

## 고무의 복합강성을 이용한 방진 마운트의 정적·동적 특성에 관한 연구

° 권오병\*, 김종연\*, 김영구\*, 한문성\* 고철수 \*

### The Study of Static and Dynamic Characteristics for a Isolation Rubber Mount using the Complex Stiffness

Oh-Byung Kwon, Jong-Youn Kim, Young-Koo Kim, Moon-Sung Han, Cheoul-Soo Ko

#### ABSTRACT

Rubber has high damping and can be formed as various shape according to specific purpose. So, Rubber has widely used as isolation mounts. However, there are still a lot of difficulties in understanding of static and dynamic characteristics of compressed and shear rubber mounts.

In this paper, Static characteristics of the rubber isolation mount are observed by the analytical method and FEM. Also dynamic characteristics of rubber mount under compression and shear strain are investigated

#### 1. 서론

오늘날 진동, 충격 및 소음에 의한 장애에 관심이 높아지고 있지만 기계의 운동으로 인한 진동, 충격 및 소음 등은 의례적으로 발생하는 것으로 생각하고 아직까지 적절한 방지 대책이 방지되고 있는 것이 현실이다. 진동, 충격 및 소음 발생은 기계류의 기능면이나 내구성에서 중요할 뿐 아니라 제품의 품질 및 작업 환경에까지 큰 영향을 미치고 있다. 기계가 정밀화 되고 고도화 될수록 진동에 대한 적극적인 대책이 이루어져야 한다.

진동에 대한 대책으로 방진마운트가 여러 산업 분야에서 이용되는데 방진마운트는 외부로부터 전달되는 진동 또는 충격을 완충시키며 기계와 설비를 보호하고 쾌적한 작업 환경을 만들고 넓은 범위에서 유형 무형의 이익을 가져온다. 이런 방진 장치 중 폭넓게 사용되는 것이 고무마운트이다.

일반적으로 고무는 금속에 비하여 내부감쇠가 크고 경제성, 성형의 용이성 때문에 기계, 구조물의 방음, 방진재로 널리 이용되어 왔다. 그러나 고무 재료는 비선형, 비압축성, 대변형 특성을 나타내며 대변형 관계에서도 초탄성의 특성과 시간에 따라 물성이 변하는 점탄성의 거동을 보여 방진고무의 효과적인 설계를 위해서는 고무재료의 정적·동적 특성을 잘 파악해야 한다.<sup>[1]</sup>

본 논문은 천연가황고무를 이용한 방진 고무마운트의 전단·압축 변형시 방진마운트로써 지지용량 및 성능을 결정하는 정적 특성을 해석적방법과 유한요소법(FEM)을 이용하여 해석하였으며 실험치와 비교 평가하였다. 또한 압축·전단 하중을 받는 방진고무의 변형진폭 및 주파수에 따라 나타나는 고무마운트의 동적 특성을 실험적 방법으로 파악하였다.

\* 유일산업 기술연구소  
obkwon@youil.com

## 2. 복합 변형된 고무마운트의 정적 특성

고무 마운트의 주요 구성은 상·하부 하우징, 좌·우측에 금속과 접착된 고무부분으로 구성되며 상부 하우징과 하부 하우징 사이 좌·우측에 고무가 일정한 경사각으로 설치되어 상·하부 하우징에 볼트로 체결되는 구조이다. Fig.1는 고무가 압축과 전단의 복합적으로 변형이 발생하는 방진마운트 형상이며 양쪽에 부착된 고무의 압축력과 전단력으로 지지하중이 결정되는 구조이다.

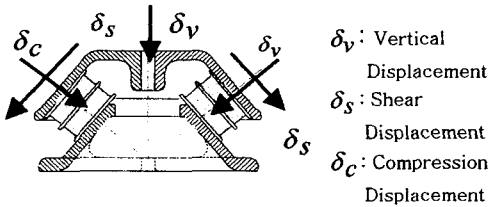


Fig. 1 Rubber Isolation Mount

### 2.1 고무마운트의 정적 강성 해석

고무마운트의 강성을 결정하는 설계 변수는 고무의 경도, 고무부분의 설치각, 고무 층의 두께, 고무 층의 길이 등이 있으며 각 변수에 대하여 탄성계수 및 전단계수를 이용하면 고무마운트의 하중-변위 관계를 예측할 수 있다.

일반적으로 방진 고무 설계시 고무는 전단변형률이 30 %이내, 압축 변형률은 20 %이내에는 설계되며 전단 강도는 1~2kg/mm<sup>2</sup>, 압축강도는 10 ~ 15 kg /mm<sup>2</sup> 이내에 설계 된다<sup>[2]</sup>.

고무마운트의 수직 변위  $\delta_v$  에 대하여 경사진 고무의 압축 변위  $\delta_c$  와 전단 변위  $\delta_s$  는 다음과 같이 계산 된다.

$$\delta_c = \delta_v \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta_s = \delta_v \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

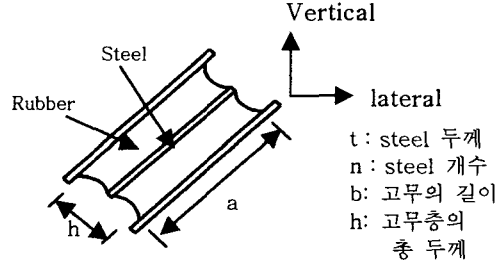


Fig. 2 고무부분의 형상

고무마운트의 해석에서 중요한 변수 중의 하나가 전단 계수(G)이다. 이 계수는 형상에 독립적이고, 고무 재료에만 의존적이다. 전단 계수는 고무 혼합물의 경도와 상호 관계는 Fig.3와 같으며 천연 가황고무의 전단계수와 경도와와의 관계를 수식으로 표현하면 다음 식(3)과 같다.

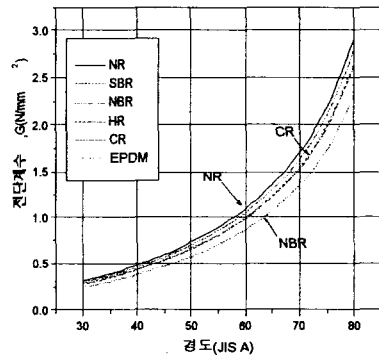


Fig.3 경도와 전단 계수(G)의 관계

$$NR\text{의경우} : H = \frac{G}{G+0.730} \times 100 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{형상계수} : S = ab / 2(a+b)h^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

체적비 압축성을 가정한 경우의 평균 겉보기 탄성계수  $E_{ap}$ 와 굽힘의 영향을 포함한 겉보기 전단 탄성 계수  $G_{ap}$ 는 실제 적용되는 전단 계수로서 순수 탄성계수(E) 및 전단계수(G)와 다음 식(5), 식(6)과 같은 관계가 있다<sup>[2]</sup>.

$$\text{겉보기 탄성 계수} : E_{ap} = (3+6.58 \cdot S^2) \cdot G$$

..... (5)

결보기전단 탄성계수:  $G_{ap} = (1 + \frac{1 \cdot h^2}{3 \cdot a^2}) \cdot G$

..... (6)

상기의 식을 이용하여 고무가  $\theta$  의 경사각을 가지고 양쪽으로 설치 될 때의 수직강성 계산을 다음 식(7)과 같이 유도될 수 있다.

$$K = \frac{2a \cdot b}{h'} \cdot G_{ap} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{2a \cdot b}{h''} E_{ap} \cdot \cos^2 \alpha$$

..... (7)

여기서  $h' = h - nt$ ,  $h'' = \frac{h - nt}{n + 1}$

식(6)을 이용하여 설계 변수에 따라 수직 강성을 해석하면 Fig.4와 같고 경도가 증가함에 따라 수직강성이 증가하며 고무의 설치 경사각에 따라 크게 수직 강성은 크게 감소함을 알 수 있다. 본 논문에 사용된 마운트는 고무 허용응력 및 변형률내에서 설계되어야 하므로 고무 설치 경사각이 60°, 고무층의 두께는 40mm로 하였다.

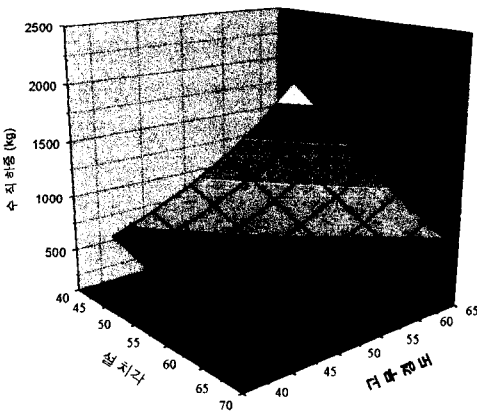


Fig. 4 설계 변수에 따른 수직 하중

## 2.2 유한요소해석

상기의 해석적 방법에 의한 강성 예측은 단순 수직 방향에 대하여 한정적이며 압축·전단 복합 변형시 수평강성 해석 예측이 쉽지 않다. 따라서 유한요소해석을 통하여 초기수직변위에 따라 수평강성 및 수직강성 해석을 수행하였다.

고무재료의 거동을 예측하기 위해서는 사용되는 방법 중의 하나는 변형률 에너지 함수 U의 개념을 이용하는 것이다. 이 경우 고무재료는 초탄성, 비압축성이라 가정한다. 일반적으로 아주 큰 변형이 아니라면 변형률 에너지 함수(strain energy function)를 표현하는 재료 모델로서 Mooney-Rivlin 모델이 잘 맞는 것으로 알려져 있고 다음 식과 같이 표현된다.

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

여기서,  $C_{10}, C_{01}$  은 물질상수로서 재료시험으로부터 얻어진 하중-변형관계에 의해 결정된다.

본 해석에 사용된 고무의 Mooney-Rivlin 모델의 재료상수는 경도 60에서  $C_{10}=0.031\text{kg/mm}^2$ ,  $C_{01}=0.028\text{kg/mm}^2$ 를 사용하였다.<sup>[1]</sup>

고무마운트의 요한요소해석 모델은 3방향의 해석을 각각 해석해야 하므로 3차원 모델링을 이용하였다. Fig.5는 방진 마운트의 3차원 유한 요소 모델링 형상과 수직 방향으로 10mm 변형시 고무의 전단변형과 압축변형을 나타낸다. 사용된 고무는 천연고무로 포와송비는 0.499를 사용하였으며 고무와 같이 적층되는 금속판재의 포와송비는 0.3의 값을 사용하였다.

수직변위에 대한 하중은 Fig.6에서 보듯이 해석적 방법과 유한요소해석 결과가 실험 결과와 잘 일치함을 볼 수 있어 유한요소해석 방법을 검증할 수 있었다. 고무 마운트의 고무 길이 방향의 수평강성(longitudinal Stiffness)은 초기 압축변위에 따라 약간 감소함을 알 수 있고, lateral 방향의 수평 강성은 초기수직변위에 따라 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 고무가 60°의 경사각으로 설치

되어 있어 압축변위에 따라 고무의 형상계수 (shape factor)가 증가되기 때문이다.

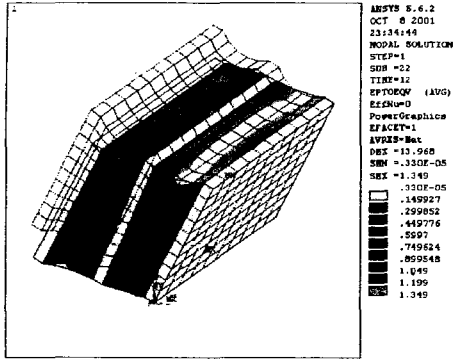


Fig.5 수직변위 10mm 발생시 압축변형과 전단변형

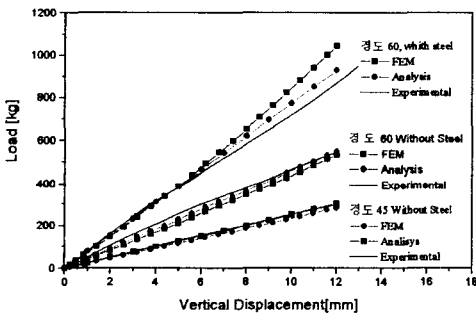


Fig.6 설계변수에 따른 수직 강성 비교

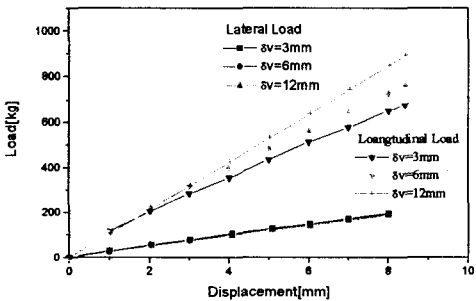


Fig.7 초기압축변위에 따른 수평강성 비교

### 3. 동적 특성 해석

일반적인 고무의 동적특성은 온도, 진동수, 평균변형과, 변형 진폭 등의 영향을 받는다.

고무 마운트의 동특성 실험은 마운트의 초기 압축변형 및 전단 변형이 복합적으로 작용시 변형진폭 및 주파수에 따라 마운트의 특성을 파악하였다. 동적 특성인 저장강성(storage stiffness), 손실강성(loss stiffness), 손실계수(loss factor) 및 동강성(dynamic stiffness)을 주파수에 대한 의존성을 살펴보기 위한 것으로 일반적으로 공진법과 비공진법이 자주 이용되는데 본 연구는 주파수와 가진 변위 조정이 용이한 비공진법으로 실험하였다.

동적특성 실험 방법으로 일정 수직 변위( $\delta_v$ ) 3mm, 6mm, 12mm 하에서 0.5Hz ~ 15 Hz 까지 주파수별 각각  $\pm 1mm$ ,  $\pm 3m$ ,  $\pm 5mm$ 의 변형 진폭( $u_o$ )으로 실험하였다.

여기서, 초기수직변위 3mm의 변위는 고무의 압축 변형률이 3%이고, 전단 변형률은 6%가 된다. 또, 초기압축변위 12mm 인 경우는 압축변형률이 12%이고, 전단 변형률이 24%가 된다.

해석 결과는 다음과 같은 이론적 배경에서 계산하였다.

하중-변위에 대한 방진고무의 운동은 식 (8)에 의해 주어지며 정상-상태조건( Steady-State)에서 이러한 운동을 유지하기위해 필요한 힘은 식(9)와 같다.

$$u = u_o \sin(\omega t) \tag{8}$$

$$p = p_o \sin(\omega t + \delta) \tag{9}$$

여기서,  $u_o$ 는 측정된 변위의 진폭,  $\omega$ 는 가진 주파수,  $t$ 는 시간,  $p_o$ 는 측정된 힘의 진폭,  $\delta$ 는 위상각을 나타낸다.

정상-상태(Steady - State) 운동에서 에너지 소산(Energy Dissipation)은 식(10)과 같으며 측정된 하중-변위 곡선내의 면적과 같다. 또 식 (9)를 다시 쓰면 식(11)와 같이 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$W_d = \oint p du = \pi \sin \delta p_o u_o \quad (10)$$

$$P = K_1 u_o \sin \omega t + K_2 u_o \cos \omega t \quad \dots (11)$$

여기서,  $K_1 = \frac{P_o}{u_o} \cos \delta$ ,  $K_2 = \frac{P_o}{u_o} \sin \delta$  (12)

다음식을 이용하면 고무마운트의 동강성( $K_d$ ), 저장 강성( $K_2$ ) 및 손실 계수( $\eta$ )을 계산 할 수 있다.

$$K_2 = \frac{W_d}{\pi u_o^2} \quad (13)$$

$$K_d = \frac{P_o}{u_o} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad \dots (14)$$

$$\eta = K_2 / K_1 = \tan \delta \quad \dots (15)$$

또한 동배율(Dynamic Factor,  $\alpha$ )는 다음식과 같다.

$$\alpha = \frac{K_d}{K_s} \quad \dots (16)$$

실험결과를 살펴보면 변형 진폭에 따라 동적 강성이 감소함을 알 수 있으며(Fig.8) 주파수가 증가함에 따라 저장 강성은 증가하다가 어느 영역의 주파수에서는 저장강성( $K_1$ )이 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 손실강성 또한 주파수가 증가함에 따라 약간씩 증가함을 알 수 있다.

또, 동배율도 저장강성과 같은 특성을 나타내며 초기 압축변위에 따라 즉, 압축변형률 및 전단 변형률이 클 수록 감소함을 알 수 있다.

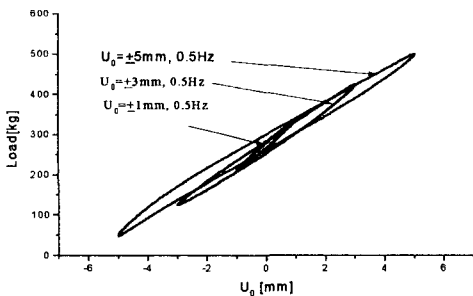


Fig. 8 변형 진폭에 따른 고무 이력 곡선

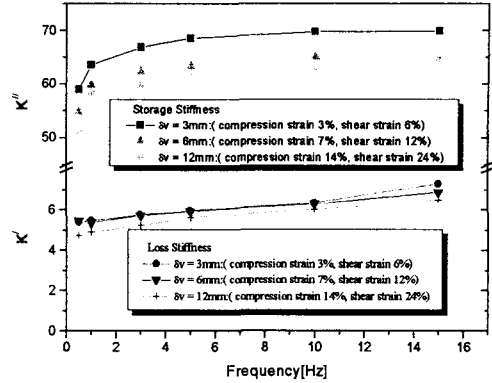


Fig. 9 초기 압축변위 및 주파수에 따른 저장강성 및 손실 강성

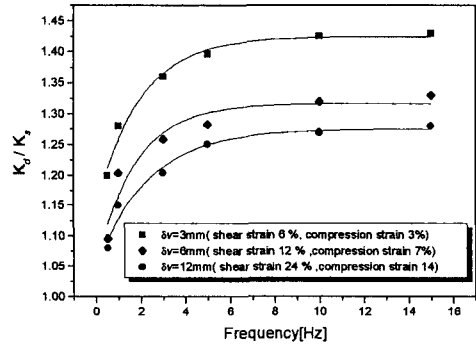


Fig.10 초기 압축변위 및 주파수에 따른 동적 강성

### 3. 결론

진동방진장치 중 고무의 전단과 압축강성 특성을 이용한 고무마운트의 해석적인 방법과 유한요소법을 이용하여 정적 특성을 조사하였으며 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 압축·전단이 동시에 받는 고무의 동적 특성을 파악하기 위하여 초기 변형에 따라 변형 진폭 및 주파수에 따른 동적 특성을 실험적 방법으로 분석하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압축과 전단 하중을 받는 고무 마운트의 정적 강성은 해석적 방법과 유한요소 해석 결과가 시험결과와 상당히 일치하였다.
- (2) 압축과 전단하중을 받는 상태에서 수직변위에 따라 고무의 길이방향(longitudinal) 수평강성은 약간 감소하였으나 길이 직각 방향(lateral) 수평강성은 증가한다.
- (3) 압축과 전단을 동시에 받는 고무 마운트의 동적 강성은 주파수에 따라 증가하다가 어느 일정한 주파수에서 일정한 값을 나타낸다.
- (4) 고무 마운트의 초기수직변위가 증가함에 따라 동강성 및 저장강성은 감소한다.

## 참고 문헌

- [1] Wan-Doo KIM, Wan-Soo KIM, Chang-Soo WOO, "Test method of rubber material models for finite element analysis" IRC, 2001.
- [2] 박노길, 방성태, "유한요소법을 이용한 고무연결요소의 정-동강성 계수에 관한 연구", 전산구조학회, 제8권, 제 2호, 1995.6.
- [3] N. Alcoutlabi and J.J. Martinez-Vega, "Application of fractional to Viscoelastic behaviour modeling and to the physical ageing phenomenon in glassy amorphous polymers", POLYMER Volume 39 Number 25, 1998.
- [4] 윤승원, 이성춘, "고무의 전단탄성을 이용한 방진마운트 개발", 정밀공학회. 학술대논문집 pp. 782~789, 1997
- [5] Kazuhiro HASHIMOTO, Kouichi OZAKI, "방진 고무의 정특성 및 동특성", 일본기계학회논문집(III), 1993. 3.
- [6] 김국원, 임종락, 손희기, 안태길, "압축된 고무재료의 정적 변형 해석과 동특성 예측", 한국소음진동학회지 제9권 제3호, pp. 472~476, 1999.
- [7] "가류고무의 동적성질 시험방법", 일본공업규격, JIS K 6394-1995.