링은 강우 초기에 다량의 비점오염물질이 유출되는 현상을 반영한 기존의 연구방법(김 등, 2004, 2005)과 동일하게 하여 수행되었다. 수질시료 채취는 초기강우 현상을 반영한 방법으로 강우초기에 집중적인 모니터링을 수행하였다. 채취된 시료는 실험실로 운반되어 입자상 물질, 유기물질, 영양염류, 중금속에 대하여 측정을 수행하였으며, 본 논문에서는 중금속에 대한 부분을 정리하여 나타내고자 한다. 중금속 분석은 전처리된 한 시료를 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy)를 이용하여 실시하였으며, 분석항목은 Cu, Pb, Zn, Cr, Fe, Ni, Cd로 한정하였다. 이외에도 유출

Table 1. Monitoring site

Site	Locations	Area (m <sup>2</sup> )	Pavement type	Imperviousness rate (%)
1	Suwon toll-gate (Kyungbu highway)	82.2	Asphalt	100
2	Gaeryoung toll-gate (Honam highway)	661.5	Asphalt	100

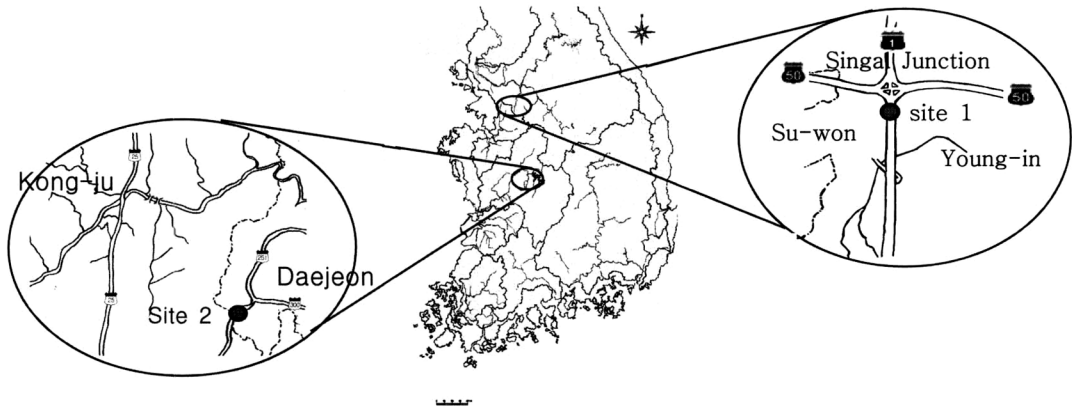


Fig. 1. Monitoring locations.

특성 분석을 위하여 강우강도, 강우지속시간, 강우 전 건기 일수, 유역면적, 총 강우량, 총 유출량, 평균 강우강도 등 강우특성과 모니터링 지점 특성을 조사하였다.

2.2. 강우 유출수의 EMC 및 부하량 산정

비점오염원으로부터 유출되는 오염물질은 강우 유출수에 의하여 영향을 크게 받기에 평균농도 산정을 위해서는 유량가중평균농도(Event Mean Concentrations, EMCs)로 나타내어진다. 식 (1)과 같이 유량과 수질자료를 이용하여 산정된 EMC는 토지이용으로부터 발생하는 비점오염물질 부하량 산정을 위한 중요한 자료로 이용되어진다(김 등, 2004). EMC는 전체 강우지속시간 T시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산할 수 있다.

$$EMC = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} \quad (1)$$

$$= \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt}$$

$$\text{Pollutant Loading per Watershed Area}(mg/m^2) = (2)$$

$$\frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2)}$$

$$\text{Pollutant Loading per RDT}(mg/m^2-hr) = (3)$$

$$\frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2) \cdot RDT(hr)} = \frac{mg}{m^2-hr}$$

다양한 토지이용으로부터 발생하는 비점오염물질의 유출량을 일반화하기 위해서는 식 (2)와 (3)과 같은 유역면적 대비 비점오염물질 부하량과 강우지속시간에 따른 부하량을 이용할 수 있다. 유역면적 대비 비점오염물질 유출 부하량은 식 (1)에서 획득된 EMC에 지점별 전체 강우 유출량을 곱한 후 유역면적으로 나누어 산정되며, 강우지속시간 별 비점오염물질 유출 부하량은 EMC에 전체 강우유출량에 곱한 후 유역면적과 강우지속시간으로 나누어 계산된다(이 등, 2006). 여기서 RDT (Rainfall Duration Time)는 강우지속시간을 의미한다.

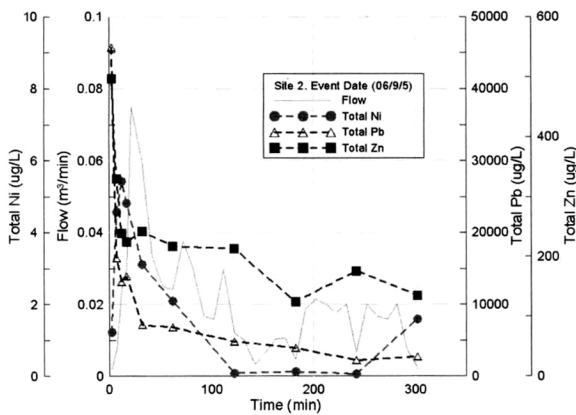
3. 결과 및 고찰

3.1. 강우특성 및 비점오염물질의 유출경향

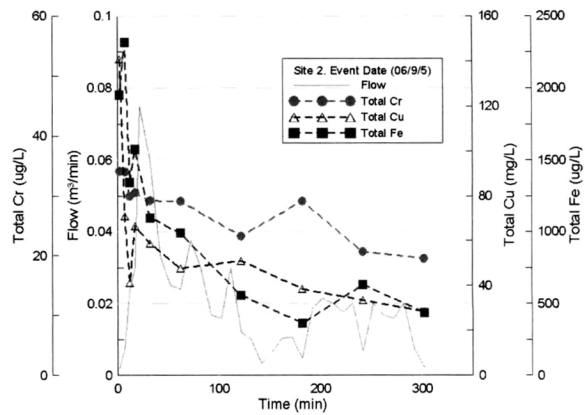
모니터링 지점별로 현재 4~5회의 모니터링이 수행되었으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Site 1은 강우 전 건조일수가 3~15일, 전체 강우량 32~77.5 mm, 평균 강우강도 3.1~5.2 mm/hr 범위의 다양한 분포를 나타내었으며, site 2의 강우전 건조일수는 3~10일, 전체강우량 3.0~18.0 mm, 평균 강우강도는 1.4~9.1 mm/hr의 범위를 나타내었다.

Table 2. Event table in toll gates

Site	Event no.	Event date	ADD (day)	Total rainfall (mm)	Runoff duration (hr)	Avg. rainfall intensity (mm/hr)	Runoff coeff.	Runoff (start time)	Runoff (end time)
1	E-1	2006/05/05	14.0	62.0	20.0	3.1	0.95	23 : 00	05/06 20:00
	E-2	2006/05/22	15.0	36.5	7.0	5.2	0.99	14 : 50	05/22 22:00
	E-3	2006/05/27	4.0	32.0	12.0	2.7	0.47	08 : 27	05/27 21:00
	E-4	2006/06/14	3.0	77.5	18.0	4.3	0.84	11 : 04	06/15 06:00
2	E-1	2006/06/29	3.1	15.5	1.7	9.1	0.68	22 : 50	06/29 0:20
	E-2	2006/07/25	3.0	9.0	6.5	1.4	0.75	22 : 30	07/26 03:00
	E-3	2006/08/16	10.0	3.0	0.8	3.8	0.66	22 : 30	08/16 23:20
	E-4	2006/09/05	5.0	18.0	11.2	1.6	0.70	17 : 50	09/06 05:00
	E-5	2006/11/09	2.1	4.5	0.5	9.0	0.70	9 : 30	11/09 10:00



(a) Total Ni, Total Pb and Total Zn



(b) Total Cr, Total Cu and Total Fe

Fig. 2. Polluto- and hydro graphs for E-4 at site 2.

Fig. 2는 호남고속도로 계룡영업소 지점에서 2006년 9월 5일(E-4)에 수행된 모니터링 결과를 수리수문 및 농도곡선으로 나타낸 예이다. 이러한 자료는 강우시 유출되는 오염물질에 대한 유출경향을 유량과 비교하는데 도움이 된다. 그림에서 보듯이, 고속도로 영업소 지점은 강우초기에 다량의 오염물질이 유출되는 전형적인 초기강우 현상을 나타내고 있다. 이러한 초기강우 현상은 향후 비점오염저감시설의 경제적 규모 산정시 효율적으로 이용 가능하다. 본 예에서 보였듯이, 일반적으로 영업소 지역에서의 초기강우는 강우 유출시 시작된 이후 30분 이내에 주로 발생하는 것으로 나타났다.

**3.2. 유출되는 중금속 오염물질의 통계학적 분석**

차량이 급정거하고 정체를 하는 고속도로 영업소에서 유출되는 중금속의 정량적인 분포를 파악하기 위해 모니터링 결과에 대하여 통계분석을 실시하였으며, 그 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 고속도로 영업소에서 유출되는 비점오염물질은 대부분 차량의 운행에 따른 것으로, 타이어와 브레이크, 엔진 등의 마모로 인한 중금속 물질이 주로 포함되어 있는 것으로 알려져 있다(Ellis et al., 1982; Harrison et al., 1981). 유출되는 중금속의 발생원을 살펴보면, Pb의 경우 휘발유에 함유되어 있는 tetramethyl-lead와 첨가되는 산에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있으며(Harrison et al., 1981), Zn의 경우 자동차타이어 제작 과정의 경화 과정시 사용되는 산화아연으로 인한 것으로 알려져 있다(Lee et al., 1997). 또한 Cd의 경우 타이어 제조시 성분으로 들어가는 아연의 불순물로 알려져 있으며, Cu, Cr, Ni은 대부분 브레이크에 의한 것으로 알려져 있다(Harrison et al., 1981).

유출되는 중금속의 오염물질별 95% 신뢰구간을 살펴보면, Total Cd의 경우 80.5~196.9 µg/L의 범위를 보이고 있으며, Total Cr의 경우 425.0~950.7 µg/L, Total Cu 595.9~1,946.3 µg/L, Total Fe 4,365.0~8,048.1 µg/L, Total Ni 204.6~826.6 µg/L, Total Pb 17,265.8~27,348.1 µg/L 그리고 Total Zn이 410.3~751.9 µg/L 범위로 나타났다. 이러한 중금속은 대부분 수질 및 수생태계 보전법에 의하여 수질보호 및 개선을 위한 유해화학물질로 분류되어 있는 중요한 관리대상 항목이다. 특히 유출되는 중금속 중에서 Pb는 수생태계 및 인

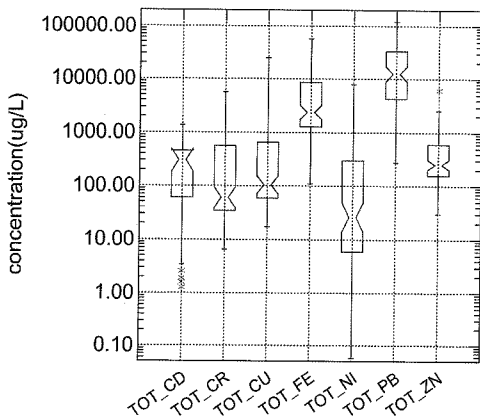


Fig. 3. Statistical analysis for metal concentrations.

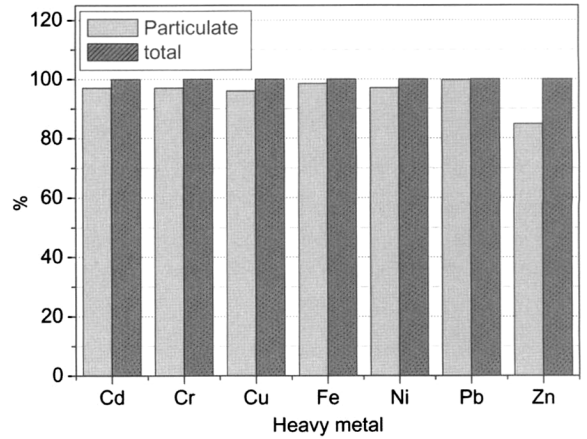


Fig. 4. Percent of particulate heavy metal for total heavy metal.

체의 안전성에 매우 중요한 인자이나 고농도로 배출되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 Pb의 발생원은 앞서 언급하였듯이 휘발유에 함유되어 있는 tetramethyl-lead가 주요한 원인으로 조사되었으나, 최근 수십년간 이러한 휘발유 사용이 급격히 줄어들었기에 대부분의 원인은 브레이크 마모 등으로부터 기인하는 것으로 알려지고 있다(Sansalone et al., 1997). 특히 영업소 지역은 자동차가 고속 주행 후 영업소 진입에 따른 브레이크 사용으로 다른 중금속 농도와 비교시 고농도로 유출된 것으로 판단된다.

강우시 노면으로부터 유출되는 중금속의 존재 형태를 분석하는 것은 저감방안 수립에 중요한 기초자료를 제공할 수 있다. 특히 중금속은 미세한 토사입자에 부착되어 유출되기에 저감방안 수립시 처리 기작 및 공법 선정에 중요한 자료로 활용 가능하다. 따라서 본 연구를 위하여 중금속별 입자상 존재량에 대한 분석을 실시하였으며, Fig. 4는 이러한 결과를 보이고 있다. 분석 결과 강우유출수에 함유되어 유출되는 중금속의 대부분은 입자상 형태로 존재하는 것으로 나타났으며, Zn을 제외하고는 대부분 90% 이상이 입자상 형태로 유출되는 것으로 나타났다. 이는 차량의 급정거로 인한 중금속의 대부분이 마모에 의한 유출이 높기에 입자가 큰 형태로 유출되는 것으로 나타났다. 또한 미세 중금속 입자는 강우시 토사의 유효 표면적에 많은 양이 흡착되어 유출되기에 입자상 물질의 중금속이 상대적으로 매우 높게 나타난 것으로 판단된다.

**3.3. 유출 중금속의 유량가중평균농도(EMCs)**

고속도로 영업소 지점에 대한 전체 중금속에 대하여 EMC를 산정하였으며, 이를 다시 일반화된 값으로 나타내기 위하여 통계분석을 실시하였다. Fig. 5는 이러한 EMC 값을 보여주고 있는데, Tot Cd의 평균 EMC는 274.3 µg/L, Tot Cr은 1,273.4 µg/L, Tot Cu는 1,822.0 µg/L, Tot Fe은 6,504.9 µg/L, Tot Ni은 1,263.5 µg/L, Tot Pb는 14,930.3 µg/L 그리고 Tot Zn은 714.1µg/L로 분석되었다. 강우시 유출되는 중금속의 농도는 Tot Pb, Tot Fe, Tot Cu의 순으로 분석되었으며, 이러한 결과는 포장지역을 대상으로 분석한

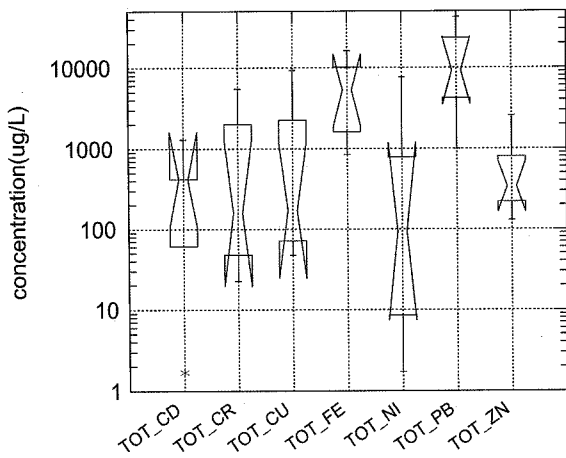


Fig. 5. Metal EMCs at the toll-gates in highways.

연구 결과 등(이 등, 2006)과 비교시 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다(Sansalone et al., 1997). 향후 비점저감시설 선정시 처리효율 산정에 큰 영향을 끼치는 입자상 물질의 제거를 예측할 수 있는 입자상 물질의 함량을 분석하기 위하여 전체 중금속 중에서 입자상 중금속에 대하여 통계분석을 실시하였다. 평균 EMC를 살펴보면, Particulate Cd은 267.0 µg/L, Particulate Cr이 1,247.5 µg/L, Particulate Cu가 1752.5 µg/L, Particulate Fe은 6377.8 µg/L, Particulate Ni은 1,225.6 µg/L, Particulate Pb는 14,833.0 µg/L 그리고 Particulate Zn은 632.9 µg/L로 나타났다.

### 3.4. 중금속의 배출부하량 산정

산정된 EMCs를 이용하여 집수면적과 강우지속시간 및 강우지속시간을 고려하여 유역으로부터 유출되는 비점오염물질의 배출부하량을 산정하였다. 강우사상별 산정된 배출부하량의 일반화된 값 도출을 위하여 통계분석을 실시하였다. 단위면적당 중금속의 평균 배출부하량은 Tot Cd이 2,399.5 µg/m<sup>2</sup>, Tot Cr이 8,713.6 µg/m<sup>2</sup>, Tot Cu가 17,921.3 µg/m<sup>2</sup>, Tot Fe이 254,002.0 µg/m<sup>2</sup>, Tot Ni이 10,345.3 µg/m<sup>2</sup>, Tot Pb가 148,637.0 µg/m<sup>2</sup> 그리고 Tot Zn 10,447.0 µg/m<sup>2</sup>로 산정되었다. 강우지속시간을 고려한 배출부하량은 Tot Cd가 707.1 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Cr이 3637.8 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Cu가 4713.4 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Fe이 29,981.9 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Ni이 2,664.1 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Pb가 107,593.8 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Zn이 2,753.4 µg/m<sup>2</sup>·hr로 분석되었다.

## 4. 결론

본 연구는 차량의 급정거 및 정체로 인하여 타이어와 엔진 및 브레이크의 마모가 심한 지역인 고속도로 영업소 토지이용 지역에서의 강우시 배출되는 비점오염물질들 중 생태계에 위해성을 끼치는 중금속의 유출경향을 파악하기 위하여 수행하였다. 본 연구결과는 다양한 토지이용별 비점오염물질 유출원단위 산정시 중요한 기초자료로 활용가능하며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 영업소지점에서 유출되는 비점오염물질은 강우 시작후

30분 이내에 초기강우 현상이 대부분 끝나는 경향을 보였다. 이러한 자료는 평균 EMC와 함께 비점오염물질 저감대책 수립시 처리대상용량 및 처리대상농도를 결정함에 있어 중요한 자료로 활용가능하다.

- 2) 영업소 지역으로부터 유출되는 중금속의 오염물질별 95% 신뢰구간을 살펴보면, Total Cd의 경우 80.5~196.9 µg/L, Total Cu가 595.9~1,946.3 µg/L, Total Pb 17,265.8~27,348.1 µg/L 그리고 Total Zn이 410.3~751.9 µg/L 범위로 나타났으며, 대부분의 유출 원인은 브레이크, 타이어 및 엔진 등의 마모로부터 기인하는 것으로 나타났다.
- 3) 강우시 노면으로부터 유출되는 중금속의 존재 형태는 비점오염저감방안 수립에 중요한 기초자료를 제공할 수 있는데, 영업소 지역에서 유출되는 대부분의 중금속은 Zn을 제외하고는 90% 이상이 입자상 형태로 유출되는 것으로 나타났다. 이러한 특징은 비점저감방안 수립시 처리 기작 및 공법 선정에 중요한 자료로 활용 가능하다.
- 4) 본 연구결과는 향후 토지이용별 비점오염물질 배출원단위 산정시 기초자료로 활용가능하다. 연구를 통해 산정된 배출부하량을 살펴보면, Tot Cu가 4713.4 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Pb가 107,593.8 µg/m<sup>2</sup>·hr, Tot Zn이 2,753.4 µg/m<sup>2</sup>·hr로 산정되었다. 이 값은 향후 추가적인 모니터링 결과를 이용하여 연간 배출되는 비점오염물질의 배출원단위 산정에 이용될 수 있다.

## 참고문헌

김이형, 강주현, 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, *한국환경학회지*, **20**(6), pp. 631-640 (2004).

김이형, 이선하, 주차장 및 교량 강우유출수의 중금속 오염물질 특성과 동적 EMCs, *한국환경학회지*, **21**(4), pp. 385-392 (2005).

이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 임정호, 이병식, 김이형, 고속도로 노면유출수의 중금속 유출 특성 및 상관성, *한국환경학회지*, **22**(1), pp. 128-133 (2006).

환경부, *오염총량관리계획수립지침(안)*, 환경부 (1999).

Bodo, B. A., Heavy metals in water and suspended particulates and urban basin impacting lake Ontario, *Science of the Total Environment*, **87/88**, pp. 329-344 (1989).

Dong, A., Chesters, G. and Simsiman, G. V., Metal composition of soil, sediments and urban dust and dirt samples from the Menomonee river watershed, Wisconsin USA. *Water, Air and soil pollution*, **22**, pp. 257-275 (1984).

Ellis, J. B. and Revitt, D. M., Incidence of heavy metals in street surface sediment: colubility and grain size studies, *Water, Air and Soil Pollution*, **17**, pp. 87-100 (1982).

Harrison, R. M., Laxen, D. P. and Wilson, S. J., Chemical Associations of Lead, Cadmium, Copper and Zinc in Street Dusts and Roadside Soil, *Environ. Sci. Technol.*, **15**, pp. 1378-1383 (1981).

Lee, P. K., Baillif, P. and Touray, J. C., Geochemical behaviour and relative Mobility of Metals(Mn, Cd, Zn and Pb) in Recent Sediments of Retention Pond along the A-71

- motorway in Slogne, France, *Environ. Geol.*, **32**(2), pp. 142-152 (1997).
- Liebens, J., Heavy Metal Contamination of Sediments in Stormwater Management Systems: The Effect of Land Use, Particle Size and Age, *Environmental Geology*, **41**, pp. 341-351 (2001).
- Sansalone, J. J. and Bushberger, S. G., Characterization of Solid and Metal Element Distributions in Urban Highway Stormwater, *Wat. Sci. & Tec.*, **36**, pp. 155-160 (1997).
- Ujevic, I., Odzak, N. and Baric, A., Trace Metal Accumulation in Different Grain Size Fractions of the Sediments from a Semi-enclosed Bay Heavily Contaminated by Urban and Industrial Wastewaters, *Water Res.*, **34**, pp. 3055-3061 (2000).
- Wiber, W. G. and Hunter, J. V., Distributions of Metals in Street Sweepings Stormwater Solids and Urban Aquatic Sediments, *Journal Water Pollution Control Federation*, **51**, pp. 2810-2822 (1979).