

자유상태에서 경상용차용 타이어의 진동특성

김용우*, 최동수**

Vibration Characteristics of Tires for Light-duty Truck under Free Suspension

Kim Yong-woo*, Choi Dong Su**

Abstract

Due to the rapid increase of long-distance transportation, particular attentions have been paid to truck tires, especially to their dynamic characteristics. In this research, experimental modal analysis on two kinds of light-duty truck tires, i.e., radial tire and bias tire, are performed by using GRFP(global rational fraction polynomial) method to investigate differences of the dynamic behavior of the two tires.

The test results have shown that the modal frequencies of bias tire are much higher than the corresponding values of radial tire with a similar mode shape, which is in accordance with the fact that the radial rigidity of bias tire is higher than that of radial tire. And most of the modal decay rates of bias tire are larger than those of radial tire within the scope of this experiment.

In the frequency domain range of test, the bias tire has extra modes, which do not occur in the radial tire. This difference is based on the fact that the circumferential rigidity of the bias tire is quite low whereas that of radial tire is so high that the frequencies of the corresponding modes are out of the frequency range of test.

Key Words : Radial Tire(레디얼 타이어), Bias Tire(바이어스 타이어), Natural Frequency(고유진동수), Mode Shape(고유진동형), Modal Decay Rate(모달 감쇠율)

1. 서 론

최근 들어 차량이 고급화되고 고속화됨에 따라 차량의 진동을 감소시켜서 승차감을 향상시키는 문제가 중요시 되고 있다. 이는 타이어가 차량과 지면사이의 최초 회전접

촉부분으로서 지면으로부터 모든 충격을 차량에 전달하는 부분이며, 차량의 승차감 향상과 타이어의 마모에 큰 영향을 미치기 때문이다.^(1,2)

차량이 정상 주행할 때 발생하는 진동 원인은 여러 가지가 있다. 자동차의 진동원으로 엔진, 노면의 요철, 타이

* 순천대학교 기계·자동차공학부
** 순천대학교 BK21사업단 연구원

어의 불균일성 등을 들 수 있으며 다양한 진동원으로부터 기인하는 폭넓은 주파수 스펙트럼(spectrum) 분포를 갖는다. 이 중에서 타이어와 관련된 진동은 노면에서 가진되어 타이어를 통하여 차에 전달되는 것과 타이어 자신이 가진 원이 되는 것인데, 노면에서 가해지는 진동은 주파수가 약 100Hz 이하인 하쉬니스(harshness)와 100~500Hz의 도로소음(road noise)으로 분리된다.^(5,5) 도로소음의 주파수 대역은 차량 또는 타이어에 따라 다르지만 주요 피크는 100~200Hz와 300~400Hz인 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾

도로소음을 줄이기 위해서는 타이어의 진동특성이 자동차 차체의 진동특성과 일치하지 않도록 설계해야 하며, 특히 저주파 영역에서 타이어의 고유진동수는 차량의 진동특성과 중요한 연관성이 있으므로⁽⁶⁾ 타이어의 모달 파라미터에 대한 지식이 필요하다. 모달 파라미터를 구하는 모달 분석은 구조물의 동적인 특성을 연구하는 가장 기본적인 방법이고, 그 결과를 타이어 진동을 감소시키기 위한 설계에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 최근의 상용차의 승차감 향상에 대한 연구가 활발한 점을 고려하여 상용차용 타이어의 레디얼 타이어와 바이어스 타이어의 진동특성을 비교하기 위해, 자유상태(free suspension)에 있는 타이어의 모달 파라미터를 구하였다. 이를 위해, '전체 주파수와 감쇠비(global frequencies and damping)'를 사용하였다. 이 이론의 배경은 SISO(single input single output)방법의 하나인 RFLS 다항식법(Rational Fraction Least Squares polynomial method)을 확장시킨 방법으로서, single input에 대한 일련의 주파수 응답함수(FRF, frequency response function)들을 분석하는 방법이다. 현재 상용 패키지(commercial package)에서 널리 사용되는 방법 중의 하나로 GRFP (global rational fraction polynomial)라고도 부른다. 본 논문에서는 이 방법에 대한 구체적인 이론적 배경⁽⁷⁾ 설명은 생략한다.

2. 실험

2.1 실험대상 타이어

타이어의 고유진동수, 감쇠비와 고유진동형을 구하기 위해 본 실험에서는 경상용차(light-duty truck)용 레디얼 타이어(radial tire; 8.25R16LT)와 바이어스 타이어(bias tire; 8.25-16LT)를 사용하였다.

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 실험장치

타이어의 진동실험은 크게 나누어 타이어의 회전 유무에 따라 회전상태의 진동실험과 정지상태의 진동실험으로 나뉜다. 회전하지 않는 경우에 있어서도 실험조건에 따라 2가지 경우로 구분할 수 있는데, 첫째는 타이어가 주변에 구속되지 않고 자유스러운 상태를 유지하는 경우이고 둘째는 타이어가 자동차에 장착되어 어댑터에 고정시킨 경우^(8,9)의 진동실험이다. 본 연구에서는 회전하지 않는 자유상태에서 자유진동실험을 실시하였다.

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 본 실험을 위하여 다음과 같은 시스템, 가속도계 및 충격해머 등을 사용하였다.

- VXI system (Multi-channel signal analyzer)
: (product: Hewlett Packard)
- Accelerometers: 353B16 (product: PCB)
- Impact hammer: 086C03 (product: PCB)

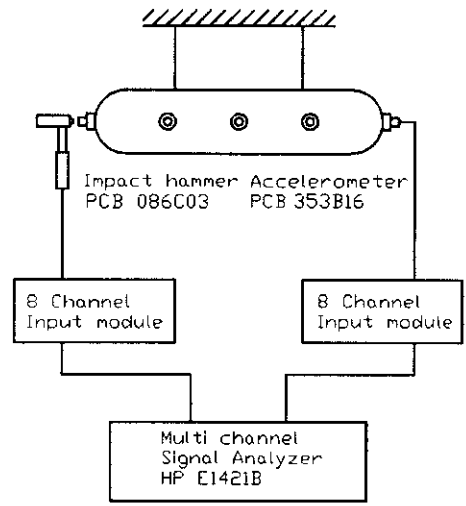


Fig. 1 Schematic diagram for an impact test

2.2.2 실험방법

8.25R16LT 타이어와 8.25-16LT 타이어 각각의 최대 허용공기압력(maximum inflation pressure)에서 3 kgf/cm² 씩 감소시키면서 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 가속도계를 원주 방향 및 자오선 방향으로 붙이고, Fig. 2의 1번 가속도계와 Fig. 3의 8번 가속도계 바로 아래 부분을 반경 방향으로 타격하였다. 충격 해머로 가해진 가진력과 그에 대한 출력 센서인 가속도계로부터 나오는 응답신호를 다채널 신호분석기(multi-channel signal analyzer)를 이용하여 타이어 표면에 수직방향 변위의 주파수 응답함수를 구하였다.

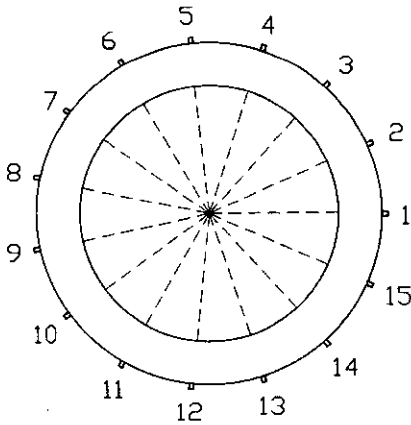


Fig. 2 Positions of accelerometers attached to circumference of tire

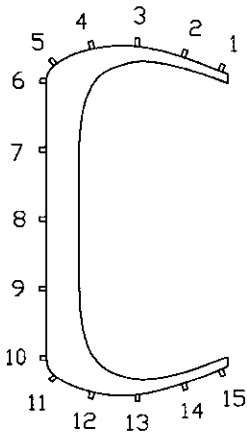
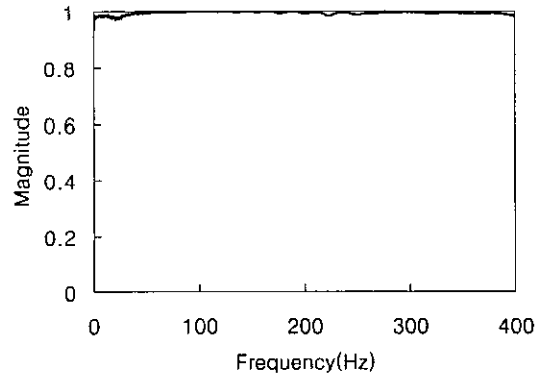


Fig. 3 Positions of accelerometers attached to tire meridian

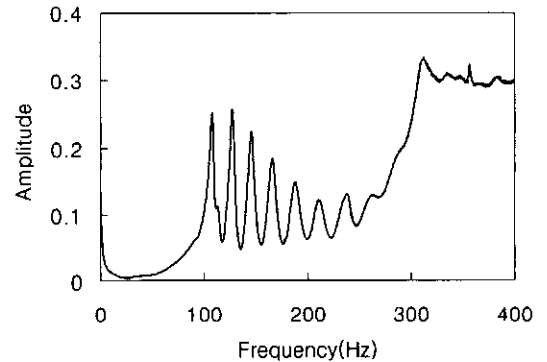
본 연구에서는 타이어의 저주파수대 진동에 초점을 맞추어 차단주파수를 400Hz로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 레디얼 타이어(공기압 8.8 kgf/cm^2)의 기여도 함수(coherence function)와 주파수 응답함수를 도시한 것이며, Fig. 5는 바이어스 타이어(공기압 8.1 kgf/cm^2)의 기여도 함수와 주파수 응답함수를 보여준다. Fig. 4-(a)와 5-(a)에 도시된 기여도 함수는 곡선 적합시 채용하는 주파수 대역내의 값이 0.95이상의 값을 나타내므로 측정된 데이터를 신뢰할 수 있다.



(a) coherence



(b) Frequency response function

Fig. 4 Coherence and FRF of the radial tire(8.25R16LT) under max. inflation pressure

3.1 레디얼 타이어의 진동 특성

최대허용공기압력(8.8 kgf/cm^2)에서 레디얼 타이어의 고유진동수와 감쇠비, 고유진동형을 측정된 결과를 Table 1에 정리한다. Table 1에서 N은 원주방향 파의 개수(circumferential full wave number)이고 M은 자오선 방향 반파의 개수(meridional half-wave number)이다. 따라서 M이 짝수인 모드는 타이어의 직경에 대해 대칭인 모드(meridionally symmetric mode)이며, M이 홀수인 경우는 반대칭 모드(meridionally skew-symmetric mode)를 의미한다.^{10,11)} 또한 굵은 실선은 변형전의 윤곽선을, 그리고 가는 실선은 진동 모드를 나타낸다.

3.2 바이어스 타이어의 진동 특성

바이어스 타이어의 최대허용공기압력(8.1 kgf/cm^2)에서

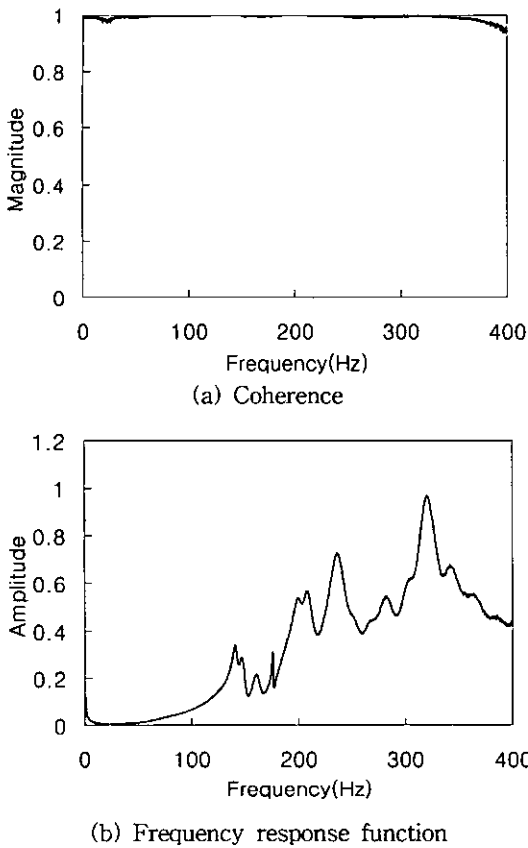


Fig. 5 Coherence and FRF of the bias tire(8.25R16LT) under max. inflation pressure

구한 고유진동수를 Table 2에 정리한다. 여기서 N과 M의 의미는 Table 1에서와 같다.

3.3 레디얼 타이어나 바이어스 타이어의 진동 특성 비교 및 고찰

3.3.1 고유진동형과 강성

Table 1과 Table 2를 비교함으로써 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

첫째, 레디얼 타이어의 고유진동형에는 N=0인 모드가 없는 반면 바이어스 타이어의 고유진동형에는 N=0의 모드가 존재한다. 이 모드는 바이어스 타이어의 원주방향의 강성이 매우 작아서 나타나는 것으로 원주방향의 강성이 매우 큰 레디얼 타이어의 경우 이러한 모드는 고주파영역에서 나타날 것으로 예측된다. Table 1의 레디얼 타이어에

이 모드가 없는 것은 이 모드들이 측정된 주파수영역보다 고주파 영역에 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 근거는 다음과 같은 타이어나 구조의 차이에 두고 있다. 즉, 바이어스 타이어의 경우 카카스의 배열이 원주방향을 중심으로 상호 40도 전후로 교차되어 원주방향의 강성이 매우 작은 반면, 레디얼 타이어의 경우 카카스의 배열이 원주방향에 직각으로 배열되어 있어 원주방향의 강성이 매우 크기 때문이다.⁽⁶⁾

둘째, 바이어스 타이어의 고유진동수가 레디얼 타이어의 고유진동수보다 훨씬 높다. 이는 바이어스 타이어의 반경방향의 강성이 레디얼 타이어의 반경방향 강성보다 크다는 것을 의미한다.

3.3.2 동일 고유진동형에 대한 고유진동수 비교

Fig. 6은 동일한 고유진동형(M=3)을 갖는 레디얼 및 바이어스 타이어의 고유진동수를 비교한 것이다. Fig. 6으로부터 동일 고유진동형에 대한 고유진동수는 바이어스 타이어의 것이 레디얼 타이어의 고유진동수보다 높음을 알 수 있다.

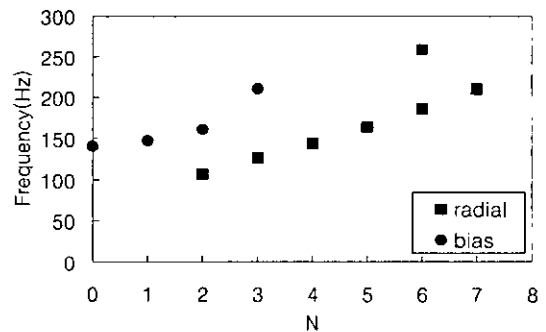


Fig. 6 The natural frequencies of the modes with M=3 under max. inflation pressure

Fig. 7과 Fig. 8은 동일한 고유진동형(M=3)에서 타이어나의 공기압 변화에 대하여 레디얼 및 바이어스 타이어나의 고유진동수를 각각 보여준다. Fig. 7과 Fig. 8로부터 타이어나의 공기압이 증가할수록 레디얼 및 바이어스 타이어나의 고유진동수는 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

3.3.3 동일 고유진동형에 대한 모달 감쇠율 비교

Fig. 9는 동일한 고유진동형(M=3)을 갖는 레디얼 및 바이어스 타이어나의 모달 감쇠율(modal decay rate)을 비교한

Table 1 Natural frequencies, modal decay rates and natural modes of the radial tire

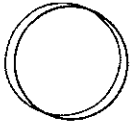

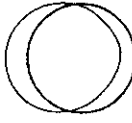

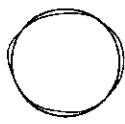

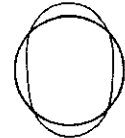

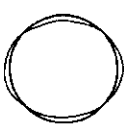

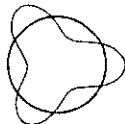
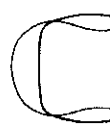
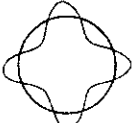

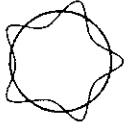

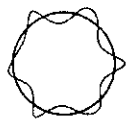

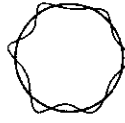



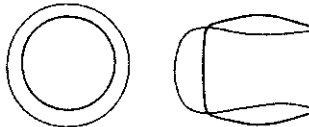
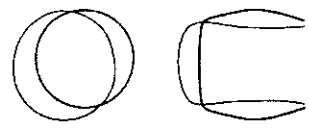
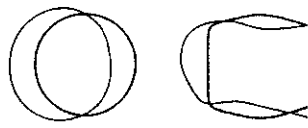

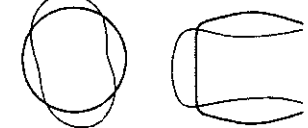
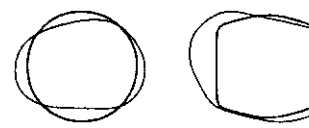
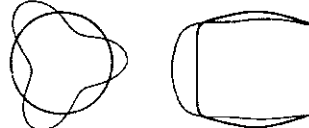
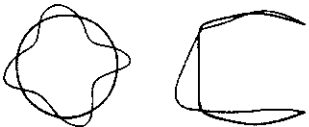

N	natural frequency [Hz]	decay rate[Hz] (damping ratio[%])	M	natural frequency [Hz]	decay rate[Hz] (damping ratio[%])	M	natural frequency [Hz]	decay rate[Hz] (damping ratio[%])	M
0									
1	91.41	1.65(1.80)	4	112.54	2.50(2.22)	4			
									
2	72.67	1.58(2.17)	4	107.30	2.00(1.87)	3	236.92	4.48(1.89)	4
									
3	126.45	2.47(1.95)	3						
									
4	144.48	3.12(2.16)	3						
									
5	164.64	4.06(2.47)	3						
									
6	186.85	5.32(2.85)	3	259.83	7.65(2.94)	3			
									
7	210.52	6.71(3.18)	3						
									

Table 2 Natural frequencies, modal decay rates and natural modes of the bias tire

N	natural frequency [Hz]	decay rate[Hz] (damping ratio[%])	M	natural frequency [Hz]	decay rate[Hz] (damping ratio[%])	M	natural frequency [Hz]	decay rate[Hz] (damping ratio[%])	M
0	140.81	2.56(1.82)	3						
									
1	147.29	3.37(2.29)	3	176.03	0.42(0.262)	4			
									
2	125.48	2.22(1.77)	2	161.69	4.44(2.75)	3	202.76	4.98(2.46)	4
									
3	210.41	6.19(2.94)	3						
									
4	237.39	5.77(2.43)	4						
									
5									
7	251.36	10.54(4.19)	1						
									

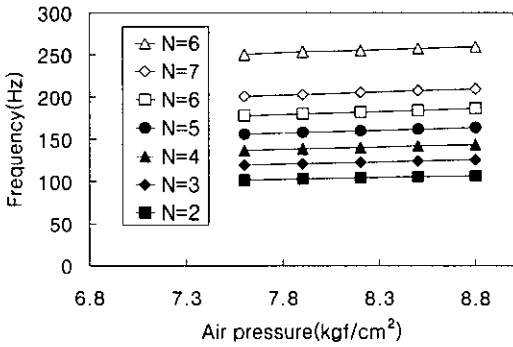


Fig. 7 The natural frequencies of the modes with M=3 under various inflation pressure(825R16LT)

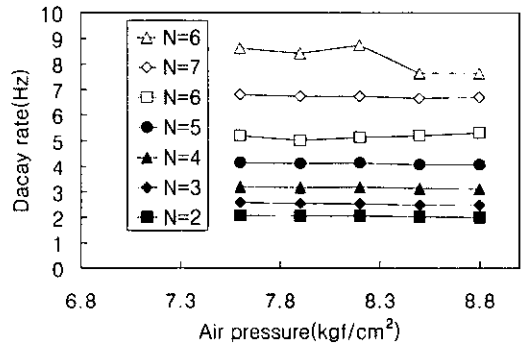


Fig. 10 The modal decay rates of the modes with M=3 under various inflation pressure(825R16LT)

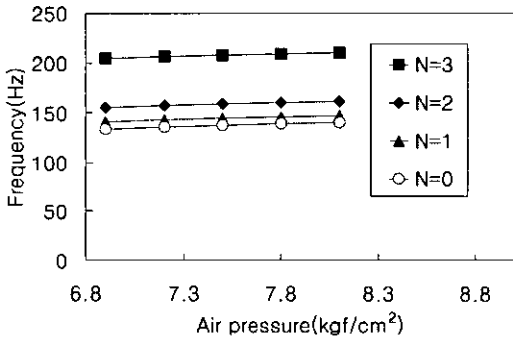


Fig. 8 The natural frequencies of the modes with M=3 under various inflation pressure(825-16LT)

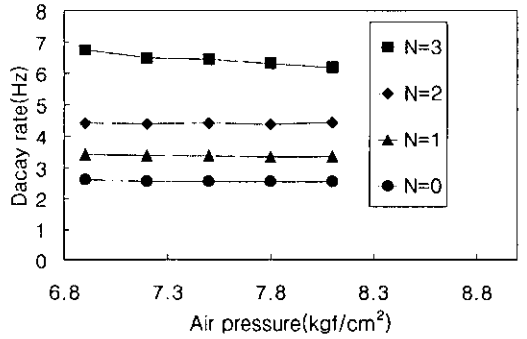


Fig. 11 The modal decay rates of the modes with M=3 under various inflation pressure(825-16LT)

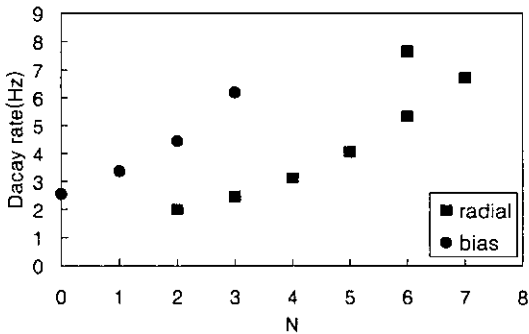
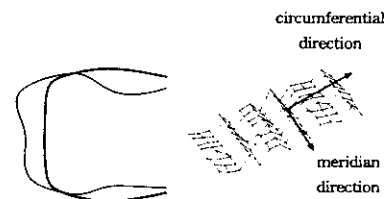


Fig. 9 The modal decay rates of the modes with M=3 under max. inflation pressure

것이다. Fig. 9로부터 동일 고유진동수에 대한 모달 감쇠율은 바이어스 타이어의 것이 레디얼 타이어의 모달 감쇠율보다 대체로 높은 편임을 알 수 있다.



(a) The lower mode(186Hz)



(b) The higher mode(259Hz)

Fig. 12 The mode shapes of the modes with M=3 and N=6 of the radial tire

Fig. 10과 Fig. 11은 동일한 고유진동형(M=3)에서 타이어의 내부 공기압 변화에 대하여 레디얼 및 바이어스 타이어의 모달 감쇠율을 각각 보여준다. Fig. 10으로부터 레디얼 타이어의 모달 감쇠율은 측정된 공기압 범위 안에서 대체로 일정한 값을 갖음을 알 수 있다. Fig. 11로부터 바이어스 타이어의 모달 감쇠율의 경우도 일정한 경향을 보이고 있다.

Fig. 10에서 보인 바와 같이 레디얼 타이어에서는 2조의 M=3과 N=6인 모드가 나타나는데, 이것들의 고유진동형의 차이는 Fig. 12와 같다. 첫 번째 그림은 자오선 방향의 단면에 대한 모드들, 두 번째 그림은 타이어의 원주면을 한 평면으로 펼쳤을 때의 모드들 그린 것이다.

4. 결 론

하중을 받지 않으면서 자유상태에 있는 타이어의 공기압 변화에 대하여 경사용차용 레디얼 및 바이어스 타이어의 고유진동수, 모달 감쇠율 및 고유진동형을 측정하였다. 본 연구에서 실시한 실험 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- (1) 레디얼 타이어의 고유진동형에 비해 바이어스 타이어는 N=0인 모드를 갖는데 이것은 바이어스 타이어의 원주방향 강성이 레디얼 타이어의 것보다 작기 때문이다.
- (2) 측정된 공기압 범위 내에서, 레디얼 및 바이어스 타이어의 모달 감쇠율은 대체로 일정한 경향을 보인다. 또한, 다음과 같은 타이어의 진동특성의 일반적인 경향을 확인하였다.
- (3) 동일한 고유진동형(M=3)에서 바이어스 타이어의 고유진동수가 레디얼 타이어의 고유진동수보다 훨씬 높으며, 바이어스 타이어의 모달 감쇠율이 레디얼 타이어의 감쇠율보다 대체로 높은 편이다.
- (4) 동일한 고유진동형(M=3)에서 공기압 변화에 대하여 레디얼 및 바이어스 타이어의 고유진동수는 공기압이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다.

후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단지정 순천대학교 자동차 부품 및 소재 연구 · 개발센터의 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) Potts, G. R. and Csora, T. T., 1974, Tire vibration studies the state of the art, Akron Rubber Group Winter Meeting
- (2) 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.
- (3) Tozawa, Y. and Suzuki, Y., 1986, Road noise and tire vibration characteristics, 自動車技術, Vol. 40 No. 12, pp. 1624~1629.
- (4) 이광재, 1988, 타이어의 진동특성, 타이어 고무, pp. 13~23.
- (5) 服部 六郎, 1986, 타이어의 話, 大成社, 東京
- (6) 김병삼 외, 1996, 하중을 받고 회전하는 승용차 타이어의 반경방향 고유진동수에 관한 연구, 대한기계학회논문집(A), 제20권 제1호, pp. 1~13.
- (7) Maia, Nuno M. M et. al., 1997, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press Ltd., England
- (8) Guan, D. H., Yam, L. H., Mignolet, M. P. and Li, Y. Y., 1999, "Study of experimental modal analysis on tires", Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference at Kissimmee, Florida, Vol. 1, pp. 386~390.
- (9) 김병삼 외, 1993, 승용차용 타이어의 진동특성에 관한 연구, 한국자동차공학회지, Vol. 15, No.2, pp. 76~83.
- (10) Kung, L. E. and Soedel, W., 1985, "Natural frequencies and mode shapes of an automotive tire with interpretation and classification using 3-D computer graphics", Journal of Sound and Vibrations, Vol. 102, pp. 329~346.
- (11) 김두만, 김항욱, 1986, "승용차용 레디얼 타이어의 동적 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제10권 제5호, pp. 724~734.