

강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기우수 특성 및 기준

김이형[†] · 강주현^{*}

국립공주대학교 건설환경공학부 방재연구센터

^{*}Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, CA 90055, USA

Characteristics of First Flush in Highway Storm Runoff

Lee-Hyung Kim[†] · Joohyon Kang^{*}

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Disaster Prevention Research Center, Kongju National University

^{*}Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, CA 90055, USA

(Received 12 July 2004, Accepted 12 October 2004)

Abstract : Vehicle emissions from highway landuse include different pollutants such as heavy metals, oil and grease and particulates from fuels, brake pad wear and tire wear. Since highways are impervious and have high pollutant mass emissions from vehicular activity, it is considered as stormwater intensive landuses. Therefore this research was performed to understand the magnitude of first flush and to suggest the criteria of first flush for storm runoff management in highways. The fractions of washed-off mass are very high in first 30% of runoff volume, which suggests a definition of first flush. The washed-off mass stabilizes after 30% of the runoff volume and it is apparent that treatment capacity in the early part of a storm is more valuable than treatment capacity in the later part of the storm. Using the criteria of "high" first flush and "medium" first flush, as 50% of the mass in the first 30% of the volume, and 30 to 50% in the first 30% volume, respectively, more than 30% of the storms showed high first flush. A "first flush friendly" best management practice(BMP), meaning a BMP that can treat a high percentage or all of the initial flow, would be advantageous up to 80% of the events.

keywords : Best management practices, First flush, Highway, Los Angeles

1. 서론

도시지역의 도로 및 고속도로는 많은 차량의 운행으로 인하여 입자상 오염물질, 중금속 및 oil & grease 등의 함량이 매우 높다. 이러한 비점오염물질들은 강우시 집중 유출되어 인근 수계로 유입되어 단기간 또는 장기간 체류하며 수질오염을 야기 시키고 있다. 고속도로의 경우 여타 토지이용에 비해서 매우 높은 오염물질의 축적과 유출이 발견되기에 중요한 비점오염원 관리대상이다(Kim et al, 2003).

불투수율이 높은 고속도로는 강우시 유출계수가 크므로 많은 양의 강우 유출수가 인근 수계로 유출되고 있다. 강우 초기에는 매우 높은 농도의 유출수가 발생되며 시간이 지남에 따라 그 농도가 감소하는 경향이 있다. 이러한 현상은 포장율이 높은 고속도로에서는 일반적으로 일어난다. 이 현상을 초기강우라고 불리며 경제적인 비점 오염원 관리방안 수립 시 중요한 현상이다. 일반적으로 초기강우의 정의는 강우 초기에 높은 농도의 부유물질이 강우초기에 관측되는 것과 관계가 있다. 초기강우(First Flush)는 다양한 원인에 의해서 영향을 받아 발생을 하는데 다음과 같

다: 최고 강우강도와 강우지속시간 등과 같은 강우특성, 강우 전 건조일수, 유역 경사, 유역면적과 같은 유출상태(큰 유역 면적을 가진 경우에는 유출 도달시간 때문에 초기강우가 발생하지 않을 수도 있다) 등.

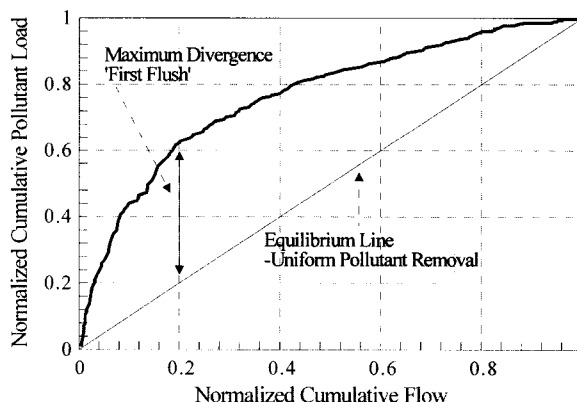


Fig. 1. Definition of first flush and relationship between normalized cumulative flow and pollutant load.

초기강우 기준은 오염물질을 처리하고자 하는 최적관리방안 선정 시 중요한 인자이며 문헌상에서는 다음과 같이 그 기준들이 나타난다. Thornton and Saul (1987)은 초기강우를 강우 이벤트에서 강우 초기에 유역을 흐르는 고농도

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

초기유출수라는 단순한 의미만을 부여했다. Geiger (1987)는 Fig. 1에 보인 바와 같이 표준 누적 부피곡선과 표준 누적 오염물질곡선을 그려서 초기부분의 경향이 45% 이상 선을 넘어갔을 때 그 중에서 45% 선과 최대로 벌어진 부분을 나타내는 시간까지를 초기강우로 지칭하였다. 1994년에 Vorreiter와 Hickey는 강우 유출수 중에서 초기 25%에 해당하는 부분에 오염물질 부하량이 높다는 것에 착안하여 이 기준까지를 초기강우 현상이라고 명명하였다. Bertrand - Krajewski et al. (1998)은 Mass First Flush(MFF) 명칭을 사용하였는데, 이는 합리법(rational method)이 표준 오염물질 부하량 곡선과 상관관계에 있다는 의미에서 출발하여 다중회귀모형 정의하였다. Deletic과 Mahsimivic (1998)은 다중회귀모형(multiple regression model)을 포함하는 표준 통계학적 방법을 사용하여 초기강우 정의에 접근하였으며, 유출수의 양적인 면을 고려하여 초기 20%의 강우 유출수에 포함되어 이동되는 오염물질의 양을 초기강우라고 정의하였다. Saget et al. (1995)과 Bertrand-Krajewski et al. (1998)은 전체 강우 유출수중 30%의 유출수가 흘러나갈 때 최소한 전체 오염물질 부하량 중에서 80% 이상의 오염물질이 유출된다고 하였으며 여기까지를 초기강우 기준으로 제안하였다. 하지만 Sansalone와 Buchberger (1997)는 초기강우에 대해 어떠한 제한적인 기준을 줄 필요가 없으며 표준 누적 오염물질 부하량 곡선이 표준 누적 유출수 곡선을 초과할시 이를 초기강우라고 단순히 단정하였다.

Ma et al. (2002)도 그의 논문에서 MFF를 결정하기 위해서 지속되는 기준(continuous criteria)과 새로운 명명을 제안하였는데, 그것이 MFFn 비이다. 여기서 n은 %단위의 유출수 부피를 표시하며, 비의 값은 전체 유출수 중의 n% 유출이 발생했을 때 유출된 오염물질의 양이다. 예를 들어, MMF10과 MMF30이 2.5와 1.5라면, 이것은 25%의 오염물질이 유출수의 초기 10%에 유출되었다는 것을 의미하며 45%의 오염물질이 초기 30% 유출수가 유출될 시 이동되었다는 것을 의미한다. 그는 이러한 정의를 제안하기 위해서 52개의 강우 사상을 조사하였으며 30개의 수질항목에

적용시켜, 최종적으로 MFF20의 범위는 2.5에서 1.0이라고 결론지었다.

2. 대상지역 및 실험 방법

본 연구는 고속도로 강우 유출수에 의한 수계의 오염을 방지하기 위하여 California 교통국의 초기강우 특성 연구(First Flush Characterization Study, FFCS) 일환으로 수행되었으며, 그 결과는 California 내의 고속도로에서 유출되는 비점오염물질 방지 및 저감 처리대책의 선택 및 기술 개발에 이용하기 위해서다. 연구지역은 Fig. 2와 같이 Southern California 지역의 Los Angeles시를 통과하는 고속도로에 8군데의 모니터링 지점을 선정하여 연구를 실시하였다.

모니터링은 강우량, 유출유량 측정 및 수질분석으로 구성되어 있으며 1999-2002년 기간동안 수행되어졌다. 강우량 및 유출수율은 자동 강우량계(automatic rainfall gage)와 자동 유량계(automatic flow meter)를 이용하여 1분 단위로 자동 측정하여 유출계수 및 유출량을 산정하였다. 수질채취는 임의채취(grab sampling)와 유량가중 종합채취(flow-weighted composite sampling)로 구성되어졌는데 임의채취는 초기강우 영향을 조사하기 위하여 수행되어졌으며 종합채취는 강우 사상별 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하기 위하여 수행되어졌다. 자세한 대상지역의 현황 및 실험방법은 “고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMCs 및 부하량 원단위 산정” 논문에 정리되어 있다 (김 등 2004).

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우량 및 유출계수 산정

Los Angeles 지역은 겨울철이 주로 우기기간이며 대부분의 강우가 이 기간에 집중된다. 따라서 4월에서 10월 사이

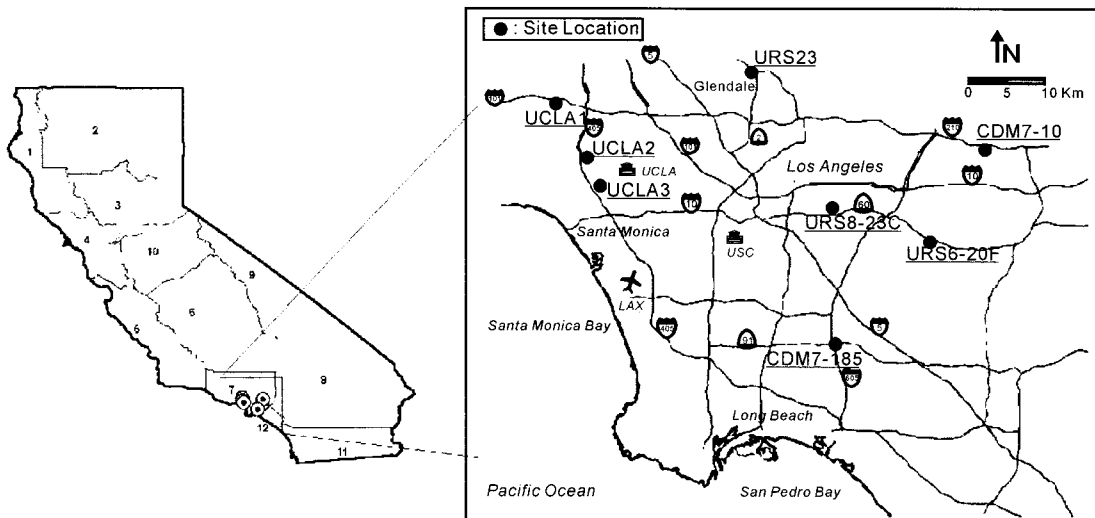


Fig. 2. Monitoring locations in Southern California.

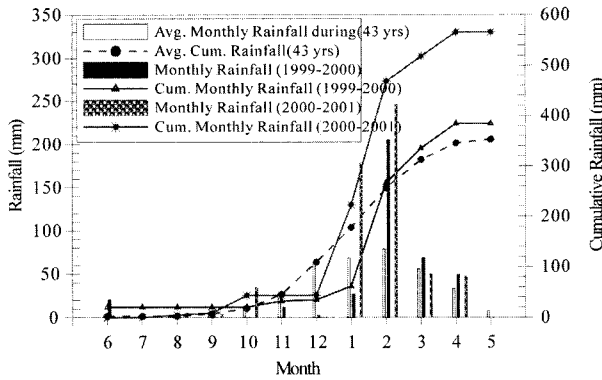


Fig. 3. Average monthly and cumulative precipitation in research area.

에는 강우가 거의 발생하지 않는 지중해성 기후를 나타내고 있다. 이러한 영향으로 인하여 가을에 처음 발생하는 강우 유출수는 오랜 기간의 건조기간으로 인하여 오염물질의 함량이 매우 높은 경향을 보인다. 이것을 “seasonal first flush”라고 지칭한다.

측정된 강우량 결과와 대상지역의 43년간 평균 강우량 및 연중 강우량 자료가 Fig. 3에 나타나 있다. 43년 평균 강우량은 약 350mm 정도를 보이나 90% 이상의 강우가 2개월 사이에 집중되는 경향을 보인다.

식 (1)로 산정한 고속도로에서의 강우 유출계수가 Fig. 4에 나타나 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Runoff coefficient}(RC) &= \frac{\text{Event runoff volume}}{\text{Event rainfall volume}} \quad (1) \\
 &= \frac{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TR}(t) dt}
 \end{aligned}$$

여기서, $Q_{TR}(t)$ 는 모니터링을 통하여 측정되어진 시간에 따른 강우량의 부피를 의미하며, $Q_{TRu}(t)$ 는 유역에서 유출되는 강우 유출수율을 나타내고 있다.

유출계수는 0.35에서 0.95까지의 넓은 범위를 보이고 있으며 모니터링 기간 중 평균 유출계수는 0.87로 산정되어

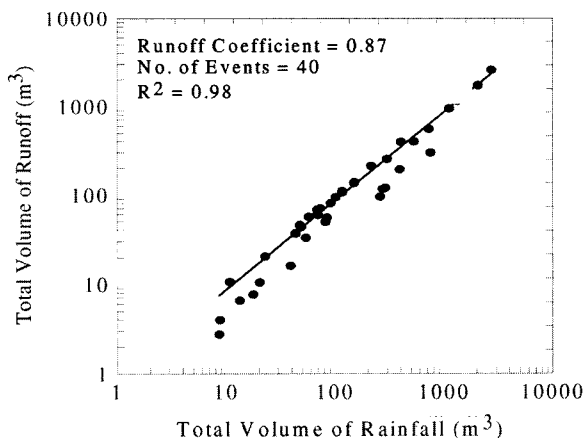


Fig. 4. Runoff coefficients.

졌다. 일반적으로 유출계수는 강우강도, 강우 전 건조일수, 강우지속시간 및 유역면적 등에 크게 영향을 받는다. 그 중에서도 발생한 강우량이 유출계수에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 큰 강우이벤트에서 큰 유출계수를, 작은 강우에서 작은 유출계수 값을 나타내었다. 매우 작은 강우량을 보이는 이벤트일 경우에는 증발, 토양저류, 침투가 활발히 발생하여 유출계수 값이 상당히 떨어지는 경향을 보인다.

3.2 고속도로 강우 유출수에 나타나는 초기강우 경향

모니터링을 통해 얻어진 고속도로 강우량, 강우 유출률 및 유출오염물질의 농도는 강우시간 및 유출시간에 따른 함수로 나타내어질 수 있다. 이러한 결과를 수문곡선(hydrograph) 및 오염물질 유출곡선(polluto-graph)이라고 하는데, 오염물질의 유출특성이 수리수문학적 조건과 매우 밀접한 관계가 있는 비점오염원 연구에서는 중요한 결과물이다.

Fig. 5와 6은 다른 형태의 수문곡선과 오염물질 유출곡선을 나타내고 있다. Fig. 5는 아래 x-축이 강우 지속시간을 나타내는 전형적인 오염물질 유출곡선을 나타내고 있으며, 위의 x-축은 강우강도, 그리고 배경에는 강우에 의해서 고속도로에서 유출되는 유출율과 오염물질 농도를 나타내고 있다. Fig. 6은 측정된 많은 모니터링 결과를 통계학적 분석을 위하여 강우시간을 일반화시킨 것이다.

Fig. 5(a)와 (b)는 UCLA3 지역에서 측정된 중금속 결과를 보이고 있으며, 강우가 지속됨에 따라 유출 오염물질의

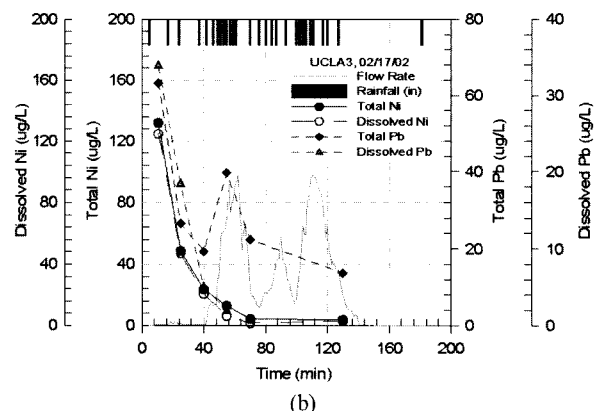
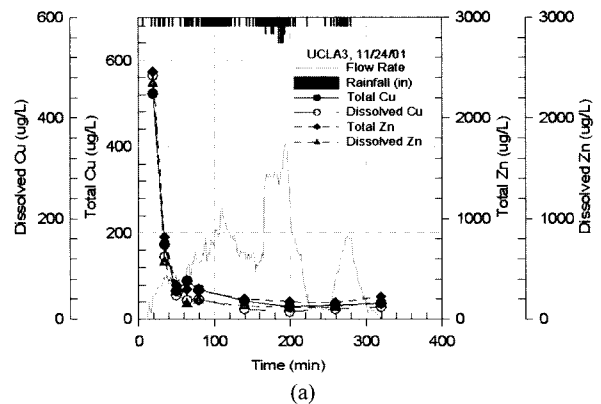


Fig. 5. Observed polluto-and hydro-graphs for metals.

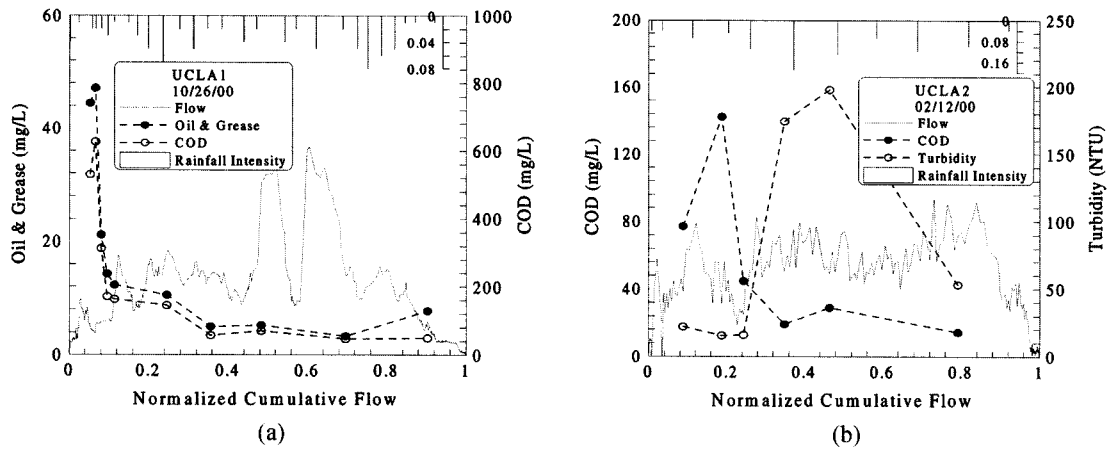


Fig. 6. Observed pollutant and hydro-graphs for water quality parameters.

농도가 줄어드는 초기강우현상을 뚜렷이 볼 수 있다. 대체적으로 고속도로에서 측정된 오염물질 유출곡선들은 강우 초기에 높은 농도의 오염물질 유출을 보이며, 대부분 최고 강우강도 이전에 오염물질들이 유출되는 경향을 나타내었다. 그러나 측정된 많은 강우 이벤트 중에서 일부는 Fig. 6(b)와 같이 시간에 따라 유출 오염물질의 농도가 불규칙하게 나타나는데 이는 강우의 형태와 강우강도가 오염물질의 유출에 큰 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 즉 강우사상에 따라서 초기강우 현상은 발생할 수도 또는 발생하지 않을 수도 있다는 것을 의미한다. 따라서 다양한 강우사상에 대한 모니터링 결과에 대한 통계학적 분석만이 초기강우 현상을 뚜렷이 확인할 수 있다.

3.3. First Flush 경향 및 기준

초기우수, 즉 초기강우는 비점오염원 연구 및 관리방안 수립에서 중요한 연구과제이다. 비점오염원의 최적 관리방안(Best Management Practices, BMP)은 오염물질 유출 저감 및 처리를 위해서 최종적으로 수립되어야 할 분야이다. 비점오염원은 다양한 토지이용에서 발생하는 오염물질들이 강우에 의해서 집중적으로 유출되는 특징 때문에 관리에 어려움이 많다. 특히 포장율이 높아 강우의 유출율이 높은 도로나 도시지역의 비점오염원 관리는 처리시설 설치가 가능한 면적의 제한으로 인하여 관리방안 수립 시 더욱 어려움이 크다.

따라서 고속도로에서 유출되는 오염물질들은 강우 초기에 다량 유출되기에 경제적인 처리를 위해서 초기강우 연구를 통한 기준제안이 절실하다. 강우초기에는 고농도의 오염물질 유출이 발생되지만 일정기간 강우가 지속된 후에는 오염물질의 유출농도가 급속도로 감소하는 초기강우의 특성상 기준제안 연구는 중요하다 하겠다. Fig. 7은 고속도로에서 수행된 37회 이상의 모니터링 결과의 통계치를 보여주고 있다. 초기강우 연구를 위해서 필수적인 유출수율에 따른 유출 오염물질의 변화를 통계학적으로 일반화시킨 것이다. COD의 경우 초기 10%의 유출수율에 전체 유출오염

물질의 평균 25% 이상이 유출되는 경향을 보이며, Total Zn의 경우 초기 22%의 오염물질 유출이 나타났다. 그림에서 보듯이 30% 정도의 강우 유출수율이 발생할 때까지 급속도로 오염물질의 유출 감소를 볼 수 있다. 특히 30% 이상의 유출수율이 발생한 이후에는 매 10%의 강우 유출수 증가에 따라 약 5-9% 정도의 매우 낮은 오염물질 유출이 나타났다. 중금속 오염물질들은 농도와 부하면에서 초기강우 현상을 나타내었으며 농도 범위는 초기강우와 그 이후와는 10배 이상의 차이를 보였다. 이 그림은 전형적인 고속도로 강우 유출수의 초기강우 경향을 설명하는 귀중한 자료가 될 것으로 사료된다.

TKN에 대한 일반화된 누적 부피와 유출 오염물질의 양이 Fig. 8에 나타나 있다. 여기서 Mass/Flow가 50/30의 의미는 강우가 발생한 후 전체 유출수의 30%가 유출되는 기간에 전체 유출 가능 오염물질중 50%가 유출됨을 의미한다. 45도 각도를 기준으로 아래쪽에 보이는 점선은 Mass/Flow 비율이 1 이하로 유출수율에 비해 상대적으로 오염물질의 유출이 적은 강우사상을 나타내고 있으며 초기강우 경향이 나타나지 않은 경우를 의미한다. 반면 45도 위쪽에 나타나 있는 일점쇄선은 강우초기에 오염물질의 유출이 매우 높은, 즉 초기강우 경향을 뚜렷이 보이는 강우 이벤트를 나타내며 Mass/Flow 비율이 1.6이상의 값을 나타내고 있는 경우이다. 그 사이에 존재하는 실선은 Mass/Flow 비율이 1과 1.6사이로 유출수율에 비해 오염물질의 유출이 높은 중간 초기강우 현상이 나타나는 강우사상을 의미한다.

따라서 Fig. 9는 측정된 강우 이벤트를 Mass/Flow의 비율을 이용하여 3가지 초기강우 유형으로 분류하고, 그 비율을 나타내고 있다. 분류된 유형으로는, 강한 초기강우(비율이 1.67 이상인 경우), 중간 초기강우(비율이 1.67에서 1사이인 경우), 그리고 비 초기강우(비율이 1.0 이하인 경우)이며, 전체 측정된 강우이벤트에 관하여 초기강우 율을 중금속에 관하여 보여주고 있다. 대부분의 중금속들이 측정된 이벤트 중 80% 이상의 이벤트에서 초기강우 경향(Mass/Flow의 비율이 1.0 이상)을 나타내고 있다. 유기물질 등의

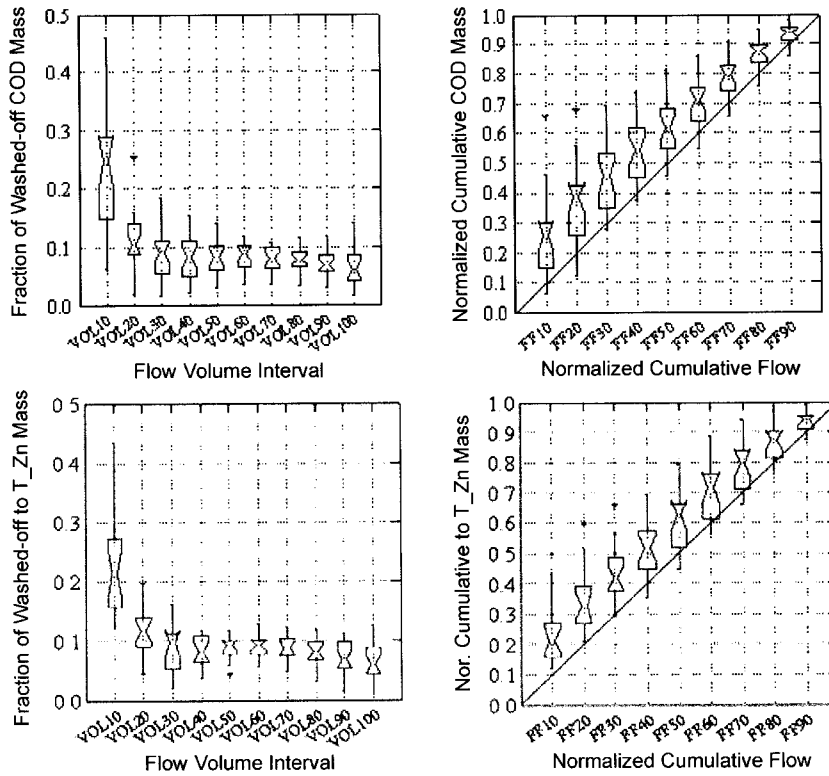


Fig. 7. Statistical analysis for first flush determination.

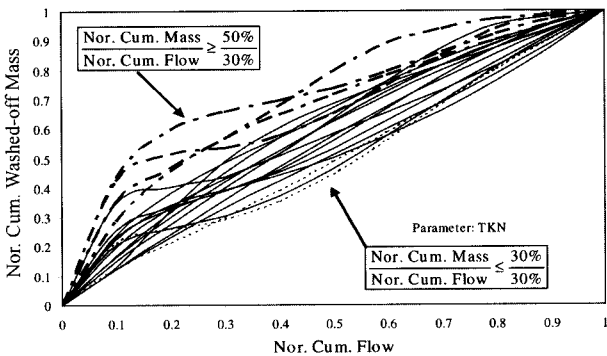


Fig. 8. Normalized cumulative flow and washed-off TKN mass.

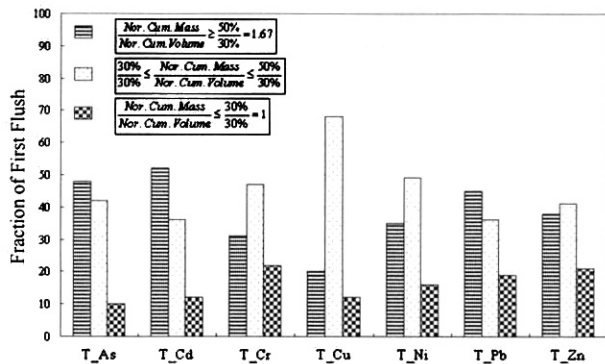


Fig. 9. Fractions of first flush events for metals.

일반적인 수질 항목에 대해서도 first flush를 해석해 본 결

과 80% 이상의 이벤트에서 초기강우 경향을 띄었다(Kim, 2002; Kim et. al., 2003). 특히 유출 중금속의 대부분이 입자상 물질에 흡착되어 유출되기에 초기강우 경향은 당연하다. 그러나 예측되는 강우 이벤트 중에서 확률통계학적으로 80%이상의 이벤트에서 초기강우 경향을 보일 것이라는 것은 중요한 연구결과라 하겠다. 일반적으로 고속도로와 같이 완전 포장율을 보이는 지역에서는 발생하는 모든 강우이벤트에서 초기강우 경향을 보일 것이라는 이론은 최근까지 지배적이었다.

4. 결론

최근 들어 수계관리에 관심이 증대되면서 다양한 토지이용에 기인하는 비점오염원에 대한 연구와 투자가 증가하고 있다. 점오염원에 의한 수계관리에는 한계가 있으며, 수질의 개선을 위해서 수계인근의 비점오염원 연구가 필요하다는 인식이 확대되면서 2000년대 이후 중요한 연구과제로 부상하고 있다. 특히 고속도로는 비점오염원 중에서 강우시 오염물질의 유출이 심한 토지이용종의 하나이며 특성상 인근 수계에 직접적인 환경영향을 끼치는 중요한 관리대상 지역이다.

이러한 인식에 근거하여 본 연구는 미국 Los Angeles 지역을 연구 대상으로 선정하여 고속도로에서 유출되는 강우 유출수의 특성을 연구하였다. 본 연구의 목적은 강우시 고속도로에서 유출되는 강우유출수의 초기강우 현상을 연구하여 오염물질의 제거기준을 제안하고자 함이다.

1. 일반적으로 고속도로와 같은 포장된 지역의 오염물질 유출 경향은 초기강우에 상당한 오염물질의 유출이 발견된다. 이러한 초기강우의 연구결과는 향후 비점오염물질의 처리기준 산정에 있어서 중요한 인자이다. 모니터링 결과에 의하면, 강우가 시작된 후 초기 30%의 강우 유출수가 유출된 이후로는 거의 일정한 농도의 오염물질 유출경향이 확인되었다. 따라서 이를 초기강우의 정의로 제안하고자 한다. 이는 향후 오염물질 처리방안 수립 시 경제적으로 사용가능한 기준이며 초기 유출되는 30%의 강우유출수를 제거함으로써 효과적인 처리효율을 가질 수 있음을 의미한다.
2. 초기강우 기준과 오염물질 제거효율을 분석하기 위하여 연구를 수행한 결과 3가지의 기준을 통하여 효율을 정리하였다. 초기 30%의 강우 유출수 내에 전체 50% 이상의 오염물질 유출이 확인되었기에, 이를 “강한 초기강우”라고 명명하였으며 전체 강우 이벤트 중에서 약 20% 정도가 이러한 경향을 나타내었다. 또한, 초기 30%의 강우 유출수 내에 30%이상의 오염물질이 함유된 경우에 이를 “중간 초기강우”라는 이름으로 명명하였는데, 전체 측정된 강우 이벤트 중에서 약 60% 이상의 강우가 이에 해당되었다.
3. 대부분의 중금속 오염물질들은 농도와 부하면에서 초기 강우 현상을 나타내었다. 중금속의 농도 범위는 초기강우와 그 이후와는 10배 이상의 차이를 보였다. 전체 분석된 중금속 항목들에서 전체 측정된 강우이벤트의 80% 이상이 초기강우 현상을 나타내었다.

사 사

본 연구는 California 교통국(California Department of Transportation)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김이형, 강주현, 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMCs 및 부하량 원단위 산정, 한국물환경학회지, **20**(6), pp. 631-640.
- 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).
- Deletic, A.B., and Mahsimovic, C.T., Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas, *J. of Environ. Engineering*, **124**(9), pp. 869-879 (1998).
- Geiger, W., Flushing effects in combined sewer systems, *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Urban Drainage*, pp. 40-46, Lausanne, Switzerland (1987).
- Kim, L.-H., *Monitoring and Modeling of Pollutant Mass in Urban Runoff: Washoff, Buildup and Litter*, Dissertation of Ph. D., University of California (2002).
- Kim, L.-H., Kayhanian, K., Lau, S.-L., and Stenstrom, M.K., A new modeling approach in estimating first flush metal mass loading, *Proceedings of 7th Int. Conf. on Diffuse Pollution, August*, Dublin, Ireland (2003).
- Ma, M., Khan, S., Li, S., Kim, L.-H., Ha, S., Lau, S., Kayhanian, M., and Stenstrom, M. K., First Flush Phenomena for Highways: How it can be meaningfully defined, *Proceedings of 9th Int. Conf. on Urban Drainage*, September, Portland, Oregon (2002).
- Saget, A., Chebbo, G., and Bertrand-Krajewski, J., The first flush in sewer system, *Proceeding of the 4th Int. Conf. on Sewer Solids-Characteristics, Movement, Effects and Control*, pp. 58-65, Dundee, UK (1995).
- Sansalone, J.J., and Buchberger, S.G., Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water, *J. of Environ. Engineering*, **123**(2), pp. 134-143 (1997).
- Thornton, R.C., and Saul, A.J., Temporal variation of pollutants in two combined sewer systems, *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Urban Drainage*, pp. 51-52, Lausanne, Switzerland (1987).
- Vorreiter, L., and Hickey, C., Incidence of the first flush phenomenon in catchments of the Sydney region, *National Conf. Publication-Institution of Engineers*, **3**, pp. 359-364, Australia (1994).