

압전 변압기의 기초 이론



소형종

건국대학교 전기공학과 전기전자 재료 및 센서 연구실



안형근

건국대학교 전기공학과 조교수



한득영

건국대학교 전기공학과 교수

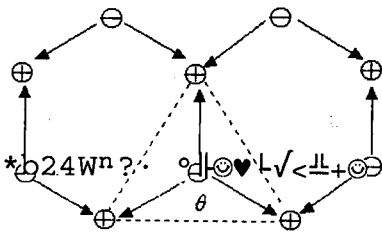
1. 서론

압전 특성이란 결정질 재료가 기계적 응력을 받으면 전하가 발생하는 현상으로 최근에는 이런 압전 특성을 갖는 각종 압전 재료가 의료기기, 비파괴 검사, Sonar 등의 초음파 응용에서 공장 자동화, 로봇, 정밀 위치 결정에 사용되는 액추에이터 등 그 응용 범위가 증가함에 따라 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다. 이 압전 현상의 응용 분야중에 하나가 압전 변압기이다.

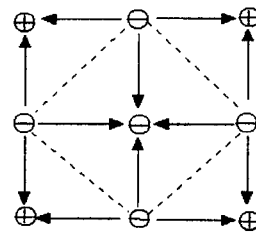
압전 변압기를 이해하기 위해서는 먼저 압전 현상에 대한 이해가 필요하다. 압전 현상이란 결정에 기

계적 압력을 가하여 이온을 변위시키면 양전하와 음전하의 분포가 비대칭으로 되어 전기 쌍극자 모멘트가 유기되어 표면에 전하가 나타나는 현상이다. 그림 1의 (a)에서 결정을 x 방향으로 끌어당기면 각 θ 가 증가하고 압축시키면 θ 가 감소하여 각각 +y, -y 축 방향의 분극이 생긴다.

그림 (b)는 대칭성을 가진 결정으로 어떤 외부의 힘에 대해서도 그 대칭성을 잃지 않으므로 분극이 일어나지 않는다. 반대로 압전성을 갖는 (a) 결정은 전기장을 인가하면 기계적인 변형이 생겨 그 부호는 전기장의 방향에 따라 변한다. 이처럼 기계적인 변형을 가하면 전하들이 생겨 전기적 에너지를 생성하는 현상을 정압전 효과라 하며 이와 반대로 전기적



(a) 대칭의 중심이 없다 : 압전성



(b) 대칭의 중심이 있다

그림 1. 결정의 전하 대칭성과 압전성의 관계 : x→, y↑ 방향

에너지를 가했을 때 기계적 변형이 일어나는 현상을 역압전 효과라 한다. 압전변압기는 이런 현상을 갖는 압전체의 결합으로 발전부에서는 역압전 효과로 기계적인 변형을 일으키고 이 기계적인 변형은 구동부의 입력이 되어 압전 효과에 의해 전기적 에너지를 출력한다.

이런 압전 현상은 1880년 프랑스의 Jacques and Pierre Curie 형제가 결정에 일정한 방향으로 압력을 가할 경우 그것에 비례하는 전하가 표면에 발생하고, 압력을 제거하였을 때 전하가 없어지는 현상을 발견한 것을 시작으로 1921년에는 프랑스의 P. Langevin이 수진동자를 이용하여 초음파 응용의 시초가 되는 수중 음파 탐지용 압전 소자를 개발하였으며, 1945년에는 V. Hippel 등이 최초의 압전 세라믹스인 BaTiO₃를 발견하였으나 당시 BaTiO₃ 세라믹스로 만든 압전변압기의 승압비가 50~60배 정도였으며 낮은 상전이 온도와 공진 주파수의 온도 의존성이 떨어진다는 단점 때문에 실용화에 제한을 받아왔다. 1954년 H.Jaffe 등에 의해 온도안정성이 뛰어나며 상경계 영역에서 압전특성이 우수한 Pb(Zr, Ti)O₃계 세라믹스가 개발되었으며 일본의 土屋는 이를 이론적으로 해석하고 특성을 향상시켜 수백 배의 승압비를 갖는 재료를 개발하였다.

압전 변압기는 1956년 미국의 G. E사의 C. E. Rosen에 의하여 최초로 원리와 응용에 관한 연구가 이루어 졌으며 P. A. Berkum, H. W. Katz에 의해 발전되었다. 압전변압기는 착화소자와 세라믹 필터의 기능을 합한 것으로 권선형 변압기에 비해 구조가 간단하고 소형이며 전기적 손실이 적다는 장점을 가지고 있다. 또한 출력이 고전압 소전류이므로 음이온 발생기, 전자복사기, 치한 퇴치기, 고주파 변압기 등의 분야에 응용되고 있다. 최근에는 수요가 증대되는 휴대용 컴퓨터의 back-light용 인버터에 응용되고 있다. 이 글에서는 Rosen 형 압전 변압기의 구조와 원리에 대해서 기술한다.

2. 압전 변압기의 구조 및 원리

2.1 압전 변압기의 동작 원리

그림 2는 압전변압기의 구조로 본 변압기의 종류이다.

압전변압기는 그림 2와 같이 여러 가지 형태로 제안되고 있으나 제작의 용이성과 실용성 면에서 Rosen형(장방형) 압전 변압기가 유리하다. 장방형 압전 변압기는 그림 2의 (a)에서 보는 바와 같이 판 형태의 세라믹 소자에 한쪽 반은 두께방향의 단면에

다른 한쪽은 길이방향의 단면에 각각 전극을 부착하였으며, 전자는 두께방향으로 후자는 길이 방향으로 각각 직류 고전압을 가하여 분극처리 하였다. 그림에서 화살표 방향(P 방향)이 분극 방향을 나타낸다. 두께 방향의 전극부를 구동부, 길이 방향의 전극부를 발전부라 하며 각각 권선형 변압기의 1차측 및 2차측에 해당한다.

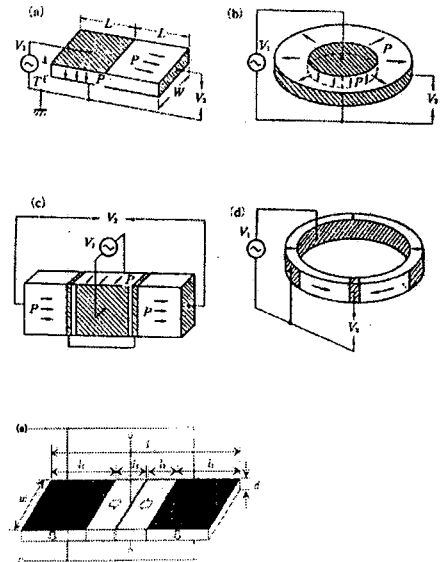


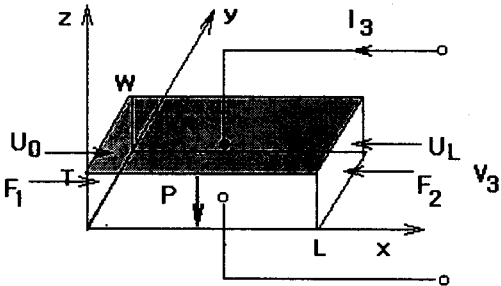
그림 2. 압전 변압기의 종류

압전변압기의 동작은 구동부의 길이 L 과 발전부의 길이 L 의 합으로 표현되는 총 길이 $2L$ 에 의해서 결정되는 고유 공진 주파수의 입력 전압을 구동부 측에 인가 하면 역 압전 효과에 의해서 길이 방향으로 강한 진동이 발생한다. 이 기계적 진동은 압전 효과에 의해 발전부측에 전하가 발생하며 따라서 출력단에서 교류 고전압을 얻을 수 있다. 즉 구동부측에 축적된 정전에너지가 역압전 효과에 의해서 탄성에너지로 변환되며, 세라믹 소체는 일체형이기 때문에 변환된 탄성에너지가 구동부측에서 발전부측으로 이동해 간다. 이때 탄성에너지는 압전세라믹 소자의 응력과 변형의 곱으로 표현되고 이렇게 해서 전달된 탄성에너지는 압전 효과에 의해서 다시 정전에너지로 변환되는데 구동부 측의 정전 용량에 비하여 발전부측의 정전용량을 충분히 작게 함으로서 교류 고전압을 얻을 수

있다.

2.2 압전변압기의 등가회로

압전 변압기의 등가 회로는 여러 가지 형태가 있으나 주로 Mason의 등가 회로와 KLM의 등가 회로가 사용된다. 이 글에서는 Mason의 등가 회로를 사용하였다.



(a) Rosen형 압전 변압기의 전극부

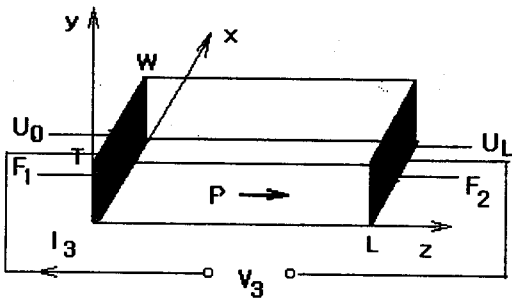


그림 3. (b) Rosen형 압전 변압기의 구동부

그림 3의 (a)는 두께방향으로 분극된 방향의 진동자로서 두께방향으로의 전 계와 압전적으로 결합된 길이 방향의 진동을 일으킨다. 전극이 상하면에 부착되어 있고 두께와 폭에 비해 길이가 훨씬 큰 압전 진동자에서의 두께방향의 진동에 관한 압전 방정식은 다음과 같다.

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3$$

탄성파의 파동방정식은 뉴턴의 제2법칙 $F=ma$ 로부터

$$\left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \cdot dx\right) dydz = (\rho \cdot dx dy dz) \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho s_{11}^E} \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2}$$

이 구해지고 이 방정식의 해는

$$\xi_1 = [A \sinh(\gamma x) + B \cosh(\gamma x)] e^{j\omega t}$$

입자 속도 u 는

$$u = \frac{\partial \xi_1}{\partial t} = j\omega [A \sinh(\gamma x) + B \cosh(\gamma x)] e^{j\omega t}$$

으로 표현된다.

$x=0, x=l$ 에서의 입자 속도를 U_0, U_l 라는 경계조건을 적용하여 계수 A, B를 구하여 변위를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\xi_1 = -\frac{1}{j\omega} \left[\left\{ \frac{U_0}{\tanh(\gamma L)} + \frac{U_l}{\sinh(\gamma L)} \right\} \sinh(\gamma x) - U_0 \cosh(\gamma x) \right]$$

변형 S 는

$$S_1 = \frac{\partial \xi_1}{\partial x} = -\frac{1}{j\omega} \left[\left\{ \frac{U_0}{\tanh(\gamma L)} + \frac{U_l}{\sinh(\gamma L)} \right\} \cosh(\gamma x) - U_0 \sinh(\gamma x) \right]$$

전극면적을 A 라 할 때 입력 전류 I_3 는 다음과 같다.

$$I_3 = \int_A \frac{\partial D_3}{\partial t} dA = -N [U_0 + U_l] + \frac{V_3}{Z_E^{LC}}$$

이를 가지고 압전 방정식에 대입하면 아래와 같은 matrix 형태를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_0}{\tanh(\beta l)} + N^2 Z_E^{LC} \right) \\ \left(\frac{Z_0}{\tanh(\beta l)} + N^2 Z_E^{LC} \right) \\ N Z_E^{LC} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{Z_0}{\sinh(\beta l)} + N^2 Z_E^{LC} \right) N Z_E^{LC} \\ \left(\frac{Z_0}{\tanh(\beta l)} + N^2 Z_E^{LC} \right) N Z_E^{LC} \\ N Z_E^{LC} \quad Z_E^{LC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

그림 2의 (b)는 길이 방향으로 분극된 길이 방향 진동자로서 좌우로 전계와 압전적으로 결합된 길이 방향의 전계를 일으킨다. 전극이 양면에 부착되어 있고 길이 방향에 관한 압전 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_3 &= s_{33}^D T_3 + g_{33} D_3 \\ E_3 &= -g_{33} T_3 + \beta_{33}^T D_3 \end{aligned}$$

전극부와 같은 방법으로 해서 얻은 결과가 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \xi_3 &= -\frac{1}{j\omega} \left[\left\{ \frac{U_0}{\tanh(\gamma L)} + \frac{U_1}{\sinh(\gamma L)} \right\} \sinh(\gamma z) - U_0 \cosh(\gamma z) \right] \\ S_3 &= \frac{\partial \xi_3}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma}{j\omega} \left[\left\{ \frac{U_0}{\tanh(\gamma L)} + \frac{U_1}{\sinh(\gamma L)} \right\} \cosh(\gamma z) - U_0 \sinh(\gamma z) \right] \end{aligned}$$

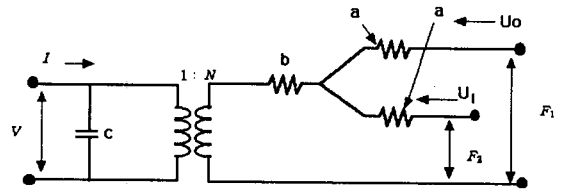
$$V_3 = \int_0^L E_3 dz = \frac{c_{33}^D g_{33}}{j\omega} [U_0 + U_1] + Z_E^{LC}$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{\tanh(\gamma L)} + N^2 Z_E^{LC} \\ \frac{Z_0}{\sinh(\gamma L)} + N^2 Z_E^{LC} \\ \frac{c_{33}^D g_{33}}{j\omega} \end{bmatrix}$$

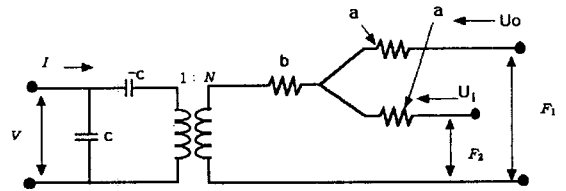
$$\begin{bmatrix} \frac{Z_0}{\sinh(\gamma L)} + N^2 Z_E^{LC} \frac{c_{33}^D g_{33}}{j\omega} \\ \frac{Z_0}{\tanh(\gamma L)} + N^2 Z_E^{LC} \frac{c_{33}^D g_{33}}{j\omega} \\ \frac{c_{33}^D g_{33}}{j\omega} \quad Z_E^{LC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

여기서
첨자 1, 2, 3 : 방향 성분

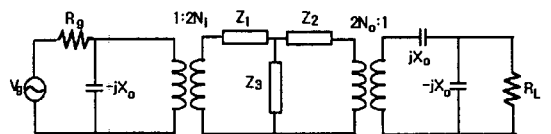
- S : 변형(strain)
- T : 응력(stress)
- D : 전속밀도
- E : 전계의 세기
- k_{31}, k_{33} : 전기기계결합계수
- d_{31}, g_{33} : 압전 상수
- ϵ_{33}^T : 응력이 일정할 때의 유전율
- c_{33}^D : 전속밀도가 일정할 때의 stiffness
- s_{11}^E : 전계가 일정할 때의 compliance
- ρ : 밀도
- Q_m : 기계적 품질계수
- Z_0 : 특성 임피던스
- Z_E^{LC} : 고정 임피던스(clamped impedance)
- N : 압전 변압기의 변성비, γ : 위상상수이다.



(a) 전극부의 등가회로



(b) 구동부의 등가회로



(c) (a)와 (b)를 결합한 압전 변압기의 등가회로
그림 4. 압전 변압기의 등가회로

$$a = Z_0 \tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right), \quad b = \frac{Z_0}{\sinh\left(\frac{\gamma L}{2}\right)}, \quad c = Z_E^{lc}$$

전극부와 구동부의 matrix 형태를 등가회로로 표현하면 그림 4의 (a), (b)로 나타난다.

압전 변압기는 이 두 압전 체의 결합이므로 그 등가 회로는 그림 4의 (c)와 같다.

2.3 압전 변압기의 진동 특성

압전 변압기는 전기 에너지가 기계적인 에너지로의 전환 즉 진동의 형태로 변환된다. 압전 변압기는 공진 주파수를 갖는 전압이 인가되었을 때 작동한다. 이 공진 주파수는 압전 변압기의 길이방향의 치수 $2L$ 에 의해서 결정되는 된다. c 를 소자중의 음속이라 하면 공진주파수 f_r 은

$$f_r = \frac{c}{4L}$$

로 표현된다.

이런 압전 변압기의 진동 모드에는 3가지가 있으나 주로 $\frac{1}{2}\lambda$ mode (공진 주파수 f_r 로 진동할 때)와 λ mode ($2f_r$ 로 진동할 때)가 사용된다. 압전 변압기의 지지는 변위가 0 인 곳 응력이 최대인 곳을 지지한다. 그림 5는 이 두 진동 모드시의 변위와 응력의 파형을 나타낸 것이다.

2.4 압전 변압기와 권선형 변압기의 비교

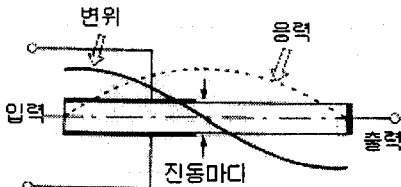
압전 변압기는 고전압 발생장치로서 종래의 권선형 변압기와 비교하여 특징을 보면 표 1과 같다.

압전 변압기가 일반 권선형 변압기에 대해 고효율과 소형 경량, 손실이 적고 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있으나 출력 전류가 적고 주파수 대역폭이 작다는 단점을 가진다. 종래의 일반 권선형 변

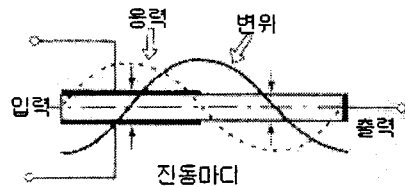
압기는 2차측 부하저항을 크게 하면 입력 임피던스도 상승하나 압전 변압기의 경우에는 공진 주파수로 부하 저항을 크게 하면 역으로 입력 임피던스가 감소한다. 그리고 권선형 변압기에 존재하는 동선에 의한 전기적 손실이 압전 변압기에는 존재하지 않고 기계적 진동에 의한 손실은 지지 점에 의해 발생되며 그 크기는 권선형 변압기의 손실에 비해 미흡하다. 또한 출력측의 단락에 대해서 급격히 전압이 작아지므로 위험성이 없어 보호회로가 간단하나 전압조정이 어렵고 대전류를 얻을 수 없다는 단점이 있다.

표 1. 압전 변압기와 권선형 변압기의 비교

	권선형 변압기	압전 변압기
원리	전자 유도	압전-전왜 효과
구성	권선(동선), 철심	압전 소자, 전자 부품
주파수 특성	어떤 주파수에서도 동작	소자의 공진 주파수만으로 동작
승압비	수10배 정도	수100배
출력 전력	고출력	고전압, 저전류에 적합
전압 조정	양호	불량
출력 파형	입력 전압 파형과 동일	정현파
연소성	가연성	불연성
구조	복잡	간단
용량, 증량	크고 무거움	소형 경량



(a) $\frac{1}{2}\lambda$ mode



(b) λ mode

그림 5. 진동 모드

3. 압전변압기의 응용

압전 변압기는 처음에는 초음파를 이용한 어군 탐지기로 사용되었다. 하지만 주로 소형 정보 기기의 고압 발생장치로 사용되었으며 현재는 노트북의 LCD back-light의 구동을 위해서 주로 사용된다. LCD back-light의 구동 전압이 1200[V] 정도이므로 압전 변압기를 사용하면 작은 입력전압을 가지고도 충분히 구동이 가능하다. 그 외에도 집진기용 고압 발생기, 정전도장용 고전압 발생기 등에 이용된다.

4. 최근의 연구 동향

Rosen이 장방형 압전 변압기를 제안한 이래 여러 가지 형태의 압전 변압기가 제안되었으나 제작의 용이성, 실용성 등 여러 측면에서 장방형 변압기가 널리 연구되고 있다. 또한 압전 변압기의 분극처리 문제점을 개선하고 높은 승압비를 얻기 위해 여러 가지 전극구조에 대한 연구가 병행되어 왔다. 새로운 전극구조 및 wiring 방법을 제안하고 simulation을 통해 분극처리의 어려움을 줄이고 또한 실제 응용에서 승압비를 높일 수 있음이 보고되었다. 일본의 NEC사는 기존 압전 변압기의 문제인 변압기의 유지, 전극 인출의 어려움을 해결한 대칭형 3차 Rosen 방식의 압전 변압기를 개발하였다.

최근에 출력용량을 높이기 위해 적층형 압전변압기에 대한 연구가 이루어지고 있는데 이는 출력 전류와 승압비에서 큰 향상을 보이고 있으나 변압기의 절연 및 지지가 어렵고 또한 내부 전극 재료의 개발과 제조시 doctor blade 기술을 이용한 tape casting 방법을 사용한다는 문제점이 있다.

7. 향후 과제

압전 변압기는 전압의 변환에 압전체의 기계적인 공진 현상을 이용하고 있으며, 이것이 에너지의 이용 효율을 높이는데 있어서는 중요하지만 압전 재료설계, 형상 및 치수 결정, 전극의 pattern, print 회로 기판의 고정 방법 및 구동회로 방식 등 많은 기술 요소가 관련되고 있기 때문에 각각의 최적화가 필수적이다. 따라서 많은 연구에도 불구하고 압전 변압기 및 전자부품으로서 실제 응용하기 위해서는 여전히 많은 문제점을 지니고 있다. 특히 압전 변압기는 항상 진동하고 있으므로 재료의 피로에 대한 문제, 그리고 고전압 인가시 표면에 인쇄된 전극이 벗겨질 수 있다. 또한 지금까지 대량으로 사용된 압전 변압기의 응용제품은 없었기 때문에 전자부품으로서 충분한 신뢰성 품질 시험의 문제도 남아있다.

Reference

1. H. W. Katz, "Solid State Magnetic and Dielectric Device", pp. 87-130.
2. 박창섭 (1994), "전지 전자용 압전세라믹스", pp. 80-89.
3. WARREN P. MASON (1964), "PHYSICAL ACOUSTICS Principles and Methods", Volume I-part A, pp. 219-242.
4. J. E. NYE (1957), "PHYSICAL PROPERTIES OF CRYSTALS", pp. 68-81.
5. 朴志植 (1988), "異方性 및 損失을 考慮한 長方形 PZT壓電세라믹變壓器의 모델링", 서울대학교 대학원 박사논문.
6. D. Y. Han, J. H. Kim, M. H. Nam, S. M. Kang, "Analysis of a Tree-layered Piezoelectric Ceramic Transformer Filter", IEEE Trans. Circuit & System-I : Fundamental Theory & Application, Vol. 42, No 6, June 1990.