

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.5.489

점탄성 재료의 복소수 동특성 측정방법

이 인 원[†] · 안 남 현*

(2008년 8월 21일 접수, 2009년 3월 3일 수정, 2009년 3월 4일 심사완료)

Measurement Method of Complex Dynamic Viscoelastic Material Properties

Inwon Lee and Nam Hyun An

Key Words : Measurement Technique(측정기법), Modulus of Elasticity(탄성계수), Shear Modulus(전단계수), Poisson's Ratio(푸아송 비)

Abstract

A novel technique to measure of viscoelastic properties of polymers is proposed to investigate complex Poisson's ratio as a function of frequency. The forced vibration responses for the samples under the normal and the shear deformation are to be measured with varying load masses. The measured data were used to obtain the viscoelastic properties of the material based on an accurate 2D numerical deformation model of the sample. The 2D model enabled us to exclude data correction by the empirical form factor used in 1D model. Comprehensive measurements of viscoelastic properties of two slightly varied silicone RTV rubber (Silastic® S2) compositions were performed. Standard composition (90% PDMS polymer + 10% catalyst) and modified composition (92.5% polymer + 7.5% catalyst) were tested in temperature range from 30°C to 70°C. Shear modulus, modulus of elasticity, loss factor, and both the real and the imaginary parts of the Poisson's ratio were determined for frequencies from 50 to 400Hz in the linear deformation regime (at relative deformations $10^{-4} \sim 10^{-3}$).

———— 기호설명 ————

- C_t : 종파의 전파속도
- C_s : 횡파의 전파속도
- E : 탄성계수
- M : 부하질량
- m : 시편질량
- Z : 진동판과 부하질량 진동 변위의 비
- ρ : 점탄성 물질의 밀도
- σ : Poisson 비

- μ : 손실계수
- θ : 진동판과 부하질량 진동 변위의 위상차

1. 서론

등방성 탄성재료의 재료거동은 두가지 매개변수로서 기술될 수 있음은 널리 알려진 사실이다.⁽¹⁾ 따라서, 어떤 변형도 체적이 유지되는 전단변형과 체적이 변화하는 수직변형의 조합으로 표현될 수 있다.⁽²⁾ 전단변형률과 가해진 전단응력 사이의 관계는 전단계수 (shear modulus) G 로써 표현된다. 마찬가지로 일정한 압축응력에 대응되는 변형률은 체적탄성률 (bulk modulus) K 로써 결정되는데, 이는 물질의 열역학적 특성이다. 이와 같은 기본적인 물성 계수 이외에 실제로는 탄성계수 E 및 푸

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 첨단조선공학연구소
E-mail : inwon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2764 FAX : (051)581-3718

* 거제대학 조선선박기술계열

아송 비 σ 가 널리 사용된다. 탄성계수는 가늘고 긴 막대 형상의 시편에 축 방향으로 하중이 가해질 때의 1 차원 변형과 하중 사이의 관계식에 사용되는데, 가장 단순한 경우는 $E = (F/S) \cdot (\Delta\ell/\ell)$ 로 주어지는 Hooke 의 법칙이다. 여기에서 F 는 하중, S 는 막대의 단면적, $\Delta\ell$ 및 ℓ 은 각각 막대의 길이와 늘어난 길이가 된다. 축면 방향 수축변형량 대 축 방향 인장변형량의 비인 푸아송 비는 $\sigma = (3K - 2G) / \{2(3K + G)\}$ 으로 주어진다.⁽²⁾ K 와 G 는 항상 양이므로 푸아송 비는 -1 부터 0.5 까지 변화한다. 체적탄성률이 전단계수보다 큰 경우는 푸아송 비가 0.5 에 근접하게 된다. 각 매개변수 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$K = \frac{E}{2(1-2\sigma)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\sigma)} \quad (1)$$

즉, 위 식의 네 가지 변수 중 두 가지만 알면 3 차원적 탄성변형을 계산하는 데에 충분하다. 따라서 이를 결정하기 위해서는 전단변형 및 수직변형과 같은 상이한 변형 조건에서 실험을 수행하여 계수를 결정하면 된다.

동적하중에 대한 응답으로서의 변형은 하중에 대한 지연이 일어난다. 주기적 하중일 때 지연은 위상차로서 나타나는데, 소재의 점성 손실에 비례한다. 더욱이, 탄성계수 및 전단계수 같은 물성치들도 주파수의 함수가 되며 다음과 같은 복소수로써 주어진다.

$$\begin{aligned} E &= E' + iE'' = E_{\infty}(1 + i\mu_{\omega}^E), \\ G &= G' + iG'' = G_{\infty}(1 + i\mu_{\omega}^G) \end{aligned} \quad (2)$$

Ferry⁽³⁾와 Riande 등⁽⁴⁾은 물질의 동특성을 기술하기 위한 다수의 연구를 정리하여 소개하고 있다. 최근 푸아송 비의 동특성이 복소수가 될 수 있다는 이론적인 연구 결과가 Tschoegl 등⁽⁵⁾ 및 Lake 와 Wineman⁽⁶⁾에 의하여 보고된 바 있다. 푸아송 비를 실험적으로 직접 측정하기 위한 다양한 사례들이 보고된 바 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

한편, 점탄성 물질에 대하여는 체계적인 결과가 알려져 있지 않은데 점성 손실효과를 고려한 계측 방법이 제시되어 있지 않은 데 기인한다. 최근 Kulik 등⁽¹¹⁾은 주파수 10Hz~10kHz, 변형률 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 에 대하여 탄성계수 및 손실계수(loss factor)를 실험적으로 측정한 바 있다. 본 방법은 사용이 용이한 표준적인 진동계측장비를 사용하는 방법으로 가진기 및 가속도계 등의 계측장비 특성에 무관한

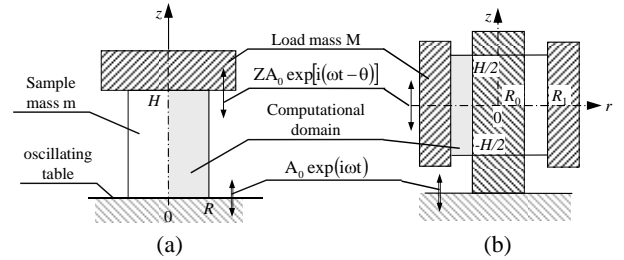


Fig. 1 Schematic diagram of samples; (a) cylindrical sample under axial deformation, (b) annular sample under shear deformation

장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 Kulik 등⁽¹¹⁾의 실험적 기법을 확장하여 점탄성 재료에 대한 탄성계수, 손실계수 및 복소수 푸아송 비를 얻는 방법을 제시하고자 한다.

2. 수학적 모델

2.1 지배방정식

Fig. 1 은 변형 해석의 대상이 되는 두 가지 시편의 형상을 나타내고 있다. Fig. 1(a)의 반경 R 인 원통형 시편은 축방향 수직변형하는 반면, Fig. 1(b)의 고리형 시편은 전단변형과 관련되어 있다. 고리형 시편의 내측 반경 및 외측 반경은 각각 R_0 , R_1 이다. 두 가지 시편 모두 높이는 H , 질량은 m 이며 탄성계수 E , 손실계수 μ 그리고 푸아송 비 σ 인 점탄성 재료로 구성되어 있다. 시편의 한쪽 면은 아랫면은 진동판에 다른 쪽 면은 부하 질량 M 에 부착되어 있다. 시편 한쪽의 진동판이 진폭 A_0 및 주파수 ω 으로 진동할 때 반대편 부하질량은 진폭 ZA_0 , 주파수 ω 및 위상차 θ 로 진동한다.

시료 내부에서의 2 차원 진동변위는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\xi} = \zeta(r, z, t)\hat{e}_z + \eta(r, z, t)\hat{e}_r \quad (3)$$

등방성 재료에 대한 이차원 탄성파동의 지배방정식은 다음과 같다.⁽²⁾

$$\frac{\partial^2 \bar{\xi}}{\partial t^2} = C_i^2 \Delta \bar{\xi} + (C_i^2 - C_t^2) \nabla(\nabla \cdot \bar{\xi}) \quad (4)$$

여기에서 $C_i^2 = [E(1+i\mu)]/[2\rho(1+\sigma)]$ 는 횡파의 전파속도, $C_t^2 = [E(1+i\mu)(1-\sigma)]/[\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)]$ 는 종파의 전파속도이고 $\rho = m/(\pi R^2 H)$ 인 재료 밀도이다. 본 실험과 같이 조화진동 가진의 경우에 위의 지배방정

식은 아래 식처럼 정리된다.

$$C_1^2 \left(r \frac{\partial \eta}{\partial r} - \eta + r^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + r^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r \partial z} \right) + C_1^2 r^2 \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r \partial z} \right) + r^2 \omega^2 \eta = 0,$$

$$C_1^2 \left(r \frac{\partial^2 \eta}{\partial r \partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial z} + r \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right) + C_1^2 \left(\frac{\partial \zeta}{\partial r} - \frac{\partial \eta}{\partial z} + r \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r^2} - r \frac{\partial^2 \eta}{\partial r \partial z} \right) + r \omega^2 \zeta = 0.$$

2.2 수직변형되는 원통형 시편의 경계조건

경계조건은 양 끝단에서의 반경반향 고정조건 및 축방향 조화진동조건, 측면에서의 무응력조건 및 중심축에서의 대칭조건이며 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\eta = 0 \text{ at } z = 0, H \quad (5)$$

$$\zeta = A_0 e^{i\omega t} \text{ at } z = 0 \quad (6)$$

$$\zeta = Z A_0 e^{i(\omega t - \theta)} \text{ at } z = H \quad (7)$$

$$\sigma_{rz} = 0 \rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \zeta}{\partial r} = 0 \text{ at } r = R \quad (8)$$

$$\sigma_{rr} = 0 \rightarrow (1 - \sigma) \frac{\partial \eta}{\partial r} + \sigma \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\eta}{r} \right) = 0 \text{ at } r = R \quad (9)$$

탄성계수 E , 손실계수 μ 는 실험적으로 측정된 강제진동의 상대진폭 Z 및 위상차 θ 를 만족하기 위하여 위 식 (3)~(9)를 풀어나가는 역문제 (inverse problem)로 얻어진다. 이 문제의 해를 얻기 위하여 부하질량의 관성력에 의한 압력이 시편 내부의 응력과 같아져야 하는 호환조건이 적용된다.

$$MZ\omega^2 e^{i(\omega t - \theta)} = 2\pi \frac{E(1+i\mu)(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \int_0^R \frac{\partial \zeta}{\partial z}(H, r) r dr \quad (10)$$

2.3 전단변형되는 고리형 시편의 경계조건

이 경우도 2.2 절의 원통형 시편과 유사한 경계조건이 적용되며 다음 식과 같이 주어진다.

$$\eta = 0 \text{ at } r = R_0, R_1 \quad (11)$$

$$\zeta = A_0 e^{i\omega t} \text{ at } r = R_0 \quad (12)$$

$$\zeta = Z A_0 e^{i(\omega t - \theta)} \text{ at } r = R_1 \quad (13)$$

$$\sigma_{rz} = 0 \rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \zeta}{\partial r} = 0 \text{ at } z = \pm H/2 \quad (14)$$

$$\sigma_{zz} = 0 \rightarrow (1 - \sigma) \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \sigma \left(r + \frac{\eta}{r} \right) = 0 \text{ at } z = \pm H/2 \quad (15)$$

고리 형태 시편에 대한 호환 조건은 다음과 같다.

$$MZ\omega^2 e^{i(\omega t - \theta)} = \frac{2\pi R_1 E(1+i\mu)}{(1+\sigma)} \int_0^{H/2} \frac{\partial \zeta}{\partial r}(z, R_1) dz \quad (16)$$

2.4 전단변형되는 고리형 시편의 경계조건

앞 절 지배방정식의 수치해를 얻기 위하여 2차원 파동방정식을 계산영역을 $N_z \times N_r$ 개의 격자점에서 pseudospectral

근사화기법⁽¹²⁾을 사용하여 이산화하였다. 격자점의 좌표는 (r_i, z_j) , $r_i = R \cos(i\pi/N_r)$, $z_j = \frac{H}{2} [\cos(j\pi/N_z) + 1]$, $i = 0, \dots, N_r$, $j = 0, \dots, N_z$ 과 같다. 격자점에서의 변위 $\eta(r_i, z_j)$ 및 $\zeta(r_i, z_j)$ 를 행렬 $(\eta)_{i,j}$ 및 $(\zeta)_{i,j}$ 로 표시하자. r 및 z 방향 1 차편도함수의 이산치는 pseudospectral 근사화를 사용하면 각각 $\bar{D}_r = D_{N_r}/R$, $\bar{D}_z = 2D_{N_z}/H$ 으로 주어지는데 Chebyshev spectral 미분행렬 D_N 은 다음 식으로 정의된다.

$$(D_N)_{00} = \frac{2N^2 + 1}{6}, (D_N)_{NN} = -(D_N)_{00},$$

$$(D_N)_{jj} = \frac{-x_j}{2(1-x_j^2)}, j = 1, \dots, N-1, \quad (17)$$

$$(D_N)_{ij} = \frac{c_i (-1)^{i+j}}{c_j x_i - x_j}, i \neq j, i, j = 1, \dots, N-1,$$

$$x_k = \cos(k\pi/N), k = 0, 1, \dots, N$$

$$c_i = \begin{cases} 2 & i = 0 \text{ or } N \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

축대칭 원통형 시편에서는 수치해석 영역을 Fig. 1 에 표시된 것처럼 $r \in [0; R]$ 로 잡을 수 있다. 또한 이산 편도함수 \bar{D}_r 및 \bar{D}_z 는 다음으로 대체된다.

$$\begin{aligned} (\bar{D}_r)_{ij} &= (\bar{D}_r)_{ij} + (\bar{D}_r)_{ik}, i, j = 0 \dots (N+1)/2, k = N+1-j \\ (\bar{D}_z)_{ij} &= (\bar{D}_z)_{ij} - (\bar{D}_z)_{ik}, i, j = 0 \dots (N+1)/2, k = N+1-j \end{aligned} \quad (18)$$

위의 이산 편도함수 행렬은 다음과 같은 텐서 곱으로 표현된다.⁽¹³⁾

$$\begin{aligned} \bar{D}_r &= \bar{D}_r \otimes I_z, \tilde{D}_r = \tilde{D}_r \otimes I_z, \\ D_z &= I_r \otimes \bar{D}_z, \\ \bar{D}_{rr} &= \bar{D}_r^2 \otimes I_z, \tilde{D}_{rr} = \tilde{D}_r^2 \otimes I_z, \\ D_{zz} &= I_r \otimes \bar{D}_z^2, \\ \bar{D}_{rz} &= \bar{D}_r \otimes \bar{D}_z, \tilde{D}_{rz} = \tilde{D}_r \otimes \bar{D}_z \end{aligned} \quad (19)$$

이산화된 지배방정식의 최종 형태는 다음 행렬방정식으로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = 0.$$

$$\begin{aligned} A &= C_r^2 (r^2 \bar{D}_{rr} + r \tilde{D}_r - I_r \otimes I_z) + C_t^2 r^2 D_{zz} + r^2 \omega^2 \\ B &= (C_r^2 - C_t^2) r^2 \bar{D}_{rz} \\ C &= (C_r^2 - C_t^2) (r \tilde{D}_{rz} + D_z) \\ D &= C_t^2 (r \tilde{D}_{rr} + \bar{D}_r) + C_t^2 r D_{zz} + r \omega^2 \end{aligned} \quad (20)$$

경계조건을 적용하기 위하여 위 식의 좌변 및 우변의 해당되는 행을 교체하면 비제차방정식이 만들어진다. 이 방정식을 역행렬변환 알고리즘을



Fig. 2 Photos of the various cylindrical samples

사용하여 변위 $\eta(r_i, z_j)$ 및 $\zeta(r_i, z_j)$ 을 구할 수 있다. 이렇게 구한 변위가 호환조건인 식 (10) 혹은 식 (16)을 만족하게 되는 탄성계수 E , 손실계수 μ 를 Gauss-Newton 반복해법으로 구하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 점탄성 시편 제작

본 연구에서는 실리콘 RTV의 일종인 Silastic S2 RTV (Dow Corning Inc.)을 측정대상으로 선정하였다. 원래 이 물질은 부가중합형 고무로서 형틀을 만드는 데에 널리 쓰이는 소재로서, 알려진 경도 및 연신율 등의 물성을 감안하여 유연벽면의 소재로 선정되었다. PDMS(Polydimethyl-siloxane) 고분자 수지와 경화제를 혼합하면 부가중합 반응이 일어나 고무 형태로 경화된다. 이 소재의 표준 조성은 수지 대 경화제가 90:10으로 혼합되는 것인데, 본 연구에서는 점탄성 물성의 변화를 시도하기 위하여 92.5:7.5로 경화제의 비율을 줄인 변경 조성도 함께 시도하였다.

시편 제조 과정에서 수지와 경화제를 혼합할 때 기포가 발생하지 않도록 특별히 주의하였으며 불가피하게 발생된 기포를 제거하기 위하여 혼합액을 일정 시간 동안 진공 건조기 내에 보관하였다.

혼합액을 형틀에 주입하여 원하는 형상의 시편

Table 1 Parameters of samples from standard composition

Number of samples	Sample shape	Height (mm)	Diameter (mm)	Sample mass m (g)	Load mass M (g)
4	Cylinder	8.05	8.00	1.83	67.4
4	Cylinder	8.05	8.00	1.83	106.4
4	Cylinder	8.05	8.00	1.83	205.4
4	Cylinder	8.05	8.00	1.83	303.4
4	Cylinder	8.05	8.00	1.83	401.8
4	Cylinder	10.05	10.0	3.58	106.4
4	Cylinder	10.05	10.0	3.58	205.4
4	Cylinder	10.05	10.0	3.58	303.4
4	Cylinder	10.05	10.0	3.58	401.8
1	Annulus	11.95	24.0/17.0	3.05	126.2
1	Annulus	11.95	24.0/17.0	3.05	185.0
1	Annulus	11.95	24.0/17.0	3.05	286.4
1	Annulus	11.95	24.0/17.0	3.05	382.4

Table 2 Parameters of samples from modified composition

Number of samples	Sample shape	Height (mm)	Diameter (mm)	Sample mass m (g)	Load mass M (g)
4	Cylinder	10.05	10.0	3.6	14.6
4	Cylinder	10.05	10.0	3.6	26.8
4	Cylinder	10.05	10.0	3.6	43.7
4	Cylinder	10.05	10.0	3.6	76.7
1	Annulus	19.3	22.0/30.0	7.2	44.0
1	Annulus	19.3	22.0/30.0	7.2	73.2
1	Annulus	19.3	22.0/30.0	7.2	105.5
1	Annulus	19.3	22.0/30.0	7.2	145.0



Fig. 3 Photos of the various annular samples

을 제작할 수 있는데, Fig. 2 및 Fig. 3은 각각 수직변형용 원통형 시편 및 전단변형용 고리형 시편을 보여주고 있다. Table 1 및 Table 2에 이들

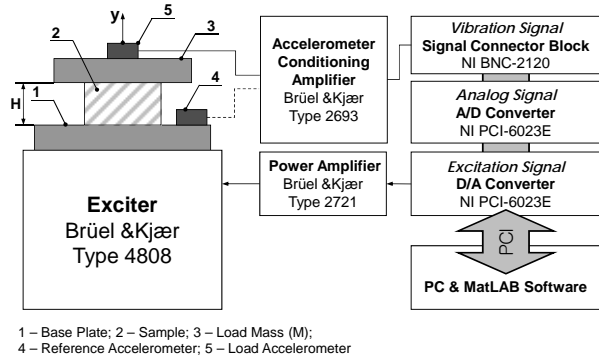


Fig. 4 Schematic diagram of measurement setup

시편의 형상 및 질량을 정리하여 나타내었다.

3.2 측정기법

측정기법에 대한 상세한 기술은 Kulik 등⁽¹¹⁾에 소개되어 있다. 시편의 기준면 진동판과 반대편 부하질량의 가속도는 각각 기준가속도계(Brüel & Kjær Type 4514-002, 감도 48.35mV/ms⁻²) 및 소형 부하가속도계 (Brüel & Kjær Type 4514-002, 감도 10.72mV/ms⁻²) 로 측정된다.

원통형 시편이 장착되었을 때는 수직변형이, 고리형 시편의 경우에는 전단변형이 일어나고 두 가지 경우 모두 기준면 진동판과 부하질량의 진동은 가속도계로 측정된다. 두 가속도계로 측정된 신호는 컨디셔닝 증폭기(Brüel & Kjær Type 2693)를 거쳐 상대진폭 Z 및 위상차 θ 가 측정된다. 원하는 주파수 대역 내에서 가진 주파수를 변화시키면서 주파수의 함수로서 측정된 Z 및 θ 를 저장하는데, 수직변형 및 전단변형 측정에서의 주파수는 서로 동일하게 변화시킨다. 이는 두 실험결과 사이에서 불필요한 보간을 피하기 위함이다. Table 1 및 2에 나타난 것처럼 수직변형 및 전단변형 측정은 주파수뿐 아니라 부하질량을 변화시키면서 수행된다.

본 방법의 정확도는 가속도계의 상대적인 정확도에 따라 좌우되는데, 10~ 4,000Hz의 주파수 대역에서 두 가속도계의 진폭차이는 $\pm 0.5\%$, 위상차는 $\pm 0.4^\circ$ 이하로서 충분히 신뢰할 수 있다. 전체 측정과정은 PC 및 Matlab S/W를 이용하여 제어되는데, 그 개념도를 Fig. 4에 도시하였다.

3.3 측정결과

본 실험의 측정 결과로부터 점탄성 물성치를 계산할 때 푸아송 비를 추정하고 지배방정식을 풀게 된다. Fig. 5(a)에는 주파수 $f = 107\text{Hz}$ 일 때 수직변형 실험 결과로부터 계산된 E 및 전단변형 실험 결과로부터 계산된 $E = 2G(1 + \nu)$ 이 푸아송 비의

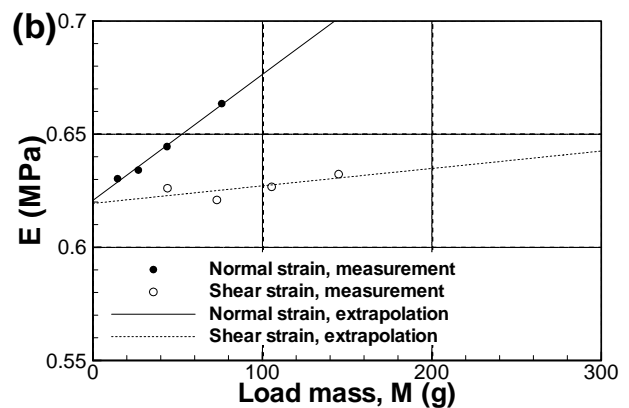
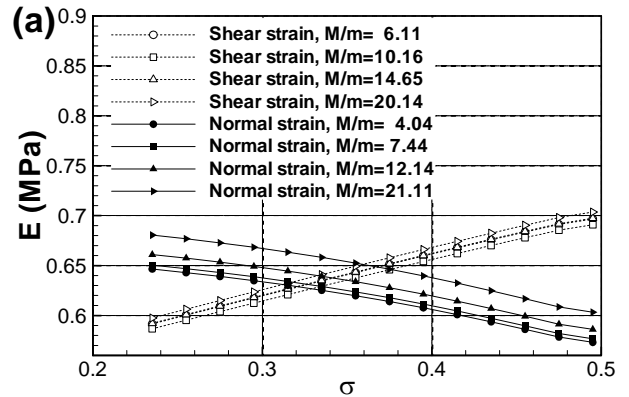


Fig. 5 Initial data at $f = 171.9\text{ Hz}$, $T = 50^\circ\text{C}$ with modified composition; (a) variation of Poisson's ratio, (b) variation of load mass

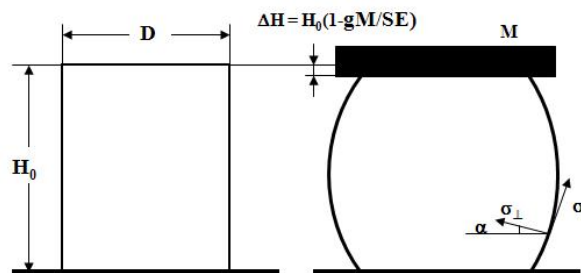


Fig. 6 Deformation of cylindrical sample under the effect of static loading

함수로서 도시되어 있다. 부하질량을 변화시키면서 얻어진 각각의 곡선들은 상당히 좁은 푸아송 비 영역에서 교차하고 있다. 이론적으로는 모든 곡선이 동일한 위치에서 교차하여야 하고 이 값으로부터 푸아송 비를 결정할 수 있겠으나 실제로는 부하질량비 M/m 이 증가할수록 수직변형 결과와 전단변형 결과 곡선의 교차점은 오른쪽으로 이동하여 더 큰 푸아송 비에서 형성된다.

이 같은 현상의 원인은 Fig. 6에 나타난 것처럼 부하질량 M 이 증가하면서 시편의 측면이 부풀어 오르는 barreling 현상으로 인하여 시편의 높이가

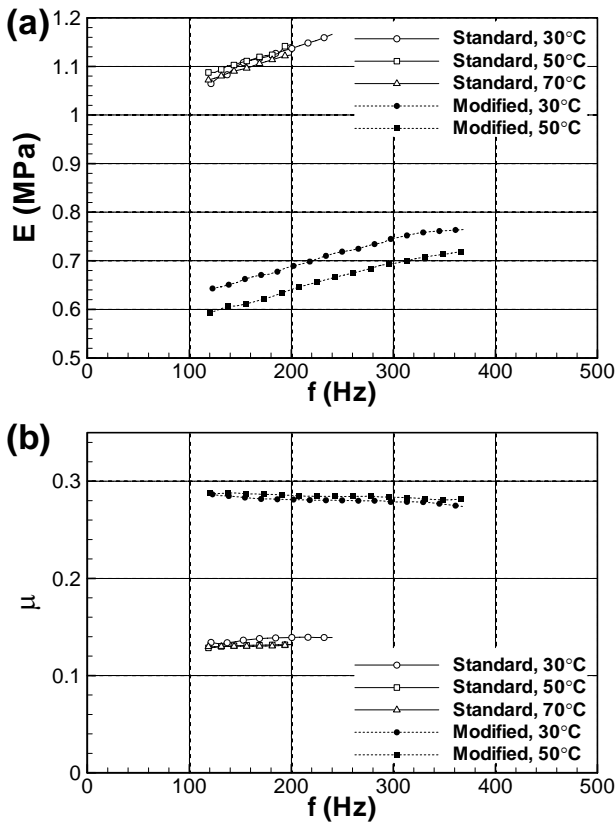


Fig. 7 Calculated viscoelastic properties; (a) modulus of elasticity E, (b) loss factor μ

$\Delta H = H_0(1 - gM/SE)$ 만큼 줄어들기 때문이다. 하지만 위 식을 이용하여 점탄성 계산 과정에서의 변수 H를 보정하는 것만으로는 위와 같은 문제는 개선되지 않음을 확인하였다. 이 문제를 제대로 다루기 위해서는 식 (9) 및 (10)의 측면 경계조건 및 호환조건을 수정하여야 하지만 변형된 형상에 대한 정보가 없기 때문에 그 과정이 매우 복잡해진다. 따라서 부하질량의 영향을 극소화하기 위한 대안으로서 본 연구에서는 부하질량을 감소시키면서 일련의 실험을 실시, Fig. 5(b)와 같이 부하질량 $M=0$ 에서 두 가지 변형 조건 실험에서의 실험결과를 외삽하여 탄성계수 E를 얻는다. 모든 실험에서 Fig. 5(b)와 같이 수직변형 및 전단변형의 결과 $E(M)$ 이 $M=0$ 에서 서로 만나는 것으로 나타났는데, 이로부터 본 방법의 신뢰성을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 조성을 변화한 두 가지 실리콘 고무에 대한 탄성계수 E 및 손실계수 μ 를 주파수의 함수로서 나타내고 있다. 상이한 부하질량이 부착된 시편마다 측정 결과가 달라지는데 그 표준편차는 평균값의 5% 이하이다. 표준조성의 경화제의 비율을 10%로부터 7.5%로 바꾼 변경조성이 될 경

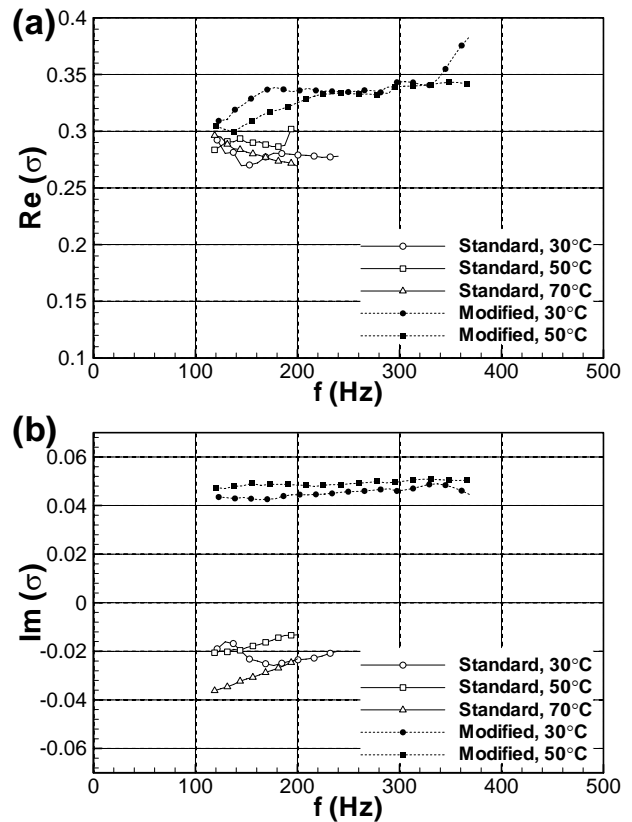


Fig. 8 Poisson's ratio; (a) real part, (b) imaginary part

우 탄성계수는 0.95MPa에서 0.55MPa로 거의 반으로 감소함을 알 수 있다. 또한 온도는 거의 영향을 주지 않음도 알 수 있다.

계산 과정에서 복소 푸아송 비의 허수부는 -0.1에서 0.1까지 변화시켜도 탄성계수에는 영향을 주지 않음을 발견하였다. 마찬가지로 손실계수의 계산에는 푸아송 비의 실수부가 영향을 주지 않는다. 따라서 탄성계수 및 푸아송 비의 실수부를 계산한 다음, 손실계수는 푸아송 비의 허수부를 변화시키면서 실험결과가 일치하는 지점의 값으로 결정하였다. 이러한 방법으로 얻어진 손실계수를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 탄성계수와 마찬가지로 경화제 함량이 2.5% 변화하여도 손실계수가 0.14에서 0.28로 약 두 배로 증가한다. 또한 온도의 변화는 중요하지 않음도 알 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 복소수 푸아송 비의 동특성 계측은 본 연구의 주된 목적이다. Fig. 8은 동적 푸아송 비의 실수부와 허수부를 나타낸다. 주파수 100~300Hz 범위에서 실수부는 0.35 정도인 반면, 허수부는 그보다 대략 한 자리수 낮은 값을 보이고 있다. 정하중 및 낮은 주파수에서는 실리콘 고무와 같은 비압축성 물질에서 푸아송 비의 값이 0.5로 예상되는데, 본 연구에서 측정된 경향

은 Lakes 와 Wineman⁽⁶⁾의 주파수 변화에 대한 이론적 예측과 일치하는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

원통형 및 고리형 점탄성 소재 시편의 강제진동 응답을 해석함으로서 탄성계수, 손실계수 및 복소수 푸아송 비와 같은 점탄성 동특성을 계산하는 방법을 제시하였다. 시편의 수직변형 및 전단변형을 해석하기 위하여 2 차원 변형해석 모델을 제시하고 지배방정식을 pseudospectral 근사화 기법을 이용하여 해석하였다. 측정 대상 물질로서는 실리콘 RTV 고무(Silastic R2)를 선정하여 수지 대 경화제의 혼합비율을 조정하여 점탄성의 변화를 조사하였다. 혼합비율을 변화하면 탄성계수 및 손실계수는 크게 변화하는 것으로 조사되었다. 한편 복소 푸아송 비의 실수부는 측정 주파수 영역에서 0.35, 허수부는 조성에 따라 ± 0.04 정도로 추정되었다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2008-331-D00728).

참고문헌

(1) Timoshenko, S. P., 1953, *History of Strength of Materials. With a Brief Account of the History of Theory of Elasticity and Theory of Structures.* McGraw-Hill, New York.
 (2) Landau, L. D. and Lifschitz, E. M., 1986, *Theory of Elasticity*, 3rd ed., Pergamon Press, Oxford, England.

(3) Ferry, J. D., 1961, *Viscoelastic Properties of Polymers*, New York-London.
 (4) Riande, E., Diaz-Calleja, R., Prolongo, M. G., Masegosa, R. M. and Salom, C., 2000, *Polymer Viscoelasticity. Stress and Strain in Practice*, Marcel Dekker Inc., New York, Basel.
 (5) Tschoegl, N. W., Knauss, W. G. and Ermi, I., 2002, "Poisson's Ratio in Linear Viscoelasticity – a Critical Review," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 6, pp.3~51.
 (6) Lakes, R. S. and Wineman, A., 2006, "On Poisson's Ratio in Linearity Viscoelastic Solids," *J. Elasticity*, Vol. 85, pp.45~63.
 (7) Kästner, S. and Pohl, G., 1963, "Ein Beitrag zur Frage der Vollständigen Erfassung des Mechanischen Relaxationsverhaltens der Polymeren," *Colloid and Polymer Science*, Vol.191, No. 2, pp.114 ~123.
 (8) Koppelman V. J., 1959, "Über den Dynamischen Elastizitätsmodul von Polymethacrylsäure-Methylester bei sehr Tiefen Frequenzen," *Colloid and Polymer Science*, Vol.164, No. 1, pp.31~34
 (9) Giovagnoni, M., 1994, "On the Direct Measurement of the Dynamic Poisson's Ratio," *Mechanics of Materials*, Vol. 17, p.33~46.
 (10) Willis, R. L., Wu, L. and Berthelot, Y. H., 2001, "Determination of the Complex Young and Shear Dynamic Moduli of Viscoelastic Materials," *J. Acoustical Society of America*, Vol. 109, No. 2, pp. 611~621.
 (11) Kulik, V. M., Semenov, B. N., Boiko, A. V., Seoudi, B. M., Chun, H. H. and Lee, I. 2008, "Measurement of Dynamic Properties of Viscoelastic Materials," *Experimental Mechanics*, Published online, doi:10.1007/s11340-008-9165-x.
 (12) Canuto, C., Hussaini, M. Y., Quarterony, A. and Zang, T. A., 1988, *Spectral Methods in Fluid Dynamics*, Springer Series in Computational Physics, Springer, Berlin.
 (13) Trefethen, L. N., 1990, Approximation Theory and Numerical Linear Algebra, in: Mason J, Cox M (Eds.) *Algorithms for Approximation II*, Chapman and Hall, London, pp.336~361.