

## 데이터베이스를 이용한 도시고형폐기물 소각바닥재에서 납(Pb)의 용출특성해석

정승미 · 大迫 政浩\* · 김용진\* · 이동훈\*\*

(株) MEC Engineering ·

\*日本國立環境研究所循環型社會形成推進·廢棄物研究센터·

\*\* 서울시립대학교 환경공학부

### I. 서 론

일본내에는 1,800개 이상의 도시고형폐기물 소각시설이 있으며, 연간 약 620만톤의 도시고형폐기물 소각부산물(슬라그)이 발생하고 있다.<sup>1)</sup> 이중 많은 부분을 차지하고 있는 소각바닥재(이하 바닥재라 함)는 대부분 직접 매립처분되고, 비산재(비산재는 air pollution control residue를 포함함)는 법에 의한 처리법에 의해 처리후 매립되고 있다. 일본은 바닥재 매립시 유해물질에 관한 용출기준이 없으며, 소각시설의 건설시 재용용설비를 소유하고 있는 시설에만 국가보조를 하고 있어, 앞으로 바닥재가 직접 매립처분되어지는 양이 감소할 것으로 예상하고 있다.<sup>2)</sup> 한편, 덴마크, 네덜란드 등 유럽에서는 물리적 선별후 aging된 바닥재를 그대로 도로건설재료로 이용하는 등 바닥재의 이용에 관심을 가지고 있으며 일본 또한 aging을 통한 바닥재의 개선 등에 대해 많은 연구를 하고 있다.<sup>3)4)</sup>

이와 같이 바닥재의 직접매립, 도로건설재료 등으로 재이용에 상관없이, 바닥재에 포함되어 있는 중금속의 용출특성에 대한 평가는 엄격히 행해질 필요가 있다. 특히, 소각부산물(슬라그)은 대부분 강알칼리성이고, 강알칼리성에서 용출량이 많은 납에 대한 거동특성 및 원인규명은 많은 연구자들에 의해 행해지고 있다. 우리나라의 바닥재에 대한 납 매립허용 용출기준은 3mg/L미만이며, 이를 초과할 경우는 직접매립이 금지되고 있다. 현재 가동중인 우리나라의 몇몇 소각시설에서는 납에 대한 용출기준을 만족시키기 위한 여러 방법을 취하고 있어, 납의 용출 메커니즘을 규명하는 것은 우리나라에서는 매우 시급한 당면과제라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는, 일본의 소각시설에서 배출된 바닥재에 대한 많은 연구발표 자료를 데이터베이스화하여, 납 용출에 영향을 미치는 인자를 파악하고, 이들의 상관관계를 조사하였다.

### II. 연구내용

현재도 수행중에 있는 소각부산물의 데이터베이스화는, 문헌을 통해 보고된 소각부산물 성분분석 데이터를 크게, 일반적 사항, 바닥재, 비산재로 구분하여 정리하였다. 일반적 사항에서는 소각로 위치 국가, 소각 대상물질(도시고형폐기물, 산업폐기물 등), 소각로 종류(스토카식, 유동상식 등), 소각로 용량, 소각로 운전조건(로온도, 연속식 등), 소각장 운전기간, 가스처리시설 등의 항목으로 분류·정리하였고, 바닥재 및 비산재에 대해서는 용출시험방법, 고액비, 용출시험에 사용한 소각재의 입경별 함유량 및 용출량을 정리하여 데이터베이스화하였다. 함유량에 대한 정리항목은 수분함량, 강열감량, 미연탄소, 밀도, As, Cr, Cr(VI), Cd, Hg, Pb, Sb, Se, Sn, Zn, Al, Ba, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn,

[연락처] (우)108-8638 日本國立環境研究所 循環型社會形成推進·廢棄物研究センター

東京都港區白金台 4-6-1 國立公衆衛生院內

Tel.: +81-3-5421-1857, Fax.: +81-3-5421-1867/66, E-mail : kim.yongjin@nies.go.jp

Na, N, Ni, Si, Ti, Cl, CN, CO<sub>3</sub>, F, P, SO<sub>4</sub>, Ag, Au, B, Be, Bi, Ga, La, Sc, Sr, V, Y, Zr(총 48종)이며, 용출량에 대한 항목은 pH, 전기전도도, 알칼리도, ANC, As, Cr, Cr(VI), Cd, Hg, Pb, Sb, Se, Sn, Zn, Al, Ba, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, N, Ni, Si, Ti, Cl, CN, CO<sub>3</sub>, F, P, SO<sub>4</sub>, Ag, Au, B, Be, Bi, Ga, La, Sc, Sr, V, Y, Zr(총 48종)이다.

본 연구에서는, 이와 같이 정리한 데이터베이스를 이용하여 납의 용출요인으로 생각할 수 있는 ① 수산화물 및 염화물의 착화물 형성에 의한 용출, ② 높은 이온강도의 영향, ③ 함유량에 대한 의존성, ④ 강열감량(미연탄소)의 영향, ⑤ 주성분 함유량의 영향에 대해 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. pH에 의한 납의 용출특성

Fig. 1에 pH에 대한 납의 이론적 용해도 곡선과 데이터베이스의 납 용출량 및 일본과 독일의 기준치를 나타내었다. Fig. 1에서 납은 강알칼리성에서 용출량이 많으며, 특히 pH 12이상에서는 급격하게 증가함을 알 수 있다. 일본의 산업폐기물 매립기준인 0.3mg/L를 초과하는 바닥재도 상당량 포함되어 있으며, 독일의 도로건설에 이용할 수 있는 용출기준 0.05mg/L를 만족하는 경우는 극히 적어, 어떠한 처리도 없이 바닥재를 그대로 이용하기에는 무리임을 알 수 있다. 大迫등<sup>2)</sup>이 비교한 우리나라와 일본 바닥재에서의 납의 용출특성 (Fig. 1중 Ref.2(Korea)도 Ref.2(Japan))은 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 1를 통해 납의 용출특성은 pH에 의존함을 알 수 있었으며, 바닥재에서 pH를 결정하는 인자들로 알칼리 금속 및 알칼리 토금속으로서, 이들에 의해 강알칼리성을 띠는 것으로 사려된다. Comans et al.<sup>3)</sup>은 고농도의 칼슘이 높은 pH를 유발할 수 있으며, 바닥재가 재(灰)냉각조에서 물과 접촉하는 과정에서 수산화물 portlandite가 생성되고, portlandite의 용해로 수산화 이온이 생성되어 pH의 상승을 발한다고 보고하였다.

Fig. 2는 일본 環告 13호법에 의한 용출액의 pH와 알칼리 (토)금속인 칼슘, 나트륨, 칼륨의 농도와와의 관계를 나타내었다. 비록 높은 pH 영역에 밀집되어 분포하고 있으나, 칼슘, 나트륨, 칼륨의 용출과 pH의 관계를 알 수 있다. Fig. 3은 칼슘, 나트륨, 칼륨의 용출량에 대한 납의 용출량을 나타내었다. 칼슘 용출량이 증가할수록 납의 용출량 역시 증가함을 알 수 있으나, 나트륨, 칼륨은 납의 용출과는 관계가 없는 것으로 보였다. 이에 나트륨, 칼륨의 주된 화학적 존재형태에 대한 고찰 결과, 용출된 나트륨과 칼륨의 양과 용출된 염소이온의 양이 약 0.95:1의 직선관계를 보여, 수산화물 형태의 물질에서 용출된 것이 아니고, 염화나트륨, 염화칼륨과 같은 염화물 형태의 것이 용출된 것으로 사료되어, 바닥재 용출액의 pH는 나트륨이나 칼륨보다 칼슘의 영향이 클 수 있다.

#### 2. 이온강도에 의한 납의 용출특성

일본 環告 13호에 의한 용출액의 이온강도에 대한 납의 용출량을 Fig. 4에 나타내었다. 이온강도 I는 (식 1)로 계산하였으며, 이때 Z<sub>i</sub>는 이온 i의 전하수, C<sub>i</sub>는 이온 i의 몰농도이다.

$$I = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 \cdot C_i \quad (\text{식 1})$$

(식 1)과 같이 이온강도는 각 이온의 전하수와 농도와의 관

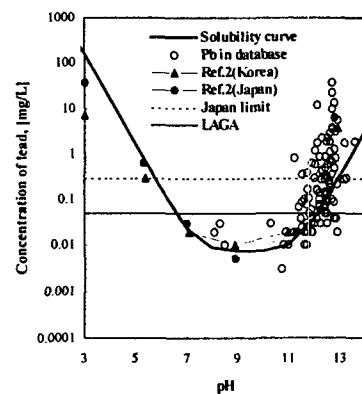


Fig. 1 Comparison of theoretic solubility and lead leach concentration by JLT-13 as function of pH

\* Japan limit is leaching standard the landfill disposal of industr wastes.

\*\* LAGA is leaching standard Germany for the utilization in t road construction

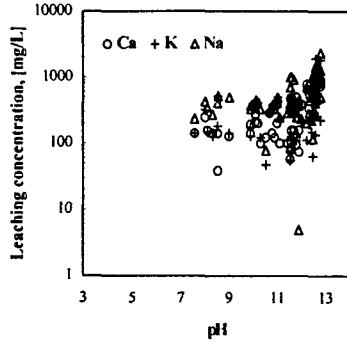


Fig. 2 Leaching concentration of alkali metals as a function of pH by JLT-1

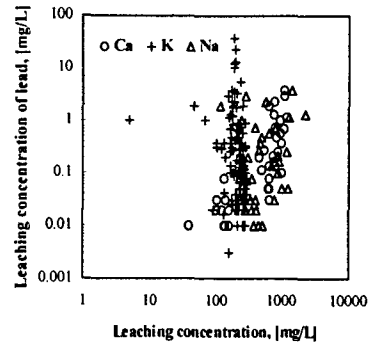


Fig. 3 Leaching concentration of lead a function of leaching concentration alkali metals by JLT-13

계로 나타낼 수 있기에, 본 데이터베이스 해석 연구에서는 용출액에서 고농도로 존재하는 칼슘, 나트륨, 칼륨, 염소이온만을 이용하였다. 황산염 이온에 대해서는 데이터 수가 적은 관계로 고려하지 못했다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 이온강도가 높을수록 납의 용출량 또한 증가하는 경향을 읽을 수 있다.

### 3. 함유량에 대한 납의 용출 의존성

바닥재에 함유된 납이 많을수록 용출되는 납의 양 또한 많음은 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 그러나, 납의 용출률을 각 시료별로 비교한 결과, 함유량이 많을수록 용출량도 많은 경향을 보이고 있지만, 함유량 3,500mg/dry-kg에서 0.025mg/L가 용출, 함유량 480mg/dry-kg에서 5.4mg/L가 용출되는 바닥재도 존재하였다. 함유량이 많으면서도 용출률이 적은 경우는 철, 규소 등 바닥재를 구성하고 있는 주성분들의 함유량과도 관계가 있는 것으로 나타나, 이에 대한 검토는 나중에 행하였다.

### 4. 강열감량(미연탄소)의 영향

Fig. 6은 강열감량과 납의 용출량의 관계를 나타낸 것이다. 현 단계에서 그 이유를 정확히 알 수 없지만, 강열감량 5%미만에서는 상관성이 없는 것으로 나타났으며, 강열감량이 커짐에 따라 납의 용출량과의 상관성이 보이는 것으로 나타났다. 이는 Herms et al.<sup>6)</sup>이 지적한 바와 같이 유기물질에 의한 중금속의 흡착은 pH가 4~6정도의 낮은 영역에서 가능하며, 용출액의 pH와 같이 pH가 높은 경우에서

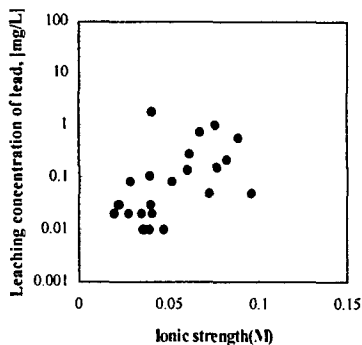


Fig. 4 Leaching concentration of lead a function of ionic strength

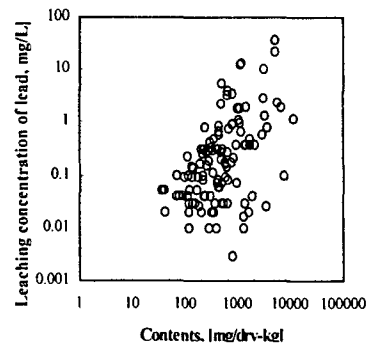


Fig. 5 Leaching concentration of lead a function of contents of lead

는 유기물질의 용해로 중금속의 용출량이 많아지는 것으로 사료된다.

#### 5. 주성분 함유량의 영향

바닥재의 주성분은 규소, 칼슘, 알루미늄, 철(각각 약 17, 12, 7, 5% 함유)로 볼 수 있다. 함유량에 대한 납의 용출의존성에서 언급한 바와 같이, 규소, 철, 알루미늄의 함유량과 납의 용출률과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 철과 규소가 많이 함유되어 있을수록 납의 용출률은 낮아짐을 알 수 있다. 이에 대한 요인으로 생각할 수 있는 것은, Schultz et al.<sup>7)</sup>의 연구에서 밝

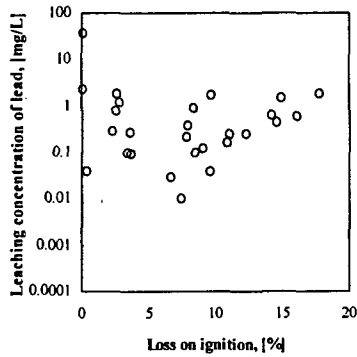


Fig. 6 Leaching concentration of lead as a function of loss on ignition

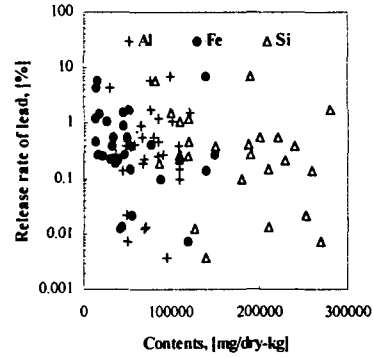


Fig. 7 Release rate of lead as a function of main elements content in bottom ash

힌 바와 같이 구리, 니켈, 납, 아연의 철화합물인 ferrihydrite으로의 흡착과 광물학적 구조의 안정성으로 생각할 수 있으나, 광물학적 구조의 안정성에 대한 것은 아직 명확하지 않다.

#### IV. 결 론

여러 문헌에 보고된 바닥재 성분분석 자료를 데이터 베이스화하여, 이를 이용해 납의 용출에 미치는 영향 인자를 조사한 본 연구에서 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

1. 알칼리 금속류가 많은 경우, 이 금속들의 용해로 pH가 상승되고, 납의 용출량이 증가된다.
2. 높은 이온강도하에서 납의 용출량은 증가한다.
3. 납의 높은 함유량은 높은 용출량을 보인다.
4. 미연탄소와 같은 유기물질이 다량 함유되어 있을수록 납의 용출량은 증가한다.
5. 바닥재의 주성분인 철, 규소가 많이 함유되어 있을수록 납의 용출률은 저하한다.

#### Reference

1. Sakai, S.: *Waste Management*, Vol.16, pp.395 (1996)
2. 大迫 政浩의: 日韓の都市ごみ焼却主灰からの重金属類溶出特性に関する比較考察, 投稿中
3. Sakai, S. et al.: *Waste Management*, Vol.16, pp.341- 350 (1996)
4. 篠崎かおりの: 東京都清掃研究所研究報告, 第27号, pp.97- 100 (1997)
5. Comans, R.N.J et al.: in J. J. J. M. Goumans, H. A. van der Sloot and Th. G. Aalbers, *Environmental Aspect of Construction with Waste Materials*, Elsevier Science B. V., pp.103-110
6. Herms, U. et al. : In environmental effects of organic inorganic contaminants in sewage pp.209-214(1983)
7. Schultz, M.F. et al.: *Environ. Sci. Technol.*, Vol.21, pp.863- 869 (1987)