

삼상 교류 플라즈마 발생의 안정화

이 경호, 김 광수, 이 홍식, 임 근희
한국전기연구원

Stabilization of Plasma in a Three-Phase AC Plasma Generator

K.H. Lee, K.S. Kim, H.S. Lee, and G.H. Rim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - A simple-structured thermal plasma generator for waste gas treatment has been studied. The 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. Moreover, the thermal plasma generated by ac power has some additional advantages such as simple electrode system and easy maintenance. A prototype 200kW class plasma generator with specifications of 10-30m/sec gas velocity and 3000-5000K temperature on the center just outside of the nozzle has been designed and tested. Case studies on heat transfer, heat flow, velocity distribution, and temperature distribution using a commercial simulation package show lots of flexibility in design. The experimental results from the prototype generator show that the ac thermal plasma is easily controlled by working gas flow once it is ignited. A stabilization condition is discussed with the data from monitoring arc voltage drops with respect to gas flow rate during the test.

1. 서 론

현재 환경정화분야와 나노분말제조 분야에서 많은 기대를 걸고 있는 플라즈마 기술 중 플라즈마 프레임 중심부의 온도가 10,000K-20,000K 범위에 이르는 열플라즈마를 발생하고 제어하는 기술은 군사기술 및 우주항공기술을 주도하던 미국과 소련에 의해 반세기 전부터 기술의 발전을 거듭하여 왔다. 특히 플라즈마 토치라 불리는 열플라즈마 발생기를 이용한 소재연구는 우주항공 분야 중 대기권 재진입 상황을 시뮬레이션하기 위해 수행되었었지만 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 폐기를 처리, 제철제강 슬러지의 재활용, 소각재 처리 등 처리비용은 비싸지만 플라즈마 응용처리 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 도시폐기를 처리시 종래의 단순 소각방식을 보다 친환경적인 열분해용 방식으로 대체할 수 있는 프로세스를 개발하여 현재 여러 가지 실용 시스템을 시장에 선보이고 있다. 고온 열플라즈마 방식은 열분해용 처리방식과는 원리적으로 달라서 처리속도가 빠르고 반응로의 구

조가 단순하여, 비록 현재 열분해용 방식이 시대의 흐름이긴 하나 소각으로 분류될 수 있는 여러 가지 환경정화 방식 중 가장 미래 지향적인 방식이라 볼 수 있다 [1-2].

열플라즈마를 이용한 환경정화 시스템의 핵심 모듈은 전기 에너지를 열플라즈마로 변환시켜 주기 위한 일종의 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. 본고에서는 전극의 수명을 연장시키기 위해 작동가스와 전자력을 이용하여 고온의 아크가 전극 위를 빠른 속도로 클라이딩할 수 있는 구조의 플라즈마 발생기를 사용하여, 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

2.1 동작원리

삼상 교류에 의한 플라즈마 발생 장치라 하면 대개는 흑연봉 전극을 이용한 저항가열 방식인 전기아크식 반응로를 지칭하는 경우가 많으나, 본 연구에서 제안하는 방식은 러시아의 물리문제연구소(ИПЕ)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 전부위를 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 클라이딩하면 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 유리할 뿐 아니라 상대적으로 방전에 의한 전리기체의 밀도가 높아지므로 주 전극간의 방전을 유도하는 데 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 위상차를 두고 일어나는 방전 즉, 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 충전방 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].

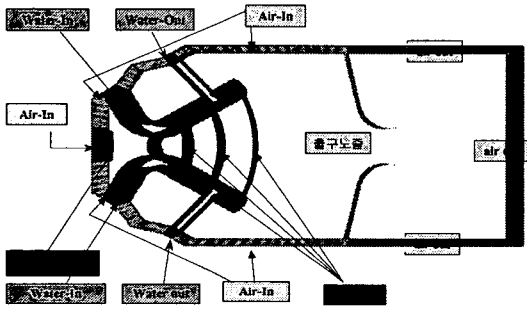


그림 1. 교류 플라즈마 토치의 개념도

그림 1은 삼상 교류에 의해 작동하는 플라즈마 토치의 개념도를 보여 주고 있으며, 그림에서 외벽을 구성하는 방전 체임버와 냉각수 난류를 만들어 내는 가스 분출구 등은 생략되어 있다. 이 토치의 동작원리는 다음과 같다. 단상 교류 고전압에 의해 발생하는 고밀도의 전리기체는 삼상 전극의 최대 전계점 부근에서의 극간 절연파괴를 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 노출을 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[5].

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 심

도 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 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 삼상일괄 강제 공행식이고 3단의 탭을 인출하여 동일 전압에서 4종류의 전류를 인가할 수 있도록 하였다. 아크전압 강화와 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[4].

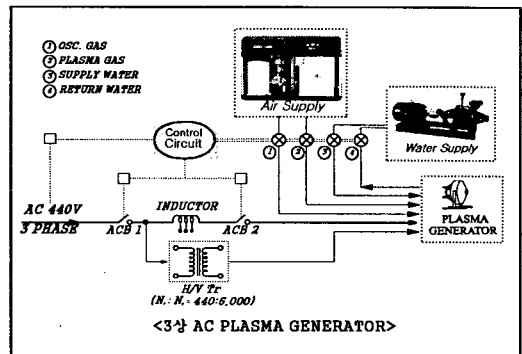


그림 2. 200kW급 삼상 교류 플라즈마 토치 시스템

2.4 열플라즈마 발생 실험

플라즈마 실험에는 다양한 종류의 혼합가스가 사용될 수 있지만, 본 실험에서는 대기압하에서 air를 사용하였다. 메인 챔버에는 플라즈마를 안정화시키고 유지시키기 위하여 연속적인 전류가 인가되었으며, 인젝터에는 고압 변압기에 의한 고전압이 인가되었다.

그림 3은 50kW의 전원을 이용한 아크 글라이딩 방식의 AC 열 플라즈마 토치의 동작을 나타낸 그림이다.



그림 3. 플라즈마 발생실험

앞에서도 언급했듯이, 아크의 동작만으로는 복잡한 플라즈마의 진행과정을 기하학적으로 명확히 설명하기는 어렵다. 하지만 주입되는 가스에 의해 플라즈마 프레임이 노즐을 통해 뿜어져 나오고, 또한 전자계의 힘에 의해 제어되는 아크-코어 흐름의 동작원리는 명확히 설명되어있다. 본 실험에서 발생된 플라즈마 프레임의 Z-축에서의 속도는 30m/s였다.

그림 4는 아크 전압과 가스 흐름의 관계를 나타낸 그림이다. 토치 내부에서의 난류의 발생과 아크 발생부분에서의 냉각을 더욱 효과적으로 하기위해서 아크 전압의 증가시 가스의 유량을 증가시키지만, 아크와 유속은 플라즈마 프레임의 흐름을 강하게 하는 것과는 아무런 상관관계가 없다. 그러나 아크전압을 증가시키고 가스의 유량을 최대가 되게 하기위한 최적의 전류의 상황은 존재한다. 아크의 속도는 전자력에 의해 결정되기 때문에, 전류가 높을 때 아크는 냉가스 층에 빠르게 다다르게 되어, 아크는 세로 방향으로 확산될 수가 없고, 노즐을 통해 앞으로 뿜어져 나온다.

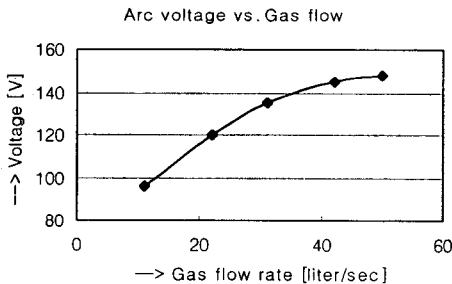


그림 4. 전압과 가스 유량

본 실험에서는, 각각의 위상에서 전압과 전류, 그리고 반응기 내에서의 가스의 유량과 가스압력, 반응기 벽면의 온도가 측정되었다.

3. 결 론

3상 AC전원을 이용한 열플라즈마 발생장치는 환경보호 설비를 위해 연구되어져 왔다. 동작원리는 아크가 발생되면 스스로 생성해내는 전자계에 의해 아크가 발산형 전극을 따라 글라이딩 되는 것을 이용한 레일 건(rail-gun)방식을 기본으로 한다.

본 실험에 사용된 플라즈마 챔버의 전극이 3상 전극구조를 이루고 있지만, 시뮬레이션은 2차원으로 간략화 한 모델로 이루어졌다.

원형 플라즈마 반응기에서 AC 열플라즈마는 동작가스에 의해 쉽게 제어가 된다는 것은 알 수 있었다. 또한

플라즈마 안정화 조건은 실험 중 전압-전류와 전압-가스유량 특성을 측정함으로써 얻어졌다.

만약 이 기술이 종래의 기술과 비교하여 경제적인 이득이 있다면, AC 플라즈마 발생장치는 치명적인 가스를 제거하거나 줄이는데 아주 중요하게 응용될 것이다.

(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 간관한 삼상 플라즈마 토치", 대한전기학회 하계대회, 2000.7
- [5] 김광수의, "고온 열플라즈마를 이용한 폐기물 처리", 대한전기학회 전기기기 춘계대회, 2000.4