

## 압전 세라믹 Converter의 특성 및 기술동향



**이수호**  
영월공과대학 전기과 전임강사



**류주현**  
세명대학교 전기공학과 부교수



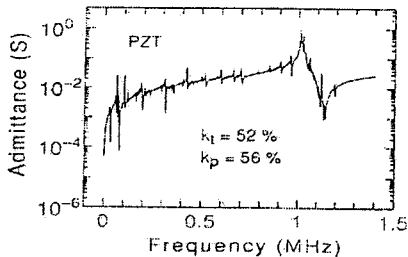
**홍재일**  
동서울대학 전기과 조교수

### 1. 서 론

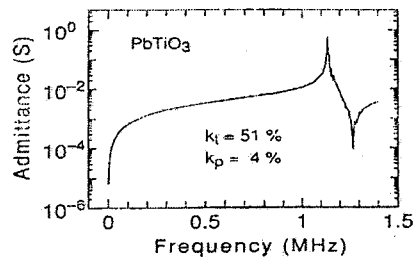
산업의 발달에 의해 전자 제품의 소형, 박형화가 되고 있는 실정이다. 따라서 고전력, 고효율을 가지는 전원 공급원의 필요성과 더불어 소형, 경량화 및 박형화를 요구하고 있다.

세라믹을 이용한 압전 변압기는 50년대말에 개발되어 TV 수신기의 고압전원등 고전압, 전력용 Inverter에 응용하고자 하였으나, 고강도와 압전 특성이 우수한 압전 세라믹 재료의 개발이 늦어 그동안 응용이 되지 못하였다. 그러나 최근에 압전 특성이

우수한 재료의 개발등에 힘입어 일본등에서 고전력용 압전 변압기의 개발로 인하여 노트북 컴퓨터의 display에 이용되는 backlight 구동용 전원으로 실용화가 되고 있다. 그러나 고전압원을 얻기 위해 제안된 Rosen형 압전 트랜스포머는 길이 방향 진동 모드로 구동 되기에 최대 구동 주파수가 200~300KHz이며, 또한 내부 임피던스가 크기 때문에 전력 손실을 가져와 고전력 밀도를 가지기는 어렵다. 그리고 종래의 권선형 트랜스포머는 1MHz 이상의 switching 주파수에서 철손 및 동손의 증가에 의해 사용하기가 어려우며, 소형화에도 많은 어려움을 가지고 있다.



(a) PZT ceramics.



(b) Modified  $PbTiO_3$  ceramics (PT-1).

그림 1. 주파수에 따른 임피던스

따라서 두께 방향 진동모드로 구동되는 트랜스포머는 전압공급원의 크기를 소형화시킬 뿐만 아니라 고주파수 (MHz대)에서 구동되기에 고전송전력 밀도를 가지는 등의 장점을 가지고 있어 최근에 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 두께 진동 모드를 이용한 압전 세라믹 converter는 다음의 몇가지 장점을 가지고 있다. (1) 공진주파수는 진동모드의 길이에 반비례하기에 고주파수에 구동할 수 있다. (2) 권선형 변압기보다 고전력 밀도의 구동이 가능하다. (3) 입력과 출력부의 절연성이 높다. (4) 전자 노이즈의 발생이 없다. (5) 소형, 경량화가 가능하다. (6) 단가가 낮다.

## 2. 압전 converter용 재료

두께 방향 진동 모드를 이용하는 압전 세라믹 converter는 전기기계결합계수의 이방성( $k_t/k_p$ )이 커야 한다. 현재 널리 사용되는 PZT계 세라믹스는 전기기계결합계수 뿐만 아니라 각종 특성이 우수하다고 알려져 있다. 그러나 PZT계 세라믹스는 압전 stiffed효과를 위한 큰 전기기계결합계수  $k_t$ 를 가질 뿐만 아니라 압전 unstiffed효과를 가지는  $k_{31}$ 과  $k_p$ 도 크다. 따라서 PZT계 세라믹스는 두께 방향 진동모드로 공진되는 AC전압을 인가시킬 때 두께 진동과 경방향 진동이 동시에 발생하는 문제점을 가지게 되어 그림 1(a)의 주파수에 따른 임피던스도가 고주파수에서 불안정한 현상을 나타낸다. 따라서 전기기계결합계수의 이방성이 큰 물질로 알려진  $PbTiO_3$ 계 세라믹스를 많이 사용한다. 물론 큰 이방성에 의해 소결의 문제점을 가지고 있어 A-site 및 B-site를 치환시켜 소결 특성을 개선하고자 하는 연구도 많이 이루어지고 있다.  $PbTiO_3$ 계 세라믹은  $k_p$ 의 값이 거의 나타나지 않기 때문에 그림 1의 (b)와 같이 주파수에 대한 임피던스가 깨끗하게 나타난다.

## 3. 압전 세라믹 converter의 구동원리

두께 진동 모드를 이용하는 압전 세라믹 converter의 일반적인 구조는 그림 2와 같이 입력층과 출력층을 적층하여 구성한다. 각 층의 분극은 두께 방향으로 행하며, 분극은 서로 반대방향으로 한다.

에너지 변환 원리는 입력층에 교류 전압 또는 직류전압을 switching하여 가하면, 압전 트랜스포머의 두께 방향 전기기계 결합계수  $k_t$ 에 의해 두께 확산 진동이 발생하여 출력층까지 전달된다. 출력층의 진동은 역압전 효과에 의해 다시 교류전압이 발생하는 전기-기계-전기 에너지의 변환에 의해 전력이 전송하게 되며, 전송의 효율을 올리기 위해서는 두께 방향의 공진을 이용하는 것이 좋다.

또한 공진 모드 이용시 반파장 모드인 1차 공진 모드보다 전파장 모드인 2차 공진모드가 주파수 대역이 넓으며, 가장 낮은 임피던스를 나타내는 등 우수한 특성을 얻을 수 있다. 이는 그림 3의 stress 분포와 진동변위의 관계를 살펴 보면 더욱 자세히 알 수 있다. 그림 3의 (a)는 1차 공진모드인 반파장 공진이 일어나는 것으로 입력층과 출력층이 확산과 수축이 동시에 일어남을 알 수 있다. 압전 물질에서 발생 전하량은 stress값에 비례하는데, 반파장 공진모드인 경우 절연층에 최대 stress가 발생한다. 그러나 전파장 공진모드인 2차 공진모드로 구동시킬 경우 최대 stress 분포가 입력과 출력층의 가운데에서 발생됨을 알 수 있다.

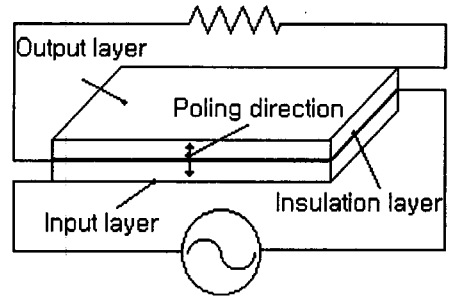


그림 2. 압전 세라믹 converter의 구조

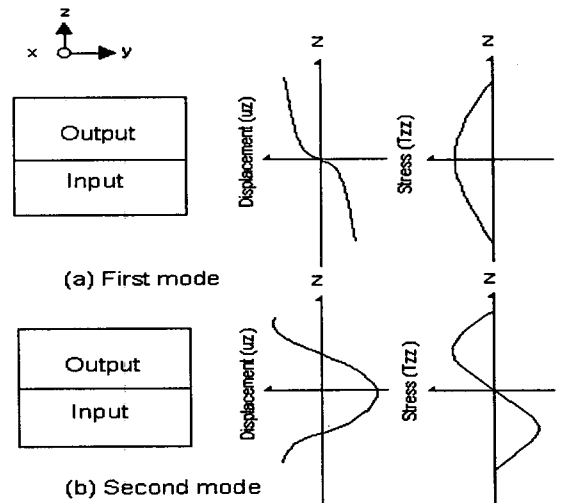


그림 3. 압전 세라믹 converter의 변위와 stress 분포

#### 4. 등가회로에 의한 해석

압전 트랜스포머는 분포 등가회로 또는 집중등가회로를 사용하여 해석할 수 있다. 일반적으로 집중 등가회로는 분포 등가회로에 비교하여 쉽게 계산되며, 집중 등가회로에 사용된 각 요소의 값들은 공진주파수에서 어드미턴스 원선도에 의해 측정할 수 있다. 그림 4은 압전 트랜스포머의 집중 등가회로를 보여주고 있으며 변압기의 전송특성을 해석하기 위해서는 그림 5와 같이 2차측을 1차측의 값들을 변환시켜 계산하여야 한다. 그림 4의  $C_2$ 와  $R_L$ 은 잘 알려져 있는 직병렬 등가 변압기를 사용하여 그림 5의  $C'$ 와  $R'$ 로 바꾼다. 그림 4에서 알 수 있듯이 2차측에 부하를 가지면 압전변압기의 공진주파수는 2차측 병렬 캐패시턴스  $C_2$ 와 부하저항  $R_L$ 에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 부하저항  $R_L$ 의 증가에 따라 공진주파수가 증가함을 알 수 있다.

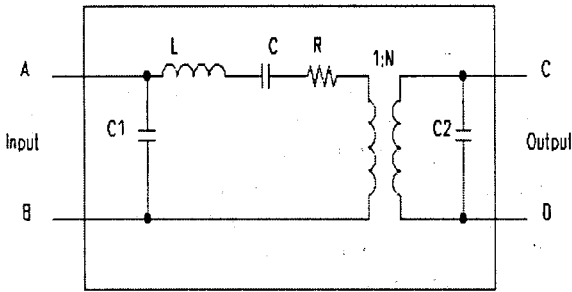


그림 4. 압전 트랜스포머의 등가회로

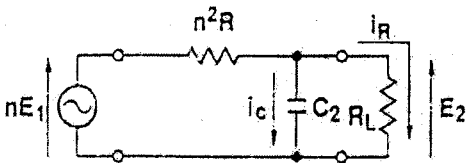


그림 5. 1차로 환산된 압전 트랜스포머의 등가회로

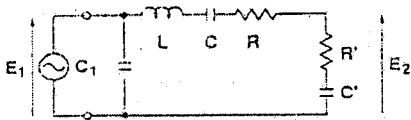


그림 6. 2차로 환산된 압전 트랜스포머의 등가회로

회로해석을 간단하게 하기위해 그림 6에 보여주고 있는 것처럼 그림 4의 값들을 이차측으로 전환시켜 회로 방정식을 해석하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$nE_1 = n^2R(i_R + i_C) + E_2 \quad (1)$$

$$i_C = j\omega_s C_2 E_2 \quad (2)$$

$$i_R = E_2 / R_L \quad (3)$$

여기서  $\omega_s$ 는 공진각주파수이고,  $1/\sqrt{LC}$ 로 주어진다.

식 (1)-(3)으로부터, 전압 이득 G는 다음 식과 같이 주어진다.

$$G = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n}{1 + \frac{n^2R}{R_L} + j\omega_s C_2 n^2R} \quad (4)$$

$R_L$ 이 무한대일 때, G는 식 (5)에 나타난 것처럼 최대가 된다.

$$G_{MAX} = \frac{n}{\sqrt{1 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2}} \quad (5)$$

출력  $P_2$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$P_2 = \frac{|E_2|^2}{R_L} = \frac{n^2 E_1^2}{R_L [(1 + \frac{n^2R}{R_L})^2 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2]} \quad (6)$$

식 (6)의 분모가 최소가 될 때  $P_2$ 는 최대값이 된다.  $P_2$ 의 최대값을  $P_{2MAX}$ 로 나타낸다.  $P_{2MAX}$ 는

$$P_{2MAX} = \frac{n^2 E_1^2}{2R(1 + \sqrt{1 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2})} \quad (7)$$

여기서  $(\omega_s C_2 n^2 R)^2 \ll 1$  일 때,  $P_{2MAX}$ 는 식 (8)처럼 간단히 나타낼 수 있다.

$$P_{2MAX} = \frac{n^2 E_1^2}{4R} \quad (8)$$

식 (6)에서  $R_L$ 의 값은

$$R_L = \frac{n^2 R}{\sqrt{1 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2}} \quad (9)$$

또한  $(\omega_s C_2 n^2 R) \ll 1$ 인 경우  $R_L$ 은 다음과 같다.

$$R_L = n^2 R \quad (10)$$

따라서 입력  $P_1$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$P_1 = n^2 R |i_C + i_R|^2 + P_2 = E_2^2 \left[ \frac{n^2 R + R_L}{R_L^2} + (\omega_s C_2)^2 n^2 R \right] \quad (11)$$

효율  $\eta$ 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{1 + \frac{n^2 R}{R_L} + (\omega_s C_2)^2 n^2 R R_L} \quad (12)$$

식 (12)의 분모가 최소값일 때, 효율  $\eta$ 는 최대값  $\eta_{MAX}$ 가 된다.

따라서,

$$\eta_{MAX} = \frac{1}{1 + 2\omega_s C_2 n^2 R} \quad (13)$$

식 (13)과 식 (12)에서  $R_L$ 은

$$R_L = \frac{1}{\omega_s C_2} \quad (14)$$

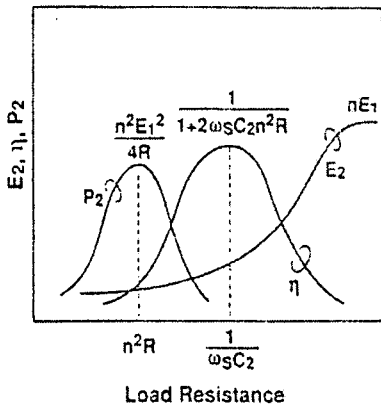


그림 7. 주파수에 따른 압전특성

즉, 출력 전압  $E_2$ 와 출력 전력  $P_2$  및 효율  $\eta$ 의 특성은 그림 7에 나타낸 것처럼 계산된다. 그림 7은 출력  $P_2$ 와 효율  $\eta$ 의 부하특성이 각각 peak를 가진다는 것을 의미한다.

## 5. 압전 트랜스포머의 전력 전송

### 5-1 구동 및 제어방법

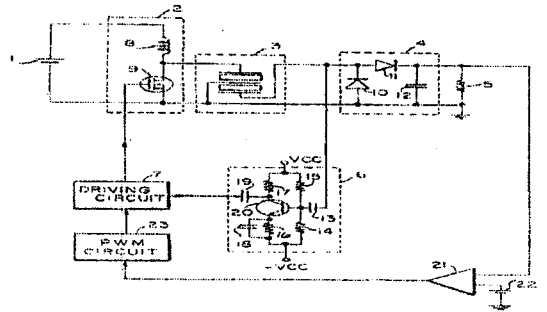


그림 8. DC-DC converter 회로도

압전 트랜스포머를 DC-DC converter로 사용하기 위해서는 먼저 1차측의 DC 입력을 switching을 하여야 하며, 2차측에 발생하는 교류분을 다시 정류하는 정류회로가 반드시 첨가되어야 한다.

그림 8은 DC-DC converter의 사용을 위한 가장 간단한 방법을 나타낸 회로이다.

만약 그림 8의 회로도에 직류가 아닌 구형파와 같은 AC전압이 압전변압기의 입력단자에 공급할 때 그림 4에서 보는 것처럼 입력에너지의 대부분은 입력 캐패시턴스  $C_1$ 에서 방전과 충전으로 소모되며, 남은 에너지만이 압전변압기를 위한 LC직렬 공진회로를 통하여 정류회로에 전송된다. 따라서 입력 캐패시턴스  $C_1$ 에서 방전과 충전에 의해 전력 손실이 발생됨을 알 수 있다. 이를 막기 위해 그림 9과 같은 converter회로도가 제시되었다. 이는 압전 트랜스포머가 half-bridge 회로 형태인 두 개의 transistor에 의해 교대로 switch될 때 압전변압기는 유도자가 아닌 단지 반도체 switching소자에 의해서만 switch된다. 그러나  $C_1$ 에 의해 야기되는 반작용력은 반도체 switching 소자에서 나타난 switching 손실만으로 유도자를 사용한 것에 비해 전력 손실을 줄일 수 있다. 즉, 공진 switching 법을 사용할 때  $C_1$ 에 의한 전력손실의 산출은 중요하다.

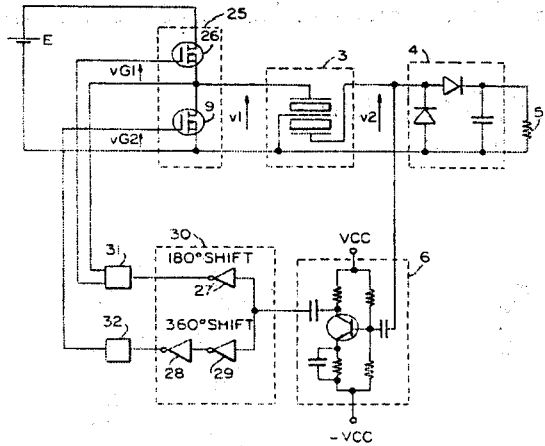


그림 9. DC-DC converter 회로도

## 6. 국외 개발 동향

고압용 압전 트랜스포머는 이미 일본등에서 개발하여 냉음극 방전등 등에 실용화를 이루고 있는 실정이다. 그러나 converter로서의 응용은 현재 실용화를 위하여 일본 등에서 많은 연구가 되어지고 있다. 또한 국내에서도 삼성 및 LG등의 연구소에서 연구에 착수하였으며, 본 연구실에서도 이미 converter에 대한 연구를 시작하여 얻어진 결과를 학회 논문지 및 국제 논문지등에 발표하였다. 그러나 아직 출력이 약한 단점의 보완이 필요하고 또한 MHz이상 구동되기에 구동회로를 위한 추가적인 연구가 뒤 따라야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. O. Ohnishi, H. Kishie, A. Iwamoto, Y. Sasaki, T. Zaitzu, and T. Inoue, "Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibratin mode for power supply", IEEE Ultrasonics Symposium Proc., pp. 483~488, 1992.
2. T. Zaitzu, T. Inoue, O. Ohnishi, A. Iwamoto, "2MHz power converter with piezoelectric ceramic transformer", IEEE INTELEC '92 Proc., pp. 430~437, Oct. 1992.
3. S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue, and S. Hirose, "Third dorder longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter", IEEE International Ultrasonic Symposium Proc., Nov. 1994.
4. O. Ohmishi, Y. Sasaki, T. Zaitzu, H. Kishie, T. Inoue, "Piezoelectric Ceramic Transformer for Power Supply Operating in Thickness Extensinonal Vibration Mode", IEICE Trans. Funamentals, Vol. E79-A, No. 12, pp. 2098~2105, 1994.
5. 山中克利, 壓正仁, 原田耕介, "電力變換特性를考慮した壓電トランス의等價回路とスイッチング電源への應用", 電子情報通信學會報, Vol. PE92-68, No. 2, pp. 25~31, 1993.