

PZT-PMNS 세라믹의 공진특성 및 압전 정수의 전계의존성

오진현, 임기조, 강성화\*, 김현후\*\*  
 충북대학교, 충청대학\*, 두원공과대학\*\*

The Electric Field Dependence of the Resonance Characteristics and Piezoelectric Constant of the PZT-PMNS Ceramics

Jin-Heon Oh, Kee-Joe Lim, Seong-Hwa Kang\*, Hyeon-Hoo Kim\*\*  
 Chungbuk National University, Chungcheong University\*, Doowon Institute of Technology\*\*

**Abstract** - In this paper, the variable tendency of the piezoelectric constant and resonance characteristics of the piezoelectric ceramics due to the electric field is studied.

The practical application of piezoelectric ceramics is not only applied in field of small signal. For example, in case of an ultrasonic motor, 120 ~ 130Vrms of driving voltage is needed and that of an piezoelectric pump, 200 ~ 220Vrms of voltage is required. The refore, to examine the characteristics of piezoelectric ceramics in large signal contributes to reducing the susceptibility to the multifarious application and securing the ease of the production of control circuit. These contributions may be connected to the expansion of industrial application.

We fabricated disk-type piezoelectric ceramic samples by using conventional method and measured the resonance characteristics of these samples under from low to high voltage driving conditions. According to increasing the value of the input voltage, we measured the resonance frequency of the piezoelectric ceramic, and inquired into the cause of these phenomena.

1. 서 론

세라믹재료에 대한 압전 현상이 Mason 등에 의해 원리 및 이론적 해석이 제시된 이후, 세라믹 재료는 각종 음향기기, 통신기기, 초음파 기기 등 전자산업 분야의 핵심소재로 이용되고 있다. 이러한 세라믹 소자들은 그 응용분야에 따라 각기 용도에 적합한 기계적, 유전적, 압전적 특성이 요구된다.

압전 세라믹 재료에 대한 특성들은 대부분 저전계하에서 측정되고, 또한 측정방법도 여러 가지 국제규격에 잘 명시되어 있어, 이러한 측정방식에 의해 결정된 여러 가지 정수들은 신뢰성 있게 받아들여지고 있다. 그러나 저전계하에서 측정된 정수들 중 몇몇을 제외한 대다수의 정수들은 전계가 높아짐에 따라 비선형적 특성을 보여주고 있다. 따라서 그대로 고전계하에서 적용하였을 때 재료의 적합성을 판단하는 데에는 어려움이 있다. 초음파 모터, 마이크로 펌프 등에서의 응용에서 알 수 있듯이 압전 세라믹을 대진폭용 진동자로 사용하는 예가 많아지고 있음을 고려할 때, 압전 세라믹의 대진폭 진동 특성에 대한 연구는 의미가 깊다고 할 수 있다. 예를 들어, 고정자의 직경이 48mm인 진행파 회전형 초음파 모터의 경우, 압전 세라믹의 진동을 일으키기 위한 구동전압은 약 120[Vrms] ~ 130[Vrms] 정도이다.

저전계하에서 이 압전 세라믹의 어드미턴스 특성을 측정하면 공진주파수는 대략 73[kHz]이다. 그러나 실제 120[Vrms] ~ 130[Vrms]의 구동전압을 인가하게 되면, 공진주파수는 약간 줄어드는 경향을 나타냈다. 그때 측정된 값은 69[kHz]이었다. 이는 Kenji Uchino 등이 인가전압에 따라 압전 세라믹의 Admittance curve를 측정할 결과에서도 확인할 수 있다.[1] 국제 규격에서의 측정방법 중 Resonance Method에 의해 측정되는 여러 가지 재료정수들은 저전계에서의 Impedance curve를 기준으로 하여 얻어지게 된다. 따라서 위의 사례와 같이 입력전압이 상승하여 Impedance curve가 변화하게 되면 규격에 의해 측정된 정수들은 실제의 구동환경에서 변화하게 될 것이며, 이는 곧 재료의 특성이 전계에 의해 영향을 받게 됨을 의미한다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 압전 세라믹의 시편을 제작하여 인가되는 전계에 따라 압전 세라믹의 공진특성의 변화경향을 측정하고, 국제 규격에 명시된 Resonance Method를 이용하여 공진, 반공진 주파수로부터 압전 변형정수를 추출하였다.

2. 본 론

2.1 실험 과정

본 논문에서는 전계의 변화에 따른 압전 세라믹의 재료정수 변화 경향을 분석하기 위하여 IRE의 규격에 명시되어 있는 Resonance Method를 이용하여 간접적으로 압전 변형정수  $d_{33}$ 를 구하는 방법을 사용하였다. IRE 규격에 의하면, Resonance method에 의해  $d_{33}$ 의 값은 다음과 같은 순서에 의해 구해질 수 있다.

$$k_{33}^2 = \frac{\pi f_s}{2 f_p} \tan\left(\frac{\pi \Delta f}{2 f_p}\right)$$

$$\frac{1}{\epsilon_{33}^D} = 4g_p^2 l^2$$

$$\epsilon_{33}^E = \epsilon_{33}^D / (1 - k_{33}^2)$$

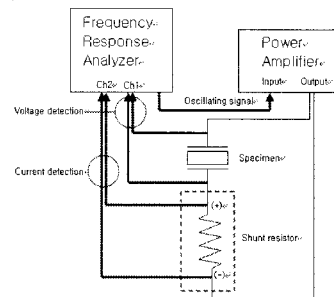
$$d_{33} = k_{33} \sqrt{\epsilon_{33}^E \epsilon_{33}^D}$$

주파수와 밀도, 크기 등으로부터 각각 전기기계결합계수와 탄성결플라이언스를 구하고, 유전율을 측정하여 최종적으로 압전 변형 정수  $d_{33}$ 을 계산할 수 있다. 이는 저전계 및 고전계에서 측정되는 공진, 반공진주파수의 변화경향이  $d_{33}$ 의 변화를 가능할 수 있는 주요 인자가 됨을 의미한다.

본 실험에서는 시편의 재료로서 직접 조성한 압전 세라믹을 사용하였다. 조성비는 다음과 같다.



다음 그림은 전계에 따른 시편의 압전 특성을 측정하기 위한 각각의 시스템을 나타낸 그림이다.



<그림 1> 공진특성을 측정하기위한 시스템 구성

시편에 입력하는 전압의 크기는 1[Vrms]에서 25[Vrms]까지 변화시켰다. 측정실험 과정상 시편의 파손이 없는 최대 한계전압의 크기는 25[Vrms]이었다. 이는 FRA5087을 이용하여 임피던스 특성을 측정하는 과정에서 Oscillating voltage의 주파수 변환이 이루어지기 때문에 인가하는 입력전압의 크기가 증가할수록 시편이 파괴되는 빈도가 증가하였다. 이러한 빈도를 줄이기 위하여 주파수 변환속도를 낮추게 되면 시편이 고주파, 고전계에 노출되는 시간이 길어져 상당한 양의 열이 발생하고, 이는 압전체의 특성에 영향을 미치게 되므로 모든 사항을 종합적으로 고려하여 실험에 인가할 전압의 크기를 최대 25[Vrms]로 결정하였다.

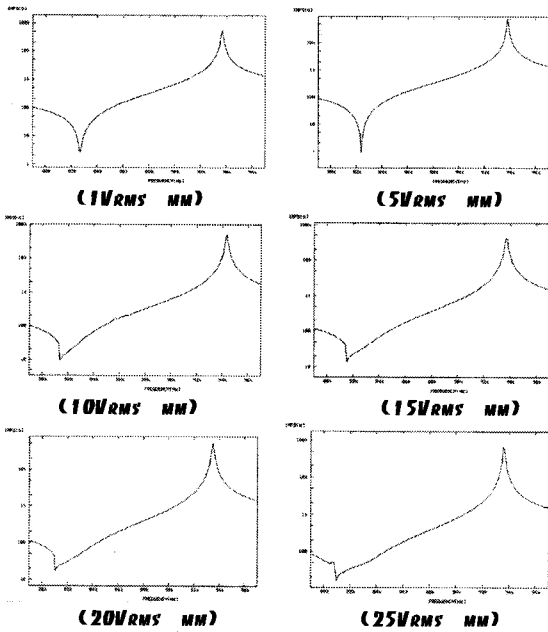
2.2 실험 결과

2.2.1 임피던스 곡선

인가전압의 크기에 따른 임피던스 곡선의 변화 양상을 그림 2에 나타내었다. 이 그림에 해당하는 시편은 직경 28mm, 두께 1mm로, 시편에 인가한 전압의 크기와 주파수는 각각 1(Vrms)에서부터 25(Vrms)까지, 76.5(kHz)에서부터 96.5(kHz)까지 증가시켰다.

1(Vrms)와 5(Vrms)의 전압을 인가하였을 때는 공진점 및 반공진점에서 임피던스 변화가 대칭 형태를 띠고 있으며, 임피던스값 변화폭이 비교적 넓고, 주파수의 변화에 따라 완만한 곡선 형태를 가짐을 알 수 있다.

10(Vrms) 이상의 전압이 인가된 경우, 공진점에서의 임피던스 곡선이 비대칭적이며, 임피던스값 변화폭도 상대적으로 작고, 공진점에 근접하여 급격하게 변화하였다. 또한 공진점보다 높은 주파수 근처에서도 곡선의 형태를 띠는 것이 아닌 직선의 형태로 임피던스가 변화하는 것으로 나타났다. K. Uchino 등은 이를 전계에 따른 압전 특성의 비선형성이라고 설명하고 있는데 이는 압전 세라믹에 인가되는 전압이 높을수록 주파수의 변화양상과 기계적 진동의 변화양상이 조화를 이루기 어렵기 때문으로 생각된다.(1) 즉, 분극된 세라믹 재료 내부에 존재하는 쌍극자들의 진동 변화가 전압이 증가할수록 둔감해짐을 보여주는 것으로 사료된다.



〈그림 2〉 전계에 따른 임피던스 곡선의 변화

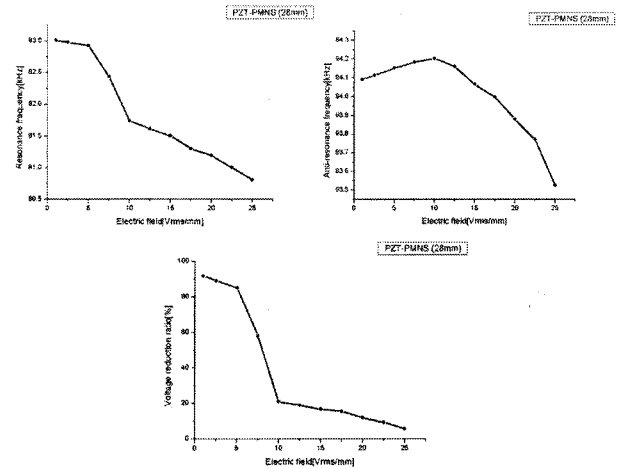
### 2.2.2 공진특성

그림 3은 세라믹 시편의 전계에 따른 공진, 반공진 주파수의 변화 및 공진점에서의 전압변동률을 각각 나타낸 것이다. 사용된 시편의 크기는 직경 28mm, 두께 1mm인 디스크형이다.

전계가 증가함에 따라 공진주파수와 전압변동률은 감소하는 경향을 보이며, 반공진 주파수는 소폭 증가하다가 감소하는 형태를 보이고 있다. 특히 공진주파수와 전압변동률을 나타내는 그래프의 모습(그림 3(a), (c))은 상당히 흡사하다는 특징을 가지고 있다. 이 그래프들을 살펴보면, 특정한 전계구간(5(Vrms/mm)~10(Vrms/mm))에서 급격하게 감소하고 있다. 이는 앞서 그림 2에서 보여진 임피던스 곡선의 입력전압에 따른 변화경향과 무관하지 않음을 알 수 있다. 그림 3의 (a)에서 공진주파수의 경우, 1(Vrms/mm)에서 측정값이 83.0128(kHz), 25(Vrms/mm)에서 측정값이 80.8062(kHz)로 약 2.2(kHz)정도 이동하였다. 이는 변화추이를 생각할 때, 전계가 증가하면 감소폭은 더 상승할 것으로 추정되어 초음파 모터나 압전 펌프의 입력전압과 같은 수준에서는 상당한 정도의 공진점 이동이 일어날 것으로 생각된다.

압전 세라믹이 공진현상을 보이는 경우, 세라믹에 인가되는 전압의 크기는 감소하게 되는 데 이를 실제 인가 전압과 비교하여 전압변동률로 표시하였다. 인가전계 1(Vrms/mm)일 때, 약 91.7(%)의 감소율을 보였으며, 인가전계 25(Vrms/mm)에서는 약 5.6(%)의 감소율을 보였다.

5(Vrms/mm)이하의 전계에서는 전압변동 폭은 컸으나 단위 주파수 변화당 전압변동 정도는 작았으나, 10(Vrms/mm) 이상의 전계에서는 전압변동 폭은 작았으나 단위 주파수 변화당 전압변동 정도는 컸다. 이는 곧 특정한 전계구간을 중심으로 재료의 구동특성에 어떠한 변화가 있음을 나타내는 것이다.

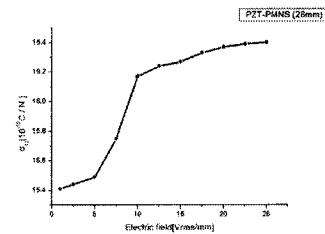


〈그림 3〉 전계에 따른 공진 특성의 변화

### 2.2.3 압전변형정수 d33

그림 5에 전계에 따른 압전 변형정수 d33의 변화를 그래프로 나타내었다. 이는 2.1절에서 설명한 IRE 규격의 Resonance method를 이용하여 계산한 결과이다.

전계적으로는 전계가 증가함에 따라서 압전 변형정수도 증가하고 있으나 일부 구간에서 급격히 증가하다가 다시 완만해지는 형태로 전계에 따른 비선형적 특성을 보여주고 있다.



〈그림 4〉 전계에 따른 압전변형정수 d33의 변화

## 3. 결 론

S. Sherrit et al은 압전 세라믹 재료의 고전계 구동특성의 특성은 전계의 크기 등 전기적인 요인보다는 세라믹 진동의 분포와 그에 따라 발생하는 열 등의 기계적인 요인에 의해 더 큰 영향을 받는다고 설명하고 있다.[2] 따라서 본 실험에서 사용한 PZT-PMNS 세라믹은 입력전압이 약 5[Vrms/mm] ~ 10[Vrms/mm]의 사이에서 시편의 압전 특성에 영향을 미칠 주목할만한 기계적 진동요인이 발생하는 것으로 생각된다. 분극된 압전 세라믹에 인가되는 전계가 상승할수록 공진 주파수에서의 진동이 커지게 되는 것은 자명하다. 그러나 저전계와 고전계에서의 PZT-PMNS 압전 세라믹 진동변화는 특정한 전계구간을 중심으로 상이한 특성을 보였으며, 이는 주파수나 전압변동, 압전변형정수 등의 비선형적인 변화로 연결되었다.

압전 세라믹이 응용되는 제품의 경우 (USM, PUMP, TRANSFORMER) 구동전압은 더 높기 때문에 위에서 언급한 여러 인자들의 변화는 더 큰 수밖에 없다. 따라서 전계의 상승에 따른 세라믹 재료의 특성 변화 경향을 측정하고 변화 경향을 규명하는 것은 의미가 깊다고 할 수 있다. 저전계하에서 측정된 특성과 실제 고전계에서 구동되는 응용제품에서 재료가 보이는 특성은 본 논문의 실험결과에서 보듯이 사뭇 다르기 때문이다.

### 〈참고 문헌〉

- [1] K. Uchino, "Drive voltage dependence of electromechanical resonance in PLZT piezoelectric ceramics", JAP, Vol28, pp47-49, 1989
- [2] S. Sherrit, "Characterization of Transducers and Resonators under High Drive Levels", Ultrasonic Symposium 2001 IEEE, Vol 2, 1097-1100, 2001