

자동차 알루미늄 합금 휠의 진동특성에 관한 연구

김병삼*

(논문접수일 2005. 5. 2, 심사완료일 2005. 5. 30)

An Study on Vibration Characteristics of Automobile Al-alloy Wheel

Byoung-Sam Kim*

Abstract

The styling of automobile 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 automobile wheel play an important role to judge a ride comfort and quality for a automobile. In this paper, the vibration characteristics of a Al-alloy and steel wheel for automobile 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.

Key Words : Al-alloy Wheel(알루미늄 합금휠), Coherence Function(기여도함수), Damping(감쇠), Frequency Response Function(주파수 응답함수), Natural Frequency(고유진동수)

1. 서 론

최근 자동차가 고급화됨에 따라 자동차의 승차감 향상에 관한 연구가 요구되고 있다. 자동차의 승차감은 노면으로부터 가진되어 타이어와 현가장치 등을 거쳐 자동차에 전달되는 진동에 의해 크게 좌우된다. 자동차 타이어 휠(wheel)은

타이어를 장착, 유지하고 차축의 허브에 취부되어 차량의 운동을 타이어에 전달하는 부분으로 자동차 타이어의 진동 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 자동차 타이어 휠의 역할은 기본적으로 자동차의 주행시 발생하는 각종 응력을 견딜 수 있는 강성을 보유하여야 하고, 타이어를 지지하는 림(rim)의 형상 및 치수를 일치시켜야 하며 자동차의

*. 순천제일대학 자동차기계과 (anvkbs@sunchon.ac.kr)
주소: 540-260 전라남도 순천시 덕월동 산 9-3

연비 측면을 고려해 볼 때 경량화되어야 한다. 알루미늄 합금 휠(Al-alloy wheel)이란 합금의 주성분이 알루미늄으로 구성된 휠로 구성 성분의 93%가 알루미늄이고 실리콘, 마그네슘, 구리, 니켈 또는 기타 금속 등이 혼합되었다. 합금 휠은 자동차의 승차감 뿐 만 아니라 안정성, 연비, 가속 제동성, 타이어 수명 등의 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다.

휠에 대한 종래의 연구를 살펴보면 다음과 같다. A. Luders⁽¹⁾는 종래 휠의 적절한 평가방법이 없음을 감안하여 여러 가지 형태의 휠에 대하여 모형을 제작하여 평가하는 방법을 제시하였다. D. G. Anderson⁽²⁾은 “On-Board” 시험 기법을 적용하여 실내 평가용 휠과 실제 노면(road) 평가 사이의 차이에 대하여 연구하였다. E. E. Tuttle⁽³⁾은 자동차에 쓰이는 여러 가지 휠의 하중에 대한 특성과 장단점에 대하여 조사하였다. K. Kao, M. Riesner, P. Surulinarayanamsami⁽⁴⁾는 유한요소법(FEM)을 이용하여 타이어와 휠의 모달 해석을 실시하여 자동차의 승차감 평가에 적용하였다. M. Riesner, M. P. Zebrowski, R. J. Gavalier⁽⁵⁾는 충격을 받는 힘에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 시도하였다.

한편, 본 연구에서는 자동차 타이어의 진동 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 알루미늄 합금 휠의 진동특성을 실험적인 방법으로 파악하고자 하였다. 알루미늄 합금 휠의 진동 특성에 관한 실험은 주파수 응답함수법(frequency response function method)을 이용하였고, 실험결과로부터 알루미늄 휠과 스틸 휠의 진동특성을 비교하였다. 또한, 본 연구결과는 동일한 규격의 자동차 타이어-휠 시스템에 휠이 미치는 영향을 파악하는데 있어 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험용 휠

자동차용 휠은 Table 1에서 볼 수 있듯이 재질 및 제조방식, 구조, 외관 등의 차이에 의해 구분된다.

본 연구에 이용된 실험용 대상 휠은 Table 2에서 보는 바와 같다. 본 연구에 이용된 실험용 대상 휠은 실제 자동차 생산업체에서 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 휠로 선정하였다.

Photo. 1은 본 연구에 이용된 실험용 휠이다. 실험용 휠은 휠(fin), 메쉬(mesh), 스포크(spoke) 타입이다.

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

Table 2 The specification of experimental wheel

wheel	Material	Specification	Structure	Design
1	Steel	5.0J × 13 ET 49	1 piece	General type
2	Al-alloy	5.5J × 13 ES1301 ET 38	1 piece	Spoke type
3	Al-alloy	5.5J × 13 EF1301 ET 38	1 piece	Fin type
4	Al-alloy	5.5J × 13 EM1301 ET 38	1 piece	Mesh type
5	Al-alloy	6.0J × 14 EM1401 ET 38	1 piece	Mesh type
6	Al-alloy	6.0J × 14 ZS1401 ET 42	2 piece	Spoke type
7	Al-alloy	6.5J × 15 EM1501 ET 38	1 piece	Mesh type
8	Al-alloy	6.0J × 15 DM1501 ET 40	3 piece	Mesh type

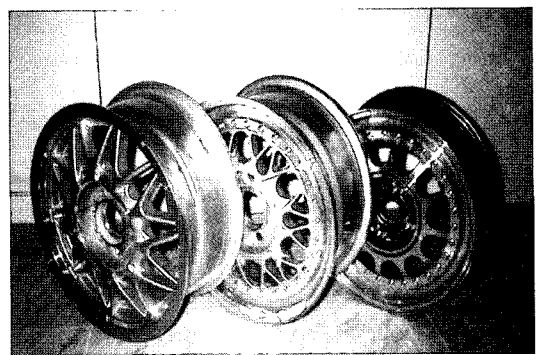


Photo. 1 Test wheel

2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 이용된 실험장치에 대한 개략은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 휠의 경계조건으로 주변에 구속되지 않고 자

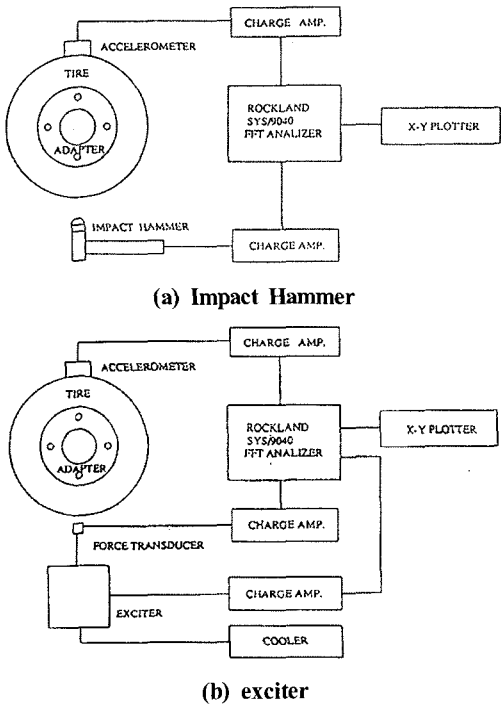


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

유스러운 상태를 유지하도록 휠을 구조물에 매달았고, 가속도계의 측정위치를 이동하여 동일한 실험을 반복하였다. 가진방법은 충격해머와 가진기를 이용하였다. 충격해머로 가진될 경우에는 가진점을 중심으로 180° 반대편에 가속도계를 부착하고 주파수 응답함수법을 이용하여 주파수 분석기로부터 측정결과를 구하였고, 가진기를 이용한 경우에는 신호발생기를 통해 신호를 발생하고 발생된 신호는 증폭기를 거쳐 가진하였다. 충격해머와 가진기를 이용하여 실험한 결과 주파수 응답함수의 진폭, 실수부, 허수부 등을 구할 수 있었고, 이로부터 휠의 고유진동수와 감쇠, 진동형태 등을 파악할 수 있었다. 휠의 고유진동수는 주파수 응답함수의 진폭으로부터 구하였고, 이때 전달함수의 기여도 함수가 0.95 이상 되는 데이터만을 선별하여 분석하였다.

휠의 감쇠는 휠의 첫 번째 고유진동수의 피크로부터 진폭이 3dB 낮아진 지점에서의 폭을 이용하거나 주파수 응답함수의 실수부에서 증폭인자를 측정하여 구할 수 있는데(Coquad plot method), 이때, 증폭인자 Q는 식 (1)과 같다.

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

여기서, f_a 는 고유진동수 이상에서 인너턴스가 극소치의 주파수, f_b 는 고유진동수 이하에서 인너턴스가 극대치의 주파수.

또한, 증폭인자 Q와 감쇠율 ζ 의 관계는 $\zeta = (1/2Q)$ 이다. 한편, 가진기를 이용할 때는 Flat Top Weighting의 창함수이며 16회 이상 평균하였다. 진동형태는 가진 조건을 일정하게 유지한 후 휠을 10등분으로 분할하고, 각각의 분할된 지점에서 가속도계를 부착하고 측정한 주파수 응답함수의 허수부로부터 구하였다.

3. 실험 결과

Fig. 2는 충격해머를 이용하여 휠을 가진시킨 충격과 그에 상응하는 응답을 시간영역(time domain)과 주파수영역(frequency domain)에서 나타낸 결과이다.

Fig. 2는 충격해머를 이용하여 휠을 가진시킨 충격과 그에 상응하는 응답을 시간영역(time domain)과 주파수영역(frequency domain)에서 나타낸 결과이다. Fig. 2 (b)에서 보는 바와 같이 휠의 고유진동수는 뚜렷하게 구분할 수 있었으며,

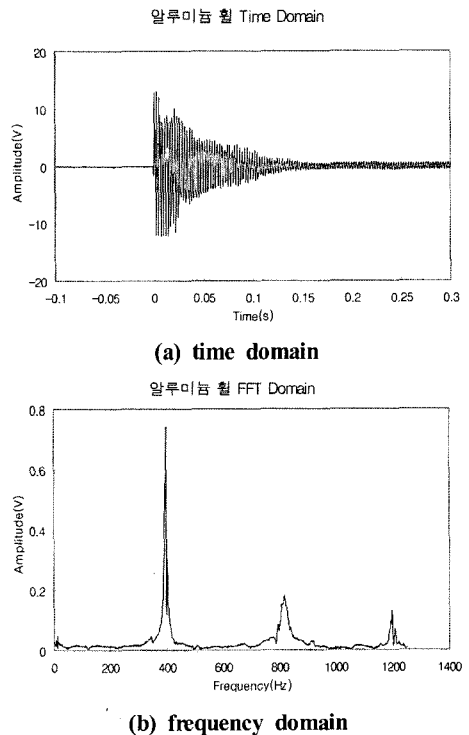


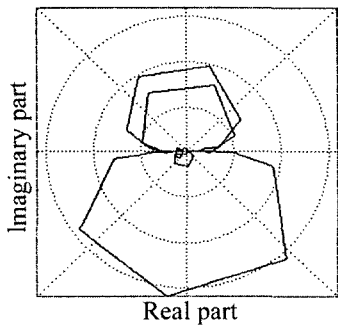
Fig. 2 Response function of wheel by impact hammer

Fig. 2 (a)로부터 대수감쇠율을 고려한 알루미늄 휠의 감쇠치는 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 충격해머의 가진점과 가속도계의 측정점의 변화에 대한 주파수 응답함수 진폭을 비교해 본 결과 측정점의 변화가 휠의 고유진동수에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

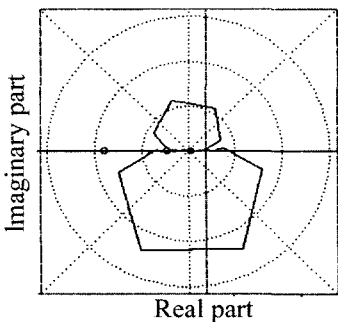
Fig. 3은 스틸과 알루미늄 합금 휠의 나이퀴스트 선도(Nyquist plot)로서 0~2kHz 사이에 나타난 고유진동수의 모드수(mode number)에 있어서 스틸 휠이 알루미늄 합금 휠보다 약 2배정도 많이 분포하고 있었고, 나이퀴스트 선도의 폭이 큰 것으로 보아 감쇠가 작음을 예상할 수 있었다.

Table 3은 충격해머를 이용하여 측정된 휠의 고유진동수와 감쇠를 나타내며 측정된 고유진동수의 주파수 대역이 0~2 kHz 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 실험용 휠의 주파수 응답함수 측정결과이고, 동일한 규격의 휠에 대한 고유진동수의 대역을 살펴보면 Fig. 4에서 보는 바와 같이 스틸 휠의 고유진동수가 알루미늄 합금 휠에 비해 저주파수 대역에 첫 번째 고유진동수가 존재하고 있음을 알 수 있다.



(a) steel wheel

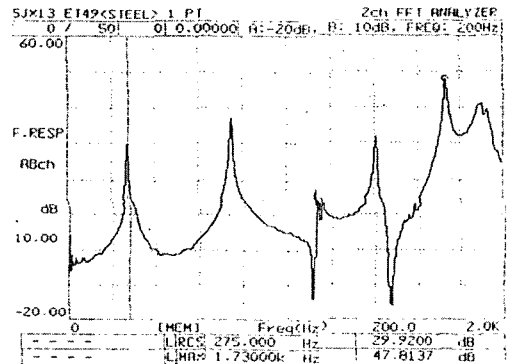


(b) Al alloy wheel

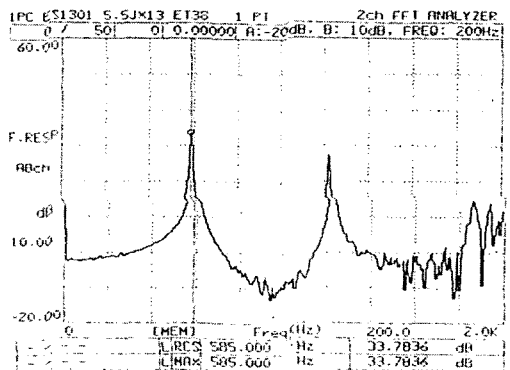
Fig. 3 Nyquist plot of wheel

Table 3 Natural frequency of experimental wheel

wheel	Natural Frequency(Hz)			Damping
	1	2	3	
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



(a) steel wheel



(b) Al alloy wheel

Fig. 4 Frequency response function of experimental wheel

스틸 휠의 고유진동수가 대체로 저주파수 대역에 존재하고 있음을 고려해 볼 때 스틸 휠이 알루미늄 합금 휠에 비해 노면 또는 타이어 등과 공진현상을 일으켜 진폭을 급격하게 증가시킬 가능성이 클 것으로 예상된다.

또한, 휠의 감쇠값 측면에서는 스틸 휠이 0.111 정도인 반면 알루미늄 합금 휠은 0.25 정도인 것을 나타내고 있어 휠이 외부로부터 가진될 경우 스틸 휠보다 알루미늄 합금 휠의 진폭이 빨리 작아질 것으로 예상된다.

시험용 휠 중에서 릿(fin), 메쉬(mesh), 스포크(spoke) 타입의 순으로 휠의 첫번째 고유진동수가 고주파수 대역에 존재하고 있었고, 감쇠의 경우에는 릿, 메쉬, 스포크 타입 순으로 감쇠가 컸다. 동일한 디자인(예: 메쉬타입)의 휠에 대하여 규격을 증가시킨 결과, 고유진동수의 경우에는 6.5J×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 고유진동수의 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 사료된다. 휠의 구조 차이를 비교해 본 결과 휠의 첫 번째 고유진동수는 3 피스(piece), 2피스, 1피스 순으로 고주파수 대역에 존재하고 있었고 감쇠의 크기는 1피스, 2피스, 3피스 순이었다.

Fig. 5, 6은 유한요소법을 이용하여 알루미늄 합금 휠의 진동형태를 예측한 결과이다. 휠의 진동형태로부터 휠의 진동에 대한 방향성을 살펴볼 수 있는데, 휠이 집중하중과 분포하중을 받게 되면 저주파 대역에서는 상하방향과 좌우방향으로, 고주파수 대역에서는 상하방향과 좌우방향이 합성된 방향으로 움직이고 있음을 알 수 있다.

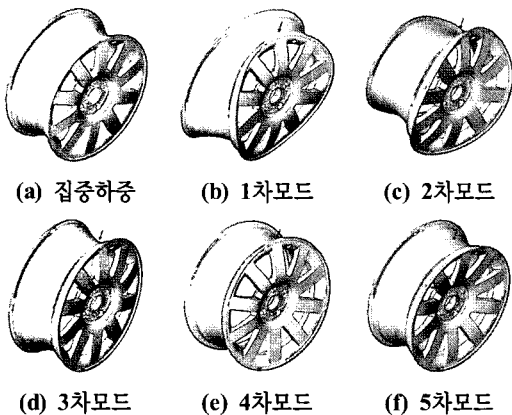


Fig. 5 Point force of wheel and mode shape

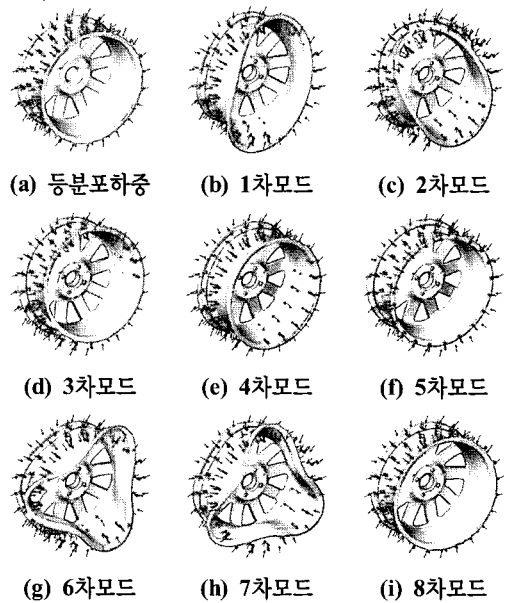


Fig. 6 Line force of wheel and mode shape

4. 결론

자동차용 알루미늄 휠의 진동특성에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

- (1) 알루미늄 합금 휠이 스틸 휠에 비해 고유진동수가 고주파수 대역에 존재하고 있는데 이는 노면의 가진 주파수와 타이어의 고유진동수가 저주파수 대역에 존재하고 있음을 고려해 볼 때 알루미늄 합금 휠이 스틸 휠에 비해 노면 또는 타이어 등과 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 나타내고 있어 휠이 외부로부터 가진 될 경우 스틸 휠보다 알루미늄 합금 휠이 빨리 안정될 것으로 예측된다.
- (2) 같은 규격의 휠에 대하여 디자인 차이에 대한 결과를 살펴보면, 스포크 타입이 메쉬나 릿보다 고유진동수가 고주파 대역에 위치하고 있었다. 메쉬타입에 대하여 크기를 증가시킨 결과, 크기가 증가하면 고유진동수가 저주파수 대역으로 이동하였다. 휠의 구조적 차이에 의해서는 1피스가 2, 3 피스보다 고주파수 대역에 고유진동수가 위치하고 있으며, 감쇠는 2, 3피스가 1 피스 보다 컸다.

참 고 문 헌

- (1) Luder, A., 1979, "Testing of wheels," SAE Paper 790044.
- (2) Anderson, D. G, 1976, "On-board passenger tire sound generation study road versus lab wheel," SAE Paper 762016.
- (3) Tuttle, E. E., 1980, "The Evolution of the passenger car wheel," SAE Paper 800065.
- (4) Kao, K., Riesner, M., Surulinarayanasami, M., 1986, "Modal analysis of a tire and wheel and its application for vehicle ride evaluation," SAE Paper 860826.
- (5) Riesner, M., Zebrowski, M. P., Gavalier, R. J., 1986, "Computer simulation of wheel impact test," SAE Paper 860829.
- (6) Akasaka, T., 1998, "Twisting Stiffness and Lateral Vibration of a Radial Tire Side wall," TSTCA, Vol. 16, No. 4, pp. 223~248.
- (7) Mousseau, C. W., Clark, S. K., 1994, "An Analytical and Experimental Study of a Tire Rolling Over a Stepped Obstacle at Low Velocity," TSTCA, Vol. 22, No. 3, pp. 162~181.
- (8) Beres, W., 1987, "Linear Models of Tyre Enveloping Properties," Int. J. of Vehicle Design, Vol. 8, No. 4/5/6, pp. 485~503.
- (9) Carson, D. H., 1965, "Effect of Tire Uniformity on Ride? Wide Base and Regular Truck Tires," SAE paper 650186.
- (10) Yoon, M. C., Cho, H. D., Kim, S. K., Kim, Y. K. and Cho, H. G., 2001, "A Study on the Modeling and Analysis of Chatter in Turning Operation," Transactions of The Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 10, NO. 4, pp. 76~83.