

직류 열 플라즈마의 발생 및 그 특성에 관한 연구

김 원규\*, 연 충규, 김 준식, 황 기웅  
서울대학교 전기공학과

A Study On D.C. Thermal Plasma Generation  
And Its Characteristics

\*W.K. Kim, C.K. Yeon, J.S. Kim, K.W. Whang  
Seoul National University

ABSTRACT

A DC thermal plasma generation system for both LPSS and APPS was designed and its characteristics was analysed.

Discharge experiments for 60 conical and cylindrical type anode nozzle were conducted and the results were compared each other.

The flow dependence and the electrode gap dependence were precisely explained and especially voltage jump phenomena under the existance of the parallel magnetic field was studied.

1. 머리말

공업기술의 수준이 향상되고 다루는 재료의 종류가 다양해지면서 보다 높은 온도를 갖는 고온 열원에 대한 요구가 커지게 되었다. 최근 중래의 열원이 제공할 수 있던 온도나 분위기 조건하에서는 열기가 불가능한 신물질의 합성이 고온 플라즈마 분위기에서 이루어질 수 있다는 사실이 널리 인식됨에 따라 이 분야의 연구가 매우 활발해지고 있다. 이들중 특히 직류 열 플라즈마의 이용은 중래의 용접이나 절단기술에서 한걸음 더 나아가서 고음점 세라믹 분말이나 초합금 금속 분말등을 용융 분사코팅 시킴으로써 모재의 내식, 내마모성을 훨씬 향상시키게 되었다. 뿐만아니라 최근의 획기적인 실험결과로서 고온 초전도 산화물의 후막 제작과 더불어<sup>(1,2)</sup> 열역학적으로 저온에선 합성이 불가능한 다이아몬드의 합성을 들 수 있으며<sup>(3)</sup> 후자의 경우 기존의 방법들에 비하여 합성속도가 훨씬 빠르고 2mm 두께에 해당하는 후막을 합성하므로써 주목되고 있다. 그러나 이와같은 응용분야의 확대에도 불구하고 전극 부식 문제와 같은 장치상의 문제점과 더불어 플라즈마 특성제어에 의한 공정방식의 확립은 아직 어려운 부분이 많은 것이 사실이다. 따라서 본 고에서는 공정목적에 따른 직류 열 플라즈마 발생장치의 설계 및 제작에 관해 논하고 제작된 장치에서 발생된 플라즈마의 전류, 전압특성을 분석하였다. 특히 플라즈마 특성제어의 새로운 방법으로서 자장의 영향에 의한 전류, 전압 특성의 변화를 관찰하였으며 이에 대한 간단한 의견을 제시하고자 한다.

2. 장치의 설계

가. 반응조 및 진공시스템

본 연구를 위해 제작된 장치는 APPS/LPSS (대기압 플라즈마 용사/감압 플라즈마 용사)

결용 장비로서 전극 연결에 따라 Transferred 및 Non-Transferred 열 플라즈마 발생이 각각 가능하게끔 했고 그 설계도가 그림1에 나타나 있다.

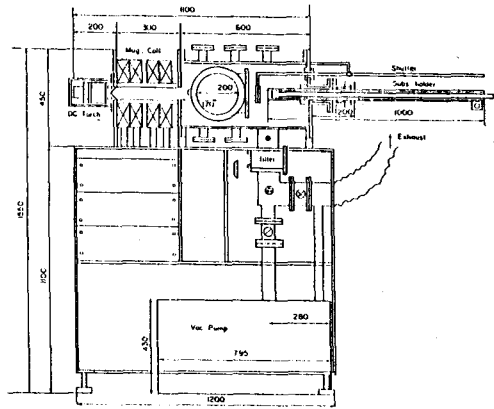


그림 1. 직류 열 플라즈마 발생 시스템

제작된 반응조는 직경 30 cm, 길이 60cm의 크기로 SUS304로 만들어졌으며 직경 20cm의 전면도어와 플라즈마 변수측정에 필요한 5개의 직경 4cm 포트가 열면에 부착되어 있다. 반응조의 오른쪽 측면에는 직경 5cm, 길이 100 cm의 좌우 이동이 가능한 기관지지용 동봉이 연결되었으며, 반응조와는 전기적으로 절연을 시킴으로써 Transferred mode의 경우 양극으로 사용할 수 있게 하였고 조업중단시 코팅막을 보호할 섀터가 기관 전면을 향하게끔 부착되어 있다. 반응조의 진공도는 로터리 펌프에 의해 2X10<sup>-3</sup> Torr 까지 배기됨이 확인되었고 분말실험에 대비하여 진공라인 입구에 교환이 용이한 필터가 부착되어 있다. 반응조와 토치 사이에 자장인가용 튜브와 코일이 설치되어 있으며 이는 분사된 플라즈마 내의 하전입자들을 효율적으로 구속할 수 있게 설계 되었다.

나. 플라즈마 발생용 토치

본 연구를 위해 제작된 플라즈마 발생용 토치의 단면도를 그림 2에 나타내었다.

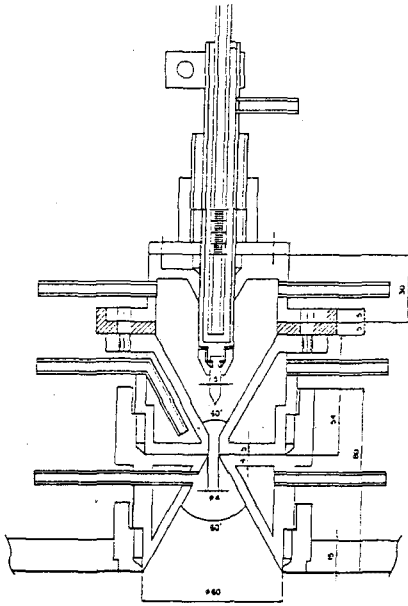


그림 2. 플라즈마 발생용 토치

전극형상은 반응기체의 종류 및 기체흐름을 고려하여 음극은 끝을 뾰족하게 하였고 양극 노즐은 60° 원수구조 및 원통형구조의 두가지 형태로 설계되었고 그림에는 원수구조의 양극이 도시되어 있다. 음극과 양극간의 거리는 방전개시전압 및 방전전압을 결정하는 중요한 변수이므로 0~20mm 까지 조절이 가능하도록 하였으며 토치의 전단부에는 분말이나 기체의 공급이 가능한 링이 부착되었다. 제작된 토치는 각 부위를 조립, 변경하기가 용이하고 음극과 양극간의 거리가 외부로 표시되도록 하여 실험중 단락 위험을 피하였으며, 전체 토치를 플라스틱 커버를 씌워 안전사고에 대비하였다.

다. 전원 및 기타 주변장치

직류 대전류 전원은 제어방식에 따라 가동 철심식, 가포화리액터식, 슬라이드 트랜스식, 싸이리스터식, 초퍼식, 인버터식등 여러가지 방식이 있으나 본 연구에서는, 가장 광범위하게 쓰이고 있으며 출력의 조정 및 안정화가 용이하고 대용량화가 가능한 싸이리스터를 채택했고 싸이리스터에 의한 파형의 일그러짐과 맥동들을 줄이기 위해 중복제어정류회로를 사용하였다. 그림 3 에 제작된 중복제어 정류회로의 기본회로도 가 나타나 있다

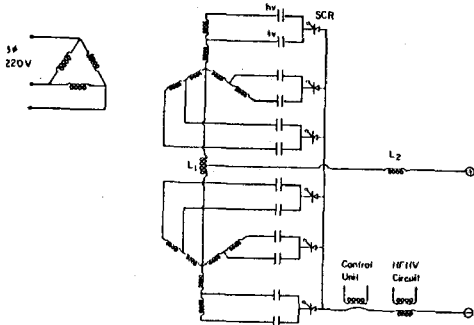


그림 3. 중복제어정류회로

그림에서 보듯이 중복제어정류회로의 특징은 상간리액터 (Interphase Reactor) 를 삽입함

으로써 정류소자, 정류회수 및 전류량을 절반으로 줄일 수 있으며 중복전류에 의한 전압강하가 적어 전압변동률이 줄어든다는 것이다. 전원의 개방전압은 본 연구의 목적상 불활성 혹은 반응성 기체 아크의 상이한 전압강하 특성과 더불어 이행성 / 불이행성 플라즈마 발생에 대비하여 80V / 300V 로 변경 가능하게 설계되었다. 과부하, 단수 혹은 냉각가스 부족시에 대비한 보호회로가 부착되었으며 방전개시전압이 매우 높으므로 직류전원과 별도로 Pilot Arc 를 형성하는 회로로서 감쇄고주파전압발생형 불꽃발진고압고주파회로를 부착하였다. 이외의 주변장비로는 기체 및 냉각수수라인과 중앙제어부들 들 수 있다. 기체 설정에 있어서는 조업의 대상이 초미세 분말이나 특수 박막임을 감안하여 고순도 기체를 사용하며 냉각수라인에는 불순물이 적고 절연성이 큰 중류수를 순환시켰다.

3. 직류 열 플라즈마 발생 및 전류전압 특성

대기중 방전전압은 매우 높으므로 앞서 언급한 감쇄고주파전압 발생장치를 통하여 직류 열 플라즈마 발생시켰다. 이는 유도 가열로나 용접기 전원용 혹은 애자의 고주파 절연시험등에 사용되는 전형적인 회로로서 불꽃간극을 통한 방전전압과 LC 공진을 이용하여 고압 고주파 출력을 내게된다. 본 실험에서의 불꽃간극은 0.4 mm 로 조정되었으며 3000 V, 2.5 MHz 의 출력조건에서 Ar 분위기 하의 플라즈마 방전개시가 용이하게 이루어졌다. 고압고주파 출력에 의한 플라즈마 방전개시시 주 전원의 싸이리스터쪽으로 고주파가 후진될 경우를 대비하여 RC 필터를 부착하였으며 ZNR 을 병렬연결시킨 결과 후진을 방지할 수 있었다.

가. 원추형 양극 노즐에서의 전류전압 특성

그림 4 에는 원추형 양극 노즐에서의 전류 전압특성을 도시하였다.

I-V CHARACTERISTIC OF ARGON PLASMA JET

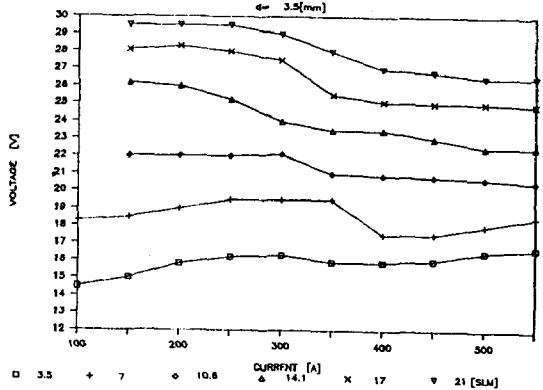


그림 4. 아르곤 유량에 따른 직류 열 플라즈마의 전류전압 특성

이 경우 간극거리는 3.5 mm로 고정되었 으며 아르곤 유량은 Mass Flow Controller 에 의해 3.5 [SLM] 으로부터 21 [SLM] 까지 변화시켰다. 여기서 볼수있듯이 낮은 유량 대역에서는 플라즈마가 정복성을 나타내다 유량이 높아지면 점차로 부복성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 유량증가로 인한 전압의 상승에 원인이 있으며 플라즈마의 방전특성곡선이 유량이 증가함에 따라 우측으로 이동하고 있음을 암시하고 있고 이는 다음의 원추형 양극 노즐에서 더욱 뚜렷이 나타나게 된다. 유량변화에 따른 전압특성 값을 그림 5 에 도시하였다.

FLOW RATE DEPENDANCE

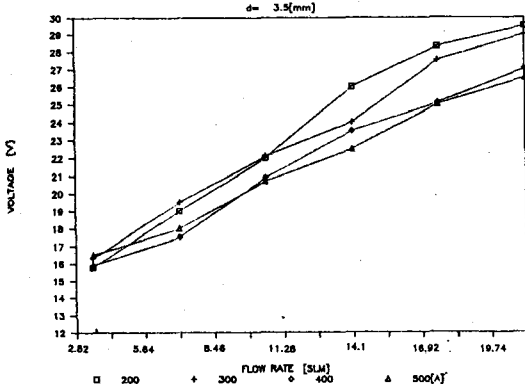


그림 5. 아르곤 유량에 따른 직류 열 플라즈마의 전압특성

그림에서 보듯이 유량을 증가시키면 전압이 단조증가하게 되는데 그 이유는 유량이 증가할수록 증성입자의 갯수가 더욱 증가하게 되므로 이를 이온화시키는데 필요한 기전력이 더욱 높아져야 하기 때문이다. 그림 6은 전극간 거리를 4.0mm에서 7.0mm까지 변화시키며 얻은 전압의 측정치를 도시한 것이다.

ELECTRODES GAP DEPENDANCE

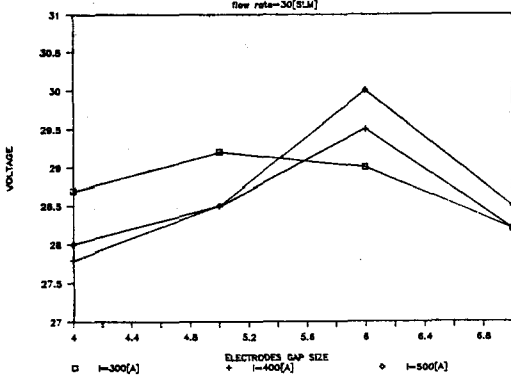


그림 6. 간극 거리에 따른 직류 열 플라즈마의 전압특성

일반적으로 플라즈마 길이가 늘어나게 되면 Sheath에서의 전압강하는 일정하나 플라즈마 내에서의 전압강하가 커지므로 전압이 증가한다고 알려져 있으나 그림에서 보듯이 간극거리 6mm 이상에서의 측정치는 오히려 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 원추형 양극 노즐 구조 자체에 원인이 있다고 여겨지며 실제로 실험후 양극을 조사한 결과 노즐 위로 1cm 가량 Anode Spot 이 이동한 흔적을 관찰할 수 있었으므로 결국 플라즈마가 음극-노즐사이의 거리보다 더 가까운 쪽으로 방전 하었다고 생각된다.

나. 원통형 양극 노즐에서의 전류 전압 특성

원추형 양극 노즐의 단점을 보완하기 위하여 양극 노즐을 원통형으로 제작하고 간극거리는 2mm로 고정하였다. 또한 이때 노즐직경을 4mm에서 6mm로 넓힘으로써 기체흐름에 따른 플라즈마의 형상을 보다 자세히 관찰할 수 있게 하였다. 그림 7에 원통형 양극 노즐에서 얻은 전류 전압 특성곡선을 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 방전특성곡선이 유량의 증가에 따라 우측으로 이동하고 있음이 뚜렷이 나타나고 최저 전압점은 150 A

부근으로 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

I-V CHARACTERISTIC AT ARGON, 300 [GAUSS], GAP=2[mm]

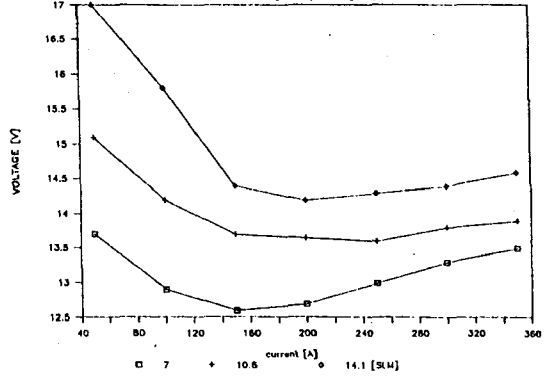


그림 7. 원통형 양극 노즐에서의 전류 전압 특성

4. 자장 효과.

원통형 양극 노즐에서 발생시킨 플라즈마에 자장을 가함으로써 자장효과를 측정하였다. 자장발생용 코일은 7X7mm<sup>2</sup>의 속이 비어있는 구리선을 220회 감아서 제작하고 코일중심부로 냉각수를 흘림으로써 200 [A] 까지 흘릴 수 있게 하였다. 코일에 200 [A] 의 최대전류를 흘렸을 경우 보빈의 중심부에서의 자장은 2800G, 토치 노즐에서의 자장은 1200G 였다. 그림 8에 플라즈마 전류가 300 [A] 일때 자장 변화에 따른 전압 측정치를 도시하였다.

MAGNETIC FIELD DEPENDANCE AT 300 [A]

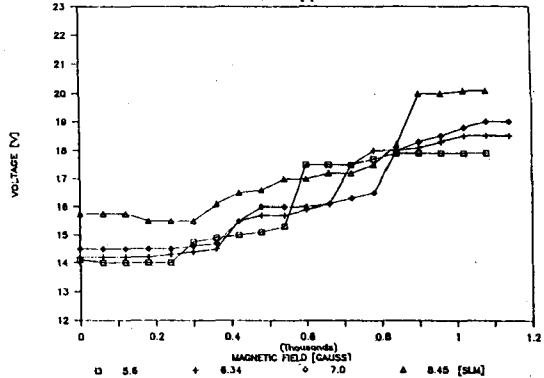


그림 8. 자장변화에 따른 전압 특성

그림에서 보듯이 전압이 급격히 증가하는 부분이 나타나고 유량이 증가함에 따라 전압 Jump를 일으키는 자장값이 조금씩 증가함을 볼 수 있다. 또한 5.6 / 6.34 / 7.0 [SLM]에서는 일관되게 두번의 전압 Jump를 볼 수 있으나 유량이 8.45 [SLM] 이상이 되면 이런 점들이 한개로 변했다가 없어지는 경향을 보였다. 이런 현상은 플라즈마의 노즐내 흐름에 있어서 어떤 변화가 생겼음을 말해주는 것으로 생각된다. 즉 유량이 작을 경우 생성된 플라즈마가 노즐을 완전히 채우지 않은 상태로 안정되게 분출되다가 자장의 영향으로 인해 플라즈마가 노즐의 중심부로 이동하므로 노즐을 틀어막으며 분출되는 형태로 전환되는 것이다. 이는 플라즈마를 고온의 유체로 간주할 때 노즐을 통과하는 속도가 달라짐으로써 층류의 흐름이 난류로 바뀌었다고 보는 해석도 가능하며 자장과 플라즈마와의 상호

작용을 설명해줄 수 있는 중요한 현상이라  
생각된다.

## 5. 결론

직류 열 플라즈마 발생 장치의 소개 및 양극  
노즐 형태에 따른 각각의 전류 전압 특성에  
관해 고찰해 보았다. 직류 열 플라즈마의 전류  
전압 특성은 유량이 증가할수록 우측으로 이동  
하였고 이는 유량의 증가에 따른 전압치 상승  
에 기인하였다. 각 유량 및 간극 거리에 따른  
전압 특성은 증가하는 경향을 보였고 간극 거리  
2mm의 원통형 양극 노즐에서 안정된 방전 특성  
을 보였다. 마지막으로 자장의 영향으로 인한  
전압 Jump 현상이 각 유량별로 일관된 경향성을  
가지고 나타났으며 이것은 플라즈마의 흐름의  
형태가 바뀐데 그 원인이 있다고 생각되지만  
보다 복합적인 원인에 의해 설명될 수 있을 것  
이라 생각된다.

## 참고 문헌

- (1) K.Tachikawa, et. al., Appl. Phys. Lett.  
Vol.52(12), 1011 (1988)
- (2) J.Karthikeyan, et. al., J. Phys. D:Appl.  
Phys., Vol.21, 1246 (1988)
- (3) M.Kawarada, et. al., 1st International  
Conference on the New Diamond  
Science and Technology, 42 (1988)