〈技術論文〉

압전형 가속도 센서의 개발과 특성평가에 관한 연구

이두희* · 임병덕* · 이용봉* · 김정태*

(1991년 8월 31일 접수)

Development of Piezoelectric Accelerometers and Their Performance Evaluation

D.H.Lee, B.D. Lim, O.B. Lee and Z.T.Kim

Key Words: Sensor Application Technology(센서응용기술), Dynamic System(동적시스템), Measurement(계측), Vibration(진동), Piezoelectric Accelerometer(압전형 가속도계)

Abstract

The sensor technology has becoming emerging area as the automation process in industry requires higher productivity, better quality, and the reliability. In this research, the dynamic measuring sensor such as piezoelectric accelerometers has been developed. Especially, the research concentrates on a design methodology, an analysis of the structural characteristics, and a method of the performance evaluation. The fabricated piezoelectric accelerometers show that the performance characteristics is better than commercial products available in the current market.

1. 서 론

근래에 들어 기계구조물에 대한 설계여건이 엄격해지고 정밀 고속 경량화되는 추세임에 따라 부수적으로 발생되는 진동문제에 효과적으로 대처하기 위하여 센서의 수요가 증대되고 있다. 또한 운전상태의 감시 및 점검을 목적으로 접촉 비접촉식의 각종 진동측정용 센서가 산업체 현장에서도 활발히 사용되고 있다.

진동측정용 센서로는 용량형(capacitive type), 압전저항형(piezoresistive type), 압전형, 가동코일형(moving coil type), 와전류 탐침자(eddy current probe)등 다양한 종류가 있지만 이중 압전형 가속도계는 사용주파수 범위가 넓고 동특성(dynamic range)이 우수한 것으로 알려져 있다[1~3].

이와함께 압전형 가속도계는 소형 경량으로 견고하며 외부전원을 필요로 하지 않을뿐 아니라 환경변화에 따른 안정성이 좋은점 등의 장점으로 인해 진동측정용 센서로 가장 널리 쓰이고 있으며 국내에서는 현재까지 전량 수입에 의존해 오고 있는 실정이다.

본 연구에서는 정밀진동 측정에 사용하기 위한 압전형 가속도계의 설계 제작기술과 가속도계의 특성평가 기술을 개발하는데 주안점을 두고 세가지 크기의 가속도계 9개를 설계 제작하여 특성평가를 하였다. 제작된 압전형 가속도계는 압축형(compression type)으로 산업체 현장에서 수요가 많은 40gram 정도의 무게를 가진 중형급이면서 사용주파수 범위가 20kHz 이상인 실용적인 진동측정용 센서가 되도록 하였다. 개발된 가속도계의 성능을 평가하기 위해서 가속도계의 대표적인 특성인자인

*정회원, 한국표준과학연구원 음향 · 진동연구실

운동방향에 대한 감도, 선형성, 횡방향 감도 및 음압감도를 측정하여 기존의 가속도계와 비교하였다.

2. 압전형 가속도계의 구성과 동작원리

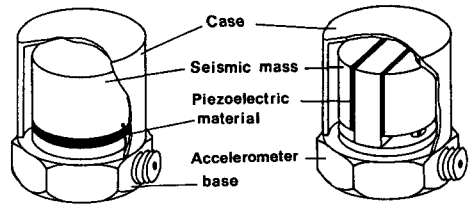
압전형 가속도계는 Fig. 1에 보이는 것처럼 구성방식에 따라 크게 압축형과 전단형으로 나누어진다. 바닥면(base)과 관성성질량(seismic mass) 사이에 있는 압전소자(piezoelectric element)는 이상적인 탄성 스프링 역할을 하면서 진동신호를 전기신호로 바꾸어 주는 변환기이다. 가속도계 전체가 운동함에 따라 압전소자는 부착된 관성질량의 질량과 가속도의 곱으로 주어지는 힘을 받으며, 압전효과(piezoelectric effect)에 의해 작용하는 힘에 비례하는 전하를 만들어 낸다. 주어진 가속도계에서 관성질량은 일정한 값을 가지고 있으므로 압전소자에서 발생되는 전하량은 결과적으로 센서가 받는 가속도에 비례하게 된다.

압전형 가속도계는 Fig. 2에 보이는 관성질량-스프링 계로 모델링 할 수 있다. 관성질량-스프링 계에서 바닥면의 변위를 u, 기저부와 관성질량 사이의 상대변위를 δ라고 하면 관성질량-스프링 계의 응답특성은 다음과 같다.

$$\frac{\delta_o}{\ddot{u}_o}=\frac{1}{\omega_n^2}\frac{1}{\{[1-(\omega/\omega_n)^2]^2+[2\xi(\omega/\omega_n)]^2\}^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 ξ는 감쇠비(damping ratio), ω_n은 관성질량 m_s와 가속도계 구성소자들의 등가 강성 k에 의해서 결정되는 공진주파수이다.

식(1)에서 공진주파수 아래의 주파수 영역에서 ω가 작아질수록 $\delta_o\omega_n^2/\ddot{u}$가 1에 접근하는 것을 알 수 있다. 즉 감쇠비 변화에 따른 식(1)의 특성은 Fig. 3과 같이 나타나며 공진주파수보다 낮은 주파수 영역에서는 관성질량-스프링 계에 가해지는 가속도 크기에 대한 관성질량의 변위의 비는 일정한 값을 가지므로 관성질량-스프링 계를 가속도 (또는 dynamic force)를 측정하는데 이용할 수 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 사용 가능한 주파수 범위는 공진주파수에 의해 결정되며 공진주파수를 높히면 사용주파수 범위가 넓어지는 반면, 동일한 가속도 크기에 대해 관성질량의 변위는 ω_n^2에 반비례하므로 감도는 낮아진다. 이와같이 사용주파수 범위와 감도 사이의 상충되는 특성을 감안하여, 가속도계를 설계할 때 사용목적에 맞추어 이들 특성을 적



(a) Compression type (b) Shear type

Fig. 1 Accelerometer types

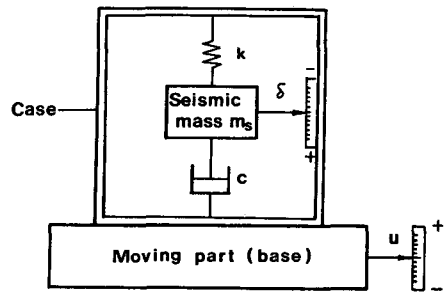


Fig. 2 Simplified model of an accelerometer

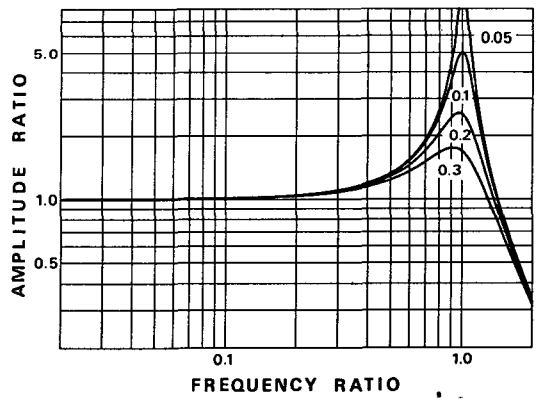


Fig. 3 Relationship between the relative displacement amplitude δ of a mass-spring system and the acceleration amplitude $\ddot{u}$ of the base

당히 절충할 필요가 있다. 일반적으로 압전소자의 강성 k는 충분히 크므로 공진주파수 ω_n을 고주파 영역으로 설계할 수 있으며 이러한 경우 넓은 주파수 범위에 걸쳐 균일한 진폭 및 위상반응을 갖는다.

3. 압전형 가속도계의 설계 및 제작

압축형 가속도계는 압전소자가 바닥면과 관성질

량 사이에 놓이는 방식이다. 본 연구에서는 압전소자와 전극용 기판을 바닥면 상층부와 관성질량 사이에 고정시키기 위해 중심부에서 볼트로 고정체결되는 Single-Ended Center-Mounted (SECM) 방식으로 설계하였다. SECM 방식은 압축형 가속도계 중 진동과 직접 관련이 없는 잡음의 영향을 최소화시키는 잇점이 있어 압축형 가속도계 시장 수요의 75% 이상이 이러한 방식에 의해 제작되고 있다. 가속도계의 사용주파수 범위는 감도변화가 5%를 벗어나지 않는 주파수 영역을 나타내며, 근사적으로 공진주파수의 1/3영역까지로 주어진다[2]. 따라서 사용주파수 범위를 20kHz 정도로 잡으면 공진주파수가 60kHz 이상이 되도록 설계하여야 한다. 설계코자 하는 공진주파수가 결정되면 가속도계 구성소자의 제원은 다음과 같은 과정을 통하여 계산할 수 있다.

압전형 가속도계의 감쇠비는 0.1이하로 작은 값을 갖기 때문에 제작된 압전형 가속도계의 구조는 Fig. 4와 같이 관성질량과 베이스 사이에 압전소자, 전극용 기판, 체결용 볼트가 직렬 및 병렬로 연결되어 있는 진동계로 볼 수 있다.

가속도계를 질량이 매우 큰 피측정체에 설치한 경우 공진주파수 f_n은 다음과 같다.

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m_s}} \tag{2}$$

여기서 m_s는 관성질량의 질량, k는 합성 강성으로 다음과 같이 주어진다.

$$k=\frac{1}{\frac{1}{k_1}+\frac{1}{k_2}}+k_3 \tag{3}$$

여기서 k_1, k_2, k_3는 각각 압전소자, 전극용 기판, 체결용 볼트의 강성을 나타낸다. 이들의 강성은 재질의 영률(young's modulus)과 외형 치수로부터 다음과 같이 계산된다.

$$K=\frac{E\cdot A}{t} \tag{4}$$

여기서

E=재질의 영률$[N/m^2]$
A=재질의 단면적$[m^2]$
t=재질의 두께$[m]$

를 나타낸다.

일반적으로 압전소자의 영률은 매우 크고 소결된 상태에서는 가공하기가 어려우므로 k_1은 압전소자가 정해지면 일정한 값을 갖는다. 한편 결합용 볼트의 길이와 단면적은 압전소자의 내경과 두께 및 관성질량의 형상에 의해 결정되므로 강성을 조절하기 위해 볼트의 형상을 변화시키기는 곤란한다.

따라서 공진주파수를 설계코자 하는 값으로 결정하기 위해서는 전극용 기판의 두께를 조절하여야 한다.

식(3)을 다시 정리하면

$$k=\frac{k_1(k_2/k_1)}{(1+k_2/k_1)}+k_3 \tag{5}$$

와 같으며 식(5)에서 k가 가질 수 있는 값의 범위는 다음과 같다.

$$k_3<k<(k_1+k_3) \tag{6}$$

식(5)는 등가강성 k가 k_2/k_1의 값에 따라 단순증가하는 함수임을 보여준다.

Fig. 5는 본 연구에서 설계 제작된 세가지 형태(C1, C2 및 C3)의 가속도 센서에 대한 형상을 보여주고 있다.

C1모델의 경우 k_1은 9.4×10^9(N/m), k_3는 7.8×10^8(N/m) 정도의 값을 갖는다. 여기서 관성질량은 약 6.3gram이므로 공진주파수는 53kHz와 200 kHz 사이의 값을 가질 수 있다. 만일 공진주파수를 60kHz로 설계할 경우 k_2/k_1 값은 0.021정도가 되어야 하므로 k_2는 약 2.0×10^8(N/m)이고 이에

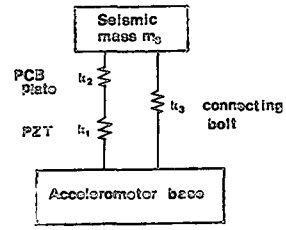


Fig. 4 Mechanical equivalence of an accelerometer

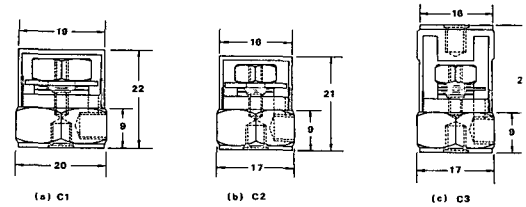


Fig. 5 Dimensions of designed accelerometers

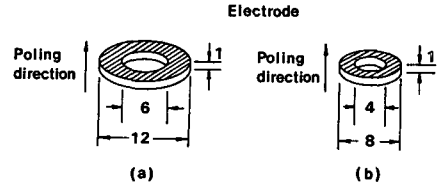


Fig. 6 Dimensions of ring type piezoelectric elements

해당되는 전극용 기판의 두께는 약 0.85mm가 되어야 한다.

이상의 설계방법은 동일한 형상을 갖는 가속도계에 대해 주어진 범위내에서 공진주파수를 조절할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서는 위에서 기술된 설계절차에 따라 가속도계의 각부 치수를 결정하였다.

가속도계에서 사용된 ring 형태의 압전소자(Vernitron PZT-5A)의 제원은 Fig. 6에 나타나 있다. 모델 C1 가속도계에 사용된 압전소자는 외경이 12mm, 내경이 6mm, 두께가 1mm이며, 모델 C2와 C3에 사용된 압전소자는 외경이 8mm, 내경이 4mm, 두께가 1mm이다. 모델C3는 다른 가속도계들을 비교 교정하는데 사용할 수 있도록 B&K 8305와 같이 양단면에 설치용 나사산을 냈다.

Table 1 Material chracteristics of PZT-5A, PCB, and stainless steel

(a) Young's Modulus of materials.

Material	Young's Modulus ($\times 10^{10}$N/m^2)
PZT-5A	11.1
PCB	0.2
Stainless steel	20.0

(b) Material constants of PZT-5A.

Young's Modulus, $c_{33}=11.1\times10^{10}$〔N/m^2〕

Piezoelectric strain constant ;

$d_{33}=374\times10^{-12}$〔coulomb/N〕

$d_{15}=584\times10^{-12}$〔coulomb/N〕

Piezoelectric voltage constant ;

$g_{33}=24.8\times10^{-3}$〔V·m/N〕

$g_{15}=38.2\times10^{-3}$〔V·m/N〕

Dielectric constant, $\varepsilon=1.5\times10^{-8}$〔farad/m〕

Density, $\rho=7.75\times10^{3}$〔kg/m^3〕

Curie temperature, $T_c=365$℃

전극을 연결하기 위한 인쇄회로 기판(PCB plate)을 제외한 모든 부분의 재질은 스테인레스 스틸(SUS 410)을 사용하였다. 바닥면에 10-32UNF 나사산을 가공하여 측정체에 가속도계를 쉽게 부착할 수 있도록 하였으며, 상용으로 시판되는 기존의 압전형 가속도계와 같이 10-32UNF 마이크로 돗트 컨넥터를 사용하여 신호를 내보낼 수 있도록 하였다. 압전소자와 전극용 판이 바닥 윗면과 관성질량 사이에 단단히 고정되도록 볼트(10-32UNF)를 사용하여 결합시켰으며, 이때 결합 토오크(torque)는 약 3N·m로하여 떨림(chattering) 현상이 일어나지 않도록 하였다.

참고로 본 연구에서 사용한 PZT-5A의 재료 특성은 Table 1과 같다[4,5]

4. 압전형 가속도계 특성평가

본 연구에서는 제작된 압축형 가속도계 9개에 대하여 (i) 운동방향에 대한 감도와 선형성, (ii) 횡방향 감도 및 (iii) 음압감도를 측정하고 상용 제품과 비교하였다.

4.1 감도 및 선형성

감도는 센서의 성능을 좌우하는 가장 중요한 특성인자로서 가속도계를 실제의 진동 측정에 사용하기 위해서는 사용되는 전체 주파수 대역에 걸쳐서 감도교정을 하여야만 한다.

가속도계의 감도는 입력되는 진동 가속도에 대한 출력신호의 비로 정의되며, 압전형 가속도계의 경우 전하량 Q와 가속도 g의 비로 표시하며 가속도계에 가해진 진동주파수와 진동레벨을 함께 명시한다.

본 연구에서는 장비의 구성과 측정 절차가 비교적 간편한 비교교정 방법을 이용하여 제작한 압전

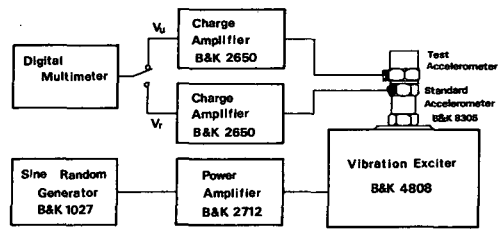


Fig. 7 Experimental set-up for the back-to-back comparison calibration of an accelerometer

형 가속도계의 감도를 10Hz~10kHz 주파수 범위에 걸쳐 측정하였다. Fig. 7은 비교 교정 장치의 구성도를 보여주고 있다.

감도 교정을 위한 가속도계를 기준 가속도계(B & K 8305, S/N 894995)에 마주하도록(back-to-back) 볼트 결합하여 진동가진기(B&K 4808)위에 2N·m의 토오크로 설치한뒤 원하는 진동 주파수로 가진시켰다. 진동 레벨은 기준 가속도계로 읽은 값이 되며, 이때 교정하고자 하는 가속도계에서 출력되는 신호를 측정함으로써 감도를 결정하게 된다. 즉 기준 가속도계의 감도를 S_r, 기준 가속도계로부터 전하 증폭기를 거쳐나온 전기신호를 V_r, 교정될 가속도계로부터 전하 증폭기를 거쳐 나온 전기신호를 V_u라 하면 교정될 가속도계의 전하감도 S_u는 다음과 같다.

$$S_u = S_r \frac{V_u}{V_r} \tag{7}$$

여기서 두 전하증폭기의 이득은 동일하다고 가정하였다.

Fig. 8은 C1-5, C2-1, C3-2 가속도계의 주파수 응답특성을 보여준다. 10Hz~10kHz 주파수 범위에서 이들의 전하감도는 각각 5.50pC/g, 1.38pC/g, 2.33pC/g이며, 일반적인 진동계측용으로 무난히 쓸 수 있을 만큼 평탄한 주파수 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 제작된 가속도계의 전하감도는 Table 2에 정리되어 있다.

한편 진동레벨에 따른 가속도계의 출력특성을 보기 위하여 Fig. 7의 비교교정 장치에서 가진 주파수를 100Hz로 고정시키고 가진 레벨을 0.1g에서부터 8.0g까지 변화시켰다. Fig. 9는 C1-5 가속도계의 선형성 측정결과를 보여주며 0.1g-8.0g의 범위에서 전하감도가 0.5% 이내로 유지되는 우수한 선형특성을 갖고 있음을 볼 수 있다.

4.2 횡방향 감도

이상적인 가속도계는 운동방향에 대해서만 전기적 신호를 발생시키지만 실제로 사용되는 모든 종류의 가속도계는 구성소자들의 불완전한 기계가공 등으로 인하여 최대감도를 나타내는 방향에 수직한 쪽의 운동에 대해서도 반응을 나타낸다. 이러한 직교방향 운동에 대한 가속도계의 감도를 횡방향 감도(transverse sensitivity)라 하며 주축 방향의 감도에 대한 비율로 표시한다.

가속도계의 횡방향 감도를 측정하기 위해서는 가

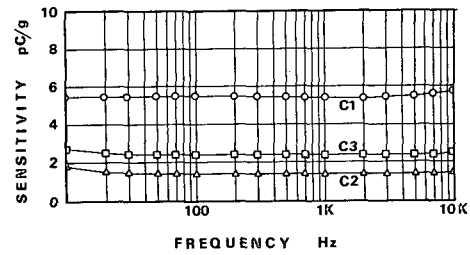


Fig. 8 Frequency responses ; (a) Type C1-5, (b) Type C2-1, and (c) Type C3-2

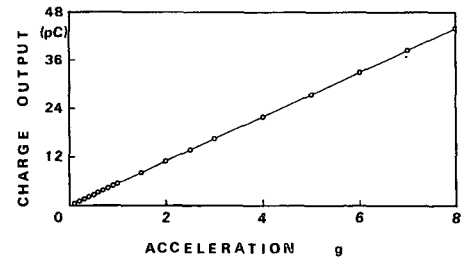


Fig. 9 Linearity of accelerometer type C1-5 at 100Hz

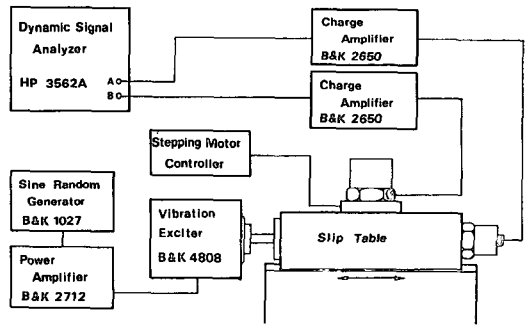
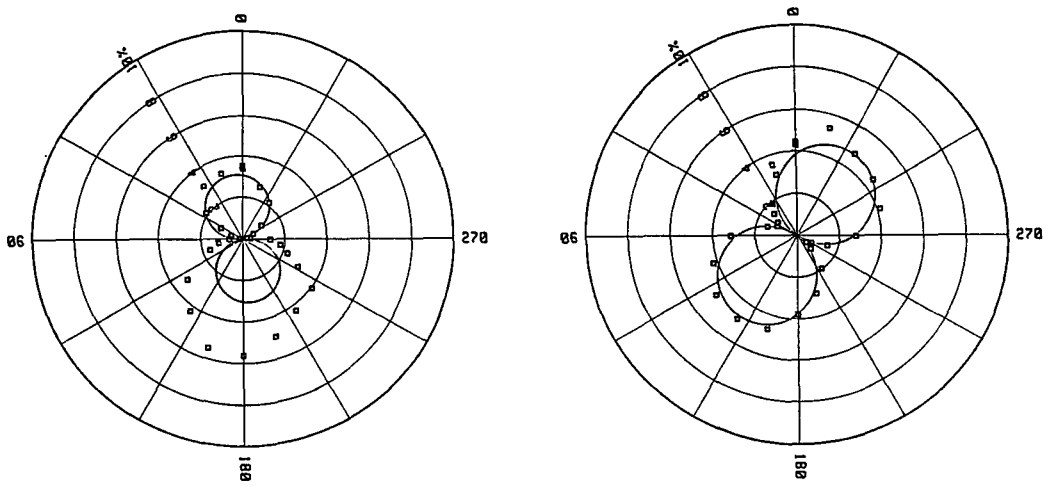


Fig. 10 Experimental set-up for transverse sensitivity measurement

속도계 주축과 90°각도를 이루는 설치면에 평행한 방향으로 가진을 시키고 그에 대한 가속도계의 반응을 구하여야 한다. Fig. 10은 횡방향 감도를 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 보여준다.

가속도계를 Fig. 10에 보여지는 것처럼 이동 탁자(slip table)의 중심부에 설치하고 이동탁자를 30 Hz의 주파수로 가진시켰다. 이때 횡방향 가진레벨은 이동탁자의 끝단에 B&K 8305(S/N894995) 가속도계를 부착하여 측정하였으며, 가진레벨은 3g로 유지하였다. 가속도계 설치용 블럭은 한 스텝당 1.8°씩 회전하는 스텝모타(stepping motor)로 구동하여 30Hz의 횡방향 진동이 360°에 걸쳐 가진되도



(a) C1-2 (b) C1-3

Fig. 11 Transverse sensitivity curve

록 고안되었다[6].

Fig. 11은 가속도계의 횡감도 측정결과를 보여준다. 가속도계의 횡감도 곡선은 이론적으로 극좌표상에 대칭되는 두개의 원으로 나타나야 한다. 측정된 횡감도 곡선을 보면 대체적으로 대칭되는 두 원으로 나타나지만 Fig. 11(b)에 보이는 것처럼 비대칭적인 분포도 나타나고 있다. 이러한 현상은 가속도계 자체의 특성이라기 보다는 가속도계와 전하증폭기 사이의 케이블에 의한 영향인 것으로 판단된다. 즉 케이블을 하나의 케페시터로 볼 수 있으며 케이블이 진동함에 따라 신호선과 접지선 사이의 간격변화로 인해 케페시터 용량이 변한다. 이로인해 동일한 진동에 대해서도 출력신호의 변동이 일어난다. 케이블에 의한 출력신호의 변화량은 케이블의 상태 또는 형상에 따라 달라지는데 측정시 생길 수 있는 오차를 최소화시키기 위해서는 가급적 케이블 자체의 운동이 작아지도록 해주어야 한다.

횡감도 측정결과는 Table 2에 나타나 있다. 이를 보면 케이블에 의한 영향을 포함하여 최대값이 3%에서 6% 사이로 양호하며 앞으로 케이블 영향에 대한 정량적인 연구를 통하여 엄밀한 횡감도 특성이 규명될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2 Performance characteristics of the fabricated piezoelectric accelerometers

Type	Weight (gram)	Natural Frequency (kHz)	Charge Sensitivity (pC/g)	Transverse Sensitivity (%)	Acoustic Sensitivity (g)
C1-1	44.2	80.6	6.36	4.2	—
C1-2	44.1	78.8	8.53	4.6	—
C1-3	44.4	56.9	7.31	3.1	0.0054
C1-4	44.9	54.8	7.19	5.0	0.0028
C1-5	44.8	57.1	5.50	16.0	0.0041
C1-6	44.8	57.0	6.32	4.3	0.0035
C2-1	29.3	71.9	1.38	12.9	0.0073
C3-1	43.1	72.0	2.40	5.8	0.0023
C3-2	42.9	72.4	2.33	6.2	0.0038
B&K4370	53.8	22.4	10.0	4.5	0.0251
B&K4366	29.0	37.3	4.88	—	0.0072

4.3 음압 감도

진동하는 물체는 소리를 내며, 반대로 소리에 의해 발생되는 음압으로도 구조물은 진동하게 된다. 높은 소음이 존재하는 상황에서 진동레벨을 정확히 측정하기 위해서는 음압감도가 낮은, 즉 소리에 둔감한 가속도계를 사용하는 것이 좋다.

음압감도(acoustic sensitivity)는 20×10^{-6}Pa을 기준으로 한 음압레벨(sound pressure level)이 154dB 즉 1000Pa인 음장에 놓여질 때 가속도계의 반응을 등가 가속도로 나타낸다[2,3]. 그러나 154dB의 높은 음압레벨을 형성시키는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 가속도계의 반응이 선형성을 유지한다고 가정하고 낮은 음압레벨의 음장에 가속도계를 노출시켜서 반응을 측정한 후, 그 결과를 154dB에서의 반응으로 환산하여 음압감도를 구할 수 있다[7].

본 연구에서는 무향실(anechoic chamber)내에 Fig. 12와 같이 스피커 앞에 가속도계와 마이크로폰(B&K4165)을 설치하여 음압감도를 측정하였다. HP3562A 주파수 분석기를 사용하여 20Hz~10 kHz의 주파수 범위에 걸쳐 마이크로폰과 가속도계의 출력신호비를 측정하였다.

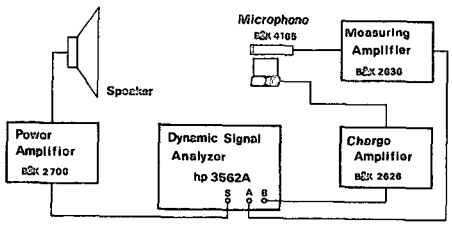


Fig. 12 Set-up for the acoustic sensitivity measurement

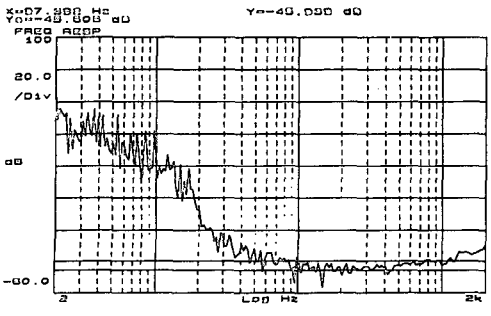


Fig. 13 Frequency response of accelerometer Type C1-3 relative to B & K 4165 condenser microphone

Fig. 13은 가속도계 C1-3에 대해 측정한 결과를 보여준다. 감도가 50mV/Pa을 가진 마이크로폰으로 측정한 음압레벨은 85.6dB이고 가속도계의 출력신호는 마이크로폰 출력신호에 비해 $-42dB$를 가지게 된다. 따라서 음압레벨 154dB에서의 가속도계 출력신호는 398mV가 된다. 가속도계 C1-3의 전하감도가 7.31pC/g이고 전하증폭기의 이득은 1 pC의 전하가 입력될때 10V가 출력되도록 조정한 것을 고려하면 음압감도는 0.0054g로 계산된다. 표2의 측정결과를 보면 제작된 가속도계들의 음압감도 특성이 B&K 제품에 비해 우수한 것을 알 수 있다.

5. 결과 및 토의

본 연구에서는 접촉식 진동측정에 사용되는 압전형 가속도계를 개발하고 이에 대한 동특성을 평가하였다. 개발대상 가속도계는 산업체 현장에서 많이 사용되는 40gram 정도의 중형으로써 사용주파수 대역이 최소한 20kHz까지 보장되는 것을 목표로 하여 압축형 SECM 방식으로 세가지 형태의 가속도계 9개를 설계, 제작하였다.

제작된 가속도계의 동적특성을 평가하기 위해 10 Hz~10kHz 주파수 범위에 걸쳐 감도 교정을 하였으며, 선형성, 횡감도 및 음압감도를 측정하였다. 측정결과 10kHz에서의 전하감도는 1.4pC/g~8.5 pC/g 값을 갖고 있어 일반적으로 사용되는 진동측정용 가속도계로서는 충분한 감도를 가지고 있음을 알 수 있었다.

최대 횡감도는 3~6% 정도의 값을 가지며 횡감도 측정시 케이블의 영향이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었고 횡감도 측정시 케이블에서 발생되는 잡음의 영향이 무시할 수 없음을 알 수 있었다.

이와함께 무향실내에서 스피커 앞에 가속도계와 마이크로폰을 케이블로 늘어뜨리는 방법을 통하여 가속도계의 음압감도를 측정하였다. 음압감도를 측정할 때 지지방법과 음압을 가하는 방식은 아직까지 통일된 기준이 없는 관계로 음압감도에 대한 측정치는 기존 상용제품의 음압감도와 비교 하였다. 시험결과 본 연구에서 제안한 방법이 음압감도의 측정에 적합한 것으로 판단되었으며 제작된 가속도계들의 음압감도 특성이 우수함을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 압전형 가속도계는 국내외에서 정밀 측정용으로 사용되는 상용 제품과 비

교한 결과 제반 동특성이 양호한 것으로 나타났으며 현재 생산공정에 대한 보완연구와 함께 국내에서 사업화가 시도되고 있다.

후 기

본 연구중 측정과정을 도와준 한국표준연구소 음향, 진동연구실의 최병천씨께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Harris, C.M. and Crede, C.E., 1961, Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill book Co., New York.

(2) Serridge, M. and Licht, T.R., 1986, Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook, Brüel & Kjaer.

(3) Shock and Vibration Measurement Technology, ENDEVCO Co.

(4) 박용기외, 1988, 압전재료 특성조사 및 아전소자용 재료개발, 한국표준연구소, KSRI-88-20-IR

(5) Bever, M.B. 1986, Encyclopedia of Materials Science and Engineering, Vol.5, Pergamon Press Ltd., Oxford

(6) 은희준외, 1988, 자동화용센서 응용기술 개발, 한국표준연구소, KSRI-88-110-IR

(7) 임병덕외, 1990, 자동화용 센서 응용기술 개발, 한국표준연구소, KSRI-90-64-IR