

## 조향 휠 수직 진동의 체감량 평가에 관한 연구

장 한 기<sup>\*1)</sup> · 홍 석 인<sup>2)</sup>

고등기술연구원 [(현) 두산인프라코어(주)]<sup>1)</sup> · 고등기술연구원<sup>2)</sup>

### A Study on the Evaluation of Sensation Magnitude of Vertical Vibration of a Steering Wheel

Han-Kee Jang <sup>\*1)</sup> · Seok-In Hong <sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup>Institute for Advanced Engineering, 633-2 Goan-ri, Baegam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi 449-863, Korea

(Received 16 April 2007 / Accepted 20 June 2007)

**Abstract** : This study aims to find equivalent comfort contours, reciprocal of frequency weighting curves, for vertical steering wheel vibration. Psychophysical responses were measured from twelve male subjects by using magnitude estimation of relative discomfort due to vertical steering wheel vibrations of magnitude of 0.1 to 1.58 m/s<sup>2</sup> in the frequency range of 4 to 250 Hz. Relative discomfort were estimated with a reference vibration of 0.4 m/s<sup>2</sup> at 31.5 Hz. Equivalent comfort contours were produced from the median of sensation magnitudes judged by twelve subjects, which showed variation in the shapes with increase of vibration magnitude. A shape of the contour came close to the perception threshold curve with decrease of vibration magnitude. When the vibration magnitude increases, the shape changed close to those in the references of Hong and et al (2003). It is also recommended frequency weighting curves for vertical steering wheel vibration must be expressed as a function of vibration magnitude as well as frequency.

**Key words** : Steering wheel vibration(조향 휠 진동), Equal sensation curve(등 감각 곡선), Gripping condition(그립 조건), Subjective test(주관평가)

### 1. 서 론

차실 내에서 탑승자에게 전달되는 진동은 승차감에 악영향을 미치고 차량의 품질을 결정하는 주요한 요인이 된다. 차량에서의 진동의 전달경로는 시트와 바닥, 그리고 조향 휠인데, 과거에는 시트에서의 진동 전달이 주요 관심사였으며, 상당한 수의 연구가 진행되어 왔다.<sup>1)</sup> 이들 연구개발의 결과로서 시트를 통해 전달되는 진동은 상당히 저감되었다. 차실내 바닥의 진동과 조향 휠의 진동은 시트 진동에 비해 그 영향이 매우 적은 것으로 인식되어 주요 관심사에서 벗어나 있었지만, 최근에 들어서는 시트

의 성능 개선과 함께 관심 대상으로 부각되고 있다.<sup>2-4)</sup> Hong 등은 조향 휠에서의 수직 방향 진동(Vertical shake)과 회전방향 진동(Shimmy)에 대한 체감 특성 평가를 통해, 조향 휠 진동에 대한 주파수 가중치를 도출한 바 있다.<sup>2)</sup> 이 연구에서는 10 Hz, 0.2 m/s<sup>2</sup>의 진동을 기준으로 하여, 기준신호와 동일한 불편함을 주는 진동의 크기를 결정하는 방법(Magnitude production)을 통해 등 감각 곡선을 도출하고, 두 방향으로의 진동에 대해 5~100 Hz 범위의 주파수 가중치를 도출하였다. 한편 Giacomini 등은 조향 휠의 회전 진동(Shimmy)에 대하여 등감각 곡선을 추출하였는데, 이 연구에서는 63 Hz, 1 m/s<sup>2</sup>의 진동을 기준으로 하여 등 감각 곡선을 추정하였다.<sup>3)</sup> 이

\*Corresponding author, E-mail: hkjang77@hotmail.com

들이 실험을 수행한 주파수는 3~315 Hz 였다. 두 가지 연구에서 사용한 기준 가속도 신호는 다르지만, 등 감각 곡선이 커버하는 진동 크기의 범위는  $0.1 \text{ m/s}^2$ 부터  $2 \text{ m/s}^2$ 까지로 비슷하고, 주파수 가중치 곡선도 주파수에 따른 기울기에서 다소 차이가 있으나 유사한 경향을 보이고 있었다.

진동에 대한 인체의 반응을 정량화하는 최근의 연구 동향은, 주파수에 따른 특성뿐만 아니라 진폭에 대한 효과도 함께 고려하는 것이다. 과거에는 특정 크기의 입력을 기준으로 하여 등 감각 곡선을 추출한 후 역수(Reciprocal)를 취해 하나의 주파수 가중치로 사용하였다. 그러나 인체는 비선형성이 강해서 진동의 크기에 대한 반응이 일정치 않기 때문에,<sup>6)</sup> 관심 진동의 크기 범위가 넓어질수록 하나의 주파수 가중치로 인체의 특성을 대변하는 것이 어려워졌다. 결국, 기존의 주파수 가중치는 실험에 사용된 진동의 크기 범위 안에서 사용하는 것이 타당하며, 그렇지 않을 경우에는 해당 진동 범위에 대해 주관평가 실험을 별도로 진행하여 주파수 가중 특성을 도출하는 것이 필요하다. Morioka 등은 시트와 손, 발에서의 진동 인지 한계를 측정할 바 있는데,<sup>7)</sup> 이 연구를 보면 진동량이 인지한계 수준까지 작아지면, 기존의 주파수 가중치 특성과 매우 상이한 특성을 나타낼 수 있다. 즉, 진동의 크기가 매우 작아지면 체감 특성 역시 변화한다는 것을 보여주고 있는 것이다.

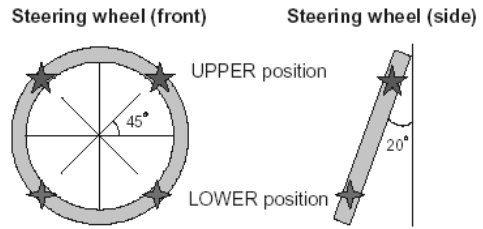
본 논문에서는 조향휠 수직 진동에 대한 인체의 체감 특성을 결정하는 것을 목표로 하고 있다. 특히 진동의 크기에 따라 주파수 가중 특성이 어떻게 변화하는지를 규명하고자 한다. 기존의 연구들<sup>2,3)</sup>에서 채택하였던, 동일한 감각의 크기를 주는 자극의 크기를 찾아나가는, 크기 도출법(Magnitude production) 대신에 자극에 대한 감각의 크기를 직접 평가하는 크기 추정법(Magnitude estimation)을 사용하여, 조향휠의 수직 진동에 대한 등감각 곡선을 추정하였다.

## 2. 실험장치 구성

조향휠 수직 진동의 안락성 평가를 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 운전자의 자세는 Fig. 1(a)에서와



(a) Gripping posture



(b) Inclination angle of the steering wheel

Fig. 1 Experimental setup for the subjective evaluation of steering wheel vibration in the vertical direction

같이 실제 차량 착석자세와 유사하도록 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 피실험자의 시각적인 효과를 배제하기 위하여, 가진기의 움직임을 볼 수 없도록 칸막이를 설치하였다. 본 연구에서는 실제 조향휠 대신에 나무로 제작된 핸들 형태의 모형을 사용하였다. 이 핸들을 잡는 위치는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 정하였으며, 옆에서 보았을 때의 경사각은  $20^\circ$ 로 정하였다. 실제 조향 휠 대신에 나무로 제작한 핸들을 사용한 이유는 본 연구에서의 진동 발생 주파수가 250 Hz에 이르기 때문이다. 차량에 사용되는 조향 휠의 경우 1차 공진 주파수가 수십 Hz에 지나지 않아서 250 Hz이내에 공진 주파수가 다수 존재하게 되며, 따라서 손으로 쥘 경우 공진 주파수가 불규칙하게 이동하므로 주관 평가 시 진폭 조절에 어려움이 있기 때문이다.

수직 방향 가진에는 Derritron VP30 가진기가 사용되었으며, 조향 휠 진동의 측정을 위하여 압전형 가속도계와 증폭기(B&K 2635)가 사용되었다. 신호의 발생과 측정에는 영국 사우스햄튼 대학교에서 개발한 HVLab system이 사용되었다.

본 연구에서는 악력의 크기에 따른 체감 특성의

변화를 관찰하기 위해 3가지 크기의 악력을 선정하였다. 악력의 크기를 최소(Minimum), 가볍게 쥐는 상태(Light), 강하게 쥐는 상태(Tight) 그림으로 나누어서, 각각 악력의 크기가 0 N, 49 N, 98 N이 되도록 하였다. 악력의 크기는, 실험 시작 직전에 피 실험자가 악력 게이지(모델명: Jamar Hand Dynamometer)를 사용하여 악력을 측정한 후에, 해당 악력이 나오는 수준을 기억하여 실험 기간 동안 유지하도록 하였다. 'Minimum' 그림의 경우 악력이 발생하지 않는 수준에서 핸들 위에 손을 가볍게 올려놓은 상태이며, 'Light' 그림의 경우 실제로 운전할 때보다 다소 강하게 잡는 수준의 힘이고, 'Tight' 그림은 운전자가 긴장하였을 때 조향 휠을 세게 쥐는 수준의 힘이다. 따라서 실제 운전 시의 그림 조건은 Minimum 그림과 Light 그림의 사이일 것으로 예상된다.

### 3. 등 감각 곡선 추출 실험 방법

본 연구에서의 등 감각 곡선(Equal sensation contour 또는 Equivalent comfort contour)의 정의는, 동일한 크기의 감각 또는 불편함을 주는 자극(진동)의 크기를 주파수에 따라 연결한 곡선을 의미한다. 예를 들어, 50 Hz에서  $1 \text{ m/s}^2$ 의 가속도가 주는 불편함이 60 Hz에서  $1.5 \text{ m/s}^2$ 의 가속도가 주는 불편함과 동일하다면 이 두 점을 잇고, 마찬가지로 방법으로 다른 주파수에까지 확장하면 하나의 연결된 곡선이 얻어지게 된다. 그리고 물리적 진동의 크기를 체감량으로 환산하기 위해 흔히 사용하는 주파수 가중치 함수가 바로 등 감각 곡선의 역수(Reciprocal)이다. 3장에서는, 3가지 악력의 크기에 대해 4~250 Hz범위에서의 조향 휠의 수직 방향 진동에 대한 등 감각 곡선을 구하는 실험 방법을 기술하였다.

#### 3.1 실험방법

본 연구에서는 등 감각 곡선을 도출하기 위해 각각의 크기 추정법(Magnitude estimation)을 사용하였다. 이 방법에서는, 기준이 되는 진동 신호를 먼저 정하고, 이 진동 자극이 주는 불편함에 대한 테스트 진동이 주는 불편함을 상대적인 크기로 결정하게 된다.<sup>5)</sup> 피 실험자에게 진동 자극을 부여하는 방법은, 처음 2초간 기준(Reference) 신호를 주고 1초의

정지 후에 평가하고자 하는 테스트(Test) 신호를 2초간 부여한다. 이 과정을 2회 반복한 후에 피 실험자가 기준 신호가 주는 불편함 대비 테스트 신호가 주는 불편함을 상대적인 수치로 평가한다.

#### 3.2 기준신호와 테스트 신호

본 실험에서 분석 대상으로 정한 테스트 신호의 주파수는 4 Hz부터 250 Hz까지를 1 옥타브 간격으로 나누어 (4, 8, 16, 31.5, 63, 120, 250) Hz로 정하였다. 진동의 크기는 RMS(Root mean square) 값으로  $0.1 \text{ m/s}^2$ 에서  $1.58 \text{ m/s}^2$ 까지 3 dB 간격으로 나누어 (0.1, 0.14, 0.2, 0.28, 0.4, 0.56, 0.79, 1.12, 1.58)  $\text{m/s}^2$ 로 정하였다. 그리고 진동 자극의 상대 비교를 위한 기준(Reference) 진동 신호는 31.5 Hz에서  $0.4 \text{ m/s}^2$ 로 정하였다.

#### 3.3 주관평가 실험의 진행

본 실험에서는 기준(Reference) 신호가 주는 불편함을 숫자 100으로 설정하고, 이어서 들어오는 진동(Test) 신호의 불편함을 수치로 평가한다. 만일, 테스트 신호가 주는 불편함이 기준 신호에 비해 2배 정도 라면 200을, 절반 정도라면 50이란 수치를 피 실험자가 말하게 된다. 테스트 신호의 발생은 랜덤한 순서로 이루어진다.

#### 3.4 피 실험자(Subjects)

본 실험은 영국 사우스햄튼 대학교의 ISVR (Institute of Sound and Vibration Research)에서 수행되었으며, 피 실험자들은 해당 기관의 학생과 직원이었다. 연령이 21~28세이고 수완계(Hand-arm system) 질환이 없는 12명의 건강한 남성을 피 실험자로 선정하였으며, 이들에 대한 세부 정보는 Table 1과 같다.

## 4. 실험 결과 및 분석

#### 4.1 심리물리학적 관계

자극의 크기( $\phi$ )와 감각의 크기( $\psi$ )의 상관관계는 Steven의 급수 법칙을 이용하면 다음 식으로 표현된다.<sup>5)</sup>

$$\psi = k \cdot \phi^n \quad (1)$$

위 수식에서  $k$ 는 측정 스케일에 따라 결정되는 상

Table 1 Basic informations of the subjects

Item (unit)	Mean (Standard deviation)
Age (years)	24.6 (2.7)
Height (cm)	178.9 (5.9)
Weight (kg)	77.0 (10.3)
Sitting height (mm)	845.8 (38.4)
Upper limb length (mm)	762.5 (45.4)
Hand length (mm)	192.2 (10.7)
Hand breadth (mm)	88.7 (4.4)
Hand thickness (mm)	39.3 (4.5)

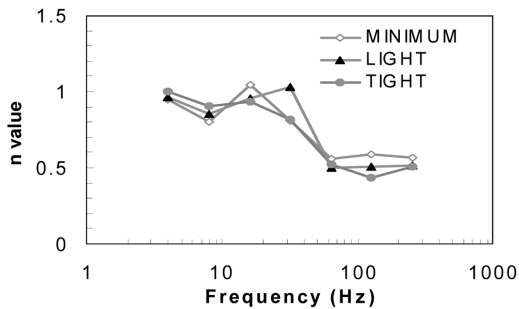


Fig. 2 Growth of sensation (median of twelve n values) as a function of frequency from 4 to 250 Hz for three grip forces

수이고, 지수  $n$ 이 자극의 크기와 감각의 크기 사이의 관계를 결정하게 된다.  $n$ 이 1일 경우 자극의 증가에 따라 감각의 크기가 선형적으로 증가하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 각 진동 주파수에 대해 진동의 크기에 대한 감각의 크기 평가치를 구함으로써 식 (1)의 지수  $n$ 값을 구하였다. Fig. 2에는 지수를 3가지 크기의 악력에 대해 각각 도시하였다. 주파수가 낮은 영역(30 Hz이하)에서는 지수가 0.8~1의 값을 갖고 있어서 진동의 크기가 증가할 경우 불편함의 크기가 거의 선형적으로 증가할 것이 예상된다. 그러나 주파수가 높은 경우(60 Hz 이상)에는 지수가 0.5에 가까운 값을 보이고 있어서, 진동의 증가 효과를 피 실험자가 다소 무디게 느낀다는 것을 알 수 있다. 악력에 따른 경향은 주파수에 따라 다소 차이가 있으나 그다지 크지 않은 것으로 관찰되었다.

#### 4.2 등 감각 곡선

12명의 피 실험자가 평가한 감각의 크기와 이에 해당하는 진동의 크기의 상관관계인 식 (1)을 이용

하면, 주파수의 함수로 등 감각 곡선을 도출할 수 있다. 등 감각 곡선은 말 그대로 동일한 감각의 크기를 갖는 진동의 크기들을 주파수에 따라 연결한 선이다. Fig. 3에는 3가지 악력의 크기에 대해, 각각 불편함의 크기를 20의 간격으로 도시한 것이다. 제일 아래 위치한 선이 불편함의 크기 40에 해당하는 등 감각 곡선이고, 아래부터 4번째 곡선이 기준 자극과 동일한 불편함 100에 해당하는 등 감각 곡선이다. 각 그림에서 하단 부분의 굵고 흐린 곡선은 손에서 느끼는 진동의 인지한계치(Perception threshold)를 도시한 것이다.<sup>8)</sup>

Minimum 그림과 Light 그림의 경우는 등 감각 곡선의 전반적인 형상이 유사함을 알 수 있다. 주파수의 증가에 따라 전반적으로 상승하는 추세를 보이고 있는데, 이는 주파수가 높을수록 동일한 불편함을 주는 진동의 크기가 커짐을 의미한다. 불편함의 크기가 낮을수록, 즉 진동의 크기가 작을수록 100 Hz 전후에서 등감각 곡선이 아래 방향으로 골짜기가 나타나고 있는데, 손에서의 진동 인지한계치 곡선에 근접하고 있음을 알 수 있다. 250 Hz 이상의 실험 데이터는 없으나 상승 추세가 이어질 것으로 예상된다.

Tight 그림의 경우, 125 Hz 부근에서 진동의 크기에 따른 등 감각 곡선의 변화 폭이 매우 큼을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Hanada와 Griffin의 연구에서 관찰된 바 있는데, 이 연구에서는 125 Hz 부근에서 골짜기가 생겼다. 이들은 와 같은 결과의 원인이 접촉력의 증가에 따른 접촉 면적의 증가로 인해 진동에 대한 민감도가 증가하기 때문이라고 하였다.

Fig. 3로부터 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다. 진동의 크기가 큰 경우는 기존의 수완계 진동에 대한 주파수 가중치들<sup>2,3,9)</sup>과 유사한 경향을 갖고 있지만, 진동의 진폭이 매우 낮아지면 인지한계치 곡선에 가까워진다는 것이다. 결국, 등감각 곡선의 역수로 결정되는 주파수 가중치 곡선은 진동 진폭에 따라 다르게 적용되어야 함을 알 수 있다.

#### 4.3 ISO 5349-1 주파수 가중치와의 비교

Fig. 4에서는 본 연구에서 도출된 등 감각 곡선(Minimum 그림)과 다른 문헌의 등 감각 곡선들을

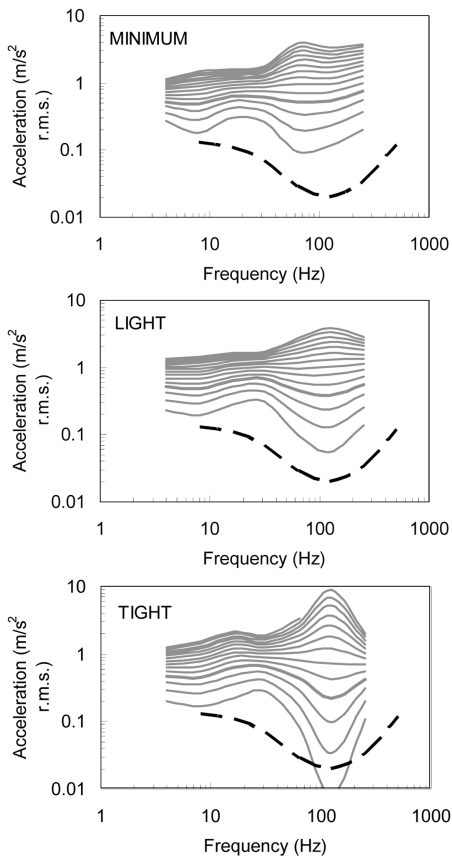


Fig. 3 Equivalent comfort contours for sensation magnitudes in steps of 20 at three levels of grip forces

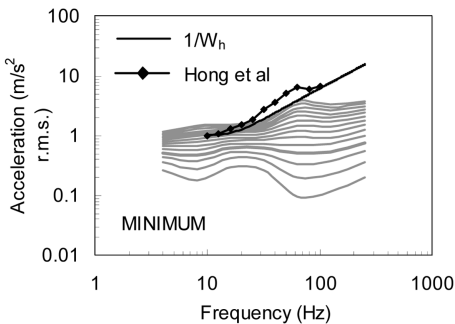


Fig. 4 Equivalent comfort contours in sensation magnitude for minimum grip force overlaid with equivalent comfort contours from frequency weighting  $W_h$  (ISO 5349-1) and the results of Hong et al (2003)

함께 도시하여 비교하였다. 짙은 실선은 ISO 5349-1에 정의되어 있는 수완계 진동의 주파수 가중치에 역수를 취하여 도시한 등 감각 곡선이고, 마름모와

검은 선의 결합된 선은 Hong 등<sup>2)</sup>이 조향휠 진동에 대해 주관평가 실험을 수행하여 얻은 결과이다. 참고문헌의 두 가지 등 감각 곡선 사이에 약간의 차이가 있는데, ISO 주파수 가중치는 주파수 증가에 따라 곡선이 일정한 기울기로 지속적으로 상승하고 있고, Hong 등이 수행한 결과는 100 Hz부근에서 기울기가 변하는 추세를 보이고 있다. 이 결과로 볼 때, ISO 5349-1의 주파수 가중치 곡선의 특성은 조향 휠 진동에 대한 체감 특성을 정확하게 대변하고 있지 못하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 차이는 해당 규격이 주로 동력공구(Power tool)을 쥐고 있는 상태에서의 전달 진동을 대상으로 하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, ISO 5349-1의 주파수 가중치는 조향휠의 진동을 평가하는데 사용하기에 적절하지 않은 것으로 판단된다. 본 연구의 등 감각 곡선과 Hong 등이 얻은 결과는 전반적인 경향은 유사하지만 기울기에서 다소 차이가 존재한다. 이 차이에 대한 원인으로서는 주관평가 실험의 특성에 기인한 것으로서, 서로 다른 주관평가 기법이 사용되었기 때문일 수 있고, 실험 장치와 피 실험자 그룹이 다른 데서 기인할 수도 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 조향 휠의 수직 방향 진동에 대해 주파수에 따른 등감각 곡선을 추출하는 실험을 수행하였다. 진동의 크기에 따른 체감특성의 변화를 관찰하기 위해 매우 작은 크기의 진동으로부터 조향휠에서 계측되는 비교적 큰 수준의 진동까지 사용하여 주관평가 실험을 수행하였다. 실험 결과, 진동의 크기가 작아지면 진동 인지 한계 곡선에 근접하고 있으며, 반대로 진동이 커지면 참고문헌에 나온 등 감각 곡선에 가까워짐을 알 수 있었다. 결론적으로 말하면, 수직방향으로 진동하는 조향휠을 쥐고 있는 사람의 체감 특성은 하나의 주파수 가중치로 정량화하는 것이 무리가 있으며, 손에 작용하는 진동 진폭을 고려하여 주파수 가중치 함수를 선정하여 사용하여야 한다. 더 나아가서, 여러 가지 주파수에서의 진동 크기가 다르다면, 진폭의 함수로 표현되는 주파수 가중치를 도출하여 적용하는 것이 타당함을 알 수 있다.

## 후 기

This paper is based on a laboratory experiment conducted by the Human Factors Research Unit at the Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.

## References

- 1) H.-K. Jang, "Survey on Development of High Comfort Vehicle Seat," Journal of KSAE, Vol.23, No.5, pp.48-59, 2001.
- 2) S.-I. Hong, H.-K. Jang and S.-H. Kim, "Determination of Frequency Weighting Curves for the Evaluation of Steering Wheel Vibration," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.165-172, 2003.
- 3) J. Giacomini, M. S. Shayaa, E. Dormegnien and L. Richard, "Frequency Weighting for the Evaluation of Steering Wheel Rotational Vibration," International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.33, Issue 6, pp.527-541, 2004.
- 4) H.-K. Jang, S.-H. Choi and K. Ruquet, Evaluation of Discomfort due to Vertical Feet Vibration at a Driver's Sitting Posture, SAE 2007-01-2395, 2007.
- 5) S. S. Stevens, Psychophysics-Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects, New Brunswick, 1986.
- 6) H.-K. Jang and S.-I. Hong, "Measurement and Investigation of Apparent Mass of a Human Body at the Sitting Posture in a Passenger Car," Proceedings of the 12th International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, Paper No.142, 2005.
- 7) M. Morioka and M. J. Griffin, "Perception Thresholds for Vertical Vibration at the Hand, Seat and Foot," ForumAcusticum, Budapest, 2005.
- 8) M. Morioka and M. J. Griffin, "Comparison of Absolute Thresholds for Vibration at the Fingertip and on the Hand in Two Different Postures," Proceedings of the 8th International Conference on Hand-Arm Vibration, Umea, Sweden, pp.165-170, 1998.
- 9) International Organization for Standardization, ISO 5349-1, Mechanical Vibration: Measurement and Evaluation of Human Exposure to Hand-transmitted Vibration, 2001.