

실험에 의한 방진고무의 동특성에 관한 연구

우 창 수[†] · 김 완 두 · 김 기 세* · 권 재 도**

한국기계연구원 마이크로응용역학그룹 · 담양대학 자동차공학부 · 영남대학교 기계공학부
(2002년 5월 22일 접수, 2002년 6월 7일 수정, 2002년 6월 12일 채택)

An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Rubber Isolator

C. S. Woo[†], W. D. Kim, K. S. Kim*, J. D. Kwon**

Micro · Applied mechanics Lab., Korea Institute of Machinery & Materials,

**Department of Automotive, DamYang University*

***Dept. of Mechanical Engineering, YeungNam University*

(Received May 22, 2002, Revised June 7, 2002, Accepted June 12, 2002)

요 약 : 우수한 신장성과 탄성복원 능력으로 여러 산업분야에 방진, 제진, 충격흡수 및 완충재료로 널리 사용되고 있는 고무재료에 대하여 주파수, 변형률 진폭 및 온도변화가 동특성에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토하였다. 동특성 시험은 5종류의 경도에 대하여 인장 · 압축시험과 전단시험용의 천연고무 시험 편으로 비 공진법으로 수행하였다. 시험결과, 경도가 높을수록 동적 특성 값들이 크게 나타났으며 저장탄성계수와 손실계수는 주파수가 증가할수록 서서히 증가하였으며 변형률 진폭이 커질수록 감소하였다. 또한, 온도 특성은 -50°C 영역에서 저장탄성계수가 급격히 상승하며 손실계수가 최대로 나타나는 전이역임을 알 수 있었다.

ABSTRACT : Rubber materials with excellent damping property are widely applied for vibration isolators. The dynamic characteristics of the rubber materials for vibration isolators were investigated. Dynamic tests for rubber materials with five different hardness were performed. In dynamic tests for test specimen, non-resonance method was used to obtain the dynamic storage modulus and loss factor. Moreover, the effect of dynamic vibration frequency, strain amplitude and temperature were investigated. As results, the storage modulus and loss factor generally increase when the hardness and frequency increase, and the glass transition temperature is -50°C by a large change in modulus and loss factor

Keywords : Rubber Materials, Isolation Rubber Component, Dynamic Test, Storage Modulus, Loss Factor

I. 서 론

고무는 신장성과 탄성복원 능력이 우수하며 형상을 자유롭게 선택할 수 있어 소형 및 경량화가 가능하고 또한, 배합을 조절하여 감쇠를 선택할 있는 장점으로 인하여 여러 산업분야에 방진, 제진,

내진, 충격흡수 및 완충재료로서 널리 사용되고 있다. 고무재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이며 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성(hyper-elastic) 특성과 시간에 따라 재료의 물성치가 변하는 점탄성(visco-elastic) 특성을 나타내는 등 매우 난해한 거동을 보인다.^{1,2,3}

따라서, 고무부품의 효과적인 설계를 위해서는 고무재료의 특성을 잘 이해하고 정적 및 동적 물

[†]대표저자(e-mail : cswoo@kimm.re.kr)

성치를 정확히 파악하여야 한다. 고무의 정적 물성치는 변형률에너지 함수로 표현되고 동적 물성치는 저장 탄성계수(storage modulus)와 손실계수(loss factor)로 나타내어진다.

고무재료의 기계적 특성은 금속과 달리 온도, 주파수 및 사용환경 등에 의해 영향을 크게 받고, 형상변화에 따라서 강성이 변할 수 있으므로 고무부품을 사용한 시스템의 동적 거동을 예상하는 경우에는 세심한 주의가 필요하다. 최근 컴퓨터의 발전에 힘입어 유한요소법을 이용하여 고무재료의 거동을 해석하는 것이 시도되고 있으나,⁴ 실제 현장에서 고무부품 설계 시에 필요한 동적 특성에 대한 기초적인 데이터는 부족한 것이 현실이다.

이에 본 논문에서는 방진고무로 많이 사용되는 천연고무 계통의 고무에 대해 경도별로 시편을 제작하여 온도, 주파수, 가진 변형률진폭 등이 고무의 동특성에 미치는 영향을 실험을 통하여 확인하였다.

II. 고무의 동적 성질

1. 동특성

이상적인 선형 탄성고체에서 응력은 변형률에 비례하는 후크의 법칙 (Hooke's law)을 따르고, 이상적인 점성유체의 경우, 응력은 변형률의 시간변화율에 비례하는데, 실제로 고무는 이들 두 가지 경우의 중간적인 특성을 갖으므로 이를 점탄성 거동이라고 한다. 이러한 점탄성 재료의 모델은 선형에 대해서는 스프링과 댐퍼요소로 이루어진 맥스웰(Maxwell) 모델과 브와(Voigt) 모델의 조합으로 이루어질 수 있다. 방진고무의 동적 성질은 손실계수와 동 배율에 의해 영향을 많이 받고 있는데 손실계수를 높이기 위한 방법으로는 충전제나 수지, 금속분말 등의 첨가나 고무 블렌드를 이용한 방법이 사용되고 있으며, 동 배율의 특성을 개선하기 위해서는 고무분자 말단의 자유쇄 변성, 단섬유 강화 등의 방법이 있다.⁵

고무시편의 한쪽에 정현파의 변위를 주고 다른 쪽에서 하중을 측정하면 동적인 변형(γ) 및 동적인 응력(σ)과 시간의 관계⁶는 Figure 1에서 보

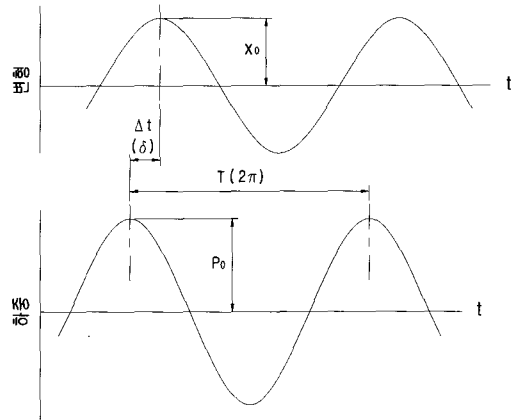


Figure 1. Stress and strain vs. time under the harmonic loading

는 바와 같이 응력이 변형보다 약간 앞서게 된다. 이 관계는 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos \omega t \tag{1}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \tag{2}$$

점탄성 재료는 스프링과 댐퍼의 특성을 동시에 갖고 있으므로 위상각이 0°과 90°도의 범위에 있다. 앞의 (2)식을 바꿔 쓰면 다음과 같다.

$$\sigma(t) = \sigma_0 [\cos \delta \cos \omega t - \sin \delta \sin \omega t] \tag{3}$$

우변의 제 1항은 변형률과 같은 위상의 응력 성분이고 제 2항은 90° 위상이 다른 응력 성분으로 각 응력 성분의 진폭과 변형률 진폭의 비를 구하면 다음 식과 같다.

$$G^* = G_1 + i G_2 = G_1(1 + i \tan \delta) \tag{4}$$

$$G_1 = \sigma_0 \cos \delta / \gamma_0 \tag{5}$$

$$G_2 = \sigma_0 \sin \delta / \gamma_0 \tag{6}$$

$$\lambda = \tan \delta = G_2 / G_1 \tag{7}$$

위 식에 있어서 G^* 는 복소탄성계수라 하며, 각

도 δ 를 손실각, G_1 을 저장탄성계수 또는 동적탄성계수, G_2 를 손실탄성계수, λ 를 손실계수라고 하며 이들은 고무재료의 동적 성질을 나타내는 양이다.

2. 동적 성질에 영향을 미치는 인자

가황고무의 동적 성질은 일종의 물질정수로서 일반적으로 온도, 주파수, 진폭에 따라 변화하는 양으로 이들 인자 중에서 하나의 인자 영향을 알이불 때는 다른 인자를 일정하게 유지하여야한다. 그렇게 하여 얻어진 동적 성질은 독립변수의 이름을 따라 온도 특성, 주파수 특성 및 진폭 특성이라고 부른다.⁶

2.1 온도 특성

고무에서 응력을 가했을 때 반응이 지연되는 주된 원인은 분자 체인들 사이의 내부 점성 때문이며 이 성질은 온도에 의해 영향을 받는다. 이는 분자들의 이동률에 의한 영향인데 온도가 올라가면 이동률이 크게 증가하게 된다. 일반적으로 주파수와 진폭을 일정하게 유지한 채로 온도를 낮추면 고무에 따라 다르지만 어느 온도영역에서는 Figure 2와 같이 저장탄성계수가 급격히 상승하는데 이 온도영역을 전이역(transition region)이라고 하며 이 전이역에서 손실계수가 극대로 나타나게된다. 이 현상은 고무상태로부터 유리상태로 전이하는 것으로 주파수가 높을수록 전이역은 고온 측으로 이동하게 된다.

2.2 주파수 특성

온도와 진폭을 일정하게 유지한 채로 진동수를 고유진동수까지 올리면 Figure 3에서와 같이 저장탄성계수는 증가하여 마침내 유리상 고체의 높은 특성치에 도달하게 되며 동시에 손실계수는 처음에는 증가하다가 고유진동수를 넘으면 분자운동의 저항이 증가되어 손실계수는 감소하는 현상이 발생한다. 주파수를 올릴 때의 주파수 특성은 온도를 내릴 때의 온도 특성과 유사한 경향을 보이며 전이영역이 나타나는데 가황고무의 경우, 실온에서 초음파의 주파수 영역에 해당한다.

2.3 변형률진폭 특성

Figure 4에서 보는 바와 같이 카본 블랙이 배합

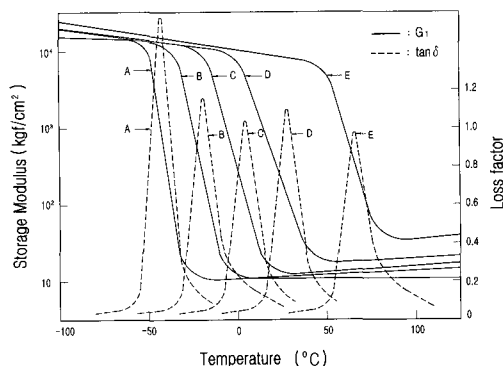


Figure 2. Effect of temperature on dynamic properties

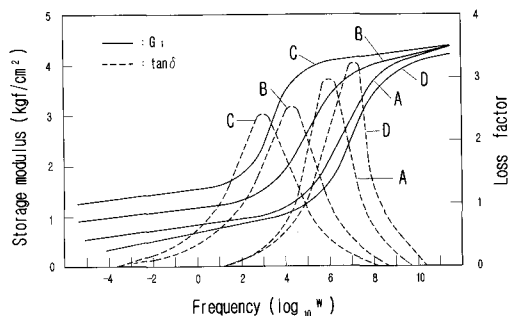


Figure 3. Effect of frequency on dynamic properties

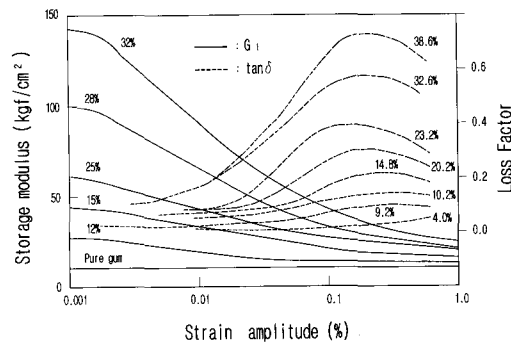


Figure 4. Effect of strain amplitude on dynamic properties

된 가황고무의 동적 성질은 변형률진폭이 증가하면 저장탄성계수는 감소하게 되고 손실계수는 초반에는 증가하다가 소프트닝(softening)이 된 후부터 다시 감소하게 되는데 이 경향은 카본블랙 배합량에 따라서 현저하게 변화한다.

III. 동특성 시험

1. 동특성 시험방법

고무재료의 동적 성질인 저장탄성계수와 손실계수에 대한 온도, 주파수, 변형률진폭 특성을 파악하기 위한 동적 시험방법에는 강제진동법, 감쇠진동법, 충격진동법 등이 있고, 강제진동법에는 비공진법과 공진법이 있다. 공진법은 시편의 공진 주파수에서만 특성치를 얻는 방법으로 신뢰도가 높으나 공진 주파수에 국한된다는 단점이 있으며, 비공진법⁷은 시편의 동강성을 이용하여 전체 주파수에서 특성을 얻는 방법으로 정밀도만 유지된다면 주파수와 진폭의 조정이 용이하며 재료의 특성치가 주파수에 따라 심하게 변하는 경우에도 그 특성파악이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비공진법 중에서 하중과 변위의 파형을 분석하여 저장스프링상수와 손실계수를 구하는 KS M 6604에 의거한 방법으로 동특성 시험을 수행하였다.

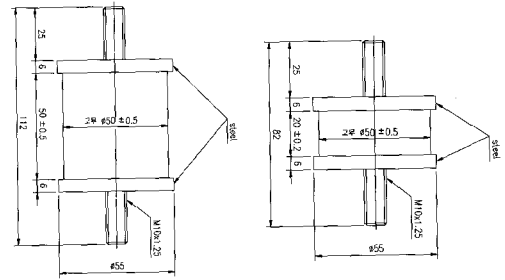
2. 시험편과 시험장치

동특성 시험에 사용된 시험편의 형상 및 치수는 Figure 5에서 보는 바와 같이 인장·압축시험과 전단시험용의 2종류의 원통형 타입으로 하였으며 각각 IRHD 경도 45, 50, 55, 60, 65인 천연고무로 제작하였다.

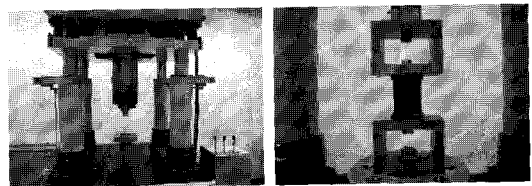
동특성 시험기는 유압서보장치에 의해 시험편에 가진력이 가해지며, 전달되는 하중과 액츄에이터의 변위 및 속도를 해당 검출기에서 측정이 가능하며 300Hz, 2톤 용량을 가진 시험장치로 Figure 6에 나타내었다.

3. 시험조건

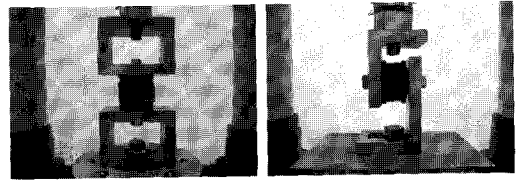
동적 성질에 영향을 미치는 인자들의 특성을 파악하기 위한 시험조건은 Table 1과 같다. 온도 특성을 파악하기 위해서 주파수는 30Hz, 변형률 진폭은 0.1%(0.05mm), 평균 변형률은 10%(5mm)로 일정하게 유지하였고 온도는 -100~+100℃로 변화하였으며, 주파수 특성을 위한 조건으로 온도는 상온, 진폭과 평균 변형률은 온도 특성조건과 동일하



(a) Tension & compression (b) Shear
Figure 5. Dimensions of dynamic test specimens



(a) Dynamic test (b) Tension test



(c) Compression test (d) Shear test

Figure 6. Dynamic test configuration

Table 1. Conditions of Dynamic Test

항 목	시험조건		
	온도 특성	주파수 특성	진폭 특성
주 파 수	30Hz	10~300Hz	30Hz
변형률진폭	0.1%	0.1%	0.2~4.5%
평균변형률	10%	10%	10%
온 도	-100~100℃	25℃	25℃

게 하였으며 주파수는 10~300Hz 영역에서 변화시켰다. 또한, 변형률 진폭 특성평가를 위한 시험조건은 상온에서 주파수는 30Hz, 평균 변형률은 10%로 고정하여 변형률 진폭변화를 0.2~4.5%(0.1~2.25mm)로 하였다.

4. 시험결과

4.1 등적 성질 계산

동특성 시험으로 동 스프링상수와 손실계수가 구해지면 이 결과를 이용하여 저장탄성률과 손실탄성률을 구할 수 있는데 가진 방향이 인장·압축, 전단인 경우에 따라 다음 식에 의해 계산되어진다.⁴

- (1) 겉보기 저장 종탄성계수 : $E_{apl} = (h/A)K_1$
- (2) 겉보기 손실 종탄성계수 : $E_{apl2} = (h/A)K_2$
- (3) 저장 종탄성계수 : $E_1 = E_{apl} / (1 + 1.645 S^2)$
- (4) 손실 종탄성계수 : $E_2 = E_{apl2} / (1 + 1.645 S^2)$
- (5) 겉보기 저장전단탄성계수 : $G_{apl} = (h/A)K_1$
- (6) 겉보기 손실전단탄성계수 : $G_{apl2} = (h/A)K_2$
- (7) 저장전단탄성계수 : $G_1 = [1 + (4/9) \cdot (h/d)^2]G_{apl}$
- (8) 손실전단탄성계수 : $G_2 = [1 + (4/9) \cdot (h/d)^2]G_{apl2}$

여기서 K : 동 스프링상수, A : 시편단면적, d : 시편직경, h : 시편높이, S : 형상률

4.2 주파수 특성

앞의 시험조건에 따라 인장·압축·전단시험을 통해 얻어진 동 스프링상수와 손실계수를 이용하여 주파수 변화에 따른 동특성을 파악하였다.

Figure 7~9에서와 같이 인장·압축, 전단시험의 경우에 대해 경도별로 유사한 경향을 나타내었으

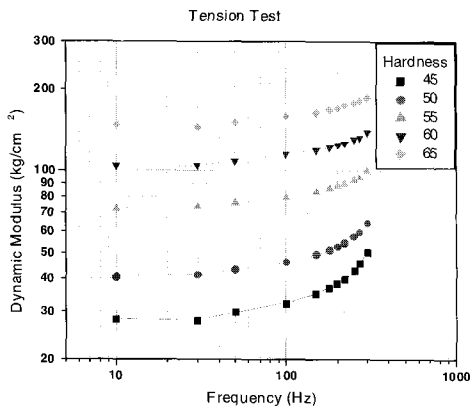
며 주파수가 증가할수록 저장탄성계수와 손실탄성계수 모두 증가하는 경향이었고, 경도가 높으면 탄성계수의 변화 폭이 증가하였다. 100Hz까지는 완만하게 증가하다가 150Hz 이상이 되면 급격히 증가하였으며 인장방향보다는 압축방향이 저장탄성계수, 손실탄성계수 모두 높게 나타났다. 이는 pre-strain에 따라서 고무의 운동이 제한되어 탄성계수가 증가한 것으로 생각된다.

4.3 변형률진폭 특성

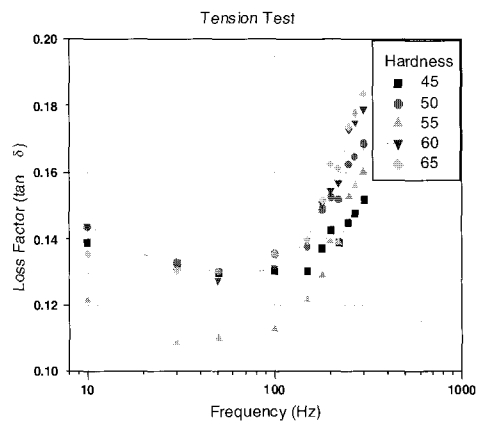
변형률 진폭변화에 따른 동특성 변화는 Figure 10~12에서와 같이 저장탄성계수는 변형률진폭이 증가하면 거의 직선적으로 감소하고 손실계수는 변형률진폭 1%까지는 증가하다가 변형률진폭이 2% 이상으로 증가하면 감소하게 된다. 또한, 경도가 낮으면 변형률진폭에 따른 탄성계수 변화가 작게 나타나나 경도가 높아지면 변화율이 커져 압축방향 경도 45에서는 변형률이 0.45%에서 4.5%로 10배 증가하면 저장탄성계수가 30% 감소하는데 비해 경도 65인 경우에는 50%로 감소한다. 가진 방향에 따라서는 인장방향보다는 압축방향이 저장탄성계수 값이 높게 나타났다.

4.4 온도 특성

Figure 13은 온도 특성시험을 위한 환경 챔버가 부착된 동특성 시험기이다. 온도 변화에 따른 일반적인 동적 성질은 Figure 2에서와 같이 저장 탄성

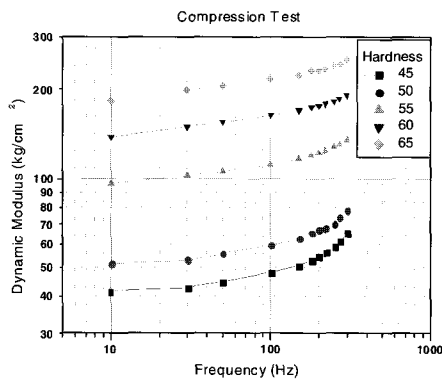


(a) Storage modulus

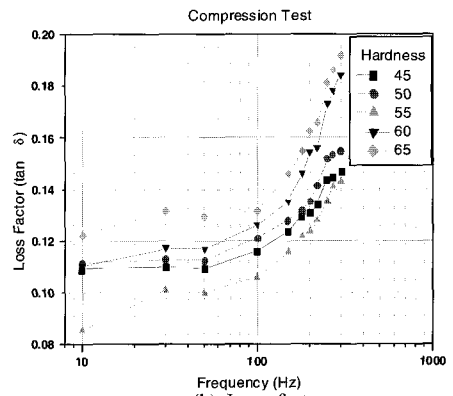


(b) Loss factor

Figure 7. Frequency effect on tension

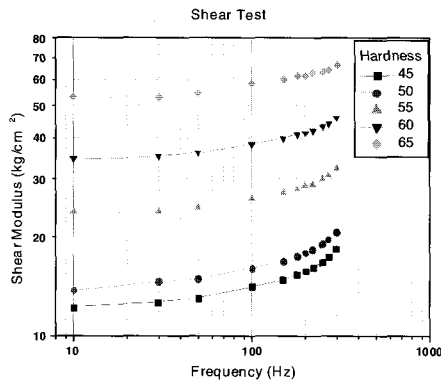


(a) Storage modulus

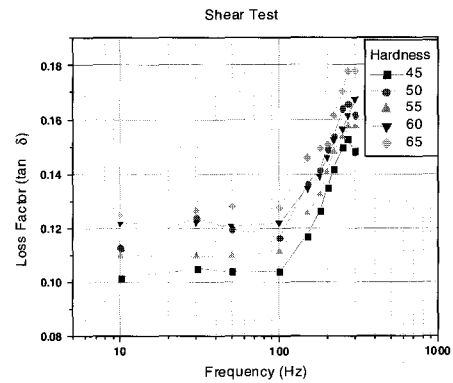


(b) Loss factor

Figure 8. Frequency effect on compression

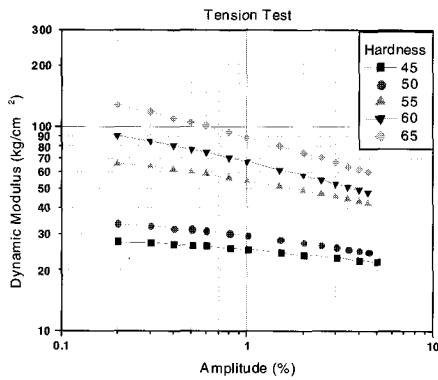


(a) Storage modulus

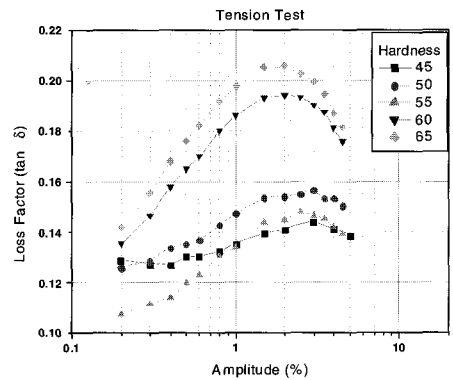


(b) Loss factor

Figure 9. Frequency effect on shear



(a) Storage modulus



(b) Loss factor

Figure 10. Strain amplitude effect on tension

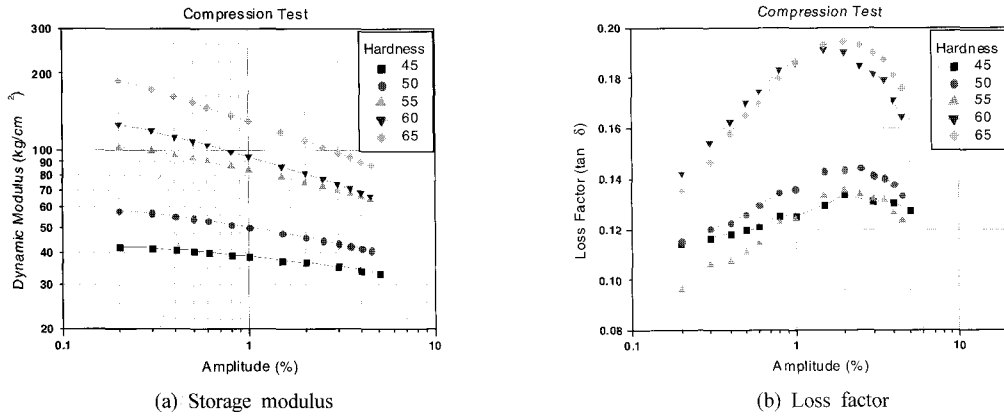


Figure 11. Strain amplitude effect on compression

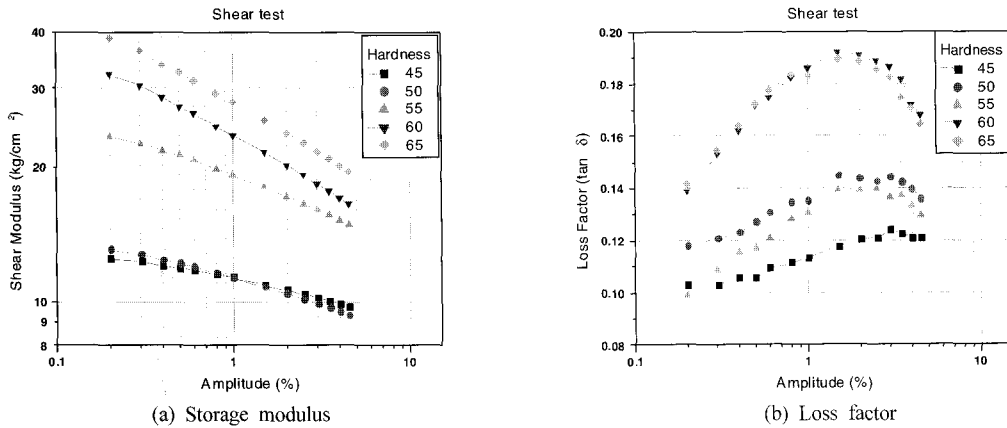


Figure 12. Strain amplitude effect on shear

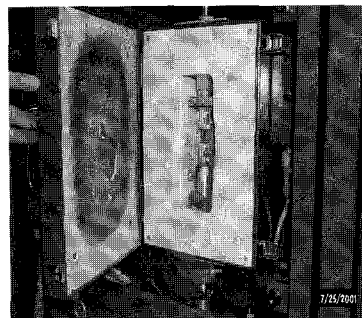
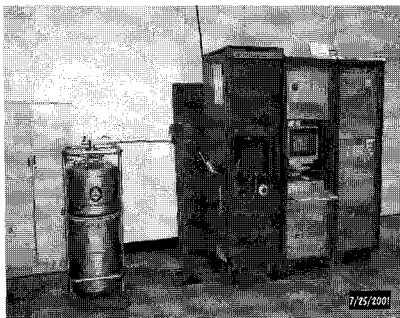
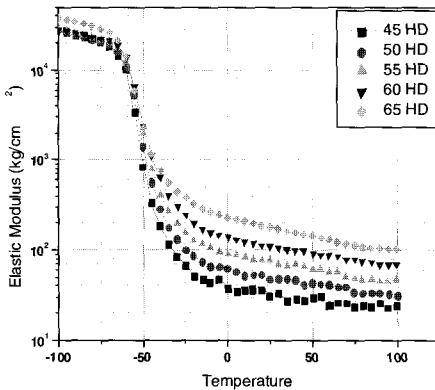
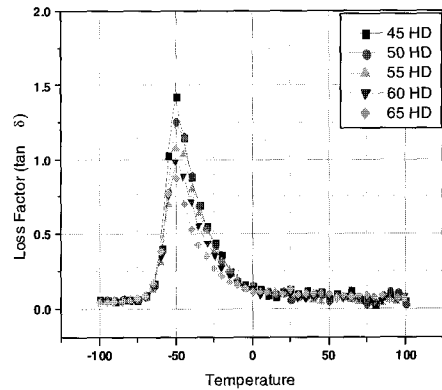


Figure 13. Dynamic tester with environmental chamber



(a) Storage modulus



(b) Loss factor

Figure 14. Temperature effect on dynamic properties

계수는 어느 온도 영역에서 급격히 상승하고 이 영역에서 손실계수가 극대로 나타나게 되는데 본 시험에서는 Figure 14에서 보는바와 같이 전이역에 해당하는 전이온도가 5가지 경도 모두 $-50\sim-60^{\circ}\text{C}$ 에 해당하여 일반적인 천연고무의 전이온도에 해당하였다. 상온 20°C 를 기준으로 하여 온도를 올리면 저장탄성계수는 감소하고 손실탄성계수는 거의 변화가 없으며, 온도를 내리면 저장탄성계수는 서서히 증가하다가 $-50\sim-60^{\circ}\text{C}$ 에서 급격히 증가하기 시작하여 -70°C 이면 경도별로 다르지만 대략적으로 150~700배로 증가하게 된다. 손실계수는 전이온도에서 1.0을 초과하게 되는데 이는 고무로서의 탄성을 잃고 유리상태로 전이된 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 방진고무재료의 천연고무 시험편에 대해 동 특성시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주파수, 변형률진폭, 온도변화에 따른 동적 시험을 통하여 얻어진 동 스프링 상수와 손실계수를 이용하여 동특성에 영향을 미치는 여러 요인의 의존성을 검토하였다.

(2) 저장탄성계수와 손실탄성계수는 주파수가 증가할수록 서서히 증가하였으며, 진폭이 커질수록 감소함을 알 수 있었다. 이 결과는 주파수와 진폭

변화에 따른 일반적인 특성과 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 경도가 높을수록 동적 특성 값들이 크게 나타났으며 압축, 인장, 전단의 순으로 나타났다.

(4) 온도 특성은 -50°C 영역에서 저장 탄성계수가 급격히 상승하며 손실계수 및 손실 탄성계수가 극대로 나타나는 전이역임을 알 수 있었다.

(5) 동특성 시험을 통해 얻어진 결과들은 방진고무부품 설계 시에 필요한 동적 특성에 대한 기초적인 데이터로 활용될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 국가지정연구실사업의 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. P. K. Freakley, A. R. Payne, "Theory and Practice of Engineering with Rubber", Applied Science Publishers LTD, London, 1978.
2. Frederick R. Eirich, "Science and Technology of Rubber", Academic Press, New York, Rubber Division of the American Chemical Society, 1978.
3. R. P. Campion, A. N. Gent, "Engineering with Rubber", Oxford University Press, New York, Rubber Division of the American Chemical Society, Edited by

- Alan N. Gent, 1992.
4. 김완두 외, "초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술 개발", 한국기계연구원 연구보고서, UCN236-712.M, 1999.
 5. 최세운, 허동섭, 홍칭석, "각종 충진제를 배합한 천연고무 가황체의 특성에 관한 연구", 한국고무학회 논문집, Vol. 19, No. 4, 231, 1984.
 6. 戸原春彦, 荒井哲夫, "防振 고무", 防振고무 研究會編, 日本鐵道車輛工業會, 1998.
 7. T. K. Ann, K. J. Kim, "Sensitivity Analysis for Estimation of Complex Modulus of Viscoelastic Materials by Non-Resonance Method", Journal of Sound and Vibration, Vol 176, pp. 543-561, 1994.