

**Crescent형 입력부를 가진 원형압전변압기의 설계 및 유한요소 해석**

정성수, 박태곤  
 창원대학교

**Design and FEM Analysis of a Circular Piezoelectric Transformer with Crescent-Shaped Input Electrode**

Seong-Su Jeong, Tae-Gone Park  
 Changwon National University

**Abstract** - This paper present a new disk-type piezoelectric transformer. The input side of the transformer has a crescent-shaped electrode and the output side has a focused poling direction. The piezoelectric transformers operated in each transformer's resonance vibration mode. The electrodes and poling directions on commercially available piezoelectric ceramic disks were designed so that the planar or shear mode coupling factor ( $k_p, k_{15}$ ) becomes effective rather than the transverse mode coupling factor ( $k_{31}$ ). A single layer prototype transformer, 26[mm] in diameter and 1.5-4.0[mm] thick, was fabricated, such as step-up ratio, power transformation efficiency and temperature were measured.

**1. 서 론**

압전변압기는 기계적인 진동 에너지를 매개로 하여 전기에너지로 전달하는 소자이다. 1950년대에 Rosen에 의해 처음 제안된 이후 기존의 자기 회로 소자를 대체하는 소자로서 활발히 연구되고 있다. 압전변압기의 응용 범위로서 최근 노트북 컴퓨터 같은 소형장비의 LCD 백라이트용 인버터로 이용되고 있다. 기존의 권선형(전자기) 변압기는 기기의 소형화에 맞춰 사이즈를 줄이게 되면 표피효과와 같은 손실, thin wire 와 core 손실이 급격히 증가하는 문제가 생기게 되어 이용 효율이 현저히 떨어지게 된다. 이에 비해 압전변압기는 구조가 간단하고 소형·경량화, 박형화가 가능하다는 점, 표피·근접효과가 없어서 고주파화에 유리하다는 점, 전자(電磁) 노이즈가 발생하지 않는다는 점 등의 장점으로 LCD 백라이트용 전원으로서의 적용이 용이하다.[1]

압전변압기는 기계적 진동을 이용한 변압기로서 압전세라믹의 기계적 충격이나 장시간 사용에 인한 열화 현상으로 기계적 안정성이 떨어진다. 본 논문에서는 Rosen형 압전변압기의 단점인 입력측과 출력측 사이에 응력이 집중되는 현상을 완화시키고, 보다 높은 효율을 얻기 위하여 circular형태의 압전세라믹에 입력부를 crescent형으로 설계하였다. 먼저 유한요소해석(ANSYS 8.0)을 통해서 응력분산의 최적 설계를 하였고, 공극의 간격을 달리 한 여러 모델을 직접 제작하여 승압비와 부하저항 및 CCFL의 적용에 따른 특성을 검토하였다.

**2. 본 론**

**2.1 압전변압기의 구조와 원리**

가장 기본적인 Rosen형의 압전변압기의 구조는 그림 2.1과 같다. 입력측의 전압을 기계적 변위로 변환하는 액츄에이터와 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 제네레이터의 결합을 통해 전압의 변환을 얻어낸다.[2]

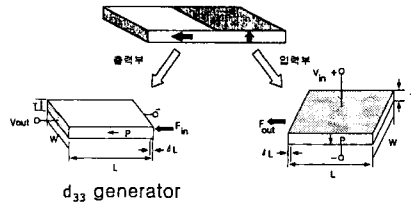


그림 2.1 Rosen형 압전변압기의 원리

Rosen형 압전변압기의 입력부와 출력부사이의 에너지 전달은 기계적 에너지에 의해 이루어지므로 입력부와 출력부의 접촉부에 응력이 집중하게 된다. 이에 응력을 분산시키기 위해 circular 형태로 입력부의 형태를 crescent형으로 하여 입력부와 출력부간의 접촉부가 최대한 넓어지도록 설계한 것이 그림 2.2와 같다.

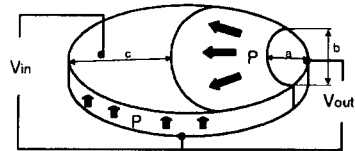


그림 2.2 Crescent형 압전변압기의 구조

**2.2 압전변압기의 유한요소해석**

설계 한 압전변압기의 출력특성을 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 8.0을 이용하여 해석하였다. 변압기의 element는 SOLID-5를 사용하였으며 ANSYS의 경우 e 형식의 압전방정식(식 2.1)을 이용하므로 사용된 압전상수  $e$ 와 stiffness상수  $c$ 는 다음과 같다.[3]

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e E \\ D &= e S + \epsilon^E E \end{aligned} \quad (2.1)$$

Piezoelectric Matrix  $e[C/m^2]$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 6.67 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.67 & 0 & 0 \\ -5.93 & -5.93 & 11.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Stiffness Matrix  $c^E[\times 10^{10}N/m^2]$

$$\begin{bmatrix} 1.16 & & & & & \\ 4.45 & 11.6 & & & & \\ 4.42 & 4.42 & 9.01 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1.02 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.02 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.6 \end{bmatrix}$$

Dielectric Matrix  $\epsilon[\times 10^9 F/m]$

$$\begin{bmatrix} 8.04 & 0 & 0 \\ 0 & 8.04 & 0 \\ 0 & 0 & 5.94 \end{bmatrix}$$

먼저 전처리(pre-processing)과정으로 압전변압기를 모델링하고, 압전세라믹의 물성치와 압전매트릭스를 입력하였다. 모델의 경계조건을 위해 압전변압기의 전극부분에 coupled-field를 형성하고 해석을 위한 모든 조건을 부여한 모델을 meshing하였다. 압전변압기는 압전세라믹을 주 재료로 이용하므로 압전세라믹의 특성인 공진주파수 부근에서의 최소임피던스 특성으로 이 주파수에서 입력부에 최대의 전류가 흐르며 최대의 변위가 나타나고, 이로 인해 출력부에 최대의 전압이 유기된다.[4]

압전변압기의 진동은 [μ]단위의 미세한 진동으로서 직접 눈으로 확인하기 힘들다. 이를 ANSYS해석프로그램으로 확인 할 수 있고, 또한 이 작업으로 원하는 진동형태인 공진주파수를 찾을 수 있다.

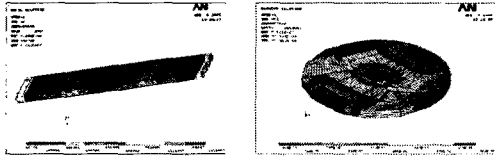


그림 2.3 Rosen형 압전변압기의 진동 및 응력분포

그림 2.3은 압전변압기에 공진주파수 인가에 따른 변형과 응력의 분포도를 유한요소해석에 의해 시뮬레이션한 것이다.

### 2.3 압전변압기의 제작

압전변압기는 압전현상을 이용하여 전기에너지-기계에너지-전기에너지의 단계로 변환하여, 압전세라믹의 입력부와 출력부에 대한 전기적 임피던스의 원리를 이용하여 전압의 변화를 얻어낸다.

모든 직사각형의 압전변압기는 transverse mode coupling constant( $k_{31}$ )가 사용된다. 그러나 shear mode( $k_{15}$ )의 경우에는  $k_{31}$ 보다 두배로 큰 값을 보인다. 따라서 본 논문에서 제안된 압전변압기에는  $k_{15}$ 와 planar mode( $k_p$ )가 함께 적용되었다. 그리고 압전변압기의 구동 주파수는 방사상의 공진주파수를 이용한다.[5]

제안된 압전변압기는 그림 2.2에서와 같이 single layered 압전세라믹으로서 crescent-shaped 입력전극과, elliptical shaped 출력전극으로 구성되어있다. 사이즈는 지름 26[mm], 두께각각 1.5[mm], 2.0[mm], 2.5 [mm], 3.0[mm], 3.5[mm], 4.0[mm]이다.

출력측 측면에는 전극이 입혀져 있지 않기 때문에 sil-ver paste를 알칼리에 희석하여 전극을 만들 부분에 도포한 후 고온에서 열처리를 하였다.

표 2.1 압전세라믹의 재료상수(APC841)

Properties		Value
Dielectric constant	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$	1350
	$k_{31}$	0.33
Coupling factors	$k_{33}$	0.68
	$k_p$	0.60
Piezoelectric coefficient	$d_{31}$	$-109(10^{-12}C/N)$
	$d_{33}$	$275(10^{-12}C/N)$
Mechanical quality factor	$Q_m$	1400

사용된 압전세라믹은 APC841이고, 물질의 특성은 표 2.1과 같다. APC841은 상용화 되고 있는 압전세라믹으로서 분극방향이 한방향이고 전극이 모두 입혀져서 나와 있다. 본 논문에서는 입력측의 분극방향과 출력측의 분극 방향이 서로 다르고, 입출력간의 전극도 나뉘어져 있기 때문에 별도의 식각공정과 입력측과 출력측에 각각 분극 처리를 해야 했다. 먼저, 종류수 80%, 암모니아수 10%, 과산화수소 10%의 비율로 된 식각 액으로 전극을 나눈

뒤 분극처리를 하고, 공동 접지를 사용하기 때문에 출력측 분극을 먼저 하고, 입력측 분극처리를 해야 한다.

그림 2.4은 분극장치로서 고전압발생을 위한 증폭기와 실리콘 오일을 가열시켜주는 열선, 그리고 온도계로 구성되어 있다.

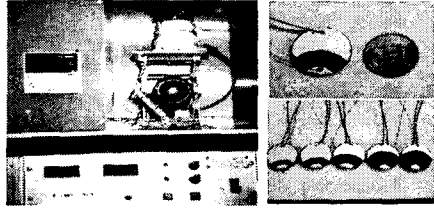


그림 2.4 분극장치 및 제작된 압전변압기

분극을 행할 때 고전압이 걸릴수록 큰 stress를 받으므로 비교적 낮은 온도로 분극을 할 수 있게 실리콘오일의 온도를 130도 정도로 높였다. 분극 전압은 1[mm]에 3[kV]를 주었고, 분극시 큰 stress로 인한 압전세라믹의 파손을 방지하기위해 약 3[kV]에서부터 서서히 전압을 상승시켰고, 마무리 단계에서도 실리콘오일에서 압전세라믹을 뺀 후 약 5분간 절반의 전압을 유지 시켜 주었다.

### 3. 실험

그림 2.5는 제작된 압전변압기의 임피던스를 측정한 스펙트럼이다. impedance analyzer로 측정한 결과는 각 모델마다 공진주파수의 차이가 있었지만 대략 86[kHz] 주위에서 최소의 임피던스를 보였다.

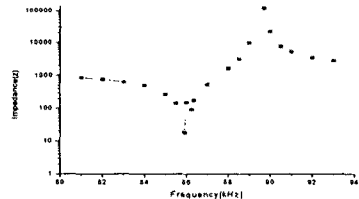


그림 2.5 분극장치 및 제작된 압전변압기

실험에 이용된 장비로는 Agilent의 arbitrary waveform generator 33120A와 digit multimeter 34401A, GW instek의 digital storage oscilloscope GDS-840을 사용하였다.

그림 2.6는 각각의 다른 두께의 압전변압기를 주파수변화에 따른 출력전압특성을 보여준다. 공진주파수에서만 큰 증압특성을 보임을 알 수 있고, 지름이 같으므로 두께가 얇을수록 출력전압이 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 최고의 증압율을 보이는 공진주파수 대역도 두께의 변화에 따라 조금씩 달라진다.

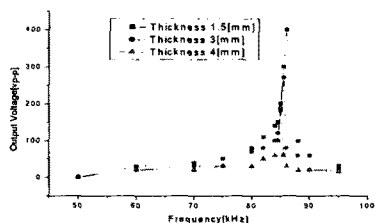


그림 2.6 주파수변화에 따른 출력전압특성(무부하)

그림 2.7은 두께 1.5-4.0[mm] 각각의 승압특성을 보여 준다. 입력전압은 5[Vp-p]이고, 공진주파수는 약 86.5[kHz]이다.

그림 2.8은 입출력간의 공극의 간격을 변화시켜 승압특성을 측정한 그래프이다. 공극의 간격이 클수록 높은 승압특성을 가지며 입력 전압의 증가에 따라 비교적 선형적인 출력특성을 보였다.

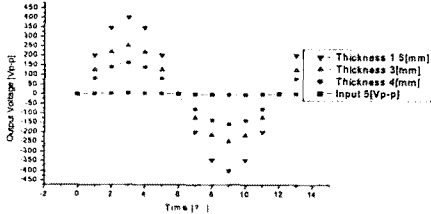


그림 2.7 두께변화에 따른 승압특성

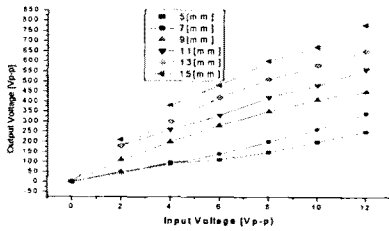


그림 2.8 공극간격에 따른 승압특성

응력집중의 분산은 유한요소해석의 응력분포도로 crescent형 압전변압기와 기존의 Rosen형의 차이를 확인할 수 있었고, 그림 2.9의 출력전력곡선으로도 crescent형 압전변압기가 동등 조건에서 높은 효율을 보임을 알 수 있다.

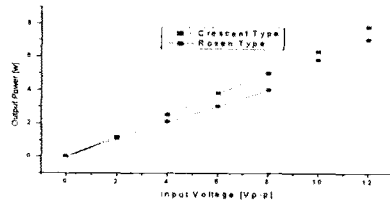


그림 2.9 Crescent형과 Rosen형의 출력전력 특성

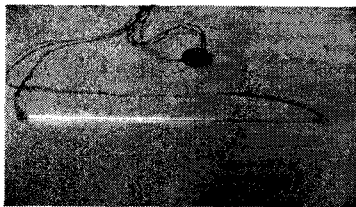


그림 2.10 압전변압기의 CCFL 점등

그림 2.10은 압전변압기를 이용하여 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)을 점등시킨 그림이다. CCFL의 관경은 2[mm], 관장은 250[mm]이다. 방전개시전압은 800[Vrms]로 압전변압기의 출력전압으로 불완전 점등을 보였고, 부하의 변화에 따른 압전변압기의 출력전압의 변화로 안정적인 운전상태를 유지하기는 힘들었으며 공진 주파수도 조금씩 변함을 확인할 수 있었다.

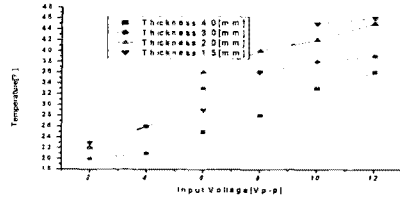


그림 2.11 두께변화에 따른 온도특성

압전변압기의 운전시 온도의 변화는 그림 2.11과 같다. 높은 승압특성을 보이는 얇은 압전변압기 일수록 온도가 높게 올라감을 알 수 있었고, 온도가 높아질수록 효율이 저하되고 압전변압기 자체 진동이 심하여 안정성에도 문제가 되었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Rosen형 압전변압기와 crescent형 압전변압기를 제작하여 응력 분포도 및 효율을 유한요소해석과 실험을 통하여 비교하였다. 또한 circular형태의 압전변압기에 crescent형 입력부의 면적을 달리한 모델과 두께를 달리한 모델을 제작하여 각각의 승압율과 CCFL의 적용에 관하여 연구하였다.

유한요소해석을 통하여 입력부와 출력부의 접촉부가 넓어진 crescent형태의 압전변압기가 응력이 분산됨을 보였고, 실험을 통한 출력전력으로도 효율이 높음을 확인하였다. 두께에 따른 승압율은 26[mm]의 같은 지름의 압전변압기로서 두께가 얇을수록 높은 승압율을 보였고, 1.5[mm]에서 약 90배에 가까운 승압율을 보였다. 그러나 두께가 얇아지면서 높은 승압비를 보였으나 열이 많이 발생하였고, 자체 진동이 심해지면서 기계적 안정성에도 문제점을 보였다.

입력부의 면적을 달리 한 축, 5[mm]에서 15[mm]까지 공극의 간격을 달리한 모델은 비교적 입력전압에 비례한 승압특성을 보였고, 공극의 간격이 넓을수록 높은 승압특성을 보였다. 높은 승압율을 얻기 위하여 공극의 간격을 넓히게 되면 아주 높은 분극전압이 요구되므로 변압기의 파손의 우려가 크며, 실로 10[mm]이상의 공극을 가진 압전변압기의 분극시 breakdown현상이 일어남을 확인할 수 있었다.

CCFL의 구동 실험에서는 완벽한 점등 및 운전상태를 구현하기가 힘들었다. 높은 방전개시전압은 얻을 수 있었지만 CCFL의 적용시 임피던스 매칭문제로 안정적인 운전을 하지 못하였고, 순간 점등 및 미세점등만을 실험을 통하여 구현할 수 있었다.

향후 CCFL의 고유임피던스와 압전변압기의 출력임피던스의 매칭과 운전전압의 안정성을 유지할 수 있는 기술 개발이 요구된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Toshiyuki Zaitzu, "New Piezoelectric Transformer Converter for AC-adaper", IEEE.
- [2] 當川義朗, 超音波エレクトロニクス振動論, 朝倉書店, p.241-242., 1997
- [3] ANSYS 5.4 verification manual.
- [4] 박형진, "ANSYS를 이용한 유한요소 해석" 광문각, 2001.
- [5] Tshiyuki Zaitzu, "Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control", IEICE Trans. COMMUN. Vol. E80 B. No. 7, pp. 1035-1043, 1997