

**유도결합형 제논 플라즈마의 전자온도, 전자밀도 특성**

허인성, 최기승, 이종찬\*, 박대희  
원광대학교, 금호전기(주)\*

**Properties of Electron Temperature and Electron Density  
in Inductively Coupled Xenon Plasma**

In-Sung Her, Gi-Seung Choi, Jong Chan Lee\*, Dae-Hee Park  
Wonkwang Univ., Kumho Electric Inc.\*

**Abstract** - In this paper, parameters of electron temperature and density for the mercury-free lighting-source were measured to diagnosis and analyze in Xe based inductively coupled plasma(ICP). In results at several dependences of 20~100 mTorr Xenon pressure, 50~200W RF power and horizontal distribution were especially mentioned. When Xe pressure was 20 mTorr and RF power was 200 W, the electron temperature and density were respectively 3.58eV and  $3.56 \times 10^{12} cm^{-3}$ . The key parameters of Xe based ICP depended on Xe pressure more than RF power that could be verified. A high electron temperature and low electron density with a suitable Xe pressure are indispensable parameters for Xe based ICP lighting-source.

광원에서 사용되어질 제논의 유도결합형 플라즈마에 대한 광학적인 특성과 물리적인 변수를 확인하였다.

**2. 본 론**

**2.1 실험**

본 실험에서 사용된 유도결합형 플라즈마 발생장치의 개략도는 그림 1과 같다. 기본구성은 1) 13.56MHz의 고주파를 발생시키는 RF 전원과 플라즈마 및 부하 임피던스와의 매칭을 위한 매칭 회로, 유도코일, 2) RF전력에 의해 방전이 발생하는 진공챔버와 진공을 발생 및 유지시키는 진공 시스템, 3) 챔버에 유입되는 제논의 양을 조절하는 유량조절장치(Mass Flow Controller: MFC)로 이루어진다.

가시적으로 플라즈마를 관찰하기 위해 원통형 스테인레스 챔버에 연결된 파이렉스 방전관은 길이 130 mm, 외경 100 mm로 설계 및 제작하였다. 투명한 방전관의 외부에서 RF전력을 공급 받는 유도 코일은 RF전원과 플라즈마를 전자기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 외경이 1 mm인 테프론 전선을 20 mm간격으로 4회 나선형(Helical)으로 방전관 외부에 감아서 사용하였다. RF 전원에서 발생되는 13.56MHz의 고주파는 매칭회로를 통해 유도 코일의 한쪽 끝으로 보내어지고 다른 반대쪽은 접지되어 있다. 제논 가스는 순도 99.999%를 사용하였고, 진공도는 로터리 펌프를 사용하여  $1.0 \times 10^{-3}$  Torr까지 배기시킨 후 유지시켰다. 유량조절장치를 이용하여 일정량의 제논을 진공 챔버 안에 유입하였다. 13.56MHz RF 전력은 매칭 회로를 통해 반사전력이 0W가 되도록 조절하여 플라즈마를 발생시켰다.

일반적으로 플라즈마를 진단한다는 것은 플라즈마 내부의 전자와 이온 밀도, 온도, 전계, 자계 등을 측정해서 물리적인 현상이나 동작을 판단하는 것을 말한다. 진단의 변수는 플라즈마 밀도를 표시하는 전자 밀도  $N_e$ , 입자의 에너지 상태를 표시하는 에너지 분포함수  $f(\epsilon)$ , Maxwell 분포일 때 정의되는 전자 온도  $T_e$ , 이온 온도  $T_i$ , 플라즈마 공간 전위  $V_p$  등이 있다. 이중 전자의 온도와 밀도는 특정의 플라즈마 상태를 이해할 수 있게 하는 대표적인 변수라 할 수 있다. 제논의 유도결합형 방전 플라즈마를 Langmuir 단일 탐침법을 통해 주 에너지원인 전자/이온의 온도 및 밀도를 실험적으로 진단과 해석하였다.

플라즈마 내에서의 전자들이 가지는 에너지를 의미하는 전자 온도는 탐침 전압  $V_{p1}$ 과  $V_{p2}$ 를 및 이를 전압에 대한 탐침 전류  $I_{e1}$ 과  $I_{e2}$ 로서 다음과 같이 나타낸다

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{V_{p1} - V_{p2}}{\ln\left(\frac{I_{e1}}{I_{e2}}\right)} \quad (1)$$

즉, 전자 온도는 측정에서 얻은 전자전류  $I_e(V)$ 를 전압  $V$ 에 대해 대수눈금을 취하면 직선이 되고, 기울기로 유도된다. 전자 밀도는 공간전위  $V_s$  부근에서의 전류는

**1. 서 론**

유도결합형 플라즈마(Inductively Coupled Plasma : ICP)는 저압가스 방전에서 약  $10^{10} \sim 10^{12} cm^{-3}$  정도의 높은 플라즈마 밀도를 만들 수 있다. 특히 반응영역의 체적 내부에 금속 전극을 삽입하지 않고도 고 순도의 박막 증착, 표면 가공, 식각 등을 위한 플라즈마 발생이 용이하기 때문에 반도체 분야 및 기타 많은 산업에서 이용되고 있다[1].

광원 분야의 응용은 ICP의 장점을 활용하여 플라즈마 내부에 無전극형 가스 방전으로 수은 여기의 254 nm UV발생 및 형광체 발광원리를 갖는 무전극 형광 램프가 있다. 내부에 전극이 없기 때문에 기존 형광 램프들이 가지고 있는 문제점인 전극에 의한 산화·휘발로 전자방출 능력 상실, 점등 실패와 에너지 손실로 램프의 수명을 단축하는 단점이 보완 되었다. 또한 높은 효율, 연색성, 10,000 시간에 상당하는 장수명의 특성을 가지고 있다. 상용화된 대표적 무전극 형광램프는 Philips의 QL Lamp, Osram의 Endura 제품들이 있지만[2], 기존 형광램프와 같이 수은(Hg)을 사용하고 있기 때문에 환경문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 수은을 사용하지 않는 광원시스템에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. UV의 매체인 수은을 대체할 물질로 제논(Xe), 중수소(D<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 등이 있다. 이 가운데 제논은 수은과는 달리 친 환경적이고, 주위 온도에 의한 광 방출 특성에 영향을 주지 않으며 UV부터 가시광선까지 넓은 광 특성을 가지고 있다[3].

본 논문에서는 광원용 제논 플라즈마의 체계적 이해, 효율화 및 최적화를 도모하기 위해서 유도결합형 플라즈마원을 설계하였고 플라즈마의 기초 특성인 전자 온도와 밀도의 파라미터를 계측 하였다. 이러한 실험적 결과는 고성능 및 고효율 특성을 가진 광원 개발의 필수 요소이다. 플라즈마 상태를 이해하기 위해 Langmuir Probe를 이용한 정전 탐침법을 사용하여 플라즈마 변수인  $eV$ 의 전자 온도와  $10^{12} cm^{-3}$ 의 전자 밀도를 측정 및 계산하였다. 또한 탐침의 위치를 변화시켜 플라즈마의 축 방향 공간분포에 따른 특성을 수치화 하였다. 이를 통해

열확산 전자전류  $I_{eo}$ 이므로 전류의 기울기에서 구한 전자 온도와  $I_{eo}$ 를 다음 식에 대입하여 실용적 단위로 변환된다.

$$N_e = 3.73 \times 10^{11} \frac{I_{eo}}{S \cdot \sqrt{T_e}} \quad [cm^{-3}] \quad (2)$$

(S는 시스를 포함한 탐침의 표면적)

단일 Langmuir 탐침은 전기 전도도와 녹는점이 높은 직경 0.4mm $\phi$ 의 텅스텐을 사용하였다. 전자나 이온이 텅스텐과 상호 작용하는 것을 막기 위해 경화점이 1,400 [C] 이상인 SiO<sub>2</sub> - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계열의 유리를 이용하여 절연시켰다.

탐침은 챔버 후면에서 방전관 중심축으로 삽입하였고, 인가 전압은 Bipolar Power Supply(KIKUSUI)를 사용하여 -72~+72 V 까지 전압을 인가해 주었다. 전류 측정에는 Digital Multi Meter(KEITHLEY 933A)를 사용하여 측정 하였다. 탐침의 위치 변화에 따른 공간분포 특성은 방전관 중심으로부터 좌, 우 40 mm씩 이동 시키며 측정 하였다.

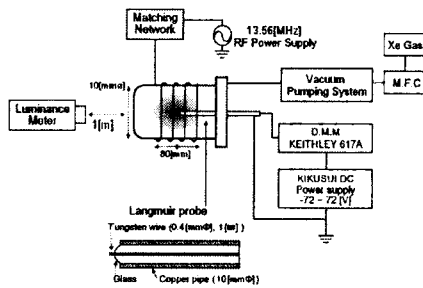


그림 1. 실험 장치 개략도

## 2.2 결과 및 고찰

그림 2은 제논을 이용한 유도결합형 플라즈마에서 가스압력에 따른 방전관 내부의 전류-전압 특성 곡선이다. 탐침된 전류는 이온 전류와 전자 전류로 분류할 수 있으며, 이온전류는 음의 부분인 수  $\mu A$ 인데 반해 전자 전류는 수십 mA 이므로 탐침 전류는 이온 전류를 무시하고 전자 전류로 대체할 수 있다.

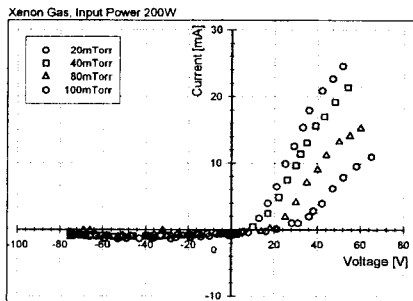


그림 2. 200W RF 전력에서 제논 압력 변화에 따른 전류-전압 곡선

전류-전압 특성 곡선에서 직선적으로 증가하는 기울기로부터 전자 온도  $T_e$ 를 구하였고 식(2)에 대입하여 전자 밀도  $N_e$ 를 구하였다. 제논의 압력이 증가할수록 전자 전류의 기울기가 감소하였고, 탐침된 전자의 포화 전류도 감소하였다. 이와 같은 결과는 제논의 압력이 증가하면 플라즈마 내부에 전자가 증가하여 음 전류가 급격히 증가하게 되고, 탐침에 음 전류가 유입되므로 전류-전압 특성 곡선의 기울기가 감소하는 결과를 보인다.

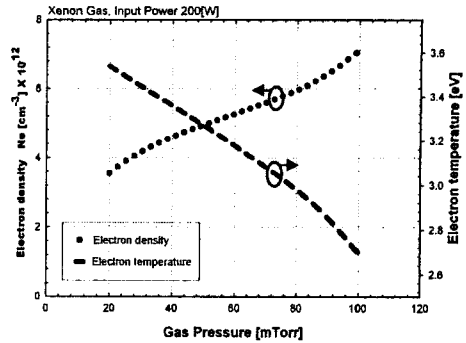


그림 3. 200W RF 전력에서 전자 온도 및 밀도의 제논 압력 의존성

제논 압력 변화에 따라서 그림 3과 같이 측정된 전류-전압 특성 곡선은 식(1)과 식(2)에 대입하여 그림 4와 같이 전자 온도 및 밀도가 유도되었다.

제논의 압력이 20mTorr로부터 증가할수록 전자 온도는 3.5~2.7eV로 약간 감소하였고, 전자 밀도는 3.5~7.3  $\times 10^{12} cm^{-3}$  로 증가하였다.

제논의 압력이 높아지면서 중성기체분자의 수와 충돌 빈도수의 증가로 전자 온도가 감소되었고, 짧아진 전자의 자유이동 경로와 더불어 전자 밀도는 상대적으로 증가하였다. 전기적 중성인 제논분자 질량( $2.18 \times 10^{-22} g$ )과 전자 질량( $9.11 \times 10^{-28} g$ ) 사이의 큰 차이로 전자는 전체에 의해 쉽게 가속된다. 중성분자는 제논압력에 의한 분자의 진동과 회전에 의해 탄성충돌이 증대되어 전리 및 여기 현상이 감소되며, 그 결과 상대적인 제논분자의 밀도가 커지므로 전자 온도가 감소되는 것으로 여겨진다. 또한 전자와 중성가스분자 간의 충돌 횟수가 줄어들어 전자의 이동도가 증가하고 손실이 많아지면, 플라즈마가 유지되기 위해서 전자의 생성률도 증가해야 하므로 전자 온도는 증가한다. 즉 방전시 유효체적내의 제논 압력 증가는 플라즈마 에너지의 매개변수인 전자온도를 상대적으로 감소시키는 결과를 나타냈다.

RF 전력은 50W씩 50~200W까지 변화시켰다. 그 결과 RF 전력의 증가로 탐침된 전류의 기울기가 선형적으로 증가 하였고, 탐침된 전자의 포화 전류도 증가하였다. 이는 RF 전력의 증가가 입자들의 충돌빈도의 증가에 기인했기 때문이다.

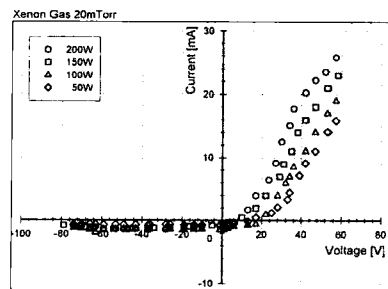


그림 4. 20mTorr 제논의 RF 전력 변화에 따른 전류-전압 곡선

그림 5는 제논의 압력이 20mTorr일 때 RF 전력 변화에 따라 탐침된 전류-전압 특성 곡선으로 전자 온도와 밀도를 계산하여 나타낸 것이다. RF 전력 증가에 따라 전자 온도는 3.3~3.5 eV로 증가하였고 전자 밀도는 2.4~3.7  $\times 10^{12} cm^{-3}$  증가하였다. 그림 3의 결과와 비교해볼 때 전자 온도와 밀도의 RF 전력 의존성은 상대적으로

완만하였다. 입력 전력의 증가는 플라즈마 생성 측면에서 볼 때 플라즈마 밀도 및 이온 전류 밀도의 증가를 가져오며 중성 기체의 해리율을 증가시켜 라디칼의 밀도를 증가시킨다. 또한 전자밀도의 증가는 전계가속에 의한 충돌이 많아지기 때문이라 여겨진다. 이는 RF 전력에 의해 공급되는 에너지의 대부분이 이온화에 사용되고 플라즈마의 매개변수인 전자 온도에 대한 영향력이 둔감함으로 사료된다. 따라서 제논의 유도결합형 플라즈마 매개변수 제어는 RF 전력 보다 제논 압력에 대해 큰 영향력이 있음을 확인할 수 있다.

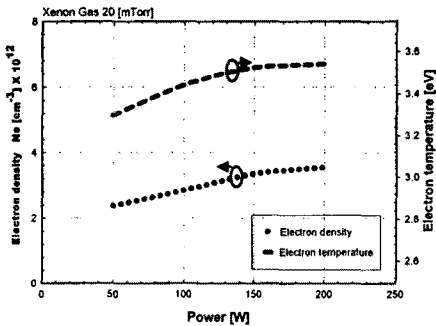


그림 5. 20mTorr 제논의 전자 온도 및 밀도에 대한 RF 전력 의존성

제논 20mTorr, RF 전력 200W 조건에서 전자 온도와 밀도에 대한 중심 축 방향의 공간적 분포를 그림 6과 같이 분석하였다. 전류-전압의 측정은 탐침의 위치를 챔버 중심으로부터 코일이 감겨진 좌, 우 40 mm씩 축 방향으로 변화 시키며 중심 축 상에서 측정하였다. 중심축에서 플라즈마 외부로 갈수록 플라즈마의 밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 전자기유도법칙에 의해 원통형 방전관의 중심에서 전자계의 세기가 강하고, 주변부로 갈수록 전자계의 세기가 약해짐에 따라서 형성된 공간분포 특성 때문으로 사료된다.

분석 결과 중심을 기준으로 전자 온도와 전자 밀도가 좌우 대칭의 분포와 유사하였고, 중심부에서(0mm) 전자 온도 3.58eV, 전자 밀도  $3.56 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$  를 나타냈다. 하지만 전자온도와 밀도의 변화는 그림 3의 제논 압력 변화(전자온도 2.7~3.5eV, 전자밀도  $3.5 \sim 7.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ )와 비교하였을 때 공간적 분포(전자온도 3.27~3.58eV, 전자밀도  $3.56 \sim 4.4 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ )는 변화율이 상대적으로 작았다. 이러한 결과는 RF 전력 의존성과 결부 지었을 때 제논 압력의 의존성이 지배적임을 나타낸다.

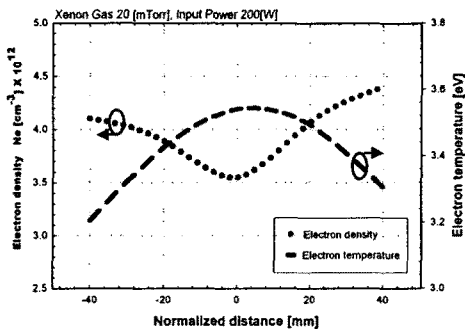


그림 6. 20mTorr 제논, 200W RF전력의 방전관 축 방향 탐침 위치 변화에 따른 전자 온도 및 밀도

### 3. 결 론

본 논문에서는 수온을 사용하지 않는 광원용 제논 플라즈마의 체계적 이해, 효율화 및 최적화를 도모하기 위해서 유도결합형 플라즈마원을 설계하였다. 고성능 및 고효율 특성을 가진 신광원 개발의 기초 자료이며 방전 플라즈마 진단 및 해석에 있어 필수 요소인 전자 온도와 밀도의 파라미터를 계측 하였다. 방전관 내부에 20~100 mTorr의 제논 압력 변화, 50~200W의 RF 전력 변화, 중심 축 방향의 공간적 분포 특성을 측정 하였다.

1) RF 전력 200W, 제논 압력 20~100 mTorr까지 변화시키며 탐침한 결과, 전자 온도는 3.5~2.7eV로 약간 감소하였고, 전자 밀도는  $3.5 \sim 7.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 로 증가하였다. 제논의 압력이 높아지면서 중성기체분자의 수와 충돌빈도수의 증가로 전자 온도가 감소되었고, 전자 밀도는 상대적으로 증가하였다. 유도체적내의 제논 압력 증가는 플라즈마 에너지의 매개변수인 전자온도를 상대적으로 감소시키는 결과를 나타냈다.

2) RF 전력 변화는 압력 의존성에 비해 상대적으로 둔감하였다. 제논 20mTorr, RF 전력 변화를 50~200W로 변화 시키며 플라즈마의 진단 결과, 전자 온도는 3.3~3.5eV, 전자 밀도는  $2.4 \sim 3.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 로 변화하였고, 따라서 제논의 유도결합형 플라즈마 매개변수 제어는 RF 전력 보다 제논 압력에 대해 큰 영향력이 있음을 확인할 수 있다.

3) 전자 온도와 밀도의 중심 축 방향의 분포는 전자기유도법칙에 의해 원통형 방전관의 중심에서 전자계의 세기가 강하고, 주변부로 갈수록 전자계의 세기가 약해짐에 따라서 형성된 공간분포 특성 때문으로 사료된다. 제논 20mTorr, RF 전력 200W의 방전관 중심부에서(0mm) 최대 전자온도 3.58eV, 최소 전자 밀도  $3.56 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 를 나타냈다. 전자 온도와 밀도의 공간적 분포 변화율은 제논 압력 변화 특성과 비교하였을 때 상대적으로 작았다. 이러한 결과는 RF 전력 의존성과 결부 지었을 때 제논 압력의 의존성이 지배적임을 나타낸다.

본 실험에서 제논을 사용한 유도결합형 플라즈마 광원의 효율화를 위한 매개변수로 가장 높은 휘도를 나타낸 제논 압력 20mTorr, RF 전력 200W의 방전관 중심부에서 전자온도 3.58eV, 전자 밀도  $3.56 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 를 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

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

### [참 고 문 헌]

- [1] Czerwiec, T, Graves, D B, "Mode transitions in low pressure rare gas cylindrical ICP discharge studied by optical emission spectroscopy", Journal of physics D, applied physics, Vol.37, No.20, p.2827-2840, 2004
- [2] Wharmby, D.O., "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A , Vol.140, Issue 6, p. 465-473, Nov. 1993
- [3] Depond, J.M, "High voltage, mercury-free fluorescent lamps with cold cathodes: state of art and future developments" Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , Vol.5, p.3322-3325, 8-12 Oct. 2000