

# 압전 트랜스포머를 이용한 CCFL 구동회로의 PSPICE Modeling에 관한 연구

黃樂燾\*, 曹文澤\*\*, 安益秀\*\*\*

## A Study on the PSPICE Modeling of CCFL Drive Circuit Using a Piezoelectric Transformer

Lak-Hoon Hwang, Moon-Taek Cho, and Ik-Soo Ahn

### 요 약

본 논문에서는 압전 변압기와 CCFL 구동회로의 전기적 동가회로에 의한 PSPICE와 모델을 제시하였다. 램프모델은 최소 제곱근을 이용하여 모델의 파라미터들을 유도하였다. 이 모델에 대한 확증을 위해 CCFL 구동회로의 단독모델을 가지고 시뮬레이션을 수행한 결과 정확한 모델링이 되었음을 확인하였으며, 압전변압기는 푸시풀 인버터와 부하로써 주로 PSPICE로 모델링한 CCFL을 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 만족스러운 모델링이 이루어졌음을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

In this paper, the modelings of PSPICE by the piezoelectric transformer and CCFL drive circuit using an electrical equivalent circuit is proposed. In the CCFL drive circuit modeling the model parameters of the CCFL were derived using the method of least squares because push-pull inverter and loads such as CCFL were also modeled using PSPICE. It is considered that the simulation techniques can be used in the piezoelectric devices such as piezoelectric transformer.

**Key Words :** PSPICE, piezoelectric transformer, CCFL, push-pull inverter

### 1. 서 론

압전 변압기는 1956년 C.A. Rosen에 의하여 최초로 원리와 응용에 관한 연구가 이루어 졌으며, H.W. Katz, P.A. van Berkum 등에 의하여 발전되어 고전압

발생 장치로서 주목을 받기 시작하였다<sup>[1][2]</sup>. 1960년대에는 TV의 수평 발진 회로에 이용되는 고압 변압기로서 개발되었지만, 고출력 특성을 얻기가 어렵기 때문에 개발이 중단되었다가 고출력용 압전 세라믹의 개발이 진행되면서 1994년 NEC사에 의해 노트북 PC용 액정 표시 장치의 배면 광원용 인버터에 사용하기 위한 대칭형 로젠 3차 방식의 압전 변압기가 개발되는 등 많은 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[3]-[5]</sup>

압전 변압기는 착화소자와 세라믹 필터의 기능을 합한 것으로 일반 권선형 변압기에 비해 고효율과 소형경량, 전기적 손실이 적고 구조가 간단하고 출력이 고전압 소전류이며 주파수 대역폭이 작아 음이온 발생

\*정회원, 세명대 전기공학과 교수  
E-mail : lhwang@semyung.ac.kr

\*\*정회원, 대원과학대학 전기과 부교수

\*\*\*정회원, 대원과학대학 인터넷 전자상거래과 전임강사  
접수일자 : 2002.12.11  
1차심사 : 2003. 1.14  
심사완료 : 2003. 2.17

기, 전자복사기, 치한 퇴치기, 고주파 변압기 등의 분야에 응용되고 있다. 최근에는 수요가 증대되는 휴대용 컴퓨터의 백라이트용 인버터에 응용되고 있다. 종래의 일반 권선형 변압기는 2차측 부하저항을 크게 하면 입력 임피던스도 상승하나 압전 변압기의 경우에는 공진 주파수로 부하저항을 크게 하면 역으로 입력 임피던스가 감소한다.

압전 변압기는 판 형태의 세라믹 소자에 한쪽 반은 두께방향의 단면에 다른 한쪽은 길이방향의 단면에 각각 전극을 부착하며, 전자는 두께방향으로 후자는 길이방향으로 각각 직류 고전압을 가하여 분극한다. 두께방향의 전극부를 구동부, 길이방향의 전극부를 발전부라 하며 각각 권선형 변압기의 1차측 및 2차측에 해당한다.

압전 변압기의 특성 해석에 있어서 C.A. Rosen은 압전 변압기의 등가 회로에서 공진 주파수가 부하 저항에 의존하는 경우에 대하여 해석을 행하고 승압비의 이론식은 치수와 재료의 압전 상수로 나타낼 수 있다고 하였으며, P.A. van Berkum은 탄성 진동 응력을 이용하여 일정 공진 주파수로 구동시 무손실의 경우와 등가 내부 손실 저항을 포함하는 일반적인 경우의 승압비 해석을 행하였다<sup>[6]-[9]</sup>.

한편, DC-DC 컨버터의 소형화를 위해서도 압전 변압기가 도입되었다. 컨버터를 소형화하기 위해서는 동작 주파수의 상승이 필연적인데, 기존의 권선형 변압기로는 코어 손실이 문제가 되어 동작 주파수 상승이 제한되었다. 하지만 압전 변압기는 이러한 코어 손실이 존재하지 않으므로 비교적 고효율을 얻으며 전원장치의 소형화를 가능하게 할 수 있다. 무엇보다도 전력 전자 분야에서 압전 변압기를 응용하려고 할 때 가장 큰 문제가 되는 것은 전력 구동 능력인데, 더 큰 전력을 구동하기 위해서는 재료분야와 회로분야에서 더 많은 연구가 필요하다<sup>[10]-[14]</sup>. 본 논문에서는 압전 변압기와 CCFL의 전기적 등가회로에 의한 PSPICE 모델을 제시하고자 한다. 이 모델에 대한 확증을 위해 CCFL의 단독모델을 가지고 시뮬레이션을 수행하고자하며, 압전변압기의 PSPICE모델은 푸시풀 인버터에 적용시켜 시뮬레이션을 수행하여 모델링을 하고자 한다.

## 2. 압전 변압기의 모델링

### 2.1 압전 변압기의 구조와 원리

그림 1에 나타낸 것처럼 판상소자의 편측반은 두께 방향에 전극을 다른 반은 길이방향의 단면에 전극을

가지고 전자는 두께방향으로, 후자는 길이방향에 직류 전압을 인가하여 분극을 한 것이다.

두께 방향의 전극부를 구동부, 다른쪽을 발전부라 부르고, 권선변압기의 1차, 2차측에 상당한다. 길이방향의 치수  $2L$ 로 결정된 고유공진주파수의 입력전압을 구동부에 인가하면 전왜효과(電歪効果)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  $(G = \frac{V_2}{V_1})_{\infty}$ 는 압전재료의 압전상수, 치수에 의해 다음 식 (1)로 표시된다.

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

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)로 표현된다.

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

압전 변압기는  $f_r$ 에서 공진할 때는 반파장진공 ( $\frac{\lambda}{2}$  모드)로 되지만,  $2f_r$  및  $3f_r$ 에서도 공진하여 승압 특성을 보이고 각각 전파장 진동 ( $\lambda$  모드,  $\frac{3}{2}\lambda$  모드)라 부른다. 그림 2는 그들 각 진동 모드의 응력 및 변위분포를 나타내었고, 각각의 진동의 절이 되는 개소가 다르다. 압전 변압기를 지지하는 경우는 변위 0의 개소, 즉 응력 최대의 개소를 지지할 필요가 있다.

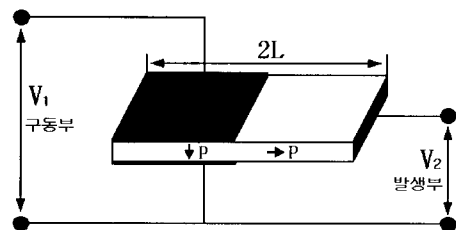


그림 1 압전 변압기  
Fig. 1 Piezoelectric Transformer

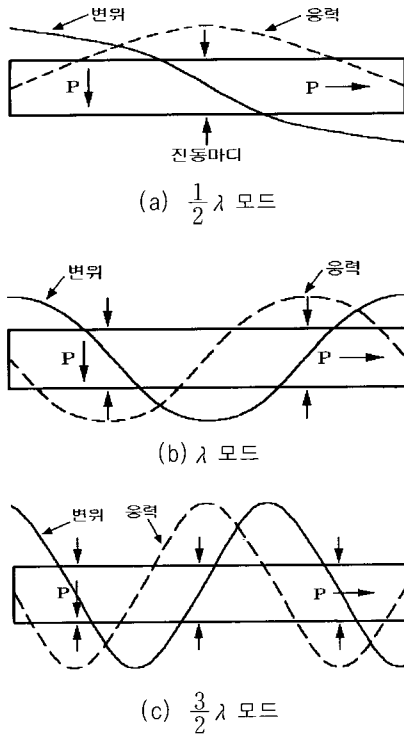


그림 2 진동모드에 따른 압전 변압기의 응력 및 변위분포  
Fig. 2 Displacement and Stress Distribution of Piezoelectric Transformer with Vibration mode

### 2.2 압전 변압기의 특징

권선형 변압기의 전압변환과정은 자기유도를 이용하여 1차전압(전류)→자계에너지→2차전압(전류)의 과정을 경유하는데 비하여 압전 변압기의 변환과정은 1차측 교번전압→초음파 기계진동→2차측 발전의 과정을 경유하여 승압한다. 따라서 변환의 원리가 상이한 종류 변압기의 특성을 비교하면 압전 변압기에는 권선형 변압기에 비하여 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 동일 출력전압, 출력전력에 대하여 승압 메카전 위 분포상 무리가 없기 때문에 소형, 경량으로 압전 변압기를 설계할 수가 있다.
- ② 권선형 변압기는 전압형 변압기로 동작하는데 비하여 압전 변압기는 전류변환형 동작을 한다. 따라서 권선형 변압기는 동작시 내부저항이 적으나, 압전 변압기는 비교적 고내부저항에서 동작을 한다.
- ③ 권선형 변압기는 사용주파수가 어느 정도 폭을 가진 설계를 할 수 있으나 압전 변압기의 경우는 거의 공진주파수에서만 동작한다. 즉 주파수 선택도가 매우 우수하다. 더구나 일반적으로 동작주파수는

초음파 주파수 영역으로 상당히 높은 주파수에서 동작한다.

④ 권선형 변압기는 출력전압의 파형이 입력전압의 파형을 추종하나 압전 변압기는 세라믹 소자의 공진시 기계적 진동을 이용하기 때문에 출력전압의 파형은 입력전압의 파형에 관계없이 항상 정현파가 된다.

⑤ 권선형 변압기는 거의 온도특성이 없으나 압전 변압기는 승압비와 공진주파수의 온도특성이 있다. 이러한 문제는 변압기의 재료 및 특성연구를 통하여 계속 해결되어야 할 것으로 사료된다.

⑥ 변환효율은 압전 변압기에서 80[%]이상을 얻을 수 있기 때문에 큰 차이가 없는 것으로 사료되나, 근접하여 부품을 배치하였을 때 권선형 변압기에서는 누설자계에 의한 약영향이 미치는 경우가 많은데 비하여 압전 변압기에서는 초음파가 차폐는 자계차폐에 비하여 용이하게 해결될 수 있다.

⑦ 권선형 압전기는 입력저항이 부하저항에 비례하기 때문에 부하저항이 단락되었을 때 1차측에 대전류가 흘러 들어가 소손의 위험성이 있다. 그러나 압전 변압기는 사용조건에 따라 다르나 2배압 정류시 입력저항은 부하저항에 거의 반비례의 관계에 있기 때문에 부하가 단락되었을 경우에는 자동적으로 입력저항이 증대하여 소손의 위험성이 없다. 다만 부하를 개방하였을 때 입력저항이 최저로 되어 고전압이 발생한다. 따라서 부하에 스파크 또는 소손의 위험성이 있다.

### 2.3 교류 등가회로

압전 변압기의 입력측 전압  $V_{Lr}(t)$  는 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$V_{Lr} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{in}}{(1-D)} \sin D\pi \quad (4)$$

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

$$R_{EQ} = \frac{\pi^2}{2} R_L \quad (5)$$

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

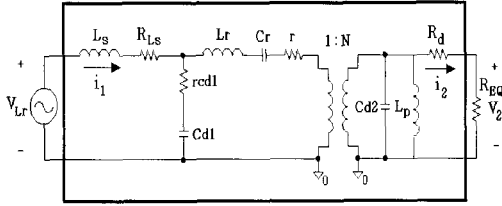


그림 3 압전 변압기의 교류등가회로  
Fig. 3 AC Equivalent Circuit of Piezoelectric Transformer

출력전압  $V_o$ 의 반주기 동안의 평균값은 식 (6)으로 표현되며, 승압비  $G$ 는 식 (7)으로 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_2 \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_2}{\pi} \quad (6)$$

$$G = \frac{V_2}{V_{Lr}} = \frac{\pi V_o}{\frac{2}{\pi} \frac{V_{in}}{(1-D)} \sin D\pi} = \frac{(1-D)\pi^2}{2 \sin D\pi} \frac{V_o}{V_{in}} \quad (7)$$

그림 3을 그림 4의 F-Matrix 형태로 나타내므로써 식 (8)과 같이 입·출력 전압과 전류의 관계를 구할 수 있으며, 이 때 F-Matrix의 요소들은 식 (9)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{Lr} \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{Ls} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\omega C_{d1}}{1 + j\omega C_{d1} r_{cd1}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{d2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{j\omega L_p} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

교류등가회로의 승압비  $G$ 는 식 (10)으로 표현할 수 있으며, 출력전압  $V_o$ 는 식 (6)과 식 (10)에 의해 식 (11)을 구할 수 있다.

$$G = \frac{V_2}{V_{Lr}} = \frac{\tilde{V}_2}{\tilde{V}_{Lr}} = \left| \frac{R_{EQ}}{A \cdot R_{EQ} + B} \right| \quad (10)$$

$$V_o = \frac{2 \sin D\pi}{(1-D)\pi^2} \left| \frac{R_{EQ}}{A \cdot R_{EQ} + B} \right| V_{in} \quad (11)$$

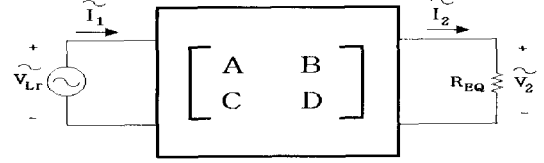


그림 4 F-Matrix  
Fig. 4 F-Matrix

또한, 입력전력  $P_{in}$ , 출력전력  $P_o$ 와 효율  $\eta$ 는 식 (12)와 식 (13) 그리고 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \text{Real} \left( \frac{C \cdot R_{EQ} + D}{A \cdot R_{EQ} + B} \right) |\tilde{V}_{Lr}|^2 \quad (12)$$

$$P_o = \frac{R_{EQ}}{|A \cdot R_{EQ} + B|^2} |\tilde{V}_{Lr}|^2 \quad (13)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (14)$$

그림 5는 제안한 압전 변압기의 등가회로이며, 이 회로를 근거로 하여 PSPICE로 라이브러리화 하였다.

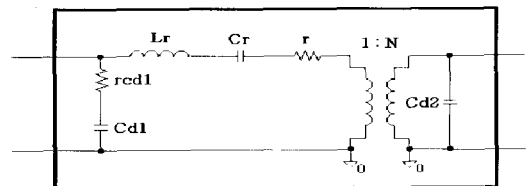


그림 5 압전 변압기 등가회로  
Fig. 5 Equivalent circuit of Piezoelectric Transformer

### 3. CCFL의 PSPICE 모델

압전 변압기는 출력 임피던스가 높고, 동작이 부하의 임피던스에 의존한다. 즉, 부하임피던스가 높을 때에는 고전압을 발생하고, 부하 임피던스가 내려감에 따라 출력전압이 저하하며, 부하가 단락된 경우에는 파괴모드에 이르지 않고 출력전압 0을 유지한다.

이러한 특성은 CCFL 부하인 경우에는 다음과 같은 장점이 가진다.

- ① CCFL은 방전 개시의 시점에서는 실온부근에서 통상 1000[V]정도의 고전압을 필요로 한다. 주위온도가 저온으로 되면 시동전압은 상승하며 0[°C]에서는 1.4~1.5배의 전압을 필요로 한다. CCFL의 발전

이 시작되기 전에는 임피던스는 무한대이기 때문에 압전 변압기 인버터에서는 출력전압이 자동적으로 높아지고, CCFL의 방전이 시작되면 자동적으로 전압이 저하한다. 권선 변압기에서는 이와 같은 특성은 없고, 변압기는 저온에서 CCFL이 스타트하는 높은 전압을 상시 내놓을 수 있을 정도의 성능을 가지고 있지 않으면 인버터용으로 만족되지 않는다. 이것이 절연 항복과 같은 경우에 발연이나 발화에 까지 쉽게 이를 수 있는 하나의 요인이 된다고 볼 수 있을 것이다. CCFL의 방전이 스타트하지 않을 때에는 압전 변압기는 자동적으로 출력전압을 높여 가지지만, 그에 따라 압전 변압기 내부의 기계진동이 커지며, 결국에는 압전 변압기의 파괴로 이어진다. 이것을 막기 위해서 NEC 압전 변압기 인버터에는 출력전압의 리미터 회로가 수납되어 있으며, 그 리미터 전압은 백 라이트가 일반적인 환경조건이 0 [°C]에서 확실히 CCFL의 방전이 시작되도록 설정되어 있다.

② CCFL은 부저항 특성, 즉 입력전력의 증대에 따라 임피던스가 감소해 가는 특성을 갖고 있으며, 통상 이와 같은 회로에서는 방전이 일어난다. 권선 변압기 인버터에서는 이 방전을 피하기 위해 형광등과 직렬로 콘덴서를 넣어, 인버터에서 본 부하 임피던스를 크게 하여 정저항 특성이 되도록 하고 있다. 이 콘덴서를 밸러스트(ballast) 콘덴서라고 부른다. 압전 변압기의 경우에는 부하 임피던스에 따라 출력전압이 변화하기 때문에 밸러스트 콘덴서를 사용하지 않고 냉음극 형광등을 안정하게 점등시킬 수 있다.

CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)은 구조가 간단하여 소형화에 적당하며 형광체의 종류, 혼합비를 변화시키는 것에 의해 임의의 형광색이 얻어지고 열음극 형광 램프보다 수명이 길며 점등회로가 간단하다. CCFL은 부성저항 특성을 가지고 있어 부성 전류를 제한하기 위해 안정기가 꼭 필요하며 안정한 상태에서 이 램프는 저항과 유사한 특성을 보인다.

기본적으로 CCFL을 점등할 때 방전 개시 전압, 유지 전압, 주파수 및 CCFL의 관 전류와 같은 4가지의 중요한 파라미터가 있다. 휘도는 램프의 동작 주파수 따라 크게 변화하지 않으며 일반적으로 램프의 전류에 의해 결정된다<sup>[11]-[16]</sup>.

본 논문에서 제시한 CCFL의 실효전압과 전류의 특성은 감광 레벨에서 형광 램프는 부성 임피던스 특성

을 가지며, 램프는 2가지 서로 다른 감광 특성을 식 (15)로 표현했다.

$$V_{rms} = 60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \times I_{rms}} \quad (15)$$

식 (15)에서 첫 번째 항은 실효 전압과 전류 곡선의 기본적인 값이며, 두 번째항은 부성 임피던스 특성, 세 번째항은 양의 임피던스 특성을 나타낸다<sup>[17]</sup>.

식 (15)의 파라미터는 최소 제곱근으로부터 유도되며, 고주파수에서 동작하는 저항으로써의 램프를 고려하면 등가 임피던스는 식 (16)과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (16)$$

식 (15)와 (16)으로부터 식 (17)을 구할 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \times I_{rms}}}{I_{rms}} \quad (17)$$

이 때 식 (18)과 같이 순시 램프 전류  $I_t$ 를 사용하여 순시램프 전압  $V_t$ 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_t &= R_{LAMP} \times I_t \\ &= \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \times I_{rms}}}{I_{rms}} \times I_t \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)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 (19)와 같이 시간 T동안의 함수로써 계산할 수 있다.

$$V_A = \int_0^T I_t^2 \frac{dt}{T} = I_{rms}^2 \quad (19)$$

그러므로 전압  $V_A$ 의 제곱근은 전류  $I_t$ 의 실효값이 된다. 실효램프전류를 계산하기 위해 이러한 RC 적분회로를 사용함으로써 램프 모델 방정식인 식 (18)은 그림 6과 같이 PSPICE 모델로 만들 수 있다.

그림 6에서 H1은 이득=1을 갖는 전류제어 전압원으로 순시램프 전류를 검출하며, G1은 전압제어 전류원,

E2는 식 (17)과 같은 램프임피던스를 가지는 전압제어 전압원, E1은 이득=1을 갖는 전압제어 전압원으로 순시램프 전압을 발생한다.

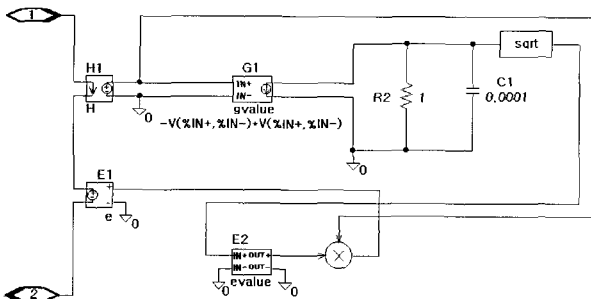


그림 6 CCFL의 PSPICE 모델  
Fig. 6 PSPICE Model of CCFL

#### 4. 시뮬레이션 결과

##### 4.1 압전 변압기의 시뮬레이션

압전 변압기는 기존의 권선형 변압기와는 변압 원리가 상이하기 때문에 다음과 같이 구동회로 구성상 몇 가지 고려해야 할 점이 있다.

① 압전 세라믹 변압기는 세라믹 공진자의 원리를 활용하기 때문에 구동 주파수에 따른 출력특성은 그림 7에 보이는 바와 같이 매우 날카로운 공진 특성을 보여주며, 공진 주파수를 구동 중심 주파수와 같게 할 경우 구동 중심 주파수에서 수 [%]만 벗어나도 변압기로서 역할을 못하게 된다. 따라서 출력 전압측면에서 고려해 볼 때 구동 주파수와 일치하는 단일 주파수의 입력전압만이 유효하며 입력전압의 왜형분은 출력으로 전달되지 않기 때문에 그 만큼 구동회로에서 손실이 남게된다. 이와 같은 사실로부터 압전 변압기의 입력 전압파형이 정현파에 가까울수록 전력변환효율측면에서 유리함을 알 수 있다.

② CCFL을 부하로 할 경우 구동 주파수에 대한 효율과 출력전력의 일반적인 주파수 특성은 그림 8에 보여주고 있다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 압전 변압기 효율의 주파수 특성과 최대 출력의 주파수 특성이 일치하지 않으며, 최대출력이 발생하는 주파수가 최대 효율이 얻어지는 주파수보다 높은 것을 알 수 있다. 따라서 주파수 제어시 공진 주파수보다 약간 높은점을 기준점으로하여 제어하는 것이 효율 및 전력 전송면에서 유리하다.

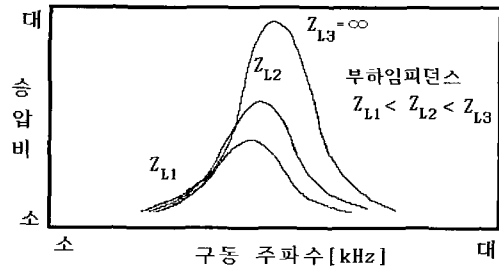


그림 7 주파수 특성에 따른 승압비  
Fig. 7 Step-up Ratio with Frequency Characteristics

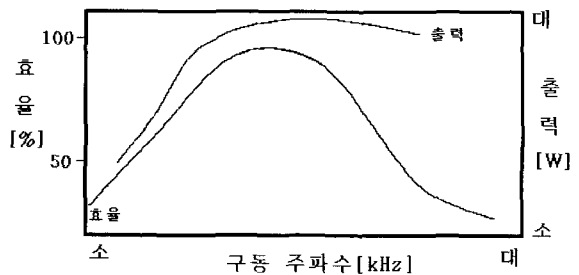


그림 8 압전 변압기의 효율과 출력의 주파수 특성 (CCFL 부하시)  
Fig. 8 Frequency Characteristics of Piezoelectric Transformer Efficiency and Power(in CCFL Load)

③ 압전 변압기는 그림 7에서 보이는 바와 같이 부하 임피던스의 변화에 따라 승압비가 대폭 변화한다, 특히 무부하 조건에서 구동할 경우에는 승압비가 급격히 상승한다. 그 결과 소자의 진동속도 또한 급격히 커져서 결국에는 소자의 자기파괴까지 갈 위험이 있다. 따라서 압전 변압기의 구동 회로에는 부하가 개방되었을 경우에 소자의 자기파괴 또는 순간적인 이상 고전압 발생으로 인한 아크 발생으로 소자 및 소자주위가 소손되는 것을 방지하는 기능이 필요하게 된다.

④ 압전형 인버터에서는 구동 주파수가 권선형 인버터에 비하여 높다, 구동 주파수가 높게되면 CCFL의 발광효율은 증가하는 경향이 있으나 CCFL주변의 기생용량(stray capacitance)에 의하여 휘도 경사가 현저하게 나타나게 된다. 이 때문에 구동 주파수가 높은 압전형 인버터에서는 휘도 경사의 발생을 억제하는 적절한 대책이 강구되어야 한다.

그림 9는 압전변압기를 가진 푸시풀 인버터를 나타내었으며 CCFL은 압전변압기의 2차측과 접지사이에 연결했다. 2개의 MOSFET Q<sub>1</sub>과 Q<sub>2</sub>는 시비율 0.5에서

교대로 구동시켰으며, ZVS 조건에서 중복각이 발생하지 않도록 하였다.

그림 10(a)에서  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 모두 오프상태에 있고, 구동부는 접지와 연결된다. 이 상태동안  $V_{ds2} (-V_1)$ 은 압전변압기의 입력측 임피던스와 캐패시터  $C_1$ 과 병렬로 연결된  $L_2, C_{ds2}$ 로 인해 공진파형이 나타난다. 그림 10(b)에서  $V_{ds2}$ 는  $Q_2$ 와 연결된 다이오드와 접지를 통해 도통된다. 이 상태동안 압전변압기에 공급되는 전압은 0[V]이다. 그림 10(c)에서  $Q_2$ 는 온되고  $Q_1$ 은 오프상태에 있다. 이 기간동안  $V_{ds1} (= V_1)$ 은 압전변압기의 입력측 임피던스와 캐패시터  $C_1$ 과 병렬로 연결된  $L_1, C_{ds1}$ 로 인해 공진파형이 나타난다. 그림 10(d)에서  $V_{ds1}$ 은  $Q_1$ 에 연결된 다이오드와 접지를 통해 도통된다. 이 상태동안 압전변압기에 공급되는 전압은 0[V]이다. 이러한 4가지 상태를 반복함으로써  $V_1$ 은 정현파와 유사한 파형을 발생하여 압전변압기의 입력측에 공급된다. 이 때 입력전압은 승압되고, 압전변압기의 필터링에 의해 거의 정현파에 가까운 파형을 2차측에 공급할 수 있다.

그림 11은 그림 5의 압전 변압기의 등가회로를 포함한 푸시풀 인버터이며, 이 때의 PSPICE 모델은 그림 12에 나타났다. 이 회로에서 CCFL은 100[k $\Omega$ ]의 저항  $R_L$ 로 나타냈으며,  $Q_1, Q_2$ 의 게이트 및 드레인 전압,  $L_1, L_2$ 의 전류 및 압전변압기의 입·출력 전압의 시물레이션 파형을 그림 13에 표현했다. 또한 그림 14는 부하저항을 200[k $\Omega$ ], 150[k $\Omega$ ], 100[k $\Omega$ ], 50[k $\Omega$ ] 가변시에 출력전압의 파형이며, 그림 15는 구동 주파수에 따른 압전 변압기의 출력전압을 나타냈다. 그림 16은 인덕턴스  $L_1$ 과  $L_2$ 를 50[ $\mu$ H], 100[ $\mu$ H], 150[ $\mu$ H]으로 가변했을 때의 각 단의 파형을 시물레이션 했다.

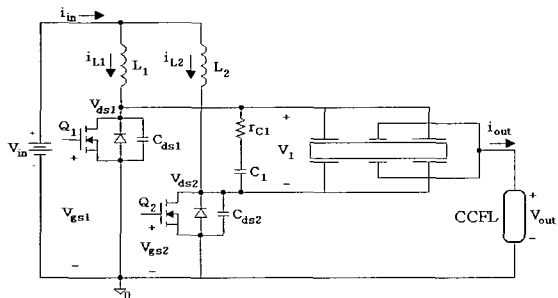


그림 9 압전 변압기의 푸시풀 인버터  
Fig. 9 Push-pull Inverter of Piezoelectric Transformer

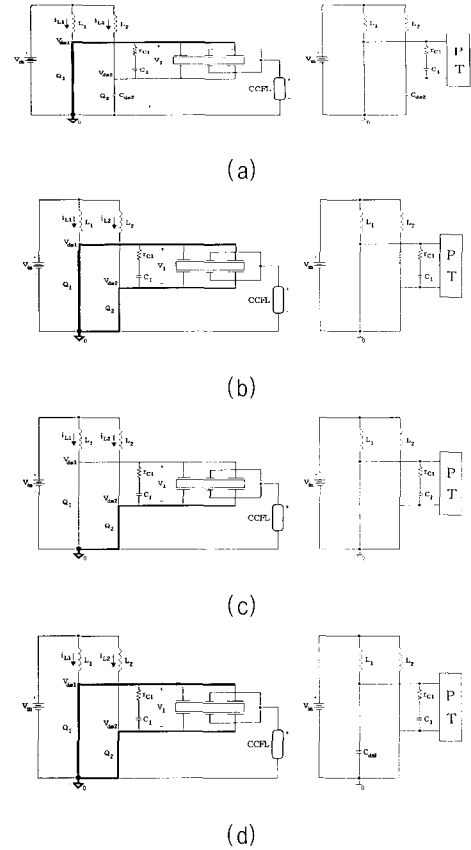


그림 10 푸시풀 인버터의 동작상태  
Fig. 10 Operation states of the Push-pull Inverter

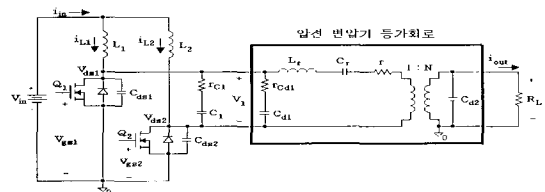


그림 11 압전 변압기를 이용한 푸시풀 인버터  
Fig. 11 Push-pull Inverter using Piezoelectric Transformer

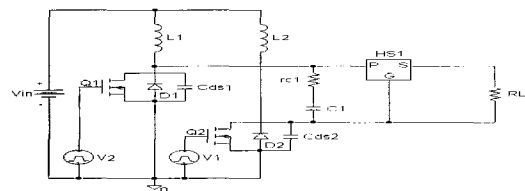
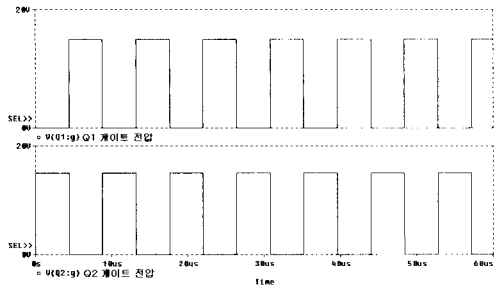
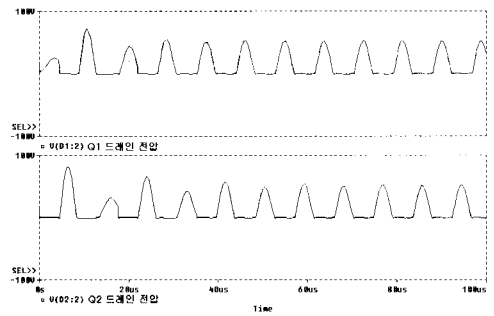


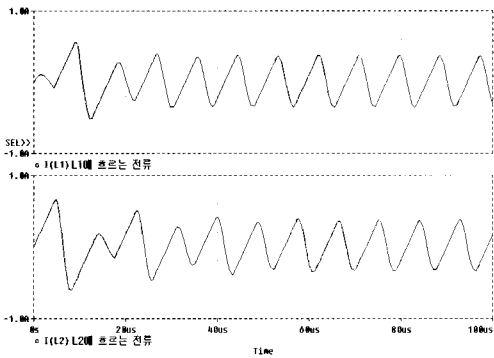
그림 12 압전 변압기를 이용한 푸시풀 인버터 PSPICE 모델  
Fig. 12 Push-pull Inverter PSPICE Model using Piezoelectric Transformer



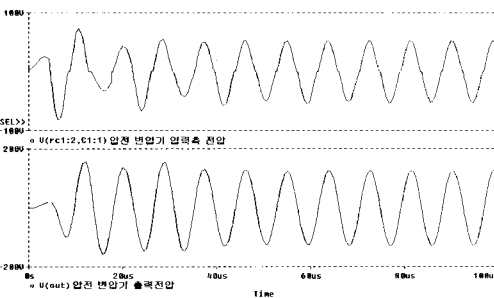
(a)  $Q_1, Q_2$  전압게이트



(b)  $Q_1, Q_2$  드레인 전압



(c)  $L_1, L_2$  전류



(d) 압전변압기 입·출력 전압

그림 13 푸시풀 인버터의 시뮬레이션 파형  
Fig. 13 Simulation Waveforms of Push-pull Inverter

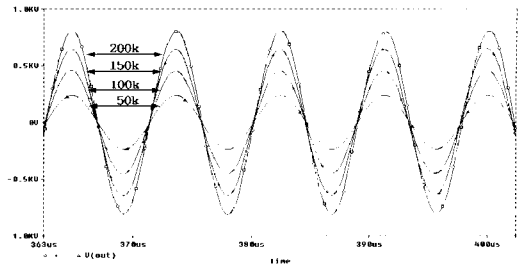


그림 14 부하저항 가변시 출력전압 파형  
Fig. 14 Output Voltage Waveforms with Load Resistor Variation

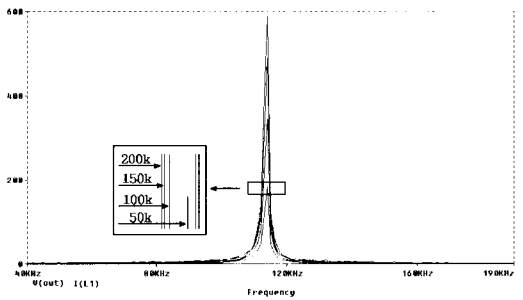


그림 15 구동 주파수에 따른 압전 변압기의 출력전압  
Fig. 15 Output Voltage of Piezoelectric Transformer as a function of driving frequency

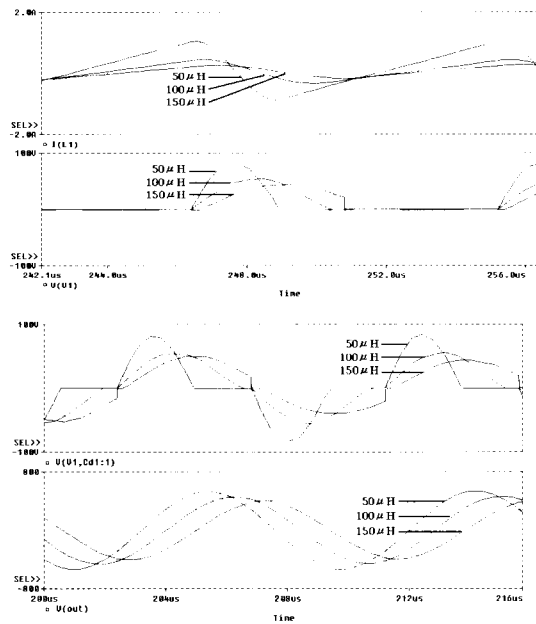


그림 16 인덕턴스  $L_1, L_2$  가변시 시뮬레이션 파형  
Fig. 16 Simulation Waveforms with Inductance  $L_1, L_2$  Variation



그림 17은 저항을 200[kΩ], 150[kΩ], 100[kΩ], 50[kΩ]로 가변시 푸시풀 인버터 PSPICE 회로로서 MOSFET  $Q_1, Q_2$ 의 게이트전압을 그림 18에 나타내었으며, 그림 19와 그림 20은 저항가변에 따른 인덕턴스  $L_1, L_2$ 의 전류파형을 각각 나타냈다. 또한, 그림 21과 22는 저항가변에 따른 각각의 MOSFET  $Q_1, Q_2$ 의 드레인 전압 파형을 나타내었다.

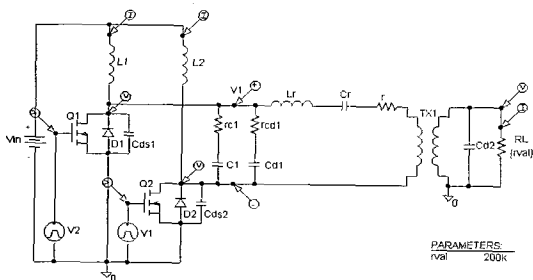


그림 17 저항가변시 푸시풀 인버터 PSPICE 회로  
Fig. 17 Push-Pull Inverter PSPICE circuit with Resistor Variation

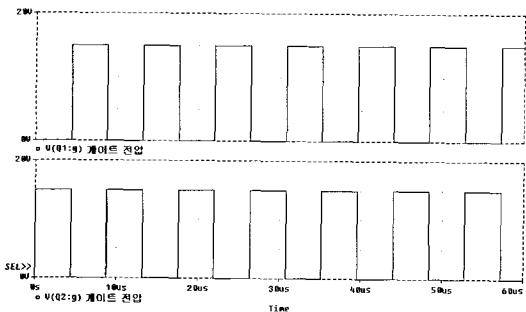


그림 18 MOSFET  $Q_1, Q_2$ 의 게이트 신호  
Fig. 18 Gate signal of MOSFET  $Q_1, Q_2$

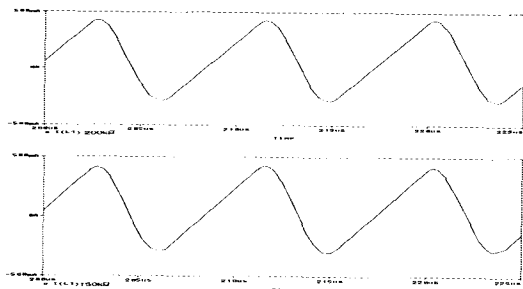


그림 19 저항가변시 인덕턴스  $L_1$ 의 전류파형  
Fig. 19 Current Waveforms of Inductance  $L_1$  with Resistor Variation

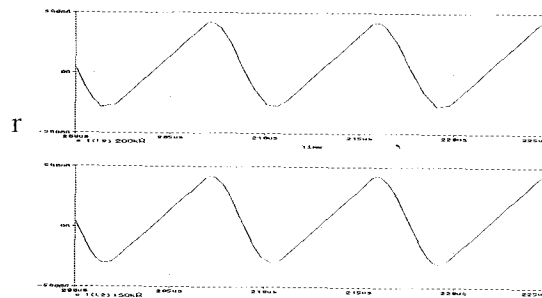


그림 20 저항가변시 인덕턴스  $L_2$ 의 전류파형  
Fig. 20 Current Waveforms of Inductance  $L_2$  with Resistor Variation

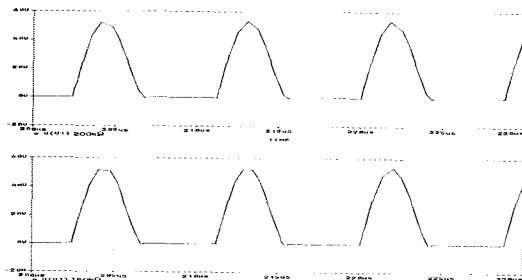


그림 21 저항가변시 MOSFET  $Q_1$ 의 드레인 전압 파형  
Fig. 21 Drain Voltage Waveforms of MOSFET  $Q_1$  with Resistor Variation

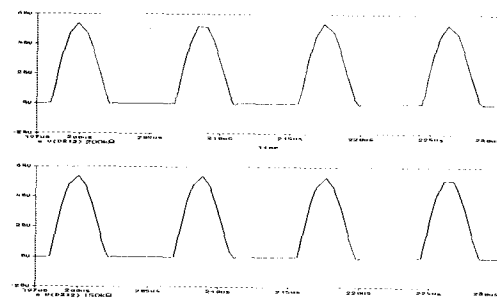


그림 22 저항가변시 MOSFET  $Q_2$ 의 드레인전압 파형  
Fig. 22 Drain Voltage Waveforms of MOSFET  $Q_2$  with Resistor Variation

그림 23과 그림 24는 저항가변에 따른 압전변압기의 입력 전압파형과 출력전압 파형을 나타내었고, 그림 25는 저항가변에 따른 출력전류의 주파수 특성을 나타내었다. 또한 그림 26은 입력전압을 가변시의 회로도 및 출력전류의 주파수 특성을 시뮬레이션 하였다.

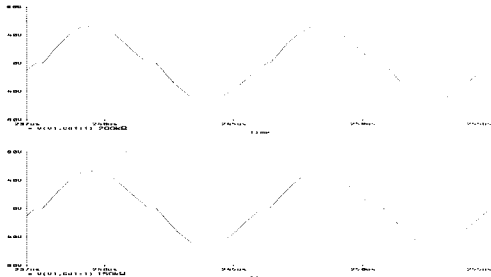


그림 23 저항가변시 압전 변압기의 입력 전압파형  
Fig. 23 Input side Voltage Waveforms of Piezoelectric Transformer with Resistor Variation

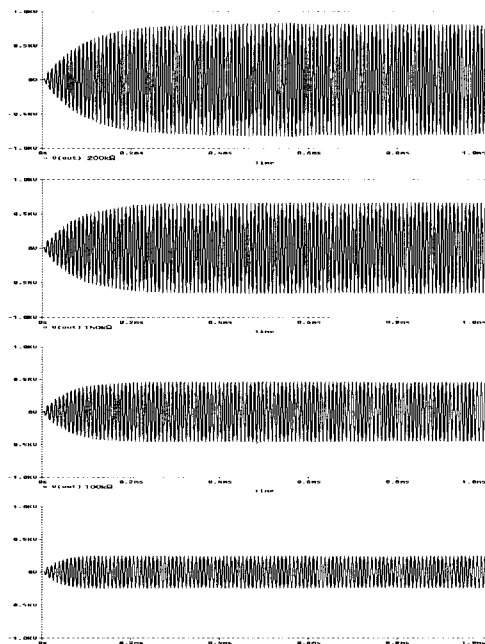


그림 24 저항가변시 압전 변압기의 출력전압 파형  
Fig. 24 Output Voltage Waveforms of Piezoelectric Transformer with Resistor Variation

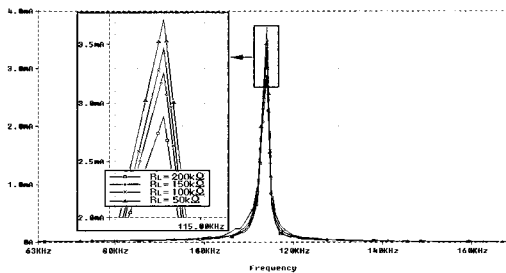
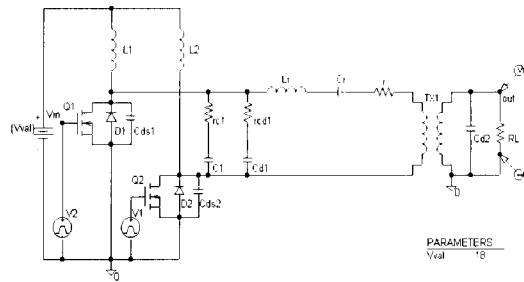
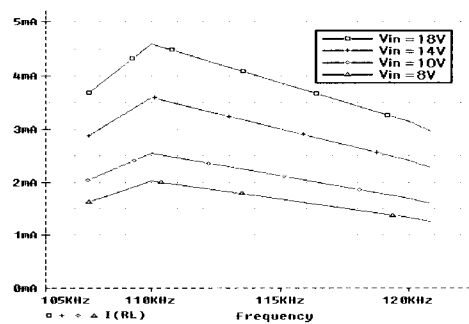


그림 25 저항가변시 출력전류의 주파수특성  
Fig. 25 Frequency Characteristics of Output Current with Resistor Variation



(a)



(b)

그림 26 입력전압 가변시 출력전류의 주파수 특성  
Fig. 26 Frequency Characteristic of Output Current with Input Voltage Variation

#### 4.2 CCFL의 시뮬레이션

그림 28은 그림 27에서 0~4[ms]동안은 75[kHz]의 렉주파수, 4~8[ms]동안은 30[kHz], 8~12[ms]동안은 75[kHz]로 가변했을 때의 CCFL의 시뮬레이션 결과로서 위의 그림은 입력주파수 변환지점 4[ms]에서 CCFL의 전압과 전류의 파형을 자세히 나타냈다. 또한 그림 29는 0~5[ms]까지는 저항을 15[kΩ]으로 하고, 5[ms]~10[ms]까지는 저항을 5[kΩ]으로 가변했을 때의 CCFL 전압 및 전류 파형의 시뮬레이션 결과이다. 그림 30은 CCFL의 V-I 특성 곡선을 나타냈다.

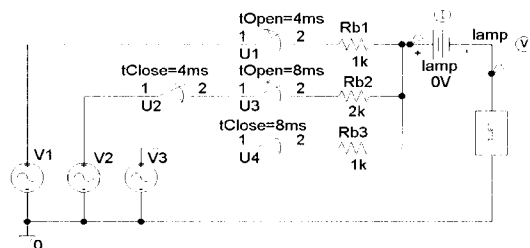


그림 27 CCFL 시뮬레이션 회로  
Fig. 27 CCFL Simulation Circuit

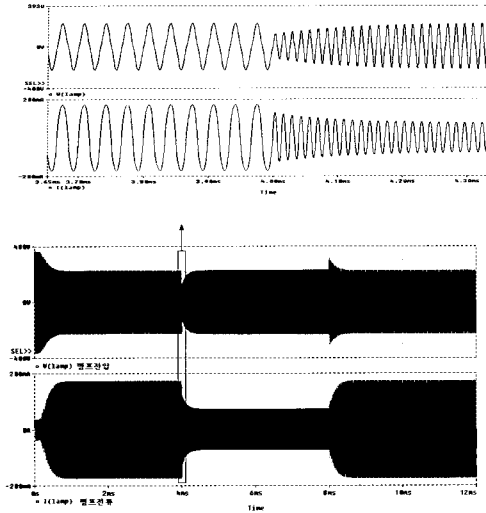


그림 28 입력 주파수 가변시 램프 전압 및 전류의 시뮬레이션 파형  
Fig. 28 Simulation Waveforms of Lamp Voltage and Current with Input Frequency

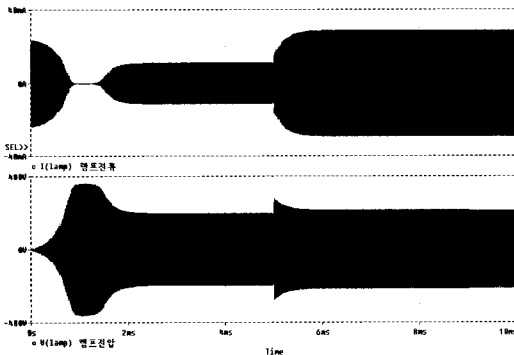


그림 29 저항 가변시의 램프 전압 및 전류의 시뮬레이션 파형  
Fig. 29 Simulation Waveforms of Lamp Voltage and Current with Resistor Variation

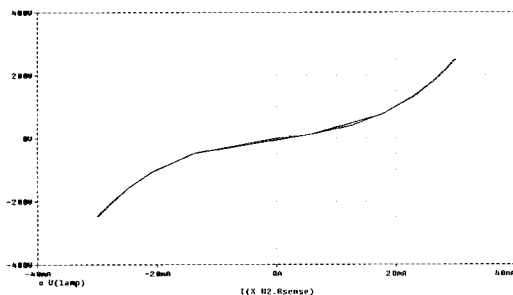


그림 30 CCFL의 V-I 특성곡선  
Fig. 30 V-I Characteristics of CCFL

그림 31은 CCFL 시뮬레이션을 위한 회로도이다. 이때의 시뮬레이션 파형은 그림 32에 나타났다.

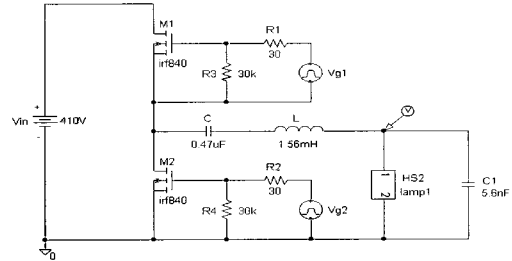


그림 31 CCFL 시뮬레이션 회로  
Fig. 31 Simulation Circuit of CCFL

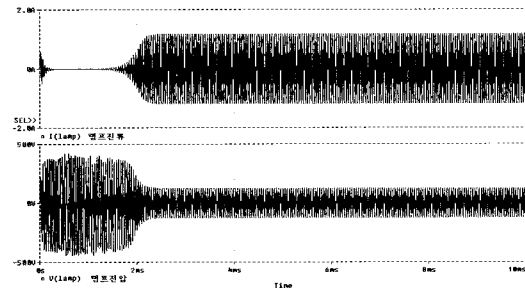


그림 32 CCFL 전류 및 전압 시뮬레이션 파형  
Fig. 32 Simulation Waveforms of CCFL Current and Voltage

## 5. 결론

본 논문에서는 CCFL과 압전 변압기의 PSPICE 모델을 제시했다. 램프모델은 최소 제공근을 이용하여 모델의 파라미터들을 유도하였으며, 압전변압기는 등가회로를 포함한 푸시풀 인버터회로로부터 부하저항을 200[kΩ], 150[kΩ], 100[kΩ], 50[kΩ] 가변했을 때 전압 및 전류파형을 시뮬레이션 하였고, 입력주파수를 0~4[ms]동안은 75[kHz], 4~8[ms]동안은 30[kHz], 8~12[ms]동안은 75[kHz]로 가변하고, 저항을 200[kΩ], 150[kΩ], 100[kΩ], 50[kΩ]로 가변했을 때 CCFL 전압 및 전류 파형을 시뮬레이션 하였으며 인버터회로에 적용시켜 램프의 특성을 해석했다. 또한, 압전 변압기는 대칭형 3차 로젠형 등가회로를 이용하여 모델링함으로써 부하저항을 가변시키고 구동주파수에 따른 출력전압을 나타냈으며, 입력측 인덕턴스를 변화시켰을 때의 압전 변압기의 입·출력 특성을 시뮬레이션 한 결과 부하조건과 입력전류에 따른 공진특성의 변화를 알 수 있었으며, 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로의 과제는 저·고주파용 CCLL의 인버터 설계 및 고출력용 램프의 모델링과 고출력용 압전 변압기의 모델링이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 2001년도 세명대학교 교내 학술 연구과제에 의해 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] T. Zaitzu, T. Shigehisa, T. Inoue, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Piezoelectric Transformer Converter with Frequency Control", IEEE INTELEC '95 Proc., pp. 175~180, Oct. 1995.

[2] T. Yamane, S. Hamamura, T. Zaitzu, T. Ninomiya, M. Shoyama, and Y. Fuda, "Efficiency Improvement of Piezoelectric Transformer DC-DC Converter", IEEE PESC '98, May 1998.

[3] T. Zaitzu, T. Shigehisa, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control", IEEE APEC '96 Proc., pp. 279~283, March 1996.

[4] T. Zaitzu, O. Ohnishi, T. Inoue, M. Shoyama, T. Ninomiya, F.C. Lee, and G.C. Hua, "Piezoelectric Transformer operating in Thickness Extensional Vibration and Its Application to Switching Converter", IEEE PESC Record. pp. 585~589. June 1994.

[5] T. Zaitzu, Y. Fuda, Y. Okabe, T. Ninomiya, S. Hamamura, and M. Katsuno. "New Piezoelectric Transformer Converter for AC-Adapter", IEEE APEC '97 Proc., pp. 568~572, March 1997.

[6] T. Zaitzu, T. Ninomiya, and M. Shoyama, "Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control", IEICE Transactions on Communications, Vol. E80-B. No. 7.

[7] C.Y. Lin and F.C. Lee, "Design of a Piezoelectric Transformer Converter and its matching networks", IEEE PESC '94 Record, pp. 607~612, June 1994.

[8] U. Mader and P. Hom, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", IEEE IAS Annual Meeting Proceeding, pp. 1928~1934, 1992.

[9] C.S. Moo, Y.C. Chuang, Y.H. Huand, and H.N. Chen, "Modeling of Fluorescent Lamps for Dimmable Electronic Ballast", IEEE IAS Annual Meeting Proceeding, pp. 2231~2236, 1996.

[10] N. Sun and B. Hesterman, "Pspice High Frequency

Dynamic Fluorescent Lamps Model", IEEE APEC Conference Record, pp. 641~647, 1997.

[11] R. Lagushenko and J. Maya, "Positive Column Hg-Rare Gas Discharge Model Applicable to Compact Fluorescent Lamps", IES Annual Conference, St. Louis, 1984.

[12] T.E. Wu, J.C. Hung, and T.H. Yu, "A Pspice Model for Fluorescent Lamps Operated at High Frequencies", IECON Proceeding, pp. 359~364, 1995.

[13] T. Liu, K.J. Tseng, and C.M. Vilathgamuwn, "A Pspice Model for Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", IEEE PESC Conference Proceeding, pp. 1749~1754, 1998.

[14] 박지식, "異方性 및 損失을 考慮한 長方形 PZT 壓電세라믹 變壓器의 모델링", 서울대학교 대학원 박사논문, 1988.

### 저 자 소 개



#### 황락훈(黃樂暻)

1958년 7월 4일생. 1981년 명지대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~1991년 충남전문대학 전기과 조교수. 1991년~현재 세명대학교 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원.



#### 조문택(曹文澤)

1965년 2월 23일생. 1988년 명지대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 대원과학대학 전기과 부교수.



#### 안익수(安益秀)

1962년 6월 28일생. 1985년 명지대 전자계산학과 졸업. 1987년 동 대학원 전자계산학과 졸업(석사). 1987년~1991년 서울공항 전산실장. 1991년~1996년 (주)큐닉스컴퓨터 선임연구원. 1996년~2001년 (주)한화/정보통신 교환 SW개발팀장.

2002년~현재 대원과학대학 인터넷 전자상거래과 전임강사.