

## 실험모드해석에 의한 승용차용 레디얼 타이어의 3차원 진동특성

### Experimental Modal Analysis for 3-D Vibration Characteristics of Radial Tire for Passenger Car under Free-Suspension

김 용 우\*, 남 진 영\*\*  
Yong-woo Kim, Jin Young Nam

#### ABSTRACT

We have performed two kinds of experimental modal analyses for a radial tire for passenger car under free-suspension. 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 the three-dimensional natural modes, which makes it possible to grasp the features of the 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 first and the second experimental analyses we have identified the cavity resonance frequency and its three-dimensional mode shape.

주요기술용어 : Frequency response function(주파수응답함수), Natural mode(고유진동형), Natural frequency(고유진동수), Symmetric mode(대칭 진동형), Non-symmetric mode(비대칭 진동형), Antisymmetric mode(반대칭 진동형), Cavity resonance(공동공명)

#### 1. 서 론

타이어의 고유진동수 및 고유진동형 등의 진동 특성은 차량의 승차감과 소음 발생을 예측하거나 감소시키는데 필요한 매우 중요한 인자들이다. 특히 타이어나부터 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 연구가 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>6-11)</sup>이다. 초창기 대부분의 이론적 연구는 타이어의 구조를 스프링으로 지지된 탄성 링 또는 셀로 단순화시킨 모델<sup>1-4)</sup>을 이용하여 타이어의 진동 특성을 연구하였다. 특히, Soedel과 Prasad<sup>12)</sup>는 지면과 접촉하는 타이어의 고유진동수와 고유진동형을 비접촉 축대칭 자유진동 모드를 이용하여 계산할 수

\* 회원, 순천대학교 기계공학과  
\*\* 회원, 순천대학교 대학원

있음을 보였다.

대표적인 실험적 접근법으로 타이어를 충격 햄머(impact hammer)나 가진기(shaker)로 가진하여 가속도계로 타이어 표면의 운동을 감지하는 접근 방법을 들 수 있다. Chiesa 등<sup>13-15)</sup>은 이러한 방법으로 실험을 실시하였다. Potts<sup>16)</sup>는 가진기로 타이어를 가진하여 홀로그래픽 장치(holographic equipment)를 사용하여 타이어의 표면의 진동 패턴을 관찰하여 연구하였다. 그러나, 홀로그래픽 방법에 의한 관찰은 광선이 비추지는 부분만의 정보를 알 수 있을 뿐 전체 타이어의 3차원적 정보를 제공하지 못한다. 또한, 가속도계를 이용한 대부분의 실험<sup>11,17,18)</sup>이 트레드(tread) 중심선을 따라서 타이어 표면에 수직한 방향의 진동형과 고유진동수를 구하는데 그치고 있어 진동형의 명확한 특징을 가려내기 어렵다.

본 연구에서는 패턴으로 인한 국부적인 효과를 배제하기 위해 패턴이 없는 민무늬 타이어(P205/60R15, 11.9kgf)를 사용하여 자유상태의 타이어에 대한 충격햄머를 이용한 모달 테스트를 실시하고 3차원 고유진동형을 구하였다. 그리고 이에 따른 3차원 고유진동형을 분석, 검토함으로써 2차원 진동형에서 판단하기 어려운 진동형의 특징을 명확히 구분하여 분석하였다. 또한, 공동공명(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 조사하였으며, 가속도계를 사용하여 공기압의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 조사함으로써 타이어의 구조진동과 공기공동 진동의 차이점을 제시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 측정을 위한 좌표 설정

타이어는 이중 곡률의 표면을 갖는 축대칭 회전체이므로 좌표계를 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 z축을 중심으로 도우넛 모양의 회전체가 되도록, 그리고 타이어의 중심평면(x-y 평면)에 대해 대칭이 되도록 직각좌표계 x-y-z를 설정하여 이를 전체좌표계(global coordinates)로 사용하였다. Fig. 1(a)에서와 같이 z축에 중심을 둔 타이어 표면상의 동심원 상에 있는 측정점들의 좌표를 기술하기 위해, Fig. 1(b)와 같이 다음의 조건이 만족되도록 타이어 표면상의 원을 포함하는 구(sphere)를 찾아서 구좌표계( $r, \theta, \psi$ )를 설정하고 이를 국부좌표계(local coordinates)로 채용하였다. 즉, 구의 중심은 z축상에

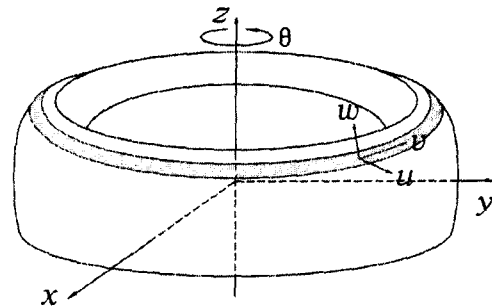


Fig. 1(a) Global coordinates x-y-z and displacements of a tire

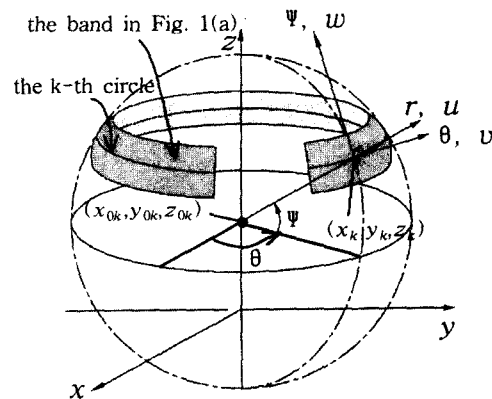


Fig. 1(b) Local spherical coordinates r- $\theta$ - $\psi$  of a circle on the surface of tire

존재하고, Fig. 1(a)의 변위  $u, v, w$ 가 각각 반경방향( $r$ 방향, 타이어의 표면에 수직한 방향)의 변위, 원주방향( $\theta$ 방향, 반경방향에 수직이면서 동시에 타이어 표면에서 원주방향으로 접선인 방향)의 변위, 자오선방향( $\psi$ 방향, 반경방향에 수직이면서 동시에 타이어 표면에서 자오선방향으로 접선인 방향)의 변위가 되도록 좌표계( $r, \theta, \psi$ )를 설정하였다.

### 2.2 측정과 모드해석

Fig. 2(a)와 같이 타이어의 표면에 있는 15개의 동심원과 등간격의 15개 자오선이 교차하는 위치를 측정점으로 삼았다. 따라서 전체 측정점의 개수는  $15 \times 15$ 곳이 된다.

Fig. 2(b)와 같이 타이어의 특정 위치에 부착한 블록을 타격하여 (트레드 표면, 자오선의 접선방향 및 원주방향에 각각  $45^\circ$ 방향으로 타격할 수 있도록 트레드의 중앙선상에 위치한 특정점에 블록을 부착함), 한 동심원상에 위치한 15개소에서  $r, \theta, \psi$  방향으로 각각 신호를 측정한다. 다시

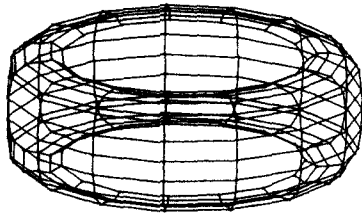


Fig. 2(a) Entire measuring points on the surface of a tire

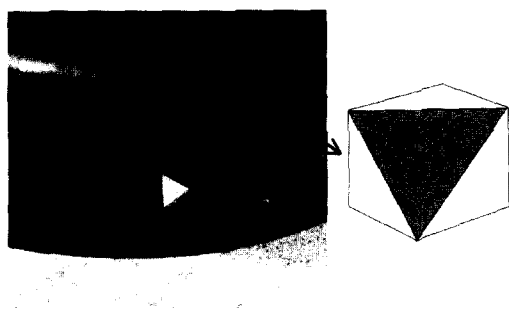


Fig. 2(b) The steel block attached to the tire surface for an impact

가속도계를 또 다른 동심원상에 부착하여 측정하는 방식을 반복하였다. 이렇게 하여 총 675개의 주파수응답함수를 얻고, 이에 SIMO(single-input-multi-output)방법의 하나인 GFRP(global rational fraction polynomial method)<sup>22)</sup>를 적용하여 3차원 고유진동형을 구하였다. 또한  $r, \theta, \psi$ 방향 각각의 225개의 FRF에 대해 모드해석을 적용하여 각 방향으로의 성분별 3차원 진동형(decomposed 3-D mode)을 구하였다. 모든 실험은 온도  $24.5^\circ\text{C}$ 의 실험실내에서 실시하였다.

타이어 표면상의  $k$ 번째 동심원상에 있는 측정점의  $r, \theta, \psi$  방향의 진동형과 그 측정점의 국부좌표( $r_k, \theta_k, \psi_k$ )는 다음 식에 의해 전체좌표계  $x-y-z$ 에 대한 것으로 변환하였다.

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{rx} & \beta_{\theta x} & \beta_{\psi x} \\ \beta_{ry} & \beta_{\theta y} & \beta_{\psi y} \\ \beta_{rz} & \beta_{\theta z} & \beta_{\psi z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_k \\ \theta_k \\ \psi_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{0k} \\ y_{0k} \\ z_{0k} \end{pmatrix}$$

여기서,  $\beta_{ij} = \cos(i, j)$ 의  $k$ 번째 동심원상에 있는 측정점의 방향여현(directional cosine)으로 국부좌표축  $i$ 와 전체좌표축  $j$ 와의 사이각에 코사인을 취한 값이다. 또한,  $x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}$ 는  $k$ 번째 동심원상에 있는 측정점에 설정된 국부좌표계의 원점의 전체좌표계에 대한 좌표이다.

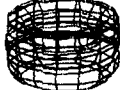

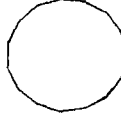









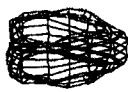





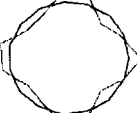



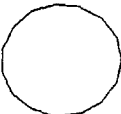





### 3. 실험결과 및 고찰







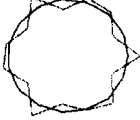



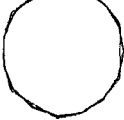

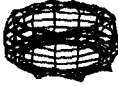

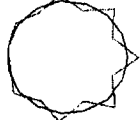









#### 3.1 진동 모드의 특징 및 분류

자유상태에 있는 타이어의 트레드의 중앙점을 타격하여 타격점에서 가까운 측정점의  $r, \theta, \psi$  방향의 주파수 응답함수를 Fig. 3에 각각 도시하였다. 50Hz 이하의 주파수 대역에서는 coherence function의 값이 매우 낮아 검토 대상에서 제외하였다. 모드해석 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 두 번째 칸은 3차원 고유진동형을 도시한 것이다. 우선 이 고유진동형들이  $x-y$ 평면에 관해 대칭인지를 검토하기 위해 트레드를 펼쳐서  $\psi$ 방향의 진동형을 Table 1의 세 번째 칸에도

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 (56.0)			 S=0	 M <sub>r</sub> =4
2 (89.9)			 S=2	 M <sub>r</sub> =2
3 (102.0)			 S=1	 M <sub>r</sub> =4
4 (112.3)			 S=3	 M <sub>r</sub> =3
5 (136.9)			 S=4	 M <sub>r</sub> =3
6 (140.3)			 S=0	 M <sub>r</sub> =4
7 (164.4)			 S=5	 M <sub>r</sub> =3

8 (178.5)			 S=0	 M <sub>r</sub> =4
9 (194.5)			 S=6	 M <sub>r</sub> =3
10 (207.8)			 S=0	 M <sub>r</sub> =4
11 (230.9)			 S=7	 M <sub>r</sub> =3
12 (233.9)			 S=1	 M <sub>r</sub> =3
13 (261.1)			 S=1	 M <sub>r</sub> =4


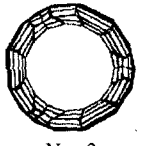

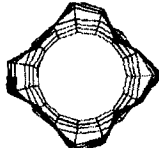
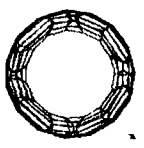
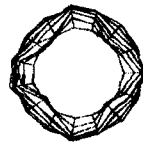
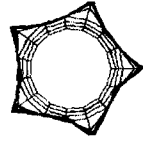


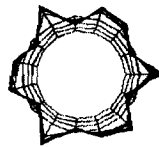
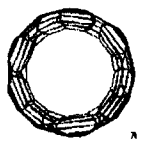
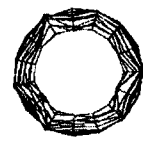
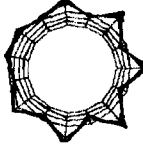


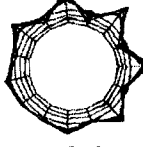
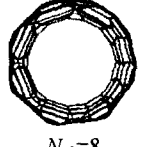

시하였다. 이로부터 트레드의  $\psi$ 방향의 진동형들은  $x-y$ 평면에 대칭인 것과 반대칭인 것으로 분류됨을 알 수 있다. 또한, 단순화시킨 타이어 모델의 연구에서 제시하는 결과와 비교하기 위하여 트레드 중심의 원주를 따라서  $r$ 방향의 진동형을 Table 1의 네 번째 칸에, 그리고 자오선을 따라서  $r$ 방향의 진동형을 Table 1의 다섯 번째 칸에 각각 도시하였다. Table 1의 네 번째 칸의 S는 트레드의 중심선이 원주방향을 따라서  $r$ 방향으로 진동하는 파수(number of full waves)를, 다섯 번째

칸의  $M_r$ 은 타이어의 단면이  $r$ 방향으로 진동하는 반파수(number of half waves)를 의미한다. 그리고, 첫 번째 칸의 일련 번호는 고유진동수가 증가하는 순으로 차례로 붙인 번호로서 본 연구에서 이 번호를 사용하여 진동형을 지칭하고자 한다.

### 3.1.1 대칭형 진동형

트레드의  $\psi$ 방향 진동형이 타이어의 중심평면( $x-y$  평면)에 대해 대칭인 것에 대하여 타이어의  $r, \theta, \psi$ 방향의 진동형을 Table 2에 도시하였

Table 2 Natural frequencies and decomposed mode shapes of symmetric modes

No.	r-directional mode	$\theta$ -directional mode	$\psi$ -directional mode
4	 $N_r=3$	 $N_\theta=3$	 $N_\psi=3$
5	 $N_r=4$	 $N_\theta=4$	 $N_\psi=4$
7	 $N_r=5$	 $N_\theta=5$	 $N_\psi=5$
9	 $N_r=6$	 $N_\theta=6$	 $N_\psi=6$
11	 $N_r=7$	 $N_\theta=7$	 $N_\psi=7$
13	 $N_r=8$	 $N_\theta=8$	 $N_\psi=8$

다. Table 2에서  $N_r$ 은 트레드가 원주방향을 따라서  $r$ 방향으로 진동하는 파수를,  $N_\theta$ 는 사이드월 (sidewall)이 원주방향을 따라서  $\theta$  방향으로 진동하는 파수를, 그리고  $N_\psi$ 는 사이드월이 원주방향을 따라서  $\psi$  방향으로 진동하는 파수를 나타낸

다. Table 2로부터, 트레드의  $\psi$ 방향 진동형이  $x-y$  평면에 대해 대칭이면 트레드의  $r$  및  $\theta$ 방향의 진동형도 대칭이며, 사이드월도 역시  $x-y$  평면에 대해 대칭이 됨을 알 수 있다. 즉, 트레드의  $\psi$ 방향 진동형이  $x-y$  평면에 대해 대칭인 모드의 3차

원 진동형(Table 1의 3번째 칸)은  $x-y$  평면에 대해 대칭이다. 이러한 진동형은 모두  $M_r=3$ 인 것(Table 1의 5번째 칸)들로서 단순화된 모델<sup>1,4)</sup>에서 볼 수 있는 굽힘 모드들로 구성되어 있다. 또한, Fig. 3에서 보인 바와 같이, 트레드에서 이 대칭형 진동형들의  $r$ 방향 공진봉(peak)들은 뚜렷하게 구분되어 나타난다.

### 3.1.2 비대칭형 진동형

트레드의  $\psi$ 방향 진동형이  $x-y$  평면에 관하여 반대칭인 것에 대하여, 타이어의 방향 진동형의 평면도와 자오선 방향으로 절단한 타이어의  $r$ 방향 진동형들을 검토한 결과, 이들은 모두  $M_r=2$  또는  $M_r=4$ 인 진동형들(Table 1의 5번째 칸)로서 단순화된 모델<sup>1,4)</sup>에서 볼 수 있는 굽힘 모드들이 아님을 확인할 수 있다. 이 비대칭 진동형 중에서 102 Hz의 모드를 제외하면, Fig. 3에서 보인 바와 같이 트레드에서  $\psi$ 방향의 공진봉이 뚜렷하게 구분되어 나타난다. 그리고 102.0Hz의 고유진동형은 트레드에서  $\theta$ 방향의 공진봉이 Fig. 3에서 보인 바와 같이 뚜렷하게 나타난다. 이들의 특징은 다음과 같다.

1) 번호 1번의 진동형(56.0Hz): 트레드가 상하로 병진운동하면서 사이드월이  $r$  및  $\psi$ 방향으로 반대칭적으로 진동한다.

2) 번호 2번의 진동형(89.9Hz): 상하의 사이드월이  $\theta$ 방향으로 대칭적으로 진동하나,  $\psi$ 방향으로는 반대칭적으로 진동한다.

3) 번호 3번의 진동형(102.0Hz): 트레드의  $\theta$ 방향 진동모드가 뚜렷한 모드로서, 양쪽의 사이드월이  $\theta$  및  $\psi$ 방향으로 대칭적으로 진동하나, 트레드는  $\psi$ 방향으로 반대칭적으로 진동한다.

4) 번호 6번(140.3Hz), 8번(178.5Hz) 및 10번(207.8Hz)의 진동형: 이 모드들은 주의 깊게 관찰하지 않으면 그 특징을 파악하기 쉽지 않은 진동형들로서 Table 3에 이 것들의 성분별 진동형을 도시하였다. Table 3으로부터 이 진동형들은 2개

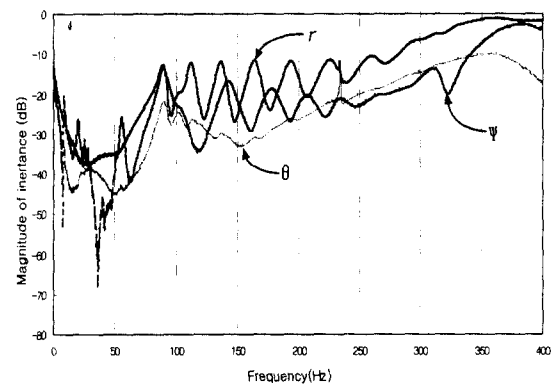


Fig. 3 Frequency response function at a point on the centerline of tread when inflation pressure is 2.20kgf/cm<sup>2</sup>

Table 3 Decomposed antisymmetric mode shapes of sidewalls (torsional modes)

No.	r-directional mode		$\theta$ -directional mode		$\psi$ -directional mode	
	Upper sidewall	Lower sidewall	Upper sidewall	Lower sidewall	Upper sidewall	Lower sidewall
6						
8						
10						

개의 사이드월이 서로 반대칭적으로 진동함을 알 수 있다. 또한 Table 1로부터, 3개의 3차원 진동형들은 z축을 중심으로 트레드가 비틀리는 진동형(torsional mode)임을 알 수 있다.

### 3.2 공동 공명

일반적으로 타이어나 휠이 결합된 단체(tire-wheel assembly)내의 공기 공동(air cavity)이 있으므로 말미암아 공동 공명이 유발된다. 첫 번째 공동 공명은 타이어가 지면에 접촉하지 않는 경우(하중을 받지 않는 경우) 300-400Hz 이하에서 존재하는 것으로 알려져 있다.<sup>20)</sup>

#### 3.2.1 압력 변화에 따른 고유진동수 변화

자유상태에 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 있다. 그러나 공기압 변화에 상관없이 번호 12번 진동형의 고유진동수는 거의 변화가 없다.

#### 3.2.2 공동 공명의 주파수 응답함수

타이어와 휠 사이의 폐쇄된 공간에 있는 공기의 공진 주파수를 구하기 위하여 압력센서를 사용하여 공기의 동압(dynamic pressure)을 측정하

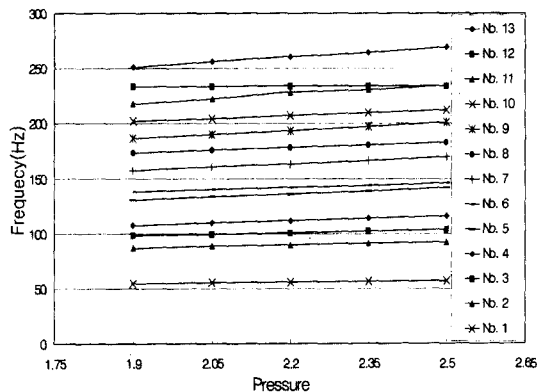


Fig. 4 The natural frequencies versus inflation pressures

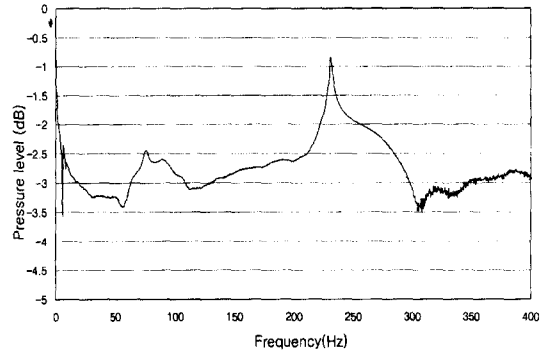


Fig. 5 FRF of the air cavity vibration

여 모드해석을 실시, 공기진동의 FRF를 구하여 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5로부터 공동 공명주파수를 233.9 Hz임을 알 수 있다. 이것은 Table 1의 12번 진동형에 해당된다. Fig. 4에서 12번 모드와 고유진동수는 공기압의 변화에 거의 영향을 받지 아니하고 일정하다. 따라서 12번의 진동 매질은 타이어의 구조진동의 매질과 다르다는 사실을 추론할 수 있으며, 공기 공동의 공명주파수는 Fig. 4와 같이 공기압 변화에 거의 영향을 받지 아니함을 알 수 있다.

또한, 공동공명의 진동형은 Table 1의 12번 모드에서 보인 바와 같이 타이어-휠 단체의 중심을 가로지르는 노드선(nodal line)을 가지며 이를 경계로 한쪽은 팽창, 그리고 다른 한쪽은 수축하는 형상임을 알 수 있다.

## 4. 결론

승용차용 레이디얼 타이어의 고유진동수 및 3차원 고유진동형을 구하기 위하여 패턴이 없는 민무늬 타이어를 사용하여 모달 테스트를 실시하였다. 타이어는 이중 곡율의 표면을 갖는 축대칭 회전체이므로 기하적으로 정확히 모델링하기 위해 좌좌표계를 국부좌표계로 채용하여 이를 기준으로 신호를 받아 고유진동형을 구한 다음, 이를 다시 전체좌표계로 변환하여 3차원 고유진동형을 얻었다. 본 연구에서는 자유상태에 있는 타이어의 모달 테스트를 실시하였고 압력



변화에 따른 고유진동수의 변화를 조사하였다. 또한 압력 센서를 사용하여 타이어와 휠 사이의 공간에 있는 공기 진동의 FRF를 구하여 공동 공명주파수를 구하였다. 두 가지의 모드해석 결과를 이용하여 고유진동형의 특징을 분석하고 다음과 같은 내용들을 확인하였다.

1) 타이어의 진동형은 크게 대칭형과 비대칭형으로 대별할 수 있는데, 이의 구분은 트레드의  $\phi$  방향 진동형을 이용하여 쉽게 구분할 수 있다. 또한 비대칭형은 좀더 자세히 반대칭형과 비대칭형으로 분류된다. 본 연구에서 찾아낸 3개의 비틀림 진동형은 타이어 중심평면에 관해 반대칭이다.

2) 대부분의 대칭형 진동형은 트레드의 굽힘 모드로서 곡선보 모델의 진동형과 일치한다.

3) 비대칭형 진동형은 트레드의  $\phi$  방향 또는  $\theta$  방향의 진동형이 뚜렷한 것들로서, 트레드 원주 방향의 중심선을 따라 측정된 2차원적 진동형만으로는 그 특징을 알기 어렵고 3차원 진동형을 통하여 진동형의 특징을 명확히 파악할 수 있다. 특히, 반경반향으로 Table 1의  $S=1$  또는 2인 진동형들은 2차원적 진동형으로는 그 특징을 구분하기 곤란하나 3차원 진동형을 통해 특징을 명확히 가려낼 수 있다.

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

## 후 기

본 연구는 2001년도 순천대학교 공과대학 학술재단과 두뇌한국21사업단의 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 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) L. E. Kung, W. Soedel, "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, 1986.
- 9) B. G. Kao, E. Y. Kuo, M. L. Adelberg, S. V. Sundaram, T. R. Richards, L. T. Charek, "A New Tire Model for Vehicle NVH Analysis," SAE 870424, 1987.
- 10) 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.
- 11) 김두만, 김항욱, "승용차용 레이디얼 타이어의 동적 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제10권 제5호, pp.724-734, 1986.
- 12) W. Soedel, M. G. Prasad, "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, 1980.
- 13) A. Chiesa, L. Oberto, L. Tamburini, "High Frequency Vibration in Tires under Vertical Perturbation,"

- rbation and Their Transmission to the Wheels,” *Automotive Engineering*, Vol.54, p.520, 1964.
- 14) G. R. Potts, C. A. Bell, L. T. Charek, T. K. Roy, “Tire Vibration,” *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.5, No.4, pp.202-225, 1977.
- 15) D. H. Guan, L. H. Yam, M. P. Mignilet, Y. Y. Li, “Study of Experimental Modal Analysis on Tires,” *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, Vol.1, pp.385-390, 1999.
- 16) G. R. Potts, “Application of Holography to the Study of Tire Vibration,” *Tire Science and Technology*, Vol.1, No.3, pp.255-266, 1973.
- 17) 문일동, 이태근, 홍동표, 김병삼, “정하중을 받는 승용차 타이어의 진동특성에 관한 연구,” *한국정밀공학회지*, 제12권 제2호, 1995.
- 18) 김병삼, 이태근, 홍동표, 정태진, 양성모, “승용차용 타이어의 진동특성에 관한 연구,” *한국자동차공학회지*, Vol.15, No.2, pp.76-83, 1993.
- 19) T. Sakata, H. Morimura, H. Ide, “Effects of Tire Cavity Resonance on Vehicle Road Noise,” *Tire Science and Technology*, Vol.18, No.2, pp.68-79, 1990.
- 20) R. W. Scavuzzo, L. T. Charek, P. M. Sandy, G. D. Shteinhauz, “Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise,” SAE 940533, 1994.
- 21) R. Gunda, S. Gau, C. Dohrmann, “Analytical Model of Tire Cavity Resonance and Coupled Tire/Cavity Modal Model,” *Tire Science and Technology*, Vol.28, No.1, pp.33-49, 2000.
- 22) Maia, Silva, He, Lieven, Lin, Skingle, To, Urgueyra, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England, pp.245-248, 1997.