

유한요소해석을 위한 고무재료시험

김완두* · 김완수* · 우창수* · 이학주*

Experimental Testing of Rubber Materials for Finite Element Analysis

Wan-Doo Kim, Wan-Soo Kim, Chang-Soo Woo, Hak-Ju Lee

Key Words: Tension Test(인장시험), Compression Test(압축시험), Pure Shear Test(순수전단시험), Specimen(시편), Finite Element Analysis(유한요소해석), Conditioning(컨디셔닝)

Abstract

Experimental methods to determine non-linear properties of rubber materials for finite element analysis is discussed. In simple tension tests, dumbbell specimens are generally used to obtain states of pure tension strain. It is shown that the strip specimens of which length is over 10 times of the width can be also used. In simple compression tests, the effect of the friction between the test specimen and the platens is investigated. the new test method with the tapered platen is proposed in order to overcome the effect of friction and it is verified by experimental and finite element analysis results. In pure shear tests, it is shown that the width of the specimen must be at least 10 times of the height. The mechanical conditioning is suggested to stabilize the properties of the rubber materials. Also, engine mount for automotive is analyzed and experimented for each cases.

기호설명

- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: 주 연신률
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 각 방향에서의 공칭 응력
 L_0, L : 초기 표점길이 및 변형 후 길이
 t_0, t : 초기 두께 및 변형 후 두께
 P, A_0 : 외력 및 초기 단면적
 I_1, I_2, I_3 : 주 연신률의 불변량

1. 서론

탄성 범위 내에서 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 일반적인 재료와는 달리 고무재료는 하중과 변형이 비 선형 관계를 보이는 대변형(large deformation) 범위에서도 탄성 거동을 나타내는 초탄성(hyperelastic) 특성을 지닌다.

고무재료의 거동은 비 선형, 비 압축성, 대변형의 특성을 지니고 있으며 그 양상이 고무의 성분에 따라 큰 차이를 나타내고 있어 고무 부품의 유한요소 해석을 위해서는 부품과 동일한 시편의 물성 시험이 필수적이다. 또한 이러한 물성시험으로부터 얻어진 하중-변위 관계를 가장 적절히 표현할 수 있는 변형을 에너지 함수(strain energy function)를 찾는 일이 중요하다¹.

본 논문은 천연가황고무를 이용한 고무 부품의 유한요소 해석 시 필요한 기본 물성을 얻기 위해서 세 가지 기본시험인 단순 인장, 단순 압축, 순수 전단 시험을 할 때 적절한 시편과 치구의 형상을 제안하였다. 또한 안정화(stable)된 물성을 얻기 위해 여러 변형을 구간에서 반복하중을 가하는 기계적 컨디셔닝(mechanical conditioning)이 재료의 물성에 어떻게 영향을 주는지도 알아보았다. 이렇게 얻어진 각 조건의 재료의 물성으로 상용 프로그램인 MARC2000을 이용하여 자동차 엔진마운트의 유한요소해석을 수행하였고 시험을 통해 부품의 변위-하중관계와 비교·분석하였다².

* 한국기계연구원 기계구조그룹

2. 기본 물성 시험

고무재료의 기본 물성 시험을 하기 위해서 IRHD(International Rubber Hardness Degrees)가 60인 천연가황고무를 사용하였다. 시편의 경도는 같은 배합조건이라 할지라도 편차가 있기 때문에 부품의 고무 경도와 인장, 압축, 전단시편의 경도가 모두 같아야 하며 가황 후 최소 16시간 이상 경과된 시편을 사용하여야 한다³.

2.1 단순인장 시험

2.1.1 시편 및 치구 설계

단순인장 시험 시편에는 KS M6518에서는 아령형(dumbbell specimens)과 고리형(ring specimens)을, ASTM D412에서는 추가적으로 직선형(straight specimens)을 제안하였으며 속도는 500mm/min로 하고 있다. 아령형은 그림에 고정하기가 쉽고 인장 시 균일한 압력으로 시편을 잡을 수 있으며 그림과의 미끄러짐 현상을 줄일 수가 있지만 익스텐소미터(extensometer) 장비가 필수적이며, 고온 및 저온 환경에서 시험할 때는 비접촉식 익스텐소미터가 필요하게 되는데 이는 고가의 장비일 뿐만 아니라 번거로운 얼라인먼트 과정을 거쳐야 한다.

Fig. 1 (a)에서는 레이저 익스텐소미터와 함께 KS 3호 아령형 시편을, (b)에서는 익스텐소미터 없이 폭10mm, 길이 100mm 즉, 형상비가 1:10인 strip 시편을 가지고 인장시험을 하는 모습이다. 아령형 시편의 경우 기존의 편심 롤러그립을 이용하였고 strip 시편의 경우는 자체 제작한 그림을 사용하였다. 이것은 strip 시편을 이용할 때는 그림사이의 거리가 변형율로 계산되므로 인장 시 미끄러지면 안되기 때문이다.

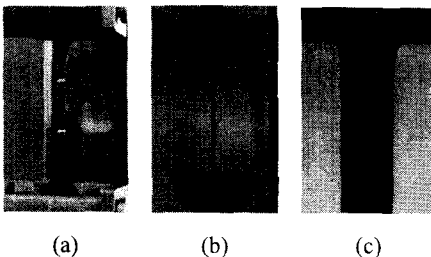


Fig. 1 Tension test

Strip 시편은 Fig.1 (c)와 같이 그림에 고정하는 부위는 구속으로 인하여 식(1), (2)와 같이 순수한

단축 인장 변형 상태가 되지 않지만 유한요소 해석 결과 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 하중-변위 관계에 주는 오차는 형상비가 1:10인 경우 1%이하이다.

$$\lambda_2 = \lambda = L/L_0, \quad \lambda_1 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma = P/A_0, \quad \sigma_1 = \sigma_3 = 0 \quad (2)$$

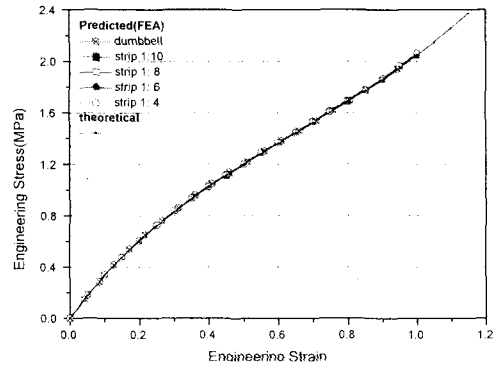


Fig. 2 Predicted curves in tension test

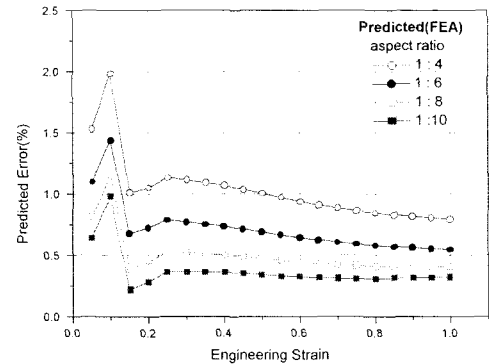


Fig. 3 Predicted error between dumbbell and strip specimens

실제 실험에서는 그림과 물리는 부위의 미끄러짐 현상으로 인하여 Fig. 4와 같이 동일한 변형율에서 아령형보다는 strip형의 응력이 낮게 나온다. 따라서 이러한 미끄러짐 현상을 최소화시키기 위해서 아령형처럼 그림과 물리는 부분의 면적을 크게 해야 할 필요가 있다.

기존에 아크릴이나 철판을 이용하여 고무시편을 부착하였는데 이러한 재료는 고무와 재질이 틀리며 미세한 기공으로 인해 접착효과가 떨어지는 단점이 있었다. 경도가 높은 고무판재를 이용하면 부착능력을 향상시킬 수 있지만 인장 시 접착되는 부위에서 균열이 발생하여 100% 이상의 변형을 범위에서는 한계성을 가지고 있다. 따라서, 근본적인 방법으로 용융상태에서 고무를 철

판에 사출시켜 풀딩하는 방법을 이용한다. 결국, 인장시험이 인장강도나 신장율을 측정하는데 목적을 두지 않고 유한요소 해석을 위한 재료의 응력-변형을 관계를 구하는 것이라면 익스텐소메터 없이 strip 시편을 이용하여 시험할 수 있음을 알았다.

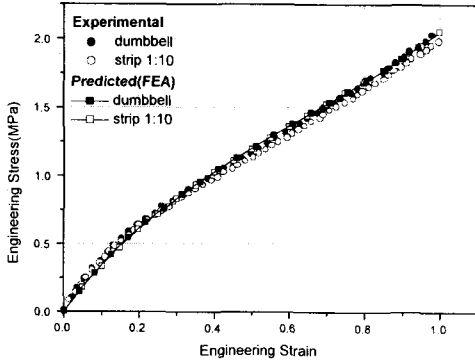


Fig. 4 Experimental curves in tensile test

2.1.2 최대 변형율에 따른 반복하중 효과

고무재료는 반복적으로 하중을 주었을 때 응력-변형률선도가 변하다가 나중에 일정한 관계를 유지하는데 보통 3~20회 정도의 반복하중을 주면 안정화된 분포를 가진다. 또한 반복하중을 주어 재료를 안정화시킬 때 변형을 범위에 따라서도 응력-변형률 선도가 달라지는데 Fig. 5는 컨디셔닝을 하지 않은 것과 변형을 범위가 각각 25%, 50%, 100%, 200%범위 내에서 5번의 반복하중을 주어 재료를 안정화시킨 후 얻어진 응력-변형률 관계선도이다.

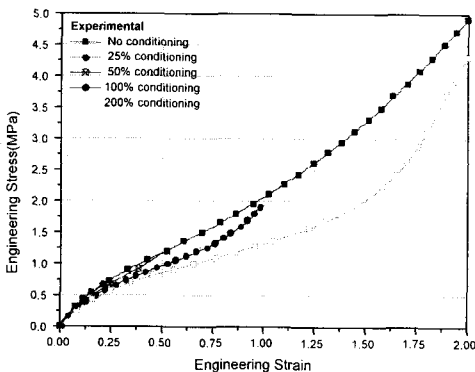


Fig. 5 Conditioning effect in tension test

25% 변형을 범위 내에서의 안정화된 데이터는 컨디셔닝을 하지 않은 결과와 거의 비슷하게 나왔으나 나머지 구간에서는 동일한 변형율에서 응

력이 점점 낮아지는 것을 볼 수 있다.

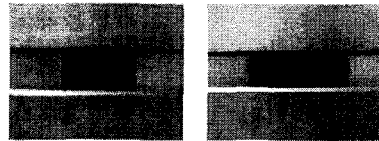
이러한 특성은 고무 부품의 유한요소 해석 시 중요한 문제가 되는데 어떠한 고무부품이 25% 범위내의 작은 변형을 범위 내에서 사용된다면 100% 또는 과단 바로 전 단계의 범위 내에서 반복하중을 주어 안정화시킨 응력-변형을 곡선의 사용은 적합하지 않다는 것이다.

2.2 단순 압축 시험

2.2.1 시편 및 치구 설계

압축시험은 인장시험과 마찬가지로 단축 응력-변형을 상태를 구할 때 사용된다. ASTM D575에서 두께 $12.5 \pm 0.5\text{mm}$, 직경 $28.6 \pm 0.1\text{mm}$ 의 시편을 $12 \pm 3\text{mm/min}$ 의 속도로, KS M6518에서는 두께 $12.7 \pm 0.13\text{mm}$, 지름 $29.0 \pm 0.2\text{mm}$ 인 시편을 10mm/min 속도로 시험하는 것을 제안하고 있다.

압축시험은 인장시험 보다는 장비가 비교적 덜 필요하지만 시편과 압축판 사이의 마찰로 인하여 압축 변형 시 식(1)과 같이 순수한 단축 변형 상태를 유지할 수 없어 Fig. 6(b)와 같이 배부름(barrelling) 현상이 일어난다. 접촉 마찰을 줄이기 위해 기존에 오일, 그리이스, 고체윤활제 등을 이용하지만 이 또한 엄밀하게 말하면 마찰계수가 0이라 할 수 없다.



(a) 초기 상태 (b) 50% 압축

Fig. 6 Barrelling in compression test

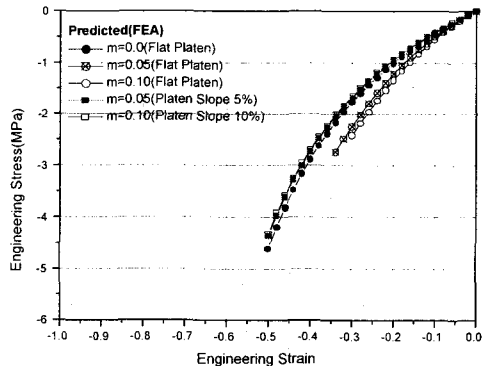


Fig. 7 Analysis of the friction and taper angle effects in compression test

이러한 윤활 방법으로는 한계가 있어 마찰력과

시편에 가해지는 압축력의 합력의 방향이 일정하도록 압축판을 마찰계수 값에 상당하는 각도를 주어 제작하였다. Fig. 7은 경사진 압축판을 사용하여 압축시험을 실시한 경우의 예상되는 압축 응력-변형을 선도이다. 유한요소 해석결과 5% 기울기의 압축판에 마찰계수가 0.05일 때와 10% 기울기의 압축판에 마찰계수가 0.1일 때는 평판 압축판에서 마찰계수가 0일 때와 비슷한 결과가 예측되었다.

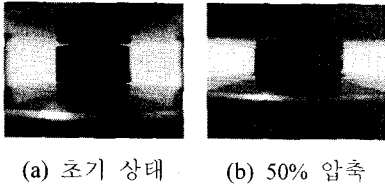


Fig. 8 Samples deformed shape with 10% tapered platen and oil lubrication

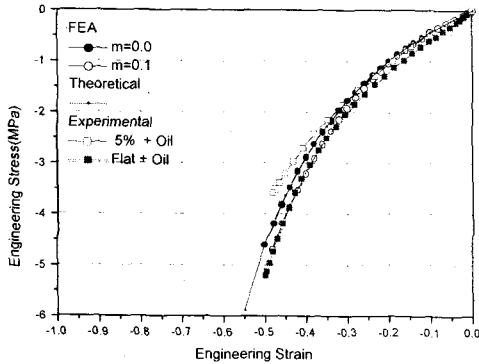


Fig. 9 Experimental curves in compression test

Fig. 8은 10% 경사진 압축판에 DTE-25 작동오일로 윤활 시켜 시험하는 모습이며 실제로 마찰로 인한 배부름 현상이 거의 나타나지 않았다. Fig. 9는 이러한 해석결과로 예측된 응력-변형을 선도와 시험을 통해 얻어진 것을 서로 비교한 것이다. 평판에서 오일 윤활을 이용한 시험은 마찰계수가 0.1일 때의 해석결과와 비슷하여 오일 윤활의 마찰계수가 0.05~0.1정도 된다는 것을 알았다. 5%의 경사진 압축판이 초기 30%의 변형률 범위 내에서는 마찰계수가 0인 이상적인 압축상태와 거의 동일한 결과를 보였다.

2.2.2 최대 변형률에 따른 반복하중 효과

인장시험과 마찬가지로 압축시험의 경우에도 컨디셔닝을 하지 않은 것과 25%, 50%의 변형률 범위 내에서 10mm/min의 속도로 컨디셔닝을 하

여 시험한 결과 Fig. 10과 같이 나왔으며 변형률 범위 수준이 높아짐에 따라 동일한 변형률에서 응력이 낮게 나오는 것을 볼 수가 있다.

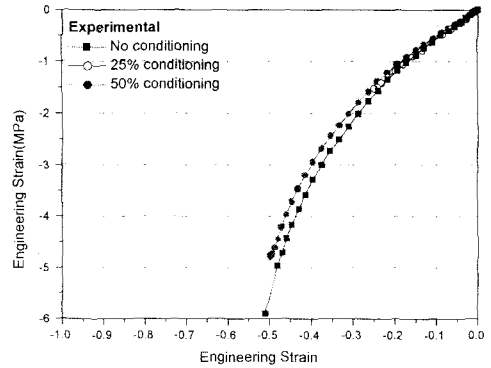


Fig. 10 Conditioning effects in compression test

2.3 순수 전단 시험

2.3.1 시편 및 치구 설계

단순 전단 시험과는 달리 순수 전단 시험은 ASTM이나 KS에서 제안하고 있지 않지만 시험 방법에 있어 인장 시험과 유사하며 시편제작이 쉽다는 편리한 점을 가지고 있다. 순수 전단의 이상적인 변형 및 응력상태는 식(3), (4)와 같다.

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = \lambda = L/L_0, \lambda_3 = \lambda^2 t/t_0 \quad (3)$$

$$\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma, \sigma_3 = 0 \quad (4)$$

순수전단 변형상태가 되기 위해서 시편의 수평 폭의 길이보다 인장시키는 수직 길이가 짧아야 하며 이것은 인장시편과 반대가 된다.

그러나, 식(3)과 같이 시편은 인장 시 수평방향(1방향)으로 변형이 없어야 하지만 실제 시험에서는 Fig. 11과 같이 수평 방향 양쪽 면에서 안쪽으로 곡선(inward curve)이 되어 순수한 변형 상태가 되지 않아 오차가 발생하게 된다.

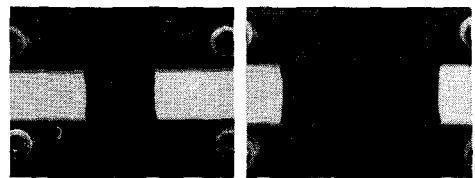


Fig. 11 Pure shear specimen deformed shape at 100 percent stretching

Fig. 12는 형상비가 각각 5:1과 10:1의 시편을 이용하여 시험했을 때 해석 및 실험 결과로써 형상비가 작은 시편이 큰 시편 보다 응력-변형률

곡선이 낮게 나오는데 이것은 형상비가 클수록 재료의 변형상태는 인장 시험의 변형상태에 가까워지기 때문이다. 또한 해석결과보다 실험결과에서 두 시편의 차이가 더 크다는 것을 볼 수 있는데 실험에서는 그림과 시편의 고정부위에서 미세한 미끄러짐이 형상비가 작은 시편에서 더 많이 일어나기 때문이다. 결국 이상적인 순수전단 변형에 가까워지기 위해서는 시편의 형상비는 10:1 이상이어야 한다.

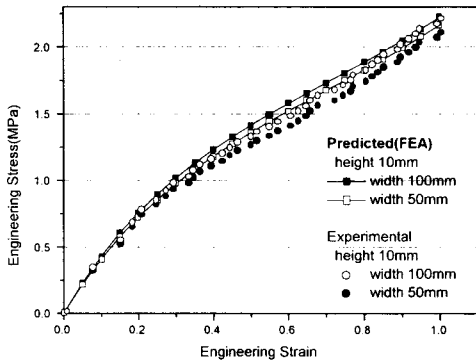


Fig. 12 Experimental and predicted stress-strain curves in pure shear test

2.3.2 최대 변형률에 따른 반복하중 효과

각 변형률 구간에서 재료의 물성을 구하기 위해서는 순수전단시험도 변형률 범위를 인장, 압축 시험과 동일한 수준에서 컨디셔닝을 해야 한다. 순수전단의 시험속도는 50mm/min로 하였다. Fig.13은 컨디셔닝을 하지 않은 것과 25%, 50%, 100%의 변형률 범위 내에서 컨디셔닝을 하여 시험한 결과이다. 다른 시험과 마찬가지로 변형률 범위 수준이 높아짐에 따라 동일한 변형률에서 응력이 낮게 나오는 것을 볼 수가 있다.

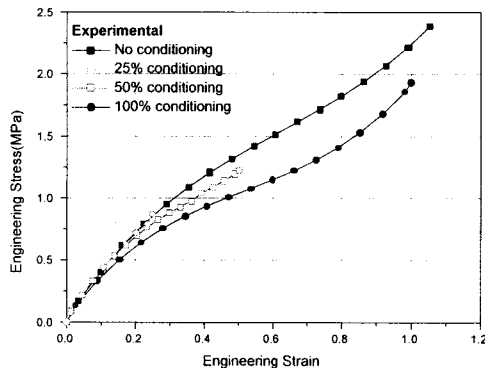


Fig. 13 Conditioning effect in pure shear test

3. 재료상수 및 유한요소해석

3.1 재료상수

고무 재료상수를 구하기 위해서 기본적으로 인장 시험 결과만을 이용하기도 하지만 이렇게 얻어진 상수는 이것으로 예측한 순수 전단 응력-변형을 관계가 매우 높게 나오는 우려를 범할 수 있다. 따라서 Fig. 14와 같이 기본적으로 인장, 압축, 순수 전단 시험의 결과를 동시에 이용하여야 한다.

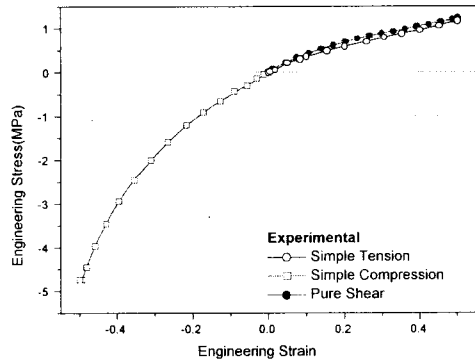


Fig. 14 Experimental data set of tension, compression, pure shear test for 50% strain

유한요소해석에서 사용하는 변형률 에너지 함수(W)는 식(5), (6)과 같이 연신율 불변량 함수인 Mooney-Rivlin 2항 모델과 주 연신율의 함수인 Ogden 3항 모델이 대표적이다. 이러한 계수 값들은 최소자승법(least square method)으로 구할 수 있다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

$$W = \sum_{n=1}^3 \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (6)$$

Mooney Rivlin 함수모델로 커브피팅을 할 때는 이 모델의 직선화 특성을 가지고 있다⁴. 따라서, 변형률이 커질수록 응력-변형률의 비선형성이 증가하여 시험오차의 절대량이 커지며 변형에너지 함수의 절대값도 증가하므로 피팅에 따른 오차가 커지게 된다. 이러한 특성으로 conditioning을 한 고무재료는 정해진 변형률 범위의 70% 이상에서의 급상승한 응력으로 인하여 전체 구간의 커브 피팅에 영향을 준다. 따라서 안정화시킨 재료는 Ogden 모델이 적절하며 Mooney 모델을 이용할

때는 이 영역을 고려해 주어야 한다. Table 1은 컨디셔닝 구간에 따라 얻어진 Ogden 상수 및 Mooney-Rivlin 상수 값들이다.

Table 1. Strain energy function of NR

case	condition	Ogden 3항		Mooney 2항 (MPa)
		μ_i (MPa)	α_i	
1	No	4.52E-6 3.07E-3 9.33E+1	4.54 8.31 0.03	C10=0.38 C01=0.33
2	0-25%	0.85E+2 0.65E+2 0.72E+1	0.02 0.02 0.01	C10=0.44 C01=0.25
3	0-50%	1.26E+0 7.78E-1 1.38E+0	0.00 1.14 1.11	C10=0.40 C01=0.22
4	0-100%	1.27E-4 7.14E+1 3.33E+1	13.47 0.02 0.02	C10=0.31 C01=0.28
5	0-200%	4.80E+1 4.75E-4 1.31E+0	0.01 8.95 1.01	C10=0.47 C01=-0.06

3.2 엔진마운트의 유한요소해석 및 실험

컨디셔닝에 따른 물성의 차이가 고무부품의 유한요소 해석에 어떻게 영향을 주는지 알아보기 위해 자동차에 사용되는 엔진마운트에 적용시켜 보았다. 엔진마운트의 고무재료의 경도는 IRHD 60이며 위의 고무시험에 사용되었던 시편의 배합 조건과 같게 하였다. Fig. 15는 엔진마운트의 실제 모습 및 3차원 유한요소 모델이며 Table 1에서 5가지 경우의 오그덴 상수를 적용시켜 해석하였다. 부품의 하단 부분은 고정하였으며 상단 부분을 수평방향으로 최대 8mm의 변위를 주어 해석하였다.

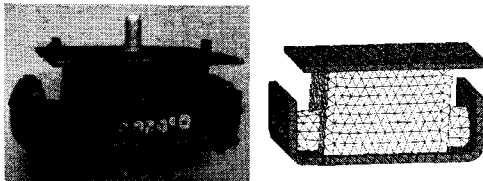


Fig. 15 Engine mount

Table 2, 3은 해석과 실험에서 변위-하중관계 선도로부터 강성을 계산한 것으로 컨디셔닝을 하지 않은 경우 강성이 가장 크게 나왔으며 변형을 범위가 커질수록 고무재료 부품의 강성이 작게 나오는 것을 알 수 있다.

Table 2. Predicted stiffness

case	1	2	3	4	5
stiffness (N/mm)	124	122	104	102	84

Table 3. Experimental stiffness

displacement	No	8mm
stiffness (N/mm)	123	115

4. 결론

고무부품의 유한요소해석을 위한 재료의 물성을 구하기 위해 인장, 압축, 전단시험을 하였다. 인장시험에서는 그림과 물리는 부위를 넓게 한 strip시편의 응력-변형을 관계는 아령형과 오차가 매우 적어 물성시험에 적용할 수 있음을 확인하였다. 압축시험에서는 마찰의 영향을 줄이기 위해 윤활 방법 이외에 마찰계수에 상응하는 경사진 압축판을 제시하였고 실제 5% 경사진 압축판과 오일 윤활을 동시에 적용할 때 이상적인 압축 변형상태의 응력-변형을 곡선을 구할 수가 있었다. 순수 전단 시험에서는 형상비가 10:1 이상의 시편이 수평방향 변형에서의 오차를 최소화시킬 수가 있었다. 여러 변형을 범위 내에서 반복하중을 가하면 응력-변형을 관계는 초기에 비해 낮게 나오고 최대 변형을 수준에 따라서도 달라지며 실제 부품에 적용시킬 경우 예측된 범위-하중관계가 차이가 보임을 알 수 있었다. 결국 사용되는 부품의 최대 변형을 수준에서 안정화시킨 고무의 물성을 유한요소 해석에 적용시켜야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

참고문헌

- (1) 김원두 외, 1999, "초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술 개발", 한국기계연구원 연구보고서, 98-NG-01-03-A-01.
- (2) "MARC user's manual", 2000, Msc software.
- (3) R. P. Brown, 1996, "Physical Testing of Rubber", 3rd Ed., Chapman & Hall, U.K..
- (4) Alan N. Gent, 1992, "Engineering with Rubber", Oxford University Press, New York.