

## AP-200L 토치를 이용한 비가연성 방사성폐기물 고온용융처리 Experiment on the Vitrification of Nonflammable Wastes Using AP-200L Plasma Torch

최종락, 유병수, 김천우, 박종길, 하중현  
한수원(주) 원자력환경기술원

### 요 약

원자력발전소로부터 발생하는 비가연성 고체폐기물의 모사시료에 대해 플라즈마 토치를 이용하여 고온용융처리 시험을 실시하였다. 실험은 AP-200L 공동형 플라즈마토치를 사용하여 콘크리트, 흙과 금속이 포함되는 혼합물에 대하여 약 50시간 정도 수행되었다. 처리속도, 토치의 노즐과 용융물 표면과 간격, 토치 회전속도, 토치가스 유속 그리고 용융로의 압력 등 몇몇 실험조건을 사전에 결정하였으며, 냉각수 온도, 배가스 온도, 토치출력변화 등 기본 파라메타를 측정하였다. 유리화된 시료는 SEM/EDS로 분석하였다.

### Abstract

The high temperature melting test for nonflammable wastes using a plasma torch was conducted. The AP-200L hollow cathode type plasma torch was installed at the pilot plasma melting furnace in NETEC. The surrogates were prepared to simulate concrete, soil and their mixture with steel. The experimental conditions such as feeding rate, the distance between melts surface and torch nozzle, torch rotation speed, gas flow rate and pressure in the furnace were decided. Basic parameters such as temperatures of cooling waters, off-gas and torch power were measured. The vitrified samples were analyzed by SEM/EDS.

### 1. 서 론

국내 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 고체 방사성폐기물은 현재 가연성폐기물과 비가연성폐기물로 분류하여 각 발전소에 임시저장하고 있다. 이러한 방사성폐기물은 방사성폐기물 처분 시설에서 통합 관리하여야 하므로 현재 한수원(주)과 정부는 처분시설 부지를 확보하기 위해 최선의 노력을 경주하고 있다.

방사성폐기물을 고온으로 열처리하면 유기물이 분해 또는 소각되고 무기물만 남아 부피가 줄고, 환경에 적합한 형태로 안정화된다. 가연성폐기물의 경우 일본 등에서는 소각로를 이용하여 연소시켜 남은 재를 비가연성폐기물과 혼합하고 플라즈마토치를 이용하여 용융 처리하는 연구를 하고 있지만, 한수원(주)은 유도가열식저온로를 이용하여 가연성폐기물을 소각처리 공정 없이 용융유리 위에서 직접 연소시켜 유리화 시키고, 비가연성폐기물은 플라즈마토치용융로(PTM)를 이용하여

용융 처리하는 기술을 개발하고 있다.

PTM은 주로 원자력발전소로부터 방출되는 구조물, 필터 등 비가연성 중저준위 방사성 폐기물을 처리할 목적으로 실증설비를 설치하여 연구 중에 있다. 본 논문에서는 수냉식 용융로와 비이송식 공동형 플라즈마 토치를 이용하여 콘크리트, 흙 및 못을 포함한 혼합폐기물 등 모사시료에 대한 플라즈마 용융 실험을 수행한 결과를 기술하고자 한다.

## 2. 장치 구성

### 2.1 플라즈마토치용융로

본 연구에서 사용한 실증용 수냉식 플라즈마토치 용융시스템은 폐기물을 이송하는 폐기물 이송 컨베이어, 이송된 폐기물을 용융로에 투입하기 위한 폐기물 투입 호퍼, 투입된 폐기물에 열에너지를 가하는 플라즈마토치, 폐기물 용융반응이 일어나는 수냉식 플라즈마토치용융로, 가열된 용융로를 냉각하는 용융로 냉각설비, 플라즈마토치를 수평으로 회전시키고 상하로 움직이게 하는 토치구동 제어장치, 용융로 내부를 감시하는 핀홀(pin hole) 모니터링 시스템 등으로 구성되어 있다.

수냉식 플라즈마토치용융로는 상단부와 하단부로 구성되며, 상단부는 배기구, 폐기물 투입구, 토치 구동제어장치가 부착된 돔(dome)으로 되어있고 하단부는 출탕구가 부착된 도가니로 이루어져 있다. 상단부와 하단부의 밀봉은 하단부에 설치된 유압 승강기에 의해 이루어진다. 도가니의 재질은 탄소강이며 용량은 187리터이다. 용융로는 운전 중  $-50 \sim -200 \text{ mmH}_2\text{O}$ 의 부압을 유지하도록 되어있다. 플라즈마토치용융로의 크기는 직경 59 cm 높이 68 cm 이며, 용융로의 모습은 그림 1과 같다.

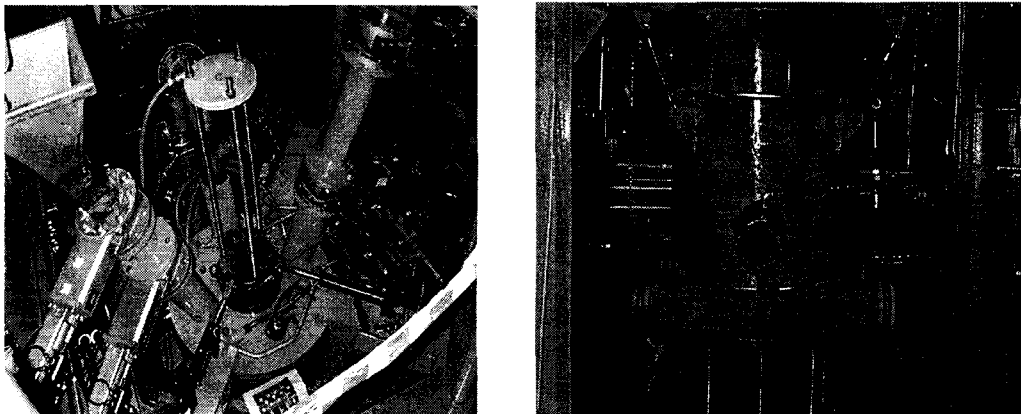


그림 1. 플라즈마 토치 용융로

### 2.2 플라즈마 토치 시스템

그림 2는 플라즈마 토치의 운전 및 interlock system의 개관도이다. 플라즈마 토치 시스템은 크게 보아 본체, 전원시스템, 냉각수 시스템, 질소 공급 시스템 및 운전 시스템으로 이루어진다. 본체는 AP-200L 플라즈마 토치로서 비이송식 공동형이며 구경이 10.6cm, 길이가 95cm이다. 동작 전압은 600V이며, 전류의 조절에 의하여 출력이 결정된다. 토치 전극의 냉각을 위한 냉각수의 회로는 음극과 양극을 분리하여 저전도도 냉각수를 사용할 필요가 없도록 되어 있다. 토치의 하우징 역시 분리된 냉각수 회로에 의하여 냉각된다. 그러나 냉각수 순환을 위한 펌프는 하나이며, 각각의 회로에 적당한 압력이 걸리도록 밸브를 조절하여 사용하였다. 플라즈마 매질로는 질소를 사용하였는데, 이는 질소산화물( $\text{NO}_x$ )의 발생을 억제하기 위한 것이다. 질소 가스는 액체 질소를 기화

기에서 적절한 속도로 기화시켜 얻었다.

플라즈마 토치의 인터록 시스템은 플라즈마 토치의 손상을 사전에 방지하고, 이어지는 용융로의 오염을 방지하기 위한 것이다. AP 토치의 인터록 시스템은 냉각수의 온도(Ti)와 유량스위치, 질소 유량스위치 및 토치 전압계, 그리고 외부의 인터록 입력으로 구성되어 있다. 일단 인터록 조건이 발생하면, 즉시 토치로 공급되는 전원 중지시키도록 되어 있다.

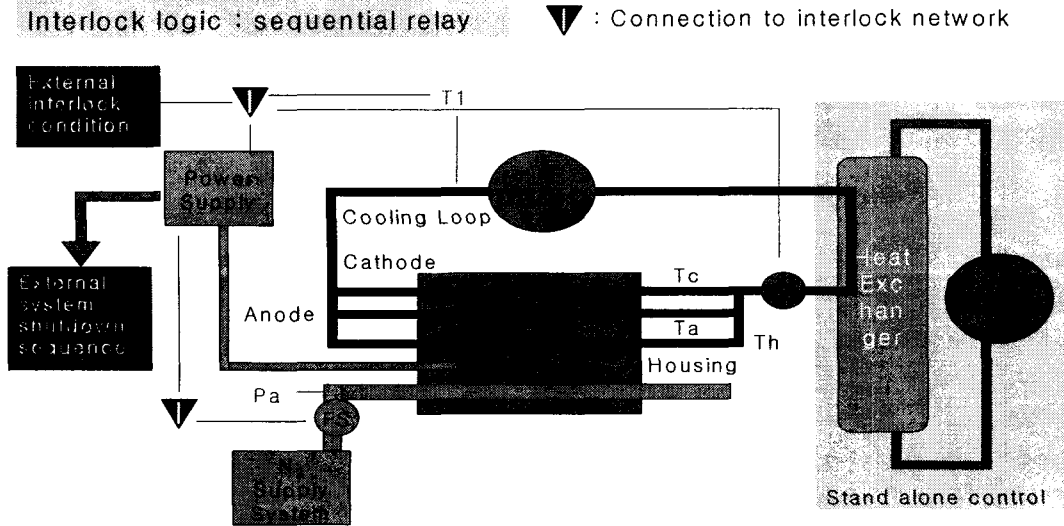


그림 2. AP-200 plasma torch.제어 및 interlock 계통

### 3. 실험

모사시료에 대한 유리화 실험은 3차례에 걸쳐 수행되었다. 각 실험의 기본 조건은 표 1에 기록되어 있다. 토치는 연속적으로 회전하면서 시료를 처리하였다. 균일한 용융상태를 유지하기 위하여 회전속도(원주속도)를 일정하게 유지하면서 회전반경을 연속적으로 증가 혹은 감소시키는 방법을 사용하였다. 토치의 노즐과 용융물 표면사이의 간격은 시료의 녹는 상태를 관찰하면서 결정하였는데, 대략 20 - 25cm 정도를 유지하였다.

각 실험 동안 주요 인자 (플라즈마토치 전압, 냉각수 인입온도, 냉각수 토출 온도, 용융로벽 냉각수 인입 온도, 용융로벽 냉각수 토출 온도, 배가스 온도)의 시간대별 변화는 그림 3에 나타나 있다. 전반적으로 보아 실험 시간 동안 플라즈마 토치와 용융로의 동작이 상당히 양호한 것을 볼 수가 있다. 플라즈마 토치의 출력은 수%의 범위내에서 거의 일정

표 1. 고온용융 시험 대상별 실험 조건

실험번호	모사 시료	소요 시간	투입속도	토치전력	질소유량
1	콘크리트 33kg	4시간 25분	14.4kg/시간 (600g/회, 2분 30초 간격)	150kW	690 l/min
2	흙 75kg	6시간 55분	14.4kg/시간 (600g/회, 2분 30초 간격)	150kW	837 l/min
3	혼합시료 69kg (콘크리트3: 흙2 : 못1)	6시간 40분	14.4kg/시간 (600g/회, 2분 30초 간격)	150kW	705 l/min

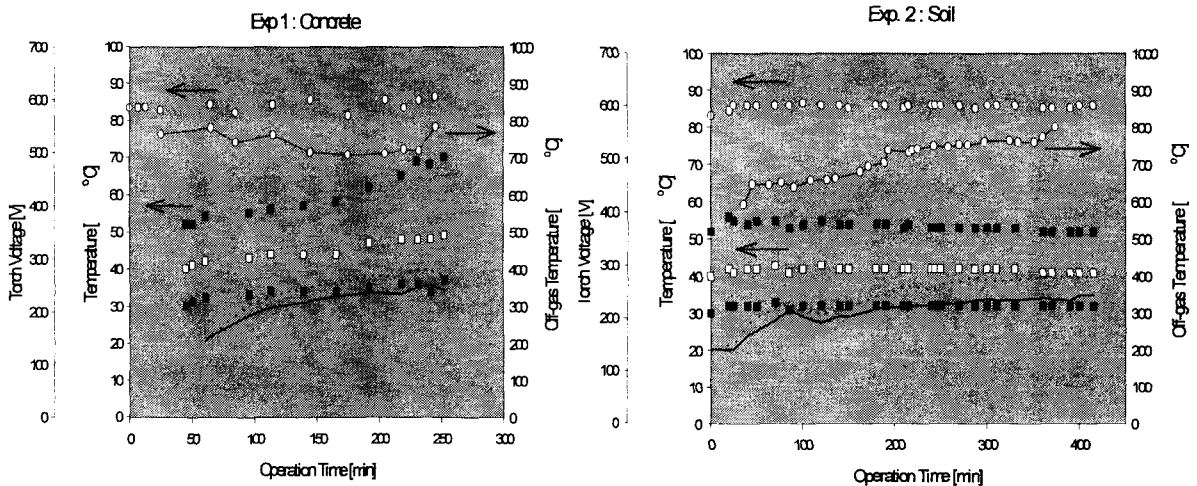
하게 유지되었다. 냉각수 온도의 경우 3번의 실험에서 특이한 차이점은 실험 1의 양극 냉각수 온도는 시간이 지나면서 점점 높아지는데 비하여 실험 2,3의 경우 별 차이가 없다는 사실인데, 이는 양극(노즐) 부위의 차이에 기인한다. 즉, 실험 1의 경우 시간이 지남에 따라 노즐에서 막힘 현상이 생겨 냉각수의 온도가 올라가고, 효율도 따라서 나빠지는 현상이 목격되었다. 이는 또한 토치에서 토출되는 플라즈마의 속도를 더욱 증가시켜서, 투입된 시료를 용융시키기보다는 비산시키는 요인으로 작용하였다. 따라서 실험 2,3에서는 노즐의 앞 부위를 원뿔 형태로 넓혔으며, 이에 따라 막힘 현상이 없어졌고, 온도의 변화도 줄어들었다. 용융로의 냉각수의 경우도 3번의 실험 동안 온도의 변화가 거의 유사한데, 초기만 제외하면 냉각수의 온도 상승은 거의 일정한 것은 용융로의 외벽을 통한 열손실이 일정한함을 나타낸다. 이는 캐스타블을 사용하는 용융로의 경우 온도의 상승과 함께 열손실이 점점 증가하는 것과 대별되는 특징이라고 할 수 있다. 실험동안 용융로의 압력은 -20mmAq 로 유지하였으며, 이 때 배기가스의 온도는 그림4에서와 같이 약 700-800도를 유지하였다. 그림 4는 플라즈마토치에 의한 모사시료의 용융과정 사진이다. 용융로가 캐스타블이 없는 수냉식이기 때문에 실험의 초기에는 열전달에 의한 냉각효과 때문에 용융물이 국부적으로만 생성된다. 하지만 용융물이 바닥을 채운 후에는 전체적으로 용융상태를 유지하는 것을 목격할 수 있었다.

#### 4. 결과 및 논의

플라즈마 용융시료의 SEM 사진은 그림 5와 같다. 그림 5-(a)는 콘크리트, 5-(b)는 토양, 그리고 5-(c)와 (d)는 혼합(콘크리트, 토양, 금속)시료에 대한 사진이다.

콘크리트 및 토양 용융물에서는 SiO<sub>2</sub>와 유리상의 2가지 상이 나타났으며 혼합폐기물에서는 2가지 상과 금속상이 아울러 나타났다. (a)와 (b)의 사진에서 어두운 색이 SiO<sub>2</sub>이며 밝은 부분이 유리상이다. (c)에서는 어두운 상이 SiO<sub>2</sub>, 회색 부분이 유리상 그리고 밝은 부분이 금속상이다. 각 용융물의 성분별 농도는 표 2와 같다.

콘크리트 용융물에서는 약 100 μm 정도의 bubble이 존재함이 확인되었고 토양 용융물에서는 200 μm 정도의 bubble 과 crack line 이 확인되었다. 또한 혼합폐기물 용융물에서는 완전히 용융되지 않은 금속 못도 관찰되었다(그림 5-(d) 참조).



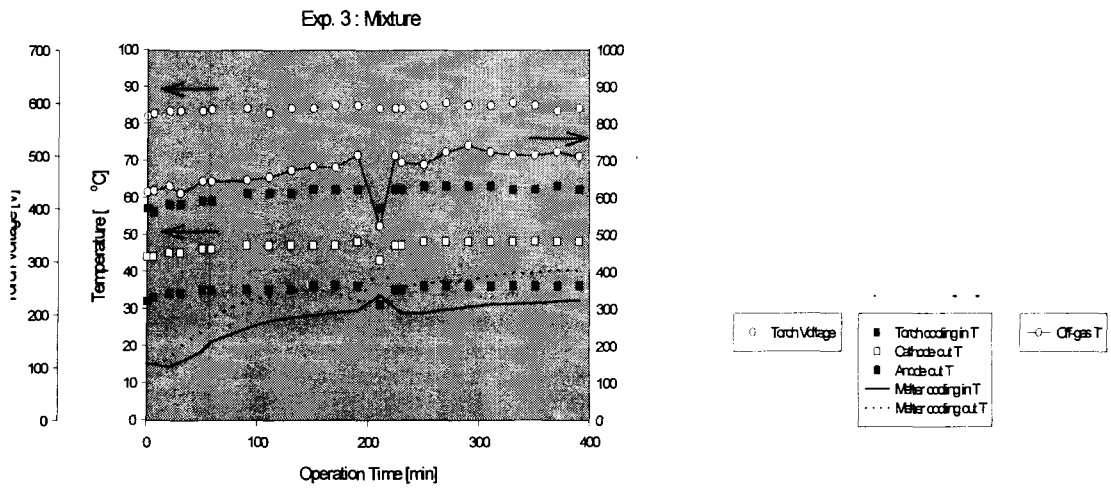
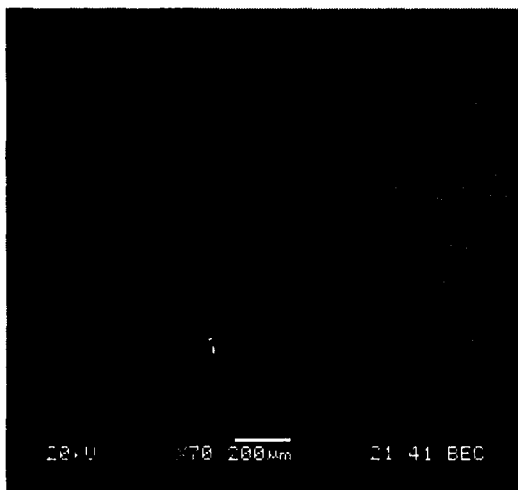


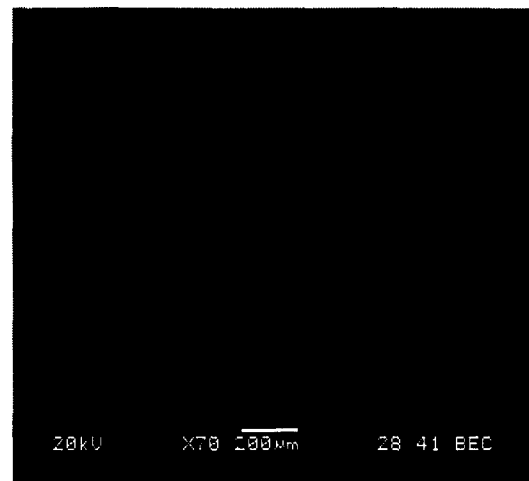
그림 3. 각 폐기물별 주요 인자의 변화



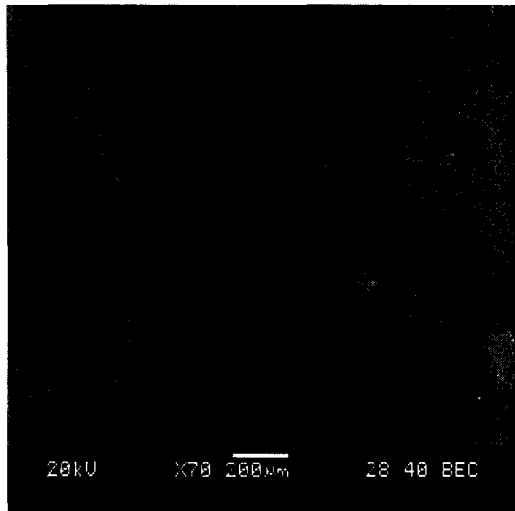
그림 4. PTM 운전 사진. 토치가 오른쪽에 있다.



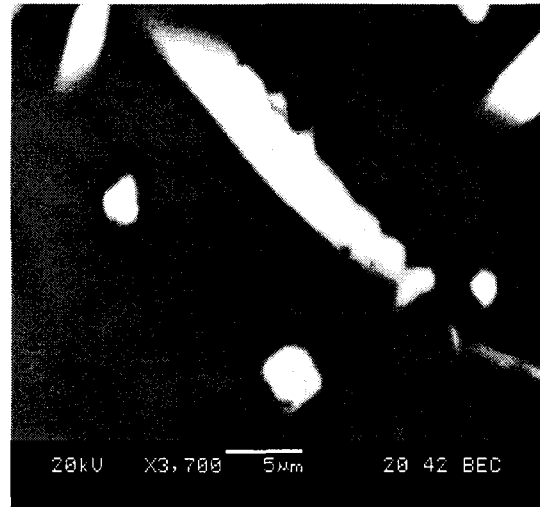
(a) 콘크리트



(b) 토양



(c) 혼합폐기물



(d) 혼합폐기물(3,700배)

그림 5. 폐기물별 용융물 SEM 분석

이는 전체적으로 폐기물 투입 속도에 비하여 에너지 공급이 적은 것이 원인인 것으로 판단된다. 즉 금번 실험에 사용된 AP-200L 토치는 주로 가연성인 도시폐기물을 산소를 매질로 하여 플라즈마 용융 처리하기 위하여 개발된 것으로 연소시 유기물의 산화에너지가 상대적으로 적은 량의 무기질을 유리화 시키는데 사용되는 것으로 고려하였으나 금번 시험과 같이 전체가 무기질인 경우에는 플라즈마 가스의 온도가 전체적으로 상당히 높아야 한다.

따라서 이 시험과 같은 정도의 폐기물을 투입할 경우 우선 전력을 약 20%정도 높은 180 kW 정도로 유지하고 플라즈마 가스의 유량을 현재의 690 - 840 lpm에서 180 - 240 lpm으로 낮추어 가스 온도 구배를 크게 할 경우 충분히 균질한 유리질의 무기폐기물 용융물을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

표 2. 시료별 용융물 성분 분석 결과(wt %)

성분 시료	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	TiO	계
콘크리트	67.44	10.61	7.63	7.47	3.72	1.65	0.75	0.74	100.01
토양	61.77	23.74	1.74	3.29	6.51	2.94	-	-	99.99
혼합물	60.46	17.85	8.61	4.98	4.52	2.91	0.67	-	100

## 5. 결 론

AP-200L 플라즈마 토치를 이용한 비가연성 방사성 폐기물에 대한 용융 실험을 수행하였다. 플라즈마 토치와 용융로의 안정적 동작을 확인하였으며, 플라즈마 토치의 전력을 상승시키고 플라즈마 가스의 유량을 적정량으로 줄여 공급할 경우 수냉식 플라즈마 용융로에서도 플라즈마 가스의 에너지가 충분히 용융 대상으로 전달되어 양질의 용융물을 생산할 것으로 판단되며 이에 대한 지속적인 연구와 시험이 요구된다.