

# 타이어의 Belt Width 변화에 따른 Belt Edge Separation 예측 방법에 관한 연구

김성래<sup>#</sup>, 성기득<sup>\*</sup>, 김선주<sup>\*</sup>, 조춘택<sup>\*</sup>

## A Study on the Prediction Method of Belt Edge Separation due to the Belt Width Variation of a Tire

Seong-Rae Kim<sup>#</sup>, Ki-Deug Sung<sup>\*</sup>, Son-Joo Kim<sup>\*</sup> and Choon-Tack Cho<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

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

Usually, passenger car tires have two layers of steelbelts having opposite steel cord's angles, which makes a shear behaviour between each belt layer. Shear behaviour is one of reason to cause belt edge separation.

In this study, to predict belt edge separation, we suggested the prediction method of belt edge separation and evaluated the effect of steelbelt width on the belt edge separation using FEM. We also studied on main parameters to affect shear behaviour at the 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 서스펜션(suspension)과 더불어 지면으로부터의 충격 완화와 차량의 하중을 지지하고, 제동력 및 구동력 등을 차체에 전달하는 중요한 부품 중 하나이다. 더욱이 타이어의 급격한 회전 운동은, 주행 시 공기압만을 받는 부분과 공기압과 하중을 동시에 받는 부분이 연속적인 주기 하중 형태를

이루고 있어 전형적으로 피로에 취약한 메카니즘을 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, 스틸벨트 끝단 영역과 비드 영역에서의 분리에 의한 파단을 가장 먼저 들 수 있다. 이는 지금까지 업계에서의 경험과 구조해석 등을 통해 통상적으로 알려진 사실이

접수일: 2005년 9월 12일; 게재승인일: 2006년 7월 13일

# 교신저자: 넥센타이어㈜ 기술연구소 특성연구팀

E-mail [srkim@nexentire.co.kr](mailto:srkim@nexentire.co.kr) Tel. (055) 370-5086

\* 넥센타이어㈜ 기술연구소 특성연구팀

다.<sup>1,2</sup>

Fig. 1 은 일반적인 레디얼 타이어의 구조를 나타낸 그림이다. 타이어에서 스틸벨트가 차지하는 역할은 크게 두 가지로 축약된다. 먼저 주행 시 외부 충격으로부터 카카스를 보호하는 역할과 노면과 트레드 접지면 간의 접촉 면적을 넓게 하여 주행 시 안정성을 높이는 역할이 있다. 하지만, 구조적 안전성 측면에서 본다면 스틸벨트는 외부의 충격으로부터는 타이어의 내부를 보호하는 역할을 하지만, 벨트끝단 영역에서는 이질 재료간의 박리현상과 강성 불연속 지점에 의한 국부 응력 집중, 그리고, 그림에서 보는 바와 같이 일정한 각을 가진 교차 적층에 의한 원주 방향의 계면 전단응력을 발생시킨다. 따라서, 설계단계에서 적절하지 못한 벨트폭의 선정은 벨트끝단 부의 분리를 일으키고, 타이어의 기본 성능인 내구성에 있어 불리한 결과를 발생시킨다.

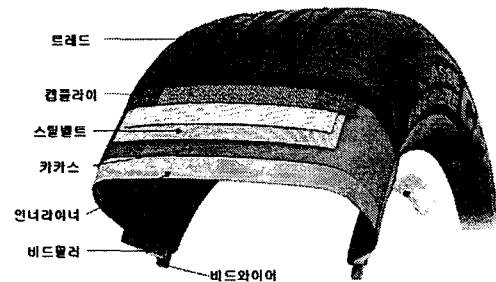


Fig. 1 Structure of radial tire

이런 벨트끝단 분리에 대한 유한요소 해석 시 어떤 위치에서 어떤 해석 인자(parameter)에 의한 평가가 실제 타이어의 내구성과 관계를 가지는지가 가장 중요한 문제이다. 고무는 기계 구조물과 같이 단편적인 응력과 변형률로 그 특성을 직접적으로 평가하는데 무리가 있다. 더구나, 타이어는 반복 굴신운동을 하고 있기 때문에 해석 후 데이터의 취득 방법이 내구 해석에 대한 판단에 큰 영향을 미친다.

따라서, 본 연구에서는 벨트 폭이 타이어의 분리에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해 벨트 주위에서 발생하는 내구해석 파라미터에 대한 정확한 관심 위치를 추적하고, 그 위치에서의 값에 대해 고찰 하였다.

## 2. 타이어의 유한요소 해석

### 2.1 벨트 폭의 설정

본 연구에서 사용된 타이어는 205/65R15 사이즈의 승용차용 타이어로 유한요소 해석을 통한 내구 해석 방법을 제시하고 또, 제시된 방법에 의해 스틸벨트 폭과 벨트 끝단 분리와의 관계에 관해 정의하게 된다. 따라서 벨트 폭에 대한 정량적인 기준이 필요하게 되는데, 타이어의 사이즈 및 성능에 따라 각기 다른 벨트 폭을 하나의 기준으로 통일하기 위해 Fig. 2 와 같이 트레드 폭과 벨트 #1 의 폭이 같게 되는 것을 Step100(100%)으로 정하고 상한과 하한을 각각 설계 한계로 정한 후 5% 단위로 변수를 설정하였다.

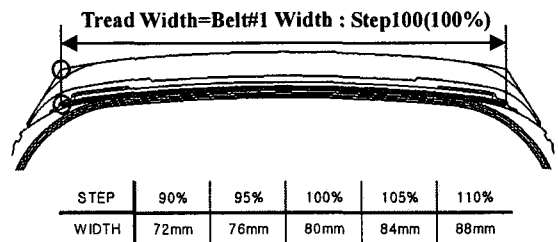


Fig. 2 Levels of steelbelt width

### 2.2 유한요소 해석

Fig. 2 에서 정의한 바와 같이 Step 을 나누어 각각에 대해 유한요소 해석을 수행 하였다. 유한요소 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS V6.5 를 사용하였고, Table 1 과 Table 2 는 본 연구에서 사용된 타이어의 각 부분 물성치를 나타낸 것이다. 여기서, 고무재료는 변형률 50%내에서 비교적 정확한 거동을 모사해 주는 무니-리블린(Mooney-Rivlin) 모델<sup>3</sup>을 이용하였고, 복합재(Cord-Rubber)의 경우 과거에는 이를 효과적으로 표현해 주는 요소가 개발되지 않았거나 쉽게 표현하기가 힘들어 Halpin-Tsai 식과 같은 등가 물성치를 사용하였으나, 본 연구에서는 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 Rebar 요소를 이용하여 좀 더 사실적으로 표현하였다.

Rebar 요소 적용 시, 요소 각각에 대해 정의해 줄 수도 있으나 보다 효과적인 방법으로 Fig. 3 에서와 같이 두께를 가지지 않는 Surface 요소에 Rebar 를 정의하고, Rebar Layer 를 만들어 고무요소 에 Layer 를 심어주는 Embedded Element Option 을

사용하여 구성을 단순화 시켰다. 여기서, 사용자는 Rebar 의 단면적, 간격, 물성치, 각도 등을 정의해 주면 Rebar 는 고무와 거동을 같이 하게 된다.<sup>3,4</sup>

구속조건은 림을 원래 위치에서 떨어지게 모델링하여 원래 위치로 찾아가고, 하중 부하시 림이 완전 구속되도록 부여하였으며, 공기압은 규정 공기압인 1.8kgf/cm<sup>2</sup>, 하중은 규정 하중인 515kgf 를 부하하였다.

Table 1 Material Properties for Cord

Cord	E(Kgf/mm <sup>2</sup> )	v
Belt	20904.17	0.29
Carcass	397.69	0.4
Wrap	265.13	0.4

Table 2 Material Properties for Rubber

Rubber	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>
Wrap	0.0752	0.0146
Bead Filler	0.0948	0.0203
Sidewall	0.0224	0.0253
Inner Liner	0.0173	0.0175
Rim Strip	0.0309	0.0552
Tread	0.0455	0.0173
Carcass	0.0663	0.0035
Belt	0.0801	0.006

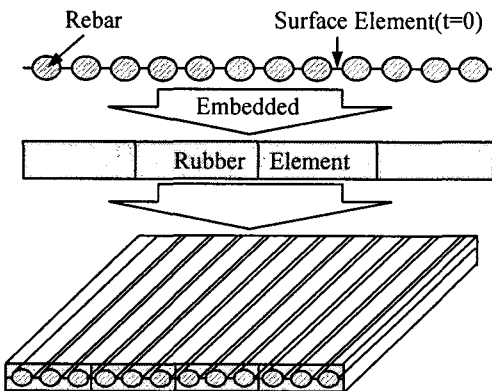


Fig. 3 Rebar Configuration

여기서, 림과 도로는 강체로 모델링 하였으며, 각각 타이어의 비드부와 트레드부에 접촉 조건을 부여하였다. Fig. 4 는 2 차원과 3 차원 유한요소 모델을 각각 보여주고 있다.

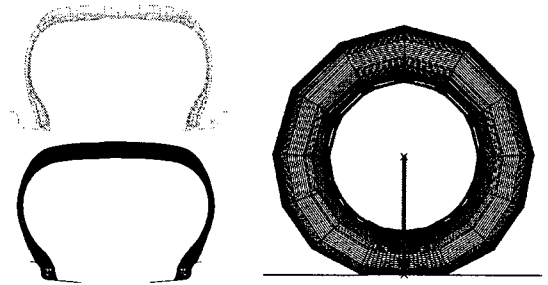


Fig. 4 Tire FE models for 2-D and 3-D analysis

### 2.3 해석 검증

본 연구에서 구성된 유한요소 모델의 타당성을 검증하기 위하여 동일한 조건의 패턴이 없는 타이어를 제조하고, Fig. 5(a)와 같이 종강성(vertical stiffness) 시험을 통해 비교 하여 보았다.

Fig. 5(b)에서는 타이어 종강성 시험기에서 수행한 실제 시험과 유한요소 해석을 통한 종강성 시험 이력을 그래프로 나타내었다. 종강성 시험은 해석조건과 같이 타이어에 공기압 1.8kgf/cm<sup>2</sup> 을 주입하고, 515kgf 의 하중을 타이어에 장착된 축으로 부하하면서 하중과 변위 관계를 측정하였다.

이때, 종강성 계수 ( $K_v$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

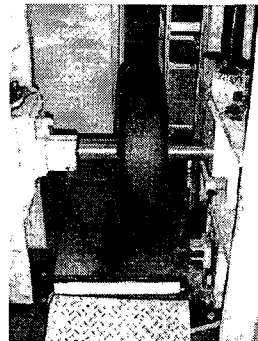
$$K_v = \frac{(F_z + 50) - (F_z - 50)}{u_+ - u_-} \quad (1)$$

여기서,

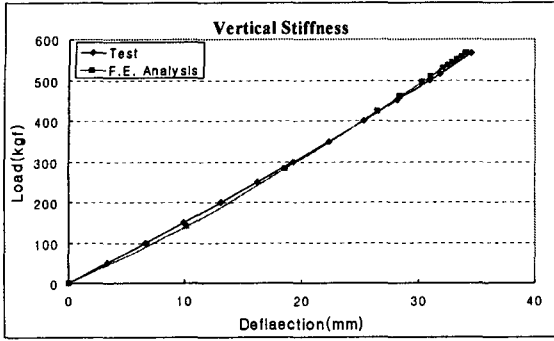
$F_z$  (kgf): 규정하중

$u_+$  (mm): 축하중  $F_z + 50$  일 때의 종변위

$u_-$  (mm): 축하중  $F_z - 50$  일 때의 종변위



(a) Vertical stiffness test



(b) Load-Deflection curve

Fig. 5 Vertical stiffness test for non-patterned tire

식 (1)에 의해 계산된 실제 종강성 시험값은 17.92kg/mm 이고, 유한요소해석을 통한 종강성 시뮬레이션값은 18.64kg/mm 로써, 약 3.9%의 오차를 보여준다. 이는 일반적인 공학적 오차인 5% 이내로서 본 유한요소해석에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

### 3. 내구성에 관한 해석 관점

타이어의 파손 원인으로는 먼저 급격한 충격이나 날카로운 물체에 의한 급속파단과 정상 주행 중 자연적으로 발생하는 마모에 의한 파손<sup>1</sup>, 그리고 서론에서 언급한 타이어의 거동 특성에서 야기된 구조적 파괴 메커니즘에 의한 파손 등으로 나눌 수 있다. 이때, 첫 번째와 두 번째 원인은 정상적인 사용으로 간주 할 수 있으므로 세 번째 구조적 원인에 대해 언급하고자 한다.

#### 3.1 재료 역학적 관점

파단에 대한 재료역학적 관점은 재료에 결함이 없음을 가정하고 최대 응력/변형률 해석 파라미터의 값이 발생하는 부분을 취약부분으로 간주하여, 이 부위가 주행 중 일정 수준 이상의 충격이나 하중으로 인해 취약부의 임계 파괴한도를 넘어서 파손이 발생하는 것을 말한다. 이 때 발생한 파손은 고무 자체의 성능이 기준에 미달하여 발생하는 원인과 타이어 구조상에서 국부적인 응력집중을 발생시켜 고무의 파괴 한도를 넘어서는 원인을 들 수 있다. 하지만, 상기와 같은 원인은 통상적으로 타이어의 파손의 직접적인 원인이 되지는 못하고 피로 파괴에 대한 초기 균열로써 작용하는 것이

대부분이다.

#### 3.2 파괴 역학적 관점

파괴역학적 관점은 어떤 재료든 미소 결함을 가지고 있다고 가정하고 공기압(inflation) 상태와 부하 후 상태간의 차이인 최대 응력/변형률 해석 파라미터 범위가 큰 부분을 취약한 부분으로 간주한다. 하중 부하 초기와 부하 후 파라미터의 차이가 크면 피로(fatigue)에 취약한 결과를 나타내고, 이는 피로 균열 성장의 원인이 된다. 타이어는 주행 중 차량과 승객의 중량에 의해 부하와 제하를 끊임없이 반복하게 된다. 따라서, 재료 자체의 미소 결함이나 충격에 의한 균열 그리고 벨트 끝단의 코드 절단부에 의한 원형균열 등에서 큰 하중 진폭에 의한 반복운동에 의해 균열이 성장하며 계면 박리 및 균열 전파에 의해 파단에 이르게 된다. 특히, 벨트 끝단의 코드 절단부는 코드와 고무의 접착을 위한 황동 피복이 적용되지 않은 바 삽입된 코드 수 만큼의 원형 균열을 가지고 있는 것으로 간주할 수 있다. 일반적으로 이런 균열은 다음의 균열 개시 조건에 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 : 표면 에너지

즉, 균열에 주어지는 에너지의 증가와 탄성 변형에너지의 해방이 균열이 얻는 에너지, 즉 표면 에너지의 증가를 상회하는 경우에만 실제로 균열 진전이 개시하는 것을 나타내고 있다.<sup>5</sup>

#### 3.3 계면 분리에 의한 균열 전파

일반적인 래디얼 타이어는 일정한 코드각을 가진 스틸벨트가 교차하며 적층되어 있는 구조를 가지고 있다. 제조 시 발생하는 공정 오차를 무시한다면 스틸벨트를 제외하고 정확히 좌우 대칭을 이루고 있기 때문에 부하 시 내부에 작용하는 응력 및 변형률은 전단 응력/변형률 보다는 주 응력/변형률이 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 하지만 타이어의 상반된 코드각은 증간 전단 변형을 발생

시키고, 특히, 벨트끝단 부에서 전단 변형이 최대가 되며, 반복 변형 시 계면 분리 현상이 발생하며 층간으로 전파되어 결론적으로 타이어의 파단을 일으킨다.

#### 4. 벨트 층간 분리

Fig. 6 은 벨트 층간 전단거동을 나타내었다. 실제 스틸벨트는 층간 폭이 다른 구조를 가지게 되나 편의상 벨트#2 를 기준으로 절단하여 보면, 하중이 가해지기 전 벨트는 (a)와 같은 형태를 지나다가 하중이 가해지면 (b)와 같이 변형되기 시작한다. 분리가 일어나기 전 두 벨트층은 하나의 연속체처럼 거동하는 것처럼 보이나, 이미 층간에는 (c)와 같은 상반된 방향의 힘이 작용하고 있다. 이런 상반된 방향의 운동은 결과적으로 층간 고무 접착력을 약화시키고 균열이 침투 했을 때, 진전을 쉽게 허용하게 한다. 또, 한번 분리된 벨트끝단은 구속되어있던 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 하중 형태를 지니고 있다.

따라서, 벨트 폭과 분리의 상관성을 알아보기 위해 벨트 층간 계면에 해당하는 지역에서의 응력/변형률 해석 파라미터값에 대해 고찰해 보아야 한다.

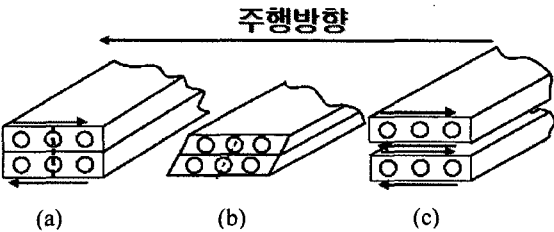


Fig. 6 Shear behaviour in belt

#### 5. 해석 결과

Fig. 7 은 공기압만 부하한 상태와 하중에 의한 접지 상태해석 후, 타이어의 접지부 절단면을 나타낸 그림이다.

Fig. 8 은 Fig. 7 에서 지면에 닿는 부분의 중앙부분의 스틸벨트만을 취하여 전단 거동에 의한 층

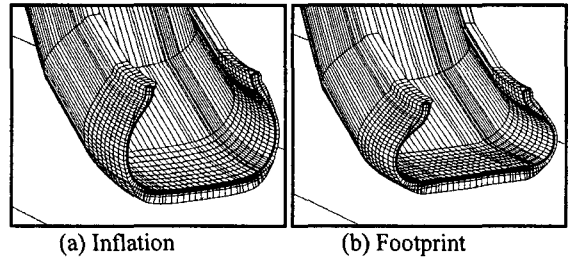


Fig. 7 Footprint simulation using F.E.M

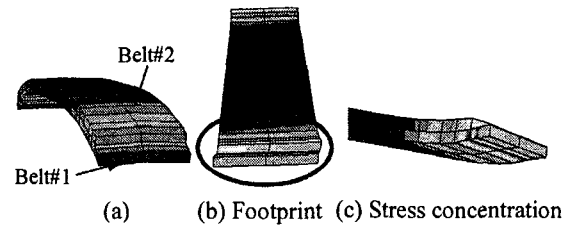


Fig. 8 Stress concentration by shear behaviour

간 응력집중을 보여주고 있다(위쪽이 지면 접지부). 그림에서 볼 수 있듯이 (a)의 공기압 상태에서는 층간 전단 거동이 보이지 않다가 (b)와 같이 수직하중이 가해지면 벨트 끝단에서 벨트간에 상반된 거동을 하게 된다. (c)는 이런 벨트간 전단 거동의 결과로 생기는 층간 응력 집중을 나타내었다. 전단 변형이 일어나는 벨트#2 의 끝단과 벨트 #1 이 맞닿은 부분에서 최대응력이 발생하고 있다.

#### 5.1 응력/변형률 해석 파라미터

일반적으로 타이어에 하중이 가해질 때, 벨트 끝단부에서의 변형률 성분을 조사해 보면, 6 개의 변형률 성분 중 Fig. 6 과 같은 단면운동인  $\epsilon_{13}$  이 균열을 일으키는 주요 파라미터로 작용한다고 알려져 있다.<sup>6</sup> 즉, 방향성만 놓고 볼 때, 층간 전단에 기여하는 또 다른 성분이 존재하기는 하나  $\epsilon_{13}$  에 비해 그 값이 매우 작기 때문에 무시할 수 있다고 한다. 하지만, 본 연구에서 살펴본 바에 의하면 계면에 작용하는 힘에 의한 변형률 성분 중에서  $\epsilon_{13}$ 에 근거해 단면에 직각한 면간의 전단  $\epsilon_{12}$  성분도 무시하지 못할 수준의 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 계면에서의 정확한 거동을 반영하기 위해 응력과 변형률이 동시에 고려되고, 각 방향의 성분을 누계하여 판단할 수 있는 응력변형률밀도(Strain energy density, 이하 SED 로 표시)의 값으로 정량화 하는 것이 바람직한 것으로 판단된

다.<sup>7,8</sup> Fig. 9는 벨트#1과 벨트#2의 계면에서 벨트 폭에 따른 각 변형률 성분의 변화 범위를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 인장변형과 압축변형이 각 성분 별로 나타나 있지만  $\epsilon_{13}$ 의 값이 현저하게 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만, 나머지 성분에 비해  $\epsilon_{12}$ 의 값도 무시할 수 없을 정도의 값을 가지는 것도 알 수 있다. 여기서는 변형률 성분에 대해서만 나타내었지만 응력 역시 비슷한 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

조<sup>9</sup>는 벨트 층간 전단 응력, 전단 변형률, 변형률에너지밀도 등의 파라미터와 그 범위를 가지고 벨트 끝단 분리에 관해 해석과 실험을 비교하였다. 여기서도 역시 SED 범위가 내구성 실험과 가장 유사한 결과를 나타내는 것으로 이 파라미터의 유용성을 증명하였다. 또, 일반적으로 알려진 하나의 응력/변형률 성분에 의한 평가는 실험과 오차를 보인 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 하나의 주요 인자 외에 다른 인자들의 영향이 무시하지 못할 수준이기 때문이라 판단된다.

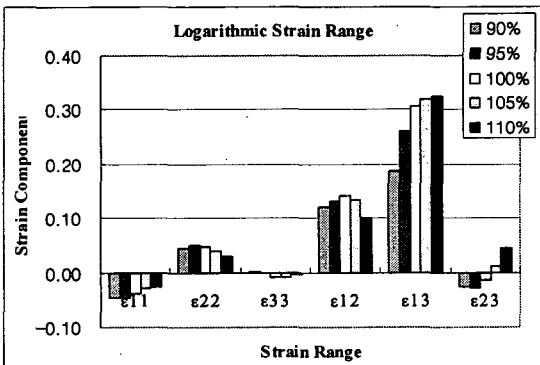
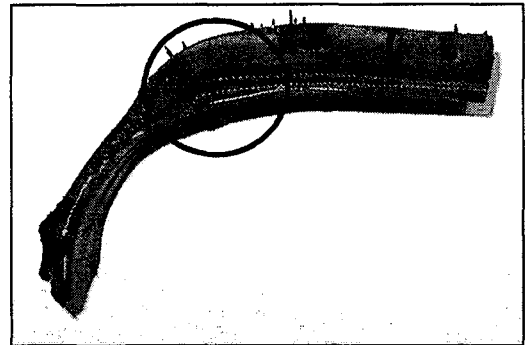


Fig. 9 Logarithmic strain range for each strain component

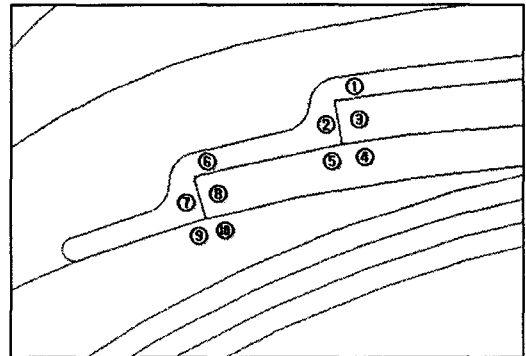
### 5.2 Belt Edge 부에서의 관심 위치 추적

Fig. 10(a)는 동일 사이즈의 타이어에 대한 고속 내구시험 결과이다. 그림에서는 벨트 끝단부를 기점으로 균열이 벨트층 사이와 카카스 코드 방향으로 전파된 것을 나타내고 있다. 따라서, 균열의 시작과 진전 시 벨트#1과 벨트#2에서 주요 관심 위치를 추적해 보기 위해 각각 벨트 폭에 대해 유한요소 해석을 수행하고, Fig. 10(b)에 표시한 위치에서의 최대 SED와 SED 범위를 Fig. 11과 12에 나타내었다. Fig. 11과 Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 최대 SED와 SED 범위 모두 1번 위치를 제외하고는 감

소하는 추세를 보이고 있다. 따라서, 벨트#1의 끝단부(6, 7, 8, 9, 10)보다 벨트#2의 끝단부(1, 2, 3, 4, 5)가 더 피로 및 파괴에 더 취약하다고 할 수 있다.



(a) Crack growth



(b) Measuring Position

Fig. 10 Belt edge crack growth for high speed endurance test

특히, SED 값이 가장 높은 벨트#2 끝단의 2, 3, 4, 5번 지역은 Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 벨트#1과 벨트#2의 계면을 공유한 지역으로 서로 다른 코드 각도에 의한 층간 전단이 발생하는 지점으로 생각할 수 있다. 또, 2번 지역에서 급격히 높은 SED 값을 보이는 것은 벨트 층간 전단 외에 벨트#2의 끝단과 바로 앞 고무 층간에 발생하는 강성 불연속에 의한 다른 응력 및 변형 성분이 작용한 복합적인 SED 값을 나타내기 때문이다. 따라서, 벨트 끝단 분리의 초기 균열 역할을 하는 벨트 절단부의 존재와 함께 균열 발생 및 초기 진전의 유력한 후보 지역으로 유추된다. 따라서, 2, 3, 4, 5번 지역의 공유지점에서의 SED 값을 찾아내는 것이

가장 합당한 것으로 생각된다.

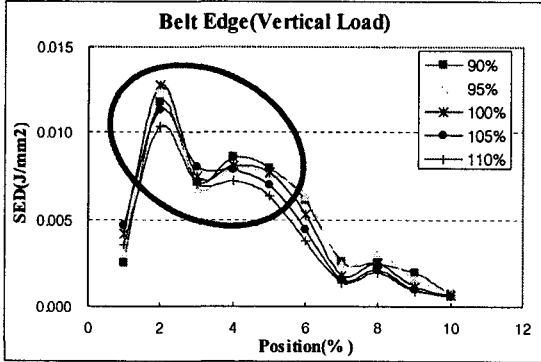


Fig. 11 Max SED on each position

커지고, 특히 100%~105%사이에서 최대가 되므로, 피로 특성에 취약한 설계 영역임을 알 수 있다.

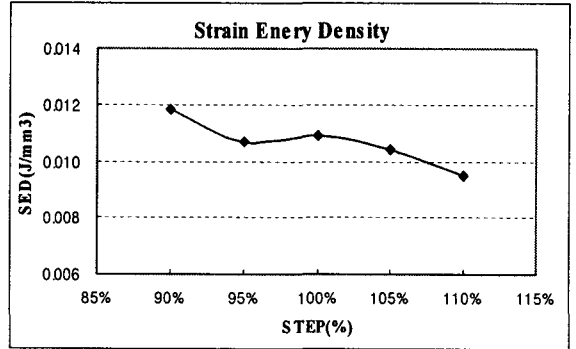


Fig. 13 Max SED at center node in area 2, 3, 4, 5

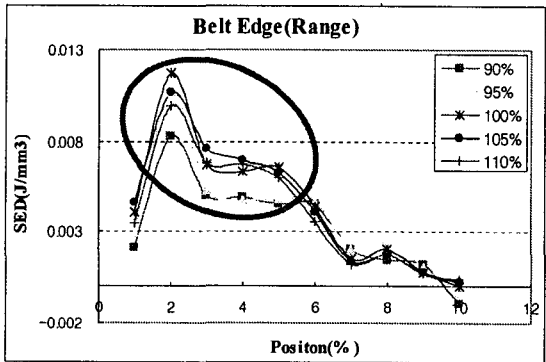


Fig. 12 SED range on each position

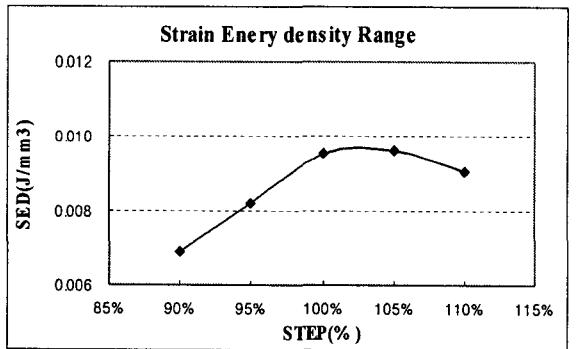


Fig. 14 SED range at center node in area 2, 3, 4, 5

### 5.3 최대 SED 및 SED Range

Fig. 13 과 Fig. 14 는 전단 거동이 예상되는 지점인 2, 3, 4, 5 번의 중앙 절점에서 스틸벨트 폭을 STEP 별로 변화하며 접지압 해석을 수행했을 때, 최대 SED 와 SED 범위값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 최대 SED 값은 벨트 폭의 증가에 따라 감소하는 반면, SED 범위는 오히려 증가하는 경향을 보인다. 이는 SED 범위는 최대 SED 값과 초기 SED 값의 차이인데 이때 초기 SED 값이 벨트 폭이 증가함에 따라 줄어드는 경향을 보이기 때문이다.

두 가지의 결과 중 내구성의 해석 관점에 따라 달라지겠지만, 본 연구에서는 벨트 끝단 분리에 대해 초점을 두고 있기 때문에 벨트 끝단부 층간 피로 특성을 고려하기 위해서는 SED 범위로 벨트 폭의 변화에 따른 내구 특성을 판단하는 것이 타당한 것으로 생각된다. 따라서, 내구성만을 고려해 볼 때, 벨트 폭이 증가함에 따라 SED 범위 값이

### 6. 결 론

스틸벨트 폭의 변화가 벨트 끝단 분리에 미치는 영향을 알아보기 위해 벨트 끝단 분리에 관한 파괴기구에 대해 알아보고, 실제 한계 내에서의 벨트 폭의 변화에 따른 접지압 해석을 유한요소해석을 통해 수행해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 벨트 끝단부에서의 내구성은 벨트#1 끝단보다 벨트#2 끝단에서 더 취약한 것으로 나타났다.
- 2) 벨트 층간에서의 전단은  $\epsilon_{13}$ 에 의한 전단 뿐 아니라  $\epsilon_{12}$ 의 전단값도 무시하지 못하므로 정확한 결과를 위해서는 각 요소값이 모두 고려된 SED 값으로 나타내는 것이 타당하다.

- 3) 타이어는 거동 특성상 부하와 제하를 반복하므로 최대 SED 값 보다는 SED 범위 값으로 벨트 끝단 분리에 관한 특성을 판단 하여야 한다.
- 4) 본 논문에서 사용된 타이어의 경우, 벨트 폭 변화에 대해, 벨트 끝단 분리의 관점에서 본다면 폭의 증가에 따라 피로 특성이 취약해 지다 100%~105%사이 구간을 기점으로 다소 개선되는 것을 알 수 있었다.
- 5) 본 연구에서의 벨트 끝단 분리 추정 방법은 향후 타이어 설계 시, 유한요소법을 통한 내구성 예측에 활용될 수 있다.

Endurance Performance using Finite Element Method,” Master’s thesis, Chonnam National Univ., Dept. of Mechanical Engineering, pp. 43-47, 1998.

### 참고문헌

1. Park, H. C. and Shim, H. W., “Car, Tire and Durability of Tire,” J. of the KSAE, Vol. 25, No. 3, pp. 21-22, 2003.
2. Hwang, J. and Namgung, S., “A Study on the Design of Automotive Tire Profile for High Speed Durability Improvement,” J. of the KSPE, Vol. 14, No. 12, pp. 135-136, 1997.
3. ABAQUS Analysis User’s Manual, Version 6.5, ABAQUS Korea, pp. 2.2.3-2.2.4, 2005.
4. Kennedy, R. H. and Terziyski, J. M., “Experiences with Embedded Elements in Tire Modeling,” ABAQUS User’s Conference, pp. 373-385, 2004.
5. Lee, J. K. and Na, E. G., “Fracture Mechanics,” Wonchang Press, pp. 47-54, 1999.
6. Park, S. S., “A Study on the Endurance of Inner Belt Layer in the Truck-Bus Radial Tire,” Ph.D’s thesis, Chonnam National Univ., Dept. of Mechanical Engineering, pp. 54-57, 2000.
7. Han, Y. H., Eric, B. B., Fahrenthold, E. P. and Kim, D. M., “Fatigue Life Prediction for Cord-Rubber Composite Tire Using a Global-Local Finite Element Method,” Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 32, No. 1, pp. 24-27, 2004.
8. Yan, X., Wang, Y. and Feng, X., “Study for the Endurance of Radial Truck Tires with Finite Element Modeling,” Mathematics and Computer Simulations, Vol. 59, pp. 474-476, 2002.
9. Cho, J. G., “A Study on the Prediction of a Tire