

Rosen형 압전 트랜스포머의 집중등가회로를 사용한 승압비 및 효율 해석.

Voltage Gain and Efficiency Analysis of Piezoelectric Transformer using Lumped Constant Equivalent Circuit.

김만성, 류주현, 정희승, 박창엽, 정영호

세명대학교, 주성전문대, 연세대학교, 전력연구원

M-S Kim, J-H Yoo, H-S Jung, C-Y Park, Y-H Jung

Abstract

In this paper, The load characteristics on the voltage gain and efficiency were analyzed using an lumped constant equivalent circuit of the piezoelectric transformer. These analytical results are confirmed by experiments. Theoretical values of voltage gain were nearly constant with experimental ones. However, It was shown that theoretical values of efficiency had higher values than experimental ones.

Key Words(중요용어): Lumped Constant Equivalent Circuit(집중등가회로), Voltage Gain(전압이득), Efficiency(효율), Piezoelectric Transformer(압전 트랜스포머)

1. 서론

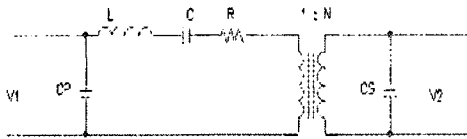
압전트랜스포머가 1950년대 말에 개발된 이래 압전트랜스포머를 TV수신기의 고압전원 등으로에 높은 전압, 전력 인버터로 적용하려고 시도하였으나 고강도, 고전력 압전재료 물질의 부족으로 그동안 응용이 어려웠다. 그러나, 최근들어 고전력 압전재료 개발에 힘입어 일본에서 종래의 Rosen형 압전트랜스포머에서 수십~수백 KHz의 공진 주파수를 갖는 압전트랜스포머가 각 연구소 및 기업체에서 개발되어 일부는 휴대용 개인 컴퓨터의 액정 display에 이용되는 backlight 구동용 고압전원으로 실용화가 되었다.[1][2] LCD는 Back Light 조명을 위해 CCFL(냉음

극관)을 사용한다. 출력전압은 점등시에 1000V 이상을 필요로하나 정상동작에서는 약 400~500Vrms로 줄어든다. 종래의 전자식 트랜스포머를 사용 할 때는 소형화나, 가격, 변환효율면에서 한계에 직면하고 있다. 더욱이 노트북PC에 사용할 때에는 슬림화가 필요한데 전자식 트랜스포머는 컴팩트화 하기가 매우 어렵다. 따라서, 높은 효율과 소형, 슬림화가 가능한 LCD Back Light 인버터로 압전트랜스포머가 응용되고 있다. 본 연구에서는 $Pb_{0.91}La_{0.06}(Mn_{0.025}Nb_{0.05})(Zr_{0.4625}Ti_{0.4625})O_3$ 계 세라믹을 제조하여 Rosen형을 개량하여 장방향으로 압전트랜스포머를 제작하고, 압전 트랜스포머의 어드미턴스 원선도를 구하여

제반 집중등가회로 정수를 구한 다음 부하저항에 따른 승압비, 효율을 계산하고, 실제로 측정하여 비교분석하고자 한다.

2. 압전 트랜스포머의 집중등가회로 해석

2.1 압전트랜스포머의 집중등가회로



$C_p=554.5\text{nF}$, $L=225.195\text{mH}$, $C=12.173\text{pF}$,
 $R=100.4\Omega$, $N=4.65$, $C_s=8.26\text{pF}$

그림 1 압전트랜스포머의 집중등가회로

Fig 1 Lumped constant equivalent circuit of PT

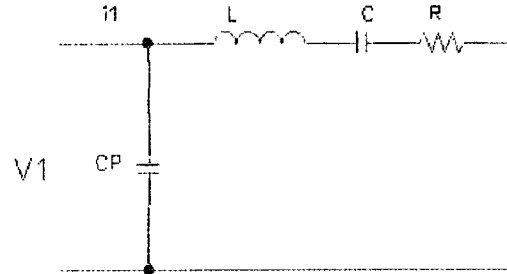
압전트랜스포머의 공진점 근처에서의 전기동가회로는 그림 1과 같다. 이 회로에서 2차측을 단락하면 다음과 같이 된다.

그림 2. 압전트랜스의 2차측을 단락할 경우의 등가 회로

Fig 2. Shortcircuiting the secondary terminals

그림 2의 등가회로에서의 어드미턴스는

$$Y(\omega) = i_1(\omega)/v_1(\omega) = G(\omega)+jB(\omega) \quad (1)$$



$$(0 < \omega < \infty)$$

이 되고, 이를 계산하면

$$Y(\omega) = j\omega C_p + \frac{j\omega C(1 - \omega^2 LC) + \omega^2 RC^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} \quad (2)$$

$\omega = \omega_0$ (공진각 주파수)에 대하여

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

공진 주파수에서의 어드미턴스는

$$Y(\omega_0) = j\omega_0 C_p + \frac{1}{R} \quad (4)$$

여기서, 어드미턴스 원선도로부터 $Y(\omega_0)$ 의 실수부와 허수부를 구하면 R과 C_p 를 구할 수 있다. 또한 어드미턴스 원선도에서 허수부의 최대, 최소점의 주파수를 고려하면 C와 L에 대한 값도 구할 수 있다.

$$C = \frac{1}{R} \frac{(\omega_H - \omega_L)}{\omega_H \omega_L} \quad (5)$$

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

또한, 같은 방법으로 압전트랜스포머의 입력측을 단락하여 어드미턴스 원선도를 구하

면 N과 Cs값도 구할 수 있다.

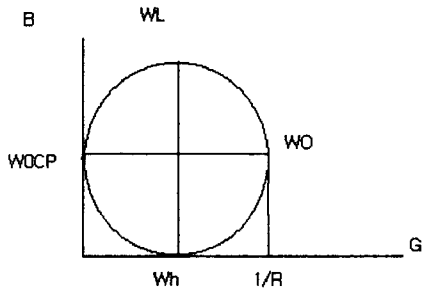


그림 3. 어드미턴스 원선도

Fig 3. Admittance circle, relevant points

2.2 압전트랜스포머의 승압비와 효율

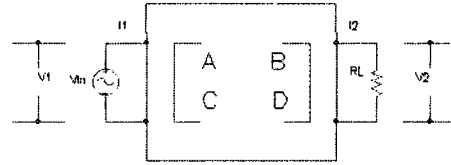
그림 4에서의 AC등가회로는 F행렬을 이용하면 계산이 용이해진다.

여기서 입력 전압 v_1 , 입력전류 i_1 , 출력전압 v_2 , 출력전류 i_2 의 심볼은 각각 V_1, I_1, V_2, I_2 로 표현한다.

그림4(a)의 F행렬 표시법은 다음과 같다.



(a) AC 등가회로



(b) F 행렬

그림 4. AC등가회로와 F행렬

Fig 4 AC equivalent circuit and F- matrix

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{--- (7)}$$

여기서, F행렬의 요소는 다음식으로 표현된다.

$$F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \text{에서}$$

$$A = \frac{1}{N} + N \left(\frac{C_s}{C} - \omega^2 LC_s + j\omega C_s R \right)$$

$$B =$$

$$j\omega \frac{C_P}{N} + Nj\omega C_s \left[\frac{C_P}{C} - \omega^2 LC_P + j\omega C_P R + 1 \right]$$

$$C = N \left(R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right)$$

$$D = M \left[\frac{C_P}{C} - \omega^2 LC_P + j\omega C_P R + 1 \right] \text{이다}$$

$$\text{-----(8)}$$

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{R_L}{AR_L + B} \right| \text{---(9)이며}$$

$$\text{입력전력은 } \therefore \text{Pin} = \text{Real} \frac{CR_L + D}{AR_L + B} |V_1|^2$$

$$\text{-----(10)이 된다.}$$

출력전력은 $P_0 = I_2^2 R_L$ 에서

$$P_0 = I_2^2 R_L = \left(\frac{I_1}{CR_L + D} \right)^2 R_L$$

$$= \frac{V_1^2}{|AR_L + B|^2} R_L \text{-----(11)이 된다.}$$

따라서, 효율은 $\eta = P_0/P_{in}$ -----(12)

3. 실험.

3-1 시편제조 및 압전특성측정.

산화물 혼합법을 사용하여 $Pb_{0.91}La_{0.06}(Mn_{0.025}Nb_{0.05})(Zr_{0.4625}Ti_{0.4625})O_3$ 계 세라믹스 소자 및 압전 트랜스포머 기판을 1200℃에서 2시간 제조 하였다. 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℃에서 10분간 열처리하여 전극을 형성시켰다. 시편의 크기는 7mm×37mm×2.25mm 이다.

표1 시편의 제특성

Table1 Characteristics of sample.

Sample No	density (g/cm ³)	curie temp [°C]	dielectric constant	Ec (kv/cm)	Pr (μc/cm ²)
S	7.47	281	1380	8.90	15.8

Kp	K31	K33	d ₃₃ [10 ⁻¹² C/N]	d ₃₁ [10 ⁻¹² C/N]	S ₁₁ ^E [10 ⁻¹² C/N]	Qm
0.422	0.225	0.64	233	85.51	10.74	529

전극 부착이 완료된 시편들은 실리콘 유속에

서 25kv/cm의 전계를 30분간 가하여 분극처리를 하여 Impedance Analyzer(HP4194A)로 공진, 반공진 주파수를 측정하여 제반 압전 특성을 측정하였다.

3-2 압전트랜스포머의 제작 및 특성측정

압전트랜스포머는 사진 1 처럼 제작하여 크기 두께 및 길이방향으로 각각 25Kv/Cm, 20Kv/Cm의 전계를 실리콘유에서 30분간 인가하여 분극처리를 하였다. 분극처리된 압전 트랜스포머는 80도에서 30분간 어닐링한후 하루 경과후에 제반 특성을 측정 하였다. 압전 트랜스포머의 송압비와 효율을 측정하기 위해 그림5의 회로를 이용하였다. 이때의 입력전류는 저항단자 10Ω의 전압을 전압계로 측정하였고, 부하저항에서의 전압은 오실로스코프(Recory)로 측정하였다. 또한 압전 트랜스포머의 집중등가회로 정수를 구하기 위하여 Impedance Analyzer(HP4194A)로 주파수변화에 따른 임피던스를 구하였으며, 또한 어드미턴스 원선도를 같이 구하였다.

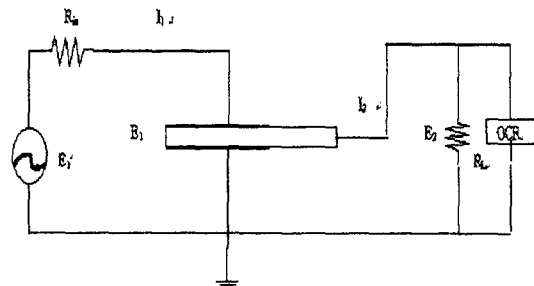


그림5. 압전트랜스포머 측정회로

Fig5. Measuring circuit for Piezoelectric transformer

4. 결과 및 고찰

압전트랜스포머는 입력부와 출력부에 각각 전극처리된 장방향 로젠형 구조가 보편적으로 널리 이용되고 있다. 입력부에 압전트랜스포머의 공진주파수를 인가하면 공진상태로 진동하게 되어 출력부에 기계적 응력에 기인한 변환 전압이 나타나게 된다. 압전트랜스포머는 $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$ 모드로 각각 진동이 가능한데 일반적으로 지지가 용이하고, 출력측 전극이 손상이 덜가는 λ 모드가 많이 이용되고 있다.

본 연구에서도 λ 모드로 진동케 하였다. 그림6은 λ 모드에서 압전트랜스포머의 출력측을 short한 상태에서 이 때의 공진주파수는 96.19KHz 이었으며, 반공진 주파수는 97.195KHz를 나타내었다.

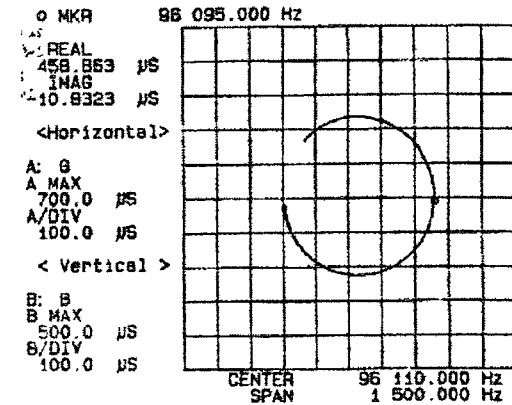
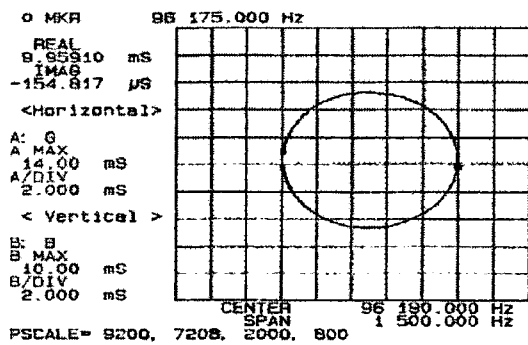
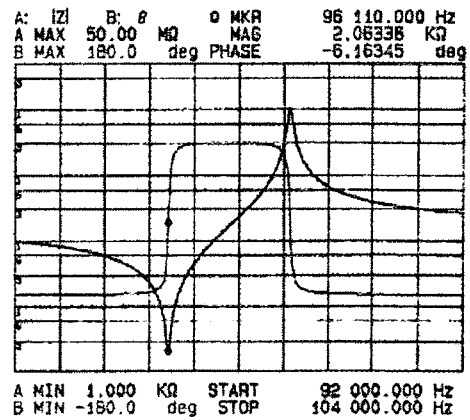
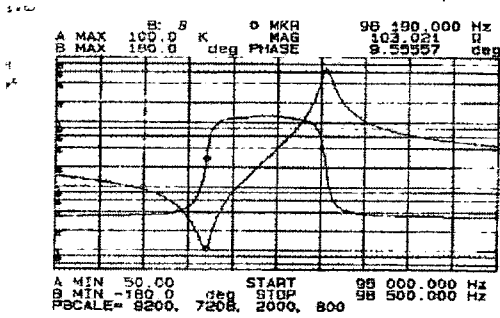


그림 6. 입력측에서 들여다본 임피던스와 원선도

Fig 6. Impedance and Admittance circle with short-circuiting the secondary terminals..

그림 7. 출력측에서 들여다본 임피던스와 원선도

Fig 7. Impedance and Admittance circle with short-circuiting the primary terminals..

또한 그림7은 압전트랜스포머의 입력측을 short한 상태에서 임피던스와 위상특성을 측정 한 결과이다. 이때의 공진주파수는 96.11KHz이었으며 반공진 주파수는

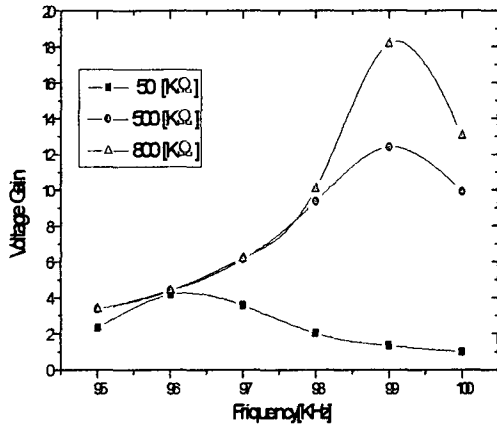


그림 8. 승압비의 이론해석.

Fig 8. Theoretical analysis of voltage gain.

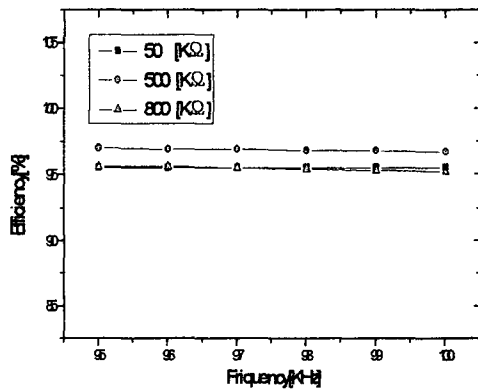
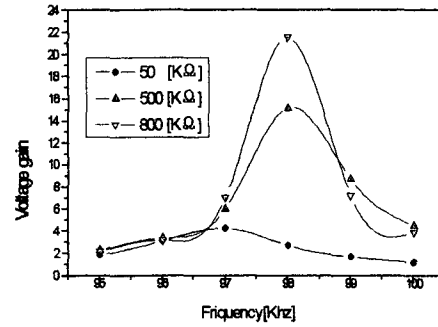
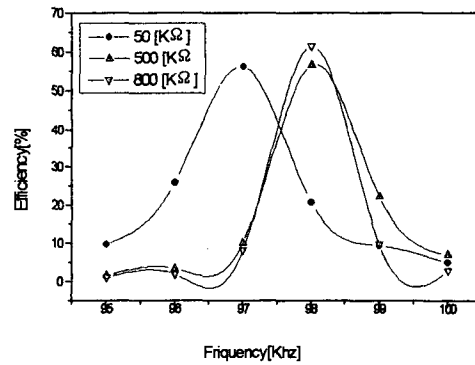


그림 9. 효율의 이론해석.

Fig 9. Theoretical analysis of efficiency
a) Voltage gain



a) Voltage gain



b)Efficiency

그림 10. 승압비와 효율의 측정치

Fig 10. Measuring values of Voltage gain and efficiency

99.350KHz를 나타내었다. 그림 7에서 입력측을 short할때의 공진저항이 2.06KΩ으로 나타났는데, 출력측에 부하저항을 달았을 때

높은 전류를 끄집어 내기 위해서는 이 저항 값을 낮출 필요가 있다.

그림 8은 Voltage gain의 이론치며, 그림 9는 효율의 이론치이다. 그림10은 측정된 결과를 나타낸 것이다. Voltage gain은 부하저항이 감소함에 따라 감소하였으며 공진주파수도 감소하는 양상을 나타내었다. 부하저항 50K Ω 일 때 주파수 96.9KHz에서 Voltage gain 3.52, 효율 56%를 나타내었으며, 500K Ω 일 때 98.08KHz에서 Voltage gain 15 효율 57%, 800K Ω 일 때 98KHz에서 Voltage gain 21.5 효율 62%를 나타내었다. LCD Back Light 구동시에 일단 점등된 후에도 부하저항이 100-500K Ω 대로 떨어지게 된다. Simulation한 결과 효율은 95% 이상을 나타내었다. 효율의 실험 결과와 이론적으로 시뮬레이션한 결과가 차이가 나는 이유는 입력측에 Cp와 직렬로 연결된 저항성분을 고려하지 않았기 때문이다. 부하저항 증가에 따라서 공진주파수는 점차 증가하였으며 승압비는 증가하였다. 공진시에는 효율이 극대가 되며 그 외 주파수에서는 손실이 증가하여 효율이 감소한다.

5. 결론

본 연구에서는 장방향으로 압전트랜스포머를 제작하여 입력 및 출력임피던스 특성 및 어드미턴스 원선도를 구하여, 제반 집중등가회로 정수를 구한다음 승압비와 효율 특성을 simulation 하였다. 측정된 결과 승압비는 이론치와 실측치가 거의 비슷한 양상을 보였으나 효율은 큰 차가 나타남을 확인하였다. 부하저항 800 K Ω 에서 공진주파수 이론치 99 KHz, 승압비는 이론치 18 효율 이론치 95% 공진주파수 실험치 98KHz, 승압비 실험치 21.5 실험치 62% 로 가장 큰 값을 나타내었

참고문헌

- 1) O.ohnishi et al., "piezoelectric Transformer operating in Thickness Extensional Vibration and it's Application to switching converter" IEEE PESC Record pp.585-595, 1994
- 2) Shoyama, Masahito et al., "Steady-state characteristics of the push-pull piezoelectric inverter" IEEE PESC Record pp.715-721, 1997
- 3) PJM Smidt and JL Duarte "Powering Nwon lamps Through Piezoelectric Transformers" IEEE PESC Record pp.310-315, 1996