

자동차용 타이어 단면형상의 최적설계 방법론

Optimal Design Methodology of Automotive Tire Profile

황 준 (충주산업대학교 기계설계학과), 남궁 석 (충남대학교 기계공학과)
Joon Hwang (Chungju National Univ.), Suk Namgung (Chungnam National Univ.)

ABSTRACT

New approach to determine the optimal design of automotive tire profile was introduced. In this study, optimal design technology was combined with a finite element method. Through tire profile optimization, tire profile was obtained and its profile improved high speed durability and maneuverability. Static and dynamic behavior analysis of new concepted tire was compared with conventional tire profile. Optimal design methodology will provide much informations to improve various tire performances.

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

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 관심도가 날로 높아지고 있다.

타이어는 여러층의 고무, 섬유, 강철코드등으로 구성된 이방성 복합구조의 회전체 형상으로 내부에 충전된 공기압에 의해 차량 및 항공기의 하중을 지지하며, 또한 고속, 고하중의 주행조건에도 견딜 수 있는 구조체로 설계되지만, 복합구조체 층간의 응력집중에 의한 균열 및 박리현상의 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 수차체에 걸친 시험용 제조 및 실내/실차 시험을 수반하고 있으나, 최근 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 이론의 급속한 발전은 설계/개발 초기의 성능예측에 진일보를 피할 수 있게 되었다.

유한요소법을 이용한 타이어 응력해석은 1970년

대 중반 이후 몇몇 선진 타이어 메이커에서 시도되었으며, NASA¹⁾등에서 항공기 이착륙시에 밀접한 타이어 동적접지 문제에 관심으로 보였으며 Kennedy²⁾등에 의해 트럭 타이어의 2차원 내압해석을 수행하였으며, Ridha³⁾등은 타이어를 하나의 고무 디스크로 개략화하고 접촉문제를 연구하였으며, Rothert⁴⁾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 이율배반적인 특성, 즉 타이어의 마모특성을 향상시키려면 벨트내구성 또는 고속내구성의 저하 및 회전저항의 증가에 의한 에너지 효율의 악화같은 특성이 서로 역기능적으로 발생하는 특성으로 인하여 최적설계를 위한 설계변수의 결정 및 영향도 검토가 중요한 연구과제중의 하나로 주목되고 있다.

본 연구에서는 자동차용 타이어 단면형상 최적설계를 목적으로 우선, 그간 제시되었던 설계방법론들의 특징들을 중심으로 비교, 고찰하고, 향후 요구되어지는 타이어 최적설계 방향에 대하여 논하고자 한다.

2. 타이어 단면형상 설계이론

2.1 자연평형 단면형상

타이어 단면형상의 최적설계에 관한 연구는 오래 전부터 계속되어 왔으며, Hofferberth는 Netting Theory를 이용하여 바이어스 타이어(bias tire) 설계이론을 전개하여 타이어 구조역학의 기틀을 마련하였으며, Day와 Gehman은 여러가지 코드경로에 대해서 카카스 프로파일(carcass profile)에 대한 방정식을 유도하였다. 그후, Bohm은 래디알 타이어의 이론을 정립하였다. 타이어는 적층형의 복합구조물이지만, 고무층의 강성이 강철코드의 강성에 비하여 극히 작기 때문에 타이어의 내압을 코드가 부담한다는 가정이 성립될수 있다. 타이어의 단면형상은 일반적으로 코드 내부의 압력과 급형 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.

2.2 비자연평형 단면형상

최근들어, 다양한 요구특성에 맞는 자동차용 타이어의 개발과 함께 기존의 자연평형형상의 범주를 뛰어넘어 고속내구성, 승차감, 고속조향성등을 만족시키기 위한 단면형상 최적설계 방법론들이 연구되어 왔다.

그 중 대표적인것이 RCOT이론(Rolling Contour Optimization Theory)과 TCOT이론(Tension Control Optimization Theory)을 들 수 있다. 이들 이론들은 승용차와 트럭/버스용 타이어의 구조와 요구특성이 각각 다르듯이 접근방법 또한 크게 대별될 수 있다. 또한 Toyo 타이어 사의 DSOC 이론(Dynamic Simulation Optimized Coutour Theory)등도 있으며, 각 선진 타이어 메이커 별로 고유의 단면형상 최적설계 이론들을 보유 또는 개발중에 있다.

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 최종 특성에 차이가 발생하고 있다.

본 연구에서 고려한 타이어의 최적설계 변수들은 다음과 같다.

- ① 중심부 트레드 크라운 반경 : TR
- ② 슐더부 카카스라인 : R1
- ③ 비드부 카카스라인 : R2
- ④ 스틸벨트의 구조

Fig.1에서 알수 있는 바와 같이 타이어의 형상 설계시 카카스 라인(R1,R2), 트레드 크라운 반경(TR)에 의해 기본형상이 이루지며, 이들 설계변수를 조합하므로써 주행시의 타이어 내부좌굴과 접지 특성을 조절하여 사용조건에 알맞는 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.

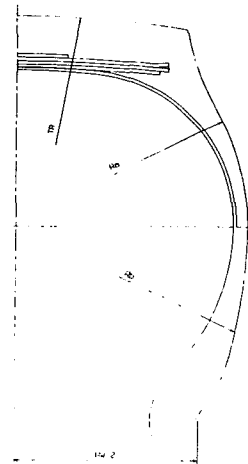


Fig.1 Contol variables for optimal profile design of automotive tire

지금까지의 연구를 바탕으로 볼때, 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 형상변화를 사전예측하여 설계시 고려하는 연구가 필요하다.

3.2 VMCT 이론

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 탄성 에너지는 원주방향변형(radial deformation) 동안에는 그 영향도를 무시한다는 가정하에 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.⁷⁾

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

$$W_F(x) = \int_0^x F(t)dt \quad (1)$$

일 W_V 은 내압의 증분으로 부터 오는 일이다.

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

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 정의아래, 다음의 식이 성립된다.

$$W_F(x) - W_V(x) \equiv 0 \quad (3)$$

벨트구조를 갖는 래디알 타이어의 축대칭으로 변형되는 체적을 구하기 위해 Fig.2과 같은 실린더 좌표계(R, ϕ , Z)를 설정할 경우, 체적함수 V(z)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

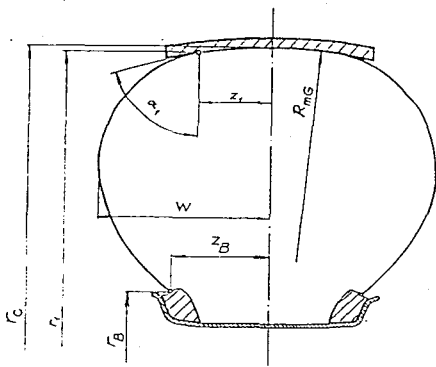


Fig.2 Profile design variables of belted tire

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

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

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

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,

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

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

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

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

4. 유한요소해석

4.1 유한요소 모델링

본 연구에서는 복합구조 회전체인 타이어의 내압 작용 및 자유회전의 응력 및 에너지 분포해석을 위해서 Halpin-Tsai 식⁵⁾을 이용한 물성계산과 유한요소 모델링을 수행하였으며, 상용유한요소코드인 ABAQUS⁶⁾를 이용하여 그 해를 구하였다.

트럭/버스용 타이어를 축대칭 2차원 요소를 이용하여 유한요소 모델링을 실시하였으며, 4절점요소 117개, 3절점 요소 37개의 총 154개의 요소로 구성하였다.

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

4.2 원심력을 고려한 운동방정식

변형체 전체에 작용하는 원심력 F_c 는 미소 요소

에 작용하는 원심력의 적분에 의해 유한요소 방정식의 행렬형태로 표현할 수 있다.

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

여기서,

$$M : \text{Mass Matrix} \\ r_2 = X + q_2 \quad (11)$$

X : Nodal position,
 q_2 : Nodal displacement

식 (11)를 식 (10)에 대입하면

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

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

무부하 상태에서 자유회전하는 타이어의 원심력 F_c 는 외력에 추가적으로 작용한다.

그러므로 원심력으로 포함한 유한요소방정식은 다음과 같다.

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

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 스피들(spindle)의 연결축상에 장착되어 타이어 회전축의 상대운동량이 클 때, 그 영향도를 무시할 수 없으므로 이를 기술해야 한다.

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

5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 트럭, 버스 전용 타이어의 설계/개발에 있어서 특히, 고속주행시의 내구특성 향상을 목적으로 최적 단면형상의 설계와 이에 미치는

설계인자의 영향도를 중심으로 응력분포 및 변형 에너지 밀도(strain energy density)등에 대한 해석 결과를 도시하고 이에 대한 평가도 아울러 수행하였다.

최적화 이론에 근거한 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.

Fig.3에 효과적인 고속내구성 평가를 위해 설계한 타이어의 유한요소모델을 나타내고 있으며, 크게 트래드 크라운 반경, 쇼더부 반경,, 비드부 반경을 설계변수로 한 3가지 형태의 서로 다른 단면 프로파일을 갖는 타이어를 평가하였다.

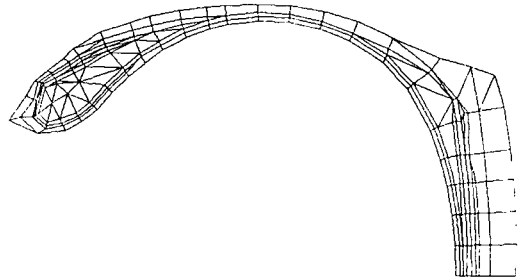


Fig.3 FE modeling of automotive tire which is combined with VMCT

우선, 내압만 작용시와 80Km/hr로 자유주행시 3종 타이어의 벨트부의 변형 에너지 밀도분포를 비교한 결과, 내압만을 작용한 경우, 트래드 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 들어 오는 것과 함께 벨트부 자유끝단이 타이어의 외주 바깥면 방향으로의 변위를 증가시키는 변형 패턴을 나타낸다. 이때 특히, 쇼울더 및 2 벨트 선단부의 굴진운동에 의한 변형량의 급증으로 인해 이 부위의 응력 및 변형률의 급격한 증대를 야기시킬 것으로 추정된다.

타이어 요구특성, 특히 고속내구성을 만족하는 타이어 설계를 위해서는 동적조건하에서의 해석과

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

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 자동차용 타이어는 내압작용시 주로 벨트 및 카카스 중심부에 응력이 집중되는 현상을 나타냄을 확인할 수 있다.

2. 타이어의 회전으로 인한 원심력 작용시, 속도 증가에 따라 응력 및 변형에너지 집중도는 중심부에서 쇼울더부위로 이동하여 집중현상을 나타내고, 이는 고속내구성과 밀접한 상관성이 있는 벨트층간 박리 현상의 주된 원인이 됨을 확인할 수 있다.

3. 정적상태에서는 자연평형형상에 근거한 설계변수의 설정과 단면형상 설계가 타이어의 응력분포에 유리한 경향을 보이니, 자유회전과 같은 내구특성 향상을 목적으로 하는 타이어의 설계시는 정적상태 대비 에너지 밀도 변동폭이 적도록 단면형상 설계변수를 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.Hirschfeld, "Finite Element Modeling of a Homogeneous Pneumatic Tire subjected to Footprint Loadings", TSTCA, vol 13, No.2, pp.91-110, 1985.
4. H.Rothert and R.Gall, "On the Three - Dimensional Computation of Steel Belted Tires", TSTCA, Vol 14, No.2, pp.116-124, 1986.
5. Samuel, K. Clark, "Theory of the Elastic Net Applied to Cord-Rubber Composite", Cord-Rubber Composite, Vol.56.
6. "ABAQUS Theory", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 1987.
7. F.Koutny, "Static Calculations of Radial Tires", Plasty a kaučuk, Vol.10, No.12, pp.360-366, 1973.
8. N.T.Tseng, R.G.Pelle, J.P.Chang, and T.C.

Warholic, "Finite Element Simulation of Destructive Tire Testing", TSTCA, Vol.19, No.1, pp.2 - 22, 1991.

9. 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.

10. S.P.Timoshenko, J.N.Goodier, "Theory of Elasticity", 3rd ed., McGraw-Hill, 1982.