

조향휠 진동의 안락성 평가를 위한 주파수 가중치 곡선 결정

Determination of the Frequency Weighting Curves for the Estimation of Discomfort by the Steering Wheel Vibration

홍석인* · 장한기** · 김승한***

Seok-In Hong, Han-Kee Jang and Seung-Han Kim

Key Words : Steering wheel vibration(조향휠 진동), Equal sensation contour(등감각 곡선), Frequency weighting curve(주파수 가중치 곡선), Magnitude estimation method(감각크기 평가법).

ABSTRACT

This study aims to derive frequency weighting curves for the estimation of driver's discomfort by steering wheel vibration in the vertical and rotational direction with respect to a steering column. Subjective tests for the determination of equal sensation curves, inverse of frequency weighting curves, for the two kinds of vibrations were performed using the sinusoidal signals with reference amplitudes from 0.2 m/s² to 0.4 m/s² in the frequency range from 5 Hz to 100 Hz. Twelve subjects joined at the tests, and median values of the twelve judgments were used to determine the frequency weighting curves. Second experiment was followed to determine relative magnitude between the two frequency weighting curves by direct comparison of discomfort due to the two kinds of vibrations at 50 Hz, which showed discomfort by the rotational vibration was 1.5 times of that by the vertical vibration.

1. 서 론

최근 '안락성'이란 항목은 소비자가 차를 구매함에 있어서 고려하는 중요한 항목 중의 하나로 자리잡고 있다. 진동은 운전자의 안락성에 크게 영향을 주며, 이러한 진동은 시트와 등받이를 통해 몸으로, 페달과 바닥을 통해 발로, 핸들과 기어를 통해 손으로 전달된다. 인체의 안락성에 가장 큰 영향을 주는 시트의 승차감에 관한 연구는 많이 수행되었으나, 조향휠 진동으로 인한 안락성에 관한 연구는 최근에 들어 관심대상으로 부각되고 있다.

진동으로 인한 인체반응을 평가하기 위해서는 물리적 진동량을 체감 진동량으로 환산해 주어야 한다. 이러한 목적으로 많은 주파수 가중치 함수들이 개발되어 그 목적에 맞게 널리 사용되고 있다⁽¹⁻³⁾. 그러나 승용차의 조향휠 진동에 관한 주파수 가중치 함수를 도출하는 연구는 인체 시작단계이며 아직 확립된 것이 없다⁽⁴⁵⁾. ISO 5349-1에서는 수완계(hand-arm system) 진동에 대한 인체반응을 평가하는 방법을 제시하고 있으나, 이는 동력공구의 진동으로 인한 인체반

응을 평가하기 위한 것으로 조향휠을 쥐고 운전하는 자세와는 많은 차이를 보인다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 조향휠의 수직방향진동(shake)과 회전진동(shimmy)에 대한 주파수 가중치 추출하기 위한 주관평가를 각각 수행하였고, 이어서 두 가지 진동이 동시에 존재할 때 상대적인 불편함을 정량적으로 평가할 수 있도록 두 가지 진동에 의한 불편함을 상대평가하는 시험도 수행하였다. 이러한 시험의 결과는 조향휠의 수직방향 진동과 회전진동에 관한 인체의 주파수 가중 특성을 정량적, 정성적으로 평가하는데 도움을 줄 것이다.

2. 실험장치 구성

조향휠 진동의 안락성 평가를 위해 본시험에 사용된 시험장치는 Fig. 1과 같다. 실제 운전하는 자세와 유사하도록 시트가 설치된 승용차의 차체 골격(BIW)를 정반에 고정시키고, 실제 차량과 동일한 위치에 조향휠을 설치하였다. 조향휠의 진동이 차체에 직접 전달되는 것을 막기 위해 조향휠 지지대와 차체는 각각 별도로 정반에 고정되었다. 피시험자가 편안한 운전자세를 취할 수 있도록 시트는 위치조절과 등받이의 각도 조절이 가능하도록 하였다. 가진기는 조향휠이 조향축에 대해 수직방향과 회전방향으로 가진될 수 있고

* 고등기술연구원 제품기술연구센터 소음진동팀
E-mail : dorry@iae.re.kr
Tel : (031)330-7455, Fax : (031) 330-7116

** 고등기술연구원 제품기술연구센터 소음진동팀

*** (주) 아미

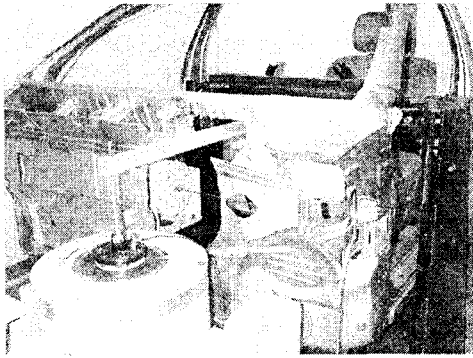


Fig.1 Experimental setup for the generation of steering wheel vibration in the vertical and rotational direction

록 두 개를 설치하였다.

조향휠은 직경이 330mm, 핸들의 직경이 30mm이며, 알루미늄으로 제작하여 100Hz 이하의 관심 주파수 범위에서 공진이 발생하지 않도록 하였다. 조향축의 경사각은 23°로 유지하였다. 두 개의 가속도계(B&K 4383)를 핸들 그립부분의 바로 아래에 장착하여 조향휠의 수직방향 진동과 회전 진동을 측정하였다. 가진신호는 신호발생기(B&K 1049)를 이용하여 가진기앰프에 부과되었으며, 가속도 신호는 LabVIEW를 이용하여 자체 개발한 프로그램과 DAQ 보드(National Instrument, PCI-6052E)를 사용하여 측정하였다.

3. 등감각곡선 추출 시험

본 시험은 관심주파수 범위에서 등감각곡선을 얻기 위한 시험으로, 등감각곡선은 동일한 크기의 안락성 또는 불편함을 주는 자극(진동)의 크기를 주파수 축에 대해 연결한 곡선을 의미한다.

3.1 시험방법 및 신호

감각 크기 평가법(magnitude estimation method)를 이용하여⁽⁷⁾, 기준신호로 인한 불편함과 동일한 크기의 불편함을 주는 테스트 신호의 크기를 찾아내는 과정을 반복하였다. 먼저 기준신호를 피시험자에게 10초간 주고, 즉시 주파수를 변화시킨 테스트 신호를 주었다. 테스트 신호의 크기를 변화시켜가면서 피시험자에게 기준신호와 비슷한 크기의 불편함을 주는 테스트 신호의 크기를 찾도록 하였다. 만일 30초 이내에 기준신호가 주는 불편함과 비슷한 불편함을 주는 테스트 신호의 크기를 찾지 못하면, 기준신호로 인한 불편함을 상기 시켜주기 위해 다시 기준신호를 피시험자에게 10초간 주고 테스트 신호의 크기를 찾도록 하였다.

조향휠 진동의 측정결과를 다룬 연구들을 보면, 조향휠 진동과 관련된 피크가 뚜렷하게 나타나는 주파수 범위는 30~60 Hz 정도이다^(8~10). 따라서, 본 시험에서는 주파수 영역을

Table 1 Initial reference signals for the equal sensation tests

	Frequency (Hz)	Amplitude (m/s ² , r.m.s.)
Reference-1	20	0.2
Reference-2	10	0.2
Reference-3	10	0.4

Table 2 Basic informations of the subjects and the postures with the standard deviation.

	Vertical vibration	Rotational vibration
Age(yr)	31.5(3.75)	31.1(3.23)
Height(cm)	175.4(6.53)	175.8(5.13)
Weight(kg)	71.6(9.93)	74.2(11.22)
Arm angle(°)	130.8(8.51)	136.2(9.40)
Wrist angle(°)	170.7(8.71)	167.7(9.10)
Back angle(°)	23.0(3.99)	27.8(4.52)
Shoulder angle(°)	38.0(4.96)	38.0(4.70)

10~100 Hz로 하여 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수를 대상 주파수로 설정하였다(5, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100 Hz). 초기 기준신호의 크기는 총 3가지로 실제 조향휠에서 측정된 진동량의 수준을 포함하도록 결정하였으며, Table 1에 정리한 바와 같다.

기준신호의 주파수와 테스트 신호의 주파수가 1 옥타브 이상의 차이를 보이면 두 신호의 불편함을 비교하기가 어려워진다⁽⁴⁾. 따라서 기준신호와 테스트 신호의 주파수 차이를 1 옥타브 밴드 내로 한정시켜 시험을 진행하였다. 먼저 초기 기준신호를 기준으로 하고 비교대상인 테스트 신호를 1 옥타브 범위 내에서 랜덤하게 선택하여 시험을 수행하였다. 1 옥타브 내의 모든 시험이 끝나면, 테스트 신호 중에서 주파수 크기가 가장 큰 테스트 신호를 새로운 기준신호의 주파수로 설정하고, 크기도 이전 단계에서 피시험자가 결정한 크기를 새로운 기준신호의 크기로 설정하여, 다음 옥타브 밴드에 대해 시험을 실시하였다. 이러한 방식으로 테스트 신호의 모든 주파수에 대해 주파수를 증가시키고(upward) 다시 초기 기준신호의 주파수까지 감소시키면서(backward) 두 번 시험을 진행하였고, 두 차례 얻어진 진동의 크기를 평균하여 등감각곡선 추출에 사용하였다.

3.2 피평가자(subject)

수완계 관련 질환이 없는 12명의 건강한 남성이 본 시험에 참여하였으며, 이들의 정보는 Table 2로 정리하였다.

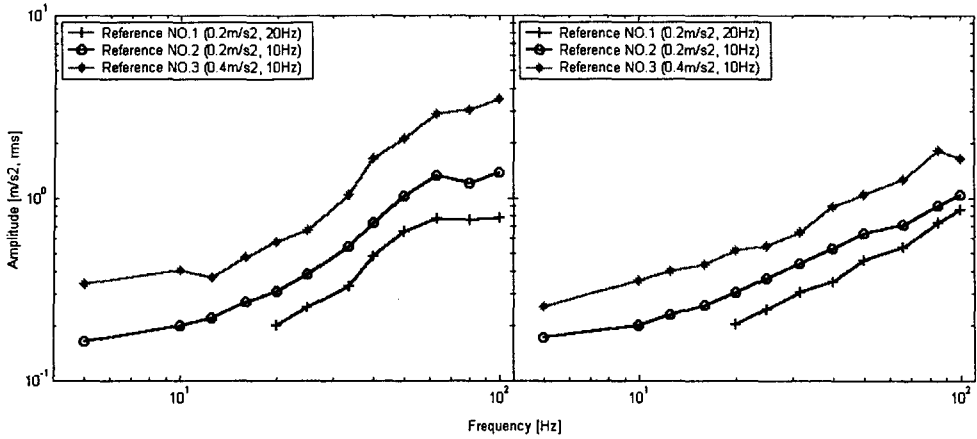


Fig.2 Equal sensation contours of vertical(left) and rotational(right) steering wheel vibrations

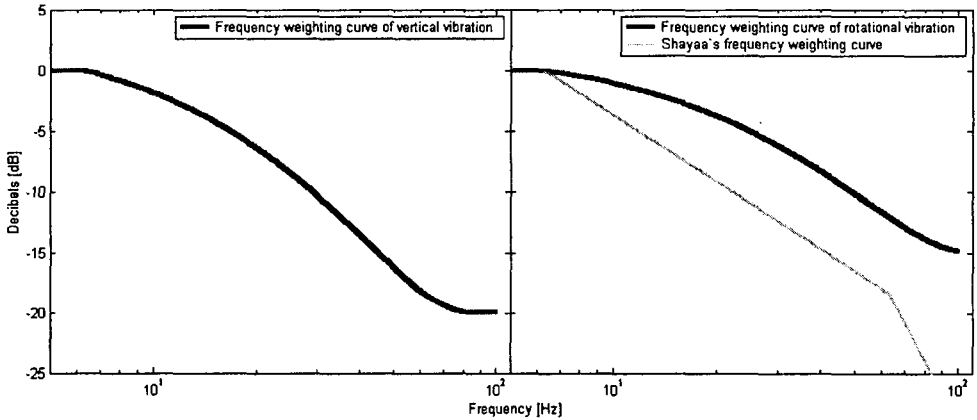


Fig.3 Frequency weighting curves for the vertical(left) and rotational(right) steering wheel vibration

3.4 결과분석

조향휠의 수직방향 진동과 회전 진동에 대한 등감각곡선을 Fig. 2에 도시하였다. 이 등감각곡선은 12명의 피시험자가 판단한 결과의 중간값(median)들을 연결한 곡선이다. 심리물리학적 법칙(Psychophysical law)이 평균값(average)보다 중간값(median)에 대해서 잘 표현되기 때문에 등감각곡선에서 중간값을 사용하였다⁽⁷⁾.

Fig. 2의 등감각곡선에 역수를 취하고 이를 가장 낮은 주파수의 진동량으로 정규화(normalize)시킨 후, 평균을 취해 2차 함수로 근사화시키면 식 (1), (2)와 같은 함수로 표현된다.

$$W_v = \begin{cases} 0 [dB], & (-6.3 Hz) \\ 0.0033f^2 - 0.5551f + 3.3662 [dB], & (6.3 \sim 80 Hz) \\ -19.92 [dB], & (80 \sim 100 Hz) \end{cases} \quad (1)$$

$$W_r = \begin{cases} 0 [dB], & (-6.3 Hz) \\ 0.00153f^2 - 0.3144f + 1.9223 [dB], & (6.3 \sim 100 Hz) \end{cases} \quad (2)$$

여기서 W_v 와 W_r 은 각각 수직방향과 회전방향의 주파수 가중치를 나타내며, f 는 주파수이다. Fig. 3은 식 (1)과 (2)에서 표현된 주파수 가중치 함수를 도시한 것이다. 수직방향 진동의 경우는 6.3 Hz와 80 Hz를 기준으로 3개의 구간으로 나누어지며, 회전진동의 경우는 6.3 Hz에서 두 구간으로 나누어진다. Miwa의 등감각곡선에 의하면 6.3 Hz이하의 주파수 범위에서는 주파수가 변하더라도 체감진동량은 변하지 않는다고 하였기 때문에 6.3 Hz 이하의 범위에서는 주파수 가중치가 동일한 것으로 설정하였다⁽¹¹⁾.

Table 3 Reference signals for the discomfort comparison test

	Frequency (Hz)	Type of Vibration	Amplitude (m/s ² , r.m.s)
Reference-1	50	Vertical	0.66
Reference-2			1.02
Reference-3			2.11
Reference-4	50	Rotational	0.45
Reference-5			0.64
Reference-6			1.03

4. 상대적인 안락성 비교 시험

4.1 시험방법 및 신호

본 시험은 수직방향 진동과 회전 진동의 불편함의 상대적인 크기를 결정하기 위한 시험이다. 시험 방법은 등감각곡선 추출시험과 거의 동일하다. 먼저 기준신호(수직방향 또는 회전 진동)를 피시험자에게 주고, 다시 진동 방향을 바꾼 테스트 신호를 주어서 기준신호와 비슷한 불편함을 주는 테스트 신호의 크기를 피시험자가 찾도록 하였다. 이 시험 역시 등감각곡선 추출시험에 참가한 12명의 피시험자가 그대로 참여하였다.

기준신호는 Fig. 2의 등감각곡선에서 50 Hz의 가속도 값을 사용하였으며 이를 Table 3에 정리하였다. 기준신호 1~3은 수직방향 진동에 대한 회전진동의 상대적인 크기를 결정하는 데 사용하였으며, 기준신호 4~6은 반대로 회전 진동에 대한 수직방향 진동의 상대적인 크기를 결정하는데 사용되었다. 중복실험을 한 이유는 일종의 크로스 체크(cross check)를 위해서이다.

4.2 결과분석

수직방향 진동과 회전진동의 상대적인 안락성 비교 시험의 결과는 Fig. 4에 도시하였다. 사분위 분석(quartile analysis)에 의해 총 18개의 값들(25%, median 또는 50%, 75% 각각 6개)로 구성되어 있으며, 이들 중 중간값을 이용하여 수직방향 진동과 회전진동의 상대적인 크기의 비를 구하면 Fig. 4에서 보인 직선의 기울기와 같다. 이 기울기는 50 Hz의 조향휠 진동에서 회전 진동 1.0의 크기의 가속도가 주는 불편함이 수직방향 진동 1.5의 크기의 가속도가 주는 불편함과 비슷하다는 것을 보여준다. 즉, 50 Hz의 동일한 진동량을 갖는 조향휠 진동에서 회전 진동으로 인한 불편함이 수직방향 진동으로 인한 불편함보다 1.5배가 크다는 것을 알 수 있다.

이를 이용하면 Fig. 5와 같이 Fig 3에서 보여준, 독립적으로 도출된 두 개의 주파수 가중치 곡선을 상대적인 크기를

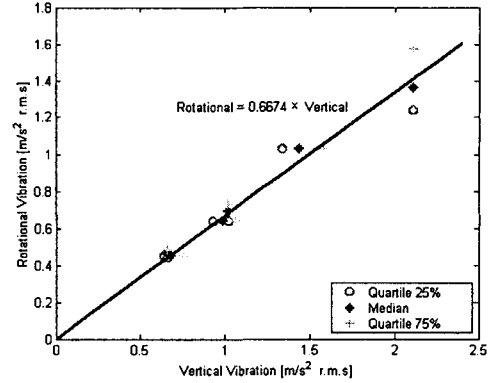


Fig.4 Linear regression of the ratios between the vertical and rotational vibration magnitude that yield the same amount of discomfort

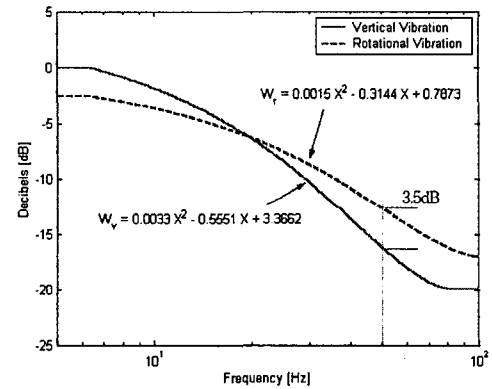


Fig.5 Quantitative comparison of two kinds of frequency weighting curves

고려하여 그릴 수 있다. 20 Hz를 경계점으로 하여 동일한 크기의 진동량에 대해 20 Hz 이하에서는 수직방향 진동이 회전 진동보다 더 많은 불편함을 주며, 20Hz 이상에서는 회전 진동이 수직방향 진동보다 더 많은 불편함을 준다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 조향휠 진동에 대한 인체 반응의 주파수 특성을 파악하기 위해 3개의 초기 기준신호에 대해 등감각곡선 추출 시험을 수행하여 수직방향 진동과 회전진동의 주파수 가중치 곡선을 각각 작성하였다. 또한 두 개의 주파수 가중치 곡선의 상대적인 크기를 비교하기 위해 안락성 비교 시험을 수행하여 50 Hz의 동일한 진동량을 갖는 조향휠 진동에서 회전 진동이 수직방향 진동보다 불편함을 약 1.5배 더 주는 것을 알았다. 이를 통해 두 가지 종류의 진동에 대한 주파수 가중치 함수를 도출해 낼 수 있었다.

실제 차량에서 두 가지 진동이 공존할 때, 이 주파수 가 중치 함수를 활용하면 어떠한 진동이 운전자에게 더 큰 불편함을 주는지 정량적으로 판단할 수 있게 되며, 나아가서는 저감대상이 되는 조향휠 진동의 우선순위를 판단하는 기준으로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press.
- (2) ISO 2631-1, 1997, Mechanical Vibration and Shock : Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration.
- (3) BS 6841, 1987, Guide to the Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock.
- (4) Shayaa, M. S., Giacomini, J. A., Dormegnie, E. and Richard, L., 2001, Human Perception of Sinusoidal Rotational Steering Wheel Vibration, 36th UK Group Conference on Human Response to Vibration, Farnborough, UK.
- (5) Morioka, M. and Griffin, M. J., 2003, Effects of Grip Force and Hand Position on Evaluation of Discomfort due to Vertical Steering Wheel Vibration, IAE Technical Report P2128-02-MR-03.01
- (6) ISO 5349-1, 2001, Mechanical vibration - Measurement and Evaluation of Human Exposure Hand-transmitted Vibration. Part 1 : General Requirements.
- (7) Stevens, S. S., 1986, Psychophysics - Introduction to its perceptual, neural and social prospects, New Brunswick.
- (8) 이두호, 김명업, 2000, 설계민감도 해석을 이용한 승용차의 스티어링 휠 아이들 진동 개선, 한국자동차공학회 논문집, Vol.8, No.2, pp129-137.
- (9) Demers, N. A., 2001, Steering Wheel Vibration Diagnosis, SAE Paper No.2001-01-1607.
- (10) Amman, S., Pielemeier, B., Snyder, D. and Toting, F., 2001, Road Vibration Investigation Using the Ford Vehicle, SAE Paper No.2001-01-1572.
- (11) Miwa, T., 1967, Evaluation Methods for Vibration Effect, Part 3 : Measurements of Threshold and Equal Sensation Contours on Hand for Vertical and Horizontal Sinusoidal Vibration, Industrial Health, Vol.5, pp213-220.