

유한요소법을 이용한 구동상태에 따른 타이어의 특성 분석

전도형*, 최주형*, 조진래†, 김기운**

Analysis of Tire Characteristics according to Driving Conditions using Finite Element Method

Do-Hyung Jeon, Joo-Hyung Choi, Jin-Rae Cho and Kee-Woon Kim

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Stiffness(강성계수), Contact shear force(마찰력), Frequency Response(주파수 응답)

Abstract

This paper discusses the measurement of tire driving performance for 2 types of tire model. Tire is almost composed of rubber, and this is related with the bearing capacity of tire due to the external force. In this study, an explicit time integration method has been used to simulate steady state rolling along a straight path and over a cleat. And analysis for tire dynamic response rolling over a cleat is important to study automobile NVH properties. Besides, the evaluation of contact shear force is performed for steady state rolling and braking state. The results show that there are noticeable differences between 205/60R15 and 225/60R15 tire model.

1. 서 론

자동차 주행에서 안정성과 승차감에 큰 영향을 주는 것은 자동차의 서스펜션과 타이어이다. 특히 타이어는 자동차와 지면을 연결시켜 주는 유일한 역할을 하고 있다.

자동차를 구성하고 있는 부품들은 하나의 부품이 하나의 기능을 수행 하지만 타이어는 수많은 기능을 수행하고 있다. 자동차 타이어의 주요기능으로는 차량의 하중을 지지하는 기능, 구동력, 제동력을 노면에 전달하는 기능, 노면으로부터의 충격을 완화하는 기능, 차량 진행방향의 전환 및 유지시키는 기능등을 하고 있다. 이러한 기능들

을 만족시키기 위해서 타이어는 탄력성이 있는 공기용기일 것이 요구된다. 그리고, 주행중 외상이나 충격에 대한 강도를 견디기 위해서 카카스라 불리는 보강층이 삽입되며, 노면과 접하는 부분은 두꺼운 고무층을 붙여 외상이나 마모에 대처하고 있다.

본 연구에서는 자동차 주행상태에 따른 타이어의 동적 특성에 대해 알아본다. 주요 관심사로는 자동차가 주행중인 경우의 특성, 제동상태에서의 특성, 노면으로부터 받는 충격에 대한 주파수 특성분석이다. 이를 위해 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용한다. 해석 대상으로는 (주)금호 타이어의 205/60R15, 225/60R15 모델에 대한 해석을 수행한다. 이 모델들은 패턴이 다르며, 구성하고 있는 재료의 물성치도 부분적으로 다르다.

타이어의 제동상태를 구현하기 위해서는 우선 차량이 일정속도로 움직이는 정상상태(steady state) 해석이 필요하며, 이를 토대로 제동을 구현한다. 본 연구에서는 40km/h의 속도로 주행중인

† 책임저자, 회원 부산대학교 기계기술연구소

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

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

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 전남대학교 기계공학과

자동차에서 급제동 했을 경우에 대해 알아본다. 이 때 ABS(Anti-brake system)는 고려하지 않았으며, 완전히 락(lock)된 상태라 가정한다.

본 연구를 통해서 서로 다른 2개의 타이어 모델에 대한 특성 분석이 가능하며, 이러한 결과는 타이어의 설계에 도움을 주리라 판단된다.

2. 이론전개

2.1 Explicit 이론

타이어의 rolling 해석과 같은 구조물의 동적 해석을 풀기 위해 운동방정식이 필요하다. 일반적으로 구조물의 운동방정식은 다음과 같은 N자유도(degree of freedom)를 갖는 행렬 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{M}\mathbf{U} + \dot{C}\mathbf{U} + K\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (1)$$

여기서 M , C , K 는 각각 질량, 댐핑, 강성행렬이며, R 은 외부하중이다. 그리고 \ddot{U}, \dot{U}, U 는 각각 가속도, 속도, 변위를 나타낸다.

위의 식 (1)을 풀기 위해서 가속도와 속도가 필요하다. 이 때 현재시점 t 시간에 대해 중앙차분법을 도입하면 가속도와 속도를 다음 식과 같이 사용할 수 있다.⁽¹⁾

$$\ddot{U} = \frac{1}{\Delta t^2} ({}^{t-\Delta t}U - 2{}^tU + {}^{t+\Delta t}U) \quad (2)$$

$$\dot{U} = \frac{1}{2\Delta t} (-{}^{t-\Delta t}U + {}^{t+\Delta t}U) \quad (3)$$

(1)식에 위의 (2),(3)식을 대입하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C\right){}^{t+\Delta t}U = {}^tR - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2}M\right){}^tU - \left(\frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{1}{2\Delta t}C\right){}^{t-\Delta t}U \quad (4)$$

(4)식으로부터 ${}^{t+\Delta t}U$ 을 구할 수 있게된다. 위와 같이 시간 t 에 대한 평형조건을 사용하여 해를 구하는 방식을 explicit integration method라 한다.

이와는 달리 시간 $t+\Delta t$ 에 대한 평형조건을 사용하여 해를 구할 수도 있다. 이러한 방식을

implicit method라 하며 Houbolt, Wilson, Newmark method 등이 implicit integration method를 이용하는 대표적인 방법들이다.

시간적분법을 이용하는 경우에는 시간간격이 안정조건이 만족되도록 선택되어야 한다. 통상, implicit integration method에서는 임의의 시간간격에 대해서 무조건 안정하게 하는 것이 가능하고, 비교적 큰 시간간격을 이용하는 것이 가능하지만, 1 사이클당의 계산량이 많기 때문에 파동전파의 상세함이 그다지 중요하지 않은 장시간응답의 해석에 이용된다. Explicit integration method은 비선형성이 크며, 비교적 짧은 시간의 해석에 주로 쓰인다. 그리고, 안정조건을 만족하도록 작은 시간간격을 이용하기 때문에 파동전파가 지배적인 초기응답의 해석에 이용된다. 안정적인 해를 얻기 위한 최소시간간격은 다음과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{l}{c} \quad (5)$$

여기서, l 은 요소의 최소길이, c 는 파동의 전파 속도($\sqrt{\text{탄성계수/밀도}}$)이다.

2.2 비선형 해석방법

비선형 문제의 해석 방법은 순차 하중 증가법(incremental loading)을 주로 사용한다. 각 하중 단계마다 반복계산을 통해 평형하중 상태를 찾아가며, ABAQUS에서는 Newton Raphson 기법을 사용한다. 이 기법은 수렴속도가 빠르지만, 매번 강성행렬을 구해야 하는 단점이 있다.

2.3 타이어 물성

타이어를 구성하고 있는 대부분의 성분은 고무이며, 고무재료는 비선형거동을 나타낸다. 보통의 경우 고무는 Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Ogden 등의 고무모델을 사용하여 물성을 입력하나 본 연구에서는 해석시간의 감소를 위해서 등가의 탄성계수를 구해서 입력하였다. 그리고 벨트, 플라이부위는 원래 편조사층이 포함되어 있어 rebar 요소를 사용해서 입력하여야 하나, 여기서는 복합재료로 보고 등가물성치를 입력하였다. 본 연구에서는 해석에 사용된 물성치 및 하중조건등에 대해 영국단위계를 적용하였으며, 이해를 돕기 위해 여기서는 SI단위계와 혼용하여 사용하였다.

3. 유한요소 모델

3.1 유한요소모델

패턴이 포함된 타이어를 모델링 하기 위해서 패턴부위만 따로 모델링을 실시한다. 그 뒤 ABAQUS에서 tie명령을 통해 패턴을 스무스(smooth) 타이어에 연결시켜준다.

타이어를 자동차에 연결시켜주는 휠(wheel)을 실제와 동일하게 모델링 하는 것은 비효율적이다. 따라서 휠은 해석시간의 감소를 위해 강체로 가정하며, 타이어가 회전하거나 하중을 받을 경우 지탱하는 역할도 해야 한다. 따라서 본 연구에서는 ABAQUS의 MPC(multi-point constraints)를 이용하여 타이어의 립부분의 노드들을 연결시켜 주어 이러한 효과가 나타나도록 하였다. 또한 휠의 중심에 1500cc급 자동차의 질량에 해당하는 1650kg의 point mass를 적용하여 실제 차량과 같은 관성의 효과가 나타나도록 하였다. 그리고 타이어와 맞닿는 지면은 강체로 모델링하였다. Fig. 1에서는 이렇게 구성된 유한요소 모델을 보여주고 있다. 205/60R15모델의 유한요소 모델링에 사용된 총 노드는 56882개이며, 요소는 35362개이며, 225/60R15모델은 총 노드 52832개, 요소는 38138개이다.

3.2 경계조건(Boundary conditions)

유한요소 해석과정은 내압과정(inflation), 하중부여 과정(footprint), 타이어 속도부여과정(rolling)으로 나뉘 수 있다.

내압과정에서 타이어는 30psi의 압력을 받는다. 그 다음 하중 부여과정에서 타이어는 909.5lbf의 힘을 받는다. 이것은 차량중량 1650kg의 1/4에 해당되는 무게이다. 그리고 타이어 휠 중심 노드에 40km/h에 해당하는 속도를 주어서 타이어가 정상상태에 이르도록 하였다. 타이어 휠 중심 노드는 타이어의 비드와 MPC로 연결되어 있으므로, 경계조건을 단지 중심 노드에 적용시킴으로써 원하는 해석을 할 수 있게 된다.

4. 유한요소 해석

4.1 연직강성(Vertical stiffness)

내압과정 후 타이어에 909.5lbf의 힘을 부여하였다. 이 때 타이어는 연직처짐이 발생한다. 이를

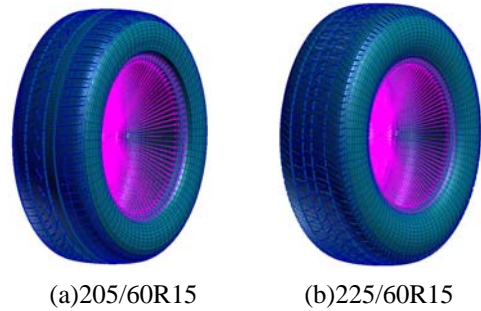


Fig. 1 Finite element model

통해서 타이어의 연직강성을 구할 수 있다. 일반적으로 타이어의 연직강성을 구하는 방법은 연직하중 60%와 100%시 secant slope를 이용한다. 이것을 식 (6)에 나타냈으며 이를 통해서 2가지 타이어 모델에 대한 연직강성값을 알 수 있다.⁽²⁾

$$K = \frac{F_y(100\%) - F_y(60\%)}{\Delta(100\%) - \Delta(60\%)} \quad (6)$$

여기서 F_y 는 연직하중, Δ 는 연직처짐량이다. 식 (6)을 이용하여 2가지 타이어 모델에 대한 연직강성 값을 Table 1에 나타내었다. 그 결과 225/60R15모델이 205/60R15모델보다 좀 더 큰 값이 나왔으며 이를 통해 225/60R15모델이 수직힘에 대한 저항이 좀 더 강할 것으로 예상된다.

Table 1 Vertical stiffness of tire

| | Tire Model | |
|--------------------|----------------|----------------|
| | 205/60R15 | 225/60R15 |
| Vertical stiffness | 1198.1(lbf/in) | 1315.6(lbf/in) |

4.2 접지압(Contact pressure)

타이어가 지면과 접지되었을 때 타이어에는 접

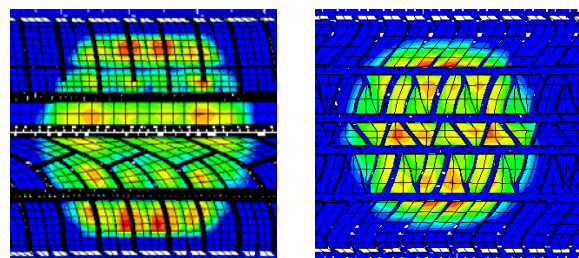


Fig. 2 Comparison of contact pressure

지압력이 생긴다. 이 때 압력이 균일하게 작용하는 것이 타이어의 성능에 중요하며, 보통 가장자리의 압력이 중간부위의 압력보다 1.6배 정도 높다. Fig. 2에서 타이어 접지압을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 타이어 모델에 따라 접지압이 조금씩 차이가 나고 있다. 205/60R15 모델은 조금 타원형의 압력 분포를 보이며, 가장자리 근처에서 조금 높은 압력을 보인다. 그에 반해, 225/60R15 모델은 거의 원형에 가까운 접지압 면적을 보이며, 압력분포가 대칭형으로 나타나고 있다. 이렇게 다른 형태의 접지압 분포가 나타나는 것은 패턴의 영향 때문이라 판단할 수 있다.

4.3 주행중 마찰력의 변화

본 연구에서는 지면을 마른 콘크리트 노면이라 가정하였으며, 이에 기초하여 타이어와 지면간에 마찰계수 0.8을 적용하였다. 또한 지면은 실제 지면과는 달리 완전히 평평한 노면으로 모델링 되어 있다.

타이어가 일정속도로 슬립없이 회전하게 되면 구름마찰이 일어난다. 구름마찰은 미끄럼마찰보다 작다. 그리고 일정속도로 회전시 슬립이 발생하게 되면 구름마찰보다 큰 마찰이 발생한다. Fig. 3에 205/60R15와 225/60R15타이어의 40km/h 주행중일 때의 마찰력을 나타내었다. 그림에서 보듯이 225/60R15타이어가 205/60R15타이어보다 높은 마찰력을 보이고 있다. 이러한 결과는 225/60R15타이어가 205/60R15타이어보다 좀 더 슬립이 많이 발생한다는 것을 뜻한다. 또한 이것은 일정속도로 주행시 225/60R15가 좀 더 많은 마모를 일으킬 가능성이 높다고 판단할 수 있다. 그리고 이러한 마찰력은 주행에 방해를 주어 연비를 떨어뜨릴 가능성이 높다. 그러나 자동차가 주행중 곡선을 따라 회전을 하게 되면 마찰력이 높은 타이어가 지면과의 그립(grip)이 좋아져서 코너링에 도움을 줄 수 있다.

4.4 급제동시 제동력 비교

타이어가 40km/h의 속도로 정상상태 주행을 하던 중 갑작스런 제동을 하게 되면 타이어의 접지면에 제동력이 발생한다. 이 제동력은 타이어 접지면의 마찰력과 동일하다 볼 수 있다. 자동차를 더 짧은 거리에서 제동시키기 위해서는 큰 마찰에너지가 필요하다. 즉, 자동차의 운동에너지를 타이어 접지면의 마찰에너지로 변화시키는 것이다.

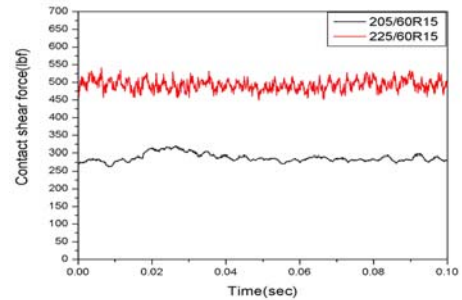


Fig. 3 Comparison of contact shear force at steady state rolling

마찰에너지는 타이어 접지면의 제동력과 미끄러진 거리(slip distance)에 의해 결정된다.⁽³⁾ Fig. 4에서 보듯이 마찰력의 차이는 크게 나지 않는다. 이 경우는 미끄럼 마찰이며, 마찰력은 수직하중과 마찰계수의 곱인 727.6lbf에 근접한다. Fig. 5에서는 마찰에너지를 보여주고 있다. 마찰에너지 역시 크게 차이가 나지 않는다. 그러나 Fig. 6을 보면 225/60R15타이어의 속도가 제동시 훨씬 빨리 감소함을 알 수 있다. 즉 제동거리가 줄어드는 것이다. 이 경우 Fig. 7에서 보듯 타이어의 내부변형에너지(internal energy)에 대해 고려할 수 있다. 즉, 225/60R15타이어는 패턴이 상당히 복잡하게 되어 있으며, 이것이 급제동시 큰 변형을 일으킨다. 따라서 마찰에너지와 내부변형에너지의 합이 운동에너지를 급격히 감소시킨 것으로 판단된다.

Fig. 8에서는 제동시 접지면적의 변화를 보여주고 있는데, 225/60R15타이어의 접지면이 좀 더 크며 이것역시 제동에 도움을 주는 것으로 판단된다. 따라서 패턴의 형상이 제동에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 추가적으로 패턴이 없는 스무스(smooth) 타이어에 대한 제동성능 평가가 필요하며, 이러한 것은 패턴의 영향에 대한 좀 더 많은 정보를 제공할 것이다.

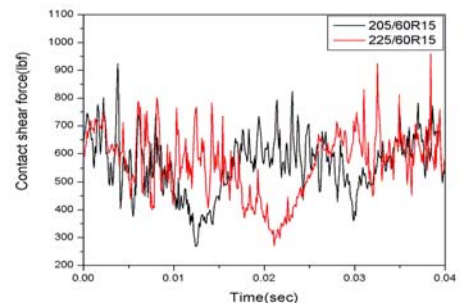


Fig. 4 Comparison of contact shear force in braking state

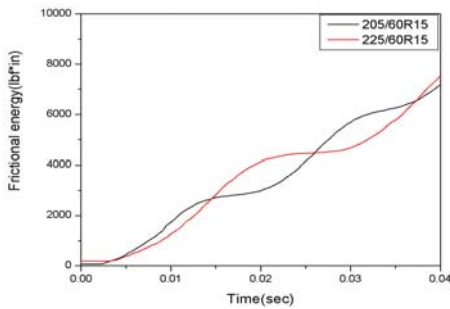


Fig. 5 Comparison of frictional energy rate in braking state

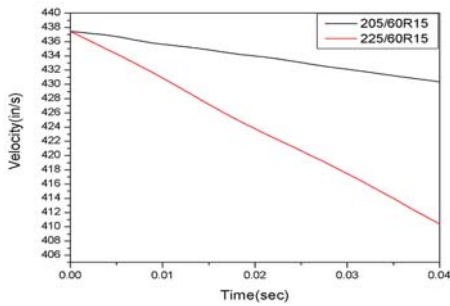


Fig. 6 Comparison of velocity in braking state

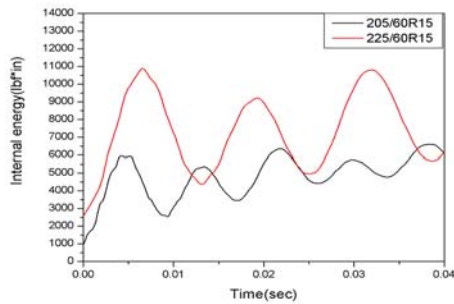


Fig. 7 Comparison of internal energy in braking state

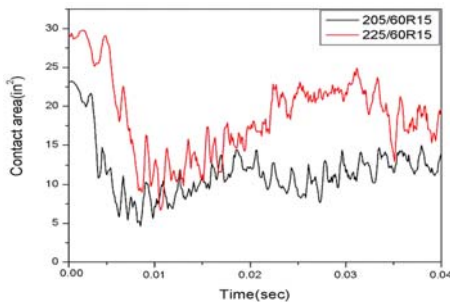


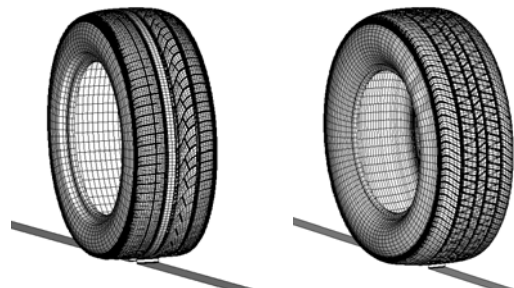
Fig. 8 Comparison of contact area in braking state

4.5 돌기물 통과시 비교

도로에는 자동차의 과속을 막기 위한 과속방지턱이 있다. 이러한 턱을 지나갈 때 타이어에 충격을 주며 이것은 차량의 승차감에 영향을

미친다.

본 연구에서는 타이어가 돌기물을 넘어갈 때의 반력의 변화를 살펴봄으로써 타이어의 모델에 대한 평가를 수행하였다. 돌기물은 높이 0.5in, 폭 2in로 모델링 하였다. Fig. 9에서 205/60R15, 225/60R15 모델이 돌기물을 통과할 때를 보여준다. Fig. 10,11은 돌기물을 통과할 때의 타이어의 수직반력과 수평반력에 대한 그림을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 12,13은 수직반력, 수평반력에 대해 Fast Fourier transformation을 이용하여, 시간영역에 대한 값을 주파수 영역에 대한 값으로 변환시킨 그래프이다.⁽⁴⁾



(a)205/60R15 (b)225/60R15

Fig. 9 Tire Rolling over a cleat

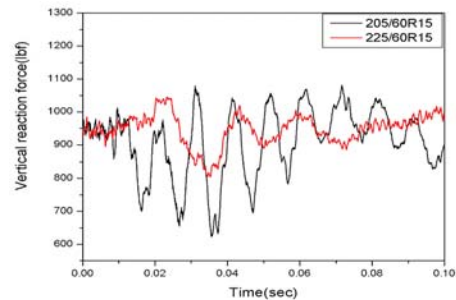


Fig. 10 Vertical reaction force in tire rolling over a cleat

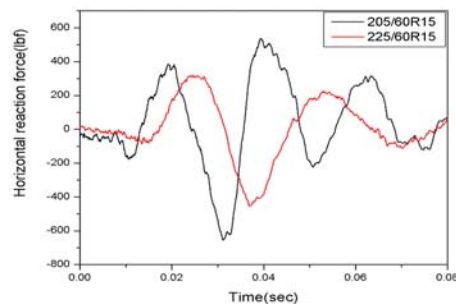


Fig. 11 Horizontal reaction force in tire rolling over a cleat

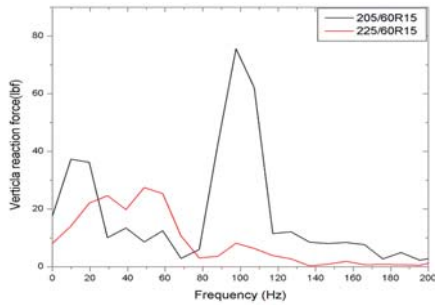


Fig. 12 Frequency response of vertical reaction force in tire rolling over a cleat

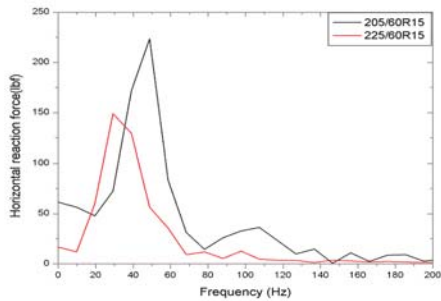


Fig. 13 Frequency response of horizontal reaction force in tire rolling over a cleat

Fig. 10~13에서 보듯이 225/60R15타이어가 205/60R15타이어보다 반력의 크기도 적으며 주파수 특성도 낮게 나왔다. 즉 225/60R15타이어는 외부의 충격에 대한 흡수능력이 좋다는 것을 알 수 있다. Table 2에 최대 진폭에서의 주파수 값을 비교하였다.

Table 2 Frequency response

| | 205/60R15 | 225/60R15 |
|------------|-----------|-----------|
| Vertical | 97.7Hz | 48.8Hz |
| Horizontal | 48.8Hz | 29.3Hz |

5. 결 론

본 연구에서는 205/60R15, 225/60R15의 2개 모델에 대한 동적 특성 평가를 수행하였다. 타이어 모델의 선택은 사용목적에 따라 다르다. 본 연구에서 사용된 205/60R15타이어는 고속주행형 타이어이며, 225/60R15타이어는 SUV(Sports utility vehicle)용 차량에 주로 사용된다. 2개의 타이어 모델에 대한 동적 특성 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 주행중인 타이어의 마찰력은 225/60R15타이어가 높았으며 이것은 타이어 연비에 좋지 못한 영향을 미친다. 그러나 코너링시에 강한 그립(grip)능력을 제공할 것으로 판단된다.

(2) 급제동시 225/60R15의 내부변형에너지가 높게 나타나며 이것은 제동거리를 줄이는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

(3) 돌기물 통과시 225/60R15타이어의 충격흡수능력이 뛰어나다.

위의 결과를 통해 225/60R15타이어는 SUV차량에 장착되는 만큼 충격 흡수능력이나, 코너링시에 우수한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 205/60R15는 주행중 마찰력이 적게 나타나며 이것은 고속주행시 연비를 절약시킬 수 있다. 따라서 위의 타이어 모델들은 원래 목적인 바에 맞게 설계되었다는 것을 알 수 있다.

본 연구를 통해 제시된 방법은 타이어의 최적 설계 및 성능분석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국환경기술진흥원의 차세대 핵심 환경기술 개발사업지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bathe, K.J., 1996, Finite Element Procedures, Prentice Hall International Editions, New Jersey
- (2) Sang Sun Lee, Jae Sam Ban, Hang Woo Kim, Kyu Zong Cho, 2002, "A Study on the Stiffness of Tire", *Proceedings of the KSPE 2002 Spring Annual Meeting*, pp. 886~889.
- (3) Joo-Hyung Choi, Do-Hyung Jeon, Jin-Rae Cho, Gi-Jeon Kim and Jong-Shik Woo, 2003, "A Study on Braking Distance Estimation of Patterned Automobile Tire", *Proceedings of the KSME 2003 Autumn Annual Meeting*, pp. 51~56.
- (4) H.S.Jeong, K.W.Kim, H.G.Beon, 2003, "Transient Dynamic Analysis of a Patterned Tire Rolling over a Cleat with an Explicit Finite Element Program", *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol.11, NO.6, pp. 164~170