

# 자동차용 알루미늄 합금 휠의 진동특성에 관한 실험적 연구

김 병 삼\* 지 창 현\*\* 문 상 돈\*\*\*

## An Experimental Study on Vibration Characteristics of Al-alloy Wheel for Passenger Car

Byoung-Sam Kim, Chang-Hun Chi and Sang-Don Mun

**Key Words:** Frequency Response Function Method(주파수응답함수법), Damping(감쇠), Natural Frequency(고유진동수), Coherence Function(기여도 함수), AL-alloy Wheel(알루미늄 합금휠)

### Abstract

The styling of passenger car wheels and their effect on vehicle appearance has increased in importance in recent years. The wheel designer has been given the task of insuring that a wheel design meets its engineering objectives without affecting the styling theme. The wheel and tire system is considered as a vehicle component whose dynamic modal information of the tire/wheel system are employed in the modal synthesis model of the vehicle. The Vibration characteristics of a passenger car wheel play an important role to judge a ride comfortability and quality for a passenger car. In this paper, the vibration characteristics of a Al-alloy and steel wheel for passenger car are studied. Natural frequency, damping and mode shape are determined experimentally by frequency response function method. Results show that wheel material property, size and design are parameter for shift of natural frequency and damping.

### 1. 서 론

최근 승용차가 고급화 됨에 따라 승용차의 승차감 향상에 관한 연구가 크게 대두되고 있다. 승용차의 승차감은 노면으로부터 가진되어 타이어와 현가장치 등을 거쳐 승용차에 전달되는 진동에 의해 크게 좌우된다. 승용차 타이어 휠(wheel)은 타이어를 장착, 유지하고 차축의 허브(hub)에 취부되어 차량의 운동을 타이어에 전달하여 승용차의 운전을 가능하게 하는 역할을 하는 부분이다. 승용차 타이어 휠은 승용차 타이어의 진동 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고

있다. 승용차 타이어 휠의 역할은 기본적으로 승용차의 주행시 발생하는 각종 응력을 견딜수 있는 강성을 보유하여야 하고, 타이어를 지지하는 림의 형상 및 치수를 일치시켜야 하며 승용차의 연비 측면을 고려해 볼 때 경량화되어야 한다. 알루미늄 알로이 휠(Al-alloy wheel)이란 합금의 주성분이 알루미늄으로 구성된 휠로 구성 성분의 93%가 알루미늄이고 실리콘, 마그네슘, 구리, 니켈 또는 기타 금속 등이 혼합되었다. 알로이 휠은 승용차의 승차감 뿐만 아니라 안정성, 연비, 가속 제동성, 타이어 수명 등의 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 휠에 대한 종래의 연구를 살펴보면 다음과 같다. A. Luders<sup>1)</sup>는 종래 휠의 적절한 평가방법이 없음을 감안하여 여러가지 형태의 휠에 대하여 모형을 제작하여 평가하는 방법을 제시하였다. D. G. Anderson<sup>2)</sup>은 "On-Board" 시험기법을 적용하여 실내 평가용 휠과 실제 노

\*순천제일대학 차량기계학부

\*\*원광대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\*전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

면(road) 평가 사이의 차이에 대하여 연구하였다. E. E. Tuttle<sup>[3]</sup>은 승용차에 쓰이는 여러가지 휠의 하중에 대한 특성과 장단·점에 대하여 조사하였다. K. Kao, M. Riesner, P. Surulinarayanasami<sup>[4]</sup>는 유한요소법(finite element method)을 이용하여 타이어와 휠의 모달해석(modal analysis)을 실시하여 승용차의 승차감 평가에 적용하였다. M. Riesner, M. P. Zebrowski, R. J. Gavalier<sup>[5]</sup>는 충격을 받는 힘에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 시도하였고, 한편, 본 연구에서는 알루미늄 합금 휠의 진동특성을 실험적인 방법으로 파악하는자 하였다. 알루미늄 합금 휠의 진동특성에 관한 실험은 주파수 응답함수법을 이용하였고, 실험결과로 부터 알루미늄 휠과 스틸 휠의 진동특성을 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1. 실험용 대상 휠

Table 1 The classification of wheel.

wheel	Material	Steel
		Al-alloy
		Mg-alloy
	Method	Casting
		Forging
	Structure	1 piece
		2 piece
		3 piece
	Design	Spoke type
		Mesh type
		Fin type
		Dish type
		Aero type

승용차용 휠은 Table 1에서 볼 수 있듯이 재질 및 제조방식, 구조, 외관 등의 차이에 의해 구분된다. 휠의 구조 및 명칭은 Fig.1과 같다.

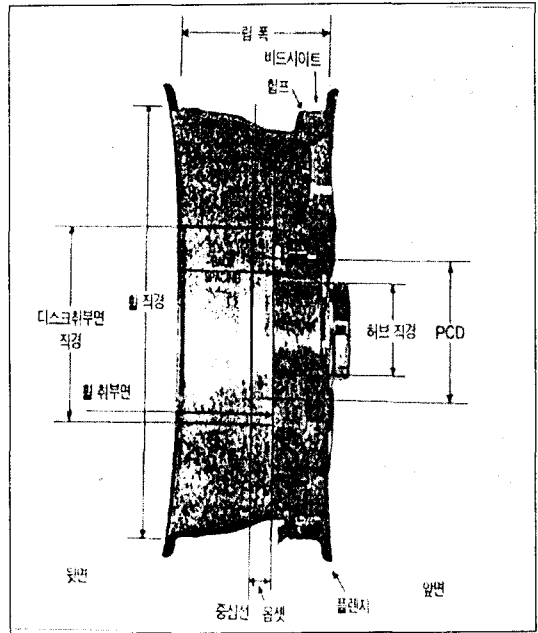


Fig.1 The structure of wheel.

Table 2. The specification of test wheel.

NO.	Material	Specification	Structure	Design
1	Steel	5.0J×13ET49	1 piece	General type
2	Al-alloy	5.5J×13ES1301ET38	1 piece	Spoke type
3	Al-alloy	5.5J×13EF1301ET38	1 piece	Fin type
4	Al-alloy	5.5J×13EM1301ET38	1 piece	Mesh type
5	Al-alloy	6.0J×14EM1401ET38	1 piece	Mesh type
6	Al-alloy	6.0J×14ZS1401ET 42	2 piece	Spoke type
7	Al-alloy	6.5J×15EM1501ET38	1 piece	Mesh type
8	Al-alloy	6.0J×15DM1501ET40	3 piece	Mesh type

본 연구에 이용된 실험용 대상 휠은 Table 2에서 보는 바와 같다. 본 연구에 이용된 실험용 대상 휠은 실제 자동차 생산업계에서 새로 출고되는 자동차에 장착할 수 있는 스틸 휠(steel wheel)과 알루미늄 합금 휠이다. 또한, 실험용 대상 휠의 크기(휠의 폭×반경)는 5.0J×13 ~ 6.5J×15 사이이고, 휠을 제조과정에 따라 1~3개 조각으로 구성된 4가지 타입의 휠을 실험용 대상 휠로 선정하였다.

## 2-2. 실험장치 및 실험방법

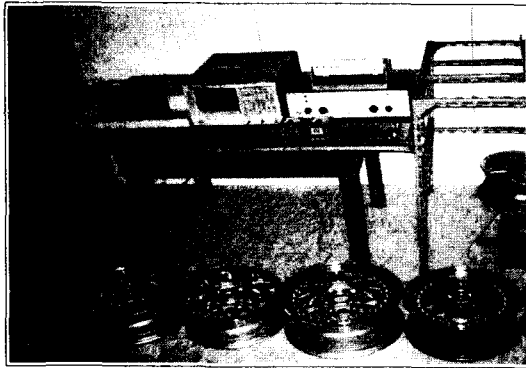


Fig.2 The schematic diagram of experimental set-up.

본 연구에 이용된 실험장치에 대한 개략도는 Fig.2와 같다. 본 연구에서는 휠의 경계조건으로 주변에 구속되지 않고 자유스러운 상태(free-free condition)를 유지하도록 휠을 구조물에 매달았고, Fig.3과 같이 가속도계의 측정 위치를 이동하여 동일한 실험을 반복하였다. 가진 방법은 충격해머(impact hammer)와 가진기(exciter)를 이용하였다. 충격해머로 가진될 경우에는 가진점을 중심으로 180. 반대편에 가속도계를 부착하고 주파수 응답함수법(frequency response function method) 또는 전달함수법(transfer function method)를 이용하여 주파수 분석기(fast fourier transformation analyzer)로 부터 측정결과를 구하였고, 가진기를 이용한 경우에는 신호발생기(function generator)를 통해 신호를 발생하게 하고 발생된 신호는 증폭기(power amplifier)를 거쳐 가진기를 가진시키도록 하였다.

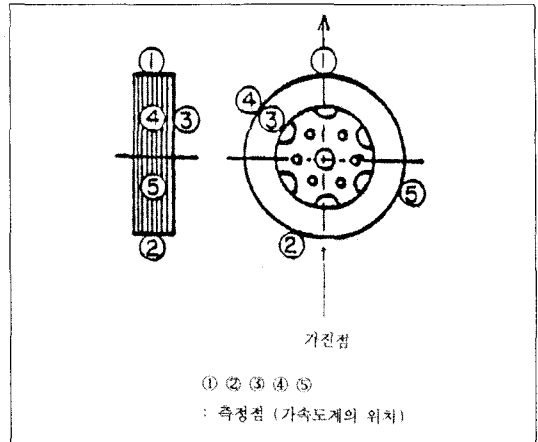


Fig.3 Transfer of input acceleration to remote parts of wheel.

충격해머와 가진기를 이용해 실험한 결과 주파수 응답함수의 진폭, 실수부, 허수부 등을 구할 수 있었고, 이로부터 휠의 고유진동수(natural frequency)와 감쇠(damping), 진동형태(mode shape)등을 파악할 수 있었다. 휠의 고유진동수는 주파수 응답함수의 진폭으로부터 구하였고, 이때 전달함수의 기여도 함수(coherence function)가 0.95이상 되는 데이터를 이용하여 분석하였다. 휠의 감쇠는 휠의 첫번째 고유진동수의 피크(peak)로부터 진폭이 3 dB 낮아진 지점에서의 폭(band-width)을 이용하거나 주파수 응답함수의 실수부에서 증폭인자를 측정하여 구할 수 있는데, 이때, 증폭인자 Q는 다음과 같다.

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

여기서,  $f_a$ 는 고유진동수 이상에서 인너턴스(inertia)가 극소치의 주파수이고,  $f_b$ 는 고유진동수 이하에서 인너턴스(inertia)가 극대치의 주파수이다. 또한, 증폭인자 Q와 감쇠율  $\zeta$ 의 관계는  $\zeta = (1/2Q)$ 이다. 한편, 가진기를 이용할 때는 Flat Top Weighting의 창함수(window function)의 16회이상의 평균(average)를 실시하였다. 진동형태(mode shape)은 가진조건을 일정하게 유지한 후 휠을 10등분으로 분할하고, 각각의 분할된 지점에서 가속도계를 부착하고 측정된 주파수 응답함수의 허수부로 부터 구하였다.

### 3. 실험결과

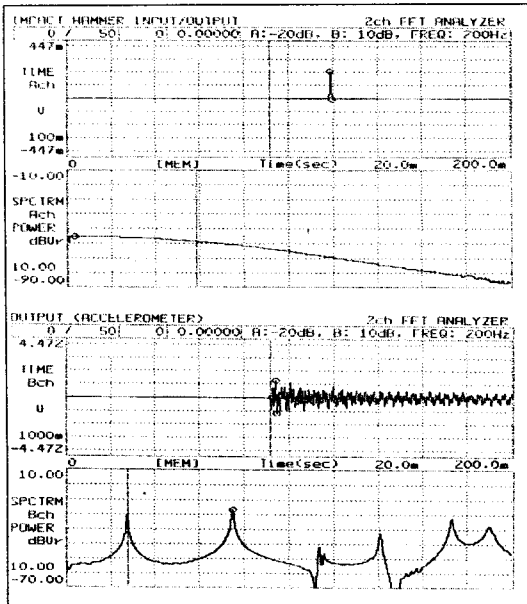


Fig.4 Impact and response in time and frequency domain.

(a) Impact (b) Response

Fig.4는 충격해머를 이용하여 휠을 가진시킨 충격(impact)과 그에 상응하는 응답(response)을 시간영역(time domain)과 주파수영역(frequency domain)에서 본 결과이다.

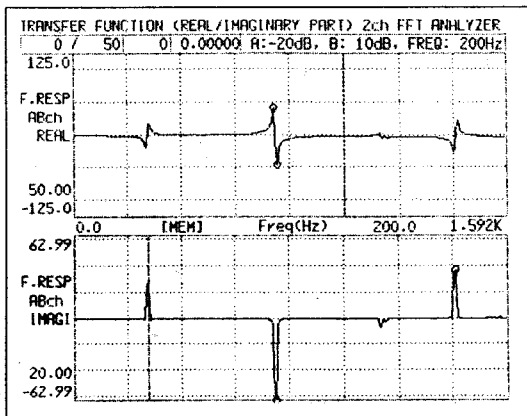


Fig.5 Frequency response function result of test wheel(real/Imaginary part).

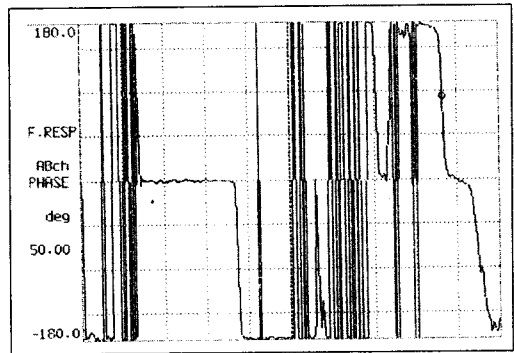


Fig.6 Frequency response function result of test wheel(phase angle).

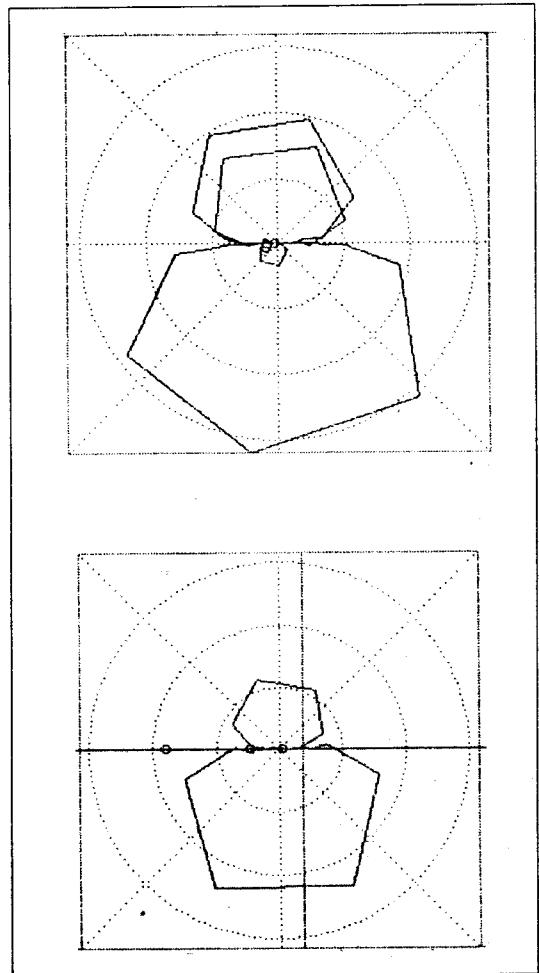


Fig.7 Nyquist diagram of test wheel.  
(a) steel wheel (b) AL-alloy wheel

Fig.5와 Fig.6은 충격해머를 이용하여 가진시켰을 때 주파수 응답함수의 실수부, 허수부와 위상각이다. Fig.7은 스틸과 알루미늄 합금 휠의 Nyquist 선도로 0~2 kHz 사이에 나타난 고유진동수의 모드 수(mode number)에 있어서 스틸 휠이 알루미늄 합금 휠보다 약 2배 정도 많이 분포하고 있었고, Nyquist 선도의 폭이 큰 것으로 보아 감쇠가 작음을 예상할 수 있었다.

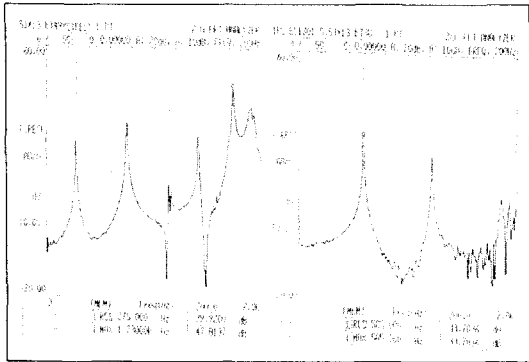


Fig.8 The variation of natural frequency by transfer of input acceleration to remote part.  
(a) steel wheel (b) Al-alloy wheel

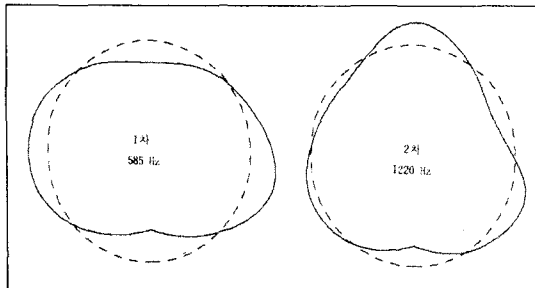


Fig.9 The mode shape of test wheel.

Fig.8은 Fig.3에서 볼 수 있듯이 측정점의 변화에 대한 주파수 응답함수 진폭을 비교한 것으로 측정점의 변화가 휠의 고유진동수에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. Table 3은 충격해머를 이용하여 측정한 휠의 고유진동수와 감쇠로 측정 주파수의 범위는 0~2 kHz 사이이다. Fig.9는 휠의 진동형태를 나타내고 있다.

Table 3 The experimental result of test wheel.

No.	Natural Frequency (Hz)			Damping
1	365	750	1,135	0.111
2	585	1,220		0.287
3	530	1,165		0.252
4	565	1,235		0.271
5	500	1,025	1,640	0.226
6	375	875	1,560	0.020
7	420	860	1,400	0.018
8	300	650	1,165	0.025

5.5J×13의 스틸과 알루미늄 합금 휠을 비교해 본 결과, 알루미늄 합금 휠의 고유진동수가 스틸 휠에 비해 고주파수 대역에 있음을 알 수 있었고, 2 kHz 이하의 대역에서의 고유진동수의 모드 수도 스틸 휠이 5~6개 정도 존재하는 반면 알루미늄 합금 휠은 2~3개 정도 존재하고 있었다. 이는 승용차 주행시 노면의 가진주파수와 타이어의 고유진동수가 저주파수 대역에 존재하고 있음을 고려해 볼 때<sup>17)</sup> 알루미늄 합금 휠이 스틸 휠에 비해 노면 또는 타이어 등과 공진현상을 일으켜 진폭을 급격하게 증가시킬 가능성이 적을 것으로 예상된다. 휠의 감쇠에 있어서는 스틸 휠이 0.111 정도인 반면 알루미늄 합금 휠은 0.25 부근인 것을 나타나고 있어 휠이 외부로부터 가진 되어질 경우 스틸 휠보다 알루미늄 합금 휠이 훨씬 빨리 진폭이 작아질 것으로 예상된다. 휠(fin), 메쉬(mesh), 스포크(spoke) 타입의 순으로 휠의 첫번째 고유진동수가 고주파수 대역에 존재하고 있었고, 감쇠의 경우에는 휠, 메쉬, 스포크 타입 순으로 감쇠가 컸다. 동일한 디자인(메쉬타입)의 휠에 대하여 규격을 증가시킨 결과, 고유진동수의 경우에는 6.6J×15, 6.0×14, 5.5J×13 순으로 고유진동수가 고주파수 대역에 존재하였고, 감쇠의 경우는 6.5J×15, 6.0J×14, 5.5J×13 순으로 컸다. 휠의 크기가 커짐에 따라 고유진동수가 저주파수 대역으로 이동하는 것은 휠의 강성이 일정하다고 가정하였을 때, 휠의 크기가 커짐에 따라 휠의 질량이 증가하여 고유진

동수의 대역을 저주파수 이동하였고, 감쇠의 경우에는 휠의 질량이 증가하면 감쇠계수가 증가하고 따라서 감쇠도 증가하였다. 휠의 질량이 증가하면 휠의 감쇠가 감소하고 있으며 이는 휠의 크기가 커지면서 제조방법과 구조적인 차이에 기인한 것으로 생각된다. 휠의 구조 차이를 비교해본 결과 휠의 고유진동수는 3 피스(piece), 2피스, 1피스 순으로 주파수가 높았고 감쇠는 1피스, 2피스, 3피스 순이었다.

#### 4. 결 론

승용차용 알루미늄 휠의 진동특성에 관한 실험적인 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

1) 알루미늄 합금 휠이 스틸 휠에 비해 고유진동수가 고주파수 대역에 존재하고 있었다. 이는 노면의 가진주파수와 타이어의 고유진동수가 저주파수 대역에 존재하고 있음을 고려해 볼 때 알루미늄 합금 휠이 스틸 휠에 비해 노면 또는 타이어등과 공진현상을 일으켜 진폭을 급격하게 증가시킬 가능성이 적을 것으로 생각되며, 휠 자체의 감쇠에 있어서는 스틸 휠이 0.111 정도인 반면 알루미늄 합금 휠은 0.25 부근인 것을 나타나고 있어 휠이 외부로 부터 가진 되어질 경우 스틸 휠보다 알루미늄 합금 휠이 빨리 안정될 것으로 예측된다.

2) 같은 규격의 휠에 대하여 디자인 차이에 대한 결과를 살펴보면, 스포크 타입이 메쉬나 휠보다 고유진동수가 고주파 대역에 위치하고 있었다. 메쉬타입에 대하여 크기를 증가시킨 결과, 크기가 증가하면 고유진동수가 저주파수 대역으로 이동하였다. 휠의 구조적 차이에 의해서는 1 피스가 2, 3 피스보다 고주파수 대역에 고유진동수가 위치하고 있으며, 감쇠는 2, 3피스가 1 피스 보다 컸다.

#### 참 고 문 헌

1. A. Luder, "Testing of wheels," SAE Paper 790044, 1976.

2. D. G. Anderson, "On-board passenger tire sound generation study road versus lab wheel," SAE Paper 762016, 1976.

3. E. E. Tuttle, "The Evolution of the passenger car wheel," SAE Paper 800065, 1980.

4. K. Kao, M. Riesner and P. Surulinarayanasami, "Modal analysis of a tire and wheel and its application for vehicle ride evaluation," SAE Paper 860826, 1986.

5. M. Riesner, M. P. Zebrowski and R. J. Gavalier, "Computer simulation of wheel impact test," SAE Paper 860829, 1986.

6. G. Lawrence and P. A. Moller, "Wheel material," SAE Paper 880697, 1988.

7. 김병삼 외 4인, "승용차 타이어의 진동특성에 관한 연구," 한국자동차공학회지 제15권 제1호, pp.76~83.