

교류 글라이딩 아크에 의한 플라즈마 발생의 안정화

김 광수, 이 홍식, 임 근희, 송 기동, 이 우영
한국전기연구원

Stabilization of Thermal Plasma in an AC Plasma Generator

K.S. Kim, H.S. Lee, G.H. Rim, K.D. Song, and W.Y. Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 삼상 교류에 의한 플라즈마 발생 장치 중 구리튜브 전극을 이용한 아크 글라이딩 식의 비이행형 플라즈마 발생장치는 전극구조가 간단하고 교체가 용이할 뿐 아니라, 전극과 노즐의 형상을 유해 가스 처리에 충분한 엔탈피를 가지도록 설계될 수 있으므로, DC형과 더불어 차세대 환경정화용 핵심장치로 관심을 모으고 있다. 본 연구에서는 교류형의 특성상 어쩔 수 없이 발생하는 열플라즈마의 플리커를 제어하기 위해 글라이딩 아크의 움직임과 플라즈마 플레임의 움직임을 분석하여 열플라즈마의 안정화 조건을 정립하고자 하였다. 또한 본 논문에서는 여러 가지 조건에서 수행된 플라즈마에 관련된 수치해석과 플라즈마 발생기의 동작시험의 결과를 바탕으로 삼상교류 열플라즈마를 안정시킬 수 있는 기본적인 조건의 범위를 제시하였으며 이에 대한 토의를 기술하였다

에너지 변환장치인 플라즈마 토치라 불리는 열플라즈마 발생장치이며, 이 플라즈마 토치는 전원의 형태에 따라 직류형, 교류형, 고주파형으로 나누어진다. 플라즈마 토치가 당면한 문제는 시스템의 유지보수에 절대적인 영향을 미치는 전극의 수명과 시스템이 대량의 전기 에너지를 필요로 하기 때문에 야기되는 시스템의 효율 즉, 에너지 변환효율과 플라즈마 이용 효율의 향상에 있다. 본 고에서는 전극의 수명을 연장시키기 위해 작동가스와 전자력을 이용하여 고온의 아크가 전극 위를 빠른 속도로 글라이딩할 수 있는 구조의 플라즈마 발생기를 사용하였으며, 교류 전압에 의한 플라즈마 발생의 흔들림을 안정시키기 위해 작동가스의 입구 압력, 인가 전압, 및 전극 형상 등에 대한 영향을 분석하였다.

2. 교류 열플라즈마 발생 장치

1. 서 론

2.1 동작원리

현재 환경정화분야와 나노분말제조 분야에서 많은 기대를 걸고 있는 플라즈마 기술 중 플라즈마 플레임 중심부의 온도가 10,000K-20,000K 범위에 이르는 열플라즈마를 발생하고 제어하는 기술은 근사기술 및 우주항공 기술을 주도하던 미국과 소련에 의해 만세기 전부터 기술의 발전을 거듭하여 왔다. 특히 플라즈마 토치라 불리는 열플라즈마 발생기를 이용한 소재연구는 우주항공 분야 중 대기권 재진입 상황을 시뮬레이션하기 위해 수행되었지만 열플라즈마 기술의 진전에 많은 기여를 하였다. 이러한 열플라즈마 기술을 환경정화분야에 적용하려는 연구는 중저준위 방사성 물질이나 화학무기 또는 다이옥신과 같은 유해한 휘발성 유기화합물을 무해화시키기 위해 1980년대 초부터 연구가 시작되어 현재 수 MW급 대용량 플라즈마 환경정화 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, 체첸체강 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. 고온 열플라즈마 방식은 열분해용융 처리방식과는 원리적으로 달라서 처리속도가 빠르고 반응대의 구조가 단순하여, 비록 현재 열분해용융 방식이 시대의 흐름이긴 하나 소각으로 분류될 수 있는 여러 가지 환경정화 방식 중 가장 미래 지향적인 방식이라 볼 수 있다[1-2].

삼상 교류에 의한 플라즈마 발생 장치라 하면 대개는 흑연봉 전극을 이용한 저항가열 방식인 전기아크식 반응로를 지칭하는 경우가 많으나, 본 연구에서 제안하는 방식은 러시아의 물리문제연구소(IPE)가 15년 전부터 연구를 해오던 것으로 10여년 전부터 독일의 환경사업회사인 Krupp사가 이와 유사한 방식을 이용한 플라즈마 발생기를 환경정화 장치에 적용시켜 시장에 선을 보인 것이다. 시스템의 구성은 크게 인젝터(injector), 삼상 구리튜브 전극, 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. 발산형의 구리튜브를 주 전극으로 사용하여 발생된 아크가 전극 위를 어느 정도 글라이딩하면 아크가 쉽게 소멸될 수 있도록 설계하였으며, 전극 위에 고온 아크가 체류하는 시간을 가능한 한 짧게 하여 전극수명이 연장되도록 하였다. 인젝터는 단상 교류를 이용한 소형 플라즈마 토치로서 단상 교류 방전의 특성상 다소 불안정한 방전을 일으키지만 사용전압이 5kV 정도의 고전압이어서 초기 방전이 유리 할 뿐 아니라 상대적으로 방전에 의한 전리기체의 밀도가 높아지므로 주 전극간의 방전을 유도하는데 유리하다는 장점이 있다. 전극은 수냉각이 용이하도록 길이방향으로 냉각수로를 형성하고 아크가 슬라이딩을 잘 할 수 있도록 발산형으로 설계하였으며, 삼상 전극을 방사상 120도 간격으로 배치하고 전극의 균형을 잡기 위해 세 개의 전극 수렴점이 중심 축상의 한 점에서 모이도록 하여 60도의 위치차를 두고 일어나는 방전 즉, 360Hz의 극간 아크방전이 분산되지 않도록 하였다. 주 전극간 아크 방전이 일어나면 아크는 자기 스스로 생성해 내는 자력에 의해 전극을 따라 빠르게 이동하게 된다. 전극의 재질은 용점이 다소 낮지만 수냉각이 잘 되도록 열전달 효율을 고려하여 구리를 사용하였다.

열플라즈마를 이용한 환경정화 시스템의 핵심 모듈은 전기 에너지를 열플라즈마로 변환시켜 주기 위한 일종의

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 인가전압의 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 흑연봉 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].

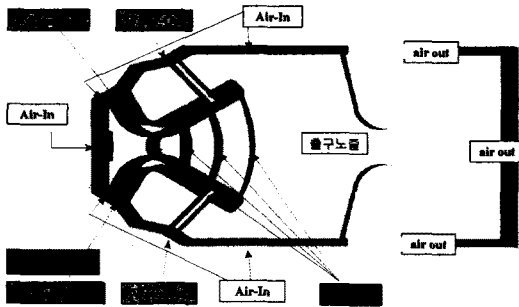


그림 1. 교류 플라즈마 토치의 개념도

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 발생되는 고밀도의 전기기체는 삼상 전극의 최대 전계점 부근에서의 극간 절연 파괴를 유도하여 주 아크 방전을 개시시킨다. 이 아크는 전기역학의 원리와 나선형 대류에 의해 그림 1에서의 극간에 삽입하여 놓은 아크 주와 같이 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 반응로로 분출된 직후 측정되는 플라즈마 플레임의 질량온도의 평균은 상황에 따라 많은 차이를 보이지만 가스를 효율적으로 처리하기 위해서는 2,500K 이상이 되도록 조정해야 한다[4].

2.2 아크 글라이딩 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 대 전류 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℃)까지 가열되기 전에 아크를 이동시킬 수 있는 구조라야 한다. 일반적으로 이러한 삼상 교류 플라즈마 토치에서 물로 냉각되는 구리튜브 전극이 용융까지 올라가는데 걸리는 시간은 약 100 μ 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 멀어짐에 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 2는 현재 성능 시험 중인 삼상 교류 플라즈마 토치 시스템을 보여 주고 있다. 그림 2의 주 전원 구성도에서 전류제한용 리액터는 삼상일팔 강재 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℃인 써모커플(thermocouple)을 설치하였다[4].

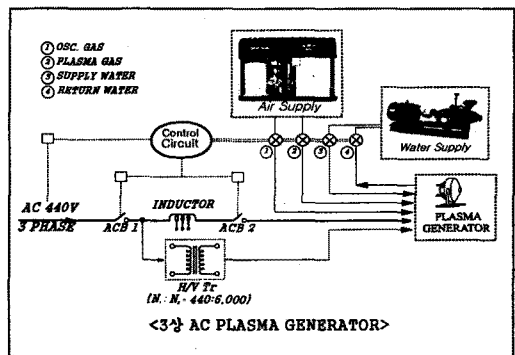


그림 2. 200kW급 삼상 교류 플라즈마 토치 시스템

2.4 플라즈마 안정화를 위한 수치 해석

플라즈마는 특성상 발전시 극간을 트리거시켜 줄 수 있는 고전압이 필요하고, 발전된 플라즈마 상태를 안정화 또는 유지시키기 위해서는 충분한 전류가 필요하다. 그러나, 이 두 조건을 만족하는 전원장치를 간단하게 제작하지는 못하므로 대개 플라즈마 발생기를 제작하기 전 수치해석을 통해 어느 정도 검증이 끝난 뒤 제작에 들어가게 된다. 본 연구에서 사용된 시스템은 플라즈마를 발전시키기 위한 별도의 소형 플라즈마 토치가 플라즈마 발생기 후단 중심부에 위치하고 있으므로 플라즈마 발전 문제는 쉽게 해결되지만, 교류를 주전원으로 사용하고

아크가 전극 위를 글라이딩하면서 아크전압을 높이기 때문에 플라즈마 자체를 안정시키는 것은 용이한 일이 아니다. 따라서, 교류 플라즈마의 안정조건을 찾기 위한 사전 연구가 필요하며, 이러한 사전 연구를 위해 열플라즈마의 수치해석이 필요해진다. 열플라즈마의 수학적 해석모델은 질량보존, 에너지보존, 운동량보존 법칙을 이용한 미분방정식이 포함되며, 기하학적 해석모델은 비록 실제 시스템의 전극 본포가 일반 삼차원이긴 하지만 열플라즈마의 경향을 알아보기 위한 작업이므로 축대칭장과 일반 이차원으로 간이화하여 파라미터들의 초기치를 추정하였다. 수치해석은 상용화된 패키지인 Phoenix를 사용하였고, 해석 알고리즘으로는 Simplest를 적용한 결과, 그림 3과 유동본포를 얻을 수 있었다.

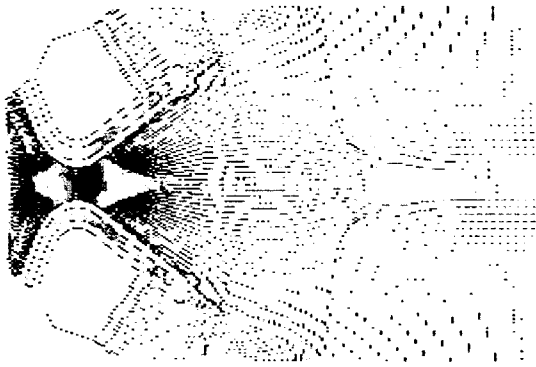


그림 3. 플라즈마 가스류의 속도분포

2.5 열플라즈마 발생 실험

열플라즈마를 환경정화 분야 특히 유해가스나 PFC가 스 처리에 적용할 때 친환경적인 요소를 배제하더라도 물성 측면에서 여러 가지 장점이 있으며, 다음 몇 가지의 실용적인 두드러진 장점 때문에 차세대 환경정화기술로서 주목받고 있다.



PT 250A Cond#1 <keri01107> Photo 3/4

그림 4. 열플라즈마 발생 실험

첫째 500-900℃에서 일어나는 열분해 및 1100℃ 이상의 고온에서 일어나는 유기물의 가스화에 충분한 온도와 에너지를 용이하게 만들어 낼 수 있다는 점과, 물체 반응로의 가스 상태를 보다 균일하게 할 수 있고 가스상태의 제어가 용이하다는 점이다[4]. 이러한 장점을 충분히 활용하기 위해서는 플라즈마 플레임의 중심부 온도가 커야함은 물론이고 플레임이 갖는 엔탈피 자체도 커야한

다. 그림 4는 설계 용량의 1/4에서 실시된 플라즈마 안정화 시험 장면이며, 안정화 문제만 해결되면 설계 용량에서 충분한 엔탈피를 가질 수 있다는 가능성을 보여 주고 있다.

고온의 플라즈마 기체는 독특한 화학적 메커니즘에 의해 각 반응 단계 즉, 환원, 중성, 및 산화의 각 영역에서 유기물 또는 무기물을 열분해 또는 가스화 시키거나 산화시키면서 반응로 내에 투입된 처리물질과 반응하므로 열플라즈마 플레임의 조건이 달라질 수 있다. 즉, 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 전환되므로 반응로에서 필요한 열용량이나 플라즈마 플레임의 조건이 달라진다. 이러한 프로세스를 이해하기 위해서는 플라즈마영역 내에서 일어나는 물리화학공정의 방향과 반응속도를 평가하고 평형조건을 결정하기 위해서는 주어진 온도조건에서 플라즈마의 열역학적 성질을 알 필요가 있으므로 또 다른 단계의 연구가 필요하다[5].

3. 결 론

환경정화산업의 소각분야에서 현재 열분해 용융방식의 뒤를 이어 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 입력에너지의 문제를 자연스럽게 해결하면서 보다 깨끗한 방식의 폐기물 감량화 방식으로 그 위치를 확보할 수 있을 것이다. 즉, 플라즈마 가동을 위해 필요한 에너지뿐만 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 글라이딩 아크 방식의 삼상 교류 플라즈마 토치는 군수분야의 레일 건(rail gun) 연구와 항공우주 분야의 대기권 재진입 연구에서 파생된 기술을 산업분야에 적용하려 하는 것으로, 그 구조가 단순하고 출력제어가 용이하므로 유해가스의 정화는 물론이고 폐기물 형태에 따라 다양한 반응로와 반응 프로세스를 요하는 특정폐기물 처리분야에 활용될 가능성이 높다.

(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. Rutberg et al., "Strong-current arc discharges of alternating current", IEEE Trans. PS vol.26 no.4, pp1297-, 1998
- [4] 김광수의, "전극구조가 간편한 삼상 플라즈마 토치", 대한전기학회 하계대회, 2000.7
- [5] 김광수의, "고온 열플라즈마를 이용한 폐기물 처리", 대한전기학회 전기기기 춘계대회, 2000.4