

# 구동 온도와 방전관 길이에 따른 ICP 광원의 전기·광학적 특성

(Electro-Optical Characteristics of an ICP Light Source Depending on Driving Temperature and Length of Discharge Tube)

임연찬\* · 박대희

(Youn-Chan Yim · Dae Hee Park)

## 요 약

본 실험은 구동 온도와 방전관의 길이에 따라 변화하는 ICP 광원의 전기·광학적 특성에 대해서 알아보았다. 광원의 전기·광학적 특성이 정상상태에 놓이는 구동 조건을 확인하기 위하여 시간에 따른 전력 소모와 광속의 변화를 측정하였다. 전력소모와 광속의 시간에 따른 변화를 측정한 결과를 통해서 볼 때 최초구동에서 70분이 경과한 이후부터 전력소모는 초기값에 대해 1.45[%], 광속은 0.36[%]의 안정성을 나타냈다. 항온챔버 내에서 온도를 5구간으로 나누어 변화하면서 구동 온도에 따른 ICP 광원의 광학적 특성을 알아보았다. 휘도는 온도의 상승과 비례적으로 증가하였으나 46.7[°C] 이상에서는 오히려 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 파센법칙과 함께 보일-샤를의 법칙을 통해 0.02[Torr]의 압력이 변화함에 따라 더 높은 방전전압이 요구되지만 충분한 전압이 안정기에서 공급되지 못하기 때문이라 판단된다. 이와 더불어 방전관 길이에 따라 광원에 인가되는 전력과 전류를 측정하였다.

## Abstract

We investigated the electro-optical characteristics of an ICP(Inductively Coupled Plasma) light source depending on driving temperature, and length of discharge tube. An electro-optical stability of a sample at operating was measured to see a steady state of a sample. In this results, we can see that a stability of power loss and luminous flux of a sample at operating of upper 70[min] was 1.45[%] and 0.36[%]. We measured the optical characteristics of a sample in a thermal chamber operated at a specific temperature divided into 5 steps. While luminance increased with temperature increasing, the decrement of luminance appeared at upper 46.7[°C]. According to Parchen's and Boyle-Charles' law, we can speculate that a pressure was increased and a higher voltage was needed but a ballaster having a rating power can't support a higher voltage corresponding to a pressure change, 0.02[Torr] at 46.7[°C]. Moreover, we measured an applied power and current of samples depending to a various length of a discharge tube.

Key Words : Inductively Coupled Plasma, Thermal Dependency, Rating Power, Aging Time, Electro-Optical Stability

\* 주저자 : 원광대학교 전자재료공학과 Post Doc과정

Tel : 063-850-7023, Fax : 063-850-7022

E-mail : caea-yyc@wonkwang.ac.kr

접수일자 : 2007년 12월 28일

1차심사 : 2008년 1월 7일

2차심사 : 2008년 2월 1일

심사완료 : 2008년 2월 29일

## 1. 서 론

전 우주의 99[%] 이상이 플라즈마 상태라는 사실은 익히 잘 알려진 사실이지만 지구상에 존재하는 대부분의 플라즈마는 인위적인 발생에 의한 것이다. 이러한 인위적인 플라즈마의 발생은 기체 방전원리를 바탕으로 하는 고진공의 고전압 기술에 의해서 구현된다[1-2]. 기체방전의 경우 기저상태에 존재하는 전자에 특정한 에너지를 공급하게 되면 이로부터 빛이 발광된다. 바닥상태의 전자를 여기하는 방법에 따라 Cold Cathode Fluorescent Lamp(C CFL), hot Cathode lamp, Inductively coupled plasma (ICP) lamp 등의 여러 광원으로 구분되어진다[3-5]. 이와 같은 기체 방전 원리는 1746년 Musschenbroek에 의해 처음으로 방전(discharge)이라는 단어가 소개되면서 Geissler, Hittorf, J. J. Thomson 그리고 Townsend 등과 같은 유명한 과학자들에 의해서 서서히 학문적 위치를 형성함과 동시에 산업적 적용이 이루어졌으나 적용 범위는 20세기 후반의 디스플레이 기술이 크게 발전하면서 산업 전반적으로 기술개발의 관심으로 자리 잡게 되었다[3]. 이로서 가정의 TV, 조명용 제품들을 비롯하여 사회 여러 분야의 방전 기술, 핵 융합기술, 폐기물 처리, 레이저 등의 일반 가정용 기술에서 첨단 산업 기술 분야까지 폭넓게 적용되어지고 있다. 그러나 최근 화두가 되고 있는 시대적 패러다임의 변화는 광원의 기술 개발에 크나큰 전환점을 부여하게 되었다. 이로 인하여 광원은 종래의 형광등이 갖고 있던 기능을 넘어서 인간과 환경을 고려함으로써 새로운 기능 확대를 이루기 위한 노력이 집중되고 있다 [6-7]. 최근 시대적 요구에 부합하기 위한 많은 연구 결과들이 보고되었는데 그 중에 전극의 열화가 제거된 ICP(Inductively Coupled Plasma) 광원에 대한 관심이 늘고 있다[8-11]. 근래의 ICP 광원에 대한 국내외 시장 형성은 주로 다국적 기업을 중심으로 형성되었다. 그러나 후발 주자로서 기술개발을 시작한 국내 기업들도 최근에는 75[W], 100[W], 150[W], 200[W]급을 판매하고 있다[12-13]. 그러나 관련 제품의 기술을 향상시키기 위해서는 더욱 명확한 광원의 특성 이해와 기술적 보고 자료가 요구

되고 있는 실정이다.

ICP 광원의 경우 원자번호가 높은 단일종 가스를 사용하는 방전광원이다. 따라서 주변온도 변화에 대한 의존성이 강하게 나타난다. 더욱이 내부 전극이 없는 형태이기 때문에 명확한 정격용량(rating power)을 결정하기에 어려움이 있다. 현행 문제는 기술을 제품으로 구현하는데 있어서 설계 요소와 제품의 성능 개선을 위해 요구된다. 게다가 전기 에너지를 공급하기 위해 사용되는 페라이트 코어 또한 온도에 강한 의존성을 가지고 있다[4]. 따라서 온도 변화에 따른 광원의 특성 변화에 대한 해석이 실험적 접근 방법을 통해서 더욱더 명확히 이루어져야 할 필요가 있다.

본 연구는 ICP 광원이 안정되기 위한 구동 시간조건을 확인하고서 이러한 조건을 바탕으로 주변온도 변화에 따른 광원의 전기·광학적 특성 변화를 알아 보았다. 이를 위해 전력소모와 휘도 및 광속 특성을 측정하였다. 그리고 광원의 기하학적 설계 요소인 방전관의 길이 변화에 따른 인가 전력과 전류를 측정함으로써 전기적 정격 용량을 확인하였고 이때 발생하는 주울열을 측정하여 길이 변화에 대한 온도의 영향을 확인하였다.

## 2. 실험 및 측정

시료가 되는 ICP광원의 구조는 벌브, 유도 코일, 2개의 페라이트 및 페라이트 고정대로 구성되어 있다. 방전관의 제작은 초기의 직관형 유리관을 ‘C’자 모양으로 구부려 만들고서 유리 방전관 내부에 형광물체를 도포한 후 동일한 방법으로 제작된 또 다른 유리 방전관을 이용하여 서로 접합하였다. 접합시 주의할 사항은 접합면을 고온의 열을 이용하여 순간적으로 녹여서 접합하게 되는데 이 때 온도가 균일하게 분포하지 못하게 되면 접합면간의 계면(interface)에 작은 구멍(hole)이 발생됨으로써 진공 파괴의 원인이 된다.

따라서 접합의 환경은 잘 조합된 혼합가스의 분위기에서 공기의 대류를 최대한 억제할 수 있는 항온의 공간 내에서 이루어졌다. 접합된 방전램프의 좌우에는 가스를 주입할 수 있는 주입구와 가스를 배

기 할 수 있는 배기구가 얇고 가는 형태의 유리관으로써 존재한다.

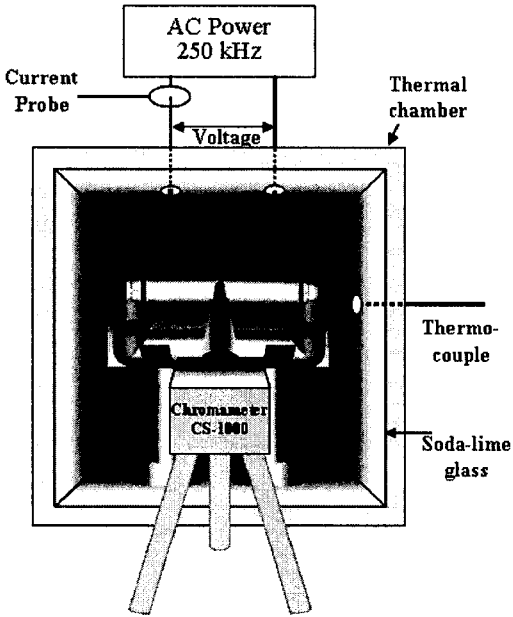


그림 1. 구동 온도 변화에 따른 광원 특성 측정 개략도  
 Fig. 1. Measurement system of optical characteristics of a lamp depending on variable driving temperature

이러한 유리관을 통해서 가스의 배기와 주입이 이루어지는데 배기된 방전관의 진공도는 약  $\sim 10^{-6}$ [Torr]의 초기 압력을 이루게 된다. 이때 배기되는 가스는 일반 대기 중의 공기이며 일부 수분과 기타의 불순물이 포함되어 있다. 따라서 배기과정이 완료된 이후 내부에 잔류하는 불순물이나 수분 등의 제거를 위하여 100[°C]정도로 열처리를 5분정도 행하였다. 열처리 과정이 끝나고 나서 MFC(mass flow controller)를 이용하여 배기구를 통해 크립톤(Krypton) 가스 0.25[Torr]를 주입하였다. 가스의 주입이 끝난 후 배기구를 잘라내어 봉합함으로써 시료를 준비하였다.

준비된 시료에 대해서 구동시간에 따른 광속과 전력 손실 변화는 적분구에서 측정이 이루어졌고 주변 온도 변화 실험은 그림 1과 같이 구성되었다. 항온과 온도변화의 제어를 위해서 사용된 항온챔버의 전면(front panel)에는 소다라임(soda-lime)재질의 유리

가 위치해 있고 휘도 변화 측정은 외부에 위치해 있는 Minolta 사의 휘도계(CS-1000), 광속은 적분구를 이용하여 측정하였다. 250[kHz]의 구동주파수를 갖는 안정기를 외부에 위치시켰으며 피드스로우(feed-through)를 통해 항온챔버 내부의 시료와 연결시켜 점등하였다.

### 3. 결과 및 토의

그림 2는 0.25[Torr]의 순도 99.99[%]인 Kr 가스가 100[%] 주입된 시료 광원을 이용하여 적분구 내에서 2시간 점등을 이루면서 10분 단위로 광속과 전력 손실의 변화를 측정된 결과이다. 이때 시료의 페라이트 코어 부분의 온도 변화는 그림 2의 삽입도(inset)에 나타내었다. 측정된 결과를 통해 볼 때 구동 후 70~80분이 경과하는 시점부터 시료의 전기·광학적 특성이 안정됨을 확인할 수 있다. 초기의 광속(11350[lm])에 대해 80분의 지점에서는 11060[lm]을 그리고 120분의 지점에서는 11030[lm]을 나타내고 있다.

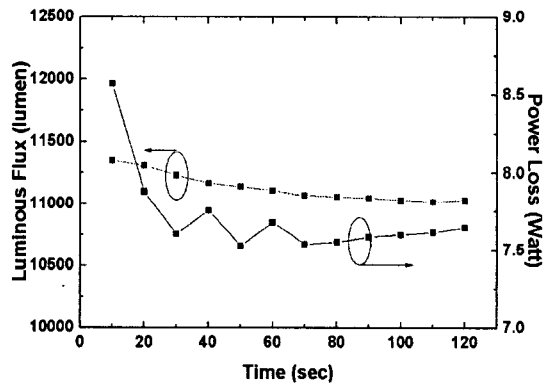


그림 2. 구동 시간에 따른 광속과 전력 손실 변화 결과 그래프, 실선(전력 손실 곡선), ■(광속 곡선)  
 Fig. 2. Luminous flux and power-loss graph depending on aging time

광원의 경우 시료의 특성 변화가 전체의 1[%] 내에 존재할 때 특성 변화를 평가할 수 있다. 따라서 전체 휘도 변화량 320[lm]에 대해 70~120분 사이에서는 전체 변화량 2.821[%]에 비해 0.36[%]의 안정성을 나타내고 있다. 전력 손실의 경우, 초기의

### 구동 온도와 방전관 길이에 따른 ICP 광원의 전기·광학적 특성

8.57[W]에서 70분의 지점에서 7.53[W], 그리고 120분의 지점에서는 7.65[W]로써 전체 변화량 12.03[%]에 대해서 70~120분 이후에는 1.45[%]의 안정성을 나타내고 있다. 따라서 초기 점등에서부터 70분의 지점까지는 급속한 감소와 요동이 나타나고 그 이후부터는 상승하는 경향을 나타내지만 70분 이후의 지점부터는 시료가 열평형 상태에 도달하면서 시료의 페라이트 코어가 갖는 특성변화에서 기인되는 임피던스의 변화가 안정되었기 때문으로 판단된다. 페라이트 코어는 시료의 구동 이후 20분이 지나면서 온도의 변화가 안정되고 있음을 그림 2의 삽입도를 통해 알 수 있다.

다음은 5구간(A, B, C, D, E)으로 나누어 항온챔버의 온도를 변화하면서 휘도 변화를 측정하였다. A, C, E구간은 온도를 일정하게 유지하는 구간으로써 각각 20, -20, 80[°C]로 1시간동안 유지하였다. B와 D의 구간은 온도를 변화시킨 구간으로 각각 20~-20[°C](0.67[°C/min]), -20~80[°C](0.83[°C/min])로 변화하였다. 시료의 온도 의존성을 측정하기 위해서 항온 챔버를 이용하여 외부와 열적으로 차단된 공간에서 구동 시간에 따른 휘도와 전력 손실 변화를 측정하였다. 그러나 이 경우 시료가 점등되기 전에는 온도가 일정하게 유지되지만 점등 후에는 시료에서 발생하는 주열열(Joule Heat)에 의해서 내부의 온도 변화가 발생된다.

또한 이때의 휘도 측정은 유리면을 통과하는 빛을 측정하기 때문에 실제의 휘도값과 차이가 있다. 게다가 인위적인 온도의 변화를 통해 형광체의 광변환 효율이 나타나기 때문에 적분구에서 측정되는 휘도와 차이를 가질 수 있다[14]. 즉 실제의 광원에 대해서 형광체의 광변환 효율 변화와 유리면에서 산란되거나 굴절되는 량에 대해서는 고려되지 못한 값으로서 측정된 값의 의미가 있다.

그림 3은 주변 온도변화에 따른 시료의 상대적 휘도 변화 결과이다. 시료 광원의 상대적 휘도는 46.7[°C] 지점에서 29,220[cd/m<sup>2</sup>]의 최고 휘도값을 나타내고 있다. 그러나 온도가 상승함에 따라 80[°C]에서는 12.33[%]만큼 감소되어 25,600[cd/m<sup>2</sup>]를 나타내고 있다. 더욱이 60분 이상 80[°C]의 온도를 유지하면서 구동이 계속됨에 따라 휘도는 더욱 감소하면서 23.96[%]가 감소된 22,220[cd/m<sup>2</sup>]가 측정되었다. 시료 광원을 60분 이상 구동할 경우, 대개 발광관의 외부 표면 온도가 80[°C]대에 이른다. 따라서 온도변화에 대해 방전관 내부의 가스 압력 변화를 보일-샤를의 법칙을 이용하여 계산할 수 있다. 0.25[Torr]의 Kr 가스 100[%]가 주입된 시료 광원의 경우 변화된 부피는 46.7[°C]일 때 0.02[Torr] 그리고 80[°C]일 때 0.05[Torr]에 해당된다. 따라서 그림 3의 결과에 대해 내부의 증가된 가스 압력이 광원의 휘도 특성을 감소시킨 것으로 판단하여 가스의 압력별 광원의 광속 특성을 측정하여 보았다. 광속의 측정은 적분구를 통해 이루어졌고 이때 실내의 온도는 실온(30[°C])으로 유지하였다.

측정 과정 중 광원 주변의 온도 변화를 최소화하기 위해 적분구를 개방한 상태에서 70분의 예비 구동을 하였고 그 이후 측정 시에만 적분구를 밀폐하여 외부 빛을 차단하였다. 그림 4는 가스 압력별 광원의 광속 특성 결과이다. 제작된 시료 광원의 경우, 0.25[Torr]에서 12809.3[lm]의 최고 광속을 나타내고 있으며 0.35[Torr]에서는 8989.62[lm] 그리고 0.5[Torr]에서는 4469.02[lm]의 광속을 나타내고 있다. 이것은 그림 3을 통한 예측과 일치하는 결과라 할 수 있다.

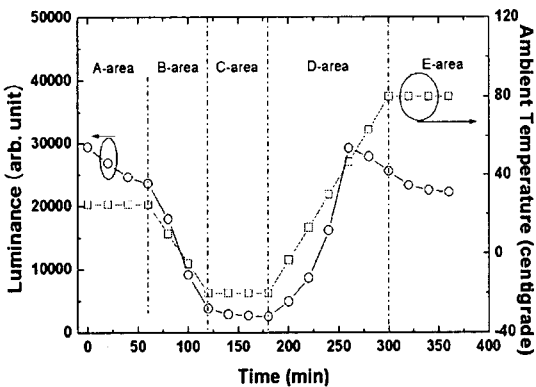


그림 3. 주변 온도변화에 따른 시료의 상대적 휘도 변화 결과 그래프, ○(상대적 휘도 곡선), □(주변 온도 곡선)

Fig. 3. Relative luminance density of a lamp depending on a ambient temperature

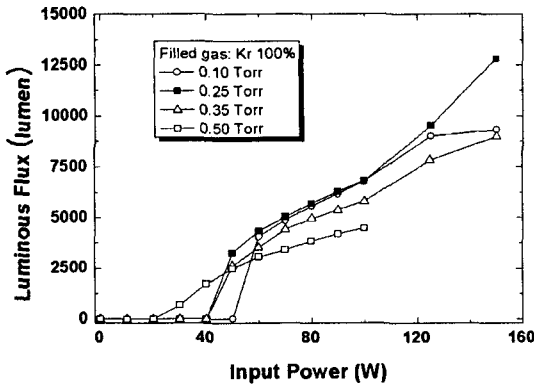


그림 4. 가스의 압력에 따른 광원의 휘도 특성  
Fig. 4. Luminous flux of a lamp with variable gas pressures

즉 결과에는 제시되지 못하였지만 46.7[°C]에서 0.02[Torr]가 증가된 0.27[Torr]에서 최고의 휘도 특성을 나타내고 그 이상의 압력 증가에서는 휘도가 감소하기 때문에 동일한 발광 면적에서 얻을 수 있는 광속값이 0.35[Torr] 이하에서는 낮게 측정된 것이라 판단된다.

결과적으로 과다한 압력 변화가 최적의 방전 조건을 벗어난 것으로서 시동전압( $V_f$ )과 압력( $p$ )간의 비례 관계를 나타내는 파센법칙을 이용하여 설명할 수 있다.

$$V_f = \frac{Bpd}{\ln[Apd / \ln(1 + \frac{1}{\gamma})]} \quad (1)$$

이때  $d$ 는 전극간 거리, 그리고  $\gamma$ 는 2차 전자 방출 계수 혹은 타운젠트(Townsend) 2차 계수이다.  $A$ 와  $B$ 는 방전을 이루는 요소들에 관련된 것으로서 이온화 전압, 기체의 질량, 전자 친밀도, 음극 물질의 속성과 기하학적 구조, 온도, 일함수(work function)에 관련된 상수값이다.

CCFL이나 PDP의 경우 시동전압과 구동전압(방전유지전압)은 다르다. 그러나 ICP 광원의 경우, 트랜스포머의 2차측에 유도되는 자기 선속(magnetic flux)의 변화가 패러데이 법칙에 따라 방위각 성분의 전기장(azimuthal electric field)을 만들게 되면서 방전이 시작된다. 따라서 트랜스포머의 2차측에서 일정한 자기 선속의 변화량을 갖는 ICP 광원은 시동전

압과 구동전압이 동일하다[15]. 따라서 동일한 휘도를 나타내기 위한 압력과 구동전압 조건이 존재할 때 압력이 낮아지거나 높아질 경우에는 더 높은 구동전압을 인가함으로써 동일한 휘도를 얻을 수 있다. 결과적으로 고정된 출력을 갖게 되는 안정기의 경우 압력의 변화에 해당되는 더 높은 전압을 인가할 수 없기 때문에 휘도와 광속의 감소가 나타난 것이라 판단된다.

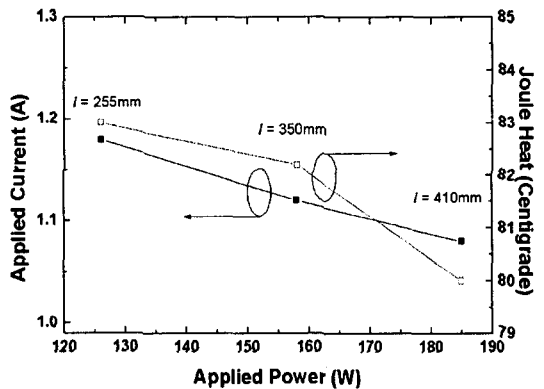


그림 5. 방전관의 길이에 따른 전력-전류-주울열 결과 그래프, ■(전류), □(주울열)  
Fig. 5. Power-current-Joule heat graph corresponding to variable longitudinal length of a lamp

그림 5는 시료의 방전관 길이( $l$ )에 따라 안정기의 출력 전력과 출력 전류 그리고 구동 시 시료의 주울열 온도를 측정된 결과이다. 3종류의 시료에 대해서 각각 방전관의 길이를 255[mm], 350[mm], 410[mm]로 제작하여 동일한 안정기를 통해 전력을 인가함으로써 측정하였다. 안정기는 국내 기업에서 제작된 것으로 150[W]급 광원용 안정기이다. 동일한 안정기를 통해 점등을 시도함으로써 안정기의 설계 용량에 부합된 시료의 방전관 길이 조건을 확인하였다. 이때 측정된 주울열 온도 값은 적외선 온도계를 이용하여 측정된 것으로 적외선 온도계의 경우 유리표면이나 백색 표면을 측정할 경우 측정 오차가 심한 문제가 있다. 따라서 위의 결과에서 주울열은 상대적인 값으로 centigrade[°C]의 단위를 갖는다.  $l$ 이 350[mm] 경우 158[W]의 안정기 출력 전압이 인가되었고 그 때의 출력 전류값은 1.12[A]임을 측정 결

## 구동 온도와 방전관 길이에 따른 ICP 광원의 전기·광학적 특성

과를 통해 알 수 있다. 그러나 시료의 휘도 특성 측정 결과가 본 연구에 나타나지는 않았지만 동일한 안정기에 대해서 255[mm]의 시료에 대해서 126[W], 410[mm]에 대해서는 185[W]의 출력을 보이고 있다. 이러한 사실은 다국적 기업의 제품에서도 나타나듯이 하나의 안정기를 통해 용량이 다른 램프 점등을 이루고 있다. 따라서 위의 결과를 통해 볼 때 본 연구에서 사용된 150[W]급 안정기는 약 130~190[W]급의 ICP 광원 점등에 사용 가능할 것으로 판단된다.

그리고 상대적 주울열의 차이는 255[mm]의 경우 83[°C]임에 반해 410[mm]에서는 80[°C]를 나타내고 있다.

이는 길이의 차가 약 150[mm]정도를 갖는 경우 온도 상승 문제는 광원의 특성 변화에 크게 기여하지 않을 것으로 판단된다.

## 4. 결 과

본 연구는 ICP광원의 구동 시간에 따른 휘도와 전력 손실의 변화, 주변 온도 및 가스 압력의 변화에 따른 광원의 휘도 특성, 그리고 광원의 방전관 길이에 따른 휘도 변화를 측정하였다.

구동 시간에 따른 휘도와 전력 손실 변화 결과를 통해 ICP 광원의 특성을 평가하기 위한 예비 구동(aging) 시간으로 70~80분 정도의 시간이 요구되는 것으로 판단된다. 이는 광원의 전기·광학적 특성을 평가하기 위해서는 안정성이 1[%] 이내에서 평형상태에 도달해야 할 필요가 있기 때문에 전력 손실과 휘도의 변화가 70~80분 이후에 각각 1.15[%], 0.27[%]의 안정됨을 확인할 수 있었다.

주변 온도 변화에 따른 광원의 휘도 특성의 경우 온도에 비례하여 휘도 특성이 나타남을 확인할 수 있었으나 46.7[°C] 이상부터는 오히려 휘도가 감소함을 확인할 수 있었다. 이러한 휘도 감소는 내부 압력 증가에 의해 기인된 것으로써 결과적으로 파센법칙을 통해 추론할 수 있는 압력 변화에 부합되는 더 높은 구동전압이 요구되기 때문이라 판단된다. 따라서 ICP 광원에 있어서 온도-압력-구동전압의 상관관계에 대한 정량적인 실험적 결과를 바탕으로 디밍(Dimming) 방법을 이용한다면 광원의 휘도 유지 능

력이 개선 가능할 것으로 판단된다.

방전관의 길이에 따른 휘도 변화 결과에서는 하나의 안정기로 구동 가능한 광원의 길이 조건을 확인할 수 있었다. 그러나 휘도 특성에 관한 연구가 함께 이루어지지 못한 점에서는 차후에 좀 더 심도 있는 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이와 더불어 안정기의 설계 용량에 부합되는 방전관의 최적 길이를 측정 결과를 통해 확인할 수 있었다.

본 연구에서 측정된 결과와 분석 결과는 ICP 광원의 설계와 특성 평가 및 광원의 광학적 특성 개선에 대한 기초 자료로서 유용하게 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성 지원사업(1-2004-0-074-0-00)의 지원을 받아 이루어진 논문입니다. 이번 연구를 지원해 주신 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

## References

- [1] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes-sputtering and plasma etching," JOHN WILEY & SONS, INC., pp.65-72, 1980.
- [2] R. O. Dendy, "Plasma Dynamics," CLARENDON PRESS · OXFORD, pp 8-18, 1990.
- [3] Miroslav sedlaček, "Electron Physics of Vacuum and Gaseous Devices", JOHN WILEY & SONS, INC., pp386-408, 1996.
- [4] J. R. Coaton and A. M. Marsden, "Lamps and Lighting", Fourth Edition, ANRNLQD, pp 1-336, 1997.
- [5] N. St. J. Braithwaite, "Introduction to gas discharges", Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 9, pp 517-527, 2000.
- [6] Michio Takagaki, Takeshi Fukuyo, Shinchi Irisawa, "Mercury-Free Arc Tube for a Discharge", US Patent, No. 7,170,230,B2, 2007.
- [7] Walter P. Lalatovich, Sharon L. Ernest, Susan L. Callahan, Robert J. Karlotski and Janice T. Karlotski, "Mercury Free Discharge Lamp with Zinc Iodine", US Patent, No. 6,853,140,B2, 2005.
- [8] D.O. Wharmby, PhD, "Electrodeless lamps for lighting: a review", IEE proceedings. A, Science, measurement and technology, Vol.140 No.6, pp. 465~473, 1993.
- [9] J. Jonkers, M. Bakker and J. A. M. van der Mullen "Absorption measurements on a low-pressure, inductively coupled, argon-mercury discharge for lighting purposes: 1. The gas temperature and argon metastable states density", Journal of physics D, applied physics, Vol.30 No.13, pp.1928~1933, 1997.

- [10] S. Kitsinelis, R. Devonshire, M. Jinno, K. H. Loo, D. A. Stone and R. C. Tozer, "Relative enhancement of near-UV emission from a pulsed low-pressure mercury discharge lamp, using a rare gas mixture", *Journal of physics D, applied physics*, Vol.37 No.12, pp.1630~1638, 2004.
- [11] E. Robert, H. Sarroukh, C. Cachoncinlle, R. Viladrosa, V. Hochet, S. Eddaoui, J. M. Pouvesle, "Spectroscopic and electrical study of rare-gas-based, hollow cathode luminescent discharges: Application to the life time and efficiency enhancement of mercury-free signs", *Pure and applied chemistry. : Chimiepure et appliquee*, Vol.77, No.2, pp.463~474, 2005.
- [12] J. Kawanaka, A. Ogata, S. Kubodera, W. Sasaki, K. Kurosawa, "Improved output characteristics of a vacuum ultraviolet xenon gas jet discharge lamp with a magnetic field", *Applied physics. B, Lasers and optics*, Vol.65, No.4, pp.609~612, 1997.
- [13] H. Motomura, M. Jinno, M. Aono, "Measurement of metastable xenon density in mercury-free fluorescent lamps by IR laser absorption spectroscopy", *2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE*, Vol.1, pp67~70, Nov. 2002.
- [14] 대한 전기학회 광원기술연구회 공역, "광방사의 기초", *인터비전*, pp82~96, 2007.
- [15] D. O. Wharmby, "Electrodeless lamps for lighting: a review", *IEE Proceedings*, Vol.140A, pp465~473, 1993.

## ◇ 저자소개 ◇

### 임연찬 (林淵贊)

1972년 4월 25일생. 1998년 원광대학교 물리학과 졸업. 2002년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 2006년 광운대학교 전자물리학과 졸업(박사). 현재 원광대학교 전자재료공학과 Post BK21 박사후 연수 과정.

### 박대희 (朴大熙)

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 오사카대학 대학원 졸업(박사). 현재 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수.