

압전 변압기 정상상태 특성과 고효율 냉 음극 방전등용 인버터 설계

권기현*, 임영철*, 양승학**, 정영국***

*전남대 전기공학과 및 RRC, **호남대 전기전자공학부 및 RRC, ***대불대 전기전자공학부

Steady-State Characteristics of the Piezoelectric Transformer and the Design of the Piezoelectric Inverter

G. H. Kweon*, Y. C. Lim*, S. H. Yang**, Y. K. Jung***

*RRC & Dept. of Electrical Eng. Chonnam National Univ.

**RRC & School of Electrical and Electronic Eng. Honam Univ.

***School of Electrical and Electronic Eng. Daebul Univ.

Abstract - The Backlight inverter used in the laptop computer is designed in this study. It has been difficult for electromagnetic transformer to enhance the efficiency and compact profile. In this study, (1) the piezoelectric transformer (PT) is used for reducing the loss; (2) the volume of core and winding coil are used in electromagnetic transformer, and (3) the zero voltage switching (ZVS) is used in the driver of the resonant circuit. The modified PT for this paper and the equivalent circuit are supported by the simulation program. ZVS is achieved by Half-Bridge inverter circuit.

The result of the experiment shows more than 91% improvement in terms of the efficiency.

1. 서 론

노트북 컴퓨터에 사용되는 LCD의 백-라이트 광원인 냉 음극 방전등(Cold Cathode Fluorescent Lamp) 구동용 인버터에 관해 논한다. 요즘의 노트북 컴퓨터의 변화 추이는 디스플레이는 커지고 외형 두께는 보다 얇아지고 있다. 그래서 디스플레이 화면의 대형화와 두께의 슬림화에 따라 그에 수반되는 백 라이트용 인버터 또한 소형, 고효율, 고효율화가 요구되어진다. 현재 권선 변압기사용 인버터는 디스플레이의 크기에 따라 길이는 조정이 가능하나 두께는 변압기의 부피에 따라 결정되므로 소형화가 어렵다. 또한 고 효율화에 가장 큰 문제점으로 지적되는 코어나 권선의 손실이 있다. 그래서 이를 대체하기에 적합한 소자로 전기적 진동을 기계적인 진동 에너지를 매개로 하여 전기 에너지를 전달하는 압전 변압기[1](Piezoelectric Transformer)가 있다.

본 논문에서는 압전 변압기를 이용한 하프브리지 직·병렬 공진 인버터[5],[6] 회로로 노트북 컴퓨터의 액정 백 라이트로 이용되는 DC/AC인버터를 설계한다. 현재 사용되는 LCD 백 라이트용 권선형 인버터에서는 대부분이 푸시-풀 방식의 트랜스를 사용하고 있으며 직류를 교류로 변환하기 위한 스위칭 방식에서 게이트 신호를 보조 권선을 이용한 자려식을 이용하고 있다. 이러한 방식의 인버터에서는 변압기의 누설용량을 이용하기 때문에 스위칭 주파수가 고정되어 있고 자속의 포화 때문에 소형화를 위한 고주파수가 어렵다. 그래서 권선 변압기를 대체하여 압전 변압기를 사용하였으며 제어 IC를 사용하여 압전 변압기의 공진 점에 맞게 스위칭을 하였다. 냉 음극 방전관의 휘도 조절을 기존의 인버터에서는 출력측의 전류를 제한 하여 조절하였다. 그러나 이 방법은 변압기 출력단과 방전등까지 배선과 제한 회로의 배선 등에서 기생용량과 누설 전류와 같은 손실이 많았다.

그래서 본 논문에서는 압전 변압기의 1차측 스위칭소자에서 전류를 측정하여 휘도 제어[2]를 하였다. 하프브리드 직·병렬 공진회로와 변압기의 1차측에서 전류를 검출하여 휘도를 제어하는 방법으로 실험한 결과 91% 이상의 효율을 보였다.

2. 압전 변압기의 구조 및 전기적 등가회로

압전 변압기는 일부 세라믹 물질에서 나타나는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 혹은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 바꾸어 주는 특성을 이용한 것으로 고유공진 주파수의 입력전압으로 인가하면 입력측에서는 전압 효과에 의해 기계적 진동이 일어나고 이를 출력측에서는 압전 효과에 의해 전하를 발생하여 고전압의 출력을 얻는다. 이는 소형, 박막이고, 권선이 없어 코어 손실이 없으며, 전자기적 소음 또한 거의 없고, 세라믹 성분으로 불연성을 갖고 노화가 거의 없다는 등 많은 장점들이 있어 고압 발생용 소자로 눈길을 끌고 있다. 본 논문에서 사용된 압전 변압기는 두 점의 입력과 한 점의 출력 점이 존재하는 길이 방향의 λ모드 진동을 갖는 로젠 타입의 변압기[1]이다. 기존의 로젠 타입과 외형은 같고 진동모드가 1/2λ모드에서 λ모드로 바뀌었다. 기존 로젠 타입에서의 입출력 접촉 점과 지지점이 진동이 큰 부분에 존재하는 단점이 있었으나 λ모드를 사용함으로써 이러한 문제점은 해결할 수 있다. 인버터 제작에 사용된 압전 변압기의 외형, 치수, 전극의 위치, 지지 점의 위치, 변위 방향, 진동 스트레스 방향 등을 그림 1에 나타냈다. 길이가 48[mm]이고 폭은 5[mm], 높이가 1.5[mm]이다. 입출력 특성으로 최대 출력 공진 주파수는 72±1[kHz]이고 최대 출력전압은 2[kVrms, ac]이고 출력전류는 6[mA]정도 이다.

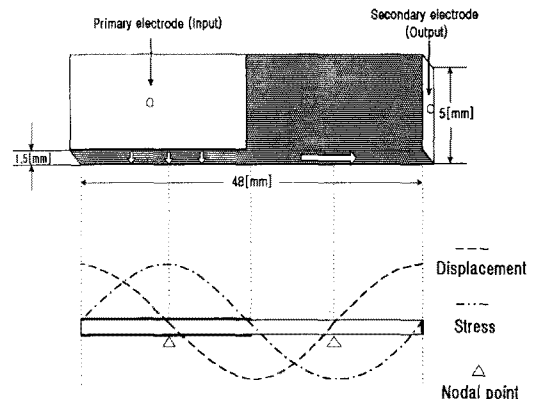


그림. 1 길이방향 λ모드 압전 변압기

압전 변압기의 특성 분석과 회로의 설계 시 이용할 수 있는 전기적인 등가회로[9]가 필요하다. 그래서 기존의 등가회로를 본 논문에서 사용된 압전 변압기의 특정 공진 주파수특성, 승압비, 임피던스 등을 이에 맞게 수정하였다. 수정된 등가회로는 그림 2에 나타났다.

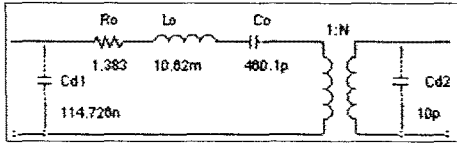


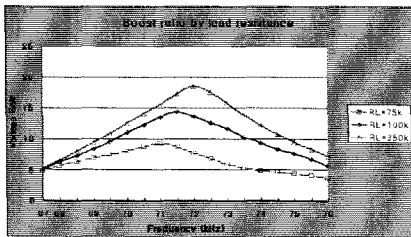
그림. 2 길이방향 λ 모드 압전 변압기 등가회로

3. 압전 변압기와 냉 음극 방전등의 입출력 특성

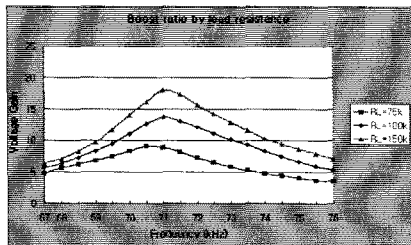
이 절에서는 압전 변압기의 특성과 제안된 인버터의 부하로 사용될 냉 음극 방전등의 특성을 알아본다.

3.1 압전 변압기의 입출력 특성

압전 변압기는 특정한 공진 주파수에서만 전압 전달을 하고 부성 저항 특성이 있어 부하에 따른 승압비 또한 변화가 심하다. 이 때문에 진동 주파수와 부하의 변화에 따른 승압비 특성을 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 하고 부하로 사용되는 냉 음극 방전등을 순수 저항 부하로 보고 세 가지의 저항부하를 가지고 특성실험을 하였다. 시뮬레이션의 결과 파형은 그림 3(a)에 나타냈으며 실험의 결과 파형은 그림 3(b)에 나타났다. 실험에서의 입력은 주파수 가변이 가능한 전력 발생 장치를 이용하였다. 결과 파형에 나타난 것처럼 압전 변압기의 부성저항 특성이 확인되었고 공진 주파수 대역이 매우 좁음을 알 수 있다. 또한 작은 부하일수록 변압기의 최대 공진 주파수가 낮은 주파수쪽에서 나타남을 알 수 있다.



(a) 컴퓨터 시뮬레이션



(b) 실험

그림. 3 저항, 주파수에 따른 승압비

그리고, 세 종류의 압전 변압기를 이용하여 입력 전압에 따른 출력 전압을 확인하기 위한 실험을 하였다. 결과 파형은 그림 4에 나타내었다. A타입은 승압비는 그리 높지 않으나 입력전압이 300[V]이상에서도 안정적 인 동작을 하였다. 그리고 B타입은 승압비는 가장 높으나 최대 입력전압이 50[V]이하로 비교적 낮았다. 그리고 C타입은 A와 C의 중간 정도의 특성이며 입력전압이 최대 700[V]이상 되었다. 본 논문에서는 램프의 점등

특성과 안정성 때문에 A타입을 이용하였다.

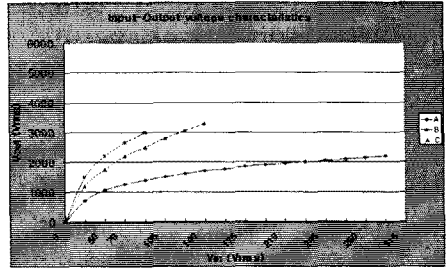


그림. 4 입출력 전압특성

3.2 냉 음극 방전등의 구동특성

압전 인버터의 부하로 사용되는 냉 음극 방전등은 고 휘도, 고효율, 저소비 전력, 장 수명, 저 발열, 우수한 내구성, 우수한 점등 특성 등 매우 많은 장점들이 있어 각종 액정 디스플레이의 백 라이트용이나 이레이저, 스캐너, 계기류, 각종 조명 기기, 장식 기기에 사용된다. 구동 특성으로 초기 점등 시 요구되는 전압이 약 1800[V]정도이고 점등 후 유지전압이 약 700[V]정도이다. 점등 후에는 점등시의 전압보다 2배 이하가 요구되지만 일정한 전류를 공급이 되어야 점등을 유지할 수 있고 깜박임도 없다. 이러한 부성저항 특성이 압전변압기와 적합하다. 실험에서는 노트북 컴퓨터의 화면 크기가 12.1"인 LCD를 이용하였다. 냉 음극 방전등의 전압 전류 특성곡선은 그림 5에 나타났다.

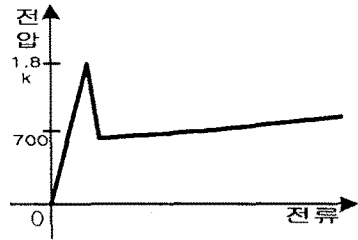
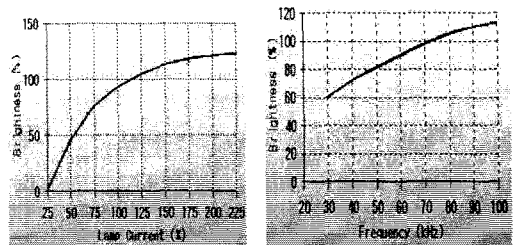


그림. 5 냉 음극 방전관의 전압-전류 특성곡선

램프의 전류와 휘도 특성은 전류가 125%정도까지는 휘도 또한 선형적으로 상승하나 그 이상에서는 방전등 내부 전류밀도 상승에 의해 온도가 상승하여 낮은 전류가 흐르는 것과 같게된다. 그리고 휘도와 주파수와 특성은 인버터에서의 출력되는 주파수에 따라서 휘도가 변하게되는데, 점등주파수가 방전등 내부의 전자의 운동량이나 자외선 발생정도를 변화시키기 때문이다. 주파수가 높아짐에 따라 휘도 또한 증가하는데 어느 정도 이상에서는 포화된다. 적정 주파수는 60~80[kHz]정도이다. 휘도와 전류와 관계는 그림 6(a), 휘도와 주파수와 관계는 그림 6(b)에 나타났다.



(a) 휘도와 전류 관계 (b)휘도와 주파수 관계
그림. 6 냉 음극 방전등 특성

4. 하프브리지형 압전 인버터

냉음극 방전관을 구동하기 위해 제안된 인버터 회로는 하프브리지 방식으로, 다양한 입력전압을 위한 DC/DC 변환부분과 L에 의해 평활된 DC전원을 AC전원으로 변환해 주는 스위칭 부분과 전류 검출부분과 휘도 제어 부분으로 구성되어있다. 전체적인 회로는 그림 7에 나타냈다.

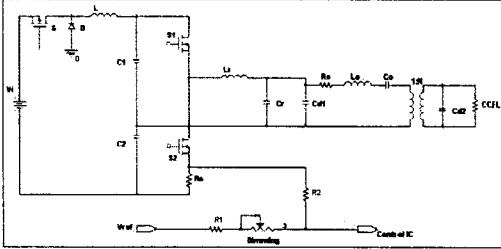


그림. 7 하프-브리지형 압전 인버터

4.1 전류 흐름에 따른 동작모드

인버터의 전력변환회로가 정상상태에서의 전체적인 동작은 한 주기 동안의 전류흐름으로 그림 8과 같이 6개의 동작모드로 나누어 나타낼 수 있다. 그림에서 보듯이 모드 1~3과 모드4~6은 전류의 방향만 다르고 동작은 같다.

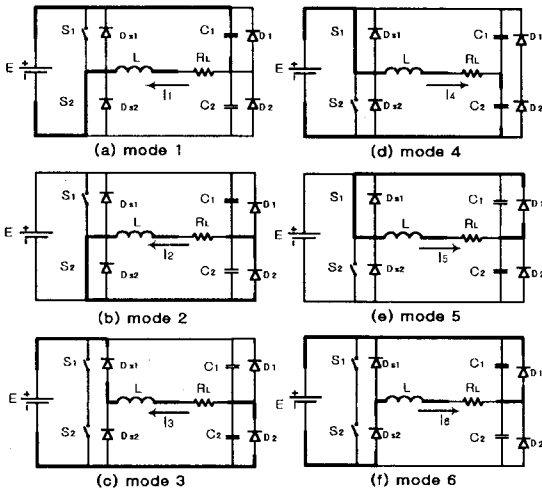


그림. 8 전류 흐름에 따른 인버터의 동작모드

모드 1은 S1이 오피, S2 온인 상태로 에너지가 부하로 공급되며 커패시터 C1이 충전되는 모드이며 그림 8(a)와 같은 루프를 형성하며 이때는 R-L-C 직렬 공진회로와 같다. 이때 흐르는 전류는 식 1과 같다.

$$i_1(t) = \frac{2E}{\beta L} \exp(-\alpha t) \sin \beta t \quad (1)$$

$$\text{단, } \alpha = \frac{R}{2L}, \beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{이다.}$$

그러므로 커패시터 양단 전압은 식 2와 식 3과 같이 표현 된다

$$V_{C1}(t) = E \left\{ 1 - \frac{1}{\beta \sqrt{LC}} \exp(-\alpha t) \sin(\beta t + \delta) \right\} \quad (2)$$

$$V_{C2}(t) = E \frac{1}{\beta \sqrt{LC}} \exp(-\alpha t) \sin(\beta t + \delta) \quad (3)$$

$$\text{단, } \delta = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \text{이다.}$$

모드 2는 환류 구간으로 그림 8(b)와 같으며 V_{C1} 이 E인 순간에 D_1 이 도통되어 인덕터에 흐르는 전류가 L-S1-D2-Re-L의 폐 회로를 통해 환류한다. 환류 구간에서 $i_2(0) = i_1(t_a)$ 일 때, 흐르는 전류는 식 4와 같다.

$$i_2(t_2) = i_1(t_a) \exp(-2\alpha t_2) \quad (4)$$

$$\text{단, } t_a = \frac{\pi - \delta}{\beta}$$

모드 3은 전원으로의 환류되는 구간으로 S1, S2 모두 개방된 상태로 그림 8(c)와 같은 루프를 형성하여 전원으로의 환류된다. 이때 흐르는 전류는 식 5와 같다.

$$i_3, t_3 = -\frac{E}{R} + \left\{ i_2 t_b + \frac{E}{R} \exp(-2\alpha t_3) \right\} \quad (5)$$

모드 4~6 또한 위와 같으나 스위치 소자와 전류의 방향만 다르다.

4.2 정상상태 등가회로 해석

하프브리지 인버터회로는 Re-L-C1의 직렬회로에 Re와 C2가 병렬로 연결된 등가회로로 나타낼 수 있다. 입력 전압은 구형파가 인가된다. 인버터의 등가회로는 그림 9에 나타냈다.

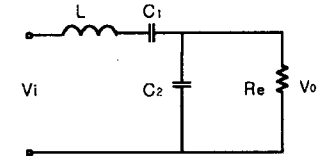


그림. 9 인버터의 등가회로

등가회로를 이용하여 입력과 출력의 관계의 전달함수를 알아가기 위해 전압과 전류에 관한 미분 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$L \frac{d}{dt} i_1(t) + \frac{1}{C_1} \int i_1(t) dt + \frac{1}{C_2} \int [i_1(t) - i_2(t)] dt = V_i(t) \quad (6)$$

$$R i_2(t) + C_2 \int [i_2(t) - i_1(t)] dt = 0 \quad (7)$$

$$R i_2(t) = V_o(t) \quad (8)$$

식 6, 식 7, 식 8을 라플라스 변환 후 정리하면 식 9와 같은 전압 이득 식을 구할 수 있다.

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{LC_2 s^2 + \frac{L}{R} s + \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{C_1} R s + 1} \quad (9)$$

이러한 인버터의 등가회로는 L, C1의 직렬 공진과 L, C2의 병렬 공진이 복합된 구조로 경 부하에서는 병렬 공진이 주로 동작하며 최대부하에서는 직렬 공진의 영향이 크게 나타난다. 무 부하에서 C1과 C2가 직렬 연결이라면 공진 주파수는 식 10과 같이 표현된다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}} \quad (10)$$

점동 후에는 L과 C1의 직렬 공진이 추가 되는 특성이 있다. 이는 식 11에 나타냈으며 식 12는 특성들이다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_1}} \quad (11)$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_e} = \frac{Z}{R_e} = \frac{1}{R_L \omega C_1} \quad (12)$$

위와 같은 해석에 의해 소자의 특성 값을 찾을 수 있으며 시뮬레이션을 통하여 최적화를 할 수 있다.

4.3 변압기 1차측 휘도 제어

방전관의 휘도 조절을 위해 본 논문에서는 동기주파수를 갖는 변압기 1차 래환 루프를 이용하였다(2). 출력

전류를 검출하기 위해 저항 R_s 를 이용하여 검출하며 이를 기준전압과 비교하여 DC/DC컨버터의 반도체 스위칭 소자의 온/오프시간을 조정한다. 동기식 변압기 1차측 휘도 제어 회로는 그림 10에 나타냈다.

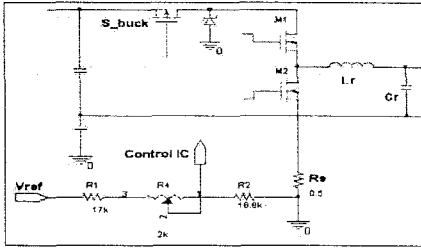


그림.10 동기식 변압기 1차측 휘도 제어

식 14에서부터 식 17까지 나타냈듯이 램프에 흐르는 전류는 저항 R_s 를 통해 흐르는 전류와 비례한다. 이를 이용하여 휘도 제어 할 수 있다.

$$V_b(aver) I_L(aver) = V_{lamp} I_{lamp} \quad (13)$$

$$V_{lamp} = N \cdot \frac{V_b(aver) \cdot \pi}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

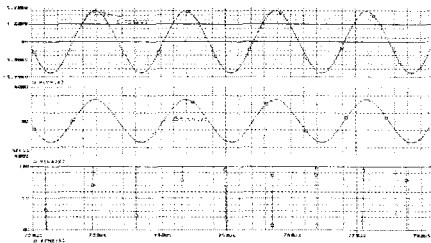
$$I_L(aver) = I_{RS} \quad (15)$$

$$I_{Lamp} \propto I_{RS} \quad (16)$$

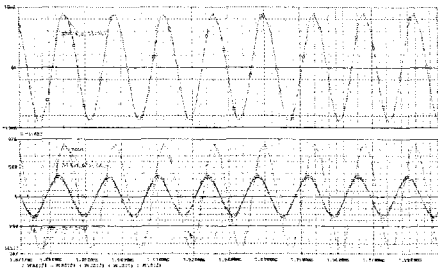
저항 R_s 에 흐르는 전류주파수는 램프 전류주파수의 2 배이므로 이를 동기화 하여야 손실이 줄어든다.

4.4 시뮬레이션 및 결과 파형

컴퓨터 시뮬레이션은 PSpice를 이용하였으며 수정된 압전 트랜스의 전기적 등가회로를 사용하였고 하프브리지를 응용하여 구성하여 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 인버터의 입출력 특성 및 소자의 스트레스와 용량 값을 최적화 하였으며 결과 파형으로 스위치 게이트 신호, 공진 전압, 출력전압, 전류 파형을 그림 11에 나타내었다.



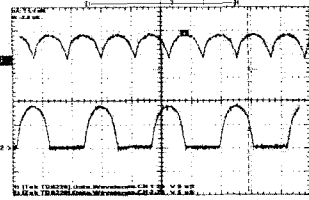
(a) 점등 전 전압 전류 파형



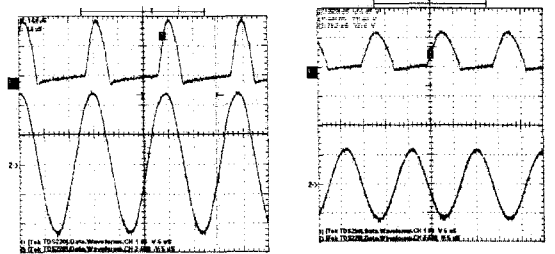
(b) 점등 후 전압 파형
그림.11 전압 출력 파형

실험 결과로 동기식 변압기 1차측 휘도 제어를 하여 60%~100%까지의 휘도제어가 되었다. 그리고 벡-컨

버터의 출력으로 동기 된 전압 파형과 스위치소자 S1의 공진 파형은 그림 12 (a)에 나타냈으며 점등 전후의 램프 전압 파형은 그림 12 (b), (c)에 나타냈다. 시뮬레이션과 실험의 결과 파형에서 나타났듯이 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) 벡- 컨버터 출력 파형



(b) 점등 전 출력전압 (c) 점등 후 출력전압
그림.12 전압 출력 파형

5. 결 론

본 논문에서는 인버터 회로를 영 전압 스위칭을 고려한 하프브리지를 병렬 공진형 회로를 이용하여 설계했다. 또한 휘도 제어를 변압기 1차측 계환 회로를 이용하여 보다 간단하며, 안정적인 회로를 구성하여 기생용량과 누설 전류를 줄일 수 있었다. 제안된 회로로 실험한 결과 출력전압 1300[V]이하와, 출력전류 7.2[mA]이상의 출력을 보여 91%이상의 효율이 나타났다.

본 연구는 한국과학기술재단 지정 '전남대 고품질 전기·전자 부품 및 시스템 연구센터'의 연구비 지원으로 연구되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Rosen, C. A., : Ceramic Transformer and Filters, Proc. Electronic Comp. Symp., pp. 205-211, 1956.
- [2] Mu-Shen Lin, Wen-Jung Ho, Fu-Yuan Shih, Dan Y. Chen, Yan-Pei Wu : A Cold-Cathode Fluorescent Lamp Driver Circuit with Synchronous Primary-Side Dimming Control, IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 45, NO. 2, pp.249-255, APRIL 1998.
- [3] Mark Jordan, John A. OConnor : Resonant Fluorescent Lamp Converter Provides Efficient & Compact Solution, IEEE APEC, pp.424-431, 1993.
- [4] Richard Redl, Koji Arakawa : A Low-Cost Control IC Single-Transistor ZVS Cold-Cathode Fluorescent Lamp Inverter and DC/DC Converter, IEEE APEC pp.1042-1049, 1997.
- [5] Hiroshi Ogasawara, Yukihiko Ohta : Electronic Ballast Using Piezoelectric Transformers for Fluorescent Lamps, IEEE APEC, pp.29-35, 1998.
- [6] Masahito Shoyama, Kuniyasu Horikoshi, Tamotsu Ninomiya, Toshiyuki Zaitzu : Steady-State Characteristic of the Push-Pull Piezoelectric Inverter, IEEE PESC 1997.