

변형률에너지밀도를 이용한 타이어용 고무의 피로 특성 평가

안상수* · 김성래** · 박한석** · 강용구** · 구재민* · 석창성*†

* 성균관대학교 기계공학부, ** 넥센타이어(주) 연구개발본부

Evaluation of Fatigue Characteristics of Rubber for Tire Using Strain Energy Density

Sang Soo Ahn*, Seong Rae Kim**, Han Seok Park**, Yong Gu Kang**, Jae Mean Koo* and Chang Sung Seok*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,

** R&D Center, Nexen Tire Co.,

(Received February 23, 2012 ; Revised July 23, 2012 ; Accepted July 24, 2012)

Key Words: Rubber(고무), Strain Energy Density Function(변형률에너지밀도함수), Fatigue(피로)

초록: 초탄성 재료인 고무는 타이어의 주 원료인데, 주행 중 다양한 형태의 하중을 받는다. 그와 같은 하중에 의하여 타이어에 변형률에너지가 축적되어 파손에 이르게 된다. 일반적으로 초탄성재료인 고무는 금속과 다른 응력연화 특성을 갖고 있기 때문에 금속의 시험법을 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 조성비가 다른 2 종의 타이어용 고무에 대한 피로특성을 평가하기 위하여, ASTM D4482 규격에서 요구하는 변형률 범위를 확장하여 인장 및 피로시험을 진행하였으며, 실험 결과를 이용하여 피로수명식을 제안하였다.

Abstract: Rubber, a hyperelastic material, is the main material used in tires. During the operation of a car, the tire receives various types of loads. The accumulation of strain energy due to such loads induces tire failure. Generally, because rubber materials used for tires have stress softening characteristics, unlike metals, test methods used for metals cannot be applied to rubber. Therefore, in this study, for the evaluation of the fatigue properties of two types of specimens that have different material components, a tensile test and a fatigue test according to the extended strain range dissimilar to ASTM D4482 are performed, and fatigue life equations are proposed based on the test results.

- 기호설명 -

- G : 기하평균(geometric mean)
- N : 피로수명(fatigue life)
- n : 실험횟수(total number of specimens)
- $\epsilon=(L_f-L_0)/L_0$: 변형률(strain)
- $\lambda=L_f/L_0$: 신장률(extension ratio)

1. 서론

자동차 운행 중에 발생하는 하중과 지열, 마찰에 의해 발생하는 열과 마모는 타이어의 내구성을

감소시키고 있는데, 특히 고속화되고 있는 자동차의 승차감의 개선 및 안전사고 예방을 위해서는 내구성 평가가 필수적이다.^(1,2) 이를 위해서는 타이어의 주재료로 사용되는 초탄성 재료인 고무의 피로특성 평가가 중요하다. 그러나 고무가 일반적인 금속과는 다른 응력연화특성을 가지고 있기 때문에 금속에 적용되는 평가 방법을 적용할 수 없다.

일반적으로 고무재료는 금속과는 달리 큰 변형에서도 탄성을 유지하며, 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 초탄성(hyperelastic) 특성과 더불어 감쇄 거동특성이 있기 때문에 진동을 제어하는 곳에 널리 적용되고 있다.⁽³⁾ 고무 부품의 설계를 위한 정밀한 유한요소해석을 위하여서는 고무 부품과 동일한 배합조건을 갖는 시편에 의한 정확한

† Corresponding Author, seok@skku.edu

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

물성 시험이 필요할 뿐만 아니라 고무의 응력-변형률 관계를 가장 적절히 표현할 수 있는 변형률 에너지밀도함수를 찾는 일이 매우 중요하다. 고무 재료의 비선형 대변형 거동을 표현하는 변형률 에너지밀도함수에 대한 여러 가지 수학적 이론들이 제안되어 있는데, 이 제안된 이론들은 유한요소해석에도 적용되고 있다.

고무는 배합성분에 따라 큰 차이를 나타내는데 강도를 향상시키기 위하여 카본블랙과 같은 보강제를 사용하게 되면 응력 연화 현상(stress softening), 영구변형(permanent set), 히스테리시스(hysteresis) 주파수의존 응답현상이 나타나는 비탄성(inelastic) 특징을 보이게 된다. 특히 하중을 가하고 제거하는 과정이 반복될 때 응력이 초기 하중을 가한 것에 비해 작아지게 되는 응력 연화현상인 Mullins 효과⁽⁴⁾가 나타나기 때문에 단순인장 시험이라 할지라도 ASTM D4482⁽⁵⁾에서는 30 회 반복 후 시험을 수행하게 하고 있다.

이와 같은 타이어의 주재료인 고무제품의 피로 특성 평가는 소재와 부품의 피로시험과 실차 내구 주행시험으로 나눌 수 있는데, 부품의 피로시험과 실차 내구시험은 시간과 경제적으로 많은 제약을 가지고 있기 때문에 시편을 사용하여 피로수명을 평가하고 있다.⁽⁶⁾ 또한 고무부품들은 환경적인 영향에 의한 노화나 반복적인 하중에 의한 피로 파괴가 발생하기 때문에 환경조건을 고려한 피로 시험이 필요하다.⁽⁷⁾

이와 같은 고무의 피로문제를 다루는데 있어서 최대 주 변형률과 변형률에너지밀도(SEM)를 활용한 기준이 널리 사용되고 있다.⁽⁸⁾ 그 중 최대 주 변형률 기준은 다축 하중이 작용하는 경우에 적합하지 않으며, 변형률에너지밀도는 균열의 진전방향을 결정하는데 적합하지 않으나, 적용의 편리성 때문에 일반적인 다축 하중이 작용하는 혼합모드문제에 많이 적용되고 있는 기준으로 알려져 있다.^(9,10)

또한 ASTM D4482 에 따르면 1.6~2.4 범위의 최대신장률(extension ratio), 즉 최대변형률인 0.6~1.4 범위에서 피로시험을 수행하도록 제시하고 있으나, 실제 타이어는 해당 범위 이외의 다양한 범위에서 운용된다고 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 타이어와 같이 복잡한 하중이 작용하는 다축 하중문제에 적용이 용이한 변형률 에너지밀도를 적용하여 카본블랙을 보강제로 사용한 고무의 인장과 피로특성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 자동차 타이어에 사용되는 화학적 조성비가 다른 고무재료인 스틸벨트화합물(steel belt compound)

과 캡플라이화합물(caply compound)을 가지고 ASTM D4482 의 피로시험법에 따라 실험을 수행하였으며, 최대 신장률의 범위를 확대하여 인장실험을 수행하였다. 또한 피로시험을 실시한 후 변형률에너지밀도를 이용한 피로 수명 식을 제안하였다.

2. 고무 모델의 구성방정식

고무는 화학적 구성성분에 따라 비선형, 비압축성, 대변형의 특징을 가지고 있다. 이러한 고무의 거동을 특성화하기 위해 여러 형태의 변형률에너지밀도함수가 보고 되는데 주불변량(principal invariant) 또는 주신장률(principal stretch ratio)을 이용한 변형률에너지밀도는 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$W=W(I_1, I_2, I_3)=W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (1)$$

$$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2 \quad (3)$$

$$I_3=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (4)$$

여기에서 W 는 변형률에너지밀도함수(strain energy density function)이며, I_1, I_2, I_3 는 주신장률로 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 에 대한 불변량들이다. 고무재료의 경우 비압축성으로 볼 때, $\lambda_1\lambda_2\lambda_3=1$ 이므로 $I_3=1, I_2=1/\lambda_1^2+1/\lambda_2^2+1/\lambda_3^2$ 이 되고, 단일 인장시 $\lambda_2=\lambda_3$ 이기 때문에 식 (3)과 (4)에 의해 $I_1=\lambda_1^2+2/\lambda_1$ 이 된다.⁽¹²⁾ 고무재료에 있어 폭넓게 사용되고 있는 변형률에너지밀도함수에는 Mooney-Rivlin 모델⁽¹³⁾과 Ogden 모델⁽¹⁴⁾이 있다. Mooney-Rivlin 모델은 변형률 2 이하에서 정확한 모델로 알려져 있으며, Ogden 모델은 변형률 2 이상에서 정확한 모델로 알려져 있으나 실험 및 해석 시 보다 폭넓게 사용될 수 있는 모델로 식 (5)와 같은 Yeoh 모델^(11, 12, 15-17)이 있다.

$$W=C_1(I_1-3)+C_2(I_2-3)^2+C_3(I_3-3)^3 \quad (5)$$

Yeoh 모델의 계수들은 단축인장인 경우에 실험에 의한 응력-변형률 선도에서 식 (6)을 이용하여 회귀 분석으로부터 얻을 수 있다.⁽¹²⁾

$$\sigma = \left[\begin{array}{l} C_1 + 2C_2 \left((1+\varepsilon)^2 + \frac{2}{(1+\varepsilon)} - 3 \right) \\ + 3C_3 \left((1+\varepsilon)^2 + \frac{2}{(1+\varepsilon)} - 3 \right)^2 \end{array} \right] \times \left[2(1+\varepsilon) - \frac{1}{(1+\varepsilon)^2} \right] \quad (6)$$

Table 1 Materials compositions

Type	Steel belt compound	Capply compound
Component		
NR(천연고무)	100%	70%
Filler(카본블랙)	60Phr	50Phr

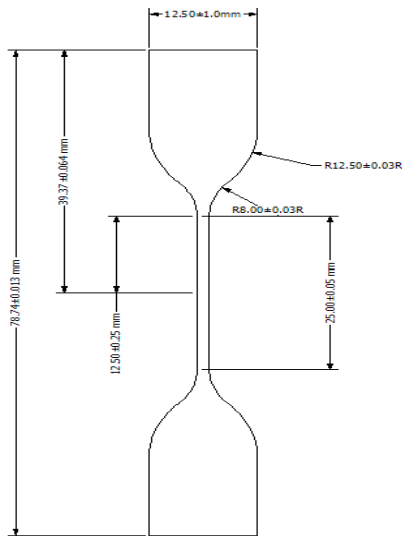


Fig. 1 Standard test specimen

3. 고무시편 및 인장시험

3.1 고무시편

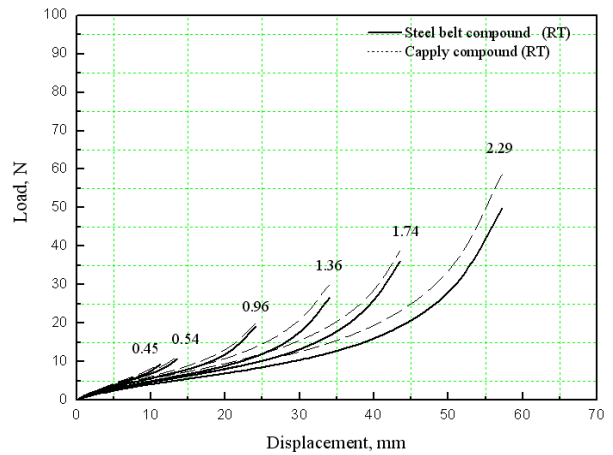
본 연구에 사용된 시험편의 재질은 타이어에 사용되는 고무재질의 스틸벨트화합물과 캡플라이화합물이며, 사용된 고무 재질의 조성비는 Table 1 과 같다. 시험편을 제작하기 위하여 몰드를 제작 후 두께가 1.4mm 인 평판 가류 고무를 우선 제작 하였으며 ASTM D4482 에 따라 Fig. 1 와 같은 형상으로 다이커터(die cutter)를 사용하여 시험편을 제작하였다.

3.2 인장시험

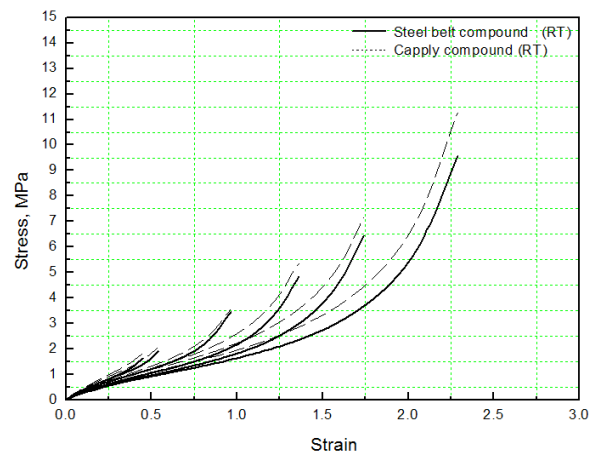
본 연구에서는 변형률에너지밀도를 얻기 위하여 시마즈사의 전기모터식 시험기를 사용하여 ASTM D4482 의 시험법에 따라 인장시험을 수행하였다.

시험속도는 50mm/min 으로 하였으며, ASTM 의 최대신장률 범위내인 최대변형률이 1.36, 0.96 인 경우와 이 범위 밖인 2.29, 1.74, 0.54, 0.45 에 대하여 시험을 수행하였다.

또한 시험 수행에 앞서 각각의 변형률에 대해서 시험편을 30 회씩 늘린 후 시험을 수행하였다.



(a) Load-displacement curve



(b) Stress-strain curve

Fig. 2 Tensile test results

고무재질의 스틸벨트화합물과 캡플라이화합물의 경우 반복 하중을 받으면 고무 구조의 변형과 파손이 발생하여 강성이 감소하는 Mullins 효과가 나타나게 되는데, Woo 등⁽¹⁸⁾은 고무 컴파운드에 대해 각각 4 회씩 늘린 후 다양한 변형률 구간에 대해서 인장시험을 수행하였다. 4 회와 30 회씩 늘린 후 인장시험을 실시하는 까닭은 고무의 분자구조를 안정화시키기 위한 것이다.

3.3 인장시험결과

Fig. 2(a)는 최대 신장률 범위 내인 최대변형률이 1.36, 0.96 인 경우와 이 범위 밖인 2.29, 1.74, 0.54, 0.45 인 경우에 각 시험편을 ASTM 시험법에 따라 30 회씩 늘린 후 각각의 변형률 구간에서 인장시험을 통하여 얻은 그래프이다. 또한 각각의 변형률 구간에서 얻은 하중 변위선도를 이용하여 Fig. 2(b)와 같이 응력과 변형률 선도를 획득 하였다.

서로 다른 조성비를 갖는 스틸벨트화합물과 캡플라이화합물에 대한 인장시험 결과 캡플라이 화합물이 스틸벨트화합물 보다 인장응력이 크게 나타났으나 최대변형률의 증가에 따라 응력이 증가하는 유사한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다.

최대변형률이 0.45 인 경우 두 시편에 작용하는 응력의 차이가 크게 나타나지는 않지만, 최대변형률이 2.29 인 경우 캡플라이 화합물 시험편이 스틸벨트화합물 보다 높게 나타남으로써 응력연화 현상이 적게 나타남을 알 수 있었다. 또한 변형률이 커질수록 두 재료에서 발생하는 응력의 차이가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 스틸벨트부에 피로가 많이 가해지므로 피로에 대한 특성이 높아야 하기 때문에 적절한 결과로 판단된다.

Table 2 Yeoh coefficients from tensile test

Type	Strain	Properties		
		C ₁ (×10 ⁻³)	C ₂ (×10 ⁻³)	C ₃ (×10 ⁻³)
Steel belt compound	0.45	735.4	-317.3	599.7
	0.54	746.8	-286.0	361.7
	0.96	639.2	-127.6	80.2
	1.36	566.5	-73.2	29.1
	1.74	530.7	-50.9	14.6
	2.29	542.4	-44.7	7.7
Capply compound	0.45	853.6	-208.1	420.3
	0.54	802.3	-197.7	292.0
	0.96	643.2	-69.5	62.2
	1.36	629.2	-51.8	26.8
	1.74	622.3	-42.9	14.1
	2.29	627.0	-46.1	8.7

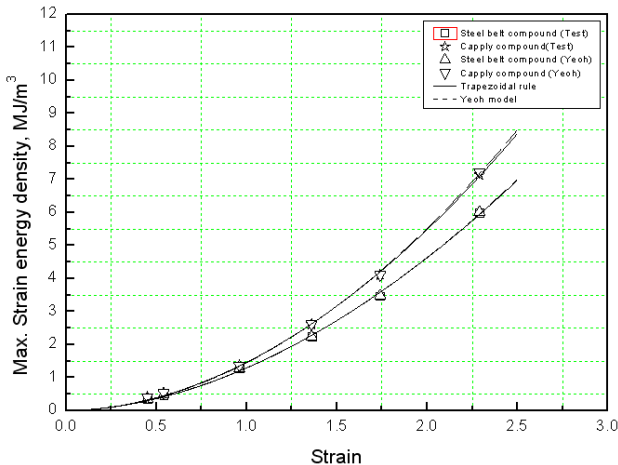


Fig. 3 Maximum strain energy density-strain curve

4. 변형률에너지밀도(Strain energy density) 도출

초탄성 재료인 고무는 반복적인 부하를 통해서 소성변형이 일어나게 되며, 이에 따라 변형률에너지가 축적되어 파손이 일어나는 양상을 가지게 된다. 인장시험으로부터 얻은 응력-변형률 선도에 면적을 구하는 수치해석법의 적분공식중의 하나인 사다리꼴 공식을 적용하여 변형률에너지밀도 값을 구하였다. 또한 Yeoh 모델을 같은 인장시험결과에 적용하여 식 (6)의 계수 값을 회귀분석에 의하여 Table 2 와 같이 구한 후, 이를 이용하여 변형률에너지밀도를 구하였다. 그 결과들을 Fig. 3 과 같이 변형률에 따른 변형률에너지밀도값을 나타내는 선도로 나타내었다. 사다리꼴 공식과 Yeoh 의 모델에 따른 변형률에너지밀도 값이 각 변형률에 따라 미세하게 차이가 발생하지만, 전체적인 변형률 선도의 경향에는 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한 보강제가 적은 캡플라이화합물 시험편이 스틸벨트 화합물 시험편보다 변형률에너지밀도 값이 높게 나타남을 알 수 있다.

5. 피로시험 및 피로수명

5.1 피로시험

피로 시험은 인장시험과 같은 시편을 사용하였다. ASTM D4482 에서는 1.7±0.17Hz 의 주파수를, Fig. 4 와 같은 파형을 사용하도록 제시하고 있다. 그러나 Mars⁽¹⁹⁾ 등의 연구에 의하면 주파수와 파형에 따른 큰 영향이 없다고 하였기 때문에, 본 연구에서는 주파수는 1.93Hz 로 하였으며, 정현파형으로 피로시험을 진행하였다. 또한 최저 변형률을 0 으로 일정하게 유지하는 변위 제어 시험을 수행하였으며, 하나의 시험장치에 10 개의 시험편을 설치하여 피로시험을 수행하였습니다.

시편의 파단 시까지의 반복횟수를 근접센서 (proximity sensor)와 카운터를 사용하여 측정하였다.

고무의 특성상 내구성시험 중 원래대로 되돌아가지 않고 남는 영구변형(permanent set)이 발생하게 되는데 ASTM D4482 시험법의 절차에 따라 1000 사이클 일 때 시험기를 정지한 후 시험편의 영구변형이 발생한 길이만큼 보정하였으며, 다시 10,000 사이클을 반복한 후 재 보정하였다. 그 후로는 매 24 시간마다 시험편의 늘어난 길이를 보정하면서 피로시험을 수행하였다.

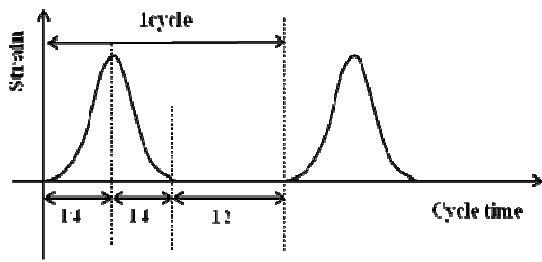


Fig. 4 Waveform type

5.2 피로시험결과

ASTM D4482 의 데이터처리 방법에 따라 식 (7) 과 같은 기하평균을 사용하여 구한 최대변형률과 평균 피로 수명과의 관계를 그래프에 나타내었다.

$$G = \sqrt[n]{N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n} \quad (7)$$

G : geometric mean
 N_i : fatigue life of the ith specimens
 n : total number of specimens

Fig. 5 는 고무 시편의 내구성 피로시험 결과로 스틸벨트화합물과 캡플라이화합물인 경우에 대한 최대변형률과 수명과의 관계를 나타낸 그래프이며, 응력연화현상이 발생한 스틸벨트화합물에 비해 캡플라이화합물의 수명이 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 스틸벨트화합물이 캡플라이화합물에 비하여 피로특성이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 기하평균값을 이용하여 ASTM D4482 에서 제시하는 변형률 범위와 확장 범위에 대하여 추세선을 얻었는데, 스틸벨트화합물의 경우 비슷한 추세의 경향을 보이지만, 캡플라이 화합물의 경우, 서로 다른 변화의 추세의 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 회귀분석에 의해 구한 변형률과 피로수명과의 관계는 Table 3 과 같다.

5.3 변형률에너지밀도(SED)에 의한 피로수명

Fig. 7 은 변형률에너지밀도와 피로수명의 관계를 나타낸 그래프이다.

고무 시편의 변형률에너지밀도에 대한 피로시험 결과를 회귀분석을 통해서 Figs. 8 와 9 과 같이 곡선접합을 하여 Table 3 과 같은 수명 예측식을 얻을 수 있었다. 여기에서 Fig. 8 은 ASTM 과 확장된 최대신장률 범위에서의 변형률에너지밀도와 수명과의 관계를 선도 통하여 비교한 결과이다. Fig. 9 는 확장된 최대신장률 범위에서의 사다리꼴 공식과 Yeoh 모델의 변형에너지 함수에 의해 얻어진 변형률에너지밀도와 수명과의 관계를 비교한 선도이다.

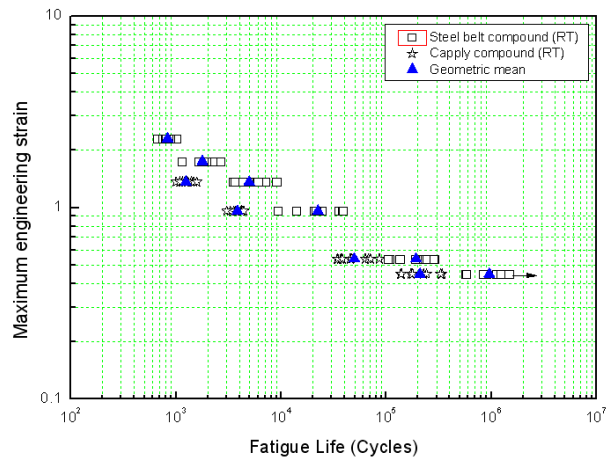


Fig. 5 Maximum engineering strain-life curve

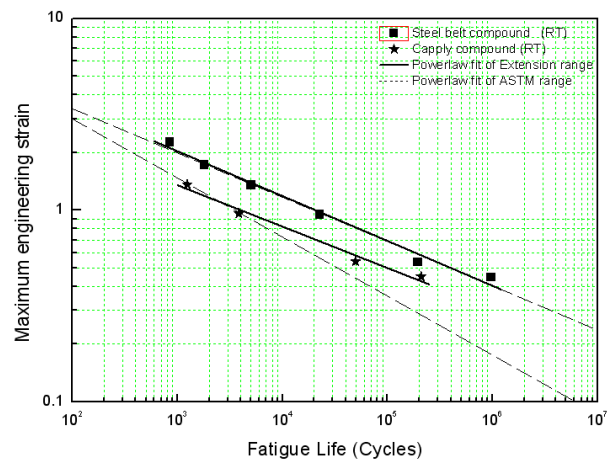


Fig. 6 Predicted line of averaged strain-life results

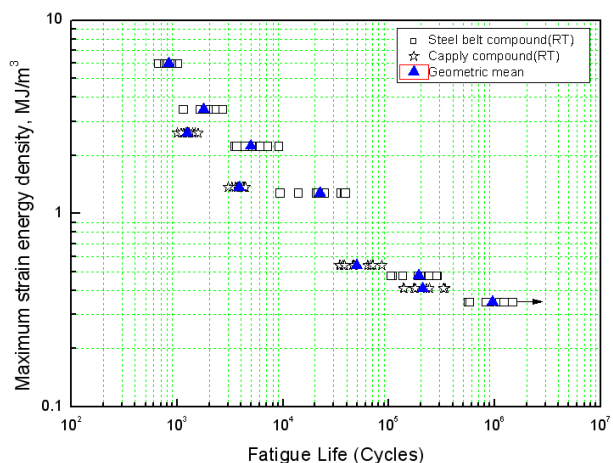


Fig. 7 Maximum strain energy density-life curve

ASTM 에서 요구하는 최대 신장률범위에서 얻은 실험식과 최대 신장률의 범위를 확대하여 얻은 실험식을 비교했을 때, 응력연화현상이 큰 스틸벨트 화합물의 경우 비슷한 경향을 나타내고 있지만, 응력연화현상이 적은 캡플라이 화합물은 차이가

Table 3 Fatigue life equations

Equations		Steel belt compound	Capply compound
ASTM range	Strain-life	$N=18893(\epsilon_{max})^{-4.323}$	$N=3392(\epsilon_{max})^{-3.243}$
	SED-life	$N=43845(W)^{-2.694}$	$N=6723(W)^{-1.753}$
Extension range	Strain-life	$N=20752(\epsilon_{max})^{-4.224}$	$N=4048(\epsilon_{max})^{-4.540}$
	SED-life	$N=45053(W)^{-2.448}$	$N=12716(W)^{-2.71}$

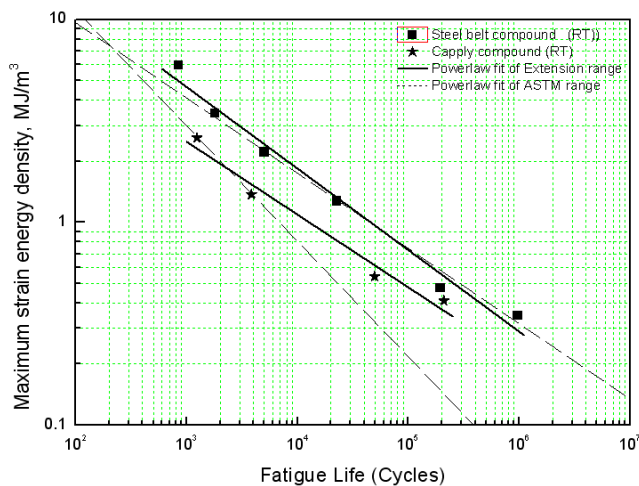


Fig. 8 Predicted line of averaged maximum strain energy density-life results (ASTM range vs Extension range)

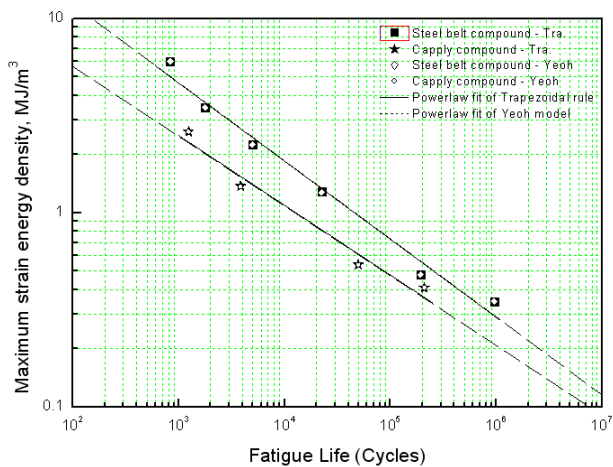


Fig. 9 Predicted line of averaged maximum strain energy density-life results (Trapezoidal rule vs Yeoh model)

있음을 알 수 있다. 또한 Yeoh 모델을 적용하여 피로수명을 예측해 본 결과와 비슷한 경향을 나타

내고 있음을 알 수 있다.

또한 자동차 주행 중 타이어에 작용하는 다양한 하중이나 변형이 ASTM 에서의 범위에 비하여 더 넓은 범위에서 작용하기 때문에, 본 연구에서의 확장된 최대신장률 범위에 의한 변형률에너지밀도와 피로수명과의 관계를 활용하는 것이 타이어용 고무 내구성 평가에 신뢰도가 높아질 것이라 판단 된다.

6. 고찰 및 결론

조성비 및 보강제의 함량비가 서로 다른 재료의 시험편에 대해서 각각의 변형률 조건을 달리 하여 피로시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스틸벨트화합물과 캡플라이화합물에 대한 인장시험 결과 캡플라이화합물이 스틸벨트 화합물 보다 인장응력이 크게 나타났으며, 최대변형률의 증가에 따라 최대인장응력이 증가하는 유사한 경향을 보였다.
- (2) 인장시험 결과를 바탕으로 사다리꼴 공식과 Yeoh 모델을 이용하여 변형률에너지밀도 값을 구해 비교해본 결과, 거의 일치하였으며, 캡플라이화합물 시험편이 스틸벨트화합물 시험편보다 변형률 에너지밀도 값이 높게 나타났다.
- (3) 피로시험에 의한 결과로부터 ASTM 에서 요구하는 최대 신장률범위에서 얻은 결과와 최대 신장률의 범위를 확대하여 얻은 결과를 비교하였으며, 또한 피로수명식을 제안하였다.
- (4) ASTM 에 제시된 범위보다는 본 연구의 확장된 범위에서 얻은 수명식을 활용하는 것이 타이어 용 고무 내구성 평가에 적합하다고 판단된다.

후 기

본 논문은 넥센타이어 및 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0020024)

참고문헌

- (1) Park, G. Y., Choi, J. W., Lee, K. C. and Jin, Y. K., 2006, "Certification Technological Trends in Aerospace tire," *Korea Aerospace Research Institute, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 4, No. 2, pp. 68~75
- (2) Hong, S. J. and Lee, H. G., 2005, "Investigation of Market Status of Imported Tires and Quality

- Evaluation,” *Transactions of KSAE*, Vol. 13, No. 6, pp. 1~6.
- (3) Kim, W. D., Woo, C. S., Kim, K. S. and Kwon, J. D., 2002, “An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Rubber Isolator,” *Elastomer*, 37, 183.
- (4) Mullins, L. 1969, “Softening of Rubber by Deformation,” *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 42, No. 1, pp. 339~362.
- (5) ASTM D4482 “Standard Test Method for Rubber Property-Extension Cycling Fatigue.”
- (6) Woo, C. S., Kim, W. D. and Kwon, J. D., 2004, “Fatigue Life Prediction and Evaluation of Rubber Components” *The Korea Society of Automotive Engineers*, KSAE 04-S0273, pp.1712~1717
- (7) Woo, C. S., Kim, W. D., Kim, W. S. and Kwon, J. D., 2004, “Effects of Maximum Strain and Aging Conditions on the Fatigue Life of Vulcanized Natural Rubber,” *the Korea Society of Automotive Engineers, KSAE*, Vol. 12 No. 4, pp.181~190.
- (8) Zine, A., Benseddiq, N. and Nait Abdelaziz, M., 2011, “Rubber Fatigue Life Under Multiaxial Loading: Numerical and Experimental Investigations,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, No. 10, pp.1360~1368.
- (9) Koo, J. M. and Choy, Y. S., 1991, “A New Mixed Mode Fracture Criterion: Maximum Tangential Strain Energy Density Criterion,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 39, No. 3, pp. 443~449.
- (10) Mroz, K. P. and Mroz, Z., 2010, “On Crack Path Evolution Rules,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 11, pp.1781~1807.
- (11) Lee, H. Y. and Lee, J. H., 2004, “Development and Verification of Micro-Indentation Technique for Material Property Evaluation of Hyper-elastic Rubber,” *The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, pp.132~137.
- (12) Hwang, K. M., Oh, J. S. and Lee, H. Y., 2009, “Enhanced Spherical Indentation Techniques for Rubber Property Evaluation,” *Transactions of the KSME A*, Vol.33 No.12, pp.1357~1365.
- (13) Rivlin, R. S., 1956, “Large Elastic Deformations in Rheology: Theory and Application,” Academic Press, New York. Vol. 1.
- (14) Ogden, R. W., 1972, “Large Deformation Isotropic Elasticity-On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubber-like Solids,” *Proceedings of Royal Society of London*, Vol. A 326, pp.565~584.
- (15) Yeoh, O. H., 1990, “Characterization of Elastic Properties of Carbon-Black-Filled Rubber Vulcanizates,” *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 63, No. 5, pp.792~805.
- (16) Yeoh, O. H., 1993, “Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber,” *Rubber chemistry and Technology*, Vol. 66, No. 5, pp.754~771.
- (17) Yeoh, O. H., 2002, “Relation Between Crack Surface Displacements and Strain Energy Release Rate in Thin Rubber Sheets,” *Mechanics of Materials*, Vol. 34, No. 8, pp.459~474.
- (18) Woo, C. S., Kim, W. D. and Kwon, J. D., 2008, “A Study on the Material Properties and Fatigue Life Prediction of Natural Rubber Component,” *Materials Science and Engineering : A*, Vol. 483-484, pp.376~381.
- (19) Mars, W. V., 2004, “Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber : A Literature Survey,” *Journal of Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 77, No. 3, pp.391~412.