

강압용 압전변압기의 설계 및 유한요소해석

Design and FEM Analysis of Piezoelectric Ceramic Transformer for Low-Voltage Step-Down Application.

정현호, 이상기, 박태곤, 이원재*

창원대학교 전기공학과 *한국전기연구소

Hyon-Ho Jueng, Sang-Ki Lee, Tae-Gone Park, Won-Jae

Dept. of Electrical Eng., Changwon National Univ.

* Korea Electric Reserch Institute.

Abstract

This paper present a new sort of multilayer piezoelectric ceramic transformer for AC-adapter. This piezoelectric transformer operates in the second longitudinal vibration mode. The output voltage of the multilayer piezoelectric transformer was simulated using ANSYS, that is one of the FEM analysis program. As results, the minimum displacement was occurred at the two points where one is the middle of input and the other is middle of output side in second thickness extensional vibration mode. And output voltage was inversely decreased by increasing number of output layers.

Key Words(중요용어) : Piezoelectric Transformer, Length Extensional Vibration Mode, Finite Element Method, Step-Down, ANSYS

1. 서 론

1880년 Curie 형제가 압전효과를 발견한 이후 많은 압전세라믹이 개발되었고, 이를 이용한 다양한 제품들이 개발되었다. 압전세라믹을 이용한 변압기는 1957년 미국 G.E.사의 C. A. Rosen이 처음으로 개발하였고 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 상당히 개선되어 압전트랜스의 장점이 부각되기 시작하여 고전압 발생용 압전트랜스의 판매가 이루어지기 시작하였다. 지금은 압전트랜스의 소형경량의 특성을 이용하여 노트북과 같은 휴대용 제품들을 위한 전원소자로서의 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1]

이에 대하여 이 논문은 승압비가 적은 단판형 압전세라믹의 단점을 보완한 적층형 압전세라믹을 이용하여 각각 층수를 달리 하여 강압용 압전트랜스를 설계하였고 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 이의 특성을 해석하여 그 출력특성을 살펴 보았다.

2. 본론

2.1 압전트랜스(PT)의 구조 와 원리

길이방향 진동모드로 동작하는 PT의 구조를 Fig.1에서 보여주고 있다(입력층:출력층=1:4). 입력층은 단일층과 2층의 적층형을 사용하여 입력전압을 100[V]로 하였고, 이에 대해 출력 층의 층수를 각각 2, 6, 10, 14, 18로 하였을 때 출력 층의 전압을 살펴보았다.

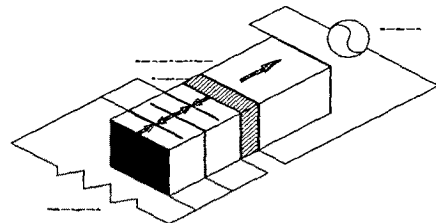


Fig.1 Multilayer PT construction

사이즈는 두께, 넓이, 높이를 $T \times b \times l = 5 \times 8 \times 30$ (mm)로 하였고, 내부의 화살표는 분극의 방향이다. 입력층과 출력층 사이에 3[mm]의 분극을 행하지 않은 동일 재료의 절연층을 두어 입력 층과 출력 층을 전기적으로 분리 시켰다. 분극의 방향은 두께 방향

으로 하였으며 화살표로 나타내었다. 입력 측에 교류의 입력전압을 가하면 전기기계 결합계수 k_e 에 의해 두께방향의 진동이 발생되고 전기-기계-전기의 변환에 의해 전력을 전송하게 된다.

Adaptor용 압전트랜스는 길이방향 진동모드를 이용하는 것이 전송효율이 높고 그 중 2차 공진모드를 이용하는 것이 주파수 대역이 넓으며 우수한 특성을 나타낸다.^[2]

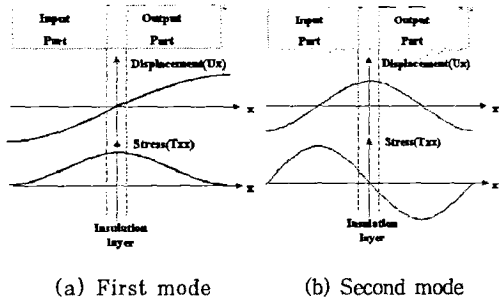


Fig.2 Mechanical displacement and stress distribution for length-extensional-vibration mode.

Fig.2는 각각의 진동모드에 대한 기계적인 변위와 응력의 분포를 나타낸 것이다. (a)는 1차 공진모드를 나타내는데 반파장 공진이 일어나고 입력측과 출력측에는 확장과 수축이 동시에 일어나게 된다. 압전물질내에서 발전전하량은 응력값에 비례하게 되는데 절연층에 최대 응력과 최소의 변위가 나타난다.^[5] (b)는 2차 공진모드를 나타내는데 입력측과 출력측에서 확장과 수축이 교대로 일어나며, 응력과 변위의 분포도 입력측과 출력측의 가운데에서 각각 최대의 응력이 공급되고 최소의 변위가 나타나게 된다. 압전 변압기의 경우 변위가 0인 점을 변압기의 지지점으로 사용하는데 1차 공진동 모드의 경우 1개의 지지점을 2차 공진동 모드의 경우 2개의 지지점을 사용할 수가 있다. 이 실험에서 사용한 압전 세라믹은 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 유한요소법을 이용한 시뮬레이션

2.2.1 압전트랜스의 등가회로

압전트랜스의 등가회로는 Mason의 등가 회로를 이용하면 Fig.4와 같이 나타낼 수 있고 다음의 방정식으로 표현 될 수 있다.^{[2][4]}

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

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

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

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

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

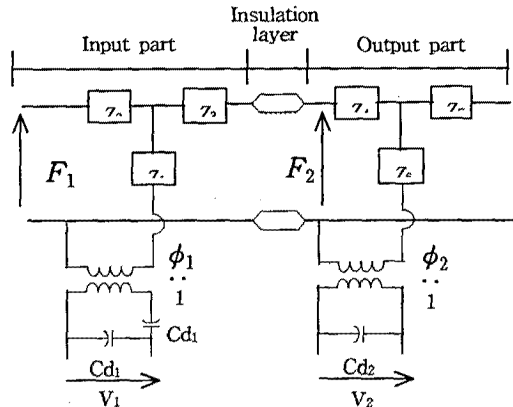


Fig.4 Distributed equivalent circuit for piezoelectric ceramic transformer

2.2.2 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 n층의 적층형구조 이므로 트랜스의 출력층의 전체 두께 T는

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

출력전압 V_2 는

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

이고 입력이 m층의 구조일때는

$$mV_{in} = nV_2 \quad (3.10)$$

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

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

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

2.3.3 각 모드별 변위와 응력

2차 두께 방향 공진 주파수로 하여 변압기의 입력측에 인가하여야 할 압전트랜스의 2차 공진모드의 공진 주파수를 구하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5.1을 사용하였다. Fig.1의 모델을 사용하였고, 입력전압은 100[V]로 하였다, Fig.5는 입력층과 출력층의 비가 1:1일때의 두 번째 공진모드에서 압전트랜스의 x방향의 길이에 따른 변위와 응력을 구한 것이다. 이때 2차 진동모드(λ mode)일때의 공진주파수는 Table 3에서와 같이 101.5[kHz]로 실제의 압전세라믹의 공진주파수 100.6[kHz]와 거의 비슷한 값들을 나타내었고 각 층수의 변화에 따른 주파수변화는 거의 없었다. 주파수의 변화에 대한 응력과 변위의 시뮬레이션 결과 역시 Fig.5

에서 보이는 바와 같이 입력층과 출력층의 가운데에서 최대, 최소의 응력과 최소의 변위가 나타났고, 이 점을 변압기의 지지점으로 사용하여야 한다.

Table 3. Resonance frequency (단위:kHz)

Output layer \ Input layer	1	2
2	101.1	101.5
6	100.1	100.7
10	102.1	101.5
14	102.5	101.2
18	102.1	101

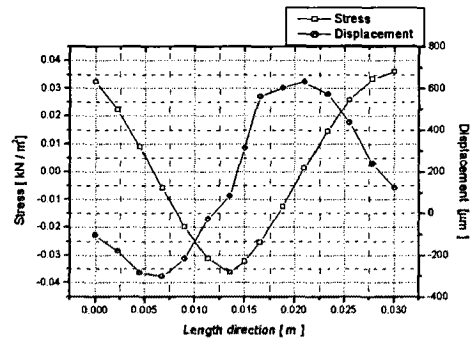


Fig.5 Displacement and stress of PT in second mode(λ mode)

2.2.4 ANSYS를 통한 압전트랜스의 출력층의 변화에 따른 전압이득

Table 2에 구해진 공진 주파수를 이용하여 출력층수의 변화에 따른 2차 공진모드의 전압 이득을 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션 하여 Fig.6에 나타내었고(입력층:출력층=1:16), 각 층수의 변화에 따른 전압이득을 Fig.7에 나타내었다.

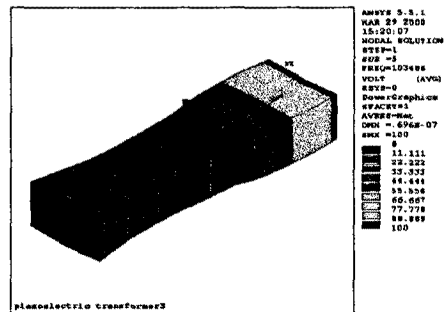


Fig.6 Simulated output voltage using ANSYS

그림 6은 단일층과 2층의 입력에 대한 출력전압을 나타낸 그래프로 입력전압에 100[V]일 때 각각의 출력전압은 입력에 비해 180°의 위상차를 나타내었고 층수가 증가함에 따라 점차 줄어들음을 알 수 있

다.

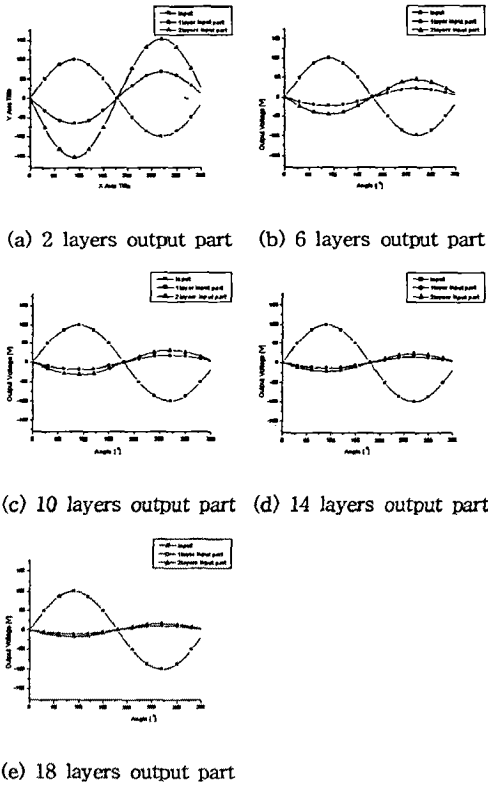


Fig.7 Voltage gain by changing number of output layer

입력과 출력의 층수의 비가 1:14일 때 약 13.8[V]를 나타내었다.

Fig.8은 입력층이 단일층과 2층의 구조일 때 출력층의 증가에 따른 전압이득을 보여주고 있다. 전압이득은 입력층을 m배로 증가 시키고 출력층 n배로 증가시킬 때 m/n배로 증가하고 있음을 알 수 있다.

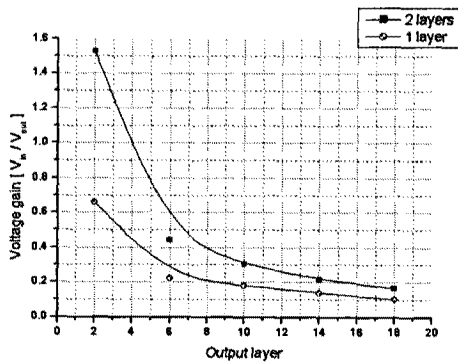


Fig.8 Output voltage by increasing number of output layers

3. 결 론

길이 방향 진동모드를 이용한 적층형 압전트랜스의 특성은 다음과 같다.

1. 2차 길이방향 공진 모드를 이용하였을 때 입력층과 출력층의 중간점에서 최대의 용력이 나타났고 이점을 이 변압기의 지지점으로 사용해야 한다.
2. 전체길이를 일정하게 하면 출력층수를 증가시켜도 공진주파수는 변화하지 않으므로 일정한 주파수대에서 다양한 출력전압을 얻을수 있다.
3. 출력전압은 입력층과 출력층의 수가 증가함에 따라 입력층과 출력층수의 역수에 비례하여 증가하였다.

이상에서 보는 바와 같이 강압용 압전트랜스의 전압이득은 층수를 증가시킬수록 그 변화의 폭이 크고 1:14일 때의 출력전압이 13.8[V]로 나타났다. 노트북용 adapt의 출력이 14[V]이므로 이번 시플레이션을 통해 노트북과 같은 소형, 경량의 adapter를 필요로 하는 제품들을 위한 강압용 압전트랜스로서의 개발 가능성을 볼 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1]. Toshiyuki Zaitzu, "New Piezoelectric Transformer Converter for AC-adapter", IEEE. 0-7803-3704-2/97, pp. 569-572, 1997
- [2]. 김동범, 이재열, "압전트랜스 적층화 기술", 전기전자재료 Vol. 12, No. 5, pp7-11, 1999
- [3]. 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.
- [4]. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N.Nakamura "Ultrasonic Motors Theory and Applications", OXFORD, 1993.
- [5]. Toshiyuki Zaitzu, "Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control", IEICE Trans. COMMUN. Vol. E80 B. No. 7, pp. 1035-1043, 1997