

## 승용차용 스트러트 고무마운트의 피로수명 예측

이학주\* · 김완두\* · 조성도성\*\* · 김창욱\*\*\*

### Fatigue Life Prediction of Strut Rubber Mount for Passenger Car

Hak Joo Lee\*, Wan Doo Kim\*, Seong-Do-Seong Cho\*\* and Chang Wook Kim\*\*\*

**Key Words:** Fatigue(피로), Life Prediction(수명예측), Rubber Mount(고무마운트), Strut(스트러트), Signed Principal Strain Method(부호를 고려한 주변형률법).

#### Abstract

A procedure to predict the fatigue life of rubber components based on the signed principal strain method was proposed. A tension-compression rubber specimen with jang-gu shape was designed and principal strain distribution was obtained by using the nonlinear finite element analysis. Finite element analysis and fatigue test of strut rubber mount were conducted to evaluate the fatigue life prediction procedure proposed. A procedure was employed to predict the fatigue life of strut rubber mount. Predicted fatigue lives have a good agreement with tested lives within a factor of 3.

#### 1. 서 론

고무재료는 고도의 신장성과 탁월한 탄성 복원 능력 및 진동 감쇠 특성으로 인하여 엔진마운트, 부상, 문밀봉장치, 타이어 등의 자동차 방진 고무 부품을 비롯하여 토목·건설분야의 방진 및 제진 고무부품과 세탁기, 에어컨 등의 가전제품의 방진부품으로 다양한 산업분야에 폭넓게 사용되고 있는 공업재료 중의 하나이다<sup>(1)</sup>.

다른 기계류 부품과 마찬가지로 고무류 기계부품도 성능 향상과 품질 고도화의 요구에 따라 부품 개발 시 고도의 설계 및 해석기술이 요구되고 있는 실정이다. 그러나 지금까지 대부분의 고무류 기계부품의 설계는 재료의 비선형성과 대변형의 특수한 성질로 인하여 시행착오에 의한 경험적인 수법에 의존하여 왔으나, 근래에는 고무류

기계부품의 설계에 체계적이고 분석적인 방법을 이용하여 부품의 성능향상에도 크게 기여할 수 있게 되었다<sup>(2), (3), (4)</sup>.

고무류 기계부품에 대한 피로해석은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하고 최적설계를 하기 위한 기술로 선진국에서는 이미 부품의 설계에 널리 활용하고 있는 실정이나, 국내 관련 산업계에서는 이의 중요성을 인식하고는 있으나 아직까지 체계적인 설계 및 해석기술이 확립되어 있지 못한 실정이다<sup>(5), (6)</sup>.

고무류 기계부품의 안전성, 신뢰성 확보를 위해서는 실제로 이들 부품이 사용되는 환경에서의 피로수명, 내구성능에 관한 검토가 수행되어야만 한다. 특히, 자동차에 사용되는 방진고무의 경우 차량의 소음을 감소시키기 위해서 스프링상수를 감소시키면 일반적으로 내구성이 저하된다. 따라서 소음 특성 향상에 따른 내구성 평가가 반드시 요구된다<sup>(7)</sup>.

부품의 내구성을 평가하기 위한 방법으로는 크게 소재의 피로시험, 부품의 피로시험 그리고 실차 내구주행시험을 통한 피로특성의 파악으로 나

\* 한국기계연구원 구조시스템연구부  
\*\* 삼성항공  
\*\*\* 충남대학교 기계설계공학과

낼 수 있다<sup>(8)</sup>.

소재의 피로시험을 이용하는 경우에는 기하학적 형상, 하중상태, 열처리 및 가공의 영향 등 여러 가지 제한점으로 인하여 부품의 내구성을 평가하는데 많은 문제점을 가지고 있다. 부품의 내구시험 및 실차 내구시험을 이용하여 부품의 내구성을 평가하는 경우에는 시간, 경제적으로 많은 제약을 가지고 있으며, 특히 제품 개발 초기 단계에서는 이 방법을 이용하여 특성을 평가하지 못하는 제한점이 있다.

따라서 본 연구에서는 설계의 초기단계에서도 단 기간에 비교적 정확한 부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 개발하고자 한다. Fig. 1은 본 연구에서 제안된 부품의 피로수명을 예측하는 절차를 보여 준다.

소재의 물성시험(인장, 압축, 전단) 결과를 이용하여 부품 및 장구형 시험편에 대한 유한요소 해석을 수행하고, 최대 인장변형을 및 최소 압축 변형률을 고려하는 부호를 고려한 주변형률법 (signed principal strain method)<sup>(9)</sup>을 이용하여 장구형시험편의 하중조건을 결정한다. 결정된 하중조건으로 장구형시험편에 대한 피로시험을 수행하여 부품의 피로수명을 예측하고, 예측된 피로수명과 부품의 피로시험결과를 비교하여 본 연구에서 제안된 피로수명 예측 절차의 타당성을 검토하였다.

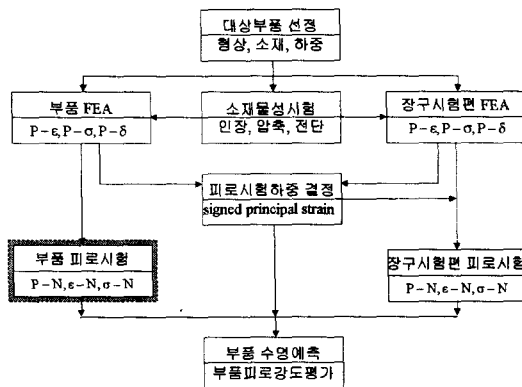


Fig. 1 Fatigue life prediction procedure for rubber components

## 2. 스트러트 고무마운트 유한요소해석

### 2.1 유한요소 모델

스트러트 고무마운트는 프레스 가공된 상하 두 개의 원통형 판재 사이에 천연고무가 접촉되어 있는 자동차 구조 부품으로 독립현가방식 승용차의 앞차 축에 설치된 속업소버를 차체에 고정시켜 주는 역할을 하고 있다<sup>(10)</sup>. 스트러트 고무마운트는 차량이 곡선로 및 요철로를 주행 할 경우에 발생하는 반복하중에 의한 피로손상을 받으며, 파손이 발생할 경우에는 차체의 심각한 손상을 유발시킬 수 있는 부품이므로 서론에서 제시된 피로수명예측 절차를 검증하기 위한 부품으로 선정하였다.

스트러트 고무마운트의 형상과 작용하중이 측대칭이므로 측대칭요소인 Full-Herrmann formulation quad 4 요소<sup>(11)</sup>를 사용하여 모형화 하였으며, Fig. 2는 2740개의 절점과 2254개의 요소로 구성된 유한요소모형을 보여 준다.

금속판재의 물성치로 탄성계수는 205.8 GPa, 포아슨 비(Poisson's ratio)는 0.3으로 하였다. 고무소재의 인장, 압축시험을 수행하여 응력-변형률 관계(Fig. 3)를 오그덴 모델(Ogden model II)을 이용하여 정의하였다<sup>(11), (12)</sup>.

차체에 고정되는 상단 볼트체결부는 x, y, z 방향의 변위를 모두 구속시켰으며, 하단 금속부에 하중을 부가하였다. 하중이 증가하면 접촉이 발생될 것으로 예상되는 부위(Fig. 2의 B부위)는 접촉체(contact body)로 지정하였으며, 미세하게 요소를 분할하였다.

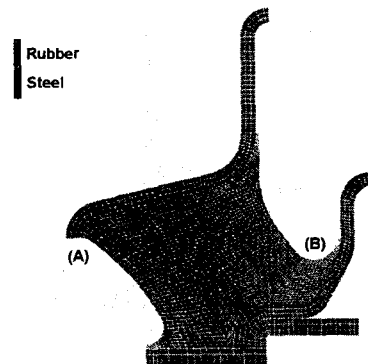


Fig. 2 Finite element model of strut rubber mount

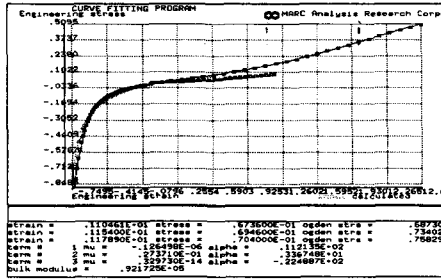


Fig. 3 Stress-strain behavior of rubber

## 2.2 유한요소해석 결과

Fig. 4, 5는 스트러트 고무마운트에 인장방향으로 5 mm의 변위를 주었을 때의 코오시(Cauchy) 응력 및 압축방향으로 10 mm의 변위를 주었을 때의 주 변형률 분포를 각각 보여준다.

응력 및 변형률 집중이 발생하는 부위는 금속과 고무가 접촉되는 부위(Fig. 2의 A)와 고무가 심한 변형을 일으켜 접촉되는 부위(Fig. 2의 B))이며, 압축 시는 전자, 인장 시는 후자의 위치에서 최대변형률 값을 나타내었다.

Fig. 6, 7은 유한요소해석 결과 얻어진 하중-변위, 변형률-변위 관계를 보여 준다. 그림에서 변형률은 스트러트 고무마운트의 취약부위로 예상되는 절점 2310에서의 변형률 값을 보여주며, 인장하중의 경우에는 최대 주변형률(maximum principal total strain)을, 그리고 압축하중의 경우에는 최소 주변형률(minimum principal total strain)을 취하였다. 취약부위로 예상되는 절점 2310은 고무가 서로 접촉되어 접혀지는 부위로서 피로시험에서의 파손부위와 잘 일치하였다.

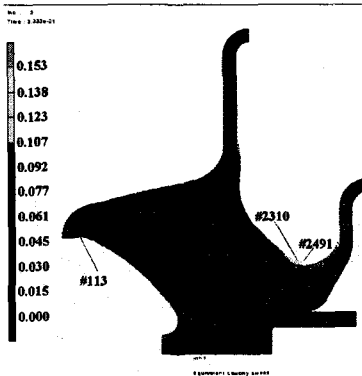


Fig. 4 Cauchy stress distribution under tension (displacement : 5 mm)

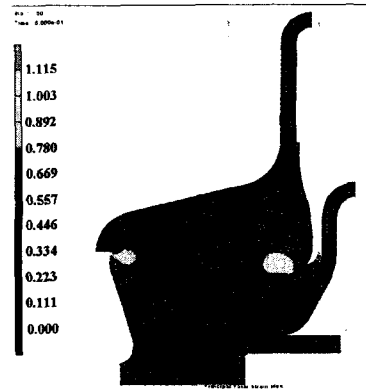


Fig. 5 Max. principal strain distribution under compression (displacement : 10 mm)

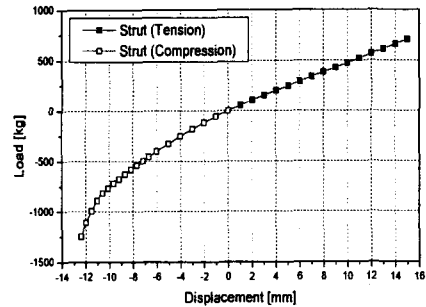


Fig. 6 Load - displacement relation of strut rubber mount

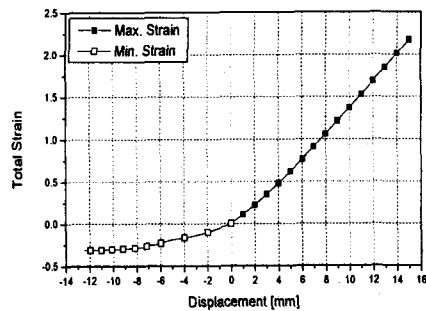


Fig. 7 Strain - displacement relation of strut rubber mount

## 3. 스트러트 고무마운트 피로시험

스트러트 고무마운트의 피로강도를 평가하기 위해 100 kN 용량의 유압식 피로시험기를 이용

하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 7개의 시편에 대해 최소하중을 -14.7 kN으로 일정하게 유지하고 최대하중을 2.45 ~ 6.86 kN의 범위에서 선택하여 수행하였으며, 시험편에 균열이 발생, 진전되어 완전히 파단된 순간의 사이클을 피로수명으로 정의하였다.

Fig. 8은 피로시험 결과를 보여주며, 최대하중과 피로수명과의 관계를 나타내었다. 최대하중이 작은 경우( $P_{max} = 2.45 \text{ kN}, 2.94 \text{ kN}$ )에는 고무 부위에서 피로파손이 일어나지 않고 금속 플레이트에서 기준 수명보다 훨씬 긴 수명에서 파손이 발생하였다. 최대하중이 3.43 kN 이상인 경우에는 고무가 서로 접촉하여 접혀지는 부위에서 파손이 발생하였으며, 유한요소 해석결과에서 나타난 최대변형을 발생지점과 잘 일치하였다.

Fig. 9는 고무에서 피로파손이 발생한 시험편의 모습을 보여준다.

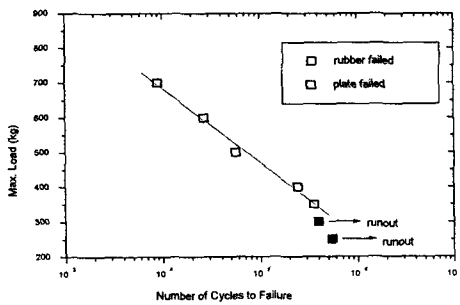


Fig. 8 Maximum load - fatigue life curve of strut rubber mount

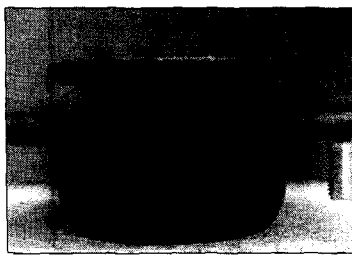


Fig. 9 Typical example for fatigue failure of strut rubber mount

#### 4. 장구형 시험편 설계 및 유한요소해석

장구형 시험편은 부품에 작용하는 피로하중에

의한 최대 인장/압축 변형률을 재현하는데 이용되므로, 적정형상의 장구형 시험편을 설계하고<sup>(13)</sup>, 유한요소 해석을 수행하였다.

장구형 시험편의 기본형상은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 양단에 금구를 가황, 접착시킨 원통형 고무로 중심부 형상은 고무부품의 내구시험결과와 변형분포 상태로부터 다음 조건을 만족하도록 설계하였다.

- 1) 압축·인장변형이 가능하여야 한다.
- 2) 변형률분포가 비교적 완만하여야 한다.
- 3) 최대 인장변형을 발생부위가 어떠한 변형에도 일정하여야 한다.

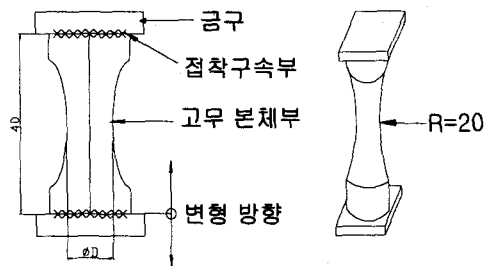


Fig. 10 Dimension and shape of test specimen

시험 데이터의 산포를 줄이기 위해서는 장구형 시험편의 곡률반경(R)이 큰 쪽이 바람직하지만 방진고무의 변형량과 변형률 범위를 고려하여  $R = 20 \text{ mm}$ 로 결정하였다.

시험편은 프레스 금형성형법에 의해 제작되어 지므로 금형면의 파팅라인(PL)부를 가지고 있어 균열발생의 원인이 되므로 파팅라인부와 최대변형을 발생부위가 일치하지 않도록 파팅라인부를 단축에 위치하도록 하였으며, 최소단면의 장반경 및 단반경을 각각 7 mm 및 5 mm로 하였다.

결정된 형상 및 치수의 장구형 시험편의 최대 변형률을 구하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 고무의 물성치는 스트러트 고무마운트와 동일한 값을 사용하였다. 해석 시에는 대칭성을 고려하여 전체의 1/2만 모델링 하였다.

Fig. 11은 장구형 시험편의 유한요소 모형을 보여 준다.

해석 결과, 최대 변형률은 인장변형 시에는 시험편 중앙에 위치한 최소단면적의 장축에서 발생

하였으며, 압축변형 시에는 장축과 단축의 중간 부위에서 발생하였다.

Fig. 12, 13은 해석결과 구해진 최대변형률 발생 절점에서의 하중-변위, 변형률-변위 관계를 보여 준다. 그림 13에서 변위가 인장인 경우에는 최대 주변형률을, 그리고 압축의 경우에는 최소 주변형률을 취하는 부호를 고려한 주변형률방법 (signed principal strain method)<sup>(9)</sup>을 따랐다.

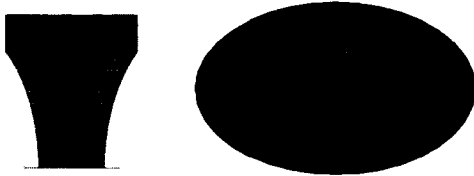


Fig. 11 Finite element model of specimen

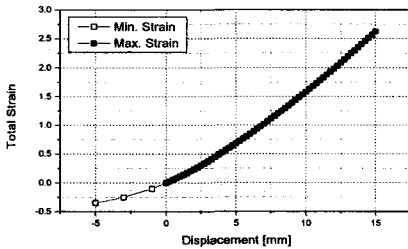


Fig. 12 Load - displacement relation of specimen

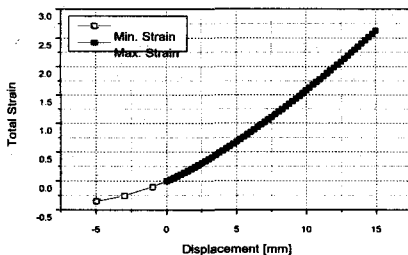


Fig. 13 Strain - displacement relation of specimen

## 5. 장구형 시험편 피로시험 및 강도평가

### 5.1 시험장치 및 시험 방법

Fig. 1에서 제안된 방법에 따라 스트러트 고무마운트의 피로수명을 예측하기 위해 장구형 시험편의 피로시험을 수행하였다. 피로시험에 사용된

시험기는 100 kN 용량의 유압식 피로시험기이며, 시험기에 장착된 5 kN 용량의 로드셀(load cell)을 이용하여 하중을 측정하였다.

시험은 상온(20℃) 대기 중에서 수행되었으며, 구체적인 시험 조건은 다음과 같다.

- 1) 제어 변수 : 하중
- 2) 하중 파형 : 정현파(sinewave)
- 3) 하중 주파수 : 0.5 ~ 2 Hz
- 4) 최소하중 : 5.2의 절차에 의해 결정
- 5) 최대 하중 : 5.2의 절차에 의해 결정

위의 조건으로 시험을 수행하면서, 시험편이 완전히 파단되는 순간의 사이클을 피로수명으로 정의하였다.

### 5.2 시험조건 결정 및 피로강도 평가

본 연구에서 제안된 방법으로 스트러트 고무마운트의 피로수명을 예측하기 위한 장구형 시험편의 피로시험 조건(최소하중 및 최대하중 크기)은 다음과 같이 결정하였다.

#### 1) 스트러트 고무마운트 유한요소해석

- 하중-변위 관계(Fig. 6)
- 변형률-변위 관계(Fig. 7)

#### 2) 스트러트 고무마운트의 피로강도조건(시험기준)에서의 변형률 크기 결정

- 1)의 변형률-변위, 하중-변위 관계 이용
- 부호를 고려한 최대주변형률법 적용

. 인장하중 : 최대 주변형률

. 압축하중 : 최소 주변형률

#### 3) 장구형 시험편 유한요소 해석

- 하중-변위 관계(Fig. 12)
- 변형률-변위 관계(Fig. 13)

#### 4) 장구형 시험편의 시험하중 크기 결정

- $(\epsilon_{sp})_{component} = (\epsilon_{sp})_{specimen}$
- .  $\epsilon_{sp}$  : 부호를 고려한 주변형률

#### 5) 4)의 하중으로 장구형시험편 피로시험 수행

6) 5)의 시험에서 구한 피로수명을 부품의 피로수명으로 예측

7) 예측된 피로수명과 부품의 피로시험으로 측정된 피로수명과의 비교

Fig. 14는 장구형 시험편의 피로시험 결과로부터 예측된 피로수명과 스트러트 고무마운트의 피

로시험 결과로부터 측정된 피로수명과의 관계를 보여주며, 오차범위 3배 이내에서 비교적 정확하게 수명을 예측하고 있음을 보여 준다. 그럼에서 점선은 오차범위 3배를 나타내는 선도이다.

예측된 피로수명과 측정된 피로수명이 차이나는 원인은 제품과 시험편과의 크기 효과 및 표면 거칠기 효과, 형상 효과에 의한 최대변형률 분포의 상이성 등으로 추정된다.

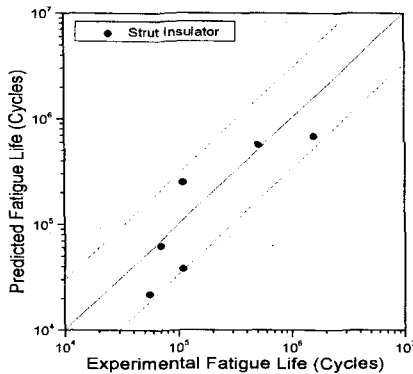


Fig. 14 Comparison of predicted & tested fatigue lives by using the signed principal strain method

### 6. 결론

고무부품 설계의 초기단계에서도 비교적 정확하게 부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, 제안된 피로수명 예측 절차는 다음과 같다.

소재의 물성시험(인장, 압축, 전단) 결과를 이용하여 부품 및 장구형 시험편에 대한 유한요소 해석을 수행하고, 최대 인장변형률 및 최소 압축 변형률을 고려하는 부호를 고려한 주변형률법을 이용하여 장구형 시험편의 하중조건을 결정한다. 결정된 하중조건으로 장구형 시험편에 대한 피로 시험을 수행하여 부품의 피로수명을 예측한다.

예측된 피로수명과 부품의 피로시험결과를 비교하여 본 연구에서 제안된 피로수명 예측 절차의 타당성을 검토하였으며, 오차범위 3배 이내에서 비교적 정확하게 부품의 피로수명을 예측할 수 있었다.

본 연구는 과학기술부에서 시행한 국가지정연구실사업 및 특정연구개발사업의 연구결과와 일부입니다.

### 참고문헌

- (1) Smith, E. H., 1994, Mechanical Engineer's Reference Book, 12th ed., p. 7/146
- (2) 김완두, 1998, 고무부품 설계의 유한요소해석 기술응용, KSME Vol. 38, No. 12., p. 42
- (3) Jankovich, E., Jomaa, M., 1991, "FE Stress Analysis of Rubber Automotive Parts Including Friction," SAE 910024
- (4) 김현영, 우창수, 김완두 외, 1995, Computer Simulation of the Behavior of CV Joint Boot," IPC-8, 9531354, Vol. 2, pp. 353-358
- (5) 신수정, 오수익, 이태수, 1997, 고무패드 성형법의 유한요소 모델링, KSME 춘계학술대회논문집(I), pp. 331-336
- (6) 김세호, 이형욱, 허훈외, 1996, 등속조인트 부트의 유한요소 해석 및 설계 변경에의 응용, SAE 추계학술대회, pp. 323-328
- (7) K. Takeuchi, M. Nakagawa, H. Yamaguchi and T. Okumoto, 1993, "Fatigue test technique of rubber materials for vibration insulators and their evaluation," International Polymer Science and Technology, Vol.20, No.10, pp. T/64-T/69
- (8) R. C. Riu, 1997, SAE Fatigue Design Handbook, 3rd ed., SAE, pp. 259-278
- (9) J. A. Bannantine, J. J. Comer and T. L. Handrock, 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice-Hall, pp.239-260
- (10) MARC Analysis Research Corporation, 1996, Non-linear FEA of Elastomer, p. 9
- (11) MARC Analysis Research Corporation, 1996, MARC User's Manual
- (12) MARC Analysis Research Corporation, 1999, Curve Fitting of Test Data, MARC, Ver. 7.3,
- (13) H. Yamaguchi and M. Nakayama, 1990, "방진고무 재료의 내피로성 평가, 풍전 합성기보, Vol.32, No.2, pp. 82-87