

노면퇴적물의 입자 크기에 따른 중금속 오염에 관한 연구

김 부 길 · 이 병 철*

동서대학교 건축토목시스템공학부, *한국건설기술연구원 국토환경연구부
(2006년 8월 9일 접수; 2006년 10월 1일 채택)

A Study On Heavy Metal Contamination in the Different Size Fractions of Deposited Road Particles(DRPs)

Boo-Gil Kim and Byung-Cheol Lee**

Division of Architecture and Civil Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea
*Department of Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Gyeongdo 411-712, Korea
(Manuscript received 9 August, 2006; accepted 1 October, 2006)

Deposited road particles (DRPs) were analysed for heavy metal concentrations at four different roads in a city, Korea. The samples were collected using a roadway surface vacuum cleaning vehicle which was commonly used in collecting roadway surface particles. Six particle size ranges were analyzed separately for twelve heavy metal elements (Cd, Cr, Pb, Ni, Al, As, Co, Cu, Fe, Mn, Zn and Hg). At all sampling sites, the high concentration of the heavy metals occurred in the <74 μ m particle size range, which conventional roadway cleaning vehicles do not remove efficiently. The Pb concentration significantly increased with decreasing particle size of DRPs, and other toxic heavy metals (Cd, Cr and Ni) also showed similar results. The heavy metal concentrations in the smaller size fraction of DRPs is important because they are contaminants that are preferentially transported by road runoff during rainfall.

Key Words : Heavy metal, Deposited road particles(DRPs), Road runoff

1. 서 론

도시지역의 교통량 증가로 자동차 배기가스에 의한 도로 주변의 환경 오염이 가중되고 있다^{1,2)}. 자동차는 연료의 연소에 의한 매연과 분진의 배출을 비롯하여 타이어와 브레이크 패드의 마모 및 도로의 침식 등에 의하여 중금속류를 포함한 다양한 종류의 오염물질을 발생시켜 도로 및 주변 환경을 오염시킨다³⁻⁵⁾. 특히, 다양한 오염물질들 중 자동차로부터 배출되는 대표적인 유해 중금속류로는 Cd, Cr, Ni, Pb, Zn 등이 있고, 이러한 중금속류는 도로주변에 토양입자나 분진등과 같이 노면퇴적입자(deposited road particles, DRPs)로 축적되거나 대기중으로 비산된다. 중금속류가 축적된 노면퇴적입자들 중 비교적 큰 입자들은 도로면 청소차량에 의해 정기적으

로 수거되어 지지만, 상대적으로 작은 입자들은 노면의 틈이나 측구에 부착되거나 침착되므로 잘 수거되지 않는다. 이러한 미세입자들은 청천시(晴天時)에 지속적으로 노면에 퇴적되고, 강우시(降雨時) 비점오염원(non-point source pollution)으로서 노면배수(road runoff)의 형태로 수계(水系)에 배출되어 수환경을 악화시키는 중요한 원인이 된다.

이와 같이 중금속을 함유한 노면배수는 배출 형태에 따라 주변 토양을 오염시키거나 수계오염을 야기하므로⁶⁻⁸⁾ 노면퇴적입자는 수계 환경조건의 변화와 함께 수계환경의 오염부하에 대한 높은 잠재력을 가지고 있다고 할 수 있다^{9,10)}.

본 연구에서는 교통량의 증대에 따라 환경오염이 가중되어지는 도시지역의 노면에 퇴적하는 입자에 함유된 중금속의 성상에 대하여 조사하였다. 특히, 청소차량에 의해 제거되기 어려운 미세입자의 성상을 파악하기 위하여 노면퇴적입자의 입자크기에 따른 중금속 농도를 분석하였다. 강우시 유출되는 노

면배수의 관리 방안에 필요한 기초자료로 활용하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

2. 시료채취 및 분석방법

2.1. 시료채취

도시지역 노면퇴적입자의 중금속 농도를 파악하기 위하여 평균교통량 60,000-140,000 vehicles/day 범위의 도심지 도로 4지점을 대상으로 2005년 9월 1일~2006년 5월 24일에 걸쳐 총 5회 시료를 채취하였다. P시의 도로면 청소차량에 의해 정기적으로 수거되는 노면퇴적물을 채취하여 분석용 시료로 사용하였다.

도로 특성에 따른 노면퇴적입자의 중금속 오염도를 파악하기 위해 선정된 조사대상 4지점의 교통량은 Table 1과 같다. 조사대상 4지점 중 터널(A) 및 해상대교(海上大橋, B)는 소형차의 교통량이 많은 구간이며, 도시고속도로(C)는 대형차의 교통량이 상대적으로 많은 지점으로서 선정하였다. 나머지 1지점(D)은 전형적인 도심지내의 편도3차선도로이며 평균교통량이 다른 지점에 비해 매우 높은 지점으로 각 지점별 도로 특성에 따른 노면퇴적입자의 중금속류 함유량을 조사하였다.

2.2. 분석방법

청소차량에서 채취한 시료를 원추형사분법¹¹⁾으로 혼합하여 균질화하고, 실험실로 옮긴 후 직사광선이 들지 않는 장소에서 약 2주간 자연 건조하였다. 건조된 시료를 2mm의 표준체로 통과시켜 분석용 시료로 사용하였다. 분석용 시료를 6단계(①850-2000 μm, ②425-850 μm, ③250-425 μm, ④150-250 μm, ⑤74-150 μm, ⑥<74 μm)로 체분리하여 각각의 입자크기 분포로 분획(分劃)하고, 노면퇴적입자의 입자크기에 따른 중금속의 농도를 검토하였다.

시료의 중금속 농도는 토양오염공정시험법¹²⁾에 의한 전처리 과정을 거쳐 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer(ICP-MS)로 분석하였다. 분석 항목은 자동차로부터 배출되는 유해 중금속류 Cd, Cr, Pb, Ni 를 포함한 Al, As, Co, Cu, Fe, Mn, Zn, Hg 등 12개 항목이며 모든 시료는 3회 반복 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도로 특성에 따른 노면퇴적입자의 중금속 오염

각 조사 지점에서 검출된 입자크기별 중금속 성분의 평균농도는 Table 2와 같다. Al, Fe, Mn은 도심지 터널(A), 해상대교(B), 도시고속도로(C), 도심지역 도로(D) 등 차종, 교통량, 시료채취 지점의 특성에 관계없이 높은 농도를 나타냈었고, As, Co, Hg는 모든 측정지점에서 검출되지 않았다.

미량으로도 인체에 유해한 중금속의 노면퇴적입자중의 평균농도범위는 도심지 터널(A)의 경우, Cd : 3.65-6.90 μg/g, Cr : 175.64-296.74 μg/g, Ni : 13.81-72.55 μg/g, Pb : 286.2-583.1 μg/g, 해상대교(B)의 경우, Cd : 4.01-9.20 μg/g, Cr : 282.72-523.26 μg/g, Ni : 28.80-110.84 μg/g, Pb : 84.80-977.98 μg/g, 도시고속도로(C)의 경우, Cd : 4.78-8.98 μg/g, Cr : 135.59-329.30 μg/g, Ni : 36.54-130.69 μg/g, Pb : 264.38-803.92 μg/g, 도심지역 도로(D)의 경우, Cd : 3.51-7.87 μg/g, Cr : 160.43-444.66 μg/g, Ni : 30.76-97.13 μg/g, Pb : 172.13-619.72 μg/g로 나타났다. 4지점 모두 Cd, Cr, Ni, Pb 성분이 상당량 존재하였고, 대상지점의 도로특성에 따른 유해중금속농도의 두드러진 변화는 보이지 않았다. 그리고 오염되지 않은 토양의 중금속 성분 농도범위¹²⁾가 Cd (0.37-0.78 μg/g), Cr (12-83 μg/g), Ni (12-34 μg/g), Pb (22-44 μg/g)인 것과 비교하면, 모든 노면퇴적입자의 중금속 함유량은 입자의 크기와 관계없이 매우 높은 것을 알 수 있었다. 따라서 P시의 경우, 도로특성에 관계없이 노면퇴적입자에 함유된 중금속 농도는 상당히 높으며 강우시 이러한 노면퇴적입자에 기인(起因)한 수계의 중금속 오염이 우려된다.

3.2. 입자크기에 따른 중금속 성상

입자크기를 ①850-2000 μm, ②425-850 μm, ③250-425 μm, ④150-250 μm, ⑤74-150 μm, ⑥<74 μm 6단계로 분획한 시료의 통과백분율은 Fig. 1과 같다. 각 지점에서의 시료의 통과백분율은 유사한 경향을 나타내었고, 중량비로 2mm이하의 입자가 80.6%-93.0% 정도였다. 425-850 μm 범위의 입자는 28.5%-46.4%로 가장 많았고 거의 대부분이 74 μm 이상의 입자로 구성되어 있다. 이 정도 크기의 입자는 대부분이 정기적인 도로면 청소차량에 의해 수거되므로 강우시 노

Table 1. Mean traffic density in each sampling site (vehicles/day)

Site	Mean traffic density	Large vehicle	Small vehicle	Light vehicle
A	61,781	3249	51107	7425
B	61,140	5171	52905	3064
C	85,497	35408	30226	19863
D	137,244	9757	118754	8733

노면퇴적물의 입자 크기에 따른 중금속 오염에 관한 연구

Table 2. Mean concentration of heavy metals in size fractions of deposited road particles (ug/g)

Sampling Area: A

Particle Size(μm)	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
① 850~2000	54172.68	N.D.	4.95	N.D.	220.17	155.30	50296.32	846.32	13.81	286.20	647.49	N.D.
② 425~850	48689.86	N.D.	4.48	N.D.	175.64	348.91	55197.67	1199.69	27.20	327.08	668.25	N.D.
③ 250~425	50087.81	N.D.	4.01	N.D.	226.70	293.65	46528.75	926.26	70.24	314.95	1337.95	N.D.
④ 150~250	52335.23	N.D.	3.65	N.D.	208.42	354.79	43992.89	886.85	41.20	299.30	1921.25	N.D.
⑤ 74~150	52713.00	N.D.	5.66	N.D.	274.88	511.06	62136.10	1319.43	64.32	504.93	2024.88	N.D.
⑥ <74	56125.15	N.D.	6.90	N.D.	296.74	573.62	60693.06	1379.44	72.55	583.10	2361.73	N.D.

Sampling Area: B

Particle Size(μm)	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
① 850~2000	31560.49	N.D.	9.20	N.D.	282.72	361.90	127506.88	1564.71	92.01	84.80	1230.41	N.D.
② 425~850	19631.45	N.D.	4.01	N.D.	523.26	103.03	52826.62	2640.27	28.80	87.51	2224.98	N.D.
③ 250~425	34929.43	N.D.	6.74	N.D.	413.87	350.09	69076.81	4190.74	76.13	258.29	6388.62	N.D.
④ 150~250	31776.63	N.D.	4.18	N.D.	302.32	432.58	51360.40	1866.60	55.24	586.49	6979.48	N.D.
⑤ 74~150	27388.65	N.D.	5.73	N.D.	373.66	1306.62	69149.94	1905.84	88.83	637.28	34088.13	N.D.
⑥ <74	35856.68	N.D.	6.45	N.D.	361.91	1337.10	58159.24	1914.69	110.84	977.93	42718.47	N.D.

Sampling Area: C

Particle Size(μm)	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
① 850~2000	34986.07	N.D.	8.98	N.D.	135.59	108.34	111855.98	1516.42	36.54	264.38	549.90	N.D.
② 425~850	28115.89	N.D.	N.D.	N.D.	174.60	15842.48	58679.67	1300.89	130.69	803.92	4565.63	N.D.
③ 250~425	38282.57	N.D.	5.61	N.D.	329.30	645.65	59740.19	1006.05	88.15	406.89	957.28	N.D.
④ 150~250	37261.68	N.D.	5.42	N.D.	254.14	1003.05	68088.07	1184.27	91.77	472.95	1183.56	N.D.
⑤ 74~150	38330.68	N.D.	5.70	N.D.	281.81	433.70	57139.98	1175.06	91.90	455.81	1443.79	N.D.
⑥ <74	35560.47	N.D.	4.78	N.D.	264.13	446.36	53725.75	1102.04	113.16	657.91	1374.21	N.D.

Sampling Area: D

Particle Size(μm)	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
① 850~2000	48392.98	N.D.	5.07	N.D.	226.74	180.68	90297.62	1093.34	30.76	172.13	931.19	N.D.
② 425~850	36487.18	N.D.	4.96	N.D.	160.43	199.13	55453.44	910.52	35.63	216.82	1129.18	N.D.
③ 250~425	20401.87	N.D.	3.51	N.D.	183.84	266.01	43058.57	1043.26	82.23	211.37	1006.35	N.D.
④ 150~250	42082.06	N.D.	5.03	N.D.	294.00	196.35	62837.63	1166.03	81.07	223.78	860.86	N.D.
⑤ 74~150	42624.65	N.D.	5.98	N.D.	425.82	623.69	72978.29	1398.08	90.31	407.63	1314.91	N.D.
⑥ <74	51804.18	N.D.	7.87	N.D.	444.66	806.75	67316.74	1582.82	97.13	619.72	1822.65	N.D.

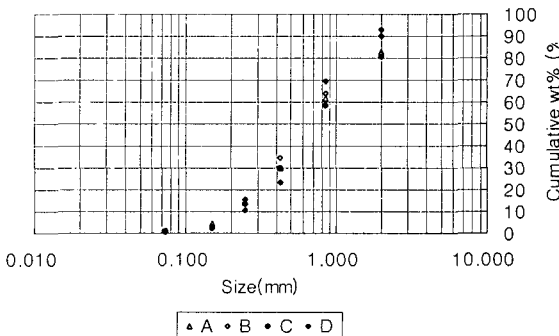


Fig. 1. Cumulative wt% curve for deposited road particles.

면배수에 함유되어 수계에 유출되는 중금속 양은 그다지 많지 않을 것으로 생각된다.

한편, 74 μm 이하 미세입자의 중량비는 A, B, C, D 지점별로 각각 0.7%, 0.6%, 1.2%, 1.3%로 매우 적게 나타났다. 이러한 크기의 입자는 청소차량에 의하여 전량 수거되기 어렵고 청천시에 지속적으로 노면상에 퇴적되어 강우시 노면배수의 오염부하량을 증대시키는 물질로 작용한다. 따라서 노면퇴적입자의 크기에 따른 중금속 성상을 분석하고 74 μm 이하 미세입자로 부터 기인하는 유해 중금속의 부하량을 저감하는 대책을 수립해야 할 것이다.

노면퇴적입자의 입자크기와 유해중금속(Cd, Cr,

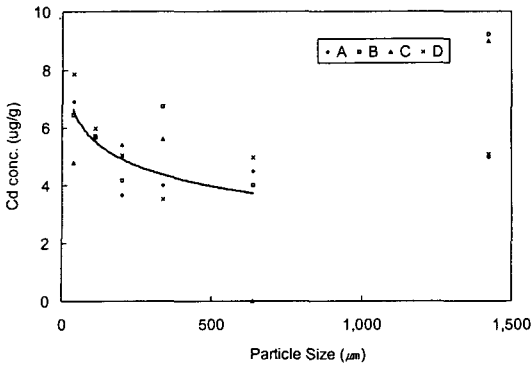


Fig. 2. Relationship between Cd concentration and median of particle size ranges in the DRPs.

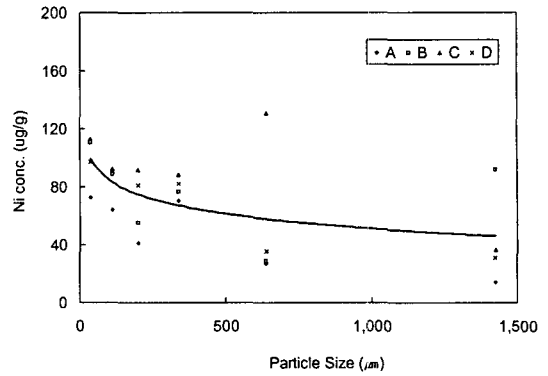


Fig. 4. Relationship between Ni concentration and median of particle size ranges in the DRPs.

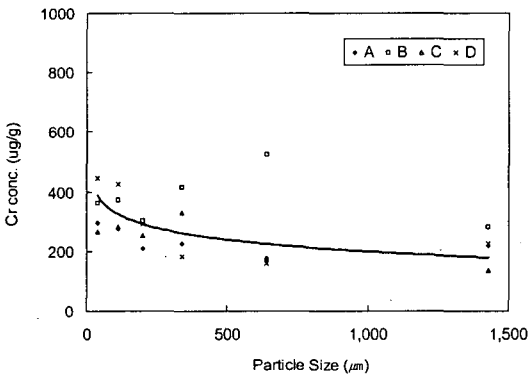


Fig. 3. Relationship between Cr concentration and median of particle size ranges in the DRPs.

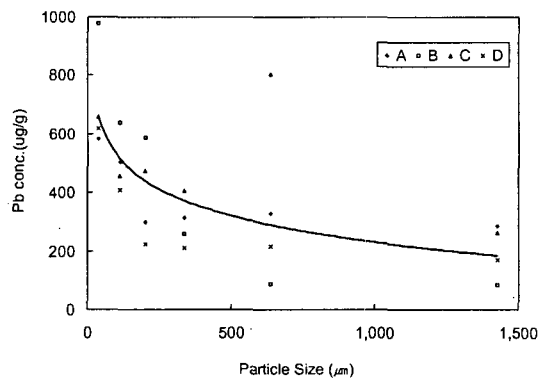


Fig. 5. Relationship between Pb concentration and median of particle size ranges in the DRPs.

Ni, Pb)의 농도와와의 관계는 Fig. 2-Fig. 5와 같다. 모든 대상지점에 있어서 입자크기에 따른 유해중금속 농도는 대체적으로 노면퇴적입자의 입자크기가 작을수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 입자크기가 작을수록 비표면적이 커지기 때문에 입자크기의 감소와 함께 중금속 농도는 증가한 것으로 생각되었다.

노면퇴적입자의 Cd농도는 입자크기에 따른 경향이 두드러지게 나타나진 않지만, 850-2000 μ m크기의 입자를 제외하면 작은 입자일수록 대체로 농도가 높은 것을 알 수 있었다. 노면퇴적입자의 Pb농도는 입자크기의 감소와 함께 증가하는 경향을 두드러지게 나타내었다. 따라서 강우시 노면배수와 함께 유출되는 노면퇴적입자중의 미세입자는 유해 중금속을 고농도로 함유하므로 이로 인한 수환경 오염에 대한 대책이 요구된다.

4. 결 론

노면퇴적입자의 중금속 오염도를 파악하기 위해

P시의 주요 도로 4지점을 대상으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미량으로도 인체에 유해한 Cd, Cr, Ni, Pb등의 중금속성분이 차종, 교통량, 시료채취 지점 등의 특성에 관계없이 노면퇴적입자중에 상당량 존재하는 것으로 나타났다.

2) 74 μ m이하의 노면퇴적입자의 중량비는 0.6~1.3% 범위이지만, 유해중금속 농도는 조대입자에 비해서 상대적으로 높으며, 대부분이 강우시 노면배수와 함께 유출될 것으로 판단된다.

3) 노면퇴적입자의 유해중금속 농도는 대체로 미세입자일수록 고농도의 특성을 보였다.

따라서 유해 중금속 농도가 고농도로 존재하는 미세입자에 의한 주변 수환경 오염이 우려되며, 강우시 유출되는 노면퇴적입자에 대해 지속적인 모니터링과 함께 제어를 위한 기술 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

- 1) 이주광, 강혜진, 권혁, 2001, 고속도로 주변 대기

노면퇴적물의 입자 크기에 따른 중금속 오염에 관한 연구

- 및 토양 환경 현황조사, 한국도로공사 연구보고서.
- 2) 이평구, 윤성택, 이대하, 2001, 서울시 무기환경 시스템의 환경지구화학 및 수리지질학적 연구, 한국과학재단 연구보고서.
 - 3) 환경부, 2002, 대기환경연보2002.
 - 4) 환경부, 2004, 4대강 비점오염관리 종합대책추진, 물환경종합정보지(3).
 - 5) Akhter, M. S., and I. M. Madany, 1993, Heavy metals in street and house dust in Bahrain, Water, Air, soil Pollut., 66, pp.111-119.
 - 6) Caselles, J., 1998, Levels of lead and other metals in citrus alongside a motor road, Water, Air, Pollut., 105, pp.593-602.
 - 7) Hamilton, R. S., D. M. Revitt and R. S. Warren, 1984, Level and physico-chemical associations of Cd, Cu, Pb and Zn in road sediments, Sci. Total Environ., 33, pp. 59-74.
 - 8) Harrison, R. M., 1979, Toxic metals in street and household dusts., Sci. Total Environ., 11, pp.89-97.
 - 9) Harrison, R. M., D. P. H. Laxen and S. J. Wilson, 1981, Chemical associations of lead, cadmium, copper, and zinc in street dusts and roadside soils, Environ. Sci. Technol., 15, pp. 1378-1383
 - 10) Morrison, G. M. P., D. M., Revitt and J. B. Ellis, 1990, Metal speciation in separate storm-water systems, Water Sci. Technol., 22, pp. 53-60.
 - 11) Stone, M., and J. Marsalek, 1996, Trace metal composition and speciation in street sediment: Sault ste. Marie, Canada, Water, Air, Soil Pollut., 87, pp.149-169.
 - 12) 환경교육연구회, 2000, 환경오염공정시험법, 대학서림.