

진동 가속도계

이 두 익*

(한국표준과학연구원 음향진동그룹)

1. 머리말

오늘날 진동 측정은 다양한 분야에서 광범위하게 이루어지고 있다. 진동 측정은 원리적으로 변위, 속도 또는 가속도를 측정하면 된다. 사실 이들 세 가지 중 어느 하나만 측정하면 나머지 둘의 스펙트럼은 각 주파수(angular frequency) ω 를 나누거나 곱하여 계산할 수 있다.

진동 변환기(픽업 또는 센서로도 부름)는 그에 가해지는 측정량(충격 또는 진동 운동)을 전기신호(또는 광학 및 기계신호)로 변환해주는 장치를 말한다. 진동 변환기는 사용되는 변환 소자에 따라 압전형(piezoelectric type), 변형 게이지, 압저항형(piezoresistive type), 자기유도형(inductance type), 정전용량형(capacitance type), 전자기식(electromagnetic element), 광학식, 자기저항형(magnetostrictive type) 등의 변환기로 나누어진다.⁽¹⁾ 변환기 출력이 비례하는 양에 따라서도 분류하며, 출력이 가속도, 속도 및 변위에 비례한다면 각각 가속도계, 속도 변

환기 및 변위 변환기로 부른다.

측정될 진동양의 예상되는 진폭과 주파수 범위를 고려하여 필요한 감도와 주파수 응답특성을 갖는 진동 변환기를 선택할 수 있으며, 진동 스펙트럼의 형태에 관해 뭔가 알고 있다면 변위, 속도 또는 가속도 중 전체 측정대역에서 가장 평탄한 스펙트럼의 전기적 출력을 갖는 것을 선정하는 것이 좋다.

여기서는 압전형 가속도계, 압저항형 변환기, 힘평형 서보 가속도계 등 대부분의 충격 및 진동 변환기가 바탕을 두고 있는 관성형 변환기(질량-스프링계 변환기)의 일반 동작 원리와 진동 변환기의 주요 성능특성 인자들을 소개한다. 충격 및 진동 변환기의 적절한 사용을 위해 변환기의 교정과 현장 사용시 고려하여야 할 점들에 대해서도 간략히 설명하였다.

2. 진동 변환기

원리적으로 충격이나 진동은 공간상의 고정된 한 점을 기준으로 하여 아래의 두 가지 방식으로 측정된다.

(1) 고정좌표 변환기(Fixed - reference transducer) 변환기의 한 단자는 공간상에

* E-mail : dhlee@kriss.re.kr

고정된 한 점에 부착되어 있다. 다른 한 점은 운동이 측정될 물체에 부착된다.

(2) 질량-스프링 계 변환기 (관성형 변환기).⁽¹⁾ 질량-스프링 계의 측정면(바닥면)이 유일한 단자이다. 측정면은 진동이 측정될 점에 부착되고, 이 측정점의 진동은 측정면에 대한 관성질량의 운동으로부터 추론된다.

2.1 질량-스프링 계 변환기의 동작원리

움직이는 차량이나 미사일과 같이 대부분의 경우 충격이나 진동 측정을 위해 고정된 기준점을 설정하는 것은 불가능하다. 따라서 진동 측정에 사용되는 많은 변환기들은 질량-스프링 계(mass-spring system)의 응답을 이용한다. 그림 1은 질량-스프링 계 변환기를 도식적으로 보여준다. 관성질량 m 이 강성이 k 인 스프링과 감쇠계수 c 의 감쇠기에 의해 변환기 몸체 a 에 연결된 구조를 갖는다. 우리가 측정하고자 하는 양은 고정된 기준에 대한 운동 물체의 변위 u 이다. 질량-스프링 계에 가해지는 외부 입력에 대한 관성질량의 응답을 해석하게 되면, 질량-스프링 계를 운동 물체에 부착하여 변위,

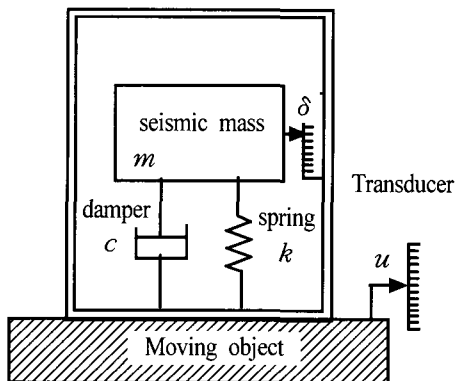


그림 1 질량-스프링 계 진동 변환기

속도 또는 가속도를 측정할 수 있는 변환기로 작동하는 원리를 이해할 수 있다. 관성질량-스프링 계 변환기는 계의 주파수 응답 특성 곡선에서 활용하는 주파수 범위와 변환기 안에 사용되는 변환소자가 감지하는 양이 상대 변위, 상대 속도, 또는 상대 가속도 인지에 따라 변위 변환기, 속도 변환기 또는 가속도계로 구분된다.

관성질량-스프링 계에서 베이스의 변위를 u , 베이스 (또는 케이스)와 관성질량 사이의 상대변위를 δ 라 하면, 공간상의 어떤 고정된 기준에 대한 관성질량의 상대변위는 $\delta + u$ 이고 관성질량을 가속시키는 힘은 $m[d^2(\delta + u)/dt^2]$ 이다. 따라서 관성질량에 의해 스프링과 감쇠기 조합에 가해지는 힘은 $-m[d^2(\delta + u)/dt^2]$ 로 주어진다. 스프링에 의해 작용되는 힘과 감쇠기에 의해 작용되는 힘은 각각 $-k\delta$ 와 $-c(d\delta/dt)$ 이다. 이들 힘들의 합은 0이 되어야 하므로 관성질량-스프링 계의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m \frac{d^2\delta}{dt^2} + c \frac{d\delta}{dt} + k\delta = -m \frac{d^2u}{dt^2} \quad (1)$$

변환기 베이스에 $u = u_0 \cos \omega t$ 의 정현진동이 가해진다고 가정하면 식 (1)의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = e^{-c/2m}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) + \frac{mu_0\omega^2 \cos(\omega t - \theta)}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (2)$$

여기서 감쇠 공진 주파수(damped natural frequency) ω_d 와 위상지연(phase lag) θ 는 다음과 같다.

$$\omega_d = \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \quad (4)$$

식 (2)에서 A 와 B 는 초기상태와 경계 조건으로부터 결정되며, 첫 번째 항은 시간이 경과하면 소멸되어 버리는 과도항이며 두 번째 항은 정상상태의 진동을 나타낸다. 즉, 과도항을 무시하면 변환기의 응답은 $\delta = \delta_0(\cos \omega t - \theta)$ 로 주어진다. 그러면 식 (2)의 해는

$$\frac{\delta_0}{u_0} = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\omega \frac{c}{m}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega \frac{c}{m}}{\frac{k}{m} - \omega^2} \quad (6)$$

변환기의 비감쇠 공진 주파수(undamped natural frequency) f_n 은 감쇠가 없을 때 ($c=0$) $\delta_0/u_0 = \infty$ 인 주파수 또는 $\theta=90^\circ$ 일 때의 주파수이다.

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ rad/s} \quad (7)$$

따라서 스프링의 강성이 크고 질량이 가벼우면 변환기의 공진 주파수는 높아지고, 반대로 강성이 작고 질량이 크면 공진 주파수는 낮아진다.

변환기의 감쇠는 감쇠비 ζ 를 사용하여 나타내며,

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (8)$$

여기서 $c_c = 2\sqrt{km}$ 는 임계 감쇠상수(critical

damping coefficient)이다.

무차원의 주파수비 ω/ω_n 과 감쇠비 ζ 를 사용하여 변환기의 응답특성을 표현하면

$$\frac{\delta_0}{u_0} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (10)$$

식 (5)로 주어지는 질량-스프링 계 변환기의 응답은 $\ddot{u} = -u_0\omega^2$ 을 대입하여 가진 가속도 크기 \ddot{u}_0 에 대한 관성질량의 상대 변위 진폭 δ_0 의 비로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\delta_0}{\ddot{u}_0} = -\frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (11)$$

그림 2, 3 및 4는 각각 여러 가지 값의 감쇠비 ζ 에 대해 주파수 비 ω/ω_n 에 따른 δ_0/u_0 , δ_0/\ddot{u}_0 및 θ 의 변화를 보여준다.

식 (9)와 그림 2로부터 ω/ω_n 이 1보다 큰 영역에서 가진 주파수가 증가함에 따라 δ_0/u_0 은 1에 접근하는 것을 알 수 있다. 이것은 질량-스프링 계를 진동 변위에 비례하여 신호의 크기가 변화되는 변환기, 즉 변위 변환기로 사용할 수 있음을 말해준다. 이 경우 변환기는 질량-스프링 계의 공진 주파수 이상의 주파수 영역에서 사용하여야 한다.

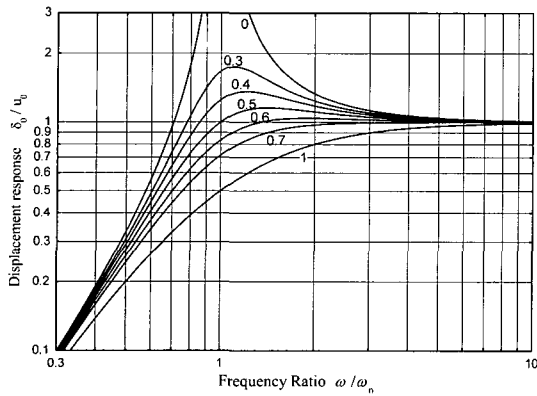


그림 2 질량-스프링 계 변환기의 변위 응답

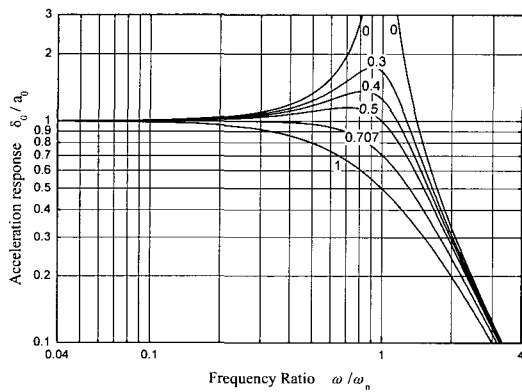


그림 3 질량-스프링 계 변환기의 가속도 응답

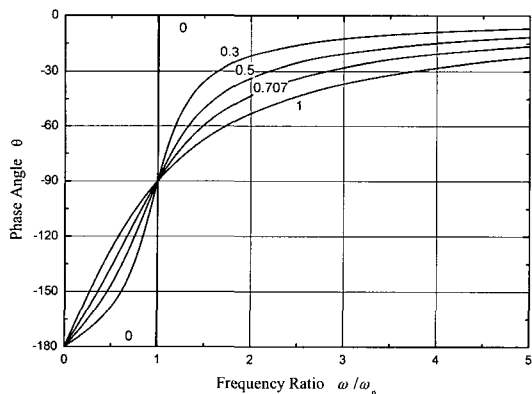


그림 4 질량-스프링 계 변환기의 위상응답

2.2 가속도 변환기

그림 3에서 보는 것처럼 상대 변위 진폭 δ_0 는 ω/ω_n 가 작은 경우 측정되는 정현 진동의 가속도 진폭 $\ddot{\delta}_0 = -u_0\omega^2$ 에 직접 비례한다. 따라서 변환기의 공진 주파수 ω_n 가 높다면 변환기를 가속도계로 사용할 수 있다. 변환기의 감쇠가 적은 경우 그림 3의 주파수 응답곡선은 ω/ω_n 이 0.2 이하인 영역에서 거의 평탄한 것을 말해준다. 이는 비감쇠 가속도계를 진동 주파수가 가속도계 공진 주파수의 20%를 넘지 않는다면 가속도를 측정하는데 사용할 수 있음을 말해준다. 측정 가능한 주파수 범위는 가속도계의 감쇠가 최적의 감쇠값까지 증가함에 따라 넓어진다. 감쇠비가 0.65 정도일 때 가속도계 공진 주파수의 60% 정도에 해당하는 주파수까지 측정 주파수 범위로 잡을 수 있다.

그림 3과 식 (11)에서 볼 수 있듯이 가속도계의 공진 주파수 ω_n 이 커지면 사용 주파수 범위는 증가한다. 그러나 주어진 가속도 \ddot{u}_0 에 대해서 가속도계의 스프링 변위는 $1/\omega_n^2$ 에 비례한다. 즉 공진 주파수의 제곱에 반비례한다. 그 결과 변환소자로부터의 전기적 출력은 아주 작아지기 때문에 높은 배율의 증폭기를 사용하여 기록이 가능한 정도의 크기로 신호를 키워 줄 필요가 생긴다. 이러한 이유로 사용 목적에 따라 감도와 공진 주파수를 적절히 절충할 필요가 있다.

2.3 압전형 가속도계

(1) 압전형 가속도계의 구조

그림 5와 6에서 보는 것처럼 압전형 가속도계는 구성방식에 따라 크게 압축형

(compression type)과 전단형(shear type)으로 나뉘어진다. 압축형 압전 가속도계는 베이스와 관성질량 사이에 압전소자가 위치한다. 압전소자는 관성질량-스프링 계의 이상적인 스프링 역할을 하면서 동시에 진동 신호를 전기신호로 바꾸어 주는 변환기의 역할을 한다. 가속도계 전체가 운동함에 따라 압전소자는 그 위에 부착된 관성질량과 가속도의 곱으로 주어지는 힘을 받으며, 압

전효과(piezoelectric effect)에 의해 작용하는 힘에 비례하는 전하를 만들어 낸다. 관성질량의 질량은 일정하므로 압전소자에서 생성되는 전하량은 결과적으로 가속도계가 받는 가속도에 비례하게 된다.

입력되는 가속도에 비례하여 전하가 생성되도록 압전소자를 사용하는 압전형 가속도계는 그림 1과 같은 간단한 1-자유도 관성질량-스프링로 모델링 된다. 압전형 가속도계의 주파수 응답특성은 베이스의 진동 가속도 \ddot{u}_0 에 대한 베이스에 대한 관성질량의 상대변위 δ_0 의 비 δ_0/\ddot{u}_0 , 즉 식 (11)과 그림 3으로 나타낼 수 있다.

공진 주파수 아래의 주파수 영역에서 ω 가 작아질수록 δ_0 는 \ddot{u}_0 에 직접 비례하며, 주파수에는 무관해진다.

그림 7은 압전형 가속도계의 전형적인 응답특성, 즉 주파수에 따른 감도 mV/g를 보

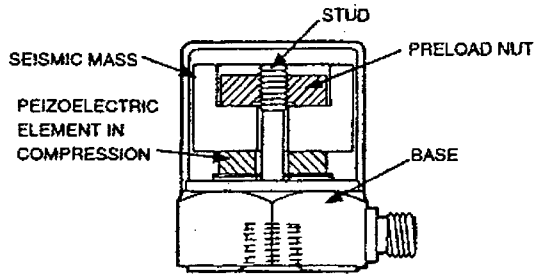
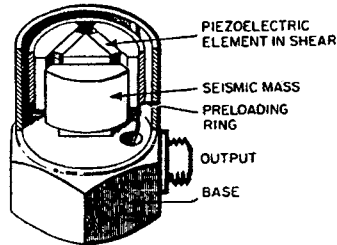
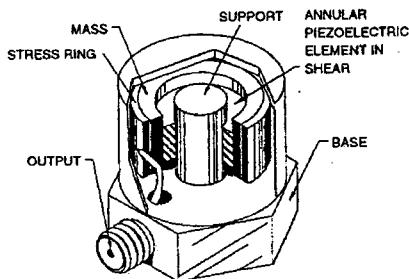


그림 5 압축식 압전 가속도계



(a) Delta-shear type



(b) Annular shear type

그림 6 전단형 압전 가속도계

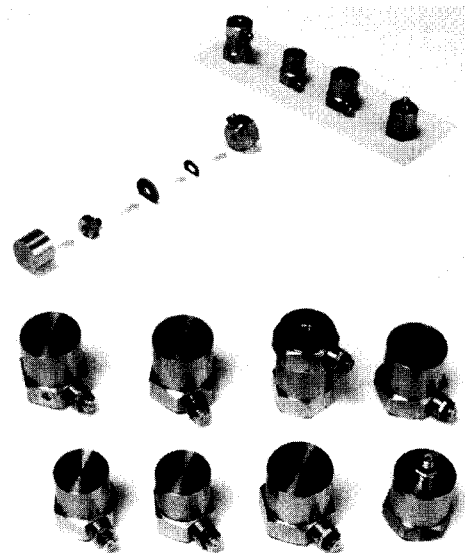


그림 7 압전형 가속도계의 구성 및 조립

여준다. 여기서 f_n 은 공진 주파수를 의미한다. 가속도계를 시험 대상체에 적절히 설치한 경우 사용 주파수 범위의 상한은 평균 감도의 12 % (1 dB) 차이까지 허용할 경우 $f_n/3$, 6 % (0.5 dB) 편차를 허용할 경우는 $f_n/5$ 로 주어진다. 낮은 주파수에서 응답이 떨어지는 것은 가속도계에 연결된 전치증폭기의 특성에 의한 것이다. 사용 주파수의 하한값 역시 평균 감도로부터의 편차로부터 정의된다.

(2) 압전 재료

압전 재료는 기계적인 응력이 가해지면 재료의 표면에 응력에 비례하는 전하가 발생하는 압전효과를 갖는 재료로 수정(quartz), 룯셀염(rochelle salt), 투말린(tourmaline)과 같은 천연 단결정과 BaTiO₃, PZT(PbZrO₃와 PbTiO₃의 고용체) 등 인공적으로 제조되는 강유전성 세라믹(ferroelectric ceramic)이 있다.

강유전성 세라믹은 임의의 원하는 형태로 만들 수 있을뿐만 아니라 사용목적에 알맞은 특성을 갖도록 그 조성비를 조절할 수

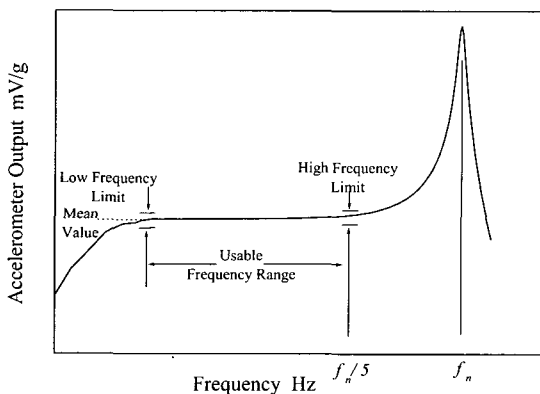


그림 7 압전형 가속도계의 주파수 응답

있어 가속도계 및 동적 힘변환기 등 각종 센서, 초음파 진동자, 비파괴 검사용 초음파 탐침자, 전화장치, 세라믹 필터 등 광범위한 분야에 걸쳐 다양하게 이용되고 있다.

수정과 같은 단결정 압전재료들은 압전변형상수(piezoelectric strain constant)가 낮아 감도가 낮지만 경년변화(aging effect)가 작고 온도 안정성이 우수하여 표준 가속도계에 주로 사용된다.

(3) 전자회로 내장 압전형 가속도계

압전형 가속도계 케이스 내에 간단한 전자회로를 삽입하여 신호를 증폭하고 출력 임피던스를 갖도록 한 것도 있다. 전자회로를 내장한 압전형 가속도계는 케이블에 의한 잡음에 상대적으로 강해 가격이 싼 케이블을 사용할 수 있어 신호 조정(signal conditioning) 비용이 줄어든다는 큰 이점이 있다. 소형인 압전형 가속도계의 이점을 제대로 살리기 위해 전자회로는 가급적 단순한 구조로 부피가 작아야 한다. 그러나 이러한 가속도계의 사용 가능한 온도범위는 내부 전자회로가 동작할 수 있는 온도 범위로 한정되고, 비정상적인 측정환경에 노출되는 경우 파손에 이르는 평균시간으로 평가되는 신뢰지수(reliability factor)는 떨어진다.

(4) 압전형 가속도계의 전기적 특성

압전형 가속도계의 감도는 전하감도(charge sensitivity) Q/\ddot{x} 또는 전압감도(voltage sensitivity) V/\ddot{x} 로 표현한다. 전하감도는 보통 가진 가속도에 대한 전하 출력 pC/ms^{-2} 으로 표시하고, 전압감도는 입력 가속도에 대한 전압 출력 mV/ms^{-2} 으로 나타낸다.

압전형 가속도계와 전하 증폭기를 연결하

는 케이블의 정전용량(capacitance) C_S 는 가속도계 자체의 정전용량 C_E 에 더해져 전압감도를 감소시킨다. 케이블 정전용량 C_S 을 포함한 전압감도는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{V_S}{\ddot{x}} = \frac{Q_S}{\ddot{x}} \frac{1}{C_E + C_S} \quad (12)$$

여기서 Q/\ddot{x} 는 전하감도이다. 케이블이 제외된 가속도계의 전압감도는 다음과 같다.

$$\frac{V}{\ddot{x}} = \frac{Q}{\ddot{x}} \frac{1}{C_E} \quad (13)$$

그러므로 케이블 정전용량의 추가로 인하여 아래와 같이 전압감도의 저하가 일어난다.

$$\frac{V_S/\ddot{x}}{V/\ddot{x}} = \frac{C_E}{C_E + C_S} \quad (14)$$

압전형 가속도계는 전압 증폭기나 전하 증폭기와 연결하여 사용할 수 있으나 외부 정전용량의 부가에 의해서 감도가 변화되지 않는 전하 검출 방식이 일반적으로 사용된다.

2.4 힘평형 서보 가속도계

주로 저주파 진동 측정에 사용되는 힘평형 서보 가속도계 (force-balance servo accelerometer)는 폐회로 궤환 계로서 위치 검출기, 증폭기 및 전기-기계 시스템으로 구성된다. 이러한 구성은 기계적인 힘을 이에 비례하는 전류로 변환시키고 다시 기계적인 힘을 상쇄시키는 반대 방향의 힘으로 변환시키는 역할을 한다. 힘-발생기(forcer)에 결합된 질량의 위치는 위치 검출기로 측정되며, 외부 힘에 의한 관성질량의 위치 변

화에 비례하는 위치 검출기로부터의 신호는 증폭기에 의해 증폭된 후 힘-발생기에 입력되어 관성질량을 원래의 위치로 되돌리기 위한 복원력을 발생시킨다. 가속도계의 출력 신호는 힘-발생기를 통하여 흐르는 전류가 되는데, 이 전류는 입력되는 힘과 크기는 같고 방향이 반대인 복원력에 비례한다. 따라서 입력 가속도는 관성질량에 작용하는 복원력에 비례하게 된다. 입력 가속도가 0이면 힘-발생기에 흐르는 전류는 0이다. 힘-발생기에 흐르는 전류는 이와 직렬로 연결된 저항에서 측정할 수 있으며, 저항의 양단에 걸리는 전압은 가속도계에 가해지는 입력 가속도의 크기에 정확히 비례한다.

힘평형 서보 가속도계는 서보 메카니즘 (servo-mechanism)을 이용하기 때문에 다른 변환기들에 비해 정밀도, 안정도 및 재현성 등의 동적 성능특성이 우수하며, 신호인출용 저항에 캐패시터를 병렬로 연결하여 감쇠를 전자적으로 조절할 수 있는 이점이 있다. 현재 상용으로 시판되는 서보 가속도계는 사용되는 전자회로에 따라 전류 출력형과 전압 출력형의 두 가지로 분류할 수 있다. 전자는 가변 부하에 적합하고, 후자는 일정 부하에 적합하다. 측정대상에 따라 선형 가속도(linear or rectilinear acceleration)와 각 가속도(angular acceleration) 측정용으로 나눌 수 있으며 선형 서보 가속도계는 경사각 측정에 이용할 수도 있다.

정밀 제조설비 및 초정밀 측정장비의 능동 진동제어, 교량이나 대형 구조물들의 동적거동 감시를 통한 안전성 진단과 진동에 대한 인체의 반응 특성 연구 등 저주파 진동 정밀측정 및 평가 기술이 요구되는 분야에서 서보 가속도계가 이용되고 있다.

2.5 진동 변환기의 주요 성능특성인자

감도: 충격 및 진동 측정 변환기의 감도는 명시된 감도축에 평행한 정현 진동을 변환기의 측정면(설치면)에 가할 때, 기계적 입력에 대한 전기적 출력의 비로 정의된다. 보통 감도는 진폭 및 위상의 두 가지 정보를 포함하며, 주파수에 따라 변하는 복소량이다. 가속도계의 감도는 mV/ms^{-2} 또는 $pC/ms^{-2}\dagger$ 와 같이 단위 가속도 당 전기 출력으로 나타내며, 압저항형이나 스트레인 게이지 가속도계는 인가전압에 따라 출력이 달라지므로 $mV/ms^{-2}/V$ 또는 $pC/ms^{-2}/V$ 와 같이 단위 인가전압 당 단위 가속도 당 전기 출력으로 나타낸다. 설치를 잘 한 경우 가속도계의 감도가 규정된 범위를 벗어나지 않는 주파수 범위를 사용 주파수 범위라 한다.

가속도계의 사용 주파수 범위를 고루 포함하도록 옥타브 밴드 또는 1/3-옥타브 밴드로 교정 주파수를 선정하고 이들 주파수에서 측정된 감도를 기준 감도에 대한 비율로 표시하여 가속도계의 주파수 응답을 나타낸다. 교정된 감도의 불확도를 표시하여야 한다.

분해능: 변환기의 분해능은 전기적 출력 변화를 구분할 수 있을 때의 가속도와 같은 기계적 입력의 최소 변화량이다. 가속도계의 분해능은 변환소자와 기계적인 설계에 따라 달라진다.

가속도계와 연결된 기록장치, 지시기 및 다른 보조 기기들이 전체 측정 시스템의 분해능을 결정하기도 한다. 기기의 전기적 출

력이 지시미터로 표시될 때 분해능은 지시미터에서 분간할 수 있는 최소 변화량으로 주어진다. 일반적으로 잡음 수준보다 낮은 신호의 변화는 잡음에 묻혀버리기 때문에 기기나 시스템의 잡음 수준이 분해능을 결정한다.

횡방향 감도: 진동 변환기는 정해진 감도축(sensitive axis) 방향의 진동 성분에 대해서만 응답하고, 그 이외 방향의 진동 성분에 대해서는 둔감하도록 설계된다. 그러나 모든 진동 변환기들은 감도축에 수직인 방향의 진동에 대해서도 약간의 응답을 나타낸다. 변환기가 최대 감도축으로 단위 진폭의 진동을 받을 때 전기 출력의 크기 e_{max} 은 감도가 된다. 최대 감도축과 각도 θ 만큼 기울어진 X축 방향(설치면에 수직)의 감도는 $e_{\theta} = e_{max} \cos \theta$ 로 주어진다. Y축 방향 감도는 $e_t = e_{max} \sin \theta$ 이다. 일반적으로 변환기의 감도축은 X축이 되며 이상적으로는 θ 가 0이어야 한다. 실제로는 가공공차와 변환소자의 불균일성 등으로 θ 는 0에 가까운 어떤 값을 갖는다. 횡방향 감도(transverse sensitivity, cross-axis sensitivity)는 e_{θ} 에 대한 e_t 의 비로 정의된다.

$$\frac{e_t}{e_{\theta}} = \tan \theta \tag{15}$$

대부분의 경우 $\tan \theta$ 는 0.01에서 0.05 사이의 값을 갖고 백분율로 표시한다.

진폭 선형성 및 동적 범위, 변환기의 감도가 어떤 주어진 범위 이내로 일정하게 유지될 때 그 진폭 범위 내에서 선형성을 갖는다고 말한다. 변환기는 제한된 진폭 범위 내에서만 선형성을 갖는다. 동적 범위의 하한

† 중력 가속도 g ($\approx 9.8 m/s^{-2}$)를 사용하여 mV/g 또는 pC/g 의 단위로 나타내기도 한다.

은 가속도계에 연결된 신호 증폭기의 잡음 수준에 의해 정해진다. 선형성의 상한은 변환소자의 전기적 특성과 강도 및 변환기의 크기 등으로 제한된다. 가속도계의 설계 특성에 따라 다르지만 공진 주파수 근방의 주파수 성분이 큰 진동에 가속도계가 노출되는 경우 공진에 의해 발생하는 과도한 응력에 의해 비선형 특성이 유발되고 심하면 손상될 수도 있다. 가령 관성질량과 압전소자를 고정시키기 위해 사용한 결합력 이상의 동적 힘이 가해지면 관성질량이 떨리거나 압전소자가 균열될 수 있다. 압전소자의 균열에 의한 영향은 입력 가속도가 낮은 경우 파악하기 어렵다. 매우 큰 동적힘에 의해 가속도계 내부의 압전소자 위치가 약간 이동하는 경우 감도가 변화된다. 측정 가능한 최대 가속도는 가속도계의 설계방식과 구조에 따라 크게 달라지며, 같은 설계방식인 경우라도 다르기 때문에 교정된 범위 이상까지 선형성이 유지된다고 가정할 수는 없다. 측정대역의 감소와 비선형 특성이 커지더라도 압전소자를 보호하기 위해 기계식 필터(mechanical filter)를 사용하기도 한다.

압전형 가속도계는 대부분 동적범위가 90 dB 이상으로 가속도계에 연결되는 기록장치나 분석장비의 동적범위보다는 훨씬 넓다.

주파수 범위, 동작 주파수 범위는 변환기의 감도가 기준 감도로부터 어떤 정해진 한도 이내로 변하는 범위를 말한다. 이 범위는 변환기의 전기적 또는 기계적 특성과 연결된 보조 기기에 의하여 제한된다. 이 범위는 진폭 선형성이 유지되는 범위와 합쳐져 기기의 전체 동작 범위를 결정하게 된다.

하한 주파수: 가속도 변환기의 출력은 변

환기의 공진 주파수보다 낮은 주파수를 갖는 진동의 가속도에 선형적으로 비례하기 때문에 질량-스프링 계 변환기의 기계적 응답특성은 가속도 변환기의 저-주파수 한계에 아무런 영향을 미치지 않는다.

저주파수 하한을 평가할 때는 변환기와 연결되는 장비 모두의 전기적 특성을 고려하여야 한다. 일반적으로 외부 전원을 사용하는 변환소자는 주파수 하한이 없지만, 자가발전형 변환소자는 주파수가 0일 때는 동작하지 않는다. 측정 시스템의 사용 가능한 주파수의 하한은 증폭기와 필터에 의해서도 제한된다.

상한 주파수: 공진 주파수 이하의 주파수 영역에서 사용되도록 설계된 가속도계의 주파수 상한은 변환기의 공진 주파수와 감쇠에 의해 정해진다. 상한 주파수 이상의 영역에서 사용할 경우 측정되는 신호는 위상 지연에 의해 왜곡될 수 있다. 진동 측정기기의 감쇠가 작은 경우 측정되는 진동의 주파수가 기기의 사용 주파수 범위 내에 포함될지라도 진동에 포함된 고조파 성분의 진동을 크게 과장하여 출력하므로 상한 주파수(upper frequency limit)는 중요한 변수가 된다. 감쇠가 작은 변환기가 공진 주파수에서 가진되면 잘못된 측정 결과를 유도하며 나아가 변환기의 손상을 일으킬 수 있다. 이 경우 필터로 공진 주파수 성분을 제거시켜 주지 않으면 연결된 계기에 과부하를 줄 수 있다.

내충격성(survivability): 내충격성은 가속도계가 성능의 변화없이 강한 충격에 견딜 수 있는 능력을 말한다. 가속도계에는 보통 견딜 수 있는 최대가속도를 표시한다. 충

격 측정에 사용되는 가속도계는 수천 g 이상의 측정 범위를 갖는다. 공진 주파수로 가진되는 압저항형 가속도계에서 큰 진폭의 가속도에 의한 응력은 내부 소자들을 파손시킬 수도 있다. 이에 반해 압전형 가속도계는 낮은 내부 응력으로 압저항형보다 견고하다.

위상지연: 위상지연은 기계적 입력과 측정 시스탬의 전기적 출력 사이의 시간 지연이다. 측정 시스템의 위상특성이 나쁘면 여러 주파수 성분을 갖는 진동의 출력신호는 왜곡이 될 수 있다. 가속도계가 감쇠가 없는 경우 ω/ω_n 이 1.0 이하이면 $\theta_1 = 0$ 이다. 따라서 가속도계의 사용 주파수 범위 내의 모든 주파수에 대해 상대변위 δ 의 위상은 측정되는 가속도의 위상과 같다. 이는 감쇠가 없는 가속도계는 위상 왜곡 없이 가속도를 측정한다는 것을 의미한다. 감쇠비 ζ 가 0.65인 경우 위상 θ_1 은 가속도계의 사용 주파수 범위 내에서 주파수비 ω/ω_n 에 거의 선형적으로 비례하여 증가한다. 이 경우 상대 변위는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_0 \cos(\omega t - \theta) \\ &= \delta_0 \cos(\omega t - a\omega) \\ &= \delta_0 \cos \omega(t - a) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 a 는 상수이다. 변환기의 상대 운동 δ 는 측정되는 가속도 \ddot{u} 와 위상 차이를 갖지만 시간에 따른 증가는 주파수와 무관한 상수이다. 결과적으로 가속도계에서 출력되는 파형은 왜곡이 없이 측정되는 진동 입력에 대해 위상지연만 된다. 가속도계의 감쇠가 $\zeta = 0$ 또는 $\zeta = 0.65$ 이외의 값을 가

지면 주파수에 따라 다른 비선형 위상지연이 일어나 출력 파형에 왜곡이 일어난다.

2.6 환경인자 및 환경 감도

온도 영향. 변환기의 감도, 공진 주파수 및 감쇠는 모두 온도의 영향을 받는다. 온도 영향은 가속도계의 종류와 설계방식에 따라 다르며, 감도가 온도에 따라 증가 또는 감소하거나 상대적으로 일정한 것이 있다. 압전형 가속도계는 사용되는 압전소자의 종류와 설계방식에 따라 다르지만 -250°C 부터 $+760^\circ\text{C}$ 이상까지의 온도 범위에서 사용될 수 있는 구할 수 있다. 전하감도는 온도에 따라 변하는 압전소자의 압전변형상수 d 에 직접 비례하여 온도 영향을 받고, 전압감도는 온도에 따라 변하는 전전용량과 전하감도를 통해 온도 영향을 받는다. 주파수 응답 특성 역시 온도에 따라 변한다. 이러한 온도 의존성은 케이블과 커넥터의 절연저항 변화에 의할 수도 있으나 주로 압전소자의 특성 변화로부터 기인한다. 온도영향을 보상해 주기 위해 사용하는 방법으로는 국부적으로 가속도계를 가열하거나 식혀 일정하게 유지하는 것과 가속도계의 온도 특성을 측정하여 보정하는 방법이 있다.

습도: 일반적으로 임피던스가 높은 변환기들이 습도 영향을 받기 쉬우며, 습도 영향의 크기를 정량화 하기는 어렵다. 그러나 습도가 높은 환경에서는 습도의 영향을 막기 위해 커넥터를 밀봉시키는 것이 좋다.

음압 감도: 큰 진폭의 진동은 종종 큰 세기의 음파를 수반한다. 가속도계의 케이스가 음파에 의해 진동하게 되면 의사 진동신호가 발생한다. 일반적으로 잘 설계된 가속도

계는 아주 높은 음압레벨에 노출되지 않는 한 심각한 반응을 보이지는 않는다. 이러한 경우에도 진동 레벨 역시 아주 높기 때문에 가속도계가 음향 소음에 노출되어 발생하는 오차는 보통 미미하다.

변형률 감도: 가속도계 설치면이 변형되면 의사 신호가 출력될 수 있다. 가속도계가 설치되는 면이 평탄하지 않아 일어나기 때문에 보통 바닥면 변형률 감도라고 한다. 변형률 감도는 보통 $ms^{-2}/\mu\epsilon$ 로 표시하며, 여기서 $1\mu\epsilon = 1 \times 10^{-6}$ inch/inch이다.

3. 가속도계의 설치 및 주의사항

시험체에 진동 변환기를 설치하는 방법은⁽²⁾ 고-주파수의 동적 측정에서 아주 중요하다. 가능하다면 시험체에 설치용 홀을 뚫어 나사산을 가공한 후 제작사에서 권고한 토크로 볼트를 사용하여 변환기를 조여 설치하여야 한다. (일부 진동 변환기에는 구입시 설치용 스테드(stud)가 제공된다.) 그러나 설치용 홀을 뚫는 것이 곤란한 상황도 많다. 이런 경우 다른 설치 방법들을 사용하여야 한다.

시험체의 표면이 매끈하고 자성을 갖는 경우 진동이 아주 커지 않다면 영구자석을 이용하여 변환기를 부착시키는 것이 저-주파수 영역에서 괜찮은 방법이다. 다양한 접착제와 양면 접착 테이프를 사용하여 변환기를 부착시킬 수 있는데 제대로 된 부착성능을 얻기 위해서는 상당한 경험을 필요로 한다. (부착강도는 다양하게 변할 수 있으며 특히 고주파수 영역에서 동일한 설치방법을 적용하더라도 큰 차이를 보일 수 있다.) 접착제를 사용하여 변환기를 부착할 때 아래 지침들을 따르는 것이 좋다.

(1) 일반적으로 접착후에도 연성인 접착제의 사용은 피해야 한다. 이들은 고-주파수에서 시험체로부터 변환기를 연결해주는 스프링 역할을 한다.

(2) 변환기를 설치용 블록에 볼트로 결합한 후 설치용 블록을 시험체에 접착제로 고정시키는 방법은 피해야 한다. 시험체에 질량부가효과를 크게 미치고 관심의 측정 대상면으로부터 변환기를 멀리 위치시켜 잘못된 측정결과로 유도할 수 있다.

(3) 폭넓게 사용되고 있는 순간 접착제는 충격에 약하므로 주의하여 사용하여야 한다.

(4) 접착제를 사용하기 전에 적절한 용제를 사용하여 가속도계의 설치면과 가속도계가 부착될 시험체 표면을 깨끗이 닦는다. 접착층은 가급적 얇게 형성되도록 하여야 한다.

변환기의 크기와 무게는 대부분의 진동 측정에서 아주 중요한 고려인자이다. 설치용 구조물을 필요로 하는 큰 기기는 진동이 측정될 시험체의 국부적인 진동특성을 바꿀 수도 있다. 유사하게 변환기의 부가 질량 역시 시험체의 진동 특성을 변화시킬 수 있다. 일반적으로 시험체의 공진 주파수는 질량을 더해주면 감소하며, 특히 단순 스프링-질량 시험체라 가정하면

$$\frac{f_n - \Delta f_n}{f_n} = \sqrt{\frac{m}{m + \Delta m}} \quad (17)$$

여기서 f_n = 시험체의 공진 주파수

Δf_n = 공진 주파수 변화

m = 시험체 질량

Δm = 변환기 부착으로 인한 질량 증가

일반적으로 주어진 형태의 변환소자에 대해서 감도는 변환기의 질량에 비례하여 증가한다. 대부분의 경우 전자적으로 신호를

쉽게 증폭시킬 수 있기 때문에 변환기의 감도보다는 변환기의 크기와 무게가 보다 중요한 인자가 된다.

4. 진동 변환기의 교정

보다 정확한 진동 측정을 위해서는 진동 변환기를 주기적으로 교정하여야 한다. 진동 변환기의 교정은 여러 가지 방법으로 이루어질 수 있다.⁽³⁾ 일반적으로 교정용 진동 발생기 위에 기준 가속도계와 교정될 진동 변환기를 면대면(back-to-back)으로 결합하여 정해진 주파수와 가속도 진폭에서 전기적 출력을 비교하는 비교교정 방법으로⁽⁴⁾ 감도를 결정한다. 불확도는 20 Hz에서 5 kHz의 주파수 범위에서 비교교정 방법으로 교정되는 감도의 확장불확도는 95 %의 신뢰수준에서 2 % 이하이다. 때로는 기준 변환기와 비교하기보다는 교정될 변환기의 진동 변위를 레이저 간섭계로 측정하는 절대교정 방법으로⁽⁵⁾ 교정이 이루어지기도 한다. 정현 진동의 변위 진폭 u_0 와 주파수 f 가 측정되면 대응되는 속도 및 가속도는 각각 $2\pi fu_0$ 및 $-(2\pi f)^2 u_0$ 으로 계산된다. 또한 특별한 전자기식 진동 발생기를 사용하여 가역 교정을 할 수도 있다.

5. 맺음 말

다양한 분야의 동적 진동 측정에서 변위 또는 속도 변환기에 비해 가속도계가 광범위하게 사용되고 있다. 이는 가속도계가 소형, 경량으로 견고하고 공진 주파수가 높아 사용 주파수가 넓은 점 등 여러 가지의 장점을 갖기 때문이다. 이러한 이유로 가속도계를 위주로 질량-스프링 계 변환기의 동작원리, 주요 성능특성과 실제 진동측정에서 고려하여야 할 점들을 소개하였다.

참고 문헌

- (1) Harris, C. M. and Crede, C. E., 1988, Shock and Vibration Handbook, 4th Ed., McGraw-Hill, New York.
- (2) ISO 5348:1998, Mechanical Vibration and Shock-mechanical Mounting of Accelerometers.
- (3) ISO 16063-1:1998, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 1: Basic Concepts.
- (4) ISO 16063-21:2001, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer.
- (5) ISO 16063-11:1999, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry.

안 리

한국소음진동공학회는문집 제 12 권 제 7 호 pp.510~519에 게재된 논문 “엔진 배기 소음기내를 전파하는 약한 충격파에 관한 연구”에서 그림 3, 5, 7, 9의 사진이 MS-Word파일을 HWP파일로 변환하는 과정에서 원본과 달리 인쇄되었습니다.

정확한 사진이 필요하신 분께서는 책임저자(이동훈 회원:Ldh@snut.ac.kr)께 연락하시면 원본이 있습니다.