

환형 무전극 램프의 광학적, 전자계적 해석

Analysis of Optical and Electromagnetic Distribution of Ring-shaped Electrodeless Fluorescent Lamps

조주웅^{1,a}, 최용성¹, 김용갑¹, 박대회¹

(Ju-Ung Jo^{1,a}, Yong-Sung Choi¹, Yong-Kab Kim¹, and Dae-Hee Park¹)

Abstract

In recent, there have been several developments in lamp technology that promise savings in electrical power consumption and improved quality of the lighting space. Above all, the advantage of ring-shaped electrodeless fluorescent lamp is the removal of internal electrodes and heating filaments that are a light-limiting factor of conventional fluorescent lamps. Therefore, the life time of ring-shaped electrodeless fluorescent lamps is substantially higher than that of conventional fluorescent lamps and last up to 60,000 hours and is intended as a high efficacy replacement for the incandescent reflector lamp in many applications. In this paper, maxwell 3D finite element analysis program (Ansoft) was used to obtain electromagnetic properties associated with the coil and nearby structures. The electromagnetic emitting properties were presented by D simulation software operated at 250 kHz and some specific conditions. Photometric characteristic of the ring-shaped electrodeless fluorescent lamp were investigated using LS-100 lightmeter and TA-0510 thermometer respectively.

Key Words : Ring-shaped electrodeless fluorescent lamp, Maxwell 3D finite element

1. 서 론

환형 무전극 램프의 장점은 광원 램프 자체의 수명이 길고, 수명 기간 동안 광속유지율 (lumen maintenance)이 거의 일정하고, 광변환 효율의 변화가 적으며, 무수은 및 폐기물의 최소화로 높은 환경 친화성 등 많은 장점을 갖고 있다. 그러나, 전자파 발전기 자체의 효율, 전자파의 방전 플라즈마 결합 효율, 발광 가스의 부적합성, 그리고, 재래식 전극 광원의 단기적이지만 더 좋은 경제성 때문에 전자파 방전을 이용한 광원의 실용화는 쉽게 일어나지 않았다[1].

일반적인 무전극 램프의 봉입 가스의 방전은 2 가지 형태를 이루고 있는데, 첫 번째 형태는 Babat라 하는 E방전으로 전계 결합형이라고 부른다. 방전관의 외벽에 대전극은 박막으로 설치하고, 교류를 인가하면 관 내부에서 방전이 형성된다. 이것은 외면의 전극과의 사이에 전기용량을 통하여 전류가 흐른다고 생각할 수 있다. 이 방식은 외면 전극형이라고 한다. 두 번째 형태는 H방전이다. 전형적으로 구형 방전관의 외주에 권선을 감고, 교류를 통과시키면 전자유도에 의한 자계가 발생하고, 관 내부에 방전이 형성된다. 관 내부의 방전형식은 환형으로 되며, 외부의 권선과는 전자결합에 의한 전력이 공급되어 진다. 외부의 '권선을 1차 권선으로 하고, 관 내부의 환형 방전을 2차권선이라 하는 변압기모델로 생각할 수 있다[2,3].

본 논문은 효율적이고 최적의 무전극 환형 유도 결합형 램프를 설계하기 위하여, 변압기 모델을 사

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부

(전북 익산시 신용동 344-2)

a. Corresponding Author : exit001@wonkwang.ac.kr

접수일자 : 2003. 12. 10

1차 심사 : 2004. 1. 12

심사완료 : 2004. 2. 3

용하여 유도코일부에서 발생하는 축방향의 교번자계 분포를 Maxwell 시뮬레이션을 통하여 전자계 해석하고, 전자기적 특성을 고찰하였다. 그리고 휘도, 온도, 그리고 스펙트럼의 세기분포를 측정하여, 전자계분포와 비교하여 발광영역의 자계의 세기를 고찰하였다.

2. 실험

고주파를 이용하여 플라즈마를 방전시키는 방법에는 용량성 RF 방전 (capacitive RF discharge), 유도 RF 방전 (inductive RF discharge), 그리고 RF파 방전 (RF wave discharge)의 3가지가 있다. 용량성 RF 방전은 전극 sheath 내 변위전류 (displacement current)에 의해 플라즈마가 발생한다. 이때 파장은 방전크기 보다 큰 정전 RF E-field에 의해 여기된다. 유도 RF 방전은 H-field와 플라즈마의 방전 경로를 따라 생성된다. 이때에도 역시 가해주는 주파수의 파장은 방전 크기보다 커야 되고, RF파 방전은 전자기파 (electromagnetic wave)에 의해 유지된다. 마이크로 웨이브 방전은 일반적으로 1 GHz보다 더 크거나 비슷한 마이크로 전력에 의해 유지된다[4-8]. 유도 RF 방전이 본 실험에서 선택된 이유는 용량성 RF 방전과는 반대로 전력이 증가함에 따라 전력효율이 증가하고, RF파 방전 보다 낮은 대역의 주파수를 사용하기 때문에 시스템의 안정성과 열손실을 줄일 수 있기 때문이다. 본 실험에서는 유도 RF 방전의 전자계 특성을 실험하였다.

전자계 시뮬레이션에 사용한 환형 무전극 램프는 그림 1과 같은 OSRAM ENDURA 150 W이며, 이것을 기준으로 전자계 특성을 평가하였다. 전자계 평가용 소프트웨어로는 Ansoft의 Maxwell 3D Field Simulator를 사용하였다. OSRAM ENDURA 150 W 환형 무전극 램프의 전자계 형성과정을 알아 보기 위하여 자성체 페라이트[9]의 재질은 투자율이 2,000인 Mn-Zn을 사용하였고, Mn-Zn 주위를 16회 감겨 있는 코일을 사용하였고, 입력 주파수는 250 kHz를 입력하였다. 이외의 영역에서는 비투자율이 1이고, 도전율이 0인 공기로 입력하여 실행하였다. 또한, 램프 내부의 가스와 유리에 대해서는 고려하지 않고 시뮬레이션을 시행하였다.

그림 1에서 LS-100 휘도계와 TA-0510 방사온도계의 측정위치는 다음과 같다. 휘도계는 3차원 직교좌표 A(0, 0, 44) cm이고, 방사온도계는 B(22,

0, 44) cm이다. 광원의 측정위치인 Point 2의 위치는 (11, 0, 0) cm이고, Point 1의 위치는 (19, 0, 0) cm이다. 휘도계와 온도계의 측정 위치를 고정시키고, 광원의 측정 위치에 따라 변하는 휘도와 온도의 분포를 시간 변화에 따라 동시에 측정하였다. 측정위치를 Point 1과 Point 2로 한정된 이유는 환형 무전극 램프의 기하학적 대칭성과 광원의 방사 특성이 균일하기 때문이다.

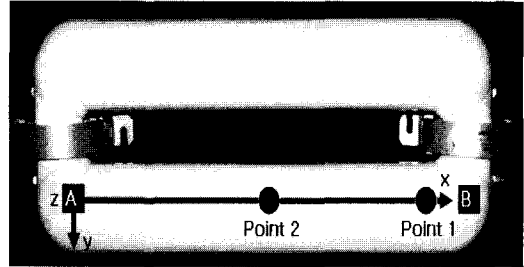


그림 1. 위치에 의한 ENDURA 150 W 환형 무전극 램프의 온도와 휘도 및 스펙트럼 세기 분포.

Fig. 1. Measurement position of distribution of brightness, temperature and spectrum intensity for ENDURA 150 W Ring-shaped electrodeless fluorescent lamp.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 OSRAM ENDURA 150 W 환형 무전극 램프를 기준으로 설계한 램프의 전자계 분포를 나타내고 있다. 코일은 자성체 코어 안쪽, 바깥쪽에 위치하며, 전류가 흐르면 그림 3과 같이 자성체 주위에 전자계가 형성된다. 이것은 전구 내부의 방전영역으로서 자속의 변화는 방위 방향의 전계가 코일 주위에 형성되고 별브 안에 있는 여러 가지 혼합가스에 영향을 주어 플라즈마[10]가 형성되어 나타난다.

그림 3은 유도 RF 방전 전자계 분포 형성을 나타내고 있다. 코일은 자성체 코어 안쪽, 바깥쪽에 위치하며, 전류가 흐르면 그림 2와 같이 자성체 주위에 전자계가 형성된다. 무전극 램프는 유도결합 방전을 이용하고, 고주파 전류가 유도 코일에 인가되었을 때 발생하는 전자계의 방사에너지에 의해 램프 내부의 가스를 여기시키는 메커니즘으로 이루어진다.



그림 2. 페라이트 주위에 형성된 전자계 분포.
 Fig. 2. Distribution of electromagnetic field formed around ferrite core.

램프 내부에는 아르곤 (Ar), 크립톤 (Kr) 등의 희소 가스가 미량의 수은과 봉입되며, 전자계로부터 에너지를 받은 전자는 충돌에 의해 수은원자를 여기시키게 되는데, 이때 자외선이 방출되고 램프 내부에 도포된 형광막을 지나면서 눈으로 볼 수 있는 가시광선으로 바뀌게 된다. 그림 2와 그림 3은 이러한 전자계 방사 에너지 교환을 위한 전자계 분포를 램프 무전극 램프 측면과 Mn-Zn 페라이트 주변에서 형상화한 것이다.

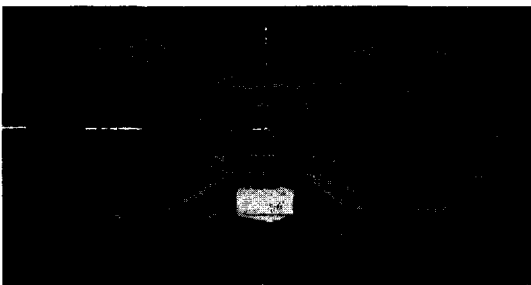


그림 3. 페라이트 코어 주변에 형성된 전기와 자계의 분포.
 Fig. 3. Distribution of electrical and magnetic field formed around ferrite core.

그림 4는 입력된 재질을 바탕으로 페라이트와 코일 주위를 세밀히 관찰하기 위하여 보다 세분하게 요소분할한 단면도이며, 이것을 통해 페라이트 내부와 코일 주위에 균일하게 전자계가 형성됨을 알 수 있다. 페라이트코일 중심에서 외곽으로 자속밀도 분포가 발생하지 않고, 환형 페라이트 주위에 자속밀도가 $2.5 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$ 이하로 분포함을 알 수 있다. 이것을 통하여 전기분포는 페라이트 코어

주변에서 강하게 발생함을 알 수 있고, 두개의 페라이트 코어에 의해 전기 분포가 유체와 같은 유동성을 갖고, 변압기의 모델에 의해 에너지가 교환됨을 알 수 있다[3].

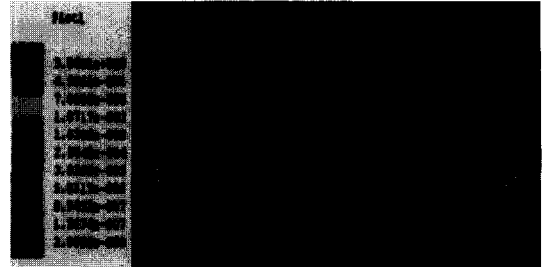


그림 4. 전체 자속밀도 분포.
 Fig. 4. Distribution of total magnetic flux density.

그림 5는 페라이트 코어 중심에서 x방향으로 해석한 자기장도 분포도이다. x축은 페라이트 코어 중심에서 유리관 끝까지 100 mm의 반경을 나타내고, y축은 자기장도의 크기를 나타낸다. 입력 전류를 0.5 A, 0.7 A 및 0.9 A로 변화시켰을 때, 자기장도 분포를 관찰하였다. 0 mm와 20 mm 근처에서는 자기장도가 6~8 AT/m 정도로 약하게 분포하고, 페라이트 코어 코일이 감겨있는 부근에서 지수 함수적으로 증가하여 입력전류에 따라 83 AT/m, 118 AT/m 및 150 AT/m이 되며, 다시 감소함을 알 수 있다. 자기장도는 입력전류의 변화에 따라 30 AT/m 정도로 균일하게 증가함을 알 수 있다.

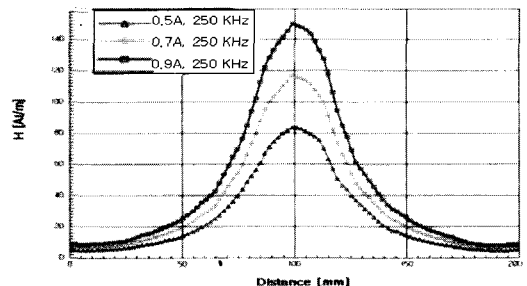


그림 5. 입력 전류에 의한 자기장도 세기분포.
 Fig. 5. Distribution of magnetic field strength by input current.

그림 6은 페라이트 코어의 직교좌표를 중심으로 하여, 직교좌표의 각 축에 따라 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. x축은 환형 페라이트 코어를 관통하지 않고, 내부를 지나는 축으로서, 자속밀도가 거리에 따라 $4 \times 10^{-2} \text{ Wb/m}^2$ 로 급격히 증가하다가, $1 \times 10^{-2} \text{ Wb/m}^2$ 로 감소하였다. y축과 z축에서는 페라이트 코어의 자속밀도 방향과 다르기 때문에 $3 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$ 정도로 커다란 변화를 나타내고 있지 않는다.

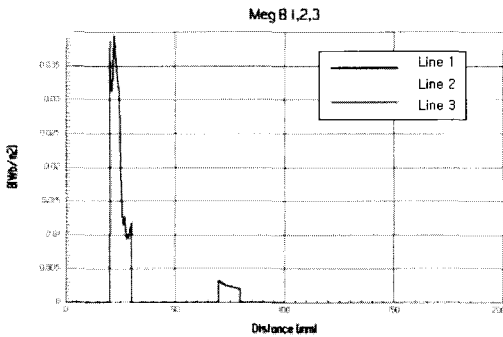


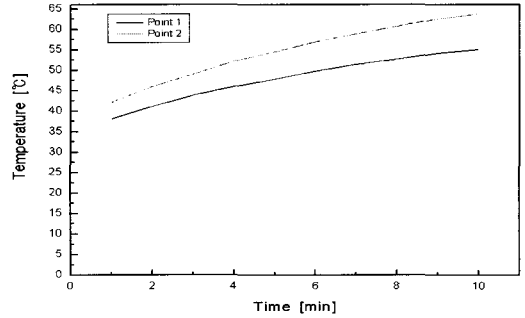
그림 6. 방전튜브 내부의 x축상의 거리에 대한 자속밀도 분포.

Fig. 6. Distribution of magnetic flux density according to distance on the X-axis inside of tube.

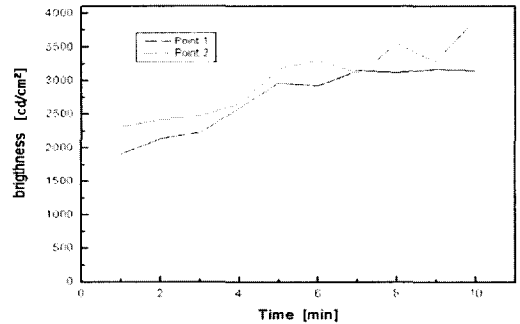
그림 7은 시간에 의한 온도분포와 휘도 분포를 측정된 것이다. 시간에 따라 온도와 휘도분포는 증가하고 있으며, 휘도는 $1800 \text{ cd/cm}^2 \sim 3600 \text{ cd/cm}^2$ 에서 증가와 감소를 보이며, 온도의 경우 $37 \text{ }^\circ\text{C} \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 일정한 형태로 증가함을 알 수 있다.

그림 8 (a)와 (b)는 시간에 따른 파장의 스펙트럼 분포를 측정된 결과로서, Point 1과 Point 2에서 파장의 스펙트럼 분포를 비교한 것이다. Mn-Zn 페라이트 코어 주변에 위치한 Point 1의 파장 스펙트럼 변화는 그림 8 (a)와 같이 550 nm와 614 nm에서 큰 변화를 보이고 있다. 시간에 따른 파장의 스펙트럼 분포 변화는 550 nm에서 800 cd/cm^2 간격으로 증가를 보이고 있으며, 다른 파장대역에서는 미미한 변화를 보이고 있다. Point 2의 파장의 스펙트럼 변화는 그림 8 (b)와 같이 Point 1의 파장 스펙트럼 분포와 동일한 분포 형태를 이루고 있으나, 시간에 따라 전체적인 스펙트

럼 분포 변화의 강도는 점점 증가함을 알 수 있다. 무전극 램프의 증상에 위치한 Point 2의 광학적 특성은 그림 2와 그림 4의 결과로 인하여, Mn-Zn 페라이트 코어 전자계 방사에너지가 거리에 따라 비선형성을 이루고 있다는 것을 알 수 있다.



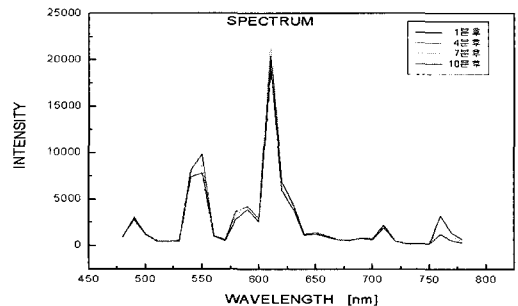
(a) 시간에 의한 휘도분포



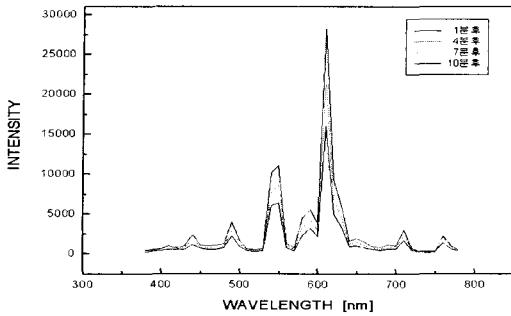
(b) 시간에 의한 온도분포

그림 7. 각각의 위치에서 휘도와 온도 분포.

Fig. 7. Distribution of brightness and temperature at each position.



(a) Point 1에서 파장에 의한 시간별 스펙트럼 세기분포



(b) Point 2에서 파장에 의한 시간별 스펙트럼 세기 분포

그림 8. 위치에 따른 스펙트럼 세기 분포.

Fig. 8. Distribution of spectrum intensity according to each position.

4. 결론

본 연구에서는 무전극 램프의 자계 형성을 Ansoft의 Maxwell 3D Field Simulator을 통하여 조사하였다. 자성체는 Mn-Zn 페라이트 (투자율 2000)를 사용하였으며, 페라이트 주위에 감겨있는 코일의 재질 (16회)은 구리선으로 선택하여 입력 전류를 0.5 A, 0.7 A 및 0.9 A로 변화시켜 시뮬레이션하였다. 또한, 광학적 인 측정은 휘도와 온도 그리고 파장 스펙트럼 분포를 동시에 1분 간격으로, 10분 동안 측정하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 페라이트코어 주위에 균일하게 전자기장이 형성됨을 확인하였고, 페라이트 코일 중심에서 램프의 외곽으로 자계강도 분포가 두개의 페라이트 코어에 대하여 대칭적으로 분포함을 알 수 있었다.
- 2) 페라이트 코어가 감겨있는 중심 부근에서 상향에서 하단까지 자계 강도 분포는 지수 함수적으로 증가하고, 다시 감소함을 알 수 있었다.
- 3) 입력전류에 따른 자계강도 세기분포 특성에서, 전체 자속밀도 분포는 벌브 중앙에서 가장 약하며, 대칭을 이루고 있음을 알 수 있었다.
- 4) 그러나, 환경 무전극 램프의 발광영역의 세기는 강한 자계가 방사되어 나오는 페라이트 코어 부근에서 가장 클 것으로 생각되지만, 위치에 따른 온도와 휘도 그리고 광 스펙트럼을 비교한 결과, 유리관의 중앙 부근에서 발광영역의 세기가 높다는 것을 알 수 있다.
- 5) 플라즈마와 반응하는 자계의 세기는 유리관의 발광 영역이 가장 큰 중앙부근에서 2.091×10^{-2}

Wb/m^2 로 나타나며, 이것을 통해 최대 발광을 위한 자계의 값을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 에너지 관리 공단에서 시행한 “직관 및 환경 무전극 형광램프의 구조 설계기술” 사업의 지원을 받아 이루어진 논문입니다. 이번 연구를 지원해 주신 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- [1] B. P. Turner, M. G. Ury, and D. A. McLennan, “Microwave excited sulfurlamp”, Paper QA2. 47th Annual Gaseous Electronics Conference (Gaithersburg, MD, USA), 1994.
- [2] 황명근, 이종찬, 박대회, “무전극 램프의 기술 동향과 전망”, 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집, p. 23, 2001.
- [3] IM El-Fayoumi and IR Jones, “The electromagnetic basis of the transformer model for an inductively coupled RF plasma source”, Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 7, p. 179, 1998.
- [4] G. I. Babat, “Electrodeless Discharge and some applied problems”, J. IEE, Vol. 94, pt3, p. 27, 1947.
- [5] 김영철, 이정우, 조영석, “Argon 유도결합 플라즈마의 광학적, 전기적 특성에 대한 연구”, New Physics, Vol. 39, No. 3, p. 157, 1999.
- [6] 이경순, 이우동, 백순철, 조영석, “Ar, CF₄ 및 혼합개스의 RF 글로우방전 플라즈마에 대한 OES를 통한 진단”, New Physics, Vol. 33, No. 1, p. 50, 1993.
- [7] D. O. Wharmby, “Electrodeless lamps for lighting: a review”, IEE Proceedings 140A, p. 465, 1993.
- [8] 신중홍, 고태인, 김두환, 박정후, “플라즈마 파라메타 측정용 고속 Langmuir 프로브 구동회로 실현 및 적용”, 전기전자재료학회논문지, 9권, p. 506, 1996.
- [9] 남창갑, 강재덕, 최희태, 신용진, “페라이트의 μ -T 특성측정을 위한 다중계측시스템에 관한 연구”, 전기전자재료학회논문지, 3권, p. 123, 1990.
- [10] 이수부, 박헌전, 이석현, “유도결합형 플라즈마원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구”, 전기전자재료학회논문지, 11권, p. 261, 1998.