The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 8. No. 1. pp. 27. 1995.

PZT계 압전변압기의 공진특성과 전기적 성질

논 문
8-1-5

Resonance Characteristics and Electrical Properties of PZT-Piezoelectric Transformer

박순태*, 정수태**, 이종현***
(Soon-Tae Park, Su-Tae Chung, Jong-Hyen Lee)

Abstract

The analysis of nonlinear equivalent circuit and the resonance characteristics of input current and output voltage were simulated, and their electrical properties are discussed in the transverse-type piezoelectric ceramic transformer. The nonlinear resonance characteristics of input current and output voltage showed by the thermal effect due to a higher driving current, the nonlinearity increased greatly as driving current increased. When load resistor was 100[MΩ], the nonlinear coefficient was -1.3. The nonlinear resonance curve of input current and output voltage for a variation of input voltage and load resistor agreed with the discussed theory. The output voltage increased nearly proportioned to input voltage when load resistors were below 50[MΩ], the voltage step-up ratio decreased when a load resistor was 100[MΩ] and their maximum value was 950.

Key Words(중요용어) : Transverse-type(장방형), Piezoelectric ceramic transformer(압전세라믹 변압기), Nonlinear resonance characteristics(비선형 공진특성), Nonlinear coefficient(비선형 계수), Voltage step-up ratio(승압비).

1. 서 론

강유전체로 만든 압전변압기는 입력부에 고유 공진주파수의 전압을 인가하면 전왜효과에 의해서 강한 기계적 진동이 일어나고, 출력부에는 압전효과로서 전하가 발생하여 교류의 고전압이 얻어진다.[1] 압전변압기는 전자장치의 소형화 추세에 따라 구조가 간단하고, 높은 승압비를 가지므로 고전압발생장치에 응용이 되고 있다.[2] 압전변압기의 이론적인 고찰은 많은 연구자들에 의해서 보고되었다.[3,8] 한편 압전세라믹변압기의 해석은 탄성진동-응력을 적용한 것[4,5]과 전기적 등가회로를 적용한 것[1,9]이 있으나, 대개 공진자의 전기적 등가회로를 적용하고 등가회로정수는 선형으로 취급하고 있다. 등가회로정수가 선형이면 공진시에 나타나는 공진특성인 전류-주파수특성은 좌우 대칭적으로 나타나며 이를 선형공진특성이라 한다. 그러나 압전세라믹변압기는 입력부의 큰 구동전류 때문에 소자의 발열현상이 크고, 이로 인하여 입력전류-주파수특성에서 좌우 비대칭성을 갖는 공진특성이 관측되기도 하였으며[5,10], 이러한 비대칭성의 공진특성을 비선형공진특성이라 한다. 비선형공진특성에 대한 이론적인 해석은 Duffing[11]이나, 소수의 단행본 등[12,13]에 의해서 일부 기술되어 있으나, 압전변압기의 이론에 적용시킨 문헌은 찾지 못했다.

본 실험에서는 기계적-전기적 열화가 적은 Pb(Mg,Te,Mn,Nb)O_3-PZT계[6]를 기본 조성으로 장방형의 압전세라믹변압기를 만들었다. 그리고 압전세라믹변압기의 전파장공진 모드에 있어서 비선형 등가회로 해석과 인가전압이나 부하저항에 대한 입력전류 및 출력전압의 공진특성에 대하여 시뮬레이션을 하였고, 이것을 실험결과와 비교하였다. 그 결과 압전세라믹변압기의 비선형공진특성은 입력부의 구동전류에 기인하며 구동전류가 클수록 비선형성이 증가함을 보였고, 압전변압기의 입출력 공진특성의 경향은 시뮬레이션 결과와 잘 부합하

* : 부산전문대학 전자과
** : 부산공업대학교 전자공학과
*** : 동아대학교 전자공학과
접수일자 : 1993년 12월 4일
심사완료 : 1994년 8월 20일

였다.

2. 비선형 등가회로 해석과 시뮬레이션

압전변압기는 입력부와 출력부로 나누어지며, 그림 1은 정류회로를 갖는 압전변압기의 4단자망 등가회로를 나타낸 것이다. 여기서, C_{01}, C_{02}는 입력단 및 출력단의 정전용량, L_0, C_0, R_0는 공진시의 등가질량(인덕턴스), 등가용량(정전용량) 및 등가기계저항(저항), ϕ는 이상변압기의 변압비, D는 다이오드, R_L은 출력단의 부하저항, C_L은 출력단의 직류전압의 크기를 평활시키는 평활콘덴서이다.

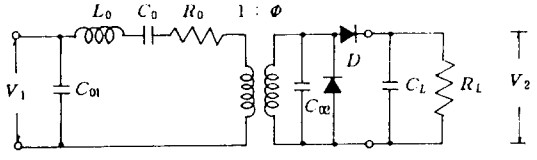

그림 1. 압전변압기의 등가회로

Fig. 1. Equivalent circuit of the piezoelectric transformer.

그림 2는 그림 1의 출력측 회로정수를 1차측으로 환산한 등가회로이다. 1차측으로 환산한 등가정수의 값은 다음과 같다. 여기서, 평활콘덴서 C_L은 정류회로를 통한 직류전원이 가해지므로 그 영향을 무시하였다.

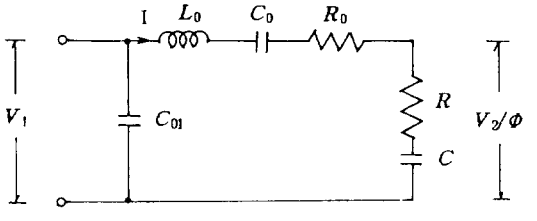

그림 2. 1차측에 환산한 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit converted to the primary-side.

$$C=(1+\frac{1}{Q^2})\phi^2 C_{02}, \quad R=\frac{R_L}{(1+Q^2)\phi^2} \qquad (1)$$

여기서, $Q=\omega \cdot C_{02} \cdot R_L$ 이고, $\omega=2 \cdot \pi \cdot f$ 이며, f[Hz]는 주파수이다.

그림 2의 등가회로에서 C_{01}에 흐르는 전류는 매우 적으므로(C_{01}은 보통 수[nF]이므로 C_0에 비해서 적은 값)무시하면 회로의 전류는 다음과 같다.

$$I=\frac{V_1^{\bullet}}{\sqrt{(R_0+R)^2+(\omega L_0-\frac{1}{\omega C_s})^2}} \qquad (2)$$

여기서, C_s는 C_{02}와 C가 직렬로 연결된 합성정전용량이다.

한편 Nosek[12]은 공진자의 등가회로에서 등가회로정수가 입력전류의 제곱에 영향을 받는다고 가정하여 비선형적인 해석을 하였다. 본 논문에서는 이론을 보다 간편하게 하기위하여 공진자의 등가회로에서 정전용량 C_0의 값만 입력전류 I^2에 관계한다고 가정하면 공진자의 등가정전용량은 다음식과 같다.

$$C_0'=\frac{C_0}{(1+\beta I^2)} \qquad (3)$$

여기서, β는 등가정전용량의 입력전류에 의존하는 계수라 하고, 이를 비선형계수라 한다. 식 (3)은 β의 값에 따라 등가정전용량은 다르다. 즉 $\beta>0$ 이면 입력전류의 증가에 대하여 정전용량은 감소하고, $\beta<0$ 이면 정전용량은 증가한다. 따라서 식 (4)의 C_0'를 고려한 등가회로의 합성정전용량 C_s'는 다음과 같다.

$$C_s'=\frac{C_0' \cdot C}{C_0'+C}=\frac{C_0 \cdot C}{C_0+C(1+\beta I^2)} \qquad (4)$$

한편 공진이 일어나면 식 (2)와 같이 회로의 리액턴스 성분은 다음식과 같다.

$$\omega L_0-\frac{1}{\omega C_s}=0 \qquad (5)$$

식 (5)에 식 (4)를 대입하여 공진주파수($\omega/2\pi$)를 구하면 다음과 같다.

$$f_r=f_{r0}\sqrt{\frac{C_0}{C}(1+\beta I^2)} \qquad (6)$$

여기서, $f_{r0}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}}$ 이다.

식 (6)으로 부터 비선형계수 β의 값에 따른 공진시의 입력전류(공진전류)의 제곱에 대한 규격화시킨 공진주파수(f_r/f_{r0})를 나타낸 것이 그림 3이다. $\beta=0$의 경우에는 공진전류가 증가하더라도 공진주파수가 변화하지 않았다. 그러나 $\beta>0$인 경우에는

공진전류의 증가에 따라 공진주파수가 증가하였고, $\beta<0$인 경우에는 공진주파수가 감소함을 보였다. 그러므로 공진전류의 증가에 대한 공진주파수의 변화를 조사하면 비선형계수 β의 범위(정 또는 부)를 알 수 있고, 또한 공진전류의 제곱에 대한 공진주파수의 기울기를 계산하면 비선형계수 β의 값을 알 수 있다.

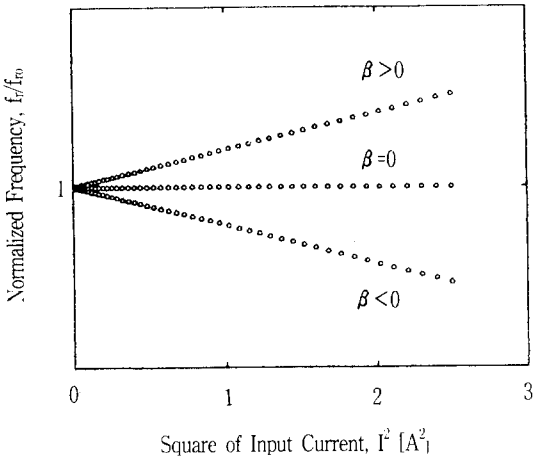

그림 3. 입력전류의 제곱에 대한 규격화 시킨 공진주파수

Fig. 3. f_r/f_{r0} vs. I^2.

그리고 비선형계수 β를 갖는 압전변압기 공진자의 주파수에 대한 입력전류를 유도해 보자. 식 (2)의 C_s 대신에 식 (4)의 C_s'를 대입하여 입력전류의 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$BI^6-2B(X_0-\frac{1}{\omega C})I^4 +[\ (R_0+R)^2+(X_0-\frac{1}{\omega C})^2]\ I^2=V_1^2 \quad (7)$$

여기서, $B=\frac{\beta}{\omega C_0}$, $X_0=\omega L_0-\frac{1}{\omega C_0}$ 이다.

식 (7)은 압전변압기의 등가회로에서 등가정전용량이 비선형임을 전제로 한 전류방정식이다. 이 식은 등가회로의 정수 및 비선형계수 β의 값이 주어질 때, 주파수 변화에 대한 전류의 해를 구할 수 있다. 이 방정식은 중근인 3개의 근을 갖는 6차방정식이다. 물리계에서 실제로 측정되는 량은 양의 실수근이므로 식 (6)의 근에서 양의 실근을 취하여 주파수에 대한 전류의 궤적(공진특성곡선)을 그리면 된다. 그림 4는 식 (7)로 부터 비선형계수 β의 변화에 대한 입력전류의 공진특성을 나타낸 것이다. 그림에서 $\beta=0$ 일 때는 입력전류곡선은 주파수의 증가 또는 감소에 대하여 차이가 없지만 (선형), $\beta\neq$일 때는 차이가 있다(비선형). 즉 $\beta>0$에서는 오른쪽으로 기울어 지고, $\beta<0$에서는 왼쪽으로 기울어 진다. 그림 4에서 $\beta>0$인 경우에 주파수를 증가시키면 P에서 P_a', P_c'로 전류가 증가하고, ω_c'인 주파수에서는 P_c'에서 Q_c'로 급격히 전류가 감소하여 그 이후로는 주파수의 증가에 대하여 Q부분을 따라 전류가 감소한다. 역으로 주파수를 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 감소시키면 처음 Q부분을 따라 Q_c', Q_a'로, 다시 P_a'로 급격히 증가한 후, 그 이후는 주파수의 감소에 따라 P부분을 따라 서서히 전류가 감소한다. 즉 ω_a'와 ω_c' 사이의 주파수 범위에서는 히스테리시스현상이 나타남을 알 수 있다. 또한 $\beta<0$ 인 경우 주파수의 변화에 대한 전류의 변화를 보면, 주파수 증가시 P→Q_a→P_a→Q_c'→Q, 그리고 주파수 감소시는 Q→Q_c'→P_c→Q_c→P로 변화한다.

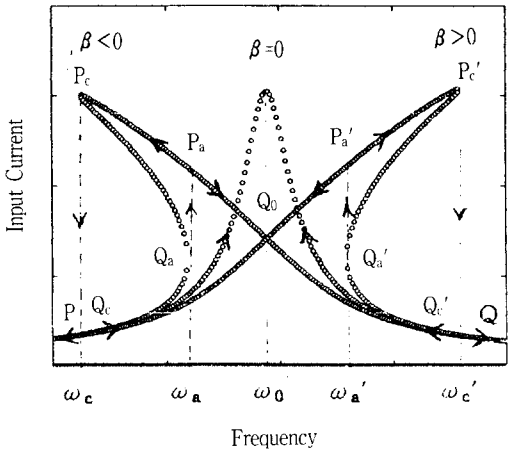

그림 4. 비선형계수(β)의 변화에 대한 입력전류의 공진특성.

Fig. 4. Resonance characteristics of input current as a function of nonlinear coefficient(β).

그림 5는 $\beta<0$ 인 경우에 β의 크기에 대한 입력전류의 공진특성을 나타낸 것이다. 그림에서 β의 절대값이 증가함에 따라 곡선의 비선형정도가 증가하였으나, 공진시의 최대전류는 변화하지 않고 공진시의 주파수는 감소하였다. 또한 주파수의 상승과 하강에 대한 주파수의 히스테리시스폭은 증가함을 보였다. 그림 6은 $\beta<0$ 인 경우에 입력전압의 변화에 대한 입력전류의 공진특성을 나타낸 것이다. 입력전압이 낮은 경우에는 공진특성이 선형에 가까운 곡선이었다. 그러나 입력전압이 증가

함에 따라 비선형성은 증가함을 보였고, 공진주파수 역시 감소하였다. 공진주파수를 증가시켰을 때와 하강시켰을 때의 전류궤적은 주파수에 대한 히스테리시스 현상이 증가함을 보였다. 따라서 그림 4, 5, 6의 시뮬레이션 결과에서 공진특성의 비선형 현상은 비선형계수 β의 크기나 공진회로에 흐르는 전류의 크기에 좌우함을 알 수 있다. 이러한 비선형 공진곡선은 2차계 비선형진동을 다룬 Duffing모델의 결과와 잘 일치하고 있다.[11]

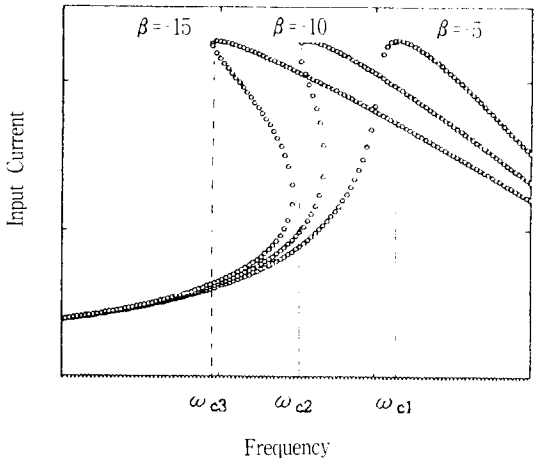

그림 5. 입력전류의 공진특성($\beta<0$)

Fig. 5. Resonance characteristics of input current as a function of nonlinear coefficient($\beta<0$).

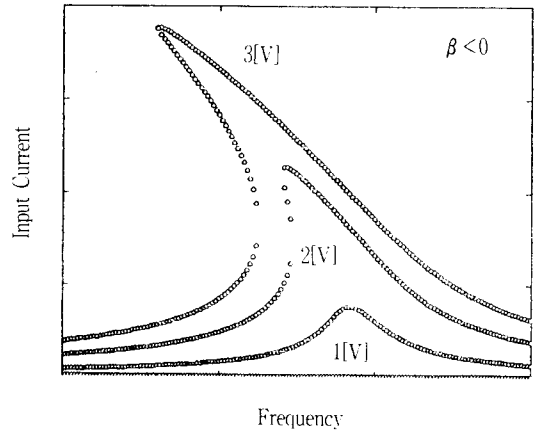

그림 6. 입력전압에 대한 입력전류의 공진특성($\beta<0$).

Fig. 6. Resonance characteristics of input current as a function of input voltage($\beta<0$).

한편 압전변압기의 부하저항에 대한 입력전류의 공진특성을 나타낸 것이 그림 7이다. 그림 7에서 부하저항이 약 1[MΩ]일 때에는 공진전류가 가장 낮음을 보였고, 그 이하의 부하저항이나 그 이상의 부하저항에서는 공진전류가 증가함을 보였다.

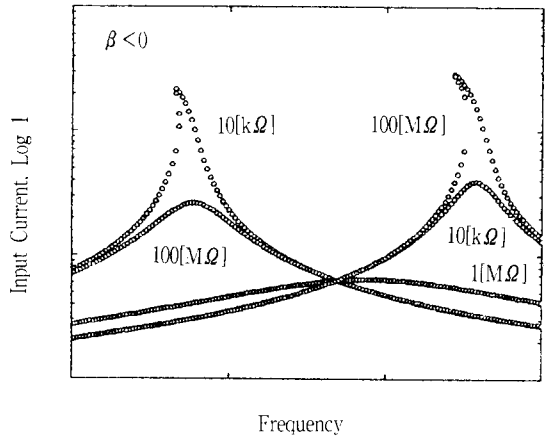

그림 7. 부하저항에 대한 입력전류의 공진특성.

Fig. 7. Resonance characteristics of input current as a function of load resistor.

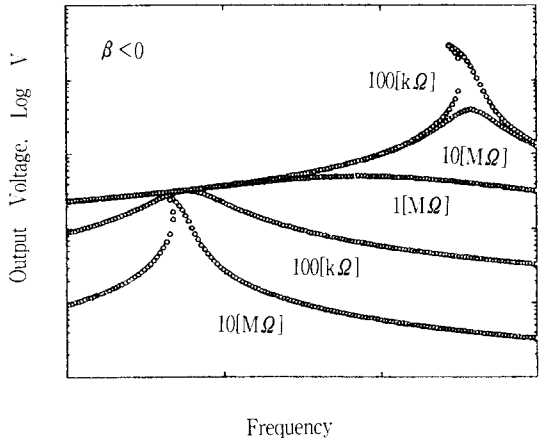

그림 8. 출력전압의 공진특성.

Fig. 8. Resonance characteristics of output voltage as a function of load resistor.

또한 식 (8)의 해에서 구한 전류값으로 부터 출력단의 전압을 구하면 다음과 같다.

$$V_2 = IR\sqrt{R^2+(\frac{1}{\omega C})^2} \qquad (8)$$

그림 8은 식 (8)에 의한 출력전압의 공진특성을 나타낸 것이다. 출력전압의 공진곡선은 그림 7의

공진곡선과 비슷한 형태를 가졌으나, 부하저항이 증가함에 따라 공진시의 최대 출력전압은 증가함을 보였다.

3. 실 험

소자의 기본조성은 $Pb[(Mg_{1/3}Te_{1/3})_{0.025}(Mn_{1/3}N_{2/3})_{0.075}Zr_{0.45}Ti_{0.45}]O_3$이고, 제조공정은 본 저자의 문헌에 보고되어 있다.[6] 표 1은 본 실험에 사용한 재료의 압전특성을 나타낸 것이다(분극처리 전계 20[kV/cm]). 압전세라믹변압기는 막대형으로 소결한 시료를 절단하여 $32\times6\times1[mm^3]$의 크기를 갖는 장방형으로 하였고, 구동부의 길이와 발전부의 길이를 동일한 구조로 하여 각각 은전극을 붙여 20[kV/cm]의 전계로 분극처리 하였다. 그림 9는 압전세라믹변압기의 구조와 정류회로를 포함한 측정회로이다. 공진특성 및 전기적 특성은 부하저항과 입력전압을 실험에 적합한 값으로 유지하고 함수발생기의 주파수를 미세하게 상승 또는 하강시켜 가면서 입력전류 또는 출력전압의 값을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 10은 부하저항이 100[MΩ]일 때 입력전압에 대한 압력전류의 공진특성을 나타낸 것이다. 입력전압이 1[V]에서는 주파수를 상승시켰을 때나, 하강시켰을 때에 전류의 값에는 변화가 적은 선형에 가까운 공진특성을 나타내었다. 그러나 입력전압이 증가함에 따라서 주파수를 상승시켰을 때와 하강시켰을 때에 공진전류의 값에 차이가 있고, 공진곡선의 형태가 크게 비선형적으로 보였다. 이러한 공진특성의 형태는 그림 5의 $\beta<0$의 경우와 같았다.

한편 그림 10에서 압전변압기의 인가전압에 따라 공진주파수(ω_r)와 공진시의 전류값이 다름을 보였다. 그러므로 인가전압에 대한 공진특성으로부터 그림 3과 같이 공진전류의 제곱에 대한 공진

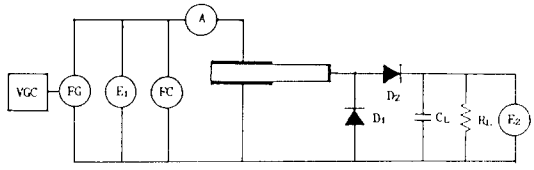

그림 9. 정류회로를 포함한 압전변압기의 측정회로.

Fig. 9. Measuring circuits of piezoelectric transformer with rectifying circuits.

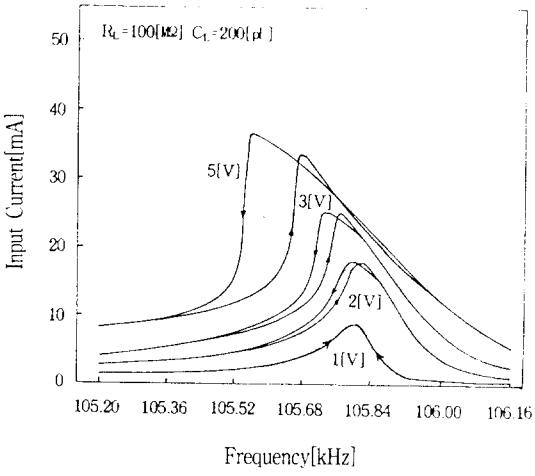

그림 10. 입력전류의 공진특성(R_L=100[mΩ]).

Fig. 10. Resonance characteristics of input current as a function of input voltage (R_L=100[MΩ]).

주파수의 곡선의 기울기를 구하면, 비선형계수 β의 값을 알 수 있다. 그림 11은 부하저항을 100[MΩ]으로 하였을 때의 공진전류의 제곱에 대한 f_r/f_{r0}를 나타낸 것이다. 구동전류가 약 [10mA]까지는 기울기가 0이었고, 약 10[mA]~30[mA]까지는 기울기가 일정(-)하였으나, 그 이상의 전류값에서는 기울기가 크게 증가하였다. 그림에서 비선형계수 β의 값은 구동전류가 약 10[mA]~30[mA]범위에서 약 -1.3을 나타내었다. 그러므로 압전변압기의 소자는 β의 값이 부(-)를 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 보아 비선형현상은 입력전류에 의한 열적요인에 의해서 나타남을 알 수

표 1. 시편의 압전상수.

Table 1. Piezoelectric constants of sample.

Poling field kV/cm	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	T_c ℃	k_p	Q_m	k_{31}	s_{11}^E 10^{-12} m^2/N	d_{31} 10^{-12} m/V	g_{31} 10^{-3} Vm/N	k_{33}	s_{33}^E 10^{-12} m^2/N	d_{33} 10^{-12} m/V	g_{33} 10^{-3} Vm/N
20	810.0	325	0.48	2140	0.29	12.3	-86.1	-12.0	0.57	12.60	171.6	23.9

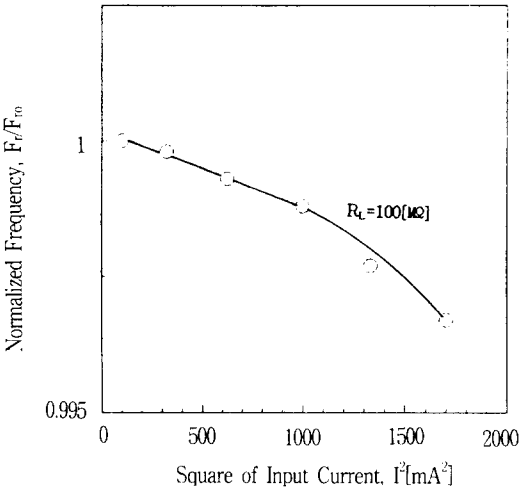

그림 11. 공진전류의 제곱에 대한 규격화시킨 공진주파수.(R_L=100[MΩ]).

Fig. 11. f_r/f_{ro} vs. I^2.(R_L=100[MΩ]).

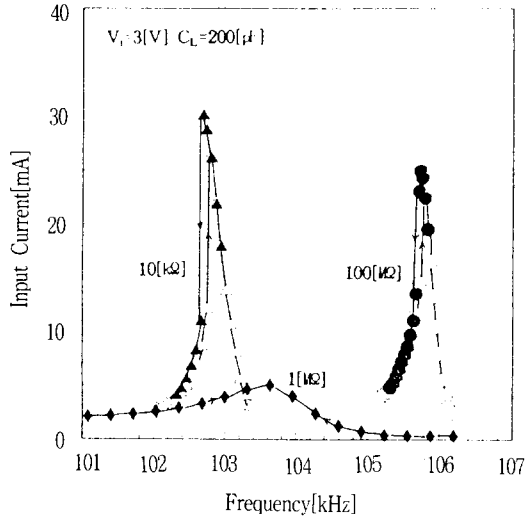

그림 12. 부하저항에 대한 입력전류의 주파수특성 (V_i=3V)

Fig. 12. Frequency characteristics of input current as a function of load resistor. (V_i=3V)

있다.

그림 12는 입력전압 3[V]일때 부하저항에 대한 입력전류의 주파수특성을 나타낸 것이다. 그림 7의 시뮬레이션한 결과와 비슷하게 부하저항이 10[kΩ]이나 100[MΩ]에서는 압력전류의 값이 크고 비선형공진특성을 나타내었으나, 부하저항이 1[MΩ]에서는 입력전류의 값이 작고 선형경향을 보였다. 1[MΩ]에서 입력전류가 작은 이유는 和田 등[9]의 결과와 일치하고 또한 전술한 압전변압기의 이론식과 잘 부합됨을 알 수 있다. 그림 12의 결과에서 압전변압기는 부하가 높은 경우나 낮은 경우에 유입하는 전류가 크기 때문에 과도한 열적 효과에 의해서 압전변압기의 특성이 저하될 우려가 있다.

그림 13은 부하저항에 대한 출력전압의 공진특성을 나타낸 것이다. 이때 입력인가전압은 4[V]로 하였다. 주파수의 변화에 대한 출력전압곡선의 형태는 그림 8과 같은 공진특성을 보였으나, 그 전압값은 부하저항이 증가함에 따라 증가함을 보였고, 그림 8의 시뮬레이션한 결과와 거의 일치함을 나타내었다. 그리고 그림 11, 12 및 13에서 입력전압의 변화나 부하저항의 변화에 따라 압전변압기의 공진주파수가 크게 변화하므로 압전변압기용 구동회로는 출력측의 전압을 피이드 백 시켜서 공진주파수를 안정화시킨 발진기가 필요하다.

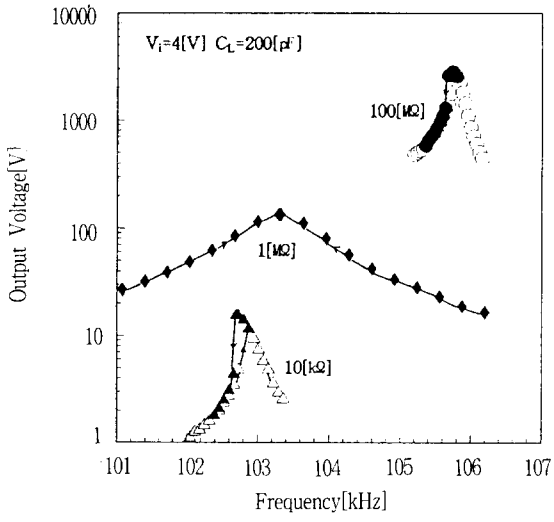

그림 13. 부하저항에 대한 출력전압의 공진특성 (V_i=4V).

Fig. 13. Resonance characteristics of output voltage as a function of load resistor. (V_i=4V)

그림 14는 입력전압에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. 여기서 최대출력전압은 공진주파수를 가변시켜 얻은 수치이고, 점선은 식 (7)에 의한 이론값을 표시한 것이다. 부하저항이 50[MΩ]이하에서 출력전압은 입력전압이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나 부하저항이 100[MΩ]일 때 입력전압이 증가함에 따라 출력전압의 증가율이 감소되었으며 그 이유는 다음과 같다. 압전변압기

의 입력전압을 증가시키면 출력전압이 어느정도 이상의 전압에 이르면 소자의 온도가 급격히 증가함이 보고 되었고[2], 또한 높은 출력전압에 의해서 시편이 고전계의 스트레스를 받아 기계적 품질계수가 감소함이 보고되었다.[14] 그러므로 압전세라믹스변압기에 큰 에너지(큰 구동전류와 높은 전압)를 가하면 재료의 피로현상이 증가하고, 이로인한 기계적 품질계수가 저하하여 출력전압의 증가가 감소된다고 생각된다.

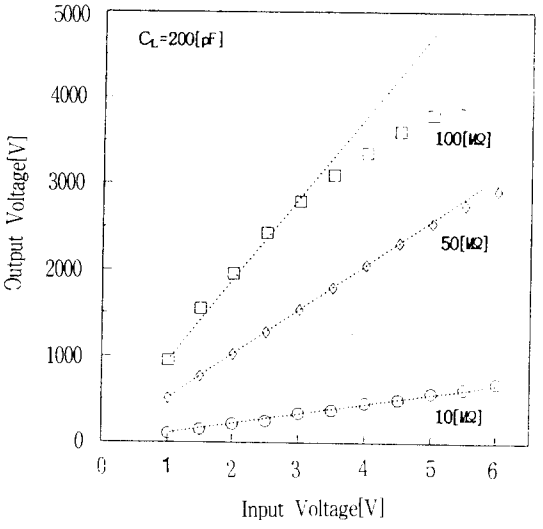

그림 14. 입력전압에 대한 출력전압.
Fig. 14. Output voltage vs. input voltage.

5. 결 론

강유전성 세라믹의 전왜-압전효과를 이용한 PZT계 압전세라믹변압기의 입력전압 및 부하저항의 변화에 대한 공진특성과 출력전압을 조사한 결과 다음과 같다.

1. 주파수에 대한 입력전류 및 출력전압의 비선형 공진특성은 구동전류에 기인하는 열적 요소에 의해서 나타나고, 그 현상은 구동전류가 증가함에 따라 증가함을 보였다. 이때 부하저항이 100[MΩ]의 경우 비선형계수 β의 값은 약 -1.3(구동전류가 약 10[mA]~30[mA])이었다.
2. 부하저항이 10[kΩ]이나 100[MΩ]인 경우에는 공진시 구동전류는 큰 값을 나타내었고, 입력전류의 공진곡선이 비선형을 보였으나, 부하저항이 1[MΩ]에서는 전류값이 작고, 공진곡선은 선형특성과 비슷하였다. 그러나 출력전압은 부하저항의 증가에 따라 증가함을 보였다.
3. 입력전압에 대한 출력전압은 부하저항이 50[MΩ]이하에서는 거의 직선적으로 증가하였으나, 부하저항이 100[MΩ]에서는 그 증가율이 둔화되었고, 이때 최대 승압비는 약 950이었다.

REFERENCES

1. H. W. Katz, "Solid State Magnetic and Dielectric Devices", John Wiley & Sons, INC., New York, pp. 170-197, 1959.
2. 電子材料工業會, "壓電セラミックスとその應用", 電波新聞社, pp. 159-175, 1974.
3. C. A. Rosen, "Ceramic Transformer and Filters", Proc. Electronic Comp. Symp., pp. 205-211, 1956.
4. P. A. Van Berkum, J. C. Sinclair and K. Raney, "High Voltage Ceramic Transformers", IRE Trans., BTR-81, pp. 22-35, 1962.
5. 要 祐一, 伊勢悠紀彦, "壓電セラミックトランス用素子の一考察" 日本音響學會誌, vol. 32, no. 8, pp. 470-479, 1976.
6. 박순태, 정수태, 이종헌, "CeO_2을 첨가한 Pb(Mg,Te,Mn,Nb)O_3-PZT계 세라믹스의 물리적 성질과 압전트랜스의 출력특성", 한국요업학회지, vol. 30, no. 9, pp. 761-767, 1993.
7. Li Long Tu, Yao Yi Jin and Mu Zhen Han, "Piezoelectric Ceramic Transformer", Ferroelectrics, vol. 28, pp. 403-406, 1980.
8. A. X. Kuang, L. Y. Chai, G. H. Hu, S. N. Pan and T. S. Zhou, "Piezoelectric Ceramic Transformer High Voltage Power Supply", IEEE, Int. Symp. Appl. Ferroelectric., 6th, pp. 689-692, 1986.
9. 和田利彦, 萩原速史, 三枝武男, "磁器變壓器の基礎特性の三領域表現法とひずみ波驅動", 電氣學會論文誌 A, vol. 104, no. 4, pp. 7-14, 1984.
10. 電子材料工業會,"壓電セラミックスとその應用", 電波新聞社, 日本, 東京, pp. 38-41, 1974.
11. 戶田盛和, "振動論", 培風館, 日本, 東京, pp. 56-81, 1968.
12. J. Zelenka, "Piezoelectric Resonators and their Applications", Elsevier, Amsterdam, pp. 174-181, 1986.
13. H. W. Katz, "Solid State Magnetic and Dielectric Devices", John Wiley & Sons, New York, pp. 163-168, 1959.
14. J. H. Belding and M. G. McLaren, "Behavior

of Modified Lead Zirconate-Lead Titanate Piezoelectric Ceramics under High Electric Fields", Ceram. Bull., vol. 49, no. 12, pp. 1025-1029, 1970.

저자소개

박순태

1950년 3월 21일생. 1973년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업. 1980년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과(석사). 1994년 8월 동아대학교 대학원 전자공학과(박사학위 취득예정). 현재 부산전문대학 전자과 부교수.

정수태

1949년 3월 3일생. 1973년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업. 1978년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과(석사). 1985년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(박사). 1988년 1월- 1989년 1월 일본 방위대학교 Post-Doc. 현재 부산공업대학교 전자공학과 교수.

이종헌

1933년 12월 25일생. 1960년 3월 동아대학교 물리학과 졸업. 현재 동아대학교 전자공학과 교수.