

폐기물 투입방법에 따른 플라즈마 토치 용융로의 용융특성

Melting Characteristics of a Plasma Torch Melter according  
to the Waste Feeding Method

김태욱, 최종락, 박승철, 류창수, 박종길, 황태원, 신상운

원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

회분식 플라즈마 용융시스템을 이용하여 비가연성폐기물의 연속투입 용융시험을 수행하였다. 이를 이용하여 열전달모델의 수립 및 이의 검증을 수행하였으며, 폐기물 투입 및 용융방법에 따른 슬래그고화체 특성, 배기가스 및 비산먼지 특성, Cs 등 방사성동위원소의 휘발 특성, 슬래그고화체 침출특성 등에 대한 분석을 수행하였다.

열전달모델은 플라즈마 토치로 공급되는 전기에너지가 플라즈마 발생과정에서 토치 내부에서 흡수되는 에너지와 플라즈마 복사를 통하여 용융로로 공급되는 에너지, 배기가스 손실에너지, 시료의 용융에너지, 도가니 및 용융로의 가열에너지 등에 대하여 수립되었으며, 검증실험에 사용된 시료는 콘크리트와 토양이었다. 실험에서 용융로 내부에 별도의 도가니를 설치하여 폐기물을 1kg 또는 0.5kg 씩 열전달모델에서 계산된 주기에 따라 투입하였다. 용융시험 결과 용융로가 충분히 가열되기 전까지는 수립된 열전달모델이 맞는 것으로 나타났다.

에너지 수지는 플라즈마 토치 전기에너지가 128kW일 경우 플라즈마 발생시 손실에너지가 27kW, 냉각수 흡수에너지가 0~36kW, 배기가스 손실에너지가 5~8kW, 내부 도가니 및 용융로 가열에너지가 82~43kW, 시료의 용융에너지가 14kW로 나타났다.

Abstract

By using a batch type plasma torch melting system, continuous feeding and melting tests of non-combustible waste were executed. Using the results, the establishment of a heat transfer model and its verification were executed; the characteristics of the molten slag, exhaust gas, fly dust, volatilization of Cs, and leaching of slag were analyzed.

In order to establish the heat transfer mode, the followings were considered; the electrical energy supplied to the plasma torch, the absorbed energy to the plasma torch for generating the plasma gas, the absorbed energy to the cooling water of the plasma torch, the energy supplied to the melter from the plasma gas by radiant heat, the energy loss through the exhaust gas, the waste melting energy, and the heating energy of an inner crucible and the melter. The concrete and soil were melted for the verification of the model. The waste was fed through waste feeder by the amount of 0.5kg or 1kg that was calculated by using the

model. The experiment for the verification resulted in that the model was fitted well until the melter was heated sufficiently.

If the electrical energy of 128kW were supplied to the plasma torch, energy balance of the plasma melting system was calculated with the model: the absorbed energy to the plasma torch for generating the plasma gas (27kW), the absorbed energy to the cooling water of the plasma torch (0~36kW), the energy loss through the exhaust gas (5~8kW), the waste melting energy (14kW), and the heating energy of an inner crucible and the melter (82~43kW).

## 1. 서론

플라즈마토치 용융시스템은 고온의 플라즈마를 이용하여 물질을 용융 또는 연소하여 처리하는 시스템으로 금속처리 공정, 폐기물처리 등의 산업분야에서 시작하여 다양한 목적으로 개발되어 왔다<sup>1)</sup>. 고온의 플라즈마를 이용하면 거의 모든 폐기물을 처리할 수 있는 장점이 있으며 유기물질, 금속류, 중금속이나 유해물질에 오염된 토양, 슬러지 등의 일반 폐기물의 처리 및 mixed waste, 고준위 방사성폐기물 뿐만 아니라 중·저준위 방사성폐기물의 처리에도 적용하여 처분에 적합한 형태로 안정화시킬 수 있다<sup>2)</sup>.

국내 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물은 소각 가능 여부에 따라 가연성과 비가연성으로 분류하고 있다. 현재 가연성폐기물은 유도저온용융로를 이용하여 소각처리 공정 없이 직접 유리화하여 처리하는 연구를 수행하고 있으며, 비가연성폐기물은 플라즈마 용융로를 이용하여 처리할 계획이다. 플라즈마토치를 이용하여 방사성폐기물을 용융하면 발생된 슬랙고화체의 내침출성 및 내화학성이 뛰어나며, 적절한 첨가물을 넣을 경우 유해 원소도 슬랙고화체 속에 고정시켜 환경에 안정된 형태로 변환시킬 수 있다<sup>3)4)</sup>.

플라즈마토치로 폐기물을 용융하는 상용 플라즈마 용융시스템을 개발하기 위해서는 폐기물의 투입 및 용융방법, 플라즈마 용융시 발생하는 배기가스 및 비산재의 농도와 조성 및 발생량, Cs 등 방사성동위원소의 휘발 특성, 슬랙고화체 침출특성에 대한 분석 등이 이루어져야 한다.

콘크리트, 토양 및 유리에 대한 질소가스를 사용한 회분식 플라즈마 용융시험의 결과에 따르면 배기가스에는 NO 가스 등의 질소산화물이 검출되나 질소산화물 이외의 황산화물 및 탄소산화물은 검출되지 않으며 NO 가스는 플라즈마 토치 유입구를 밀폐하여 막을 수 있는 것으로 나타났다<sup>5)</sup>, 4kg의 시료를 용융시간별로 시험한 결과에 따르면 20분간 용융할 경우에 용융 상태가 양호하고 비산재의 발생도 적으며, 용융 후 용융물 표면의 온도가 약 1,600°C~1,650°C 정도로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 미국 EPA가 제정한 슬랙고화체에 대한 TCLP 40CFR268에 따른 침출시험결과 모든 원소들이 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 회분식 플라즈마 용융시험의 결과를 이용하여 비가연성폐기물의 연속투입 용융시험을 수행하고, 이를 이용하여 열전달모델의 수립 및 이의 검증은 수행하였으며, 폐기물 투입 및 용융방법에 따른 슬랙고화체 특성, 배기가스 및 비산먼지 특성, Cs 등 방사성동위원소의 휘발 특성, 슬랙고화체 침출특성 등에 대한 분석을 수행하였다.

## 2. 실험

### 가. 실험장치

본 연구에서 사용된 플라즈마토치 용융로는 그림 1과 같다. 플라즈마 용융로는 조개형(Clamshell Type)의 자연 공기냉각 방식의 회분식 용융로이며, 실제로 용융 반응이 일어나는 도가니와 상부 덮개, 용융로 몸체 및 외부 강피로 구성된다. 도가니는 벽면을 통한 열손실을 줄이기 위해 소모성인 흑연(Clay Graphite) 도가니가 설치되어 있으며, 도가니 외부에는 철재 강피에 의해 보호되는 92%와 70% 알루미나( $Al_2O_3$ )의 2 중 내화물이 설치되어 있다. 또한 용융로 덮개와 용융로 몸체 사이에 단열성 및 열손실량이 적은 세라믹 섬유가 있어 밀봉을 유지할 수 있도록 되어 있다.

실험은 이러한 용융로 내부에 별도의 도가니를 설치하여 수행하였다. 별도의 도가니를 사용한 이유는 비가연성폐기물을 내부의 도가니에 투입하여 용융한 후 도가니를 꺼내어 생성된 슬랙고화체 특성을 파악하고 이를 이용하여 열전달모델의 수립 및 검증은 하기 위해서였다.

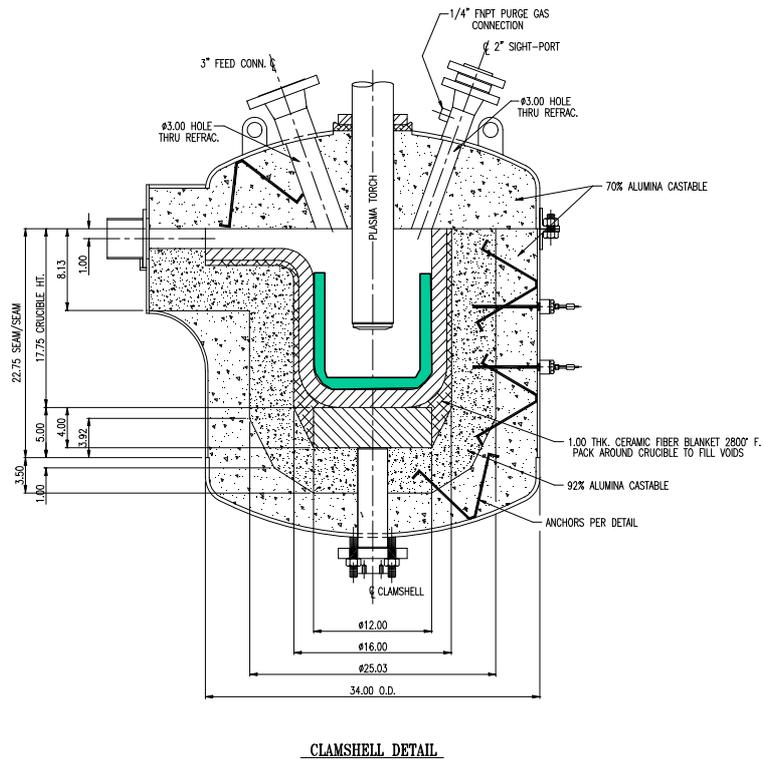


그림 1. 플라즈마토치 용융로

본 실험에 사용된 플라즈마 용융시스템의 배기장치는 그림 2와 같이 플라즈마 용융로, 배기가스 냉각기, 세라믹 필터, 배기 필터, 연돌 및 휴대용가스분석기(PGA; Portable Gas Analyzer)로 구성되었다. PGA는 플라즈마 용융로에서 발생하는 배기가스 중 일산화탄소, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>를 비교적 높은 농도 범위에서 측정하기 위하여 사용되었다.

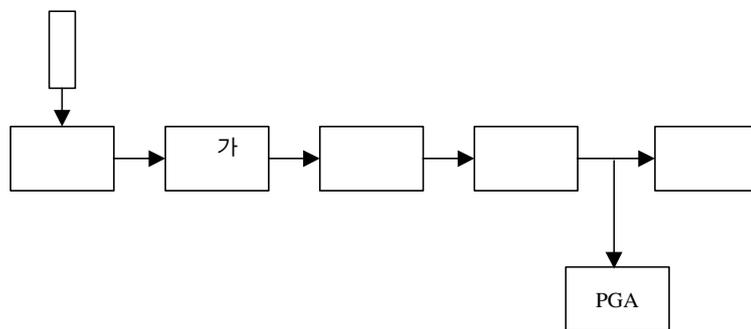


그림 2. 플라즈마 용융시스템 배기장치 흐름도

플라즈마토치는 미국 Callidus Technology사 제품의 PT-150C로 이행형과 비이행형의 운전이 가능하도록 되어있다. 플라즈마 토치는 매니플레이터에 고정되어 있고 상하좌우 원격조작이 가능하며 PLC (programable logic controller) 제어방식이다. 본 실험에서는 용융처리 대상물의 대다수가 비전도성 물질이므로 비이행형의 정전류 방식으로 운전하였다.

내부 도가니는 흑연(graphite)으로 만들어졌으며 두께는 2.5cm이고 내부 직경은 바닥부분이 13cm 상단부분이 21cm이며 높이는 22cm이다.

#### 나. 실험방법

사용된 시료는 콘크리트와 토양이었으며 콘크리트의 경우 5cm 이내의 크기로 부수어 각각 1kg 또는 0.5kg 씩 열전달모델에서 계산된 주기에 따라 투입되었으며, 방사성폐기물에 포함된 주요 방사성물질인 Cs<sup>137</sup>과 Co<sup>60</sup>의 고화체 포집률 및 휘발 특성을 조사하기 위하여 각 시료에 비방사성물질인 Cs과 Co를 시료 1kg당 각각 0.5g씩 첨가하였다.

용융물의 표면온도는 측정온도 범위가 600~3,000℃인 실리콘 광전관(silicon photocell)을 온도 검출소자로 사용한 비접촉식 방사온도계(모델 TR-630)를 사용하여 용융 후 측정하였다. 실험 내용은 표 1과 같다.

표 1. 플라즈마토치 용융로 용융시험 내용

시험 번호		CONT-01	CONT-02	CONT-03	CONT-04	CONT-05	CONT-06
시료	콘크리트	1kg	4kg	4kg	4kg	4kg	
	백열전구	3kg					
	토양						7kg
투입 방법	점화 전	1kg	1kg	0.5kg	1kg	도가니만 가열	도가니만 가열
	점화 후	6분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg	7분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg	7분 후 0.5kg 2분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg	10분 후 1kg 3분 후 1kg 3분 후 1kg	6분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg	4분 후 0.5kg 4분 후 0.5kg 2분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg 4분 후 1kg
	숙성시간	4분	4분	4분	3분	4분	4분
	총 용융시간	18분	19분	21분	19분	22분	34분

실험 후에는 폐기물 투입 및 용융방법에 따른 슬랙고화체의 용융상태를 평가하기 위하여 내부 도가니를 파괴하여 투입된 시료의 용융상태를 육안으로 관찰하고 주요원소(Cs, Co, Pb, Al, Ca, Fe, K, Na, Si)에 대한 조성을 분석하였다. 또한 시료, 내부 도가니, 고화체의 무게를 측정하여 비산먼지 휘발특성 및 열전달모델을 평가하였다. 또한 비산먼지에 대한 주요원소의 농도를 측정하여 주요원소의 휘발특성을 평가하였으며, 주요원소(Cs, Co, Ba, Ni, Pb, Sb, Zn, Cr)에 대한 침출특성도 평가하였다.

### 3. 열전달모델

실험을 통하여 수립된 열전달모델은 다음과 같다<sup>7)8)</sup>.

가. 가정

플라즈마 가스의 주된 열전달은 복사를 통하여 이루어진다. 초기에 용융로로 공급에너지는 에너지는 도가니 또는 용융물의 가열에 사용된다. 용융물의 온도가 1,650℃에 도달하면 용융물과 도가니 내부는 흑체(black body)가 되며, 용융물과 도가니 내부가 흑체가 되면 도가니와 용융물에 공급되는 플라즈마 에너지는 전량 도가니 밖으로 방사된다. 도가니 내부에 새로운 시료를 투입하면 용융물에 공급되는 플라즈마 에너지는 시료의 복사 단면적에 비례하여 시료에 흡수된다.

나. 단기 열전달(용융로 가열 전까지)

1) 플라즈마 토치냉각수 열손실 및 플라즈마 공급에너지

토치 평균출력이 128kW일 때의 플라즈마 토치냉각수 열손실 및 플라즈마 공급에너지는 표2 및 3과 같다.

표 2. 플라즈마 토치냉각수 열손실

경과시간	1	6	8	12	14	16	20
열손실(kW)	26.9	43.8	55.7	55.7	57.7	59.7	62.7

표 3. 플라즈마 공급에너지

경과시간	1	6	8	12	14	16	20	
에너지	(kW)	101	84	72	72	70	68	65
	(kJ/h)	363,600	302,400	259,200	259,200	252,000	244,800	234,000

냉각수 온도 차이가 변화하는 이유는 용융이 진행되면서 용융로 및 용융물의 온도가 상승함에 따라 용융로 및 용융물의 복사열이 토치 몸체에 전달되어 토치 몸체의 온도가 올라가기 때문이다. 플라즈마 토치의 공급에너지 : 플라즈마 토치의 공급에너지는 초기의 냉각수에 의한 열손실(토치가동 후 1분 이내)만을 고려했을 때의 363,600 kJ/h이며, 플라즈마 공급에너지가 시간에 따라 줄어드는 것은 용융물과 도가니의 온도가 높아지며 상대적으로 차가운 플라즈마 토치 몸체가 용융물의 복사에너지를 흡수함으로 발생하는 것으로 실제 플라즈마 공급에너지는 동일하다.

3) 배기가스 손실에너지

배기가스 온도는 초기 온도(3분 이내)가 709℃이고 20분 후가 1,042℃이며, 배기가스 손실에너지는 초기 손실에너지가 18,700 kJ/h (329 mol/h × 80 J/mol℃ × 709℃)이고 20분 후 손실에너지가 27,400 kJ/h (329 mol/h × 80 J/mol℃ × 1,042℃)이다.

4) 도가니 가열에 필요한 시간<sup>9)</sup>

도가니 가열에 필요한 에너지는 26,400 kJ (1 kJ/kg · ℃ x 1650℃ x 16 kg)이며, 초기 도가니 가열시 플라즈마 공급에너지는 312,000 kJ/h이다. 따라서 도가니 가열에 소요되는 시간은 5.1 min {(26,400 kJ / (312,000 kJ/h) × 60 min/h)이다.

5) 콘크리트 용융에 필요한 시간<sup>10)11)</sup>

콘크리트 용융에 필요한 에너지는 3,575 kJ/kg이다. 도가니 내의 온도가 1,650℃에 달해 열평형상태에 도달하면 차가운 플라즈마 토치는 도가니 내의 복사열을 흡수한다. 이때 플라즈마 토치의 복사에너지 흡수율은 다음과 같다<sup>12)</sup>.

$$dQ/dt = e \sigma A T^4 \text{ (Stefan Boltzmann law)}$$

, e : 방사율 (black body의 경우 e=1)

$\sigma$  : Stefan Boltzmann 상수 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ J/sec m}^2 \text{ T}^4$ )

$$dQ/dt = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J sec}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ T}^{-4} \times A \times (1923\text{K})^4$$

$$= 2790 \text{ MJ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

따라서 콘크리트 용융에 투입되는 플라즈마 공급에너지는 260,000 kJ/h (토치 가동 7분 후)이고, 도가니의 직경은 바닥이 18cm 상부가 22cm 시료 용융시 평균 반경이 19cm이므로 전체 콘크리트에 전달되는 복사에너지는 다음과 같다.

$$2790 \text{ MJ h}^{-1} \text{ m}^{-2} \times \pi \times (0.095\text{m})^2 \times 2 = 50,000 \text{ kJ/h}$$

따라서 콘크리트 용융에 필요한 시간은 4.3분 $\{(3,575 \text{ kJ/kg}) / (50,000 \text{ kJ/h}) \times 60 \text{ min/h}\}$ 이다.

다. 에너지 수지

플라즈마토치 용융로 내의 에너지 수지는 그림 2와 같다.

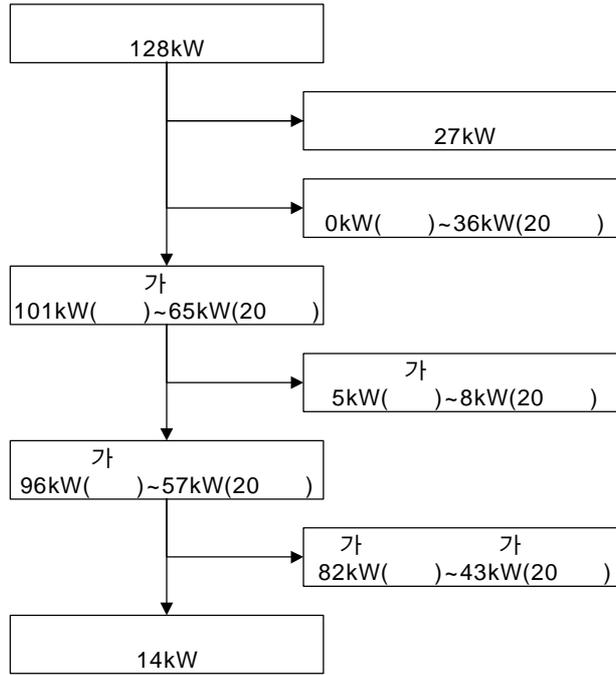


그림 2. 플라즈마토치 용융로 내의 에너지 수지

#### 4. 시험결과 및 모델검증

가. 시험결과

1) 용융상태

초기 시료는 CONT-01~05의 실험에서 초기 시료의 용융시간을 차례로 증가시키며 실험하거나(5분→7분→9분→10분), 도가니를 먼저 가열하고 시료를 투입하였으나 모두 초기에 투입된 시료의 하부 부분이 미용융 되었다. CONT-06의 실험은 시료를 2회로 나누어 투입하고, 시료를 콘크리트에서 토양으로 변경하였는데 초기투입 시료의 용융상태가 양호하였다.

추가 시료는 백열전구가 포함된 시료의 용융시험에서는 시료의 용융상태가 불량하였으며, 이는 백열전구에 포함된 필라멘트의 연소가 어렵고 용융 후에 숙성시간이 많이 필요한 때문으로 판단된다. 시료를 4분마다 1kg 씩 연속 투입한 결과 시료의 용융상태가 양호하였다.

2) 무게 변화

연속투입방법에 따른 도가니와 고화체의 무게변화는 표 4와 같다.

표 4. 연속투입방법에 따른 도가니와 고화체의 무게변화는

시험 번호		CONT-01	CONT-02	CONT-03	CONT-04	CONT-05	CONT-06
무게 변화	전체	△1.20kg	△1.00kg		△1.10kg		△2.45kg
	도가니		△0.65kg		△0.63kg		△1.30kg
	고화체		△0.35kg		△0.47kg		△1.15kg
용융시간		18분	19분	21분	19분	22분	34분

도가니의 무게 변화는 20분 정도의 용융시험에서는 0.63kg~0.65kg 정도 가벼워졌으며, 34분의 용융시험에서는 1.30kg 가벼워졌음. 34분의 시험에서 도가니의 무게가 더 가벼워진 이유는 시험 30분 경과 후 도가니의 연소현상이 발생하였기 때문으로 판단됨.

고화체의 무게 변화는 20분 정도의 용융시험에서 슬랙고화체의 무게가 초기 시료에 비하여 0.35kg~0.47kg 정도 가벼워졌으며, 34분의 용융시험에서 1.15kg 정도 가벼워졌음. 시험 30분 경과 후 도가니의 연소현상이 발생되면서 강한 불꽃과 함께 투입된 토양이 비산되는 경향이 나타났으며 이에 따라 슬랙고화체의 무게가 이전의 시험에 비하여 더 가벼워진 것으로 판단됨.

3) 비산먼지 및 고화체 농도

연속투입방법에 따른 비산먼지 및 고화체 농도는 표 5와 같다.

표 5. 비산먼지 및 고화체 농도

단위 : w%

원소	원료	CONT-01		CONT-03		CONT-04	
		먼지	고화체	먼지	고화체	먼지	고화체
Cs	0.05	0.33	0.13	0.12	0.02	-	-
Co	0.05	<DL	<DL	<DL	<DL	-	-
Pb	-	10.3	3.92	-	-	-	-
Al	2.59	-	-	1.02	3.10	1.11	1.27
Ca	9.86	-	-	0.20	2.58	0.21	4.86
Fe	0.99	-	-	0.17	1.29	0.21	1.25
K	1.51	-	-	1.97	2.29	2.18	2.31
Na	0.58	-	-	7.16	1.79	6.83	1.67
Si	29.46	-	-	18.62	30.58	20.36	5.79

소각로의 비산재와 바닥재의 조성에 관한 논문에서 따르면 Ca, Na, K 등은 비산먼지로 날아가는 경향이 높고 Si, Al, Fe 등은 고화체에 남는 경향이 높은 것으로 나타난다<sup>13)</sup>. 본 실험결과에서는 Na와 K는 휘발되는 경향이 높으나 Ca, Fe, Al, Si 등은 휘발경향이 낮게 나타났음. 또한 Fe, K, Na는 고화체에 존재하는 경향이 높고 Ca는 낮은 것으로 나타났으며 Al과 Si은 불규칙적인 경향을 나타냈음. 그러나 이 결과는 Na와 K의 경우 휘발율과 고화체 존재율 모두 원료 비율보다 높고, Ca는 휘발율과 고화체 존재율 모두 원료 비율보다 낮은 것이어서 일정한 경향을 파악하기 어려웠다.

4) TCLP

연속투입방법에 따른 TCLP 시험결과는 표 6과 같다. 시험결과 모든 원소가 EPA 규제값을 만족하였다.

표 6. 연속투입방법에 따른 TCLP 시험결과

원소	기준값	CONT-01	CONT-03	CONT-04
Cs		0.35mg/l	0.01mg/l	-
Co		-	0.97mg/l	-
Ba	21 mg/l	0.03mg/l	0.73	0.82
Ni	11 mg/l	2.33mg/l	<DL	<DL
Sb	1.15 mg/l	0.32mg/l	<DL	-
Zn	4.3 mg/l	0.32mg/l	0.34	0.21
Cr	0.6 mg/l	<DL	<DL	<DL

나. 모델 검증

1) 시료 용융방법

수립된 열전달모델에 따르면 시료의 용융방법은 도가니 가열에 필요한시간이 5.1분이 고, 시료의 용융에 필요한 시간은 1kg/4.3분으로 나타났다.

2) 연속투입률

CONT-01~05의 실험에 걸쳐 연속투입률은 1kg/4분이 적정하며 이에 대한 열전달모델이 맞는 것으로 나타났다. 그러나 34분 동안 용융한 CONT-06의 실험에서는 30분 경부터 도가니의 연소현상이 발생되었으며, 이는 시료의 투입량보다 공급된 용융에너지가 많거나 시간이 지나면서 용융로가 가열되어 나타나는 현상으로 보이며, 장기 시험시에는 용융로 벽의 가열에 따른 복사에너지를 고려해 주어야 할 것이다.

3) 초기시료 용융

수립된 열전달모델에 따라 수행된 시험에서 초기투입 시료의 하부 부분이 미용융 되었다. 그러나 시료를 2회로 나누어 투입하고, 시료를 콘크리트에서 토양으로 변경한 실험에서는 초기투입 시료의 용융상태가 양호하였다. 이는 토양의 경우 시료의 알갱이가 작아 유동성이 뛰어나거나 초기 시료를 나누어 투입하여 열전달이 용이했던 때문으로 판단된다.

4) 검증 결과

34분의 용융시험에서 투입된 토양이 모두 용융된 것으로 나타남에 따라 플라즈마 토치 가동 후 초기에 용융로로 공급되는 에너지가 도가니와 용융물의 가열에만 사용되며 용융로의 가열 등에 사용되지는 않은 것으로 판단된다.

또한 용융물의 온도가 1,650℃에 도달하면 도가니와 용융물에 공급되는 플라즈마 에너지가 전량 도가니 밖으로 전달되는지는 확인하지 못하였으나 투입주기를 단축시킬 경우 미용융이 발생하는 점으로 볼 때 1,650℃에 도달하면 도가니와 용융물에 공급되는 플라즈마 에너지가 전량 도가니 밖으로 전달되는 것으로 판단된다. 이는 장기시험을 통해 도가니 밖으로 방사되는 에너지를 계산하거나 실험을 통하여 구할 수 있을 것으로 판단됨.

도가니 내부가 흑체에 도달한 후 투입된 시료에 공급되는 에너지가 시료의 표면에 비례하는지는 투입된 시료의 표면적이 커질수록 용융이 빨라지는 것은 확인되었으나 이러한 사항이 시료의 표면에만 의존하는 것인지는 확인되지 않았다. 장기시험을 통해 도가니 밖으로 방사되는 에너지를 계산 또는 실험을 통하여 구하면 시료에 흡수되는 에너지를 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

배치식 플라즈마 용융로를 이용하여 비가연성폐기물의 연속투입 용융시험을 수행한 결과 용융 상태는 도가니를 먼저 가열하고 시료를 2회로 나누어 투입하면 초기투입 시료의 용융상태가 양호하며, 128kW 전기에너지의 플라즈마 토치의 경우 연속투입률은 콘크리트나 토양을 4분마다 1kg 씩 연속 투입하면 시료의 용융상태가 양호한 것으로 나타났음.

시험에서 사용한 내부 도가니는 20분 정도의 용융시험에서는 0.63kg~0.65kg 정도 34분의 용융 시험에서는 1.30kg 정도 가벼워졌는데 34분의 시험에서 도가니의 무게가 더 가벼워진 이유는 시험 30분 경과 후 도가니의 연소현상이 발생하였기 때문으로 판단됨.

고화체의 무게는 20분 정도의 용융시험에서는 초기 시료에 비하여 0.35kg~0.47kg 정도 34분의 용융시험에서는 1.15kg 정도 가벼워졌음. 시험 30분 경과 후 도가니의 연소현상이 발생되면서 강한 불꽃과 함께 투입된 토양이 비산되는 경향이 나타났으며 이에 따라 슬래그고화체의 무게가 이전의 시험에 비하여 더 가벼워진 것으로 판단됨. 비산먼지와 고화체 농도, 침출실험은 모두 양호하게 나타났음.

본 실험을 통하여 열전달모델을 수립하고 이의 검증시험을 수행하였다. 플라즈마 토치로 공급되는 전기에너지는 일부가 플라즈마 발생과정에서 토치 내부에서 흡수된 후 플라즈마 복사를 통하여 에너지가 용융로로 전달된다. 용융로로 전달된 에너지 중 배기가스 손실에너지를 제외한 에너지가 용융로로 공급되며, 용융로로 공급되는 에너지는 시료의 용융과 도가니 및 용융로의 가열에 사용되지만, 초기에는 용융로의 가열에 사용되는 에너지가 없고 시간이 지나면서 도가니가 가열됨에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

검증실험에 사용된 시료는 콘크리트와 토양이었으며 용융로 내부에 별도의 도가니를 설치하여 1kg 또는 0.5kg 씩 열전달모델에서 계산된 주기에 따라 투입되었다. 용융시험 결과 용융로가 가열되지 전까지는 수립된 열전달모델이 맞는 것으로 나타났다.

에너지 수지는 플라즈마 토치 전기에너지가 128kW일 경우 플라즈마 발생시 손실에너지가 27kW, 냉각수 흡수에너지가 0~36kW, 배기가스 손실에너지가 5~8kW, 내부 도가니 및 용융로 가열에너지가 82~43kW, 시료의 용융에너지가 14kW로 나타났다.

## 6. 참고문헌

- 1) Michael G. Malloy, " Plasma Arc Technology - Comes of Age," Waste Age, 1995.
- 2) Thomas J. Overcamp, Matthew P. Speer, Stewart J. Griner, and Douglas M. Cash, " Gaseous and Particulate Emissions from a DC Arc Melter", The Air & Waste Management Association's 90th Annual Meeting & Exhibition, Toronto, 1997.
- 3) "Plasma Environmental Technologies," Bright Engineers, <http://brightengr.com/>.
- 4) 신상운 등, " 중·저준위 방사성폐기물 유리화 기술개발(I) 중간보고서," 원자력환경기술원 TM.96NJ17.M1999.7 (1999).
- 5) 김태욱 등, " 비가연성폐기물의 플라즈마 용융에 따른 배기가스 발생 특성," 한국원자력학회 - 2000 춘계학술발표회 논문집.
- 6) 김태욱 등, " 비가연성폐기물의 플라즈마 용융 특성," 한국원자력학회 - 2000 추계학술발표회 논문집.
- 7) 김태욱 등, " 플라즈마토치 용융로의 열전달모델링," 한국물리학회 - 2001 춘계학술발표회 논문집.
- 8) Alexis G. Pincus, " Melting Furnace Design in the Glass Industry," Books for Industry and The Glass Industry Magazine, 1980.

- 9) Kuzman Raznjevic, "Handbook of Thermodynamic Table and Charts," Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
- 10) <http://www.caloritech.com/catalog/page198.htm>
- 11) <http://www.hcc.hawaii.edu/hcconline/sci122/Programs/p20/p20.html>
- 12) 신상운 등, "비가연성 폐기물 처리용 플라즈마 용융시스템 개념설계," 원자력환경기술원 TM.A00NJ01.M2000.8 (2000).
- 13) "플라즈마를 이용 소각회 용융·고형화 기술," 삼성중공업(주) (2000).