

동적 EMC를 이용한 고속도로 초기우수 처리 기준 산정

김이형[†] · 이은주 · 고석오^{*} · 김성길 · 이병식 · 이주광^{**} · 강희만^{**}

공주대학교 건설환경공학부

^{*}경희대학교 토목공학과

^{**}한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹

Determination of First Flush Criteria in Highway Stormwater Runoff using Dynamic EMCs

Lee-Hyung Kim[†] · Eun-Ju Lee · Seok-Oh Ko^{*} · Sung-Gil Kim · Byung-Sik Lee · Joo-Kwang Lee^{**} · Hee-Man Kang^{**}

Dept. of Civil & Environ. Engineering, Kongju National University

^{}Dept. of Civil & Environ. Engineering, Kyunghee University*

*^{**}Environ. & Material Res. Lab., Highway & Transportation Technology Institute*

(Received 19 October 2005, Accepted 25 November 2005)

Abstract

The Ministry of Environment in Korea has introduced Total Pollution Load Management System (TPLMS) in major 4 large rivers to protect the water quality from possible pollutants. In order to successfully achieve the TPLMS, the nonpoint source should be controlled by applying the best management practices in highly polluted areas. Of the various nonpoint sources, the highways are stormwater intensive landuses because of its high imperviousness and high pollutant mass emissions. The EMC (Event Mean Concentration) is an important parameter to correctly determine the pollutant mass loadings from nonpoint sources. However, it has wide ranges because of various reasons such as first flush phenomenon, rainfall and watershed characteristics. Even though the EMC is closely related to the first flush phenomenon, the relationship have not proven until present. Therefore, in this paper, the dynamic EMC method will be introduced to clearly make the relationship between EMC and first flush phenomenon. Also by applying the dynamic EMC method to monitored data, we found that the highly concentrated stormwater runoff was washed off within 20~50 minutes storm duration. The first flush criteria for economical treatment was also determined to 5~10 mm (mean=7.4 mm) as a cumulative rainfall.

keywords : Dynamic event mean concentration, First flush criteria, Highways, Runoff

1. 서 론

오염총량관리제는 산업의 발달과 토지이용의 고도화로 인해 기존의 농도규제로는 하천의 수질개선이 어렵다는 판단 하에 유역으로부터 하천수계로 유입되는 오염물질의 총량을 규제한다는 목적으로 최근 도입되었다. 국내 4대강의 비점오염원의 오염부하량 기여율은 BOD 기준으로 22~40%를 차지하고 있으나, 환경기초시설확대로 인하여 점오염원에 의한 오염기여율은 감소하고 있는 추세이지만 비점오염원에 의한 기여율은 점차 증가하고 있다(환경부, 2004). 따라서 비점오염원관리의 중요성은 지속적으로 커지고 있으나, 비점오염물질의 유출은 강우 및 유역특성에 영향을 받기 때문에 특유의 불확실성에 의해 관리가 쉽지 않다(Chiew et al., 1999; Deletic et al., 1998). 특히 비점오염원 부하량의 정확한 산정을 위해서는 토지이용별 모니터링을

통한 기초자료의 확보가 매우 중요하나 현재 국내의 상황은 이러한 자료의 부족으로 인해 수계로 유입되는 비점오염물질 부하량 산정에 어려움을 겪고 있다. 이러한 영향은 향후 수계를 전체 부하량으로 관리하는 오염총량관리제의 성공에 큰 부담을 줄 것으로 예측된다(Barrett et al., 1998; Becher et al., 2000; Kim et al., 2005a, 2005b).

앞에서도 언급하였듯이, 비점오염물질은 다양한 토지이용에서 발생되어 축적되어 있다가 발생하는 강우에 의해서 집중적으로 유출되는 특징 때문에 관리에 어려움이 많다. 특히 포장율이 높고 많은 차량의 운행으로 인하여 오염물질의 축적이 높은 고속도로, 도로 및 도시지역의 경우에는 비점오염원 관리를 위한 처리시설 설치가 가능한 면적의 제한으로 인하여 최적 관리방안 수립이 절실히 요구되는 토지이용이다(Bertrand-Krajewski et al., 1998; Charbeneau et al., 1998; Kim et al., 2005b). 또한 포장지역은 인간의 활동영역인 수계 인근에 대부분 분포하고 있기에 오염물질 발생시 하천수질에 직접적인 영향을 끼치는 지역이다. 따라서 미국을 비롯하여 국내의 경우에서도 이러한 포장지역의

[†] To whom correspondence should be addressed.
leehyung@kongju.ac.kr

특성에 기인하여 다양한 비점오염원 중에서 포장지역의 비점오염물질 관리에 관심이 매우 크다(환경부, 2004; U.S. EPA, 1994).

고속도로 등의 포장지역에서 유출되는 비점오염물질의 가장 큰 특징은 초기강우 현상이다. 초기강우 현상이란 강우가 발생하고 유출이 시작된 이후 일정기간 동안 고농도로 오염물질의 유출이 일어나는 현상을 의미한다. 포장지역의 경우 이러한 초기강우가 끝나고 난 이후에는 유출수내 오염물질의 농도는 급격하게 감소하는 경향을 보인다(Bertrand-Krajewski et al., 1998; Wu et al., 1998). 이러한 초기강우 현상은 향후 포장지역에서 유출되는 비점오염물질의 최적관리방안 선정시 중요한 설계인자로 사용된다. 그러나 기초자료의 부족 및 초기강우에 대한 연구의 부족은 경제적 처리용량 산정에 큰 어려움을 주고 있다(Kim et al., 2005a, 2005b).

따라서 본 연구에서는 초기강우 기준을 산정하기 위하여 새로운 접근법을 연구하여 그 결과를 보여주고자 한다. 이러한 새로운 초기강우 기준 산정을 위한 접근법을 설명하기에 앞서 비점오염물질 부하량 산정을 위해 필수적으로 연구되는 EMC(Event Mean Concentration)에 관하여 그 개념을 정립할 필요가 있다. 비점오염물질의 유출원단위인 EMC는 강우사상에 따른 평균농도를 의미하며, 유량을 고려하여 산정된다. 이는 농도가 거의 일정하게 유출되는 점오염원에서의 평균농도와는 의미가 매우 다르다. 즉, 단순히 채취된 수질시료의 평균 농도를 평균하여 EMC를 산정하는 것은 최근 연구결과에 의하면 수배에서 수 십배까지의 부하량 차이를 가져올 수 있기에 부하량 산정에 큰 오류를 범할 수 있다. 따라서 바람직한 EMC 산정을 위해서는 모니터링 프로그램의 계획이 매우 중요하며, 그 중에서도 가장 중요한 항목은 유량 측정 계획이다. 많은 연구자(Irish et al., 1998; Kim et al., 2005a, 2005b; Wu et al., 1998)들에 의하면, 유량 측정의 경우 최소의 시간단위로 측정하는 것이 바람직하다. 이렇게 산정된 EMC는 부하량 산정에도 이용되지만, 초기강우 현상을 대변할 수 있어야만 향후 초기강우 기준 설정시 사용될 수 있다. 그러나 현재까지 EMC는 부하량 산정에는 효과적이지만 초기강우현상

을 설명하는데 한계가 있다는 것이 대체적인 논리였다(김 등, 2005). 따라서 본 연구에서는 동적 EMC 개념을 도입하여 EMC와 초기강우현상과의 관계를 규명함과 동시에 초기강우 기준을 산정하고자 한다.

2. 연구 대상지역 및 방법

2.1. 모니터링계획

본 연구는 다양한 토지이용 중에서 고속도로에서의 비점오염원 유출특성을 파악하기 위하여 수행되었다. 수행된 유량 모니터링 프로그램은 비점오염원의 불확실성을 최대한으로 줄이기 위하여 강우량 및 유출량을 1분단위로 하여 측정하였다. 유량 및 강우량 측정은 고속도로 현장에 자동 유량측정기(Automatic Flow Meter, Sigma 950)와 자동 강우계(Automatic Rainfall Gauge)를 현장에 설치하여 1분 단위로 강우가 시작과 함께 유출이 끝나는 시점까지 측정하였다. 수질측정은 강우유출수의 초기강우현상을 파악하고자 초기 한 시간동안은 집중적으로 시료채취를 시행하였는데, 시료채취는 강우 시작 후 유출이 발생하는 즉시 첫 번째 시료로 하여 초기에는 5분 간격으로, 15분 후에는 15분 간격으로, 30분 후에는 30분 간격으로 채취하였으며, 초기강우가 거의 끝나는 시점인 1시간 후에는 유출이 끝날 때까지 1시간 간격으로 하여 수질 시료채취를 수행하였다. 모니터링 지점으로는 경부고속도로, 영동고속도로 및 호남고속도로상의 5개 지점을 선정하였으며, 그 위치가 Fig. 1에 나타나 있다. 선정된 지점은 국내 고속도로를 대표하는 도로로 년중 차량 운행이 높은 지역이기에 오염도가 타 고속도로에 비하여 높은 지역이다. 5개 지점은 모두 아스팔트로 포장되어 있으며, 불투수율이 100%로 산정되었다. 자세한 집수면적은 다음과 같다(김 등, 2006): Site 1(1,170 m²), Site 2(936 m²), Site 3(1,950 m²), Site 4(1,570 m²), Site 5(859 m²).

2.2. 동적 EMC

강우유출수의 EMC는 모니터링 계획에 따라 수집된 자료를 이용하여 1분당 유량과 오염물질의 농도를 고려한 평균

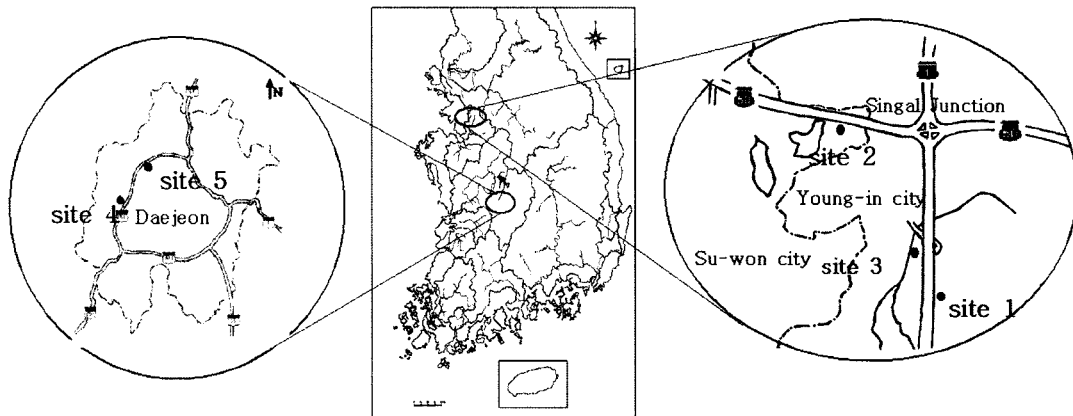


Fig. 1. Monitoring locations.

농도로 식 (1)에 의해서 산정이 가능하다. 식의 아래 부분은 Automatic flow meter로 측정된 총 유량이며, 위 부분은 1분당 유량과 오염물질의 농도에 따른 총 오염물질 양을 나타낸다. 이러한 EMC 값은 대상지역으로부터 유출되는 비점오염물질의 부하량 산정에 긴요하게 사용된다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} C(t) \cdot q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^{t=T} q_{run}(t)} \quad (1)$$

여기서 $q_{run}(t)$ 와 $C(t)$ 는 t 시간에서의 유출율과 오염물질의 유출 농도를 나타내고 있다.

그러나 향후 비점오염물질의 경제적 적정 처리 기준을 산정하기 위해서는 식 (1)의 EMC가 의미가 없는데, 그 원인은 초기강우 현상 때문이다. 따라서 초기강우 기준을 적정하게 산정하기 위해서는 새로운 접근 방식이 필요하다. 식 (2)는 초기강우 현상과 EMC의 상관성을 규명하기 위하여 본 연구진에 의하여 처음으로 제안되는 동적 EMC의 식을 나타내고 있다. 동적 EMC는 t 시간의 강우지속시간 동안 유출된 오염물질의 EMC로 초기강우 현상이 발생되는 토지이용에서 지속적으로 동적 EMC가 감소하는 경향을 나타낸다. 즉 EMC는 전체 강우지속시간에 따른 유출오염물질의 평균농도이지만, 동적 EMC는 강우지속시간에 따라 EMC가 지속적으로 변한다는 개념이다.

$$Dynamic \ EMC(mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^{t=t} C(t) \cdot q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^{t=t} q_{run}(t)} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

유량 및 수질측정이 수행된 5개 고속도로 지점은 국내에서도 차량 운행이 가장 높은 지역에 포함되며, 모니터링 결과 유출되는 오염물질의 농도 및 유출 경향은 매우 유사한 결과를 보였다. 따라서 본 논문에서는 대표적인 오염물

질의 값을 도출하기 위하여 지점별 구분 없이 통계학적 결과를 보이고자 한다.

3.1. 모니터링 결과

수행된 모니터링에 대한 기본 자료는 현재 물환경학회지에 기 투고되어 심사 중으로 본 논문에서는 나타내지 않기로 한다(김 등, 2006; 이 등, 2006). 모니터링 결과를 간략히 요약하면, 강우 전 건조일수(antecedent dry days, ADD)는 2~18일, 전체 강우량(total rainfall)은 6.9~50.5 mm, 강우 지속시간(runoff duration)은 1.0~8.3 시간, 평균 강우강도(average rainfall intensity)는 1~13 mm/hr, 그리고 유출계수(runoff coefficient)는 0.58~0.90의 범위로 나타났다.

Fig. 2는 모니터링 지점에서 채취된 시료의 걸보기 농도와 이를 수리수문 및 수질농도곡선으로 나타낸 것이다. 포장된 지역의 강우유출수에서 볼 수 있는 초기강우현상은 수리수문곡선과 수질농도곡선의 시간에 따른 변화곡선으로 확인할 수 있으나 시료의 걸보기 농도변화를 통해서 쉽게 확인할 수 있다.

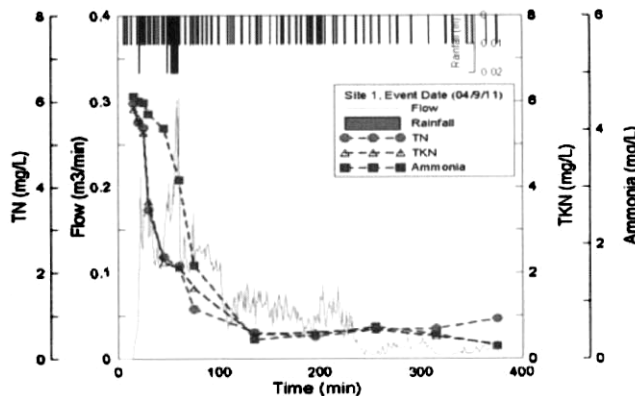
3.2. First Flush 경향 및 기준

Fig. 3은 강우유출수율에 따른 유출 오염물질의 변화를 통계학적으로 일반화시킨 결과이다. 전체유출량의 10%에 해당하는 유출량에 대하여 TSS의 경우, 평균 26%정도가 유출되는 경향을 나타내었으며, COD의 경우 31%, Cu의 경우 24%가 유출되는 것으로 분석되었다. 또한 전체 강우유출량의 30% 정도에 해당하는 유출이 발생할 때까지 유출오염물질의 유출이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 이후 유출량에 대해서 감소되는 정도가 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 향후 고속도로 오염물질 처리 기준 산정시 중요하게 사용될 수 있는 비점오염물질의 특성이다.

Fig. 4는 site 1지점의 강우 유출수 내 COD와 Cu에 대하여, 강우 유출수 표준 누적 부피에 대한 표준 누적 유출오염물질 농도의 상관성을 나타낸 것이다. 본 그림은 모니터링을 통하여 실측된 유출유량과 농도를 이용하여 전체 유출된 오염물질의 양을 산정하여 그 결과를 누적 유량비와 비교한 것이다. 이 방법은 비점오염원관리에 관한 최적



Fig. 2. Polluto/hydro-graphs and appearance concentrations.



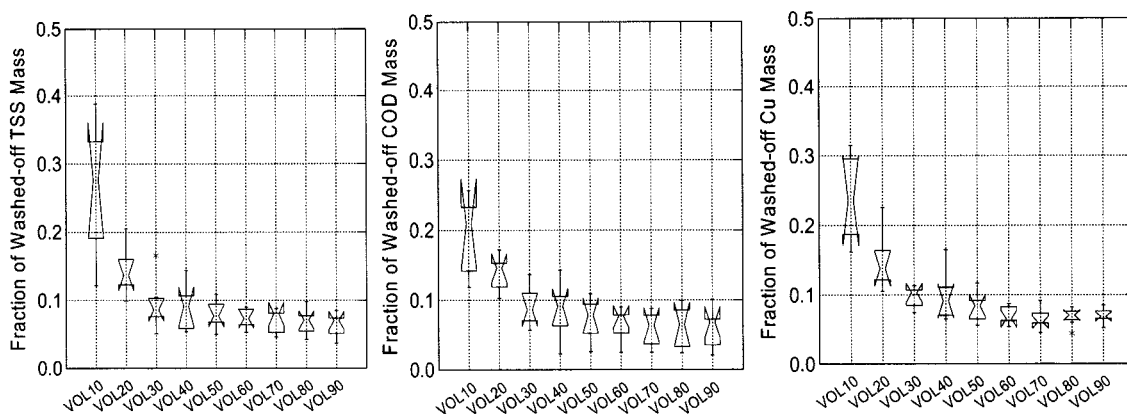


Fig. 3. Statistical analysis for first flush determination.

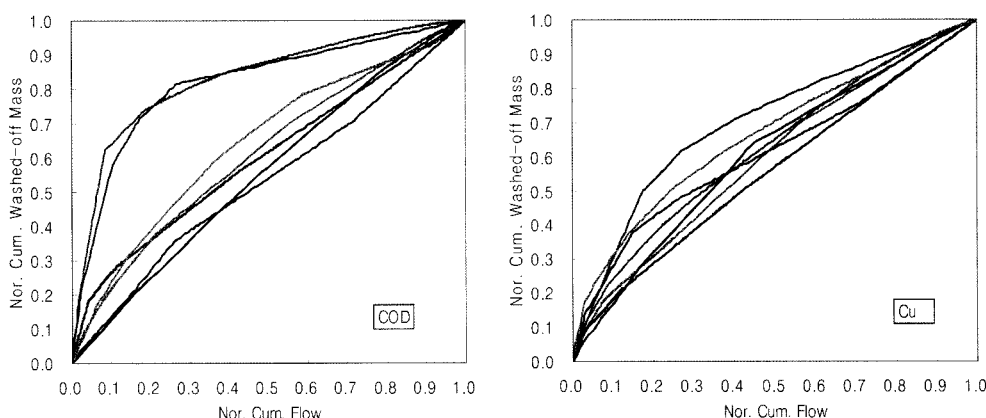


Fig. 4. Normalized cumulative flow and washed-off pollutant mass.

관리방안 수립시 오염물질들의 적정 처리용량 산정 및 처리효율 예측을 위하여 국제적으로 많이 이용되는 해석 방법이다. 분석결과, 대부분 직선의 기울기가 45도 보다 큰 것으로 나타나 초기강우현상을 뚜렷이 확인할 수 있다. 모든 모니터링 지점에 대하여 이러한 방법을 적용하여 분석한 결과, 유출이 시작된 이후 초기 30% 강우 유출이 발생할 때 35~80%까지의 비점오염물질이 유출되는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 이용하여 실측 강우량과 비교 검토해 본 결과 처리대상 강우량의 범위로는 6~12 mm의 범위로 분석되었다.

3.3. 동적 EMC를 이용한 초기강우 기준산정

초기강우 현상은 앞서 언급하였듯이 향후 비점오염물질 처리기준 산정시에 경제적 용량 산정을 위해 중요하게 고려되어야 할 부분이다. 식 (2)에서 도입한 동적 EMC는 EMC와 초기강우와의 관계를 규명하는 것으로 초기강우 현상을 설명하기 위해 새롭게 도입되고 개념이다. Fig. 5는 모니터링 지점에서 수행된 결과에 대하여 동적 EMC 적용의 예를 보여주고 있다. 강우유출이 시작된 이후 EMC는 20분까지 또는 50분까지 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러다가 강우가 끝나고 유출이 끝나는 시간에 동적 EMC는 강우사상에 대한 대표 EMC로 끝나는 결과를 보인다. 이러한 특징은 전형적인 초기강우 현상을 대변하며 경

제적인 오염물질 처리용량 산정시 중요한 고려대상이다.

Fig. 6은 초기강우 기준을 산정하기 위하여 동적 EMC를 모니터링에 적용한 결과를 통계학적으로 분석한 것이다. 전체 35개의 강우 사상에 대하여 동적 EMC를 적용하였으며, 그 결과 누적강우량 기준으로 초기강우 기준은 95% 신뢰구간으로 6.8~7.9 mm(mean=7.4 mm)로 산정이 되었다. 또한 강우지속시간 기준으로는 95% 신뢰구간에서 30~36분(mean=33분)으로 산정되었다. 본 초기강우 기준은 향후 고속도로에서 비점오염원 저감방안 수립시 경제적 처리용량 산정에 긴요하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

포장지역에서 유출되는 강우유출수의 적정 처리를 위한 초기강우 기준 산정은 국내 비점오염원의 연구에서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 새로운 개념인 동적 EMC를 모니터링 결과에 적용하여 초기강우 기준을 산정하고자 하였다. 또한 본 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강우 초기에 고농도의 비점오염물질이 유출되는 초기강우현상은 강우 유출수의 결빙기 농도변화와 수리수문 및 수질농도 곡선에서 뚜렷하게 확인되었다.
- 2) 기존의 표준 유량곡선 및 표준 부하량 연구결과, 전체 강우 유출량에 대한 초기 30%에 해당하는 양을 처리함

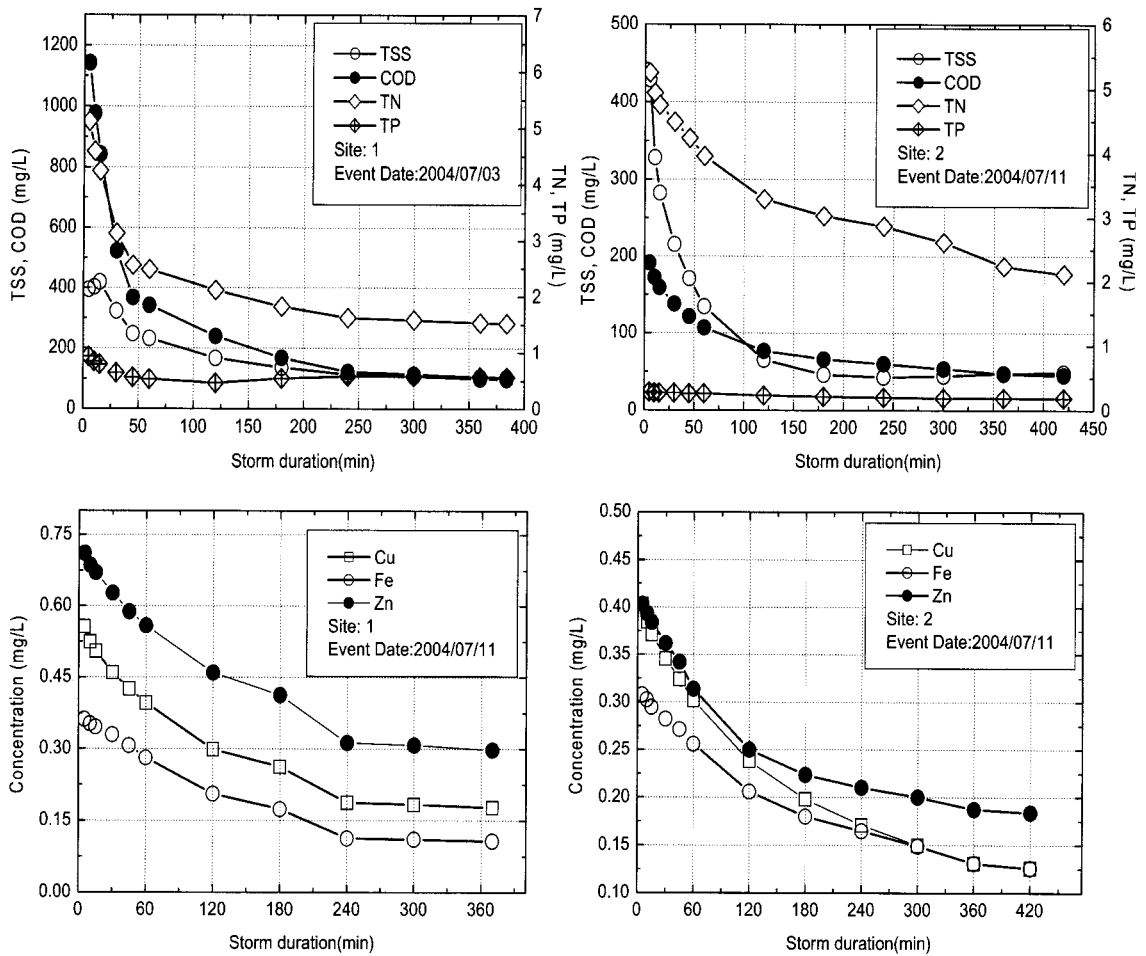


Fig. 5. Dynamic EMCs.

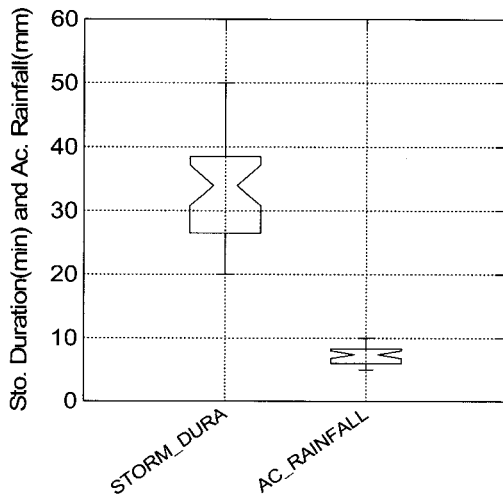


Fig. 6. First flush criteria in highway stormwater runoff.

Parameters	Storm duration (min)	Accumulated Rainfall (mm)
N of cases	35	35
Min.	20	5
Max.	50	10
Median	34	7.4
Mean	33.6	7.36
95% CI Upper	36.36	7.89
95% CI Lower	30.84	6.83
Standard Dev	8.04	1.56

- 으로써 전체 유출 가능 오염물질의 35~80%가 저감되는 것으로 나타났다.
- 3) 동적 EMC를 모니터링에 적용한 결과, 강우 초기 20~50분 이내에 급격한 EMC 감소를 보이는 것으로 나타났다.
 - 4) 5개 지점의 전체 35개의 강우 사상에 대하여 초기강우 기준을 산정한 결과, 누적강우량 기준으로 평균 7.4 mm로 산정이 되었으며, 강우지속시간 기준으로는 평균 33

분으로 산정되었다. 이러한 초기강우 기준은 향후 고속도로에서 비점오염원 저감방안 설계시 중요한 용량 산정 기준으로 적용이 가능하다. 그러나 이러한 초기강우 기준은 지역의 제한된 사항이기에 전국적으로 더욱 더 많은 모니터링을 수행하여 그 기준을 정확하게 만들어 가야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국건설교통기술평가원(과제번호: 2005-0262) 및 한국도로공사 도로교통기술원의 연구과제로 수행된 결과 중에서 그 결과를 정리한 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

김이형, 이신하, 주차장 및 교량지역의 강우유출수내 비점 오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs, *한국불환경학회지*, **21**(3), pp. 248-255 (2005).

김이형, 이은주, 고석오, 강희만, 아스팔트 포장 고속도로에서의 강우지속 시간별 오염물질 유출 경향, *한국도로학회 논문집*, **8**(1), pp. 79-89 (2006).

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

환경부, 관계부처합동[물관리 종합대책]의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책 (2004).

Barrett, M. E., Irish, Jr. L. B., Malina, Jr. J. F. and Charbeneau, R. J., Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area, *J. of Environmental Engineering*, **124**(2), pp. 131-137 (1998).

Becher, K. D., Schnoebelen, D. J. and Akers, K. K. B., Nutrients Discharged to the Mississippi River from Eastern Iowa Watershed, 1996-1997, *J. of The American Water Resources Assoc.*, **36**(1), pp. 161-173 (2000).

Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G. and Saget, A., Distribution of Pollutant Mass vs Volume in Stormwater Discharges and the First Flush Phenomenon, *Wat. Res.*, **32**(8), pp.

2341-2356 (1998).

Charbeneau, R. J. and Barrett, M. E., Evaluation of Methods for Estimating Stormwater Pollutant Loads, *J. of Water Environmental Research*, **70**(7), pp. 1295-1302 (1998).

Chiew, F. H. S. and McMahon, T. A., Modeling Runoff and Diffuse Pollution Loads in Urban Areas, *Wat. Sci. & Tech.*, **39**(12), pp. 241-248 (1999).

Deletic, A. B. and Mahsimivic, C. T., Evaluation of Water Quality Factors in Storm Runoff from Paved Areas, *J. of Environmental Engineering*, **124**(9), pp. 869-879 (1998).

Irish, Jr. L. B., Barrett, M. E., Malina, Jr. J. F. and Charbeneau, R. J., Use of Regression Models for Analyzing Highway Storm-water Loads, *J. of Environmental Engineering*, **124**(10), pp. 987-993 (1998).

Kim, L.-H., Determination of Event Mean Concentrations and First Flush Criteria in Urban Runoff, *Environmental Engineering Research*, **8**(4), pp. 163-176 (2003).

Kim, L.-H., Kim, K.-B., Lim, K.-H., Kang, H.-M., Lim, J.-H. and Ko, S.-O., Dynamic EMCs and First Flush Criteria in Highway Storm Runoff in Korea, *The 9th IWA Specialized Conference on Diffuse pollution*, Johannesburg, South Africa (2005a).

Kim, L.-H., Kim, K.-B., Lim, K.-H. and Ko, S.-O., Characteristics of Washed-off Pollutants and Dynamic EMCs in a Parking Lot and a Bridge during Storm, *10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark (2005b).

U.S. EPA, *Nonpoint sources pollution control program*, U.S. EPA, Report 841-F-94-005, USA (1994).

Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, W. L. and Evett, J. B., Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff, *J. of Environmental Engineering*, **124**(7), pp. 584-592 (1998).