

무전극 형광램프의 임피던스 특성에 관한 연구

김철진\*, 유병규\*, 홍성호\*, 신희교\*\*  
 한라대학교\*, 경상대학교\*\*

A Study on the Impedance Model of Electrodeless Fluorescent Lamp

Cherl-Jin Kim\*, Byeong-Kyu Yoo\*°, Sung-Ho Hong\*, Heung-Kyo Shin\*\*  
 Halla Univ\*, Gyeongsang National Univ\*\*

**Abstract** - This paper presents a impedance model for the simulation of both static and dynamic characteristics of the electrodeless fulorescent lamp. A behavioral, PSpice compatible, model has been developed for the electrodeless fluorescent lamp. The model was tested at steady-state for different power levels, with an LCC modulated drive. and this model is established from some equations and measured electrical characteristics of EEFL. The validity of porposed lamp model is verified from the simulation and experimental results.

1. 서 론

최근, 장수명과 고효율 특성을 갖는 무전극 형광램프(EEFL)에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 무전극 램프는 유리관 내부에 빛을 발하는 형광물질이 코팅되어 있는 간단한 구조의 발광메카니즘을 가지며, 관 내부에는 불활성 기스와 수은 기스가 들어 있다. 동작되는 동안, 수은은 여기 되어 자외선(UV)을 발생하며 자외선은 형광물질을 활성화시켜 빛을 발생한다. 전극이 있는 램프에서는 수은은 전극을 통해 전달된 전류에 의해서 여기된다.[1] 그러나, 무전극 램프에서는 유도성 또는 용량성으로 결합되어 전력이 램프에 전달되어야만 한다.

대부분의 무전극 램프는 유도성 결합의 특징을 나타내며 구형, 직관형, 환형 등 다양한 형상과 구동주파수 영역에 따른 효율향상에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 회로의 시뮬레이션에 적용 가능한 램프의 임피던스 모델에 대한 연구를 진행하였다. 고주파에서 동작하는 무전극 램프의 중요한 전기적 특성으로, 일정 전력으로 구동되는 램프 부하의 특성과 전기적 여기 상태에서의 과도응답 특성을 들 수 있으며, 이를 표현할 수 있는 임피던스 모델을 개발하는데 본 연구의 목적을 두고 있다.

또한 실험에 의한 관측과 물리적 이론에 근거하여, 무전극 램프의 모델을 설정한 후 구동 실험을 통하여 제시한 모델의 타당성을 입증하였으며, 연구의 결과는 다양한 형태의 무전극 램프에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 본 론

2.1 무전극 램프의 모델 가정

형광램프모델은 가스방전이 부 온도계수(NTC)를 갖는 저항과 같이 작용하는 것을 기본으로 생각할 수 있다. 즉, 램프전력이 높을 때는 램프 기스가 높게 이온화되기 때문에 방전램프의 저항은 낮아진다. 또한, 램프전력이 낮을 때는 램프내부의 기스의 이온화가 저감 되기 때문에 방전램프의 저항이 높아진다. 형광램프는 NTC저항과 같이 온도가 열적 평형을 이룰 때 램프의 양단에는 일정한 전압강하를 갖는 경향이 있다.

형광램프의 광생산 메카니즘은 램프를 흐르는 전력  $P_L$ 에 의해 방전램프는 여기되고, 수은 원자는 이온화 된다. 이후, 수은 원자의 여기에 의해 자외선이 방사되며, 보다 낮은 에너지 상태로 되돌아간다. 자외선의 양은 램프 내의 수은 원자의 이온화 정도에 따라 거의 비례하며, 자외선 방사에서 형광 물질에 의한 가시광선으로의 변환은 매우 빠르게 진행된다. 이온화의 정도가 광 출력과 거의 비례관계를 가지므로 모델에서 이온화 밀도  $\rho$ 는 순시 램프전력  $P_L$ 과 관련된 것으로 가정하면 라플라스 변환 조건에서 1계 저역통과 필터를 이용하여 실현할 수 있다.

$$\rho(s) = C \frac{1}{1 + \tau s} P_L(s) \tag{1}$$

여기서,  $C$  : 비례계수  
 $\tau$  : 이온화/재결합을 위한 시정수

이온화밀도  $\rho$ 와 상수  $C$ 가 평균램프전력  $\overline{P_L}$ 로 치환된다면 해석은 간소화되며,  $\overline{P_L}$ 은 램프기스의 이온화 정도에 비례한다.

$$\overline{P_L}(s) = C \frac{1}{1 + \tau s} P_L(s) \tag{2}$$

$\overline{P_L}$ 이 순시 램프전력  $P_L$ 의 저역통과 필터의 형태를 가지며, 일정한 이온화에 대한 램프의  $V-I$ 특성은 고주파동작에서 조도조절이 가능한 고주파 안정기를 사용함으로써 쉽게 측정할 수 있다.

본 연구에서 제안된 모델은 무전극 램프가 열전극을 갖는 형광램프와 동작이 유사한 동작 특성을 갖는다는 기본적인 가정을 둔다. 두 램프간의 유일한 차이점은 전극을 갖는 램프는 전기 에너지가 도체를 통하여 전달되지만, 무전극 램프는 전기적 에너지가 플라즈마와 결합된다는 사실이다. 따라서 이러한 가정은 타당하며, 제시한 무전극 램프의 경우 자기유도 결합을 적용한 것이다.

2.2 무전극 램프의 모델 유도

고주파에서 동작되는 형광램프의 임피던스는 1차 근사로 저항성이라 할 수 있다.[2] 즉, 임의의 동작점에서 램프 아크튜브의 전류는 다음 식(3)으로 표현될 수 있다.

$$I_{lamp} = \frac{V_{lamp}}{R_{eq}} \tag{3}$$

여기서,  $I_{lamp}$  : 램프전류  
 $V_{lamp}$  : 램프전압  
 $R_{eq}$  : 고주파 구동시 램프의 등가저항

그러나, 여기서 등가저항  $R_{eq}$ 는 램프의 실효치 전류를 적용한 동작점의 함수로 표현된다. 이 의존성은 전 동작 영역에서 램프에 대한 실효치 전류와 전압을 측정함으로써 쉽게 구할 수 있다.

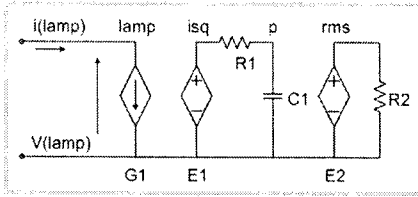


그림 1. 제안된 형광램프 모델

$G_1$  함수는 임의의 동작점에서 램프양단의 전압을  $R_{eq}$ 로 나눈 값으로, 램프의 실효치 전류의 함수로 표현한 것이다. 여기서, 종속전압원  $E_1$ 의 출력은 램프전류  $i_{(lamp)}$ 의 제곱에 비례한다.

$$G_1 = \frac{V_{lamp}}{R_{eq}(i_{rms})} \quad (4)$$

$$E_1 \equiv \{i_{(lamp)}\}^2 \quad (5)$$

노드 ( $i_{sq}$ )에서의 전압신호  $V(i_{sq})$ 는 저주파성분을 구하기 위해, 저역통과 필터 ( $R_1, C_1$ )을 경유하게 된다. 주파수  $f = 1/2\pi\sqrt{R_1 C_1}$ 와 시간  $t > R_1 C_1$ 에서  $C_1$ (노드(p))의 평균전압은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{(p)} = \frac{1}{T} \int_0^T V(i_{sq}) dt \equiv \frac{1}{T} \int_0^T [i_{(lamp)}]^2 dt \quad (6)$$

여과된 실효전류  $I_{rms}$ 는 커패시터  $C_1$ (노드(p)) 양단의 평균전압의 제곱근으로 표현되는  $E_2$ 에 의해서 구할 수 있다.

$$E_2 \equiv \sqrt{V(P)} \quad (7)$$

따라서, 노드 rms에서의 전압,  $V_{(rms)}$ 는 램프의 실효치 전류와 같은 값이 되며, 이전압은 식(3)에서 램프전류를 계산하기 위한  $R_{eq}(V_{(rms)})$ 로 사용된다.

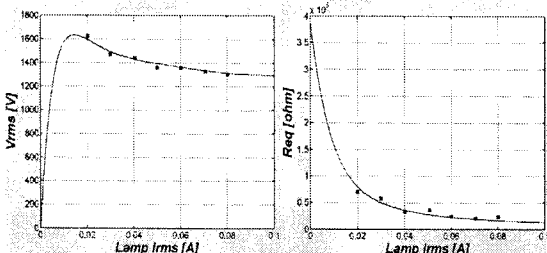


그림2. 실험을 통한 무전극 램프의 특성곡선

함수  $R_{eq}(V_{(rms)})$ 는 램프전류의 함수로 표현되는  $R_{eq}$ 로 대체할 수 있다. 이와 같은 다양한 관계는 고차다항식의 선형화등 이전의 연구결과에서도 적용된바 있다.[3][4][5] 본 연구에서는 지수근사 방법을 적용했으며, 그림 2로부터 실험결과와 비교적 양호한 일치율을 나타내는 것을 확인하였다.

### 2.3 무전극 램프의 모델 설정

본 연구에서 적용한 직관형 70W 램프에 대한 모델의 파라미터는 실험을 통해서 설정하였다. 램프의 등가저항  $R_{eq}$ 는 20mA에서 90mA까지의 램프전류범위에서 전압과 전류를 측정하여 구하였으며, 결과를 그림 3에 나타내었다.  $R_{eq}$ 와 램프의 실효치 전류사이의 함수관계를 결정하기 위하여 지수근사방법을 적용하였으며, 직관형 70W 램프의 등가저항에 대한 수식적 표현은 식(8)과 같다.

$$R_{eq} = A_0 + A_1 \times \text{EXP}(A_3 \times I_s) + A_3 \times \text{EXP}(A_4 \times I_s) \quad (8)$$

식(8)의 파라미터  $A_0 - A_4$ 는 표 1에 제시하였다.

표 1. 방정식(8)의 모델 파라미터

Parameter	value
$A_0$	8550
$A_1$	79000
$A_2$	28.7
$A_3$	310000
$A_4$	120

본 연구에서는 직관형 70W 램프의 PSpice 시뮬레이션을 설정하기 위해 종속전류원  $G_1$  및 그림 2의 모델당 추가 전원 ( $E_1 - E_2$ )으로 대체하여 나타내었다.

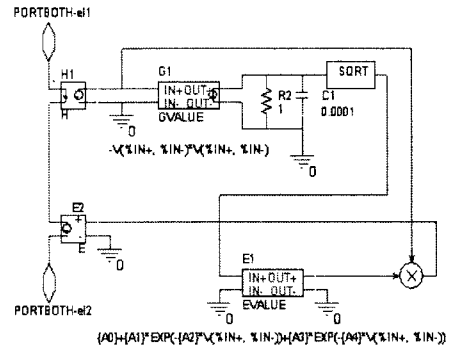


그림 3. 무전극 형광램프의 PSpice 모델

그림 3의 무전극 램프 PSpice 모델 회로에서,  $H_1$ 는 램프순시전류를 검출하기 위한 이득 1을 갖는 전류제어 전압원이며,  $E_1$ 은 제곱함수 전압제어 전류원이다.  $E_2$ 는 식 (8)을 나타낸 전압제어 전압원이며,  $E_3$ 는 램프순시전압을 발생하기 위한 이득 1을 갖는 전압제어 전압원이다.

### 2.4 무전극 램프의 실험 및 시뮬레이션

무전극 램프의 실험 구성을 위해 LCC직 병렬공진형 인버터를 사용한 예를 그림 4에 제시하였다. 하프 브릿지 인버터( $M_1, M_2$ ) 및 공진회로( $L_r, C_r$ )로 구성되어 있으며, 램프전압은 무전극 램프  $L_{11}, L_{12}$ 을 구동하기위해 같은 트로이달형 트랜스포머의 기타의 권선에서 측정하였다.[6][7] 또한, 램프 전류는 그림 5에 설정한 전류용 트랜스포머(CT)에  $100\Omega$ 의 저항( $R_{sh}$ )을 병렬 연결하여 측정하였다. 그림 5의 시뮬레이션 모델에서는 램프를 구동하기 위한 두 개의 트랜스포머를 포함하여 트로이달형 구동기를 예측할 수 있도록 하였다.

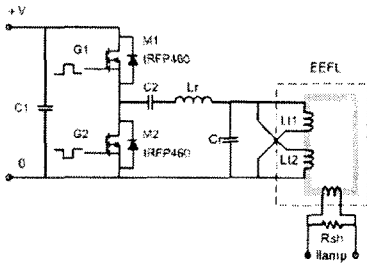


그림 4. 무전극 램프의 측정에 사용된 실험 모델

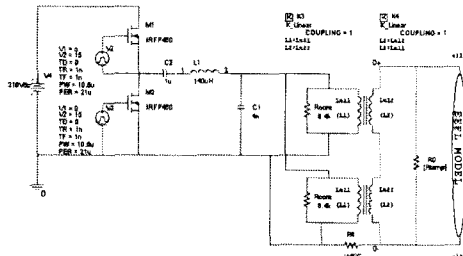
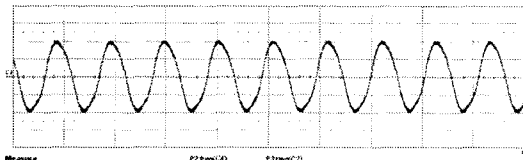
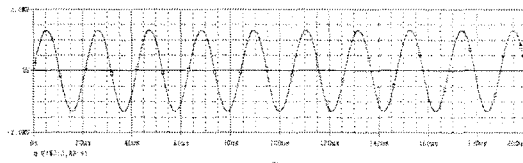


그림 5. 무전극 램프의 시뮬레이션 모델

정상상태 실험결과와 모델 시뮬레이션결과 사이의 일치 정도는 그림 6의 시간영역 신호와 그림 7의 정상상태 V-A곡선으로부터 알 수 있다.

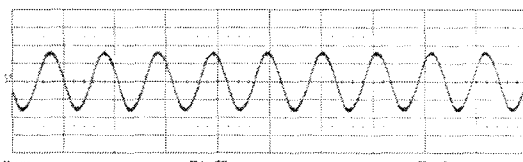


(a) 실험파형[1kV/div]

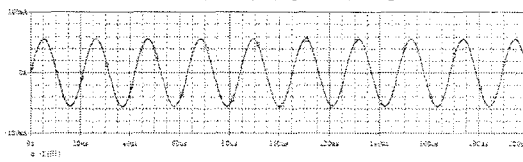


(b) 시뮬레이션파형[1kV/div]

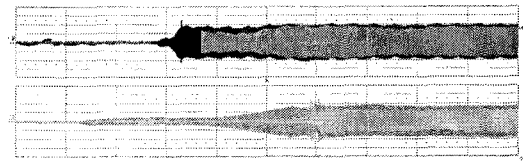
그림 6. 정상상태시 실험치 전압파형



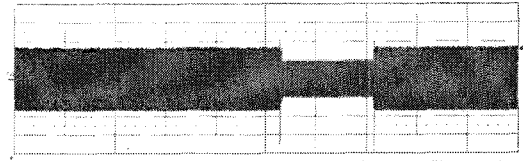
(a) 실험측정파형[1kV/div]



(b) 시뮬레이션결과파형[1kV/div]  
그림 7. 정상상태시 실험치 전류파형



(a) 실험측정파형[1kV/div]



(b) 시뮬레이션결과파형[1kV/div]

그림 8. 부하변동시 실험치 전압파형

### 3. 결 론

본 연구에서 제시한 동작 모델은 무전극 형광램프 직관형 70W의 정특성을 예측하는데 양호한 결과를 나타내었으며, 램프의 표준동작 및 조도가변 조건에서도 양호한 정상특성을 나타내었다. 결국 모델에 변화를 가하여 파라미터를 적절한 값으로 설정한다면 본 연구에서 제안한 시뮬레이션 모델은 무전극 형광램프에 대한 안정기의 설계, 특히 조도제어 회로의 설계 및 전체 시스템에 대한 제어에 유용하게 적용 가능할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 무전극 형광램프의 과도특성에 대한 모델이 제시되지 않았다, 향후, 램프전류의 단계적 변화에 따른 램프전압의 과도특성을 관측함으로써 시뮬레이션 모델을 확장할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 육성지원사업 (I-2004-0-074-0-00)에 의하여 수행된 과제입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] W. Elenbas, Ed. Fluorescent Lamps, Macmillan, London, 1971.
- [2] E. E. Hammer, "High frequency characteristics of fluorescent lamp up to 500kHz," Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 52-61, Winter, 1987
- [3] S. Ben-Yaakov, M. Shvartsas, and S. Glzman, "Static and dynamic of fluorescent lamps operating at high frequency : Modeling and simulation," IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC-99, pp. 467-472, Dallas, 1999.
- [4] M. Gulco and S. Ben-Yaakov, "Current-sourcing parallel-resonance inverter (CS-PPRI) : Theory and application as a fluorescent lamp driver," IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC-93, pp. 411-4117, San-Die해, 1993.
- [5] S. Glzman and S. Ben-Yaakov, "Dynamic interaction of high frequency electronic ballasts and fluorescent lamps. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37. 2001 pp. 1531-1536, 2001.
- [6] J. W. Shaffer and V. A. Godyak, "The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamps," Journal of the IES, vol. 28, no. 1, p142, Winter 1999.
- [7] R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, "A Simple Analysis of an Inductive RF Discharge," Plasma Sources Sci. Technol. 1, pp. 79-186, 1992.