

## 소각재 용융슬래그를 이용한 중금속 흡착특성에 관한 연구

### A Study on Adsorption Characteristics of the Heavy Metals using Melting Slag of Incinerator Ash

유승철\* · 김환기

Seung-Chol Yoo\* · Hwan-Gi Kim

전북대학교 토목공학과 토목·환경연구실

(2008년 1월 29일 접수 ; 2008년 2월 18일 1차 수정 ; 2008년 3월 14일 2차 수정 ; 2008년 6월 16일 채택)

#### Abstract

In order to utilize cinder melting slag as a filter media to control the quality of early rainwater, its environmental stability was verified by heavy metal elution experiment and improved by pre-treatment. Possibilities of improving its function as an absorbent was considered. Adsorption characteristics of melting slag before and after the pre-treatment were analyzed by heavy metal equilibrium and stationary-phase column experiments, which in turn were analyzed by comparison experiment with activated carbon. As a result of heavy metal elution experiment, every metal item existed in a much lower amount than the criteria or was not detected, implying that there is no problem recycling it. Adsorption equilibrium experiment showed that the time for pre-treatment melting slag to reach the equilibrium was reduced, while the absorbed amount was greatly increased. Stationary-phase column experiment assures us that the elimination rate was not changed much by influx rate, pH and the change in packing volume rate, indicating that this melting slag can be used not only as a filter media to control the quality of early rainwater but also in many areas of water-processing.

**Key words :** melting slag, adsorption, heavy metal

**주 제 어 :** 용융슬래그, 흡착, 중금속

#### 1. 서론

현재 소각로 보급확대에 따라 소각재의 발생량이 급증하고 있으며, 소각에 의한 감량화로 유해물질이 농축되고, 다이옥신 및 중금속 등을 함유하고 있어 철저히 관리되어야 하며, 많은 소각로에서 유해물질문제로 사회적 물의를 일으키고 있어 이러한 소각재의 안정화 및 적정 처리 문제가 시급한 실정이다. 현재까지 개발된 안정화 및 재활용 방법 중에

서 용융은 가장 안정한 방법일 뿐만 아니라 발생원의 플랜트에서 원천적으로 오염물질의 유출을 봉쇄할 수 있기 때문에 매력적인 기술이다. 소각재를 용융시키면 원래 부피의 1/2~1/5까지 감용화가 가능하고, 소각재내에 함유되어 있는 유해성 유기물이 완전히 분해될 뿐만 아니라, 중금속 성분은 용융슬래그의 망사조직내에 고용체를 형성하므로 상당히 안정화되며(김 등, 1998), 그 자체로도 노반재나 건축재료 등으로 재활용이 가능하다(Wunsch, 1996). 그러나 용융

\*Corresponding author Fax: +82-63-275-2515, E-mail: tirano7803@nate.com (Yoo, S.C.)

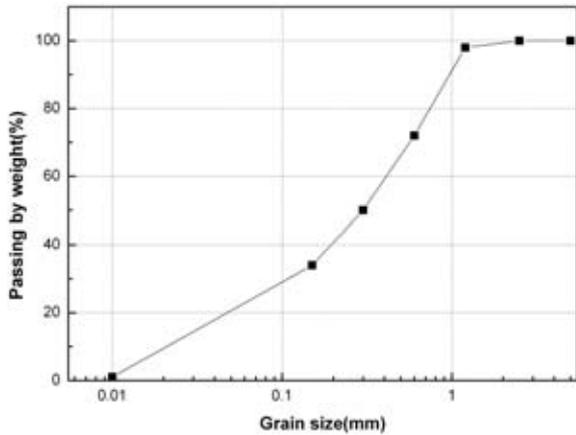


Fig. 1. Grain size analysis.

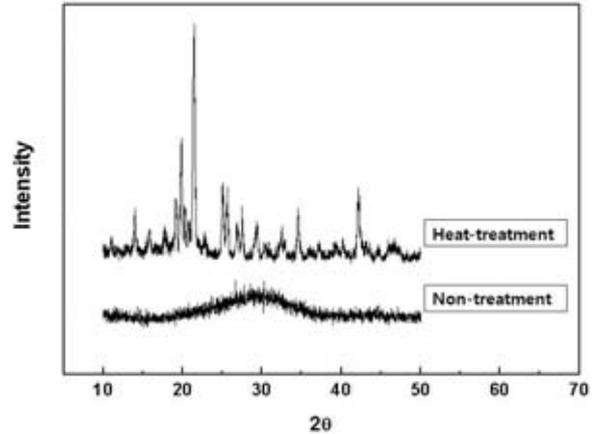


Fig. 2. XRD analysis of melting slag.

슬래그의 이용에 관한 연구는 대부분 토목·건축 기반재나 성토재료로서의 이용에 편중되고 있는 실정이다. 따라서 용융슬래그의 고부가가치 창출을 위한 고기능성 재료로서 재활용되는 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

초기 강우의 유거수에는 도시 분진이나 유기 오염물, 중금속 등이 상당량 포함되어 있다. 따라서 초기 유거수가 그대로 호소나 하천으로 유입될 경우 수질에 심각한 영향을 주는 주요 비점오염원으로 작용하고 있는데 이러한 초기강우의 수질을 효과적으로 제어할 수 있는 방법은 국내 여건상 상대적으로 소요 부지면적이 작은 여과시스템의 활용이 적절하며 이에 따른 많은 연구가 진행되고 있으나, 여과시스템의 중요한 인자로 작용하는 여재 및 흡착제에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 소각재 용융슬래그를 활용하여 여과-흡착제로서의 기능이 우수하며 경제성을 갖춘 흡착제로 개발할 경우 양질의 수자원을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 폐기물의 적정처리 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 소각재 용융슬래그의 기초 물리적 특성을 분석하고, 중금속 용출실험을 통하여 환경안정성을 검증한 후 보다 큰 흡착능과 구조적, 환경적 안정성을 확보하기 위한 전처리를 통하여 전처리 전·후의 물리적 변화와 이로 인한 흡착특성변화를 분석하였으며 흡착평형실험, 다양한 조건에서의 고정층 Column 실험 등을 수행하여 소각재 용융슬래그의 여재로서의 활용 가능성을 평가하였다.

## 2. 연구내용

### 2.1. 실험 재료

#### 2.1.1 도시쓰레기 소각장 소각재(Municipal Solid Waste Incinerator ash)

소각재 용융슬래그는 투입 폐기물에 따라 물성이 달라진다. 일반적인 소각재의 성상은 폐기물의 특성 및 종류, 소각

시설의 운전조건, 소각시설 및 오염방지설비의 특성, 잔재물의 종류에 따라 각기 다른 특성을 나타낸다.

국내 9개 대형생활폐기물 소각시설 유입폐기물 성상별 조성비는 음식물류가 47%로 가장 높았으며 그 다음이 종이류, 비닐·플라스틱류, 나무·짚류, 불연물, 섬유·가죽류 순으로 분석되었으며 계절에 따른 성상별 조성 추이는 큰 변화를 보이지 않는 것으로 조사되었다. Table 1에 생활폐기물 성상별 발생량을 나타내었다.

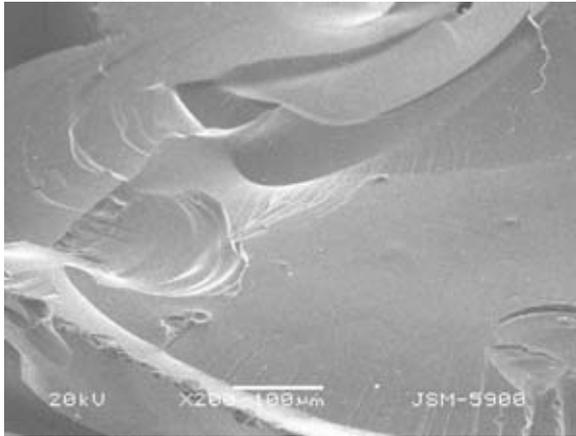
#### 2.1.2. 소각재 용융슬래그의 특성 분석

본 연구에서 사용한 소각재 용융슬래그(이하; 용융슬래그)는 플라즈마 방식의 소각장에서 배출된 것을 출발 원료로 사용하였다. 플라즈마 용융법은 플라즈마 토치로부터 방출되는 고온의 플라즈마를 이용하여 폐기물을 용융 및 슬래그화를 통하여 유해폐기물을 무해화시키는 방법이며 냉각 방식은 수냉에 의한 급냉방식에 의해 배출되었다. 용융층의 슬래그와 금속의 비중 분리, 슬래그·금속의 연속수세, 금속 및 슬래그 배출, 코크스 첨가에 의한 NOx 저감 등을 할 수 있으며 주요 특징은 아래와 같다.

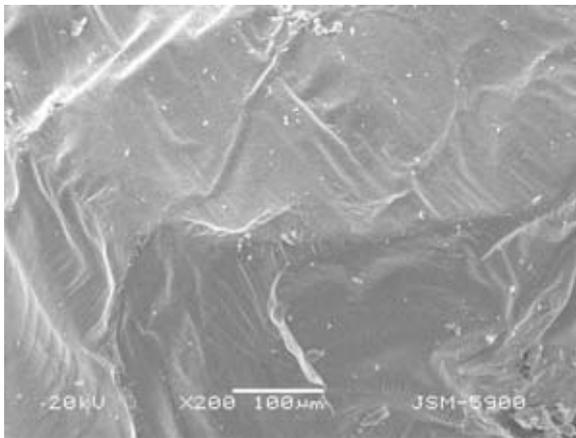
- 약전리 플라즈마를 이용하여 고온으로 하기 쉽다.
- 플라즈마 프레임의 복사와 슬래그부 joule 열 및 슬래그층의 대류에 의해 피용해물을 고온으로 용융한다. 이 때문에 전처리의 간소화 및 저비등점 중금속의 휘발 분리가 쉽다.
- 슬래그/금속 층을 분리하여 재자원화하기 쉽다.
- 전극은, 금속을 사용하고 있어 수명은 매우 길고, 안정

Table 1. Amount emissions of MSWI ash(1999)

구분	비중 (ton/m <sup>3</sup> )	발열량 (Kcal/kg)	삼성분(%)		
			수분	가연분	회분
평균	0.4	1,449	54	34	12



(a) Non-treatment



(b) Heat-treatment

Fig. 3. SEM analysis of melting slag.

된 운전을 할 수 있다.

용융슬래그는 불순물을 제거하기 위하여 초 순수한 증류수로 수차례 세척하여 105℃에서 24시간 건조한 후 성분분석(XRF)을 실시하였으며, 유효입경을 알아보고자 체가름실험, pH(Orion 250A) 및 KS F 2504 방법에 따라 비중 및 흡수율 실험을 실시하였다. 그 결과를 Table 2 ~ 3, Fig. 1에 나타내었고, 용융슬래그의 흡착 특성에 대한 고찰로서 활성탄(대립 입상활성탄; Mesh 12\*30)을 사용하여 비교 분석하였으며, 활성탄의 주요 특성은 Table 4에 나타내었다. 실험에 사용하기 전에 먼저 초 순수한 증류수를 사용하여 5회 세척한 후 105℃ 건조로에서 24시간 건조하여 완전히 건조된 상태에서 흡착실험 등에 사용하였다.

Table 2. Chemical components of melting slag

	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	etc.	Total
M. slag	3.68	2.92	15.6	41.3	1.92	0.82	22.3	1.37	0.29	4.90	4.70	100

Table 3. Physical characteristics of melting slag (Unit:%)

Items	Type	A. specific gravity	specific gravity	absorption factor	pH	
					Before	After
melting slag		2.54	2.47	1.2	9.2~9.5	10.8~11.2

Table 4. Physico characteristics of A. carbon

	Volume(m <sup>3</sup> /g)	Average Pore Diameter(nm)	Surface area(m <sup>2</sup> /g)
A. Carbon	0.349	2,397	582.0

## 2.2. 용융슬래그의 전처리

용융슬래그는 비결정질의 유리화된 상태의 모래 알갱이와 같은 형태를 띠고 있어 그 상태로는 흡착제로서의 기능을 하기에는 무리가 따른다. 따라서 보다 큰 흡착능과 구조적, 환경적 안정성을 확보하기 위한 전처리가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 전처리 방법은 1000℃에서 3시간 열처리 후 -5℃/min 속도로 서냉시킨 물리적 방법을 사용하였다. 용융슬래그를 흡착제로 사용한 경우가 없기 때문에 전처리 방법 또한 보고된바 없는 것으로 판단되어 비결정상태의 용융슬래그를 결정화 시킬 수 있는 열처리 방법을 사용하였다(유 등, 2003). 비결정질의 용융슬래그를 결정화 할 경우 강도 증진과 흡착능 및 환경안정성 등이 향상될 것으로 판단된다.

## 2.3. 실험방법

### 2.3.1. 중금속 용출실험

중금속 용출실험은 KSLT(김 등, 2004) 법과, TCLP 법을 사용하여 분석하였다. 분석항목은 Cu, Zn, As, Cd, Pb, Cr으로 하였으며, 세부 내용은 Table 5에 나타내었다.

### 2.3.2. 중금속 흡착평형 실험

본 연구에서는 0.3~0.6mm 크기의 용융슬래그를 대상으로 하여 20℃로 유지되는 교반형 항온수조에서 수행하였으며, 대상 중금속은 Cu, Pb, Zn(Standard solution, Showa, Japan)으로 하고 그 수용액의 pH는 3차례 샘플링한 실제 우수의 pH 범위가 6.8~7.2인 것을 감안하여 0.1mol의 NaOH를 사용하여 7로 조정하였다. 전처리 전·후의 용융슬래그 및 활성탄을 충전한 50ml tube(15ea, 3set)를 준비하였고 tube는 각각 5분 ~ 5시간까지 동일한 조건에서 진탕한 후 각각의 접촉시간을 거친 교반용액은 원심분리기(Hanil MF550)를 이용하여 3,000RPM에서 15분

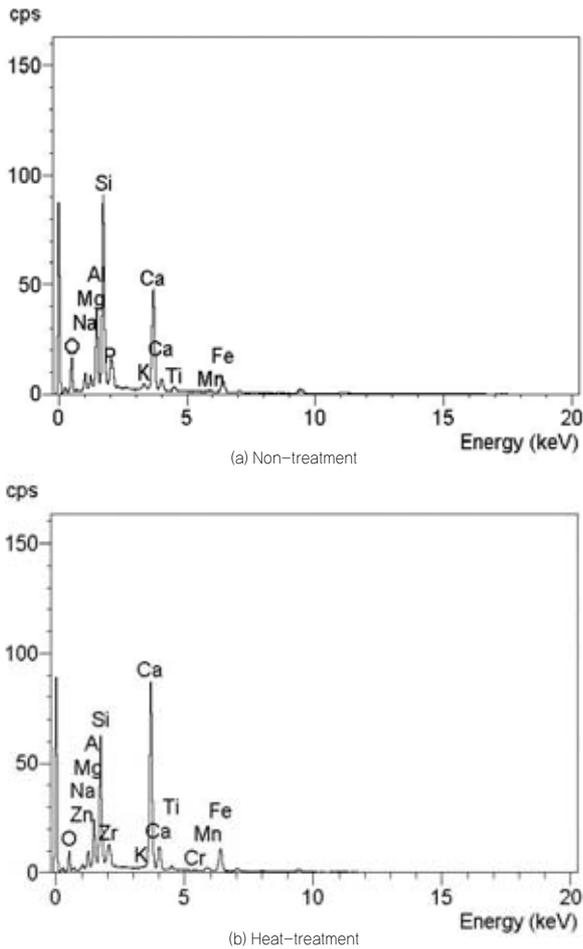


Fig. 4. EDX analysis of melting slag.

간 원심분리한 후 상정액을 취하여 ICP(SHIMADZU, ICPS-7500)로 분석하였다. 진탕시간은 예비실험을 통하여 결정되었으며, 이러한 실험방법은 통상의 isotherm test 와 비교하여 동일한 메커니즘으로 흡착특성을 파악하기에 무리가 없는 것으로 판단된다.

### 2.3.3. 고정층 Column실험

외경 2cm, 길이가 20cm인 Column을 제작하여 실험을 수행하였다. 중금속 흡착실험을 위한 다양한 중금속 수용액을 제조하여 준비한 후에 정밀한 정량펌프를 사용하여 유속 및 pH를 다양하게 변화시켜가면서 유입시킨 후 그 유출액을 원심분리기를 이용하여 3,000RPM에서 15분간 원심분리한 후 상정액을 취하여 ICP로 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 전처리 전·후의 물리적 특성 분석결과

용융슬래그의 흡착능을 향상시키고, 구조적, 환경적 안정

성을 향상시키기 위한 방법으로 1000℃에서 3시간 가열한 후 -5℃/min의 속도로 서냉시켰다. Fig. 2는 전처리 전·후의 용융슬래그 X선 회절분석결과이다. 분석결과 전처리 전의 용융슬래그는 결정상이 관찰되지 않았으며, 전형적인 유리질 패턴이었고, 전처리한 용융슬래그는 많은 결정상이 생성되었으며, peak의 세기가 두드러지게 향상되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 전처리한 용융슬래그의 패턴을 분석한 결과 anorthite(CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SiO<sub>2</sub>)가 주된 광물상으로 존재하고 있음을 확인하였다.

Fig. 3은 주사전자현미경(SEM)을 이용한 입자표면의 관찰 결과를 보여주고 있다. 전처리 전 용융슬래그의 입자표면은 매끈한 형태를 띠고 있었으며, 전처리한 용융슬래그의 입자표면에는 결정화가 진행됨에 따른 변화가 관찰되었다. 유등(2003)의 연구결과에 따르면 결정화가 진행됨에 원추 모양의 침상 혹은 구형의 결정상들이 생성된 것을 확인하였는데 이로 인한 결과로 입자 표면에 많은 조직이 생성된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 전처리 전·후 용융슬래그의 EDX 분석결과를 보여주고 있다. 분석결과 전처리 전의 용융슬래그는 Si가 제1성분으로 Al, Ca 3성분이 주를 이루고 있는 것으로 확인되었다. 또한 전처리한 용융슬래그는 Ca상이 성장하여 제1성분으로 나타났으며 Si, Al 순으로 분석되어 anorthite 상이 소량 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 분석결과는 XRD 분석결과와 일치하는 것으로 나타났다. 또한, Ca상의 성장으로 인하여 pH범위가 전처리 전 9.2~9.5에서 전처리 후 10.8~11.2로 분석되어 열처리 조건에서 알칼리도가 증가한 것으로 판단된다. 이러한 결과로 미루어 열처리한 용융슬래그를 흡착제로 활용할 경우 흡착효과 뿐만 아니라 응집효과 및 산성조건의 초기우수를 중화할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. 중금속 용출실험결과

용융슬래그는 폐기물에서 출발한 원료이기 때문에 소각재에 다량으로 함유되어 있는 중금속의 용출에 대한 가능성이 높다 하겠다. 따라서 환경적 안정성이 입증되어야 한다.

Table 5. Method of heavy metal extraction test

Method	KSLT	TCLP
Condition		
Liquid solution(pH)	HCl (pH:5.8~6.3)	Acetic acid (pH:2.88±0.05)
Ratio of L/S	10	20
Size of sample	0.5~5mm	ϕ9.5mm
Temperature	Room temp.	22.3±3
Agitation apparatus	Speed:200rpm Shaking stroke:4~5cm	Speed: 30rpm Rotary Extraction Device
Leaching time	6	18
Filter size	1μm GFF	0.6~0.8μm GFF

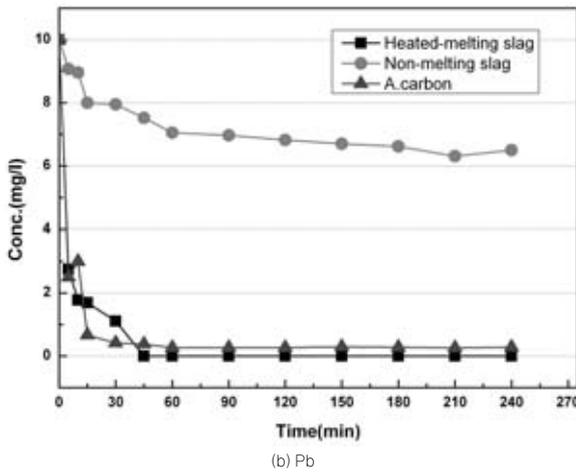
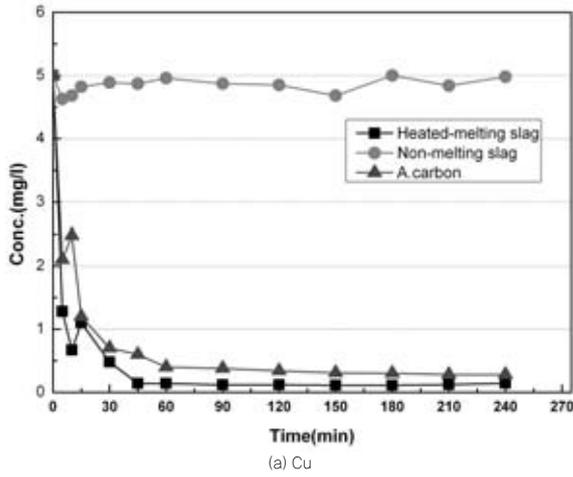


Fig. 5. Adsorption capacity of Heavy metals on batch experiment of melting slag.

본 연구에서는 환경적 안정성에 대한 고찰로서 중금속 용출 실험을 전처리 전·후로 구분하여 KSLT와 TCLP 2가지의 방법으로 수행하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

전체적으로 KSLT에 비하여 TCLP에서의 용출량이 높게 나타났는데, 이는 용출 용매의 pH에 기인한 것으로 판단된다. KSLT의 경우 용매의 pH가 5.8~6.3인데 비해 TCLP는 초기 pH가  $2.88 \pm 0.05$ 의 산성을 띠는데, Pb 등 중금속은 양쪽성을 가져 중성보다는 산성이나 알칼리성의 용매에서 높은 용출농도를 보이는 것으로 알려져 있다. 소각재를 용융하여 슬래그화하면 다이옥신과 같은 화합물질은 분해되고, 납 등과 같은 유해한 중금속은 분리되거나 혹은 용융슬래그 내의 유리질과 일체화되어 용출되지 않는다. 용융슬래그의 구조는 기본적으로 실리카 유리의 성질과 유사하여  $\text{SiO}_4^{4-}$ 가 망목 형성 이온으로 각각 4개의 O원자로 연결된 3차원적인 망목구조로 되어 있고, 슬래그 중 분리되지 않은 중금속들은 이러한 망목 구조 안에 이온의 형태로 결합되어 있으며 이러한 망목수식 이온이 용출되기 위해서는 주위의 유리구조로

부터 용출되어야 하는데, 일반적으로 유리구조의 용출 속도가 상당히 느리기 때문에 실제로 망목수식 이온은 거의 검출되지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 소각재를 용융 슬래그화하면 중금속의 용출농도는 급격히 감소하게 되어 소각재의 슬래그화는 매우 뛰어난 중금속의 안정화 및 고정화 방안으로 평가받고 있다(유 등, 2003). 분석결과에 따르면 KSLT, TCLP방법 모두 용출허용기준치 대비하여 불검출되었거나 매우 낮게 측정되었으며, 전처리한 용융슬래그가 미량이나마 전처리를 하지 않은 용융슬래그에 비하여 용출량이 감소되었다. 이는 용융에 의한 중금속의 고정효과가 크게 작용하였으며(최 등, 2005), 전처리한 경우 용융슬래그의 망목구조 및 내부 밀도가 증가하여 중금속 용출억제에 효과적으로 작용한 것으로 판단된다.

### 3.3. 중금속 흡착평형 실험 결과

용융슬래그를 흡착제로 활용하기 위하여 전처리 전·후 용융슬래그의 중금속 흡착평형 실험을 수행하였으며, 여러 분야의 분리공정에서 폭넓게 사용하고 있는 활성탄과의 비교실험을 통하여 흡착특성을 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Cu의 흡착 실험 결과 전처리를 하지 않은 용융슬래그의 흡착량은 큰 변화를 보이지 않았으며, 반응시간 5분에서 약간의 흡착을 보이다가 30분 이후 주입농도와 거의 비슷한 농도로 나타났다. 반면, 전처리한 용융슬래그의 흡착량은 반응시간 5분 이후 급격히 증가하였으며, 30분 이후에는 평형 상태에 도달한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 평형에 도달한 상태에서의 중금속 흡착량은 주입농도 대비 약 97.6%로서 매우 큰 흡착능을 보였다. 이러한 결과는 활성탄과 비교하여 볼 때 비슷한 경향을 보였으며, 평형에 도달한 상태에서의 흡착량은 오히려 활성탄을 능가하는 것으로 분석되었다.

Pb의 흡착 실험 결과 Cu의 흡착 실험 결과와 비슷한 경향을 보였다. 전처리를 하지 않은 용융슬래그의 흡착 특성을 보면 반응시간에 따라 흡착량이 소량 증가하였으며, 60분 이후 평형상태에 도달한 것으로 분석되었다. 그러나 평형상태에 도달하였을 때의 흡착량은 주입농도 대비 약 30%로서 흡착제로서의 기능을 할 수 없을 것으로 판단된다. 반면, 전

Table 5. Result in heavy metal extraction test of melting slag

(Unit: ppm)

Kind Elements	KSLT			TCLP		
	Non-treatment	Heat-treatment	Standard	Non-treatment	Heat-treatment	Standard
Cu	0.06	0.05	3.0	0.08	ND	-
Pb	0.01	ND	3.0	0.60	ND	5.0
As	ND	ND	1.5	0.80	0.06	5.0
Cd	ND	ND	0.3	ND	ND	1.0
Cr	0.15	ND	5.0	0.46	ND	5.0

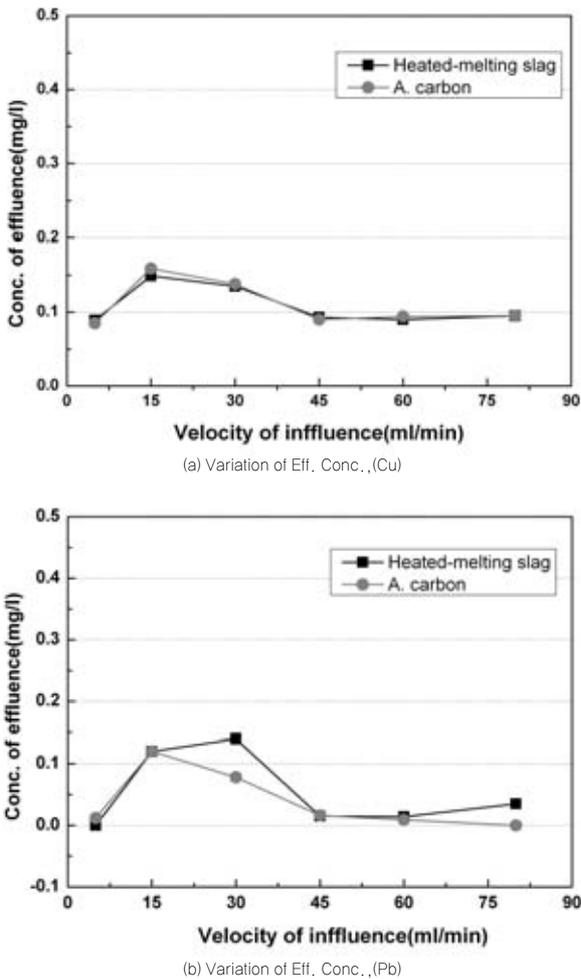


Fig. 6. Analysis of heavy metals column test.

처리한 용융슬래그의 흡착량은 반응시간 5분 이후 급격히 증가하였으며, 45분 이후부터 반응시간 5시간까지는 불 검출되었다. 이는 Cu의 흡착 실험 결과와 매우 유사한 패턴을 보인 것으로 분석되어 전처리한 상태의 용융슬래그의 다른 중금속 흡착능 또한 뛰어날 것으로 판단된다. 용융슬래그를 초기 우수처리용 여재로서 활용할 경우 흡착평형상태에 도달하는 시간이 매우 중요하다. 본 연구의 결과에 따라 용융슬래그의 흡착평형상태에 도달하는 시간은 15~30분으로서 활성탄과 비교하여 뒤떨어지지 않았으며, 흡착량에 대해서는 오히려 활성탄을 능가하는 것으로 분석되어 열처리 방법이 결정상을 생성하여 강도 증진 및 환경안정성을 향상시킬 뿐만 아니라 흡착능 향상에도 효과가 있는 것으로 판단된다.

### 3.4. 고정층 Column 실험 결과

외경 2cm, 높이 20cm의 고정층 Column에 전처리한 용융슬래그를 충전한 뒤 유입속도, pH를 다양하게 변화시켜 중금속 흡착실험을 수행하였다. 또한, 활성탄을 사용하여 같

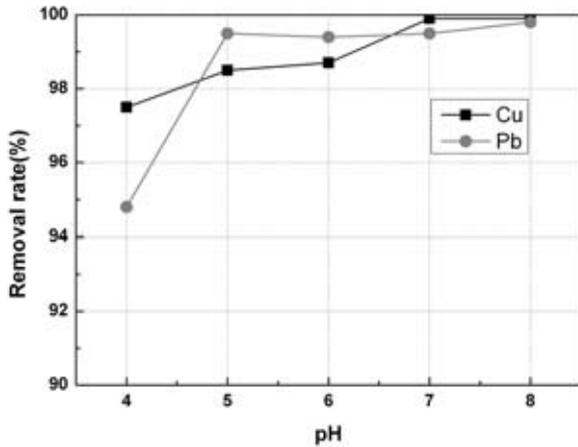
은 조건에서 동일한 실험을 수행하여 비교 분석하였다. 대상 중금속은 Cu(5ppm), Pb(3ppm), Cd(1ppm), Zn(1ppm) 으로 하였으며, 유입속도는 각각 5, 15, 30, 45, 60, 80ml/min, pH는 4~8의 범위로 조정하였다.

실험결과 Cd, Zn의 경우 유입농도가 낮아서 모든 조건에서 유출수의 농도가 검출한계를 벗어나 검출되지 않았다. 따라서 Cu, Pb의 결과를 이용하여 다양한 조건에서의 흡착특성을 분석하였다.

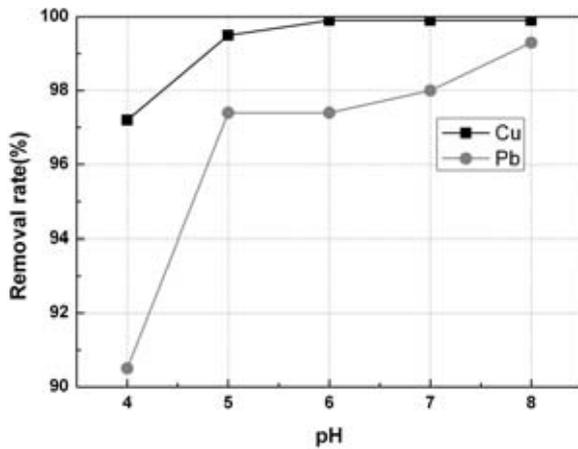
Fig. 6에 Cu와 Pb의 유입속도에 따른 유출수의 농도변화를 나타내었다. 유입속도가 증가할수록 유출수의 농도역시 증가할 것으로 기대하였으나 유입속도 5ml/min 일 때의 유출농도가 가장 낮았으며 15ml/min일 때 가장 높게 분석되었다. 이는 유입속도에 따라 중금속 수용액을 제조하였는데 제조시 발생한 오차에 의한 결과로 판단된다. 활성탄과의 비교실험 결과도 이와 비슷한 결과로 나타나 흡착특성에 따른 결과라고 보기는 어려우며 실험상의 오차가 작용한 것으로 판단된다. 유입수의 농도와 유출수 농도와의 관계에 의한 전처리한 용융슬래그와 활성탄의 중금속 제거율은 유입속도 5 ml/min일 때 Cu의 경우 각각 97.8%, 98.0%, Pb는 각각 99.9%, 99.6%로서 Cu의 경우 활성탄이 약간 우세하나 거의 같은 제거율을 보였으며, Pb의 경우도 Cu의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 유입속도 80ml/min일 때 Cu의 경우 96.4%로 제거율이 동일한 것으로 분석되었으며, Pb의 경우 각각 95.3%, 99.9%로 분석되었다. 유입속도가 증가할수록 제거율은 미소 감소하였으나, 큰 변화는 없어 향후 흡착제로 활용할 경우 유량변동에 대한 안정적인 처리 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 다양한 pH에서의 제거율 변화를 나타내었다. 실험조건은 유입속도 30ml/min, 대상 중금속은 Cu(5ppm), Pb(3ppm), Cd(1ppm)으로 하였으며, 활성탄에 대한 전처리한 용융슬래그의 충전율을 각각 70% 와 50%로 조정하면서 실험을 수행하였다.

Koon 과 Kaufman(Koon and Kaufman, 1975)은 제올라이트의 암모늄이온의 흡착이 pH 6인 경우에 가장 좋다는 결과를 얻었고, pH가 4~8 범위에서 최적의 이온교환이 일어난다고 보고되고 있다. 또한, 이 등은(2003) 천연제올라이트의 암모늄이온의 흡착은 pH가 증가할수록 흡착량 또한 증가한다는 결과를 얻었다. 분석결과 Cd은 모든 조건에서 검출한계 이하로 분석되어 불 검출되었다. 따라서 Cu와 Pb의 결과를 사용하여 pH변화에 따른 흡착특성을 분석하였다. 충전율 75%일때의 pH 변화에 따른 제거율은 pH가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. pH가 4일 경우 Cu와 Pb의 제거율은 각각 97.5%, 94.8%로 가장 낮게 나타났으며, pH가 8일 때 각각 99.9%, 99.8%로 가장 높게 측정되었다. 충전율 50% 역시 pH 4일 때 제거율은 각각 97.2%, 90.5%



(a) Packing volume rate of 75%



(b) Packing volume rate of 50%

Fig. 7. Effect of pH for the removal of heavy metals.

로 가장 낮게 측정되었고 pH가 증가할수록 제거율 또한 증가하는 경향을 보였다. 특히 납의 경우 산성조건(pH 4)일 경우 제거율이 크게 감소되었으나, pH 8일 때 제거율 99.3%로 증가하였다. pH가 산성조건보다 중성이나 중성 부근에서의 흡착율이 더 높게 분석되어 기존의 연구와 유사한 경향을 보였다. 특히 Pb는 Cu에 비하여 pH의 영향을 더 크게 받는 것으로 분석되었다. 그러나 일반적인 경우 우수의 pH가 4 미만으로 떨어질 경우는 없는 것으로 보고 이를 제외하면 전처리한 용융슬래그는 pH 변화에 대하여 안정적인 처리 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

소각재 용융슬래그를 초기우수의 수질제어를 위한 여과 장치의 여재로서 활용하기 위한 방법으로 중금속 용출실험을 통하여 환경안정성을 검증하였고, 전처리를 통하여 환경안정성을 향상 시키고, 흡착제로서의 기능을 향상시킬 수 있

는 가능성을 고찰하였으며, 전처리 전·후 용융슬래그의 흡착특성을 중금속 흡착평형 실험 및 고정층 Column 실험을 통하여 분석하였고, 이를 활성탄과의 비교실험을 통하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

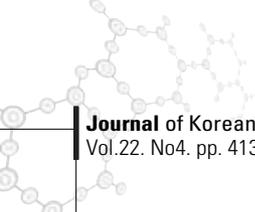
1. 중금속 용출실험결과 KSLT에 비하여 TCLP의 용출량이 높게 나타났으나, 용출허용기준에 비하여 매우 낮거나 불검출 되었으며, 또한 전처리한 용융슬래그의 용출량이 전처리를 하지 않은 용융슬래그에 비하여 낮게 측정되어 전처리한 용융슬래그의 환경안정성이 증가한 것으로 분석되었다. 따라서 용융슬래그를 재활용하는데 문제는 없을 것으로 판단된다.
2. 중금속 흡착평형 실험 결과 전처리를 하지 않은 용융슬래그에 비하여 전처리한 용융슬래그는 흡착평형에 도달하는 시간이 크게 단축되었으며, 또한 흡착량이 크게 증가되었다. 활성탄과의 비교실험 결과 흡착평형에 도달하는 시간과 최대 흡착량이 거의 비슷하거나 능가하는 것으로 나타났다.
3. 고정층 Column 실험 결과 유입속도가 증가함에 따라 유출수의 농도가 미량 증가하였으나, 큰 변화는 없었으며 활성탄과의 비교실험 결과 거의 비슷한 경향을 보여 향후 초기우수의 수질제어를 위한 여재로서 활용할 경우 유량변동에 대한 안정적인 처리효율을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
4. pH 변동에 따른 제거율 변화를 분석한 결과 pH4에서 최소, pH8에서 최대인 것으로 나타나 pH가 증가함에 따라 제거율도 증가하는 경향을 보였다. 또한, Cu에 비하여 Pb의 pH의 변화에 따른 영향이 크게 작용하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서의 결과로 미루어 전처리한 용융슬래그는 초기 우수처리에서 여과에 의한 처리장치의 여재로서 뿐만 아니라 다양한 수처리 분야에 폭넓게 이용할 수 있을 것으로 판단된다.



#### 감사의 글

본 연구는 산학협력사업의 일환으로 중소기업청의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.



## 참고문헌

1. 김미란, 성호진, 장정국, 이제근 (1998) 선회용융로에서 용제주입에 따른 산업폐기물 소각잔류물의 용융고형화 특성, *대한환경공학회지*, 20(9), pp.1331-1340
2. Wunsch, P., Girellinger, C., Bienida, D., and Kettrup, A. (1996) Investigation of the binding of heavy metals in thermally treated residues from waste incineration, *Chemosphere*, 32(11), pp 2211-2218
3. 유영석, 신현철, 김범석, 최재일, 지재성 (2003) 소각재 용융슬래그의 결정화에 의한 고품질화 특성, *한국폐기물학회지*, 20(7), pp 717-723
4. 김삼권, 권영식, 김민호, 김승호, 김인배, 김정대, 배광수, 오세천, 이의상, 이호식, 정준오, 황재석 (2004) *폐기물 공정시험방법주해*, pp. 32-37, 신광문화사
5. 장경수, 강병희 (2002) 카올리나이트의 납 흡착 특성, *한국지하수토양환경학회지*, 7(4), 24-30 한국 상하수도 협회(2004), "상수도 시설 기준", 건설도서, 서울
6. 유영석 (2003) *소각재 용융슬래그의 건설자재 활용기술 개발 연구보고서*, 한국건설기술연구원, pp 88-94
7. 최용균 (2005) *소각재 용융슬래그 활용기술의 경제성 분석*, 인하대학교 대학원, 석사학위논문, pp 23-24
8. Koon, J. H., Kaufman, W. J. (1975) Ammonia removal from municipal waste waters, *J. WPCF*, 47(82), pp 64-68
9. 이현석 (2003) *천연 제올라이트를 이용한 축산폐수의 암모늄이온 제거에 관한 연구*, 전북대학교 대학원, 박사학위논문, pp 75-76