

고속내구성 향상을 위한 자동차용 타이어 프로파일의 설계연구

황 준* , 남궁 석**

A Study on the Design of Automotive Tire Profile for High Speed Durability Improvement

Joon Hwang* , Suk Namgung**

ABSTRACT

New approach to determine the design of automotive tire profile was introduced. In this study, design technology for tire profile was combined with a finite element method to improve high speed durability. Static and dynamic behavior analysis of new concept tire was compared with conventional tire profile. To obtain the improved tire performance, appropriate design values, ie. design methodology, section profile selection, material properties, are needed.

Key Words: Automotive Tire(자동차용 타이어), Finite Element Method(유한요소법), High Speed Durability(고속내구성)

1. 서 론

국내의 자동차, 항공산업의 발전과 함께 안락하고 안전한 운송수단의 개발에 전 세계가 총력전을 펴고 있으며, 특히 차량의 운동성능에 결정적인 영향을 미치는 타이어에 대한 관심이 날로 높아지고 있다.

타이어는 여러층의 고무, 섬유, 강철코드 등으로 구성된 이방성 복합구조의 회전체 형상으로 내부에 충전된 공기압에 의해 차량 및 항공기의 하중을 지지하며, 또한 고속, 고하중의 주행조건에도 견딜수 있는 구조체로 설계되지만, 복합구조체 층간의 응력집중에 의한 균열 및 박리

현상의 발생시는 치명적인 사고를 야기시킬 수 있는 바, 각종 설계 예측기술의 적용 및 확립이 매우 중요하다고 판단된다.

그러나 타이어의 응력해석은 타이어가 갖고 있는 고유특성인 복합재료구조에 의한 비선형적 거동과 구조적 복잡성 때문에 그 적용이 쉽지 않았으며, 이에 대한 해결책으로써 수차례에 걸친 시험용 제조 및 실내/실차 시험을 수반하고 있으나, 최근 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 이론의 급속한 발전은 설계/개발 초기의 성능예측에 진일보를 꾀할 수 있게 되었다.

* 충주산업대학교 기계설계학과 (중신회원)

** 충남대학교 기계공학과 (중신회원)

유한요소법을 이용한 타이어 응력해석은 1970년대 중반 이후 몇몇 선진 타이어 메이커에서 시도되었으며, NASA⁽¹⁾등에서 항공기 이착륙시의 타이어 동적접지 문제에 관심을 보였으며 Kennedy⁽²⁾등에 의해 트럭 타이어의 2차원 내압해석을 수행하였으며, Ridha⁽³⁾등은 타이어를 하나의 고무 디스크로 개략화하고 접촉문제를 연구하였으며, Rotherth⁽⁴⁾등은 스틸벨트(steel-belted) 타이어의 3차원 응력 해석등을 수행하였으나, 주로 정적하중 및 내압작용시의 해석조건들이 주로 채택되어왔다.

최근, 타이어에 대한 요구가 다양화되고 요구성능이 고도화됨에 따라 타이어의 설계기술에 보다 다양한 기반기술들이 적극적으로 사용되기 시작하였다.

그러나, 타이어의 설계기술상 난점중의 하나인 이윤배 반적인 특성, 즉 타이어의 마모특성을 향상시키려면 벨트 내구성 또는 고속내구성의 저하 및 회전저항의 증가에 의한 에너지 효율의 악화같은 특성이 서로 역기능적으로 발생하는 특성으로 인하여 최적설계를 위한 설계변수의 결정 및 영향도 검토가 중요한 연구과제 중의 하나로 주목되고 있다. 또한, 종래의 타이어설계프로세스에서도 유한요소법등을 적극적으로 이용하였으나, 여러가지 제약조건에 의해 실제 타이어의 운전상태인 차량의 하중작용, 노면과의 접촉, 회전, 제동, 구동등이 수반되는 동적인 상태에 대한 해석 및 고찰이 충분히 이루어지지 못한 바, 고속내구성 향상과 같은 성능향상은 많은 시행오차를 통해 실현되어오고 있다.

본 연구에서는 자동차용 타이어 단면형상 최적 설계를 목적으로 우선, 그간 제시되었던 설계 방법론들의 특징들을 중심으로 비교, 고찰하고, 향후 요구되어지는 타이어 최적설계 방향에 대하여 논하고자 한다.

2. 타이어 단면형상 설계이론

타이어 단면형상의 최적설계에 관한 연구는 오래전부터 계속되어 왔으며, 10여년전만 하더라도 자연평형 단면형상 계산방법론에 근거한 타이어 설계가 주종을 이루어 왔다. 그 대표적인 이론으로서 Hofferberth⁽⁵⁾는 Netting Theory를 이용하여 바이어스 타이어(bias tire) 설계이론을 전개하여 타이어 구조역학의 기틀을 마련하였으며, Day와 Gehman⁽⁶⁾은 여러가지 코드경로에 대해서 카카스 프로파일(carass profile)에 대한 방정식을 유도하였다. 그후, Bohm⁽⁷⁾은 래디알 타이어의 이론을 정립하였다. 타이어는 적층형의 복합구조물이지만, 고무층의 강성

이 강철코드의 강성에 비하여 극히 작기 때문에 타이어의 내압을 코드가 부담한다는 가정이 성립될 수 있다. 타이어의 단면형상은 일반적으로 코드 내부의 압력과 금형 형상에 의해 변할 수 있으므로, 정확한 자연현상을 얻기는 어렵다. 그러나, 코드 신장의 미소함을 고려하여 카카스 코드 장력이 일정한 때의 카카스 형상을 자연평형형상이라 볼 수 있다.

그러나 최근들어 다양한 요구특성에 맞는 자동차용 타이어의 개발과 함께 기존의 자연평형형상의 범주를 뛰어넘어 고속내구성, 승차감, 고속조향성등을 만족시키기 위한 단면형상 최적설계 방법론들이 연구되고 있다. 그 중 대표적인것이 Bridgestone 사의 RCOT이론⁽⁸⁾(Rolling Contour Optimization Theory)과 TCOT이론⁽⁹⁾(Tension Control Optimization Theory)을 들 수 있다. 이들 이론들은 각각 고속내구성과 중하중 지지특성을 높여 승용차용과 트럭/버스용 타이어 설계에 크게 나누어 적용하고 있으며, 또한 Toyo 사의 DSOC이론⁽⁸⁾(Dynamic Simulation Optimized Coutour Theory)은 타이어의 사용조건에 맞추어 구조변형과 응력집중을 최소화시키기 위한 구조개발에 초점을 맞추어 연구된 설계이론이다. 이와같이 각 선진 타이어 메이커 별로 고유의 단면형상 최적설계 이론들을 보유 또는 개발중에 있으며, 이러한 점에 비추어 보다 적극적인 관심과 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

3. 최적형상 설계를 위한 설계변수 결정

3.1 타이어의 설계변수

타이어의 요구성능에 영향을 미치는 설계변수들은 타이어의 형상, 구조, 재료, 트레드 패턴(tread pattern)형상등 수십종에 이르며, 이들의 미세한 조합에 따라 최종특성에 차이가 발생하고 있다.

본 연구에서 고려한 타이어의 최적설계 변수들은 다음과 같다.

- ① 중심부 트레드 크라운 반경 : TR
- ② 솔더부 카카스라인 반경 : Ra
- ③ 비드부 카카스라인 반경 : Rb

Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 타이어의 형상 설계시 카카스 라인을 구성하는 곡률(Ra, Rb)과 트레드 크라운반경(TR : Tread Radius), 차량의 제원에 따라 취부될 림폭(RW : Rim Width), 기본 벨트구조(카카스 라

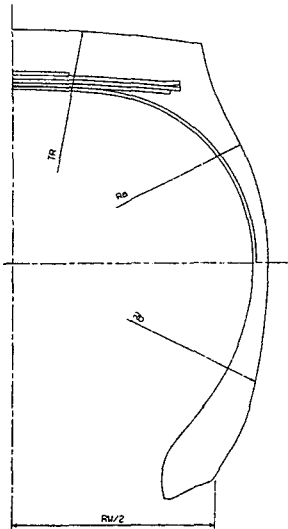


Fig. 1 Control variables for the optimal profile design of an automotive tire

인 위부터 외경방향으로 순서대로 1번, 2번, 3번, 4번 벨트(트) 등에 의해 기본형상이 이루지며, 이들 설계변수를 조합하므로써 주행시의 타이어 내부좌굴과 접지특성을 조절하여 사용조건에 알맞은 최적화를 도모하고 있다. 특히, 타이어의 고속주행성 향상을 목적으로 할 경우, 벨트 내구성의 향상이 가장 중요한 성능인자이며, 이는 타이어가 회전할 때 벨트의 변형을 감소시키기 위해서 최적형상의 계산이 필수 불가결한 문제가 된다.

지금까지의 연구를 바탕으로 불배, 토러스형상의 타이어는 내부 공기압에 의해 코드의 장력 및 형상변화가 균일하게 되려는 성질이 있으며, 이때 얻어지는 형상을 자연평형형상 (equilibrium contour) 이라 한다. 그런데, 서론에서 언급한 바와 같이 이윤배반적인 특성을 모두 고려하여 타이어의 최적설계를 수행해야 하는 오늘날, 비평형형상(non equilibrium contour)의 필요성을 인식하게 되었으며, 고속회전주행과 같은 실제 사용조건시의 형상 변화를 사전예측하여 설계시 고려하는 연구가 필요하다.

3.2 VMCT 이론

본 연구에서는 이미 2장에서 언급한 바와 같이, 최근 차량의 고성능화, 고속화에 따라 자동차용 타이어의 고속 내구성 향상을 목적으로 비평형 프로파일 설계방법론의 개발과 유한요소법을 이용한 설계연구에 중점을 두어 실

시하였다. 타이어의 고속내구성 향상을 위해서는 벨트부의 구조적 보강이 1차적인 방법이나, 굴신운동의 메카니즘을 이해하고 초기 설계단계부터 그에 따른 대책을 세우는 것이 무엇보다도 중요하다고 판단된다.

본 연구의 초기 카카스 프로파일 형상은 외부에서 가해진 일과 카카스 내부의 공기가 하는 일이 평형을 이룰 때의 체적 변화와 응력의 상관관계를 계산하여 타이어 체적이 최대가 되는 현상을 근거한 체적 최대화 단면 이론 (Volume Maximized Contour Theory)을 제시한다. 이때 사이드월 탄성에너지는 원주방향변형(radial deformation) 동안에는 그 영향도를 무시한다는 가정하에 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.⁽⁹⁾

정적인 변형은 변위 X와 힘 F에 의한 일 W_F 로 나타낼 수 있다.

$$W_F(x) = \int_0^x F(t)dt \tag{1}$$

일 W_V 은 내압의 증분으로부터 오는 일이다.

$$W_V(x) = \int_{V_0}^{V(x)} p(v)dv \tag{2}$$

여기서,

$V(x)$: 정적 변위 X일때의 타이어 체적

$p(v)$: 체적에 상응하는 초과내압

이때, 하중에 의한 일 $W_F(x)$ 와 체적 변화로 인해 생기는 내압의 일 $W_V(x)$ 는 같다는 정의 아래, 다음의 식이 성립된다.

$$W_F(x) - W_V(x) = 0 \tag{3}$$

벨트구조를 갖는 래디알 타이어의 축대칭으로 변형되는 체적을 구하기 위해 Fig. 2와 같은 실린더 좌표계 (R, ϕ, Z) 를 설정할 경우, 벨트와 림 부분의 치수는 설계하고자 하는 타이어의 제원이므로 각각 비드 점 (r_B, z_B) 과 크라운 센터점 $(r_C, 0)$ 으로 고정되며, 이때 벨트 표면의 자오선방향 곡률반경 R_{mG} 을 결정하고, 이 단면형상을 회전시키면 3차원 타이어 형상을 얻을 수 있다. 또한, Fig. 2에서 w는 카카스 라인의 최대단면폭을, $\alpha_1 = -\arctan z'(r)$ 로 치환하여, 타이어의 쇼울더 부 설계시 가용곡률 범위내의 r_1 을 찾는데 사용되는 변수를 나타낸다.

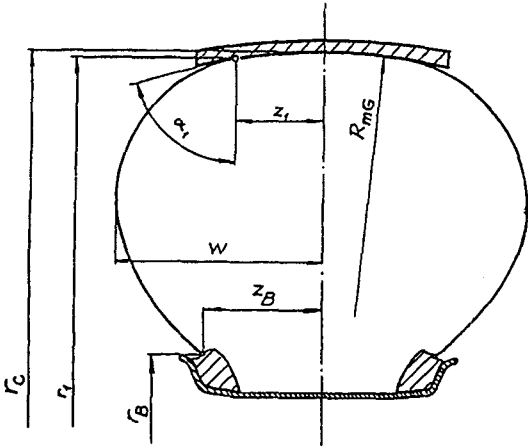


Fig. 2 Profile design variables of a belted tire

체적함수 $V(z)$ 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$V(z) = 4\pi \int_{r_B}^{r_c} rz(r)dr \quad (4)$$

$V(z)$ 가 최대이면 코드길이, 즉 자오선곡선의 길이는 고정이고, 최대치 L_0 와 같다.

$$L(z) = \int_{r_B}^{r_c} \sqrt{1+(z'(r))^2} dr \quad (5)$$

여기서, $z' = \frac{dz}{dr}$

구속적인 $L(z) = L_0$ 에서 함수 $V(z)$ 은 최대치를 갖는다.

$$\text{MAX}(V(z)/L(z)) = L_0 \quad (6)$$

점 (r_1, z_1) 이 주어진 경우,

$$\bar{V}(z) = 2\pi \int_{r_B}^{r_1} rz(r)dr \quad (7)$$

$$\bar{L}(z) = \int_{r_B}^{r_1} \sqrt{1+(z'(r))^2} dr \quad (8)$$

$r \leq r_1$ 에서의 함수 $z(r)$ 은 다음과 같은 등경계선 문제의 해이다.

$$\text{MAX}(\bar{V}(z)/\bar{L}(z)) = L_0 - L_1 \quad (9)$$

여기서, L_1 은 점 $(r_c, 0)$ 와 점 (r_1, z_1) 사이의 자오선 방향 카카스 라인의 길이이다.

상기의 VMCT이론을 이용하여 초기 타이어 프로파일을 설계할 경우, 차량 장착시 요구되는 타이어의 기본제원인 외경(overall diameter)과 립경(rim diameter)은 물론, 최대 단면폭과 벨트곡률 반경을 만족하는 최대최적의 프로파일을 얻을 수 있으므로 벨트부 굴신운동을 최소화 하고 타이어의 구조강성(structure stiffness)을 높일 수 있어 고속내구성과 함께 조종안정성등의 특성등도 함께 올릴 수 있다.

4. 유한요소해석

4.1 유한요소 모델링

본 연구에서는 복합구조 회전체인 타이어의 내압작용 및 자유회전의 응력 및 에너지 분포해석을 위해서 Halpin-Tsai 식⁽⁶⁾을 이용한 물성계산과 유한요소 모델링을 수행하였으며, 상용유한 요소코드인 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 이용하여 그 해를 구하였다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 트럭/버스용 타이어를 축대칭 2차원 요소를 이용하여 유한요소모델링을 실시하였으며, 4절점요소 117개, 3절점 요소 37개의 총 154개의 요소로 구성하였다.

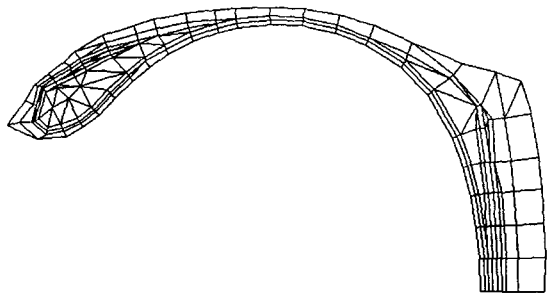


Fig. 3 FE modeling of automotive tire which is combined with VMCT

또한, 타이어는 고무와 스틸 또는 섬유가 주 재질인 코드강화층으로 구성된 복합구조체이며, 이것은 이방성(anisotropy)으로 축 방향에 따라 각기 다른 물성을 나타내는 특성을 가지고 있다.

4.2 원심력을 고려한 운동방정식

변형체 전체에 작용하는 원심력 F_c 는 미소 요소에 작용

하는 원심력의 적분에 의해 유한요소 방정식의 행렬형태로 표현할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$F_C = \omega_z^2 M \cdot r_2 \quad (10)$$

여기서,

M : 질량 행렬

$$r_2 = X + q_2 \quad (11)$$

X : 절점 위치좌표,

q₂ : 절점의 변위

식 (11)를 식 (10)에 대입하면

$$F_C = \omega_z^2 M \cdot X + \omega_z^2 M \cdot q_2 \quad (12)$$

기하학적 비선형성을 갖는 구조체의 문제 해석을 위해서 Quasi-Static의 형태로 평형방정식을 선형화 할 수 있다.

무부하 상태에서 자유회전하는 타이어의 원심력 F_c는 외력에 추가적으로 작용한다.

그러므로 원심력으로 포함한 유한요소방정식은 다음과 같다.

$$(K - \omega_z^2 M) \cdot q = R_2 + \omega_z^2 M \cdot X - F_1 \quad (13)$$

또는,

$$K^* \cdot q = R^* \quad (14)$$

또한, 일반적으로 회전운동체를 해석할 경우, 회전계의 속도에 기인하여 발생하는 코리올리스 (coriolis) 항은 좌표계의 설정과 함께 고려되어야 한다.

만약 차량의 슈미(shimmy)현상과 같이 타이어가 서스펜션(suspension)의 킹핀과 스핀들(spindle)의 연결축상에 장착되어 타이어 회전축의 상대운동량이 클 때, 그 영향도를 무시할 수 없으므로 이를 기술해야 한다.

그러나, 본 연구에서는 타이어의 회전축 중심축은 스핀들 축으로 고정되어 있으며, 다른 계와의 상대운동 및 상대거리의 변화가 없다고 가정하므로 코리올리스 항의 영향을 무시하였다.

5. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 트럭, 버스 전용 타이어의 설계 / 개발에 있어서 특히, 고속주행시의 내구특성향상을 목적으로 하는 단면형상의 설계와 이에 미치는 설계인자의 영향도를

중심으로 응력 및 변형을 등에 대한 해석결과를 도시하고 이에 대한 평가도 아울러 수행하였다. 타이어는 고속 회전시 차량의 하중을 지지하면서 동시에 지면과의 접촉에 의한 반복 굴신운동을 하게되며, 이로 인해 구조 내부응력이 증가하고 고무 및 금속의 복합구조로 구성된 카카스, 벨트 부위의 반복 변형률에 의한 발열이 증가하게 된다. 따라서, 고속내구성을 향상시키기 위해서는 굴신운동이 가장 심한 벨트부 및 비드부의 운동량을 억제할 수 있으며, 이 부위에서 발생하는 응력중 강철코드를 싸고 있는 고무와 코드 사이의 전단응력과 변형을 에너지 밀도값을 낮출 수 있는 프로파일의 설계와 재료의 선택이 요구되어 진다.

타이어 단면형상의 계산을 위해 개발코자 하는 타이어의 외곽 단면형상을 설계변수로서 채택하였으며, 계산을 통해 타이어의 골격역할을 하는 단면형상을 얻을 수 있으며, 장기간의 경험과 설계 know-how를 바탕으로 고속내구성 향상에 유리하도록 단면형상의 일부를 설계변경한 후, 유한요소 모델링과 해석을 수행하였다.

본 연구에서 채택한 자동차용 타이어 단면형상의 설계 흐름도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 개념 설계가 끝난 VMCT 이론을 통한 coutour 설계와 유한요소해석을 통한 타이어 각 부위의 응력해석 및 평가를 통해 최종 단면설계시방을 얻게 되어있다.

Fig. 5에는 내압작용시와 140 Km/hr로 고속회전시의 단면형상의 변형상태를, Fig. 6에는 내압 작용시와 100Km/hr 회전시의 변형을 에너지밀도의 분포상태를

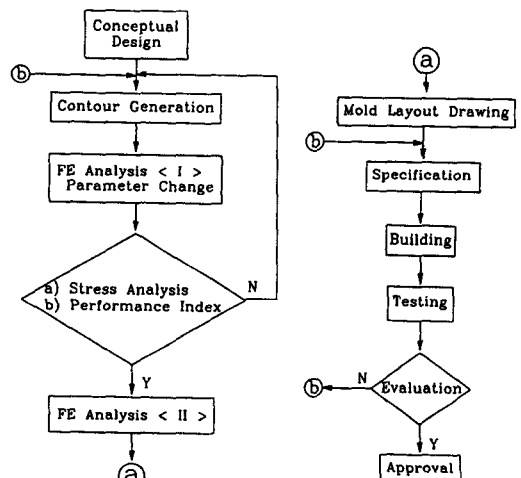


Fig. 4 Design procedure of an automotive tire

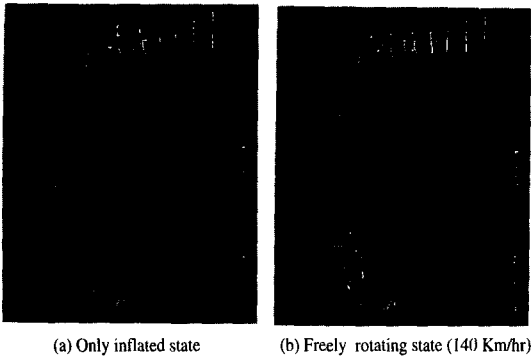


Fig. 5 Comparison of deformed configuration of Truck/Bus tire

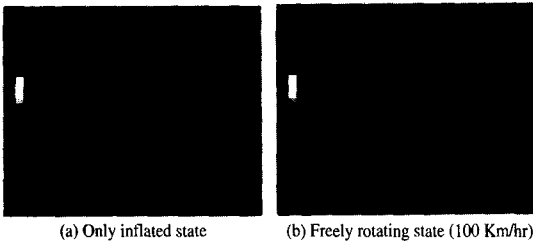


Fig. 6 Comparison of strain energy density distribution of Truck/Bus tire

비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 내압만을 작용한 경우, 트레드 크라운 중심부 바깥방향으로의 변형량이 증가함에 따라 쇼울더보다 변형에너지 밀도가 증가하는 경향을 나타내고 있는 반면, 자유주행과 같이 회전속도의 증가 조건하에서는 원심력의 증가로 인해 사이드월 부위가 자연형상보다 안쪽으로 들어오는 것과 함께 벨트부 자유끝단이 타이어의 외주 바깥면 방향으로의 변위를 증가시키는 변형 패턴을 나타낸다. 이때 특히, 쇼울더 및 2번 벨트 선단부의 굴신운동에 의한 변형량의 급증으로 인해 이 부위의 응력 및 변형률의 급격한 증대를 야기시킬 것으로 추정된다.

Fig. 7에 효과적인 고속내구성 평가를 위해 설계한 타이어의 유한요소모델을 나타내고 있으며, 크게 트레드 크라운 반경, 쇼울더 반경, 비드부 반경을 설계변수로 한 3가지 형태의 서로 다른 단면 프로파일을 갖는 타이어의 설계를 통해 고속내구성에 미치는 설계변수의 영향도를 평가하였다. 채택된 프로파일들은 과거의 개발경험을 바탕으로 하여 기 개발된 타이어에서 변경가능 범위내의 곡률 및 치수를 변경하였으며 Table 1에는 설계변수를 중심으로 각 종별 단면형상의 특징을 정리해 보았다. Table

1에 나타난 바와 같이, TR은 Type-1(이하 T1)과 Type-2(이하 T2)가 동일하며, Type-3(이하 T3)는 T1, T2 보다 작게 설계하였으며, 쇼울더 반경 및 총두께는 T1이 가장 큰 프로파일로 설계하였다. 결국, T2 프로파일은 기존 타이어 프로파일 보다 고속내구성에 유리하도록 TR을 증가시키고, 쇼울더 두께를 낮춤으로서 비드부 반경을 증가시킨다는 개념으로 설계되었으며, T1은 기 개발된 프로파일에 근사하게, T3는 T2 프로파일의 각 곡률반경을 극단적으로 선택했을 때의 프로파일이 되도록 설계하였다.

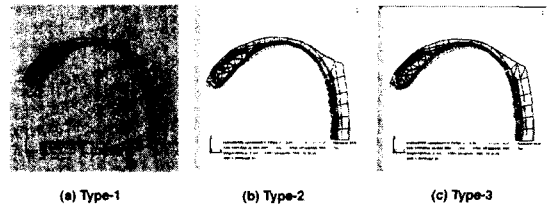


Fig. 7 Comparison of deformed configurations of a newly designed tire

Table 1 Comparison of design variables for optimal design

Design Variables	Comparisons
Tread Radius (TR)	T1 = T2 > T3
Shoulder Radius (Ra)	T1 > T2 > T3
Shoulder Gauge	T1 > T2 > T3
Bead Part Radius (Rb)	T2 = T3 > T1
Structure of Belts	All 4 Belts

Fig. 7에 나타난 바와 같이, 3종의 단면형상 유한요소 모델에 $8.4 \times 10^5 \text{Pa}$ 의 내압을 작용시킨 경우, 붉은색 실선은 내압 작용전의 초기 유한요소 형상을 나타내고 있으며, 검정색 실선은 내압작용에 의한 변형 후의 유한요소 형상을 나타내고 있다. T2 또는 T3의 경우가 종래의 단면형상과 유사한 T1과 비교할 때, 사이드월 부위와 비드부위의 초기변형이 사이드월의 바깥방향으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있으며, 이를 통해 초기 개념설계 및 단면 contour설정시 쇼울더 부위 또는 사이드 부위의 반경값을 인위적으로 조정할 경우, 타이어의 단면형상은 그 형상이 갖는 최대체적 형상을 이루는 방향으로 기본 단면 contour가 형성됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8에는 본 연구에서 설계된 3종의 타이어에 내압만을 작용시킨 후에 변형률 에너지 밀도를 비교한 결과이다. T2의 타이어가 다른 두 종류에 비하여 크라운 중심부

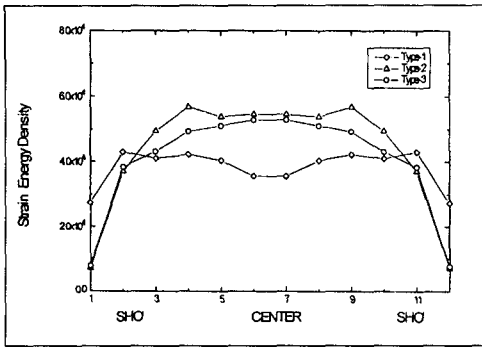


Fig. 8 Strain energy density distribution under air inflation state

(center)의 변형을 에너지 밀도가 상대적으로 높게 집중되고 있으며, 쇼울더 부위(SHO' : shoulder)에서는 T1이 가장 크게 나타나고 있지만, 우리의 주 관심의 대상인 2번 벨트부 전체적으로는 T1의 변형을 에너지 밀도 분포가 가장 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 그러나, 이는 종래의 타이어 설계지표가 이와 같이 정적상태에서의 응력분포의 균일화를 목표를 하였으나, 최근 트럭/버스용 대형 타이어의 사용조건이 점점 고속화 됨으로써 이에 걸맞는 동적조건하의 응력해석이 요구되어지는 바이다.

Fig. 9에는 상기의 3종의 타이어를 80Km/hr로 고속주행시킬 경우, 2번 belt 부위의 변형을 에너지밀도 분포를 도시한 결과이다. 이미 Fig. 5, Fig. 6에서 고찰한 바와 같이, 고속주행의 조건하에서는 사이드월 부위가 안쪽으로 들어오는 변형 패턴과 함께 쇼울더부위의 변형이 확대되면서 2번 벨트 가장자리 부위의 반복변형의 증가

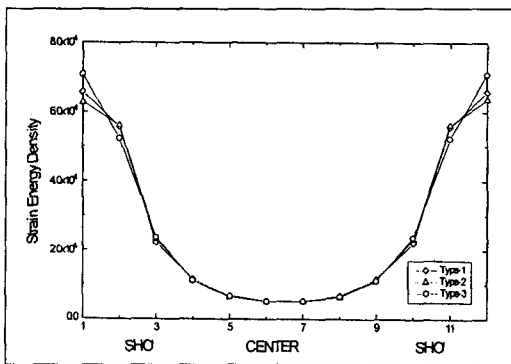


Fig. 9 Strain energy density distribution under freely rotation state (80km/hr)

에 의해 변형을 에너지 밀도가 증가함을 알 수 있다. 특히, Fig. 8과 비교해 보면, 크라운 중심부위의 변형을 에너지밀도는 3종 모두 감소하는 반면, 벨트에서부위쪽으로 응력 집중 부위가 이동하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, T2의 단면형상을 갖는 타이어의 벨트에서 변형률이 가장 작으며, 이는 TR을 증가시키고, 쇼울더 부의 반경과 두께를 줄임으로써 2 벨트에서부의 반복변형을 감소시키고, 또한, 초기 단면형상을 고속회전시 변화하는 형상에 가깝도록 설계했기 때문인것으로 사료된다.

본 연구결과를 확인코자 실내 내구특성시험(indoor high speed durability test)을 실시하였으며, 그 결과를 요약해 보면 Table 2와 같다. 여기서, 시험항목의 'TL02', 'TKPH', 'TP06'은 모두 타이어의 고속내구성을 검사하기 위한 대표적인 시험방법을 규정한 시험코드이며, 본 실험은 대형의 회전드럼에서 타이어를 회전시키면서 타이어에 부과되는 하중과 속도를 변경하면서 내부 복합재료간의 균열이나 박리변상이 발생할 때까지의 시간과 그 때의 타이어 훼손상태를 검사하는 시험이다. 특히, 'TL02' 나 'TP06'은 가장 가혹한 고속회전상태에서의 타이어 최종주행시간을 측정하는 시험이다. Table 2에 나타난 바와 같이, T2 또는 T3 타이어의 고속내구성이 기존 개발품의 프로파일과 유사한 T1 타이어 대비 매우 우수한 것으로 측정되었으며, 특히 'TL02', 'TP06' 시험에서는 'T2' 타이어의 최종주행시간이 가장 우수한 것으로 측정되었다.

Table 2 Comparison of indoor test result for high speed durability

Test item	Test results (rank)
TL02	T2 > T3 > T1
TKPH	T3 > T2 > T1
TP06	T2 > T3 > T1

본 시험결과로부터 고속내구성을 향상시키기 위해서는 2 벨트부 및 비드부 등의 반복변형이 많이 일어나는 부분에 대한 응력집중 및 변형을 증가를 최소화할 수 있는 단면 프로파일의 설계가 요구되어지며, 이를 위해서는 적절한 설계변수의 설정, 프로파일 설정이론의 정립, 유한요소 해석등을 통한 사전 성능평가등이 함께 수행될 때 비로소 가능해짐을 확인할 수 있었다.

따라서, 본 연구결과로부터 타이어 요구특성, 특히 고속내구성을 만족하는 타이어 설계를 위해서는 동적조건

하에서의 해석과 응력분포에 대한 고찰이 필요하며, 그간의 연구들이 정적상태의 자연평형형상에 근거한 설계방법론에서 한 걸음 진보하기 위한 방향이라 사료된다.

6. 결 론

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 개발코자 하는 타이어 단면형상의 초기 외곽치수결정이 이루어지면, VMCT이론을 이용하여 초기 단면 contour를 결정할 수 있으며, 정적 및 동적 유한요소해석을 통해 요구성능을 만족시킬 수 있는 타이어 프로파일의 설계가 가능하다.
2. 자동차용 타이어는 내압작용시 주로 벨트 및 카카스 중심부에 응력이 집중되는 현상을 나타냄을 확인할 수 있다.
3. 타이어의 회전에 의한 원심력 작용시, 속도증가에 따라 응력 및 변형에너지 집중도는 중심부에서 쇼울더부위로 이동하여 집중현상을 나타내고, 이는 고속내구성과 밀접한 상관성이 있는 벨트층간박리현상의 주된 원인이 됨을 확인할 수 있다.
4. 정적상태에서는 자연평형형상에 근거한 설계 변수의 설정과 단면형상 설계가 타이어의 응력 분포에 유리한 경향을 보이나, 자유회전과 같은 내구특성 향상을 목적으로 하는 타이어의 설계시는 정적상태 대비 에너지 밀도 변동폭이 적도록 단면형상 설계 변수를 선정하는 비자연평형형상을 채택함으로써 취약부위의 응력집중을 감소시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. Carl M. Anderson, "Deep Anisotropic Shell Program for Tire Analysis", NASA Contractor Report 3483., 1981.
2. R.H. Kennedy, H.P. Patel, and M.S. McMinn, "Radial Truck Tire Inflation Analysis: Theory and Experiment", Rubber Chemistry and Technology, 1981.
3. R.A. Ridha, K. Satyamurthy and L.R. Hirschfeldt, "Finite Element Modeling of a Homogeneous Pneumatic Tire subjected to Footprint Loadings", TSTCA, vol 13, No.2, pp.91-110, 1985.
4. H. Rothert, R. Gall, "On the Three - Dimensional Computation of Steel Belted Tires", TSTCA, Vol 14, No.2, pp.116-124, 1986.
5. S.K. Clark, "Theory of the Elastic Net Applied to Cord-Rubber Composite", Cord-Rubber Composite, Vol.56.
6. R.B. Day, S.D. Gehman, "Theory for the Meridian Section of Inflated Cord Tires", Rubber Chemistry and Technology, Vol.36, pp.11-27, 1963.
7. F. Bohm, "Zur Mechanik des Luftreifens, Habilitationsschrift, TH Stuttgart, 1965.
8. Y. Nakajima, T. Kamegawa, A. Abe, "Application of Optimization Technology into Tire Design", TSTCA, Vol.15, No.51, 1978.
9. F. Koutny, "Static Calculations of Radial Tires", Plasty a kaučuk, Vol.10, No.12, pp.360- 366, 1973.
10. "ABAQUS Theory", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 1987.
11. J. Hwang, S. Namgung, "A Study on the Finite Element Analysis of Tire under Rolling and Loading Conditions", KSPE, Vol.12, No.3, pp.101-109, 1995.
12. R.H. Kennedy, J. Padovan, "Finite Element Analysis of a Steady-State Rotating Tire Subjected to Point Load or Ground Contact", TSTCA, Vol.15, No.4, pp.243-260, 1987.
13. 김균옥, "타이어 연구개발에 CAE적용", 대한기계학회지, 제31권, 제4호, pp.348-355, 1991.
14. S.P.Timoshenko, J.N.Goodier, "Theory of Elasticity", 3rd ed., McGraw-Hill, 1982.