

Enhancement of the Life of Refractories through the Operational Experience of Plasma Torch Melter

플라즈마토치 용융로 운전경험을 통한 내화물 수명 증진 방안

Young Pyo Moon^{1*} and Jang Young Choi²

¹Technology Institute, Korea Radioactive waste Agency (KORAD), 168 Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

²Chungnam National University (CNU), 99 Daehak-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

문영표^{1*}, 최장영²

¹한국원자력환경공단 기술연구소, 대전광역시 유성구 가정로 168

²충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

(Received January 5, 2016 / Revised February 19, 2016 / Approved March 22, 2016)

The properties of wastes for melting need to be considered to minimize the maintenance of refractory and to discharge the molten slags smoothly from a plasma torch melter. When the nonflammable wastes from nuclear facilities such as concrete debris, glass, sand, etc., are melted, they become acid slags with low basicity since the chemical composition has much more acid oxides than basic oxides. A molten slag does not have good characteristics of discharge and is mainly responsible for the refractory erosion due to its low liquidity. In case of a stationary plasma torch melter with a slant tapping port on the wall, a fixed amount of molten slags remains inside of tapping hole as well as the melter inside after tapping out. Nonmetallic slags keep the temperature higher than melting point of metal because metallic slags located on the bottom of melter by specific gravity difference are simultaneously melted when dual mode plasma torch operates in transferred mode. In order to minimize the refractory erosion, the compatible refractories are selected considering the temperature inside the melter and the melting behavior of slags whether to contact or noncontact with molten slags. An acidic refractory shall not be installed in adjacent to a basic refractory for the resistibility against corrosion.

Keywords: Refractory, Nonflammable waste, Plasma torch, Slag, Basicity

*Corresponding Author.

Young Pyo Moon, Korea Radioactive waste Agency, E-mail: ypmoon@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5324

ORCID

Young Pyo Moon <http://orcid.org/0000-0002-7523-4763>

Jang Young Choi <http://orcid.org/0000-0001-9121-4407>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

플라즈마토치 용융로에 있어서 내화물의 보수를 최소화하고 용융물의 배출을 원활하게 하기 위해서는 처리대상 폐기물의 물성을 충분히 고려하여야 한다. 원전에서 발생하는 비가연성 방사성폐기물 중 많은 비중을 차지하고 있는 콘크리트 조각, 유리, 모래 등에 대한 화학적 조성비를 조사하여 보면 산성산화물이 염기성산화물에 비해 압도적으로 많은 비중을 차지하고 있으므로 용융 시 염기도가 매우 낮은 산성 슬래그가 된다. 이 용융슬래그는 유동도가 낮아서 용융물의 배출특성이 좋지 않으며 내화물에 침식을 유발시키는 주된 요인이 된다. 경사형 구조의 측면 출탕구를 가진 플라즈마토치 용융로의 경우, 구조상 출탕 후 일정량의 금속성 용융물이 항상 용융로 내부 바닥과 출탕구에 남게 된다. 비중차에 의해 비금속 용융슬래그는 금속성 용융물 상부에 위치하게 되며 혼합형 플라즈마토치를 이행형 운전모드로 가동하게 되면 금속성 용융물과 비금속 용융물이 동시에 용융되므로 비금속 용융슬래그의 온도는 금속 용융온도 이상으로 유지가 된다. 내화물의 수명 향상을 위해 용융로 내부의 온도와 용융물과 접촉하는 부위와 접촉되지 않는 부위를 구별하여 내화물의 특성을 주지하고 가장 적합한 내화물을 부위별로 선정하였다. 산성 내화물과 염기성 내화물이 인접하지 않도록 하고 용융슬래그에 대한 저항성을 높이도록 하였다.

중심단어: 내화물, 비가연성 폐기물, 플라즈마토치, 슬래그, 염기도

1. 서론

플라즈마토치를 장착한 용융로를 이용하여 콘크리트 조각, 모래, 유리류, 폐필터, 철재류 등과 같은 다양한 형태의 비가연성 방사성폐기물을 고온용융처리 하는 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 이 기술은 플라즈마토치 용융로에서 열에너지 밀도가 높은 고온의 플라즈마 화염으로 비가연성 방사성폐기물을 용융시키고 방사성 핵종을 용융슬래그 내에 가두게 함으로써 안정화된 침출율이 낮은 슬래그고화체를 만들어 낼 수 있어 환경친화적이며, 또한 폐기물의 부피를 대폭 감소시킬 수 있어 처분비용 절감을 도모할 수 있는 것으로 평가 받고 있다[1]. 콘크리트 및 철재류 등의 비가연성 방사성폐기물을 혼합하여 용융하는 플라즈마토치 용융로의 내부환경은 고온의 플라즈마 화염, 금속 및 비금속 용융물, 배출가스 등에 노출되어 있어 용융로의 내화물은 내화물의 표면이나 침투부분에서 화학반응을 일으키고 변질이나 침윤의 작용을 받게 되어 내화물에 손상을 주게 되어 빈번한 유지보수가 필요하다. 용융로 내부는 약 1,500°C의 고온 분위기이므로 내화물의 수명향상을 위해서는 내화물의 높은 기계적 강도와 낮은 열전도율의 열적 특성과 같은 물리적 조건 뿐만 아니라 처리하고자 하는 비가연성 방사성폐기물의 화학성분의 조성비를 바탕으로 화학적 침식 및 슬래그의 저항성 등을 고려하여 선택하여야 한다.

본 논문에서는 원전에서 발생하는 비가연성 방사성폐기물의

종류와 발생특성을 조사한 자료를 기반으로 모의폐기물을 조성하고 이에 대한 염기도 예측과 플라즈마 용융로의 각 부위별 내화물 특성을 고찰하고 내화물의 손상을 방지하기 위한 축조사례 경험을 공유하여 플라즈마 용융로의 내화물 수명 향상을 위한 기초자료로 활용할 가치가 있을 것으로 기대된다.

2. 플라즈마토치 용융로 내화물의 선정

2.1 내화물의 분류

내화물(refractories)은 각종 산업분야에서 그 사용목적에 따라 알맞은 성질과 모양을 가져야 하므로 그 종류가 다양하며 분류방법도 여러가지가 있다. 즉, 내화물은 화학적 성질, 주원료, 주요 화학성분, 주요 광물, 열처리 방식, 모양, 내화도, 용도 및 상품명 등에 따라서 분류할 수 있으나, 화학적 성질, 주원료 및 주요 화학성분에 의한 분류법이 가장 많이 사용된다[2]. 내화물(refractories)은 고온에 견디는 물질로 한국산업규격(KS)에 의한 내화도 측정법에서 SK26(제거 콘이 녹아서 넘어지는 온도: 1,580°C) 이상의 내화도를 가진 것을 말하며 화학적 성질이나 주원료, 형태, 열처리 방식 등 다양한 분류기준에 의해 구분될 수 있다. 내화물을 구성하고 있는 성분에 따라 분류를 해보면 이산화규소(SiO_2)가 주성분인 것을 산성내화물, 산화알루미늄(Al_2O_3)이 주성분인 것을

Table 1. Classification of refractories based on chemical properties and composition[2]

Properties	Major type of raw material	Major chemical composition	Major mineral constituent
Acid refractory	silica	SiO ₂	crystalite-tridymite-quartz system
	semi silica	SiO ₂ -Al ₂ O ₃	crystalite-mullite-quartz system
	chamotte	SiO ₂ -Al ₂ O ₃	mullite-crystalite system
	clay-silicon carbide	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -SiC	mullite-crystalite-silicon carbide system
	clay-graphite-silicon carbide	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -C-SiC	mullite-crystalite-graphite-silicon carbide
Neutral refractory	zircon	ZrO ₂ -SiO ₂	zircon system
	high-alumina	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	mullite-corundum system
	silicon carbide	SiC	silicon carbide system
	alumina-carbon	Al ₂ O ₃ -C(SiC)	corundum-graphite(-silicon carbide) system
	carbon	C(SiC)	graphite system
	chrome	FeO-MgO-Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	chromite-spinel system
Basic refractory	spinel	MgO-Al ₂ O ₃	spinel system
	magnesia-chrome	MgO-FeO-Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	periclase-chromite system
	magnesia	MgO	periclase system
	dolomite	MgO-CaO	periclase-calcia system
	magnesia-carbon	MgO-C	periclase-graphite system

중성내화물, 산화마그네슘(MgO)과 산화칼슘(CaO)이 주성분인 것은 염기성 내화물이라고 구분한다. 이 분류법은 금속 산화물에 대한 SiO₂의 포화도 즉 과포화(산성), 포화(중성), 불포화(염기성)에 따른 것으로 고온에서의 화학적 침용성을 이해하는데 편리하다[3].

내화물을 형태로 분류한다면 용융로에 쌓기 좋도록 내화벽돌과 같이 일정한 형상을 가지고 있는 것을 정형내화물(shaped refractories)이라 하고, 반면에 일정한 형상이 없이 크고 작은 입자로 된 재료를 혼합시켜 시멘트처럼 일정량의 물이나 바인더에 반죽하여 사용할 수 있도록 만들어진 분말 상태의 내화물로 된 것을 부정형 내화물(monolithic refractories)이라 한다. 또한, 내화물을 열처리 방식으로 분류한다면 성형한 뒤 높은 온도로 구워 소결시킨 소성내화물(burned refractories), 화학적 결합재를 첨가하여 성형한 뒤 불에 굽지 않고 저온에서 화학 결합만 시킨 불소성 내화물(unburned refractories), 그리고 내화 원료를 용도에 맞게 혼합하여 전기로에서 액체로 녹여 주조한 전주내화물(electric

fusion refractories)로 분류된다. 전주내화물은 고순도의 세라믹 원료혼합물을 전기를 이용하여 완전히 용융시킨 후, 원하는 형태로 주조하여 제조된 내화물로서 기공율이 매우 낮은 치밀한 조직을 소유하고 있다. 소결내화물은 일반적인 세라믹공정(분말→성형→소결)에 의해 제조된 전형적인 세라믹스로서, 전주내화물에 비해 기공율이 높고 치밀하지 못하다. 대표적인 소결내화물은 silica계, alumina계, Al₂O₃-SiO₂계의 점토 광물 등이 있다[4]. Table 1에 화학적 성질 및 조성에 따른 분류를 서로 관련시켜 나타내었다.

2.2 내화물의 성질

내화재료의 성질은 구성적 성질, 열적 성질, 기계적 성질, 화학적 성질로 나뉘어 진다[4].

내화물의 구성적 성질이라 함은 재료의 성질과 그 구조에 관련된 성질을 말하는 것으로 균일한 크기의 결정질 입자로 구성된 소결체에서는 입자크기가 작을수록 강도는 커지지만

침식 등 화학적 반응성은 소결체의 입자에 의해 지배되므로 너무 작은 입자만으로 되어 있는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 내화물은 어느 정도 큰 입자를 사용하여 강한 결합을 이루게 하는 것이 중요하다. 내화물은 수종(數種)의 결정상과 유리상으로 되어 있으나 내부에는 여러 가지 모양과 크기가 다른 기공을 포함하고 있다. 이 기공의 형상, 분포, 전용적비(全容積比) 등은 내화물의 통기성, 열전도율, 강도 등에 직접 관계가 있으며 슬래그(slag), 용융금속에 의한 침윤성, 스포링(spalling) 저항성 등에도 관계가 깊으므로 내화물의 품질을 결정하는 요소가 된다. 내화물의 열적 성질은 여러 가지 성질 중에서도 재료를 평가하는데 기준이 되며 용융로의 기능 또는 수명을 지배하는 요인이 되기도 한다. 이러한 열적 성질에는 내화도, 열용량, 부피변화(팽창, 수축), 열전도도, 열충격저항성, 하중연화성 등이 있다. 이러한 열적 성질은 내화물이 가지는 고유한 특성으로서 온도의 크기와 변화속도에 따라서 영향을 받게 된다. 내화도(refractoriness)란 고체에 열을 가하면 어떤 온도에서 녹아서 액상으로 바뀌는데 이 온도를 녹는 점(melting point)이라 한다. 그러나 많은 무기재료 중에는 이 녹는 점이 한 점으로 표시할 수 없을 정도로 고상이 액상으로 바뀌는 과정, 즉 넓은 온도범위에서 고상과 액상이 공존하고 있는 것이 많으므로 이것을 녹는 점으로 표기하지 않고 용융점(fusion point) 또는 연화점(softening point)으로 나타내는 경우가 많다. 일반적으로 불순물이 함유되었거나 두 종류 이상의 물질이 섞여 있는 것은 고상이 액상으로 바뀌는 온도범위가 넓은 편이므로 용융점으로 나타내는 것이 옳겠으나 일일이 온도에 따른 액상의 생성을 또는 원료의 순도 등을 알아내는 데 많은 노력과 시간이 필요하므로 순수한 물질이거나 순수하지 않는 물질이거나 모두 간단한 방법으로 내화도를 측정하여 용융점으로 대신하고 있으나 실제로 용융범위 내에 한 온도라 할 수 있다. 열용량이란 어떤 재료를 온도 1°C 올리는데 필요한 열량을 말하며 그 재료의 단위무게 당 열량을 비열(specific heat)이라 하고 몰 당 열량을 molar 열용량이라 한다. 이것은 어떤 량의 재료를 어떤 온도까지 올리는 데 필요한 열량을 계산하는데 이용된다. 부피변화는 어떤 재료에 열을 가하였다가 냉각하면 그 온도에 따라 다르기는 하지만 가열전과 냉각후의 길이 변화가 있는 수가 있다. 이것을 영구적인 변화로서 잔존 팽창수축(residual change)이라 하는데 내화벽돌을 고온에서 소성하거나 고온에서 열처리하여 열적으로 안정화시킨

샤뫼트(chamotte, grog)를 많이 사용하면 적은 값을 가지지만 점토류와 같이 열분해 하거나 석영과 같이 미전이 광물을 많이 함유한 재료는 큰 값을 가지게 된다. 내화물의 기계적 성질은 내화물은 운반이나 운송, 취급하는데 있어서 파손이 가거나 용융로를 구축하여 사용할 때 변형이 되지 않아야 한다. 특히 사용 중에는 고온 또는 침윤성의 용융물이나 가스 속에서 화학반응을 일으켜서 새로운 광물을 형성하므로 상온에서 보다 견디기가 어렵다. 내화물의 열적 특성의 특정 필요성은 재료의 시험, 공정관리의 수단으로 특히 큰 의의를 가지고 있으며, 동시에 내화물의 전이관계나 그 조직을 알 수 있는데 필수적인 요소이다. 내화물의 기계적 성질 중에는 압축강도, 인장강도, 꺾임강도, 충격강도 등의 기계적 강도, 가해 준 응력과 변형의 비를 나타내는 탄성율 등의 기계적 강도, 표면의 단단하기와 포성의 크기를 나타내는 경도(hardness)와 인성(toughness) 등이 있다. 기계적 강도로서 꺾임강도와 압축강도를 가장 많이 쓰지만 실제 사용조건에서 특성은 상온에서의 그것과 다소 차이가 있으므로 열간강도(hot strength)로서 꺾임강도 또는 압축강도를 많이 쓸려는 경향이다. 내화물의 화학적 성질이라 함은 그 내화물 자체의 화학적 구성이나 화학적 특성을 의미한다고 하기 보다는 이와 작용하는 침윤제와의 화학적 반응성을 의미하는 것이다. 일반적으로 용융로에 내화물을 사용하였을 때 그 내화물은 단지 고열의 작용을 받을 뿐만 아니라 고온에서 연소가스, 열기, 연료의 재, 비산하고 있는 분진, 용융체, 고체 등 극히 많은 종류의 이물질과 접촉하게 되므로 내화물의 표면이나 침투부분에서 이것들과 화학반응을 일으키고 변질이나 침윤의 작용을 받는다. 그러므로 내화물은 열적 작용을 받아 수명이 단축되는 것도 물론이지만 그 보다는 이 화학적인 손상에 의하여 내화물의 수명이 좌우되는 수가 많다. 그러므로 내화물은 내화도가 높고 기계적 강도가 충분하고 열적 특성이 양호하여야 한다는 등의 제 물리적 조건 외에 화학적 저항성 또는 내식성을 구비하고 있어야 한다.

2.3 내화물의 손상기구

플라즈마토치 용융로의 내화물 주요 손상요인으로는 플라즈마 화염에 의한 열, 용융로 내 가스에 의한 제트(jet) 기류, 용탕 및 슬래그 등이 있다. 내화물의 손상은 한 가지 이상의 복합적 인자에 의해 이루어지며 높은 온도에서 일어나고

결정되기 때문에 손상원인을 명확하게 규명하기는 매우 어려우며 내화물의 종류, 사용조건 등에 따라 다르다. 내화물의 손상기구는 마모(abrasion), 스폐링(spalling), 침용(corrosion) 등이 있다[4]. 마모는 물질의 표면에서 일어나는 충격 등으로 인한 기계적 손상을 의미하며, 마모와 관련 있는 내화물의 물성은 경도(hardness)이다. 내마모성은 직접적으로 경도와 비례한다고 볼 수 있다. 스폐링은 내화물이 균열하여 표면이 탈락해서 내면이 노출되는 현상으로서 내화물 주위의 갑작스런 온도 변화에 의해 발생하는 표면과 내부의 온도 기울기에 의한 열적 응력, 온도변화나 수축에 의해 발생하는 내부 응력에 의한 발생하는 구조적 응력 그리고 불균일한 기계적 응력이 부분적으로 작용할 때 국부적인 집중 응력이 발생되어 파괴되는 기계적응력 등이 있다. 열적 응력은 내화물이 급열 급랭되면 내부의 온도 경사가 급해지고, 열팽창의 차에 의해 변형이 생겨 조직이 점차로 파괴되는 현상이다. 열적 스폐링에 견디는 재질로는 열전도율이 크고 열팽창률이 작은 것이 좋다. 구조적 응력은 결정 변형태나 슬래그와의 반응에 의해 조직에 구조적 변화를 일으켜 파괴되는 현상으로, 열적으로 안정된 광물을 사용함과 동시에 슬래그의 침입을 방지하는 세밀한 조직으로 할 필요가 있다. 기계적 응력은 기계적 충격에 의해 파괴되는 현상으로 기계적 강도의 증가에 의해 방지할 수 있다. 침용은 슬래그와의 화학반응으로 생긴 저융물(low melting material)이 표면에서 용해하거나 내화물 입자가 이탈하는 현상으로 내화물의 용해에 의하여 액상과 접촉하거나 기상, 액상, 고상과의 반응 또는 기공을 통한 액상, 기상의 침투에 의한 변질층을 형성한다. 내화물이 슬래그와 접촉할 때 내화물이 슬래그에 용해되는데, 내화물에는 기공이 존재하기 때문에 용액과 접촉하면 매트릭스(matrix) 부의 열린 기공(open pore)를 통해서 용액이 내화물 내로 침투하게 되고, 침투와 액상과의 반응이 복합적으로 용해를 촉진시킨다. 내화물에서 순수한 고상간의 반응에 의한 침식은 드물며 액상생성 및 액상과 관련된 침식이 대부분이다.

2.4 용융슬래그상의 성질

용융슬래그는 산화물, 규화물 또는 염 등으로 구성되어 있으며, 대부분의 경우 슬래그가 유리화 응고를 하도록 하는 이산화규소(SiO_2) 성분이 많다. 일반적으로 슬래그의 구성성분은

이들 내의 화학적 성분의 거동에 따라 산성산화물(예: SiO_2), 염기성 산화물(예: CaO , MgO), 중성산화물(예: Al_2O_3) 및 염(예: CaF_2) 등으로 나눌 수 있다. 슬래그의 이온성 이론에 따르면 슬래그의 성분을 산성적인 특성을 나타내는 비금속 산화물과 염기성, 중성 혹은 염과 같은 성질의 금속 결합물 등으로 분류할 수 있다. 비금속 산화물은 매우 안정된 결정격자를 이루고 극성을 지닌 공유결합을 나타내는 반면에 염기성 및 염과 같은 성질의 금속 결합물은 고체상태에서 특정한 결정격자의 형으로 배열될 수 있는 이온 결합물이다. 용융슬래그의 화학적 거동은 염기성 산화물과 산성산화물 성분의 비율에 따라 정해지며 염기도(basicity)를 CaO 와 SiO_2 의 비로 간단하게 정의할 수 있다[3].

용융슬래그의 염기도는 점도에 큰 영향을 미치며 또한 산화물의 구성 상태나 구조에 밀접하게 연결되어 있다. 슬래그에 함유되어 있는 실리카(SiO_2)는 기본적으로 사면체를 이루고 꼭지점에 있는 산소이온이 인접 사면체에 의해 모두 공유되는 구조를 가지고 있다. 슬래그의 점성은 공유되는 구조를 빠져 나오는 실리카가 늘어날수록 점성이 감소한다. 산소이온을 제공하는 것은 염기성 산화물이므로 슬래그의 염기도(basicity)가 높을수록 점성이 감소하고 CaO 와 화합하여 용융점이 낮은 점성의 슬래그로 변환된다. 용융슬래그의 점도는 온도의 증가에 따라 감소하는 온도에 대한 의존성을 가지고 있으며 용융반응 및 내화물의 마모에 커다란 영향을 미친다. 그리고 용융슬래그의 점도변화에 따른 슬래그의 유동성은 슬래그 반응속도와 밀접한 관계가 있으며, 슬래그의 유동성에 따른 열 및 물질 전달, 그리고 슬래그의 원활한 배출 등에 직접적인 영향을 미친다. 한편, 염기성 산화물의 함유량이 많을수록 전도도는 크다. 용융슬래그의 전기전도도는 조성이나 온도에 따라 변화하며, 온도가 상승하면 전도도는 커져 이온 전도체로서의 거동을 나타낸다. 일반적으로 염기도 0.7 미만을 산성영역, 염기도 0.7이상에서 1.2 미만을 중성영역, 염기도 1.2 이상을 염기성 영역으로 구분한다[3,5]. 염기성 슬래그의 경우 점도에 의한 하한 온도치가 존재한다. 고온에서는 슬래그의 점도가 온도변화에 따라 크게 영향을 받지 않으나, 액상온도(liquidus temperature)에 도달하게 되면 슬래그 내에 고상입자가 석출하게 되어 약간의 온도 차이에도 슬래그의 점도는 매우 크게 변화하게 된다. 따라서 슬래그의 점도를 고려함에 있어 용점이 하한 온도치를 형성하며, 이 용점 이하에서는 슬래그 점도가 급격히

상승하게 된다. 염기성 슬래그가 유동성을 가지기 위해서는 최소 1,350°C 이상의 온도를 유지시켜 주어야 한다. 한편, 작업 중 충분한 유동성을 고려한다면 슬래그의 온도를 1,400°C 이상의 온도를 유지함으로써 슬래그의 점도를 2 poise 이하로 떨어뜨린 것이 작업에 용이하다[5]. Fig. 1은 슬래그의 점성이 감소되는 실리카의 구조변화를 나타낸다.

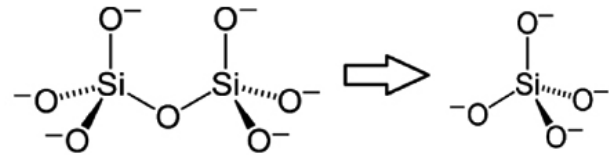


Fig. 1. Structural change of SiO₂.

3. 플라즈마토치 용융로의 내화물 시공

3.1 플라즈마토치 용융로의 부위별 내화물 특성분석

플라즈마토치 용융로에 있어서 내화물의 선택은 설비에 대한 안전성, 신뢰성 및 경제성 등에 영향을 미치게 되므로 매우 중요하다. 내화물은 내열성과 구조적 성질 등을 겸비한 물질이어야 하며 플라즈마토치 용융로의 운전특성 또한 충분히 고려하여 선정되어야 한다[6]. 측면에 경사형 출탕구가 설치된 고정형 플라즈마토치 용융로의 구조적 특성과 운전특성을 살펴보면 미니드럼 크기로 제작된 비가연성폐기물은 용융로의 로드록 챔버 뒷부분에 장착된 미니드럼 게이트를 이용하여 투입장치에 장착된 투입기(pusher)에 의해서 용융로 내부로 들어가게 된다. 투입된 폐기물은 먼저 투입구 부근에서 용융로의 복사열에 의하여 가열되기 시작하는데 미니드럼의 표면 쪽에서는 일부 용융이 진행되기도 한다. 한편, 이전에 투입된 폐기물 드럼이 있었다면 그 폐기물은 새로 투입된 폐기물 드럼에 의하여 밀려 용융로 내부로 전진하게 되고 경사면을 따라 서서히 용탕 속으로 들어가게 된다. 폐기물이 투입되면 혼합형 플라즈마토치를 IGBT 스택(insulated gate bipolar transistor stack)의 온/오프 시간(on/off time)을 조절하여 비이행형 전류와 이행형 전류를 임의의 비율로 제어하여 출력을 조절하고 표면가열과 동시에 용탕의 전기전도도 변화에 따라 전기아크(electric arc)에 의한 주열열(joule's heat)을 발생시켜 내부가열을 하게 되므로 플라즈마 컬럼(plasma column) 통로 부근에 있는 용융물은 집중적으로 용융이 이루어지고 대류(convection)가 양호해져 내화물에 대한 침식이 증가한다[7,8]. 투입된 비가연성 폐기물이 충분히 용융이 되면 약 1,550°C 이상의 온도와 점도가 있는 액상(liquid-like phase)으로 변화하게 되고 용융물의 비중차에 의해 용탕 내 경계층을 형성하여 두 상으로 분리되는데

상부에는 비금속류의 용융물이, 그리고 하부에는 금속류의 용융물이 위치하게 되며 투입된 폐기물의 양에 의해 용탕의 수위는 변동하게 된다[8]. 용융공정이 완료되면 출탕을 준비하기 위해 전자접촉기(magnetic contactor)를 조작하여 용융로 바닥에 설치된 보조전극(auxiliary electrode)과 출탕유도전극(guide electrode) 등에 전기회로를 구성하고 혼합형 플라즈마토치의 운전모드를 전환하여 출탕구 언저리의 용융로 내부와 출탕구에 있는 용융물을 충분히 가열하여 유동성을 확보하여야 한다. 이렇게 가열된 용융물은 출탕시 용융물의 비중차 때문에 용탕 하부에 위치하고 있는 금속 용융물이 먼저 배출되는데 금속 용융물의 수위가 출탕구 부근까지 떨어지면 금속과 비금속 용융물이 섞여서 배출된다. 그리고 금속 용융물의 수위가 더 낮아지면 비금속 용융물인 슬래그가 배출되게 된다[8]. 따라서 용융물을 출탕하게 되면 항상 마지막 단계에는 슬래그가 배출되게 되므로 출탕구의 표면은 항상 슬래그에 의해 덮히게 되어 있다. 이러한 혼합형 플라즈마토치를 장착한 용융로의 운전특성을 감안하여 용융로 부위별로 적합한 내화물을 선정하기 위해 출탕구, 용융물과의 접촉노벽 및 비접촉 노벽, 노 내부바닥, 폐기물 투입구 및 배기구로 구분하고 마모(abrasion), 스폐링(spalling), 침용(corrosion) 등의 내화물 손상기구를 기초로 하여 용융로의 부위별 손상요인과 요구특성을 Table 2와 같이 분석하였다.

3.2 비가연성 방사성폐기물의 슬래그 특성분석

국내 원자력설비에서 발생하는 비가연성 잡고체 방사성 폐기물에는 콘크리트 조각, 철재류, 유리류, 모래 등이 많은 비중을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 대표물질에 대한 화학성분 조성비를 알면 용융슬래그의 염기도(basicity)를 예측할 수 있어 용융물의 원활한 배출에 매우 유용하게 활용될 수 있다. 염기도는 용융물의 화학거동에 대한 척도로 실리카(SiO₂) 같은 산성산화물에 대한 산화칼슘(CaO) 등의 염기성 산화물의 비율에 바탕을 두고 있다. 이들 대표물질 중

Table 2. Damage factors and demand characteristics by zone of plasma torch melter

Sector	Damage factors	Demand characteristics
Tapping hole	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasion by flow of metallic and nonmetallic melts • Corrosion by flow of metallic and nonmetallic melts • Thermal expansion and contraction 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistance to abrasion • Resistance to corrosion • Resistance to thermal spalling • Resistance to structural spalling
Wall contacted with slags	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasion by flow of metallic and nonmetallic melts • Corrosion by flow of metallic and nonmetallic melts • Thermal expansion and contraction 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistance to abrasion • Resistance to corrosion • Resistance to thermal spalling • Resistance to structural spalling
Wall contacted with no slags	<ul style="list-style-type: none"> • Thermal expansion and contraction • Chemical corrosion by high temperature gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistance to thermal spalling • Resistance to chemical corrosion
Bottom Inside	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasion by flow of metallic melts • Corrosion by flow of metallic melts • Thermal expansion and contraction 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistance to abrasion • Resistance to corrosion • Resistance to thermal spalling • Resistance to structural spalling
Throat for waste feeding	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical Impact by waste feeding • Thermal expansion and contraction • Chemical corrosion by high temperature gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistance to mechanical spalling • Resistance to thermal spalling • Resistance to chemical corrosion
Off-gas outlet	<ul style="list-style-type: none"> • Thermal expansion and contraction • Chemical corrosion by high temperature gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistance to thermal spalling • Resistance to chemical corrosion

콘크리트 조각은 국내 원전의 평균 콘크리트 배합설계표에 의한 건조 콘크리트를 기준으로, 철재류는 스테인레스강을 기준으로, 유리는 전구유리(lamp glass)를 기준으로 그리고 모래는 강모래를 기준으로 분석한 화학적 조성을 Table 3에 나타내었다[9].

이들 대표물질을 바탕으로 콘크리트 조각 5 kg, 스테인레스강 10 kg, 유리 3 kg 및 모래 2 kg으로 모의 비가연성 폐기물을 제조하였을 때의 화학적 조성 분석을 통해 예측한 용융슬래그의 염기도(basicity)를 Table 4에 나타내었다. 용융로 내화물의 침식에 중요한 영향을 미치는 용융물의 염기도와 유동도를 예측하기 위해서는 비가연성 폐기물별 화학적 조성을 조사하고 폐기물 조성비에 따라 전체 모의 폐기물의 화학적 조성을 계산하여야 한다. 혼합폐기물의 화학성분의 조성비는 각 물질의 혼합비와 화학성분을 곱하여 전체를 합한 것으로 나타낼 수 있다. 혼합폐기물의 전체적인 SiO₂와 CaO의 조성비를 살펴보면 SiO₂가 85.8 % 이고, CaO가 14.17 % 이다. 이 때의 염기도(CaO/SiO₂)는 약 0.17로서 매우 낮고 산성 용융슬래그 이다. 염기도가 낮으면 용융슬래그의 점성도가 높고 유동도가 낮아서 용융물의 배출특성이 나쁘게 되므로 염기도 제어를 위한 검토가 필요하다. 용융슬래그는

Table 3. Chemical composition by samples

A. Concrete

Chemical composition (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	others
50.83	14.12	3.87	16.49	3.82	2.49	1.82	6.56

B. Stainless steel

Chemical composition (%)							
Fe	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Al	C
74.03	0.5	0.5	17.0	7.0	0.7	0.2	0.07

C. Lamp glass

Chemical composition (%)							
SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	BaO	B ₂ O ₃
73.6	16.0	0.6	5.2	3.6	1.0	-	-

D. River sand

Chemical composition (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	others
60.0	15.89	2.96	3.69	5.85	3.54	2.52	2.84	2.71

Table 4. Expected basicity based on chemical composition of mixed waste

Waste	Mixed quantity (kg)①	Mixed ratio (%)②	Composition ratio (w%)③		Total composition ratio(w%) ①×③		Basicity (CaO/SiO ₂)
			SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	
Concrete	5	25	50.83	14.69	254.15	70.95	0.28
Stainless steel	10	50	0	0	-	-	-
Lamp glass	3	15	73.6	5.2	220.8	15.6	0.07
River sand	2	10	60	5.85	120	11.7	0.1
Total	20	100	-	-	595	98.25	0.17

※ Stainless steel is excluded from basicity calculation due to none of SiO₂ and CaO.

점도 특성에 따라 Glassy 슬래그와 Crystalline 슬래그로 분류된다. Glassy 슬래그는 온도가 저하됨에 따라 점도가 점차 증가하는 특성을 가진 반면에 Crystalline 슬래그는 고온에서 낮은 점도를 유지하다가 일정한 온도에 도달하면 슬래그의 점도가 급격하게 증가하는 특성을 가진다[10]. 이산화규소(SiO₂)를 다량 함유하고 있는 혼합폐기물의 용융슬래그는 Glassy 슬래그의 특성을 나타낸다.

3.3 플라즈마토치 용융로의 내화물 축소

비가연성폐기물 용융실험 설비인 플라즈마토치 용융로의 크기와 형상은 용탕의 부피, 온도 및 가스체류시간 등을 고려하여 제작되었다. 플라즈마토치 용융로는 내경 700 mm, 외경 968 mm, 높이 1,020 mm(내화물 작업 후 800 mm), 용탕의 최저 높이는 바닥으로부터 100 mm, 허용되는 용탕의 최대높이는 투입구의 바로 밑부분까지인 300 mm, 회당 배출할 수 있는 용융물의 부피는 최대 77리터, 스테인레스강 외피로 된 원통형의 내화물 구조로서 측면에 경사형 구조의 출탕구가 설치되어 있다. 용융로의 구조상 출탕 후 일정량의 금속 용융물이 항상 용융로 내부에 남게 되며 비가연성 폐기물의 성분이 대체적으로 산성인 것을 감안하여 용융 슬래그가 접촉하는 부위와 접촉되지 않는 부위를 구별하여 내화물의 손상에 대비하였다. 특히, 산성 내화물이 염기성 내화물과 인접하지 않도록 하여 용융슬래그에 대한 저항성을 높이도록 하였다. 플라즈마토치 용융로의 내화물은 기계적 강도가 충분하여 고온에서 열의 작용에 충분히 견딜 수 있고, 용적 변화가 적어야 하고, 침윤 및 마모에 대한 저항성을

가져야 한다[11]. 용융로 내부의 각 부분별 내화물 재질은 바닥층의 경우, 마그네시아-카본 연화(MgO-C brick)를 사용하고, 그 다음 층은 high-Al₂O₃계의 부정형 내화물(HACT-170)을, 그리고 마지막으로 세라믹 단열재(B-5, 조선내화이엔지)를 사용하였다. 용융로의 전체 바닥의 두께는 온도구배를 감안하여 약 20cm두께로 시공하였다. 한편, 하부전극 주위는 마그네시아-카본 부정형 내화물 (MgO-C plastic)을 충전재로 사용하였다. 용융로의 바닥층에 사용된 마그네시아-카본 연화(MgO-C brick)는 마그네시아(magnesia) 원료에 흑연을 조합한 염기성 내화물로서 다공성 재질로 내화도가 높고 내화도가 높고 용융금속에 대한 내식성을 가지고 있다. 또한, 부정형 내화물(HACT-170)은 내화 골재를 결합재인 alumina cement와 혼합하여 제조되는 부정형 내화물로서 Al₂O₃를 80% 함유하고 있다. 그리고 세라믹 단열재(B-5, 조선내화이엔지)는 다공질로써 우수한 단열 보온력을 가지고 있다. 용융로의 하부전극 주위에 사용된 MgO-C Plastic은 내화성 골재에 소량의 결합제를 가해 이겨서 연토상으로 만든 것으로 다지기에 따라 임의의 형상으로 시공할 수 있는 특징을 갖는 내화물이다. 용융로의 벽면의 경우, 용탕의 움직임과 슬래그 성분에 의하여 가장 부식이 심각할 것으로 예상되기 때문에 내화물을 물로 간접냉각시켜서 부식을 최소화하도록 하였다. 이 경우 내화물이 어느 정도까지 침식이 되면 슬래그가 코팅되어 내화물의 표면에서 고화되어 내화물을 보호하게 된다. 비가연성 폐기물 용융시 슬래그의 성분이 대체적으로 산성인 것을 감안하여 슬래그가 접촉하는 부위에 해당하는 바닥면에서 460 mm 높이까지는 알루미늄 크롬 연화(Al₂O₃-Cr₂O₃ 10% brick)를 사용하였으며 용융물과 직접 접촉되지

않는 부위에 해당하는 높이 460 mm 높이에서 800 mm 높이까지는 내화 단열 연화 다공질로써 우수 단열 보온력을 가지고 있는 고알루미나 연화(SK40)를 사용하였다. 한편, 투입구 주위는 알루미나 크롬 연화($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 10% brick)와 캐스타블(castable)을 사용하였다. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (10%) 연화(brick)는 고온 소성으로 제조되는 중성 내화물로서 내화성 및 슬래그의 저항성이 우수하다. 그리고, SK40은 고알루미나 내화물 벽돌로서 내화도, 내식성 및 열충격 저항성이 좋다. 캐스타블 내화물은 연화축조에 비하여 시공시간이 짧고 시공이 간편하여 제철제강공정의 가열로 바닥 및 부분 보수가 요구되는 대탕도 보수제로 많이 사용 되고 있으며 최근에는 고온의 용강에 장시간 접촉하는 레이들(ladle)에 까지 사용범위가 확대되고 있다[12,13]. 출탕구의 경우, 용융물 배출시 슬래그와 기계적인 접촉을 계속 하기 때문에 마모(abrasion)에 의해 내화물의 손상이 발생하는 부분이므로 마그네시아-카본 연화(MgO-C brick)를 착탈식으로 손쉽게 교체가 가능하도록 하였다. 뚜껑의 경우, 용융로의 유지보수 및 내부 감시, 부대장비 설치 등을 감안하여 내화물을 사용하지 않았다. 단 초기 가동 시 철판(upper steel plate of melter)가 고온에 노출되어 손상을 입는 것을 방지하고 슬래그의 코팅을 원활히 하여 주기 위하여 철판보호용 내화물($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)을 코팅하였다. 그리고, 배가스 출구의 경우, 부정형 내화물(HACT-170)을 사용하여 침식에 대비 하였다. Fig. 2는 각 부분별 내화물 축조공사가 완료된 상태의 플라즈마토치 용융로의 내부 모습이다.

4. 결과 및 고찰

비가연성 모의 방사성폐기물의 용융처리를 위한 플라즈마토치 용융로의 운전경험과 학습을 통해 얻어진 결과에 의하면, 플라즈마토치 용융로에 있어서 내화물 관련 보수작업을 최소화하고 용융물의 배출을 원활하게 하기 위해서는 처리대상 폐기물의 물성과 용융로의 운전특성을 충분히 고려하여 내화물을 선정하여야 한다. 원전에서 발생하는 비가연성 방사성폐기물 중 많은 비중을 차지하고 있는 철재류, 콘크리트 조각, 유리류, 모래 등에 대한 화학적 조성비를 살펴보면 철재류를 제외한 대다수가 산성산화물이 염기성산화물에 비해 큰 비중을 차지하고 있으므로 용융시 염기도가 매우

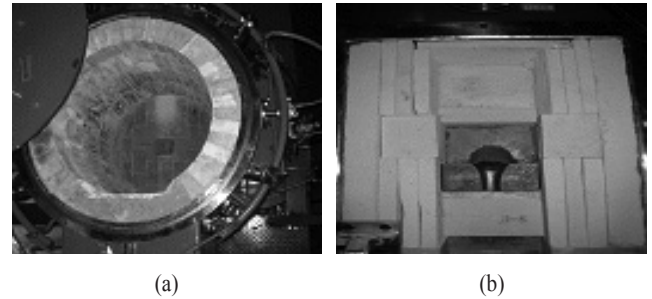


Fig. 2. Photos of refractory construction (a) melter inside (b) discharge hole.

낮은 산성 슬래그가 되어 내화물 손상을 유발시키는 주된 요인이 된다. 내화물의 수명 향상을 위하여 내화물의 기계적 강도와 열적 특성 뿐만 아니라 처리대상 폐기물의 화학적 침식 등을 고려하여 용융로 부위별로 특성에 적합한 내화물을 선택하여 슬래그에 대한 저항성을 높이도록 해야 한다. 산성 내화물이 염기성 내화물과 인접하지 않도록 내화물을 축조하고, 출탕중에도 최종 슬래그 배출시까지 플라즈마토치를 가동하여 슬래그의 유동성을 확보하므로써 내화물에 슬래그가 고착되지 않도록 하는 것이 내화물의 수명 향상에 기여한다고 본다.

REFERENCES

- [1] J.K. Park, Y.P. Moon, B.C. Park, M.C. Lee, M.J. Song, K.S. Koh, J.M. Cho, and J.W. Lee, LILW Vitrification Technology Development(I), Korea Electric Power Co. Final Report, 3-4, 96NJ17 (1999).
- [2] H.R. Lee, History of Refractory Materials, 1st ed., 88-89, The Korean Ceramic Society e-book, December 31 (2015).
- [3] H.J. Engell(Joint translation by J.D. Shim and B.C. Ban) , Schlacken in der Metallurgie, 1st ed., 13-86, Dae-Kwang-Moon-Wha company, May (1991).
- [4] H. Kim, K.C. Park, Y.H. Paek, K.D. Oh, J.K. Lee, H.R. Lee, M.O. Ju, and S.W. Choi, Refractory Materials Engineering, 1st ed., 3-4, Korea Refractory Industry Cooperative, July (1991).
- [5] H.S. Park, K.I. Gee, J.S. Chang, S.K. ,H.J. Bae, H.J. Kim, S.C. Lee, S.J. Ju, and B.S. Shin, "Slagging treat-

- ment of MSW incineration ash by plasma system”, Proc. of Korean Society of Soil and Environment, 66-67, Oct. 29, 1999, JeJu University.
- [6] B.C. Ban, Y.B. Kweon, S.J. Kim, and H.S. Park, Advanced Melting Technology for Waste Treatment, 1st ed., 179-186, Whan-Kyung-Kong-Eop publishing company, Oct. 13 (2003).
- [7] H.S. Park, H.J. Kim, J.S. Chang, K.I. Jee, and H.N. Lee, Melting Technology for Municipal Waste and Sewage Sludge, 1st ed., 52-53, Engineering & Technology Research Center of Industrial Waste for Advanced Materials, August (1998).
- [8] Y.P. Moon, T.W. Kim, H.S. Kim, S.W. Shin, and M.C. Lee, “Melting Experiment in Concrete Waste using a Hollow Type Plasma Torch mounted on Furnace”, 601-609, Proc. of Korean Nuclear Society, Spring, 2000, Kori.
- [9] M.J. Song, Y.P. Moon, and C.H. Cho, K.S. Ko, S.Y. Keum, Y.S. Yang, and J.M. Cho, Vitrification and Plasma Technology for LLW Volume Reduction, Korea Electric Power Research Institute 3rd Report, 15-17 (1997).
- [10] D.M. Kim, A Study on Electrical conductivity of High temperature Melts with Noncombustible Wastes in Furnace by Plasma, Master’s thesis, Chung-Nam National University, 18-19, (2011).
- [11] J.K. Park, Y.P. Moon, B.C. Park, M.J. Song, K.S. Ko, and J.M. Cho, J. of Environmental Science and Health, Vol. A36, 861-871(2001).
- [12] T.G. Kim, J.S. Park, K.H. Kim, K.J. Kim, and H.S. Kim, “Effect of Inorganic Additive Contents on the Thermal Properties of Al₂O₃-SiC-C System Refractories”, Proc. of the Fall Meeting of The Korean Ceramic Society, P1-G7-3, 198, November 4-6, 2015, Song-do.
- [13] H.S. Park, Y.K. Hong, K.S. Kim, D.k. Kim, and S.O. Moon, Project for utilization of contagious & hazardous waste pyrolysis melting system by extended arc plasma, Young Engineering Company Project Report, 239-252 (2007).