

FEM을 이용한 타이어의 벨트각도에 따른 강성 및 PRAT 특성 연구

성기득*(넥센타이어(주) 기술연구소), 김성래(넥센타이어(주) 기술연구소),
김기현(넥센타이어(주) 기술연구소), 김선주(넥센타이어(주) 기술연구소),
조춘택(넥센타이어(주) 기술연구소)

A Study on Characteristics of Stiffness and PRAT due to the Belt Angle of Tire using FEM

K. D. Sung(R&D Center, Nexen Tire), S. R. Kim(R&D Center, Nexen Tire),
K. H. Kim(R&D Center, Nexen Tire), S. J. Kim(R&D Center, Nexen Tire),
C. T. Cho(R&D Center, Nexen Tire)

ABSTRACT

The paper has analyzed the influence of tire design variable on the tire Force and Moment (F&M) characteristics, especially by the belt angle, the Plysteer Residual Aligning Torque (PRAT) which is considered as one of the causing factors for the vehicle pull.

To validate the tire FE model, the tire stiffness and the PRAT which can be derived from the simulation data have been compared with the experimental data of test machine.

In addition to PRAT characteristic, the tire stiffness and cornering characteristics due to the belt angle have been investigated. The effects of drum's curvature on the PRAT have been also investigated using the tire FE model and the usefulness of the current drum type F&M test machine can be confirmed.

Key Words : Vehicle Pull(차량 쏠림), Belt Angle(벨트각도), Vertical Stiffness(종강성), Lateral Stiffness(횡강성), Slip Angle(슬립각), PRAT(Plysteer Residual Aligning Torque, 플라이스티어 잔류 복원 토크), F&M Test(Force and Moment 시험)

1. 서론

타이어는 차량의 하중을 지지하는 기본적인 역할 뿐만 아니라, 운전자의 안전을 보장해야 하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한, 차량의 성능이 우수해짐과 더불어 소비자의 요구가 까다로워짐에 따라 타이어에도 요구하는 특성들이 점차 늘어나고 있는 실정이다.

타이어에 요구되는 특성들은 기본적인 차량하중 지지 능력과 더불어 차량의 성능과 연관되어 제동/구동력, 직진성, 조종안정성, 승차감 등이 있다. 뿐만 아니라, 소비자의 요구에 따라 저소음화, 경량화, 저연비화 등의 요구도 거세지고 있는 실정이다.

이런 여러 특성들 중 최근에 도로조건의 개선과 차량성능의 향상으로 차량의 직진성을 위한 차량 쏠

림(Vehicle Pull) 현상의 연구에 대한 요구가 점차 늘어나고 있다.

국내의 많은 타이어 회사에서 이에 대한 연구^{1,4}에 많은 시간과 투자를 아끼지 않고 있다.

차량의 쏠림과 관련된 타이어의 특성인자로서 PRAT(Plysteer Residual Aligning Torque)와 PRCF(Plysteer Residual Cornering Force)가 있으며 이들의 값을 제어함으로써 차량의 쏠림을 제어 할 수 있다. 이들의 값을 제어하기 위한 타이어의 설계 인자로서 벨트각도(Belt Angle)와 패턴형상이 연구대상으로 사용되고 있다. 이것은 설계인자만 고려하였을 때 쏠림에 영향을 미치는 타이어 구조의 비대칭성의 존재가 벨트각도와 패턴형상이기 때문이다.

이에 본 연구에서는 타이어 개발 시 개발비와 개발기간을 단축시키기 위한 방법으로 많이 사용되고

있는 유한요소법을 이용하여 차량의 쏠림 현상에 대한 연구를 수행하고자 한다.

우선, 벨트각도와 관련된 연구로서, 패턴의 비대칭성이 없는 상태의 종그루브만 존재하는 타이어에 대해서 벨트각도에 따른 강성(종강성(Vertical Stiffness, 횡강성(Lateral Stiffness)) 특성과 PRAT 특성을 파악하였다. 또한, 실차 평가에서의 코너링 특성을 실내평가인 F&M 시험(Force & Moment Test)으로서 예측하는 방법을 응용하여, F&M 시뮬레이션의 데이터를 이용하여 벨트각도에 대한 코너링 특성을 파악하였다. 또한, Drum 방식의 곡률효과를 파악하기 위해 Drum 방식과 Flat 방식의 PRAT 값을 시뮬레이션을 통하여 서로 비교해 보았다.

본 해석모델의 검증은 위해서 종강성, 횡강성, PRAT값을 시험과 비교하였다.

2. 유한요소해석 모델

본 연구에서 사용된 타이어의 종류는 185/65R14 이며 패턴 형상은 패턴 블럭의 영향을 배제하기 위해서 메인 그루브(중그루브) 3개가 있는 경우로 설정하였다. 벨트각도는 19도, 20도, 22도, 24도로 설정하였다. Fig. 1은 벨트각도를 나타낸 그림이다.

Fig. 2는 본 연구에서 2차원, 3차원 해석에 각각 사용된 유한요소 모델이다. 3차원 모델의 경우 사용된 총 요소수는 18,310개이며, 노드 수는 33,830개이다. 코드들은 Rebar 요소를 사용하였으며, 고무 재료는 Mooney-Rivlin 함수를 사용하여 비선형 거동을 표현하였다.

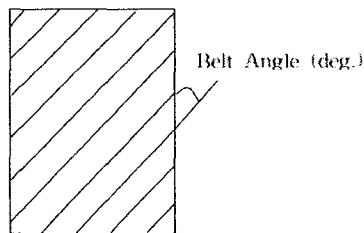
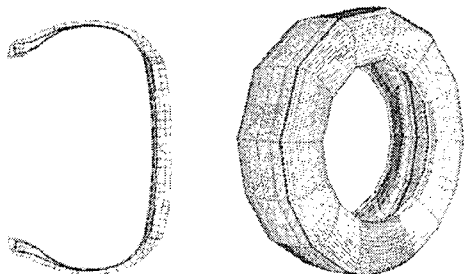


Fig. 1 Belt Angle of Tire.



(a) 2-D F. E. model (b) 3-D F. E. model

Fig. 2 Finite element models for 2-D and 3-D analyses.

해석 프로그램은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.5를 사용하였다.

3. 해석결과

3.1 종강성, 횡강성 특성

3.1.1 시험과 비교

해석 모델의 타당성 검증을 위하여, 시험(Test)과 같은 조건으로 해석을 수행하였다. 종강성의 경우, 기준하중 431kgf (4223.8N)을 주었으며, 공기압은 2.1kgf/cm² (2.06e5 N/m²)을 주었다. 이때, 종강성 값은 시험기와 같은 방법인 기준하중의 ? 0kgf (? 90.5N) 때의 변위를 이용하여 식(1)과 같이 구하였다. 횡강성의 경우, 시험과 동일하게 횡력을 변위 제어 하였으며, 횡력이 50kgf (490.5N) 일 때의 변위 값을 이용하여 식(2)와 같이 구하였다. Fig. 3은 강성 해석을 위한 유한요소 모델과 시험한 그림이다. 이때 타이어의 벨트각도는 24도이다.

종강성 K_v

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

여기서, F_z : 기준하중

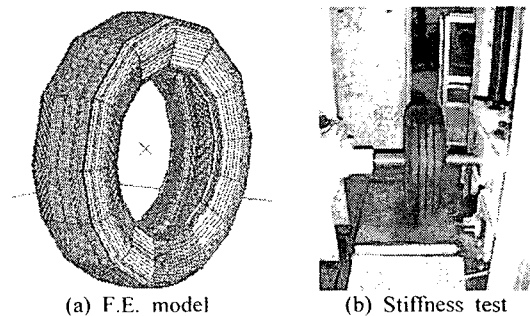
u_+ : 축하중 $F_z + 50\text{kgf}$ 일 때의 종변위

u_- : 축하중 $F_z - 50\text{kgf}$ 일 때의 종변위

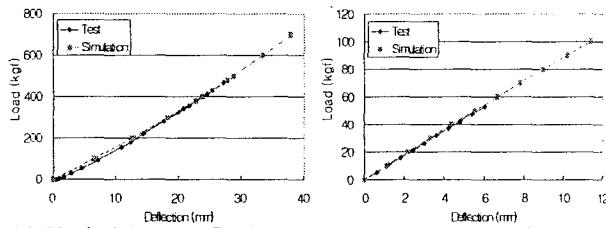
횡강성 K_L

$$K_L = \frac{50\text{kgf}}{u_L} \quad (2)$$

여기서, u_L : 50kgf일 때의 횡변위



(a) F.E. model (b) Stiffness test
Fig. 3 F. E. model for stiffness simulation and picture for stiffness test.



(a) Vertical Load-Deflection (b) Lateral Load-Deflection
 Fig. 4 Vertical and lateral load-deflection curves of simulation and test.

Table 1 Comparison of vertical and lateral stiffness about simulation and test.

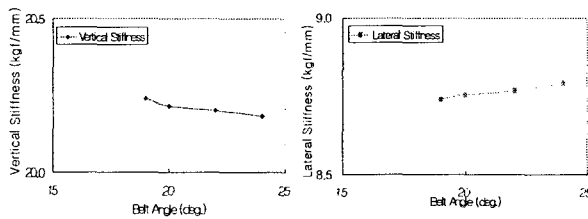
	Simulation (kgf/mm)	Test (kgf/mm)	Error (%)
Vertical Stiffness	20.18	19.51	3.4
Lateral Stiffness	8.79	9.12	3.7

Fig. 4는 종강성 및 횡강성의 시험과 해석의 하중-변위 곡선을 도시한 그림이며, Table 1은 그 강성 값을 비교한 표로서, 해석이 약 3%의 오차로 시험과 잘 일치함을 볼 수 있다. 이로서, 벨트각도에 대한 특성을 파악하는데 있어서, 본 해석 모델의 타당성이 검증 되었다고 볼 수 있다.

3.1.2 벨트각도에 따른 강성 변화

Fig. 5는 벨트각도에 따른 종강성과 횡강성 변화를 도시한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이, 벨트각도에 따라 종강성과 횡강성의 변화는 크지 않다. 그러나, 그 경향은 종강성은 벨트각도가 증가함에 따라 작아지는 경향을, 횡강성은 커지는 경향을 보였다. Olatunbosun⁴은 벨트각도에 대한 종강성 변화에 대하여 연구를 수행하였는데, 본 연구와 일치하는 경향을 보였다.

벨트각도에 따른 이러한 경향은 동특성과도 상관성이 있으므로 이에 관련한 관계 파악이 필요하다. (3.3절 참조)



(a) Vertical stiffness (b) Lateral stiffness

Fig. 5 Vertical and lateral stiffness due to the belt Angle.

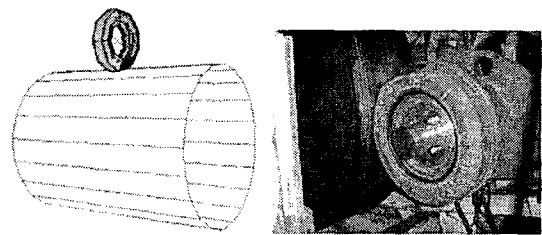
3.2 PRAT 특성

3.2.1 시험과 비교

F&M(PRAT) 해석은 자사 보유 시험기와 같은 조건인 드럼타입(Drum Type)으로 해석하였다. 속도는 30km/h로 설정하였으며, 슬립각(Slip Angle)은 -1.5~1.5도로 설정하여 횡력(Lateral Force)과 복원토크(Aligning Torque)를 구하였다. 하중은 431kgf (4223.8N)을 가하였다.

우선, 해석의 타당성 검토를 위하여, 벨트각도 24도에 대한 PRAT 값을 시험과 비교하였다. Fig. 6은 해석모델과 시험한 그림이다.

Fig. 7은 벨트각도 24도에 대한 슬립각에 따른 횡력과 복원토크 그래프이다. Table 2는 시험과 해석결과를 비교한 표이다. PRAT 값이 7% 정도의 오차로 잘 일치하였다.



(a) F.E. model (b) F&M test

Fig. 6 F. E. model for F&M simulation and picture of F&M test.

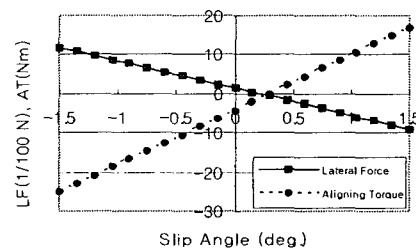


Fig. 7 F&M graph by simulation

Table 2 Comparison of PRAT about simulation and test.

	Simulation (Nm)	Test (Nm)	Error (%)
PRAT	-1.20	-1.12	7.1

3.2.2 벨트각도에 따른 PRAT 변화

Fig. 8은 벨트각도에 따른 PRAT 값을 표시한 그래프로서, 그림에서 보는 바와 같이 벨트각도가 감소함에 따라서 PRAT 값이 “-” 방향으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 벨트각도가 감소함에 따라서 차량의 쏠림은 왼쪽으로 생기는 경향이 있다는 것을 의미한다. 즉, 차량의 쏠림이 왼쪽으로 생기는 경우에는 벨트각도를 크게 되도록 설계 하여 쏠림을 줄일 수 있고, 차량의 쏠림이 오른쪽으로 생기는 경우에는 벨트각도를 작게 되도록 설계하여 쏠림을 줄일 수 있는 설계 가이드 라인이 될 수 있다. 물론, 이 설계 가이드 라인은 다른 특성을 제외한 쏠림의 경우에만 해당되며, 실제 설계 시는 다른 특성까지 고려한 벨트각도를 설정하여야 할 것이다.

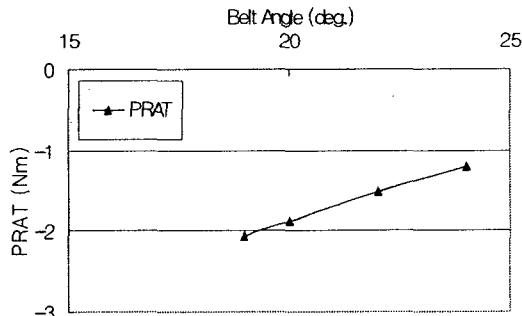


Fig. 8 PRAT variation due to the belt angle.

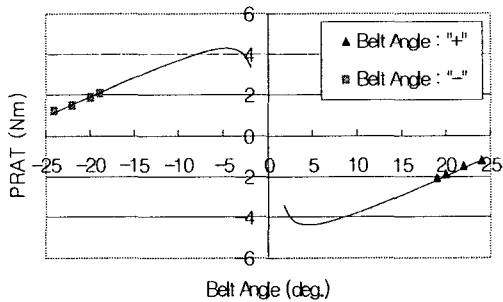


Fig. 9 PRAT variation due to the reverse belt angle.

Fig. 9는 벨트각도가 반대인 경우를 사용한 타이어에 대한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 정방향과 비교했을 때 완전히 점대칭 되는 경향으로 나오는 것을 볼 수 있다. 이것은 실제의 경우에는 제조 오차가 존재하므로 완전한 점대칭은 이루어지지 않을 수 있다. 그러나, 시뮬레이션은 제조 오차를 완전히 배제한 경우이므로 완전한 점대칭으로 나오고 또한, 이것은 해석모델이 타당하다는 것을 보여주는 또 하나의 증거로 볼 수 있다.

그리고, 벨트각도가 현용보다 더 작은 경우(데이터는 표시하지 않았음)를 해석을 해보면 그림에서

보는 바와 같은 경향을 이룬다. 벨트각도가 감소함에 따라 PRAT 값은 “-” 방향으로 커지다가 어느 한 계에서는 횡력의 감소 추세전환으로 인해서 PRAT 값이 줄어드는(절대값 기준) 것을 볼 수 있다.

3.3 코너링 특성

Fig. 10은 벨트각도 19도와 24도에 대한 슬립각 -10도와 10도 사이에서의 코너링 해석을 한 결과이다. Fig. 11은 Fig. 10의 그래프에서 벨트각도에 대한 코너링 특성을 알아보기 위해서 SAE 좌표계에 준하여 슬립각 -10도에서 0도까지의 횡력을 도시한 그림이다.(본 논문에서는 “Cornering Force”와 횡력의 구분을 안두었음) 그래프에서 보는 바와 같이 슬립각 0도에서의 횡력은 19도가 크나, 슬립각이 커짐에 따라 횡력이 24도가 커지는 것을 볼 수 있다. 즉, 벨트각도가 커짐에 따라 코너링 파워(Cornering Power)가 커진다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Olatunbosun⁴의 연구와 일치하는 결과로, 벨트각도가 커지면 커질수록 응답성이 좋다는 것을 의미한다. 본 연구에서의 타이어 모델의 경우, 코너링 파워가 벨트각도 19도는 677 N/deg., 24도는 694 N/deg. 이다.

3.1 절에서의 정특성과 비교해 보았을 때, 코너링 특성은 횡강성의 경향과 일치하는 경향을 보였다. 즉, 횡강성의 정특성은 코너링 강성의 동특성과 비례하는 상관성이 있다고 볼 수 있다.

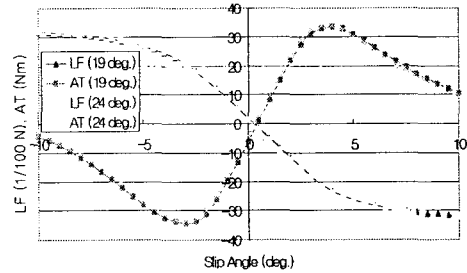


Fig. 10 F&M graph by cornering simulation.

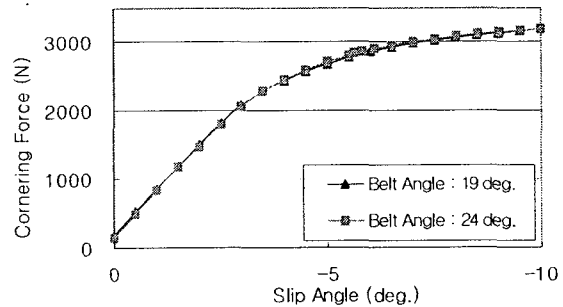


Fig. 11 Cornering force due to the belt angle.

3.4 Flat 과 Drum Type의 곡률 효과 비교

실제, 차량주행에 가까운 형태의 시험기는 Flat Type의 시험기이다. 그래서 본 논문에서는 Drum Type 시험기의 효용성(드럼 곡률의 효과)을 해석을 통하여 알아보았다. 현용 Drum Type 시험기의 곡률반경은 853.8 mm (직경 1707.6 mm)이다. 본 연구에서는 벨트각도 24도에 대하여 Flat Type과 드럼의 곡률반경 500mm, 853.8mm(현용), 1000mm에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 4는 그 결과를 나타낸 그래프로서, 그림에서 보는 바와 같이 현용은 Flat Type과 약 8% 정도의 차이가 난다. 곡률반경 500 mm의 경우와 비교 하였을 때는 20% 이상의 큰 차이를 보이고 있고, 곡률반경 1000 mm와 비교할 때는 차이를 보이지 않는다. 그래서 현용의 곡률반경을 가진 Drum Type은 Flat Type의 시험기를 대용할 수 있다고 판단되어 진다.

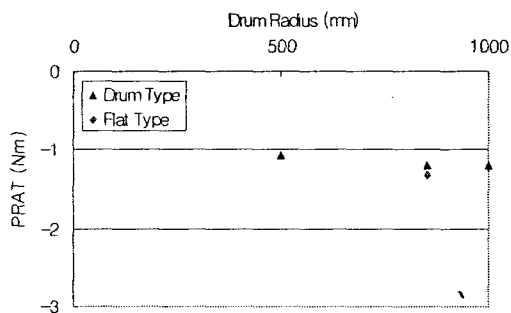


Fig. 12 PRAT variation due to the drum radius.

4. 결론

유한요소해석 기법을 이용하여 시험과 해석모델의 타당성을 먼저 검증하였다. 타당성 검증 후, 타이어의 벨트각도에 따른 정특성(종강성, 횡강성)과 동특성(PRAT, 코너링 강성)에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 벨트각도의 커짐에 따라서 종강성은 작아지는 경향을, 횡강성은 커지는 경향을 보인다. 그러나, 본 연구에서의 타이어의 경우 그 차이는 미비하였다.
- 2) 벨트각도의 정방향 각도, 역방향 각도, 모두 벨트각도가 커짐(절대값 기준)에 따라서 PRAT는 감소(절대값 기준)하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 슐림(Pulling)을 고려한 타이어의 설계 시 설계기준이 될 수 있다.
- 3) 벨트각도가 커짐에 따라 코너링 강성은 증가한다. 이러한 코너링 특성은 정특성 중 횡강성

과 밀접한 관련성을 가진다.

- 4) Drum Type 시험기의 곡률효과를 알아본 결과, Drum Type의 시험기는 Flat Type 시험기를 대용할 수 있다.
- 5) 추후, PRAT에 더 큰 영향을 미치는 설계 인자로 알려져 있는 패턴 형상에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Sang-Hyun Oh, Young-Hee Cho, Gwanghun Gim, "Identification of A Vehicle Pull Mechanism," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.
2. KAZUYUKI KABE, MASATAKA KOISHI, "Tire Cornering Simulation Using Finite Element Analysis," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 78, pp. 1566-1572, 2000.
3. Ohishi K, Suita H, Ishihara K, "The Finite Element Approach to Predict the Plysteer Residual Cornering Force of Tires," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 30, No. 2, pp. 122-133, 2002.
4. Olatunbosun O. A., Bolarinwa O., "FE Simulation of the Effect of Tire Design Parameters on Lateral Forces and Moments²," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 32, No. 3, pp. 146-163, 2004.
5. 이정환, 이주완, "타이어와 차량 슐림 I - 시험결과," 한국자동차공학회, 제8권, 제4호, pp. 194-201, 2000.
6. 김기운, 정현성, 조진래, 양영수, "트레드 블록을 고려한 타이어의 잔류 복원 토크 및 마찰 에너지에 대한 유한요소해석," 한국자동차공학회, 제12권, 제4호, pp. 173-180, 2004.