

접지면 중앙에서 3차원 방향의 충격 가진에 의한 타이어의 3차원 진동형이 축에 미치는 영향

김 용 우¹⁾ · 남 진 영²⁾

순천대학교 기계공학과¹⁾ · 순천대학교 대학원²⁾

3-D Vibration Modes of the Tire in Ground Contact and Its Effects on Axle When Excited by a 3-D Impact at the Center of Contact Patch

Yong-woo Kim¹⁾ · Jinyoung Nam²⁾

*^{1,2)}Department of Mechanical Engineering, Sunchon National University, Sunchon 540-742, Korea

(Received 21 December 2002 / Accepted 22 August 2003)

Abstract : Tire vibration modes are known to play a key role in vehicle ride and comfort characteristics. Inputs to the tire such as impacts, rough road surface, tire nonuniformities, and tread patterns can potentially excite tire vibration. In this study, experimental modal analysis on the tire in ground contact are performed by a 3-D impact at the center of contact patch to investigate which modes of tire influence the vibration of wheel and axle. Through the experiment, the vibration transmission properties from tire to axle are examined. And we have compared the influential tire modes when the tire is excited by a vertical impact with those when excited by the 3-D impact. Additionally, the modes of ground contact tire are compared with those of the suspended tire.

Key words : Radial tire(레이디얼 타이어), Frequency response function(주파수응답함수), Natural modes(고유진동형), Natural frequency(고유진동수), Air cavity resonance(공기공동공명)

1. 서 론

승용차의 승차감과 소음 발생을 예측하거나 감소시키는데 있어서 타이어의 진동 특성은 중요한 부분을 차지한다. 따라서 1960년대 초반부터 많은 연구자들에 의해 타이어의 진동 특성에 대하여 많은 연구^[1-9]가 이루어지고 있다.

타이어의 진동 특성과 승차감을 연관시킨 대표적인 연구로 다음과 같은 연구들을 들 수 있다. Barone^[10]는 드럼 테스트를 실시하여 돌기에 의한 충격력과 축에 작용하는 힘의 크기와의 관계를 정량화하고자 시도하였다. Richards 등^[11]은 타이어의 진

동 특성이 접지여부 및 축의 경계조건에 의존함을 보였다. Scavuzzo 등^[12]은 승차감에 대한 타이어 진동형의 영향을 보이기 위하여 축(spindle)의 모든 자유도를 제한하지 않는 장치를 제작하고 이 장치에 타이어를 장착하여 타이어의 진동특성을 측정하였으며, 또한, 타이어를 회전하는 드럼시험기(chassis roll)에 장착하여 축의 진동 특성과 차량내부(steering column과 seat track)의 진동 특성을 측정하였다. 그 결과, 축의 진동특성과 차량내부의 진동 특성간의 밀접한 관계가 있음을 보였다. 그러나 Scavuzzo 등이 위의 두 가지 실험에 적용한 장치가 다르기 때문에 타이어에 부과되는 경계조건이 다르게 되어 타이어의 진동특성과 축의 진동특성을 직접적으로

* To whom correspondence should be addressed.
kyw@sunchon.ac.kr

연관시키지 못하였다.

본 연구에서는 양단지지형 축에 장착된 타이어(P205/60R15)에 하중을 가하여 지면에 접지시키고 타이어의 접지면의 중앙에 3차원 방향의 가진을 하여, 타이어 및 축에서의 진동 특성을 측정함으로써 타이어의 진동 특성이 휠과 축에 미치는 효과를 검토한다. 또한 지면에 접촉한 타이어의 진동형을 지면에 접촉되지 않은 상태¹³⁾의 타이어 진동형과 비교한다.

2. 실험

Fig. 1과 같은 실험 장치를 이용하여 타이어에 300kgf의 하중을 가하여 지면과 접촉시킨 상태에서 모달 테스트를 실시하였다. Fig. 1의 실험장치는 타이어-휠의 단체(tire-wheel unit)를 축에 고정시킨 부분(tire-wheel-axle unit)과 이 부분을 잡고 두 개의 평행한 기둥(column)을 따라 상하로 이동할 수 있도록 잡아주는 □-자형 프레임 고정구-슬라이더 부분(□-shaped frame-fixture-slider unit)으로 구성되어 있다. Fig. 1은 타이어-휠의 단체를 축에 있는 어댑터(adapter)에 고정하고, 이 축이 회전할 수 없도록 □-자형 프레임의 양쪽 하단에서 고정구(fixture)로 완전하게 고정시킨 상태를 보여주고 있다. 그리고 이상태에서 □-자형 프레임의 상단 중앙에 설치된 유압 실린더로 타이어에 하중을 가할 수 있도록 제작하였다. 타이어와 접촉되는 접지면(ground plate)으로는 밀링머시인으로 기계가공한 두께 20mm의 강판을 사용하였다.

접지면의 중앙점에서 Fig. 2와 같이 상하방향(Z축 방향), 좌우방향(Y축 방향) 및 전후방향(X축 방향)으로 동시에 타이어를 충격해머(impact hammer)로 직접 가진하기 위해, 접지판의 중앙에 Fig. 2에 보인 방향(3-D impact direction)으로 직경 16mm의 관통 구멍을 뚫고 이 구멍을 통해 타이어의 표면에 스틸플러그(steel plug)을 부착시킨 다음 이 플러그를 타격하여 타이어를 가진시켰다. 이 타격 방향은 타격의 영향이 X, Y, Z축의 세 방향으로 균일하게 전달되도록 세 축과 각각 동일한 각도를 이루는 방향이다. 이와 같은 가진을 본 연구에서는 3차원 가진이라 부른다.

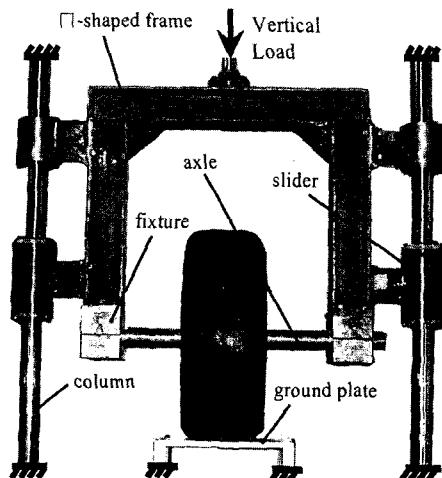


Fig. 1 Experimental apparatus

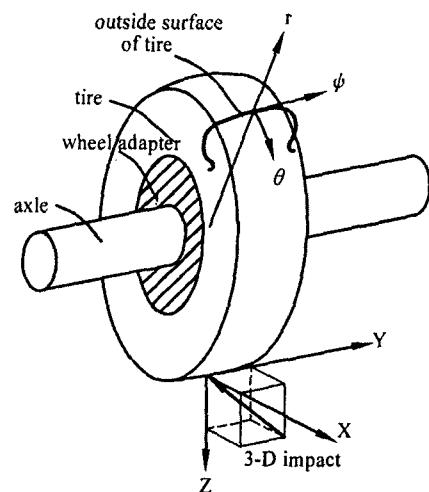


Fig. 2 Global coordinates(X-Y-Z) of tire-wheel-axle assembly, local coordinates(r - θ - ϕ) of tire and impact direction

3차원 가진을 이용하여, 타이어, 휠 및 축에서 응답을 받아 주파수 응답함수(FRF, frequency response function)를 검토하기 위하여, Fig. 3과 같은 다채널 신호분석기(multi-channel signal analyzer)시스템을 사용하였다. 그리고 타이어 및 축에서 응답을 받아 주파수응답함수(FRF, frequency response function)을 검토하기 위하여, SIMO(single-input-multi-output)방법의 하나인 GRFP(global rational fraction polynomial method)¹⁴⁾를 적용하여 3차원 고유진동형을 구하였다.

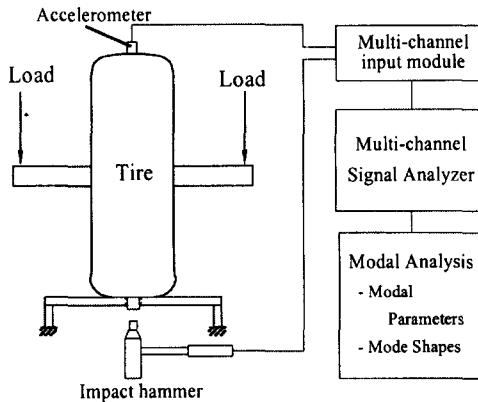


Fig. 3 Schematic diagram for a tire modal test

타이어의 주파수 응답함수를 측정하기 위해, 타이어의 좌표설정 및 측정은 참고문헌 9)에서와 동일한 방법을 사용한다. 즉, 타이어 표면상에서 응답을 받기 위해 설정한 국부좌표계는 Fig. 4에서 보인 바와 같이 타이어 표면에 수직한 방향을 r 방향, 회전방향을 θ 방향, $r-\theta$ 평면에 수직한 방향을 ψ 방향으로 하는 구좌표계를 사용하여, Fig. 4(a)에서 보는 225개의 격자점에서 세 방향으로 응답을 받아 FRF를 얻었다. 그리고 휠 어댑터(wheel adapter)에 대해서도 축에서 동일한 반경 상에 있는 8개소(Fig. 4(b) 참조)에서 각각 세 방향의 FRF를 얻었으며, 축을 따라서 7개소(Fig. 4(b) 참조)에서 X, Y, Z축 방향으로 각각 응답을 얻었다. 또한 타이어와 지면이 접하는 접지면적에서의 응답을 얻는 것이 불가능하므로, 접지판의 아랫면의 5개소(Fig. 4(c) 참조)에서 X, Y, Z축 방향으로 각각 응답을 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 타이어 진동형

지면에 접촉된 타이어(내압 2.20kgf/cm², 수직하중 300kgf)의 접지면의 중앙에서 3차원 가진을 하여 실험모드해석을 실시하여 Fig. 5와 같은 FRF를 얻었다.

Fig. 5(a)는 타이어의 A점(Fig. 4(a))의 γ , θ , ψ 방향의 주파수 응답함수이고, Fig. 5(b)는 B점(Fig. 4(a))의 γ , θ , ψ 방향의 주파수 응답함수이다.

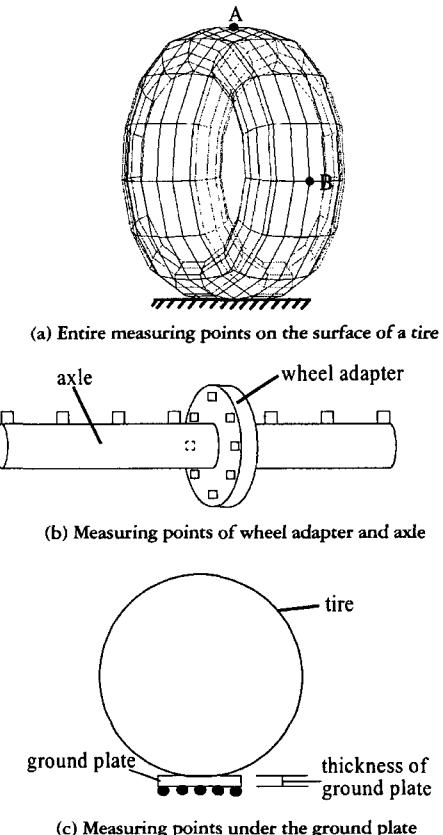


Fig. 4 Measuring points

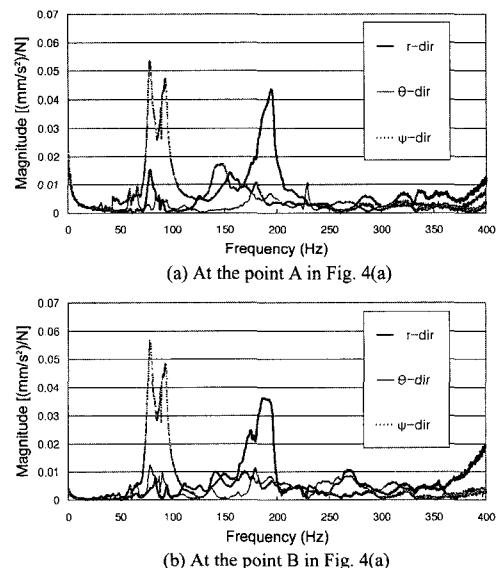


Fig. 5 Frequency response functions of the tire

3.1.1 공진봉의 크기 비교

Fig. 5를 살펴보면 γ 방향의 공진봉의 크기는 130Hz~200Hz사이에서 크게 나타나고 있다. 전체적으로 θ 방향에서 나타나는 공진봉의 크기는 γ 방향과 ψ 방향의 크기보다 상대적으로 작다. ψ 방향의 공진봉의 크기는 60Hz~100Hz사이에서 크게 나타나고 있다. 즉, 100Hz이하의 진동형들은 ψ 방향의 진동형(좌우방향의 진동형(lateral mode))이 지배적이며, 100Hz 이상에서는 γ 방향의 진동형들이 지배적임을 알 수 있다.

3.1.2 좌우방향 진동형(lateral mode)

좌우방향의 진동형은 100Hz 이하에서 주로 많이 발생한다. 타이어의 ψ 방향의 응답을 잘 살펴보기 위하여 트레드 부분을 펼쳐서 ψ 방향의 진동형을 고려한다. Fig. 6은 타이어가 지면에 접촉되지 않았을 때,¹⁵⁾ Fig. 7은 타이어가 지면에 접촉되어 있을 때의 펼친 트레드 ψ 방향의 진동형이다.

지면에 접촉되지 않은 상태에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 타이어의 중앙선을 중심으로 반대칭

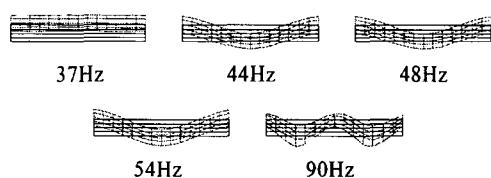


Fig. 6 Lateral modes of a tire which is not contacted with ground and is suspended by ends-supported axle

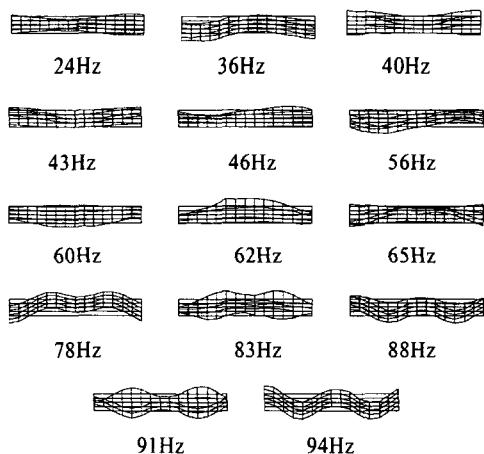


Fig. 7 Lateral modes of the tire in ground contact

이거나 좌우 대칭인 진동형으로 존재하나 지면과 접촉되었을 때는 Fig. 7에서와 같이 많은 좌우방향의 진동형이 존재하고 있고 접지의 효과로 인하여 비대칭적인 진동형이 많이 발생한다.

3.1.3 공기공동공명(air cavity resonance)

Fig. 8은 타이어가 지면에 접촉되지 않았을 때와 접촉되었을 때 압력센서를 사용하여 공기진동의 동압을 측정한 FRF를 비교한 것이다. Fig. 8을 살펴보면 공기공동공명은 타이어가 지면과 접촉되지 않았을 때 234Hz에서 하나로 나타나는데^{9,15)} 지면과 접촉되면서 228Hz와 235Hz로 분지되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

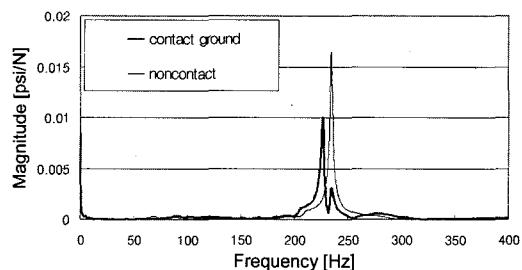


Fig. 8 FRF of the air air cavity vibration

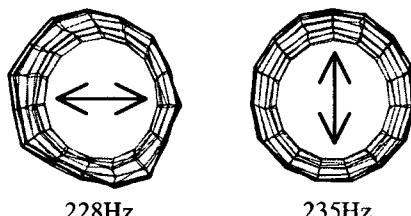


Fig. 9 3-D modes of air cavity resonance

또한 공기공동공명은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 타이어의 θ 방향의 FRF에서 뚜렷이 측정되며, 전후방향으로 진동하는 진동형(228Hz)과 상하방향으로 진동하는 진동형(236Hz)으로 나타나고 있다(Fig. 9).¹⁶⁾

3.1.4 굽힘진동형(bending mode)

지면과 접촉하는 타이어의 진동형을 살펴보면, 지면과 접촉하지 않는 경우의 진동형에는 없던 새로운 굽힘진동형이 나타난다. 이러한 모드 중 대표적인 굽힘형을 Fig. 10에 도시한다.⁸⁾

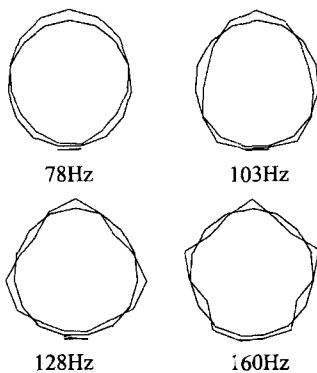


Fig. 10 Bending modes in ground contact

3.2 타이어 진동형과 축의 진동형

하중을 받고 있는 지면접촉 타이어를 지면에서 3 차원 가진하였을 때, 타이어 진동형이 축에 미치는 영향을 알아보기 위하여 축과 일체로 되어 있는 휠 어댑터에서의 주파수응답함수를 검토한다. Fig. 11 은 3차원 방향으로 가진하였을 때의 휠 어댑터에서의 주파수 응답함수이다. 그리고 이때의 타이어의 주요 고유진동수와 타이어의 진동형 그리고 이 고유진동수에서의 축과 휠 어댑터의 진동형을 Table 1 에 정리한다. Fig 2에서 정의한 좌표계를 사용하여, 휠 어댑터와 축의 진동형의 정면도(Y-Z 평면), 평면도(X-Y 평면)를 Table 1의 두 번째 및 세 번째 칸에 각각 도시한다. 그리고 휠 어댑터의 진동형을 네 번째 칸에, 그리고 타이어의 트래드 중앙선의 r 방향

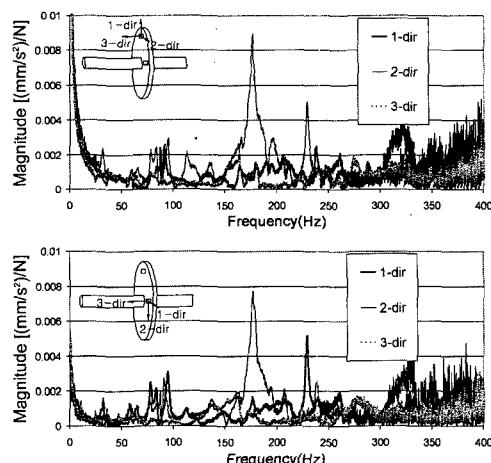


Fig. 11 Frequency response functions at the wheel adapter when the tire is excited by the 3-D impact

진동형 및 접지판의 진동형과 타이어의 3차원 진동형을 다섯 번째 칸에 각각 도시한다.

Fig. 11과 Table 1로부터 타이어 진동형 중에서 축에 크게 영향을 미치는 주요 진동형을 순서대로 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 The frequency and its magnitude of the major modes that influence on the vibration of wheel adapter and axle, where the unit of magnitude is $[10^{-3} (\text{mm/s}^2)/\text{N}]$ and the asterisk denotes that the corresponding modes are originated from the natural modes of the unit of □-shaped frame and axle

	Z-direction	X-direction	Y-direction	Torsional mode
1	91Hz (2.71)	228Hz (5.20)	165Hz (3.03)	175Hz (8.92)
2	88Hz (2.43)	95Hz (3.06)*	179Hz (1.58)	195Hz (2.90)
3	235Hz (2.37)	78Hz (2.53)		165Hz (1.69)
4	24Hz (1.99)	83Hz (2.44)		179Hz (1.51)
5	179Hz (1.58)	32Hz (2.40)		60Hz (1.08)
6		195Hz (2.28)		65Hz (1.07)
7		113Hz (2.22)		
8		60Hz (1.29)		
9		65Hz (1.27)		

Fig. 11, Table 1 및 Table 2로부터 주요 특징을 요약하면 다음과 같다. 175Hz의 타이어 진동형은 타이어의 사이드 월이 비틀리면서 어떠한 진동형보다 휠과 축을 비트는 테 크게 영향을 미치고 있다. 또한 91Hz, 88Hz의 타이어 진동형과 공기공동공명인 236Hz의 것이 휠과 축의 상하방향 진동에 크게 영향을 미치고 있으며, 전후방향으로는 공기공동공명인 228Hz의 타이어 진동형이 가장 크게 영향을 미치고 있다. 좌우방향으로는 165Hz의 진동형이 크게 영향을 미치고 있다. 또한 100Hz 이하의 타이어의 진동형은 대부분 상하방향 및 전후방향 진동에 큰 영향을 미치고 있으며 160Hz~200Hz 사이의 고유진동형은 축을 비트는데 많이 기여하고 있음을 알 수 있다.

3.3 실험장치의 진동특성에 의한 영향 검토

Table 1에 정리한 지면접촉 타이어(내압, 2.20 kgf/cm²)의 진동특성에는 실험장치의 진동특성에

Table 1 Natural frequencies and wheel adapter/axle mode shapes when tire is in ground contact. The asterisk in the first column denotes that the corresponding tire modes are originated from the natural modes of the unit of \square -shaped frame and axle

Freq. (Hz)	wheel adapter & axle		wheel adapter's mode	tire mode		
	Y-Z Plane	X-Y Plane				
24						
32						
60						
65						
78						
83						
88						

접지면 중앙에서 3차원 방향의 충격 가진에 의한 타이어의 3차원 진동형이 축에 미치는 영향

91						
95*						
113						
165						
175						
179						
195						
228						
235						

의한 것이 있을 수 있으므로 본 절에서는, 이에 대하여 검토한다.

3.3.1 □-자형 프레임과 축의 영향 검토

Fig. 1의 상태에서 타이어를 제거한 상태, 즉 Fig. 12(a)에서와 같은 상태의 「□-자형 프레임과 축」의 진동특성을 검토한다.

□-자형 프레임과 축에 대하여 Fig. 12(a)와 같이 □-자형 프레임의 양쪽에 각각 4개소씩, 위쪽에 3개소, 그리고 축에 3개소에 X, Y, Z 방향으로 가속도계를 부착하고 휠 어댑터(Fig. 12(b)))에서 각각 X, Y, Z 방향으로 가진하여 Fig. 13과 같은 주파수응답함수를 얻었다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이 본 실험의 주요 관찰대상의 주파수대역인 250Hz 미만에서 「□-자형 프레임과 축」의 공진봉은 X방향으로 33Hz, 57Hz, 87Hz, 89Hz, 94Hz에서 나타나고 있다. 이 고유진동수에서 「□-자형 프레임과 축」의 고유진동형은 Fig. 14와 같다.

Fig. 14로부터, 「□-자형 프레임과 축」의 진동이 운동학적으로 지면접촉 타이어의 X-방향(전후방향) 진동에 영향을 주고 있을 뿐 다른 방향으로는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러므로 이 영향을 고려하지 아니한 지면 접촉 타이어의 고유진동수와 진동형(Fig. 11과 Table 1)을 「□-자형 프레임과 축」의 고유진동수(Fig. 13과 14 참조)에서 각각 관찰, 비교해봄으로써 「□-자형 프레임과 축」의 고유진동형이 타이어의 진동에 미치는 영향 정도를 관찰할 수 있다. 이러한 관점에서 지면접촉 타이어에 3차원 가진시의 「□-자형 프레임과 축」의 진동 특성을 조사하여, 세 방향의 FRF를 Fig. 15에, 그리고 고유진동형을 Fig. 16에 도시하였다.

Fig. 15와 Fig. 16을 Table 1의 타이어의 주요 진동형과 비교해 보면, 「□-자형 프레임과 축」의 고유진동형 중에서 94Hz의 것이 실제로 타이어를 전후 방향으로 진동하게 하고 있음을 알 수 있다. 33Hz의 진동형(Fig. 14)은 타이어와 결합하여 지면에 접지되었을 경우 나타나지 않는다. 57Hz의 진동형(Fig. 14 및 Fig. 15)에 해당하는 지면접촉 타이어의 진동형에 미치는 영향(크기)은 무시할 정도로 작다. 또한, 87Hz 및 89Hz의 진동형(Fig. 14)은 지면접

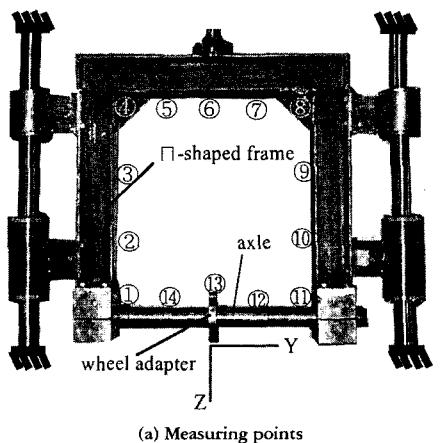


Fig. 12 Measuring points and impact points in the modal test of the unit of □-shaped frame and axle

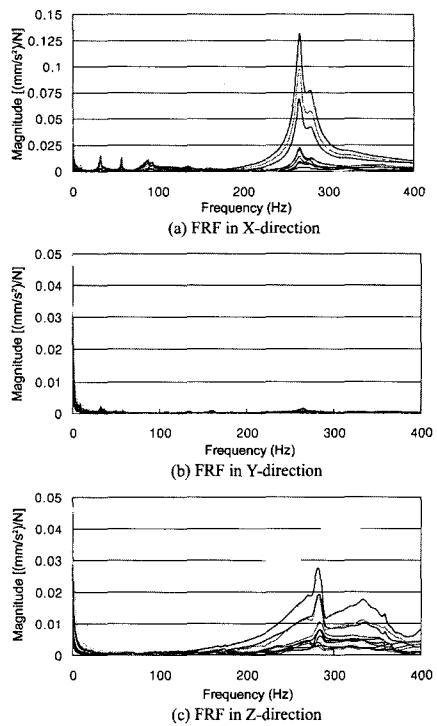


Fig. 13 Frequency response functions of the unit of □-shaped frame and axle

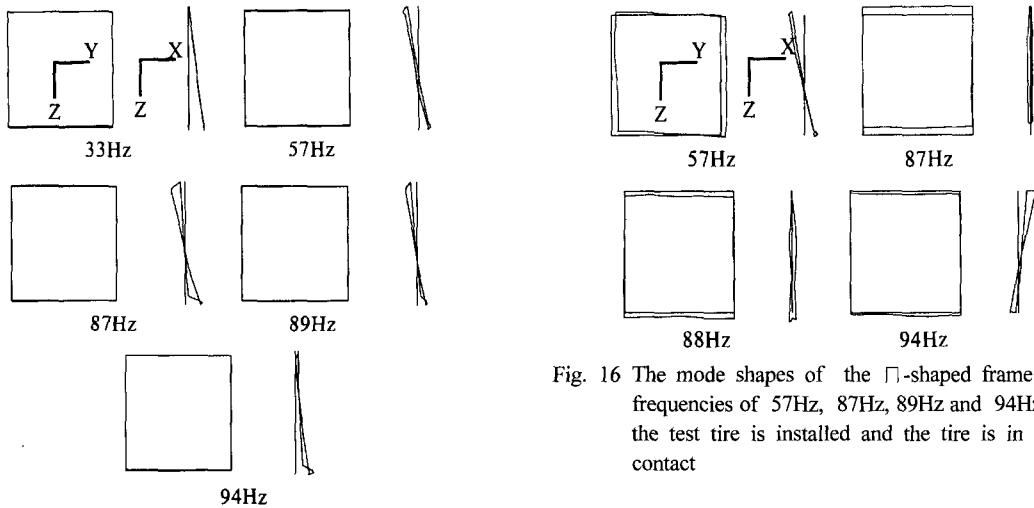


Fig. 14 The mode shapes of the unit of □-shaped frame and axle

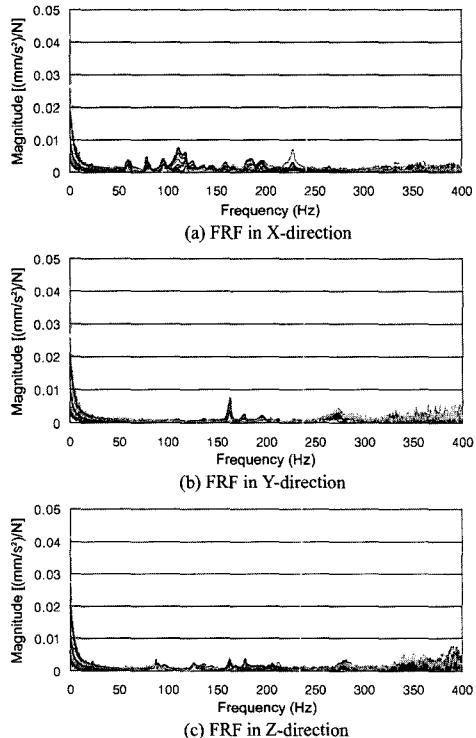


Fig. 15 The frequency response functions of the □-shaped frame when the test tire is installed and the tire is in ground contact

측 타이어를 장착할 경우 Fig. 16에서 보는 바와 같이 X축 방향으로 진동은 무시할 정도로 작아진다.

Fig. 16 The mode shapes of the □-shaped frame at the frequencies of 57Hz, 87Hz, 89Hz and 94Hz when the test tire is installed and the tire is in ground contact

따라서 Table 1의 진동형 중 94Hz의 것은 실험장치에 의해 발생한 타이어 모드이며, 나머지는 타이어의 고유모드에 의한 것임을 알 수 있다. 이 진동형을 구분하기 위해 Table 1과 Table 2에 실험장치에 의한 고유진동수에는 별표(*)를 표시하여 구분하였다.

3.3.2 접지판의 영향 검토

접지판의 진동특성에 의한 영향을 검토하기 위해 Fig. 17과 같이 측정점(접지판의 윗면에 4개소, 양쪽 면의 바깥쪽면에 각각 4개소)을 설정하고, X, Y, Z 방향으로 가진하여 각 측정점의 FRF를 얻었다. 그 중에서 측정점 ⑤-⑧의 FRF를 Fig. 18에 도시하였다. 또한 타이어에 300kgf의 수직하중을 가하여 타이어를 접지시켰을 때 타이어에 3차원 방향으로 부착된 스틸 프력을 가진하여 접지판의 측정점 ⑤-⑧에서의 FRF를 Fig. 19에 나타내었다.

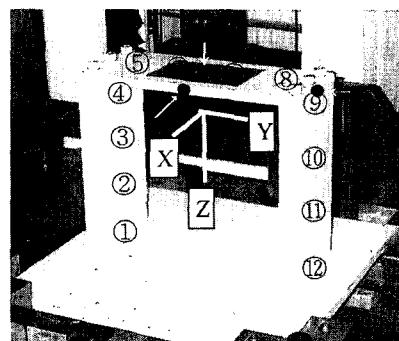


Fig. 17 Measuring points, impact points(•) and their directions(\downarrow , \leftarrow , \nearrow) in the modal test of the unit of ground plate

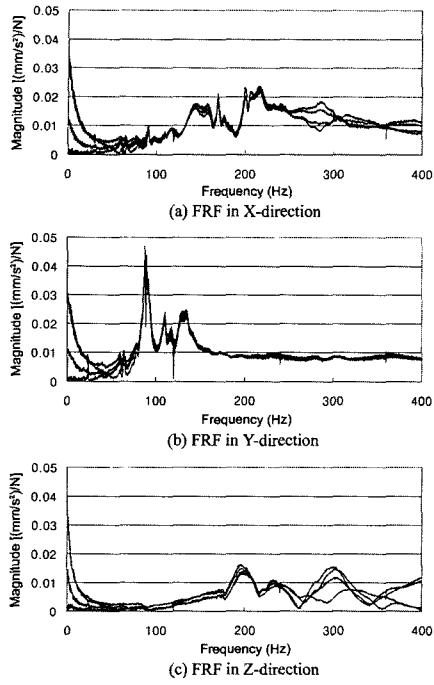


Fig. 18 Frequency response functions of the unit of ground plate

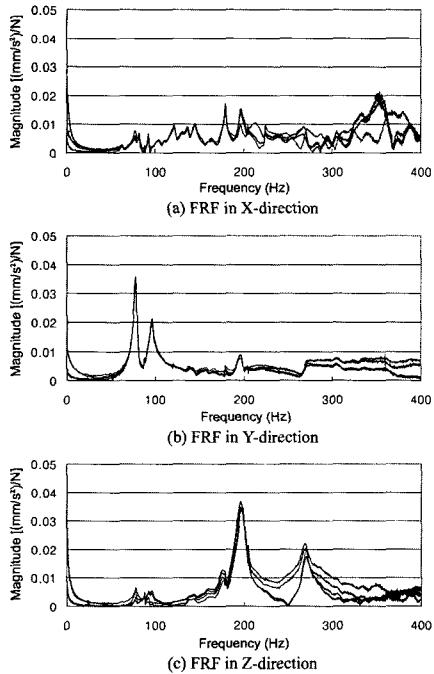


Fig. 19 Frequency response functions of the ground plate when the tire is installed and is in ground contact under the vertical load of 300 kgf

Fig. 18 및 19를 검토한 결과, 78Hz, 95Hz 및 195Hz의 접지판의 진동이 타이어의 진동과 연관이 있는 것처럼 보인다. 이에 대해 그 연관성 여부를 검토하기 위하여, 지면접촉 타이어를 3차원가진하여 얻은 접지판의 해당 고유진동형을 Fig. 20에 도시한다. Fig. 20의 78Hz의 고유진동형은 좌우방향으로 진동하는데 반해, Table 1을 보면 타이어는 상하방향으로 진동하며, 휠 어댑터는 전후방향으로 진동하고 있다. 이러한 사실로부터 접지판의 좌우방향의 진동(78Hz)은 타이어 및 축의 진동에 그다지 큰 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있다. 95Hz(Fig. 20)의 경우 접지판이 주로 좌우방향으로 진동하는데 반해, Table 1을 보면 타이어 및 휠 어댑터는 전후방향으로 진동한다. 이러한 사실은 접지판의 좌우방향의 진동(95Hz)은 타이어 및 휠 어댑터의 진동에 영향을 주지 못함을 의미한다. 또한, 195Hz(Fig. 20)의 경우 접지판은 상하방향으로 진동한다. 이 진동방향은 Table 1에 나타난 접지판의 진동방향과 일치한다. 그러나 Table 1의 휠 어댑터의 진동형을 보면 타이어의 지면 접촉부분에 가까운 쪽만 진동하며 먼 쪽은 거의 진동하지 않고 있으며 또한 축의 상하방향(Table 1)의 진동이 거의 무시할 정도로 작은 것으로 보아, 접지판의 상하방향 진동이 축에 미치는 영

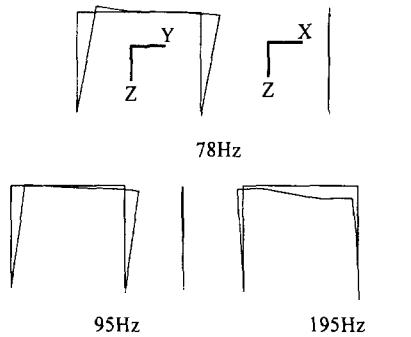


Fig. 20 The natural mode shapes of the ground plate unit at the frequencies of 78, 95, and 195 Hz

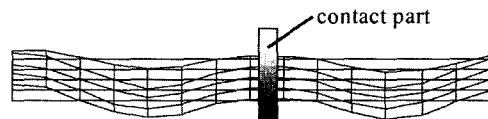


Fig. 21 The contact part(shaded area) denoted in a typical lateral mode in Fig. 7

향은 매우 적음을 알 수 있다. 따라서 대체로 접지판의 진동이 타이어의 축과 휠 어댑터에 미치는 영향은 무시할 수 있는 정도의 것으로 판단된다.

3.3.3 접지판의 특성이 지면 접촉 타이어의 진동특성에 미치는 영향 고찰

Fig. 10이나 Table 1의 지면접촉 타이어의 반경방향 진동형을 보면, 지면과 접촉하는 부분에서도 Z방향의 변위가 발생하고(즉, 진동하고) 있다. 이는 가진된 접지 타이어가 진동함에 따라 그 진동이 접지판에 전달되어 접지판이 Z방향으로 강제진동하게 되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7에 있는 지면접촉 타이어의 트레드의 좌우방향(Y방향 또는 ϕ 방향) 진동형을 보면 지면접촉부분(펼친 트레드의 중앙 부분, Fig. 21에 예를 들어 지면 접촉부분을 표시하였음)에서도 지면과 완벽하게 접촉하여 미끄러지지 않는 것이 아니고, 지면과 마찰하면서 좌우방향으로 진동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 지면과 타이어 트레드 사이의 접촉면에서의 마찰력의 크기에 따라서 고유진동수 및 진동형에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 향후, 지면과의 접촉면에서의 마찰력이 지면접촉 타이어의 진동 특성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 타이어가 지면에 접촉되어 있을 때의 상하방향 뿐만 아니라 좌우방향 및 전후방향의 가진에 의한 타이어의 고유진동형이 휠과 축에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 지면에 접촉된 타이어(P205/60R15)를 가진하여 타이어와 휠과 축에서의 주파수 응답함수를 검토, 분석하였다. 또한 지면접촉 타이어의 진동형과 비접촉 타이어의 진동형의 차이점을 비교하였다. 그결과 다음의 사실들을 확인할 수 있다.

- 1) 타이어의 진동형은 60Hz~100Hz에서 좌우방향의 진동형(lateral mode)¹⁾이 지배적이며, 130Hz~200Hz 사이에서는 r 방향의 진동형이 지배적이다.
- 2) 3차원 가진하였을 때, 어떠한 진동형보다 휠과 축에 가장 크게 영향을 미치는 진동형은 축을 비

트는 175Hz의 진동형이다. 그리고 상하방향으로 휠과 축에 가장 큰 영향을 미치는 타이어의 고유형은 91Hz와 88Hz의 것이며, 휠과 축의 전후방향 진동에 가장 큰 영향을 주는 타이어의 고유진동형은 공기공동공명 진동형인 228Hz의 것이다. 또한 100Hz이하의 타이어 고유진동형은 주로 휠과 축에 전후방향과 상하방향으로 영향을 미치고 있고 160Hz~200Hz 사이의 타이어 고유진동형은 사이드 월의 비틀림으로 휠과 축의 비틀림진동에 큰 영향을 미친다.

- 3) 지면에 접촉한 타이어의 진동형 중에는 지면과 접촉하지 않은 타이어에서 나타나지 않는 새로운 굽힘진동형들이 발생한다. 그리고 100Hz이하의 좌우방향 진동형은 더욱더 많이 나타나는데 접지조건으로 인해 비대칭형의 형태로 많이 나타나고 있다. 또한 지면과 접촉하지 않은 상태에서는 하나로 존재하는 공기공동공명도 2개로 분지된다.

References

- 1) J. T. Tielking, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model," SAE 650492, 1965.
- 2) R. N. Dodge, "The Dynamic Stiffness of a Pneumatic Tire Model," SAE 650491, 1965.
- 3) S. K. Clark, "The Rolling Tire Under Load," SAE 650493, 1965.
- 4) F. Bohm, "Mechanik des Gurtelreifens," Ingenieur Archiv, Vol.35, pp.82-101, 1966.
- 5) H. Pacejka, "Tire In-plane dynamics" in Mechanics of Pneumatic Tires edited by Clark, S. K., pp.726-784, 1981.
- 6) C. J. Hunckler, T. Y. Yang, W. Soedel, "A Geometrically Nonlinear Shell Finite Element for Tire Vibration Analysis," Computers and Structures, Vol.17, pp.217-225, 1983.
- 7) L. E. Kung, W. Soedel, T. Y. Yang, L. T. Charek, "Natural Frequencies and Mode Shapes of an Automotive Tire with Interpretation and Classification Using 3-D Computer Graphics," Journal of Sound and Vibration, Vol.102, pp.329-346, 1985.

- 8) Y. Zhang, T. Palmer, A. Farahani, "A Finite Element Tire Model and Vibration Analysis: A New Approach," *Tire Science and Technology*, Vol.26, pp.149-172, 1998.
- 9) Y. W. Kim, J. Y. Nam, "Experimental Modal Analysis for 3-D Vibration Characteristics of Radial Tire for Passenger Car under Free-Suspension," *Transactions of KSAE*, Vol.10, No.3, pp.227-236, 2002.
- 10) R. M. Barone, "Impact Vibrations of Rolling Tires," *SAE 770612*, pp.245-252, 1977.
- 11) T. R. Richards, L. T. Charek, R. W. Scavuzzo, "The Effects of Spindle and Patch Boundary Conditions on Tire Vibration Modes," *SAE 860243*, 1986.
- 12) R. W. Scavuzzo, T. R. Richards, L. T. Charek, "Tire Vibration Modes and Effects on Vehicle Ride Quality," *Tire Science and Technology*, *TSTCA*, Vol.21, No.1, January-March, pp.23-39, 1993.
- 13) Y. W. Kim, J. Y. Nam, "3-D Vibration Modes of the Tire in Ground Contact and Its Effects on Wheel and Shaft When Excited by Impact at the Center of Contact Patch," *2002 KSAE Autumn Conference Proceeding*, 2002.
- 14) Maia, Silva, He, Lieven, Lin, Skingle, To, Urgueyra, Theoretical and Experimental Modal Analysis Edited by Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M., Research Studies Press Ltd. Baldock, Hertfordshire, England, pp.245-248, 1997.
- 15) R. W. Scavuzzo, L. T. Charek, P. M. Sandy, G. D. Shteingauz, "Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise," *SAE 940533*, 1994.
- 16) Y. W. Kim, J. Y. Nam, "3-D Vibration Characteristics of Radial Tire for Passenger Car under Fixed Axle," *KSNVE*, Vol.12, No.3, pp.228-235, 2002.