

## 강우시 지붕유출수의 EMCs 및 특성비교

홍 정 선\* / Franz Kevin F. Geronimo\*\* / Jean Margaret R. Mercado\*\*\* / 김 이 형\*\*\*\*+

### Characteristics of EMCs for Roof Runoff

Jung Sun Hong\* / Franz Kevin F. Geronimo\*\* / Jean Margaret R. Mercado\*\*\* / Lee-Hyung Kim\*\*\*\*+

**요지** : 각종 개발사업은 불투수층의 증가를 야기 시켜 자연적 물 순환 왜곡과 함께 비점오염물질의 유출을 증가시킨다. 개발로 인한 환경생태수리학적 영향을 저감하고 건전한 물 순환을 구축하기 위해서는 오염물질의 함량이 적은 유출유량에 대해서는 이용(use)을 고려해 볼 만하며, 오염물질의 함량이 높은 유량에 대해서는 조정공간에서 처리 후 저류, 침투 또는 증발산을 고려하여야 한다. 본 연구는 지붕빗물유출수의 상대적 오염도를 평가하여 이용 가능성을 검토하고, 평균 EMC 산정을 위한 비용 효율적 적정 모니터링 기법을 제안하고자 수행되었다. 지붕유출수의 오염도는 도로와 주차장에 비해 오염물질별 3배에서 13배 정도 낮은 것으로 조사되었으며, 나뭇잎, 담배꽂초 등의 협잡물과 바람의 영향으로 인한 오염물질의 대기침적 및 옥상구조물 등이 주요 오염원인 것으로 나타났다. 비용 효율적 모니터링 기법 연구결과 평균 EMC를 보이는 시료는 유출 발생 후 약 15분 경인 것으로 나타났으며, 최소 8회 이상의 강우사상에 대한 모니터링이 수행되어야 평균 EMC를 산정할 수 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 비점오염원, 지붕빗물 유출수, 최적 모니터링 기법, EMCs

**Abstract** : The development projects distort the natural water circulation system and increase the non-point source pollution by changing the natural cover type. The low impact development (LID) techniques are considering as new development approach to decrease the ecological- and hydrological impacts from high imperviousness rate. The high imperviousness rate is because of the construction of building, parking lot and road for human activities. Knowing the basic characteristics of rood runoff can give the direction for setting up the water management strategy. The monitoring results show the pollutant EMCs of roof runoff are 3~13 times lower than EMCs of the road and parking lot. The pollutant sources from roof runoff are mainly from leafs, cigarette butts, atmospheric deposition and materials of the roof. The EMC is occurred around 15minutes later after starting runoff and more than 8 storm events are needed to have the average EMCs.

**Keywords** : EMCs, non-point sources, optimal monitoring technique, roof runoff

### 1. 서 론

도시화의 진행에 따른 포장율의 증대는 수리학적 측면에서 유량, 침투유량 및 침투유량 발생기간의 증가를 초래하며, 건기시 하천의 배경용수가 되는 기저유량을 감소시킨다. 또한 강우시 입자상

물질의 다량 유출로 인하여 토사 부하량을 증가시키며, 홍수유발, 하천침식, 수로확장 및 수로바닥의 변화 등을 야기 시킨다. 도시화 이전의 일반적 나지에서는 강우 발생 시 유출수가 산림의 초목, 들판의 식생, 농경지의 농작물, 많은 수의 물웅덩이 등으로 인해 저류된 후 일부는 증발산을

+ Corresponding author: leehyung@kongju.ac.kr

\* 공주대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail: jungsun518@kongju.ac.kr

\*\* 공주대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail: fkgeronimo@kongju.ac.kr

\*\*\* 공주대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail: ummmercado@kongju.ac.kr

\*\*\*\* 공주대학교 건설환경공학부 교수 · E-mail: leehyung@kongju.ac.kr

거쳐 대기 중으로 사라지며, 일부는 침투를 통해 지하수의 원천이 되어 천천히 하천으로 배출되지만, 도시개발과 같은 지표면 교란 및 포장사업이 진행되면 불투수면의 증가로 인해 자연적인 물 순환 시스템이 왜곡된다. 왜곡된 물 순환 시스템은 짧은 시간 안에 많은 유량의 강우를 유출시켜 지역적 및 국지적 도시홍수를 일으키며 기후변화로 야기된 강우패턴 변화에 의하여 그 피해가 점점 증가하고 있다(김이형과 강주현, 2004; 이홍식과 이승환, 2009). 특히 개발사업의 행위범위가 초목이 존재하는 고지대인 산림과 물과 녹지를 가진 저지대 사이에서 이루어지면서 물과 녹지를 단절시켜 왜곡된 생태계를 유발시키며 결국 인간의 생활에 까지 영향을 주고 있다(노상덕 등, 2006).

도시화는 환경학적 측면에서도 다양한 영향을 준다. 도시화는 인간의 다양한 활동이 이루어지는 공간이기에 애초 자연계에 존재하지 않던 다양한 종류의 오염물질을 과다하게 발생시킨다. 특히 고도화된 토지이용에서 발생하는 비점오염물질의 유출은 하천의 자정작용에 영향을 끼치며 수생태계를 파괴하고, 최종적으로 인간에게 물, 여가 및 휴식 공간 등을 제공하는 수질을 악화시켜 인간의 건강에도 영향을 주게 된다(김이형과 이선하, 2005). 도시화 및 토지이용의 고도화는 입자상물질, 중금속류 및 각종 유해화학물질 등의 축적과 유출을 증가시킨다. 또한 불투수층이 높은 지표면에 의하여 강우초기에 다량의 오염물질이 유출되는 초기강우 현상은 도시지역 비점오염원에서 일어나는 주요한 현상이며, 초기강우 내 비점오염물질의 평균농도는 포장물에 비례하여 증가하다(Deletic and Mahsimovic, 1998). 이러한 도시지역 비점오염원의 특성은 비점오염원 관리시 초기강우 및 유출수량 저감이 중요하다는 것을 보여주고 있다(이은주 등, 2006; 이소영 등, 2009; 김성표 등, 2012; Hunt et al., 2008; Lee et al., 2010; Lee et al., 2011; Maniquiz et al., 2012). 따라서 유럽 및 미국 등의 선진국은 2000년대 이후 도시화 및 개발사업 등으로 인한 물 순환 왜곡과 비점오염물질 유출 저감을 위해

저영향개발(Low Impact Development, LID)이라는 새로운 도시개발방식을 제안하고 있다(김이형, 2008). 국내에서도 2006년 이후 꾸준히 LID에 대한 제안이 이루어져 왔으며, 2012년 현재 제도화(환경영향평가 등)를 앞두고 있고, 다양한 지침 등에 포함되고 있다. 향후 LID 개발시 중요하게 고려될 부분은 녹지 및 조경공간 확보(김이형, 2008; 강민지 외, 2011)이며, 침투 및 저류를 통하여 환경수리수문 및 조경학적 효과를 극대화하는 방향으로 추진될 것이다(환경부, 2012). 환경부와 7개 부처 공동으로 발표된 ‘제2차 비점오염관계기관 종합대책(2012)’에 의하면 4대강 수계의 비점오염물질은 2010년 하천 오염부하량의 약 67%를 차지하고 있는 것으로 보고하고 있으며 2020년에는 약 72%를 차지할 것으로 예상하고 있다. 이러한 비점오염물질 유출저감을 위하여 2차 종합대책에서는 유출유량저감을 통한 비점오염원 관리를 주 내용으로 하는 LID를 주요 과제로 선정하여 강력하게 추진할 계획이다(환경부, 2012).

본 연구는 도시지역의 조경공간 LID화에 앞서 적용 가능한 LID 기술을 도출하기 위한 사전 연구로 지붕 유출수의 특성을 분석하고자 수행되었다. 지붕유출수는 다른 피복형태와 달리 오염물질의 농도가 낮아 단순한 처리를 통해 이용이 가능할 것으로 평가되나, 어느 정도의 오염물질이 함유되어 있는지에 대해서는 연구 결과가 충분하지 않은 편이다. 특히 건기시 지붕에 축적되는 오염물질은 인근의 포장지역, 즉 도로와 주차장 등에 쌓여있던 오염물질이 바람이나 자동차 등의 활동에 의한 오염물질 부상도 영향을 줄 수 있기에 인근 주차장 및 도로와의 오염물질 특성을 비교분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연구내용과 더불어 적정 모니터링기법도 제안하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구를 위한 모니터링 지점은 충남 천안시

소재 대학캠퍼스의 학생회관 지붕을 선정하였는데, 그 이유는 모니터링의 용이성과 더불어 건물 앞의 집수면적 약 600m<sup>2</sup>의 주차장(아스팔트 포장, 경사도 1% 이하)과 520m<sup>2</sup>의 도로(아스팔트 포장, 경사도 1% 이하)에서의 비점오염물질 유출에 대한 기존 비교자료가 존재하고 있기 때문이다. 지붕의 면적은 161m<sup>2</sup>으로 측정되었으며, 모니터링은 2011년 4월부터 시작되어 현재에도 진행 중이며, Fig. 1은 모니터링 지점을 보여주고 있다. 수질시료 채취는 강우시 초기의 농도변화를 면밀하게 살펴보기 위하여 강우가 시작된 이후 15분까지는 5분 간격으로, 30분까지는 15분, 1시간까지는 30분 간격으로 시료를 채취하였으며, 1시간 이후로는 강우가 끝날 때까지 1시간 간격으로 모니터링을 수행하였다(김이형과 강주현 2004).

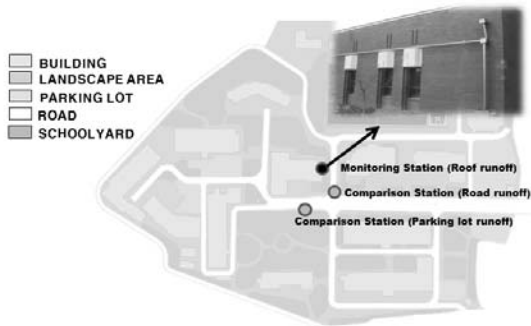


Fig. 1. Site and monitoring location

모니터링을 통해 채취된 지붕유출수는 실험실로 옮겨 수질오염공정시험법에 준하여 수질분석이 이루어졌으며, 분석항목으로는 입자상 물질, 유기물질, 영양물질, 중금속에 대한 분석이 이루어졌다. 입자상 물질로는 TSS를 분석하였으며, 유기물질 분석에는 BOD와 COD 분석을 수행하였다. 영양물질로는 질소와 인에 대한 분석을 수행하였으며, 중금속의 경우, 전처리 후 ICP-AES를 통해 분석하였다. 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)는 식(1)을 이용하여 산정(Sansalone and Buchberger, 1997) 되었으며, 여기서  $C(t)$ 와  $q_{run}(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 유출농도와 유출율을 나타

내고 있다.

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

일반적으로 비점오염원 모니터링은 강우에 의하여 좌우되기에 어렵고 비용도 크게 들어간다. 본 연구에서는 비용효율적 적정 모니터링 기법을 제시하기 위하여 강우사상별 EMC를 활용하여 대표 EMC(Representative EMC)를 산정하였으며, 식(2)와 같은 식을 제안하였다. 여기서  $EMC_i$ 는 강우사상  $i$ 에서의 EMC를 나타내고 있으며,  $N_i$ 는 강우사상 개수를 의미한다.

$$Representative EMC(mg/L) = \frac{\sum_{i=1}^i EMC_i}{\sum_{i=1}^i N_i} \quad \text{식(2)}$$

### 3. 연구결과

#### 3.1 모니터링 강우사상

Table 1은 2011년 4월부터 2012년 6월동안 수행된 총 8회의 모니터링 강우사상 결과를 정리한 것이다. 모니터링 강우의 강우 전 건기일수(antecedent dry day, ADD)는 1.4~21.3일, 총 강우량(Total Rainfall)은 1.5~22.5mm, 유출율(Total Runoff)은 0.03~2.76m<sup>3</sup>/min, 강우지속시간(Total Rainfall Duration)은 1.1~4.0hr, 유출지속시간(Total Runoff Duration)은 1.0~3.8hr, 평균강우강도(Avg. Rainfall Intensity)는 1.1~22.5mm/hr의 범위를 나타내고 있다. 모니터링 결과 지붕은 100%의 포장율로 인하여 1.5mm라는 적은 강우에도 유출이 발생하는 것으로 조사되었다.

Table 1. Event table of roof runoff

Event No.	Event Data (yyyy/mm/dd)	ADD (day)	Total Rainfall (mm)	Total Runoff (m <sup>3</sup> /min)	Total Rainfall Duration (hr)	Total Runoff Duration (hr)	Avg. Rainfall Intensity (mm/hr)
1	2011/04/29	3.5	3.0	0.80	2.1	2.0	1.4
2	2011/05/10	2.7	2.0	0.18	1.1	1.0	1.9
3	2011/06/22	20.7	1.5	0.16	1.4	1.0	1.1
4	2011/06/28	1.4	2.0	0.03	1.1	1.0	1.9
5	2011/08/16	2.0	22.5	2.76	1.1	1.0	20.1
6	2011/11/18	6.8	7.0	0.77	4.0	3.8	1.8
7	2012/03/16	10.4	2.5	0.29	3.8	3.0	0.7
8	2012/06/29	21.3	5.5	0.86	2.1	2.0	22.5

### 3.2 지붕 유출수의 EMC 산정

강우시 지붕에서 유출되는 유출수의 경향이 Fig. 2에 나타나 있다. 강우초기에 오염물질의 농도가 높게 유출되는 초기강우 현상이 지붕에서도

존재하는 것을 확인할 수 있다. 특히 TSS의 경우 순간적이지만 강우초기에 약 500mg/L까지 발생하는 경우가 있어 지붕빗물 유출수 이용 시에는 이러한 초기강우 부분을 제외하고 이용하여야 할 것이다.

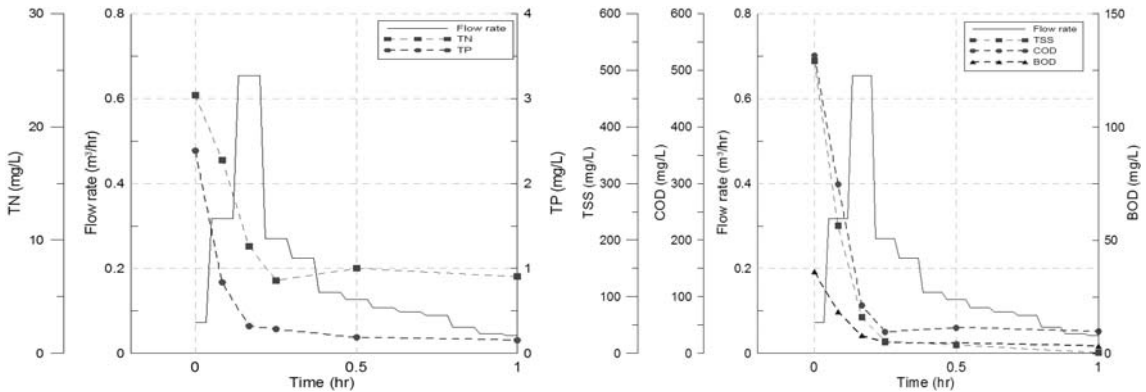


Fig. 2. Hydro and pollutant-graphs (05/10/2011)

Fig. 3은 강우사상별 산정된 EMC에 대해 통계 분석 결과를 보여주고 있다. 지붕유출수의 평균 EMC 산정 결과, TSS의 경우 37.7mg/L, BOD는 4.9mg/L, COD는 53.5mg/L, TN은 9.6mg/L, TP는 0.31mg/L로 나타났다. 중금속 EMC의 경우 Total Cu가 0.25mg/L, Total Zn은 0.19mg/L, Total Pb는 0.38mg/L로 조사되었다. Gobel(2007)

의 지붕유출수 농도와 비교시 TSS와 COD는 본 연구결과와 비슷한 농도를 보이지만 BOD의 경우 본 연구결과가 약 2배 정도 낮은 값을 보였다. 그 이유는 본 연구의 지붕이 있는 건물 주위에는 자동차의 운행이 많지 않아 대기침적으로 인한 유기물질 유입이 낮기 때문이다. 중금속의 경우 김성표 등(2012)의 연구결과에서는 검출되지 않은 것

으로 보고되고 있으나, Chang (2004)의 연구결과에서는 평균 Total Cu 및 Total Pb가 적으나 0.029mg/L 및 0.045mg/L 로 존재하는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 중금속의 EMC가

다소 높게 나타났는데, 이는 옥상에 존재하는 각종 철제구조물 및 대기침적물 등이 영향을 준 것으로 평가된다(Gobel, 2007).

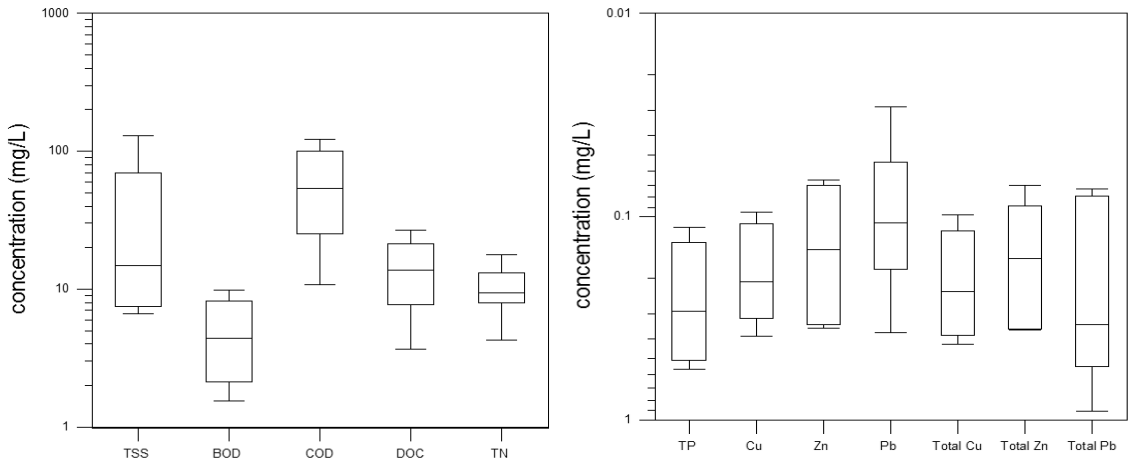


Fig. 3. Statistical summary of EMCs

### 3.3 다른 포장지역과의 EMCs 비교

Fig. 4는 지붕유출수의 EMC 결과를 인근의 도로와 주차장 유출 EMCs와의 비교를 보여주고 있다. TSS의 경우 도로에서 445.8mg/L, 주차장에서 140.7mg/L로 유출되어 지붕유출수에 비해 도로는 약 12배 그리고 주차장에서는 약 4배 정도로 매우 높게 유출되는 것으로 나타났다. COD의 경우, 도로에서 312.0mg/L가 유출되어 지붕유출수의 6배 그리고 주차장에서 140.5mg/L로 유출

되어 지붕유출수의 약 3배가 높은 것으로 조사되었다. 중금속 및 TP의 경우 도로가 지붕유출수에 비해 약 4배, 그리고 주차장이 약 3배 정도 높게 유출되는 것으로 나타났다. TN은 대기에서 유입되는 양이 많아 도로, 주차장 및 지붕유출수에서 비슷하게 유출되는 것으로 나타났다. 일반적으로 지붕유출수의 오염물질 근원은 지붕에 퇴적되어 있던 나뭇잎, 담배꽂초 등의 협잡물의 분해와 바람의 영향으로 인한 오염물질의 대기침적 및 옥상구조물 등이 원인인 것으로 조사되었다.

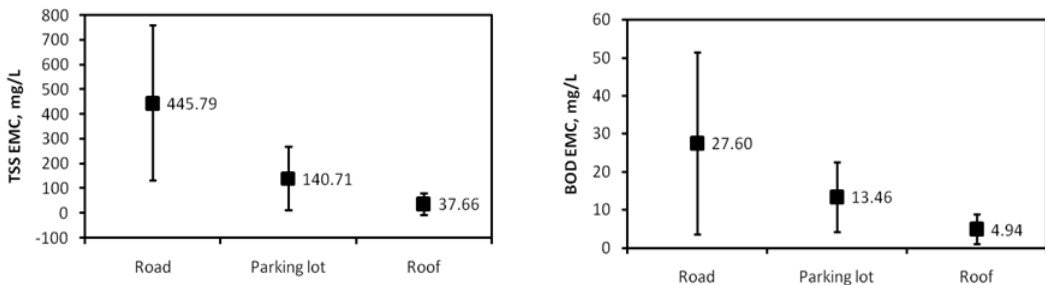


Fig. 4. Comparison of EMCs with other runoff (Mean±S.D)

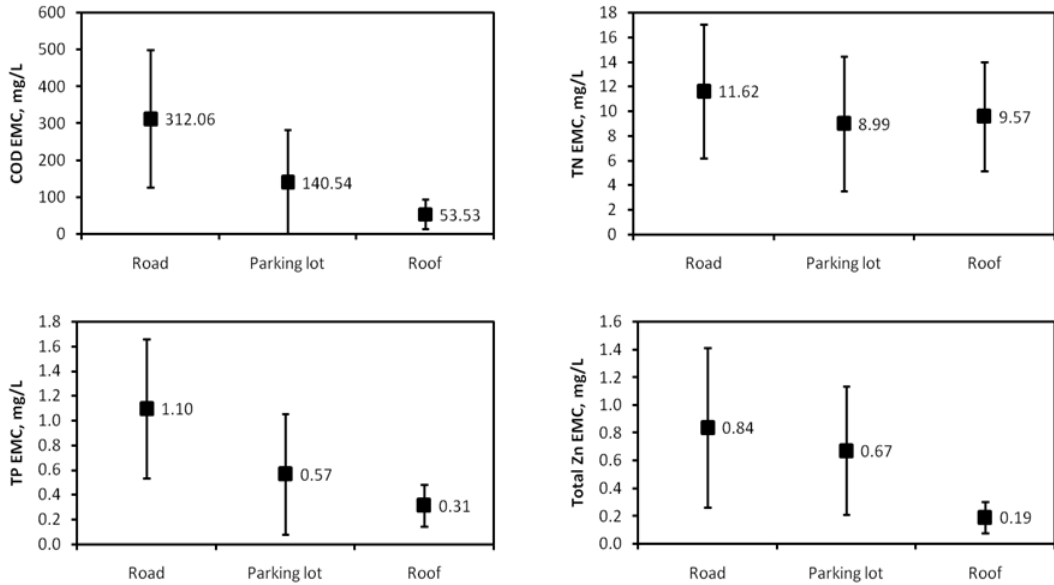


Fig. 4. Comparison of EMCs with other runoff (Mean±S.D) (continue)

### 3.4 적정 EMC 도출위한 최적 모니터링 기법 제안

Fig. 5는 강우발생시 수행된 시간대별 오염물

질의 농도를 산술평균하여 시간대별로 나타낸 것이다. 본 그림에 EMC 값을 적용하면 EMC 값을 보이는 적정 시간을 찾아낼 수 있으며, 이를 통해 시료를 채취할 수 있다. 예를 들어, TSS의 경우

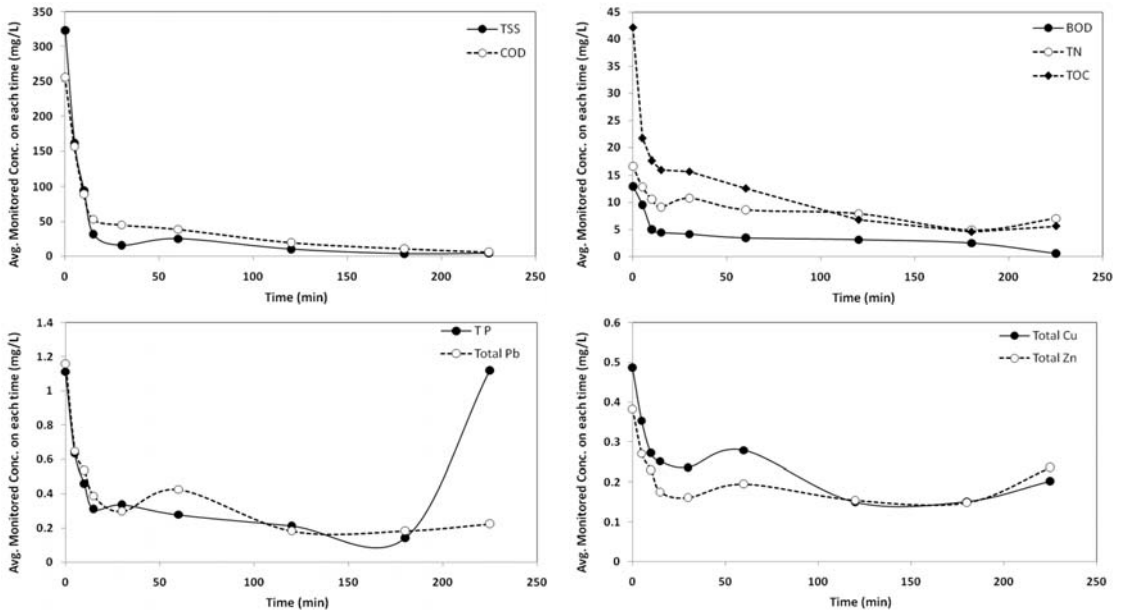


Fig. 5. Changes of average concentration with time

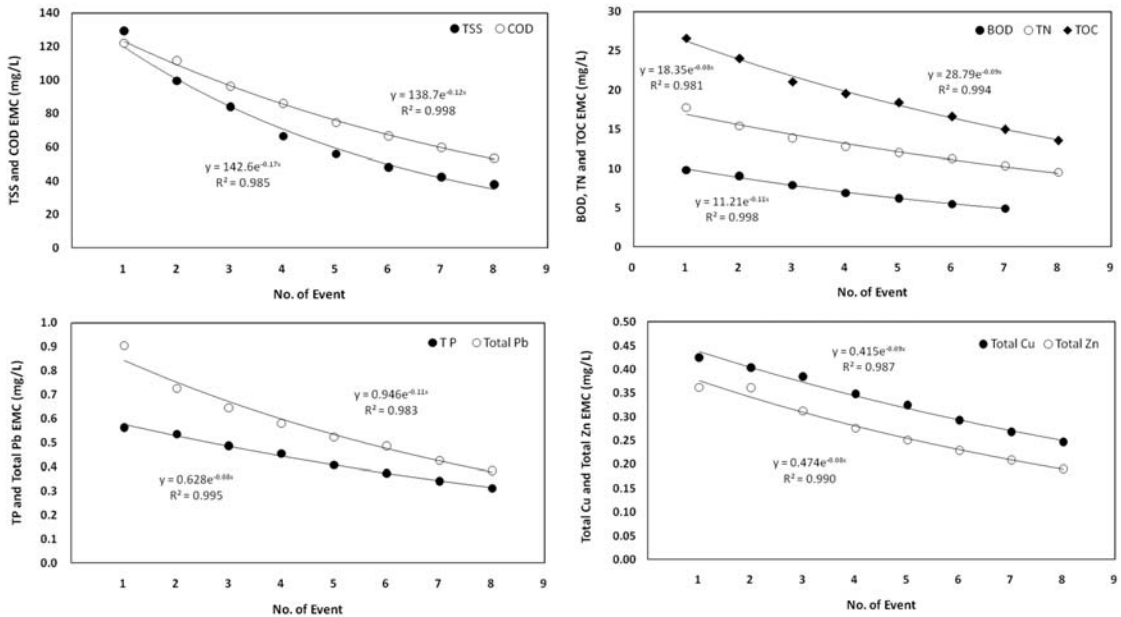


Fig. 6. Changes of average EMC by event number

평균 EMC가 37.7mg/L이기에 이 경우 평균 EMC를 보이는 시료는 4번째 시료이고 유출 발생 후 약 15분경에 평균 EMC를 보이는 시료를 채취할 수 있다는 것이다. 이렇게 다른 오염물질에 대해서도 평균 EMC를 적용한 결과 대략 4번째 시료, 즉 유출 발생 후 약 15분 경에 EMC에 도달하는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 평균 EMC를 보이는 적정 강우사상 개수를 산정하기 위한 새로운 접근법이며, 강우사상별 산정된 EMC를 강우사상별로 누적하여 산술 평균한 값이다. 강우사상이 누적될수록 산술평균 EMC의 값은 점차적으로 줄어들어 어느 순간 안정된 값을 보일 것으로 예측되나 총 8회의 강우사상에서는 안정된 값을 보이지 않는 것으로 나타났다. 즉, 평균 EMC를 산정하기 위해서는 최소 8회 이상의 강우사상에 대해 모니터링이 수행되어야 함을 의미하며 추가적인 모니터링을 통해 향후 적정 모니터링 개수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 지붕빗물유출수의 상대적 오염도를 평가하여 이용가능성을 검토하며, 평균 EMC 산정을 위한 비용효율적 적정 모니터링 기법을 제안하고자 수행되었다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지붕빗물 유출수의 오염물질의 농도는 도로나 주차장에 비해 매우 낮게 나타났기에 적정한 처리만 수행된다면 이용가능성이 매우 높게 나타났다. 지붕빗물 유출수내 입자상물질의 EMC는 도로에 비해 12배 그리고 주차장에 비해 약 4배 정도로 낮게 유출되는 것으로 나타났다. 또한 유기물질, 중금속 및 영양소의 경우에도 지붕유출수가 도로에 비해 4-6배 그리고 주차장에 비해 약 3배 정도 낮은 것으로 조사되었다.
- 2) 지붕유출수의 주요 오염물질의 근원은 나뭇잎, 담배꽂초 등의 협잡물과 바람의 영향으로 인한 오염물질의 대기 침적 및 옥상구조

물 등인 것으로 나타났다. 지붕유출수 이용을 위해서는 주기적 청소를 통해 오염물질의 근원을 제거할 필요가 있다.

- 3) 비용효율적 모니터링 기법을 도출하기 위해서는 평균 EMC를 보이는 시료의 발생시간대가 중요하다. 연구결과 평균 EMC를 보이는 시료는 주로 4번째 시료, 즉 유출 발생 후 약 15분경에 평균 EMC를 보이는 것으로 나타났으며, 최소 8회 이상의 강우사상에 대해 모니터링이 수행되어야 평균 EMC를 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 연구는 추가적 모니터링을 통해 적정 강우사상 개수를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통평가원의 “빗물저류조 급속시공기술 및 친환경 빗물처리시스템 개발(과제번호: 10CCTI-C056937-01)”과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

강민지, 이성준, 김병익, 신동석(2011). 저영향개발(LID) 도입 현황과 과제, 한국물환경학회 학술대회.

김성표, 김두철, 오준식, 김이형, 민경석(2012). 강우지속시간에 따른 건물지붕빗물의 성상특성 변화에 대한 기초 연구, 한국습지학회지, 14(1), pp. 11-20.

김이형, 강주현(2004). 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, 한국물환경학회지, 20(6), pp. 631-640.

김이형, 이선하(2005). 주차장 및 교량에서 유출되는 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs, 한국물환경학회지, 21(3), pp. 248-255.

김이형(2008). 21세기 친환경 건설을 위한 Low Impact Development (LID) 기술, 한국수자원

학회지-물과 미래, 41(6), pp. 47-57.

노상덕, 김장현, 이대근, 김선주, 손병용, 전양근(2006). 횡성호 유역의 비강우시 및 강우시 오염물질 유출특성, 한국물환경학회지, 22(4), pp. 695-705 .

이소영, Marla C. Maniquiz, 최지연, 김이형(2009). 교통관련 토지이용에서의 강우계급별 EMC 산정, 한국습지학회지, 11(2), pp. 67-76.

이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 이병식, 임경호, 김이형(2006). 포장지역에서의 강우사상별 EMC 산정 및 단순 샘플농도와의 비교, 한국물환경학회지, 22(1), pp. 104-109.

이흥식, 이승환(2009). 국내 중소 도시지역 강우 유출수의 유출특성, 대한환경공학학회지, 31(3), pp. 193-202.

환경부(2012). 관계부처합동 제2차 비점오염 관계기관 종합대책.

Chang, M., Matthew W. McBroom, and R. Scott Beasley(2004). Roofing as a source of nonpoint water pollution, *J. of Environmental Management*, 73, pp. 307-315.

Deletic, A. B., and Mahsimivic, C.T(1998). Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas, *J. of water Environmental Engineering*, 124(9), pp. 869-879.

Gobel, P., C. Dierkes, and W.G. Coldewey(2007). Storm water runoff coconcentration matrix for urban areas, *J. of Contaminant Hydrology*, 91, pp. 26-42.

Hunt, W., Jadlocki, S., Hathaway, J., and Eubanks P.(2008). Pollutant removal and peak flow mitigation by bioretention cell in Urban Charlotte, N.C. *Journal of Environmental Engineering*, 134(5), pp. 403-408.

Lee, K., H. Kim, G. Pak, S. Jang, L. Kim, C. Yoo, Z. Yun, and J. Yoon (2010). Cost-effectiveness analysis of stormwater best



- management practices (BMPs) in urban watersheds, *Desalination and Water Treatment (DWT)-science and engineering*, 19(1-3), pp. 92-96.
- Lee, J.Y., H. Kim, and M. Han(2011). Quality assessment of rooftop runoff and harvested rainwater from a building catchment, *Water Science and Technology*, 63(11), pp. 2725-2731.
- Maniquiz, M.C., J. Choi, S. Lee, and L. Kim(2012). Performance comparison between infiltration and non-infiltration type of structural stormwater treatment systems, *Water Science and Technology*, 66(2), pp. 363-369.
- Sansalone J. J., and Buchberger, S. G.(1997). Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater, *Water Science and Technology*, 36(8-9), pp. 155-160.
- 논문접수일 : 2012년 08월 16일
  - 심사의뢰일 : 2012년 08월 17일
  - 심사완료일 : 2012년 10월 23일