

노면으로부터 충격을 받는 자동차 타이어의 진동해석에 관한 연구

이태근*·김병삼**·홍동표***·장욱춘*

The Study on the Vibration Analysis of Automobile Tire due to Road Impact

Tae-Keun Lee, Byoung-Sam Kim, Dong-Pyo Hong and Uk-Choon Chang

Key Words: Automobile Tire(자동차용 타이어), Harshness(하쉬니스), Ride(승차감), RMS(실효치), Tread Rubber(트래드고무)

Abstract

As the technique of automobile industry is being advanced, the advancement of vehicle ride is being required. In order to achieve this purpose, the study on the vibration which are produced by moving vehicle is carried out actively. In this study, the tire vibration characteristics for passing over a cleat are analyzed. The model is verified against simulations and experiments.. The tire is modeled with 7-DOFs (degree of freedom), and the effects of changing tire design parameters are considered. According to the results of analysis, the design parameters that reduce the tire and wheel vibration energy are conducted.

1. 서론

수년간 자동차 승차감과 소음제어에 대해 많은 관심을 가져왔으며, 특히 20~100Hz 사이의 진동 감소를 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 차량의 여러 가지 진동 중에서 현가장치(suspension)와 조향장치(steering)와 같은 현가계의 진동은 일반적으로 진동형태보다는 스프링 상/하 질량(sprung mass/unsprung mass)의 강제진동과 이를 구성하고 있는 부품들의 강성진동으로 크게 분류한다. 스프링 상/하 질량의 강제진동은 비교적 저주파수 영역의 진동현상과 관련이 깊으며, 강성진동은 구성부품에 분포하는 질량, 강성, 감쇠에

의해 결정되는 진동으로 차내소음, 치차소음, 제동소음 등의 비교적 고주파 영역의 진동, 소음현상과 관련이 깊다. 자동차에 작용하는 진동원은 노면의 굴곡에 의해 차륜외부에서 작용하는 강제력과 엔진 토크(engine torque) 변동에 의해 차체에 발생되는 강제력도 있다. 특히, 범프나 돌기에 의한 타이어 충격은 20~100Hz 주파수대 진동의 주된 요인이다. 이러한 진동은 불쾌감이나 소음으로 명백히 나타나는 하쉬니스(harshness)와 관련되어 있다. 노면의 진동이 타이어와 서스펜션을 통해 전달되므로 관심 있는 주파수대에서의 타이어-현가계 시스템의 모델설정 및 해석이 요구된다. 타이어 진동에 관한 연구로서 Chiesa et al는 비회전 타이어를 가진기로 가진하여 타이어 원주방향의 가속도로부터 고유진동수와 모드 형상을 구하였으며[1], Tielking은 래디알 타이어의 자유진동에 대해 해석적으로 연구를 수행하였다[2]. G. R. Potts는 타이어를 탄성지반

* 금호타이어(주) 기술연구소

** 순천제일대학 차량기계학부

*** 전북대학교 정밀기계공학과

상의 얇은 링으로 모델하고 이 형상과 재질특성의 향으로 고유진동수와 진동형태를 구하였으며 [3], N. Yoshimira는 타이어의 진동특성해석을 위해 타이어 수직진동에 대한 1자유도 타이어 모델과 접선방향 진동에 대한 3자유도 타이어 모델을 사용하였으며 타이어의 자력 진동을 고려하였다 [4]. 타이어 진동해석을 위한 모델로 Ronald는 회전하는 타이어의 반경방향 진동특성 해석을 위해 노면형상(road profile)으로부터 반경방향 힘을 산출하고 실제노면과 비교하였다 [5]. 또한 Barone는 범프에 의한 충격시 타이어의 수평방향/반경방향 진동특성을 해석하였다 [6]. 본 연구에서는 노면의 굴곡에 의해 작용하는 강제력을 고려한 첫 단계로 타이어가 돌기를 통과할 때의 타이어의 진동특성해석을 수행하였다. 타이어는 설계인자를 고려하여 7자유도계로 모델링하였고, 설계인자 변화에 따른 진동에너지 변화를 파악하였다. 실내 실차시험을 통해 본 해석모델을 검증하였으며, 검증된 모델을 이용하여 타이어 진동에너지에 대한 타이어 설계인자의 영향을 파악할 수 있었다.

2. 이론적 배경

본 모델은 크게 휠(wheel), 돌기에 의해 변형된 트레드 블록(tread block), 트레드 링(tread ring) 질량에 대한 x, y 방향 변위 및 트레드 링 질량의 각 변위를 고려한 7자유도계 모델이다. 본 모델에서는 타이어를 트레드 블록, 트레드 링, 사이드월의 3가지 강체로 구성되어 있다고 가정하였으며, 사이드가 벨트 및 카카스를 포함하는 트레드링과 트레드를 지지하는 것으로 모델링하였다. 또한 현가장치의 강성과 감쇠는 상수로 하여 수치해석하였다. 각각의 강체는 타이어 설계인자 변화에 따라 변화하는 강성 및 감쇠를 가지고 있으며 타이어에 작용되는 하중에 대한 타이어의 반경방향 스프링 상수(vertical spring rate), 감쇠 및 비틀림 스프링 상수(torsional spring rate), 감쇠를 고려하였다. 돌기를 통과할 때의 타이어의 진동해석 모델은 Fig. 1과 같다.

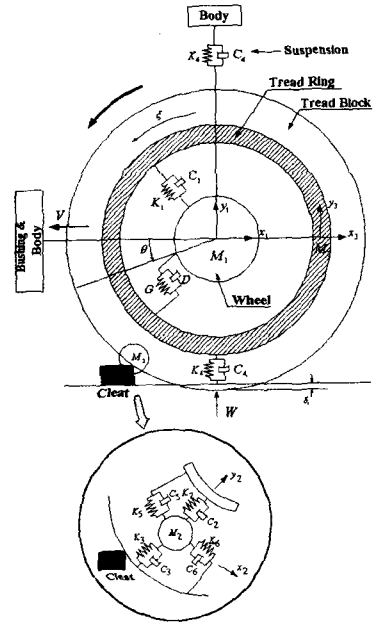


Fig. 1 Tire Harshness Model.

타이어가 V (km/h)의 속도로 이동하는 경우에 운동방정식은 다음과 같다.

(1) 휠에서의 운동방정식

$$M_1 \ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_3) + C_7 \dot{y}_1 + K_1(y_1 - y_3) + K_7 y_1 = 0 \quad (1)$$

$$M_1 \ddot{x}_1 + C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) + K_1(x_1 - x_3) = 0 \quad (2)$$

(2) 돌기에 의해 변형된 트레드 블록에서의 운동방정식

$$M_2 \ddot{y}_2 + C_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_3 \sin \theta - \dot{x}_3 \cos \theta) + C_3 \dot{y}_2 + K_3 y_2 + K_2(y_2 - y_3 \sin \theta - x_3 \cos \theta) = (C_3 \dot{\delta}_1 + K_3 \delta_1) \sin \theta \quad (3)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_5(\dot{x}_2 - \dot{x}_3 \sin \theta \dot{y}_3 \cos \theta - r \dot{\xi}) + C_6 \dot{x}_2 + K_6 x_2 + K_5(x_2 - x_3 \sin \theta + y_3 \cos \theta - r \xi) = -(C_6 \dot{\delta}_1 + K_6 \delta_1) \cos \theta \quad (4)$$

여기서 θ 는 타이어 이동방향에 대한 돌기의 위치를 표시한다.

3. 수치해석결과

본 연구에서는 타이어 설계인자 변화에 따른 영향을 보기 위하여 각각의 설계인자들을 상대적으로 변화시키며 수치해석 하였고, 이를 RMS(root mean square) 및 주파수 영역에서 분석하였다. 특히 설계인자의 변화시 P185/65R14 규격에 사용되는 인자를 기준으로 타이어 업계에서 사용 가능한 범위 내에서 변화량을 선정하였다. Table1은 시뮬레이션에 사용된 트레드 고무와 에이펙스의 특성치를 나타낸다.

Table 1. The Properties of Tread Rubber and Apex for Simulation

| Tread Rubber | A | B | C | D | E | F |
|--------------|----------|------|-----|----------|------|------|
| Stiffness | 100% | 79% | 79% | 79% | 104% | 117% |
| Damping | 100% | 119% | 94% | 115% | 115% | 98% |
| | | | | | | |
| Apex | AA | BB | CC | DD | EE | FF |
| Length | Standard | ← | -10 | ← | +10 | ← |
| Hardness | Standard | +20 | ← | Standard | ← | +20 |

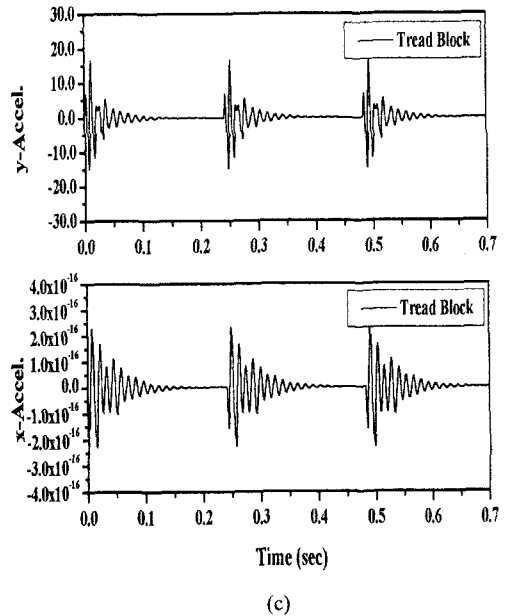
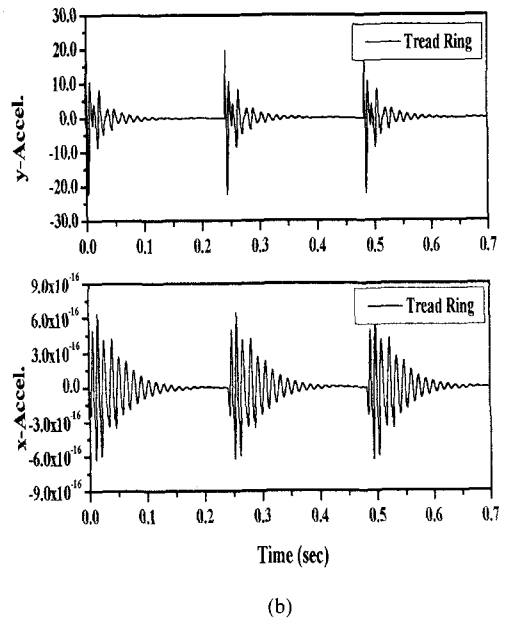
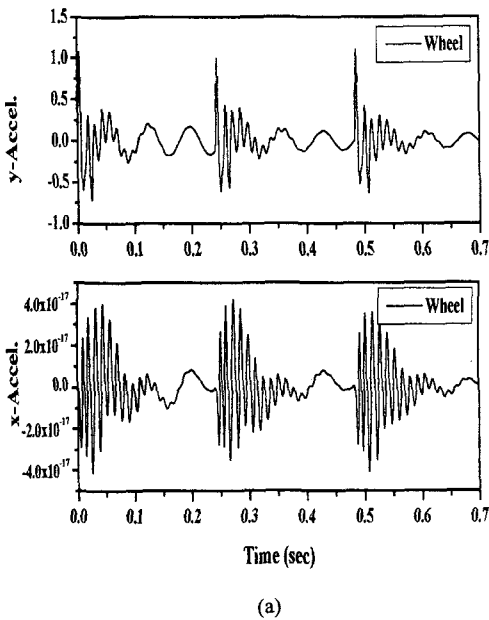


Fig.2 Time Signal as the Results of Simulation for Tire P185/65R14 (80 km/h)
 (a) Wheel x, y-direction
 (b) Tire Tread Ring x, y-direction
 (c) Tire Tread Block x, y-direction

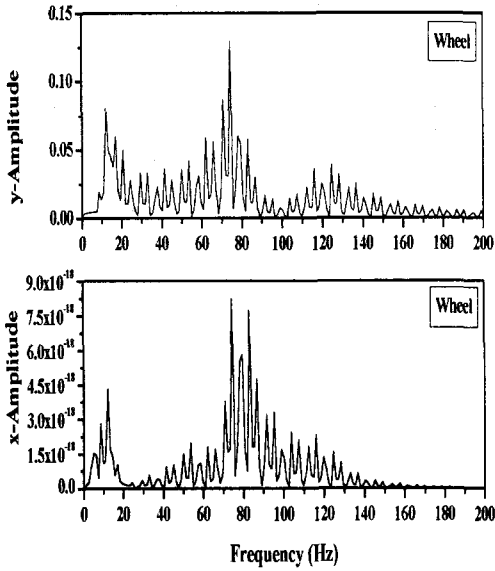
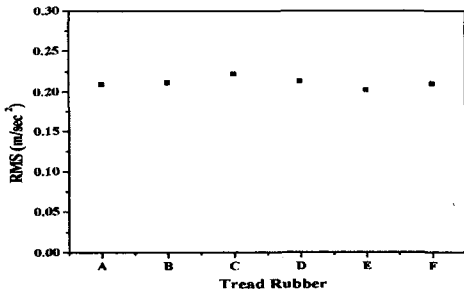
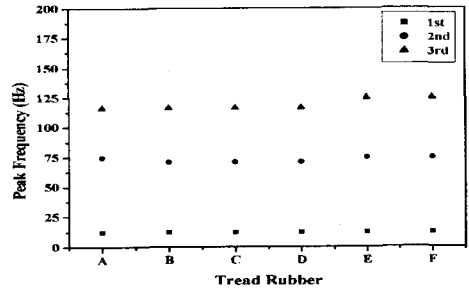


Fig.3 Frequency Signal as the Results of Simulation for Tire P185/65R14(80 km/h) Wheel x, y-direction

Fig.2, 3은 시뮬레이션 결과로 휠, 타이어 트레딩, 트레드 블록에서의 수직, 수평방향 성분을 나타낸다. Fig.4는 트레드 고무의 특성을 변경하였을 때 휠에서의 수직방향 성분에 대한 RMS 및 주파수 분석결과를 보인다. 트레드 고무의 강성이 동일할 때, 감쇠비가 크면 타이어 전체적인 감쇠가 증가하여 진동에너지는 작고 강성이 크면 진동에너지는 작아짐을 볼 수 있다. 트레드 고무의 강성비가 클수록 주파수의 1차 피크(peak)는 동일하나, 2, 3차 피크는 고주파쪽으로 이동하였다.



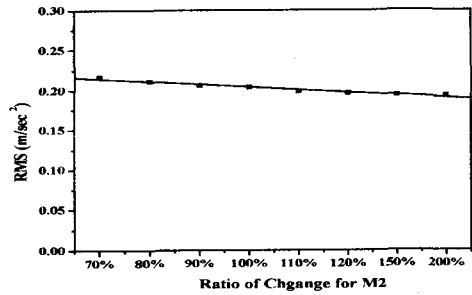
(a)



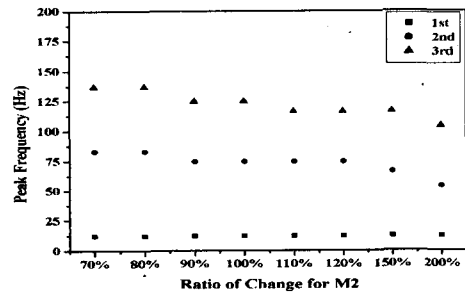
(b)

Fig.4 The Variation of RMS and Peak Frequency according to Tread Rubber

(a) RMS (b) Peak Frequency



(a)



(b)

Fig.5 The Variation of RMS and Peak Frequency according to Deformed Tire Tread Block

(a) RMS (b) Peak Frequency

Fig.5는 돌기에 의해 변형되는 타이어 트레드 블록의 질량변화에 따른 결과를 보인다. 질량이 작을수록 RMS는 감소하였고 주파수의 1차 피크는

동일하였으며 2, 3차 피크는 고주파수로 이동하였다.

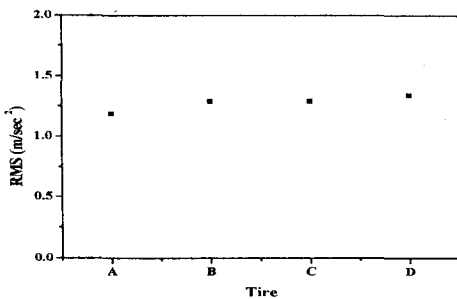
4. 실험방법 및 결과

실험타이어는 P185/65R14로 4가지 서로 다른 구조의 타이어가 사용되었으며, Table 1은 실험타이어의 특성치를 나타낸다. 가속도계는 차량의 축에 부착하고 드림의 속도를 조절하며 시험을 실시한다.

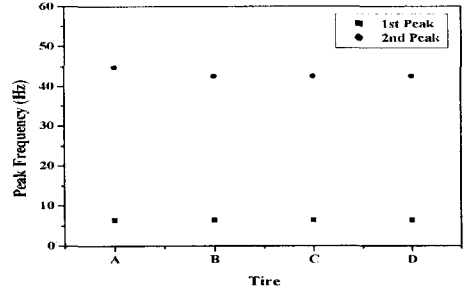
Table 2. Structure of Test Tire

| Item | Unit | Tire A | Tire B | Tire C | Tire D |
|-------------------------------|-----------|----------------------|------------------|------------------|----------------------|
| Vertical Spring Rate (30 PSI) | kg/m m | 21.7 at 448kg | 20.5 at 448kg | 21.5 at 471kg | 21.3 at 471kg |
| Usage | - | Domestic | ← | Europe | ← |
| Tread Rubber Hardness | - | Type 'A' Standard | Type 'B' -5 | ← | Type 'C' Standard |
| Apex Length Hardness | mm | Standard | ← | ← | +15 +20 |

Fig.6는 타이어 'A', 'B', 'C', 'D'에 대한 RMS 및 주파수 변화를 보여준다. 트레드부의 전체적인 강성이 커지면 진동에너지는 작고 고주파로 이동함을 보인다. 이는 해석결과와 동일한 경향을 가진다.



(a)



(b)

Fig.6 The Variation of RMS and Frequency for Tire 'A', 'B', 'C', 'D'

(a) RMS (b) Peak Frequency

5. 결과고찰

Fig.7은 해석결과와 실험결과를 보여주고 있으며, 유사한 경향을 가짐을 볼 수 있다. 결과 사이의 오차항들은 수치해석시에 사용된 타이어의 물성치에 대한 영향으로 판단된다.

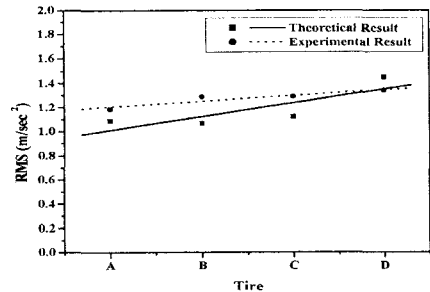


Fig.7 The Comparison between Theoretical and Experimental Result for the Tires having other Structure

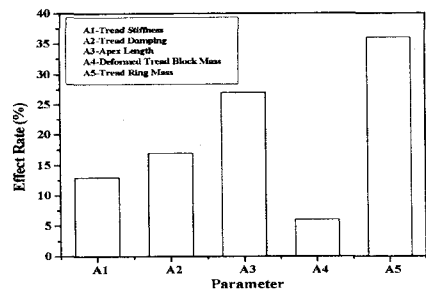


Fig.8 The Effect of Tire Design Parameter for Vibration Energy Fig.10 is Here

Fig.8은 개발된 모델을 이용하여 타이어 진동에 영향을 미치는 타이어 설계인자의 영향도를 보인다. 트레드 링과 에이펙스 길이의 영향이 가장 큰 영향을 가짐을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서 트레드 링의 질량은 10%에서 100%로 변경시켰으며, 에이펙스 길이는 실제 사용되고 있는 범위 내에서 변화시켰다. 실제 타이어에서 트레드 링 질량변화는 10% 이내로 진동에 미치는 영향도는 10% 이내로 파악된다. 따라서 타이어 진동에 가장 큰 영향을 미치는 타이어 설계인자는 에이펙스로 판단된다.

6. 결론

노면의 굴곡에 의해 작용하는 강제력을 고려하여 타이어의 진동특성을 해석하기 위해 타이어를 7자유도계로 모델링하여 수치해석한 결과와 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 타이어 설계인자 변화에 따라 주파수의 1차 피크치는 동일하였으며
 가. 트레드 컴파운드의 강성이 클수록,
 나. 돌기에 의해 변형되는 트레드블록의 질량이 작을수록,
 다. 트레드링의 질량이 클수록
 2, 3차 피크 주파수는 고주파로 이동하였다.
- 2) 노면으로 부터의 진동을 림으로 전달하는 부분인 에이펙스의 변화가 진동에너지 및 고유진동수에 큰 영향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 에이펙스의 길이가 클수록 진동에너지는 증가하였고 고유진동수는 고주파로 이동함을 볼 수 있었다. 에이펙스의 경도가 클수록 진동에너지는 증가하였으나 고유진동수에는 영향을 미치지 않았다.
- 3) 타이어가 돌기를 통과할 때의 진동에너지 저감을 위한 방안을 다음과 같이 제시할 수 있었다.
 가. 트레드 고무드의 강성, 감쇠 증가
 나. 돌기에 의해 변형되는 타이어 트레드 블록 질량 감소
 다. 트레드 링의 질량 감소

라. 사이드부 강성 감소(에이펙스 길이 및 경도 감소)

7. 참고문헌

- 1) A. Chiesa, L. Oberto and L. Tamburini, "Transmission of Tyre Vibrations", *Automobile Engineer*, December 1964.
- 2) J.T. Tielking, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model", SAE Paper No.650492.
- 3) G.R. Potts, C.A. Bell, L.T. Charek and T.K. Roy, "Tire Vibration", *TSTCA Vol.5, No.4*, Nov. 1977.
- 4) N. Yoshimira, "On the Vibrational Properties of Tires", *I.R.C.*, 1985, pp.153-158.
- 5) R.A. Cripe, "Making A Road Simulator Simulate", SAE Paper No.720095.
- 6) M.R. Barone, "Impact Vibrations of Rolling tires", SAE Paper No.770612.