

〈論 文〉

하중을 받고 회전하는 승용차 타이어의 반경방향 고유진동수 측정에 관한 실험적 연구

김병삼* · 홍동표** · 지창헌***

(1994년 6월 22일 접수)

An Experimental Study on the Measurement of Radial Directional Natural Frequency in a Passenger Car Tire Rotating under the Load

Byoung Sam Kim, Dong Pyo Hong and Chang Heon Chi

Key Words : Circular Beam Model(원환보 모델), Frequency Response Function Method(주파수 응답함수법), Mode Shape(진동형태), Radial Directional Natural Frequency(반경방향 고유진동수), Tire(타이어)

Abstract

The measurement of radial directional natural frequency in a passenger car tire rotating under the load is studied. In order to obtain theoretical natural frequency and mode shape, the plane vibration of a tire is modeled to that of circular beam. By using the Tielking method based on Hamilton's principle, theoretical results are determined by considering tension force due to tire inflation pressure, rotational velocity and tangential, radial stiffness. Radial directional modal parameters varying with the inflation pressure, load, rotational velocity are experimentally determined by using frequency response function method. The results show that experimental conditions can be considered as the parameters which shift the natural frequency.

기 호 설 명

- EI : 트레드 및 벨트의 굽힘강성
- K_r : 단위길이당 반경방향의 강성
- K_t : 단위길이당 접선방향의 강성
- P_i : 타이어 내부 공기압
- r : 타이어 반경
- s : 타이어 진동모드수
- T : 공기압에 의한 벨트의 장력
- ω : 하중의 진동수
- $\rho_s A$: 트레드 및 벨트의 단위길이당 질량
- Ω : 타이어의 회전각속도

1. 서 론

최근 승용차가 고급화되어짐에 따라 승용차의 진동을 감소시켜 승차감을 향상시키려는 문제가 중요시되고 있다. 승용차가 정상 주행할 때 발생하는 진동의 원인으로는 여러가지 인자가 있겠으나 타이어 진동에 기인한 영향이 차지하는 비율이 점점 증가하고 있다. 특히, 타이어는 승용차와 지면과의 최초 회전접촉부분으로 지면으로부터의 모든 충격을 승용차에 전달하는 부분이며 승용차의 승차감 향상에 큰 영향을 미친다.

종래, 타이어 진동에 관한 연구를 살펴보면

*회원, 순천공업전문대학 환경공업과

**회원, 전북대학교 정밀기계공학과

***원광대학교 기계공학과

Tielking⁽¹⁾은 공기압 타이어 트레드 운동을 기초가 반이 지지된 원형 셀로 가정한 공기압 타이어의 평면 진동특성에 관한 연구를 시점으로 Bohm⁽²⁾은 타이어를 탄성 링으로 가정하여 타이어의 정, 동적 특성을 기초로 타이어의 운동방정식을 유도하고 실험적인 방법으로 증명하였으며, Barson⁽³⁾은 회전하는 타이어의 충격진동에 대하여 연구하였다. Potts, Bell과 Roy⁽⁴⁾는 타이어를 탄성지지된 얇은 링으로 모델링하고 타이어의 재질과 기하학적인 측면을 고려하여 타이어의 고유진동수에 대하여 연구하였으며, Soedel, Prasad⁽⁵⁾는 자유스러운 상태의 타이어 진동특성을 파악하여 하중을 받고 접지된 타이어의 진동특성을 해석적인 방법으로 연구하였다. Takayama와 Yamagishi⁽⁶⁾는 타이어를 강체 링으로 Kamitamari, Sakai⁽⁷⁾는 원환보로 가정하여 해석적인 방법으로 진동특성에 관하여 연구하였고, Ushijima와 Takayama⁽⁸⁾는 타이어의 모드해석과 시뮬레이션에 대하여 연구하였으며, Eberhardt⁽⁹⁾는 원경 측정장치를 이용하여 회전하는 타이어의 고유진동수에 대하여 연구하였다. 그러나, 종래 타이어 고유진동수를 파악하기 위해 해석적인 방법이나 수치해석적인 방법을 이용한 결과는 타이어의 구조나 재질의 비선형적인 특성에 기인하여 실험결과와 큰 차이를 보이고 있으며, 타이어 고유진동수 측정에 관한 종래의 실험적 연구는 타이어가 회전하지 않고 정지된 상태에서 수행되었기 때문에 실제 도로상을 주행하는 승용차 타이어의 고유진동수 측정에 관한 실험조건과는 상이하다.

따라서, 본 논문에서는 승용차에 장착된 타이어의 구속이나 경계조건이 타이어-휠(wheel) 시스템의 반경방향 고유진동수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 구속되지 않은 타이어-휠 시스템의 반경방향 고유진동수를 측정하였고, 실제 승용차에 장착되어 도로상을 주행하는 타이어의 구속과 경계

조건을 실내실험으로 가정하여 실험을 실시하였다. 또한, 본 논문에서 제시한 실내실험 결과와 실제 승용차를 이용한 실험결과를 비교하여 본 논문에서 제시한 실내실험의 유용성을 확인하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험용 타이어

본 연구에 이용된 타이어는 실제 자동차에 장착되는 현용 레디얼(radial)타이어와 타이어의 설계인자를 제조공정상 무리없는 범위 내에서 변경한 실험용타이어로 구분된다. 또한, 신제품과 마모된 타이어의 반경방향 고유진동수를 비교하기 위하여 트레드 그루브(groove) 깊이가 신제품에 비해 크게 떨어지는 마모된 타이어를 준비하였다. 실험용 타이어의 크기와 용도 및 변경된 설계인자는 Tables 1, 2와 같다.

2.2 하중을 받지 않고 회전하지 않는 경우

하중을 받지 않고 회전하지 않는 경우의 실험장치는 실험조건에 따라 두 가지 경우로 구분된다. 첫째, 타이어가 주변에 구속되지 않고 자유스러운 상태의 경계조건을 유지하는 경우(Fig. 1)이고 둘

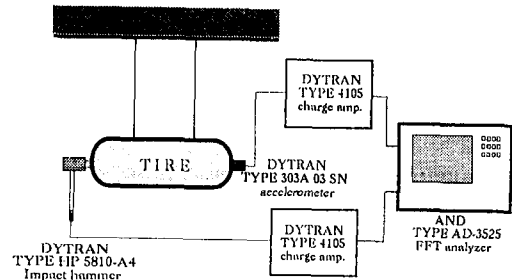


Fig. 1 Schematic diagram for a vibration test. A tire is not rotating while a load is not applied : free-free condition

Table 1 Size and used application of experimental tire

Tire	Size	Use	Tire	Size	Use
A	155R13T	Summer	F	185/65R13H	All season
B	P175/70R13T	All season	G	185/65R13Q	Snow
C	P175/70R13S	All season	H	P185/70R14S	All season
D	175/70R13Q	Snow	I	195/65R14H	All season
E	185/65R13H	All season			

Table 2 Proposed design parameters of experimental tire

Tire	Parameters	Tire	Parameters
H-1	Cap tread compound I	H-7	Turn up height I
H-2	Cap tread compound II	H-8	Turn up height II
H-3	Belt angle I	H-9	Under tread gauge I
H-4	Belt angle II	H-10	Under tread gauge II
H-5	Beal filler I	H-11	None
H-6	Beal filler II		

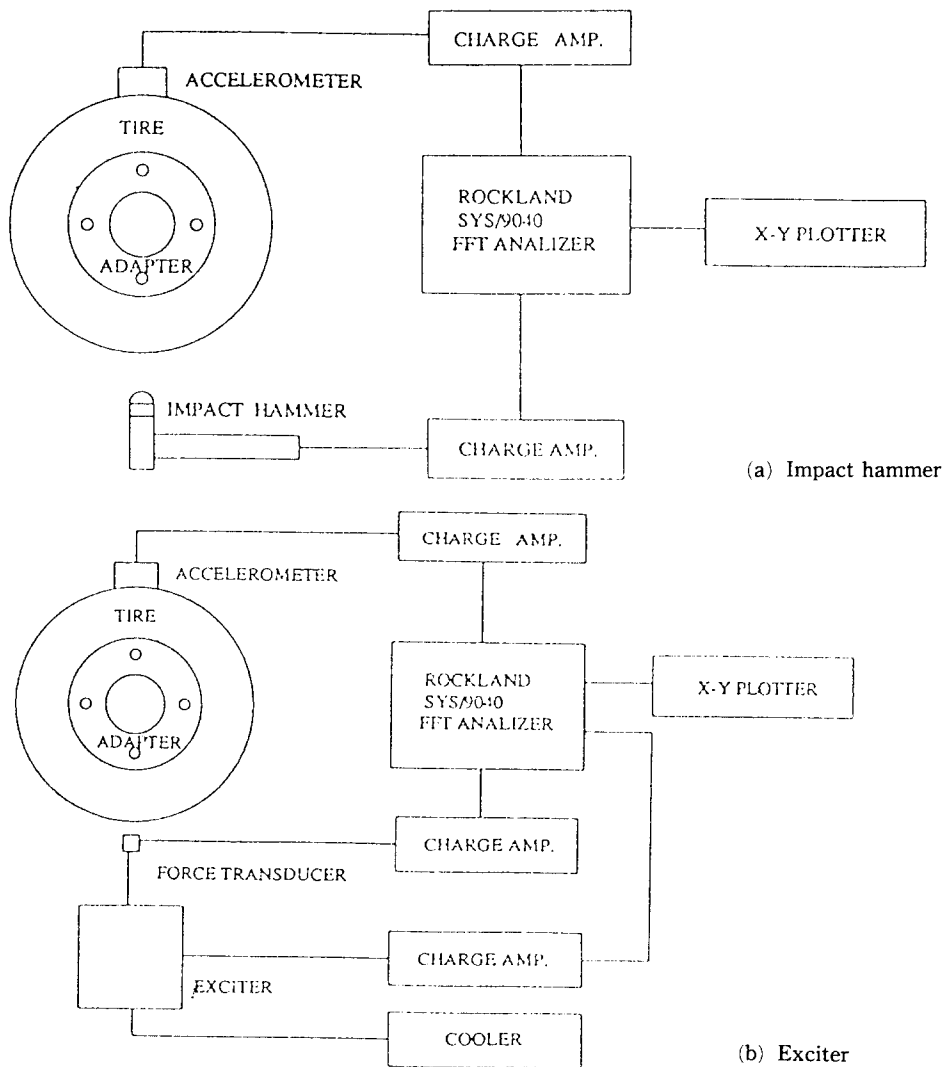


Fig. 2 Schematic diagram for a vibration test. A tire is not rotating while a load is not applied : fixed-fixed condition

째, 타이어가 승용차에 장착되는 경우와 같이 타이어를 어댑터(adapter)에 고정시킨 경우(Fig. 2)이다.

타이어 내부 공기압이 타이어의 반경방향 고유진동수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 측정하고자 하는 타이어의 내부 공기압을 임의로 변화시킨 후 타이어의 반경방향 고유진동수를 측정하였으며, 출력센서로 이용된 가속도계(accelerometer)의 측정 위치가 측정결과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3과 같이 출력센서의 측정 위치를 이동하여 동일한 실험조건에서 반복실험을 실시⁽¹⁰⁾하였다. 타이어를 가진시키는 가진방법으로는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 충격해머(impact hammer)와 가진기(exciter)를 이용하였다. 충격해머를 이용할 경우에는 충격해머에 의해 타이어에 가해진 가진력과 그에 대한 응답신호를 증폭시킨 후 주파수 응답함수를 이용하여 타이어의 반경방향 고유진동수를 측정하였고, 가진기를 이용할 경우에는 주파수 분석기 자체에서 불규칙 신호를 발생할 수 있는 주파수

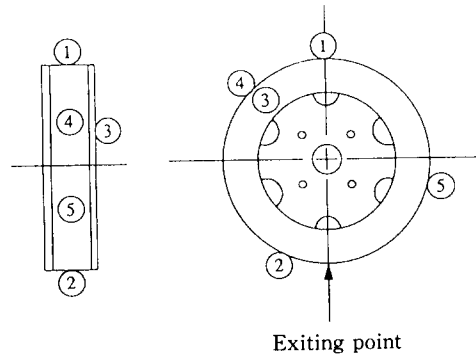


Fig. 3 Transfer of input acceleration to remote parts of tire

분석기(Rockland sys/9040)로부터 발생된 불규칙 신호를 증폭하여 타이어를 가진시켰다. 또한, 충격해머와 가진기, 가속도계 등의 실험장치로부터 구한 가진력과 응답신호의 관계로부터 주파수 응답함수, 기여도함수를 구하고 주파수 응답함수의 진폭, 실수부, 허수부 등의 측정결과들을 이용하여 반경

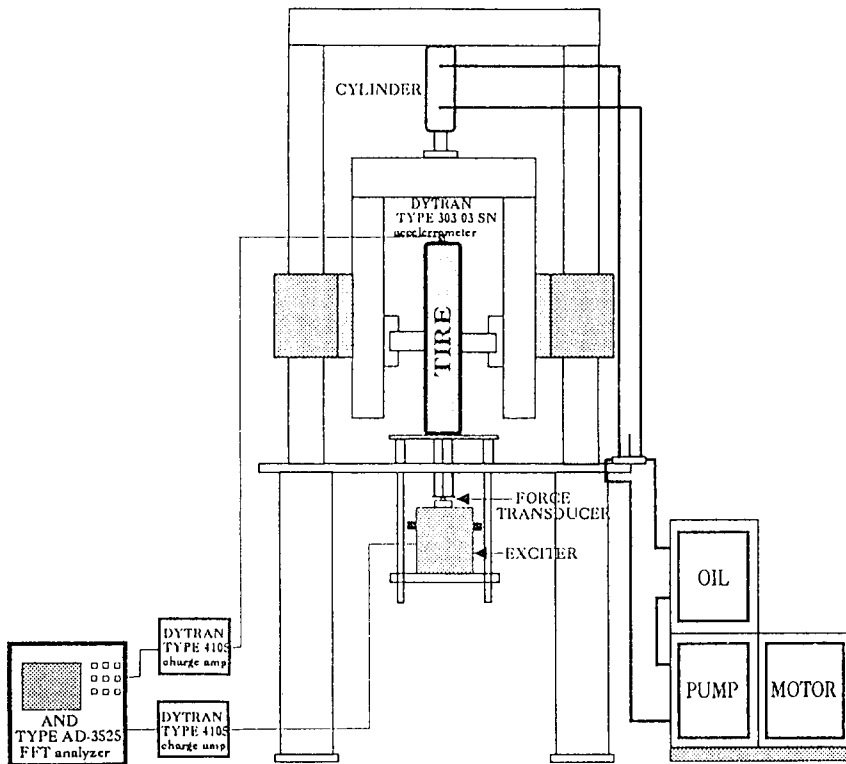
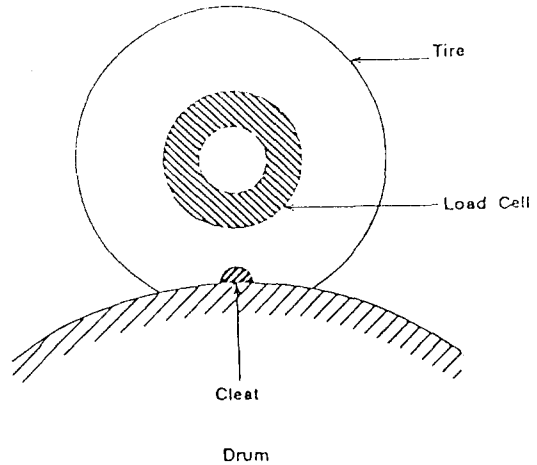


Fig. 4 Schematic diagram for a vibration test. A tire is not rotating while a load is applied

방향 고유진동수, 감쇠율, 진동형태 등을 구하였다. 가진기를 이용하여 타이어를 가진시킨 경우에는 flat top 창(window)⁽¹¹⁾과 32회의 평균을 실시하였다.

타이어의 반경방향 고유진동수는 주파수 응답함수의 진폭으로부터 구하였으며, 감쇠율은 타이어의 재질적인 측면을 고려하여 Co-quad plot method⁽¹²⁾를 이용하여 구하였다. 또한, 승용차 타이어의 반경방향 진동형태는 가진조건을 일정하게 한 후, 타이어를 축대칭이라고 가정하고 대칭의 한쪽면을 20등분한 후 각각의 위치로 가속도계를 이동하여 측정된 주파수 응답함수의 허수부를 이용하여 구하였다.



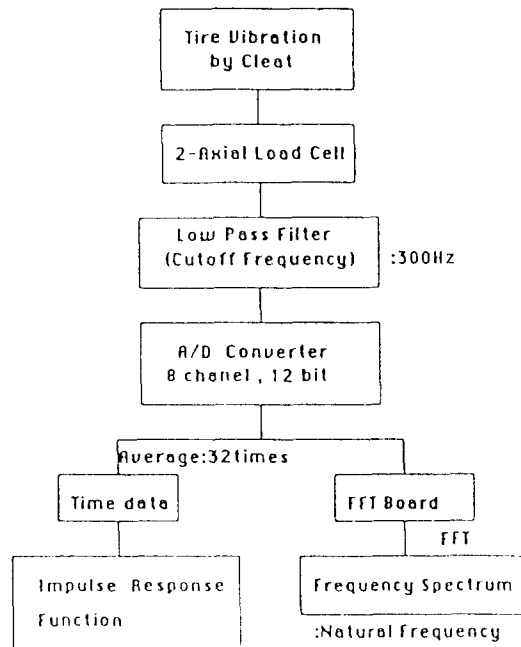
2.3 하중을 받고 회전하지 않는 경우

승용차에 장착된 타이어는 항상 일정한 하중을 받고 있기 때문에 하중이 타이어의 고유진동수에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 4는 하중을 받고 회전하지 않는 타이어의 반경방향 고유진동수를 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 타이어에 가해진 하중을 일정하게 유지하기 위하여 실린더의 용량이 1톤, 모터의 용량이 3마력인 유압장치를 이용하였고, 하중방향에 대한 재연성을 고려하여 가이드 칼럼을 설치하였다. 하중을 받는 타이어는 가진대 위에 위치하고, 가진기가 가진대를 가진 시킴으로써 하중을 받은 타이어는 반경방향으로 진동하게 된다. 타이어는 가진대의 중심에서 가진되어야 하므로 휠(wheel)의 오프셋(off-set)을 고려하였다.

2.4 하중을 받고 회전하는 경우

하중을 받고 회전하는 경우에는 타이어의 충격진동⁽³⁾과 밀접한 관계가 있는 돌기승월 시험기를 이용하였다. 돌기승월 시험기는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 하중을 받고 회전하는 타이어의 진동특성을 측정하는 시험기로 직류(DC) 모터에 의해 드럼이 구동되고 드럼 구동시 타이어는 자유진동한다. 드럼의 표면에 돌기(cleat)를 설치하여 타이어를 가진시키고 타이어를 장착한 축에 내장된 힘 변환센서로부터 반경방향의 가진력을 검출하고 검출된 신호는 저역필터(low pass filter)를 거친 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터로 전송되어 실시간(real-time) 처리된다.

주행속도가 타이어에 미치는 영향을 조사하기 위하여 주행속도를 20~100 km/h로 증가하였으며 타



- : peak to peak
- : Damping Coefficient
- : Damping Ratio

Fig. 5 Schematic diagram for a vibration test. A tire is rotating while a load is applied

이어 내부의 공기압과 하중이 반경방향 고유진동수에 미치는 영향을 조사하기 위해 타이어 내부의 공기압과 타이어에 작용하는 하중을 변화시켰다. 드럼 표면상의 돌기로부터 타이어에 가해지는 충격력은 힘 변환센서에 의해 측정된 신호의 진폭으로부터 구하였다. 또한, 반경방향 고유진동수는 힘 변환센서에 의해 측정된 신호를 주파수 영역으로 푸

리에(fourier) 변환하여 구하였고, 감쇠율은 시간 영역에서 대수감쇠율을 이용하여 구하였다. 또한, 타이어 내부의 공기압과 하중의 변화는 JIS (Japanese Industrials Standards)를 표준으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 하중을 받지 않고 회전하지 않는 경우

Fig. 6은 주파수 응답함수의 진폭과 기여도함수이다. 충격해머를 이용하여 측정된 데이터의 기여도함수는 타이어의 반경방향 고유진동수 근처에서 0.95 이상의 값을 가지고 있어 측정된 데이터를 신뢰할 수 있다. 저주파수(약 60 Hz이하)영역에서의 기여도함수가 현저하게 떨어지고 있는데, 이는 측정시 샘플링 시간을 짧게 설정한 결과로 동일한 실험조건에서 측정 샘플링 시간을 길게하여 실험한 결과 저주파수 영역에서의 기여도함수가 양호하게 측정되었으며 타이어의 반경방향 고유진동수를 측정하는데는 큰 영향을 미치지 않았다. 또한, 가진력과 응답신호 사이의 잡음(noise)을 고려하였는데 여러 가지 주파수 응답함수 추정법의 성격상 본 연구에서는 응답신호보다는 가진력의 잡음이 미약한 것으로 판단되어 가진력과 응답신호 사이에서 상호스펙트럼에 대한 자기스펙트럼의 비(G_{xy}/G_{xx})로 정의되는 H_1 을 채택하였다.

Fig. 7은 주파수 응답함수의 실수부와 허수부이다. 본 연구는 Co-quad plot method를 이용하여 타이어의 감쇠율을 구하였으므로 주파수 응답함수

의 실수부에서 식 (1)을 적용하여 증폭인자를 계산하였다. 증폭인자와 감쇠율 ζ 와의 관계는 $\zeta = (1/2Q)$ 이다.

$$Q = \frac{\left(\frac{f_a}{f_b}\right)^2 + 1}{\left(\frac{f_a}{f_b}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

식 (1)에서, f_a 는 반경방향 고유진동수 이상에서 인너턴스(inertance)의 실수함수부가 극소치에 이르는 주파수이고, f_b 는 반경방향 고유진동수 이하에서 인너턴스의 실수함수부가 극대치에 이르는 주파수이다. 출력센서의 측정위치가 측정결과에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 3과 같이 출력센서의 측정위치를 이동하여 동일한 실험을 반복 실시한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 출력센서의

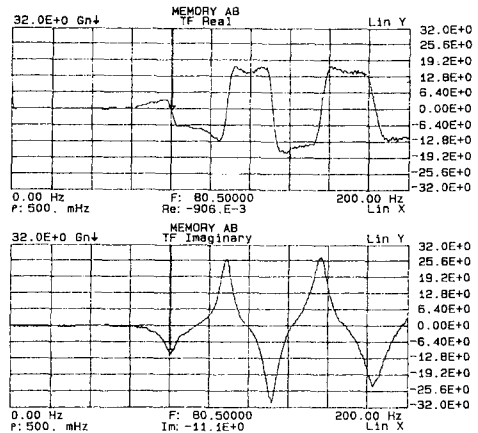


Fig. 7 Frequency response function of test tire by impact hammer (Real/Imaginary part)

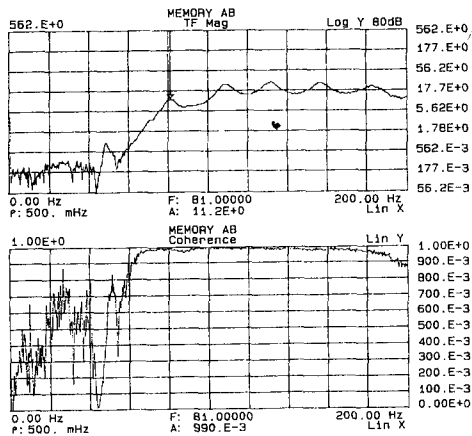


Fig. 6 Frequency response function of test tire by impact hammer (Magnitude/Coherence)

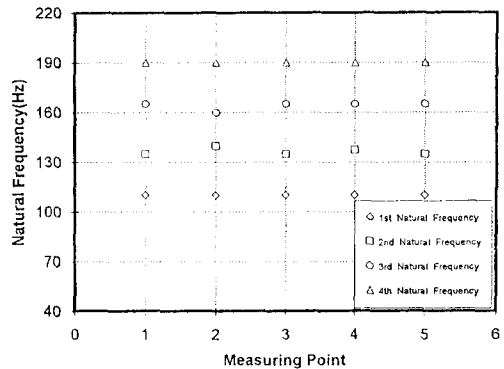


Fig. 8 The effect of measuring point on the natural frequency

위치에 따라 약간의 차이가 있었으나 반경방향 고유진동수에 큰 영향을 미치지 않았다.

Tables 3, 4는 타이어의 경계조건이 자유스러운 상태의 타이어와 타이어가 승용차에 장착되었으나 하중을 받지 않고 회전하지 않는 조건에서의 반경방향 고유진동수를 구하기 위해 타이어를 어댑터에 고정시킨 상태에서 타이어의 반경방향 고유진동수와 감쇠율을 측정된 결과이다.

Fig. 9는 Tables 1, 2와 같이 준비된 실험용 타이어의 내부 공기압을 증가시키면서 반경방향 고유진동수와 감쇠율을 측정된 결과이다. 타이어의 내부 공기압이 증가하면 반경방향 고유진동수는 고주파

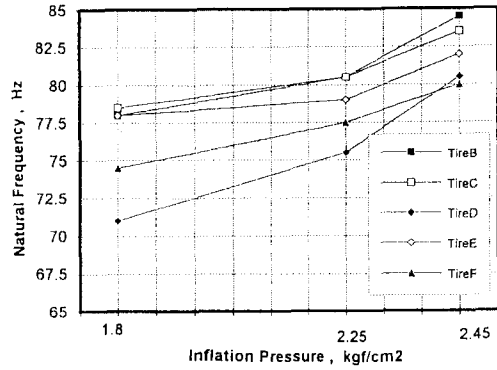


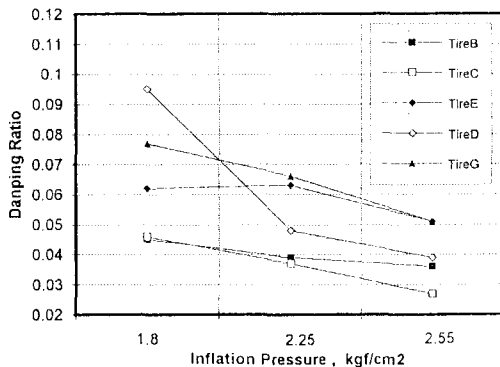
Fig. 9 The variation of radial directional natural frequency by increasing inflation pressure

Table 3 Summary of experimental results : free-free condition

Test tire	Condition	Pressure (kg/cm ²)	Natural freq (Hz)	Damping ratio
P175/70R13T All season (I)	Hammer/ Exciter	1.80	95.0	0.0525
		2.00	97.5	0.0511
		2.30	100.0	0.0361
		2.45	105.0	0.0361
P175/70R13S All season (II)	Hammer/ Exciter	1.40	92.5	0.0511
		1.80	100.0	0.0499
		2.00	102.5	0.0487
		2.30	110.0	0.0454
		2.50	112.5	0.0454
	Weared	1.45	107.5	0.0475
	185/65R13H All season	Hammer/ Exciter	1.80	97.5
2.00			100.0	0.0379
2.30			105.0	0.0450
2.45			110.0	0.0464
175/70R13Q Snow	Hammer/ Exciter	1.80	90.0	0.0554
		2.00	90.0	0.0554
		2.30	97.5	0.0511
		2.45	100.0	0.0379
P185/65R13Q Snow	Hammer/ Exciter	1.80	95.0	0.0554
		2.00	97.5	0.0554
		2.30	97.5	0.0511
		2.45	100.0	0.0379

Table 4 Summary of experimental results : clamped condition

Test tire	Condition	Pressure (kg/cm ²)	Natural freq (Hz)	Damping ratio
P175/70R13T All season (I)	Hammer/ Exciter	1.80	78.0	0.045
		2.00	80.5	0.039
		2.30	84.5	0.036
	Weared	2.45	85.0	0.036
P175/70R13S All season (II)	Hammer/ Exciter	1.80	78.5	0.046
		2.00	80.5	0.037
		2.30	83.5	0.027
185/65R13H Snow	Hammer/ Exciter	1.80	71.0	0.062
		1.90	75.5	0.063
		2.30	80.5	0.051
175/70R13Q Snow	Hammer/ Exciter	1.80	78.0	0.095
		1.90	79.0	0.048
		2.30	82.0	0.039
P185/65R13Q Snow	Hammer/ Exciter	1.90	74.5	0.077
		2.00	77.5	0.066
		2.30	80.0	0.051

**Fig. 10** The variation of damping ratio by increasing inflation pressure

대역으로 이동하였고, 감쇠율은 Fig. 10과 같이 상대적으로 감소하였다. 이는 내부 공기압이 타이어의 반경방향 고유진동수에 영향을 미치고 있음을 나타내고 있으며 타이어의 내부 공기압이 증가하면 타이어의 강성이 상대적으로 증가하는데 기인한 것으로 생각된다. 또한, Tables 3, 4에서 겨울용 타이어와 사계절용 타이어의 반경방향 고유진동수와

감쇠율에 차이가 있는 것을 볼 수 있는데 이는 노면과 접촉하는 부분이고 고무층으로 구성된 트레드 (tread)의 물리적인 성질에 기인한 것으로 생각된다. 겨울용 타이어 트레드는 사계절용 타이어 트레드보다 손실계수 (loss factor, loss angle 또는 $\tan \delta$)가 크고 타이어 내부 구조에 차이가 있다. 그러므로, 타이어의 재질이나 구조적인 차이에 의해 반경방향 고유진동수와 감쇠값이 변하고 있음을 알 수 있다.

또한, 일정한 거리를 주행하여 타이어 트레드 그루브의 깊이 (skid depth)가 타이어 마모 한계인 트레드 그루브 깊이 1.5 mm 이하로 마모된 타이어의 반경방향 고유진동수는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 마모되지 않은 신제품 타이어에 비해 고유진동수가 높았고, 감쇠율은 감소하였는데 이는 마모된 타이어가 신제품 타이어에 비해 질량이 감소하고 트레드 재질의 경도가 높아졌기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 12는 카카스를 보호하고 굴신운동하는 사이드월 (sidewall)과 트레드의 반경방향 고유진동수와 감쇠율을 비교한 것으로 트레드가 사이드

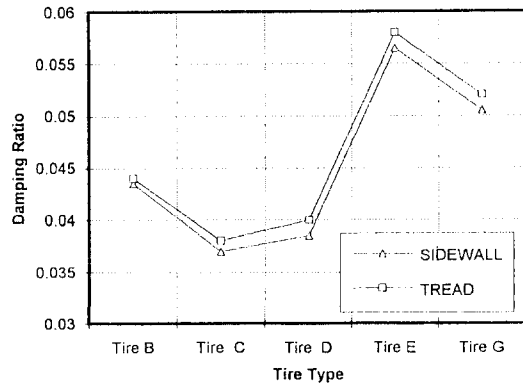
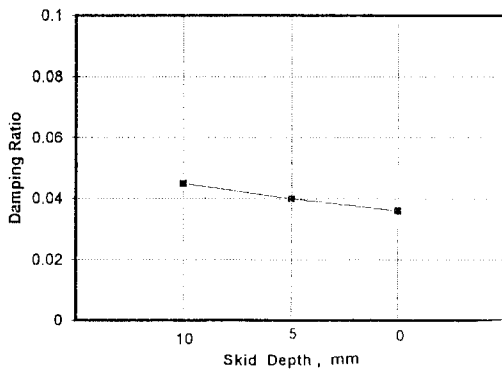
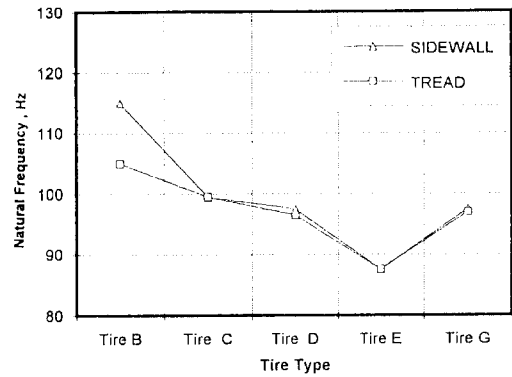
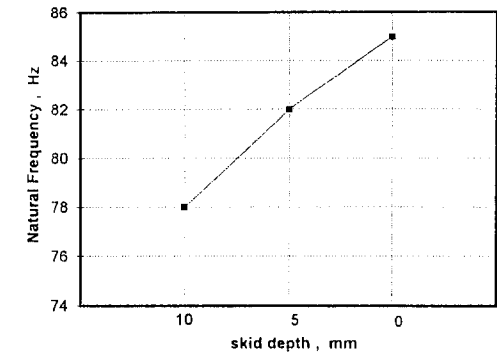


Fig. 11 The variation of radial directional 1st natural frequency and damping ratio in worn tire

Fig. 12 The variation of radial directional natural frequency and damping ratio for sidewall and tread

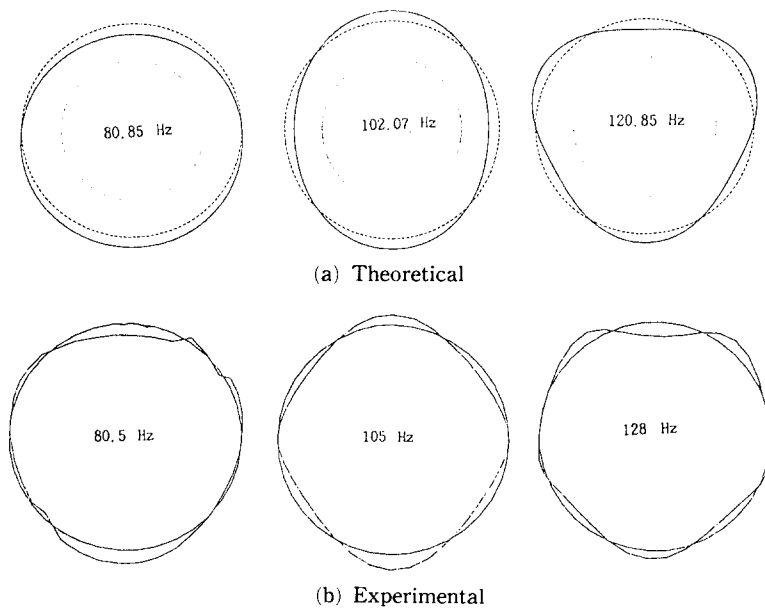


Fig. 13 Mode shape of experimental tire

Table 5 The variation of natural frequency by proposed design factor of test tire : Clamped condition, P185/70R14 () : %

Tire	Natural freq. (Hz)	Damping (%)	Magnitude (dB)	Proposed design factors
H-1	73.5(0.7 ↑)	3.06(7.3 ↓)	70.8(2.3 ↑)	Cap tread hardness ↑
H-2	72.0(1.4 ↓)	2.91(11.8 ↓)	71.4(3.2 ↑)	Cap tread tan δ ↓
H-3	73.8(1.1 ↑)	3.57(8.2 ↑)	69.1(0.1 ↓)	Belt angle 3° ↑
H-4	72.8(0.3 ↓)	3.28(0.6 ↓)	69.3(0.1 ↑)	Belt angle 6° ↑
H-5	72.5(0.7 ↓)	3.36(1.8 ↑)	69.1(0.1 ↑)	Bead filler hardness 93
H-6	72.0(1.4 ↓)	3.66(10.9 ↑)	68.0(1.7 ↓)	Bead filler hardness 74
H-7	74.5(2.1 ↑)	3.77(14.2 ↑)	67.5(2.5 ↓)	Turn up height 70 mm
H-8	74.0(1.4 ↑)	3.56(7.9 ↑)	68.5(1.0 ↓)	Turn up height 50 mm
H-9	70.0(3.4 ↓)	3.43(4.0 ↑)	69.8(0.9 ↑)	Under tread ga.2 mm ↑
H-10	70.5(4.1 ↓)	3.00(9.1 ↑)	71.5(3.3 ↑)	Under tread ga.1 mm ↑
H-11	73.0	3.30	69.2	None

월보다 고유진동수가 고주파수 대역에 존재하고 큰 감쇠율을 가지고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에 이용된 타이어의 진동형태를 조사하기 위하여 타이어를 2등분하고, 2등분한 타이어를 다시 20등분으로 나누어 등분된 지점을 충격해머로 가진시켜 주파수 응답함수의 진폭을 구하였다. Fig. 13은 타이어를 원환 보로 가정하고 해밀톤(Hamilton)의 원리를 바탕으로 타이어의 진동형태를 유도한 Tielking⁽¹⁾의 이론식을 이용하여 구한 계산치와 본 연구에서 구한 실험결과를 비교한 것이며, 계산치와 실험결과가 완전하게 일치하지 않고 유사함을 볼 수 있는데 이는 타이어와 고정장치 사이에서 발생하는 경계조건에 불안정성에 기인한 것으로 추측된다. 또한, Tielking이 제시한 이론식을 이용하여 반경방향 고유진동수의 계산치와 실험을 통해 구한 측정치를 비교한 결과는 Fig. 14와 같다.

설계인자의 변화가 반경방향 고유진동수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Table 2와 같이 타이어의 설계인자를 변화시켜 실험하였으며 설계인자 변화에 대한 결과는 Table 5와 같다. 타이어의 반경방향 고유진동수는 Table 5에서 보는 바와 같이 하부 트레드(under tread)의 영향을 크게 받고 있는 점을 고려해 볼 때 타이어의 고유진동수는 타이

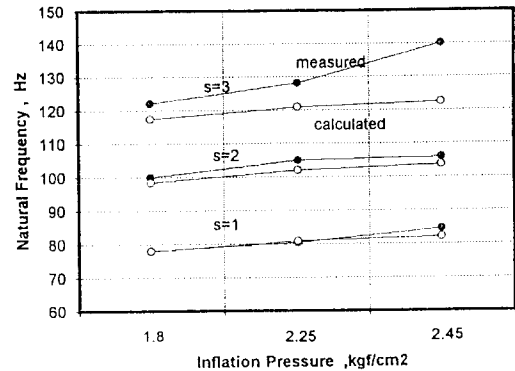


Fig. 14 The variation of radial directional natural frequency of P175/70R13 all season I tire by increasing inflation pressure : fixed-fixed condition

어 중량에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있고, 고유진동수를 이동시키기 위해서는 중량의 변화가 손쉬운 방법임을 알 수 있다. 또한, 상부 트레드 고무배합(cap tread compound)이나 벨트각도(belt angle), 비드필러(bead filler)의 고무경도 등은 큰 영향을 미치지 못하였으며, 감쇠율은 상부 트레드 고무배합(cap tread compound)에서 손실계수의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 하중을 받고 회전하지 않는 경우

Fig. 15는 타이어에 가해진 하중이 반경방향 고유진동수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 타이어에 가해진 하중이 증가할수록 고유진동수는 고주파로 이동하였는데, 이는 하중의 증가가 타이어 사이드월 강성의 증가를 수반하기 때문이다. 타이어 사이드월 강성은 타이어에 가해진 하중의 증가분을 변위의 증가분으로 나눈 값이다. 하중에 대한 타이어 사이드월 강성의 측정은 Akasaka, Yamazaki와 Asano⁽¹²⁾의 연구결과를 기초로 제작한 사이드월 강성 측정장치를 이용하여 구하였다. Fig. 16은 사이드월 강성 측정장치로부터 구한 하중의 증가에 대한 반경방향 강성으로 하중이 증가하면 반경방향 강성이 증가하고 하였고 타이어 내부 공기압에 큰 영향을 받고 있다.

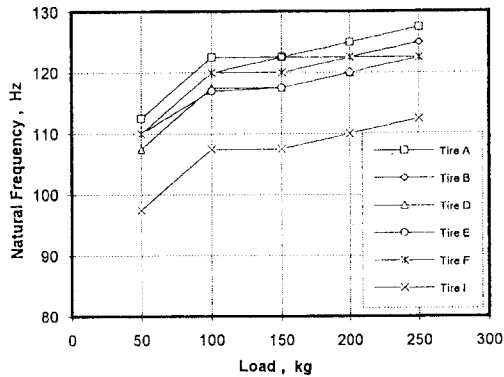


Fig. 15 The variation of radial directional natural frequency by increasing load

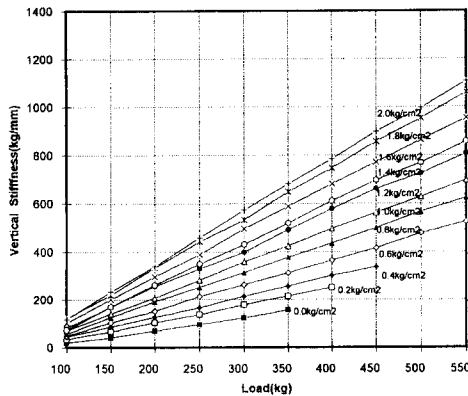


Fig. 16 The variation of radial directional stiffness by increasing load

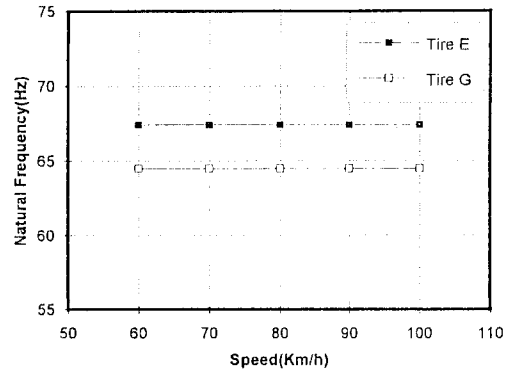


Fig. 17 The variation of radial directional natural frequency to speed

3.3 하중을 받고 회전하는 경우

Fig. 17은 타이어의 주행속도가 반경방향 고유진동수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 타이어의 반경방향 고유진동수는 타이어의 주행속도와 관계없이 일정하였다. Tielking이 제시한 이론식 식 (2)와 비교해 볼 때, 타이어의 반경방향 고유진동수는 내부 공기압이나 사이드월 강성과 밀접한 관계가 있고, 회전각속도에 거의 영향을 받지 않고 있다.

$$\omega^2 = \left[\frac{4\Omega^2 s}{s^2 + 1} - \Omega^2 s^2 + \frac{EI}{\rho_s^2 A r^4} s^2 (s^2 - 1)^2 + \frac{T}{\rho_s A r^2} s^4 + \frac{1}{\rho_s A} (K_r + 2P_i \frac{b}{r}) s^2 + \frac{1}{\rho_s A} K_t \right] \frac{1}{(s^2 + 1)} \quad (2)$$

3.4 실제의 주행조건이 타이어 반경방향 고유진동수에 미치는 영향

승용차에 장착된 타이어는 수시로 변하는 주변조건과 타이어 자체의 실험조건으로 인하여 반경방향 고유진동수가 변하고 있다. 종래, 타이어 반경방향 고유진동수에 관한 연구로는 타이어 단체에 대한 연구가 대부분이었는데, 실제 타이어 단체의 반경방향 고유진동수와 승용차에 장착된 후 주행하는 타이어의 반경방향 고유진동수는 현격한 차이를 보이고 있어 종래의 연구방법이 개선되어야 할 것으로 생각된다. 그 예로 Table 6은 본 연구에서 하중을 받지 않고 회전하지 않는 타이어를 어태처에 고정 (clamped) 시키고 반경방향 고유진동수를 측정 한 실내실험의 결과와 정지상태의 승용차에 타이어를 장착한 후 지면으로부터 승용차를 분리시켜 타

Table 6 The variation of natural frequency by experimental condition

Mode number (n)	Clamped (Hz)	Non-contact (Hz)	Contact (Hz)
1	75.0	74.5	130.0
2	98.5	97.0	144.0
3	122.5	121.5	158.5
4	148.0	167.0	171.0

이러한 하중을 받지 않는 상태(non-contact)에서 측정된 반경방향 고유진동수를 비교한 것으로 반경방향 고유진동수는 큰 차이가 없었다. 그러나, 승용차에 타이어를 장착한 후 지면에 100% 하중을 받고 있는 상태(contact)에서의 반경방향 고유진동수는 본 연구의 하중을 받고 회전하지 않는 경우와 같이 하중을 받지 않은 경우와 비교해 볼 때 반경방향 고유진동수가 고주파 대역으로 이동하여 현격한 차이를 보이고 있다. 그러므로 실제 승용차에 장착되어 주행중인 타이어의 반경방향 고유진동수는 타이어 단체의 반경방향 고유진동수와는 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

하중을 받고 회전하는 승용차 타이어 반경방향 고유진동수 측정에 관한 실험적인 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 타이어의 반경방향 고유진동수는 내부 공기압이나 타이어에 가해지는 하중이 증가하면 타이어 사이드월 강성이 증가하여 고주파수 대역으로 이동하였고, 주행속도의 증가에 대해서는 큰 영향을 받지 않았다. 또한, 타이어가 마모되면 마모되지 않은 타이어에 비해 반경방향 고유진동수가 고주파수 대역으로 이동하였는데, 이는 타이어가 마모되는 과정에서 타이어의 물리적인 특성이 변하고 중량이 감소하는데 기인함을 알았다.

(2) 타이어의 감쇠율은 내부 공기압이 증가하면 상대적으로 감소하였고, 트레드 고무의 손실계수와 같이 재료의 특성차이에 따라 변하였다.

(3) 타이어의 반경방향 고유진동수는 실험조건에 따라 차이가 있으며, 실제 승용차에 장착된 타이어의 반경방향 고유진동수를 파악하기 위해서는 기존의 타이어 단체에 대한 연구방법이 개선되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Tielking, J. T., 1965, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model," *SAE Paper 650492*.
- (2) Bohm, F., 1966, "Mechanik des Gurtelreifens," *Ingenieurarchiv Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 35, pp. 82 ~ 101.
- (3) Barons, M. R., 1977, "Impact Vibrations of Rolling Tires," *SAE Paper 770612*.
- (4) 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.
- (5) Soedel, W. and Prasad, M. G., 1980, "Calculation of Natural Frequency and Modes of Tires in Road Contact by Utilizing Eigenvalues of the Axisymmetric Non-Contacting Tire," *J. Sound Vib*, 70(4), pp. 573 ~ 584.
- (6) Takayama, M. and Yamagishi, K., 1984, "Simulation Model of Tire Vibration," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 11, Nos. 1 ~ 4, pp. 38 ~ 49.
- (7) Kamitamari, T. and Sakai, H., 1985, "A Study on Radial Tire Vibration," *SAE Paper 852195*.
- (8) Ushijima, T. and Takayama, M., 1988, "Modal Analysis of Tire and System Simulation," *SAE Paper 880585*.
- (9) Reiter, W. F. and Eberhardt, A. C., 1976, "Radio Telemetry Applied to Tire Vibrations," *SAE Paper 760745*.
- (10) Walker, J. C., 1981, "Noise Generated at the Tyre-Road Interface," PH. D. dissertation, Aston university, Birmingham.

- (11) Eberhardt, A. C. and Reiter, W. F., "Digital Signal Processing Techniques in Truck Tire Vibration and Sound Analysis," Center for Acoustical Studied, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27607.
- (12) 산학협동공개강좌, 1994 "모드해석 : 이론 측정기술 및 응용," 한국과학기술원, pp. 2-50~2-53.
- (14) Akasaka, T. and Yamajaki, S., 1987, "Radial Stiffness of Radial Tire Sidewall," *Bull. Facul. Sci & Eng.*, CHUO UNIVERSITY, Vol. 25, pp. 185~199.
- (14) Potts, G. R. and Csora, T. T., 1975, "Tire Vibration Studies : The State of the Art," *Tire Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 196~210.
- (15) 김병삼, 이태근, 홍동표, 정태진, 양성모, 1993 "승용차 타이어의 진동특성에 관한 연구," 한국자동차공학회지, Vol. 15, No. 2 pp. 76~83.
- (16) Kwon, Y. D. and Prevorsek, D. C., 1984, "Formation of Standing Waves in Radial Tires," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 12, Nos. 1~4, pp. 38~49.
- (17) Huang, S. C. and Soedel, W., 1987, "Effect on Coriolis Acceleration on the Free and Forced in-Plane Vibrations of Rotation Rings on Elastic Foundation," *J. Sound Vib.*, Vol. 115, No. 2, pp. 253~274.
- (18) Kung, L. E., 1990, "Radial Vibration of Pneumatic Radial Tires," *SAE Paper 900759*.
- (19) Gong, S., Savkoor, A. R. and Pacejka, A. B., 1993, "The Influence of Boundary Conditions on the Vibration Transmission Properties of Tires," *Proceedings of the 1993 Noise and Vibration Conference*, pp. 139~146.
- (20) Richarrds, T. R., Charek, L. T. and Scavuzzo, R. W., 1986, "The Effect of Spindle and Patch Boundary Condition on Tire Vibration Modes," *SAE Paper 860243*.