

## 플라즈마 토치를 이용한 비가연성 폐기물 처리

### Incombustible Waste Melting with Plasma Torch

박종길, 문영표, 박병철, 이명찬

한전 원자력환경기술원  
대전광역시 유성우체국 사서함 149

#### 요 약

원자력 발전소에서 발생하는 방사성 폐기물 중 비가연성 방사성 폐기물은 콘크리트, 유리, 석고, 금속류, 토사류 및 필터류 등으로 구성되어 있다. 이들 폐기물 중에 콘크리트, 유리, 모래, 필터류에 대한 용융처리실험을 60 kW 플라즈마 토치를 이용하여 수행하였다. 실험에 사용된 폐기물은 비방사성 폐기물이며 방사성 폐기물을 모사하기 위하여 비방사성 Co와 Cs를 첨가하여 실험을 수행하였다. 이들 폐기물을 혼합하여 4종류의 혼합폐기물을 만들어 용융시킨 후 형성된 슬랙에 대해 여러 가지 물성을 측정하였다. 용융전의 혼합물의 비중과 슬랙의 비중을 측정하여 감용비를 측정하였고, 슬랙에 대한 총 원소함량을 측정하고 TCLP법에 의한 침출시험을 수행하여 As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Se, Co, Cs에대한 침출량을 측정하고, 각 원소들의 고화체내 총함유량을 측정하여 침출계수를 계산하였다. 감용비는 2.0 ~ 2.6으로 나타났으며 TCLP 시험결과 Se, Co, Cs이외의 원소들에 대한 침출량이 EPA에서 제정한 규제치 이하로 나타났다. Co, Cs의 경우 EPA 규제치는 없으나 기타 원소에 비해 10배 정도 높은 침출량과 침출계수를 보였다.

#### Abstract

Incombustible radioactive waste from NPPs is 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 Co & Cs were added to the surrogate in order to simulate the radioactive waste. Four kinds of surrogate were prepared by mixing them and were melted with plasma torch system to produce slags. The characteristics of slags were examined for the volume reduction factor(VRF) and the leach rate. The VRFs were estimated through measurement of specific gravities for surrogate and slag and were turned out to be 2.0 ~ 2.6. The TCLP was applied to test leach rate for As, Ba, Hg, Pb, Se, Co, Cs and the leaching index was calculated using both the total content in slag and the leached amount for each element. The TCLP resulted that the leach rates for all elements except Se, Co, and Cs were lower than those of the EPA guide line. For Co and Cs, there was no the EPA guide line and the leach rate & index for them were around 10 times higher than those of the other elements.

#### 1. 서 론

'플라즈마(plasma)'는 "전자기력(electromagnetic forces)에 영향을 받는 하전입자들을 포함하는 매질"이라고 정의될 수 있다. 다시 말해서 플라즈마는 이온화된 기체를 지칭하며 보통의 기체와는

다른 특유의 성질을 지니기 때문에 '제4의 물질상태'라고도 한다. 플라즈마는 전자, 이온, 여기된 원자 또는 분자 및 반응성이 강한 라디칼(radical)로 구성되며, 이들 상호간의 작용으로 인해 거의 중성인 하전입자의 집단을 형성한다.[1]

플라즈마를 발생시키는 방법은 직류 또는 교류 방전에 의한 방법과 고주파 전기장 방전에 의한 방법으로 크게 나눌 수 있다. 기체를 전리시켜 플라즈마를 생성하는 경우 기체분자 A개중 전자가 B개 생성되었을 때, B/A를 전리도라고 한다. 전리도가 충분히 낮은 경우에는 전자나 이온이 충돌하는 상대는 대부분이 기체분자이며 하전입자간의 충돌 영향을 무시할 수 있다. 이런 플라즈마를 약전리 플라즈마라고 하며 전리도는 0.1% 이하이다. 반면 전리도가 1% 정도 되는 열플라즈마는 강전리 플라즈마에 속하며 폐기물 처리에 활용되고 있다. 핵융합에 사용되는 플라즈마는 100%에 가깝게 전리된 완전전리 플라즈마에 해당된다.[2]

본 연구에서 사용된 플라즈마 토치는 번개와 비슷한 일정길이의 아크 칼럼을 유지하면서 기체를 주입하여 기체를 전리시키는 장치로서 제한된 공간에서 순간적으로 초고온을 낼 수 있는 장점을 지니고 있다. 플라즈마 토치를 열원으로 사용하면 독성 가스의 처리가 가능하고 유기성 폐기물을 열분해하여 탄화수소, 이산화탄소 등의 기체로 전환시킬 수 있으며, 잔여 무기물은 매우 안전한 슬랙형태로 남게되며, 여기상태나 전리상태의 입자가 다수 존재하므로 화학반응이 촉진되고 전류, 전압 등의 조절을 통해 열원을 신속하게 제어할 수 있는 등의 장점이 있기 때문에 최근 이 기술을 환경산업에 접목하려는 연구가 전세계적으로 활발히 추진되고 있다.[3]

본 논문에서는 플라즈마 토치를 이용하여 원자력발전소에서 발생하는 비가연성 폐기물을 용융 처리하는 실험을 수행하였다. 원자력 발전소에서 발생하는 방사성 폐기물 중 비가연성 방사성 폐기물은 콘크리트, 유리, 석고, 금속류, 토사류 및 필터류 등으로 구성되어 있다.[4] 이들 폐기물 중에 콘크리트, 유리, 모래, 필터류에 대한 용융 실험을 수행하였다. 다른 첨가물 없이 발생하는 폐기물만을 용융처리할 수 있는지를 검토하기 위해 폐기물들을 여러 혼합비로 섞고 여기에 적당량의 비방사성 Co와 Cs를 첨가한 후 용융시켜 슬랙을 제조하였다. 폐기물 및 슬랙의 화학적 조성, 비중 등을 측정하고, 슬랙에 대한 침출시험을 통하여 용융처리시의 감용비, 침출계수 등을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

플라즈마 토치 용융시설은 플라즈마 발생장치인 용량 60 kw의 플라즈마 토치와 토치에 필요한 DC 전력을 공급하는 전원공급장치, 용융로, 제어반, 배기체 처리 장치 등으로 구성된다. 또한, 플라즈마 토치의 상하운동을 조절할 수 있도록 토치지지대를 설치하였다. 플라즈마 토치 용융시설의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 플라즈마 토치는 전형적인 solid type 토치이며, 사용전원이 DC인 straight polarity 연결 방식의 토치이다.

토치 내부의 전극은 수냉각되는 전선으로 전원을 공급받는 텅스텐 solid 전극(-극)과 기동아크 발생을 위한 보조전극(+극)이 연결되어 있다. 보조 전극선(+)은 절연된 구리 도선을 통해 토치의 앞부분인 노즐까지 연결되어 주전극선인 텅스텐 solid(-극) 사이의 기체를 이온화시켜 기동 아크를 발생시키게 된다. 이러한 기동아크의 발생은 non-transferred 방식으로 볼 수 있으며, 발생된 기동아크는 주 플라즈마 발생의 매개가 된다. 초기 기동 아크는 용융로 하부의 전극(+)과 전기적으로 통할 수 있는 용융로 내부 모재와 접촉하여 주 플라즈마를 발생시키는데 이용된다. 주 플라즈마가 발생하게 되면, 보조전극선에 연결된 저항에 의해 전류 흐름이 차단되어 자동적으로 기동 아크가 차단된다. 따라서 주 플라즈마 불꽃이 플라즈마 토치의 텅스텐 주전극선과 용융로 하부의 전극에 의해 발생되고 아크의 도달점이 토치 외부인 용융로 하부 전극이 되게 되므로 transferred

방식의 토치로 전환되게 된다.

토치의 재질은 스테인레스강, 구리합금, 텅스텐 합금, 알루미늄, 초자류, 기타 절연성 폴리머이다. 이 중 중요 부품인 주 전극 solid는 텅스텐 96%와 전극의 성능을 증가시키기 위해 토륨을 4% 도핑한 합금이다. 토치의 각 부위를 결합하는 링은 황동 재질이며, 노즐은 열전도도와 전기전도도를 고려하여 구리로 제조되었다. 기타 토치의 몸체부는 스테인레스강으로 제조되었으며, 기체 공급과 냉각수 공급을 위한 배관은 구리관이 사용되었다. 절연이 필요한 부분은 폴리프로필렌 계통의 합성수지가 사용되었다.

토치의 냉각은 토치 내부의 냉각과 외부 냉각 jacket에 의한 냉각으로 이루어지며, 내부 냉각은 토치 앞부분의 구리 노즐을 냉각하는 역할을 하며, 외부 냉각 jacket은 토치 전체의 냉각 작용과 토치의 지지대 역할을 하고 있다. 외부 냉각 jacket은 용융로의 mast에 clamp로 고정되어 상하운동을 할 수 있도록 설치된다. 냉각수는 별도의 장치를 설치하지 않고 수도물을 이용하였다.

용융로는 외부강피에 의해 보호되는 내화물로 구성되어 있으며, 회분식 공정에 적합하도록 설계되어 있다. 용융로 내부 직경은 250mm, 깊이는 250mm이며, 전체 높이는 500mm이다. 1회분에 대한 용융 용량은 금속기준으로 5kg정도이다. 용융로 하부 내화물에는 하부전극선이 장치되어 있으며, 용융물의 배출을 위해 전체 용융로가 기울어지는 기능을 가지고 있다. 용융로가 경사지도록 기울어졌을 때 원활한 용융물 배출을 위해 배출구가 용융로 상부에 마련되어 있으며, 개방형인 용융로 상부를 밀폐할 수 있는 덮개가 마련되어 있다.

용융로에 장착된 부속계통으로 플라즈마 토치의 상하 운동을 위한 mast가 존재하지만 좌우 이동은 불가능하다. 토치의 상하운동은 조절기를 통해 조작자가 조절한다. 플라즈마 토치가 용융로에 장착되는 방식은 mast에 연결된 토치 arm에 외부 수냉 jacket에 결합하는 것이며, jacket 하부의 구멍으로 플라즈마 불꽃이 방출된다. 용융로 상부에는 배기가스의 배출을 위한 duct가 존재하며, 후단의 집진기에 의해 강제 배기된다.

## 2.2 실험방법

### (1) 모의 폐기물 제조

모의 폐기물을 제조하기 위해 콘크리트-유리(PT1), 콘크리트-모래(PT2), 유리-모래(PT3)의 혼합 모의폐기물 3종류를 준비하였는데 각각의 혼합폐기물은 콘크리트:유리, 콘크리트:모래, 유리:모래의 질량비가 3:1이 되도록 섞어 500g씩 준비하였다. 또한 콘크리트-유리-모래-필터류(PT4)를 1:1:1:1의 질량비가 되도록 150g씩 혼합하여 600g이 되도록 한 모의폐기물 1종류를 준비하였다. 필터류의 경우는 스테인리스강 60g, 아연도금강판 30g, 유리섬유 30g, 폴리프로필렌 30g을 혼합하였다. 그리고 각각의 혼합폐기물마다 비방사성 세슘과 코발트가 혼합폐기물 kg당 5g이 되도록  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ 와 분말형 Co를 첨가하였다.

### (2) 모의 폐기물 용융 및 배출

본 실험에서 사용된 용융 대상 폐기물이 대부분 비전도성 물질이므로 transferred 방식의 토치를 가동하기 위하여 용융로 하부전극과 통전될 수 있는 금속재료로 용탕(molten bath)을 제조하여야 한다. 이를 위하여 선철괴 4000g을 용융 작업전 용융로에 투입한다. 선철괴가 용융되어 형성된 용탕은 전기전도도를 유지시켜 줄 뿐만 아니라 용융로 내부를 항온으로 유지시키는 역할을 하기도 한다. 용탕 재료를 투입한 상태에서 플라즈마 토치를 점화시킨다.

플라즈마 토치의 점화는 플라즈마 발생 기체로서 Ar(18 lpm)과  $\text{H}_2$ (2 lpm)를 9:1의 비율로 공급한 상태에서 제어반의 기동아크 발생 스위치를 작동하면 보조전극선(+)이 연결된 토치 노즐과 주전극선이 연결된 텅스텐 solid 전극(-)사이에서 기동아크(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 transferred 방식이 될 수도 있으며, non-transferred 방

식이 될 수도 있다. 대체로 non-transferred 방식은 용융로 하부 전극과 토치 내의 solid 전극(-극) 사이의 공간에 있는 기체(Ar, H<sub>2</sub>의 흐름)를 이온화하기 위한 기동 아크 점화시에만 사용되고 이에 이용되는 전원은 solid 전극과 용탕 재료 사이에서 주 플라즈마 아크가 연결되는 순간에 자동적으로 차단된다. 이러한 회로에서는 한 개의 DC 전원만이 연결되어 회로에 전기를 공급하고, 양극선이 중간에 나와서 토치 노즐에 연결되어 있다. 이 중간 연결선에는 보조 아크, 또는 기동아크의 전류를 제한하는 저항이 연결되어 있다.

기동아크와 용융로 하부전극의 접촉이 이루어지면, non-transferred 방식에서 transferred 방식으로 자동적으로 전환되고 주 플라즈마 불꽃이 형성된다. 공급되는 플라즈마 발생기체의 종류와 유량이 일정하고 정전압 mode에서 운전할 때, 공급전류는 토치의 -전극과 용융로 하부의 +전극 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 jacket의 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 액상(liquid-like phase)을 띠게 된다. 그러나 금속류 용탕과 비금속류 용융물은 비중 차이에 의해 경계층을 형성하며 두 상으로 분리된다. 실험용 플라즈마 토치 용융시설에서도 이러한 현상을 볼 수 있다. 폐기물의 용융이 완료되면 용융로를 기울여서, 용융로 내부의 용융물(용탕, 비금속류 용융물)을 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 소요된다.

### 3. 실험결과 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 1은 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 콘크리트-유리(PT1)와 콘크리트-유리-모래-필터류(PT4)에 대한 감용비가 2.6정도로 나타났고 그외의 시료는 약 2정도의 감용비를 보여주었다.

#### 3.2 침출량

침출시험은 미국 EPA에서 제정한 TCLP 측정법에 따라 수행하였다.[5] 침출된 원소들은 Cs이외의 원소는 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer)(Shimadzu사 제품 model: ICP S-1000 IV)를 이용하여 분석하였고, Cs는 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)(Shimadzu사 제품 model: VG plasma Quad PQ2 Turbo)를 이용하여 분석하였다.

TCLP 실험 결과를 그림 2에 나타내었다. 전체 시료가 Se를 제외하고는 EPA에서 규정하고 있는 규제치를 안정적으로 만족하고 있다. Se에 대한 규제치는 콘크리트와 유리를 3:1로 혼합한 PT1의 경우만 만족하는 것으로 나타났다. 원료물질의 Se 침출량이 0.1~0.2 mg/L인 점으로 미루어보아 슬랙고화체로부터 용출되는 Se는 용탕에서 사용되는 선철류로부터 기인하는 것이라 판단된다. Co와 Cs에 대한 EPA 규제치는 없었지만 상당히 높은 침출율을 나타내고 있다. 다른 원소에 비해 10배 정도 침출량이 많은 것으로 나타났다. 따라서 방사성폐기물에 적용하기 위해서는 Co와 Cs의 침출율을 감소시킬 수 있는 슬랙 조성에 대해 더 연구를 수행해야 할 것으로 보인다. Co와 Cs에 대한 침출량이 높게 나타난 다른 이유는 폐기물에 첨가된 Co와 Cs이 Co는 분말형태로 Cs는  $Cs_2CO_3$  형태로 첨가되어 폐기물내 성분들과 반응성이 약해진데 기인한 것 같다. 차기 연구에서는 CsCl 이나  $CoCl_2$  형태의 화합물을 첨가하여 용융실험을 수행하여 비교하고자 한다. 본 연구에서 Co 및 Cs를 포함한 원소에 대해 침출량이 가장 양호한 슬랙고화체는 콘크리트와 모래를 3:1로 혼합한 모의폐기물(PT2)로 제조한 것으로 나타났다. 또한 콘크리트와 유리를 3:1로 혼합한 폐기물(PT1)로 만들어진 고화체의 경우 Co, Cs의 침출량이 가장 큰 것으로 나타났다.

### 3.3 침출지수

위에서 살펴본 침출량이라는 것은 슬랙고화체내에 존재하는 각 원소의 초기 농도가 얼마인가에 따라 달라질 수도 있으므로 시료들간의 절대적 비교는 곤란하다. 따라서, 각 원소가 슬랙고화체로부터 얼마나 침출되는가를 시료간에 절대적으로 비교하기 위하여 아래와 같이 정의되는 침출지수를 도입하였다. 즉, 침출지수란 각 슬랙고화체에 함유되어 있는 원소중에 명 퍼센트가 침출되었는가를 보여주는 지표이다.

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

여기서,  $i$ 는 용출 대상 유해 무기 원소를 나타내며, 20이라는 숫자는 MD법에서 소화용액 1리터당 들어가는 슬랙고화체의 무게를 나타낸다.

고화체내 원소의 총함량을 분석하는데 사용한 MD법은 Microwave Digestion 방법을 말하며, 다음과 같은 절차를 따라 분석이 진행된다. 시료를 0.2~0.5g 정도 채취하여 teflon재질의 용기에 넣은 후, 산을 첨가한다. 용기의 뚜껑을 닫은 후 용기를 Rotor에 고정시킨 후, Microwave Digestion Unit(Milestone mls 1200 mega)에 넣고, 소화방법을 정하여 주면 소화가 진행된다. 질산 4mL, 과염소산 2mL를 넣고 250W에서 5분, 400W에서 10분, 600W에서 10분, 250W에서 5분 동안 소화시킨 후 불화수소산 4mL를 넣고 250W에서 5분, 400W에서 10분, 600W에서 10분, 250W에서 5분 동안 소화시킨다. 시료에 따라 조금씩 차이가 있지만, 이 방법을 한 주기로 하여, 3~5주기를 실시한다. 시료가 거의 완벽하게 녹은 것을 확인한 후 소화시킨 시료를 검액으로 사용한다. 소화된 검액의 분석은 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer)와 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)로 수행한다.

그림 3은 각 원소에 대한 침출지수를 나타낸 것으로 분석대상 원소에 따라 침출지수의 크기가 현저히 차이를 알 수 있다. 예를 들어 Cr의 경우에는 0.083(PT4) 이하의 값을 나타내는 반면 Co의 경우, 최대 135.01(PT1)을 나타내고 있다. 같은 슬랙고화체에 대하여 원소에 따라 용출지수의 값이 다른 이유는 슬랙고화체 내부의 결정구조나 내부공극으로부터 빠져나올 수 있는 정도가 각 원소마다 다르고, 또한 주어진 용출액의 pH 조건하에서 각 원소의 존재형태가 달라서 생긴 용해도의 차이 때문이라고 판단된다.

그림 3으로부터, Co와 Cs를 제외한 원소에 대해서는 콘크리트와 유리의 혼합폐기물(PT1)로부터 제조된 고화체가 가장 우수한 것으로 나타났지만 Co와 Cs를 고려할 때는 PT3(유리+모래)와

PT4(콘크리트+유리+모래+필터류)를 이용하여 만든 고화체가 우수한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

원전에서 발생하는 비가연성 방사성폐기물을 플라즈마 토치를 이용하여 처리하는데 필수적인 최적 슬랙 고화체 조성을 위해 몇가지 모의 방사물에 대한 용융실험을 수행하였다. 슬랙고화체의 건전성을 측정하기 위해 감용비와 TCLP 및 Microwave Digestion을 이용한 총합량 분석을 수행하였다.

콘크리트-유리(PT1), 콘크리트-모래(PT2), 유리-모래(PT3), 콘크리트-유리-모래-필터류(PT4)의 혼합폐기물 4종류를 각각 용융시켜 슬랙고화체를 만들고 고화체 건전성을 측정하였다.

모의 폐기물 종류별 감용 효과에 있어서는 콘크리트-유리(PT1)와 콘크리트-유리-모래-필터류(PT4)에 대한 감용비가 2.6정도로 나타났고 그외의 시료는 약 2정도의 감용비를 보여주었다.

TCLP 시험을 통한 침출량 측정 결과는 Se를 제외하고는 EPA에서 규정하고 있는 규제치를 안정적으로 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, Co와 Cs에 대한 EPA 규제치는 없었지만 침출량이 상당히 높아 다른 원소에 비해 10배 정도 침출량이 많은 것으로 나타났다. 따라서 방사성폐기물에 적용하기 위해서는 Co와 Cs의 침출율을 감소시킬 수 있는 슬랙 조성에 대해 더 연구를 수행해야 할 것으로 보인다. 본연구에서 Co 및 Cs를 포함한 원소에 대해 침출량이 가장 양호한 슬랙고화체는 콘크리트와 모래를 3:1로 혼합한 모의폐기물(PT2)로 제조한 것으로 나타났다. 또한 콘크리트와 유리를 3:1로 혼합한 폐기물(PT1)로 만들어진 고화체의 경우가 Co, Cs의 침출량이 가장 큰 것으로 나타났다.

슬랙고화체내에 존재하는 총 원소함량중 몇 %가 침출되는지를 나타내는 침출지수의 경우 분석 대상 원소에 따라 침출지수의 크기가 현저히 차이를 알 수 있었다. 예를 들어 Cr의 경우에는 0.083(PT4) 이하의 값을 나타내는 반면 Co의 경우, 최대 135.01(PT1)을 나타내고 있다. 침출지수 측면에서 볼 때, Co와 Cs를 제외한 원소에 대해서는 콘크리트와 유리의 혼합폐기물(PT1)로부터 제조된 고화체가 가장 우수한 것으로 나타났지만 Co와 Cs를 고려할 때는 PT3(유리+모래)와 PT4(콘크리트+유리+모래+필터류)를 이용하여 만든 고화체가 비슷하게 우수한 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- [1] Yaffa Elizer and Shalom Eliezer, The Fourth State of Matter, Adam Hilger Press, 1989
- [2] Pierre Fauchais and Armelle Vardelle, Thermal Plasmas, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 25(6), 1997
- [3] 최현구, Thermal Plasma Processes for Industrial Waste Treatment and Valorization, 한국폐기물학회 춘계학술대회, 1996
- [4] 박종길, 송명재, "저준위 방사성 폐기물 유리화에 관한 타당성 연구", 전력연구원 연구보고서 KEPRI-94Z-17, 1995
- [5] US EPA, "Toxicity Characteristic Leaching Procedures, Method 1311, Test Method for Evaluating Solid Waste SW-846,", 1990

표 1. 모의 폐기물과 슬랙고화체의 비중(감용비) 측정 결과

시료번호	비중			감용비 (%)	
	폐기물(A)	슬랙고유 비중(B)	슬랙겔보기 비중(C)	$(B/A) \times 100$	$(C/A) \times 100$
PT1	1,316	3,450	-	262.2	-
PT2	1,351	2,740	1,680	202.76	124.32
PT3	1,389	2,670	1,510	192.24	108.72
PT4	0,938	2,440	1,830	260.27	195.2

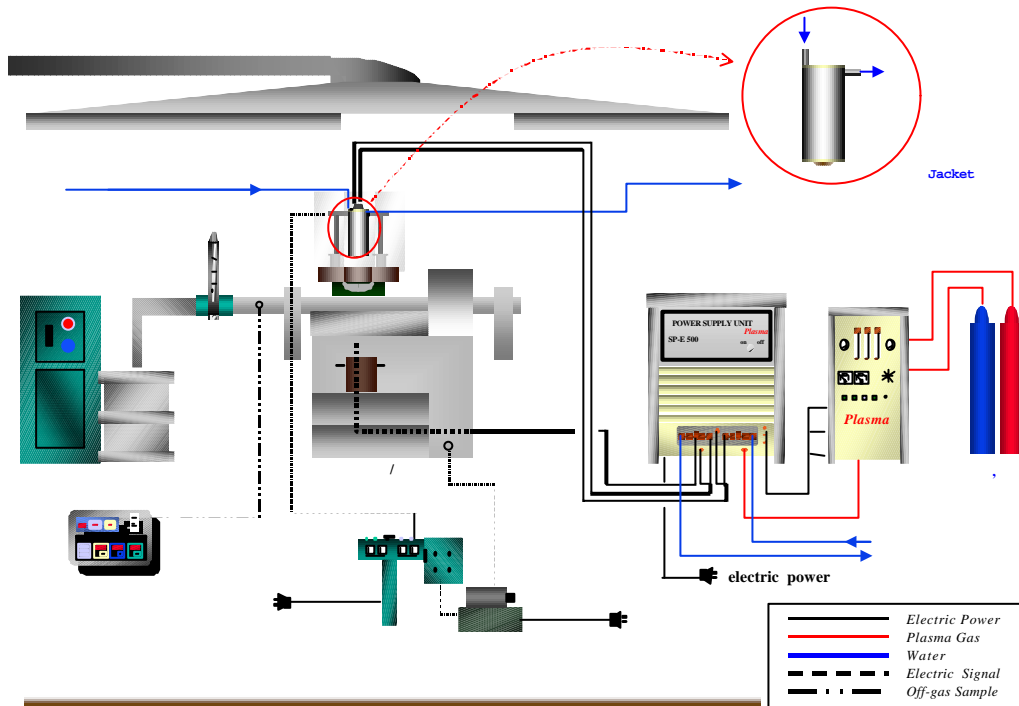


그림 1. 플라즈마 토치 응용시스템의 개략도

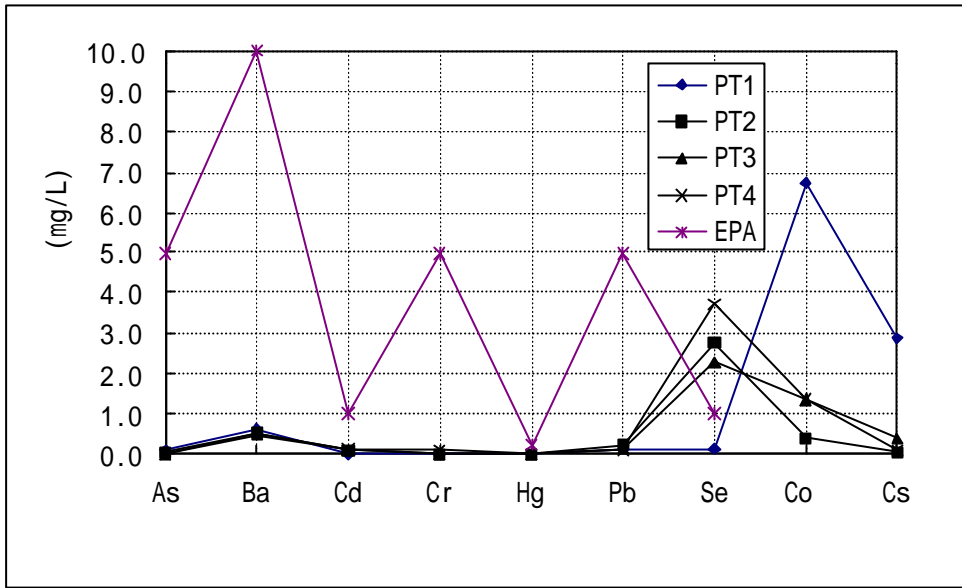


그림 2. 슬랙고화체에 대한 TCLP 결과  
(Ba에 대한 EPA 기준치 및 Co, Cs에 대한 TCLP 결과는 그래프에 표시된 값의 10배임)

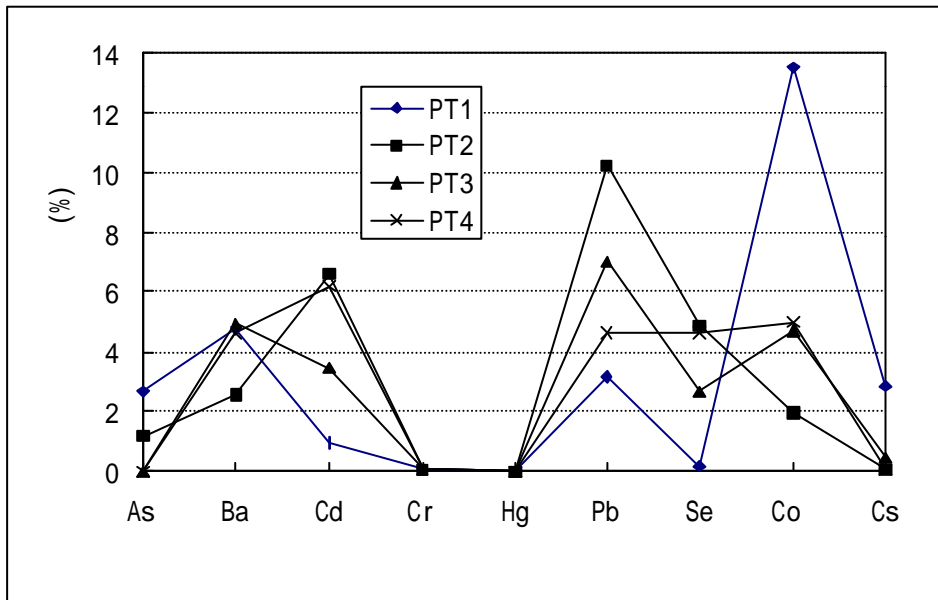


그림 3. 슬랙고화체에 대한 침출지수  
(Co, Cs에 대한 결과는 그래프에 표시된 값의 10배임)