

소각재 용융슬래그의 건설재료로서 재활용시 적합성 평가

The evaluation of the compatibility of recycling melting slag from
incinerator ashes as construction materials.

한영수 · 이재영

서울시립대학교 환경공학부 (yshan@ene.uos.ac.kr, leejy@uoscc.uos.ac.kr)

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 from incinerator ashes. In order to evaluate the environmental compatibility of the recycled melting slag, the samples analysed various leaching tests of heavy metals were 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 result of leaching test with the method of RG Min-StB 93, FGSV(Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) met the requirements in German. (3) The compressive strengths of mortar samples used for evaluating the feasibility of recycling the melting slag as construction materials also showed the suitable range for recycling. (4) Melting slag was considered the stable materials with respect to the chemical stability against chemical solutions with various pH conditions.

Key words : Incinerator ashes, melting slag, KSLT, RG Min-StB 93, FGSV

I. 서론

현재 도시폐기물 소각시설에서 배출되는 폐기물 소각재의 처리는 바닥재와 비산재의 경우를 분리하여, 바닥재는 폐기물 공정시험법의 용출시험을 거쳐 기준을 만족하면 일반폐기물로서 분류하며, 비산재는 지정폐기물로 처리하고 있는데, 대부분의 처리가 매립을 통해 이루어지고 있다. 그러나 소각재중 일반폐기물로서 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. 뿐만아니라 매립지의 사용용량의 확보 및 폐자원의 재활용 측면에서, 용융슬래그를 적절히 처리하여 재활용할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요한 시점이다.

소각재와 같은 폐자원의 재활용을 위해서는 우선적으로 재활용 물질의 환경에 대한 안전성의 확보가 필요하며, 안전성이 확보된 후에는 재활용 용도에 맞는 강도 및 물리·화학적 특성을 만족해야한다. 소각재를 재활용하기위한 처리방법에는 용융고화법, 시멘트고화법, 약제혼련법, 용매용출법등의 여러가지가 있는데, 본 연구에서는 이중 비교적 중금속의 용출우

려가 적은 방법인 용융고화 처리 후에 이용하여 얻은 소각재의 용융슬래그를 재활용함에 있어 환경적 안전성 및 골재로서의 적합성 평가를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서 용융의 원재료로서 사용된 소각재는 경기도 안양시에 위치한 평촌 쓰레기 소각장의 바닥재 및 비산재이다. 평촌쓰레기 소각장은 연면적 6,928m² 용량 200ton/day의 생활쓰레기 소각장이다. 본 소각장에서 소각되는 생활쓰레기의 2000년도 평균 성상은 수분 44.18%, 가연분 35.91%, 회분 19.91%, 고위발열량 2,233 kcal/kg, 저위발열량 1,574kcal/kg, 겉보기비중이 0.28ton/m³인 도시 고품 폐기물이다. 위와 같은 성상의 쓰레기를 소각한 후 발생한 소각재 중 바닥재 85%, 비산재 15%를 혼합하여 40kg/hr의 속도로 약 1400℃의 용해로 투입하고, 용탕내의 온도를 약 1500℃로 유지시키며 용융시킨다. 슬래그는 용탕내의 수위가 일정수위 이상이 되면 월류하여 1300℃의 온도로 로의 출구로 배출된다. 배출된 슬래그는 수냉식으로 급속 냉각시켜 별도의 파쇄 및 처리과정없이 사용하였으며, 균질한 시료를 얻기 위해 No. 10체 (2mm)를 통과시켜 실험에 이용하였다. 시료의 기본적인 토성은 Table 1에 나타냈으며, 물리·화학적 특성은 Table 2에 나타내었다.

용융슬래그의 환경에 대한 안전성을 평가하기 위하여 소각재와 용융슬래그에 대하여 국내 표준 용출시험법(KSLT: Korea Standard Leaching Test)으로 중금속에 대한 용출시험을 수행하였다. 또한 국내에서는 정하고 있지 않으나 독일에서 규정하고있는 소각재를 도로건설용 골재로 사용하기 위한 가이드라인 RG Min-StB 93, FGSV(Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen)에서 정하는 용출시험법에 의한 실험을 실시하였는데, 본 가이드라인에서는 증류수에서 24hr의 진탕시간으로 1:10의 고액비로써 용출시험방법을 정하고 있다. 용융슬래그의 잔골재로서의 강도 및 장기간 환경에 노출시 화학적 내구성을 조사하기 위해 KS L 5105에서 정하는 방법에 의해 모르타르 공시체를 제작하여 일축압축강도시험과 다양한 pH의 용액에 장기간 침전시킨 용융슬래그의 광물조성을 XRF(X-ray fluorescence)를 통해 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 소각재 및 용융슬래그의 용출시험

바닥재의 경우 모든 중금속 항목에 대하여 폐기물 관리법에서 정하는 규제기준을 만족하여 일반폐기물로서 분류되었으며, 비산재의 경우에는 Pb의 농도가 382.3mg/L로 측정되어 규제기준인 3mg/L보다 100배이상 높은 값을 나타냈다. 그러나 이들 물질중 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 기준치 이내인 0.237mg/L로 감소하여 높은 중금속 고정화 능력을 나타냈다. (Table 3)

Table 1. Physical properties of slag

Gs	LL (%)	PI (%)	ω (%)	<No.200	USCS	H.C. (cm/sec)
2.72	N.P.	N.P.	14.5	0.1	SP	1.2×10^{-1}

Table 2. Chemical composition of slag (%)

원소	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
중량	8.45	35.21	3.14	1.91	27.21	2.38	22.28

1) N.D.: not detected, 2) SP: sand poorly graded

2) USCS: Unified Soil Classification System

3) H.C.: Hydraulic Conductivity

Table 3. Heavy metal leaching concentration by KSLT

단위(mg/L)

Item	Cr	Cu	Cd	Pb	Hg	As
Bottom ash	0.031	0.343	0.015	0.497	N.D. ¹⁾	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

1) N.D. : not detected

Table 4. Leaching concentration in accordance with RG Min-StB 93, FGSV in German

Item.	pH	EC	SO ₄	Cl	CN	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	EOX	TOC
Slag	8.07	4.95	2.10	5.99	N.D. ¹⁾	N.D.	N.D.	0.06	N.D.	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	0.0007
Regulation	7-13	250	250	30	0.02	0.005	0.05	0.3	0.001	0.04	0.05	0.3	3	3
Unit		mS/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/kg	wt%

1)N.D: not detected

2. 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 4에 나타내었다. 독일에서 사용되고 있는 본 실험 방법은 KSLT 법에 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 증류수를 용출액으로 사용하도록 규정하고 있다. 본 실험자는 KSLT는 pH 5.9의 용출액으로, 본 가이드라인에 의한 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. Table 4에서 볼 수 있듯이 용출슬래그는 용출결과 모든 항목에서 기준을 만족하여 건설용 자재로 사용하는데 있어서 환경적인 적합성을 지녔음이 입증되었다.

3. 모르타르 공시체의 일축압축강도시험

모든 공시체에서 양생일수가 증가할수록 압축강도는 증가하였으며, 동일한 양생일수에서 압축강도를 비교해 보면, 대체로 잔골재의 비율 중 표준사가 100%인 경우가 가장 높은 압축강도를 나타냈으며 잔골재의 비율이 100%인 경우가 가장 낮게 나타났다. 그러나 28일 강도를 살펴보면 압축강도가 각각 슬래그 비율이 적은 순서대로 나열해보면 390.53kgf/cm², 375.22kgf/cm², 396.43kgf/cm², 382.02kgf/cm²로서 거의 비슷한 값을 나타내고 있어 표준사의 대

Table 5. Compressive strengths of specimens

Specimen	7 days	28 days	Strenght(7days)/ Strenght(28days)
Slag 0	333.74	390.53	0.85
Slag 30	315.59	375.22	0.84
Slag 50	317.90	396.43	0.80
Slag 100	259.16	382.02	0.86

* Fraction of aggregates

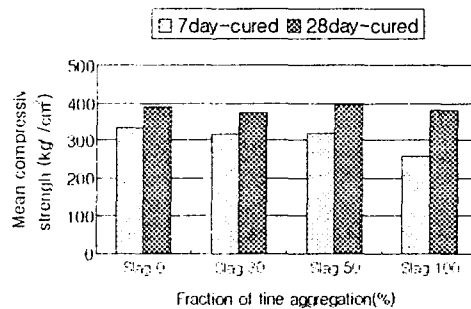


Fig. 1 Compressive strength of specimens

체 잔골재로서 슬래그를 사용한 경우 모르타르의 압축강도에는 거의 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있다.(Table 5, Fig. 1)

4. 다양한 pH에서의 장기침출에 의한 용융슬래그의 화학적 조성변화

슬래그의 화학적인 조성은 대략 SiO₂ 21.8%, CaO 60.6%, Fe₂O₃ 3.56%의 비율로 조성되어 있는데, 약 1개월간의 화학용액과의 접촉결과 Table 6과 같은 비율로 조성이 변화하였다. pH 1에서는 약 SiO₂ 54.49%, CaO 12.45%, Fe₂O₃ 15.33%의 조성을 가지며, pH가 pH 3, pH 5, pH 7의 약산성 및 중성의 범위에서는 SiO₂, CaO, Fe₂O₃의 세가지 광물질이 각각 약 40%, 25%, 13%의 비슷한 조성비를 나타내었다. 또한 염기성 범위인 pH9 및 pH 11에서는 약산성 및 중성용액에서의 결과에 비해 SiO₂는 감소하고 CaO, Fe₂O₃는 증가하여 세가지 광물질의 조성비가 약 35%, 28%, 16-17%의 조성을 보였다. 이러한 결과는 원재료의 광물조성과 비교하여 불때 CaO의 비율이 크게 줄어 전체적인 조성비가 변한 것으로 사료된다

Table 6. Chemical composition of exposed slag to various pH conditions

pH Elements	Percentage of weight (%)					
	pH 1	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
Al ₂ O ₃	5.49	10.23	10.43	9.98	7.99	7.78
SiO ₂	54.49	40.63	40.47	40.66	35.76	35.13
P ₂ O ₅	4.71	3.65	3.18	3.03	3.05	2.76
K ₂ 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 ₂	3.35	1.76	1.79	1.80	2.18	2.16
Fe ₂ O ₃	15.33	12.38	12.63	13.22	16.02	17.10

IV. 결론

국내표준 시험법에 의한 용출실험 결과, 용융처리는 소각재내의 중금속을 효과적으로 고정시키는 것으로 나타났다. 또한 독일의 도로건설용 자재의 재활용을 위한 가이드라인에 의해 실험한 결과 모든 분석항목에서 기준치를 만족하는 결과를 보여 용융슬래그를 재활용하는데 있어서 환경적 위해성이 우려되지 않을 것으로 예상된다. 용융슬래그를 잔골재로 사용하여 제작한 모르타르 공시체의 일축압축강도 실험 결과, 용융슬래그는 강도면에서도 표준사와 동등하다고 판단되는 강도를 보여 슬래그의 강도용 골재로서의 사용도 가능하다고 사료되며, 광물조성에 대한 화학적 안정성도 비교적 우수한 것으로 판단된다.

V. Reference

1. 서용철 외 3인, 소각재 및 고화체에서의 유해중금속의 침출특성, 한국폐기물학회지, 제 13 권 6호, pp. 161~168 (1996).
2. 이우근 외, 소각장별 비산재 중의 중금속 용출특성 및 존재형태, 대한환경공학회지 Vol. 20. No. 3. pp.421-432 (1998)
3. Kirby, C.S. and Rimstidt, J.D., Mineralogy and surface properties of municipal solid waste ash, Environ. Sci. Technol., 27. 652~660 (1993)
4. EPA, Development document for effluent limitations guidelines and standards for the metal finishing point source category, EPA 440/1-83-091 (1983)