

2차 두께방향 진동모드로 동작되는 압전트랜스포머의 Voltage Gain특성

논문
11-10-17

Voltage Gain Characteristics of Piezoelectric Transformer Operating in Second Thickness Extensional Vibration Mode

김성진*, 이수호**, 류주현*, 임인호***, 홍재일****

(Sung-Jin Kim, Su-Ho Lee, Ju-Hyun Yoo, In-Ho Lim, Jae-Il Hong)

Abstract

This paper presents a new structure for a piezoelectric transformer, operating in thickness extensional vibration mode. Modified $PbTiO_3$ family ceramics were used for the piezoelectric transformer, because it was a material with large anisotropy between electromechanical coupling factors k_t and k_p . The size of piezoelectric transformer was 20mm long, 20mm wide and 3.1mm thick. The second harmonic resonant frequency of thickness extensional vibration mode was 1.72MHz at loading resistance $100[\Omega]$. And Voltage gain of piezoelectric ceramics showed 0.53 at resonant frequency of second thickness extensional vibration mode.

Key Words(중요용어) : Piezoelectric Transformer(압전 트랜스포머), Voltage Gain(전압이득), Thickness Extensional Vibration(두께방향진동)

1. 서 론

최근 전자기술의 진보에 의해 제품이 매우 소형화가 되면서 공급전원의 소형 박형화가 요구되고 있다¹⁻³⁾. Switching power supply의 소형화를 위해서는 switching 주파수의 고주파수가 필요하다. 따라서 최근 소형박형화가 가능하며 고주파수에서 높은 전력 전송 디바이스로 압전 트랜스포머에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 고전압원을 위한 C. R. Rosen형의 길이 방향 진동 모드로 구동시킨 압전 트랜스포머는 최대 구동 주파수가 200-

300KHz 이기 때문에 종래의 전자 트랜스포머와 같이 고전력 밀도를 가지기는 어렵다. 또한 종래의 권선형 트랜스포머는 1MHz 이상의 switching 주파수에서 동손과 철손의 증가에 의해 사용하기 어려울 뿐만 아니라 소형, 박형화도 어려운 문제점을 가지고 있다. 그러나 두께방향 진동을 이용한 압전 트랜스포머는 MHz대에서 공진이 일어나기 때문에 고주파수에서 구동이 가능하며, 전송전력 밀도도 우수하게 된다.

이러한 두께방향 진동모드를 이용하기 위해서는 압전재료가 큰 전기기계 결합계수의 이방성(k_t/k_p)을 가져야 한다. 그러나 일반적으로 폭 넓게 사용되고 있는 PZT계 세라믹은 큰 전기기계 결합계수 k_t 를 가지고 있지만 k_{31} 및 k_p 가 크기 때문에 고주파수에 이용하기 어렵다. 따라서 큰 전기기계 결합계수 이방성을 나타내는 $PbTiO_3$ 계 세라믹을 사용하였다.

본 논문에서는 $PbTiO_3$ 계 세라믹을 이용하여 두께방향 진동 모드로 구동되는 압전 트랜스포머를 제작하기 위하여 압전 트랜스포머의 등가회로의 시물

* : 세명대학교 전기공학과

(충북 제천시 신월동, Fax: 0443-648-0868

E-mail : juhyun57@chollian.dacom.co.kr)

** : 영월공과대학 전기과

*** : 삼화콘덴서(주)

**** : 동서울대학 전기과

1998년 7월 23일 접수, 1998년 9월 3일 심사완료

<'98 춘계학술회의에서 우수논문으로 추천됨>

레이션을 통해 얻어진 결과와 실제 제작된 트랜스포머의 전압이득 등의 특성을 비교하여 power supply로 응용 가능성을 제시하였다.

2. 두께방향 진동모드의 압전 트랜스포머 구조 및 구동원리

두께방향 진동모드를 이용한 압전 트랜스포머는 길이 20mm, 폭 20mm 및 입력층과 출력층의 두께는 각각 1.4mm로 그림 1과 같이 제작하였으며, 입력층과 출력층 사이에 0.3mm의 분극을 행하지 않은 동일 재료의 절연층을 두어 입력층과 출력층을 전기적으로 분리시켰다. 또한 입력층과 출력층은 반대의 두께 방향으로 분극을 행하였으며, 분극방향을 화살표로 나타내었다.

입력층에 교류전압을 가하면 압전 트랜스포머의 전기기계 결합계수 k_t 에 의해 두께 확산 진동이 발생되며, 그 진동은 출력층으로 전달된다. 출력층의 진동은 다시 교류전압을 발생시켜 전기-기계-전기의 변환에 의해 전력을 전송하게 된다. 또한 전송효율을 올리기 위해서는 트랜스포머의 두께방향의 공진을 이용하는 것이 우수하다. 두께방향 진동 모드 중 2차 공진모드가 공진 주파수 대역이 넓으며, 가장 낮은 임피던스를 나타내는 등 가장 우수한 특성을 나타낸다. 이는 그림 2의 (a), (b)에 나타난 것과 같이 stress분포와 진동변위의 관계에서 알 수 있다. 그림 2의 (a)는 1차 공진 모드로 반파장 공진이 일어나고 있음을 나타내고 있다. 즉, 입력층과 출력층에 확산과 수축이 동시에 일어나게 된다. 압전 물질내에서 발생전하량은 stress값에 비례하게 되는데, (a)는 절연층에 최대 stress가 공급된다. 그러나 그림 2의 (b)와 같이 2차 공진 모드로 구동시킬 경우 입력층과 출력층에서 확산과 수축이 교

대로 일어나며, 또한 stress의 분포도 입력층과 출력층의 가운데에 각각 최대 stress가 공급되고 있음을 알 수 있다.

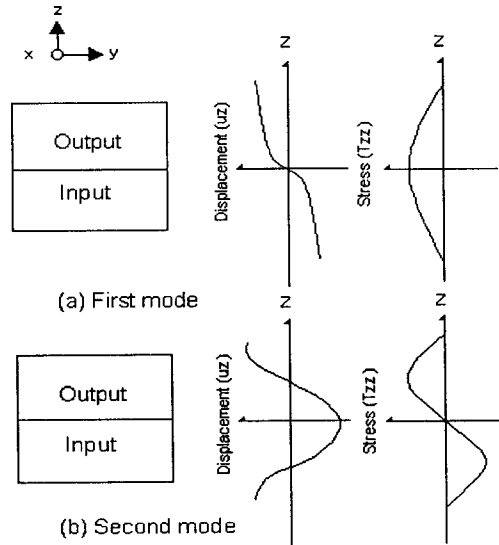


그림 2. 압전 트랜스포머의 변위와 stress 분포
Fig. 2. Displacement and stress distribution of piezoelectric transformer.

또한, 두께방향 진동모드를 사용하기에 MHz대에서 구동이 가능하지만, 전송 주파수대의 폭이 권선형 트랜스포머보다 좁은 단점을 가지고 있다. 그러나 압전 트랜스포머를 사용할 경우 MHz대에서 동작이 가능하며, 표피 및 근접효과가 없다. 또한 전자 노이즈가 발생하지 않으며, 동일한 크기의 권선형 트랜스포머보다 고전력을 얻을 수 있는 등의 장점을 지니고 있다.

3. 압전 세라믹 재료

압전 트랜스포머를 두께방향 진동모드로 이용하기 위해서는 큰 전기기계결합계수의 이방성을 가져야 한다. 즉, (k_t/k_p) 가 커야 한다. 그러나 전기기계 결합계수 및 각종 특성이 우수하다고 알려져 있는 PZT계 세라믹스는 압전 stiffened 효과를 위한 큰 전기기계 결합계수 k_t 를 가질 뿐만 아니라 압전 unstiffened 효과를 가지는 k_{31} 과 k_p 를 가지고 있다. 따라서 PZT 세라믹스는 두께방향 진동모드로 공진되는 AC전압을 공급시킬 때 두께 진동보다 경방향 진동이 더 크게 발생하는 문제점을 가지고 있다.

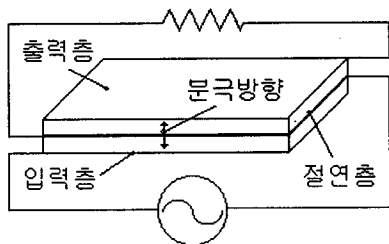


그림 1. 압전 세라믹 변압기의 구조
Fig. 1. Piezoelectric ceramic transformer construction.

향 진동이 더 크게 발생되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서 전기기계 결합계수의 이방성이 큰 물질로 알려진 PbTiO₃계 세라믹스를 사용하였다. 또한, 제반 압전특성들을 향상 시키기 위하여 A-site 및 B-site에 각각 Ca와 (Co_{1/2}W_{1/2})를 치환시킨 PbTiO₃계 세라믹을 사용하였으며, 그 조성은 (Pb_{0.76}Ca_{0.24})[(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04} Ti_{0.96}]O₃ 이고 재료정수는 표 1과 같다⁴⁾. 그림 3은 주파수에 따른 임피던스 공진특성을 나타내었는데,

표 1. PbTiO₃계 세라믹의 재료정수
Table. 1. Material constant of PbTiO₃ ceramic.

재료 정수	측정치
유전상수 ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)	150
밀도 (ρ)	7.06(g/cm ³)
전기기계결합계수 (k_t)	49(%)
(k_p)	≈ 0

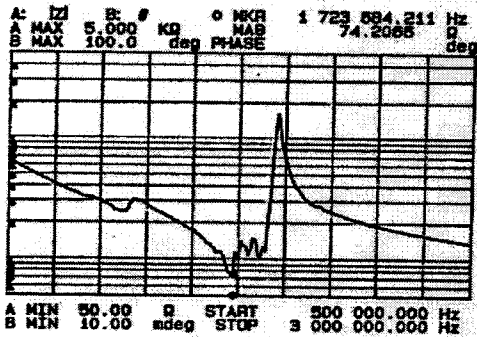
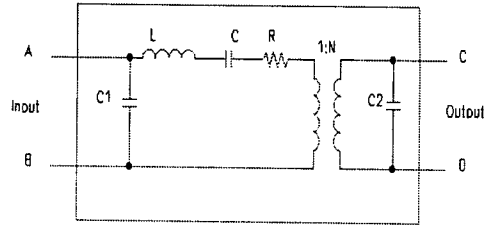


그림 3. PbTiO₃ 세라믹의 주파수에 따른 임피던스
Fig. 3. Impedance of PbTiO₃ ceramic with frequency

출력측을 단락하여 측정하였다. 이는 1차, 2차 및 3차 두께 공진 응답을 보이고 있었으며, 이중 2차 공진시 가장 작은 임피던스를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 2차 공진시 가장 높은 효율과 변압비를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

4. 집중 등가회로에 의한 시뮬레이션 및 실험



transformer
그림 4. 압전 세라믹 트랜스포머의 등가회로

시뮬레이션을 위한 전기기계 등가회로는 집중 등가회로정수를 사용하였으며, 그림 4에 압전 세라믹 트랜스포머의 등가회로를 나타내었다. 입력과 출력은 모두 한 층으로 구성되어 있기에 Mason 등가회로를 적용할 수 있다⁵⁾. 등가회로에 이용된 정수는 표 2에 정리 하였으며, 이는 그림 5에 나타낸 어드미턴스원선도를 통하여 계산된 값들로 이 시뮬레이션에 사

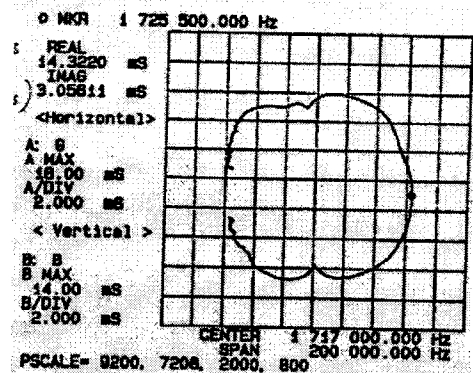
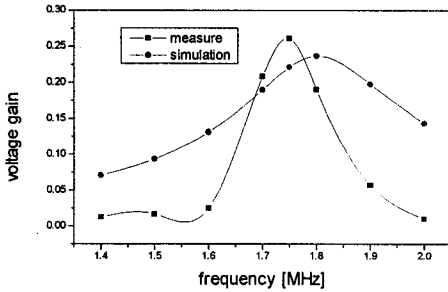


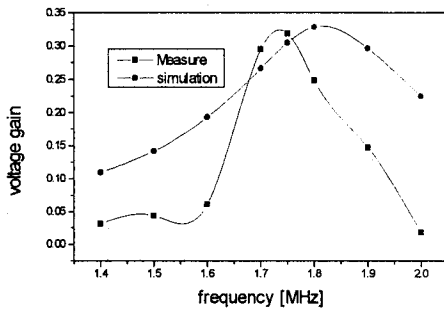
그림 5. 압전 트랜스포머의 어드미턴스 원선도
Fig. 5. Admittance circle of piezoelectric transformer.

용하였다. 이 등가회로는 Rosen형 압전 트랜스포머의 등가회로로 두께 진동형 압전 트랜스포머에 적용하는 경우 다소 문제점이 있지만, 입력과 출력이 한층으로 구성된 경우 어드미턴스 특성은 비교적 잘 일치하고 있다고 알려져 있다⁶⁾. 전압 gain의 값은 입력전압(V_{in})과 출력전압(V_{out})에 의해 식 (1)과 같이 계산되었다.

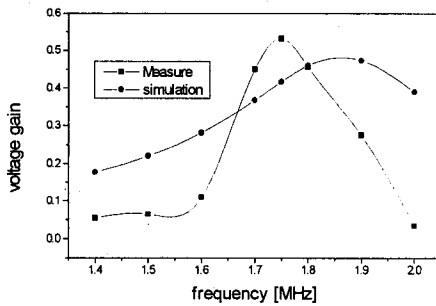
$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$



(a) load resistance 30Ω



(b) load resistance 50Ω



(c) load resistance 100Ω

Fig. 6. Voltage gain according to frequency
그림 6. 주파수 변화에 따른 전압 gain G값

그림 6의 (a), (b), (c)에 부하저항이 30, 50 및 100Ω일 경우 시뮬레이션에 의해 계산된 이론치와 실제 측정에 의해 얻은 전압 gain을 나타내었다. 시뮬레이션에서 얻어진 전압 gain값과 실측한 값이 다소 차이가 있는데, 이는 어드미턴스 원선도에서 구한 제반 집중등가회로정수는 공진주파수근방에서의 값이기 때문이기 공진주파수에서 다소 떨어진부

분에서는 계산치와 측정치가 많은 차이를 나타나기 때문이다. 또한 고주파 구동시에 입력부에 존재할 수 있는 손실저항을 고려할 필요가 있는데, 이것을 무시하였기 때문이라 생각된다. 또한 최대 전압 gain이 얻어지는 공진 주파수도 시뮬레이션에서 약간 높게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 공진 주파수로 구동시에 입력측과 출력측 사이에 존재하는 기생용량이 작용한 것으로 생각된다. 또한, 그림 7에 최대 전압 gain을 공진주파수에서 부하저항의 증가에 따라 나타내었으며, 부하의 증가에 따라 최대 전압 gain도 증가함을 알 수 있으며, 시뮬레이션과 실측한 gain값이 비교적 일치하고 있음을 나타내고 있다.

표 2. 세라믹 변압기의 등가회로 정수

Table 2. Equivalent Circuit constant of Piezoelectric Ceramic Transformer

회로정수	계산치
C ₁	914pF
R	105Ω
C	97.37pF
L	80.77 μH
C ₂	719pF
N	0.85

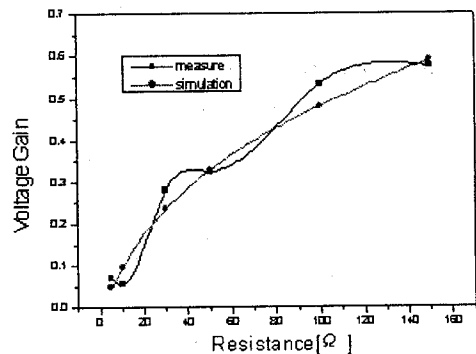


그림 7. 부하저항의 변화에 따른 최대 gain값

Fig. 7. Maximum voltage gain according to load resistance.

그림 8에서는 실측한 전압 gain의 값을 주파수와 부하의 변화에 따라 살펴 보았다. 부하의 증가에 따라 공진주파수의 증가를 알 수 있으며, 부하 저항이

50Ω일 경우 gain이 얻어지는 피크가 가장 넓다. 이는 등가회로에서 출력단 커패시턴스 C₂의 임피던스가 50Ω에 가장 가깝기 때문이라 사료된다. 또한 부하의 증가에 의해 공진주파수도 다소 고주파로 이동되는 것을 알 수 있었다. 표 3에 시뮬레이션과 실측한 최대 전압 gain과 공진주파수를 부하저항에 따라 정리하여 두었다.

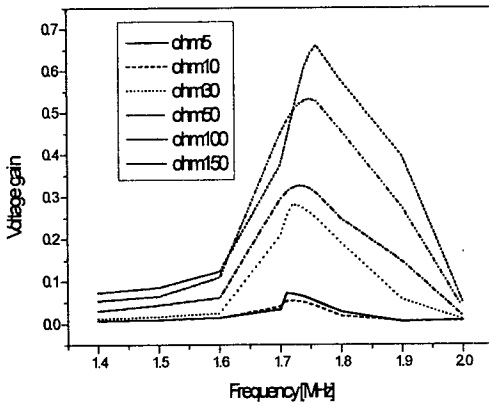


그림 8. 부하저항 및 주파수의 변화에 따른 전압 gain

Fig. 8. Voltage gain according to frequency and load resistance.

표 3. 부하저항에 따른 공진주파수와 최대 전압 gain

Table 3. Resonance frequency and maximum voltage gain according to load resistance.

저항 [Ω]	측 정 치		이 론 치	
	전압 gain	공진주파수	전압 gain	공진주파수
5	0.07	1.71	0.05	1.8
10	0.055	1.72	0.097	1.8
30	0.282	1.72	0.236	1.8
50	0.326	1.73	0.328	1.8
100	0.532	1.75	0.48	1.85
150	0.576	1.8	0.59	1.9

5. 결 론

두께방향 진동모드로 구동되는 압전 세라믹 트

랜스포머를 제작하기 위하여 이방성이 큰 (Pb_{0.76}Ca_{0.24}) [(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04}Ti_{0.96}]O₃ 를 사용하여 집중등가회로를 통해 얻어진 이론값과 실측값을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 2차 공진 모드인 약 1.72MHz에서 가장 낮은 임피던스를 얻을 수가 있었으며, 우수한 두께 방향 공진을 나타내었다.
- 2) 시뮬레이션에 의해 계산된 전압 gain과 실측한 값은 비교적 일치하였다.
- 3) 부하저항의 증가에 따라 최대 전압 gain값은 증가하였다.
- 4) 공진 주파수는 부하가 증가됨에 따라 다소 증가되었다.

본 실험에서는 고주파[MHz]용 power supply의 가능성을 제시하기 위한 전압 gain에 대한 연구만을 제시하였다. 그러나 실질적인 응용을 위하여 추후에 전력밀도 및 효율등을 고려하고자 하며, 또한 구동회로 설계를 위하여 입력중에서 발생하는 손실 저항 및 기생용량등을 고려한 수정된 등가회로에 대한 연구가 계속되어야 하며, 이를 토대로 고주파수에 구동되는 switching power supply의 제작을 하고자한다.

감사의 글

이 논문은 1998년도 한국과학재단의 핵심전문과제 (과제번호 : 981-0904-014-1)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

6 참 고 문 헌

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. 홍 재일, 류 주현, 윤 현상, 윤 광희, 장 낙원, 박 창엽, "MnO₂ 첨가에 따른 PbTiO₃계 세라믹스

- 구조적, 전기적 특성”, 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 11. pp. 1488~1493, 1995.
5. O. Ohmishi, Y. Sasaki, T. Zaitzu, H. Kishie, T. Inoue, "Piezoelectric Ceramic Transformer for Power Supply Operating in Thickness Extensional Vibration Mode", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E79-A, No. 12. pp.2098~2105, 1994.
6. 山中克利, 庄山正仁, 原田耕介, "電力變換特性を考慮した壓電トランスの等價回路とスイッチング電源への應用", 電子情報通信學會技報, Vol. PE92-68, No. 2, pp.25~31, 1993.