

고출력 무전극램프의 가스압 및 아말감종류에 따른 특성분석 및 최적화에 관한 연구

정영일*, 정대철*, 김용갑*, 박대희**

Study of the Characteristic and Optimization of Induction Lamp according to Gas Pressure and Amalgam Type

Young-Il Chung*, Dae-Chul Jung*, Yong-Kab Kim*, Dae-Hee Park**

요약 현재는 도로조명의 경우 기존 메탈할라이드 램프 400W이하로 설치되어 있어 에너지절약형 조명으로 대체가 이루어지고 있으며, 무전극 램프는 터널조명과 고천정조명 적용분야를 타겟으로 더욱 활발한 교체가 이루어질 것으로 예상된다. 따라서 추가적으로 고효율, 고출력 무전극 램프 시스템 개발이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 고출력 무전극 램프의 설계 및 제작을 진행하여 가스종류 및 가스압에 따른 비교 분석, 아말감 종류에 따른 특성 분석 등을 통한 무전극 램프 최적화를 진행하였다. 현재 고출력 무전극 램프 방전관 및 페라이트코어에 맞는 가스압 300~350[mmHg] 사이로 최적화 하였다. 인듐(In) 아말감을 적용한 무전극 램프로 점등회로 매칭을 완료하여 250W(정격±10%)로 정격소비전력으로 최적화를 완료하였다.

Abstract Currently, road lightings are installed with less than 400W of existing metal halide lamps. These road lightings are being replaced by energy-saving lightings. Induction lamps are expected to be more actively replaced with targets for tunnel lighting and high ceiling lighting. Therefore, it is necessary to develop high efficiency, high power induction lamps system.

In this study, the gas type & pressure, amalgam type were designed for the high power of the induction lamps. And induction lamp system was optimized through electrical, optical characteristics analysis. It is optimized to the gas pressure 300~350 [mmHg] for the discharge tube of high power induction lamp and ferrite core. The driving circuit matching was completed with a induction lamp using indium amalgam. The rated power consumption of the induction lamp was optimized with 250 W (rated ± 10%).

Key Words : Induction Lamp, ICP(inductively coupled plasma), gas pressure, amalgam, discharge

1. 서론

에너지 절약은 국내에 국한된 문제가 아니라 지구촌 전체의 현안으로 대두되면서 선진국을 비롯한 각국은 에너지 절약형 산업용기기의 개발에 심혈을 기울이고 있다[1]. 국내 총 전력 소비량의 약 20%를 사용하는 조명분야는 다른 기술보다 에너지절약 잠재량이 크고, 연구개발의 효율성이 높은

기술로 인정받고 있으며, 고효율 조명기기의 개선, 각종 고효율 광원개발 및 보급에 주력하고 있다. 이러한 광원 중 LED는 고출력 조명등의 사용으로 인해 다량의 칩을 어레이 하는 구조를 사용하여 글레이어 현상과 쉐도우 현상의 문제점이 발생되어 빛의 품질이 저하되고 있다[2]. 반면에 무전극 램프의 경우 1884년 히트로프에 의하여 방전현상이

*Department of Information and TeleCommunication Engineering, Wonkwang University

**Corresponding Author : Department of Information and TeleCommunication Engineering, Wonkwang University
 (dhpark@wku.ac.kr)

Received January 12, 2017

Revised January 19, 2017

Accepted January 25, 2017

최초로 발견되었고, 1891년 니콜라테슬라는 상대적으로 낮은 용량의 결합형 RF(Radio Frequency) 방전램프를 소개하였다. Bethenod와 Claude에 의하여 페라이트코어를 적용한 ICP원리의 무전극 램프가 소개되었고, 앤드슨에 의해서 1970년에 유도 결합형 램프의 원리가 비로소 정착되었다. 이후 안정기 개발 기술의 발달로 1991년 최초로 마쯔시다와 필립스에서 미래형 광원으로써 상용화하게 이른다. 이후 오스람에서도 무전극 램프를 개발하게 되었다[3,4].

국내의 경우 수십W에서 수백W까지 넓은 범위로 개발이 가능하며 당초 긴 수명으로 주목받아 2000년도 중반부터 국산화에 성공하여 사용화 되었다. 하지만 현재 초기 가격 경쟁력, 보급정책 등의 문제로 활성화가 지연되어 200W까지만 개발이 이루어진 상태이며, 무전극 램프 개발에 있어서 당면기술의 문제는 국내의 램프제조 관련기술이 매우 취약하다는 것이다.

현재는 도로조명의 경우 기존 메탈할라이드 램프 400W이하로 설치되어 있어 무전극 램프 대체가 일부 이루어 졌으며, 최근 LED조명의 대체 비중이 높아지고 있는 상황이다. 또한 무전극 램프는 터널조명과 고천정 조명 적용분야를 타겟으로 더욱 활발한 교체가 이루어질 것으로 예상된다. 하지만 무전극 램프 시스템의 대체 가능한 메탈할라이드 램프 400W급 대체 시 무전극 램프 200W급 [1:1] 대체 불가하다. 따라서 추가적으로 고효율, 고출력 무전극 램프의 개발이 필요한 상황이고, 고출력 무전극 램프 시스템을 개발할 경우 기존 설치현장 [1:1] 교체가 가능하며, 배광이 넓기 때문에 등 간격을 넓혀서 교체가 가능하며, 그 이상의 기존조명 W급도 교체 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 고출력 무전극 램프의 설계 및 제작을 진행하여 가스종류 및 가스압에 따른 비교 분석, 아말감 종류에 따른 특성 분석 등을 통한 무전극 램프 최적화를 진행하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 무전극 램프의 발광원리

무전극 램프의 발광 원리를 그림 1에 나타내었다. 점등회로를 통해 RF 전류가 램프의 바깥부분에 위치해 있는 유도 코일부분의 솔레노이드 코일에 공급되면 페라이트의 형상을 따라 자기장이 형성되고 형성된 자기장은 페라이트에 의해서 더욱 밀집화 된다. 이때 형성된 자기장의 시간에 대한 변화율은 기전력을 만들게 되고 따라서 기전력에 의하여 방전램프 내부의 전자는 가속된다.

가속된 전자는 중성입자와 충돌하게 되고 충돌 과정에서 방출되는 에너지는 관벽에 도포되어있는 형광물체에 흡수된다. 기저상태로 되돌아가는 과정에서 에너지를 방출하는데 이 때 방출되는 발생된 자외선이 벌브 내부에 도포된 형광물질에 여기되어 가시광선으로 최종 방출하게 된다. 이러한 형광체의 에너지 흡수와 에너지 방출의 원리는 프랑크-콘돈의 원리에 의하여 설명된다[5].

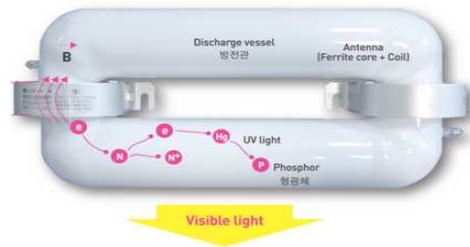


그림 1. 무전극 램프의 발광원리
Fig 1. The principle of Induction lamp

2.2 무전극 램프의 등가회로 이론

유도결합형(ICP) 무전극 램프는 수MHz~수백 kHz의 범위의 주파수로 동작을 하며, 전용 전자식 안정기에 의해서 구동된다. 무전극 램프를 구동을 위해 고주파가 인가되었을 시 외부페라이트코어에 감긴 코일과 플라즈마 성분에 의하여 공진주파수가 결정된다. 무전극 램프는 페라이트코어에 감긴 코일의 인덕턴스(L)와 원형의 플라즈마가 결합계수 k를 가지는 변압기 원리를 적용하여 설명이 가

능하다[6].

$$Z_L = R_1 + j\omega L_1 \quad (1)$$

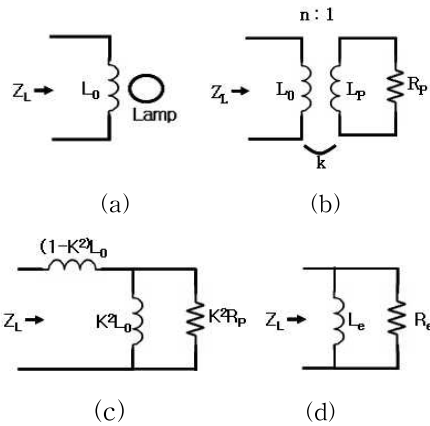


그림 2. 무전극램프의 등가회로
Fig 2. Equivalent circuits of Induction lamp

기본적으로 무전극 램프는 페라이트코어에 감긴 코일에 고주파 전력을 인가하는 부분을 그림 2(a)와 같이 변압기의 1차 측으로 보고 원형의 플라즈마가 형성되는 방전관을 1턴을 가지는 변압기의 2차 측으로 해석하여 모델화 하였으며, 그림 2(b)에서와 같이 플라즈마 저항(Rp)은 결합계수 k에 의해 n:1의 트랜스포머에 연결된 구조이다. 최종적으로 변환을 진행하여 그림 2(b)는 그림 2(c)와 회로가 형성되며 페라이트코어에 감긴 코일을 거친 임피던스(ZL)는 동작주파수 ω의해 식(1)과 같이 나타낼 수 있고, 각각의 R1과 L1은 식(2),(3)으로 나타낼 수 있다. 다음으로 그림 2(d)와 같이 병렬로 변환 되고 저항Re과 인덕턴스Le를 식 (4),(5)로 나타낼 수 있다[6,7].

$$R_1 = \frac{(kn)^2 R_p k^4 \omega^2 L_0^2}{(kn)^4 R_p^2 + k^4 \omega^2 L_0^2} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{(kn)^4 R_p^2 k^4 L_0^2}{(kn)^4 R_p^2 + k^4 \omega^2 L_0^2} + (1 - k^2) L_0 \quad (3)$$

$$R_e = R_1 + \frac{\omega^2 L_1^2}{R_1} \quad (4)$$

$$L_e = L_1 + \frac{R_1^2}{\omega^2 L_1} \quad (5)$$

등가회로 그림 2(b)에서의 페라이트 코어에 감긴 코일의 인덕턴스(L0)와 방전관에 형성되는 플라즈마 인덕턴스(LP)와 저항(RP)경우 코일이 감긴 페라이트 코어와 방전관 가스, 아말감등의 램프특성에 의해 영향을 받으며 결국에는 임피던스(ZL)을 변화시키는 최종 변화요소로써 무전극램프의 전기, 광학적 특성에 영향을 미치게 된다[6,9-11].

2.3 무전극 램프용 아말감 설계

유도결합형 무전극 램프는 플라즈마 방전에서 일반 튜브 타입의 형광램프보다 높은 에너지 밀도와 관벽 부하를 가지기 때문에 높은 온도에서 동작한다. 그래서 금속과 결합된 아말감형태로 램프 안에 수은을 봉입한다. 일반적으로 아말감은 In, Bi, Sn과 수은의 합금으로써 고유특성 곡선을 가지며, 아말감온도에 따른 수은증기압과 광출력 특성은 합금의 혼합비율에 따라 달라진다. 또한, 그림 3과 같이 수은 증기압의 특성은 초기 액상수은의 특성곡선에 따라 움직이나 온도가 상승함에 따라 수은의 증발과 아말감과의 재결합을 통하여 아말감 고유의 특성 곡선 내에서 컨트롤이 가능하게 된다.

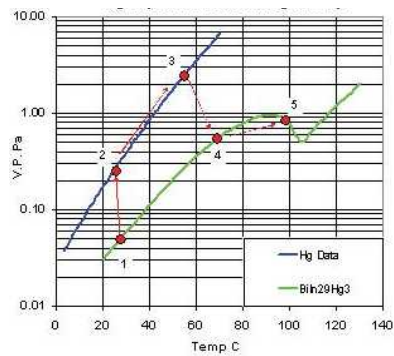


그림 3. 온도에 따른 수은증기압 변화
Fig 3. Hg vapor pressure according to temperature

무전극 램프의 아말감 온도변화에 따른 수은 증기압의 변화는 램프점등 직후 냉점의 온도는 상승하고, 아말감의 증발된 증발 수은은 관벽으로 이동하며 액화된 후 방전관의 온도상승과 함께 액화된 수은은 증발한다. 이 후, 아말감과 인듐메쉬에 재결합, 다시 아말감과 인듐메쉬에서 수은기체가 증발 하여 램프의 온도가 안정화됨에 따라 증기압을 컨트롤 할 수 있게 된다[12-14].

3. 무전극 램프 시스템 제작 및 측정평가

3.1 무전극 램프 제작

무전극 램프 제작을 위하여 그림 4와 같은 조립 공정을 거쳐 최종 고출력 무전극 램프를 제작할 수 있다. 첫째, 직관형 유리관을 사이즈에 맞게 커팅한 후 불순물 제거를 위한 워싱 공정을 진행한다. 둘째, 고출력 W급에 맞는 직관형 유리관을 원형유리관 금형에 안착시켜 반원형 형상의 유리관을 제작한 후 형광체 코팅을 진행한다. 반원형의 유리관의 중간부분을 실링처리 하여 원형유리관 형태를 만든 후 가스를 주입하여 최종적으로 발광 가능한 원형 유리관형상이 완성된다. 마지막으로 코일이 감긴 페라이트 코어 및 브라켓을 조립한 후 최종 점등 및 검사를 진행하여 무전극 램프의 제작이 완료된다.

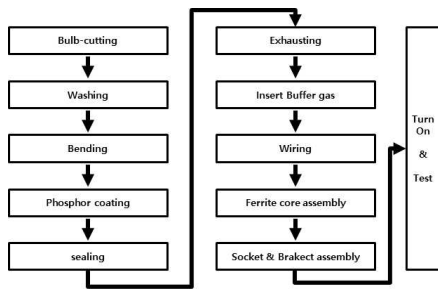


그림 4. 무전극 램프 제조 공정도
Fig 4. Manufacturing processes of Induction lamp

고출력 무전극 램프 개발을 위하여 유리관 직경 및 사이즈를 키워서 최적화하기 위하여 유리관 밴딩 전 직관 유리관을 가열하기 위한 가열로 및 그

림 5와 같이 반원형 유리관 밴딩을 위한 62Φ유리관 금형 제작을 진행하였다.

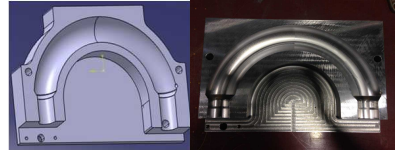


그림 5. 반원형 유리관 금형
Fig 5. semicircular glass tube mold

제작된 유리관 금형을 밴딩 제조공정에 적용하여 그림 6과 같이 고출력에 따라 유리관 사이즈를 증가시키고 이에 수반된 페라이트코어의 사이즈 및 체적을 변화하여 무전극 램프의 제작을 진행하였다.

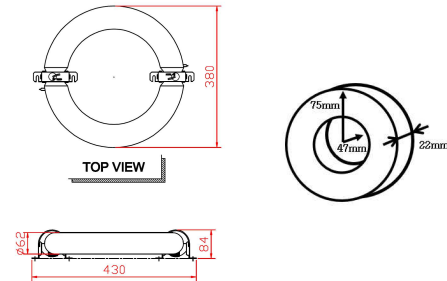


그림 6. 고출력 무전극 램프의 방전관 및 페라이트코어
Fig 6. Ferrite Core and Bulb of High power induction Lamp

4. 실험결과 및 고찰

4.1 무전극 램프 가스압 최적화

일반적으로 무전극 램프의 초기 방전을 위하여 가장 안정적인 18족 비활성기체를 여기가스로 사용하게 된다. 무전극 램프의 경우 전극의 간격을 고려하기 어렵기 때문에 휘도특성을 통해 특성 분석하는 방법으로 진행한다. 초기에 이러한 비활성기체의 혼합비 별 인가전력증가에 따른 휘도를 측정함으로써 혼합비를 최적화하고, 가스압에 따른 인가전력증가에 따른 휘도를 측정함으로써 가스압을 최적화한 선행연구가 진행되었으며[15], 기본적

으로 Kr기반으로 한 여기가스를 선택하여 제조를 하고 있다. Ar, Ne을 미량 혼합하였을 경우 페닝 효과에 따른 방전전압을 낮추는 효과는 있으나 제조시설의 정확도, 주변 환경에 따라 가스압의 변화율이 높은 관계로 일반적으로 Kr 100% 가스를 주입함으로써 양산을 진행하고 있다. 본 논문에서의 고출력 무전극 램프의 경우도 동일하게 제작을 진행하는 것으로 최적화 하였다.

기본적으로 기존램프와 제조설비에 표시되는 동일한 가스압으로 생산을 할 경우 체적이 커짐에 따라 실질적으로 램프 내부의 가스압은 올라가기 때문에 이러한 점을 고려하여 가스를 주입하여야 하며, 램프의 특성을 최적화하기 위한 범위를 찾은 후 가스압을 최적화시켜야한다.

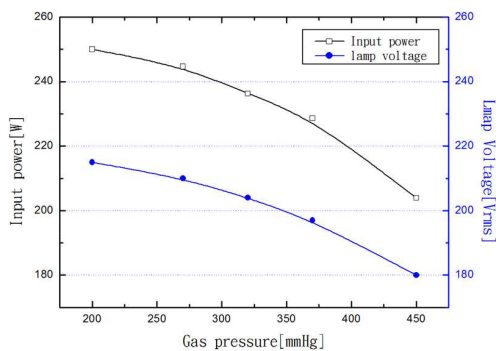


그림 7. 가스압에 따른 전기적특성
Fig 7. Electrical Characteristics of gas pressure

시험용으로 제작된 램프 관전류는 1.2[Arsm]인 250W급 동일한 점등회로로 전력을 인가하여 시험한 결과 그림 7과 같이 가스압이 증가함에 따라 무전극 램프의 관전압이 낮아져서 인가전력이 낮아짐을 알 수 있다.

가스압에 따른 광효율 및 연색성을 측정된 결과 그림 8과 같이 약 270~370[mmHg]사이에서 최적점을 찾을 수 있었다. 가스압이 낮을 경우 연색성이 저하되는 문제점이 있으며, 가스압이 높을 경우 급격하게 관전압이 낮아짐에 따라 인가전력이 떨어지는 영향으로 광학적 특성이 저하가 심해지는 특

성을 보였다.

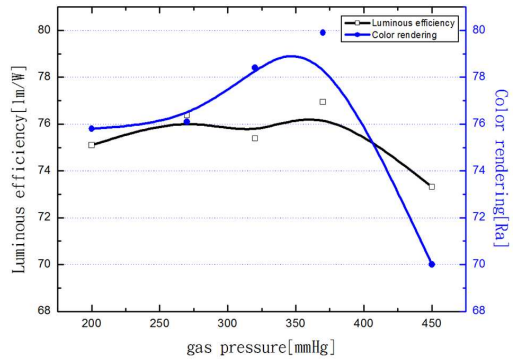


그림 8. 가스압에 따른 광학적 특성
Fig 8. Optical Characteristics of gas pressure

물론 점등회로 측에서 인가전력을 높이기 위하여 램프의 관전류로 높일 수 있으나 전류한도에 따른 소자가격 상승과 인덕터 및 반도체소자의 열적인 문제 등 한계점을 가지고 있다.

때문에 현재 최적화된 고출력 무전극 램프 방전관 및 페라이트코어에 맞는 가스압 300~350 정도로 최적화 한 후 최종 점등회로 셋업을 진행하는 것으로 결론을 내렸다.

4.2 아말감에 따른 특성분석 및 최적화

유도결합형 무전극 램프는 플라즈마 방전에서 일반 튜브 타입의 형광램프보다 높은 에너지 밀도와 관벽 부하를 가지기 때문에 높은 온도에서 동작한다. 그래서 금속과 결합된 아말감형태로 램프 안에 수은을 봉입한다.

일반적으로 아말감은 In, Bi, Sn과 수은의 합금으로써 수은 증기압의 특성은 초기 액상수은의 특성곡선에 따라 움직이나 온도가 상승함에 따라 수은의 증발과 아말감과 재결합을 통하여 아말감 고유의 특성 곡선 내에서 컨트롤이 가능하게 된다. 아말감의 온도증가에 따른 수은증기압의 변화는 방전관에 형성되는 플라즈마 인덕턴스(LP)와 저항(RP)의 변화요인이 된다.

고출력 무전극 램프 사이즈가 결정된 후 아말감

의 성분비에 따른 최적화된 가스압 범위에서 무전극 램프의 효율 및 연색성을 확인하고, 본 시험결과를 토대로 가스압과 동시에 아말감을 성분비를 최적화 하였다.

인듐(In)을 적용한 무전극 램프의 경우 그림 9 와 그림 11에서 보는바와 같이 가스압이 높아짐에 따라 인가되는 전력이 낮아지더라도 광효율은 큰 변화는 없으며, 가스압이 높아짐에 따라 연색성이 향상되는 특성을 보였다.

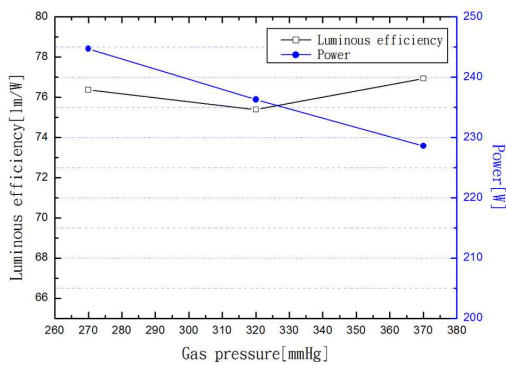


그림 9. 인듐(In)아말감을 적용할 경우 광효율, 전력
Fig 9. Luminous efficiency & Wattage according to indium amalgam application

주석(Sn)을 적용한 무전극 램프의 경우 그림 10 과 그림 11에서 보는바와 같이 전반적으로 광효율 및 연색성이 저하되는 특성을 보였다. 이는 무전극 램프 구동 시 전달되는 열에 의한 아말감내부의 수은의 증기압 최적화가 되지 않고, 이러한 영향으로 인가전력이 낮아지기 때문에 최적화에 어려움이 있는 것으로 판단된다.

또한 본시험 결과를 바탕으로 점등회로와의 매칭을 통하여 정격전력을 맞추기 위한 최적화된 무전극 램프를 제작할 수 있었다.

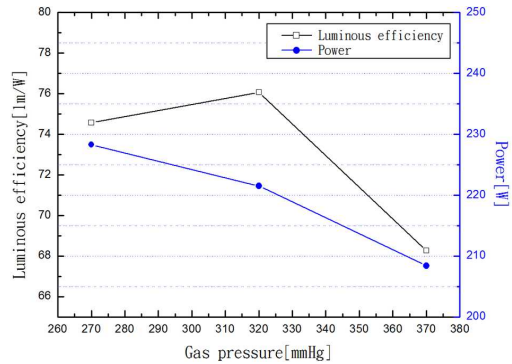


그림 10. 주석(Sn)아말감을 적용할 경우 광효율, 전력
Fig 10. Luminous efficiency & Wattage according to indium amalgam application

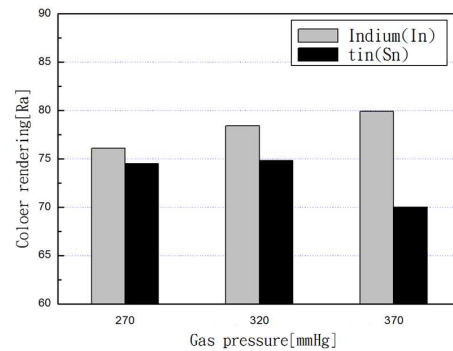


그림 11. 가스압에 따른 인듐, 주석 아말감 적용 시 연색성
Fig 11. In case of applying In & Sn amalgam, color rendering according to gas pressure

5. 결론

본 논문은 고효율, 고출력 무전극 램프의 개발을 위한 목적으로 기존의 공정을 개선 및 추가를 진행한 후 가스종류 및 가스압, 아말감 종류 등의 설계요소에 따라 무전극 램프를 제작하여 광학적, 전기적 특성분석 통하여 무전극 램프를 최적화를 하였다.

제조시설의 정확도, 주변 환경에 따라 가스압의 변화율이 높은 관계로 Kr 100% 가스를 주입함으로써 최적화 한 후, 발광면적을 넓히고, 온도특성을 개선하기 위하여 유리관 관경을 62mm로 키워 최적화를 진행하였다. 또한, 현재 고출력 무전극 램프 방전관 및 페라이트코어에 맞는 가스압 300~350[mmHg] 사이로 최적화 하였다. 인듐(In)

아말감을 적용한 무전극 램프로 점등회로 매칭을 완료하여 250W급(정격±10%)로 정격소비전력을 맞추어 최적화를 완료하였다.

REFERENCES

- [1] Hyun-seob Cho, "The study of induction heating apparatus with high efficiency", Journal of Korea Institute of Information Electronics and Communication Technology, Vol. 9, No. 2, pp185-189, Apr. 2016
- [2] Ui-Hyo Jeong, Jae-Phil Hyung, Seong-Yong Lim, Hong-Woo Lim, Joong-Soon Jang, "High Temperature Reliability Study of Low Frequency In-door Electrodeless Lamp", International Journal of Reliability and Applications, Vol.14 No.3, pp203-207, Sep. 2014
- [3] Jae-hyun Kwon, Jun-myung Lee, "Thermal characteristics of the design on residential 13.5W COB LED down light heat sink", Journal of Korea Institute of Information Electronics and Communication Technology, Vol. 7, No. 1, pp20-25, Mar. 2014
- [4] Wharmby, D. O., "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science Measurement and Technology, IEE Proceedings A, Vol.140, pp.465-473, 1993
- [5] V. A Godyak, K. Ohata., "Radio Frequency Light Sources", Industry Applications Conference, Conference Record of the 2002 IEEE, Vol.5, pp. 3281-3288, 2000
- [6] Oleg Popov, Jakob Maya, "Characteristics of electrodeless ferrite-free fluorescent lamp operated at frequencies of 1-15 MHz", Plasma Sources Sci. Technol. 9, 227 - 237, 2000
- [7] Yunoue. N, Harada. K, Ishihara. T, "A self-excited electronic ballast for electrodeless fluorescent lamps operated at 10MHz", IEEE APEC, pp. 2019-2024, Mar. 2002
- [8] X. H. Cao J. "Design Orientated Model and Application of Electronic Ballasts for Two Toroidal Ferrite Coupled Electrodeless lamps", IEEE APEC, pp. 1764-1769, 2005
- [9] S. H. Chen, S. C. Chang, I. N. Lin "The influence of grain boundary internal stress on permeability: temperature curve for Mn - Zn ferrites", Journal of Magnetism and Magnetic Materials Vol.209, Issues 1-3, Pages 193-196, February 2000
- [10] Eugen Statnic, Valentin Tanach, "Investigation of the electrical discharge parameters in electrodeless inductive lamps with a re-entrant coupler and magnetic core", Plasma Sources Sci. Technol. 15, pp 465 - 473, 2006
- [11] Motoichi Kawaguchi, "Impedance of Electrodeless RF Spherical Light Source with Plasma Uniformity", J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 85, No.2, pp 113-119 2001
- [12] Serres, A.W., Taelman, W., "Amalgams and compact fluorescent lamps" Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1993 IEEE, 1993, pp.2296-2304, 1993
- [13] Richard Speer, Philip Moskowitz, Jeff Holt "Transient State Mercury Transport During the Run-Up Phase of Inductively Coupled Fluorescent Lamps", The 11th International Symposium on the Science & Technology of Light Source, pp.585-589, 2007
- [14] Ron van Os, David Chazen., "Amalgam system for electrodeless discharge lamp" US Patent 5598069 Issued on January 28, 1997
- [15] Hyun Il Kim, "A Study on the Characteristics Analysis and the Standardization of Fluorescent Induction Lamps", Dongguk University Doctoral Thesis, 2007

저자약력

정 영 일(Young-Il Chung)

[정회원]



<관심분야>

- 1993년 7월 : 성균관대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
 - 2016년 12월 : 원광대학교 대학원 정보통신공학 박사과정
 - 1990년 3월 ~ 2000년 2월 : 금호전기(주) 선임연구원
 - 2001년 12월 ~ 현재 : (주)이택대표이사
- 정보경영, 정보통신, 조명시스템

정 대 철(Dae-Chul Jung)

[정회원]



<관심분야>

- 1962년 : 원광대학교 전기공학과 학사 과정
- 전기기기, 전자회로, LED통신

김 용 갑(Yong-Kab Kim)

[중신회원]



<관심분야>

- 1988년 아주대학교 전자공학과(공학사)
 - 1993년 엘라베마 주립대학교(공학석사)
 - 2000년 노스캐롤라이나 주립대(공학박사)
 - 2003년~현재 원광대학교 정보통신공학과 교수
 - 2006년~2013년: POST-BK21 사업단장
 - 2012년~2015년 : 원광대학교 창업보육 센터장
 - 2014년~2015년 : 원광대학교 창업지원단장
 - 2012년~현재 : LED고급인력 양성사업단장(전북)
- 가시광통신&시스템, 광메모리센서, 전력선통신, Nonlinear Optics

박 대 희(Dae-Hee Park)

[정회원]



<관심분야>

- 1979년 한양대학교 전기공학과(공학사)
 - 1983년 한양대학교 전기공학과(공학석사)
 - 1989년 일본대관대학 전기전자공학(공학박사)
 - 2003년 - 현재 : 한국조명연구원 이사
 - 2004년 - 현재 : 지식경제부 지정 전기응용신기술연구센터 센터장
 - 2009년 - 2011년 : 원광대학교 공과대학장
- 고전압 및 진단기술, LED광원 및 조명기술