

## 엔진마운트 고무부품의 내구 평가 및 동적 특성 예측

김 춘 휴<sup>\*1)</sup> · 김 기 주<sup>1)</sup> · 정 호 태<sup>2)</sup> · 김 철 웅<sup>3)</sup> · 손 일 선<sup>4)</sup> · 김 중 배<sup>5)</sup>

쌍용자동차 CAE팀<sup>1)</sup> · 강릉대학교 금속재료공학<sup>2)</sup> · 고려대학교 기계공학과 & 유엔아이(주) 고려대연구소<sup>3)</sup>  
오산대학 자동차기계계열 · 심장동력 특성화사업단<sup>4)</sup> · 동양공업전문대학 기계설계과<sup>5)</sup>

### Prediction of Durability, Static and Dynamic Properties on Rubber

Choonhyu Kim<sup>\*1)</sup> · Kee Joo Kim<sup>1)</sup> · Hyo-Tae Jeong<sup>2)</sup> · Cheol-Woong Kim<sup>3)</sup> ·  
Il-Seon Sohn<sup>4)</sup> · Joongbae Kim<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>CAE Team, Ssangyong Motor Co., 150-3 Chilgoi-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea

<sup>2)</sup>Department of Metallurgical Engineering, Kangnung National University, Gangwon 210-702, Korea

<sup>3)</sup>Mechanical Eng., U&I Corporation Research Center, Korea University, Seoul 130-701, Korea

<sup>4)</sup>School of Automotive & Mechanical Engineering, Osan College, Gyeonggi 447-749, Korea  
Center for Growth Power Characterization

<sup>5)</sup>Department of Mechanical Design, Dongyang Technical College, Seoul 152-714, Korea

(Received 27 December 2005 / Accepted 3 July 2006)

**Abstract** : Rubber materials have the nonlinear, large deformation and viscoelastic behavior. W.D. Kim et al.<sup>1)</sup> studied these characteristics through the static, fatigue, dynamic, aging and viscoelastic test. This paper discussed that the properties of engine mounting rubber, such as static stiffness, fatigue life and damping factor, are predicted based on CAE by using material properties acquired by the report of Kim et al. In result, the static stiffness of engine mounting rubber is predicted approximately in comparison with test value. Also, it was confirmed that the relationship of fatigue life and Green-Lagrange strain in specimen was the valid tool to predict the fatigue life of engine mounting rubber. From the results of transient viscoelastic analysis the damping factor changed rapidly at the range less than 8hz.

**Key words** : Durability(내구), Engine mounting rubber(엔진 마운트), Nonlinear(비선형), Large deformation(대변형), Viscoelastic (점탄성), CAE(Computer Aided Engineering)

### 1. 서론

고무는 자동차에서 하중 지지 및 진동 절연재질로서 엔진 마운트, 바디 마운트 등으로 널리 사용되며, 비선형, 대변형 및 점탄성 특성을 가지고 있다. 이런 특성에 의해 같은 재질일지라도 하중 조건에 따라 물성이 변하기 때문에, 고무 소재에 대한 다양한 물성 시험이 수행되어야 하고 데이터 베이스를 구축해야 하는 등 이에 대한연구는 그 복잡성으로

인해 많은 어려움이 따르는 상황이다.<sup>1)</sup> 이런 다양한 기초 물성확보의 어려움으로 인해 고무류 부품의 정적 특성 및 동적 특성을 CAE(Computer Aided Engineering)로 예측하는데 상당히 어려움이 있었다.

차량에서 엔진이 적절하게 구속되지 않거나 절연되어 있지 않으면, 차체에 진동을 일으키는 원인이 된다. 엔진은 다양한 모든 것들을 고립(isolation)시키는 역할을 해야 하며, 엔진의 정적인 장착 하중에 대한 지지와 전후, 좌우 및 수직 방향의 운동에 대해 적절한 강성을 가져야 한다. 또한, 정숙성을 향상시

\*Corresponding author, E-mail: chhkim@smotor.com.

키기 위해서는 엔진 마운트의 재료인 고무의 강성 계수를 낮추는 것이 필요한데 이는 일반적으로 내구성의 저하를 가져온다. 따라서 개발 과정에서 강성계수를 낮추는 변경을 하면 부품의 내구성을 보정함에 따르는 재평가 또한 필요하게 된다. 엔진 마운트에 쓰이는 고무부품의 해석은 엔진 마운트 시스템에 대한 내구수명의 예측과 병행해야 하며, 주어진 조건에 대한 형상의 최적 설계능력 등이 요구된다.<sup>2,4)</sup> 지금까지 대부분의 엔진 마운트를 비롯한 고무 부품의 설계 및 내구수명의 예측은 고무 재료의 복잡한 특성 때문에 경험과 실험에 의존해 왔다. 이러한 시행 착오적인 방법으로 인한 개발 기간의 장기화와 재료 손실 등을 고려할 때, 보다 체계적이고 분석적인 방법이 요구된다.<sup>5,6)</sup> 최근에는 컴퓨터의 고속화와 대형화에 따라 유한요소법에 의한 비선형 해석이 실용화되어 실제 설계에 이용되고 있으며, 그 적용 범위가 고무나 플라스틱으로까지 확대되고 있다.<sup>7-9)</sup>

본 논문에서는 국가지정연구실사업의 고무류 기계부품의 통합설계 시스템 연구 과제에서 제시한 고무 시편의 정적 시험, 동적 시험결과를<sup>1)</sup> 유한요소 해석(FEM)의 인풋으로 응용하여 정적 강성, 정적 내구수명 및 동적 특성을 예측 및 고찰하고자 한다.

## 2. 고무의 특성

고무의 비선형, 대변형 거동은 금속재료에 응용한 탄성변형 이론을 이용하여 변형률 에너지 밀도 함수로서 표현할 수 있다. 이 함수를 변형률로 미분함으로써 응력-변형률 관계를 나타낼 수 있다. 이 에너지 밀도 함수로서 Mooney-Rivlin, Ogden 모델이 널리 사용되고 있다.

### 2.1 정적 재료 모델

Mooney-Rivlin 모델은 식 (1)과 같이 변형률 에너지 함수(W)를 변형률의 불변량으로 표현한다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

여기서, I는 변형률 불변량이고 고무를 비압축성 재료( $\nu \approx 0.5$ )로 가정하면  $I_3=1$ 이 된다.<sup>2)</sup> 변형률 에

너지 밀도와 응력과의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = \partial W / \partial E \quad (2)$$

여기서, 응력  $\sigma$ 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력이며, E는 그린-라그랑지(Green-Lagrange, G-L) 변형률이다.

$$E = (\lambda^2 - 1)/2 = \epsilon(\epsilon + 2)/2 \quad (3)$$

$$\sigma = \bar{\sigma} / \lambda \quad (4)$$

여기서,  $\lambda$ 는 주연신률,  $\epsilon$ 은 변형률,  $\bar{\sigma}$ 는 공칭 응력이다. Fig. 1은 주연신율과 응력의 전형적인 관계를 나타내었다. 단순 전단인 경우, 전단응력이 전단 변형률에 비례하고, Hooke's Law가 성립되므로, 전단계수 G 및 종탄성계수 E는 다음과 같다.

$$G = 2(C_{01} + C_{10}) = E / 3 \quad (5)$$

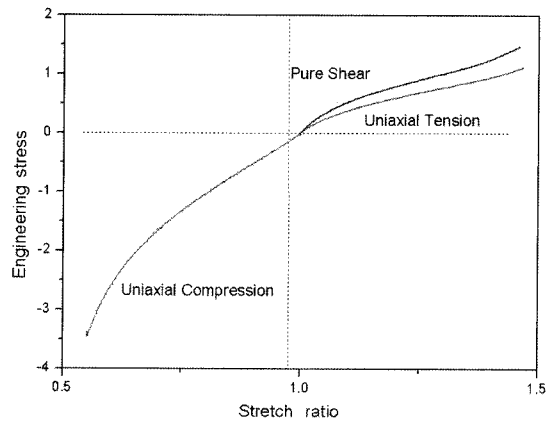


Fig. 1 Typical static behavior of rubber materials

### 2.2 동적 특성 모델

고무는 비선형 정적 특성 외에 시간에 따라 물성이 변하는 점탄성 특성을 가지고 있다. 점탄성 거동을 표현하는 기계적 등가 모델은 Maxwell 모델, Kelvin(Voigt) 모델 및 standard linear 모델이 있다. 이 중 standard linear 모델은 위의 두 모델을 결합한 모델로서 고무의 특성을 잘 나타낸다. 동적 특성은 저장 탄성계수(storage Modulus), 손실계수(loss Modulus)로 나타내어지는 복소 탄성계수(complex Modulus)로 표현된다. 복소 탄성계수는 주로 온도, 주파수, 진폭, 평균 변형률에 대한 의존성이 높다.

$$G(\omega)^* = G_1(\omega) + iG_2(\omega) = G_1(\omega) + i\eta G_1(\omega) \quad (6)$$

여기서  $G^*$ 는 복소 전단계수,  $G_1$ 은 저장 전단계수,  $G_2$ 는 손실 전단계수,  $\eta$ 는 손실계수이다. 식 (6)은 다음과 같은 Prony series의 라플라스 변환식인 무차원 주파수 함수로 표현된다.

$$G_1(\omega)/G_0 = [1 - \sum_{i=1}^N g_i^P] + \sum_{i=1}^N \frac{g_i^P \tau_i^2 \omega^2}{1 + \tau_i^2 \omega^2}$$

$$G_2(\omega)/G_0 = \sum_{i=1}^N \frac{g_i^P \tau_i \omega}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (7)$$

여기서,  $G_0$ 는 순간( $t \approx 0$ ) 전단계수이고,  $g_i^P$ 는 무차원 탄성계수비,  $\tau_i$ 는 시간상수이며, 시험을 통해 얻은 동적 전단계수를 식 (7)을 이용하여 구한다. Fig. 2는 식 (7)의 이해를 돕기 위하여 고무의 전형적인 동적 특성을 각 상수와와의 관계로 나타내었다.

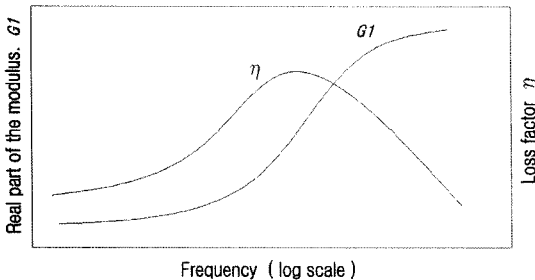


Fig. 2 Typical dynamic properties of Rubber<sup>1)</sup>

### 3. 고무의 특성

#### 3.1 정적특성 및 정적 내구특성

고무의 정적 특성은 기본적으로 KS<sup>11)</sup>, JS 및 ASTM<sup>12)</sup>의 규격에 따르며, 단순 인장, 압축 시험과 2축 인장 시험<sup>13)</sup> 및 순수 전단 시험<sup>1)</sup>을 수행하여 구할 수 있다. Fig. 3은 본 연구에서 고무 경도 40, 50, 60에 대해 단순 인장, 압축, 순수 전단 시험을 통해 구한 Ogden 함수의 3차 상수를 이용한 계산을 통해 단순 인장의 공칭응력-변형률을 계산한 결과를 나타내었고, Table 1은 본 연구에서 이용한 실험을 통하여 구한 물성을 토대로 계산에 사용된 Mooney-Rivlin 소재 특성 상수값을 나타내었다.

고무부품의 내구 수명은 소재 경도, 평균 변형률,

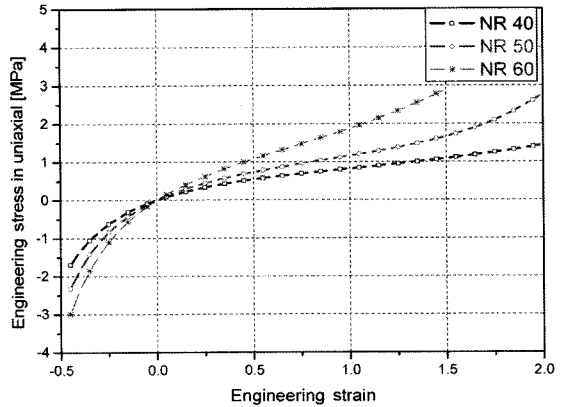


Fig. 3 Engineering stress-strain relation of rubber

Table 1 Static properties of rubber

Hardness	C10 (MPa)	C01 (MPa)	E (MPa)	$\nu$
40	0.305	0	1.83	0.499
50	0.414	0	2.48	0.499
60	0.610	0	3.66	0.499

진폭, 최소 변형률에 따라 변하기 때문에, 이들 모든 인자들을 고려한 내구 수명 예측은 상당한 어려움이 있다. 그러나, C.S Woo, W.D Kim 등<sup>1,14)</sup>은 Fig. 4와 같이 장구형 시편에 대한 내구 시험을 통하여 피로수명 대 최대 G-L 변형률로 식 (8)과 같이 표현하였다. 이 변형률이 위의 인자와 상관없이 고무 재료의 피로수명을 잘 표현함을 계산을 통해 확인할 수 있었다.

$$N_f = 1096(E_{G-L}/E_{b,G-L})^{-2.22} \quad (8)$$

여기서,  $E_{G-L}$ 은 최대 G-L 변형률,  $E_{b,G-L}$ 은 각 경도에서 파단 될 때의 G-L 변형률이다. Fig. 4는 장구 시편을 이용하여 최대 G-L 변형률을 각 소재가 파단 될 때까지의 G-L 신율로 나누어 피로 수명과 무차원 G-L 변형률을 나타내었다. Fig. 5는 Fig. 4에서 무차원화 변수로서 사용된 G-L 신율을 Hardness 변화에 따라 나타내었다. 계산결과가 내구특성 그림의 경향을 잘 반영하고 있음을 알 수 있으며 경도의 값이 높을 수록 G-L 변형률값도 높다.

#### 3.2 동적 특성

고무의 동적 물성은 일반적으로 저장 탄성계수와

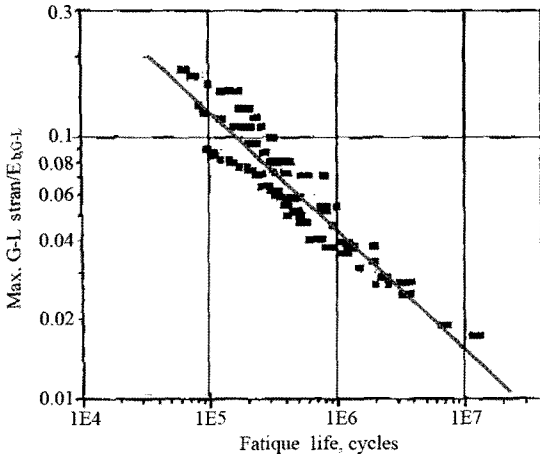


Fig. 4 Relation between fatigue life and G-L strain

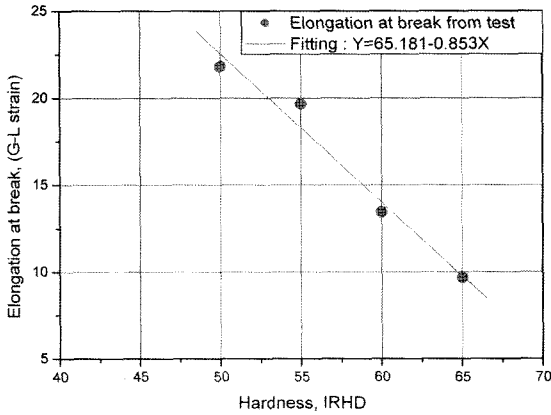
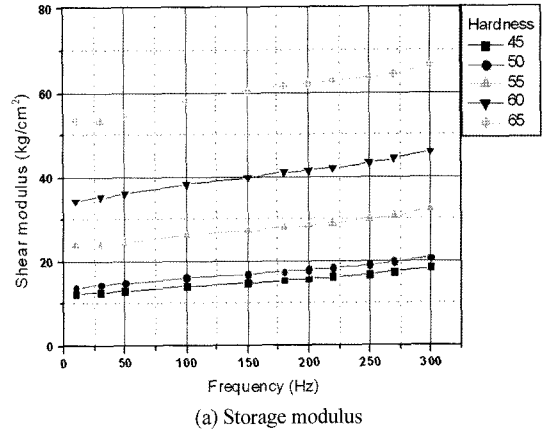


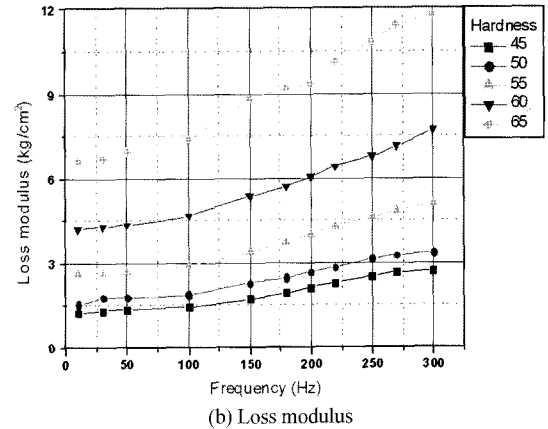
Fig. 5 Relation between hardness and elongation

손실 탄성계수로 나타내어지는 복소 탄성계수로 표현된다. C.S Woo, W.D Kim 등<sup>1,14-16)</sup>은 하중-변위 곡형을 이용하는 강제진동 비공진법 시험으로부터 평균 변형률, 변형률 진폭, 경도, 하중 특성에 대해 저장 탄성계수, 손실 탄성계수 및 고무의 감쇠 정도를 표현하는 손실계수를 주파수에 따라 구하였다. 이들 연구에 따르면, 평균 변형률, 변형률 진폭의 증가에 따라 저장 탄성 계수 및 손실계수가 감소하고, 소재 경도가 높을수록 그 정도가 심하였다. 특히, 변형률 진폭 2%에서 손실계수가 최대가 되며 그 이후에는 감소하는 특징을 보였다.

Fig. 6에는 동적 특성 시험(DMA Test) 결과, 10%±0.1% 변형률 가진으로 고무 소재 별 주파수에 따른 저장 전단계수와 손실계수를 나타내었다.



(a) Storage modulus



(b) Loss modulus

Fig. 6 Dynamic shear modulus of rubber from test

## 4. 엔진 마운트의 특성 예측

### 4.1 정적 특성 및 내구 예측

엔진 마운트의 정적 특성 및 내구를 유한요소법을 사용하여 예측하는데 있어서, 고무의 비선형 재료 모델을 이용하여 해석을 수행해야 하나, 엔진 마운트는 통상 50% 이하의 변형을 받으며, 비선형 재료 모델과 선형 재료 모델로 계산한 정적 강성의 미소한 차이와 해석 시간의 단축을 위하여 Mooney-Rivlin 상수를 이용하여 선형 재료 모델로 치환하여 수행하였다. 본 연구에서 해석에 사용된 엔진마운트의 물성은 Table 1에 나타난 경도 60에 대한 값을 사용하였으며<sup>1,15,16)</sup>, 본 실험결과를 응용하여 2차 Tetra 요소 및 상용 프로그램인 Nastran을 이용하여 정적강성 및 내구수명을 계산하였다.

Fig. 7에 내구수명 평가를 위한 엔진 마운트의 변

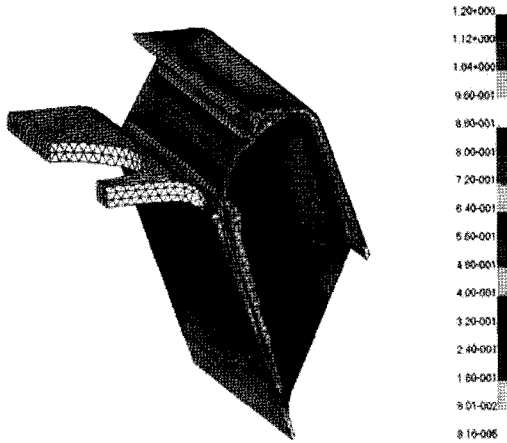


Fig. 7 Strain contour after simulation

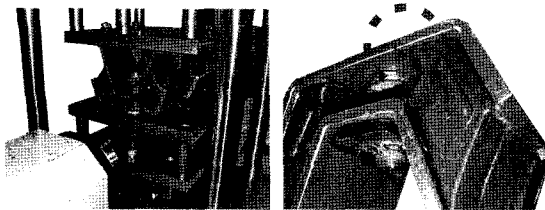


Fig. 8 1±1.5G Fatigue life test of engine mounting

형률 계산결과를 나타내었는데, 크랙 부위의 최대 변형률은 1.03으로 계산되었다.

Fig. 8은 엔진 마운트의 내구 시험 모습과 약 525,000 cycles에서 발생한 크랙을 나타내었는데, Fig. 7에서 최대변형률을 나타내는 부위와 동일한 위치에서 크랙이 발생한 것을 알 수 있었다.

식 (3)으로부터 주연신율을 구하여 Fig. 5와 식 (8)로부터 내구수명을 예측하였다. Table 2는 위의 해석(FEM)결과로부터 계산된 정적강성 및 내구수명 값을 시험결과와 비교하였으며 오차범위내에서의 값으로 예측되었다. 고무 부품의 정적특성 예측은 Mooney-Rivlin 상수를 이용한 고무의 물성상수 값을 계산에 활용시 오차의 범위를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 상수를 이용한 예측 해석을 활용하면 제품 개발 초기에 설계 시행착오를 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단되며 제품 설계를 최적화시킬 수 있을 것이다.

#### 4.2 동적 특성 예측

동적 특성은 시간 영역의 점탄성 해석과 주파수

Table 2 Prediction of static stiffness of engine mounting

	Test	CAE	Error
Static stiffness (N/mm) For Hs 60	220.3	212.8	3.4%
Fatigue life, cycles for Hs 40	525,000	467,600	10%

영역의 점탄성 해석을 통해 예측할 수 있다. 시간 영역의 점탄성 해석은 응력 이완 및 creep test를 수행하여 prony series의 마스터 곡선을 구하며 이로부터 고무부품의 동적 특성을 예측한다. 그러나, 이 방법은  $t \approx 0.0001$ 에서의 시험 값 측정에 상당한 어려움과 추가적인 시험결과를 필요로 하고 있다. 조화가진 하중을 받는 고무부품의 동적특성은 3.2절에서의 주파수 영역의 동적시험에서 얻어지는 저장 탄성계수, 손실 탄성계수를 이용하여 예측할 수 있으며, 시간 영역 점탄성 해석의 경우에 비해 시험 측정이 쉬운 장점을 가지고 있다. 본 해석에서는 경도 50의 주파수 영역의 동적 시험 data를 이용하여 비선형 상용 소프트웨어 ABAQUS를 통해 무차원 prony series의 인자를 계산하고, 과도 점탄성 해석을 통해 엔진 마운트의 동적 특성을 예측하였다. 해석에서 사용한 엔진 마운트의 고무 모델은 경도 50이고, 두께 50mm인 2차원 평면변형(plane strain) 요소를 사용하였고, 재료는 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다. 경계조건은 4±1mm의 변위제어로 가진하였다. 경도 50에 대한 prony series 상수와 엔진 마운트의 정적, 동적 특성 해석결과를 Table 3, 4와 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 9는 각 주파수에 따라 하중-변위 선도를 나타내고 있는데, 그래프에서 주파수가 증가함에 따라

Table 3 Prony constants of rubber(Hs 50)

i	1	2	3
$g_i^P$	0.281	0.105	0.106
$\tau_i$	0.0008	0.0169	0.3671

Table 4 Dynamic properties of engine mounting

@ 30 Hz		Test	CAE	Error
Stiffness (N/mm)	Static	223.4	260.0	16%
	Dynamic	309.5	460.8	49%
Loss factor		0.1007	0.0970	4%
Damping (Ns/mm)		0.1548	0.1970	27%

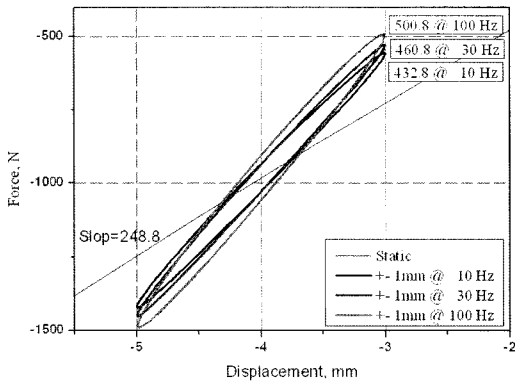


Fig. 9 Force-displacement of engine mounting

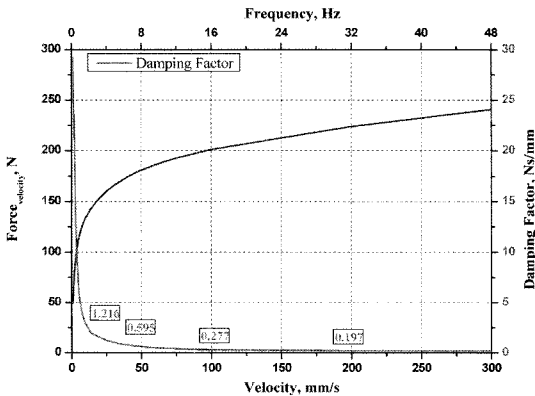


Fig. 10 Damping change for engine mounting

동적 강성이 증가함을 알 수 있으며 이는 고무의 점탄성 성질 때문이다. Fig. 10은 주파수 또는 속도에 따른 감쇠력 및 감쇠 상수의 변화를 나타내고 있으며, 8Hz 또는 10 mm/s 이하에서 이들 특성이 급격히 변화함을 알 수 있었다. 이는 고무에 동특성이 부여 되면 고분자재료인 고무의 체인구조가 풀리거나 회복되는데 용이한 일부 주파수에서 나타나는 현상이다. 동적 특성 예측이 시험과의 정확도를 높이기 위해서는 보다 정확한 물성의 확보와 고무의 시간에 따른 혹은 변형량에 따른 가변적인 물성의 차이를 용도에 맞게 잘 이용할 때 그 차이를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 또한 시편의 동적 시험에서 정확한 전단계수 측정이 이루어져야 할 것이다.

### 5. 결론

- 1) 고무 시편에 대한 비선형, 대변형 특성과 함께 시

간에 따라 변하는 점탄성 특성 등을 이용하여 엔진 마운트의 정적 특성, 정적 내구 수명 및 동적 특성을 CAE로 예측 및 그 기법을 제시하였다. 이와 같은 방법으로 다른 고무류 부품에 대해서도 그 특성을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

- 2) 해석결과와 실험결과와의 비교를 통하여 시편의 G-L 변형률과 피로 수명과의 관계식이 엔진 마운트의 내구 수명을 예측함에 있어서 유용한 방법임을 알 수 있었다.
- 3) 시편의 동적 물성을 이용하여 엔진 마운트의 동적 거동을 예측하는 기법을 제시하였으며 이를 제품 설계에 응용한다면 요구되는 내구수명에 맞추어 신뢰도 높은 설계에 기여할 것으로 판단된다.
- 4) 동적 특성 예측이 시험과의 정확도를 높이기 위해서는 보다 정확한 물성의 확보와 고무의 시간에 따른 혹은 변형량에 따른 가변적인 물성의 차이를 용도에 맞게 잘 이용할 때 그 차이를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 또한 시편의 동적 시험에서 정확한 전단계수 측정이 이루어져야 할 것이다.

### References

- 1) W. D. Kim, C. S. Woo and W. S. Kim, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components," National Research Laboratories Project Report, Korean Institute of Machinery & Materials, 2004.
- 2) H. Y. Kim and J. J. Kim, "Optimized Shape Design and Endurance Life Prediction of Engine Mount Rubber," KSAE, Vol.18, No.6, pp.23-32, 1996.
- 3) J. H. Choi, H. J. Kang, H. Y. Jeong and T. S. Lee, "Heat Aging Effects on the Material Property and the Fatigue Life of Vulcanized Natural Rubber and Fatigue Life Prediction Equations," J. of Mechanical Science and Technology, Vol.19, No.6, pp.1229-1242, 2005.
- 4) H. Kim and H. Y. Kim, "Formulation of Tearing Energy for Fatigue Life Evaluation of Rubber Material," Journal of KSAE, Vol.29,

- No.8, pp.1132-1138, 2005.
- 5) J. J. Kim and H. Y. Kim, "Shape Optimization of Engine Mount Rubber Using Shape Parameter Method," Transactions of KSAE, Vol.2, No.2, pp.33-41, 1993.
  - 6) J. J. Kim, H. Y. Kim and C. Choi, "Computer Aided Shape Design of Engine Mounting Rubber," SAE Conference, Oct. 25-27, Dearborn, Michigan (93MJA84) 1993.
  - 7) T. Scharnhorst and T. H. Pian, "Finite Element Analysis of Rubber-like Materials by a Mixed Model," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.12, pp. 665-676, 1978.
  - 8) B. Haggblad and J. A. Sundberg, "Large Strain Solutions of Rubber Component," Comp. Struct. Vol.17, pp.835-843, 1983.
  - 9) S. R. Swanson, L. W. Christensen and M. Ensign, "Large Deformation Finite Element Calculations for Slightly Compressible Hyperelastic Materials," Comput. Struct. Vol.21, pp.81-88, 1985.
  - 10) Ajit K. Mal, Sarva Jit Singh, "Deformation of Elastic Solids," Prentice Hall PTR, 1990.
  - 11) "Physical Testing methods for vulcanized rubber," Korean Industrial Standard M 6518, 1996.
  - 12) "Standard Test Methods of Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers - Tension," ASTM D412, 1998.
  - 13) J. Day and K. Miller, "Equibiaxial Stretching of Elastomeric sheets, an Analytical Verification of and Experiment Technique," ABAQUS Users Conference Proceeding (June), pp.205-220, 2000.
  - 14) C. S. Woo, W. D. Kim, W. S. Kim and J. D. Kwon, "Effects of Maximum Strain and Aging Conditions on the Fatigue Life of Vulcanized Natural Rubber," Trans. KSAE, Vol.12, No.4, pp.181-190, 2004.
  - 15) C. Woo, W. Kim and J. Kwon, "A Study on the Fatigue Life Prediction and Evaluation of Rubber Components for Automotible Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.13, No.6, pp.56-62, 2005.
  - 16) C. Woo, W. Kim, W. Kim and J. Kwon, "Effects of Maximum Strain and Aging Conditions on the Fatigue Life of Vulcanized Natural Rubber," Transactions of KSAE, Vol.12, No.4, pp.181-190, 2004.