

## 소각재 용융슬래그의 중금속 용출특성에 관한 연구

한영수·이재영

서울시립대학교 도시과학대학 환경공학부

### A Study on Leaching Characteristics of the Heavy Metal in Melting Slag of Incinerator Ashes.

Young-Soo Han · Jai-Young Lee

*Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Korea*

### ABSTRACT

Melting is one of the most effective treatments for stabilizing heavy metals and also creates high value by-products. In this study, authors evaluated the leaching characteristics of heavy metals in melting slag obtained by incinerator ashes. In order to evaluate the environmental compatibility of the recycled melting slag, the samples were analysed various leaching tests of heavy metals with raw incinerator ashes, melting slag and the construction materials recycled from melting slag. As the results : (1) The leaching concentrations of the melting slag were lower than those of the raw incinerator ashes in the experiment performed in accordance with Korea Standard Leaching Test (KSLT). (2) The heavy metal concentration of long term leaching test, which was conducted in various pH conditions, were under the standard level of regulation in KSLT. (3) The leaching concentration of mortar samples used for evaluating the feasibility of recycling the melting slag as construction materials also shows the suitable range for recycling. (4) The result of leaching test with the method of RG Min-StB 93, FGSV(Forschungsgesellschaft fur Straβen- und Verkehrswesen) met the requirements in German.

**Key words :** MSW incineration ashes, melting slag, heavy metal, KSLT

## 요약문

용융처리는 중금속을 안정화시키는 효과적인 방법의 하나이며, 또한 고가의 부산물을 생산해낸다. 본 연구에서는 소각재를 용융하여 얻은 슬래그의 중금속 용출특성을 평가하고자 한다. 슬래그를 재활용하는데 있어서 환경적인 적합성을 평가하기 위하여 소각재, 슬래그 및 슬래그를 재활용재로 하여 제조한 건설재료에 대한 용출시험을 수행하였다. 시험결과는 다음과 같다. (1) 국내표준용출시험법(KSLT)에 의해 시험한 슬래그의 중금속 용출농도는 소각재의 용출농도보다 낮은 값을 나타냈다. (2) 장기용출시험법에 의해 평가한 슬래그의 중금속 용출농도도 KSLT의 기준을 만족했다. (3) 슬래그의 건설재료로서의 사용성을 평가하기 위해 만든 모르타르 공시체의 용출결과, 슬래그를 재활용재로서 사용하는데 있어서 중금속 용출 측면에서 적합하다고 사료된다. (4) 독일의 소각재 재활용을 위한 가이드라인인 RG Min-StB 93, FGSV에서 제시하는 방법에 의해 시험한 결과, 본 슬래그의 용출농도는 독일의 규제기준을 만족하였다.

**주제어 :** 도시 폐기물 소각재, 용융 슬래그, 중금속, 표준 용출시험법

## 1. 서 론

산업이 발달하고 인구가 증가함에 따라 폐기물의 발생량은 증가하는 반면, NIMBY 현상으로 신규 폐기물 처리장 건설이 어려운 형편이다. 따라서 국가적인 폐기물 처리의 방향은 매립을 줄이고 소각과 재활용을 늘리는 방향으로 추진하고 있는 실정이며, 이에 기인하여 소각처리율이 급증할 것으로 예상된다. 이에따라 소각재의 발생량도 크게 증가하고 있는 실정이다. 현재 소각재의 처리는 바닥재와 비산재의 경우를 분리하여 처리하고 있는데, 바닥재는 폐기물 공정시험법의

용출시험을 거쳐 기준을 만족하면 일반폐기물로써 처리되며, 비산재는 지정폐기물로 처리되고 있다. 그러나 최근 도시쓰레기 소각시설에서 배출되는 소각재중 일반폐기물로써 여겨지던 바닥재에서 지정폐기물 기준을 초과하는 납(Pb)이 검출되어 매립지 반입이 금지됨에 따라 소각장에 바닥재가 적체되는 등의 문제점이 발생되어 비산재뿐만 아니라 바닥재에 대한 적정 처리가 시급한 환경문제로 대두되고 있다. 그러므로 중금속 등의 오염물질을 안정화시키면서 소각재를 재활용 할 수 있는 처리 방안의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

**Table 1. Physical properties of slag**

Gs	LL(%)	PI(%)	$\omega$ (%)	No.200통과량(%)	통일분류법	투수계수(cm/sec)
2.72	N.P.	N.P.	14.5%	0.1	SP	$1.2 \times 10^{-1}$

N.P : Non Plastic, SW : Sand well graded

**Table 2. Chemical composition of slag**

원 소	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$P_2O_5$	$K_2O$	CaO	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	CEC(meq)
중량백분율(%)	8.45	35.21	3.14	1.91	27.21	2.38	22.28	4.7

소각재등과 같은 폐기물의 재활용을 위해서는 먼저 선행되어야 하는 부분이 환경에 대한 안전성의 확보이다. 특히 소각재의 경우에는 중금속에 의한 위해성의 우려가 높으므로 처리 및 재활용을 위한 대책 마련 시 이를 고려하여야 한다. 소각재의 재활용 방법은 용융고화법, 시멘트고화법, 약제혼련법, 용매용출법 등의 여러가지가 있는데 이중 비교적 중금속의 용출 우려가 적은 방법으로 용융고화법을 들 수 있다. 본 연구에서는 소각재를 용융고화법을 이용하여 얻은 재활용 골재에 대한 중금속 용출특성을 다양한 용출실험을 통해 알아보고자 한다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1 시료의 특성

본 연구에서 용융의 원재료로써 사용된 소각재는 경기도 안양시에 위치한 평촌 쓰레기 소각장의 바닥재 및 비산재이다. 평촌쓰레기 소각장은 총연면적 6,928 m<sup>2</sup>, 용량 200ton/day의 생활쓰레기 소각장이다. 본 소각장에서 소각되는 생활쓰레기의 2000년도 평균 성상은 수분 44.18%, 가연분 35.91%, 회분 19.91%, 고위 발열량 2,233 kcal/kg, 저위 발열량

1,574kcal/kg, 결보기비중이 0.28ton/m<sup>3</sup>인 도시 고형 폐기물이다. 위와 같은 성상의 쓰레기를 소각한 후 발생한 소각재 중 바닥재 85%, 비산재 15%를 혼합하여 40kg/hr의 속도로 약 1400°C의 용해로 투입하고, 용탕내의 온도를 약 1500°C로 유지시키며 용융시킨다. 슬래그는 용탕내의 수위가 일정수위 이상이 되면 월류하여 1300°C의 온도로 로의 출구로 배출된다. 배출된 슬래그는 수냉식으로 급속 냉각시켜 별도의 파쇄 및 처리과정없이 사용하였으며, 균질한 시료를 얻기위해 No 10체(2mm)를 통과시켜 실험에 이용하였다. 시료의 기본적인 토성은

Table 1과 같다. 슬래그의 화학조성을 파악하기 위해 EDXA 분석(Electron Dispersed X-ray Analysis)을 이용하여 분석한 결과를 Table 2에 나타냈는데, 약 SiO<sub>2</sub> 35.21%, CaO 27.21%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 22.28%로 나타났다. 투수시험용 시료의 다짐정도 및 함수비를 나타내고 있다. 토양이 보유하고있는 교환 가능한 양이온의 총량(CEC : Cation Exchange Capacity)을 구하기 위해 염화바륨법을 이용하여 CEC를 측정한 결과 슬래그의 CEC는 4.7meq로써 측정되었다. 슬래그의 투수계수는 총단위중량  $\gamma_c$ 는 1.65 g/cm<sup>3</sup>, 견조단위중량  $\gamma_d$ 는 1.44 g/cm<sup>3</sup>, 함수비  $w$ 는 14.5, 간극비  $e$ 는 0.89의 조건으로 지름 10cm, 높이 10cm

Table 3. Mixing fraction of the cement mortar

Item	W/C ratio	Cement : Fine agg.	Mix proportion of fine agg.(%)	
			Standard sand	Slag
Sample 1	0.485	1 : 2.45	100	0
Sample 2	0.485	1 : 2.45	70	30
Sample 3	0.485	1 : 2.45	50	50
Sample 4	0.485	1 : 2.45	0	100

Table 4. Chemical composition and physical properties of cement

Item Type	Chemical Composition (%)							Specific Gravity	Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig.loss		
Ordinary Cement	21.8	5.8	3.56	60.6	3.54	2.6	1.0	3.14	3.422

의 컬럼에서 정수두 투수시험을 실시한 결과 슬래그의 투수계수는  $1.2 \times 10^1 \text{ cm/sec}$  으로 나타났다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 폐기물 공정시험 방법에 의한 중금속 용출 시험

현재 국내에서 사용하고 있는 국내 표준용출시험법 (KSLT : Korea Standard Leaching Test)을 이용하여 용출시험을 실시하였다. KSLT법의 용출조건은 pH 5.8-6.2의 용출액, 1 : 10의 고액비, 200rpm의 속도로 약 6시간 진탕하고 얻은 여액을 검출용 시액으로 하였으며, 용출하여 얻은 용출액은 질산 전처리법을 거친 후 ICP (Inductively coupled plasma emission spectroscopy : SHIMAZU ICPS 1000-IV)를 이용하여 분석하였다. 분석시료는 용융시키기 전의 바닥재, 비산재 및 두 가지를 85 : 15의 비율로 섞어서 용융시킨 슬래그이다.

**2.2.2 pH에 따른 중금속의 장기 침출 가능성 평가**  
 슬래그가 여러 가지 pH의 용액에 장기적으로 노출될 때, 중금속의 용출 특성을 알아보기 위하여 pH 1, 3, 5, 7, 9, 11의 다양한 조건의 용출액에 슬래그를 1 : 10의 고액비로 침지시킨 후 약 1개월간의 용출특성을 시간별로 알아보는 실험을 수행하였다. 슬래그는 진탕시키지 않고 용출액에 완전히 잠기게 하여 상온에서 침지시킨 채 유지하였다. 분석항목은 Pb, Cd, Cu, Cr의 4항목이며 ICP를 이용하여 분석하였다.

### 2.2.3 모르타르 공시체의 중금속 용출시험

향후 슬래그가 건설토목재료로 이용될 때의 중금속의 용출량을 알아보기 위하여 모르타르 공시체를 제작하여 7일, 28일 양생시킨 후 중금속의 용출량을 KSLT를 이용하여 실험하였다. 본 연구에 사용한 슬래그는 용융 직후 수냉식으로 급속 냉각하였으므로 모래대용의 잔골재로 재활용할 수 있는 입도분포를 갖는다. 모르타르 제작시 잔골재의 비율을 표준사 및 슬래그를 혼합하여 4가지 배합비의 모르타르 공시체를 제작하였다. 시험에 사용한 모르타르의 배합비 및 시멘트의 특성은 Table 3, 4와 같다.

### 2.2.4 장기침출시 pH 변화에 따른 슬래그의 화학적 조성변화

용융슬래그가 여러 가지 pH의 용액에 장기적으로 노출되었을 때, 화학적인 조성이 어떻게 변하는가를 알아보기 위해 pH 1, pH 3, pH 5, pH 7, pH 9, pH 11의 용액에 슬래그를 1개월 간 침지시킨 후 화학적 조성 변화를 EDXA 분석으로써 분석하였다. 용출은 고액비 1 : 10으로 하였으며, 진탕없이 약 1개월 간 침지시키고 일정한 시간간격으로 침출액내의 중금속량을 ICP를 이용하여 분석하였다.

### 2.2.5 독일의 가이드라인 RG Min-StB 93, FGSV의 용출실험

독일의 도로건축에 있어서 사용되는 광물성분의 품질 관리를 위한 가이드라인 RG Min-StB 93, FGSV (Forschungsgesellschaft fur Straßen- und Verkehrswesen)에서는 재활용물질을 건축재료로 사용하기 위한 기준으로써 본 시험방법을 제시하고 있다. 이는 생활폐기물 소각재의 활용을 위한 기술지

**Table 5. Heavy metal leaching concentration by KSLT**

Item	Cr	Cu	Cd	Pb	Hg	As	단위(mg/l)
Bottom ash	0.031	0.343	0.015	0.497	N.D.	N.D.	
Fly ash	0.017	1.140	0.579	382.3	0.001	0.001	
Slag	N.D.	0.017	0.044	0.237	N.D.	N.D.	
Criterion	1.5	3	0.3	3	0.005	1.5	

※ N.D. : Not Detected

침으로 생활폐기물 및 사업장 일반폐기물의 생활폐기물 소각장치에 의한 소각시에 발생되는 잔재물에 해당되는 기준이다. 그러므로 보일러재, 비산재와 배가스 처리시 발생하는 반응생성을 및 지정폐기물 소각장의 잔재물을 포함되지 않는다.

본 가이드라인에서는 시료의 전처리과정으로써 다음과 같은 과정을 규정하고 있다. Quenching Tower로부터 끓겨진 재는 수분을 제거하기 위해 2,3일 방치한다. 자석분리 장치로 금속과 비금속을 분리하고 여과기로 입경 분리를 하여, 규정입경 32mm 이하의 재는 모으고 32mm이상의 재는 매립한다. 이렇게 모아진 재는 3개월 이상 약적한다.

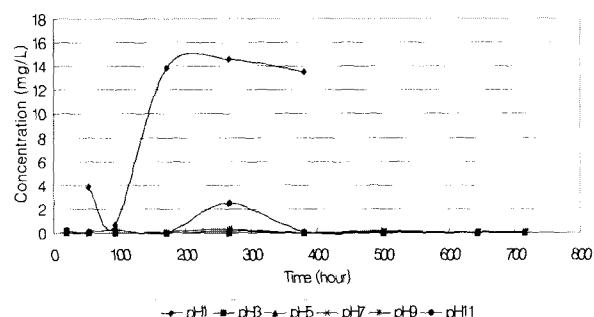
위와 같은 방법으로 준비한 용융슬래그 시료는 독일의 용출시험법(DIN 38 414)방법으로 용출시험을 수행하였다. 용출시험은 시료와 증류수를 10:1로 하여 24시간 용출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

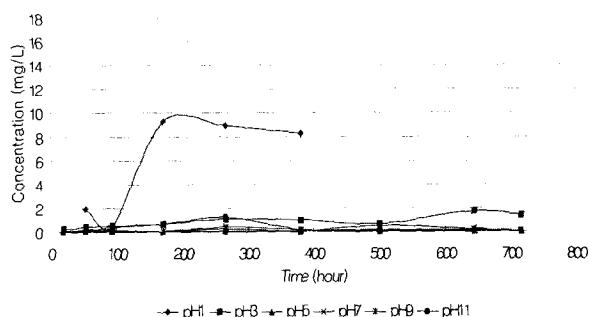
#### 3.1. 폐기물 공정시험 방법에 의한 중금속 용출시험

바닥재 및 소각재, 슬래그에 대하여 KSLT법을 이용하여 중금속 용출시험을 수행한 결과를 Table 5에 나타내었다. 바닥재의 경우 모든 중금속 항목에 대하여 폐기물 관리법에서 정하는 규제기준을 만족하여 일반폐기물로써 분류되었으며, 비산재의 경우에는 Pb의 농도가 382.3mg/L로 측정되어 규제기준인 3mg/L보다 100배이상 높은 값을 나타냈다. 그러나 이들 물질 중 바닥재 85%, 비산재 15%를 혼합하여 용융시킨 결과 슬래그의 용출농도는 Cd을 제외하고는 바닥재, 소각재의 용출결과보다 낮은 값을 나타내어 용융고화처리법에 의한 처리가 중금속을 고정화하는 역할을 한다는 이전 연구자들의 보고와 일치되는 결과를 보여주고 있다. 특히 Pb의 경우에는 비산재에서 용출된 382.3mg/L의 높은 농도가 기의 투수계수는 총단위중

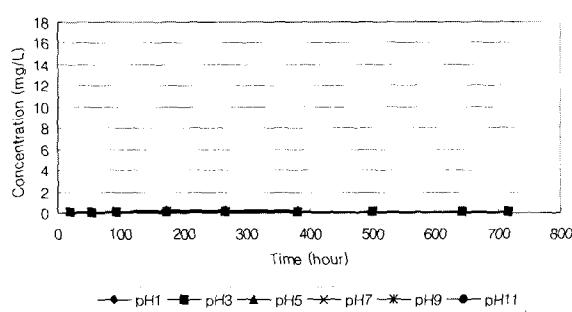
a) Leaching of C



b) Leaching of Cu



c) Leaching of Cd



d) Leaching of Pb

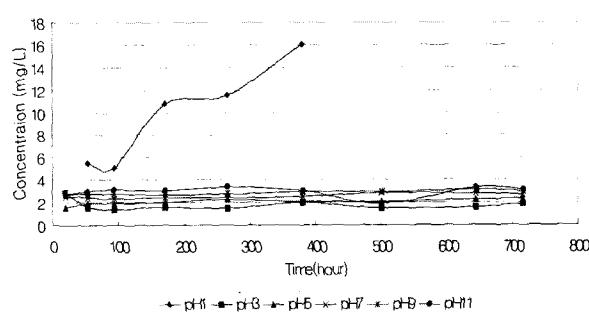


Fig. 1. Heavy metal leaching concentration of long term test with various pH.

량  $\gamma$ 는 1.65 준치 이내인 0.237mg/L로 감소하여 높은 중금속 고정화 능력을 나타냈다.

### 3.2 pH에 따른 중금속의 장기 침출 가능성 평가

Fig. 1에서는 pH별 중금속의 장기침출량을 나타내고 있다. pH 1에서는 Cd를 제외하고 Cr, Cu, Pb등 중금속 항목은 시간에 따라 용출농도가 높아지다가 평형을 이룸을 알 수 있다. Cr은 pH 1에서 0.67~13.88mg/kg의 높은 용출농도를 나타내었지만, 그 밖의 pH에서는 1mg/kg 이하의 낮은 용출량을 보였다. Cu의 경우에는 pH 1에서 0.5~8.95mg/kg의 용출농도를 나타내었으며 pH가 올라감에 따라 용출농도가 적어지는 경향을 보여서 기존의 연구결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 반면에 Pb은 pH 1에서 5.0~16.11mg/kg의 농도를 보였으며, 그밖의 pH 범위에서는 pH가 3에서부터 11로 올라갈수록 그 용출량이 증가하고 있어 Pb이 양쪽 성 원소라는 기존의 연구결과와 일치하는 결과를 나타냈다. 그러나 pH 1을 제외한 다른 pH에서의 용출농도의 차이는 미미한 것을 알 수 있다. Cd은 모든 pH 범위에서 용출량이 미미하게 나타났는데, pH 1에서 1개월 방치한 결과 Cd이 거의 용출되지 않은 것으로 보아 본 슬래그에는 Cd의 함유량이 거의 없음을 예측할 수 있다. pH 1을 제외한 pH 3에서 pH 11의 조건에서 각 중금속의 용출농도 범위는 Cr 0~2.4 mg/kg, Cu 0.09~1.74mg/kg, Cd 0.05~0.16mg/kg, Pb 1.55~3.43mg/kg이다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 Cd은 슬래그 자체에 함유된 총량이 적은데 비해, Cr, Cu, Pb는 슬래그 자체에는 함유되어 있으나, pH가 강산성일때만 다량 용출되고, 그밖의 pH에서는 용출량이 극히 적음을 알 수 있다. 특히 Cr은 다른 pH에서보다 pH 1에서 용출되는 양이 많았다.

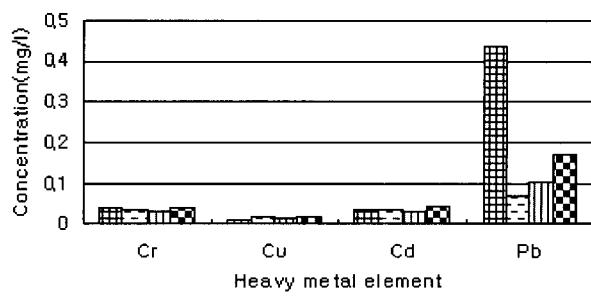
### 3.3 모르타르 공시체의 중금속 용출시험

중금속의 용출 농도는 슬래그 100%일때의 Pb 용출 농도를 제외하고는 4가지 배합비의 공시체에서 Cu,

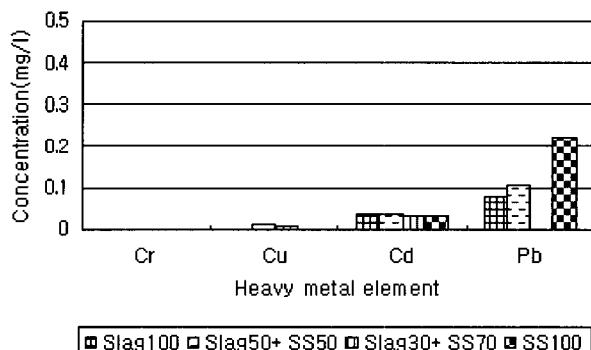
Cr, Cd, Pb 모두 0.1mg/L이하의 적은 농도로 검출되었다. 또한 대체적으로 낮은 농도이기는 하나 7일 양생의 경우보다 28일 양생의 경우가 중금속 용출농도가 더 낮아 시간이 경과함에 따라 시멘트가 중금속을 흡착하는 기작이 미세하게나마 작용하고 있다고 판단된다. 이에 대한 기작은 추후의 연구를 통해 밝혀져야 하겠다.

Fig. 2 의 잔골재 배합비 슬래그 100%의 경우는 저농도이기는 하나 다른 중금속보다 Pb의 농도가 높게 검출되는 결과를 보였다. 이는 소각재의 바닥재 중 Pb의 함량이 높아 일반폐기물로 처리시 논란이되었던 기존의 연구결과와 일맥상통하는 결과이나 폐기물 공정 시험법상 용출농도의 규제기준이 Pb 3mg/L인 것과 비교에 보면 크게 유려하지 않아도 되는 범위 내에 있

Leaching from 7 day-aged mortar



Leaching from 28 day-aged mortar



**Fig. 2. Heavy metal leaching concentration of mortar samples (SS : Standard Sand)**

**Table 6. Chemical composition of exposed slag with various pH**

Elements \ pH	Percentage of weight (%)					
	pH 1	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.49	10.23	10.43	9.98	7.99	7.78
SiO <sub>2</sub>	54.49	40.63	40.47	40.66	35.76	35.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.71	3.65	3.18	3.03	3.05	2.76
K <sub>2</sub> O	0.92	1.70	1.72	1.70	1.86	1.82
CaO	12.45	24.81	25.14	25.25	28.13	27.81
TiO <sub>2</sub>	3.35	1.76	1.79	1.80	2.18	2.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.33	12.38	12.63	13.22	16.02	17.10

다고 사료된다.

### 3.4 장기침출시 pH 변화에 따른 슬래그의 화학적 조성변화

용융슬래그가 여러가지 pH의 용액에 장기적으로 노출되었을 때, 화학적인 조성이 어떻게 변하는가를 알아보기 위해 pH 1에서 pH 11 사이의 용액에 슬래그를 1개월 간 침지시킨 후 화학적 조성 변화를 XRF 분석을 수행하였다. 슬래그의 화학적인 조성은 대략 SiO<sub>2</sub> 21.8%, CaO 60.6%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3.56%의 비율로 조성되어 있는데, 약 1개월간의 화학용액과의 접촉결과 Table 6과 같은 비율로 조성이 변화하였다. pH 1에서는 약 SiO<sub>2</sub> 54.49%, CaO 12.45%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.33%의 조성을 가지며, pH가 pH 3, pH 5, pH 7의 약산성 및 중성의 범위에서는 SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 세가지 광물질이 각각 약 40%, 25%, 13%의 비슷한 조성비를 나타내었다. 또한 염기성 범위인 pH 9 및 pH 11에서는 약산성 및 중성용액에서의 결과에 비해 SiO<sub>2</sub>는 감소하고 CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 증가하여 세가지 광물질의 조성비가 약 35%, 28%, 16~17%의 조성을 보였다. 이러한 결과는 원재료의 광물조성과 비교하여 볼 때 CaO의 비율이 크게 줄어 전체적인 조성비가 변한 것으로 사료된다. CaO는 Ca<sup>2+</sup> 이온으로 용액내에 용출되었을 것으로 사료된다. XRF분석을 원소내의 광물질의 절대적인 양은 구할 수 없고 상대적인 조성비율만을 나타내는 지표이므로 정확한 질량수지는 세울 수 없으나, 일반적으로 Si 및 Fe 광물은 풍화 및

**Table 7. Leaching concentration in accordance with RG Min-StB 93, FGSV in German**

Item.	Slag	Regulation	Unit
pH	8.07	7-13	-
EC	4.95	250	mS/m
SO <sub>4</sub>	2.10	250	mg/l
Cl	5.99	30	mg/l
CN	N.D.	0.02	mg/l
Cd	N.D.	0.005	mg/l
Cr	N.D.	0.05	mg/l
Cu	0.06	0.3	mg/l
Hg	N.D.	0.001	mg/l
Ni	N.D.	0.04	mg/l
Pb	0.04	0.05	mg/l
Zn	N.D.	0.3	mg/l
EOX	N.D.	3	mg/kg
TOC	0.0007	3	wt%

\* EC : Electric Conductivity

EOX : Extracted Organic Halogen

TOC : Total Organic Carbon

화학적 변화에 강한 광물이므로 총량의 변화는 미미할 것으로 사료되며, 1개월간의 침출후 조성변화는 CaO의 용출로 인한 것으로 생각할 수 있다.

### 3.5 독일의 가이드라인 RG Min-StB 93, FGSV의 용출실험

바닥재를 도로 건설용으로 사용하기 위한 독일의

TL HMVA-StB95에서 제시하고 있는 용출시험법에 따라 용출시험을 수행한 결과를 Table 7.에 나타내었다. 독일에서 사용되고 있는 본 실험 방법은 KSLT법에 비하여 보다 엄격한 규제기준을 적용하고 있다. 실험방법을 비교해보면, pH와 용출시간면에서 약간의 차이를 보이고 있는데 KSLT는 pH를 5.8-6.2로 규정하고 있는 반면, 본 실험법은 중류수를 용출액으로 사용하도록 규정하고 있다. 본 실험자는 KSLT는 pH 5.9의 용출액으로, 본 3.5절의 시험은 pH 7.5의 용출액으로 수행하였다. 용출시간은 KSLT에서 6시간, 본 실험에서는 24시간을 정하고 있다. 실험결과를 비교해 보면 Cr, Cd, Pb에서 KSLT로 시험한 농도가 본 독일의 실험방법보다 더 높게 나온것으로 미루어 용출의 지배인자는 용출시간보다는 pH임을 알 수 있다. 본 슬래그는 건설용자재로 사용하는데 있어서 환경적인 적합성을 지녔다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도시폐기물 바닥재 및 비산재를 용융고화처리하여 얻은 슬래그의 중금속 용출 특성을 알아보기 위해 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 국내 표준용출법(KSLT)으로 용출실험을 수행한 결과 바닥재는 모든 중금속항목에서 규제치 이내의 농도를 나타냈으나, 비산재에서는 382.3mg/L의 Pb이 용출되었다. 그러나 두 가지 물질을 바닥재 85%, 비산재 15%로 혼합하여 용융시킨 결과 Pb의 용출농도가 0.237mg/L로 줄어들어 용융고화법이 중금속의 고정화에 효과가 좋다고 사료된다.
- 여러가지 pH에서 장기적인 중금속 용출시험을 수행한 결과, pH 1에서만 다량의 중금속이 용출되었고, 다른 pH에서는 약 1개월간의 노출에도 불구하고 규제치 이하의 미량의 중금속만이 용출된 것으로 나타나 강산성의 극한 조건이외의 자연조건에서는 슬래그가 중금속 용출면에서 안전하다고 사료된다.

- 슬래그를 제작한 7일 및 28일 재령 모르타르 공시체에 대해 용출실험을 실시한 결과, 슬래그를 잔골재로 사용하여 제작한 모르타르의 용출결과가 표준사를 이용한 결과와 큰 차이를 보이지 않았으며, 모르타르의 양생일수가 늘어남에 따라 중금속의 용출량이 줄어드는 결과를 얻었다.
- 슬래그의 화학적 조성을 분석한 결과 슬래그는 다량의 CaO, SiO<sub>2</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 함유하고 있으며, 슬래그가 장기간 화학용액에 노출되면 CaO의 비율은 감소하고, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 SiO<sub>2</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 풍화 및 화학적 환경에 대한 변화가 적으며 CaO는 쉽게 용출·변성됨을 나타내준다.
- 바닥재를 도로 건설용으로 사용하기 위한 독일의 TL HMVA-StB95에서 제시하고 있는 용출시험법에 따라 용출시험을 수행한 결과, 본 슬래그는 독일의 본 가이드라인을 기준을 모두 만족하는 결과를 나타내 건설재료로 사용하여도 환경적으로 안전하다고 사료된다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 주식회사 K의 용융신기술개발을 위한 슬래그의 환경성 평가를 위한 연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

#### 참 고 문 헌

- 서용칠 외 3인, 소각재 및 고화체에서의 유해중금속의 침출특성, 한국폐기물학회지, 제 13권 6호, pp. 161~168 (1996).
- 이우근 외, 소각장별 비산재 중의 중금속 용출특성 및 존재형태, 대한환경공학회지 Vol. 20. No. 3. pp.421-432 (1998)
- Kirby, C.S. and Rimstidt, J.D., "Mineralogy and surface properties of municipal solid waste ash", Environ. Sci. Technol., 27. 652~660(1993)
- EPA, Development document for effluent limitations

- guidelines and standards for the metal finishing point source category, EPA 440/1-83-091(1983)
5. 김진범, 이우근, 심영주, 소각비산재의 적정처리를 위한 기초연구(Ⅱ)-용출인자의 영향-, 대한환경공학회 학회지 Vol. 22, No. 7. pp. 1357~1364. (2000)
6. 윤호석 외, 매립지에 반입되는 도시 쓰레기 소각재의 성상 및 용출특성, 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문초록집(1995)