

감압 분위기가 직류 열 플라즈마에 미치는 영향

The Effects of the Reduced Pressure on DC Thermal Plasma

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

요 약

본 연구에서는 감압하에서의 직류 열 플라즈마 물성분석 및 특성해석을 주 내용으로 하였다. 이를 위해 분광분석법에 의한 직류 열플라즈마 온도측정장치를 설치하였으며 그 측정방법 및 측정결과들이 소개되었다. 감압하에서는 열플라즈마의 외관이 크게 변하는것이 관측되었으며 그 방전특성곡선을 측정, 분석하였다. 본 실험에서 얻어진 열 플라즈마는 온도가 $10,000^{\circ}\sim 15,000^{\circ}\text{K}$ 인 것이 관측되었고 온도는 유량과 자장의 세기에 대체로 비례하는 특성을 나타내었으며 감압하에서 압력에 따른 온도특성은 알려진 결과와 상당히 일치하였다.

Abstract- This study is to figure out the properties of the DC thermal plasma at low pressure. For this purpose, a temperature measurement system utilizing emission spectroscopy has been set up and its measurement method and results have been described. At low pressure, the plasma has shown drastic changes in its appearance. The discharge characteristics under low pressure have been measured and analyzed. The temperature of thermal plasma generated in this research has been ranged from $10,000^{\circ}\text{K}$ to $15,000^{\circ}\text{K}$. Temperature has been observed to increase with the flow rate and magnetic field strength. The temperature characteristics at low pressure has been observed to coincide with the reported results.

1. 서 론

직류 열 플라즈마는 일반적으로 플라즈마 변수 특성상 고밀도($10^{13} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 저온 ($10^4 - 10^5 \text{ K}$) 상태에 있고, 전기적 특성상 직류 저전압

(수십-수백 Volt), 대전류($100\text{A}/\text{cm}^2$ 이상) 상태에 있으며 열적 특성으로는 LTE(Local Thermodynamic Equilibrium) 상태에 있고 고휘도의 광 특성을 지니고 있다. [1] 이러한 직류 열 플라즈마의 제특성들은 고온을 필요로 하는 여러가지 공정에 이용되어 왔다. 특히 감압상태에서의 열플라즈마공정은 고속, 고엔탈피 제트가 형성되며 부착성이 좋은 두껍고 조밀한 분사막을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 오염이 적은 장점으로 인하여 최근 신

*正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程
**正 會 員 : 서울대 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

물질의 합성공정으로 각광받고 있으나 아직 플라즈마 물성 파악 및 반응 메카니즘에 대한 이해는 제대로 이루어지지 못하고 있다[2] 최근에 시도되고 있는 감압 직류 열 플라즈마의 물성측정방법으로는 탐침에 의한 방법과[3, 4] 톨슨 산란법에 의한 방법[5], 그리고 분광분석법에 의한 방법[6, 7, 8]등을 들 수 있다. 탐침법의 경우 플라즈마에 직접적인 교란을 유발하므로 탐침의 크기 및 재질에 제약을 받을 뿐만 아니라, 노즐 바로 바깥쪽 2cm 이내에서는 측정이 불가능하다고 보고하고 있다. 톨슨 산란법에 의한 측정의 경우 비교적 정밀한 측정이 이루어 졌으나 압력, 유량 등 공정변수에 따른 물성의 변화에 대해서는 언급이 없다. 분광분석법에 의한 측정은 가장 활발하게 추진되고 있으나 이 경우에도 대부분 상압 열 플라즈마 측정에 한정되어 있고 무엇보다도 외부자장의 유무에 따른 온도변화 측정은 아직 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 분광분석법을 이용하여 직류 열플라즈마의 온도를 측정하였으며 이를 위해 설치된 분광분석장치에 대해 설명하고 감압 및 감압에서의 여러가지 공정변수에 대한 온도측정 결과 및 감압하에서의 열플라즈마 특성 변화에 대해 논해보고자 한다. 본 연구에서 사용된 감압 직류 열 플라즈마 발생장치 및 외부 자장 인가장치는 모두 자체 설계, 제작되었으며 그 설명 및 설계도는 참고문헌12에 상세히 수록되었다. [12]

2. 분광 분석법에 의한 온도측정장치

2.1 분광 분석법

분광분석법은 Plasma에서 방출되는 빛을 해석하는 것이다. 즉 원자, 이온 혹은 분자들의 분광 휘도는 전이되는 에너지 준위의 윗 준위밀도와 양자 에너지에 비례하므로 그 분광선의 휘도를 측정하면 주어진 플라즈마내 원소들의 양자상태의 밀도를 계산할 수 있다. 뿐만 아니라 LTE의 경우 플라즈마내 화학적 조성비를알고 불츠만의 법칙을 이용하게 되면 각기 다른 양자상태의 밀도를 온도로 환산할 수 있게 된다. Boltzmann의 식은 다음과 같이 표현된다. [10]

$$\frac{n_k}{n_a} = \frac{g_k}{u_a} \exp\left(-\frac{E_k}{KT}\right) \quad (1)$$

또한

$$\epsilon_{\nu,L} = \frac{hv}{4\pi} A_{ki} n_k p_\nu \quad (2)$$

$$I_\nu = \int_0^l \epsilon_\nu(\chi) d\chi \quad (3)$$

여기서

- h : Plank's constant
- c : Speed of light
- λ : Wavelength
- g_k : Statistical Weight
- A_{ki} : Einstein's Spontaneous Transition Probability
- n_a : Partition function
- E_k : energy between k -ground level
- P_ν : normalized line profile
- $\epsilon_{\nu,L}$: line emission coefficient
- I_ν : line intensity
- l : optical length of the plasma

(1), (2), (3)식으로부터 플라즈마가 Uniform하다고 가정하면

$$\begin{aligned} \therefore I_{\nu,L} &= \epsilon_{\nu,L} \cdot \ell \\ &= \frac{hc}{4\pi\lambda} (g_k A_{ki}) \frac{n_a}{u_a} \cdot \\ &\quad \exp\left(-\frac{E_k}{KT}\right) P_\nu \cdot \ell \end{aligned} \quad (4)$$

임을 알 수 있다. 즉 전이화물들의 원자상수들을 알고 LTE의 조건을 만족한다면 분광도가 좋은 Monochromator를 이용하여 분광선의 휘도를 측정함으로써 윗 식으로부터 플라즈마의 온도를 구할 수 있다. 윗 식으로부터 플라즈마의 온도를 구하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 그것은 절대휘도측정에 의한 방법, 즉 Calibration된 Monochromator로부터 측정된 분광선 하나로 온도를 구하는 방법과 상대적인 휘도 측정에 의한 방법, 즉 2가지의 분광선을 측정하여 그 상대적인 비로부터 온도를 구하는 방법으로 그 식은 각각의 파장에 대한(4)식으로부터 구할 수 있고 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{KT}\right) \quad (5)$$

본 연구에서는 (5)식을 이용하여 플라즈마 온도를 구하였으며 그 전제조건으로는 열플라즈마의 중심부에서 LTE상태를 만족하며 플라즈마는 균일하고 Optically Thin하다고 가정하였다.

2.2 온도 측정 장치

본 연구에 사용된 온도측정장치의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 먼저 장치변수들의 변화에 의한 경향성을 측정하는 것이 목적이므로 토치에서 분사된 플라즈마의 중심부에 한 점을 고정하고 측정하였다. 측정점은 노즐출구로부터 1cm떨어진 중심점을 선택하였으며 이점을 광원으로 하여 공간적으로 퍼져나오는 빛을 볼록렌즈 2개(F285/F100)를 이용하여 Slit으로 집속시켰다. 측정점의 Alignment는 Aerotech PS2 He-Ne Laser를 이용하였으며 집속된 빛을 분광하는 Monochromator는 일본 미조지리 광학사의 SG-10D-10B로서 격자정수 1200본/mm, 분산역수 8 Å/mm, 초점거리 1000mm, 밝기는 F:17.0으로서 파장범위 2000~7000 Å의 측정범위를 가졌다. 모터로 구동되는 Grating에 의해 분광된 빛 신호가 PMT (Photo-Multiplier)를 통해 전기신호로 바뀌어 증폭된 신호를 XY Plotter에 기록하게 되고 그 peak치들의 크기를 읽어서 IBM PC로 입력하면

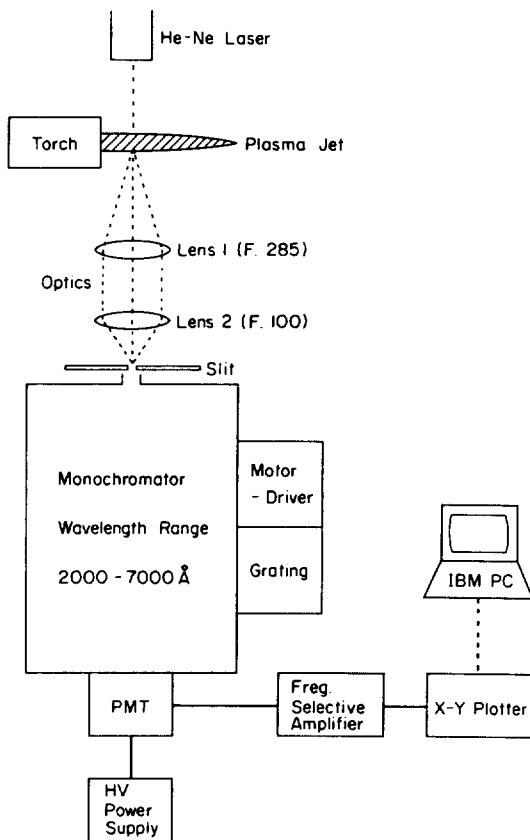


그림 1 온도측정장치
Fig. 1 Temperature Measurement System

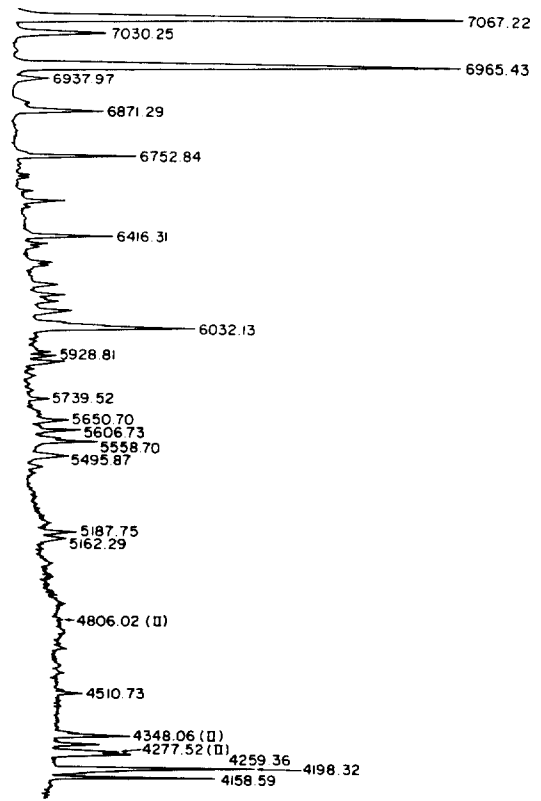


그림 2 상압 아르곤 직류 열 플라즈마의 파장별 선휘도 측정 스펙트럼
Fig. 2 Measured Emission Spectrum of the Ar DC Thermal Plasma

측정치 비교에 의해 앞 절에서의 식5를 풀어서 온도를 계산하게끔 하였다. Monochromator로부터 분광된 아르곤 직류 열 플라즈마의 파장별 선 휘도를 그림 2에 나타내었다. 이는 상압에서의 아르곤 열 플라즈마로부터 항상 측정되는 Peak치들로서 장치 변수들의 변화에 따라 그 크기가 증감되는 것이 확인되었다. 표1은 측정된 Peak치들의 원자상수들을 정리한 것이다. [11] 표에서 보듯이 온도계산에 사용된 총 Peak치들의 수는 Ar I Line이 17개 Ar II Line이 3개로 도합 20개이고 이들중 실험에 따라 불필요하거나 중복된 Peak로 나타나서 파장을 결정하기 힘든 Peak치들은 빼고 계산하였다.

상대휘도 측정에 의한 온도계산에 있어서 중요한 사실은 $E_1 - E_2$ 값이 크지 않으면 구해진 온도값의 오차가 훨씬 커진다는 것이며 실제 계산에서도 에너지차가 2eV이하인 Peak치들의 쌍은 큰 오차

표 1 아르곤 열 플라즈마의 선휘도별 원자상수
Table 1 Atomic Constants of the Ar DC Thermal Plasma

Accur-acy	No	$\lambda(\text{\AA})$	$[\text{cm}^{-1}]$ E_j	$[\text{cm}^{-1}]$ E_k	g_j	g_k	$[10^8 \text{sec}^{-1}]$ A_{kj}	f_{jk}
C	31	6965.43	93144	107496	5	3	0.067	0.0292
C	136	6871.29	104102	118651	3	3	0.029	0.0205
C	137	6752.84	104102	118907	3	5	0.0201	0.0229
C	268	6416.31	104102	119683	3	5	0.0121	0.0124
C	219	6032.13	105463	122036	7	9	0.0246	0.0173
D	339	5928.81	105617	122479	5	3	0.011	0.0034
D ⁺	239	5739.52	106087	123506	3	5	0.0091	0.0075
C	214	5650.70	104102	121794	3	1	0.0333	0.0075
C	215	5606.73	104102	121933	3	3	0.0229	0.0108
C	216	5558.70	104102	122087	3	5	0.0148	0.0148
C	302	5495.87	105463	123653	7	9	0.0176	0.0102
C	218	5187.75	104102	123373	3	5	0.0138	0.0092
C	299	5162.29	104102	121368	3	3	0.0198	0.0079
C ⁺	II -18	4806.02	134242	155043	6	6	0.79	0.274
C	76	4510.73	95400	117563	3	1	0.0123	0.00125
C	II -19	4348.06	134242	157234	6	8	1.24	0.469
D	II -31	4277.52	148842	172214	6	4	1.0	0.18
C	80	4259.36	95400	118871	3	1	0.0415	0.00376
C	64	4198.32	93751	117563	3	1	0.0276	0.00243
C	57	4158.59	93144	117184	5	5	0.0145	0.00376

를 수반하였으므로 제외되었다. 결론적으로 에너지대역이 낮은 Ar I Line Peak치들과 그보다 5 eV 이상 에너지대역이 높은 Ar II Line Peak치들이 주로 비교되었으며 Ar I Line Peak치들중 서로 에너지차가 큰 Peak치들이 포함되어 계산되었다. 감압하에서의 Peak치들은 Ar I Line들이 없어지거나 많이 감소한 반면 Ar II Line들이 상대적으로 뚜렷이 나타났고 Continuum Radiation은 감압하에서는 거의 보이지 않으나 압력이 높아질수록 점차 높아져서 대기압부근에서는 그림 2에서 보듯이 비교적 크게 나타남을 알 수 있으며 이는 압력이 높아질수록 전자와 무거운 입자들의 에너지가 비슷해지고 열 플라즈마의 복사가 흑체복사에 가까워지고 있다는 것을 의미한다.

2.3 상압 직류 열플라즈마에서의 온도 특성

앞절에서 소개된 분광분석법에 의해 아르곤 직류 열 플라즈마의 온도를 측정하였다. 본 실험에서는 반복실험을 통해 500~1000°K가량의 오차범

위를 두고 얻어진 온도값들의 평균치를 구함으로써 측정결과의 경향성 파악에 주로 역점을 두었다. 먼저 그림 3에 각 유량별 온도특성을 도시하

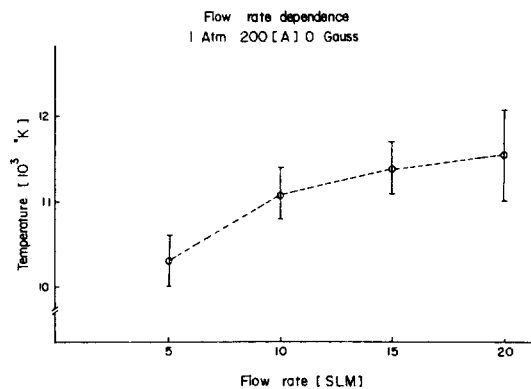


그림 3 유량에 대한 온도특성
Fig. 3 Flow Rate Dependence of the Temperature

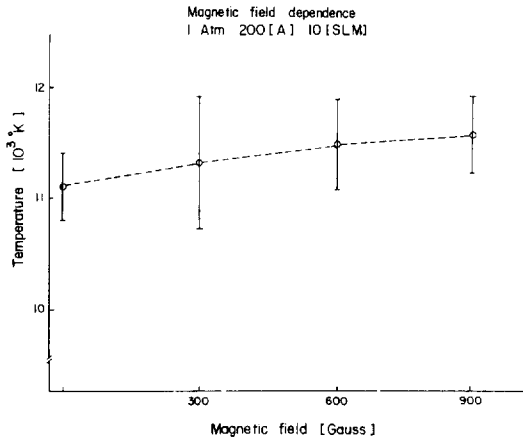


그림 4 자장에 대한 온도특성
 Fig. 4 Magnetic Field Dependence of the Temperature

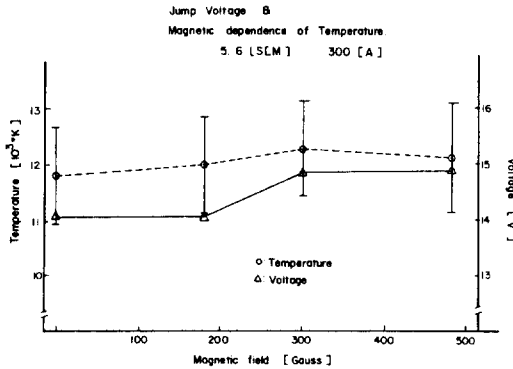


그림 5 전압 Jump에 대한 온도 및 전압특성 비교
 Fig. 5 Jump Voltage and Magnetic Field Dependence of the Temperature

였다. 그림에서 보듯이 낮은 유량에서 뚜렷한 온도상승을, 그보다 높은 대역에서는 완만한 온도상승을 보이고 있는데 이는 유량증가로 인한 전압의 급격한 증가 및 높은 유량에서의 Mean Free Path 감소에 그 원인이 있다고 생각된다. 그림 4는 자장에 대한 온도특성을 조사한 것이다. 외부자장은 토치 주변에 220회 감긴 공심코일에 최대전류 200 A까지 흘려줌으로써 인가되었고 이때 온도측정점에 있어서의 축방향 자장세기는 최대 1200Gauss이다. [12]자장의 증가에 대해서도 대체로 온도는 증가하는 경향을 보였으나 그 오차범위가 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림5는 5.6SLM, 300A

에서의 전압 Jump현상을 전후하여 온도를 측정된 결과이다.

그림에서 보듯이 전압 Jump에 의해 온도가 상당히 증가하는 경향을 보였으나 480Gauss로 자장을 올렸을 때 오히려 소량 감소하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 기전력으로서의 전압이 크면 클수록 같은 전류에서 전력소모량이 커지게 되고 이는 열 확산에 대한 반작용으로서의 Thermal Pinch효과를 가져와서 일반적으로 온도가 상승한다고 알려져 있으며 외부자계에 의한 Magnetic Pinch효과 역시 입자들을 구속함으로써 플라즈마 중심부에서의 온도상승효과를 가져온다고 기대되지만 실제 실험에 있어서는 뚜렷한 상승폭은 보기 힘들었고 전체적인 경향 파악에 그쳤는데 이는 광학부품들을 보다 정밀한 것으로 대체하고 진공펌프 등에 의한 기계적 진동을 완전히 차단하는 등의 실험조건 개선을 통해 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

3. 감압 직류 열 플라즈마 발생 및 특성실험

3.1 불꽃형상

대기압에서와 달리 감압하에서는 플라즈마유속이 빨라질 뿐만 아니라 입자간의 Mean Free Path가 길어지므로 하전입자들이 중성입자와의 충돌에 의해 에너지를 잃어버리는 비율이 작아지게 되고 이는 불꽃의 크기에 영향을 미치게 된다. 따라서 압력이 낮아지면 낮아질수록, 전류가 크면 클수록 불꽃의 길이는 길어지게 되어 5 Torr이하의 압력에서는 30cm가량의 긴 플라즈마 빔을 형성하게 된다.

아르곤유량 4.5SLM, 300A, 노즐직경 6mm의 원통형 양극구조 토치에서 분사된 열플라즈마는 100 Torr의 압력에서 10cm미만이었던 불꽃이 점차로 커져서 5Torr의 압력에서는 20cm이상의 긴 플라즈마 빔을 형성하게 된다.

이는 대기압에서의 불꽃이 3~4cm이하인데 비하면 매우 큰 차이임을 알 수 있고 그 직경 또한 수배 증가함을 볼 수 있다.

3.2 전류전압특성

앞 절에서 소개된 토치를 사용하여 발생된 감압 직류 열 플라즈마의 I-V 특성곡선을 그림6에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 100Torr이하의 낮은 압력에서는 부특성을 나타내는 반면 압력이

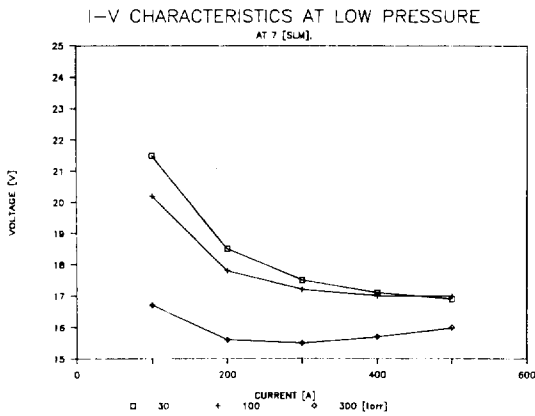


그림 6 감압하에서의 각 압력별 I-V 특성
Fig. 6 I-V Characteristics at Low Pressure

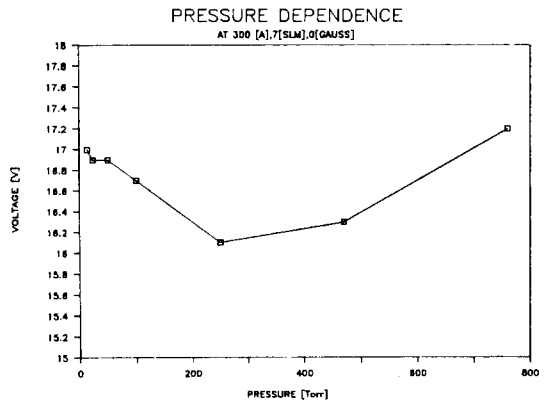


그림 8 압력에 따른 아르곤 직류 열 플라즈마의 전압특성
Fig. 8 Pressure Dependence of the Plasma Voltage

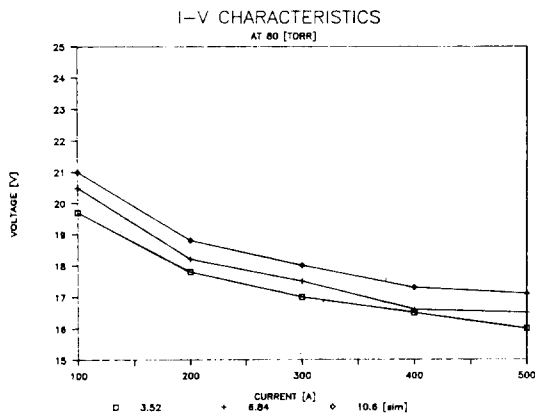


그림 7 감압하에서의 각 유량별 I-V 특성 (P=80Torr)
Fig. 7 I-V Characteristics under the Various Conditions of the Flow Rate (P=80Torr)

증가할수록 정특성을 보이게 되며 또한 최저 전압점이 200A 지점까지 좌측으로 이동함을 볼 수 있는데 이는 감압하에서 유량의 분출속도가 빨라질 뿐만 아니라 하전입자들의 수가 압력증가에 따라 차츰 늘어나게 되어 같은 전류값을 유지하는데 요구되는 기전력이 감소되기 때문이다. 그림7에 감압하에서의 각 유량별 I-V 특성을 도시하였다. 여기서 압력은 80Torr로 고정시켰으며 유량에 의한 압력변화는 Conductance 조절밸브로 보정되었다. 그림에서 보듯이 유량에 따라 방전전압이 증가하며 낮은 압력에서의 부특성을 일관되게 나타내고 있음을 관찰할 수 있다.

그림8은 압력에 따른 아르곤 직류 열 플라즈마의 전압특성을 도시한 것이다. 플라즈마 전압은 200~300Torr 부근에서 최소치를 가지며 압력이 이보다 더욱 커지면 오히려 증가한다. 이는 낮은 압력에서와는 달리 대기압에 가까워질수록 중성입자들의 수가 더욱 더 증가하여 Mean Free Path가 점차 줄어들게 되므로 하전입자들의 감소가 더욱 심하게 되어 이를 유지하기 위한 기전력이 점차 높아지는 경향을 보이는 것으로 해석된다.

3.3 자장효과

감압하에서의 직류 열 플라즈마에 자장을 걸어 주었을 때 상압에서의 결과와는 달리 전압 Jump

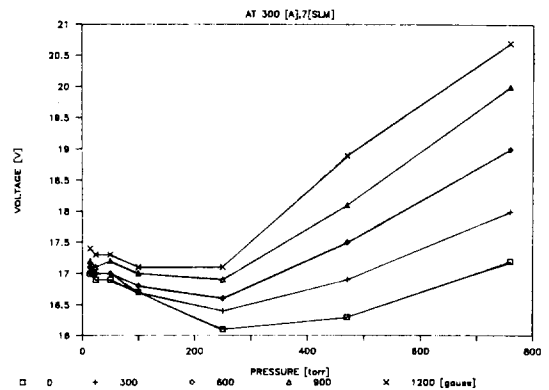


그림 9 자장효과에 따른 압력-전압 특성곡선
Fig. 9 Pressure-Voltage Curves under the Magnetic Field

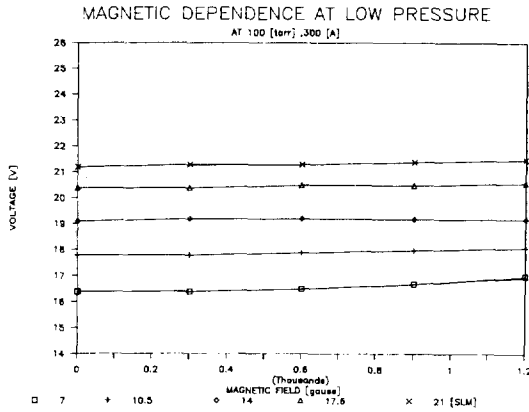


그림 10 감압상태에서의 자장효과
Fig. 10 Magnetic Dependence at Low Pressure

현상이 일어나지 않았다. 뿐만 아니라 상압에서는 자장증가로 인한 전압증가가 큰 폭이었으나 감압시 전압증가는 0.5V내외로 거의 일정한 값을 유지하였다. 그림9에 자장효과에 따른 압력과 전압과의 특성곡선을 도시하였으며 감압하에서의 자장효과를 보다 정확히 보기 위하여 100Torr의 압력하에서 각 유량에 대한 자장세기와 전압과의 특성곡선을 그림 10에 도시하였다. 그림9에서 볼 수 있듯이 100Torr의 감압상태에서 자장에 대한 전압증가가 매우 적지만 그 이상의 압력에서부터 대기압에 이르기까지 점점 큰 폭으로 증가하고 있음을 확연히 알 수 있다. 또한 감압상태에서는 각각의 기체유량에 대해 전압이 거의 일정하게 유지되고 있음을 그림 10에서 볼 수 있다. 이를 Magnetic Reynolds Number로써 설명하면 감압하에서는 플라즈마의 속도가 더욱 빨라지게 되므로 자장의 영향이 상압에 비해 줄어들게 되는 것이다. 그러나 감압하에서의 직류 열 플라즈마 공정이 주로 100 Torr를 전후하여 이루어짐을 감안할 때 공정시 플라즈마에 대한 자장의 영향은 크다고 볼 수 있다.

3.4 온도특성

그림 11에 압력변화에 따른 온도특성곡선을 도시하였다. 기체유량은 5SLM으로, 그리고 전류량은 300A로 고정되었을 때 3/20/100/300/760Torr로 압력을 변화시키며 온도를 측정하였다. 측정결과는 그림에 나타난 바와 같이 20Torr부근에서 최대치를 가지는 온도분포를 나타내었다. 이는 일반적인 열 플라즈마의 온도분포가 50Torr부근에서 LTE상태로 들어가며 100Torr부근에서 최대온도

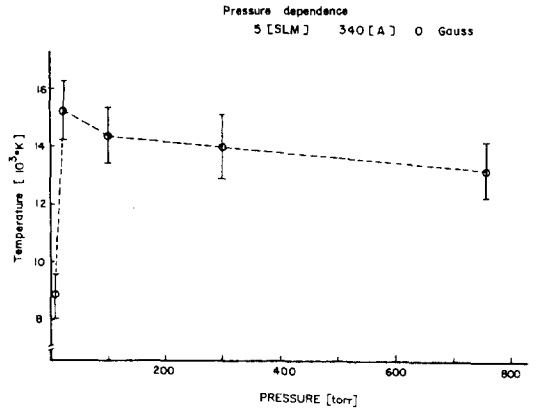


그림 11 압력변화에 따른 온도특성곡선
Fig. 11 Pressure Dependence of the Temperature

치를 갖는다는 사실을 감안할 때 완전한 LTE상태라고 하기는 어려운 3/20 Torr에서의 측정값 오차를 제외하고는 상당히 기존 결과들과 일치함을 알 수 있다. [8]

4. 결 론

직류 열플라즈마의 물성변화를 보기위하여 분광분석법에 의해 플라즈마온도를 측정하였다. 본 연구에서는 여러 분광선의 상대회도를 측정하여 이로부터 계산된 온도들의 평균값을 취하는 방법을 썼으며 이를 위해 설치된 분광분석장치를 설명하고 온도계산에 필요한 각 데이터들을 제시하였다. 감압하에서의 직류 열플라즈마는 압력이 감소함에 따라 유속이 커지고 또한 입자들의 Mean Free Path가 길어지므로 플라즈마 불꽃의 길이가 2cm에서 25cm까지 변화하는 큰 차이를 관찰할 수 있었다. 감압하에서의 방전특성곡선은 100Torr이하의 압력에서는 부특성을 나타내지만 압력이 증가할수록 정특성으로 바뀌는 경향을 보였고 그 방전 유지 전압은 200-300Torr부근에서 최소값을 나타내었다. 직류 열 플라즈마의 온도특성은 유량과 자장의 세기에 대체적으로 비례하였고 그 값은 10,000~15,000K임이 측정되었다. 본 실험의 결과 감압상태에서의 압력에 따른 온도특성은 LTE가정에 있어서의 오차를 감안할 때 기존의 결과와 상당히 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] Merle N. Hirsh, H.J. Oskam, *Gaseous Electronics*, Academic Press 1978, pp. 291-398.
- [2] Kazuo Akashi, "Application of plasma to processing for ceramics," *J. Ceram. Soc. Jpn. Inter. Ed.*, vol. 95, pp. 1-19, 1987.
- [3] M. Suzuki, "Experimental investigation on interaction between plasma flow and neutral gas in parallel magnetic field," *ISPC-7 Eindhoven*, vol. 3, pp. 830-835, July 1985.
- [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] Ryouta Hidaka, et. al., "Ruby-laser scattering diagnostics of a supersonic plasma flow for low pressure plasma spraying" *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 26, no. 10, pp. L1724-L1726, Oct. 1987.
- [6] D. Degout, P. Recourt, G. Salinier, A. Catherinot, "Spectroscopic analysis of a double flux TIG arc plasma column, correlations with thermal measurements," *ISPC-7 Eindhoven*, vol. 3, pp. 737-741, July. 1985.
- [7] Ph. Roumilhac, J.F. Coudert, J.M. Leger, A. Grimaud, P. Fauchais, "Optical and thermal diagnostics to study Ar, Ar-H₂, N₂ plasma jets produced by a spraying plasma gun," *ISPC-8 Tokyo*, vol. 1, pp. 419-425, Sep. 1987.
- [8] H.D. Steffens, M. Mack, R. Lauterbach and B. Eckhardt, "Electron density and temperature measurements in low pressure plasma jets," *ISPC-9 Italy*, vol. 1, pp. 388-393, Sep. 1989.
- [9] Hans R. Griem, *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill Inc. 1964.
- [10] W. Lochte-Holtgreven, *Plasma Diagnostics*, North-Holland Pub. Co. 1968.
- [11] W.L. Wiese, M.W. Smith, and B.M. Miles, *Atomic Transition Probabilities*, Vol. 2, National Bureau of Standards.
- [12] 김원규, 황기웅, "직류 열 플라즈마의 발생 및 그 특성에 관한 연구," *대한전기학회지* 제39권 11호 제재, (1990)