

HID Lamp용 전자식 안정기의 시뮬레이터 개발

(Development of Simulator to Electronic Ballast for HID Lamp)

장목순 · 조계현 · 조호찬* · 박종연

(Mok-Soon Jang · Gye-Hyun Jc · Ho-Chan Cho · Chong-Yeun Park)

요 약

전자식 안정기는 자기식 안정기에 비해서 고주파로 점등하기 때문에 방전등에서 나타나는 음향 공명 현상으로 인한 Arc의 떨림이 나타날 수는 있으나 소형, 경량화 및 조광 기능을 가질 수 있으므로 인해서 그 응용분야가 더욱 더 넓어지고 있다. 본 논문에서는 일반적으로 잘 알려져 있는 수은 램프 모델링을 응용하여 메탈 할라이드 램프의 모델링을 만들고 램프에서 발생하는 음향 공명 현상을 해소하기 위해 음향 공명의 영향을 받지 않는 동작 주파수를 설정하였다. 또한 새로운 방법의 출력 회로(LCC)의 설계 방법을 다루었다. 또한 SIMULINK를 이용하여 메탈할라이드 램프를 사용한 전자식 안정기 시뮬레이터를 제작하였고, 이를 통해서 쉽게 인버터 출력부 LCC값을 결정하였고 시뮬레이션 특성은 실제 안정기를 제작한 후 결과 값을 비교함으로써 시뮬레이터 특성을 검증하였다.

Abstract

The electronic ballast have much more shaking of arc than magnetic ballast because of acoustic resonance phenomenon. but it has used more than before. In this paper, we made metal halide lamp modeling by modifying modeling of mercury lamp. To avoid acoustic resonance phenomenon, We calculated acoustic resonance frequency band. We proposed design of LCC circuit. Also, electronic ballast simulator for metal halide lamp was developed by simulink. LCC parameters of inverter was decided on the basis of simulation results. After development of prototype ballast, it was verified the characteristics of simulator.

Key Words : MHD lamp, Simulator, Acoustic Resonance, Electronic Ballast

1. 서 론

* 주저자 : 강원대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 033-250-6292, Fax : 033-241-3775
E-mail : c1260@hanmail.net

접수일자 : 2001년 6월27일
1차심사 : 2001년 6월30일 2차심사 : 2001년 7월30일
3차심사 : 2001년 9월 7일
최종완료 : 2002년 1월 9일

HID 램프는 광 효율과 연색성이 좋아 자동차 전조등이나 프로젝터등 많은 영역에서 사용되어지고 있다[1]. HID 램프는 동작 영역에서 부성 저항 특성을 가지기 때문에 안정한 동작을 위해서 안정기라는 전류 제한 소자를 필요로 하게 된다[2]. 이제까지 HID 안정기는 저주파수(60Hz)에서 동작하는 자기식 안정기가 주종을 이루었지만 크고, 무겁고, 효율이

좋지 않아 점차 전자식 안정기로 변화하고 있는 추세이다.

고 주파수로 동작하는 전자식 안정기는 자기식 안정기가 지니는 단점들을 보완해주고는 있지만, 고주파수로 동작시킴으로써 HID 램프와 같은 방전등에서 나타나는 방전관내 아크가 떨리는 음향 공명 현상이 발생하게 된다[3].

본 논문은 수은램프의 모델링을 기반으로 하여 메탈할라이드 램프 모델링을 만들었고 전자식 안정기를 음향 공명이 없는 주파수 대역에서 동작시킴으로써 음향공명현상을 피했고 램프 모델링을 사용하여 시뮬레이터를 설계 적절한 LCC값을 찾는 방법을 제안하였다. 또한 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 결과를 비교함으로써 시뮬레이터의 타당성을 증명하였다.

2. 본 론

2.1 음향 공명 현상

음향 공명 현상은 HID램프를 고 주파수로 동작시킬 때 나타나는 현상이다. 이러한 음향 공명 현상이 발생하면 아크의 안정성, 램프 불빛의 떨림, 색온도 변화와 같은 여러 가지 문제를 야기시키며, 램프 전압이 증가하여 방전관내 아크가 사라지거나 심하게는 방전관이 깨어지기도 한다[4]. 이러한 현상은 램프로 공급되는 전류로 인한 방전관으로 공급되는 주기적인 입력 에너지에 의해서 발생한다. 램프로 공급되는 주기적인 에너지는 방전관내 가스를 가열하고 가스의 가열은 방전관내 압력변화를 일으키게 된다. 이러한 압력변화가 방전관이 가지는 공진 주파수와 일치하게되면 아크 파형이 흔들리게 되어 불빛이 떨리는 현상이 발생하며, 이를 음향 공명 현상이라고 한다.

2.2 음향 공명 주파수 계산

음향 공명 주파수는 그림1 (a)와 같은 HID 램프에서 아크 튜브라고 불리는 방전관(b)이 갖는 외형에 따라서 크게 좌우되는 특성을 갖는다.

음향 공명 현상은 기본적으로 방전관의 길이, 반지름, 방위각에 따라서 발생하는 공명 주파수와 각각의 합성에 의해서 나타나는 공명주파수, 그리고 공명 주파수들의 $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ 배와 같은 부 고조파들과

2,3,4배와 같은 고조파 성분들도 영향을 미친다. 램프 공명을 일으키는 기본적인 주파수 중에서 길이(L)에 의해서 발생하는 공명주파수는 식 (1)과 같다. 여기에서 C는 아크 튜브 내에서의 음속으로 500[m/s]로 설정하였다.

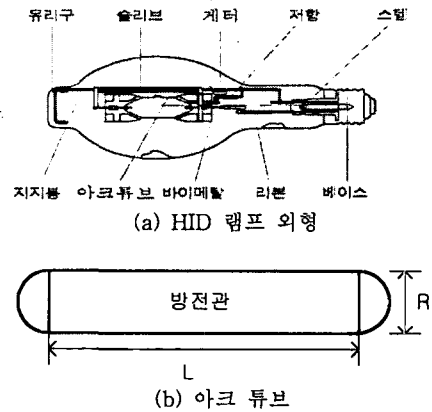


그림 1. 방전관의 외형
Fig 1. Shape of HID lamp & arc tube

$$f_{001} = \frac{C}{2L} \tag{1}$$

또한 반지름(R)에 의해서 발생하는 공명주파수는 식(2)와 같다.

$$f_{010} = \frac{3.83C}{2\pi R} \tag{2}$$

마지막으로 방위각에 의해서 발생하는 공명주파수는 식(3)과 같다.

$$f_{100} = \frac{1.84C}{2\pi R} \tag{3}$$

위에서 언급한 공명을 일으키는 기본적인 주파수와 각각의 고조파 성분들을 고려한 주파수는 범위는 식(4)와 같다[5].

$$\frac{1}{54} f_{001} \leq ARF \leq 4f_{018} \tag{4}$$

400watt MHD 램프의 경우 공명현상이 발생하는 주파수 대역은 $77.2\text{Hz} \leq f_{resonance} \leq 151.6\text{kHz}$ 이다.

하지만 공명현상을 일으키는 주파수는 램프에 공급되는 에너지가 갖는 주파수이므로 램프의 입력 전류 I 로 인해서 램프로 공급되는 전력 P 와의 관계를 보면 식 (5)와 같이 전력 P 가 가지는 주파수는 입력전류 I 의 2배가 됨을 알 수 있다.

$$P = I^2 R \tag{5}$$

$$(I^2 = (A \cos \theta)^2 = \frac{A^2}{2} (1 + \cos 2\theta))$$

고압 방전 램프가 가지는 특성을 주파수를 기준으로 나타내면 그림 2와 같다.

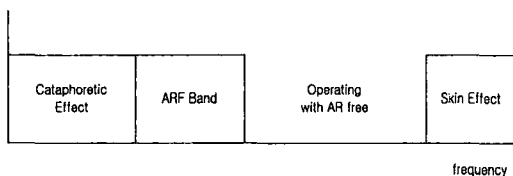


그림 2. 고압 방전 램프의 주파수 대역
Fig 2. Frequency band of HID lamp

Cataphoretic Effect는 DC 전류에 의해서 램프를 구동할 때와 같은 현상이 일어나고 램프의 점등 할 수 없게 만드는 영역이고 ARF Band는 음향 공명 주파수 대역이고 Skin Effect는 표피 효과의 영향을 받는 주파수 영역이다. 그러므로 램프의 동작 주파수는 Cataphoretic Effect 영역, ARF Band 영역, Skin Effect의 세 가지 영역을 피해야만 한다.

고압 램프들은 일반적으로 그림2와 같은 주파수 특성을 만족하며 이러한 특성들로부터 동작주파수 f_0 를 찾기 위해서는 식(6)과 같은 범위에서 중간 값을 동작주파수로 결정한다.

$$151.6\text{kHz} \leq f_{op} \leq f_{skin} \tag{6}$$

skin effect가 일어나는 주파수를 400kHz로 놓으면 실제 동작 주파수는 대략 138kHz정도이다.

2.3 MH 램프의 모델링 [5]

기본적인 메탈 할라이드 램프의 모델링은 식(7)의 고압 수은램프 모델링에서 적용한 방전 에너지 평형

식을 이용해서 모델링을 하며 전체적인 형태는 동일하다. 이때 필요한 요소는 가스의 온도, 램프의 저항, 컨덕션 손실 그리고 빛의 방사의 4가지 성분이다.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (-k \nabla T) + P_i - P_r \tag{7}$$

식(7)을 전개하여 풀면 식(8)을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{1}{c\rho 2\pi r^2 l} \int (W - P_c - P_r) dt$$

$$= a_1 \int (W - P_c - P_r) dt \tag{8}$$

식(8)에서 각각의 기호가 의미하는 것은 P_c 는 컨덕션 손실, P_i 는 줄 전력 손실, P_r 는 빛의 방사, T 는 가스의 온도, P_r 은 줄 전력손실 c 는 비열, ρ 는 체적 전하 밀도, k 는 볼츠만 상수, W 는 입력 전력이다.

상수값은 다시 식(9)~(11)로 표현된다.

$$P_r \propto 2\pi r^2 l n_0 e^{-\frac{e V_m}{kT}} = a_2 e^{-\frac{e a_3}{kT}} \tag{9}$$

$$P_c = 4\pi l \lambda n (T_0 - T_w)$$

$$= a_4 (T_0 - T_w) \tag{10}$$

$$R = \frac{l}{2\pi r^2 \mu} \frac{h^{\frac{3}{2}}}{n_0^{\frac{1}{2}} (2 m_e k)^{\frac{3}{4}}} T^{-\frac{3}{4}} e^{\frac{e V_i}{2kT}}$$

$$= a_5 T^{-\frac{3}{4}} e^{\frac{e a_6}{2kT}} \tag{11}$$

각 수식에서 표현된 계수들이 의미하는 값은 다음과 같다.

$2\pi r^2 l$: 체적 n_0 : cm^3 당 원자의 숫자

V_m : 에너지 레벨을 가지고 여기된 상태

λ : 온도의 도전을 T_0 : tube 중심의 온도

T_w : tube 벽의 온도 h : 프랑크 상수

k : 볼츠만 상수 V_i : 수은의 이온화 전위

m_e : 전자의 체적 R : 램프의 저항

μ : 투자율 n : 차수

식(8)~(11)까지를 이용한 고압 수은 램프에 대한 모델링은 그림3과 같은 block으로 표현된다.

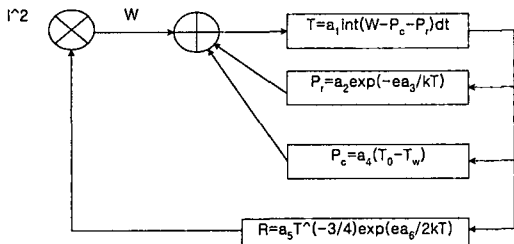


그림 3. 방전 램프의 SIMULINK 모델링
Fig 3. Simulation model of HID lamp using Simulink

메탈할라이드 램프의 모델링은 식 (8)~(11)에서 정의된 고압 수은 램프 상수 $a_1 \sim a_6$ 를 메탈할라이드 램프 계수로 대체함으로써 얻는다. 그림 4와 같은 회로를 구성한 후에 부하를 메탈할라이드 램프로 사용하고 인가전원을 가변하면서 램프 양단 전압과 램프 전류, 빛의 방사, 방전관 온도등의 변화를 측정함으로써 얻을 수 있다.

그림 4의 실험을 통해서 그림5의 컨덕턴스 ($G_1, G_2 = I/V$)와 빛의 방사의 기울기를 구할 수 있고 P_{r1} 과 P_{r2} 는 광 센서를 이용하여 측정시 기준전압에 의해서 결정이 되고 각각의 값보다는 두 값의 비가 중요하다.

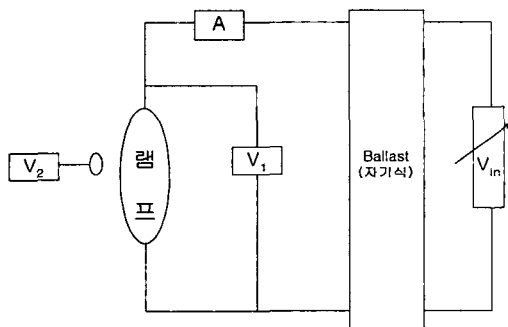


그림 4. $a_1 \sim a_6$ 의 검출을 위한 실험도
Fig 4. Experimental circuit for $a_1 \sim a_6$ constant parameter

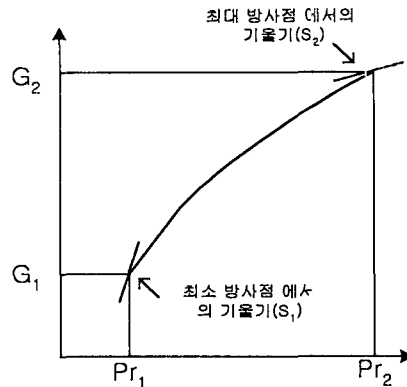


그림 5. 그림4의 실험을 통한 결과
Fig 5. Experimental Result from Fig4

그림 4의 실험을 통해서 얻은 상수 값은 표1과 같다.

표 1. 실험에서 얻은 메탈할라이드 램프 상수값
Table1. Experimental parameters

$T_2 = 5800(K)$: 최대 아크 온도
$T_0 = 1000(K)$: 방전관 중심 온도
$R_1 = 121.28(\Omega)$: 최소 방사점에서의 저항
$R_2 = 30.88(\Omega)$: 최대 방사점에서의 저항
$c = 0.000197$ 상수 a_3 와 T_2 의 비
$P_{r1} = 136.7856$: 최소 빛의 방사
$P_{r2} = 632.8746$: 최대 빛의 방사
$P_{r1} / P_{r2} = 5.232947$: 최대와 최소의 비
$Q = 0.8847256$: S_1 과 S_2 의 비

그림 4의 실험을 통해서 얻은 상수값을 가지고 고압 수은 램프 모델링에서 사용한 방법과 같이 계수 a_1 과 a_6 계수를 결정하고 식은 식(12)~(14)와 같다.

$$a_3 = C \times T_2 \quad (12)$$

$$T_1 = \frac{11605 a_3 T_2}{11605 a_3 + \ln\left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right) T_2} \quad (13)$$

$$a_6 = \ln \left[\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{2}{11605} \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right) \right] \quad (14)$$

또한 a_2 와 a_4 값은 식(15), (16) 두 개의 연립방정식을 풀어서 구한다.

$$i_1^2 R_1 - a_2 e^{-\left(\frac{11605 \times a_1}{T_1}\right)} - a_4(T_1 - T_o) = 0 \quad (15)$$

$$i_2^2 R_2 - a_2 e^{-\left(\frac{11605 \times a_1}{T_2}\right)} - a_4(T_2 - T_o) = 0 \quad (16)$$

마지막 계수인 a_5 값은 식(17)을 계산하여 얻는다.

$$R_1 = a_5 T_1^{-\frac{3}{4}} e^{\left(\frac{11605 \times a_6}{2T_1}\right)} \quad (17)$$

최종적으로 얻은 계수 $a_2 \sim a_6$ 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_2 &= 5710.376 & a_3 &= 1.14275 \\ a_4 &= 0.0109477 & a_5 &= 5451.736 \\ a_6 &= 1.3251 \end{aligned}$$

또한 a_1 값은 식(18)을 계산하여 얻는다.

$$J(a_1) = \mu' \sum (v_i - V_i^*)^2 + \mu'' \sum (I_i - I_i^*)^2 \quad (18)$$

이것은 실험에 의해 측정된 전압, 전류값과 시뮬레이션한 전압과 전류의 값의 Mean Square Error가 최소가 되는 상수이다.

$$a_1 = 5965$$

이상에서 제시한 방법으로 $a_1 \sim a_6$ 까지 계수를 구한 후 이를 시뮬레이션에 적용한다.

2.4 LCC 인버터의 설계

안정기의 출력 회로로 그림 4와 같은 LCC 구조를 선택한 주된 목적은 부하의 임피던스 크기가 클 때는 L, C2의 영향으로 인해서 램프 부하 양단에 고

전압, 저 전류가 형성되고, 부하의 임피던스가 작을 때는 L, C1의 영향으로 인해서 램프 부하에 저전압, 대 전류가 흐르는 특성을 가진다. 이러한 구조는 부하가 MHD 램프와 같은 방전등일 경우 램프 방전 전, 후의 특성과 LCC구조가 가지는 특성이 일치하기 때문이다. 또한 램프가 방전되기 전에 램프 양단에 인가되는 전압의 크기가 램프 방전전압보다 크게 설정할 수 있기 때문에 추가적으로 들어가는 Ignitor가 불필요하도록 할 수 있기 때문이다.

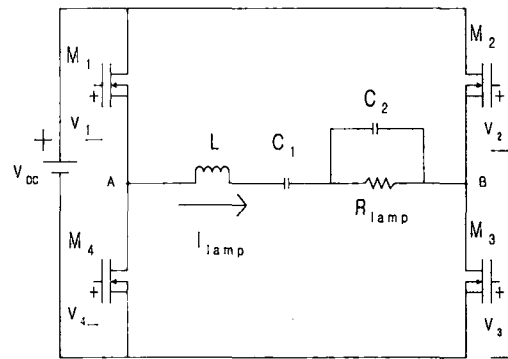


그림 6. LCC의 구조
Fig 6. Circuit figure of LCC

LCC가 가지는 동작 특성은 램프가 점등되기 전과 점등후에 램프가 가지는 전기적인 성질이 바뀜으로써 구분해서 해석해야한다. 또한 해석에서 사용될 계수에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{esr} &= R_L + R_{C1} + R_{C2} \quad (\text{등가 직렬 저항}) \\ C_n &= \frac{C_2}{C_1} \quad (\text{커패시터의 비}) \\ Z_o &= \sqrt{\frac{L}{C_1}} \quad (\text{특성 임피던스}) \\ Z_o \sqrt{\frac{1 + C_n}{C_n}} &\gg R_{esr} \quad (19) \end{aligned}$$

램프 점등 전 조건은 식(19)와 같다. 하지만 출력 전압은 램프 방전보다 작아야 하므로 (20)와 같은 범위를 가진다.

$$V_0 = \frac{R_L}{Z_0} \sqrt{(1 + C_n) C_n} V_i \quad (20)$$

$$V_{ignition} < \frac{R_L}{Z_0} \sqrt{(1 + C_n) C_n} V_i \quad (21)$$

램프가 완전히 점등되지 않았을 때, 즉 일정한 저항값을 가지고 있을 때는 식(21),(22)과 같은 범위를 갖는다.

$$R_L \gg \frac{Z_0}{C_n} \sqrt{\frac{C_n}{1 + C_n}} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} w_l &= \frac{1}{\sqrt{LC_1}} \\ &= \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{\frac{1}{w_l^2} C_2}} \\ &= w_l \sqrt{\frac{1 + C_n}{C_n}} \end{aligned} \quad (23)$$

주파수 관계는 식(23)과 같은 관계를 갖는다. 즉 음향 공명 현상이 일어나지 않는 주파수에서 동작을 시키고 초기 동작 주파수는 높게 정상 동작시는 최대 출력이 나오는 주파수보다 커야한다.

$$w_{AR} < w_l < w_0 < w_h \quad (24)$$

램프 점등 후 정상 동작 때는 식(25)~(27)로 표현된다.

$$V_{min} < \frac{R_m}{Z_0} \sqrt{(1 + C_n) C_n} V_{input} \quad (25)$$

$$V_o > \frac{R_m}{Z_0} \sqrt{(1 + C_n) C_n} V_{input} \quad (26)$$

$$V_{input} > V_0 \quad (27)$$

램프 점등전과 램프 점등 후 LCC 구조가 가지는 특성 범위를 표시하면 그림6과 같은 범위를 얻을 수 있다.

그러므로 램프 점등전과 후에 적절한 특성을 얻고자 할 때에는 식(25), 식(26)이 나타내는 조건을 만족하는 범위에서 정출력을 얻을수 있는 LCC값을 시뮬레이터를 사용하여 얻는다.

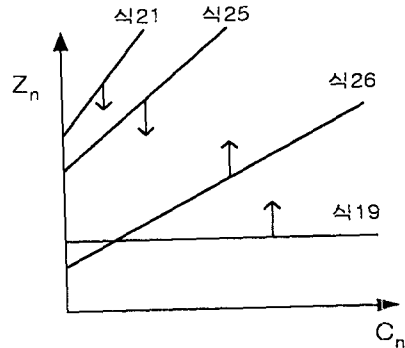


그림 7. 설계를 위한 Z_0, C_n 의 범위
Fig 7. Range of Z_0, C_n for design

조건에 부합되는 값으로 $L=300\mu H, C_1=16nF, C_2=24nF$ 값을 선정하였다.

2.5 시뮬레이션 및 실험 결과

메탈 할라이드 램프 모델링 방법과 음향 공명 현상이 없는 주파수를 고려하여 적합한 전자식 안정기를 SIMULINK 프로그램을 이용하여 모델링한 결과는 그림 8과 같다.

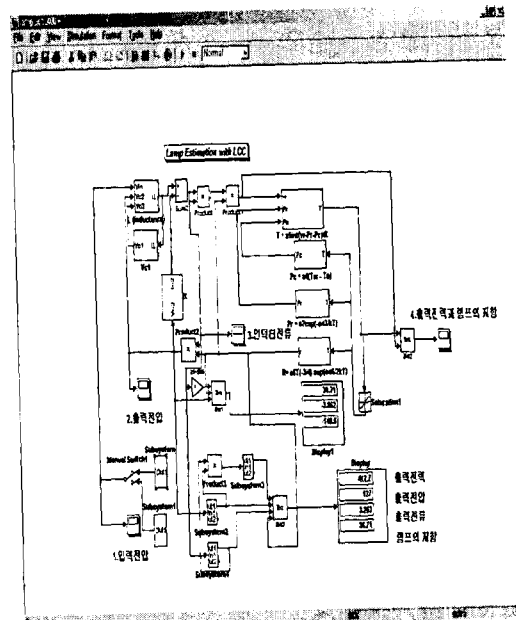


그림 8. Simulink를 이용한 시뮬레이션
Fig 8. Simulation using simulink

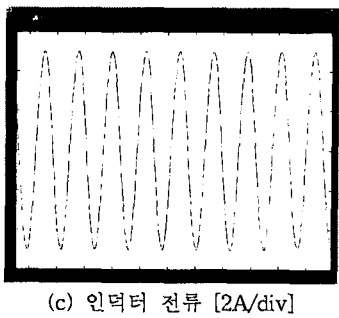
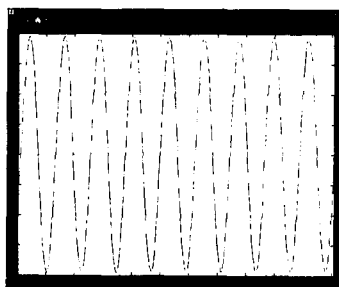
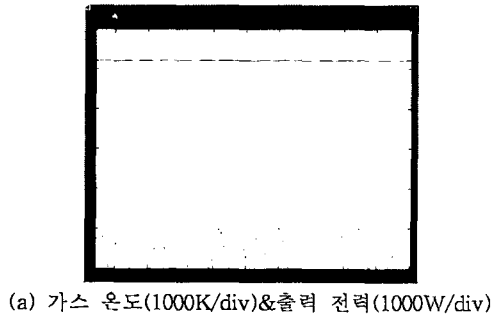


그림 9. 시뮬레이션 결과 파형
Fig 9. Simulation results

그림 9는 SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 각각 램프 외벽 온도, 출력전력, 램프전압, 인덕터 전류를 이다. 또한 실제 안정기 제작 후 측정 한 각부분 파형은 그림 10과 같다.

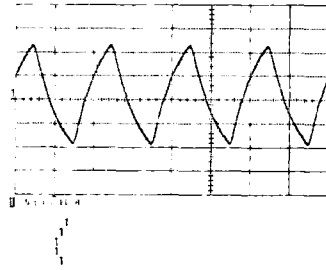
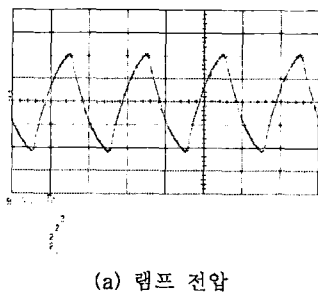


그림 10. 실제 안정기 램프 전압, 전류 파형
Fig 10. Lamp voltage and current of prototype ballast

램프 점등 시간에 따른 램프 전압, 전류 변화를 측정한 결과는 그림 11과 같다. 시간 변화에 따라 램프 전압, 전류값의 변화는 램프전압은 서서히 증가하고 램프 전류는 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

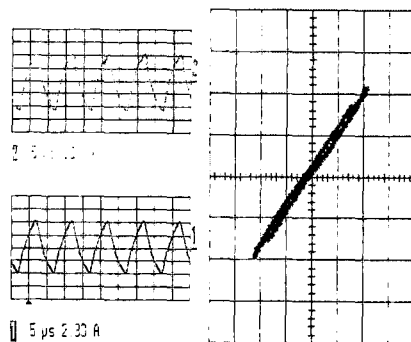
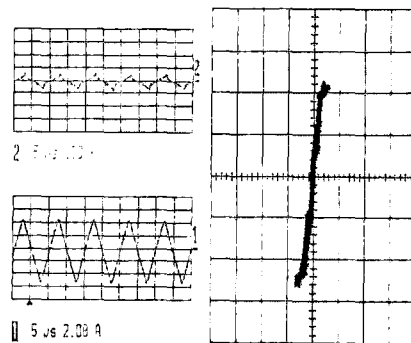


그림 11. 점등 시간의 변화에 따른 전압, 전류 파형
Fig 11. Lamp voltage and current waveform at start-up time

램프 모델링후 전자식 안정기를 시뮬레이션한 결과와 실제 안정기 제작 후 얻은 결과를 비교한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 시뮬레이션과 실제 제작 후 결과 비교
Table 2. Comparison of Results

	시뮬레이션	실험 결과	에러(%)
램프전압[V]	127	136.15	7.2
램프전류[A]	3.203	3.346	4.46
램프저항[Ω]	38.71	40.69	5.11
출력전력[W]	417.7	430	2.94

표 2에서 나타낸 것과 같이 시뮬레이션 결과와 실제 안정기 제작 후 얻은 결과와의 차이점은 가장 큰 차이가 나는 전압의 경우 7.2%이고 그 외의 값은 전압보다 더 작은 차이가 난다는 것을 볼 수 있다. 이것으로 볼 때 수은 램프의 모델링을 응용하여 만든 메탈할라이드 램프 모델링이 타당함을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 고압 수은 램프 모델링 방법을 이용하여 메탈 할라이드 모델링을 만들었고, 실험을 통해서 적용 가능함을 밝혔다 또한 메탈 할라이드 램프에서 발생하는 음향공명 현상이 일어나지 않는 주파수 대역을 계산에 의해서 구한후에 동작주파수를 결정 한 후 사용했다. 이를 바탕으로 부하 단을 이루는 LCC 값을 설정하였다. 실험 결과 시뮬레이터를 통해서 얻은 출력 결과와 실제 안정기 제작 후 얻은 결과가 매우 유사했다. 이는 본 논문에서 제시한 방법으로 구현한 시뮬레이터가 실제 안정기와 유사하다는 것을 의미한다. 그러므로 본 시뮬레이터를 안정기 제작에 이용한다면 많은 시행착오를 막을 수 있고 가장 적절한 형태의 안정기 설계가 가능하리라고 생각된다.

본 연구는 강원대학교 BK21사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] "Special Issue for Metal Halide Lamps and its applications", J. Illum. Jpn. Inst. Jpn, vol. 77, No.12, pp.4-35.
- [2] M. Nakamichi and Mihara, "Trends of Electronic Technologies for HID Lamps Luminaries", J.Illum. Inst. Jpn, vol 77, No.5, pp.233-237, 1993.
- [3] M. C. Cosby, Jr, and R. M. Nelms, "A Resonant Inverter for Electronic Ballast applications", IEEE Trans on I.E Col41, No.4, pp.418-425 Aug, 1994.
- [4] S. wada, A. Okada, S. Morii, "Study of HID Lamps with Reduced Acoustic Resonances", J. Illum pp.162-175, 1987.
- [5] E. L. Laskowski, "Dynamics and Control of a Mercury ARC Lamp", Doctoral thesis The Cleveland State University pp.59-107 Sep, 1978.
- [6] 김기철 "메탈할라이드 램프의 음향공명현상을 감소시킨 전자식 안정기의 개발" 강원대학교 전기공학과 대학원 공학박사학위논문. 2. 2000.

◇ 저자 소개 ◇

박종연 (朴鍾演)
1951년 2월 23일생. 1973년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 대학원 졸업(석사). 1984년 경북대 대학원 졸업(박사). 1973-1977년 KIST 연구원. 1977-1984년 울산공대 조교수, 부교수. 1984년-현재 강원대 교수

장목순 (張牧淳)
1966년 10월 25일생. 1990년 강원대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년 6월-현재 토론토 대학교 전기공학과 선임 연구원

조계현 (曹桂鉉)
1973년 3월 27일생. 1998년 강원대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 3월-현재 동대학원 전기공학과(박사과정)

조호진 (趙浩贊)
1975년 1월 19일생. 2001년 강원대학교 전기공학과 졸업. 2001년-현재 동대학원 전기공학과 (석사과정)