

3차원 장구형 고무시편의 피로수명예측

한승우* · 김정엽* · 김완두* · 김춘휴*

Prediction of Fatigue Life of 3D Jang-gu Rubber Specimens

S. W. Han, J. Y. Kim, W. D. Kim, C. H. Kim

Key Words: Rubber(고무), Tearing Energy(인열에너지), J-Integral(J-적분), FE Analysis(유한요소해석), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

Rubber is used extensively in many industries because of its large reversible elastic deformation, excellent damping and energy absorption characteristics, and wide availability. It becomes very important to predict the fatigue life of rubber components. But a great deal of time and cost are necessary for the fatigue test of rubber components. In this study the fatigue life of rubber components is evaluated by performing the fatigue test of a specimen and FE analysis.

The fatigue life of Jang-gu type specimen which is considered as a simple rubber component is predicted and compared with experimental results. Its material is natural rubber of which hardness is 60 and used for the engine mount of commercial vehicles.

1. 서론

최근 일류화를 지향하는 선진 제품의 경우 기본적인 기능 외에 저진동, 저소음화 및 작동감 향상 등을 통한 고품질·고품위·고신뢰성 달성을 위해 대부분의 기계제품에 고무류 부품의 사용이 날로 증가하고 있는 추세이다. 또한 고무부품은 고도의 신장성과 탁월한 복원 능력 및 진동 감쇠 특성으로 인하여 엔진 마운트, 부싱, 밀봉장치, 타이어 등 자동차, 철도차량을 비롯하여, 방진 및 제진을 위한 토목·건설분야, 세탁기, 에어컨 등 가전제품 뿐 만 아니라 미래산업 분야인 반도체, 정보통신 등 전 산업분야에 널리 활용되고 있다.⁽¹⁾

이와 같이 여러 산업분야에서 고무의 다양한 적용이 증가함에 따라 고무 부품의 안전성 및 신뢰성 확보가 중요한 사항이 되었고, 따라서 고무부품에 대한 피로수명평가에 대한 필요성이 요구되고 있다.

고무부품의 피로수명을 평가하기 위해서는 부

품에 대한 피로시험을 수행하거나 실제 사용 환경에서 실차시험을 수행하여야 하는데 이는 시간이나 경제적으로 많은 제약을 수반한다.

따라서 본 연구에서는 고무재료에 대한 피로시험과 유한요소해석을 통하여 고무부품의 피로수명을 예측하고자 한다.

고무부품의 피로수명평가를 위하여 먼저 간단한 부품으로 간주되는 3차원 장구형 시편에 대하여 피로수명을 예측하였다. 예측한 장구형 시편의 피로수명은 장구형 시편의 피로시험을 통하여 검증하였다.

실험에 사용된 고무는 경도 60의 천연고무(NR)로서 자동차의 엔진 마운트에 흔히 사용되는 재료이다. 유한요소해석은 상용 비선형 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.⁽²⁾

2. 유한요소해석

2.1 재료상수 결정

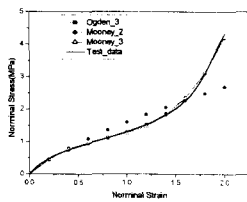
고무의 재료상수를 결정하기 위해서는 일반적으로 단축 인장·압축시험, 순수전단시험을 통하여 얻어진 응력-변형율의 데이터와 변형율 에너지함수로부터 구해진 응력-변형율값과의 차이를

* 한국기계연구원

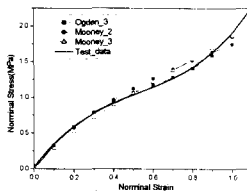
최소화 시킴으로써 구해진다.

본 연구에서 사용된 재료는 NR 60으로, 인장시험 결과와 순수전단시험 결과를 종합하여 재료상수를 구하였다.⁽³⁾

Fig 1은 단축인장 시험, 순수전단시험의 결과와 커브 피팅에 따른 응력-변형을 관계이다. 여기서 구해진 각 모델의 재료상수는 Table 1에 나타내었다. 커브 피팅 결과를 보면 Ogden 모델의 결과가 좋음을 알 수 있다.



(a) Uniaxial tension



(b) Planar shear

Fig. 1 Results of curve fitting

Table 1 Material constants

Mooney	$C_{10} = 0.555 \text{ MPa}$	
-Rivlin	$C_{01} = -0.0877 \text{ MPa}$	
Ogden	$\mu_1 = 4.857,$	$\alpha_1 = 0.1569$
	$\mu_2 = 0.001271,$	$\alpha_2 = 12.38$
	$\mu_3 = -3.881,$	$\alpha_3 = -0.3524$

2.2 순수전단시편

순수전단시편에 대하여 유한요소해석을 수행하여 균열진전에 따른 인열에너지(Tearing Energy)를 구하였으며 그 결과를 이론해와 비교하였다. 고무의 비선형 재료상수는 Ogden 모델을 적용하였다. 순수전단시편에 대한 인열에너지의 이론식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$G = U h_0 \quad (1)$$

여기서 U 는 변형에너지밀도(Strain Energy Density)이다.

시편의 치수는 Fig. 2에서와 같이 폭(B) 10 mm, 높이(h_0) 10 mm, 두께(t) 1 mm이다. 균열길이(C)는 15, 22, 29, 36, 43, 50 mm일 때에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 3은 순수전단시편의 유한요소 모델이며, 균열 면에 대하여 하중 및 경계조건과 기하학적 형상이 상하 대칭이므로 1/2만 모델링하였다. 균열선단에서의 요소 크기는 0.75 mm이다. 해석에는 4절점 평면응력 요소를 사용하였다. 경계조건은 균열면에 상하 대칭조건을 부여하였으며, 윗면의 폭 방향 변위를 구속하였다. 그리고 윗면에서 4 mm의 높이 방향 변위(연신률 $\lambda = 1.4$)를 가하였다.

Fig. 4에서는 순수전단시편에 대한 인열에너지의 계산 결과를 보여준다. 탄성영역에서는 인열에너지와 J-적분(Integral)이 같은 값을 가지므로 유한요소해석에서 J-적분을 계산하여 인열에너지를 구하였다.⁽⁵⁾ Fig. 4의 유한요소해석 결과에 따르면 균열길이에 무관하게 인열에너지가 일정함을 볼 수 있으며, 이는 식 (1)의 이론식과 일치한다. 또한 연신률이 증가할수록 인열에너지가 증가함을 알 수 있다.



Fig. 2 Pure shear specimen

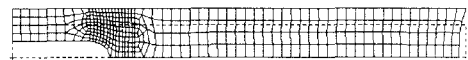


Fig. 3 Deformed shape of pure shear specimen at C/B=0.22

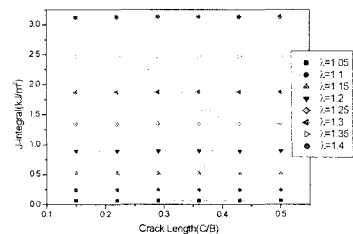


Fig. 4 Tearing Energy of Pure Shear Specimen

2.3 장구형 시편

Fig. 5와 같은 장구형 시편에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 균열진전에 따른 인열에너지를 계산하여 그 결과를 실험과 비교하였다.

고무재료의 모델은 순수전단시편과 마찬가지로 Ogden모델을 이용하였다. Fig. 6는 장구형 시편의 유한요소모델이며 대칭을 이용하여 1/4만 모델링하였다. 해석의 효율성을 위하여 균열부위를 Fig. 7과 같이 서브모델(Submodel)로 구성하였다. 전체 시편에 사용한 요소는 10절점 사면체요소이며, 서브모델에서는 8절점 육면체요소를 사용하였다. 경계조건으로는 대칭면에 대칭조건을 부여하였으며 윗면의 단축, 장축방향변위는 구속하고 길이방향 변위로 10 mm(연신율 $\lambda = 1.5$)를 추가하였다.

3차원 모델에서 균열의 진전방향은 균열선단의 법선방향으로 정해지므로 이에 맞게 유한요소 모델링을 구성하였으며, 균열선단의 형상은 Fig. 8에서와 같이 타원형으로 가정하였으며, 장축에서의 균열길이는 0.9, 1.4, 1.9, 2.4, 2.9, 3.4 mm의 6가지 균열크기에 대해 해석하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 균열선단의 중앙부에서의 인열에너지 값을 연신율과 균열길이에 대하여 나타낸 것이며, 연신율과 균열길이가 커질수록 인열에너지가 커짐을 알 수 있다.

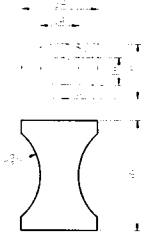


Fig. 5 Jang-gu type specimen

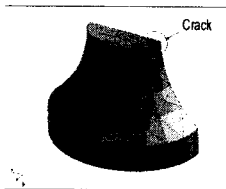


Fig. 6 FE model of Jang-gu type specimen

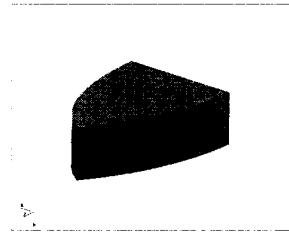


Fig. 7 Submodel of crack region

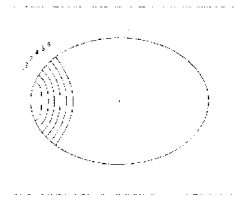


Fig. 8 Crack front shape

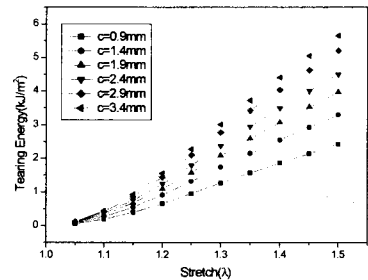


Fig. 9 Tearing energy vs stretch

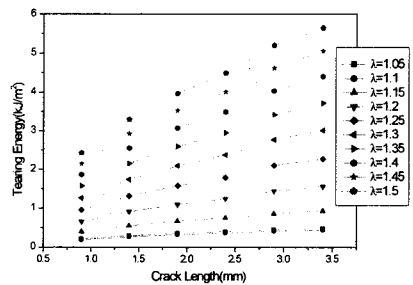


Fig. 10 Tearing energy vs crack length

3. 순수전단시편의 피로균열진전해석

일반적으로 고무의 피로균열진전은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$\frac{dC}{dN} = f(G) \quad (2)$$

여기서 함수 $f(G)$ 는 인열에너지 범위에 의존한다.

오존의 영향은 없고 기계적인 힘에 의해 균열이 진전하게 되는 영역에서 피로균열진전속도와 인열에너지는 다음과 같은 관계를 가지고 있다.⁽⁴⁾

$$\frac{dC}{dN} = BG^\beta \quad (3)$$

여기서 B 와 β 는 재료상수이다.

순수전단 시편에 대한 피로균열진전 시험을 수행하였다. 순수전단 시편의 크기는 Fig. 2와 같으며, 초기 균열은 15mm가 되도록 제작하였다.

순수전단시편의 경우 높이에 대한 폭의 비를 약 1/10 이하로 하여 Edge 효과를 최소화하도록 권하고 있다.⁽⁴⁾

시험기로는 2.5kN의 로드셀이 설치된 유압식 피로시험기를 사용하였다. 시험은 변위제어로 수행하였으며, 시험하중은 최소 변위를 영으로 하고 최대 변위는 시편 높이의 10%~40%까지 변위를 부가하였다. 시험 주파수는 변위를 고려하여 3Hz~15Hz로 조절하였다.

균열길이는 오차범위 0.01mm, 25배율의 이동식 현미경을 사용하여, 0.1~0.75mm 간격으로 측정하였다. Fig. 11은 순수전단시편의 피로시험 모습이다.

순수전단시편의 인열에너지는 균열길이에 관계없이 일정하므로 인열에너지는 균열이 없는 순수전단시편의 응력-변형률 선도를 이용하여 구할 수 있다. Fig. 12는 순수전단시편의 응력-변형률 선도이다.

Fig. 13은 피로균열진전 시험결과이다.

시험에 의해 구해진 인열에너지 G 와 피로균열진전속도 dC/dN 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{dC}{dN} = 3.32 \times 10^{-17} \cdot G^{2.83} \quad (4)$$

여기서 Fig. 13에서 보이는 커브 피팅 선도의 기울기 β 는 재료에 따라 달라지는 물성이다. 고무재료에 대해 β 는 통상 2~6의 값을 가지며, NR인 경우는 약 2, cis-polybutadiene와 SBR인 경우는 3~4 정도의 값을 갖는다.⁽⁴⁾ 본 실험에서 사용한 재료는 NR이며, 시험결과는 $\beta = 2.83$ 으로 나타났다.

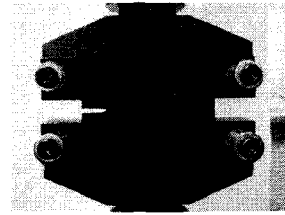


Fig. 11 Fatigue test of pure shear specimen

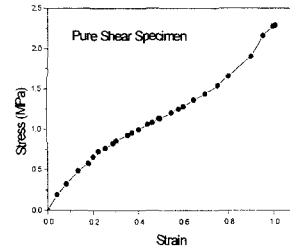


Fig. 12 Stress-strain curve of pure shear specimen

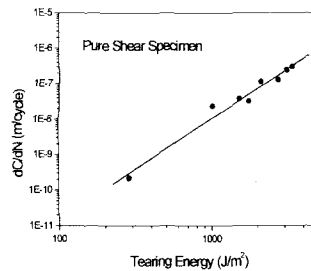


Fig. 13 Fatigue crack growth of pure shear specimen

4. 장구형 시편의 피로시험

Fig. 5와 같은 형상의 장구형 시편의 피로시험을 수행하였다. 사용한 시험기는 고무 전용 피로 시험기로서 모터에 의해 구동되며, 변위제어가 가능하다.

시험하중 조건으로 최소 변위인 영에서부터 최대 변위인 시편 높이(40mm)의 25~50%까지 변위를 부가하였다. 시험 주파수는 5Hz로 조절하였다. 초기균열은 칼을 이용하여 0.15 ~ 1.14 mm까지 도입하였다.

Fig. 14는 피로 균열이 있는 장구형 시편의 피로 시험하는 모습이다.

피로시험 후 현미경을 이용하여 시편의 파단면을 관찰하여 초기 균열길이와 최종 균열길이를 측정하였다. Fig. 15는 피로시험 후 파단된 장구형 시편의 모습으로 피로균열을 관찰할 수 있다.

Table 2와 Fig. 16은 장구형 시편의 피로시험 결과이다. 장구형 시편의 균열진전속도가 순수전단시편에 비해 느림을 알 수 있다.

이러한 두 시편에 대한 시험결과의 차이는 평균변형률의 영향, 시편간의 형상의 차이 등에 기인하는 것으로 판단된다.

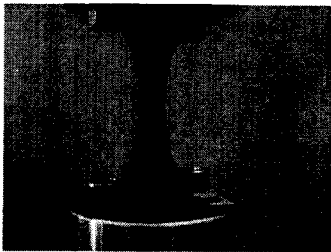


Fig. 14 Fatigue test of Jang-gu type specimen



Fig. 15 Fatigue failure of Jang-gu type specimen

Table 2 Results of fatigue test of Jang-gu type specimen

시편	최대변위 (mm)	초기균열 길이(mm)	최종균열 길이(mm)	피로수명 (cycles)
#1	31.0	0.15	2.45	8,389
#2	21.84	1.11	2.56	8,100
#3	11.0	1.14	2.04	158,702

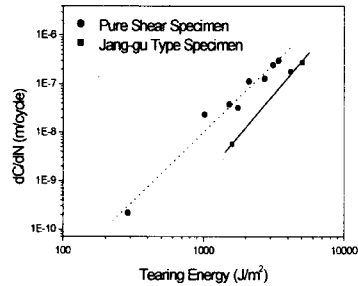


Fig. 16 Prediction of fatigue life on Jang-gu type specimen

5. 장구형 시편의 피로수명예측

식(2)를 이용하여 피로수명을 계산하면 식(5)와 같다.

$$N = \int_{G_i}^{G_f} \frac{1}{dG/dC} \frac{dG}{f(G)} \quad (5)$$

여기서 G_i 는 초기 균열길이에 대한 인열에너지이며, G_f 는 최종 균열길이에 대한 인열에너지이다.

따라서 식(5)에 식(3)을 대입하여 적분을 수행하면 피로수명은 다음의 식에 의해 계산된다.

$$N = \frac{1}{B(\beta-1)} \left(\frac{1}{G_i^{\beta-1}} - \frac{1}{G_f^{\beta-1}} \right) \frac{1}{dG/dC} \quad (6)$$

G_i , G_f 는 장구형 시편의 유한요소 해석 결과에 의해 구해지며, dG/dC 는 Fig. 10에서의 기울기로부터 구할 수 있다.

따라서 순수전단시편의 시험 결과로부터 B , β

를 구하고 장구형 시편의 유한요소해석결과를 이용하면 식(6)에 의해 장구형 시편의 피로수명을 예측 할 수 있다.

순수 전단시편의 피로균열진전시험에 의하면 사용된 재료에 대해 식(3)의 재료상수는 $B = 3.32 \times 10^{-17}$, $\beta = 2.83$ 으로 나타났다.

Table 3은 장구형 시편의 피로수명을 예측한 결과이며, Fig. 17에는 예측결과와 장구형 시편의 피로시험에 대한 결과를 비교하였다. 장구형 시편의 피로시험결과는 예측된 피로수명에 비해 약 2.3~6.4배 만큼 크게 나타났다.

이러한 시험결과와 예측치의 차이는 다음의 인자에 의한 것으로 사료된다.

- 첫째, 평균변형률의 영향
- 둘째, 판통균열과 표면균열의 차이를 포함한 두 시편간의 형상에 대한 영향
- 셋째, 장구형 시편의 균열길이 측정에 따른 오차

Table 3 Prediction of fatigue life on Jang-gu type specimen

시편	초기균열 인열에너지 (J/m ²)	최종균열 인열에너지 (J/m ²)	피로수명 (cycles)
#1	5,356	14,714	3,638
#2	6,276	10,361	2,800
#3	2,647	3,740	24,613

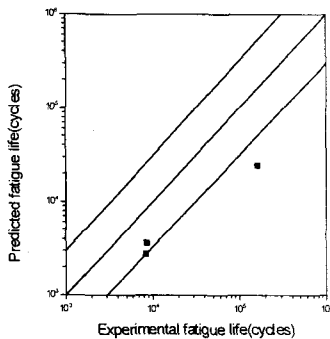


Fig. 17 Comparison of predicted and tested fatigue lives for Jang-gu type specimen

6. 결론

천연고무재료의 순수전단시편을 사용한 피로균열진전시험 결과와 장구형 시편에 대한 유한요소해석 결과를 이용하여 장구형 시편의 피로수명을 예측하였다. 그리고 장구형 시편의 피로시험을 통하여 예측된 피로수명을 비교한 결과 2.3~6.4배의 오차를 나타내었다. 이는 평균변형률, 형상의 차이, 균열길이 측정에 따른 어려움 등에 기인한 것으로 판단된다.

고무시편과 고무부품의 피로수명간의 관계를 좌우하는 인자들에 대한 향후 연구가 진행됨에 따라 본 연구의 피로수명예측 절차를 이용하여 직접 고무부품을 실험하지 않고도 보다 정확한 피로수명을 평가할 수 있으리라 기대된다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

참고문헌

- (1) 김완두 외, 1999, "초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술 개발," 한국기계연구원 연구보고서, UCN236-712.M.
- (2) HKS, 2000, "ABAQUS User's Manual".
- (3) "Standard Test Methods for Rubber Properties in Tension", ANSI/ASTM D412-80.
- (4) Alan N. Gent, 1992, Engineering with Rubber: how to design rubber components, Hanser.
- (5) 김정엽 외, 2000, "고무시편의 파괴특성평가", 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 395-401.