



Evaluation on Fatigue Characteristics of Tire Sidewall Rubber according to Aging Temperature

Namgyu Jun, Byungwoo Moon, Yongseok Kim, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok[†],
Ui Seok Hong^{*}, Min Kyeong Oh^{*}, and Seong Rae Kim^{**}

Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ., 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16419, Rep. of Korea

**Polymeric Materials Research Team, Hyundai Motor Group, Hyundaiakia-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18280, Rep. of Korea*

***R&D Center, Nexen Tire Corporation 226, Bangbae-ro, Seocho-gu, Seoul, 06584, Rep. of Korea*

(Received March 6, 2017, Revised March 15, 2017, Accepted March 17, 2017)

Abstract: Ultra-high performance (UHP) tires, for which demand has recently surged, are subject to severe strain conditions due to the low aspect ratio of their sidewalls. It is important to ensure sidewall material durability, since a sudden tire sidewall breakage during vehicle operation is likely to cause a major accident. In the automotive application of rubber parts, cracking is defined as a failure because when cracks occur, the mechanical properties of rubber change. According to Mars⁽⁸⁾, Andre⁽¹¹⁾ et al., strain and strain energy density (SED) are mainly used as a failure parameters and the SED is generally used as a fatigue damage parameter. In this study, the fatigue life curves of sidewall rubber of tires were determined by using the SED as fatigue damage parameter while the effect of aging on fatigue life was evaluated after obtaining the SED-Nf curves according to aging condition.

Keywords: fatigue life, strain energy density, prediction equation, tire sidewall rubber, aging

Introduction

최근 자동차 부품의 신뢰성 및 내구성 평가에 대한 관심이 높아지고 있으며, 개발단계에서 피로내구수명을 예측할 수 있는 기술이 요구되고 있다.^{1,2} 특히 고무는 금속과는 달리 큰 변형률에서도 탄성을 유지하며, 하중과 변형률이 비선형 관계를 보이는 초탄성(hyperelastic) 특성과 감쇄특성이 있기 때문에³ 차량진동제어부품에 다양하게 이용되고 있지만 고무재료의 특성상 내구수명 예측평가 기술이 낙후되어 신뢰성 있는 설계 및 평가가 어려운 실정이다.

타이어는 자동차 고무부품구성의 대부분을 차지하고 있으며 차체를 지지하고 진동이나 충격을 흡수해줄 뿐만 아니라 엔진의 동력을 지면으로 전달하여 주행할 수 있게 하는 중요한 부품이다.^{4,5} 최근 수요가 급증한 UHP (Ultra high performance)타이어는 접지면적이 넓고 횡력에 견디는 힘이 커서 선회능력이 우수하다는 장점이 있지만 단면높이가 낮아서 타이어의 사이드월 부분이 가혹한 변형률조건에 노출되게 되는 단점이 있다.

일반적으로 타이어의 교체주기, 내구수명을 평가할 때 타이

어 트레드의 마모 정도를 기준으로 평가한다.^{6,7} 하지만 차량 운행 중 급작스런 타이어 사이드월 파손이 발생할 경우 대형 사고를 유발할 가능성이 높기 때문에 타이어 사이드월을 기준으로 한 타이어 내구수명을 평가하는 방법의 개발이 요구되고 있다. 타이어의 내구수명을 평가하기 위해서는 일반적으로 실제 타이어의 피로시험 및 실차 주행시험이 이용되고 있으나, 시간, 경제적 제약이 크기 때문에 단기간에 타이어 내구수명을 평가하기 어렵다. 또한 개발단계에서 타이어의 내구수명을 예측할 수 있는 방법이 요구되기 때문에 고무재료의 시편단위에서 내구수명을 평가하는 방법이 수행되고 있다.

고무재료의 내구성능 평가 방법으로는 KS M6518에서 제시하는 인장시험, ASTM D4482 에 따라 수행하는 피로시험 그리고 찢김 에너지(Tearing Energy)를 활용하여 균열성장 속도를 구하는 균열진전시험이 널리 사용되고 있으며,⁸⁻¹⁰ 고무의 내구성능을 평가하는 인자로서 변형률 또는 SED를 활용하고 있다.^{11,12}

타이어는 주행 시 반복적으로 가해지는 변형에너지 이외에도 마찰열, 주위환경 등으로 인한 노화도 함께 가해진다. 또한 타이어는 장기적으로 주위환경에 직접 노출되기 때문에 노화에 의한 영향을 반드시 고려해야 하며 그에 따른 내구특성을 평가하여 실 주행환경에서의 타이어의 내구성을 평가할 수

[†]Corresponding author E-mail: seok@skku.edu

있어야 한다.

Ahagon 등은 타이어고무의 노화메커니즘을 규명하였으며 노화온도가 80°C 이상인 경우 사슬분리(Chain Scission)에 의해 급격한 기계적 특성의 변화가 나타남을 밝혔다.¹³

본 연구에서는 차량 주행 시 가해지는 변형에너지와 노화 온도에 따른 타이어 사이드월 고무의 내구수명특성을 평가하기 위해 다음과 같은 시험을 수행하였다.

타이어 사이드월에 사용되는 상용 고무재료에 대하여 ASTM¹⁴에서 제시하고 있는 범위의 변형률(Strain: 0.69, 0.93, 1.16, 1.39)을 선정하고 인장시험 및 피로시험을 진행하여 SED에 따른 인장특성과 피로성능을 비교 분석하였다. 또한, 노화온도와 피로수명간의 관계를 평가하기 위하여 25°C, 70°C, 90°C, 100°C 온도에서 17일씩 노화 한 시편에 대해 시험을 수행하여 노화 정도에 따른 피로수명의 변화를 평가하였으며 추가시험을 통해 검증 및 보완 하였다.

Experimental

1. 인장시험

본 연구에서 사용된 인장시편은 타이어 사이드월에 사용되는 상용조성으로 만들어진 시편이며 시편 형상은 KS M 6518¹⁵에 준하여 아령형 3호로 제작하였다. 두께 2 mm인 시트를 시편 모양의 절단날로 커팅 후 환경챔버를 사용하여 노화조건 별로 노화를 실시하였다.

인장시편형상과 노화조건 별 제작된 시편정보에 대해 각각 Figure 1과 Table 1에 나타내었다. 인장시험에는 Instron사의 5ton 유압식 시험기를 사용하였으며, 하중 값 획득의 정밀도를 높이기 위해 200N 로드셀을 설치하여 Figure 2와 같이 시험 장비를 구성하였다.

본 시험을 시작하기 전 고무 분자구조의 안정화를 위하여 시험하고자 하는 변형률 범위까지 피로 반복을 30회 수행하

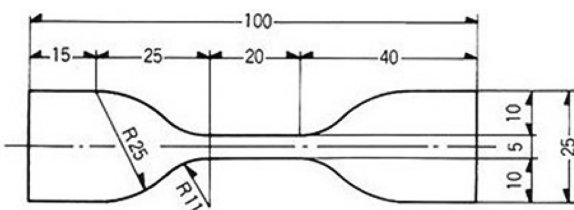


Figure 1. Tensile test specimen.

Table 1. Number of Tensile Specimens.

Aging Temperature	23°C	70°C	90°C	100°C
	0.69	2	2	2
Aging time	0.93	2	2	2
17day	1.16	2	2	2
	1.39	2	2	2



Figure 2. Tensile test machine.

여 Mullin's effect¹⁶를 제거하였다. 인장시험 과정은 ASTM D412-a에 준하여 수행되었으며, 각 조건 별 2회씩 시험 후 평균값을 구하였다.

2. 피로시험

피로시편은 인장시편과 동일조성으로 만들어진 시편이며 시편 형상은 ASTM D4482에 준하여 제작하였다. 두께 1.4 mm인 시트를 시편 모양의 절단날로 커팅 후 전기식 퍼니스를 사용하여 노화온도 별로 노화를 실시하였다. 피로시편형상과 노화온도 별 제작된 시편정보에 대해 각각 Figure 3과 Table 2에 나타내었다. 싸인(Sine) 파형의 1.93 Hz 주기의 변위를 반복할 수 있도록 크랭크를 사용하여 전기모터로 구동

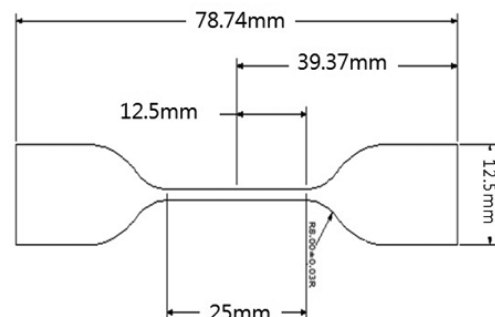


Figure 3. Fatigue test specimen.

Table 2. Number of Fatigue Specimens.

Aging Temperature	23°C	70°C	90°C	100°C
Aging time	17day	40	40	40

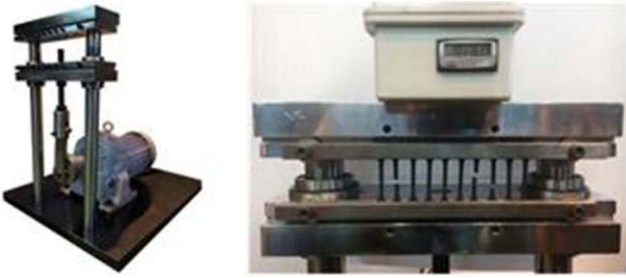


Figure 4. Fatigue test machine.

되는 피로시험장치를 제작하였으며 피로시험을 수행하였다. 또한 cycle 수 확인을 위해 근접센서와 카운터를 설치하였으며, 시편과판 현황을 녹화하여 판단시점의 cycle수를 기록, 피로수명을 평가하였다. 전체적인 시험 과정은 상온 범위에서 ASTM D4482에 준하여 수행하였으며, 피로시험이 진행됨에 따라 발생하는 고무의 영구변형을 1,000, 10,000 cycle 그리고 매 24시간 마다 보정하여 시험 중 동일 변형률이 적용되도록 하였다. 전체적인 피로시험기의 구성은 Figure 4와 같다.

Results and Discussion

1. 인장시험 결과

인장시험을 수행하여 4가지 변형률(Strain: 0.69, 0.93, 1.16, 1.39) 조건에서 노화온도 변화에 따른 응력과 변형률(Stress-Strain) 선도를 획득하였다. Figure 5은 최대변형률이 1.39인 경우에 노화온도의 변화에 따르는 응력과 변형률선도이다. 모든 변형률조건에서 노화온도가 증가할수록 인장응력이 증가하는 경향이 나타났다.

1.1 변형률-SED 관계식 도출

초탄성 재료인 고무는 반복하중에 의한 소성변형이 일어나

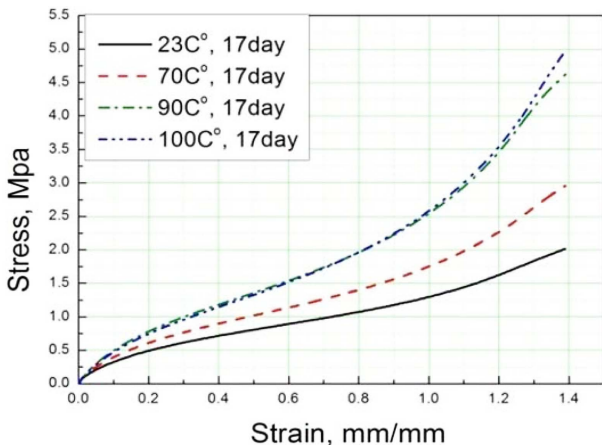


Figure 5. Stress-Strain curve, Maximum strain : 1.39.

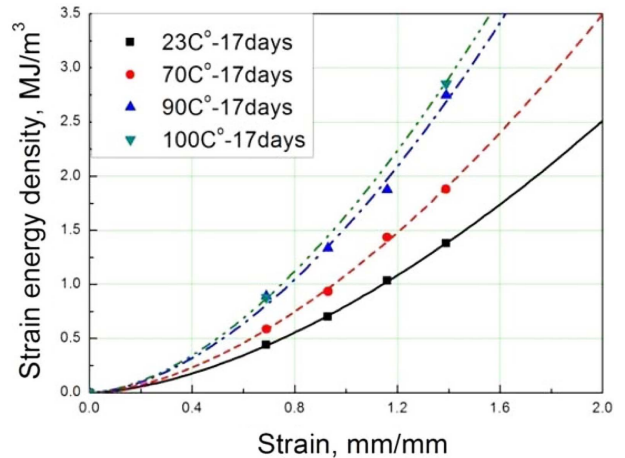


Figure 6. SED-Strain curve, According to aging temperature.

며 이에 변형률 에너지가 축적되어 파손이 일어난다. 때문에 고무재료의 경우 내구특성을 평가하는 인자로서 SED를 주로 사용한다.¹⁷ 본 연구에서도 내구특성 평가인자로서 SED 값을 사용하기 위해 인장시험으로부터 얻은 응력과 변형률선도로부터 수치해석법 적분공식인 Simpson's rule¹⁴을 적용하여 SED값을 구하였다. 노화온도 별 SED값을 Figure 6에 나타내었으며 산출한 데이터에 회귀분석을 적용하여 노화온도 별 변형률과 SED 관계식을 식 (1)~(4)과 같이 나타내었다. 그 결과 노화온도가 증가함에 따라서 SED값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 노화가 진행될수록 고무가 경화되어 동일 SED에서 변형률이 감소하기 때문이라고 판단된다.

$$SED = 0.802 \times (\text{Strain}_{23^\circ\text{C}, 17\text{day}})^{1.647} \quad (1)$$

$$SED = 1.088 \times (\text{Strain}_{70^\circ\text{C}, 17\text{day}})^{1.685} \quad (2)$$

$$SED = 1.530 \times (\text{Strain}_{90^\circ\text{C}, 17\text{day}})^{1.709} \quad (3)$$

$$SED = 1.639 \times (\text{Strain}_{100^\circ\text{C}, 17\text{day}})^{1.700} \quad (4)$$

2. 피로시험 결과

피로시험은 노화온도 별 0.69, 0.93, 1.16, 1.39 총 4 구간의 변형률 구간에서 수행하였으며, 각각의 변형률마다 10개의 시편을 사용하여 파손 시 cycle수를 획득하였다. ASTM D4482의 데이터처리 방법에 따라 식 (5)과 같은 기하평균(Geometric mean)¹⁴을 사용하여 각 변형률 구간의 피로수명 평균값을 도출 하였으며 노화온도 별 최대변형률과 피로수명과의 관계를 Figure 7에 나타내었다.

$$G = \sqrt[n]{N_1 \times N_2 \dots N_n} \quad (5)$$

G : geometric mean

n : number of specimen

N : fatigue life cycle

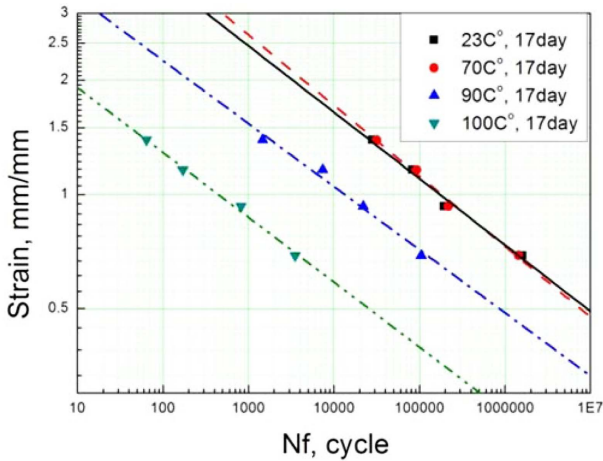


Figure 7. Strain-Nf curve according to aging temperature.

2.1 노화온도 별 피로수명 관계식 도출

앞서 획득한 노화온도 별 변형률-SED 관계식에 최대변형률을 대입, SED와 피로수명간의 관계를 도출하여 Figure 8에 나타내었으며 회귀 분석을 통한 곡선접합으로 SED와 피로수명의 관계식 (6)~(9)을 획득하였다.

$$N_f = 81318 \times (SED_{23^\circ C, 17day})^{-3.298} \quad (6)$$

$$N_f = 239067 \times (SED_{70^\circ C, 17day})^{-3.192} \quad (7)$$

$$N_f = 59257 \times (SED_{90^\circ C, 17day})^{-3.520} \quad (8)$$

$$N_f = 3469 \times (SED_{100^\circ C, 17day})^{-3.482} \quad (9)$$

2.2 노화온도에 따른 피로수명 예측식

Ahagon 등의 연구에 따르면 타이어고무는 노화온도 80°C 이상에서 기계적 특성이 급격히 변화하기 때문에 피로수명 또한 급격히 감소할 것으로 판단하였다. 이에 피로수명이 완만히 변화할 경우를 포함하여 두 가지 모델을 이용한 노화온도에 따른 피로수명 예측식을 구하였다.

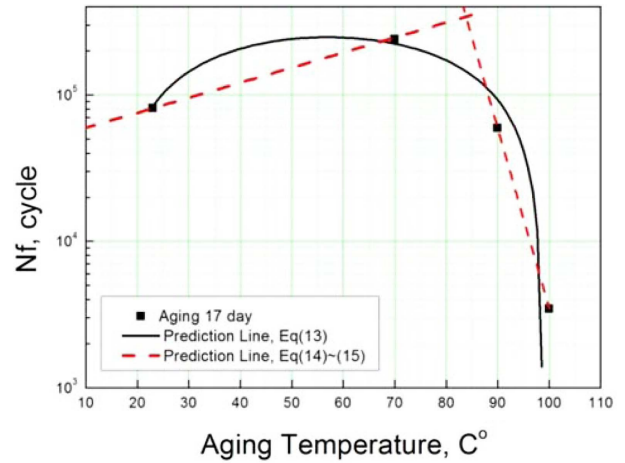


Figure 9. Nf-Aging temperature curve on the same SED (MJ/m³).

$$N_f = -214435 + 16210 \times T_{aging} - 142.23 \times T_{aging}^2 \quad (10)$$

피로수명이 완만히 변화할 경우 완만한 곡선 형태인 식 (10) 과 같은 예측식을 구하였다. 피로수명이 급격히 변화할 경우 변곡점의 위치는 80°C~90°C 사이로 판단되며, 피로수명이 선형적으로 증감하는 형태인 식 (11)~(12)와 같은 예측식을 구하였다. 두 모델을 이용한 예측식의 선도를 Figure 9에 나타내었다. 그 결과 노화온도 80°C 부근에서 피로수명의 차이가 크게 나타났으므로 80°C에서의 추가시험을 통해 두 예측식을 검증하였다.

$$N_f = 10^{(0.0127 \times T_{aging} + 4.67178)} \quad (T_{aging} \leq 83.8^\circ C) \quad (11)$$

$$N_f = 10^{(-0.12325 \times T_{aging} + 15.86556)} \quad (T_{aging} \geq 83.8^\circ C) \quad (12)$$

3. 추가시험을 통한 노화온도에 따른 피로수명 예측식 검증

노화온도에 따른 피로수명 예측식을 검증하기 위해 80°C, 17day 노화한 시편에 대해 추가 인장 및 피로시험을 실시하

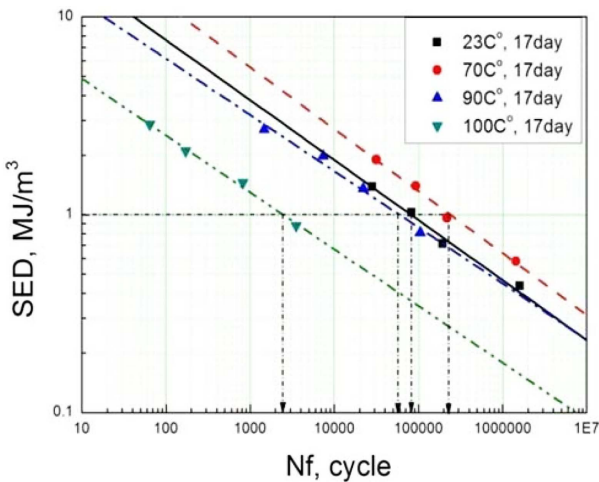


Figure 8. SED-Nf curve according to aging temperature.

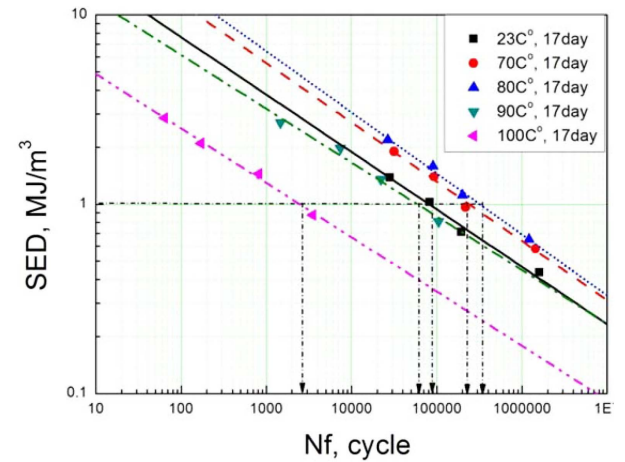


Figure 10. SED-Nf curve according to aging temperature.

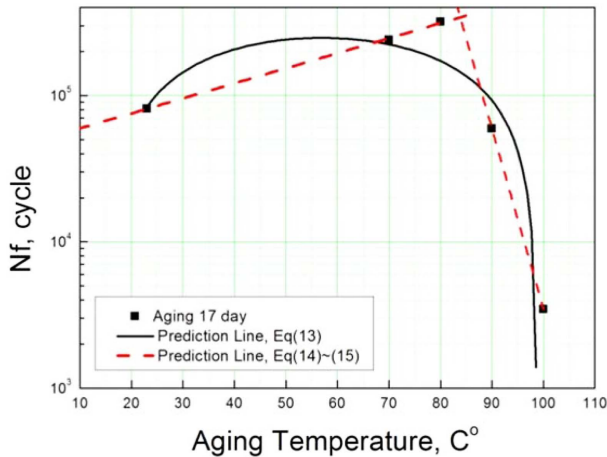


Figure 11. Nf-Aging temperature curve on the same SED (MJ/m³).

였다. 노화온도 별 SED-피로수명 선도인 Figure 8에 80°C, 17day 노화한 시편의 시험결과를 추가하여 Figure 10과 같이 나타내었으며, 노화온도에 따른 피로수명 변화선도인 Figure 9에 추가하여 Figure 11로 나타내었다. 그 결과 노화온도에 따라 피로수명이 증가하다 감소하기 시작하는 변곡점은 80°C~90°C 사이에서 존재함을 확인하였다. 또한 노화온도에 따라 피로수명이 완만한 곡선을 그리며 변하는 것이 아니라 선형적으로 증가 및 감소함을 확인하였다. 따라서 식 (11)~(12)와 같이 선형적으로 피팅하는 것이 타당하다.

노화온도 80°C 부근까지는 가교결합(Crosslinking)에 의해 수명이 증가하였지만, 그 이상의 온도에서는 사슬분리(Chain Scission)에 의한 급격한 기계적 특성의 변화로 인해 피로수명이 급격히 감소하는 것으로 판단된다.¹³ 따라서 두 요인에 의한 수명증감효과를 정량화한다면 더욱 정확한 피로수명 예측이 가능할 것으로 판단된다.

추후 연구를 통해 데이터를 추가 확보하여 예측식의 정확도를 높이고 노화온도와 시간과의 관계를 아레니우스식을 통해 규명한다면 피로수명이 감소하기 시작하는 변곡점의 노화 정도가 상온에서는 며칠에 해당하는 노화 정도인지 예측 가능하기 때문에 타이어 내구성평가에 기준자료로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Conclusion

본 연구에서는 타이어 사이드월에 사용되는 사용 고무재료에 대해서 노화온도 별 인장시험 및 피로시험을 수행하고 노화온도에 따른 내구특성을 평가하였다.

1. 인장시험 결과 모든 변형률조건에서 노화온도가 증가할수록 인장응력이 증가하는 경향을 나타냈다.

2. 인장시험 결과에 Simpson's rule 을 적용하여 SED값을 구하였으며, 변형률-SED관계식을 도출하였다. 그 결과 노화온

도가 증가할수록 동일 변형률에서 SED값이 증가하였다. 이는 노화가 진행될수록 고무가 경화되기 때문이라고 판단된다.

3. 피로시험을 수행하여 노화온도 별 SED-피로수명 관계식을 도출하였다. 그 결과 노화온도가 증가할수록 피로수명이 선형적으로 증가하다 80°C 이후부터 급격히 선형적으로 감소하는 경향을 확인하였으며 동일 SED(MJ/m³)에서 노화온도에 따른 피로수명 예측식을 제시하였다.

4. 추후 연구를 통해 앞서 제시한 노화온도에 따른 피로수명 예측식을 보완하고 아레니우스식을 통해 피로수명이 감소하기 시작하는 상온에서의 노화일수를 도출한다면 타이어 사이드월 내구성평가에 기준자료로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

본 논문은 현대자동차의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. G. Y. Park, J. W. Choi, K. C. Lee, and Y. K. Jin, "Certification Technological Trends in Aerospace tire", *Korea Aerospace Research Institute, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, **4**, 68 (2006).
2. S. J. Hong and H. G. Lee, "Investigation of Market Status of Imported Tires and Quality 1169 Evaluation", *Transactions of KSAE*, **13**, 1 (2005).
3. W. D. Kim, C. S. Woo, K. S. Kim, and J. D. Kwon, "An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Rubber Isolator", *Elastomer*, **37**, 183 (2002).
4. Institute of Machinery and Materials, 2004, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components", M1-9911-00-0014.
5. T. K. Lee and B. S. Kim, "Vibration Analysis of Automobile Tire Due to Road Impact," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, **22**, 505 (2003).
6. C. Wright, G. L. Pritchett, and R. J. Kuster, "Laboratory Tire Wear Simulation Derived from Computer Modeling of Suspension Dynamics", *Tire Science and Technology, TSTCA*, **19**, 136 (1990).
7. S. R. Chung, B. H. Choi, and K. J. Cho, Tire Wear Influence on the Vehicle Dynamics, 한국자동차공학회 춘 추계 학술대회 논문집, 408 (1995).
8. W. V. Mars and A. Fatemi, "A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber", *International Journal of Fatigue*, **24**, 949 (2002).
9. R. J. Harbour, A. Fatemi, and W. V. Mars, "Fatigue crack growth of filled rubber under constant and variable amplitude loading conditions", *Fatigue and Fracture of Eng. Materials*

- and Structures*, **30**, 640 (2007).
10. W. H. Kim, Y. M. Kim, Y. W. Chang, J. E. Shin, and J. W. Bae, "Fatigue Crack Growth Behavior of NR and HNBR Based Vulcanizates with Potential Application to Track Pad for Heavy Weight Vehicles", *The Polymer Society of Korea*, **11**, 73 (2003).
 11. 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).
 12. D. W. Lee, S. R. Kim, K. D. Sung, J. S. Park, T. W. Lee, and S. C. Huh, "A study on the fatigue life prediction of tire belt-layers using probabilistic method", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **27**, 673 (2013).
 13. A. Ahagon, "Aging of Tire Parts During Service", *Rubber Chemistry Technology*, **63**, 683 (1990).
 14. ASTM D4482-11, "Standard test method for rubber property-extension cycling fatigue"
 15. KS M 6518, "가황 고무 물리 시험 방법"
 16. L. Mullins, "Softening of Rubber by Deformation", *Rubber Chemistry and Technology*, **42**, 339 (1969).
 17. A. Zine, N. Benseddiq, and M. Nait Abdelaziz, "Rubber Fatigue Life Under Multiaxial Loading: Numerical and Experimental Investigations", *International Journal of Fatigue*, **33**, 1360 (2011).