

## 무전극 형광등용 전원

(A Study on the Power Supply for Electrodeless Lamp)

한수빈\* · 장우진

(Soo-Bin Han · Woo-Jin Jang)

\* 한국에너지기술연구원, 서울산업대학교

### Abstract

Power supply technique for electrodeless lamps is presented in this paper. The power supply uses a conventional power factor correction technique due to its proved performance. But in the inverter stage, resonant converter with parallel loading scheme is used to mitigate the variation of matching circuit characteristics by time varying load. Experiment and performance comparison for both Endura and QL are performed and further study to commercialization are discussed .

### 1. 서 론

1990년초 무전극 램프가 오스람, 필립스, GE 등 주요 조명회사로부터 개발되어 발표된 이후 꾸준히 주목을 받아오고 있다. 무전극 램프는 형광등이나 기타 HID등과 달리 필라멘트나 전극이 없이 발광된다. 전극이 없는 무전극 램프에서는 전자유도법칙의 원리를 이용하여 가스를 방전시켜 발광한다 [1][2]. 따라서 전극으로 인한 수명의 영향이 없어서 통상적으로 6만시간 이상의 동작이 가능하게 된다.

통상 무전극램프 시스템의 구성 부분은 크게는 무전극 램프와 무전극 램프를 구동하기 위한 외부 고주파 전원부, 외부전원을 통해서 무전극등이 유도 방전할 수 있도록 하는 에너지 유도코일부, 유도코일이 효과적으로 동작하기 위한 임피던스 정합부 그리고 램프에서의 광이 원하는 공간에 적정한 조도분포를 제공할 수 있도록 하는 등기구로 구성된다. 여기에서 RF유도코일은 제품에 따라 램프의 내부에 설치되는 경우와 외부에 설치되는 경우가 있는데 Endura의 경우는 램프의 외부에 설치되어 있고[3] QL의 경우는 내부에 설치되어 있다[4]. 임피던스 정합부분의 경우는 대부분 고주파 전원장치 안에 같이 설치되게 되므로 무전극 램프의 전원장치는 시스템 효율에 대한 결정적인 영향을 주게 된다.

무전극 광원용 전원개발에 있어서 당면문제로는 250kHz-수MHz의 주파수로 광원을 구동하여야 하며 이 영역에서의 국내 관련 기술이 전반적으로

매우 취약하다는 것이다. 반면에 최근 선진국의 경우 전체 시스템의 효율을 80lm/W이상으로 높이고 조광기능도 가능하기 위한 지속적인 연구를 수행하는 등의 보다 성능이 향상되는 추세이다. 이에 따라 전원장치가 매우 컴팩트하고 장수명을 유지하여야 하고 고주파수로 구동됨에도 고효율로 제작되어야 하는 것이 기술적으로 쉽지 않은 문제이므로 이에 대한 연구가 필요하다. 본 논문은 100W급의 고효율(90%이상), 고역율(93%이상)의 무전극 점등용 전원 기술 개발과 관련된 현재까지의 주요 내용을 기술하였다. 궁극적으로는 성능은 유지하면서 저가로 제작될 수 있는 방향에서 연구되었다.

### 2. 광원의 모델과 정합성

광원의 구조는 엔두라 램프의 경우는 전체적으로는 굵은 직관형 형광등 2개를 결합한 형태로 램프 외부에 페라이트 코어를 2개를 설치하고 있는데 이를 통해서 RF유도방식에 의해 램프내부의 가스에 에너지를 전달하여 방전시키는 형태이다. 반면 QL 램프의 경우는 일반 전구모양의 유리구 내에 전력결합기인 페라이트 코어가 설치된다.

즉 이들은 램프내부에 전극이 없이 외부의 페라이트코어에 자계를 발생시킴으로서 전구내부의 봉입가스에 에너지를 공급하여 방전시키고 이때 발생하는 가시광선과 함께 주로 발생하는 자외선은 형광물질에 의해 가시광선으로 바뀌어서 발광하도록 동작된다.

램프와 안정기와의 정합성을 위해서는 램프모델에 대한 파악이 중요하다. 동작시 램프자체는 폐루프를 형성하는 방전 프라즈마가 다수 턴으로 감긴 페라이트 코어에 대해 1턴의 2차측으로 결합된 것처럼 동작하는 트랜스포머로 볼 수 있다. 따라서 램프의 등가회로는 엔두라의 경우는 그림 1과 같이 그리고 QL의 경우는 단일 트랜스포머로 모델링된다. 궁극적으로는 엔두라나 QL의 경우 모두 등가적으로는 그림 2와 같이 유도되어 모델링할 수 있다. 즉 안정기 측에서는 무전극램프는 단순한 저항으로 연결되는 것이 아니라 트랜스포머를 통해서 임피던스 변환이 생기면서 트랜스포머의 자화(magnetizing) 인덕턴스가 나타나게 되어 R-L부하로 연결된다. 이러한 트랜스포머를 통해 RF유도를 위한 고주파의 전원이 사용되고 Endura의 경우는 외부의 약 250kHz의 고주파 스위칭 전원을 QL의 경우는 2.65MHz의 고주파에너지의 전원을 공급받고 있다.

정합성 구현을 위해서는 램프모델과 안정기사이의 정합 필터의 구현이 중요한데 그 방식은 RF 측면에서는 Smith chart를 사용하는 방법, 회로 방정식을 사용하는 방법 그리고 성능지수의 한가지를 최적화하는 방법 등이 사용된다.

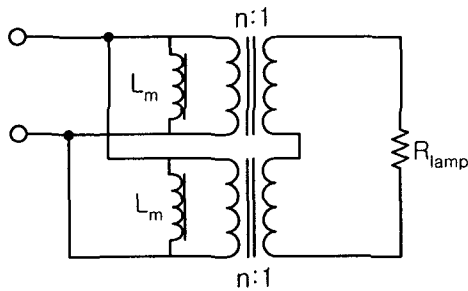


그림 1. 엔두라 램프 모델  
Fig.1 Model of Endura lamp

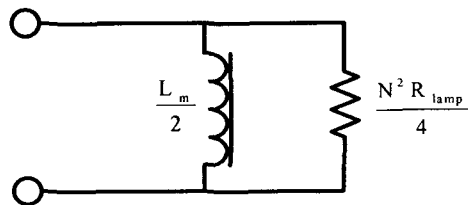


그림 2. 최소화된 램프 모델  
Fig.2 Compact Model of lamp

### 3. 무전극 형광등 전원장치

주파수가 수백KHz정도로 동작하므로 PWM방식이 아닌 공진형 컨버터를 사용하는 것은 일반적인 선택이다. 가장 기본적인 직렬공진회로(SRC)는 일반적인 Series Loaded SRC이지만 본 연구에서는 Parallel Loaded SRC로 구성하였다[5]. 방전 전후의 임피던스의 차이가 크고, 일반적인 형광등 안정기의 스위칭주파수 20kHz~40kHz에 비해 스위칭 주파수가 250kHz 또는 2.6MHz로 매우 높으므로 필터의 설계는 중요하다.

설계 회로의 주요 블록은 그림 3과 같이 일반적인 안정기의 노이즈필터, 정류기, 역률개선회로(Power Factor Correction), 공진회로(Resonant Converter), 램프로 구성하였다. 역률개선회로는 Boost Convert를 Boundary Mode에서 동작시키는 방법을 채택했다. Boundary Mode는 인덕터의 전류가 연속인 연속모드와 전류가 불연속인 불연속모드의 경계영역에서 동작하는 것이다. 이러한 동작을 제어하는 IC는 여러 반도체 회사에서 출시되고 있으며 출력전압은 400V로 조정하였다.

안정기를 포함한 램프의 동작 시뮬레이션 회로를 구성하게 되면 엔두라 램프와 관련해서는 그림 4와 같다. 사용된 파라미터는  $R_{lamp}=2.7\text{ohm}$ ,  $L_{lamp}=0$ 이고 트랜스포머의 자화인덕턴스는 각 1000uH로 2개가 1차측에서 병렬이므로 실제 500uH가 되게 된다. 그림 5는 엔두라램프의 경우 전원장치의 구성도로서 자려식으로 구성하였다. 초기 점등하기 위한 트리거회로와 MOSFET 구동부, 필터부와 보호회로 및 IC전원 공급부로 분류되며 필터부에서 전류를 피이드백하여 구동부를 구동하는 자려발전 방식으로 동작된다. 기존의 포화트랜스를 사용한 방식과는 달리 고주파수에서 고효율로 동작할 수 있도록 전류트랜스포머의 자화인덕턴스를 이용한 방식으로 구성되었다.

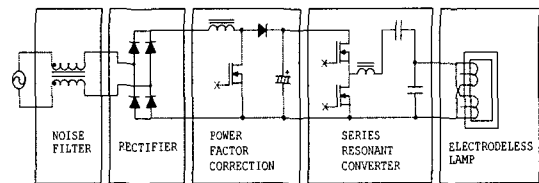


그림 3. 무전극 램프 전원장치의 구조  
Fig.3 Construction of lamp power supply

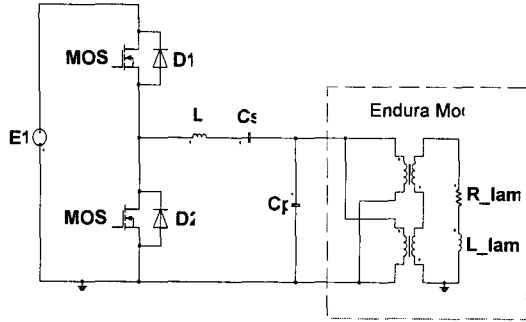


그림 4 무전극 램프 인버터 시뮬레이션도  
Fig. 4 Simulation of inverter of electrodeless lamp

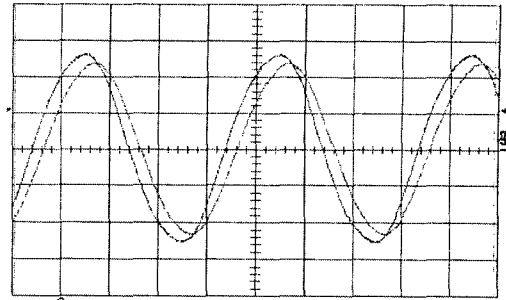


그림 6 엔두라 램프의 전압, 전류 파형  
(100V/div, 0.5A/div, 1usec/div)  
Fig. 6 Endura lamp voltage, current waveform

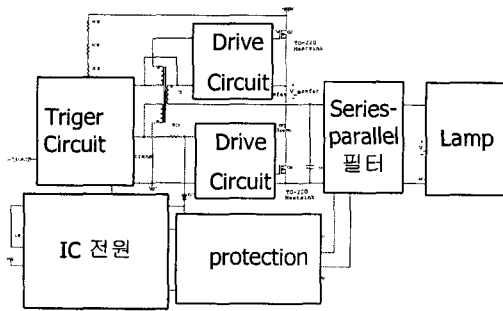


그림 5 엔두라 무전극램프 전원의 구조  
Fig.5 ballast organization for Endura lamp

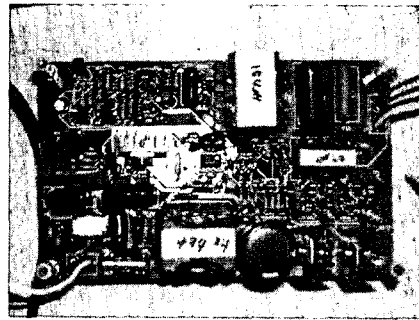


그림 7 엔두라 전원장치의 1차 시제품  
Fig. 7 Prototype of Endura ballast

전체적으로 동작은 스위칭 손실을 최소화 하기 위해서 턴온시에는 스위칭손실이 영으로 동작한다. 램프가 방전하기 전에는 램프의 임피던스가 커서 공진 Q가 크다. 따라서 공진전압인  $V_{lamp}$ 가 램프를 방전시킬 수 있을 정도로 커진다. 일단 방전이 되면 램프의 임피던스가 작아져서 공진 Q도 작아진다. 따라서 같은 조건으로 스위칭을 하더라도 공진전압과 전류는 작아지게 된다.

그림 6은 정상상태의 엔두라 램프의 전압전류 파형으로 거의 정현파이다. 즉 인버터 출력은 구형파이지만 임피던스 매칭회로인 필터회로에 의해서 정현파 전압과 전류가 형성되어 램프에 인가됨을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 각각 전원장치의 1차 시제품과 점등시험을 보여준다. 실험결과 주요 특성을 오스람사의 것과 비교한 것은 표 1과 같다. 실험은 상대적 비교를 위해서 동일한 조건에서 수행하였으며 실제 광속등은 제품 사양서에서 명시된 것과 실험환경이 다르므로 동일하게 나오지 않을 수도 있다. 효율은 71lm/W와 68lm/W로 약간 적으나 prototype으로는 만족할 수 있는 수준이다.

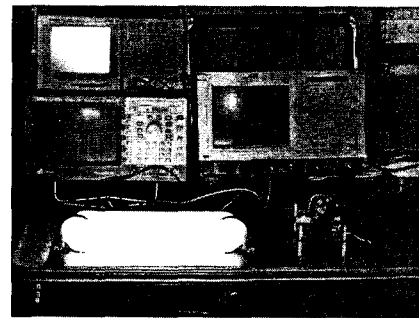


그림 8 Endura 전원장치의 점등시험  
Fig. 8 Lighting test of power supply

전체적인 효율과 특성이 아직은 오스람사의 경우보다 뒤져있으나 큰 차이를 보이고 있지는 않고 있어 향후의 개선에 의해서 거의 동등한 성능이 확보될 수 있는 가능성은 충분히 확인되었다. 안정기의 효율은 시제품의 148W 출력의 경우 8W의 손실로 약 94%의 고효율을 보이고 있다.

그림 9는 정상상태의 QL 램프의 전압전류 파형으로 거의 정현파이며 주파수는 약 2.6MHz고 고주파수이다. 그림 10은 시제품이며 그림 11은 실험

$$\mathbf{M} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (M_{xn} e^{jk_n x} \mathbf{a}_x + M_{yn} e^{jk_n x} \mathbf{a}_y) \quad (1)$$

여기서,  $M_{xn}$ 과  $M_{yn}$ 은 각각 영구자석의 자화  $\mathbf{M}$ 의  $x$  방향과  $y$ 방향의 푸리에 계수이며,  $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지는  $n$ 차 공간고조파이다. 맥스웰 방정식으로부터 지배방정식은 식 (2)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{A} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{A}_x + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathbf{A}_x + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{A}_x \\ &= -\mu_0 (jk_n M_{xn} e^{jk_n x}) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 지배방정식에서 자기 벡터 포텐셜이 정의되면 자속밀도와 자기 벡터 포텐셜의 관계  $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 로부터 자속밀도 특성식이 식 (3)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} B_y^I &= -jk_n (C^I e^{k_n y} + D^I e^{-k_n y}) e^{jk_n x} \\ B_x^I &= k_n (C^I e^{k_n y} - D^I e^{-k_n y}) e^{jk_n x} \\ B_y^{II} &= -jk_n (C^{II} e^{k_n y} + D^{II} e^{-k_n y} + \frac{j\mu_0 M_{yn}}{k_n}) e^{jk_n x} \\ B_x^{II} &= k_n (C^{II} e^{k_n y} - D^{II} e^{-k_n y}) e^{jk_n x} \end{aligned} \quad (3)$$

계수  $C^I, D^I, C^{II}, D^{II}$ 는 경계조건에 의해 계산되며, 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} x = y_0 & \quad H_x^I = -M_{xn} e^{jk_n x} \\ y = y_m & \quad B_y^I = B_y^{II}, \quad H_x^I - H_x^{II} = -M_{xn} e^{jk_n x} \\ y = y_s & \quad H_x^I = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

코일의 전류 분포는 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{J} = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} J_{\text{slotless}} e^{jk_n x} \mathbf{a}_z \quad (5)$$

추력은 영구자석과 전류에 의한 자계의 상호작용을 고려함으로써 구할 수 있다. 미소 축방향 길이  $dx$ 에 작용하는 추력은 식 (6)로 주어진다.

$$dF_x(x) = -l J_z B_y^I dx \quad (6)$$

여기서,  $l$ 은 코일의 유효 길이이다. 전체 추력은 식 (6)를  $x$ 방향에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

### 3.3 슬롯형 PMLSM의 해석모델

그림 4는 슬롯형 PMLSM의 해석모델을 보여준다. 해석모델에서 전류는  $y=y_c$ 에서 면전류 밀도로 분포해 있다고 가정하고, 철심의 투자율과 진행 방향 길이는 무한이라 가정하였다. 슬롯형 PMLSM의 경우에는 치슬롯 형상을 고려하여 자속밀도 특성식을 구하여야 하며 치슬롯 형상을 고려하는 방법에는 카터 계수를 이용하는 방법, 퍼미언스 함수를 이용하는 방법, 2D 비퍼미언스 함수를 이용하는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 2D 비퍼미언스 함수를 이용하여 치슬롯 형상을 고려하였다. 치슬롯 형상이 고려된 영구자석에 의한 자속밀도는 슬롯리스 모델에서 계산된 자속밀도와 2D 비퍼미언스 함수를 이용하여 계산할 수 있고 식 (7)과 같다[4].

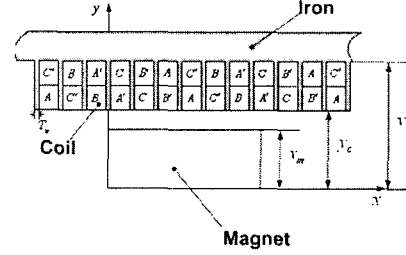


그림 4. 슬롯형 PMLSM

$$B_{\text{slotted}} = \bar{\lambda}(x, y) B_{\text{slotless}} \quad (7)$$

여기서  $\bar{\lambda}(x, y)$ 는 2D 비퍼미언스 함수이다. 슬롯형 PMLSM에서 코일의 전류 분포는 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{J} = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} J_{\text{slotted}} e^{jk_n x} \mathbf{a}_z \quad (8)$$

여기서,  $J_{\text{slotted}}$ 는 치슬롯 형상이 고려된 푸리에 계수이다. 슬롯형 PMLSM의 추력은 치슬롯 형상이 고려된 영구자석과 전류에 의한 자계의 상호작용을 고려함으로써 구할 수 있으며 식 (9)와 같다.

$$dF_x(x) = -l J_{\text{slotted}} B_y^I dx \quad (9)$$

## 4. 해석 결과

### 4.1 자속밀도 특성

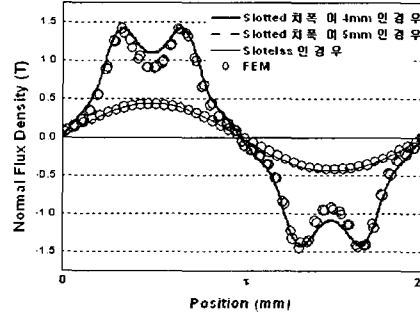


그림 5. 공극에서의 자속밀도

그림 5는 슬롯리스형과 슬롯형 PMLSM의 공극 자속밀도를 보여준다(공극 5mm). 슬롯형의 경우에는 치 폭 ( $T_n$ )이 4mm와 5mm인 경우에 대하여 해석하였다. 슬롯리스형의 자속밀도 특성은 정현적인 특성을 가지고 있으나 크기가 슬롯형에 비해 매우 적음을 알았고, 슬롯형의 자속밀도 특성은 그 크기가 슬롯리스형에 비해 매우 크나 치슬롯 형상에 의해 고조파 성분을 많이 함유하고 있어 파형이 일그러짐을 알 수 있다. 또한 슬롯형의 경우 치 폭의 변화에 의한 자속밀도 특성의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.