

FEM을 이용한 타이어의 Belt Width와 Separation에 관한 연구

김성래*(넥센타이어(주) 기술연구소), 성기득(넥센타이어(주) 기술연구소),
김선주(넥센타이어(주) 기술연구소), 조춘택(넥센타이어(주) 기술연구소)

A Study on the Belt width and Separation of Tire using FEM

S. R. Kim(R&D Center. Nexen Tire Corp.), K. D. Sung(R&D Center. Nexen Tire Corp.),
S. S. Kim(R&D Center. Nexen Tire Corp.), C. T. Cho(R&D Center. Nexen Tire Corp)

ABSTRACT

This study is concerned with the relation between steelbelt and belt edge separation, Belt edge separation causes tire burst and threatens passenger's safety. For that reason, it is important to predict durability caused by belt edge separation first in tire structure design step.

In this study, to predict belt edge separation, we suggest the prediction method of belt edge separation and evaluate the effect of steelbelt width on the belt edge separation using FEM. We study on analysis parameter also to do exact estimation about the shear behaviour of belt edge area.

Key Words : FEM(유한요소법), Belt Width(벨트 폭), Belt Edge Separation(벨트 끝단 분리), Strain Energy Density Range(변형률 에너지 밀도 범위), Shear Behaviour(전단 거동)

1. 서론

차체에서 타이어는 지면과 유일하게 맞닿아 있어 Suspension과 더불어 지면으로부터의 충격 완화와 차량의 하중을 지지하고, 제동력 및 구동력 등을 차체에 전달하는 중요한 부품중 하나이다. 더욱이 타이어는 빠른 속도로 회전 운동을 하고 있어, 주행 시 공기압만을 받는 부분과 공기압과 하중을 동시에 받는 부분이 연속적인 주기 하중 형태로 부하되어 전형적으로 피로에 취약한 Mechanism을 이루고 있다. 따라서, 타이어의 내구성은 승객의 안전과 차량의 보호 측면에서 매우 중요한 성능이므로 타이어 개발 시 가장 우선적으로 고려되어야 할 사안이다.

타이어의 내구성을 고려할 때, Steelbelt Edge 영역과 Bead 영역에서의 Separation에 의한 파단을 가장 먼저 들 수 있다. 이는 지금까지 업계에서의 경험과 구조해석 등을 통해 통상적으로 알려진 사실이다.

여기서, 타이어에서 Steelbelt가 차지하는 역할은 크게 두 가지로 축약된다. 먼저 주행 시 외부 충격으로부터 Carcass를 보호하는 역할과 노면과 Tread 접지면 간의 접촉 면적을 넓게 하여 주행 시 안정성을

높이는 역할이 있다. 하지만, 구조적 안정성 측면에서 본다면 Steelbelt는 외부의 충격으로부터는 타이어 내부를 보호하는 역할을 하지만, Belt Edge에서는 이질 재료간의 박리현상과 강성 불연속 지점에 의한 국부 응력 집중, 그리고 일정한 각을 가지고 적층되어 있어 Belt Edge에서 원주 방향으로 계면간에 전단 응력이 발생한다. 따라서 적절한 Belt Width를 선정하지 못할 때에는 상기의 원인으로 Belt Edge에 Separation을 일으키고, 타이어의 기본 성능인 내구성에 있어 불리한 결과를 발생시킨다.

이런 Belt Separation에 대한 유한요소 해석 시 어떤 위치에서 어떤 해석 Parameter에 의한 평가가 실제 타이어의 내구성과 관계를 가지는지가 가장 중요한 문제이다. 고무는 기계 구조물과 같이 단편적인 응력과 변형율로 그 특성을 직접적으로 평가하는데 무리가 있다. 특히, 타이어는 반복 굴신운동을 하고 있기 때문에 해석 후 Data의 취득 방법이 내구 해석에 대한 판단에 큰 영향을 미친다.

따라서, 본 연구에서는 Belt Width가 타이어의 Separation에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 Belt 주위에서 발생하는 내구해석 Parameter에 대해 정확한 관심 위치를 추적하고, 그 위치에서의 값

에 대해 고찰하였다.

2. 타이어 유한요소 해석

2.1 Steelbelt Width 설정

본 연구에서 사용된 타이어는 205/65R15 PCR Type의 타이어로 유한요소 해석을 통한 내구 해석 방법을 제시하고 또, 제시된 방법에 의해 Steelbelt Width와 Belt Edge Separation과의 관계에 대해 정의하게 된다. 따라서 Belt Width에 대한 정량적인 기준이 필요하게 되는데, 타이어 Size 및 성능 설정에 따라 각기 다른 Belt Width를 하나의 기준으로 통일하기 위해 Fig. 1과 같이 Tread Width와 Belt #1의 Width가 같게 되는 것을 Step100(100%)으로 정하고 상한과 하한을 각각 설계 한계로 정한 후 5% 단위로 변수를 설정하였다.

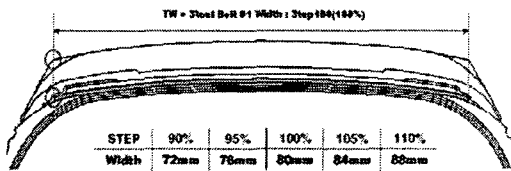


Fig. 1 Set the level of steelbelt width

2.2 유한요소 해석

상기에서 정의한 바와 같이 Step을 나누어 각각에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS V6.5를 사용하였으며 재료 모델은 변형을 50%내에서 비교적 정확한 거동을 모사해 주는 Mooney-Rivlin 모델을 이용하였다. 복합재(Cord-Rubber)의 경우 과거에는 이를 효과적으로 표현해 주는 요소가 개발되지 않았거나 쉽게 표현하기가 힘들어 Halpin-Chai식¹⁾등을 이용하여 등가 물성치로 계산하였으나, 본 연구에서는 ABAQUS Program에서 제공하는 Rebar Layer를 이용하여 좀 더 사실적으로 표현 하였다.

구속조건은 Rim을 원래 위치에서 떨어지게 모델

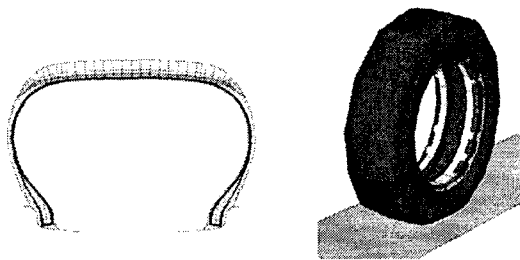
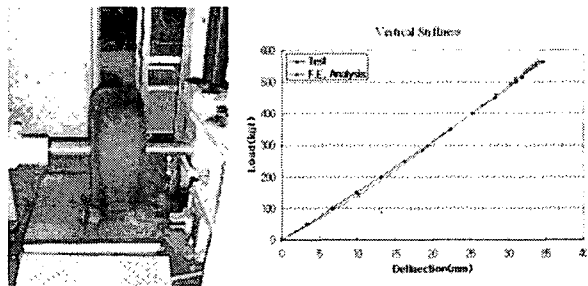


Fig. 2 Tire FE models for 2-D and 3-D analysis

링하여 원래 위치로 찾아가고, 하중 부하시 Rim이 완전 구속되도록 부여 하였으며, 공기압은 규정 공기압인 1.8kgf/cm², 하중은 규정 하중인 515kgf를 부과 하였다. Fig. 2는 2차원과 3차원 유한요소 모델을 각각 보여주고 있다.

2.3 해석 검증

본 연구에서 모델된 유한요소 모델의 타당성을 검증하기 위해 동일한 조건의 Non-Patterned Tire를 제조하고, Fig. 3(a)와 같이 종강성(Vertical Stiffness) 시험을 통해 비교 하여 보았다.



(a) Vertical stiffness test (b) Load-Deflection curve
Fig. 3 Vertical stiffness test for non-patterned tire

Fig. 3(b)에서는 Test와 F.E. Analysis를 통한 종강성 시험 이력을 Graph로 나타내었다.

이때, 종강성 계수(Kv)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_v = \frac{(F_z + 50\text{kgf}) - (F_z - 50\text{kgf})}{u_+ - u_-} \quad (1)$$

여기서,

F_z : 규정하중

u₊ : 축하중 F_z + 50kgf 일 때의 종변위

u₋ : 축하중 F_z - 50kgf 일 때의 종변위

식 (1)에 의해 계산된 Test값은 17.92kgf/mm 이고, F.E Analysis 값은 18.62kgf/mm로써 Test에 대한 F.E. Analysis 오차는 약 3.9%를 보여준다. 이는 일반적인 공학적 오차 5%내로서 시험과 해석이 거의 일치한다고 판단 할 수 있다.

3. 내구성에 대한 해석 관점

타이어의 파손 원인으로는 먼저 급격한 충격이나 날카로운 물체에 의한 급속파단과 정상 주행 중 자연적으로 발생하는 마모에 의한 파손²⁾, 그리고 서론에서 언급한 타이어의 구조 역학적 파괴 Mechanism에 의한 파손 등으로 나눌 수 있다. 이때, 첫 번째와

두 번째 원인은 정상적인 사용으로 간주 할 수 있으므로 우리는 세 번째 구조 역학적 원인에 대해 언급하고자 한다.

3.1 재료 역학적 관점

재료에 결함이 없음을 가정하고 최대 Stress/Strain Analysis Parameter의 값이 발생하는 부분을 취약 부분으로 간주하여, 이 부위가 주행 중 일정 수준 이상의 충격이나 하중으로 인해 취약부의 임계 파괴 한도를 넘어서 파손이 발생하는 것을 말한다. 이 때 발생한 파손은 고무 자체의 성능이 기준에 미달하여 발생하는 원인과 타이어 구조 설계상에서 국부적인 응력 집중을 발생시켜 고무의 파괴 한도를 넘어서는 원인을 들 수 있다. 하지만 상기와 같은 원인은 통상적으로 타이어 파손의 직접적인 원인이 되지 않는다고 피로 파괴에 대한 초기 균열로써 작용하는 것이 대부분이다.

3.2 파괴 역학적 관점

어떤 재료든 미소 결함을 가지고 있다고 가정하고 Inflation 상태와 부하 후 상태간의 차이인 최대 Stress/Strain Analysis Parameter Range가 큰 부분을 취약 부분으로 간주한다. 하중 부하 초기와 부하 후 Parameter의 차이가 크면 피로(Fatigue)에 취약한 결과를 나타내고 이는 피로 균열 성장의 원인이 된다. 타이어는 주행 중 차량과 승객의 중량에 의해 부하와 재하를 끊임없이 반복하게 된다. 따라서, 재료 자체의 미소 결함이나 충격에 의한 균열 그리고 벨트 끝단의 코트 절단부에 의한 원형균열 등에서 큰 하중 진폭에 의한 반복 운동에 의해 피로 균열이 성장하며 계면 박리 및 균열 전파에 의해 파단에 이르게 된다. 특히 벨트 끝단의 코트 절단부는 코트와 고무의 접착을 위한 황동 피복이 물질이 적용되지 않은 바 삽입된 코트 수 만큼의 원형 균열을 가지고 있는 것으로 간주할 수 있다. 일반적으로 이런 균열은 다음의 균열 개시 조건의 의해 진전을 개시하게 된다.

$$\frac{d}{da}(L+U) \geq \frac{dW}{da} \quad (2)$$

여기서,

L : 균열에 주어지는 에너지

U : 탄성 변형 에너지

W : 표면에너지

즉, 균열에 주어지는 에너지의 증가와 탄성 변형 에너지의 해방이 균열이 얻는 에너지, 즉 표면에너지의 증가를 상회하는 경우에만 실제로 균열 진전이 개시하는 것을 나타내고 있다.³

3.3 계면 분리에 의한 균열 전파

타이어는 일정한 코드각을 가진 Steelbelt가 적층되어 있는 구조를 가지고 있다. 제조 시 발생하는 공정 오차를 무시 한다면 Steelbelt 외에는 정확한 좌우 대칭을 이루고 있기 때문에 부하 시 내부에 작용하는 응력 및 변형률은 전단응력/변형률 보다는 주응력/변형률이 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 하지만 타이어에서 Steelbelt는 서로 상반된 코드각과 상이한 Width를 가지고 적층되어 있기 때문에 층간 전단 변형을 발생시키고, Belt Edge 부에서 최대가 되며, 반복 변형 시 계면 분리 현상이 발생하며 층간으로 전파되어 결론적으로 타이어의 파단을 일으킨다.

4. Belt Edge Separation

Fig. 4는 Belt 층간 전단거동을 나타내었다. 하중을 가해지기 전 Belt는 (a)와 같은 형태를 지나 하중이 가해지면 (b)와 같이 변형되기 시작한다. Separation이 일어나기 전 두 Belt 층은 하나의 연속체처럼 거동하는 것처럼 보이나, 이미 층간에는 (c)와 같은 상반된 방향의 힘이 작용하고 있다. 이런 상반된 방향의 운동은 결과론적으로 층간 고무 접착력을 약화시키고 균열이 침투 했을 때 진전을 쉽게 허용하게 된다. 또, 한번 분리된 Belt Edge는 구속되어 있던 전단 거동이 해방되면서 자유단 역할을 하여 반복 변형에 의한 균열 전파속도가 급격히 증가한다. 이런 운동은 일반적인 선형탄성파괴역학(LEFM)에서 가정하는 Mode-III(면외전단모드)와 유사한 하중형태를 가지고 있다.

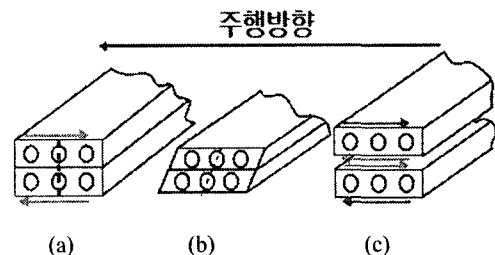


Fig. 4 Shear behaviour in belt

따라서, Belt Width와 Separation의 상관성을 알아 보기 위해 Belt 층간 계면에 해당하는 Fig. 5(b)에서의 2, 3, 4, 5번 지역의 Center Node 값에 대해 고찰해 보아야 한다.

일반적으로 타이어에 하중이 가해질 때 Belt Edge 부에서의 응력/변형률 성분을 조사해 보면, 6개의 응력/변형률 성분 중 $\sigma_{xz}/\epsilon_{xz}$ 이 균열을 일으키는 주요 응력/변형률로 작용한다고 알려져 있다.⁴ 즉, 방향성만 놓고 볼 때, 층간 전단에 기여하는 또 다른 성분이 존재하기는 하나 $\sigma_{xz}/\epsilon_{xz}$ 에 비해 그 값이 무

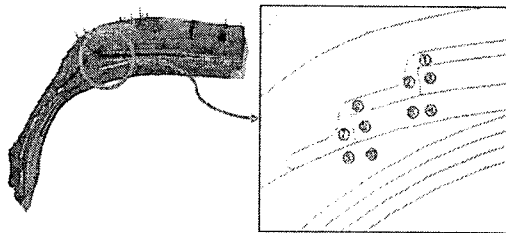
시 될 정도로 작기 때문에 무시할 수 있다고 한다. 하지만, 본 연구에서 살펴본 바에 의하면 계면에 작용하는 힘 중 Belt #2에서의 $\sigma_{xy}/\epsilon_{xy}$ 성분도 무시하지 못할 수준의 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 계면에서의 정확한 거동을 반영하기 위해 Strain Energy Density의 값으로 정량화 하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

조6는 Belt 층간 전단 응력, 전단 변형률, Strain Energy Density 등의 Parameter와 그 Range를 가지고 Belt Edge Separation에 관해 해석과 실험을 비교하였다. 여기서는 이상의 Parameter 중 Strain Energy Density Range가 내구성 실험과 가장 유사한 결과를 나타내는데서 이 Parameter의 유용성을 증명하였다. 하지만, 전단거동에 대해서 하나의 성분에 의한 평가였으므로 전술한 이유에 의해 실험과의 오차가 발생된 것으로 판단된다.

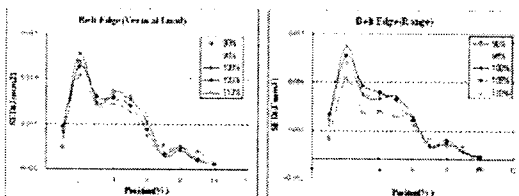
5. 해석 결과

5.1 Belt Edge부에서의 관심 위치 추적

Fig. 5(a)는 동일 Size의 타이어에 대한 고속 내구 시험후의 결과이다. 그림에서는 Belt Edge 부를 기점으로 균열이 Belt 층 사이와 Bodyply Cord 방향으로 전파된 것을 나타내고 있다. 따라서, 균열의 시작과 전진시 Belt #1과 Belt #2에서 주요 관심 위치를 추적해 보기 위해 각각이 Belt Width에 대해 유한요소 해석을 수행하고, Fig. 5(b)에 표시한 위치에서의 Strain Energy Density와 그 Range를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) Crack growth (b) Measuring position
Fig. 5 Belt edge crack growth for high speed endurance test



(a) Strain energy density (b) Strain energy density range

Fig. 6 Strain Energy Density on Each Position

Fig. 6에서 볼 수 있듯이, Strain Energy Density와 Strain Energy Density Range 모두 1번 위치를 제외하고는 감소하는 추세를 보이고 있다. 따라서, Belt #1의 Edge 부(6, 7, 8, 9, 10) 보다 Belt #2의 Edge 부(1, 2, 3, 4, 5)가 더 파괴에 취약하다고 할 수 있다.

특히, Energy 값이 가장 높은 Belt #1 Edge의 2, 3, 4, 5번 지역은 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 Belt #1과 Belt #2의 계면을 공유한 지역으로 Belt 각도에 의한 층간 전단이 발생하는 지점으로 생각 할 수 있다. 또, 2번 지역에서 급격히 높은 Energy 값을 보이는 것은 Belt 층간 전단 외에 Belt #2의 Edge와 바로앞 고무층간에 발생하는 강성 불연속에 의한 다른 방향의 응력 및 변형이 작용한 복합적인 Energy 값을 나타내기 때문이다. 따라서, Belt Separation의 초기 균열 역할을 하는 Belt 절단부의 존재와 함께 균열 발생 및 초기 전진의 유력한 후보 지역으로 유추된다.

5.2 최대 Strain Energy Density

Fig. 7과 Fig. 8은 전단거동이 예상되는 지점인 2, 3, 4, 5번의 Center Node에서 Steelbelt Width의 변화에 따른 Strain Energy Density 와 그 Range를 나타낸 것이다. Graph에서 Strain Energy Density 값은 Belt Width의 증가에 따라 감소하는 반면, 그 Range는 오히려 증가하는 경향을 보인다. 두 가지의 결과 중 내구성의 해석 관점에 따라 달라지겠지만, 본 연구에

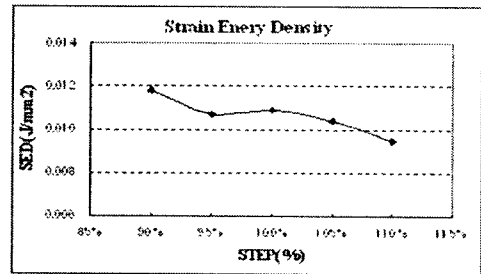


Fig. 7 Strain energy density at center node in area 2, 3, 4, 5

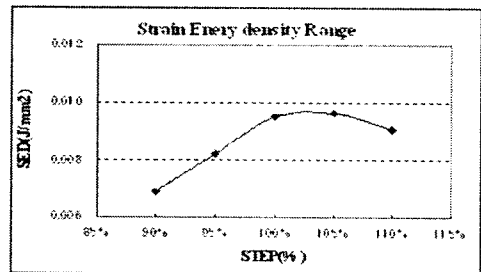


Fig. 8 Strain energy density range at center node in area 2, 3, 4, 5

서는 Belt Edge Separation에 대해 초점을 두고 있기 때문에 Belt Edge 및 층간 피로 특성을 고려할 때 Strain Energy Density Range로 Belt Width의 변화에 따른 내구 특성을 판단해야 한다. 따라서, 내구성만을 고려해 볼 때, Belt Width가 증가함에 따라 Belt Edge Separation에는 더 취약해 지는 경향을 보이므로 Belt Width가 가장 짧은 90%의 값이 추천된다. 하지만, 실제 설계 시 타이어의 특성은 내구성만 고려하지 않으므로, 다른 특성에 영향이 최소화 되는 범위 내에서 가능한 짧은 Belt Width를 선택하는 것이 Belt Edge Separation을 줄이는 한 가지 방법이라 판단된다.

6. 결 론

Steelbelt Width의 변화가 Belt Edge Separation에 미치는 영향을 알아보기 위해 Belt Edge Separation에 관한 파괴기구에 대해 알아보고 유한요소 해석을 수행해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Belt Edge 부에서의 내구성은 Belt #1 Edge 보다 Belt #2 Edge에서 더 취약한 것으로 나타났다.
- 2) Belt 층간에서의 전단은 $\sigma_{xz}/\epsilon_{xz}$ 에 의한 전단 뿐 아니라 $\sigma_{xy}/\epsilon_{xy}$ 의 전단값도 무시하지 못하므로 정확한 결과를 위해서는 Strain Energy Density 및 그 Range 값으로 나타내는 것이 타당하다.
- 3) Belt Width 변화에 대해, Belt Edge Separation의 관점에서 본다면 Width의 증가에 따라 피로 특성에 취약해 지는 것을 알 수 있었다.
- 4) 본 연구에서의 Belt Edge Separation 추정 방법은 향후 타이어 설계 시 유한요소법을 통한 내구성 예측에 활용될 수 있다.
- 5) 향후 Belt Edge Separation을 고려한 Belt Width 설정 시 본 연구의 결과물은 참고 자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

1. Samuel, K. Clark, "Theory of the Elastic Net Applied to Cord-Rubber Composite," Cord-Rubber Composite, Vol. 56.
2. 박현철, 심현우, "자동차, 타이어 그리고 내구성," 자동차공학회지, 제25권, 제3호, pp. 20-24, 2003.
3. 이종기, 나의균, "파괴역학," 원창 출판사, 1999.
4. 박상서, "트럭 버스용 래디알 타이어 내부 벨트층의 내구성에 관한 연구." 전남대학교 대학원, 박사학위 논문, 2000.
5. 조점근, "유한요소법을 이용한 타이어 내구력 측

정 방법에 관한 연구," 전남대학교 대학원, 석사학위 논문, 1998.

6. Y. H. Han, Becker, E. B, Fahrenthold, E. P., Kim, D. M., "Fatigue Life Prediction for Cord-Rubber Composite Tires Using a Global-Local Finite Element Method," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 32, No. 1, 2004
7. Xiangqio Yan, Youshan Wang, Xijin Feng, "Study for the endurance of radial truck tires with finite element modeling," Mathematics and Computer in Simulation, Vol. 59, 2002