

〈논 문〉

## 축으로 고정된 승용차용 레디얼 타이어의 3차원 진동특성

### 3-D Vibration Characteristics of Radial Tire for Passenger Car under Fixed Axle

김 용 우<sup>†</sup> · 남 진 영\*

Yong-woo Kim and Jinyoung Nam

(2001년 11월 8일 접수 : 2002년 2월 14일 심사완료)

**Key Words** : Frequency Response Function(주파수응답함수), Natural Mode(고유진동형), Natural Frequency(고유진동수), Symmetric Mode(대칭 모드), Non-symmetric Mode(비대칭 모드), Antisymmetric Mode(반대칭 모드), Cavity Resonance(공동공명)

#### ABSTRACT

Two kinds of experimental modal analyses have been performed on a radial tire for passenger car under fixed axle. One is the modal analysis to obtain three-dimensional modes of tire using accelerometers and the other is the one to identify cavity resonance frequency using a pressure sensor. From the first analysis, we have obtained three-dimensional natural modes and their decomposed 3-D modes in each direction, which make it possible to grasp the features of the modes that cannot be identified in the conventional 2-D modes and to classify the vibrational modes into symmetric, non-symmetric, and antisymmetric modes in a simple way by using the experimental results. From the second experimental analysis, the cavity resonance frequency is found. Comparing the results of the two analyses, we have identified the three-dimensional mode of the cavity resonance. We also have shown that natural frequencies of structural vibration depends on inflation pressure while the cavity resonance does not.

#### 1. 서 론

타이어의 고유진동수 및 고유진동형 등의 진동 특성은 차량의 승차감과 소음 발생을 예측하거나 감소시키는데 필요한 매우 중요한 인자들이다. 특히 타이어로부터 휠 축까지 진동 전달에 관한 연구를 위해서는 타이어의 고유진동수와 고유진동형에 관한 자세한 지식이 요구된다. 따라서 1960년 초반부터 많은 연구자들에 의해 이에 대한 이론적 연구 및 실험적 연구

가 지속적으로 이루어지고 있다.

타이어의 진동 특성에 관한 연구는 실험적인 접근법과 이론적인 접근법으로 대별된다. 이론적인 접근법은 다시 크게 두 가지로 분류할 수 있는데 첫째는 타이어의 변형 또는 운동을 단순화시킨 모델로 대체시켜 이를 이론적으로 분석, 검토하는 방법<sup>(1~5)</sup>이고 둘째는 타이어를 유한요소법으로 모델링하여 해석하는 방법<sup>(6~10)</sup>이다. 초창기 대부분의 이론적 연구는 타이어의 구조를 스프링으로 지지된 탄성 링 또는 셸로 단순화시킨 모델<sup>(1~4)</sup>을 이용하여 타이어의 진동 특성을 연구하였다. 특히, Soedel과 Prasad<sup>(11)</sup>는 지면과 접촉하는 타이어의 고유진동수와 고유진동형을 비접촉 축대칭 자유진동 모드를 이용하여 계산할 수 있음을 보였다. 대표적인 실험적 접근법으로 타이어를 충

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 순천대학교 기계자동차공학부  
E-mail : kyw@sunchon.ac.kr  
Tel : (061) 750-3536, Fax : (061) 750-3530

\* 순천대학교 대학원 기계공학과

격 햄머(impact hammer)나 가진기(shaker)로 가진하여 가속도계로 타이어 표면의 운동을 감지하는 접근방법을 들 수 있다.<sup>(12~14)</sup> 이러한 연구들은 궁극적으로 노면으로부터의 가진으로 인해 차축에 전달되는 진동 특성을 조사하는 데 있다.

이 목표에 도달하기 위해서는 우선 타이어의 진동형에 대한 상세한 지식이 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 승용차용 레디얼 타이어의 진동형의 특징을 명확히 파악하기 위하여 축으로 고정된 타이어에 대해 충격햄머를 이용한 모달 테스트를 실시하고 3차원 고유진동형을 구하였다. 그리고 이에 따른 3차원 고유진동형을 분석, 검토함으로써 2차원 측정(트레드의 중심선을 따라서 반경방향의 진동을 측정할 실험)을 통해서도 타이어 중심평면에 관해 대칭인 모드만을 얻게 되며, 타이어 중심평면에 관해 비대칭이거나 반대칭인 모드는 얻을 수 없음을 보였다. 또한, 대칭형 뿐만 아니라 2차원 측정에서 얻을 수 없는 진동형들의 특징을 명확히 분류하여 제시하였다. 더 나아가, 공동 공명(cavity resonance)<sup>(16~18)</sup>을 가려내기 위하여, 압력센서를 사용하여 타이어와 휠(wheel) 사이의 공동에 있는 공기 진동의 동압을 측정하여 동압의 주파수응답함수(FRF, frequency response function)를 구함으로써 공기공동의 공명주파수를 조사하고 공기공동 공명의 진동형을 제시하였다. 더불어 가속도계를 사용하여 공기압의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 조사함으로써 타이어의 구조진동과 공기공동 진동의 차이점을 제시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 3차원 진동형 측정을 위한 좌표 설정

타이어는 이중 곡률의 표면을 갖는 축대칭 회전체이므로 구좌표계를 국부좌표계로 채용하여 이를 기준으로 신호를 받아 고유진동형을 구한 다음 이를 다시 전체좌표계로 변환하여 3차원 고유진동형을 얻었다. 이 과정에서 다음과 같은 좌표계를 설정하여 사용하였다.

Fig. 1(a)와 같이 타이어가  $z$ 축을 중심으로 도우넛 모양의 회전체가 되도록, 그리고 타이어의 중심평면( $x$ - $y$  평면)에 대해 대칭이 되도록 직각좌표계  $x$ - $y$ - $z$ 를 설정하여 이를 전체좌표계로 사용하였다. Fig. 1(a)에서와 같이, 측정점들은  $z$ 축에 관해 축대

칭인 원상에 존재한다고 가정하면, Fig. 1(b)에서와 같이 각 측정점에서의 접평면에 수직하면서 각 측정점을 통과하는 법선들은 공히  $z$ 축상의 점  $Q$ 를 통과하게 되며, 이 때  $Q$ 점은 측정점들로 이뤄진 원(Fig. 1(b)의  $k$ 번째 원)을 포함하는 구(sphere)의 중심이 된다. 이 구의 중심에 Fig. 1(b)와 같이 구좌표계  $(r^{(k)}, \theta^{(k)}, \phi^{(k)})$ 를 설정하고 이를 국부좌표계로 채용하였다.

다른 원상에 존재하는 측정점들에 대해서도 위와 같은 방식으로 국부좌표계를 채용하여 반경방향( $r$  방향, 타이어의 표면에 수직인 방향)의 변위  $w$ , 원주방향( $\theta$  방향, 반경방향에 수직이면서 동시에 타이어 표면에서 원주방향으로 접선인 방향)의 변위  $u$ , 자오선방향( $\phi$  방향, 반경방향에 수직이면서 동시에 타이어 표면에서 자오선방향으로 접선인 방향)의 변위  $v$ 를 표현하였다.

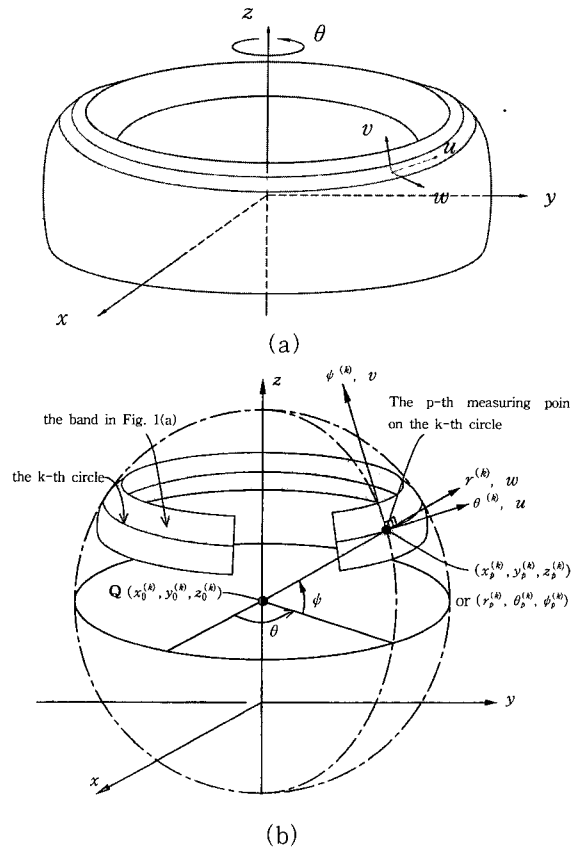


Fig. 1 (a) Global coordinates  $x$ - $y$ - $z$  and displacements of a tire (b) Local spherical coordinates  $r$ - $\theta$ - $\phi$  of a circle on the surface of tire

### 2.2 측정과 모드해석

Fig. 2(a)와 같이 타이어의 표면에 있는 15개의 원(이들은 모두 z축상에 중심을 둔 동심원임)과 등간격의 15개 자오선이 교차하는 위치를 측정점으로 삼았다. 따라서 전체 측정점의 개수는 15×15 곳이 된다. 가속도계는 3축 어댑터(triaxial mounting adapter)에 끼워 측정점에 부착하였다.

타이어를 충격해머를 사용하여 r, θ, ψ 방향으로 동시에 가진하기 위해, Fig. 2(b)와 같이 타이어의 특정 위치에 부착한 블록을 타격하여 (트레드 표면, 자오선의 접선방향 및 원주방향에 각각 45° 방향으로 타격할 수 있도록 트레드의 중앙선상에 위치한 측정점에 블록을 부착함), 한 원상에 위치한 15개소에서 r, θ, ψ 방향으로 각각 신호를 측정함 다음, 다시 가속도계를 또 다른 원상에 부착하여 측정하는 방식을 반복하였다. 이렇게 하여 총 675개의 주파수응답 함수를 얻고, 이에 SIMO(single-input-multi-output) 방법의 하나인 GFRP(global rational fraction polynomial method)<sup>(15)</sup>를 적용하여 3차원 고유진동형을 구하였다. 또한 r, θ, ψ 방향으로 각각 225개의

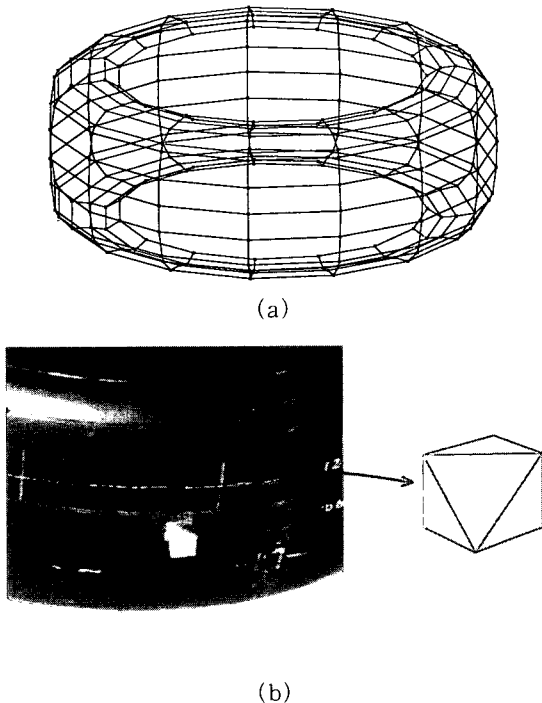


Fig. 2 (a) Entire measuring points, where circumferential lines and meridians cross, on the surface of a tire (b) The steel block attached to the tire surface for an impact

FRF에 대해 모드해석을 적용하여 각 방향으로의 성분별 3차원 모드(decomposed 3-D mode in each direction)를 구하였다. 모든 실험은 온도 24.2 °C의 실험실내에서 실시하였다.

타이어 표면상의 k번째 원상이 위치한 p번째 측정점의  $r_p^{(k)}$ ,  $\theta_p^{(k)}$ ,  $\psi_p^{(k)}$  방향의 진동형(mode shape)과 그 측정점의 국부좌표( $r_p^{(k)}$ ,  $\theta_p^{(k)}$ ,  $\psi_p^{(k)}$ )는 다음 식에 의해 전체좌표계 x-y-z에 대한 것으로 변환하였다.

$$\begin{Bmatrix} x_p^{(k)} \\ y_p^{(k)} \\ z_p^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{rx}^{(k)} & \beta_{\theta x}^{(k)} & \beta_{\psi x}^{(k)} \\ \beta_{ry}^{(k)} & \beta_{\theta y}^{(k)} & \beta_{\psi y}^{(k)} \\ \beta_{rz}^{(k)} & \beta_{\theta z}^{(k)} & \beta_{\psi z}^{(k)} \end{bmatrix}_p \begin{Bmatrix} r_p^{(k)} \\ \theta_p^{(k)} \\ \psi_p^{(k)} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x_0^{(k)} \\ y_0^{(k)} \\ z_0^{(k)} \end{Bmatrix}$$

where  $k, p=1, 2, \dots, 15$

여기서  $\beta_{ij}^{(k)}$  ( $i=r, \theta, \psi; j=x, y, z$ )는 k번째 원상이 있는 측정점 p의 방향여현으로 국부좌표축 i와 전체좌표축 j의 사이각에 코사인을 취한 값이다. 또한  $(x_0^{(k)}, y_0^{(k)}, z_0^{(k)})$ 는 k번째 원에 설정된 국부좌표계 원점의 전체좌표계에 대한 좌표이다.

### 2.3 공기공동 공명 주파수의 측정

자체 제작한 어댑터를 사용하여 압력센서(pressure sensor)를 타이어의 공기 주입구(air valve)에 부착하고, 가속도계를 사용한 측정방법과 동일한 방법으로 실험을 실시하여 공기공동 내의 동압(dynamic pressure)의 FRF를 얻었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 구조 진동 모드의 특징 및 분류

측으로 고정되어 있는 타이어의 트레드(tread)의

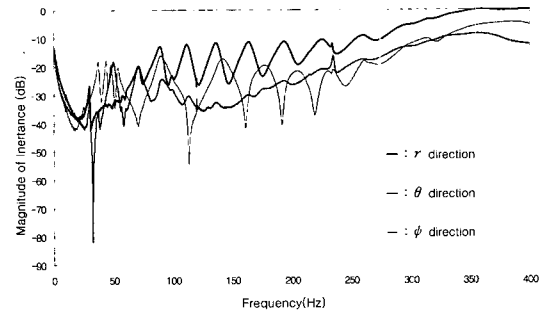
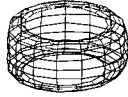

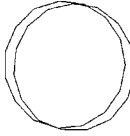

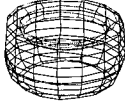

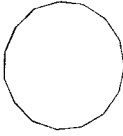

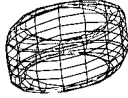

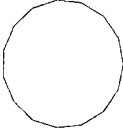

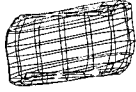

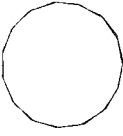

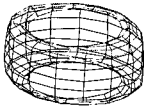
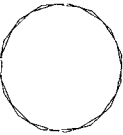
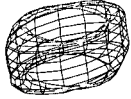

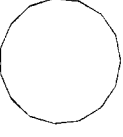


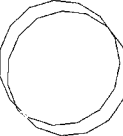
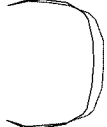
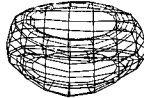

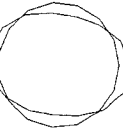

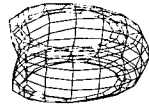
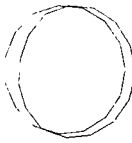

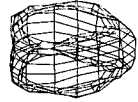

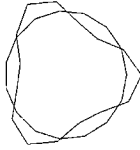
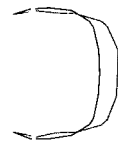
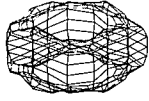

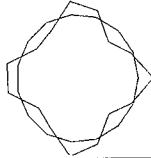



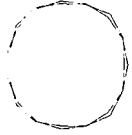
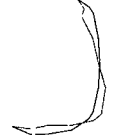
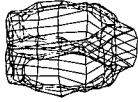

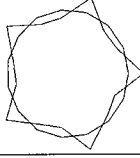



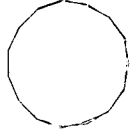

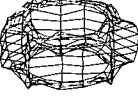
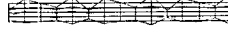
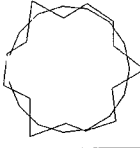


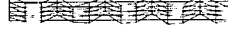


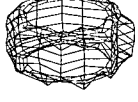

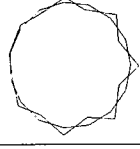


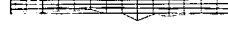




Fig. 3 Frequency response function at a point on the centerline of tread when inflation pressure is 2.20 kgf/cm<sup>2</sup>

**Table 1** Natural frequencies and 3-D and 2-D mode shapes of the tire under fixed condition when inflation pressure is 2.20 kgf/cm<sup>2</sup>

No. Freq(Hz)	3-D mode shapes	$\psi$ -directional modes of expanded tread	$r$ -directional modes along the central circumference in $x-y$ plane	$r$ -directional modes along meridian
1 (29.8)			 S=1	 $M_r=3$
2 (37.3)			 S=0	 $M_r=2$
3 (44.0)			 S=0	 $M_r=2$
4 (48.0)			 S=0	 $M_r=2$
5 (50.0)		—	 S=0	—
6 (53.6)			 S=0	 $M_r=2$
7 (71.4)		—	 S=1	 $M_r=3$
8 (89.6)			 S=2	 $M_r=2$

9 (99.3)		—	 $S=1$	 $M_r=3$
10 (112.2)			 $S=3$	 $M_r=3$
11 (136.7)			 $S=4$	 $M_r=3$
12 (141.3)			 $S=0$	 $M_r=4$
13 (164.2)			 $S=5$	 $M_r=3$
14 (177.0)			 $S=0$	 $M_r=4$
15 (194.2)			 $S=6$	 $M_r=3$
16 (205.2)			 $S=0$	 $M_r=4$
17 (225.2)			 $S=7$	 $M_r=3$
18 (234.6)			 $S=1$	 $M_r=3$

중양점을 타격하여 타격점에서 가까운 측정점의  $r$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 주파수 응답함수를 Fig. 3에 각각 도시하였고, 모드해석 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 두 번째 칸은 3차원 고유진동형을 도시한 것이다. 우선 이 고유모드들이  $x$ - $y$  평면에 대칭인지를 검토하기 위해 트레드를 펼쳐서  $\psi$  방향의 진동형을 Table 1의 세 번째 칸에 도시하였다. 이로부터 트레드의  $\psi$  방향의 진동형들은  $x$ - $y$  평면에 대칭인 모드와 반대칭인 모드로 분류됨을 알 수 있다. 하지만  $\psi$  방향에서 나타나지 않는 진동형들은 트레드를 펼쳐서 보는 것으로는 구분할 수 없었고 각 방향의 모드를 살펴봄으로써 모드를 분류할 수 있었다. 또한 단순화시킨 타이어 모델의 연구에서 제시하는 결과와 비교하기 위하여 트레드 중심의 원주를 따라서  $r$  방향의 진동형을 Table 1의 네 번째 칸에, 그리고 자오선을 따라서  $r$  방향의 진동형을 Table 1의 다섯 번째 칸에 각각 도시하였다. Table 1의 네 번째 칸의  $S$ 는 트레드의 중심선이 원주방향을 따라서  $r$  방향으로 진동하는 파수(number of full waves)를, 다섯 번째 칸의  $M_r$ 은 타이어의 단면이  $r$  방향으로 진동하는 반파수(number of half waves)를 의미한다. 그리고 첫 번째 칸의 일련 인 번호로서 본 연구에서 이 번호를 사용하여 모드를 지칭하고자 한다.

3차원 진동형과  $r$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 성분별 3차원 진동형 그리고 Fig. 3의 주파수 응답함수를 종합하여 검토한 결과, 타이어의 진동형은 해 볼 때,  $x$ - $y$  평면에 대해 대칭인 진동형, 반대칭인 진동형, 그리고 대칭형도 아니고 반대칭형도 아닌 비대칭형으로 분류할 수 있음을 알았다.

(1) 대칭형 진동형

Fig. 3의 주파수 응답함수에서,  $r$  과  $\theta$  방향의 FRF에서만 공통으로 공진봉이 나타나는 공진주파수의 진동형(7, 9, 10, 11, 13, 15, 17번)은  $x$ - $y$  평면에 대칭인 진동형이고,  $\theta$  방향에서만 공진봉이 나타나는 공진주파수의 진동형(5번)은  $z$  축에 대칭형 진동형이다. 이 진동형도 역시  $x$ - $y$  평면에 관해 대칭이다.

- 번호 5번의 모드(50.0 Hz):  $\theta$  방향에서만 나타나는 공진주파수로서  $z$  축을 중심으로 트레드가 회전하면서 사이드월에는  $\theta$  방향의 비틀림이 발생한다.
- 번호 7번(71.4 Hz), 9번(99.3 Hz)의 모드: 트레드의  $r$  과  $\theta$  방향의 공진봉이 뚜렷한 모드로서, 트레드의  $\psi$  방향 진동형으로는  $x$ - $y$  평면에 대칭형임을

알 수 없으나  $r$  방향 및  $\theta$  방향의 진동형을 보면  $x$ - $y$  평면에 대칭적으로 진동하는 모드이다.

- 번호 10번(112.2 Hz), 11번(136.7 Hz), 13번(164.2 Hz), 15번(194.2 Hz), 17번(225.2Hz)의 모드: 트레드의  $\psi$  방향 진동형이 타이어의 중심평면( $x$ - $y$  평면)에 대해 대칭인 모드이며,  $M_r=3$  인 모드(Table 1의 5번째 칸)들로서 단순화된 모델<sup>(1~4)</sup>에서 볼 수 있는 굽힘 모드들이다. 또한, 이 대칭형 진동형들은 Fig. 3에서 보인 바와 같이 트레드의  $r$  방향 FRF의 공진봉이 뚜렷하게 나타나는 모드들이다.

(2) 반대칭형 진동형

트레드의  $\psi$  방향 모드가  $x$ - $y$  평면에 관해 반대칭적인 진동형(2, 3, 4, 5, 6, 12, 14, 16번)의  $r$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향의 진동형과 자오선 방향으로 절단한  $r$  방향의 진동형 등을 검토한 결과, 이러한 반대칭형 진동형은 모두  $M_r=2$  또는  $M_r=4$  인 모드들(Table 1의 5번째 칸)로서 단순화된 모델<sup>(1~4)</sup>에서 볼 수 있는 굽힘 모드들이 아님을 확인할 수 있다. 또한 이 모드들은 Fig. 3에서 보인 바와 같이 트레드의  $\psi$  방향에서만 공진봉이 뚜렷하게 구분되는 모드들이다.

- 번호 2번의 모드(37.3 Hz): 트레드가 상하로 병진 운동하면서 사이드월이  $x$ - $y$  평면에 관해  $r$  및  $\psi$  방향으로 반대칭적으로 진동하는 모드이다.
- 번호 3번(44.0 Hz), 4번(48.0 Hz), 6번(53.6 Hz)의 모드: 트레드가  $x$ - $y$  평면에 관해 반대칭적으로 상하운동(pitching)을 하는 모드이다.
- 번호 12번(141.3 Hz), 14번(177.0 Hz) 및 16번(205.2 Hz)의 모드: 이 모드들은 2개의 사이드월이 서로 반대칭적으로 진동하는 모드들이다. 또한 Table 1의 3차원 진동형으로부터, 3개의 모드들은  $z$  축을 중심으로 트레드가 비틀리는 진동형(torsional mode)임을 알 수 있다.

(3) 비대칭형 진동형

$r$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  방향에서 트레드 FRF의 공진봉이 모두 함께 나타나는 진동형은  $x$ - $y$  평면에 관해 비대칭모드로서 나타난다. 번호 8번(89.6 Hz)의 모드는  $x$ - $y$  평면에 관해 비대칭형이지만  $x$ - $z$  평면에 관해서는 대칭적으로 진동하는 모드이다.

3.2 공동 공명

일반적으로 타이어와 휠이 결합된 단체(tire-wheel

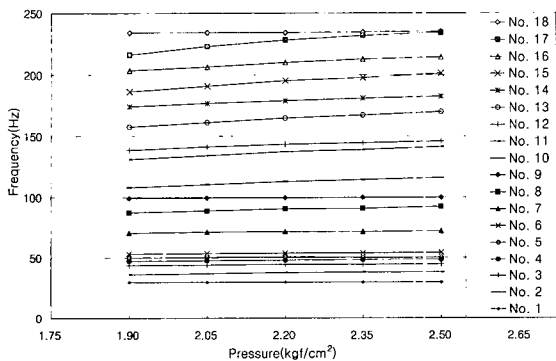


Fig. 4 The natural frequencies versus inflation pressures

assembly)내의 공기 공동(air cavity)이 있음으로 말미암아 공동 공명이 유발된다. 타이어가 지면에 접촉하지 않는 경우(하중을 받지 않는 경우) 첫 번째 공동공명은 300~400 Hz 이하에 존재하는 것으로 알려져 있다.<sup>(17)</sup>

(1) 압력 변화에 따른 고유진동수 변화

축으로 고정된 상태에 있는 타이어의 공기압 변화에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보기 위하여 동일한 고유진동형에 대하여 고유진동수의 변화를 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4로부터, 공기압이 증가할수록 고유진동수가 증가함을 알 수 있는데 고유진동수가 높을수록 증가량은 커져감을 알 수 있다. 그러나 공기압 변화에 상관없이 번호 18번 모드의 고유진동수는 거의 변화가 없다. 이것은 공동 공명의 진동 매질은 타이어의 구조 진동의 매질과 다르므로 앞의 Fig. 3에서처럼 고유진동수가 공기압 변화에 거의 영향을 받지 아니한다.

(2) 공기공동 진동의 주파수 응답함수

타이어와 휠 사이의 폐쇄된 공간에 있는 공기의 공진 주파수를 구하기 위하여 압력센서를 사용하여 공기의 동압을 측정하여 모드해석을 실시, 공기진동의 FRF를 구하여 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5로부터 공동 공명주파수를 234.6 Hz임을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에 보인 바와 같이 타이어의 공동 공명주파수는 공기압 변화에 거의 영향을 받지 않음을 확인하였다.

따라서 공동 공명 모드는 Table 1의 18번 모드에서 보인 바와 같이 타이어-휠 단체의 중심을 가로지르는 노드선(nodal line)을 가지며 이를 경계로 한쪽은 팽창, 그리고 다른 한쪽은 수축하는 진동모드임을 알 수 있다.

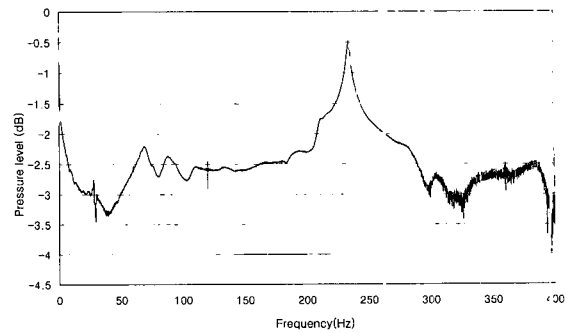


Fig. 5 FRF of the air cavity vibration

#### 4. 결 론

승용차용 레디얼 타이어의 고유진동수 및 3차원 고유진동형을 구하기 위하여 축으로 고정된 타이어에 대해 두 가지의 모달 테스트를 실시하였다. 즉, 가속도계를 사용하여 구조진동 및 공기 공동 진동의 3차원 모드를 구하였으며, 압력센서를 사용하여 타이어와 휠 사이의 공간에 있는 공기 진동의 공동 공명주파수를 구하였다. 가속도계를 사용하여 3차원 진동형을 구함에 있어, 타이어의 형상을 기하학적으로 정확히 모델링하기 위해 좌표계를 국부좌표계로 채용하여 이를 기준으로 신호를 받아 고유진동형을 구한 다음, 이를 다시 전체좌표계로 변환하여 3차원 고유진동형을 얻었다.

두 가지의 모드해석 결과를 이용하여 고유진동형의 특징을 분석하고 다음의 사실들을 확인하였다.

(1) 타이어의 진동형은 대칭형, 반대칭형, 비대칭형으로 구분할 수 있는데, 이 진동형의 구분은 트레드의  $\phi$  방향 모드를 이용하여 쉽게 구분할 수 있다. 즉, 트레드의  $\phi$  방향 모드가 트레드의 원주방향의 중심선에 관해 반대칭이면 타이어의 3차원 모드는 반대칭형이거나 비대칭형이다. 특히,  $\phi$  방향에서만 공진점이 나타나는 모드들은 모두 반대칭형으로 나타나며, 모든 방향에서 공진점이 나타나는 모드는 비대칭형 진동형이다.

(2) 대부분의 대칭형 진동형은 트레드의 굽힘 모드로서 단순화된 모델에서 볼 수 있는 굽힘 모드들이다.

(3) 굽힘 모드의 대칭형 진동형을 제외한 다른 진동형은 트레드의  $\phi$  방향 또는  $\theta$  방향의 모드가 뚜렷한 것들로서 타이어 중심평면에 관해 비대칭이거나 반대칭인 모드이다. 이 모드들은 트레드 원주방향의

중심선을 따라 측정된 2차원적 반경방향 진동형으로  
는 그 특징을 파악할 수 없다. 특히 반대칭형의 경우  
트레드 원주방향의 중심선을 따라 측정된 2차원적 반  
경방향 진동형은 모두 동일한 진동형( $S=0$ )으로 나  
타난다.

(4) 공기공동 공명주파수는 타이어 구조진동과 그  
진동 매질이 다른 관계로 공기압 변화에 거의 영향을  
받지 아니하나, 구조진동 모드의 고유진동수는 공기압  
이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다.

## 후 기

본 연구는 2001년도 순천대학교 공과대학 학술재단  
과 두뇌한국21사업단의 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Tielking, J. T., 1965, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model", SAE 650492.
- (2) Dodge, R. N., 1965, "The Dynamic Stiffness of a Pneumatic Tire Model", SAE 650491.
- (3) Clark, S. K., 1965, "The Rolling Tire under Load", SAE 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) Hunckler, C. J., Yang, T. Y. and Soedel, W., 1983, "A Geometrically Nonlinear Shell Finite Element for Tire Vibration Analysis", Computers and Structures, Vol. 17, pp. 217~225.
- (7) Kung, L. E., Soedel, W., Yang, T. Y. and 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.
- (8) Kung, L. E. and Soedel, 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.
- (9) Kao, B. G., Kuo, E. Y., Adelberg, M. L., Sundaram, S. V., Richards, T. R. and Charek, L. T., 1987, "A New Tire Model for Vehicle NVH Analysis", SAE 870424.
- (10) Zhang, Y., Palmer, T. and Farahani, A., 1998, "A Finite Element Tire Model and Vibration Analysis: A New Approach", Tire Science and Technology, Vol. 26, pp. 149~172.
- (11) Soedel, W. and Prasad, M. G., 1980, "Calculation of Natural Frequencies and Modes of Tires in Road Contact by Utilizing Eigenvalues of the Axisymmetric Non-contacting Tire", Journal of Sound and Vibration, Vol. 70, pp. 573~584.
- (12) Chiesa, A., Oberto, L. and Tamburini, L., 1964, "High Frequency Vibration in Tires under Vertical Perturbation and Their Transmission to the Wheels", Automotive Engineering, Vol. 54, p. 520.
- (13) Potts, G. R., Bell, C. A., Charek L. T. and Roy, T. K., 1977, "Tire Vibration", Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 5, No. 4, pp. 202~225.
- (14) Guan, D. H., Yam, L. H., Mignilet, M. P. and Li, Y. Y., 1999, "Study of Experimental Modal Analysis on Tires", Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference, Vol. 1, pp. 385~390.
- (15) Maia, Silva, He, Lieven, Lin, Skingle, To and Urgueyra, 1997, Theoretical and Experimental Modal Analysis edited by Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M., Research Studies Press Ltd, Baldock, Hertfordshire, England.
- (16) Sakata, T., Morimura, H. and Ide, H., 1990, "Effects of Tire Cavity Resonance on Vehicle Road Noise", Tire Science and Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 68~79.
- (17) Scavuzzo, R. W., Charek, L. T., Sandy, P. M. and Shteinhauz, G. D., 1994, "Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise", SAE 940533.
- (18) Gunda, R., Gau, S., and Dohrmann, C., 2000, "Analytical Model of Tire Cavity Resonance and Coupled Tire/Cavity Modal Model", Tire Science and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 33~49.