

## 전극 구조가 간편한 삼상 교류 플라즈마 토치

김 광수, 박 정문, 김 영배, 이 홍식, 임 근희  
한국전기연구소

### Three-Phase AC Plasma Torch with Simple Electrode System

K.S. Kim, J.M. Park, Y.B. Kim, H.S. Lee, and G.H. Rim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - The high temperature thermal plasma technology applied to waste treatment has undoubtedly gained high importance owing to its outstanding properties such as flexibility, compact reactor, and clean treatment as the environmental problem goes to a main issue in public talks, because the thermal plasma with temperature of around 10,000K or little less is particularly suitable for waste treatment. Since the thermal plasma is, in general, governed by a number of parameters, some complicated and elaborate controls might be mandatory. The high maintenance cost caused by big input power has been a main obstacle to the growth of the waste treatment plant based on thermal plasma technology, but the recent R&D on the waste-to-energy shows that the problem could be solved soon. In this paper, the authors introduce the current R&D activity related to three-phase ac plasma torch in KERI.

#### 1. 서 론

고온(통상 10,000K이상) 열플라즈마 기술은 군사기술 및 우주항공기술을 주도하던 미국과 소련에 의해 적어도 50여년 전부터 기술의 발전을 거듭하여 왔다. 이러한 열플라즈마 기술을 환경분야에 적용하려는 연구는 중저전위 방사성 물질이나 화학무기 또는 PCB(poly-chlorinated biphenyl)와 같은 독성물질을 무해화시키기 위해 1980년대 초부터 연구가 시작되어 현재 수 MW급 대용량 플라즈마 폐기물 처리 시스템의 상용화가 진행 중이다. 또한, 고온 열플라즈마를 발생시키는 데 많은 전기에너지가 소요되므로 발생하는 고가의 운영비 부담 때문에 적용대상물이 원전 관련 저준위 방사성 폐기물 처리, 제철제강 슬러지의 재활용, 소각재 처리 등 처리비용은 비싸지만 플라즈마 용융처리 외에는 뚜렷한 대안이 없는 특정분야에 한정되어 왔다. 그러나 재래식 소각이 폐기물을 다이옥신과 같은 보다 유해한 물질로 바꾸어 준다는 사실로 인한 소각에 대한 지자체의 만연된 불신으로 인해 유럽과 일본을 중심으로 한 소각 선진국들은 도시폐기물 처리시 종래의 단순 소각방식을 보다 친환경적인 열분해용 방식으로 대체할 수 있는 프로세스를 개발하여 현재 여러 가지 실용 시스템을 시장에 선보이고 있다. 다양한 종류의 폐기물 열분해용 처리방식 중 가장 미래 지향적인 방식은 처리속도가 빠르고 반응로의 구조가 단순한 고온 열플라즈마 방식이다[1-2].

플라즈마 폐기물 처리시스템의 가스화용융부의 핵심부품은 플라즈마 토치(plasma torch)라고 하는 전기 에너지에 의한 열플라즈마 발생장치로서 전원의 형태에 따라 직류형, 교류형, 고주파형으로 나누어지고, 플라즈마 플라임의 형성방법에 따라 이행형(transferred)과 비이행형(nontransferred)으로 구분한다. 플라즈마 토치의

현안은 토치의 내구성, 전극의 수명, 고장확률, 교체용이함 등의 정도에 따라 결정되는 유지보수비용과 토치 효율에 의존되는 정상운전비용의 절감에 있다. 본 고에서는 전극의 수명은 다소 짧으나 토치 전체의 단순한 구조로 인해 내구성 및 신뢰성이 뛰어난 삼상교류 플라즈마 토치를 소개하고, 이를 이용한 플라즈마 폐기물 처리 시스템에 대해 기술하고자 한다.

#### 2. 삼상 교류 플라즈마 토치

##### 2.1 구조 및 동작원리

삼상 교류에 의한 플라즈마 발생 장치는 흑연봉 전극(graphite electrode)에 의한 전기아크반응로(electric arc reactor)를 지칭하는 경우가 많으나, 본 연구에서 제안하는 방식은 독일의 Krupp사와 러시아의 물리문제연구소(IPE)가 1980년대 중반 거의 동시에 선을 보인 구리류브전극을 이용한 아크 슬라이딩 식의 비이행형 플라즈마 가스 가열기(gas heater)와 유사한 형태의 플라즈마 발생장치로서, 전극과 노즐의 형상이 폐기물 처리에 충분한 엔탈피를 가질 수 있도록 설계된 구조를 가졌다. 시스템의 구성은 크게 인젝터(injector), 삼상 구리류브전극, 노즐(nozzle), 그리고 체임버로 되어 있는 비교적 단순한 구조의 플라즈마 토치이며, 전극을 제외한 모든 재질은 스테인레스 스틸을 사용하였고 체임버 내부의 전 부위를 물로 냉각하고 체임버 벽면의 접선방향으로 고속의 플라즈마 반응기체용 냉가스를 주입시켜 벽면이 고온의 플라즈마 가스와 직접 접촉하는 것을 방지하여 장시간 사용에 무리가 없도록 설계하였다. 인젝터는 단상 교류를 이용한 소형 플라즈마 토치로서 단상 교류 방전의 특성상 다소 불안정한 방전을 일으키지만 사용전압이 5kV 정도의 고전압이어서 초기 방전이 유리할 뿐 아니라 상대적으로 방전에 의한 전리기체의 밀도가 높아지므로 주 전극간의 방전을 유도하는 데 유리하다는 장점이 있다. 전극은 수냉각이 용이하도록 길이 방향으로 냉각수로를 형성하고 아크가 슬라이딩을 잘 할 수 있도록 발산형으로 설계하였으며, 삼상 전극을 방사상 120도 간격으로 배치하고 전극의 웨이스트(waist) 방향이 축상의 한 점에서 모이도록 하여 60도의 위상차를 두고 일어나는 방전 축, 360Hz의 극간 아크방전이 분산되지 않도록 하였다. 주 전극간 아크 방전이 일어나면 아크는 자기 스스로 생성해 내는 자계에 의해 전극을 따라 빠르게 이동하게 된다. 전극의 재질은 용점이 다소 낮지만 수냉각이 잘 되도록 열전달 효율을 고려하여 구리를 사용하였다. 극간 거리의 조정이 가능하도록 하여 주 전극 인가전압을 380V에서 약 500V까지 가변할 수 있도록 하였으며, 가능한 한 사업장에서 주로 사용하는 380V나 440V에서 최상으로 운전되도록 설계하였다. 플라즈마 토치의 출력은 가변 리액터를 통한 전류의 제어와 인가 전압의 조정에 의하여 100kW에서 200kW의 범위 내에서 사용 가능하도록 설정하였다. 이러한 전압, 전류 및 토치 출력에 대한 유연성은 본 연구에 사용된 삼상 교류 플라즈마 토치가 DC 플라즈마 토치나 흑

연봉 전극 시스템보다 적용면에 있어서 유리함을 보여 준다. 극간 거리가 최소인 영역에서 아크의 이동속도는 주로 전극의 발산각과 아크전류의 크기에 따라 좌우되며, 발산각이 대략 20도 정도이고 전류가 250A에서 850A 범위 내에 있을 때 10m/sec에서 25m/sec 정도로 추정된다. 체임버 내부로 주입되는 플라즈마 동작가스 역시 아크의 이동에 다소 영향을 줄 것으로 추정되지만 그 과정이 대단히 복잡하여 평가가 어려운 것으로 보고되고 있다[3].

Conceptual drawing of 3-phase ac nontransferred plasma torch for waste

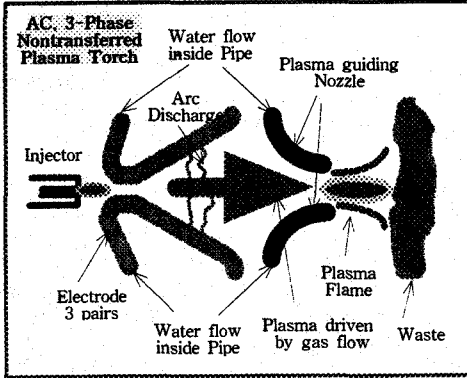


그림 1. 삼상 교류 플라즈마 토치의 개념도

그림 1은 삼상 교류에 의해 작동하는 플라즈마 토치의 개념도를 보여 주고 있으며, 그림에서 외벽을 구성하는 방전 체임버와 냉가스 난류를 만들어 내는 가스 분출구 등은 생략되어 있다. 이 토치의 동작원리는 다음과 같다. 단상 교류 고전압에 의해 발생하는 고밀도의 전리 기체는 삼상 전극의 최대 전계점 부근에서의 극간 절연 파괴를 유도하여 주 아크 방전을 개시시킨다. 이 아크는 전기역학의 원리와 나선형 대류에 의해 빠른 속도로 전극의 오른쪽(노출 방향)으로 이동하면서 플라즈마 동작가스(working gas)와 열교환을 하고 동시에 아크전압을 상승시킨다. 어느 정도 아크 전압이 상승되면 아크는 소멸되고 고온으로 가열된 플라즈마 동작가스는 플라즈마 플레임을 형성하여 노즐을 통해 체임버 바깥으로 분출된다. 체임버 바깥으로, 즉 플라즈마 용융로로 분출된 직후 측정되는 플라즈마 플레임의 질량온도의 평균은 상황에 따라 많은 차이를 보이지만 폐기물을 효율적으로 처리하기 위해서는 2500K 이상이 되도록 조정해야 한다.

## 2.2 전극 프로세스

고온 열플라즈마 발생장치에 있어서 주 전극은 기타 부품에 비해 상대적으로 수명이 짧아 장치의 연속사용시간을 결정하는 부품이 되므로 전체 시스템의 운전비용을 산정할 때 주요한 역할을 한다. 따라서, 연속사용시간을 늘리기 위해 전극의 마모를 줄여야 하는 것은 당연하며, 이를 위해 전극 주변에서 발생하는 물리현상에 대한 심도 있는 연구가 불가피하다. 열플라즈마 발생을 위한 대전류 아크방전에 사용되는 전극은 아크 체류영역에서 심한 열적 부하를 가지게 된다. 이 아크 체류영역은 전극의 재질, 전류의 크기 및 냉각 방식에 따라 응축되거나 또는 팽창하게 된다. 동일 전원에서 전극의 마모에 크게 영향을 주는 인자는 플라즈마 가스의 화학적 성질과 전극 재료의 일 함수(work function)라 알려져 있으며 이와 관련된 수학적 해석모델이 여러 가지 제시되지만 그 중요성에 비추어 볼 때 아직 뚜렷한 해석모델이 나오진 않고 있다. 현재 실험에 의해 전극마모 프로세스를

관찰하는 방법이 유일한 수단이며, 주로 전극표면에서 발광되는 광의 스펙트럼을 분석하여 판정한다. 전극의 마모를 줄이는 것은 결국 전극표면의 용융과 증발을 억제하는 것으로 귀착되며, 전극표면이 용융점(구리의 경우 1083°C)까지 가열되기 전에 아크를 이동시킬 수 있는 구조야 한다. 일반적으로 이러한 삼상 교류 플라즈마 토치에서 물로 냉각되는 구리류로 전극이 응결까지 올라가는데 걸리는 시간은 약 100 $\mu$ s 정도이다[3]. 따라서, 아크가 이동할 수 있는 전극의 길이가 100mm일 때 삼상 교류 아크 방전을 지속적으로 유지하기 위한 기본 조건은 아크의 평균 이동속도를 약 30m/sec 이하로 조정해야 한다는 것이다. 이 수준의 속도는 다소 느려 보이지만, 아크가 발생부위에서 떨어질 때 따라 이동 속도가 현저하게 떨어지는 현상을 고려했을 때, 아크의 스팟 반경이 1mm 정도가 되더라도 전극의 마모를 충분히 줄일 수 있는 속도이다.

## 2.3 시스템 구성 및 특성

열플라즈마 발생 시스템은 플라즈마 토치, 전원장치, 수냉각 시스템, 가스공급 시스템, 그리고 측정 시스템으로 구성되며 용도에 따라 설계 변경이 용이하도록 모두 모듈화 되어 있다. 그림 2의 사진은 현재 성능 시험 중인 삼상 교류 플라즈마 토치 시스템을 보여 주고 있다. 그림의 좌상에 있는 방전 체임버는 직경이 약 40cm이고 길이가 약 50cm인 200kW급 플라즈마 토치 시스템의 핵심 구성품이다.



그림 2. 200kW급 삼상 교류 플라즈마 토치 시스템

그림 3은 삼상 교류 플라즈마 토치의 주 전원 구성도로서 전류제한용 리액터는 삼상일팔 강제 공랭식이고 3단의 탭을 인출하여 동일 전압에서 4종류의 전류를 인가할 수 있도록 하였다. 아크전압 강하와 순수 입력파워를 정밀하게 측정하기 위하여 오차범위 2%이내인 CT(current transformer)와 PT(potential transformer)를 설치하였으며, 냉각 효율을 평가하기 위해 플라즈마 토치의 냉각수 입출구에 정밀도 0.2°C인 써모커플(thermocouple)을 설치하였다.

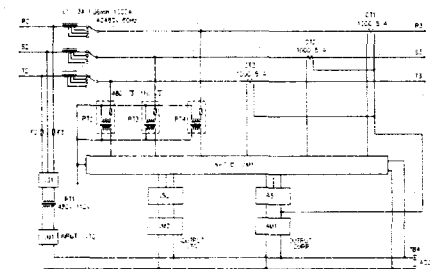


그림 3. 삼상 교류 플라즈마 토치의 주 전원 구성도

## 2.4 폐기물 처리를 위한 플라즈마 용융 프로세스

일반적으로 열플라즈마 용융분야를 대별하면 환경산업에서의 폐기물 처리와 신소재 개발로 나눌 수 있다. 시스템 전체 측면에서는 두 분야가 판이하게 다르지만 핵심기술인 플라즈마 발생 및 공정기술 면에서 그 공통점이 대단히 많다고 할 수 있다. 신소재 분야보다는 다소 뒤늦게 출발하였지만 열플라즈마 기술의 환경산업에의 적용은 폐기물 소각시 다량 발생하는 다이옥신과 같은 유기성 독성물질이 발암 및 내분비계 혼란의 주요 물질로 판명되어 소각로 신설 및 운전이 세계적으로 첨예한 문제가 되어 있을 뿐 아니라, 플라즈마를 이용한 폐기물 처리방법의 발전이 열분해 용융방식이라는 개선된 소각방식의 뒤를 이어 차세대 폐기물 처리시장을 점유할 수 있다는 가능성을 점차 현실화시킴에 따라 소각이 주요 폐기물 처리 방식인 일본과 유럽을 중심으로 상용화 연구가 진행 중이다[4].

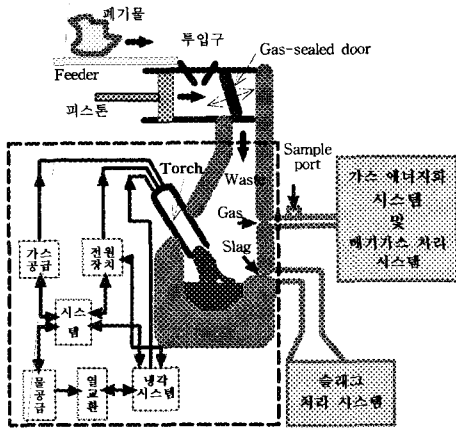


그림 2. 플라즈마 폐기물 처리 시스템의 개념도

열플라즈마를 폐기물 처리에 적용할 때 친환경적인 요소를 배제하더라도 물성 측면에서 여러 가지 장점이 있으나 다음 몇 가지의 두드러진 장점 때문에 소각방식을 대신할 수 있는 차세대 폐기물처리방식으로 주목받고 있다. 첫째 500-900°C에서 일어나는 열분해(pyrolytic decomposition) 뿐만 아니라 1100-1500°C의 고온에서 일어나는 가스화(gasification)에도 충분한 온도와 에너지를 용이하게 만들어 낼 수 있다는 점과, 둘째 반응로의 가스 상태를 보다 균일하게 할 수 있고 가스상태의 제어가 용이하다는 점이다[5].

열분해 공정 자체는 고체연료로부터 가스상이나 액체 연료를 얻기 위해 오래 전부터 연구되어져 왔었다. 그러나 고온의 열플라즈마를 이용할 경우 반응영역의 온도가 1500°C-2000°C 정도로 올라가므로 생성가스의 구성비가 달라진다. 고온의 플라즈마 기체는 독특한 화학적 메카니즘에 의해 각 반응 단계 즉, 환원, 중성, 및 산화의 각 영역에서 유기물 또는 무기물을 열분해 또는 가스화시키거나 산화시키면서 반응로 내에 투입된 폐기물과 반응한다. 플라즈마영역 내에서 일어나는 물리화학공정의 방향과 반응속도를 평가하고 평형조건을 결정하기 위해서는 주어진 온도조건에서 플라즈마의 열역학적 성질을 알 필요가 있다. 유기물 즉 저급 탄소화합물에 열플라즈마가 주입되면 매우 활발한 수분 증발과 함께 가스가 유출되는 열분해 가스화 반응이 있고, 재와 같은 무기물은 고온의 열에 의해 용융된 슬래그로 전환된다[5-6].

열플라즈마 폐기물 처리공정은 전처리, 용융, 배기가스처리 등 3가지로 크게 나눌 수 있으며 전처리는 폐기물 내용에 따라 다소 차이는 있으나 분류, 건조 및 파쇄로 구성되며, 배기가스 처리는 여러 가지 필터류에 의해

무독, 무취, 무색의 가스를 대기 중에 방출하는 과정이다. 전처리와 배기가스처리는 소각로의 경우와 유사하나 플라즈마 반응으로 성능이 폐기물의 상태에 대해 민감하지 않고 반응로에 들어온 폐기물은 대부분 가스화가 되거나 슬래그화되므로 소각로에 비해 훨씬 간단해진다..

## 3. 결 론

소각분야에서도 차세대 소각방식으로는 플라즈마 가스화 용융 방식만이 현재 인류가 보유하고 있는 기술 중 유일한 해결책을 느끼고 있으나, 플라즈마 발생에 대한 기술적 어려움과 플라즈마 발생을 위해 투입해야 하는 전력 때문에 시공업체가 주저하고 있는 실정이다. 그러나 플라즈마 가스화 용융 프로세스에서 발생되는 고온 가연성 가스를 이용한 가스터빈발전의 상용화 연구 성공이 근년에 들어 연이어 발표됨에 따라, 폐기물의 전처리 공정 및 가스화 용융 프로세스의 최적화 연구 결과와의 연계를 통해 그 동안 시장 확보에 있어서의 장애물이었던 입력에너지 문제를 자연스럽게 해결하면서 보다 깨끗한 방식의 폐기물 감량화 방식으로 그 위치를 확보할 수 있을 것이다. 즉, 플라즈마 가동을 위해 필요한 에너지 뿐만 아니라 대부분의 운전 에너지를 처리대상인 폐기물의 함유 열량으로부터 확보하기 위하여 자체의 폐기물 발전시스템을 병행시키는 보다 경제적인 접근방법인 폐기물 자원화 개념을 적극 수용하는 것이 현재의 연구방향이라 볼 수 있다.

본 연구에서 제안한 삼상 교류 플라즈마 토치는 군수 분야의 레일 건(rail gun) 연구에서 파생된 기술을 산업분야에 적용하려 하는 것으로, 그 구조가 단순하고 출력재료가 용이하므로 폐기물 형태에 따라 다양한 반응로와 반응 프로세스를 요하는 특정폐기물 처리분야에 활용될 가능성이 높다.

현재 전기연구소에서 수행 중인 이와 관련된 플라즈마 폐기물 처리에 대한 연구는 시작된 지 그리 오래지 않아, 삼상 교류 열플라즈마 안정화 및 평가, 유효 엔탈피를 고려한 열효율 개선, 전극수명 연장, 폐기물 가스화 용융 프로세스 등과 같은 중요한 향후 연구과제를 가지고 있지만, 열플라즈마 해석기술, 교류 삼상 열플라즈마 토치 설계 기술, 대용량 플라즈마 토치 전원 장치 기술 등을 산업체에 제공할 수 있기 때문에 산업체의 플랜트 공정 기술과 협력하게 되면 좋은 연구결과가 도출될 것으로 예상된다.

## (참 고 문 헌)

- [1] P. Fauchais and A. Vardelle, "Thermal Plasmas", IEEE Trans. PS vol.25 no.6, pp1258-, 1997
- [2] R. Henne, "Thermal Plasmas for Material Processing", Contrib. Plasma Phys. vol.39 no.5, pp358-, 1999
- [3] P.G. Rutberg et al., "Strong-current arc discharges of alternating current", IEEE Trans. PS vol.26 no.4, pp1297-, 1998
- [4] M. I. Boulos, "New frontiers in thermal plasma processing", Pure&Appl Chem, vol.68 no.5, pp1007-, 1996
- [5] 김광수, "고온 열플라즈마를 이용한 폐기물 처리", 대한전기학회 전기기기 춘계대회, 2000.4
- [6] 박현서외, "플라즈마를 이용한 비산재 처리기술", 99 다이옥신 및 애취처리 신기술 심포지엄, 1999.12.3