

무전극램프에서의 Hysteresis와 모드 변환 특성

이주호, 양종경, 이종찬*, 박대희
원광대학교, 금호전기(주)*

Hysteresis and Mode Transition in Electrodeless Lamp

Lee Joo Ho, Yang Jong Kyung, Lee Jong Chan*, Park Dae Hee
Wonkwang University, Kumho Electric, Inc.*

Abstract - Electrodeless fluorescent lamp exhibit two modes of operation : a low density mode in which the power is capacitively coupled to the plasma and which is known as the E-mode, and a higher density mode which is an inductive discharge known as the H-mode. The transition between these two(E to H) mode exhibits hysteresis. It is observed that transition currents change at different frequencies and hysteresis exists not only between the starting and minimum maintaining currents of the electromagnetic mode (H mode) discharge but also between the starting and minimum maintaining currents of the electrostatic mode (E mode) discharge. Hysteresis effect can be important role in dimming system.

까지 0.5 MHz 간격으로 반복하였으며 주변의 온도는 최대한 25℃를 유지하고 습도는 30%를 유지하였다.

1. 서 론

다양한 RF 방전 중에서, 유도적으로 결합된 플라즈마(ICP)는 안정적이고 재생 가능한 고밀도 플라즈마 소스이다.[1] 현재 ICP 소스는 조명, 반도체, 플라즈마 공정 산업 등 많은 분야에서 응용되고 있다. 조명 분야에서 ICP 방전을 응용한 것으로는 무전극 램프가 있다. 무전극 램프는 전자기 유도법칙에 의해 외부에서 내부가스를 방전시켜 발광하므로 램프 내부에 전극이 필요하지 않다. 고주파 전류가 외부 전극으로부터 방전 가스 중으로 자기장을 만들어 내고, 시간 변화에 따른 자기장이 전기장을 만들어 플라즈마를 생성하며 방전을 유지한다. 낮은 동작압력, 높은 플라즈마 밀도, 플라즈마를 생성하는 진공용기 내에 전극을 갖지 않으므로 플라즈마중으로 전극의 스퍼터링 현상이 작다. 강력한 자기장을 이용하지 않으므로 플라즈마 균일도와 플라즈마 면적을 증가시키는 것이 용이하다. 이러한 유도결합 특성을 이용한 무전극 램프는 장수명을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 고효율, 고연색성의 장점을 가지고 있다.[2] 이러한 추세에 맞추어 국내에서도 유도결합형 무전극 형광등 램프에 대한 기술개발의 필요성 및 중요성이 인식되어 무전극 형광램프의 가스, 형광체, 구조, 인버터 등에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다.

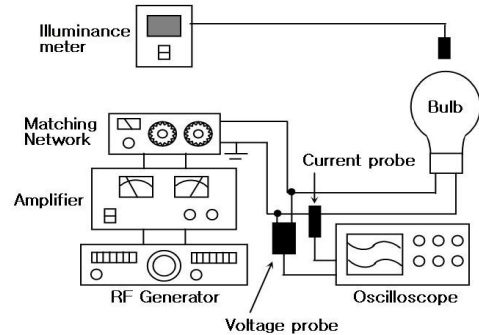
일반적인 ICP 방전은 2개의 잘 알려진 모드로 동작한다. 용량결합형 방전인 E 모드와, 유도결합형 방전인 H 모드이다.[3, 4] H 모드 방전에서는 전자밀도와 광 출력이 E 모드 방전보다 높기 때문에 2개의 모드는 쉽게 확인할 수 있다. E 모드에서 H 모드로의 변환이 일어나기 위해서는 문턱 입력 파워 또는 입력 전류가 존재하는데, 이것은 H to E 로의 역변환 될 때 보다 높은 전류에서 일어난다.[5, 6] 이러한 Hysteresis 현상과 모드변환을 설명하는 이론들이 많이 있지만, 그것들을 이해하기는 아직도 어려움에 있다.[7] 이 논문에서는 주파수와 전력을 변화시켜가며 무전극 램프에서 일어나는 Hysteresis 현상과 모드변환을 이해하기 위하여, 모드변환 할 때 전기적, 광학적 특성을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 실험방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 계략도는 <그림 1>에 나타내었다. 플라즈마의 발생은 RF Power에 연결된 안테나에 의해서 Bulb내부에서 발생하며 가스는 Ar : Kr = 75 : 25 의 비율로 0.3 Torr 주입하였다. 수은을 직접 사용하기보다는 아말감을 사용하여 수은의 양을 최소한으로 하였다. RF Power는 RF Generator와 Amplifier로 구성되고, Matching network는 2개의 가변 캐패시터로 구성된다. 전압 프로브와 전류 프로브를 사용하여 V_i 와 I_i 를 측정하고 오실로스코프로 기록한다. 휘도계(Cs-100)를 사용하여 발광하는 빛을 측정하였다.

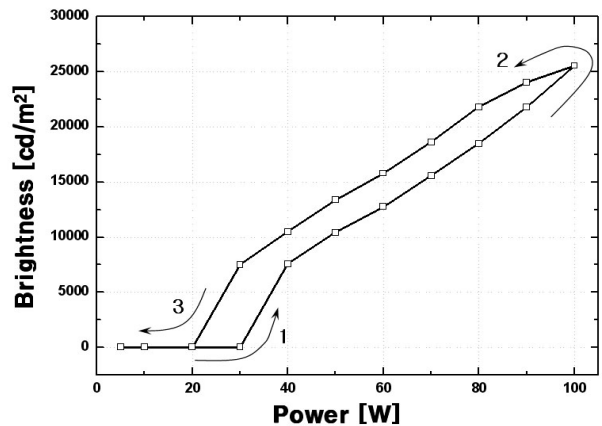
무전극 램프에서의 두 가지 모드변환을 이해하기 위하여 다음 실험 절차를 따른다. 전력을 0~100 W 까지 증가 시켰다가 다시 감소시키면서 전압, 전류를 측정하고 휘도를 측정하였다. 주파수는 2 MHz ~ 4 MHz



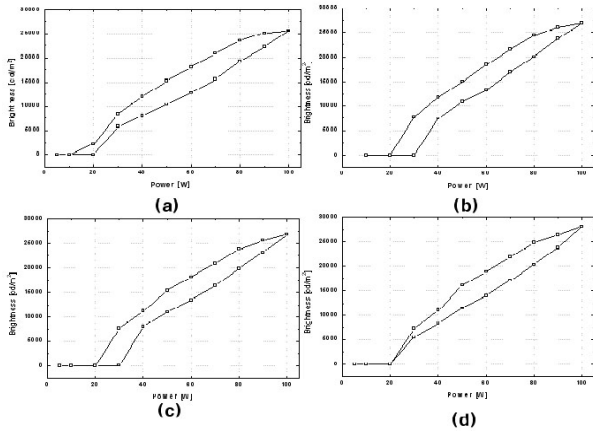
<그림 1> 실험장치의 계략도

2.2 실험결과

<그림 2>는 주파수에 따른 전력과 휘도의 상관 그래프를 나타낸 것으로 2 MHz의 경우 전력을 증가시키에 따라 초기 방전이 일어나지 않다가 10 W에서 E 모드의 방전이 시작이 되었다. E-모드의 경우 매우 낮은 휘도 값을 보였으며 전력이 증가함에 따라 30 W - 40 W에서 모드 변환이 일어남을 확인할 수 있었다. (상태 1.) H 모드로 변환 후 휘도값은 급격히 증가하였으며 전력 증가함에 따라 휘도가 선형적으로 증가하였다. Maximum 포인트를 지나서는 전력을 감소시키에 따라 휘도값도 감소를 하지만 초기 E 모드에서 H모드로 변환 될 때와 다른 특성을 보였다(상태 2.) 30 W에서 20 W로 넘어 갈 때 모드의 역변환 즉, H 모드에서 E 모드로 변환이 되었으며 (상태 3.) 5 W에서 플라즈마가 소멸되었다. 결과적으로 H모드의 시작과 유지에서뿐 아니라 E 모드의 시작과 유지시 Hysteresis 특성을 확인할 수 있었다.



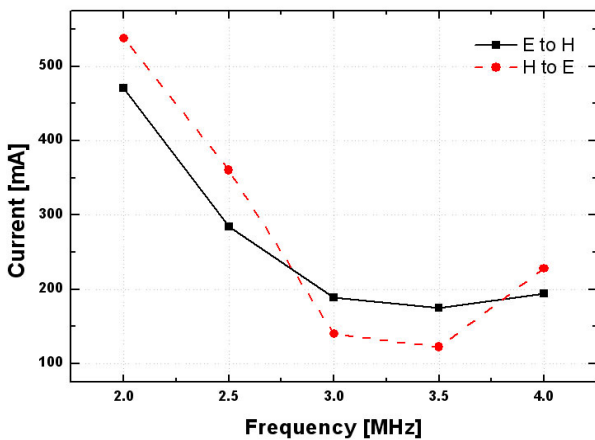
<그림 2> 2 MHz 에서의 전력 vs 휘도 그래프



〈그림 3〉 각 주파수에서의 Hysteresis (a) 2.5 MHz (b) 3 MHz (c) 3.5 MHz (d) 4 MHz

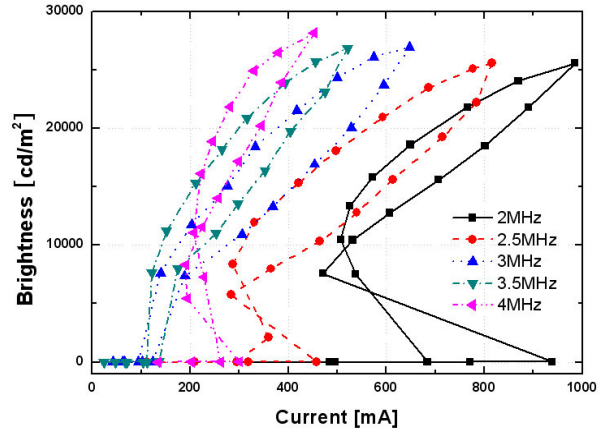
주파수에 따른 Hysteresis 특성은 <그림 3>과 같다. 마찬가지로 모든 주파수에서 H 모드의 시작과 최소 유지, E 모드의 시작과 최소유지에서 Hysteresis 특성을 보였다. 그러나 주파수가 높아질수록 E to H 그리고 H to E 로의 변환되는 구간의 변화 폭이 감소함을 볼 수 있었다.

주파수의 변화가 Hysteresis 특성에 어떠한 영향을 주었는지 알아보기 위하여 각각의 주파수에서 H 모드로 변화 할 때의 전류와 역변환 되는 E 모드로 변화 할 때의 전류를 살펴보았다. <그림 4>에서 보면 주파수가 올라갈수록 H 모드로 변환하는데 필요한 전류는 더 낮아지는 것을 관찰 할 수 있다. 마찬가지로 E 모드로 역변환 하는데 필요한 전류도 낮아짐을 확인할 수 있다. 그러나 3.5 MHz 이상에서는 전류가 다시 올라가는데, 이것은 무전극 램프의 동작 주파수가 증가함에 따른 내부 레지스턴스의 증가로 인해 플라즈마 생성시 더 높은 에너지가 요구되어 전류가 증가한 것으로 볼 수 있다.



〈그림 4〉 H모드 변환, 역변환 전류 vs 주파수

주파수에 의한 전류의 변화가 무전극 램프의 광학적 특성에 어떠한 영향을 주었는지 전류 변화에 따른 휘도 변화특성<그림 5> 을 살펴보았다. 그래프를 살펴보면 전류가 급격히 감소하는 부분과, 급격히 증가하는 부분을 볼 수가 있는데 그 부분에서 H 모드의 변환과 E 모드의 역변환이 일어난다. 주파수가 높아질수록 전류의 증가, 감소폭이 작아졌으며 주파수가 작을수록 처음 플라즈마를 발생시키기 위해서는 높은 전류가 필요하며 주파수가 높아질수록 적은 전류로 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 또한 E 모드에서는 전계에 의한 전자의 충돌로만 플라즈마를 발생시키기 때문에 높은 전류가 필요하지만, H 모드에서는 전계뿐만 아니라 자계에 의해서도 전자의 움직임들이 활발해져 낮은 전류로도 플라즈마를 발생시킬 수 있는 것이다.



〈그림 5〉 각 주파수에서의 전류 VS 휘도 그래프

3. 결 론

본 논문에서는 무전극 램프에서의 Hysteresis 특성과 모드 변환을 이해하기 위하여, 전력과 주파수에 따른 전기적, 광학적 특성을 살펴보았다. 각각의 주파수에 따른 모드 변환 시점을 통해 Hysteresis 특성을 확인하였으며 E 모드에서는 전계에 의한 전자의 충돌로만 플라즈마를 발생시키기 때문에 높은 전류가 필요하지만, H 모드에서는 전계뿐만 아니라 자계에 의해서도 전자의 움직임들이 활발해져 낮은 전류로도 플라즈마를 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다.

또한 주파수 증가로 인해 Hysteresis 곡선의 변화 폭이 감소하는 특성을 보였으며 3.5 MHz 이상에서는 전류 증가는 무전극 램프의 동작 주파수가 증가함에 따른 내부 레지스턴스의 증가로 인해 플라즈마 생성시 더 높은 에너지가 요구됨을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다.

이 논문은 에너지 관리 공단에서 시행한 "200W급 전구형 무전극 형광 램프의 가스방전/안테나 구조설계 기술" 사업의 지원을 받아 이루어진 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lieberman M.A. and Lichtenberg A.J. "Principles of Plasma Discharges and Material Processing", New York: Wiley, 1994
- [2] D.O. Wharmby, "Electrodeless lamps for lighting", IEE Proceedings A, Vol.140 Issue: 6, Nov, p465, 1993.
- [3] Ostrikov K, Tsakadze E, Ning J, Tsakadze Z, Long J D, Storer R and Xu S Y, "Dynamics of Mode Transitions in Inductively Coupled Plasmas", IEEE Trans. Plasma Sci. 30, p128-129, 2002
- [4] Razzak M A, Takamura S and Uesugi Y, "Dynamics of E-H Mode Transition in High Pressure RF Inductively Coupled Plasmas", IEEE Trans. Plasma Sci. 33 p284-285, 2005
- [5] Xu S, Ostrikov K N, Luo W and Lee S, "Hysteresis and mode transitions in a low frequency inductively coupled plasma", J. Vac. Sci. Technol. A 18, p2185-2197, 2000
- [6] Cunge G, Crowley B, Vender D and Turner M M, "Characterization of the E to H transition in a pulsed inductively coupled plasma discharge with internal coil geometry: bi-stability and hysreresis", Plasma Sources Sci. Technol. 8 p576-586, 1999
- [7] Razzak M A, Kondo K, Uesugi Y, Ohno N and Takamura S, "Transition from electrostatic-to-electromagnetic mode in a radio-frequency Ar inductively coupled plasma in atmospheric pressure", J. Appl. Phys. 95 p427-433, 2004