

# 고무의 동탄성계수와 손실계수의 주파수 의존성을 평가하기 위한 양팔 샌드위치보 시험법의 개발

김광우\*, 최낙삼\*\*

## Development of a double cantilever sandwich beam method for evaluating frequency dependence of dynamic modulus and damping factor of rubber materials

Kwangwoo Kim, Nak-Sam Choi

**Key Words:** Double Cantilever Beam(양팔보), Dynamic Elastic Modulus(동탄성계수), Material Loss Factor(재료손실계수), Flexural Vibration Damping(횡진동 감쇠), Resonant Frequency(공진주파수)

### Abstract

This paper proposes a double cantilever sandwich-beam method for evaluating the frequency dependence of material dynamic characteristics. The flexural vibration of a double cantilever sandwich-beam specimen with a partially inserted rubber layer was studied using a finite element simulation in combination with the sine-sweep test. Quadratic relationships of dynamic elastic modulus and material loss factor of rubbers with frequency were quantitatively suggested employing the least square error method.

## 1. 서론

현재 기계구조물의 방진문제를 해결하기 위해 복합화 구조물을 설계하여 적용하는 연구가 이루어지고 있다. 그 중 주된 것이 고무 재질을 보강재에 접착하여 흡진재로 사용함으로써 구조물계(structural system)의 방진 또는 흡진 특성을 극대화하는 것이다. 이는 동적하중을 받아 구조물이 공진할 때 그 진폭을 크게 감소시킬 수 있으므로 구조물설계를 위해 매우 중요하다고 볼 수 있다. 점탄성재료로 접합한 단일 겹침이음부를 가진 보의 경우, Saito 와 Tani<sup>(1)</sup>는 양단 고정지지조건에서 이 보가 횡진동을 할 때 겹침이음부의 길이를 변수로 하여 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. 박과 최<sup>(3)</sup>는 단일겹침 이음부(single-lap-joint)를 갖는 양단 고정지지된 보에 대해 국부적 층댐퍼를 기하학적 대칭형태로 부착·추가하여 이론적으로 유도하였으며, 이 결과를 유한요소법에 의한 수치해석 결과와 비교하였다. 그렇지만 위의 연구들에서는 점탄성층의 동탄성계수와 손실계수를, 주파수의 함수가 아닌, 일정한 상수로 취급하였으며, 이에 따른 수치해석결과는 실험결과와 적지않은 차이를 주

고 있었다. 또한 점탄성 고무류의 동탄성계수와 손실계수의 기존측정법은 한 개의 저주파수에 대해 측정하도록 되어있어, 동적 물성에 대한 주파수의 의존성을 한 개의 시험편으로 구할 수 있는 방법의 개발이 필요하겠다.

본 연구는 점탄성 고무층이 부분적으로 삽입된 양팔 샌드위치보(double cantilever sandwich beam, DCSB)를 횡진동 모델로 개발하고 고무재료의 동탄성계수 및 재료손실계수를 주파수의 함수로서 정량화하여 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 EPDM 고무재료

고무의 재료로는 (주)한국후코꾸-심슨에서 제작한 EPDM-Hs61, EPDM-Hs65, EPDM-Hs72 를 사용하였다. 정적탄성계수는  $\epsilon=100\%$ 일 때 -Hs61, -Hs65, -Hs72 의 경우 각각 1.59, 2.34, 3.16MPa 이다.

### 2.2 고무의 동적점탄성해석실험(DMA): 저장탄성계수와 재료손실계수의 측정

동적점탄성해석장치(Dynamic mechanical analyzer, DMA 2980, TA Instruments Co.)에서 필름 인장형(Film tension mode)실험을 위하여 길이 26mm, 폭 7mm, 두께 2.0mm 의 film 형상의 시험편을 만들었다. 실험조건은 정적인 인장력(static force) 1N 을 가해준 상태에서 진폭 5 $\mu\text{m}$ , 주파수 1Hz 로 하였다.

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 한양대학교 기계공학과

nschoi@hiware.hanyang.ac.kr

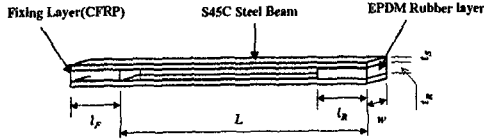


Fig. 1 Geometry of a double cantilever sandwich beam specimen

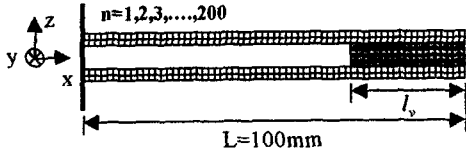


Fig. 2 Finite element analysis of a DCSB specimen

온도범위  $-100\sim 200^\circ\text{C}$  에서 온도의 상승속도( $\Delta T/\Delta t$ )는  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  으로 하였다. 본 실험에서는 상기 EPDM 고무 단일체의 저장탄성계수( $E'$ )와 재료손실계수( $\eta_d=\tan\delta$ )를 시험 온도의 함수로서 측정하였다.

### 2.3 고무 삽입형 Double Cantilever Sandwich Beam 시험

본 연구의 Double cantilever sandwich beam 시험편 용 보는 S45C 강재를 두께 1mm, 길이 120mm, 폭 10mm 로 하고 표면 열처리나 방청처리 없이 가능한 평평하게 가공하였다. 고무층의 재료로는 상기의 EPDM 고무를 사용하였으며 DCB 시험편의 형상은 Fig.1 에 나타내었다. 고무층을 두 개의 금속보 사이에 삽입하여 접합하기 위하여 고무와 금속의 접착제인 Chemlok 205/220 (Lord Co.)을 사용하였다. 고정부를 제외한 DCSB 시험편의 전체유효길이( $L$ )는 100mm 이며, 시험편 고정부의 길이( $l_f$ )는 20mm 이다. 샌드위치보에 삽입된 고무층의 폭( $w_s$ )은 강제 보와 동일한 10mm, 두께( $t_s$ )는 2.4mm 로 일정하게 하였다.

가진기(B&K vibration exciter type 4808)에 장착된 고정구에 DCSB 시험편의 한쪽부위를 고정시켰다. 가진기를 이용하여 시험편의 유효길이 부분에 횡방향 진동을 주어 1~2000Hz 범위의 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>(4)</sup>으로 계의 점성감쇠계수(system viscous loss factor,  $\zeta_s$ )를 구하였다. 즉 FRF 선도에서 피크값의 3dB 만큼의 저점값에 대응하는 주파수( $f_1, f_2$ )를 이용하여 계의 손실계수( $\eta_s$ )를 다음 식(1)로 구하였다.

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

### 3. DCSB 시험편의 유한요소 모사해석

Fig.2 와 같이  $y$  방향으로 일정한 폭을 갖고 한쪽 끝단을 완전고정한 대칭형 양팔 샌드위치보 2차원 시험편 모델에 대해 상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys Ver. 5.3 을 사용하여 횡진동해석을 수행했다. 고무층의 길이( $l_y$ )를 변수로 하고 보의 유효 길이( $L$ )는 100 mm로 일정하다고 가정하였다. 각 절점에서 2 개의 자유도(변위  $u, v$ )를 갖는 4 절점요소(Plane42)로 구성된 유한요소 메시는 각 보에서 요소 개수를 400 개( $x$  축방향 200 개  $\times$   $y$  축방향 2 개)로 하였다. 보와 고무층에서 한 개 요소 길이를 일정값 0.5 mm로 하며 고무층의  $y$  방향 개수는 4 개로 하였다. 예를 들어,  $l_y=10$  mm일 경우 고무층의 요소 개수는 80 개( $20 \times 4$ )이고  $l_y=100$  mm일 경우에는 고무층의 요소개수는 800 개( $200 \times 4$ )가 된다. 보의 탄성계수는 단일외팔 Steel 보(single cantilever steel beam)의 실험결과에서 구해진 공진주파수와 유한요소해석을 통한 공진주파수가 일치하도록 하는 조건하에서 각 모드별 단일 강보의 동탄성계수를 찾아 양팔 샌드위치보 시험편의 수치 모델에 입력하였다.

### 4. 고무의 동탄성계수 측정

EPDM 고무재료의 주파수별 동탄성계수를 정확히 구하기 위해서, 우선 정적 인장시험(JIS K 6301)에 의해 구한 정적탄성계수를 초기값으로 입력하였다. 유한요소수치 모달해석을 수행하여 구한 각 모드별 공진주파수값  $f_{(r)}^{elem}$  과 DCSB 시험편을 이용한 각 모드별 공진주파수의 실험값  $f_{(r)}^{exp}$  을 비교하고, 식(2)과 같이  $f_{(r)}^{exp}$  값과  $f_{(r)}^{elem}$  값의 오차( $\varepsilon$ )가 0.01%를 넘지않도록 보간법을 이용하여 고무층의 동탄성계수  $E_d$  를 구하였다.

$$\text{error } \varepsilon = \left| \frac{f_{(r)}^{elem} - f_{(r)}^{exp}}{f_{(r)}^{exp}} \right| \leq 0.01\% \quad (2)$$

또한, 외팔형 단일 강보에 대해서도 위와 같은 보간법으로 모드별 공진주파수마다 동탄성계수를 구하였다.

### 5. 고무의 손실계수 측정

고무의 재료손실계수  $\eta_d$  는 모달변형에너지법<sup>(5)</sup>을 통해 구했다. 모달변형에너지법은 땀땀이 없는 경우의 모달 해석을 통해 구한 계의 각 모드에서의 모드형상(mode shape)과 구조물의 각 부위에서의 재료 손실계수를 이용하여 전체 계의 손실계수를 구하는 방법으로 구조물의 복잡한 형상에 대해서도 계의  $r$  번째 모드의 손실계수를 구할 수 있으며, DCSB 시험편 계에서 고무층의 재료손실계수는

$$\eta_d^{(r)} = \left( \frac{U_{visco}}{U_{total}} \right) \eta_s^{(r)} \quad (3)$$

로써 구할 수 있다. 여기서  $U_{total}$  와  $\eta_s^{(r)}$  은  $r$  번째 모드에서 각각 계의 전체 스트레인에너지와 계의 손실계수이며,  $U_{visco}$  와  $\eta_d^{(r)}$  은  $r$  번째 모드에서 고무층의 스트레인 에너지와 재료손실계수이다.  $\eta_s^{(r)}$  은 sine-sweep 실험에 의해서,  $U_{total}$  과  $U_{visco}$  는 유한 요소해석에 의해 구하는 값이다.

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1 DMA 시험에 의한 EPDM 고무의 저장탄성계수와 손실계수 평가

Fig. 3은 DMA 시험으로 구한 EPDM-Hs61, -Hs65, -Hs72 고무에 대한 저장탄성계수(storage modulus)의 거동을 나타내고 있으며, 온도범위  $-100 \sim 200^\circ\text{C}$  에서 측정된 실험값이다. 주파수 1Hz, 상온 ( $23^\circ\text{C}$ ).

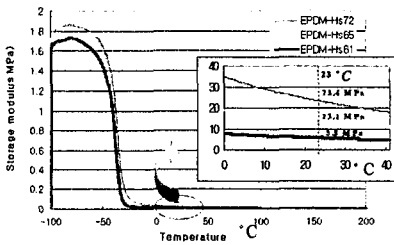


Fig. 3 Storage modulus of EPDM rubbers

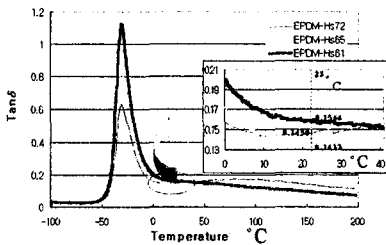


Fig. 4 Storage modulus of EPDM rubbers

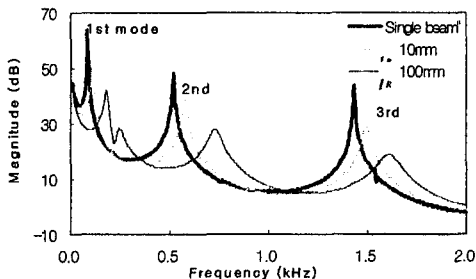


Fig. 5 Experimental frequency responses of a single steel beam specimen and DBSB specimens inserted with EPDM-Hs72 rubber

에서 고무의 저장탄성계수의 평균값은 EPDM-Hs61, -Hs65, -Hs72 고무별로 각각 5.8, 13.1, 23.4 MPa 을 보이고 있다. 한편, Fig.4 는 고무의 시험온도에 따른 재료손실계수( $\eta_d = \tan\delta$ )의 거동을 나타내고 있다. 각 고무별  $\eta_d$  값은 각각 0.157, 0.145, 0.143 이었다

### 6.2 DCSB 시험편을 이용한 고무의 동탄성계수와 재료손실계수 평가

#### 6.2.1 DCSB 시험편의 횡진동 주파수 응답거동

고무층이 접착되지 않은 단일강보(single steel beam)와 EPDM-Hs72 고무층이 시험편의 전체길이에 걸쳐 삽입 접착된 양팔 샌드위치보(DCSB) 시험편, EPDM-Hs72 고무층이 10mm 길이만큼 부분적으로 삽입 접착된 양팔샌드위치보(DCSB) 시험편의 3가지 시험편에 대해서 sine sweep 실험을 수행하여 구한 주파수응답거동 결과를 Fig.5 에 나타낸다.  $lv$ 가 커질수록 주파수응답곡선에서 극값의 주파수인 각 모드별 고유진동수(공진주파수)는 오른쪽으로 이동하여 커졌으며, 극값의 크기가 낮아지고 완만해져서 댐핑효과가 커졌음을 나타냈다.

#### 6.2.2 EPDM 고무의 동탄성계수와 재료손실계수

Fig.6 은 고무층이 전체적으로 접착된 DCSB 시험편( $lv=100\text{mm}$ )으로 구한 동탄성계수를 EPDM 고무의 종류에 따라 비교한 것이다. EPDM-Hs61 고무의 동탄성계수와 비교하여 -Hs65 고무의 경우는 약 2 배, -Hs72 고무의 경우는 약 4.5 배 증가했다. 또한 각 고무별 동탄성계수는 1Hz 에서 측정된 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 증가하여 동탄성계수의 주파수 의존성이 고무재료의 종류에 따라 다름을 알 수 있다.

Fig.7 은 고무층이 전체적으로 접착( $lv=100\text{mm}$ )된 시험편으로 평가한 고무의 재료손실계수를 고무의 종류별로 비교한 것이며, 주파수에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 EPDM-Hs61, -Hs65, -Hs72 의 시험편으로 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 경우,  $\eta_d$  가 가장 크고 주파수의 강한 의존성을 나타냈다.

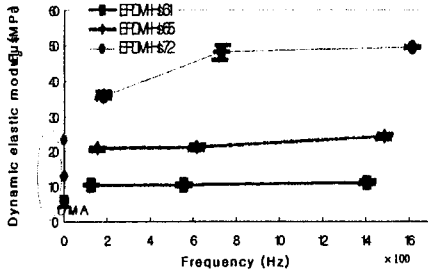


Fig. 6 Dynamic elastic modulus of the various rubbers evaluated by DCSB specimens fully inserted with rubber layer

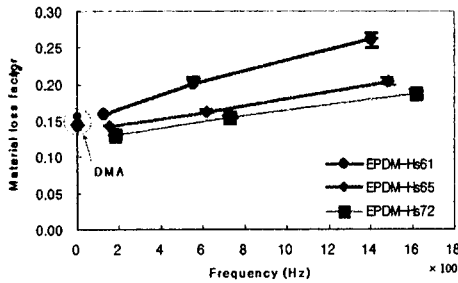


Fig. 7 Material loss factor of the various rubbers evaluated by DCSB specimens fully inserted with rubber layer

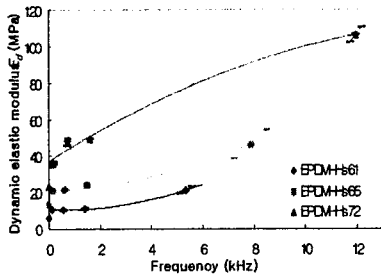


Fig. 8 Quadratic frequency dependence of dynamic elastic modulus of rubbers

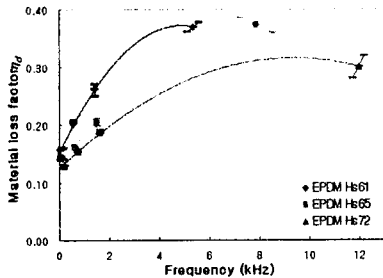


Fig. 9 Quadratic frequency dependence of material loss factor of rubbers

### 6.3 EPDM 고무의 동특성의 주파수 의존성

Fig.8 는 DCSB 시험편을 사용한 sine sweep 실험, 단순공진시험편을 사용한 sine sweep 실험을 통하여 구한 각 EPDM 고무의 동탄성계수를 주파수의 함수로 나타내고 있다. 또한 Fig.9 는 각 실험을 통하여 얻어진 각 고무재료에 대한 재료손실계수를 주파수의 함수로 나타내고 있다. 주파수 영역별로 얻어진 실험결과를 기준으로 최소자승오차법(least square error method)을 사용하여 재료의 동탄성계수와 재료손실계수를 주파수의 함수로서 가정하여 이차식으로 근사화하였다. 고무의 동탄성계수가 작을수록 재료손실계수는 커졌으며, 주파수가 커질수록 동탄성계수와 재료손실계수는 증가하는 거동을 나타냈다. 또한 고무종류에 따라 동탄성계수와 재료손실계수는 다른 주파수 의존성을 보여주었다.

## 7. 결론

본 논문에서는 고무의 동탄성계수와 손실계수의 주파수 의존성을 평가할 수 있는 새로운 양팔 샌드위치보 시험법을 개발하였다.

고무층이 삽입된 양팔 샌드위치보의 공진주파수는 각 모드별로 단일 강보의 공진주파수에 근접하게 나타났으며, EPDM 고무층의 길이가 길어질수록 계의 감쇠는 커졌다. 이와 같은 양팔 샌드위치보의 횡진동특성을 모드별로 측정하고 유효요소수치모사해석을 조합하여 삽입된 고무의 주파수별 동탄성계수와 재료감쇠계수를 주파수의 함수로 회귀시켜 평가할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Saito, H., Tani, H., 1984, *J. of Sound and Vibration*, Vol. 92(2), pp. 299~309.
- (2) Rao, M. D., Crocker, M. J., 1990, *Trans. of the ASME, J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 112, pp. 444~451.
- (3) 박 정일, 최낙삼, 1999, 한국복합재료학회지, 제 12 권, 제 2 호, pp. 26~35.
- (4) Mario, Paz, 1997, *Structural Dynamics: Theory and Computation*, Chapman & Hall, New York.
- (5) Conor D. Johnson, David A. Kienholz, 1992 *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 9, pp. 1284~1290