

PMN-PZT 세라믹을 사용한 압전트랜스포머 제작과 특성 Fabrication and Characteristics of Piezoelectric transformer using PMN-PZT

류주현*
손은영
류규현, 윤현상
정희승
Joo Hyun Yoo*
En Young Son
Gyu Hyun Yoo, Hyun Sang Yoon
Whoe Sueng Jung

세명대학교 전기공학과
안성기능대학교 전자과
세명대학교 전기공학과
주성전문대학 전기과
Dept. of Electrical Eng. Semyung Univ.
Dept. of Electronics. AhnSung Tech. Jr. College
Dept. of Electrical Eng. Semyung Univ.
Dept. of Electricity. JooSung. Tech. Jr. College

Abstract

In this paper, the voltage step-up ratio, efficiency and input impedance of the PMN-PZT ceramic transformer(PT) were investigated for the variation of resonant frequency according to load resistance. The output voltage and voltage step-up ratio are increased with the the increase of load resistance. The efficiency of PT showed the maximum value of 91% at R_L of 500k Ω .

1. 서론

압전트랜스포머는 최근들어 일본에서 종래의 Rosen형에서 수십~수백KHz의 공진주파수를 갖는 압전트랜스포머가 각연구소 및 기업체에서 개발되어 일부는 휴대용 Personal Computer의 액정 display에 이용되는 backlight구동용 고압전원으로 실용화가 되었다.[1][2]

backlight(냉음극관사용)는 방전개시시는 수MQ 이상의 용량성 부하로 높은 방전개시 전압이 필요하나 일단 점등후에는 수백K Ω 의 저항부하로 되기 때문에 높은 전압을 필요치 않는다.[2]

따라서, 압전트랜스포머는 승압비의 개략치가 $(\frac{\text{부하임피던스}}{\text{내부저항}})^{1/2}$ 로 결정되어 냉음극관은 방전개시시에 높은 임피던스 조건으로 승압비가 커서 고전압을 발생시키기 때문에 점타시에 유리하고 점타후에는 부하임피던스가 감소하여 승압비가 감소되므로 냉음극관의 전압이 하강되어 안정된 전류, 전압이 유지되는 특징을 갖기 때문에 이 냉음극관 구동용 전원으로서 아주 적합하여 선진 각국은 물론 국내에서도 우수한 재료 개발을 비롯한 구동회로 개발에 앞다투고 있는 실정이다.[2]

따라서, 본 연구에서는 냉음극관에 이용할 수 있는 압전 트랜스포머 조성 $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 계 세라믹을 제조하여 그에 관한 제반 전기적, 유전적 특성을 조사한 다음 압전트랜스포머를 설계 제작하여 부하저항에 따른 구동주파수, 승압비, 효율등을 측정하고자 한다.

2. 압전트랜스포머 등가회로 해석[3]

압전진동자인 압전트랜스포머의 등가회로를 2차정수의 1차측으로의 환산을 행하면, 그림1로 표시 가능하다. 여기서, 1차측으로 환산한 2차정수는 다음식으로 된다.

$$C = \frac{1 + Q_{02}^2(1+a)^2}{\omega R_1 Q_{02}^2(1+a)} \times \phi^2 \text{ -----(1)}$$

$$R = \frac{R_l}{1 + Q_{02}^2(1+a)^2} \times \frac{1}{\phi^2} \text{ -----(2)}$$

$$E = \frac{1}{\phi} \times E_2 \text{ -----(3)}$$

여기서, E는 2차전압을 1차측으로 환산한 기호를 표시하고 출력단 용량의비율 a로 두고 $a=C_1/C_{02}$ 이다.

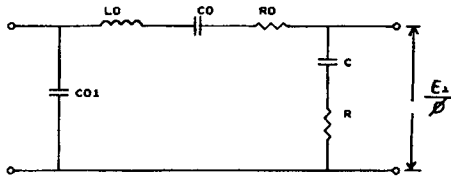


그림1. 1차측으로 환산한 등가회로
Fig.1 Simplified Equivalent Circuit Converted to the primary side

그림1의 등가회로 의해 공진시의 승압비 r 는 다음식으로 된다.

$$r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\phi R_2 \sqrt{1 + Q_{02}^2 (1+a)^2}}{\phi^2 R_0 (1 + Q_{02}^2 (1+a)^2) + R_1} \quad \text{-----}(4)$$

여기서, $Q_{02} = \omega C_{02} R_L$, $1 \ll Q_{02}^2$ 로 두고, $\phi^2 R_0$ 의 치는 R_L 에 비해서, 10^{-3} 이하로 무시할 수가 있기 때문에 (4)식은

$$r \approx \frac{\phi R_1 Q_{02} (1+a)}{\phi^2 R_0 Q_{02}^2 (1+a)^2 + R_1} \quad \text{-----}(5)$$

로 된다. 기본파 공진mode($\lambda/2$)에 있어서 출력 단 개방시의 승압비, r_∞ 는 (5)식의 실효저항 R_1 을 무한대로 하면 다음식이 얻어진다

$$r_\infty = \frac{1}{\phi \omega C_{02} R_0} = \frac{4Q_m}{\pi^2} \times K_{31} K_{33} \times \frac{L}{T} \quad \text{-----}(6)$$

$$\phi = \frac{L}{T} \times \frac{K_{31}}{K_{33}}, \quad C_{02} = \frac{\epsilon_{33}^T (1 - K_{33}^2) \omega T}{L}$$

$$R_0 = \pi T / 2 C^E \omega Q_m d_{31}^2 Y_3^E (1 - K_{33}^2)$$

$$\omega = \pi C^E / 2L, \quad d_{33} = \epsilon_{33}^T g_{33}$$

$$K_{33} = \left(\frac{d_{31}^2 Y_1^E}{\epsilon_{33}^T} \right)^{1/2}, \quad K_{33} = (g_{33} d_{33} Y_3^E)^{1/2} \quad \text{-----}(7)$$

같은 모양에 전파장 공진 mode(λ)의 λ_∞ 는 (6)식

으로 표현된다. 따라서, 전파장 공진모드의 공진주파수 ω_λ 및 등가저항 $R_{0\lambda}$ 는

$$\omega_\lambda = \pi C^E / L, \quad R_{0\lambda} = R_0 / 2 \quad \text{-----}(8)$$

로 된다. (6)식은 종래의 등가회로 및 탄성진동 해석에 의해 도출한 출력 단자 개방의 승압비에 관한 이론식이다. (5)식은 (6)식을 이용하여,

$$r = r_\infty \frac{(1+a)}{(1+a)^2 + R_{loss} / R_1} \quad \text{-----}(9)$$

로 표현된다. (9)식은 탄성진동해석의 승압비의 식에 상당하여 부하저항의 실효용량의 영향이 내포되고 있다. 본 식중의 R_{loss} 는 1차측의 등가저항 R_0 를 2차측으로 환산한 등가내부 손실저항이며 다음 식으로 된다.

$$R_{loss} = r_\infty^2 R_0 = \frac{4g_{33}^2 Y_3^D Q_m L}{\omega \pi^2 A} \quad \text{-----}(10)$$

$$\text{단, } Y_3^D = Y_3^E / (1 - K_{33}^2), \quad A = \omega T$$

등가회로 해석으로부터 R_{loss} 의 관계를 확립한 것에 의해 종래 불명확한 탄성진동 이론식과의 관계가 명확하게 되었다. 또한 (4)식의 엄밀한 승압비의 식은

$$r = r_\infty \frac{\sqrt{1/Q_{02}^2 + (1+a)^2}}{1/Q_{02}^2 + (1+a)^2 + R_{loss} / R_L} \quad \text{-----}(11)$$

으로 된다. 압전변압기가 공진시의 입력저항 R_{in} 은 그림2의 등가회로의해

$$R_{in} = R_0 + R \quad \text{-----}(12)$$

이며 입력 임피던스 Z_{in} 은

$$Z_{in} = \frac{R_{in}}{1 + j\omega C_{01} R_{in}} \quad \text{-----}(13)$$

로 된다. 단, $C_{01} = \omega L \epsilon_{33}^T (1 - K_{31}^2) / T$

$$P_m = E_1^2 / R_{in} \quad \text{-----}(14)$$

로 된다. 공진시의 부하저항의 소비전력 P_{out} 은 $1 \ll Q_{02}^2$ 의 경우에는

$$P_{out} = \left[\frac{r_\infty (1+a) E_1}{R_L (1+a)^2 + R_{loss}} \right]^2 R_L \quad \text{-----}(15)$$

이며 전범위의 해는

$$P_{out} = \left[\frac{r_{\infty} Q_{i2}^2 \sqrt{1/Q_{i2}^2 + (1+a)^2 E_1}}{R_L + Q_{i2}^2 R_L (1+a)^2 + R_{loss} Q_{i2}^2} \right]^2 R_L$$

-----(16)

그 때의 효율 η 은 그림2의 등가회로에 의해

$$\eta = R/(R_0+R) \text{ -----(17)}$$

로 표현한다.

3. 실험

3-1 시편제조 및 압전특성측정

산화물 혼합법을 사용하여 $Pb_{0.91}La_{0.06}(Mn_{0.025}Nb_{0.05})(Zr_{0.4625}Ti_{0.4625})O_3$ 세라믹스에 과잉PbO를 3mol% 첨가하여 세라믹스 소자 및 압전트랜스포머 기판을 1200°C에서 2시간 제조하였다. 제조된 시편의 제반특성은 표 1과 같다.

소성이 끝난 시편은 sand paper와 SiC분말을 사용하여 1mm의 두께로 연마한 다음 초음파 세척기로 아세톤 속에서 세척한 다음 듀폰사의 실버페이스트 #7095를 600°C에서 10분간 열처리하여 전극을 형성시켰다.

표 1 시편의 제특성

Table characteristics of sample

Sample No.	density (g/cm ³)	Curten p. r°C.	dielectric constant	Ec (V/cm)	Pr (μc/cm ²)	K _D	K ₃₁	K ₃₃	ds ₁₁ [10 ⁻¹² C/N]	ds ₁₂ [10 ⁻¹² C/N]	S ₁₁ ^R [10 ⁻¹² C/N]	Q _m
S	7.47	281	138	8.90	15.8	0.42	0.22	0.64	233	-85	10.7	529

전극 부착이 완료된 시편들은 실리콘 유속에서 25kv/cm의 전계를 30분간 가하여 분극처리하여 Network Analyzer(E5100A)로 공진, 반공진 주파수를 측정하여 제반 압전특성을 측정하였다.

3-2 압전트랜스포머의 제작 및 특성측정

압전트랜스포머는 입력 전기에너지를 기계진동 에너지로 변환하는 구동부와 기계적 진동에너지로 전기 출력에너지로 변환하는 발전부로 구성된 장방향 판상의 압전 세라믹 진동자이다.

그림3은 압전 트랜스포머의 구조로 좌 반분 1은 구동부로 위, 아래면에 입력 전극 2 및 3이 있다. 우반분 4는 발전부분이며 출력전극 5가 있다. 구동부는 두께방향으로 분극(p표시)하고, 발전부는 길이 방향으로 분극(p'로 표시)하여 제작한다.

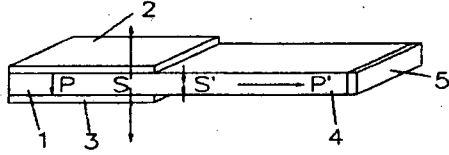
이때, 분극시에 먼저 입력전극 2, 3을 단락하고 그것과 출력전극 5와 간에 직류전압을 가하여 발전부분 4를 길이 방향으로 분극한다.

다음에 입력전극 2, 3을 개방하여 2, 3에 직류전계를 가하여 구동부를 두께방향으로 분극하면되나 이때 구동부 1과 발전부 4간에 경계면에는 분극방향이 직교하게 된다.

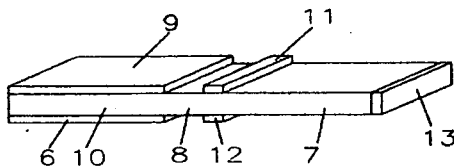
압전재료는 분극에 의해 분극방향으로 늘어나고 그것과 직각방향으로 축소하기 때문에 구동부와 발전부 경계부분에는 각각 S와 S'로 표시한 왜형의 응력이 걸리기 때문에 그곳에 집중적으로 전단 응력이 생겨 경계면 근방에 있어서 기계적 강도가 약해진다.

따라서, 본 연구에서는 그림3(b)처럼 중간 영역 8을 형성하여 경계면근방에 있어서 국부적인 전단 왜형이 작게 되어 강도를 높여 분극이나 동작중에 있어서 파괴가 되지 않는 방법으로 신뢰성을 현저하게 향상하고자 하였다.

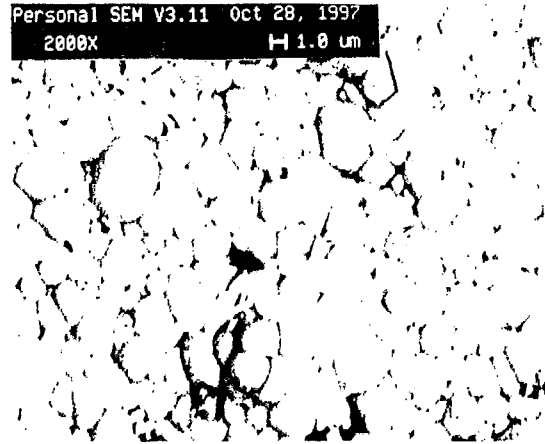
분극하는 방법은 먼저 보조전극과 출력전극간(11, 13)에 길이 방향으로 분극을 한 다음 구동부(6, 9)를 두께방향으로 분극하였다.



(a) 종래의 압전트랜스포머 제작



(b) 신뢰성을 향상시킨 압전트랜스포머 제작



(b)

사진1.시편의 XRD와 미세구조
Photo1 XRD and Microstructure

그림3 압전 트랜스포머 제작

Fig3 Fabrication of piezoelectric Transformer

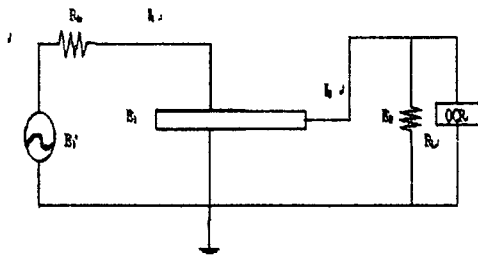
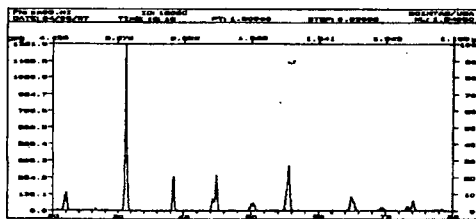


그림4.압전트랜스포머특성 측정회로

Fig.4 Circuit for measuring the properties of PT

4.결과 및 고찰



(a)XRD

사진1은 시편의 XRD와 미세구조를 나타낸 것이다. 사진1의(a)의 x선 회절도에서 회절각 40~47°C 범위에서 (200) 면과 (002) 면의 쌍 peak가 나타난 것으로 보아 정방성(tetragonal)결정으로 생각된다.

이에 따라, 정방정계의 격자상수를 구한 결과, $\frac{c}{a}$ 가 1.01로 비교적 작게 나타났다.

사진1(b)는 SEM 사진을 나타낸 것이다. 그래린이 비교적 치밀하게 이루어져 평균 그래인 크기는 2.65 μm를 나타 내었다. 시편의 압전특성은 표 1에서 알 수 있듯이 압전d정수와 전기기계 결합계수가 비교적 양호한 값을 나타내었다. 본 실험에서 제작한 압전 트랜스포머는 1차측과 2차측에 전극을 형성하였는데 분극처리는 1차측(구동부)에는 두께 방향으로 하고 2차측(발전부)는 길이 방향으로 한다. 분극처리된 압전트랜스포머에 1차측에 소자의 공진주파수를 갖는 전압을 인가하면 압전 역효과에 의해 길이 방향으로 강한 진동이 발생하게 되어 출력전압은 그의 진동에 의해 압전효과로 발생된 전압이 2차측 전극으로 나오게 된다. 압전트랜스포머는 2개의 진동mode를 실질적으로 많이 이용되는데 이는 λ와 λ/2mode이다. 본 실험에서는

λ 진동mode방법을 이용하여 측정하였다.[4]

이는 승압비와 변환효율이 높을 뿐 아니라 실장이 이용한 2개의 지지점을 가지기 때문이다.

본 실험에서는 또한 실제로 냉음극관 구동을 목표로 냉음극관의 특징인 점등전에 고전압(저항은 무한대) 점등후에는 비교적 저전압이고 저항이 수십 k Ω 으로 감소하기 때문에 부하저항변화에 따른 승압비, 효율특성을 조사하였다.

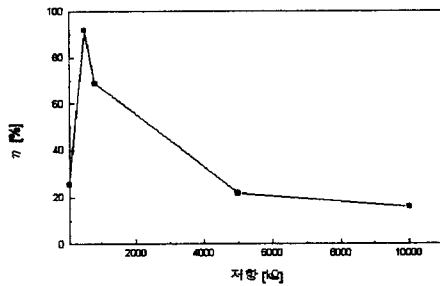


그림5 부하저항에 따른 효율

Fig.5 Efficiency according to load resistance

그림5 에서 알 수 있듯이 부하저항이 500k Ω 일 때 효율이 91%으로 가장 높게 나타났으며, 부하저항이 이보다 감소하거나 더욱 증가하면 점차 감소하는 특성을 나타내었다. 또한 그림6에서처럼 승압비는 부하저항증가에 따라 점차 증가하였다. 무부하에서 최고 123배의 승압비를 보이고 있다. 더불어 구동공진 주파수는 부하저항 증가에 따라 약간씩 증가함을 알 수 있었다. 따라서 냉음극관 구동시에는 점타전후에 임피던스가 변하므로 미소하게 이 구동주파수를 조절할 필요가 있다.

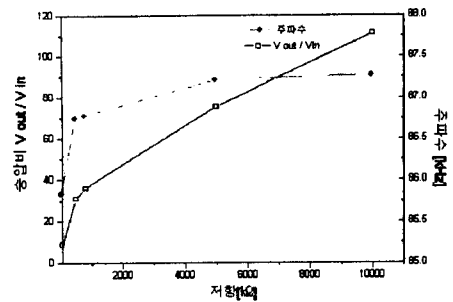


그림6. 부하저항에 따른 승압비와 공진주파수

Fig.6 Step-up ratio and resonant frequency according to load resistance

그림7은 무부하에서 입력전압증가에 따른 출력전압을 측정한 것이다. 입력전압증가에 따라 점차 승압비가 증가하고 있다. 본 연구에서는 입력전압을 증가함에 따라 출력전압을 측정하였는데, 노트북에 필요로 하는 백라이트에서는 점타에 필요한 출력전압이 1200Vrms이상이 필요하므로 입력전압을 높이는 회로가 필요하다. 그림8은 부하저항에 따른 voltage Gain을 Network Ananyzer로 측정한 결과를 나타낸 것이다. λ 와 $\lambda/2$ mode 두부분에서 voltage Gain이 각각 높게 나타나고 있다. 특히, $\lambda/2$ 보다는 λ mode에서 더욱 크게 나타났다.

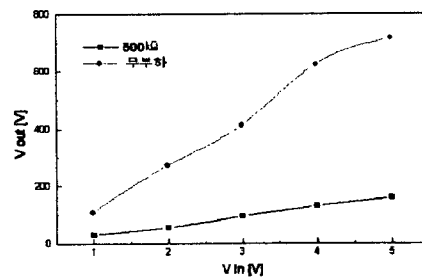
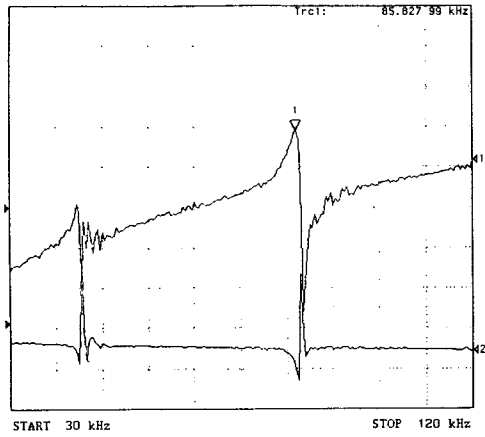
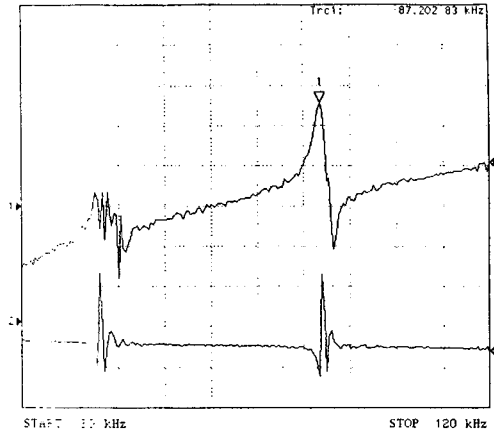


그림7. 무부하에서 입력전압에 따른 출력전압

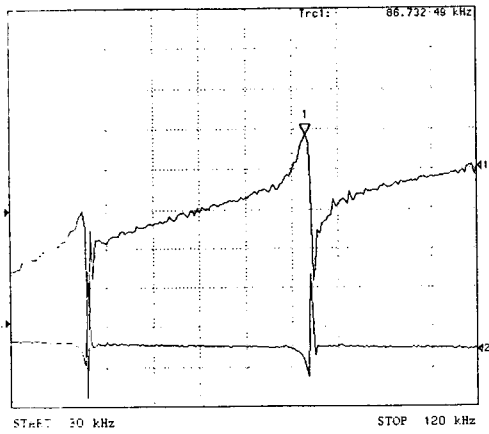
Fig.7 Output voltage according to input voltage at no load



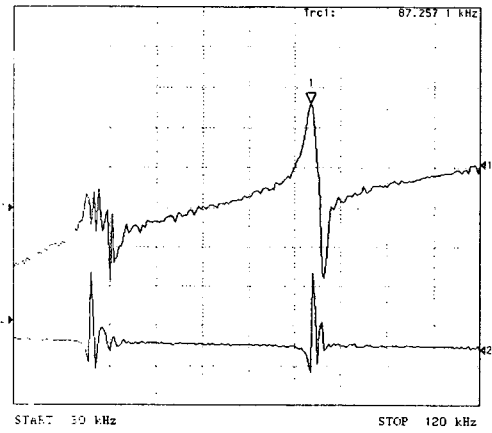
(a) 50kΩ



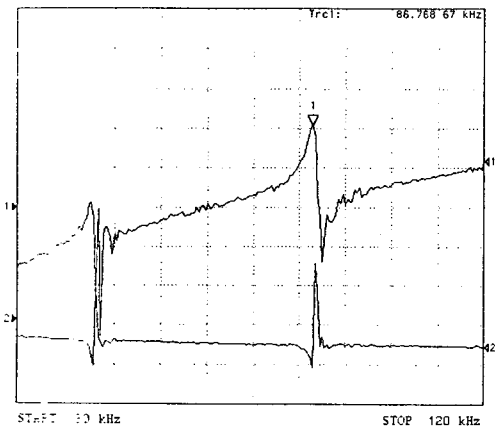
(d) 5MΩ



(b) 500kΩ



(e) 10MΩ



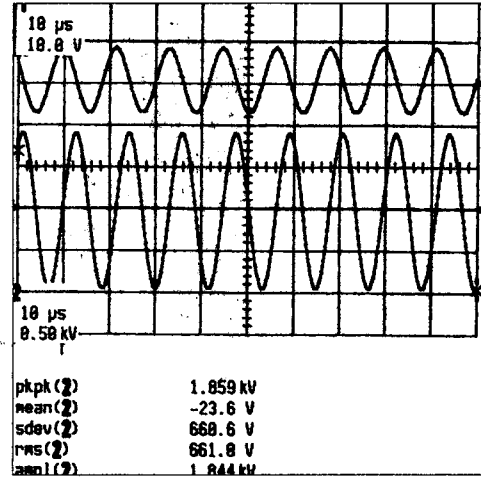
(c) 800kΩ

그림8. 주파수변화와 부하저항에 따른 전압이득
Fig.8 Voltage gain according to the variation of frequency and load resistance

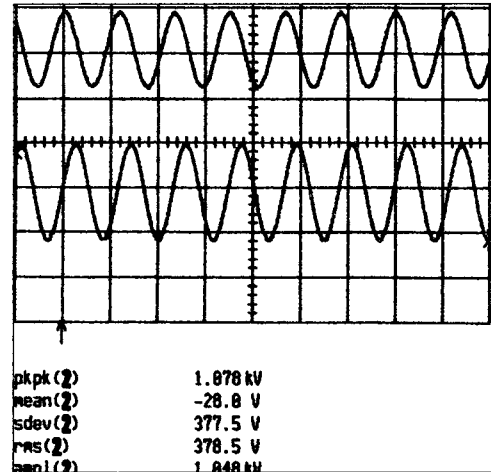
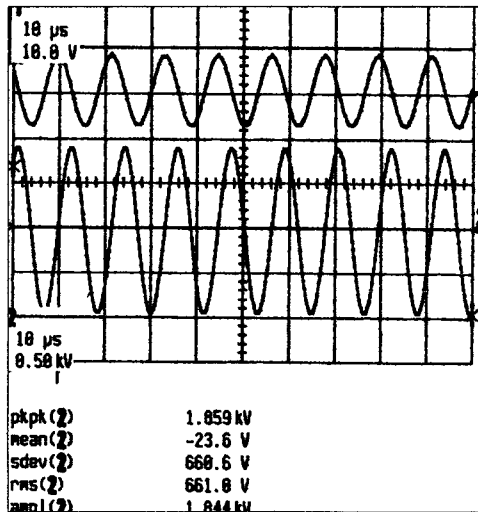
표 2 부하저항에 따른 압전트랜스포머의 공진주파수 및 승압비

Table2 Resonant frequency and step-up ratio according to load resistance

부하저항[Ω]	공진주파수[kHz]	승압비	비고
50k	85.827	1 : 8.6	
500k	86.732	1 : 31	
800k	86.768	1 : 36	
5M	87.202	1 : 75.44	
10M	87.257	1 : 111.3	



(a) 점등전 (661 Vrms)



(b) 점등후 (378 Vrms)

그림10 무부하에서의 입,출력 전압파형
Fig.10 Input and output voltage at no load

그림 9는 PT에서의 점등전, 후에 입력전압 대 출력전압 특성이다. 점등시 무부하에서는 입력전압 15 V_{P-P}(5.39V_{rms})이고, 출력전압이 1859 V_{P-P}(661 V_{rms})로 승압비가 123.9배로 가장 높았다. 점등후에는 출력전압이 1078 V_{P-P}로 전압이 down되었으며, 점등이 안정화 되었다. 이때 사용한 back light의 사양은 다음과 같다.

직경(2.6mm), 길이(140mm), 램프 구동전류(5mA), 램프전압(V_{rms}=190-465), 램프전력(0.95-2.35W)

그림9 점등 전후 입, 출력전압 파형
Fig.9 Input and output voltage before and after lighting

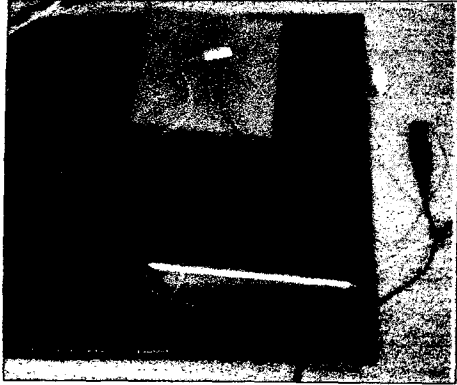


사진 2.PT(트랜스포머)를 사용한 냉음극관의 점등
 Fig 2. lighting of cold cathode fluorescent
 at transformer

4. 결 론

본 연구에서는 PMN - PZT 계에 La를 6 mol % Pb자리에 치환시키고 과잉 PbO를 3 mol% 첨가한 조성 세라믹을 산화물 혼합법으로 제조하여 압전 특성특성을 측정하였으며, 장방형 압전트랜스포머를 설계 제작하여 부하저항에 따른 승압비, 효율 및 구동주파수 및 입력전압에 따른 출력특성 및 압전트랜스포머를 이용하여 액정 display에 이용되는 Backlight 구동용 고압 전원으로서의 응용가능성을 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 시편의 압전특성을 조사한 결과, 전기기계 결합계수 ($K_p = 0.422$, $K_{31} = 0.225$) 압전 d상수 ($d_{33} = 233 \times 10^{-12}$ C/N, $d_{31} = -85.5$ C/N)를 나타내었다.
2. 시편의 구조적 특성을 조사한 결과, 정방정계(tetragonal)이었으며, 그레인 크기는 $2.65\mu\text{m}$ 이었다. 또한, 상온에서의 유전 상수는 1380으로 가장 높았으며 항전계와 큐리온도 281°C 이었다.
4. 압전 트랜스 포머의 출력전압은 부하저항 증가에 따라 점차 증가하였으며 승압비는 123.9를 나타내었다.
5. Back light를 구동하여 전압을 측정한 결과

점등전에는 661V, 점등후에는 전압이 378V가 출력되어 냉음극관에 점등이 되었다.

参考文献

1. S. Kawashima, O. ohnishi, et al "Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer and It's Application to Hugh-Voltage Power Inverter", Ultrasonics Symposium, 1994
2. 若月昇 "壓電トランスは 電源小型化の 切札になれるか?" 超音波 TECHNO 4月号, 1996
3. 和全利彦 "磁器 變壓器の 昇壓比解析方法の 考察と 並列驅動への 應用" 電氣學會論文誌 A 100 권 102 pp.555~512 昭 55~10
4. 박순태, 정수태, 이종현, "CeO₂을 첨가한 Pb(Mg, Mn, Nb) O₃-PZT계 세라믹스의 물리적 성질과 압전트랜스의 출력특성", 한국요업학회지, 30권 9호, 1993