

적층압전변압기의 전기적 특성

논문
9-2-2

Electrical Properties of Multilayer Piezoelectric Transformer

정수태*, 조상희**

(Su-Tae Chung and Sang-Hee Cho)

Abstract

A multilayer piezoelectric transformer (MPT) which generates a high voltage dc power with low driving voltage and high voltage setup ratio was made by the tape casting method. The measured electrical characteristics of the MPT agreed with the results simulated from the equivalent circuit of the MPT. With increasing the number of layer in the MPT, the resonance curve of the input current revealed an asymmetry due to the increasing input capacitance, while that of output dc voltages revealed symmetry. The MPT which has very thin layer was excellently characterized as low driving voltage and high voltage setup ratio. The output dc voltage is nonlinearly influenced by the number of layer in the MPT.

key words(중요용어) : multilayer piezoelectric transformer(적층압전변압기), high voltage dc power(직류 고전압), low driving voltage(낮은 구동전압), high voltage setup ratio(높은 승압비).

1. 서론

고전압직류발생소자로 사용되는 압전(세라믹)변압기는 승압비가 높고, 구조가 간단하므로 정전집진기, 음이온발생기, 전자복사기, 레이저 등의 전원에 응용되고 있으며^{1,2)}, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다³⁻⁷⁾. 그러나 이 소자는 출력용량이 적은 것이 문제였는데, 압전변압기소자를 병렬운전한 결과 출력전압 및 용량이 증가함을 齊藤 등⁸⁾이 보고하였다. 이것은 압전변압기의 적층화의 가능성을 제시한 것이라 생각한다. 적층세라믹소자는 낮은 전압동작에 적합할 뿐만아니라 소형화에도 그 기여도가 크다. 이러한 이유로 tape casting 방법으로 제조한 적층압전변압기는 단일층보다도 승압비(출력전압/입력전압)가 매우 큼이 보고되었고⁹⁾, 또한 적층수가 많을 수록 승압비가 증가하며, 낮은 입력전압에 의해서도 승압비가 약 9000정도의 높은 승압비를 갖는 적층변압기가 보고되기도 하였다¹⁰⁾. 따라서 압전변압기의 적층화는

고전압발생소자로 매우 바람직하다. 한편 Rosen형 압전변압기는 전기적 등가회로와 압전상수 및 등가정수의 관계가 비교적 명확하게 정립되어 있으나^{1,11,12)}, 적층압전변압기에 대한 이론적 정립은 부족하다고 생각한다. 본 실험에서는 단일층 압전변압기의 등가회로정수를 적층압전변압기에 적용시켜 공진특성과 승압비에 대한 이론식을 검토하고 simulation하였다. 그리고 Rosen형구조를 갖는 적층압전변압기를 제작한후, 전기적특성을 조사하여 이론식과 비교 검토하였다.

2. 이론과 simulation

4단자망으로 나타낸 압전변압기의 등가회로는 그림1과 같다. 여기서 C_1 , C_2 는 입력측 및 출력측의 정전용량이고, L_m , C_m , R_m 은 공진이 일어날 때의 등가인덕턴스, 등가정전용량 및 등가저항이다. 또한 n 은 변압비이고, R_l 은 출력단의 부하저항이다. 그리고 V_1 , V_2 는 입력측 및 출력측의 전압이다.

그림1의 등가회로에서 i_1 은 입력측 전류이고, 그 크기는 I_1 이며 위상각 θ 는 다음과 같이 요약된다.

* : 부산공업대학교 전자공학과
** : 경북대학교 무기재료공학과
접수일자 : 1995년 11월 16일
심사완료 : 1996년 1월 13일

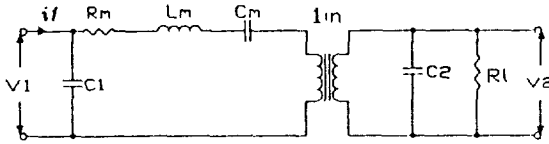


그림 1. 압전변압기의 등가회로.

Fig. 1. Equivalent circuit of piezoelectric transformer.

$$i_1 = \left[\frac{R}{R^2 + X^2} + j\left(\omega C_1 - \frac{X}{R^2 + X^2}\right) \right] V_1 \quad (1)$$

$$I_1 = V_1 \sqrt{\left(\frac{R}{R^2 + X^2}\right)^2 + \left(\omega C_1 - \frac{X}{R^2 + X^2}\right)^2} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega C_1(R^2 + X^2) - X}{R} \quad (3)$$

여기서

$$R = R_m + \frac{R_l/n^2}{1 + (\omega C_2 R_l)^2}, \quad (4)$$

$$X = \omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} - \frac{\omega C_2 R_l^2/n^2}{1 + (\omega C_2 R_l)^2}$$

이다. 그리고 입력측 전압에 대한 출력측 전압의 승압비를 구하면 식(5)와 같다.

$$G = V_2/V_1 = \frac{R_l/n}{\sqrt{(R^2 + X^2)[1 + (\omega C_2 R_l)^2]}} \quad (5)$$

한편 압전진동자의 길이가 2L이고, 소자내의 음속을 c라고 하면 공진주파수 f(반파장공진주파수)는 다음과 같다.

$$f = \frac{c}{4L} \quad (6)$$

식(6)에서 소자의 음속 c는 보통 PZT계 세라믹스의 경우 약 3000 - 3500 [m/s] 정도이며, 공진자의 길이가 일정하면 공진주파수가 일정하게 된다. 적층형압전세라믹에 있어서도 소자의 길이는 일정하고 단지 소자의 두께만 변한다. 그러므로 공진주파수는 단일층의 소자와 거의 같음을 알 수 있다. 그리고 공진자의 등가회로에서 공진주파수는 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \quad (7)$$

따라서 식(6)과 식(7)의 주파수는 동일하므로, 적층형소자의 경우에도 등가회로정수인 인덕턴스 L_m 과 정전용량 C_m 의 곱은 항상 일정해야 한다. 즉 인덕

턴스가 1/k배이면 정전용량은 k배이어야 한다. 또한 공진시의 등가저항은 소자의 전극면적에 반비례하고 두께에 비례하므로¹³⁾, 적층의 수를 k라 하면 적층소자의 등가저항은 단일층소자의 1/k배가 된다. 이러한 관계는 압전변압기의 병렬구동에 대한 齋藤 등⁸⁾의 보고와 비슷한 결과이다. 그러므로 적층수 k인 압전변압기에 있어서 등가회로정수는 표1과 같이 생각할 수 있다. 그러므로 적층압전변압기에 대한 이론식은 단일층의 이론식(1)-(5)에 표1의 값들을 대입하여 구할 수 있다.

표 1. 단일 및 적층압전변압기의 물리적상수.
Table 1. Property constants of single and multilayer piezoelectric transformer.

number of layers	single	k layers
resonance frequency	f	f
input capacitor	C_1	$k C_1$
output capacitor	C_2	$k C_2$
equivalent resistor	R_m	R_m / k
equivalent capacitor	C_m	$k C_m$
equivalent inductor	L_m	L_m / k

적층압전변압기의 전기적특성을 simulation하기 위하여 이론식(1)-(5)에서 C_1, C_2, R_m, C_m, L_m 대신에 $k C_1, k C_2, R_m/k, k C_m, L_m/k$ 을 각각 치환하였다. 그리고 실험에 나타난 수치와 simulation에 의한 결과의 차이를 최소화 시키기 위하여 표2와 같은 회로정수를 사용하였다. 여기서 각 정수값들중 R_m, L_m, C_m 은 0.5[V]을 인가하였을 때 전류의 공진특성으로 부터 계산한 값이다.

표 2. 압전변압기의 등가회로상수

Table 2. Equivalent circuit constants of piezoelectric transformer.

C_1 [nF]	C_2 [pF]	R_m [Ω]	L_m [mH]	C_m [pF]	n	R_l [M Ω]
1	2	90	74	90	5	100

그림2는 인가전압을 1 [V]로 하고, 적층수(k= 1, 3, 5층)를 변화시켰을 때, 주파수에 대한 입력전류, 위상 및 출력전압의 공진특성을 나타낸 것이다. 입력전류는 적층수의 증가에 따라 거의 비례적으로 증가하였다(그림2-a). 입력전압에 대한 입력전류의 위상각은 공진 및 반공진주파수의 약 1/2인 지점에서 좌우 대칭을 나타내었으며, 적층수가 증가할수록 대칭중심점의 위상은 -90° 쪽으로 이동하였다(그림2-b). 일반적으로 2차 선형계의 위상각은

공진주파수를 중심으로 90° 에서 -90° 로 점대칭을 나타내지만, 압전공진자에는 공진 및 반공진이 존재하기 때문에 그림과 같이 위상각은 90° 에서 -90° 로 되었다가 다시 $+90^\circ$ 가 된다. 이점이 바

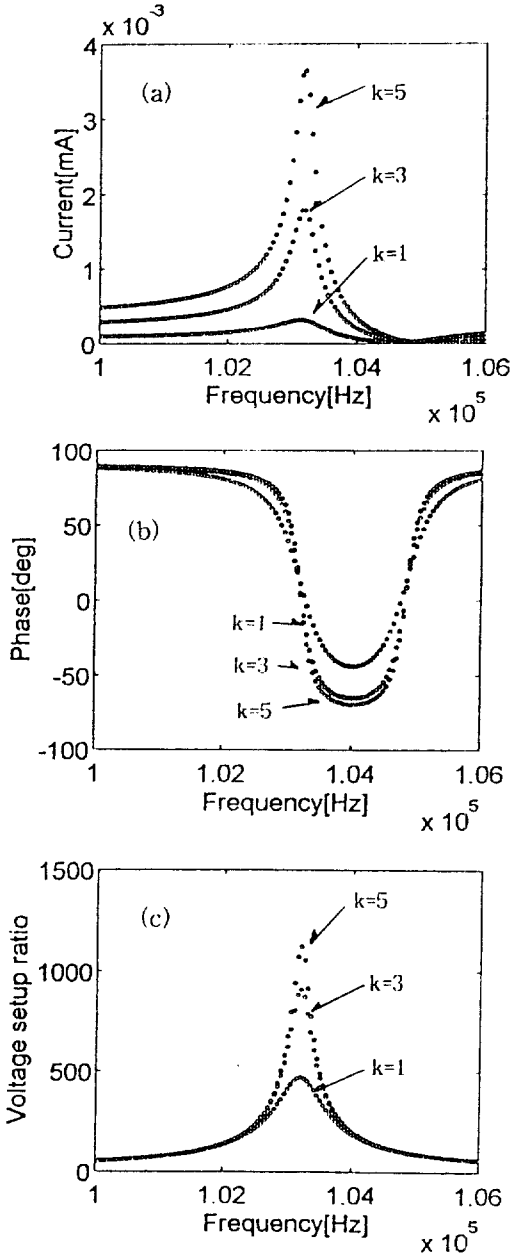


그림 2. 적층수에 따른 주파수특성, (a) 입력전류, (b) 위상, (c) 승압비

Fig. 2. Frequency characteristics as a function of the number of layers. (a) input current, (b) phase, (c) voltage setup ratio (V_{dc}/V_{rms}).

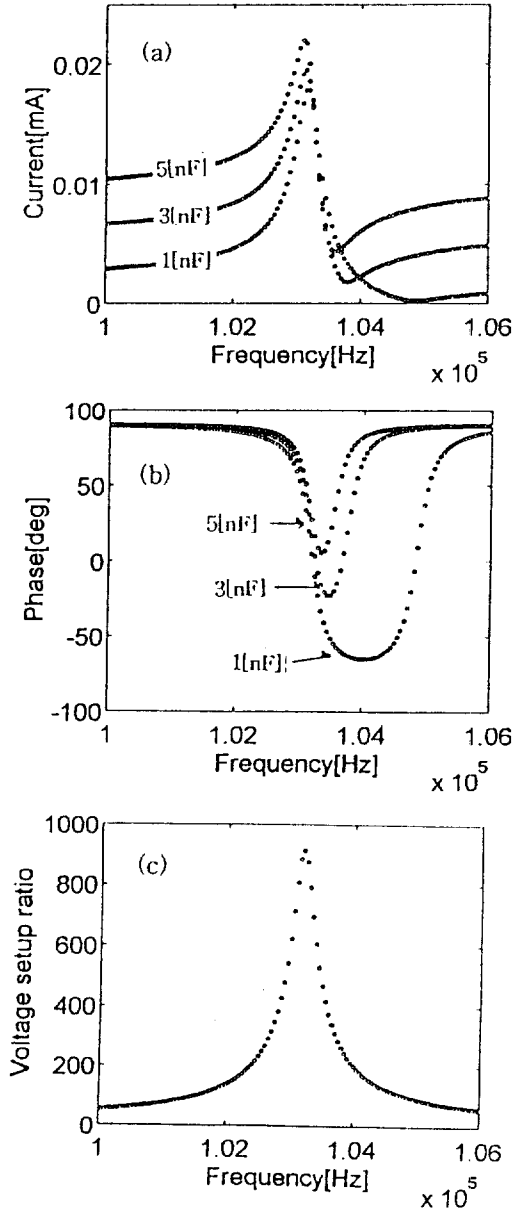


그림 3. 입력정전용량에 따른 주파수특성, (a) 입력전류, (b) 위상, (c) 승압비.

Fig. 3. Frequency characteristics as a function of input capacitance.

(a) input current, (b) phase, (c) voltage setup ratio (V_{dc}/V_{rms}).

로 압전공진자의 특징이다. 그리고 승압비는 적층수가 증가함에 따라 증가하였으나, 적층수에 비례하지는 않고 그 증가정도는 감소하였다(그림2-c).

한편 적층형압전변압기의 경우에는 얇은 green sheet을 적층으로 하기 때문에 green sheet의 두께에 따라서 입력부의 정전용량이 다르다(평행판 시료의 정전용량은 전극의 넓이에 비례하고 두께에 반비례한다). 만일 층간의 두께가 얇으면, 입력부의 정전용량 C_1 은 다소 큰 값을 가지게 된다. 그러므로 입력부의 정전용량 C_1 의 변화에 대한 공진특성을 나타낸 것이 그림3이다. 여기서 다른 정수의 값은 변화시키지 않았다. C_1 의 값이 증가함에 따라 공진주파수를 중심으로 입력전류의 공진특성이 비대칭으로 나타났으며, 공진전의 전류는 증가한 반면에 공진후의 전류는 조금 감소하였으며, 반공진 이후의 전류는 오히려 증가하였다(그림3-a). 또한 C_1 의 값이 증가함에 따라 공진과 반공진주파수의 폭이 감소하였으며, 위상각의 대칭중심이 되는 주파수는 공진주파수로 접근하고 그때의 위상은 점점 낮아져 90° 쪽으로 이동하였다(그림3-b). 그러나 승압비는 C_1 의 값에 관계없이 거의 좌우 대칭이고, 일정하였다(그림3-c).

3. 실험

3.1. 적층압전변압기의 제작

압전변압기용 재료는 압전상수 및 기계적품질계수가 크고, 강력한 진동과 고전압발생에 대하여 기계적 및 전기적 열화가 적은 $Pb[(Mg_{1/2} Te_{1/2})_{0.025} (Mn_{1/3} Nb_{2/3})_{0.075} Zr_{0.45} Ti_{0.45}]O_3$ 을 기본조성으로 하였고⁷⁾, ABO_3 구조의 B site에 해당하는 산화물을 반응시킨(950°C, 3시간)후에 PbO을 혼합하는 방법을 이용하였다. 이 분말을 하소처리(750°C에서 2시간 유지)하고, glass frit(조성: 0.857PbO - 0.143WO₃)을 3wt%의 무게비로 혼합한(혼합시간 16시간) 후 건조하였다. 이것을 slurry용 세라믹분말로 사용하였다. 적층세라믹용 slurry의 조성은 표3과 같다. 표3에서 solvent는 trichloroethylene (60wt%), tetrachloroethylene(17wt%), n-butyl alcohol(23wt%)의 혼합물을 사용하였다¹⁴⁾. 그의 결합제, 가소제 및 분산제 등의 함량은 적층세라믹스에 관한 몇가지 문헌으로 부터 선별한 값이다¹⁵⁻¹⁷⁾

균일한 slurry을 얻기 위한 제조공정은 다음과 같다. 직경 10[mm] 인 ZrO₂ 볼을 담은 polyethylene 용기에 PZT분말, 용매 및 분산제를 넣고 24시간 혼합한 후에 결합제와 가소제를 넣어 또 다시 24시간 혼합하였다¹⁸⁾. 이 slurry을 진공중에서 배기시켜 기포를 제거함과 동시에 적당량의 용매를 휘발시켜 뉴토니안유체가 되도록 점도를 유지시켰다. 이 slurry을 SiO₂가 코팅된 폴리에틸

표 3. PZT slurry의 조성.

Table 3. Composition of PZT slurry

Component	Role	Fraction [wt%]
PZT	ceramic	89.0
poly vinyl butyral	binder	6.0
polyethylen glycol 400	plasticizer	2.0
dibutyl phthalate	plasticizer	2.0
glycerol triolete	deflocculant	1.0
solvent		proper quantity

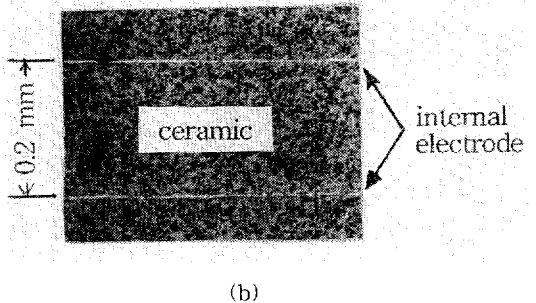
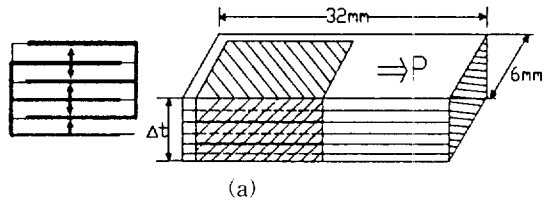


그림 4. 적층압전변압기의 단면과 구조. (a) 구조, (b) 내부전극의 단면.

Fig. 4. Structure and cross section of multilayer piezoelectric transformer. (a) structure, (b) section of MPT with internal electrode.

표 4. sheet시료의 압전상수.

Table. 4. Piezoelectric constants of sheet sample.

ϵ_{33}	k_{31}	S_{11}^E [m ² /N]	d_{31} [m/V]	g_{31} [Vm/N]	Q_m
882	0.29	11.2×10^{-12}	85×10^{-12}	11.1×10^{-3}	1322

렌 필름위에 doctor blade방법으로 tape casting하여 green sheet을 얻었다. 이때 green sheet의 두께는 약 0.25 mm였다. 이 green sheet 위에 그림 4(a)와 같은 형태로 전극(70wt% Ag - 30wt% Pd)을 인쇄하여 건조시켰다. 이것을 폭 8[mm], 길이 40[mm]로 자르고 소정의 층수로 적층시켰다.

(적층의 수가 홀수이던 짝수이던 관계가 없으나, 외부전극을 용이하게 설치하기 위해서는 홀수층이 바람직하다). 적층시킨 시료에서 결합제 및 가소제 등의 유기물을 제거하기 위하여 약 550[°C]의 온도에서 24시간 열처리 하였다. 이 시료를 950[°C]에서 3시간 소결하였다. 이때 전기로의 온도상승은 시간당 100[°C]로 하였으며, 열처리 및 소결시 시료의 굽힘을 방지하기 위하여 MgO판 위에 시편을 놓고 그 위에 또 다른 MgO판으로 압력이 가해지도록 포개었다. 소결된 시료는 green sheet의 두께에 비하여 약 80%의 수축률을 보였고 소결이 양호하였으며, 그림4(b)는 그 단면사진을 나타낸 것으로 적층된 시편의 층간 두께는 약 0.2 mm였다. 적층시료에 외부 전극을 만들고, 약 15 [kV/cm]의 전계로서 두께 및 길이방향으로 각각 분극처리하였다. 참고로 doctor blade 방법으로 만든 길이방향시료(23.3 x 3.85 x 0.37 mm³)에 대한 압전상수(분극처리전계: 30[kV/cm])를 나타낸 것이 표4와 같다.

3.2. 측정

압전변압기의 진동형태는 기본공진(반파장) 및 전파장공진이 있는데, 승압비가 높은 전파장공진형태에 대하여 전기적특성을 조사하였다. 그림5는 압전변압기의 전기적특성을 측정하는 회로이다. 입력전원은 함수발생기를 사용하였으며, 주파수의 변화는 VGC기능을 이용하였다. 출력전압은 그림과 같이 2배전압 정류회로를 구성하였다. 공진특성은 X-Y기록계를 사용하여 측정하였으며, 입력전압 또는 입력전류에 대한 출력전압은 부하저항과 입력전압을 각각 실험에 적합한 값으로 유지하고, 공진점의 주파수에서 출력전압의 값을 측정하였다.

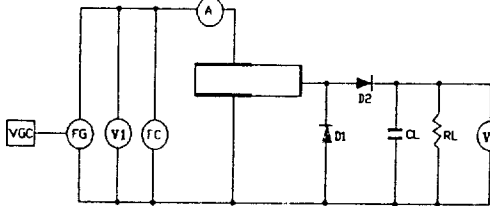


그림 5. 정류회로를 포함한 압전변압기의 측정회로.

Fig. 5. Measuring circuits of piezoelectric transformer with rectifying circuit.

4. 결과 및 고찰

압전변압기의 출력전압은 입력전류 및 동작주파

수의 의존성을 갖고 있으며, 이것이 압전변압기의 가장 주요한 특징중의 하나이다. 그러므로 소자에 관한 전기적특성중에 입력전류 및 출력전압의 주파수 특성은 매우 중요하다. 그림6은 3층소자에 대하여 입력전압을 변화시켰을 때 입력전류 및 출력전압의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 입력전류는 공진주파수에 가까이 갈 수록 전류가 서서히 증가하다가 공진주파수에서 최대값을 나타내고 그 이상의 주파수에서는 급격히 감소하다가 증가함을 보였다. 그리고 입력전류는 공진주파수를 중심으로 비대칭성을 나타내었다. 일반적으로 선형계에 있어서 공진진류특성은 공진주파수를 중심으로 대칭적이다. 그러나 본 시료의 경우에 공진진류특성이 비대칭인 이유는 압전변압기의 simulation 결과(그림3. 참조)에서 본 바와 같이 적층으로 인하여 입력부의 정전용량의 값이 증가하였기 때문이다. 또한 입력전류의 비대칭성은 공급전압이 증가함에 따라 더욱 더 커졌다. 그러나 공진주파수를 중심으로 입력전류가 비대칭임에도 불구하고 출력부에 나타나는 전압은 거의 대칭성을 보였다. 이러한 이유는 다음과 같다. 그림1의 등가회로에서 입력전류는 직렬공진요소와 입력부의 입력정전용량으로 나누어 진다. 그러나 출력전압은 직렬공진시에 흐르는 공진전류에 의해서만 나타나므로, 이 직렬공진회로의 등가요소들이 열적요인등으로 그 값의 변화가 없다고 가정하면 선형적인 공진특성(공진주파수를 중심으로 좌우 대칭임)을 갖기 때문이다¹⁹⁾. 그러므로 출력전압은 입력정전용량의 크기에 관계없이 대칭적인 공진특성을 갖게된다. 한편 입력전압의 증가에 대하여 입력전류가 증가하고, 공진시에 출력전압은 입력전류에 거의 비례적으로 증가함을 보였다. 즉 압전변압기의 출력전압은 소자에 인가되는 전류에 의한 힘이 출력부에 전달되며, 이로 인하여 출력부에는 압전효과에 의한 전압이 유기된다. 따라서 출력전압은 유입되는 전류가 클 수록 출력전압이 증가됨을 알 수 있다. 그러나 입력부에 흐르는 전류가 어느정도 큼에도 불구하고 출력전압이 적게 나타났다. 박동²⁰⁾의 논문에 의하면 단일층 압전변압기(소자의 규격 및 부하조건이 본 실험의 소자와 비슷함)에서 입력전압 1[V]을 인가하였을 때 입력전류는 약 10[mA]임에도 출력전압은 약 1000[V]정도로 나타났다. 반면에 본실험의 그림6에서는 입력전류가 약 10 [mA]의 경우에 출력전압이 약 500[V]에 불과하였다. 이러한 차이는 재료의 종류나 분극처리전계(본 시료는 분극처리전계가 15 [kV/cm]임) 등에도 영향이 있지만, 적층형소자의 입력정전용량이 크기

때문에 그것으로 인한 입력전류가 증가하였고, 또한 적층구조상 비압전부분(구동부에 전극이 없는 부분)이 존재하기 때문에 에너지 전달효율이 다소 감소하였다고 생각한다.

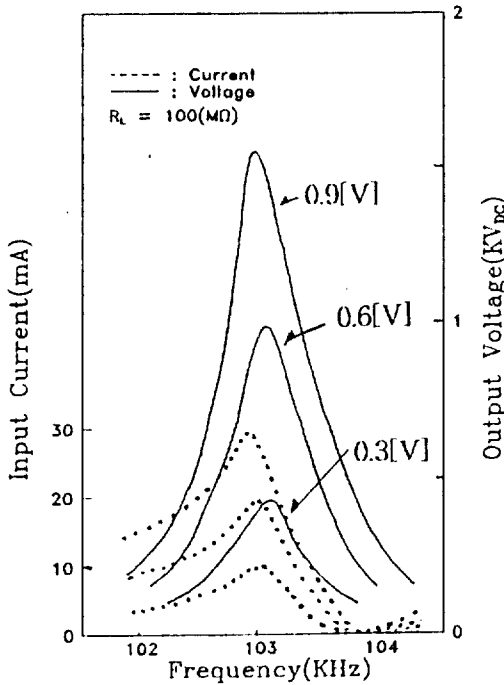


그림 6. 인가전압에 따른 입력전류와 출력직류전압의 주파수특성.

Fig. 6. Frequency characteristics of input current and output dc voltage as a function of applied voltage.

그림7은 부하저항이 100[MΩ]일 때 적층의 수가 각기 다른 소자에 대하여 공진시의 입력전압에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. 비교적 낮은 전압에서는 입력전압의 증가에 대해서 출력전압은 거의 선형적으로 증가하였으나, 입력전압이 높아짐에 따라 그 증가 정도는 감소하였다. 이는 출력전압의 증가로 인하여 시료의 압전상수가 저하하기 때문이다⁷⁾. 그리고 적층의 수가 증가함에 따라 출력전압은 증가하였으나, 그 적층의 수에 비례적으로 증가하지 않았으며, 승압비에 있어서 정도의 차이는 있지만 전술한 이론식의 simulation 결과에 어느정도 부합하였다. 적층의 수가 3일 때는 승압비가 약 1710이고, 5층은 2130 그리고 7층은 2390 정도를 나타내었다. 이러한 승압비는 박 등²⁰⁾이 연구한 단일층 압전변압기(승압비: 950)와 비교해 볼 때 본 실험의 재료가 압전상수 및 기계적품질계수가 다

소 적음에도 불구하고 높은 값을 나타내었다. 적층형소자가 높은 승압비를 갖는 이유는 다음과 같다. 즉 압전변압기의 승압비는 등가회로에 의해서 $G = (4/\pi^2)Q_m k_{31} k_{33}(L/T)$ 로 표현된다²⁾. 여기서 압전상수가 비슷한 경우에는 승압비는 소자의 길이(L)에 비례하고 두께(T)에 반비례한다. 따라서 적층형소자는 얇은 green sheet을 사용하였기 때문에 그 두께가 약 0.2[mm]로 얇으므로(단일층소자의 경우²⁰⁾: 두께가 약 1[mm]임) 승압비가 증가하였다. 그러므로 적층형 소자는 중간 두께가 얇기 때문에 적은 입력전압으로도 구동이 가능하고, 적층의 수가 증가할 수록 높은 출력전압을 얻을 수 있다.

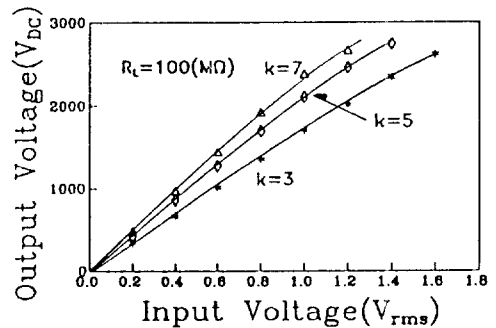


그림 7. 입력교류전압에 대한 출력직류전압.

Fig. 7. Output dc voltage vs input ac voltage.

그림8은 3층시료에서 부하저항의 변화에 대한 입력측의 임피던스와 위상곡선이다. 부하저항이 1[MΩ]에서 100[MΩ]로 증가함에 따라 공진주파수는 증가하였다. 그리고 부하의 증가에 따라 공진시의 임피던스는 낮은 값으로 감소하였고, 반공진시의 임피던스는 높은 값으로 증가하였으며, 공진과 반공진주파수 사이에 나타나는 위상차는 +90° 쪽으로 이동함을 보였다.(그림8(b)의 위상곡선과 그림2(b) 및 그림3(b)의 위상곡선과 반대인 이유: 그림8(b)의 경우는 임피던스에 대한 위상이고, 그림2(b) 및 그림3(b)는 전류의 위상을 나타내었기 때문이다). 이것은 부하저항이 1[MΩ]에서 100[MΩ]로 증가함에 따라 공진전류가 증가되어 출력전압이 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 압전변압기의 이론식에서도 잘 부합한다.

그림9는 3층의 시료에 있어서 부하저항에 대한 승압비와 효율을 나타낸 것이다. 부하저항이 1[MΩ]에서 100[MΩ]로 증가함에 따라 승압비는 증가한 반면에 효율은 감소함을 보였고, 부하저항이 100[MΩ]일 때 승압비는 약 1700이고, 효율은 약 55 %를

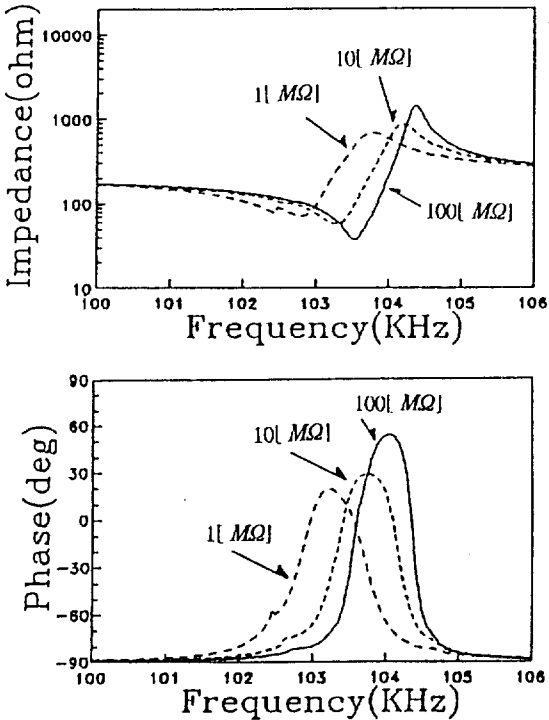


그림 8. 부하저항에 따른 임피던스와 위상의 주파수특성 (a)임피던스, (b)위상.

Fig. 8. Impedance and phase vs frequency as a function of load resistor. (a) impedance, (b) phase

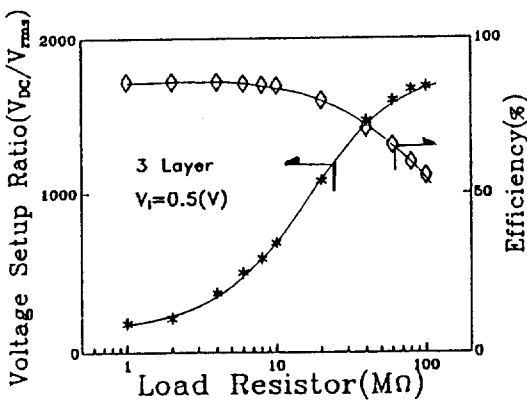


그림 9. 부하저항에 따른 승압비와 효율.
Fig. 9. Voltage setup ratio and efficiency vs load resistor.

나타내었다. 부하저항에 대한 승압비와 효율의 경향은 단일층의 압전변압기특성과 비슷함을 보였다 (8, 12)

5. 결 론

tape casting 방법을 이용하여 Rosen형의 PZT계 적층압전변압기소자를 제작하였고, 전파장공진모드에서 적층소자의 전기적특성은 압전변압기의 등가회로로부터 simulation결과와 비교적 잘 부합하였으며, 단일층압전변압기의 전기적특성과 다른 점을 요약하면 다음과 같다.

1. 공진특성에서 주파수에 대한 입력전류의 비대칭성은 적층으로 인하여 입력부의 정전용량이 증가하였기 때문이며, 입력전류가 비대칭성임에도 불구하고 출력전압은 거의 대칭성을 나타내었다.
2. 적층형 소자는 층간 두께가 얇으므로 적은 입력전압으로도 구동이 가능할 뿐만 아니라 승압비가 높았다. 그리고 적층수가 증가할수록 높은 출력전압을 얻을 수 있으나, 적층수에 비례적으로 출력전압이 증가하지는 않았다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구된 것으로, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. H. W. Katz; Solid State Magnetic and Dielectric Devices, John Wiley & Sons, INC., 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. 土屋英俊, “強誘電性磁器を使用せる磁器變壓器”, 電氣學會雜誌, 81(871), pp.603-609, 1961.
4. P.A.VanBerkum, J.C.Sinolair and K.Raney, “High Voltage Ceramic Transformers”, IRE Trans., BTR-81, pp.22-35, 1962.
5. Li Long Tu, Yao Yi Jin and Mu Zhen Han, “Piezoelectric Ceramic Transformer”, Ferroelectrics, Vol. 28, pp.403-406, 1980.
6. A. X. Knang, et al; “Piezoelectric Ceramic Transformer High Voltage Power supply”, IEEE, Int. Symp. Appl. Ferroelectric., 6th, pp. 689-692, 1986.
7. 박순태, 정수태, 이종현, “CeO₂을 첨가한 Pb(Mg, Te, Mn, Nb) O₃-PZT계 세라믹스의 물리적 성질

- 과 압전트랜스의 출력특성”, 한국요업학회지, 30권 9호, pp.761-767, 1993.
8. 齊藤健一,和田利彦, “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(10), pp.17-24, 1980.
 9. J. A. Mangels, Forming of ceramics, Advance in ceramics Vol.9, The American Ceramic Society, Inc., pp.124-126, 1984.
 10. Li Long Tu, et al, “Lead Zirconate Titanate Ceramics and Monolithic Piezoelectric Transformer of Low Firing Temperature”, Ferroelectrics, Vol.101, pp.193-200, 1990.
 11. 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, 32(8), pp. 470-479, 1976.
 12. 和田利彦, 萩原述史, 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, 104(4), pp.7-14, 1984.
 13. J. Zelenka, Piezoelectric Resonators and their Applications, Elsevier, pp.147-154, 1986.
 14. B. Y. Ryu, M. Takahashi and S. Suzuki, “Effect of Added Organicss on Mechanical Properties of Alumina Green Sheets Prepared by Doctor Blade Method”, Journal of the Ceramic Society of Japan, 100(4), pp. 422-425, 1992.
 15. K. S. Etre, “Method of Producing Multilayer Transferable Castings”, U.S. patent 3,574,029, (1971).
 16. T. Ueyama, H. Wada and N. Kaneko, “Advanced Manufacturing Process of Dielectric Ceramic Green Sheet”, Ferroelectrics, Vol.68, pp.207-214, 1986.
 17. T. Ueyama, H. Wada and N. Kaneko, “Pulverization and Dispersion Technique for Agglomerated Particles of Alumina Powder in a Slurry”, J. Am. Cerm. Soc. 71(2), C74 - C77, 1988.
 18. D. J. Shanefield and R. E. Mistler, “Fine Grained Alumina Substrates : 1, the Manufacturing Process”, Ceramic Bulletin, 53(5), pp.416-420, 1974.
 19. 정수태, 조상희, “장방형 PZT 세라믹 공진자의 비선형공진특성”, 한국요업학회지, 31권 10호, pp.1133-1140, 1994.
 20. 박순태, 정수태, 이종헌, “PZT계 압전변압기의 공진특성과 전기적 성질”, 전기전자재료학회지, Vol.8, No. 1, pp.27-34, 1995.

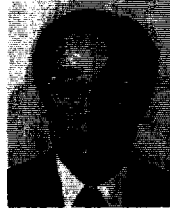
저자소개

정수태



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

조상희



1941년 8월 21일생. 1965년 한양대 화공과 졸업. 1975년 일본 KEIO대 대학원 응용화학과 (석사). 1978년 일본 KEIO대 대학원 응용화학과 (박사). 현재 경북대학교 공대 무기재료공학과 교수 및 한국과학재단지정 재료정보센터 소장