

외연적 유한요소법을 이용한 패턴 타이어에 대한 돌기물 통과시의 동적 특성 해석

김기운^{*1)} · 정현성¹⁾ · 범현규²⁾

금호타이어(주) 기술연구소¹⁾ · 전남대학교 기계공학과²⁾

Transient Dynamic Analysis of a Patterned Tire Rolling over a Cleat with an Explicit Finite Element Program

Kee-Woon Kim^{*1)} · Hyun-Sung Jeong¹⁾ · Hyeon Gyu Beom²⁾

¹⁾R&D Center, Kumho Tire Co., Inc., 555 Sochon-dong, Kwangsan-gu, Gwangju, 506-711, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 3 May 2003 / Accepted 16 August 2003)

Abstract : The finite element analysis of tires has been conventionally performed by either neglecting tread pattern or modeling only circumferential grooves. Besides, the tire analysis has been mainly limited to static or steady state rolling analysis. In this paper, a transient dynamic analysis of a patterned tire rolling over a cleat with an explicit finite element program is presented. The patterned tire with detailed tread blocks is modeled by a systematic mesh generation procedure, in which tire body and tread pattern meshes are separately generated in the beginning and then both meshes are combined by the tie constraint method. The cleat impact analysis is conducted by using both the patterned tire and the smooth tire models to predict the cleat enveloping characteristics. It is seen that the analysis results of the patterned tire model are in a good agreement with the experimental results.

Key words : Cleat impact(돌기물 통과), Explicit dynamic analysis(외연적 동적해석), Pattern tire(패턴 타이어), Finite element analysis(유한 요소 해석)

1. 서론

타이어는 차량이 지면과 접촉하는 유일한 부품으로서, 하중을 지지하고 차량에 전달되는 각종 힘을 지탱해야 한다. 이를 위해 타이어는 여러 가지의 고무층과 고무로 피복된 코드 복합체가 결합되어 제조된다. 이로 인해 타이어의 유한요소 해석에서는 여러 가지의 비선형성에 의해 제약을 받게 된다. 구조물의 대변형으로 인해 기하학적 비선형성이 존재하고, 또한 재료의 비선형성과 비압축성이 존재할

뿐만 아니라, 타이어와 지면의 접촉에 의한 경계조건 비선형성이 동시에 존재한다.¹⁾

이러한 난점들은 비선형 유한요소 해석 프로그램의 발전으로 정복이 가능하게 되었다.

기존에 실시되던 타이어의 유한요소 해석에서는 정상 상태에서의 타이어 거동을 주로 취급하였다.²⁾ 정상 상태의 해석으로는 돌기물을 통과하는 타이어에 대한 과도 상태에서의 응답 특성을 고려할 수 없다. 이로 인해 최근에는 외연적(Explicit) 유한요소법을 이용한 타이어의 동적 거동 해석이 활성화되기 시작하고 있다.³⁻⁵⁾ 그러나 대부분의 동적 거동 해석이 트레드 패턴이 없는 스무드(Smooth) 타이어에

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

한정되었다. 본 논문에서는 ABAQUS/Explicit 를 이용하여 패턴 타이어가 돌기물을 통과할 때에 타이어의 동적 특성을 해석하는 방법을 기술하고, 이를 런플랫(Run-flat) 타이어에 적용한 사례를 소개한다.

2. 유한요소 해석 모델

2.1 외연적 유한 요소 해석법

동적 특성 해석을 위한 외연적 유한 요소 해석 프로그램에 사용되는 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \ddot{u} + I - P = 0$$

이 방정식을 시간에 대해 연속적으로 적분하면 속도와 변위를 계산할 수 있게 된다. 즉, 중앙 차분법(Central difference method)를 이용하여 상기의 운동 방정식을 적분하면 속도와 변위는 다음과 같이 표현된다.⁶⁾

$$\dot{u}_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{(\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)})}{2} \ddot{u}(t)$$

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \dot{u}_{(t+\frac{\Delta t}{2})}$$

외연적 유한 요소 해석에서는 시간 증분(t)이 다음과 같이 정의되는 최소 시간 증분보다 작아야 안정적인 해를 구할 수 있다.⁶⁾

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi)$$

여기서 max는 최대 고유 진동수이고, 는 임계 감쇠비이다. 안정적인 해를 얻기 위한 최소 시간 증분은 다음과 같이 파장 전달 속도(Dilatational wave speed, C)와 요소의 특성 길이(Element characteristic length, L)의 성분으로 표현될 수 있다.⁶⁾

$$\Delta t = \min\left(\frac{L}{C}\right) \quad C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

따라서 외연적 유한요소 해석에서 해석시간을 단축시키기 위해서는, 재료의 강성을 감소시키고 재료의 밀도를 증가시키고 또한 요소의 특성 길이를 증가시키도록 모델을 구성해야 한다.

타이어에는 차량 하중을 지지할 수 있도록 뼈대 역할을 하는 카카스(Carcass)와 벨트(Belt)라는 복합

체가 존재하는데, 이를 솔리드(Solid) 요소로 모델링하면 요소의 특성 길이가 너무 작게 되어 장시간의 해석 시간이 소요된다. 이를 극복하기 위해 카카스와 벨트를 모델링하는 데에 셸(Shell) 요소나 막(Membrane) 요소가 주로 사용된다.³⁻⁵⁾ 또한 타이어가 림에 장착되는 비드(Bead)부에는 스틸 와이어(Steel wire)가 존재하는데, 이는 고무에 비해 강성이 상당히 커서 해석 시간을 증가시키는 요인이 된다. 이를 해소하기 위해 비드부의 스틸와이어는 일반적으로 강체 요소로 모델링 된다.³⁻⁵⁾

외연적 유한 요소 해석에서는 필연적으로 발생하는 해석 응답의 불규칙 진동(Oscillation)을 감소시키기 위해서는 타이어 구조물에 가상의 감쇠(Artificial damping) 기법을 부여해야 한다. ABAQUS/Explicit 는 구조물의 팽창 변형율을 감쇠시키는 벌크 점성 감쇠(Bulk viscosity damping)와 표면 속도의 반대방향으로 속도에 비례하는 감쇠력을 부여하는 점성 압력 감쇠(Viscous pressure damping)의 기법을 제공한다.⁶⁾

2.2 패턴 타이어 모델링 방법

타이어의 트레드 패턴은 상당히 복잡한 형상을 취하고 있으므로 패턴에 대한 정확한 메쉬를 생성하기 위해서는 특별한 프로그램이 필요하다. 상용 메쉬 프로그램을 이용하여 패턴에 대한 자동 메쉬를 생성하게 되면 일반적으로 사면체의 솔리드 요소가 생성되고 메쉬 형상도 조잡하여 해석의 정확도가 저하된다.

패턴 타이어에 대한 메쉬는 금호에서 개발한 프로그램을 이용하여 Fig. 1에 도시된 절차를 따라서 생성된다. 2차원 패턴 메쉬를 생성한 후에, 이를 3차원 타이어 곡면상으로 매핑하여 육면체의 솔리드 요소를 갖는 패턴 메쉬가 생성된다. 그리고 2차원 타이어 단면 메쉬를 생성한 후에 이를 360도 회전하여 타이어 본체 메쉬가 생성된다. 최종적인 패턴 타이어 메쉬는 패턴 메쉬와 본체 메쉬를 타이 구속 조건(Tie constraint)을 이용하여 결합함으로써 완성된다.⁷⁾

2.3 유한 요소 해석 모델

패턴 타이어에 대한 돌기물 통과시의 동적 특성

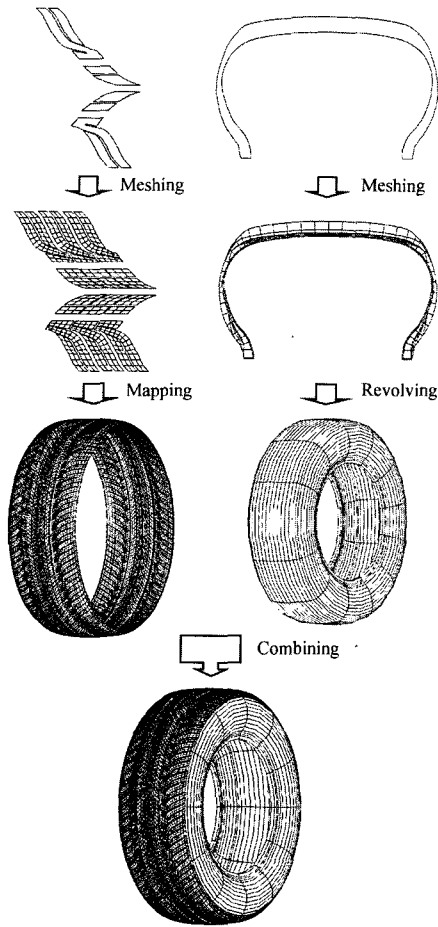


Fig. 1 Patterned tire modeling process considering detailed tread pattern

해석을 위해 사용된 타이어 모델은 금호 타이어에서 제조된 205/60R15 KU11 제품이다. Fig. 2는 타이어 모델의 2차원 단면 메쉬를 보여주는데, 카카스와 벨트 등의 복합체를 표현하기 위해 쉘요소를 사용하였다.

Fig.3은 본 해석에 사용되는 패턴 타이어에 대한 3차원 메쉬를 나타낸다. 패턴 타이어의 메쉬는 앞절에서 기술한 바와 같이, 패턴부와 본체부에 대한 메쉬를 각각 생성한 후, 타이 구속 조건(Tie constraint)을 이용하여 이들을 결합함으로써 완성된다.

해석시간 단축을 위해 복합체는 직교 이방성을 갖는 쉘요소로 모델링 하였고, 비드부의 스틸와이어는 강체요소로 모델링 하였다. 그외의 고무 부품들은 비선형 물성을 갖는 솔리드 요소로 모델링 하

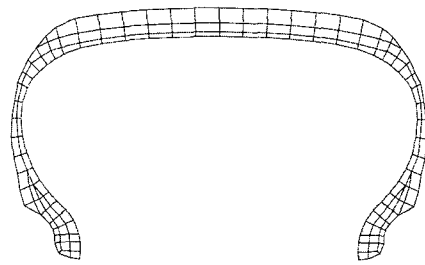


Fig. 2 Two-dimensional Finite element model of a tire

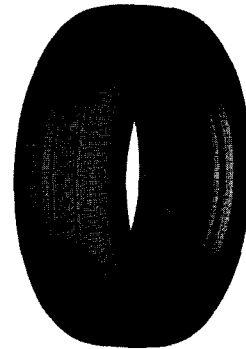


Fig. 3 Three-dimensional Finite element model of a tire

였다. 림과의 접촉이 예상되는 부위는 고정하였고, 휠을 모델링하는 대신에 휠의 질량(Mass)과 관성 모멘트(Moment of inertia)를 타이어 회전축에 부여하였다. 또한 해석 응답의 불규칙 진동을 감소시키기 위해 타이어에 가상의 감쇠 기법을 적용하여 해석하였다.

본 타이어 해석에서 공기압은 26 psi, 수직 하중은 475 kgf, 주행 속도는 40 km/h, 타이어와 드럼 사이의 마찰계수는 1.0을 적용하였다. 타이어를 구동시키는 드럼은 67" 직경을 갖는 강체요소로 모델링 하였고, 드럼상에는 2"폭과 0.5" 높이를 갖는 돌기물(Cleat)을 설치하였다.

3. 유한요소 해석 결과

3.1 돌기물 통과 해석 결과

트레드 패턴이 없는 스무드(Smooth, SMT) 타이어와 트레드 패턴을 반영한 패턴(Pattern, PTN) 타이어를 이용하여 돌기물을 통과시의 동적 특성을 해석하였다. Fig. 4는 패턴 타이어가 돌기물을 통과시에 타이어의 변형 에너지 분포를 보여준다.

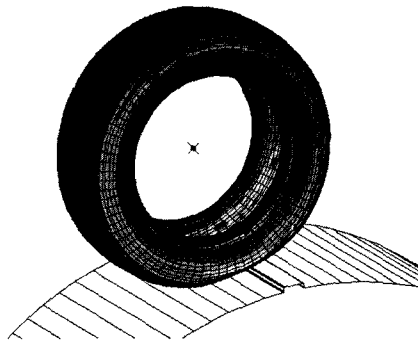


Fig. 4 Strain energy distribution of a patterned tire

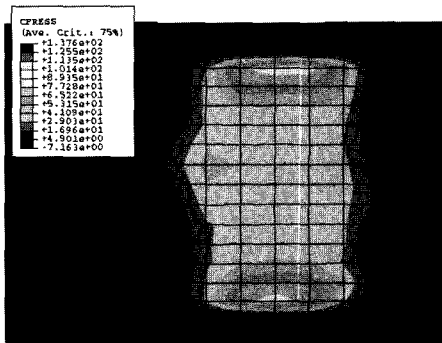


Fig. 5 Contact pressure distribution of a smooth tire by analysis

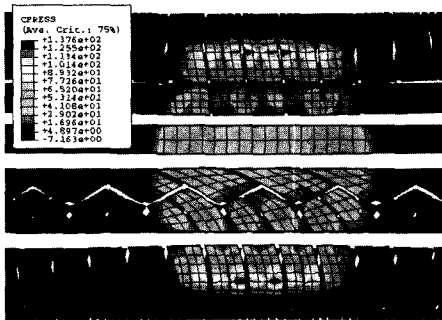


Fig. 6 Contact pressure distribution of a patterned tire by analysis

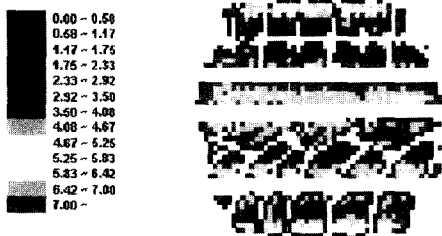


Fig. 7 Contact pressure distribution of a patterned tire by experiment

Fig. 5와 Fig. 6은 스무드 타이어와 패턴 타이어가 수직 하중을 받았을 때의 접지압 해석결과를 나타내고, Fig. 7은 타이어의 접지압 시험결과를 나타낸다. 패턴 타이어의 접지압 해석결과가 스무드 타이어보다 더 정확한 접지압을 제공함을 알 수 있다.

스무드 타이어와 패턴 타이어가 돌기물을 통과시에 타이어 축에 걸리는 수평력의 감쇠 특성에 대한 해석 결과가 Fig. 8에 도시되고, 이에 대한 시험결과가 Fig. 9에 도시된다. 또한 타이어가 돌기물 승월시에 타이어 축에 걸리는 수직력의 감쇠 특성에 대한 해석 결과가 Fig. 10에 도시되고, 이에 대한 시험결과가 Fig. 11에 도시된다.

돌기물 통과시의 감쇠 특성이 도시된 그래프에서, 해석에서는 시간에 대한 힘의 변화로 표현되고, 시험에서는 시간에 대한 가속도의 변화로 표현되어, 직접적이 수치 비교는 어렵다. 그러나 수평력 및 수직력의 감쇠 특성에 대한 해석결과와 시험결과가 대체적으로 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 그리고 스무드 타이어와 패턴 타이어에 대한 해석결과

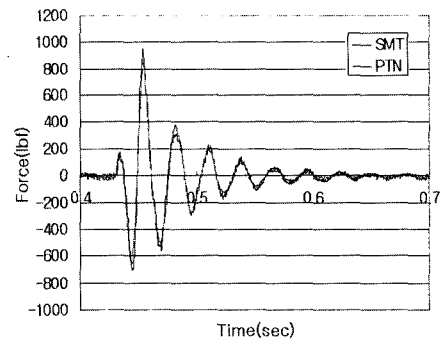


Fig. 8 Time response of the tire longitudinal force by analysis

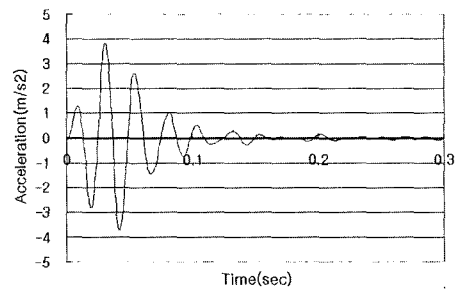


Fig. 9 Time response of the tire longitudinal force by experiment

는 약간의 차이가 있는 것으로 나타났다.

돌기물 통과시에 타이어의 응답 특성을 주파수 영역에서 분석하기 위해, 패스트 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 기법을 이용하여 시간 영역에 대한 응답을 주파수 영역의 응답으로 변환하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 주파수 영역에서 수평력 응답 특성에 대한 해석결과와 시험결과를 나타내고, Fig. 14와 Fig. 15는 수직력 응답 특성에 대한 해석결과와 시험결과를 나타낸다. 돌기물 통과시에 주파수 응답 특성에 대한 해석 결과와 시험결과를 Table 1에 정리하였다. 수평력에 대한 공진 주파수(Resonant frequency)의 해석결과는 시험결과보다 약 6 hz 낮게 나타났으나 수직력에 대한 공진 주파수는 대체로 유사함을 알 수 있다. 스무드 타이어와 패턴 타이어의 공진 주파수에 서의 진폭은 수평력에 대해서는 대체로 유사하나 수직력에 대해서는 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다. 따라서 스무드 타이어와 패턴 타이어에 대한 돌기물 통과시의 해석결과가

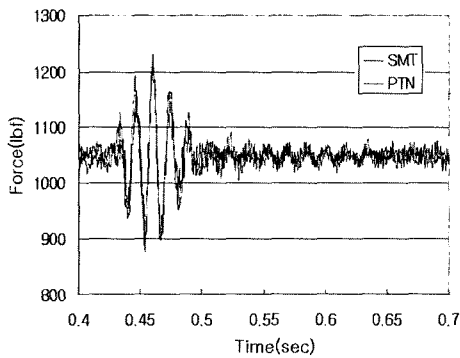


Fig. 10 Time response of the tire vertical force by analysis

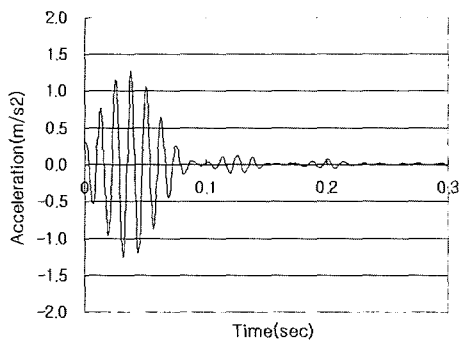


Fig. 11 Time response of the tire vertical force by experiment

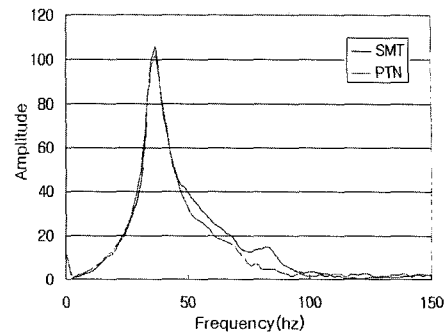


Fig. 12 Frequency response of the tire longitudinal force by analysis

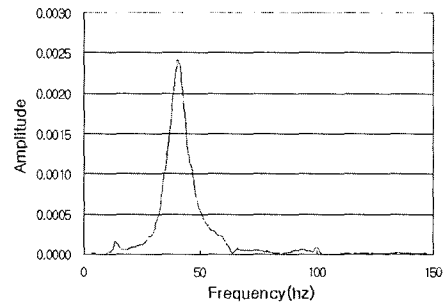


Fig. 13 Frequency response of the tire longitudinal force by experiment

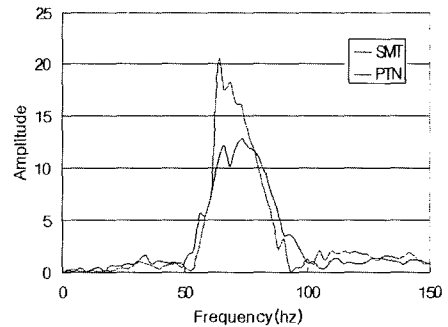


Fig. 14 Frequency response of the tire vertical force by analysis

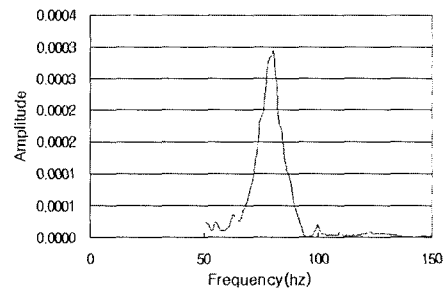


Fig. 15 Frequency response of the tire vertical force by experiment

Table 1 Comparison the analysis results with experimental results about frequency response

타이어	항목	수평력	수직력
Smooth	주파수	34.2hz	73.2hz
	진폭	105.5	12.82
Pattern	주파수	34.2hz	71.0hz
	진폭	101.7	20.24
Test	주파수	40.0hz	76.0hz

공진 주파수 측면에서는 대체로 유사한 경향을 보이나 진폭 측면에서는 차이를 나타내므로, 대략적인 경향 분석을 위해서는 스무드 타이어를 적용해도 되나 정확한 분석을 위해서는 패턴 타이어를 사용해야 할 것으로 사료된다.

3.2 런플랫 타이어에 대한 해석결과

펑크(Punk)시에 타이어 교환의 불편함을 해소하고 스페어 타이어를 제거하기 위해, 타이어 회사들은 펑크시에도 일정한 속도로 일정한 거리를 주행이 가능한 런플랫(Run-flat) 타이어를 개발하고 있다.⁸⁾ 그러나, 펑크시에 차량 하중을 견디기 위해 타이어 측벽부에 보강 고무를 삽입한 런플랫 타이어는 정상적인 주행시에 하쉬니스(Harshness) 성능이 하락하고 타이어 중량이 증가하는 단점이 존재하였다. 이를 개선하기 위해 트레드 외곽부의 반경을 감소시킴으로서 타이어 측벽부에 삽입되는 보강 고무의 체적이 감소하도록 타이어형상을 설계하였다.

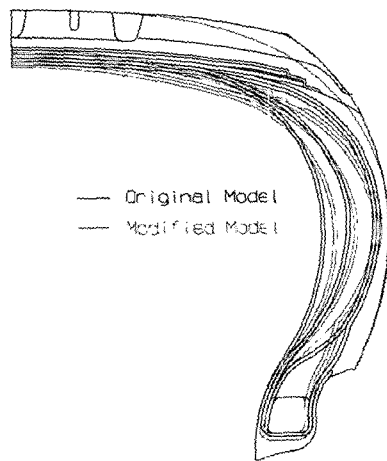


Fig. 16 Comparison of original and modified run-flat tire model

Fig. 16은 기존의 런플랫 타이어와 개선된 런플랫 타이어의 단면도를 보여준다. 이와 같이 개선된 런플랫 타이어가 하쉬니스 성능 측면에서 기존보다 향상되는 지를 예측하기 위해, 돌기물 통과시의 동적 특성에 대한 해석을 실시하였다. 해석 모델로는 P215/60R16규격을 사용하였고, 해석 조건으로는 30 psi의 공기압과 527.5 kgf의 수직하중과 40 km/h의 주행속도를 적용하였다.

런플랫 타이어가 돌기물을 통과시에 주파수 응답 특성에 대한 해석 결과를 Table 2에 정리하였다. 또한 수평력 및 수직력에 대한 주파수 영역에서의 응답 특성 그래프를 Fig. 17과 Fig. 18에 각각 도시

Table 2 Frequency response of the run-flat tires by analysis

타이어	항목	수평력	수직력
Original	주파수	44hz	92hz
	진폭	120.5	11.0
Modified	주파수	34hz	78hz
	진폭	118.5	6.0

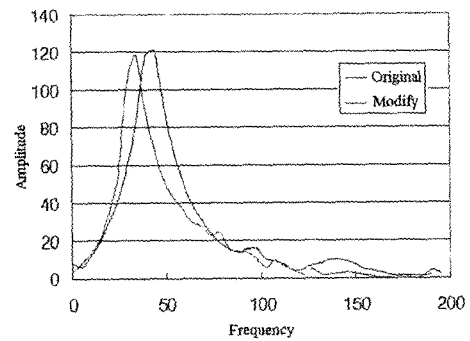


Fig. 17 Frequency response of the longitudinal force of run-flat tire

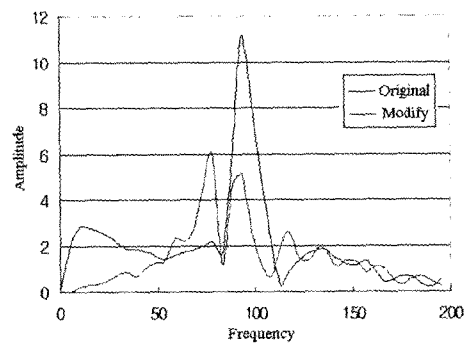


Fig. 18 Frequency response of the vertical force of run-flat tire

하였다. 개선된 런플랫 타이어의 수평력과 수직력에 대한 공진 주파수 및 진폭은 기존 런플랫 타이어에 비해 상당히 감소함을 알 수 있다. 공진 주파수와 진폭이 감소하면 보편적으로 타이어의 하쉬니스 성능이 향상되므로, 개선된 런플랫 타이어는 기존 런플랫 타이어보다 하쉬니스 성능이 향상될 것으로 예상된다.

4. 결론

외연적 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 이용하여 타이어가드럼상의 돌기물을 통과시에 동적 특성을 해석하였다.

타이어 해석시간 단축을 위해 카카스와 벨트 등의 복합체는 쉘 요소로 모델링 하였고, 비드부의 스틸와이어는 강체 요소로 모델링 하였다. 또한 외연적 유한 요소 해석에서 필연적으로 발생하는 불규칙 진동(Oscillation)을 감소시키기 위해 가상의 감쇠(Damping) 기법을 타이어에 적용하였다.

돌기물 통과시에 타이어 측에 발생하는 수평력과 수직력의 시간 응답 특성에 대한 해석결과는 시험결과와 대체로 유사한 경향을 나타냈다. 또한 주파수 영역에서의 응답 특성에 대한 해석결과도 시험결과와 대체로 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 스무드 타이어와 패턴 타이어를 이용한 돌기물 통과시의 동적 해석결과는 약간의 차이가 발생하므로, 대략적인 경향 분석을 위한 해석에서는 스무드 타이어를 사용해도 되나, 정확한 분석을 위해서는 패턴 타이어를 적용해야 한다. 또한 구조 및 형상이 다른 2개 버전의 런플랫 타이어에 대한 돌기물 통과시의 동적 해석을 통해 주파수 응답 특성이 개선된다는 것을 예측하였다.

본 해석에서는 타이어 전체에 대한 가상의 감쇠 기법을 적용하였으나, 향후 타이어 각 재질에 대해 실제 감쇠 물성을 반영한다면 돌기물 통과시의 동적 특성을 좀더 정확하게 해석할 수 있을 것이다.

References

- 1) G. Meschke, H. J. Payer, H. A. Mang, "3D Simulations of Automobile Tires : Material Modeling, Mesh Generation, and Solution Strategies," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.25, No.3, 1995.
- 2) Masataka, Koishi, Kazuyuki, "Simulation of Rolling Tire with ABAQUS," 1998 ABAQUS User's Conference, 1998.
- 3) S. R. Wu, L. Gu, H. Chen, "Airbag Tire Modeling by the Explicit Finite Element Method," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.25, No.4, 1997.
- 4) A. Kamoulakos, B. G. Kao, "Transient Dynamics of a Tire Rolling over Small Obstacles - A Finite Element Approach with PAM-SHOCK," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.26, No.2, 1998.
- 5) B. G. Kao, M. Muthukrishnan, "Tire Transient Analysis with an Explicit Finite Element Program," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.25, No.4, 1997.
- 6) ABAQUS/Explicit User's M, Version 6.2, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.
- 7) K. W. Kim, S. I. Hong, J. R. Cho, N. J. Kim, K. W. Kim, "Mesh Generation of Three Dimensional Tire Considering Detailed Tread Pattern," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering, KSME 01F054, 2001.
- 8) T. Doi, T. Itagaki, D. J. Major, "Tire and Allied Technology for a Spareless Vehicle," International Tire Exhibition and Conference, ITEC 1998, Paper 38, 1998.
- 9) 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, 1999.