



Characteristics of heavy metal concentrations in urban stormwater runoff, Daejeon, Korea

Yu, Eunjin^a · Seo, Dongil^{a*}

^aDepartment of Environmental Engineering, Chungnam National University

Paper number: 18-070

Received: 17 August 2018; Revised: 4 September 2018 / 10 September 2018; Accepted: 10 September 2018

Abstract

Seven heavy metal concentrations (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) were continuously analyzed for twenty rainfall events in 2017~2018 in an urban basin. The overall and dynamic correlations between runoff characteristics and heavy metal concentrations were examined. The peak metal concentration generally appeared in the initial runoff but found to be delayed when the rainfall intensity was low. The rainfall duration had no relationship with either heavy metal concentrations or their total mass. Dynamics of heavy metal mass (load), with the exception of Cu and Zn, showed strong correlation with the 30 minute rainfall intensity (0.60~0.88) and runoff volume (0.74~0.89). While event mean concentration (EMC) showed positive correlation (0.54~0.73) with antecedent dry days (ADD), no significant relationship was found between runoff volume and pollutant concentration. This implies that the pollutants built up on the surface during dry days are washed off even with low rainfall energy. The dynamics of heavy metal and TSS concentrations showed good correlation (0.68~0.87). This result shows that the metals are transported along with solid particles as adsorbate in surface runoff. Regular street sweeping will reduce significant amount of heavy metal loads in urban surface runoff.

Keywords: Stormwater runoff, Urban basin, Heavy metals, Suspended solid, Nonpoint source pollution

도시 유역 강우유출수 내 중금속 농도의 변화 특성에 관한 연구

유은진^a · 서동일^{a*}

^a충남대학교 환경공학과

요 지

본 연구에서는 대전 관평천의 도시유역에서 2017~2018년에 발생한 강우 20건의 유출수를 연속적으로 채취하여 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn의 중금속 및 총고형물질(TSS) 농도와 유량을 분석하고, 강우특성과 수질 변화의 강우사상별 및 시간별 상관관계를 조사하였다. 일정 강우강도에서 오염물질의 최대농도는 강우 초기에 발생하는 경향을 나타냈으나, 강우량 및 강우강도가 작은 경우에는 일정 시간 경과 후 발생하는 것이 관찰되었다. 강우지속시간은 중금속 농도 및 부하량과 큰 상관성을 보이지 않았다. Cu와 Zn을 제외한 중금속 질량은 강우강도(0.60~0.88) 및 총강우유출량(0.74~0.89)과 상대적으로 높은 상관관계를 나타냈다. 강우 시 유량가중평균농도와 선행무강우일수 또한 양의 상관성(0.54~0.73)을 보이는 반면, 30분 강우강도로 표현된 시간별 유출량과 TSS 및 중금속 농도는 전혀 상관성을 나타내지 않았다. 무강우 기간 동안 지표면에 축적된 오염물질이 최소한의 강우 에너지에도 세척효과가 발생하여 강우특성과는 무관하기 때문인 것으로 추정된다. 중금속과 TSS 농도의 시간에 따른 변화특성은 상관계수가 0.68~0.87로 양호한 수준을 나타냈다. 이는 고형물질의 이동과 중금속 물질의 이동이 함께 발생한다는 것을 시사하며 동시에 중금속이 고형물질에 흡착되어 이동한다는 것을 의미한다. 따라서 비강우 시에 유역 표면의 고형물질을 청소 등으로 사전에 제거할 경우 하천으로 유입되는 중금속오염물질의 양을 현격하게 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 강우유출수, 도시유역, 중금속, 고형물질, 비점오염

*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-6679
E-mail: seodi@cnu.ac.kr (D. Seo)

1. 서론

도시 유역에서는 하·폐수 처리기술의 발달, 포장면적의 증가 및 분류식 하수관거로의 개선 등으로 인해 강우 시 발생하는 비점오염부하의 비중이 점차적으로 증가하는 추세이다 (Ministry of Environment, Republic of Korea, 2003). 우리나라에서는 지표수의 수질 관리를 위해 과거에는 유기물의 지표로서 BOD를 위주로 수질관리대책을 수립하여 왔으나, 지속적으로 반복되는 녹조현상에 따라 영양염류의 제어를 위한 각종 대책이 또한 실시되고 있다. 그러나 지표수의 오염물질은 유기물이나 영양염류에 국한되지 않으며 중금속을 포함한 각종 유해물질에 대한 문제점이 보고된 바 있으나(USEPA, 2017) 우리나라에서는 아직 이에 대한 자료와 대책이 매우 미흡한 실정이다. 하·폐수 처리장으로 유입되는 유해물질의 경우 어느 정도 제거가 가능하나 강우에 의해 직접 수계로 유입되는 비점오염형태의 유해물질은 거의 무방비 상태로 수계로 유입되고 있다. 특히 도시 유역은 자동차 통행을 포함한 각종 활동이 활발하고 불투수층의 비율이 높기 때문에 평상시 지표면에 오염물질이 다량 축적되고 강우 시 수계로 급속하게 유입될 가능성이 매우 크다.

중금속은 생체의 신진대사를 위해 미량으로 필요한 원소도 있으나, 필요 이상의 농도는 생물의 생화학적 반응을 방해할 수 있으며, 결과적으로 수체 내의 식물계와 동물계의 건강성에 부정적 영향을 끼칠 수 있다(Myers *et al.*, 1985; Beasley and Kneale, 2002; Kayhanian *et al.*, 2008). 중금속은 생체 내에 유입되어 뇌, 폐, 신장, 간 등의 주요 장기의 작용을 방해하거나 장기에 손상을 입히며, 심각한 경우 인체, 근육 및 신경 기능 퇴행을 일으킬 수도 있다(Davis *et al.*, 2001; Hengren *et al.*, 2005; Jaishankar *et al.*, 2014). 주거 및 산업 현장에서

인체에 영향을 미치는 중금속 종류 중 폐수에서 흔히 발견되는 중금속 원소는 매우 다양하나 대표적으로 니켈(Ni), 비소(As), 크롬(Cr), 구리(Cu), 아연(Zn)과 납(Pb)의 7종으로 제한된 바 있다(Lambert *et al.*, 2000).

Davis *et al.* (2001)은 건축물 벽, 지붕, 전기 및 우기 축적, 자동차 브레이크, 타이어 및 기름의 7가지 오염원을 비교하였으며, 대상 유역에선 건축물 벽에서 가장 높은 중금속 발생이 일어난다고 결론지었다. Wicke *et al.* (2012)는 중금속의 대기 중 축적 특성을 분석하였으며, 해당 경로로 인한 광범위한 오염을 경고하였다. Charters *et al.* (2016)은 다른 재질의 표면에서 발생 및 이동하는 Cu, Zn, Pb와 총고형물질(Total suspended solids, TSS)을 분석하였으며, 금속 지붕이 가장 큰 배출원임을 발견하였다. 또한, 많은 연구에서 중금속의 주발생원으로 자동차 및 도로를 지목하였다(Adachi and Tainosho, 2004; Zanders, 2005).

도시 하천의 중금속 오염 현상을 합리적으로 관리하기 위해서는 이들의 발생 및 이동기작을 이해하는 것이 우선적으로 필요하나 이에 대한 본격적인 조사나 연구가 부족한 것으로 분석된다. 본 연구는 향후 하천의 중금속 오염을 개선하기 위한 대책을 수립하기 위해 도시유역에서 강우 시 중금속 농도를 연속으로 측정하여 강우특성에 따른 중금속의 이동특성 및 상관관계 등을 분석하였고, 향후 중금속 등 독성물질에 의한 지표수의 수질오염관리를 위한 기초자료를 제공될 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

연구대상지역은 대전광역시 대덕테크노밸리에 위치한 도시하천 관평천의 일부 유역이다. 유역면적은 632,800 m²으로,

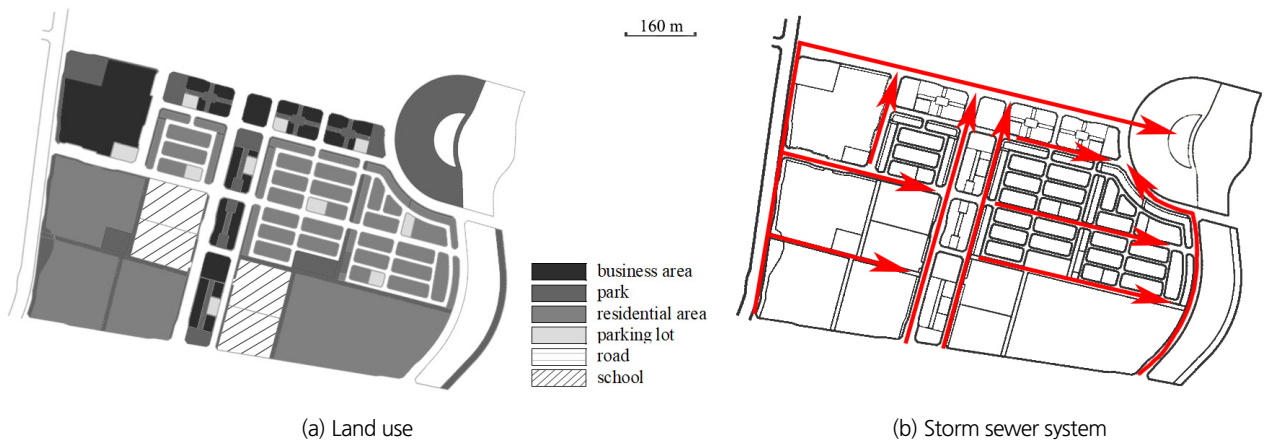


Fig. 1. Land use and storm sewer system map of the study area

Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 35.1%의 주거지역과 34.7%의 도로가 주종을 차지하고 기타 상업지역(10.8%)과, 녹지공간(9.6%), 학교(7.9%) 등으로 구성되어 있다. 해당 지역의 하수관거시스템은 분류식으로, 강우유출수를 배출시키는 우수거의 위치는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같다(Yin *et al.*, 2015). 강우유출수는 관평천으로 합류되기 전 동화울 공원에 위치한 우수지로 유입되고, 중력식 수문을 통해 관평천으로 유입된 후 갑천 하류부로 유입되며, 금강으로 합류된다.

2.2 현장측정 및 시료 채취

대상지역의 우수관거 하단부에는 본 연구진이 2009년부터 운영하면서 강우량, 강우유출유량 및 강우유출 수질을 연속으로 측정하는 빗물 자동 모니터링 시스템이 상시 가동되고 있으며, 여기서 관측된 자료는 각종 연구 관련 연구에 활용되고 있다(Seo and Fang, 2012; Han and Seo, 2014; Koo *et al.*, 2015; Yin *et al.*, 2015; Seo and Kim, 2016; Kim *et al.*, 2017, Koo *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2017). Fig. 2는 본 연구가 진행된 2017~2018년 기간의 강우특성과 집중 분석이 시행된 20개의 강우 사상을 나타내고 있다.

모니터링 시스템이 설치된 위치에서 시간별로 자동 채수장치를 이용하여 강우유출수 시료를 채취하였다. 시료는 강우 시작 시 5~10분 간격으로 채취하였고, 유출수가 감소하는 강우 후반에는 1~3시간 간격으로 채취하였다. 강우 초기의 시료는 자료의 신뢰도를 위해 인력에 의해 직접 채취하였으며, 이후의 시료는 자동 채수기를 이용하여 채취하였다. 직접 채취한 시료는 2L 무균채수통에 담아 분석을 위해 실험실로 이동하였으며, 후반부의 시료는 4°C에서 냉장 보관하였다가 이후 1L 무균채수통을 이용하여 실험실로 이동하였다.

2.3 중금속 항목 선정 및 실험분석

2.3.1 중금속 항목 선정

중금속의 환경영향에 대해 연구된 사례들은 Table 1에 정리된 바와 같다. Lambert *et al.*, (2000)은 폐수에서 가장 보편적으로 검출되는 중금속을 비소(As), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb)과 아연(Zn) 등의 7가지 종류로 보았으며 본 연구에서도 이 항목들을 대상으로 실험 및 분석을 실시하였다. Table 2는 본 연구에서 선정된 중금속의 주요발생원을 나타내고 있다(USEPA, 2001; Youm *et al.*, 2005; Jaishankar *et al.*, 2014).

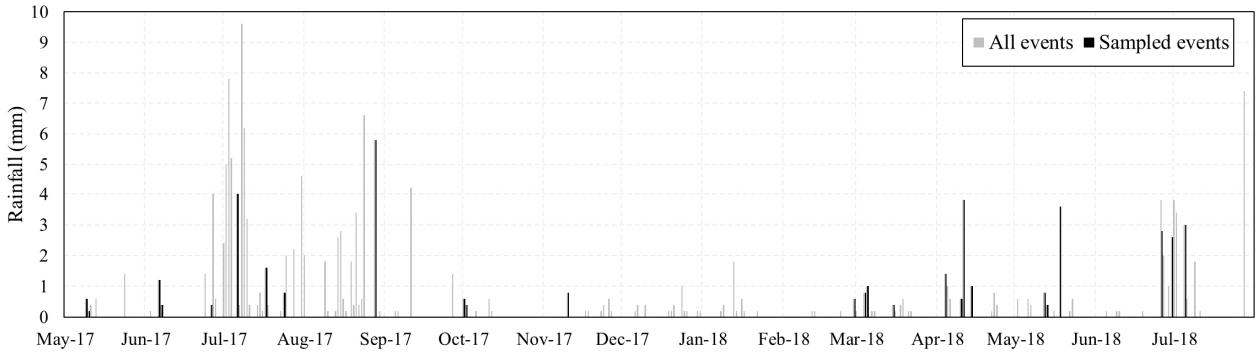


Fig. 2. Rainfall events from May 2017 to Jul 2018

Table 1. Heavy metal species in prior studies

Reference	Heavy metal	Keyword
Huang <i>et al.</i> , 2017	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	River sediment release
Charters <i>et al.</i> , 2016	Cu, Pb, Zn	Stormwater runoff
Jaishankar <i>et al.</i> , 2014	Al, As, Cd, Cr, Fe, Hg, Pb	Health effect
Wicke <i>et al.</i> , 2012	Cu, Pb, Zn	Urban surface buildup
Genç-Fuhrman <i>et al.</i> , 2007	As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn	Stormwater
Šćiban <i>et al.</i> , 2007	Ca, Cd, Cu, Mg, Zn	Wastewater adsorption
Mpherson <i>et al.</i> , 2005	Cr, Cu, Ni, Pb	Urban runoff
Youm <i>et al.</i> , 2005	As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Reservoir sediment
Granato <i>et al.</i> , 1995	Al, Be, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn	Highway runoff

Table 2. Heavy metal species and their known sources (USEPA, 2001; Youm *et al.*, 2005; Jaishankar *et al.*, 2014)

Heavy metal	Source
Arsenic (As)	Agricultural applications, orchard, wood preservations, paints, dyes, soaps, drugs
Cadmium (Cd)	Tire wear, lubricants, cements
Chromium (Cr)	Metal plating, brake lining wear, moving engine parts
Copper (Cu)	Brake pad wear, metal plating, insecticides
Nickel (Ni)	Lubrication oil, diesel fuel and gasoline, metal plating, asphalt paving
Lead (Pb)	Paint flake, old brake, wheel-balance weights, cosmetics, household dust
Zinc (Zn)	Lubrication oil, tire wear, brake pad wear

2.3.2 실험 방법

채취한 유출수 시료를 50 mL 폴리프로필렌 원심분리 튜브에 옮겨 담고, 질산(HNO₃)으로 대기압 산분해법을 통해 전처리한 후 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy, ICP-MS)를 사용하여 중금속 분석을 시행하였으며, TSS 등 일반적인 수질 항목에 대해서도 실험을 동시에 실시하였다.

2.4 자료 분석 방법

빗물모니터링 시스템을 통해 측정된 자료들을 이용하여 선행무강우일수(Antecedent dry days, ADD), 강우량, 강우 지속시간과 총유출량을 추출하고, 이를 활용하여 30분 강우 강도, 총강우량과 유출률을 산정하였으며 본 연구의 자료 분석에 사용하였다. 본 연구에 사용된 강우특성을 정리한 자료는 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table 3. Rainfall characteristics of the study site (May 2017~July 2018)

Event number	Date	Antecedent dry days (day)	Rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Total rainfall volume (m ³)	Total runoff volume (m ³)	Runoff rate
01	09 May 2017	20.6	13.0	19.6	0.7	8,226	3,084	0.37
02	06 Jun 2017	13.3	15.2	18.6	0.8	9,619	3,852	0.40
03	26 Jun 2017	1.9	3.8	5.1	0.7	2,405	496	0.21
04	06 Jul 2017	2.3	21.4	3.2	6.8	13,542	9,529	0.70
05	17 Jul 2017	1.4	2.4	0.6	4.1	1,519	272	0.18
06	24 Jul 2017	0.8	2.0	0.7	3.0	1,266	399	0.32
07	28 Aug 2017*	4.0	28.0	0.9	30.5	17,718	-	-
08	01 Oct 2017	4.2	15.8	15.7	1.0	9,998	2,334	0.23
09	10 Nov 2017	29.1	3.1	1.2	2.7	1,962	246	0.13
10	28 Feb 2018	5.3	37.2	10.1	3.7	23,540	7,588	0.32
11	04 Mar 2018	3.5	30.6	15.0	2.0	19,364	7,207	0.37
12	15 Mar 2018	6.6	3.8	1.2	3.3	2,405	322	0.13
13	04 Apr 2018	13.4	18.2	3.6	5.1	11,517	4,081	0.35
14	11 Apr 2018	4.6	12.2	2.4	5.0	7,720	4,259	0.55
15	14 Apr 2018	3.1	36.0	10.5	3.4	22,781	9,905	0.43
16	12 May 2018	4.8	24.8	23.4	1.1	15,693	5,887	0.38
17	18 May 2018*	2.0	8.0	0.3	24.0	5,062	-	-
18	26 Jun 2018	6.5	7.4	3.5	2.1	4,683	2,534	0.54
19	30 Jun 2018	1.6	8.8	2.1	4.2	5,569	2,966	0.53
20	05 Jul 2018*	2.9	34.8	4.0	8.7	22,021	-	-

*The total runoff was left blank for some rainfall events because flowrate over 2 m³/s cannot be measured due to backwater effect with the height of storm sewer being 2 m and the water gauge installed inside the sewer

본 연구에서는 누적 강우량을 5분 간격으로 측정하였으며, 일반토양손실방정식(Universal Soil Loss Equation, USLE)에서 강우에너지를 표현하기 위해서 사용되는 30분 강우강도로 환산하여 사용하였다(Novotony, 1994).

강우유출수 유량과 중금속 농도를 분석하기 위해 Eq. (1)와 같이 유량가중치를 고려한 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였다(Novotony, 1995; Kim *et al.*, 2006).

$$EMC = \frac{\int_0^t C(t) Q(t) dt}{\int_0^t Q(t) dt} \quad (1)$$

$$M(t) = \int_0^t C(t) Q(t) dt \quad (2)$$

여기서, $C(t)$ 와 $Q(t)$ 는 각각 시간 t 에서의 오염물 농도와 유량을 의미한다. Eq. (1)의 분자는 오염물질의 질량(부하량)을 의미하며 이들의 총합은 Eq. (2) 나타난 바와 같이 강우기간 동안 측정된 오염물질의 총질량을 의미한다. 앞으로의 본문에서 부하(load)는 질량(mass)으로 통일하여 지칭한다.

유역에서 비점오염원 물질의 발생 및 이동은 유역의 표면 및 토지이용 특성과 강우강도 또는 강우량 등을 포함하는 강우특성에 따라 크게 변한다. 강우특성에는 강우강도, 선행무강우일수(ADD), 강우지속시간, 유출량 및 유출률이 있으며, 이로 인해 비점오염의 이동이 영향을 받는 것으로 분석된다(Giudice *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2017).

본 연구에서는 중금속 농도와 강우특성의 상관성을 파악하기 위하여 Table 4에 나타난 항목들에 대하여 상호 간 선형관계를 나타내는 피어슨 상관계수(Pearson's coefficient)를 이용하여 분석을 실시하였다(Walpole *et al.*, 1993).

Table 4. The variables used in linear regression

Variables		Unit
Heavy metal concentrations	EMC	µg/L
	Total mass	kg
Rainfall characteristics	Antecedent dry days	day
	30 minute rainfall intensity	mm/hr
	Total rainfall volume	m ³
	Total runoff volume	m ³
	Rainfall duration	hr

3. 연구결과

3.1 중금속 분석

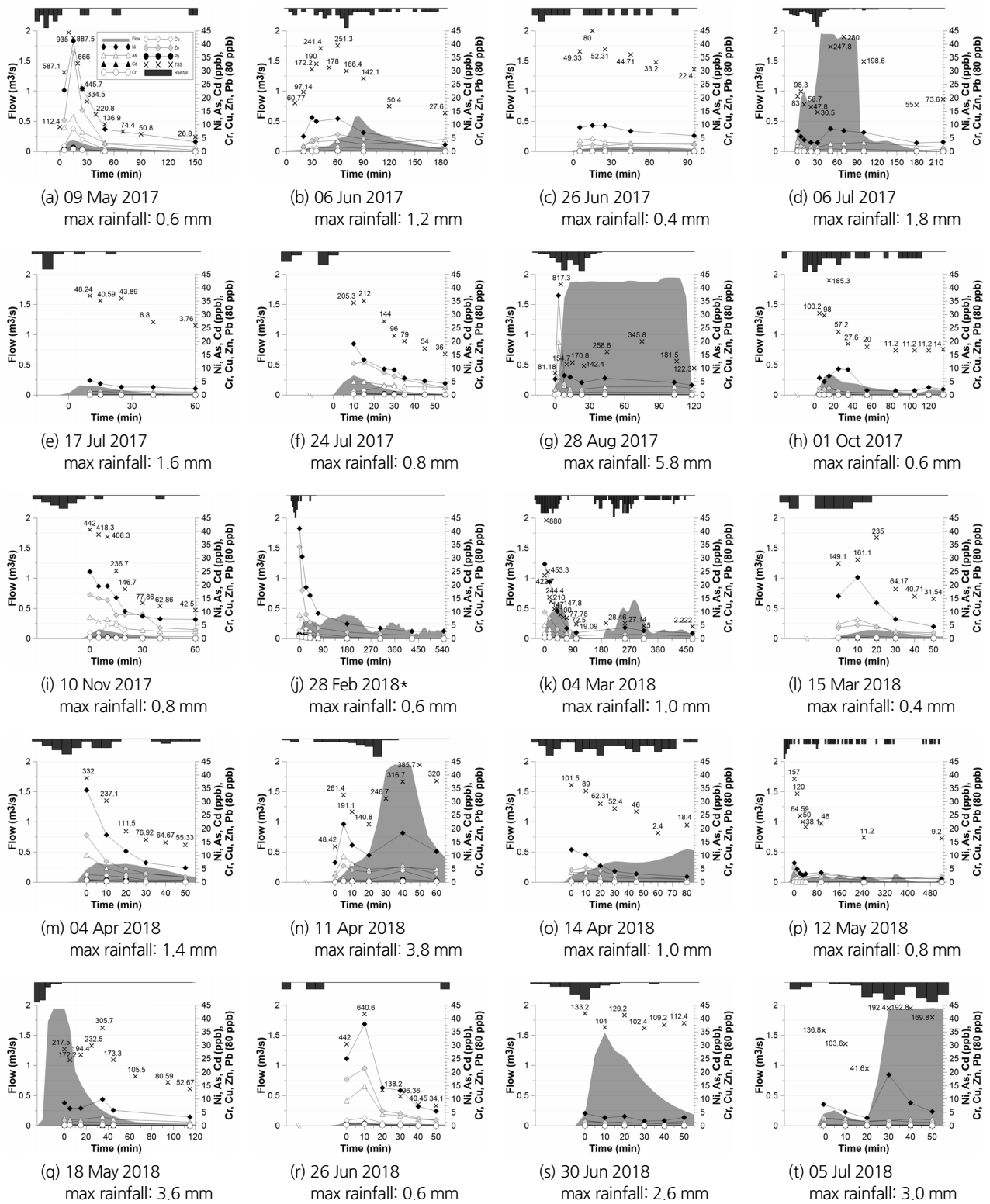
Fig. 3은 강우유출수 내 중금속 농도의 시간별 변화 특성을 나타내고 있다. 그림 상단에 5분 간격의 강우량을 나타내었으며 유출량은 음영으로 나타내었다. 시간에 따른 중금속 농도를 표시하였으며 TSS 농도는 숫자로 표시하였다. 유출량 및 중금속 농도의 축은 모든 그래프에서 동일하나, 강우량은 각 강우별로 크게 차이를 보임에 따라 가독성 확보를 위하여 그림으로 표현하고 최대 강우량을 낱자 하단에 표기하였다. 예를 들어, (a) 09 May 2017의 경우 최대 강우량이 0.6 mm이며, x로 표시된 TSS 농도와 중금속 농도의 변화 경향이 매우 비슷한 것을 확인할 수 있다. 일반적인 중금속의 발생경로는 Table 2에 나타난 바와 같다. 각 강우사상별 강우특성은 Table 3에 정리된 바와 같다. Table 5는 연구 기간에 발생한 20개의 강우사상에 대해 강우유출평균농도(EMC)의 평균 및 범위를 나타낸 것이다.

일반적으로 유기물질과 중금속은 고형입자에 흡착되어 이동한다고 알려져 있다(Sansalone and Buchberger, 1997; Li *et al.*, 2014). 본 연구에서도 중금속 농도와 TSS는 시간에 따른 변화특성이 유사한 경향을 보였다. Fig. 3에 나타나 바와 같이 TSS와 중금속의 농도의 최대치는 강우가 다량 발생하였을 경우에는 강우 초기에 발생하는 경향이 있으며 강우강도가 약한 경우에는 다소 시간이 경과한 후에 발생하는 경향을 나타내고 있다. 강우 초기에 수질 농도가 뚜렷하게 증가하는 경우는 (a) 09 May 2017, (g) 28 Aug 2017, (i) 10 Nov 2017, (j) 28 Feb 2018, (k) 04 Mar 2018 (n) 11 Apr 2018 (o) 14 Apr 2018 및 (p) 12 May 2018 등의 8개 강우에서 뚜렷하게 관찰되었다. 그러나 강우특성에 따라 강우유출의 최대 유량보다 늦은 시점에 수질 농도의 최대치가 나타나거나 복수의 최대농도가 나타나는 경우도 다수 관찰되었다. 이는 무강우기간 동안 축적된 오염물질이 강우에너지가 작은 강우에 의해서도 쉽게 유출되지만, 효과적인 세척을 위해선 보다 강한 강우강도를 필요로 함을 의미하며 Kayhanian *et al.* (2008) 또한 유사한 결과를 보고한 바 있다.

3.2 강우특성에 따른 강우유출수 내 중금속 분석

3.2.1 강우특성과 중금속 유출량의 상관성

강우유출수의 수질은 강우강도, 선행무강우일수(ADD), 강우지속시간, 총유출량 및 유출률 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Giudice *et al.*, 2012). 본 연구에서는 위의 강우관련 변수와 중금속의 강우유출평균농도(EMC)와 강우사상별 중금속 총유출질량(Total mass)에 대한 상관성 분석



Note: y-axis on the right indicates that if Cr, Cu, Zn, Pb concentration reads 1 $\mu\text{g/L}$, the actual value is 80 $\mu\text{g/L}$
 TSS unit: mg/L
 *: missing TSS data

Fig. 3. Flow rate, TSS and heavy metal concentrations during storm events in the study site (2017 May~2018 July)

을 실시하였다. Table 6은 강우특성과 중금속 농도 및 질량과의 상관계수를 나타내고 있다. Fig. 4는 중금속 항목별 농도 범위가 매우 광범위하여 원활한 비교를 위해 각 변수를 최댓값

으로 나눈 무차원의 값을 이용한 산점도로 나타내었다.

Table 6 and Fig. 4에 나타난 바와 같이 강우지속시간은 중금속 농도 및 질량과 유의한 상관성을 보이지 않았다. 그러

Table 5. EMC statistics of seven heavy metals during the study period

μg/L	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Average	17.43	10.31	93.99	406.42	3.43	0.30	28.12
Standard deviation	12.00	6.75	98.48	414.13	2.30	0.26	22.22
Minimum	0.58	0.68	4.80	16.06	0.29	0.02	0.68
Maximum	52.30	27.32	396.06	1641.81	9.08	1.05	81.64

Table 6. Correlation coefficients between heavy metals and variables related to rainfall events

	Cr		Ni		Cu		Zn		As		Cd		Pb	
	EMC	Mass	EMC	Mass	EMC	Mass	EMC	Mass	EMC	Mass	EMC	Mass	EMC	Mass
Antecedent dry days (day)	0.62**	-0.22	0.63**	-0.19	0.73***	-0.04	0.70***	-0.09	0.65**	-0.18	0.69***	-0.17	0.54*	-0.15
30 minute rainfall intensity (mm/hr)	-0.15	0.79***	-0.16	0.60**	-0.26	0.32	-0.32	0.42	-0.12	0.88***	-0.24	0.69***	-0.13	0.67**
Total rainfall volume (m ³)	-0.18	0.62**	-0.15	0.59**	-0.21	0.37	-0.21	0.79***	-0.28	0.53*	-0.26	0.58**	-0.09	0.58**
Total runoff volume (m ³)	-0.21	0.89***	-0.19	0.87***	-0.29	0.38	-0.31	0.71***	-0.28	0.84***	-0.31	0.79**	-0.18	0.74***
Rainfall duration (hr)	0.06	-0.18	0.04	-0.13	0.18	-0.02	0.18	0.18	0.08	-0.14	0.11	-0.14	0.05	-0.19

*: p-value < 0.05, **: p-value < 0.01, ***: p-value < 0.001

Unit: EMC (μg/L), Mass (kg)

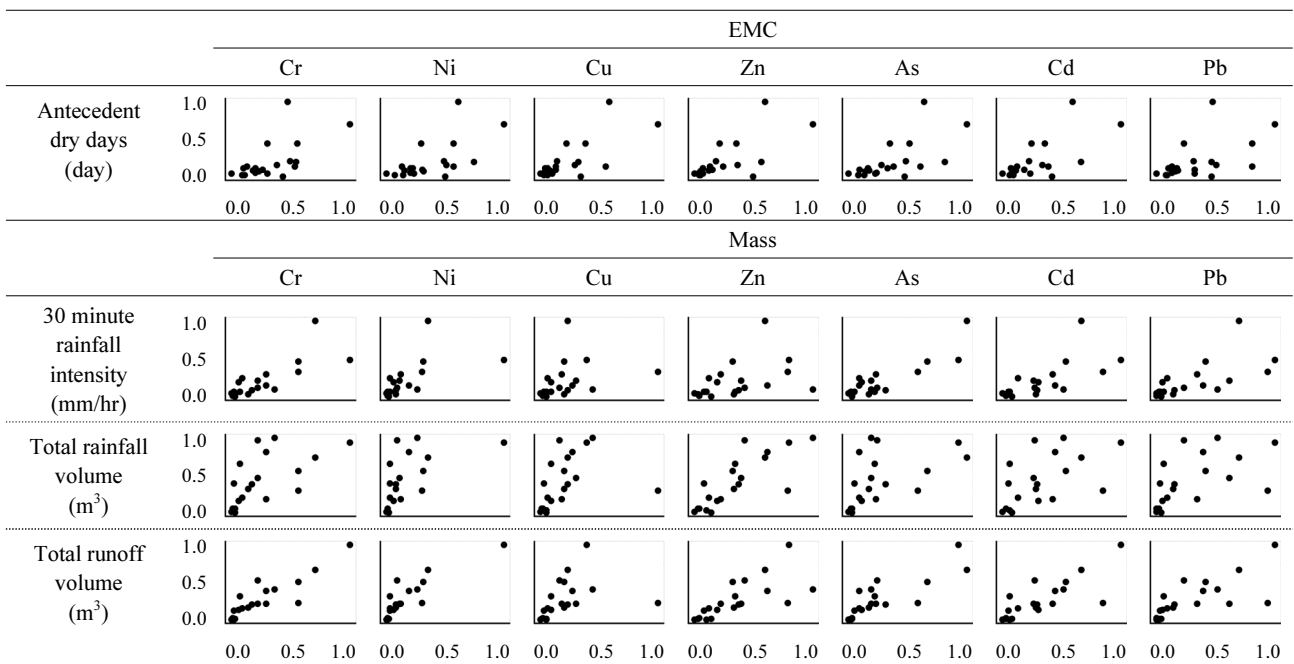


Fig. 4. Scatter plots of heavy metals and variables related to rainfall events

나 강우강도와 중금속 질량의 상관계수는 Cu와 Zn을 제외한 다섯 금속에 대해서 0.60~0.88의 상대적으로 양호한 상관관계를 나타냈다. 한편, Cu와 Zn은 강우특성과 무관하게 모든 시료에서 높은 농도로 분석되었다. 이는 위 두 가지 중금속이 해당 지역에 높은 상태로 유지되어 약한 강우에도 고농도로 유출되기 때문으로 추정되나 정확한 원인은 현재의 연구 범위에서 파악하기 힘든 것으로 판단된다. Cu와 Zn을 제외한 다섯 금속의 질량으로 표현되는 질량은 총강우유출량과도 0.74-0.89의 상관관계를 보이고 있다. 그러나 강우량과의 상관관계는 강우유출량의 경우보다 낮으며 이는 유역에서 발생한 강우가 유출지점까지 모두 도달하지 않는다는 것을 의미한다(Akan and Houghtalen, 2003). 이 분석결과는 도시유역과 고속도로 유출수에 대해 시행되었던 선행연구의 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 분석되었다(Wu *et al.*, 1996, 1998; Barrett *et al.*, 1998; Davis *et al.*, 2001; Wicke *et al.*, 2012). 이는 본 연구

대상유역이 포장면적의 비중이 상대적으로 높음에 따라 자동차의 영향이 또한 크게 작용한다는 것으로 분석된다.

중금속 7개 원소의 EMC 값은 모두 ADD와 양의 상관성(0.54~0.73)을 보였다. 이는 낮은 강우강도에서도 ADD가 길수록 유출수 내의 중금속 농도가 높은 값을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 강우가 없는 기간에 오염물질은 지표면에 축적되고 최소한의 강우에도 표면에서 세척효과(washoff)가 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 비강우시에 도로의 청소를 통해 오염물질을 사전에 제거할 경우 하천으로 유입되는 중금속 오염물질의 양을 현격하게 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 시간별 강우유출유량과 TSS 농도 및 중금속 농도의 상관성

Fig. 5는 시간에 따른 매 5분마다 산정한 30분 강우강도, TSS, 농도 분포 및 중금속 농도 자료의 관계도 및 피어슨상관계수를 나타내고 있다. 이 그림에서는 비교를 돕기 위해 모든

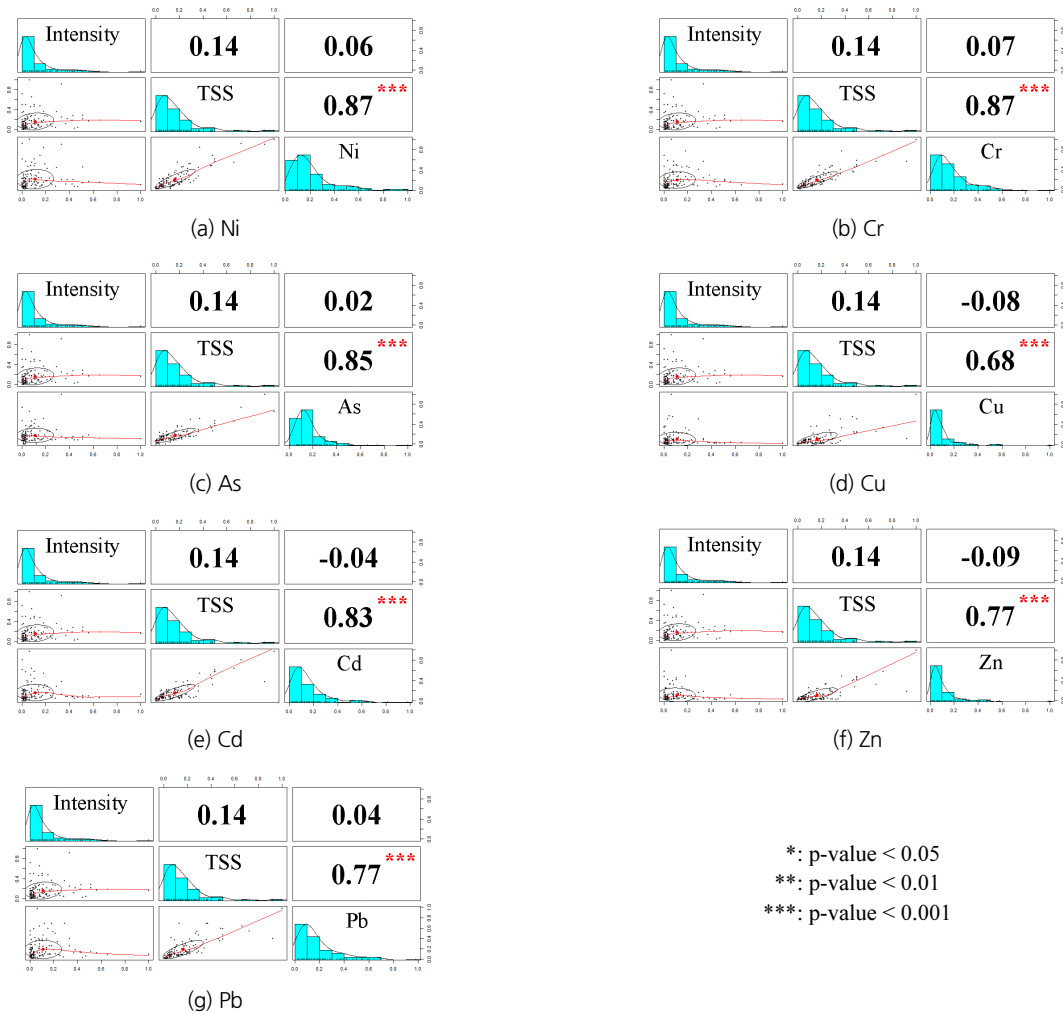


Fig. 5. Correlation analysis result of Intensity, TSS and heavy metal elements

자료를 각 항목의 최댓값으로 나누어 무차원의 값으로 변환하여 사용하였다. 각 항목의 명칭이 표기된 대각선을 기준으로 두 항목이 직각으로 교차하는 상하 측에 각각 상관계수와 산점도가 나타나 있다. 예를 들어, Ni 농도의 경우 30분 강우강도, TSS 농도와 상관계수가 각각 0.06, 0.87이고, 그 산점도는 차례대로 세 번째 행에 나타나 있다.

30분 강우강도는 시간축이 30분으로 고정되어 있는 강우량의 변화량이다. 30분 강우강도와 TSS 농도의 상관관계는 0.14로서 전혀 상관성을 나타내지 않고 있으며, 중금속 농도 또한 아무런 상관성을 나타내지 않고 있다. 이러한 결과는 TSS 농도와 중금속 농도는 강우량이나 강우강도와는 상관이 없음을 의미한다. 이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 TSS 및 중금속 농도가 유출량의 크기와 상관없이 강우 초기에 최고농도를 나타내었다가 감소하는 경향을 보인다는 것에서 일정 강우 유출이 어떠한 형태로 발생하더라도 이동 여건만 형성된다면 쉽게 유출될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5의 강우유출수의 TSS 농도와 중금속 농도가 0.68~0.87의 범위로서 양호한 상관관계를 나타내고 있다. 이는 고형물질의 이동과 중금속 물질의 이동이 함께 발생한다는 것을 나타내며 동시에 중금속이 고형물질에 흡착되어 이동한다는 것을 의미한다.

4. 결론 및 토의

본 연구는 불투수면적이 80% 이상인 대전의 도시 소유역에서 강우유출수에 포함되어 이동하는 중금속 물질의 거동 특성을 파악하기 위해서 수행되었다. 2017년 5월부터 2018년 7월까지 총 20회의 강우에 대하여 강우특성과 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn의 중금속 7가지 그리고 TSS 농도를 연속적으로 조사하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 시간별로 분석한 강우유출수 내 TSS 농도와 중금속 농도의 상관관계는 0.68~0.87의 범위로서 양호한 수준을 나타내고 있다. 이는 고형물질과 중금속 물질이 함께 이동한다는 것을 의미하며 동시에 중금속이 고형물질에 흡착되어 이동한다는 것을 의미한다.
- 2) 본 연구에서 강우강도와 중금속 질량의 상관계수는 Cu와 Zn을 제외한 다섯 가지 금속에 대해서 0.60~0.88의 비교적 양호한 상관관계를 나타냈다. Cu와 Zn을 제외한 다섯 금속의 질량은 총유출량과 또한 0.74~0.89 범위의 상관관계를 보이고 있다. 그러나 강우량과의 상관관계는 유출량

의 경우보다 낮으며 이는 유역의 유출계수가 평균적으로 0.4 이하로서 발생한 강우가 유출지점까지 모두 도달하지 않기 때문에 발생하는 현상으로 분석된다.

- 3) 반면 강우강도와 TSS 및 중금속 농도의 상관성이 없는 것으로 분석되었다. 이는 TSS 및 중금속 농도는 강우량이나 강우강도와는 상관이 없고, 일정 강우 유출이 어떠한 형태로 발생하더라도 이동 여건만 형성된다면 쉽게 유출될 수 있다는 것을 의미한다.
- 4) 중금속 7개 원소의 EMC 값은 ADD와 모두 양의 상관성(0.54~0.73)을 보였다. 따라서 낮은 강우강도에서도 ADD가 긴 경우 유출수 내의 중금속 농도가 높은 값을 나타내는 것으로 관찰되었다. 따라서 비강우시에 유역 표면의 고형물질을 청소 등을 통해 사전에 제거하는 경우 하천으로 유입되는 중금속 오염물질의 양을 현저하게 저감할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 우리나라 및 외국의 연구에서도 20개 이상의 연속강우사상에 대해 강우량, 유출유량, 수질 및 중금속을 시간에 따라 분석한 경우는 거의 찾아 볼 수 없으며 본 연구의 자료 관련 연구에 매우 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 강우에 따른 중금속 유출 모델을 구축하고 및 관리대안 수립하는 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부지정 대전녹색환경지원센터(DJGEC)의 2017년도와 2018년도 연구개발사업으로 지원받은 과제임.

References

- Adachi, K., and Tainosho, Y. (2004). "Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust." *Environment international*, Vol. 30, No. 8, pp. 1009-1017.
- Akan, A. O., and Houghtalen, R. J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*. John Wiley & Sons, US.
- Barrett, M. E., Irish Jr, L. B., Malina Jr, J. F., and Charbeneau, R. J. (1998). "Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 131-137.
- Beasley, G., and Kneale, P. (2002). "Reviewing the impact of metals and PAHs on macroinvertebrates in urban watercourses." *Progress in Physical Geography*, Vol. 26, No. 2, pp. 236-270.

- Charters, F. J., Cochrane, T. A., and O'Sullivan, A. D. (2016). "Untreated runoff quality from roof and road surfaces in a low intensity rainfall climate." *Science of the Total Environment*, Vol. 550, pp. 265-272.
- Davis, A. P., Shokouhian, M., and Ni, S. (2001). "Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources." *Chemosphere*, Vol. 44, No. 5, pp. 997-1009.
- Genç-Fuhrman, H., Mikkelsen, P. S., and Ledin, A. (2007). "Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from stormwater: Experimental comparison of 11 different sorbents." *Water Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 591-602.
- Giudice, G. D., Padulano, R., and Rasulo, G. (2012). "Factors affecting the runoff coefficient." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 9, No. 4, pp. 4919-4941.
- Granato, G. E., Church, P. E., and Stone, V. J. (1995). "Mobilization of major and trace constituents of highway runoff in groundwater potentially caused by deicing chemical migration." *Transportation Research Record*, Vol. 1483, pp. 92-104.
- Han, Y., and Seo, D. (2014). "Application of LID methods for sustainable management of small urban stream using SWMM." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 36, No. 10, pp. 691-697.
- Herngren, L., Goonetilleke, A., and Ayoko, G. A. (2005). "Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall." *Journal of Environmental Management*, Vol. 76, No. 2, pp. 149-158.
- Huang, Y., Zhang, D., Xu, Z., Yuan, S., Li, Y., and Wang, L. (2017). "Effect of overlying water pH, dissolved oxygen and temperature on heavy metal release from river sediments under laboratory conditions." *Archives of Environmental Protection*, Vol. 43, No. 2, pp. 28-36.
- Ichiki, A., and Yamada, K. (1999). "Study on characteristics of pollutant runoff into Lake Biwa, Japan." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 12, p. 17.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., Beeregowda, K. N. (2014). "Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals." *Interdisciplinary Toxicology*, Vol. 7, No. 2, pp. 60-72.
- Kayhanian, M., Stransky, C., Bay, S., Lau, S.-L., and Stenstrom, M. K. (2008). "Toxicity of urban highway runoff with respect to storm duration." *Science of the Total Environment*, Vol. 389, No. 2-3, pp. 386-406.
- Kim, J., Seo, D., and Lee, T. (2017). "Effectiveness of settling treatment system to reduce urban nonpoint source pollutant load by first flush." *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, Vol. 39, No. 3, pp. 140-148.
- Kim, L. H., Ko, S. O., Lee, B. S., and Kim, S. (2006). "Estimation of pollutant EMCs and loadings in highway runoff." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 2B, pp. 225-231.
- KMA (2018). Climate monitoring: Climate of Korea, accessed 13 August 2018, <http://www.weather.go.kr/weather/climate/average_south.jsp>.
- Koo, Y. M., Kim, J., Kim, B. R., and Seo, D. (2015). "Removal of suspended solids from stormwater runoff using a fabric filter system." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 37, No. 3, pp. 165-174.
- Koo, Y. M., Seo, D. (2017). "Parameter estimations to improve urban planning area runoff prediction accuracy using Stormwater Management Model (SWMM)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 5, pp. 303-313.
- Lambert, M., Leven, B. A., and Green, R. M. (2000). *New methods of cleaning up heavy metal in soils and water*. Environmental Science and Technology Briefs for Citizens. Kansas State University, Manhattan, KS, US.
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Gong, J., Sun, F., and Xu, Y. (2014). "Characterization and first flush analysis in road and roof runoff in Shenyang, China." *Water Science and Technology*, Vol. 70, No. 3, pp. 397-406.
- McPherson, T. N., Burian, S. J., Stenstrom, M. K., Turin, H. J., Brown, M. J., and Suffet, I. H. (2005). "Trace metal pollutant load in urban runoff from a Southern California watershed." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 7, pp. 1073-1080.
- Ministry of Environment, Republic of Korea (2003). Introduction: Effects of Nonpoint Source, accessed 08 September 2018, <<https://nonpoint.me.go.kr/contentsid/225/index.do>>.
- Myers, C. F., Meek, J., Tuller, S., and Weinberg, A. (1985). "Non-point sources of water pollution." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 40, No. 1, pp. 14-18.
- Novotny, V. (1994). *Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution*. Van Nostrand-Reinhold Publishers, New York, US.
- Novotny, V. (1995). *Non point pollution and urban stormwater management (Vol. 9)*. CRC Press, US.
- Pegram, G. C., Quibell, G., and Hinsch, M. (1999). "The nonpoint source impacts of peri-urban settlements in South Africa: implications for their management." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 12, pp. 283-290.
- Sansalone, J. J., and Buchberger, S. G. (1997). "Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 123, No. 2, pp. 134-143.
- Seo, D., and Fang, T. (2012). "Application of automatic stormwater monitoring system and SWMM model for estimation of urban pollutant loading during storm events." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 34, No. 6, pp. 373-381.
- Seo, D., and Kim, J. (2016). "Reduction of pollutant concentrations in urban stormwater runoff by settling." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 38, No. 4, pp. 210-218.
- Seo, D., Lee, T., Kim, J., and Koo, Y. (2017). "Development of integrated management system (ISTORMS) for efficient operation of first flush treatment system for urban rivers." *Water Practice and Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 557-563.
- Šćiban, M., Radetić, B., Kevrešan, Ž., and Klačnja, M. (2007). "Adsorption of heavy metals from electroplating wastewater by wood sawdust." *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 2,

- pp. 402-409.
- USEPA (2001). *Technical fact sheet: final rule for arsenic in drinking water*. EPA/815/F-00/016.
- USEPA (2017). Nonpoint source: urban areas, accessed 27 November 2017, <<https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-urban-areas>>.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., and Ye, K. (1993). *Probability and statistics for engineers and scientists (Vol. 5)*. (Kim, B. S., Park, S. K., Yoo, Y. K., Jung, S. I., Trans.), New York: Macmillan, US.
- Wicke, D., Cochrane, T. A., and O'sullivan, A. (2012). "Build-up dynamics of heavy metals deposited on impermeable urban surfaces." *Journal of Environmental Management*, Vol. 113, pp. 347-354.
- Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, W. L., and Evett, J. B. (1998). "Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 584-592.
- Wu, J. S., Holman, R. E., and Dorney, J. R. (1996). "Systematic evaluation of pollutant removal by urban wet detention ponds." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 122, No. 11, pp. 983-988.
- Yin, Z., Koo, Y., Lee, E., and Seo, D. (2015). "Development of integrated management system of stormwater retention and treatment in waterside land for urban stream environment." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 126-135.
- Youm, S. J., Lee, P. K., Yeon, K. H., and Kang, M. J. (2005). "Heavy metal contamination in roadside sediments within the watershed of the Hoidong reservoir in Busan city." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 38, No. 3, pp. 247-260.
- Zanders, J. M. (2005). "Road sediment: characterization and implications for the performance of vegetated strips for treating road run-off." *Science of the Total Environment*, Vol. 339, No. 1-3, pp. 41-47.