

압전 변압기 구동을 위한 인버터 회로설계

권기현, 임영철*, 조성구*, 양승학**, 윤석진
KIST 박막재료연구센터, 전남대학교 전기공학과*, 호남대학교 전기공학과**

Design of the inverter circuits for driving a piezoelectric transformer

G.H. Kweon, Y.C. Lim*, S.K. Cho*, S.H. Yang**, and S.J. Yoon
KIST, RRC & Electrical Engineering Chonnam Nat'l Univ.*,
RRC & Electrical Engineering Honam Univ.**

ABSTRACT

액정 디스플레이의 백라이트에 사용되는 냉음극 방전 램프(CCFL: Cold Cathode Fluorescent Lamp) 구동 인버터의 설계함에 있어 압전 변압기(Piezoelectric Transformer)를 사용하였으며, 파라미터 선정 및 최적화를 하여 실험을 통해 검증하였다. 적용한 압전 인버터로는 푸시-풀(Push-pull)과 하프-브리지(Half-bridge) 회로이며, 휘도 제어기법으로는 아날로그(Analog)와 버스트(Burst) 방법을 사용하였다. 푸시-풀 인버터의 경우 아날로그 제어방식으로 제어전압 2.5-4.5V에서 출력전류 1-6mA(최소)로 휘도 0-100% 특성을 보였다. 입출력 효율로 18.6(최소)-90.3(최대)%를 얻었으며, 버스트 제어방식에서는 듀티비 50-5%에서 1-6mA의 제어 성능을 보였다. 인버터의 입출력 효율은 13.6(최소)-82.1(최대)%를 얻었다.

1. 서 론

일반적으로 액정 디스플레이(LCD: Liquid Crystal Display)는 TV, Laptop PC, Monitor, Video Cam, Hand phone, Navigation 등 전자정보기기 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 그러나 자체 발광능력이 없기 때문에 백라이트용 광원이 필요로 하여 냉음극 방전램프의 사용이 일반적이다. 방전램프는 구동함에 있어 고압의 교류전원이 요구된다. 냉음극 방전램프 구동용 인버터로는 권선 변압기를 사용하는 것이 일반적이나 이는 코어나 권선 손실에 의해 효율이 낮으며, 부피나 중량 또한 크다. 또 과열에 의한 화재의 위험성 등 단점이 있다. 이를 대체하기 적합한 소자로서 압전 변압기가 있는데 고효율, 소형, 경량, 불연성, 저 EMI 등 많은 장점이 있는 반면 공진주파수가 있는 일종의 세라믹 소자로 주파수 의존도가 높고 깨지기 쉽다는 단점이 있어 인버터 설계 시 주의가 필요하다.

본 논문에서는 랩톱 컴퓨터의 화면사이즈가 14.1인치를 기준부하로 선정하고 파워 스테이지는 푸시-풀과 하프-브리지를 응용하여 4.5W급 압전 인버터를 설계하므로써 압전 변압기 특성에 부합된 회로설계기법을 체계화하고자 한다.

2. 압전 변압기

2.1 냉음극 방전램프

냉음극 방전램프의 방전특성은 램프 양단의 전극에 고전압을 인가하면 전계에 의한 전자 방출이 일어나 내부에 삽입된 수은(Hg)을 여기하여 자외선을 발산하며, 이는 형광물질에 부딪혀 가시광선으로 빛을 발한다.

점등 특성으로는 그림 1에 나타낸 것과 같이 점등 시 높은 전압과 점등 후 안정된 유지전압전류가 필요하다. 예로 랩톱 컴퓨터에서 14.1인치 모니터의 경우는 점등 시 약 1000[V]이상의 초기전압과 구동상태에서는 약 600-700[V] 정도의 유지전압이 필요하며, 최대 6[mA] 정도의 출력전류를 요구한다. LCD모니터 화면의 대형화, 슬림화에 따라 방전램프의 길이 또한 길어지고 얇아지고 있어 더 높고 큰 초기 점등전압과 소비전류가 요구된다.

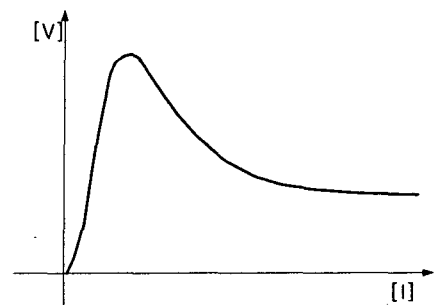


그림 1 CCFL 방전 특성

Fig. 1 Discharge Characteristics of CCFL

2.2 압전 변압기^[1]

압전 변압기는 PZT계열의 세라믹으로 만들어지며, 정·역압전효과를 모두 이용한 것으로, 고유 주파수의 입력전압을 구동부에 인가하면 역압전 효과에 의해 진동이 발생하고, 구동부에서 전달된 기계적 진동은 정압전 효과에 의해 다시 전기적인 에너지로 출력하게 된다. 이때 변환되는 에너지는 교류전압의 형태로 입력에 비하여 승압 또는 강압되어 나타난다.

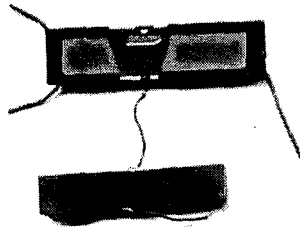


그림 2 압전 변압기
Fig. 2 PT

압전 변압기는 권선 변압기에 비해 소형, 경량, 고효율이며, 구조가 간단하고 높은 승강압비에 비해 경박단소하고, 불연성, EMI발생이 거의 없으며, 동선이 없어 전자기적 손실이 존재하지 않는 등 많은 장점이 있다. 그러나 충격에 약해 깨지기 쉬우며, 주파수 의존도가 높고 구동주파수 대역폭이 좁아 회로 설계 시 주의해야 한다. 실제 사진은 그림 2에 나타냈으며, 크기는 5.8(W)×29.9(L)×2.5(T)[mm]이다. 변압기 전압전달특성과 공진점을 보기 위해 네트웍분석기(HP3577A)를 사용해 측정된 결과는 그림 3과 같다. 특징으로는 $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$ 에서 공진 특성이 있으나 본 논문에서는 $\lambda/2$ 로 55kHz 부근의 공진 주파수를 사용하였다. 이는 냉음극 방전램프의 세경화에 따른 고주파수 구동이 램프 포화를 야기하여 더 이상의 효율상승이 없기 때문이다.

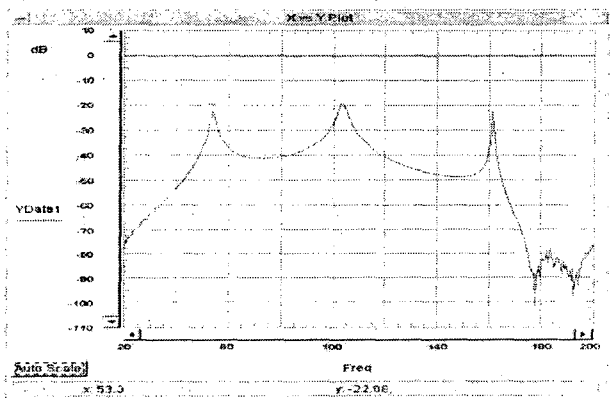


그림 3 압전 변압기의 전압전달특성
Fig. 3 Voltage Transfer Characteristics of the PT

그림 2에 나타난 변압기의 승압비는 최대 55배, 최소 40배이며, 효율은 최대 94%, 최소 88%이다.

이외에 인버터 설계에 필요한 요소로 시뮬레이션에 이용할 수 있는 전기적 등가회로가 있다. 이는 임피던스분석기(HP4194A)를 이용하여 G-B에 의한 어드미턴스(Y) 측정법을 사용하여 간단히 구할 수 있다. 구해진 등가회로는 그림 5와 같다. 회로 설계 시에 중요 인자로써 입·출력측 커패시턴스값(Cd1, Cd2)과 승압비(1:N)가 있다. 보통 Cd1은 수십-수백[nano]이며, Cd2는 수[pico]이다.

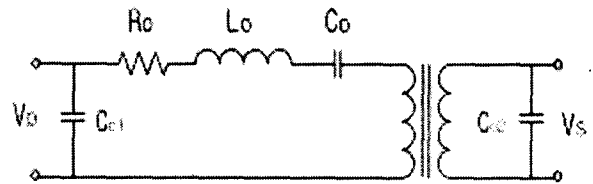


그림 4 전기적 등가회로
Fig. 4 Electrical Equivalent Circuit

3. 압전 변압기 구동 인버터

3.1 전력변환 토폴로지^[2]

백라이트 구동을 위한 인버터는 다음과 같이 세 가지의 요건이 필수적이다. 첫째로 다양한 직류 입력에 대응하기 위한 DC/DC변환기가 있어야 한다. 이는 일반적인 랩톱 컴퓨터의 경우, 배터리와 어댑터의 출력이 다르기 때문이다. 둘째로 고압의 정현파에서 최대 효율로 램프를 구동하기 위한 DC/AC 변환기가 필요하다. 마지막으로 모니터의 화면 밝기 조절을 위한 휘도제어가 있어야 한다. 이외에 부가적으로 부하의 손상 시 과전압보호, 저전압 입력방지 그리고 온/오프회로 등이 필요하다.

압전 변압기를 이용한 전력변환 토폴로지는 그림 5와 같이 매우 다양하다. 특징으로는 다음과 같은 것들이 있다. (b)는 간단한 구조와 제어가 쉬운 반면에 높은 품질계수와 큰 공진인덕터를 요구하고 ZVS(Zero Voltage Switching)설정이 어렵다는 단점이 있다. (f)의 경우는 높은 전력변환효율과 저전압구동시 좋은 특성이 있으나 많은 스위칭소자의 사용과 회로가 복잡해지는 단점이 있다. (c)와 (e)의 변환기는 ZVS 설정이 용이하고 변환효율도 우수하며 제어용이성등의 장점이 있으나 푸시-풀의 경우 공진인덕터의 동일한 용량이 요구되고 주파수 변화에 따른 데드타임 설정에 주의해야하며, 하프-브리지의 단점은 upper side의 공진전압을 이용하므로 변압기의 노화가 일어날 수 있고 스위칭 소자 구동 시 주의를 요한다.

본 논문에서는 푸시-풀과 하프-브리지형을 응용하여 설계하고, 그 특징을 비교하여 최적의 조건을 알아본다. 구성도는 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

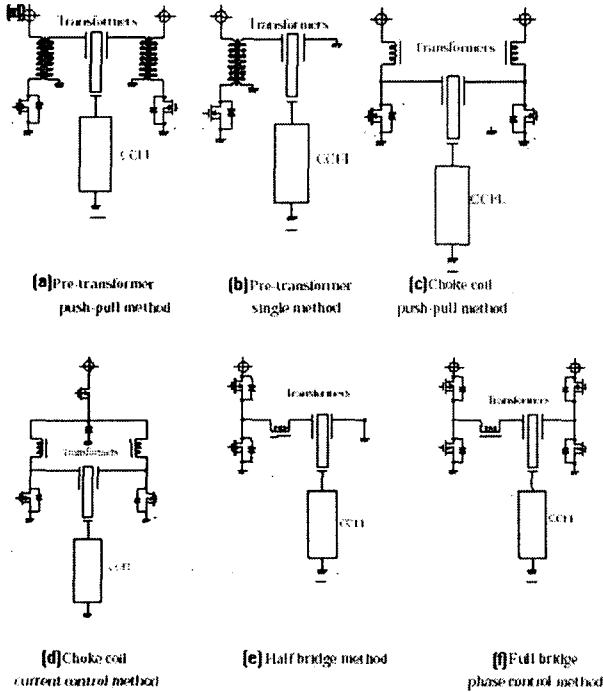


그림 5 압전 변압기 구동 토폴로지
Fig. 5 Topologies for Driving the PT

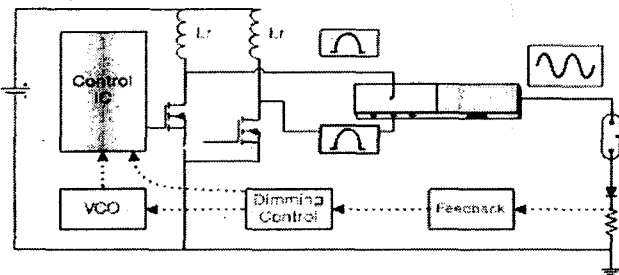


그림 6 푸시-풀 압전 인버터
Fig. 6 Push-pull Piezoelectric Inverter

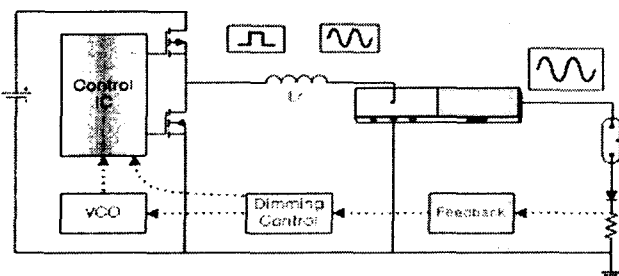


그림 7 하프-브리지 압전 인버터
Fig. 7 Half-Bridge Piezoelectric Inverter

3.2 구동 주파수 선정

압전 변압기는 그림 3에 나타냈듯이 특정 주파수에서 동작하기 때문에 주파수 선정이 매우 중요하다. 따라서 주파수변조방식(PFM)을 많이 이용하며, 또한 입력전압과 휘도제어전압에 따라서 구동주파수가 변화해야 한다. 전압제어 주파수 변조(VCO: Voltage Controlled Oscillator)방식의 사용이 일반적이며, 구성은 그림 8과 같다. 그림 8은 제어 IC의 주파수 선정 부분이며, V_{comp} 는 IC의 비교기 출력 전압이다. 전류 I의 크기에 따라 RC공진에 따른 발생클럭의 주파수가 변화된다. R_t , C_t 는 주파수를 R_r 은 범위 설정을 위한 소자이다.

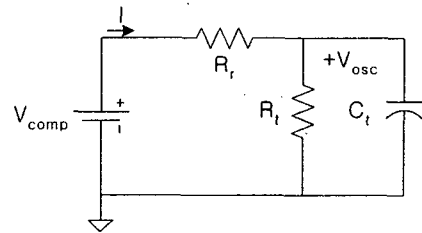


그림 8 VCO 설정
Fig. 8 Programming of the VCO

초기상태에서 방전시간 t 는 고유응답의 시정수를 통하여 구할 수 있으며, 식 (1)은 마디방정식과 전압방정식이다. 이를 이용하여 시정수를 구하면 식 (2)와 같이 방전시간을 구할 수 있다.

$$\frac{V_{osc}}{R_t} + C_t \frac{dV_{osc}}{dt} = 0, V_{osc} = V_{osc0} \times e^{-\frac{t}{R_t C_t}} \quad (1)$$

$$t(V_{osc}) = R_t C_t \times \ln\left(\frac{V_{osc}}{V_{osc0}}\right) \quad (2)$$

V_{osc0} 은 초기 전압이고 V_{osc} 는 방전 후 최종전압이다. 식 (3)-(5)는 선정된 VCO의 방전 특성식으로 이를 이용하여 방전시간을 구할 수 있다. 방전시간은 식 (4)에 나타냈다. 발진기 주파수는 충전시간과 방전시간의 합으로 표현되며, 그 시간은 같은 것으로 보고 주파수 설정은 방전시간의 2배의 역수로 식 (5)와 같이 표현된다. 식 (1)-(5)를 이용하여 공진 주파수에서의 R_t , C_t , R_r 을 구할 수 있다.

$$V_{osc}(t) = [V_{osc}(t) - (R_t // R_r)I]e^{-t/(R_t // R_r)C_t} + (R_t // R_r)I \quad (3)$$

$$at (R_t \times R_r)I = V_{comp} \quad (4)$$

$$t(V_{comp}) = \frac{R_t \times R_r \times C_t}{R_t + R_r} \times \ln \left[\frac{V_{osc}(R_t + R_r) - V_{comp} R_t}{V_{osc0}(R_t + R_r) - V_{comp} R_t} \right] \quad (5)$$

$$Frequency = \frac{1}{2 \times t(V_{comp})} \quad (5)$$

3.3 공진회로 설계^[3]

그림 6, 7에 나타난 토폴로지에서 보다 정현파에 가까운 파형을 만들 때에 조절 가능한 부분은 인덕터뿐이다. 이는 압전 변압기는 제작 시에 모든 상수값들이 정해지기 때문이다. 따라서 인덕터의 선정이 공진회로 매칭의 핵심이다. 고려되어야 할 사항으로 높은 품질계수와 온도 안정성 푸시-풀의 경우 동일한 용량값 등이 있다.

LC 공진 주파수는 반드시 스위칭 주파수 보다 커야하므로 인덕터의 용량은 다음의 식 (6)과 (7)을 통하여 구할 수 있다. 스위칭 주파수가 55kHz 부근이고 Cd1이 55nF이므로 인덕터 용량은 152uH보다 작은값으로 선정하여야 한다. 작은 용량은 고조파에 의해 정현파가 되지 않으며 입력전류의 증가로 효율 또한 내려간다. 큰 인덕터의 경우는 입력전류의 감소로 인해 충분한 출력을 얻기 힘들다. 따라서 선정한 인덕터의 용량으로는 100uH이다.

$$f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{d1}}} \quad (6)$$

$$L < \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C_{d1}} \quad (7)$$

3.4 휘도 제어

LCD 백라이트용 인버터의 필수 요건중하나로 화면의 밝기 조절이 있다. 본 논문에서는 이를 위하여 아날로그와 버스트(Burst)제어방식을 사용하였다. 아날로그 제어 방식은 밝기조절을 위해 직류 기준값을 조정하는 것으로 매우 간단하나 수동소자(가변저항)를 사용한 방법으로 현재는 거의 사용되지 않는다. 버스트제어방식은 가변펄스폭 방법으로 인버터의 온/오프를 디지털적으로 제어하며, 보편화되어 있다.

본 논문에서 설계한 푸시-풀 압전 인버터에서는 아날로그제어방식을 이용하여 제어전압이 2.5-4.5V에서 출력전류 1-6mA의 특성과, 하프-브리지 압전 인버터에서는 버스트제어방식을 사용하여 듀티비 50-5%에서 1-6mA의 제어 성능을 보였다.

3.5 보호회로 설계

사용된 보호회로로는 부하오프 시 과전압 방지와 저전압 입력시 자동 오프 기능등이다. 과전압은 압전 변압기의 특성 상 무부하시 최대 승압비를 나타내므로 갑작스런 부하개방상태가 되면 발진이 계속 커져 과전동으로 인한 파손을 방지하여야 한다. 저전압입력시 구동 방지는 VCO 동작에 의해 최대공진점 즉 최소 임피던스에서

동작할 수 있기 때문에 이를 막아 과전류 입력으로 인한 변압기의 손상을 보호하기 위함이다.

4. 실험 결과

설계된 인버터의 효율은 그림 9와 같은 시스템을 구성하여 측정하고 식 (8)-(10)를 이용하여 계산하였다.

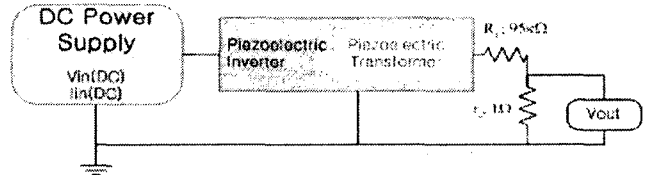


그림 9 압전 인버터 효율 측정 시스템
Fig. 9 Measurement System for Piezo Inverter

$$P_{in}[W] = V_{in} \square I_{in} \quad (8)$$

$$P_{out}[W] = R \square I_{out}^2 \quad (9)$$

$$Efficiency[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (10)$$

설계된 푸시-풀, 하프-브리지 압전 인버터에서의 특성값은 아래의 표 1과 같다.

표 1 실험결과

Table 1 Experimental Results

ITEM	Calculated	Experiment
Vin	3-13V	7-13V
VCO	Rt	22kΩ
	Ct	470nF
	Rr	160kΩ
	F _{range}	43-61kHz
Lr	152uH	100uH
Load	95kΩ	14"
Dimming	Analog	2.5-5V
	PW	100-0%
Efficiency	Push-pull	90.3-18.6%
	Half-bridge	82.1-13.6%

압전 인버터의 특성 및 결과로 휘도 제어성능은 푸시-풀 인버터는 그림 10, 12, 14에 나타내었으며, 하프-브리지 인버터는 그림 11, 13, 15에 나타내었다. 최대휘도 기준은 인버터 출력 6mA이다.

푸시-풀에 비해 낮은 효율은 변압기 입력전압은 높게 반해 고조파의 영향과 upper side만의 구동에 기인한 것으로 보인다. 압전 변압기를 이용한 인버터에서의 설계절차는 1)부하의 선정, 2) 압전 변압기 선정 및 특성 분석, 3) 인버터 적용 토폴로지 선택 및 설계, 4) 제어 및

케환회로 설계로 하였다.

설계절차에 따라 디자인된 인버터에서 특성값을 비교 분석한 결과 이론과 실험이 거의 일치함을 보였다.

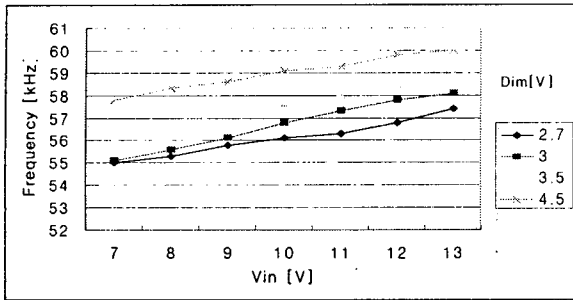


그림 10 동작주파수 특성(푸시-풀)
Fig. 10 Operating Frequency by Vin and Vdim

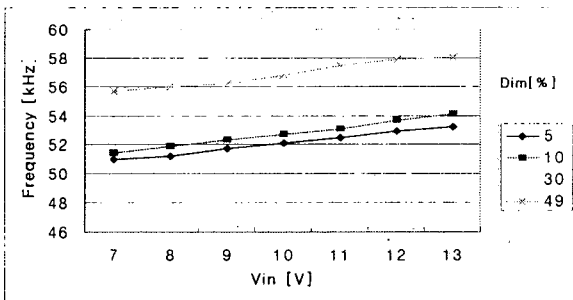


그림 11 동작주파수 특성(하프-브리지)
Fig. 11 Operating Frequency by Vin and PW

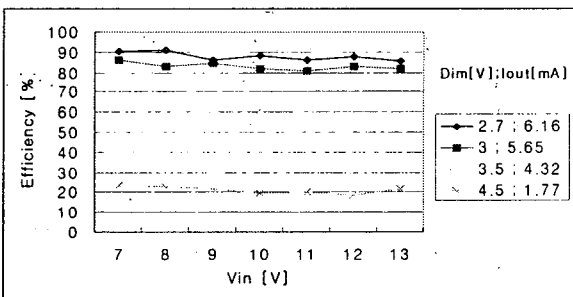


그림 12 인버터 효율(푸시-풀)
Fig. 12 Inverter Efficiency by Vin and Vdim

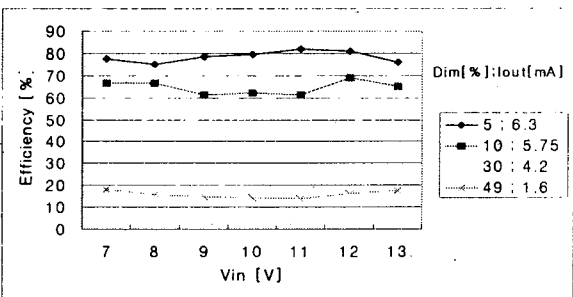


그림 13 인버터 효율(하프-브리지)
Fig. 13 Inverter Efficiency by Vin and PW

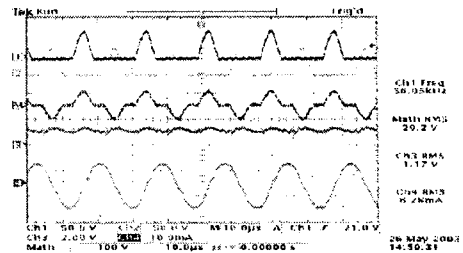


그림 14 최대휘도(푸시-풀)
Fig. 14 Max. Brightness(Push-pull)

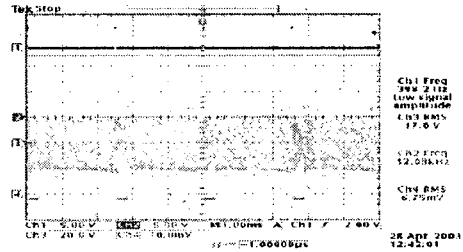


그림 15 최대휘도(하프-브리지)
Fig. 15 Max. Brightness(Half-Bridge)

5. 결 론

1. 압전 인버터에서의 설계절차는 1)부하의 선정, 2) 압전 변압기 선정 및 특성 분석, 3) 전력변환 토폴로지 선정 및 설계, 4) 제어 및 케환회로 설계로 하였다.
2. 공진인덕터는 스위칭주파수를 고려하여 선정하되 적은 용량은 고조파에 의해 정현파가 되지 않고 입력전류의 증가로 효율이 내려가고, 큰 인덕터의 경우는 입력전류의 감소로 인해 충분한 출력을 얻기 힘들므로 적절한 값의 선택이 중요하다.
3. 푸시-풀 인버터의 경우 동일한 인덕터의 사용과 공진 시 데드타임 설정이 중요하고, 하프-브리지 압전 인버터의 경우에는 공진시 변압기의 upper side만의 구동되므로 노화에 주의해야 한다.
4. 향후에는 보다 높은 전력전달 특성과 높은 효율을 갖는 다양한 토폴로지의 설계절차를 제시하고 디자인하여 장단점을 비교 분석하고자 한다.

이 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교
RRC-HECS 지원에 의해 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 35th ICAT Smart Actuator Symposium : Conference Note, April 18-19, 2002.
- [2] G.H. Kweon, Y.C. Lim, S.H. Yang. "An analysis of the backlight inverter by topologies" IEEE, ISIE-2001, pp 896-900, 2001.
- [3] Data sheet & User's Guide Note, Multi-Topology Piezoelectric Transformer Controller, Texas Instrument, January 2002.