

13.56MHz ICP에서 단일 탐침법에 의한 Ar 가스의 발광특성 연구

조주웅, 최용성, 김용갑, 박대희
원광대학교

A Study on Emission Characteristics of Ar Gas Using a Single Langmuir Probe Method in Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma

Ju-Ung Jo, Yong-Sung Choi, Yong-Kab Kim and Dae-Hee Park
Wonkwang University

Abstract

In recent, there have been several developments in lamp technology that promise savings in electrical power consumption and improved quality of the lighting space. Above all, Electrodeless fluorescent lamp is the removal of internal electrodes and heating filaments that are a light-limiting factor of conventional fluorescent lamps. The electrodeless fluorescent lamp is intended as a high efficacy replacement for the incandescent reflector lamp in many applications. Therefore, the electrodeless fluorescent lamps is substantially higher than that of conventional fluorescent lamps and last up to 60,000 hours. In this paper, electron temperature and electron density were measured in a radio-frequency inductively coupled plasma using a Langmuir probe method for emission characteristics. Measurement was conducted in an argon discharge for pressure from 10 [mTorr] and input RF power 100 [W] to 150 [W]. As for the electron density, a electron temperature was more distinguished for a emission characteristic. The results of ideal may contribute to systematic understanding of a electrodeless fluorescent lamps of emission characteristics.

Key Words : Langmuir probe method, Emission characteristic, Electron density, Electron temperature

1. 서 론

무전극 방전 램프의 방전현상은 1884년 Hittrof 에 의해서 처음으로 발견되었다. 1891년 Nikola Tesla는 비교적 낮은 용량 결합형 RF 주파수에 의한 방전 램프를 소개하였고, 1907년 P. C. Hewitt 에 의해 오늘날의 플라즈마 반응로의 원리인 ICP (Inductively Coupled Plasma)를 발견하였다. 그리고 Bethenod와 Claude에 의하여 페라이트 코어를 적용한 ICP가 소개되었으며, 1970년대 Anderson에

의해서 유도결합형 램프의 방전 원리가 비로소 정착 되었다 [1, 2].

이러한 무전극 방전 원리는 직류나 저주파 교류에 의한 전극 방전과는 여러 가지 면에서 매우 다르며, 특히 방전의 개시와 방전을 지속시키는 조건에서 많은 차이를 보이고 있다. 무전극 방전 원리는 크게 용량적 결합 방전과 유도적 결합 방전으로 구분할 수 있다. 첫째, 용량적 결합방전은 주파수가 수십 kHz에서 수십 MHz 사이인 RF전원을 평행판 전극 사이에 가할 때 전극 사이에서 형성

되는 전장에 의해 기체가 이온화되고, 방전이 유지되는 경우으로써, 이러한 방전원리에 의해 이것을 E-방전이라고 한다. 이 원리는 변위전류에 의해 전자가 가열되므로 사용 주파수가 높아야 한다.

둘째, 유도적 결합방전은 방전관 주위에 감겨진 코일이나 연자성체 물질인 Ni, Mn계열의 페라이트에 코일을 감아 코일에 흐르는 전류에 의한 전자계 유도가 축방향의 교번 자계 및 페라이트 코어에 의한 인덕턴스 특성으로 전자계 에너지를 가하므로 H-방전이라고 한다 [3].

방전에 의해 빛을 방출하기 위한 방전관 내의 전자의 에너지 상태는 여기 (excitation), 해리 흡착 (dissociative attachment), 해리 (Dissociation) 및 이온화 (ionization) 등의 형태로 존재하며, 전자의 생성과 소멸을 진행시킨다. 전자의 생성과 소멸은 가스의 종류, 가스의 밀도, 용기의 형상 등에 의해 복잡한 함수의 형태를 이루게 된다.

전자충돌에 의한 기체 발광의 메커니즘은 주로 3가지 형태로써 설명될 수 있다. 첫째는 특성복사라고 하는데, 원자 또는 이온에 속박되어 있는 전자가 여기 상태에서 보다 낮은 상태로 천이할 때 나오는 빛의 방출이다. 둘째는 재결합 복사로 전자가 이온에 붙잡혀 구속전자가 될 때에 그 결합 에너지를 빛으로써 방출하는 것이다. 셋째는 제동복사이며, 전자가 이온과의 Coulomb 충돌을 할 때 궤도를 휘게 하는 제동을 받는 경우에 방출하는 빛이다.

첫 번째 현상은 휘선스펙트라가 되지만, 뒤의 두가지는 연속스펙트라이며, 전방사광에 대해서는 연속스펙트라에 의한 것이 크다. 이 외에, 하전입자가 자력선의 주위를 선회 운동할 때에 가속도를 받아서 내놓는 사이클로트론 복사, 두꺼운 플라즈마로부터 방출되는 흑체복사가 있다 [4].

본 논문에서는 유도결합형 무전극 방전의 발광 메커니즘을 분석하기 위해 Langmuir probe법을 이용하여 전자밀도와 전자온도를 조사하였다. 압력 1 [mTorr]에서 인가 전력을 10 [W]~150 [W]로 변화시키면서, 전자밀도와 전자온도의 발광특성을 조사하였다. 전자온도와 전자밀도의 발광특성을 조사하기 위해, Minolta LS-100 휘도계와 Darsa-2000 Spectrum Analysis를 사용하여 발광특성을 조사하였다.

2. 이론 및 실험 방법

2.1 배경 이론

I. Langmuir과 H. M. Moot-Smith에 의하여 창안된 Langmuir single probe법은 탐침에 걸여준 전압에 의한 전류변동을 맥스웰 속도 분포에 의한 전류밀도 공식을 사용하여 전자온도와 전자밀도를 계산하는 것이다. 그림 1은 전압에 의한 전류변동을 나타낸 것으로써, 탐침에 포획되기 위한 하전입자의 포화영역은 전압의 극성에 의해 (a) 영역은 양이온포화영역, (b) 영역은 전자전류유입영역이며 (c) 영역은 전자포화영역으로 구분된다. 이 결과로부터 전자온도, 전자밀도, 공간전위 (space potential, V_s) 및 이온에 관한 정보를 전류밀도로 계산할 수 있다.

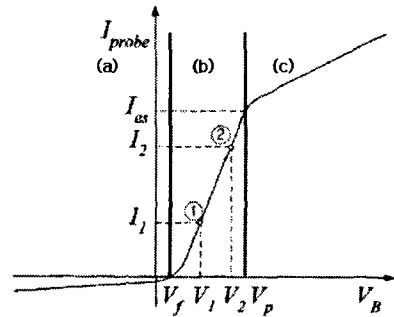


그림 1. 단일 탐침의 전형적인 I-V 특성곡선 [4] (a) 양이온 포화영역, (b) 전자전류 유입영역, (c) 전자 포화영역.

전류밀도 공식을 사용하기 위한 맥스웰 속도 분포 조건은 다음과 같다. 즉, 1) 전자들은 맥스웰 속도 분포를 이룬다. 2) 플라즈마 자체 진동은 없다. 3) 입자들은 전자와 단일 하전 이온만 존재한다. 4) 탐침에 의한 플라즈마 요동은 없다. 5) 이차전자방출은 무시한다. 6) 하전입자의 탐침 표면에서의 반사는 무시한다. 이러한 조건을 만족하면 다음의 식 (1)에 의해 전자밀도와 전자온도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J_e(V_B) &= e \int f(v) v dt \\
 &= n_e e \left(\frac{m_e}{2\pi k T_e} \right)^{1/2} \left[\int_{v_{\min}}^{\infty} - \left(\frac{m_e v^2}{2k T_e} \right) \right] v dv \quad (1)
 \end{aligned}$$

v_{\min} 은 인가전압과 플라즈마 전위가 같아질 때 탐

침 외부의 sheath를 통과하기 위한 최빈 속도로써, 전자의 Bohm 조건이라고 한다. 그림 1의 전자전류 유입영역은 Bohm 조건에 의해서 인가전압의 영향을 받지 않는 전자의 에너지 영역이 되는 것이다 [5~7].

$$I_e(V_B) = J_e(V_B)$$

$$I_e(V_B) = I_{es} \left[\frac{e(V_B - V_P)}{kT_e} \right] \quad (\text{전자전류유입영역})$$

$$I_e(V_B) = An_e e \sqrt{kT_e / 2\pi m_e} = I_{es} \quad (\text{전자포화영역}) \quad (2)$$

Langmuir single probe법에 의한 I-V 특성곡선에서 전자전류 유입영역의 V_2 과 V_1 의 값의 차이는 전자 에너지 변화를 의미하므로 전류밀도 공식에 대입하여 계산하면, 다음과 같은 전자온도와 전자 밀도의 식 (3)에 의하여 구할 수 있다. [8]

$$T_e = \frac{e}{k} (V_2 - V_1) \left[\ln \left(\frac{I_{e2}}{I_{e1}} \right) \right]^{-1}$$

$$n_e = \frac{I_{es}}{Ae} \left(\frac{2\pi m_e}{kT_e} \right)^{1/2} \quad (3)$$

2.2 실험 방법

그림 2는 Ar 가스에 의한 유도결합 플라즈마 발생장치의 개략도이다. 유도결합형 플라즈마의 구성은 챔버를 기준으로 하여 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 실험에 사용되는 Ar 가스의 양을 조절하는 유량 조절기 (Mass Flow Controller)이다. 두 번째는 고주파를 발생시키는 고주파 전원과 플라즈마 및 부하 임피던스와의 매칭을 위한 매칭 네트워크 및 RF안테나이다. 세 번째는 저진공을 위한 Mechanical Pump이다.

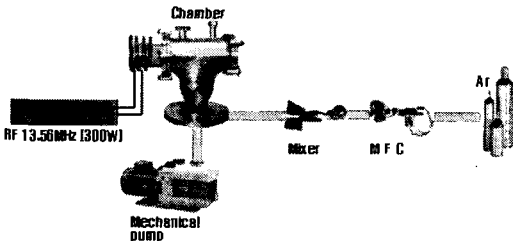


그림 2. 유도결합 플라즈마 발생장치의 개략도.

챔버는 초기 진공도를 1.0×10^{-3} [Torr]로 배기하고, 게이슬러관을 이용하여 진공관 내부에 존재하

는 이물질을 제거하였다. 플라즈마에 에너지를 가하는 방법은 13.56 [MHz] 고주파 전원을 매칭 박스를 통해 반사전력을 0이 되도록 조정하여 안테나 코일에 인가하여 전달할 수 있다. 고주파 전원은 주파수 출력을 위하여 동관으로 제작된 안테나를 사용하였다. 안테나 코일은 고주파 전원과 플라즈마를 전자기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 외경 95 [mm]의 동관을 7 [mm] 간격으로 4회 나선형 (helical)으로 감아서 사용하였다.

그림 3은 Langmuir single probe법을 위한 진공 장비와 측정기기의 폐회로를 나타내고 있다. 전류 측정을 위한 Langmuir probe tip은 직경 1.6 [mm], 길이 4.5 [mm]이고, 탐침봉의 재질은 녹는 점이 높은 텅스텐을 사용하여 유리로 절연하였다. Probe에 인가하는 전압은 Agilent 6035A System Unipolar Power supply를 사용하여 0 [V]부터 150 [V]까지 30 [V] 간격으로 증가시키며 Keithley 193A DMM를 이용하여 전류를 측정하였다.

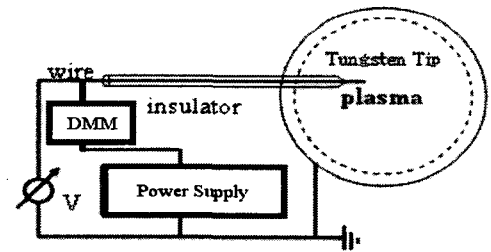


그림 3. Langmuir Single Probe 폐회로

3. 결과 및 고찰

그림 4는 인가전력에 의한 파장의 분포 세기를 나타내고 있다. 인가전력이 10 [W]에서는 파장의 세기 분포가 거의 없다가 30 [W] ~ 70 [W]에서 거의 동일한 변화를 보이고 있다. 외부에서 가하는 RF 인가전력이 100 [W] 이상일 때 4의 파장 대역에서 파장의 분포 세기는 뚜렷하게 증가하는 경향성을 보이고 있다.

그림 5는 인가전력에 의한 광특성을 보이고 있다. 광특성이 균일하게 보이는 30 [W] ~ 70 [W]는

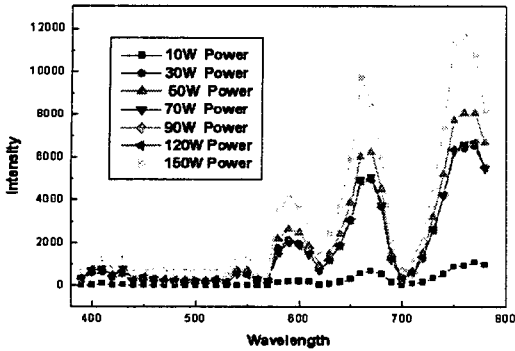


그림 4. 인가전력에 의한 파장의 세기 분포

파장의 분포에서도 동일한 결과를 나타내었는데, 이 결과로부터, 이 구간은 여기되기 위한 플라즈마 결합 계수에 영향이 있음을 알 수 있다. 90 [W] 이상에서는 인가전력에 의해 선형적인 결과를 보이고 있다.

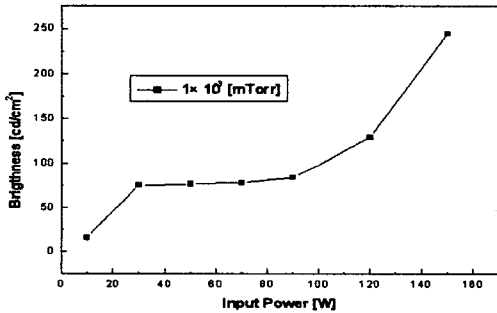


그림 5. 인가전력에 의한 휘도와 광속을

그림 6은 인가전력에 의한 전자온도를 나타내고 있다. 전자온도는 플라즈마 방전관 내의 온도분포를 나타내는 파라미터로써, 인가전력에 의한 전자온도는 비선형성임을 확인할 수 있다.

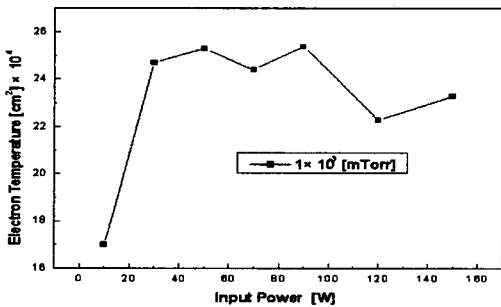


그림 6. 인가전력에 의한 전자온도 변화

휘도와 파장의 세기의 광특성의 결과는 30 [W] ~ 70에서 균일한 변화를 보임을 알 수 있는데, 이 구간의 전자온도의 경우, 전자온도 분포가 비슷한 결과를 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 휘도 변화에 의한 전자밀도를 나타내는 것으로써, 전자밀도의 변화는 플라즈마를 방전하기 위한 회로상의 전류값으로 유추할 수 있다. 30 [W] ~ 70 [W] 변화하는 구간은 앞의 결과로 인해 에너지 변화가 일어나기 위한 플라즈마 흡수라는 것을 전자밀도 값으로부터 알 수 있다. 이 구간 중 60 [W]~ 90[W]의 구간을 급격한 증가를 이루고 있음을 알 수 있고, 전자밀도의 변화는 휘도 값이 244.6 [cd/cm²]일 때 그리고 전자밀도 값이 10.3×10^6 임을 알 수 있다. 이 결과를 통해, CFD-ACE의 플라즈마 시뮬레이션의 전자밀도 값이 실험적으로 구현되어, 전자밀도의 광특성 경향성이 유추될 수 있음을 확인하였다.

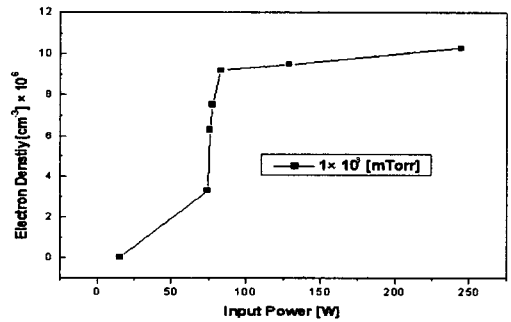


그림 7. 휘도 변화에 의한 전자밀도 변화

4. 결론

본 논문에서는 유도결합형 무전극 방전의 발광 메커니즘을 분석하기 위해 Langmuir probe법을 이용하여 전자밀도와 전자온도를 조사하였다. 압력 1 [mTorr]에서 인가 전력을 10 [W]~ 150[W]로 변화시키면서, 전자밀도와 전자온도의 발광특성을 조사하였다. 조사 결과는 다음과 같다.

- 1) Ar 유도결합형 플라즈마 장치의 광특성과 전자 밀도는 선형적임을 알 수 있고, 휘도값이 244.6 [cd/cm²] 일때 전자밀도 값이 10.3×10^6 임을 확

인하였다.

- 2) 인가전력이 30 [W]~ 70 [W]일 때, 광특성을 위한 플라즈마의 에너지 흡수가 확인되었다.
- 3) 인가전력에 의한 광특성 및 전자밀도는 플라즈마 흡수 구간을 제외한 구간에서 선형적인 결과를 보이고 있다.
- 4) 플라즈마 흡수 구간은 유도결합 플라즈마에서 전계의 영향이 자계의 영향으로 변하는 E-mode가 될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다. 이번 연구를 지원해 주신 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

[1] Wharmby, D. O, "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science Measurement and Technology, IEE Proceedings A, Vol. 140, pp.465-473, 1993.

[2] V.A Godyak, K. Ohata, et al., "Radio Frequency Light Sources", Industry Applications Conference, Conference Record of the 2002 IEEE, Vol. 5, pp. 3281-3288, 2000.

[3] 여인선, "무전극 방전의 원리와 방전등에의 응용", 한국조명전기설비학회지 제6권, 제3호, pp.10-16, 1992.

[4] M&EE, 월간반도체 2월호 특별연재(2), 2002

[5] 홍창희, "소재공정용 직류 열플라즈마 발생기 개발", 1차년도 중간보고서 제6장, 2000.

[6] M. A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994, Chap. 6.

[7] 이병규, "자기화된 RF 플라즈마의 전자 특성 대한 연구", 한양대 석사 학위논문, 2002.

[8] 서동철, "유도결합에 의한 산소 플라즈마의 특성 연구", 동아대 박사 학위논문, 2001.