

## 플라즈마를 이용한 도시 쓰레기 소각재 용융처리 기술 Slagging treatment of MSW incineration ash by plasma system

박현서, 지규일, 장준섭, 전석구, 배희주, 김형진, 이시창, 주성준, 신범수, 조기현

삼성중공업(주) 중앙연구소 에너지환경센터

### ABSTRACT

A plasma melting system to vitrify fly ash from MSW(Municipal Solid Waste) incinerator has been operated in SHI(Samsung Heavy Industries) since 1996. Waste feeding rate was 200kg/hr. with maximum working power of 500kW. Because of high melting temperature of fly ash, bottom ash was used as an additive to decrease melting temperature. Data analysis for discharged slag shows volume reduction up to 30% and no leaching of heavy metals such as Pb, Cd, Cr which were an obstacle for landfill and recycle. Atmospheric pollution gas like nitrogen oxides, carbon monoxide, and PCDD/PCDF were restrained below the regulatory limit.

---

**key word** : Plasma, MSW Ash, Dioxine, Melting process, Slag, Heavy metal, Basicity.

### I. 서론

도시쓰레기 소각로의 최대 현안문제는 다이옥신 배출문제와 아울러 소각량의 15 - 20%에 이르는 소각재의 적절한 처리이다. 지금까지 소각재는 가장 경제적이면서도 처리하기 간편한 방법인 매립에 의하여 주로 처리되어 왔다. 그러나 매립은 매립지 부족이라는 근본적 문제 외에 침출수에 의한 토양 및 지하수 오염이라는 2차오염을 유발시킨다. 특히 도시쓰레기 소각재중 비산재에는 고농도의 유해 중금속과 다이옥신과 퓨란 같은 인체에 극히 유해한 물질이 잔존하고 있어 일반 매립시킬 수 없는 지정폐기물로 되어 있다. 현재 매립조건을 맞추기 위하여 중금속 용출문제에 대해서는 불완전하지만 시멘트 고형화와 킬레이트 약제 처리법 및 산 추출법과 같은 방법이 사용되고있다. 그러나 다이옥신과 같이 열화학적으로 안정한 유기물에 대해서는 장기적인 용출에 대한 안전한 처리방법이 되지 못한다. 도시쓰레기 소각재에 대해 가장 이상적인 처리방향은 소각재를 부피감량과 함께 중금속 및 다이옥신의 용출의 위험이 없는 재활용 품으로 전환시키는 것이다. 최근들어 소각재 용융 슬래그화 기술이 이와 같은 조건을 만족시키는 기술로 대두되었다. 본 고에서는 용융 슬래그 기술중 하나인 플라즈마식 도시쓰레기 소각재 용융슬래그화 기술에 대해 소개한다.

## II. 플라즈마 용융설비의 구성 및 처리원리

### 1. 플라즈마 용융설비의 구성

Fig. 1은 500kW급 플라즈마 용융로의 개요도이다. 설비는 크게 플라즈마 발생장치, 용융로, 2차연소로, 배가스 처리설비로 구성되어 있다. 플라즈마 발생장치는 500kW급 용량 전원설비와 이송형 플라즈마 토치를 사용하였으며 플라즈마가스는 공기를 사용하였다. 용융로 상단에 플라즈마 토치가 장착되어 있으며 내화물은 MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>과 chamotte 내화물로 구성되어 있다. 용융로와 2차연소로는 일체형으로 구성되어 있으며 후처리설비는 Quenching tower, Bag filter 그리고 Packed Tower로 구성되어 있다.

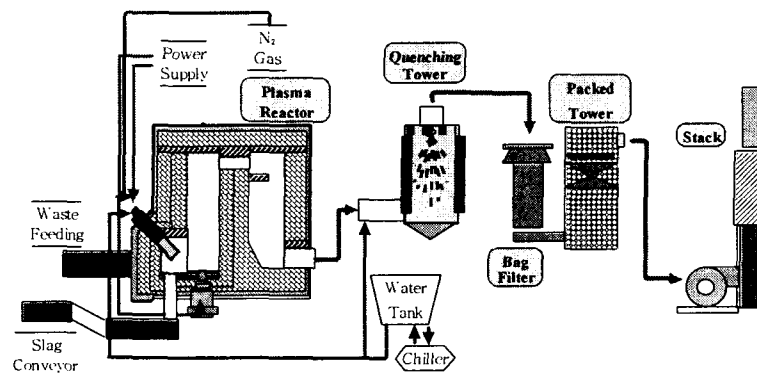


Fig. 1. Flow diagram of 500kW plasma pilot plant.

### 2. 처리원리

플라즈마는 전기적 방전에 의해 생성된 고온의 가스흐름으로 화염의 중심온도가 5,000℃ 이상되는 고온의 열원이다. 본 실험에서 사용되는 플라즈마 발생장치는 이송형(Transferred type)으로 전극의 음극은 플라즈마 토치에, 양극은 용융로 바닥에 위치하여 플라즈마 화염을 형성한다. 폐기물인 소각재가 용융로에 투입되면 소각재중 다이옥신과 같은 유기물은 플라즈마 열에 의해 완전 열분해 되어 무해화 되며, 중금속 등은 유리화된 용융 슬래그내에 안정화 된다. 결과적으로 용융에 의해 부피감량과 중금속이 안정화된 슬래그를 부산물로 얻게되며 슬래그는 골재 및 로반재등으로 재활용 가능하다.

## III. 도시쓰레기 소각재 처리실험

### 1. 소각재 특성

도시쓰레기 소각재중 비산재는 고농도의 중금속과 다이옥신이 농축된 특성이 있다. 이외에 용융공정에 직접적으로 영향을 미치는 인자로는 소각로 배가스중 산성가스(HCl, SO<sub>x</sub>) 처리방식이다. 최근 소각로 산성가스처리시스템은 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 사용하는 반건식배가스처리방식을 대부분 도입하고 있다. 따라서 발생 비산재는 CaO함량이 매우 높아지게 되며, 융점이 1,500℃ 가까이 상승하게된다. Table 1은 본 실험에 사용된 소각재의 조성을 나타낸다. 산성가스 처리가 반건식 시스템에 의해 이루어진 소각로의 비회로 융점과 관계가 깊은 염기도(CaO/SiO<sub>2</sub>)의 경우 바닥재는 0.34이고 비산재는 3.18이며, 비산재중 Total Cl과 SO<sub>3</sub>의 농도가 높게 나타난다.

Table 1. Composition of incineration ash.

항목	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	T-Fe	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	SO <sub>3</sub>	T-Cl
Bottom ash	13	38	9	4	7	5	1	10	0.5	1
Fly ash	35	11	4	7	2	6	4	0.01	5	10
항목	Zn	Cu	Hg	Cd	Pb	Cr <sup>6+</sup>	As	Dioxine(ng TEQ/g)		
Bottom ash	0.3	0.2	0.0001	0.0005	0.1	0.03	0.01	0.024		
Fly ash	0.1	0.05	0.001	0.005	0.6	0.05	0.05	0.446		

## 2. 용융실험

Heating microscope로 측정된 용점은 바닥재가 1,260℃이고 비산재는 1,482℃이다. 비산재 단독용융하기에는 용융온도가 너무 높으므로 용점을 낮추기 위하여 염기도(CaO/SiO<sub>2</sub>)가 낮은 바닥재를 비산재의 염기도 하강용 첨가제로 사용하였다. 용점과 염기도는 바닥재의 배합율이 클수록 낮아지는 경향이 있다. 본실험에서는 운전온도 1,450℃에서 용융이 가능한 바닥재와 비산재의 배합율을 3대7로 선정하여 용융하였다. 용융속도는 시간당 200kg이었다.

## 3. 배가스 제어실험

소각재 용융과정중 발생하는 배가스는 농축 중금속류 와 Cl 그리고 다이옥신을 함유한 다량 함유한 비회 특성상 배가스중 산성가스 와 중금속 염화물 농도가 높고 다량의 다이옥신을 함유한 배가스가 대기로 배출될 수 있는 문제가 있다. 용융비회 형태로 백필터에서 포집되는 용융비회 또한 대부분이 용융로 재투입이 불가능한 고농도의 중금속 염화물 형태임으로 용융비회의 발생량을 최소화하는 조업조건을 결정하는 것이 중요하다. 이러한 유해가스의 제어는 배가스 처리설비에서 최종적으로 제어되지만 설비의 배가스 처리설비규모를 줄이고 성능부담을 줄이기 위하여 프로세스 상에서 1차적으로 제어하는 공정실험을 하였다.

## IV. 결과 및 토의

### 1. 용융슬래그

Table 2 와 3은 배출된 슬래그의 조성과 중금속 용출량을 각각 나타낸 것이다. 슬래그의 염기도는 1.2이고 밀도는 2.65g/cm<sup>3</sup>이므로 건축자재용으로 활용할 수 있는 강도를 보유하고 있다. 용점은 1,350℃ 이었으며 슬래그의 겉보기 비중은 1.40g/cm<sup>3</sup>으로서 부피감량이 1/3 수준이었다. 슬래그의 중금속 용출시험에서 Pb 등 6개 성분이 용출되지 않았으므로, 재활용과 매립가능을 동시에 만족시켰다.

Table 2. Composition of slag.

성분	wt%	성분	wt%	성분	wt%	성분	wt%
CaO	29	Total Fe	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	MgO	8
SiO <sub>2</sub>	24	Na <sub>2</sub> O	11	K <sub>2</sub> O	4	CaO/SiO <sub>2</sub>	1.2

Table 3. Heavy metal elusion test of slag.

Element	Spec. (ppm)	Result (ppm)	Element	Spec. (ppm)	Result (ppm)
Pb	≤ 3	N.D.	Hg	≤ 0.005	N.D.
Cu	≤ 3	N.D.	Cd	≤ 0.3	N.D.
As	≤ 1.5	N.D.	Cr <sup>6+</sup>	≤ 1.5	N.D.

## 2. 배가스제어

용융과정중 발생하는 가스의 제어는 NO<sub>x</sub>, CO, 비산재, 산성가스 및 다이옥신에 대해 실행됐다. NO<sub>x</sub>는 플라즈마 가스가 공기인 이유로 다량 발생되지만 운전분위기를 조절함으로써 2차연소로 출구에서 50ppm 이하로 줄일 수 있었다. 용융비산재는 폐기물중 Fly Ash의 비율과 환원분위기 유도를 위해 주입되는 LNG의 투입량에 따라 증가하는 경향이 있었으나 5%이하로 제어가 가능하였다. 산성가스(HCl)의 경우 용융로 출구에서 800ppm정도로 고농도이었지만 배가스 처리설비 통과후 30ppm이하로 제어되었다. 다이옥신(Table 4)은 배가스 냉각장치 출구에서 미국 EPA의 규정에 의한 등속흡입방법(isokinetic sampling method)을 포함하고 있는 Method-23으로 채취된 결과 용융로와 quencher를 통과하는 과정에서 0.085ng TEQ/Nm<sup>3</sup>으로 환경규제치 이하로 나타났다.

Table 4. Emission Distribution of Dioxine and Furan Isomer

PCDDs/Fs	TEF	Quantity (pg)	Quantity (pg TEQ)	PCDDs/Fs	TEF	Quantity (pg)	Quantity (pg TEQ)
2,3,7,8-TCDD	1.0	ND	ND	1,2,3,7,8-PeCDF	0.05	71.5	3.6
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	20.3	10.2	2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	155.9	78.0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	TR	TR	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	460.2	46.0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	37.2	3.7	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	258.4	25.8
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	29.8	3.0	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	393.5	39.6
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	201.4	2.0	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	58.2	5.8
OCDD	0.001	410.8	0.4	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	2272	22.7
2,3,7,8-TCDF	0.1	976.9	97.7	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	538	5.4
OCDF	0.001	4222.6	4.2	Total		10106.7	348.1

- \* ND means not detected
- \* TR means trace which too small to quantify, but qualifiable
- \* Quantity (pg TEQ) = Quantity(pg) x TEF
- \* Quantity (pg TEQ)/sampling volume = 0.085 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>

## 3. 토의사항

비산재의 용융처리는 유해한 폐기물을 무해한 자원으로 재활용 하게 한다는 면에서 기존 처리법에 대한 장점이 있다. 본 실험에서 배출된 슬래그의 용출Test 결과 중금속의 용출이 전혀 없었으며 용융과정의 배기가스도 환경기준치를 만족시키는 것으로 나타난다. 각 성분의 이행율에 있어서도 Ca, Si, Al, Mg 등 산화물 형태로 존재하는 원소는 대부분 슬래그로 이행되었고, 가연분은 배가스로 이행되었다. 그러나 지금까지 비회처리 공정에 있어서 중금속류와 산성가스성분의 이행거동은 설비의 내화물수명, 용융슬래그의 용점제어 및 산성가스 발생억제측면에 유리한 방법, 즉 이들 성분을 슬래그내로 유도하는 공정을 택하고 있었다. 그러나 슬래그의 다양한 재활용 측면에서 산성성분 특히 Cl성분의 슬래그내 함량이 재활용을 위한 슬래그 재질과 중금속의 용출특성에 미치는 영향을 고려하여 이들 성분의 슬래그내로의 이행율을 결정하는 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. R. BENOCCHI, G. BONIZZONI and E. SINDONI, *Thermal plasma for Hazardous Waste Treatment*, World Scientific, London, 1955.
2. *Waste Stabilisation and Environment*, Lyon, 1999