

도로노면 유출수의 비점오염원 배출 특성(1): 기본 수질 항목

Characteristics of Non-point Pollutants from the Road Runoff (1): Water Quality

박상우¹ · 오재일^{1,*} · 최영화¹ · 서정우²

Park, Sangwoo¹ · Oh, Jeill^{1,*} · Choi, Younghwa¹ · Seo Jeongwoo²

1 중앙대학교 건설환경공학과
2 GS건설 주식회사

(2007년 1월 23일 논문 접수: 2007년 4월 2일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Road runoff water is one of the non-point sources (NPSs) of pollution negatively influencing drinking water source. Numerous road runoff NPS waters have been studied for over the last decade. However, the sources of pollution can be conditional, seasonal, or accidental. Therefore, measurement of pollutant loadings in different site is necessary to estimate the effect of road runoff water. The objective of this study was to examine the quality of road runoff water from a city bridge in Seoul, Korea. This study was conducted for two years to assess annual discharge pollution loads. In this study, key water quality parameters including chemical oxygen demand (COD_{Cr}), biochemical oxygen demand (BOD₅), total nitrogen (T-N), total phosphorus (T-P), and suspended solid (SS) were measured at 18 different events. The results showed that typically the pollutant concentrations are higher at the beginning of each event and decrease afterwards. The first 20% of the volume of the runoff from each event is transporting 46% (COD_{Cr}), 48% (BOD₅), 50% (T-N), 34% (T-P), 30% (SS), respectively. The event mean concentrations (EMCs) were COD_{Cr} (199mg/L), BOD₅ (41.2mg/L), T-N (7.97mg/L), T-P (0.42mg/L) and SS (113mg/L). Although the results were consistent with the previous study (Barbosa and Hvitved-Jacobsen, 1999), COD_{Cr}, BOD₅, T-N exhibit a stronger first flush effect compared to the other contaminants.

Key words: Non-point source, Road runoff, Water quality, EMC, First-flush

주제어: 비점오염원, 도로노면 유출수, 기본수질항목, 유량가중평균농도, 초기유출

*Corresponding author Tel: +82-2-820-5339, FAX: +82-2-812-1834, E-mail: ohjeill@cau.ac.kr (Oh, J.I.)

1. 서론

팔당상수원 유역으로 배출되는 전체 오염 부하량 중 비점오염원이 차지하는 비중이 44.5%에 달해, 수계 오염에 비점오염원이 미치는 영향이 상당한 것으로 조사되는 등(환경부, 2000), 점오염원 위주의 오염원 관리 정책의 문제점 및 한계성이 도출됨에 따라, 최근 몇 년 사이에 비점오염원과 관련된 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

도시 내 비점오염원 배출원은 도로, 지붕, 공원, 녹지, 주차장 등으로 분류 가능하며, 이 중에서 오염기여도가 가장 심하다고 알려진 도로노면에서 유발되는 초기 우수 유출수의 경우 강우강도 2mm 이내에서 COD_{Cr} 농도가 800mg/L까지 나타나고, SS의 경우 도로 외 지역보다 20~80배 높은 것으로 조사되는 등(경기도보전환경연구원, 2001), 그 위험성 및 시급성으로 인하여 여러 비점오염원 분류 내에서도 주요 연구 대상으로 여겨지고 있다.

이러한 도로노면 비점오염원의 위해성으로 인해 미국에서는 1990년대 이후부터 EPA를 중심으로 많은 연구가 진행되었는데, Legret(1999) 등은 도로노면 유출수의 유량이중평균 농도가 COD_{Cr}은 103mg/L, T-N은 2.3mg/L, SS는 71mg/L로 나타난다고 밝혔으며, Lee(2004) 등은 도로노면 유출수의 계절적 초기유출 현상을 규명하여 우기 초반의 배출 농도가 우기 종료 시의 배출 농도의 1.2~20배에 달함을 발표하였다. 국내에서는 조금 늦은 2000년 이후부터 본격적으로 도로노면 비점오염원에 대한 다양한 연구적 접근이 이루어졌는데, 국내 연구진에 의한 도로노면 비점오염원의 기초연구 결과에 따르면 대략적인 도로노면 유출수 수질농도범위는 COD_{Cr}는 40~931mg/L, BOD₅는 48.6~153.4mg/L, T-N은 0.1~19.6mg/L, T-P는 0.2~25.1mg/L, SS는 45~2,396mg/L 내외인 것으로 알려졌다(이준호 등, 2005; 김이형 등, 2005; 노성덕 등, 2004). 김이형(2006, 2004) 등과 이춘식(2006) 등은 오염부하 원단위 산정 등의 기초자료 확보를 위해 유량이중평균 농도를 산정하였는데, 대략적으로 그 범위가 COD_{Cr}은 138.9~197.6mg/L, BOD₅는 3.9~97.6mg/L, T-N은 6.3~9.2mg/L, T-P는 2.3~3.31mg/L, SS는

8.0~385.1mg/L 내외인 것으로 조사되었다. 오염원의 초기유출 현상 역시 국내 연구진을 통해서도 파악되었으며, 대부분의 오염물질이 유출 초반에 배출된다는 보고가 국내·외 모두 지배적이었다.

이러한 다양한 국내·외의 연구 결과를 토대로 국내·외의 오염물질 배출 현상을 비교한 결과 전체적인 유출 현상(각 오염물질의 초기유출 여부 및 배출 형태)은 유사하나 전반적인 오염물질의 상대적인 조성 비율이 상당히 다른 것들을 확인할 수 있었다(오재일 등, 2005). 국내의 경우 국외에 비하여 상대적으로 T-N 및 SS의 비율이 높은 것으로 드러났으며 전반적인 검출 범위 자체가 높은 편으로 나타났다. 이러한 차이로 인하여 국외 연구 사례 경우 국내에 바로 적용하기 어려울 것으로 판단되었으며, 현재까지 국내에서 수행된 선행 연구 역시 대다수가 단기간의 일시적인 모니터링을 통한 연구들이 대부분이어서 국내의 정확한 현황을 반영한다고 보기 어려워, 장기간 모니터링을 통한 체계적인 국내 도로노면 유출수의 배출 현황 파악 및 부하량 산정, 나아가 원단위 산정 관련 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 전체 2년(2004/06/17~2006/05/22, 총 18회)에 걸친 장기간 모니터링을 통하여, 도로노면에서의 강우 초기유출수 오염 항목인 COD_{Cr}, BOD₅, T-N, T-P, SS의 오염물 배출 및 부하 특성을 살펴보고, 각 오염물의 First-flush 분석을 실시하여, 차후 국내 도로 환경에 적합한 초기유출수 오염 저감 기술 개발 및 처리시설 설계에 적합한 기초 자료를 획득하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 조사지역

일반적으로 도로 노면 유출수의 시료채취는 접근성이 떨어져 시료채취가 용이하지 않고, 시료채취 시 교통사고의 위험성이 크며, 강우가 적을 경우 단위 배수구 당 노면 배수면적이 작아서 충분한 유량을 확보하기 어려운 실정이다. 따라서 접근이 용이한 고수부지가 있는 교량 저부의 배수구를 시료채취 지점으로 선정하면 시료채취 시 유량 확보 측면과, 채취의 용이성, 차량으로부터의 안정성 등이 확보됨에 따라 상당히 용이하게 장기 실험이 수행될 수 있을 것으로

Table 1. 조사지역의 도로노면 특성 및 기본 현황

배수면적(m ²)	노면포장재료	일평균교통량(cars/day)	차선 수	차집관 수
587.43	아스팔트	80,000	3	4

판단되었다.

상기 사항을 바탕으로 본 연구에서 선정된 조사 지역은 서울 한강을 횡단하는 25개 교량 중 서울시의 중앙부에 위치해 있고 노면 유출수 배출구가 고수부지 바로 위에 위치하여 접근성이 용이한 W대교로 표 1에 표시한 바와 같이 하루 평균 교통량(양방향)이 약 80,000대로 비교적 통행량이 많은 곳이다. 교량의

노면은 아스팔트 포장으로 되어 있으며, 교량 본선은 왕복 4차선(인도 1차선)이고, 교량 남/북측 양단의 접속로(Ramp) 구간에는 6차선으로 구성되어 있다.

교량 측면의 빗물받이는 5~10m 간격으로 설치되어 있으며, 도로 종단을 기준으로 양방향 배수 형상을 갖고 있다. 시료 채취 지점의 세부적인 교량 배수 구조를 살펴보면, 교량 하부에 고수부지 노면이나 접

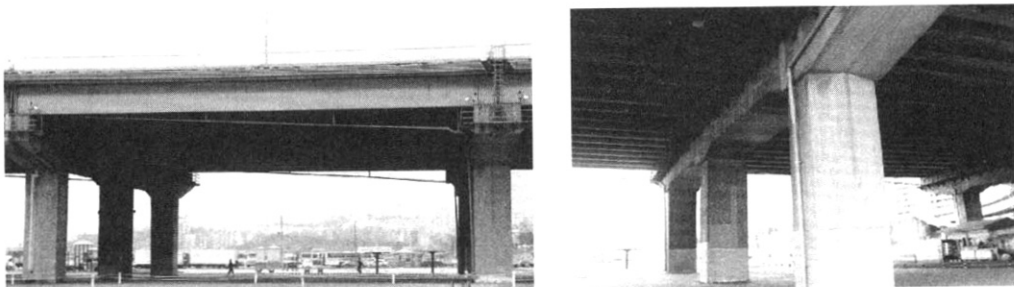
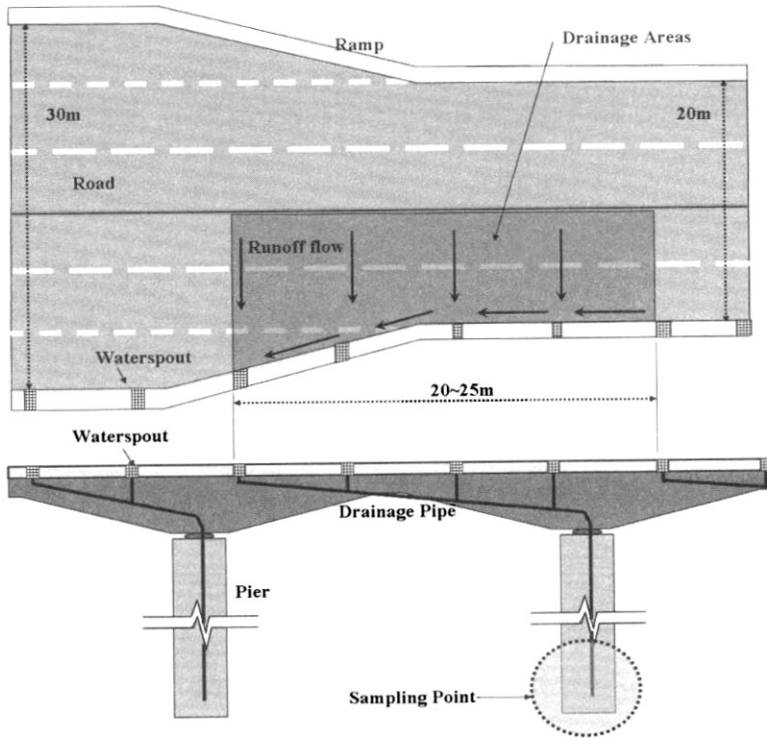


Fig. 1. 조사지역(W 대교)과 시료채취 지점의 모식도 및 전경.

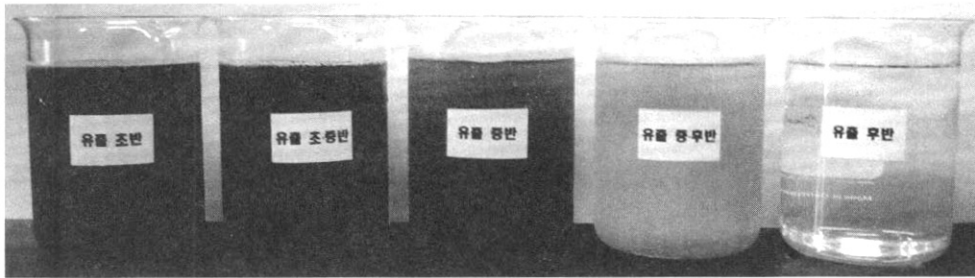


Fig. 2. 도로 노면 유출수의 유출 진행에 따른 걸보기 수질 변화(2005/05/05).

근 도로가 존재하는 경우 배수 시설물에서 노면유출수가 직강하 되는 것을 피하기 위해, Fig. 1과 같이 약 20~25m 간격으로 육교용 배수관으로 차집 후 교각 하부의 일정 높이에서 배수 되는 구조이며 이 지점에서 시료 채취가 수행되었다. 그 외의 한강 횡단 교량 구간에서는 각 빗물받이에서 바로 한강으로 직강하 배출되도록 설계되어 있다.

한편 교량노면에서 유출되는 오염물질은 일반 고속도로와는 달리 주변에 식생 둔치 및 절토면 등에 노출되지 않기 때문에 교량 포장 도로 노면에 축적된 오염물질 이외에 다른 오염원이 유입되지 않는다고 가정할 수 있으므로 순수한 노면 오염 물질의 축적 및 유출 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다.

2.2 시료채취 및 수질분석

도로노면 유출수 시료채취는 2004년 6월~2006년 5월에 걸친 약 2년 동안 총 18회 수행하였으며, 조사 기간 중 선행건기일수가 충분하지 못한 장마기간이나, 강수량은 있으나 유출수가 발생되지 않는 동절기는 제외하였다.

시료채취 과정은 크게 유출 유량 측정과 유출 시료 채취로 구분할 수 있다. 본 연구의 경우 좁은 집수면적으로 발생 유량이 그다지 높지 않기 때문에 용기 포집에 의한 직접 측정법을 사용하여 집수 용기(20L)에 일정 시간동안 집수된 유량을 측정함으로써 도로노면 유출 유량을 산정하였다. 한편, 시료 채취는 강우 이후 유량이 발생한 시점부터 초기에는 5~15분 간격으로 이후 30~60분 간격으로 실시하였다. 채취 시간 간격의 조정은 채취된 시료의 걸보기 수질 변화를 육안으로 관찰하여 판단하였다. 유출 초기에는 진한 고동색을 띄나 점차 유출이 진행됨에 따라

그 정도가 점점 멀어지다 마지막에 이르러선 거의 투명해지는 것이 일반적이다. 유출수의 걸보기 색이 거의 투명해진 시점에서 시료 채취를 종료하였다.

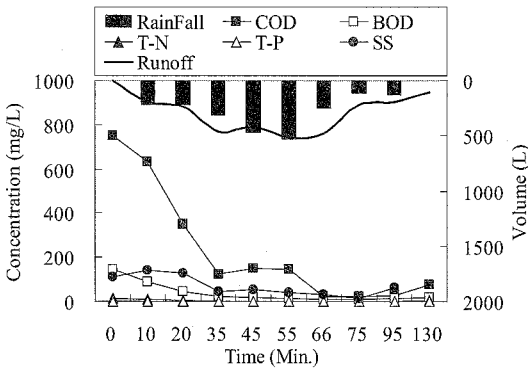
채취한 시료는 기본수질항목(5종)인 COD_{Cr} , BOD_5 , T-N, T-P, SS를 중심으로 분석을 수행하였으며, COD_{Cr} , BOD_5 , T-N, T-P, SS 농도 분석은 수질오염 공정시험법(환경부, 1999)에 준하여 분석하였다. 한편, 개별 오염물질의 추가적인 배출 특성 규명을 위하여, 전체 18회 조사 중 일부(2회)에 걸쳐 개별 오염물의 용존 및 입자상 농도를 측정하였는데, 자세한 방법론은 시리즈 논문에 기술되어 있다.

3. 결과 및 고찰

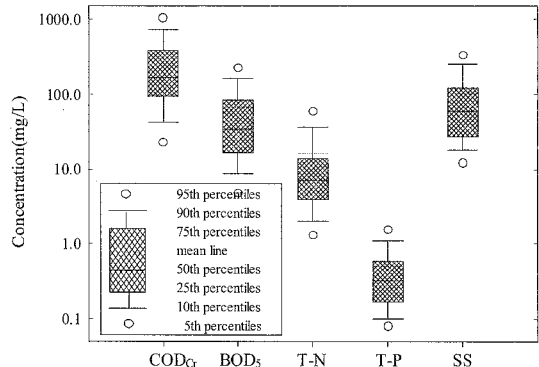
3.1. 도로노면 유출수의 기본 수질 특성

도로노면 유출수 내 오염물의 전형적인 배출 거동을 Fig. 3의 (a)와 같이 나타내었다. 유출 초반 높은 농도를 나타내며 배출되던 오염물은 유출 후반으로 갈수록 그 농도가 낮아져 일정한 수준의 농도를 나타냈다. 또한, 개별 강우 발생 시의 수질 데이터를 상호 비교한 결과, 유출 농도의 상대적 차이가 유출 초반에는 매우 크나, 후반으로 갈수록 값이 엇비슷하게 일정해짐을 확인했다. 이는 유출 초반의 경우 선행건기일수 등에 의하여 도로노면 상의 오염물 축적량이 큰 차를 보이지만, 외부의 오염원이 차단되어 있는 조사지점의 특성상 점차 배출 가능한 양이 줄어드는 현상을 나타내는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 3의 (b)는 각 오염물질별 배출 농도 범위를 나타낸다. 각 오염물질별 최대농도를 살펴보면 COD_{Cr} 은 2232mg/L, BOD_5 은 576mg/L T-N은 293mg/L, T-P는 3.18mg/L, SS는 681mg/L까지도 나



(a) 전형적인 오염원 배출 패턴(2004/09/05)



(b) 각 오염물별 배출 농도 범위

Fig. 3. 도로노면 유출수의 오염을 배출 특성.

타났으며, 기존의 도심지역의 유출농도에 비해 약 3 배 이상 높은 수치를 보였다(최지용 등 2002). 이렇게 타 유사연구보다 현저하게 높은 수치를 보이는 이유는 본 조사지점의 특이성 및 충분한 선행건기일수의 확보 때문인 것으로 판단된다. 일반적인 단기간 모니터링 시 충분하고 다양한 선행건기일수의 확보를 하지 못하므로 극한 상태의 유출특성 등을 고려하지 못하므로 장기간의 모니터링을 통한 다양한 자료 확보를 통해 폭 넓은 조건에서의 유출 현상에 대한 대처가 필요하다. 따라서 아래와 같이 장기간의 모니터링 및 다양한 선행건기일수를 고려한 데이터 수집을 통하여 국내 도로노면 유출수의 배출 농도 범위를 확률론적으로 나타내는 연구가 더 많이 진척되어야 할 것이다.

한편, COD_{Cr}, BOD₅, T-N의 최대농도는 대체적으로 선행건기일수가 길면 유출농도 또한 높아지는 것으로 나타났으며, SS와 T-P의 경우에는 선행건기일수에도 영향을 받지만 유출량에 의해서도 크게 변화하는 것으로 나타났다. 개략적으로 각 오염항목이 선행건기일수 및 유출량에 따라 불규칙된 연관관계에 의해서 변동됨을 알 수 있으나, 본 연구에서는 연구 범위를 도로노면에서의 오염물 유출특성 분석까지로 제한하였으므로 차후 후속 연구를 통하여 선행건기일수 및 유출량에 따른 연관관계를 규명하고자 한다.

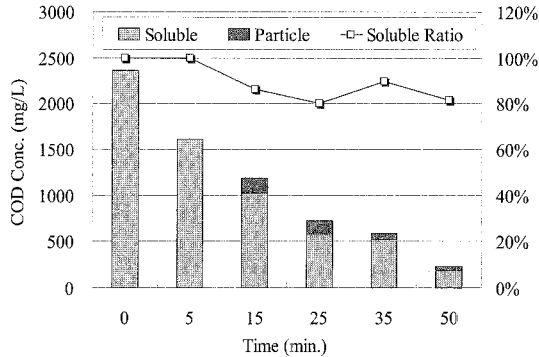
3.2. 용존상과 입자상에 따른 기본 수질 항목별 배출 형태

COD_{Cr}, BOD₅, T-N이 유사한 유출패턴을 보이

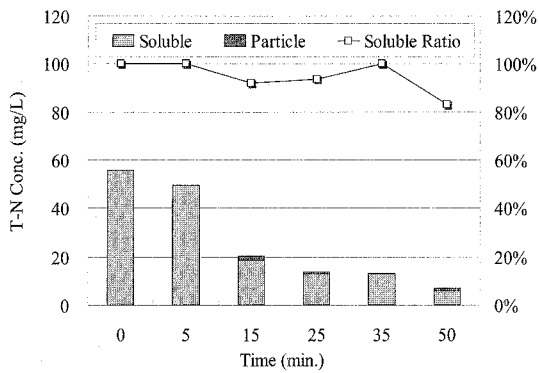
며, 전체 유출의 약 20%가 지나면 상당한 양이 유출되어 그 이후로는 그 오염부하가 점차 감소하는 반면, T-P와 SS는 COD_{Cr}, BOD₅, T-N에 비해 상대적으로 유출형상이 불규칙적이고 지속적인 오염물 유출 경향을 나타냄을 이미 선행연구(오재일 등, 2005)를 통하여 발표한 바 있다.

이러한 각 오염물의 유출 현상을 설명하기 위해 Fig. 4와 같이 각 오염물의 배출 형태를 살펴보았다.

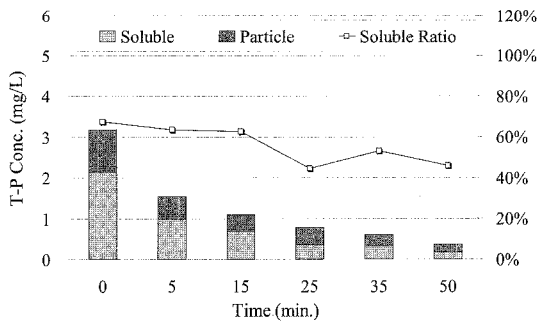
Fig. 4는 충분한 강우로 인하여 오염원 유출이 충분히 이뤄진 2005년 05월 05일에 강우유출 시작 후 50분까지 채취한 유출수를 원시료 샘플(total fraction)과 0.45 μm syringe filter를 이용하여 여과한 샘플(soluble fraction)로 나눠 COD_{Cr}, T-N, T-P 항목에 대해 분석한 뒤 원시료 농도를 총 오염농도, 원시료의 농도에 여과한 시료의 농도를 감한 값을 입자상 오염농도로 규정하고, 총 오염농도에서 입자상 오염농도를 감한 값을 용존상 오염농도라 정의하여, 시료채취 시간에 따른 용존상과 입자상 오염농도를 구분하여 표현한 것이다(보다 자세한 설명은 시리즈 논문의 실험방법에서 논하고 있다). 그림 3에서 보는 바와 같이 COD_{Cr}, T-N의 경우 대부분이 용존형態로 존재하며, 유출초기에 100%에 가까운 용존을 보이는 것으로 보아 강우 시 쉽게 용해되어 유출됨을 알 수 있었다. 반면 T-P의 경우 최 등(최영화 등, 2004)이 조사한 결과와 유사하게 COD_{Cr}, T-N에 비해 입자상으로 존재하는 농도가 비교적 높으며, 이는 T-P 성분이 SS 성분에 흡착되어 거동함을 뒷받침하는 결과이다. 이와 같은 현상으로 인해 T-P의 유출 거동이 SS



(a) COD_{Cr}



(b) T-N



(c) T-P

Fig. 4. 유출 진행에 따른 각 오염물질별 용존상 및 입자상 농도 비율 변화(2005/05/05).

와 같이 불규칙한 것으로 판단된다.

한편, 해당 오염원들이 모두 용존 비율이 높아 강우시 쉽게 용존되어 초반에 유출될 것으로 판단되었으며, 이에 정확한 수치적 계산에 의한 오염물질별 First-flush 현상을 분석하였다.

3.3. 기본 수질 항목별 First-flush 현상

어떠한 오염물질 성분이 일정한 농도로 유출될 경우, 그것은 누적 유출 유량에 비례하는 오염물질 발생 부하를 표현할 수 있으며, 이때 둘의 관계는 45°의 경사를 갖게 된다. 반면, 앞서 제시한 바와 같이 강우 초기에 높은 오염물질 농도로 유출 되는 경우, 기울기가 1 이상의 양상을 보이게 될 것이다. 이러한 것을 흔히 First-flush 현상이라고 하며 다음 식 (1)을 이용하여 확인 할 수 있다(Lee 등, 2000).

$$(P_i/P_j)/(Q_i/Q_j) > 1: \text{First flush}$$

$$(P_i/P_j)/(Q_i/Q_j) \leq 1: \text{No First flush} \quad (1)$$

where, P_i/P_j : Normalized cumulative pollutant mass ratio,

Q_i/Q_j : Normalized cumulative Runoff volume ratio,

P_i : Total pollutant mass, Q_i : Total Runoff volume

각 강우 발생별 유출 유량과 오염물질을 부하 단위로 환산하고, 이를 다시 상대 누적 유출유량과 부하량 단위로 환산하여 식 (1)에 따라 First-flush 현상을 살펴보면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

COD_{Cr}, BOD₅, T-N, T-P, SS 성분에 대한 초기 우수 특성을 살펴보면, Fig. 5에 나타난 바와 같이 COD_{Cr}, BOD₅, T-N의 경우 First-flush 현상이 매우 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. T-P, SS 또한 First-flush 현상을 보여주었으나 그 정도가 낮았으며, 이러한 미묘한 차이를 보이는 것은 앞서 설명한 바와 같이 T-P와 SS의 상대적으로 높은 입자상 비율로 인해 용존상이 절대적인 다른 항목들에 비해 원활한 배출이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 측정 항목으로 선정된 모든 항목에서 First-flush 현상을 목격할 수 있었으며, 이는 도로노면에 쌓인 오염물의 대부분이 강우초기에 유출됨을 의미한다. 또한 앞서 본 바와 같이 이들 초기유출수의 오염도는 매우 심각하며, 이러한 초기유출수가 하천 혹은 호소로 직접 유입할 시 생태환경에 상당한 오염을 초래할 것으로 예측된다.

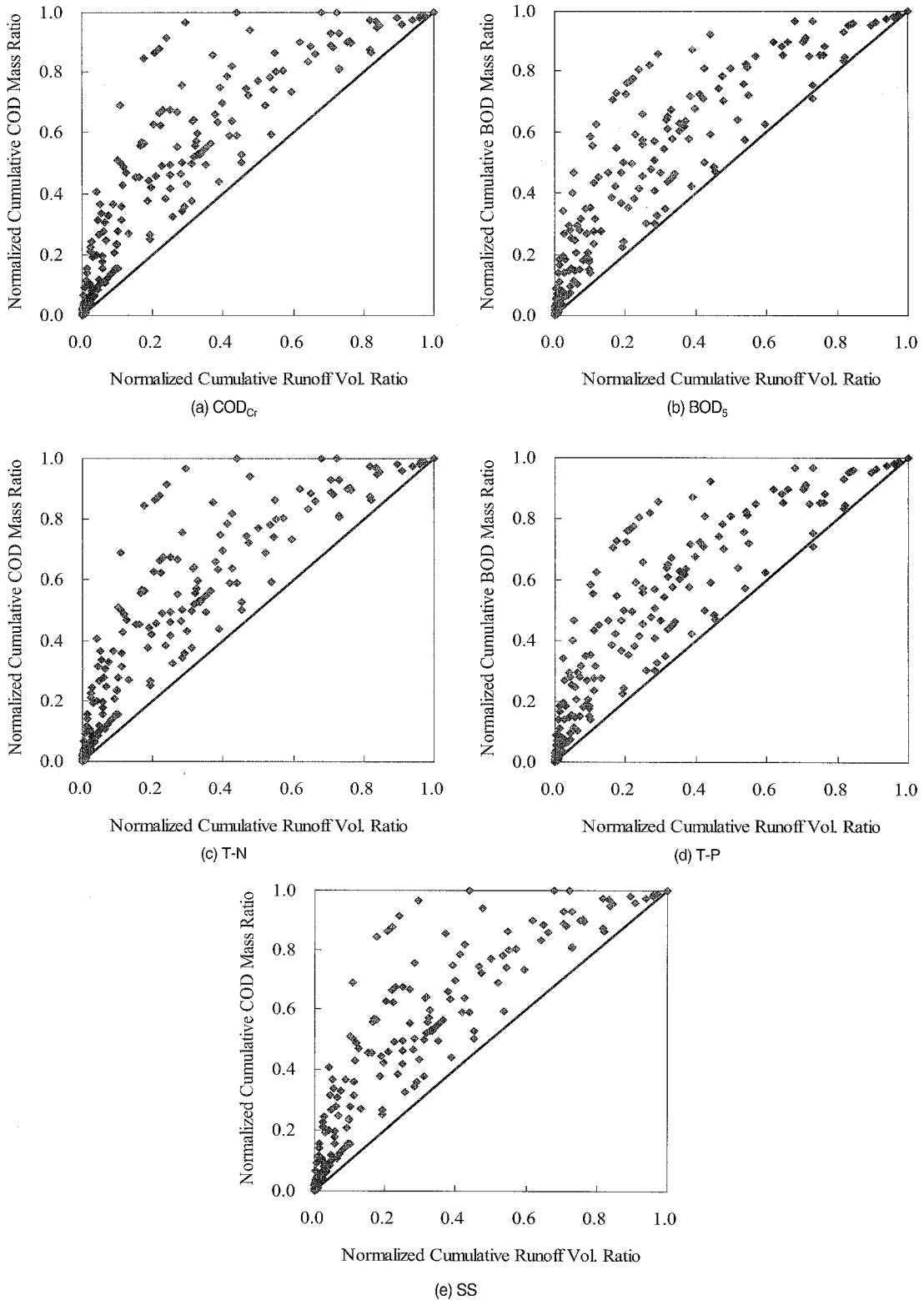


Fig. 5. 오염물질별 First-flush 현상.

Table 2. 각 오염물질 배출 범위(EMC)

(Unit: mg/L)

구분	COD _{Cr}	BOD ₅	T-N	T-P	SS
농도범위*	43.86~462.36	6.47~143.71	1.14~15.43	0.11~0.88	18.25~269.83
제1사분위수**	128.62	27.64	4.46	0.22	62.67
중앙값***	195.61	37.99	7.53	0.31	90.05
제3사분위수****	231.80	47.50	11.25	0.60	172.63
평균	198.58	41.24	7.97	0.42	113.15
95% 신뢰구간	149.86~247.30	27.45~55.03	6.07~9.86	0.30~0.54	76.50~149.80

*농도범위: 최대값~최소값, **제1사분위수: 25번째 백분위수, ***중앙값: 50번째 백분위수, ****제3사분위수: 75번째 백분위수

Table 3. 국내·외 EMC 산정 비교 자료

(Unit: mg/L)

참고문헌	COD	T-N	T-P	SS	ADT*
NCHRP (2001)	114	1.83	0.4	142	>30000
Wu et al. (1998)	70	2.25	0.43	283	25000
Legret (1999)	103	2.3	-	71	12000
Barrett et. al. (1995)	126	1.03	0.33	131	58150
김이형 등(2006)**	29.69~159.66	1.17~10.04	0.1~0.76	20.66~284.76	-

*ADT: Average Daily Traffic(cars/day)

**조건이 다른 다양한 지역에서의 EMC 산정임을 고려하여 대략적인 범위로 표기함.

3.4. 기본 수질 항목별 EMC 산정

도로 노면 유출수로 인하여 배출되는 오염부하량의 산정을 위하여 일반적으로 사용되는 유량 가중 평균 농도(이하 EMC, 식 (2))를 계산하였으며, 각 강우 발생별로 계산된 결과는 통계 처리하여 Table 2에 제시하였다.

$$\text{Event mean concentration (EMC)} = \frac{\text{Discharged mass during storm event}}{\text{Discharged volume}}$$

$$= \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q_{\text{Runoff}}(t) dt}{\int_0^t Q_{\text{Runoff}}(t) dt} \quad (2)$$

where, $C(t)$: Pollutant at time t , $Q_{\text{Runoff}}(t)$: Runoff volume at time t

각 항목별 EMC 값을 Table 3의 국내·외 보고와 비교한 결과, 국내 타 연구진과는 상당히 유사한 수

치를 나타내었으나, 국외 조사 보고에 비해서는 상당히 다르게 나타났다. COD_{Cr}과 T-N의 경우 국외 보고에 비해 각각 2배와 4배 정도 더 높은 수치를 보였고, T-P는 비슷한 수치를 보였으며, SS는 국외 보고의 약 80% 정도 수준으로 나타났다. 즉, 국내·외의 상대적인 농도 비율이 상당히 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 국내·외의 EMC 산정 결과가 다른 양상을 나타내는 것으로 미루어볼 때 국내 현황에 적합한 비점오염원 저감 대책 마련이 시급하며, 무분별한 국외 사례 적용은 지양되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 도로노면 유출수 내 오염물질의 유출 농도 범위와 First-flush 현상 및 EMC의 산정까지만 살펴보았으나, 더 나아가 유출 관련 영향 인자 분석 및 부하량 원단위 산정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 이를 기초로 초기유출 저감 시설에 대한 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 강우 시 발생하는 도로노면 유출수

의 COD_{Cr}, BOD₅, T-N, T-P, SS의 유출 특성을 살펴보기 위해 2004년에서 2006년까지 18회에 걸친 수질 자료를 바탕으로 분석하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 조사기간 내의 각 오염물질별 최대 농도는 COD_{Cr}은 2232mg/L, BOD₅은 576mg/L T-N은 293mg/L, T-P는 3.18mg/L, SS는 681mg/L로 조사되었으며, 도로노면 유출수 내 오염물은 유출 초반 고농도로 배출되나 유출이 진행됨에 따라 점차 감소하여 일정한 기저 농도를 나타냄을 확인하였다.

2. 도로노면 유출수 내 오염물 항목인 COD_{Cr}, BOD₅, T-N, T-P, SS 모두 초기 유출 현상을 나타냈으며, 특히 전체 유출 유량 중 초기 20%의 도로노면 유출수 내에 각각 46%, 48%, 50%, 34%, 30%가 배출되는 것으로 나타났다.

3. COD_{Cr}, T-N, T-P, SS의 오염원 배출 형태를 간략히 살펴본 결과, COD_{Cr}, T-N은 용존율이 80%를 상회하지만, T-P의 경우 용존율이 50% 정도에 머무는 것을 확인하였다. 이는 개별 오염원의 초기 유출 양상의 차이를 설명하여 주는 근거가 된다.

4. 조사지점의 각 오염물질에 대한 EMC는 COD_{Cr}은 43.86~462.36mg/L, BOD₅은 6.4~143.71mg/L, T-N은 1.14~15.43mg/L, T-P는 0.11~0.88mg/L, SS는 18.25~269.83mg/L로 개별 오염물질의 상대적 비율이 국외 사례와는 상당히 다른 것으로 나타났다. COD_{Cr}과 T-N은 국외 보고에 비해 각각 2배와 4배 높은 수치를 보였고, T-P는 동일하며, SS는 국외 보고의 약 80% 정도 수준으로 나타났다.

참고문헌

1. 경기도보건환경연구원 (2001) 비점오염원관리방안.
2. 국립환경연구원 (1992) 비점오염원 유출부하량 조사지침.
3. 김석구, 김영임, 윤상린, 이용재, 김이호, 김종오 (2004) 강우강도에 따른 노면 유출수 유출특성, *한국물환경학회지*, 20(5), pp. 494-499.
4. 김이형, 강주현 (2004) 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, *한국물환경학회지*, 20(6), pp. 631-640.

5. 김이형, 강주현 (2004) 강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기유수 특성 및 기준, *한국물환경학회지*, 20(6), pp. 641-646.
6. 노성덕, 이대근, 전양근 (2004) 도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기 우수 유출수 처리에 관한 연구, *한국물환경학회지*, 20(5), pp. 525-533.
7. 오재일, 박상우, 최영화 (2005) 도로 노면 유출수의 비점오염원 배출 특성 - 기본수질항목, *공동추계학술발표회논문집*, 대한상하수도학회, pp. 430-435
8. 최영화, 오재일, 황환구, 김중화 (2004) 교량부 비점오염원 배출 특성 분석:1. 오염물질 별 유출 거동 분석, 04년 공동추계학술발표회, 한국물환경학회, 대한상하수도학회, 8 pp.
9. 최지용, 신창민 (2002) 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안, *한국환경정책·평가연구원*.
10. 환경부 (1999) 수질오염공정시험법.
11. 환경부 (2000) 팔당상수원 비점오염 최적관리사업 타당성 조사 및 기본계획수립 보고서.
12. APHA (1998) AWWA, WEF, Standard Method: 20th Edition.
13. H. Lee, S.L. Lau, M. Kayhaanian, M. K. Stenstrom (2004) Seasonal First-flush Phenomenon of Urban Stormwater Discharges, *Water Research*, 38, pp. 4153-4163.
14. Kim, Lee-Hyung (2003) Determination of Event Mean Concentrations and First Flush Criteria in Urban Runoff, *Korea Society of Environmental Engineers*, 8(4), pp. 163-176.
15. Lee, Bang (2000) Characterization of Urban Stormwater Runoff, *Water Research*, 34(6), pp. 1773-1780.
16. M.E. Barrett, J.F. Malina and R.J. Charbeneau (1995) Characterization of Highway Runoff in the Austin, Texas Area, Technical Report CRWR 262, Center for Research in Water Resources, Univ of Texas.
17. M. Legret, C. Pagotto (1999) Evaluation of Pollutant Loadings in the Runoff Waters from a Major Rural Highway, *The Science of Total Environment*, 235, pp. 143-150.
18. NCHRP (2001) Management of Runoff from Surface Transportation Facilities-Synthesis and Research plan, Web Document 37.
19. S. Wu, C.J. Allan, W.L. Saunders and J.B. Evett (1998) Characterization of Pollutant loading estimation for highway runoff, *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 124, pp. 584-592.
20. Barbosa, A. E. and Hvitved-Jacobsen, T. (1999) Highway Runoff and Potential for Removal of Heavy Metals in an Infiltration Pond in Portugal, *Science of the Total Environment*, 235, 151-159.