

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.7.629>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

타이어 사이드월 고무의 피로특성 및 수명예측에 관한 연구

문병우* · 김용석* · 전남규* · 구재민* · 석창성† · 홍의석** · 오민경** · 김성래***
* 성균관대학교 기계공학부, ** 현대자동차 고분자재료연구팀, *** 넥센타이어 연구개발본부

A Study on the Fatigue Characteristics and Life Prediction of the Tire Sidewall Rubber

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

* Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,
** Polymeric Materials Research Team, Hyundai Motor Group,
*** R&D Center, Nexen Tire Corporation

(Received January 24, 2017 ; Revised March 6, 2017 ; Accepted March 22, 2017)

Key Words: Fatigue Life(피로수명), Strain Energy Density(변형률에너지밀도), Prediction Equation(수명예측식), Tire Sidewall Rubber(타이어 사이드월 고무)

초록: 최근 수요가 급격히 증가하고 있는 고성능 UHP (Ultra High Performance)타이어의 경우 낮은 편평비로 인해 일반 타이어 보다 사이드월 고무에 가혹한 변형이 발생하게 된다. 사이드월 고무의 변형이 지속적으로 발생할 경우 피로손상이 축적되어 피로파괴 현상이 나타날 수 있다. 따라서 차량 주행 중 발생하는 안전사고 예방을 위한 사이드월 고무의 내구성능 평가가 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나 타이어 사이드월 고무의 내구성능에 대한 설계 기준 및 연구는 국내외적으로 잘 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 타이어 사이드월 고무 2종에 대하여 인장시험과 피로시험을 수행하여 변형률에너지밀도를 이용한 수명예측식을 제시하였다. 또한, 저연비 타이어의 주행가능 예상거리를 도출하여 내구성능 만족 여부를 검토하였다.

Abstract: In the case of the UHP (Ultra high performance) tire that the demand has increased rapidly, compared with the commonly used tire, severe deformation has been observed because of the low aspect ratio. When repeated deformations are applied to the sidewall rubber, accumulated fatigue damage may cause fatigue failure. Thus, the evaluation of the durability of the tire sidewall rubber has become a very important issue to prevent accidents that occur while the vehicle is running. However, the research and design criteria for the durability performance of the tire sidewall rubber hardly exist. In this study, we suggest a lifetime prediction formula using strain energy density obtained by performing tensile tests and fatigue tests on two different kinds of the tire sidewall compounds. Additionally, the applicability of our findings for low fuel consumption tires was reviewed by converting the fatigue life of the sidewall rubber into the expected mileage of the tire.

1. 서론

고무는 에너지흡수성, 탄성복원성, 높은 신장성 등의 특성으로 차량부품에 다양하게 이용되고 있

다. 특히, 자동차 타이어의 경우 차체를 지지하고 지면으로부터 발생하는 진동이나 충격을 흡수해주는 고무의 역할이 상당히 중요하다.^(1,2) 최근 수요가 급격히 증가하고 있는 고성능 UHP(Ultra high performance)타이어는 승차감 개선과 더불어 핸들링 성능이 뛰어나고 회전저항이 낮아 고속 주행이 가능한 차량에 많이 장착되고 있다.^(3,4) 하지만

† Corresponding Author, seok@skku.ac.kr

UHP 타이어의 경우 낮은 편평비로 인해 사이드월의 길이가 짧은 특징이 있으며, 구조적 특성에 의해 사이드월 부분의 고무가 일반 타이어 보다 가혹한 변형조건에 노출되는 단점이 있다. 따라서 차량 주행 중 발생하는 안전사고의 예방을 위해서 타이어 사이드월 고무의 내구성 평가가 필수적이다. 타이어 고무의 내구성을 평가하는 대표적인 방법으로는 단품 피로시험 및 실차 주행시험이 있으나, 대부분 소요시간이 길며 경제적으로 많은 제약을 받기 때문에 단기간에 내구성을 평가하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 여러 연구자들은 고무 피로시험 규격에 의거하여 고무재료에 대한 내구수명을 평가하고 있는 실정이다.^(5,6) 고무의 내구성 평가 방법으로는 KS M6518 에서 제시하는 인장시험, ASTM D4482에 따라 수행하는 피로시험 그리고 찢김에너지(Tearing Energy)를 활용하여 균열성장 속도를 구하는 균열진전시험이 널리 사용되고 있으며,⁽⁷⁻⁹⁾ 고무의 내구성을 평가하는 인자로서 변형률 또는 변형률에너지밀도(Strain Energy Density)를 활용하고 있다.^(7,10,11) 하지만 타이어 사이드월 고무의 피로성능평가에 대한 파라미터는 국내외적으로 잘 알려져 있지 않기 때문에 신뢰성 측면에서 반드시 연구되고 수행되어야 한다.

본 연구에서는 차량 주행시 반복적으로 가해지는 변형에너지와 타이어 사이드월 고무의 수명관계를 도출하기 위하여 타이어 사이드월 고무재료 2종(상용 타이어 사이드월, 저연비 타이어 사이드월)에 대하여 ASTM⁽¹²⁾에서 제시하고 있는 범위의 변형률(Strain: 0.69, 0.93, 1.16, 1.39)을 선정하고 인장시험 및 피로시험을 진행하여 각 고무재료에 따른 인장특성과 피로성능을 비교 분석하였다. 또한, 변형률에너지 밀도와 변형률 조건에 따른 타이어의 수명 및 주행가능거리를 도출하기 위하여 80km/h의 등속주행시 발생하는 타이어 사이드월의 변형률에너지밀도를 피로수명관계식에 대입하여 사이드월의 예상 수명을 획득하였다. 최종적으로 타이어 사이드월에 사용되는 고무 2종의 주행가능 예상거리를 도출하였으며, 상용 타이어의 사이드월 고무와 저연비 타이어 사이드월 고무의 수명을 비교하여 내구성 만족여부를 검토하였다.

2. 사이드월 고무의 인장특성 평가

2.1 인장 시험

본 연구에서 사용된 고무는 타이어 사이드월의 고무조성과 동일하게 만들어진 2종의 컴파운드로서 주요 재료는 NR(Natural rubber)과 BR(Butadiene

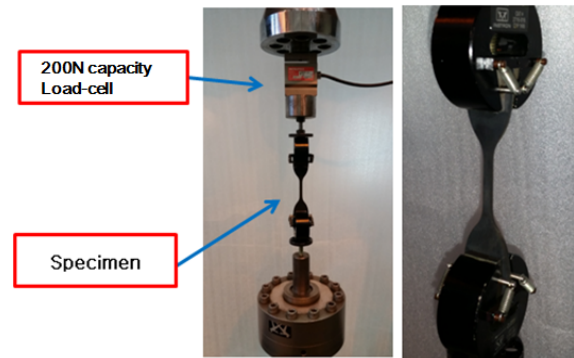


Fig. 1 Tensile test of sidewall rubber

rubber) 이다. A 컴파운드(Compound A)의 경우 현재 사용되고 있는 상용 타이어 사이드월 고무의 배합이며, B 컴파운드(Compound B)의 경우 연비 향상을 위해 새롭게 개발된 사이드월 고무의 배합이다. Compound A와 비교하여 Compound B의 경우에는 NR의 함량비를 10% 증가시키고 BR과 Carbon black의 함량비를 10% 감소시켜 제작하였다. 인장시험에 대한 형상은 KS M 6518에 준하여 아령형 3호 시편으로 선정하였으며, 두께가 2mm인 시트를 제작한 후 KS규격과 동일한 치수의 절단날로 다이커팅(die cutting)하여 시편을 제작하였다. 시험에는 Instron 사의 유압식 시험기를 사용하였으며, 고무 인장시험의 하중에 적합한 200N 로드셀을 추가 설치하여 Fig. 1과 같이 시험을 진행하였다. 전체적인 시험과정은 가황 고무 및 열가소성 탄소중합체의 인장시험 규정인 ASTM D412-a에 준하여 수행되었으며, 본 시험을 시작하기 전 고무 분자구조의 안정화를 위하여 시험하고자 하는 변형률 범위까지 피로 반복을 30회 수행하여 Mullin's effect⁽¹⁷⁾를 제거하였다.

2.2 인장시험 결과

인장시험을 수행하여 2종의 컴파운드에 대한 4가지 변형률(Strain: 0.69, 0.93, 1.16, 1.39) 구간의 응력-변형률 선도 획득하고, Fig. 2에 나타내었다. 서로 다른 조성비를 가진 사이드월 고무의 인장시험 결과 A와 B 컴파운드의 응력-변형률 선도가 유사하게 나타났으며, 동일한 변형률에서 인장응력의 차이가 5% 이내로 나타남에 따라 하중에 따른 타이어 사이드월 고무의 변형량에는 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다.

$$SED_{A \text{ compound}} = 0.802 \times (\epsilon)^{1.647} \quad (1)$$

$$SED_{B \text{ compound}} = 0.825 \times (\epsilon)^{1.731} \quad (2)$$

Table 1 Value of the strain energy density about Strain

Strain		0.69	0.93	1.16	1.39
SED [MJ/m ³]	Comp. A	0.440	0.701	1.032	1.377
	Comp. B	0.446	0.718	1.062	1.463

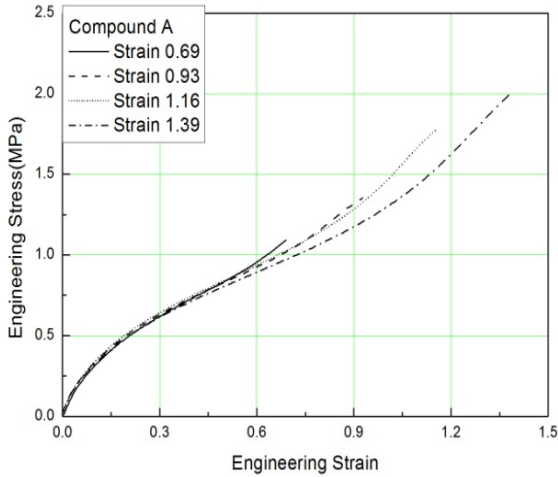


Fig. 2 Example of Stress-Strain curves (compound A)

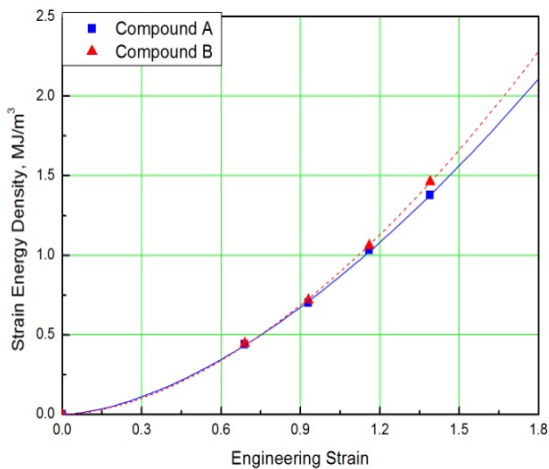


Fig. 3 Strain energy density-Strain curves

2.3 변형률-변형률에너지밀도 관계식 도출

변형률에너지밀도를 도출하기 위해서는 응력-변형률 선도의 하부면적을 계산해야 한다. 따라서 비선형 거동을 보이는 타이어 사이드월 고무재료의 경우 불규칙한 경계선으로 둘러싸인 적분경로를 수치해석적으로 구할 때 사용되는 Simpson's rule을 적용하여 면적을 계산하였다.⁽¹²⁾ Table 1에는 각 컴파운드별로 변형률에 따른 변형률에너지밀도 값을 정리하여 나타내었다. 계산 결과 동일 변형률에서 B 컴파운드의 변형률에너지밀도가 크게 나타났으며, 결과를 곡선접합하여 변형률-변형률

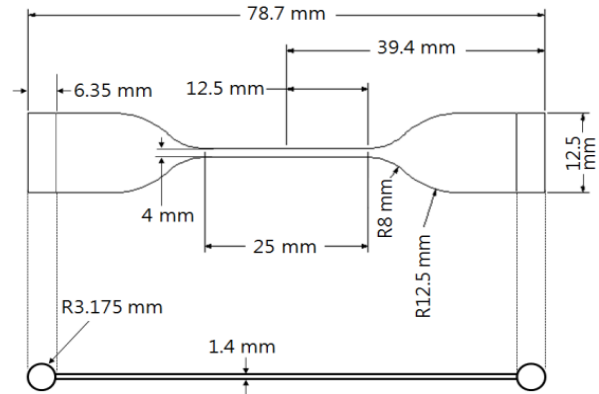


Fig. 4 Dimension of fatigue specimen

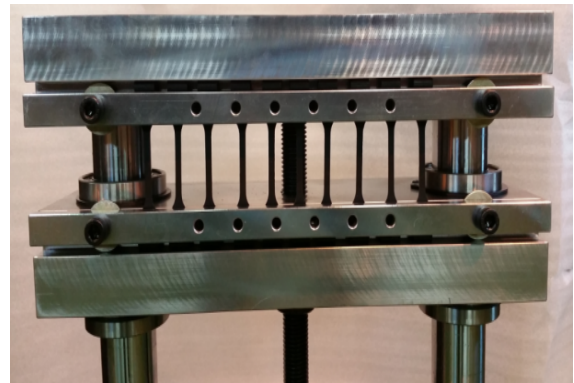


Fig. 5 Cycling fatigue test of sidewall rubber

에너지밀도 관계식 (1)~(2)을 도출하고 Fig. 3에 나타내었다.

3. 사이드월 고무의 피로특성 평가

3.1 피로 시험

인장시편의 고무조성과 동일하게 배합된 2종의 컴파운드에 대하여 두께가 1.4mm인 시트를 제작하였다. 피로 시편의 형상은 ASTM D4482에 준하여 Fig. 4와 같이 선정하였으며, 다이커터(die cutter)를 사용하여 시편을 커팅 제작하였다. 피로시험은 Sine 파형의 1.93Hz로 영점에서 최대변형률까지 반복 피로변위를 부가하는 방식으로 진행되었다. 전체적인 시험 과정은 상온 23 ± 2C° 범위에서 ASTM D4482에 준하여 수행되었으며, 피로시험이 진행됨에 따라 발생하는 고무의 영구변형(permanent set)을 1,000 사이클, 10,000 사이클 그리고 매 24시간마다 보정하여 변형률이 일정하게 유지되도록 하였다. 시험이 진행되는 동안에는 근접 센서와 카운터를 사용하여 시편 파단시의 피로반복 횟수를 측정하였으며 시험중인 시편의 모습을

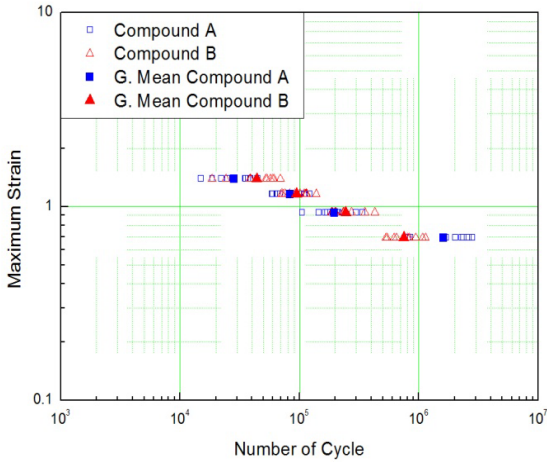


Fig. 6 Cycling fatigue test results of sidewall rubber

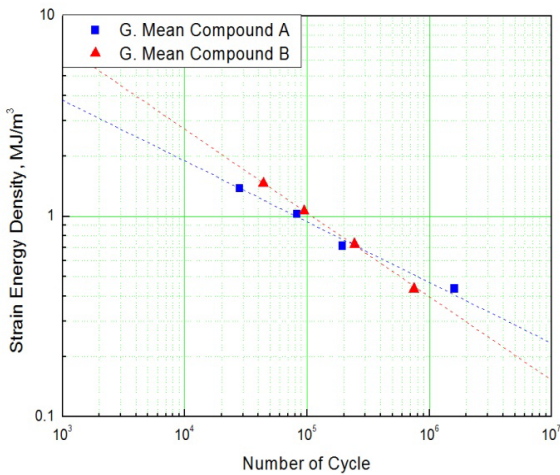


Fig. 7 Strain energy density-Fatigue life curves

Fig. 5에 나타내었다.

$$N_f^A \text{ compound} = 81318 \times (\text{SED}_A)^{-3.2980} \quad (3)$$

$$N_f^B \text{ compound} = 109546 \times (\text{SED}_B)^{-2.3960} \quad (4)$$

3.2 피로 시험 결과

피로시험은 최대 변형 변위를 각각 30, 40, 50, 60mm로 제어하여 ASTM 범위 내 0.69, 0.93, 1.16, 1.39 총 4 구간의 변형률 구간에서 수행하였으며, 각각의 변형률마다 10개의 시편을 사용하여 파단시의 피로 반복 횟수를 획득하였다. 시험 결과에 따라 컴파운드 A를 사각형, 컴파운드 B를 삼각형으로 표기하여 최대변형률과 피로수명과의 관계를 Fig. 6에 나타내었으며, 기하평균⁽¹²⁾ (Geometric mean)을 사용하여 각 변형률 구간의 피로수명 평균값을 도출하였다.

3.3 피로수명 관계식 도출

인장시험을 수행하여 획득한 관계식 (1)~(2)에 최대변형률을 대입하여 변형률에너지밀도와 피로수명의 기하평균(Geometric mean)과의 관계를 도출하여 Fig. 7에 나타내고, 회귀 분석을 통한 곡선접합으로 변형률에너지밀도와 피로수명과의 관계식 (3)~(4)를 획득하였다. 그 결과 0.719 MJ/m³ 이상의 높은 변형률에너지밀도에서는 B 컴파운드가 성능이 우수한 것으로 나타났으나, 0.719 MJ/m³ 이하의 변형률에너지밀도에서는 A 컴파운드의 피로수명이 길게 나타났다. 따라서 타이어 설계시 사이드월 고무재료에 발생하는 변형률에너지밀도 값을 고려하여 우수한 피로성능을 갖는 컴파운드를 선택해야 할 것으로 판단된다.

4. 사이드월 고무의 수명평가

타이어 사이드월의 수명을 평가하기 위해서는 주행하는 타이어의 변형률에너지밀도를 획득해야 한다. Fujigaki⁽¹³⁾의 초고속카메라 촬영기법을 통해 80km/h의 속도로 주행하는 타이어 사이드월 부근의 변형률이 -0.13~0.20 사이임을 확인하였으며, Kim⁽¹⁴⁾의 실험을 통해 하중변화에 대한 타이어 사이드월 내부 Inner liner의 변형률은 0.1~0.15임을 확인하였다. 또한, Tang⁽¹⁵⁾과 Namjoo⁽¹⁶⁾의 연구에 따르면 정상상태회전을 하는 185/60R15 타이어의 변형률에너지밀도의 범위는 약 0.02~0.06 MJ/m³이며 타이어 내부의 공기압의 증가와 하중감소에 따라 사이드월의 변형률에너지밀도가 감소함을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 타이어의 수명을 도출하기 위한 변형률에너지밀도를 종합적으로 판단한 결과 80km/h 속도로 주행하는 타이어 (185/60R15) 사이드월 부분의 변형률에너지밀도값 0.06 MJ/m³를 피로수명 관계식에 대입하여 파단수명을 예측하였다. 또한, 실제 타이어(185/60R15)의 회전반경(Dynamic Rolling Radius: 291.67mm)과 피로수명을 식 (5)에 대입하여 타이어의 주행가능 거리를 환산하고 결과를 Table 2에 나타내었다. 그 결과 양산형 타이어 사이드월의 수명이 저연비 타이어 사이드월 수명보다 약 9.4배 길게 산출되었으나 저연비 타이어 사이드월 고무의 경우에도 약 17만km의 주행가능 거리를 갖는 것으로 평가됨에 따라 내구수명을 충분히 만족하여 실제 타이어에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 획득한 B 컴파운드의 사이드월 수명은 약 17만km로서 양산형 타이어의 교체주기(10만km 이하)보다 길게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 실

Table 2 Expected mileage of the tire sidewall

Compound	A	B
N _f (Cycle)	870,650,522	92,714,173
Distance(km)	1,595,568	169,909

제 타이어는 Tread 마모로 인하여 타이어를 교체하며, Tread의 수명이 사이드월의 수명보다 훨씬 짧기 때문이다. 또한 상온에서 이상적으로 실험한 결과이기 때문에 실제로 복합노화를 받는 타이어의 경우 온도, 균열, 노화 등에 의하여 수명이 짧아질 것으로 판단되며, 복합노화를 고려한 사이드월 고무에 대한 연구가 추가로 필요하다.

$$\text{Distance(km)} = 2\pi \times \text{DRR} (291.67\text{mm}) \times N_f (\text{Cycle}) \quad (5)$$

5. 결 론

본 연구에서는 타이어 사이드월 고무재료 2종에 대해서 인장시험 및 피로시험을 수행하고 사이드월의 수명 예측식을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험 결과 변형률이 동일한 경우 2가지 컴파운드에 대한 인장응력 차이가 5% 이내로 적게 나타났으며, 이에 따라 동일한 하중에서 타이어 사이드월 고무를의 변형량은 유사할 것으로 판단된다.

(2) 비선형 거동을 보이는 인장시험 결과에 Simpson's rule을 적용하여 변형률에너지밀도를 구하였으며, 변형률-변형률에너지밀도 관계식을 도출한 결과, B 컴파운드의 변형률에너지밀도 값이 A 컴파운드보다 크게 나타났다.

(3) 피로시험을 수행하여 변형률에너지밀도와 평균수명과의 관계식을 도출하였으며, 운행 중 타이어에 발생하는 변형률에너지밀도 값이 0.06 MJ/m³ 이하인 것을 고려할 때 A 컴파운드의 피로성능이 우수한 것으로 평가되었다.

(4) 자동차 운행 중 발생하는 변형률과 변형률에너지밀도 범위를 고려할 때 사이드월 고무를의 피로수명이 타이어의 사용 수명보다 긴 것으로 평가됨에 따라 2종의 컴파운드 모두 실제 타이어에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 현대자동차의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) Institute of Machinery and Materials, 2004, "Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components," *National Research Foundation of Korea*, M1-9911-00-0014.
- (2) Lee, T. K. and Kim, B. S., 2003, "Vibration Analysis of Automobile Tire Due to Road Impact," *The journal of the acoustical society of Korea*, Vol. 22, No. 6, pp. 505~5111.
- (3) Oh, H. K., "Study on the Pattern Design for Passenger Car Tire: Focus on Ultra High Performance Tire Development of Hankook Tire," *Master's thesis, Automobile design, Kookmin University*.
- (4) Lee, J. K. and Lee, D. J., 2013, "A Study on the Friction of Tire Tread Rubber using High-Speed Friction Test Machine," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 6, pp. 622~628.
- (5) Plaček, V., Kohout, T., Hnát, V. and Bartoniček, B., 2008, "Assessment of the EPDM Seal Lifetime in Nuclear Power Plants," *Polymer Testing*, Vol. 28, Issue 2, pp. 209~214.
- (6) Verrona, E. and Andriyana, A., 2008, "Definition of a New Predictor for Multiaxial Fatigue Crack Nucleation in Rubber," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 56, No. 2, pp. 417~443.
- (7) Mars, W. V. and Fatemi, A., 2002, "A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 9, pp. 949~961.
- (8) Harbour, R. J., Fatemi, A. and Mars, W. V., 2007, "Fatigue Crack Growth of Filled Rubber under Constant and Variable Amplitude Loading Conditions," *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*, Vol. 30, No. 7, pp. 640~652.
- (9) Kim, W. H., Kim, M. Y., Chang, Y. W., Shin, J. E. and Bae, J. W., 2003, "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*, Vol. 11, No. 2, pp. 73~79.
- (10) Andre, N., Cailletaud, G. and Piques, R., 1999, "Haigh Diagram for Fatigue Crack Initiation Prediction of Natural Rubber Components," *Kautschuk Und Gummi dunstoffe*, Vol. 52, p. 120.
- (11) Lee, D. W., Kim, S. R., Sung, K. D., Park, J. S., Lee, T. W. and Huh, S. C., 2013, "A Study on the Fatigue Life Prediction of Tire Belt-layers using Probabilistic Method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 3, pp. 673~678.
- (12) *ASTM D4482-11*, "Standard Test Method for Rubber Property-extension Cycling Fatigue."
- (13) Fujigaki, M. and Kousuke, S., 2012, "Dynamic Shape and Strain Measurements of Rotating Tire in

- Time-Series,” *Experimental and Applied Mechanics*, Vol. 4, Chapter 8, pp. 57~66.
- (14) Kim, S. J., Kim, K. -S. and Yoon, Y. -S., 2015, “Development of a Tire Model Based on an Analysis of Tire Strain Obtained by an Intelligent Tire System,” *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 16, No. 5, pp. 865~875.
- (15) Tang, T., Johnson, D., Smith, R. E. and Felicelli, S. D., 2014, “Numerical Evaluation of the Temperature Field of Steady-state Rolling Tires,” *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 38, pp. 1622~1637.
- (16) Namjoo, M. and Golbakhshi, H., 2014, “Finite Element Analysis for Estimating the Effect of Various Working Conditions on the Temperature Gradients Created Inside a Rolling Tire,” *IJE transactions C: Aspects*, Vol. 27, No. 12, pp. 1929~1936.
- (17) Mullins, L., 1969, “Softening of Rubber by Deformation,” *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 42, No. 1, pp. 339~362.