

# 접지면 중앙에서 수직방향 가진에 의한 타이어의 3차원 진동모드가 휠/축에 미치는 영향

김 용 우\* · 남 진 영\*

(2002년 10월 31일 접수, 2004년 3월 2일 심사완료)

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

Yong-woo Kim and Jinyoung Nam

**Key Words:** Tire(타이어), Frequency Response Function(주파수응답함수), Natural Modes(고유진동형), Natural Frequency(고유진동수), Air Cavity Resonance(공기공동 공명)

### 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 with ground contact are performed by impacting the tire in the radial direction at the center of contact patch. To investigate which modes of tire influence the vibration of wheel and axle when the tire is in contact with ground, the vibration characteristics such as frequency response functions, natural frequencies and their mode shapes from tire to wheel/axle are examined.

### 1. 서 론

승용차의 승차감과 소음 발생을 예측하거나 감소시키는데 있어서 타이어의 진동특성은 중요한 부분을 차지한다. 따라서 1960년대 초반부터 많은 연구자들에 의해 타이어의 진동특성에 대하여 이론적 연구와 실험적 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

타이어의 진동특성에 관한 연구는 실험적인 접

근과 이론적 접근으로 대별된다. 이론적 접근에는 타이어의 변형 또는 운동을 단순화시킨 모델을 이용하는 방법<sup>(1-6)</sup>과 유한요소해석법을 적용하는 방법<sup>(7-12)</sup>이 있다. 초창기의 이론적 접근은 타이어의 구조를 스프링으로 지지된 탄성 링 또는 셀로 단순화시킨 모델<sup>(1-4)</sup>을 이용하여 타이어의 진동특성을 연구하였다. 한편, 대표적인 실험적 접근법으로, 타이어를 충격해머나 가진기로 가진하고 가속도계로 타이어 표면의 운동을 감지하는 방식을 들 수 있다. Chiesa 등<sup>(13-15)</sup>은 이러한 방법으로 타이어 진동특성을 측정하였으나, 대부분의 실험이 트레드(tread)의 중심선을 따라서 타이어의 표면에 수직방향의 진동특성만을 측정하고 있어 3차원적 특징을 파악할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 Kim 등<sup>(16,17)</sup>이 적용한 측정방법, 즉 한 측정점에서 서로

† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계공학과

E-mail : kyw@sunchon.ac.kr

TEL : (061)750-3536 FAX : (061)750-3530

\* 순천대학교 대학원 기계공학과

수직한 세 방향의 신호를 측정하는 방법을 사용함으로써 3차원적 진동특성을 측정하였다. 한편, Potts<sup>(18)</sup>는 홀로그래픽 장치를 사용하여 타이어의 진동특성을 연구한 바 있다.

타이어의 진동특성과 승차감을 연관시킨 대표적인 연구로 다음과 같은 연구들을 들 수 있다. Barone<sup>(19)</sup>는 타이어가 지면의 돌기(cleat)와 충돌할 때 축에서 나타나는 정량적인 정보를 얻기 위해 드럼 테스트를 실시하여 돌기에 의한 충격력과 축에 작용하는 힘의 크기와 의 관계를 정량화하고자 시도하였다. Richards 등<sup>(20)</sup>은 여러 가지 경계조건 하에 타이어에 대한 진동특성을 측정하여, 타이어의 진동특성이 접지여부 및 축의 경계조건에 의존함을 보였다. Scavuzzo 등<sup>(21)</sup>은 승차감에 대한 타이어 고유진동형의 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 진동특성과 차량내부(steering column과 seat track)의 진동특성을 측정하였다. 그 결과, 축의 진동특성과 차량내부의 진동특성간의 밀접한 관계가 있음을 보였다. 그러나 Scavuzzo 등이 위의 두 가지 실험에 적용한 장치가 다르기 때문에 타이어에 부과되는 경계조건이 다르게 되어, 동일한 타이어에 대해서도 실험장치에 따라 진동특성이 서로 다르게 되어 타이어의 진동특성과 축의 진동특성을 직접적으로 연관시키지 못하였다.

본 연구에서는 타이어를 지면에 접촉시킨 상태에서 타이어(P205/60R15)를 지면 아래쪽에서 지면에 수직방향으로 가진하여 타이어, 휠 그리고 축에서의 진동특성을 측정함으로써 타이어의 진동특성이 휠과 축에 미치는 효과를 검토한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 타이어(공기압 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>)에 300 kgf의 하중을 가하여 지면과 접촉시킨 상태에서 모달 테스트를 실시하였다. 이 때, 접지면의 중앙에서 접지면에 수직방향으로 타이어를 충격hammer로 가진하기 위하여 접지면(ground plate)의 중앙에 직경 20mm의 관통구멍을 뚫고 이 구멍을 통해 타이어의 표면에 스

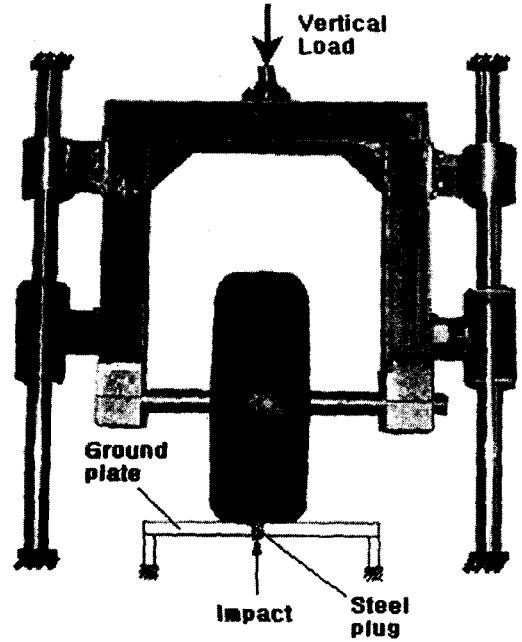


Fig. 1 Experimental apparatus

틸 프릭(steel plug)을 부착시킨 다음 이 프릭을 타격하여 타이어를 가진시켰다. 그리고 타이어와 휠과 축에서 응답을 받아 주파수응답함수(FRF, Frequency Response Function)를 검토하였다.

### 2.2 좌표설정 및 측정

타이어/휠/축의 전체좌표계는 SAE에서 규정하는 방식과 동일하게 상하방향을 Z축, 전후방향을 X축, 축방향(좌우방향)을 Y축으로 설정하여 Fig. 2와 같은 전체좌표계(X-Y-Z)를 사용하였다.

타이어의 국부좌표설정 및 측정은 참고문헌 (16)에서와 동일한 방법을 사용하였다. 즉, 국부좌표 설정은 타이어 표면의 수직방향을  $r$ , 회전방향을  $\theta$ ,  $r, \theta$  평면에 수직방향을  $\psi$  방향으로 하는 구 좌표계(spherical coordinates)를 사용하였다. Fig. 3은 타이어 표면상의 측정점(225개소의 격자점 위치)을 나타낸 것이다. 지면에서 수직으로(Z방향으로) 가진하여 타이어(225개소)와 휠(8개소) 그리고 축(7개소)에서 각각 세 방향으로 응답을 받아 접지 타이어의 어떤 고유진동형이 휠과 축의 진동에 큰 영향을 미치는지를 살펴보았다.

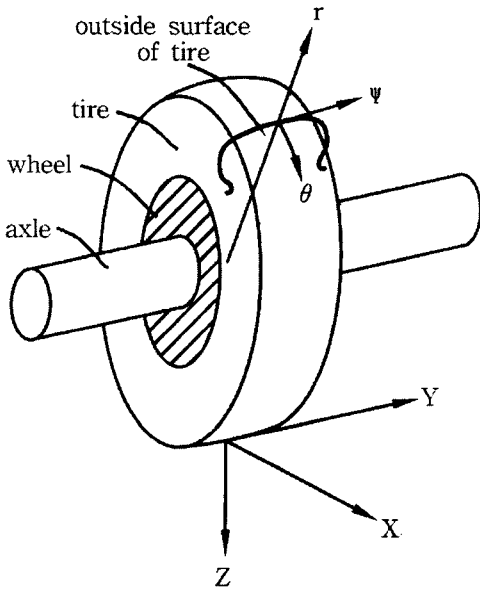


Fig. 2 Global coordinates(X-Y-Z) of tire-wheel-axle assembly and local coordinates( $r$   $\theta$   $\psi$ ) of a tire

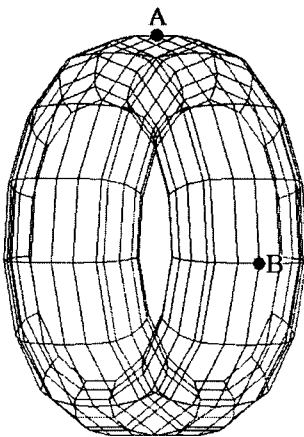
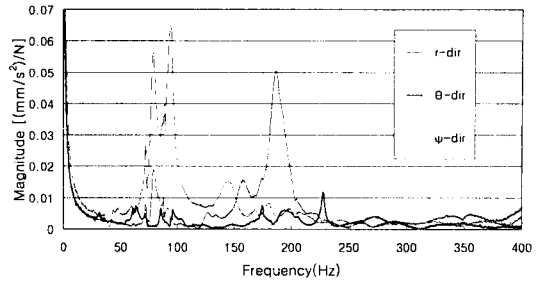


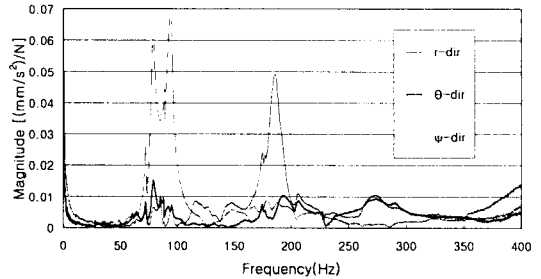
Fig. 3 Entire measuring points on the surface of a tire

### 3. 실험결과 및 고찰

3.1 지면접촉 타이어의 주파수응답함수 검토  
 휠 및 축과 결합된 지면접촉 타이어(Fig. 1)에 대해 실험모드해석을 실시하고, 이로부터 얻은 지면



(a) At the point A in Fig. 3



(b) At the point B in Fig. 3

Fig. 4 Frequency response functions of the tire

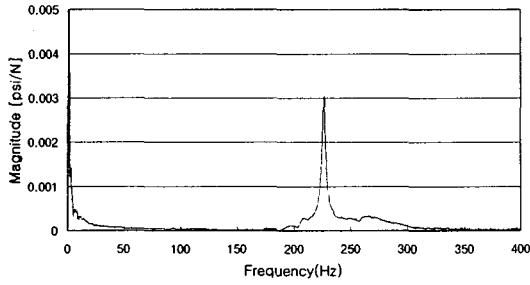
접촉 타이어의 주파수응답함수(Fig. 4)를 분석하여 지면접촉 타이어의 진동특성을 검토한다.

Fig. 4(a)는 지면접촉 타이어를 지면에서 수직방향으로 가진 하였을 때 타이어의 A점(Fig. 3)의  $r$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 주파수응답함수이고, Fig. 4(b)는 B점(Fig. 3)의  $r$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 주파수응답함수이다. Fig. 4의 FRF에서 각 공진봉(peak)들의 크기를 보면  $r$  방향의 공진봉의 크기는 130Hz~200Hz사이에서 크게 나타나고 있다. 전체적으로  $\theta$  방향에서 나타나는 공진봉의 크기는  $r$  방향과  $\psi$  방향의 크기보다 상대적으로 작다.  $\psi$  방향의 공진봉의 크기는 60Hz~100Hz 사이에서 크게 나타나고 있다. 즉 100Hz이하 모드들은  $\psi$  방향의 모드 즉 좌우방향의 모드가 지배적이고, 100Hz 이상에서는  $r$  방향의 모드들이 지배적임을 알 수 있다.

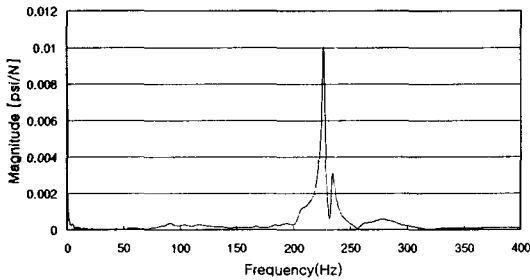
### 3.2 공기공동 공명주파수 및 진동형

축과 휠에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 공기공동 공명(air cavity resonance)에 대하여, 지면에 접촉되지 않은 상태의 타이어의 경우와 지면접촉 타이어의 경우의 진동특성을 비교한다.

Fig. 5는 타이어가 지면에 접촉되지 않았을 때와



(a) In free-suspension



(b) In ground contact condition

Fig. 5 FRF of the air cavity vibration

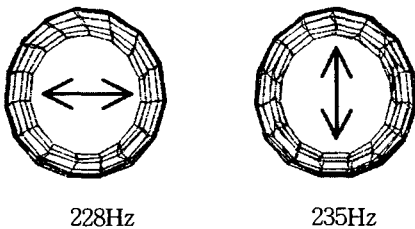


Fig. 6  $\theta$  directional modes due to the air cavity resonances

접촉되었을 때 압력센서를 사용하여 공기진동의 동압을 측정하여 FRF를 나타낸 것이다. Fig. 5를 살펴보면 공기공동 공명은 타이어가 지면과 접촉되지 않았을 때 234Hz에서 하나로 나타났는데 지면과 접촉되면서 228Hz와 235Hz로 분지되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 2개의 공기공동 공명중 공명주파수가 낮은 쪽(228Hz)의 공기공동 공명은 타이어를 전후방향으로 진동하게 하며, 공명주파수가 높은 쪽(235Hz)의 것은 타이어를 상하방향으로 진동하게 한다. 이러한 공기공동 공명에 의한 타이어의 진동은, Fig. 4에 보인 바와 같이 타이어의  $\theta$  방향의 FRF에서 뚜렷이 측정되며, 각 공기공동 공명에 의한 타이어의 진동형을 Fig. 6<sup>(22)</sup>에 도시하였다.

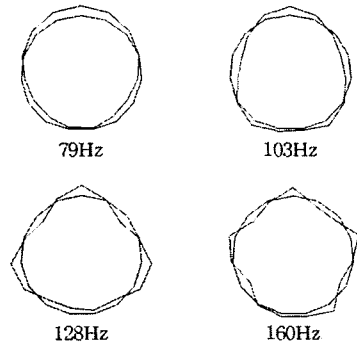


Fig. 7 Bending modes of the tire in ground contact

3.3 지면 접촉 타이어의 굽힘 진동형

지면과 접촉하는 타이어의 고유진동형을 살펴보면, 지면과 접촉하지 않는 경우에는 없던 새로운 진동형들이 나타난다. 이러한 진동형 중 대표적인 굽힘 진동형을 Fig. 7에 도시한다.<sup>(11)</sup>

3.4 타이어의 진동모드가 휠/축에 미치는 영향

지면에서 수직방향으로 가진 하였을 때 타이어 모드가 휠과 축에 미치는 영향을 알아보기 위하여 휠과 축에서의 주파수응답을 살펴보았다. Fig. 8은 휠에서의 주파수응답함수이다.

Fig. 8에서 나타난 주파수응답함수의 공진봉과 타이어의 고유진동형을 연관시켜, 타이어의 고유진동형이 휠과 축에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 휠과 축에 영향을 미치는 타이어의 고유진동형과 휠/축의 진동형을 Table 1에 정리하였다. Table 1의 두 번째 및 세 번째 칸의 그림(wheel & axle)은, Fig 2에서 정의한 좌표계를 사용하여 휠과 축의 진동모드의 정면도(Y-Z 평면), 평면도(X-Y 평면)를 각각 도시한 것이다. 그리고 네번째 칸의 그림(wheel mode)은 휠의 진동모드를 도시한 것이고, 다섯 번째 칸의 그림(tire mode)중, 첫 번째의 것은 타이어의 트레드 중앙선상의  $r$  방향의 고유진동형을, 그리고 두 번째와 세 번째의 그림은 타이어의 3차원 진동형을 각각 도시한 것이다.

예를 들어 Fig. 8에서 나타난 공진봉 중 88 Hz의 것을 검토해 보면, Fig. 8(a)에서 상하방향(1-dir)으로 공진봉이 나타나며, Fig. 8(b)에서도 상하방향(2-dir)으로 공진봉이 나타난다. 따라서 휠은 88Hz에서 상하방향으로 진동함을 의미한다. Table 1의 첫 번째 칸(wheel & axle)에서도 휠과 축이 상하방향(Z축

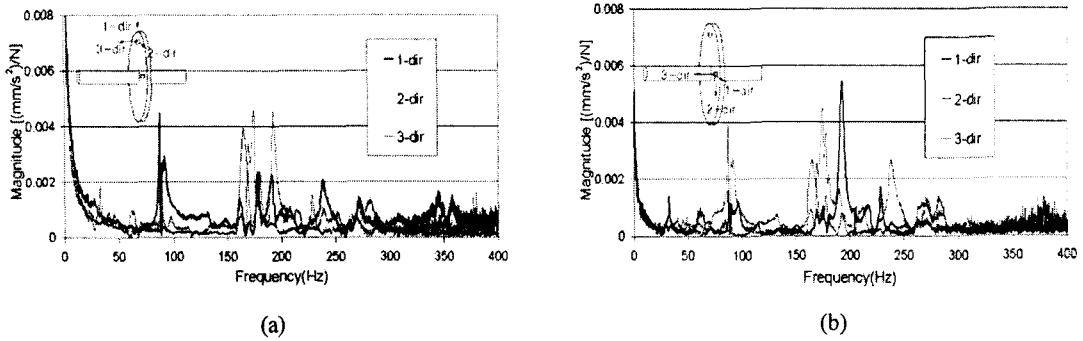


Fig. 8 Frequency response functions at the wheel

Table 1 Natural frequencies and wheel/axle mode shapes when the tire is in ground contact

Freq. (Hz)	wheel & axle		wheel mode	tire mode		
	Y-Z plane	X-Y plane		X	X	Y
32						
64						
88						
92						
96						
165				-		

Table 1 (Continued)

170						
175						
179						
192						
228						
235						

방향)으로 진동하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 진동모드는, Table 1의 다섯 번째 칸을 보면, 타이어의 상하방향의 고유진동형에 기인한 것임을 알 수 있다. 타이어의 92, 179, 235Hz의 고유진동형들에서도, 타이어의 상하방향 진동형이 휠과 축에 효과적으로 전달되어 휠과 축이 상하로 진동하는데 크게 기여하는 진동형임을 확인할 수 있다. 또한, 32, 64, 96, 192, 228Hz의 타이어 고유진동형들은 타이어가 전후방향(X축 방향)으로 진동함으로써 휠과 축이 전후방향으로 진동하는데 크게 기여하는 모드임을 알 수 있다.

Fig. 4(a)와 (b)의 FRF에서 타이어는 165Hz( $\psi$  방향)의 공진봉을 보이고 있으나, 그 크기가 상대적으로 작은 관계로 타이어의 해당 진동형은 분명하게 측정되지는 않았다. 그러나 타이어의  $\psi$ 의 진동 효과가 축과 휠에 전달되어 Table 1에서 보는

바와 같이 축과 휠이 좌우방향(Y축 방향)으로 진동하는데 기여하고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에서 179Hz의 공진봉을 살펴보면  $x$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 공진봉이 함께 존재하고 있다. 이는 179Hz의 타이어 고유진동형은  $x$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 모드가 복합된 3차원적 진동형임을 알 수 있다. 이로 인하여 Table 1과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 휠과 축은 상하방향으로 진동할 뿐만 아니라  $\theta$  및  $\psi$  방향으로도 진동하고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 4에서 175Hz의 공진봉( $\theta$  방향)이 뚜렷한데 이 진동형은 Table 1에서 보는 바와 같은 비틀림 모드로서, 이 모드의 영향으로 인해 Fig. 8에서 보는 바와 같이 휠의 FRF는  $\theta$  방향(2-dir)의 공진봉을 보인다. 170Hz 및 179Hz에서의 타이어의 진동형은 상대적으로 175Hz의 것보다 뚜렷하지 않

**Table 2** The frequency and its magnitude of the major modes that influence on the vibration of wheel and axle, where the unit of the magnitude is  $[10^3(\text{mm/s}^2)/\text{N}]$

	Z-direction	X-direction	Y-direction	Torsional mode
1	88Hz(4.48)	192Hz(5.45)	165Hz(3.86)	175Hz(4.60)
2	92Hz(2.94)	228Hz(1.73)	179Hz(1.94)	170Hz(3.41)
3	179Hz(2.35)	32Hz(1.45)		179Hz(2.38)
4	235Hz(1.32)	96Hz(1.21)		
5		64Hz(0.98)		

으나  $\theta$  방향의 진동모드로 인해 Table 1에 보인 바와 같이 휠과 축이 비틀림 진동을 하는 것으로 판단된다.

앞에서 검토한 바와 같이 타이어의 고유진동형들 중, 휠과 축에 영향을 미치는 타이어의 진동형은, 운동학적으로 타이어의 진동형과 합치되는 방식으로 휠과 축에 전달되어 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 Fig. 7에 도시한 타이어의 고유진동형들은, 지면에 수직인 방향으로 타이어를 가진할 때, 휠과 축에 큰 영향을 미치지 못한다.

위의 검토를 바탕으로 하여, Fig. 8로부터 타이어의 고유진동형들 중에서 휠과 축에 크게 영향을 미치는 모드를 순서대로 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2의 결과를 보면, 상하방향으로 휠과 축에 가장 큰 영향을 미치는 타이어의 고유진동형은 88Hz의 것임을 알 수 있다. 그리고 175Hz의 타이어 고유진동형은 축을 비트는데 가장 크게 기여하는 진동형이다. 192Hz의 타이어 고유진동형은 휠과 축을 전후방향으로 진동하는데 가장 크게 영향을 미치는 진동형이다.

Fig. 6의 공기공동 공명에 의한 타이어의 진동형 중 228Hz의 것은 축의 전후방향 진동모드를 유발시키며(Table 1), 235Hz의 것은 축의 상하방향 진동모드를 유발시킨다(Table 1). 이로부터 공기공동 공명에 의한 타이어의 진동형들도 휠과 축의 진동에 운동학적으로 합치되는 방식으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

공기공동 공명에 의한 진동을 제외하고 위의 검토를 종합해보면, 대체로 100Hz이하의 타이어 고유진동형들은 대부분 휠과 축에 상하방향 또는 전후방향으로 진동을 일으키고, 160Hz~200Hz 사이의 타이어 고유진동형들은 주로 축의 비틀림 진동

을 유발시키는데 기여하는 경향이 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지면접촉 타이어의 고유진동형이 휠과 축에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 지면접촉 타이어(P205/60R15)를 지면쪽에서 지면에 수직방향으로 가진하여 타이어와 휠과 축에서의 주파수 응답함수를 검토, 분석함으로써 다음의 사실들을 확인할 수 있었다.

(1) 타이어의 고유진동형들 중, 60Hz~100Hz의 범위의 진동형들은 주로  $\psi$  방향의 진동형 성분이 지배적인 관계로 타이어가 좌우방향으로 진동하는 진동형들이다. 그리고, 130Hz~200Hz사이의 진동형들은 주로  $r$  방향의 진동형 성분이 지배적인 진동형들이다.

(2) 지면에 접촉한 타이어의 고유진동형들 중에는 지면과 접촉하지 않은 타이어에서 나타나지 않는 새로운 굽힘진동형들이 발생한다. 대체로 160Hz 이하의 이러한 굽힘진동형들은 휠과 축의 진동에 그다지 큰 영향을 미치지 아니하였다.

(3) 지면과 접촉하지 않은 상태에서는 하나로 존재하는 타이어의 공기공동 공명은 2개로 분지되어, 고유진동수가 낮은 쪽(228Hz)의 공기공동 진동형은 축의 전후방향 진동을 유발시키며, 높은 쪽(235Hz)의 공기공동 진동형은 축의 상하방향 진동을 유발시킨다.

(4) 타이어의 진동형들 중, 휠과 축의 진동에 큰 영향을 미치는 타이어의 진동형들은, 운동학적으로 타이어의 진동형과 합치되는 방식으로 휠과 축의 진동을 유발시킨다. 휠과 축의 상하방향 진동, 좌우방향 진동, 그리고 축의 비틀림 진동을 유발시키는데 가장 큰 영향을 미치는 타이어의 고유진동형은 각각 다음과 같다. 휠과 축의 상하방향 진동에 가장 큰 영향을 미치는 타이어의 고유진동형은 88Hz의 것이고, 축의 비틀림 진동에 가장 큰 영향을 미치는 타이어의 고유진동형은 175Hz의 것이다. 그리고, 축의 전후방향 진동에 가장 큰 영향을 주는 타이어의 고유진동형은 192Hz의 것이다.

(5) 공기공동 공명에 의한 진동을 제외하면, 대체로 축 및 휠의 전후방향의 진동과 상하방향의 진동을 유발시키는 타이어의 고유진동형은 100Hz 이하에서 나타나고 있으며, 160Hz~200Hz 사이의

타이어 고유진동형들은 축의 비틀림 진동을 유발시키는데 크게 기여하는 경향을 보인다.

### 참고문헌

- (1) Tielking, J. T., 1965, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model," SAE paper No. 650492.
- (2) Dodge, R. N., 1965, "The Dynamic Stiffness of a Pneumatic Tire Model," SAE Paper No. 650491.
- (3) Clark, S. K., 1965, "The Rolling Tire Under Load," SAE Paper No. 650493.
- (4) Bohm, F., 1966 "Mechanik des Gurtelreifens," *Ingenieur Archiv*, Vol. 35, pp. 82~101.
- (5) Pacejka, H., 1981, "Tire In-plane Dynamics" in *Mechanics of Pneumatic Tires* edited by Clark, S. K., pp. 726~784.
- (6) I. D. Moon, T. K. Lee, D. P. Hong, B. S. Kim, 1995, "A Study on Vibration Characteristics of Passenger Car Tire under the Static Load," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 14~22.
- (7) Hunckler, C. J., Yang, T. Y., Soedel, W., 1983, "A Geometrically Nonlinear Shell Finite Element for Tire Vibration Analysis," *Computers and Structures*, Vol. 17, pp. 217~225.
- (8) Kung, L. E., Soedel, W., Yang, T. Y., Charek, L. T., 1985, "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.
- (9) Kung, L. E., Sodel, W., 1986, "Free Vibration of a Pneumatic Tire-Wheel Unit Using a Ring on an Elastic Foundation and a Finite Element Model," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 107, No. 2, pp. 181~194.
- (10) Kao, B. G., Kuo, E. Y., Adelberg, M. L., Sundaram, S. V., 1987, "A New Tire Model for Vehicle NVH Analysis," SAE 870424
- (11) Zhang, Y., Palmer, T., Farahani, A., 1998, "A Finite Element Tire Model and Vibration Analysis: A New Approach," *Tire Science and Technology*, Vol. 26, pp. 149~172.
- (12) Kim, D. H. and Kim, H. W., 1986, "A Study of the Dynamic Characteristics of a Passenger Radial Tire," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 724~734.
- (13) Chiesa, A., Oberto, L., Tamburini, L., 1964, "High Frequency Vibration in Tires under Vertical Perturbation and Their Transmission to the Wheels," *Automotive Engineering*, Vol. 54, p. 520.
- (14) Potts, G. R., Bell, C. A., Charek, L. T., Roy, T. K., 1977, "Tire Vibration," *Tire Science and Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 202~225.
- (15) Guan, D. H., Yam, L. H., Mignilet, M. P., Li, Y. Y., 1999, "Study of Experimental Modal Analysis on Tires," *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, Vol. 1, pp. 385~390.
- (16) Yong-woo Kim, Jin Young Nam, 2002, "Experimental Modal Analysis for 3-D Vibration Characteristics of Radial Tire for Passenger Car under Free-Suspension," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 227~236.
- (17) Yong-woo Kim, Jinyoung Nam, 2002, "3-D Vibration Characteristics of Radial Tire for Passenger Car under Fixed Axle," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 228~235.
- (18) Potts, G. R., 1973, "Application of Holography to the Study of Tire Vibration," *Tire Science and Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 255~266.
- (19) Barone, Martin R., 1977, "Impact Vibrations of Rolling Tires," SAE 770612, pp. 245~252.
- (20) Richards, T. R., Charek, L. T. and Scavuzzo, R. W., 1986, "The Effects of Spindle and Patch Boundary Conditions on Tire Vibration Modes," SAE 860243.
- (21) Scavuzzo, R. W., Richards, T. R., Charek, L. T., 1993, "Tire Vibration Modes and Effects on Vehicle Ride Quality," *Tire Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, January-March, pp. 23~39.
- (22) Scavuzzo, R. W., Charek, L. T., Sandy, P. M., Shteinhauz, G. D., 1994, "Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise", SAE 940533.