

논문 17-5-16

환형 무전극 형광램프의 전자계 시뮬레이션, 전기적 및 광학적 특성

Electromagnetic Simulation of Ring-shaped Electrodeless Fluorescent Lamps and its Electrical and Optical Characteristics

최용성<sup>1,a</sup>, 조주웅<sup>2</sup>, 이영환<sup>2</sup>, 김광수<sup>2</sup>, 박대희<sup>1</sup>  
(Yong-Sung Choi<sup>1,a</sup>, Ju-Ung Jo<sup>2</sup>, Young-Hwan Lee<sup>2</sup>, Kwang-Soo Kim<sup>2</sup>, and Dae-Hee Park<sup>1</sup>)

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. The ring-shaped electrodeless lamp is intended as a high efficiency replacement for the incandescent reflector lamp in many applications. 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. 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 3D simulation software operated at 250 kHz and some specific conditions. The optical characteristics were measured luminance and a temperature and an optical spectrum distribution for 10 min in a one minute interval at the same time. With a goal of finding alternative materials, we show measurement results of electrical characteristics of a ring-shaped electrodeless fluorescent lamp as a function of frequency and the number of coil turns using a highly permeable( $\mu_r \approx 2,000$ ) Mn-Zn ferrite. These results are compared with those of conventional ring-shaped electrodeless fluorescent lamp. It is found that the resistance, inductance and impedance are increased while the quality factor decreases as frequency increases.

Key Words : Electrodeless fluorescent lamp, Maxwell 3D finite element, Ferrite core, Quality factor, Skin effect

1. 서론

일반적으로 널리 사용되고 있는 램프는 발광관 내부에 필라멘트나 전극이 있어서 전극의 산화나 증발로 인해 수명을 단축시키게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위한 무전극 램프가 1884년 Hittorf에 개발된 이후 지속적으로 많은 연구가 진행되어 왔

다. 무전극 형광램프의 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[1].

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[2].

일반적인 무전극 형광램프의 봉입 가스의 방전은 2가지 형태를 이루고 있는데, 첫 번째 형태는 Babat라 하는 E방전으로 진계 결합형이라고 부른

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부  
(전북 익산시 신용동 344-2)  
2. 원광대학교 전자재료공학과  
a. Corresponding Author : biochips@wonkwang.ac.kr  
접수일자 : 2003년 12월 10일  
1차 심사 : 2004년 1월 19일  
심사완료 : 2004년 3월 8일

다[3-5]. 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 2차 권선이라 하는 변압기 모델로 생각할 수 있다[6]. 여기서 무전극 램프 특성에 큰 영향을 주는 코일이나 페라이트 코어의 전·자기적 특성에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 논문은 효율적이고 최적의 무전극 환형 유도결합형 램프를 설계하기 위하여, 변압기 모델을 사용하여 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. 또한 코일의 권선수와 주파수 변화에 따른 전기적 특성을 측정하여 최적의 설계 조건을 조사·검토하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

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 시스템 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, RF 파 방전은 전자기파(electromagnetic wave)에 의해 유지된다. 웨이브 방전은 일반적으로 1 GHz보다 더 크거나 비슷한 마이크로 전력에 의해 유지된다[7-14]. 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 논

문에서는 유도 RF 방전의 전자계 특성을 실험하였다.

### 2.1 전기적 등가 회로

페라이트 코어에 코일이 감겨진 환형 무전극 형광 램프의 등가 회로는 그림 1과 같다. 환형 무전극 형광 램프의 점등 회로는 유도 결합형 플라즈마를 이용한다. 실험에서 코일이 페라이트 코어에 감겨진 상태는 변압기의 원리와 같다. 변압기의 원리를 이용한 등가 회로[15]는 유도 코일에 RF 전압을 인가하는 1차 측과 방전관인 2차 측으로 구분하여 나타내었다.

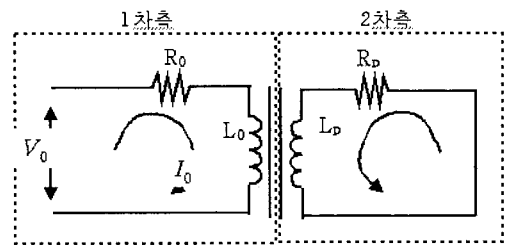


그림 1. 실험회로의 등가회로.

Fig. 1. Equivalent circuit of experimental circuit.

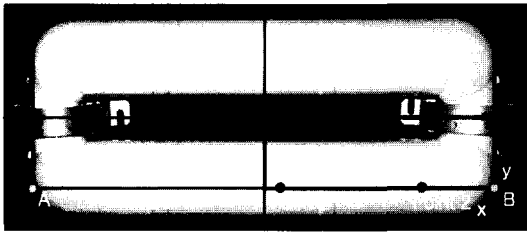
### 2.2 시료 및 시뮬레이션 조건

전자계 시뮬레이션에 사용한 환형 무전극 형광 램프는 그림 2 (a)와 같은 OSRAM ENDURA 150 W이며, 이것을 기준으로 전자계 특성을 평가하였다. 전자계 평가용 소프트웨어로는 Ansoft의 Maxwell 3D Field Simulator를 사용하였다. 150 W 환형 무전극 형광램프의 전자계 형성과정을 알아보기 위한 코어는 그림 2 (b)와 같으며, 투자율이 2,000인 Mn-Zn계 페라이트를 사용하였고, Mn-Zn 페라이트 주위를 16회 감겨 있는 코일의 재질은 구리로 하였다. 입력 주파수는 250 kHz로 하였다. 이외의 영역에서는 비투자율이 1이고, 도전율이 0인 공기로 입력하여 실행하였다. 또한, 램프 내부의 가스와 유리에 대해서는 고려하지 않고 시뮬레이션을 시행하였다.

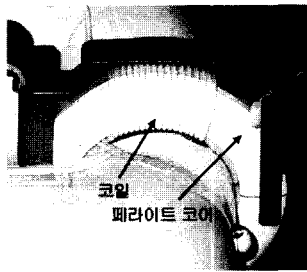
### 2.3 전기적 특성

기존의 환형 무전극 형광 램프는 페라이트 코어에 코일이 17회 감겨있으며, 실험에서는 기존의 권선수와 동일한 것과, 14회에서 21회까지 권선수를 변화시켜서 전기적 특성을 측정하였다. 사용된 코

일의 외경은 1.2 mm이며, 고온에서도 견딜 수 있는 테프론 코팅된 절연 전선을 사용하였다. 전기적 특성 측정에는 Impedance/Gain-phase analyzer인 HP4194A를 사용하였다. 기존의 환형 무전극 형광램프와 코일의 권선수를 변화시킨 램프 시스템에 대하여 램프의 사용 주파수인 250 kHz를 기준으로 50 kHz부터 500 kHz까지 25 kHz의 간격으로 주파수를 변화시키면서 저항, 품질지수(Q-factor), 임피던스, 인덕턴스 등의 전기적 특성을 측정하였다.



(a) 환형 무전극 형광램프



(b) 페라이트 코어

그림 2. ENDURA 150 W 환형 무전극 형광램프의 휘도, 온도 및 스펙트럼의 강도 측정 위치.

Fig. 2. Measurement position of distribution of brightness, temperature and spectrum intensity for ENDURA 150 W ring-shaped electrodeless fluorescent lamp.

#### 2.4 광학적 특성

LS-100 휘도계와 TA-0510 방사온도계의 측정 위치는 그림 2와 같이 A(0,0,0) cm과 B(0,0,0) cm을 휘도계와 방사온도계의 직교좌표 원점으로 하여 지면으로부터 A를 기준으로 C(39,28,44) cm의 위치에 있는 온도계와 B로부터 D(42,22,44) cm의 위치에 있는 휘도계가 45° 하향에서 측정하였다. B로부터 Point 1의 위치는 (0,-7,0) cm이고, Point 2의 위치는 (0,-16,0) cm이다. 측정 위치가 4/4분면으로 선택된 이유는 환형 무전극 램프의 기하학적 대칭과 광원의 방사특성 때문이다.

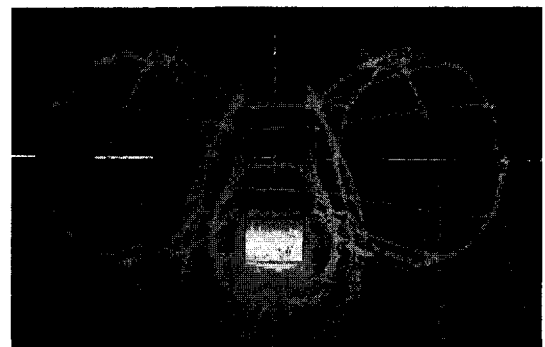
### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 전자계 시뮬레이션

그림 3 (a)는 150 W 램프의 전자계 분포를 나타내고 있다. 코일은 자성체 코어 안쪽, 바깥쪽 혹은 코어 내부에 위치하며, 전류가 흐르면 그림 3 (a)와 같이 자성체 주위에 전자계가 형성된다. 이것은 진구 내부의 방전영역으로서 자속의 변화는 방위 방향의 전계가 코일 주위에 형성되고 별브안에 있는 여러 가지 혼합가스에 영향을 주어 플라즈마가 형성되어 나타난다. 그림 3 (a)에서 페라이트 코어 중심에서 외곽으로 자속밀도 분포가 발생하지 않고, 환형 페라이트 주위에 자속밀도가  $2.5 \times 10^{-1}$  Wb/m<sup>2</sup> 이하로 분포함을 알 수 있다. 이것을 통하여 전계분포는 페라이트 코어 주변에서 강하게 발생함을 알 수 있고, 두개의 페라이트 코어에 의해 전계 분포가 유체와 같은 유동성을 갖고, 변압기의 모델에 의해 에너지가 교환됨을 알 수 있다.



(a) 전체 자속밀도 분포



(b) 전자계분포

그림 3. 페라이트 주위의 자계밀도 분포.

Fig. 3. Distribution of magnetic flux density around ferrite core.

그림 3 (b)는 유도 RF 방전 전자계 분포 형성을 나타내고 있다. 코일은 자성체 코어 안쪽, 바깥쪽 혹은 코어 내부에 위치하며, 전류가 흐르면 그림 3 (a)와 같이 자성체 주위에 전자계가 형성된다. 이것은 진구 내부의 방전영역으로서 자속의 변화는 방위 방향의 전계가 코일 주위에 형성되고 벌브 안에 있는 여러 가지 혼합가스에 영향을 주어 플라즈마가 형성된다.

그림 4는 입력된 재질을 바탕으로 페라이트와 코일 주위를 세밀히 관찰하기 위하여 보다 세분하게 요소분할한 단면도이며, 이것을 통해 페라이트 코어 주위에 자계강도가 균일하게 형성됨을 나타낸다. 페라이트 코어 중심 부근에서는 최고  $1.1 \times 10^2$  AT/m로 분포하며, 유리관 중앙으로 갈수록 점점 자계강도가 줄어들어  $6.0 \times 10^{-1}$  AT/m로 분포하게 된다. 이것을 통하여 자계강도 분포는 페라이트 코어 주변에서 강하게 발생함을 알 수 있고, 두개의 페라이트 코어에 의해 자계강도 분포가 유체와 같은 유동성을 갖고, 변압기의 모델에 의해 에너지가 교환됨을 알 수 있다.

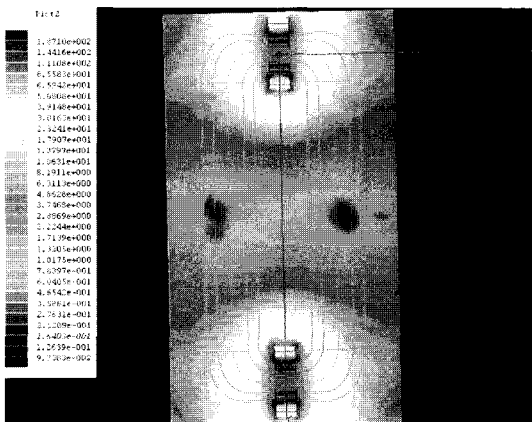
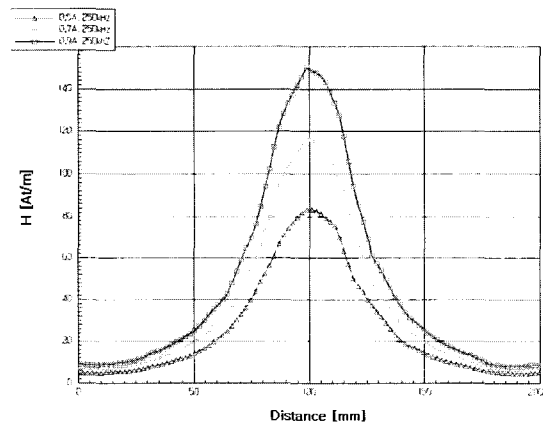


그림 4. 전체 자계의 분포.  
Fig. 4. Distribution of total magnetic field.

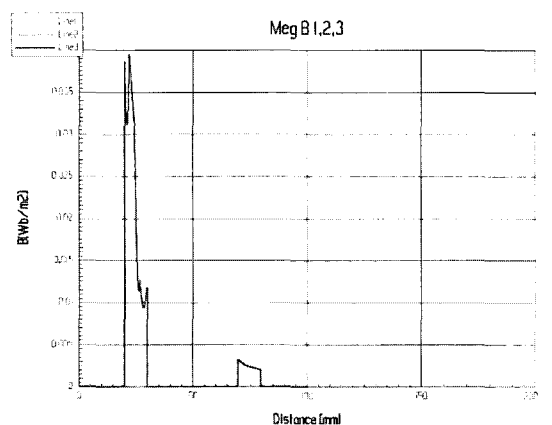
그림 5 (a)는 페라이트 코어 중심에서 x방향으로 해석한 자계강도 분포도이다. x축은 페라이트 코어 중심에서 유리관 끝까지 100 mm의 반경을 나타내고, y축은 자계강도의 크기를 나타낸다. 입력 전류를 0.5 A, 0.7 A 및 0.9 A로 변화시켰을 때, 자계강도 분포를 관찰하였다. 0 mm와 20 mm 근처에서는 자계강도가 6~8 AT/m 정도로 약하게 분포하고, 페라이트 코어 코일이 감겨있는 부근에

서 지수 함수적으로 증가하여 입력전류에 따라 83 AT/m, 118 AT/m 및 150 AT/m이 되며, 다시 감소함을 알 수 있다. 자계강도는 입력전류의 변화에 따라 30 AT/m 정도로 균일하게 증가함을 알 수 있다.

그림 5 (b)는 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  $4 \times 10^{-2}$  Wb/m<sup>2</sup>로 급격히 증가하다가,  $1 \times 10^{-2}$  Wb/m<sup>2</sup>로 감소하였다. y축과 z축에서는 페라이트 코어의 자속밀도 방향과 다르기 때문에  $3 \times 10^{-3}$  Wb/m<sup>2</sup> 정도로 커다란 변화를 나타내고 있지 않는다.



(a) 입력전류에 따른 자계의 세기



(b) 자속밀도

그림 5. 자계의 세기 및 자속밀도의 분포.  
Fig. 5. Distribution of magnetic field strength and magnetic flux density.

### 3.2 전기적 특성

그림 6은 기존의 환형 무전극 램프와 코일의 권선수를 바꾼 램프에서의 주파수 변화에 따른 품질지수 특성을 비교하여 나타낸 결과이다. 품질지수는 주파수가 증가함에 따라 160에서 20 정도까지 전체적으로 감소하는 경향이 나타났다. 여기에서 품질지수는 인덕턴스와 공진 주파수에 비례하고 저항에 반비례하지만, 코일의 권선수가 증가하게 되면 인덕턴스와 저항이 동시에 증가하게 되므로 기존의 품질지수에 근접하기가 어려웠다. 모든 시료에서 기존 램프에 비하여 적은 값을 나타냈으나, 코일 권선수가 21회이면 기존 램프와 가장 근접한 값이 나타났다. 이것은 RLC 직렬회로에 대한 품질지수 Q의 정의식[16]인  $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$ 에서 알 수 있듯이, 권선수에 따라 저항보다 인덕턴스가 더 커지기 때문인 것으로 생각된다. 향후, 코일의 종류나 직경도 함께 변경하면서 적절한 값을 찾아야 할 것이다.

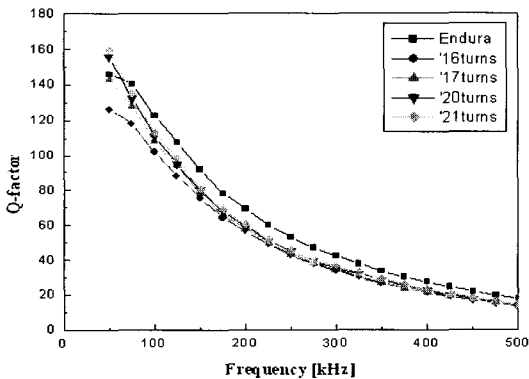


그림 6. 품질지수 특성.  
Fig. 6. The Q-factor characteristics.

그림 7은 기존의 환형 무전극 램프와 코일 권선수 변화에 의한 시료의 임피던스 특성을 비교한 것이다. 회로의 임피던스는 주파수 증가에 따라 250 Ω~3800 Ω까지 선형적으로 증가하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 권선수가 16회인 코일의 임피던스 특성이 기존 무전극 형광램프의 동작 주파수인 250 kHz를 포함하여 전반적으로 기존 환형 무전극 램프와 유사하게 나타났다.

그림 8은 기존의 환형 무전극 램프와 코일의 권선수를 변화시킨 램프의 저항 특성을 주파수 별로 나타내고 있다. 코일의 권선수가 14회와 15회가 기존의 무전극 형광 램프와 유사한 특성이 나타났다.

그리고 주파수가 증가함에 따라 저항도 5 Ω~250 Ω까지 지수 함수적으로 증가하였다. 여기서 주파수 증가에 따라 저항이 증가하는 것은 표피효과에 의해서 코일 내부로는 전류의 흐름이 어려워 저항이 증가하게 되는 것이다.

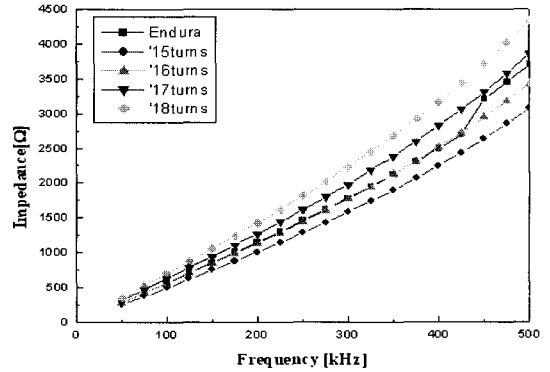


그림 7. 주파수와 권선수에 따른 임피던스 특성.  
Fig. 7. The Impedance characteristics as a function of frequency and coil turns.

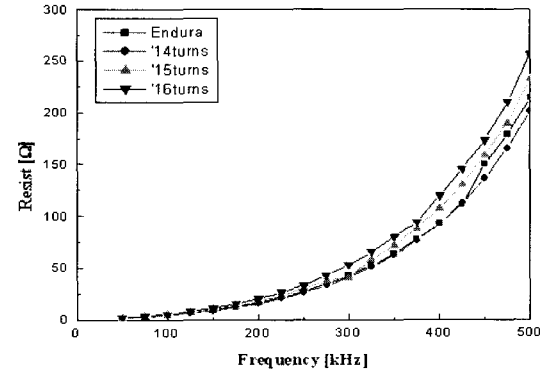


그림 8. 주파수와 권선수에 따른 저항 특성.  
Fig. 8. The Resistance characteristics as a function of frequency and coil turns.

그림 9는 주파수 변화에 따른 인덕턴스 특성을 기존의 환형 무전극 형광 램프와 코일의 권선수를 변화시킨 램프와 비교하여 나타낸 것이다. 코일을 16회 감은 램프의 인덕턴스 특성이 250 kHz의 주파수를 사용하는 기존 램프와 유사하였다. 또한, 50 kHz~500 kHz의 전체 주파수 범위에서도 유사한 인덕턴스 특성을 나타내었다. 그러나, 15회와 17회의 권선수를 감은 램프에서는 인덕턴스 차이가 많이 나타났다.

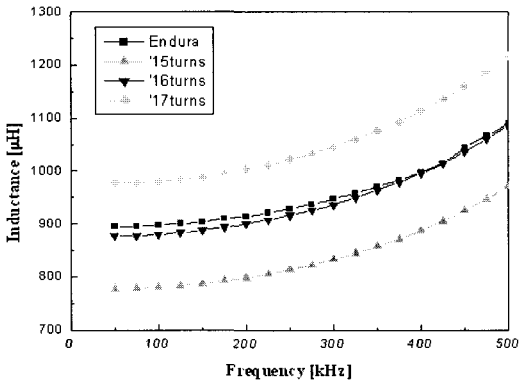
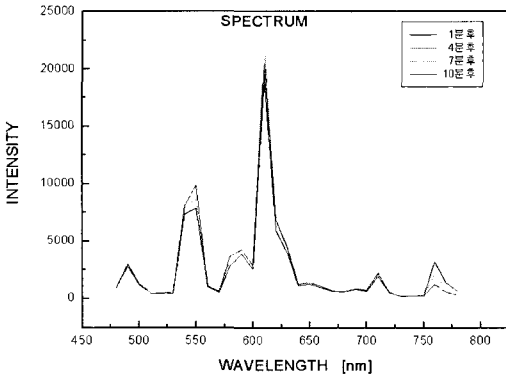
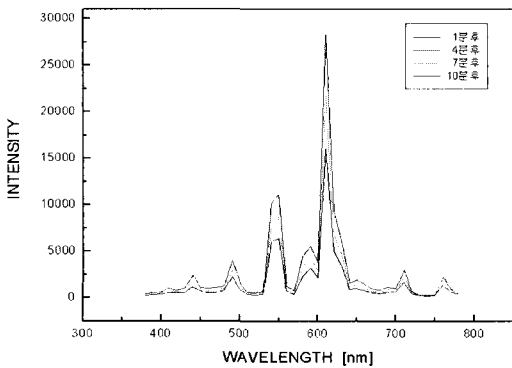


그림 9. 주파수와 권선수에 따른 인덕턴스 특성.  
Fig. 9. The Inductance characteristics as a function of frequency and coil turns.



(a) point 1에서 스펙트럼 세기



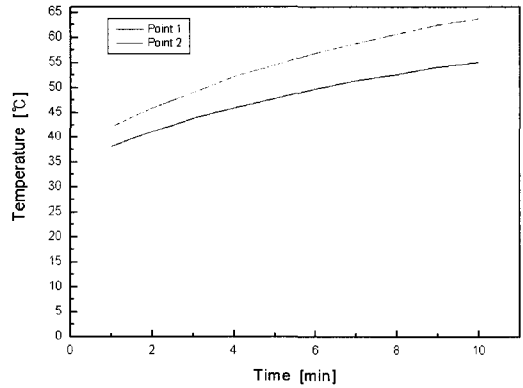
(b) point 2에서 스펙트럼

그림 10. 각 위치에서 스펙트럼의 분포.  
Fig. 10. Distribution of spectrum intensity.

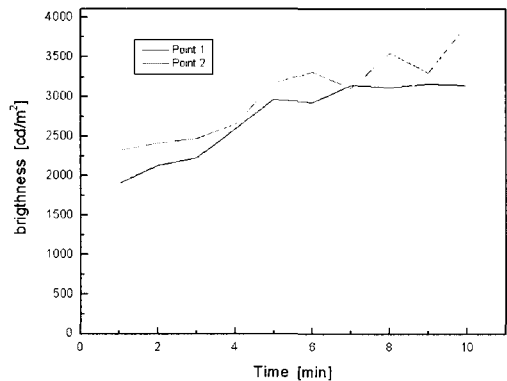
### 3.3 광학적 특성

그림 10 (a)는 Point 1에서 시간에 따른 광 스펙트럼 분포의 세기를 나타내며, 620 nm에서 22000이고, 그림 10 (b)와 같이 Point 2에서는 28000을 나타내며, 625 nm을 기준으로 동일한 분포형태이다. 시간에 의한 광 스펙트럼 분포의 변화는 Point 2가 Point 1보다 더 뚜렷한 변화를 보이고 있다. 이러한 이유로 유리관의 발광영역이 페라이트코어 주위보다 유리관 중앙에서 관측되었기 때문이다.

그림 11 (a) 및 (b)는 시간에 의한 온도분포와 휘도 분포를 측정된 것이다. 시간에 따라 온도와 휘도 분포는 증가하고 있으며, 휘도는  $1800 \text{ cd/m}^2 \sim 3600 \text{ cd/m}^2$ 에서 증가와 감소를 보이며, 온도의 경우  $37^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C}$ 에서 일정한 형태로 증가함을 알 수 있다.



(a) 시간에 따른 휘도의 분포



(b) 시간에 따른 온도의 분포

그림 11. 각 위치에서 휘도와 온도의 분포.  
Fig. 11. Distribution of brightness and temperature at each position.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Maxwell 3D Field Simulator을 통하여 무전극 형광램프의 자계 형성을 시뮬레이션하였다. 또한, 코일 권선수 및 주파수 변화에 따른 전기적 특성과 휘도, 온도, 스펙트럼 등의 광학적 특성을 측정하여 전자계 분포와 비교하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 페라이트 코어 주위에 균일하게 전자계가 형성됨을 확인하였고, 페라이트 코일 중심에서 램프의 외곽으로 자계강도 분포가 두개의 페라이트 코어에 대하여 대칭적으로 분포함을 알 수 있었다.
- 2) 자계 분포는 0 mm에서 페라이트 코어가 감겨있는 중심 부근까지 지수 함수적으로 증가하고, 다시 감소함을 알 수 있었다.
- 3) 코일의 품질지수를 제외한 다른 전기적 특성은 기존의 램프와 근접할 수 있었으나, 품질지수는 유사한 값을 찾지 못했다. 품질지수는 저항과 인덕턴스와 관계되는 값이므로 코일의 종류와 직경을 변화하면서 적정한 값을 얻을 수 있으리라 판단된다. 그러나 동일 조건에서는 21회의 권선수에서 기존의 램프와 유사한 값을 얻을 수 있었다.
- 4) 임피던스는 250 kHz의 고주파를 사용하는 관계로 저항은 거의 무시되고, 유도성 리액턴스에 의해 크게 좌우됨을 확인하였다. 동일 조건에서는 16회의 권선수에서 기존의 램프와 유사한 값을 얻을 수 있었다.
- 5) 저항은 주파수 변화에 따라 표피 효과에 의해 300 kHz 부근에서 급격히 상승하는 것이 나타났고, 전체적으로 모든 시료가 지수 함수적으로 증가함을 확인하였다. 동일 조건에서는 14 및 15회의 권선수에서 기존의 램프와 유사한 값을 얻을 수 있었다.
- 6) 무전극 형광램프의 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.
- 7) 플라즈마와 반응하는 자계의 세기는 유리관의 발광영역이 가장 큰 중앙부근에서  $2.091 \times 10^{-2} \text{ Wb/m}^2$ 로 나타나며, 이것을 통해 최대 발광을 위한 자계의 값을 알 수 있다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] 추장희, 구성근, 박기준, 이영우, “무전극 황방진등에서 고압 이원자 황의 자체역전 효과”, 대한전기학회지, 49C권, 11호, p. 609, 2000.
- [2] B. P. Turner, M. G. Ury, and D. A. McLennan, “Microwave excited sulfurlamp”, Paper QA2. 47th Annual Gaseous Electronics Conference (Gaithersburg, MD, USA), 1994.
- [3] J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, “Langmuir probe measurements of a radio frequency induction plasma”, J. Vac. Sci. Technol. A 11(1), p. 152, 1993.
- [4] M. Tuda, K. Ono, and H. Ootera, “Large-diameter microwave plasma source excited by azimuthally symmetric surface waves”, J. Vac. Sci. Technol. A 18(3), p. 840, 2000.
- [5] J. H. Keller, J. C. Forster, and M. S. Barnes, “Novel radio-frequency induction plasma processing technics”, J. Vac. Sci. Tech. A11, p. 2487, 1993.
- [6] 황명근, 이종찬, 박대희, “무전극 램프의 기술동향과 전망”, 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집, p. 23, 2001.
- [7] G. I. Babat, “Electrodeless Discharge and some applied problems”, J. IEE, Vol. 94, pt3, p. 27, 1947.
- [8] 김영철, 이정우, 조영석, “Argon 유도결합 플라즈마의 광학적, 전기적 특성에 대한 연구”, New Physics, Vol. 39, No. 3, p. 157, 1999.
- [9] 이경순, 이우동, 백순철, 조영석, “Ar, CF<sub>4</sub> 및 혼합개스의 RF 글로우방진 플라즈마에 대한 OES를 통한 진단”, New Physics, Vol. 33, No. 1, p. 50, 1993.
- [10] D. O. Wharmby, “Electrodeless lamps for lighting: a review”, IEE Proceedings 140A, p. 465, 1993.

- [11] B. P. Turner, M. G. Ury, and D. A. McLennan, "Microwave excited sulfurlamp", Paper QA2. 47th Annual Gaseous Electronics Conference (Gaithersburg, MD, USA), 1994.
- [12] 신중홍, 고태언, 김두환, 박정후, "플라즈마 파라메타 측정용 고속 Langmuir 프로브 구동회로 실현 및 적용", 전기전자재료학회논문지, 9권, p. 506, 1996.
- [13] 남창갑, 강재덕, 최희태, 신용진, "페라이트의  $\mu$ -T 특성측정을 위한 다중계측시스템에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 3권, p. 123, 1990.
- [14] 이수부, 박현건, 이석현 "유도결합형 플라즈마 원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11권, p. 261, 1998.
- [15] R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, "A simple analysis of an inductive RF discharge", Plasma Sources Sci. Tech. 1, p. 179, 1992.
- [16] 박송배, "알기쉬운 회로이론", 문운당, p. 337, 2003.