

타이어 고무배합물의 초탄성을 고려한 레이디얼 타이어의 팽창에 관한 유한요소해석

김 용 우^{*1)} · 김 종 국²⁾

순천대학교 기계공학과^{*1)} · 순천대학교 대학원²⁾

F.E. Analysis of the Radial Tire Inflation Using the Hyperelastic Properties of Rubber Compounds Sampled from a Tire

Yong-woo Kim^{*1)} · Jong Guk Kim²⁾

^{*1)}Department of Mechanical Engineering, Suncheon National University, Chonnam 540-742, Korea

²⁾Graduate School, Suncheon National University, Chonnam 540-742, Korea

(Received 16 September 2002 / Accepted 17 March 2003)

Abstract : In this study, Mooney-Rivlin 1st model and Mooney-Rivlin 3rd model are adopted as strain energy density functions of the rubber compounds of a radial tire. It is shown that the FE analysis using Mooney-Rivlin models for rubber compounds may provide good approximations by employing the appropriate strain range of experimental stress-strain data in a way to describe the stress-strain relationship accurately. Especially, Mooney-Rivlin 3rd model gives an accurate stress-strain relationship regardless of the fitting strain range used within the strain of 100%.

The static nonlinear FE analysis of a tire inflation is performed by employing an axisymmetric model, which shows that the outside shapes of the tire before and after inflating the tire agree well with those of the real tire. Additionally, the deformations at crown center and turning point on sidewall, distribution of belt cord force, interlaminar shear strain are predicted in terms of variation of belt cord angle which is known as the most influential factor in inflation behavior of a tire.

Key words : Hyperelasticity(초탄성), Mooney-Rivlin 1st model(무니-리브린 1차모델), Mooney-Rivlin 3rd model(무니-리브린 3차모델), Radial tire(레이디얼 타이어), Inflation pressure(내압), Rubber compound(고무배합물), Belt cord angle(벨트각)

1. 서론

타이어는 차량의 하중을 지탱하고 제동력 및 구동력을 지면에 전달하며 노면으로부터 오는 충격과 진동을 흡수하고 주행 중 차량의 방향전환 및 방향 유지의 기능을 담당한다. 이러한 기능들 중에 첫 번째로 요구되는 것은 차량이 이동하면서 발생하는 타이어의 굴신운동에 대한 피로강도와 인장강도가

높아야 한다는 것이다.¹⁾ 따라서 타이어의 코드에 작용하는 인장력과 코드를 감싸고 있는 고무에 작용하는 전단응력이 최소화되면서 적절히 분포되도록 타이어의 구조가 설계되어야 하고, 또한 재료도 이에 합당하도록 선택하여야 한다. 이를 위해서 설계 인자와 타이어의 성능과의 관계를 파악하여야 한다. 그러나 타이어는 비압축성 초탄성 및 점탄성의 특성을 지닌 고무와 섬유, 그리고 여러 강선이 꼬여진 강철코드 등 극히 상이한 물리적 특성을 가진 재

*To whom correspondence should be addressed.
wsyoo@pusan.ac.kr

료로 구성된 복합재로 제조되어 있어, 물성적 비선형의 특성을 보이며, 기능적으로 대변형을 일으키는 매우 복잡한 구조물이다. 따라서, 다른 구조물에서 찾아보기 어려운 많은 인자들이 관련되고 있어 수학적 연구에는 한계가 있게 마련이다. 이러한 관점에서 유한요소법^{2,11)}은 이 복잡한 구조물을 실제와 가깝게 접근할 수 있는 대표적인 해석방법이라고 할 수 있다. 그러나 유한요소해석에서도 위에서 언급한 복잡성은 여전히 난제로 남기 때문에, 타이어에 대한 유한요소 구조해석에는 첫째, 타이어의 형상과 구성 요소들의 물성에 대한 파악이 필요하고, 둘째, 가해지는 외력과 경계조건에 대한 완전한 모델링이 필요하고 셋째, 계산방법의 이론에 대한 이해를 필요로 한다.^{4,5)}

본 연구에서는 타이어를 구성하는 재료들의 물성에 대한 가정이 유한요소해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 타이어의 팽창변형에 대한 유한요소해석을 실시하고 일부의 해석 결과를 실험값과 비교한다. 팽창변형에 관한 해석은 타이어의 가장 기본적인 변형으로 타이어에서 발생하는 지면과의 접촉에 의한 수직하중, 제동시 발생하는 접촉면에서의 원주방향의 하중, 또는 코너링할 때 발생하는 접촉면의 횡하중 등에 의한 변형에 비해 비교적 단순하다. 이러한 이유로 팽창변형에 대한 수학적 해석이 비교적 초창기부터 이루어진 바 있다.^{1,12,13)} 그러나 이에 관한 수학적 해석은 타이어의 대부분을 구성하는 고무배합물의 비선형적인 물성을 반영시키지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는, 첫째 타이어 고무배합물의 물성을 가능한 정확히 반영하기 위해 그리고 패턴의 영향을 배제시키기 위해, 패턴이 없는 실제 타이어(P205/60R15)로부터 시편을 직접 채취하여 인장시험을 실시하고 인장시험에서 얻은 데이터를 사용하여 무니-리브린 에너지밀도함수(Mooney-Rivlin energy density function)의 물질상수를 결정함으로써 고무배합물의 초탄성적 거동을 유한요소해석에 반영한다. 둘째, 타이어 내압의 변화에 따른 타이어의 형상 변화에 대해 유한요소해석을 실시하고 그 해석결과를 실험값과 비교함으로써, 초탄성 재료의 거동을 표현하는 모델들이 유한요소해석 결과에 미치는 영향을 검토한다. 셋째, 타

이어의 부품 중 트레드부의 강성에 가장 큰 영향을 끼치며, 타이어의 팽창거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 벨트 코드의 각(belt cord angle)의 변화⁴⁾가 타이어의 변형, 벨트에 걸리는 힘(belt force), 벨트층간 전단변형을 등에 미치는 영향을 수치해석적으로 예측하고 검토한다.

2. 고무배합물의 물성

타이어의 대부분을 차지하고 있는 고무배합물(rubber compound)들은 비압축성의 등방성 물질로서 초탄성 물질의 특성을 가지고 있으므로 고무의 응력-변형을 관계를 표현하기 위해서는 변형을 에너지밀도함수가 필요하다. 본 논문에서는 변형을 에너지밀도함수로 무니-리브린 1차모델(M-R 1st model)과 무니-리브린 3차모델(M-R 3rd model)을 채용하여 고무배합물의 거동을 표현한다.

2.1 무니-리브린 모델

변형을 에너지밀도함수는 주신장률(principal stretch ratios, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)을 사용하여 다음과 같이 표현된다.^{14,15)}

$$W = \sum_{i,j,k=0}^{\infty} C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k$$

with $C_{000} = 0$ (1)

여기서 I_1, I_2, I_3 는 다음과 같다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (4)$$

또한 고무는 거의 비압축성으로 $I_3 \approx 1$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$W = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$

with $C_{00} = 0$ (5)

본 연구에서는 위 식으로부터 유도된 무니-리브린 함수 중, 식 (6)과 같이 2개의 물질상수를 갖는 무니-리브린 1차모델과 식 (7)과 같은 5개의 물질상수를 갖는 무니-리브린 3차모델을 채용한다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (6)$$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (7)$$

2.2 인장시험

본 연구에서는 타이어의 고무배합물(트레드, 사이드월, 이너라이너, 에이팩스, 비드투우 등)의 시편을 타이어로부터 직접 채취하여 단축인장시험을 실시한다. 트레드를 제외한 다른 고무배합물의 시편을 실제 타이어로부터 채취할 때, 시편의 크기에 제약을 받기 때문에 Table 1과 같은 크기로 시편(Fig. 1)을 만든다. 시편을 보호하고 응력집중을 막기 위해, Fig. 2와 같이 시편의 양쪽에 두께 1 mm의 알루미늄 탭(tap)을 붙인다.¹⁶⁾ 이 탭은 시편을 고정구에 물려 고정시킬 때, 시편을 보호하는 역할을 한다. 시편을 압박하여 고정하면, 고무가 양쪽으로 밀려나므로 탭의 폭을 시편의 폭보다 더 크게 만든다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 탭의 한 쪽에 부드러운 경사를 준 것은 이 부분에서 시편에 발생하는 응력집중

을 완화시키기 위함이다. 또한, 하중을 가하는 과정에서 탭과 시편의 미끄러움을 막기 위해 고무와 접촉하는 면을 사포로 거칠게 만든다. 각 시편들을 Fig. 3과 같은 인장시험기(UTM)를 이용하여 0.5 mm/min의 속도¹⁶⁾로 인장하면서 표점간 변위를 레이저 신장계(laser extensometer)를 사용하여 측정하였다.

인장시험 결과를 무니-리브린 1차모델과 무니-리브린 3차모델을 사용하여 곡선적합시킴으로써 응력-변형률 관계를 결정한다. 일반적으로 식 (6)은 고무의 경우 변형률이 약 100% 정도의 값까지 유효한 것으로 알려져 있으므로,¹⁵⁾ 우선 변형률이 0~100% 사이의 실험 데이터를 이용하구려 각 고무배합물들에 대한 무니-리브린 1차모델 및 3차모델의 물질상수를 구하여 Table 2와 3에 정리한다.

타이어에 사용하는 전형적인 고무배합물 중의 하나인 사이드월 고무의 변형률-응력 관계를 Fig. 4에서 실험결과와 비교한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 실제의 실험결과와 무니-리브린 1차모델의 두 물질상수를 이용하여 구한 변형률-응력 관계는 변형률이 작은 영역(0~20%)에서 비교적 큰 차이를 보인다.

일반적으로 타이어의 고무는 코드의 높은 강성으로 인하여 최대 20% 내외의 변형률을 초과하지 않

Table 1 Dimensions of specimens (unit: mm)

Material	Length × Width × Thickness	Gage length
Tread	200 × 15 × 3.5	40
Sidewall	120 × 7.4 × 2.1	15
Bead-toe	100 × 5.5 × 1.3	15
Inner-liner	120 × 7.2 × 0.8	15
Apex	100 × 10.3 × 2.3	15

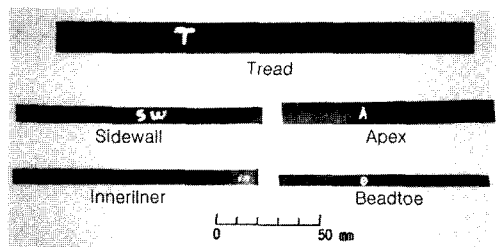


Fig. 1 Specimens of various rubber compounds sampled from a real tire

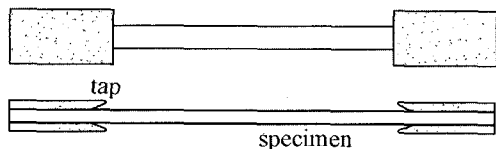


Fig. 2 Tap and specimen

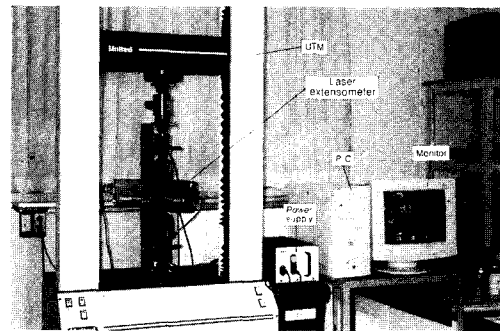


Fig. 3 Experimental apparatus for a tensile test

Table 2 Material constant(N/mm²) for Mooney-Rivlin 1st model based on the test data within 0~100% strain range

	C ₁₀	C ₀₁
Tread	0.6033	-0.2683
Apex	0.0788	2.2473
Bead-toe	2.2058	-1.2636
Sidewall	0.6021	-0.4175
Inner-liner	0.6070	-0.2179

Table 3 Material constant(N/mm^2) for Mooney-Rivlin 3rd model based on the data within 0~100% strain range

	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}
Tread	-3.1584	4.0481	1.8713	-6.2041	6.5129
Apex	-45.853	49.912	1021.4	-2497.3	1564.1
Bead-toe	-6.2161	7.9745	3.6555	-13.340	15.384
Side wall	-0.0664	0.5005	-0.6714	2.3831	-1.9646
Inner-liner	-1.2729	1.8664	0.5632	-2.0952	2.6488

Table 4 Material constants(N/mm^2) for Mooney-Rivlin 1st model based on the test data within 0~20% strain range

	C_{10}	C_{01}
Tread	-0.9745	1.7568
Apex	-1.9683	4.7167
Bead-toe	-0.8864	2.4349
Sidewall	-0.3159	0.7692
Inner-liner	-0.1827	0.7271

Table 5 Material constant(N/mm^2) for Mooney-Rivlin 3rd model based on the data within 0~20% strain range

	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}
Tread	-14.821	16.015	362.47	-878.35	544.35
Apex	-45.853	49.912	1021.4	-2497.3	1564.14
Bead-toe	-11.591	13.454	408.74	-966.65	581.77
Side wall	-4.8644	5.4707	100.83	-244.08	151.69
Inner-liner	-6.9017	7.6745	123.24	-302.64	191.44

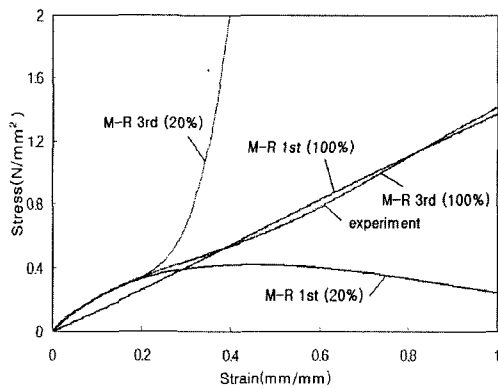


Fig. 4 Stress-strain curves of the sidewall rubber compound modeled by Mooney-Rivlin 1st and 3rd model. The numbers in the parentheses denote strain ranges used for the curve fittings

으며,¹⁷⁾ 또한 변형률이 0~100% 사이의 실험에 무니-리브린 1차모델을 적용할 경우 앞서와 같이, 부분적으로 실제의 응력-변형률관계를 제대로 묘사하지 못할 수 있으므로 좀더 정확한 응력-변형률 관계를 묘사하기 위해 0~20% 범위의 변형률의 데이터에 무니-리브린 1차모델 및 3차모델을 적용하여 각 배합물의 물질상수(Table 4와 5에 정리) 및 응력-변형률 관계식을 결정하고, 사이드월 고무배합물의 변형률-응력 관계를 Fig. 4에 함께 도시하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 무니-리브린 1차모델 및 3차모델(0~20% 범위의 데이터를 이용한 것)을 이용한 변형률-응력 관계는 변형률 0~20% 범위에서 매우 정확함을 알 수 있다. 또한 무니-리브린 3차모델(0~100% 범위의 데이터를 이용한 것)을 이용한 변형률-응력 관계는 0~100% 범위에서 실험값과 거의 일치함을 알 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델

Fig. 5의 단면 형상은 휠을 장착하지 아니한 타이어의 단면으로서 이 상태를 변형률이 영인 상태로 가정하여 유한요소해석의 초기 모델로 삼는다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS V6.2를 사용하여, 패턴이 없는 승용차용 레이디얼 타이어(205/60R15)의 공기압 주입에 따른

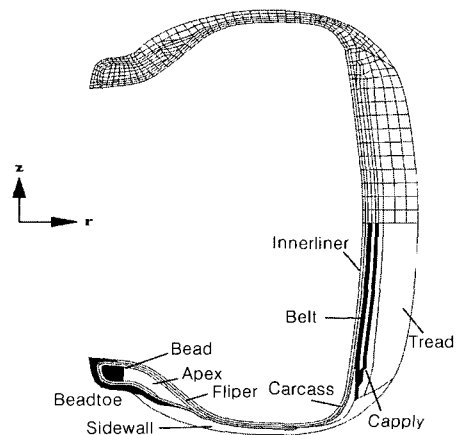


Fig. 5 Cross section of tire and discretization of axisymmetric model

타이어의 형상 변화에 대하여 유한요소해석을 실시한다. 이를 위해 Fig. 5와 같은 축대칭 모델을 사용한다. 이 모델에서 사용한 요소 개수와 절점수는 각각 960개와 1139개이다.

트레드 벨트 코드($E=137,024N/mm^2$)와 카카스 코드($E=7,132N/mm^2$)는 탄성 재료로 가정한다. 그리고 고무배합물들은 비압축 초탄성 재료로 가정하여 변형에 따른 물성적 비선형을 고려한다. 이 고무배합물의 거동을 모사하기 위해 비압축성이거나 거의 비압축성 물체에 적합한 요소인 하이브리드 솔리드 요소(hybrid solid element)인 3절점 연속체 요소와 4절점 연속체 요소를 사용한다. 이 요소를 구성하는 각 절점은 3개의 자유도(u_r, u_z, ϕ)를 갖고 있다. 또한 코드와 고무배합물의 복합체 부품의 경우, 카카스 고무합성물의 것은 이너라이너의 물성을, 벨트층과 캡프라이 고무합성물의 것은 트레드 고무배합물의 물성을, 플리퍼 고무배합물의 것은 에이팩스의 물성을 사용하였다. 그리고, 벨트층과 카카스층, 캡플라이, 그리고 플리퍼에 포함된 코드들은 rebar 요소¹⁴⁾를 사용하여 모델링하였다.

3.2 경계조건 및 하중

휠을 장착한 타이어가 내압을 받는 경우에 대한 유한요소해석을 실시하기 위해, 휠을 장착하지 아니한 타이어를 변형률이 영인 상태의 초기 모델로 설정하고, 이 초기 모델에 대해 다음과 같은 연속적인 2단계의 해석과정을 거친다.

1) 타이어를 휠에 장착 : Fig. 6은 타이어를 휠(wheel)에 장착할 때, 타이어의 위쪽 비드투우의 경계조건을 표시한 것이다. 즉, 강체로 가정한 림(rim)과 타이어 비드의 접촉면에서 타이어의 미끄러짐이나 분리가 일어나지 않는다고 가정한다.¹⁷⁾ 이에 따라, Fig. 6과 같이, 초기 형상에서 r 방향의 변위는 고정하고 z 방향으로는 -0.74 mm 의 강제 변위를 주고, 아래쪽 비드 투우에는 r 방향의 변위를 고정하고 z 방향으로 $+0.74\text{ mm}$ 의 강제 변위를 줌으로써 타이어를 휠에 장착한 상태를 모사한다.

2) 내압(inflation pressure) 부가: 내압 부가 과정에서는 Fig. 7에서처럼 타이어의 안쪽 면을 따라 균일한 압력을 가한다.

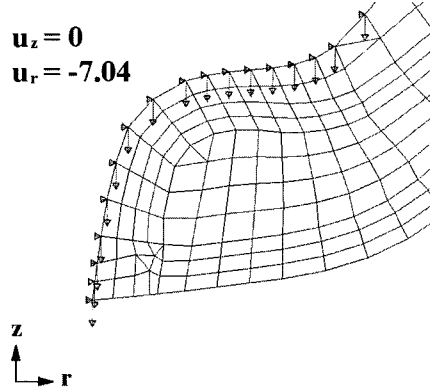


Fig. 6 Boundary conditions for upper side of the bead-toe

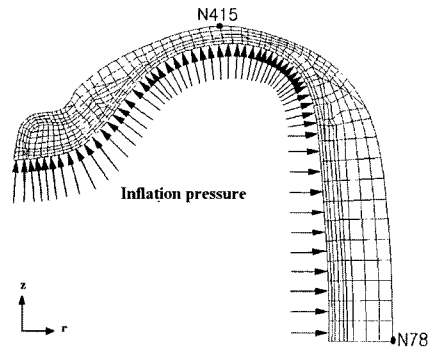


Fig. 7 Inflation pressure

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 타이어 폭과 높이의 변화량

휠을 끼운 타이어 폭의 변화량은 트레드의 중심점(crown center)에서의 반경 방향의 변위(δ_c)의 2배이고, 타이어 높이의 변화량은 사이드월부에서 가장 부풀어 나온 최외곽점(turning point)의 축방향 변위(δ_t)의 2배가 된다. 따라서 휠을 장착한 타이어에 대해 공기압의 변화에 따른 폭과 높이의 변화량을 측정하기 위해, 휠을 끼운 타이어의 형상(내압 0 kgf/cm^2)을 기준으로 하여 내압을 2.5 kgf/cm^2 까지 증가시키면서 δ_t 와 δ_c 를 레이저 변위계를 사용하여 측정하였다(Fig. 8 참조). 이때, 고무의 점탄성으로 인해 변형이 늦게 완료되므로 압력을 변화시킨 후 변위와 하중이 정상상태에 이르렀을 때 변위와 하중을 측정하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 내압의 증가에 따른 사이드월의 최외곽점(Fig. 7의 N415) 및 크라운 중심점(Fig. 7

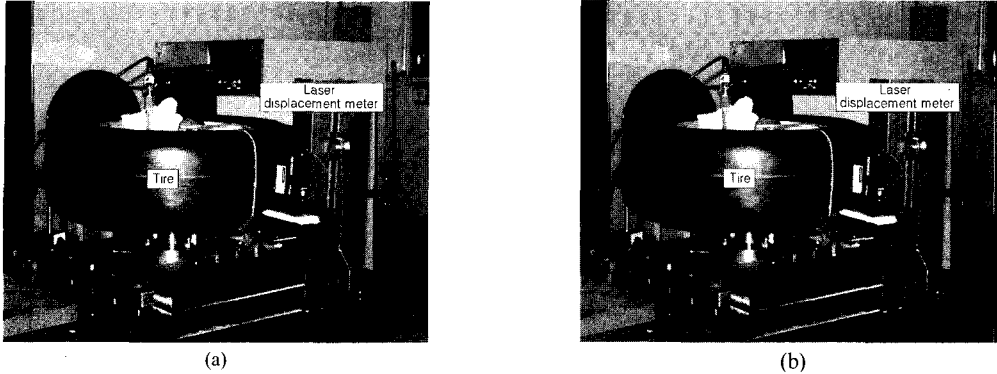


Fig. 8 Measurement of (a) the axial displacement at the turning point, and (b) the radial displacement at the crown center

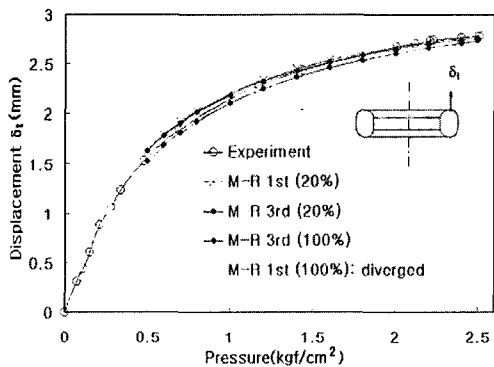


Fig. 9 Effect of inflation pressure on axial displacement at the turning point on the sidewall

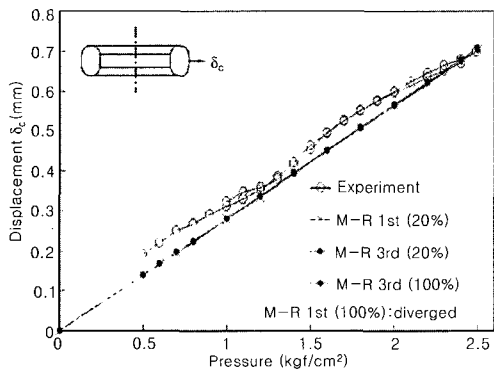


Fig. 10 Effect of inflation pressure on radial displacement at the crown center on the tread

의 N78)에서의 δ_t 와 δ_c 에 대한 측정값과 해석결과를 비교한 것이다. 여기서, 유한요소해석결과는 실험값과 비교할 수 있도록, 「내압 p 일 때의 변위」에서 「내압 0일 때의 변위」를 빼서 구한 상대변위이다.

Fig. 9와 10에 보인 바와 같이, 변형률이 작은 범위(0~20%)에서 응력-변형률 관계가 정확한 1차 및 3차 무니-리브린 모델을 적용한 유한요소해석의 결과는 모두 실험과 동일한 경향을 보이지만, 변형률이 작은 범위(0~20%)에서 응력-변형률 관계가 실제와 큰 차이를 보이는 무니-리브린 1차모델(변형률 범위 0~100%의 데이터를 이용한 것)을 적용한 유한요소해석의 해는 수렴하지 않아 해를 구할 수 없었다. 또한, 사이드월부 최외곽점의 변위 δ_t 는 내압이 증가함에 따라 그 증가율이 둔화되는 반면, 크라운 중심의 변위 δ_c 는 공기압에 비례하여 증가한다.

4.2 공기압 증가에 따른 타이어의 외형

Fig. 11은 휠을 타이어에 장착하기 전(Fig. 11에서의 ●, 측정값)과 후(◆, 측정값)의 외곽 형상을 비교한 것이다. 무니-리브린 3차모델(변형률 0~100%의 실험 데이터를 이용한 것)을 채용한 유한요소 해석결과(실선)는 사이드월과 트레드 사이의 쇼울더(shoulder)에서 실제 형상(◆)과 조금 차이를 보이고 나머지 부분은 실제 타이어의 모습과 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 휠을 장착한 타이어에 내압을 가하기 전과 후의 외형을 비교한 것이다. Fig. 12의 점선은 Fig. 11의 실선(타이어에 휠을 장착한 후 내압이 영일 때의 외형, 유한요소해석 결과)을 비교를 위해 다시 그린 것이다. 그리고 Fig. 12의 실선은 휠을 장착하고 공기압(2.4 kgf/cm²)을 가한 후의 타이어에 대하여 무니-리브린 3차모델(변형률 0~100%의 실험 데

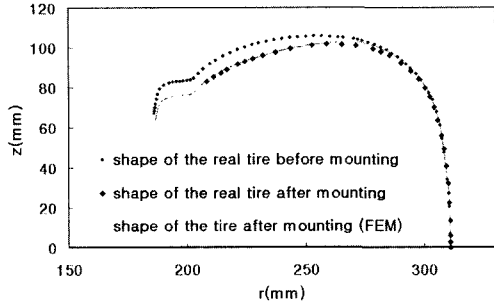


Fig. 11 Outside shapes of the tire before and after mounting on the wheel (M-R 3rd model with fitting strain range, 0~100%)

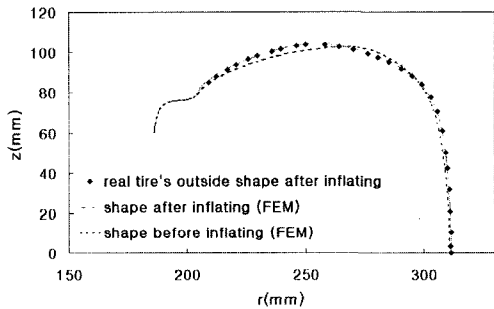


Fig. 12 Outside shape of the tire before and after inflating the tire with inflation pressure of 2.4 kgf/cm² (M-R 3rd model with fitting strain range, 0~100%)

이터를 이용한 것)을 채용해서 얻은 유한요소해석 결과로서 실제 타이어의 외형(●, 측정값)과 잘 일치하고 있다. 압력을 가하기 전의 모습(점 선)과 비교해 보면, 트레드 부분의 변형량이 작고 사이드월의 변형은 상대적으로 커서 사이드월은 볼록하게 부풀어 올랐고 트레드 부위는 압력을 가하기 전보다 더욱 편평해져 있다. 이는 카카스 코드만으로 내압을 지지하는 사이드월의 강성보다 벨트층이 있는 트레드의 강성이 훨씬 크기 때문이다.

Fig. 11에서 타이어의 외곽 형상은 휠을 타이어에 장착하기 전과 후에 각각 석고로 그 형상을 떠내어 측정된 것이다. 각기 따로 측정된 두 가지 타이어의 형상에 대해, Fig. 6에서와 같이 림과 타이어 비드의 접촉면에서 r 방향의 변위는 영이며 z 방향으로 강제 변위가 ± 7.04 만큼 발생한다는 사실을 이용하여, Fig. 11과 같이 두 형상을 중첩시켜 그렸다. Fig. 12에서, 공기압을 가한 후의 타이어의 외곽형상도 동일한 방법으로 측정된 후, 림과 타이어 비드의 접촉면

에서 변위에 대한 경계조건을 이용하여 유한요소해석 결과와 중첩하여 그린 것이다.

4.3 벨트각 변화와 변형

벨트각(belt cord angle)은 벨트층에 포함된 벨트 코드가 타이어의 원주방향과 이루는 각이다. 휠을 장착한 타이어에서 벨트각의 변화에 따른 사이드월 상의 최외곽점 및 트레드상의 크라운 중심점에서의 변위(4.1절에서 정의한 δ_s 와 δ_c)에 미치는 영향을 알아보기 위해, 타이어의 공기압이 2.2 kgf/cm²일 때 벨트각을 15°에서 30°까지 변화시키면서 유한요소해석을 실시하여 변위(「내압 p 일 때의 변위」에서 「내압 0일 때의 변위」를 뺀 상대변위)을 계산하였다. 이때 고무배합물에 대한 물성값은 무나-리브린 3차 모델(변형률 0~100%의 데이터를 사용한 것)을 적용하였다.

Fig. 13과 Fig. 14를 보면 벨트각이 클수록 사이드월 상에 있는 최외곽점의 축방향 변위(δ_s)는 작아지

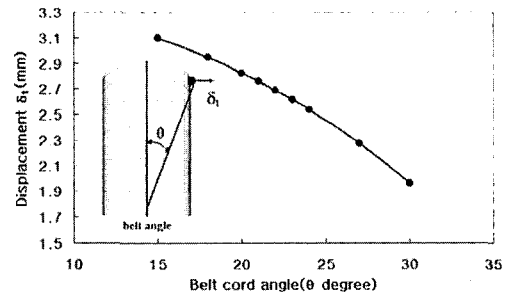


Fig. 13 Effect of belt cord angle on axial displacement at the turning point of sidewall when belt cord angle is 22° under inflation pressure of 2.2 kgf/cm²

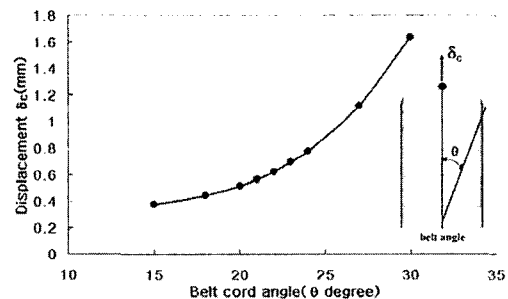


Fig. 14 Effect of belt cord angle on radial displacement at the crown center when belt cord angle is 22° under inflation pressure of 2.2 kgf/cm²

고 트레드상에 있는 크라운 중심점의 반경방향 변위(δ)는 커지고 있는데, 이는 벨트각이 클수록 트레드의 원주 방향의 강성이 약해지기 때문이다.

4.4 벨트각 변화와 벨트 코드에 걸리는 힘

본 연구에서 다루고 있는 타이어는 2장의 벨트층을 갖고 있다. 타이어 안쪽의 것을 벨트#1, 바깥쪽의 것을 벨트#2라고 지칭한다. 내압이 2.2 kgf/cm^2 이고 벨트각이 22° 일 때 벨트#1과 #2에 걸리는 힘(belt cord force)의 분포에 대한 해석결과를 Fig. 15에 도시한다.

Fig. 15에서 보는 바와 같이 크라운 중앙부에서 힘이 거의 균일하게 걸리나 양쪽의 벨트 모서리(belt edge)부근에서 급격히 감소하는 분포를 보인다. 또한 벨트#1과 #2가 매우 근접하게 위치하고 있어 두 벨트에 걸리는 힘은 거의 동일하나 안쪽의 벨트#1에 걸리는 힘의 벨트#2의 것보다 약간 크다.

벨트각의 변화가 벨트 코드의 힘에 미치는 영향을 조사하기 위해, 벨트각을 변화시키면서 벨트에 걸리는 힘을 계산하여 Fig. 16에 도시한다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 벨트각이 증가하면 벨트 코드에 걸리는 힘도 증가하는데, 특히 크라운 중심부분의 벨트 코드에 걸리는 힘이 증가함을 알 수 있다.

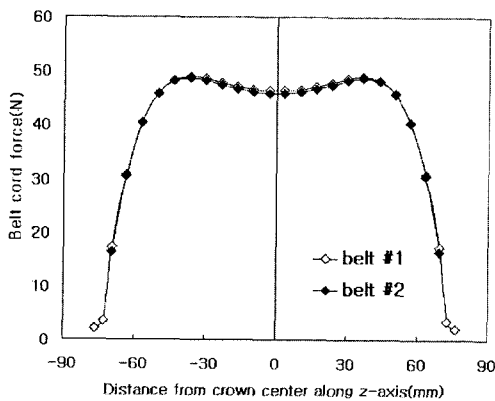


Fig. 15 Predicted belt cord force distribution in belt #1 and #2 with belt cord angle 22° under inflation pressure of 2.2 kgf/cm^2

4.5 벨트각 변화와 층간 전단변형률 분포

내압이 2.2 kgf/cm^2 이고 벨트각이 22° 일 때 벨트

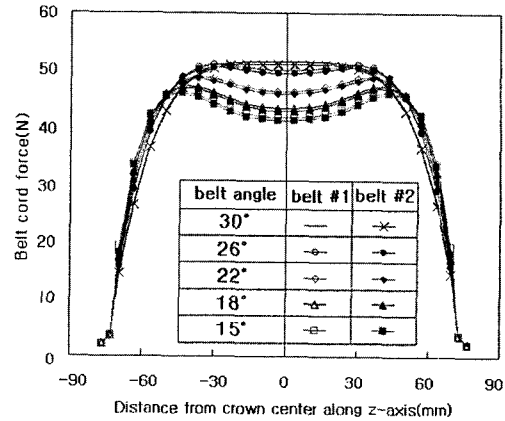


Fig. 16 Effect of belt cord angle on belt cord force distribution under inflation pressure of 2.2 kgf/cm^2

#1과 벨트#2 사이의 층간전단변형률 $\gamma_{r\theta}$ 의 분포를 구하여 Fig. 17에 도시한다. Fig. 17에서 보는 것처럼 전단변형률은 크라운 중심에서 영이고 벨트 모서리(belt edge)쪽으로 갈수록 급격히 증가한다.

Fig. 17을 Fig. 15와 비교해 보면, 벨트코드에 걸리는 힘이 급격히 감소하는 부분에 층간 전단변형률이 존재하며, 벨트코드에 걸리는 힘의 변화가 거의 없는 곳(크라운 중심부)에서는 층간 전단변형률이 거의 영임을 알 수 있다.

또한 벨트각의 변화가 층간 전단변형률 분포에 미치는 영향을 검토하기 위해, 내압이 2.2 kgf/cm^2 일 때 벨트각을 변화시키면서 층간 전단변형률의 분포

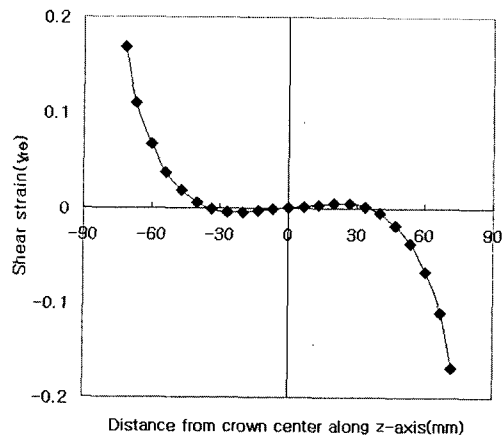


Fig. 17 Distribution of interply shear $\gamma_{r\theta}$ between the belt #1 and belt #2 with belt cord angle 22° under inflation pressure of 2.2 kgf/cm^2

를 계산하여 Fig. 18에 도시하였다. Fig. 18로부터 벨트각이 증가할수록 층간 전단변형률이 증가함을 알 수 있다.

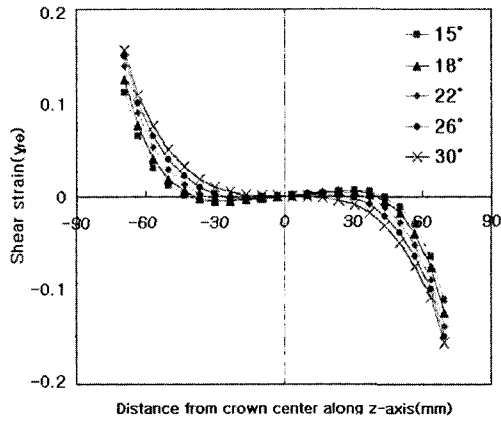


Fig. 18 Effect of belt cord angle on distribution of interply shear γ_{θ} between the belt #1 and belt #2 under inflation pressure of 2.2 kgf/cm^2

5. 결론

승용차용 레이디얼 타이어나고무배합물들의 시편을 채취하여 인장시험을 실시하고, 이 시험 데이터를 이용하여 각 고무배합물의 응력-변형률 관계를 무니-리브린 1차모델(변형률 범위, 0~20% 및 0~100%) 및 3차모델(변형률 범위, 0~20% 및 0~100%)로써 이상화하였다. 이 네 가지의 응력-변형률 관계를 유한요소해석의 초기모델(휠을 끼우지 아니한 타이어나)에 적용하여, 내압 변화가 휠을 끼운 타이어나의 변형에 미치는 영향에 대해 유한요소해석을 행하고 그 결과를 실험값과 비교하였다. 또한 무니-리브린 3차모델을 사용하여 벨트각의 변화에 따른 타이어나의 팽창거동에 대하여 유한요소해석을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 무니-리브린 1차모델 및 3차모델에 적용하는 인장시험 데이터는 타이어나의 실제 변형 범위의 데이터(변형률 0~20% 범위)만을 사용하여 응력-변형률 관계식을 곡선적합시킴으로써 변형률-응력-관계를 정확히 표현되게 할 수 있다. 이로 인해 유한요소해석의 수렴성이 향상되며 실험값에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 또한 무니-리브린 3차모델을 사용하면 실제 변형 범위보다 더 큰 범위의 시험 데이터

(변형률 0~100% 범위)를 사용하여도 정확한 해석결과를 얻을 수 있다.

2) 공기주입 과정($1.5\sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 의 공기압 범위)에서 강성이 강한 트레드 부분의 r -방향 변형률은 사이드월의 z -방향 변형률에 비해 상대적으로 작고, 강성이 약한 사이드월의 변위량이 상대적으로 크기 때문에 사이드월은 볼록하게 부풀고 트레드부위는 더욱 편평해진다.

3) 사이드월부 최외곽점의 변형률은 내압이 증가함에 따라 그 증가율이 둔화되는 반면, 크라운 중심의 변형률은 공기압에 비례하여 증가한다.

4) 동일 내압에서 벨트각이 증가하면 트레드의 반경방향 변형률은 증가하고 사이드월의 축방향 변형률은 감소한다.

5) 벨트 코드에 걸리는 힘의 분포는 크라운 중심부에서 거의 일정하며, 벨트모서리 부근에서 급격히 작아져 영에 접근한다. 또한 벨트각이 증가할수록 크라운 중심부의 벨트 코드에 걸리는 힘이 증가한다.

6) 벨트#1과 #2사이의 층간 전단변형률은, 벨트에 걸리는 힘이 급격히 감소하는 부분에 존재하며, 벨트코드에 걸리는 힘의 변화가 거의 없는 곳에서는 층간 전단변형률이 거의 영이다. 또한 벨트각이 증가할수록 층간 전단변형률 값은 증가한다.

References

- 1) W. W. Curtiss, "Principles of Tire Design," Tire Science and Technology, Vol.2, No.1, pp.77-98, 1973.
- 2) K. O. Kim, "The Application of CAE to Tire Research and Development," Journal of KSME, Vol.31, No.4, pp.348-355, 1991.
- 3) H. P. Patel, C. F. Zorowski, "Deformation of the Pneumatic Tire," Tire Science and Technology, Vol.6, No.4, pp.233-247, 1978.
- 4) R. H. Kennedy, H. P. Patel, M. S. McMinn, "Radial Truck Tire Inflation Analysis: Theory and Experiment," Rubber Chemistry and Technology, Vol.54, pp.751-766, 1981.
- 5) R. A. Ridha, "Computation of Stresses, Strains, and Deformations of Tires," Rubber Chemistry

- and Technology, Vol.53, pp.849-902, 1980.
- 6) R. A. Stechschulte, J. R. Luchini, "A Laminated Composite Solid Element and its Application to Tire Analysis," *Tire Science and Technology*, Vol.15, No.1, pp.42-57, 1987.
 - 7) K. Satyamurthy, L. R. Hirschfeld, "An Axisymmetric Finite Element and Its Use to Examine the Effects of Construction Variables on Radial Tires," *Tire Science and Technology*, Vol.15, No.2, pp.97-122, 1987.
 - 8) T. M. Kenny, R. A. Stechschulte, "Applications of Finite Element Analysis in Tire Design," *Tire Science and Technology*, Vol.16, No.2, pp.96-117, 1988.
 - 9) R. Gall, F. Tabaddor, D. Robbins, P. Majors, W. Shepherd, S. Johnson, "Some Notes on the Finite Element Analysis of Tires," *Tire Science and Technology*, Vol.23, No.3, pp.175-188, 1995.
 - 10) H. W. Kim, K. Z. Cho, "A Study for the Prediction of a Tire Cornering Characteristics Using a Finite Element Method", *Transactions of the KSAE*, Vol.6, No.1, pp.151-162, 1998.
 - 11) N. J. Kim, K. W. Kim, "New Tire Contour Theory, Uniform Swelling Contour Theory, and Its Application on Passenger Car Tires," *Transactions of KSAE*, Vol.7, No.3, pp.234-240, 1999.
 - 12) Robecchi, Edoardo and Amiei, Luigi, "Mechanics of the Inflated Tire," *Tire Science and Technology*, Vol.1, No.3, pp.290-345, 1973.
 - 13) H. K. Brewer, "Prediction of Tire Stress and Deformation from Composite Theory," *Tire Science and Technology*, Vol.1, No.1, pp.47-76, 1973.
 - 14) ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc., 2001.
 - 15) M. A. Crisfield, *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures: Advanced Topics*, John Willey & Sons, 1997.
 - 16) M. Kumar, "Experimental Characterization of Mechanical Behavior of Cord-Rubber Composites," M. S. Thesis, Mechanical Engineering, University of Oklahoma, Norman, OK, 1981.
 - 17) E. Tönük, Y. S. Ünlüsoy, "Prediction of Automobile Tire Cornering Force Characteristics by Finite Element Modeling and Analysis," *Computers & Structures*, Vol.79, pp.1219-1232, 2001.