

# 우주환경하에서 횡진동 모드 PZT진동자의 특성변화 예측

## Estimation of Characteristics Change on Transverse Mode PZT Vibrator Under Space Environment

이상훈, 문귀원, 유성연\*, 김정순\*\*, 김무준\*\*\*†

(Sang Hoon Lee, Guee Won Moon, Seong Yeon Yoo\*, Jung Soon Kim\*\*, and Moo Joon Kim\*\*\*†)

한국항공우주연구원, \*충남대학교 기계설계공학과, \*\*동명대학교 미디어공학과, \*\*\*부경대학교 물리학과  
(접수일자: 2012년 6월 27일; 채택일자: 2012년 8월 11일)

**초 록:** 횡진동 모드 압전진동자의 우주-항공산업에의 적극적인 활용을 위하여 우주환경을 모사한 열진공 챔버를 사용하여  $-100^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 PZT-5 계열의 압전세라믹 진동자의 온도변화에 따른 특성변화를 조사하였다. 그 결과 공진 및 반공진주파수는 상온일 때를 중심으로 온도의 변화에 따라 증가하였고 유전상수의 경우 주어진 온도 범위에서 2500~7500의 범위에서 선형적으로 증가하였다. 기계적 손실은 0.08~0.03의 범위에서 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 이들에 대한 회귀분석을 통하여 1차원 및 2차원 회귀함수를 이용하여 압전진동자의 각 특성에 대한 온도의존함수들을 도출하였다. 이들 함수를 적용하여 구한 횡모드 압전 진동자의 입력어드미턴스의 계산결과는 측정 결과와 좋은 일치를 보이고 있었으며 우주환경에서의 온도에 따른 특성변화 예측에 유효함을 확인할 수 있었다.

**핵심용어:** 압전진동자, 우주환경, 온도변화, 열진공챔버, 전기-기계결합계수, 공진주파수, 반공진주파수

**투고분야:** 초음파 및 탄성과 분야(4.1)

**ABSTRACT:** The temperature dependence of the characteristics in a PZT-5 piezoelectric ceramic vibrator with the transverse mode was investigated in the range of  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $90^{\circ}\text{C}$  using a thermal vacuum chamber to utilize the vibrator in aerospace industries. As the results, at room temperature, the resonant and anti-resonant frequencies had the minimum value, whereas, the dielectric constant increased linearly from about 2500 to 7500 in the given temperature range. The mechanical loss decreased linearly from 0.08 to 0.03. Through the regression analysis, the temperature dependence functions of the characteristics were derived to linear and square regression functions. Applying the functions, the input admittance characteristics of the piezoelectric vibrator were calculated, and the results showed good agreement with measured ones. It can be confirmed that this method is useful to estimate the characteristics change of the piezoelectric vibrator caused by the temperature change under the space environment.

**Key words:** Piezoelectric vibrator, Space environment, Temperature change, Thermal vacuum chamber, Electro-mechanical coupling factor, Resonant frequency, Anti-resonant frequency

**ASK subject classification:** Ultrasonic and Elastic Waves (4.1)

### 1. 서 론

압전 진동자의 응용분야는 통신용 소자 혹은 초음파 탐상을 위한 전기-음향 변환소자뿐만 아니라 초음파 모우터나 바이몰프형 액츄에이터 등 기계 소자 분야에도 그 범위를 넓혀가고 있으며 국내에서도 이

에 대한 연구가 다수 수행되고 있다.<sup>[1-3]</sup> 특히 압전 진동자를 이용한 액츄에이터는 전자기파의 발생이 적으며 정밀 제어가 가능해 첨단 기기의 동력원으로 활용되는 예가 많다.<sup>[4-7]</sup>

최근 이러한 압전 진동자의 우수한 특성을 이용한 통신 및 기계 소자를 우주-항공 산업에 활용하려는 시도가 보고되고 있으나,<sup>[8-11]</sup> 그 사용 영역에 있어서는 극히 제한되어 있어 실용화를 위해서는 보다 충

†Corresponding author: Moo Joon Kim (kimmj@pknu.ac.kr)  
Department of Physics, Pukyong National University, 45,  
Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 608-737, Republic of Korea  
(Tel: 82-51-629-5572)

분한 검토가 요구되고 있다. 실용화를 위해 검토되어야 할 사항중의 하나는 압전체의 온도의존성을 들 수 있다. 우주환경은 고온과 저온의 상태가 비행체의 운항궤적에 따라 주기적으로 나타나는 환경이다. 따라서 이러한 환경하에서 압전진동자의 특성 변화는 기기의 오작동 및 정보의 오해를 가져올 수 있다. 이러한 이유로 현재 우주선 및 항공기에서 사용되는 압전 소자는 항온장치가 구비된 실내에 국한되어 사용되고 있다.

압전체의 활용범위를 항온장치를 갖는 우주선의 실내뿐만 아니라 실외 혹은 다른 행성의 표면으로 넓히기 위해서는 압전체의 온도의존성을 파악하고 또한 예측하여 이를 이용한 장치 설계에 적용해야 할 것이다. 또한 온도의존성의 적극적인 응용으로 우주 환경에서의 적외선 센서나 온도센서로의 활용도 고려될 수 있다.

압전체의 진동모드에는 인가하는 전계의 방향과 같은 방향으로 진동하는 압전 두께진동 모드(thickness mode) 혹은 종진동 모드(longitudinal mode)와 함께 인가전계의 방향과 수직인 방향으로 진동하는 횡진동 모드(transverse mode)가 있다.<sup>[12]</sup> 압전진동자를 이용한 압전 밴딩모드 액추에이터, 위치제어센서 등에 사용되는 압전 자이로 스코프, 통신용 필터에 사용되는 압전 표면파 디바이스 등은 모두 압전 횡진동 모드를 이용한 예이다.<sup>[13-18]</sup> 이러한 소자들은 우주항공 산업에 적극적으로 응용될 수 있는 소자들으로써 우주환경하에서의 특성검토가 요구되고 있다.

압전 단결정 및 특정 압전체에 대한 주위 온도에 따른 압전체의 특성 변화에 대한 연구는 많이 보고되고 있으며 주로 압전체의 탄성계수 및 압전상수 등 본질적인 물리상수의 변화에 주목한 내용이 많다.<sup>[19-24]</sup>

본 연구에서는 우주환경하에서 횡진동 모드 압전진동자의 실용적인 활용을 위하여 가장 널리 사용되고 있는 PZT-5계열의 압전 세라믹 진동자에 대하여 온도변화에 따른 전기-기계적 특성변화를 실험적으로 고찰하고 이를 바탕으로 1차원 및 2차원 회귀함수를 이용하여 우주환경하에서 나타날 압전 세라믹진동자의 특성을 예측하였다.

## II. 이 론

횡진동 모드 압전 진동자의 모델을 그림 1에 나타내었다. 1차원 해석을 가능하게 하기 위하여 다음과 같은 조건을 둔다.

$$l \gg w, t \quad (1)$$

압전 횡진동 모드에 대한 입력 어드미턴스  $Y$ 는 다음 식으로 주어진다<sup>[25]</sup>.

$$Y = j\omega C_0 + j\omega C_0 \frac{k_{32}^2 \tan a}{1 - k_{32}^2} \quad (2)$$

여기서, 다음과 같은 관계가 성립하며

$$a = \frac{kl}{2} = \frac{\omega l}{2v} \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\rho s_{22}^E}} \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{hw\epsilon_{33}^{LS}}{t} \quad (5)$$

$$\epsilon_{33}^{LS} = \epsilon_{33}^T (1 - k_{32}^2) \quad (6)$$

$$k_{32}^2 = \frac{d_{32}^2}{\epsilon_{33}^T s_{22}^E} \quad (7)$$

$\omega = 2\pi f$ 는 각진동수,  $C_0$ 는 제동용량(clamped capacitance),  $k$ 는 파수,  $v$ 는 압전체의 음속,  $\rho$ 는 압전체의 밀도,  $s_{22}^E$ 는 전계가 일정할 때의 컴플라이언스,  $\epsilon_{33}^T$ 는

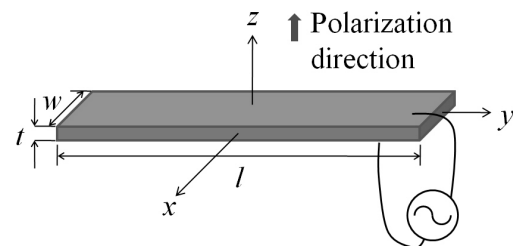


그림 1. 압전시편의 좌표계

Fig. 1. Coordinate of piezoelectric plate.

응력이 일정할 때의 유전율,  $\epsilon_{33}^{LS}$  는 변형이 일정할 때의 유전율,  $k_{32}$ 는 전기-기계 결합계수,  $d_{32}$ 는 압전 상수이다.

어드미턴스는 공진주파수일 때 최대이며 반공진 주파수일 때 최소가 되어야 한다는 조건으로부터 결합계수는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$k_{32} = \sqrt{\frac{\frac{\pi f_a}{2 f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2 f_r}\right)}{1 - \frac{\pi f_a}{2 f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2 f_r}\right)}} \quad (8)$$

여기서  $f_r$ 는 공진주파수,  $f_a$ 는 반공진 주파수이다.

한편 파워의 반치폭을 나타내는 높은 주파수를  $f_2$ , 낮은 주파수를  $f_1$ 라 두면 기계적 품질계수는 다음과 같이 주어지며

$$Q_m = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (9)$$

이것은 기계적 손실  $\tan \delta$ 와는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tan \delta = \frac{1}{Q_m} \quad (10)$$

이 때  $f_0$ 는 기계적 공진주파수이다.

횡진동 모드의 진동분포로부터 압전 진동자의 길이는 기본 공진 모드의 반파장에 해당된다. 즉, 파장과 음속과의 관계를 이용하여 다음의 관계가 성립한다.

$$f_r = \frac{v}{2l} \quad (11)$$

### III. 실험방법 및 조건

횡진동 모드 압전진동자의 시편으로 시판되는 PZT-5계열의 압전세라믹을 사용하였으며 그 크기 및 밀도를 Table 1에 나타내었다. 1차원적인 해석이 가능하게 하기 위하여 시편의 진동방향의 길이는 두

께의 10배 이상 길게 하였다.

진공상태에서 압전진동자의 온도변화에 따른 특성변화를 확인하기 위해서 그림 2에 나타난 것과 같은 온도 및 압력가변형 열진공 챔버를 사용하였다.

열진공 챔버는 내직경 1 m, 길이 1.5 m의 진공용기로 구성되어 최대  $10^{-4}$  Pa 이하의 고진공환경과 내부 쉬라우드를 통해 흐르는 GN2의 온도에 따라  $100^\circ\text{C} \sim -150^\circ\text{C}$  사이의 온도 환경을 모사함으로써 지상에서 최대한 우주환경에 근접한 환경을 제공할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 한국 항공우주연구원이 보유한 열진공 챔버를 사용하여 실험을 수행하였다.

그림 3에 나타난 것과 같이 동일한 압전 시편 두 장을 열진공 챔버내부에 진동에 영향을 받지 않도록 고정하고 그 중 한 장의 시편의 전극에는 리이드선을 연결하여 외부의 임피던스 분석기(impedance analyzer 4294a)에 연결하여 공진 특성을 측정하였다. 다른 한 장의 시편에는 열전대(thermocouple)를 장착하여 시편의 온도를 측정하게 하였는데 이는 열전대의 접촉에 의한 진동특성에의 영향을 제거하기 위함이다. 시편을 장착한 챔버 내부의 온도를  $90^\circ\text{C}$ 로 설정하여 온도평형이 이루어지길 기다려 어드미턴스(admittance)를 측정하였으며 온도를  $-100^\circ\text{C}$ 까지 낮추어 가며 공진특성의 변화를 관찰하였다. 각 측정

표 1. 압전 시편의 크기 및 밀도

Table 1. Size and density of piezoelectric plate.

$l$ (mm)	$w$ (mm)	$t$ (mm)	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
30.0	5.0	1.0	7333

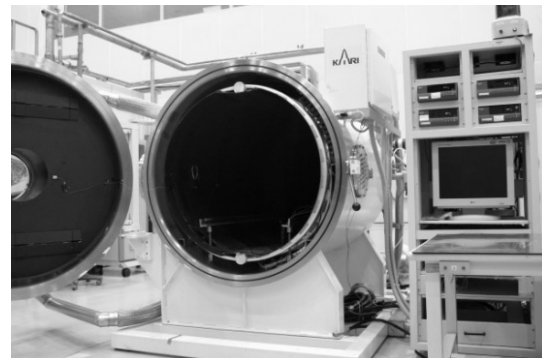


그림 2. 한국 항공우주연구원의 열진공챔버

Fig. 2. Thermal vacuum chamber in Korea Aerospace Research Institute.

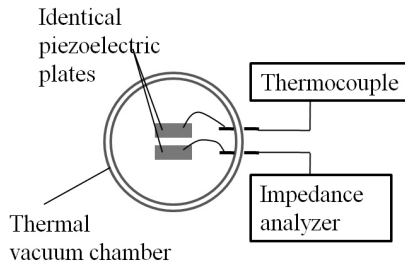


그림 3. 공진법을 이용한 실험장치  
Fig. 3. Experimental setup of resonance method.

온도에서의 온도 평형시간은 1시간이었다.

#### IV. 회귀분석 및 토의

##### 4.1 공진 및 반공진 주파수

상온 상압에서 측정된 시편의 횡진동 모드 공진특성의 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 이 결과로부터 공진 및 반공진 주파수는 각각 43.523 kHz 및 45.647 kHz 임을 확인 할 수 있다. 이와 같은 어드미턴스 특성을 챔버내의 온도를 변화시켜 -100°C ~ 90°C의 범위에 대한 공진 및 반공진 주파수의 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 결과로부터 공진 및 반공진 주파수의 온도에 따른 변화를 이차원 함수로 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

$$f(\theta) = a\theta^2 + b\theta + c \quad (12)$$

여기서

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
$f(\theta) = f_r$	$2.77 \times 10^{-4}$	$-1.56 \times 10^{-2}$	43.11
$f(\theta) = f_a$	$2.91 \times 10^{-4}$	$-2.37 \times 10^{-2}$	46.98

그림 5의 결과를 보면 -100°C에서 약 47.5 kHz이던 공진주파수는 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 상온인 22°C에서 약 43.0 kHz로 최소값을 나타내며 다시 증가하여 90°C에서는 약 44.0 kHz를 나타내고 있다. 반공진 주파수의 경우도 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 시편의 횡진동 모드 공진 주파수는 상온에서의 공진 주파수를 기준으로 약 10.3%

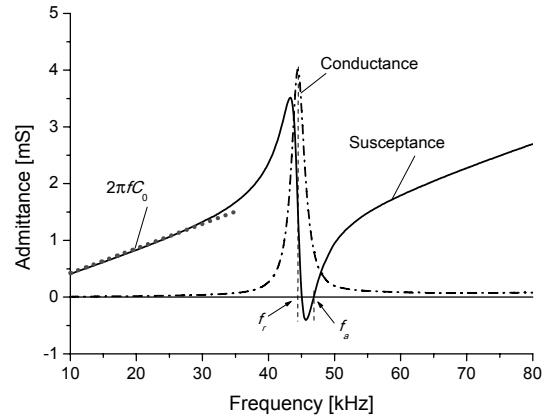


그림 4. 상온에서의 횡효과 압전 시편의 어드미턴스 특성  
Fig. 4. Admittance characteristics of the piezoelectric plate with lateral effect at room temperature.

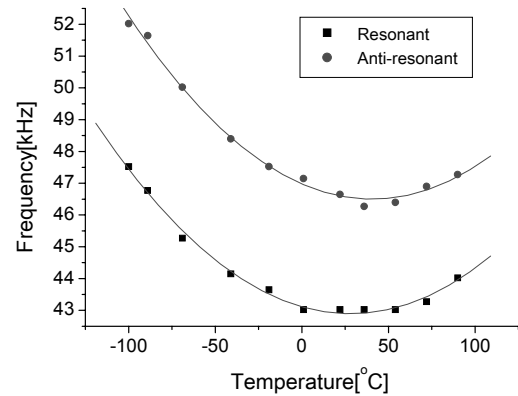


그림 5. 진공챔버내의 온도변화에 따른 공진특성의 변화  
Fig. 5. Resonance characteristics change with temperature of the vacuum chamber.

의 변화를 나타내고 있었으며 반공진의 경우 약 12.6%의 변화를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 탄성 표면파 필터(SAW filter) 등 통신용 소자로 사용될 경우 매우 큰 통신에러로 작용할 수 있으며 액츄에이터 등 동력원으로 사용될 경우에도 압전재료는 일반적으로 기계적 품질계수가 매우 크므로 공진 주파수의 변화는 에너지 변환효율의 극단적인 감소를 가져와 구동에 큰 문제를 야기시킬 수 있다.

식(12)에서 구한 공진 및 반공진 주파수의 함수를 식(8)에 적용하여 구한 전기-기계결합계수의 추정 결과를 그림 6에 측정치와 함께 나타내었다. 이 결과를 보면 회귀곡선을 이용한 추정치를 이용하여 온도에 따른 전기-기계결합계수의 변화를 예측할 수 있음을 나타내고 있다.

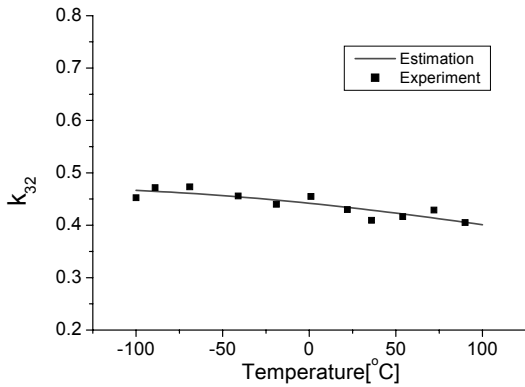


그림 6. 전기-기계결합계수의 온도의존성  
Fig. 6. Temperature dependence of the electromechanical coupling factor.

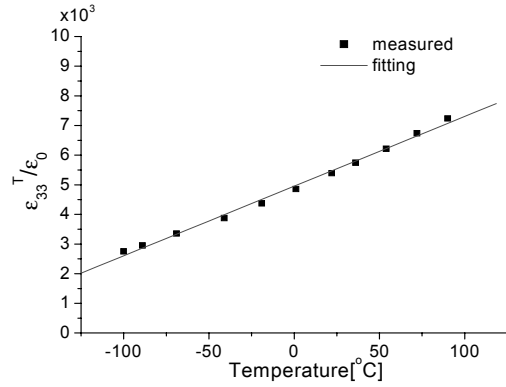


그림 7. 유전상수의 온도의존성  
Fig. 7. Temperature dependence of the dielectric constant.

### 4.2 유전율 및 기계적 손실

압전체는 용량성(capacitive)의 소자이므로 비공진 영역에서의 어드미턴스 값으로부터 유전율을 구할 수 있다. 예를 들면 그림 4에 나타낸 서셉턴스(susceptance)의 접선의 기울기는 압전 시편의 전기적 제동용량(clamped capacitance)에 비례하므로 식(5)를 이용하면 길이방향으로 고정된 상태(진동이 억제된 상태)의 유전율  $\epsilon_{33}^{LS}$  을 구할 수 있다. 이로부터 구한 유전율을 식(6)을 이용하여 응력이 일정한 경우에 대한 유전율  $\epsilon_{33}^T$  를 얻을 수 있으나 일반적으로는 공진모드가 없는 매우 낮은 주파수 영역에서 구한 전기적 용량으로부터  $\epsilon_{33}^T$  를 직접 구한다. 이는 매우 낮은 주파수 영역에서는 진동시 응력을 무시할 수 있기 때문이다. 이러한 방법으로 온도변화에 따른 유전상수  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  의 변화를 구하였다.

일반적으로 온도 변화에 따른 유전 상수의 변화에 대해서는 큐리-와이즈의 법칙으로 알려져 있다.<sup>[27]</sup> 그러나 압전성의 상실을 가져오는 큐리온도 근방에서는 압전체로서의 의미가 없으므로 본 연구에서는 실용적인 함수로써 식(13)와 같이 온도의 변화에 따라 선형적으로 변화하는 1차원 함수를 선택하여 회귀분석을 하였다. 측정된 유전율의 변화와 회귀함수로부터 추정된 값을 그림 7에 나타내었다.

$$\epsilon_{33}^T(\theta)/\epsilon_0 = c_1 + c_2\theta \quad (13)$$

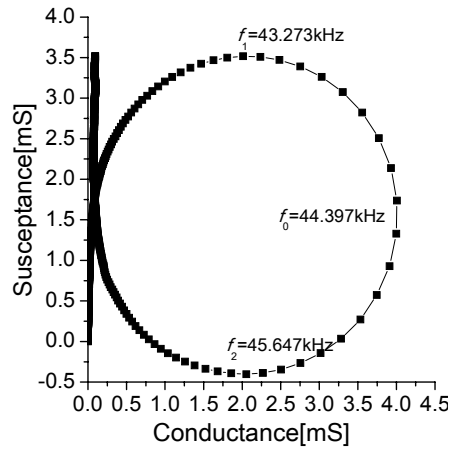


그림 8. 상온에서의 압전시편의 어드미턴스 로커스  
Fig. 8. Admittance locus of the piezoelectric plate at room temperature.

여기서  $c_1 = 4954.6, c_2 = 23.50$ .

이 결과에서 주어진 온도변화 영역에 한정하여 보면 유전 상수는 최소 2750, 최대 7240의 값을 나타내고 있어 약 62%의 증가폭을 가지며 선형적으로 증가한다고 볼 수 있다.

압전 진동자의 기계적 품질계수(quality factor) 혹은 그 역수로 나타내는 기계적 손실(mechanical loss,  $\tan \delta$ )은 공진시의 어드미턴스 로커스로부터 구할 수 있다. 그 예로서 그림 8에 상온 상압의 경우에 대한 시편의 어드미턴스 로커스를 나타내었다. 로커스가 종축(susceptance axis)으로부터 기울어진 각도가 매우 작은 것으로 보아 압전 진동자의 유전적인 손실

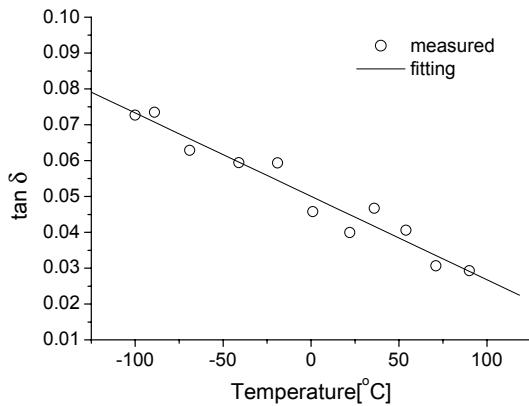


그림 9. 기계적 손실의 온도의존성  
Fig. 9. Temperature dependence of the mechanical loss.

은 기계적 손실에 비해 무시할 수 있을 만큼 작은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기계적 손실만을 고찰하기로 한다. 반치폭을 결정하는 두 주파수(quadrantal frequency)는 각각 서셉턴스가 최대인 점과 최소인 점의 주파수로 결정할 수 있으며  $f_1 = 43.273$  kHz 및  $f_2 = 45.647$  kHz로 측정되었다. 또한 기계적 공진 주파수는 근사적으로 콘택턴스가 최대인 점의 주파수로 결정할 수 있으므로  $f_0 = 44.397$  kHz로 확인 되었다. 이들의 결과를 식(9) 및 식(10)에 적용하면 기계적 손실을 구할 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 온도의 변화에 따른 압전 시편의 기계적 손실을 측정된 결과를 그림 9에 나타내었다. 이 결과를 보면 기계적 손실은 주어진 온도변화 범위 내에서 약 0.03에서 0.08사이의 범위 내에서 변하고 있으나 전체적으로 온도의 증가에 따라 기계적 손실은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 큐리온도 이전까지는 일반적으로 기계적 품질계수가 온도에 따라 증가한다는 다른 연구의 결과와도 일치한다.<sup>[23]</sup>

이 결과로부터 기계적 손실에 대한 회귀함수는 다음과 같이 온도의 1차 함수로 구할 수 있다.

$$\tan \delta(\theta) = c_3 + c_4 \theta \quad (14)$$

여기서  $c_3 = 6.4 \times 10^{-2}$ ,  $c_4 = -1.428 \times 10^{-4}$ .

### 4.3 입력 어드미턴스

식(12)에서 나타낸 온도변화에 따른 공진주파수의 변화를 식(11)에 적용하여 압전 진동자의 온도변화에 따른 음속변화를 예측할 수 있다. 또한 식(13)에 나타낸 회귀함수로부터 온도변화에 따른 압전체의 유전율의 변화를 알 수 있으며 이를 식(5)에 적용함으로써 제동용량의 변화를 예측할 수 있다. 이들의 결과를 식(2)에 적용함으로써 우주환경하에서 온도의 변화에 따른 횡진동 모드 압전진동자의 입력어드미턴스 특성의 변화를 예측할 수 있으며 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 이 때 전기-기계결합계수의 특성변화는 식(12)의 결과를 식(8)에 적용하여 사용하였다. 이 결과를 보면 압전 진동자의 온도변화에 따른 어드미턴스 특성이 적지 않은 범위에서 변화하고 있음을 확인 할 수 있으며 예측치는 그 변화를 매우 잘 추정하고 있음을 나타내고 있다. 압전체의 손실은 일반적으로 기계적 손실뿐만 아니라 유전적 손실 등 여러 가지 원인에 기인하므로 본 연구에서 고려한 기계적 손실만으로는 정확한 추정이 어렵다. 그림 10의 결과에서도 이로 인한 오차가 나타나고 있으나 압전 디바이스 설계시 매우 주요한 설계요소인 공진 및 반공진 주파수, 유전율 등의 변화는 잘 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

## V. 결 론

우주환경하에서 압전진동자의 보다 적극적인 활용을 위해 시판되는 PZT-5계열의 횡진동 모드 압전체의 온도에 대한 특성변화를 실험적으로 확인하고 이를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 공진 및 반공진 주파수, 유전율, 기계적손실 등 압전 디바이스 설계시 중요한 설계요소들에 대한 온도의존함수들을 도출하였다. 우주환경을 모사하기 위하여 항공우주연구원에서 사용하는 열진공 챔버를 사용하였다. 그 결과 챔버내의 온도가  $-100^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 변할 때 압전시료의 공진특성은 상온에서의 공진 특성을 기준으로 약 10% 이상 변화를 보였다. 이 결과로부터 도출한 회귀함수를 이용하여 압전진동자의 회효과 전기-기계결합계수를 추정한 결과 40%에서 50% 사이의 범위에서 서서히 감소하는 측정치의 변화경

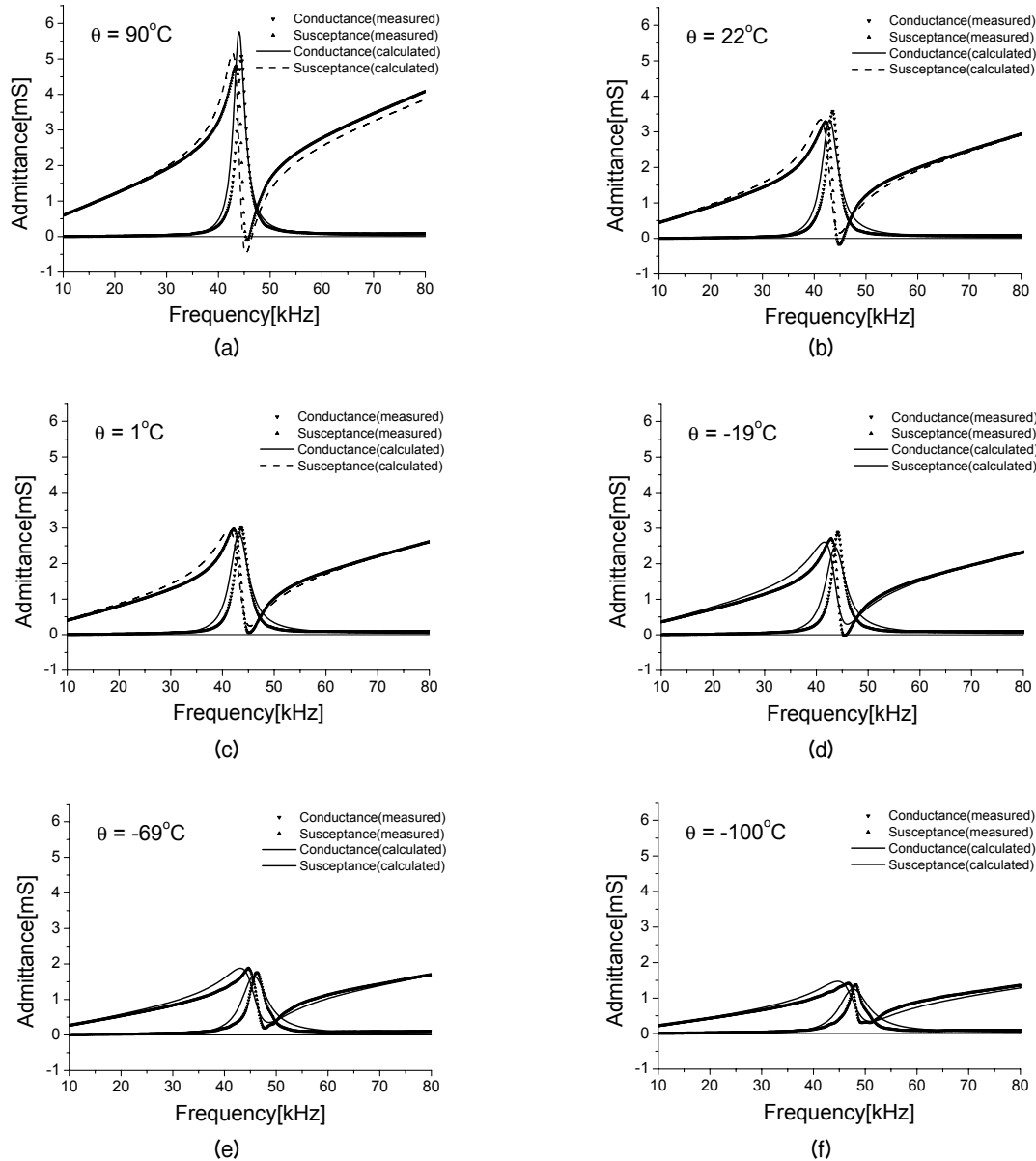


그림 10. 입력 어드미턴스의 온도의존성

Fig. 10. Temperature dependence of the input admittance.

향을 잘 나타내 주었다. 유전상수의 경우 주어진 온도 변화범위에서 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었고 이는 1차원 함수로 회귀분석 되었다. 기계적 손실의 경우 역시 1차원 함수로 회귀분석 되었으나 주어진 온도범위 내에서 0.08~0.03로 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 이들 결과로부터 구한 회귀함수를 적용하여 나타낸 압전 진동자의 입력 어드미턴스의 온도에 따른 변화는 측정치와 잘 일치하는 결과를 나타내어 본 연구에서 구한 회귀함수의 유효

성을 확인할 수 있었다.

이상의 결과들로부터 우주환경에서 운항 궤적에 따라 발생할 수 있는 온도변화에 기인한 압전 횡모드 진동자의 특성변화경향을 확인할 수 있었고, 이로부터 구한 회귀분석결과는 임의의 온도환경에서의 특성에측에 유효함을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 우주-항공산업에 활용하기 위한 압전 디바이스 설계에 활용될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Yongrae Roh, Susung Lee, Wooseok Han, "Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 94, Issue 3, pp. 205-210, 2001.
2. Seung-Hee Lee, Yongrae Roh, Woo-Seok Han, Yeon-Bo Kim, "Design and fabrication of ultrasonic traveling wave bi-directional linear motors," *Ultrasonics Symposium Proceedings, IEEE*, vol. 1, pp. 657-660, 1999.
3. 김정순, 김무준, 하강렬, 강갑중, "압전 횡효과를 이용한 무지향성 주파수가변 초음파트랜스듀서," *센서학회지*, 13권, 6호, pp. 417-423, 2004.
4. Jong-in Im, Sunuk Kim and Yong-rae Roh, "Design and Evaluation of Piezoelectric Bimorphs Combined with Multilayer Actuator Using FEM," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 32, no. 93, pp. 1251-1253, 1998.
5. Xiaoming Wang, Zhan Kang, Yiqiang Wang, "Topology design of slender piezoelectric actuators with repetitive component patterns," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, no. 18, pp. 2161-2172, 2011.
6. Zhen Luo, Wei Gao, Chongmin Song, "Design of Multi-phase Piezoelectric Actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 21, no. 18, pp. 1851-1865, 2010.
7. Mao-Hsiung Chiang, "Development of X-Y Servo Pneumatic-Piezoelectric Hybrid Actuators for Position Control with High Response, Large Stroke and Nanometer Accuracy," *Sensors*, vol. 10, no. 4, pp. 2675-2693, 2010.
8. Allen J Bronowicki, Nandu S Abhyankar and Steven F Griffin, "Active vibration control of large optical space structures," *Smart Mater. Struct.* vol. 8, pp. 740-752, 1999.
9. Jack Jacobs, James Ross, Steve Hadden, Mario Gonzalez, Zach Rogers, Benjamin Henderson, "Miniature Vibration Isolation System for Space Applications -Phase II," *Proceedings of SPIE* vol. 5388 (SPIE, Bellingham, WA, 2004), pp. 32-42, 2004.
10. T W Nye, R A Manning and K Qassim, "Performance of active vibration control technology: the ACTEX flight experiments," *Smart Mater. Struct.* vol. 8, pp. 767-780, 1999.
11. Eric H. Anderson, John P. Fumo, R. Scott Erwin, "Satellite Ultraquiet Isolation Technology Experiment," *IEEE Aerospace Conference Big Sky*, Montana March 19-25, pp. 1-17, 2000.
12. *IEEE Standard on Piezoelectricity*, IEEE/ANSI Std. 176-1978, pp. 27-34, 1979.
13. Min-Ku Chae, Moo-Joon Kim, Kang-Lyeol Ha and Chai-Bong Lee, "Focal Length Controllable Ultrasonic Transducer Using Bimorph-Type Bending Actuator," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 42, pp. 3091-3092, 2003.
14. S. C. Her and C. Y. Liu, "The deflection of a simply supported plate induced by piezoelectric actuators," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, pp. 1745-1751, 2007.
15. Youngjin Lee, Seunghee Lee, Yongrae Roh, "Design of withdrawal-weighted SAW filters," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 49, no. 3 pp. 337-344, 2002.
16. J. Yang, H. Fang, and Q. Jiang, "Equations for a piezoelectric parallelepiped and applications in a gyroscope," *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 10, pp. 337-350, 1999.
17. J. S. Yang, "Analysis of ceramic thickness shear piezoelectric gyroscopes," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, pp. 3542-3548, 1997.
18. J. H. McClellan, T. W. Parks and L. R. Rabiner, "A computer program for designing optimum FIR linear phase digital filters," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. AU-21, pp. 506-526, 1973.
19. Y. Ohmachi, and N. Uchida, "Temperature Dependence of Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants in TeO<sub>2</sub> Single Crystals," *J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 6, pp. 2307-2311, 1970.
20. R. T. Smith and F. S. Welsh, "Temperature Dependence of the Elastic, Piezoelectric, and Dielectric Constants of Lithium Tantalate and Lithium Niobate," *J. Appl. Phys.* vol. 42, no. 6, pp. 2219-2230, 1971.
21. K. Omote, H. Ohigashi, and K. Koga, "Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric properties of single crystalline" films of vinylidene fluoride trifluoroethylene copolymer," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 6, pp. 2760-2769, 1997.
22. R. A. Wolf and S. Trolier-McKinstry, "Temperature dependence of the piezoelectric response in lead zirconate titanate films," *J. Appl. Phys.*, vol. 95, no. 3, pp. 1397-1406, 2004.
23. C. Miclea, C. Tanasoiu, L. Amaranche, C.F. Miclea, C. Plavitu, M. Cioangher, L. M. Trupina, C.T. Miclea, C. David, "Effect of Temperature on The Main Piezoelectric Parameters of A Soft PZT Ceramic," *ROMANIAN JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 10, no. 3, pp. 243-250, 2007.
24. R. G. Sabat, B. K. Mukherjee, W Ren., and G. Yang, "Temperature dependence of the complete material coefficients matrix of soft and hard doped piezoelectric lead zirconate titanate ceramics," *J. Appl. Phys.* vol. 101, pp. 064111-1~064111-3, 2007.
25. T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford



- University Press, Tokyo, pp. 83-189, 1990.
26. H. Ohigashi, "Electromechanical properties of polarized polyvinylidene fluoride films as studied by the piezoelectric resonance method," *J. Appl. Phys.* vol. 47, no. 3, pp. 949-955, 1976.
27. M. Trainer, "Ferroelectrics and the Curie-Weiss law," *Eur. J. Phys.* vol. 21, pp. 459-464, 2000.

2001년 7월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 책임연구원  
(관심분야) 인공위성, 우주환경, 열제어, 연소

▶ 유 성 연(Seong Yeon Yoo)

1977년 2월: 서울대학교 기계설계과(공학사)  
1979년 2월: KAIST 기계공학과(공학석사)  
1989년 2월: KAIST 기계공학과(공학박사)  
1980년 6월 ~ 현재: 충남대학교 기계설계공학과 교수  
2012년 1월: ~ 제56대 대한기계학회 회장  
2012년 1월: ~ 한국기계기술단체 총연합회 회장  
(관심분야) 열전달, 공기조화, 열교환기

▶ 김 정 순(Jung Soon Kim)

1996년 2월: 부경대학교 물리학과(이학사)  
1999년 2월: 부경대학교 음향진동공학과(공학석사)  
2002년 3월: Tokyo University of Agriculture and Technology,  
Bio-Applications and Systems of Eng. (Ph.D)  
2006년 3월 ~ 현재: 동명대학교 미디어공학과 조교수  
(관심분야) 의용초음파, 수중음향, 초음파영상

▶ 김 무 준 (Moo Joon Kim)

1985년 2월: 부경대학교 물리학과(이학사)  
1990년 2월: 부경대학교 대학원 물리학과(이학석사)  
1994년 3월: 일본 토호쿠대학 대학원 공학연구과(공학박사)  
1995년 3월 ~ 현재: 부경대학교 물리학과 교수  
(관심분야) 초음파 변환기

## 저자 약력

▶ 이 상 훈(Sang Hoon Lee)

1996년 2월: 부경대학교 물리학과(이학사)  
1998년 2월: 부경대학교 물리학과(이학석사)  
2001년 4월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 선임연구원  
(관심분야) 인공위성, 우주환경, 열제어, 진공, 압전구동기

▶ 문 귀 원(Guee Won Moon)

1989 2월: 서울대학교 항공우주공학과(공학사)  
1991 2월: 서울대학교 항공우주공학과(공학석사)  
1991 3월 ~ 1998 7월: 현대자동차 연구원  
2001 2월: 서울대학교 항공우주공학과(공학박사)