

고속도로 노면유출수의 중금속 유출 특성 및 상관성

이은주 · 고석오* · 강희만** · 이주광** · 임경호 · 이병식 · 김이형†

공주대학교 건설환경공학부

*경희대학교 토목공학과

**한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹

Washoff Characteristics of Metal Pollutants in Highways

Eun-Ju Lee · Seok-Oh Ko* · Hee-Man Kang** · Joo-Kwang Lee** · Kyeong-Ho Lim · Byung-Sik Lee · Lee-Hyung Kim†

Department of Civil & Environment Engineering, Kongju National University, Kongju

*Department of Civil & Environment Engineering, Kyunghee University

**Environmental & Material Research Laboratory, Highway & Transportation Technology Institute

(Received 21 September 2005, Accepted 7 November 2005)

Abstract

The paved areas in nonpoint source are highly polluted landuses because of high imperviousness and high pollutant mass emissions from vehicle activities. Particularly, the metal pollutants are a big issue in the paved area. It is usually washed-off during storms by adsorbing on sediments or soluble status. Therefore, this research was achieved for understanding the characteristics of metal pollutants in stormwater runoff in highways. Five monitoring sites were equipped with an automatic rainfall gage and an automatic flow meter. This manuscripts will summarize the washoff characteristics of metal pollutants and its concentration changes during storms. Usually first flush phenomenon was observed for all of the storm events and visibly confirmed with hydro- and polluto-graphs. Also it was coincided with the tendency of particulates and organic matters. The decrease rate per total reduced amount for metals during initial 30-min storm duration was obtained on 80%. The result may be able to use for determining the economical treatment criteria for stormwater runoff in highways.

keywords : Highways, Metals pollutants, Nonpoint sources, Stormwater

1. 서론

환경부의 4대강에서의 오염총량관리제(Total Pollution Load Management System, TPLMS)의 도입은 점오염원관리와 더불어 비점오염원 관리에 대한 중요성을 인식한 결과이며, 오염물질의 농도규제에서 오염물질의 총량을 규제한다는 내용이다. 비점오염원은 다양한 토지이용에서 발생하는 불특정 오염물질이라 관리 및 처리가 쉽지 않으며 직접적으로 상수원수의 수질에 영향을 끼친다. 또한 토지이용의 특성에 따라 유출되는 오염물질의 종류와 양이 매우 다른 특성을 보인다(김 등, 2004).

도시지역에서 유출되는 강우는 무기성분, 특히 중금속을 상당량 함유하고 있다. 강우 유출수 내 중금속의 존재는 중요한 의미를 가지고 있는데, 그 이유는 중금속의 독성 때문이다. 많은 중금속 중에서 특히 Pb 및 Zn은 차량의 이동으로 기인된 오염물로 알려져 있다. 또한 건물의 부식, 대기침적, 운송, 다양한 산업활동과 더불어 의도적/고의적인 방출 등도 도시지역 내 중금속 누출의 원인으로 꼽히고

있다. 유기탄소와 pH와 같은 인자들은 이러한 도시내 부유물질로부터 중금속을 상당부분 탈착시킬 수 있다고 알려져 있다. 도시 강우유출수내 대부분의 중금속은 부유물질에 부착되어 있으며, 중금속 농도는 일반적으로 입자크기가 감소함에 따라 증가되는 경향을 나타내고 있다. 이것은 미세침전물의 비교적 큰 표면적과 양이온교환능력이 큰 것에 기인한다(Bodo, 1989; Dong et al., 1984; Liebens, 2001; Sansalone et al., 1997; Ujevic et al., 2000; Wiber et al., 1979).

특히 고속도로와 같은 포장된 지역은 불투수성 면적 비율이 다른 토지이용보다 높아 강우시 표면유출이 많은 지역이며, 강우에 의한 유출유량과 수질농도의 변화가 매우 빠르게 나타나는 특성을 지닌 토지이용이다. 이러한 특성 때문에 미국을 비롯하여 여러 선진국은 비점오염원 관리에 대한 대책을 강구할 시 포장지역의 비점오염원 관리를 우선관리대상으로 분류하여 연구 및 관리를 하고 있다. 또한 대부분의 경우 고속도로는 하천 및 호수근처를 지나면서 많은 차량의 운행으로 인하여 하천이나 호소의 수질에 직접적인 영향을 끼치는 비점오염물질 발생의 근원이다. 따라서 이러한 포장지역에서 배출되는 비점오염물질에 의한 수계의 수질영향을 파악하기 위해서는 유출되는 오염물질의

† To whom correspondence should be addressed.
nierpsk@hanmail.net

부하량 산정이 필수적이다. 비점오염원에서의 부하량 산정은 다양한 불확실성 때문에 면밀한 모니터링 계획 하에서 그 결과를 얻을 수 있다.

따라서 본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원의 지원으로 수행되었으며, 그 결과는 고속도로 지역의 비점오염물질 원단위 산정을 위하여 사용될 것이다. 본 논문에서는 유출되는 오염물질들 중에서 특히 독성이 높아 관심의 대상이 되고 있는 중금속에 대하여 유출경향 및 시간대별 농도 분포 분석 결과를 정리하여 향후 고속도로지역의 비점오염원 관리시 강우유출수에 대한 처리량 산정시 활용될 수 있도록 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 대상지역 및 방법

2.1. 모니터링

국내 고속도로 강우유출수내 중금속 농도를 평가하기 위하여 경부고속도로(site 1, 2), 영동고속도로(site 3) 및 호남고속도로(site 4, 5)를 대상으로 5개의 모니터링 지점을 선정하였으며, 자세한 지점에 대한 내용은 Table 1에 정리되어 있다. 5개 지점은 국내 고속도로를 대표하는 도로로 년중 차량 운행이 높은 지역이기에 오염도가 타 고속도로에 비하여 높은 지역이다. 5개 지점은 모두 아스팔트로 포장되어 있으며, 불투수율이 100%로 산정되었다. Fig. 1은 5개 모니터링 지점의 위치를 나타내고 있다.

비점오염원은 유역 및 강우의 특성에 의하여 불확실성이 매우 큰 오염원이다. 따라서 강우시 발생하는 강우량과 유출량에 대한 모니터링의 불확실성을 줄이기 위하여 자동유량계와 우량계를 이용하여 1분 단위의 측정이 이루어지도록 모니터링을 계획하여 수행하였다. 비점오염물질의 수질

특성을 파악하기 위해서는 강우유출수의 시료채취를 강우가 시작된 직후 첫 번째 시료를 초기농도로 하여 채취하였으며, 5분 간격으로 15분 동안 시료채취를 수행하였고, 이후 30분까지는 15분 간격으로, 1시간까지는 30분 간격으로 채취하였다. 또한 강우사상에 대한 결과를 파악할 필요성이 있기에 강우유출이 끝날 때까지 1시간 간격으로 수질모니터링을 실시하였다.

채취된 시료는 입자상 물질, 유기물질, Oil & Grease, 영양염류 및 중금속에 대하여 분석을 수행하였다. 그 중에서 본 논문에서는 중금속, 특히 유출농도가 높아 독성을 나타내고 있는 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Fe 및 Ni 등에 대한 항목을 관심대상으로 하여 정리하고자 하며, 분석은 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy)를 이용하였다.

2.2. 중금속 유출경향 및 시간대별 농도변화분석

강우량 및 유출량의 관계를 나타내는 수리수문곡선 및 중금속 농도곡선을 이용하여 강우유출수 내 중금속 유출경향을 분석하고, 유출되는 중금속의 정량적인 분포를 파악하기 위하여 통계분석을 행하였다. 또한, 유출시간에 따른 오염물질의 평균 농도변화는 초기 1시간 내 유출된 강우유출수에 대한 통계분석방법을 통해서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

모니터링이 수행된 고속도로 5개 지점은 국내에서도 차량 운행이 가장 높은 지역에 포함되며, 모니터링 결과 유출되는 오염물질의 농도 및 유출 경향은 매우 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과는 물환경학회지에 기 제출된 논문인 [고속도로 강우 유출수의 유출 경향 및 시간대별 농도

Table 1. Characteristics of monitoring location

Site	Locations	Area(m ²)	Pavement Type	Imperviousness Rate(%)
Site 1	Highway No. 25(South bound)	1,170	Asphalt	100
Site 2	Highway No. 25(North bound)	936	Asphalt	100
Site 3	Highway No. 1(North bound)	1,950	Asphalt	100
Site 4	Highway No. 50(East bound)	1,570	Asphalt	100
Site 5	Highway No. 1(South bound)	859	Asphalt	100

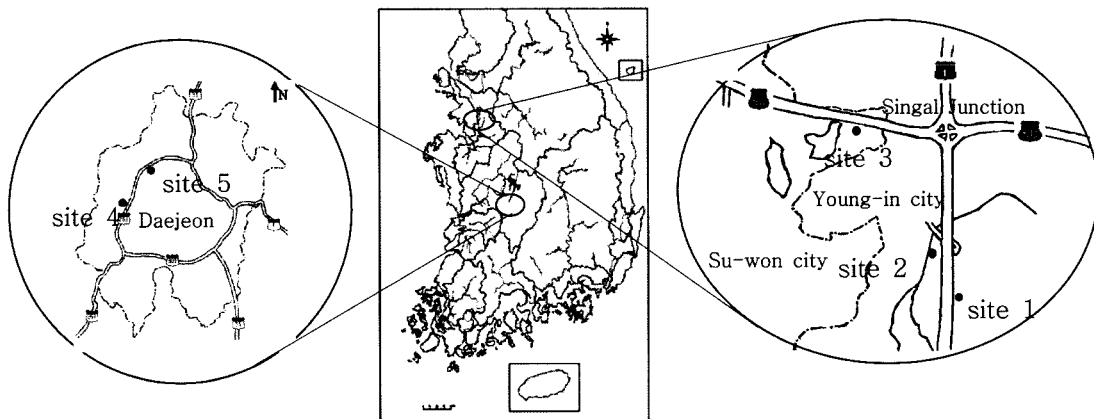


Fig. 1. Monitoring locations.

분포]에서도 잘 나타나 있다(이 등, 2005 심사중). 따라서 본 논문에서는 대표적인 오염물질의 값을 도출하기 위하여 지점별 구분 없이 통계학적 결과를 보이고자 한다.

3.1. 모니터링 결과 및 비점오염물질 유출경향

고속도로 강우유출수에 대하여 2004년 5월에서 9월까지 7회의 모니터링을 실시한 결과, 강우 전 건조일수인 ADD (antecedent dry days)는 2-18일, 전체강우량(total rainfall)은 6.9-50.5 mm, 강우지속시간(runoff duration)은 1.0-8.3 hr의 범위로 조사되었다. 평균 강우강도(average rainfall intensity)는 1-13 mm/hr의 범위로 나타났으며, 이러한 자료는 향후 오염물질의 유출 및 예측시 이용 가능한 자료로 판단된다. 유출계수(runoff coefficient)는 0.58-0.90의 범위로 나타났다.

모니터링을 통해 채취된 시료의 정량적인 농도변화와 1분 단위로 측정된 강우량과 유출율을 Fig. 2에 나타내었다. 수리수문곡선과 농도곡선으로부터 초기강우현상을 확인할 수 있었다. 특히, 강우가 시작된 이후 30-60분 이내에 많은 오염물질의 유출이 발생하는 것으로 나타났다.

3.2. 강우에 의해 유출되는 중금속 통계학적 분석

고속도로에서 유출되는 중금속의 정량적인 분포를 파악하기 위하여 전체지점에 대하여 통계분석을 실시하였으며, 그 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 강우유출수내 각 중금속에 대한 최소값과 최대값의 범위를 살펴보면, Total Cd이 0.5-18.24 $\mu\text{g/L}$, Total Cr이 1.18-1,150 $\mu\text{g/L}$, Total Cu가 13.5-4,781 $\mu\text{g/L}$ 및 Total Fe가 7.73-36,300 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 나타내고 있다. 또한 Total Ni이 3.34-182.4 $\mu\text{g/L}$, Total Pb가 2.1-289 $\mu\text{g/L}$, Total Zn이 13.36-6,850 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 보이고 있다.

통계분석을 통한 평균 농도를 살펴보면 Total Cd이 4.89 $\mu\text{g/L}$, Total Cr이 30.7 $\mu\text{g/L}$, Total Cu가 358.8 $\mu\text{g/L}$ 및 Total Fe가 3,206.6 $\mu\text{g/L}$ 의 값을 나타내고 있으며, Total Ni이 46.4 $\mu\text{g/L}$, Total Pb가 49.4 $\mu\text{g/L}$ 그리고 Total Zn이 511.5 $\mu\text{g/L}$ 의 값을 나타내고 있다. 95% 통계학적 농도의 확신범위를 보면, Total Cd이 4.47-5.32 $\mu\text{g/L}$, Total Cr이 19.1-42.3 $\mu\text{g/L}$, Total Cu가 279.3-438.2 $\mu\text{g/L}$ 및 Total Fe가 2,394-4,013 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 나타내고 있다. Total Ni의 범위는 39.3-53.5 $\mu\text{g/L}$, Total Pb는 42.7-56.1 $\mu\text{g/L}$ 그리고 Total Zn는 412.9-610.2 $\mu\text{g/L}$ 로 분석되었다. 결과적으로

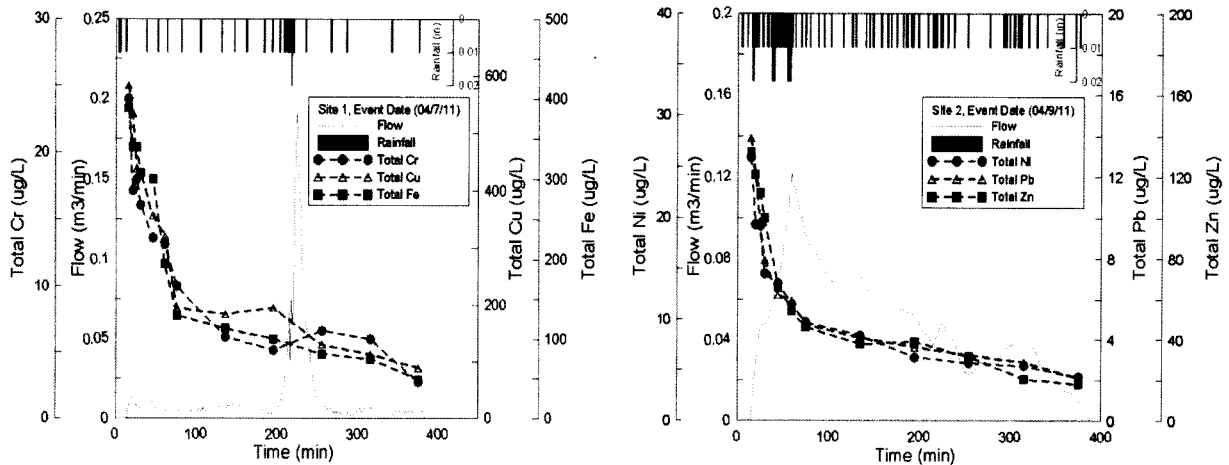


Fig. 2. Polluto- and Hydro-graphs for washed-off metals.

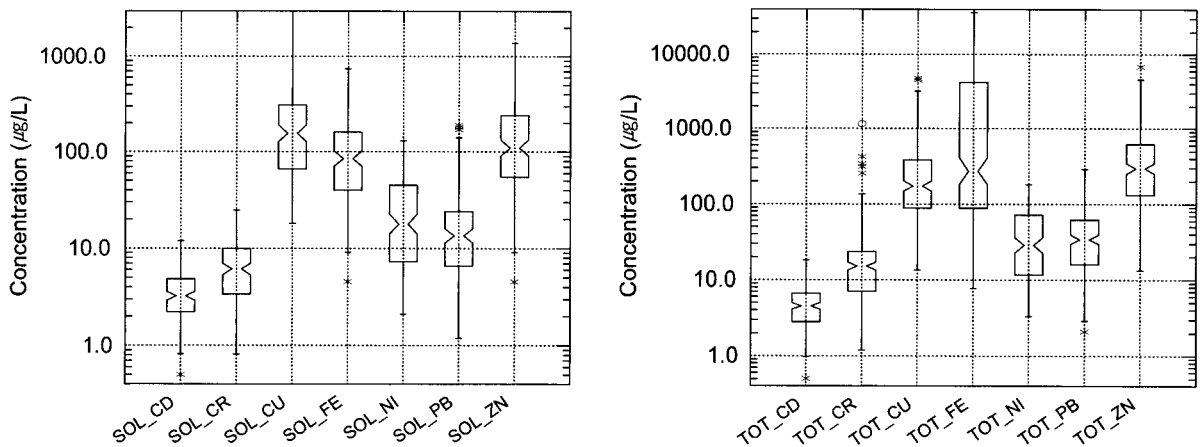


Fig. 3. Statistical analysis for metal concentrations (SOL= Soluble, TOT= Total, CD, CR, CU, FE, NI, PB, and ZN= Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn).

Cu, Fe, Zn 함량은 주로 높게 나타났고, 상대적으로 Pb Cd, Ni, Cr의 함량은 낮게 나타나 포장된 지역인 주차장과 교량지역에서의 중금속 유출특성과 유사한 것으로 나타났다(김 등, 2005).

3.3. 유출시간에 따른 오염물질의 평균농도변화

Fig. 4는 중금속에 관한 시간대별 농도변화와 강우지속시간에 대한 저감된 량을 나타내었다. 강우유출수 내 평균 농도가 높았던 site 1 지점의 중금속에 대하여 살펴보면, Total Cu의 경우 강우유출 직후 822.3 $\mu\text{g/L}$ 의 농도가 60분 동안 496.4 $\mu\text{g/L}$ 로 떨어졌으며, Total Fe의 경우 5,971 $\mu\text{g/L}$ 가 4,094 $\mu\text{g/L}$ 로 줄어들었다. 또한 Total Ni의 경우 84.12 $\mu\text{g/L}$ 가 60분 동안에 62.07 $\mu\text{g/L}$ 로 줄어들었으며, Total Pb는 90 $\mu\text{g/L}$ 에서 63.48 $\mu\text{g/L}$ 로, 그리고 Total Zn은

1,125 $\mu\text{g/L}$ 에서 697.2 $\mu\text{g/L}$ 로 평균농도가 저감되었다.

각 중금속별 1 hr의 강우지속시간 동안 저감된 총량에 대한 시간에 따른 중금속 농도의 저감율(Fig. 5)을 살펴보면 강우유출시간 30분 동안에 저감된 비율은 중금속 종류와 상관없이 전체 감소량의 80% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 유출경향은 향후 경제적인 비점오염물질 처리용량을 산정함에 있어서 중요한 처리기준으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

3.4. 중금속 및 기타 오염물질과의 상관관계

고속도로의 경우 많은 차량의 운행으로 인하여 중금속의 축적이 높은 지역이므로, 중금속은 고속도로 강우 유출수 관리에 있어서 매우 중요한 오염물질로 고려된다. 그러나 향후 고속도로 오염물질 처리 및 저감시설 관리시 중금속

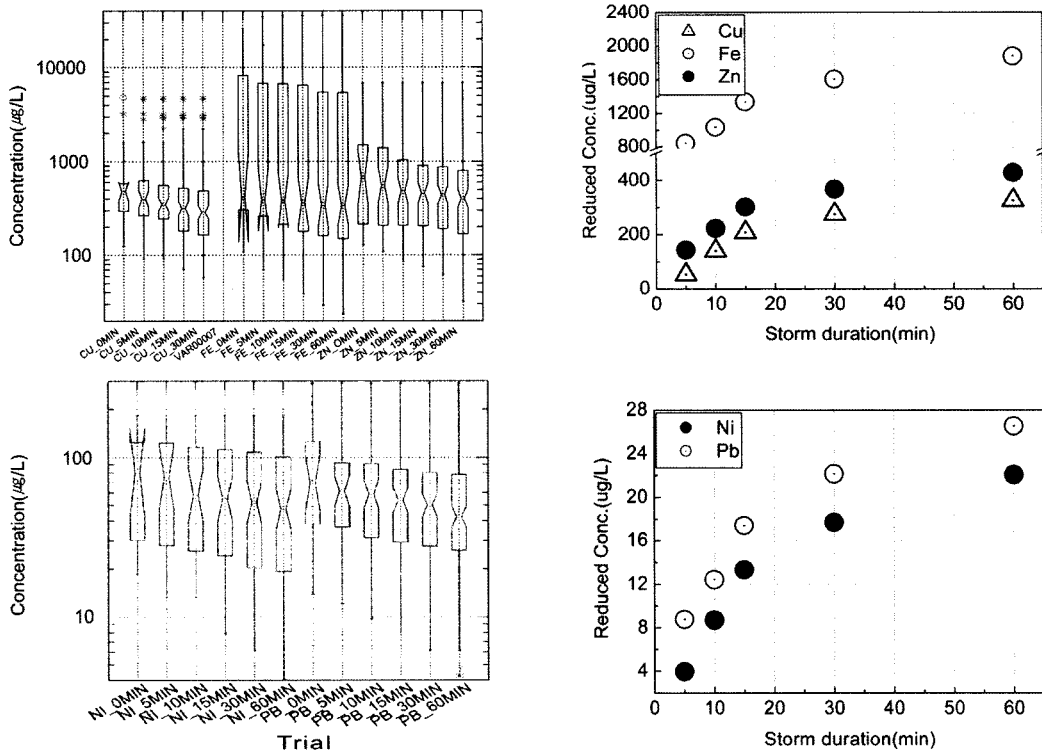


Fig. 4. Metal concentration changes during initial 1-hr.

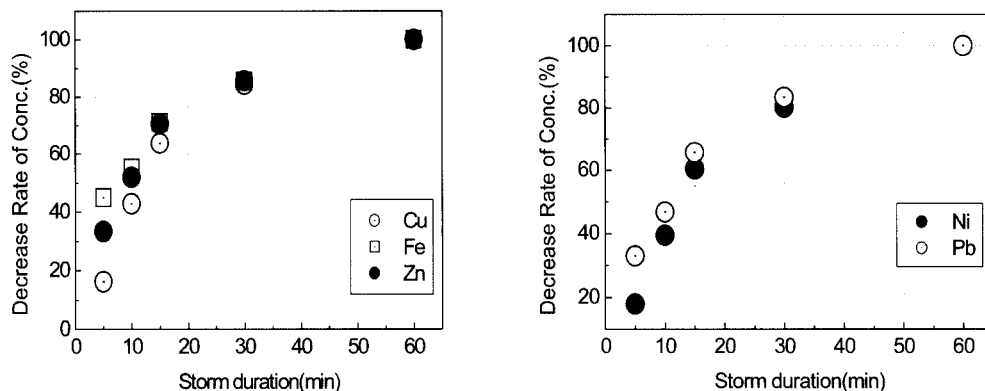


Fig. 5. Decrease rate of concentration versus total reduced concentrations with storm duration (site 1 and 2).

을 개별적으로 분석하기는 경제적으로 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 오염물질과 중금속간의 상관성을 보여줌으로써 저감시설 설계 및 관리시 기준으로 활용하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 고속도로지역에서 강우시 유출되는 오염물질과 중금속에 대한 상관관계를 파악하기 위하여 통계분석을 실시하였으며, Fig. 6은 Pearson correlation matrix를 나타내고 있다. 대각선 아래에는 상관계수(R, correlation coefficients)를, 위쪽에는 유의수준(P value, confidence values)을 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 중금속 중에서 높은 농도로 유출되는 특성이 나타난 Cu, Fe, Zn의 경우 입자성 물질과 유기물질, 영양염류와의 상관관계가 높은 것으로 나타났고, Ni, Pb의 경우는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 자동차의 부속품 및 각종 유류는 각종 중금속 재료의 합금으로 이루어져 있기 때문에 중금속의 주요 오염원이다. 그 중에서도 Cu, Fe, Zn의 경우 다른 중금속에 비하여 타이어, 윤활유, 브레이크 패드 등에 많이 함유되어 있기에, 타 중금속에 비하여 유출되는 오염물질의 농도가 높고 분포가 넓다. 또

한 중금속은 입자상 물질, 즉 TSS와 많은 양이 부착되어 유출되기에 상관성이 높은 것으로 판단된다. 또한 입자상 물질은 COD, TN 및 TP와도 부착되어 유출되기에 동시에 상관성이 높은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 고속도로 지역으로부터 발생하는 강우 유출수 내 오염물질 중 중금속 유출경향 및 시간대별 농도분포분석을 수행한 결과를 정리하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다. 이러한 결과는 향후 고속도로지역의 비점오염원 관리시 강우유출수에 대한 처리량 산정에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

- 1) 수리수문곡선과 농도곡선을 연구한 결과, 강우가 시작된 이후 초기 30-60분 이내에 많은 중금속의 유출이 발생하는 것으로 나타났는데, 그 이유는 초기강우 현상 때문이다.
- 2) 오염물질의 95% 통계학적 신뢰범위를 분석한 결과, Cu,

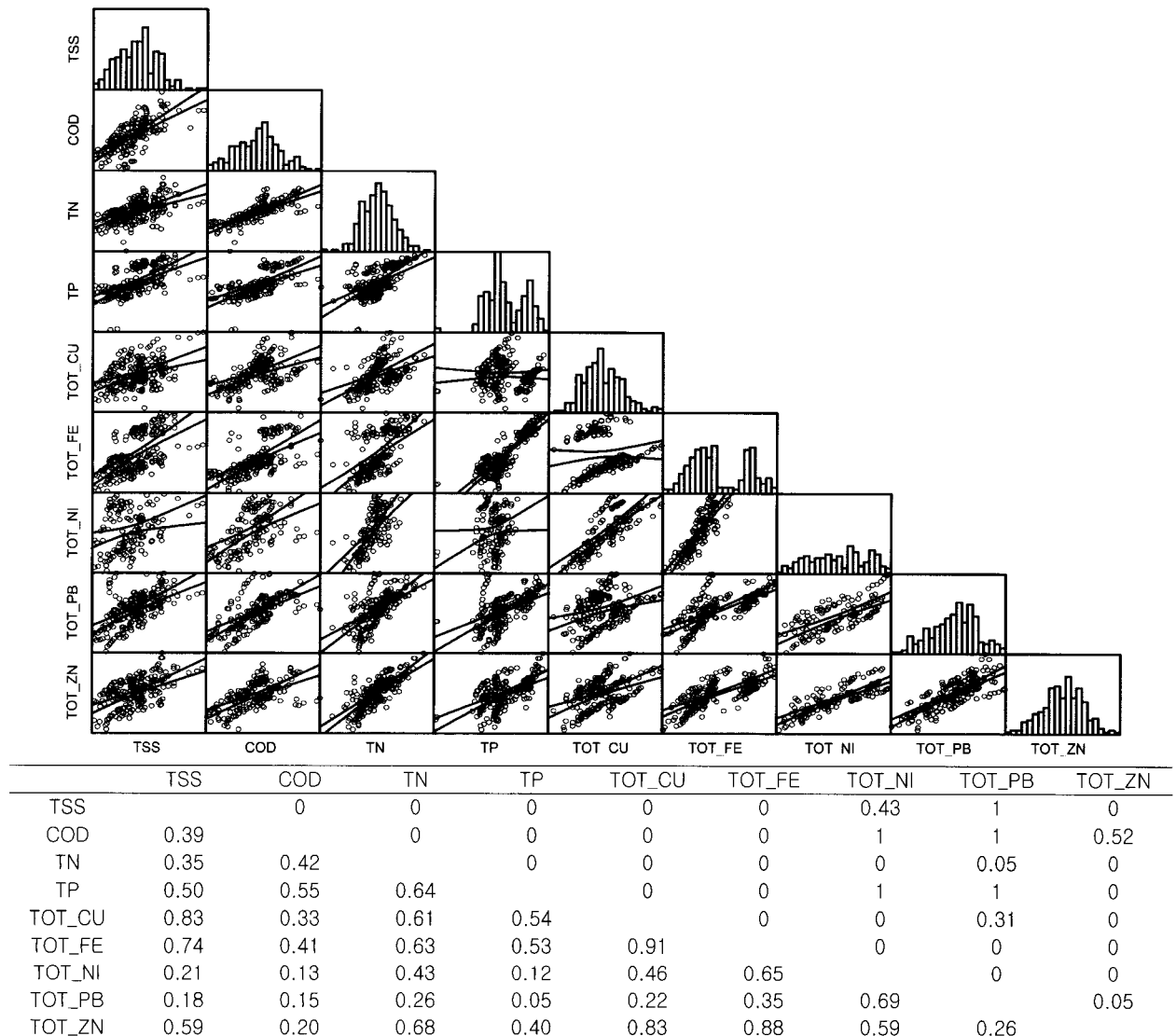


Fig. 6. Matrix of correlation and Pearson coefficients.

Fe, Zn의 함량이 높게 나타났으며, 상대적으로 Pb, Cd, Ni, Cr의 함량은 낮게 나타났다.

- 3) 강우지속시간에 대한 중금속농도의 저감율 분석결과, 강우유출시간 30분 동안에 저감된 비율은 중금속 종류와 상관없이 1 hr 동안에 감소된 양의 80% 정도를 차지하는 것으로 나타났다.
- 4) 통계학적 오염물질 상관관계를 분석한 결과, 중금속 중에서 높은 농도로 유출되는 특성이 나타난 Cu, Fe, Zn의 경우 입자상 물질과 유기물질, 영양염류와의 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, Ni, Pb의 경우는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 한국건설교통기술평가원(과제번호: 2005-0262) 및 한국도로공사 도로교통기술원의 연구과제로 수행된 결과 중에서 그 결과를 정리한 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김이형, 강주현, 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 631-640 (2004).
- 김이형, 이선하, 주차장 및 교량강우유출수의 중금속 오염물질 특성과 동적 EMCs, *한국물환경학회지*, **21**(4), pp. 385-392 (2005).
- 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 임경호, 이병식, 김이형, 고속도로 강우 유출수의 유출 경향 및 시간대별 농도 분포, *한국물환경학회지* (2005 심사중).
- Bodo, B. A., Heavy Metals in Water and Suspended Particulates and Urban Basin Impacting Lake Ontario, *Science of the Total Environment*, **87/88**, pp. 329-344 (1989).
- Dong, A., Chesters, G. and Simsiman, G. V., 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 (1984).
- Liebens, J., Heavy Metal Contamination of Sediments in Stormwater Management Systems: the Effect of Land Use, Particle Size and Age, *Environmental Geology*, **41**, pp. 341-351 (2001).
- Sansalone, J. J. and Bushberger, S. G., Characterization of Solid and Metal Element Distributions in Urban Highway Stormwater, *Wat. Sci. & Tec.*, **36**, pp. 155-160 (1997).
- Ujevic, I., Odzak, N. and Baric, A., 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 (2000).
- Wiber, W. G. and Hunter, J. V., Distributions of Metals in Street Sweepings. Stormwater Solids and Urban Aquatic Sediments, *Journal Water Pollution Control Federation*, **51**, pp. 2810-2822 (1979).