

강우시 불투수성 지역의 비점오염물질 EMCs 산정 및 초기세척효과 분석

안 태 웅 · 김 태 훈 · 오 종 민^{1,*}

(경희대학교 대학원 환경응용과학과,
¹경희대 공과대학 환경학 및 환경공학과, 환경연구센터)

Analysis of First Flushing Effects and EMCs of Non-point Pollutants from Impervious Area during Rainfall. Ahn, Tae-woong, Tae-hoon Kim and Jong-min Oh^{1,*} (Environmental Application Science, Kyung Hee University; ¹Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University)

This study evaluated the rainfall-runoff characteristics of Non-point Pollution Source (NPS) of the impervious area through on-site monitoring. In this study, trend analysis was performed by various runoff analysis method of non-point pollution source. The characteristics of rainfall at impervious area appeared to be influenced by rainfall strength. It is judged that the measure is required to be prepared against that now that concentration difference of non-point pollution source appeared to be big by precedent number of days of no rainfall. However, it appeared that Rainfall Sustaining Time (RST) has nothing to do with effluent concentration of non-point pollution source, however, the rising tendency that effluent concentration did not appear because the tendency that concentration of non-point pollution source reduces more than 50% within initial 60 min due to first flushing effects and rainfall sustaining time is long. If looking into the outflow tendency of non-point pollution source at the impervious area, it showed the tendency that the concentration lowers gradually as time goes by after initial concentration appeared very high. However, it could be recognized that the concentration of non-point pollution source appeared to be high as the pollutants integrated on the surface of the road during dry season. The Event Mean Concentrations (EMCs) in impervious area were ranged 9.2~199.3 mg · L⁻¹ for TSS, 8.1~24.2 mg · L⁻¹ for COD_{Mn}, 0.070~1.860 mg · L⁻¹ for T-N. Based on such runoff characteristics of non-point pollution source, it is judged that it would be desirable to process initial rain efficiently as the measure against initial rain phenomenon at the impervious area.

Key words : Non-point Pollution Source (NPS), rainfall-runoff characteristics, impervious area, Event Mean Concentrations (EMCs), Rainfall Sustaining Time (RST), First Flushing Effects (FFE)

* Corresponding author: Tel: 031) 201-2461, Fax: 031) 203-4589, E-mail: jmoh@khu.ac.kr

서 론

최근 기후변화로 인한 극심한 가뭄으로 인해 피해가 속출하고 있으며, 홍수 피해가 증대하고 있기 때문에 강우량, 강우강도, 강우의 패턴 변화로 수질 관리의 효율성이 저하되고 있는 실정이다. 또한 토지이용의 고도화로 인한 비점오염이 증가함에 따라 하천에 대한 비점오염부하 기여율은 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. Polls and Lanyon (1980)은 비점오염원 관리 없이는 목표수질 달성은 불가능하다고 지적하였으며, 특히 도시지역에서 비점오염원에 대한 연구의 필요성을 강조하였다. 또한 비점오염원 조사를 위한 유역 선정시의 기준 등을 제시하였으며, 비점오염원에 대한 대책이 마련되어야 한다고 보고하였다.

불투수성 지역 중 도로 및 주차장, 교량 등은 도시지역 중 강우시 오염부하량이 높게 발생하는 토지이용지역이다. 이러한 불투수성 지역이 증가하면 유출계수가 증가하여 강우시 지표유출에 의하여 유출된다. 또한 교통과 관련된 불투수성 지역은 배수시스템과 직접적으로 연결되어 있기 때문에 수문학적 및 환경적으로 하천에 큰 영향을 미친다. Kim *et al.* (2010)은 국내 고속도로 휴게소지역 비점오염원 유출특성 분석을 수행하였는데, 최근 비점오염원에 대한 관심이 높아지면서, 환경부 및 유관단체를 중심으로 노면 유출수를 포함한 비점오염원에 대한 현황 조사 및 처리 방법에 대한 관심이 증가하고 있다고 하였다. 또한 휴게소지점에 대한 강우유출수의 EMCs 분석 결과, TSS 128.2~273.4 mg · L⁻¹, COD_{Mn} 145.4~310.1 mg · L⁻¹, T-N 6.1~11 mg · L⁻¹, T-P 1.9~2.9 mg · L⁻¹의 범위로 분석되어 고속도로에서 유출되는 강우유출수와 비슷한 수준으로 유출되는 것으로 분석되었으며, 이것은 차량 정차 시 브레이크 패드나 타이어의 마모 등에 의한 것으로 분석하였다.

Sartor *et al.* (1974)은 인공적으로 거리에 살수를 하여 노면의 상태, 토지이용도별 오염물질의 유출특성에 대해 연구하였는데, 오염물질의 유출량은 강우강도에 비례하며, 노면에 축적된 오염부하량에 비례한다는 관계를 제시하였다. Whipple *et al.* (1977)은 강우시 도시지역에서 초기세척에 의해 배출되는 오염부하량은 건기시의 수백 배 이상으로 하천오염의 주요 원인임을 지적하였다. 또한 강우특성과 오염물질 부하량과의 관계를 연구하였는데, 강우량이 클수록 오염물질 유출부하량은 크게 나타났으며, 강우 전 건조일수가 길수록 유출부하량도 크게 나타났다고 보고하였다(Kim *et al.*, 2005). 또한 평균 강우강도가

클수록 유출부하량은 적게 나타났는데, 이는 희석효과에 의한 것으로 판단하였으며, 강우지속시간에 따른 오염물질의 평균농도는 강우 초기 30분까지 많은 양의 오염물질들이 유출된다고 하였다. Kim *et al.* (2006)은 강우에 의한 도로 비점오염원 유출특성에 대한 연구를 하였는데, 도시화로 인해 증가하고 있는 불투수층은 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 비점오염물질의 유출량을 증가시킨다고 하였다. 또한 유역특성은 수문곡선 형태뿐만 아니라 유출시간에 따른 비점오염물질의 유출분포에 즉각적인 변화와 영향을 준다고 하였으며, 특히 농촌유역에 교통량이 많은 고속도로와 같은 폐쇄된 불투수성 지역이 존재하는 경우에는 도시지역에서 흔히 관측되는 초기강우 효과가 발생되었다고 기술하였다(Kim *et al.*, 2002). 또한 강우시 비점오염원에 대하여 불투수성 지역의 존재, 배수체계 및 경로 등에 대한 면밀한 분석이 선행되어야 한다고 보고하였다. 강우시 오염물질의 유출은 유량에 의해 지배적인 영향을 받는 것으로 보고하였다(Kim *et al.*, 2002). Lee *et al.* (2008)은 도로를 포함하는 교통관련 포장지역에서 발생하는 비점오염물질의 EMCs를 산정하였는데, 그 결과를 보면, 포장지역에서의 EMCs는 TSS가 94.9 mg · L⁻¹, COD_{Mn} 84.8 mg · L⁻¹, T-N은 2.95 mg · L⁻¹, T-P의 경우에는 0.60 mg · L⁻¹로 산정되었다. 포장지역에 포함된 고속도로, 교량, 주차장 등에서 많은 농도의 차이가 나타나는 것으로 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 불투수성 지역의 비점오염원 유출특성을 파악하기 위하여 도로, 주차장, 교량 지역을 선정하여 현장 모니터링을 수행하여 비점오염물질의 유출 경향을 파악하였다. 또한, 비점오염물질 EMCs를 산정하고, 산정된 결과를 이용하여, 면적과 강우지속시간(SRD, Storm Runoff Duration) 따른 비점오염부하량을 산정하여 비점오염원 유출특성을 파악하고자 하였다. 또한 강우시 불투수성 지역에서의 초기세척효과를 분석함으로써, 향후 비점오염원 처리하기 위하여 설치되는 비점오염 저감 시설의 설계 시 반영할 수 있도록 하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 모니터링 위치

본 연구에서는 강우시 불투수성 지역에 대한 비점오염원 유출특성을 파악하기 위하여 불투수율이 높은 지역을 대상으로 선정하여 현장 모니터링을 수행하였다. 강우 및 유역특성에 의하여 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위하여 강우시 모니터링은 매우 중요한 요소이다. 모니터링

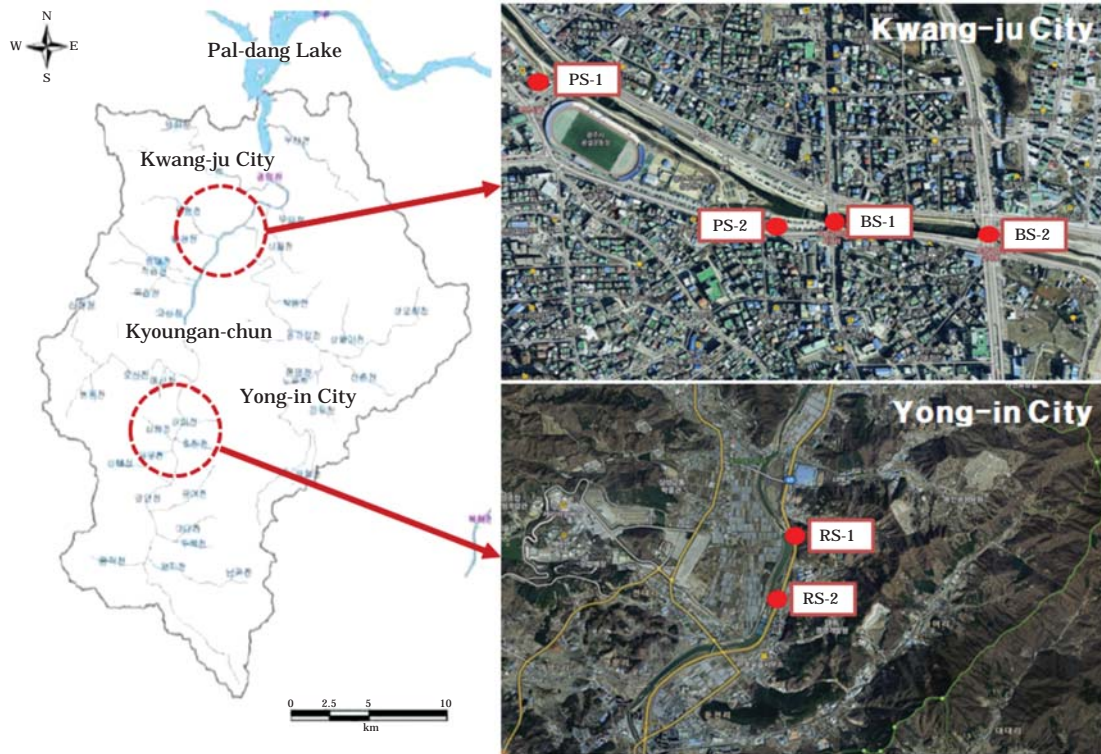


Fig. 1. Location of sampling site in the impervious area.

Table 1. Parameter and method of water analysis.

Parameter	Method	Preservation and pre-treatment	Materials
TSS	Filtering method of GF/C	—	—
BOD	Winkler {(sodium) azide modification} method	Modified Winkler's Azide Method	DO meter (YSI 95)
COD _{Mn}	Acid digestion by KMnO ₄	Add H ₂ SO ₄ conc. (< pH 2) preserved in low temperature	—
T-N	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	Add H ₂ SO ₄ conc. (< pH 2) preserved in low temperature	Photometer (550 nm)
T-P	Water autoanalyser (BRAN+LUEBBE)	Add H ₂ SO ₄ conc. (< pH 2) preserved in low temperature	Photometer (800 nm)

지점 중 차량 이동이 많은 도로 (RS, Road Stormwater) 는 경기도 용인시 처인구 부근 45번 국도에 위치하고 있으며, 차량 이동 및 정차로 인한 비점오염원 유출 특성을 파악하기 위하여 주차장 (PS, Parking lot Stormwater) 및 교량 (BS, Bridge Stormwater) 은 경기도 광주시 경안동 부근으로 선정하였다. 이에 본 연구에서는 모니터링 지점을 각각 2지점씩 선정하여 비점오염원 유출특성 분석을 위해 강우시 현장 모니터링을 수행하였으며, 전체 모니터링 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

2. 분석항목 및 방법

수질 분석용 시료는 정점 표층에서 채수한 시료를 0.1 N 질산 (HNO₃) 용액으로 세척한 1L 폴리에틸렌 병에 저장한 후 드라이아이스가 채워진 아이스박스에서 보관하였다. 본 조사 연구에서 사용된 분석 방법은 수질오염공정시험법에 준하였으며, 동법에서 규정하고 있는 비점오염물질의 분석항목 및 방법은 Table 1에 나타내었다.

3. 비점오염물질의 EMCs 산정

일반적으로 평균농도를 산정하는 가장 간단한 방법인 산술평균농도는 시간간격이 일정한 경우, 타당한 평균농도로써 제시될 수 있을 것으로 판단되지만, 강우시 발생하는 비점오염원의 유출은 실시간으로 변화되는 유출량과 농도의 변화가 있을 뿐 만 아니라, 모니터링 지점에 대하여 샘플채취가 일정간격으로 이루어지지 않기 때문에, 산술평균에 의한 평균농도는 대표성을 갖지 못하는 단점이 있다 (Kim *et al.*, 2002). 이러한 이유로 지역특성에 따른 모니터링을 통한 산술적인 평균으로는 강우시 유출되는 비점오염물질의 대표성을 가진 평균농도를 산정하는 것에 대하여 불확실하기 때문에 확률통계학적 방법을 이용하여 비점오염물질의 농도와 유출율을 고려하는 유량가중평균농도 (EMCs, Event Mean Concentrations)를 산정하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 불투수성 지역의 비점오염원 유출특성을 분석하기 위하여 적용한 EMCs로 산정된 값은 비점오염물질의 유출을 평가하는데 가장 적절한 인자로 판단된다. 비점오염원의 유출특성은 강우 강도에 의해 일정하게 발생하지 않는 경향이 있기 때문에 시간 및 강우 강도에 따른 오염 물질 배출 패턴을 함수로 표현하기에는 다소 어려움이 있다. 따라서 시간과 유출 유량의 개념을 모두 감안하여 유출되는 유량을 기준으로 비점오염원 오염물질의 유출특성을 파악하기 위해, EMCs를 산정할 필요가 있다.

EMCs는 모니터링 지역에서 강우지속시간 T시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산할 수 있으며, 비점오염원에서의 평균 농도 산정 시 중요하게 이용될 수 있으며, 향후 지역특성을 고려하여 비점오염원에 대한 제어 방안을 수립하기 위해 중요한 자료로써 활용 할 수 있다. 다음에 수학적 표현으로 나타낸 (식 1)에서의 C(t)와 Q(t)는 강우 지속시간 t에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미하며, T는 전체 유출시간을 나타낸다.

$$EMC (mg L^{-1}) = \frac{\sum_{t=0}^{t=T} C(t) \cdot Q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^{t=T} Q_{run}(t)} \quad (\text{식 1})$$

4. 단위면적당 비점오염부하량 산정

본 연구에서는 불투수성 지역의 비점오염원 유출특성을 파악하기 위해 단위면적당 비점오염부하량을 산정하고자 하였으며, 다음에 나타낸 (식 2)에 산정식을 나타내었으며, (식 1)에서 획득된 EMCs에 지점별 전체 유출량에 곱

한 후 유역면적으로 나누어 산정된다. 이러한 비점오염부하량은 강우시 불투수성 지역에서 유출되는 비점오염물질에 대한 오염도를 판단의 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\text{Pollutant Loading Per Area (mg m}^{-2}\text{)} = \frac{EMC (mg L^{-1}) \times Q (m^3)}{Area (m^2)} \quad (\text{식 2})$$

5. SRD에 따른 비점오염부하량 산정

본 연구에서는 불투수성 지역의 모니터링 지점에서 도출된 결과를 각 지점에서 산정된 EMCs와 대상 구역의 면적, 강우지속시간을 이용하여 지역별 각 지점에서의 강우지속시간에 따른 비점오염부하량을 산정하였다. 또한 비점오염물질의 유출은 주로 강우가 발생하여 시작되며, 강우에 의하여 유출되는 특성을 보이기 때문에 강우지속시간에 따른 비점오염물질부하량 산정도 매우 중요하다고 판단된다.

강우는 연간 다양하게 발생되는데, 강우 사상에 따른 불투수성 지역의 비점오염부하에 대한 판단을 하기 위해서는 다양한 강우지속시간에 따른 부하량 산정이 필요하다고 판단된다. 다음에 나타낸 (식 3)은 강우지속시간에 따른 비점오염부하량 산정식을 나타내었으며, EMCs와 유출량 및 조사 대상 지역의 각 지점별 면적과 강우지속시간을 고려하여 산정된다. 여기서, SRD (Storm Runoff Duration, hr)는 강우지속시간을 의미한다. 이러한 비점오염부하량은 강우시 불투수성 지역에서 유출되는 비점오염물질에 대한 오염도를 판단의 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\text{Pollutant Loading Per SRD (mg m}^{-2} \cdot \text{hr)} = \frac{EMC (mg L^{-1}) \times Q (m^3)}{Area (m^2) \cdot SRD (hr)} \quad (\text{식 3})$$

6. 강우시 초기세척효과 분석

강우시 지역특성에 따라 다양한 비점오염원 유출이 일어나며, 특히 강우초기에 고농도의 유출수가 수계로 유입되기 때문에, 이에 대한 문제를 해결하기 위한 노력과 이를 정량적으로 표현하고자 하는 연구들이 부족한 것이 현실이다. 또한 초기세척효과에 대한 분석을 하기 위해서는 강우시 초기세척효과 발생여부를 판단하고 발생하는 비점오염원에 대한 특성을 정확하게 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 초기세척효과 분석을 통해서 불투수성 지역

Table 2. Rainfall events at the impervious area.

Date (Event)	Antecedent dry days (day)	Rainfall duration (hr)	Total rainfall (mm)	Average rainfall intensity (mm · hr ⁻¹)
2011/4/30 (Event 1)	7	22	136.0	6.18
2011/7/03 (Event 2)	3	20	190.0	9.50
2011/7/07 (Event 3)	3	9	49.5	5.50
2011/8/12 (Event 4)	3	5	55.5	11.10

을 대상으로 비점오염원 유출특성을 해석하고자 하였다. 초기세척효과 (FFE, First Flushing Effects)란, 강우초기에 유역에 존재하고 있는 오염물질들이 초기유출에 다량 함유되어 고농도로 유출되는 현상을 말한다. 강우시 동일한 유역일지라도 강우사상 특성인 강우량, 강우지속시간, 강우강도에 따라서 강우시 초기세척 현상의 발생이 일어나는 것에 대한 차이가 있을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 강우사상뿐만 아니라 지역특성에 따라 많은 차이가 있을 수 있기 때문에 본 연구의 결과는 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 초기세척효과에 대한 분석은 비점오염원 관리에서 비점오염 저감방안 계획수립을 위한 저류용량 산정과 밀접한 관계가 있기 때문에 매우 중요한 자료가 된다. 따라서 본 연구에서는 불투수성 지역의 강우시 강우유출수에 의해 발생된 비점오염원의 초기유출을 분석하기 위하여 누적유출유량에 따른 누적오염부하량비를 산정하였으며, (식 4~식 5)에 나타내었다.

$$\frac{[Pi/\sum Pi]}{[Qi/\sum Qi]} > 1: \text{First flush effect} \quad (\text{식 } 4)$$

$$\frac{[Pi/\sum Pi]}{[Qi/\sum Qi]} \leq 1: \text{No First flush effect} \quad (\text{식 } 5)$$

여기서, $[Pi/\sum Pi]$ 는 Event 시간에 측정된 오염부하량에 대한 누적오염부하량 비를 의미하고, $[Qi/\sum Qi]$ 는 Event 시간에 측정된 유출유량에 대한 누적유출유량비를 나타내는 것이다.

결과 및 고찰

1. 불투수성 지역의 강우사상 특성

불투수성 지역의 경우, 유역 면적의 대부분이 아스팔트나 콘크리트 같은 불투수면으로 되어 있기 때문에 강우시 강우유출이 비교적 빠르게 일어나는 특징이 있다. 또한 불투수성 지역을 신뢰성 있게 유출을 모니터링 하기 위해서는 불투수성 지역에서의 강우량, 누적강우량, 강우에 대한 유출시간 등을 고려하여 종합적으로 평가해야 한다.

본 연구에서는 각 지점에 대한 강우사상 특성을 Table 2에 나타내었으며, 강우량 및 누적강우량 그래프를 Fig. 2에 나타내었다. 모니터링 기간 동안의 강우사상은 선행무강우일수 (ADD, Antecedent dry days)가 최소 3일 이상인 경우에만 현장 모니터링을 수행하였으며, 본 연구에서의 ADD는 3~7일로 나타났으며, 강우지속시간은 5~22 hr로 나타났다. 또한 불투수성 지역에서의 총강우량 (Total rainfall)은 55.5~190.0 mm로 나타나, 불투수성 지역에서 강우량의 차이가 모니터링 시기별로 많이 나는 것으로 나타났다. 또한 평균 강우강도 (Average rainfall intensity)의 경우, 5.50~11.10 mm · hr⁻¹로 나타났으며, 모니터링 시기별 강우강도에 대한 편차가 크게 나타났다. 강우강도가 크면 강우시 불투수성 지역에서 많은 양의 비점오염물질들이 유출되는 것으로 나타났으며, 강우지속시간의 경우에는 초기 유출에 대한 영향만 있는 것으로 나타났다.

2. 불투수성 지역의 비점오염원 유출특성

강우시 불투수성 지역에서 발생하는 강우유출수의 유량과 강우유출수에 포함된 비점오염물질의 농도를 유출 시간에 따라서 비점오염원의 유출 경향을 분석하였다. 불투수성 지역은 다른 토지이용에 비해 강우 유출율이 매우 높고 지속적인 도로 및 주차장, 교량 등에 의한 비점오염물질 축적이 쉽게 발생되어 비점오염물질의 발생 및 유출이 뚜렷한 특징을 보이는 것으로 나타났으며, 불투수성 지역의 비점오염원 유출 경향을 Figs. 3과 4에 나타내었다.

불투수성 지역의 RS-1 지점에 대한 강우유출 시간에 따른 TSS, BOD, COD_{Mn}의 유출 경향을 보면, TSS 11.2~855.5 mg · L⁻¹, BOD 4.2~32.4 mg · L⁻¹, COD_{Mn} 6.4~72.4 mg · L⁻¹로 나타났다. 본 연구와 같은 유형인 도로의 비점오염원 유출특성에 관한 연구결과에 의하면, 현재 국내에서 조사된 도로의 비점오염물질 평균 농도는 SS 126 mg · L⁻¹, COD_{Mn} 67 mg · L⁻¹, T-N 7.5 mg · L⁻¹, T-P 0.48 mg · L⁻¹로 나타난다고 보고하였다 (Kim et al., 2006). 이러한 결과를 볼 때, 본 연구에서도 입자성 물질의 농도가 높게 나타났고, 기존 연구들에서도 TSS 농도가 높게 나타

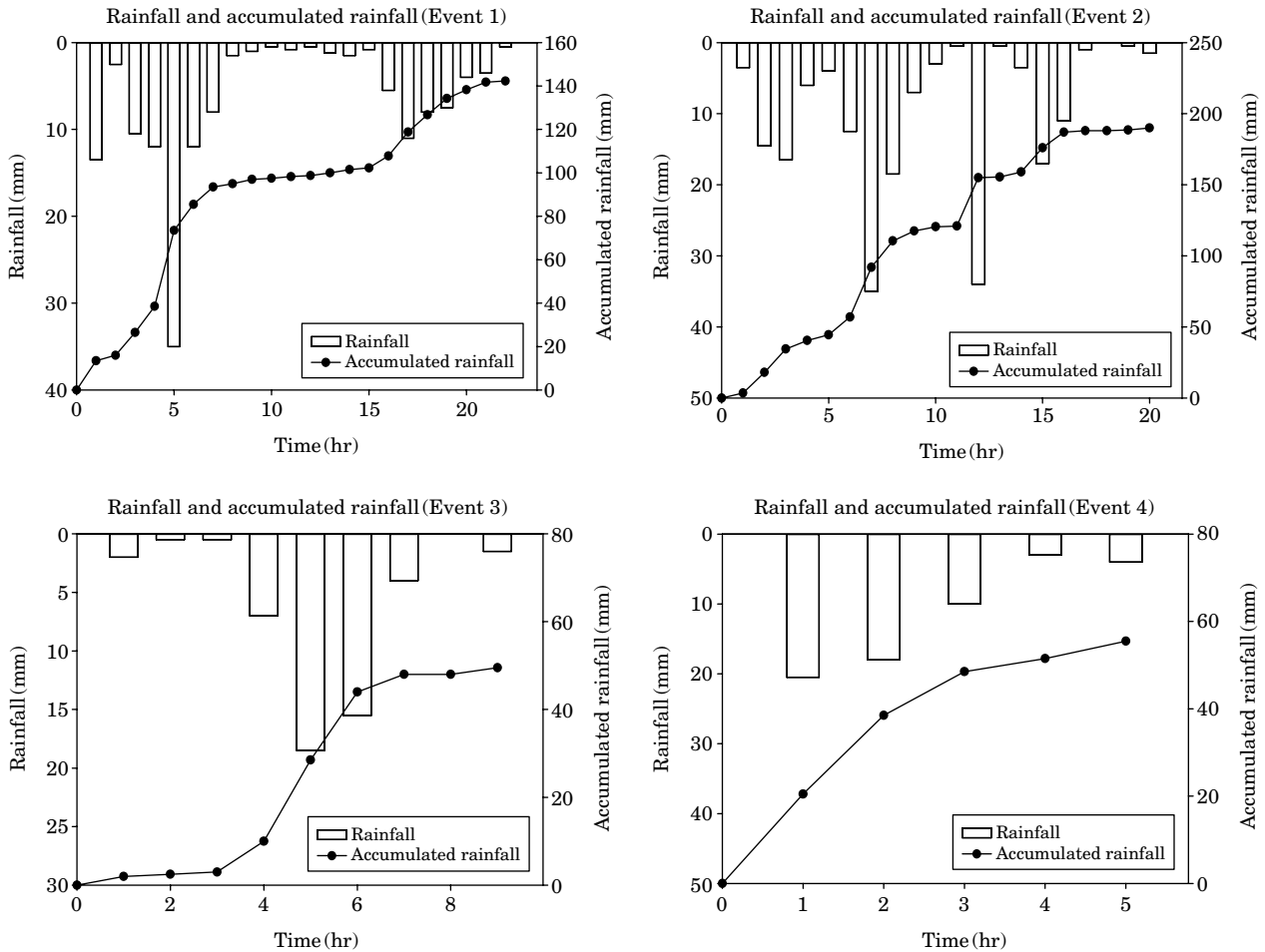


Fig. 2. Rainfall and accumulated rainfall at the impervious area.

나는 경향을 보여, TSS는 비점오염원에 주요 관리 대상으로 판단된다. RS-1 지점에서의 T-N, T-P 유출 경향 분석결과, T-N은 0.848~4.888 mg · L⁻¹, T-P는 0.084~0.545 mg · L⁻¹로 나타났다. 선형무강우일수가 길수록 비점오염물질의 농도가 강우초기에 높게 나타나는 경향을 보였으며, 대부분 초기강우 현상을 보이며 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 이유는 무강우일수가 길어지면서 도로 표면에 집적되어 있던 영양물질들이 강우시 유출되는 것으로 나타났다. 기존 연구에 의하면, 도로 유출수 수질 농도 범위는 TSS 14~596 mg · L⁻¹, COD 35.8~245.5 mg · L⁻¹, T-N 1.49~23.5 mg · L⁻¹, T-P 0.022~0.789 mg · L⁻¹로 나타나 (Lee et al., 2008), 본 연구에서의 영양물질의 범위보다 더 큰 것으로 나타났지만, 유출 경향은 비슷하였다. RS-2 지점에 대한 강우유출 시간에 따른 TSS, BOD, COD_{Mn}의 유출 경향을 보면, TSS는 6.6~422.0 mg · L⁻¹, BOD는 3.4~50.6 mg · L⁻¹, COD_{Mn} 4.4~72.2 mg · L⁻¹로 나타났

다. 기존 연구에 의하면, TSS는 346 mg · L⁻¹, COD_{Mn}는 278.6 mg · L⁻¹로 보이는데, 이는 차량의 정체 및 지체가 심한 토지이용 때문이라고 보고하였다 (Kim et al., 2005). 본 연구에서의 모니터링 지점은 차량의 이동이 많은 특성을 가지고 있으며, 이로 인해 입자성 물질이 건기 시 도로 표면에 집적되어 있다가 강우시 초기에 유출되는 경향을 보였으며, 이에 대한 대책으로는 초기강우를 처리할 수 있는 비점오염 저감시설의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

PS-1 지점의 TSS는 4.0~50.2 mg · L⁻¹로 나타났으며, 유기물질인 COD_{Mn}는 6.2~35.8 mg · L⁻¹로 나타났다. 기존 연구에 의하면, TSS는 115.2 mg · L⁻¹로 나타났는데, 이러한 이유는 선형무강우기간 및 강우량 등의 강우특성에 따라 다르기 때문으로 판단된다. 주차장의 특성 상 정차되어 있는 경우가 대부분이지만, 차량 이동이 많기 때문에 오염물질의 편차가 심한 것으로 판단된다. 또한 Kim

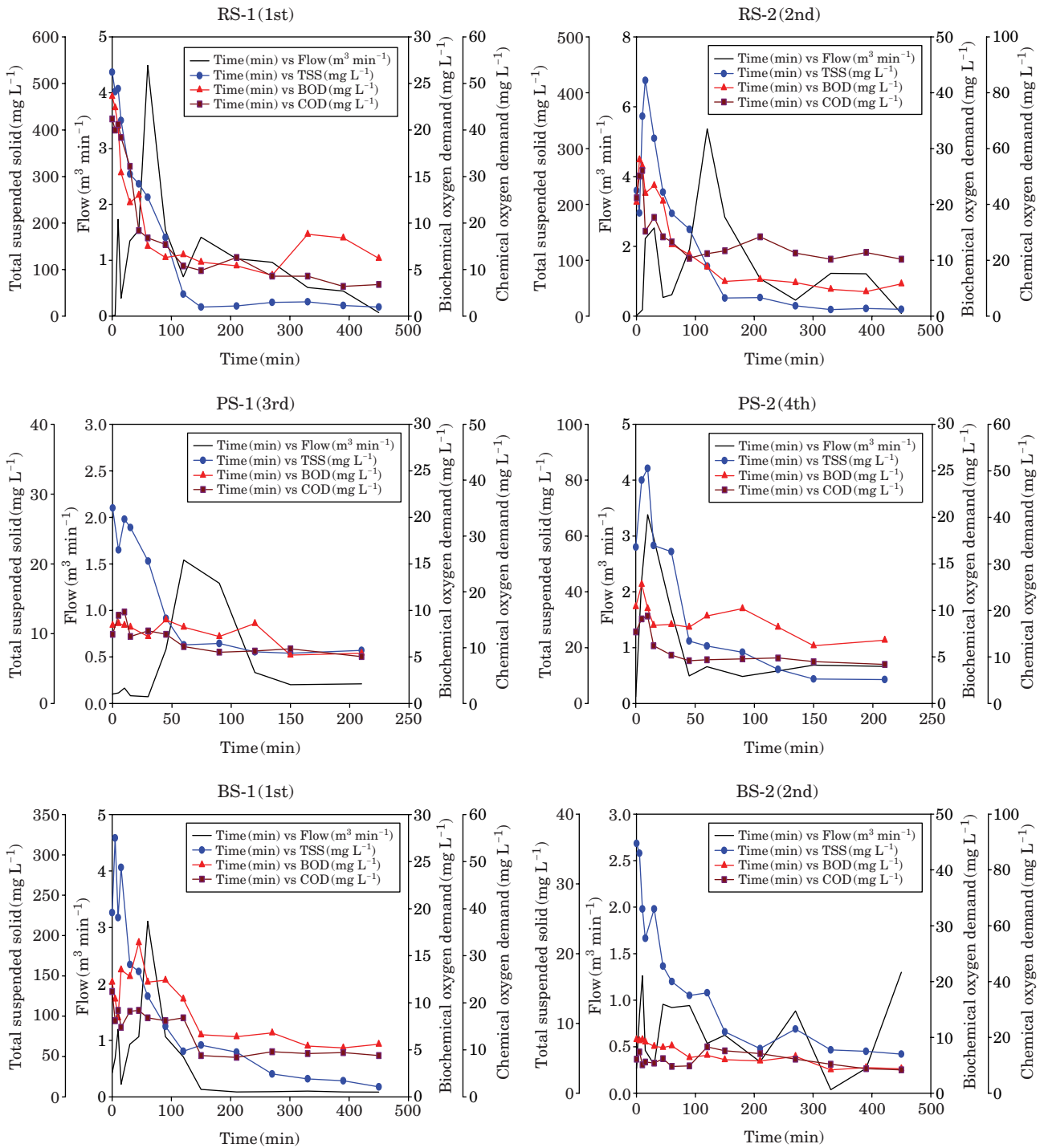


Fig. 3. The concentration variation of TSS, BOD, COD_{Mn} at the impervious area.

et al. (2005)에 의하면, 주차장 지역은 작은 면적에 비해서 강우시 다른 토지이용에 비해 강우 유출량이 높다는 유역 특성을 가지고 있으며, 입자상 물질을 유출시킨다고 보고하였다. PS-2 지점의 TSS는 6.0 ~ 380.2 mg · L⁻¹로

나타나, 초기유출 농도와 강우후반부에 나타난 유출농도의 차가 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 기존 연구의 TSS 12.06 ~ 397.10 mg · L⁻¹와 비슷한 경향을 보이고 있었다. 이러한 이유는 강우사상 특성에 기인한 것으로 판단되며,

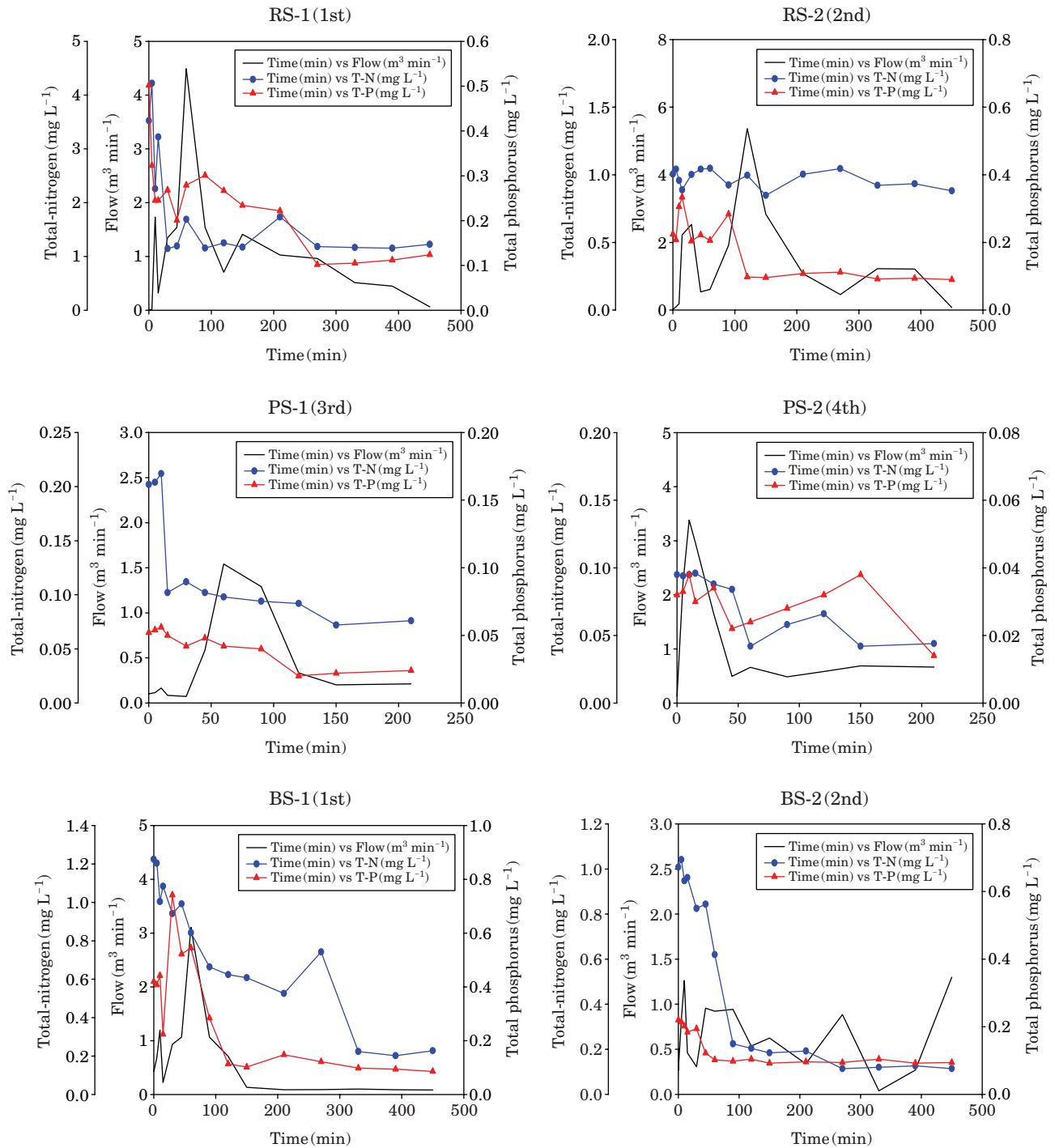


Fig. 4. The concentration variation of T-N, T-P at the impervious area.

주차장의 특성 상 정차되어 있는 경우가 대부분이지만, 차량 이동이 많기 때문에 오염물질의 편차가 심한 것으로 판단된다.

BS-1 지점의 경우에는 TSS가 $6.4 \sim 322.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로

나타났으며, COD_{Mn} 는 $5.4 \sim 42.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 나타났다. 기존 연구에 의하면, TSS의 경우 평균농도가 강우유출 직후 $432.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 나타내었으나, 강우지속시간 60분이 경과한 후 $41.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 감소하였다고 보고하였다(Wee et al.,

Table 3. EMCs of non-point pollutants discharged from the road.

Classification	TSS (mg · L ⁻¹)	COD _{Mn} (mg · L ⁻¹)	T-N (mg · L ⁻¹)	T-P (mg · L ⁻¹)
Kim, L.H. (2004)	15 ~ 4,100	13 ~ 1,720	20	2.5
Wu <i>et al.</i> (1998)	283	70	2.25	0.43
Legret (1999)	71	103	2.30	-
Barrett <i>et al.</i> (1995)	131	126	1.03	0.33

2008). 교량 지역의 특성 상 차량 이동이 많기 때문에 집적되어 있던 오염물질이 초기에 유출됨을 본 연구와 비교했을 때에도 비슷한 경향이 나타났다. BS-2 지점의 TSS는 5.6 ~ 280.0 mg · L⁻¹로 나타났으며, 입자성 물질에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 비점오염원 관리 시 불투수율이 높은 포장지역의 경우 교량 노면에 집적된 오염물질이 강우초기에 쓸려서 유출되는 특성을 보였으며, 강우가 지속되면서 비점오염물질의 농도가 낮아지는 경향이 나타났다.

3. 비점오염물질의 EMCs 산정 결과

본 연구에서는 불투수성 지역에서의 모니터링을 통해 비점오염물질에 대한 EMCs를 산정하여 비점오염원 유출 특성을 반영할 수 있도록 하였다. 도시나 도로 지역과 같은 포장지역의 경우에는 초기강우 현상이 일어나기 때문에 단수 시료 샘플의 평균농도가 아닌 비점오염원의 유출특성을 잘 반영할 수 있는 강우유출량이 고려된 유량가중 평균농도(EMCs)로 산정되어야 한다고 보고하였다 (Kim *et al.*, 2006).

불투수성 지역 중 국내 · 외 연구의 EMCs 결과를 Table 3에 나타내었으며, TSS 농도 범위가 편차가 나타나는 것으로 조사된 것을 알 수 있으며, 다른 오염물질들의 농도도 매우 높게 나타나 있기 때문에 이러한 비점오염물질들이 수계로 유입 시 오염부하가 증가될 것으로 판단된다.

강우시 불투수성 지역에서의 비점오염원 유출특성을 분석하기 위하여 비점오염물질의 항목별 EMCs를 산정한 값들을 Fig. 5에 나타내었다. EMCs 산정 결과, RS-1 지점에서는 TSS가 59.9 ~ 122.2 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, 평균값은 80.6 mg · L⁻¹로 나타났다. 유기물질인 COD_{Mn}는 14.0 ~ 18.0 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, 평균값은 16.4 mg · L⁻¹로 나타났다. 기존 연구에 의하면, 강우에 의한 도로면 유출수의 오염물질 유출특성을 파악하기 위해 EMCs 산정 결과, SS 26.8 ~ 123.4 mg · L⁻¹, COD 15.3 ~ 117.7 mg · L⁻¹, TN 0.06 ~ 5.16 mg · L⁻¹, T-P 0.05 ~ 0.49 mg · L⁻¹로 검출되었다고 보고하였다. 또한 강우량에 따라 오염물질의 초기 유출이 쉽게 발생하는 것으로 조사되어

초기세척효과가 미미하게 발견되었으며, 대부분의 오염물질들이 SS와 유출상관계수가 0.93 이상으로 관찰되어 SS에 부착되어 유출되는 것으로 판단된다 (Kim *et al.*, 2006). RS-2 지점에서는 TSS가 53.3 ~ 96.8 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, 평균값은 73.5 mg · L⁻¹로 나타났다. 유기물질의 경우 BOD의 범위는 4.7 ~ 12.4 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, 평균값은 8.0 mg · L⁻¹로 나타났으며 COD_{Mn}의 범위는 10.5 ~ 24.2 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고 평균값은 15.7 mg · L⁻¹로 나타났다. 영양물질인 T-N은 0.398 ~ 1.248 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, T-P는 0.092 ~ 0.139 mg · L⁻¹의 범위로 나타났다. PS-1 지점에서는 TSS가 9.2 ~ 18.3 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, 평균값은 12.1 mg · L⁻¹로 나타났으며, PS-2 지점에서는 TSS가 14.6 ~ 199.3 mg · L⁻¹의 범위로 나타났는데, 기존 연구에 의하면 (Kim *et al.*, 2005). 주차장 지역에서의 TSS EMCs는 12.1 ~ 37.4 mg · L⁻¹로 나타나, 본 연구결과와 차이가 나는 것으로 나타났는데, 이는 강우사상 특성이 다르고, 불투수면에 집적되어 있던 오염물질의 양이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

BS-1 지점에서의 EMCs 산정 결과, TSS가 13.9 ~ 114.8 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고, 평균값은 64.8 mg · L⁻¹로 나타났다. 영양물질의 경우, T-N은 0.084 ~ 1.102 mg · L⁻¹의 범위로 나타났고 평균값은 0.675 mg · L⁻¹로 나타났으며, T-P는 0.026 ~ 0.359 mg · L⁻¹의 범위로 나타났다. BS-2 지점에서는 TSS가 11.3 ~ 116.1 mg · L⁻¹의 범위로 나타났다.

본 연구에서 불투수성 지역에 대한 비점오염원 유출특성을 분석한 결과, 기존 연구와 비교해 보면, 비점오염물질의 EMCs 농도는 도로, 주차장, 교량에서 강우시 유출되는 값과 비슷한 경향을 보였으며, 특히 TSS가 고농도로 유출되는 것으로 나타나, 이에 대한 대책으로는 장치형 시설을 설치하여 입자성 물질의 저감을 하는 것이 바람직하다.

4. 단위면적당 비점오염부하량 산정 결과

본 연구에서 모니터링 지점인 도로, 주차장, 교량 지역에서 도출된 결과를 각 지점에서 산정된 EMCs와 대상 구역의 면적을 이용하여 각 지점별 면적당 비점오염부하

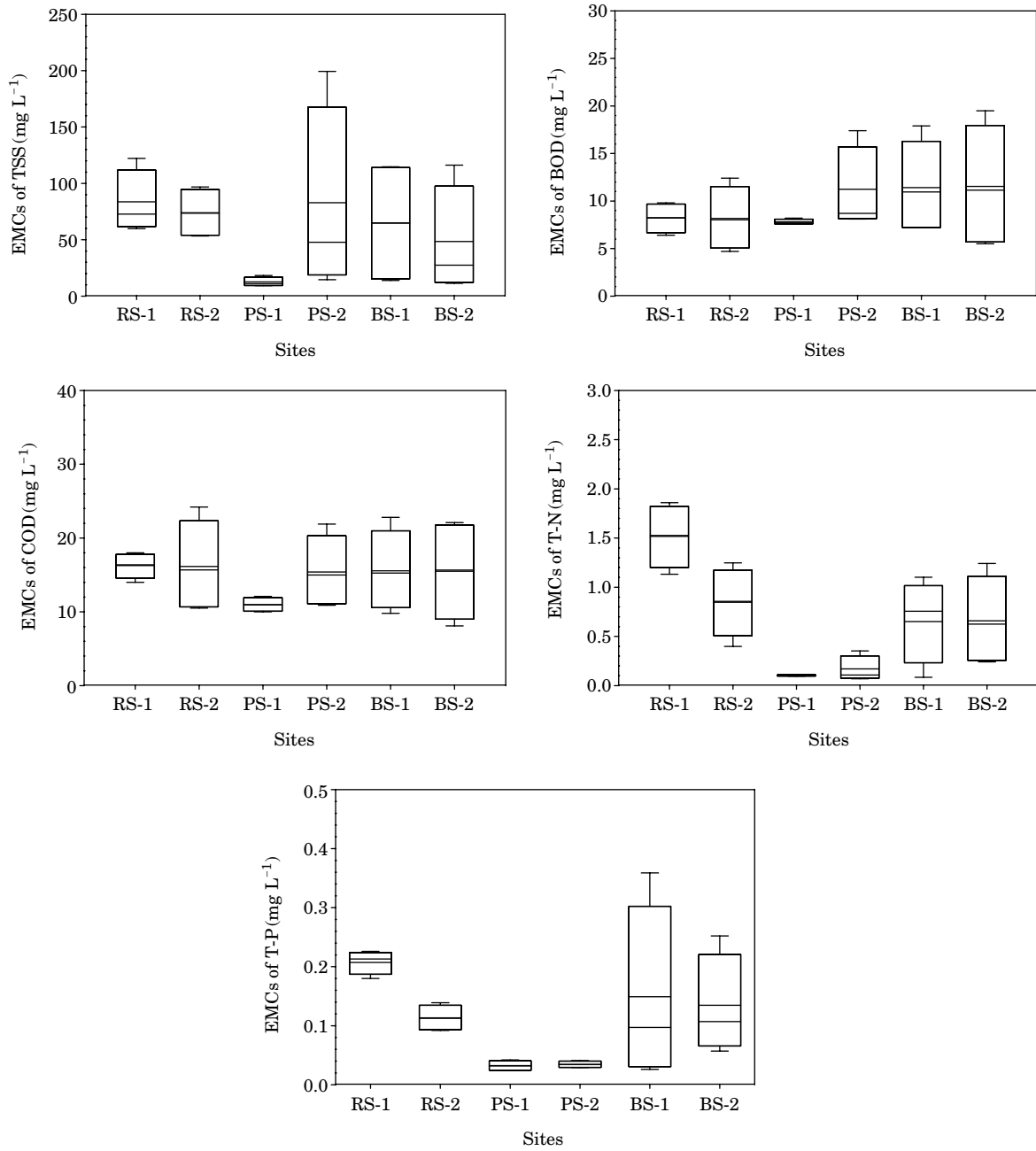


Fig. 5. Determination of monitored EMCs at the impervious area.

량을 산정하여 Table 4에 나타내었다. 비점오염물질 항목별 단위면적당 오염부하량은 매우 높은 값을 나타내고 있는데, 이는 불투수성 지역의 특성상 아스팔트로 되어 있는 도로 및 주차장, 교량 등이 있는 불투수면이 대부분의 토양상부를 덮고 있기 때문에 강우가 집중되어 유출되기 때문에 비점오염물질의 유출이 증가하기 때문에 오염부하량이 증가한 것으로 판단된다. RS-1 지점에서의 면

적 대비 비점오염부하량 산정 결과, TSS는 1,007~8,572 mg · m⁻²이며, 평균 4,504 mg · m⁻²로 분석되어 다른 비점오염물질 보다 매우 높게 나타나는 경향을 보였다. RS-2 지점에서 TSS 오염부하량이 매우 높게 나타나는 경향을 보이고 있기 때문에 오염부하량을 줄이기 위해서는 TSS의 저감효율이 가장 높은 시설을 설치해야 한다. 기존 연구에 의하면, TSS의 경우에는 146.17~715.87 mg · m⁻²

Table 4. Computation of pollutants load per impervious area.

Site	TSS (mg · m ⁻²)	BOD (mg · m ⁻²)	COD _{Mn} (mg · m ⁻²)	T-N (mg · m ⁻²)	T-P (mg · m ⁻²)	
RS-1	Event-1	7,401	453	850	84.6	13.16
	Event-2	8,572	816	2,285	236.2	27.09
	Event-3	1,037	169	282	19.6	3.11
	Event-4	1,007	129	238	23.7	3.13
	Average	4,504	392	914	91.0	11.62
RS-2	Event-1	5,164	662	895	66.6	4.91
	Event-2	6,400	645	1,764	69.2	10.12
	Event-3	1,070	89	214	7.6	1.85
	Event-4	1,568	179	309	24.4	3.59
	Average	3,551	394	795	42.0	5.12
PS-1	Event-1	482	427	633	5.9	2.22
	Event-2	869	607	900	8.2	2.05
	Event-3	217	169	223	2.1	0.80
	Event-4	282	117	158	1.5	0.37
	Average	462	330	478	4.4	1.36
PS-2	Event-1	7,585	663	833	13.4	1.43
	Event-2	4,019	736	983	9.1	3.43
	Event-3	323	180	343	1.8	0.64
	Event-4	596	158	207	1.3	0.57
	Average	3,131	434	591	6.4	1.52
BS-1	Event-1	45,777	4,687	6,372	309.9	146.98
	Event-2	11,143	4,277	5,732	446.2	15.26
	Event-3	2,991	1,562	2,777	18.1	9.70
	Event-4	23,166	3,615	4,606	222.3	19.60
	Average	20,769	3,535	4,872	249.1	47.89
BS-2	Event-1	17,524	2,946	3,127	108.9	38.02
	Event-2	2,434	1,358	2,527	63.7	23.03
	Event-3	1,296	505	747	22.1	5.20
	Event-4	1,942	943	1,563	87.8	6.40
	Average	5,799	1,438	1,991	70.6	18.16

로 나타났으며, COD_{Mn}는 45.38~321.80 mg · m⁻², 영양염류인 T-N은 14.24~28.73 mg · m⁻², T-P는 0.78~2.40 mg · m⁻²의 범위로 나타났다 (Lee *et al.*, 2008).

PS-1의 TSS는 216~869 mg · m⁻²이며, 평균 462 mg · m⁻²로 분석되어 다른 비점오염물질보다 매우 높게 나타나는 경향을 보였다. 주차장의 경우에는 대부분의 차량이 정차되어 있기 때문에 차량에 의한 오염물질 집적은 차량 이동에 의한 것으로 기인된다. 이러한 부분을 고려한다면, 면적당 오염물질의 양을 줄일 수 있는 방안이 고려되어야 할 것이다. 비점오염물질에 대한 항목별 단위면적당 오염부하량 산정 결과, 도로 지역의 경우에는 TSS가 7.5~11.6 kg · ha⁻¹, 유기물질인 COD가 2.25~3.38 kg · ha⁻¹, 영양물질인 T-N의 경우에는 0.34~0.51 kg · ha⁻¹로 나타났고, T-P는 0.05~0.08 kg · ha⁻¹의 범위로 나타났다고 하였다 (Kwon, 2010).

BS-1 지점에서의 TSS 범위는 2,991~45,777 mg · m⁻², 평균 20,769 mg · m⁻²로 분석되어 다른 비점오염물질 보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 유기물질인 COD_{Mn}는 2,777~6,372 mg · m⁻², 평균 4,872 mg · m⁻²로 나타났다. BS-1 지점에서 TSS 오염부하량이 매우 높게 나타나는 경향을 보이고 있기 때문에 오염부하량을 줄이기 위해서는 TSS의 저감효율이 가장 높은 시설을 설치해야 한다. BS-2 지점에서도 BS-1 지점과 비슷하게 TSS 오염부하량이 매우 높게 나타나는 경향을 보이고 있기 때문에 오염부하량을 줄이기 위해서는 TSS를 효과적으로 줄이는 방안을 모색하고, 이에 대한 비점오염 저감시설을 교량에 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 불투수성 지역의 각 지점에 대한 면적당 비점오염부하량을 산정한 결과 값은 기존 연구와 거의 비슷한 경향을 보였으며, 특히 TSS의 경우에는 매

Table 5. Estimation of pollutants loading from non-point sources according to storm runoff duration.

Site	TSS ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)	BOD ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)	COD _{Mn} ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)	T-N ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)	T-P ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)	
RS-1	Event-1	462.6	28.3	53.1	5.29	0.82
	Event-2	535.7	51.0	142.8	14.76	1.69
	Event-3	64.8	10.6	17.6	1.22	0.19
	Event-4	62.9	8.0	14.9	1.48	0.20
	Average	281.5	24.5	57.1	5.69	0.73
RS-2	Event-1	322.8	41.3	55.9	4.16	0.31
	Event-2	400.0	40.3	110.2	4.33	0.63
	Event-3	66.9	5.6	13.4	0.48	0.12
	Event-4	98.0	11.2	19.3	1.52	0.22
	Average	221.9	24.6	49.7	2.62	0.32
PS-1	Event-1	30.1	26.7	39.5	0.37	0.14
	Event-2	54.3	38.0	56.2	0.51	0.13
	Event-3	13.5	10.5	13.9	0.13	0.05
	Event-4	17.6	7.3	9.9	0.10	0.02
	Average	28.9	20.6	29.9	0.28	0.08
PS-2	Event-1	474.1	41.4	52.1	0.84	0.09
	Event-2	251.2	46.0	61.4	0.57	0.21
	Event-3	20.2	11.2	21.4	0.11	0.04
	Event-4	37.3	9.9	12.9	0.08	0.04
	Average	195.7	27.1	37.0	0.40	0.09
BS-1	Event-1	2861.1	292.9	398.3	19.37	9.19
	Event-2	696.4	267.3	358.3	27.89	0.95
	Event-3	186.9	97.6	173.6	1.13	0.60
	Event-4	1447.8	226.0	287.9	13.89	1.22
	Average	1298.1	221.0	304.5	15.57	2.99
BS-2	Event-1	1095.3	184.1	195.4	6.81	2.38
	Event-2	152.1	84.8	157.9	3.98	1.44
	Event-3	81.0	31.6	46.7	1.38	0.33
	Event-4	121.4	58.9	97.7	5.49	0.40
	Average	362.4	89.9	124.4	4.42	1.14

우 크게 나타났다. 이는 불투수성 지역에서의 비점오염원 저감 방안을 수립 시 TSS에 대한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

5. SRD에 따른 비점오염부하량 산정 결과

본 연구에서 불투수성 지역의 모니터링 지점에서 도출된 결과를 각 지점에서 산정된 EMCs와 대상 구역의 면적과 강우지속시간을 이용하여 불투수성 지역의 각 지점별 SRD (Storm Runoff Duration)에 따른 비점오염부하량을 산정하였다. 비점오염물질의 유출은 주로 강우에 의하여 유출되는 특성을 보이기 때문에 강우지속시간에 따른 오염물질 부하량 산정도 매우 중요하다. 각종 비점오염물질들의 지표면 퇴적 및 강우유출수 내에서의 거동은 TSS로 측정되는 고형물질의 이송과정과 긴밀한 연관을 가지

고 있다. 불투수성 지역의 강우지속시간에 따른 비점오염부하량 산정 결과를 Table 5에 나타내었으며, 모니터링 지점에서의 강우사상별 비점오염부하량 분석을 각 지점별로 나타내었다. RS-1 지점에서의 강우지속시간에 따른 비점오염부하량 산정 결과, TSS는 62.9~535.7 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$, 평균 281.5 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 분석되었으며, 다른 비점오염물질 보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 유기물질인 COD_{Mn}는 14.9~142.8 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$, 평균 57.1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다. RS-1 지점에서는 다른 오염물질 보다 TSS 오염부하량이 매우 높게 나타나는 경향을 보이고 있기 때문에 오염부하량을 줄이기 위해서는 TSS의 저감효율이 가장 높은 시설을 설치해야 할 것으로 판단된다. 또한 RS-2 지점의 TSS는 66.9~400.0 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 이며, 평균 221.9 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 분석되었다. 기존 연구에 의하면, 강우지속시간에 따른 오염부하량을 산정한

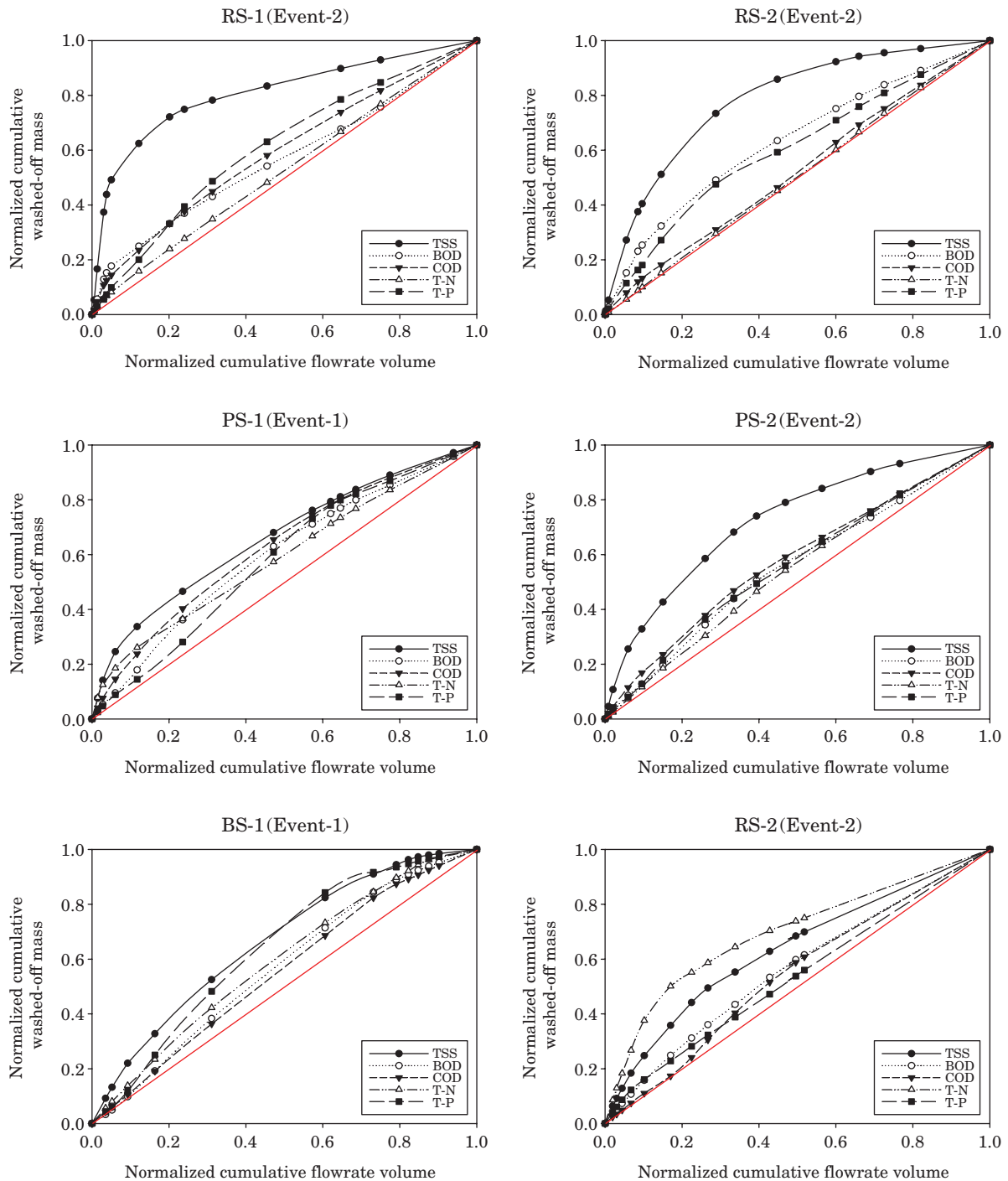


Fig. 6. Analysis of First Flushing Effects (FFE) at the impervious area.

결과, TSS는 $36.39 \sim 213.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났으며, COD_{Mn} 는 $7.54 \sim 76.72 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$, 영양염류인 T-N의 경우에는 $2.03 \sim 28.73 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$, T-P의 경우에는 $0.15 \sim 1.90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 의 범위로 나타났다 (Lee *et al.*, 2008).

PS-1 지점에서의 강우지속시간에 따른 비점오염부하량 산정 결과, TSS의 범위는 $13.5 \sim 54.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 이며, PS-2 지점의 TSS는 $20.2 \sim 474.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다. BS-1 지점의 TSS의 범위는 $186.9 \sim 2,861.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 이며, 평균 $1,298.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 분석되어 다

른 비점오염물질 보다 높게 나타나는 경향을 보였다. BS-2 지점의 TSS는 $81.0 \sim 1,095.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 이며, 평균 $362.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 분석되어 다른 비점오염물질 보다 높게 나타나는 경향을 보였고, COD_{Mn}의 경우에는 $46.7 \sim 195.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$, 평균 $124.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났는데, 다른 지점과 비교하면 유기물질이 매우 높은 경향을 보이고 있으며, 이는 TSS의 영향으로 상관성이 매우 높은 것으로 판단된다. T-N은 $1.38 \sim 6.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 이며, 평균 $4.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 분석되었고 최소값과 최대값의 차이가 매우 높게 나타났다.

따라서 본 연구에서는 불투수성 지역의 각 지점에 대한 강우지속시간에 따른 비점오염부하량을 산정한 결과 값은 기존 연구와 거의 비슷한 경향을 보였으며, 특히 TSS의 경우에는 면적당 비점오염부하량도 크게 나타났는데, 매우 크게 나타났다. 이는 불투수성 지역에서의 비점오염원 저감 방안을 수립 시 TSS에 대한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다. 특히 불투수성 지역에서의 유출은 초기 강우시 농도로 유출되고, 매우 빠르게 쓸림 현상을 보이기 때문에 이에 대한 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

6. 강우시 초기세척효과 분석 결과

본 연구에서 현장 모니터링을 수행한 불투수성 지역 중 도로, 주차장, 교량에 대하여 초기유출 특성을 표현하기 위하여 초기세척효과를 산정하였다. 초기강우는 실제 총강우량에 있어 상대적으로 높은 오염도를 지니고 있으므로 이에 대한 분석과 관리방안의 필요성이 제기되고 있다 (Hawkins and Hjelmfelt, 1979).

초기세척효과는 선행건기일수가 길고, 강우강도가 강한 지역일 경우에 각각의 경향이 나타나는 것 보다는 동시에 일어나는 경우에 초기세척효과가 크게 발생한다. 따라서 강우인자에 대한 명확한 파악을 통해 초기세척효과에 대한 분석을 하는 것이 바람직하며, 이에 대한 메커니즘을 규명하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 불투수성 지역의 비점오염원 유출특성을 파악하기 위하여 강우유출수에 포함된 TSS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P의 초기유출특성을 표현한 것을 Fig. 6에 나타내었다.

TSS의 경우, Event 1, Event 2에서 초기세척효과가 매우 잘 관찰되었으며, TSS > COD_{Mn} > T-P 순으로 뚜렷하게 나타나는 것으로 조사되었다. 초기세척효과는 강우량이 많고 강우강도도 크게 발생하였던 1차와 2차 Event의 경우 매우 뚜렷하게 나타났으며, 강우강도가 강우 후 반부에 나타났던 Event 4의 경우에는 비점오염물질에 대

한 초기세척 개념을 적용시키기 힘들 것으로 판단된다. TSS와 COD_{Mn}가 가장 민감하게 강우에 영향을 받는 것으로 나타났다.

초기세척효과 분석에 대한 수질항목의 경우 TSS가 유기물질보다 변동 폭이 훨씬 크게 나타나고 있기 때문에, TSS가 강우에 더욱 민감한 것으로 분석되었다. 이는 향후 비점오염 저감시설의 설치 시 고려해야 할 사항으로 판단된다.

적 요

본 연구는 강우시 불투수성 지역에서 비점오염원 유출 특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 불투수성 지역의 강우사상 특성은 강우강도에 대한 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 강우강도가 크게 작용하면, 초기강우 현상이 잘 일어나는 것으로 나타났다. 또한 선행무강우일수에 의해서 비점오염물질의 농도차가 큰 것으로 나타나, 이에 대한 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다. 불투수성 지역의 비점오염원 유출 경향을 보면, 강우초기 유출 유량에 포함되어 유출되는 오염물질의 농도가 상대적으로 매우 높게 나타났고, 일정 시간 경과 후에는 지속되는 강우에도 불구하고 오염물질의 농도는 증가하지 않고 낮은 농도로 안정적인 유출경향을 나타내었다. 이러한 이유는 건기 시 도로 표면에 집적되어 있던 오염물질들이 강우시 초기에 유출되어 비점오염물질의 농도가 높게 나타나는 것으로 나타났다. 불투수성 지역에서 발생하는 비점오염물질 항목별 단위면적당 오염부하량은 매우 높은 값을 나타내고 있는데, 이는 불투수성 지역의 특성상 아스팔트로 되어 있는 도로 및 주차장, 교량 등이 있는 불투수면이 대부분의 토양상부를 덮고 있기 때문에 강우시 불투수성 지역 내 모니터링 지점에서 강우가 집중되어 유출되기 때문에 비점오염물질의 유출이 증가하기 때문에 오염부하량이 증가한 것으로 판단된다. 강우시 초기세척효과는 TSS의 경우, Event 1, Event 2에서 초기세척효과가 매우 잘 관찰되었으며, TSS > COD_{Mn} > T-P 순으로 뚜렷하게 나타나는 것으로 조사되었다. TSS와 COD_{Mn}가 가장 민감하게 강우에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이에 본 연구 결과를 통해 분석된 결과를 토대로 비점오염원 유출특성에 대한 다양한 데이터베이스를 구축하여 향후 비점오염원을 효율적으로 관리하는데 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 비점오염원을 체계적으로 관리하여 수계환경의 오염부하를 줄일 수 있는 방안을 강구해야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Ahn, T.W., I.S. Choi and J.M. Oh. 2009. Study on Water quality Purification Effect of Compact Wetland for Non-point Source Pollution Control. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology* **17**: 143-151.
- Barrett, M.E., L.B. Irish, J.F. Malina and R.J. Charbeneau. 1998. Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area. *Journal of Environmental Engineering* **124**: 131-137.
- Becher, K.D., D.J. Schnoebelen and K.K.B. Akers. 2000. Nutrients Discharged to the Mississippi River from Eastern Iowa Watershed, 1996~1997. *Journal of The American Water Resources Asspcia* **36**: 161-173.
- Ham, J.H., C.G. Yoon, J.Y. Han, H.C. Kim. 2006. Seasonal Performance of Constructed Wetland for Nonpoint Source Pollution Control. *The Korean Society of Limnology* **39**: 471-480.
- Hawkins, R.H. and A.R. Hjelmfelt. 1979. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *Journal of Irri. and Drain* **111**: 330-340.
- Heo, W.M., B.C. Kim, Y.N. Kim and K.S. Choi. 1998. Storm runoff of phosphorus from nonpoint sources Into Lake Soyang and transportation of turbid water mass within the lake. *The Korean Society of Limnology* **31**: 1-8.
- Kim, J.H., H.M. Kang and S.O. Ko. 2010. Evaluation of Pollutants Concentrations and Runoff Characteristics in Highway Rest Area. *Journal of Korean Society of Road Engineers* **12**: 131-137.
- Kim, L.H., B.S. Lee and S.Y. Kwon. 2007. Optimum Capacity of Retention Basin for Treating Nonpoint Pollutants and Its Removal Efficiency in Industrial Complex Areas. *Journal of Korean Wetlands Society* **7**: 75-85.
- Kim, L.H. and J.H. Kang. 2004. Determination of Event Mean Concentrations and Pollutant Loadings in Highway Storm Runoff. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**: 631-640.
- Kim, L.H. and S.H. Lee. 2005. Characteristics of Washed-off Pollutants and Dynamic EMCs in a Parking Lot and a Bridge during Storms. *Journal of Korean Society on Water Quality* **21**: 248-255.
- Kim, S.K., Y.I. Kim, S.W. Kang, S.L. Yun and S.J. Kim. 2006. Runoff Characteristics of Non-Point Sources on the Stormwater. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **28**: 104-110.
- Kim, S.S., J.S. Kim, K.Y. Bang, E.M. Gwon and W.J. Chung. 2002. The Estimation of the Unit Load and Characteristics of Non-Point Source Discharge According to Rainfall in Kyongan Watershed. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **24**: 2019-2027.
- Kim, Y.C. and J.S. Lee. 2002. Shapes of the Pollutograph versus Types of Watershed during Rainfall Events. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **24**: 633-645.
- Kwon, K.H. 2011. Characterization of Runoff properties of non-point pollutant from various landuse watersheds and evaluation of BMPs, Kyungpook National University, pp. 55-62.
- Lee, J.Y., S.H. Jang and J.S. Park. 2008. Analyzing Runoff Pollutant Loading Characteristics of Non-Point Source During Rainfall in Urban Area. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology* **16**: 35-44.
- Lee, S.Y., E.J. Lee, Marla C. Maniquiz and L.H. Kim. 2008. Determination of Pollutant Unit Loads from Various Transportation Landuses. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**: 543-549.
- Polls, I. and R. Lanyon. 1980. Pollutant concentration from homogeneous land uses. *Journal of Environmental Engineering, ASCE* **106**: 69-80.
- Sartor, J.D., G.B. Boyd and F.J. Agardy. 1974. Water pollution aspects of street surface contaminants. *Journal of WPCF* **46**: 458-467.
- Wee, S.K., L.H. Kim, Y.J. Jung and K.I. Gil. 2008. Washoff Characteristics and Correlation of Nonpoint pollutants in a Bridge Storm Runoff. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**: 378-382.
- Whipple, W., J.V. Hunter and S.L. Yu. 1977. Nonpoint sources and planning for water planning for water pollution control. *Journal of WPCF* **21**: 15-23.
- Wu, J.S., C.J. Allarn, W.L. Saunders and J.B. Evett. 1998. Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff. *Journal of Environmental Engineering* **124**: 584-592.
- Zhi-Qiang, D., L.M.PL. Joao and P.S. Vijay. 2005. Fractional kinetic model for first of stormwater pollutants. *Journal of Environmental Engineering* **126**: 313-320.
- Zhuang, Y., T. Nguyen, B. Niu, E. Shao and S. Hong. 2012. Research Trends in Non Point Source during 1975-2010. *Physics Procedia* **33**: 138-143.

(Manuscript received 20 November 2012,

Revised 26 November 2012

Revision accepted 8 December 2012)