

가황 천연고무의 피로수명에 미치는 최대 변형률과 노화도 영향

우 창 수^{*1)} · 김 완 두¹⁾ · 김 완 수¹⁾ · 권 재 도²⁾

한국기계연구원 구조연구부¹⁾ · 영남대학교 기계공학부²⁾

Effects of Maximum Strain and Aging Conditions on the Fatigue Life of Vulcanized Natural Rubber

Changsu Woo^{*1)} · Wandoo Kim¹⁾ · Wansoo Kim¹⁾ · Jaedo Kwon²⁾

¹⁾Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongbuk 712-749, Korea

(Received 2 February 2004 / Accepted 25 June 2004)

Abstract : The interest of the fatigue life of rubber components such as engine mounts is increasing according to the extension of warranty period of the automotive components. Automotive engine mounts get damaged due to thermal and mechanical loadings. This paper discusses a fatigue life prediction of the 3-dimensional dumbbell specimens for natural rubber compound considering the effects of maximum strain and heat aging temperature. Displacement controlled fatigue life tests were performed using specimens with different levels of maximum strain and various hardness. The basic mechanical properties test and the fatigue test of aged rubber specimen under normal and elevated temperature were executed. A procedure to predict the fatigue life of vulcanized natural rubber material based on the maximum strain method was proposed, and then this curve was in good agreement with fatigue test data less than 200% error range.

Key words : Vulcanized natural rubber(가황 천연고무), Fatigue life(피로수명), Heat aging(노화), Mean strain(평균 변형률), Maximum strain(최대 변형률), Hardness(경도)

1. 서론

대부분 방진 고무부품들은 환경적인 영향에 의한 노화와 반복하중에 의한 피로 손상 누적으로 인해 수명을 다하게 되는데 특히, 자동차 방진 고무부품들은 차량 주행 중 반복하중에 의한 피로손상이 발생할 수 있는 부품으로서 피로내구성 평가가 필수적이다.^{1,2)}

최근 자동차 부품의 신뢰성 보증기간 확대추세에 따라 방진 고무부품의 내구성 평가 및 수명 향상에

대한 관심이 높아지고 있으며 개발 초기에 피로내구성수명을 예측할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있다.³⁾

고무부품의 피로수명을 평가하기 위한 방법으로는 크게 소재 피로시험, 부품 피로시험 그리고 실차 내구주행시험으로 나눌 수 있는데, 소재 피로시험은 기하학적 형상, 하중상태 등의 영향으로 부품의 피로특성을 평가하는데 많은 어려움을 가지고 있다. 부품 피로시험 및 실차 내구피로시험은 시간과 경제적으로 많은 제약을 가지고 있으며, 특히 제품 개발 초기단계에서는 이 방법을 이용하여 수명을 평가하지 못하는 제한점이 있다.

*To whom correspondence should be addressed.
eswoo@kimm.re.kr

따라서 본 연구에서는 설계 초기단계에서도 짧은 시간에 비교적 정확하게 방진 고무부품의 피로수명을 예측할 수 있는 피로수명 식을 유도하였다.

Fig. 1은 방진 고무부품의 피로수명 예측 절차를 보여 준다. 고무재료의 물성시험 결과를 이용하여 고무부품의 유한요소 해석을 수행하고, 취약 부위에서의 최대 변형률과 하중과의 관계를 구한다. 다음에 부품과 같은 물성을 갖는 고무시편의 피로시험을 수행하여 최대 변형률과 피로수명과의 관계를 구하며, 이로부터 적절한 피로손상 변수를 규명한다.

고무부품의 유한요소 해석 결과와 고무시편의 피로실험결과를 이용하여 고무부품의 피로수명을 예측할 수 있다.^{4,5)}

본 논문에서는 방진 고무재료로 가장 많이 사용되는 가황 천연고무재료의 피로수명 식을 유도하기 위하여 여러 가지 정도의 피로시편을 제작하여 최대 변형률과 노화조건을 달리하여 피로시험을 실시하였다.

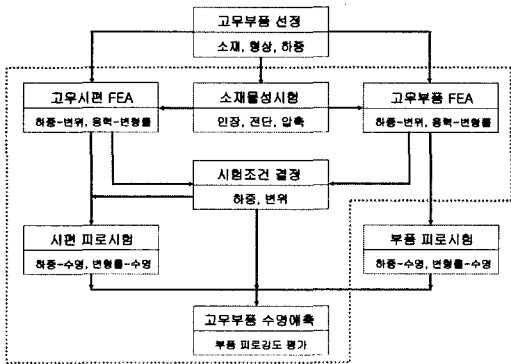


Fig. 1 Procedure of fatigue life prediction of rubber components

2. 고무시편 및 시험장치

2.1 고무시편

고무부품의 피로수명을 예측하기 위해서는 우선 동일한 고무재료에 대한 피로수명선도가 있어야 한다. 고무재료의 내구수명을 평가하기 위하여 평판 덤벨형 시편을 이용할 경우에는 압축변위와 압축하중을 부가할 수 없어 시편과 제품의 피로시험결과와의 상관성 유지가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는

피로하중에 의한 최대 인장변형률을 재현할 수 있도록 Fig. 2에서와 같이 양단에 금속판을 접착한 후 가황시킨 장구형 타입의 3차원 덤벨형 피로시편이 사용되었다.⁶⁾ 고무시편은 반복하중에 의한 이완이 발생하지 않고 인장·압축변형이 가능하여야 하며, 변형에 의한 변형률분포가 비교적 완만하여야 한다. 또한, 최대 인장변형률 발생부위가 어떠한 변형에도 일정하게 발생하는 조건을 만족하도록 하였다. 고무시편은 프레스 금형 성형법에 의해 제작되어 지므로 금형 면의 파팅 라인을 가지고 있어 균열 발생의 원인이 되므로 파팅 라인부와 최대변형률 발생부위가 일치하지 않도록 파팅 라인부를 단축에 위치하도록 하였으며, 장축의 지름을 14mm, 단축의 지름은 10mm의 타원 단면 형상으로 하였다. 고무시편의 곡률반경은 시험 데이터의 산포를 줄이기 위해서는 치수가 큰 쪽이 바람직하지만 고무의 변형량과 변형률 범위를 고려하여 20mm로 설정하였다.

고무시편의 변형률 분포와 최대 변형률을 구하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 최대 변형률은 고무 본체부

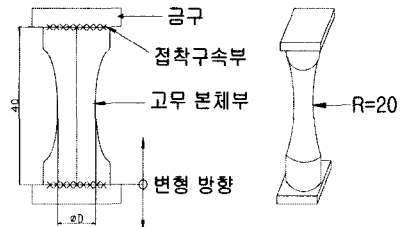


Fig. 2 A scheme of the fatigue specimen

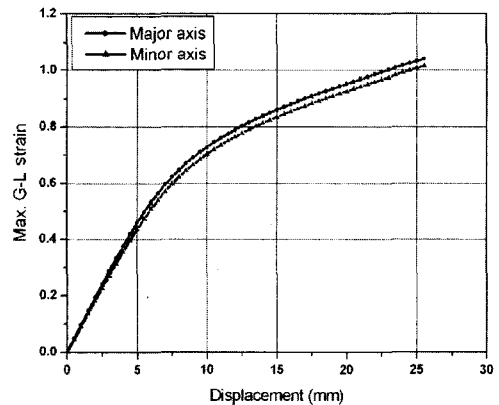


Fig. 3 Max. G-L strain of the 3-D dumbbell specimen

중앙의 표면에 발생하였으며 단축보다 장축에서 더 큰 변형률이 발생함을 알 수 있었다.

2.2 시험장치

고무시편에 대한 피로수명을 파악하기 위해 Table 1에서와 같이 3종류의 각각 다른 조성으로 제작된 천연고무 시편(NR55, NR60, NR65)을 제작하였으며, 시험기는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 변위 제어를 할 수 있는 피로 시험기를 이용하였다.

변위 제어 피로시험기는 전기모터를 이용하여 하중을 부여하도록 하였으며, 수직운동을 전달하는 연결봉에 3개의 시편을 장착하여 각각 다른 평균 변위를 손쉽게 부여하여 다양한 변위 조건으로 시험할 수 있다.

시편의 파손 발생 여부를 감지하기 위해서 모든 시편에 로드 셀(load cell)을 부착하였으며, 변위는 LVDT로 측정하였다.

Table 1 Compound of rubber materials

배합 \ 컴파운드	NR 55	NR 60	NR 65
SMR CV60	100	100	100
C/B FEF	27	40	40
C/B SRF	18	20	32
S/A	1	1	1
ZnO	5	5	5
S	1.8	1.8	1.8

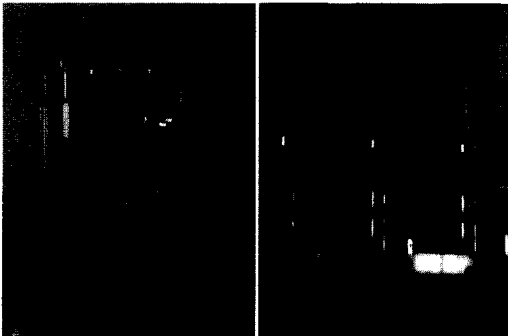


Fig. 4 Displacement controlled fatigue test machine

3. 피로시험 결과

3.1 피로수명 정의

Fig. 5는 피로시험 중 기록된 최대하중과 반복회

수의 관계를 보여 주는 그림으로 사이클릭 소프트닝(cyclic softening)에 의해서 반복회수의 증가에 따라 초기에는 최대 하중 값이 약간씩 감소하다가 균열이 발생하여 성장하는 시점에서는 하중 값이 급격하게 감소함을 알 수 있다.

그림에서 N_f 로 표시된 부분은 시편에 균열이 발생하여 시험편의 최대하중이 초기 최대하중의 80% 까지 감소하는 순간을 나타내며 이 때의 사이클 수가 피로수명이 된다.

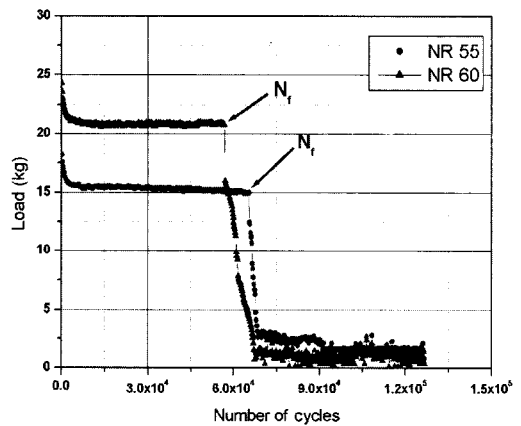


Fig. 5 Variation of load during fatigue test

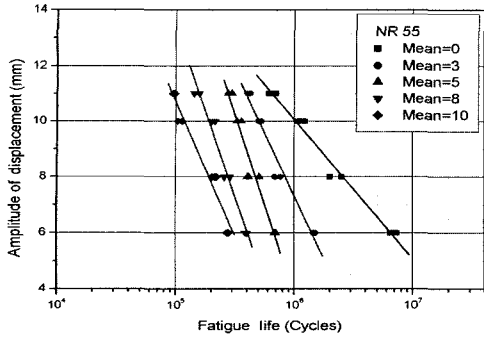
3.2 상온시험

고무재료의 종류와 평균 변위, 진폭 등이 피로수명에 끼치는 영향을 검토하고 적절한 피로 손상변수를 규명하기 위해 상온에서 평균 변위가 0, 3, 5, 8, 10mm 가 되도록 -11~21mm의 범위에서 변화시키면서 피로 시험을 수행하여 평균 변위가 피로수명에 미치는 영향을 파악하였으며, 변위 진폭은 6, 8, 10, 11mm로 하여 진폭변화에 따른 피로수명도 검토하였다.

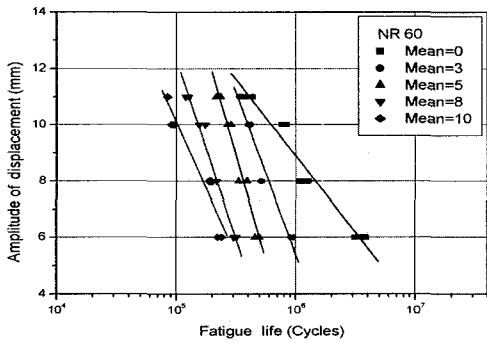
Fig. 6은 고무시편에 대해 경도와 평균 변위 변화에 따른 변위 진폭과 피로수명과의 관계를 나타낸 것으로, 동일한 진폭에서 평균 변위가 클수록 피로수명은 감소하였다. 또한 경도가 높은 재료일수록, 진폭이 증가할수록 피로수명은 감소함을 알 수 있었다.

3.3 노화시험

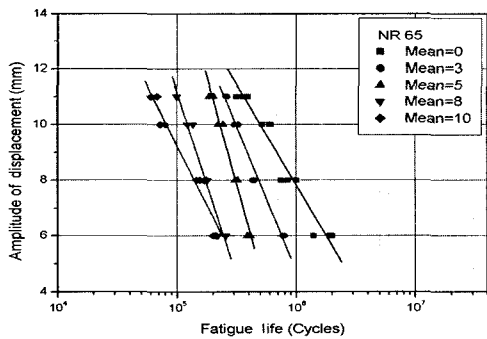
노화된 시편의 피로수명을 평가하기 위해 각 고무시편을 70°C의 환경 챔버에 90일 동안 노화시키



(a) NR 55



(b) NR 60

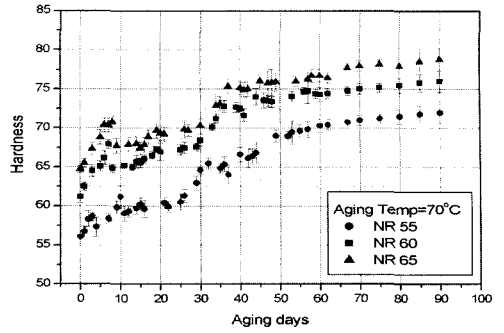


(c) NR 65

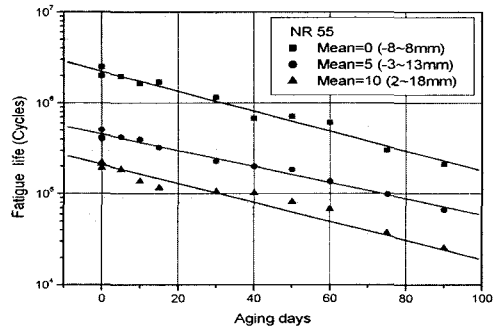
Fig. 6 Effect of mean displacement on fatigue life

면서 일정기간의 간격으로 시편을 꺼내서 상온에 방치한 후 진폭 8mm에서 평균 변위를 0mm(-8~8mm), 5mm(-3~13mm), 10mm(2~18mm)로 변화시켜 가면서 피로시험을 수행하였다.

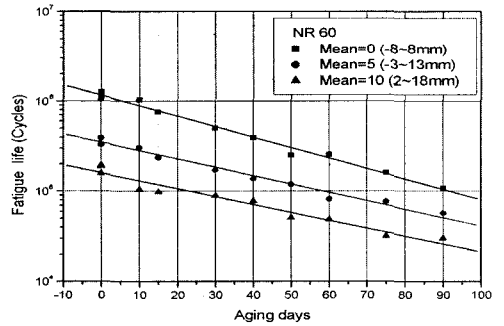
Fig. 7은 노화시간에 따른 경도변화와 피로수명과의 관계를 나타낸 것으로 노화시간이 길수록 경도는 증가하였다. 또한, 노화시간과 평균 변위 및 경도가 증가할수록 피로수명은 감소하는 경향을 나타내었다.



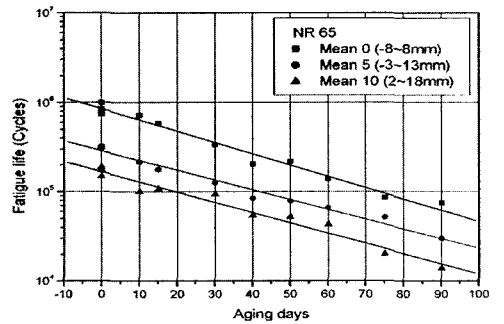
(a) Hardness



(b) NR 55



(c) NR 60



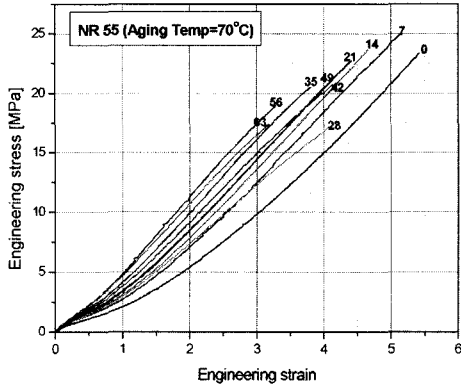
(d) NR 65

Fig. 7 Effect of aging days on the hardness and fatigue life

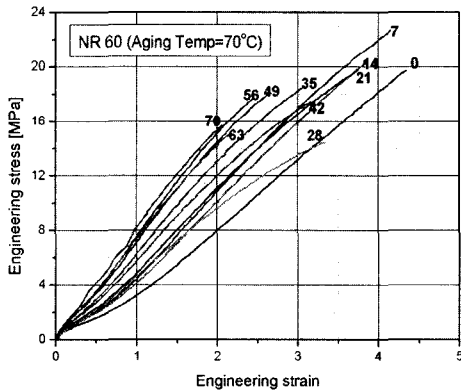
4. 피로수명 예측 및 평가

4.1 물성시험

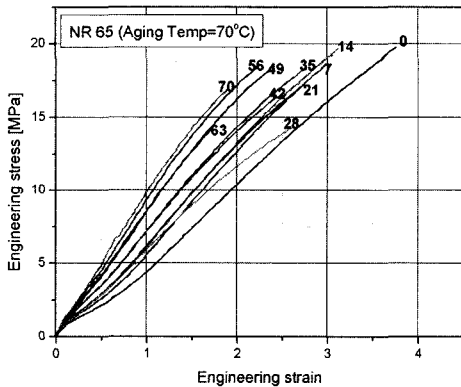
Fig. 1에서와 같이 제안된 고무시편의 피로수명을 예측하기 위해 고무소재의 물성시험을 수행하여



(a) NR 55



(b) NR 60



(c) NR 65

Fig. 8 Strain-stress curves at heat aging temperature

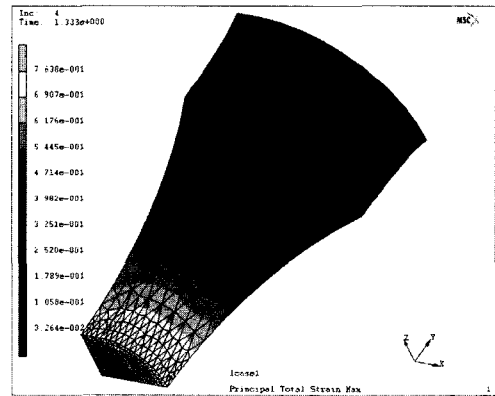
상은 및 노화시간에 따른 경도, 신율, 인장강도, 응력-변형률 등의 물성변화를 데이터 베이스(database)화 하였다.⁷⁾

Fig. 8은 70°C에서 노화일수에 따른 응력-변형률 관계를 나타낸 것으로 노화기간이 길수록 강성이 점차적으로 커지는 것을 알 수 있었다.

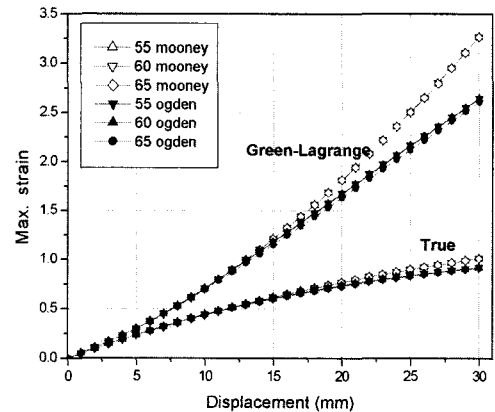
4.2 고무시편 유한요소해석

경도 및 노화시간 변화에 따른 고무재료에 대한 물성시험 결과를 이용하여 고무시편에 대해 유한요소 해석을 통하여 Fig. 9와 같이 각 고무시편에 대해 인장 변위와 변형률과의 관계를 구하였다.

고무와 같이 대 변형이 발생하는 재료의 유한요소 해석에서는 일반 공칭 변형률보다 그린-라그랑지 (Green-Lagrange, G-L) 변형률이 많이 사용되므로,⁵⁾



(a) Max. strain distribution of 3-D dumbbell specimen



(b) Relationship of the Max. strain vs displacement

Fig. 9 Result of 3-D dumbbell specimen by FEA

고무시편의 유한요소해석 결과로부터 최대 G-L 변형률 값을 계산하였으며, 신장율(λ)과 공칭 변형률(ϵ_0) 및 G-L 변형률(ϵ_{G-L})과의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_0 = \lambda - 1, \quad \epsilon_{G-L} = \frac{1}{2}(\lambda^2 - 1) \quad (1)$$

4.3 피로손상 변수

여러 가지 시험조건에서 얻어진 피로시험 결과를 고무재료, 평균 변위, 진폭 변화 따라 다양한 피로수명선도로 나타내었다. 시험조건에 따라 각각 다른 피로수명 선도를 적절한 피로손상 변수를 이용하여 하나의 피로수명 선도로 표현하면 고무시편의 피로수명을 예측하는데 큰 도움이 될 것이다.

Fig. 10은 피로시험 데이터를 이용하여 진폭, 평균 변위, 최대인장 변위를 변수로 하여 피로수명과의 관계선도를 보여준다. Fig. 10(a)는 변위 진폭과 피로수명 선도로써, 평균 변위(M)가 커질수록 피로수명이 감소하며 변위 진폭과 피로수명이 하나의 선도로 나타낼 수 없음을 알 수 있다. 한편, Fig. 10(b)는 최대인장 변위와 피로수명 선도로써 평균 변위와 진폭에 상관없이 인장변위가 클수록 피로수명이 감소함을 알 수 있다. 따라서 최대인장 변위를 피로손상 변수로 하면 시험조건에 상관없이 피로수명을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

4.4 피로수명 예측

4.4.1 상온시험을 통한 피로수명 예측

고무시편에 대한 상온에서의 피로시험 결과를 Fig. 11(a)에서와 같이 각 재료에 대한 최대인장 변위와 피로수명과의 관계로 나타내었다.

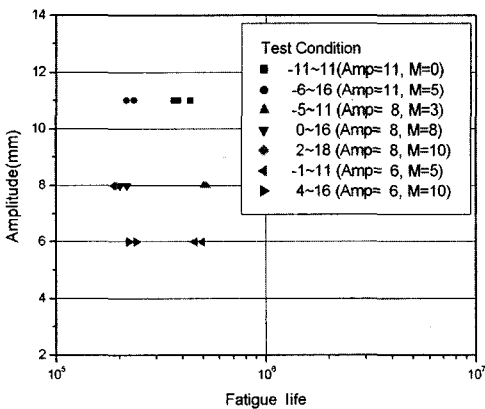
고무시편과 고무부품의 피로수명과의 상관관계를 얻기 위해서 최대인장 변위와 피로수명과의 선도를 최대 변형률과 피로수명과의 관계선도로 변환할 필요가 있다. Fig. 9(b)에서 구해진 최대인장 변위와 변형률과의 관계를 이용하여 Fig. 11(b)와 같이 최대 G-L 변형률과 피로수명과의 관계선도로 나타내었다.

그림에서와 같이 평균 변위가 달라도 최대인장 변위와 최대 G-L 변형률이 피로손상을 잘 표현하는 변수임을 알 수 있었다.

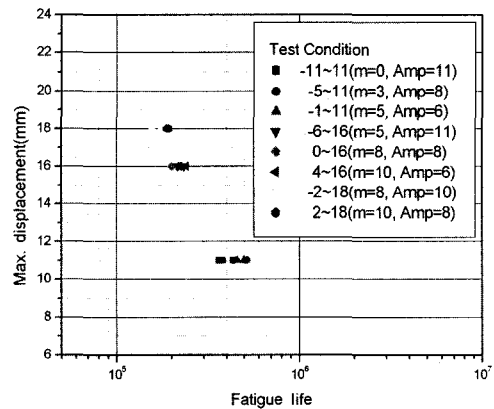
최대 G-L 변형률을 피로손상 변수로 하여 피로수명 예측 식을 제안하였으며, 제안된 예측 식을 이용하여 피로수명을 예측하였다.

다음은 각 시편에 따른 최대 G-L 변형률과 피로수명과의 관계를 고무재료와 시험조건 등에 상관없이 하나의 식으로 나타내기 위하여 각각의 재료에 대한 최대 변형률을 각 소재에서 파단 될 때까지의 신율로 나누어 무차원 시키면 Fig. 11(b)는 Fig. 12(a)와 같이 하나의 선도로 표현할 수 있다.

$$N_f = 1,096 \cdot [\text{Max. } G-L \text{ Strain} / EB_{G-L}]^{-2.22} \quad (2)$$

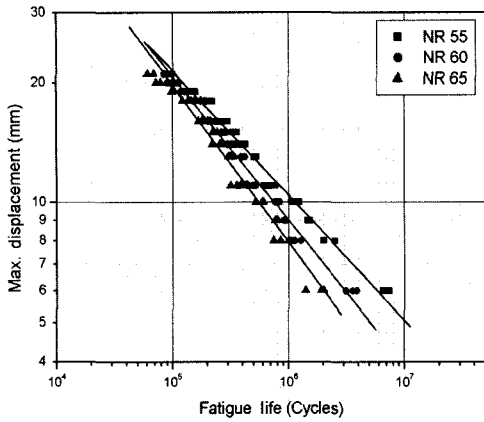


(a) Amplitude

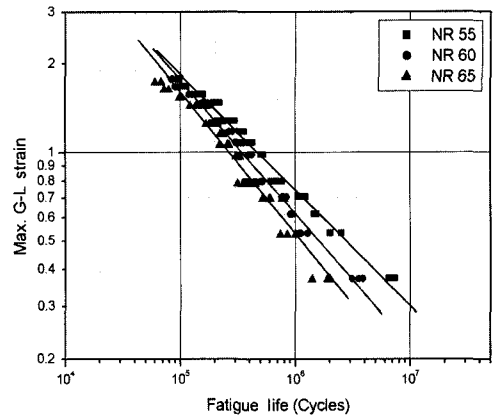


(b) Maximum displacement

Fig. 10 Fatigue life curve at various conditions

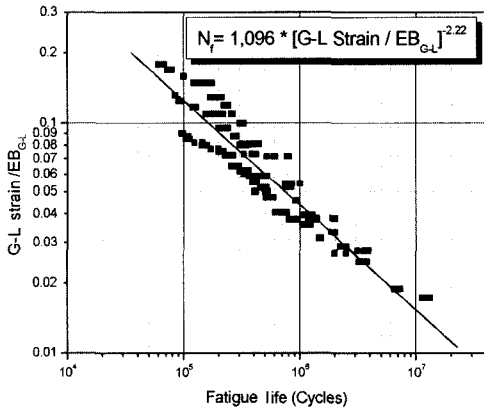


(a) Max. displacement

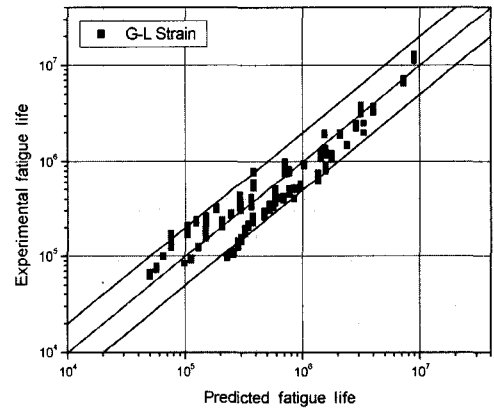


(b) Max. G-L strain

Fig. 11 Max. displacement & G-L strain vs fatigue life



(a) Predicted fatigue life



(b) Experimental vs. predicted fatigue life

Fig. 12 Predicted fatigue life by using max. G-L strain

식 (2)는 고무시편 피로수명 예측 식으로, 이 식을 이용하면 고무재료 및 평균 변위의 변화에 따른 피로수명은 그림 Fig. 12(b)와 같이 피로수명을 오차 범위 2배 이내에서 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

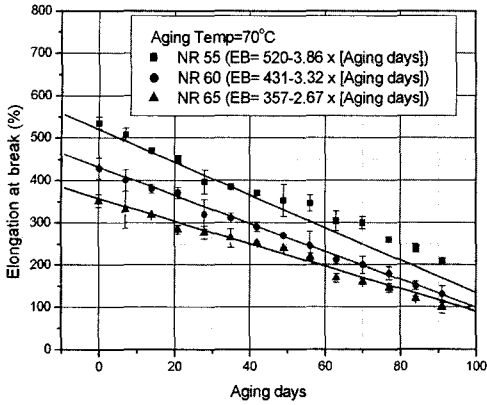
이와 같이 최대 변형률을 판단 시 발생하는 신율로 나누어 무 차원한 변수는 고무재료 및 평균 변위, 진폭이 달라도 고무시편의 피로수명을 예측할 수 있는 피로손상 변수임을 알 수 있었다.

4.4.2 노화시험을 통한 피로수명 예측

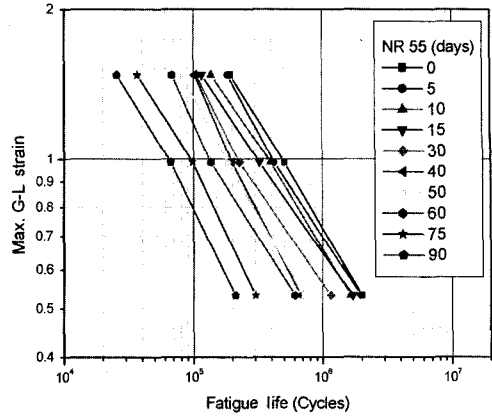
노화된 고무시편에 대한 피로수명 예측은 고무소재에 대한 노화 특성시험 결과와 노화 피로수명시험 결과를 활용하여야 한다.

각 소재에 대한 고무시편을 70°C의 환경 챔버에서 90일 동안 노화시키면서 피로시험을 수행하였으므로, 소재에 대한 물성도 70°C에서 90일 동안 노화시킨 시편에 대한 노화 특성을 이용하여야 한다. 상온 피로수명 예측에서 고무소재의 최대 변위와 판단 시의 신율 및 최대 변형률이 피로수명 손상 변수임을 알았기 때문에 노화 피로수명예측에서도 이 변수를 활용하여 노화 피로수명을 예측해 보았다.

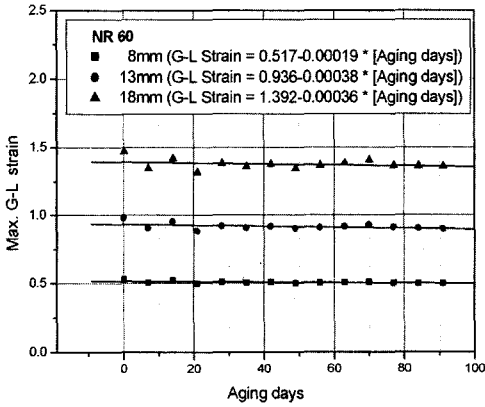
고무소재에 대한 노화시간에 따른 신율 변화는 Fig. 13(a)와 같이 노화시간이 길수록 신율은 감소하였으며, 유한요소 해석을 통해 얻어진 최대 G-L 변형률과 노화시간과의 관계는 Fig. 13(b)와 같이 노화시간에 무관하게 비교적 일정함을 알 수 있었다.



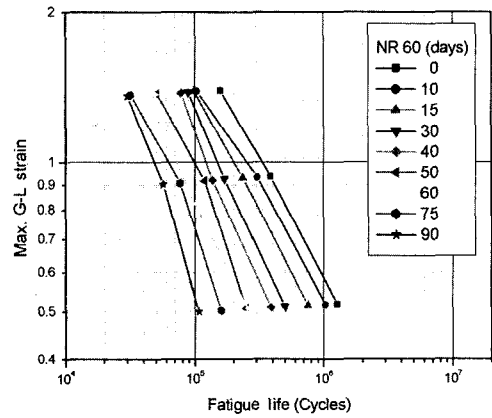
(a) Elongation at break



(a) NR 55



(b) Max. G-L strain



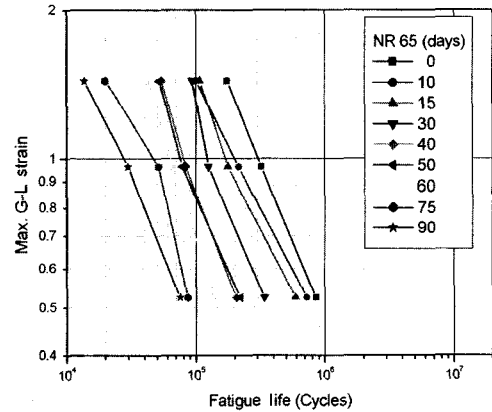
(b) NR 60

Fig. 13 Effect of aging on elongation and max. G-L strain

노화 피로시험을 통해 얻어진 최대인장 변위와 피로수명과의 관계를 최대 G-L 변형률과 노화시간과의 관계를 이용하여 최대 G-L 변형률과 피로수명과의 관계로 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서와 같이 노화시간이 증가할수록 피로수명은 감소하였으며, 노화시간 및 재료에 따라 피로수명이 크게 변화함을 알 수 있었다.

노화된 시편의 피로수명 예측은 상온 피로수명을 예측하는 같은 방법으로 각각의 소재에 대한 최대 G-L 변형률을 노화시간에 따른 신율로 나눈 값으로 무차원 하면 Fig. 15와 같이 고무소재 및 노화시간에 상관없이 표현됨을 알 수 있었으며, 식 (3)과 같이 피로수명을 예측할 수 있는 식을 얻을 수 있었다.

$$N_f = 3,846 \cdot [Max. G-L Strain / EB_{G-L}]^{-1.75} \quad (3)$$



(c) NR 65

Fig. 14 Max. G-L strain vs. fatigue life for aging specimens

Fig. 16은 식 (3)을 이용하여 예측된 피로수명과 실험에서 구한 피로수명과의 관계를 나타낸 것으로

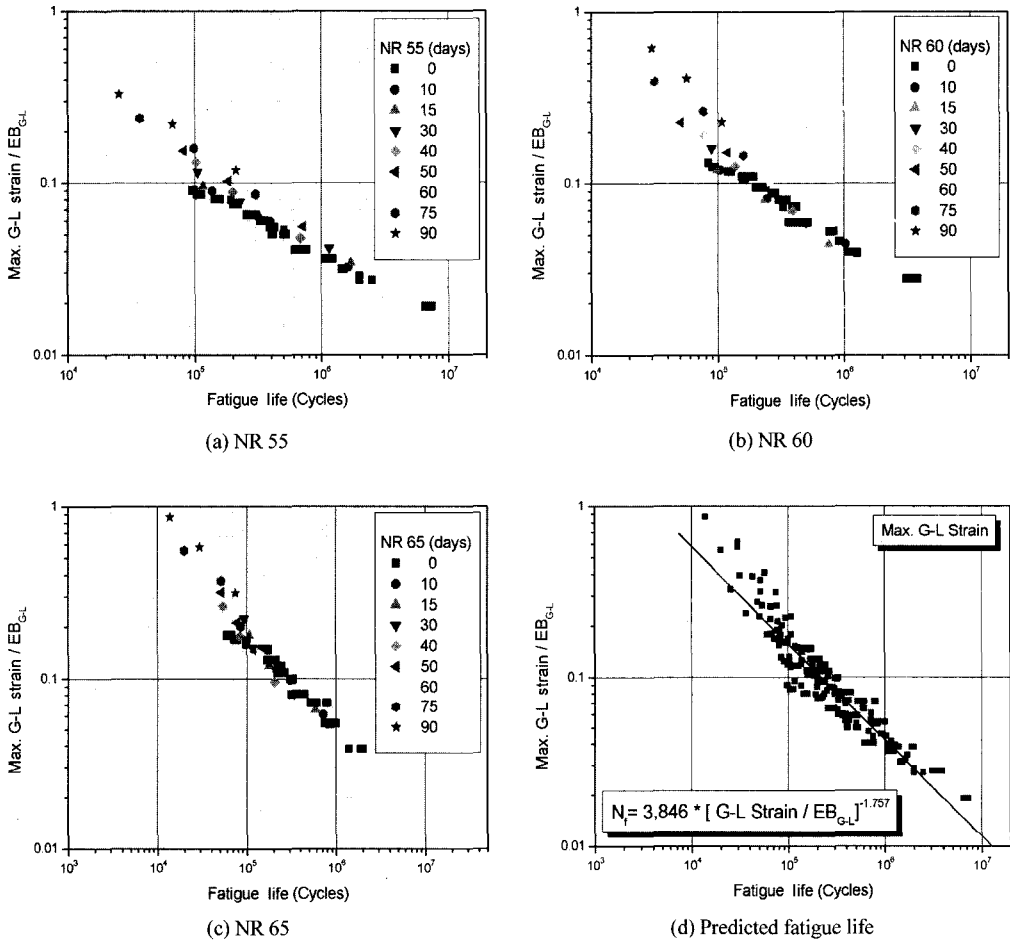


Fig. 15 Normalized max. G-L strain vs. fatigue life

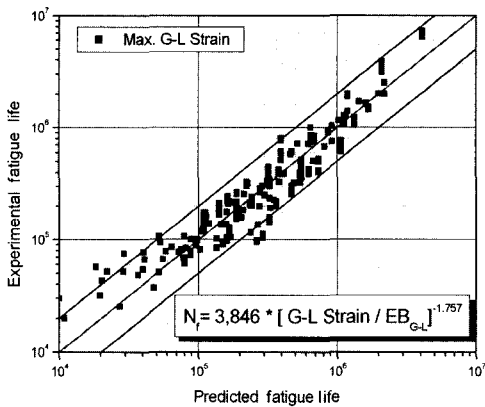


Fig. 16 Experimental vs. predicted fatigue life

오차범위 2배 이내에서 예측결과와 실험결과가 잘

일치하였다.

이로부터 최대 G-L 변형률을 파단 시 발생되는 신율로 나눈 값을 피로 손상변수로 이용하면 고무 재료 및 노화시간 등에 무관하게 피로수명을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

고무부품의 피로수명을 평가하기 위한 방법 중의 하나로 고무시편을 이용하여 여러 가지 시험 조건에 따른 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 최대 G-L 변형률을 고무재료의 신율로 나누어 준 무차원 변수로서 고무재료와 평균 변위, 진폭

의 영향을 하나의 선도로 잘 나타낼 수 있었으며, 이 결과를 이용한 피로수명 예측 식을 제안하였다.

- 2) 제안된 피로수명 식을 이용하면 고무재료 및 노화시간에 관계없이 오차범위 2배 이내에서 비교적 정확하게 피로수명을 예측할 수 있었다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 시행한 국가지정연구실 사업 연구결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) A. N. Gent, "Engineering with Rubber," Hanser, 1992.
- 2) R. C. Riu, "SAE Fatigue Design Handbook," 3rd. ed. SAE, pp.259-278, 1998.
- 3) K. Takeuchi, M. Nakagawa, "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, 1993.
- 4) W. D. Kim, C. S. Woo, "Design and Analysis of the Hyperelastic Rubber Components," KIMM Report, 98-NG-01-03-A-01, 1999.
- 5) W. D. Kim, C. S. Woo, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components," KIMM Report, UCN 323-902.M, 2000.
- 6) Katsumasa Takeuchi, "Fatigue Test Technique of Rubber Materials for Vibration Insulators and Their Evaluations," JSME, Vol.66, pp.247-252, 1995.
- 7) W. D. Kim, D. J. Kim, "A Study on the Equi-biaxial Tension Test of Rubber Materials," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.95-104, 2003.