

A Study on the Characteristics of PCN-PZT

Piezoelectric Acceleration Sensor

金榮德* · 金光一** · 鄭宇喆*** · 高載哲§

(Young-Deog Kim · Kwang-Il Kim · Woo-Chul Jung · Jae-Seog Koh)

Abstract - PCN-PZT piezoelectric acceleration sensors of annular shear mode voltage type were fabricated and their characteristics have been investigated. Field tests are also carried out. To avoid noise problems from the environmental conditions, acceleration sensors employed solid state micro-electronics for pre-amplifier. The calibration procedures based on the principle of the comparison method were adopted for investigating the characteristics of fabricated acceleration sensors. The voltage sensitivity and resonant frequency of fabricated acceleration sensors were 83mV/g, 23kHz, respectively. The lower and upper frequency limit were 4Hz and 9kHz, respectively. The variation of the voltage sensitivity showed 10% at -40°C and 9% at 121°C compared to that of reference temperature at 40°C.

Key Words : Accelerometer, PCN-PZT, Piezoelectric, Vibration, Acceleration sensors

1. 서 론

전통적인 진동변환자인 velocity probes, eddy current probes 등에 비하여 압전형 가속도센서는 넓은 동적 범위(dynamic range)에 걸친 선형성, 넓은 주파수 범위와 측정, 분석장비의 발달로 높은 분해능을 가지므로 크게 각광받고 있다. 압전형 가속도센서는 물질이 외부의 역학적 응력에 비례하는 전하를 발생시키는 압전현상을 이용한다. 압전 세라믹은 전기적 출력임피던스와 기계적 임피던스(혹은 stiffness)가 크기 때문에 하중 하에서 변형이 무시할 수 있을 정도로 적으므로 압전효과를 이용하여 힘이나 가속도와 같은 물리량을 직접 측정할 수 있는 능동소자로 활용이 가능하다.

압전형 가속도센서의 역학적 특성은 압전 세라믹의 탄성 특성에 의존하며, 전기적인 출력은 압전 세라믹의 압전 특성에 의해 결정된다. 높은 감도를 가지는 가속도센서를 제조하기 위해서는 전하형(charge type)의 경우 압전계수 값이 큰 압전 세라믹소자를 사용하여야 하며, 전압형(voltage type)의 경우는 압전 전압계수 값이 큰 압전 세라믹소자를 사용하는 것이 유리하다. 일반적으로 전하형에 비하여 전압형이 노이즈가 심한 환경에서 우수한 특성을 가지며[1], 초진효과와 베이스 벤딩(base bending)의 영향을 거의 받지 않는 전단형

(shear type)이 압축형(compression type)에 비하여 우수한 특성을 갖는다[2,3].

본 논문에서는 압전 전압계수 값이 큰 환형 압전 세라믹소자와 hybrid 형태로 제조된 임피던스 변환기를 이용하여 전압출력을 갖는 환형 전단 압전 가속도센서를 제작하고, 비교 교정 방법(comparison calibration method)으로 주파수에 따른 감도특성과 공진 주파수 특성 및 감도의 온도 의존성을 조사하였으며, 제작된 센서를 냉각 팬을 구동하는 모터의 본체에 연결하여 신뢰성을 조사하였다.

2. 동작원리

진동하는 시스템에 진동을 측정하고자 하는 방향의 수직한 면에 가속도센서를 부착하면 센서 내의 관성질량에 의해 관성력을 전달받은 압전 세라믹소자는 역학적 변형이 발생한다. 이때 압전 세라믹소자의 역학적 변형에 의한 전하 Q의 크기는 다음과 같다.

$$Q = \alpha d m_s a \quad (1)$$

여기서, α 는 비례상수, d 는 압전전하상수(piezoelectric charge constant : pC/N), m_s 는 관성질량(seismic mass : kg), 그리고 a 는 가해진 가속도(m/s^2)이다. 식(1)로 나타나는 전하량은 압전세라믹소자의 우수한 선형성으로 인하여 외부로부터 전달된 가속도에 비례하게 된다.

가속도센서의 부착 공진 주파수(mounted resonant frequency) ω_m 은

* 正 會 員 : 浦港産業科學研究院 센서計測팀 先任研究員

** 正 會 員 : 浦港産業科學研究院 센서計測팀 先任研究員

*** 正 會 員 : 浦港産業科學研究院 센서計測팀 先任研究員

§ 正 會 員 : 浦港産業科學研究院 센서計測팀 先任研究員

接受日字 : 1998年 11月 9日

最終完了 : 1999年 3月 16日

$$\omega_m = \left(\frac{k}{m_s} \right)^{1/2} \quad (2)$$

로 주어지며, k 는 결합 구조물의 전체 강성(combined stiffness : N/m)을 나타낸다. 보통의 가속도센서는 부차공진 주파수의 1/3 영역에 해당하는 주파수 상한 값을 갖게된다.

전압형 압전 가속도센서의 등가회로를 그림 1에 나타내었고, Q 는 압전 세라믹소자에서 발생한 전하를, R_c, C_c, R_{im}, C_{im} 은 각각 압전 세라믹소자와 임피던스 변환기의 저항과 정전용량을 나타낸다. D 는 임피던스 변환기가 MOSFET를 기본소자로 구성되어 있으므로, 정전기로 인한 파괴를 방지하기 위해 설치한 blocking diode이다. 이때 PMOS(P-type MOSFET)의 입력전압 V_{in} 은

$$V_{in} = \frac{Q}{C_c + C_{im}} \quad (5)$$

이고, PMOS의 개방회로 전압(open circuit voltage) V_{out} 은 임피던스 변환기의 이득(gain)을 A 라고 하면 다음과 같이 주어진다.

$$V_{out} = AV_{in} \quad (6)$$

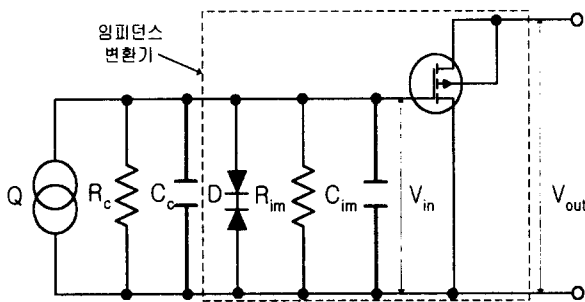


그림 1 전압형 압전 가속도센서의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of piezoelectric acceleration sensor of voltage type

환형(annular) 모양을 가진 전단형 압전세라믹소자의 정전용량 C_c 는

$$C_c = \frac{2\pi\epsilon_{11}L}{\ln(r_o/r_i)} \quad (7)$$

이다. 여기서 ϵ_{11} 은 압전세라믹소자의 11 방향의 비유전율이며, L 은 압전 세라믹소자의 두께를, r_o 는 외 반경을, r_i 는 내 반경을 나타낸다. 일반적으로 $C_c \gg C_{im}$ 이고, 임피던스 변환기는 Source follower이므로 이득은 이상적으로 1이다[4]. 식(7)을 이용하여 식(6)을 다시 정리하면 아래의 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{out} = AV_{in} \approx V_{in} \approx \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi\epsilon_{11}L} Q \quad (8)$$

식(8)에서 가속도센서의 전압감도는 Q 와 r_o/r_i 값이 커질수록 커지며, ϵ_{11} 과 L 값이 적어질수록 커짐을 알 수 있다. 그러나 동일한 압전 세라믹소자에 대해 Q 값이 커지기 위해서는 (1)식에 의하면 관성질량의 무게가 커져야 한다. 관성질량이 커지면 사용 주파수 상한 값을 결정하는 부차 공진 주파수가 줄어들게 되어 감도와 서로 상대적 관계(trade-off)를 갖게됨을 알 수 있다. 그러므로 기하학적 변수와 관성질량의 적절한 조합으로부터 가장 이상적인 특성을 가지는 센서의 설계가 가능하다.

전압형의 주파수 하한 특성은 그림 1의 등가회로의 입력 측 전체저항 R_t 와 전체정전용량 C_t 값에 의해 결정되며, 전체 저항과 전체 정전용량은 각각

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{im}}, \quad (9)$$

$$C_t = C_c + C_{im}$$

이므로, 저주파 하한값은 다음식으로 계산 가능하다[5].

$$f_{low} = \frac{1}{2\pi R_t C_t} \quad (10)$$

식(10)에 의하면 전압형 압전 가속도센서의 저주파 특성을 높이기 위해서는 임피던스 변환기의 저항 값이 압전형 가속도센서의 저항 값과 거의 같은 값을 갖도록 해야함을 알 수 있다.

압전 세라믹소자의 정전용량과 전하감도의 온도의존성이 전압형 압전 가속도센서의 온도특성을 결정하게 된다. 일반적으로 압전 세라믹소자의 전하감도와 정전용량은 온도가 증가함에 따라 증가하므로 식(5)에 의하면 전압감도는 상쇄되는 것 같이 보이지만 정전용량의 온도 변화율이 전하감도의 온도 변화를 보다 훨씬 크므로 전압형 압전 가속도센서의 감도는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 가지게 된다 [6].

3. 실험방법

3.1 가속도센서의 구조

압전 세라믹소자는 $0.06\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.46\text{PbZrO}_3-0.48\text{PbTiO}_3$ (PCN-PZT) 조성의 시편을 제조하기 위하여 PbO , ZrO_2 , TiO_2 , CoO , Nb_2O_5 를 조성에 따라 칭량 한 후, ZrO_2 Ball로써 에탄올을 매체로 하여 24시간 혼합 및 분쇄한 후 건조하였다. 건조한 혼합물을 알루미늄 도가니에서 시간당 $180^\circ\text{C}/\text{hr}$ 의 승온속도로 900°C 에서 2시간 하소하였다. 하소한 분말을 재 분쇄한 후, 80 Mesh로 체가름하여 세라믹 분말을 제조하였다. 제조된 PCN-PZT 분말을 유압프레스를 이용하여 성형물들로 $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 성형한 후, 냉간 정수압 프레스(Cold Isostatic Press)에 의하여 $1.2\text{ ton}/\text{cm}^2$ 의 압력

으로 성형하였다. 이상의 방법으로 준비된 시편을 PbO 분위기
 기로 1250℃에서 2시간 동안 소결하였으며, 승온속도는 180℃
 /hr로 하였다. 소결된 시편은 내경 4mm, 외경 11mm였고, 두께
 는 양면연마기를 이용하여 4.5mm가 되도록 연마한 후, 초음
 과 세척기를 이용하여 이물질들을 제거하고 건조하였다. 건조
 된 시편을 Silver Paste(Dupont Co. #7095)를 도포하여 590℃
 에서 15분간 열처리하여 전극소성을 한 다음, 3.3kV/cm의 직
 류전압으로 분극하였다.

임피던스 변환기는 센서 내부에 내장하게 되므로 가능한
 한 작아야 하기 때문에 SMD(Surface Mount Device) 형의
 전자부품을 이용하여 hybrid로 제작하였다. 제작된 임피던스
 변환기의 입력 저항과 정전용량 값은 각각 800MΩ과 5pF이었
 고, 정전기에 의한 MOSFET의 파괴를 방지하기 위하여 입력
 단에 Blocking diode를 역 방향으로 연결하였으며, 그 크기는
 6×7×2.5mm 이었다. 기판재료는 알루미늄나 판을 사용 하였다.

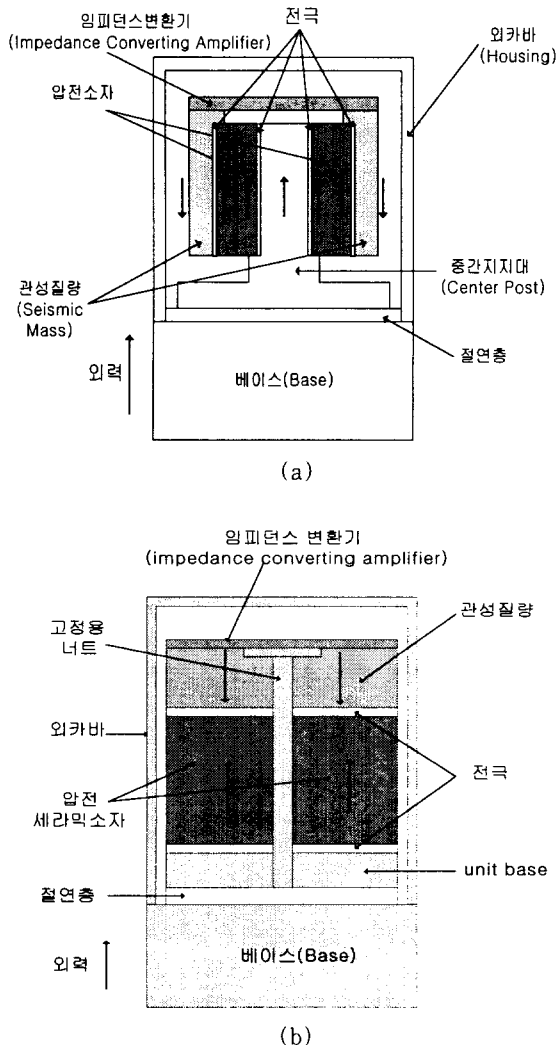


그림 2 압전 가속도센서의 구조
 (a) 환형 전단구조 (b) 압축형 구조
 Fig. 2 Construction of the piezoelectric acceleration sensors
 (a) Annular shear type (b) Compressive type

관성질량으로는 비중이 17.2인 텅스텐 카바이드(대한중석)
 소재를 이용하여 무게 5.6 gram으로 제작하였으며, 윗 부분
 에 0.15mm 턱을 내어 압전 세라믹소자 외경의 윗 부분에
 걸리도록 설계하였으며, 중간 지지대는 하단에 0.15mm 턱
 을 내어 압전 세라믹소자가 중간지지대 위에 걸리도록 설
 계하여 베이스로부터 전달되는 가속도가 관성질량에 의해 압전
 세라믹소자에 전단 방향으로 관성력이 작용하게 하였다.

그림 2 (a)에는 환형 전단 가속도센서의 단면을, (b)에는
 압축형 압전 가속도센서의 구조를 나타내었다. 그림 2 (a)의
 환형 전단 가속도센서는 압전 세라믹소자가 중간 지지대와
 관성질량 사이에 샌드위치 형태로 전도성 에폭시로 결합되어
 있어 분극과 나란한 면에서 외력의 변화로 인한 전하가 발생
 한다. 압전 세라믹소자의 전극은 관성질량 위에 위치한 임피
 던스 변환기의 입력단에 연결되어 있고, 베이스와 외부단개는
 방폭 특성이 우수한 스테인리스(SUS 304) 재질을 사용하였
 다[7]. 중간 지지대(Center Post)와 베이스는 두께 0.5mm
 도의 절연체를 접착하여 500V의 DC 전압에 대해 500MΩ 이상
 의 절연저항 값을 갖도록 하여 ground-loop 전압으로 인한
 노이즈를 차단하였다. 그림 2 (b)의 압축형 압전 가속도센서
 는 압전 세라믹소자와 관성질량 및 베이스가 너트를 이용하
 여 5kgf/cm의 pre-stress를 가한 상태로 체결되어 있으며,
 전 세라믹소자의 분극방향에 수직인 면에서 외력의 변화에
 의한 전하가 발생한다.

그림 3 에는 이상의 방법으로 시제작한 센서를 현장에 설
 치한 사진을 나타내었고, 설치부위는 모터의 기본 회전수와
 모터의 이상으로 인한 신호를 검출하기 위하여 냉각 팬을 구
 동하는 모터(motor)의 본체에 연결하였다.

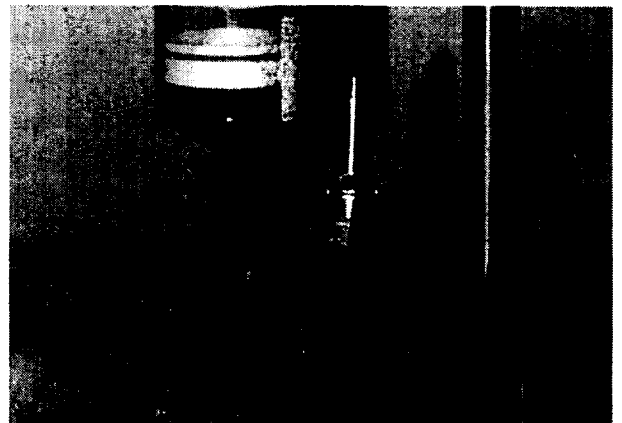
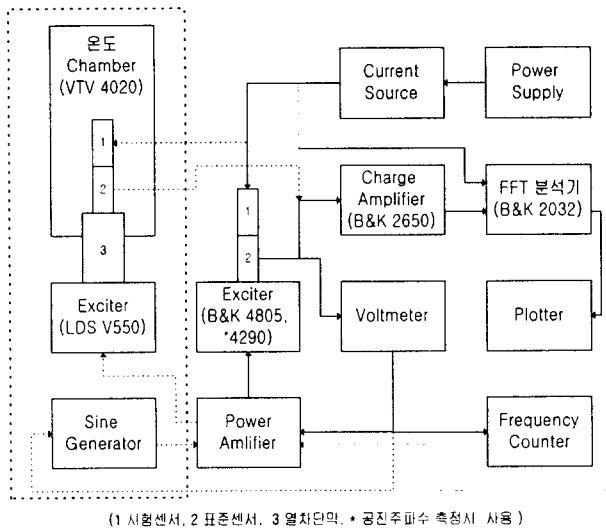


그림 3 현장시험을 위해 설치한 센서의 사진
 Fig. 3 Photograph of the mounted sensor for field test

3.2 측정방법

제작된 전압형의 출력특성을 측정하기 위하여 그림 4에 나
 타낸 비교교정방법을 사용하였다. 제작된 가속도센서는 표준
 센서(Reference Sensor : B&K 8305)위에 볼트를 사용
 체결하였고, 표준센서는 한국표준과학연구원(KRISS : Kore
 Research Institute of Standard and Science)에서 교정
 아 사용하였다. FFT 분석기(B&K 2032)에서 159 Hz의 주
 수 신호가 Power Amplifier를 거쳐 가진기(Excite : B

4805, B&K 4290)에 입력되면 입력신호의 크기에 비례하는 가속도로 가진기가 진동하게 되며, 이때 표준센서와 시험센서에서 발생한 출력 값을 각각 Charge Amplifier(B&K 2650)와 정전류 방식을 이용한 구동회로를 통하여 FFT로 입력되도록 하였다.



(1) 시험센서, 2 표준센서, 3 열차단막. * 공진주파수 측정시 사용)

그림 4 비교교정 측정시스템 블록도

Fig. 4 Block diagram of the comparison calibration system

표준센서의 감도를 S_R , 표준센서와 시험센서의 출력 값을 각각 O_R , O_T 라 두면 시험센서의 감도 S_T 는

$$S_T = S_R \frac{O_T}{O_R} \quad (11)$$

이며, 이 식으로부터 표준센서의 감도를 알고 있으면 시험센서의 전압감도를 계산할 수 있다. 주파수 특성은 FFT 분석기에서 Pseudo Random Noise로 가진기를 구동하여 표준센서와 시험센서의 주파수 응답을 구한 후 기준 주파수(159Hz 감도에서 $\pm 10\%$ 편차를 가지는 하한 주파수와 상한 주파수를 측정하여 사용주파수 대역으로 결정하였다.

전압형의 온도특성은 그림 4의 점선 내부에 주어진 온도 측정시스템을 이용하였으며, 온도 챔버(VTV 4020)는 -40°C 에서 180°C 온도 구간에서 동작 가능하고 온도 편차는 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 이내로 조절 가능하며, 챔버 하단에 가진기(LDS V550)와 연결할 수 있는 구멍(port)을 설치하였다. 가진기의 동작 온도가 0에서 30°C 이므로 알루미늄 합금과 Engineerin Plastic으로 제작된 열차단막(Thermal Barrier)을 가진기에 설치하고 특수소재의 천으로 밀봉하여 챔버의 열이 가진기로 전달되는 것을 방지하였다. 주어진 주파수에서 일정한 진동값을 유지하기 위하여 표준센서의 출력 값을 신호 발생기로 귀환 시켰으며, 시험센서의 출력은 FFT 분석기를 거쳐 PC로 입력되어 저장된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압전 세라믹소자의 압전특성

분극된 압전 세라믹소자의 특성과 크기를 표 1에 나타내었고, 표 1의 압전 전하상수(Piezoelectric Charge Constant : d_{15})로부터 전압감도와 관계되는 압전 전압상수(Piezoelectric Voltage Constant : g_{15})는 다음 식으로 계산된다.

$$g_{15} = \frac{d_{15}}{\beta C} \quad (12)$$

여기서 β 는 압전세라믹소자의 기하학적 모양에 의존하는 상수이며, (12)식을 이용하여 계산한 압전 전압상수 g_{15} 값은 50.83mV/N 으로 충분히 큰 값을 나타내었다.

표 1 압전 세라믹소자의 특성

Table 1 Piezoelectric properties of the fabricated PCN -PZT element

Composition	PCN-PZT	
Dimensions(mm ³)	4×11×4.5	
Piezoelectric charge constant	$d_{15}(\text{pC/N})$	542
Capacitance at 1 kHz	C (pF)	298
Resonance Frequency	f_r (kHz)	336
Anti-Resonance Frequency	f_a (kHz)	368
Impedance	Z (Ω)	176

4.2 임피던스 변환기의 출력특성

그림 5는 hybrid 형 임피던스 변환기의 입력에 대한 출력 신호의 모양을 25°C 에서 측정하여 나타낸 것이다.

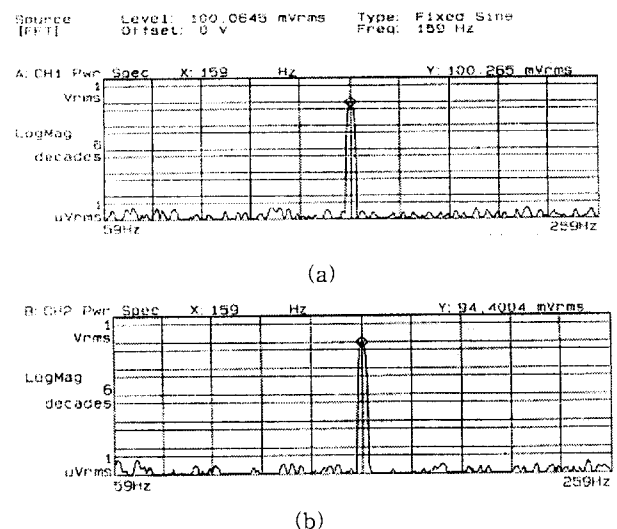


그림 5 Hybrid형 임피던스 변환기의 출력특성

(a) 입력신호 (b) 출력신호

Fig. 5 Output characteristics of the fabricated hybrid impedance converting amplifier

(a) Input signal (b) Output signal

주파수 159Hz, 100mV_{rms}의 입력신호에 대해 출력신호의 크기는 94mV_{rms}로 나타났고, 노이즈 신호(Noise Signal)의 크기는 1μV_{rms}이하의 아주 작은 값을 가진다. 그리고 1 Hz에서 51kHz의 주파수 대역에서 -0.5dB의 일정한 출력 값을 가져 주파수 특성이 아주 우수함을 알 수 있다. -40℃와 121℃의 온도에서 기준온도(40℃)에 대한 출력 값의 비가 각각 3%와 -1.5% 정도의 온도에 따른 변화를 나타내어 낮은 온도에서 출력 값이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

4.3 환형 전단 가속도센서의 출력특성

표 2에는 제작된 전압형의 전하 및 전압감도를 나타내었으며, 이때 전하형은 임피던스 변환기를 연결하기 전에 측정하였다. 설계값 보다 측정값이 적게 나타난 것은 전체적인 구조와 조립상태의 부정확으로 인해 베이스로부터 전달된 가속도 값이 상쇄되어 압전소자로 전달되었기 때문이며, 식 (1)에 따라 시제작된 전단 가속도센서의 비례상수 α를 구해보면 상온에서 0.94 정도로 나타났다. 전압감도가 전하감도보다 더 큰 편차를 보인 것은 설계시 임피던스 변환기 자체의 임피던스 값을 약 1pF 정도로 두었지만 실제 제작시 하이브리드 기판의 형태에 의한 기생 용량과 blocking diode의 정전용량으로 인하여 약 5pF 정도의 값을 가져 상대적으로 많은 전압감소를 가져왔음을 알 수 있다.

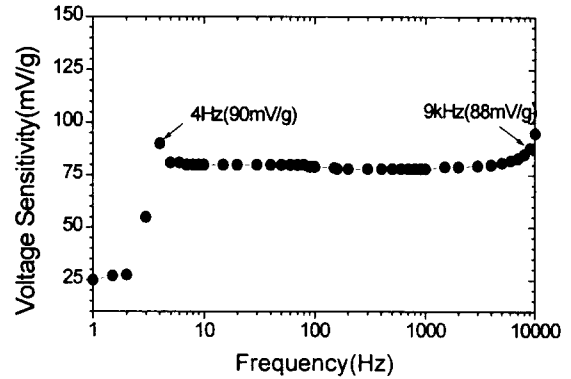
표 2 제작된 전압형 압전 가속도센서의 전하 및 전압감도
Table 2 Charge and voltage sensitivity of the fabricated piezoelectric acceleration sensor

전하감도 (pC/g)	설계값	29.8
	측정값	28
전압감도 (mV/g)	설계값	100
	측정값	83

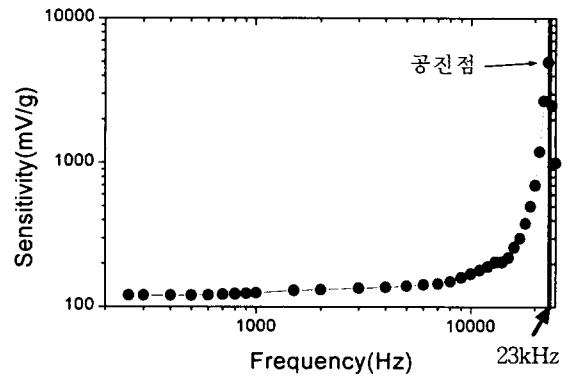
그림 6 (a)에는 25℃에서 전압형 압전 가속도센서의 주파수에 대한 전압감도를 측정하여 나타내었으며, (b)에는 부착 공진주파수에 대한 전압감도 특성을 나타내었다. 4 Hz에서 9kHz의 주파수 영역에서 기준감도 값(159Hz)의 ±10% 편차 범위 내에 안정된 값을 보여주고 있으며, 부착 공진 주파수는 23kHz로 나타났다. 저주파 하한 값은 식(10)에 의하면 약 0.667Hz 이지만 실제 측정에 의하면 4Hz 정도로 나타났다. 이는 사용하고 있는 가진기의 주파수 특성이 10Hz에서 10kHz의 안정 사용 주파수 대역을 가지고 있으므로 4Hz 이하의 저주파에서는 가진기의 출력 값이 안정되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 그림 6의 (a)와 (b)의 감도 값 차이는 공진 주파수 측정시 사용한 가진기(B&K 4290)의 사용주파수 대역이 200Hz에서 40kHz인 고주파용이므로 절대감도 측정에는 부적합하여 나타난 현상으로 생각된다.

그림 7은 동일한 조성으로 제조된 압전 세라믹소자를 사용하여 제작한 압축형과 환형 전단 가속도센서의 온도특성을 그림 4의 측정시스템으로 측정하여 나타낸 것이다. 측정 온도구간은 -40℃에서 121℃ 였고, 주파수는 159Hz 였으며, 전자의 특성곡선의 기울기는 -0.3 정도 였고, 후자의 경우는 -0.11로 나타나 전단형의 온도특성이 뛰어난 것으로 나타났다. 온도가 증가함에 따라 출력이 감소하는 것은 압전 세라

믹소자의 정전용량 값이 온도증가에 따라 커지므로 나타나는 현상이다. 압축형이 전단형에 비해 식(1)로 주어지는 비례상수 α의 온도에 따른 변화가 심하여 전단형 보다는 온도특성이 떨어지는 것으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 6 전압형 압전가속도센서의 주파수특성곡선
(a) 주파수특성 (b) 부착 공진주파수

Fig. 6 Frequency response of the fabricated acceleration sensor

(a) Frequency response characteristics

(b) Mounted resonant frequency

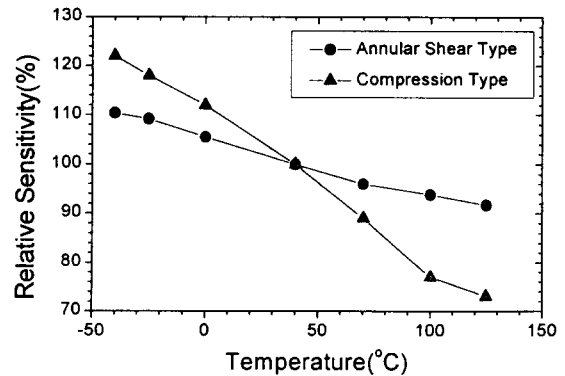


그림 7 전압형 압전가속도센서의 온도특성곡선

Fig. 7 Temperature characteristics of the annular shear and compressive type acceleration sensors

그림 8은 CMS(Condition Monitoring System : DP2000)를 이용하여 냉각팬 구동 모터의 본체에 시제작한 가속도센서를 설치하여 110일 동안 측정된 가속도 값이다. 실선은 Peak-to-Peak 값을, 점선은 RMS(Root Mean Square) 값으로, 전반부의 Peak는 현장설비가 정지(Shot Down) 되었을 때 나타나는 현상이고, Peak-to-Peak 값이 상대적으로 크게 나타난 것은 평균(Averaging) 주기에서 가장 큰 값을 표시하도록 하였기 때문이며, RMS 값은 설치기간 내에서 상당히 안정된 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 CMS에서 가속도 값을 받아 적분기를 통하여 속도와 변위로 변환한 값으로써 실선은 Peak-to-Peak 값을 점선은 RMS 값이다. 가속도 값과 마찬가지로 상당히 안정된 특성을 보여주고 있다.

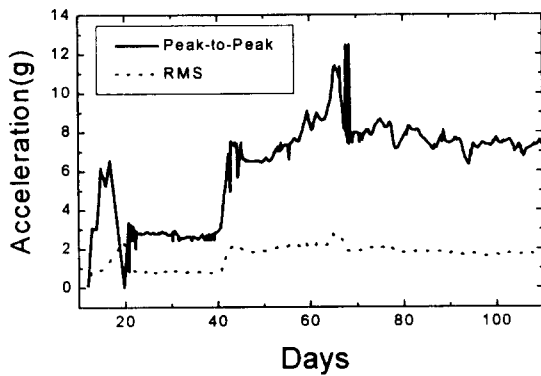


그림 8 현장시험에서 측정된 가속도 값
Fig. 8 Measured value of the acceleration in the field

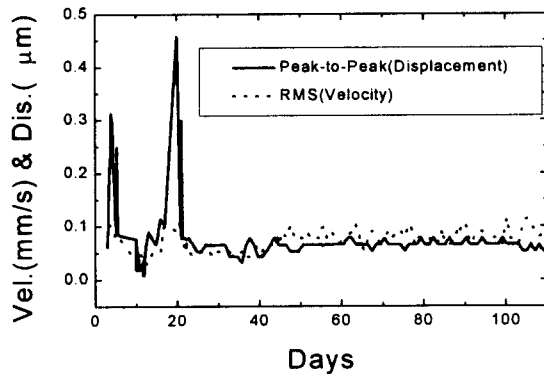


그림 9 CMS에서 적분된 속도 및 변위값
Fig. 9 Velocity and displacement value integrated by CMS

5. 결 론

임피던스 변환기를 내장한 환형 전단형 가속도센서를 제작하여 감도와 주파수 및 온도에 따른 감도특성을 측정된 결과 압축형 보다는 상당히 우수한 온도 특성을 가졌으며, 제작된 가속도센서의 중요한 특성은 다음과 같다.

1) 임피던스 변환기의 이득(gain)은 0.94 정도였고, 기준온

도(40℃)에 대한 출력 값의 변화율은 -40℃일 때 3%, 121℃일 때 -1.5%이다.

2) 환형 전단 가속도센서의 전하 및 전압감도는 각각 28pC/g와 83mV/g로 나타났다.

3) 환형 전단 가속도센서의 부착공진주파수는 대략 23kHz였고 동작 주파수 영역은 4Hz에서 9000Hz(±10%)였으며, 기준온도 (40℃)에 대한 출력감도값의 변화율은 -40℃일 때 10%를 121℃일때는 -9%로 나타났다.

4) 시제작된 전단형 가속도센서의 α 값은 상온에서 약 0.94 정도로 나타났다.

참 고 문 헌

[1]D.Purdy,"Vibration Measurement-An Introduction to Piezoceramic Accelerometers and Associated Instrumentation-Part 1",Noise Control Vibration Isolation, April 1979, pp.140-142.
 [2]Yasunori OHTSUKI, Yoshiaki FUDA and Tetsuo YOSHIDA, "High-Sensitivity Accelerometer Using Multilayer Piezoelectric Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, pp.4209-421,1993.
 [3]Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preampfier Handbook, Brüel & Kjaer, October, 1986, pp.21.
 [4]Adel S.Sedra, Kenneth C. Smith, Microelectronic Circuits, Saunders College Publishing, 1991, pp.360.
 [5]Yasunori OHTSUKI and Tetsuo YOSHIDA, "Piezoelectric-Ceramic Biaxial Accelerometer", Jpn., J. Appl. Phys., Vol. 32, pp. 2396-2398,1993.
 [6]Mechanical Vibration and Shock Measurements, Brüel & Kjaer, April, 1984, pp.108.
 [7]Ray Fussell,"Development of piezo-ceramic accelerometers for hazardous environments", Transducer Technology, March 1982.

저 자 소 개



김 영 덕 (金榮德)

1964년 5월 15일생. 1989년 부산대 자연대 물리학과 졸업. 1991년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년~1996년 (주)포스콘 연구소 주임연구원. 1996~현재 (재)포항 산업과학연구원 선임연구원.

Tel : (0562) 279-6743

E-mail : ydkim@risnet.rist.re.kr



김 광 일 (金 光 一)

1958년 9월 1일생. 1981년 경북대공재 전자공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년 일본 게이요 대학 전기공학과 졸업(박사). 1987~현재 (재)포항산업과학연구원 책임연구원.

Tel : (0562) 279-6791

E-mail : kikim@risnet.rist.re.kr

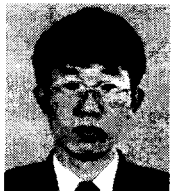


정 우 철 (鄭 宇 喆)

1969년 2월 28일생. 1992년 영남대 공대 전자공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1996년~현재 (재)포항 산업과학연구원 선임연구원.

Tel : (0562) 279-6744

E-mail : wcjung@risnet.rist.re.kr



고 재 식 (高 載 哲)

1961년 6월 13일생. 1985년 울산대 공대 재료공학과 졸업. 1991년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1991년~현재 (재)포항 산업과학연구원 선임연구원.

Tel : (0562) 279-6751

E-mail : kojaesk@risnet.rist.re.kr