

진동을 이용한 설비진단 IV

- 기계 진동 측정 -

정정호/공학박사·선임연구원

Mechanical vibration measurement

1. 센서의 설치장소

정확한 진동측정의 비결은 기계를 반영하고 있는 장소에 센서를 설치하는 것이다. 데이터 수집기로 측정하는 경우, 진동센서를 설치하는 측정 장소도 동일하다. 진동센서는 물리적으로 가능한 한 베어링에 가까운 위치에 설치하는 것이 좋다. Figure 1은 진동측정을 위해 진동센서를 설치하는 최적 장소를 나타낸다. 베어링 중심선을 통과하는 수평선 및 연직선상에 설치한다. 이와 같이 진동센서의 수감축을 회전축 중심선으로 향하도록 하는 이유는 질량 불평형과 같은 회전축 중심선에서 반경방향의 힘(radial force)에 의한 진동을 검출하기 위해서이다.

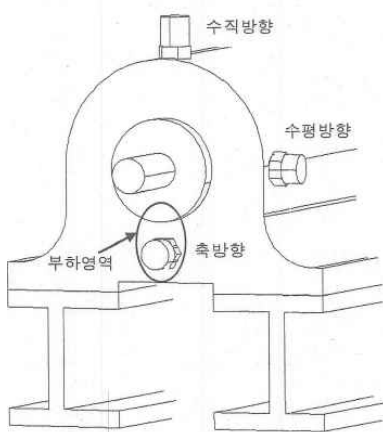
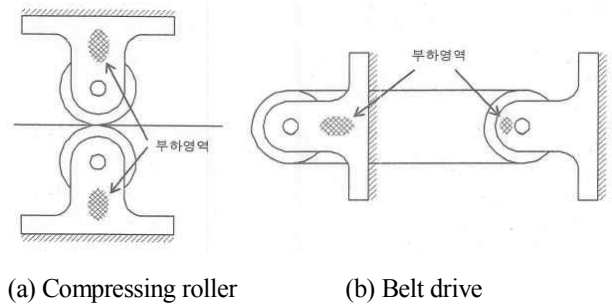


Figure 1. The best vibration measurement position

축방향 힘에 의한 진동은 부하영역(load zone)에서 축방향으로 측정을 한다. 부하영역은 회전체 중량이 관계되는 장소로, 시계의 문자판으로 말하면 6시 방향의 구역이다. Figure 2는 부하영역의 예를 나타낸다.



(a) Compressing roller (b) Belt drive
Figure 2. Location of loaded area

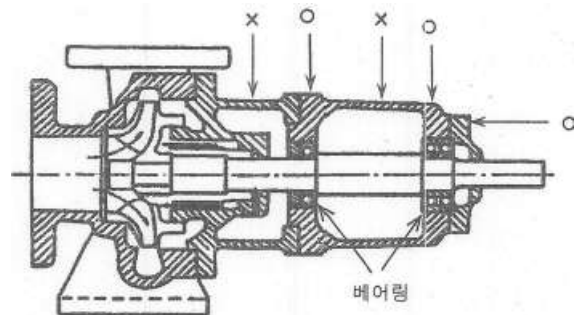


Figure 3. Vibration measurement position

진동센서의 설치는 기계요소의 수납상자나 연결기 그리고 팬의 보호 커버 등으로 인해 반드시 최적인 장소에 설치할 수 없는 경우도 있지만, 센서는 가능한 베어링부근에 설치한다. 진동센서의 설치에 권장되는 장소를 Figure 3에 나타낸다. 베어링의 종류와 수납상자 내부의 상세한 도면을 검토하고, 기계적인 진동이 전파되는 경로를 예상해서 진동센서의 설치장소를 결정한다. 베어링 부근에 진동센서를 설치할 수 없을 때는 검출장소까지 틈새가 없이 진동이 중단되지 않고 전달될 수 있는 견고한 수납상자 위에 진동센서를 설치한다. 절대로 손쉽게 커버 등의 위에서 측정해서는 안 된다. Figure 3의 ○의 장소는 구름 베어링의 진동이 전달되고 있는 측정 장소로서 권장되지만, ×의 장소는 케이스의

윗부분으로 구름베어링의 결합부분에서 발생하는 높은 주파수의 진동 전달이 의심되고 측정점으로서 인정될 수 없는 장소이다.

저속 회전에 무거운 하중이 걸리는 구름 베어링에서 축 중심에서 반경방향의 틈새를 보면, 기계의 부하영역만이 내륜, 전동체, 외륜의 접촉이 있고, 다른 방향은 틈새가 없을 가능성이 있다. 반경방향의 물리적 접촉에 대해서는 접촉각이 0 °인 모든 레디알 베어링으로 전달되는 것으로, 구름 베어링의 이상 진단을 수행하는 경우는 부하영역에서 진동을 측정하는 것이 바람직하다. 레디알 베어링은 전동기나 중소형 송풍기 또는 축방향의 부담이 적은 동력장치 등에서 많이 사용된다.

앵글러 볼베어링과 스러스트 베어링에서 내륜과 외륜은 반경방향과 축방향에서 물리적으로 접촉하고 있다. 이러한 베어링에서 정확한 상태 감시를 위해서는 반경방향 뿐만 아니라 축방향 진동측정이 필요하다. 평기어(spur gear)는 축방향의 힘을 받지 않고 베어링에 전달되지 않지만, 평기어와 기어 장치용 베어링은 축방향의 진동측정을 하여야 한다. 질량 불평형, 정렬 불량, 헐거움, 공진 및 축 휨 등의 이상상태에서는 회전성분의 진동을 발생한다. 회전축의 중심선에 직각인 반경방향의 진동측정은 이러한 상태를 확인하기 위해 필요하다.

2. 측정 주파수 범위

진동 측정에서 overall 진동 크기만을 측정하는 경우도 있지만, 대부분의 경우 동시에 스펙트럼 수집 또는 나중에 스펙트럼 분석을 할 수 있도록 진동파형을 취득한다. 스펙트럼 수집이나 진동파형 취득기능은 데이터 수집기에 준비되어 있다. 스펙트럼 수집 또는 분석용 데이터를 취득할 경우 중요한 것은 주파수 상한과 분해능을 고려하는 것이다.

취득하는 주파수의 상한에 따라 샘플링 주기(sampling interval : 진동 파형을 A/D 변환하여 수치화하는 주기)를 정확하게 선택해야 한다. 샘플링 주기를 1/2로 나눈 값이 분석이 가능한 최대 주파수이다. 샘플링 주기를 1 ms로 하면 상한 주파수는 500 Hz가 된다.

사용하는 진동센서의 선택도 중요하다. 예를 들면 기어장치의 측정에는 중요한 정보를 갖는 기어 맞물림 주파수와 이의 고차 조화성분이 발생하지만, 동전식 진동속도센서를 사용하면 차단 주파수가 2 kHz로 되어, 2 kHz 이상의 주파수는 제외되어 고차 조화성분을 측정하지 못하게 된다. 이와 같이 기어장치를 측정하는 경우 동전식 진동속도센서를 사용하지 않고 진동가속도센서를 사용하여 진동가속도를 측정해야 할 것이다.

진동가속도의 진동파형을 취득하여 분석할 경우 주의할 것은 과부하(overload)이다. 과부하란 데이터의 취득 중에 진동계(여기서는 데이터 수집기)로 측정 가능한 진폭의 상한치를 진동파형의 진폭이 한 순간이라도 초과하는 것으로, 과부하의 지시계(indicator)가 점등하는 데이터의 경우이다. 과부하가 발생한 데이터는 어떠한 수법을 이용하여도 분석이나 다른 처리가 불가능한 쓸모없는 무용한 데이터이다

스펙트럼 분석을 하는 상한 주파수가 낮은 경우, 주파수 범위의 스펙트럼 에너지가 너무 낮기 때문에 측정범위를 무심코 낮은 쪽으로 교체하고 싶게 된다. 그러나 높은 주파수 영역에 큰 스펙트럼이 존재할 가능성이 높으므로, 이러한 경우에 과부하의 상태로 된다.

감시와 분석 목적으로 데이터 수집기를 사용하여 회전기계로부터 스펙트럼을 취득하는 경우의 상한 주파수에 대한 권장치는 Table 1과 같다. 상한 주파수는 회전수와 기계요소에 따른 고유한 값을 기본으로 결정하고 있다. 이 주파수 범위의 스펙트럼 에너지는 전체 레벨에 대해서 상당히 낮게 된다.

Table 1. Higher frequency band for vibration data acquisition

구성요소	상한 주파수
기어	기어 맞물림 주파수 × 3
송풍기	회전주파수 × 블레이드 수 × 3
펌프	회전주파수 × 깃 수 × 3
전동기, 발전기	전원주파수 × 3
구름 베어링	회전주파수 × 전동체 수 × 6
회전축 진동	회전주파수 × 10
미끄럼 베어링	회전주파수 × 10

높은 주파수 영역까지 보기 위해 상한 주파수를 높게 하면, 주파수 분해능이 나빠지게 되고, 1개 스펙트럼의 폭이 넓어지게 된다. 주파수 분해능은 이용 가능한 한계점의 폭까지 넓혀서 분석할 수 있지만, 너무 넓히면 탁월 주파수를 높은 정밀도로 읽을 수 없게 된다. 상한 주파수를 높게 하고, 주파수 분해능도 세밀하게 하는 경우는 샘플링 하는 데이터 수를 증가시키지 않으면 안 된다.

스펙트럼의 분해능은 샘플링 주기와 샘플링 수의 곱의 역수로 된다. 예를 들면 1 ms의 샘플링 주기로 256 개의 샘플링 데이터로부터 스펙트럼을 구해보면, 4 Hz의 분해능으로 상한 주파수 500 Hz까지의 128 개의 스펙트럼으로 된다. 데이터 수집기에서는 통상 128개의 표시를 하지 않고, 400 Hz까지의 100 개의 스펙트럼을 표시하고 있다. 여기서 샘플링 주기를 반으로 하는 500 μ s로 하고 샘플링 개수는 동일한 256 개로 하면, 분해능은 8 Hz가 되고 상한 주파수가 1 kHz인 128개의 스펙트럼으로 된다. 샘플링 주기는 500 μ s 그대로 하고 샘플링 수를 2배인 512개로 하면, 분해능은 4 Hz로 상한 주파수는 1 kHz 그대로 이지만 스펙트럼수가 2배인 256개로 된다. 데이터 수집기 내에서 분석결과로서 800 Hz까지 200개의 스펙트럼을 구하고 있지만, 표시 가능한 스펙트럼 수가 제한되기 때문에, 그 중에서 임의의 100개가 표시 가능하고, 이 예에서는 0 ~ 800 Hz 주파수 중에서 표시 범위를 360 Hz ~ 760 Hz 등으로 임의의 100 개를 선택해서 표시되는 기능을 갖고 있다. 이것을 확대기능(zooming)이라 부르는 데이터 수집기도 있지만, 표시 가능한 스펙트럼수의 8 배 이상의 스펙트럼 수의 연산능력을 갖고 있다.

샘플링 주기와 샘플링 수를 가증 좋은 값으로 설정하면, 베어링 결함이나 기어 맞물림으로부터 발생하는 높은 주파수 영역의 진동분석과 함께, 운전속도나 기타 요인에 의한 측대파(sideband)를 분석하는 것이 가능한 분해능으로 된다. 그림 18은 기어 맞물림 주파수의 측대파를 측정할 예이다. 분석은 1 kHz까지의 주파수를 1.25 Hz의 분해능으로 FFT분석을 하고, 475 Hz ~ 600 Hz까지 100개의 스펙트럼을 표시하

고 있다.

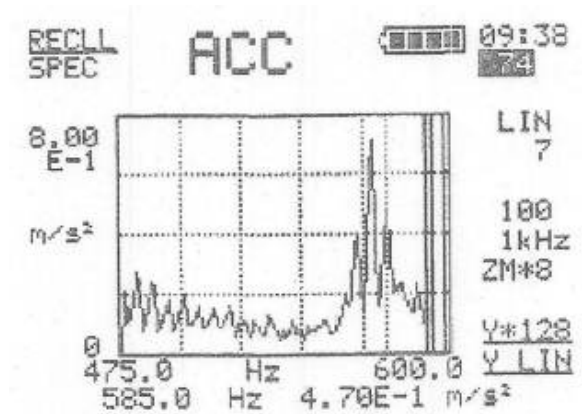


Figure 4. Sideband measurement using windowing function

이와 같이 필요로 하는 스펙트럼 정보를 놓치지 않고 수집하고자 하면, 확대기능을 사용하여 스펙트럼 데이터를 2개 또는 4개의 범위로 분할에서 수집하거나 샘플링 주기를 짧게 하여 샘플링 수가 많도록 하여 진동파형을 취득하는 것이 바람직하다. 동일한 측정 점에서 샘플링 주기를 바꾸어 몇 번의 데이터를 취득할 필요가 있다.

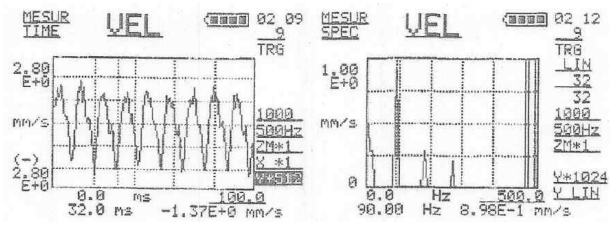
3. 데이터의 표시

일정한 운전조건에서 가동되고 있는 기계설비에서 발생하는 진동 측정에서는 재현성이 좋은 데이터를 얻을 수 있다. 그러나 부하나 회전속도가 변동하면 다소라도 진동데이터에 영향을 준다. 진동데이터를 수집할 때는 부하조건, 온도, 습도 등의 환경조건에도 충분한 주의를 기울여야 한다. 진동을 측정하면 그 결과를 보고(report)나 표시(display)하여야 한다. 일반적으로 진동데이터는 시간파형, 스펙트럼 및 궤적(orbit)의 데이터로 표시된다.

3.1 시간파형

시간파형은 시간에 대한 진동진폭의 궤적이다. 시간파형에는 기계의 물리적인 움직임이 반영되어 있다. 시간파형을 오실로스코프에 표시하면 어떤 것에도 제안되지 않고 정확하게 반영

되어 나타난다. Figure 5에 정렬불량이 발생하고 있는 기계의 진동속도 파형과 그 파형을 스펙트럼 분석한 예를 나타낸다. 기계의 특이한 사상(event)을 반복하면 시간 파형에 동일한 형태가 나타나므로, 이러한 반복 현상을 식별하기 위해서는 시간파형 데이터가 효과적이다. 시간파형 데이터를 표시하는 시간의 길이(초, s)는 기계의 회전주기 τ 에 관계한다. $\tau(s)$ 는 60/회전수(rpm)이다. 회전주기 τ 의 데이터를 표시하는 것으로, 평형잡기(balancing)에 필요한 위상각을 얻을 수 있다.



(a) Vibration velocity (b) Spectrum of vibration velocity
Figure 5. Example of vibration data display

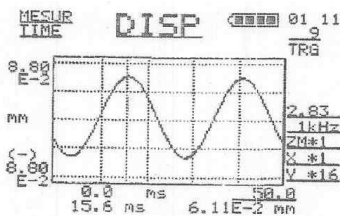


Figure 6. Example of vibration data of unbalance

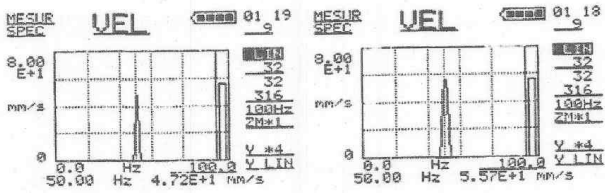
Figure 6은 불평형(unbalance)이 발생하고 있는 기계의 변위파형을 나타낸 예이다. 표시 구간은 50 ms이고 128점이 표시되어 있다. 좌단의 0 ms의 부분이 트리거(trigger) 신호를 받아서 진동파형을 취득하기 시작한 부분이다. 커서가 변위파형의 최초의 피크를 나타내고, 그 부분은 좌측으로부터 15.6 ms인 것을 나타내고 있다. 회전축의 회전수는 2 400 rpm이고, 회전주기 τ 는 2.5 ms에 대해서 15.6 ms는 각도로 하면 225° 로 된다. 트리거신호를 얻기 위해서 부착된 마크(mark)의 부분에는 회전방향과 반대방향으로 225° 의 위치가 파형이 피크인 것을 나타내고 있다.

시간파형 기록은 기록하는 시간적인 길이에 따라서 기록 매체를 선택한다. 기록지에 직접 그리면 장기간 기록이 가능하다. 감열기록지를 사용한 기록기의 응답속도는 빠르지만, 기계식 기록지는 응답속도가 느리기 때문에 주의가 필요하다. 데이터 수집기에는 IC카드의 반도체 메모리에 수집 초간의 파형기록이 가능하도록 되어 있고, 이 IC 카드의 데이터를 컴퓨터로 읽어 들여 파형을 볼 수 있다. 시간파형 기록은 회전주기 τ 의 10배 이상의 기록이 필요하다.

3.2 스펙트럼

진동데이터를 스펙트럼 분석함으로써 많은 정보가 얻어진다. 이는 분석하는 상한주파수 범위 내의 정보이다. 스펙트럼 분석을 하면, 회전축의 회전속도와 이것과 관련된 주파수 성분을 수치로 얻을 수가 있다. 회전축의 진동을 측정하는 경우는 분석 상한주파수를 회전수의 10배로 설정하고, 이 주파수 범위를 400개의 스펙트럼 수로 분석, 처리한다.

FFT에 의한 주파수 분석에서 가장 부주의 하는 사항은 시간창(time window)이다. 시간창으로 자주 사용되는 함수로서 해닝창(Hanning window)과 플랫폼창(Flat top window)이 있다. 해닝창을 걸어서 분석하면 에너지가 큰 스펙트럼의 주파수를 정확하게 읽을 수 있다. 그러나 이 스펙트럼이 나타내는 진폭치는 정확하다고 할 수 없다. 스펙트럼의 에너지는 인접한 스펙트럼에 분산되어 정밀도가 나빠진다. 플랫폼창을 이용하여 분석하면, 진폭치의 정밀도는 높지만 스펙트럼이 현저하게 표시되지 않기 때문에 주파수를 정확하게 파악하는 것이 어렵게 된다. Figure 7은 주파수 분해능이 1 Hz인 분석으로, 50.5 Hz에서 56.3 mm/s의 진동속도를 입력한 경우의 예를 나타낸다.



(a) Hanning window (b) Flat top window

Figure 7 Example 50.5 Hz, 56.3 mm/s analysis

Figure 7 (a)는 해닝창을 이용하여 분석한 것으로 50 Hz와 51 Hz 모두 47.2 mm/s로 되고 오차는 16 %로 크다. Figure 7 (b)는 플랫폼창을 걸어서 분석한 것으로서 50 Hz와 51 Hz 모두 55.7 mm/s로 되고 오차는 1 %로 매우 적다. 당연히 50.0 Hz와 주파수 분해능으로 나누어진 주파수의 경우의 시간창에 의한 오차는 생기지 않는다.

정보로서 주파수가 중요한지 또는 진폭치가 중요한지에 따라서 시간창을 선택한다. 어떤 경우에도 필요하다면 두 가지 시간창으로 분석한다. 진동수범위의 절에서도 설명하였지만, 정보의 누설이 없도록, 복수의 다른 조건으로 스펙트럼을 수집하든지, 샘플링 수가 많은 진동파형 데이터를 취득한다.

3.3 궤적

궤적(orbit)은 진동하고 있는 물체의 운동을 눈으로 보는 것으로, 그 원인이나 대책을 고려하는데 극히 유용한 정보를 제공한다.

Figure 8은 미끄럼베어링에 직각인 위치에 상설되어 있는 2개의 와전류식 변위센서에서 측정된 오일휠(oil whirl) 발생 시의 궤적이다. 그림중에 까맣고 큰 원은 키 홈의 통과점을 나타내며, 궤적이 일주하는 사이에 축이 2회전하고 있는 것이 판명되고, 오일휠 발생 시에 회전수의 약 1/2 주파수의 진동을 발생하는 것을 나타내고 있다.

궤적 관측의 필요성은 대형 기계의 미끄럼 베어링에만 한정되지 않는다. Figure 9에 나타난 궤적은 구름베어링의 축 하우징에서 수평과 수

직방향 2축의 진동속도를 동시에 측정하고, 변위파형으로 변환해서 그린 2차원 궤적이다.

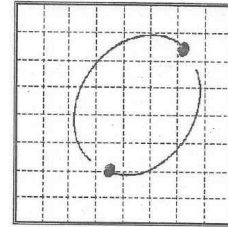


Figure 8 Example of orbit

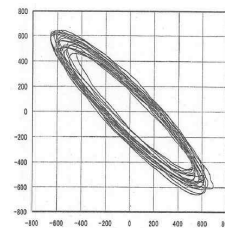
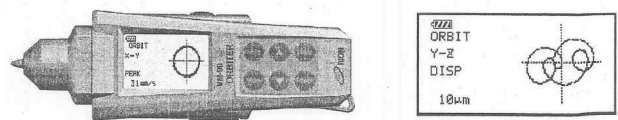


Figure 9 Example of unbalance orbit

센서가 상설되어 있지 않은 장소에서 궤적을 측정하기 위해 특수한 센서를 가진 Figure 10에 나타난 것과 같은 진동계가 있다. 이 진동계는 대상물에 대고 누르는 것만으로 3축의 진동속도가 동시에 측정되고, Figure 10 (b)에 나타난 것 같은 궤적을 표시하는 장치이다. 이러한 기기를 사용함으로써 간편하게 궤적 데이터의 수집이 가능하다.



(a) 3 axial vibration meter (b) orbit

Figure 10 Vibration meter and display

4. 진동 측정 시스템

기계설비의 상태감시를 하기 위해, 정기적으로 진동을 측정하는 경우는 데이터 수집기와 같이 휴대할 수 있는 소형 장비를 사용하는 경우가 많지만, 기계가 이상 진동을 발생하고 있을 때의 진동측정은 이상 원인을 규명하기 위해 여

러 가지 장비를 사용하는 경우가 있다. 이 절에는 측정시스템의 예와 교정에 대해서 설명한다.

4.1 진동가속도 측정시스템

Figure 11에 압전식 진동가속도센서를 사용하고, 측정기로 전하증폭기를 이용한 측정시스템의 예를 나타낸다. 전하증폭기의 출력파형을 관측함과 동시에 시간영역의 진동파형을 기록하는 시스템이 필요하다. 최근 컴퓨터를 사용한 데이터 저장시스템을 사용하는 경우가 많아졌지만, 과거 오실로스코프와 데이터 기록기로도 좋다. 이와 같은 진동파형 데이터의 기록을 남기는 것은 이상상태에서 기계의 운전시간을 단축하는 것이 목적이지만, 고장원인의 규명을 위해 다양한 분석처리를 수행하기 위한 것도 있다. 이러한 이상상태의 진동 데이터를 남기는 것에 의해, 나중의 고장 시 중요한 참고 자료로도 된다.

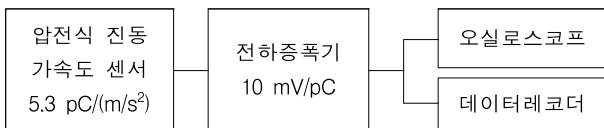


Figure 11 Vibration measurement system

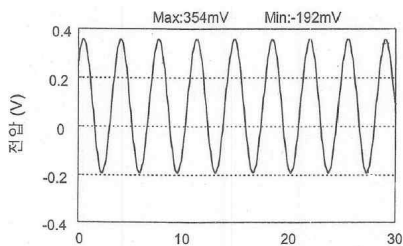


Figure 12 Measured vibration signal

이러한 시스템으로 데이터를 기록할 때 중요한 것은 측정시스템의 감도를 정확히 하는 것이다. 전용 진동센서가 갖춰져 있는 진동계라면, 그 진동계의 출력은 $100 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ 와 같이 규정되어 있기 때문에, 그 수치를 기준으로 파형의 관측이나 데이터 기록기에 기록할 수가 있다. Figure 11의 경우는 압전식 진동가속도센서의 감도와 전하증폭기의 증폭도를 고려해야만

한다.

압전식 진동가속도센서의 감도가 $5.3 \text{ pC}/(\text{m/s}^2)$ 이고, 전하증폭기의 증폭도가 $10.0 \text{ mV}/\text{pC}$ 인 경우를 가정해서 감도를 고려한다. 이 측정시스템의 감도로서 1.0 m/s^2 인 진동이 센서에 가해지는 경우에 전하증폭기가 몇 볼트의 전압을 출력하는지를 나타내면 된다. 이 진동센서에 1.0 m/s^2 의 진동이 가해지면 센서의 출력으로 5.3 pC 의 전하를 발생한다. 이 5.3 pC 의 전하를 전하증폭기에 입력하면 출력전압은 53 mV 로 된다. 따라서 이 측정시스템의 감도는 $10 \text{ mV}/\text{pC} \times 5.3 \text{ pC}/(\text{m/s}^2)$ 로 된다.

Figure 12는 측정시스템으로 측정된 진동을 오실로스코프에서 관측한 진동파형이다. 정현진동이고, 최대점의 전압은 354 mV 이며, 최소점의 전압은 -192 mV 로 측정되었다. 최대점과 최소점의 중간 $(354 \text{ mV} - 192 \text{ mV}) / 2 = 81 \text{ mV}$ 의 점이 진동이 0인 기준선이다. 전하증폭기의 출력이 직류증폭기로 되어 있는지, 오실로스코프의 입력이 DC 입력으로 되어 있는지 등의 이유로 기준선은 0.0 mV 만으로 한정할 수 없으며, 이 0의 기준선 위치를 확인할 필요가 있다. 이 0의 기준선으로부터 최대점까지의 전압차는 $354 \text{ mV} - 81 \text{ mV} = 273 \text{ mV}$ 이다. 이 측정시스템은 1.0 m/s^2 의 진동이 가해지면 53 mV 의 전압을 출력하기 때문에 $273 \text{ mV} = 273 \text{ mV}/53 \text{ m/s}^2 = 5.15 \text{ m/s}^2$ 의 가속도 입력에 상당한다. 동전식 진동가속도센서의 경우도 출력 전압에 관해서는 동일하게 취급할 수가 있다.

4.2 와전류식 변위 측정 시스템

와전류식 변위센서의 출력은 금속 물체의 재질에 따라 다르다. 와전류식 변위계의 교정 작업을 통해서 와전류계 사용방법을 설명한다. 교정용 도구로서 목표물(target)과 센서부분이 정확한 거리에 유지하도록 하기 위한 스페이서(spacer)를 2개 준비한다. 이 스페이서의 재질은 세라믹이나 경질 유리 등으로 되어 있어 와전류의 발생에 영향이 없는 것이다. 준비한 스페이

서의 두께를 0.7 mm와 1.5 mm의 2개로 한다.

측정시스템을 Figure 13에 나타낸다. 먼저 1.5 mm의 스페이서를 목표물과 센서 사이에 끼워서 변환부의 출력을 DC 전압계로 읽은즉 11.4 V 였다. 다음에 0.7 mm의 스페이서를 끼웠을 때, DC 전압계는 5.07 V였다. 이 와전류식 변위계의 출력은 $y = ax + b$ 의 식으로 표현이 가능한 선형으로 하면

$x = 1500 \mu\text{m}, y = 11.40 \text{ V} : x = 700, \mu\text{m}, y = 5.07 \text{ V}$ 의 2개의 측정치로부터 기울기 $a = 7.91 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 0 바이어스(zero bias) 성분 $b = -47 \text{ mV}$ 가 구해진다. 이 기울기 $7.91 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 가 이 측정시스템의 감도이다. 이것으로 교정작업은 완료된다.

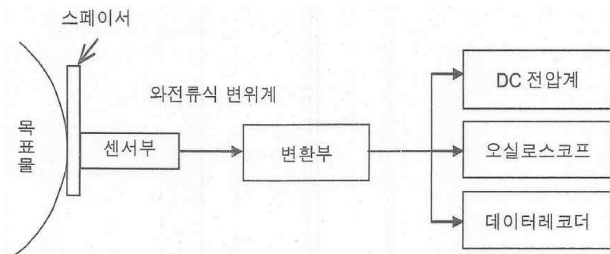


Figure 13 Eddy current displacement measurement system

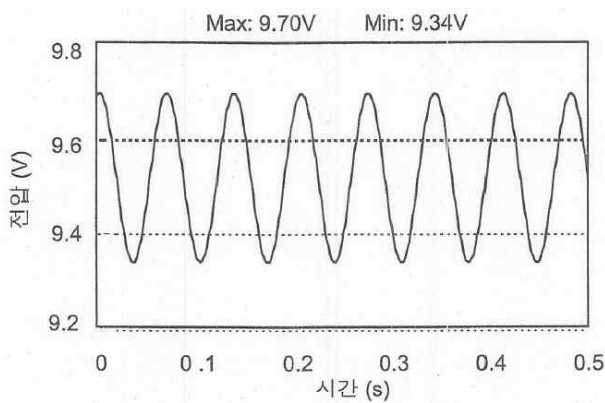


Figure 14 Example of measured vibration signal

다음으로 스페이서를 빼내고 목표물에서 $1.2 \mu\text{m}$ 정도의 거리에 센서부분을 고정한다. 얻어진 데이터로부터 변환부의 출력전압 y 가 $7.91 \times 1200 - 47 = 9445 \text{ mV}$ 로 되도록 센서부분을 고정하면 목표물에서 1.2 mm의 거리가 된다.

실제 공사에서는 정확하게 1.2 mm로 되지 않지만, 회전축 진동의 측정에는 영향이 없다. 센서부분을 고정했을 때의 변환부의 출력은 9.59 V 였다. 이것을 거리로 환산하면 $(9590 + 47) / 7.91 = 1218 \mu\text{m}$ 이다.

Figure 14은 이 측정시스템에서 측정한 진동을 오실로스코프에서 관측한 진동파형이다. 최대점의 전압은 9.70 V이고, 최소점의 전압은 9.34 V이었다. 최대점과 최소점 중간($9.70 \text{ V} + 9.34 \text{ V} / 2 = 9.52 \text{ V}$)의 점이 목표물(회전축)과 변위센서 사이의 평균거리이다. 9.52 V를 거리(gap)로 환산하면 $(9520 + 47) / 7.91 = 1209 \mu\text{m}$ 이다. 이 최대점과 최소점의 전압차는 $9.70 \text{ V} - 9.34 \text{ V} = 0.36 \text{ V}$ 이다. 이 측정계의 감도는 $7.91 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 이기 때문에 360 mV는 $45.5 \mu\text{m}$ 의 변위에 상당한다. 축 진동의 변위는 $45.5 \mu\text{m p-p}$ 이다.