

# 진동을 이용한 설비진단 3

## - 데이터 수집 -

Mechanical vibration data acquisition

정정호/공학박사 · 선임연구원

기계설비의 진동데이터는 기계의 진동을 전기적인 신호로 변환하는 센서로부터 얻어진다. 얻어진 신호의 정도는 센서 종류, 부착방법 및 부착장소에 크게 의존한다. 진동측정은 기계의 감시, 이상의 진단, 상태의 평가 및 승인시험(acceptance test)을 수행할 때에 수행된다. 진동을 이용한 설비진단 시 품질이 높은 데이터를 얻기 위해 사전에 진동의 성질, 사용되는 측정기기 및 측정목적(감시, 진단, 상태평가 혹은 승인시험) 등을 이해하여야 한다.

이를 위해 진동측정(변위, 진동 속도 및 진동 가속도), 센서의 부착방법 및 부착장소 선정에 관하여 알아보고자 한다. 측정 데이터를 수치화하여 기록하지만, 분석과 평가에 사용될 수 있도록 샘플링 주기와 수를 고려하여 데이터를 취득하여야 한다.

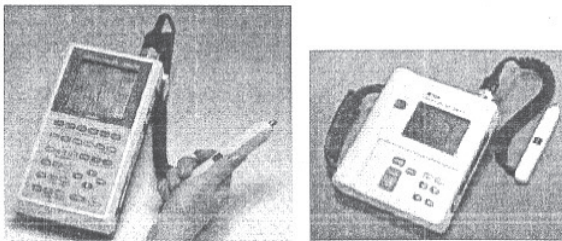


Figure 1. Data acquisition unit

### 1. 진동의 종류 선택

Figure 2는 진동속도가 전 주파수 범위에서 1 mm/s로 일정한 경우의 진동변위와 진동가속도의 관계를 나타낸 것이다. 159 Hz의 교점에서는 진동속도가 1 mm/s이

고, 변위는 1  $\mu\text{m}$ , 진동가속도는 1  $\text{m/s}^2$ 이다.

1 Hz에서 진동속도가 1 mm/s라면, 변위는 160  $\mu\text{m}$ 로 큰 진폭이 되지만, 진동가속도는 6.3  $\text{mm/s}^2$ 로 작은 값이다. 다음으로 10 kHz에서는 변위가 16 mm로 매우 작은 진폭이지만, 진동가속도는 6.3  $\text{mm/s}^2$  큰 값이 된다.

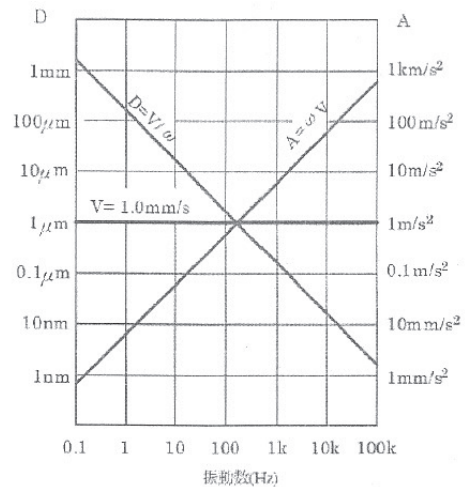


Figure 1. Data acquisition unit

Table 1. Measurement of mechanical vibration

진동의 종류		주파수 범위	물리적 파라미터	응용
변위	상대 변위	0 ~ 10000 Hz	운동과 응력	하우징과 회전축 사이의 상대 운동
	절대 변위	0 ~ 20 Hz	운동과 응력	구조물의 운동 및 진동
진동 속도		10 Hz ~ 1000 Hz	에너지와 피로	일반적인 기계 상태, 중간 주파수 대역의 진동
		> 1000 Hz	힘	일반적인 기계 상태, 중간 및 높은 주파수 대역의 진동

주파수가 낮은 진동은 변위로 측정을 하고, 주파수가 높은 진동은 진동가속도로 측정하는 것이 좋다는 것을 이해할 수 있다. 대체로 주파수가 1 kHz 이상의 진동은 진동가속도를 측정하고, 1 kHz이하의 진동은 변위를 측정하는 것이 권장된다. 진동속도는 10 Hz에서 1 kHz 사이의 진동을 측정하는 경우 사용된다. 측정목적과 사용하는 주파수 범위는 Table 1과 같다.

진동변위는 위치가 변하는 것을 의미하고, 위치의 변화량은 운동의 양으로 나타낼 수 있다. 진동속도는 피로의 양을 표시하는 것으로 취급할 수 있다. 진동가속도는 진동하고 있는 물체에 가해지는 힘의 양을 표시하는 것으로 나타낼 수 있다.

변위의 절대치는 진동하고 있는 물체에 센서를 부착하여 측정한다. 변위는 진동 가속도를 측정하고 두 번 적분하여 변위로 변화해서 측정된다. 변위를 직접 측정하는 센서로는 와전류식 변위센서가 있고, 넓은 진동수 범위를 비접촉으로 측정할 수 있다. 이 센서를 이용하여 베어링과 회전축의 틈새(clearance) 등을 측정할 수 있다. 미끄럼 베어링에서 케이싱과 회전축사이의 상대변위를 감시하기 위해 와전류식 변위센서를 상시 설치하는 경우가 많다.

회전축의 구조적인 응력을 측정하기 위해서는 회전축 변위의 절대치를 측정해야만 한다. 이 회전축의 절대변위 측정은 와전류식 변위센서로 베어링과 회전축의 상대변위를 측정하고, 와전류식 변위센서를 설치한 베어링의 변위를 사이즈 모형식(지진계)의 센서로 측정하고 보간하는 것으로부터 측정할 수 있다.

기계에서 발생하는 음향방사에 관련한 목적으로 진동을 측정할 때에는 진동속도를 이용한다. 오래전부터 청진봉으로 기계의 이상 음(abnormal sound)을 듣고 진단하는 경험이 풍부한 정비기능자가 있다. 청진봉 대신에 진동계를 사용해서 출력을 리시버(receiver)에 연결하여 음을 듣는 경우, 진동의 종류를 진동속도로 하는 것으로 청진봉과 다르지 않은 음을 듣는 것이 가능하다. 일반적인 기계진동의 감시와 분석에는 10 Hz ~ 1 kHz 범위의 진동속도의 측정을 한다. 10 Hz ~ 1 kHz 범위의 진동속도 실효치나 피크치는 주파수를 고려하지 않

고 상태를 대략 파악하는 경우에 사용할 수 있고, 편리한 측정방법이다. 대개의 데이터 수집기는 진동가속도를 측정하고 적분하여 진동속도로 변환하고 있다.

이와 같이 주파수에 따라 측정하는 진동의 종류를 선택한다. 측정하는 진동의 종류는 센서로 결정하는 경우도 있다. 센서의 성능에는 한계가 있고, 반드시 이상적인 측정이 가능한 것은 아니다.

기계설비의 고장에는 여러 종류가 있지만, 그 중에서 많이 발생하는 고장으로는 불평형(unbalance), 정렬불량(misalignment), 거더(guider) 등이 있고, 파손되는 부품은 구름베어링과 기어가 가장 많다. 불평형, 정렬불량 및 거더는 구조계 이상으로 불러진다. 구조계 이상의 경우에 발생하는 진동은 주축의 회전성분과 이의 고차 조화성분을 포함하는 경우가 많다. 경우에 따라서는 분수조화성분을 포함하는 경우도 있지만 드물다. 구조계 이상의 진동을 측정하는 경우는 1 kHz 이하의 진동속도를 측정한다.

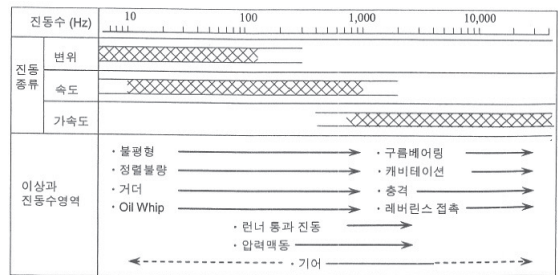


Figure 3. Frequency and vibration

기어에서 금속 접촉이 있는 고장의 진동을 측정하는 경우는 구름베어링과 같이 높은 주파수영역을 측정하는 일도 있지만, 기어 맞물림 주파수(gear mesh frequency)의 3배 정도의 주파수영역을 측정하는 경우가 많다. 드물지만 기어가 편평 마모 되었을 경우 또는 기어의 회전중심이 어긋나 편심되었을 때는 수십 Hz 또는 수 Hz로 낮은 주파수의 진동을 발생한다. 기어의 상태감시는 광범위한 영역의 진동을 감시해야만 한다. Figure 3에 진동수와 진동의 종류 및 기계설비 이상의 관계를 나타낸다.

## 2. 진동 센서

진동의 정보는 기계에 설치한 진동검출기로부터 얻어진다. 진동검출기는 진동센서, 진동변환기(transducer) 또는 진동트랜스듀서, 진동픽업(pick-up), 변위계, 진동속도계, 진동가속도계 등의 다양한 방법으로 불리고 있으며, 일반적으로 총칭하여 진동센서(vibration sensor)라 부르기도 한다.

진동센서는 기계진동을 전기신호로 변환하는 것이다. 진동을 검출하는 센서에는 Table 2와 같이 변환 성능이나 변환 방법이 다른 것이 있다. 이들 센서로부터 기계의 운전상태 확인이나 이상 진단 및 식별을 위한 파라미터 등 상태감시에 필요한 정보가 얻어진다.

이들 센서의 중요한 성능으로서, 측정대상의 진동체에 센서를 고정하거나 접촉시켜서 측정하는 접촉방식과, 진동체와는 별개의 장소에 설치하고 떨어져 진동을 측정하는 비접촉방식이 있다. 측정이 가능한 주파수가 DC 영역 측정이 가능한 것과, DC 영역 측정이 불가능한 것도 있다.

측정하는 진동과 실시하는 분석방법이 센서의 선택에 영향을 미친다. 진동센서는 감도, 주파수 응답 특성, 크기, 측정방법, 기계의 성능과 운전속도를 고려하여 선택하지만, 측정 환경이나 경제성도 고려하여야 한다.

Table 2. Performance of vibration sensors (ISO 13373-1)

진동의 종류	센서 종류	성 능	
진동변위	와전류식	비접촉	(DC) 0 Hz ~ 10 kHz
진동속도	동전식		1 Hz ~ 2 kHz
진동가속도	압전식		0.1 Hz ~ 30 kHz

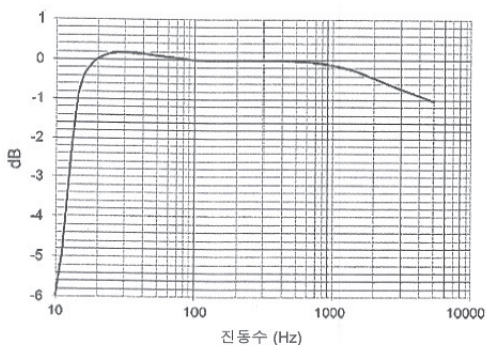


Figure 4. Frequency response of vibration velocity sensors

주파수 응답 특성이란 센서를 포함한 측정기에 소정의 주파수 입력(전압 또는 진동)을 주고 어떠한 측정 결과가 얻어지는지를 주파수 대 진폭 곡선 또는 표로 나타낸 것이다. 진동을 측정하는 경우에는 측정된 진동 크기에 비례하는 전기신호가 얻어지고, 전 주파수 영역에서 평탄한 주파수 응답 특성을 갖는 진동센서가 바람직하지만, 이러한 이상적인 센서는 존재하지 않는다. Figure 4에 나타난 진동속도센서의 주파수 응답 특성은 평탄하지 않다. 20 Hz 이상의 주파수에서는 평탄하지만, 낮은 영역의 주파수에서는 감소되고 있다. 만일, 이 센서를 전 주파수범위에서 20 mV(mm/s)의 감도를 갖는 것으로 하여 사용한다면, 낮은 주파수 진폭은 실제 값보다 작은 진폭을 갖는 것으로 측정된다. Table 4에 나타난 주파수 응답 특성을 갖는 진동속도센서는 센서 제작사로부터 제공되는 전형적인 것이다. 센서의 감도(Sensitivity)는 8 V/mm, 20 mV(mm/s), 10 mV(mm/s<sup>2</sup>)와 같다. 소정의 진동을 입력했을 때의 출력으로 결정된다. 1 공학단위에 대한 출력이 높은 전압일수록, 해당 센서는 예민하고 감도가 높다는 것을 나타낸다.

### 2.1 와전류식 변위센서

증기터빈이나 원심압축기와 같이 미끄럼베어링으로 지지된 대형 회전기계의 상태감시나 진동진단을 위해서는 회전축의 진동측정은 불가피하다. 이러한 용도에서 일반적으로 회전축의 거동을 측정하기 위해 비접촉 진동센서가 사용된다. 이 진동센서로서 기계 오일이 비산할 수 있는 환경에서도 영향을 받지 않는 와전류식 변위센서가 사용된다. 일반적으로 회전축의 진동 측정용 와전류센서는 API 670 규격을 만족하는 경우가 많고, 센서는 축에서 1.2 mm 전후의 거리에서 베어링 하우스에 고정되고, 회전축과 베어링의 상대적인 진동을 측정한다.

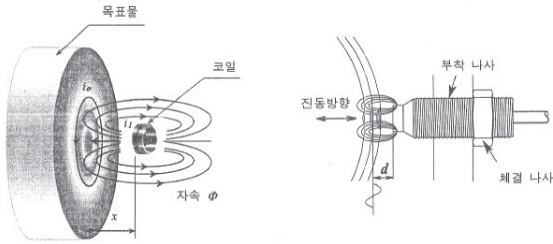


Figure 5. Eddy current displacement sensor

와전류식 변위센서의 원리를 Figure 5에 나타낸다. 와전류식 변위센서로 변위를 측정하는 대상물은 전기 저항이 작은 금속물체여야만 한다. 와전류식 변위센서는 원통의 선단에 센서코일을 넣고 밀봉한 것이다. 와전류식 변위계는 센서부와 발진회로, 공진회로, 검파회로 등의 전자회로가 들어있는 변환기 및 센서부와 변환기를 연결하는 전용 케이블로 구성된다.

센서코일은 변환기의 발진회로에 의해 수 MHz 고주파로 여기되고, 이것에 의해 센서코일에서 고주파의 자속이 발생된다. 자계 중에 목표물(target)이 되는 금속물체를 놓으면, 금속 물체 표면에 와전류가 발생한다. 와전류의 크기는 센서코일과 금속사이의 거리에 따라 다르며, 거리가 가까우면 와전류는 많아지고 멀게 되면 적게 된다. 와전류의 방향은 Figure 5와 같이 센서 코일에 흐르는 전류의 방향과는 역 방향으로 되기 때문에 센서코일의 자속밀도를 감소시키는 효과로 나타난다. 와전류의 크기에 따라서 센서코일의 임피던스가 변화되는 것과 등가인 현상으로 된다. 변환기의 공진회로에서 센서코일의 임피던스를 전압으로 출력하고 검파회로에서 거리에 대한 직류 전압으로 변환하고 있다. 그 특성의 예를 Figure 6에 나타내었다.

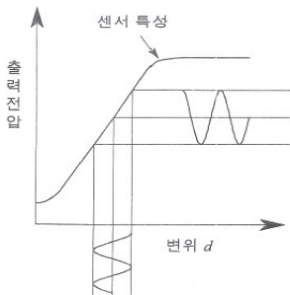


Figure 6. Characteristics of eddy current displacement sensor

와전류식 변위센서의 출력은 센서와 금속물체 사이의 거리에 비례하므로 금속 물체가 정지해 있어도 출력을 얻을 수가 있고, 직류(DC) 성분의 측정이 가능한 센서이다. DC 성분은 축의 위치를 나타내고, 교류(AC) 성분은 진동을 나타낸다.

일반적으로 와전류식 변위센서의 감도는 센서와 금속물체 사이의 간격이 0 ~ 2 mm인 범위에서 8 mV/μm 정도이다. 와전류식 변위센서는 구조가 간단하고 견고하므로 신뢰성이 높고, 주파수 대역이 DC ~ 10 kHz로 넓으나, 온도나 선형성 등 특성이 안정적이라는 등의 이점이 있다. 사용 온도범위는 통상 30 °C ~ 150 °C 정도이지만, 세라믹을 이용한 센서는 800 °C까지 사용할 수 있는 고온용 센서도 있다.

변환기에 전자회로가 포함되어 있기 때문에 회부로부터 전원 공급이 필요하다. 와전류식 변위센서의 원통은 금속으로 되어 있지만, 이와 같은 변위센서는 도전체로 둘러싸여 실드(Shield)되고 접지(도선으로 지구에 연결하는 것)되어야 한다. 센서부와 변환기를 연결하는 케이블은 센서코일 + 케이블의 회로정수 (L, C, R)에 대해서 조정되어져 있기 때문에, 회로정수가 변경될 수 있는 케이블의 종류나 길이는 변경할 수 없다. 또한, 센서코일에서 고주파의 자속이 발생하므로 2개의 센서를 근접시키면 서로 간섭하여 고주파의 주파수 차이에 의한 울림(beat) 신호가 측정 파형으로 나타나기 때문에 센서 진경의 3배 이상 떨어져서 설치하여야 한다.

와전류식 변위센서는 금속 물체 표면에 와전류를 발생시키고, 발생된 와전류를 이용하여 센서와 금속물체 사이의 거리를 측정하는 것이 가능하다고 설명하였다. 이를 응용하여 베어링에서 비접촉으로 회전하고 있는 회전축과의 상대진동을 측정하고 있다. 베어링 하우징에 고정되어 있는 센서와 회전하고 있는 축과의 상대거리가 변화하고 있고, 이에 따라서 회전축 표면에 발생하는 와전류도 변화하기 때문이다.

와전류를 변화시키는 원인은 센서와 회전축 사이의 거리만이 아니다. 와전류식 변위센서가 발생시키는 와전류의 투자율(permeability)이나 도전율(Electrical conductivity)이 고르지 못해 잔류자기가 잔류응력이



있으면 회전축의 1회전에 따른 출력이 와전류식 변위센서에 발생한다. 이러한 현상으로 전기적 런아웃(electrical runout)이라 하며, 와전류식 변위센서를 이용한 축 진동 측정의 오차요인이 되고, 측정되는 진동의 최소치와 분해능에 영향을 미친다. 와전류식 변위센서의 출력은 금속 물체의 재질에 따라 다르기 때문에 동일한 재질로 교정 작업(calibration)을 할 필요가 있다.

## 2.2 동전식 진동속도센서

Figure 7에서와 같이 자석에는 N극과 S극이 있고, 그 사이는 자력이 작용하는 장소로 되어있다. 이것을 자장(magnetic field) 또는 자계라 부른다. 이 자계의 가운데를 자력선에 수직으로 도전체를 통과시키면 플레밍의 오른손 법칙에 따라서, 그 도전체의 양단에 전압이 발생한다. 이 도전체에 발생하는 전압  $e$ 는 자석의 자계 자속밀도와 도전체의 통과속도  $v$ 에 비례한다. 이 원리를 응용한 진동센서를 동전식 진동속도센서라 하며, Figure 7에 그 원리를 그리고 Figure 8에 구조를 나타낸다.

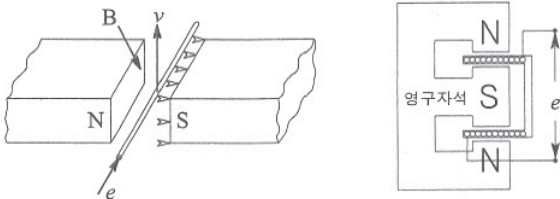


Figure 7. Theory of dynamic vibration sensor

동전식 센서는 Table 2의 내용과 같이 진동속도를 측정하는 센서이지만, 진동하고 있는 물체에 접촉시키거나 고정하여 사용한다. 동전식 진동속도센서는 DC 성분의 측정은 불가능하다. 동전식 센서의 이점은 출력 임피던스가 낮기 때문에, 긴 케이블로 멀리까지 가설하는 것이 가능하며 노이즈로 인한 문제가 적다는 것이다. 동전식 센서는 전원 공급이 필요 없는 자기발전형이기 때문에, 출력전압이 10 mV(mm/s) ~ 100 mV(mm/s)로 고감도이고, 전치증폭기(preamplifier)가 필요 없다. 진동속도센서의 출력을 오실로스코프나 분석기에 직접 연결하여 파형 관측과 주파수 분석이 가능하다. 센서의 출력

은 진동속도이므로, 미분하면 진동가속도가 얻어지고, 적분하면 진동변위가 용이하게 얻어진다.

사용 주파수 범위가 10 Hz ~ 2000 Hz로 한정되고, 측정 주파수 범위가 좁다는 것이 단점이라고 할 수 있지만, 구조계의 이상 진단에는 충분한 성능이다. 진동가속도센서를 이용한 진동측정에서는 높은 주파수 영역의 진동가속도가 크기 때문에 측정범위를 높게 설정하지 않으면 안 되고, 낮은 주파수 영역의 작은 진동속도 및 변위를 측정할 수 없는 경우가 다. 동전식 진동속도센서를 이용한 진동 측정에서는 상한 주파수 범위가 낮기 때문에 낮은 주파수 영역의 측정이 가능한 것이 장점이다.

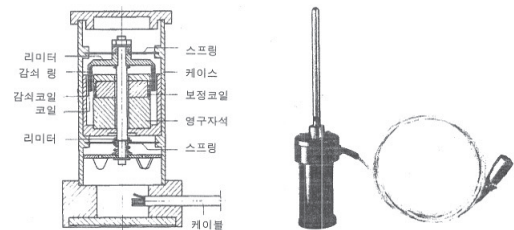


Figure 8. Structure of dynamic vibration sensor

회전축 진동을 직접 측정하는 경우에는 선단에 V자형의 홈을 갖는 목재로 만든 간단한 진단 도구에 진동속도센서를 부착하고, V자 부분을 회전축에 접촉시켜 측정한다. 이때 회전축 표면에 키 홈이나 다른 변형 부분이 있으면 위험하므로 주의해야 한다.

동전식 진동센서는 원통코일을 스프링으로 매단 사이즈모계의 구조를 하고 있다. 구조공진은 20 Hz 이하이지만, 낮은 주파수 영역에서는 위상 특성이 나쁜 단점이 있다. Figure 8에 나타난 것처럼 영구자석을 이용하고 있기 때문에, 진동센서의 중량이 무겁고 소형화가 어렵다.

## 2.3 압전식 진동가속도센서

기계설비의 이상 진단에 가장 널리 사용되는 센서는 압전식 진동가속도센서(piezoelectric acceleration sensor)이다. 시판되는 수집기에 부착되어 있는 센서는 작고 주파수 응답 특성이 좋으며, 긴 수명에 감도가 높다는 등의 이유로 압전식 진동가속도센서가 많이 사용

된다. 압전식 진동가속도센서는 진동 검출소자로 압전 재료(piezoelectric material)를 이용한 센서로서, 진동체에 고정 또는 접촉하여 진동가속도를 검출하는 것이다. 가속도에는 중력이나 원심력과 같이 항상 일정한 DC 성분의 가속도와 진동처럼 언제나 변화하고 있는 변동성분의 가속도가 있다. 압전식 가속도센서는 DC 성분 가속도는 측정할 수 없다.

수정(crystal)에 기계적인 변형을 가하면 전하(전위)가 발생한다. 이 현상을 압전효과(piezoelectric effect)라 하고, 이러한 현상을 일으키는 물질을 압전재료라 한다. 압전재료는 수정 외에 폴리불화비닐라덴(PVDF) 박막이나 지르콘산, 티탄산, 납(PZT)을 주성분으로 하여 소결한 세라믹이다. 진동가속도센서로 사용되고 있는 압전재료는 세라믹이 많지만, 수정을 사용한 센서도 있다. 이 두가지 압전재료의 차이는 온도특성이다. 최근 수정에 뒤떨어지지 않는 온도의존성이 적은 재료나 퀴리점(압전성을 잃어버리는 온도)이 높은 세라믹 재료가 개발되어 있고, 낮은 가격에 고출력을 얻는 이점 때문에 세라믹을 이용한 진동가속도센서가 사용된다.

소결만으로는 세라믹 결정립(grain)의 압전 방향이 여러 방향으로 향하고 있어, 그대로는 압전효과가 얻어지지 않는다. 압전효과를 얻기 위해서는 압전재료에 고전압을 가하여 분극을 행하고, 결정립의 압전방향을 정렬시킬 필요가 있다. Figure 9에 나타난 것처럼 세라믹의 두께 방향으로 분극(화살표 방향)을 하고, 동일하게 두께방향으로 세라믹을 압축하도록 진동 힘을 가하는 구조의 센서를 압축형(compression type) 진동센서라 한다. 또한 세라믹의 길이방향으로 분극하여 세라믹이 전단변형을 하도록 진동 힘을 가하는 구조의 센서는 전단형(shear type) 진동센서라 한다.

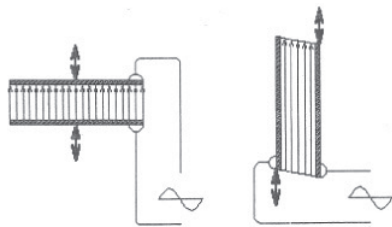


Figure 9. Vibration direction of piezoelectric acceleration sensor

압축형 센서는 구조가 간단하므로 비교적 저가이다. 그러나 압축형의 단점은 주위 온도의 급격한 변화에 대한 영향을 받기 쉽다는 점이다. 예를 들면 바람이 불던지 강한 빛을 받으면 낮은 주파수의 잡음이 발생하고, 낮은 레벨의 진동측정이 곤란하게 된다. 이를 Pyro 현상이라 하며, 세라믹의 압전소자에 급격한 온도변화를 주면 소자의 분극 상태가 순간적으로 변화하여 전압이 발생하는 현상이다. 압축 구조는 분극 방향과 출력을 내는 전극 방향이 일치하기 때문에, 높은 주파수 영역에서는 영향이 적다. 따라서 구름베어링과 기어 등의 마무계의 이상 진단에는 1kHz 이상의 진동가속도를 측정하기 때문에 압축형 진동가속도센서를 사용할 수 있다.

전단 구조의 센서는 분극 방향과 전극 방향이 직교하고 있기 때문에 Pyro 현상이 극히 작다. 따라서 진동속도나 변위를 측정하여 구조계의 이상을 진단하는 경우에는 전단형 진동센서를 사용하는 것이 바람직하다. 전단형 진동센서를 사용하므로 센서의 온도 변화에 대한 Pyro 현상을 이상 진동으로 잘못 파악할 위험을 피할 수 있다. 전단형 가속도센서는 압축형에 비해 소형이고 또한 고감도이다. 압축형 가속도센서의 예 및 전단형 가속도센서를 Figure 10에 각각 나타낸다.

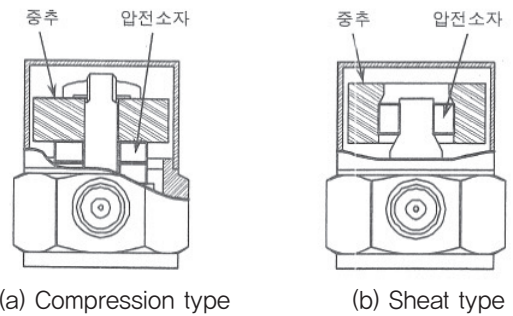


Figure 9. Structure of piezoelectric acceleration sensor

수정은 완전한 결정체이므로, 압전 세라믹과 같은 Pyro 현상은 발생하지 않는다. 수정을 사용한 진동가속도센서는 신뢰성이 높지만, 검출감도가 낮은 단점이 있다.

압전식 진동가속도센서는 진동에 대응하는 전기적인 출력을 발생한다. 압전식 진동가속도센서 중에는 저 출

력 임피던스를 목적으로 증폭기를 내장하는 것도 있지만, 대부분의 압전식 진동가속도센서는 압전소자에서 발생한 전기적인 출력을 그대로 발생하고 있다. 압전식 진동가속도센서의 감도는  $5.3 \text{ pC}/(\text{m}/\text{s}^2)$ 과 같이 전하량으로 표시하고 있다. 이를 전하감도(charge sensitivity)라 한다. 전하감도는  $1 \text{ m}/\text{s}^2$ 의 가속도에 대해서 발생하는 전하 C(쿨롱)의 정도이지만, 발생하는 전하가 극히 작기 때문에 실용적으로는 pC(1 pico Coulomb =  $10^{-12} \text{ C}$ )의 단위가 사용된다.

압전식 진동가속도센서의 출력은 극히 높은 임피던스이므로, 케이블 노이즈가 발생하기 쉽고 전달거리가 짧은 단점이 있다. 이것을 해소하기 위해 전하증폭기(charge amplifier) 또는 전압증폭기(voltage amplifier)를 통해서 낮은 임피던스로 변환해야만 한다. 데이터 수집기에 부착되어 있는 센서는 증폭기를 내장하고 있는 것이 많다.

진동가속도센서는 중추(weight)에 작용하는 힘을 검출하는 것으로 진동을 측정하지만, 중추를 제거하고 압전재료의 양측에 가해지는 힘을 직접 측정하도록 한 것이 힘 센서(force sensor)이다. 힘센서로 모드 해석용의 충격해머(impact hammer) 등이 있다.

#### (1) 감도와 주파수 영역

진동센서는 금속이나 세라믹 등의 부품을 조립한 구조물이므로 구조적인 고유주파수가 존재한다. 이를 진동센서의 구조공진이라 한다. 일반적으로 진동센서의 구조공진 주파수는 카탈로그 등에서 언급하고 있는 측정 가능한 상한주파수의 3배 이상의 주파수에 있다고 보면 좋다. 측정 주파수가 높은 진동센서의 형상은 소형으로 된다. 형상을 소형으로 하면 구조 공진 주파수를 높일 수 있지만, 감도가 저하하는 단점도 있다. 이와 같이 측정 주파수 범위와 검출감도는 서로 상반되는 관계가 있다. 시판되고 있는 대표적인 진동센서의 감도와 측정 주파수 영역의 예를 Figure 11에 나타낸다. 1.2 g의 작은 진동가속도센서는 25 kHz까지의 주파수 특성을 갖지만, 감도는  $0.15 \text{ pC}/\text{ms}^{-2}$ 로 낮다.  $92 \text{ pC}/\text{ms}^{-2}$ 로 진동속도센서와 동일한 정도의 고감도 진동가속도센서

는 390 g으로 무겁고, 주파수 영역도 200 Hz로 좁은 범위 밖에 사용할 수 없다. 진동가속도센서를 선택할 때, 측정하는 주파수 영역과 감도는 중요한 요소이다.

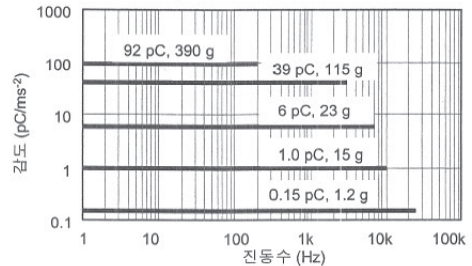


Figure 11. Relation between sensitivity and frequency range of vibration acceleration sensor

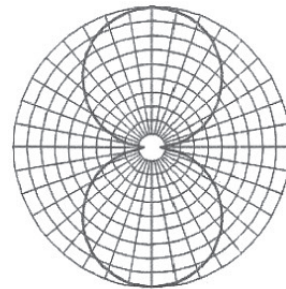


Figure 12. Directivity of vibration sensor

#### (2) 횡감도

진동센서는 하나의 축방향 진동을 측정하도록 제작되어 있다, 이 축을 수감축이라 한다. 압전식 진동가속도센서는 설치 시트와 추 사이에 압전소자를 삽입한 구조로 되어 있고, 압전소자를 삽입하는 방향이 수감축의 방향이다.

한방향으로 일정한 크기로 진동하는 물체(예를 들면 가진기)에 진동센서를 설치하고, 진동센서의 수감축을 회전시키면 Figure 12와 같은 지향 특성을 얻을 수 있다. Figure 12에서 외측의 원은 100%를 표시하고 중심점이 0%를 나타낸다. 진동센서는 한 방향만의 진동을 측정하기 때문에 횡으로 하면 진동을 측정하지 못하므로 지향특성은 8자와 같이 그림의 중심점에서 교차해야만 하지만, 실제 진동센서는 조금 진동을 감지하므로 지향특성은 중심점에서 교차하지 않고 open 특성으로 된다.

횡감도라는 것은 수감축의 감도를 100 %로 했을 때 직각방향의 감도 비를 말한다. 그림 12는 횡감도가 5 %인 예를 나타내고 있다. 횡감도가 5 %인 진동센서를 이용해서 진동을 측정하는 경우, 측정하고자 하는 수감축 방향의 진동이  $0.5 \text{ m/s}^2$ 이고, 수감축과 직각인 방향의 진동의  $10 \text{ m/s}^2$ 이라고 가정한다. 수감축방향의 진동성분  $0.5 \text{ m/s}^2$ 과 직각인 진동성분  $10 \text{ m/s}^2$ 의 5 %, 즉  $0.5 \text{ m/s}^2$ 도 동시에 검출된다. 이때 진동센서는  $0.71 \text{ m/s}^2$ 이 ( $= \sqrt{0.5^2 + 10^2}$ )의 진동을 검출하므로 수감축방향의 진동성분  $0.5 \text{ m/s}^2$ 에 대해서 측정오차가 + 41 %로 된다. 횡감도 5 %의 진동센서를 이용하여 진동을 측정하는 경우, 수감축 방향의 진동에 대해서, 횡방향 진동의 크기가 6배 이내라면 측정오차를 5 % 이하로 할 수 있다. 일반적으로 측정오차가 5 % 이하라면, 실용적인 범위라 할 수 있다.

### 3.진동센서의 선택

진동센서의 선택에서 중요한 것은 진동센서의 주파수 응답 특성, 신호 대 잡음비(S/N비), 센서감도 미 측정하는 신호의 강도이다. 센서의 주파수 범위는 기계에서 발생하는 주파수를 담당하는 범위가 되어야 한다.

데이터 수집기에는 진동센서가 부착되어 있지만, 이 센서는 손으로 누르는 식(hand-held type) 또는 자석(magnet) 방식의 진동가속도센서가 많다. 진동센서로 측정 가능한 주파수 범위 이외의 주파수를 측정하는 것은 불가능하므로, 사용하는 데이터수집기용 진동센서의 주파수 응답 특성을 사전에 제작사의 시방서나 문의 등을 통하여 확인하여야 한다. 데이터 수집기에 부착되어 있는 진동가속도센서는 통상 6 kHz ~ 8 kHz 정도의 주파수까지 측정할 수 있도록 되어 있다.

데이터 수집기는 진동가속도를 측정하지만, 내부에 적분기능을 갖고 있어 진동속도 값을 읽을 수 있도록 되어 있다. 적분기 자체도 주파수응답특성을 갖고 있어 수 Hz의 낮은 주파수에서는 기능을 하지 않는다.

데이터 수집기에는 진동센서, 트리거(trigger) 기기, 프린터 또는 컴퓨터 등과 연결하기 위해 많은 케이블이

사용된다. 이들 중에서 진동센서와 연결하는 케이블 또는 트리거 기기와 연결하는 케이블이 단선되어 측정이 불가능한 경우도 있다. 진동센서의 케이블은 표준의 단단한 동축 케이블(coaxial cable)보다도 사용이 쉽도록 컬 코드(curl code)를 사용하는 경우가 많다. 컬 코드 내에는 여러 개의 도선이 들어 있지만, 개개의 도선은 가늘고 유연하기 때문에 사용 중이나 또는 상자에 넣어 운송하는 도중에 단선되는 경우도 있다. 커넥터가 부착되어 있는 터미널 부분이 약하므로 조심하여 다룰 필요가 있다. 통상은 케이블의 터미널 부분을 보강하기 위해 몰드를 성형하고 있다. 몰드 성형한 케이블은 커넥터 부분의 개방이 어렵기 때문에 단선이 되면 수리가 불가능하다. 측정에 약간 의문이 있을 때나 측정 시간에 쫓겨서 실패할 수 없는 경우를 고려하여 센서 케이블만은 예비 케이블을 보유하는 것이 권장 된다.

진동측정은 진동체와 진동센서가 일체로 되어 진동하는 것을 전제로 한다. 이 때문에 진동센서를 진동체에 나사로 고정하든지, 손으로 눌러서 접촉시킬 필요가 있다. 설치나 접촉도 기계적인 결합이기 때문에 고유 주파수가 존재한다. 이를 설치공진 또는 접촉공진이라 한다.

설치 공진 주파수가 낮으면 측정 가능한 주파수 범위가 좁아지고, 측정하고 싶은 주파수 영역의 진동을 측정할 수 없게 된다. 진동측정에서는 필요한 주파수 범위가 평탄한 주파수 응답 특성으로 되도록 설치방법을 선택할 필요가 있다. 적극적으로 설치공진 주파수를 이용해서 측정을 하는 사례도 있지만, 일반적으로 설치공진 주파수의 1/3 영역까지가 평탄한 주파수 응답 특성을 나타내고 계량적으로 높은 정밀도의 측정이 가능한 주파수 영역이다. 설치공진 주파수는 설치면의 넓이와 스프링 정수(stiffness)로 결정되고, 견고하게 결합되어 있는 편이 공진 주파수가 높게 된다. 설치공진은 설치방법이나 접촉방법에만 의존하는 것이 아니고 진동센서 무게와 설치 표면의 거칠기에도 의존한다. 진동센서가 가벼우면 설치공진 주파수가 높게 된다. 설치 표면의 면 거칠기(surface roughness)가 작으면 진동체와 진동센서의 접촉 면적이 증대하여 스프링 정수가 크게 되고 설치공진 주파수가 높게 된다. 스프링 정수를 높이기 위해



접촉면에 왁스나 그리스와 같은 것을 얇게 도포하여 접촉면을 증가시키는 것도 효과적인 방법이다.

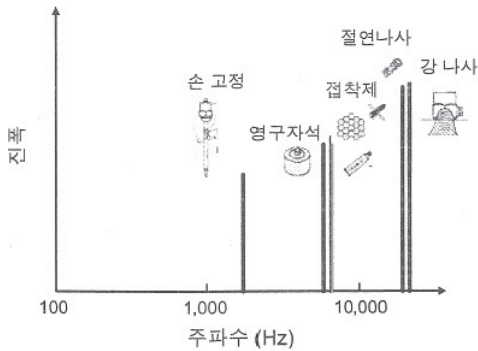


Figure 13. Contact resonance of piezoelectric acceleration sensor

Figure 13에 질량 23 g의 진동가속도센서를 다양한 설치 방법을 이용했을 때의 접촉공진의 예를 나타낸다. 설치방법은

- ① 나사로 고정
  - ② 순간접착제로 고정
  - ③ 양면 접착테이프로 고정
  - ④ 자석(magnet)로 흡착
  - ⑤ 봉 형상의 연결 장치(attachment)로 접촉
- 의 다섯 종류가 있다.

Figure 13에서와 같이 ①의 나사로 견고하게 결합되는 경우의 접촉공진 주파수가 가장 높고, ②의 순간접착제도 동일한 주파수이며, 20 kHz를 초과하고 있다. 이들 방법으로 설치하면 평탄 영역은 7 kHz, 8 kHz이고, 기계의 진동측정에 충분한 주파수 영역을 망라하고 있다고 할 수 있다. ②의 순간접착제를 사용하는 것은 나사 구멍이 없는 경우는 권장 가능한 방법이지만, 이탈할 때에 센서를 파손하는 경우가 많다. ③의 양면 접착테이프를 이용하는 방법은 간편하고 센서의 파손위험이 적지만, 접착부분의 면거칠기가 크면 사용할 수 없다. ④의 자석에 의한 흡착의 공진주파수는 10 kHz 이하로 되고 평탄영역은 2 kHz ~ 3 kHz 정도로 되지만, 구조계의 이상 진단에는 사용될 수 있는 범위이다. 마모계의 이상 진단에도 7 kHz 정도까지 다룬다면 검출 가능하므로, 기존의 자석 흡착이 사용될 수 있다고 할 수 있다.

자석의 경우도 흡착면의 거칠기와 사용되는 센서의 질량에 의존하므로, 가능한 경량 센서를 사용하고 흡착면의 거칠기와 사용되는 센서의 질량에 의존하므로, 가능한 경량 센서를 사용하고 측정부분을 평면연삭을 하거나 평면연삭 된 부분을 예비 나사로 고정하면 좋다. Figure 13에서와 같이 ⑤의 탐침봉 접촉공진 주파수는 2 kHz 부근이고 평탄영역도 700 Hz까지로, 탐침봉으로 이상 진단을 수행하면 질량 불평형, 정렬불량 등의 구조계 이상의 진단 밖에 사용할 수 없게 된다. 탐침봉은 일반적으로 가속도센서에 봉 형상의 연결 장치를 부가한 구조로써 질량적으로 경량이라고 하기 어렵다. 데이터 수집기에 부착되어 있는 손으로 누르는 형식의 진동센서는 검출부분을 경량화하여 holder와 절연(isolation)하는 등의 고려가 되고 있고, 접촉공진 주파수가 7 kHz ~ 8 kHz로 개선된 것이 많다. 누르는 형식의 진동가속도센서의 특수한 예로, 32 kHz에 구조공진이 있는 센서를 사용하고 접촉공진 주파수의 7 kHz 부근을 대역통과필터(band pass filter)로 제외해서 1 kHz 이하와 20 kHz 이상의 진동을 측정하는 것도 있다. 데이터 수집기에 첨부되어 있는 시방서 데이터로부터 확인할 필요가 있다. 그 외 진동가속도센서를 사용하기 위해서는 제작사로부터 입수할 수 있는 자료, 해설서 등을 활용해야 할 것이다.

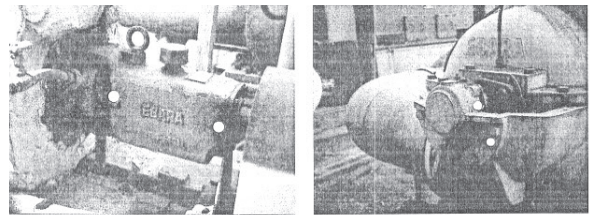


Figure 14. Measurement position marking

데이터 수집기를 갖고 순회하면서 측정하는 경우, 측정위치가 측정할 때마다 변경되어서는 안 된다. 이를 위해 Figure 14와 같이 페인트나 seal로 표시(marking)하여 항상 동일한 부분을 측정할 수 있도록 고려한다. 측정하는 장소의 표면이 도장된 부분, 구조품으로 표면이 까칠까칠한 부분은 진동센서를 부착하는 조건이 변

하고 진동 측정이 재현성이 나빠지기 쉬워 표면을 가공하여 평탄하게 하거나, 평탄한 면을 갖는 와셔(washer)를 용접하거나 접착하고, 이 평탄한 면에서 측정하는 것이 필요하다.