

비전도성 물질의 이행형 플라즈마 가열특성

Heating Properties of Transferred Arc Plasma by Non-conductive Materials

문영표, 신상운, 이명찬

한국전력공사 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

요 약

국내의 원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물 가운데 많은 부분을 점유하는 콘크리트, 유리, 모래, 철재류, 유리섬유 등과 같은 폐기물의 초고온 플라즈마 용융조업의 가능성을 조사하고자 모의 폐기물을 제조한 후, 60kW급 플라즈마 용융설비를 사용해 수소-아르곤 혼합기체의 분위기 중에서 비전도성 물질을 용융중에 투입했을 때 이행형 플라즈마 아크전압의 변화를 살펴보고, 이를 바탕으로 비전도성 폐기물의 염기도에 의한 전기전도도의 변화가 플라즈마 토치의 운전전압에 미치는 영향과 용융공정을 통해 생성된 슬랙고화체의 건전성을 고찰하였다.

Abstract

The purpose of this melting experiment was to evaluate the possibility of treating the low- and intermediate-level non-conductive radioactive waste such as concrete, glass, sand, and glass wool which were major parts of non-combustible wastes generated from the domestic nuclear power plants with very high temperature plasma gas of hydrogen-argon mixture.

During experiments, increase of plasma arc voltages at the feeding in a 60kW plasma melting system was measured while nonconductive materials was being melted and converted into slag in the furnace. Also, the quality of the produced slags that were in general appeared to be quite glassy was investigated.

1. 서론

산업의 고도화는 우리 생활을 편리하고 풍요롭게 하지만 자연환경오염이라는 반대급부가 중요한 관심사로 대두되고 있다. 산업생산의 증대와 에너지 수요의 급증으로 국가발전의 원동력인 전

기의 생산량은 이에 비례하여 증가하고 있으며, 부존자원이 부족한 우리나라는 필요한 전력을 원자력발전으로 상당부분 충당할 수 밖에 없는 실정이다. 최근 원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물을 비롯하여 각종 산업체에서 발생하는 난분해성 유해폐기물의 적절한 처리 및 처분대책이 사회의 중요한 과제로 계속 부각되고 있다.^[12] 한편, 원자력발전시 불가피하게 발생하는 부산물로서 방사성 폐기물은 시멘트 고화처리, 초고압 압축처리 등을 거쳐 철제드럼에 저장하여 별도의 소내 저장고에 안전하게 관리되고 있으나 누적되는 이들 방사성 폐기물의 저장능력에는 한계가 있다.^[13] 지금까지 유해폐기물의 처리는 대부분 재래기술인 매립 또는 소각에 많이 의존하고 있는 실정이다. 그러나 지역이기주의의 확산으로 매립부지 선정 및 처리시설 마련에 많은 현실적인 어려움이 따르고 있고 단순히 부피만을 줄이는 소각의 경우는 처리대상 폐기물이 한정되는 문제점이 있다. 폐기물을 소각하는 경우 유해가스인 질소산화물과 황산화물이 발생하며 특히 다이옥신, 퓨란 등의 맹독성 유해 발암물질인 물질도 배출되며 비가연성 물질인 유리, 콘크리트, 철재류 등 고형물질은 그대로 잔류하게 된다. 이러한 문제점과 한계상황을 해결하기 위하여 산화·환원 반응성 화합물은 안정한 물질로 분해시키고 중금속 물질은 환경적으로 가장 안정한 상태로 존재할 수 있는 슬래그내에 안정화하여 처리하는 기술에 대해 최근 많은 연구가 이루어지고 있다.

플라즈마 열원을 이용한 고온용융처리 방법은 폐기물을 고온에서 용융하여 유리화하거나 결정상태의 세라믹화 하는 기술로서 각종 폐기물의 효과적인 처리방식으로 새로이 도입되고 있는 환경친화적 신기술이다. 플라즈마를 이용한 환경기술이 환경산업과 관련하여 새롭게 주목을 받기 시작하는 것은, 산소의 도움으로 화석연료들을 연소시키는 소각과는 달리 고온의 플라즈마는 유기 화합물을 빠르고 안전하게 분해할 수 있을 뿐만아니라 무기물들을 용융하여 부피를 감소시키고 분자의 구조를 변화시켜 슬랙 고화체를 생성하게 된다.^[12] 이 때 생성되는 최종 슬랙고화체는 우수한 내화학적 성질, 내침출성, 내구성 및 뛰어난 기계적 특성을 가지는 환경친화적인 물질이다.

본 논문에서는 초고온의 플라즈마 열원을 이용하여 국내의 원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물 가운데 많은 부분을 점유하는 콘크리트, 유리, 모래, 철재류, 유리섬유 등과 같은 폐기물의 용융조업의 가능성을 조사하고자 모의 폐기물을 제조한 후, 60kW급 플라즈마 용융설비를 사용해 수소-아르곤 혼합기체의 분위기 중에서 비전도성 물질을 용융중에 투입했을 때 이행형 플라즈마 아크전압의 변화를 살펴보고, 이를 바탕으로 비전도성 폐기물의 염기도에 의한 전기전도도의 변화가 플라즈마 토치의 운전전압에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 용융공정을 통해 생성된 슬랙고화체의 건전성을 고찰하였다.

2. 비전도성 폐기물의 용융슬래그에 관한 이론

콘크리트류, 유리류, 모래류, 유리섬유 등으로 구성되는 비전도성 방사성 폐기물의 용융물은 칼슘 산화물(CaO), 알루미늄 산화물(Al_2O_3), 규화물(SiO_2), 금속(metals) 등으로 구성되어 있으며 대부분의 경우 용융슬래그가 유리화 응고를 하도록 하는 규화물의 성분이 많다. 산화물과 규화물의 상대적인 비(CaO/SiO_2)로 표시되는 염기도(Basicity)는 슬래그 용융작업시 여러 가지 중요성을 갖는다. 이 염기도는 용융슬래그의 전기전도도, 반응성 및 점성도 등에 영향을 미친다.^[14] 일반적으로 용융슬래그의 점성도가 낮으면 용융물의 대류가 양호해지고 슬래그의 혼합 및 열전도가 용이

해지며 전기전도도가 향상되는 반면에 용융로 내화물의 침식이 심해진다. 따라서, 용융대상물에 따라 내화물의 선정이 되어져야 하고, 용융물의 전기전도도를 높여 전류효율을 높임으로서 전력소모를 줄일수 있도록 용융슬래그의 적정 염기도를 조절하는 슬래그 디자인이 필요하다.¹⁰⁾ 용융조업중 플라즈마로의 입력파워는, 대개 아크 전압과 전류의 곱으로 주어지지만, 전류가 일정하게 제어되고 있기 때문에, 주로 아크 전압에 의해 결정된다. 이 때문에 예상하지 않은 전압변동은 가열능력의 목적이 되는 입력 파워의 관리를 어렵게 하므로, 가열에너지의 관리측면에서도 폐기물의 투입에 따른 전압의 변화에 대한 검토가 필요하다.

2.1. 용융 슬래그의 구조

일반적으로 슬래그의 구성성분은 이들 내의 화학적 성분의 거동에 따라 아래의 4그룹으로 나눌 수 있다.¹¹⁾

1. 염기성 산화물 : CaO, MnO, FeO, MgO, Na₂O
2. 산성 산화물 : SiO₂, P₂O₅
3. 중성 산화물 : Al₂O₃, Fe₂O₃
4. 염 : CaF₂, Na₃AlF₆(cryolite), CaS

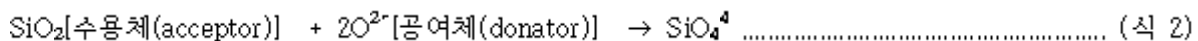
용융슬래그의 분자설에 입각한 종래의 개념에 따르면 용융슬래그는 전하를 띠지 않는 여러 가지 분자들로 혼합되어 있으며, 화학적 거동은 염기성 산화물 성분과 산성 산화물 성분의 비율에 따라 다음식과 같이 정해진다. 이에 따라 염기도를 간단하게 식1과 같이 정의할 수 있다.

$$B = \frac{C_{\text{bO}}}{S_{\text{aO}_2}} \quad \text{혹은} \quad B = \frac{C_{\text{bO}} + M_{\text{bO}}}{S_{\text{aO}_2}} \dots\dots\dots \text{(식 1)}$$

또한, 용융슬래그의 이온성 이론에 따르면 슬래그의 성분을 두 개의 주요그룹으로 분류할 수 있다.¹²⁾

- 산성적인 특성을 나타내는 비금속 산화물:
- 염기성, 중성 혹은 염과 같은 성질의 금속 결합물

비금속 산화물은 매우 안정된 결정격자를 이루고 극성을 지닌 공유결합을 나타낸다. 예를 들면 순수한 고체 SiO₂ 결정은 cristobalite 형태를 나타내는데 이 경우, 사면체의 각 Si 원자는 4개의 산소 원자에 의해 공유적으로 둘러 싸여 있고, 또한 산소원자는 동시에 각각 2개의 Si 원자에 공유되어 있다. 순수한 용융 SiO₂는 고체격자와 유사한 구조를 나타낸다. 그러나, 6개의 고리모양 대신에 4,5,7 혹은 8 고리형을 가진 불규칙한 배치는 긴고리가 연결된 모양을 나타내기 때문에 체계적인 구조가 풀어지게 된다. 용체상태에서도 이러한 구조가 유지됨으로써 순수한 SiO₂ 용체는 용융염과 금속 산화물과는 자유이온을 나타내지 않게 된다. SiO₂ 분자는 그것이 O²⁻ 이온을 받아들여, 그 결과 산염기의 반응시 O²⁻ 이온의 수용체로(acceptor)로 식 2와 같이 작용하게 된다.



금속산화물은 CaO, MgO, MnO, FeO 혹은 CaF₂과 같은 염기성 산화물과 염은 고체상태에서 특정한 결정격자의 형태로 배열될 수 있는 이온결합물이다. 예를 들면, CaO는 NaCl과 동일한 결정격

자를 나타내는데 이때 두 이온들은 각각 6개의 최근접 이온에 의해 둘러 싸여 있다.

용융염기성 산화물의 중요한 성질은 항상 산소이온의 공여체(donator)로의 역할이며, 이러한 공여체로서의 작용효과를 갖는 성분이 식 3과 같이 염기성 성질을 지니게 된다.



그리고, 그들 사이에 중간성질을 지닌 일련의 산화물이 있다. Al_2O_3 , Fe_2O_3 등이 이에 해당하며 양쪽성을 띤다. 순수한 중성 산화물의 결정에서 원자의 결합은 공유성 결합과 이온성 결합이 혼합된 성질을 나타낸다. 이에 따르면 이들 산화물은 산성슬래그에서는 식 4와 같이 염기성으로 거동하며, 혹은 염기성 슬래그내에서 식 5와 같이 산성산화물 처럼 거동한다.^[1]



2.2. CaO-Al₂O₃-SiO₂계 슬래그 용체

CaO함량이 일정할 때에는 Al_2O_3 - SiO_2 비에 따라 밀도가 증가하며 SiO_2 함량이 일정할 때는 Al_2O_3 -CaO 비에 따라 감소한다. CaO- Al_2O_3 - SiO_2 슬래그에서의 등밀도선에 의하면 보통 CaO- SiO_2 비가 증가함에 따라 밀도가 증가한다. 이로 부터 밀도의 온도와 슬래그 조성에 대한 의존성을 분명히 알 수 있다. 표면장력도 기본적으로 CaO- SiO_2 비에 따라 변한다.

균일한 용융슬래그의 점성도는 일반적으로 용융금속의 점성도에 비해 크다. 이들 점성도는 온도와 조성에 대한 의존성이 금속의 점성도에 비하여 훨씬 크다.^[1]

용융슬래그의 점성도는 금속용체와 슬래그 용체 사이의 물질교환속도에 큰 영향을 미친다. 슬래그의 점성도가 낮으면 대류가 양호해져 슬래그와 금속의 혼합으로 인한 물질수송과 열전도는 용이해지나 내화물에 대한 침식은 더욱 심해진다. 한편으로 점성도가 높으면 슬래그내의 이온들의 확산을 방해하고, 전기전도도를 저하시킨다. 현장 조업슬래그의 경우는 슬래그 형성체의 용해가 늦어지고 불균일 상평형 영역으로 들어가기 때문에 점성도가 현저히 상승하는데, 이는 용융된 부분과 고체부분 사이의 추가되는 마찰력에 의해 함께 결정되어지기도 한다.

규산염용체의 전기전도도는 반경이 비교적 작은 양이온의 농도에 의해 결정된다. 특히 알카리족, 알카리토족 금속이온의 함량이 증가함에 따라 전기전도도는 향상된다. 그에 비해 점성도는 전기장내에 실제로 이동성이 없는 규산염의 큰 음이온에 의해 정해진다. CaO- Al_2O_3 - SiO_2 용체의 등전기전도도선의 경로를 보면 전기전도도는 근본적으로 CaO의 함량, 즉 용체에서의 Ca^{2+} 이온의 이동에 의해서 결정된다.

3. 실험재료 및 방법

3.1. 용융시료

본 용융실험에 사용된 용융대상물은 원자력발전소에서 배출되는 비전도성 잡고체 방사성 폐기물을 근간으로한 콘크리트, 유리 및 모래 등을 기본조성으로 하고 염기도 조절을 위하여 생석회

(순도 99.5%)를 첨가하여 각각 염기도가 0.16, 0.69 및 1.18이 되도록 제조하였으며, 제조된 실험시료의 조성은 아래 표 1과 같다.

표 1. 실험시료의 조성표

원료물질	weight %	Total (g)	화학적 조성 (%)								염기도 (CaO/ SiO ₂)
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	기타	
콘크리트	60	300	64.8	12.0	10.46	4.1	4.36	2.8	0.38	1.22	0.16
유리	20	100									
모래	20	100									
CaO	0	0									
콘크리트	44.8	300	48.26	8.96	33.18	3.06	3.25	2.09	0.28	0.92	0.69
유리	14.9	100									
모래	14.9	100									
CaO	25.4	170									
콘크리트	36.2	300	38.96	7.23	46.06	2.47	2.62	1.69	0.23	0.74	1.18
유리	12.0	100									
모래	12.0	100									
CaO	39.8	330									

3.2. 실험장치

본 실험에 사용된 플라즈마 용융시스템은 국내에서 자체제작된 60kVA의 용량을 가진 것으로서, 플라즈마 토치, 용융로, 플라즈마 개스 공급장치, 전원공급장치, 냉각수 공급장치, 배기체 처리장치, 용융슬랙 배출장치 등으로 구성되어 있다.

본 설비의 핵심장치중의 하나인 원통형의 플라즈마 토치는 solid electrode type으로서 운전초기에는 비이행형으로 점화한 후 플라즈마 토치를 용융대상물에 접근시켜서 이행형으로 플라즈마 아크가 점화되면 즉시 운전모드가 비이행형에서 이행형으로 자동전환되도록 되어 있다. 또한, 용융 실험중 용융로 내부의 고온분위기 및 용융물로 부터 방사되는 복사열로 부터 플라즈마 토치의 건전성을 유지하기 위해 플라즈마 토치 내부를 물로 순환냉각하고 외부 몸체는 별도의 강철로 된 수냉각 자켓(water jacket)을 제작 설치하였다. 또 다른 핵심장치인 용융로는 회분식으로 운전되며

약 5kg의 슬래그를 용해할 수 있는 도가니형으로서 하부 3곳에 전극봉이 설치되어 있다. 그리고 안정적으로 직류전원을 플라즈마 토치에 공급하기 위한 전원공급장치는 정전류방식으로 운전하였다. 냉각장치에 사용되는 냉각수는 일반 수도배관에 연결하여 수도물을 사용하였다. 배기체 배출 및 분석장치로는 방사성 개스 흡착탑을 추가로 설치하였으며 용융로 상부에 덮개를 개폐식으로 설치하였다. 용융된 슬랙은 별도 용기를 제작하여 담을 수있도록 하였다.

3.3. 용융실험 및 절차

약 1000℃ 정도의 용융로의 분위기 온도 및 용융 pool의 형성을 위하여 먼저 초기 용탕용 선철 4kg 과 비전도성 물질을 같이 넣어 용융로 하부에 투입하여 이행형 아크 플라즈마에 의해 용융한다. 본 실험의 용융 대상 폐기물이 대부분 전기적으로 비전도성의 물질이므로 이행형 방식의 토치를 가동하기 위하여 용융로 하부전극과 통전될 수 있는 금속재료(선철괴)로 용탕(molten bath)을 제조하여야 한다. 선철괴가 용융되어 형성된 용탕은 전기전도도를 유지시켜 줄 뿐만아니라 용융로 내부를 항온으로 유지시키는 역할을 하기도 한다. 용탕재료를 투입한 상태에서 플라즈마 토치를 점화시킨다. 용융 pool이 형성된 후에 고염기성의 LD슬래그를 첨가하여 1회당 300g씩 3회에 나누어 투입하여 60kW의 파워로 가열하고 있는 동안 염기도가 0.16, 0.69 및 1.18의 화학적 조성을 갖도록 제조된 비 전도성 폐기물 용융시료를 그 위에 투입하고 이행형 아크 플라즈마에 의해 용융하고 이들의 용융상태와 운전전압의 변화를 관찰하였다.

이행형의 아크 플라즈마는 가열대상이 한쪽의 전극이 되기 때문에 일반적으로 비이행형의 아크 플라즈마에 비해 높은 가열효율이 얻어지고 플라즈마 가스의 사용량도 상대적으로 적다. 그러나 가열분위기나 가열대상에서의 교란의 영향을 받기 쉽고 플라즈마로에서는 폐기물의 투입에 의해 그 안정성이 저하한다. 아크 플라즈마의 전원은 전류 I가 일정하게 되도록 제어를 하지만 이때 전원의 부하 전압 V는 전극간격이나 플라즈마 및 용탕의 물성 등에 의해 변화한다.

약 1000℃ 정도의 용융로의 분위기 온도 및 용융 pool의 형성을 위하여 먼저 초기 용탕용 선철 4kg과 비전도성 물질을 같이 넣어 용융로 하부에 투입하여 이행형 아크 플라즈마에 의해 용융한다. 본 실험의 용융 대상 폐기물이 대부분 전기적으로 비전도성의 물질이므로 이행형 방식의 토치를 가동하기 위하여 용융로 하부전극과 통전될 수 있는 금속재료(선철괴)로 용탕(molten bath)을 제조하여야 한다. 선철괴가 용융되어 형성된 용탕은 전기전도도를 유지시켜 줄 뿐만아니라 용융로 내부를 항온으로 유지시키는 역할을 하기도 한다. 용탕재료를 투입한 상태에서 플라즈마 토치를 점화시킨다. 용융 pool이 형성된 후에 고염기성의 LD슬래그를 첨가하여 1회당 300g씩 3회에 나누어 투입하여 60kW의 파워로 가열하고 있는 동안 염기도가 0.16, 0.69 및 1.18의 화학적 조성을 갖도록 제조된 비 전도성 폐기물 용융시료를 그 위에 투입하고 이행형 아크 플라즈마에 의해 용융하고 이들의 용융상태와 운전전압의 변화를 관찰한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 이행형 아크 플라즈마의 운전전압 측정

이형형의 아크 플라즈마는 가열대상이 한쪽의 전극이 되기 때문에 일반적으로 비이형형의 아크 플라즈마에 비해 높은 가열효율이 얻어지고 플라즈마 가스의 사용량도 상대적으로 적다. 그러나 가열분위기나 가열대상에서의 교란의 영향을 받기 쉽고 플라즈마로에서는 폐기물의 투입에 의해 그 안정성이 저하된다. 아크 플라즈마의 전원은 전류 I가 일정하게 되도록 제어를 하지만 이때 전원의 부하 전압 V는 전극간격이나 플라즈마 및 용탕의 물성등에 의해 변화한다.

부하전압 V는 $V = V_{cathode} + V_{column} + V_{anode} + V_{bath}$ 로 나타낼 수 있다. $V_{cathode}$, V_{column} , V_{anode} , V_{bath} 은 각각 음극강하전압, 아크칼럼의 저항에 의한 전압, 양극강하전압, 용탕의 저항에 의한 전압이다. 이들 중 $V_{cathode}$ 를 제외한 모든 전압이 폐기물의 투입의 영향을 받아 변화하는 것이다. 아크 플라즈마 전압은 위의 모델에서 부하전압에서 양극저항에 의한 전압 V_{bath} 을 뺀 것이다. 그러나 불활성 분위기하에서 통상의 금속가열에 있어서는 슬래그가 없기 때문에 V_{bath} 가 상당히 작고 또 플라즈마로에서 V_{bath} 를 직접 측정하는 것이 곤란하기 때문에 부하전압을 편의상 아크전압이라 부른다. 따라서, 아크전압이라는 것은 부하전압을 나타내는 것이고 V로 나타낸다.⁽²⁾

폐기물의 투입에 의한 전체적인 전압상승은 아크 플라즈마의 가열능력의 변화에 밀접하게 관련한다. 여기서는 투입후 평균전압 V_f 로, 전체적인 전압상승을 평가하였다. 여기서 투입후 평균전압 V_f 라는 것은 비전도성 폐기물 투입후 전압이 변화하고 다시 정상전압으로 돌아오기 까지의 사이의 전압의 시간에 대한 평균을 나타내고 다음 식6~8과 같다.

$$V_f = \left\{ \int_0^{t_f} V(t) dt \right\} \div t_f \dots\dots\dots (식 6)$$

$$\Delta V_f = \Delta V_f - V_r \dots\dots\dots (식 7)$$

$$\eta_{vf} = \Delta V_f / V_r \times 100 \dots\dots\dots (식 8)$$

여기서, η_{vf} : 평균 전압 상승률(%)

V_f : 투입후 평균전압(V)

V_r : 정상 전압(V)

ΔV_f : 평균 전압상승(V)

t_f : 전압상승시간

평균전압 상승률 η_{vf} 는 염기도가 0.16일때 가장 높고, 염기도가 1.18일때 가장 낮은 것을 알 수 있었다. 통상, 아크 플라즈마의 전류는 일정해 지도록 전원에서 제어되고 있지만, 실제로는 폐기물의 투입과 같은 재빠른 교란에 대해서는 조금이지만 일시적으로 변화한다. 또, 아크 전류치는, 각 실험조건에서, 정상시 파워(power)를 거의 같게 유지하도록 설정하고 있으나 각 분위기 중에서 다소 다르다. 필터를 통하여 육안으로 관찰한 결과 점성이 있어 보이는 용탕이 생성되었다. 아크길이는 변동이 없으나 용탕이 증가함에 따라 아크전압이 상승하는 것을 관찰할 수 있었는데 이것은 저항이 큰 용탕내부의 전압강하분이 추가된 것으로 보인다. 슬래그 염기도가 증가함에

따라 전기전도도는 증가하고 점도는 감소하는 경향을 알수 있었다. 전기전도도의 증가는 슬래그의 전기저항을 감소시켜 소비전력에너지가 감소한다. 슬래그 점도의 감소는 유동성의 향상을 의미하며 연속적인 슬래그 배출을 위해서는 염기도가 증가하여야 하나, 염기도가 1.2 이상이 되면 CaO의 과도한 증가로 인하여 점도가 증가하는 경향을 나타내므로 0.3-1.2범위에서 염기도를 제어하여야 한다.

4.2. 슬랙고화체의 건전성 시험

슬랙고화체의 건전성 시험항목으로는 모의 폐기물이 비중과 용융후 슬랙고화체의 비중을 측정하여 감용효과를 분석하였다. 그리고, 슬랙고화체의 용출시험은 그림 1의 절차에 따라 TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)방법으로 수행하였다. 그리고, 총 3종의 실험시료를 용융하여 얻어진 슬랙고화체의 외관은 흑갈색의 암석과 같았다. 슬랙고화체의 비중을 측정하기 위해 떼어낸 부분이 시료의 대표성을 가질 수 있도록하여 비중을 측정하였는데, 슬랙고화체의 비중은 커서 밀도가 높음을 의미하며 슬랙고화체의 비중측정결과는 표 2에 나타내었다.

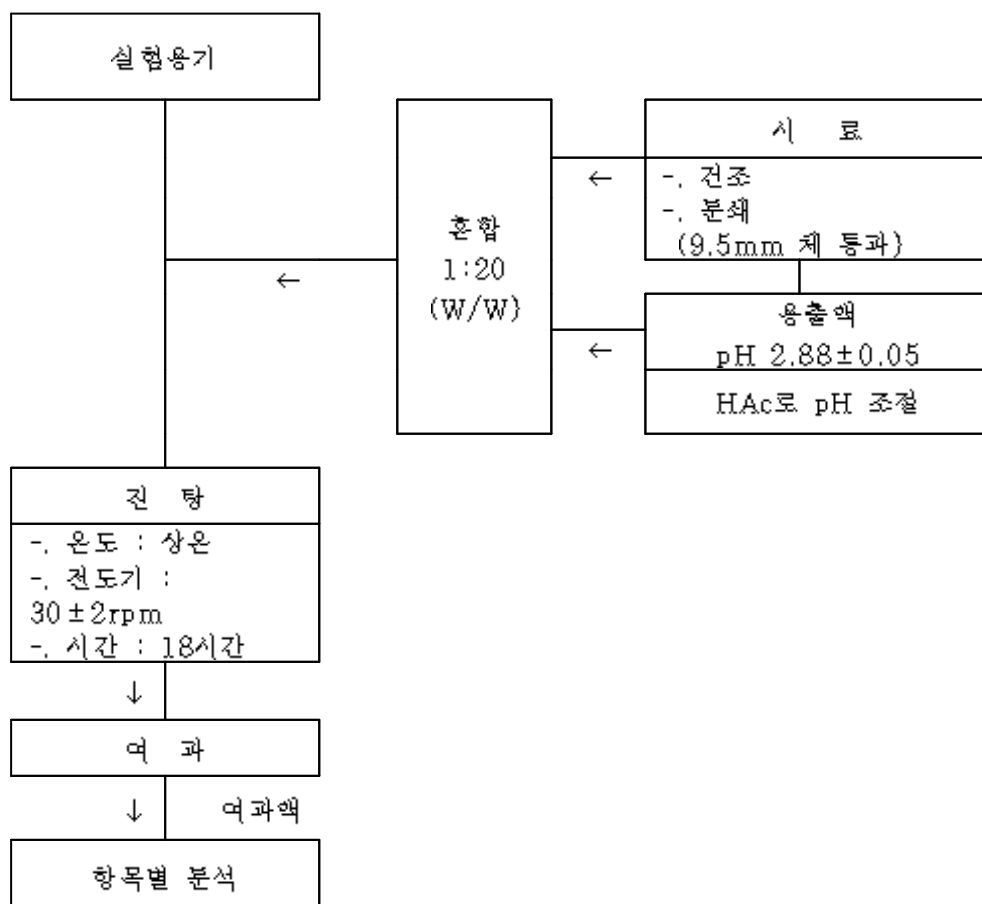


그림 1. 슬랙고화체 용출시험(TCLP) 절차

표 2. 슬랙고화체의 비중측정 결과

원료물질	weight %	Total (g)	비 중			감 용 비(%)	
			원료비중 (A)	슬랙고화체 고유비중 (B)	슬랙고화체 겉보기비중 (C)	(B/A)X100	(C/A)X100
콘크리트	60	300	1.32	3.02	1.98	228	150
유리	20	100					
모래	20	100					
CaO	0	0					
콘크리트	44.8	300	1.33	2.99	2.11	224	158
유리	14.9	100					
모래	14.9	100					
CaO	25.4	170					
콘크리트	36.2	300	1.40	3.17	2.03	226	145
유리	12.0	100					
모래	12.0	100					
CaO	39.8	330					

또한, 슬랙고화체의 침출시험을 TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)방법에 의해 수행하였으며, 용출시험 결과를 살펴볼 때 표 3에서 나타난 바와 같이 용출된 화학성분의 수치는 환경규제치보다 훨씬 낮은 수치로서 전반적으로 양호하였다.

표 3. 슬랙고화체의용출시험(TCLP) 결과

분석 대상	규체치 (mg/L)	슬랙고화체(mg/L)		
		시료1	시료2	시료3
As	5	0.08	0.04	0.07
Ba	100	0.62	0.51	0.40
Cd	1	0.02	0.09	0.08
Cr	5	0.05	0.02	0.03
Hg	0.2	N/D	N/D	N/D
Pb	5	0.15	0.21	0.13
Se	1	0.13	2.75	2.24

5. 결론

플라즈마 용융조업에서 염기도는 용융슬래그의 전기전도도, 열화학 반응성 및 점도 등의 측면에서 가장 중요한 인자로서 전력소모를 최적화하기 위해서는 용융물의 복합작용을 충분히 고려하여야 한다. 이행형 플라즈마 아크 전압은 모재로 전달되는 파워(power)와 직접적인 관련이 있다. 플라즈마 용융로에 비전도성 폐기물을 혼입할 때 플라즈마 아크 운전전압은 플라즈마의 냉각에 의한 도전성의 저하, 플라즈마 아크 경로·형상의 변화 그리고 폐기물의 조성비와 용탕의 온도에 의한 도전성의 저하에 의해 주로 변화한다.

일반적으로, 이행형 플라즈마 아크의 입력 파워는 아크 저항에 비례한다. 이행형 플라즈마 아크 저항의 증가는 유량의 조절이나 전류의 증가, 노즐 구속에 의해 이루어질 수 있고, 또한 아크 길이를 길게하면 아크 저항을 증가시킬 수 있다. 그러나 아크 길이가 길어지면 아크의 열 손실이 증가되고, 증가에 따른 아크의 퍼짐이 넓어져 가열성능이 저하한다.

이번 실험에서 이행형 플라즈마 아크전압은 비전도성 폐기물 투입 직후에 정상운전전압 보다 약 2배 정도 상승하였다. 이러한 상승은 투입직후에 나타나는 피크의 높은 순간적인 것과 최초의 순간적인 상승후 완만하게 저하하고 수 십초 후에 정상전압으로 돌아오는 완만한 것이 중첩된 것이다. 비전도성 폐기물의 투입에 의한 이행형 플라즈마 토치의 운전전압파형은 피크 전압의 아크가 큰 변형이나 사행(蛇行)에 대응하고 있는 것으로 추정되며, 용융슬래그의 염기도가 증가함에 따라 전기전도도가 증가하고 점도는 감소하는 경향을 알 수 있었다. 전기전도도의 증가는 용융슬래그의 전기저항을 감소시켜 소비전력 에너지가 감소한다. 한편, 본 플라즈마 용융실험에서 정전류 운전상태에서의 플라즈마 화염의 길이와 전압과의 관계는 플라즈마 화염이 길어질수록 운전전압이 증가함을 보였다. 이 현상은 플라즈마 화염의 길이가 길어질수록 양극 사이가 커짐에 따라 저항이 증가하여 전압의 상승을 유도하는 것으로 판단된다.

본 플라즈마 용융실험을 통해 생성된 슬랙고화체는 대체적으로 슬랙고화체의 외관은 흑갈색의 암석과 같았으며, 슬랙고화체의 비중은 커서 밀도가 높음을 의미하며, 기계적 강도가 우수하다. 또

한, 슬랙고화체의 용출시험 결과는 용출된 화학성분의 수치가 환경규제치보다 훨씬 낮은 수치로서 화학적으로도 매우 안정된 성상을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 본 플라즈마 용융실험중 비전도성 폐기물에 관한 실질적인 조업경험이 부족하여 시행착오를 여러번 경험하였는데, 분말 생석회(CaO)의 높은 용융점으로 인해 첨가된 전체량이 용융되지 못하고 다시 분말 형태로 일부 배출됨에 따라 용융물의 점성도의 증가가 관찰되었으며, 용융상태 및 출탕이 원활하지 못하여 용융슬래그가 용융로 내벽에 고착되기도 하였다. 따라서, 고온의 플라즈마 용융조업시에는 용융슬래그의 염기도, 점도, 밀도, 전기전도도를 사전에 충분히 고려하여 슬래그 디자인을 함으로써 양질의 슬랙고화체의 생산이 가능할 뿐만아니라 플라즈마 용융설비의 건전성을 확보하고 전력소모를 줄일수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 심재동,반봉찬, "금속공학에서의 슬래그", 대광문화사, 13~16, 21, 46, 217~220페이지, 1991년
- [2] 김동의,고인용, "플라즈마 금속학", 반도출판사, 14~16, 59, 60,128,271~274페이지, 1997년
- [3] J. Bradley Mason "Vitrification Advances for Low Level Radioactive and Mixed Wastes" Proceedings, EPRI International LLW Conference, 4~9 페이지, 1995년
- [4] Pierce G.D. and Arndt M.B, "Volatility Studies in a Rotation Hearth Furnace" Americal Nuclear Society Meeting, Washington, D.C, USA,1994년.
- [5] Handbook "Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and Radioactive Waste", Office of R&D U.S. Environmental Protection Agency, Cininnati, OH,
- [7] 송명재, 박종길 외2, "중·저준위 방사물 유리화기술개발(I) 중간보고서, 전력연구원, 1997년
- [8] Handbook "Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and Radioactive Waste," Office of R&D U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH 45268, pp.3,6,8, 1992.
- [9] Camacho, S.L, "Industrial-Worthy Plasma Torches : State of the Art," Pure&Applied Chemistry, Vol, 60, pp. 619-632, 1988.
- [10] Eschenbach, R.C., "Glass slag from Rotary Hearth Vitrification, "presented at the ACS Engineering Technologies in Hazardous Waste Management VII, Retech Atlanta, Georgia, USA, 1995
- [11] Louis J.C. and Robert A.N, "Final Report for Destruction of Asbestos-Containing Materials Using Plasma Arc Technology", Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 1995
- [12] Jong-Kil Park,et.al., Technical and Economical Assessment for Vitrification of Low level Radioactive Waste from Nuclear Power Plants in Korea, Proceedings in Waste Management '96, Tucson, Arizona, USA, Feb. 25-29,1996.