

二重層 壓電變壓器의 特性

韓 得 永
(建國大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 서 언
- 2. 2중층 압전변압기의 등가회로
- 3. 2중층 압전변압기의 특성
 - 3.1 전압비
 - 3.2 전류비
 - 3.3 공진주파수
 - 3.4 입력임피던스
- 4. 결론
- 참고문헌

1 서 언

압전변압기는 일반적으로 전자기현상을 이용하는 변압기와는 달리 전기적 입력에너지를 압전현상의 역효과에 의하여 기계적 진동에너지로 변환시킨 후, 그 기계적 진동에너지를 압전현상의 정효과에 의하여 다시 전기적 출력에너지로 변환시키는 장치로서, 유전체인 압전진동자를 사용하므로 취급전류가 적고, 그 진동자의 기계적 공진현상을 이용하므로 주파수대역이 좁다는 단점이 있으나, 구조가 간단하고 소형이며 전기적 손실이 적다는 장점이 있어서, 특히 고전압소전류원을 필요로 하는 음극선관, 음이온발생기, 집진기, 전자복사기 등에 응용되고 있으며¹⁾, 최근에는 다른 분야에도 그 응용이 시도되고 있다.^{2),3)}

더우기 적층형 압전변압기는, 기존의 압전변압기 중에서 가장 많이 쓰이고 있는 Rosen형(또는 transverse형) 압전변압기에 비하여 부하저항의 변동에 대하여 전압비가 안정적이고, 제작이 용이하며 기계적으로 강한 장점들이 있어서 그 응용이 기대되고 있다.⁴⁾

이러한 적층형 압전변압기는 사용된 압전진동자의 형상에 따라서 원판형과 사각형, 사용된 진동

자의 적층수에 따라서 2중층형과 다중층형 등으로 구분할 수 있고, 또 2중층형은 다시 진동자의 전극을 분할한 수에 따라 단전극형과 다전극형으로 구분할 수 있으며, 다중층형과 다전극형은 임·출력 단자의 연결방법에 따라 승압비를 가변할 수 있는 특징이 있다.

여기에서 기술하려는 압전변압기는 위에서 언급한 여러종류 중에서 가장 기본적이고 간단한 형태로서, BaTiO₃나 PZT 등의 재료로 만든 원판형 압전진동자의 두께, 반경, 탄성정수, 압전정수 등이 각각 서로 같은 두개의 진동자를, 진동자/얇은 절연판/진동자의 순으로 적층하고, 그 진동자의 하나에 입력전원을 연결하고 나머지 하나의 진동자에서 출력을 인출하는 2중층 단전극형 압전변압기이다.

2 2중층 압전변압기의 등가회로

그림 1과 같이 전극이 양면에 부착되어 있고, 그 면적이 A 이며, 반경 r 이 두께 t 보다 훨씬 큰 원판형 압전진동자를, 그 기계적 손실을 고려한 등가회로로 나타내면 그림 2와 같이 된다.^{5),6)}

그림 1과 그림 2에서 V_i 및 I_i 는 진동자에 인가한 각 주파수 ω 인 입력전압 및 전류이고, F_i

과 F_2 는 그 진동자 양면에서의 힘이며, U_1 과 U_2 는 그 양면의 진동속도이다. 또 그림 2에서 C_o , N , Z_o 는 각각 그 진동자의 고정용량 (clamped capacitance), 변성비(turn ratio), 기계적 임피던스로서

$$C_o = \epsilon_{33}^s \frac{A}{l}$$

$$N = h_{33} C_o$$

$$Z_o = A \sqrt{\rho C_{33}^D}$$

의 관계가 있다.

여기서 ϵ_{33}^s 는 변형(strain) S 가 일정할 때의 유전율이고, h_{33} 는 압전정수이며, ρ 는 밀도이다. 또 C_{33}^D 는 전속밀도 D 가 일정할 때의 탄성정수

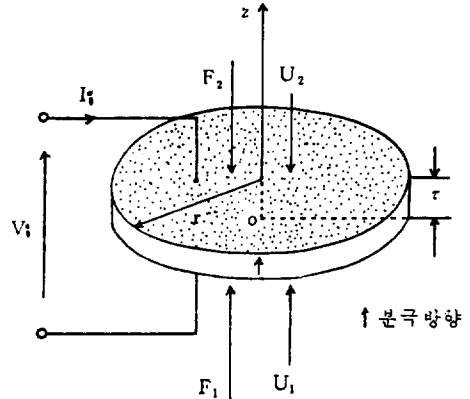


그림 1. 원판형 압전진동자

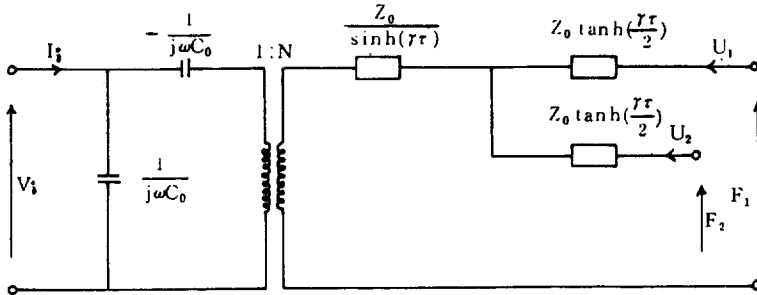


그림 2. 원판형 압전진동자의 동가회로

(elastic stiffness constant)로서 그 압전진동자의 기계적 손실을 고려하면

$$C_{33}^D = C_1^D + j C_2^D$$

로 나타낼 수 있다.

한편 진동자 내에서 탄성파의 전파 정수 γ 는, $C_1^D \gg C_2^D$ 인 일반적인 압전진동자의 경우

$$\gamma = j \omega \sqrt{\frac{\rho}{C_1^D}} \left(1 - \frac{j}{2 Q_m} \right)$$

로 나타낼 수 있으며, 이때 Q_m 은 그 진동자의 기계적 품질계수(mechanical quality factor)로서

$$Q_m = \frac{C_1^D}{C_2^D}$$

의 관계가 있다.

여기서 그림 1과 같은 진동자 2개를 적층하고 그 사이에 얇은 절연판을 삽입하여 그림 3과 같은 2중층 압전변압기를 구성한다.

이때 두 압전진동자의 면적 A 와 두께 l 및 물리정수 C_{33}^D , h_{33} , ϵ_{33}^s 가 각각 서로 같고, 변압기의 반경 r 이 그 두께 $2l$ 보다 훨씬 큰 경우의 동가회로는, 그림 2의 회로를 이용하여 그림 4와

같이 나타낼 수 있다.

그림 4에서 Z_f 및 Z_f' 는 각각 변압기의 입력소자와 출력소자의 자유면에서의 지지물에 의한 지지임피던스(backing impedance)이며, R_L 은 부하저항이다.

또 F_2 , F_2' 는 각각 입력소자와 출력소자의 접

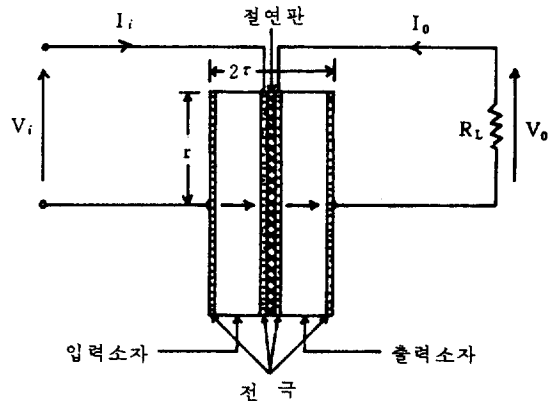


그림 3. 2중층 압전변압기

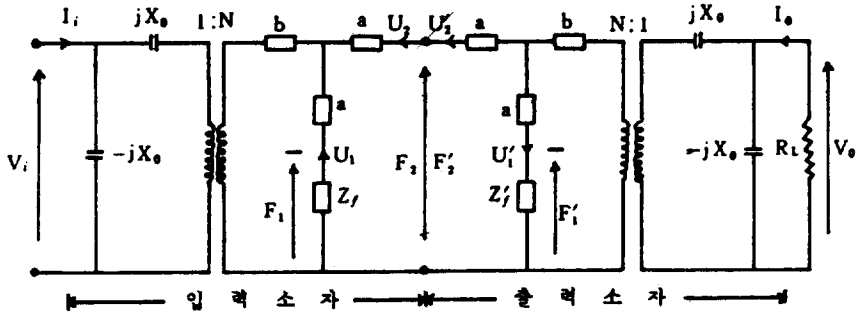


그림 4. 2중층 압전변압기의 등가회로

착면에서의 힘이고, U_2, U_2' 는 그 면의 진동속도이며, a, b, X_0 는 각각

$$a = Z_0 \tanh \left(\frac{\gamma \tau}{2} \right)$$

$$b = \frac{Z_0}{\sinh(\gamma \tau)}$$

$$X_0 = \frac{1}{\omega C_0}$$

의 관계가 있다.

이때 이상적인 경우로서 변압기의 양면을 지지하는 지지물의 영향을 무시하고, 또 전극과 절연판의 두께가 얇아서 그 영향을 무시하면

$$Z_f = Z_f' = 0$$

$$F_2 = F_2'$$

$$U_2 = U_2'$$

의 관계가 성립하며, 특히 이 변압기를 전파장도 오도로 동작시키면

$$\gamma \tau \cong j \pi$$

이므로, 전기적 입력 V_i, I_i 와 전기적 출력 V_o, I_o 사이에는

$$\begin{pmatrix} V_o \\ I_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R_m + jX_m + j4N^2 X_0}{j4N^2 X_0} \\ -\frac{R_m + jX_m}{4N^2 X_0^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ I_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

의 관계가 있다.

여기서 R_m, X_m 은 각각

$$R_m = \frac{\pi Z_0}{Q_m}$$

$$X_m = 2\pi Z_0 \frac{f - f_s}{f_s}$$

의 관계가 있으며, f_s 는 압전진동자의 직렬공진 주파수, f 는 압전변압기의 동작주파수를 의미한다.

한편 그림 4에서

$$V_o = -I_o R_L$$

이므로, 식(1)로부터 이 변압기의 입력임피던스를 구하면

$$Z_{in} = \frac{1}{4N^2} \frac{(-j4N^2 X_0)}{(-j4N^2 X_0) +$$

$$\frac{[(R_m + R_e) + j(X_m + X_0)]}{[(R_m + R_e) + j(X_m + X_0)]} \quad (2)$$

이 된다.

식(2)에서 R_e 및 X_e 는 각각

$$R_e = \frac{4N^2 X_0^2 R_L}{R_L^2 + X_0^2}$$

$$X_e = 4N^2 X_0 + \frac{4N^2 X_0^3}{R_L^2 + X_0^2}$$

의 관계가 있다.

이때 두 진동자의 사이에 있는 절연판에 의한 정전용량 C_d 는 이 변압기의 공진주파수에 상당한 영향을 미치므로 그에 의한 리액턴스성분 X_d 를 고려하면

$$X_e' = X_e - X_d \quad (3)$$

가 된다

여기서 X_d 는

$$X_d = \frac{4N^2}{\omega C_d}$$

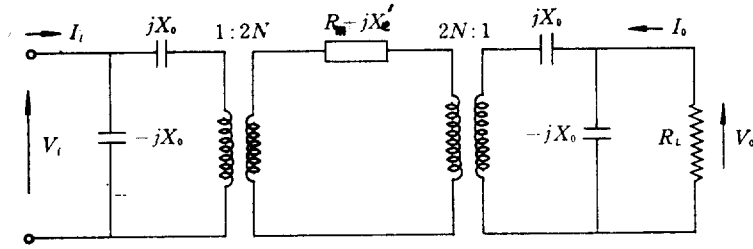


그림 5. 2중층 압전변압기의 등가회로(전파장모드)

의 관계가 있다.

식(2), (3)을 이용하여 그림 3과 같은 압전변압기의 전파장모드에 관한 등가회로를 구하면 그림 5와 같이 된다.

그림 5의 등가회로는 압전진동자의 두께, 반경, 무게, 공진주파수, 자유용량, Q_m 등을 측정하면 구할 수 있는 것으로서, 다음과 같이 그 변압기의 여러가지 특성들을 이해하는데 도움이 된다.

③ 2중층 압전변압기의 특성

3.1 전압비

그림 5와 같이 임의의 부하저항 R_L 을 출력단자에 연결하고 입력단자에 임의의 주파수를 갖는 입력전원을 인가하였을 때, 입·출력전압의 비 A_v 은 그림 5로부터

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-j 4N^2 X_o}{(1 - j \frac{X_o}{R_L}) [(R_m + R_e) + j(X_m + X_e')]}$$

가 구해진다.

이때 입력전원의 주파수가 그 변압기의 공진주파수와 같으면, 그때의 전압비 A_v^R 은 위 식으로

부터

$$A_v^R = \frac{-j 4N^2 X_o}{(1 - j \frac{X_o}{R_L}) (R_m + R_e)}$$

가 되고, 특히 이때 부하저항 R_L 이 X_o 보다 훨씬 큰 경우는

$$R_e = \frac{4 N^2 X_o^2}{R_L}$$

이 되므로, 그 때의 전압비 A_{vL}^R 은 $\frac{-j 4N^2 X_o}{R_m + \frac{4N^2 X_o^2}{R_L}}$

가 되며, 무부하시의 전압비 $A_{v\infty}^R$ 은

$$A_{v\infty}^R = \frac{-j 4 N^2 X_o}{R_m} \tag{5}$$

가 된다. 또한 전기기계 결합계수를 k_t 라 하면 전압비 $A_{v\infty}^R$ 은

$$A_{v\infty}^R = -j \frac{4 Q_m k_t^2}{\pi^2} \tag{6}$$

으로 간단히 표현된다.

한편 단락시의 전압이 A_{v0} 는 식(4)로부터 0임을 알 수 있다.

위에서 보아왔듯이 이러한 압전변압기를 사용하여 고전압을 얻고자 할 때는 부하저항 R_L 이 크고 공진주파수의 입력전원으로 구동시키는 것이 적당

표 1. 압전세라믹 재료의 상수

Materials	Ceramic B	P Z T - 4	P Z T - 5 A	P Z T - 5 H
Constants				
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1,200	1,300	1,700	3,400
$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$	910	635	830	1,470
$h_{33} (\times 10^8 \text{ V/m})$	16.7	26.8	21.5	18.0
$c_{33}^D (\times 10^{10} \text{ N/m})$	17.7	15.9	14.7	15.7
$\rho (\times 10^3 \text{ kg/m}^3)$	5.55	7.5	7.75	7.5
Q m	400	500	75	65
k_t	0.384	0.513	0.486	0.505
$N_{3t} (H_2 \cdot m)$	2,740	2,000	1,890	2,000

표2. 압전세라믹 진동자의 특성

Resonators	Ceramic B	P Z T - 4	P Z T - 5 A	P Z T - 5 H
Radius, r ($\times 10^{-6}$ m)	25	25	25	25
Thickness, τ ($\times 10^{-3}$ m)	6.85	5	4.75	5
Area, A ($\times 10^{-9}$ m ²)	1.9635	1.9635	1.9635	1.9635
f_s (KHz)	400	400	400	400
C_o (pF)	2,310	2,210	3,050	5,110
N (Newton/V)	3.86	5.91	6.56	9.20
Z_o ($\times 10^4$ kg/sec)	6.15	6.78	6.63	6.74
X_o (Ω)	172.36	180.29	130.35	77.89
R_m (kg/sec)	483.33	426.06	2775.90	3256.62

하므로, 표 1 과 표 2 와 같이 주어진 자료^{7),8)}를 이용하여 부하저항 R_L 이 X_o 보다 훨씬 큰 경우 공진시의 전압비의 크기 $|A_{vL}^R|$ 과 부하저항의 관계를 알아 보기로 한다.

그 결과는 그림 6 과 같다.

이때 이 변압기를 공진주파수에서 무부하 공진시의 전압비 $|A_{v\infty}^R|$ 로부터 3 dB이내의 전압비를 갖도록 동작시키려면 부하저항 R_L 이

$$R_L > 2.5 X_o |A_{v\infty}^R|$$

이어야 함을 알 수 있다.

또 식(5)와 식(6)으로부터 구한 무부하 공진시의 전압비의 크기는 표 3 과 같다.

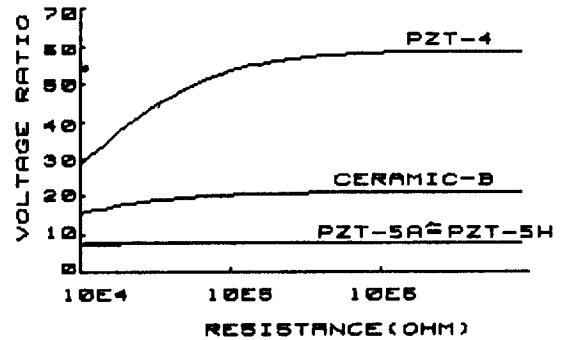


그림 6. 부하저항과 전압비의 관계(공진시)

표 3. 무부하 공진시의 전압비

Material	Ceramic B	P Z T - 4	P Z T - 5 A	P Z T - 5 H
Voltage ratio				
$ A_{v\infty}^R = \frac{4 N^2 X_o}{R_m}$	21.25	59.12	8.08	8.10
$ A_{v\infty}^R = \frac{4 Q_m}{\pi^2} k_t^2$	23.90	53.33	7.18	6.72

3.2 전류비

출력단자에 임의의 부하저항 R_L 를 연결하고, 입력측에 임의의 주파수를 갖는 입력을 인가하였을 때의 전류비 A_i 는, 그림 5로부터

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{4 N^2 X_o^2}{(R_L - j X_o) [(R_m + R_o) + j (X_m + X_o' - 4 N^2 X_o)]}$$

이 구해지며, 입력전원의 주파수가 그 변압기의 공진주파수와 같은 경우의 전류비 A_i^R 은

$$A_i^R = \frac{4 N^2 X_o^2}{(R_L - j X_o) (R_m + R_o - j 4 N^2 X_o)}$$

이 된다.

특히 부하저항 R_L 이 X_o 보다 훨씬 큰 경우의 전류비 A_{iL}^R 은

$$A_{iL}^R = \frac{X_o}{R_L} \left(\frac{R_m}{4 N^2 X_o} + j \right)$$

가 되며, 이 식으로부터 무부하에서 공진시의 전

류비 $A_{i\infty}^R$ 은 0임을 알 수 있다. 또 단락시의 전류비 A_{i0} 는

$$A_{i0} = \frac{j 4 N^2 X_0}{R_m + j 4 N^2 X_0}$$

가 되며, 이때 $|A_{v\infty}^R|$ 이 1보다 훨씬 큰 경우의 단락전류비 A_{i0} 는 위의 식으로부터 1에 접근함을 알 수 있다.

표 1 및 표 2의 압전진동자로 만든 변압기의 부하저항 R_L 에 대한 공진시의 전류비 $|A_{iL}^R|$ 의 관계는 그림 7과 같다.

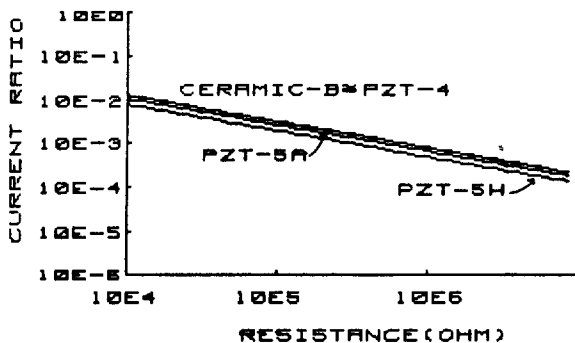


그림 7. 부하저항과 전류비의 관계(공진시)

3.3 공진주파수

그림 5로부터 이 변압기의 공진조건을 구하면

$$X_m + 4 N^2 X_0 + \frac{4 N^2 X_0^3}{R_L^2 + X_0^2} - \frac{4 N^2}{\omega C_d} = 0$$

이 된다.

여기서 전압비가 높은 경우인 무부하시의 공진주파수 f_{∞}^R 을 구하면

$$f_{\infty}^R \approx f_s \left(1 + \frac{N^2}{\pi^2 Z_0 f_s} \left(\frac{1}{C_d} - \frac{1}{C_0} \right) \right)$$

이 되며, 부하저항 R_L 이 X_0 보다 훨씬 큰 경우의 공진주파수 f_L^R 은

$$f_L^R \approx f_s \left(1 + \frac{N^2}{\pi^2 Z_0 f_s} \left\{ \frac{1}{C_d} - \frac{1}{C_0} \left(1 + \frac{X_0^2}{R_L^2} \right) \right\} \right)$$

이 된다. 따라서 $f_L^R \approx f_{\infty}^R$ 의 관계가 있음을 알 수 있으며, 또 단락시의 공진주파수 f_0^R 은

$$f_0^R \approx f_s \left(1 + \frac{N^2}{\pi^2 Z_0 f_s} \left(\frac{1}{C_d} - \frac{2}{C_0} \right) \right)$$

이 됨을 알 수 있다.

한편 주파수의 변동에 따른 무부하 전압비의 크기 $|A_{v\infty}|$ 는, 식(4)로부터

$$|A_{v\infty}| \approx \frac{2 N^2}{\pi^2 Z_0 C_0 f \sqrt{\frac{1}{Q_m^2} + 4 B^2}}$$

이 구해진다. 여기서

$$B = \frac{f - f_s}{f_s} - \frac{N^2}{\pi^2 Z_0 f} \left(\frac{1}{C_d} - \frac{1}{C_0} \right)$$

의 관계가 있다.

이때 절연판으로 두께 0.05(mm), 반경 25(mm), 비유전율 2.26인 폴리에틸렌비닐을 사용하면 이 절연판에 의한 정전용량이 786(pF)이므로, 이 변압기의 주파수에 대한 무부하전압비의 크기 $|A_{v\infty}|$ 의 관계를 나타내면 그림 8과 같다.

또한 이 변압기를 공진시 무부하전압비 $|A_{v\infty}^R|$ 로부터 3 dB이내의 전압비를 갖도록 동작시키려면 공진주파수에서의 주파수편차 Δf

$$\Delta f < \frac{f_s}{2 Q_m}$$

이어야 함을 알 수 있다.

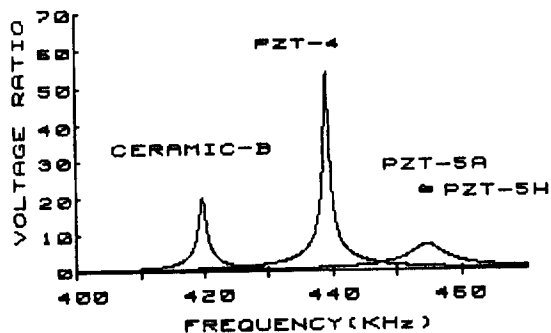


그림 8. 주파수와 전압비의 관계(무부하시)

3.4 입력임피던스

그림 5로부터 부하저항 R_L 을 연결하였을 때의 입력임피던스 Z_i 를 구하면

$$Z_i = \frac{1}{4N^2} \frac{(-j4N^2X_0) \{ (R_m + R_e) + j(X_m + X'_e) \}}{(-j4N^2X_0) + \{ (R_m + R_e) + j(X_m + X'_e) \}}$$

(단, $R_e' = \frac{4N^2X_0^2}{R_L}$)

이 구해지고, 특히 무부하시의 입력임피던스 Z_{i0}^R 과 단락시의 입력임피던스 Z_{i0}^R 은 모두

$$Z_{i0}^R = Z_{i0} = \frac{-jX_0}{1 + A_{v\infty}^R}$$

가 되며, 이때 $|A_{v\infty}^R|$ 이 1보다 훨씬 큰 경우는

$$Z_{i0}^R = Z_{i0}^R = \frac{R_m}{4N^2} \tag{7}$$

이 되며, 이 식으로부터 공진시의 입력임피던스 Z_i^R 을 구하면

$$Z_i^R = \frac{1}{4N^2} \frac{(j4N^2X_0)(R_m + R_e)}{(-j4N^2X_0) + (R_m + R_e)}$$

이 된다.

또 R_L 이 X_0 보다 훨씬 큰 경우의 입력임피던스 Z_{iL}^R 은

$$Z_{iL}^R = \frac{-jX_0(R_m + R_e')}{R_m + R_e' - j4N^2X_0}$$

의 관계가 있다.

표 1 및 표 2의 압전진동자로 만든 변압기의 공진시 무부하 입력임피던스를 식(7)로부터 구하면 표 4와 같다.

표 4. 무부하시의 입력임피던스

Material Impedance	Ceramic B	P Z T - 4	P Z T - 5 A	P Z T - 5 H
$ Z_{i0}^R (\Omega)$	8.11	3.05	16.13	9.62

4 결 언

위에서 알 수 있듯이 2중층 압전변압기를 공진 주파수로 동작시키면 부하저항이 클수록 전압비가 커지고 부하저항의 변동에 대하여도 안정되며, 특히 무부하시의 전압비는 전기기계결합계수의 제곱과 기계적 품질계수의 곱에 비례하고, 또 그 크기나 형상에는 관계없으므로 설계시 제약이 적은 장점이 있다.

한편 이 변압기의 공진주파수는 압전진동자의 직렬공진주파수에 크게 의존하고, 진동자의 고정용량, 전기기계결합계수, 절연판의 정전용량 등에 의해서도 영향을 받으며, 부하저항이 큰 경우의 공진주파수는 부하저항의 변동에 대하여 안정됨을 알 수 있다.

따라서 이러한 2중층 압전변압기를 이용하여 높은 전압비를 얻으려면, 변압기를 전기기계 결합계수와 기계적 품질계수가 큰 압전진동자로 제작하고, 또 그 변압기를 저항이 큰 부하에서 공진주파수로 동작시키는 것이 바람직하다.

참고문헌

- 1) 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, 東京, 1974.
- 2) A.A. Tyshko & V.N. Baryshnikov; "Com-

pact Regulated Photomultiplier Power Supply Using a Piezoelectric Transformer," Instrum. & Exp. Tech., 18 (1975), pp.1185-1186.

- 3) D.V. Igumnov & V.V. Drozhzhev, "The Pizelectric Transformer as an Emitter of Electromagnetic Waves," Telecomm. & Radio Eng., 34 (1979), p.87.
- 4) 박창엽, 한득영; "적층형 PZT압전변압기의 특성해석," 전기학회논문지, 제 33 권, 제 9 호(1984), pp.29-37.
- 5) H.W. Katz; Solid State Magnetic and Dielectric Devices, John Wiley and Sons, Inc., N.Y., 1959.
- 6) G.E. Martin; "On the Theory of Segmented Electromechanical Systems," J. Acoust. Soc. Am., 36 (1964), pp.1366-1370.
- 7) G. Kossoff; "The Effects of Backing and Matching on the Performance of Piezoelectric Transducers," IEEE Trans. Sonics & Ultrasonics, SU-13(1966), pp.20-30.
- 8) "Piezoelectric Ceramics-Typical Room Temperature Data (Low Signal)," Clevite Corporation, Cleveland, Ohio, pp.32-33.