

Langevin 형 PZT 압전변압기의 동가회로

Equivalent Circuit of a Langevin-Type Piezoelectric Transformer

박 광 모  
학 부 모

연세대학교 전기공학과  
건국대학교 전기공학과

1. 서론

압전변압기는 보임을 이용하는 일반적인 변압기에 비하여 주파수대역이 좁고 취급하는 전류가 적다는 단점이 있으나, 한편으로는 구조가 간단하며, 제작이 용이하고, 소형이며, 전기적 손실이 적다는 등의 장점이 있어서 특히 고전압 소전류원을 필요로 하는 음극선관, 음이온 발생기, 집진기, 전자복사기, 고주파변압기 등에 응용되고 있고, 다른 분야에도 그 응용이 시도되고 있다. 1)

이에 대한 연구는 주로 장방형과 원판형에 관해 진행되어 왔으며, 그 중에서 장방형에 관해서는 1956년 Rosen<sup>2)</sup>과 Veen<sup>3)</sup>에 의하여 시작되어 최근에 일본, 자유중국, 소련 등에서 그에 관한 연구 및 개발이 다시 활발해지고 있고, 4), 5) 원판형에 관한 연구는 1961년 Lungo<sup>6)</sup> 등에 의하여 시작되어 Munk<sup>7)</sup>를 거쳐 현재도 그에 관한 연구가 진행되고 있다. 8)

본 논문에서는 원판형 PZT 압전진동자 2개를 진동자/얇은 접연판/진동자의 순으로 적층하여 제작하는 Langevin 형 PZT 압전변압기에 관한 동가회로를 유도하고자 한다.

2. 원판형 PZT 압전진동자의 동가회로

그림 2-1과 같이 전극이 양면에 부착되어 있고, 그 면적이 A 이며 반경 r 이고 두께

t 보다 훨씬 큰 원판형 PZT 압전진동자에서, 그 두께방향의 진동에 관한 식은

$$T_3 = c_{33}^D S_3 - h_{33} D_3$$

$$E_3 = -h_{33} S_3 + \beta_{33}^D D_3$$

로 표현된다. 여기서  $T_3, S_3, E_3, D_3$  는 각각 본극방향인 z 축 방향의 응력(stress), 변형(strain), 전계의 세기, 전속밀도를 나타내고,  $c_{33}^D$  는 전속밀도 D 가 일정할 때의 탄성경수(elastic stiffness constant),  $h_{33}$  은 압전경수,  $\beta_{33}^D$  는 변형 S 가 일정할 때의 유전율  $\epsilon_{33}^D$  의 역수이다.

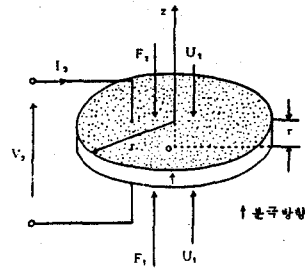


그림 2-1. 원판형 PZT 압전진동자

그림 2-1에서  $F_1, F_2$  는 진동자 양면에서의 힘,  $U_1, U_2$  는 그 면들에서의 입자속도,  $v_3, I_3$  는 입력전압 및 전류이다.

이 압전진동자의 기계적 손실을 고려하여 탄성경수  $c_{33}^D$  를

$$c_{33}^D = c_1^D + j\omega^2 D$$

라 하고, 밀도를  $\rho$  라 하면,  $c_1^D \gg c_2^D$  인 일반적

인 PZT 압전진동자의 탄성파에 관한 전파정수

γ는

$$\gamma \approx j\omega \sqrt{\frac{\rho}{c_1^p}} \left(1 - \frac{j}{2Q_m}\right)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $Q_m$ 은 압전진동자의 기계적 품질계수로서  $Q_m = \frac{C_1^p}{C_2^p}$

의 관계가 있다. 9)

이 때 그림 2-1과 같은 압전진동자의 등가회로는 그림 2-2와 같이 나타낼 수 있다.

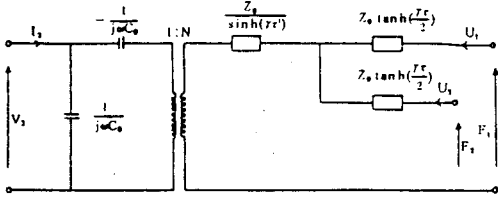


그림 2-2. 원판형 PZT 압전진동자의 등가회로

그림 2-2에서  $C_0, N, Z_0$ 는 각각 고정용량 (clamped capacitance), 변성비(turn ratio), 기계적 특성임피던스라 하며

$$C_0 = \epsilon_{33}^s \frac{A}{t}$$

$$N = h_{33} C_0$$

$$Z_0 = A \sqrt{\rho c_{33}^p} \approx A \sqrt{\rho c^p}$$

의 관계가 있다.

3. Langevin 형 PZT 압전변압기의 등가회로

연격 A와 두께 t 및 물리계수  $C_{33}^D, h_{33}$

$\epsilon_{33}^S$ 가 각각 서로 같은 2개의 원판형 PZT 압전진동자의 사이에 얇은 절연판을 삽입하여 그림 3-1과 같은 압전변압기를 구성한다. 이 때 전극과 절연판의 두께는 무시할 만큼 얇으며, 반경 r 이 두께 2t 에 비하여 훨씬 크다고 가정한다.

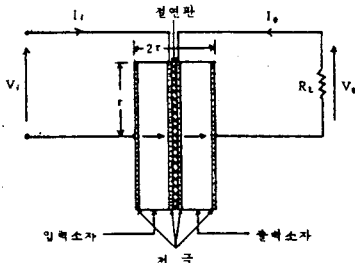


그림 3-1. Langevin 형 PZT 압전변압기

그림 3-1에서  $V_1, I_1$ 는 입력전압 및 전류,  $V_2, I_2$ 는 출력전압 및 전류이고,  $R_L$ 은 부하저항을 나타낸다.

이 때 그림 3-1과 같은 압전변압기의 등가회로는 그림 2-2의 회로를 이용하여 그림 3-2와 같이 나타낼 수 있다.

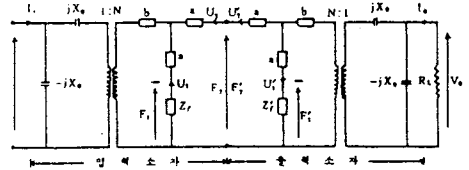


그림 3-2. Langevin 형 PZT 압전변압기의 일반적인 등가회로

그림 3-2에서

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

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

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

의 관계가 있다.

여기서 지지임피던스 (backing impedance )

$Z_f$  와  $Z_f'$ , 접촉면에서의 임피던스를 무시하면  $Z_f = Z_f' = 0$ ,

$$F_2 = F_2', \quad U_2 = U_2'$$

가 되며, 이 경우의 전기적 입력과 출력사이에는

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a+b+jN^2X_0}{aN} & \frac{a+2b+j2N^2X_0}{N} \\ -\frac{a+b}{jNX_0} & -\frac{a+2b}{jNX_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

의 관계가 있고, 특히 이 압전변압기를 전파장 모오드로 동작시키면,  $C_1^p \gg C_2^p$ 인 경우  $\gamma t \approx j\pi$ 가 되므로, 식(1)은

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_m + jX_m + j4N^2X_0}{j4N^2X_0} & -\frac{R_m + jX_m + j8N^2X_0}{4N^2} \\ -\frac{R_m + jX_m}{4N^2X_0^2} & \frac{R_m + jX_m + j4N^2X_0}{j4N^2X_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

가 된다. 이 식에서

$$R_m = \frac{\pi Z_0}{Q_m} \frac{f - f_s}{f_s}$$

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

의 관계가 있으며,  $f_s$ 는 압전진동자의 직렬공진 주파수이고,  $f$ 는 변압기의 동작주파수이다.

또한 그림 3-2와 같이 변압기의 출력측에 부하 저항  $R_L$  을 연결한 경우의 입력임피던스  $Z_{in}$  을 구하면

$$Z_{in} = \frac{1}{4N^2} \frac{(-j4N^2X_0)[(R_m+R_e)+j(X_m+4N^2X_0+X_e)]}{(-j4N^2X_0)+[(R_m+R_e)+j(X_m+4N^2X_0+X_e)]} \quad (2)$$

가 된다. 이 식에서

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

이다.

식(2)를 이용하여 그림 3-1과 같은 압전변압기의 저지임피던스 및 접착면에서의 임피던스를 무시한 이상적인 동가회로를 그리면 그림 3-3과 같다.

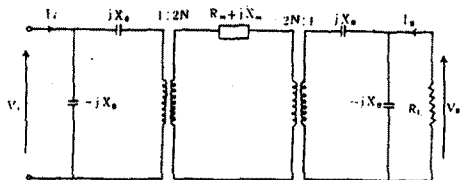


그림3-3. Langevin 형PZT 압전변압기의 이상적인 동가회로.

그림 3-3의 동가회로를 기본으로 하여 입력소자와 출력소자의 특성들이 각각 약간 다르고, 접착면에서의 임피던스를 고려한 근사적인 동가회로를 구하면 그림 3-4와 같이 된다.

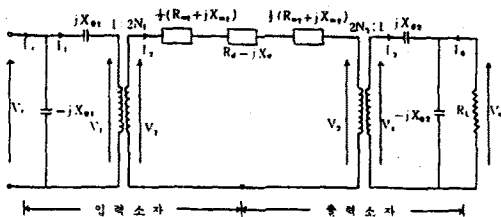


그림3-4. Langevin 형PZT압전변압기의 근사적인 동가회로.

그림 3-4에서  $R_m$ 는 접착면에서의 손실을 나타내는 기계적 저항이고,  $X_{02}$ 는 주로 접연판에 의한 정전용량  $C_d$ 에 기인된 기계적 리액턴스이다.

#### 4. 결론

원판형 PZT 압전진동자의 기계적 손실을 고려한 동가회로를 기초로 하여 Langevin 형 PZT 압전변압기의 전파장모오드에 관한 이상적인 동가회로와 근사적인 동가회로를 구하였다. 특히 근사적인 동가회로는 입력소자와 출력소자 각각의 특성과 접착면에서의 임피던스를 고려한 것으로서 그 변압기의 공진주파수, 권압비, 권류비등의 해석에 도움이 될터라 믿는다.

#### 참 고 문 헌

- 1) D.V.Igumnov & V.V. Drozhzhen, "The Piezoelectric Transformer as an Emitter of Electromagnetic Waves," Telecomm. & Radio Eng., 34(1979), p.87.
- 2) C.A.Rosen, "Ceramic Transformer and Filter," Ph.D. dissertation, Syracuse University, 1956.
- 3) B.v.d. Veen, "The Equivalent Network of a Piezoelectric Crystal with Divided Electrodes," Philips Res. Repts., 11(1956), pp.66-79.
- 4) K.Saito & T.Wada, "Analysis of Equivalent Circuit of a Ceramic Transformer and Its Set-up Characteristics for Driving Frequencies," Sci. & Eng. Rep. Nat. Def. Acad., 18(1980), pp.171-184.
- 5) Li Tong Tu, Yao Yi Jin, & Mu Zhen Han, "Piezoelectric Ceramic Transformer," Ferroelectrics, 28(1980), pp.403-406.
- 6) A. Lungo & F.A.Sauerland, "Ceramic Bandpass Transformer and Filter Elements," IRE Intern. Conv. Record, 9(1961), pp. 189-203.
- 7) E.C.Munk, "The Equivalent Electrical Circuit for Radial Modes of a Piezoelectric Ceramic Disc with Concentric Electrodes," Philips Res. Repts., 20(1965), pp. 170-189.
- 8) V.L.Karlash, "Radial Modes of Piezoceramic Disks with Open Circuit Electrodes," Soviet Applied Mechanics, 17(1981), pp.836-189.
- 9) H.W.Katz, Solid State Magnetic and Dielectric Devices (New York : John Wiley & Sons, Inc., 1959), pp. 119-122.