

건축구조물의 진동측정 및 기준

이 규 배

(안산공과대학 컴퓨터응용설계과)

1. 머리말

인간이 도구를 사용하기 시작하면서 물체의 운동(motion)은 다양한 형태로 현실에 응용하고 있다. 자연활동인 지진 등의 영향으로 인간이 주거하고 있는 주거 공간의 건축구조물에 있어서 여러 가지 운동의 영향을 다각적으로 받고 있다.

의식주의 관점에서 건축구조물은 인간이 생활함에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하고 있으며, 이에 대한 건축구조물의 운동현상을 정확하게 파악하여 쾌적한 환경 조성을 위하고 보다 고품위의 구조물 설계에 반영하기 위하여 진동을 측정하고 진동발생 메커니즘과 전달 메커니즘을 이해하는 것은 보다 절실하다고 할 수 있다.

진동을 측정하는 신호는 일반적으로 물리현상의 신호 형태와 동일한 것으로 연속시간(continuous time) 신호와 이산시간(discrete time) 신호로 구분할 수 있고 연속시간 신호는 시간에 따른 모든 값에 대하여 신호 함수의 값이 정의되어 있는 것을 말하며, 이산시간 신호는 시간에 대하여 특정한 값들에 대하여만 불연속적으로 신호함수 값이 정의되어 있는 것을 말한다.

진동은 평가와 진단 절차에 있어서 연속시간 신호와 이산시간 신호가 모두 해당되며 데이터를 사용하는 관점에서 정량적인 해석이 가능하고 건축구조물의 진동을 측정하는 방법을 다각적으로 접근하여 명확한 건축구조물의 거동을 파악하기 위하여 건축구조물의 진동측정과 기준을 이해하고자 한다.

2. 진동측정 센서

2.1 진동 픽업

진동픽업(vibration pick up)은 변환기에 사이즈믹 시스템(seismic system)을 내장하는 것으로 질량-스프링계인 기계적인 시스템에서 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 변환 소자로 구성되어 있다.

진동을 측정한다는 것은 측정대상인 건축구조물이나 지면의 운동을 수직방향과 수평방향에 대하여 측정하게 되는데, 진동 픽업은 각 방향별로 소자를 내장하여 3축 방향의 출력을 동시에 측정이 가능하게 하던가 1축 방향의 픽업 3개를 3방향의 접촉면을 형성하게 하여 구성하기도 한다.

진동픽업의 형태는 센서가 대상물의 접촉 여부에 따라 접촉형과 비접촉형으로 구분할 수 있고 건축구조물의 측정에 사용하는 형태는 접촉형 진동가속도계를 사용한다. 일반적인 진동을 측정하기 위하여 사용하는 픽업은 변환 출력의 형태에 따라 진동변위형, 진동속도형 및 진동가속도형이 있으며 건축구조물에서는 가속도형이나 변위형을 사용한다.

진동 가속도계는 소형이고 경량이며 기계적인 강도가 높고 측정할 수 있는 주파수 범위가 넓기 때문에 여러 분야의 진동 측정에 사용된다. 일반용도의 가속도계는 250°C까지는 사용이 가능하지만 그 이상의 온도에서는 특수한 센서를 사용하거나 설치시에 별도의 보완작업이 요구된다.

2.2 압전형 가속도계

건축구조물의 진동측정에 사용하는 변환기는 압전형 가속도계(piezoelectric accelerometer)를 들 수 있다. 압전형 가속도계는 넓은 주파수 범위에서 좋은 선형성(linearity)과 출력 범위가 큰 동적범위(dynamic range)를 가지고 있으며 내구성이 좋다. 또한 측정시 전원이 필요하지 않고 마모로 인하여 출력의 특성이 변화하는 부분이 없다. 또한 가속도를 측정함으로써 신호를 쉽게 적분하여 진동속도와 진동변위를 구할 수 있는 장점이 있다.

압전형 가속도계는 질량이 압전소자에 전단응력을 가하는 형태인 전단형(shear type)과 질량이 압전소자에 압축력을 가하는 압축형(compression type)이 있으며 변환소자에 강유전체를 주요 재료로 구성하고 원료분말을 성형하여 고온으로 소성가공한 후 강한 직류전류를 가하여 분극화한 압전 세라믹을 사용한다⁽¹⁾.

압전 세라믹은 기계적으로 변형하는 형태인 인장력, 압축력 및 전단력을 받으면 전극면 사이에 비례하는 전기적인 전하를 발생하게 되는 특성을 계측센서로 이용하며 압전소자의 전하 q , 압전소자의 전기용량 C 일 때 출력전압 E 는 q/C 와 같이 표현된다.

가속도계를 선정할 때 고려할 사항으로는 접촉식의 적용 여부, 감도, 중량, 동적 범위, 측정이 가능한 주파수 범위, 공진주파수 등이 있다.

가속도계의 감도는 압전형일 경우에는 높은 출력이 감도를 높이게 되며 압전체의 부피나 중량이 커지게 되는 현상을 가지게 된다. 가속도계의 출력 감도는 $1\sim 10 \text{ mV/ms}^{-2}$ 또는 $1\sim 10 \text{ pc/ms}^{-2}$ 를 가지고 있다. 특수 목적을 위한 가속도계는 고주파수 대역이나 측정대상물이 극히 경량의 곳에 사용하기 위하여 1 g 이하의 것도 있으며 3축 방향을 동시에 측정할 수 있는 것도 있다. 종류로는 측정 환경이 고온인 곳에 사용할 수 있는 것, 진동 레벨이 매우 낮은 곳에 사용할 수 있는 것, 가속도계를 교정하기 위한 것, 산업현장의 모니터링 시스템에 사용하는 것, 높은 충격현상을 측정하기 위한 것 등이 있다.

가속도계의 무게는 진동을 측정할 대상물과 질량으로 비교하여야 하는데 센서를 설치할 때 가속도계의 질량이 측정대상물의 관성

력에 영향을 주지 않아야 하며 일반적으로 측정 대상물 동적질량의 10% 이하로 하여야 한다.

가속도계의 동적범위는 센서가 측정할 수 있는 하한한계와 상한한계를 벗어나는 것은 측정에 있어서 무의미하다. 진동측정의 레벨에 있어서 하한 한계는 가속도계의 특성 뿐만 아니라 증폭기, 연결 케이블 등의 전기적인 잡음에 의해서 상호 작용하지만 일반적인 가속도계는 0.01 m/s^2 까지이며, 상한한계는 가속도계의 구조적인 강성과 선형성의 상한영역 특성에 의해 지배적이게 되는데, 건축구조물의 진동측정범위는 거의 만족하며 기계적인 충격범위인 $50\sim 100,000 \text{ m/s}^2$ 을 측정하기 위한 $1,000,000 \text{ m/s}^2$ 까지 가능하다.

가속도계가 측정 가능한 주파수 범위는 하한한계와 상한한계로 구분할 수 있고 측정 대상물의 관심 주파수영역과 관련 지을 수 있다. 공해진동 분야에서는 상한한계가 100 Hz이하이며 건축구조물은 공해진동 분야보다 더욱 낮은 주파수 대역을 가지며, 기계류나 산업장비에서는 10~1,000 Hz 영역이 대부분이나 고속 회전하는 기계류에서는 10 kHz 까지 관심대상이 되는 경우도 있다.

가속도계의 주파수 하한한계는 증폭기의 저주파 차단 특성이 지배적으로 작용한다. 일반적인 저주파 차단은 1 Hz 정도이지만, 건축구조물에서는 0.2 Hz도 관심대상이 될 수 있으므로 정확한 검증이 요구된다. 압전형 가속도계의 전단형은 1 Hz이상에서는 영향을 무시할 수 있지만 1 Hz미만일 때는 문제가 발생할 수 있으므로 충분히 고려하여야 한다. 가속도계의 주파수 하한/상한 한계는 제품의 교정 성적서나 특성그래프에서 확인이 가능하다.

가속도계의 주파수 상한한계는 자체의 질량스프링계의 공진주파수(resonance frequency)에 의해 결정된다. 가속도계의 형태가 소형인 경우는 상한한계가 180 kHz인 경우도 생산되고 있는데 이는 출력 감도가 낮은 단점이 있으나, 높은 출력과 좋은 감도를 가지는 일반적인 경우는 20~30 kHz의 상한 한계를 가진다.

2.3 전치증폭기

압전형 가속도계의 출력에 대한 직접적인

부하는 비교적 높은 임피던스의 부하를 가질 지라도 가속도계의 감도와 주파수 응답의 한계가 제한받는 영향을 줄이기 위하여 가속도계의 출력 신호를 전치증폭기(pre-amplifier)에 연결시켜 낮은 임피던스로 변환하여 전기적인 임피던스 매칭(matching)을 하게 된다. 임피던스 매칭을 행하는 것은 측정장비나 분석장비의 입력신호, 즉 가속도계의 출력 임피던스를 낮게 한다.

전치증폭기는 전압계, 신호분석기 및 계측용 증폭기 등을 포함하고 있으며, 압전형 가속도계를 사용하는 진동레벨계는 내장하고 있다. 일반적인 계측 및 분석 시스템은 전치증폭기를 분리하여 여러 센서와 증폭기를 다양하게 구성할 수 있도록 호환성을 높이고 있다.

계측장비에 사용하는 대부분의 전치증폭기는 임피던스 변환기능 뿐만 아니라 입력신호를 조정하는 기능을 가지는데, 전치증폭기의 출력신호를 테이프 레코더에 입력할 때 출력계인 변환장치, 가속도계를 사용하는 전용 전치증폭기인 경우는 진동속도나 변위로 변환시키는 적분기, 저주파수 대역필터와 고주파수 대역필터의 기능을 가지는 밴드 패스필터의 기능, 과부하 표시기 등을 가지는 경우도 있다.

전하증폭기(charge amplifier)는 진동 측정 센서와 측정기 또는 분석기를 연결하는 것으로 압전 소자에서 출력하는 전하량(coulomb)을 전압으로 변환하고 사용하기 용이하도록 신호의 이득을 증폭하고 조정하는 장비이다.

2.4 센서의 교정

진동 가속도계는 제작하여 출고될 때 교정 차트와 함께 사용자에게 공급되는데 가속도계가 공급된 후 과도한 물리적인 충격, 온도 및 방사능 조사량에 영향을 갖지 않는 환경에서 10여년을 사용해도 특성의 변화가 2% 미만으로 알려지고 있다.

계측기기의 교정에 대하여 ISO 17025에 따른 KOLAS(한국공인시험검사기구)에서 제시하는 경영요건과 기술요건을 만족하면 측정값에 대한 신뢰성은 충분히 유지하는 것으로 볼 수 있다.

가속도계를 취급함에 있어서 책상 높이 정

도에서 낙하하게 되면 수 천 g의 충격력이 센서에 가해지게 됨에 따라 주파수 특성이나 감도 특성이 변화하는 경우가 많으므로 사후 관리 관점에서 교정관리를 해야 하고 선형성과 출력 특성에 문제가 발생되면 폐기하여야 한다.

센서의 교정을 주기적으로 행하기 위하여 진동교정기(calibration exciter)를 사용할 수 있는데 이 때 사용하는 교정기는 국가교정기관(KOLAS)에서 교정을 행한 것을 사용하여야 한다.

센서교정을 현장에서 사용하는 휴대용 교정기는 교정관리가 되는 것을 사용하여야 하고 건축구조물의 진동을 측정하기 직전에 가속도계의 각각에 대하여 교정을 행한 후 실제 측정에 임하여야 교정으로 인한 시스템 오차를 감소시킬 수 있는데, 이는 제품의 출고시의 교정차트가 온도나 환경의 변화에 따라 센서특성이 차이가 발생하기 때문이다. 교정기를 통하여 센서를 교정할 때 계측시스템에 대하여 불확도(uncertainty)를 관리하여야 하는데 진동측정을 위한 교정 불확도는 우연불확도와 계통불확도로 구분하여 구하여 합성표준불확도를 평가하고 확장불확도를 표현하여야 하는데 이때 신뢰수준(confidence level)을 반드시 표기하여야 한다⁽²⁾.

레이저 간섭계(laser interferometry)에 의한 가속도계 교정방법은 ISO 5347에서도 언급하고 있으며 우연불확도 U_r 와 계통불확도 U_s 를 구하고 합성표준불확도 $U_c = \sqrt{U_r^2 + U_s^2}$ 를 계산하고 신뢰수준을 99.74%(정규곡선 이하 면적 3σ)를 만족하는 포함인자(coverage factor) $k=3$ 으로 하여 확장불확도는 U 를 구할 수 있다⁽³⁾.

3. 진동레벨계 및 신호분석기

3.1 진동레벨계

진동레벨계(vibration level meter)는 공해 진동, 작업환경 등과 관련하여 사용되는 것을 말하며⁽⁴⁾ 진동레벨이란 인체의 전신을 대상으로 하는 진동의 평가 척도를 의미하고 교류(AC) 출력단자를 갖추고 있으므로 이 단자를 신호분석기에 연결하여 진동가속도레벨을 측정할 때 필요하며 진동레벨계가 센서로

이용할 수 있다.

건축구조물의 진동을 정밀분석 및 평가하기 위하여 신호분석기를 사용하지만 진동을 환경적인 것으로 인체의 감각과 관련지을 때 진동레벨계를 사용하게 되는데 이는 취급이 용이하고 측정에 따른 온도, 습도, 바람, 소음 및 전자기적인 영향을 거의 받지 않는 구조로 제작되어 있다.

진동 센서는 지면에 설치할 수 있는 구조로 되어 있고 진동 감각 보정회로를 내장하고 있는 특징이 있으며 측정 대상 주파수영역이 1~90 Hz로 될 수 있도록 통과 필터를 갖추고 있다. 필요에 따라 진동가속도레벨을 측정하기 위한 회로를 구비할 수가 있으며 이러한 경우의 종합 주파수 응답은 평탄특성으로 나타난다.

진동레벨계의 지시 계기는 1 dB마다 눈금 간격이 1 mm이상인 범위의 유효 눈금범위가 15 dB이상으로 하고 1 dB마다 눈금을 표시하던가 디지털 값으로 나타내고 있다. 감쇠기는 지시계기의 유효 눈금범위가 30 dB미만일 때는 10 dB 간격으로 범위를 정하고 있으므로 시각적으로 계기의 지침 판독이 용이하다.

진동레벨계의 시험은 기준 진동값을 발생하는 진동조정기나 가진기(exciter)를 사용할 수 있으며, 전기입력에 의한 시험은 정현파 신호를 사용하고 시험신호는 진동레벨계의 진동 피업 또는 이것과 등가인 전기 임피던스를 접속한 상태에서 진동 피업의 개회로 기전력과 전환하여 놓고 가한다. 눈금을 읽는 방법은 지시계기 지침의 진동이 주기적으로 변화하는 저주파수 영역에서는 최대눈금을 읽는다.

사용하는 주파수 대역은 1/3옥타브밴드와 1/3옥타브밴드를 조합한 9개로 하고 중심주파수는 1, 2, 4, 6.3, 8, 31.5, 63, 90 Hz로 한다⁽⁴⁾. 건축구조물의 진동측정을 위한 주파수 범위는 공해진동의 관점에서 국한할 경우 최소 1 Hz에서 최대 90 Hz까지 1/3 옥타브밴드 중심주파수로 설정하여야 하겠지만 필요하다면 주파수를 좀더 세분화할 필요가 있으며 주파수 대역도 확장할 필요도 있다.

측정계기의 안정도는 교류 전원을 사용할 때는 전원을 넣고 1분과 60분 후를 비교하고, 직류 전원을 사용할 때는 1분과 10분 후의

지시 변화가 ± 0.5 dB이하인 것을 확인한다. 이는 시간에 따라 전원의 안정성이 측정계에 영향을 평가하는 것이다. 지시계기의 눈금 오차는 일반적으로 85 dB인 위치를 기준점으로 하여 6.3, 31.5 Hz에 있어서 ± 0.5 dB 이내에 있어야 한다. 지시계기의 동특성은 31.5 Hz, 계속시간 1 sec의 정현파 입력을 가하였을 때 최대지시는 그 주파수에서 진폭이 같은 정상입력에 의한 지시에 대하여 -1.0 ± 0.5 dB로 한다.

복합 진동특성을 파악하기 위하여 지시계기의 지시값이 동일한 2개의 진동을 동시에 입력하였을 때 지시값은 단일진동의 경우보다 3 ± 0.25 dB의 범위에 있어야 한다.

3.2 신호분석기

신호분석기(signal analyzer)는 센서로 측정 한 물리량의 신호를 계측기나 변환기가 받아들여 물리적인 의미를 가지는 데이터로 변환하는 것이다. 고전적인 신호분석기로는 전기 전자 분야에 많이 쓰이고 있는 오실로스코프가 있으며 이는 측정대상의 신호형태가 전압으로 시간에 따른 신호의 변화과정을 추적할 수 있으며 일반적인 것은 측정할 수 있는 입력전압의 최대값은 300V이다.

진동측정에 있어서의 신호분석기는 주파수분석기 또는 FFT(fast fourier transform)가 있으며 주파수분석기는 측정된 신호가 시간의 변화에 따라 진동의 크기가 변화하는 것을 측정하고 이를 주파수의 변화에 따른 진동의 변화의 값으로 나타낸다.

주파수 분석을 하는 목적은 시간신호를 푸리에 변환하여 주파수 대역이 광대역(broad band) 또는 협대역(narrow band)에 분포하는 것을 각 주파수의 성분을 알기 위함에 있다. 주파수 분석을 행함에 있어 진동신호 중에서 대상 주파수 범위에 포함된 것을 통과하게 하는 밴드패스(band pass) 필터를 사용한다. 필터에서 통과하는 대역이 전체 주파수에 걸쳐 연속적으로 변화할 때 각 주파수대역에 대한 레벨을 얻을 수 있다.

대역 필터의 이상적인 형태는 해당 주파수 대역 내에 있는 주파수 성분은 통과시켜야 하지만 다른 주파수 영역에서는 완전하게 제거하지만 사용하는 필터는 대역폭에서 가장

자리 부분의 주파수 성분을 완전하게 제거할 수가 없다. 필터 대역폭을 정의하는데 사용하는 방법은 백색잡음(white noise)을 필터에 통과시켰을 때 입력의 에너지레벨과 동일한 출력을 가지는 측면이 이상적인 직선으로 된 필터의 폭으로 정의할 수 있는데 이를 유효잡음 대역폭(effective noise bandwidth)라고 한다.

필터 대역폭의 다른 정의는 입력을 정상적인 전달레벨보다 3 dB만큼 낮은 곳을 필터의 폭으로 정의하는 것으로 비교적 낮은 선택도를 가진 필터를 비교할 때 사용한다.

주파수 분석에서 사용하는 필터에는 대역폭의 특성에 따라 일정폭 필터와 정비폭 필터가 있다. 일정폭(constant band width) 필터는 필터의 정수가 변하지 않는 대역으로 구성된 것이며, 정비폭(constant percentage band width) 필터는 주파수 대역이 동조된 중심주파수에 대하여 일정한 백분율을 가지는 필터이다.

일정폭과 정비폭 필터 모두 선형 주파수축과 대수 주파수축으로 표현이 가능하며 대수 축에서 정비폭 필터는 일정한 대역폭으로 나타나고 넓은 주파수 대역을 표현할 때 용이하다. 선형 주파수축에서는 일정폭 필터가 일정하게 나타나게 되는데 비해 정비폭 필터는 주파수의 증가에 따라 표시되는 폭이 증가하는 것으로 나타난다.

일정폭 필터는 고주파수 대역에서 분해능이 좋으며 주파수 축이 선형적이기 때문에 조화 모드를 표현하는데 유용하며, 정비폭 필터는 넓은 주파수 영역의 표시가 가능하기 때문에 주파수 분포와 경향을 쉽게 파악할 수 있으므로 진동측정에 많이 활용하고 있다. 주파수 분석의 분해능은 통과 대역의 좁은 정도를 나타내는 필터 선택도에 따라 결정된다. 좁은 대역폭 필터를 사용하면 진동 스펙트럼에서 피크값을 쉽게 파악할 수 있으므로 세밀한 분석이 가능하다.

주파수 분석시 협대역 필터를 사용하여 세밀한 분석을 처음부터 사용하는 것보다 광대역 필터를 사용하여 예비분석을 하고 난 후 관심 주파수 대역에 대하여 협대역 필터를 사용하면 효과적이다.

순차분석 방법은 일정폭 필터나 정비폭 필

터중에서 하나의 필터를 사용하는 아날로그 방법으로 필터의 중심주파수를 연속적으로 변경시켜 관심주파수 영역을 분석한다. 임의의 시간에 한 개의 필터위치가 측정되므로 넓은 주파수 범위를 좁은 밴드폭으로 분석하기 위해서는 많은 시간이 요구되는데 정상상태 신호나 반복적인 신호에 유용하다. 순차분석을 직렬분석이라고도 하며 동조필터(turnable filter)를 사용하여 연속적으로 주파수 대역을 변환시키면 광대역 주파수분석이 가능하다.

실시간 분석(real time analysis)은 여러 개의 필터를 동시에 가동하는 것으로 분석속도가 빠르기 때문에 비정상 신호를 즉시 분석할 수 있다. 여기서 실시간이란 측정 데이터가 입력하는 것과 같은 비로 결과가 만들어지는 것을 의미한다.

4. 기록계

진동측정한 결과에 대한 데이터를 기록하는 것은 분석, 평가 및 보존을 위하여 매우 중요하다. 진동 측정레벨은 시간의 변화에 대한 것과 주파수에 따른 값을 기록할 수 있으며 진동뿐만 아니라 소음 등의 기타 물리량을 기록할 수 있는데 이는 전기 신호를 데이터나 그래프에 기록하는 것이다.

레벨 기록계(level recorder)는 진동이나 소음을 기록하는 장비로 시간의 변화에 따라 측정값을 그래프로 기록할 수 있고 미리 교정된 용지에 주파수 스펙트럼을 자동적으로 기록할 수 있는 장비이다. 측정 레벨 범위를 조정할 수 있도록 전체 범위를 몇 단계로 구분하여 조절이 가능하며 건축구조물의 부지 등 외부환경에서 기록이 가능하도록 배터리 구동형이 있다. 레벨 기록계는 대수 전위차계, 증폭기, 실효치 정류회로, 서보기구 등이 내장되어 기록을 편리하도록 되어 있다.

테이프 레코더(tape recorder)는 현장에서 신호를 테이프에 저장하여 실험실에서 분석하거나 측정된 값에 대한 동일한 신호를 분석하기 위하여 여러 번의 반복신호를 필요로 할 때 사용하게 되며 아날로그 방식과 디지털 방식이 있다.

아날로그 방식은 측정신호를 마그네틱 테이프에 기록할 때 신호와 교류 바이어스를

중첩하여 기록하는 직접기록과 변조기술을 사용하여 반송파의 형태로 기록하는 주파수 변조방식이 있는데 이는 저주파수 대역까지 기록 및 재생할 수 있으므로 진동 신호의 저장에 사용할 수 있다.

디지털 방식은 측정 신호를 샘플링하여 디지털로 변환하여 테이프에 기록하고 D/A (digital to analog) 변환기를 사용하여 재생하는 것으로 신호의 왜곡을 최소화하고 신호가 충실한 특징이 있으며 DAT(digital audio tape) 레코더로 알려지고 있으며 멀티 채널로 구성되어 있어서 동시에 몇 개의 신호를 저장할 수 있다.

5. 진동 측정

5.1 개요

진동계의 종류는 크게 진동변위(m), 진동속도(m/s) 및 진동가속도(m/s^2)를 계측하며 이는 기계진동이나 구조물 진동 측정에 사용한다.

측정진동레벨이란 대상이 되는 진동배출원을 가능한 최대출력으로 가동시킨 상태에서 측정된 진동레벨을 의미하며, 암진동(background vibration) 레벨은 대상 배출진동원의 가동을 중지한 상태에서 측정된 진동레벨이다. 대상 진동레벨이란 측정진동레벨에 암진동을 보정한 값으로 정의하며, 평가진동레벨이란 대상 진동레벨에 진동의 특성, 측정시간대 및 지역별 등의 보정치를 보정하여 구한 값이다.

건축구조물에서 사람의 전신진동에 대한 진동노출의 평가관련 규정에서는 ISO 2631-2에서는 1/3 옥타브 밴드로 1~80 Hz까지 20개의 중심주파수를 사용한다⁽⁵⁾. ISO 2631-3에서는 1/3 옥타브 밴드 중심주파수로 0.1~0.63 Hz까지 9개 즉 0.10, 0.125, 0.16, 0.20, 0.25, 0.315, 0.40, 0.50, 0.63 Hz를 사용하는 주파수로 한다⁽⁶⁾.

진동측정에 대한 데이터를 dB로 표현할 때 유럽지역과 미국, 일본과는 기준값을 다르게 적용하고 있기 때문에 구분하여 적용하여야 한다. 진동가속도레벨에 대하여 비교하면 기준값이 한국과 일본에서는 $10 \sim 5 m/s^2$ 을 적용하며, 유럽에서는 ISO R 1683을 적용하여 $10 \sim 6 m/s^2$ 이며 가속도, 속도 및 힘에 대한

표 1 진동관련 물리량에 따른 dB의 정의와 기준값

물리량	정의 [dB]	기준값
진동가속도레벨	$20 \log(a/a_0)$	$a_0 = 10^{-6} m/s^2$
진동속도레벨	$20 \log(v/v_0)$	$v_0 = 10^{-9} m/s$
진동 힘 레벨	$20 \log(F/F_0)$	$F_0 = 10^{-6} m/s^2$

정의와 기준값은 표 1과 같다⁽⁷⁾.

구조물에 대한 진동응답의 측정을 위한 진동 발생원은 교통진동, 철도, 브레이커, 토목공사를 위한 작업, 발파작업 및 건물내의 각종 장비류 등을 들 수 있으며 이로 인한 건축구조물의 거동은 구조물의 형태, 높이 및 기둥이나 보의 형식에 따라 응답은 다양하게 나타나게 된다.

진동을 측정함에 있어서 변환기는 센싱 메카니즘에서 고유진동수 상한 영역과 하한 영역에서 선형성을 가지는 것이 있는데 구조물의 진동측정에 사용하는 속도 픽업 또는 지오폰(geophone)은 고유공진 이상의 범위에서 사용되는 센서로 위상 정보를 유용하게 활용할 수 있다. 압전형 가속도계는 공진주파수 아래의 영역에서 사용되는 센서이다.

구조물에 있어서 측정환경의 변화에 따른 측정 물리량을 언급한 것으로 건축구조물의 진동과 평가에 대한 가이드 라인의 규정인 ISO 4866에서는 진동원의 형태에 따라 주파수 대역과 진폭범위, 속도범위 및 가속도 범위를 표 2과 같이 주요 관심 대상으로 하고 있다⁽⁸⁾.

5.2 센서 설치

진동을 측정하려는 방향과 센서의 주축의 방향은 반드시 일치하게 설치하여야 하며, 압전형 가속도계는 주축방향의 직각방향에도 어느 정도 미소하게 반응하지만 이는 주축방향의 1~3%이하이므로 거의 무시할 수 있다. 비접촉식 센서는 측정면과 센서의 조사방향은 90도의 각도를 반드시 유지해야 하며 어떤 각도를 가질 경우에는 $\sin\theta$ 만큼 측정값의 오차가 발생하게 된다.

센서의 설치는 측정 대상물의 주 발생위치에 하여야 하며 건축구조물일 경우에는 기둥, 보, 바닥, 천정, 그라운드 및 부지경계선 등에 설치하게 되는데 측정 목적에 가장 부합하게 하여야 한다. 건축 구조물내에 배치하고 있는

표 2 진동원에 대한 구조체 응답 범위

진동 구분	주파수범위 [Hz]	진폭 [μm]	입자속도 [mm/s]	입자가속도 [m/s^2]	시간특성	측정량
교통-도로,레일,구조체전달	1~80	1~200	0.2~50	0.02~1	C/T	pvth
발파진동-구조체전달	1~300	100~2500	0.2~500	0.02~50	T	pvth
Pile driving-구조체전달	1~100	10~50	0.2~50	0.02~2	T	pvth
기계외부-구조체전달	1~300	10~1000	0.2~50	0.02~1	C/T	pvth/ath
음향-교통,기계외부	10~250	1~1100	0.2~30	0.02~1	C	pvth/ath
기류흐름	1~40	-	-	-	T	pvth
기계내부	1~1000	1~100	0.2~30	0.02~1	C/T	pvth/ath
인간활동-충격	0.1~100	100~500	0.2~20	0.02~5	T	pvth/ath
인간활동-직접	0.1~12	100~5000	0.2~5	0.02~0.2	T	pvth/ath
지진	0.1~30	10~105	0.2~400	0.02~20	T	pvth/ath
바람	0.1~10	10~105	-	-	T	ath
내부 음향	5~500	-	-	-	-	-

C=Contineous, T=Transient, pvth=Particle velocity time history, ath=Acceleration time history

각종 기계류에 대하여는 장비가 가지는 진동 발생원과 전달경로 등을 고려하여 측정지점을 선정하여야 한다. 가속도계의 적절하지 못한 고정은 공진주파수의 감소를 야기하게 되고 가속도계의 유용한 주파수 한계 즉 상한한계를 감소시킨다. 가속도계의 설치방법에 따른 상한주파수는 표 3과 같고 실제 사용구간은 공진주파수보다 약 20 %이하로 설정하기를 권장한다.

가속도계를 측정면에 고정하기 위하여 고정면 사이에 그리스(greece)를 바르면 센서와 측정면 사이의 고정강성이 다소 증가하게 되며, 나사못으로 고정할 때 측정대상물의 나사부가 충분히 길어야 한다.

밀랍(bees wax)을 사용하여 센서를 고정할 때는 측정 주변 환경의 온도와 진동레벨의 크기를 고려하여야 하는데 온도가 40°C 이상이 되면 밀랍이 연해질 우려가 있으며 진동 측정레벨이 100 m/s^2 이하에서 사용이 가능하다.

표 3 설치 방법에 따른 가속도계의 공진주파수

설치방법	공진주파수 (Hz)
나사못으로 고정	31,000
밀랍으로 고정	29,000
경질 접착제로 고정(에폭시, 순간접착제)	28,000
연질 접착제로 고정	20,000
운모와셔와 절연나사로 고정	28,000
마그네틱으로 고정	7,000
탐침봉(probe)을 사용한 손으로 고정	2,000

다. 센서를 부착하기 위하여 접착제를 사용할 때 부드러운 아교는 유효 주파수영역이 경질 접착제에 비하여 약 25% 감소시키기 때문에 경질 접착제인 에폭시나 순간접착제를 사용하면 공진주파수 27 kHz를 기대할 수 있다.

운모와셔와 절연나사는 센서의 몸체가 측정물로부터 전기적인 절연을 요구될 때 사용된다. 센서를 마그네틱으로 고정하는 방법은 측정에 있어서 매우 쉬운 방법이며 자석의 접착력은 센서의 크기에 따라 다르고 중요한 인자로 작용하며 일반적으로 측정 가능한 진동레벨은 1~2 km/s^2 까지이다.

센서를 측정점에 손으로 탐침봉을 사용할 때는 신속한 측정이나 조사에 유용하며 손의 움직임의 영향으로 오차가 발생할 가능성이 있으므로 반복적인 측정할때와 정밀한 측정에는 사용이 어렵다. 이 때는 고주파수 대역의 신호를 차단하기 위하여 저역통과 필터를 사용한다.

진동측정시 주위의 영향으로는 온습도 변화, 전자기 영향, 횡진동의 영향, 측정지점에 대한 베이스 부분의 변형, 음향 소음, 부식물질, 연결 케이블 진동, 접지 회로 등을 고려할 수 있다.

압전형 가속도계를 측정 대상물이 250°C 이상의 온도 표면에 고정될때는 방열판과 운모 와셔를 측정표면과 센서 베이스 사이에 넣으면 350~400°C까지는 측정할 수가 있으며 이때 센서에 냉각공기를 이용하여 온도를 저감하면 보다 좋은 상태를 유지할 수 있다.

그러나 압전 세라믹의 일반적인 특성은 250°C 이상에 놓이게 되면 감도가 영구 변형하게 되므로 각별한 주의가 요구된다.

압전형 가속도계는 접지회로에 있어서 가속도계와 측정장비가 분리 접지됨에 따라 가속도 케이블로 전류가 흐르게 될 수 있는데 이를 방지하기 위하여 절연 나사못이나 운모 와셔로 가속도계의 베이스를 전기적인 절연을 하여야 한다.

센서와 측정기 또는 전치증폭기에 연결하는 케이블의 기계적인 운동인 인장, 압축 및 굽힘에 의하여 마찰전기 잡음이 발생하는데 이를 방지하기 위하여 흑연화 처리한 케이블을 사용하던가 기구적인 운동을 제한할 수 있도록 아교나 테이프로 고정시키야 한다. 전기 및 자기장이 형성되어 있는 장소에서 진동을 측정할 때 전자기 잡음의 영향을 받아 오차를 발생할 수 있는데 이는 전자기 차폐장치를 활용함으로 방지할 수 있다.

건축 구조물에 대한 진동측정지점은 측정 목적과 부합하는 곳이어야 하는데 구조물 바닥의 거동이라면 기둥과 기둥사이의 노드에 위치하지 않는 슬래브이어야 하고 구조물 전체의 응답을 필요로 하면 기둥이나 보의 위치에 측정지점을 선정하여야 한다. 때때로 바닥이나 벽의 진동레벨이 스펙의 중간지점에서 최대값 또는 최소값으로 되는 경우를 볼 수 있다.

공해진동에 대한 진동측정지점은 공장이나 건설작업장에서는 사업장의 부지경계선이 되고 도로교통에서는 도로부지 경계선에서 측정지점이 된다. 일본 국철에서는 대상으로 하는 건물 등으로부터 1 m정도 떨어진 지반에서 대상으로 하는 건물에 존재하는 지역의 진동을 대표한다고 인정되는 지점으로 선정한다.

진동피입의 설치장소는 옥외지표를 원칙으로 하고 복잡한 반사, 회절현상이 예상되는 지점은 피하고 진동 감쇠물이 없고 충분히 다져서 단단히 굳은 장소로 한다. 또한 경사 또는 요철이 없는 장소로 하고 수평면을 충분히 확보할 수 있는 장소로 하고 온도, 자기, 전기 등의 외부영향을 받지 않는 장소에 설치한다.

5.3 진동 보정

진동가속도레벨이란 진동가속도레벨계의 감

각보정회로를 통하지 않고 측정된 값으로 진동의 물리량을 레벨로 나타내며 단위는 [dB]이다.

건축구조물의 진동측정은 진동가속도레벨로 측정하여도 되지만 건축구조물내에 인간이 거주하기 때문에 공해진동의 의미를 적용하여야 할 필요성이 있을 때에는 인체 감각을 적용하는 것이 더욱 의미가 있다.

진동레벨 V 는 진동가속도레벨의 입력신호가 감각보정회로를 통하여 측정된 값으로 인체의 감각량으로 환산한 것이며, 단위의 표기는 수직 감각보정회로를 적용하였을 때는 [dB(V)]이고 수평 감각보정회로를 적용하였을 때는 [dB(H)]이다.

$$V = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_0} \right) \quad [dB]$$

$$a = [\sum a_n^2 \cdot 10^{(c_n/10)}]^{1/2}$$

여기서

a_0 : 기준진동가속도 (= 10⁻⁵ m/s²)

a : 진동감각 보정을 한 진동가속도 실효값

a_n : 주파수 nHz의 성분인 진동가속도의 실효값

c_n : 주파수 nHz에 있어서 상대응답

(표4 참조)

진동을 측정된 데이터가 응답의 평탄특성에서 $c_n = 0$ 일 때 $20 \log_{10}(a/a_0)$ 를 진동가속도레벨이라고 한다.

수감축이란 진동 피입이 최대의 감도를 가지는 방향을 말하고 횡감도란 수감축에 직각인 임의의 방향에 대한 감도를 의미한다. 감각보정회로에 대한 관련 규격은 KS C 1507, ANSI S3.29, ASA 48 및 ISO 2631이 있으며 KSC 1507에서 제시하는 주파수 대역에 따른 종합주파수 응답 특성을 사용한다.

6. 건축구조물 진동관련 기준

빌딩에서 구조체 진동은 DIN 4150에서 정하고 있는데 주파수 1~80 Hz에서 건축구조물 바닥을 통하여 사람에게 전달되는 진동에 대한 내용이며 진동가속도, 진동속도 및 진동변위에 대하여 KB 값을 도입하고 있다⁽⁹⁾.

$$KB = a \frac{a}{\sqrt{1+(ff_0)^2}}$$

소특집 : 건축구조물의 진동

표 4 건축지역에 따른 건축구조물 실내에서 KB 허용값

항목	건축 지역	연속진동(낮/밤)	충격진동(낮/밤)
1	주택가, 주말 별장지역, 교외	0.2(0.15)/0.15(0.1)	4/0.15
2	대단위마을, 혼합 및 중심지역	0.3(0.1)/0.2	8/0.02
3	상업지역, 사무실 지역	0.4/0.3	12/0.3
4	공업지역	0.6/0.4	12/0.4
5	특별 거주지역	0.1~0.6/0.1~0.4	4~12/0.15~0.4

()은 약 5 Hz이하의 주파수에서 건물의 수평진동에 대한 허용값이다.

표 5 짧은 주기 진동의 효과를 평가하기 위한 진동속도⁽¹⁰⁾

라인	구조물 형식	진동속도 [mm/s]			
		기초부분			최고층 바닥면 혼합한 주파수
		10 Hz이하	10~50 Hz	50~100*) Hz	
1	상가빌딩, 산업빌딩	20	20~40	40~50	40
2	주택	5	5~15	15~20	15
3	진동에 민감한 구조물	3	3~8	8~10	8

*) 100Hz이상의 주파수에 대해서는 제시한 범위의 최소값

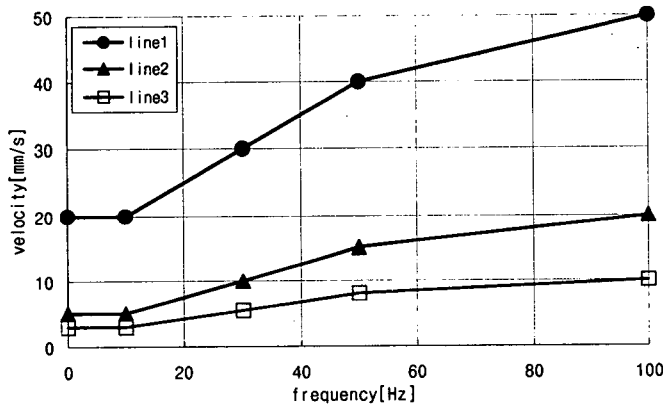


그림 1 진동의 효과를 평가하기 위한 진동속도(DIN4150)

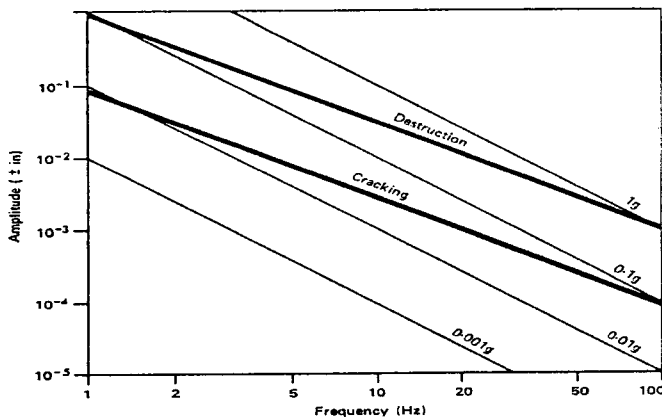


그림 2 구조물에 대한 진동가속도의 영향(Waller)

$$= v \frac{B f}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}}$$

$$= x \frac{\gamma f^2}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}}$$

$$a = \frac{20.2}{m/s^2},$$

$$\beta = \frac{0.13}{mm/s},$$

$$\gamma = \frac{0.80}{mm}$$

여기서

a : 가속도 (m/s^2),

v : 속도 (mm/s),

x : 변위 (mm) 이고

f : 주어진 운동의 주파수이고

f_0 : 기준진동수 5.6 Hz이다.

Waller는 건축구조물에 진동가속도의 영향을 주파수 1~100 Hz까지 구조물의 균열과 파괴에 대한 기준을 그림 2와 같이 제안하였다⁽¹¹⁾.

참고 문헌

- (1) 한국소음진동공학회, 1994, "소음진동 편람".
- (2) ISO 17025, 1998, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement".
- (3) Torben R. Licht & Henrik Andersen,

1987, "Trends in Accelerometer Calibration",
Bruel & Kjaer Technical Review No. 2, pp.
23~42.

(4) KS C 1507, "진동레벨계".

(5) ISO 2631-2, "Evaluation of Human
Exposure to Whole-Body Vibration Part 2 :
Continuous and Shock-Induced Vibration in
Buildings(1 to 80 Hz)".

(6) ISO 2631-3, "Evaluation of Human
Exposure to Whole-Body Vibration Part 3 :
Evaluation of Exposure to Whole-Body
z-axis Vertical Vibration in Frequency
Range 0.1 to 0.63 Hz.

(7) Bruel & Kjaer, 1993, "Measuring
Vibration", Denmark.

(8) ISO 4866, "Mechanical Vibration and
Shock - Vibration of Buildings - Guidelines
for the Measurement of Vibrations and
Evaluation of Their Effects on Buildings".

(9) DIN 4150 Part 2, "Structural Vibration
in Buildings : Effects on Humans in
Buildings".

(10) DIN 4150 Part 3, "Structural
Vibration in Buildings : Effects on
Structures".

(11) R.A. Waller, "International Series of
Monographs in Civil Engineering Volume 2
: Building on Spring", Pergamon Press
Ltd., pp. 23~24.

(12) DIN 4150 Part 1, "Structural Vibration
in Buildings : Principles, Predetermination
and Measurement of Vibration Parameters".

(13) ISO 10137, "Base for Design of
Structures-Serviceability of Buildings Against
Vibration".

(14) Cyril M. Harris and Charles E.
Crede, "Shock and Vibration Handbook",
McGraw -Hill Book Co.