

# PSPICE 회로해석에 의한 압전변압기와 CCFL의 모델링

김영춘<sup>1\*</sup>

## Modeling of Piezoelectric Transformer and CCFL by PSPICE Circuit Analysis

Young-Chun Kim<sup>1\*</sup>

**요 약** 본 논문에서는 압전 변압기와 CCFL의 전기적 등가회로에 의한 PSPICE 모델을 제시하였다. CCFL 모델은 최소 제곱근을 이용하여 모델의 파라미터들을 유도하였으며, 푸시풀 인버터로 구동되는 압전 변압기 및 CCFL을 PSPICE로 시뮬레이션하여 모델들을 해석하였다.

**Abstract** In this paper, a PSPICE model of piezoelectric transformer and CCFL using an electrical equivalent circuit was presented. The parameters of CCFL for PSPICE were derived by the least square method. The computer simulations were performed and the results are compared on the PSPICE model of piezoelectric transformer driven by push-pull inverter and CCFL.

**Key Words** : 압전변압기, CCFL, PSPICE

### 1. 서론

압전변압기는 기계적인 진동을 통해 전기적인 에너지로 변환하는 소자로 착화소자와 세라믹 필터의 기능을 합친 것으로 일반 권선형 변압기에 비해 고효율, 소형경량, 전기적 손실이 적고 구조가 간단하고 출력이 고전압 소전류이며 주파수 대역폭이 작아 음이온 발생기, 전자 복사기, 치한 퇴치기 등 응용분야가 다양하다.<sup>[1],[2]</sup> 최근에는 노트북의 백라이트용 인버터에 응용되고 있다. 1950년대 C.A.Rosen이 제안한 이후로 다양한 압전변압기의 응용 기술들이 제안되었다.<sup>[3]</sup>

압전 변압기 설계를 위해서는 요구되는 파라미터 값이 있는데, 이 값들을 구하기는 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 모델링에 의해 최적으로 구성된 압전 변압기의 시뮬레이션이 필요하다.

본 논문에서 압전 변압기는 판 형태의 세라믹 소자에 한쪽 반은 두께 방향의 단면에 다른 한쪽은 길이 방향의 단면에 각각 전극을 부착하며, 전자는 두께 방향으로 후자는 길이 방향으로 각각 직류 고전압을 분극하여 동작

하며, CCFL의 응용을 위해 사용했다.

압전 변압기의 모델링을 위하여 C.A.Rosen이 제안한 압전 변압기의 등가회로에서 공진 주파수가 부하 저항에 의존하는 경우에 대하여 해석을 했으며, 승압비의 이론식은 치수와 재료의 압전 상수로 나타내었다. 또한 P.A.Van Berkum이 제안한 탄성 진동 응력을 이용하여 일정 공진 주파수로 구동시 무손실의 경우와 등가 내부 손실 저항을 포함하는 일반적인 경우의 승압비 해석을 하였다. 또한 실험을 통해 압전 변압기의 등가회로에 적용되는 파라미터들을 구하였으며<sup>[4],[5]</sup> 이러한 모델링에 의해 새로운 특성을 가진 압전 변압기의 제작에 적용시킬 수 있었다.

또한 압전 변압기로 동작되는 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)의 모델링을 위하여 실효전압과 전류로 표현되는 램프의 2가지 서로 다른 감광 특성과 고주파에서 동작하는 램프의 등가 임피던스, 순시램프 전류를 사용하여 순시램프전압을 구하므로써 RC 적분회로에 적용시켰다.

이러한 결과 본 논문에서는 압전 변압기와 CCFL의 전기적 등가회로를 미시적인 모델링에 가장 효과적인 시뮬레이터인 PSPICE를 사용하여 해석하였으며, 실제적인 압전 변압기 제작시에 시뮬레이션으로 구한 파라미터 값들을 사용하였으며,<sup>[3],[4],[5]</sup> 푸시풀 인버터에 적용시켜 시

<sup>1</sup>국립공주대학교 기계자동차공학부

\*교신저자: 김영춘(yckim59@kongju.ac.kr)

물레이션을 수행하여 모델링 정확성을 확증하였다.

## 2. 압전변압기의 PSPICE 모델링

### 2.1 압전 변압기의 구조와 원리

그림 2-1에 나타낸 것처럼 판상소자의 편축반은 두께 방향에 전극을 다른 반은 길이방향의 단면에 전극을 가지고 전자는 두께방향으로, 후자는 길이방향에 직류전압을 인가하여 분극을 한 것이다.

두께 방향의 전극부를 구동부, 다른쪽을 발전부라 부르고, 권선변압기의 1차, 2차측에 상당한다. 길이방향의 치수  $2L$  로 결정된 고유공진주파수의 입력전압을 구동부에 인가하면 電壱效果에 의해 길이방향으로 강한 기계적진동을 일으키고, 이것에 의해 발전부에서는 길이방향의 응력이 공진적으로 증폭되면 발전부 양단의 출력전극에서 꽤 높은 승압된 전압 ( $V_2$ )이 발생한다. 전기에너지에서 기계에너지로 또 전기에너지로의 변환을 통하여 승압작용을 하게된다.

출력단 무부하시의 승압비  $\left( G = \frac{V_2}{V_1} \right)_\infty$  는 압전재료의 압전상수, 치수에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$G_\infty = \frac{4}{\pi^2} Q_m k_{31} k_{33} \frac{L}{T} \quad (2-1)$$

여기서  $G_\infty$ : 무부하시 승압비

$Q_m$ : 압전 세라믹의 기계적 품질계수

$k_{31}, k_{33}$ : 전기기계 결합계수

$L$ : 길이

$T$ : 응력

또한, 기본 공진 주파수는 소자중의 음속을  $C$  라 할 때 식 (2-2)로 표현된다.

$$f_r = \frac{C}{4L} \quad (2-2)$$

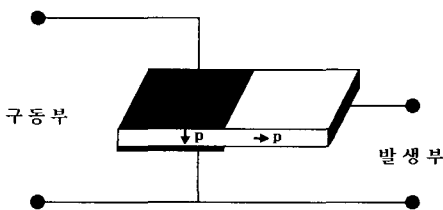
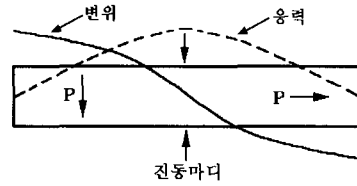
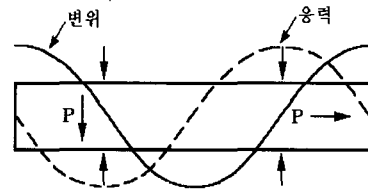


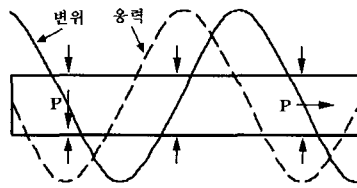
그림 2-1. 압전 변압기 구조



(a)  $\frac{1}{2} \lambda$  모드



(b)  $\lambda$  모드



(c)  $\frac{3}{2} \lambda$  모드

그림 2-2. 압전 변압기의 응력 및 변위

### 2.2 압전변압기의 교류등가회로

압전 변압기의 입력측 전압  $V_{Lr}(t)$ 는 식 (2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{Lr}(t) = V_{Lr} \sin \omega_s t \quad (2-3)$$

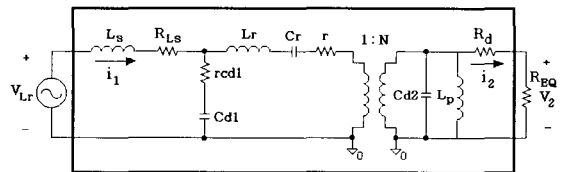


그림 2-3. 압전 변압기의 교류등가회로

또한 압전 변압기의 출력 단자측의 등가임피던스는 식 (2-5)로 표현된다.

$$R_{EQ} = \frac{\pi^2}{2} R_L \quad (2-4)$$

그림 2-3의 압전 변압기의 교류 등가회로에서 기생저항  $r_{cd1}$ 과  $C_{d1}$ 은 효율의 주파수 특성을 정확하게 나타내기 위해 삽입하였으며,  $R_{L_s}$ 와  $R_d$ 는  $L_s$ 의 등가저항이다.

출력전압  $V_o$ 의 반주기 동안의 평균값은 식 (2-5)로 표현되며, 승압비  $G$ 는 식 (2-6)으로 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_2 \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_2}{\pi} \quad (2-5)$$

$$G = \frac{V_2}{V_{Lr}} = \frac{\pi V_o}{\frac{2}{\pi} \frac{V_{in}}{(1-D)} \sin D\pi} = \frac{(1-D)\pi^2}{2 \sin D\pi} \frac{V_o}{V_{in}} \quad (2-6)$$

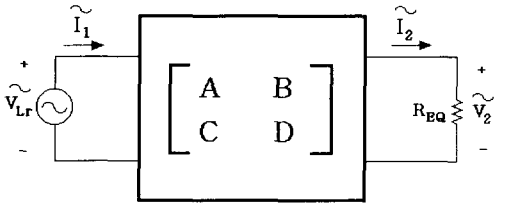


그림 2-4. F-Matrix

그림 2-3을 그림 2-4의 F-Matrix 형태로 나타내므로 식 (2-7)과 같이 입·출력 전압과 전류의 관계를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{Lr} \\ \tilde{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_2 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

압전 변압기의 교류등가회로 승압비  $G$ 는 식 (2-8)로 표현할 수 있으며, 출력전압  $V_o$ 는 식 (2-5)와 식 (2-8)에 의해 식 (2-9)을 구할 수 있다.

$$G = \frac{V_2}{V_{Lr}} = \frac{\tilde{V}_2}{\tilde{V}_{Lr}} = \left| \frac{R_{EQ}}{A \cdot R_{EQ} + B} \right| \quad (2-8)$$

$$V_o = \frac{2 \sin D\pi}{(1-D)\pi^2} \left| \frac{R_{EQ}}{A \cdot R_{EQ} + B} \right| V_{in} \quad (2-9)$$

그림 2-5은 제안한 압전 변압기의 등가회로이며, 이 회로를 근거로 하여 PSPICE로 라이브러리화 하였다.

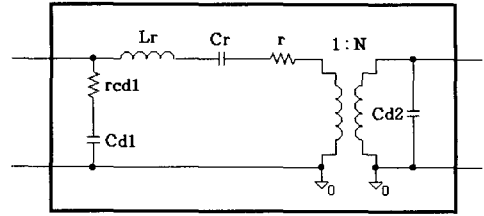


그림 2-5. 압전 변압기의 등가회로

### 3. 압전변압기의 시뮬레이션

그림 3-1은 그림 2-5의 압전 변압기의 등가회로를 포함한 푸시풀 인버터이며, 이 때의 PSPICE 모델은 그림 3-2에 나타냈다. 이 회로에서 CCFL은 100[kΩ]의 저항  $R_L$ 로 나타냈으며 각단의 시뮬레이션 파형은 그림 3-3에 표현했다. 또한 그림 3-4는 부하저항을 200[kΩ], 150[kΩ], 100[kΩ], 50[kΩ], 20[kΩ] 가변시에 출력전압의 파형이며, 그림 3-5는 구동 주파수에 따른 압전 변압기의 출력전압을 나타냈다. 그림 3-6은 인덕턴스  $L_1$ 과  $L_2$ 를 50[μH], 100[μH], 150[μH]으로 가변하였을 때의 각 단의 파형을 시뮬레이션 했다.

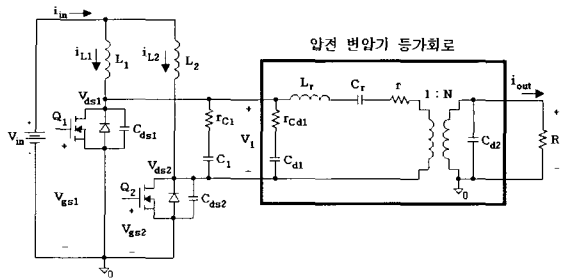


그림 3-1. 압전 변압기를 이용한 푸시풀 인버터

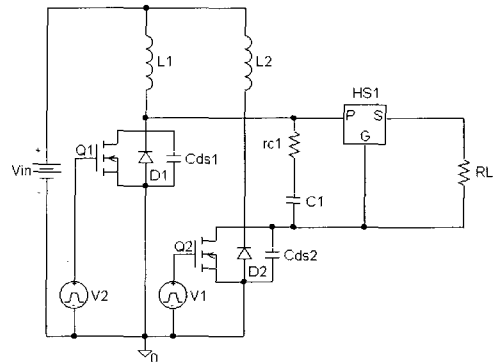


그림 3-2. 압전 변압기를 이용한 푸시풀 인버터 PSPICE 모델

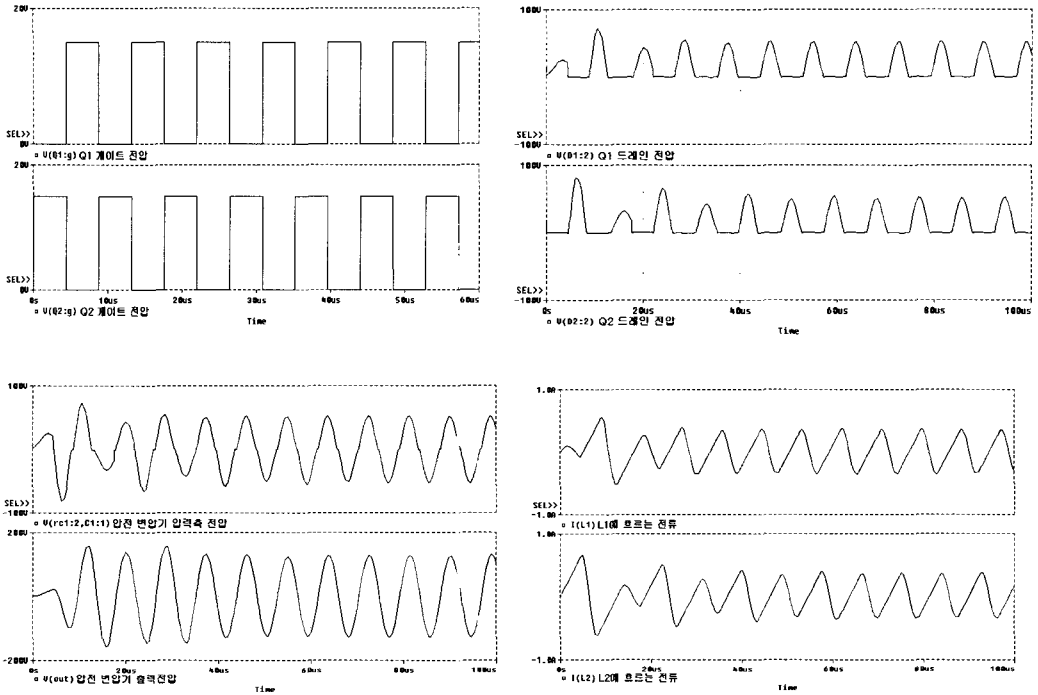


그림 3-3. 푸시풀 인버터의 시뮬레이션 파형

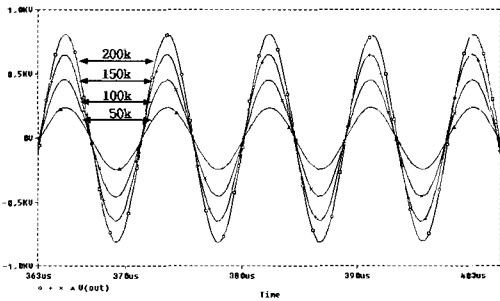


그림 3-4. 부하저항 가변시 출력전압 파형

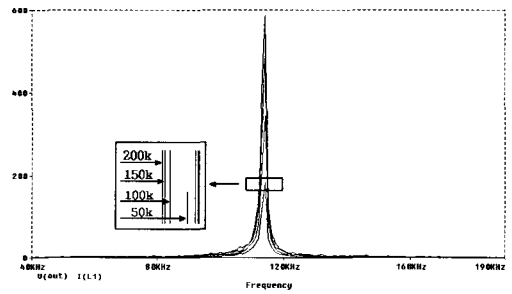


그림 3-5. 구동 주파수에 따른 압전 변압기의 출력전압

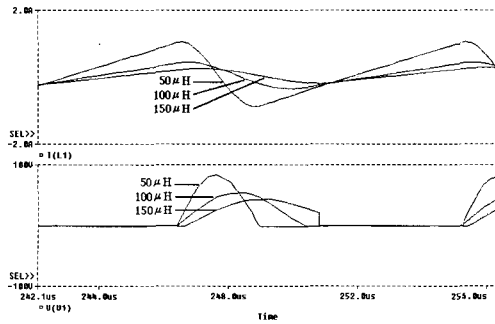
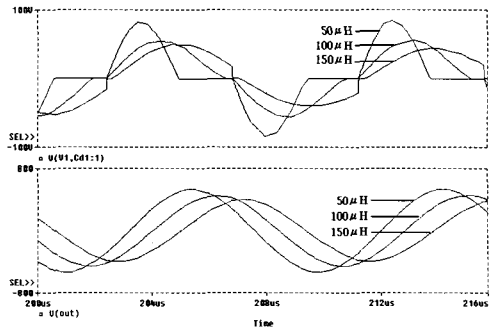


그림 3-6. 인덕턴스  $L_1$ ,  $L_2$  가변시 시뮬레이션 파형



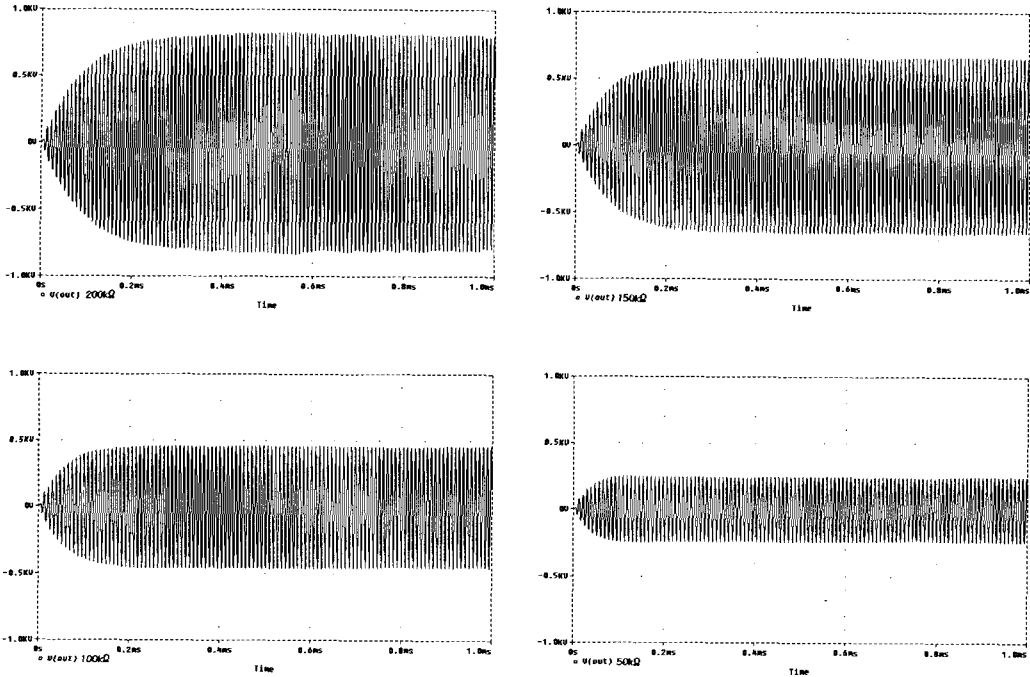


그림 3-7. 저항가변시 압전변압기의 출력전압 파형

#### 4. CCFL의 PSPICE 모델링

압전 변압기에 의해 동작되는 상태를 해석하기 위해 부하로써 CCFL을 사용하였다.

본 논문에서 제시한 CCFL의 실효전압과 전류의 특성은 감광 레벨에서 형광 램프는 부성 임피던스 특성을 가지며, 램프는 2가지 서로 다른 감광 특성을 식 (4-1)로 표현할 수 있다.

$$V_{rms} = 60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \cdot I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \cdot I_{rms}} \quad (4-1)$$

식 (4-1)의 파라미터는 최소 제공근으로부터 유도된다. 고주파수에서 동작하는 저항으로써의 램프를 고려하면 등가 임피던스는 식 (4-2)와 같이 쓸 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (4-2)$$

식 (4-1)과 (4-2)로부터 식 (4-3)을 구할 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \cdot I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \cdot I_{rms}}}{I_{rms}} \quad (4-3)$$

이 때 식 (4-4)와 같이 순시 램프 전류  $I_t$ 를 사용하여 순시 램프 전압  $V_t$ 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$V_t = R_{LAMP} \times I_t = \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \cdot I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \cdot I_{rms}}}{I_{rms}} \times I_t \quad (4-4)$$

식 (4-4)에 의해 CCFL을 모델링 하였으며, 순시전압  $V_t$ 는 순시램프전류  $I_t$ 와 실효전류  $I_{rms}$ 의 함수로써 구할 수 있다.

PSPICE 모델에서 램프 전류의 실효값은 RC 적분회로를 사용하여 구하며, 이 때 입력 전류원  $I_s$ 는 순시램프전류  $I_t$ 의 제공으로써 정의되며, 출력전압  $V_A$ 는 식 (3-5)와 같이 시간 T동안의 함수로써 계산할 수 있다.

$$V_A = \int_0^T I_t^2 \frac{dt}{T} = I_{rms}^2 \quad (4-5)$$

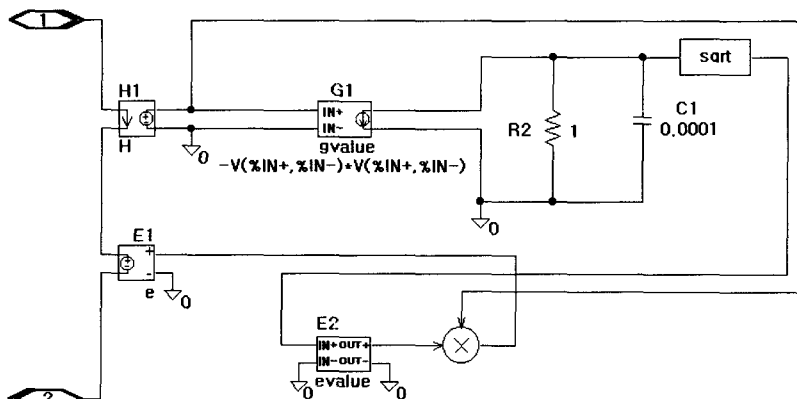


그림 4-1. CCFL의 PSPICE 모델

그러므로 전압  $V_A$ 의 제공근은 전류  $I_l$ 의 실효값이 된다. 실효램프전류를 계산하기 위해 이러한 RC 적분 회로를 사용함으로써 램프 모델 방정식인 식 (4-4)는 그림 4-1과 같이 PSPICE 모델로 만들 수 있다.

### 5. CCFL의 시뮬레이션

그림 5-1은 0~5[ms]까지는 저항 15[kΩ], 5[ms]~10[ms]까지는 5[kΩ]으로 가변했을 때의 CCFL의 전압 및 전류 파형의 시뮬레이션 결과이며, 그림 5-2는 CCFL의 전압-전류 특성곡선을 나타냈다.

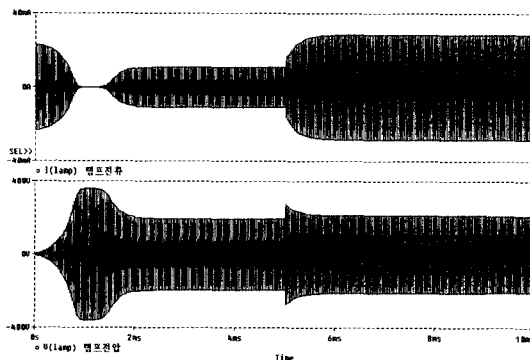


그림 5-1. 저항 가변시의 램프 전압 및 전류의 시뮬레이션 파형

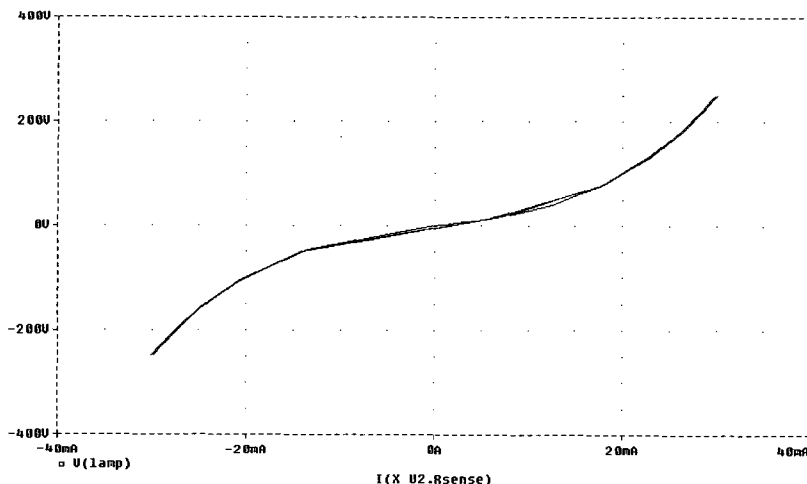


그림 5-2. CCFL의 V-I 특성곡선

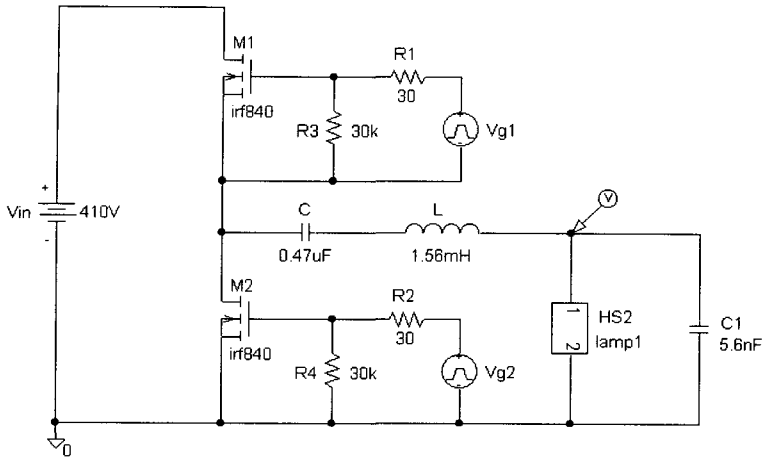


그림 5-3. 푸시풀 인버터의 시뮬레이션 회로

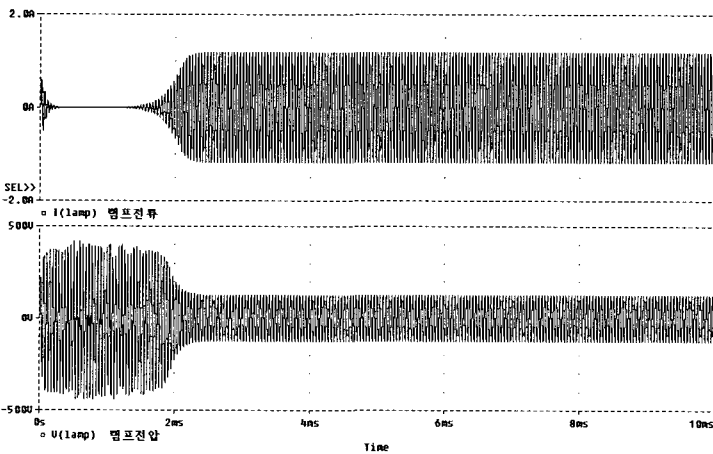


그림 5-4. CCFL 전류 및 전압 시뮬레이션 파형

그림 5-3은 전자 안정기 시뮬레이션을 위한 푸시풀 인버터이다. 이 때의 시뮬레이션 파형은 그림 5-4에 나타났다.

## 6. 결론

본 논문은 압전 변압기와 CCFL의 PSPICE 모델을 제시했다. CCFL PSPICE 모델은 최소 제공근을 이용하여 모델의 파라미터들을 유도하였으며, 시동모드에서 상승 모드까지 시뮬레이션이 가능했다. 또한 입력전류에 따른 기계적 공진 특성의 변화를 고려하고 3차 길이방향진동 모드에서 동작하는 압전 변압기는 여러 가지 부하조건과 입력 전류에 따른 기계적인 공진 특성의 변화를 알 수 있었으며, CCFL 램프 안정기의 응용회로에도 적합하다.

또한, 압전변압기는 대칭형 3차 로젠형 등가회로를 이용하여 모델링함으로써 만족스러운 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로의 과제는 저가형 압전 변압기의 제작을 위한 모델링 제시, 저·고주파용 형광램프의 안정기 설계 및 고효율용 램프의 모델링과 고효율용 압전 변압기의 모델링이 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] T.Zaitso, T.Inoue, O.Ohnishi, and A.Iwamoto, "2 MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer." IEEE INTELEC'92 Proc., PP.430-437, Oct.1992.

- [2] T.Zaitso, T.Shigehisa, M.Shoyama, and T.Ninomiya, "piezoelectric Transformer Converter with PWM Control," IEEE APEC'96 Proc., pp.279-283, March 1996.
- [3] L.H.Hwang, J.H.Yoo, J.R.Kim, E.S.Jang, Dongon Oh, Yeongho Jeong, Iksoo Ahn, Moontack Cao," Fabrication and characteristics of PDA LCD backlight driving circuit using piezoelectric transformer", Sensor and Actuator, 2004, pp.74-78
- [4] L.H.Hwang, J.H.Yoo, J.R.Kim, J.H.Jang, E.S.Jang, M.T.Cho, I.S.Ahn, H.B.Song"A study on Driving of 35W(T5) fluorescent lamp by the electronic ballast using piezoelectric transformer", ICEE, 2005, PS1-60
- [5] L.H.Hwang, J.H.Yoo, J.R.Kim, E.S.Jang, C.S.Lee, M.T.Cho, J.S.Kim,"A Study on the T5 Fluorescent Lamp Ballast used Contour Vibration Mode Piezoelectric Transformer using a One-Chip Microcontroller", ISAF, 2002, pp.287-290
- [6] N.Sun and B.Hesterman,"Pspice High Frequency Dynamic Fluorescent Lamps Model" IEEE APEC Conference Record, 1997, pp.641-647
- [7] T.Zaitso, TInoue, O.Ohnishi, and Y.Sasaki, "2 MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer," IEICE Transactions on Electronics. Vol. E77-C, No.2.

김 영 춘(Young-Choon Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 대전공업대학교 전기공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 명지대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 :공주대학교 기계자동차 부교수

<관심분야>

전기자동차전력변환, 전장제어, 하이브리드자동차,.....