

A PSpice Model for the Electrical Ballast of HID Lamps

池潤根* · 金南俊**
(Yun-Keun G · Nam-Joon Kim)

Abstract - The thesis is used by PSpice circuit model to the characteristics of a fluorescent lamp modified form of the classical Cassie and Mayr equations in order to show the characteristics of HID(High-Intensity Discharge) Lamp. This is useful for applying high-frequency electric ballast for HID Lamp, and show that the result of experimentations and simulations, such as lamp rating, input voltage, high-frequency electric ballast which is using the ABM circuit model of the low pressure sodium lamp, come to the voltage and current wave.

Key Words : Electric Ballast, PSpice Simulation Model, HID Lamp, Low Pressure Sodium, ABM

1. 서 론

고휘도 방전등(High-Intensity Discharge Lamp)은 고효율의 광원으로 점등장치인 안정기와 함께 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 형광램프나 HID 램프 등 모든 가스 방전 램프는 방전이 일어나기 전까지의 영역에서 부저항 특성을 나타낸다. 이러한 부저항 특성에 의해서 방전관이 이온화하는 전압보다 더 큰 전압이 걸릴 경우 불안정한 상태가 되기 때문에 안정기라는 전류 제한 장치가 필요한 것이 보편적이다[1]. 그래서 매년 HID 램프를 제작할 때마다 새로운 안정기에 대한 설계 및 제작이 필요하게 된다. 여기에 CAD나 시뮬레이션 도구 등을 이용하여 시스템을 개발하게 되는데 이는 제작의 시행착오를 감소하게 하고 최적의 시스템으로 만들기 위해 들어가는 비용의 절감 효과를 가져올 수 있다. 그러므로 시스템 개발에 있어서 시뮬레이션은 매우 중요하고, 여기에 컴퓨터의 발전으로 점차적으로 업그레이드 된 시뮬레이션 도구가 만들어지고 있다.

아크 방전 램프나 아크 플라즈마 리액터와 같이 아크 부하의 제어를 필요로 하는 전력전자 회로에서는 시뮬레이션을 쉽게 하기 위해서 시뮬레이션에 적당한 모델이 필요하게 된다. 특히 아크 전압이나 아크 전류의 상호관계에 있어서는 비선형적이며 복잡한 아크현상이 발생하므로 순수 저항으로서의 아크 부하에 대한 모델링은 충분한 조건을 갖춘 정확도를 줄 수 없게 된다. 그러므로 회로 시뮬레이터 상에서 사용할 수 있는 전자기적 아크 모델(정상 상태와 과도 상태 모

두)을 해석할 수 있는 보다 발전 된 시뮬레이션 모델을 만들 필요성이 있다[3].

PSpice는 새로운 모델을 반영하여 이에 적합한 방식을 제공해 주는 시뮬레이터로서 아날로그 수행(Analog Behavioral)[4]이라는 옵션을 이용하여 회로 내부적으로 일반화될 수 있는 수학적 방정식을 사용할 수 있게 하였다. 여기에 Cassie와 Mayr의 전기 아크 모델과 아크 물리학의 기초에서 약간 변형한 공식을 이용하여 나타낸 아크 모델을 두 개의 단자를 이용한 아크 부하를 묘사하였고, 이것을 Nodal-Analysis 방법을 이용하여 컴퓨터를 이용한 회로분석을 할 수 있다. 이 논문에서는 기본적인 아크의 수학적 모델링으로 구성된 PSpice 회로를 통하여 이미 검증된 특성을 확인하고, 여기에 HID 램프의 특성을 기본적인 아크 모델의 수식적 표현에 적용하여 나타낸다[7].

이 논문의 구성은 2.1장에서 기본적인 아크현상을 묘사한 후 아크 모델의 발달을 설명하고, 2.2장에서는 PSpice 시뮬레이터에서 아크 모델을 설명하며, HID 램프의 시뮬레이션과 실험적 현상을 2.3장에서, 그리고 전자식 안정기 모델을 실제 적용한 결과는 2.4장에서 나타내었다.

2. 본 론

2.1 Cassie 와 Mayr 모델

HID 램프는 가스 방전 램프 범주에 속하고, 가스 방전 형태는 가스 매개를 통한 전기 전류의 흐름을 묘사하는데 사용된다. 아크-플라즈마는 램프 관에서 발생하며, 방전의 길이는 포지티브 컬럼과 애노드 폴 사이의 전체 동작에서 더 중요한 역할을 하는 여러 영역으로 구성되고, 우리는 이 두 영역의

* 準 會 員 : 大 眞 大 學 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

** 正 會 員 : 大 眞 大 學 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002 年 7 月 23 日

最 終 完 了 : 2002 年 10 月 18 日

모델링에 초점을 둔다. 이론과 실험, 둘 모두의 연구에서 동적 아크-플라즈마 현상은 매우 복잡하다. 또한, 접속된 전력 전자 회로의 기술 모델과 함께 유사한 아크의 완전한 수학적 모델의 구현은 불가능하다. 그러나 오랜 기간에 걸쳐 비교적 간단한 Cassie와 Mayr 미분 방정식 모델로 가장 근접하게 인정되어 왔다. 그러므로, 포지티브 컬럼에서 에너지 저장과 전력손실의 평형화를 근거로 한 에너지 형태로 쓰이거나 현저한 아크를 결정하는 현상의 최초 방정식으로 유용하게 쓸 수 있다. 여기에 Cassie방정식을 나타내면 식(1)과 같다.

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{v^2}{E_0^2}\right) \quad (1)$$

여기서 E_0 는 정상상태 아크 전압이고 θ 는 아크 시간으로 불변이며, v 는 아크 순시전압, R 은 아크저항이다. 이 식은 고 전류 영역에서 곡선을 설명하는데 적절하다. Mayr 방정식을 나타내면 식(2)와 같다.

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{vi}{P_0}\right) \quad (2)$$

여기서 P_0 는 전력 손실이며 역시 불변이고, 이 방정식은 저 전류 영역에서 곡선을 설명하는데 아주 적절하다.

위의 방정식을 포지티브 컬럼과 과도 회로 시뮬레이션에 대한 적당한 형태로 Cassie와 Mayr 모델을 수정하고 결합시켜 아크 저항 대신 아크 컨덕턴스 G 로 나타낸다. 변화된 Cassie방정식과 Mayr 방정식은 각각 식(3)과 식(4)와 같다.

$$G = \frac{vi}{E_0^2} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (3)$$

$$G = \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (4)$$

식(3)의 Cassie 방정식이 고 전류 영역에 나타나는 동안 Mayr 방정식은 거의 0에 대한 값으로 나타나고, 이 방정식이 저 전류 영역이 된다. 저 전류와 고 전류 두 영역에서의 곡선을 설명하는데는 Cassie와 Mayr의 수학적 모델을 이용하여 크게 포지티브 컬럼과 애노드 폴의 두가지로 분류할 수 있고 포지티브 컬럼의 컨덕턴스 G_p 는 식(3)과 식(4)의 조합에 의해 나타나고, 애노드 폴의 컨덕턴스 G_a 는 포지티브 컬럼 G_p 에 비례하고, 램프 전류 I 의 선형 함수에 의해서 나타난다. 그 때 계산된 모델은 다음과 같은 방정식에 의해 주어진다.

$$G_p = \frac{v_p i}{E_0^2} + \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG_p}{dt} + G_0 \quad (5)$$

$$G_a = \frac{G_p}{I} + G_0 \quad (6)$$

$$I = \alpha |i|^n + |i|^{n-1} + \beta \quad (7)$$

$$v_p = \frac{i}{G_p} \quad (8)$$

$$v_a = \frac{i}{G_a} \quad (9)$$

$$v = v_p + v_a \quad (10)$$

여기서, v_p 와 v_a 는 포지티브 컬럼과 애노드 폴의 전압이고, G_0 는 아크가 결여 될 때 두 전극 사이 컨덕턴스의 매우 작은 양으로 한정된 값이다.

2.2 PSpice 표현

PSpice 소프트웨어의 Libraries는 회로 디자인을 돕고, 장치 모델링의 시스템 동작연구를 위한 많은 유용한 특징을 가지고 있다. 한가지 예를 들자면 특성에 의한 성분을 디자인 할 필요가 없는 모델이 있다는 것이다. 즉, 이것은 회로 부분 모델에서 사용되는 수학적 관계인 아날로그 동작 모델 ABM(Analog Behavioral Model)이다. PSpice에서 Symbol Library는 “제어 시스템” 부분 하에서 분류한 여러 ABM 부분으로 구성되는데, 그 예로 미분기와 필터, 적분기를 들 수 있다. 시뮬레이션을 하기 위해서 방정식은 ABM 표현에 의해 설명되는 것이 그 최선의 방법이라고 생각한다. 왜냐하면, 수학적 작용의 변화 수행을 할 수 있다는 점 때문이다. 각 ABM의 표현은 다섯 개의 표현 빌딩 블록에 각각의 속성을 배치하고 다섯 방정식과 정적특성에 대한 테스트 회로를 그림 1에서 구성하였다[5]. 여기에서 간단한 아크 시뮬레이션 결과를 확인하고, 주어진 모델에 대해 저압나트륨 램프의 시뮬레이션 특성을 파악 할 수 있다. E_0 는 정적 특성의 점화 전압 값을 선택했고, P_0 는 고전류 레벨에서 정적 특성의 램프의 정상 상태 전력, α 와 β 는 전압 진폭 값의 실험 값으로 설정하였으며, G_0 , θ , n 은 실험에 의한 결과 값으로 디폴트값에 의해 선택되었다.

시뮬레이션 된 모델 파라미터들은 상호적 영향에 의해서 중요한 특성을 나타내므로 이것을 잘 이해하는 것은 모델 파라미터 판단에 도움을 주기 때문에 매우 중요하다. 각 파라미터의 시뮬레이션 특성은 시뮬레이션들의 관찰로부터 분석할 수 있는데, 시뮬레이션 회로의 구성은 저항과 아크를 가진 직렬로 연결된 전압 소스로 이루어져 있으며 이것은 높은 전압소스를 인가함으로써 아크가 발생하는 것을 명백하게 보여 준다.

이 모델은 기본적인 아크 방정식을 토대로 하여 PSpice 시

클레이션 회로를 만들었기 때문에 E_o , θ , G_o 와 P_o 와 함께 n , α 와 β 의 파라미터 결정 여부에 따라 HID 램프에 적용이 가능하다. 중요한 것은 다섯 가지 방정식으로 기본 바탕이 되었다는 것을 명심해야 하며, 그것들은 램프 전압 v 와 램프 전류 i 의 두 가지 변수에 의해 구성된다.

이 모델을 HID 램프에 적용하기 위해서는 다음의 사항을 고려하여 파라미터를 결정하여야 한다. 즉, 아크 전압은 낮은 전류에서 쌍곡선 형태를 가지고 있고, 이것은 파라미터 P_o 의 값에 의존한다. 또한, 같은 아크 전류를 갖기 위해서, 아크 전압은 P_o 의 값보다 더 커야하며, 매우 낮은 P_o 에 대해 변환영역에서의 특성은 양의 미분저항 형태를 나타내어야 한다는 것이다. 그리고 방전전압은 G_o 에 의해 주로 결정된다.

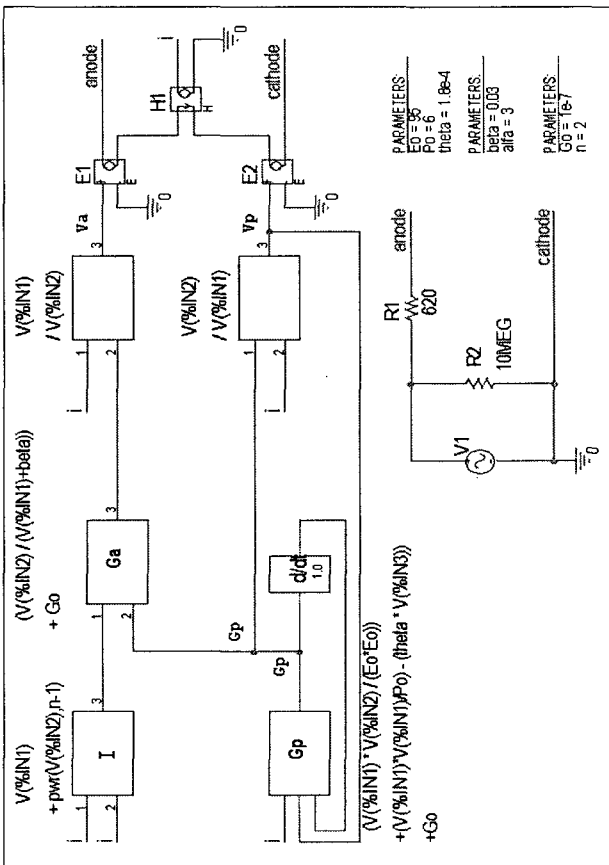


그림 1 ABM 모델을 이용한 HID 램프의 PSpice 회로
Fig. 1 PSpice circuit of HID lamp using ABM model

2.3 실험적 증명

그림 2와 그림 3은 HID 램프의 특성을 시뮬레이션과 실험값에 대하여 특성비교를 한 것이다. 아크 모델의 파라미터에 대한 기본값을 바탕으로, 실험과 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 비교할 때 잘 일치하고 있는 것으로 판단한다. 본 모델은 오리지널 Cassie와 Mayr 모델을 결합시켰을 뿐만 아니라, 정상상태를 시뮬레이션 할 수 있도록 하여 전자식 안정기

를 적용한 램프에서도 시뮬레이션이 가능하게 하였다. 여기서 HID 램프는 36W 저압나트륨 램프를 사용하였다.

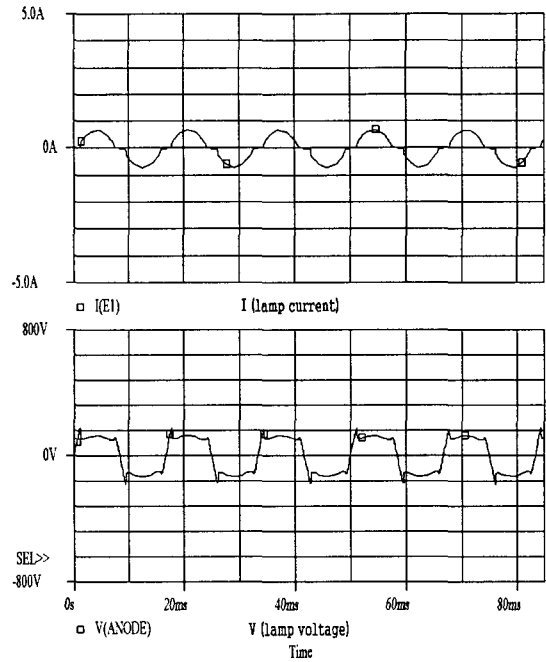


그림 2 HID 램프 모델을 이용한 PSpice 시뮬레이션 결과(36W)
(전류:1A/div, 전압:200V/div, 시간:10ms/div)
Fig. 2 Simulation results of 36W HID lamp model
(current:1A/div, voltage:200V/div, time:10ms/div)

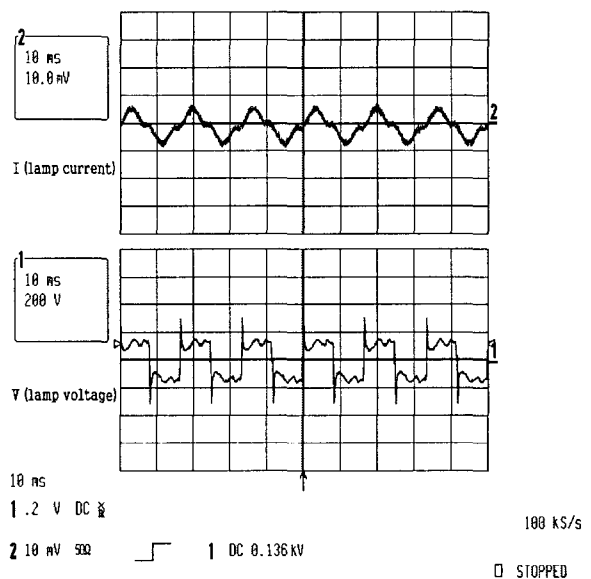


그림 3 HID 램프의 전압 전류 파형 측정값(36W)
(전류:1A/div, 전압:200V/div, 시간:10ms/div)
Fig. 3 Experimental results of 36W HID lamp model
(current:1A/div, voltage:200V/div, time:10ms/div)

2.4 전자식 안정기 설계의 응용

이전에 도출된 모델은 전자식 안정기 설계에 사전 준비차원에서 많은 도움이 된다. 이 장에서는 하프-브리지 직렬 공진 평형부하를 가진 안정기의 설계에 대한 샘플과 그에 대한 응용을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 L-C탱크는 4각파의 전압원에 의해 이끌어진다. 전자식 안정기를 설계하려 할 때, 우리는 회로의 파라미터를 쉽게 수정할 수 있고, 최적화 된 결과를 얻을 수 있다. 전자식 안정기의 적용에 있어서도 제안된 시뮬레이션 회로에 대한 HID 램프의 적용은 그림 5와 그림 6에서와 같이 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교해서 살펴볼 수 있다.

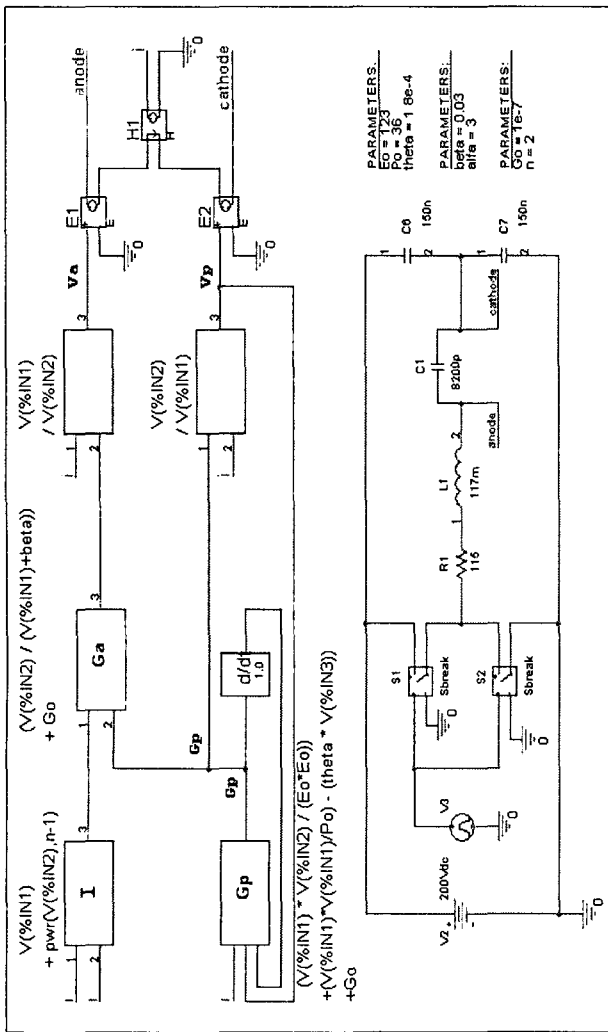


그림 4 전자식 안정기샘플을 적용한 HID 램프 PSpice 시뮬레이션 모델
 Fig. 4 PSpice circuit of HID lamp and schematic of the electronic ballast

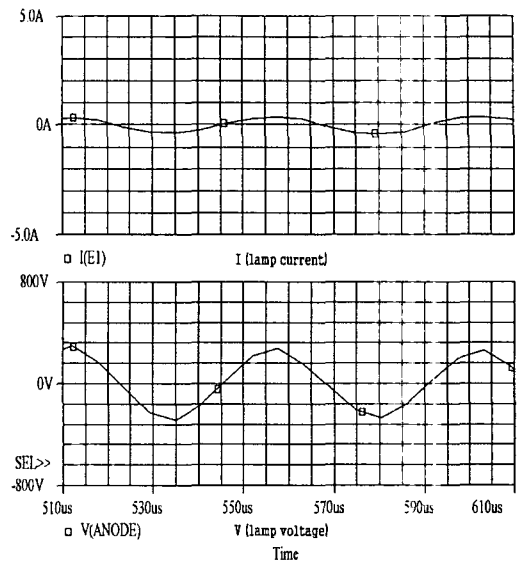


그림 5 전자식 안정기를 적용한 HID램프 시뮬레이션 결과(36W)
 (전류:1A/div, 전압:100V/div, 시간:5us/div)
 Fig. 5 Simulation results of 36W HID lamp model at application electronic ballast
 (current:1A/div, voltage:100V/div, time:5us/div)

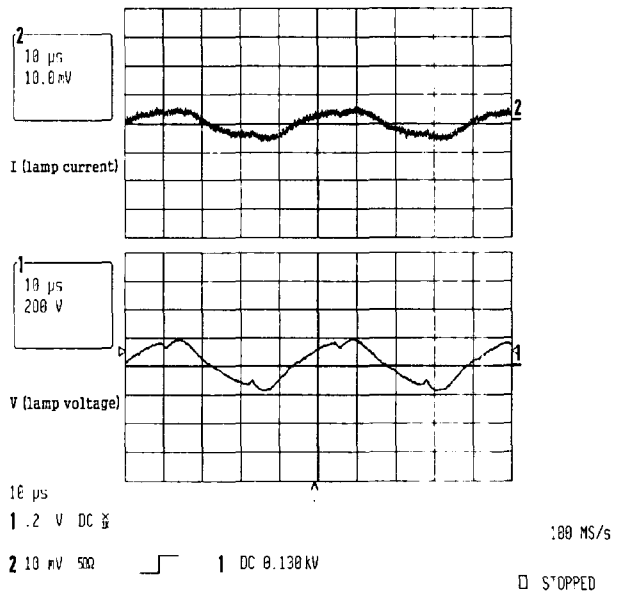


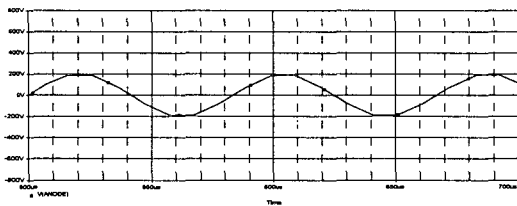
그림 6 전자식 안정기를 이용한 HID램프 실험결과(36W)
 (전류:1A/div, 전압:200V/div, 시간:10us/div)
 Fig. 6 Experimental results of 36W HID lamp model at application electronic ballast
 (current:1A/div, voltage:200V/div, time:10us/div)

표 1 안정기의 입력전압 변화에 따른 HID램프 전력 비교(36W)

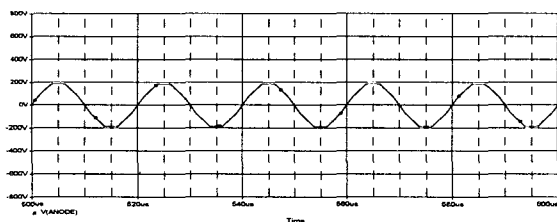
Table 1 Comparison of simulation and experimental results of 36W HID lamp at different input voltage

	자기식 안정기(36W)			전자식 안정기(36W)		
	200	220	240	200	220	240
입력전압(V)	200	220	240	200	220	240
시뮬레이션 결과(W)	45.8	45.7	45.6	55.3	55.3	55.3
실험결과(W)	42.2	42.6	42.9	54.0	54.1	54.1

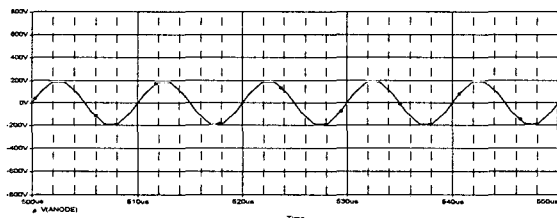
표 1 에서 나타내고 있는 자기식 안정기와 전자식 안정기의 입력전압에 대한 HID 램프 전력을 비교해 볼 때 시뮬레이션에 의한 결과값과 실험값에 의한 결과값이 전압, 전류의 패턴 뿐 아니라 입력전압의 변화에 따른 출력 또한 비교적 근사한 변화를 보이고 있으므로 전자식 안정기 설계에 있어서 제안된 시뮬레이션 회로를 적용하는데 적합하다고 볼 수 있다.



(a)12kHz(전압:200V/div, 시간:10us/div)



(b)50kHz(전압:200V/div, 시간:5us/div)



(c)100kHz(전압:200V/div, 시간:2us/div)

그림 7 전자식 안정기를 적용한 HID램프 시뮬레이션 결과(36W)

Fig. 7 Simulation results of 36W HID lamp at application electronic ballast

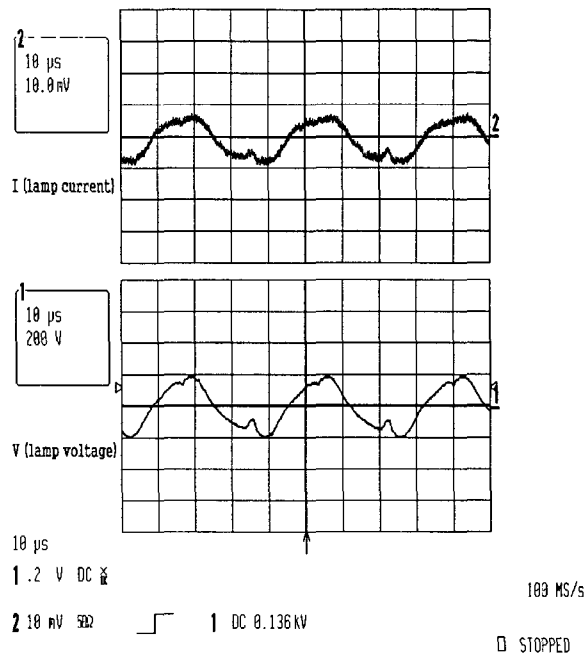


그림 8 전자식 안정기를 이용한 HID램프 실측값(66W) (전류:1A/div, 전압:200V/div, 시간:10us/div)

Fig. 8 Experimental results of 66W HID lamp at electronic ballast (current:1A/div, voltage:200V/div, time:10us/div)

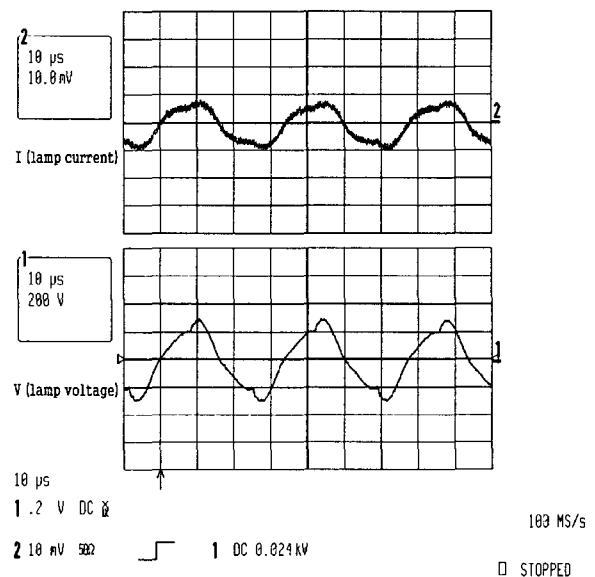


그림 9 전자식 안정기를 이용한 HID램프 실측값(91W) (전류:1A/div, 전압:200V/div, 시간:10us/div)

Fig. 9 Experimental results of 91W HID lamp at electronic ballast (current:1A/div, voltage:200V/div, time:10us/div)

그림 2 와 그림 5의 램프 전압과 전류 파형은 각각 60Hz 와 120kHz의 구동주파수를 사용한 실험값에 의해서 시뮬레이션 한 것이며, 전자식 안정기를 적용함에 있어서 그림 7 과 같이 12kHz와 50kHz, 100kHz 에서도 동일한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 전압과 전류 파형에 있어서 실험에서 나타나는 왜곡현상을 완벽하게 표현하지는 못하였지만, 표 1 과 같이 입력전압 변화에 따른 평균전력의 오차는 $\pm 2\%$ 를 넘지 않으며, 구동 주파수별 시뮬레이션이 같은 패턴을 유지한다. 이는 제안한 HID 램프의 시뮬레이션 모델이 다양한 정격의 설계에 적용하는 것 또한 가능하다는 것을 보여준다. 또한 그림 8 의 66W 램프와 그림 9 의 91W 램프의 실측 파형이 앞에서 제시한 31W의 실측결과와 유사한 패턴을 보여 주므로 다양한 정격의 램프에 대한 전자식 안정기의 설계에 있어서도 가능하다는 것을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서 제시한 HID 램프 모델은 기본적인 아크 방정식을 이용한 램프 모델을 바탕으로 구성되며, 이를 이용한 시뮬레이션 및 실험결과로부터 본 모델의 적절함을 확인할 수 있었다. 이 모델은 과거에 전기 아크를 해석하기 위해 폭넓게 사용되었던 고전적인 Cassie 와 Mayr방정식에 뿌리를 둔다는 것이며, 표준 산업적인 회로 시뮬레이터에서 다양한 램프 모델에 대하여 파라미터의 적절한 값 선택에 따라 그 특성을 확인할 수 있도록 만들어졌다. 이러한 과정을 거쳐서 구해진 시뮬레이션 결과는 폭넓은 램프 전력 레벨에 걸쳐 동적·정적 특성을 미리 알 수 있도록 해준다.

또한, 본 논문에서 나타낸 결과는 자기식 안정기에 적용한 모델이 전자식 안정기에서도 동작이 용이함으로 현재 개발된 자기식 안정기를 사용하는 HID 램프를, 제안된 모델에 적용하여 점등시간과 효율 면에서 좋은 조건을 가진 전자식 안정기의 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 보다 효율적으로 전자식 안정기를 연구 개발 할 수 있다고 본다.

그러나, 제안된 모델은 HID 램프의 정상상태의 현상을 이해하는 데에만 적합하다. 사실, 파라미터의 변화에 의한 기존 모델의 HID 램프적용은 적절하긴 하였으나, 과도상태나 열적 요인과 같은 주변의 다른 요인에 의한 해석은 앞으로 계속 수행되어야 할 과제이다.

감사의 글

본 논문 실험에 많은 도움을 주신 (주)조일조명공업 관계자 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] W. Elenbaas, Ed., Fluorescent lamps and Lighting. New York: Macmillan, 1959.
- [2] Muhammad Taher Abuelmatti, "Modeling the

Current-Voltage Characteristic of a Fluorescent Lamp for Computer-Aid Design," International Journal of Electronics, Vol.66, No.5, pp.835~839, 1988.

- [3] Sun. Ning, Hesterman. Bryce, "PSpice High Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model," Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. Vol.2, pp.641~647, 1996.
- [4] Ned Mohan, Power Electronics: Computer Simulation, Analysis, and Education Using PSpice (Release 9), 1999.
- [5] T. Liu, K.J. Tseng and D.M. Vilathgamuwa, "A Pspice Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps," Conference Proceedings-IEEE, pp.1749~1754, 1998
- [6] Thomas E. Browne, JR., "Circuit Interruption Theory and Techniques," Marcel Dekker, INC.,1984
- [7] K.J. Tseng, Y.Wang and D.M. Vilathgamuwa "Development of a Dynamic Model of Electric Arc for Power Electronics Simulations," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol.4, No.4, pp.2173~2180, 1996.

저 자 소 개



지 윤 근(池潤根)

1973년 3월 12일생. 2000년 대전대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : 031-539-1045

E-mail : chiyun@daejin.ac.kr



김 남 준(金南俊)

1964년 12월 19일생. 1997년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학). 현재 대전대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 031-539-1912

E-mail : njkim@road.daejir.ac.kr