

비가연성 폐기물 슬랙고화체 건전성 평가  
Intactness Evaluation of Incombustible Waste Molten Slag

박병철, 맹성준, 문영표, 이명찬

한전원자력환경기술원  
대전광역시 유성우체국 사서함 149

요 약

원자력발전소에서 발생하는 비가연성 방사성폐기물은 콘크리트, 유리, 석고, 금속류, 토사류 및 필터류 등으로 구성된다. 이들 폐기물중 콘크리트, 유리, 모래, 필터류에 대한 혼합 용융처리 실험을 60kW 플라즈마 토치를 이용하여 수행하였다. 실험에 사용된 폐기물은 비방사성이며, 방사성을 모사하기 위하여 비방사성 세슘을 첨가하였다. 최적의 슬랙고화체를 생성할 수 있는 폐기물 조성비를 찾기 위하여 총 11종의 혼합폐기물을 만들어 용융시킨 후 형성된 슬랙고화체에 대하여 감용비, 외관의 육안 평가, 세슘 포집율 및 용출지수 등 4 가지 항목에 대한 건전성 평가를 실시하였다. 건전성 평가 결과, 콘크리트-유리를 1:3 비율로 혼합하여 플라즈마 토치로 용융할 경우 폐기물의 처분 안정성과 경제성 측면에서 최상의 슬랙고화체를 생성할 수 있는 것으로 판명되었다.

Abstract

Incombustible radioactive waste from nuclear power plants is generally composed of concrete, glass, asbestos, metal, sand, soil, and spent filter. The melting tests for concrete, glass, sand, and spent filter were carried out using 60 kW plasma torch system. Surrogate waste was prepared for the tests and stable cesium was added to the surrogate in order to simulate the radioactive waste. Eleven kinds of surrogate were prepared by mixing the wastes and were melted with the plasma torch system to produce slag samples. The intactness evaluation of the samples was performed to find the optimum mixing ratio of the wastes for the plasma torch melting. The items of the evaluation have included volume reduction factor, visual inspection, cesium trapping efficiency and leaching index. As a result, it was found that the mixing ratio of 3:1 of concrete and glass was the optimum composition considering disposal stability and economical efficiency of the wastes.

1. 서론

최근 들어 전세계적으로 문제가 되고 있는 환경오염으로 인해 환경보전에 대한 국민들의 열망이 고조되고 있으며, 님비(NIMBY) 현상의 확산으로 중·저준위 방사성폐기물 처리·처분 관계시

설을 건설하는 것이 매우 어렵게 됨에 따라, 폐기물을 시멘트와 섞어서 콘크리트화하거나 폐기물을 압축하여 드럼속에 보관하는 기존의 처리 방법을 대체할 수 있는 안전하고 획기적인 신처리 기술에 대한 요구가 증가되어 왔다.

플라즈마 용융 처리는 산업폐기물 처리 등에서 이미 우수성이 입증된 기술로서, 최종 발생하는 폐기물 고화체가 매우 안정하여 처분장에서 지하수와 접촉했을 때도 유독성 핵종이 거의 침출되지 않고, 기존의 처리 기술보다 처분 부피를 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 60kW 플라즈마 토치를 이용하여 원자력발전소에서 발생하는 비가연성 폐기물인 콘크리트, 유리, 석고, 금속류, 토사류 및 필터류 중에서 콘크리트, 유리, 모래, 필터류를 용융 처리하였다. 또한 생성된 슬랙고화체에 대한 특성 및 건전성 평가를 실시하여, 최적의 슬랙고화체 조성을 제시하고 그 때의 모의 폐기물 혼합비를 플라즈마 용융 처리에 적합한 최적의 폐기물 조성비로 선정하였다.

다른 첨가물 없이 발생하는 폐기물만을 용융처리할 수 있는지를 검토하기 위해 폐기물들을 여러 혼합비로 섞고 여기에 방사성 핵종의 분포비를 분석하기 위하여 적당량의 비방사성 세슘( $Cs-133$ )을 첨가한 후 용융시켜 총 11종의 슬랙 시료를 제조하였다. 슬랙고화체의 건전성에 관한 판정 기준은 현재 공인된 방법이 없기 때문에 기존의 방사성폐기물 고화체의 특성 평가 항목인 비중, 압축강도시험, 총함량시험, 용출시험, 침출시험, 온도순환시험, 침수시험 중에서 본 실험 특성상 시료의 분말화와 정형화 등의 전처리 과정이 필요없는 항목을 선정하였다. 본 논문의건전성 평가 항목으로는 폐기물 감용비 추정외의 근거가 되는 비중과 시료의 압축강도, 유리화 상태 등 물리적 성질의 대신할 수 있는 외형, 용융 공정중 발생 배기체에 의한 2차 계통의 방사능 오염 방지와 1차 계통의 방사능 누적등과 관련있는 방사성 핵종 포집율 및 슬랙고화체 내에 존재하는 유해성 무기물질이 얼마나 용출되는가를 절대적으로 비교하는 용출지수 등을 고려하였다.

## 2 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 플라즈마 토치 용융설비는 60kW의 용량을 가진 것으로서 주요 구성은 원통형의 플라즈마 토치, 회분식 용융로, 전력공급장치, 제어반, 배기체 처리장치 및 냉각장치 등으로 되어 있다.

플라즈마 용융시설의 핵심장치인 플라즈마 토치는 전형적인 고체 전극형(solid electrode type)의 토치이며, 순극성(straight polarity)연결 방식을 취하고 있다. 직류 전원을 사용하고 플라즈마 토치의 전극은 주 전극선과 기동 아크를 발생시키기 위한 보조전극이 설치되어 있다. 보조 전극선(+극)은 절연된 구리 도선을 통해 토치의 앞부분인 노즐까지 연결되어 있고 주 전극선(-극)인 텅스텐 전극사이의 아크방전에 의해 기동 아크를 발생시키게 되며 주 플라즈마 발생의 매개체가 된다.

토치의 냉각은 내부의 냉각과 외부 수냉각 자켓(water jacket)에 의한 냉각으로 이루어지며, 내부 냉각은 토치 앞부분의 구리 노즐을 냉각하고, 외부 냉각자켓은 토치 몸체의 냉각과 토치의 지지대 역할을 하고 있다.

용융로는 외부강피에 의해 보호되는 알루미나( $Al_2O_3$ )를 90%이상 함유한 CA-18 형의 내화물로

구성되어 있으며, 용융로 내부 직경은 250mm, 깊이는 250mm이며, 전체 높이는 500mm로서 회분식 용융로로, 1회 용량은 금속기준으로 5kg정도이다. 용융로 하부 내화물에는 하부전극(+극)이 3곳에 설치되어 있으며, 용융물의 배출을 위해 전체 용융로가 기울어지도록 되어 있다. 용융로를 기울였을 때 원활한 용융물 배출을 위해 배출구가 용융로 상부에 마련되어 있으며, 개방형인 용융로 상부를 밀폐할 수 있는 덮개가 마련되어 있다.

용융로에 장착된 부속계통으로는 플라즈마 토치의 상하 운동을 위한 마스트(mast)가 존재하며, 좌우 이동은 불가능하다. 플라즈마 토치가 용융로에 장착되는 방식은 마스트에 연결된 토치 지지대(arm)가 외부 냉각 자켓에 결합하는 방식이며, 냉각 자켓 하부의 구멍사이로 플라즈마 토치의 불꽃이 방출된다. 용융로 상부에는 배기가스의 배출을 위한 덕트(duct)가 설치되어 있으며, 후단의 집진기를 거쳐 강제 배기된다.

전력공급장치는 배전반에서 공급되는 삼상 교류(380V, 60Hz)를 직류로 정류하여 플라즈마 토치와 용융로 하부 전극으로 연결되어 있으며, 정전압 또는 정전류 운전이 가능하도록 설계되어 있다. 전력공급장치에서 토치로 입력되는 전기 회로는 수냉각되는 주 전극선(-)과 토치 노즐에 연결되는 보조 전극선(+)이며, 주 전극선을 냉각하는 냉각수는 토치 노즐의 냉각을 위해 순환된 후 전력공급장치 쪽으로 배출된다. 토치로부터 전력공급장치쪽으로 냉각수가 배출되는 배관은 플라즈마 발생기체 공급관과 같이 토치에 연결되어 있으며 용융로 하부 전극봉(+극)으로 연결되어 있다.

플라즈마 토치 제어반은 전력공급장치로부터 전기를 공급받으며 플라즈마 토치의 on/off 스위치와 기동 아크를 발생시키는 스위치 등이 설치되어 있어 플라즈마 토치를 운전할 수 있도록 되어 있다. 알곤(Ar)와 수소(H<sub>2</sub>) bombe(bombe)와도 연결되어 있어 플라즈마 발생기체 연결함(junction box)의 역할을 한다. 또한 전압계와 전류계가 설치되어 공급전압과 공급전류의 감시가 가능하며, 플라즈마 발생 기체의 공급 유량을 측정할 수 있는 유량계(rotameter)와 압력계가 설치되어 있다.

플라즈마 토치가 장착된 외부 냉각 물자켓의 토치와 하부전극의 간격 조절을 하기 위한 상하 운동은 제어반과는 별도의 조작기로 조작한다. 조작기는 전기 모터를 구동하여 클램프로 고정된 외부 냉각 자켓이 마스트를 따라 상하 운동을 할 수 있도록 한다.

배기체 배기구 중간에 유량계와 배기체 시료채취구(sampling port)가 설치되어 있다. 배기체 분석과 핵종 흡착 실험을 위하여 불필요한 배기구를 제거하였으며 후단에 카트리지(cartridge) 필터를 이용하여 배기체를 흡착·처리하도록 설계되어 있다.

냉각수로는 일반 수도물을 사용하였으며 냉각후 방류하였으며, 조업중 수도물 공급 중단에 대비하여 비상 냉각수 저장탱크가 설치되어 있다. 그림 1은 실험설비에 대한 전체적인 개략도를 보여주고 있다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 모의 폐기물 제조

원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물은 크게 가연성 폐기물과 비가연성 폐기물로 구분될 수 있으며, 가연성 폐기물에는 방호복, 양말, 장갑, 신발, 비닐시트, 슈즈커버, 제염지 및 목재, 스폰지 등이 포함되고 비가연성 폐기물에는 콘크리트, 석고, 각종 필터류, 유리, 철제, 형광등, 모래 등이 포함된다.

그러나, 실제 방사성폐기물은 그 위험성 때문에 원자력발전소 밖으로 반출이 허용되지 않으므로 원자력발전소에 대한 실사와 관련 자료에 근거하여 발생폐기물과 같은 물리적, 화학적 특성을 가지는 물질을 사용하여 총 11종의 비가연성 모의 폐기물을 제조하였다. 또한 방사성 핵종의 분포비를 분석하기 위하여 Cs-133의 화합물인 세슘카보네이트( $Cs_2CO_3$ )를 용융 대상 폐기물 1kg당 5g의 Cs-133가 첨가되도록 하여 모의 폐기물에 혼합하였다.

모의폐기물의 제조에 이용된 원료 및 용융실험에 사용된 비가연성 모의 폐기물의 조성을 표 1과 표 2에 나타내었으며, 필터류의 경우 필터류만에 대한 용융 실험을 수행하는 경우에는 스테인리스강 200g, 아연도금강판 100g, 유리섬유 100g, 폴리프로필렌 100g을 혼합하여 사용하였으며, 다른 모의폐기물과 혼합할 경우에는 스테인리스강 60g, 아연도금강판 30g, 유리섬유 30g, 폴리프로필렌 30g을 혼합하여 사용하였다.

### 2.2.2 모의폐기물 용융 및 배출

본 실험에서 사용된 용융 대상 폐기물이 대부분 비전도성 물질이므로 이행(transferred) 방식의 토치를 가동하기 위하여 용융로 하부전극과 통전될 수 있는 금속 재료로 용탕(molten bath)을 제조하여야 한다. 이를 위하여 선철과 4000g을 용융 작업전 용융로에 투입하며, 선철과가 용융되어 형성된 용탕은 전기전도도를 유지시켜 줄 뿐만 아니라 용융로 내부를 항온으로 유지시키는 역할을 하기도 한다. 용탕 재료를 투입한 상태에서 플라즈마 토치를 점화하게 되며, 플라즈마 토치의 점화는 플라즈마 발생 기체로서 알곤(18 lpm)과 수소(2 lpm)를 9:1의 비율로 공급한 상태에서 제어반의 기동 아크 발생 스위치를 작동하면 보조 전극선이 연결된 토치 노즐과 주 전극선이 연결된 텅스텐 음극 사이에서 기동 아크(청백색)가 발생하게 된다. 이 때 노즐은 토치 점화시에 임시적인 전극의 역할을 하는 것이다. 이는 흔히 이용되는 혼합 방식의 회로이며 이러한 방식의 배열에서 플라즈마 아크는 이행 방식이 될 수도 있으며, 비이행(non-transferred) 방식이 될 수도 있다. 대체로 비이행 방식은 용융로 하부 전극(양극)과 토치내의 음극사이의 공간에 있는 기체(알곤, 수소의 흐름)를 이온화하기 위한 기동 아크 점화시에만 사용되고 이에 이용되는 전원은 음극과 용탕 재료 사이에서 주 플라즈마 아크가 연결되는 순간에 자동적으로 차단된다. 이러한 회로에서는 한 개의 직류 전원만이 연결되어 회로에 전기를 공급하고, 양극선이 중간에 나와서 토치 노즐에 연결되어 있다. 이 중간 연결선에는 보조 아크, 또는 기동아크의 전류를 제한하는 저항이 연결되어 있다.

기동 아크와 용융로 하부전극의 접촉이 이루어지면, 비이행 방식에서 이행 방식으로 자동적으로 전환되고 주 플라즈마 불꽃이 형성된다. 공급되는 플라즈마 발생기체의 종류와 유량이 일정하고 정전압 모드에서 운전할 때, 공급전류는 토치의 음극과 용융로 하부의 양극 사이의 간격에 따라 변화한다. 즉 간격이 커질수록 전류밀도는 감소하게 되며, 간격이 줄어들수록 전류밀도가 증가하게 되어 접촉이 일어날 경우, 통전되게 된다. 실험용 플라즈마 용융시설에서 두 전극의 간격은 외부 냉각 자켓의 위치를 조절하여 일정한 전류(500A)가 흐를 수 있도록 하였다. 즉 용융물로부터 토치의 높이를 조절함으로써 안정한 플라즈마가 발생할 수 있도록 조정하는 것이다. 이렇게 함으로써 토치 노즐이 보호될 수 있다. 주 플라즈마에 의해 용탕재료가 용융되고 용탕이 형성되면, 미리 준비된 모의 폐기물을 용융로 내부로 투입한다.

용탕과 함께 충분히 용융된 용융 대상물질은 액상을 띠게 된다. 그러나 금속류 용탕과 비금속류 용융물은 비중 차이에 의해 경계층을 형성하며 두 상으로 분리된다. 실험용 플라즈마 토치 용

용시설에서도 이러한 현상을 볼 수 있다. 폐기물의 용융이 완료되면 용융로를 기울여서, 용융로 내부의 용융물을 배출시키는데, 이 때 비중이 높은 용탕성분이 먼저 배출되고 용탕이 배출된 후 비금속류 용융물(슬랙)은 서서히 용융로를 빠져나오게 된다. 배출된 용융물은 용탕 및 용융물을 받아내는 주형에서 자연적으로 냉각된다. 500g의 모의 폐기물을 용융하여 슬랙고화체를 생성하는데 소요되는 시간은 용탕제조에 3분, 모의 폐기물 투입과 용융에 7~8분, 용융물 배출에 2분 가량 소요되었다.

### 2.2.3 슬랙고화체 특성 및 건전성 평가

원자력발전소에서 발생하는 비가연성 방사성폐기물중 금속류를 제외한 물질들의 성분은 산화규소( $\text{SiO}_2$ )가 60% 이상, 산화칼슘( $\text{CaO}$ )이 12%, 산화알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )이 10% 미만으로 일반 유리의 성분과 유사하다. 따라서 이들 비가연성 방사성폐기물을 최적의 혼합비로 용융하였을 경우 안정한 유리질의 고화체(슬랙고화체)를 생성시킬 수 있다. 그러나, 최적의 폐기물 혼합조건을 도출하는 과정에는 고화체의 최종 처분시 안정성 뿐만 아니라, 경제성 측면도 고려되어 져야 한다.

본 논문에서는 기존의 방사성폐기물 고화체의 특성 평가 항목인 비중, 압축강도시험, 총합량시험, 용출시험, 침출시험, 온도순환시험, 침수시험 중에서 슬랙고화체 시료에 대한 전처리 과정이 필요없는 비중과 용출시험 등을 실시하였으며, 여기에 비중에 의한 감용비, 외관의 육안 평가, 방사성핵종 포집율 등을 추가하여 종합적으로 건전성 평가를 실시하였다.

건전성 평가 과정에서 각 항목의 산정 기준은 각 시료에 대하여 비중에 의한 감용비 30점, 육안 평가 30점, 방사성핵종포집율 30점, TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure) 용출시험 30점 등 총 120점을 만점으로 하였으며, 건전성 평가에 대한 상세한 판정 기준을 표 3에 정리하였다.

평가 결과 건전성이 우수한 시료의 총합량을 최적의 슬랙고화체 조성으로 제시하고 그 때의 모의 폐기물 혼합비를 최적의 폐기물 조성비로 간주하였다.

## 3. 실험 결과 및 토론

### 3.1 감용비

모의 폐기물의 용융전 비중 측정은 전체 용융 대상 폐기물의 질량과 부피를 측정하여 결정하였으며, 실험 슬랙고화체의 비중 측정은 두 가지 방법으로 수행되었다. 첫 번째는 슬랙고화체 내부의 공극의 영향을 배제하기 위하여 부피를 측정하는 시료의 크기를 0.25mm~1mm사이로 통일하는 방법과 두 번째는 슬랙고화체 내부의 공극을 포함하여 부피를 측정하는 방법이다. 전자의 방법에서 측정된 비중을 고유비중이라 하고 후자를 겉보기 비중이라 한다. 표 4는 고유 비중과 겉보기 비중 및 용융 후의 감용비를 나타낸다. 고유비중이 겉보기비중보다 큰 것으로 나타났으며, 감용효과에 있어서도 고유비중으로 산출한 결과가 더 큰 것으로 나타났다.

모의 폐기물 종류별 감용 효과에 있어서는 특히 폐필터류를 모사하여 제조한 PT-10 시료가 약 7.4로 높은 감용 효과를 나타내었으며, 콘크리트-유리를 3:1로 혼합한 PT-01 시료와 콘크리트-유리-모래-필터류를 각각 1:1:1로 혼합한 PT-11 시료에 대한 감용비가 2.6 정도로 나타났고 그외의 시료는 1.5 ~ 2 정도의 감용비를 나타냈다.

## 3.2 외 형

슬랙고화체의 외형은 정량적인 기준으로 평가될 수 없는 항목으로 시료의 압축 강도, 유리화 상태 등 물리적 성질을 대신하기 위해 선택된 기준이다. 따라서 육안에 의해 판단되는 표면상태, 기포 포함 유무, 용융 상태의 균질성 등에 의해 평가하였다. 표 5는 외형의 육안 판정 결과를 나타내며, 유리-콘크리트를 1:3으로 혼합한 PT-02 시료가 특히 양호한 것으로 분석되었다.

## 3.3 방사성 핵종 포집율

방사성 핵종 포집율은 용융 공정중 발생 배기체에 의한 2차 계통의 방사능 오염 방지와 1차 계통의 방사능 누적 등의 문제와 관련되어 있는 중요한 항목으로, 방사성폐기물을 용융 처리하였을 경우 슬랙고화체가 어느 정도의 방사성 핵종을 내부에 포집할 것인가에 대해 추정하기 위하여 대적인 방사성 핵종인 세슘-137의 안정한 동위원소인 세슘-133을 일정량 첨가하여 용융 후에 슬랙고화체 내에 포집된 세슘-133의 함량을 유도결합 플라즈마(ICP : Inductively Coupled Plasma)를 사용하여 분석함으로써 포집율을 산출하였다. 세슘-133에 대한 포집율은 유리만을 용융하여 생성된 PT-08 시료가 86.9%로 가장 높게 나타났으며, 유리-모래를 3:1로 혼합한 PT-05시료가 30.8%로 가장 낮게 나타났다. 그러나 이러한 포집율은 세슘의 낮은 휘발 온도(600℃)를 고려할 때 대체로 높게 나타난 것이다. 표 6에 세슘-133에 대한 포집율 분석 결과를 정리하였다.

## 3.4 용출지수

일반적으로 TCLP에 의한 용출량은 슬랙고화체내에 존재하는 각 원소의 초기 농도가 얼마인가에 따라 달라질 수도 있으므로 시료들간의 절대적 비교는 곤란하다. 따라서, 각 원소가 슬랙고화체로부터 얼마나 용출되는가를 시료간에 절대적으로 비교하기 위하여 아래와 같이 정의되는 용출지수를 도입하였다. 즉, 용출지수란 각 슬랙고화체에 함유되어 있는 원소중에 몇 퍼센트가 용출되었는가를 보여주는 지표이다.

$$\text{용출지수}_i = \frac{\text{TCLP 실험에서의 용출량 [mg/L]}}{\text{MD법으로 결정된 슬랙고화체내의 함량 [mg/kg]}} \times 20[\text{L/kg}] \times 100$$

여기서,  $i$ 는 용출 대상 유해 무기 원소를 나타내며, 20이라는 숫자는 MD(Microwave Digestion)법에서 소화용액 1리터당 들어가는 슬랙고화체의 무게를 나타낸다.

슬랙고화체내 원소의 총함량을 분석하는데 사용한 MD법은 마이크로파 소화 방법을 말하며, TCLP는 미국 환경청(EPA)에서 제정한 측정법에 따라 수행하였다. 건전성 평가에 필요한 시료의 평균 용출지수를 구하기 위하여 고려된 원소는 비소(As), 바륨(Ba), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 수은(Hg), 납(Pb), 세슘(Cs)의 7가지이다. 용출된 원소들은 세슘외의 원소는 유도결합 플라즈마 방출분광법(ICP-AES)를 이용하여 분석하였고, 세슘은 유도결합 플라즈마 질량분광법(ICP-MS)를 이용하여 분석하였다.

MD 분석 및 TCLP 실험 결과를 표 7에 나타내었다. TCLP 실험 결과 대부분의 슬랙고화체 시료가 EPA에서 규정하고 있는 용출 기준을 만족하였다. MD법에 의한 총함량 시험 결과에서 검출되지 않았던 수은은 TCLP 용출 시험에서도 전 시료에 대해 검출되지 않았다.

EPA 규제 규정에 세슘에 대한 항목은 없으나, 다른 원소에 비해 10배 정도 용출량이 많은 것으로 나타났다. 따라서 방사성폐기물에 적용하기 위해서는 세슘의 용출율을 감소시킬 수 있는 슬랙 조성에 대해 더 연구를 수행해야 할 것으로 보인다. 세슘에 대한 용출량이 높게 나타난 다른 이유는 폐기물에 첨가된 세슘이 탄산세슘( $Cs_2CO_3$ ) 형태로 첨가되어 폐기물내 성분들과 반응성이 약해진데 기인한 것 같다.

표 8은 각 원소에 대한 용출지수를 나타낸 것으로 분석대상 원소에 따라 용출지수의 크기가 현저히 차이를 알 수 있다. 예를 들어 콘크리트-유리를 3:1로 혼합한 PT-01 시료의 경우, 크롬의 용출지수가 0.03의 값을 나타내는 반면 세슘의 용출지수는 최대 28.58를 나타내고 있다. 이와 같이 같은 슬랙고화체에 대하여 원소에 따라 용출지수의 값이 다른 이유는 슬랙고화체 내부의 결정 구조나 내부공극으로부터 빠져나올 수 있는 정도가 각 원소마다 다르고, 또한 주어진 용출액의 pH 조건하에서 각 원소의 존재형태가 달라서 생긴 용해도의 차이 때문이라고 판단된다.

### 3.5 건전성 평가

앞에서 제시한 슬랙고화체의 건전성 평가 기준에 따라 평가한 항목별 결과를 표 9에 정리하였다. 평가 대상 시료중에서 콘크리트-유리를 1:3으로 혼합한 PT-02 시료가 120점중 85점으로 가장 높은 점수를 받았으며, 모래만 500g 용융한 PT-09가 35점으로 최저점을 받았다. 따라서 비가연성 폐기물중 콘크리트-유리를 1:3 비율로 혼합하여 플라즈마 토치로 용융할 경우, 처분 안정성과 경제성 측면에서 최상의 슬랙고화체를 생성할 수 있는 것으로 나타났다.

## 4 결 론

본 연구에서는 60kW 플라즈마 토치를 이용하여 원자력발전소에서 발생하는 비가연성 폐기물인 콘크리트, 유리, 석고, 금속류, 토사류 및 필터류 중에서 콘크리트, 유리, 모래, 필터류를 용융 처리하여, 생성된 슬랙고화체에 대한 특성 및 건전성 평가를 실시하였다.

건전성 평가는 비중에 의한 감용비, 외관의 육안 평가, 방사성핵종 포집율 및 폐기물의 최종 처분 안정성을 평가할 수 있는 용출지수 등 4 가지 항목에 대하여 종합적으로 수행되었다.

용융 전후의 감용비는 모든 시료에서 1.5이상을 나타내어 용융에 의한 감용 효과가 있는 것으로 나타났으며, 특히 폐필터류를 모사하여 제조한 모의 폐기물이 포함된 시료에서 높은 감용 효과를 나타냈다.

슬랙고화체내 유해 무기물질 함량에 대한 MD 분석과 이들의 용출특성을 조사한 TCLP 용출시험에 근거하여 용출지수를 산출한 결과, 대체적으로 낮은 용출지수를 나타내었으며, 세슘을 제외한 모든 규제 대상 물질에 대한 용출량이 EPA 규제치 이하의 결과를 보여주었다.

또한 슬랙고화체 건전성 평가 결과, 평가 대상 시료중에서 콘크리트-유리를 1:3으로 혼합한 시료가 가장 높은 점수를 받아, 콘크리트와 유리를 1:3의 비율로 혼합하여 플라즈마 용융 처리하는 것이 최적의 슬랙고화체를 생성할 수 있는 조성비로 판명되었다.

따라서, 플라즈마 토치를 사용하여 비가연성 방사성폐기물을 용융 처리할 경우 콘크리트와 유리를 1:3의 비율로 혼합하여 용융하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 심재동, 반봉찬, "금속공학에서의 슬래그", 대광문화사, 1991년
- [2] J. Bradley Mason "Votification Advances for Low Level Radioactive and Mixed Wastes" Proceedings, EPRI International LLW Conference, 1995년
- [3] Pierce G.D. and Arndt M.B. "Volatility Studies in a Rotation Hearth Furnace" Americal Nuclear Society Meeting, Washington, D.C, USA, 1994년
- [4] Handbook "Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and Radioactive Waste", Office of R&D U.S. Environmental Protection Agency, Cininnati, OH, 1992년.
- [5] Y.P. Moon, C.H.Cho, M.J. Song, S.O. Han, "A Plasma Melting of Noncombustible Waste for Vitrification" Proceedings of International Symposium on Radiation Safety Management '97, KEPRI/KNS, 1997년
- [6] US EPA, Toxicity Characteristic Leaching Procedures, Method 1311, Test, Method for Evaluating Solid Waste SW-846, 1990년
- [7] EPRI, Assessment of Power Reactor Waste Immobilization by Vitrification, EPRI NP-3225, 1983
- [8] Appratus and Method for High Temperature Disposal of Hazardous Waste Materials, Retech Inc., U.S. Patent No. 5005,494
- [9] 김정국, "방사성 폐기물 고화체의 특성평가 및 검사방법 연구", 한국 원자력연구소, '88년도 선임승격보고서, 1988
- [10] 이상호, 인터넷에 소개되고 있는 환경분야의 플라즈마 아크기술 (1),(2), 환경 기술, 1997
- [11] 박승국, 김홍재, 허영수, 주정명, 화학편람, 대광서림, 1988
- [12] R.B. 라두, W.M. 마이아, 비금속광물, 대한교과서 주식회사, 1963



표 1. 모의 폐기물의 원료 물질

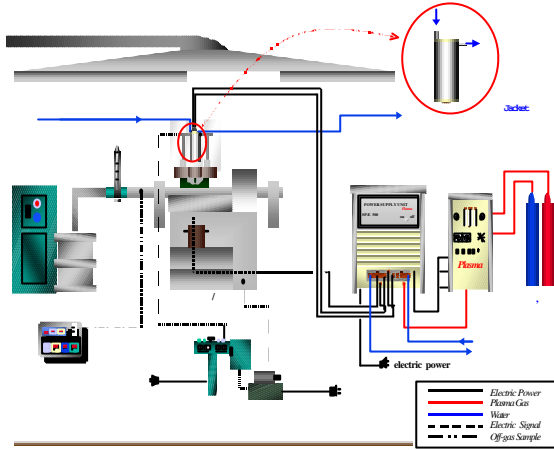


그림 1. 플라즈마 토치 용융시스템의 개략도

비가연성 방사성폐기물	모의 폐기물 원료
콘크리트, 석고류	콘크리트 블록
필터류	아연도금강판, 스테인레스강
유리철재, 형광등류	일반 판유리, 탄소강철근, 형광등
모래 및 기타류	건축용 모르타르사

표 2. 모의 폐기물 조성표

시료번호	비가연성 모의 폐기물 조성					Csium (5g/kg)	용량
	폐기물				용량		
	콘크리트	유리	모래	필터류			
PT-01	375g	125g			Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-02	125g	375g			Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-03	375g		125g		Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-04	125g		375g		Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-05		375g	125g		Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-06		125g	375g		Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-07	500g				Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-08		500g			Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-09			500g		Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-10				500g	Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.1g	선철류 4000g	
PT-11	150g	150g	150g	150g	Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3.72g	선철류 4000g	

표 3. 슬랙고화체의 건전성 판정 기준

평가 항목	적용 방안	산정 기준
비중에 의한 감용비	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 모의폐기물 원료물질의 비중을 실험적으로 측정하여 용융대상 폐기물의 혼합 비중을 계산한다.</li> <li>· 용융 후 슬랙고화체의 고유비중을 측정하여 감용비를 산출한다.</li> <li>· 감용비가 큰 시료를 양호한 것으로 평가한다.</li> </ul>	271% 이상 : 30
		251 ~ 270% : 27
		231 ~ 250% : 24
		210 ~ 230% : 21
		191 ~ 210% : 18
		171 ~ 190% : 15
		151 ~ 170% : 12
		131 ~ 150% : 9
111 ~ 130% : 6		
110%이하 : 3		
외형의 육안판정	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 슬랙고화체의 외형을 육안으로 판별한다.</li> <li>· 일반 유리와 같은 형태를 양호한 것으로 평가하고 시료의 강도에 대한 판정도 병행한다.</li> </ul>	A, 유리질 : 30
		B, 내부기포존재 : 20
		C, 불균일질 용융 : 10
방사성 핵종 포집비	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 일정하게 투여한 방사성 핵종 추적자(Cs)가 최종폐기물인 슬랙고화체내에 존재하는 비율을 실험적으로 결정</li> <li>· 세슘의 존재 비율이 높은 시료를 양호한 것으로 평가한다.</li> </ul>	포집효율 90% 이상 : 30
		포집효율 80 ~ 90% : 25
		포집효율 70 ~ 80% : 20
		포집효율 60 ~ 70% : 15
		포집효율 50 ~ 60% : 10
		포집효율 50%미만 : 5
TCLP 용출시험 (용출지수)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 유리화 고화체에 대해 방사성 핵종 추적자와 기타 유해 물질의 용출 특성을 분석한다.</li> <li>· 용출량이 적은 시료를 양호한 것으로 평가한다.</li> <li>· 평균용출지수 산정시 용출시험 대상 물질은 As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Cs로 설정한다.</li> </ul>	평균용출지수 0.50 미만 : 30
		평균용출지수 0.50 ~ 1.00미만 : 28
		평균용출지수 1.00 ~ 1.50미만 : 26
		평균용출지수 1.50 ~ 2.00미만 : 24
		평균용출지수 2.00 ~ 2.50미만 : 22
		평균용출지수 2.50 ~ 3.00미만 : 20
		평균용출지수 3.00 ~ 3.50미만 : 18
		평균용출지수 3.50 ~ 4.00미만 : 16
		평균용출지수 4.00 ~ 4.50미만 : 14
		평균용출지수 4.50 ~ 5.00미만 : 12
		평균용출지수 5.00 ~ 5.50미만 : 10
		평균용출지수 5.50 ~ 6.00미만 : 8
		평균용출지수 6.00 ~ 6.50미만 : 6
		평균용출지수 6.50 ~ 7.00미만 : 4
평균용출지수 7.00이상 : 2		

표 4. 모의 폐기물과 슬랙고화체의 비중(감용비)

시료 번호	비중			감용비 (%)	
	모의 폐기물 (A)	고유비중 (B)	겉보기비중 (C)	(B/A)×100	(C/A)×100
PT-01	1.316	3.450	-	262.2	-
PT-02	1.250	2.990	3.000	239.2	240.0
PT-03	1.351	2.740	1.680	202.76	124.32
PT-04	1.563	3.330	2.130	213.12	136.32
PT-05	1.389	2.670	1.510	192.24	108.72
PT-06	1.563	2.360	2.000	151.04	128.0
PT-07	1.250	3.070	1.720	245.6	137.6
PT-08	1.282	2.180	2.110	170.04	164.58
PT-09	1.429	2.550	1.700	178.5	119.0
PT-10	0.439	3.230	-	736.44	-
PT-11	0.938	2.440	1.830	260.27	195.2

표 5. 외형의 육안 판정

시료번호	외형의 육안 판정	등급
PT-01	완전히 용융된 상태이나, 견고하지 않음	B
PT-02	내부에 기포가 거의 없으며, 완전 유리질로 용융되어 견고함	A
PT-03	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-04	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-05	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-06	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-07	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-08	완전히 용융되어 유리질을 띠, 견고하지만 내부에 공극이 존재함	B
PT-09	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-10	완전히 용융되었으나, 유리질이 거의 없고, 내부에 미세한 공극이 많음	B
PT-11	완전히 용융되었으나, 견고하지 않고 내부에 크고 작은 공극이 많음	B

표 6. 방사성세슘 포집율

시료번호	슬랙고화체내 세슘 함량 (mg/kg)	세슘 포집효율 (%)
PT-01	2018.02	40.36
PT-02	1863.89	37.28
PT-03	3106.62	62.13
PT-04	2301.54	46.03
PT-05	1540.40	30.80
PT-06	2073.72	41.47
PT-07	2698.75	53.98
PT-08	4345.11	86.90
PT-09	1717.60	34.25
PT-10	1710.08	34.20
PT-11	1893.62	37.87
평균	2297.21	45.94

표 7. 슬랙고화체의 MD 분석 및 TCLP 용출시험 결과

시료번호	분석 대상 물질													
	As		Ba		Cd		Cr		Hg		Pb		Cs	
	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)	MD (mg/kg)	TCLP (mg/l)
PT-01	60.19	0.08	261.57	0.62	41.67	0.02	1287.04	0.02	0	0	76.39	0.12	2018	28.84
PT-02	62.99	0	286.09	0.52	55.12	0.06	916.01	0.03	0	0	70.87	0.13	1864	0.48
PT-03	68.24	0.04	398.54	0.51	27.30	0.09	685.17	0.02	0	0	40.95	0.21	3107	0.50
PT-04	21.93	0.07	307.02	0.4	37.28	0.09	910.09	0.01	0	0	52.63	0.19	2302	0.76
PT-05	54.32	0	194.44	0.48	40.60	0.07	683.76	0.02	0	0	34.19	0.12	1540	3.75
PT-06	0	0.08	176.79	0.2	21.76	0.08	2605.62	0.03	0	0	0	0.08	2074	1.17
PT-07	44.20	0.04	281.76	0.19	35.91	0.07	2091.16	0.01	0	0	24.86	0.09	2699	0.53
PT-08	0	0.01	150.57	0.21	25.57	0.08	2855.10	0.09	0	0	45.45	0.18	4345	45.10
PT-09	0	0.04	200.62	0.49	9.33	0.08	751.17	0.05	0	0	7.00	0.08	1718	1.03
PT-10	30.85	0	208.86	0.71	35.60	0.14	2760.29	0.02	0	0	28.48	0.09	1710	17.85
PT-11	35.61	0	222.56	0.52	35.61	0.11	2415.43	0.1	0	0	38.58	0.09	1894	0.72

\* EPA 분석대상 물질 TCLP 규제치(mg/l)  
 As : 5 mg/l, Ba : 100 mg/l, Cd : 1 mg/l, Cr : 5 mg/l, Hg : 0.2 mg/l, Pb : 5 mg/l, Cs : - mg/l (관련 규정이 없음)

표 8. 슬랙고화체의 용출지수

시료번호	분석 대상 물질							평균 용출지수
	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Pb	Cs	
PT-01	2.66	4.74	0.96	0.03	0	3.14	25.58	5.73
PT-02	0	3.64	1.81	0.07	0	3.67	0.52	1.39
PT-03	1.17	2.56	6.59	0.06	0	10.26	0.32	2.99
PT-04	6.38	2.61	4.83	0.02	0	7.22	0.66	3.10
PT-05	0	4.94	3.45	0.06	0	7.02	4.87	2.99
PT-06	0	2.26	7.35	0.02	0	0	1.13	1.54
PT-07	1.81	1.35	3.90	0.01	0	7.24	0.39	2.10
PT-08	0	2.79	6.26	0.06	0	7.92	20.76	5.40
PT-09	0	4.88	17.15	0.13	0	22.86	1.20	6.60
PT-10	0	6.80	7.87	0.01	0	6.32	20.88	5.98
PT-11	0	4.67	6.18	0.08	0	4.67	0.76	2.39

표 9. 슬랙고화체의 건전성 평가 결과

시료번호	외형의 육안판정	감용비	방사성핵종 포집비	TCLP 용출지수	총점 (120 만점)
PT-01	20	27	5	8	60
PT-02	30	24	5	26	85
PT-03	20	6	5	20	51
PT-04	20	9	5	18	52
PT-05	20	3	5	20	48
PT-06	20	6	5	24	55
PT-07	20	9	5	22	56
PT-08	20	12	10	10	52
PT-09	20	6	5	4	35
PT-10	20	30	5	8	63
PT-11	20	18	5	22	65