

## 국내 고속도로 강우 유출수의 EMCs 및 유출 부하량 산정

## Estimation of Pollutant EMCs and Loadings in Highway Runoff

김이형\* · 고석오\*\* · 이병식\*\*\* · 김성길\*\*\*\*

Kim, Lee-Hyung · Ko, Seok-Oh · Lee, Byung-Sik · Kim, Sunggil

## Abstract

The nonpoint source control is based on TPLMS (Total Pollution Load Management System) program. Recently, the Ministry of Environment in Korea has programmed TPLMS for 4 major large rivers to improve the water quality in rivers by controlling the total pollutant loadings from the watershed area. Usually the urbanization is the main pollutant sources, particularly for nonpoint pollutants, because of high imperviousness and high pollutant mass emissions. The stormwater runoff from urban areas is containing various pollutants such as sediments, metals and toxic chemicals due to human and vehicle activities. Of the various landuses, the highways are highly polluted landuses because of high pollutant accumulation rate by vehicle activities during dry periods. Therefore, this research is achieved to provide pollutant EMCs (Event Mean Concentrations) and mass loadings washed-off from highways during rainfall periods. Five monitoring locations were equipped with an automatic rainfall gage and an flow meter. The results show that the EMC ranges for 95% confidence intervals in highway land use are 45.52-125.76 mg/L for TSS, 52.04-95.48 mg/L for COD, 1.77-4.48 mg/L for TN, 0.29-0.54 mg/L for TP. The ranges of washed-off mass loading are 712.7-2,418.4 mg/m<sup>2</sup> for TSS and 684.1-1,779.6 mg/m<sup>2</sup> for COD.

Keywords : EMC, Highway, TPLMS, stormwater, nonpoint sources

## 요 지

최근 들어 오염총량관리제의 시행과 함께 비점오염원 관리의 중요성이 커지고 있다. 오염총량이란 하천수질의 개선을 위하여 도입하였으며 유역이란 개념을 도입하였다. 하천수계로 유입되는 오염물질 부하량은 점오염원 부하량, 비점오염 부하량 및 안전율의 합으로 산정이 되고 있다. 그러나 일반적으로 유역 및 강우 특성에 기인하여 유출되는 비점오염원의 특수성 때문에 안전율을 보통 10% 정도로 두고 있다. 이러한 불확실성은 다양한 요인에 기인하는데, 모니터링을 통한 기초자료의 부족이 가장 원인으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구는 다양한 비점오염원 중에서 포장율이 높아 오염물질의 유출이 높은 고속도로 지역에서의 오염물질 유출 부하 원단위 산정을 위하여 가장 필수적으로 요구되는 오염물질의 EMC 및 유출부하량 산정을 위하여 수행되었다. 고속도로의 경우, 높은 포장율과 많은 자동차의 운행으로 인하여 건조기간 동안 오염물질들의 축적이 높은 지역이며, 강우시 집중적으로 인근 수계로 유입되기에 비점오염원 관리에서 매우 중요한 토지이용으로 고려되고 있다. 그러나 현재 국내에서는 비점오염원에 관한 기초 연구가 미흡하여 고속도로 등을 포함한 각종 토지이용에서의 비점오염원에 관한 기초 자료의 부족이 매우 심각한 상황이다. 본 연구를 수행하기 위하여 국내 5개의 고속도로 지점에서 모니터링이 수행되었으며, 각 지점별 자동 유량 및 강우량 측정계를 설치하여 자료를 수집하였다. 모니터링 자료는 고속도로에서의 비점오염물질 EMC 및 부하량 산정을 위하여 사용되었다. EMC에 관한 95% 신뢰구간을 살펴보면, TSS의 경우 45.52-125.76 mg/L, COD는 52.04-95.48 mg/L, TN은 1.77-4.48 mg/L 그리고 TP의 경우 0.29-0.54 mg/L의 범위로 나타났다. 부하량에 관한 95% 확신범위는 TSS가 712.7-2,418.4 mg/m<sup>2</sup>의 범위를 보였으며, COD의 경우 684.1-1,779.6 mg/m<sup>2</sup>의 범위로 나타났다.

핵심용어 : EMC, 고속도로, 오염총량관리제, 강우유출수, 비점오염원

## 1. 서 론

최근 4대강에 도입된 오염총량관리제는 하천수계로 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 것으로 기존의 방류수 규제

와는 달리 유역이라는 개념으로 접근한 것이다. 현재 4대강에 대한 비점오염원의 기여율은 22-40%정도를 차지하고 있으나 점오염원관리를 위한 환경기초시설확대로 비점오염원의 기여율은 점점 증가할 전망이어서 오염총량제의 성공적인 정

\*정회원 · 교신저자 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수(E-mail: leehyung@kongju.ac.kr)

\*\*정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: soko@khu.ac.kr)

\*\*\*공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수(E-mail: blee@kongju.ac.kr)

\*\*\*\*공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수(E-mail: sgkim@kongju.ac.kr)

작은 비점오염원관리의 성공여부와 직결될 것이다. 또한, 토지이용 중 도시지역에서 2004년에 유출되는 BOD는 전체 유출부하량의 52%로 나타났으나 2020년에는 65.2%로 도시지역에서 유출되는 부하량이 계속 증가할 것으로 예상하고 있다(환경부, 2004).

비점오염원은 강우에 의해 유출되는 오염원으로 다양한 토지이용에 따라 발생되며, 강우 및 유역의 특성에 따라 유출되는 오염물질의 종류와 양이 다르다. 다양한 토지이용 중에서 도시지역의 비점오염원에 관한 관심이 높은 이유는 유역면적은 적으나 높은 불투수율로 인하여 강우유출량 및 오염물질의 유출량이 커서 단위면적당 오염부하가 크기 때문이다(Becher *et al.*, 2000; Charbeneau와 Barrett, 1998). 특히, 고속도로는 포장율이 높고 유역면적이 작기 때문에 유출계수가 다른 토지이용에 비해 매우 크며, 건조 시에는 오염물질의 축적이 타 토지이용에 비해 매우 높은 특성을 가지고 있다(김 등, 2004, 2005; Kim, 2003; Kim *et al.*, 2004). 고속도로에서의 주요 오염물질 발생원으로는 주행하는 자동차, 트럭, 가솔린을 이용하는 각종 운반도구로부터 발생하며(U.S. EPA, 1994), 건조시 도로면에 축적되었다가 강우시 인근 하천으로 유출되어 수질 악화의 원인으로 작용한다(Barrett *et al.*, 1998; Becher *et al.*, 2000; Charbeneau와 Barrett, 1998). 따라서 미국을 비롯한 여러 선진국들은 이러한 특성에 기인하여 비점오염원 관리시 고속도로를 포함한 포장 지역을 우선 관리대상 지역으로 분류하여 각종 연구 및 관리에 많은 투자를 하고 있다. 그러나 비점오염원은 강우 및 유역 특성에 기인하여 다양한 오염물질들이 유출되기 때문에 불확실성이 매우 큰 분야이다(Sansalone과 Bushberger, 1997). 따라서 이러한 불확실성을 줄이기 위해서는 비점오염원에 대한 많은 모니터링을 수행하여 기초자료를 충분히 확보하여야 하며, 그러한 자료들은 EMC 및 부하량 산정시 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 특히 비점오염물질 유출 부하량 산정시 이용되는 EMC는 강우 사상에 따른 평균

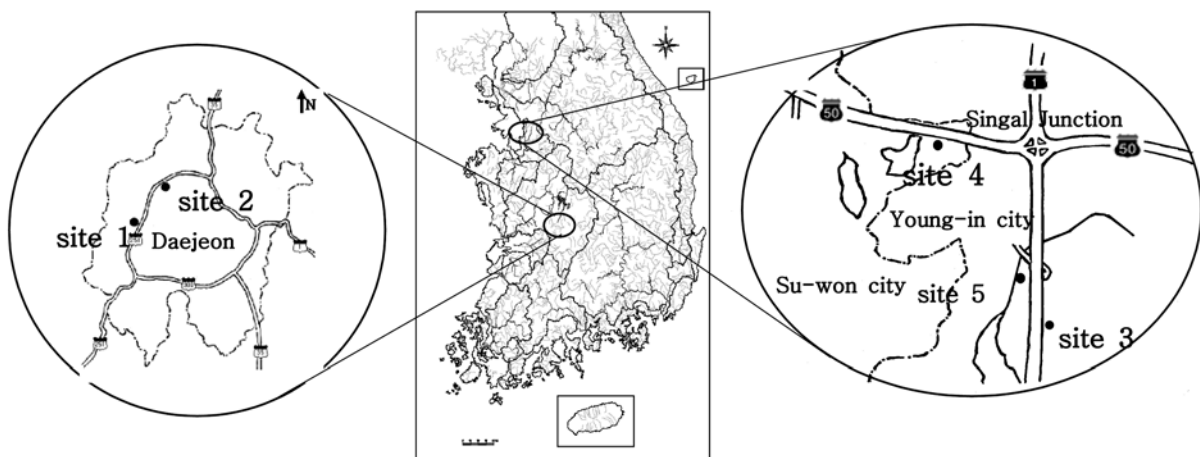
농도를 의미하며, 채취된 수질시료의 산술적 농도 평균으로 산정되어서는 안 된다. 명확치 않은 산정방법은 유출부하량을 몇 십배 이상 차이를 나타낼 수도 있기 때문에 세밀한 모니터링 프로그램을 수행한 후 그 결과를 이용하여 EMC를 산정하여야 한다(Deletic과 Mahsimovic, 1998; Ujevic *et al.*, 2000).

따라서 본 연구에서는 포장된 지역 중 국내 5개 지점에서 총 39회에 걸쳐 의 고속도로에서 수행된 모니터링 결과를 이용하여 오염물질의 EMC를 산정하고, 산정된 EMC를 이용하여 유출부하량을 산정하고자 한다. 본 연구 결과는 유출되는 오염물질의 저감방법 및 처리방안 마련 시 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 대상지역 및 방법

### 2.1 모니터링 지점 및 방법

강우 및 유역특성에 의하여 오염물질 유출이 발생하는 비점오염원 연구에 있어서 모니터링은 가장 중요한 부분이다. 모니터링 수행에 앞서 모든 지점에는 효율적 유량 측정 및 수질시료의 채취를 위하여 웨어를 설치하였으며, 강우 시작 전부터 현장에 대기하면서 모니터링 준비를 완료하였다. 수질 및 유량 측정에 있어서 불확실성을 최대한으로 줄이기 위해서는 강우량 및 유출량을 1분 단위로 측정하였다. 또한 강우유출수의 초기강우현상을 파악하기 위하여 강우 시작 후 유출이 발생하는 즉시 첫 번째 시료로 하여 초기에는 5분 간격으로, 15분 이후부터는 15분 간격으로, 30분 이후에는 30분 간격으로, 1시간 후에는 유출이 끝날 때까지 1시간 간격으로 하여 모니터링을 수행하였다. 채취된 시료는 즉시 냉장되었으며, 강우 사상이 끝난 후 곧바로 실험실로 운반되어 입자상 물질, 유기물질, Oil & Grease, 영양염류 및 중금속 등의 항목으로 분류하여 실험이 수행되었다. 모니터링지점은 경부고속도로, 영동고속도로 및 호남고속도로상의 5개



Site	Highway	No. of Lane	Area (m <sup>2</sup> )	Approx. Percent of Impervious(%)	ADT (cars/day)	Pavement and Drainage Outfall
1	No. 1 highway(North)	4	1,170	100	109,209	- Highway
2	No. 50 highway(East)	3	936	100	196,250	pavement: Asphalt
3	No. 1 highway(South)	4	1,950	100	61,426	- Drainage Outfall:
4	No. 251 highway(South)	2	1,570	100	151,492	Concrete
5	No. 251 highway(North)	2	859	100	97,711	

Fig. 1 Site locations and descriptions

지점을 선정하였으며, 선정된 지점은 국내 고속도로를 대표하는 도로로 년중 차량 운행이 높은 지역이다(Fig. 1).

## 2.2 강우유출수의 EMC 및 부하량 산정

고속도로로부터 유출되는 비점오염물질의 부하량 산정은 모니터링을 수행하여 획득된 유출 오염물질의 농도와 강우 유출량을 이용하여 산정할 수 있다. 강우에 의해서 유출되는 오염물질의 부하량 산정시 이용되는 오염물질의 농도는 유량가중평균농도, 즉 EMC로 불리우며 식(1)과 같이 모니터링 결과를 이용하여 산정된다. EMC는 전체 강우지속시간 T시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산할 수 있으며, 비점오염원에서의 평균 농도 산정시 중요하게 이용되고 있다. 여기서 C(t)와 Q<sub>TRu</sub>(t)는 강우 지속시간 t에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다.

$$EMC = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} = \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt} \quad (1)$$

식 (2)는 유역면적 대비 오염물질 부하량을 나타내고 있으며, 식 (1)에서 획득된 EMC에 지점별 전체 유출량에 곱한 후 유역면적으로 나누어 산정된다. 이러한 부하량은 고속도로 비점오염물질에 의해서 인근의 수계환경에 년간 어느 정도 영향을 끼칠 것인가를 판단하는데 중요한 자료로 이용될 수 있다.

$$\text{Pollutant Loading Per Watershed Area} (mg/m^2) = \frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2)} \quad (2)$$

비점오염물질의 유출은 주로 강우에 의하여 유출되기에 강우 지속시간에 따른 오염물질 부하량 산정도 매우 중요하다. 강우는 년간 다양하게 발생하는데 강우 사상별 인근 수계

환경에 어떠한 영향을 끼칠 것인지를 판단하기 위해서는 다양한 강우 사상별 부하량 산정이 필요하다.

$$\text{Pollutant Loading Per RDT} (mg/m^2 \cdot hr) = \frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2) \cdot RDT(hr)} \quad (3)$$

식(3)은 이러한 부하량 산정식을 보이고 있으며, EMC와 유출량 및 유역면적과 강우지속시간을 고려하여 산정된다. 여기서 RDT(Rainfall Duration Time)는 강우지속시간을 의미한다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구는 국내 고속도로 5개 지점에서 강우시 유출되는 비점오염물질의 유출특성, 초기강우 현상, 강우 특성에 따른 오염물질별 EMC 및 부하량 산정을 위하여 연구되었다. 그 중에서 본 논문에서는 오염물질별 EMC 및 부하량 산정에 관한 연구 결과를 정리하고자 한다.

### 3.1 강우 및 비점오염물질의 특성

Table 1은 지점 4에서 2004년 5월에서 2005년 7월까지 수행된 총 11회의 강우사상에 대한 강우 특성을 요약한 것이다. ADD(Antecedent Dry Days)는 2-18일의 범위를 보이며, 측정된 강우량은 6.9-68.1 mm 그리고 강우 유출계수는 0.58-0.93의 범위를 나타내고 있다.

Table 2는 5개의 지점에서 측정된 전체 39개 강우사상에 대한 통계 분석 결과를 나타내고 있다. 강우량은 6.90-68.1 mm의 범위, 강우강도는 1.0-13.0 mm/hr의 범위, 그리고 강우 전 건조일수인 ADD는 1.80-18.00일의 범위로 나타났다.

Fig. 2는 지점 1에서 2005년 6월 10일에 모니터링된 강우사상에 대한 수리수문 및 농도곡선의 예를 나타내고 있다. 아래

Table 1. Descriptions of storm event at site 5

Event No.	Event Date	ADD (days)	Total Rainfall (mm)	Runoff Duration (hr)	Avg. Rainfall Intensity (mm/hr)	Runoff Coeff.	Runoff (start time)	Runoff (end time)
E-1	2004/5/28	13	17.5	3.3	5.3	0.87	13:57 PM	17:19 PM
E-2	2004/6/17	18	50.5	8.3	6.1	0.85	3:58 AM	12:14 PM
E-3	2004/7/3	2	30.7	6.4	4.8	0.93	5:04 PM	11:29 PM
E-4	2004/7/11	3	6.9	7.2	1.0	0.62	4:58 PM	11:07 PM
E-5	2004/8/14	8	19.5	1.5	13.0	0.58	14:03 PM	15:34 PM
E-6	2004/8/22	2	8.4	1.0	8.4	0.84	11:33 AM	12:34 PM
E-7	2004/9/11	3	20.6	6.1	3.4	0.85	1:03 PM	7:11 PM
E-8	2005/5/11	4	12.9	6.1	2.1	0.74	5:35 PM	11:40 PM
E-9	2005/6/01	13	28.5	7.3	3.9	0.81	4:10 PM	11:28 PM
E-10	2005/6/10	7	68.1	9.3	7.3	0.85	3:43 AM	2:03 PM
E-11	2005/6/26	7	17.8	2.0	8.9	0.78	2:34 PM	4:36 PM

Table 2. Statistical analysis of monitored event for all sites

Parameters	Min.	Max.	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	St. Dev
Rainfall (mm)	6.90	68.1	21.88	30.22	13.54	14.44
Rain Intensity (mm/hr)	1.00	13.0	4.57	5.91	3.23	2.32
ADD (days)	1.80	18.00	6.56	10.15	2.97	6.22

x축은 강우지속시간을 나타내고 있으며, 위쪽 x축은 1분당 측정된 강우량을 보이고 있으며, 배경의 실선은 1분당 측정된 강우 유출율을 나타내고 있다. 또한 그림은 채취된 시료의 농도를 보이고 있는데, 강우가 지속됨에 따라 유출수의 농도는 급격한 감소 현상을 나타내고 있다. 이는 포장지역인 고속도로에서의 초기강우 현상을 의미한다. 이러한 현상은 EMC 산정에 있어 단순 시료 샘플의 농도가 아닌 유출유량이 고려된 유량가중 평균농도로 산정되어야 한다는 것을 의미한다.

### 3.2 EMC 통계분석

고속도로에서 강우에 의해 유출되는 오염물질의 부하량 산정을 위해서는 유량가중 평균농도인 EMC의 정밀한 산정이 필요하다. 이러한 값 산정을 위해서 본 연구에서는 식(1)을 이용하여 각 지점별 강우사상에 대한 EMC를 산정한 후, 산

정된 EMC에 대한 통계적 대표성을 찾기 위하여 SYSTAT 버전 9.0을 이용하여 통계분석을 행하였다(SYSTAT version 9.0). Fig. 3은 이러한 과정을 통해서 취득된 입상상 물질, 유기물질과 중금속에 대한 EMC 산정 결과이다.

TSS EMC는 20.66-284.76 mg/L의 범위, COD EMC는 29.69-159.66 mg/L 범위, Oil & Grease의 EMC는 0.74-9.68 mg/L, TN과 TP의 EMC는 각각 1.17-10.04 mg/L, 0.10-0.76 mg/L의 범위로 산정되었다. 중금속 EMC의 경우, 비교적 높은 농도로 유출되는 Total Cu가 58.06-928.16  $\mu\text{g/L}$ , Total Fe는 23.78-343.76  $\mu\text{g/L}$ , Total Zn은 42.74-858.55  $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 산정되었다.

유출되는 비점오염물질의 EMC에 대한 95% 신뢰구간을 살펴보면, TSS가 45.52-125.76 mg/L, COD가 52.04-95.48 mg/L, Oil & Grease는 1.41-4.50 mg/L의 범위로 산정되었

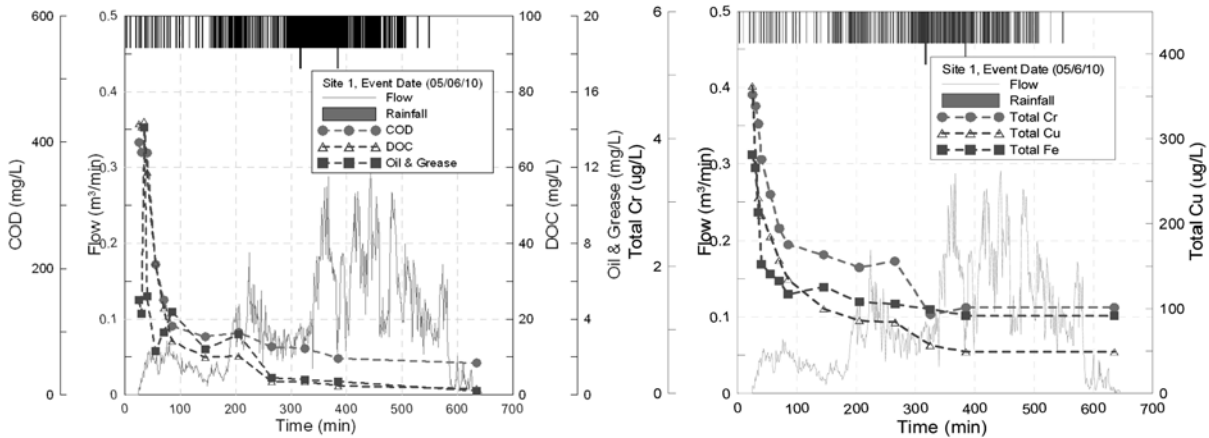


Fig. 2 Polluto- and hydrographs for E-10 at Site 1

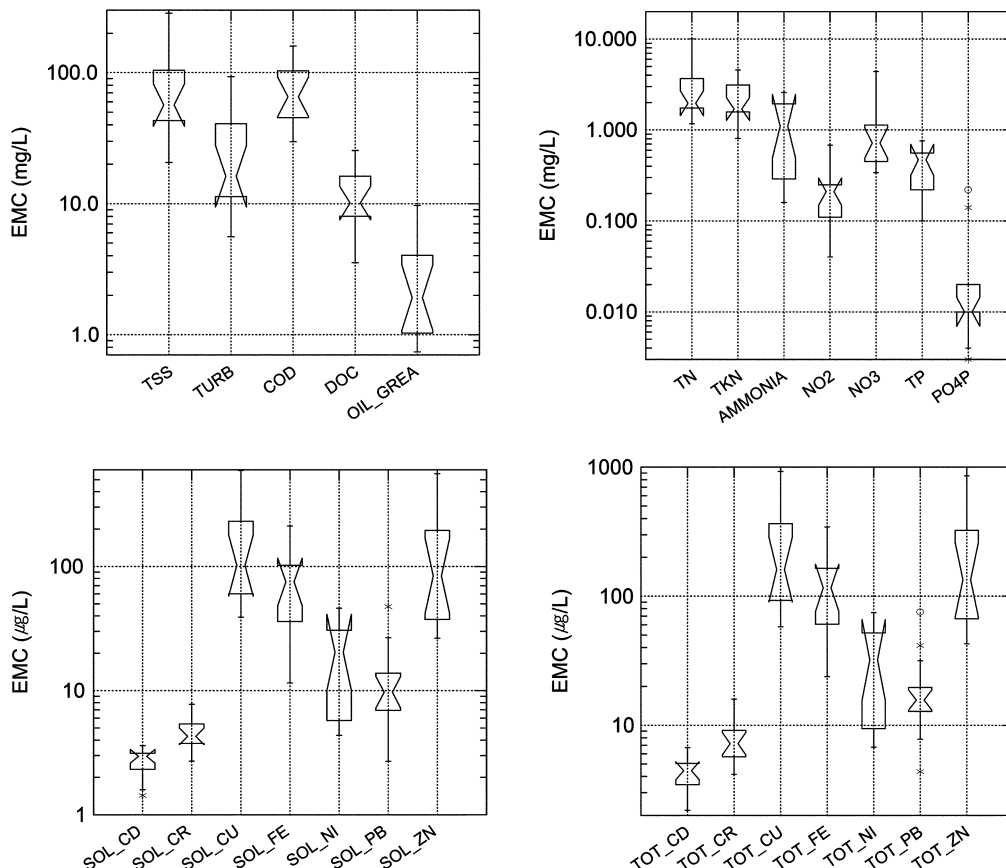


Fig. 3 Statistical summaries of EMCs

Table 3. Pollutant mass loadings per watershed area

Parameters	Min.	Max.	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	St.Dev
TSS(mg/m <sup>2</sup> )	88.27	4,693.96	1,565.56	2,418.39	712.73	1,477.07
COD(mg/m <sup>2</sup> )	203.86	3,218.13	1,231.8	1,779.57	684.10	948.65
Oil & Grease(mg/m <sup>2</sup> )	4.61	277.81	68.06	118.07	18.05	86.61
TN(mg/m <sup>2</sup> )	13.43	136.18	45.32	64.65	25.00	33.47
TP(mg/m <sup>2</sup> )	0.53	15.98	6.54	8.88	4.2	4.05
Total Cd( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.02	0.16	0.07	0.1	0.05	0.05
Total Cr( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.03	0.26	0.13	0.18	0.08	0.09
Total Cu( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.76	16.45	4.36	7.25	1.47	5.01
Total Fe( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.43	7.40	2.04	3.25	0.84	2.09
Total Ni( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.09	1.08	0.41	0.56	0.25	0.27
Total Pb( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.05	0.69	0.31	0.44	0.19	0.22
Total Zn( $\mu$ g/m <sup>2</sup> )	0.64	12.05	3.33	5.48	1.17	3.73

Table 4. Pollutant mass loadings per rainfall duration time

Parameters	Min.	Max.	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	St.Dev
TSS(mg/m <sup>2</sup> hr)	12.26	1309.13	370.92	589.58	152.25	378.73
COD(mg/m <sup>2</sup> hr)	28.31	606.32	294.81	408.55	181.06	196.0
Oil & Grease(mg/m <sup>2</sup> hr)	0.64	38.58	12.39	19.23	5.55	11.85
TN(mg/m <sup>2</sup> hr)	1.86	38.91	11.82	17.89	5.75	10.51
TP(mg/m <sup>2</sup> hr)	0.07	5.01	1.69	2.42	0.96	1.26
Total Cd( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01
Total Cr( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0	0.07	0.03	0.04	0.02	0.02
Total Cu( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0.11	3.6	1.08	1.74	0.41	1.15
Total Fe( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0.06	1.58	0.53	0.83	0.23	0.51
Total Ni( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0.02	0.53	0.12	0.2	0.04	0.14
Total Pb( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0.01	0.19	0.07	0.1	0.04	0.05
Total Zn( $\mu$ g/m <sup>2</sup> hr)	0.14	3.65	0.98	1.71	0.26	1.25

다. 영양물질인 TN과 TP는 각각 1.77-4.48 mg/L와 0.29-0.54 mg/L의 범위로 나타났다. 중금속 중에서 Total Cu는 120.08-422.10  $\mu$ g/L, Total Fe는 74.75-186.80  $\mu$ g/L, Total Zn은 94.91-403.69  $\mu$ g/L의 범위로 나타났다. 현재 국내에는 고속도로에서 적용 가능한 비점오염물질의 유출 EMC 값이 제대로 산정되어 있지 않다. 따라서 이러한 값은 향후 고속도로 비점오염물질을 저감하기 위한 시설의 설계나 설치시 중요한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 오염물질별 부하량 산정

고속도로 강우유출수에 의해 인근 수계에서의 환경적 영향을 분석하기 위해서는 부하량 산정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 모니터링을 통해 획득된 EMC를 이용하여 고속도로지역에서 유출되는 오염물질의 부하량을 면적당 오염물질 부하량과 강우지속시간당 오염물질부하량에 대해서 산출하였다.

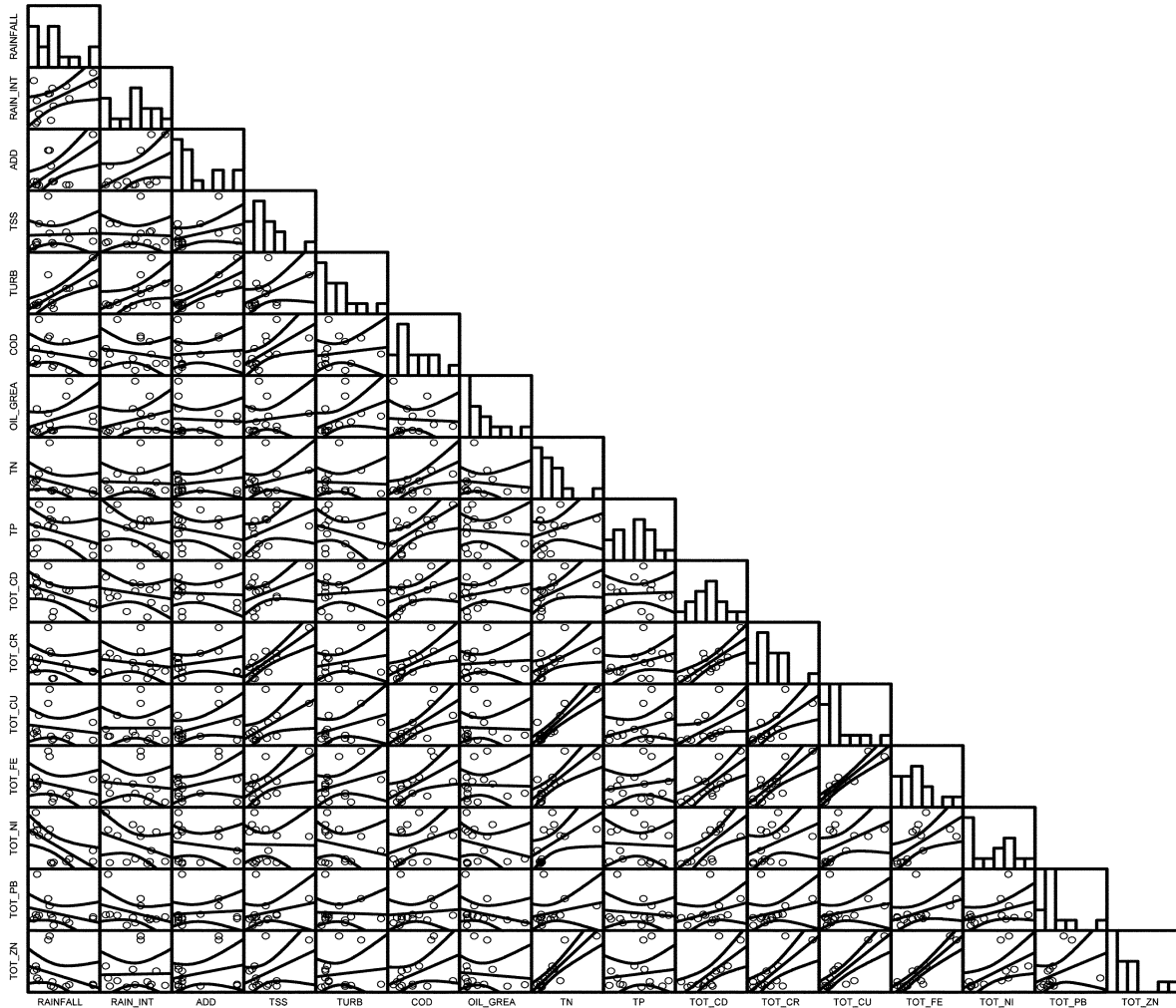
Table의 3은 유역면적에 대한 비점오염물질 유출부하량 산정 결과를 나타내고 있다. TSS의 95% 신뢰구간 범위는 712.7-2,418.4 mg/m<sup>2</sup>, COD는 684.1-1,779.6 mg/m<sup>2</sup>, 그리고

Oil & Grease는 18.1-118.1 mg/m<sup>2</sup>의 범위로 산정되었다. 영양염류인 TN의 95% 신뢰구간은 26.0-64.6 mg/m<sup>2</sup> 그리고 TP는 4.2-8.88 mg/m<sup>2</sup>의 범위로 산정되었다. 중금속의 경우, Total Cu가 1.47-7.25  $\mu$ g/m<sup>2</sup>, Total Fe가 0.84-3.25  $\mu$ g/m<sup>2</sup>, 그리고 Total Zn은 1.17-5.48  $\mu$ g/m<sup>2</sup>의 범위로 산정되었다.

강우지속시간에 대한 비점오염물질 유출부하량의 산정 결과를 Table 4에 정리하였다. TSS의 95% 신뢰구간 범위는 152.25-589.58 mg/m<sup>2</sup>hr로 산정되었으며, COD는 181.06-408.55 mg/m<sup>2</sup>hr의 범위, Oil & Grease는 5.55-19.23 mg/m<sup>2</sup>hr의 범위로 산정되었다. 영양염류인 TN은 5.75-17.89 mg/m<sup>2</sup>hr의 범위로 산정되었으며, TP는 0.96-2.42 mg/m<sup>2</sup>hr의 범위로 나타났다. 중금속은 Total Cu가 0.41-1.74 mg/m<sup>2</sup>hr, Total Fe이 0.23-0.83 mg/m<sup>2</sup>hr, Total Zn은 0.26-1.71 mg/m<sup>2</sup>hr의 범위로 산정되었다.

### 3.4 EMC 및 강우특성과의 상관성 분석

강우유출수에 의해 고속도로 비점오염물질의 유출에 영향을 끼치는 인자를 파악하기 위하여 강우특성과 유출된 오염물질과의 상관성을 분석하였으며, 그 결과가 Fig. 4에 나타나 있다.



	RAINFALL	RAIN_INT	ADD	TSS	TURB	COD	OIL_GREA	TN	TP	TOT_CD	TOT_CR	TOT_CU	TOT_FE	TOT_NI	TOT_PB	TOT_ZN
RAINFALL	1															
RAIN_INT	0.59	1														
ADD	0.67	0.48	1													
TSS	0.04	-0.1	0.38	1												
TURB	0.76	0.53	0.75	0.47	1											
COD	-0.2	-0.2	0.1	0.62	0.14	1										
OIL_GREA	0.39	0.3	-0.1	0.13	0.43	-0.1	1									
TN	-0.4	-0	0.18	0.3	-0	0.6	-0.1	1								
TP	-0.4	-0.4	-0.3	0.41	-0.3	0.63	-0.1	0.33	1							
TOT_CD	-0.4	-0.2	-0.1	0.45	0.1	0.43	0.24	0.52	0.04	1						
TOT_CR	-0.3	-0.2	0.24	0.82	0.21	0.64	0.08	0.6	0.38	0.8	1					
TOT_CU	-0.2	0	0.4	0.58	0.32	0.7	-0	0.9	0.32	0.54	0.7	1				
TOT_FE	-0.3	-0.1	0.33	0.63	0.32	0.61	-0	0.79	0.19	0.76	0.81	0.92	1			
TOT_NI	-0.6	-0.4	-0.2	-0	-0.2	0.35	-0.3	0.56	-0.1	0.71	0.4	0.47	0.63	1		
TOT_PB	-0.3	-0.4	0.09	0.26	-0	0.1	-0.3	0.25	-0.1	0.34	0.28	0.27	0.43	0.42	1	
TOT_ZN	-0.4	0.02	0.26	0.44	0.12	0.44	-0.1	0.88	0.15	0.72	0.75	0.85	0.91	0.61	0.38	1

Fig. 4 Person correlation coefficients(r) of storm variables and pollutants

우선 강우특성인자와 오염물질과의 상관성을 살펴보면, 총 강우량과 강우강도 및 선행건조일수 등의 강우특성인자와 탁도 EMC와의 상관관계(r)가 다른 수질항목보다 비교적 높은 것으로 분석되었다. 특히 TSS EMC와 탁도 EMC는 선행건조 일수인 ADD와 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. 그러나 강우사상별 강우량과 강우강도는 탁도 EMC를 제외하고는 오염물질별 EMC와 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다.

오염물질간의 상관성을 살펴보면, TSS와 COD의 경우 Ni와 Pb를 제외하고는 대부분의 중금속과 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 Oil & Grease의 경우 타 오염물질과의 상관성이 거의 없는 것으로 나타났는데, 이

는 강우 중에도 많은 차량에 의해 지속적으로 유출이 되고 있으며, 노면에 축적되어 있던 Oil & Grease가 지속적으로 강우에 의하여 용해되어 유출되기 때문인 것으로 판단된다. 중금속간의 상관관계 분석결과, Cd-Cr, Cr-Fe, Cu-Fe, Fe-Zn의 상관관계를 나타내는 r값이 0.8 이상으로 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 중금속들 중에서는 Fe가 비교적 타 오염물질들과 상관성이 높은 것으로 분석되었다.

#### 4. 결 론

포장지역 중 고속도로지역은 많은 차량의 운행과 높은 강

우 유출계수로 인하여 다량의 오염물질들이 유출되는 지역이다. 본 논문은 이러한 고속도로로부터 유출되는 비점오염물질의 EMC와 부하량을 산정함으로써 향후 비점오염물질 저감 시설 또는 인근 수계의 환경영향에 대한 후속 연구시 기초자료를 제공하기 위하여 수행한 모니터링 결과를 정리한 것이다. 경부, 영동 및 호남고속도로 5개 지점의 39개 강우사상에 대한 모니터링이 수행되었으며, 그 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 강우시 유출율과 오염물질의 유출농도를 비교해 본 결과, 강우가 지속됨에 따라 유출수의 농도는 급격한 감소를 나타내고 있는데, 이는 포장지역인 고속도로에서의 초기강우 현상이 보편적으로 발생함을 의미한다. 이러한 초기강우 현상은 EMC 산정에 있어 단순 시료 샘플의 농도가 아닌 유출유량이 고려된 유량기중 평균농도로 산정되어야 한다는 것을 의미한다.
2. 현재 국내에는 고속도로에서 적용 가능한 비점오염물질의 유출 EMC 값이 제대로 산정되어 있지 않다. 고속도로지역에서의 EMC에 대한 95%신뢰구간을 살펴보면, TSS EMC는 45.52-125.76 mg/L, COD EMC는 52.04-95.48 mg/L, TN EMC는 1.77-4.48 mg/L 그리고 TP EMC는 0.29-0.54 mg/L의 범위로 나타났다. 중금속 중에서 Total Cu EMC는 120.08-422.10  $\mu\text{g/L}$ , Total Fe EMC는 74.75-186.80  $\mu\text{g/L}$ , Total Zn EMC는 94.91-403.7  $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 나타났다. 따라서 이러한 EMC 값은 향후 고속도로 비점오염물질을 저감하기 위한 시설의 설계나 설치시 중요한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.
3. 고속도로 강우유출수에 의해 인근 수계에서의 환경적 영향을 분석하기 위해서는 부하량 산정이 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 고속도로지역에서 유출되는 오염물질의 부하량을 유역 면적을 고려하여 산정한 결과, TSS의 95% 신뢰구간 범위는 712.7-2,418.4 mg/m<sup>2</sup>, COD는 684.1-1,779.6 mg/m<sup>2</sup>, Oil & Grease는 18.1-118.1 mg/m<sup>2</sup>, TN은 26.0-64.6 mg/m<sup>2</sup>, TP는 4.2-8.88 mg/m<sup>2</sup>의 범위로 산정되었다.
4. 고속도로 비점오염물질의 유출에 영향을 끼치는 인자를 파악하기 위하여 강우특성과 유출된 오염물질과의 상관성을 분석도 시행하였다. 강우특성인자와 오염물질과의 상관성을 살펴본 결과, 총 강우량과 강우강도 및 선행건조일수 등의 강우특성인자와 탁도 EMC와의 상관관계(r)가 다른 수질항목보다 비교적 높은 것으로 분석되었다. 특히 TSS EMC와 탁도 EMC는 선행건조 일수인 ADD와 비교적 높은 상관성을 보이고 있는 것으로 나타났다.
5. 오염물질간의 상관성을 살펴본 결과, TSS와 COD의 경우 Ni과 Pb를 제외하고는 대부분의 중금속과 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 중금속간의 상관관계 분석결과, Cd-Cr, Cr-Fe, Cu-Fe, Fe-Zn의 상관관계를 나타

내는 r값이 0.8 이상으로 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었으며, 중금속들 중에서는 Fe가 비교적 타 오염물질들과 상관성이 높은 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 대전충남환경기술개발센터(연구과제 번호: 2004-0118), 한국도로공사 도로교통기술원 및 한국건설교통기술평가원(연구과제 번호: 2005-0261)의 연구과제로 수행된 연구 결과들 중에서 정리한 자료로 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김이형, 강주현(2004) 강우 시 발생하는 고속도로 유출수의 초기 우수 특성 및 기준, **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제20권 6호, pp. 641-646.
- 김이형, 이선하(2005) 주차장 및 교량강우유출수의 중금속 오염물질 특성과 동적 EMCs, **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제21권 4호, pp. 385-392.
- 환경부(2004) 관계부처합동 [물관리 종합대책]의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책.
- Barrett, M.E., Irish, Jr.L.B., Malina, Jr.J.F., and Charbeneau, R.J. (1998) Characterization of highway runoff in austin, texas, area, *J. of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 131-137.
- Becher, K.D., Schnoebelen, D.J., and Akers, K.K.B. (2000) Nutrients discharged to the mississippi river from eastern iowa watershed, 1996-1997, *J. of The American Water Resources Associa.*, Vol. 36, No. 1, pp. 161-173.
- Charbeneau, R.J., and Barrett, M.E. (1998) Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads, *J. of Water Environmental Research*, Vol. 70, No. 7, pp. 1295-1302.
- Deletic, A.B., and Mahsimovic, C.T. (1998) Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas, *J. of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 9, pp. 869-879.
- Kim, L.-H. (2003) Determination of event mean concentrations and first flush criteria in urban runoff, *Environmental Engineering Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 163-176.
- Kim, L.-H., Kayhanian, M., and Stenstrom, M.K. (2004) Event mean concentration and loading of litter from highways during storm, *Science of Total Environment*, Vol. 330, pp. 101-113.
- Sansalone, J.J., and Bushberger, S.G. (1997) Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater, *Wat. Sci. & Tec.*, Vol. 36, pp. 155-160.
- SYSTAT version 9.0 for windows, SPSS Inc.
- Ujevic, I., Odzak, N., and Baric, A. (2000) 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.*, Vol. 34, pp. 3055-3061.
- U.S. EPA (1994) Nonpoint sources pollution control program, *U.S. EPA*, Report 841-F94-005, USA.

(접수일:2005.10.17/심사일:2005.11.21/심사완료일:2006.1.5)