

# ICP 광원 시스템의 Ne:Xe 및 Ne:Ar 혼합가스의 전자온도 및 전자밀도 특성

|         |
|---------|
| 論 文     |
| 55C-3-9 |

## The Electron Temperature and Density Properties of Mixed Gases in ICP Lighting System : (Ne:Xe, Ne:Ar)

崔起承<sup>†</sup> · 李鐘燦<sup>\*</sup> · 崔龍成<sup>\*\*</sup> · 朴大熙<sup>\*\*\*</sup>  
(Gi-Seung Choi · Jong-Chan Lee · Yong-Sung Choi · Dae-Hee Park)

**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 and root. In the mercury free lighting source system the Xe gas lamp is one type. And the Ne:Xe and Ne:Ar mixed gas lamp improve firing voltage of Xe gas lamp. Purpose of this study is to understand ideal mixing-ratio of Ne:Xe and Ne:Ar gas by electron temperature and electron density for mercury free lamp. Before ICP was designed, basic parameters of plasma, which are electron temperature and electron density, were measured and calculated by single-Langmuir probe. Property of electron temperature and electron density were confirmed by changing ratio of Ne:Xe and Ne:Ar.

**Key Words** : Inductively Coupled Plasma (ICP), Ne:Xe, Ne:Ar, Electron Temperature, Electron Density, Lighting Source

### 1. 서 론

무전극 램프 기술이 발전함에 따라 형광램프의 문제점인 전극의 산화·휘발로 인한 전자방출 능력상실, 점등 실패와 에너지 손실, 램프 수명단축 등이 해결되었다. 또한 이들은 높은 효율, 연색성, 10,000 시간에 상당하는 장수명의 특징을 가지고 있다. 상용화된 대표적 무전극 형광램프는 Philips의 QL Lamp, Osram의 Endura 제품들이 있지만[1], 기존 형광램프와 같이 수은(Hg)을 사용하고 있기 때문에 환경문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 수은을 사용하지 않는 광원시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

UV의 매체인 수은을 대체할 물질로 제논(Xe), 중수소(D<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 등이 있다. 이 가운데 제논 수은과는 달리 친환경적이고, 주위 온도에 의한 광방출 특성에 영향을 주지 않으며 UV부터 가시광선까지 넓은 광 특성을 가지고 있다[2]. 제논가스의 방전은 수은가스나 기타 다른 불활성 가스에 비해 초기 방전전압이 높은 문제점을 가지고 있다. 이러한 단점을 혼합가스를 사용하고, 페닝(Penning) 효과의 원리를 이용하여 보완할 수 있다. 따라서 보다 효과적인 혼합가스의 종류와 혼합가스의 혼합비의 연구가 필요로 하고 있다.

본 논문에서는 광원용 Ne:Xe 플라즈마와 Ne:Ar 플라즈마의 체계적 이해, 효율화 및 최적화를 도모하기 위해서 유도결합형 플라즈마원을 설계하였고 플라즈마의 기초 특성인 전자온도와 밀도의 파라미터를 계측하였다. 계측된 결과값으로 플라즈마의 상태를 해석할 수 있었고 각 플라즈마의 적정 혼합비를 찾을 수 있었다. 또한 Ne:Xe 플라즈마와 Ne:Ar 플라즈마의 특성을 비교함으로써 페닝(Penning)효과에 의한 플라즈마 파라미터의 변화 특성을 분석할 수 있었다.

### 2. 실험 방법

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

가시적으로 플라즈마를 관찰하기 위해 원통형 스테인레스 챔버에 연결된 파이렉스(Pyrex) 방전관은 길이 130 mm, 외경 100 mm로 설계 및 제작하였다. 투명한 방전관의 외부에서 13.56MHz의 RF전력을 공급받는 유도 코일은 RF전원과 플라즈마를 전자기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 외경이 12 mm인 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.

<sup>†</sup> 교신저자, 學生會員 : 圓光大 電子材料工學科 碩士課程  
E-mail : kitong21@wonkwang.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 금호전기(주) 부설연구소 선임연구원 · 工博

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 東新大學校 教授 · 工博

<sup>\*\*\*</sup> 終身會員 : 圓光大學校 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 9月 27日

最終完了 : 2005年 12月 29日

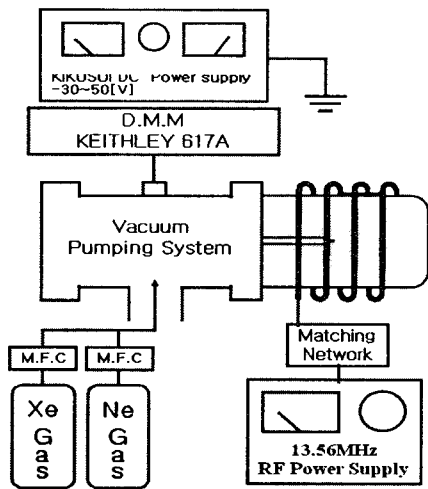


그림 1. 실험장치의 계략도  
Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Equipments

사용된 가스는 네온 (순도 99.999%), 제논 (순도 99.999%), 아르곤 (순도 99.999%)을 사용하였고, 첫 번째 실험에서는 Ne과 Xe을 90:10[%], 80:20[%], 70:30[%], 60:40[%], 50:50[%]의 비율로 하였고 혼합 가스의 양은 50Torr를 주입하였다. 주입방법은 로터리 펌프를 사용하여  $1.0 \times 10^{-3}$  Torr까지 배기시켜 압력을 유지시킨 후, 유량조절장치 (M.F.C)를 이용하여 일정량의 Ne와 Xe을 진공 챔버 안에 주입하였다.

13.56MHz RF 전력 200W를 매칭 회로를 통해 반사전력이 0W가 되도록 조정하여 플라즈마를 발생시켰다. 두 번째 실험에서는 같은 방법으로 Ne과 Ar을 주입하여 실험하였다.

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 하는 대표적인 변수라 할 수 있다[3, 4]. 제논의 유도결합형 방전 플라즈마를 Langmuir 단일 탐침법을 통해 주 에너지원인 전자/이온의 온도 및 밀도를 실험적으로 진단과 해석을 하였다.

플라즈마 내에서의 전자들이 가지는 에너지를 의미하는 전자 온도는 탐침 전압  $V_{p1}$ 과  $V_{p2}$  및 이들 전압에 대한 탐침 전류  $I_{e1}$ 과  $I_{e2}$ 로서 식 (1)과 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 전류를 열확산 전자전류  $I_{ie0}$ 이므로 전류의 기울기에서 구한 전자온도와  $I_{ie0}$ 를 식 (2)에 대입하여 실용적 단위로 변환

된다[5].

$$N_e = 3.73 \times 10^{11} \frac{I_{ie0}}{S \cdot \sqrt{T_e}} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (2)$$

(S는 시스(Sheath)를 포함한 탐침의 표면적)

단일 Langmuir 탐침은 전기 전도도와 녹는점이 높은 직경 2 mm의 텅스텐을 사용하였다. 전자나 이온이 텅스텐과 상호 작용하는 것을 막기 위해 경화점이 1,400 [°C] 이상인  $\text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$  계열의 유리를 이용하여 절연시켰다.

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

### 3. 결과 및 고찰

13.56MHz RF 전력은 200W로 고정하고, Ne:Xe, Ne:Ar의 압력을 45:5~25:25[Torr]까지 변화시켜 단일 Langmuir 프로브를 이용하여 탐침하였다. 프로브의 전압은 -30~50[V]으로 1V씩 변화시키면서 전류값을 측정하여 그 값을 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

Ne:Xe 혼합가스에서는 그림 2와 같이 Xe의 압력이 증가할수록 전류의 기울기가 증가하였고, 탐침된 전자의 포화 전류도 8.512~18.177[mA]로 증가하였다. 이와 같은 결과는 제논의 압력이 증가하면서 페닝(Penning) 효과는 줄어들고 Xe 방전 성질이 강해졌기 때문으로 사료된다. 또한 이때 Xe 플라즈마는 Xe의 전자와 분자에 의한 플라즈마이다. 45:5[Torr]의 경우 페닝(Penning) 효과가 활발하여 효율 좋은 발광이 발생하였다.

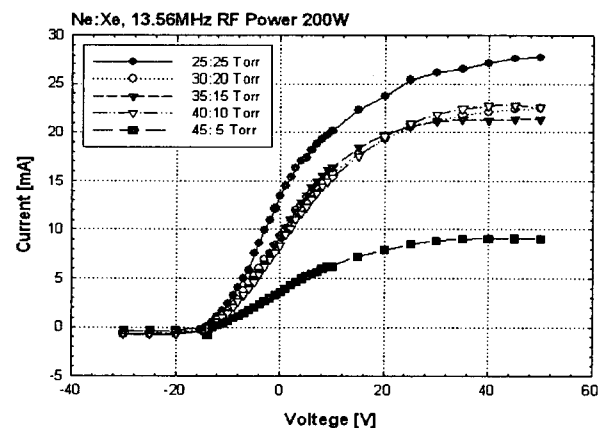


그림 2. 13.56MHz 200W RF 전력에서 Ne:Xe 압력에 따른 I-V 곡선

Fig. 2 Current-Voltage characteristics of Ne:Xe pressure at 13.56MHz RF power 200W

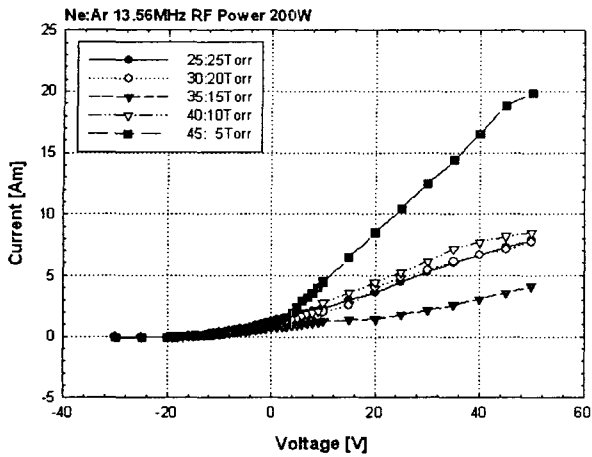


그림 3. 13.56MHz 200W RF 전력에서 Ne:Ar 압력에 따른 I-V 곡선  
 Fig. 3 Current-Voltage characteristics of Ne:Ar pressure at 13.56MHz RF power 200W

Ne:Ar 혼합가스에서는 그림 3과 같이 Ne:Ar의 비가 45:5[Torr]일 때 전류의 기울기가 가장 크고 35:15 Torr일 때 기울기가 낮았으며, 포화전류는 6.423~4.124[mA]의 변화를 보였다. 이는 35:15[Torr]의 혼합비에서 페닝(Penning) 효과가 가장 활발하였고, 45:5 Torr의 혼합비에서는 네온 플라즈마의 성향이 강하였기 때문으로 생각된다.

그림 4와 그림 5는 그림 2와 그림 3의 전류축을 semi-log 그래프로 나타낸 결과이다. 이와 같이 semi-log 그래프로 변환시키면 쉽게 곡선의 기울기  $T_e$ 와 포화 전류값  $I_{eo}$ 를 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 6과 그림 7에 나타내었다.

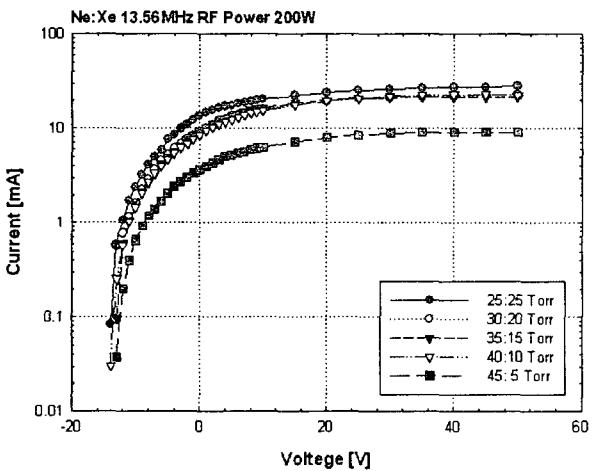


그림 4. 13.56MHz 200W RF 전력에서 Ne:Xe 압력에 따른 I-V 곡선 (semi-log)  
 Fig. 4 Current-Voltage characteristics of Ne:Xe pressure at 13.56MHz RF power 200W (semi-log)

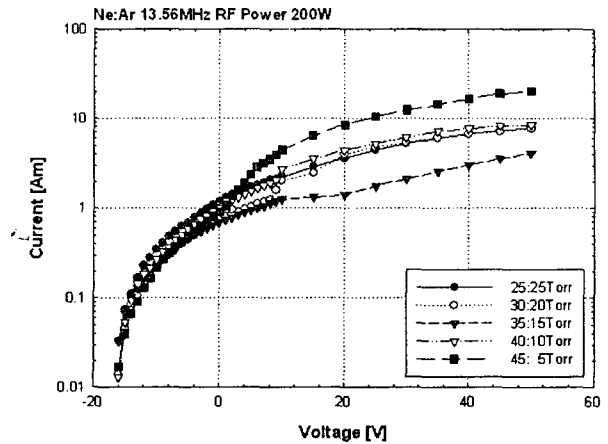


그림 5. 13.56MHz 200W RF 전력에서 Ne:Ar 압력에 따른 I-V 곡선 (semi-log)  
 Fig. 5 Current-Voltage characteristics of Ne:Ar pressure at 13.56MHz RF power 200W (semi-log)

Ne:Xe 혼합가스에서는 그림 6과 같이 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 Xe 원자의 큰 충돌단면적으로 인해 분자들의 충돌로 손실이 생겨 전자온도  $T_e$ 가 낮아지는 것으로 유추되며 이것은 기존의 연구결과 [6]과 유사하다. 또한 Xe의 양이 10%인 45:5[Torr]에서는 특히 높은 전자온도  $T_e$  3.663[eV]를 보이는데 이는 Ne과의 페닝(Penning) 효과가 원활하여 효과적인 플라즈마가 형성되었음을 예상할 수 있었다. 이때의 전자밀도는  $1.76 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 로 안정된 플라즈마가 형성됨을 육안으로도 확인할 수 있었다.

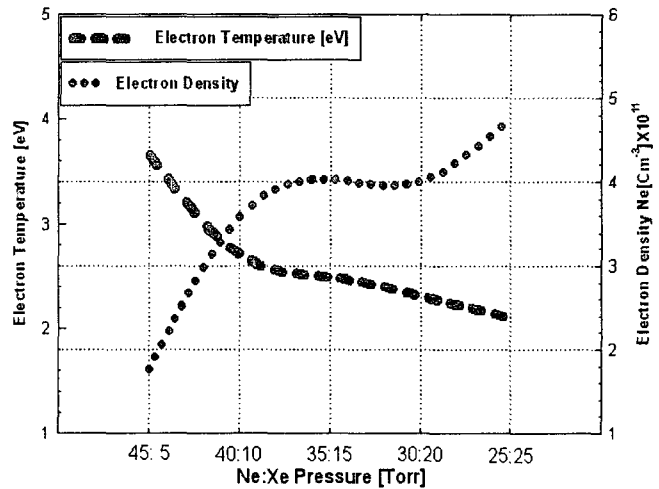


그림 6. 13.56MHz 200W RF 전력에서 전자 온도 및 밀도의 Ne:Xe 압력 의존성  
 Fig. 6 Electron temperature and density dependence of Ne:Xe Pressure at 13.56MHz 200W RF Power

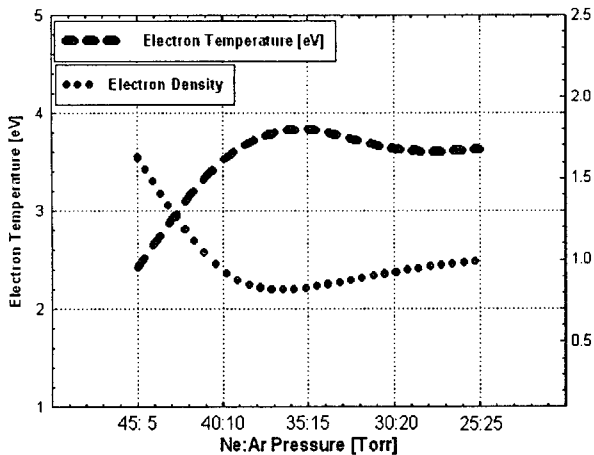


그림 7. 13.56MHz 200W RF 전력에서 전자 온도 및 밀도의 Ne:Ar 압력 의존성

Fig. 7 Electron temperature and density dependence of Ne:Ar Pressure at 13.56MHz 200W RF Power

Ne:Ar 혼합가스에서는 그림 7과 같이 Ar의 비율이 증가할수록 전자온도  $T_e$ 가 2.421[eV]에서 증가하다 35:15[Torr]일 때 최고치 3.834[eV]를 나타내고, 다시 3.624[eV]로 감소하였다. 전자밀도  $N_e$ 는  $1.63 \times 10^{11} [cm^{-3}] \sim 0.831 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 로 Ne:Xe 보다 상대적으로 낮은 분포를 보였다. Ar의 비율이 35:15[Torr]일 때 전자온도는 3.834[eV]로 가장 높고, 전자밀도는  $0.831 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 로서 가장 낮은 특성을 보였는데, 이러한 결과는 Ne:Xe 혼합가스의 최대 전자온도 혼합비율 45:5[Torr]과 비교했을 때, 상대적으로 주 여기가스 Ar의 압력이 높았다. 그 이유는 Ar의 이온화 에너지가 15.76[eV]로 Xe의 12.13[eV]에 비해 상대적으로 높지만, 충돌 단면적을 고려했을 경우 Xe원자보다 Ar원자가 상대적으로 작기 때문에 실제 가스가 여기 하는데 필요한 에너지는 Ar이 작다. 따라서 같은 에너지로 여기 되는 가스의량은 Ar이 크고, 이러한 이유로 Ne:Xe의 혼합비와 비교했을 때 Ne:Ar의 혼합비에서 Ar의 비율이 높다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 수은을 사용하지 않는 광원용 제논 플라즈마의 체계적 이해, 효율화 및 최적화를 도모하기위해서 유도 결합형 플라즈마원을 설계하고, 제논 플라즈마의 단점을 보완한 Ne:Xe 플라즈마의 특성을 Ne:Ar 플라즈마의 특성과 비교하였다. Langmuir 정전탐침법을 이용하여 플라즈마 진단 및 해석에 있어 필수 요소인 전자온도와 전자밀도의 파라미터를 측정하였다. 방전관 내부에 Ne:Xe 혼합가스를 45:5~25:25[Torr]의 비율로 주입하고, 13.56MHz 200W RF Power로 플라즈마를 발생시켜 플라즈마의 전자온도와 전자밀도 특성을 확인하였다. 또한 비교 실험을 위해 Ne:Ar 혼합가스를 같은 방법으로 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ne:Xe 혼합가스의 Xe의 비율이 높아질수록 페닝

(Penning)효과가 감소하고 Xe의 방전 성질이 강해져 전자온도  $T_e$ 는  $3.663[eV] \sim 2.107[eV]$ 로 감소하였고, 전자밀도  $N_e$ 는  $1.76 \times 10^{11} [cm^{-3}] \sim 4.757 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 로 증가하였다. Ne:Xe 혼합가스의 비율이 45:5[Torr]일 때 플라즈마의 안정성이 높았으며, 이때의 전자온도  $T_e$ 는 3.663[eV], 전자밀도는  $1.76 \times 10^{11} [cm^{-3}]$ 이었다. 그러나 본 논문에서는 Xe의 비율이 10% 미만의 경우의 실험 결과는 배제된 결과로 이 부분의 연구가 요망된다.

2. Ne:Ar 혼합가스의 Ar의 비율이 35:15[Torr]일 때 가장 높은 전자온도 3.834[eV]를 나타내고, 가장 낮은 전자밀도  $0.831 \times 10^{11} [cm^{-3}]$  특성을 보였는데 이때 가장 효율적인 Ne:Ar의 혼합비율임을 확인할 수 있었다.
3. Ne:Xe과 Ne:Ar 플라즈마의 파라미터를 각각 비교하였을 때, Ne:Ar 플라즈마가 상대적으로 페닝(Penning)효과에 의한 플라즈마 발생이 용이한 것으로 계속되었다. 하지만 Ne:Xe 플라즈마의 파라미터 또한 Ne:Ar 플라즈마에 상당히 접근된 값으로 해석되었고, Xe 플라즈마의 단점을 보완하기에 충분한 값이었다. 이처럼 혼합가스의 파라미터를 비교 해석함으로써 광원 설계에 있어서 고려해야 하는 하나의 비교 가능한 해석방법으로 생각된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년도 원광대학교 교내 연구비 지원에 의해 작성되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Wharmby, D.O., "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A , Vol.140, Issue 6, pp. 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, pp.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 Thesis, 2000.

저 자 소 개



**최 기 승(崔 起 承)**

1977년 3월 2일생. 2005년 2월 원광대학교 공대 전기전자및정보공학부 졸업. 2006년 현재 원광대학교 대학원 전자재료공학과 석사과정.

Tel : 063-850-6349, Fax : 063-857-6890  
E-mail : kitong21@wonkwang.ac.kr



**최 용 성(崔 龍 成)**

1967년 11월 14일생. 1991년 동아대학교 전기공학과 졸업 (학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공박). 1999년~2001년 JAIST Post-Doc.. 2001년~2003년 Osaka Univ. Post-Doc.. 2002년~2005 원광대학교 교수. 2006년~현재 동신대학교 전기공학과 교수.

Tel: 061-330-3204, Fax: 061-330-3204  
E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr



**이 중 찬(李 鐘 燦)**

1972년 8월 13일생. 1977년 원광대학교 공대 전자공학과 졸업. 1999년 동대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 2003년 동대 대학원 졸업(공학박사). 2003년~2004년 UTD Univ. Post-Doc 2004년~2005년 Ehime Univ. Post-Doc. 2005년~현재 금호전기(주) 부설연구소 선임연구원.

Tel : 031-329-7740, Fax : 031-329-7705  
E-mail : chaos@kumho.khe.co.kr



**박 대 희(朴 大 熙)**

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 오사카대학 대학원 졸업(공박). 1979년~1991년 LG전선 연구소 선임연구원. 1999년~2000년 미국 미시시피 주립대학교 교환교수. 1992년~현재 원광대학교 전기전자및정보공학부 교수. 2004년~현재 원광대학교 전기응용기술연구센터 소장

Tel: 063-850-6349, Fax: 063-857-6890  
E-mail : parkdh@wonkwang.ac.kr