

주차장 지역의 강우에 의한 Pb와 Zn의 유출 특성

임종권 · 손현석 · 김성근 · 조경덕[†]

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Runoff Characteristics of Heavy Metals from a Parking Lot by Rainfall

Jong-Kwon Im · Hyun-Seok Son · Sung-Keun Kim · Kyung-Duk Zoh[†]

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

(Received 5 July 2010, Revised 5 September 2010, Accepted 13 September 2010)

Abstract

Runoff from a parking lot can be highly contaminated nonpoint source due to the impermeability of rainwater. This study presented runoff characteristics of heavy metals especially Zn and Pb from a parking lot during total 17 rain events. Monitoring results showed the first flush phenomenon within 30 min was observed in all rain events, but the event mean concentration (EMC) did not clearly show the characteristics of runoff. The ranges of Pb and Zn was 4~201 µg/L and 131~672 µg/L, respectively, and the runoff mass of Zn and Pb was highly to related with the flow rate, and runoff coefficient of rain. The runoff mass of Zn was greater than that of Pb in all events. The runoff mass of Pb was highly correlated with the amount of TSS, and TSS and DOC were was related with the mass of Zn. This result implies that Pb and Zn are mainly existed in the particulate form. The results can be used to as meaningful data in the management of nonpoint source, and in the management in the runoff catchment in the parking lot.

keywords : Event mean concentration, First flush, Nonpoint source, Runoff, Pb, Zn

1. 서론

강우로부터 유출되는 비점오염물은 하천, 호수로 유입되거나 지하수로 유입된다. 강우로부터 유출되는 비점오염물의 특성은 다양한 토지이용으로 인한 토지의 성상과 이용 정도, 방법에 따라 다르게 나타난다. 특히 도시지역의 비점오염원물의 영향은 도로의 포장율의 증가에 의한 불투수층의 감소에 의한다. 예를 들어 고속도로, 교량, 그리고 주차장과 같은 포장된 지역은 비포장지역에 비해 토양 속으로의 투수 작용에 의한 강우의 분산이 거의 일어나지 않기 때문에 다른 지역에 비해 강우유출수의 양이 증가된다(Gupta and Saul, 1996). 이는 토양에 의한 자연적 정화작용이 차단될 뿐만 아니라 적은 유역면적에 비하여 강우 유출수의 양 및 오염물질의 유출량이 크기 때문이다. 따라서 이러한 도시지역, 특히 포장된 지역의 비점오염원의 효율적인 관리방안의 수립은 수계의 질적 향상을 위해 매우 중요하다(Kim, 2003).

도로로 포장된 지역에서 유발되는 이러한 현상은 특정한 곳에 대량 집수의 원인이 되며 이 과정에서 집수된 대부분의 비점오염물은 강, 호수 등의 지표수로 배출되기 때문에 지표수의 주요한 오염원으로 작용되고 있다. 특히 포장된 지역으로 부터의 강우 유출수는 단위 면적당 높은 오염물

질 부하량을 가질 뿐만 아니라 높은 부하농도 유발 가능성이 매우 크다고 할 수 있다(Sansalone and Bushbregger, 1997; Ujevic et al., 2000).

비점오염물질은 건물의 부식, 대기침적, 운송, 다양한 산업활동, 그리고 의도적/비의도적인 방출 등으로 유발된다(김이형과 이선하, 2005). 특히 주차장, 교량, 고속도로 등과 같이 자동차의 통행량이 빈번한 지역의 경우 자동차의 브레이크와 라이닝, 타이어 등의 마모에 의한 Pb 및 Zn 등의 다양한 중금속에 의한 오염과 강우초기에 고농도의 비점오염물질이 유출되는 초기강우 현상을 일으킬 가능성이 높다(Christensen and Guinn, 1979; McKenzie et al., 2009). 이러한 오염물질은 보건학적 그리고 건전한 생태시스템의 유지 관점에서 오염수계의 관리에 매우 불리한 점으로 작용되고 있다.

우리나라의 경우는 대부분의 음용수원으로 한강, 낙동강 등 지표수를 주요 원천으로 사용하고 있다. 하수와 폐수 같은 점오염원은 환경중으로 부하되기 전에 그 관리가 비교적 잘 이루어지는 것에 비하여, 한국의 주요 4대강의 수질의 개선 효과는 미미할 뿐만 아니라 최근의 연구에 의하면 더 악화되고 있다(환경부, 2008). 한강, 낙동강, 영산강, 금강등 한국의 주요 4대강의 수질에서의 비점오염물질의 영향은 대략 42~68%로 보고되고 있다(환경부, 2008). 이것은 음용수원의 4대강의 수질을 개선하기 위해서는 비점오염원의 처리 및 관리가 필요하다는 것을 의미한다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
zohkd@snu.ac.kr

본 연구는 주차장 지역에서의 강우에 의해 유출되는 비점오염물질의 처리 설계를 위한 기본 자료를 제공하기 위해 증금속 중 특히 Pb와 Zn의 유출경향 및 시간대별 농도 분포 분석결과를 토대로 분석하였으며, 차량에 의한 주요 오염 지역이고 포장된 지역의 오염물질 초기강우효과(first flush effect)를 오염물질의 농도와 부하량 관점에서 살펴보았다.

2. 연구방법

2.1. 대상지역

Fig. 1(a)에 비점오염원 모니터링 사이트를 나타내었다. 모니터링 사이트는 경기도 남서부에 위치한 광주시의 한 보건소 지역의 주차장으로서 강우의 집수 장치가 주차장에 설치되어 있다. 여기에 집수된 강우는 집수조에 연결된 파이프를 통해 한강의 지류인 모현천에 유입된다. 연구대상 지역의 넓이는 5000 m²으로 효과적인 연구대상물질의 채취를 위해 집수조 유입부분에 자동유량계를 설치하여 5분 단위로 샘플링이 이루어지도록 하였다. 자동적으로 측정된 유출특성의 자료는 자동으로 컴퓨터내에 마이크로소프트 엑셀(Microsoft Excel, USA) 프로그램 형식으로 저장되었다.

Fig. 1(b)는 본 연구 대상지역을 나타내고 있다. 본 대상지역은 주차장내의 화단과 울타리가 설치되어 있으며 이들은 투수층으로 이루어져 있으며 주차시설과 격리된 상태로 전체 주차장 면적에 30%를 차지하고 있다.

모니터링 대상 주차장의 최대 가능 주차대수는 30대이고 주중의 야간 시간과 주말의 모든 시간에서 일반인들에게 개방되었다. 일일평균 주차수는 170~250대의 범위에 있으며 측정된 주차장의 평균온도는 12.3°C이었다. 겨울동안 강설에 즉각적인 유출이 없었기 때문에 눈에 의한 유출은 본 연구에서 포함되지 않았다.

2.2. 샘플링과 분석

강우가 집수조로 유입되기 전에 멸균된 채수병을 이용하여 3 L를 채수하였으며 분석전까지 저온 냉장 보관하였다. 채취된 시료는 BOD(biochemical oxygen demand), COD(chemical oxygen demand), TSS(total suspended solid), turbidity, DOC(dissolved organic carbon)와 같은 일반적인 오염평가 항목과 T-N(total nitrogen), T-P(total phosphorus)

등의 영양염류, oil & grease, 그리고 증금속 중 Cd, Pb, 그리고 Zn을 측정하였다. 그러나 분석의 결과 각 사상에서 Cd는 검출한계 이하로 분석되어 본 논문에서 제외하였다. Pb와 Zn은 Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy(ICP-AES)를 이용하여 분석하였으며 그 외의 BOD, COD, TSS, Turbidity 등과 같은 다른 오염지표를 위한 분석은 *Standard Method* 에서 제시한 방법에 의해 수행되었다(APHA, AWWA, WPCF, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우사상의 특성

주차장 강우 유출수에 대하여 2006년 9월부터 2008년 10월까지 총 17번 실시하였다. 본 모니터링은 선행건기일수(antecedent dry days, ADD)가 최소한 2일 이상인 경우에 한해서 실시하였으며, 모든 모니터링 실시의 조건들인 사상날짜(event date), 집수면적(catchment area), 선행건기일수, 총강우량(total rainfall), 유출지속시간(runoff duration), 유출계수(runoff coefficient)를 Table 1에 제시하였다. 강우사상 동안 선행건기일수와 총 강우량의 범위는 각각 2~34 일과 4~56 mm이었고 총 유출량의 범위는 7.61~168.7 m³이었다. 이 결과를 기초로 산출된 평균 강우강도와 유출계수는 각각 0.75~7.75 mm/hr와 0.35~0.62의 범위로 나타났다.

이전 연구들에 의하면 일반적으로 포장된 지역의 유출계수가 0.8 이상으로 보고되고 있으나, 본 연구에서 산출된 유출계수는 0.38~0.6의 범위로 낮게 나타났다(Dong et al., 1984; Liebens, 2001). 실제로 Bach 등(2010)에 의하면 강우의 유출계수는 표면의 경사도와 불투수층을 이루는 포장율과 관계가 깊다고 보고하고 있기 때문에 Fig. 1(b)에서 제시된 주차장의 투수층의 비율(30%)을 고려할 때 유출계수는 $0.8 \times 0.7 = 0.56$ 정도로 산출된다. 그러므로 본 연구대상지역의 화단과 울타리에 점유된 투수층에 의하여 유출계수가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.2. 모니터링 결과 및 비점오염 물질의 유출수의 특성

총 17번의 사상 중 대표적인 사상으로 사상 9와 13의 모니터링에 의한 시간에 따른 유출수의 변화특성을 Fig. 2와 3에 나타내었다. 일반적으로 강우사상 동안 집수조내로의

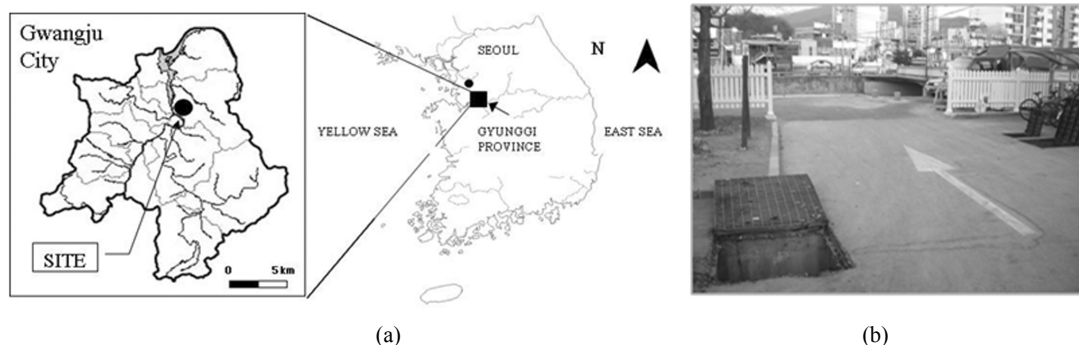


Fig. 1. (a) The location and (b) circumference view of sampling site.

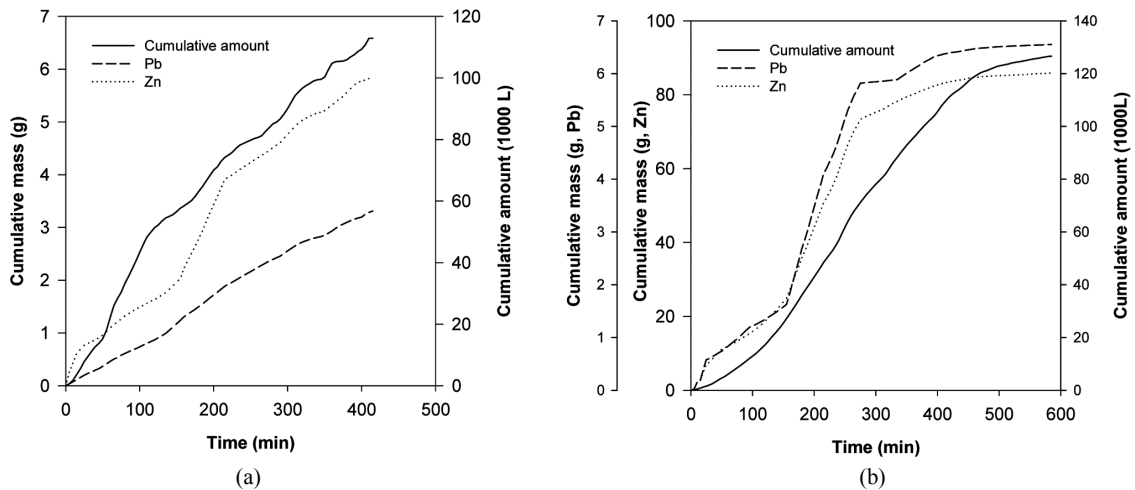


Fig. 2. The change of rainfall amount and the mass of Pb and Zn by the sampling time at (a) event 9 and (b) event 13.

Table 1. The characteristics of the rain event during the monitoring period in the parking lot

Event date (yy-m-dd)	Area (m ²)	ADD (antecedent dry day) (day)	Total rainfall (mm)	Runoff duration (hr)	Runoff coefficient
2006-09-17	5000	8	4	3	0.38
2006-10-22	5000	34	5	4	0.51
2006-11-05	5000	12	5.5	4	0.44
2006-12-08	5000	6	4.5	6	0.43
2007-03-04	5000	2	27.5	14	0.35
2007-04-30	5000	8	9.5	7	0.51
2007-05-16	5000	3	56	8	0.60
2007-06-21	5000	7	16	7	0.55
2007-07-19	5000	2	35	7	0.57
2007-09-14	5000	14	62	8	0.62
2008-03-13	5000	7	7.5	5	0.54
2008-03-22	5000	8	20	9	0.52
2008-05-18	5000	10	45.5	9	0.56
2008-06-02	5000	5	43	7	0.50
2008-06-08	5000	4	7.5	5	0.52
2008-06-17	5000	8	33	9	0.52
2008-10-22	5000	26	10.5	7	0.51

초기 유출량 속에 가장 높은 오염물질의 농도가 포함된다 는 것을 가정하였으며 이 현상은 초기강우현상(first flush phenomenon)으로 알려진다(Bach et al., 2010). Fig. 3에 나타낸 강우 시간에 따른 Pb와 Zn의 농도 변화에 의하면 초기강우현상을 확인할 수 있었다. 특히 Pb와 Zn의 경우 초기 20분 이후부터의 농도 변화는 거의 보이지 않았다.

일반적으로 포장된 지역 등의 불투수층으로부터 강우의 초기 단계에서 일어나는 유출수에는 고농도의 오염물의 포함가능성이 매우 높다. 실제로 기존의 연구들에 의하면 이 초기강우 효과는 최대강우강도, 강우, 유출계수, 강우기간과 밀접한 양적 관계가 있다고 보고하고 있다(Deletic, 1998; Ma et al., 2002; Taebi and Droste, 2004).

3.3. 강우 중 유출농도와 유출량의 평가

Table 2에 총 17개의 사상별로 모니터링된 Pb와 Zn의 최대값과 최소값을 Table 2에 나타내었다. Table 2에 의하면, 가장 짧은 선행건기일수와 가장 긴 강우 지속기간을 보인 사상 5의 경우 강우에 의해 유출된 Pb와 Zn의 농도는 각각 0.013 mg/L와 0.26 mg/L였다. 이와 마찬가지로 모니터링 된 모든 사상들의 Pb와 Zn은 최저 농도의 범위는 0.01~0.02 mg/L와 0.11~0.26 mg/L로 조사되었다. 이것은 강우 조건에 상관없이 모니터링 지역에 존재하는 배경농도로 간주될 수 있다. 이러한 배경농도의 존재는 강우에 모든 오염물질의 유출이 어렵다는 것을 의미하며 이는 용존 상태나 부유상태로 존재할 수 없는 즉, 대상지역의 토양 또는 포장 재료에 흡착되어 있는 고형물질로 존재한다고 할 수 있다(Bach et al., 2010).

Table 2. The patterns of event mean concentration (EMC) of Pb and Zn in each event

Event	Pb (µg/L)			Zn (µg/L)		
	Max	Min	EMC	Max	Min	EMC
1	10	9	4	415	143	181
2	88	170	2.6	819	133	304
3	74	190	6.1	109.7	136	132
4	98	160	5.8	118.7	112	618
5	22	2	1.2	488	260	333
6	97	53	4.7	147.5	639	432
7	188	58	6.6	156.6	194	483
8	255	65	9.1	2280	124	624
9	162	65	8.3	108.7	52	131
10	214	45	6.3	192.1	147	342
11	415	143	18.1	196.8	275	506
12	159	112	12.1	422	140	199
13	513	4	51	578.4	133	672
14	532	86	201	409	115	161
15	151	14	160	168.6	111	254
16	418	13	340	130.4	590	183
17	61	8	220	717	156	277

일반적으로 주차장과 같은 비점오염원은 차량의 활동이 주요오염원이 되며 주로 자동차의 주요부품의 마모와 유류의 배출에 의해 이루어진다. 그중에 Pb와 Zn의 경우 타이어, 윤활유, 브레이크 패드 등에 많이 함유되어 있는 중금속이므로 차량의 주차 활동에 주로 의심되는 오염물질이다. 이러한 중금속 물질들은 입자상 물질 즉, TSS와 연관성이 높을 것으로 판단된다. 또한 TSS는 COD와 BOD성 물질들, 그리고 T-N과 T-P와의 화학적 결합에 의한 유출가능성이 있다고 판단된다.

이러한 모니터링 자료는 비점오염물질의 처리 시스템 등의 비점오염원 관리의 기본 자료로서 중요하다. 그러나 Table 2에 나타난 결과와 같이 강우 중 Pb와 Zn의 농도 분포는 매우 넓기 때문에 그 농도의 경향을 대표적으로 나타낼 수 있는 대표값을 구현할 필요가 있다. 대표값으로 가장 많이 사용되는 것으로 강우유출수의 사상평균농도(event mean concentration, EMC)로서 유량에 따른 오염물질의 농도를 고려한 평균농도로서 식 (1)과 같이 산정한다(Kim et al., 2005, 2007; Lee et al., 2002). 이 값은 강우유출에 따른 전체 오염부하 농도를 의미하는 것으로 오염수의 처리를 위한 처리시설의 설계에 중요한 자료가 된다.

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

여기서 $q_{run}(t)$ 와 $C(t)$ 는 시간 t 에서의 유출율과 오염물질의 농도를 나타낸다.

일반적으로 처리시스템의 설계에서는 오염물질의 최고 부하농도가 중요한 의미를 나타낸다. 그러므로 이 대표값은 최고농도수준을 반영해야 한다. 이러한 관점에서 Table 2에 제시한 각 사상에서의 Pb와 Zn의 EMC 값은 모든 사상에서 모니터링 결과에 대한 올바른 경향을 보이지 못한다고 할 수 있다. 이것은 강우 유출에 의한 농도의 변화가 매우 편중되어 있고 총유출량과 오염물질의 농도가 비례하지 않음을 의미한다.

Fig. 2는 사상 9와 13에서 강우와 Pb와 Zn의 부하량의 누가곡선을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 두 사상 모두에서 Zn의 축적 경향이 강우의 경향과 유사함을 볼 수 있다. 즉, 강우에 의한 유출의 정도는 Pb보다 Zn이 크다고 할 수 있다. 이러한 경향은 역시 같은 사상들에서 유출율에 대한 Pb와 Zn의 농도와 질량의 유출 경향을 나타낸 Fig. 3에서 나타난다. 즉, Fig. 3에 의하면 Pb에 비해 Zn의 유출량이 매우 증가했음이 관찰되었다. 또한 각 물질의 농도는 유출 초기, 약 20 분간의 유출을 제외하고 거의 변화가 없었다. 이것은 Pb와 Zn이 강우에 의한 유출 영향을 받지 않는 배경농도가 존재한다는 것을 의미한다. Fig. 3의 결과를 바탕으로 Pb와 Zn의 유출 초기현상에서의 고농도와 마지막 부분에 지속적으로 관찰되는 각 물질의 농도의 비를 산출해 보면 Pb와 Zn 각각 0.45~0.55와 0.06~0.08 이었다. 이 수치에 의하면 Zn의 경우가 상대적으로 유출에

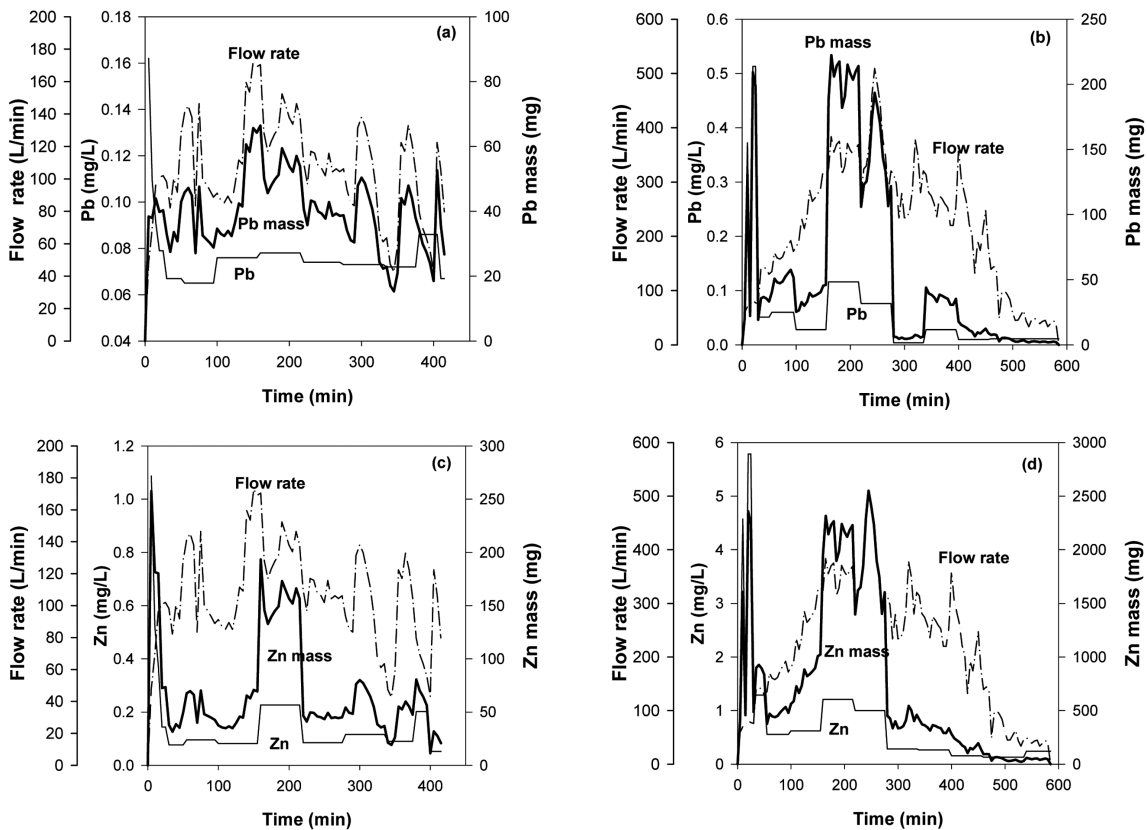


Fig. 3. Concentration and loading change of Pb and Zn during the rainfall at event 9 (a, c) and 13 (b, d).

의한 농도차이가 크고 강우에 의한 유출에 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 또한 Fig. 3에 제시한 각 물질의 유출 특성에 의하면 강우 초기의 농도(mg/L)와 부하량은 동일한 경향을 보이지만 전체적인 강우 시간동안 부하량(mass)의 변화는 강우의 유출율(flow rate)에 더욱 부합하는 것을 알 수 있다. 이는 비점오염원의 관리를 위해서는 강우유출수의 농도뿐만 아니라 부하량 즉, 강우유출속도를 함께 고려해야 함을 의미한다.

3.4. 고속도로와 주차장의 Pb, Zn의 유출 특성

기존 불투수층에서의 비점오염원 연구는 일반적으로 차량의 속도와 이동량이 큰 고속도로(highway)에서 연구가 활발히 진행되고 있는 반면 주차장(parking lot)에서는 오염원이 차량이라는 공통점이 있지만, 연구가 상대적으로 미비하다. 본 연구 결과를 미국의 고속도로와 주차장에서의 연구와 비교한 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에 의하면, 일반적으로 고속도로 5곳의 일일통행량은 본 연구를 포함한 주차장 2곳보다 높았지만, Pb, Zn의 농도는 일일통행량에 비하여는 오히려 고속도로보다 주차장에서 높게 측정되었다. 이는 일일통행량보다는 차량의 이동특성이 주차장에서의 Pb와 Zn의 증급속 오염농도를 높게 된 원인으로 파악된다.

일반적으로 주차장에서는 고속도로보다, 차량이 서행하기 때문에 브레이크와 기어변속의 사용빈도가 높아지고, 주차하는 과정에서 지표면과 타이어의 마찰이 증가하여 마모됨에 따라 자동차로부터 오염물질, 특히 중금속의 유출이 가속화 될 수 있다. 실제로 차량에서 발생하는 Pb는 브레이크 마모에 의해 발생되고(Harrison et al., 1981), Zn는 타이어 제조 과정에서 사용되는 산화아연의 사용이 원인이 된다(Lee et al., 1997).

본 연구 결과를 뒷받침하기 위한 최근의 국내의 연구로, 고속도로 영업소 지역에서 관찰된 연구 결과에 의하면, Pb와 Zn는 95% 신뢰구간 17265.8~27348.1 µg/L, 410.3~751.9 µg/L로 각각 측정되었다(이소영 등, 2007). 영업소 지역은 고속도로의 주차장이라고 볼 수 있으며, 일일통행량이 본 연구의 주차장보다 수백배에 해당한다. 여기서도 Pb와 Zn의 매우 높은 농도의 관측은 차량의 브레이크 사용과 타이어와 지표면의 마찰이 고속도로에 비해 증가되어 나타났다고 파

악된다. 이처럼, 주차장(parking)에서는 차량에서 발생 가능한 Pb와 Zn의 유출을 촉진할 수 있는 여러 요인이 존재하기 때문에 상대적으로 고속주행을 하는 고속도로(highway)에서보다 비점오염원의 관리 측면에서 더 중요시 여겨져야 함을 의미한다.

3.5. 강우조건과 Pb와 Zn의 유출의 상관성

Table 4는 각 사상에서의 Pb와 Zn의 EMC와 유출 부하량과 선행건기일수, 총강우량, 강우지속기간, 유출계수, 그리고 강우강도와와의 상호관계 분석의 결과를 나타내었다. Table 3에 의하면 강우에 의한 Pb와 Zn의 유출부하량은 총강우량과 강우강도에 매우 큰 상관성을 보이나, EMC의 경우 그 강우조건과의 연관성은 매우 희박한 것으로 보였다. 또한 유출계수의 경우 역시 EMC보다는 유출부하량과 밀접한 관계성을 보였다. 즉, EMC와 각 강우조건에 대한 연관성보다는 유출부하량에 대한 연관성이 크게 나타난 것을 알 수 있다. 결과적으로 EMC는 각 사상의 모니터링 자료를 대표하는 평균농도를 나타내지만, 초기강우효과가 존재할 때 사상에서 대상물질의 전체적인 경향을 나타내기는 어렵다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 비점오염물의 집수 후 처리를 위한 제어시설의 설계에서 물질의 EMC 보다는 부하량이 기준이 되어야 할 것을 의미한다.

Table 5는 TSS, COD, BOD, DOC, TN, 그리고 TP등의 유출부하량과 선행건기일수, 총강우량, 강우지속기간, 유출

Table 4. Correlation analysis of Pb and Zn with ADD (antecedent dry day), total rainfall, rainfall duration, or (d) runoff coefficient

	ADD (day)	Total rainfall (m)	Rainfall duration (hr)	Runoff coefficient	Rainfall intensity (mm/hr)
Pb EMC (mg/L)	-0.26	0.20	-0.04	0.32	0.28
Pb mass (mg)	-0.23	0.77	0.20	0.48	0.80
Zn EMC (mg/L)	-0.03	0.02	0.09	0.21	-0.04
Zn mass (mg)	-0.07	0.83	0.26	0.68	0.82

Table 3. The comparison of EMCs concentration of Pb and Zn with other studies conducted in highway and parking lots (Kayhanian et al., 2007; Rebecca et al., 2002)

Type	Highway	Highway	Highway	Highway	Highway	Parking lot	Parking lot
Site	California statewide ^a (low-urban) 2000-03	Texas ^b (1998)	North Carolina ^c (1998)	FHWA ^d (1990)	NURP ^e (1983)	Connecticut ^f (1999)	This study ^g (Gyunggi-province, Korea)
Pb (µg/L)	12.7	53	15	234	182	104	70
Zn (µg/L)	111.2	222	NA	217	202	226	340

a: 34 low-urban highway spots, 2,000~328,000 vehicles traffic daily
 b: 3 highway spots, 9,000~58,000 vehicles traffic daily
 c: 3 highway spots, 6,000~25,000 vehicles traffic daily
 d: Federal Highway Administration, 34 low-urban highway spots,, 4,000~200,000 vehicles traffic daily
 e: US EPA Nationwide Urban Runoff Program, 28 highway spots, approximately 5,000~120,000 vehicles traffic daily
 f: one parking lot, daily traffic: approximately 650 vehicles
 g: one parking lot in community hospital in Gyunggi-province, Korea, daily traffic: approximately 250 vehicles

Table 5. Correlation analysis of Pb and Zn with ADD, total rainfall, rainfall duration, or (d) runoff coefficient

Mass (mg)	ADD (day)	Total rainfall (m)	Rainfall duration (hr)	Runoff coefficient	Rainfall intensity (mm/hr)
TSS	-0.37	0.21	0.19	0.21	0.36
BOD	0.05	0.23	0.34	0.26	0.05
COD	-0.09	0.20	0.31	0.32	0.01
DOC	0.02	0.11	0.22	0.25	-0.13
TN	-0.12	0.30	0.37	0.26	0.24
TP	-0.41	0.80	0.86	-0.19	0.66

계수, 그리고 강우강도와와의 상호관계 분석의 결과를 제시하였다. 일반적으로 선행건기일수에 따른 강우에 의한 유출부하량은 클 수 있는데 본 연구결과 BOD와 DOC를 제외하고 다른 항목에 대한 선행건기일수와의 관계는 음의 상관성을 보였다. 이러한 음의 상관성은 Pb의 경우에서도 관찰되었다 (Table 4). 반면 Pb, Zn, TSS, TN, 그리고 TP 모두 총 강우량과 강우강도와 강한 상관성을 보였다. 이러한 결과는 강우 중에 유출되는 오염물질이 이미 주차장의 아스팔트와 결

합 즉, 흡착되어 있는 상태였음을 의미한다. 또한 본 연구지역인 주차장의 경우 주기적으로 시행되는 청소에 의해 오염물질의 축적 정도가 낮을 것이라는 예측과 일치한다.

3.6. 다른 오염지표와 Pb, Zn의 상관관계

본 연구에서 시행된 모든 사상에서 자료들을 바탕으로 TSS, COD, BOD, DOC등의 오염지표와 중금속 Pb와 Zn의 상관성을 Fig. 4에 제시하였으며, 각 결과에 대한 상관계수 (R)을 Table 6에 나타내었다. 그 결과, Pb의 경우 다른 오염지표에 비해 TSS와 비교적 높은 상관성을 보이는 반면, DOC와의 상관성은 TSS에 비해 매우 낮았다. 그러나 Zn의 경우 TSS와 DOC와 모두 비슷한 상관성을 보였다. 이 분석에 의하면 Pb는 Zn보다 고체성 물질에 흡착성이 큰 것으로 판단되며 모니터링 자료에서 우수 유출수에 Pb가 Zn보다 낮은 유출농도와 양을 보인 원인일 것이라 사료된다.

4. 결론

본 연구는 강우로 인해 주차장에서부터 발생하는 Pb와

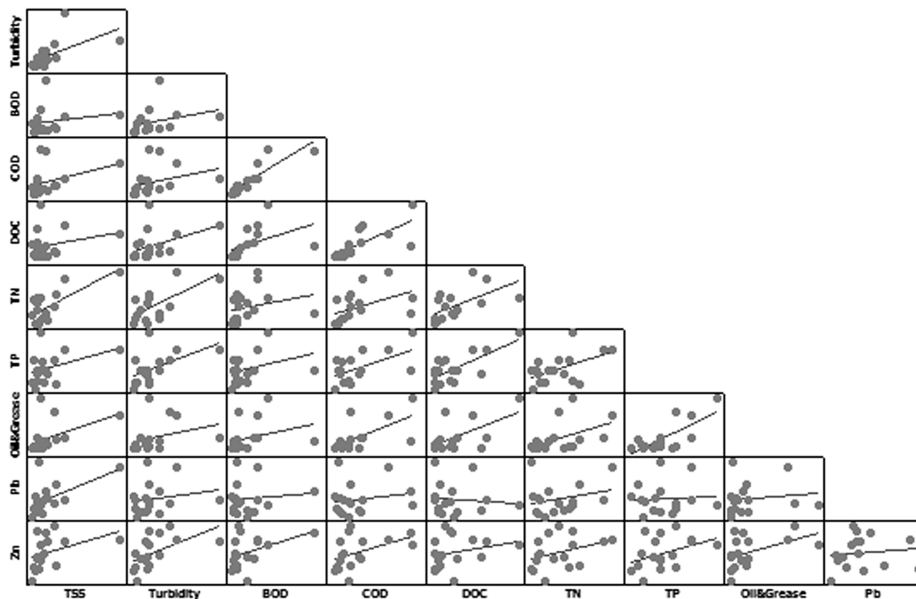


Fig. 4. Correlation of measured parameters among the pollutants.

Table 6. The relationship with Pearson coefficient (R) among measured parameters

	TSS	BOD	COD	DOC	TN	TP	Turbidity	Oil & Grease	Pb	Zn
TSS	1									
BOD	0.59	1								
COD	0.19	0.31	1							
DOC	0.36	0.31	0.88	1						
TN	0.24	0.43	0.46	0.73	1					
TP	0.71	0.66	0.24	0.44	0.59	1				
Turbidity	0.41	0.54	0.33	0.58	0.72	0.52	1			
Oil & Grease	0.47	0.31	0.29	0.64	0.63	0.47	0.74	1		
Pb	0.57	0.20	0.12	0.17	-0.09	0.25	0.05	0.16	1	
Zn	0.40	0.52	0.41	0.46	0.27	0.38	0.40	0.48	0.11	1

Zn의 유출경향 및 시간대별 농도와 유출량을 비교하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 각 사상의 시간별 농도곡선을 분석한 결과 강우초기 15~30분 이내에 유출된 Pb와 Zn의 농도가 매우 높았다. 이는 초기강우현상이 뚜렷히 나타남을 의미한다. 그러나 유출 농도 대신 유출에 의한 각 물질의 부하량의 경향에 의하면 강우초기와 함께 강우 증반에 확인한 증가 효과를 보였다.
- 2) 각 사상에서의 모니터링 결과 사상평균농도(EMC)는 강우에 의한 Pb와 Zn의 변화 경향을 나타내지 못하였다.
- 3) 강우에 의한 Pb와 Zn의 유출은 총강우량과 유출계수와 밀접한 관계를 나타내었으며, 이러한 상관성은 유출에 의한 각 물질의 농도보다는 부하량과의 관계에서 뚜렷한 상관성을 보였다.
- 4) 주차장에서의 유출되는 Pb와 Zn의 농도 범위는 4~201 µg/L (EMC: 70 µg/L), 131~672 µg/L (EMC: 70 µg/L)의 범위로 각각 조사되었으며, 일반적으로 두 중금속의 유출 원인은 주차장에서의 빈번한 브레이크의 사용과 타이어와 지표면의 마찰에 의한 마모가 증가된 것으로 사료된다.
- 5) 모니터링 결과 Pb보다는 Zn의 유출농도와 부하량이 많았다. 이는 다른 오염지표들과의 상관성 분석 결과로 고체성 물질로의 Pb의 흡착성이 크기 때문인 것으로 생각된다.

본 연구는 주차장에서 발생하는 강우에 의한 비점오염원의 특성을 알아본 연구로 특히 비점오염원에서 발생하는 중금속은 인근 하천 생태계에 주는 영향이 크므로 이들의 비점오염원 특성 및 제어는 중요한 의미를 지니고 있다. 또한 본 연구의 결과는 주차장 등의 비점오염원에서 제어 시설의 설계인자를 위한 기초 자료로 특히 아스팔트와 흙으로 구성되어 있어 전체적인 유출계수가 낮은 지역에서의 유출되는 Pb와 Zn등의 오염물질의 제어를 위한 장치 설계 시 중요한 기초자료로 활용될 수 있으리라 사료된다.

사 사

이 논문은 2008년도 정부재원(교육과학기술부 학술연구 조성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2008-013-D000700).

참고문헌

김이형, 이선하(2005). 주차장 및 교량 강우유출수의 중금속 오염물질 특성과 동적 EMCs. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(4), pp. 385-392.

이소영, 이은주, 김철민, 손현근, Marla C. Maniquiz, 손영규, 강희만, 김지형, 김이형(2007). 고속도로 영업소지역의 강우유출수내 중금속 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 945-950.

환경부(2008). 환경백서. <http://ekp.me.go.kr/ekc/>.

APHA, AWWA, WPCF (1998). Standard methods for the

examination of water and wastewater. 20th American Public Health Association/American Water Works Association/Water Pollution Control Federation, Washington, DC, USA.

Bach, P. M., MacCarthy, D. T., and Deletic, A. (2010). Redefining the stormwater first flush phenomenon. *Water Res.*, **44**, pp. 2487-2498.

Christensen, E. R. and Guinn, V. P. (1979). Zinc from automobile tires in urban runoff. *J. Environ. Engineer. Division ASCE*, **105**, pp. 165-168.

Deletic, A. (1998). The first flush load of urban surface runoff. *Water Res.*, **32**, pp. 2462-2470.

Dong, A., Chesters, G., and Simsiman, G. V. (1984). Metal composition of soil, sediments and urban dust and dirt samples from the Menomonee river watershed, Wisconsin, USA. *Water, Air and Soil Pollution*, **22**, pp. 257-275.

Gupta, K. and Saul, A. J. (1996). Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Res.*, **30**, pp. 1244-1252.

Harrison, R. M., Laxen, D. P., and Wilson, S. J. (1981). Chemical associations of lead, cadmium, copper and zinc in street dusts and roadside soil. *Environ. Sci. Technol.*, **15**, pp. 1378-1383.

Kayhanian, M., Suverkropp C., Ruby A., and Tsay K. (2007). Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *J. of Environ. Management*, **85**, pp. 279-295.

Kim, L. H. (2003). Determination of event mean concentrations and first flush criteria in urban runoff. *Kor. Environ. Eng. Research*, **8**(4), pp. 163-176.

Kim, L. H., Kayhanian, M., Zoh, K. D., and Stenstrom, M. K. (2005). Modeling of highway stormwater runoff. *Sci. Tot. Environ.*, **348**, pp. 1-18.

Kim, L. H., Ko, S. O., Jeong, S., and Yoon, J. (2007). Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm. *Sci. Tot. Environ.*, **376**, pp. 178-184.

Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., and Yu, M. J. (2002). First flush analysis of urban storm runoff. *Sci. Tot. Environ.*, **293**, pp. 163-175.

Lee, P. K., Baillif, P., and Touray, J. C. (1997). Geochemical behaviour and relative mobility of metal (Mn, Cd, Zn and Pb) in recent sediments of retention pond along the A-71 motorway in slogne, France. *Environ. Geol.*, **32**(2), pp. 142-152.

Liebens, J. (2001). Heavy metal contamination of sediments in stormwater management systems: the effect of land use, particle size, and age. *Environ. Geol.*, **41**, pp. 341-351.

Ma, J. S., Khan, S., Li, Y. X., Kim, L. H., Ha, S., Lau, S. L., Kayhanian, M., and Stenstrom, M. K. (2002). First flush phenomena for highways: how it can be meaningfully defined. Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage, September, Portland, Oregon.

McKenzie, E. R., Money, J. E., Green, P. E., and Young, T. M. (2009). Metals associated with stormwater-relevant brake and tire samples. *Sci. Tot. Environ.*, **407**, pp. 5855-5860.

Rebecca, S. S., John, C. C., and David, R. A. (2002). Treatment of parking lot stormwater using a stormtreat system. *Environ. Sci. Technol.*, **36**, pp. 4441-4446.

Sansalone, J. J. and Bushbregger, S. G. (1997). Partitioning and

- first flush of metals in urban roadway storm water. *J. Environ. Eng.*, **123**(2), pp. 134-143.
- Taebi, A. and Droste, R. L. (2004). First flush pollution load of urban storm water runoff. *J. Environ. Engineer.*, **3**, pp. 301-309.
- Ujevic, I., Odzak, N., and Baric, A. (2000). Trace metal accumulation in different grain size fractions of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastewaters. *Water Res.*, **34**, pp. 3055-3061.