論 文
39~11~10

직류 열 플라즈마의 발생 및 그 특성에 관한 연구

A Study on DC Thermal Plasma Generation and its Characteristics

金 元 圭*·黃 琪 雄**
(Won Kyu Kim · Ki-Woong Whang)

요 약

본 연구에서는 직류 대전류 전원에 의한 플라즈마 발생장치를 설계, 제작하고 발생된 플라즈마 장치변수의 변화에 대한 물성변화 파악 및 특성해석을 살펴보았다. 이를 위하여 설계, 제작된 반응조, 진공시스템, 열 플라즈마 발생용 토치, 자장발생용 코일 및 전원장치, 직류 대전류 전원 및 기타 주변장치들에 대한 설명과 아울러 여러 장치변수들에 대한 실험결과들을 분석하였다. 외부자장과 플라즈마와의 관계를 설명하기 위해 Magnetic Reynolds Number를 도입하였으며 이를 통해 유속과 압력에 따른 자장영향의 변화를 설명할 수 있었다. 자장의 세기가 점증할 때 플라즈마 전압이 갑자기 증가하는 현상이 관측되었고 이는 노즐 내의 플라즈마 흐름에 있어서 근본적인 변화가 생겼음을 말해주므로 이 현상에 대해 설명하였다.

Abstract- This paper is to report the results on the design and construction of a thermal plasma generator with high current DC source. Also, this paper presents the methods to stabilize plasma and to find effects of process variables on plasma characteristics. For this purpose, the reaction chamber, vacuum system, plasma generating torch, magnetic field generating coil with power supply, high current DC source and the other parts have been designed. Fundamental properties of the thermal plasma under various conditions have been measured and analyzed. Magnetic Reynolds Number has been introduced to explain the relationship between plasma and external magnetic field. Through this number, the effect of magnetic field on the plasma has been explained under various flow rates and pressure. A sudden increase in the plasma voltage has been observed with the increase of magnetic field. From this, fundamental changes in plasma flow are believed to occur at the nozzle, and an effort to explain this phenomenon has been tried.

1. 서 론

공업 기술의 수준이 향상되고 다루는 재료의 종류가 다양해지면서 보다 높은 온도를 갖는 고온

*正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程
**正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 副教授 · 理博
接受日字 : 1990年 2月 27日
1次修正 : 1990年 10月 5日

열원에 대한 요구가 커지게 되었다. 뿐만 아니라 종래의 열원이 제공할 수 있던 온도나 분위기 조건하에서는 합성이 불가능하였던 신물질들이 고온 플라즈마 분위기에서 합성될 수 있다는 사실이 널리 인식됨에 따라 이 분야의 연구가 더욱 활발해지고 있다. 이들 중 특히 직류 열 플라즈마의 이용은 종래의 용접이나 절단에서 한 걸음 더 나아가 고융점 세라믹 분말이나 초합금 금속 분말 등을 용융 분사코팅 시킴으로써 모재의 내식, 내마모성을 훨씬 향상시키게 되었다. 최근의 획기적인 실험 결과로서는 고온 초전도 산화물의 후막 제작과 더불어[1, 2]열역학적으로 저온에서는 합성이 불가능한 다이아몬드의 합성을 들 수 있으며[3]후자의 경우 기존의 방법들에 비하여 합성 속도가 훨씬 빠르고 2mm두께에 이르는 후막을 합성함으로써 주목되고 있다. 그러나 이와 같은 응용 분야의 확대에도 불구하고 장시간 동작시킬 때의 전극 손상문제와 같은 장치상의 문제점과 더불어 플라즈마 특성제어에 의한 최적공정방식의 확립은 이 분야에서의 많은 연구를 요구하고 있다. 특히 기존의 열플라즈마 공정장비에 있어서 플라즈마 안정화방식은 주로 기체안정화방식이나 냉벽면 안정화방식등 몇가지 방법에 국한되어왔고 이러한 방식으로는 플라즈마 조건을 직접 변화시키고 제어함으로써 공정의 질을 향상시키거나 새롭게 요구되는 공정조건을 만족시킬 수 없는 단점이 있다. 또한 외부자장에 의한 자기안정화방식(Magnetic Stabilization Method)으로 플라즈마를 직접 제어하려는 시도가 발표되었으나[4]자장에 의한 플라즈마 물성의 변화에 대해서는 구체적인 언급이 없다. 따라서 본 고에서는 공정목적에 따른 직류 열 플라즈마 발생장치의 설계 및 제작에 관해 논하고 생성된 플라즈마의 안정화 및 집속화를 위해 외부자장을 인가하여 이의 영향을 분석해 보고자한다.

2. 장치의 구조 및 설계

2.1 반응조 및 진공 시스템

본 실험을 위해 제작된 장치는 APPS/LPPS (Atmospheric Pressure Plasma Spray/Low Pressure Plasma Spray)겸용장비로서 전극 연결에 따라 Transferred 및 Non-Transferred 열 플라즈마 발생이 각각 가능하게끔 하였고 그 설계도를 그림 1에 나타내었다. 제작된 반응조는 직경 30cm, 길이 60cm의 크기로 SUS304로 만들어 졌으며, 직경 20cm의 전면도어와 플라즈마 변수측정에 필요한 5개의 직경 4cm의 포트가 옆면에 부착되어 있다. 반응조의 오른쪽 측면에는 직경 5cm, 길이 100cm의 좌우이동이 가능한 기판지지용 동봉이 연결되었으며 반응조와는 전기적으로 절연을 시킴으로써 Transferred Mode의 경우 양극으로 사용할 수 있게 하였고 조업중단시 코팅막을 보호할 셔터가 기판 전면을 향하게끔 부착되어 있다. 반응조와 진공펌프사이에는 분말실험에 대비하여 교환이 용이한 필터함이 부착되어 있고 진공라인에는 Conductance조절밸브가 부착되었다. LPPS공정시 최대 30SLM가량의 기체가 주입되므로 조업예상압력인 10~100Torr정도의 진공도를 유지하기 위해서는 배기속도가 2500SLM이상의 진공펌프가 필요하므로 본 실험에서는 ULVAC사의 0.4KW PMB001 CM Mechanical Booster Pump와 1.1KW D-650D Rotary Pump를 부착시킴으로써 2700SLM의 배기속도를 유지하게 하였다. 진공도의 측정은 1Torr 이하의 압력에서는 Alcatel CFA212 Pirani-Penning계기를 사용하였고 1 Torr 이상의 압력에서는 Vacuum General 80-6B Capacitance Manometer로써 측정한결과 반응조의 진공도는 10^{-3}Torr까지 배기됨이 확인되었다. 반응조 및 진공시스템을 지지하는 Rack은 높이조절이 가능하게 설계되었고 제작된 Rack의 전면 판넬에는 기체라인 밸브 및 MFC 그리고 각종 전원 스위치를 부착함으로써 작업의 효율성을 높혔다. 또한 반응조의 좌측 토치부착부분의 주위에는, 발생되는 플

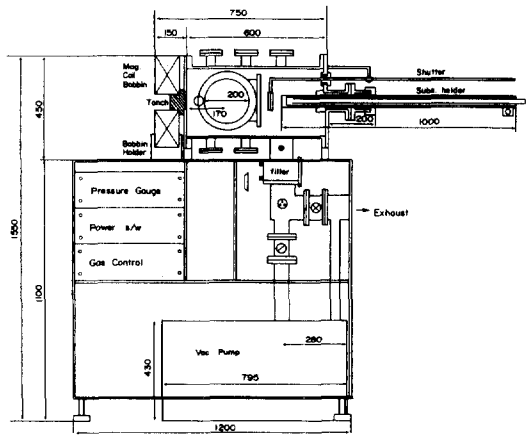

그림 1 직류 열 플라즈마 발생시스템
Fig. 1 DC Thermal Plasma Generation System

라즈마의 안정화를 위해 인가되는 자장발생용 코일이 감겨있는 보빈이 설치되게끔 설계되었다.

2.2 플라즈마 발생용 토치

본 실험을 위해 제작된 두가지 종류의 플라즈마 발생용 토치의 단면도를 각각 그림2, 그림3에 나타내었다. 그림 2는 원추형 구조의 양극을 도시한 것으로 반응기체의 원활한 흐름을 위하여 60°각도의 양극각을 주었고 그림3은 노즐 부위가아닌 양극 내벽으로의 기생방전을 피하기 위해 원통형으로 제작된 것으로 그 재료로는 전기동을 사용하였다. 음극의 형상은 반응기체가 주로 불활성인 Ar임을 감안하여 각각 5ϕ 및 8ϕ직경의 뾰족한 모양으로 제작되었고 그 재료로는 융점이 높고 표면 열전자 방출이 용이한 텅스텐에 2%의 ThO_2가 첨가된 합금을 사용하였다. 제작된 토치는 실험목적에 따라 극간 거리조정을 비롯하여 각 부위가 조립,

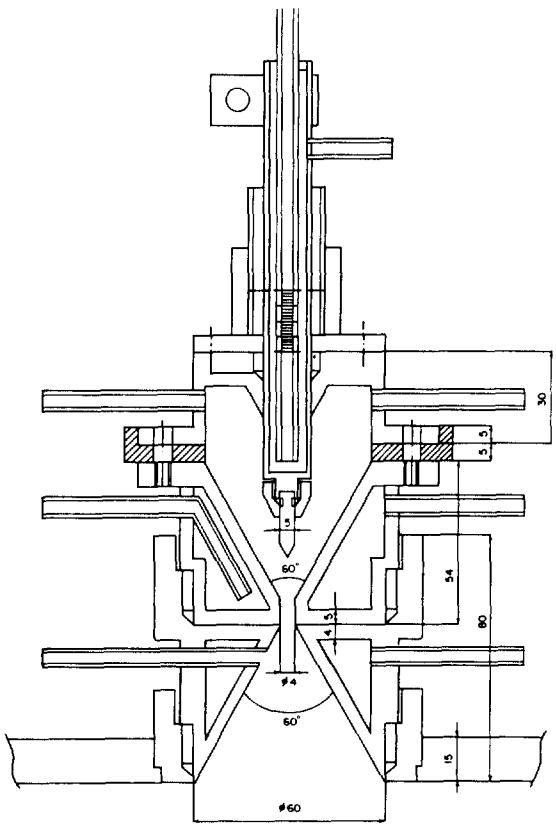

그림 2 플라즈마 발생용 토치(원추형 양극구조)
Fig. 2 Plasma Generation Torch(Conical Structure)

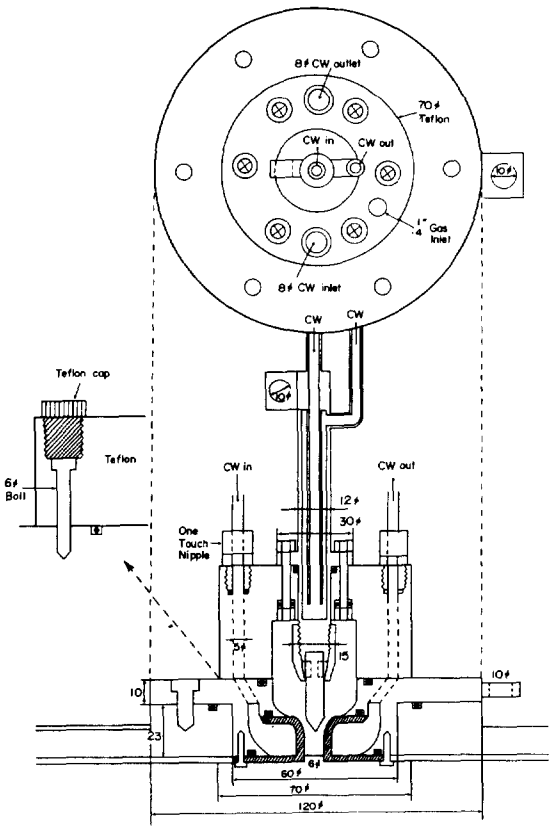

그림 3 플라즈마 발생용 토치(원통형 양극구조)
Fig. 3 Plasma Generation Torch(Cylindrical Structure)

변경하기에 용이하고 음극과 양극간의 거리가 외부에 표시되도록 하여 실험중 단락의 위험을 피하였으며 전체토치를 아크릴 카바로 씌워 안전사고에 대비하였다.

2.3 자장발생용 코일 및 전원장치

자장발생용 코일은 절연지가 감긴 7×7mm²단면의 사각형 공심구리선을 220회 감아서 제작하였고 코일의 공심을 따라 냉각수를 흘려줌으로써 최대 200Amp의 전류를 흘릴 수 있게 하였다. 코일에 200A의 최대전류를 흘렸을 경우 보빈 중심부에서의 자장은 2600Gauss, 토치노즐에서의 자장은 1200Gauss였다. 수치해석에 의해 구해진 자장의 공간적 분포를 그림 4에 나타내었다. 실제자장의 분포는 Gauss-Meter에 의해 측정되었고 이는 이론치와 거의 일치하였다. 자장인가용 전원은 Power-Diode를 이용한 3상 전파정류회로를 썼고 입력단에서 10KVA Slidac으로 전력제어를 하였

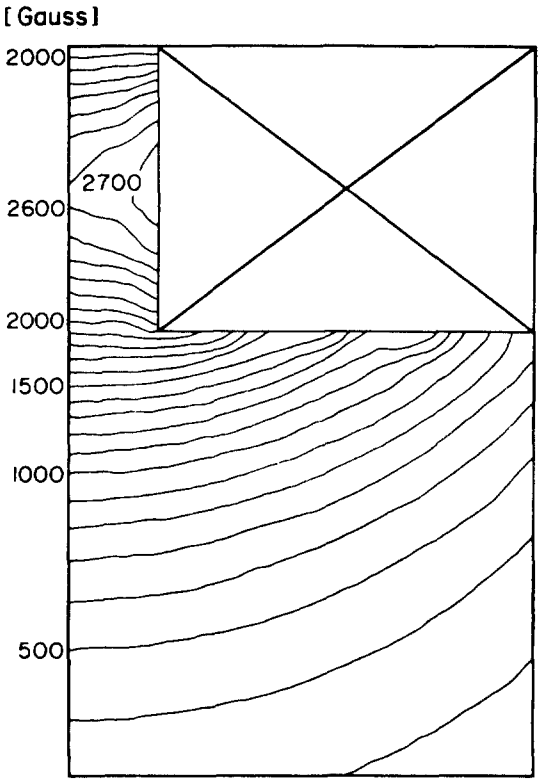

그림 4 자장의 공간적 분포
Fig. 4 Spatial Distribution of the Magnetic Field

다.

2.4 주 전원 및 기타 주변장치

직류 대전류 전원으로는 현재 가장 광범위하게 활용되고 있으며 출력의 조정 및 안정화가 용이하고 대용량화가 가능한 싸이리스터식을 채택하였고 싸이리스터에 의한 파형의 일그러짐과 맥동률을 줄이기 위해 중복제어정류회로를 사용하였다. 그림 5에 제작된 주전원의 기본회로도가 나타나 있다.

그림에서 보듯이 중복제어 정류회로의 특징은 상간리액터(Interphase Reactor)를 삽입함으로써 정류소자의 정류회수 및 전류량을 반으로 줄일 수 있으므로 중복전류에 의한 전압강하가 적고 전압변동률이 줄어든다는 것이다. 직류 열 플라즈마의 발생 및 안정화에 있어서 전원부는 가장 기본적이면서도 중요한 부분이므로 본 연구의 목적상 불활성 혹은 반응성 기체 플라즈마의 상이한 전압강하 특성에 맞춰서 개방전압을 300V(HV) 또는 80V

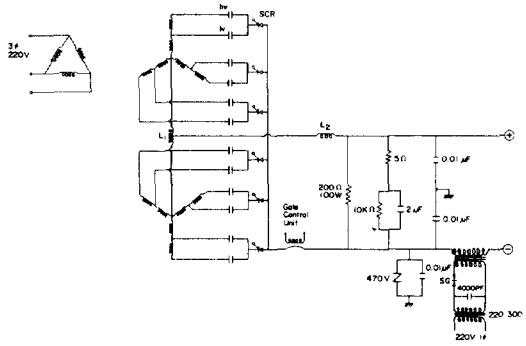

그림 5 주전원 회로도
Fig. 5 Main DC Current Source

(LV)로 변경이 가능하게 하였으며 과부하, 단수 혹은 냉각 가스 부족시에 대비한 보호회로가 부착되었다. 또한 방전 개시전압이 매우 높으므로 직류전원과는 별도로 Pilot Arc방전을 일으키는 회로로서 감쇄 고주파 전압 발생형 불꽃발진 고압고주파회로를 부착하였다. 이는 유도가열로나 용접기 전원용 혹은 애자의 고주파 절연시험 등에 사용되는 전형적인 회로로 그림 5의 하단부에 위치하며 그 원리는 다음과 같다. 고압변압기를 통해 3000V로 승압된 60Hz의 전압이 1초에 120번씩 SG를 통해 불꽃방전하게 되며 이는 곧 Switching 역할을 하게되어 매 주기마다 회로상의 LC에 의한 공진을 일으키게 된다. 본 실험에서의 불꽃간극은 0.4mm로 조정 되었으며 3000V, 2.5MHz의 출력조건에서 Ar분위기하의 플라즈마 방전개시가 용이하게 이루어졌다. 고압고주파 출력에 의한 플라즈마 방전개시에 있어서 주 전원의 싸이리스터 쪽으로 고주파가 후진될 경우를 대비하여 RC필터를 부착하였으며 ZNR을 병렬 연결시킨 결과 후진을 방지할 수 있었다. 이외의 주변장비로는 기체 및 냉각수라인과 중앙제어부를 들 수 있다. 기체 설정에 있어서는 조업의 대상이 초미세 분말이나 특수 박막임을 감안하여 고순도 기체를 사용하고 기체용량은 TYLAN사제의 기체유량제어 장치로 조절하였으며 냉각수라인에는 불순물이 적고 절연성이 큰 증류수를 순환시켰다.

3. 상압 직류 열 플라즈마의 발생 및 특성실험

3.1 원추형 양극구조에서의 전류전압특성

원추형 양극구조에서의 전류전압특성곡선을 그

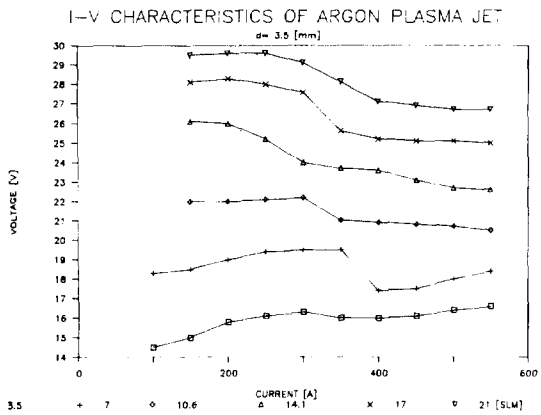

그림 6 아르곤 직류 열 플라즈마의 전류전압특성 (원추형 양극 구조)

Fig. 6 IV Characteristics of the Ar DC Thermal Plasma (Conical Structure)

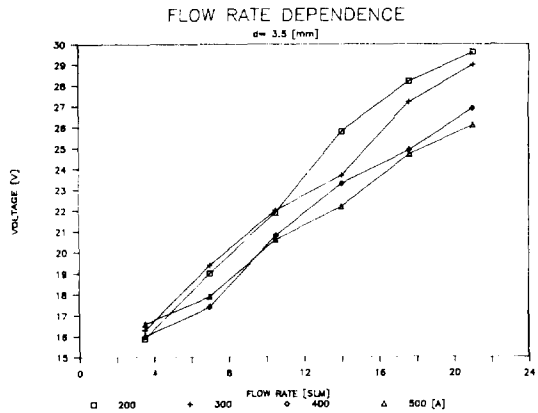

그림 7 아르곤 유량에 따른 직류 열 플라즈마의 전압특성 (원추형 양극구조)

Fig. 7 Ar Flow Rate Dependence of the DC Thermal Plasma (Conical Structure)

림 6에 도시하였다. 이 경우 간극거리는 3.5mm로 고정되었으며 유량은 MFC에 의해 3.5SLM으로부터 21SLM까지 변화시켰다. 여기서 볼 수 있듯이 낮은 유량대역에서는 플라즈마가 정특성을 나타내다 유량이 높아지면 점차로 부특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 유량증가로 인한 전압의 상승에 그 원인이 있으며 플라즈마의 방전특성 곡선이 유량이 증가함에 따라 우측으로 이동하고 있음을 암시하고 있고 이는 다음의 원통형 양극구조에

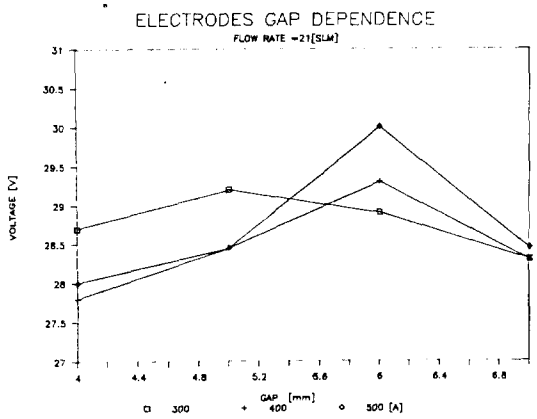

그림 8 간극거리에 따른 직류 열 플라즈마의 전압특성 (원추형 양극 구조)

Fig. 8 Discharge Gap Dependence of the DC Thermal Plasma (Conical Structure)

서 더욱 뚜렷이 나타나게 된다. 유량변화에 따른 전압측정값을 그림 7에 도시하였다. 그림에서 보듯이 유량을 증가시키면 전압이 단조증가하게 되는데 그 이유는 유량이 증가할수록 중성입자의 갯수가 더욱 증가하게 되므로 이를 이온화시키는데 필요한 기전력이 더욱 높아져야 하기 때문이다. 그림 8은 전극간 거리를 4.0mm에서 7.0mm까지 변화시키며 얻은 전압의 측정치를 도시한 것이다. 일반적으로 플라즈마의 길이가 늘어나게 되면 Sheath에서의 전압강하는 일정하나 플라즈마내에서의 전압강하가 커지므로 전압이 증가한다고 알려져 있으나 그림에서 보듯이 측정치는 오히려 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 원추형 양극구조 자체에 원인이 있다고 여겨지며 실제로 실험후 양극을 조사한 결과 노즐 윗쪽으로 1cm가량 Anode Spot이 이동한 흔적을 관찰할 수 있었으므로 결국 플라즈마가 음극-노즐사이의 거리보다 더 가까운 쪽으로 방전하였다고 생각된다.

3.2 원통형 양극구조에서의 전류전압특성

원추형 양극구조의 단점을 보완하기 위하여 양극구조를 원통형으로 제작하고 간극거리는 2.5mm로 고정하였다. 또한 이때 노즐직경을 4mm에서 6mm로 넓힘으로써 기체흐름에 따른 열 플라즈마의 형상을 보다 자세히 관찰할 수 있게 하였다.

그림 9에 원통형 양극구조에서의 전류전압특성

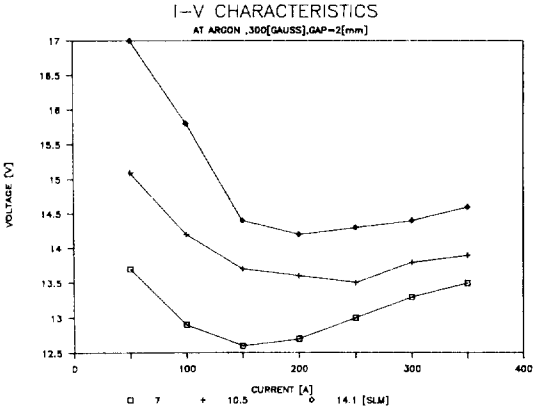

그림 9 원통형 양극구조에서의 전류전압특성
Fig. 9 IV Characteristics of the Ar DC Thermal Plasma (Cylindrical Structure)

곡선을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 방전특성곡선이 유량의 증가에 따라 우측으로 이동하고 있음이 뚜렷하고 최저 전압점은 150A부근으로 거의 변화가 없음을 볼 수 있고 이는 매우 안정된 열플라즈마가 형성됨을 의미한다.

3.3 자장효과

외부에서 가해준 자장과 플라즈마와의 관계를 설명해줄 수 있는 변수로 Magnetic Reynolds Number가 있다. 이는 유체속도에 대한 자장의 확산속도의 비로써 정의되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_m=\frac{\mu_o V d}{\eta} \tag{1}$$

여기서 μ_o는 투자율이고 V는 유체의 속도, d는 노즐의 직경, 그리고 η는 플라즈마의 저항을 나타낸다.

플라즈마의 온도를 대략 10,000°~15,000°K로 가정했을때 속도 V는 유량을 면적으로 나눈 값을 이상기체 상태방정식으로 보정해 줌으로써 구할 수 있고 그 값은 대략 200~500m/sec로 결정지워진다. μ_o와 d는 알고있는 값이므로 η의 값을 구하면 R_m의 대략의 값이 결정지워진다. 여기서 플라즈마의 저항률 η를 Langevin식 으로부터 구하면 다음과 같다. [5]

$$Re(\partial_\perp)=\frac{4}{3}\frac{e^2}{m}\frac{n\nu_m}{\nu_m^2+\omega_c^2} \tag{2}$$

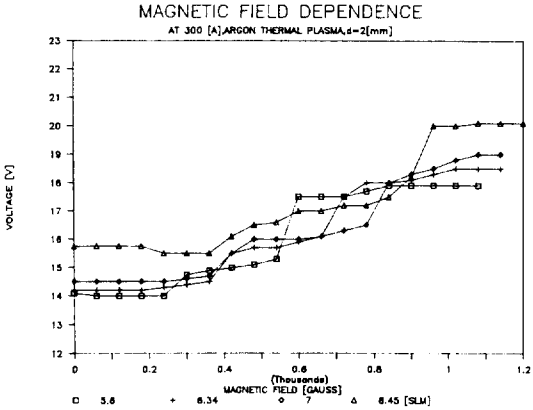

그림 10 각 유량별 자장에 따른 전압변화 I
Fig. 10 Magnetic Field Dependence I

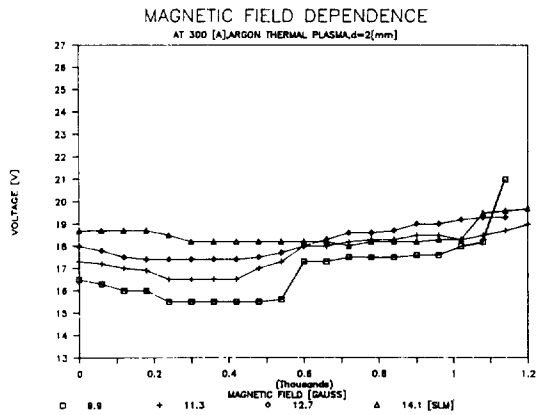

그림 11 각 유량별 자장에 따른 전압변화 II
Fig. 11 Magnetic Field Dependence II

여기서 좌변은 복소수인 플라즈마 도전율의 실수부를 취한 것이며 이것의 역수가 저항률 η이다. 우변의 e는 전하량, m은 전자질량이며 n은 전자밀도, ν_m은 충돌주파수 그리고 ω_c는 Electron Cyclotron Resonance Frequency이고 ν_m과 ω_c는 다음의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\nu_m=N\sigma_m V_{th} \tag{3}$$

$$V_{th}=\sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \tag{4}$$

$$\omega_c=\frac{eB_o}{m} \tag{5}$$

여기서 N은 기체밀도, σ_m은 충돌단면적, V_{th}은 Thermal Velocity, 그리고 B_o는 외부 자장을 의미한다.

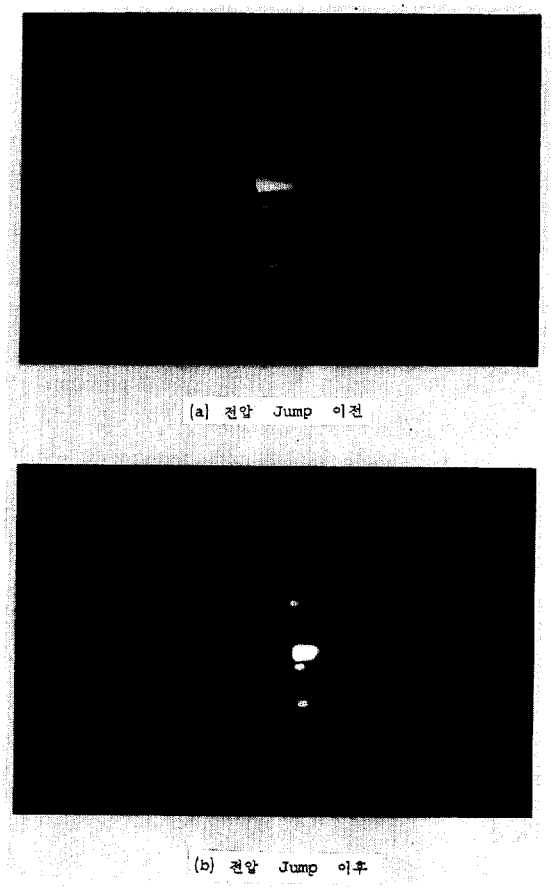

그림 12 자장의 영향에 의한 불꽃형상의 변화
Fig. 12 The Change of the Flame Shape under the Magnetic Field

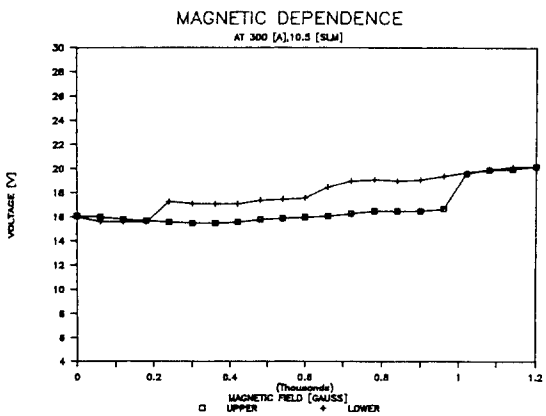

그림 13 자장 Hysteresis곡선
Fig. 13 Magnetic Hysteresis Curve

(1)~(5)식으로부터 Magnetic Reynolds Number가 구해지며 상압 아르곤 직류 열 플라즈마의 알고있는 상수들을 대입했을때 외부자장 0 1200 Gauss에 대해 0.1~0.005정도의 값을 얻을 수 있었다. Magnetic Reynolds Number가 1보다 작을 때는 플라즈마에 자장이 확산되는 속도가 상대적으로 빠른 것을 의미하며 이는 자장의 영향이 더욱 강하게 미친다고 해석될 수 있다. 따라서 위의 계산결과를 볼때 자장이 커지면 커질수록, 플라즈마의 유속이 느리면 느릴수록 자장의 영향은 더욱 커진다고 예상할 수 있고 이는 이후의 실험결과와 상당히 일치하였다.

그림 10과 그림 11에 플라즈마 전류가 300A일때 각 유량별 자장변화에 따른 전압측정치를 도시하였다. 그림에서 보듯이 전압이 급격히 증가하는 부분이 나타나고 유량을 증가시킴에 따라 전압 Jump를 일으키는 자장값 또한 조금씩 증가함을 알 수 있다. 또한 5.6/6.34/7.0SLM에서는 일관되게 2번의 전압 Jump현상을 볼 수 있으나 유량이 8.45SLM이상이 되면서부터 한번으로 변했다가 10 SLM이상으로 가면 없어지는 경향을 볼 수 있다. 유량이 커질수록 전압 Jump현상에 더욱 큰 자장이 필요하게 되고 어느 이상의 유량에서부터 자장의 영향이 훨씬 줄어드는 현상은 위에서 논한 Magnetic Reynolds Number에 의하여 해석될 수 있다. 즉 유량이 커질수록 유속이 빨라지게되고 이는 즉 자장의 확산속도가 상대적으로 줄어드는 결과를 가져왔다고 볼 수 있다.

그러나 자장에 의해 전압 Jump가 일어나는 근본적인 원인은 해석적인 접근이 상당히 어려우리라 예상되며 이는 자장과 플라즈마의 상호작용을 설명해줄 수 있는 중요한 현상이라고 간주된다. 전압 Jump현상을 관찰했을 때 불꽃의 모양변화와 Jump이후의 소음 변화는 플라즈마의 노즐내 흐름에 있어서 어떤 변화가 생겼음을 말해주는 것으로 생각된다. 즉 유량이 작을 경우 생성된 플라즈마가 노즐을 완전히 채우지 않은 상태로 분출되다가 자장의 영향으로 인해 플라즈마가 노즐의 중심부로 이동하면서 노즐을 틀어막으며 분출되는 형태로 전환되는 것이다. 이는 플라즈마를 고온의 유체로 간주할 때 노즐을 통과하는 속도가 달라짐으로써 층류의 흐름이 난류로 바뀌었다는 해석도 가능하다. 그림12는 자장을 가했을 때 전압 Jump를 전후하여 찍은 사진을 보여주고 있다. 사진에서 보듯이 한쪽으로 치우쳐서 포물선 형태의 층류형상으로 분출되던 불꽃이 전압 Jump이후에 굵고 짧은 형태의 난류형상으로 바뀌었음을 알 수 있

다. 일반적으로 자장을 가했을 때 플라즈마 불꽃 부분이 길이가 짧아지면서 직경이 늘어나는 경향을 보이고 있으며 이 또한 앞으로 해석해야할 과제라 할 수 있다. 그림 13은 전압을 올릴 때와 내릴 때의 전압 Jump를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 플라즈마 자체의 L성분으로 인하여 Hysteresis곡선을 그리고 있음을 알 수 있다. 직류 열플라즈마 공정에 있어서 고온에 의한 전극의 침식을 방지하는 것이 매우 중요하다.[6] 본 실험의 결과 외부자장을 걸어줌으로써 플라즈마에 의한 양극침식이 한 부위로만 집중되는 것을 방지할 수 있었고 따라서 전극의 수명이 매우 연장됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 실험을 위해 설계, 제작된 반응조, 진공시스템, 열 프라즈마 발생용 토치, 자장발생용 코일 및 그 전원장치 그리고 직류 대전류 전원 및 기타 주변장치들에 대한 설명과 여러 장치변수들에 대한 실험결과가 보여졌다. 상압 열 플라즈마의 전압 특성은 기체유량에 따라 증가하는특성을 보였고 기생방전이 없는 원통형 양극구조에서의 최저방전 유지전압은 150A부근에서 결정되었다. 외부에 자장을 인가했을 경우에 자장의 세기와 열 플라즈마와의 관계를 설명할 수 있는 매개변수로서 Magnetic Reynolds Number를 도입하였으며 이를 통하여 유속과 압력에 따른 자장영향의 변화를 설명할 수 있었다. 즉 유량이 낮을 경우 R_m이 작아지므로 플라즈마에 자장이 확산하는 속도항이 상대적으로 커지게 되어 자계변화에 의한 전압 Jump와 같은 현상이 관찰되는 것을 설명할 수 있었다. 이러한 전압의 Jump현상은 자장과 플라즈마와의 상호관계를 설명해줄 수 있는 중요한 실험결과라고 할 수 있으며 이는 불꽃모양의 변화와 Jump를 전후한 소음의 변화로 미루어 볼 때 노즐내의 플라즈마 흐름에 있어서 근본적인 변화가 있었음을 암시하며 그 결과를 사진을 통해 분석하였다.

참 고 문 헌

[1] K. Tachikawa, et. al., "High Tc superconducting films of Y-Ba-Cu oxides prepared by low-pressure plasma spraying," Appl. Phys. Lett. Vol. 52, no. 12, pp. 1011-1013, March 1988.

[2] J. Karthikeyan, et. al., "Plasma sprayed superconducting YlBa2Cu3 O7-x Coatings," J. Phys. D : Appl. Phys., Vol. 21, pp. 1246-1249, 1988.

[3] Kazuaki Kurihara, et. al., "High rate synthesis of diamond by dc plasma jet chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett. Vol. 52, no. 6, pp. 437-438, Feb. 1988.

[4] M. Suzuki and H. Mikami, "Characteristics and magnetic control of plasma jet in parallel magnetic field," ISPC-8 Tokyo, vol. 1, pp. 55-60, Sep. 1987.

[5] B.E. Cherrington, Gaseous Electronics and Gas Lasers, Pergamon Press 1979.

[6] Michel G. Drouet, "Electrode erosion in plasma torches," ISPC-9 Italy, vol. 3, pp. 1702-1707, Sep. 1989.