

# 고속도로 청소 폐기물 토사에 대한 중금속 오염 및 함량 분포

## Heavy Metal Contamination and Fraction of Soil Wastes in Highway Cleaning

김영준\* · 지상현\*\* · 고석오\*\*\* · 김성민\*\*\*\* · 강희만\*\*\*\*\*

Kim, Young Jun · Jee, Sang-Hyun · Ko, Seok-Oh · Kim, Seong-Min · Kang, Hee-Man

### 1. 서 론

최근 비점오염원 관리의 필요성이 증가하고 있으며, 비점오염원 중에서도 차량통행에 의한 입자상 오염물질의 배출은 현재 처리 없이 가까운 수계나 토양으로 유입되고 있어 환경보호 측면에 악영향을 지속적으로 미치고 있는 실정이다. 이러한 영향을 줄이기 위해 일부 지역에서 특성화된 청소차량을 이용한 도로면 청소작업을 실시하고 있다. 도로 청소는 도시 지역에서 먼지의 농도를 감소시키고 오염물질의 직접적인 환경배출을 저감시킬 수 있는 비용 효율적인 청소방법으로 평가되고 있으나, 기존의 연구에서는 도로 청소가 큰 입경을 가진 물질의 제거 효율은 높지만, 미세한 입경의 입자에 대해서는 처리 효율이 좋지 못하다는 연구 결과도 있다. 도로청소에 따른 입자의 제거 효율에 대해서 평가한 연구들이 있지만, 경우에 기인한 도로면 상부의 경우유출수질을 개선한다는 것을 뒷받침할만한 증거가 별로 없다. 이에 본 연구에서는 청소차량에 의해 수집된 노면 위 입자상 물질들의 중금속 함량 특성을 조사하였으며, 용출실험에 의해 용출될 수 있는 중금속의 함량 분포에 대해서 조사하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

경부고속도로 구간에서 주기적으로 실시된 청소차량의 흡입방식에 의해 수거된 폐기물 토사 창고에서 5개 지점의 시료를 채취하였으며, 채취한 시료는 실험실 온도에서 풍건하여 건조하였으며, 입경 2mm 이하의 시료를 대상으로 분석하였다. 다음에 제시한 방법으로 중금속 함량 및 용출 실험을 실시하였다.

#### 2.1 입도 분포 분석

시료의 입도 분포 분석을 위해 - 한국공업규격 (KS F2302, KS F2309)에 의해 규정된 입도 분석 방법에 따랐으며, 체 분석은 표준 망 체 4.75, 2.0, 0.84, 0.42, 0.25, 0.105, 0.075, 0.038 mm 이용하여 분리하였다.

#### 2.2 전량 분석법

농질산과 농염산을 1:3(V/V)의 비율로 한 왕수를 이용하여 70℃에서 1시간 소화하여 증류수로 희석하여 ICP로 분석하였다. 희석비는 10mL/g으로 하였다.

#### 2.3 연속추출법(Sequential Extraction)

\* 학생회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail : yj2435@khu.ac.kr) -발표자

\*\* 비회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 Post-Doc · 공학박사(E-mail : sanghyun@khu.ac.kr)

\*\*\* 비회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사(E-mail : soko@khu.ac.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사(E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

\*\*\*\*\* 비회원 · 한국도로공사 책임연구원, 도로교통연구원(E-mail : kheeman@ex.co.kr)



중금속의 존재 형태별 분석을 위해 연속 추출법을 적용하였으며, 표 1에 분류와 사용된 추출 용매를 나타내었다.

표 1. 연속추출법의 분류와 추출 용매

Fraction	Chemicals
Exchangeable fraction	0.5 M MgCl <sub>2</sub> (pH=7)
Carbonate bound fraction	1.0 M NaOAc (pH=5)
Fe-Mn Oxide fraction	HOAc 25% in 0.04 M NH <sub>2</sub> OH · HCl
Organic and Sulfide fraction	30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH=2)
Residual fraction	HCl and HNO <sub>3</sub>

## 2.4 용출실험법

### ① Extraction Test(폐기물공정시험방법에 의함)

시료 100g을 정확히 달아 정제수에 염산을 넣어 pH 5.8~6.3으로 한 용매(mL)를 시료:용매=1:10(W/V)의 비율로 2,000mL 삼각플라스크에 넣어 혼합하였으며, 시료용액의 조제가 끝난 혼합액을 상온, 상압에서 진탕회수가 매분 당 약 200회, 진폭이 4~5 cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 1.0 μm의 유리섬유 여과지로 여과하고 여과액을 취하여 용출시험용 시료용액으로 하였다. 분석시료의 전처리는 질산-염산에 의한 유기물분해에 의한 방법을 사용하였다. 용출용액을 킬달플라스크에 넣고 여기에 질산 3 mL와 유리구 4~5개를 넣은 다음 서서히 가열하여 액량이 약 5 mL가 될 때까지 증발농축하고 방냉 하였으며, 다시 질산 5 mL를 넣고 서서히 가열하여 액이 거의 건조되는 부근까지 증발농축하고 방냉하였다. 여기에 염산 10 mL와 물 15 mL를 넣고 약 15분간 가열하여 잔류물을 용해시킨 후 분석하였다.

### ② TCLP(Toxicity Characteristic leaching procedure)방법

시료와 용매를 1:20의 혼합비(W/V)로 혼합하여 TCLP 교반기에서 30±2 rpm으로 18시간 교반한 후 여과하여 여액을 분석하였다. 혼합용매는 시료의 pH에 따라 아래의 두 종류의 용매 중 하나를 선택하였다. 시료 5 g에 증류수 96.5 mL를 넣고 5분동안 교반 후, pH를 측정하여, pH<5이면 1번용액을 사용하였으며, pH>5이면 1 N 염산을 3.5 mL 넣은 후 10분간 50℃로 가열하여 식힌 후 다시 pH를 측정해서 pH<5이면 1번용액, pH>5이면 2번용액 사용하였다.

표 2. TCLP 추출용매 사용 조건

pH 조건	Extraction Fluid
pH<5.0	#1 : 5.7mL Acetic Acid를 500mL의 물에 넣고, 64.3mL(1N)의 NaOH를 넣는다. 그후에 물로 1L를 맞춰줌. 예상 pH는 4.93±0.05.
pH>5.0	#2 : 5.7mL Acetic Acid를 넣고 1L를 맞춰줌. 예상 pH는 2.88±0.05.

### ③ 인공강우에 의한 추출 방법

인공강우 조성을 위하여 황산칼륨(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, EM Science), 질산나트륨(NaNO<sub>3</sub>, EM Science), 황산마그네슘(MgSO<sub>4</sub>, Sigma), 염화암모늄(NH<sub>4</sub>Cl, Sigma), 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O, EM Science), 포름산나트륨(HCOONa, Sigma), 및 아세트산나트륨(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>Na, Sigma)를 사용하였으며, 농도 조건은 표 3에 나타내었다. 인공강우 20mL를 1 g의 시료에 넣고 18시간 교반한 후 ICP를 이용하여 용출된 중금속을 분석하였다.

## 3. 결과 및 토의

임도분석 결과 모든 시료의 정상 분류가 모래로 분석되었으며, 실트질 이하의 입경 분율은 미미한 것으로 나타났다. 연속추출법은 Exchangeble fraction에서 시작하여 Residual fraction까지 용출되는 세기가 약한 순서부터 실험이 진행되는데 대부분의 중금속들이 처음에는 용출되지 않다가 용출용매가 강할수록 중금속이 더 많이 용출되는 것을 알 수 있다. Fe 같은 경우에는 Fe-Mn Oxide fraction부터 많은 양이 용출됨을 알 수

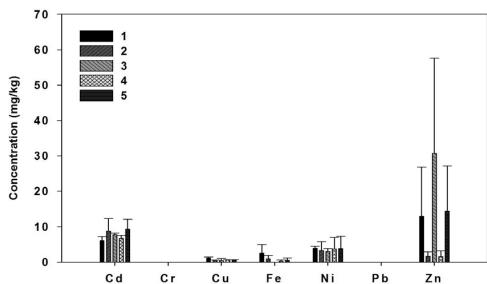
있으며, Zn 같은 경우에는 Carbonate bound와 Fe-Mn Oxide fraction에서 대부분 용출이 되었다.

표 3. 인공강우의 조성 성분과 농도

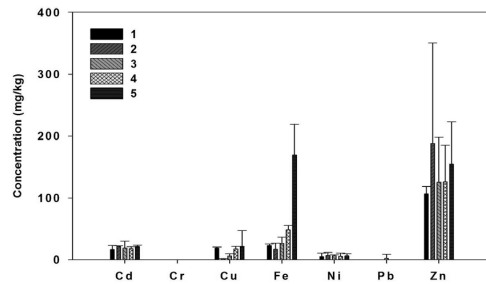
Species	Synthetic rainwater concentration ( $\mu\text{M}$ )
$\text{Na}^+$	190
$\text{K}^+$	20
$\text{NH}_4^+$	100
$\text{Ca}_2^+$	50
$\text{Mg}_2^+$	30
$\text{Cl}^-$	200
$\text{NO}_3^-$	100
$\text{SO}_4^{2-}$	90
Formate	70
Acetate	20

표 4. 입도분석 결과 요약

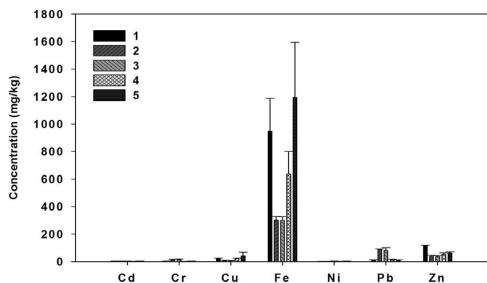
	1	2	3	4	5
유효입경 (mm)	0.0985	0.1674	0.1348	0.0895	0.0775
60% 통과율의 입경 (mm)	0.7274	1.1221	1.0439	0.4715	0.4948
30% 통과율의 입경 (mm)	0.2645	0.4387	0.3889	0.2130	0.1934
균등계수(Cu)	7.3847	6.7031	7.7441	5.2682	6.3845
곡률계수(Cg)	0.9764	1.0246	1.0748	1.0751	0.9754
분류	SP	SW	SW	SP	SP



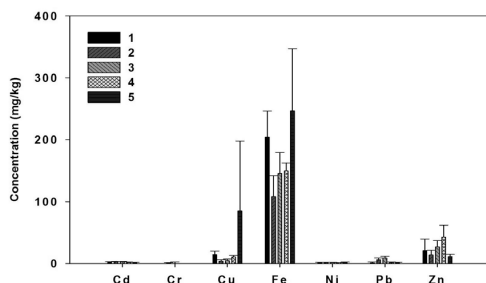
(a) Exchangeable fraction



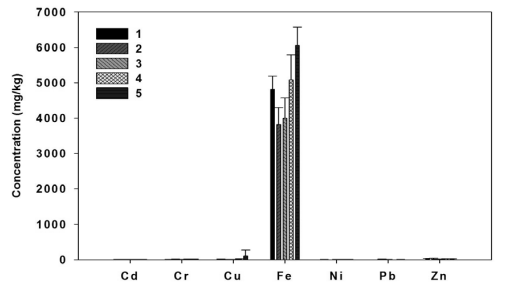
(b) Carbonate bound fraction



(c) Fe-Mn oxide fraction



(d) Organic sulphide fraction



(e) Residual fraction

그림 1. 연속추출법에 의한 존재형태별 중금속 함량

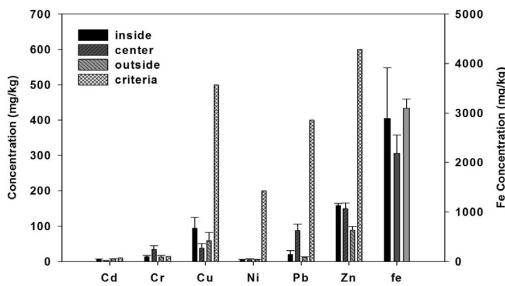


그림 2. 전량분석에 의한 중금속 농도와 토양오염 우려기준의 비교

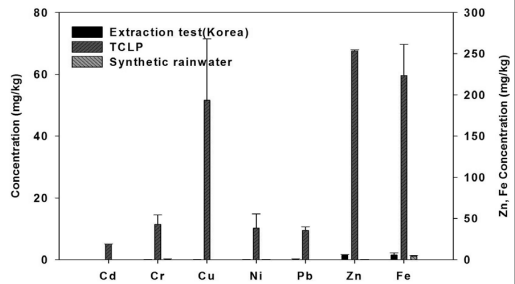


그림 3. 용출실험에 의한 중금속 용출 농도

세 가지 용출 실험에 의한 중금속 용출 농도는 TCLP 방법에 의해 가장 높게 용출되었으며, 인공강우나 폐기물공정시험법에 의한 용출농도는 미미하였다.

#### 4. 결론

도로 청소폐기물의 기본 성상을 파악하기 위해 도로 청소폐기물 집하장에서 시료를 채취하여 입도분포, 중금속 함량 및 세 가지 용출 실험에 의한 중금속 용출농도를 분석하였다. 수집된 청소 폐기물의 물리적 특성은 대부분이 모래로 분석되었으며, 실트질 이하의 입경을 가진 폐기물의 함량은 높지 않았다. 또한 실험결과로부터 폐기물의 중금속 함량을 알 수 있었으며, 토양오염우려기준(2지역 기준)과 비교하였을 때 크롬항목을 제외하고는 우려기준을 초과하지 않았다. 세 가지 용출 실험결과로부터 인공강우에 의한 용출농도는 미미한 수준이었지만, EPA 실험법 중에 하나인 TCLP 용출실험은 우려기준에 근접하는 수준으로 평가되었다. 그러나 수집된 청소 폐기물의 경우 폐기물 관리법상의 기준을 적용받으므로 별도의 관리기준치를 설정할 필요가 있다고 판단된다.

#### 참고 문헌

1. Kang, J.-H., Debats, S. R. and Stenstrom, M. K.(2009), "Storm-water management using street sweeping." Journal of Environmental Engineering, Vol. 135, No. 7, pp. 479-489.
2. Hur, Jin, Schlautman, M. A. and Yim, S.(2004), "Effects of organic ligands and pH leaching of copper from brake wear debris in model environmental solutions." J. Environ. Monit., Vol. 6, pp. 89-94.