

않는 구조로 하는 것(주로 개발 설계 단계에서 질량과 강성을 최적 배분하므로 달성) 이라면, 제진은 진동 또는 소음 발생원으로 되기 쉬운 panel 등에 감쇠력을 부여하여 막진동을 억제하고 역학적 에너지를 열 에너지 등 다른 에너지로 변환시키므로 발생한 진동을 제거하는 감쇠 기능을 부가하는 것이라고 할 수 있다. 그러나 방진과 제진의 가장 큰 차이점이라면 방진에는 진동 절연 기능과 함께 지지 기능이 요구된다는 점이라고 할 수 있다.

2.2 진동 전달율과 동배율

Fig. 1은 자유 진동에 대한 모식도이다. 그림에서 진동 전달율(transmissibility, T_r)은 하부에 전해지는 힘(F_t)과 상부로부터의 강제력 (F_0)의 비율로서 다음 식으로 주어진다.

$$\text{즉, } T_r = \frac{F_t}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \delta}{\{(1 - (f/f_n)^2)^2 + \tan^2 \delta\}}} \quad (1)$$

- f_n ; natural frequency
- f ; disturbing frequency
- $\tan \delta$; 손실 계수, loss tangent of the spring
- k ; stiffness(kg/cm)
- m ; mass of system

식 (1)에서 f_n 은 엔진의 고유 진동수로서 $f_n = \frac{1}{2\pi}$

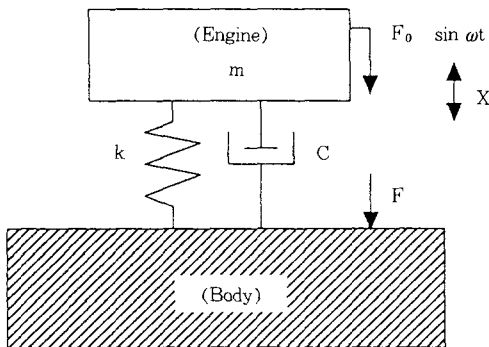


Fig. 1. 자유 진동계의 model

$\sqrt{\frac{k}{m}}$ 의 관계에 있고 전달율은 진동수비 (f/f_n)와 손실 계수 $\tan \delta$ 의 변화에 의존하는 것을 알 수 있으며 이들의 관계를 plot하면 Fig. 2와 같이 된다.

Fig. 2에서 전달율은 진동수비(f/f_n)가 0 또는 $\sqrt{2}$ 인 경우 $\tan \delta$ 에 관계 없이 1인 것을 알 수 있으며 외력의 진동수 f 와 계의 진동수 f_n 이 일치하는 경우 즉 진동수비(f/f_n)가 1인 경우 damping이 없으면 ($\tan \delta=0$) 전달율은 무한대로 되어 공진이 일어나게 되며 이 때 기계나 구조물은 파손된다.

위의 식과 Fig. 2에서 진동의 절연은 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상인 경우에 비로써 일어나는 것을 알 수 있다.

식 (1)에서 $f/f_n < \sqrt{2}$ 인 경우 즉, 저 주파수 영역에서는 $f/f_n \approx 1$ 로 간주할 수 있으며 전달율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_r \approx \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}} \quad (2)$$

즉, 저 주파수 영역에서는 $\tan \delta$ 의 영향이 지배적으로 되고 $\tan \delta$ 가 클수록 전달율이 작게 되어 진동을 전달하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 완충(충격 흡수, damping)특성도 이 영역에 속한다고 할 수 있으며 개선 방법 또한 저주파 영역의 isolation에 적용하기 위한 시도와 동일한 방법이 채용된다.

한편 식 (1)에 $f/f_n > \sqrt{2}$ 인 경우 즉, 고 주파수 영역에서는 $f/f_n \gg \tan \delta$ 로 강주되며 전달율은 다음과 같

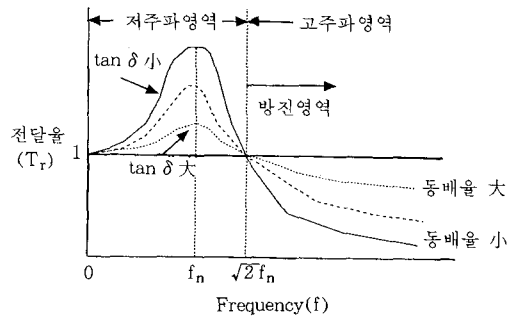


Fig 2. 진동수 변화에 따른 진동 전달율

이 된다.

$$T_r = \frac{(1 + \tan \delta)}{(f/f_n)} = \frac{(k_d/k)}{(f/f_n)}, \quad k_d = k + Cf \quad (3)$$

식 (3)과 Fig. 2로부터 외력의 진동수가 큰 경우에는 $\tan \delta$ 가 클수록 오히려 진동 절연이 나쁘게 되며 (진동 전달율이 크다) 동배율이 작은(동적 스프링 상수가 작은) 만큼 진동 전달율이 저하된다는 사실을 알 수 있다. 동배율은 정적 스프링 상수에 대한 동적 스프링 상수의 비이다.

일반적인 경우 손실 계수(손실 계수, $\tan \delta$)는 엔진 마운트(10~30Hz)와 같이 비교적 주파수가 낮은 영역에서 유용한 parameter로 사용되며 주파수가 높은 경우에는 동배율을 사용하게 된다.

또한 Fig. 2로부터 $\tan \delta$ 와 동배율은 서로 상반된 관계에 있으며 $\tan \delta$ 가 클수록 동배율이 작은 것을 알 수 있다.

2.3 고분자 물질의 진동 감쇠

고분자 물질 특히 고무에 의한 진동 절연(isolation)은 스프링 작용(탄성)을 활용한 것이다.

Fig. 3에는 고분자 물질에 의한 진동 감쇠 기구를 모식적으로 나타내었다. 일반적으로 고분자는 유리상 영역에서는 탄성률(E')이 크고 경도가 높으나 전이 영역에서는 E' 이 급격히 저하하여 부드럽게 된다. 분자론적으로 해석하면 온도가 높아짐에 따라 동결해 있던 분자의 주쇄가 micro 브라운 운동을 개시한다. 분자의 micro 브라운 운동이 극히 활발하게 일어나는 온도에는 E' 이 가장 급격히 저하하며 제진 수지의 제진성을 나타내는 손실 계수(손실정점, $\tan \delta$)는 최대치를 나타낸다.

이와 같은 전이 영역에 있어서 고분자 물질에 주기적으로 변동하는 외력이 가해지면 분자쇄 segment의 상태가 변화하고 외력이 제거되면 분자쇄 segment는 원 상태로 되돌아가려고 하며 이 때 분자간 또는 분자 내에서 마찰이 일어나고 진동 에너지가 열 에너지로

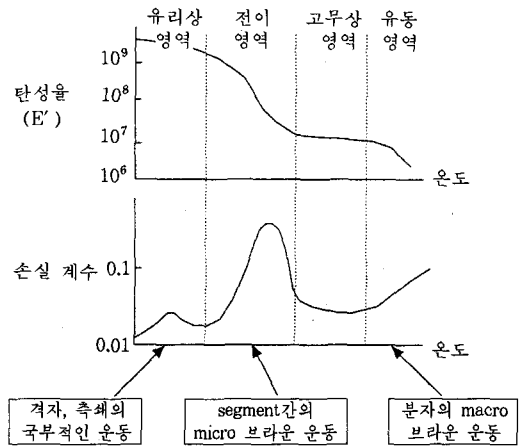


Fig. 3. 제진 수지의 진동 감쇠 mechanism

변환되어 진동은 감쇠한다.

따라서 제진성은 고분자의 점탄성 거동과 분자 구조에 의하여 크게 영향을 받으며 제진 수지는 목적으로 하는 온도 영역이 전이 영역으로 되어 그 온도에서 진동이 가해졌을 때 큰 내부 마찰을 일으키는 것이 바람직하다.

3. Isolation 및 damping 특성의 활용

3.1 방진·제진

방진·제진 기술은 앞서도 언급한 바와 같이 자동차를 위시하여 차량이나 선박, 항공기 등의 수송 기관, 정보 기기나 가전제품 등 광범위한 분야에서 그 역할의 중요성이 더욱 증대되고 있다.

Isolation과 damping에 관련된 방진·제진 및 완충 특성, 소음 대책, 면진 등은 근본적으로는 동일한 개념으로 이해할 수 있으나 사용 목적 및 적용 분야가 서로 다르며 본 항에서는 좁은 의미에서의 방진·제진과 소음 방지, 면진 등으로 나누어 살펴보고자 한다.

일반적으로 방진 장치는 크게 공기 스프링, 코일, 스프링 및 방진 고무의 3가지로 분류할 수 있으며 Table 1에 각각의 특징을 나타내었다.

방진 장치에서 요구되는 성능은 적용하고자 하는 진

Table 1. 각종 방진 장치의 특징

항 목	방진 고무	Coil 스프링	공기 스프링
방진 성능	△	◎	◎
고유진동수 f_n	4~15 Hz	1.5~5 Hz	1~3 Hz
진동 전달율	-5	-20	-28
T_r (dB($f=10$ Hz))	($f_n=6$)	($f_n=3$)	($f_n=2$)
진동 감쇠 능력	◎	△	◎
공진 배율(dB)	10~20	40 이상	10~20
Space factor	◎	○	△
직경×높이 (허용하중 100kg)	φ40×50 h	φ100×100 h	φ120×100 h
Level 조정	◎	△	◎
가격	◎	○	△

◎ : 아주 우수, ○ : 우수, △ : 불량.

동수 범위에서 진동 전달율의 최소화와 감쇠 기능 및 지지 성능이다.

진동 전달을 면에서 공기 스프링은 고유 진동수가 1~3Hz로서 가장 방진 성능이 우수하고 coil 스프링이 2~5Hz로서 공기 스프링에 준하는 성능을 발휘한다. 방진 고무는 공기 스프링과 마찬가지로 엔트로피 탄성에 의하여 방진기능을 발휘하며 공기 스프링에 비하여 스프링 작용이 딱딱한 편이다. 방진 고무의 고유 진동수는 허용 하중 50kg 이하의 소형 방진 고무가 8~10Hz, 100kg 정도인 경우 7Hz, 500kg인 경우 약 6Hz정도이다.

방진 장치에 있어서 또 하나의 중요한 기능이 damping 능력이다. Damping 성능은 공기 스프링과 방진 고무가 우수하며 공진점에서의 공진 배율을 식(4)에 따라 비교하면 대략 공기 스프링이 15~20dB 정도이고 coil 스프링은 단독 사용시 대략 40dB 정도로서 damping 능력이 작다. 방진 고무는 재료 자체가 감쇠 능력을 가지고 있으며 대략 T_r 이 20dB 이하의 공진 배율을 갖는다.

$$\text{공진점}(f/f_n=1)\text{에서의 공진 배율, } T_r = 20 \log \frac{1}{2\zeta} \quad (4)$$

(ζ 는 임계 감쇠계수비로서 방진재의 감쇠 계수

(C)과 임계 감쇠계수 (C_c)의 비($\zeta=C/C_c$)임)

이상 방진 장치 각 특징에 대하여 대략적으로 살펴 보았으나 이들은 서로 장단점이 있으며 방진 장치는 적용 주파수 영역과 지지 기능에 맞추어서 정확히 설계하여야 한다.

Fig. 4에는 진동 절연 재료와 적용 주파수 영역에 대하여 나타내었다.

방진 고무의 형태에 따른 특징은 Table 2에 정리하였으며 실제 적용에 있어서 방진 성능은 제품의 구조 설계나 제품 형태면의 개량이 매우 중요하다.

따라서 방진 특성은 재료 정수에 의한 평가보다는 형상을 가진 표준 시료로서 평가한다. 참고로 특

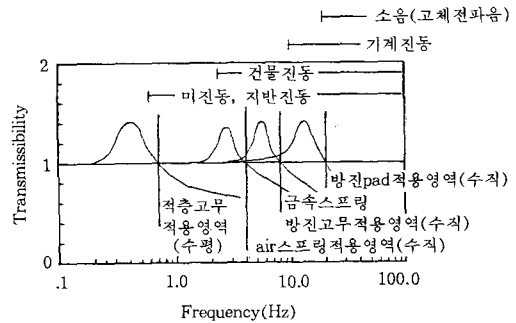


Fig. 4. 진동 절연 재료와 적용 주파수 영역

Table 2. 방진 고무의 형태에 따른 특징 및 용도

형태	특	징
압축형	단위 면적 당의 하중을 크게 할 수 있으므로 대하중의 경우나 방진고무부의 여유가 작은 경우에 많이 사용	
전단형	주방향의 스프링 상수를 특히 작게 하고자 할 경우 이용되며 경하중의 경우나 저회전 기기의 지지에 많이 사용	
복합형	압축형과 전단형으로 불가능한 스프링 상수가 요구되는 경우에 이용	
비틀림형	동력 전달축의 중간에 삽입하여 축의 비틀림진동을 회피하기 위한 목적	
Bush형	축방향(전단), 축의 직각 방향 및 축 주위의 회전 방향의 각 하중 또는 torque에 사용	

성 평가에 있어서 지지 기능은 시료의 정적 스프링이 상수로서 평가되며 동적 스프링의 지표로서는 동적 스프링 상수를 측정하고 감쇠력의 지표로서 손실 계수를 측정하게 된다.

방진이 지지 기능(정적 스프링 특성)을 필요로 하는데 비하여 제진은 구조체인 강판에 감쇠 기능을 부여하여 공진을 억제하는 것으로 지지 기능은 필요로 하지 않는다.

방법론적으로 제진에는 동흡진기(動吸振器) 등의 제진기를 이용하는 방법과 제진재의 부가에 의한 방법이 있으나 제진재에 의한 방법이 간단하고 정도의 차이는 있으나 어떤 것에도 효과가 있고 범용성이다.

제진 재료로서는 고분자계 점탄성 재료를 이용하여 내부손실이 큰 재료를 진동 전달 부위에 직접 붙여서 진동 에너지를 열에너지로 변환하여 공진시의 진동, 나아가서는 고체 전파음을 저감하게 된다. 참고로 Fig. 5에는 각종 재료와 그 제진성의 척도로서 손실 계수를 나타내었다.

일반적으로 제진재는 강재의 강도 특성과 수지의 감쇠 특성을 조합한 복합형으로 사용된다. 제진 강판과

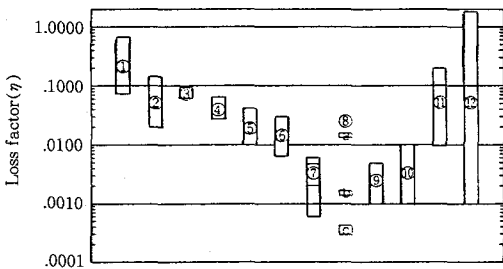


Fig 5. 각종 재료의 제진성(상온)

① 복합 구속형 (금속+수지+금속)	② 복합 비구속형 (금속+수지)	③ 전위형 합금
④ 쌍정형 합금	⑤ 복조적형 (편상후연주철 등)	⑥ 강자성형 합금
⑦ 극연강, 구상후연주철, 탄소강	⑧ a: 납, b: stainless steel, c: Al합금, Ti합금, 황동	⑨ 유리
⑩ 콘크리트, 벽돌	⑪ 합판, 콜라, 목재	⑫ 고무, 플라스틱

같이 sandwich구조로 한 것은 구속형 제진재이고 제진 시트, 도료와 같이 기관의 한쪽 면에 제진 재료를 부착한 것은 비 구속형에 속하여 기타 제진 합금 등의 입체형으로 구분된다.

구속형 제진 강판과 비 구속형 제진 재료의 구조와 제진 mechanism에 대하여 Fig. 6과 Table 3에 비교하여 나타내었다.

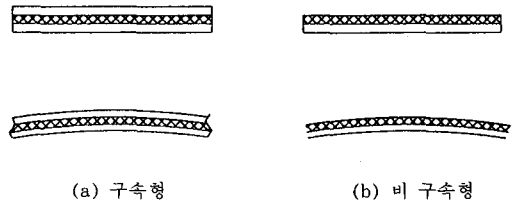


Fig. 6. 제진 강판의 구조

Table 3. 제진 강판의 구조와 그 진동 감쇠 기구

	구속형	비구속형
구조	금속+수지+금속	금속+수지
기구	고분자 재료의 점탄성 변형에 의한 점탄성 hysteresis	고분자 재료 등이 신장 변형에 의한 점탄성 hysteresis

구속형 제진 재료는 통상 두께 0.03~0.2mm의 수지를 삽입한 3층 구조로 되어 있으며 비 구속형에 비하여 수지 두께가 얇으면서 높은 제진성을 얻을 수 있다.

비 구속형은 기관의 진동에 따라 제진 재료가 신축 변형하므로 재료의 내부 마찰에 의한 발열에 의하여 진동 에너지를 열 에너지로 변환하여 진동을 감쇠하며 구속형과 동일한 정도의 제진성을 얻기 위해서는 강판 두께의 수배의 수지를 적층하여야 한다.

3.2 방음

소리 역시 음파로서 일종의 진동 현상이며 특히, 고체 전파음은 기계 등의 진동이 공진에 의하여 소리로 변환한 것으로서 소음 방지 대책은 근본적으로 방진·제진 형상과 같이 취급된다.

소음 방지를 위해서는 음의 발생원을 제거하거나 발생한 음의 전달을 방지하여야 하며 구체적인 소음 방지 방법으로는 차음, 흡음, 방진 및 제진이 있다.

흡음과 차음은 공기 전파음(매질이 공기인 음)에 대한 대응 방법이고 방진이나 제진은 고체 전파음에 대한 대응 기술이다.

흡음·차음은 공기 감쇠를 일으키도록 구성되어 있으며 제진 재료는 진동을 저감시켜 진동에 의한 소음의 발생을 억제하는 기능을 가지고 있다.

Fig. 7에는 자동차의 진동·소음과 관련한 요구 특성을 정리하였으며 소음 방지 재료의 성능은 손실 계수보다는 동배율에 의하여 평가된다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 8에는 소음의 종류와 소음 방지 대책을 모식적으로 나타내었다. 흡음·차음 재료는 공기 감쇠를 일으켜야 하고 따라서 재료 자체의 진동 흡수 감쇠 성능이 중요하며 구조물을 지지하는 기능은 필요로 하지 않는다.

현 상	진 동 수	요구특성
<ul style="list-style-type: none"> • Body shake • Engine shake 	$\frac{10\sim 15\text{Hz}}$ (약 $\pm 0.8\%$ 변형)	$\tan \delta$ 大
<ul style="list-style-type: none"> • 실내소음 	$\frac{100\text{Hz}}$ (약 $\pm 0.2\%$ 변형)	E/d/Es 小

Fig 7. 자동차에 있어서의 진동·소음과 요구 특성

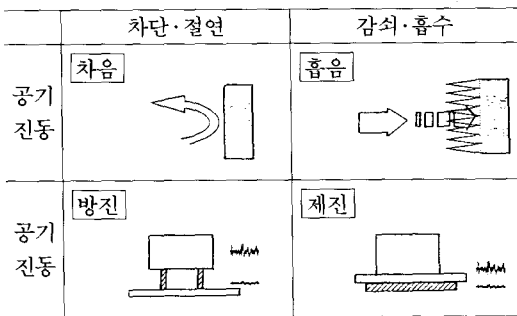


Fig. 8. 소음의 종류와 소음 방지 방법

또한 흡음·차음 재료는 재료 자체의 진동 흡수 감쇠 기능도 중요하나 구조 설계에 의한 방음·흡음 효과의 차이가 매우 크기 때문에 구조 설계에 대해서도 충분히 검토하여야 한다.

방진 고무에 의한 진동 소음 대책은 대부분이 진동 전달의 차단에 관한 것으로서 일반적으로 방진 고무의 스프링 상수가 낮으면 낮은 만큼 즉 방진 고무가 연하면 연한 만큼 진동 전달의 차단 성능은 우수하다.

3.3 면 진(免震)

우리 나라는 세계적인 지진대에서 약간 벗어나 있으므로 지진에 대해서는 안전하다고 생각되어 왔으나 최근 지진 발생의 빈도나 강도가 커지는 경향으로 지진에 대한 관심도 더욱 커지고 있다.

건축물에 대한 지진 대책으로서 강도 향상에 의한 내력 구조화는 건물의 강도가 큰 만큼 지진 에너지의 전달도 용이하여 내부 설비의 파괴 등이 늘어나는 문제점을 야기하게 된다.

지진파는 주기(또는 진동수)의 범위가 넓으나 많은 경우에 초대 가속도를 나타내는 성분은 0.2~0.5sec (2~5Hz)의 주기 범위이다. 10~15층 이하의 중·저층 콘크리트 건물의 고유 주기가 0.2~0.5sec의 범위에 있으므로 지진 시에는 공진 현상에 의하여 피해가 더욱 커진다. 면진 구조는 건물의 수평 방향의 진동 주기를 지진파의 주기보다 장주기측으로 이동시키므로 지진 피해를 최소화 하는 것이다.

면진은 1960년대 중반에 처음으로 rubber-steel laminated bearing이 사용되기 시작한 이래 미국, 호주, 일본을 중심으로 발전되어 왔으며 실제 효과도 증명된 바 있다.

면진 isolator는 다음의 3가지 역할 기능을 갖추어야 한다. 첫째, 상시 하중에 견디기 위하여 수직 하중에 대한 경도와 수평 방향에 대한 저 스프링 상수화로서 이러한 특성은 고무와 철판을 sandwich상으로 적층하여 각 고무와 철판을 강고히 접착(가교 접착) 시키므로 달성된다. 여기에서 고무는 극히 낮은 인장 및

압축 탄성 계수(10kgf/cm^2 정도)를 나타낸다. 그러나 적층화된 내부의 고무는 압축에 의하여 체적 탄성 계수가 상당히 높아져서 수직 방향으로 큰 강성($2 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$)을 나타낸다. 반면, 수평 방향의 전단에 대하여 철관은 고무의 움직임에 구속하지 않으므로 기본적으로 면진 고무의 수평 방향의 강성은 변화하지 않는다.

둘째, 감쇠 기능이 요구되며 면진 고무만으로는 감쇠가 작아서 건물의 흔들림이 커지기 쉬우므로 damper를 병용하여 흔들림을 최소화하고 단시간에 감쇠시킨다.

마지막으로 지진 시의 건물의 수평 방향의 움직임을 보정할 수 있는 능력이 요구되며 일반적으로 대지진 발생시 면진 고무의 수평 변위는 $20 \sim 30\text{cm}$ 에 달하므로 고무 부분은 평균 200% 및 그 이상의 전단 변형을 받게 된다. 여기에 건물을 지지하면서 크리이프에 의한 수직 변형이 복합되면 고무 부분에 발생하는 국부 응력, 변형은 극히 큰 것으로 된다.

한편 면진 isolator는 장시간에 걸쳐 $60 \sim 70\text{kgf/cm}^2$ 의 수직 하중을 받고 있으며 항상 미진동을 받고 있고 외기 온도의 변화에 의한 열팽창, 열수축을 반복하고 있다. 이와 같은 조건을 고려하면 고무 재료는 면진 구조의 고유 주기를 길게 하기 위하여 영율이 낮을 것, 신장율이 클 것, 금속과의 접착성이 클 것 등이 기본적으로 요구되며 기타 장기 수명 특성이 요구된다. 건축용 강재, 콘크리트 등이 60년의 실용 성능의 유지가 요구되므로 고무 재료도 동등한 정도의 수명 특성이 요구된다. 수명 특성은 가열 촉진 노화 시험을 하여 Arrhenius식을 이용하여 추정된다.

면진 isolator용의 고무로서는 천연고무가 가장 많이 이용되고 있으며 그외 CR이나 고도의 감쇠 특성을 고려한 고무 재료가 연구되고 있다. 천연고무는 파괴 피로성, 크리이프성 및 반복 복원성이 우수한 반면, 내후성에 문제가 있다. CR계는 내후성은 우수하나 내크리이프성이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

현재 이용되고 있는 대표적인 면진 isolator의 구조

는 철관과 고무를 샌드위치 구조로 한 것으로 수직/수평 방향의 스프링 상수의 비가 $500/1 \sim 1000/1$ 정도로 되어 있다. 그러나 isolator만으로는 건물이 천천히 그리고 길게 요동하므로 damper를 사용하여 일정 한계 이상으로 움직이지 않게 하는 것이 중요하다.

참고로 현재 면진 설비가 안고 있는 가장 큰 문제점은 내구성이며 최근에는 건물 전체에 대한 면진보다는 국부적인 면진 설비 즉 건물 내의 특정 장치에 대한 면진 설비가 증가되는 경향이다.

4. 고무의 방진·제진 및 완충 특성

모든 고무 제품은 광의로 해석하면 방진 고무에 속한다. 예를 들면 기차의 바퀴와 자동차 tire를 비교하면 이해하기 쉽다. 그러나 여기에서는 차량이나 기계·기기류의 방진 또는 완충성을 주목적으로 제품화된 것으로서 진동이나 소음을 감쇠 시키는 것을 목적으로 만들어진 방진 고무 제품 및 이들의 특성 증가를 위한 방법 등에 대하여 기술하고자 한다.

방진 고무 부품으로서 구조면에서의 성능 향상이나 개량은 방진 고무 메이커에서 주로 검토하였으며 액체 봉입식이나 전자 제어 방식의 방진 고무가 가장 진보된 것이라고 할 수 있다.

방진 고무는 자동차용으로 가장 많이 사용되고 있으며 자동차용 방진 고무는 진동, 소음을 저감시킬 뿐만 아니라 조종 안정성이나 자동차의 운동 성능에도 영향을 미치므로 그 중요성이 날로 더해지고 있다. 이상적인 방진 고무로서는 자동차의 idling시 및 저속 주행시의 제진 작용을 나타내는 손실 계수가 가능한 한 크게 되고 고속 주행시에는 진동 전달율을 낮추기 위하여 저동배율화와 저손실 계수화가 중요하다.

방진 고무 재료는 동적 변화를 받으므로 일반 고무와는 달리 다음의 특성이 요구된다.

- ① 진동 특성이 우수할 것
- ② 온도 의존성이 작을 것
- ③ 진동 내구성이 우수할 것

이외에 방진 고무로서 요구되는 특성으로서는 부품의 형태 및 성격상 금속과 접촉하는 것이 많기 때문에 접촉성도 중요하며 접촉제는 고무 재질과 금속의 종류에 의하여 선택되고 상온 접촉도 가능성은 하나 진동 내구성이 떨어지므로 거의 채용되지 않으며 가교 성형과 동시에 가열 접촉하는 것이 통례이다.

그러나 방진 고무로서 기본 특성인 진동 절연 및 damping과 관련하여 저 동배율화와 고 감쇠화가 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 이들 특성의 개선은 구조 감쇠에 의한 것이 효과적이거나 본 항에서는 구조화에 대한 것을 생략하고 기술적으로 서로 상반되는 관계인 저 동배율화 및 고 감쇠화의 방법을 중심으로 방진 고무의 특성 개선 방법을 소개하고자 한다.

4.1 방진 고무의 진동 전달과 감쇠 특성

방진 고무의 진동 전달 특성은 동적 스프링 상수, 손실 계수, 방진 지지체의 질량에 의하여 결정된다.

동적 스프링 상수와 정적 스프링 상수의 관계는 고무의 종류, 진폭, 주파수에 의하여 다르나 일반적으로는 손실 계수가 큰 만큼 동배율(=동적 스프링 상수/정적 스프링 상수)이 크게 되는 경향이 있다.

이상적인 것은 저 동배·고 손실 계수이나 동배율과 손실 계수는 이물배반적인 특성으로서 손실 계수가 크게 되면 공진 피크는 억제되나 방진 역에서의 진동 전달율이 커지게 되므로 감쇠 결국 적절한 손실 계수를 갖도록 하는 것이 중요하다.

손실 계수($\tan \delta$)는 크면 클수록 좋고 따라서 손실 계수만 고려한다면 사용 온도 범위에 T_g 를 갖는 재료가 가장 효과적이다.

그러나 손실 계수나 동배율 등은 온도나 진동수의 변화에 민감하며 고무상 온도 영역과 방진 고무의 사용 환경 온도 영역을 맞추어야 한다. 특히, 감쇠 성능을 설계함에 있어서 방진 고무 재료는 지지 기능을 필요하므로 계진재와 같이 유리 전이점 전의 전이 영역에서의 최대 감쇠를 이용하는 것이 불가능하며 여기에 방진 고무의 어려움이 있다.

진동 전달율은 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 고유 진동수($f_n=1/2\pi \cdot \sqrt{k/m}$)를 적게 할수록 유리하다. 고유 진동수는 동적 스프링 상수에 비례하고 질량에 반비례하므로 방진 고무의 질량을 크게 하고 동적 스프링 상수를 작게 할수록 진동 절연성은 좋게 된다. 그러나 질량의 증가는 한계가 있고 일반적으로 방진 고무의 고유 진동수는 4~5Hz가 한계인 것으로 알려져 있다.

Fig. 9는 순고무의 손실 계수와 동배율과의 관계를 plot한 것이고 Table 4에는 각종 고무 재료의 동특성과 신뢰성에 대하여 정리하여 나타내었다. Fig. 9에서 동배율 면에서는 NR이 가장 우수하며 감쇠 특성은 IIR이 가장 우수하나 동배율이 높다는 것을 알 수 있다.

한편 방진 고무 수요의 대부분을 차지하는 자동차용 방진 고무의 사용 부위별 요구 특성을 Table 5에 정리하여 나타내었다.

Table 5에서 진동 저감을 위해서는 손실 계수인 $\tan \delta$ 가 큰 것이 유효하고 소음 저감을 위해서는 동배율(동적 탄성율/정적 탄성율)이 작은 것이 유효하다는 사실을 알 수 있다.

자동차용 방진 고무의 요구 특성으로서는 ① 저동배·고loss, ② 고경도·저동배, ③ 고온·고loss로 구분할 수 있으며 여기에 외부 인자로서 ④ 온도, ⑤ 변형,

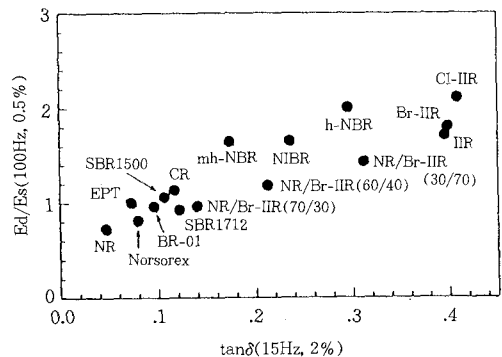


Fig. 9. 각종 순 고무의 동배율 및 loss factor(측정 온도 : 25°C)

Table 4. 각종 고무 재료의 동특성과 신뢰성

		폴리머 종류												
		R	R	B	R	B	S	I	C	P	C	K	F	
동특성	상온시	저동배율화의 용이성	◎	◎	△	×	×	○	×	×	×	×	○	×
		고감쇠화의 용이성	△	△	○	○	◎	◎	○	△	△	△	△	△
	고온시 (100℃)	동적 탄성율의 유지	○	○	△	△	△	×	×	△	△	△	△	◎
		감쇠력의 유지	○	○	△	△	△	×	×	△	△	○	○	×
	저온(-30℃)	동적탄성율의 변화	○	○	○	△	×	×	×	△	△	△	◎	×
신뢰성	상온시	대변형 피로 특성	◎	○	○	○	△	△	△	△	△	△	×	×
		Set in fatigue by load	◎	◎	◎	△	△	×	×	×	×	×	×	△
	고온시 (100℃)	대변형 피로 특성	◎	○	○	△	△	×	×	×	△	△	×	×
		정적 탄성율의 유지	○	○	○	△	△	×	×	×	△	△	×	○
	노화후 (100℃×240h)	동특성의 변화	△	△	△	○	△	-	△	-	△	-	○	○
		내구성의 변화	△	△	△	△	○	-	△	-	△	-	○	○
Set in fatigue by heat		△	△	△	△	△	-	×	△	×	○	○	○	

◎ 주파수가 더해진다.

Table 5. 방진 고무의 방진 성능과 고무의 요구 특성

방진공구	방진성능	주파수	진폭	온도범위	고무의 요구 특성
Engine mount	저주파 idling 및 shake 대책	10Hz 전후	大	0~60℃	Loss factor를 크게 한다
	실내 소음의 고주파 진동 대책	100Hz	小		동배율을 작게 한다
Suspension-용 방진 고무	실내 소음, 진동 대책, 승차감 조종 안정성	100Hz 전후	大	0~40℃	고경도·저동배율로 한다
구동계 방진고무 (damper 외)	구동계의 진동 소음 대책	200 ~ 500Hz 전후	中	60~100℃	고온에서의 loss factor를 크게 한다

Carbon black의 배합에 따른 특성의 변화는 고무의 종류에 따라서도 그 효과의 차이가 있는데 예를 들면 NR의 경우에는 carbon black의 첨가 효과가 크고 -20℃ 이상의 넓은 온도 범위에서 tan δ가 증가되나 CI-IIR의 경우에는 상호 작용이 약하고 계내에서 폴리머의 체적 분율이 작아져서 점성 부분을 감소시키므로 오히려 상온 부근의 tan δ가 낮아지거나 거의 영향이 없고 50℃ 이상에서 tan δ가 약간 증가할 뿐이다.

4.2 방진 고무의 요구 특성 및 개발 동향

4.2.1 손실 계수

1) 충전제에 의한 개량

충전제 등을 배합하여 탄성율을 높이는 보강 작용은 고무와 충전제의 계면에서 발생하는 hysteresis loss로 인하여 높은 감쇠(tan δ)가 기대되는 것으로 보고되어 있으며 입자의 형상, 입자경, 입도 분포, 비중, 표면의 활성 등이 감쇠 효과에 영향을 미친다.

Carbon black의 첨가에 의한 감쇠의 변화는 폴리머와 carbon black 사이에 야기되는 내부 마찰 면적과 폴리머끼리의 내부 마찰 기회의 변화로서 이해되며 엘라스토머의 감쇠 성능을 높이기 위해서는 고 에너지 소비를 야기할 수 있는 carbon black의 고 레벨 배합이나 저 분산도가 좋다. 그러나 일단 파괴된 carbon black 망목의 완전한 회복에는 실온에서 1일 이상이 걸린다고 한다.

2) 압전체 powder의 사용

압전체는 다음과 같은 mechanism에 의하여 손실 계수를 증가시키는 것으로 알려져 있다.

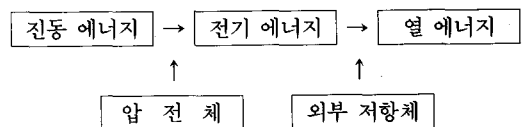


Fig 10. 압전체에 의한 제진

3) 블렌드에 의한 개선¹⁾

새로 damping 기능 재료 또는 블렌드용 재료로서 bis-1,4-polyisoprene/1,2-polybutadiene의 상용계 블렌드, urethane/epoxy IPN계, 블렌드용으로서 ENR, 99% cis-1,4-polybutadiene, butadiene/isoprene 공중합 고 cis-polymer 등이 주목을 받고 있다.

4) 금속분의 첨가

금속분의 첨가는 제진 강판 제조시에 강판 사이의 용접을 용이하게 하기 위한 방법이나 고분자의 damping 과정에서 발생한 열의 방출이 용이하게 하므로 간접적으로 손실 계수의 증가에 기여한다.

5) Cork powder의 첨가

예로부터 isolator 재에 많이 사용되어 온 방법으로 cork의 hysteresis에 의하여 damping 특성이 개선되며 특히 저 주파수의 진동에 대한 isolation에 유리하다.

6) 도전층 코팅 압전 분말 재료의 사용

압전 분말 재료를 고분자 수지 재료 중에 분산시키고 동시에 압전 재료에 생긴 압전 전위를 단락시키기 위한 통전 경로를 형성시킨 것으로서 제진체에 진동 에너지가 주어지면 압전체에 전압이 발생하고 통전 경로를 통하여 Joule열로서 진동 에너지가 소실된다. 일종 2의)항과 3)항의 방법의 복합화로서 압전 분말 재료에 코팅된 도전 피복물 또는 수지 중에 분산시킨 도전 분말이 통전 경로의 역할을 하게 된다.

7) PU계 엘라스토머

Polyoxypropylene polyol($f=2.3\sim 4.0$)의 활성 isocyanate 화합물을 반응시켜서 얻은 말단 isocyanate 화합물과 β -methyl- δ -valerolactone을 개환 중합하여 얻은 polyol oligomer를 가교제로 반응시킨 연질 엘라스토머 조성물로서 신장율이 크고 내구성이 우수하며 손실 계수($\tan \delta$)는 0.309~0.372 또는 0.377~0.523 범위인 것으로 보고하고 있다.

8) 연화제나 가소제의 사용

연화제나 가소제는 사용 온도 또는 주파수 범위에

있어서 손실 계수의 피크를 broad하게 하는 즉, 넓은 온도 범위에서 높은 손실 계수를 유지하기 위하여 사용된다.

9) 수지의 사용

수지는 통상의 석유계 연화제에 비하여 감쇠를 향상시키는 효과가 크고 탄성율의 온도 의존성이 적으며 비교적 고경도에서 감쇠 기능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 수지 첨가에 의하여 $\tan \delta$ 의 온도 분산 곡선은 고온 측으로 이동하고 높은 $\tan \delta$ 를 나타내는 온도 범위도 확대되는. 이것은 점성 부분을 지배하고 있는 폴리머 부분에 수지가 사용하여 Tg를 상승시키고 수지 분자가 높은 유동 저항을 나타내기 때문이며 첨가되는 수지의 유리 전이점과 상용성이 중요한 factor이다.

4.2.2 동배율

동배율 특성의 개선은 동시에 손실 계수의 변화를 수반한다. 또한 방진 고무는 지지 성능이 요구되므로 정적 스프링 상수를 여기에 맞추어야 한다. 지지 특성인 정적 스프링 상수는 충전제 등을 첨가하여 최적으로 조정하는 것이 가능하나 정적 스프링 상수에 따라 스프링 상수도 동시에 변하며 여기에 문제가 있다.

통상 동특성의 개질 방법으로는 폴리머와 carbon black간의 계면 성질의 개질과 폴리머의 입체 장애의 설계 개질이 중요한 수단이 되고 있다.

사용하는 carbon black의 경우도 보강성이 작은 것을 사용하는 것이 저 동배율화를 위하여 유리한 방법이다.

일반적으로 저 동배율 고무로 되기 위한 조건은 다음과 같다.

- i) 분자 회전이 용이하고
- ii) 분자간 상호작용이 낮으며 분자 운동이 활발
- iii) 분자의 엉킴이 풀리기 어렵다.
- iv) filler와의 결합이 강고하다.
- v) 화학 가교가 충분히 일어난다.

이하 방진 고무의 동배율 저하를 위한 개발 방법 중

몇 가지를 소개하고자 한다.

1) 분자 말단 화학 변성

고무 재료의 화학적 수식은 완전한 고무 탄성을 발현시키기 위하여 탄성에 기여하지 않는 말단 자유쇄를 없애기 위한 방향에서 접근하는 것으로서 첫째, 말단 효과를 최소화하기 위하여 고분자화하거나 둘째, coupling 반응에 의하여 고분자화하거나 셋째, 말단에 작용기를 도입하여 가교 반응시에 반응시키는 방법 등이 응용된다.

분자 말단의 화학 변성은 직접적인 효과 이외에도 변성에 의하여 고무와 카본 블랙 사이에 상호작용이 증대되고 카본 블랙의 분산성이 향상되므로서 동배율이 저하된다고 한다.

2) Coupling제에 의한 방법

Yamaguchi²⁾ 등의 연구 결과로서 N,N'-Bis(2-methyl-2-nitropropyl)-1,6-diaminohexane(BNAH)이 천연 고무계에 대하여 방진 고무에 있어서 진동, 소음 저감의 중요한 요소인 E'의 주파수 의존성을 저하시켜 동배율을 현저히 저하시키는 것으로 보고하고 있다.

또한 BNAH는 내구성, 특히 내진동피로성이 비약적으로 개선되며 zinc methacrylate와의 병용에 의하

여 스프링 특성이 개선되는 것으로 보고하고 있다.

BNAH의 개질 기구는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 고무와 carbon black을 coupling하여 분산성을 향상시키고 고무와 carbon black 계면에서 에너지 손실을 개량시키기 때문인 것으로 생각되고 있다.

3) Aramid 섬유의 사용

천연고무에 아라미드 섬유를 1~10 중량부 사용하므로서 지지 강성을 나타내는 정적 스프링 상수는 크고 동시에 진동 전달의 차단 성능 즉, 동적 스프링 상수는 크게 증가되지 않아서 동배율이 작게 된다고 한다.

아라미드 섬유에 계면 접착 처리제를 사용하므로서 그 효과는 더욱 상승되는 것으로 보고하고 있다.

4.2.3 기타 요구 특성

진동의 전달 방지를 주목적으로 방진 고무에 사용되는 고무의 재질은 방진 고무로서의 특성뿐만 아니라 지지 성능 및 내구성이 요구되며 합리적인 설계에 의하여 그 효과를 향상시킬 수 있다.

방진 고무에 있어서 지지 성능의 설계는 방진 고무의 다른 중요한 특성 즉, 감쇠나 동배율 등에 영향을 미치므로 각각 성능에 대해서는 동시에 고려되어야 하나 여기에서는 특히 방진 고무로서의 '지지 성능'이라는 특성에 중점을 두고 기술하고자 한다.

1) 피로 특성

방진 고무와 같은 동적 부하 조건하에서 사용되는 엘라스토머는 반복된 변형에 의하여 결합부에 응력이 집중하여 여기에 균열이 발생하여 성장하며 결국 파단되게 된다.

따라서 엘라스토머의 초기 특성이 요구되는 강도를 만족하고 있어도 사용 환경하에서 기계적 반복 변형에 대한 충분한 내구성을 만족시키지 않으면 안된다.

내열성이나 flex resistance를 향상시키기 위해서는 semiefficient vulcanization system이 가장 적당하나 내피로성이나 금속류와의 접착성이 저하되는 문제점이 발생한다.

2) 내 크리이프성

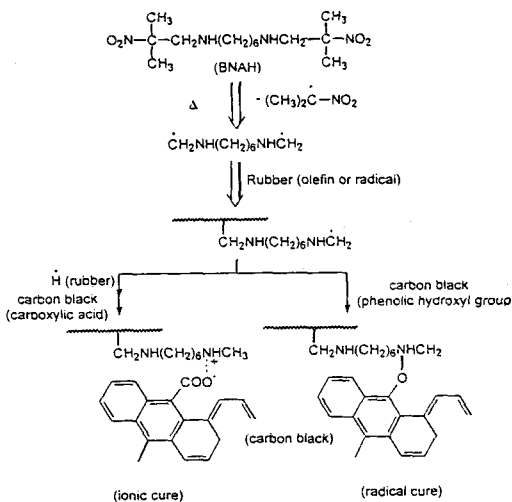


Fig. 11. BNAH의 개질 기구

특히 면진 고무, 액체 봉입 engine mount용 고무에 중요한 특성으로서 고무 분자의 분자 회전성이 높고 응집 에너지가 낮을수록 유리하다. (Q
NR>EPDM>SBR>CR>NBR>T)

특히 엘라스토머는 감쇠 기능은 고 hysteresis 성질을 가져야 유리하나 이와 같은 엘라스토머는 크리이프를 일으키기 쉽고 기계적 성질의 온도 의존성이 높고 기능적으로 불안정하게 된다.

3) 내열성 및 내열 산화성

기계적 제성질의 온도 의존성이 낮은 것일수록 유리하며 분자간 응집력이나 보강제 의존성이 강한 고무는 내열성이 떨어진다. 최근 액체 봉입 engine mount용 고무도 80℃에서 130℃로 내열내구성의 요구가 가혹해지고 있으며 내열성뿐만 아니라 내열산화성 등도 문제가 된다.

Silane coupling제의 사용에 의해서도 제품 수명의 연장이 가능한 것으로 알려져 있다. 즉, 규산 마그네슘 배합 SBR에 silane coupling제를 첨가하므로 정적 스프링 상수가 증대되고 modulus 증대 및 발열성 저하에 의하여 제품의 수명이 연장되는 것으로 알려져 있다.

5. 결 론

이상 고무의 방진·제진 및 완충 특성에 대하여 살

펴 보았다. 방진은 진동절연의 문제로서 일반적으로 전달율로서 평가된다. 전달율은 공진 영역에서는 손실 계수를 크게 할 필요가 있으며 방진 영역에서는 가능한 한 손실 계수는 작은 것이 유리하다.

방진용 소재 개발은 이러한 이율배반적인 문제를 해결하고 동적 특성과 함께 내구성이나 내열성에 대한 개선이 필요한 것으로 생각된다. 방진 고무의 내구성 및 내열성에 대한 요구는 엔진 룸의 온도 상승과 더불어 더욱 가혹해질 것은 틀림없는 사실이다.

방진 설계는 액체 봉입 마운트로 대표되는 바와 같이 구조 설계가 방진 설계의 중심이지만 기본적으로 방진 설계에 고무가 사용되는 한 계속 연구되어야 할 분야이고 고무는 앞으로도 중요한 기능성 부품으로서 그 역할을 담당할 것이다.

참 고 문 헌

1. S. Yamashita, 日本고무協會誌 vol. 64(12), 752 (1991) : ref., 56, 68~74.
2. T. Yamaguchi, I. Kurimoto, H. Nagasaki, and T. Okita, Rubber World, Feb., 30 (1989).