

# 정상 상태 롤링 해석 기법 적용을 통한 타이어 패턴 형상에 따른 PRAT 특성 연구

성기득\* · 박현만 · 구병국 · 조춘택

넥센타이어(주) 기술연구소

## The Study on PRAT Performance due to Tire Pattern Shapes using Steady State Rolling Analysis Method

Kideug Sung\* · Hyunman Park · Byongkook Koo · Choontack Cho

R&D Center, Nexen Tire Co., 30 Yusan-dong, Yangsan-si, Gyeongnam 626-230, Korea

(Received 26 May 2007 / Accepted 14 February 2008)

**Abstract** : It is generally known that the PRAT(Plysteer Residual Aligning Torque) is one of indicating a performance factors of a tire for assessing the vehicle pull, also tire pattern shape, which means lateral groove angle, is very important tire design factor in relation to the PRAT. Lateral grooves of tire pattern are widely divided into center and shoulder parts. So, this paper has studied the correlation between the PRAT and their lateral groove angles using FEM. Especially, the steady state rolling analysis among tire rolling analysis methods has been used for the PRAT performance study.

Firstly, analysis result data have been compared with the experimental data to validate FE analysis for PRAT. Next, the PRAT due to the lateral groove angle about PCR(Passenger Car Radial) tire and SUV tire has been analyzed. The tendency of the PRAT due to the lateral groove angles can be used as a guide line for the tire design in relation to vehicle pull.

**Key words** : Steady state rolling analysis(정상 상태 롤링 해석), Vehicle pull(차량쏠림), Slip angle(슬립각도), Lateral force(횡력), Aligning torque(복원토크), PRAT(Plysteer Residual Aligning Torque; 플라이스티어 잔류 복원 토크), Lateral groove angle(횡그루브 각도)

### Nomenclature

$\alpha$  : slip angle, degree

$\Theta$  : lateral groove angle, degree

### 1. 서론

타이어 특성들 중 최근에 도로조건의 개선과 차량 성능의 향상으로 차량의 직진성을 위한 차량 쏠림(Vehicle Pull) 현상에 대한 연구가 많이 이루어지

고 있다. 국내외 많은 타이어 회사에서 이에 대한 연구<sup>1-11)</sup>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 이 값들은 차량의 쏠림을 제어 할 수 있는 방법 중의 하나로 사용 된다.

이러한 타이어 특성 인자는 일반적으로 타이어 설계인자 중 타이어 구조의 비대칭성으로 표현 될 수 있는 벨트각도와 패턴형상과 관련이 있으며, 특

\*Corresponding author, E-mail: kdsung36@nexentire.co.kr

히 패턴 형상이 더 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 또한, 최근에는 이러한 연구에 있어서, 타이어 개발 시 개발비와 개발기간을 단축시키기 위한 방법으로 유한요소법을 많이 사용하고 있다.<sup>1-7)</sup>

이와 관련한 연구로서 성 등<sup>1)</sup>은 3차원 패턴을 고려한 PRAT 유한요소 해석 방법을 이용하여 대표적인 횡 그루브 3개 타입에 대한 PRAT 연구를 수행하였다. 그러나, 횡 그루브는 센터부와 솔더부로 나누어져 있으며 이들 각각은 그 영향성이 다른데, 이에 대한 영향성은 검토되지 않았다. 또한, 김 등<sup>2)</sup>은 타이어 횡 그루브 센터부와 솔더부에 각각에 대한 PRAT 시험 및 해석을 통한 연구를 수행하였으나, 아주 일부 횡그루브 각도에 대한 PRAT 영향만을 검토하였다.

그래서, 본 연구에서는 기존 연구를 토대로 차량 쏠림과 관련된 타이어 특성인자인 PRAT와 PRAT에 가장 큰 영향을 미치는 타이어 설계인자로서 알려져 있는 패턴 형상, 즉 솔더부 및 센터부 각각의 횡 그루브 각도 -60도 ~ 60도의 설계 가능한 넓은 범위에 대해서 연구를 수행하고자 한다. 이를 통하여 센터부 솔더부 횡 그루브 각각의 PRAT 영향성을 검토하고자 하며, 또한 PRAT에 영향을 많이 미치는 각도 수준을 파악하고자 한다.

이 결과는 타이어 패턴 설계 초기에 차량 쏠림을 고려한 설계 가이드라인으로서 사용 될 수 있을 것이다.

또한, 본 연구에서는 3차원 패턴을 고려한 타이어 롤링 해석에 있어서 기존에 주로 사용했던 외연적(Explicit) 방법이 아닌, 해석 시간의 효율성을 위하여 정상 상태 해석 기법(Steady State Rolling Analysis Method)을 사용하고자 한다. 정상 상태 해석 기법은 지금까지는 단면의 메쉬 구성이 원주 방향으로 축대칭으로 균일하게 되어야 하는 한계가 있어 3차원 타이어 패턴은 고려하지 못하고, 타이어 내부 구조와 관련된 특성 연구에만 한정되어 사용되어 왔다. 그러나, 최근 들어서 F.E. 해석 코드의 개발로 3차원 패턴 형상을 고려한 정상 상태 롤링 해석이 가능하게 되었다. 즉, 3차원 패턴을 고려한 타이어 해석에 대해서도 해석 시간의 단축 효과를 가지고 롤링 특성 연구를 수행 할 수 있게 된 것이다.

연구 수행 절차를 정리 하면 다음과 같다.

- 1) 3차원 패턴 형상을 고려한 타이어에 대한 정상 상태 롤링 해석 기법 적용
  - 2) PRAT 예측 타당성 검토 : PRAT 예측 결과 시험과 비교 분석
  - 3) 솔더부 횡그루브 각도 변화에 따른 PRAT 해석
  - 4) 센터부 횡그루브 각도 변화에 따른 PRAT 해석
- 본 논문에서 사용된 모든 좌표기준은 Fig. 1과 같은 SAE 좌표계(SAE Coordinate System)를 기준으로 한다.

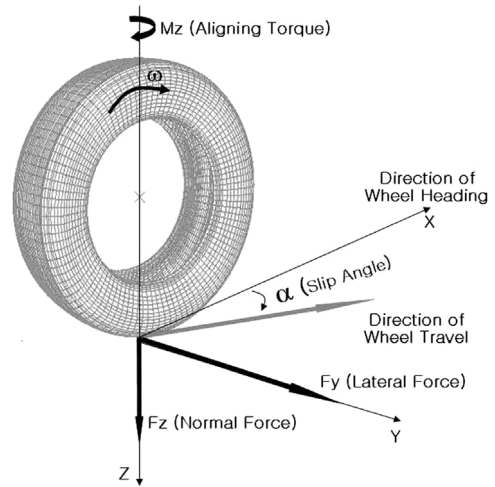


Fig. 1 SAE coordinate system

## 2. 관련 이론

PRAT는 차량 쏠림(Vehicle Pull)과 관련되어 있는 타이어의 특성 인자로서 SAE 좌표계를 기준으로 하였을 경우, 일반적으로 “-” 부호인 경우 차량이 왼쪽으로 가려는 경향을, “+” 부호인 경우 차량이 오른쪽으로 가려는 경향을 보인다. 그러나, 모든 차량에 대해서 일률적이지 않고, 차량과 타이어에 따라서 그 특성이 달리 나타난다.<sup>8,9)</sup>

$$PRAT = \frac{RAT_{cw} + RAT_{ccw}}{2} \quad (1)$$

Fig. 2는 전형적인 Force & Moment 선도를 나타낸 그래프로서 이 그래프를 이용하여 PRAT 값을 식(1)로서 구할 수 있다.

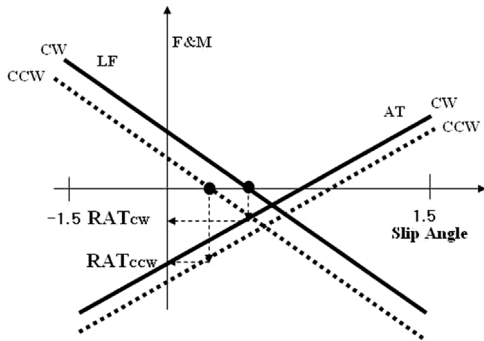


Fig. 2 Force and moment graph

### 3. 정상 상태 롤링 해석 기법 (Steady state Rolling Analysis Method)

서론에서 언급한 바와 같이 3차원 패턴을 고려한 타이어의 PRAT 해석을 수행하기 위해서 ABAQUS Ver. 6.6에서 제공한 3차원 패턴 모델링 기법 및 정상 상태 롤링 해석 기법을 사용하였다. 이 기법은 지금까지 외연적(Explicit) 기법으로 해석해야만 하는 3차원 패턴드 타이어에 대한 롤링 특성 연구를 대신할 수 있을 것이다.

Fig. 3은 3차원 패턴드 타이어에 대한 정상 상태 롤링 해석을 위한 모델링 방법을 나타낸 그림이다.

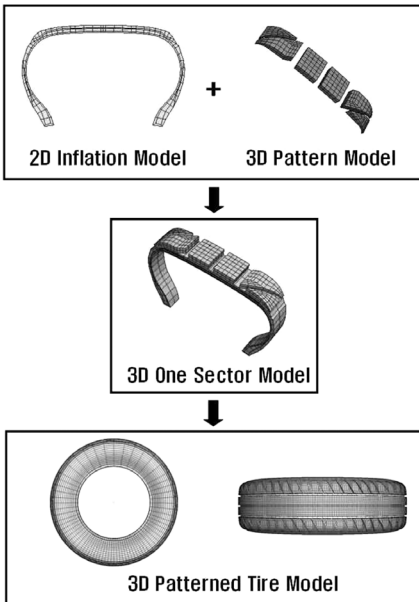


Fig. 3 F.E. modeling method for steady state rolling analysis of patterned tire

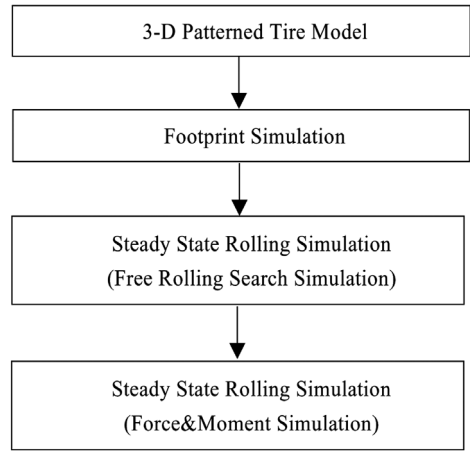


Fig. 4 Flow chart for force & moment simulation

우선, 2차원 공기압(Inflation) 해석을 수행하고, 3차원 한 섹터(Sector)에 대한 패턴 모델링을 수행한다.

다음에, ABAQUS에서 제공하는 3차원 확장 옵션인 SMG(Symmetric Model Generation) 옵션을 사용하여 3차원 한 섹터(Sector)에 대한 패턴에 대한 공기압 해석을 수행한다. 이 결과를 다시 한번 SMG 옵션을 사용하여 완전한 3차원 패턴드 타이어 모델을 만든다. 이때, 해석 시간을 줄이기 위해서 원주 방향으로 관심(접지 부분) 밖 외의 부분은 Coarse 하게 메쉬를 한다.

Fig. 4는 Force & Moment 해석을 수행하는 방법을 나타낸 흐름도(Flowchart)이다. 해석 방법은 모델링 이후, 1단계로 정적 상태의 접지 해석을 수행하고, 2단계로 정상상태 롤링 해석으로 자유구름(Free Rolling) 상태를 찾는다. 마지막으로, 자유구름상태에서 슬립각도 -1도~1도를 주어 Force & Moment 선도를 구한다.

### 4. 해석 결과

해석 변수는 패턴 형상, 즉 솔더부와 센터부의 횡그루브 각도를 각각 -60도, -30도, 0도, 30도, 60도로 설정하였다. Fig. 5는 센터부와 솔더부 횡 그루브 각도를 표시한 그림이다. 대상 타이어는 일반 승용차용 타이어와 SUV 차량용 타이어 각각에 대해서 하나씩 선정하였다. 각각의 타이어 규격은 195/65R15와 235/60R17이다.

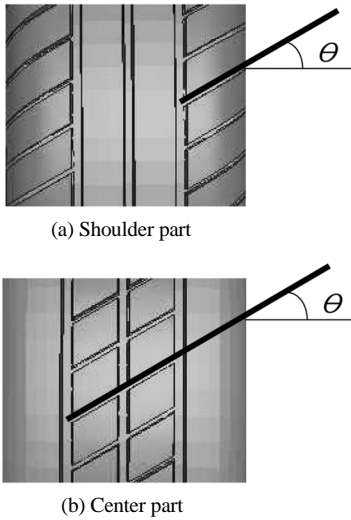


Fig. 5 Lateral groove angle for tire pattern design

### 4.1 시험과 비교

정상 상태 롤링 해석의 PRAT 적용성 검토를 파악하기 위해서 시험결과와 비교하였다. PRAT 시험은 타이어 시험 전문 기관인 Smithers 사의 Flat Trac III 시험기를 이용하여 시험을 하였다. 시험을 위한 타이어는 승용차용 타이어 195/65R15이며 솔더부 횡그루브 각도가 0도, 30도, 60도인 세 개 타입 대해서 시험을 수행하였다. 시험법은 정상 상태 시험법을 사용하였고, 이 시험법은 슬립각도 -1도~1도 사이에서 슬립각도 0.2도 간격으로 11회 시험이 수행이 되고 또한 이를 정방향/역박향 시험을 수행해야 하기 때문에 한번의 PRAT 값을 얻기 위해서 총 22회 시험이 수행된다. 이러한 이유로 슬립각도 -1도~1도 사이를 연속적으로(Sweep) 슬립각도를 주어 시험하는 다이내믹 시험법보다 시간이 많이 걸리는 단점이 있으나 재연성면에서는 우수한 것으로 알려져 있다.

시험의 롤링(Rolling) 속도는 3.5km/h, 하중은 4223.8N(431kgf)이다. Fig. 6은 PRAT 시험 및 해석을 위한 솔더부 횡그루브 각도가 30도인 타이어와 F.E. 해석 모델이다.

Fig. 7은 솔더부 횡그루브 각도 0도, 30도, 60도에 대한 시험과 해석의 PRAT 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 경향은 두 경우 모두 솔더부 횡그루브 각도가 커짐에 따라서 PRAT 값도

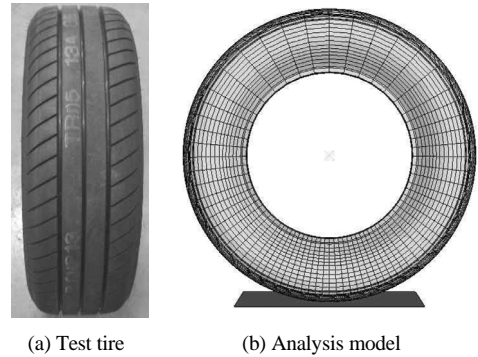
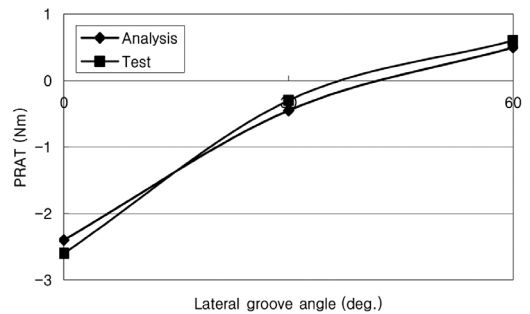
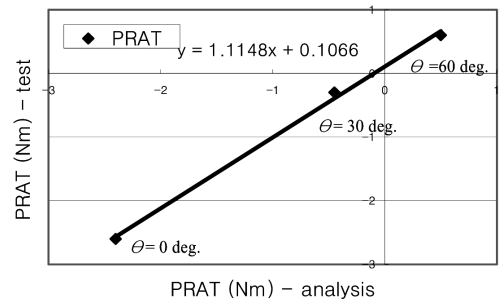


Fig. 6 The PRAT test tire and analysis model



(a) The PRAT comparison of test and analysis



(b) Correlation graph of test and analysis

Fig. 7 The comparison of the PRAT test and analysis due to the lateral groove angle of tire shoulder part

“+” 방향으로 커지고 있음을 알 수 있다. 그리고 그 값도 잘 일치함을 확인할 수 있다.

### 4.2 솔더부 횡그루브 각도에 따른 PRAT 경향

솔더부 횡그루브 각도에 따른 PRAT 경향을 알아보기 위해서, 195/65R15 규격의 승용차용 타이어와 235/60R17 규격의 SUV 차량용 타이어에 대한 솔더부 횡그루브 각도 -60도, -30도, 0도, 30도, 60도에 대

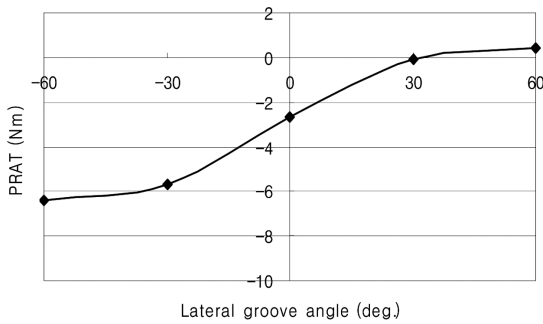


Fig. 8 The PRAT variation due to the lateral groove angle of shoulder part for PCR tire (195/65R15)

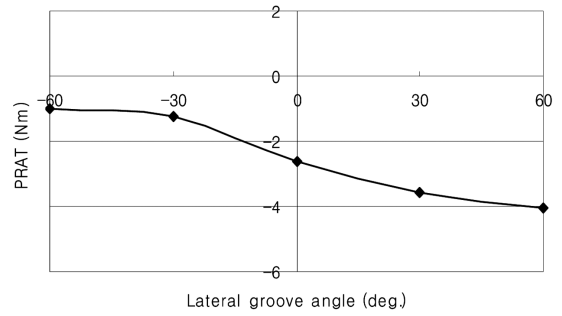


Fig. 10 The PRAT variation due to the lateral groove angle of center part for PCR tire (195/65R15)

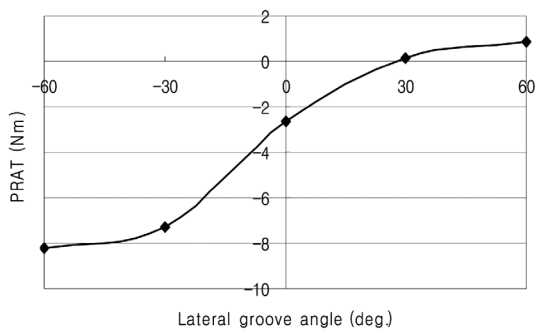


Fig. 9 The PRAT variation due to the lateral groove angle of shoulder part for SUV car tire (235/60R17)

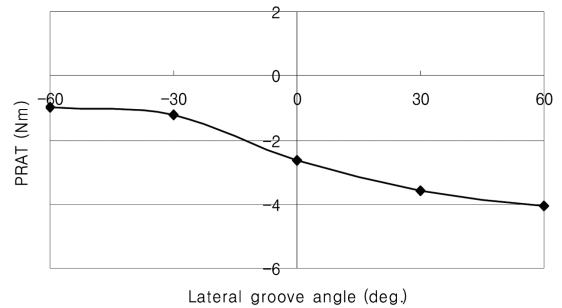


Fig. 11 The PRAT variation due to the lateral groove angle of center part for SUV car tire (235/60R17)

해서 해석을 수행하였다.

Fig. 8과 9는 솔더부 횡그루브 각도에 따른 PRAT 값을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 두 규격 모두 횡그루브 각도가 커짐에 따라서 PRAT 값이 “+” 방향으로 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 그리고, 각도에 대한 PRAT 변화의 민감도는 -30도~30도까지는 값 변화의 폭이 크나, -60도~-30도와 30도~60도는 -30도~30도까지의 값 변화의 폭에 비해서 크지 않음을 알 수 있다.

### 4.3 센터부 횡그루브 각도에 따른 PRAT 경향

센터부 횡그루브 각도에 대한 PRAT 경향을 알아보기 위해서 솔더부와 같은 방법으로 195/65R15 규격의 승용차용 타이어와 235/60R17 규격의 SUV 차량용 타이어의 센터부 횡그루브 각도 -60도, -30도, 0도, 30도, 60도에 대해서 해석을 수행하였다.

Fig. 10과 11은 센터부 횡그루브 각도에 따른 PRAT

값을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 두 규격 모두 횡그루브 각도가 커짐에 따라서 PRAT 값이 “-” 방향으로 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 김 등<sup>2)</sup>의 연구에서도 일부 언급되었지만, 횡그루브 각도 전역에 걸쳐 센터부는 솔더부의 경향과는 반대이다. 각도에 대한 PRAT 변화의 민감도는 솔더부와 같은 경향으로 -30도에서 30도까지는 그 크기의 변화가 크나, -60도~-30도와 30도~60도는 -30도~30도까지의 값 변화의 폭에 비해서 크지 않음을 알 수 있다.

### 4.4 결과

3D 패턴드 타이어를 적용한 정상 상태 롤링 해석 기법을 적용하여 PRAT 해석과 시험의 상관성을 검토하여 해석의 타당성을 검증하였다. 패턴 형상 즉, 솔더부 및 센터부 횡그루브 각도에 따른 PRAT 경향을 분석한 결과, PCR 및 SUV Tire가 같은 경향으로, 솔더부 횡그루브는 각도가 커짐에 따라 PRAT 값이 “+” 방향으로 증가하는 경향을 보이고, 센터부 횡그

루브는 각도가 커짐에 따라서 “-” 방향으로 감소하는 경향을 보임을 확인 하였다. 또한, 각도 변화에 따른 PRAT 변화 민감도는 솔더부 및 센터부 모두 절대값 기준으로 30도 이상(-60도~ -30도, 30도~60도)에서는 30도 이하(-30도~30도)보다 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 솔더부(민감도 0.101 Nm/deg.)와 센터부(민감도 0.033 Nm/deg.)의 횡그루브가 PRAT에 미치는 영향도는 약 7:3 정도로 솔더부의 영향이 큰 것으로 파악되었다. 이러한 경향은 차량 쏘림을 고려한 패턴개발 초기에 설계 가이드라인으로 사용 될 수 있다.

## 5. 결론

3D 패턴드 타이어에 대해 정상 상태 롤링 해석 기법을 이용하여 PRAT 특성 연구의 적용성을 검토하였고, 이를 이용하여 차량 쏘림과 관련된 타이어 특성 인자인 PRAT와 이 PRAT에 가장 큰 영향을 미치는 타이어 설계인자로 알려져있는 패턴형상과의 상관성 연구를 수행하였다. 대상 타이어는 195/65R15 규격의 승용차용 타이어와 235/60R17 규격의 SUV 차량용 타이어로 각각 선정하였다.

연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PRAT 특성 연구를 위하여 3차원 패턴드 타이어에 대한 정상 상태 롤링 해석을 적용하였고, 해석 결과를 시험과 비교 분석 하여 본 기법의 타당성을 검증 하였다. 또한, 본 방법은 슬립각도가 큰 경우의 Force & Moment 선도를 이용한 핸들링 연구 등에도 사용 될 수 있을 것이다.
- 2) 솔더부 횡그루브 각도가 커짐에 따라서 PRAT 값은 “+” 방향으로 증가하는 경향을 보이며, 센터부 횡그루브 각도가 커짐에 따라서는 PRAT 값은 “-” 방향으로 작아지는 경향을 보인다. 즉, 솔더부와 센터부의 횡그루브 각도가 PRAT에 미치는 영향은 서로 상반된다.
- 3) 횡그루브 각도에 따른 PRAT 변화의 민감도는 -30도~30도 사이에서는 PRAT 값이 민감하게 크게 변화하나, -30도 이하와 30도 이상에서는 그 변화가 크지 않다.
- 4) 솔더부와 센터부의 횡그루브 각도가 PRAT값에

미치는 영향은 약 7:3 정도로 솔더부가 더 크다.

- 5) 본 연구는 차량 쏘림을 고려한 패턴 개발 초기에 설계 가이드라인으로 사용될 수 있다.

## References

- 1) K. D. Sung, S. R. Kim, I. S. Son, B. K. Koo, S. J. Kim and C. T. Cho, “The Correlation Study between PRAT, Cornering Stiffness and Tire Design Factors,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1349-1354, 2005.
- 2) K. W. Kim, “Finite Element Analysis of a Steady-State Rolling Tire Taking the Effect Tread Pattern into Account,” Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.1, pp.101-107, 2006.
- 3) K. Kabe and M. Koishi, “Tire Cornering Simulation Using Finite Element Analysis,” Journal of Applied Polymer Science, Vol.78, pp.1566-1572, 2000.
- 4) K. Ohishi, H. Suita and K. Ishihara, “The Finite Element Approach to Predict the Plyster Residual Cornering Force of Tires,” Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.30, No.2, pp.122-133, 2002.
- 5) H. W. Kim and K. Z. Cho, “A Study for the Prediction of a Tire Cornering Characteristics using a Finite Element Method,” Transactions of KSAE, Vol.6, No.1, pp.151-162, 1998.
- 6) K. W. Kim, H. S. Jeong, J. R. Cho and T. S. Yang, “Finite Element Analysis on Residual Aligning Torque and Frictional Energy of a Tire with Detailed Tread Blocks,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.4, pp.173-180, 2004.
- 7) K. D. Sung, S. R. Kim, K. H. Kim, S. J. Kim and C. T. Cho, “A Study on Characteristics of Stiffness and PRAT due to the Belt Angle of Tire using FEM,” Spring Conference Proceedings, KSPE, pp.1371-1375, 2005.
- 8) J. H. Lee and J. W. Lee, “Tire and Vehicle Pull I - Experimental Results,” Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.194-201, 2000.
- 9) S. H. Oh, Y. H. Cho and G. H. Gim, “Identification of A Vehicle Pull Mechanism,” Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.

- 10) T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," Society of Automotive Engineers, pp.195-236, 1992. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Administration, pp.367-467, pp.658-720, 1981.
- 11) S. K. Clark, Mechanics of Pneumatic Tires,