

고무의 전단 탄성을 이용한 방진마운트 개발

윤 승 원*(한국생산기술연구원), 이 성 춘(대한방음방진주식회사)

Development of Shear Type Rubber Isolator

Seungwon Youn(KITECH), Seong-Choon Lee(DNV)

ABSTRACT

Rubber isolator has many advantages compared with steel spring mount. Rubber has high internal damping and can be formed various shape depending on specific purpose. On the contrary, low modulus of elasticity of rubber results the instability of rubber isolator by buckling phenomenon. This paper presents the development of shear type rubber isolator for industrial application by using shear rigidity property of rubber. The static load-deflection characteristics of developed isolator has been analyzed by the FEM. Consequently, the static load testing and a measure of the effectiveness of a vibration isolator in terms of force transmissibility for developed isolator have been carried out.

Key Words: Isolator(방진기), Shear Rigidity(전단 강도), Isolator Effectiveness(방진기 효율)

1. 서 론

방진마운트는 외부로부터 전달되어 오는 진동 또는 충격을 완충시켜 장비 및 시설물을 보호하거나, 가진원에 의해 발생하는 진동을 외부의 장비와 시설물 또는 운전자에게 전달되지 않도록 격리시켜 주는 기계요소의 일종이다. 방진마운트는 재료나 사용상의 용도, 구조 등의 측면에서 여러가지 종류가 있으며, 산업용이나 건축 현장용으로 사용되고 있는 방진마운트는 재료에 따라 크게 금속재질 및 고무재질 방진마운트로 구분된다^(1,2).

일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 방진재는 금속재질의 스프링 마운트이며 큰 변위, 높은 온도, 사용 환경상 고무와 같은 탄성체를 사용하지 못하거나, 열가의 방진마운트가 요구되는 경우에 많이 사용된다. 스프링 마운트는 주로 스프링강을 코일 형상으로 성형하여 작용 하중 하에 있는 스프링의 탄성 복원력을 이용하는 것이 보통이며, 다른 종류의 재질에 비하여 내구성과 선형성이 탁월하다.

고무재질의 방진마운트는 고무를 탄성을 이용한 대표적인 비금속재 방진마운트로 주로 합성고무 또는 천연고무가 사용되며, 진동이나 소음이 문제되고 있는 경우에 많이 사용된다. 금형을 사용하여 제조

하는 고무재질의 방진마운트는 금속재질의 스프링 마운트에 비하여 방진재 내부의 댐핑 효과가 좋고, 강성 조절이 쉬우며, 임의 형상으로 성형할 수 있어 비교적 넓은 범위에 걸쳐 사용된다. 또한 협소한 공간에 장착하기가 쉽고, 가볍게 만들 수가 있으며, 방진시키려는 대상 금속체에 접합하여 만들 수 있는 등의 장점이 있다. 현재는 주로 네오프렌 고무가 많이 사용되고 있으며, 금속스프링과 비교할 때 선형성이 떨어지고 주위의 온도 변화나 화학 물질에 의한 영향 등에 따라 물성치의 변화가 다소 커서 방진기 효율이 일정하지 않은 단점이 있으나, 고무의 특성상 점성에 의한 내부 저항이 아주 높아 공진 영역에서도 진동의 진폭이 높지 않고, 진동에 대한 과도 응답 시간이 짧아 안정성이 높다. 또한 금속스프링에서 나타나는 서징 현상이 없어 구조 소음의 문제가 일어나지 않으며, 금속과의 접촉 성능이 높아 금속 하우징과 일체형으로 제작되기도 한다.

고무의 여러 가지 물성치 중에서 방진고무의 성질을 나타내기 위한 값으로는 고무의 경도값이 가장 넓게 사용되고 있다. 이 외에 인장 강도, 최대 인장율 및 압축율 등이 사용되고 있으며, 인장 강도는

경도 다음으로 많이 사용되고 있는 물성치이다. 고무의 응력-변형률 선도는 일반 스프링강에서와 같이 선형성이 유지되지 않는다. 이러한 비선형성은 방진마운트를 설계할 때 가장 중요한 변수인 탄성계수 값을 결정할 때 어려움을 준다. 비교적 많이 사용되는 압축의 경우 응력-변형을 곡선은 시험편의 형상계수에도 많은 영향을 받으며, 단면에 대한 길이가 상대적으로 지나치게 크거나 작은 경우에는 더욱 큰 영향을 받게 된다. 이러한 이유에서, 탄성계수 대신에 고무의 경도를 듀로미터(duro-meter)로 측정하여 물성치를 나타내는 방법을 흔히 사용한다. 그러나 듀로미터로 측정한 경도값은 시험편의 형상과 관계가 없는 대략적인 값이다. 듀로미터로 고무면을 누른 변형 부위는 고무의 점탄성 성질에 의하여 접촉 후 5초에서 15초 지나면 복원되어 경도값이 변하기도 한다. 이러한 요소들로 고무의 물성치를 정확하게 측정하는 데에는 어려움이 있다⁽³⁾.

고무의 탄성계수는 금속재료에서 일반적으로 사용되는 탄성계수와 같은 표현으로 나타내지 않고 「신장율 또는 전단을 몇 %에서의 탄성계수」로 구분하여 나타낸다. 고무는 방진용으로 사용되는 경우에는 극한 인장 강도나 변형율에 도달하는 경우가 거의 없어, 「강도」에 의해서라기 보다는 「변형율」에 의하여 물리적인 특성이 결정된다. 방진마운트용 고무의 인장 강도는 일반적으로 35-250kg/cm²이며, 가황 고무의 극한 신장율은 약 150-600% 정도이다. 인장 강도의 값은 고무가 피로 강도, 파단 상태 등에 처해 있을 때에는 중요한 의미가 있으나, 그 외에는 신장율이 더 중요한 값이 된다. 아래의 그림 1은 방진용 고무의 횡탄성계수와 고무 경도와의 관계를 나타낸 것이다.

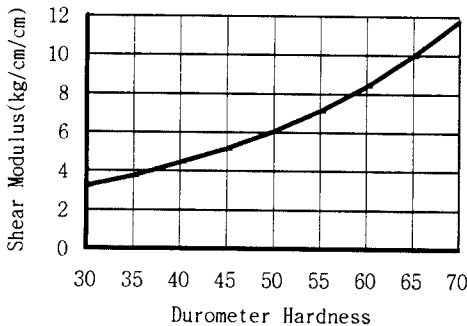


그림 1: 고무의 횡탄성계수(G)

고무는 비압축성 재료로 체적이 변하여 하중을 담당하는 것이 아니라 형상이 변하여 하중을 담당하며, 포아송비가 거의 0.5에 가까운 값을 갖는다. 고

무 재료는 내부의 탄성반발력에 의하여 하중을 가할 때와 하중을 제거할 때의 하중-변형 히스테리시스 곡선이 뚜렷이 나타나는 재료이다. 고무재질 방진마운트의 장·단점은 다음과 같다⁽⁴⁾.

가. 고무재질 방진마운트의 장점

- (1) 하나의 방진고무로 수직 방향에 대해서는 물론이고 수평 방향이나 회전 방향 진동에 대해서도 동시에 방진을 할 수가 있다. 즉, 3축 방향과 회전 방향에 대한 특성값이나 스프링 상수 등을 넓은 범위에서 선정할 수가 있다.
- (2) 지지장치를 비교적 경량, 소형으로 통합할 수가 있으며 금속과 용이하게 접촉된다.
- (3) 방진고무 내부의 마찰이 있어 댐퍼가 불필요하다. 실제 사용시에는 고무의 종류나 기계의 공진점에서의 허용 진폭을 검토할 필요가 있다.
- (4) 고무와 영역에 있어 고체를 절연 능력이 있다.
- (5) 진동수비가 1 이상인 영역에서도 진동전달율이 거의 증대하지 않는다.

나. 고무재질 방진마운트의 단점

- (1) 스프링정수를 아주 작은 값으로 설계하기가 어렵다. 일반적으로 고유진동수 하한값은 4~5Hz이며, 그 이하에서 사용할 필요가 있을 때에는 금속스프링이나 공기 및 유압스프링을 사용하는 것이 좋다.
- (2) 대용량의 것은 급형의 제작과 접촉 등에 비용이 많이 들며, 비교적 중·소형 하중에 사용되는 것이 많다.
- (3) 금속스프링에 비하여 내고온 및 내저온성이 약하다. 천연고무의 사용 온도는 -10~70℃, 특수용도용 합성고무의 사용 온도는 -30~120℃이다.
- (4) 금속재료의 스프링에 비해 내유성과 내후성 등의 내환경성이 떨어진다.
- (5) 스프링 상수의 산포를 작게 유지하기가 어렵다.

본 연구는 위와 같은 방진고무의 여러 가지 장점과 고무의 전단 강도 성질을 이용하여 산업기계용으로 사용되는 전단형 방진고무마운트를 개발하는 것에 관한 것이다. 일반적으로 방진마운트는 일정량의 정적 변위에 대한 하중 담당 용량으로 제품을 구분하며, 본 연구에서는 20mm 변위에서 500kgf의 정하중 용량을 갖는 전단형 방진고무마운트를 설계 제작하고, 정하중 및 동하중 특성 시험을 통하여 하중 담당 용량 및 방진기 효율을 측정 평가한다.

2. 전단형 방진고무마운트 설계

방진고무마운트는 주로 중대형 회전기계나 2ton 이상의 왕복기계 등에서 진동을 감쇄시키는 용도로 사용된다. 그림 2는 개발하는 전단형 방진고무마운트의 기본 구조를 나타낸 것이다. 주요 구성 부품

은 상부하우징, 방진고무 및 하부하우징의 세 부품이며, 상부하우징과 하부하우징 사이에 방진고무를 넣은 후 볼트로 체결하는 구조이다.

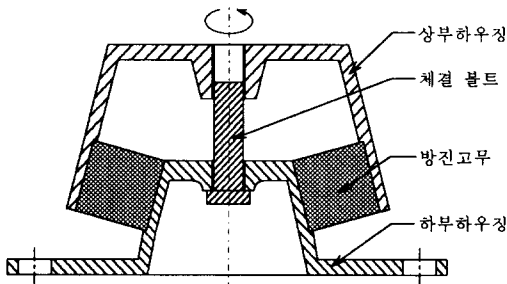
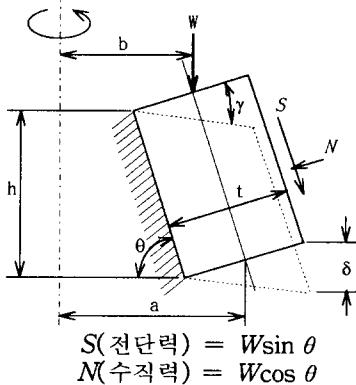


그림 2: 전단형 방진마운트 단면

가. 해석적 방법에 의한 하중-변위 예측

그림 3은 원추형 사각형 단면의 전단형 방진마운트의 하중 용량을 계산하기 위한 단면 형상과 관계 변수를 나타낸 것이다. 계산을 단순화하기 위하여 수직 작용력이 전단력으로만 작용하여 수직변위 δ 가 발생한다는 가정하에 계산식을 유도하였다. 즉, 수직 하중(W) \approx 전단력(S)이라고 가정하였다.



$$S(\text{전단력}) = W \sin \theta$$

$$N(\text{수직력}) = W \cos \theta$$

그림 3: 원추형 사각형 단면의 전단형 방진마운트

이 때 전단변형각은

$$\gamma(\text{전단변형각}) = \frac{\tau}{G} = \frac{S/A}{G} = \frac{S}{GA} \quad (1)$$

이며, 여기서 각 변수는

τ : 전단응력

G : 고무의 횡탄성계수

A : 전단면적(원추형 실린더: $A = \pi(a+b)h$)

이다. 전단변형에 의한 수직처짐량은 다음과 같다.

$$\delta = \gamma t = \frac{St}{GA} = \frac{St}{G\pi(a+b)h} \quad (2)$$

사각형 단면 형상에 대한 예상 크기 $a=5.0\text{cm}$, $b=3.7\text{cm}$, $h=5.0\text{cm}$, $t=4.0\text{cm}$ 와, G 가 작은 경우의 적용 하중 $S \approx W = 500\text{kgf}$, 및 고무 경도가 듀로메타로 약 56인 재료의 종탄성값 $G=7.5\text{kgf/mm}^2$ 을 식(2)에 대입하여 예상 변형량을 계산하면

$$\delta = \frac{St}{G\pi(a+b)h}$$

$$= \frac{500 \cdot 4}{7.5 \cdot \pi \cdot (5+3.7) \cdot 5} = 1.95(\text{cm}) \quad (3)$$

가 된다. 그러나 개발하려는 제품의 단면 형상은 그림 3과 같은 사각형 단면이 아닌 곡선 형상이다. 임의 곡선 형상에 대하여는 식을 수립하거나 풀기가 거의 불가능하다. 개발 제품의 치수를 결정하는 데 있어서는 식(2)를 사용하여 원추형 실린더 형상에 대한 대략적인 치수를 예측한 후, 여러 가지 모양의 축 대칭 단면 형상에 대한 하중-변위 관계를 수치 해석법으로 해석하여 치수를 결정하였다.

나. 유한요소 해석에 의한 하중-변위 예측

그림 2와 같은 전단형 방진마운트는 중심축에 대하여 축대칭인 모습을 하고 있다. 이와 같은 축대칭 문제는 하중이 대칭축에 대하여 축대칭으로 작용할 경우 대칭축에 대한 임의 각도에서의 모든 기하학적 및 물리적인 성질이 동일하게 되므로, 회전축에 대한 한 단면만을 유한요소 해석 대상 모델로 선정하여 축대칭 문제로 취급하게 된다. 축대칭 문제와 같은 특별한 경우는 모델링 및 해석 시간에 많은 잇점이 있다.

방진고무의 횡탄성계수는 그림 1에서와 같이 고무의 경도값에 따라 다른 값을 갖으며, 방진고무의 변형량에 따라서도 비선형적인 값을 갖는다. 본 해석에서는 전단형 방진마운트의 정격 변위가 20mm인 상태에서의 하중 담당 능력을 예측한다는 측면에서, 정격 변위 전·후의 추가적인 미세한 변형 내에서의 변형 경로에 따른 비선형성을 무시하고 탄성계수가 선형성을 갖는다고 가정하여, 주철과 고무로 된 이 종재 구조물에 대한 선형 탄성 해석을 하였다. 고무는 온도 변화에 따라 상당히 민감하여 경도값 변화가 크며 이에 따른 종·횡탄성계수의 값도 크다. 해석시에 어떤 특정한 상황에 대한 물성치를 선택하여 비선형 해석을 한다고 하더라도 여러 물리적인 영향으로부터 독립되지 못하며, 해석 결과를 실제 제품에 적용함에 있어서도 비선형 해석에 의한 약간의 특성 변화량 고려에 큰 의미를 부여하기가 어렵다. 방진고무의 포아송비는 0.5에 가까우나 수치해석시에 발생할 수 있는 계산의 발산을 방지하기 위

하여 0.49로 하였다. 종탄성계수와 횡탄성계수와와의 관계식 $E=2G(1+\nu)$ 로부터, 해석에 사용된 재료의 물성치는, 방진고무의 경우 $E_r=0.23\text{kgf/mm}^2$, $\nu_r=0.49$, 주철재인 상·하하우징은 $E_c=20,000\text{kgf/mm}^2$, $\nu_c=0.26$ 이었다. 하드웨어는 Pentium-586 166MHz, RAM 64MB, HDD 2.1GB이며, 유한요소해석 프로그램은 ALGOR Inc.사의 ALGOR Windows Version으로 축대칭 선형 해석 모듈을 사용하였다^(5,6).

아래의 두 그림은 각각 내·외경부에서의 두께가 다르면서 단면의 상·하 경계가 직선형인 방진고무(그림 4)와 상·하 경계가 서로 다른 곡선으로 된 방진고무(그림 5) 위에 연직 하중을 가할 때, 유한요소해석에 의한 변형 전·후 모습을 보여 주고 있다. 그림 4를 자세히 보면 주철재 내경부 하우징에 접촉되어 있는 고무 밑부분이 전단하중에 의한 밀림으로 크게 변형된 것을 볼 수가 있다.

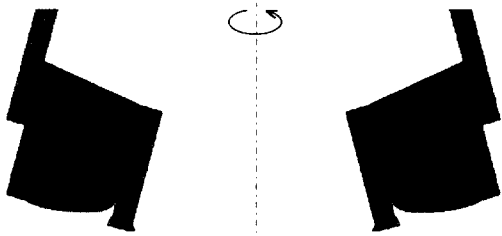


그림 4: 단면 상·하 경계선이 직선형인 방진마운트

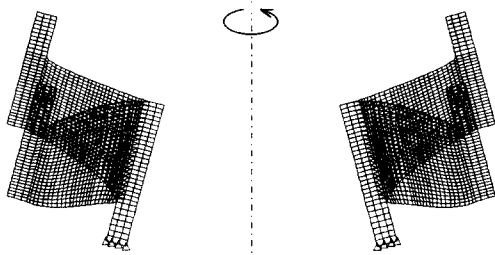


그림 5: 단면 상·하 경계선이 곡선형인 방진마운트

예상되는 여러 가지 형상에 대한 해석을 통하여, 설계 하중에 요구되는 방진고무의 크기 및 피로 수명, 변형 형상 및 스프링 상수 등을 고려하여, 방진고무 단면의 상·하 경계선이 서로 다른 곡선 형상이며 외경부에 비하여 내경부가 두꺼운 형상인, 그림 5의 경우를 시제품 제작용 모델로 선정하였다. 그림 6은 그림 5의 모델이 500kgf의 연직 하중을 받을 때 연직 방향으로의 변위 분포이다. 방진고무에 걸리는 폰미시스 최대 응력값은 약 0.3kgf/mm^2 으로 허용 범위 35kgf/mm^2 에 비하여 상당히 작은 값으로 나타났다.

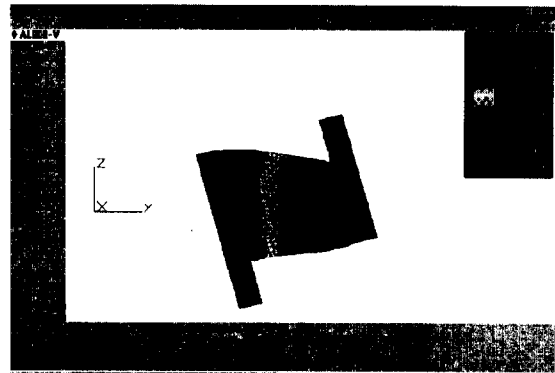


그림 6: 전단형 방진고무의 연직 방향 변위 분포

방진고무 제작을 위한 고무 금형은 고무의 수축율을 감안하여 제품 치수보다 약 2% 크게 만들었다. DURO50인 네오프렌 고무를 금속제 링 내에 넣은 후, 금형을 약 130℃로 가열한 상태에서 50-60분 정도 가황, 가압하여 금속제 링 내에 방진고무가 정착된 상태로 성형하였다. 성형 후 듀로미터로 측정한 고무의 경도값은 약 58 정도이다. 그림 7은 전단형 방진고무마운트의 방진고무 부분, 그림 8은 각 구성 부품들, 그림 9는 조립된 전단형 방진고무마운트의 실물 사진이다.

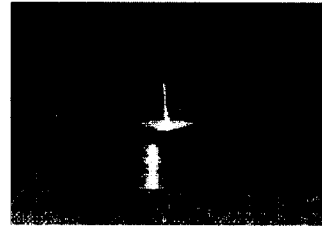


그림 7: 전단형 방진고무마운트의 방진고무



그림 8: 전단형 방진고무마운트의 구성 부품들



그림 9: 전단형 방진고무마운트

3. 전단형 방진고무마운트의 정하중 시험

전단형 방진고무마운트의 정하중에 대한 변위-하중 곡선은, 최대 하중 용량이 2,000kgf인 만능시험기를 사용하여 일정량의 변위에서 담당 하중 크기를 읽어 구하였다. 초기 변위가 10mm 되도록 조립된 다섯 세트 각각에 대하여, 시편 고정판에 방진마운트를 고정시키고 일정량의 압축 변위를 가한 후 약 20초 정도 경과하여 고무의 탄성 복원력(resilience) 변화가 어느 정도 둔화된 상태에서 하중값을 읽었다. 최대 변위가 30mm가 될 때까지 2mm씩 모두 20mm의 추가 변위를 단계적으로 증가시켜 가면서 (loading process) 하중값을 측정하고, 다시 변위를 감소시켜 가면서(unloading process) 같은 방법으로 담당 하중의 크기를 다시 측정하여, 즉 변위를 가할 때와 변위를 제거할 때의 하중값들을 측정하여, 그림 10에 변위-하중 곡선으로 나타내었다. 해석시에 측정한 대로 총 변위 20mm에서의 하중 크기가 약 500kgf이었다.

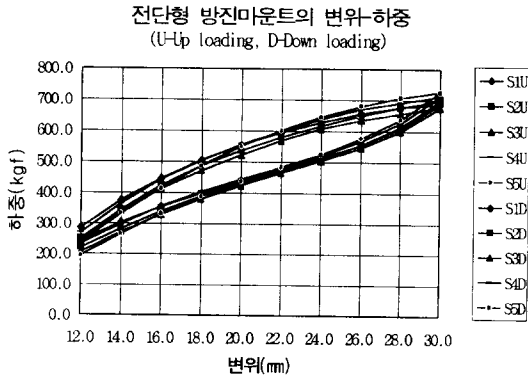


그림 10: 전단형 방진고무마운트의 변위-하중 곡선

4. 전단형 방진고무마운트의 방진기 효율 측정

개념적인 측면에서 볼 때, 방진마운트의 방진기 효율은 진동시 전달되는 진동 속도나 전달되는 힘의 상대적인 비율로 측정된다⁽¹⁾. 전달되는 진동 속도로 나타내는 방진기 효율은 방진마운트가 없는 상태일 때 물체의 진동이 기초 구조물에 직접 전달되는 진동 속도를, 방진마운트를 설치했을 때 물체의 진동이 기초 구조물에 전달되는 진동 속도의 비율로 나타낸 것이다. 전달되는 힘으로 표현되는 방진기 효율은 진동 속도 대신에 전달되는 힘의 비율로 나타내는 것으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$E = \frac{F^{(U)}}{F^{(D)}} \quad (4)$$

여기서, $F^{(U)}$ 는 방진마운트가 설치되지 않은 상태

에서 물체의 진동으로 기초 구조물에 전달되는 힘을 나타내며, $F^{(D)}$ 는 방진마운트가 설치되어 있는 상태에서 물체의 진동으로 기초 구조물에 전달되는 힘을 나타낸다. 본 연구의 방진기 효율 측정에서는 방진마운트를 장착하지 않은 경우, 금속재료 스프링마운트를 장착한 경우, 및 전단형 방진고무마운트를 장착한 경우 각각에 대하여 전달되는 진동 가속도를 측정하여, 전달되는 힘의 성분과 비례한다, 그 비율을 계산하여 방진기 효율을 구하였다.

본 연구의 방진기 효율 측정에 사용된 가진대의 구조는 그림 11과 같으며, 그림 12는 편심 모터, 가변 인버터, 및 측정 장비 등으로 구성된 실험 장치 모습이다.

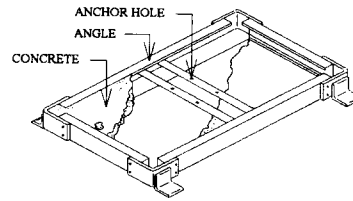


그림 11: 가진대

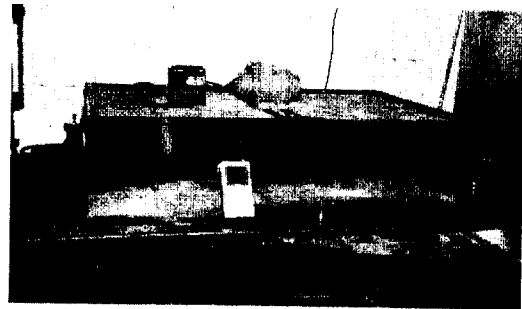


그림 12: 방진기 효율 측정 실험 장치

그림 12의 가진대 네 모퉁이 밑에 측정하려는 방진마운트가 장착되었으며, 가변 인버터를 사용하여 회전수를 임의 조절하는 방법으로 가진대 위의 중앙 부분에 설치된 편심 모터(vibro-motor)를 구동시켜 강제 진동을 가한 후, 방진마운트를 통해 전달되는 가속도를 가진대가 고정되어 있는 고정판에 부착된 가속도 센서로 측정하여, 방진마운트가 설치되어 있지 않은 경우에 측정한 가속도 값과 비교하여 방진기 효율을 구하였다. 가속도 측정에 사용된 장비와 절차는, (1)RION PV-85로 진동을 감지하고, (2)RION VP-26C pre-amplifier를 사용하여 신호를 증폭시키거나 조절한 후, (3)RION SA-77 FFT analyzer로 진동 신호의 주파수를 분석하여, (4)RION CP-10B printer로 측정 결과를 출력하였다.

무방진 상태에서의 전달 가속도를 측정하기 위하여는, 가진대를 I-형 형강으로 받힌 후 편심 모터를 구동시켜 강제 진동이 고정판에 그대로 전달되도록

한 상태에서 측정하였다. 또한 일반적으로 많이 사용되고 있는 금속재료 스프링마운트에 대한 방진기 효율도 측정하여 비교하였다. 개발된 전단형 방진 고무마운트 하나가 담당하는 설계 하중의 크기는 500kgf으로, 네 개의 방진마운트가 담당하는 하중은 모두 2,000kgf이다. 이에 따라 자체 무게가 800kgf으로 설계 제작된 가진대 위에 1,200kgf의 철판을 얹어 총 무게가 2,000kgf이 되게 한 후 측정하였다. 그림 13은 가속도 측정 그래프이며, 측정된 가속도 값과 방진기 효율은 표 1에 종합 정리하였다.

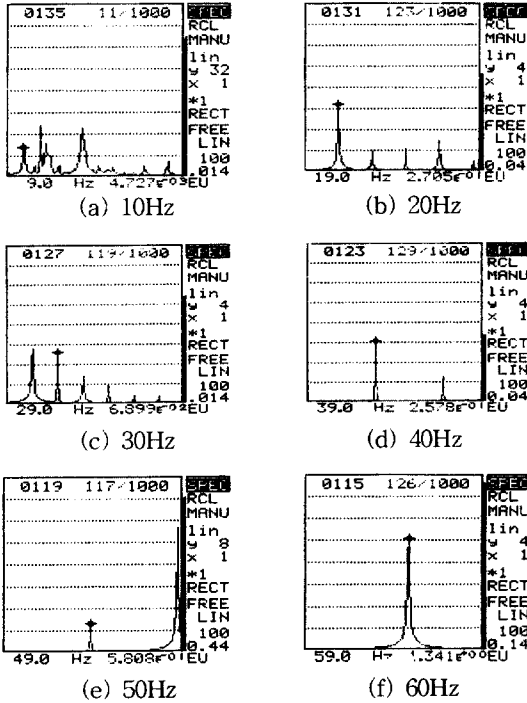


그림 13: 전단형 방진고무마운트 방진시 전달 가속도 측정 결과(전달 가속도 단위: m/sec.²)

표 1: 전달 가속도 측정값과 방진기 효율 (전달 가속도 단위: m/sec.²)

항목	강제 진동 주파수(Hz)					
	10	20	30	40	50	60
무방진시 (I-형 형상)	0.173	0.630	0.849	1.086	1.881	4.082
스프링마운트 (500kgf x 4개)	0.003	0.013	0.052	0.072	0.205	0.294
스프링마운트 방진기 효율	0.017	0.02	0.06	0.07	0.11	0.07
전단형 마운트 (500kgf x 4개)	0.005	0.271	0.069	0.258	0.581	1.341
전단형 마운트 방진기 효율	0.027	0.43	0.08	0.24	0.31	0.33

5. 결 론

고무의 전단 탄성을 이용한 산업용 및 건축현장용 저진동, 저소음 방진고무마운트가 개발되었다. 정적 변위 20mm에서의 하중 용량이 500kgf인 전단형 방진고무마운트 개발에 있어 유한요소법에 의한 하중-변형 및 응력 해석이 실시되었으며, 시제품 제작에 이어 정하중 용량과 방진기 효율이 측정되었다. 전단형 방진고무마운트에 대한 정하중 측정 결과는 변위가 증가할 때와 변위가 감소할 때의 히스테리시스 특성을 뚜렷히 보여 주고 있으며, 정적 변위에서 측정된 하중의 크기는 설계시 예측한 유한요소 해석 결과와 상당히 잘 일치하였다. 전단형 방진고무마운트의 방진기 효율 측정 결과는 같은 하중 용량의 금속재료 스프링마운트의 방진기 효율 측정 결과와 비교되었다. 방진기 효율만을 고려할 때에는, 전단형 방진고무마운트의 방진기 효율이 금속재료 스프링마운트의 방진기 효율에 비해 낮은 것으로 나타났으나, 소음 감쇄 특성과 서징 현상 등이 함께 고려될 때에는 전단형 방진고무마운트가 정숙한 운동을 하면서도 방진기 효율이 좋은 것으로 평가된다.

본 연구를 통하여 산업용이나 건축 현장에서 요구되는 다양한 규격의 변형-하중 특성을 갖는 방진마운트를 설계하고 방진기 효율을 측정하는 능력이 확보되었다. 이는 향후 제품의 고급화 및 다양화와, 정숙한 환경에 대한 수요의 창출 및 차별성 있는 제품 개발에 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- Harris, C. M., Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill Book Co., 3rd Ed., pp. 38-8-38-9, 1988.
- Vibration and Noise Control Products, 대한방음 방진주식회사, 1996.
- 社団法人 日本音響材料協會編, 騒音・振動対策 핸드북.
- 金聖擇, 騒音振動便覽-振動編, 圖書出版 東和技術.
- Linear Stress Analysis Release Notes, Algor, Inc., July, 1992.
- Stress Decoder Reference Manual, Algor, Inc., January, 1995.