

원편파를 이용한 무전극 고압 방전 램프 시스템에 관한 연구

(A Study on Electrodeless HID Lamp Systems Using Circularly Polarized Microwaves)

김경신* · 김진중 · 이승철

(Kyoung-Shin Kim · Jin-Joong Kim · Seung-Chul Lee)

Abstract

This paper presents the results of a study on an electrodeless high intensity discharge (HID) lamp system that is powered by circularly polarized microwaves (CPMs). The technique to generate CPMs enables an electrodeless high intensity discharge lamp to be turned on without the rotation of the bulb but conventional electrodeless high intensity discharge lamps use rotating bulbs in order to prevent a puncture in a hot spots that are formed by the linearly polarized microwaves in the circular cavity.

The technique to generate CPMs is described and the salient features of the lamp characteristics are presented.

Key Words : Electrodeless High Intensity Discharge(ELS-HID) Lamp, Circularly Polarized Microwaves(CPMs), Plasma Lighting System (PLS)

1. 서 론

무전극 고압 방전 램프는 전극 없이 방전 되는 조명용 광원 시스템으로 획기적인 기술로 인식되어 왔으며, 무전극 방전 램프는 방전구 안에 전극이 없기 때문에 재래식 전극 램프에 비해 많은 장점을 갖고 있다 [1-2]. 예를 들면, 전극이 없어 램프 자체의 수명이 20,000시간 이상으로 길며, 수명 기간 동안 광속 유지율이 5[%] 이내로 거의 일정하다. 방전구 안의 전극과 플라즈마간의 화학적 반응으로 인한 전극 부식과 램

프 흑화를 발생시키지 않고, 전극과 유리간의 진공 접합을 필요로 하지 않아, 무전극 램프의 제작 공정은 재래식 전극 램프보다 훨씬 더 단순하며, 형광 물질을 사용하지 않는 비(非)형광 광원이다. 또한, 수은과 같은 유해 물질을 사용하지 않으므로, 수은 및 유해 물질을 발생하지 않는 친환경적이다.

1990년대에 고압 증기를 마이크로파와 같은 초고주파로 방전하여 광대역의 집적된 가시광선을 발광시키는 기술이 개발 되었으며[3-4], 무전극 방전 램프의 물리적 특성 연구와 실용적인 무전극 방전 램프 시스템의 개발이 진행되고 있다[5-9].

국내에서는 한국전력연구원에서 처음 광원 개발에 성공한 후, LG 전자, 태원전기산업이 기술 개발에 성공 하였다[10-11]. 이러한 무전극 방전 램프는 국내에서 PLS(Plasma Lighting System)로 알려져 있으며,

* 주저자 : 중앙대학교 전기전자공학부 박사과정
Tel : 02-837-9107, Fax : 02-837-9066
E-mail : syni@taewon.co.kr, syni@wm.cau.ac.kr
접수일자 : 2010년 11월 15일
1차심사 : 2010년 11월 24일, 2차심사 : 2010년 12월 13일
심사완료 : 2010년 12월 17일

높은 에너지 절약 및 친환경적인 조명 기술로서 LED와 함께 차세대 광원으로 발전하고 있다.

비형광 광원을 사용하는 무전극 방전 램프의 시조는 무전극 황(Sulfur)램프이며, InBr, CsBr 등과 같은 다른 2-원자 메탈-할라이드(metal-halide)에도 적용할 수 있어, 연색성 98을 갖는 거의 완벽한 백색광원이 개발되고 있다[12].

제 1세대 무전극 방전 램프 시스템은 램프를 포함하는 전자파 공동(cavity)의 열에 의한 산화에 따른 전도성 저하, 주변 기기의 열처리 문제, 선편파에 의한 국부적인 가열로 인한 램프의 파손을 막기 위해, 램프 회전에 필요한 모터 사용으로 인한 불안전성과 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 선편파에 의한 램프의 국부적 파손을 해결하는 방법으로 원편파(circularly polarized microwaves ; CPMs)방전을 도입하였고[13-14], 원편파 도파관을 포함한 무전극 고압 방전 램프(electrodeless high intensity discharge lamp ; ELS-HID lamp)시스템을 실제 제작하여, 광 특성 측정을 통해 무전극 원편파 방전 램프 시스템의 특성을 설명하였다.

2. 본 론

기존의 무전극 고압 방전 램프 시스템은 원통형의 cavity안에 구형 램프가 회전하는 구조로 그림 1과 같이 TE11 모드의 선편파를 사용한다.

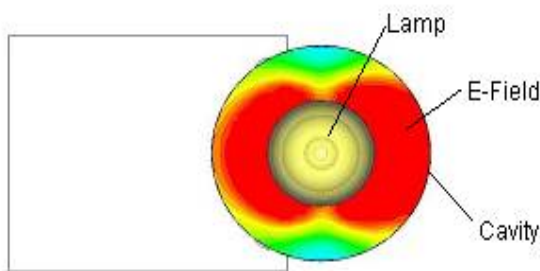


그림 1. Cavity 내에서 TE11 모드를 갖는 선편파의 전계
Fig. 1. The linearly polarized electric fields in TE11 Mode in the circular cavity

그림 1에서 알 수 있듯이 선편파는 구형 램프 양쪽

으로 전계가 집중되어 국부적인 가열에 의한 램프 파손의 원인이 된다. 이러한 램프의 파손을 막기 위해 기존의 무전극 방전 램프 시스템은 램프를 회전시켜야 하는 단점을 가지고 있다. 램프를 회전시키기 위해 모터를 사용하므로 공간 활용의 문제와 시스템 변형에 한계점을 발생시킨다. 램프와 모터의 결합 또한 시스템 활용에 제약을 주며, 대개 모터의 수명이 무전극 방전 램프 시스템의 다른 부품보다 짧음으로, 모터의 수명이 무전극 방전 램프 시스템 수명을 결정 지을 수도 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 무전극 방전 램프 시스템에 원편파 도파관을 설계하여 적용하였다.

2.1 원편파 도파관의 원리

원편파 도파관 설계를 설명하기 전에 원편파 발생 원리를 간단히 설명한다.

\hat{z} 방향으로 진행하는 전계성분의 크기가 E_x, E_y 인 평면파의 전계 \mathbf{E} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z) &= E_x(z)\hat{x} + E_y(z)\hat{y} \\ &= E_x e^{-jkz}\hat{x} + E_y e^{-j\phi} e^{-jkz}\hat{y} \end{aligned} \quad (1)$$

또, $\mathbf{E}(z)$ 를 시간 영역으로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z, t) &= \text{Re}[\mathbf{E}(z) e^{-j\omega t}] \\ &= E_x \cos(\omega t - kz)\hat{x} + E_y \cos(\omega t - kz - \phi)\hat{y} \end{aligned} \quad (2)$$

편의상, $z = 0$ 인 점을 고려하면,

$$\mathbf{E}(0, t) = E_x \cos \omega t \hat{x} + E_y \cos(\omega t - \phi)\hat{y} \quad (3)$$

식 (2)는 식 (3)처럼 간단히 표현할 수 있다. 첫째로 $\phi = 0$ 인 경우 $\mathbf{E}(0, t)$ 는

$$\mathbf{E}(0, t) = [E_x \hat{x} + E_y \hat{y}] \cos \omega t \quad (4)$$

식 (4)와 같이 되며, 시간에 따라 전계의 크기는 변

하지만, 전계의 방향은 항상 일정한 선형편파가 된다.

둘째로 $\phi = \pi/2$ 인 경우 $\mathbf{E}(0, t)$ 는

$$\mathbf{E}(0, t) = E_x \cos \omega t \hat{x} + E_y \sin \omega t \hat{y} \quad (5)$$

식 (5)로, 시간이 변함에 따라 주기 $2\pi/\omega$ 로 타원의 주기를 도는 타원편파가 된다.

셋째로 $E_x = E_y = E_0$ 이고, $\phi = \pi/2$ 인 $\mathbf{E}(0, t)$ 는

$$\mathbf{E}(0, t) = E_0 [\cos \omega t \hat{x} + \sin \omega t \hat{y}] \quad (6)$$

식 (6)과 같이 시간에 관계없이 전계의 크기는 항상 E_0 으로 일정하나, 전계의 방향은 시간에 따라 그림 2처럼 원의 주위를 따라 회전하게 되는 원형편파가 된다.

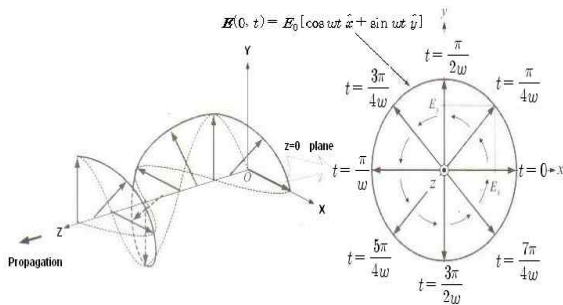


그림 2. 평면파의 원형편파
Fig. 2. A circular polarization for plane waves

원편파 도파관 설계 방법은 도파관에 TE_{11} 모드로 전파되는 마이크로파의 진행 방향에 수직인 \vec{E}_x , \vec{E}_y 두 개의 전계 성분이 원편파 도파관을 지나면서, \vec{E}_x 와 \vec{E}_y 의 각속도(phase velocity)가 변하여, 전파된 마이크로파의 전계 성분인 \vec{E}_x , \vec{E}_y 의 위상차가 90° 가 되고($|\angle \vec{E}_x - \angle \vec{E}_y| = 90^\circ$), 이 때, 전파되는 마이크로파의 전계가 회전하게 되며, 전계의 크기가 같아지면($|\vec{E}_x| = |\vec{E}_y|$), 원편파가 발생한다[15]. 즉, 전계 \vec{E}_x , \vec{E}_y 의 위상차가 90° 가 되고, 전계의 크기가 같게 되도록 원편파 도파관을 설계하면 된다.

2.2 원편파 도파관 설계

원편파 도파관을 설계하기 위해서는, 우선 무전극 방전 램프의 plasma 전도율(electric conductivity, σ)을 알아야 한다.

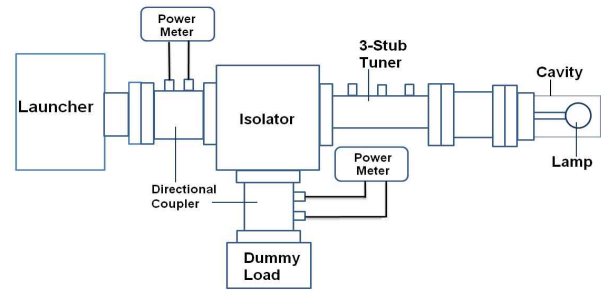


그림 3. Plasma의 반사계수 측정 시스템
Fig. 3. The measurement system of the reflection coefficient of plasma

전도율을 구하기 위해서는 먼저 그림 3과 같은 측정 시스템에서 3-stub을 변화함에 따른 반사계수(Γ)를 측정하고, 시뮬레이션을 이용하여 실험 측정값과 시뮬레이션 결과 값이 같게 되는 전도율을 찾는다.

전도율 측정 방법은 램프 위치와 3-stub를 고정 한 후 반사계수를 측정하고, 다시 3-stub를 변경시켜 도파관의 임피던스를 변화시킨 후 반사계수를 측정한다. 위 과정을 수차례 반복하여 측정 데이터를 얻어야 하며, 이 때 3-stub의 도파관 삽입 깊이를 정확히 알아야 한다. 3-stub를 변경시키며, 반사계수 측정을 수차례 반복해야 하는 이유는 측정 데이터 수가 적을 경우, 시뮬레이션을 이용하여 동일한 반사계수가 되도록 하는 전도율 값이 여러 개 나올 수가 있으므로, 3-stub를 변화시킴으로 반사계수가 커지거나 작아지는 경향을 파악하여 정확한 전도율을 선택해야 한다.

표 1은 반사계수 측정값과 시뮬레이션 결과 값을 비교한 것이다. 실험과 시뮬레이션에 사용한 주파수는 $2.45[\text{GHz}]$ 이고, 화합물은 InBr, 석영 벌브의 직경은 $32[\text{mm}]$ 이고, 입사파의 전력은 약 $620[\text{W}]$ 이다. 표 1처럼 plasma 전도율을 $0.72 (\text{S/m})$ 로 선택할 경우 측정값과 시뮬레이션 결과 값의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

표 1. Plasma 반사계수의 측정값과 Simulation 값의 비교

Table 1. Comparison of measurement and simulation results

실험 측정값			Simulation
입사파(W)	반사파	반사계수	반사계수, ($\sigma=0.72$)
		$ \Gamma $ (dB)	$ \Gamma $ (dB)
624	25.5	-13.9	-13.5
624	39.1	-12.0	-12.1
625	52	-10.8	-11.1
624	196.4	-5.0	-5.1
624	305.9	-3.1	-3.1

위에서 구한 램프의 Plasma 전도율을 사용하여, 전자파 해석 시뮬레이션 프로그램인 CST사의 microwave studio를 이용하여, 3D 모델링을 통해 원편파 도파관의 구조, 길이, 각도 등을 조정하여, 원편파 발생 조건이 되도록 설계하였다.

그림 4는 두 전계의 위상을, 그림 5는 두 전계의 크기를 나타내는 시뮬레이션 결과이다.

그림 4의 두 전계 E_x , E_y 의 위상은 $165.2[^\circ]$ 와 $76.1[^\circ]$ 이다. 두 전계의 위상차는 $89.1[^\circ]$ 로, 원편파 발생 조건인 $90[^\circ]$ 에 매우 근접하며, 그림 5의 두 전계 E_x , E_y 의 크기는 45.9 (dBV/m)와 46.5 (dBV/m)로 두 전계 크기의 차는 0.6 (dBV/m)으로 두 전계의 크기는 거의 같음을 알 수 있다. 즉, 설계된 원편파 도파관이 원편파 발생 조건을 충족함을 알 수 있다.

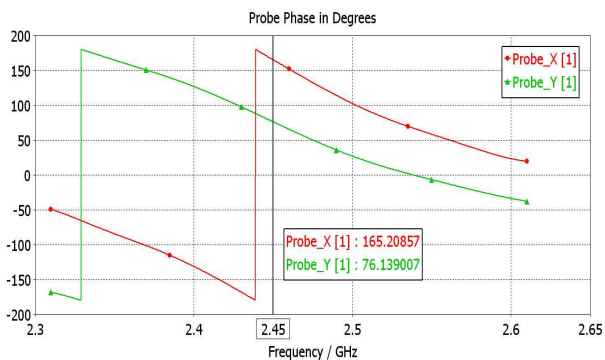


그림 4. 전계 E_x 와 E_y 의 위상

Fig. 4. The phase of electric fields E_x and E_y

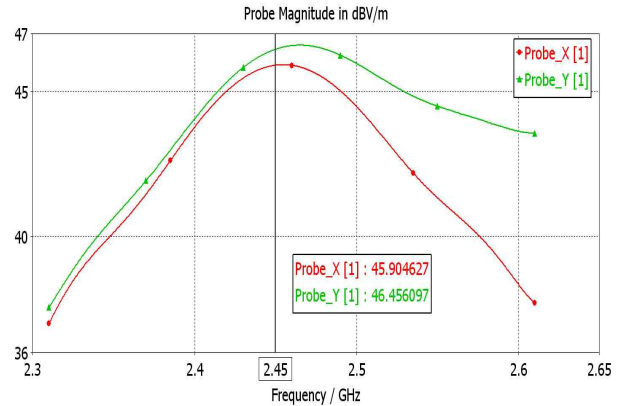


그림 5. 전계 E_x 와 E_y 의 전계 크기

Fig. 5. The magnitudes of electric fields E_x and E_y

그림 6은 원편파 발생 조건을 충족하도록 설계된 원편파 도파관을 보여준다.

도파관 구조는 십자형 모양을 기초로 설계 되었다. 중심에서 일정 각만큼 회전되어 있고, 십자 모양의 길이 또한 차이가 있다. 하지만, 원편파 발생 조건은 항상 동일하나, 램프의 크기, 램프에 봉입된 화합물 및 불활성 가스, cavity의 구조와 크기 등 조건에 따라 원편파 도파관의 구조, 길이, 각도 등이 다르게 설계 될 수 있다.

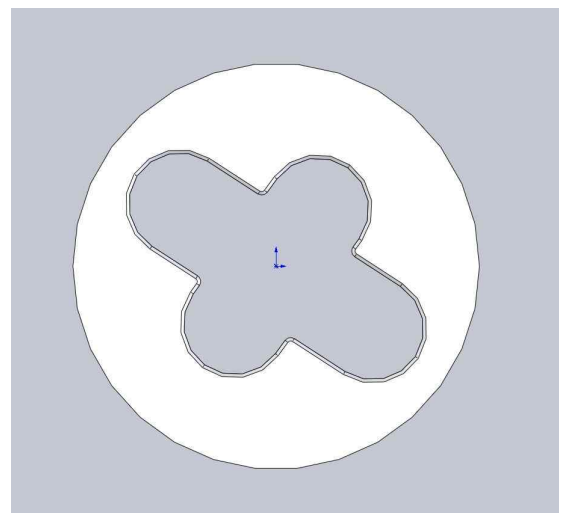


그림 6. 원편파 도파관

Fig. 6. A circular polarizing waveguide

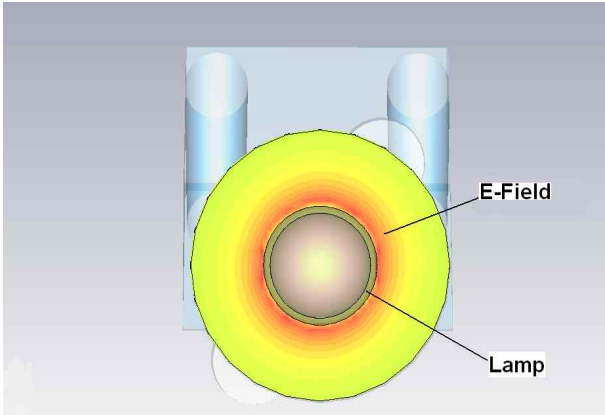


그림 7. 원편파에 의한 램프 주위의 전기 분포 시뮬레이션
 Fig. 7. Simulation results of rotation of E-field pattern at the lamp position by circularly polarization wave

위의 설계를 토대로 원편파 도파관을 적용한 무전극 원편파 방전 램프의 전기 분포는 그림 1과 같은 기존 무전극 고압 방전 램프의 전기 분포와는 다르게 국부적인 가열로 인한 램프 파손의 위험을 없앨 수 있도록 그림 7과 같이 램프 주위에 균일하게 형성됨을 알 수 있었으며, 시뮬레이션을 통해 원편파 발생을 확인함과 동시에, 원편파 도파관 및 무전극 원편파 방전 램프 시스템을 최적화하여 제작할 수 있었다.

2.3 무전극 원편파 방전 램프의 특성

본 실험에 사용된 램프는 석영(quartz)으로 만들어진 구형 램프로, 내부에 수십 mg의 InBr 와 수 torr의 Ar을 채워 제작하였고, 고주파 발생장치로는 1[kW]급, 2.45[GHz]대의 마그네트론을 사용하였다.

광 측정 장비로는 광 스펙트럼은 Acton Research사의 스펙트로미터(SpectraPro 500i)로, 상관색온도와 평균연색성 지수는 Photo Research사의 컬러리미터(PR-650)로 측정 하였으며, 광속은 PIMACS사의 적분구(NeoLight PL5000)를 이용하여 측정하였다.

그림 8은 무전극 원편파 방전 램프의 실제 설치된 사진이며, 설치된 무전극 원편파 방전 램프의 광 특성 및 사양은 표 2와 같다.



그림 8. 무전극 원편파 방전 램프 시스템의 실제 설치 사진
 Fig. 8. A picture showing the actual ELS-HID lamp system installed in a field

표 2. 무전극 원편파 방전 램프 시스템 사양
 Table 2. Specifications of a ECDL system

Input RF power (W)	650
Lumen Efficacy (lm/W_{RF})	100
Correlated color temperature (K)	6,540
Color rendering index (Ra)	98
Lumen maintenance [%] [est.]	> 90
System lifetime (hrs) [est.]	> 20,000
Starting time (s)	< 20
Mercury content	0
Rotation of bulb	Non-Rotating

표 2에서 보인 듯이 무전극 원편파 방전 램프는 수은 및 형광물질을 포함하지 않는 친환경적인 램프이며, 연색지수(Ra) 또한 거의 100에 가까운 값을 가지고 있어 매우 뛰어난 색상의 광원임을 알 수 있다. 이러한 광원의 우수함은 태양광 스펙트럼과 비교하면 확실한 차이를 느낄 수 있다.

그림 9는 무전극 원편파 방전 램프와 재래식 메탈-할라이드 램프의 스펙트럼과 태양광 스펙트럼을 비교한 것이다. 무전극 원편파 방전 램프의 스펙트럼은 태양광과 매우 흡사하며, 모든 가시광선 대역의 광을 포함하고 있어, 매우 높은 연색성을 가지고 있다. 반면,

메탈할라이드 램프의 스펙트럼은 가시광선 대역의 광 분포가 비교적 불연속적이므로, 무전극 원편파 방전 램프에 비해 연색성이 낮음을 알 수 있다. 무전극 원편파 방전 램프의 특징 중 하나는 높은 광속 유지율과 색온도의 변화가 매우 적다라는 것이다.

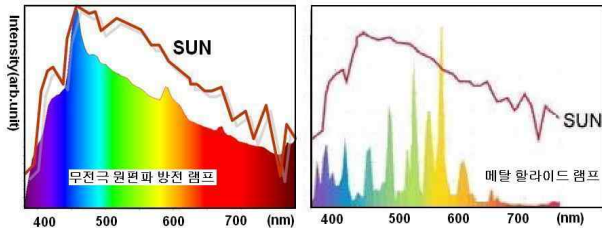


그림 9. 무전극 원편파 방전 램프와 메탈-할라이드 램프의 스펙트럼

Fig. 9. Spectrums of an ELS-HID lamp and a metal-halide lamp

그림 10과 그림 11의 무전극 원편파 방전 램프의 광속 유지율 곡선과 색온도 변화 곡선은 약 2,000시간 동안 실제 측정된 자료를 가지고 나타낸 것이다.

2,000시간의 실험 또한 연속적으로 점등시킨 것이 아니라, 실제 사용하는 방식으로 하루 8시간씩 점등하는 방식으로 1년 동안 측정된 자료이다.

그림 10에 나타난 무전극 원편파 방전 램프의 광속 유지율은 약 2,000시간 경과해도 95% 이상이며, 색온도 변화 또한 거의 일정함을 그림 11에서 알 수 있다.

무전극 원편파 방전 램프는 높은 연색성, 높은 광속 유지율을 가지고 있으며, 일정한 색온도를 유지하는 우수한 광원임을 보여 주었다.

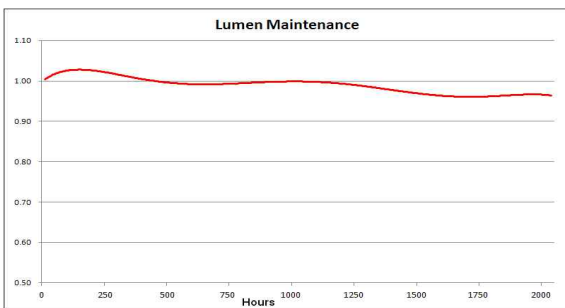


그림 10. 무전극 원편파 방전 램프의 광속 유지율
Fig. 10. Lumen maintenance curve for an ELS-HID lamp

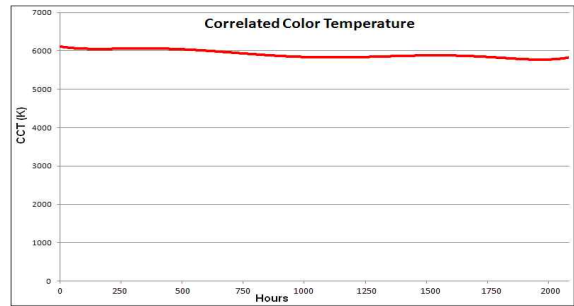


그림 11. 무전극 원편파 방전 램프의 색온도 변화
Fig. 11. Variation of the correlated color temperature curve of an ELS-HID lamp

3. 결 론

본 연구는 무전극 방전 램프의 플라즈마 전도율 구하여, 무전극 방전 램프 시스템에 원편파를 적용할 수 있었다. 원편파를 적용함으로써 기존의 기술 문제점을 해결 하였으며, 무전극 원편파 방전 램프의 광 특성을 측정, 분석할 수 있었다.

본 논문에서 무전극 원편파 방전 램프 시스템의 기술적 우수성과 램프의 뛰어난 광 특성을 보임으로써, 무전극 고압 방전 램프 시스템이 친환경적이며, 매우 뛰어난 광원임을 확인하였다.

무전극 고압 방전 램프는 높은 연색성을 가지고 있어, 태양광과 유사한 색 재현이 필요한 영화촬영, 무대조명과 같은 분야에도 적합하다. 메탈-할라이드 램프 중에서도 특수 용도의 램프는 높은 연색성을 가지고 있으나, 램프 수명이 짧고, 가격이 매우 높다는 단점이 있다. 또한 원편파를 이용한 무전극 고압 방전 램프는 광속과 색온도를 일정하게 유지하므로 광원의 변화가 적은 우수한 광원임을 실험을 통해 입증하였다.

향후 연구에서는 무전극 원편파 방전 램프의 특성을 좀 더 세밀히 분석하여, 무전극 원편파 방전 램프의 한층 더 정확한 전도율 측정 방법을 찾아내고, InBr를 포함하는 다른 In-혼합물과 다양한 여러 발광체의 연구를 계속 진행하여, 광원 효율의 최적화를 이루어야 할 것이다. 또한 무전극 원편파 방전 램프 시스템의 소형화 및 사용 분야의 폭을 넓히기 위해, 주변 장치의 개선 및 개발이 필요하다.

본 연구를 위한 태원전기산업(주)의 지원과 태원전기산업(주) 조명기술연구소 연구원들의 도움에 감사드립니다.

References

- [1] Stephan Offermanns, "Electrodeless high-pressure microwave discharges", J. Appl. Phys. 67, 1990.
- [2] D .O. Wharmby, "Electrodeless lamps for lighting: a review", IEE Proceedings-A, pp. 465~473, 1993.
- [3] B. P. Turner, M. G. Ury, Y. Leng, W. G. Love, "Sulfur Lamps -Progress in Their Development", IES Annual Conference, Paper 87, 1995.
- [4] W. P. Lapatovich, "Novel Microwave Powered high Intensity Discharge Lamps", the 7th Int. Symp. on Light Sources, No. 42, 1, pp. 139~148, 1995.
- [5] B. P. Turner, "Progress in sulfur lamp technology", the 7th Int. Symp. on Light Sources, No. 35, 1996.
- [6] Jin J. Kim, et al., Proc. The 9th Int. Symp. on Light Sources, p. 123, 2001.
- [7] Jin J. Kim, IEEE International Conference on Plasma Science, p. 318, 2002.
- [8] C. W. Johnston, H. W. P. van der Heijden, J J A M van der Mullen, "A self-consistent LTE model of a microwave-driven, high-pressure sulphur lamp", J. Appl. Phys. 35, 2002.
- [9] Jin J. Kim, J. T. Ko, Dong H. Won, S. S. Kim, and H-Y Chang, Appl. Phys. Lett. 84, 2004.
- [10] 김진중, 박기준, 구선근, "무전극 황전등 연구개발 최종 보고서", 한국전력연구원, 1998.
- [11] Jin Joong Kim, "Light Sources Excited by Micro-wave High Intensity Discharges", The 10th Int. Symp. on Light Sources, p. 85, 2004.
- [12] A. M. Donald, B. P. Turner, J. T. Dolan, D. A. Kirkpatrick, and Y. Leng, "High frequency inductive lamp and power oscillator", U.S. Patent, 6,137,237.
- [13] J. J. Kim, K. S. Kim, K. S. Oh, D. H. Won, H. S. Yoon, "An electrodeless HID sulfur lamp system using a non-rotating bulb excited by circularly polarized micro wave discharges", the 11th Int. Symp. on Light Sources, 2007.

- [14] K. S. Oh, J. J. Kim, K. S. Kim, D. H. Won, H. S. Yoon, "Generation of circularly polarized microwave to power electrodeless HID lamp systems", 11th Int. Symp. on Light Sources, 2007.
- [15] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1997.

◆ 저자소개 ◆



김경신(金京信)

1974년 10월 30일생. 1997년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 2000년 중앙대학교 전기전자공학부 석사. 2007년 중앙대학교 전기전자공학부 박사수료. 2001년~현재 태원전기산업(주). 조명기술연구소 선임 연구원.

E-mail : syni@taewon.co.kr, syni@wm.cau.ac.kr



김진중(金振重)

1940년 1월 17일생. 1962년 서울대학교 물리학과 졸업. 1969년 미국 위스콘신 대학 물리학과 석사. 1974년 미국 위스콘신 대학 물리학과 박사. 1975~1996년 미국 노스캐롤라이나 주립대, 뉴멕시코 대학교, 센트럴 플로리다 대학교 물리학 및 전기 공학과 교수. 1996~1998년 한국 전력 연구원 에너지 환경 연구소 소장. 1999~2001년 호서대학교 물리학과 교수. 2001~2005년 세종대학교 광전자공학과 교수. 1999년~현재 태원전기산업(주) 조명기술연구소 소장.

E-mail : kimjj@taewon.co.kr



이승철(李承哲)

1946년 6월 16일생. 1969년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1974년 재무부 전매청 신탄진 연초제조장 전력과장. 1980년 현대 엔지니어링 기전사업부 차장. 1982년 미국 플로리다 대학 전기공학과 석사. 1985년 미국 플로리다 대학 전기공학과 박사. 1986~1995년 미국 테네시대학교 항공우주대학원 전기 및 컴퓨터 공학과 교수. 1995년~현재 중앙대학교 전자 전기공학부 교수.

E-mail : sclee@cau.ac.kr