

## 스틸휠의 체결력에 따른 조향휠 진동에 관한 연구

안세진<sup>1)</sup> · 정의봉<sup>\*2)</sup> · 유원석<sup>2)</sup> · 김명규<sup>3)</sup>

부산대학교 기계기술연구소<sup>1)</sup> · 부산대학교 기계설계공학과<sup>2)</sup> · 현대자동차<sup>3)</sup>

### A Study on the Steering Wheel Vibration affected by the Fastening Torque of the Wheel Mounting Hub Bolts of Steel Wheels

Sejin Ahn<sup>1)</sup> · Weuibong Jeong<sup>\*2)</sup> · Wansuk Yoo<sup>2)</sup> · Myunggyu Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>3)</sup>Hyundai Motors Company, 700 Yangchung Buk ku, Ulsan 683-791, Korea

(Received 17 April 2003 / Accepted 31 May 2003)

**Abstract** : The steel wheels are widely used in the passenger cars because of their low cost of production although the aluminum wheels have many advantages in their performance and appearance. It is known that the steering wheel vibration with steel wheels is generated more often than one with aluminum wheels. Both the constant velocity driving test and the run up test are carried out in this study to analyze the causes and path of the steering wheel vibration generated from the steel wheels. And this study shows that the steering wheel vibration is affected by the fastening torque of the wheel mounting bolts between the steel wheel and the suspension disk.

**Key words** : Steel wheel(스틸휠), Steering wheel vibration(조향휠 진동), Order tracking analysis(오더 해석), Misalignment(축 어긋남), Imbalance mass(불평형 질량)

### 1. 서론

최근에 생산되는 각종 승용차량에 있어서 외관상의 고급화뿐만 아니라 기능상의 높은 연비와 승차감 등을 고려하여 알루미늄 휠(aluminum wheel)의 적용이 일반화되고 있다. 하지만 알루미늄 휠의 높은 생산 원가 등의 이유로 스틸휠(steel wheel)은 경·소형 차량 등과 같이 경제성이 강조되는 차량에서 주요하게 사용되고 있다. 최근에는 소비자들의 차량성능에 대한 기대감이 증대됨에 따라 경제적으로 개발된 경·소형 차량에 대해서도 승차감은 영업의 중요한 주안점이 되고 있다. 주행하는 차량

에 있어서 시트(seat)와 플로어(floor) 그리고 조향휠(steering wheel)의 진동은 차량의 승차감을 결정하는 중요한 요소가 된다.<sup>1,2)</sup> 특히 조향휠 진동은 승차감뿐만 아니라 조향 안정성의 측면에서도 중요한 요소가 된다.<sup>3)</sup> 그런데 스틸휠은 알루미늄 휠에 비해 비교적 큰 불평형력이 존재함으로써 조향 휠(steering wheel) 등의 진동을 더욱 크게 유발하는 경향이 있다. 스틸휠이 서스펜션 디스크/허브(suspension disk/hub)에 장착될 때 체결력의 크기에 따라 접촉부위의 탄성 변형량의 정도가 달라지게 된다. 이러한 불균일한 접촉부에 의해 스틸휠은 불평형질량(unbalanced mass) 뿐만 아니라 축 어긋남(misalignment)을 유발하여 진동발생을 더욱 가중시키게 된다. 일반적으로 불평형질량은 타이어 회전수

\*To whom correspondence should be addressed.  
wbjeong@pusan.ac.kr

(revolutions of tire)와 동일한 주파수의 가진력을 유발하고, 휠의 회전 축과 구동축이 일치하지 않을 경우에는 타이어 회전수의 배수에 해당하는 주파수들의 가진력이 발생된다.<sup>4)</sup>

본 연구는 국내에서 개발된 소형차량 모델에서 스틸휠을 장착하였을 경우에 조향휠 진동이 특정 속도에서 크게 발생하는 원인을 분석하기 위한 일련의 시험을 실시하였다. 스틸휠이 장착된 시험차량의 조향휠 진동은 120 kph 주행 속도에서 크게 발생하여 130 kph 속도 이상에서는 점차 감소하는 것으로 운전자(test driver)에 의해 주관평가(subjective evaluation) 되었다. 운전자가 느끼는 주관적인 조향휠 진동현상을 객관적인 물리량으로 표현하기 위해 정속주행시험(constant velocity driving test) 및 가속주행시험(run up driving test)을 실시하였다. 그리고 특정한 주행속도에서 크게 되는 조향 휠 진동의 발생 메커니즘과 전달 경로를 분석하기 위하여 조향계(steering system)에 대한 임팩트햄머(impact hammer) 시험을 실시하였다.

## 2. 시험방법

국내에서 생산되는 시험차량은 배기량이 1500 cc이고 자동변속기(auto transmission)와 ABS(anti-lock brake-system)가 장착된 소형차량이다. 기본 사양으로 직경이 13 in 또는 14 in인 스틸휠이 장착되고 있다.

시험차량에서 발생하는 조향휠 진동현상 분석뿐만 아니라 스틸휠이 서스펜션 디스크/허브에 장착되는 체결력의 크기에 따른 조향휠 진동의 변화를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 측정장비를 설치하였다. 조향휠의 상단부에 3축 가속도계를 설치하였고, 스틸휠의 진동이 조향시스템에 직접 전달되는 위치인 너클(knuckle)과 타이로드(tie-rod)가 결합되는 위치에 3축 가속도계를 좌·우 각각 2개를 설치하였다. 이 때 조향휠 상단부에 설치된 가속도계의 전·후방향(fore-aft) 성분은 조향축(steering column)과 평행한 방향이며 좌·우방향(left·right) 성분은 조향휠의 접선(tangential)방향을 나타내고, 상·하방향(up-down) 성분은 조향휠의 반경(radial)방향을 의미한다. 너클에 설치된 가속도계의 경우는 차량의

진행방향을 전·후방향으로 하고, 휠 허브의 축과 평행한 방향을 좌·우방향으로 하였다. 시험차량의 ABS(anti lock brake system) 센서에서 발생하는 펄스신호로부터 스틸휠의 회전속도를 측정하였다. 시험차량의 주행속도와 휠 회전수의 관계를 Table 1에 나타내었다.

정속주행시험은 시험차량의 주행 속도를 100 kph, 110 kph, 120 kph 그리고 130 kph 각각에 대하여 정속으로 20초 이상 운전하여 획득한 가속도 신호를 스펙트럼 분석하였다. 그리고 가속주행시험에서는 시험차량의 속도를 80 kph에서 140 kph까지 가속하는 동안 획득한 가속도 신호와 ABS 센서 펄스신호를 이용하여 오더 분석(order analysis)를 실시하였다.

조향 휠과 스틸휠의 진동모드를 분석하고 진동이 전달되는 경로를 추정하기 위해 충격햄머시험을 실시하였다.<sup>5)</sup> Fig. 1과 같이 가속도계를 부착한 상태에서 조향휠의 하단부와 스틸휠의 측면을 충격가진하였다.

마지막으로 시험차량에서 스틸휠이 서스펜션 디스크/허브에 체결될 때 볼트의 조임 토크(torque)를 7 kgf·m, 11 kgf·m 그리고 20 kgf·m로 하여 각각의 경우에 대하여 정속주행시험 및 가속주행시험을 실시하였다. 참고로 시험차량의 정비지침서에서 권

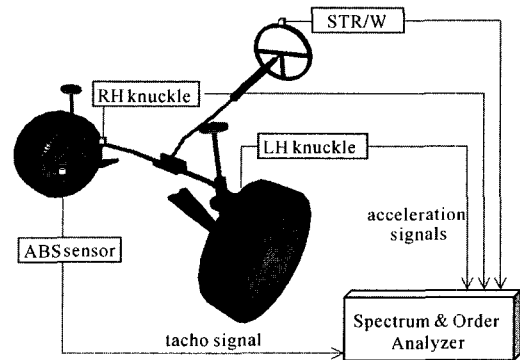


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Table 1 Correlation between vehicle's speed and its wheel speed

Vehicle speed	Revolution speed
100kph	984rpm(16.4Hz)
110kph	1080rpm(18.0Hz)
120kph	1164rpm(19.4Hz)
130kph	1254rpm(20.9Hz)

장하는 조임 토크는 10 ~ 11 kgf · m이다. 또한 체결력이 동일한 스틸휠에 대하여 스틸휠 직경의 변화에 대한 조향휠 진동특성 변화를 분석하기 위한 시험도 실시하였다. 즉 11 kgf · m의 체결력에 대하여 스틸휠의 직경을 13 in와 14 in로 하여 정속주행시험과 가속주행시험을 실시하였다.

### 3. 시험결과 및 분석

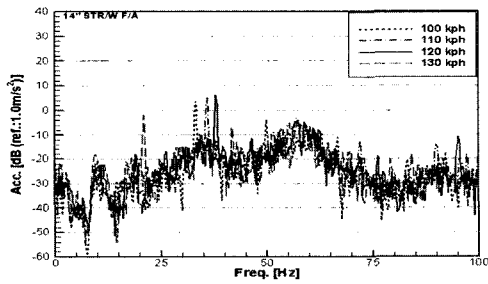
#### 3.1 조향휠 진동현상 분석 시험

시험차량이 특정한 속도로 주행될 때 발생하는 조향휠 진동의 특성을 분석하기 위해 14 in 스틸휠을 11 kgf · m의 체결력으로 장착하여 정속주행시

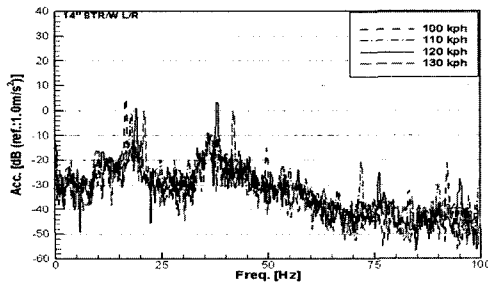
험과 가속주행시험을 각각 실시하였다. 시험이 진행되는 동안 운전자는 조향휠 진동에 대한 주관적인 평가를 동시에 실시하였다.

운전자의 주관적인 평가에 의하면 시험차량의 조향휠 진동은 120 kph 전 · 후의 속도로 주행할 때 발생하고 130 kph 이후에서는 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

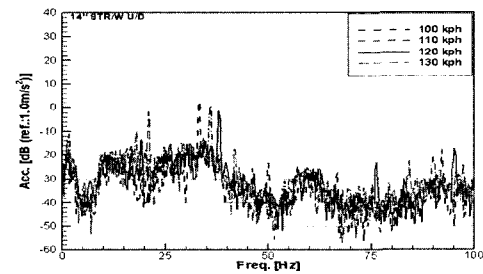
Fig. 2는 정속주행 시 조향휠의 상단부에서 발생하는 각 방향의 가속도 스펙트럼을 주행속도 별로 구분하여 나타낸 것이다. Fig. 2에서 16 Hz ~ 21 Hz 영역에서 나타나는 피크들(peaks)은 타이어 회전 1차 오더(order) 성분의 진동이고, 32 Hz ~ 42 Hz 영역은 타이어 회전 2차 오더 성분에 의한 진동이다.



(a) Fore-aft direction

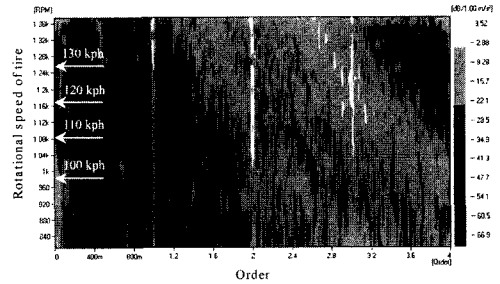


(b) Left-right direction

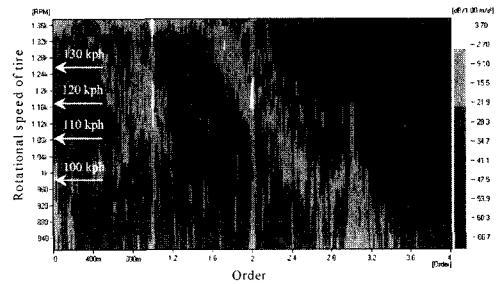


(c) Up-down direction

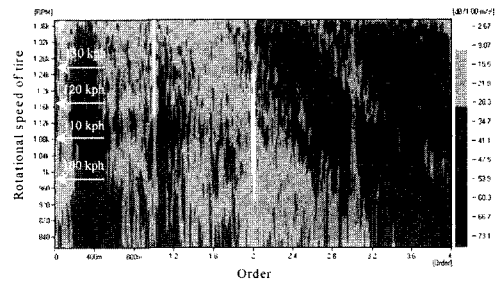
Fig. 2 Spectrums of the steering wheel vibration obtained by the constant velocity driving test



(a) Fore-aft direction



(b) Left-right direction



(c) Up-down direction

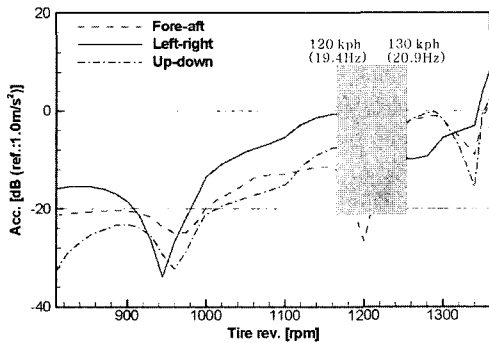
Fig. 3 Order analysis of the steering wheel vibration obtained by the run-up driving test

Fig. 2의 스펙트럼에서 나타나는 주요한 피크들 (peaks)에 대하여 타이어 회전 오더와 차량의 속도의 관계를 Table 2에 나타내었다.

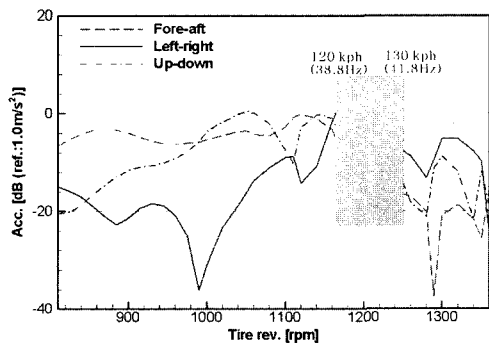
Fig. 3은 시험차량의 주행속도를 80 kph에서 140 kph까지 점진적으로 가속하면서 얻은 ABS 센서의 Tacho 신호와 조향휠의 가속도 신호를 이용하여 오더 해석(order analysis)한 결과를 나타낸 것이다.<sup>6)</sup> Fig. 3에서 시험차량의 주행속도와 타이어 회전수의 관계는

Table 2 Peak values of the spectrums in Fig. 2 (dB ref.: 1.0m/s<sup>2</sup>)

Direction \ Order Speed	Fore-aft		Left-right		Up-down	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
100kph	-	3.8	4.9	-	-	2.6
110kph	-	5.3	-0.9	-	-	0.6
120kph	-	6.1	1.0	3.3	-	-1.3
130kph	-2.0	-	-0.3	-0.3	-1.5	-



(a) 1st order



(b) 2nd order

Fig. 4 Order tracking data with respect to the rotational speed of the tire

$$speed \approx \frac{rev. of tire (rpm)}{9.75}$$

Fig. 4는 Fig. 3에서 타이어 회전수의 1차 오더와 2차 오더 성분을 추적(order tracking)하여 나타낸 것이다. 즉 Fig. 4는 타이어 회전 오더에 대한 진동 값을 차량의 속도와 측정방향 별로 구분하여 나타낸 그래프이다.

정속주행시험과 가속주행시험으로 얻은 Table 2와 Fig. 3 그리고 Fig. 4로부터 특정 주행속도 구간 (120 kph ~ 130 kph)에서 운전자가 느끼는 조향휠 진동은 타이어 회전수의 2차 오더 성분의 전·후 및 좌·우 방향 진동과 가장 유사한 패턴을 가짐을 알 수 있다.

충격햄머 시험으로 구한 조향휠 자체의 주파수 응답함수는 Fig. 5와 같고, 시험차량의 조향휠은 9.5 Hz 과 34.5 Hz 그리고 57.0 Hz에 고유진동수가 존재한다.<sup>7)</sup> 특히 조향휠의 2차 고유진동수(34.5 Hz)는 타이어 회전의 2차 성분의 가진 주파수 영역에 있고, 전·후와 좌·우 그리고 상·하 모드가 연성(coupling)되어 있다.<sup>8)</sup>

좌·우 스티어링의 측면을 충격햄머 가진하였을 때 조향휠의 좌·우방향 가속도 응답 주파수 응답함수는 Fig. 6과 같다. Fig. 6으로부터 36.0 Hz 근처에 스티어링의 측면 가진에 대한 조향계의 공진이 있음을 알 수 있고, 왼쪽보다는 오른쪽 스티어링에 의한 진동 전달률이 약 2배 정도 큼을 알 수 있다.

시험차량에 정상적인 체결력인 11 kgf·m로 장착된 좌·우의 스티어링을 각각 충격가진하여 얻은 주파수 응답함수를 Fig. 7에 나타내었다. 좌·우 스티어링 모두 전후방향과 좌우방향의 진동모드가 24.0

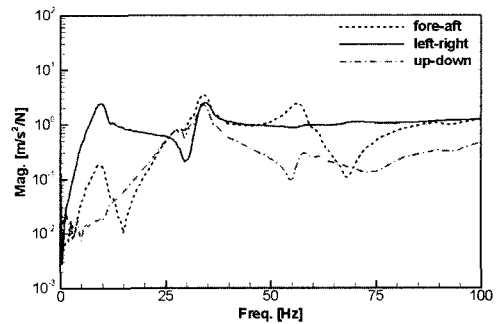


Fig. 5 FRF of the steering wheel

Hz와 36.0 Hz 근처에서 연성되어 있음을 알 수 있고, 타이어 회전의 2차 성분의 가진 영역에 있는 36.0 Hz는 왼쪽(LH: left hand)보다 오른쪽(RH: right hand) 스틸휠의 진동 전달율(transmissibility)이 더 크다는 것을 알 수 있다.

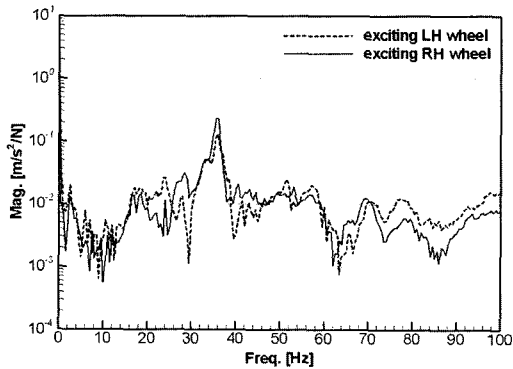
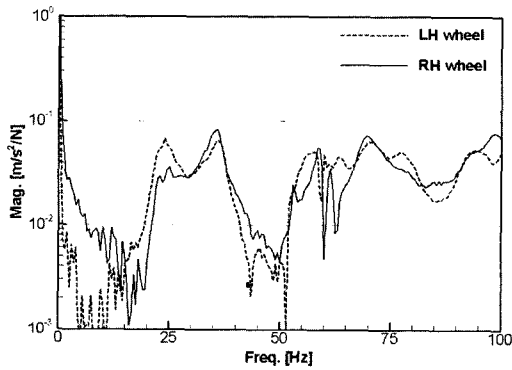
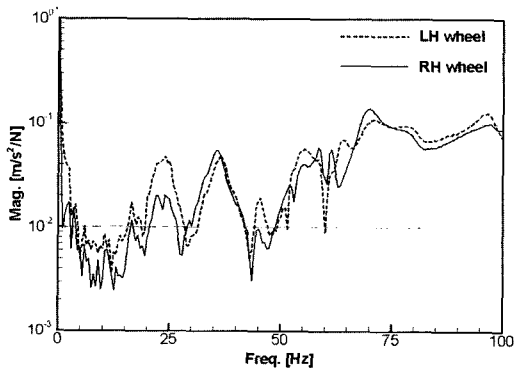


Fig. 6 Transfer FRF between the steering wheel vibration and the steel wheel exciting



(a) Fore-after mode



(b) Left-right mode

Fig. 7 FRFs of the steel wheels

가속주행 중에 좌·우의 너클(knuckle) 위치에서 발생하는 진동의 크기를 타이어 회전 차수별로 구분하여 Fig. 8에 나타내었다. 타이어 회전 1차 성분뿐만 아니라 2차 성분도 오른쪽의 스틸휠에서 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 9는 시험차량의 스틸휠이 정상적인 체결력(11 kgf·m)으로 장착되었을 때 서스펜션 디스크면에 접촉하는 부위를 특수 물감을 이용하여 나타낸 것이다. 검정색이 짙어질수록 스틸휠과 서스펜션 디스크가 더욱 강하게 압착되어 접촉하는 것을 의미한다. Fig. 9에서 우측하단 부분이 좌측상단 부분에 비하여 접촉면이 고르지 못하고, 접촉되는 면적도 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이것은 4개의 볼트를 동일한 조임 토크로 체결하더라도 스틸휠의 변형이 균일하지 않음을 의미한다. 그리고 이러한 불균일한 변형에 의하여 스틸휠의 회전축과 서스펜

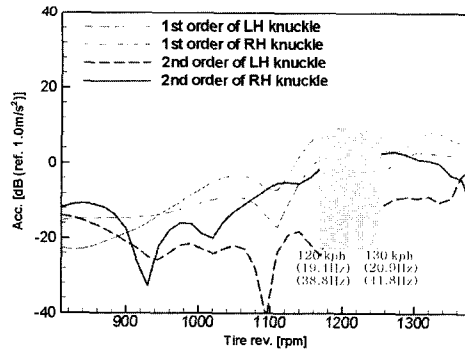


Fig. 8 Order tracking data of the knuckle vibration

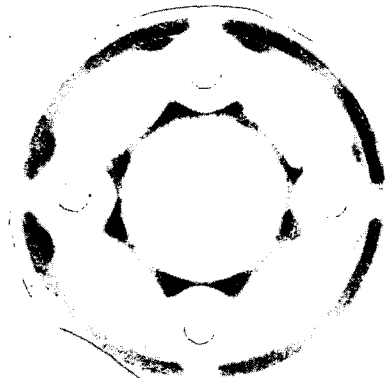


Fig. 9 Picture of the contact area between the steel wheel and the suspension disk

선 허브의 회전축이 어긋나게(misalignment) 되고, 이로 인해 타이어 회전수의 배수에 해당하는 주파수들의 동하중이 스틸휠을 전·후와 좌·우 방향으로 가진하는 현상을 예측할 수 있다.<sup>4)</sup>

**3.2 스틸휠 체결력에 따른 조향휠 진동의 변화**

본 연구에서는 시험차량에 장착되는 스틸휠의 체결력 변화에 따른 조향휠에서 발생하는 진동의 크기를 비교하고 진동현상을 분석하기 위한 시험을 실시하였다. 또한 동일한 체결력에 대하여 스틸휠의 직경의 크기가 조향휠 진동에 미치는 영향을 분석하기 위한 시험도 실시하였다.

직경이 14 in인 스틸휠이 시험차량에 장착될 때 체결되는 볼트의 조임토크를 7 kgf·m, 11 kgf·m 그리고 20 kgf·m로 하여 정속주행시험 및 가속주행시험을 실시하였다. 그리고 직경이 13 in인 스틸휠

을 11 kgf·m의 조임토크로 시험차량에 장착하여 동일한 시험을 실시하였다.

Fig. 10은 스틸휠의 체결력과 직경의 변화에 따른 조향휠의 좌·우방향 진동의 크기를 정속주행 속도 별로 나타낸 것이다. 여기서 피크 값의 크기는 조향휠 좌·우방향 진동 스펙트럼에서 타이어 회전수의 2차 성분의 피크 값을 의미한다. Fig. 11은 가속주행 시험 중에 조향휠의 좌·우방향으로 발생하는 진동을 타이어 회전2차 성분으로 추적(tracking)하여 나타낸 것이다.

Fig. 10과 Fig. 11로부터 스틸휠의 체결력이 크거나 스틸휠의 직경이 작은 경우에 특정한 주행속도(120 kph)에서 조향휠 진동이 줄어드는 것을 알 수 있다. 스틸휠의 체결력이 어느 정도 이상으로 커지게 되면 접촉부의 변형이 전체적으로 일정하게 되어 축 어긋남(misalignment)의 효과는 작아지게 됨을 판단할 수 있다. 그리고 스틸휠의 직경이 작으면 회전관성도 작아지기 때문에 동일한 축 어긋남에 대해서 진동 유발효과가 상대적으로 작게 된다. 이러한 원리로부터 직경이 작은 스틸휠에 대해서는 조향휠 진동이 작게 됨을 짐작할 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 나타내는 조향휠 진동의 경향은 운전자에 의해 주관 평가된 것과 잘 일치하였다.

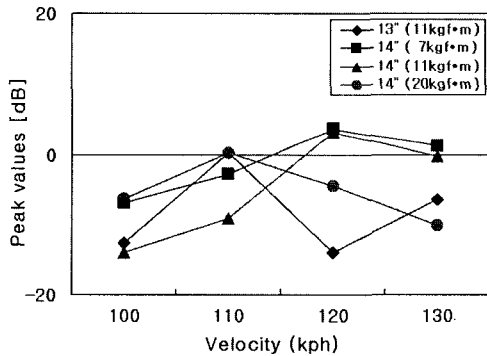


Fig. 10 Peak values with respect to 2<sup>nd</sup> order of the tire speed on the spectrums obtained by the constant velocity driving test (dB ref.:1.0 m/s<sup>2</sup>)

**4. 결론**

본 연구에서는 스틸휠이 장착된 시험차량이 특정한 속도로 주행할 때 발생하는 조향휠 진동의 발생 원인과 전달경로를 분석하기 위해 정속주행시험과 가속주행시험 그리고 충격햄머시험을 실시하였다. 그리고 스틸휠의 체결력과 스틸휠의 직경 크기에 따른 조향휠 진동특성을 분석하기 위해 정속주행시험과 가속주행시험을 실시하였다. 이상의 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 스틸휠이 장착된 시험차량은 주행속도가 120 kph ~ 130 kph일 때 조향휠의 진동이 크게 발생한다는 것을 운전자에 의해 주관평가 되었다.

2) 특정한 속도에서 크게 발생하는 시험차량의 조향휠 진동은 타이어 회전수의2차 오더 성분이 스틸휠과 조향휠 시스템의 공진주파수 영역을 지날

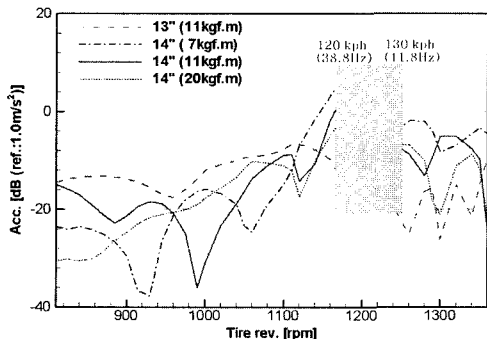


Fig. 11 Comparison of 2<sup>nd</sup> order tracking data according to changes of the fastening torque of the wheel mounting bolts and the diameter of the steel wheels

때 나타나는 현상임을 시험 결과로부터 유추할 수 있었다.

3) 조향휠 진동 중에서 타이어 회전수의 배수 성분은 스틸휠의 회전축과 디스크 허브 회전축의 어긋남(misalignment) 현상에 기인된 것으로 판단된다. 또한 이러한 축 어긋남 현상은 스틸휠과 허브 접촉면의 접촉압력 분포가 불 균일하게 된 데서 비롯된 것으로 판단된다

4) 스틸휠이 서스펜션 디스크에 장착될 때 체결 볼트의 조임 토크가 작은 경우에 접촉면의 불 균일한 변형의 정도가 커짐으로 인해 조향휠 진동은 더욱 크게 발생하였다.

5) 직경이 작은 스틸휠에 대해서는 회전관성의 감소 또는 접촉면의 불 균일성의 감소로 인해 조향휠 진동이 크게 감소하였다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부 국가지정연구실 사업 (과제번호 M10203000017-02J0000-00910)의 지원으로 이루어졌습니다.

## References

- 1) M. G. Kim, W. S. Yoo, J. H. Kim, "Evaluation of Ride Comfort Considering Seat and Ride Vibration Modes," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.93-99, 2002.
- 2) M. J. Griffin, Handbook of Human Vibration, Academic Press, 1990.
- 3) M. A. Demers, "Steering Wheel Vibration Diagnosis," SAE 2001-01-1607, 2001.
- 4) V. Wowk, Machinery Vibration: Measurement and Analysis, McGraw-Hill, pp.128-142, 1991.
- 5) K. G. McConnel, Vibration Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, pp.475-487, 1995.
- 6) R. B. Randall, B. Tech, Frequency analysis, B&K, pp.211-226, 1987.
- 7) Y. S. Lee, S. Y. Song, M. H. Choi, C. H. Ryu, Y. W. Kim, "Vibration Characteristics of a Passenger Car Steering Column", Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.130-141, 2000.
- 8) N. M. Maia, J. M. Silva, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press Ltd., pp.87-122, 1998.