



1. 머리말

이 글은 산업체나 학계, 연구소 등의 진동분야에서 일하는 모든 분들께 압전형 가속도 센서에 대한 이해를 돕고자 간단히 소개하고자 한다.

센서(sensor)라는 용어가 일반화된 지 오래되었지만 아직까지 센서란 무엇인가라 물으면 명확한 해답을 보내는 경우는 의외로 적다. 이러한 질문에 대해 어떤 사람은 정보의 검출 장치(detector)라고 하거나 또 어떤 사람은 에너지 변환 장치(transducer)라고 말한다. 더욱이 다른 의견으로 물체의 모든 상태를 검지하는 장치의 총칭이라고도 한다. 그렇다면 센서란 한마디로 무엇인가? 이것을 한마디로 정의한다는 것은 매우 어려운 것이지만 谷腰欣司는 다음과 같이 표현하고 있다. 센서란 “모든 정보 및 에너지의 검출 장치로서 그 규모는 비교적 작은 파워의 것”으로 말하고 있다. 이와같이 센서는 모든 정보 및 에너지를 물리적, 화학적, 생물학적 수단을 사용하여

* E-mail : gwheo@nadasnv.co.kr

검출하고 있으며 이들의 출력 정보(신호)는 일반적으로 전기 신호(charge & voltage)로 바뀌어 나타내진다. 일상적으로 흔히 사용되는 센서를 살펴보면 검출 대상으로서 광, 자기, 온도, 압력, 진동, 기체 등을 예로 들 수 있다. 그 중에서 진동을 측정하는 센서에 대해 알아보기로 한다.

일반적으로 제어되지 못한 모든 진동은 잡음(noise)을 발생시키거나 기계적인 응력 혹은 구조적인 파손을 유발하는 것과 같은 바람직하지 못한 현상을 발생케 한다. 최근 구조물과 기계류의 복잡성 및 정밀성이 증가함에 따라 진동과 관련된 문제가 운전비용이나 효율 측면에서 그 중요성이 더욱 크게 증가되었다. 따라서 진동의 원인이나 진동력에 대한 구조물의 동적인 반응에 대한 이해가 필요하게 되었으며, 이를 위해 우수한 성능의 진동센서의 개발 필요성이 대두되었다. 여기서는 산업용으로 흔히 사용되는 압전형(piezo-type) 가속도 센서의 원리 및 종류와 특성, 비교 교정 방법 등을 간단히 소개하고자 한다. 이후부터는 가속도 센서를 가속도계라 일컫는다.

2. 가속도계의 특징

진동을 측정하는 기기로는 압전형 가속도계 외에도 많은 것들이 있으나 절대측정을 위해서는 가장 적절한 것으로 알려져 있다. 압전형 가속도계의 특징은 다음과 같다.⁽¹⁾

- (1) 넓은 주파수 범위에서 사용이 가능하며
- (2) 선형성을 나타내는 동적범위가 넓고
- (3) 측정된 가속도 신호를 적분하면 속도 및 변위에 대한 값도 얻을 수 있으며
- (4) 뛰어난 정확성을 갖고 진동을 감지하며
- (5) 별도의 전원공급이 필요없는 자체 발전형이며
- (6) 움직이는 요소가 없어 내구성을 향상시킬 수 있고
- (7) 소형이며, 무게에 비하여 감도가 높다.

3. 가속도계의 작동원리

진동하는 시스템의 표면에 가속도계를 부착하게 되면 표면에 대해 수직인 방향의 진동에 의해 가속도계 내부에 있는 관성 질량이 압전소자에 관성력을 전달하게 되어 압전소자에 물리적인 변형을 가한다. 이때 압전효과에 의해 압전소자의 변형량에 비례한 전하가 발생하며 이때 발생한 전하량은 압전소자의 뛰어난 선형성으로 인하여 베이스로부터 전달된 가속도에 비례하게 된다. 따라서 압전형 가속도계를

기계적 진동계로 보면 압전소자가 관성질량과 베이스 질량 사이의 스프링 역할을 하게 되어 가속도계의 물체에 대한 관성 질량의 상대적 운동을 측정하는 원리로 작동된다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.⁽²⁾

압전형 가속도계는 설계시 감쇠효과는 무시할 정도로 아주 작다고 가정한 질량-스프링 계로 생각할 수 있으며 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + k(x_b - x_s) &= F_e \\ m_s \ddot{x}_s + k(x_b - x_s) &= 0 \end{aligned}$$

여기서 m_b 는 베이스 질량, m_s 는 관성질량, x_b 는 베이스의 변위, x_s 는 관성질량의 변위, k 는 압전소자의 강성률(stiffness), F_e 는 조화 가진력, F_0 는 그 진폭을 나타낸다. 여기서는 외력이 가해지지 않는다($F_e=0$)고 하고 두 식의 해인 고유 공진 주파수(ω_n : natural resonance frequency)를 얻게 된다.

$$\omega_n^2 = k \left(\frac{1}{m_b} + \frac{1}{m_s} \right)$$

가속도계의 베이스는 진동하는 물체와 함께 움직이는 강체로 가정하면 $m_b \gg m_s$ 가 되므로 $1/m_b$ 는 무시할 수 있다. 따라서 다음 식으로 표현된다.

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_s}$$

여기서 ω_m 을 부착 공진 주파수(mounted resonance frequency)라 하며 이 값이 압전형 가속도계의 특성을 나타내는 주파수

계측기기

가 된다. 그런데 실제로 압전형 가속도계에 적용되는 조건은 외력이 작용되는 강제 진동이므로 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\ddot{x}_b - \ddot{x}_s) + k\left(\frac{1}{m_b} + \frac{1}{m_s}\right)(x_b - x_s) \\ = \frac{F_e}{m_b} \end{aligned}$$

여기서 $F_e = F_0 \sin \omega t$ 라 하고 저주파수 영역의 변위와 고주파수 영역의 변위의 비 (A)는 다음과 같이 표현된다.

$$A = \frac{1}{1 - (\omega / \omega_n)^2}$$

이 식에서와 같이 ω 가 ω_n 에 가까워질수록 A 값은 ∞ 로 커지게 된다. 즉 이것은 관성 질량과 베이스간의 변위 증가와 이에 따른 가속도계에서 발생하는 전기적인 출력의 증가를 의미하며 가속도계의 설계에 중요한 변수로 작용된다.

4. 가속도계의 구성요소

4.1 기본구조

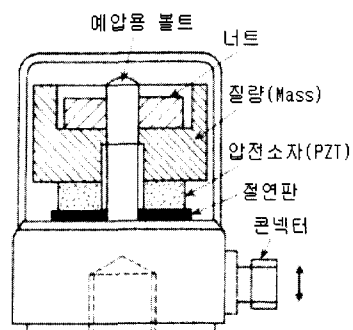


그림 1 가속도계의 구조

그림 2와 같이 기계적인 응력이 가해지면 재료의 표면에 응력에 비례하는 전하가 발생하는 압전효과를 갖는 재질로서 Quartz, Rochelle salts, Tourmaline과 같은 천연 단결정과 BaTiO₃, PZT 등 인공적으로 제조되는 강유전성 세라믹 등의 소재가 사용되고 있다.

4.2 압전소자(Piezoelectric Element)

(1) 압전재료

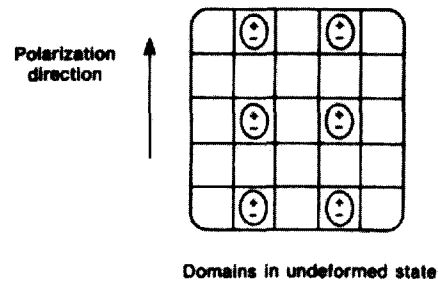


그림 2 압전소자

(2) 압축변형

그림 3과 같이 전하는 분극방향으로 발생하며 아무런 변화가 없는 경우에도 온도 변화로 인해 전하가 분극방향으로 발생하는 결점을 가진다.

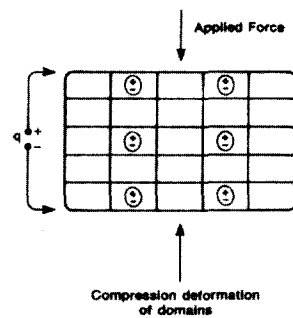


그림 3 압전소자의 압축변형

(3) 전단변형

그림 4와 같이 전하는 분극된 소자의 수직방향으로 발생하며 어떤 온도변화에도 영향을 받지 않는 장점을 가진다.

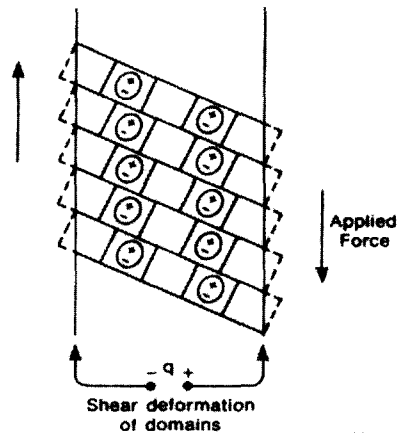


그림 4 압전소자의 전단변형

4.3 관성질량

외부진동력을 압전소자에 전달하는 역할을 담당하며 무거우면 감도는 좋아지나 부착 공진 주파수가 낮아지게 되므로 사용주파수 영역이 줄어드는 단점을 가진다. 재질로는 스텐레스강, 인코넬, 텅스텐, 탄화텅스텐 등을 사용한다.

4.4 베이스

가속도계를 측정표면에 부착시켜 측정물로부터의 진동을 받아들이는 역할을 담당하며 베이스의 크기나 무게 및 측정면과 부착면의 가공도에 따라 가속도계의 감도 및 부착 공진 주파수에 큰 영향을 미치며 재질로는 스텐레스강, 인코넬, 티타늄 등을 사용하고 있다.

4.5 케이스

가속도계 집합체를 덮는 덮개로 집합체를 보호하며 잡음방이나 가속도계를 사용 환경으로부터 격리시키는 역할을 담당하며 재질은 베이스와 같은 종류의 것을 사용하고 있다.

4.6 케이블

가속도계에서 발생한 전기적인 출력을 전증폭기를 통해 진동분석계에 전달하는 역할을 담당하며 잡음감소처리를 한 특수한 케이블을 사용한다. 굽혀지거나 꼬이지 않도록 잘 고정해서 사용해야 하고 설치환경에 따른 적절한 케이블 선택도 중요하다.

4.7 동축연결단자

잡음을 줄이고 정확하고 감도가 우수한 신호를 분석시스템에 보내기 위해 사용하며 적절한 플러그와 잭, 어댑터를 선택하는 것도 중요하며 일반적으로 BNC, TNC, 10-32 UNF를 많이 사용하며 M형, N형도 사용되고 있다.

5. 가속도계의 종류

가속도계는 관성질량이 압전소자에 응력을 전달하는 방식에 따라 압축식(compression type)과 전단식(shear type)이 있으며, 출력신호의 감지 방식에 따라 전하(charge)신호 감지식과 전압(voltage)신호 감지식이 있고, 측정방향에 따라 단축식, 이축식, 삼축식 및 다축식으로 나눌 수 있다.

5.1 압축식 가속도계

(1) Upright 방식

그림 5와 같이 관성질량과 베이스 사이에 압전소자가 위치하는 구조이며 주파수 응답범위가 넓고 큰 충격에 잘 견디지만 열적으로 불안정한 환경에서는 출력신호에 오차를 발생시킬 수 있다.⁽³⁾

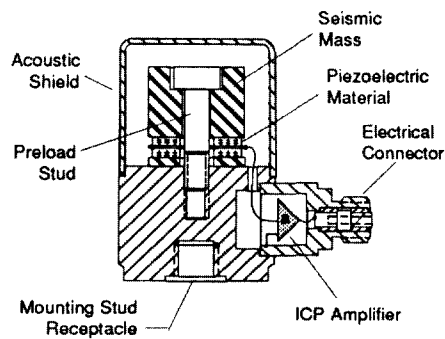


그림 5 Upright 방식

(2) Inverted 방식

Upright 방식에서 문제시된 열적 전이 및 베이스 변형 영향을 줄이고자 베이스와 압전소자가 서로 격리되도록 설계한 구조이다.

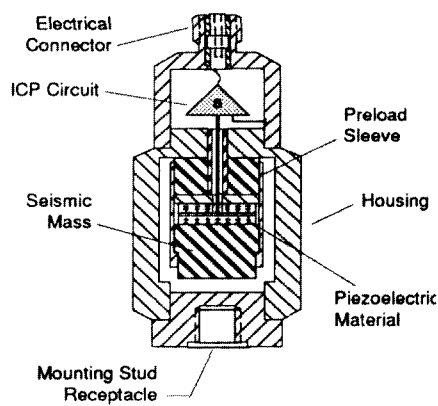


그림 6 Inverted 방식

(3) Isolated 방식

이 구조는 압축식의 단점인 열적 전이와 베이스 변형으로 인한 잘못된 출력을 줄이기 위한 형태로 와셔가 사용되며 속이 빈 관성질량을 단열장벽으로 사용한 것으로 저주파 영역에서 안정한 거동을 나타낸다.

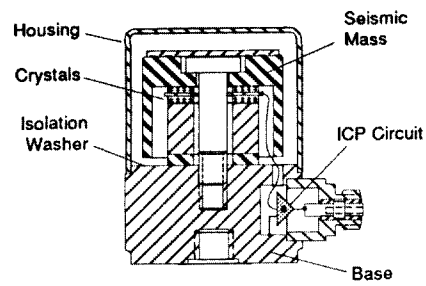
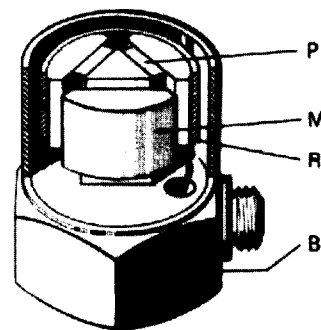


그림 7 Isolated 방식

5.2 전단식 가속도계⁽²⁾

(1) 델타 전단 방식

그림 8과 같이 중심의 삼각기둥 주변에 3개의 관성질량들과 압전소자들이 3각형 배열을 하는 구조로 관성질량에 대한 감도비가 매우 크며 공진 주파수가 높고 베이스의 변형 및 열적 전이의 영향을 적게 받는다.

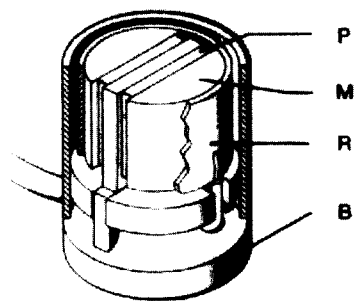


Delta Shear®

그림 8 델타 전단

(2) 평판 전단 방식

그림 9와 같이 두 개의 직사각형 압전판을 사용하여 각각 관성질량과 부착되어 clamp ring으로 고정시킨 구조로 델타전단과 마찬가지로 베이스 변형이나 열적 전이의 영향을 감소시킨 것이다.



Planar Shear

그림 9 평판 전단

5.3 솔림식 가속도계

그림 10과 같이 빔모양의 압전소자를 사용하여 가속되었을 때 변형을 증가시키도록 고안된 것으로 가벼우며 우수한 열적 안정성을 가진다. 주로 저주파, 저중력 가속도계에 사용된다.

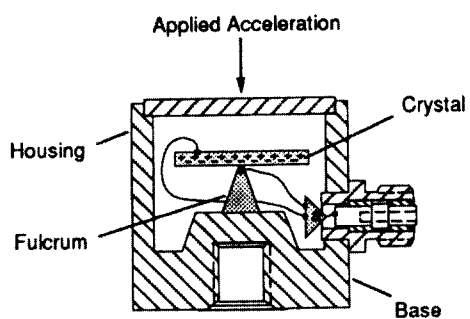


그림 10 솔림식 가속도계

5.4 전하(Charge)신호 감지식

압전소자에서 발생한 높은 임피던스의 신호를 바로 출력신호로 받는 방식으로 정확한 측정을 위해 신호분석기에 신호가 입력되기 전에 낮은 임피던스의 전압신호로 조정되어야 한다. 특별한 저잡음 동축 케이블로 가속도계와 전하 증폭기, 동시 전하 변환기를 연결하여 사용하며 고온의 환경에서 주로 이용된다.

5.5 전압(Voltage)신호 감지식

전하신호 감지방식에서 gain, filtering 및 자기진단 기능을 지닌 신호조정 전자회로를 추가적으로 장착한 방식으로 사용이 간단하며 높은 정밀도를 가지며 폭넓은 주파수 영역을 지닌다. 그러나 내부전자회로의 사용온도가 제한을 받기 때문에 고온용으로 부적합하다.

6. 가속도계의 비교교정

현재 만들어지는 가속도계의 대부분은 그림 11에서와 같이 레이저 간섭계를 이용한 절대교정을 받은 기준가속도계에 의한 비교 교정 방식에 의해 감도가 교정되어 산업현장의 설비 진단에 사용되고 있다.

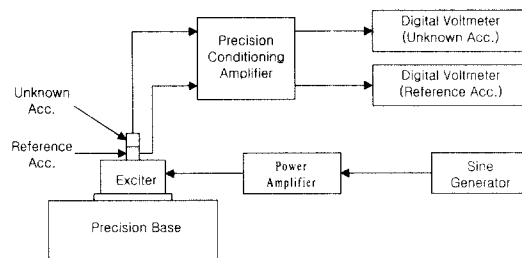


그림 11 가속도계의 비교 교정 방법

기준가속도계의 절대교정은 ISO 5347/1규격에 따라 교정되고 있으며 주파수 범위는 20, 40, 80, 100, 160, ..., 5000 Hz로 규정되어 있다. 이와같이 레이저 간섭계를 이용해 절대 교정된 결과를 이용하여 그림에 서와 같이 가진기에 2개의 가속도계를 back to back 결합하여 교정하게 된다.

7. 맺음말

지금까지 현재 산업현장에서 사용되는 가속도계의 특징과 그 원리 및 구성 요소와 가속도계의 종류를 알아 보았으며 마지막으로 비교 교정 방법에 대해 살펴보았다. 이와 같이 다양한 종류의 가속도계는 그 환경에 따라 선택되어지며 사용자는 총

분히 사용환경에 적합한 것을 선택하여 보다 정확한 정보를 얻는데 초점을 가져야 할 것이다. 모쪼록 이 글이 가속도계에 관심있는 분들께 조그마한 도움이 되길 바라는 바이다.

참고문헌

- (1) 구경희, 1989, "압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정", 한국과학기술원, 석사학위논문.
- (2) B & K, 1987, "Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers".
- (3) PCB, 1993, "Vibration & Shock (Sensor selection guide)".