

Inductively Coupled Plasma 광원 시스템의 Ne:Xe 혼합가스의 전자온도 및 전자밀도 특성

최 용성¹, 구 할본², 이 진³, 임 종열⁴, 이 경섭¹
동신대학교¹, 전남대학교², 목포대학교³, 남부대학교⁴

Electronic Temperature and Density of Mixed Gases in Inductively Coupled Plasma Lighting System (Ne:Xe)

Yong-Sung Choi¹, Hal-Bon Gu², Jin Lee³, Jong-Yeol Lim⁴, Kyung-Sup Lee¹
Dongshin University¹, Chonnam National University², Mokpo National University³, Nambu University⁴

Abstract : In whole world consciousness of environment maintenance have increased very quickly for the end of the 20th century. To use and disuse toxic substances have been controled at the field of industry. Also the field of lighting source belong to environmental control. And in the future the control will be strong. In radiational mechanism of fluorescence lamp mercury is the worst environmental problem. In radiational mechanism of fluorescence lamp mercury is the worst environmental problem root. In the mercury free lighting source system the Xe gas lamp is one type. And the Ne:Xe mixing gas lamp improvements firing voltage of Xe gas lamp. Purpose and subject of this study are understand, efficiency, ideal of Ne:Xe plasma which mercury free lamp. Before ICP was designed, basic parameters of plasma, which are electron temperature and electron density, were measured and calculated by langmuir probe data. Property of electron temperature and electron density were confirmed by changing ratio of Ne:Xe.

Key Words : Toxic substance, Lighting source, Fluorescence lamp, Mercury, Ne:Xe mixed gas

1. 서 론

광원 분야는 ICP의 장점을 활용하여 플라즈마 내부에 無전극형 가스 방전으로 수은 여기의 254 nm UV발생 및 형광체 발광원리를 갖는 무전극 형광 램프가 있다. ICP를 이용한 램프는 내부에 전극이 없기 때문에 기존 형광 램프들이 가지고 있는 문제점인 전극에 의한 산화·취발로 전자방출 능력 상실, 정등 실패와 에너지 손실로 램프의 수명을 단축하는 단점을 보완 하였다. 또한 높은 효율, 연색성, 10,000 시간에 상당하는 장수명의 특징을 가지고 있다. 상용화된 대표적 무전극 형광램프는 Philips의 QL Lamp, Osram의 Endura 제품들이 있지만[1], 기존 형광 램프와 같이 수은(Hg)을 사용하고 있기 때문에 환경문제를 야기 시킬 수 있다. 따라서 수은을 사용하지 않는 광원시스템에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. UV의 매체인 수은을 대체할 물질로 제논(Xe), 중수소(D₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 등이 있다. 이 가운데 제논은 수은과는 달리 친 환경적이고, 주위 온도에 의한 광 방출 특성에 영향을 주지 않으며 UV부터 가시광선 까지 넓은 광 특성을 가지고 있다[2].

본 논문에서는 광원용 Ne:Xe 플라즈마의 체계적 이해,

효율화 및 최적화를 도모하기 위해서 유도결합형 플라즈마원을 설계하였고 플라즈마의 기초 특성인 전자 온도와 밀도의 파라미터를 계속 하였다. 이러한 실험적 결과는 고성능 및 고효율 특성을 가진 광원 개발의 필수 요소이다. 플라즈마 상태를 이해하기 위한 방법으로 Langmuir Probe를 이용한 정전 탐침법을 사용하여 플라즈마 변수인 수 eV의 전자 온도와 $\sim 10^{12}cm^{-3}$ 의 전자 밀도를 측정 및 계산하였다. 또한 방전 Plasma의 휘도를 측정하여 이를 통해 광원에서 사용되어질 제논의 유도결합형 플라즈마에 대한 광학적인 특성과 물리적인 변수를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

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 유지

시키는 진공 시스템, 3) 챔버에 유입되는 제논의 양을 조절하는 유량조절장치(Mass Flow Controller: MFC)로 이루어진다.

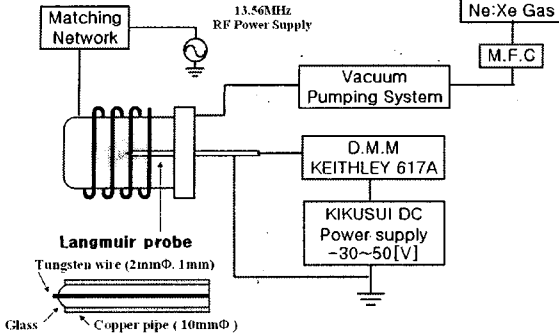


그림 1. 실험장치의 계략도
Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Equipments

2.2 실험방법

가시적으로 플라즈마를 관찰하기 위해 원통형 스테인레스 챔버에 연결된 파이렉스 방전관은 길이 130 mm, 외경 100 mm로 설계 및 제작하였다. 투명한 방전관의 외부에서 13.56MHz RF 전력을 공급 받는 유도 코일은 RF 전원과 플라즈마를 전기기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 외경이 12 mmΦ인 구리관을 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.

사용된 가스는 네온(순도 99.999%)과 제논(순도 99.999%)을 사용하였고, 네온과 제논의 비를 90:10[%], 80:20[%], 70:30[%], 60:40[%], 50:50[%]로 하고 혼합 가스의 양은 50Torr를 주입 하였다. 주입방법은 로터리 펌프를 사용하여 1.0×10^{-3} Torr까지 배기시킨 후 유지시킨 후, 유량조절장치(M.F.C)를 이용하여 일정한 Ne와Xe를 진공 챔버 안에 주입하였다.

13.56MHz RF 200W를 매칭 회로를 통해 반사전력이 0 W가 되도록 조정하여 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 $f(\xi)$, 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 하

는 대표적인 변수라 할 수 있다[3][4]. 제논의 유도결합형 방전 플라즈마는 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 이들 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 대수논증을 취하면 직선이 되고, 기울기로 유도된다. 전자 밀도는 공간전위 V_s 부근에서의 전류를 열확산 전자전류 I_{eo} 이므로 전류의 기울기에서 구한 전자 온도와 I_{eo} 를 다음 식에 대입하여 실용적 단위로 변환된다[5].

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

(S는 시스를 포함한 탐침의 표면적)

단일 Langmuir 탐침은 전기 전도도와 녹는점이 높은 직경 2 mmΦ의 텅스텐을 사용하였다. 전자나 이온이 텅스텐과 상호 작용하는 것을 막기 위해 경화점이 1,400 [°C] 이상인 SiO₂ - B₂O₃계열의 유리를 이용하여 절연시켰다.

탐침은 챔버 후면에서 방전관 중심축으로 삽입하였고, 인가 전압은 Bipolar Power Supply(KIKUSUI)를 사용하여 -30~+50 V 까지 전압을 인가해 주었다. 전류 측정에는 Digital Multi Meter(KEITHLEY 193A)를 사용하여 측정 하였다.

3. 결과 및 고찰

13.56MHz RF 전력은 200W로 고정하고, 네온과 제논의 압력을 45:5~25:25[Torr] 까지 변화시켜 단일 Langmuir 프로브를 이용하여 탐침 하였다. 프로브의 전압은 -30~50[V]으로 1V씩 변화 시키면서 전류값을 측정하여 그 값을 그림 2에 나타내었다. Xe의 압력이 증가할수록 전류의 기울기가 증가하였고, 탐침된 전자의 포화 전류도 8.512~18.177[mA]로 증가하였다. 이와 같은 결과는 제논의 압력이 증가하면서 페닝 효과가 줄어들고 이로 인하여 Xe 플라즈마의 성질이 강해졌기 때문으로 사료된다. 또한 이때 Xe 플라즈마는 Xe의 전자와 분자에 의한 플라즈마이다. 45:5[Torr]의 경우 페닝 효과가 활발하여 효율 좋은 발광이 발생 하였다[6-8].

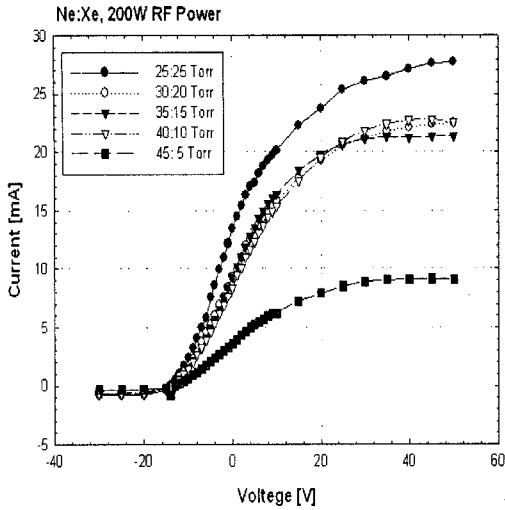


그림 2. 200W RF 전력에서 Ne:Xe 압력에 따른 I-V 곡선
Fig. 2 Current-Voltage curve dependence of Ne:Xe pressure at 200W RF power

그림 3은 그림 2의 전류축을 log값을 취하여 semi-log 그래프로 표현 하였다. 이처럼 semi-log 그래프로 변환시키면 쉽게 곡선의 기울기 T_e 와 포화 전류값 i_{eo} 을 구할 수 있다[5]. 식 (1)에 의해 구해진 전자온도 T_e 를 이용하여 식 (2)에 대입에 의해 전자밀도 N_e 를 얻어 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

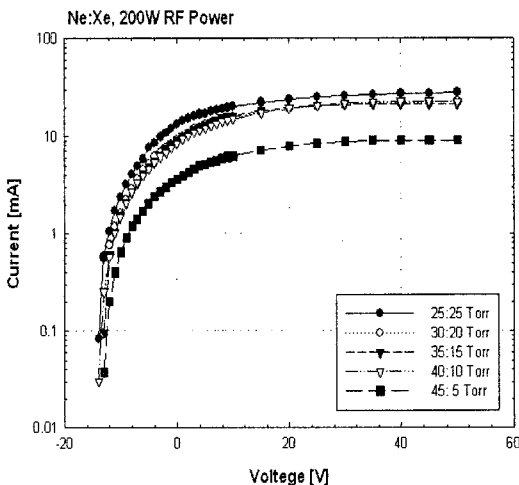


그림 3. 200W RF 전력에서 Ne:Xe 압력에 따른 I-V 곡선 (semi-log graph)
Fig. 3 Current-Voltage curve dependence of Ne:Xe pressure at 200W RF power (semi-log graph)

Xe의 비율이 증가할수록 전자온도 T_e 는 3.663[eV]~2.107[eV]로 감소하였고, 전자밀도 N_e 는 $1.76 \times 10^{11} [cm^{-3}] \sim 4.757 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 로 증가하였다. Xe의 비율이 높아질수록 Xe의 전자와 분자에 의한 플라즈마 작용이 우세하고, 따라서 Xe원자의 큰 부피로 인해 분자들의 충돌로 손실이 생겨 전자온도 T_e 가 낮아짐으로 유추된다 [6]. 또한 Xe의 양이 10%인 45:5[Torr]에서는 특히 높은 전자온도 T_e 3.663[eV]를 보이는데 이는 Ne과의 페닝 효과가 원활하여 효과적인 플라즈마가 형성되었음을 예상할 수 있었다. 이때의 전자밀도는 $1.76 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 로 안정된 플라즈마가 형성됨을 확인할 수 있었다

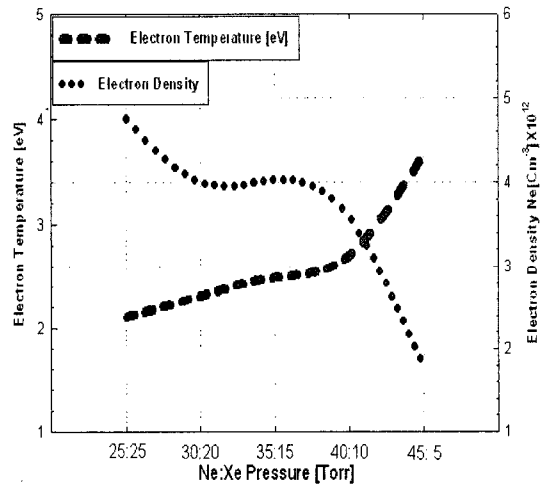


그림 4 200W RF 전력에서 전자 온도 및 밀도의 Ne:Xe 압력 의존성
Fig. 4 Electron temperature and density dependence of Ne:Xe Pressure at 200W RF Power

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 $2.4 \sim 3.7 \times 10^{12} cm^{-3}$ 로 증가하였다. 그림 5의 결과와 비교해 볼 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.

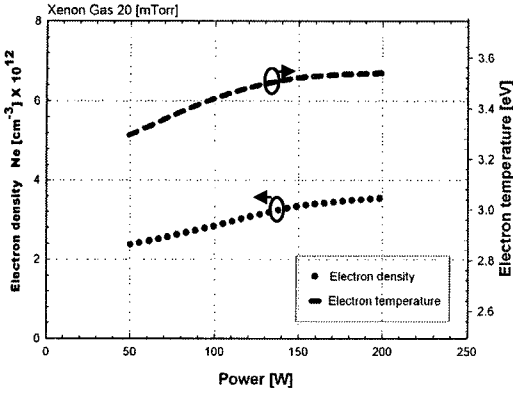


그림 5. 20mTorr 제논의 전자 온도 및 밀도에 대한 RF 전력 의존성
Fig. 5. Electron Temperature and Density Dependence of RF Power at Xe 20mTorr

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 시켜가며 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 때문에 사료된다.

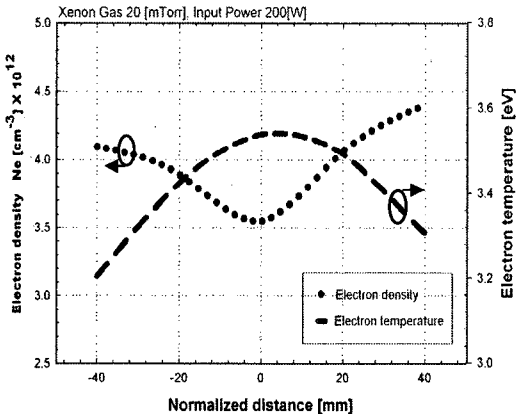


그림 6. 20mTorr 제논, 200W RF전력의 방전관 축 방향 탐침 위치 변화에 따른 전자 온도 및 밀도
Fig. 6. Electron Temperature and Density of Normalized distance at Xe 20mTorr and 200W RF Power

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 나타내었다. 그러나, 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.

4. 결론

본 논문에서는 수은을 사용하지 않는 광원용 제논플라즈마의 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 전자온도와 밀도의 파라미터를 계측하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 방전관 내부에 Ne:Xe 혼합가스를 45:5~25:25[Torr]의 비율로 주입하고, 13.56MHz 200W RF Power로 플라즈마를 발생시켜 Langmuir 정전탐침법을 이용하여 플라즈마의 전자온도와 밀도 특성을 확인하였다.
2. Ne:Xe 혼합가스의 Xe의 비율이 높아 질수록 페닝 효과가 감소하고 Xe의 방전 성질이 강해져 전자온도 T_e 는 3.663[eV]~2.107[eV]로 감소하였고, 전자밀도 N_e 는 $1.76 \times 10^{11} [\text{cm}^{-3}] \sim 4.757 \times 10^{11} [\text{cm}^{-3}]$ 로 증가하였다.
3. Ne:Xe 혼합가스의 비율이 45:5[Torr]일 때 플라즈마의 안정성이 높았으며, 이때의 전자온도 T_e 는 3.663[eV], 전자밀도는 $1.76 \times 10^{11} [\text{cm}^{-3}]$ 로 광원용으로 사용하기 위한 낮은 전자온도, 높은 전자밀도의 조건을 만족 하는 것으로 확인되었다.
4. 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 나타내었다. 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.

그러나, 본 논문에서는 Xe의 비율이 10% 미만의 경우의 실험 결과는 배제 돼있는 결과로 이부분의 연구가 요망된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 전력산업 기초인력 양성사업 (I-2006-0-092-01)에 의해 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Hong Loo, " Dynamic Collisional-Radiative Model of A Low-Pressure Mercury-Argon Discharge Lamp", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 4, JULY 2004.
- [4] R. H Duddleston and S. L. Leonard, "Plasma Diagnostic Techniques", Academic Press, New York, (1965).
- [5] O. Auciello and D. L. Flamm, "Plasma Diagnostic"Vol 1. Discharge Parameters and Chemistry, Academic Press, San Diego, (1989).
- [6] J.H. Seo, Seoul national university Ph.D paper, 2000
- [7] Lai, C., Breun, R. A, Sandstrom, P. W., Wendt, A. E., "Langmuir probe measurements of electron temperature and density scaling in multidipole radio frequency plasmas", Journal of vacuum science & technology. an official journal of the American Vacuum Society. A, Vacuum, surfaces, and films, Vol.11, No.4, p.1199, 1993.
- [8] Demidov, V I, DeJoseph Jr, C A, Kudryavtsev, A A "Ionization kinetics and E-H mode transition in a noble gas, low-pressure pulsed ICP discharge", Plasma sources science & technology, Vol.13, No.4, p.600-603, 2004.