

## 트레드 블록을 고려한 타이어의 잔류 복원 토크 및 마찰 에너지에 대한 유한 요소 해석

김 기 윤<sup>\*1)</sup> · 정 현 상<sup>2)</sup> · 조 진 래<sup>3)</sup> · 양 영 수<sup>4)</sup>

금호타이어(주) 기술연구소 & 전남대학교 기계공학과<sup>1)</sup>  
금호타이어(주) 기술연구소<sup>2)</sup> · 부산대학교 기계공학부<sup>3)</sup> · 전남대학교 기계공학과<sup>4)</sup>

### Finite Element Analysis on Residual Aligning Torque and Frictional Energy of a Tire with Detailed Tread Blocks

Kee-Woon Kim<sup>\*1)</sup> · Hyun-Sung Jeong<sup>2)</sup> · Jin-Rae Cho<sup>3)</sup> · Young-Soo Yang<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>R&D Center, Kumho Tire Co. Inc., & Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University

<sup>2)</sup>R&D Center, Kumho Tire Co. Inc., 555 Sochon-dong, Kwangsan-gu, Gwangju 506-711, Korea

<sup>3)</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>4)</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 2 February 2004 / Accepted 28 May 2004)

**Abstract** : The tread pattern of a tire has an important effect on tire performances such as handling, wear, noise, hydroplaning and so on. However, a finite element analysis of a patterned tire with detailed tread blocks has been limited owing to the complexity of making meshes for tread blocks and the huge computation time. The computation time has been shortened due to the advance in the computer technology. The modeling of tread blocks usually requires creating a solid model using a CAD software. Therefore it is a very complicated and time-consuming job to generate meshes of a patterned tire using a CAD model. A new efficient and convenient method for generating meshes of a patterned tire has been developed. In this method, 3-D meshes of tread pattern are created by mapping 2-D meshes of tread geometry onto 3-D tread surfaces and extruding them through tread depth. Then, the tread pattern meshes are assembled with the tire body meshes by the tie contact constraint. Residual aligning torque and frictional energy are calculated by using a patterned tire model and compared to the experimental results. It is shown that the calculated results of a patterned tire model are in a good agreement with the experimental ones.

**Key words** : Residual aligning torque(잔류 복원 토크), Frictional energy(마찰 에너지), Patterned tire(패턴 타이 어), Tread pattern(트레드 패턴), Tread block(트레드 블록), Finite element analysis(유한 요소 해석)

### 1. 서 론

타이어는 차량이 지면과 접촉하는 유일한 부품으로서, 차량에 의해 요구되는 각종 주행 성능을 최적으로 발휘해야 한다. 이를 위해 타이어의 외곽부

는 지면과 접촉되는 트레드(Tread) 고무층이 존재하고, 이 부위에는 타이어의 종류 및 용도에 따라 여러 가지 모양의 블록과 홈이 배치된다. 이러한 트레드 블록과 홈을 총칭하여 트레드 패턴(Tread pattern)이라고 명명한다. 트레드 패턴은 빗길이나 눈길에서 주행 안정성을 향상시키는 역할을 하지만, 반대로 타이어 소음을 유발시키는 문제점을 발생시킨다.

\*To whom correspondence should be addressed.  
kwkim@tire.kumho.co.kr

또한 트레드 패턴은 타이어의 차량 쏠림, 마모, 수막 현상 등에도 밀접한 영향을 미친다. 따라서 트레드 패턴이 타이어의 각종 주행 성능에 미치는 영향을 설계 단계에서 예측하는 것은 필수적이다. 그러나 트레드 패턴은 매우 복잡한 형상을 취하고 있기 때문에 일반적인 방법으로 유한 요소 모델을 생성하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라, 유한 요소 모델을 생성한다 해도 해석 시간이 상당히 오래 소요되는 문제점이 존재하였다. 이로 인해 기존에 실시되었던 대부분의 유한 요소 해석에서는 트레드 패턴이 전혀 없거나 혹은 원주 방향으로 연속적인 홈만을 반영하는 스무드(Smooth) 타이어로 가정하였다.<sup>1,2)</sup> 그러나 스무드 타이어 모델은 트레드 패턴이 지배적인 영향을 미치는 타이어의 잔류 복원 토크, 마찰 에너지, 수막 현상 등에 대한 유한요소 해석에는 한계성을 드러내었다. 최근 들어, 컴퓨터 계산 성능이 급진적으로 향상되면서 장시간 소요되던 타이어 해석 시간 문제가 해결됨에 따라, 트레드 패턴을 효율적이고 간편하게 모델링하는 방법론이 필요하게 되었다. 본 저자에 의해 발표된 논문<sup>3)</sup>에서는 트레드 패턴을 모델링하는 방법론이 개략적으로만 소개되었으나, 본 논문에서는 패턴 타이어 모델을 생성하는 상세한 알고리즘이 기술되고, 이 패턴 타이어 모델을 이용하여 잔류 복원 토크와 마찰 에너지를 해석한 사례가 소개된다.

## 2. 패턴 타이어 모델링 알고리즘

기존에 패턴 타이어의 해석 모델을 생성하는 방법은, 먼저 상용 CAD 프로그램을 이용하여 타이어의 3차원 CAD 모델을 구성한 다음, 상용 메쉬 프로그램을 이용하여 이에 대한 유한 요소 해석용 메쉬를 생성하는 것이었다.<sup>4)</sup> 그러나 이러한 방법은 상용 CAD 및 메쉬 프로그램에 대한 상당한 수준의 사용 능력이 필요할 뿐만 아니라, 메쉬 모델링에 오랜 시간이 소요되는 단점이 존재한다. 또한 상용 메쉬 프로그램을 이용하여 CAD 모델에 대한 자동 메쉬를 생성하게 되면 일반적으로 사면체의 솔리드 요소가 생성되고 메쉬 형상도 조잡하여 해석 정확도가 저하된다.<sup>5)</sup> 따라서 패턴 타이어에 대한 메쉬를 효율적이고 손쉽게 생성하기 위해서는 타이어 전용 메쉬

프로그램이 필요하다. 타이어 전용 메쉬 프로그램은 타이어의 3차원 CAD 모델 없이, 단지 2차원 트레드 패턴 형상과 타이어 단면 형상을 이용하여 3차원 패턴 타이어 메쉬를 자동으로 생성하도록 개발되었다.

패턴 타이어에 대한 메쉬는 타이어 전용 메쉬 프로그램을 이용하여 Fig. 1에 도시된 절차를 따라서 생성된다. 2차원 패턴 메쉬를 생성한 후에, 이를 3차원 타이어 곡면상으로 매핑하여 육면체의 솔리드 요소를 갖는 트레드 패턴 메쉬를 생성한다. 그리고 2차원 타이어 단면 메쉬를 생성한 후에 이를 360도 회전하여 타이어 본체 메쉬를 생성한다. 최종 패턴 타이어 메쉬는 트레드 패턴 메쉬와 타이어 본체 메쉬를 타이 구속 조건(Tie constraint)을 이용하여 결합함으로써 완성된다.

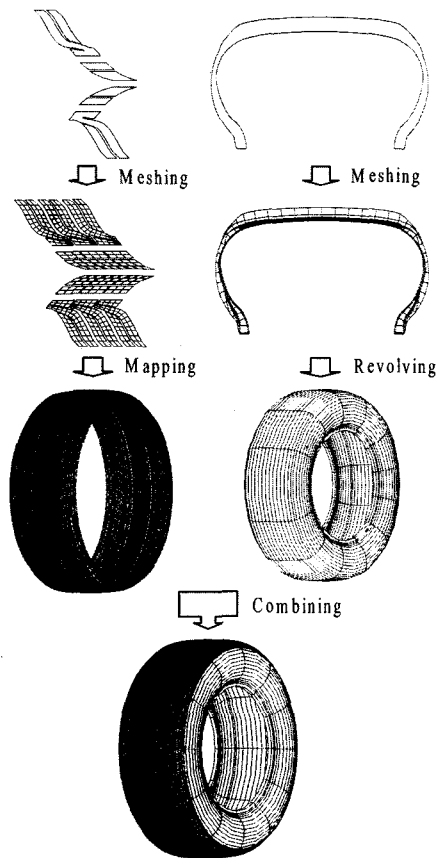


Fig. 1 Finite element modeling process of a patterned tire with detailed tread blocks

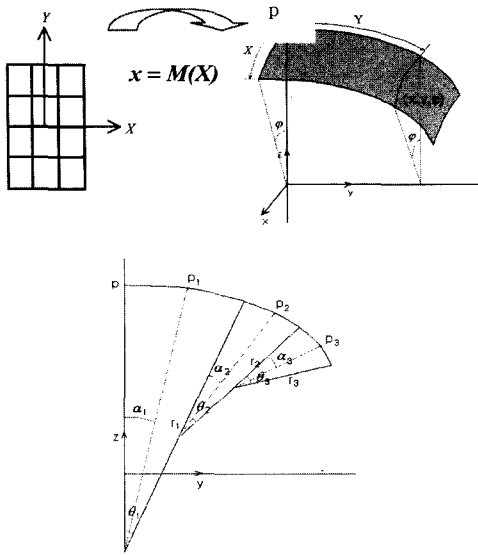


Fig. 2 Mapping of 2-D plane mesh onto 3-D surface mesh

트레드 패턴 메쉬를 생성하기 위해서는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 먼저 2차원 평면 메쉬를 3차원 곡면 메쉬로 다음과 같은 매핑 함수  $M$ 을 이용하여 변환한다.

$$x = M(X)$$

여기서  $X$ 는 2차원 평면상의 좌표이고  $x$ 는 3차원 곡면상의 좌표이다. 2차원 평면 메쉬가 3차원 곡면 메쉬로 변환하는데 사용되는 자세한 매핑 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x &= \left\{ p + r_k \cos(\alpha_k + \sum_{i=1}^k \theta_{i-1}) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^k (r_{i-1} - r_i) \cos(\sum_{i=1}^k \theta_{i-1}) \right\} \sin \phi \\ y &= r_k \sin(\alpha_k + \sum_{i=1}^k \theta_{i-1}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^k (r_{i-1} - r_i) \sin \sum_{i=1}^k \theta_{i-1} \\ z &= \left\{ p + r_k \cos(\alpha_k + \sum_{i=1}^k \theta_{i-1}) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^k (r_{i-1} - r_i) \cos(\sum_{i=1}^k \theta_{i-1}) \right\} \cos \phi \\ \alpha_k &= (Y - \sum_{i=1}^k r_{i-1} \theta_{i-1}) / r_k \\ \phi &= X/p, r_0 = 0, \theta_0 = 0 \end{aligned}$$

여기서  $k$ 는 타이어 y-z 단면상에서 트레드 원호의 갯수이고,  $\theta$ 는 타이어 y-z 단면상의 트레드 원호의

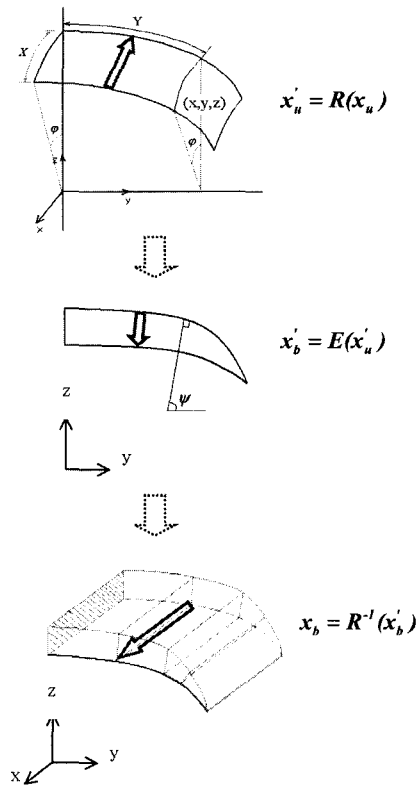


Fig. 3 Mapping of 3-D surface mesh onto 3-D solid mesh

각도이고,  $\phi$ 는 타이어 y-z 단면에 대한 원주방향의 각도를 나타낸다.

3차원 곡면 메쉬는 다시 회전 매핑 함수  $R$ 과 솔리드 매핑 함수  $E$ 를 이용하여 Fig. 3에 도시된 변환 과정을 거쳐 최종적인 3차원 솔리드 메쉬를 형성하게 된다.

$$x_b = R^{-1} E R(x_u)$$

여기서  $x_u$ 는 곡면 매핑 변환을 통해 생성된 트레드의 상부 곡면상의 좌표이고,  $x_b$ 는 회전 및 솔리드 매핑을 통해 생성된 트레드의 하부 곡면상의 좌표이다. 회전 매핑과 솔리드 매핑에 대한 자세한 매핑 함수는 다음과 같이 표현된다.

- Rotation mapping ( $R$ )

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \phi - z \sin \phi \\ y' &= y \\ z &= x \sin \phi + z \cos \phi \end{aligned}$$

- Solid mapping ( $E$ )

$$y'_b = y'_a - h \cos \psi$$

$$z'_b = z'_a - h \sin \psi$$

여기서  $\Psi$ 는 타이어 y-z 단면상의 트레드 원호에 직각인 선과 수평선이 만나서 이루는 각도를 나타낸다.

이와 같이 2차원 평면 메쉬에 대해 연속적인 매핑 과정을 통해 3차원의 솔리드 메쉬로 변환함으로써 트레드 패턴 메쉬가 생성된다. 트레드 패턴 메쉬와 별도로 타이어 본체 메쉬는 Fig. 4에 도시된 단면 메쉬를 360도 회전 매핑함으로써 생성된다. 이렇게 생성된 트레드 패턴 메쉬와 타이어 본체 메쉬를 타이 구속 조건(Tie constraint)을 이용하여 결합시킴으로써 Fig. 5에 도시된 바와 같이 최종적인 패턴 타이어 메쉬가 완성된다.

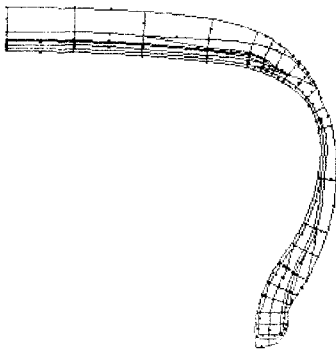


Fig. 4 2-D section mesh of a tire

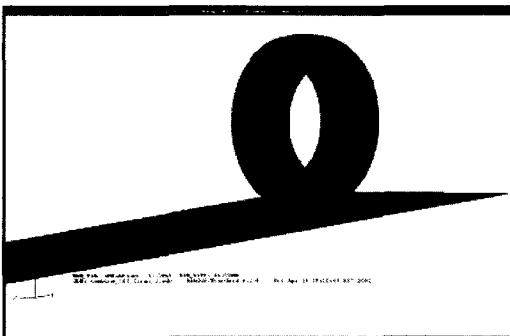


Fig. 5 Finite element model of a patterned tire

### 3. 유한요소 해석 결과

타이어의 잔류 복원 토크 및 마찰 에너지 해석을 위해 사용되는 패턴 타이어 메쉬는 앞절에서 기술

된 알고리즘을 적용한 타이어 전용 메쉬 프로그램을 이용하여 생성하였다. 본체 메쉬는 원주방향의 섹터수를 감소시키기 위해 20개의 절점을 갖는 2차 브릭(Quadratic brick) 요소를 사용하였고, 패턴 메쉬는 해석시간의 단축을 위해 타이어 원주방향에 대해 약 150° 영역에 해당하는 부위에만 적용하였고 지면과의 접촉 해석시에 정확도 향상을 위해 8개의 절점을 갖는 1차 브릭(Linear brick) 요소를 사용하였다. 고무 재료는 Mooney-Rivlin 형태의 변형에너지 함수를 이용하여 비선형 물성을 반영하였다.

$$U = C_{10}(\hat{I}_1 - 3) + C_{01}(\hat{I}_2 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2$$

여기서  $U$ 는 단위 체적당 변형에너지이고,  $C_{10}$ ,  $C_{01}$ ,  $D$ 는 재료 상수이고,  $\hat{I}_1$ ,  $\hat{I}_2$ 는 각각 1차, 2차 Deviatoric strain invariant이고,  $J$ 는 탄성 체적비이다.

벨트와 카카스 등의 복합 재료는 ABAQUS에서 제공하는 Rebar 기능을 이용하여 모델링 하였다.<sup>6)</sup> 또한 림과의 경계조건을 부여하기 위해 림과 접촉이 예상되는 부위를 고정하였다. Fig. 4는 잔류 복원 토크 해석에 사용된 타이어의 2차원 단면 메쉬의 예제이고, Fig. 5는 지면을 포함한 패턴 타이어의 3차원 유한 요소 해석 모델을 나타낸다.

이렇게 구성된 타이어 해석 모델에 대해, 먼저 공기압을 주입한 다음에, 실제 차량 중량에 해당하는 하중을 지면에 부여하였다. 그리고 나서 타이어 회전축에 회전 각도를 적용하여 준정적 회전(Quasi-static rolling)을 구현하였다. 타이어가 회전하면 지면과의 마찰력에 의해 지면이 이동하도록 하였다. 이 후에 타이어의 코너링을 모사하기 위해 타이어 중심축에 일정한 횡력을 부여하였다. 그리고 타이어와 지면간의 마찰계수는 지면 종류, 접촉 압력, 슬립 속도, 지면 온도 등에 따라서 다소 달라지나, 타이어 해석에서 통상적으로 사용되는 1.0을 적용하였다.

### 4. 잔류 복원 토크 해석

승용차용 래디알 타이어의 내측에는 공기압을 지탱하도록 원주방향에 대해 약 90도의 각도로 배치된 섬유 코드 복합체로 이루어진 카카스(Carcass)가

존재한다. 카카스 외측에는 원주 방향에 대해 약 +21/-21도로 배치된 스틸 코드로 구성된 2개의 벨트(Belt)가 차례로 존재한다. 다시 상벨트 외측에는 상벨트 각도와 반대 방향으로 배열된 홈으로 구성된 트레드 고무층이 존재한다.

이와 같이 상벨트층과 트레드 패턴의 각도로 인해 타이어는 슬립 각도가 0인 상태로 직진 주행시에도 횡력과 복원 토크가 발생하게 된다. Fig. 6에 도시된 바와 같이 타이어에 발생하는 횡력이 0이 되는 슬립 각도( $a_2$ )에서 존재하는 타이어의 복원 토크를 잔류 복원 토크(Plyster Residual Aligning Torque, PRAT)라고 한다. 타이어 PRAT는 차량의 직진 주행시에 핸들에서 손을 뗐을 때면 차량이 직진 경로에서 이탈하게 되는 현상인 차량 쏠림(Vehicle pull)과 상당히 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 타이어 PRAT는 벨트 각도와 트레드 패턴상의 홈의 각도에 의해 지배되므로 트레드 패턴을 반영하지 않고는 정확한 계산이 불가능하다.

타이어에 작용하는 횡력과 복원 토크는 1도 이하의 작은 슬립 각도에서 일반적으로 선형성을 보인다. 따라서 0도의 슬립 각도와 1도 근처의 슬립 각도( $a$ )에서 패턴 타이어에 대한 회전 해석을 통해 횡력과 복원 토크를 구하면 다음 식을 이용하여 잔류 복원 토크를 계산할 수 있다.

$$PRAT = \frac{1}{LF_0 - LF_a} (LF_0 AT_a - LF_a AT_0)$$

여기서  $LF_0, LF_a$ 는 각각 0과  $a$ 의 슬립 각도에서 횡력(Lateral force)이고,  $AT_0, AT_a$ 는 각각 0과  $a$ 의 슬립 각도에서 복원 토크(Aligning torque)를 나타낸다.

Fig. 7에 도시된 패턴 형상을 갖는 승용차용 타이

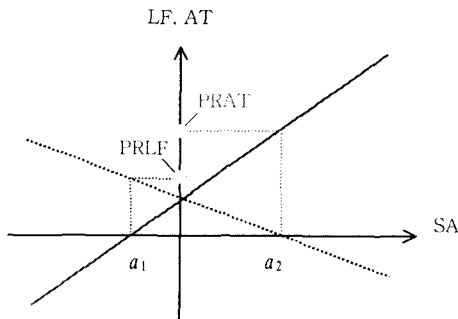
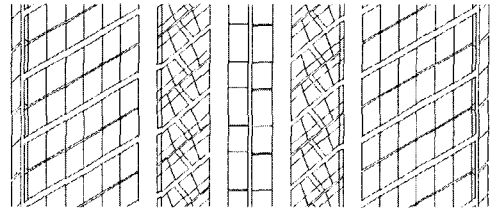
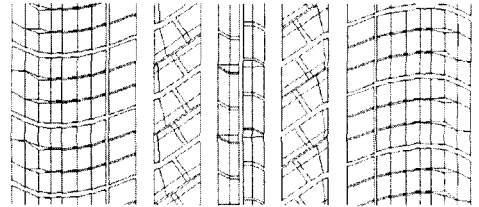


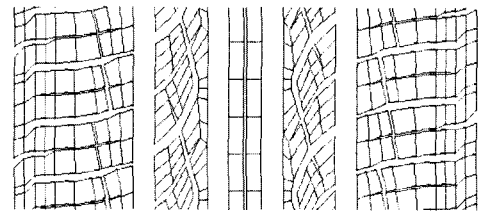
Fig. 6 Schematic for PRAT definition



(a) 205/60R16 A Pattern



(b) 205/60R16 B Pattern



(c) 205/55R16 C Pattern

Fig. 7 Tread pattern geometry for PRAT analysis

어의 3개 제품에 대해, 트레드 패턴을 무시한 스무드(Smooth) 타이어 모델과 트레드 패턴을 고려한 패턴 타이어 모델을 이용하여 잔류 복원 토크를 해석하였다. 또한 타이어 전문 시험소인 Smither's Lab.에서 힘과 모멘트 시험기(Flat Trac III)를 이용하여 동일 타이어에 대한 잔류 복원 토크(PRAT)를 측정하였다. 해석과 시험에서 공히 내부 공기압은 30 psi를 적용하였고, 수직 하중은 440 kgf를 적용하였다. PRAT 해석에서 사용된 타이어 각 부위의 고무와 복합체 물성을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 타이어의 잔류 복원 토크에 대한 해석 결과와 시험 결과를 Table 3에 정리하였고 이를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 패턴 타이어에 대한 PRAT 해석결과는 시험결과와 아주 유사한 경향을 보이나, 스무드 타이어의 해석결과는 시험결과와 상당한 오차가 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 차

Table 1 Rubber material properties for PRAT simulation

	E (psi)	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>
Tread	830	110.7	27.7
Side	570	76.0	19.0
Apex	1,950	260.0	65.0
Flange	1,210	161.3	40.3
Bead	12,484,000	1,664,533.3	416,133.3

Table 2 Composite material properties for PRAT simulation

	Cord			Rubber	
	E(psi)	Angle <sup>1)</sup>	EPI <sup>2)</sup>	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>
Belt	1.603E7	+21/-21	18.8	157.3	39.3
Carcass	3.937E5	90	18.8	89.3	22.3
Capply	2.118E5	0	29.1	293.3	73.3

- 1) Angle은 타이어 단면 중앙부에서 원주방향에 대한 코드의 배치 각도를 나타낸다.
- 2) EPI (Ends Per Inch)는 타이어 단면 중앙부에서 코드의 직각 방향으로 복합체 1 inch내에 배열되는 코드의 개수를 나타낸다.

Table 3 Calculated and experimental results of PRAT (unit : Nm)

제품	해석결과		시험결과
	Smooth	Pattern	
205/60R16 A PTN	-2.76	2.01	2.54
205/60R16 B PTN	-1.51	0.26	0.20
205/55R16 C PTN	-1.69	0.56	0.45

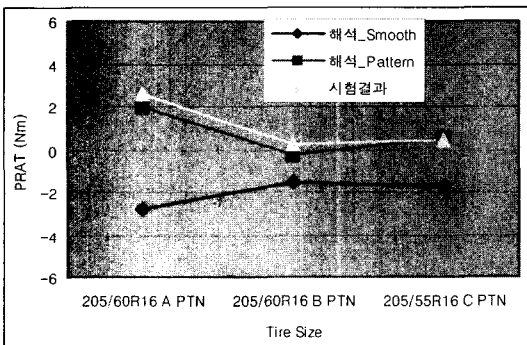


Fig. 8 Calculated and experimental results of PRAT

이를 보이는 이유는 스무드 타이어 모델은 벨트 각도의 영향만을 반영하는데 반해, 패턴 타이어 모델은 패턴 각도의 영향까지 고려하기 때문이다. 따라서 트레드 패턴에 의해 민감하게 영향을 받는 타이

어 PRAT 해석에서는 반드시 트레드 패턴을 고려해야 한다.

### 5. 마찰 에너지 해석

타이어의 장기간 주행시에 발생하는 편마모는 타이어 수명을 좌우하는 중요한 품질 문제중의 하나 이므로, 설계단계에서 편마모가 발생하는지 여부를 예측해야 한다. 타이어 마모량은 접지면에서의 마찰에너지 크기에 비례하고, 마찰에너지는 지면과의 접촉에 의해 발생하는 마찰력과 슬립양을 곱하여 계산된다.<sup>8)</sup>

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^n \{ (F_x)_k^i (S_x)_{ij}^k + (F_y)_k^i (S_y)_{ij}^k \}$$

여기서  $F$ 는 단위면적당 마찰력(Frictional stress)이고,  $S$ 는 슬립양(Slip)이고,  $ij$ 는 지면과 접촉하는 트레드 패턴 메쉬의 노드 위치를 나타낸다.

레저용 차량에 취부되는 타이어인 P255/ 65R16 제품에 대해 직진 주행 해석을 실시하여 마찰 에너지를 계산하였다. 이 해석에서 내부 공기압은 26 psi를 적용하였고 수직 하중은 550 kgf를 적용하였다. 마찰에너지 해석에서 사용된 타이어 각 부위의 고무와 복합체 물성을 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다.

타이어가 직진 주행시에 트레드 패턴의 1개 피치(Pitch)에 걸리는 마찰에너지 분포가 Fig. 9에 도시된

Table 4 Rubber material properties for frictional energy simulation

	E (psi)	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>
Tread	630	84.0	21.0
Side	570	76.0	19.0
Apex	1,720	229.3	57.3
Flange	1,210	161.3	40.3
Bead	12,484,000	1,664,533.3	416,133.3

Table 5 Composite material properties for frictional energy simulation

	Cord			Rubber	
	E(psi)	Angle	EPI	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>
Belt	1.603E7	+24/-24	16.8	157.3	39.3
Carcass	4.782E5	+88/-88	18.1	89.3	22.3
Capply	2.300E5	0	29.0	101.3	25.3

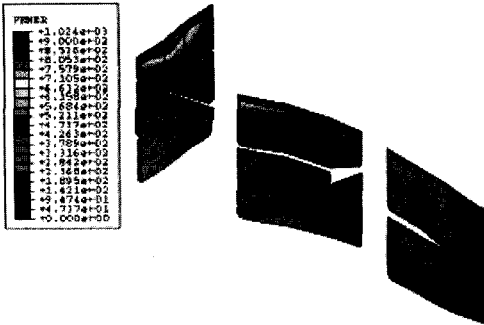


Fig. 9 Calculated result of frictional energy density (contour plot)

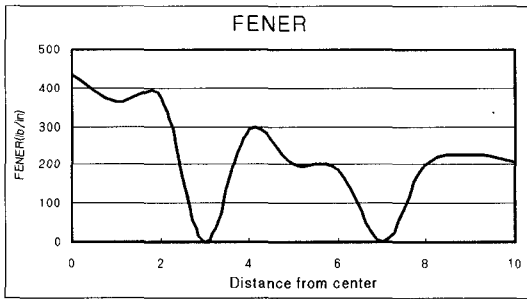


Fig. 10 Calculation result of frictional energy (X-Y plot)

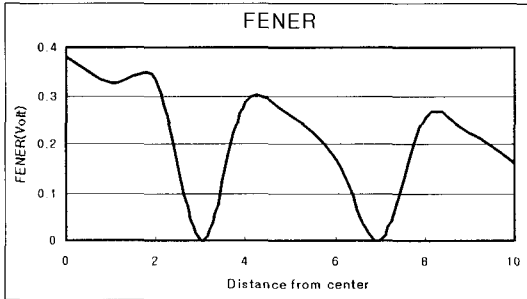


Fig. 11 Experimental result of frictional energy (X-Y plot)

다. 여기에서 트레드 패턴의 좌우 대칭성 때문에 트레드 패턴의 우측 피치에 대한 마찰에너지만을 도시하였다. 타이어의 트레드 패턴이 지면에 닿았다가 떨어질 때까지의 마찰에너지 합산하여, 타이어 단면상의 중앙으로부터 각 위치별 마찰에너지를 계산한 그래프를 Fig. 10에 도시하였다. 또한 금호에서 자체 개발한 마찰에너지 시험기(Flat bed machine)를

이용하여 측정한 시험결과를 Fig. 11에 도시하였다. 마찰에너지 해석결과는 실제 마찰에너지 단위계로 표현되고, 시험결과는 압전 센서를 이용하여 측정하였기 때문에 전압으로 표현되어 직접적인 수치 비교는 어렵다. 그러나 마찰에너지에 대한 해석결과와 시험결과가 상당히 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

패턴 타이어에 대한 마찰에너지 해석을 통해 1개 피치에 걸리는 마찰에너지가 어느 정도 균일하게 분포하는지를 분석함으로써, 타이어의 편마모 발생 여부를 설계 단계에서 진단할 수 있다.

## 6. 결론

트레드 패턴은 타이어의 잔류 복원 토크, 마찰에너지, 수막현상 등에 밀접한 영향을 미친다. 그러나 타이어의 구조 해석에서 트레드 패턴을 모델링하는 것은 상당히 수작업을 필요로 한다. 이를 극복하기 위해, 2차원 트레드 패턴 메쉬와 타이어 단면 메쉬를 이용하여 3차원 패턴 타이어 메쉬를 아주 용이하게 모델링하는 알고리즘을 제시하였다.

이렇게 완성된 패턴 타이어 모델을 이용하여 타이어의 잔류 복원 토크와 마찰 에너지를 해석하였다. 스무드 타이어와 패턴 타이어를 이용하여 잔류 복원 모멘트를 해석한 결과, 패턴타이어 해석결과가 시험결과와 상당히 유사한 경향을 보였다. 또한 패턴 타이어를 이용한 마찰에너지 해석결과도 시험결과와 상당히 유사한 결과를 얻었다. 따라서, 트레드 패턴이 중요한 영향을 미치는 구조 해석에서는 반드시 패턴 타이어를 이용하여야 타이어 성능을 정확히 예측할 수가 있다.

CPU(Central Processing Unit) 1개당 750 Mhz의 성능은 갖는 HP Superdome 컴퓨터에서 2개의 CPU를 이용하여 패턴 타이어 모델에 대한 잔류 복원 모멘트와 마찰에너지를 해석하는데, Wall clock time으로 192 시간(Total CPU time 355시간)의 계산 시간이 소요된다. 따라서 여러 개의 CPU를 이용한 병렬 처리 기능 향상 등 계산 시간을 단축시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

### References

- 1) H. Murakoshi, H. Ide, S. Nishihata, "An Approach to Vehicle Pull Using a Tire Finite Element Model," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.20, No.4, 1992.
- 2) A. A. Goldstein, "Finite Element Analysis of a Quasi-Static Rolling Tire Model for Determination of Truck Tire Forces and Moments," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.24, No.4, 1996.
- 3) K. W. Kim, H. S. Jeong, H. G. Beom, "Transient Dynamic Analysis of a Patterned Tire Rolling over a Cleat with an Explicit Finite Element Program," *Transactions of KSAE*, Vol.11, No.6, 2003.
- 4) M. Shiraishi, H. Yoshinaga, A. Miyori, E. Takahashi, "Simulation of Dynamically Rolling Tire," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.28, No.4, 2000.
- 5) G. Meschke, H. J. Payer, H. A. Mang, "3D Simulation of Automobile Tires : Material Modeling, Mesh Generation, and Solution Strategies," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.25, No.3, 1997.
- 6) ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.3, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.
- 7) Matyja, E. Frank, "Steering Pull and Residual Aligning Torque," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.15, No.3, 1987.
- 8) M. G. Pottinger, J. E. McIntyre, "Effect of Suspension Alignment and Modest Cornering on the Footprint Behavior of Performance Tires and Heavy Duty Radial Tires," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.27, No.3, 1999.