

# 온도 변화가 승용차용 레이디얼 타이어의 공기공동 공명 및 타이어의 진동특성에 미치는 영향에 관한 실험

김 용 우\*

순천대학교 기계공학과

## Experiments on Temperature Effect on Air Cavity Resonance and Tire's Vibration Characteristics of a Radial Tire

Yong-woo Kim\*

Department of Mechanical Engineering, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea

(Received 23 August 2007 / Accepted 25 November 2007)

**Abstract** : It is well known that the acoustic cavity inside the tire-wheel assembly contributes to vehicle interior noise and ride comfort. In this paper, we performed acoustic and structural modal testings by varying the temperature ranging from 20°C to 45°C to investigate the effects of temperature on acoustic cavity resonance and structural vibration characteristics for unloaded and loaded tires. The testing has given us some findings, which are reported in this paper.

**Key words** : Radial tire(레이디얼 타이어), Air cavity resonance(공기공동 공명), Modal test(모달 테스트), Natural frequency(고유진동수), Natural mode(고유진동형), Frequency response function(주파수 응답함수)

### 1. 서 론

타이어와 휠로 구성되는 공기공동의 음향학적인 공명은 구조소음(structure-borne noise)의 전달 경로를 따라서 차량의 실내로 전달되며 타이어에서 축으로 전달되는 전달율(transmissibility)이 다른 구조진동의 것보다 훨씬 큰 경향이 있다. 따라서 이 공기공동 공명은 차량의 실내소음뿐만 아니라 승차감에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히 공기공동 공명주파수가 구조진동의 고유주파수와 매우 근접해 있어 연성(coupling)이 되는 경우, 이로 인해 소음 및 진동 문제는 더욱 심각해진다. 이러한 이유로 지금까지는 첫 번째 공기공동공명이 승차감과 실내 소음에 주요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 이에 대한 연구가 꾸준히 지속되어 왔다.<sup>1-10)</sup> 그

러나 지금까지의 대부분의 연구는 온도의 효과를 고려하지 않고 있다. 실제의 타이어 및 공기공동 안의 공기 온도는 주변의 온도에 영향을 받으며 주행시 타이어 점탄성 재료의 발열로 인해 타이어 및 공기공동의 온도가 증가한다.<sup>11,12)</sup> 또한, 타이어의 주재료인 고무배합물의 강성은 온도에 영향을 받으며, 특히 공기공동의 공명주파수는 온도에 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 온도 변화가 타이어의 공기공동 공명 특성 및 타이어의 구조적 진동 특성에 미치는 영향을 분석 검토하기 위하여, 승용차용 레이디얼 타이어(P205/60R15)에 대해 타이어 주변 및 타이어 내부의 온도를 변화시키면서 압력 센서를 이용한 공기공동 내부의 음압(acoustic pressure)에 관한 모달 테스트와 가속도계를 이용한 타이어의 구조적 모달 테스트를 실시하였다.

\*Corresponding author, E-mail: kyw@sunchon.ac.kr

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 좌표 설정

지면접촉 타이어의 좌표계는 Fig. 1과 같이 설정한다.

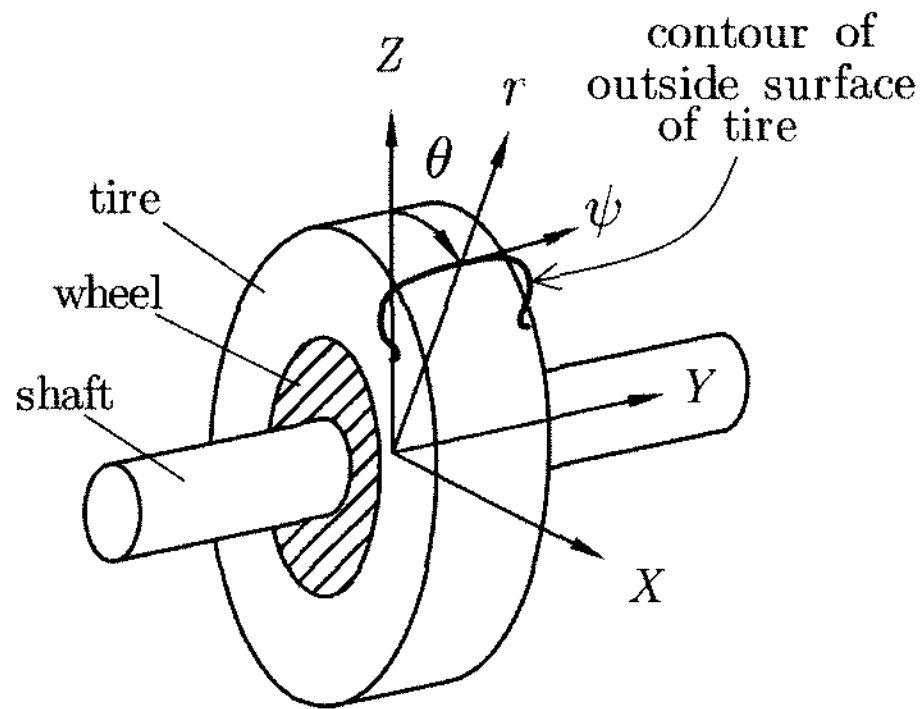


Fig. 1 Global coordinates(X-Y-Z) and local coordinates( $r$ - $\theta$ - $\psi$ ) of the tire

### 2.2 타이어의 구속조건

#### 2.2.1 자유상태의 타이어

Fig. 2와 같이, 타이어(20.7°C에서 공기압 2.2  $kgf/cm^2$ 으로 설정)의 휠에 15개의 구멍을 내어 각각의 구멍에 압력센서를 삽입하고, 타이어 표면을 타격하여 압력센서를 통해 응답을 받는 공기공동의 음압에 관한 모달 테스트(acoustic modal test)를 실시하였다. 또한 동일 타이어의 트레드 중심선을 따라 등간격으로 타이어 표면의 15개소에 반경방향( $\gamma$ -반향)으로 가속도계를 부착하여 타이어의 구조적 모달 테스트를 실시하였다.

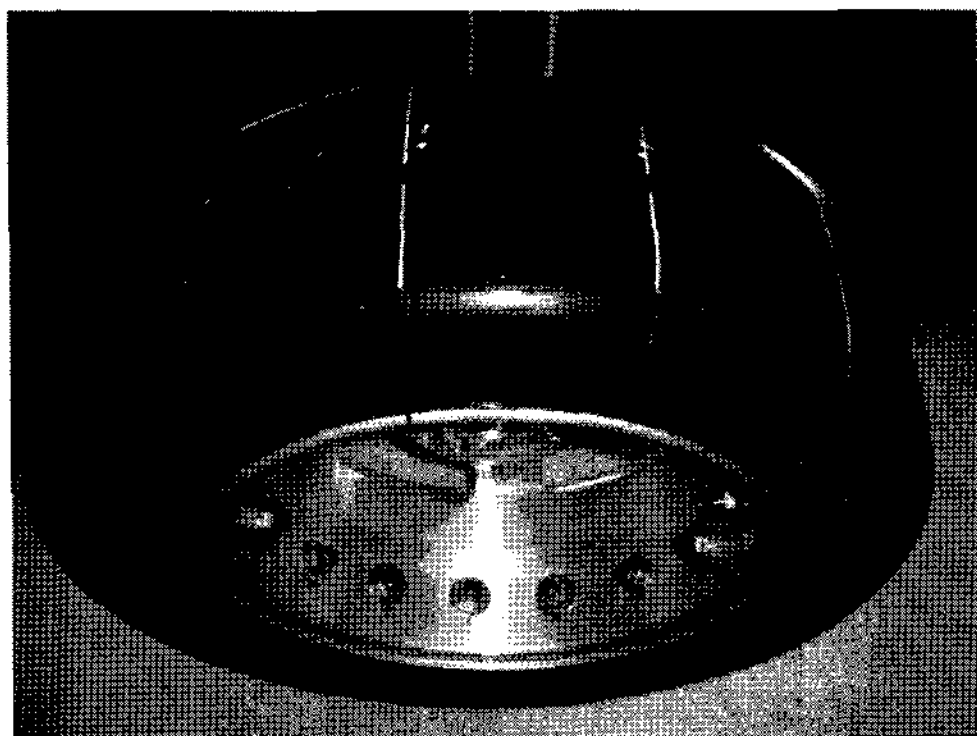


Fig. 2 The unloaded tire in free-suspension

#### 2.2.2 수직하중을 받는 타이어

Fig. 3과 같이 타이어에 300  $kgf$ 의 수직하중을 가하여 지면과 접촉시킨 상태에서 음압 모달 테스트 및 구조적 모달 테스트를 실시하였다.

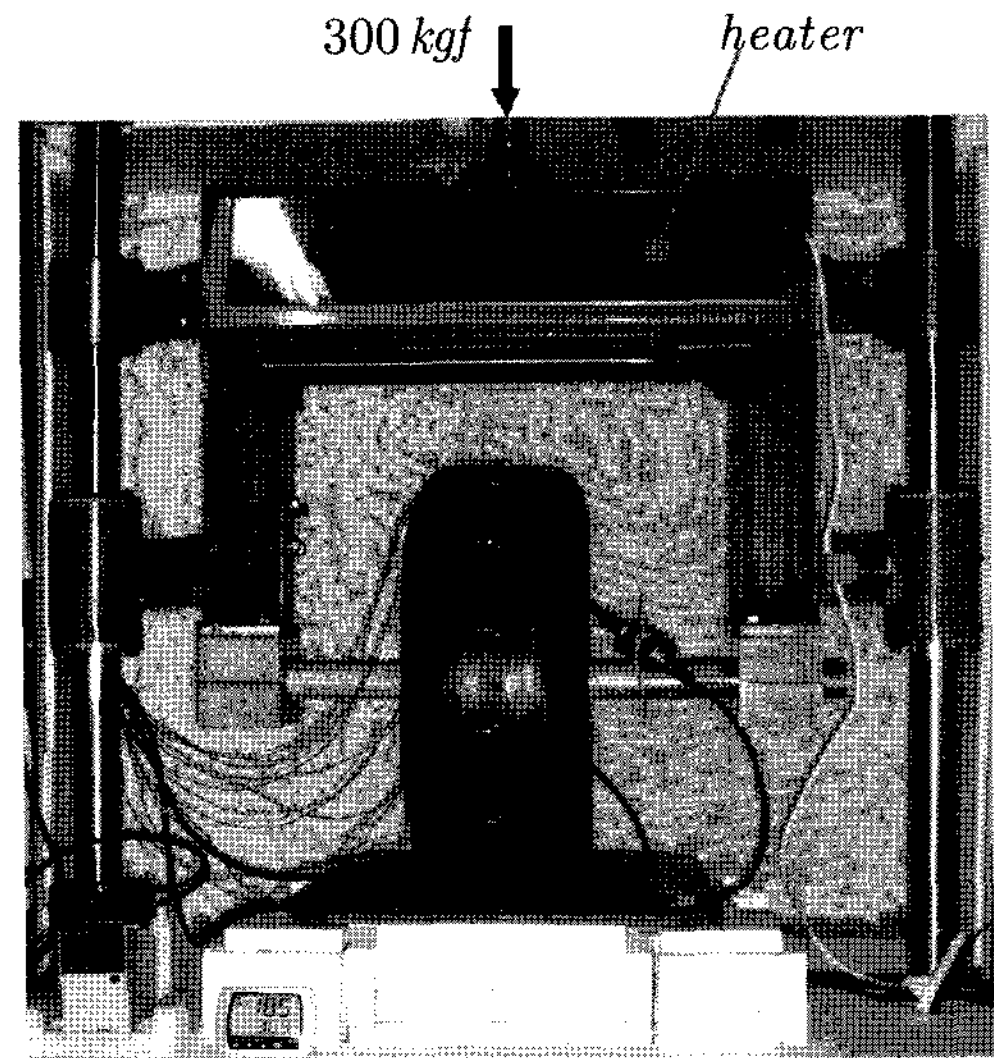


Fig. 3 The loaded tire subjected to 300  $kgf$

### 2.3 온도 변화에 따른 모달 테스트

자유상태와 지면접촉 상태의 타이어에 대하여 온도 변화에 따른 구조적 진동 및 공기공동 공명의 특성 변화를 검토하기 위해 Fig. 3과 같이 실험장치를 단열재로 만든 엔클로저(enclosure)로 감싸고 온도를 조절할 수 있는 가열기(heater)로 공기의 온도가 일정 값까지 오르도록 가열하였다. 엔클로저 내부 및 타이어의 공기공동의 온도가 정상상태에 도달하였음을 확인한 다음, 두 가지 모달 테스트를 실시하였다. 이 때 공기공동 내부의 온도는 측온 저항체(RTD, resistance temperature detector)를 삽입하여 측정하였다. 그리고 두 가지 모달 테스트로부터 얻은 주파수 응답함수(FRF) 및 진동특성을 비교하여 구조진동과 공기공동 공명의 연성 여부 및 타이어의 진동 특성을 검토하였다.

## 3. 실험 결과 및 검토

### 3.1 압력센서를 이용한 모달 테스트

#### 3.1.1 상온에서의 공기공동의 공명 특성

우선, 21.5°C에서의 두 가지 실험의 결과를 Fig. 4와 Table 1에 요약한다. Fig. 4는 두 가지 상태의 타이어에 대한 모달 테스트로부터 얻은 주파수응답함수(FRF)를 비교한 것이고, Table 1은 공기공동의 고유진동형을 비교한 것이다.<sup>10)</sup>

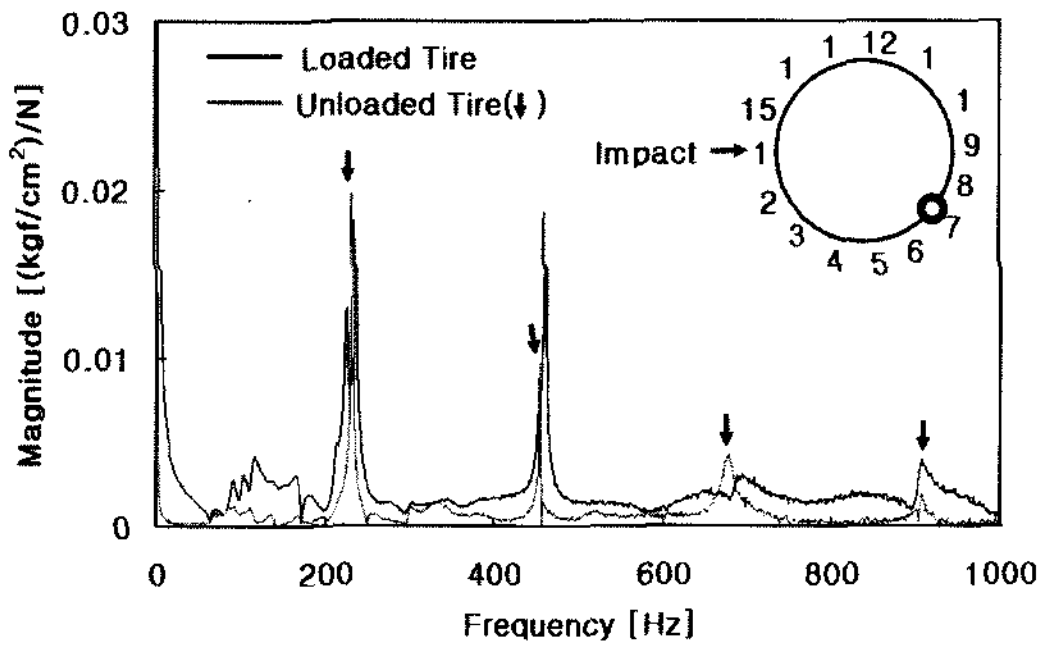


Fig. 4 Comparison of FRF's between unloaded and loaded tire at 21.5°C

Table 1의 왼쪽 열에 보인 바와 같이, 자유 상태의 공기공동 공명주파수를 4개까지 측정하였다. 또한 동일한 타이어를 Fig. 3과 같이 지면에 세워서 하중을 가한 상태에서 측정하여 Table 1의 오른쪽 열에 정리하였다. Table 1로부터 다음의 사실을 확인할 수 있다.

첫째, 자유상태의 첫 번째와 두 번째의 공명주파수를 기준으로, 하중을 받는 타이어의 공명주파수는 약간 큰 주파수와 약간 작은 주파수로 분리된다. 그러나 하중을 받는 타이어에서, 자유상태의 세 번째와 네 번째의 공명주파수에 해당하는 공명주파수는 명확히 측정하기 어려웠다.

둘째, 하중을 받는 타이어의 첫 번째 고유진동형(225 Hz)은 전후 방향(X-축 방향)으로 진동하며, 두 번째의 것(237 Hz)은 상하 방향(Z-축 방향)으로 진동한다. 특히 두 번째의 공명주파수는 차축을 상하 방향으로 진동시켜 승차감에 큰 영향을 주는 것으로 보고 되고 있다.<sup>5)</sup>

셋째, 하중을 받는 타이어의 세 번째 고유진동형(454 Hz) 및 네 번째의 것(461 Hz)은 중심축의 위치가 거의 변함이 없는 진동형으로서 첫 번째 및 두 번째 모드에 비해 차축을 흔드는 효과는 미미할 것으로 판단된다.

Table 1 Comparison of cavity resonance frequencies and their natural modes at 21.5°C

	Unloaded tire	Loaded tire	
1	 232 Hz	 225 Hz	 237 Hz
2	 456 Hz	 454 Hz	 461 Hz
3	 680 Hz	-	-
4	 905 Hz	-	-

### 3.1.2 온도 증가에 따른 공기공동의 공명 특성

자유상태와 지면접촉 상태의 타이어에 대한 두 가지 실험에서 공기공동의 온도 변화에 따른 타이어의 구조적 진동 및 공기공동 공명의 특성 변화를 검토하기 위해 공기공동의 공명주파수와 온도와의 관계를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 5는 자유상태의 타이어에 대한 공기공동의 첫 번째 및 두 번째의 공명주파수를 도시한 것으로 공명주파수는 온도가 증가함에 따라 각각 비례하여 증가함을 보여준다.

Fig. 6은 지면접촉 타이어에 대한 첫 번째부터 네 번째까지의 공기공동 공명주파수를 도시한 것으로 공명주파수는 온도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는, 공명주파수가 음속(sound velocity)에 비례하고 음속(C)은 0~100°C의 공기 중에서 공기의 절대온도에 거의 비례하기 때문이다. 공기 중에서의 음속과 공기의 절대온도(T)

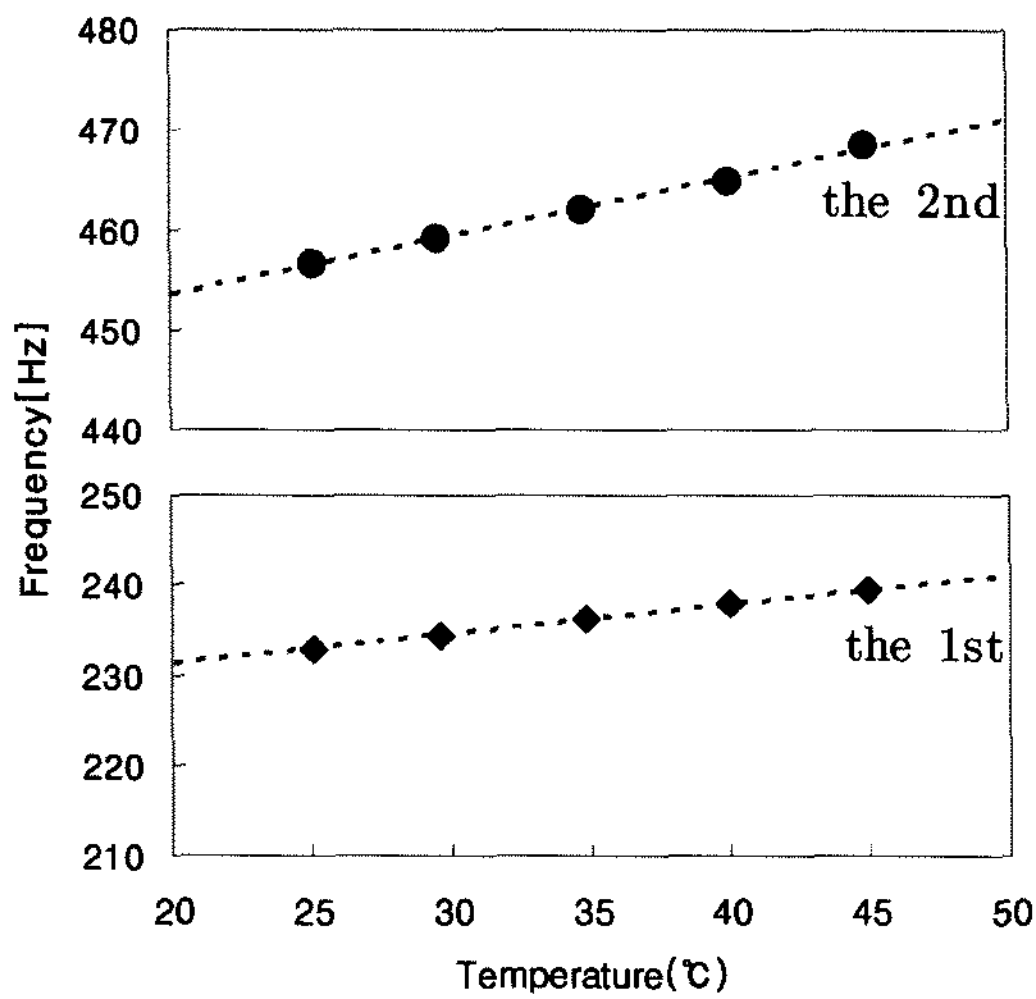


Fig. 5 The first two cavity resonant frequencies of the unloaded tire with temperature

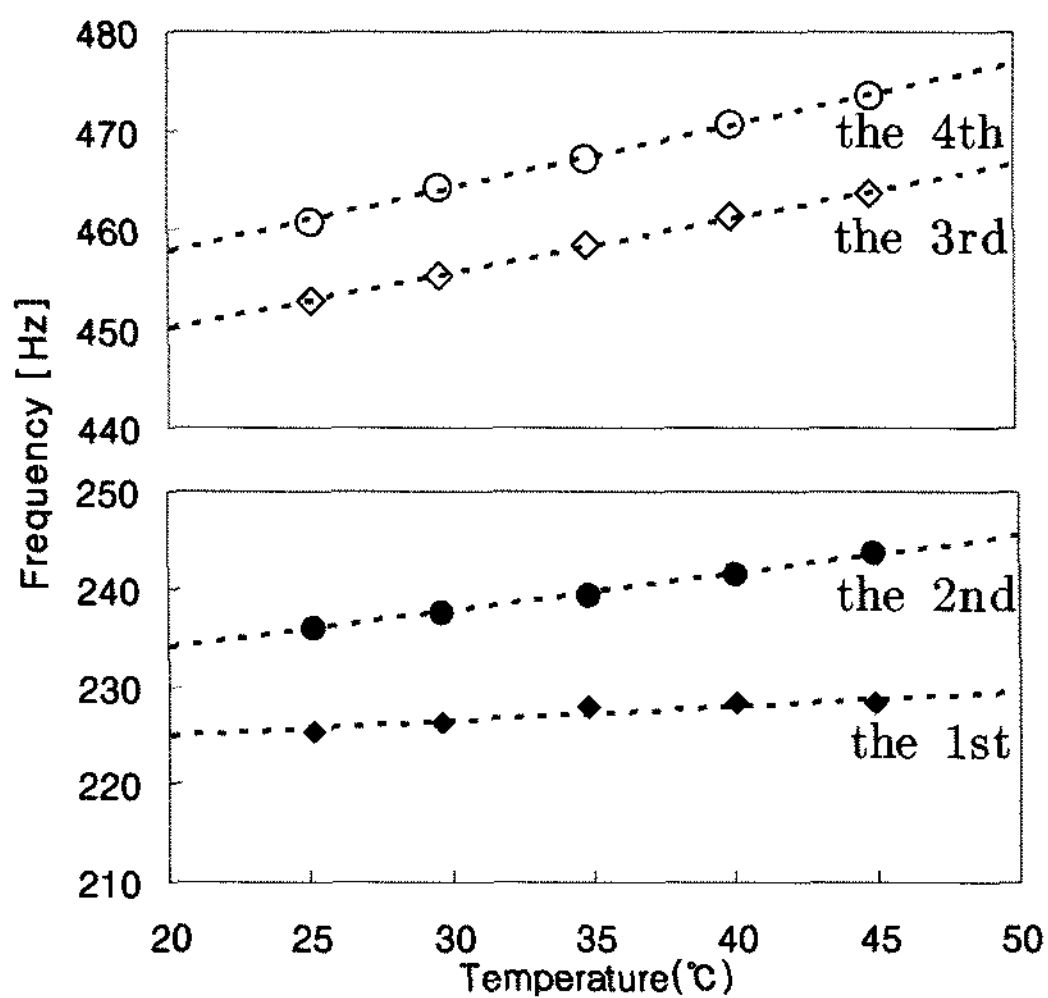
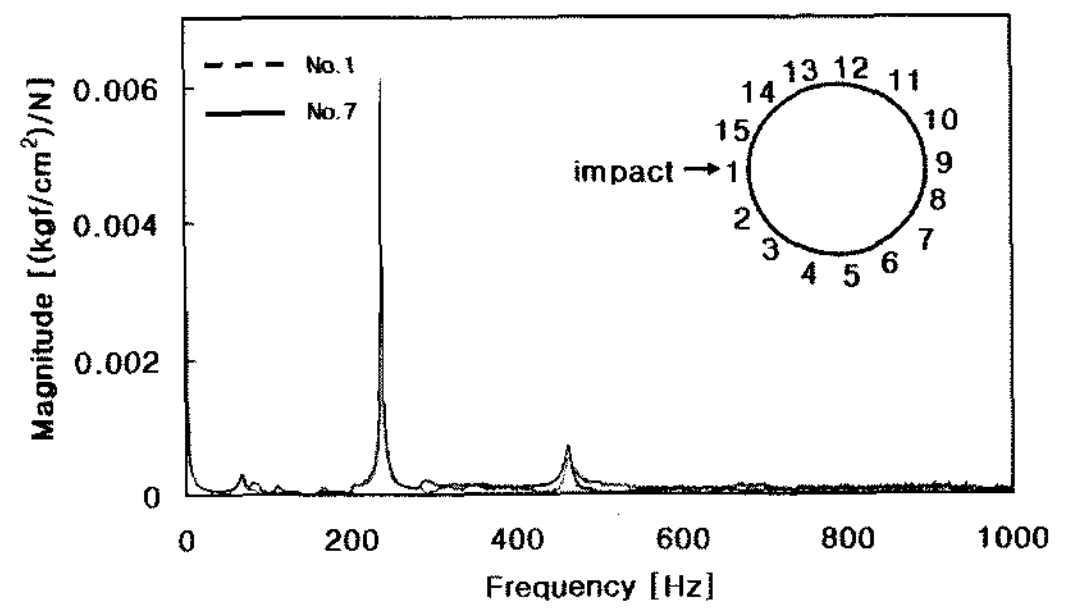


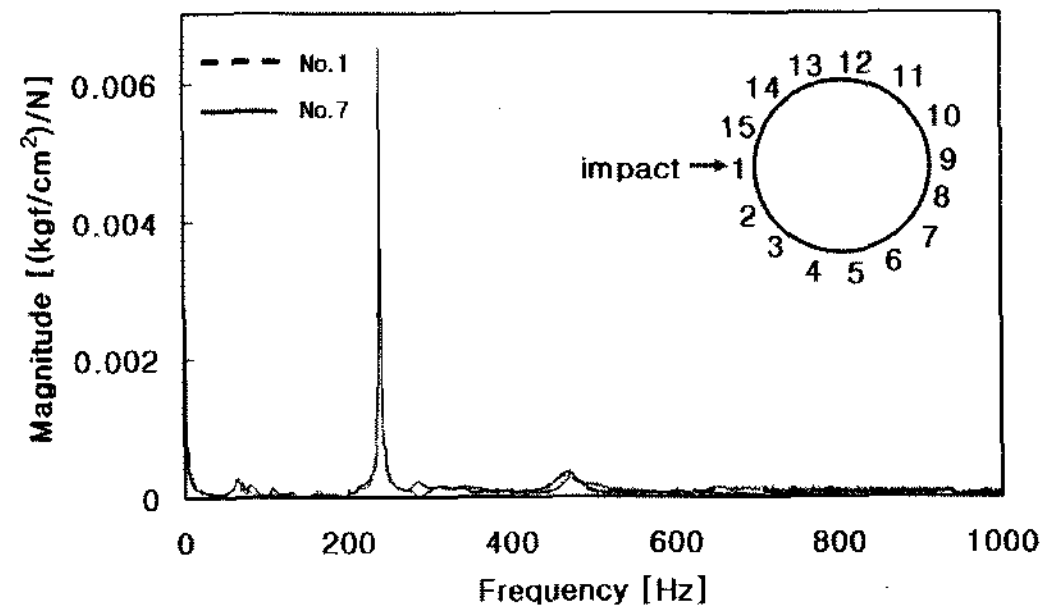
Fig. 6 The first four cavity resonant frequencies of the loaded tire with temperature

와의 관계는  $C = 347.37 \sqrt{T/T_{20}}$  m/sec이다. 여기서  $T_{20}$ 은 20°C의 절대온도이다. 또한, 지면접촉 타이어의 온도에 따른 공기공동 공명의 진동형은 Table 1의 경우와 동일하다.

자유 상태 및 지면접촉 상태의 타이어 공기공동의 주파수 응답함수를 Fig. 7과 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 7의 자유상태의 주파수 응답함수를 보면, 온도가 증가함에 따라, Fig. 4와 같이 약 20°C 근방의 상온에서 명확히 관찰되던 공기공동의 세 번째 및 네 번째의 공명주파수가 불분명해지는 경향을 보인다.

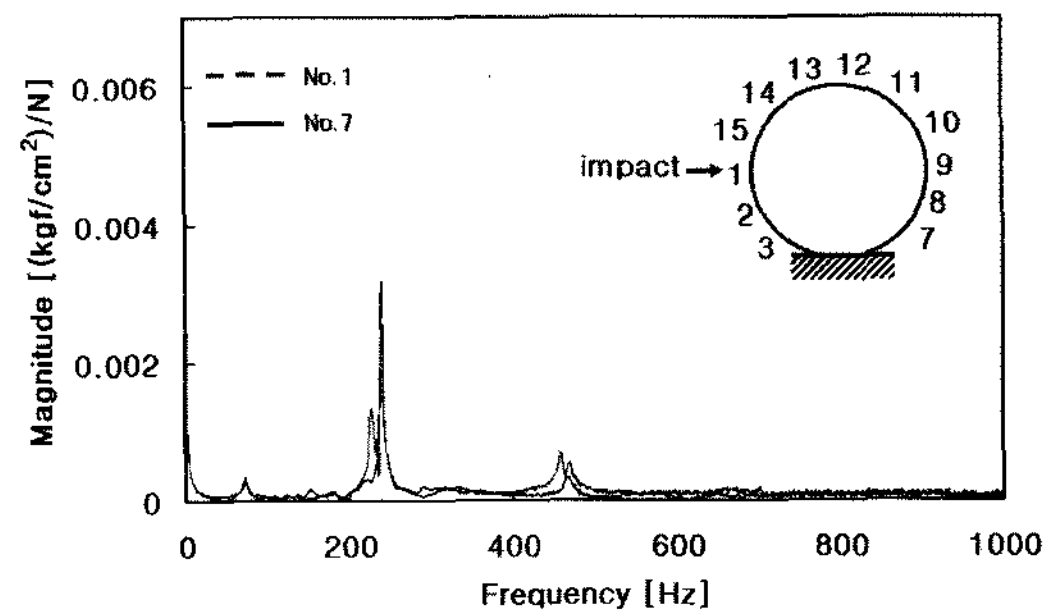


(a) Acoustic FRF of the unloaded tire at 34.8°C

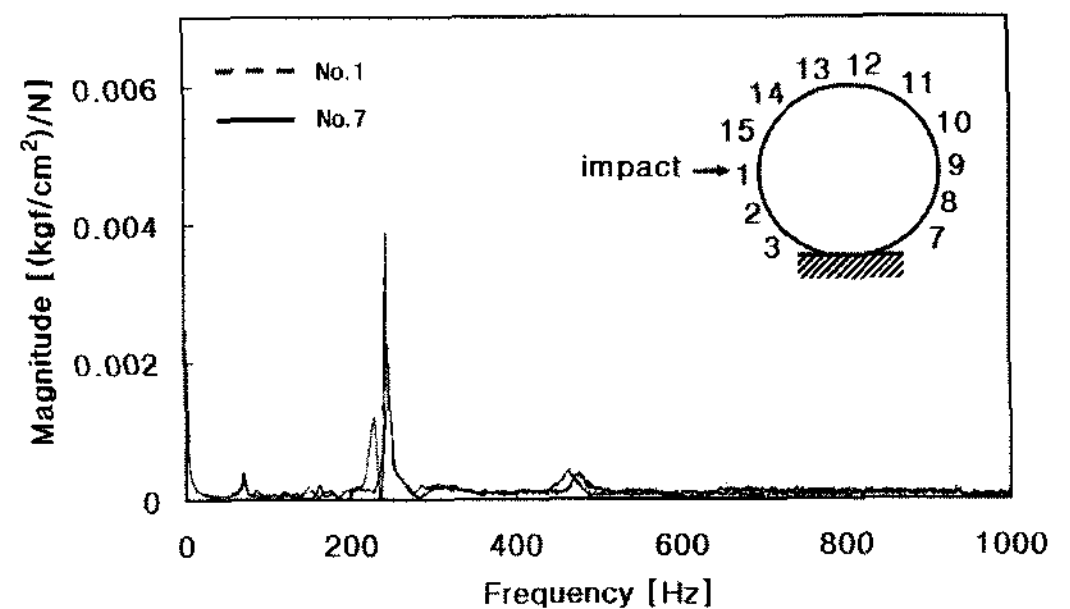


(b) Acoustic FRF of the unloaded tire at 44.9°C

Fig. 7 The acoustic FRF's of the unloaded tire at various temperature levels



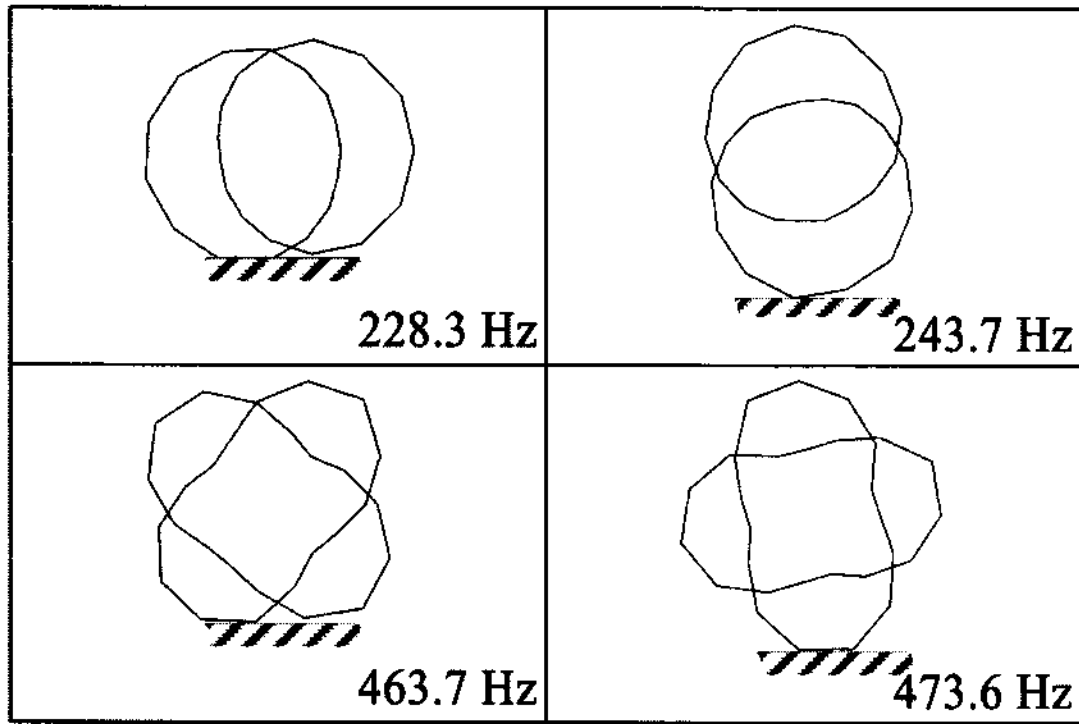
(a) Acoustic FRF of the loaded tire at 34.8°C



(b) Acoustic FRF of the loaded tire at 44.9°C

Fig. 8 The acoustic FRF's of the loaded tire at various temperature levels

Table 2 The first four acoustic modes of the loaded tire at temperature 44.9°C



이에 반해, 지면접촉 타이어의 주파수응답함수(Fig. 8)의 경우 첫 번째부터 네 번째까지의 공진봉(peak)이 분명히 나타나고 있고 Table 2와 같이 약 45°C에서도 네 번째까지의 공기공동의 모드가 명확히 측정된다. 여기서 주목할 점은 상온에서 측정가능했던 자유상태 타이어의 3차 및 4차 모드의 공명주파수가 온도가 증가하면서 측정 불가능하게 된다는 사실과 온도가 증가하더라도 두 가지 타이어 상태에서 측정 가능한 공명주파수는 파의 개수가 2차 이하인 모드의 공명주파수라는 사실이다. 이는 온도가 증가하면서 타이어의 강성이 약해지고 점성이 증가함에 따라 3차 및 4차 모드의 압력파가 타이어의 공동 안에서 압력센서로 감지할 수 있을 정도로 충분히 형성되지 못한 때문이라 판단된다.

### 3.2 가속도계를 이용한 모달 테스트

온도변화에 따라 타이어의 공기공동의 진동형이 타이어의 진동 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해, 타이어 및 공기공동 내부의 온도를 20~45°C의 범위에서 변화시키면서 자유상태의 타이어와 지면접촉상태의 타이어의 표면에 가속도계를 부착하고 반경방향으로 타격하여 모달 테스트를 실시하였다.

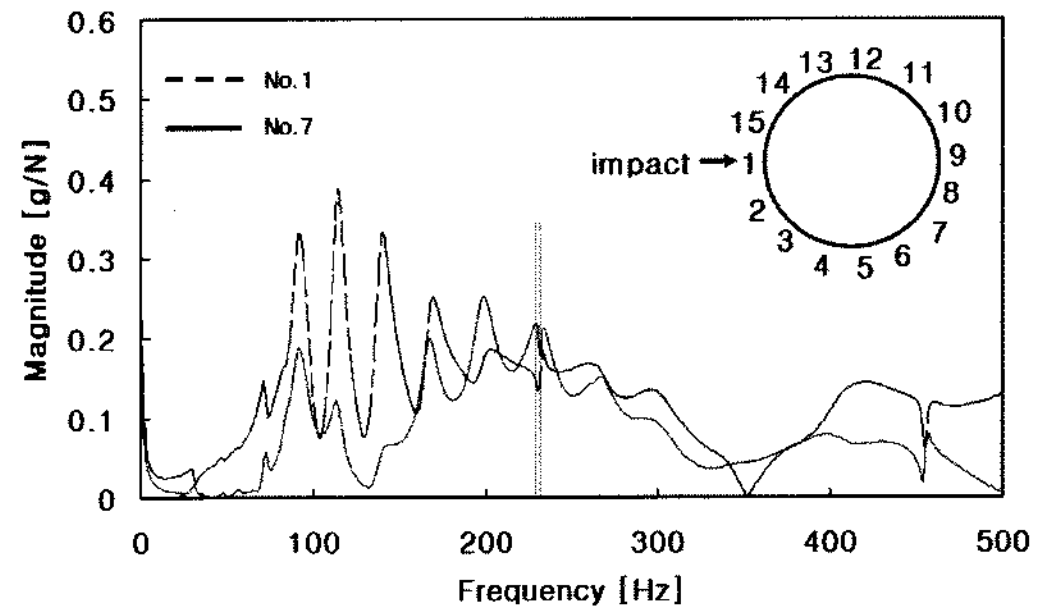
#### 3.2.1 자유상태의 타이어

자유상태의 타이어에 대해 온도 변화에 따른 반경방향의 주파수 응답함수를 차례로 Fig. 9에 비교하였다. Fig. 9의 주파수 응답함수 그래프로부터 다음과 같은 사실을 관찰할 수 있다.

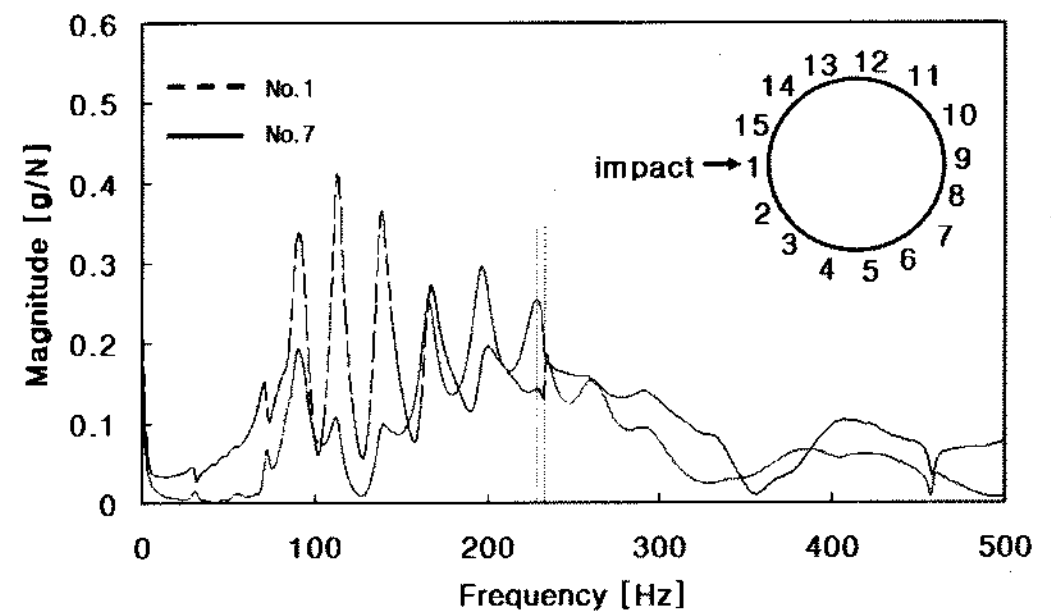
첫째, 공기공동 공명주파수가 존재하는 곳에서

FRF가 국부적으로 급격히 변화하는 형태를 보인다.

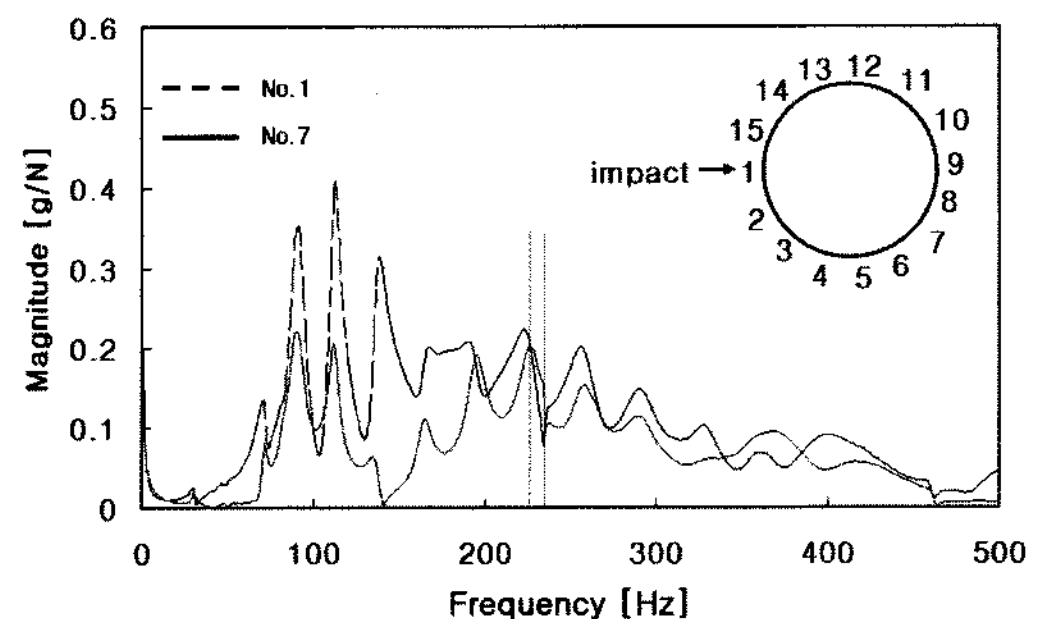
둘째, 온도가 증가함에 따라 첫 번째 공기공동 공명주파수 근처의 타이어의 구조적 진동주파수는 점



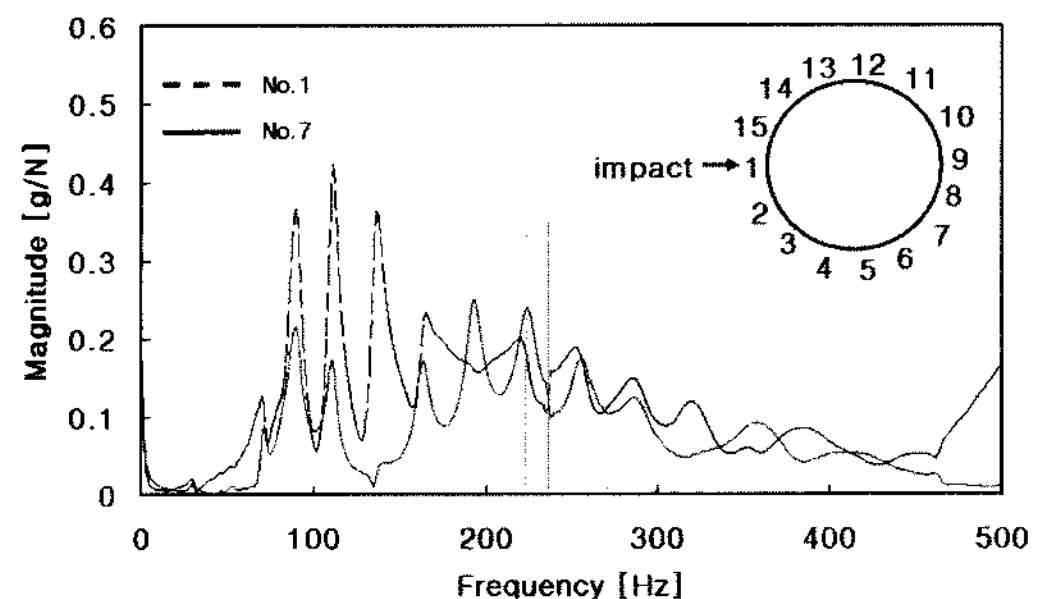
(a) Structural FRF of the unloaded tire at 20.7°C



(b) Structural FRF of the unloaded tire at 25°C

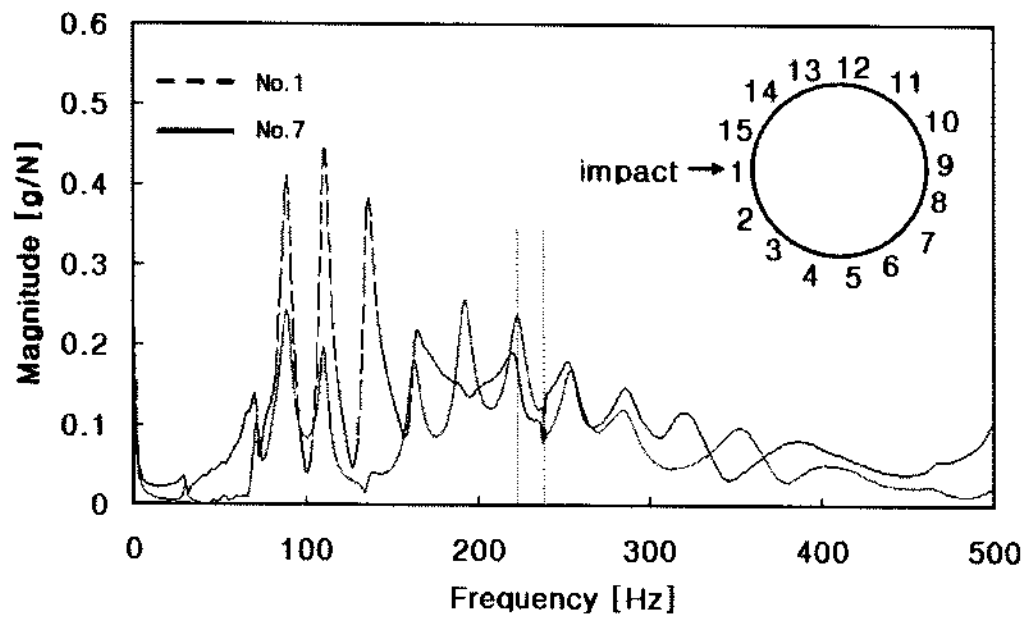


(c) Structural FRF of the unloaded tire at 29.8°C

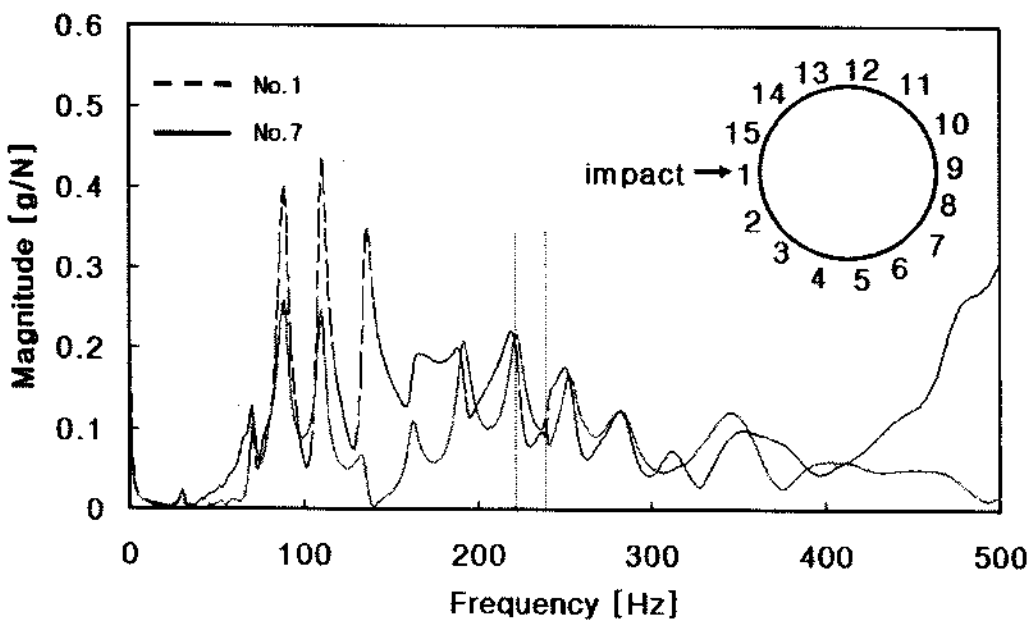


(d) Structural FRF of the unloaded tire at 34.8°C





(e) Structural FRF of the unloaded tire at 39.7°C



(f) Structural FRF of the unloaded tire at 44.8°C

Fig. 9 Comparison of structural FRF's of the unloaded tire at various temperature levels

점 감소하는 반면에, 첫 번째의 공기공동 공명주파수는 점점 증가하게 되어, 첫 번째 공기공동 공명주파수와 그 근처의 타이어 고유진동수 사이의 간격이 점점 벌어짐을 알 수 있다. 이러한 사실은 첫 번째 공기공동 공명모드와 타이어의 진동모드의 연성이 점점 약해진다는 것을 의미한다. 이를 확인하기 위하여, 온도가 증가함에 따라 첫 번째 및 두 번째 공기공동 공명주파수에서의 타이어의 진동 모드와 공기공동 공명 주파수 근처에서의 타이어의 진동 모드를 Table 3에 정리하였다.

Table 3으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 온도가 증가함에 따라 첫 번째 공기공동의 공명 모드가 타이어의 진동 모드에 미치는 영향은 점점 감소하여 약 35°C 이상이 되면 전혀 영향을 미치지 못하게 된다. 이는 온도가 증가함에 따라 공기공동 공명주파수와 첫 번째 공기공동 공명주파수 근처의 구조적 고유진동수 간의 간격이 점점 멀어지게 되어 공기공동 공명모드와 구조적 진동모드의 연성이 점점 약해지기 때문이다.

또한 Fig. 9와 Table 3의 두 번째 열로부터, 두 번째

Table 3 Comparison of tire's vibration modes of the unloaded tire at cavity resonance frequencies and at the tire's natural frequency near the first cavity resonance frequency

Temperature (°C)	At the 1st cavity resonance frequency	At the 2nd cavity resonance frequency	At the tire's natural frequency near the 1st cavity resonance frequency
20.7	 231.3 Hz	 455.2 Hz	 231.7 Hz
25	 232.5 Hz	 458.0 Hz	 229.6 Hz
29.8	 233.8 Hz	 461.0 Hz	 227.5 Hz
34.8	 236.3 Hz	 463.4 Hz	 224.0 Hz
39.7	 238.0 Hz	 465.2 Hz	 222.7 Hz
44.8	 239.8 Hz	-	 221.8 Hz

공기공동 공명주파수 근처에 타이어 구조물 자체의 고유진동수가 존재하지 않는 관계로, 두 번째 공기공동 공명주파수에서의 타이어의 진동형은 공기공동 공명모드만의 영향을 받아 형성됨을 알 수 있다.

3.2.2 수직하중을 받는 지면접촉 상태의 타이어

수직하중(300 kgf)을 받는 지면접촉 상태의 타이어에 대해 온도 변화에 따른 공기공동의 공명 및 타이어의 진동 특성 그리고 이들의 상호 연관성을 검토하기 위해, 공기공동 공명주파수에서의 타이어의 진동 모드를 Table 4에 정리하였다. Table 4로부터 다음의 사실을 확인할 수 있다.

첫 번째 공기공동 주파수에서의 타이어의 진동형은 20.7°C에서 공명주파수 근처의 타이어의 구조진동형과 공기공동 공명모드가 중첩된 형상으로 나타난다. 그러나 24.9°C 이상부터는 타이어를 전후방향으로 흔드는 공기공동의 모드가 나타나지 않고 구조진동 모드만이 나타난다.

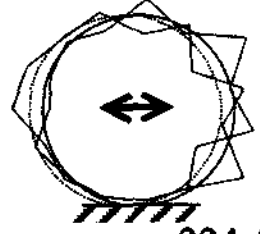
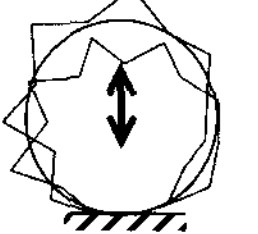
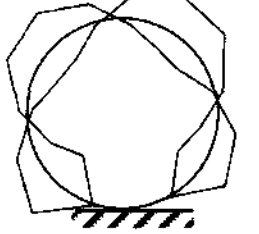
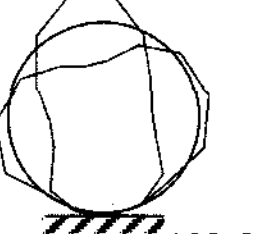
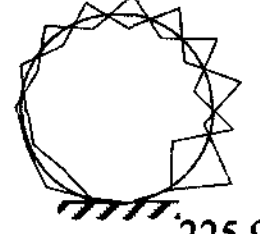
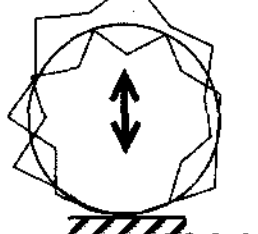
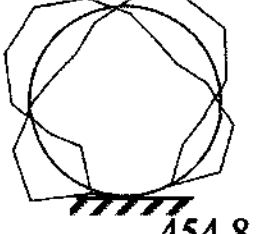
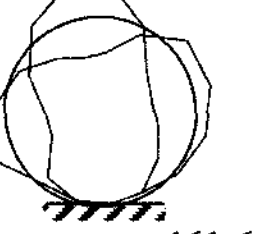
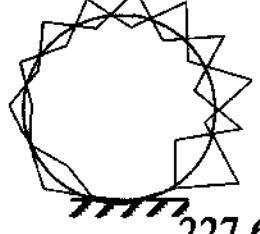
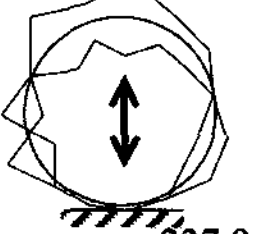
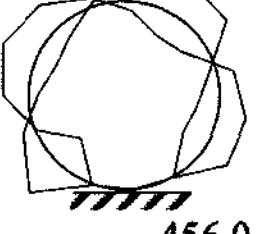
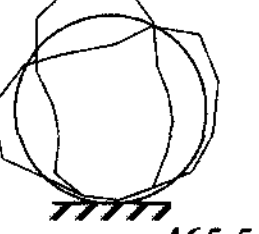
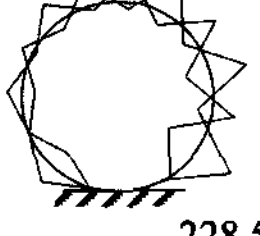
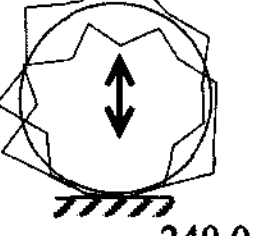
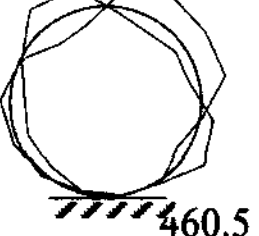
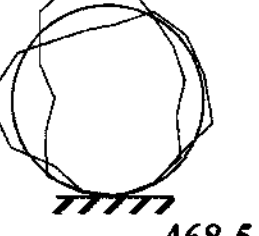
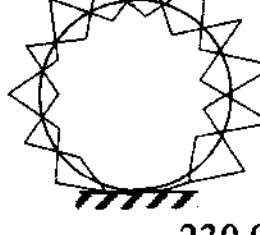
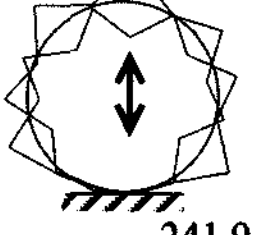
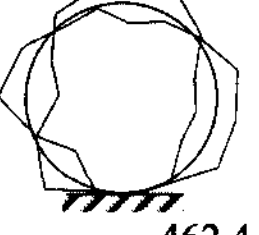
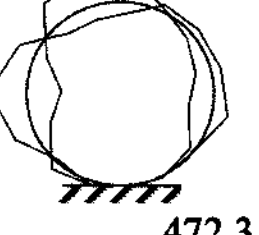
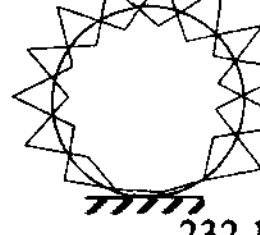
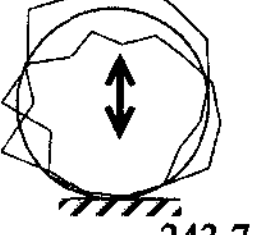
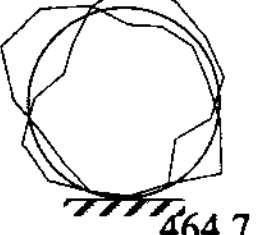
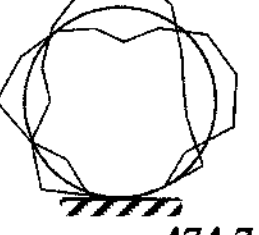
두 번째 공기공동 주파수에서의 타이어의 진동형

은 온도변화에 상관없이 상하로 흔드는 공기공동 모드와 구조 진동모드가 혼합된 진동형을 보인다. 즉, 온도가 올라가도 여전히 두 번째의 공기공동 모드는 근방의 구조진동 모드와 결합되어 차축을 상하로 흔드는 진동을 일으키고 있음을 알 수 있다.

세 번째 및 네 번째의 공기공동 공명주파수에서의 타이어의 진동형은 공명주파수 근처에 구조적 고유주파수가 존재하지 않음으로써 공기공동 모드만이 그대로 반영되어 나타나고 있다.

세 번째 및 네 번째 공명주파수에서의 타이어의 진동형은 그 중심이 변화하지 않는 진동형인 반면, 두 번째 공명주파수에서의 타이어의 진동형은 그 중심이 상하로 진동하는 모드이다. 따라서 두 번째 공명주파수에서의 타이어의 진동형은 차축을 흔드

Table 4 Structural modes of the loaded tire at the cavity

Temperature	At the 1st frequency	At the 2nd frequency	At the 3rd frequency	At the 4th frequency
20.7 °C	 224.4 Hz	 234.8 Hz	 451.9 Hz	 458.5 Hz
24.9 °C	 225.9 Hz	 236.6 Hz	 454.8 Hz	 461.6 Hz
30.1 °C	 227.6 Hz	 237.9 Hz	 456.0 Hz	 465.5 Hz
34.5 °C	 228.5 Hz	 240.0 Hz	 460.5 Hz	 468.5 Hz
39.7 °C	 230.9 Hz	 241.9 Hz	 462.4 Hz	 472.3 Hz
44.6 °C	 232.1 Hz	 243.7 Hz	 464.7 Hz	 474.7 Hz

는 효과가 다른 공기공동 모드보다 훨씬 클 것으로 예측된다.

Table 4에서 보는 바와 같이, 전반적으로 온도가 증가함에 따라 세 번째 및 네 번째 공기공동 공명주파수에서 타이어의 모드는 상온에서 보여주는 전형적인 모드의 형태로부터 차츰 정형성을 잃어가는 경향을 보인다. 이에 반해, Table 2에 보인 바와 같이 공기공동 공명 모드는 온도가 증가하여도 상온에서와 같은 정형성을 유지한다. 이 사실로부터 온도가 증가할수록 세 번째 및 네 번째 공기공동의 공명이 타이어의 진동모드에 미치는 영향이 점점 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 온도가 공기공동 공명에 미치는 효과를 살펴보기 위해, 그리고 공기공동 공명이 타이어의 구조진동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 20~45°C의 범위에서 온도변화에 따른 모달 테스트를 실시하고 그 결과를 검토하였다. 측정을 위해 15개의 압력 센서를 타이어의 공기공동에 삽입하여 음압의 모달 테스트를 실시하고, 또한 15개의 가속도계를 트레드의 중앙선을 따라 트레드 표면에 부착하여 구조적 모달 테스트를 실시하였다. 그 결과를 분석 검토한 결과 다음과 같은 사실을 새로이 발견하였다.

- 1) 자유 상태의 공기공동 공명주파수를 상온에서는 4번째 공명주파수까지 측정 가능하나 온도가 증가함에 따라 2번째 공명주파수까지만 측정이 가능하였다. 또한 지면접촉 상태의 타이어의 경우, 온도에 상관없이 4번째 공명주파수까지 측정이 가능하였다. 위의 공통점은 2차 모드 이하의 공기공동 모드까지 측정이 가능하다는 점이다.
- 2) 온도가 증가함에 따라 공기공동의 공명주파수는 대체로 절대온도에 비례하여 증가한다. 이는 공명주파수가 음속에 비례하고 음속은 0~100°C의 공기 중에서 공기의 절대온도에 거의 비례하기 때문이다.
- 3) 자유상태 타이어의 첫 번째 공기공동의 공명 모드가 타이어의 진동 모드에 미치는 영향은 온도가 증가함에 따라 점점 감소하여 약 35°C 이상이

되면 전혀 영향을 미치지 못하게 된다. 이는 온도가 증가함에 따라 첫 번째 공기공동 공명주파수와 그 공명주파수 근처의 구조적 고유진동수 간의 간격이 점점 멀어지게 되어 공기공동 공명모드와 구조적 진동모드의 연성이 점점 약해지기 때문이다.

- 4) 자유상태의 타이어에 대한 첫 번째 공명주파수에서 타이어의 구조 진동형은 약 35°C 이하에서 공기공동 공명의 진동형과 타이어 자체의 구조 진동형이 결합하여 나타난다. 그러나 두 번째 공명주파수에서 타이어의 진동형은 온도에 상관없이 공기공동의 진동형만이 반영되어 나타난다. 이는 두 번째 공명주파수의 근방에 타이어의 구조적 고유진동수가 존재하지 않기 때문이다.
- 5) 지면접촉 상태에서 측정 가능했던 4개의 공기공동 공명주파수는 자유상태의 첫 번째와 두 번째의 공명주파수를 중심으로 약간 큰 주파수와 약간 작은 주파수로 각각 분포한다. 이러한 현상은 본 연구에서 실시한 온도 범위에서 모두 나타난다.
- 6) 수직하중을 받는 지면접촉 타이어에서, 첫 번째 공기공동 공명주파수에서의 타이어의 진동형은 상온에서는 공기공동의 진동형과 구조 진동형이 중첩되어 나타나지만, 온도가 높아짐에 따라 타이어의 구조적 진동형만이 나타난다. 그러나 두 번째 공기공동 공명주파수에서의 타이어 진동형은 온도에 상관없이 공기공동의 모드와 구조 진동형이 결합되어 나타난다. 그리고 세 번째 및 네 번째의 공기공동 공명주파수에서의 타이어 진동형은 온도에 상관없이 공기공동 진동형만의 영향을 받는다.

#### References

- 1) H. Yamauchi and Y. Akiyoshi, "Theoretical Analysis of Tire Acoustic Noise and Proposal of Improvement Technique," JSAE Review, Vol.23, pp.89-94, 2002.
- 2) R. Gunda, S. Gau and 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.
- 3) J. K. Thompson, "Plane Wave Resonance in



- the Air Cavity as a Vehicle Interior Noise Source,” *Tire Science and Technology*, Vol.23, No.1, pp.2-10, 1995.
- 4) T. Sakata, H. Morimura and H. Ide, “Effects of Tire Cavity Resonance on Vehicle Road Noise,” *Tire Science and Technology*, Vol.18, No.2, pp.68-79, 1990.
  - 5) R. W. Scavuzzo, L. T. Charek, P. M. Sandy and G. D. Shteinhauz, “Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise,” *SAE 940533*, pp.1-6, 1994.
  - 6) Y.-W. Kim and J. Y. Nam, “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,” *Transactions of the KSME (A)*, Vol.28, No.4, pp.325-332, 2004.
  - 7) Y.-W. Kim and J.-Y. Nam, “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, 2002.
  - 8) Y.-W. Kim and J.-Y. Nam, “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,” *Transactions of KSAE*, Vol.11, No.6, pp.171-182, 2003.
  - 9) Y.-W. Kim and 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) Y.-W. Kim and K.-S. Jeong, “Experiments on Air Cavity Resonance of Radial Tire for Passenger Car,” *Spring Conference Proceedings, KSAE*, Vol.II, pp.747-753, 2006.
  - 11) J. Mc Allen, A. M. Cuitino and V. Sernas, “Numerical Investigation of the Deformation Characteristics and Heat Generation in Pneumatic Aircraft Tires, Part II. Thermal Modeling,” *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.23, pp.265-290, 1996.
  - 12) B. S. Oh, Y. N. Kim, N. J. Moon and H. Y. Park, “Internal Temperature Distribution in a Rolling Tires,” *Tire Science and Technology*, Vol.23, No.1, pp.11-25, 1995.