

積層形 壓電變壓器

朴 昌 燁
 (延世大 工大 教授)
 韓 得 永
 (建國大 工大 助教授)

1. 서 론	4. 결 론
2. Rosen형 압전변압기	참고문헌
3. 적층형 압전변압기	

1 서 론

압전변압기는 압전효과를 응용한 점화소자와 필터의 중간적인 존재로서 그 두 기능을 합친 것과 같은 특성을 가지며, 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환된 후 다시 전기적 에너지로 환원되는 과정을 통하여 고전압을 얻는 변압기이다.

이러한 변압기는 자속을 응용하는 일반적인 변압기와는 달리, 유전체인 압전세라믹소자의 압전현상과 공진현상을 응용하므로 주파수대역이 좁고 취급되는 전류가 적다는 단점이 있으나, 구조가 간단하고, 제작이 용이하며, 소형이고, 손실이 적은 장점들이 있어서 특히 고전압소전류원을 필요로 하는 음극선관, 음이온발생기, 집진기, 전자복사기, 도장기 등에 이용되고 있으며¹⁾, 최근에는 다른 분야에도 응용이 시도되고 있다.^{2),3)}

이에 대한 연구는 압전세라믹소자가 개발되기 전에 수정을 이용하는 것이 검토되었으나, 1947년 Roberts⁴⁾에 의하여 BaTiO₃ 세라믹소자에 높은 직류전압을 가하면 현저한 압전효과가 나타남이 발견된 이후, Mason⁵⁾에 의하여 BaTiO₃ 세라믹이 압전재료로서 확고한 위치를 차지하게 되고, 1954년 Jaffe⁶⁾ 등에 의하여 압전효과가 특히 강한 PZT가 개발됨에 따라 세라믹소자를 이용하는 압전변압기에 관하여 본격적으로 연구가 시작되었으며,^{7),10)} 현재까지 여러형태의 것이 발표되어있고 아직도 그에 관한 연구

개발이 진행되고 있다.^{11),12),13)}

여기서는 기존의 압전변압기 중에서 가장 많이 쓰이고있는 Rosen형(또는 transverse형)압전변압기의 구조와 특성들을 간단히 기술하고, 새로운 형태인 적층형 압전변압기에 관하여 소개하고자 한다.

2 Rosen형 압전변압기

기존의 압전변압기를 형태별로 대별하면 대체로 직육면체형, 원판형, 고리형으로 나눌 수 있으나, 이들 압전변압기 중에서 가장 많이 연구되어 왔고 보급되어 있는 형태는 그림 1과 같은 Rosen형으로서의 1956년 Rosen⁷⁾에 의하여 개발된 것이다.

그림 1에서 화살표는 분극(Poling)방향을 나타내며, 점찍은 부분은 전극이 부착된 곳을 의미한다. 또 V_i 및 V_o 은 입력전압과 출력전압, $2L$, W , T 는 각각 압전변압기의 길이, 폭, 두께를 표시한다.

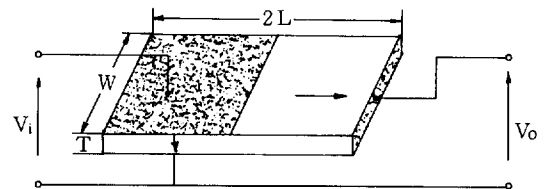


그림 1. Rosen형 압전변압기

이 변압기에서 입력측이 정전압원인경우, 공진시의 전압비의 크기 $|A\dot{V}|$ 은

$$|A\dot{V}| \approx \frac{2N_1}{2R+R_2} (R_2 R_L)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, 특히 공진시 무부하전압비의 크기 $|A\dot{V}^0|$ 은

$$|A\dot{V}^0| \approx \frac{2N_1 N_2}{R} X_r \approx \frac{4}{\pi^2} Q_m K_{33} K_{33} \frac{L}{T} \quad (2)$$

의 관계가 있고, 공진주파수 f_r 은

$$f_r \approx \frac{C^p}{4L} \quad (3)$$

으로 표현된다.¹⁴⁾

식(1),(2),(3)에서 N_1, N_2 는 각각 입력측과 출력측의 전기기계적 변성비(electromechanical turn ratio)로서

$$N_1 = W d_{31} Y_{33}^2$$

$$N_2 = \frac{K_{33}^2(1 - K_{33}^2)}{g_{33}} \frac{WT}{L}$$

의 관계가 있고, R, R_2, X_r 은 각각

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

$$R_2 = \frac{R_L X_r}{R_L^2 + X_r^2} 4N_2^2$$

$$X_r = \frac{1}{2\pi f \epsilon_{33}^r (1 - K_{33}^2)} \frac{L}{WT}$$

의 관계가 있다. 또 R_L 은 부하저항을 나타내고, $\epsilon_{33}^r, g_{33}, d_{31}$ 은 각각 압전소자의 유전율과 물리적 상수들이며 K_{33}, K_{33} 은 그 소자들의 전기기계결합계수(electromechanical coupling factor), Y_{33} 은 Young을 의미한다.

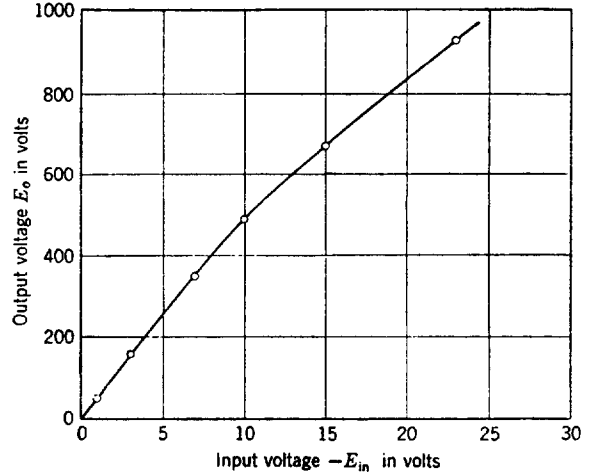


그림 3. Rosen 형 압전변압기의 입력전압-출력전압 특성

또 C^p 는 그 소자내에서의 탄성파속도이며, Z_0 는 기계적 특성임피던스, Q_m 은 기계적 품질계수(mechanical quality factor)를 의미한다.

대표적인 경우로서 $2L = 14.63\text{ cm}, W = 2.54\text{ cm}, T = 0.61\text{ cm}$ 인 BaTiO_3 계 압전세라믹소자로 제작한 변압기의 부하특성과 입·출력전압특성을 보면 각각 그림 2와 3과 같다.¹⁴⁾

이 Rosen 형 압전변압기는 그 압전소자의 길이가 폭이나 두께보다 훨씬 커야하며, 한편으로 그 전압비가 길이와 두께에 관계하고 공진주파수는 그 길이에 반비례함을 식(2)와 (3)을 통하여 알 수 있다.

크기가 다른 여러 변압기의 공진주파수는 표 1에 보인 바와 같고 전파장모드에서 그들 변압기에 부하저항 $100M\Omega$ (실선)과 $30M\Omega$ (점선)을 연결하였을 때의 입력전압(실효치)과 출력전압(2배압 정류된 직류)의 관계는 그림 4와 같다.

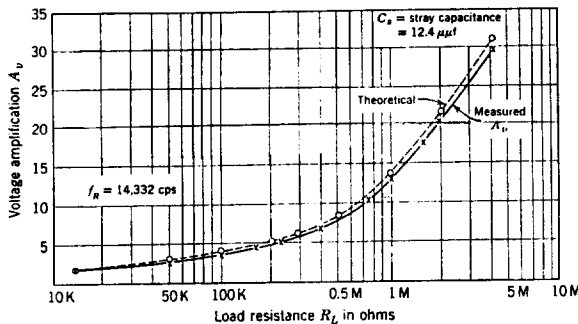


그림 2. Rosen 형 압전변압기의 부하저항-전압비 특성

표 1. Rosen 형 압전변압기의 크기와 공진주파수

압전소자의 무게 (g)	압전소자의 크기 (mm)			공진주파수 (KHz)	
	길이	폭	두께	반파장 모드	전파장 모드
3	28	7.5	2	60	120
7	37	10	2.5	45	90
22	56	15	3.5	30	60
56	75	20	5	22.5	45
170	110	30	7	15	30

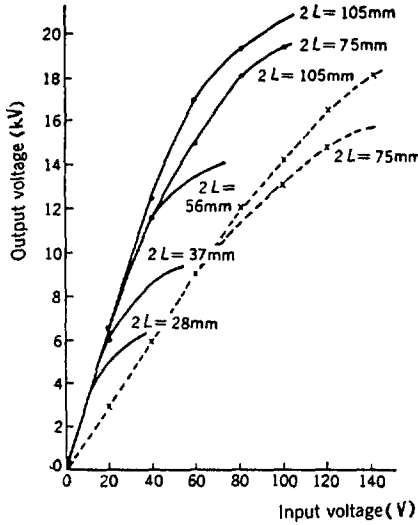


그림 4. Rosen 형 압전변압기의 크기와 입·출력전압의 관계

식(2)와 그림 2 및 그림 3에서 알 수 있듯이 이들 압전변압기로부터 높은 전압비를 얻으려면 전기기계결합계수 K_{31} 과 K_{33} 이 크고 기계적 품질계수 Q_m 이 높은 압전소자로 제작된 변압기를 저항이 큰 부하에 연결하여 사용하는 것이 요구된다.

최근 Li Tong Tu¹⁹ 등은 Q_m 이 2,825 이며 크기가 $114 \times 26.4 \times 3mm$ 인 압전소자를 사용하여 전압비가 206인 변압기에 관하여 발표한 바 있다.

③ 적층형 압전변압기

현재까지 개발된 직육면체형이나 원판형 압전변압기와는 달리 물리적 특성들이 각각 서로 같고, 반경 r 이 두께 τ 에 비하여 훨씬 큰 일반적인 원판형 압전세라믹진동자 2개를, 그림 5와 같이 진동자 / 전극 / 절연판 / 전극 / 진동자의 순으로 적층하여 제작하는 새로운 압전변압기에 관하여 논하기로 한다.

16) 17)

그림 5에서 그 변압기의 두께 2τ 가 반경 r 보다 훨씬 크고 두 진동자의 두께와 반경이 각각 같으며 물리적인 특성들이 각각 서로 거의 같으면, 기본파공진주파수에서의 전압비 A_v^R 은

$$A_v^R = \frac{-j4N_1 N_2 X_{o2}}{(1-j\frac{X_{o2}}{R_L})(\bar{R}_m + R_e + R_d)} \quad (4)$$

로 표현된다. 여기서 입력소자 및 출력소자의 전기

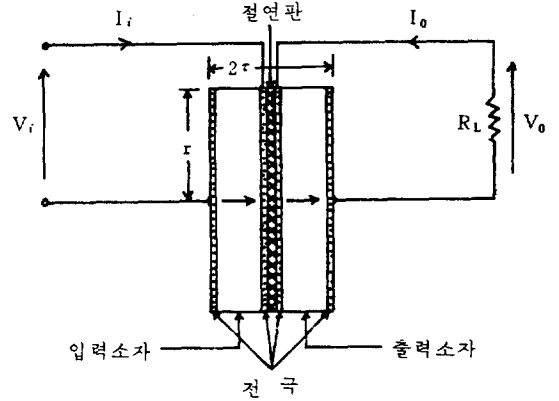


그림 5. 적층형 압전변압기

기계적 변성비인 N_1 과 N_2 는 각각

$$N_1 = (h_{33})_1 C_{o1} \quad N_2 = (h_{33})_2 C_{o2}$$

의 관계가 있고, $(h_{33})_1$ 과 $(h_{33})_2$ 는 각각 입력소자와 출력소자의 압전상수, C_{o1} 과 C_{o2} 는 각각 그들의 고정용량 (clamped capacitance) 이다. 또 X_{o2} , \bar{R}_m , R_e 는 각각

$$X_{o2} = \frac{1}{2\pi f_r C_{o2}} \quad \bar{R}_m = \frac{\pi \bar{Z}_o}{Q_m}$$

$$R_2 = \frac{4N_2^2 X_{o2}^2 R_L}{R_L^2 + X_{o2}^2}$$

을 나타내며, \bar{Q}_m 과 \bar{Z}_o 입·출력소자의 기계적 품질계수의 평균치와 기계적 특성 임피던스의 평균치를 각각 의미한다. R_L 과 f_r 을 부하저항과 변압기의 공진주파수이며, R_d 는 전극, 절연판, 공기 층, 지지물등에서의 손실을 등가화한 기계적 저항이다.

이때 전극이나 절연판, 그리고 그들사이의 공기층이 극히 얇아서 그에 의한 손실을 무시할 수 있고, 지지물에 의해 진동자의 양면에 가해지는 압력이 적어서 지지물에 의한 손실도 무시한다면, 즉 $R_d = 0$ 이면 R_L 이 X_{o2} 보다 훨씬 큰 경우 공진시 전압비의 크기 $|A_v^R|$ 은

$$|A_v^R| \approx \frac{4N_1 N_2 R_L X_{o2}}{\bar{R}_m R_L + 4N_2^2 X_{o2}^2} \quad (5)$$

로 나타내지며, 또 무부하시 전압비의 크기 $|A_{\infty}|$ 는

$$|A_{\infty}| = \frac{2N_1 N_2}{\pi^2 \bar{Z}_o C_{o2} f \left[\left(\frac{1}{Q_m} \right)^2 + 4B^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

으로부터 구할 수 있다. 여기서 B 는

$$B = \frac{f}{f_s} - 1 + \frac{1}{\pi^2 \bar{Z}_o f} \left(\frac{N_1^2}{C_{o1}} - \frac{N_1 N_2}{C_d} \right)$$

의 관계가 있으며 C_d 는 절연판에 의한 정전용량이 고, f 는 입력주파수이며, \bar{f}_s 는 입·출력소자의 직렬 공진주파수 f_s 의 평균치이다. 또 직렬 공진 주파수 f_s 는 C^E 를 진동자 내에서의 탄성파속도라 하면

$$f_s \approx \frac{C^E}{2\tau} \quad (7)$$

의 관계가 있다 또 부하저항 R_L 이 X_{o2} 보다 훨씬 큰 경우 이 적층형 압전변압기의 공진주파수 f_L^R 은

$$f_L^R \approx \bar{f}_s \left(1 + \frac{1}{\pi^2 Z_o \bar{f}_s} \left(\frac{N_1 N_2}{C_d} - \frac{N_1^2}{C_a} - \frac{X_{o2}^2 N_2^2}{R_L^2 C_{o2}} \right) \right) \quad (8)$$

로부터 구할 수 있으며, 식 (8)로부터 무부하시의 공진주파수와 f_L^R 은 거의 같음을 알 수 있다.

이 변압기를 무부하 공진시의 전압비로부터 3dB 이내의 전압비를 갖도록 동작시키려면 부하저항 R_L

이 $2.5 \frac{N_2}{N_1} X_{o2} |A^R|$ 이상이어야 하고 공진주파수로

부터의 주파수편차 Δf 가 $\frac{\bar{f}_s}{2Q_m}$ 있다. 여기서 $|A^R|$ 은 공진시 무부하전압비의 크기로서

$$|A^R| = \frac{4}{\pi^2} Q_m K^2 \quad (9)$$

의 관계가 있으며 K , 는 압전소자의 두께 방향의 전기기계결합계수이다.

따라서 높은 전압비를 갖는 적층형 압전변압기를 제작하려면 식 (5) 와 (9)로부터 알 수 있듯이 기계적 품질계수 Q_m 과 전기기계결합계수 K , 가 큰 재질의 진동자가 요구된다. 또 특정한 공진주파수가 요구되면 식 (7) 과 (8)로부터 알 수 있듯이 적당한 두께의 진동자를 선택하면 가능하다.

이러한 적층형 압전변압기에 관한실험은 반경 3007 mm, 두께 6.94mm, 무게 150g인 압전진동자 5 개를 사용하여 수행하였으며 이들 진동자들의 기본 특성은 표 2와 같다.

표 2에서 f_p 는 진동자의 병렬공진주파수를 나타낸다. 또 표 2와 같은 압전진동자의 물리적 상수들은 표 3과 같다.

표 3. 원판형 압전진동자의 물리상수

구분	c_{33}^E	c_{33}^D	c_1^P	h_{33}	Z_o	R_m	N
시편번호	$\times 10^{-9} [F/m]$	$\times 10^{10} [N/m^2]$		$\times 10^8 [V/m]$	$\times 10^4 [kg/sec]$	$[kg/sec]$	$[N/V]$
A	4.553	15.48		22.82	9.754	331.3	4.251
B	4.535	15.49		22.79	9.757	327.8	4.230
C	4.467	15.46		23.49	9.741	337.0	4.294
D	4.416	15.44		23.33	9.735	324.7	4.216
E	4.631	15.42		22.54	9.729	334.3	4.271

표 2. 원판형 압전진동자의 기본특성

시편번호	f_s [kHz]	f_p [kHz]	k_t [%]	C_o [pF]	Q_m
A	303.16	324.67	39.14	1863	925.0
B	303.48	324.83	38.99	1856	935.2
C	302.31	324.75	39.92	1828	906.8
D	302.67	324.55	39.46	1807	941.8
E	302.88	324.27	39.06	1895	914.3

표 3에서 ϵ_{33} 는 변형 (strain) S가 일정할 때의 유전율, C_{33} 는 전속일도 D가 일정할 때의 탄성상수, h_{33} 은 압전상수를 의미한다.

표 1 과 2의 특성들을 갖는 진동자 중에서 임의로 선택한 2개와 두께 0.05mm인 알루미늄전극 2장, 그리고 0.05mm인 폴리테틸렌비닐 절연판 1 장을 사용하여 그림 5와 같은 변압기를 제작하였다.

제작된 변압기의 무부하시 주파수 변화에 따른 전압비의 변동을 실험한 결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서 계산치를 나타내는 곡선은 식 (6) 을 그린 것이며, 이때 절연판의 비유전율이 2.26¹⁸⁾이고 그 유효면적이 진동자의 면적과 같으므로 C_d 의 값으로 1136 pF 를 취하였다.

또한 공진시의 부하저항 변동에 따른 전압비의 변화는 그림 7과 같다.

그림 7에서 계산치를 나타내는 곡선은 식 (5) 를 그린 것이다.

몇가지의 변압기에 대한 무부하시의 공진 주파수와 공진시 무부하전압비의 측정치와 계산치는 표 4와 같다.

그림 6 과 표 4에서 공진주파수에 대한 측정치와 계산치의 오차는 진동자와 전극, 전극과 절연판 사이의 공기층에 의한 정전용량이 주된 원인이라 생각되며, 그림 7 과 표 4에서 전압비에 대한 측정치와 계산치는 지지물, 전극, 절연판, 공기층등에서의 등가 저항 R_d 를 무시하였기 때문이라 생각된다. 그러나 그림 6 과 그림 7에서 볼 수 있듯이 측정치와 계산치

표 4. 적층형 압전변압기의 공진주파수와 전압비

구분		무부하공진주파수 (KHz)		공진시무부하전압비	
변압기		측정치	계산치	측정치	계산치
입력소자	출력소자				
A	B	317.63	309.68	52.70	58.92
A	D	316.22	309.23	53.83	60.91
B	D	316.11	309.37	54.31	60.90
B	E	317.50	309.70	52.50	57.75
D	E	316.05	309.04	53.91	58.10

를 나타내는 곡선들의 형태가 유사함을 알 수 있다. 이러한 오차는, 변압기를 제작할 때 외부회로와 연결하기 위하여 사용된 알루미늄전극 대신에 진동자의 주변으로 인출하여 사용하고, 별도의 절연판 대신에 절연성이 좋은 접착제로 두 진동자를 접착시켜서 절연판으로 사용하면 감소되리라 생각되며 그렇게 함으로써 입력측의 진동이 출력측으로 잘 전달되고 또, 재현성도 더욱 우수해지리라 본다.

또 그림 2와 그림 7을 비교하면 Rosen 형 압전변압기는 부하저항이 감소함에 따라 전압비가 급속히

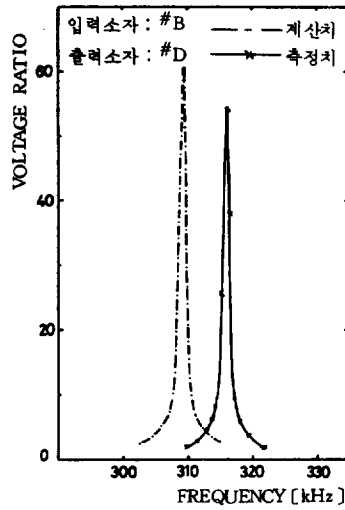
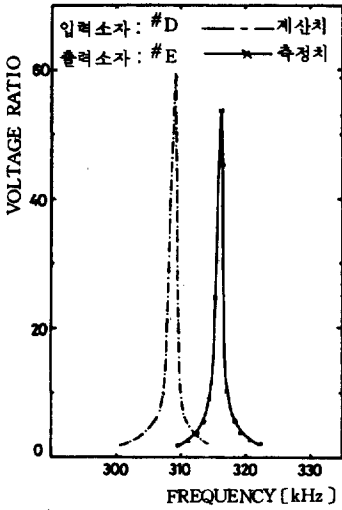


그림 6. 적층형 압전변압기의 주파수 - 전압비 특성 (무부하시)

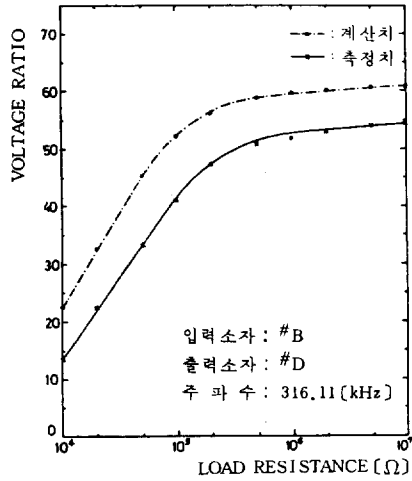
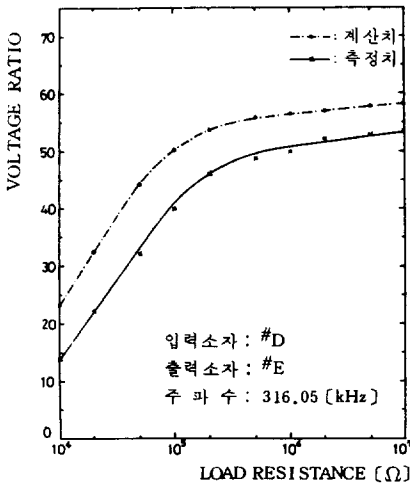


그림 7. 적층형 압전변압기의 부하저항 - 전압비 특성 (공진시)

감소하지만 적층형 압전변압기는 넓은 범위에서 전압비가 안정됨을 알 수 있으며, 또 식 (2) 와 (9) 을 비교하면 Rosen 형은 전압비를 크게하기 위하여 압전진동자의 두께 T 를 얇게하고 길이 2L 을 길게할 필요가 있어서 기계적으로 약하게 되고 또 식 (3) 에서 알 수 있듯이 공진주파수에 제약이 있는 반면에 적층형은 진동자의 반경이나 두께가 전압비에 영향을 주지 않으므로 요구되는 공진주파수에 맞는 두께의 진동자를 선택할 수 있어서 설계상의 제약이 적음을 알 수 있다. 또 Rosen 형은 그림 1에서 볼 수 있듯이 분극방향이 두방향이어서 분극과정이 다소 복잡하고 또 진동자를 변압기 전용으로 특수하게 제작해야 하지만 적층형은 분극을 두께방향 한 방향으로만 행한 일반적인 진동자를 사용할 수 있으며, 원판형 진동자 2 개를 적층하여 제작하므로 직육면체형의 얇은 진동자 하나로 제작하는 Rosen 형보다 기계적으로 강하다는 장점들이 있다.

4 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 적층형 압전변압기는 부하저항의 변동에 대하여 전압비가 안정되고 있고 설계상의 제약이 적으며 제작이 용이하고 기계적으로 강한 장점들이 있어서 고전압소전류원을 필요로 하는 고주파변압기, TV의 고전압 발생장치, 전자복사기, 소형공기정화기등에 응용이 기대된다.

참고 문헌

- 1) 電子材料工業會, 圧電セラミックスとその應用, 電波新聞社, 東京, 1974, pp. 159-175.
- 2) A. A. Tyshko & V. N. Baryshnikov, "Compact Regulated Photomultiplier Power Supply Using a Piezoelectric Transformer," *Instrum. & Exp. Tech.*, 18, 1975, pp. 1185-1186.
- 3) D. V. Igumnov & V. V. Drozhzhev, "The Piezoelectric Transformer as an Emitter of Electromagnetic Waves," *Telecomm. & Radio Eng.*, 34, 1979, p. 87.
- 4) S. Roberts, "Dielectric and Piezoelectric Properties of Barium Titanate," *Phys. Rev.*, 71, 1947, pp. 890-895
- 5) W. P. Mason, "Electrostrictive Effect in Barium Titanate Ceramics," *Phys. Rev.*, 74, 1948, pp. 1134 - 1147
- 6) B. Jaffe, R.S. Roth, & S. Marzullo, "Piezo-

- electric Properties of Lead Zirconate - Lead Titanate Solid-Solution Ceramics," *J. Appl. Phys.*, 25, 1954, pp. 809-810.
- 7) C. A. Rosen, "Ceramic Transformer and Filter," Ph. D. dissertation, Syracuse University 1956.
- 8) B. v. d. Veen, "The Equivalent Network of a Piezoelectric Crystal with Divided Electrodes," *Philips Res. Repts.*, 11, 1956, pp. 66-79.
- 9) A. Lungo & F. A. Sauerland, "Ceramic Band-pass Transformer and Filter Elements," *IRE, Intern. Conv. Record*, 9, 1961, pp. 189-203.
- 10) E. C. Munk, "The Equivalent Electrical Circuit for Radial Modes of a Piezoelectric Ceramic Disk with Concentric Electrodes," *Philips Res. Repts.*, 20, 1965, pp. 170-189.
- 11) A. A. Erofeev, "Dynamic Properties of Piezoelectric Transformers and of Systems Based on Them," *Automation & Remote Control*, 40, 1979, pp. 285-292.
- 12) 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.
- 13) V. L. Karlash, "Radial Modes of Piezoceramic Disks with Open Circuit Electrodes," *Soviet Appl Mechanics*, 17, 1981, pp. 836-839.
- 14) H. W. Katz, Solid State Magnetic and Dielectric Devices, John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1959, pp. 170-197.
- 15) Li Tong Tu, Yao Yi Jin, & Mu Zhen Han, "Piezoelectric Ceramic Transformer," *Ferroelectrics*, 28, 1980, pp. 403-406.
- 16) 한득영, "적층형 PZT 압전변압기의 특성에 관한 연구," 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1984.
- 17) 박창엽, 한득영, "적층형 PZT 압전변압기의 특성해석," *대한전기학회지*, 33, 1984, pp. 29-37.
- 18) R. C. Weast (Ed), Handbook of Chemistry and Physics, 54th Edition, CRC Press, Cleveland, 1973, P. E-59.