

Sidewall 반경변화에 따른 Carcass 장력분포 변동 추이에 관한 유한요소 해석

조진래[†] · 정현성^{*} · 이홍우^{*} · 김남전^{**} · 김기운^{**}
(2000년 9월 6일 접수, 2001년 3월 21일 심사완료)

Finite Element Analysis for the Variation of Carcass Tension Distribution to the Sidewall-Radius Change

Jin-Rae Cho, Hyun-Sung Jeong, Hong-Woo Lee, Nam-Jeon Kim and Kee-Woon Kim

Key Words: Cord Tension(코드 장력), Carcass(카카스), Sidewall(측면), Nonlinearity(비선형), Hyperelastic Material(초 탄성체), Hypoelastic Material(아 탄성체), Contact(접촉)

Abstract

Tire performance is significantly influenced by the carcass tension distribution that is governed by the sidewall contour. To maximize the tire performance, it is very important for one to find the sidewall contour with the ideal tension distribution. But it is not easy to find such an optimal sidewall contour. Therefore, in order for a successful tire-shape optimization, we need to investigate how the change of sidewall radius influences on the carcass tension distribution. In this paper, we intend to numerically investigate the relation between the sidewall-radius change and the carcass tension distribution.

기호설명

- (a)₀^t : 시간 0의 형상에 대하여 측정된 시간 t에서의 물리량. 단, (a)_t^t = (a)^t.
- (a)_t^t : 시간 t*의 형상에 대하여 측정된 시간 t에서의 증분량.
- (x_{i,j})₀^t = ∂(x_i)^t / ∂(x_j)⁰ : 시간 0의 형상에 대한 시간 t에서의 형상의 deformation gradient.

1. 서론

현재 매우 광범위하게 사용되고 있는 공기 주

입식 타이어는 1845년 Scotland의 Thomson에 의해 발명되었으나 실용화는 그 보다 늦은 1888년에 Dunlop에 의해 이루어졌다.⁽¹⁾ 하지만 그 당시 타이어는 접지부의 변형에 의한 마찰로 인해 내구성이 뒤떨어지는 단점이 있었다. 그후 1915년 코드(cord)를 포함한 고무층을 삽입함으로써 내구성은 비약적으로 향상되었다. 한편 코드 재료에 있어서도 나일론(nylon), 폴리에스테르(poly-ester), 강선(steel wire) 등이 쓰여지게 되어 내구성 등의 성능이 크게 향상되었다. 그후 기존의 카카스(carcass) 코드 방향이 타이어의 중심선과 약 35°의 각을 이루고 있는 바이어스 타이어(bias tire) 구조에서 탈피하여 래디얼 타이어(radial tire)로 변천하게 되었다. 래디얼 타이어는 카카스의 코드 방향이 중심선에 대하여 약 90° 방향으로 배열되고 그 위에 강력한 벨트(belt)가 부착되어 고속 및 안전주행에 적합하도록 설계되었다.⁽²⁾

타이어의 주요 성능은 첫째로 차량의 하중을 지지하고, 둘째로 제동 및 구동력을 지면에 전달

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소
E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)570-2467 FAX : (051)514-7640

^{*} 부산대학교 대학원 기계설계공학과

^{**} (주)금호산업

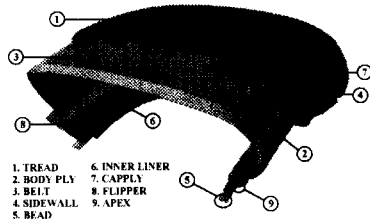


Fig. 1 Components of automobile tire

하여 차량의 운동을 조절하며, 셋째로 노면으로부터의 충격흡수를 통해 운전자를 보호하고, 넷째로 차량의 방향전환 및 유지를 원활히 하는 것이다. 이와 같은 기본적인 기능을 수행함과 동시에 차량의 성능을 결정하는 중요한 부속품으로서의 기능을 동시에 만족해야 한다. 즉, 내구력, 내마모, 견인력, 낮은 회전저항, 조정안정성, 승차감 및 저소음 등에 탁월한 성능을 가져야 좋은 타이어라고 할 수 있다. 따라서 타이어의 일반적인 기능 및 필수적인 성능을 향상시키기 위한 타이어 기술이 필요하며, 이는 재료 선정, 설계 및 제조기술의 향상을 통하여 확보할 수 있다. 타이어 성능 중 조정안정성은 타이어 측면(sidewall) 부의 카카스 장력(cord tension)을 이상적으로 분포시킴으로써 향상시킬 수 있다. 이는 카카스의 최적형상에 의해 얻을 수 있으며, 이를 위해 RCOT(Rolling Contour Optimization Theory), TCOT(Tension Control Optimization Theory), GUTT(Grand Unified Theory in Tire) 등 여러 가지 이론적인 연구가 이루어져 왔다.⁽³⁾ 또한 최적의 장력분포를 얻기 위한 수치기법으로서 다목적함수의 최적화도 함께 이루어지고 있다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 타이어 측면 형상 최적설계에 앞서 측면 형상변화가 카카스 장력 분포에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통해 알아보고자 한다.

2. 타이어 구조 및 용어

Fig. 1은 자동차용 타이어의 일반적인 구조를 도시한 것이다. 타이어는 크게 고무, 강선(wire), 폴리에스테르(polyester)로 구성되어 있으며, 복잡한 형태로 접착되어 있다. 따라서 타이어는 여러 개의 부분으로 나뉘어지며 각각은 서로 다른 재료의 구성과 구조를 가지고 특정한 역할을 수행하고 있다. 트레드(tread)는 노면과 접촉하는 부분

으로 내마모성이 양호해야 하며, 외부충격에도 충분히 견딜 수 있고 발열이 적어야 한다. 카카스(carcass)는 타이어 내부의 코드(cord)층을 가리키는 것으로 하중을 지지하고 충격을 흡수하는 역할을 한다. 따라서 주행중 굴신운동에 대한 내피로성이 우수해야 한다. 벨트(belt)는 강선 또는 식물 섬유로 구성되어 있고, 주행시 노면 충격을 감소시키고 노면에 닿은 트레드 부위를 넓게 하여 주행 안정성을 좋게 하는 역할을 한다. 타이어 측면(sidewall)은 타이어의 옆부분을 지칭하는 것으로 카카스를 보호하고 굴신운동을 통해 승차감을 좋게하는 역할을 한다. 비드(bead)는 코드의 끝부분을 감아주어 타이어를 림(rim)에 장착시키는 역할을 하며, 비드 와이어(bead wire)와 코어 고무(core rubber) 등으로 구성되어 있다. 쇼울더(shoulder)는 트레드 가장자리에서부터 타이어 측면의 윗부분까지를 가리키며 방열 효과가 우수해야 한다. 캡플라이(capply)는 벨트위에 부착되는 특수 코드지로 쇼울더부의 성장을 억제하여 쇼울더부의 내마모성을 향상시켜주며, 벨트의 이탈현상을 방지한다. 마지막으로 에이펙스(apex)는 비드의 분산을 최소화 할 수 있도록 하며 비드가 받는 충격을 완하시키는 역할을 한다.

3. 유한요소 정식화

타이어는 여러 개의 고무층에 강철 코드가 강화된 구조를 가지며 또한 타이어가 지면 및 림과 접촉하는 부위가 존재하므로 이러한 복잡한 재질적 특성 및 외부조건 등을 고려한 유한요소 해석이 필요하다. 해석모델의 정식화는 다음의 세 가지 비선형성을 중점적으로 고려해야 한다.

첫째 기하학적 비선형으로 대변형 문제를 고려하여야 한다. 둘째, 물성 비선형에 관한 것으로 고무재료는 hyperelastic 물질로 처리하고 코드는 hypoelastic 물질로 모델링한다. 셋째, 접촉조건에 관한 것으로 지면 및 림과의 접촉부위의 경계조건을 비선형으로 처리해야 한다.

3.1 3차원 탄성 변형(3D elastic deformation)

먼저 일반적인 탄성체의 유한요소 수식화를 고려한다. 평형상태의 물체에 체적력 f_i 와 표면력 t_i 가 작용하고 하중경계조건과 변위경계조건이 주어졌을 경우 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} + f_i &= 0, & \text{in } \Omega \\ \sigma_{ij} n_j &= t_i, & \text{on } \partial \Omega_N \\ u_i &= u_i^*, & \text{on } \partial \Omega_D \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 u_i^* 는 $\partial \Omega_D$ 에 부여된 변위 경계조건, 그리고 n_j 는 단위 법선벡터 성분을 의미한다.

이 기본적인 변분 정식화에 다음 절에서의 기하학적 비선형, 물성 비선형 그리고 접촉조건을 고려하면 비선형 제약 변분 정식화된다.

3.2 기하학적 비선형(geometric nonlinearity)

Lagrangian 증분기법을 사용하여 시간 증분에 따른 표현식으로 $t + \Delta t$ 에서의 물체의 형상에 대한 평형상태를 시간 근사화하면 다음과 같은 변분 방정식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\sigma_{ij})^{t+\Delta t} \delta(\epsilon_{ij})_{t+\Delta t} d\Omega \\ = \int_{\Omega} \delta v_i(f_i)^{t+\Delta t} d\Omega + \int_{\partial \Omega_N} \delta v_i(t_i)^{t+\Delta t} ds \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, Cauchy 응력 σ_{ij} 와 2종 Piola-Kirchhoff 응력 tensor⁽⁶⁾ S_{ij} 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (S_{ij})_0^t &= \frac{(\rho)^0}{(\rho)^t} (x_{i,m})_0^t (x_{j,m})_0^t (\sigma_{mn})^t \\ (\sigma_{mn})^t &= \frac{(\rho)^t}{(\rho)^0} (x_{m,i})_0^t (x_{n,j})_0^t (S_{ij})_0^t \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $(\rho)^0$ 및 $(\rho)^t$ 는 각각 시간 0 및 t 시점에서 물체의 밀도를 나타낸다. 식 (3)에 의해 다음의 관계식을 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\sigma_{kl})^{t+\Delta t} \delta(\epsilon_{kl})_{t+\Delta t} d\Omega \\ = \int_{\Omega} (S_{ij})_0^{t+\Delta t} \delta(e_{ij})_0^{t+\Delta t} d\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 라그랑지 변형률 텐서(Lagrange strain tensor) e_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} (e_{ij})_0^t &= \frac{1}{2} [(u_{i,i})_0^t + (u_{j,j})_0^t \\ &\quad + (u_{k,i})_0^t (u_{k,i})_0^t] \\ \delta(e_{ij})_0^t &= (x_{m,i})_0^t (x_{n,j})_0^t \delta(\epsilon_{mn})^t \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 시간 0에서의 형상에 대한 가상일의 정리는 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$\int_{\Omega} (S_{ij})_0^{t+\Delta t} \delta(e_{ij})_0^{t+\Delta t} d\Omega = (F)^{t+\Delta t} \quad (6)$$

여기서 우변항은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (F)^{t+\Delta t} &= \int_{\Omega} \delta v_i(f_i)^{t+\Delta t} d\Omega \\ &\quad + \int_{\partial \Omega_N} \delta v_i(t_i)^{t+\Delta t} ds \end{aligned} \quad (7)$$

최종적으로 시간 $t + \Delta t$ 에서의 TL(Total Lagrangian) 정식화에 의한 선형화된 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (C_{ijrs})_0 (\epsilon_{rs})_0 \delta(\epsilon_{ij})_0 d\Omega \\ + \int_{\Omega} (S_{ij})_0^t \delta(\eta_{ij})_0 d\Omega \\ = (F)^{t+\Delta t} - \int_{\Omega} (S_{ij})_0^t \delta(\epsilon_{ij})_0 d\Omega \end{aligned} \quad (8)$$

위의 각 항들의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (S_{ij})_0^{t+\Delta t} &= (S_{ij})_0^t + (S_{ij})_0 \\ (e_{ij})_0^{t+\Delta t} &= (e_{ij})_0^t + (e_{ij})_0 \\ (e_{ij})_0 &= (\epsilon_{ij})_0 + (\eta_{ij})_0 \\ (\epsilon_{ij})_0 &= \frac{1}{2} [(u_{i,j})_0 + (u_{j,i})_0 \\ &\quad + (u_{k,i})_0^t (u_{k,j})_0 + (u_{k,i})_0 (u_{k,j})_0^t] \\ (\eta_{ij})_0 &= \frac{1}{2} (u_{k,i})_0 (u_{k,j})_0 \\ (S_{ij})_0 &= (C_{ijrs})_0 (\epsilon_{rs})_0 \\ \delta(e_{ij})_0 &= \delta(\epsilon_{ij})_0 \end{aligned} \quad (9)$$

3.3 물성 비선형(material nonlinearity)

3.3.1 고무 재료(rubber material)

고무는 비압축성 응답을 보이므로 재료의 거동은 변형에너지 밀도를 사용하여 정의한다. 물성 모델로는 통상 Mooney-Rivlin 물성모델과 Ogden 물성모델이 사용된다.

Mooney-Rivlin 물성모델⁽⁷⁾에서 변형 에너지 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} (\bar{W})_0^t &= C_1 [(J_1)_0^t - 3] \\ &\quad + C_2 [(J_2)_0^t - 3] + \frac{1}{2} \alpha [(J_3)_0^t - 1]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 각 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\left. \begin{aligned} (J_1)_0^t &= (I_1)_0^t [(I_3)_0^t]^{-1/3} \\ (J_2)_0^t &= (I_2)_0^t [(I_3)_0^t]^{-2/3} \\ (J_3)_0^t &= [(I_3)_0^t]^{1/2} \end{aligned} \right\} \text{reduced invariants}$$

C_1, C_2 : material constants
 $(I_1)_0^t, (I_2)_0^t, (I_3)_0^t$: strain invariants
 χ : bulk modulus
 $(p)^t = -\chi[(I_3)_0^t - 1]$: hydrostatic pressure

한편, 2종 Piola-Kirchhoff 응력과 재료상수의 증분은 다음과 같이 정의되며 고무 재료의 물성 행렬로 식 (8)에 첨가된다.

$$\begin{aligned} (\bar{S}_{ij})_0^t &= \frac{\partial(\bar{W})_0^t}{\partial(\varepsilon_{ij})_0^t} \\ (\bar{C}_{ijrs})_0 &= \frac{\partial(\bar{S}_{ij})_0^t}{\partial(\varepsilon_{rs})_0^t} = \frac{\partial^2(\bar{W})_0^t}{\partial(\varepsilon_{rs})_0^t \partial(\varepsilon_{ij})_0^t} \end{aligned} \quad (11)$$

3.3.2 코드 재료 (cord material)

코드의 거동을 수식화하기 위해 hypoelastic 물질을 사용한다. 이 재료는 응력 증분율을 정의하기 위해 변형률 증분율과 tangent modulus 행렬의 곱으로 표현된다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijrs} d\varepsilon_{rs} \quad (12)$$

여기서, 재료 상수 C_{ijrs} 는 strain invariants의 함수로 정의된다.

3.4 접촉 조건(contact condition)

두 개 이상의 물체가 접촉하고 있는 접촉 해석은 특히 어려운 비선형 거동을 보인다. 접촉 문제는 미소 변위의 마찰이 없는 접촉에서 일반적인 마찰이 있는 대변형 비탄성 조건까지의 영역을 가진다. 하지만 모든 접촉 조건에서의 정식화는 모두 동일하다.

다음은 2개의 물체, 즉 물체 1의 \mathbf{x} 지점이 물체 2의 \mathbf{y} 지점에 접촉하는 경우를 고려한다. 먼저 S^c 를 물체 2에 접촉할 물체 1의 표면이라고 하고, \mathbf{f}^{12} 를 S^c 상에 작용할 contact traction이라고 둔다. 그리고 \mathbf{f}^{12} 를 법선성분과 접선성분으로 분해하면 다음과 같다.

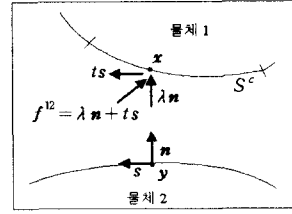


Fig. 2 Geometry and symbol definition

$$\mathbf{f}^{12} = \lambda \mathbf{n} + \tau \mathbf{s} \quad (13)$$

한편, normal contact 조건은 다음과 같이 정의된다.^(7,8)

$$h \geq 0; \quad \lambda \geq 0; \quad h\lambda = 0 \quad (14)$$

여기서, h 는 $(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \cdot \mathbf{n}$ 으로 정의된다. 무차원 변수 τ 를 다음과 같이 정의하면

$$\tau = \frac{t}{\mu\lambda} \quad (15)$$

마찰에 관한 Couloumb 법칙은 다음과 같다.^(7,8)

$$\begin{aligned} |\tau| < 1 &\rightarrow \dot{u} = 0 \\ |\tau| = 1 &\rightarrow \text{sign}(\dot{u}) = \text{sign}(\tau) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 \dot{u} 는 두 물체간 상대 접선속도이다.

식 (14)는 비침투에 대한 kinematic 조건이고, 식 (16)은 접선방향의 dynamic friction 조건을 각각 나타낸다. 이들 두 조건을 벌칙기법(penalty method)이나 라그랑지 승수기법에 따라 변분 공식화할 수 있다. 후자에 있어서 λ 와 τ 를 라그랑지 승수로 취급하고, 조건 (14)와 (16)을 각각 만족하는 함수를 w 와 v 로 다음과 같이 정의하면,

$$w(h, \lambda) = 0, \quad v(\dot{u}, \tau) = 0 \quad (17)$$

다음 변분식으로 귀착된다.^(7,8)

$$\int_{S^c} [\delta\lambda w(h, \lambda) + \delta\tau v(\dot{u}, \tau)] dS^c = 0 \quad (18)$$

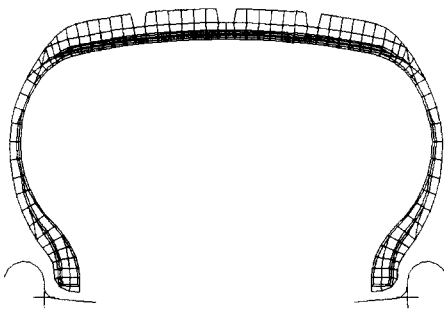


Fig. 3 Two-dimensional axisymmetric tire model

식 (18)을 앞의 비제약 변분 정식화 (8)에 첨가하면 제약 변분 정식화가 완성된다.

4. 타이어 형상 변화

타이어의 카카스 형상 변화에 따른 코드 장력 분포의 변화양상을 분석하기 위하여 모델링한 타이어의 측면 부에 위치하는 5개의 절점(node)의 반경을 설계변수로 파라메트릭 수치해석을 수행한다. 각 절점의 반경을 양방향으로 독립적으로 변화시킴으로써 10개의 새로운 타이어 측면 형상을 생성시키고, 각 경우에 있어서의 코드 장력 분포의 변화를 비교하여 카카스 형상의 변화와 코드 장력과의 상관 관계를 파악코자 한다.

4.1 타이어 모델(tire model)

해석의 간편화를 위해 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 이 논문에서는 상용 solid modeler인 I-DEAS로 형상과 FEM 모델링을 수행하고, ABAQUS로 비선형 해석을 수행한다. 타이어 내부의 공기압은 30psi로 설정하고, 립과 결합하는 부위는 마찰이 없는 접촉조건을 부여한다. 따라서, 공기압이 주어지고 립과의 접촉에 의한 변형만을 고려하였다.

재료의 물성치는 고무 부분을 탄성 및 hyperelastic 재료로 처리하고, 코드는 hypoelastic 재료로써 ABAQUS 상의 REBAR 요소⁽⁵⁾를 사용하여 정의하였다.

4.2 설계 영역 및 변수

Fig. 4에서는 설계영역과 설계변수를 나타내었

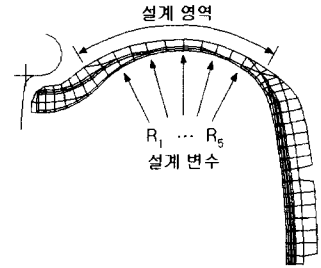


Fig. 4 Design region and variable

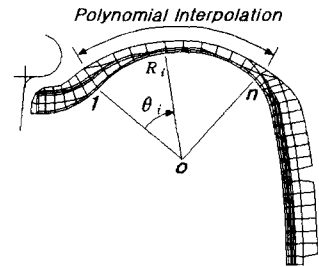


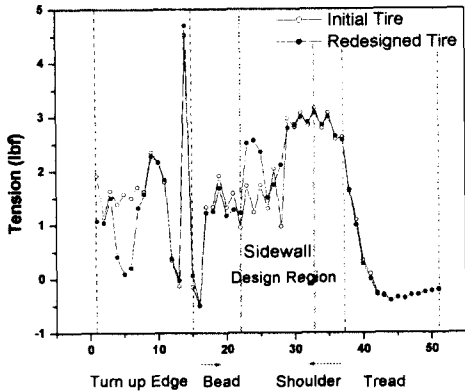
Fig. 5 Polynomial interpolation of sidewall contour

다. 설계 영역은 카카스의 형상 변화가 이루어지는 부분으로 타이어 측면 부이며, 설계 변수는 설계 영역내에 거의 등간격으로 5개의 절점 반경을 설정하였다. 따라서 설계 변수의 이동은 반경 방향으로만 이루어지고 측면 부의 두께는 불변량으로 둠으로써 같은 반경상에 존재하는 나머지 절점의 이동량은 설계 변수의 이동량과 같다. 설계 변수는 다음의 벡터로 표시할 수 있다.

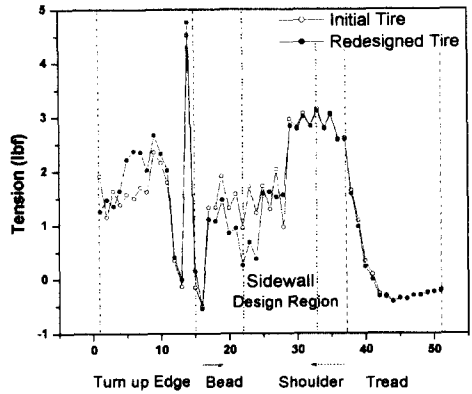
$$R^T = \{ R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 \} \quad (19)$$

4.3 다항식 근사 (polynomial interpolation)

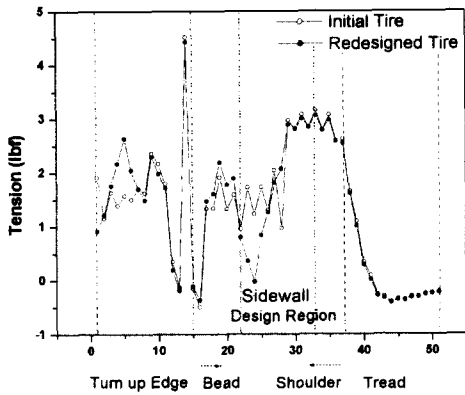
절점 이동량은 하나의 변수에 대해 타이어 외부 및 내부로 0.2in 의 이동을 주고 나머지는 다항식 근사를 이용하여 타이어 측면 부 형상을 정의하였다. 따라서 모두 10개의 측면 부 형상에 대한 코드 장력 분포를 얻을 수 있다. Fig. 5에서 타이어 측면 부 형상을 얻기 위한 다항식 근사에 필요한 인자를 나타내었다. 설계 영역내의 첫 번째 절점으로부터의 각도(θ)와 절점 반경(R)을 계산하고 다음의 식을 사용하여 측면 부 형상을 정의한다.



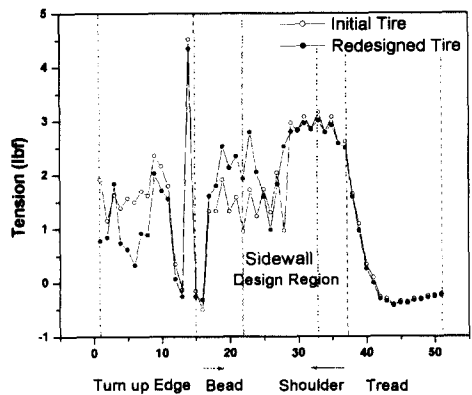
(a) Increase of R_1



(a) Increase of R_2



(b) Decrease of R_1



(b) Decrease of R_2

Fig. 6 Cord tension variations to the change of R_1

Fig. 7 Cord tension variations to the change of R_2

$$R(\theta) = \sum_{i=1}^n R_i N_i(\theta) \quad (20)$$

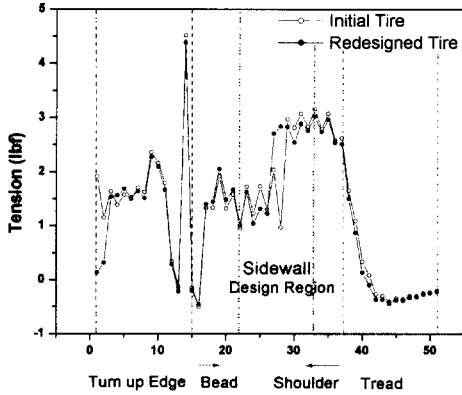
$$N_i(\theta) = \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{\theta - \theta_j}{\theta_i - \theta_j}$$

5. 수치 결과

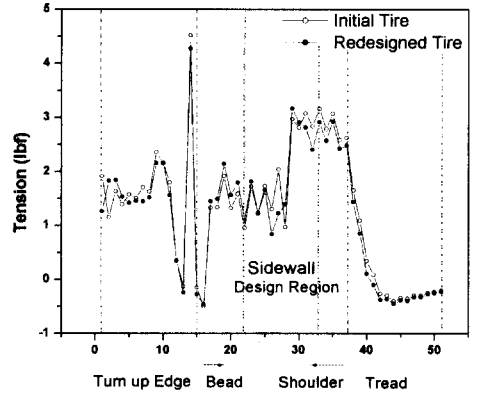
첫 번째 변수를 이동시켰을 경우의 코드장력 분포가 Fig. 6에 도시되어 있다. 첫 번째 변수의 반경이 증가하면 측면 부의 비드쪽 코드 장력이 초기치에 비해 크게 증가하고, 반경이 감소하면 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 비드를 지나 접혀진 후 설계 영역에 걸쳐지는 부분의 코드 장력은 반대의 현상을 보이는 것을 알 수 있다. 즉 타이어 내부 카카스층의 장력이 증가하면 외

부의 장력은 감소하고, 반대로 감소하면 증가하는 양상을 보이고 있다. 설계 영역 외 트레드 부분에서의 코드 장력은 초기 분포에서 거의 벗어나고 있다.

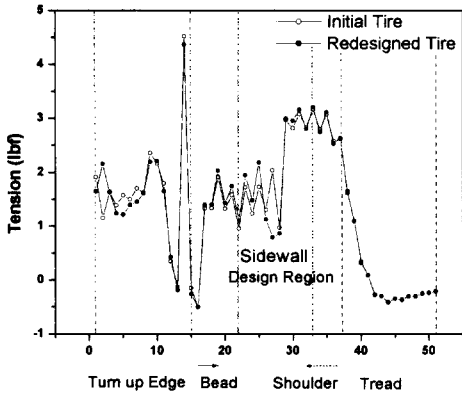
Fig. 7은 두 번째 변수를 이동시켰을 때의 코드 장력분포의 변화에 대한 결과이다. 두 번째 변수가 코드 장력분포에 미치는 영향은 첫 번째 변수보다 큰 것으로 보인다. Fig. 6에서는 장력분포가 증가하거나 감소한 영역이 전체 타이어 영역에서 일부분에 제한되어 있지만, Fig. 7에서의 변화 영역은 비드에서 설계 영역 중앙부까지 넓게 차지하고 있다. 변화 양상은 첫 번째 변수의 이동 시와 반대로 반경이 증가할 경우 장력은 감소하고, 반대로 감소하면 증가하는 현상을 보이고 있다. 접혀진 후의 코드 장력은 역시 반대의 양상을 띄



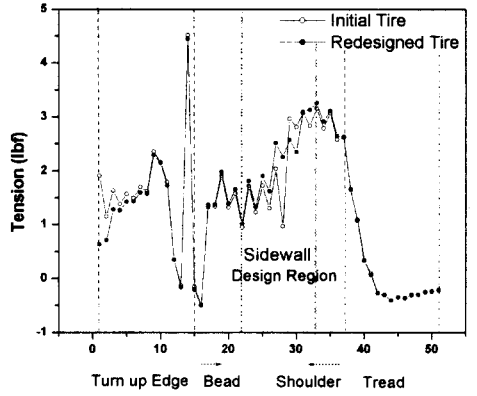
(a) Increase of R_3



(a) Increase of R_4



(b) Decrease of R_3



(b) Decrease of R_4

Fig. 8 Cord tension variations to the change of R_3

Fig. 9 Cord tension variations to the change of R_4

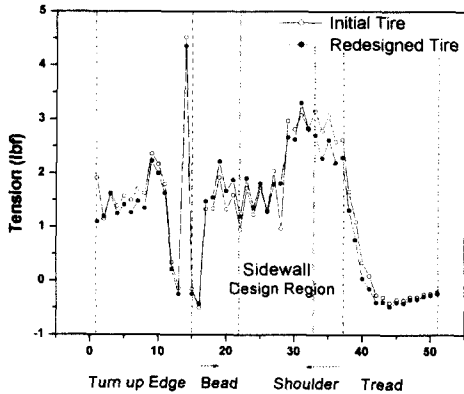
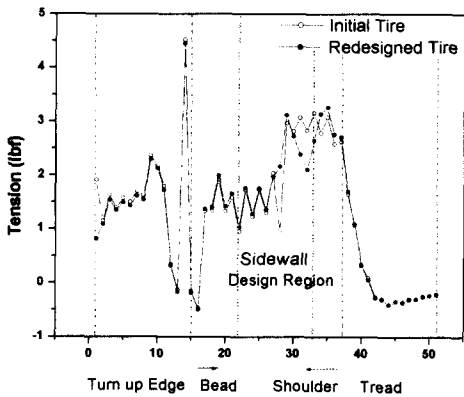
는 것을 알 수 있다.

Fig. 8로부터 세 번째 변수의 이동에 의한 코드 장력 분포는 초기에서 크게 벗어나지 않음을 볼 수 있다. 반경이 증가하면 타이어 측면 중앙 일부의 장력이 증가함과 동시에 비드쪽 장력은 미소 감소하고, 반경이 감소하면 측면 중앙부의 장력이 다소 감소함을 볼 수 있다. 하지만 비드에서는 장력이 다소 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 네 번째 변수의 변화에 따른 장력분포 변화 양상을 나타내고 있다. 네 번째 변수의 이동은 앞의 세 경우에서 거의 변화가 없던 쇼울더 부의 코드 장력을 변화시키고 있지만 큰 변화량은 아니다. 반경이 증가할 경우, 비드 부와 측면 부의 쇼울더 쪽 일부 장력이 조금 증가하고 중앙 부 및 쇼울더에서 트레드 중앙부까지 감소하는

양상을 띤다. 반면 반경이 감소하면 반경이 증가했을 때에 높아졌던 쇼울더 쪽 일부가 초기에 비해 낮아지고, 중앙부 및 쇼울더 부의 코드 장력이 높아진다. 전체적인 분포는 반경이 감소했을 때 측면 부 중앙에서 일어나는 코드 장력의 격차가 줄어든 것을 알 수 있다.

다섯 번째 변수의 이동은 쇼울더 부의 코드 장력을 가장 크게 변화시킨다. Fig. 10에서와 같이 타이어 측면 중앙부까지는 반경의 증가나 감소와 상관없이 큰 장력의 변화는 보이지 않는다. 하지만, 중앙부이후로 장력의 변화가 크게 나타난다. 특이할 점은 쇼울더 쪽 몇 개 요소의 장력은 반경 변화와 상관없이 모두 감소하는 것을 보이고 있다. 결과적으로 다섯 번째 변수에 의한 코드 장력분포는 반경 변화 방향에 상관없이 코드 장

(a) Increase of R_5 (b) Decrease of R_5 Fig. 10 Cord tension variations to the change of R_5

력의 감소를 유발하는 부분이 쇼울더 쪽에 존재한다고 할 수 있다.

6. 결론

타이어 카카스의 측면 부 형상을 5개의 절점 반경을 기초로 하여 형성시키고, 각각의 절점 반경을 독립적으로 변화시킴으로써 얻을 수 있는 새로운 카카스 형상에 따른 코드 장력분포를 파라메트릭하게 비교한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 비드쪽 절점 반경을 증가시키면 반경이 증가한 부위의 코드 장력이 크게 증가하고 반대 경

우는 코드 장력이 크게 감소한다.

- 쇼울더 쪽 코드 장력의 변화는 비드 쪽 절점 반경 변화에 그다지 민감하지 않았다.

- 쇼울더 쪽 절점 반경을 증가시켰을 경우와 감소시켰을 경우에 초기에 비해 크게 반응하는 코드 장력의 부위는 다르며, 비드쪽 코드 장력의 변화에는 그다지 큰 영향을 미치지 않는다.

- 중앙의 절점 반경을 증가시키면 측면 중앙부의 코드 장력은 크게 증가하는 반면 나머지 부분은 미소한 감소를 보였다. 한편, 반경을 감소시키면 중앙부의 코드 장력은 감소하지만 그 외 부분은 조금 증가하는 경향을 보인다.

따라서 이와같은 파라메트릭 결과를 통해 조정성을 향상시키는 즉, 최적의 장력분포를 가지는 타이어 측면형상 경향을 제시하여 준다.

참고문헌

- (1) Clark, S. K., 1982, *Mechanics of Pneumatic Tires*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.
- (2) 비-델만 著, 貞政忠利 譯, 1979, *自動車タイヤ工學*, 現代工學社, 東京.
- (3) Nakajima, Y., Kamegawa, T. and Abe, A., 1996, "Theory of Optimum Tire Contour and Its Application," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol. 24, No. 3, pp. 184~203.
- (4) Nakayama, H. and Furukawa, K., 1985, "Satisficing Trade-Off Method with an Application to Multiobjective Structural Design," *Elsevier Science Publishers B.V.*, pp. 47~57.
- (5) ABAQUS/Standard *User's Manual*, 1998, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (6) Malvern, L. E., 1969, *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, New Jersey.
- (7) Bathe, K. J., 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Inc., Singapore.
- (8) Oden, J. T. and Carey, G. F., 1984, *Finite Elements: Special Problems in Solid Mechanics*, Vol. V, Prentice-Hall, New Jersey.