



다축하중이 작용하는 방진고무부품 피로손상 파라미터 결정에 관한 연구

문성인[†] · 우창수* · 김완두*

한국원자력연구원 핵비확산시스템연구부, *한국기계연구원 나노융합기계연구본부
접수일(2012년 6월 25일), 수정일(2012년 7월 16일), 게재확정일(2012년 7월 19일)

Study on the Determination of Fatigue Damage Parameter for Rubber Component under Multiaxial Loading

Seong In Moon[†], Chang Su Woo*, and Wan Doo Kim*

Division of nonproliferation system research, Korea Atomic Energy Research Institute,
Daejeon, 305-353 Korea

*Division of nano-convergence mechanical system, Korea Institute of Machinery & Materials,
Daejeon, 305-343, Korea

(Received June 25, 2012, Revised July 16, 2012, Accepted July 19, 2012)

요약 : 고무재료는 배합조건에 따라 기계적 거동이 다르기 때문에 피로수명평가를 위해 부품소재에 대한 물성데이터 확보가 선행되어야 한다. 그러나 모든 종류의 배합조건을 고려하여 표준화된 재료물성을 확보하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 최소한의 제한된 실험으로부터 피로수명평가를 위한 입력물성을 선택하기 위한 방법을 제시하였으며, 피로수명 평가를 위한 최적 피로손상 파라미터를 결정하였다. 이러한 결과를 활용하여 부품의 피로수명 평가결과와 내구시험결과를 비교한 후, 본 연구에서 제안된 피로수명 평가절차의 타당성을 검토하였다.

ABSTRACT : Rubber components have been widely used in automotive industry as anti-vibration components for many years. These subjected to fluctuating loads, often fail due to the nucleation and growth of defects or cracks. To prevent such failures, it is necessary to understand the fatigue failure mechanism for rubber materials and to evaluate the fatigue life for rubber components. The objective of this study is to develop the durability analysis process for vulcanized rubber components, which is applicable to predict fatigue life at initial product design step. The determination method of nonlinear material constants for FE analysis was proposed. In order to investigate the applicability of the commonly used damage parameters, fatigue tests and corresponding finite element analyses were carried out and strain energy density was proposed as the fatigue damage parameter for rubber components. The fatigue analysis for automotive rubber components was performed and the durability analysis process was reviewed.

Keywords : rubber component, fatigue life, suspension bush, fatigue damage parameter

I. 서 론

탄성복원특성, 진동감쇠특성, 에너지 흡수성 등의 특성으로 인해 고무는 자동차의 타이어, 엔진마운트, 서스펜션 부시 등 주요 부품에 폭넓게 사용되고 있다.^{1,2} 이러한 고무부품 대부분은 정적 또는 동적 하중을 지속적으로 받게 되며, 이로 인해 종종 피로손상이 누적되어 파손이 발생한다. 고무부품의 내구성능을 평가하기 위한 방법으로는 단품 내구시험, 실차 주행 내구시험 등이 있으나, 이러한 방법으로 부품의 내구성능을

평가할 경우에는 시간적, 경제적 제약으로 인해 적기에 신뢰성있는 내구성능을 평가하기 어렵다는 단점이 있다.

따라서, 여러 연구자들^{3,5}은 시험을 통한 내구성능 평가기법의 단점을 보완하기 위해 해석적 방법을 통한 내구수명 평가기법 개발을 위한 연구를 수행한 바 있으나, 다음과 같은 몇 가지 문제점이 있다. 첫째, 고무재료는 배합조건 및 가공조건에 따라 다른 기계적 거동^{6,7}을 보이기 때문에 특정 부품에 대한 내구성능을 평가하기 위해 소재의 물성데이터가 확보되어야 하지만 모든 부품에 대해 소재물성을 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 둘째, 고무부품의 피로수명을 평가하기 위해 일반적으로 응력, 변형률, 변형률 에너지밀도(Strain Energy

[†]Corresponding Author. E-mail: simoon21c@kaeri.re.kr

Density: SED) 등의 피로손상 파라미터가 사용⁸⁻¹⁰되지만, 이러한 파라미터의 적용법 및 사용상의 제한점에 대해서는 거의 알려져 있지 않다.

본 연구의 목적은 고무부품 피로수명예측 신뢰성 향상을 위한 내구해석 프로세스를 구축하는 것이다. Figure 1은 본 연구에서 제안된 고무부품의 예측절차를 도식적으로 나타낸 것이다. 부품에 대한 유한요소해석을 수행하여 최대 주변형률(principle strain), 변형률 에너지밀도 등의 피로손상 파라미터를 계산한 후, 소재 피로물성을 이용하여 피로수명을 예측한다. 이를 위해 본 연구에서는 최소한의 제한된 실험결과로부터 해석용 입력물성을 도출하기 위한 방법을 제시하였으며, 서스펜션 부시(suspension bush) 단품 피로수명 평가결과와 내구시험결과를 비교하여 고무부품 내구해석을 위한 최적 피로손상 파라미터를 결정하였다. 또한, 이러한 결과를 활용하여 서스펜션 부시에 대한 내구해석을 수행함으로써 제안된 피로수명 평가절차를 검토하였다.

II. 고무소재 특성시험 및 단품 내구시험

1. 재료물성

본 실험에서는 차량 후륜 서스펜션 시스템에 사용되는 트레일링 암 부시(trailing arm bush)를 시편으로 사용하였다. 서스펜션 부시 소재의 기본 재료물성을 측정하기 위해 경도시험과 단축 인장시험을 수행하였다. 경도는 가장 보편적으로 사용되는 쇼어 A(Shore A) 경도와 국제 경도 규격인 마이크로

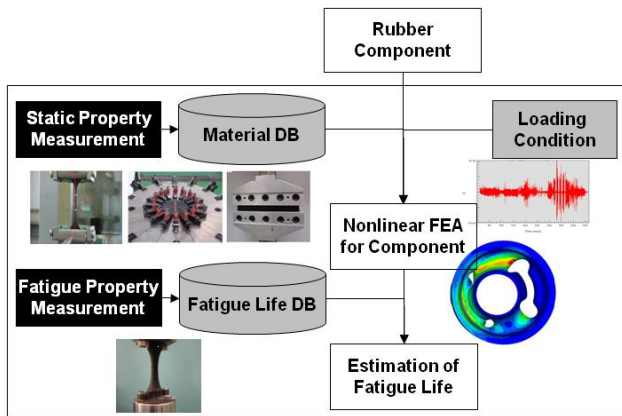


Figure 1. Fatigue lifetime evaluation procedure.

Table 1. Basic material properties of suspension bush

Shore Hardness	IRHD Hardness	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
67.8	70.5	26.3	436

IHRD(International Rubber Hardness Degree) 경도를 측정하였다. 단축 인장시험은 한국산업규격 KS M 6518 “가황고무 물리시험 방법”에 따라 이령형 3호형으로 시편을 제작하여 수행하였다. Table 1은 트레일링 암 부시 소재의 기본물성 측정결과를 나타낸 것이다.

2. 비선형 재료상수

일반적인 탄성재료는 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 범위 내에서 탄성복원특성을 보이지만, 고무재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성복원 특성을 보이는 초탄성 특성을 나타낸다. 이러한 고무재료의 특성은 수치적으로 변형률에너지 함수(strain energy function, W)로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 비압축성 고무의 기계적 거동을 표현하기 위해 연신률의 불변량으로 표현되는 Mooney-Rivlin 변형률에너지함수를 사용하였으며, 이는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, I_1, I_2 는 각각 1, 2차 연신률 불변량(strain invariant)이며, C_{ij} 는 시험결과로부터 결정되는 재료 상수로서 단축인장시험, 압축시험, 전단시험 등을 수행하여 얻어지는 응력과 변형률 관계로부터 결정할 수 있다.

본 연구에서는 단축인장시험, 이축인장시험, 순수전단시험을 각각 25, 50, 100% 변형률 범위에 대해 수행하였으며, 시험 중인 각 시편의 모습을 Figure 2에 나타내었다. Figure 3은 비선형 재료상수시험을 통해서 얻어진 응력-변형률 선도를 나타낸 것으로서 이축인장, 순수전단, 단축인장의 순으로 강성이 높은 것을 알 수 있다. 이러한 응력-변형률 곡선을 곡선적합(curve fitting)하여 구한 비선형재료상수를 Table 2에 나타내었다.

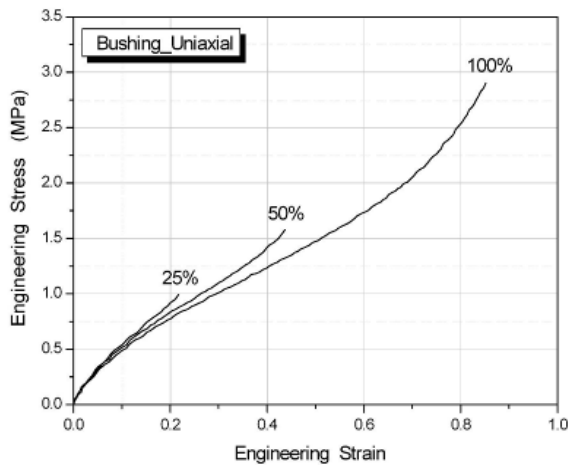
3. 피로물성

서스펜션 부시에 사용되는 재료의 피로물성을 측정하기 위해 Figure 4(a)에 나타낸 것과 같은 장구형 시편을 제작하여

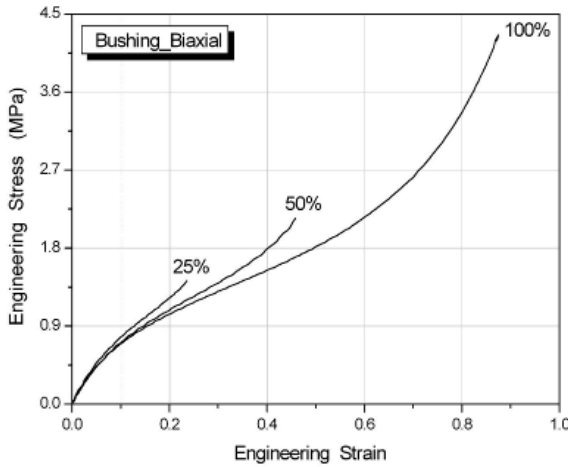


(a) Uni-axial (b) Bi-axial (c) Pure shear

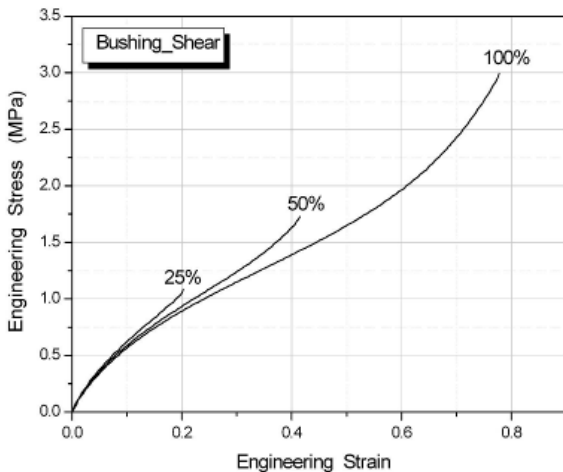
Figure 2. Nonlinear material constant test.



(a) Uni-axial



(b) Bi-axial



(c) Pure shear

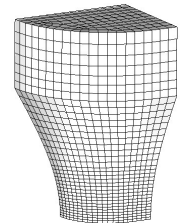
Figure 3. Stress-strain curves.

Table 2. Nonlinear material constant of Mooney-Rivlin function for suspension bush

Strain Range	C_{10}	C_{01}	$2(C_{10}+C_{01})$
25%	0.901	0	1.802
50%	0.781	0	1.562
100%	0.727	0.001	1.468



(a) Dumbbell specimen



(b) FE Model

Figure 4. Fatigue specimen.

피로시험을 수행하였다. 피로시험은 상온에서 3Hz의 속도로 변위제어 조건으로 수행하였으며, 평균변위는 0, 1, 2, 3, 4, 5 mm, 진폭은 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12 mm를 고려하여 수행하였다.

Figure 5는 평균변위에 따른 진폭과 수명의 관계를 나타낸 것으로서 평균변위와 진폭이 증가함에 따라 피로수명은 감소하였다. 피로손상 파라미터와 수명과의 관계를 결정하기 위해 상용 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.8¹¹을 사용하여 장구형 시편의 변형거동을 살펴보았다. Figure 4(b)는 장구형 시편의 유한요소모델을 나타낸 것으로서, 형상의 대칭성을 고려하여 1/8만 모델링 하였으며 8절점요소(C3D8H)를 사용하여 요소망을 구성하였다. 피로수명은 피로손상 파라미터의 최대값에 의해 결정된다³고 가정하였으며, 시험결과와 유한요소 해석결과로부터 피로수명과 대표적인 피로손상 파라미터인 변형률과 변형률 에너지밀도와의 관계를 구하여 Figure 6에 나타내었다.

4. 단품 특성 및 내구성능 평가

유한요소해석 및 내구해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 서스펜션 부시를 이용하여 정특성과 피로수명을 평가하였다. 정특성은 보이드(void) 방향(P-방향)과 브릿지(bridge) 방향(Q-방향)으로 측정하였다.

III. 내구해석 프로세스 구축

본 절에서는 한국기계연구원의 고무물성 데이터베이스 RubPRO로부터 해석용 비선형 재료상수를 선택하기 위한 방법을 제시하였으며, 고무부품 내구해석을 위한 최적의 피로손상 파라미터를 결정하였다. 또한, 이러한 결과를 활용하여 서

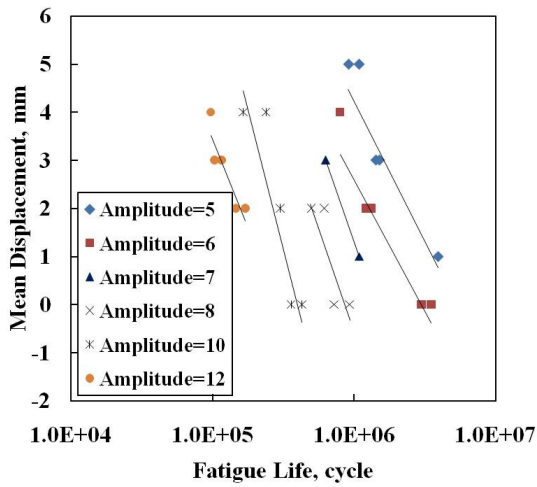
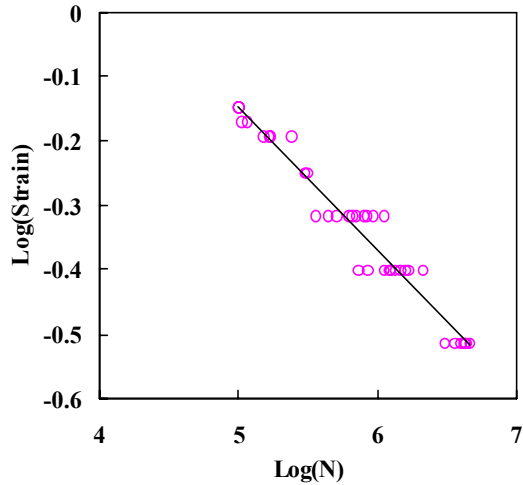
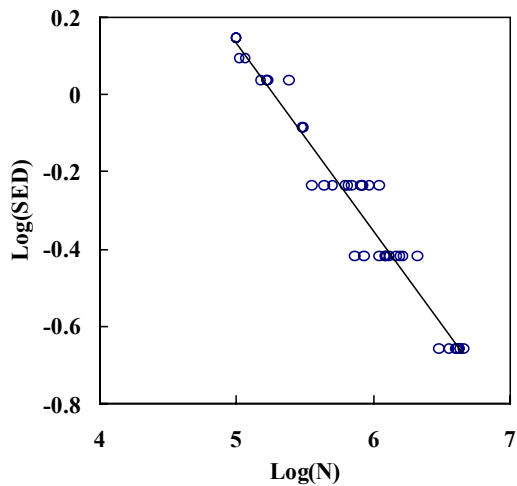


Figure 5. Displacement-fatigue life curve.

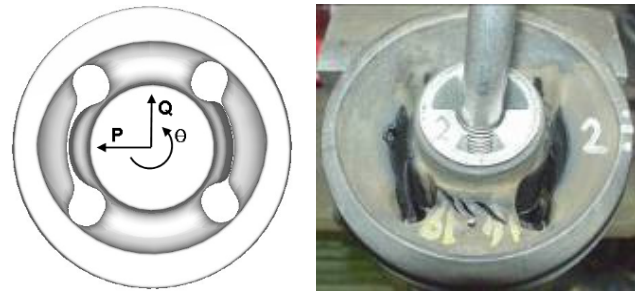


(a) 1st principle strain



(b) Strain energy density

Figure 6. Damage parameter and fatigue life curves.



(a) Loading condition (b) Tested specimen

Figure 7. Suspension bush specimen.

Table 3. Loading condition for fatigue test

Direction	Load	Frequency (Hz)
Radial P	$P \pm 5.5P$	3.3
Torsion θ	$T \pm 1.2T^\circ$	3.3

스펜션 부시에 대한 내구해석을 수행하여 제안된 피로수명 평가절차를 검토하였다.

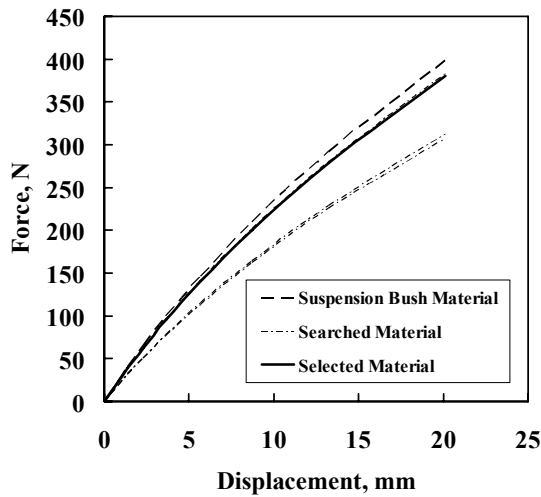
1. 비선형 재료상수 결정

고무재료는 배합조건에 따라 기계적 거동이 다르기 때문에 유한요소해석을 수행하기 위해 소재에 대한 비선형재료상수 확보가 선행되어야 하지만, 부품마다 배합조건이 다르기 때문에 이는 현실적으로 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 최소한의 제한된 실험결과로부터 해석을 위한 입력물성인 비선형 재료상수를 RubPRO에서 선택하기 위한 방법을 제시하였다.

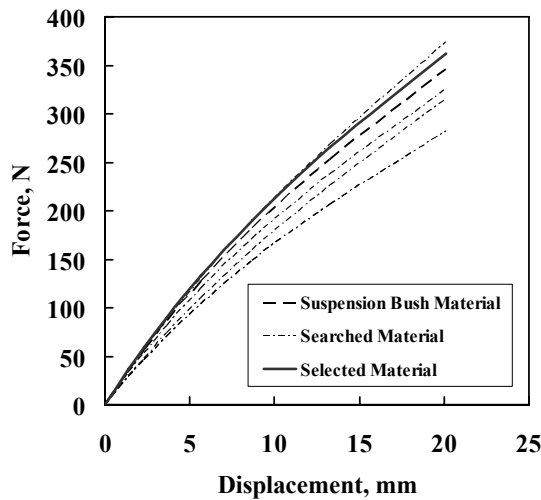
Table 1에 제시한 서스펜션 부시 소재의 경도인 70도와 유사한 60~75도를 검색조건으로 하여 RubPRO내에서 39개의 데이터를 검색하였다. 이들 중 인장강도와 신률이 유사한 7개의 고무소재를 선택하였으며, 이를 Table 4에 나타내었다. 서스펜션 부시 소재와 가장 유사한 소재는 경도 75도, 인장강도 26.3 MPa, 신률 452%인 NR70-01임을 알 수 있다.

Table 4. Basic material properties searched from RubPRO

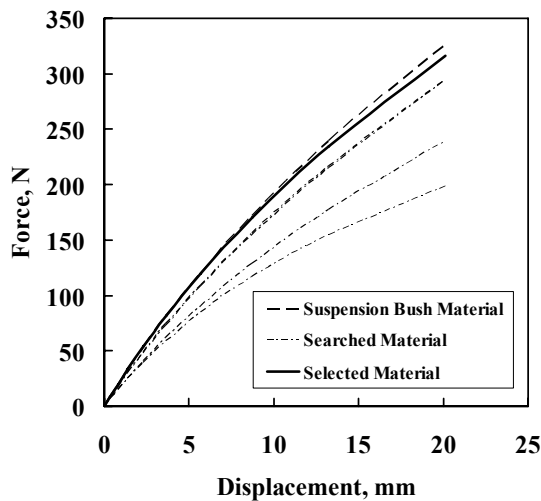
Material Name	IRHD Hardness	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
NR60-01	66	21.2	400
NR60-02	65	20.9	456
NR65-01	66	20.8	460
NR65-02	72	19.7	412
NR65-03	65	24.9	471
NR70-01	75	26.3	452
NR70-02	70	24	495



(a) 25% strain range



(b) 50% strain range



(c) 100% strain range

Figure 8. Load-displacement curves of dumbbell specimen.

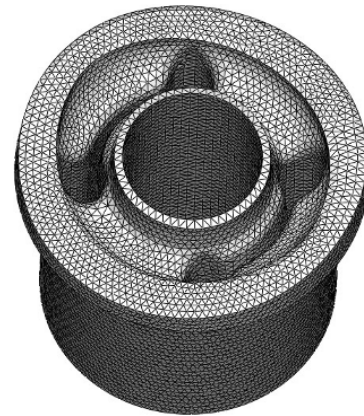
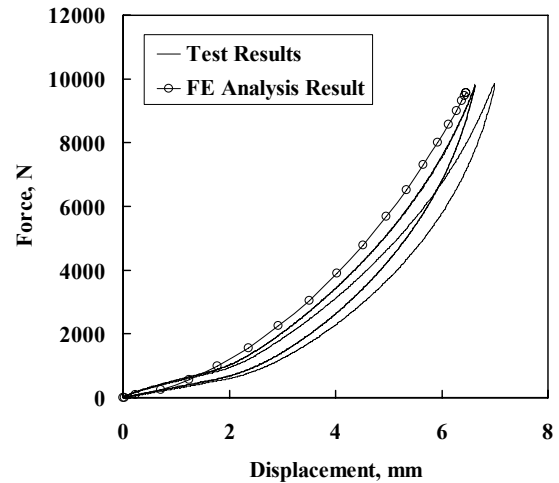
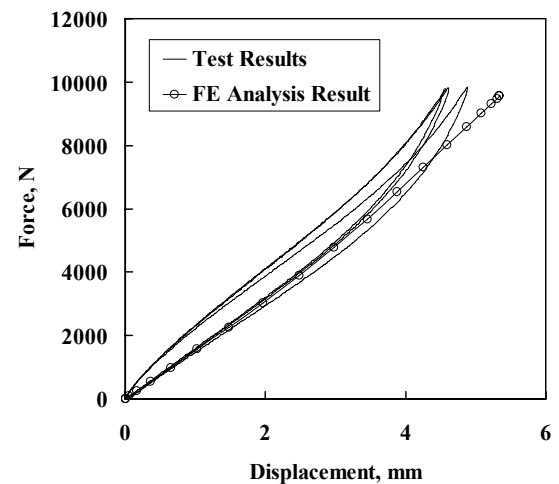


Figure 9. Finite element mesh of suspension bush.



(a) P direction



(b) Q direction

Figure 10. Load-displacement curves of suspension bush.

Table 4에 제시된 고무소재의 비선형 재료 상수를 이용하여 장구형 시편에 대한 유한요소 해석을 수행하여 각 변형률 범위 내 대한 하중-변위 선도를 구하였다. Figure 8은 해석결과를 나타낸 것으로서 서스펜션 부시 소재와 가장 유사한 기본물성을 보유한 NR70-01이 하중-변위 선도로 표현되는 기계적 거동 또한 가장 유사함을 알 수 있다.

2. 유한요소해석

서스펜션 부시의 변형거동을 살펴보기 위해 상용 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.8 Explicit Code를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. Figure 9는 서스펜션 부시의 유한요소모형을 나타낸 것으로서 10절점 사면체 요소(C3D10M)를 약 10만개 사용하여 요소망을 구성하였다. 초기 체적탄성률과 전단탄성률의 비(K_0/μ_0)는 100으로 가정하였다.

Figure 10은 서스펜션 부시에 대한 하중-변위 선도를 도시한 것으로서 해석결과는 실험결과를 비교적 잘 예측하였다.

3. 피로손상 파라미터 결정

일반적으로 고무부품의 피로수명을 평가하기 위해서는 균열발생과 균열진전을 고려하지만, 자동차에 적용되는 고무부품의 경우, 균열이 발생한 후에는 고무의 기계적 특성이 변화하기 때문에 균열발생을 파손이라 정의하고 균열발생 예측에 초점을 두고 있다. 균열발생을 예측하기 위한 손상 파라미터는 주로 주변형률(또는 신장률), 변형률 에너지밀도가 사용되며, 응력은 거의 사용되지 않는 것으로 알려져 있다.^{8,9}

Figure 11은 최대하중이 작용한 상태에서의 변형률 에너지 밀도와 주변형률의 분포를 나타낸 것이다. 두 피로손상 파라미터 최대값의 발생위치가 다른 것을 관찰할 수 있으며, 변형률 에너지밀도가 최대인 위치와 실제 서스펜션 부시 수명평가 실험에서 관찰된 균열발생 위치가 동일하였다. 이로부터 변형률 에너지밀도가 피로손상 파라미터로 사용하기에 보다 적합함을 알 수 있다.

Figure 12는 변형률 에너지밀도와 주변형률이 최대인 위치에서의 변형률에 대한 Mohr 원을 나타낸 것이다. 최대 전단 변형률은 변형률 에너지밀도가 최대인 위치에서 발생하며 부품내에서 최대 주변형률이 발생하는 위치와 다르다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 전단변형이 고무부품의 파손에 지배적인 영향을 미치는 경우에는 최대 주변형률만으로 고무부품의 파손을 예측하는 것이 부적절 한 것으로 판단된다.

4. 고무부품 피로수명평가

유한요소해석을 수행하여 계산된 대표적인 피로손상 파라미터인 최대 변형률과 변형률 에너지밀도를 사용하여 서스펜

션 부시의 피로수명을 예측하였다. 피로수명을 예측하기 위해 장구형 시편을 사용하여 구한 피로물성을 사용하였으며, 이를 변형률과 변형률 에너지밀도를 변수로 하여 다음과 같이 나타내었다.

$$N_f = 21,314(\text{Strain})^{-4.521} \tag{2}$$

$$N_f = 190,546(\text{SED})^{-2.063} \tag{3}$$

여기서, N_f 는 피로수명이다.

최대 주변형률, 변형률 에너지밀도를 사용하여 평가한 수명은 각각 135,707회, 86,746회로서 시험수명의 0.52배, 0.33배로 평가되어 매우 보수적으로 평가되었다. 이는 전술한 바와 같이 전단변형에 의해 파손이 발생하기 때문인 것으로 판단되며, 정확한 피로수명을 평가하기 위해서 전단변형을 고려할 수 있는 평가방법이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 일반적으로 천연고무에 대해 이축인장 피로수명은 단축 인장 피로수명에 비해 약 4배 큰 것으로 알려져 있다.⁸ 이와 같이 응력상태에 따라 다른 거동을 보이는 고무재료의 특성을 고려하여 피로물성을 평가하면 고무부품 피로수명을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

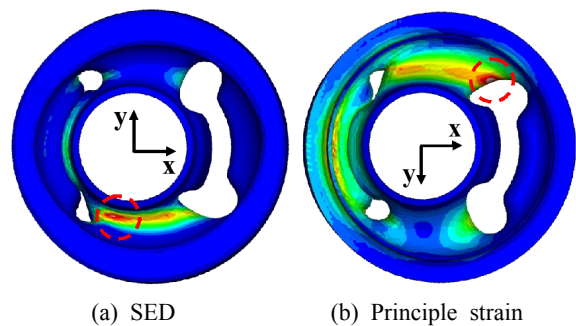


Figure 11. Contour plots of principle strain and SED.

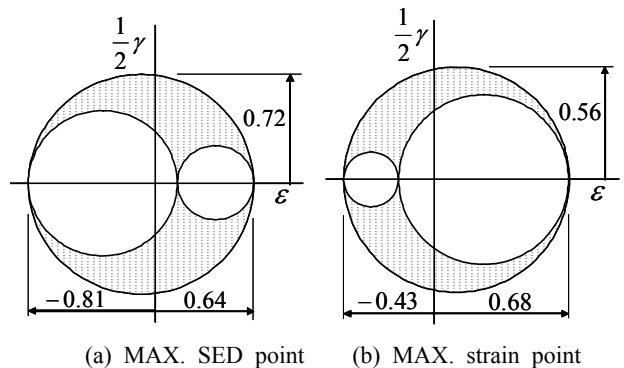


Figure 12. Mohr's circle for strain.

IV. 결 론

본 연구에서는 설계 초기단계에서 적용가능한 고무부품 내구해석 프로세스를 개발하기 위해 최소한의 제한된 실험결과로부터 해석용 입력물성을 선택하기 위한 방법을 제시하였으며, 고무부품 내구해석을 위한 최적의 피로손상 파라미터를 결정하였다. 또한, 서스펜션 부시에 대한 내구해석을 수행하여 제안된 피로수명 평가절차를 검토하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 설계 초기단계에 고무부품의 피로수명을 예측하기 위한 프로세스를 구축하였다.
- 2) 최소한의 제한된 실험(인장시험)을 수행하여 한국기계연구원 고무물성 DB RubPRO로부터 유한요소해석을 위한 비선형 재료상수를 선택하기 위한 방법을 정립하였다.
- 3) 최대 변형률 에너지밀도는 고무부품의 피로 균열 발생위치를 정확하게 예측하였다.
- 4) 전단변형이 고무부품의 파손에 지배적인 영향을 미치는 경우에 최대 주변형률은 피로수명을 평가하기에 부적합하며 전단변형을 고려할 수 있는 평가방법이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Korea Institute of Machinery and Materials, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components", M1-9911-00-0014, (2004).
2. A. N. Gent, "Engineering with Rubber", Hanser Gardner (2001).
3. C. S. Woo, W. D. Kim, and J. D. Kwon, "A Study on the Fatigue Life Prediction and Evaluation of Rubber Components for Automobile Vehicle", *Transaction of KSME*, **13**, 56 (2005).
4. C. H. Kim, K. J. Kim, H. T. Jeong, C. W. Kim, I. S. Sohn, and J. B. Kim, "Prediction of Durability, Static and Dynamic Properties on Rubber", *Transaction of KSME*, **14**, 17 (2006).
5. C. S. Woo, W. D. Kim, and J. D. Kwon, "A Study on the Material Properties and Fatigue Life Prediction of Natural Rubber Component", *Material Science and Engineering*, 367 (2008).
6. J. H. Kim and H. Y. Jeong, "A Study on the Material Properties and Fatigue Life of Natural Rubber with Different Carbon Blacks", *Internal Journal of Fatigue*, **27**, 263 (2005).
7. B. J. Roberts and J. B. Benzies, "The Relationship between Uniaxial and Equibiaxial Fatigue in Gum and Carbon black filled Vulcanizates", *Proceedings of Rubbercon*, **2.1**, 1 (1997).
8. V. Mars and A. Fatemi, "A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber", *International Journal of Fatigue*, **24**, 949 (2002).
9. GM, Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and TPE for Use in finite Element Analysis Modeling (2001).
10. N. Andre, G. Cailletaud, and R. Piques, "Haigh Diagram for Fatigue Crack Initiation Prediction of Natural Rubber Components", *Kautschuk Und Gummi dunstoffe*, **52**, 120 (1999).
11. Dassault Systems, ABAQUS Version 6.8 User's manual (2008).