

압전 트랜스포머를 적용한 네온관용 인버터에서의 Pspice 모델을 이용한 특성분석

윤정원, 김윤호, 박경수, 곽형찬
중앙대학교

An Analysis of Neon Tube Inverters with Piezoelectric Transformers Using Pspice Model

Jeong-Won Yun, Yoon-Ho Kim, Kyoung-Soo Park, Hyung-Chan Kwak
Chung-Ang University

ABSTRACT

Typically, dimensions of the power circuit depend on magnetic components, heat sink, and smoothing capacitor, etc. For the miniaturization of the power circuit, one of the solutions is that bulky magnetic transformer in previously used is replaced by a piezoelectric transformer.

Therefore, since many systems are attempted to apply the piezoelectric transformers, a new piezoelectric material is tending to be developed continuously.

In this paper, an analysis of neon tube inverters with piezoelectric transformers are presented by Pspice modeling. Simulation results show that it is possible to apply a piezoelectric transformer to neon tube inverters with high conversion efficiency.

서는 이러한 네온관용 인버터에 기존의 자기 회로식 변압기를 압전 변압기로 대체하려고 한다.

압전 변압기는 전력밀도와 절연레벨이 높고 권선이 없기 때문에 누설 자속이 없어서 더 높은 승압 효율을 기대할 수 있다. 하지만 몇 가지 단점이 있는데, 동작 주파수의 폭이 작고 그 특성들이 부하나 온도에 대하여 변한다는 것이다. 이러한 단점에도 불구하고, 압전 변압기의 몇 가지 두드러진 특징들 때문에 많은 시스템들이 압전 변압기를 적용하고자 시도되고 있고 이러한 요구에 따라 새로운 압전재료들도 많이 개발되고 있다.^[3]

본 논문에서는 네온관용 인버터에서 기존의 자기 회로식 변압기를 압전 변압기로 대체하였을 때의 여러 가지 특성들을 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 예측하고 실제 네온관용 인버터 회로에 압전 변압기를 적용하여 기존의 네온 램프 시스템을 개선할 수 있음을 확인하고자 한다.

2. 네온 램프(부하)와 인버터

네온 램프는 일반적으로 가늘고 긴 유리관(∅6~20)에 저압(10~15mmHg)의 가스를 봉입한 형태로 양극에 1~1.5kV_{peak}를 인가해 주면 가스를 통하여 방전이 일어나 빛을 내게 된다. 관 안에 봉입되는 가스로는 주로 네온과 아르곤 가스 또는 헬륨이나 질소 가스를 사용하는 경우도 있다.

시뮬레이션에서 부하로 사용한 네온램프는 점등하기 위해 860V_{rms}, 9mA_{rms}가 필요하고 점등 후 등가 램프 저항 R_{lamp} = 90kΩ가 된다.

입력에 220VAC를 전원이 인가되면 이 전압을 높은 AC 전압으로 승압하기 위하여 인버터가 필요하다. 그런데 이 인버터에 일반적인 자기식 변압기를 사용하면 절연조건 때문에 그 부피가 커지게 되므로 전체 회로의 소형화에 한계가 있다.

1. 서론

· 기존에 사용해 오던 네온램프는 무방향성 규소강판을 사용한 자기 회로식 누설 변압기를 이용하여 승압 하는 방식을 많이 이용해왔다. 그런데 이러한 네온관용 변압기는 중량이 무겁고 외형이 큰 관계로 네온 램프 설치 작업 시 상당한 불편한 점이 많았다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 근래에는 네온 변압기의 전원장치 및 2차측 고압 출력부를 고속의 스위칭 소자를 이용하여 상용 주파수인 60 Hz를 kHz 단위의 고주파로 변환하여 설계하는 추세이다.^[2]

비록 주파수가 kHz 단위로 증가함에 따라 회로의 자기 소자들의 부피가 많이 줄어들긴 하였지만 그 절연조건 때문에 소형화에 한계가 있다. 본 논문

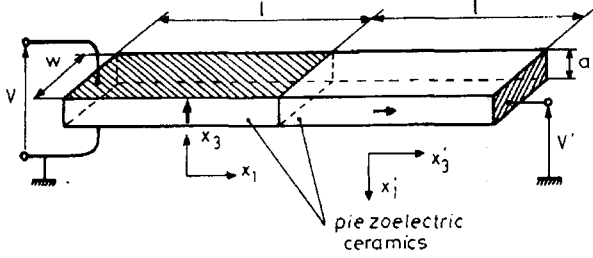


그림 1. 압전 변압기의 구조

Fig. 1. Structure of Piezoelectric Transformer

3. 압전 변압기 (Piezoelectric Transformer)

3.1 구조

일반적인 변압기는 자기장에 의해 결합된 2개의 코일로 이루어지고 그 변압 비는 코일의 턴수 비와 같다. 그러나 압전 변압기는 두 개의 piezoelectric 부분이 연결된 합성 공진 회로이다. 전기적 전압에 의하여 입력부분에 진동이 발생하고 그 진동이 출력부분을 통과하여 출력전압으로 발생한다.

이 이론은 30년 전에 Rosen에 의해 밝혀졌지만, 그 제어 어렵기 때문에 실제로는 크게 이용되지 않았다. 그런데 최근에 와서는 소형, 경량화가 중요시됨에 따라 새로운 압전 재료들이 많이 개발되고 있는 추세이다.

그림 1의 압전 변압기는 그 크기가 $a \times (l+l)$ mm²인 두 개의 압전 세라믹 판이 에폭시 수지로 단단히 접합된 형태로 구성되어 있다.

1차측에 전압 V 를 인가하면 전기장 V/a 에 비례하는 압력을 발생시키고 이 압력은 분극을 발생시킨다. 분극은 출력부분에 길이 l 를 따라서 일어

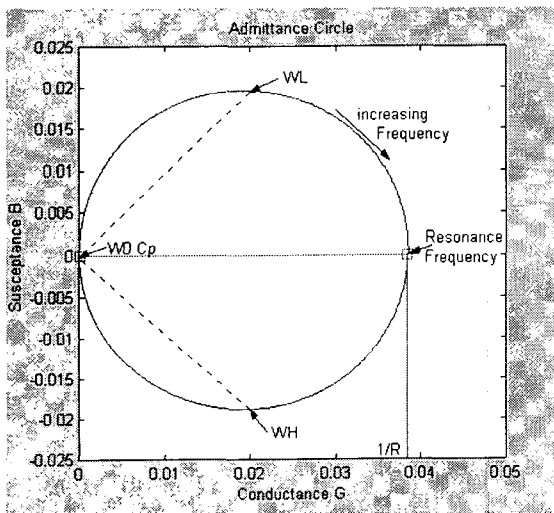


그림 2. 어드미턴스 사이클

Fig. 2. Admittance Circle

나는데 이 분극에 의한 압력으로 전압 $V' = lE'$ 를 발생시킨다. 그러므로 변압 비 N 은 아래 식과 같다.^[3]

$$N = \frac{V'}{V} \propto \frac{l}{a} \quad (1)$$

3.2 어드미턴스 $Y(\omega)$

그림 2는 압전 변압기가 공진으로 동작하는 전기적 등가회로이다. $0 < \omega < \infty$ 일 때, 복수 어드미턴스 값 $Y(\omega) = i_p(\omega) / v_p(\omega) = G(\omega) + jB(\omega)$ 을 계산함으로써 등가회로의 각 요소들의 값을 계산할 수 있다. 이렇게 구해진 어드미턴스는 그림 3에서 어드미턴스 사이클로 나타내었다.^[4]

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= i_p(\omega) / v_p(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) \\ &= j\omega C_1 + \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L} \\ &= j\omega C_1 + \frac{R - j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 실수 부분과 허수 부분으로 나누면,

$$\therefore G(\omega) = \frac{R}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (3)$$

$$\therefore B(\omega) = \frac{-(\omega L + \frac{1}{\omega C})}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (4)$$

$\omega = \omega_0$ 일 때, 공진주파수 $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ 이면,

$$Y(\omega_0) = j\omega_0 C_p + \frac{1}{R} \quad (5)$$

따라서, 어드미턴스 $Y(\omega_0)$ 의 허수부와 실수부 값은 각각 C_p 와 R 에 의해 변화한다.

그리고 식 (5)에서 보면 주파수는 단지 허수값에만 관계가 있으므로 C 와 L 의 값은 다음과 같다.

$$C = \frac{1}{R} \frac{(\omega_H - \omega_L)}{(\omega_H \omega_L)} \quad (6)$$

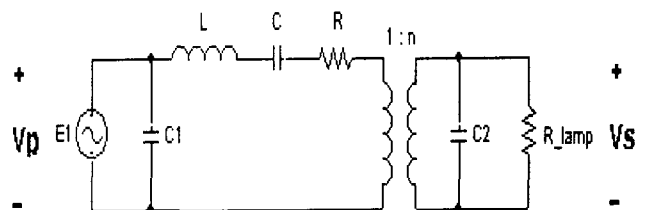


그림 3. 압전변압기의 등가회로^[6]

Fig. 3. Equivalent Circuit for Piezoelectric Transformer^[6]

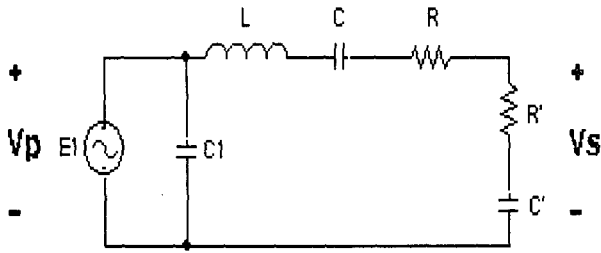


그림 4. 1차측에서 본 압전변압기의 등가회로
Fig. 4. Equivalent Circuit of Piezoelectric Transformer, Converted to Primary Side.

$$L = R \frac{1}{(\omega_H - \omega_L)} \quad (7)$$

3.3 등가회로

압전변압기의 전달함수 특성을 구하기 위해, 그림 4에서 공진 주파수 일 때 2차측의 소자를 1차측으로 환산한 압전변압기의 등가회로를 나타낸다. 그런데 여기서 회로의 분석을 쉽게 하기 위해, 1차측 소자를 2차측으로 환산하여 계산하기로 한다. 그 등가회로는 그림 5와 같다.

그림 5의 회로 방정식은 아래 식과 같이 정의된다.

$$nE_1 = n^2R(i_R + i_C) + E_2 \quad (8)$$

$$i_C = j\omega_0 C_2 E_2 \quad (9)$$

$$i_R = \frac{E_2}{R_L} \quad (10)$$

여기서 ω_0 는 직렬 공진 주파수를 의미하며 그 값은 앞에서 정의했듯이 $1/\sqrt{LC}$ 이다.

식 (9)과 (10)를 식 (8)에 대입하고 E_2/E_1 으로 정리하면 전압 전달함수 H 를 구할 수 있다. 따라서,

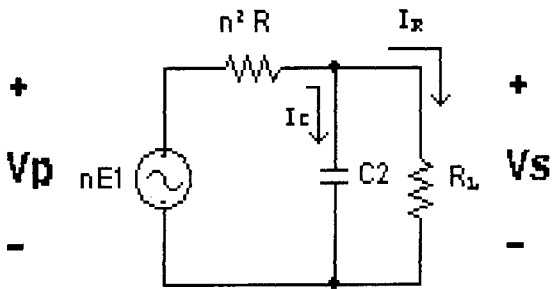


그림 5. 2차측에서 본 압전변압기의 공진상태일 때 등가회로

Fig. 5. Equivalent Circuit of Piezoelectric Transformer, Converted to Secondary Side at resonant Condition.

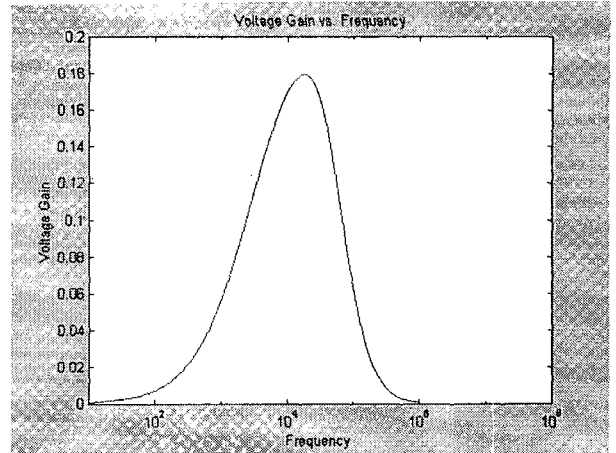


그림 6. 전압 이득 대 주파수
Fig. 6. Voltage Gain vs. Frequency

$$H = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n \left(1 + \frac{n^2 R}{R_L} \right) - j\omega_0 C_2 n^3 R}{\left(1 + \frac{n^2 R}{R_L} \right)^2 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2} \quad (11)$$

그림 6은 전압 gain 대 주파수의 특성을 시뮬레이션에 의하여 보여주고 있는데, 그 그래프의 특성이 마치 band-pass filter처럼 동작한다. 그리고 그림 7은 전압 gain 대 부하저항의 특성이다.^[5] 그림에서 알 수 있듯이 전달함수의 최대값일 때의 R_L 은 무한대일 때이다. 따라서, 식 (11)에서 최대의 승압비가 나오기 위한 전달함수의 최대값을 구하기 위해 R_L 이 무한대라고 가정한다. 그러면 H 의 최대값은

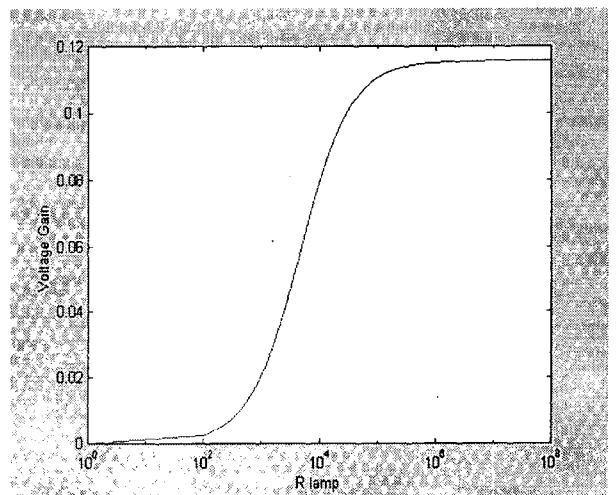


그림 7. 전압 이득 대 부하저항
Fig. 7. Voltage Gain vs. R_{lamp}

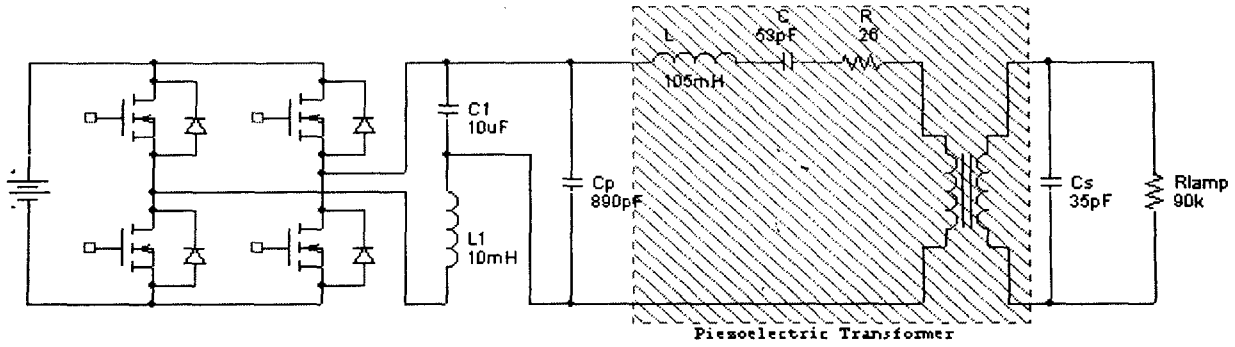


그림 8. 압전 변압기를 적용한 공진형 인버터
Fig. 8. Resonant Inverter applying the Piezoelectric Transformer

$$H_{\max} = \frac{n |1 - j\omega_0 C_2 n^2 R|}{1 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2} \quad (12)$$

$$= \frac{n \sqrt{1 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2}}{1 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2}$$

식 (11)을 이용하여 출력전력 P_2 를 구하면,

$$P_2 = \frac{|E_2|^2}{R_L}$$

$$= \frac{n^2 E_1^2}{R_L \left| 1 + n^2 \frac{R}{R_L} + j\omega_0 C_2 n^2 R \right|^2}$$

$$= \frac{n^2 E_1^2}{R_L \left\{ \left(1 + n^2 \frac{R}{R_L} \right)^2 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2 \right\}} \quad (13)$$

다음은 출력전력 P_2 가 최대값 $P_{2\max}$ 가 되기 위한 R_L 을 구하기 위해 식 (13)을 R_L 로 편미분 하고 그 값 zero로 둔다.

$$\frac{\partial P_2}{\partial R_L} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial R_L} \left\{ \frac{n^2 \cdot E_1^2}{R_L \left\{ \left(1 + n^2 \frac{R}{R_L} \right)^2 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2 \right\}} \right\}$$

$$= \frac{\left\{ (n^2 E_1^2) \cdot \left[1 - n^4 \frac{R^2}{R_L^2} + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2 \right] \right\}}{R_L^2 \cdot \left\{ \left(1 + n^2 \frac{R}{R_L} \right)^2 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2 \right\}^2} \quad (14)$$

식 (14)가 zero가 되기 위해서는 분자가 zero가 되어야 한다. 따라서, 아래의 식 (15)와 같으며 $P_{2\max}$ 가 되기 위한 R_L 는 식 (16)과 같이 얻을 수 있다.

$$1 - n^4 \frac{R^2}{R_L^2} + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2 = 0 \quad (15)$$

$$R_L = \frac{n^2 R}{\sqrt{1 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2}} \quad (16)$$

식 (16)을 식 (13)에 대입하면 $P_{2\max}$ 를 구할 수 있다.

$$P_{2\max} = \frac{E_1^2}{2R(1 + \sqrt{1 + (\omega_0 C_2 n^2 R)^2})} \quad (17)$$

이 식에서 $(\omega_0 C_2 n^2 R)^2 \ll 1$ 이므로 무시하면 식 (16)과 식 (17)은 아래와 같이 간단해 진다.

$$R_L = n^2 R \quad (18)$$

$$P_{2\max} = \frac{E_1^2}{4R} \quad (19)$$

다음은 식 (8)~(10)과 식 (13)을 이용하여 입력전력 P_1 을 구한다.

$$P_1 = n^2 R |i_R + i_C|^2 + P_2 \quad (20)$$

$$= \frac{E_2^2}{R_L^2} \{ \omega_0^2 C_2^2 n^2 R R_L^2 + R_L + n^2 R \}$$

따라서 효율 η 은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$= \frac{\frac{E_2^2}{R_L}}{\frac{E_2^2}{R_L^2} \{ \omega_0^2 C_2^2 n^2 R R_L^2 + R_L + n^2 R \}} \quad (21)$$

$$= \frac{1}{\omega_0^2 C_2^2 n^2 R R_L + 1 + \frac{n^2 R}{R_L}}$$

식 (13)에서 최대값을 구하기 위해 편미분 한 것과 마찬가지로 효율 η 이 최대값 η_{\max} 로 되기 위한 R_L 을 구하기 위하여 식 (21)을 R_L 로 편미분 한다.

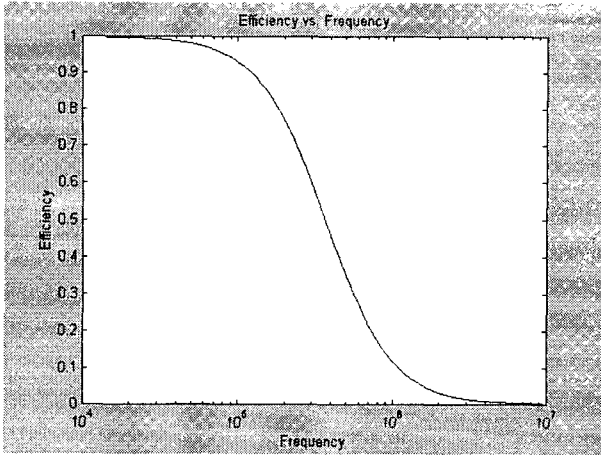


그림 9. 효율 대 주파수
Fig. 9. Efficiency vs. Frequency

$$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = \frac{\partial}{\partial R_L} \left\{ \frac{1}{\omega_0^2 C_2^2 n^2 R R_L + 1 + \frac{n^2 R}{R_L}} \right\} \quad (22)$$

$$= \frac{1 - \omega_0^2 C_2^2 R_L^2}{n^2 R \left\{ \omega_0^2 C_2^2 R_L^2 + \frac{R_L}{n^2 R} + 1 \right\}^2}$$

식 (22)가 zero가 되기 위해 분자가 zero가 되어야 한다. 따라서, 아래 식 (23)과 같으며 η_{\max} 가 되기 위한 R_L 는 식 (24)와 같이 얻을 수 있다.

$$1 - \omega_0^2 C_2^2 R_L^2 = 0 \quad (23)$$

$$R_L = \frac{1}{\omega_0 C_2} \quad (24)$$

3. 시뮬레이션 결과

그림 8에서 간단한 공진형 인버터를 보여준다. 그림에서 빗금 쳐진 부분이 압전 변압기의 등가모델이다. 그림에서 보는 바와 같이 부하인 램프에 다른 어떤 소자들이 연결되지 않고 단지 변압기의 입력측에 공진을 위한 인덕터와 커패시터만 연결된다.

그림 8에서 공진형 인버터를 설계할 때 주파수는 계산의 편의를 위해 공진 주파수라고 가정한다.

그림 9는 식 (21)인 주파수에 대한 효율의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수가 증가함에 따라 어느 주파수 이상에서 그 효율이 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

그림 10은 부하저항에 대한 효율의 변화를 나타낸 것이다. 이 그래프는 주파수에 대한 Voltage Gain 그래프와 비슷하게 어느 특정한 주파수에서 band-pass filter의 특성을 보여준다.

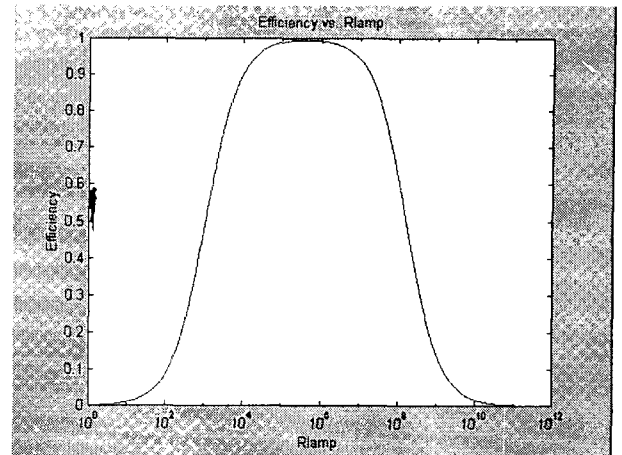


그림 10. 효율 대 부하저항
Fig. 10. Efficiency vs. R_{lamp}

시뮬레이션에서 사용된 압전 변압기는 세로 방향의 진동 모드에서 $4W/cm^3$ 의 전력밀도를 가진 일반적인 압전 변압기이다. 부하로는 $860V_{rms}$, $9mA_{rms}$ 네온 램프를 사용하였고, 점등되었을 때 $90k\Omega$ 의 등가저항을 가진다.

변압기의 등가회로를 위하여 앞에서 전개한 수식들에 의해 다음의 파라메타들이 구하여진다.

$$R = 26\Omega \quad L = 105mH$$

$$C = 53pF \quad C_p = 890pF$$

$$C_s = 35pF \quad n = 6.4$$

그림 11은 입력 전압과 램프 단자에서 전압을 비교하여 측정된 결과이다. 풀 브리지 스위칭 주파수는 $68.3kHz$, 출력 전력은 $8.2W$ 로 측정되었다.

시뮬레이션 파형을 보면 입력전압이 12V의 축전지를 가정했을 때 최종 부하에 걸리는 전압은 네온 램프의 점등에 충분한 1.2kV를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

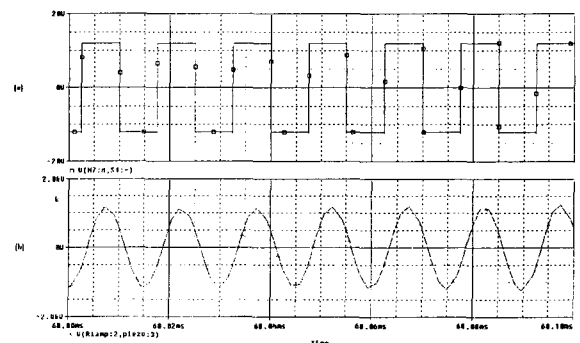


그림 11. 시뮬레이션 결과
(a) 입력전압, (b) 출력전압
Fig. 11. Simulation Results
(a) Input Voltage (b) Output Voltage

4. 결 론

본 논문에서는 압전 변압기의 수식적 모델링을 이용하여 네온 램프 시스템을 모의 시험하였다. 모의 시험 결과 압전 변압기를 사용하여 네온관용 인버터를 제작할 수 있고, 이렇게 제작된 인버터는 높은 주파수, 높은 전압에서 동작할 수 있음을 보였다.

압전 변압기를 적용한 인버터는 기존의 방식에 비해 제어 주파수가 높고, 응답이 빨라지므로 그 성능이 향상된다. 그리고 동작 주파수가 매우 높아서 제품의 소형, 경량화가 가능하다. 따라서, 실제 네온관에 적용 시 그 설치면적을 줄일 수 있다.

그러나 압전 변압기가 가지는 강도 문제와 같은 몇 가지 단점 때문에 여러 분야에서 계속 연구가 필요하며, 이러한 단점들이 가까운 장래에 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Smidt, P.J.M.; Duarte, J.L. "Powering neon lamps through piezoelectric transformers", Power Electronics Specialists Conference, 1996. PESC '96 Record., 27th Annual IEEE, Volume : 1, 1996, pp. 310 - 315 vol. 1
- [2] Zaitso, T. ; Inoue, T. ; Ohnishi, O. ; Iwamoto, A. "2MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer." Telecommunications Energy Conference, 1992. INTELEC'92. , 14th International , 1992, pp. 430 - 437
- [3] Dieulesaint, E. ; Royer, D. ; Mazeroue, D. ; Nowak, P. "Piezoelectric transformers", Electronics Letters, Volume : 24 Issue : 7, 31, March, 1988, pp. 444 - 445
- [4] Lin, C. Y. ; Lee, F. C. "Design of a piezoelectric transformer converter and its matching networks", Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE, 1994, pp. 607 - 612 vol.1
- [5] Vasic, D. ; Costa, F. ; Sarraute, E. "A new MOSFET & IGBT gate drive insulated by a piezoelectric transformer", Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual , Volume: 3 , 2001, pp. 1479 - 1484 vol. 3