

상세 트레드 패턴을 반영한 3차원 타이어 유한요소 격자 생성

조진래[†] · 김기환* · 홍상일* · 김남전** · 김기운**

(2002년 3월 20일 접수, 2003년 8월 7일 심사완료)

3-D Finite Element Mesh Generation of Tires Considering Detailed Tread Pattern

Jin-Rae Cho, Ki-Whan Kim, Sang-Il Hong, Nam-Jeon Kim and Kee-Woon Kim

Key Words: Tire(타이어), FE Mesh(유한요소 메쉬), Detailed Tread Pattern(상세 트레드 패턴), ASD(Anti-Skid Depth), Groove(그루브), Case(타이어 본체), Contact Pressure(접지압), Frictional Energy Intensity(마찰 에너지 강도)

Abstract

Being contacted directly with ground, the tire tread part is in shape of complex patterns of variable ASDs(anti-skid depth) to satisfy various tire performances. However, owing to the painstaking mesh generation job and the extremely long CPU-time, conventional 3-D tire analyses have been performed by either neglecting tread pattern or modeling circumferential grooves only. As a result, such simplified analysis models lead to considerably poor numerical expectations. This paper addresses the development of a 3-D tire mesh generation considering the detailed tread pattern and shows that the contact pressure and frictional energy distribution of tires considering the detailed pattern become better than those by the simplified tire model.

1. 서론

타이어는 주행 중인 자동차의 하중을 지지하는 부품으로, 자동차의 안정성과 주행에 크게 기여하고, 핸들링, 지면과의 마찰 특성, 구름 저항, 마모 특성 등을 좌우하는 중요한 부품이다.^(1,2)

타이어의 트레드(tread)는 타이어가 전동할 때 노면과 직접 접촉하는 부분으로 카카스(carcase)를 보호함과 동시에 타이어와 노면간의 마찰계수를

확보하여, 유효한 제동력이나 조종성을 제공한다.⁽³⁾ 또한 우천시 빗길에서의 주행안정성을 위해 빗물 방출을 위한 그루브를 가지며, 이로 인해 발생하는 소음, 국부적인 마모 등을 방지하기 위해 다양한 형상의 패턴(pattern)을 가진다. 그러나 모델링의 어려움과 지나치게 커지는 계산시간으로 인하여 기존의 유한요소해석에 사용된 3차원 타이어 격자(mesh)에서는 트레드 부분을 원주방향의 주 그루브(main groove)만을 모델링하였고, 축방향으로의 상세한 그루브는 반영하지 못하였다. 그 결과 트레드 부분의 신뢰할 수 있는 유한요소 해석이 어려웠다. 하지만, 컴퓨터 성능과 격자생성 기술의 발전은 상세패턴을 고려한 격자 생성을 가능하게 하였다.^(4,5)

본 연구에서는 상세 트레드 패턴을 고려한 3차원 타

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : jrcho@hyowon.puan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** (주)금호산업 타이어사업부 특성연구팀

이어 유한요소 격자를 생성하였다. 트레드 부분과 타이어 본체 부분을 분리하여 격자를 각각 생성하고, 두 격자를 다시 결합하여 하나의 타이어 FEM 격자를 완성시킨다.⁽⁶⁾ 상세패턴 또는 ASD(anti-skid depth)의 변화를 고려한 트레드의 격자는 타이어 본체 격자에 대해 부분적 또는 전체적으로 결합되어 다양한 해석을 효율적으로 수행할 수 있다. 생성된 3차원 유한요소 격자를 통해 유한요소 해석결과와의 정도 향상, 해석 범위의 확대 그리고, 유한요소 모델링 오차의 감소를 기대할 수 있다.^(7,8)

또한 본 연구를 통해 개발한 3차원 타이어 격자생성 프로그램을 이용하여 지면과의 3차원 타이어 접촉해석을 수행한다.⁽⁹⁾ 그리고 상세패턴을 고려한 유한요소 격자의 신뢰성과 정도 향상을 평가하기 위해 접지압 및 마찰에너지장도 분포를 기존의 그루브만 반영한 경우와 비교분석 하고자 한다.

2. 격자 생성 절차 및 합체 방식

2.1 격자생성 절차

상세패턴이 적용된 타이어의 유한요소 격자를 생성하기 위해서 크게 5개로 구성된 전용 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 포트란 언어를 이용하였으며, 일반 PC환경에서 충분히 모델링 작업을 할 수 있도록 하였다.

모델링 절차를 Fig. 1의 플로차트에 나타내었다. 먼저, 타이어 상세패턴의 제품도로부터 2차원 1피치의 패턴격자를 생성한다. 생성된 2차원 1피치의 패턴격자를 전용 프로그램을 이용하여 2

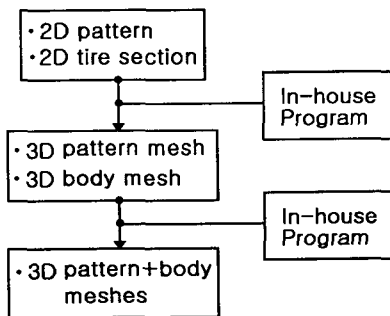


Fig. 1 Flowchart of 3-D tire mesh generation

차원 멀티피치 패턴으로 확장한 후, 전용 프로그램을 이용하여 3차원 멀티피치의 상세패턴격자를 생성한다. 한편, 타이어 본체는 2차원 축대칭 형상의 격자를 전용 프로그램을 이용하여 3차원 타이어 본체 격자를 형성한다. 그 다음으로 형성된 3차원 상세패턴 격자와 타이어 본체 격자를 결합하여 상세패턴이 적용된 3차원 타이어의 유한요소 격자를 완성한다.

2.2 합체 방식

지면에 의해 트레드에 작용하는 압력분포의 공간상의 변화는 매우 크다. 따라서, 정교한 3차원 타이어 해석을 위해 트레드 부분에 세밀한 격자가 필요하다. 하지만, 모델링과 해석에 수반되는 연산시간(CPU time)을 줄이기 위해 타이어 본체 부분에는 비교적 성긴 격자를 사용할 필요가 있다.⁽¹⁰⁾ 이를 위해 Fig. 2와 같이 트레드 부분과 케이스 부분에 서로 크기가 다른 격자를 생성하고, 두 격자를 합체하는 방식으로 전체 타이어의 격자를 생성한다.

요소 크기가 다른 두 격자를 합체하는 방식에는 접합면 상의 절점을 일치시키는 접합(compatible) 방법과 일치시키지 않는 비접합(incompatible) 방법이 있다. 전자의 경우, 타이어 본체의 성긴 격자의 절점들이 조밀한 트레드 격자의 일부 절점들과 일치되도록 하여야 한다. 하지만 후자의 경

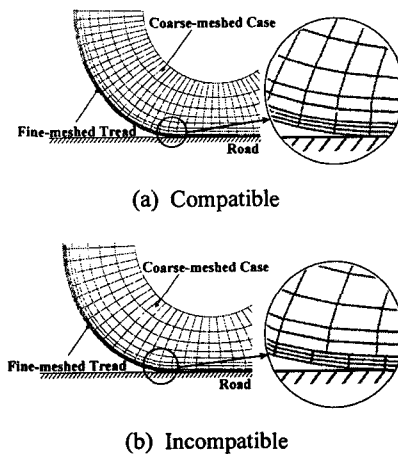


Fig. 2 Combining methods of fine-meshed tread and coarse-meshed tire body

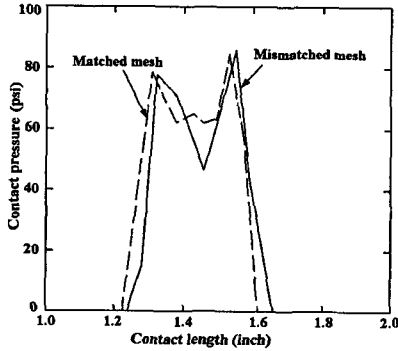


Fig. 3 Contact pressure comparison between compatible and incompatible meshes

우는 두 격자의 접합면에 매우 큰 압력과 비슬립(non-slip) 제약조건을 부여하여 격자 합체를 구현한다.

절점이 불일치하는 격자와 일치하는 격자에 대해 각각 2차원 모델을 생성하여 불일치하는 격자의 타당성을 검증하였다. 접지압 해석을 수행하여 구한 해석결과를 Fig. 3에 비교 도식하였다. 그림으로부터 두 경우가 거의 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.⁽¹¹⁾

3. 패턴 격자 생성

2차원 멀티피치 패턴생성 과정은 1피치 패턴의 단순 확장으로 이루어진다. 먼저, Fig. 4와 같이 1피치 패턴의 제품도로부터 상용프로그램인 I-DEAS를 이용하여 2차원 격자를 생성한다.

생성된 1피치 격자를 전용 프로그램에 의해 여러 개로 복사하여 하나의 멀티피치 격자를 형성한다. 2차원 멀티피치 패턴격자를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 ASD의 변화를 고려한 것이고, Fig. 5(b)는 ASD의 변화를 고려하지 않은 패턴격자이다. 그림에서 보듯이 ASD변화를 고려하면 각 그루부의 깊이 차이를 반영하기 위해 추가로 요소를 생성해야 한다.

다음으로 2차원 평면 멀티피치 격자를 Fig. 6에 도시한 두께를 가진 3차원 곡면 형태의 트레드를 위한 격자로 확장한다. 이 과정에는 두께방

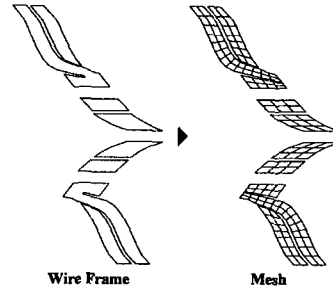
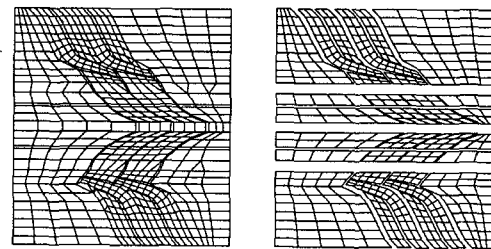


Fig. 4 Generation of 2-D 1-pitch pattern mesh



(a) Variable ASD (b) Uniform ASD
Fig. 5 2-D multi-pitch pattern mesh

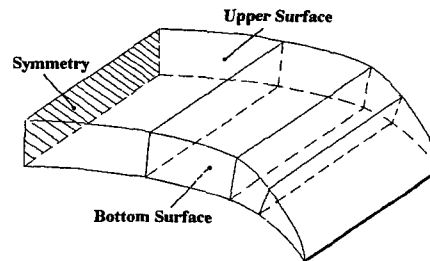
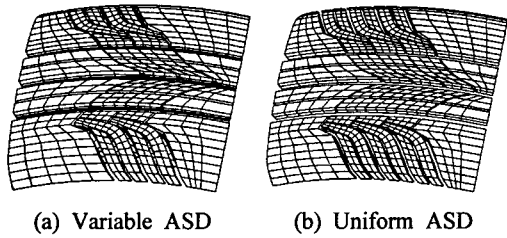


Fig. 6 3-D geometry of tread

향 확장(extrusion)과 곡면사상(curve mapping)이 필요하다. Fig. 6에서 트레드 단면 자체는 타이어 중심 원호에 대해 좌우 대칭이며, 대칭 단면 하나의 윗면과 아랫면은 4개의 기본 곡면으로 구성되어 있다. 두께방향 확장은 1개 혹은 여러개의 격자층으로 구성할 수 있으며, 곡면사상은 전용 프로그램 내 곡면 좌표변환에 따라 구현된다.

접지압 해석 등에 이용되는 부분적으로 생성된 3차원 멀티피치의 상세패턴 격자를 Fig. 7에 나



(a) Variable ASD (b) Uniform ASD

Fig. 7 3-D multi-pitch pattern meshes

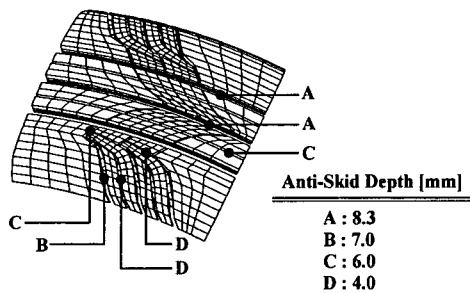


Fig. 8 Four different ASDs

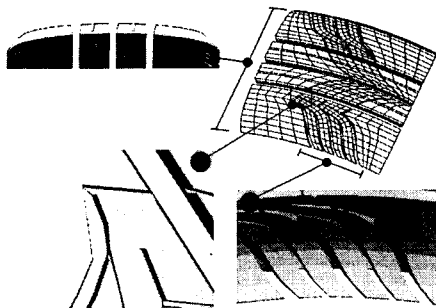
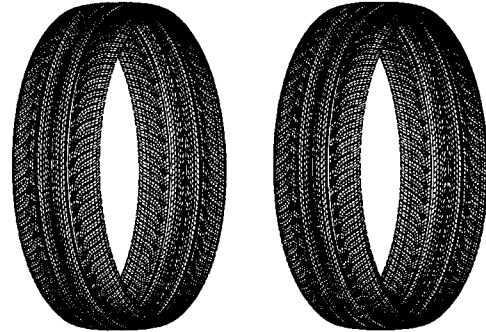


Fig. 9 Implementation of variable ASD

타내었다. Fig. 7(a)는 ASD의 변화를 고려한 것이고, Fig. 7(b)는 ASD의, 변화를 고려하지 않은 것이다. 본 연구에서 대상으로 하는 타이어에는 4개의 ASD깊이가 적용되었고, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

ASD 변화를 고려하여 생성한 3차원 상세패턴 격자를 Fig. 9에 부분적으로 자세하게 나타내었다. ASD의 변화는 타이어 성능 향상을 위해 필요한 요소이다. 타이어가 건조한 노면을 주행할 때에는 트레드 부분에 요철이 없을 때가 주행 성능이 제일 우수하다. 하지만, 젖은 노면에서는



(a) Variable ASD (b) Uniform ASD

Fig. 10 3-D full pattern meshes

타이어의 배수능력을 위해 ASD가 반드시 필요하고, 아울러 진동 및 소음 마모 성능을 향상시키기 위해 부분적으로 서로 다른 ASD를 적용한다. 소음의 경우에는 ASD의 길이를 다르게 하여, 공명을 억제한다. 마모의 경우에는 ASD에 따라 패턴의 굽힘강성을 달리하여, 마모가 심한 곳에 작은 ASD를 적용하면 굽힘강성은 커지게 되고 마모가 잘 일어나지 않게 된다. ASD의 변화를 적용하여 격자를 생성함으로써, 서로 다른 ASD의 변화에 대한 마모 경향, 배수 상태 등을 유한요소 해석만으로도 분석할 수 있도록 하였다.

다음으로, 수막현상 등과 같은 타이어 동해석에 이용되는 3차원 전체 상세패턴 격자를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 ASD의 변화를 고려한 경우로 41,076개의 요소와 68,670개의 절점으로 이루어져 있고, Fig. 10(b)는 ASD의 변화를 무시한 경우 20,466개의 요소와 39,690개의 절점으로 구성되어 있다. 격자의 바깥면은 접촉 조건을 적용할 수 있도록 하여, 접지압, 마찰에너지, 지면 돌출부 통과 시 승월 특성과 같은 주요한 3차원 타이어 해석이 가능하다.

4. 본체 격자 생성 및 합체

4.1 타이어 본체 격자 생성

타이어 본체 부분의 유한요소 격자는 Fig. 11에 나타낸 2차원 축대칭 형상을 360°회전시켜 Fig. 12와 같은 3차원 본체 격자를 생성하게 된

다. 본체 격자는 패턴을 무시한 트레드 부분과 케이스 부분으로 구성되어 있고, 케이스 부분은 기본적으로 여러 종류의 고무층, 벨트층 및 cord 층으로 구성되어 있다. 각기 다른 물성 부분을 그룹으로 지정하여 물성부여가 용이하도록 하였다. 격자의 개수는 원주방향에 따라 조절 할 수 있는데, 상세패턴 격자가 삽입되는 부분에는 격

자밀도를 높여서 모델링 한다. 한편, Fig. 13에 도시한 것과 같이 상세 트레드 격자가 삽입될 부분만큼 본체 트레드 격자를 제거시켜야 한다.

4.2 패턴과 본체 격자의 결합

타이어 본체 트레드 부분의 격자를 제거한 후 상세 트레드 패턴 격자를 Fig. 13과 같이 합체한다. 본 연구를 통해 개발한 격자생성 전용 프로그램은 패턴 격자의 삽입 범위를 0°~360°로 임의로 설정할 수 있도록 되어 있다. 한편, 전술한 비적합 합체 방식에 따라 본체 격자와 상세 트레드 패턴 격자가 접하는 모든 접촉면에 압력 및 비슬립 구속조건을 부여한다. 이 구속조건 부여는 ABAQUS 상용프로그램을 이용한 타이어 해석시 프로그램 내 접촉실행 기능에 의해서 수행된다.

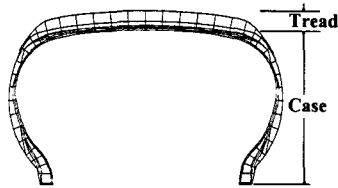


Fig. 11 2-D axisymmetric FEM mesh of tire body

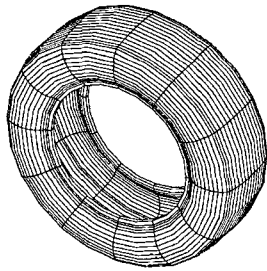


Fig. 12 3-D FEM mesh of tire body

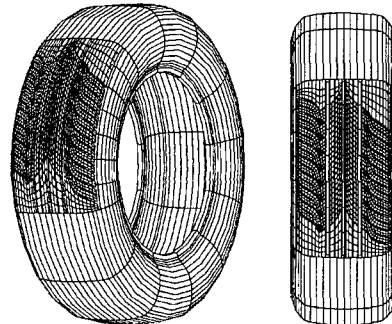


Fig. 14 3-D tire mesh with partly imbedded detailed pattern mesh

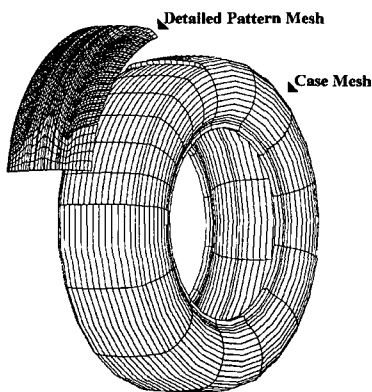


Fig. 13 Combining of detailed pattern mesh and coarse body mesh

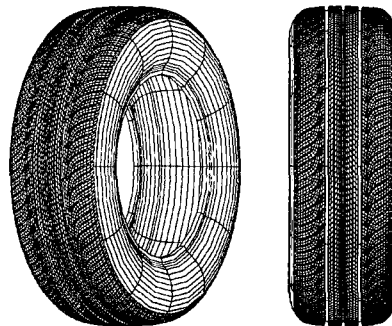


Fig. 15 3-D tire mesh with fully imbedded detailed pattern mesh

결합된 전체 격자를 Fig. 14와 Fig. 15에 각각 나타내었다. Fig. 14는 상세패턴 격자가 부분적으로 적용된 것으로, 접지압 해석과 같이 타이어가 지면과 접하는 경우에 압력분포나 변형 등이 관심의 대상일 때, 접지부에만 부분적으로 상세패턴 격자를 삽입하여 계산 시간을 효과적으로 줄일 수 있다. 반면, 구름저항(rolling resistance)이나 수막현상(hydroplaning) 등의 해석에서는 타이어가 지면과 접촉하여 회전하는 상태를 해석하기 때문에, 타이어 전체에 상세패턴 격자가 적용되어야 한다. 전체적으로 상세패턴 격자가 적용된 것을 Fig. 15에 나타내었다. 전자의 모델의 요소의 개수는 6,942개로 절점은 34,252개이다. 후자의 모델을 구성하는 요소의 개수는 26,250개이고, 절점은 58,626개이다.

5. 유한요소 해석 및 결과

상세패턴이 적용된 유한요소 격자의 정도 향상을 평가하기 위해 원주방향 주 그루브만을 적용한 타이어와 접지부에 부분적으로 상세패턴의 격자를 삽입한 경우에 대하여 지면과 타이어의 접촉해석을 수행하였으며, 접지압(contact pressure)과 마찰 에너지 강도(frictional energy intensity)의 분포를 상호 비교하였다.

해석에 사용된 모델은 단면폭이 206이고 림(rim)경이 381mm인 타이어(P206/60R15)를 사용하였다. 유한요소 해석은 정해석으로 3단계에 걸쳐 수행하고, 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. Fig. 16과 같이 먼저 림 부분에 변위 경계조건을 적용하여 타이어를 고정하고 내부공기압을 180kPa로 적용하였고 강체 평판을 타이어의 접지부에 접촉시킨 후 800kgf의 접촉하중을 적용하였다.

5.1 접지압 분포

주 그루브만 적용한 경우에는 접지부 중앙선상에 위치한 절점들의 접지압을 나타내었으나, 상세패턴의 격자를 삽입한 경우는 각 단면(cross section)의 접지압력이 패턴의 형상에 따라 달라

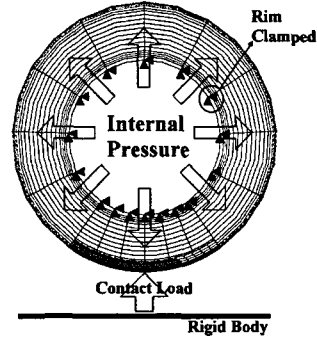


Fig. 16 Loading and boundary conditions

지므로 접지면 상의 평균값을 이용해야 한다.

상세패턴을 적용한 타이어 모델의 접지압은 Fig. 17과 같이 접지중앙부를 중심으로 30mm폭의 영역에 $m \times n$ 개의 샘플링 포인트를 분포시키고, 진행방향으로 m 개 샘플링 포인트의 압력값들의 평균을 계산하였다. Fig. 18은 3개의 주 그루브만 적용한 경우에서의 접지압 분포이고, Fig. 19는 상세패턴을 적용한 타이어의 접지압 분포를 도시하였다.

위 결과로부터 원주방향 주 그루브만을 적용한 경우에 비해 상세 패턴 격자를 적용한 경우에 트레드 패턴의 특성을 잘 반영한 접지압 분포를 보여줌을 확인할 수 있다.

5.2 마찰에너지강도 분포

마찰에너지강도의 분포는 접지부에서의 트레드의 마찰로 인한 마모경향을 분석할 수 있으며 마찰에너지강도는 다음과 같이 정의된다.⁽¹²⁾

$$E_{total} = \sum_{i,j} (dE_{xij,k} + dE_{yij,k}) \quad (1)$$

여기서, $dE_{ij,k}$ 는 ij 샘플링 지점에서의 전단응력과 변위에 의한 미소 마찰에너지로서, 각 $dE_{xij,k}$, $dE_{yij,k}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} dE_{xij,k} &= 0.5 |(\sigma_{xij,k} + \sigma_{xij,k-1})(u_{xij,k} - u_{xij,k-1})| \\ dE_{yij,k} &= 0.5 |(\sigma_{yij,k} + \sigma_{yij,k-1})(u_{yij,k} - u_{yij,k-1})| \end{aligned} \quad (2)$$

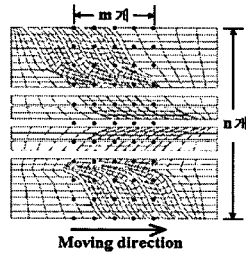


Fig. 17 Sampling points distribution for plotting contact pressure

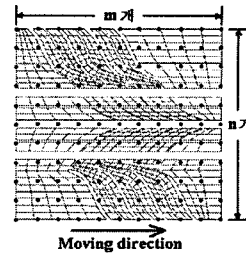


Fig. 20 Sampling points distribution for evaluating frictional energy intensity

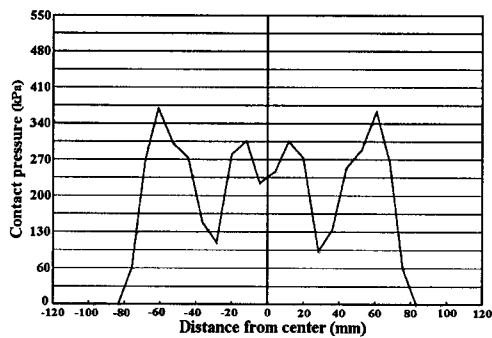


Fig. 18 Contact pressure distribution considering the circumferential grooves only

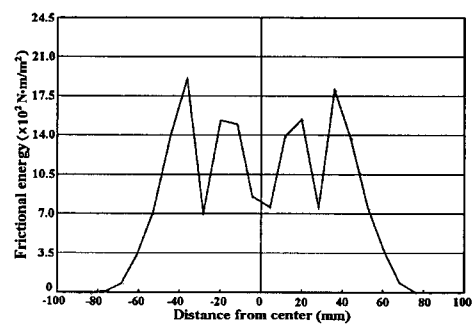


Fig. 21 Frictional energy distribution considering the circumferential grooves only

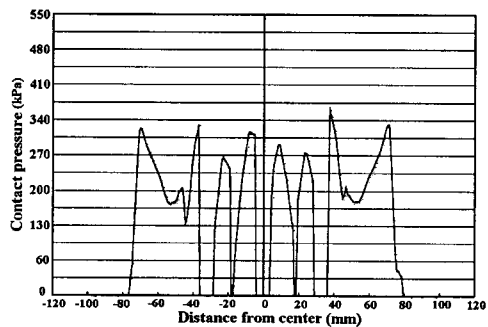


Fig. 19 Contact pressure distribution considering the detailed pattern

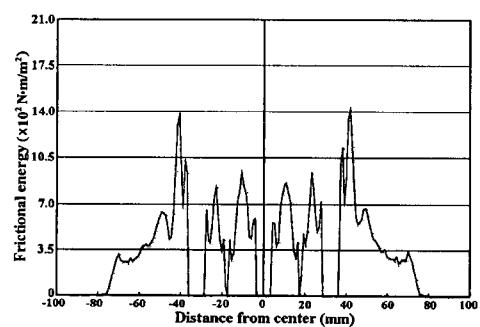


Fig. 22 Frictional energy distribution considering the detailed pattern

상세패턴 격자를 적용한 타이어 모델의 마찰에너지강도의 분포를 나타내기 위해 Fig. 20과 같이 3-D 패턴 격자부의 전 영역에 샘플링포인트를 분포시킨다. 마찰 에너지 강도를 구할때 요구되는 응력값과 변위값은 샘플링 포인트 근방에 위치한 절점들의 응력값과 변위값에 대해 내삽법으로 구한 값을 사용하였다.

Fig. 21은 3개의 주 그루브만 적용한 경우에서의 마찰에너지 분포이고, Fig. 22는 상세패턴을 적용한 타이어의 마찰에너지 분포이다. 두 경우 모두 중앙부분보다 쇼울더(shoulder) 부분이 더 높아지는 경향을 보이며 이로부터 쇼울더부의 편마모를 예상할 수 있다. 상세패턴을 적용한 경우, 주그루브만을 적용한 경우에 비해 유한요

Table 1 Comparison of main grooves model and detailed pattern model

	Number of node	Number of element	CPU time(hr)
Main groove	5,022	4,284	2.60
Detailed pattern	39,266	7,524	167.57

소의 절점개수와 컴퓨팅 시간이 각각 7.8배 및 64.4배로 엄청나게 증가한다(Table 1 참조). 하지만 이러한 증가는 고성능 컴퓨터나 병렬연산을 적용하면 효과적으로 대처할 수 있다.

6. 결론

기존의 원주방향의 주 그루브만을 적용한 타이어의 유한요소 격자를 개선하여, 상세패턴과 ASD의 변화가 적용된 3차원 타이어 유한요소 격자를 생성하였다. 트레드 부분에는 세밀한 요소를 적용하고, 타이어 본체 부분에는 성긴 격자를 적용하여 계산시간의 절감 (전체 상세격자의 373.54시간에 비해 부분 상세격자는 167.57시간으로 연산시간이 약 45%로 감소)과 해석정도의 향상을 동시에 꾀하였다. 한편 주 그루브 만을 반영한 격자와 비교한 결과, 본 연구의 상세 트레드 패턴 격자를 고려한 경우가 보다 정확한 접촉 해석 결과를 제공하였다. 하지만 상세모델에 대한 검증을 위해 실험결과와의 비교평가가 향후 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Gall, R., Tkacik, P. and Andrews, M., 1993, "On the Incorporation of Frictional Effects in the Tire/Ground Contact Area," *Tire Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, pp. 2~22.
- (2) Cho, J. R., Jeong, H. S., Lee, H. W., Kim, N. J. and Kim, K. W., 2001, "Finite Element Analysis for the Variation of Carcass Tension Distribution to the Sidewall-Radius Change," *Transactions of KSME (A)*, Vol. 25, No. 6, pp. 980~987.
- (3) Cho, J. R., Jeong, H. S., Lee, H. W., Kim, N. J. and Kim, K. W., 2001, "Optimal Design of Tire Sidewall Contours for Improving Maneuverability and Durability," *Transactions of KSME (A)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1636~1643.
- (4) Gall, R., Tabaddor, F., Robbins, D., Majors, P., Sheperd, W. and Johnson, S., 1995, "Some Notes on the Finite Element Analysis of tires," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol. 23, No. 3, pp. 175~188.
- (5) Danielson, K. T., Noor, A. K. and Green, J. S., 1996, "Computational Strategies for Tire Modeling and Analysis," *Computers & Structures*, Vol. 61, No. 4, pp. 673~693.
- (6) Meschke, G., Payer, H. J. and Mang, H. A., 1997, "3D Simulations of Automobile Tires: Material Modeling, Mesh Generation, and Solution Strategies," *Tire Science & Technology*, TSTCA, Vol. 25, No. 3, pp. 154~176.
- (7) Mancosu, F., 1995, "Finite-Element Analysis for Tire Design," *Tire Technology International*.
- (8) Mancosu F. and Matrascia, G., 1997, "Integrated Models for Tire Comfort Analysis: 2D rigid Ring Model and 3D Finite Element Model," *Proc. 16th Annual Conference of the Tire Society*, Akron, Ohio.
- (9) Han, Y. H., Kim, Y. H., Kwak, Y. K. and Huh, H., 1989, "Finite Element Analysis of the Tire Contact Problem," *Transactions of KSME (A)*, Vol. 13, No. 5, pp. 820~830.
- (10) Mancosu, F., 1995, "Overview of Abaqus Applications at Pirelli," *Proc. Abaqus Users' Conference*, Paris.
- (11) "Tire Tread Pattern Modeling and Technology Development for KUMHO Tire," *Technical Report ACE TR 95-28 P9553*, 1995.
- (12) Pottinger M. G. and McIntyre, J. E., 1999, "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, pp. 128~160.