

유도결합형 플라즈마에서 압력에 따른 Ar Gas의 전기적 특성분석

조주웅, 이영환, 허인성, 김광수, 최용성, 박대희
원광대학교

Analysis of Electrical Properties of Ar Gas According to Input Pressure for Inductively Coupled Plasma

Ju-Ung Jo, Y.H. Lee, In-Sung Her, Kwang-Soo Kim, Yong-Sung Choi, Jong-Chan Lee, Dea-Hee Park
Wonkwang Univ.

Abstract

Low-Pressure inductively coupled RF discharge sources have important industrial applications mainly because they can provide a high-density electrodeless plasma source with low ion energy and low power loss. In an inductive discharge, the RF power is coupled to the plasma by an electromagnetic interaction with the current flowing in a coil. In this paper, the experiments have been focussed on the electric characteristic and carried out using a single Langmuir probe. The internal electric characteristics of inductively coupled Ar RF discharge at 13.56 [MHz] have been measured over a wide range of power at gas pressure ranging from 1~70 [mTorr].

Key Words : 무전극 램프, 플라즈마, 유도결합형, RF

1. 서론

가스나 금속 증기의 고주파 방전은 여러 가지 광원의 궁극적인 적용 기술의 하나로 인식되어 오랫동안 연구 개발되어 왔다 [1]. 초고주파 방전을 이용한 램프는 방전구 안에 전극이 없이 이루어지기 때문에, 재래식 전극 램프에 비하여 많은 장점을 갖고 있다. 예를 들면, 광원 램프 자체의 수명이 길고, 수명 기간 동안 광속유지율 (Lumen maintenance)이 거의 일정하고, 광변환 효율의 변화가 적으며, 제작이 간편하고, 무수은 및 폐기물의 최소화로 높은 환경 친화성 등 많은 장점을 갖고 있다. 그러나 전자파 발전기 자체의 효율, 전자파의 방전 플라즈마 결합 효율, 그리고 발광 가스의 부적합성, 그리고 재래식 전극 광원의 단기적이지만 더 좋은 경제성 때문에 전자파 방전을 이용한 광원의 실용화는 쉽게 일어나지 않았다 [2].

고주파방전의 초기단계인 플라즈마 방전의 메커니즘을 규명하는 것은 실용화 과정에서 문제해결의 실마리를 찾기 위한 중요한 단서가 될 수 있다.

고주파를 이용하여 플라즈마를 방전시키는 방법에는 용량성 RF 방전 (Capacitive RF Discharge),

유도 RF 방전 (Inductive RF Discharge), 그리고 RF파 방전 (RF Wave Discharge)의 3가지가 있다. 용량성 RF 방전은 전극 sheath 내 변위전류 (displacement current)에 의해 플라즈마가 발생한다. 이때 파장은 방전크기 보다 큰 정전 RF E-field에 의해 여기된다. 유도 RF 방전은 H-field와 플라즈마의 방전 경로를 따라 생성된다. 이때에도 역시 가해주는 주파수의 파장은 방전크기보다 커야되고, RF파 방전은 전자기파 (electromagnetic wave)에 의해 유지된다. 웨이브 방전은 일반적으로 1 [GHz]보다 더 크거나 비슷한 마이크로 전력에 의해 유지된다 [3].

따라서, 본 논문은 고주파방전에서 중요한 요소인 전자밀도와 전자온도를 구하기 위한 기초연구로서, Ar 가스 유도결합 플라즈마의 전류-전압 특성을 측정하였다. Ar 가스 압력을 1~70 [mTorr]로 변화시키면서, 플라즈마의 전류-전압 특성을 측정하였다.

2. 실험

Ar 가스에 의한 유도결합 플라즈마 발생장치의 개략도는 그림 1과 같다. 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 매칭네트워크 및 RF안테나이다. 세 번째는 방전관 안에 있는 플라즈마의 상태를 측정하기 위한 Langmuir Probe 장치이다.

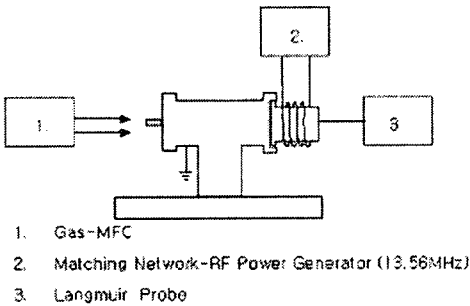


그림 1. 플라즈마 발생장치 개략도.

조명에 사용되는 글로우방전은 저압이므로, 로타리 펌프를 사용하였다. 진공을 만들기 위한 챔버는 초기 진공도를 1.0×10^{-4} [Torr]로 배기하고, 가이슬러관을 이용하여 진공관 내부에 존재하는 이물질 제거하였다. 진공장비는 측정기와 연결하고, 접지시켜 폐회로를 구성하였다. 플라즈마에 에너지를 가하는 방법은 13.56 [MHz]의 고주파 전원을 매칭 박스를 통해 반사전력을 0이 되도록 조정하여 안테나 코일에 인가하여 전달하였다. 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. 출력 주파수는 무전극 형광 램프에 많이 사용되고 있는 13.56 [MHz]이고, 주파수 발전기의 최대 출력은 300 [W]이다. 플라즈마의 전류 측정은 Langmuir probe를 이용하여 측정하였다. 탐침봉은 전도성의 금속선과 이를 둘러싸고 있는 세라믹 물질로 구성된다. 금속선은 높은 용융점을 가지는 물질이어야 하고, 플라즈마와 화학 반응을 잘 일으키지 않아야 한다. 본 논문에서 사용된 탐침봉의 재질은 녹는점이 높은 몰리브덴, 텅스텐, 백금 등이 사용되는데[4], 여

기서는 텅스텐을 사용하였고, glass로 절연하였다. 크기는 직경 1.2 [mm]에 길이 6 [mm]의 길이만을 남기고 넣어서 플라즈마와 절연되도록 한 단일 탐침봉이다. Probe에 인가하는 전압은 공급 전류가 최대 2 [A]인 power supply를 사용하여 -100 [V]부터 +100 [V]까지 10 [V] 간격으로 증가시키며 DMM/193A를 이용하여 전류를 측정하였다. 사용된 아르곤 가스의 순도는 99.99 [%]이고, MFC 밸브를 통하여 방전관 안에 유입시켜서 압력을 1~70 [mTorr]까지 변화하면서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

유도결합 플라즈마는 전자, 이온, 중성 원자, 중성 분자 등의 입자들로 구성되어 있으며 플라즈마를 구성하는 모든 입자들이 국소적으로 열적 평형을 이루어서 동일한 온도로 맥스웰 분포를 갖는다고 가정할 수 있다.

따라서 유도결합 플라즈마의 거동이 기존의 열유체의 거동과 매우 비슷하기 때문에 기존의 열유체의 거동을 파악하기 위해 필요한 물리량과 유사한 물리량으로 유도결합 플라즈마의 거동을 파악할 수 있다. 그러므로 유도결합 플라즈마 진단은 기본적으로 플라즈마 열유체의 밀도, 속도, 전자 온도, 이온 온도, 열함유량 등의 기본적인 유도결합 플라즈마 특성변수를 알아야 한다.

이러한 기본적인 유도결합 플라즈마 물리량을 알기 위해 측정하는 플라즈마의 전류-전압 특성 곡선을 측정하였다.

그림 2는 고주파 전원 (RF)이 10 [W]일 때 탐침에 인가하는 전압에 따른 플라즈마의 거동과 정전 탐침에 의해 측정된 전형적인 전류-전압 특성 곡선을 나타내고 있다. 탐침에 인가한 전압이 유도결합 플라즈마 전위 보다 작은 x축의 바이어스전압은 50~100 [V]의 범위에서 탐침 주위에 있는 이온들은 모두 반발하고 주위의 전자들만이 탐침에 집속되어 전자포화영역이 형성되어야 한다. 그러나, 그림 2의 I-V특성은 각각의 압력에 대하여 기울기가 45° 정도이다. 이러한 이유는 플라즈마의 상태가 불안정함으로써 발생하는 것으로 생각된다. 그리고, 탐침에 집속되는 전자의 운동을 방해하는 이물질과 진공관 내부의 플라즈마 진동이 압력 변화에 의해 플라즈마가 유동적으로 변해서 입자의 데바이 거리에 문제를 발생시키기 때문이다 [5].

데바이 거리는 서로 다른 부호의 하전 입자군을 전기적 중성으로 볼 수 있는 최소 공간적 거리이며, 이는 전자와 이온이 각각 다른 속도로 운동하고 있는 플라즈마 중에 쿨롱력과 열 운동에 의한 상대적인 배타력이 같아 질 때까지의 상대적 거리를 의미한다. 이런 데바이 거리와 같은 여러 변수에 의해 플라즈마 진동은 안정화시키기가 어렵고, 정확한 그래프가 측정될 수 없는 것이다.

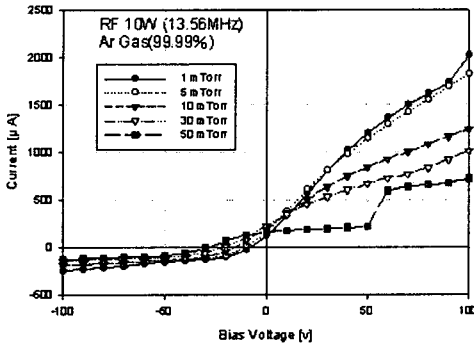


그림 2. 10 [W]전력에서 압력에 따른 Ar Gas의 전압-전류특성.

10 [W] 전력에서 I-V특성과 비교하기 위하여 13.56[Mhz]의 주파수에서 RF전력이 압력에 따라 변하는 전압-전류특성을 30 [W] 전력에서 측정하였다. 이 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 I-V특성에서, 전류가 0인 점인 부동 전위가 -50 [V]까지 벗어나 있지만, 각각 30 [mTorr]와 70 [mTorr]에서 전형적인 Ar가스의 전압-전류특성을 나타내고 있다. 그림 2의 I-V특성에서, 부동전위에서 전류가 0 [A]가 되어야 하지만, 약 250 [μ A] 근처에서 교차됨을 알 수 있다.

유도결합 플라즈마를 열역학이나 유체역학적인 관점에서 생각하면, 그림 2와 그림 3의 부동전압의 차이는 앞에서 언급한 데바이 거리와 같은 입자의 거동을 나타내는 변수들이 안정한 상태를 유지하기 어렵기 때문에 나타나는 것으로 생각된다. 유도결합 플라즈마를 구성하고 있는 이온, 전자, 중성 입자들과 같은 입자들은 끊임없이 에너지의 교환을 하고 있다. 이들 입자들의 에너지교환이 이루어지는 방식을 통해 유도결합 플라즈마의 안정상태를 알 수 있다고 생각한다. 이러한 유도결합 플라즈마의 안정상태 변수는 각 조건에 따라 달라질

수 있고, 유도결합 플라즈마 변수의 값을 찾아내어 유도결합 플라즈마 상태를 제어할 수 있지만, 입자는 연속적인 브라운 운동을 하므로, 정확한 유도결합 플라즈마 안정 상태를 규명하는 것은 어려운 것이다. 그러므로 각 변수들의 측정시간을 오래 지속시켜 얻을 수 있는 물질의 관성력을 이용하여 좀 더 안정화된 유도결합 플라즈마 상태를 만들 수 있다고 생각한다.

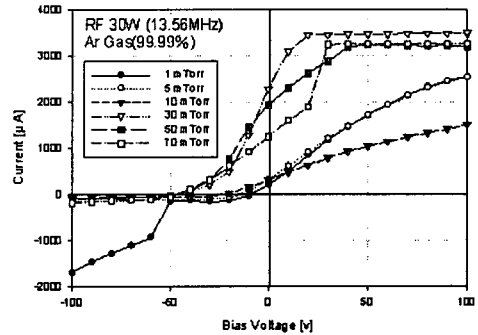


그림 3. 30 [W]전력에서 압력에 따른 Ar Gas의 전압-전류특성.

그림 4는 그림 2와 그림 3에서 부동전압이 안정된 전압-전류 특성곡선을 함께 나타낸 것이다. 이와 같은 실험결과에 의한 전류는 다음의 조건하에서의 이론식과 비교될 수 있다.[6] 플라즈마는 매우 얇은 외장 (sheath)이 형성하고, 요동지역 내에서 입자들은 비충돌적이며, 자기장이 외부에서 걸리지 않고, 플라즈마의 유동이 없으며, 탐침에 도달한 전자는 모두 포획된다는 가정하에서 전류는 아래에 서술하는 바와같이 정량화된다. 우선 평형상태의 플라즈마 내에서의 전자의 움직임은 식 (1)의 볼츠만 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (1)$$

이 경우에 플라즈마 영역과 플라즈마 외장 경계에서의 연속방정식과 포아송 방정식을 풀면 식 (2)와 같이 탐침에 접촉되는 전자에 의한 전류에 대한 식을 구할 수 있다.

$$I_e = -\frac{1}{4} e v A_p n_0 \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (2)$$

참고 문헌

- [1] Wharmby, D. O. " Electrodeless lamps for lighting: a review", IEE Proceedings 140A, pp.465~473, 1993.
- [2] Turner, B. P., Ury, M. G. and McLennan, D. A. " Microwave excited sulfurlamp," Paper QA2. 47th Annual Gaseous Electronics Conference(Gaithersburg, MD, USA), 1994.
- [3] G. I. Babat, "Electrodeless Discharge and some applied problems", J.IEE, vol.94, pt3, pp.27~37, 1947.
- [4] 박철웅, "플라즈마 온도 측정에 관한 연구", 석사학위 논문, 서울대학교, 1987.
- [5] Francis F. Chen, " Introduction to Plasma Physics And Controlled Fusion", Plenum Press, pp.10., 1984. Vac. Sci. Tech. B9, p.362, 1991.
- [6] <http://fusma.snu.ac.kr/~tptl/kor/00nrl.shtml>

여기서 V 는 탐침의 전위, A_p 는 탐침의 면적, v 는 전자의 평균속도를 나타낸다.

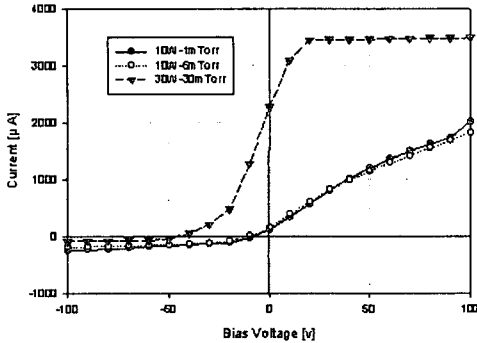


그림 4. 부동전압이 안정된 Ar Gas의 전압-전류 특성의 비교.

그림 4에서 10 [W], 1 [mTorr]와 10 [W], 5 [mTorr]에서의 전압-전류특성은 30 [W]-30 [mTorr]의 전압전류특성보다 전형적인 전압-전류 특성을 나타내지 않지만, 부동전압이 0점에 근접한다. 이러한 이유는 플라즈마의 안정상태가 시간에 의해 많이 좌우되는 불안정한 물질 상태이기 때문이라 생각한다.

4. 결 론

유도결합 플라즈마에 인가한 전압을 -100 [V]부터 +100 [V]까지 10 [V] 간격으로 인가하였다. Ar 가스 압력을 1~70 [mTorr]까지 변화시키면서 측정된 결과, 전압-전류 특성에서 부동전압이 안정적인 경향을 나타냄을 관측하였고, 이론식에 의하여 전류값의 변화를 살펴보았다.

감사의 글

본 논문은 에너지 관리 공단에서 시행한 "고효율 무전극 형광등 광원 기술 개발-전구형"사업의 지원을 받아 이루어진 논문입니다. 이번 연구를 지원해 주신 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.