

## 압전진동자의 우주부품 활용에 관한 연구

이상훈\*, 황권태\*\*, 조혁진\*\*\*, 서희준\*\*\*\*, 문귀원\*\*\*\*\*

### A Study on the PZT Application for Spacecraft Components

Sang-Hoon Lee\*, Kwon-Tae Hwang\*\*, Hyokjin Cho\*\*\*, Hee-Jun Seo\*\*\*\*, Guee-Won Moon\*\*\*\*\*

#### Abstract

All spacecraft components shall be checked for compatibility with vacuum using CVCMM and TML in advance. CVCMM and TML of the PZT-5 piezoelectric vibrator has to be less than 0.1% and 1.0% respectively. Also, it has less than 500ng/cm<sup>2</sup>/hr of TQCM for vacuum bake-out test using high temperature and high vacuum. Thus, the piezoelectric vibrator may be employed in the vacuum environments. Finally, it can be confirmed that the characteristics change of the piezoelectric vibrator is less than 1% under vacuum environments. Also, the temperature dependency of the characteristics in the PZT-5 piezoelectric vibrator with the lateral mode was investigated in the range of -100°C to 90°C using the thermal vacuum chamber to utilize the vibrator to the 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.

#### 초 록

PZT-5 계열 압전진동자의 위성부품 활용성 연구를 위하여 CVCMM(Collected Volatile Condensable Material) 및 TML(Total Mass Loss)을 측정하여 규정된 0.1% 및 1.0% 이하의 값을 얻었고, 베이카아웃 챔버를 이용하여 고온 및 고진공상태에서 500 ng/cm<sup>2</sup>/hr 이하의 낮은 TQCM(Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance) 값을 얻어 위성체 부품으로의 적합성을 재확인하였다. 압전진동자에 대한 고진공 환경 전후의 압전특성을 비교 분석한 결과 진공환경에 의한 전기-기계적 특성은 1% 미만으로 큰 변화가 없음을 확인하였다. 아울러, -100°C ~ 90°C 의 범위에 대한 PZT-5계열의 압전 진동자에 대하여 온도변화에 따른 특성변화를 조사한 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.

키워드 : 압전진동자 (Piezoelectric vibrator), 우주환경(space environments) 결합계수(coupling factor), 기계적손실(mechanical loss)

접수일(2013년 5월 3일), 수정일(1차 : 2013년 6월 13일, 게재 확정일 : 2013년 7월 1일)

\*우주환경시험팀/leesh@kari.re.kr

\*\*우주환경시험팀/kthwang@kari.re.kr

\*\*\*우주환경시험팀/wittycho@kari.re.kr

\*\*\*\*우주환경시험팀/seohj@kari.re.kr

\*\*\*\*\*우주환경시험팀/aeromoon@kari.re.kr

## 1. 서 론

압전 진동자의 응용분야는 통신용 소자 혹은 초음파 탐상을 위한 전기-음향 변환소자 뿐만 아니라 초음파 모터나 바이폴프형 액츄에이터 등 기계 소자 분야에도 그 범위를 넓혀가고 있으며 국내에서도 이에 대한 연구가 다수 수행되고 있다. 특히 압전 진동자를 이용한 액츄에이터는 전자기파의 발생이 적으며 정밀 제어가 가능해 첨단 기기의 동력원으로 활용되는 예가 많다<sup>(1-2)</sup>.

최근 이러한 압전 진동자의 우수한 특성을 이용한 통신 및 기계 소자를 우주-항공 산업에 활용하려는 시도가 보고되고 있으나<sup>(3)</sup>, 그 사용 영역에 있어서는 극히 제한되어 있어 실용화를 위해서는 보다 충분한 검토가 요구되고 있다. 우주 환경은 고진공 및 고온과 저온의 상태가 비행체의 운항궤적에 따라 주기적으로 나타나는 환경이다. 따라서 이러한 환경 하에서 압전진동자의 특성 변화는 기기의 오작동 및 정보의 오해를 가져올 수 있다. 따라서 압전체의 우주산업에 대한 활용범위를 넓히기 위해서는 압전체의 온도 및 압력의존성을 정확히 파악하여 이를 이용한 장치설계에 적용해야 할 것이다.

압전체의 진동모드에는 인가하는 전계의 방향과 같은 방향으로 진동하는 압전 두께진동 모드(thickness mode) 혹은 종진동 모드(longitudinal mode)와 함께 인가전계의 방향과 수직한 방향으로 진동하는 횡진동 모드(transverse mode)가 있다<sup>(4)</sup>. 압전진동자를 이용한 압전 밴딩모드 액츄에이터, 위치제어센서 등에 사용되는 압전 자이로스코프, 통신용 필터에 사용되는 압전 표면파 디바이스 등은 모두 압전 횡진동 모드를 이용한 예이다<sup>(5-7)</sup>. 본 연구에서는 우주환경 하에서 횡진동 모드 압전 진동자의 실용적인 활용을 위하여 시판되고 있는 압전 진동자에 대한 진공환경 호환성과 온도 및 압력변화에 따른 전기-기계적 특성 변화를 실험적으로 고찰한다.

## 2. 이 론

횡진동 모드 압전 진동자의 모델을 Fig. 1에

나타내었다. 1차원 해석을 가능하게 하기 위하여 다음과 같은 조건을 둔다.

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

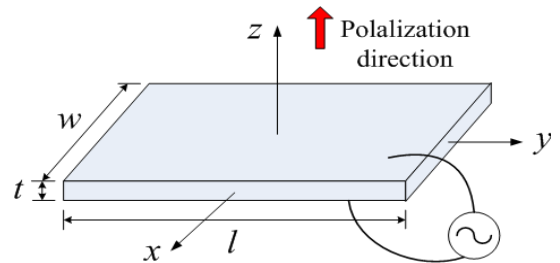


Figure 1 Coordinate of piezoelectric plate

압전 횡진동 모드에 대한 입력 어드미턴스는 다음 식으로 주어진다<sup>(8)</sup>.

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

여기서,

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

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

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

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

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

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

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

한편 기계적 품질계수는 다음과 같이 주어지며

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

이것은 기계적 손실과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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

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

### 3. 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 두께의 10배 이상 길게 하였다.

Table 1 Size and density of piezoelectric plate

$l$ (mm)	$w$ (mm)	$t$ (mm)	(kg/m <sup>3</sup> )
30.0	5.0	1.0	7333

진공상태에서 압전진동자의 온도 및 압력변화에 따른 특성변화를 확인하기 위해서 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 온도 및 압력가변형 열진공 챔버를 사용하였다. 열진공 챔버는 내직경 1 m, 길이 1.5 m의 진공용기로 구성되어 되어 최대 10<sup>-4</sup>

Pa이하의 고진공환경과 내부 쉬라우드를 통해 흐르는 GN<sub>2</sub>의 온도에 따라 100℃ ~ -150℃ 사이의 온도 환경을 모사함으로써 지상에서 최대한 우주환경에 근접한 환경을 제공할 수 있다.

고진공의 우주열환경 하에서는 표면에 달라붙어 있던 미세한 오염물질들이 외부로 떨어져 나오게 되며 이 중에 일부는 위성체의 주요 부품에 다시 달라붙게 되어 원활한 기능수행에 저해요인이 된다. 따라서 사전에 사용될 소자들이 진공에 적합한지 여부를 CVCМ (Collected Volatile Condensable Material) 및 TML (Total Mass Loss)을 통해 확인하고, 위성 부품의 제작 후 지상에서 고온(80 ℃ 이상)과 고진공(5.0 × 10<sup>-3</sup> Pa 이하)의 상태를 모사하여 오염물질의 방출 및 근원을 검출할 수 있는 진공 베이क्र아웃 시험을 수행한다<sup>(9)</sup>.

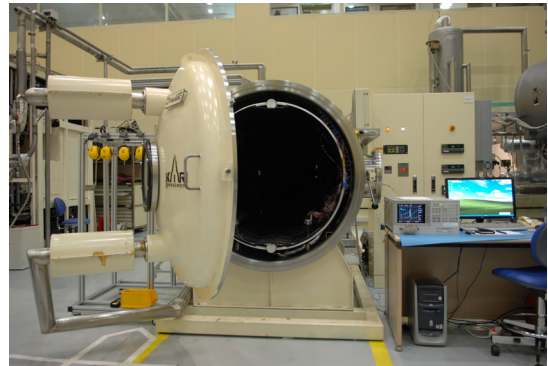


Figure 2 Thermal vacuum chamber in KARI

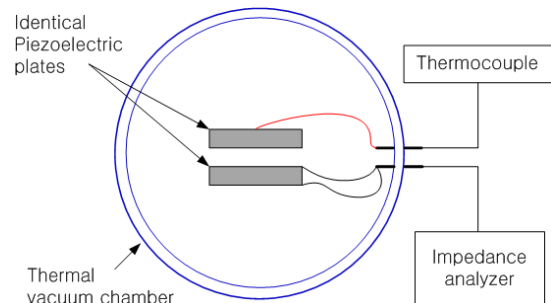


Figure 3 Experimental setup of resonance method

베이क्र아웃 시험을 통해 진공환경에서의 사용

적합성을 확인 한 다음 온도변화에 따른 압전진동자의 특성 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 3에 나타난 것과 같이 동일한 압전 시편 두 장을 열진공 챔버 내부에 진동에 영향을 받지 않도록 고정하고 그 중 한 장의 시편의 전극에는 리이드선을 연결하여 외부의 임피던스 분석기(Impedance Analyzer 4294a)에 연결하여 공진 특성을 측정하였다. 열전대의 접촉에 의한 진동특성에의 영향을 제거하기 위하여 다른 한 장의 시편에는 열전대를 장착하여 시편의 온도를 측정하게 하였다. 시편을 장착한 챔버 내부의 온도를 90 °C로 설정하여 온도평형이 이루어지길 기다려 어드미턴스(admittance)를 측정하였으며 온도를 -100 °C까지 낮추어 가며 공진특성의 변화를 관찰하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 오염 및 압력에 의한 특성변화

먼저 상용 PZT-5 계열의 압전진동자에 대한 CVCM과 TML 측정을 수행하였다. 신뢰성있는 값을 얻기 위하여 측정은 표준과학연구원에 의뢰하였으며, CVCM은 0.005%, TML은 0.0361%의 값을 얻었다. 이는 위성부품용 조건인 0.1%와 1.0% 이하를 각각 만족하는 값이다. 동일하게 TQCM으로 측정된 값도 500ng/cm<sup>2</sup>/hr 이하 수준으로 압전진동자 자체에서 방출되는 오염량은 한국항공우주연구원에서 허용하는 위성부품 적용 수준 내에 있음을 확인할 수 있었다.

압전체를 10<sup>3</sup> Pa 이하의 고진공 환경(Fig. 4의 case B, C, K)과 상압 상태를 번갈아 겪게 하며 공진 및 반공진주파수를 측정한 결과 횡진동 모드에 대한 공진 및 반공진 주파수의 변화 범위는 상온 상압시의 값을 기준으로 0.3% 이내임을 알 수 있었다. 또 (8)식을 이용하여 전기-기계적 결합계수를 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 압전진동자의 전기-기계적 특성 변화는 주어진 환경변화에 대해 0.1% 이내로 대기압에서 측정된 구동기내 압전 특성을 진공 하에서 동일하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

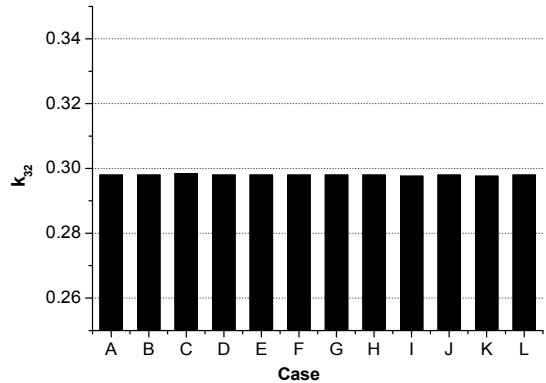


Figure 4 Pressure dependence of the electro-mechanical coupling factor for PZT-5

### 4.2 공진 및 반공진 주파수

상온 상압에서 측정한 횡진동 모드 공진특성의 측정결과는 Fig. 5와 같다. 이 결과로부터 공진 및 반공진 주파수는 각각 43.523 kHz 및 45.647 kHz임을 확인 할 수 있다. 이와 같은 어드미턴스 특성을 챔버내의 온도를 변화시켜 -100 °C ~ 90 °C의 범위에 대한 공진 및 반공진 주파수의 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과를 보면 -100 °C에서 약 47.5 kHz이던 공진 주파수는 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 상온인 22 °C에서 약 43.0 kHz로 최소값을 나타내고 다시 증가하여 90 °C에서는 약 44.0 kHz를 나타내고 있다. 반공진 주파수의 경우도 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 시편의 횡진동 모드 공진 주파수는 상온에서의 공진 주파수를 기준으로 약 10.3%, 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 공진주파수의 변화는 에너지 변환효율의 극단적인 감소를 가져와 구동에 큰 문제를 야기할 수 있다.

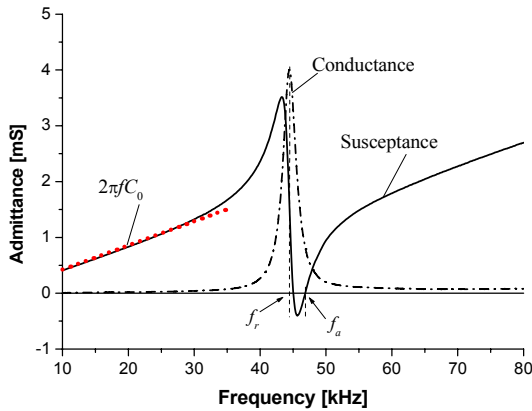


Figure 5 Admittance characteristics of the piezoelectric plate with lateral effect at room temperature

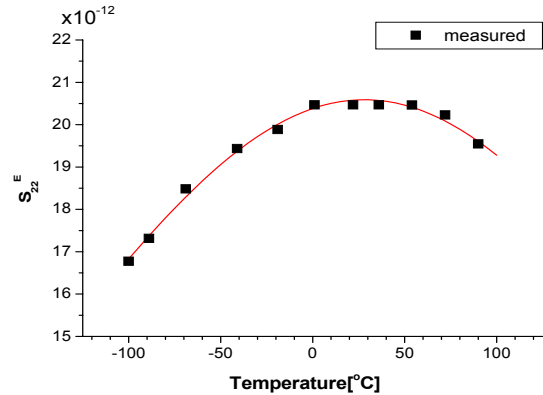


Figure 7 Temperature dependence of the compliance

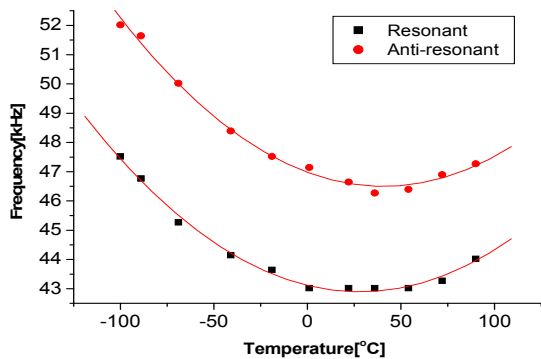


Figure 6 Resonance characteristics change depend on temperature of the vacuum chamber (lateral)

### 4.3 탄성계수 및 결합계수

식(11)에서 온도변화에 따른 시편의 밀도변화를 무시하면 공진 주파수의 변화로부터 시편의 횡진동 모드의 음속변화를 나타낼 수 있다. 따라서 식(4)와 식(11)의 관계를 이용하면 시편의 온도변화에 따른 탄성변화를 나타낼 수 있는데 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과에서 탄성 컴플라이언스(compliance)는 온도에 따라 증가하다가 상온부근에서 최대치를 보이고 다시 감소하는 경향을 보인다. 이 결과는 압전체의 상전이에 의한 것으로, 압전 비닐(PVDF) 등 다른 종류의 압전 매질에서의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다<sup>(10-11)</sup>.

Fig. 6의 결과를 식(8)에 적용하여 압전시료의 횡진동 모드에 대한 전기-기계결합계수를 구한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전기-기계결합계수는 온도가 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 나타내나 주어진 온도범위에서는 약 40% 부근으로 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 저온영역에서는 압전체의 탄성의 변화에 의해 기계적인 특성(공진특성)은 크게 변화하나 압전 현상은 비교적 큰 영향을 받지 않음을 나타낸다.

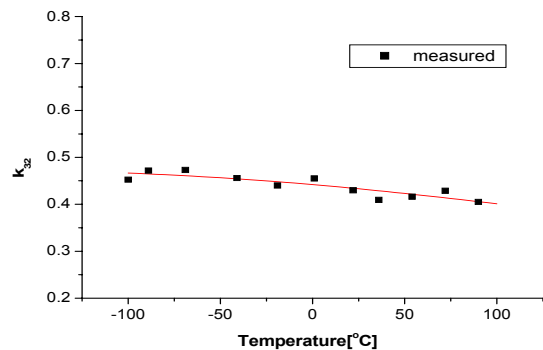


Figure 8 Temperature dependence of the electromechanical coupling factor

### 4.4 유전율 및 압전상수

압전체는 용량성(capacitive)의 소자이므로 비공진 영역에서의 어드미턴스 값으로부터 유전율을 구할 수 있다. 예를 들면 Fig. 5에 나타낸 서

셉턴스(susceptance)의 접선의 기울기는 압전 시편의 전기적 제동용량(clamped capacitance)에 비례하므로 식(5)를 이용하면 길이방향으로 고정된 상태의 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 구하여 Fig. 9에 나타내었다. 주어진 온도변화 영역에 한정하여 보면 유전 상수는 최소 2750, 최대 7240의 값을 나타내고 있어 약 62%의 증가폭을 가지며 선형적으로 증가한다고 볼 수 있다.

온도의 변화에 따른 압전상수의 변화를 확인하기 위하여 식(7)을 이용하여 Fig. 10의 결과를 구하였다. 이 결과를 보면 주어진 온도변화 범위에서 압전 상수는  $368.77 \times 10^{-12} \sim 600.98 \times 10^{-12} [\text{C/N}]$ 의 범위에서 증가 경향을 보이고 있으며, 단위 온도당 그 평균 증가량은 약  $1.21 \times 10^{-12} [\text{C/N}/^\circ\text{C}]$ 이었다. 이는 상술한 전기-기계결합계수에 대한 결과와 상치되는 결과로 보일 수 있으나, 전기-기계결합계수는 압전 상수에도 비례하지만 유전율 및 탄성 컴플라이언스의 제공근에 역비례하기 때문이다.

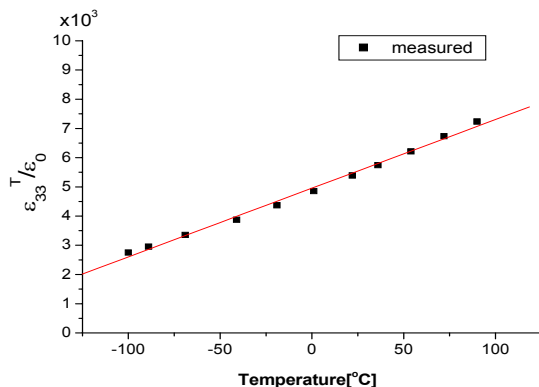


Figure 9 Temperature dependence of the dielectric constant

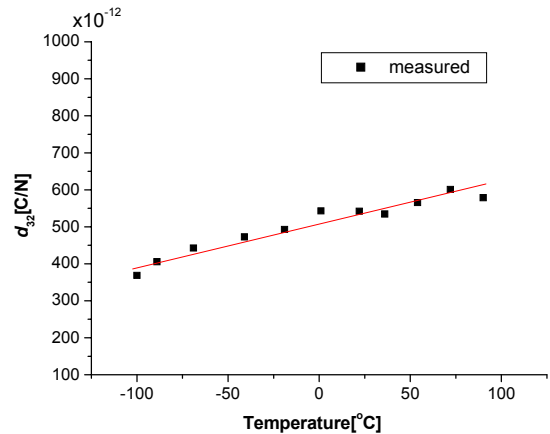


Figure 10 Temperature dependence of the piezoelectric constant

#### 4.5 기계적 손실

압전 진동자의 기계적 품질계수(Quality factor) 혹은 그 역수로 나타내는 기계적 손실(mechanical loss,  $\tan\delta$ )은 공진시의 어드미턴스 로커스로부터 구할 수 있다. 반치폭을 결정하는 두 주파수(quadrantal frequency)는 각각 서셉턴스가 최대인 점과 최소인 점의 주파수로 결정할 수 있으며  $f_1=43.237$  kHz 및  $f_2=45.647$  kHz로 측정되었다. 또한 기계적 공진 주파수는 근사적으로 콘덕턴스가 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 측정 한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이 결과를 보면 기계적 손실은 주어진 온도변화 범위 내에서 약 0.05에서 0.08사이의 범위 내에서 변하고 있으나 전체적으로 온도의 증가에 따라 기계적 손실은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 약  $200^\circ\text{C}$ 의 압전체 큐리온도 이전까지는 일반적으로 기계적 품질계수가 온도에 따라 증가한다는 다른 연구의 결과와도 일치한다<sup>(12)</sup>.

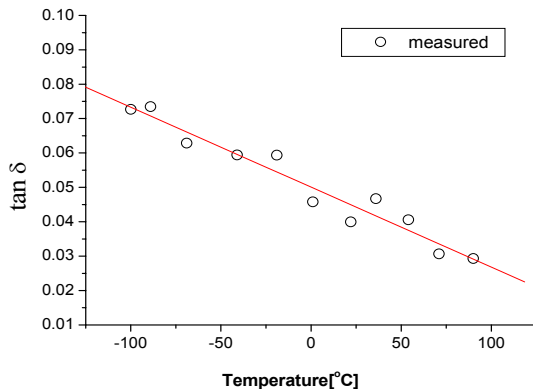


Figure 11 Temperature dependence of the mechanical loss

## 5. 결 론

우주환경 하에서 압전진동자의 보다 적극적인 활용을 위해 시판되는 PZT-5계열의 압전 횡진동 모드 압전체의 온도 및 압력에 대한 특성변화를 실험적으로 확인하였다. 우주환경을 모사하기 위하여 항공우주연구원에서 사용하는 열진공 챔버를 사용하였다. 그 결과 압력변화에 따른 압전체 특성변화는 무시할 만한 수준이었으며, 챔버내의 온도가  $-100^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 변할 때 압전재료의 공진특성은 상온에서의 공진 특성을 기준으로 약 10% 이상 변화를 보였다. 온도에 따른 탄성특성변화를 알아보기 위하여 측정된 탄성 킴플라이언스는 상온일 때의 값을 중심으로 온도의 변화에 따라 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며,  $-100^{\circ}\text{C}$  일 때는 상온일 때의 값에 비해 약  $4 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{N}]$ 만큼 감소하였다. 그러나 전기-기계결합계수의 경우 주어진 온도범위 내에서 큰 변화 없이 약 40% 정도의 값을 나타내었다. 유전상수 및 압전상수의 경우 온도변화에 따라 증가하는 경향을 나타내었고 이는 변화 경향에 있어서 유사연구의 결과와 일치하였다. 기계적 손실의 경우 주어진 온도범위 내에서 0.08 ~ 0.05로 선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

이상의 결과들로부터 우주환경에서 운항 궤적에 따라 발생할 수 있는 온도변화에 기인한 압전 횡진동자의 특성변화경향을 확인할 수 있었

고, 관련 디바이스를 설계할 경우, 이들 결과가 기초 데이터로 활용될 것을 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. 최종원, 윤재성, 김민수, “압전식 구동기를 이용한 양방향 마이크로 펌프의 성능에 관한 연구”, Trans. of the KSME(B), Vol.30, No.4, 2006, pp.350~357.
2. 정남희, 강호식, 윤일성, 송오섭, “압전감지기 및 압전작동기를 이용한 복합재료 회전축의 진동 및 안정성 제어”, Trans. of the KSME(A), Vol.31, No.2, 2007, pp.152~159.
3. 곽동기, 배재성, 황재혁, “초점면부 영상안정화를 위한 압전형 마찰구동기의 동특성 연구”, 한국항공우주학회지, 제37권, 제4호, 2009, pp.399~405.
4. IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE/ANSI Std.176-1978, pp.27~34.
5. 임영석, 민승재, 유정훈, “분극방향과 재료분포의 연속적 근사방법을 고려한 압전형 액추에이터의 구조설계”, Trans. of the KSME(A), Vol.30, No.9, 2006, pp.1102~1109.
6. Her S. C., and Liu C. Y., “The deflection of a simply supported plate induced by piezoelectric actuators”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, 2007, pp. 1745~1751.
7. Yang J. S., Fang H. Y., and Jiang Q., “Equations for a piezoelectric parallelepiped and applications in a gyroscope”, Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 10, 1999, pp.337-350.
8. Ikeda T., Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford University Press, Tokyo, 1990, pp.83~189.
9. S. H. Lee, H. J. Seo, G. W. Moon, S. W. Choi, “A Study on the Contamination Measurement of Spacecraft Components

- under High Vacuum Environment”, J. Korean Vacuum Soc. 11, (2002), pp.87~96
10. Sabat R. G., Mukherjee B. K., Ren W., and Yang G., “Temperature dependence of the complete material coefficients matrix of soft and hard doped piezoelectric lead zirconate titanate ceramics”, J. Appl. Phys. Vol. 101, 2007, pp. 064111-1~064111-3.
  11. Jean-Claude T., Pierre T., The Landau theory of phase transitions, World Scientific Lecture Notes in Physics, Vol.3, World Scientific, Singapore, pp.1~46.
  12. C. Miclea, C. Tanasoiu, L. Amarande, C. F. Miclea, C. Plavitu, M. Cioangher, L. Trupina, C. T. Miclea and 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, 2007, pp. 243-250,