

공진모드의 변화에 따른 압전변압기의 특성에 관한 연구

A Study on Design and Analysis of Piezoelectric Transformer for Resonance Mode

정현호, 이상기, 박태곤, 김명호, 이원재*

(Hyon-Ho Jueng, Sang-Ki Lee, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim, Won-Jae Lee)

Abstract

This paper present a new sort of multilayer piezoelectric ceramic transformer for the application to AC-adapters. This piezoelectric transformers operate in the second and third length extensional vibration mode. And the output performance of two types of piezoelectric transformers are compared by ANSYS, which is one of the FEM analysis program. As a result, the minimum displacement was occurred at the two points in second length extensional vibration mode and three point in third length extensional vibration mode. One is the middle of input and the other is middle of output parts. And output voltage was inversely decreased by increasing number of output layers. Also The third mode type is shown higher power transition ratio than the second mode type.

Key Words(중요용어) : piezoelectric Transformer, multilayer, Finite Element Method, Step-Down

1. 서 론

압전세라믹을 이용한 변압기는 1957년 미국 G.E.사의 C. A. Rosen에 의해 개발되었고, P. A. Barkman, A. E. Craford 등에 의해 실용화 연구가 진행되었다. 그러나 초기의 제품들에는 발열로 인한 세라믹의 열화 현상으로 장시간 사용이 곤란하였고 이에 신뢰성 문제가 대두되어 기계적강도가 우수한 소재의 개발이 선행되어야 했다. 1990년에 들어와서 압전세라믹의 소재특성이 개선되어 고전압 발생용 압전트랜스의 판매가 이루어지기 시작하였다. 압전트랜스의 경우 권선이 존재하지 않으므로 구조가 간단하고 소형·경량화, 박형화가 가능하다는 점,

표피·근접효과가 없어서 고주파화에 유리하다는 점, 전자(電磁) 노이즈가 발생하지 않는다는 점등의 장점을 갖고 있는 반면, 압전트랜스포머의 전력 변환기회로의 응용에는 구동방법이 어렵다는 점, 해석이 어렵다는 점등의 단점도 갖고 있으나 충분히 해결이 가능한 문제이다.^[1] 지금은 압전트랜스의 소형경량의 특성을 이용하여 노트북과 같은 휴대용 제품들을 위한 전원소자로서의 연구가 활발히 진행되고 있다.^[2]

이에 대하여 이 논문은 승압비가 적은 단판형 압전세라믹의 단점을 보완한 적층형 압전세라믹을 이용하여 출력층의 층수를 달리 하고 두 번째 길이방향 공진 모드와 세번째 길이방향 공진 모드일때의 적절한 구조로 설계하여 강압용 압전트랜스를 구성하였고 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 이의 특성을 해석하여 그 출력특성을 살펴보았다.

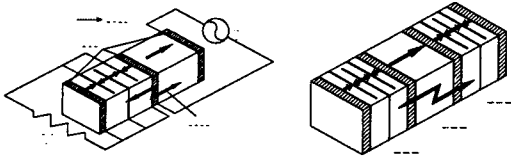
2. 본론

창원대학교 전기공학과, 창원대학교*세라믹공학과,
**한국전기연구소 신소재연구그룹,
(경남 창원시 사림동 9번지 창원대학교)
Fax: 0551-263-9956
E-mail : sassy9@orgio.net

2.1 압전트랜스(PT)의 구조와 원리

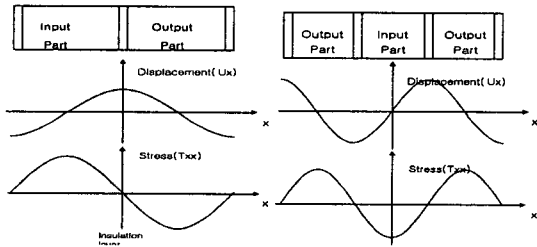
길이방향 진동모드로 동작하는 압전트랜스의 2차 길이방향 공진 모드일 때와 3차 길이방향 공진 모드일 때의 구조를 Fig.1에서 보여주고 있다(입력층: 출력층=1:4). 입력층은 단일층을 사용하여 입력전압을 200[V]로 하였고, 이에 대해 출력층의 층수를 각각 2, 6, 10, 14, 18로 하였다.

사이즈는 두께, 넓이, 높이를 5, 8, 30[mm]로 하였고, 내부의 화살표는 분극의 방향이다. 압전트랜스의 말단부위와 입력층과 출력층 사이에 1[mm]의 분극을 행하지 않은 동일 재료의 절연층을 두어 입력층과 출력층을 전기적으로 분리 시키고, 분극의 방향은 화살표로 나타내었다. 입력 층에 교류의 입력전압을 가하면 전기기계 결합계수 k_3 에 의해 길이방향의 진동이 발생되고 전기-기계-전기의 변환에 의해 전력을 전송하게 된다.



(a)Second mode type (b)Third mode type
Fig.1 Multilayer PTs construction

Adaptor용 압전트랜스는 길이방향 진동모드를 이용하는 것이 전송효율이 높다. 본 실험에서는 2차 공진모드와 3차 공진모드에서의 출력특성을 서로 비교하여 보았다.^[3]



(a)Second mode (b)Third mode
Fig.2 Mechanical displacement and stress distribution for length-extensional vibration mode.

Fig.2는 각각의 진동모드에 대한 기계적인 변위와 응력의 분포를 나타낸 것이다. (a)는 2차 공진모드를 나타내는데 입력층과 출력층에는 확산과 수축이 교대로 일어나게 된다. 압전물질내에서 발생전하량은 응력값에 비례하게 되는데 입력층과 출력층의 중심에 최대 응력과 최소의 변위가 나타난다. (b)는

3차 공진모드를 나타내는데 입력층에서 확산과 수축이 일어나면 두 출력층에서 확산과 수축이 동시에 나타난다. 입력층과 출력층의 중심부에서 최소의 변위가 나타나고 최대의 응력이 나타난다.^[4] 압전 변압기의 경우 변위가 0인 점을 변압기의 지지점으로 사용하는데 2차 공진동 모드의 경우 2개의 지지점을 3차 공진동 모드의 경우 3개의 지지점을 사용할 수가 있다. 이 실험에서 사용한 압전세라믹은 TOKIN사의 NEPEC 6이고 물질의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Material constant of NEPEC 6

재료정수	측정치
Dielectric constant ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)	14000
Curie temperature T_c (°C)	325
Density (ρ)	7.77×10^3 kg/m ³
Elastic constant (Y_{33}^E)	$6.5 [10^{10}$ N/m ²]
Piezoelectric constant (d_{33})	$302 [10^{-12}$ m/V]
Mechanical quality factor (Q_m)	1500

2.2 압전트랜스의 등가회로

압전트랜스의 등가회로는 Mason의 등가 회로를 이용하면 Fig.4와 같이 나타낼 수 있고 다음의 방정식으로 표현 될 수 있다.^{[3][6]}

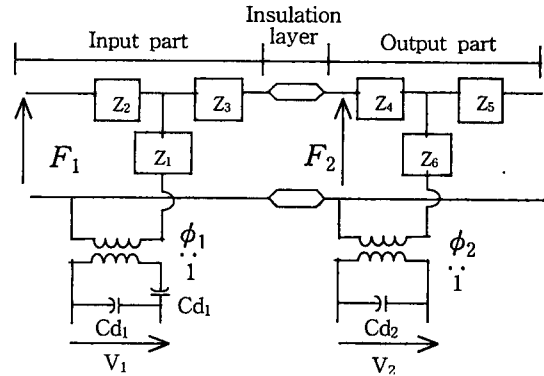


Fig.4 Distributed equivalent circuit for piezoelectric ceramic transformer

$$\left(F_2 - \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}} Q\right) = \left(F_1 - \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}} Q\right) \cos\left(\frac{\omega}{v} l\right) - jZ_0 \cdot \sin\left(\frac{\omega}{v} l\right) \cdot \dot{u}_1 \quad (3.1)$$

$$\dot{u}_2 = \dot{u}_1 \cos\left(\frac{\omega l}{v}\right) - j \frac{\left(F_1 - \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}} Q\right)}{Z_0} \cdot \sin\left(\frac{\omega}{v} l\right) \quad (3.2)$$

$$Z_0 = \rho v b t, \quad (F = -btT_3)$$

$$\therefore \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^S} Q = \left(\frac{e_{33} b t}{l} \right) V + \phi^2 \frac{1}{j\omega C_d} (\dot{u}_2 - \dot{u}_1), \quad (3.3)$$

$$\phi = \frac{e_{33} b t}{l}, \quad C_d = \frac{\epsilon_{33}^S b t}{l}$$

2.3 적층형 압전트랜스의 승압비

적층형 압전트랜스의 출력부 capacitance는

$$C_{out} = \frac{n\epsilon_0\epsilon_r S}{t} \quad (3.4)$$

n : 적층수 S : 내부 전극 면적

ϵ_r : 비유전율 t : 한 층의 두께

여기서 트랜스의 전체두께 T 는 nt 이며 따라서

$$C_{out} = \frac{n^2\epsilon_0\epsilon_r S}{T} \quad (3.5)$$

이상에서 보면 두께 T 인 단판형 압전트랜스의 구동부 정전용량에 비해 n 층의 적층형 압전트랜스는 n^2 배의 정전용량을 갖게 된다. 그러므로 출력층수의 변화에 따른 캐패시턴스의 변화는 Table 2와 같다.

Table 2. Capacitance of output part

출력층수	Capacitance
2	0.00147[μ F]
6	0.01322[μ F]
10	0.03673[μ F]
14	0.07199[μ F]
18	0.11900[μ F]

트랜스의 내부손실 R_{Loss} 는 아래와 같이 표현된다.^[1]

$$R_{Loss} = \frac{8g_{33}^2 Y_3^D Q_m L^2}{\pi^3 \nu \omega T} \quad (3.6)$$

전압의 강압이득은 (출력전압/입력전압)은 다음과 같다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{j\omega W d_{31} Y_1^E}{Y_3^D g_{33}} \cdot \frac{R_{Loss} \cdot R_{Load}}{R_{Loss} + R_{Load}} \quad (3.7)$$

한편, 출력층은 n 층의 적층형 구조이므로 트랜스의 출력층의 전체 두께 T 는

$$T = nt \quad (3.8)$$

출력전압 V_2 는

$$V_{in} = nV_2 \quad (3.9)$$

식 (3.10)을 식 (3.7)에 적용하면 전압이득은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V_2}{V_{in}} = \frac{1}{n} \cdot K \cdot \frac{R_{Loss} \cdot R_{Load}}{R_{Loss} + R_{Load}} \quad (3.10)$$

$$\left(K = \frac{j\omega W d_{31} Y_1^E}{-Y_3^D g_{33}} \right)$$

2.4 유한요소법을 이용한 시뮬레이션

2.4.1 각 모드별 변위와 응력

모드의 변화에 따른 압전트랜스의 출력특성을 알아보기 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5.1을 사용하였다. Fig.1에서 보여지는 각각의 모드에 따른 모델을 사용하여, 입력전압은 200[V]로 하고, 재료는 TOKIN사의 NEPEC 6를 이용하였다, Fig.5는 입력층을 단일층으로 하고 출력층을 6으로 하였을 때의 두 번째 공진모드와 세 번째 공진모드에서의 압전트랜스의 x방향의 길이에 따른 변위와 응력을 구한 것이다. 이때 2차 진동모드(λ mode)일 때의 공진주파수는 Table 3에서와 같이 100[kHz] 부근에서 나타났고, 이론적인 압전세라믹의 공진주파수 100.6[kHz]와 거의 비슷한 값을 나타내었다. 3차 공진모드의 경우 2차 공진모드의 3/2배인 150[kHz] 부근에서 나타났다. 주파수의 변화에 대한 변위와 응력의 시뮬레이션 결과 역시 Fig.5에서 보이는 바와 같이 2차 공진의 경우 입력층과 출력층의 가운데 2점에서 최소의 변위와 최대의 응력이 나타났고, 3차 공진의 경우 입력층과 두 출력층의 중심에서 최소의 변위와 최대의 응력이 나타났으며, 이점을 변압기의 지지점이 된다.

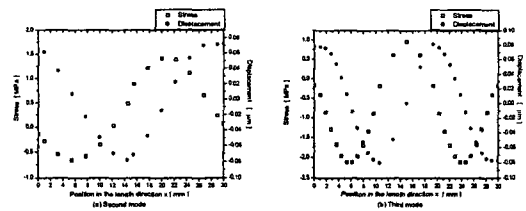


Fig.5 Displacement and stress of PT in second mode(λ mode).

2.4.2 ANSYS를 통한 압전트랜스의 출력층의 변화에 따른 전압이득

Fig.1 (b)의 모델의 3차 공진모드에서의 전압이득을 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션 하여 Fig.6에 나타내었고(입력층:출력층=1:6), 각 층수의 변화에 따른 전압이득을 Fig.7에 나타내

었다.

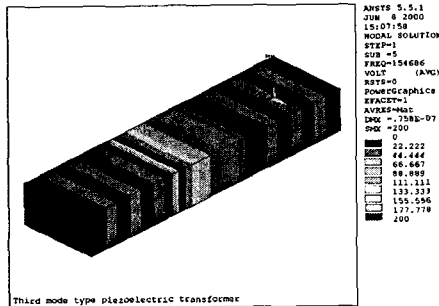


Fig.6 Simulated output voltage using ANSYS

fig.7은 2차 공진모드와 3차 공진모드에서의 입력에 대한 출력전압을 나타낸 그래프로 입력전압에 200[V]일 때 각각의 출력전압은 입력에 비해 180°의 위상차를 나타내었고, 층수가 증가함에 따라 점차 줄어들었다. 3차 공진모드에서 입력과 출력의 층수의 비가 1:18일 때 약 15[V]를 나타내었다. 2차 공진모드일 때와 3차 공진 모드일 때의 출력전압이 fig.7에 나타나 있는데 출력층을 n배로 증가시킬 때 출력전압은 1/n배로 증가하고 있으며, 2차 공진모드에 비해 평균 2/3배 정도의 출력이 나타났다.

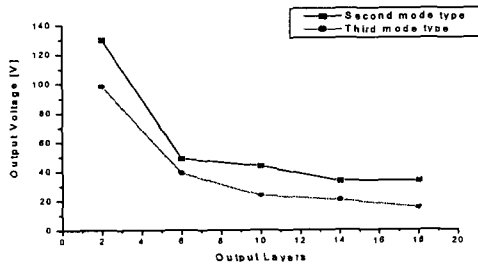


Fig.7 Output voltage by increasing number of output layers

3. 결 론

2차와 3차 길이방향 진동모드를 이용한 적층형 압전트랜스의 출력 특성은 다음과 같다.

1. 길이방향 공진 모드를 이용한 압전트랜스의 2차 공진모드시 입력층과 출력층의 중간점에서 최소의 변위가 나타났고, 3차 공진모드의 경우 입력층과 두 출력층의 중심에서 최소의 변위가 나타났다.
2. 출력층의 층수를 증가시켜도 사이즈의 변화를

주지 않으면 같은 주파수대에서 다양한 출력전압을 얻을 수 있다.

3. 출력전압은 입력층과 출력층의 수가 증가함에 따라 입력층과 출력층수의 역수에 비례하여 증가하였다.
4. 2차 공진모드에 비하여 3차공진모드를 이용하는 것이 더 높은 변환효율을 얻을 수 있다.
4. 압전트랜스포머의 경우 주파수의 변화가 출력전압을 변화에 영향을 미친다.

이상에서 보는 바와 같이 강압용 압전트랜스의 전압이득은 층수를 증가시킬수록 그 변화의 폭이 커지는 것을 알수 있다. 이를 통해 노트북과 같은 소형, 경량의 어댑터를 필요로 하는 제품들을 위한 강압용 압전트랜스로서의 개발 가능성을 볼 수 있었다. 그러나 강압용 압전트랜스를 개발하기 위해서는 높은 기계적 품질계수와 전기기계결합계수를 가진 재료의 개발과 주파수의 변화에 대처할 수 있는 구동드라이브의 개발이 선행되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국전기연구소 신소재응용연구그룹의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1]. 김희준, "압전트랜스포머를 이용한 전력변환기 회로", *전기전자재료*, 제45권, 제3호, pp.16, 1996.
- [2]. Toshiyuki Zaitso, "New Piezoelectric Transformer Converter for AC-adapater", *IEEE*. 0-7803-3704-2/97, pp. 569-572, 1997
- [3]. 김동범, 이재열, "압전트랜스 적층화 기술", *전기전자재료* Vol. 12, No. 5, pp7-11, 1999
- [4]. Junhui Hu, "A Study on the Rectangular-Bar-Shaped Multilayer Piezoelectric Transformer Using Length Extensional Vibration Mode." *J. Applied Physics*, May, Vol.38, No. 5B, pp.3208-3212, 1999,
- [5]. Osamu Ohnishi "Piezoelectric Ceramic Transformer for Power Supply Operating in Thickness Extensional Vibration Mode", *IEICE TRANS. Fundamentals*. Vol. E77-A. NO. 12, pp2098-2105, 1994.
- [6]. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N.Nakamura "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, 1993.