

〈논 문〉

점탄성 재료의 동적 특성 측정에 관한 연구

A Study on the Dynamic Test of Viscoelastic Material

최 현* · 박 건 록* · 김 두 훈* · 이 상 조**

Hyun-Choi, Kun-Rok Park, Doo-Hoon Kim and Sang-Jo Lee

(1997년 5월 22일 접수 ; 1997년 7월 14일 심사완료)

Key Words : Impedance Method(임피던스방법), Natural Rubber(NR, 천연고무), Nonresonant Method(비공진법), Resonant Method(공진법)

ABSTRACT

Viscoelastic materials have the characteristics of elasticity and viscosity. Unlike the metals which show negligible damping characteristics, the damping characteristic of viscoelastic materials like rubber mounts is very important in the analysis of the dynamic system. So there has been a great interest in measuring the damping characteristics of viscoelastic materials. There are two kinds of methods which the damping characteristics of the material can be measured. One is the resonant method which loss factor can be measured only in the resonant frequency. The other is the nonresonant method which is characterized by the impedance method and transfer function method. In this paper, the test procedure and the physical meaning of the impedance method are introduced. The impedance test results, the loss factor by the impedance method, are compared to the results of the resonant method including some recommendations in the experimental setup.

1. 서 론

대부분의 금속재료의 경우에는 내부댐핑특성이 무시될 정도로 작아서 재료의 강성에 기여하는 영계수만이 중요한 요소로서 취급되는 경우가 많다.

그러나, 점탄성재료(viscoelastic material)는 탄성과 점성특성을 갖는 재료로서, 고무와 같은 고분자 재료에서는 금속재료와는 달리 내부댐핑의 영향이 커 탄성과 점성을 모두 고려하여야 한다.

재료탄성은 외부에너지를 스프링에서와 같이 저장하는 역할을 하며, 점성은 재료내부에서 마찰등에

따라서 외부에너지를 열에너지로 소산시킨다. 방진/제진을 목적으로 하는 고무마운트와 제진시트와 같은 제품에서는 댐핑성분이 진동시스템의 동적특성을 크게 좌우하게 되며, 따라서 시스템의 동특성을 정확히 예측하거나 점탄성재료를 이용한 제품의 성능을 표현하기 위해서는 필연적으로 재료의 강성에 기여하는 동적탄성특성과 댐핑특성을 나타내는 손실계수를 정확히 측정할 필요가 있다.

점탄성재료의 손실계수 측정방법은 크게 공진법과 비공진법으로 나눌 수 있다. 공진법에서는 점탄성 재료에 인가된 부가질량과 점탄성재료의 강성 및 댐핑에 의하여 결정된 고유진동수에서 모달댐핑을 측정할 수 있으며, 따라서 서로 다른 주파수에서의 댐핑성능을 측정하기 위해서는 해당 고유진동수를 기준으로 부가질량의 크기를 바꾸어 측정해야 한다.

* 정희원, 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

** 정희원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

비공진법은 주파수에 의존하는 손실계수를 측정주파수대역내에서 모두 측정할 수 있는 방법이며, 임피던스방법(impedance method)과 전달함수법(transfer function method)이 있다.⁽¹⁾ 임피던스방법은 재료의 외부에서 동적힘을 작용시키고 동적변위를 측정함으로써 손실계수를 측정하는 방법이며, 전달함수방법은 재료의 끝단에 동적변위를 인가시키고 양단에서의 동적변위를 측정하여 손실계수를 구하는 방법이다.

본 논문에서는 천연고무(NR, Natural Rubber)의 고무시편을 이용하여 비공진법의 한방법인 임피던스방법으로 비교적 간단한 가진시스템을 구성하여 시편에 인가된 동적인 외부힘에 대하여 발생된 진동 응답을 측정하여 재료의 동적강성을 구하고, 그 결과를 이용하여 점탄성재료의 댐핑성능을 평가하기 위한 손실계수를 측정할 수 있는 방법 및 측정과정에서의 물리적 의미를 기술한다. 또한, 동일한 재료에 대하여 공진법을 이용하여 비공진법으로 측정된 손실계수와 그 결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 연구개요

외부에서 작용하는 동적하중에 의하여 점탄성재료에서 발생하는 응력과 변형률간에는 Fig. 1에서와 같이 위상차가 발생하게 된다. 점탄성재료에 주기적으로 작용하는 동적응력, σ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = \hat{\sigma} \times e^{j\omega t} \quad (1)$$

동적응력에 의하여 점탄성재료에서 위상차, θ 를 갖는 변형율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \hat{\epsilon} \times e^{j(\omega t - \theta)} \quad (2)$$

일반적으로 탄성계수(elastic modulus 또는

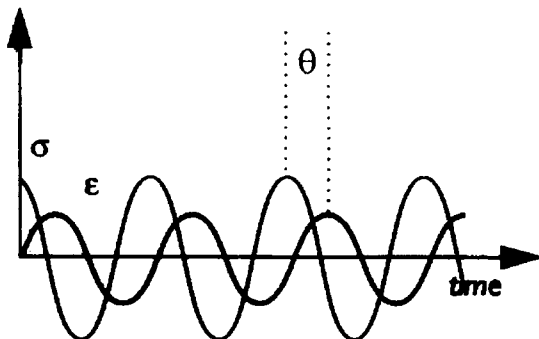


Fig. 1 Dynamic stress and strain

Young's modulus)는 변형률과 응력간의 비율로 나타내며, 점탄성재료에서와 같이 응력과 변형률간에 위상차가 발생하는 경우에는 복소수 탄성계수(complex modulus), E^* 의 개념을 도입하여 다음과 같이 표현할 수 있다.^(2,4)

$$\begin{aligned} E^* &= \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\epsilon}} e^{j\theta} \\ &= E' + jE'' \\ &= |E^*| (\cos \theta + j \sin \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 2에서와 같이 복소수 탄성계수, E^* 에서 동적응력과 동일위상(in phase)부분의 탄성계수를 탄성모듈러스(modulus of elasticity 또는 Young's modulus)라 하고 $E' = E^* \cos \theta$ 로 표현할 수 있다. 반대로 동적응력과 위상차가 발생된(out of phase)부분의 탄성계수를 로스모듈러스(loss modulus)라고 하며 $E'' = E^* \sin \theta$ 로 표현할 수 있다.

손실계수, η 는 복소수 탄성계수에서 탄성모듈러스와 로스모듈러스간의 위상각, θ 의 tan값으로서 점탄성 재료의 댐핑성능을 나타낸다.

2.2 비공진법에 의한 손실계수 측정실험

비공진법은 측정주파수영역에서 손실계수를 주파수에 대한 연속함수의 형태로 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 측정주파수 대역내에 필연적으로 존재하는 측정장치의 고유진동수에서 공진현상으로 인한 영향으로 측정결과와 신뢰도를 저하시킬 수 있다는 단점을 갖고 있다. 따라서, 비공진법 측정시험에 있어서 측정장치의 공진현상에 의한 잡음의 영향이 최소화되도록 시험장치를 구성하여야 한다.

가진기를 이용하여 점탄성시편에 랜덤가진력(random excitation)을 작용시키고, 가진기 끝단에 설치된

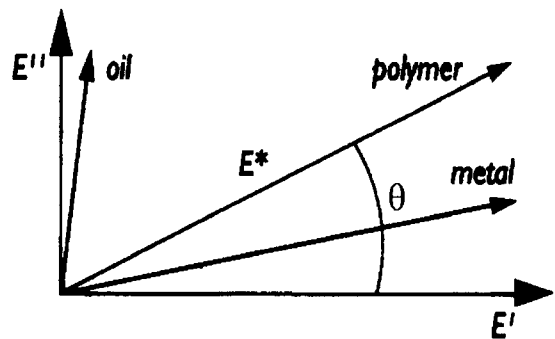


Fig. 2 Elastic modulus and loss modulus

힘센서를 통하여 가진력을 측정하여 계측기의 채널.1에 입력한다. 또한, 점탄성시편에서 발생한 진동을 힘센서 측면에 설치된 가속도계를 이용하여 측정하여 계측기의 채널.2로 입력한다.

실험중에 있을 수 있는 외부잡음의 영향을 최소화하기 위하여 측정결과를 충분히 평균한 후에 계측기에서 측정된 주파수 응답함수형태의 측정결과를 얻는다. 이는 점탄성시편에 작용하는 동적힘당 측정된 진동가속도로서 엑셀러런스(accelerance)값이다.

측정된 엑셀러런스에 대하여 채널.2에서 측정된 진동가속도를 수치적으로 2회 적분함으로써 진동변위로 치환할 수 있으며, 이때 변환된 주파수응답함수는 동적외력에 대하여 재료의 탄성, 점성특성에 의하여 크기가 결정된 진동변위인 컴플라이언스(compliance)이다. 측정된 컴플라이언스의 역수는 주파수에 의존하는 점탄성재료의 동적 또는 복소수 강성(dynamic or complex stiffness)이 된다. 주파수응답함수 형태의 동적강성은 실수부 및 허수

부로 분리할 수 있으며, 각각은 식 (4)와 (5)에서와 같이 시편의 형상을 고려하여 탄성 및 손실모듈러스로 변환될 수 있다. 실험을 통해 점탄성 재료의 손실계수를 구하는 순서를 Fig. 3에 나타내었다.

탄성모듈러스는 동적강성의 실수부에 시편의 형상을 고려한 단위면적당 길이를 곱한 값이며, 따라서 탄성 및 손실모듈러스값은 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E' = \frac{|F|}{|x|} \times \frac{l}{A} \cos \theta$$

$$= \text{Real} (K^*) \times \left(\frac{l}{A} \right) \quad (4)$$

$$E'' = \frac{|F|}{|x|} \times \frac{l}{A} \sin \theta$$

$$= \text{Im} (K^*) \times \left(\frac{l}{A} \right) \quad (5)$$

여기서, K^* 는 실험에서 주파수 응답함수형태로 측정되는 점탄성시편의 동적강성이다. 측정된 동적강성을 이용하여 구한 탄성모듈러스와 손실모듈러스간의 위상각, θ 을 식 (4)와 (5)를 이용하여 구할 수 있다. Fig. 2에서와 같이 탄성모듈러스와 손실모듈러스간의 위상각, θ 에 대한 \tan 값은 점탄성재료의 손실계수가 된다.

$$\eta = \tan \theta \quad (6)$$

Fig. 4에서 시험용 시편에 가진기의 자중보다 큰 힘을 가하기 위하여 가진기 상단에 부가적인 질량을 부착하였다. 가진장치에서 점탄성시편에 작용하는 동적하중이 가진기 및 부가질량의 자중보다도 큰 경우에 가진시스템이 위방향으로 운동하게 된다.

계측기의 신호출력단(source)에서 발생시킨 랜덤 가진신호를 파워앰프를 통하여 증폭하여 가진기를 구동한다. 스위프사인(swept sine)형태의 가진신호는 저주파수에서 과도한 변위를 발생시켜 안정된 실험을 행하기 곤란하였다.

시험장치 설치에 있어서 고무의 가공상태와 가진기의 설치상태가 측정결과에 영향을 주므로 주의해야 한다.⁽⁶⁾ 이론적으로 점탄성시편에 수직방향의 동적하중을 작용시키고, 이 힘에 의하여 점탄성시편에서 수직방향으로 진동을 발생시켜 이를 측정함으로써, 동적강성을 얻는다는 실험가정이 실험시에는 고무시편에서 가공상태에 따른 시편의 상하면의 평면상태에 따라서 동적하중의 작용방향 및 시편의 바닥면과의 접촉상태등에 영향을 받아 결국 측정결과와 신뢰도를 저하시키게 된다.

측정주파수대역 400 Hz까지 주파수 응답함수형태로 측정된 엑셀러런스는 Fig. 5와 같다. 20 Hz

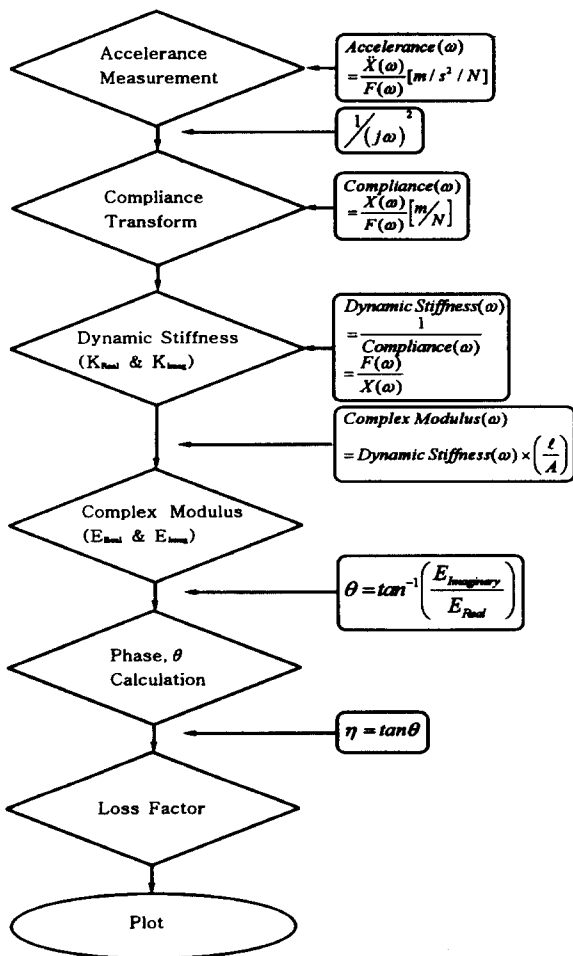


Fig. 3 Test flowchart for impedance method

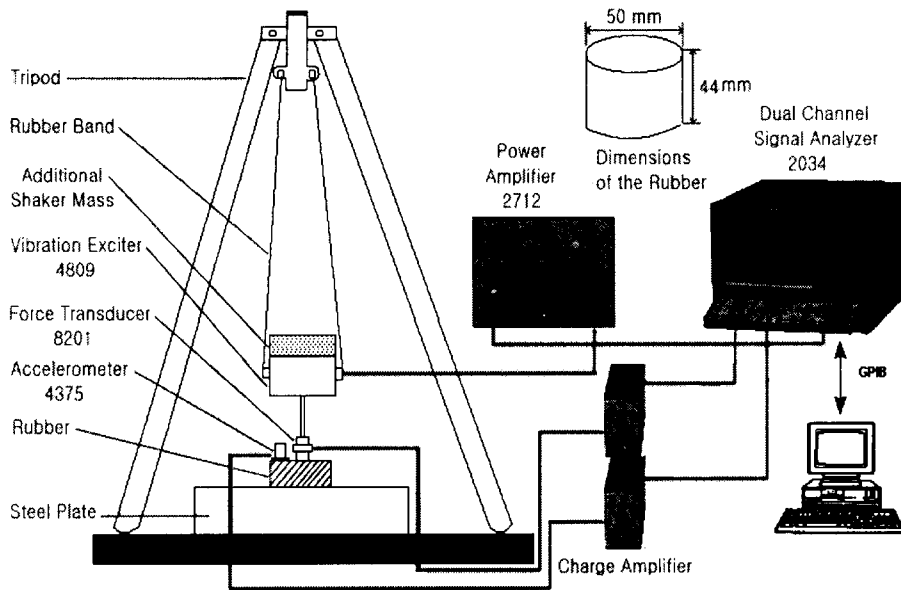


Fig. 4 Experimental test setup

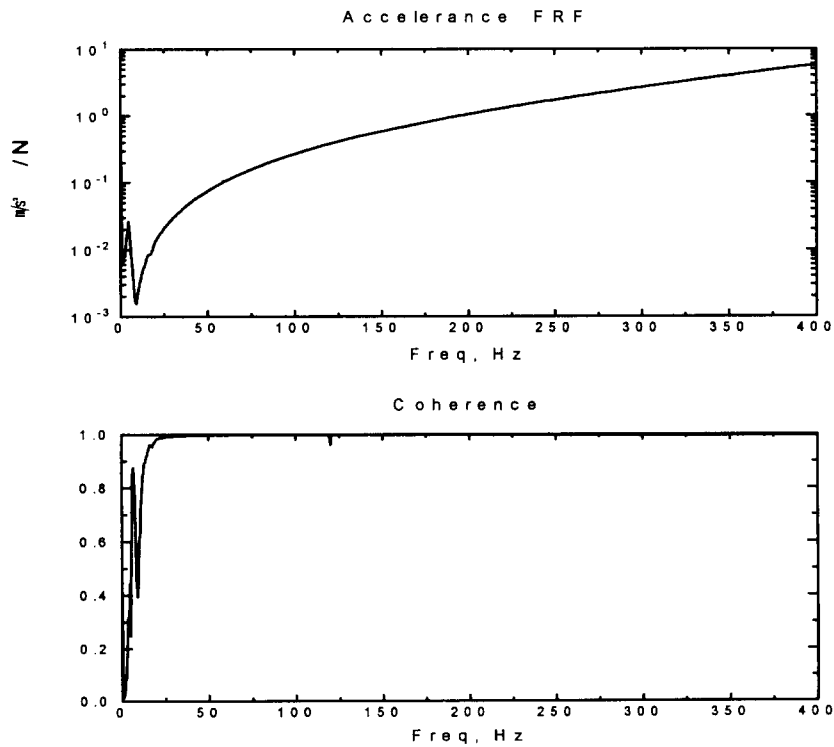


Fig. 5 FRF of accelerance and its coherence function

이하의 주파수영역에서 코히리언스가 저하되며 그 원인은 가진장치의 공진 및 외부잡음의 영향이다.

Fig. 6 은 측정된 엑셀러런스를 시간에 대하여 2회 적분하여 구한 점탄성 시편의 동적강성이다.

동적강성은 주파수에 따라서 다른 값을 가지며, 주파수가 증가할수록 증가하다가 일정한 주파수이상은 감소하고 있음을 알 수 있다.

동적강성의 실수부는 가진주파수의 증가에 따라서

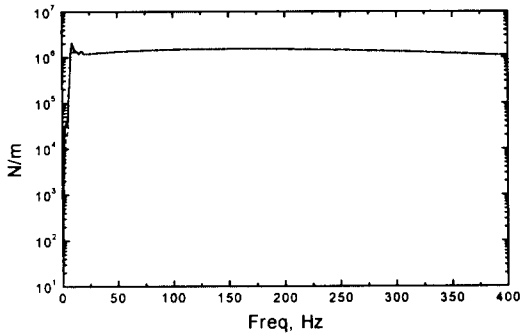


Fig. 6 FRF of dynamic stiffness

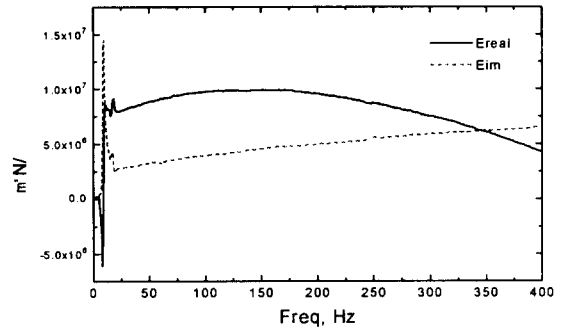


Fig. 9 Real and imaginary part of complex modulus

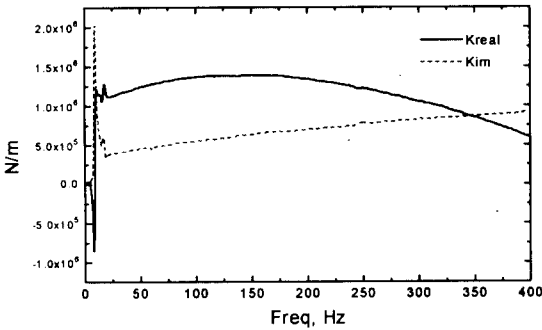


Fig. 7 Real and Imaginary part of Dynamic stiffness

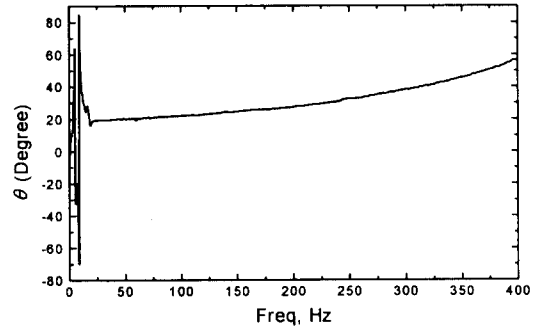


Fig. 10 Phase, θ between E_{real} and E_{im}

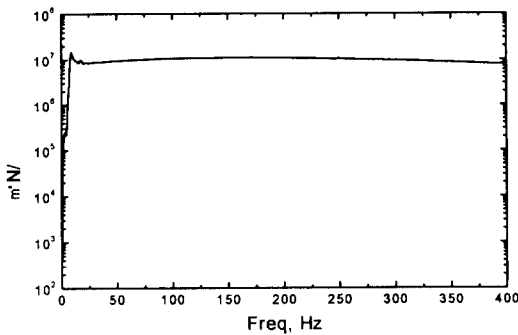


Fig. 8 Complex modulus

증가하다가 감소하고, 동적강성의 허수부는 일정하게 증가하고 있음을 Fig. 7에서 알 수 있다.

동적강성의 실수부는 주파수의 증가에 따라서 점차 증가하다가 진동측정을 위해 점탄성시편의 상부에 접착된 얇은 철판질량을 포함한 고무자체의 질량과 점탄성재료의 동적강성에 의하여 형성된 수직방향 고유진동수에서 저하됨을 알 수 있으며, 재료의 점성에 의한 성분은 공진주파수와 무관하게 주파수 증가에 따라서 일정하게 증가하고 있음을 알 수 있

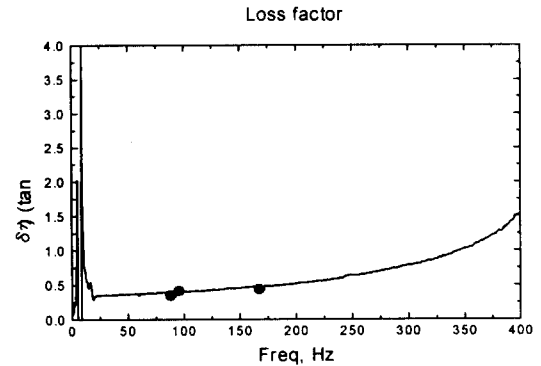


Fig. 11 Loss factor

(— : nonresonant method ● : resonant method)

다. 스프링과 같이 내부댐핑이 적은 재료는 공진주파수에서 점탄성시편의 임피던스(impedance)가 영이 되고 따라서 진동응답이 크게 발생하지만, 점탄성 재료에서는 점성이 기여하는 동적강성성분에 의하여 공진주파수에서 진동응답을 줄일 수 있음을 의미한다.⁽⁵⁾

동적강성을 이용하여 시편의 길이를 곱하고 면적으로 나눈 복소수 탄성계수는 Fig. 8과 같다. 또한 복소수 탄성계수의 실수부인 탄성계수와 허수부인

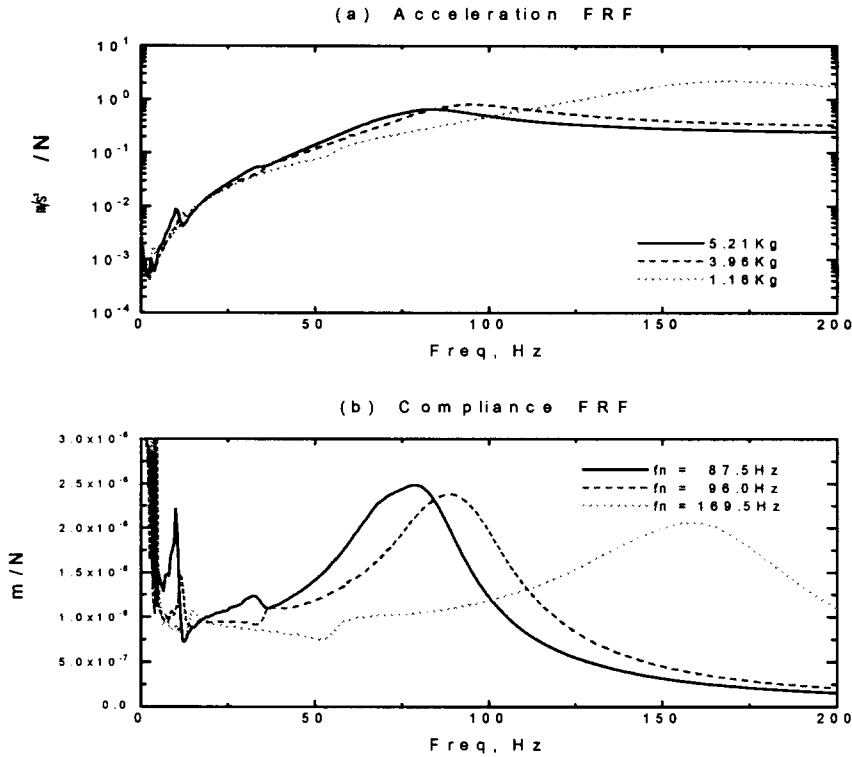


Fig. 12 FRF of acceleration and compliance

손실모듈러스값은 Fig. 9와 같다.

Fig. 9의 복소수 탄성계수의 실수부와 허수부의 형태는 식 (4)와 (5)에서와 같이 동적강성의 실수부와 허수부에 시편의 길이, l 과 단면적, A 의 비, $(\frac{l}{A})$ 를 곱한 값이므로 동적강성의 결과와 유형이 동일하다. 복소수 탄성계수의 실수부인 탄성모듈러스와 허수부인 손실모듈러스는 식 (2)와 Fig.2에서와 같이 두 값이 갖는 위상각, θ 를 알 수 있으며, $\tan \theta$ 값은 손실계수인 η 가 된다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각 위상각, θ 와 손실계수, η 를 나타낸다.

2.3 공진법에 의한 손실계수측정

비공진법 손실계수측정에 사용된 동일한 점탄성시

편에 대하여 부가질량을 사용하여 부가질량과 점탄성재료의 탄성과 강성으로 이루어진 진동계를 구성하고, 부가질량에 가진기를 이용하여 신호의 동적힘을 인가하였다.

3개의 부가질량에서 스윙사인형태의 동적가진력에 대하여 부가질량위에서 측정된 진동응답을 가속도계를 이용하여 측정하였다. 계측기에서 측정된 액셀러런스 주파수응답함수에서 공진주파수의 피크에서 half power method를 이용하여 피크값에서 -3dB 저하된 주파수폭을 고유진동수로 나눈값으로 손실계수를 계산하였다.

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_n} \tag{7}$$

Table 1. Comparison of stiffness between nonresonant and resonant method

No	Mass (kg)	f_n (Hz)	K (N/m)		$\Delta K(\%)$
			Nonresonant	Resonant	
1	5.21	87.5	1.446E6	1.576E6	-8.3
2	3.96	96.0	1.467E6	1.441E6	+1.2
3	1.16	169.5	1.538E6	1.316E6	+16.8

Table 2. Comparison of test results between nonresonant and resonant method

No	Mass (kg)	f_n (Hz)	η		$\Delta \eta (\%)$
			Nonresonant	Resonant	
1	5.21	87.5	0.350	0.377	-7.1
2	3.96	96.0	0.362	0.401	-10.8
3	1.16	169.5	0.475	0.431	+9.2

부가질량과 점탄성시편의 점성, 탄성이 형성하는 공진주파수에서의 동적강성을 식 (8)에 의하여 계산하면 Table 1과 같다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_d}{M}} \quad (8)$$

Fig. 12(a)는 부가질량별로 측정된 액셀러런스형태의 주파수응답함수이며 (b)는 액셀러런스값을 시간에 대하여 2회적분한 콤프라이언스 주파수응답함수이다. Fig. 5의 (b)에서 주파수응답함수가 저주파수영역에서 불연속적이며, 특히 20 Hz이하의 영역에서 시험장치의 공진형상에 기인하는 측정잡음이 현저하게 나타난 것을 알 수 있다.

3. 고찰 및 결론

점탄성재료인 천연고무(NR, Natural Rubber)의 고무시편에 대하여 비공진법의 한방법인 임피던스법 (impedance method) 으로 손실계수를 측정 한 결과 측정주파수대역내에서 전 주파수대역에서 손실계수를 얻을 수 있었다. 비공진법 손실계수 측정시험에서 가진주파수가 높아지면 동적강성은 저하되며 그 원인은 가진주파수 증가에 대하여 댐핑에 의한 동적강성은 일정한 수준을 유지하나, 동적강성의 실수값인 탄성에 의한 동적강성이 저하되기 때문이며, 이는 가진 및 진동측정을 위한 측정지그와 시편의 질량과 점탄성재료의 탄성 및 점성에 의하여 공진이 발생하기 때문으로 판단된다.

탄성에 의한 동적강성과 점성에 의한 동적강성이 같아지는 값에서 동적가진력과 발생하는 변위간에는 45°의 위상각이 발생하며, 이때 손실계수가 1이 됨을 알 수 있다. 이는 손실계수가 1보다도 크면, 동적강성에서 탄성의 기여도보다는 점성에 의한 기여도가 큼을 의미한다.

비공진법과 공진법의 실험결과, 동적강성 및 손실

계수값이 각각 Table 1과 Table 2에서와 같이 약 9% 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 이에 대한 원인으로서는 (1) 가진장치의 공진에 의한 측정잡음의 영향 (2) 시편의 가공형상에 따른 가진방향과 진동측정방향과의 차이 및 바닥면과의 밀착상태 (3) 비교적 댐핑이 큰 시편사용등의 요인을 생각할 수 있다.⁽⁶⁾

점탄성재료인 고무시편을 이용하여 비공진법과 공진법으로 동적강성 및 손실계수를 구한 결과, 두 측정결과와의 차이는 약 10% 수준이었다. 시험을 진행하는 과정에서 가진 및 진동측정장치의 상태와 측정대상물인 고무시편의 상태가 측정결과에 큰 영향을 줄 수 있으며, 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 가능한한 단순한 시험장치를 적용해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 심 송, 1991, "점탄성재료의 복소영계수 및 유한요소법에의 응용을 위한 포아 송비 추출방법", 한국과학기술원, 박사학위논문.
- (2) Daniel J. Inman, 1996, "Engineering Vibration", Prentice Hall, pp.271~275.
- (3) 日本軌道車輛工業會, 1975, "防振ゴム", pp.52~60.
- (4) S. Gade, K. Zaveri, H. Konstantin-Hansen and H. Herlufsen, 1995, "Stress/Strain Measurements of Viscoelastic Materials", Sound and Vibration, March, pp.16~19.
- (5) 이규섭, 이상엽, 유춘화, 1990, "방진고무의 진동특성 해석 및 실험(1)", 한국소음진동공학회 (추계학술대회논문집), pp.27~32.
- (6) Pranab Saha, John Cahine, 1995, "The Testing of Vibration Damping Materials", Sound and Vibration, May, pp.38~42.