

# 양팔 샌드위치보 시험법에 의한 EPDM 고무의 동특성 평가 연구

최 낙 심<sup>†</sup> · 김 광 우<sup>\*</sup>

(2001년 11월 9일 접수, 2002년 4월 4일 심사완료)

## Evaluation of Dynamic Characteristics of Rubber Materials Using a Double Cantilever Sandwich Beam Method

Nak-Sam Choi and Kwang-Woo Kim

**Key Words :** Double Cantilever Sandwich Beam Method(양팔 샌드위치보 시험법), Rubber Materials(고무재료), Modal Strain Energy Method(모달 변형률 에너지법), Dynamic Elastic Modulus(동탄성계수), Material Loss Factor(재료손실계수), Frequency Dependence(주파수 의존성)

### Abstract

A double cantilever sandwich-beam method has been applied to the evaluation of the frequency dependence of dynamic elastic modulus and material loss factor of EPDM rubbers. The flexural vibration of a double cantilever sandwich-beam specimen with an inserted rubber layer was studied using a finite element simulation in combination with the sine-sweep test. Effects of the rubber layer length on the dynamic characteristics were also investigated: reliable values were measured when the length of the inserted rubber layer was larger than and equal to 50% of the effective specimen length. The values were compared with those obtained by the dynamic mechanical analysis and the simple resonant test. Relationships of the dynamic characteristics of rubbers with frequency could be determined using the least square error method.

### 1. 서 론

기계구조물의 복합화 설계를 통해 방진 및 제진을 하는 기술 중에서 주된 것은 고무 재질을 보강층(constraining stiff layer)에 접합하여 구조물계(structural system)의 흡진재로 사용하는 것이다. 특히 동적하중을 받아 구조물이 공진할 때 이와 같은 복합화 설계는 그 진폭을 크게 감소시킬 수 있으므로 구조물의 제진 및 내피로 성능향상을 위해 중요하다고 볼 수 있다.

점탄성재료로 접합한 단일 겹침이음부를 가진 보가 횡진동을 할 때 양단 고정지지조건에서 Saito 와 Tani<sup>(1)</sup>는 겹침이음부의 길이를 변수로 하

여 계의 공진주파수와 손실계수를 구하는 이론식을 제안하였다. Rao 와 Crocker<sup>(2)</sup>는 겹침이음부를 갖는 단순지지 보에서 겹침이음부의 길이변화에 따른 고유진동수, 손실계수 및 진동모드를 이론적으로 구하고 실험에 의한 결과와 비교하였다. Johnson 과 Kienholz<sup>(3)</sup>는 구속 강성층(constraining stiff layer)과 피구속 점탄성층(constrained viscoelastic layer)을 갖는 복합구조물계의 손실계수(system loss factor)를 구하기 위한 유한요소 모달변형에너지법을 제안하였다. 최와 박<sup>(4)</sup>은 단일겹침이음부(single-lap-joint)를 갖는 양단 고정지지된 보에 국부적응댐퍼를 기하학적 대칭형태로 부착·추가하여 계의 공진주파수와 손실계수를 이론적으로 유도하였으며, 이 결과를 유한요소법에 의한 모달변형에너지의 결과와 비교하였다. 그렇지만 위의 연구에서는 점탄성층의 동탄성계수와 손실계수를, 주파수의 함수가 아닌, 일정한 상수로 취급하였으며, 이에 따른 수치해석결과는 실험결과와 적지않은 차이를 주고 있었다. 또한 점탄성 고무류의 동

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과  
E-mail: nschoi@hanyang.ac.kr  
TEL: (031)400-5283 FAX: (031) 406-5550

<sup>\*</sup> 한양대학교 대학원 기계설계학과

탄성계수와 손실계수의 기존측정법인 동적 점탄성시험 해석법(dynamic mechanical test and analysis, DMA)은 한 개의 주파수에서 시험하도록 되어 있어 다양한 공진주파수를 갖는 기계구조물의 흡진 해석을 위해서는 데이터의 한계를 보여왔다.

최근, 저자<sup>1)</sup>는 고무의 동적 물성에 대한 주파수 의존성을 한 개의 시험편으로 구할 수 있는 양팔 샌드위치 보(double cantilever sandwich beam, DCSB) 시험법을 고안하여 기존의 동적시험법에 의한 결과와 비교하였다. 본 연구에서는 위의 연구결과에 추가하여 점탄성 고무층이 전부 혹은 부분 삽입된 양팔 샌드위치보를 횡진동 모델로 제시하고, 고무재료의 동탄성계수 및 재료손실계수 측정값에 대한 고무층 길이의 효과를 검토함과 함께, 그 결과를 기존의 동적시험법에 의한 결과와 비교하여 그 유효성을 검토하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 고무재료

고무재료로는 (주)한국후포우-심슨에서 제작한 EPDM(ethylene-propylene diene rubber)-Hs61, EPDM-Hs65, EPDM-Hs72 를 사용하였다. EPDM-Hs61 과 EPDM-Hs65 의 경우 비중은 1.06 이며, EPDM -Hs72 의 경우 1.1 이었다. 축변형률(axial strain)이 100%일 때 정적탄성계수는 -Hs61, -Hs65, -Hs72 의 경우 각각 1.59, 2.34, 3.16MPa 이었다.

### 2.2 고무의 동적 점탄성해석시험(DMA)

길이 26mm, 폭 7mm, 두께 2.0mm 의 필름형상의 시험편을 만들어 동적 점탄성해석장치(Dynamic mechanical analyzer, DMA 2980, TA Instruments Co.)를 이용한 필름 인장형(Film tension mode)동적실험을 하였다. 시험조건은 정적인 인장력(static force) 1N 을 가해준 상태에서 인장-인장하중상태의 진폭 5 $\mu$ m, 주파수 1Hz 로 선택하였다. 시험온도의 범위를 -100 ~200°C 로 하여 온도의 상승속도는 5°C/min 으로 하였다. 본 실험에서는 위의 EPDM 고무 단일체의 저장탄성계수( $E$ )와 재료손실계수( $\eta_d = \tan\delta$ )를 시험 온도의 함수로서 측정하였다

### 2.3 고무 삽입형 양팔 샌드위치보 시험

본 연구에서 사용한 양팔 샌드위치보(double cantilever sandwich beam, DCSB) 시험편의 보 재료는 S45C 강재이며, 표면 열처리나 방청처리 없이 두께 1mm, 길이 120mm, 폭 10mm 로 평평하게 가공하였다. 고무층은 상기의 EPDM 고무로 하였으며 DCSB 시험편의 형상은 Fig. 1 에 나타냈다.

고무와 금속의 접착제인 Chemlok 205/220 (Lord

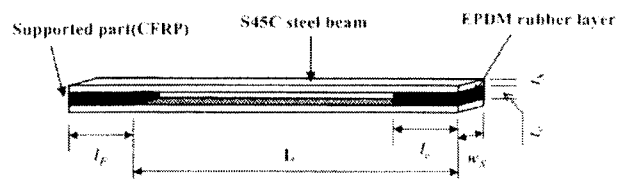


Fig. 1 Geometry of a double cantilever sandwich beam specimen

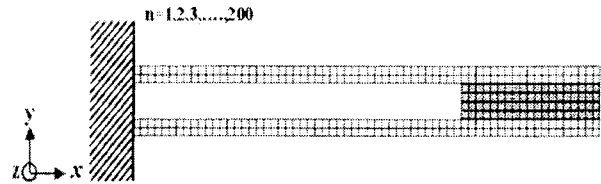


Fig. 2 Finite element model of a DCSB specimen

Co.)을 사용하여 고무층을 두 개의 금속보 사이에 삽입하여 집착하였다. 즉, 금속접합부는 연마후 chemlok 205 를, 고무 접합부는 chemlok220 을 도포하여 1 시간동안 건조시킨 후 자체 제작한 고정구로 DCSB 시험편의 기본형상을 유지하도록 한 상태에서 진공압 0.08atm, 경화온도 150°C 에서 1 시간동안 경화시켜 집착하였다. 집합후에 현미경으로 관찰한 결과 집착층의 두께는 약 35 $\mu$ m 이었다. 고정부를 제외한 DCSB 시험편의 전체유효길이( $L$ )는 100mm 였으며, 시험편 장착부의 길이( $l_f$ )는 20mm 이었다. 샌드위치보에 삽입된 고무층의 폭( $w_x$ )은 강재 보와 동일한 10mm, 두께( $t_s$ )는 2.4mm 로 일정히 한 상태에서 길이( $l_s$ )를 10, 30, 50, 100mm 의 4 종류로 하였다.

가진기(B&K vibration exciter, type 4808)의 가진판에 DCSB 시험편의 한쪽부위(Fig. 1 의  $l_f$  부위)를 장착시켰다. 이 장착부위를 가진함으로써 시험편의 유효길이 부분(Fig. 1 의  $L$  부위)에 횡방향 진동을 주어 1Hz~2kHz 범위의 사인 스위프(sine sweep)실험을 수행하고 동적신호해석기(HP 35670A, dynamic signal analyzer)를 통해 주파수 응답함수(frequency response function, FRF)를 측정하였다. FRF 선도의 피크값에 대응하는 각 모드의 공진주파수를 구하고 half power bandwidth 방법<sup>2)</sup>으로 계의 점성감쇠계수(system viscous loss factor,  $\zeta$ )를 구하였다. 즉 FRF 선도에서 피크값의 3dB 만큼의 저점값에 대응하는 주파수( $f_1, f_2$ )를 이용하여 계의 손실계수( $\eta$ )를 다음 식 (1)로 구하였다.

$$\eta = 2\zeta = 2 \times \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (1)$$

### 2.4 고무삽입 단순공진시험

질량, 스프링, 댐퍼를 가진 1 자유도 단순계를 모델링하여 단순공진 시험편(simple resonant specimen, SR)을 제작하였다. 폭 10mm, 길이 10mm의 S45C 강판(두께 1mm)과 고무판(두께 2.4mm)을 가진판에 층상으로 접합하였으며 이때 2.3 절과 동일한 접착법을 이용하였다. 실험방법은 주파수 1Hz~50kHz 범위에서 시험편의 두께방향으로 가진하여 사인 스위프(sine sweep)실험을 수행하였다.

이 경우, 고무층의 동탄성계수  $E_d$ 는 식 (2)

$$E_d = (2\pi f_0)^2 \frac{Mt}{A} \quad (2)$$

로 구하며,  $M$  은 강판의 질량,  $A$  는 고무층의 면적,  $t$  는 고무층의 두께,  $f_0$  는 계의 공진주파수이다.

### 3. DCSB 시험편의 유한요소 모사해석

Fig. 2 와 같이  $z$  방향으로 일정한 폭을 갖고 한 쪽 끝단을 완전고정한 대칭형 양팔 캔드위치보 2 차원 시험편 모델에 대해 상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys Ver. 5.3 을 사용하여 횡진동해석을 수행했다. 보의 유효 길이( $L$ )는 100 mm로 일정하다고 가정하였다. 4 절점요소(Plane42)로 구성된 유한요소 메쉬는 각 절점에서 2 개의 자유도(변위  $u, v$ )를 가지며 각 보의 요소 개수는  $x$  축방향 200 개,  $y$  축방향 2 개로 하여 총 400 개로 하였다. 보와 고무층의 한 개 요소의  $x$  축방향 길이를 일정값 0.5 mm로 하였으며 고무층의  $y$  축방향 개수는 4 개로 하였다. 예를 들어,  $t_r = 10\text{mm}$  일 경우 고무층의 요소개수는 80 개( $20 \times 4$ )이고  $t_r = 100\text{mm}$  일 경우에는 고무층의 요소개수는 800 개( $200 \times 4$ )가 된다. 양팔강보의 굽힘변형시에 탄성계수가 매우 낮은 고무삽입층에서 큰 변형이 발생하므로 유한요소 수치해석상의 오차를 적게 하기 위해서 고무층의  $y$  방향 요소 개수를 강보 보다 많게 한 것이다. 여기서 보의 푸아송비는 0.30 으로 입력하였고, 탄성계수는 유한요소해석과 실험을 조합하여 각 모드별 단일 강보의 동탄성계수 값(Table 1)을 다음의 4 절에 설명한 바와 같은 보간법으로 구하고 이를 DCSB 수치 모델에 입력하였다.

**Table 1** Experimental values of dynamic elastic modulus obtained from a cantilever steel beam

| Mode                          | 1 <sup>st</sup> mode | 2 <sup>nd</sup> mode | 3 <sup>rd</sup> mode |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resonant frequency (Hz)       | 83.45                | 522.76               | 1462.92              |
| Dynamic elastic modulus (GPa) | 225.4                | 206.8                | 200.9                |

### 4. 고무의 동탄성계수 측정

우선 고무를 정적 인장시험(JIS K 6301)하여 측면형률 100%에서 구한 탄성계수(Young's modulus)를 상기 DCSB 시험편의 유한요소 모사해석 시에 초기값으로 입력하였다. 이 시험편의 유한요소 모달해석을 수행하여 구한 각 모드별 공진주파수값  $f_0^{clm}$  과 DCSB 시험편을 사인스위프 시험하여 구한 각 모드별 공진주파수의 실험값  $f_0^{esp}$  을 비교하고, 보간법을 이용하여 식 (3)과 같이  $f_0^{clm}$  값이 오차( $e$ ) 0.01% 내에서  $f_0^{esp}$  값에 근사하도록 EPDM 고무층의 주파수별 동탄성계수  $E_d$  를 구하였다.

$$\text{오차 } e = \left| \frac{f_0^{clm} - f_0^{esp}}{f_0^{esp}} \right| \leq 0.01\% \quad (3)$$

### 5. 고무의 손실계수 측정

고무의 재료손실계수  $\eta_d$ 는 Fig. 2 의 유한요소모델을 통한 모달변형에너지법<sup>(3-5)</sup>을 이용하여 구했다. 모달변형에너지법은 댐핑이 없는 경우의 모달해석을 통해 구한 계의 각 모드에서의 모드형상(mode shape)과 구조물의 각 부위에서의 재료 손실계수를 이용하여 전체 계의 손실계수  $\eta_r$  를 구하는 방법으로 구조물의 복잡한 형상에 대해서도 계의  $r$  번째 모드의 손실계수를 다음식 (4)로 구할 수 있다.

$$\eta_d^{(r)} = \frac{\{\phi^{(r)}\}^T [K_{VR}] \{\phi^{(r)}\}}{\{\phi^{(r)}\}^T [K_R] \{\phi^{(r)}\}} = \frac{U_{visco}}{U_{total}} \quad (4)$$

여기서  $U_{total}$  와  $\eta_d^{(r)}$  은  $r$  번째 모드에서 각각 계의 전체 스트레인 에너지와 계의 손실계수이며,  $U_{visco}$  와  $\eta_d^{(r)}$  는  $r$  번째 모드에서 고무층의 스트레인 에너지와 고무의 손실계수이다.  $\{\phi^{(r)}\}$  은  $r$  번째 모드의 계의 모달벡터,  $[K_R]$  은 계의 실수부 강성 매트릭스,  $[K_{VR}]$  은 고무층의 실수부 강성 매트릭스이다. 따라서 DCSB 시험편 계에서 고무층의 재료 손실계수는 다음 식

$$\eta_d^{(r)} = \left( \frac{U_{total}}{U_{visco}} \right) \eta_s^{(r)} \quad (5)$$

로써 구할 수 있다. 여기서  $\eta_s^{(r)}$  은 사인 스위프

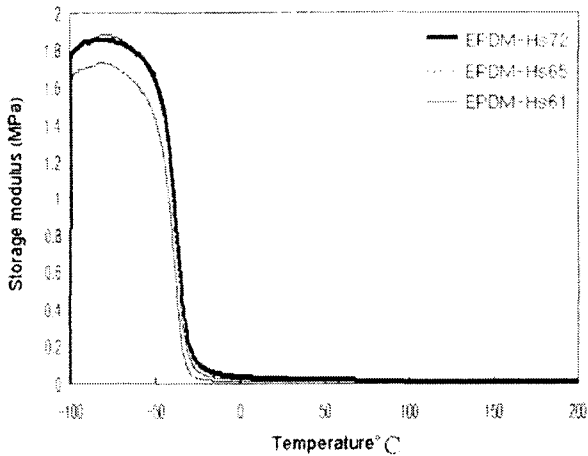


Fig. 3 Storage modulus of EPDM rubbers

실험에 의해서,  $U_{total}$  과  $U_{visco}$  는 유한요소해석에 의해 구하는 값이다.

한편, 2.4 절에 언급한 단순공진(SR) 시험편에서는 고무층만의 변형에너지  $U_{rubber}$  가 계의 변형에너지  $U_{system}$  에 근사하므로 고무의  $\eta_d$  는  $\eta_d \approx \eta_s$  가 됨을 식 (5)를 통해 알 수 있다.

### 6. 결과 및 고찰

#### 6.1 DMA 시험에 의한 EPDM 고무의 동특성 평가

Fig. 3 은 온도범위  $-100 \sim 200^\circ\text{C}$  에서 DMA 시험으로 구한 EPDM-Hs61, -Hs65, -Hs72 고무의 저장탄성계수(storage modulus)의 거동을 나타내고 있다. 이들은 주파수  $1\text{Hz}$  에서 구한 것인데, 상온( $23^\circ\text{C}$ )에서 고무의 저장탄성계수의 평균값은 EPDM-Hs61, -Hs65, -Hs72 별로 각각 5.8, 13.1, 23.4 MPa 을 보였다

Fig. 4 는 고무의 시험온도에 따른 재료손실계수( $\eta_d = \tan\delta$ )의 거동을 나타내고 있다. 상온에서 각 고무별 평균  $\eta_d$  값은 각각 0.157, 0.145, 0.143 였으며, 저장탄성계수의 증가에 따라  $\eta_d$  값은 감소하는 경향을 경향을 알 수 있다. 그렇지만, 손실계수가 극대값이 되는  $-30^\circ\text{C}$  근처에서는 -Hs72 재료와 -Hs65 재료의 저장탄성계수가 동일수준의 높은 값을 나타낸 반면, 손실계수는 -Hs72 재료가 가장 낮은 값을 보였다.

#### 6.2 DCSB 시험에 의한 EPDM 고무의 동특성 평가

6.2.1 DCSB 시험편의 횡진동 주파수 응답거동  
고무층이 삽입되지 않은 두께 1mm, 유효길이가 100mm 의 단일외팔강보(single cantilever steel

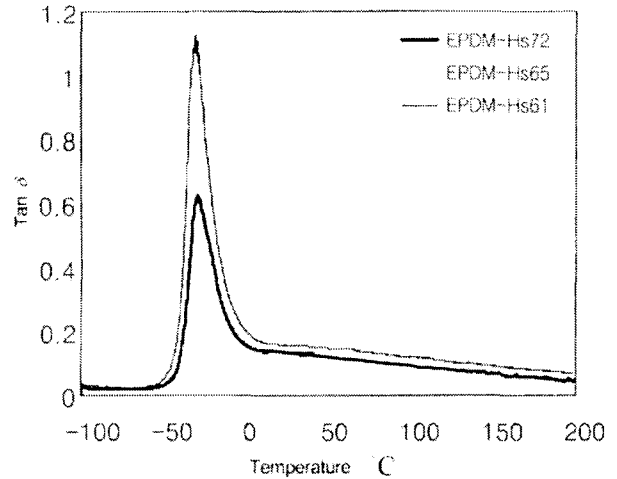


Fig. 4 Loss factor( $\eta_d = \tan\delta$ ) of EPDM rubbers

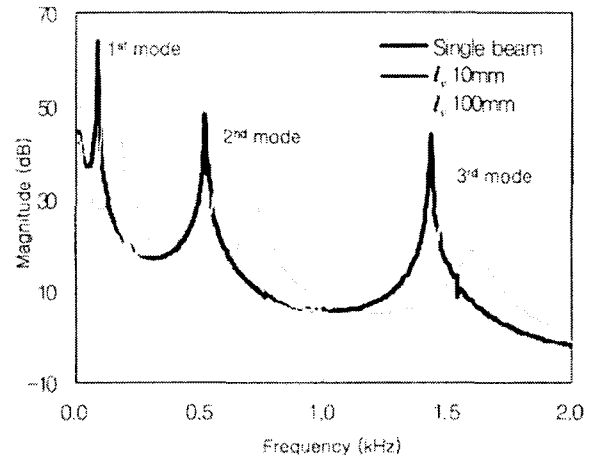


Fig. 5 Experimental frequency responses of a single steel beam specimen and DCSB specimens inserted with EPDM-Hs72 rubber

beam)시험편, EPDM-Hs72 고무층이 전체길이에 걸쳐 삽입 접착된 양팔 샌드위치보(DCSB)시험편 ( $l_s = 100\text{mm}$ ), 고무층이 10mm 길이만큼 부분적으로 삽입 접착된 DCSB 시험편( $l_s = 10\text{mm}$ )의 3 가지 시험편에 대해서 사인 스위프(sine sweep) 실험을 수행하여 구한 주파수응답거동 결과를 Fig.5 에 나타낸다. DCSB 시험편의 경우 이 주파수응답곡선에서 극값의 주파수인 각 모드별 고유진동수(공진주파수)가 단일외팔강보의 고유진동수보다 오른쪽으로 이동하여 계의 동적강성(dynamic stiffness)이 커졌으며, 접탄성층의 길이  $l_s$  가 클수록 극값의 강도(intensity)가 낮아지고 완만해져서 계의 댐핑효과가 커졌음을 보였다. 즉, 계의 강성(system stiffness)과 손실계수(system loss factor)는  $l_s$  가 클수록 더 커진 것이다. 따라서,  $l_s$  가 작을수록 계의 손실

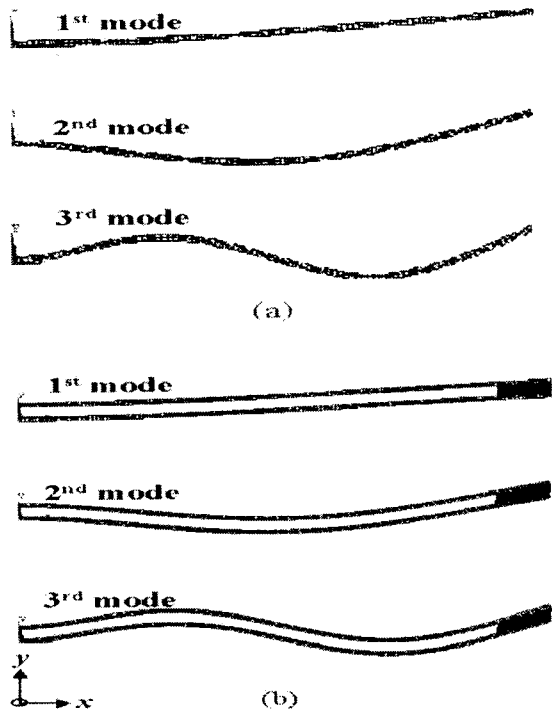


Fig. 6 Simulated mode shapes of a single cantilever beam (a) and a double cantilever sandwich beam with partly inserted rubber layer (b)

계수가 작아지고 4 차 모드 이상의 고주파수 영역에서도 극값을 갖는 주파수 응답을 실측할 수 있으므로,  $l_r$  가 작아짐에 따른 고무재료의 동탄성계수와 재료손실계수 측정값의 신뢰성을 검토할 필요가 있겠다.

각 모드의 횡진동 형상을 가시적으로 관찰하기 위해서 상기의 단일외팔강보와 고무층 부분삽입 DCSB 시험편에 대해 유한요소 시뮬레이션한 결과를 각각 Fig. 6(a)와 (b)에 나타낸다. 양팔 샌드위치보의 횡진동은 1 차, 2 차, 3 차모드에서 반대칭 모드형상(anti-symmetric mode shape)을 보여 각 모드에서 단일외팔강보의 횡진동 형상을 따르고 있음을 알 수 있다. 고무층이 양팔샌드위치보의 유효길이 전체에 걸쳐 삽입 접착된 경우에도 각 진동모드는 위와 유사한 형상을 보였다. 이 경우 윗보의 밑면과 아래보의 윗면이 반대 위상으로 변형하므로, 샌드위치보에 삽입된 고무층에서는 주로 전단형 변형(shear deformation)이 일어나게 된다.

6.2.2 EPDM 고무의 동탄성계수와 재료손실계수

Fig. 7 은 고무층이 전체적으로 접착된 DCSB 시험편( $l_r=100\text{mm}$ )으로 구한 고무층의 동탄성계수를 고무의 종류에 따라 비교하여 나타낸 것이다. EPDM-Hs61 고무의 동탄성계수와 비교하여 -Hs65 고무는 평균적으로 약 2 배, -Hs72 고무의 경우는

약 4.5 배 증가했다. 또한 각 고무별 동탄성계수는 1Hz 에서 측정한 DMA 시험결과보다 1.6 배 이상 컸으며, 주파수가 커질수록 동탄성 계수가 커짐을 나타내고 있다. -Hs72 고무의 동탄성계수는 1 차에서 2 차 모드로 갈 때 크게 증가하고 2 차에서 3 차 모드로 갈 때는 증가율이 둔화되었으나, -Hs61, -Hs65 고무의 경우는 1 차에서 3 차에 이르기까지 점진적으로 증가하였다. 이는 동탄성계수의 주파수 의존성이 고무재료의 종류에 따라 다를 수 있다.

Fig. 8 은 EPDM-Hs61 고무가 접착된 DCSB 시험편으로 구한 고무재료의 동탄성계수를 고무층의 길이별로 나타낸 것이다. 약 128Hz 근처에 있는 1 차 공진주파수에서의 동탄성계수는 고무층의 길이 ( $l_r$ )가 10mm 에서 50mm 까지 갈 때 대체로 감소하였으나 100mm 에서는 다소 증가했다. 이들 동탄성계수값은 주파수 1Hz 에서의 DMA 시험결과 (5.8MPa)보다 훨씬 큰 값(8~15MPa)임을 주목해야 할 것이다. 측정값의 분산정도는  $l_r=10\text{mm}$  인 경우 주파수의 증가에 따라 커졌으나  $l_r$  가 50mm 이상으로 증가함에 따라 그 분산정도는 안정적으로 작아졌다.  $l_r$  가 10mm 와 30mm 인 시험편의 경우 주파수의 증가에 따라 동탄성계수는 대체로 감소했지만 50mm 와 100mm 시험편의 경우 증가하는 경향을 나타냈다. 고무층 단부에서의 응력자유상태(stress-free state)가 진동변형 시에 전체 계의 횡진동 거동에 미치는 효과는 고무층의 길이가 길수록 작아질 것이므로 고무층의 동탄성계수의 측정값 오차를 작게 할 것으로 생각된다. EPDM-Hs65, -Hs72 의 경우에도  $l_r=10\text{mm}$  에서 동탄성계수 측정값의 분산정도가 매우 커서 실험데이터의 신뢰성을 저하시켰으나,  $l_r \geq 50\text{mm}$  에서는 안정한 값을 보였다.

Fig. 9 는 고무층이 전체적으로 접착( $l_r=100\text{mm}$ )된 DCSB 시험편으로 평가한 고무재료별 손실계수를 공진주파수의 함수로 나타낸 것이며, 1 차 공진주파수(약 128Hz)에서의  $\eta_d$  값은 어느 고무에서나 DMA 실험에 의한 주파수 1Hz 에서의  $\eta_d$  값과 비슷한 수준에 있었다. 그렇지만,  $\eta_d$  는 공진주파수의 증가에 따라 상당히 증가하는 거동을 보였다. 한편, 고무재료의 종류가 EPDM-Hs61, -Hs65, -Hs72 으로 갈수록 각 모드별 재료손실계수는 감소하였으며, 이는 DMA 실험을 통한 주파수 1Hz 에서의 재료손실계수를 고무의 종류별로 비교한 경향과 일치하였다. 또한 동탄성계수가 상대적으로 낮은 EPDM-Hs61 고무의 경우에  $\eta_d$  값이 가장 컸으며 주파수의 강한 의존성을 나타냈다.

Fig. 10 은 -Hs61 고무재료에 대해 DCSB 시험편

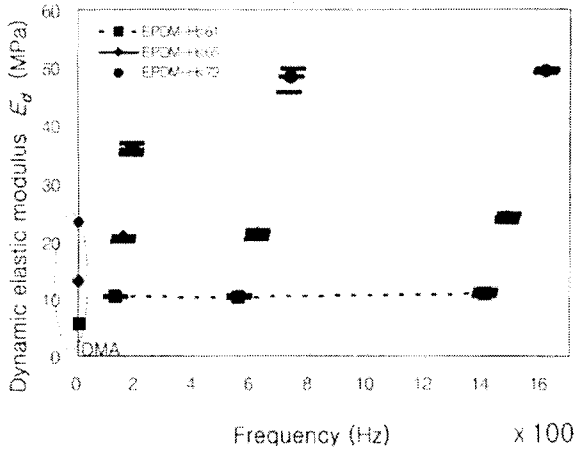


Fig. 7 Dynamic elastic modulus of the various rubbers evaluated by DCSB specimens with fully inserted rubber layer

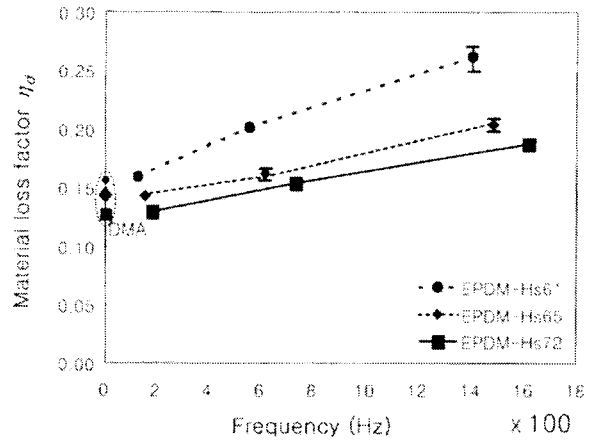


Fig. 9 Material loss factor of the various rubbers evaluated by DCSB specimens fully inserted with rubber layer

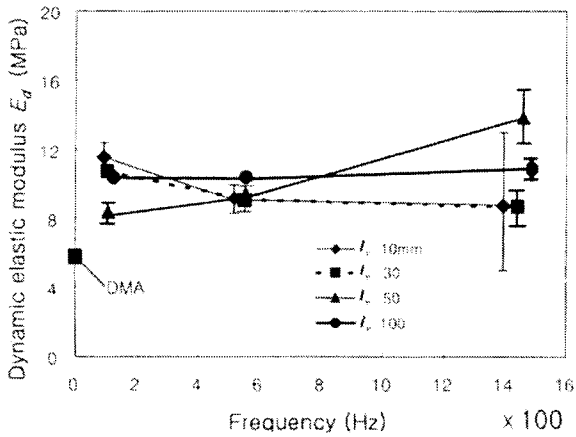


Fig. 8 Dynamic elastic modulus of EPDM-Hs61 as a function of  $l_i$

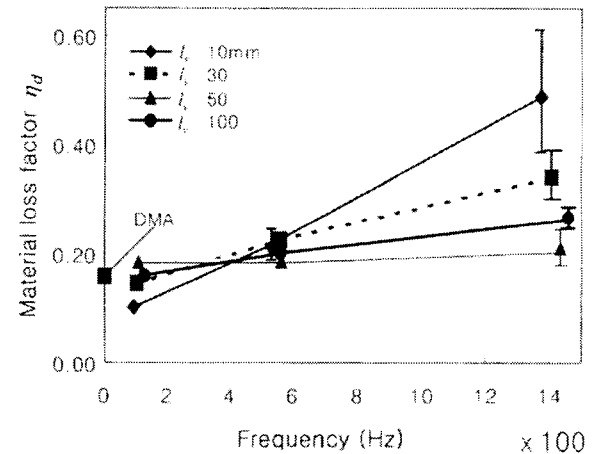


Fig. 10 Material loss factor of EPDM-Hs61 as a function of  $l_i$

으로 평가된 재료손실계수  $\eta_d$  를 고무층의 길이별로 나타내고 있다.  $l_i$  가 10mm 인 경우 위의 동탄성계수 결과와 마찬가지로 공진주파수의 증가에 따라 측정값의 분산정도가 커져 신뢰성을 저하시켰으며, 증가기울기도 커졌음을 알 수 있다. 그렇지만 고무층 길이가 길어질수록 완만히 증가하고 재료손실계수 측정값의 분산정도가 작아짐을 보였다. EPDM-H65 와 -Hs72 의 경우에서도,  $l_i=10$  mm 에서는 측정값의 분산정도가 크고 평균값은  $l_i \geq 50$  mm 에서의 값보다 1 차공진주파수에서는 과소하게, 3 차공진주파수에서는 과다하게 나타나, -Hs61 의 경우와 비슷한 경향을 보였다.

6.3 단순공진시험에 의한 EPDM 고무의 동특성 평가

고무가 삽입된 단순공진(SR)시험편에 대한 1Hz

에서 50 kHz 까지의 주파수응답거동을 관찰한 결과, EPDM-Hs61 고무의 경우는 약 5.0kHz 에서, -Hs65 의 경우는 약 8.5kHz 에서, -Hs72 의 경우는 약 12kHz 에서 1 차 공진주파수를 관찰할 수 있었으며, 15 kHz 이상의 주파수부터는 기계적 노이즈에 의하여 주파수응답거동의 관찰이 어려웠다. 이들 1 차공진주파수값은 DCSB 시험편의 1,2,3 차 공진주파수보다 훨씬 큰 대역에 위치하였다.

Fig. 11 은 SR 시험편의 1 차 공진주파수를 측정하여 구한 고무재료의 종류별 동탄성계수값을 DCSB 시험편의 결과와 비교하여 나타내고 있으며, Fig. 12 는 이에 대응하는 재료손실계수를 나타낸다. EPDM-Hs61 부터 -Hs72 로 갈수록, 동탄성계수가 증가하였으며 재료손실계수는 이와 반대로

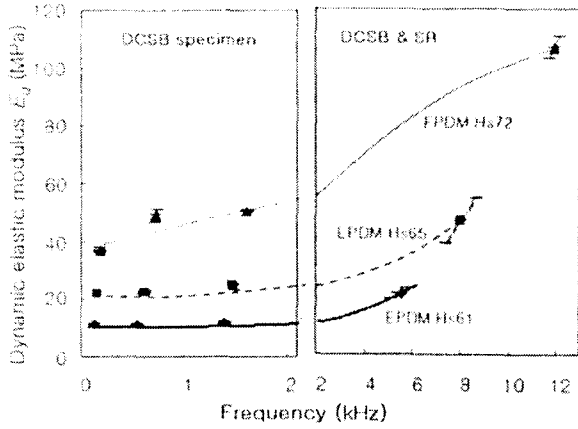


Fig. 11 Frequency dependence of dynamic elastic modulus of Rubbers

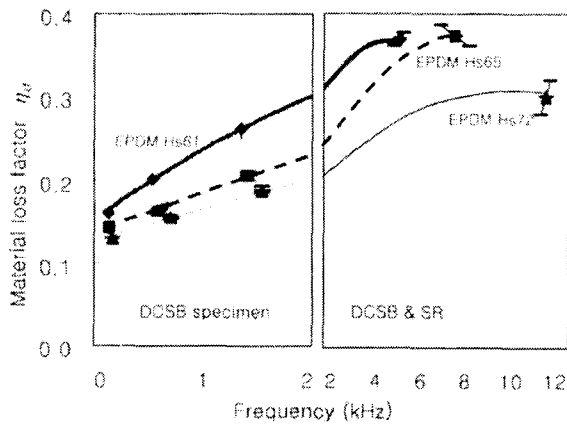


Fig. 12 Frequency dependence of material loss factor of rubbers

감소하는 경향을 보였는데, 이는 DCSB 시험편의 경향과 일치하였다. 또한 이들 값은 각 고무종류별로 DCSB 시험편으로 구한 값보다 더 컸으며 이는 단순공진시험편의 공진주파수가 DCSB 시험편에서의 3 차 공진주파수인 약 1.6 kHz 보다 훨씬 커서, 고주파수의 효과가 나타났던 것으로 생각된다.

6.4 EPDM 고무의 동탄성의 주파수의존성

위에서 주파수별로 구한 실험결과를 바탕으로 최소자승오차법(least square error method)을 사용하여 재료의 동탄성계수와 재료손실계수를 주파수의 함수로써 가정하여 이차식으로 근사화하고 각각 Table 2 와 Table 3 에 제시하였다. 여기서는 DCSB 시험편 만으로 구한 100Hz~2kHz 대역의 주파수 함수와, DCSB 시험결과를 SR 시험결과와 연계하여 구한 100Hz~13kHz 대역의 주파수함수를 나타내고 있다. 회귀계수  $r^2$  은 전반적으로 높게 나왔는데, 고무의 동탄성계수가 작을수록 재료손실계수는 커

Table 2 Coefficients for quadratic relations of dynamic elastic modulus  $E_d$  of rubbers with frequency  $f$ (Hz):  $E_d = a_0 + a_1f + a_2f^2$

| Dynamic elastic modulus |           | $E_d = a_0 + a_1f + a_2f^2$ |                     |                        |       |
|-------------------------|-----------|-----------------------------|---------------------|------------------------|-------|
| Materials               | Method    | $a_0$                       | $a_1$               | $a_2$                  | $r^2$ |
| EPDM Hs61               | DCSB only | $1.04 \times 10^7$          | $4.23 \times 10^2$  | $-9.61 \times 10^{-1}$ | 0.91  |
|                         | DCSB & SR | $1.05 \times 10^7$          | $-3.84 \times 10^2$ | $4.52 \times 10^{-1}$  | 0.99  |
| EPDM Hs65               | DCSB only | $2.06 \times 10^7$          | $1.51 \times 10^2$  | 1.52                   | 0.88  |
|                         | DCSB & SR | $2.13 \times 10^7$          | $3.40 \times 10^2$  | $3.69 \times 10^1$     | 0.96  |
| EPDM Hs72               | DCSB only | $3.14 \times 10^7$          | $2.69 \times 10^4$  | -9.74                  | 0.83  |
|                         | DCSB & SR | $3.73 \times 10^7$          | $8.82 \times 10^3$  | $-2.52 \times 10^1$    | 0.98  |

Table 3 Coefficients for quadratic relations of material loss factor  $\eta_d$  of rubbers with frequency  $f$ (Hz):  $\eta_d = b_0 + b_1f + b_2f^2$

| Material loss factor |           | $\eta_d = b_0 + b_1f + b_2f^2$ |                       |                        |       |
|----------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| Materials            | Method    | $b_0$                          | $b_1$                 | $b_2$                  | $r^2$ |
| EPDM Hs61            | DCSB only | $1.43 \times 10^{-1}$          | $1.30 \times 10^{-5}$ | $-3.36 \times 10^{-8}$ | 0.98  |
|                      | DCSB & SR | $1.53 \times 10^{-1}$          | $9.01 \times 10^{-5}$ | $-9.23 \times 10^{-7}$ | 0.94  |
| EPDM Hs65            | DCSB only | $1.37 \times 10^{-1}$          | $3.86 \times 10^{-5}$ | $4.39 \times 10^{-8}$  | 0.99  |
|                      | DCSB & SR | $1.29 \times 10^{-1}$          | $5.90 \times 10^{-5}$ | $-3.57 \times 10^{-7}$ | 0.96  |
| EPDM Hs72            | DCSB only | $1.21 \times 10^{-1}$          | $4.86 \times 10^{-5}$ | $-4.61 \times 10^{-7}$ | 0.99  |
|                      | DCSB & SR | $1.25 \times 10^{-1}$          | $4.09 \times 10^{-5}$ | $-2.19 \times 10^{-6}$ | 0.98  |

졌으며 주파수가 커질수록 동탄성계수와 재료손실계수는 증가하는 거동을 나타냈다. 또한 고무종류에 따라 동탄성계수와 재료손실계수는 다른 주파수 의존성을 보여주었다. DCSB 시험편 만으로 구한 주파수 함수는 보통 기계구조물의 진동주파수 대역에 해당하는 100Hz~2kHz 의 저주파 진동영역에서 유용하게 활용 될 수 있을 것이다. 또한 Fig. 11 과 Fig. 12 에는 DCSB 시험편과 SR 시험편을 연계하여 구한 고무재료의 동탄성계수와 재료손실계수를 각각 도시하였으며, 이들 주파수함수는 2kHz~13kHz 의 고주파 진동 영역에서 유익하게 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

7. 결론

본 논문에서는 EPDM 고무의 동탄성계수와 손실계수의 주파수 의존성을 평가할 수 있는 새로운

양팔 샌드위치보 시험법을 고안하여 횡진동 모델로 제시하고, 고무층의 길이와 고무 종류에 따른 특성을 검토하였다.

고무층이 삽입된 양팔 샌드위치보의 공진주파수는 각 모드별로 단일외팔 강보의 공진주파수보다 약간 크게 나타났다. 이와 같은 양팔 샌드위치보의 횡진동특성을 모드별로 측정하고 유한요소모사해석을 이용한 모달변형에너지법을 조합함으로써 삽입된 고무의 주파수별 동탄성계수와 재료감쇠계수를 주파수의 함수로 회귀시켜 평가할 수 있었다. 고무층의 길이가 시험편의 전체 유효길이의 50%이상일 때 동특성 측정값의 분산정도가 작아지고 신뢰성있는 주파수의 함수로써 평가될 수 있었다. 또한 고무의 동특성은 고무종류에 따라 다른 주파수 의존성을 보였다. DCSB 시험편만으로 구한 고무재료의 동특성은 기계구조물의 보통진동주파수 대역에서 유용하게 활용될수 있을 것이며, 이들 데이터를 단순공진시험편을 이용한 고주파수의 동특성값과 연계하여 평가할 경우에는 고주파수 대역에서의 동특성도 구할 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) Saito, H. and Tani, H., 1984, "Vibrations of Bonded Beams with a Single Lap Adhesive Joint," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 92(2), pp. 299~309.
- (2) Rao, M. D. and Crocker, M. J., 1990, "Analytical and Experimental Study of the Vibration of Bonded Beams with a Lap Joint," *Trans. of the ASME, J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 112, pp. 444~451.
- (3) Johnson, C.D. and Kienholz, D.A., 1992, "Finite Element Prediction of Damping in Structures with Constrained Viscoelastic Layers," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 9, pp. 1284~1290
- (4) Park, J.I. and Choi, N.S., 1999, "Analysis of Vibration Damping of a Single Lap Joint Beam with Partial Dampers," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 12, No. 2, pp. 26~35.
- (5) Choi, N.S. and Park, J.I., 2001, "Analysis of the Vibration Damping of Bonded Beams with a Single-Lap-Joint and Partial Dampers," *JSME International Journal, Series C*, Vol. 44, No. 2, pp. 350~359.
- (6) Kim, K.W., Park, J.T., Lee, D.B. and Choi, N.S., 2001, "A Double Cantilever Sandwich Beam Method for Evaluating Frequency Dependence of Dynamic Modulus and Damping Factor of Rubber Materials," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 3, pp. 69~76
- (7) Mario, P., 1997, *Structural Dynamics: Theory and Computation*, Chapman & Hall, New York. pp. 59~60.