

진동 측정용 압전형 가속도센서의 압전특성 효과

권 정 락

(주) 포스콘 기술연구소

(1995년 4월 26일 접수)

Influence of Effective Piezoelectric Properties on Performance of Piezoelectric Accelerometer for Vibration Measurements

Jeong-Rock Kwon

R & D Center, POSCON Corporation

(Received April 26, 1995)

요 약

압전성질에 따른 압축형 가속도센서의 특성을 조사하기 위해서 PZT 물질을 고찰하였다. 링 형태의 압전소자는 상용되는 PZT 분말을 사용하여 일반 세라믹 공정으로 제조하였다. 제조한 압전소자의 유전상수는 390~3400, 압전전하상수(piezoelectric charge constant : d_{33})는 $(90\sim593)\times10^{-12}$ C/N, 압전전압상수(piezoelectric voltage constant : g_{33})는 $(19.5\sim40.5)\times10^{-3}$ V·m/N의 분포를 보였다. 가속도 센서의 전하감도는 압전소자의 압전전하상수값 (d_{33})에 비례하지만, 전압감도는 압전전압상수(g_{33}) 값에 의존한다. 가속도센서의 감도와 부착공진 주파수는 압전소자의 물리적 특성과 크기뿐만 아니라, 관성질량에도 의존하기 때문에 설계시 이를 두 구성 요소들간의 적절한 고려가 요구된다.

ABSTRACT

In order to investigate the performance of compression-type accelerometer on piezoelectric properties, PZT materials have been studied. The ring-shaped piezoelectric elements were prepared using commercial PZT powders by conventional ceramic process. Their estimated relative dielectric constant, piezoelectric charge constant (d_{33}) and voltage constant (g_{33}) values showed 390~3400, $(90\sim593)\times10^{-12}$ C/N and $(19.5\sim40.5)\times10^{-3}$ V·m/N, respectively. The charge sensitivity of accelerometer is proportional to the piezoelectric charge constant value (d_{33}) of PZT, but its voltage sensitivity is related with the piezoelectric voltage constant (g_{33}). Since the mounted resonance frequency and sensitivity are dependant on the seismic mass as well as physical characteristics and size of PZT elements, the suitable considerations between two components are required for accelerometer's design.

Key words: Piezoelectric accelerometer, Piezoelectric constant, Accelerometer sensitivity, Mounted resonance frequency

1. 서 론

압전 세라믹은 기계적 신호와 전기적 신호 사이의 결합이 이루어지기 때문에 기계적계와 전기적계 간의 에너지 변환자로서 응용이 가능하다. 1880년 Curie 형제가 수정에서 압전효과를 발견한 이래로 압전재료의 응용은 전압 발생기, 초음파 변환기, 가전 및 기타 여러 산업 분야에 다양하게 적용되고 있다. 산업분야의 측정을 위한 압전 디바이스로는 가속도계, 압력계, 비파괴 검사용 초

음파 탐촉자, 초음파 레벨계, 초음파 유량계 등을 들 수 있다^[1-3].

압전세라믹은 전기적 출력 임피던스는 크지만, 기계적 입력 임피던스(혹은 stiffness)가 크기 때문에 하중하에서 변형이 무시할 수 있을 정도로 작다. 압전 효과에 의해서 힘이나 가속도와 같은 물리량을 직접적으로 측정할 수 있는 능동소자로 활용이 가능하다. 최근 기계 구조물의 고속, 대형 및 자동화 추세에 따라 부수적으로 발생되는 진동으로 인한 설비의 이상유무의 점검 및 경향판리를

위해 각종 진동 측정용 센서들이 산업 현장에 널리 사용되고 있다. 진동 측정용 가속도센서로는 여러 종류가 있지만, 이들중 압전 세라믹을 이용한 압전형 가속도 센서는 넓은 사용 주파수 대역, 우수한 동적특성, 소형화 그리고 내구성이 좋은 점으로 인해 진동 측정용으로 가장 널리 쓰이고 있다⁴⁻⁶⁾. 압전형 가속도센서는 정량적으로 역학적인 입력 진동신호의 크기에 비례하는 전기적 신호를 발생시키는 것이다. 이를 위해서는 역학적 진동과 전기적 출력과의 선형성이 뛰어나고, 동작 범위가 사용 용도에 적합해야 한다.

본 연구에서는 시판되고 있는 PZT 압전소자와 자체적으로 제작한 PZT 압전소자들을 사용하여 압전특성에 따른 가속도센서의 전하 및 전압감도를 조사하였다.

2. 실험 및 측정방법

2.1. 출발 물질

가속도 센서의 핵심요소의 하나인 PZT 압전소자는 충격이나 진동과 같은 기계적 신호를 전기적 신호로 변환하는 역할을 한다. PZT 분말은 VERNITRON 사의 PZT-5H, PZT-5A, PZT-8와 ENDEVCO 사의 EC-64와 EC-69 그리고 자체적으로 개발한 PU-01, PU-2, PU-3 조성의 하소된 분말을 사용하였다. 관성질량(seismic mass)의 재질은 텍스텐 카바이드(WC), 베이스와 외부 케이스는 SUS 304를 사용하였다.

2.2. 시편제조

압전소자 제조는 외경이 12 mm, 내경이 2 mm인 mould를 사용하여 2.5 mm 두께로 성형한 후 약 1200°C 극처에서 1시간 동안 소결하였다. 소결된 시편의 외경은 약 9.60 mm, 내경은 약 3.43 mm로 나타났으며, 두께는 2 mm로 연마를 하였다. 스크린 방법으로 압전소자의 양면에 은전극을 도포한 후, 600°C 극처에서 전극처리를 하였다. 다결정인 압전소자의 압전성을 부여하기 위해서 120°C의 실리콘 오일 유조내에서 약 40 kV/Cm의 전계를 인가하였다. 관성질량은 베이스의 중심축 상에 압전소자와 함께 적층으로 체결할 수 있도록 무게가 5.5 g 정도인 링 형태로 제작하였으며, 베이스는 육각 볼트 형태로 밀면은 가진기와 볼트 결합이 가능하도록 중심축 상에 나사홀을 주었다.

2.3. 압전형 가속도계의 작동원리 및 특성 측정방법

압축식 전하형 가속도계의 구조는 Fig. 1과 같으며, 베이스와 관성질량 사이에 위치하는 압전소자가 탄성

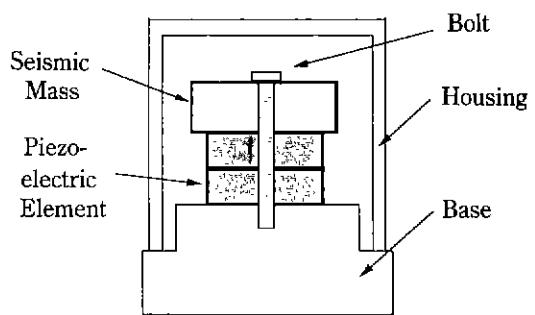


Fig. 1. Compression-type piezoelectric accelerometer.

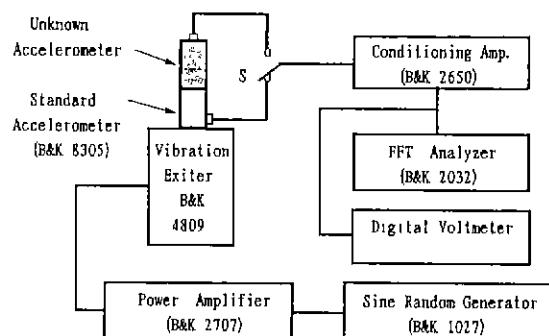


Fig. 2. Block diagram of a comparision calibration system of accelerometer.

스프링 역할을 하면서 진동신호를 전기적 신호로 변환하는 역할을 한다. 가속도계가 진동함에 따라서 관성질량(m)과 가속도(g)의 곱으로 주어지는 힘이 압전소자에 전달되어지며, 압전효과에 의해 외력에 비례하는 전하가 발생된다. 전하형 가속도 센서는 전기적 출력이 매우 작을뿐만 아니라, 출력 임피던스가 수 GΩ 정도로 매우 높기 때문에 범용 계측 전압 증폭기나 전압계로 측정이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전압형 가속도 센서에서는 전하를 전압으로 변환하는 전하 증폭기(charge amplifier)를 센서내에 내장하여 사용한다⁴⁻⁶⁾.

본 연구에서는 압전소자의 압전특성에 따른 가속도 센서의 특성 분석은 Fig. 2의 장치 구성도에 도시한 바와 같이 B&K 사의 표준 가속도계(Type 8305)를 이용한 비교 교정방법(Comparision Calibration Method)을 사용하였다⁵⁻⁷⁾. 일반 세라믹 제조공정으로 제작한 압전소자의 압전특성은 HP사의 Impedance/Gain Phase Analyser(Model 4194)와 Channel 사의 d₃₃-meter를 이용하여 평가하였다^{8,9)}.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 본실험에 사용한 PZT 압전소자의 압전특성을 나타낸 것으로서 유전상수는 390~3400, 압전전하상수(piezoelectric charge constant : d_{33})는 $(90\sim 593) \times 10^{-12} \text{ C/N}$, 압전전압상수(piezoelectric voltage constant : g_{33})는 $(19.5\sim 40.5) \times 10^{-3} \text{ V-m/N}$ 의 분포를 보여준다. 가속도계에 있어서 압전소자는 관성질량(seismic mass : ms)과 가속도(acceleration : a)의 곱으로 주어지는 외력에 비례하는 전하를 발생된다. n개의 압전소자가 병렬구조로 적층된 가속도계에 있어서 전기적 임피던스는 $(1/n)$ 로 감소하지만, 발생되는 전하량은

$$Q_e = n d_{33} m_s a \quad (1)$$

이다^{7,10)}.

Fig. 3은 무게가 5.5 gr인 관성질량, 110 gr인 베이스와

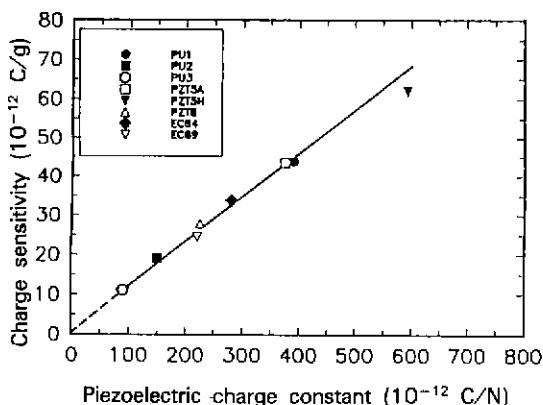


Fig. 3. Relative charge sensitivity dependence of accelerometer on the d_{33} values of various piezoelectric elements.

Table 1에 요약한 압전소자들로 제작한 가속도 센서들을 Fig. 2에 도시한 가진 시스템에 bolting 한 후 1 중력가속도($\text{gravity} : g = 9.8 \text{ m/s}^2$)의 가진하에서 가속도 센서의 전하감도(charge sensitivity : Q_e)를 측정한 결과들이다. 압전전하상수(d_{33}) 값이 $90 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ 정도인 PU-3 압전소자를 사용한 센서는 최저의 전하감도(약 11.0 pC/g)를, 가장 큰 d_{33} 값($=593 \times 10^{-12} \text{ C/N}$)을 갖는 PZT-5H는 59.3 pC/g 정도의 가장 높은 전하감도를 나타낸다. 즉, 전하형 가속도 센서의 경우 출력전하는 대략적으로 수십 pC 정도로서 (1)식에서 보는 바와 같이 관성질량과 외력이 일정할 때 압전소자의 d_{33} 값에 선형적으로 의존함을 보여준다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 방법으로 전하증폭기(charge amplifier : B&K 2650)를 사용하여 가속도 센서들의 전압감도(voltage sensitivity : V_o)를 측정한 결과로서 가장 큰 g_{33} 값($=40.5 \times 10^{-3} \text{ V-m/N}$)을 갖는 PU-2 압전소자에서 최대의 감도($V_o = 75.6 \text{ mV/g}$)를 보이는 반면, PU-3 압전소자($g_{33} = 19.5 \times 10^{-3} \text{ V-m/N}$)에서 가장 낮은 감도($V_o = 31.6 \text{ mV/g}$)를 나타낸다. 가속도센서의 전압감도는 전하감도와는 달리 압전소자의 압전 전하상수값(d_{33})의 크기에 의존하지 않고, 압전전압상수(g_{33}) 값에 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 이러한 전압감도(V_o)의 g_{33} 값 의존성은 다음과 같이 정성적으로 설명 할 수 있다.

$$V_o = Q_e / (C_s + C_c) \quad (2)$$

이때, 여기서 Q_e = 가속도 센서의 전하감도, C_s = 센서의 정전용량, C_c = 케이블의 정전용량을 의미한다. 즉, 전하감도는 Q_e 에 비례하고, 가속도 센서와 케이블의 정전용량합에 반비례 한다. 일반적으로 가속도 센서 출력용으로 사용되는 동축케이블의 정전용량과 가속도센서의 압전소자 양단의 정전용량은 각각 수십 pF/m 와 수백 pF

Table 1. Characteristics of Various Piezoelectric PZT Materials.

material	ϵ_{33}/ϵ_0	k_p (%)	d_{33} (10^{-12} C/N)	g_{33} (10^{-3} V-m/N)	Y_E^{33} (10^{10} N/m^2)	T_c ($^\circ\text{C}$)	ρ (g/cm^3)	Maker
PU-1	1630	60	390	23.4	5.6	330	7.7	POSCON
PU-2	390	55	150	40.5	9.4	335	7.7	
PU-3	515	58	90	19.7	8.2	325	7.5	
PZT-5A	1700	60	374	24.8	5.3	365	7.7	
PZT-5H	3400	65	593	19.7	4.4	250	7.4	VERNITRON
PZT-8	1000	51	225	25.4	8.7	300	7.6	
EC-64	1350	58	280	24.5	8.1	320	7.6	ENDEVCO
EC-69	1048	52	220	23.8	8.4	300	7.6	

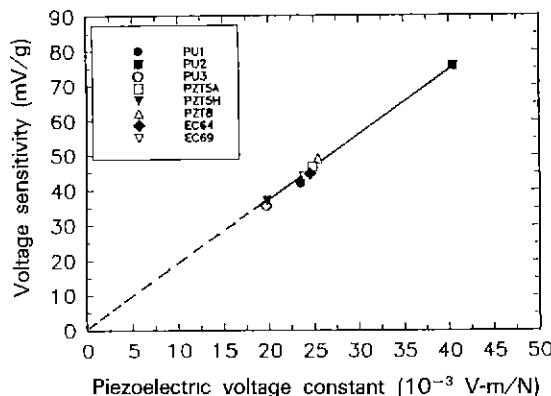


Fig. 4. Relative voltage sensitivity dependence of accelerometer on the g_{33} values of various piezoelectric elements.

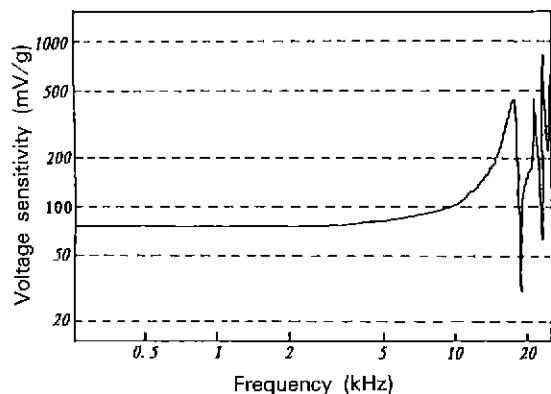


Fig. 6. Relative voltage sensitivity of accelerometer with a piezoelectric PU-2 element versus frequency.

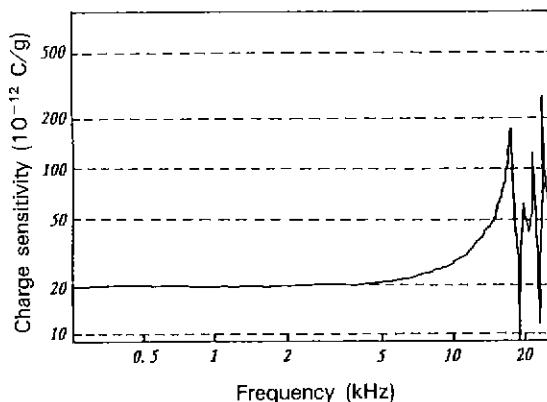


Fig. 5. Relative charge sensitivity of accelerometer with a piezoelectric PU-2 element versus frequency.

정도이나, 간략하게 설명하기 위해서 동축케이블의 길이가 매우 짧다는 가정을 하면, (1)과 (2)식으로부터 센서의 전압감도는

$$\begin{aligned} V_o &= (n d_{33} m_s a) / (C_s + C_d) \quad (3) \\ &\approx (n d_{33} m_s a) / C_s \\ &= (n g_{33} m_s a) (t/S) \end{aligned}$$

로 주어진다. 여기서, g_{33} =압전전압상수, S =압전소자의 단면적, t =압전소자의 두께를 의미한다. 따라서 압전형 가속도센서의 전압감도는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 압전소자의 전하상수(d_{33})보다는 전압상수(g_{33}) 값에 선형적으로 의존할 뿐만 아니라, 압전소자의 단면적 및 두께에도 의존함을 예상할 수 있다. 그러나, 설비 및 구

조물의 진동측정을 위해서는 상당히 긴 동축케이블이 요구되기 때문에 케이블의 정전용량에 기인한 효과를 고려해야 될 것으로 사료된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 Fig. 3의 실험과 동일한 방법으로 PU-2 압전소자로 제작한 가속도센서의 주파수에 따른 전하감도와 전압감도를 나타낸 것이다. 100 Hz에서의 감도를 기준으로 10%의 오차 범위내에서 사용 주파수 범위(useful frequency range)는 수 Hz에서 약 4.5 kHz, 그 부착 공진주파수(mounted resonance frequency : fm)는 약 14.5 kHz 정도로 평가되었다. 가속도계의 부착 공진주파수는 가속도 센서의 구성요소인 관성질량과 압전소자의 특성에 의존하며, 다음과 같이 정의할 수 있다^{7,10}.

$$fm = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{m_s} \right) Y_{33} \left(\frac{S}{t} \right) \left(\frac{1}{n} \right) \right]^{1/2} \text{ (Hz)} \quad (4)$$

여기서, Y_{33} =Young's Modulus of piezoelectric이다.

윗 식들로부터 가속도 센서의 구성 요소들중 센서 특성에 영향을 주는 입력 변수는 관성질량과 압전소자로 구분할 수 있다. 첫째로, 관성질량만 고려할 경우 관성질량이 클수록 사용 주파수 대역과 관련되어지는 부착 공진주파수는 낮아지지만, 센서의 감도는 상대적으로 증가한다. 둘째로, 관성질량이 일정한 경우 압전소자의 갯수가 많거나 두께가 두꺼울수록 부착 공진주파수는 감소하지만, 센서의 감도는 증가한다. 따라서, 가속도센서 설계시 감도와 부착 공진주파수와의 상간관계를 고려하여 관성질량과 압전소자의 압전특성들간의 적절한 조합이 요구될 뿐만 아니라, 센서의 온도특성 및 부착 공진주파수, 전하 충폭기 그리고 케이블의 전기적 특성에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 압축형 가속도계에 있어서 PZT 압전소자가 센서의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 연구 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 가속도계의 감도와 부차 공진주파수는 관성질량과 압전소자의 압전특성에 의존한다. 관성질량이 일정할 때 전하감도는 수십 pC/g 정도로서 압전소자의 압전전하상수(d_{33}) 값에 선형적으로 비례한다. 따라서, 높은 감도를 갖는 전하형 센서를 설계하기 위해서는 d_{33} 값이 큰 PZT 압전소자를 사용하는 것이 바람직하다.

2. 전압형 가속도센서의 설계시 전압감도에 영향을 주는 압전소자의 압전전압상수(g_{33}) 값 뿐만 아니라, 센서 출력선인 동축 케이블의 정전용량을 고려해야 될 것으로 사료된다.

3. 가속도센서의 부차 공진주파수는 관성질량과 압전소자의 크기 및 갯수에도 영향을 받는다. 사용 주파수 대역을 확장하기 위해서는 두께가 얕은 단일 압전소자가 좋으나, 상대적으로 센서의 감도는 감소하기 때문에 설계시 이들간의 절충이 요구된다.

tics and Applications," *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**(6), 1586-1595 (1981).

2. A.J. Pointon, "Piezoelectric Devices," *IEEE Proc.*, **129**, 285-307 (1982).
3. H. Jaffe, "Piezoelectric Applications of Ferroelectrics," *IEEE Trans.*, **ED-16**, 557-561 (1969).
4. Mark Serridge, BSc and Torben R. Licht, MSc, "Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifiers," *Theory and Application Handbook*, B & K (1987).
5. J.T. Broch, "Mechanical Vibration and Shock Measurements," B & K (1984).
6. 음향, 진동연구실, '진동측정기술,' 한국표준과학연구원 (1993).
7. 구경희, "압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정," 한국과학기술원, 석사학위논문 (1989).
8. I.R.E. Standards on Piezoelectric Crystals: "Determination of the Elastic, Piezoelectric and Dielectric Constants-the Electromechanical Coupling Factor," *Proc.*, **46**, 764-778 (1958).
9. I.R.E. Standards: "Measurements of Piezoelectric Ceramics," *Proc. IRE*, **49**, 1161-1169 (1961).
10. C.M. Harris and C.E. Crede, "Shock and Vibration Handbook," McGraw-Hill Book Company (1961).

REFERENCES

1. D. Berlincourt, "Piezoelectric Ceramics; Characteris-