

승용차량의 정차진동 주파수에 대한 불편함의 등감각곡선 Equivalent Discomfort Curve on Idle Vibration Frequency of Passenger Vehicle

전 경 진*.이 재 영**.안 세 진†.정의 봉***

Gyeongjin Jeon, Jaeyoung Lee, Sejin Ahn and Weuibong Jeong

(2012년 3월 14일 접수 ; 2012년 4월 19일 심사완료)

Key Words : Absolute Discomfort Threshold(불편함의 절대역치), Idle Vibration(정차진동), Passenger Vehicle(승용차량), Frequency Weighting Curves(주파수가중곡선), Equal Sensation Curves(등감각곡선), Up-down Method(계단형방법), Taxi Driver(택시기사)

ABSTRACT

The three-down one-up method which is commonly used in the field of psychophysics is employed in this study that is to reveal how much magnitude of vibration makes discomfort in passenger vehicle on idle condition. Thirteen taxi drivers were invited for subject of the experiment where they evaluated the controlled vibrations on rigid seat in terms of idle vibration on passenger vehicle at frequency range from 15 Hz to 40 Hz. As the result, vibration of 100~105 dB is marginal range to make discomfort on passenger seat. Frequency dependency of the discomfort was found at the frequency range, which is the higher frequency the lower discomfort with the same magnitude of vibration. The frequency dependency found here was compared with ISO 2631-1 that is more sensitive at the frequency range.

1. 서 론

승용차량의 정차진동(idle vibration)은 차량의 소음진동 저감 기술이 발전하고 소비자들의 NVH(noise vibration and harshness) 성능에 대한 기대수준이 높아짐으로 인해 차량의 승차감 평가에 있어서 중요한 항목이 되었다. 정차진동의 주된 원인으로 엔진 연소에 의해 발생된 토크 성분과 샤프트

등의 회전에 의해 발생된 회전 관성력으로 구분된다. 연소 토크는 엔진의 정상 연소에 의한 주기적인 연소토크와 사이클간 편차와 실리더간의 편차로 인한 비주기적인 연소토크로 나누어진다. 이러한 주기 또는 비주기적인 토크는 아이들 진동을 발생시키는 입력요소로 작용하게 되고, 이것은 차량의 차체(body) 진동모드에 연계되어 시트까지 전달되면서 증폭되기도 하고 감소되기도 한다. 이러한 기계적이고 구조적인 특성을 가지는 정차진동을 향상시키기 위하여 엔진과 차체를 결합하는 마운트의 위치와 강성의 최적화를 포함하여 각종 진동저감 기술들이 발달하였다.

차량의 아이들 엔진 회전수(RPM)는 차량을 개발할 때 엔진타입과 연비 그리고 차체의 진동모드 등을 고려하여 결정되어진다. 즉 연소토크에 의한 진동의 주파수는 엔진 회전수와 비례하므로, 승용차량

† 교신저자; 정희원, 르노삼성자동차
E-mail : sejin.ahn@renaultsamsung.com
Tel : (051)979-9551

* LG전자 EC사업부

** 부산대학교 대학원 기계공학부

*** 정희원, 부산대학교 기계공학부

이 논문의 일부는 2012년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

의 아이들 진동의 주파수는 차량의 목표 성능과 특성에 따라 가변적이다. Jeon⁽¹⁾ 등은 국내에 시판되고 있는 차량의 아이들 진동주파수를 조사한 결과 17~53 Hz로 주파수범위를 가지며 이중에서 20~40 Hz범위에 포함된 차량이 약 90% 이상을 차지하고 있다고 설명하였다. 그런데 인체가 진동에 노출되었을 때 느끼는 불편함의 정도는 진동에 노출된 인체의 부위와 진동의 방향 그리고 주파수에 의존적이다⁽²⁾. ISO 2631-1⁽³⁾과 BS 6841⁽⁴⁾에서는 앉은 자세의 인체가 진동에 노출되었을 때 느끼는 불편함을 진동주파수에 따라 보정하기 위해 주파수가중합수를 정의하고 있으며, 이것은 보편적인 상황에 대하여 진동량을 불편함의 정도로 변환하기 위한 파라미터로 이용되고 있다. 그리고 ISO 2631-1에서는 인지수준 이상의 진동크기는 안락도의 손실을 야기시키며 안락도 한계 이상의 진동크기는 활동성 및 작업효율의 저해를 초래하며 이 보다 큰 진동크기에서는 건강과 안전에 위협을 초래하게 된다고 명시하였다.

Cheung⁽⁵⁾ 등은 발과 등(back) 위치에 각각 병진 3방향 및 엉덩이 위치에 6방향(병진 3방향, 회전 3방향), 모두 12축을 동시 가진하여 승차감에 영향을 미치는 주요 5개의 진동성분을 연구하였다. 그 결과 승차감에 주된 영향을 미치는 5가지 진동방향은 엉덩이 부위의 z축과 y축, 등 부위의 x축, 그리고 발 부위의 y축과 z축이며 이중에서 엉덩이 부위의 z축 방향 진동이 전체 승차감의 약 30% 정도를 차지하여 가장 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 또한 엉덩이 부위의 회전 가속도 또한 전체 승차감에서 10~15% 정도의 영향을 미쳤으며 Yaw방향보다 roll과 pitch방향의 영향이 더 크다고 보고하였다. 그리고 인체와 전신진동의 다양한 형태의 신호에 대한 인체반응과 불편도를 시험하고 평가한 많은 연구가 있었으며, 그 중에 Ahn^(6,7) 등은 차량이 노면의 bump를 통과할 때 발생하는 속타입 진동신호를 모사하여 이에 대한 인체의 물리적 반응과 불편함을 연구하였다. Ahn 등의 연구에서는 준겔보기질량을 정의하여 속타입 진동의 다양한 크기뿐만 아니라 감쇠비와 역위상에 대한 인체반응 특성이 비선형적임을 보였다. 그리고 수직방향 속타입 진동에 대한 불편함 평가에서는 속타입진동의 기본주파수에 따라 달라짐을 보였으며, 특히 1 Hz이하의 저주

파수와 인체의 공진영역인 4~10 Hz영역의 주파수에 서 상대적으로 큰 불편함을 느낀다고 보고하였다.

Jeon⁽¹⁾은 승용차량의 정차중 진동주파수를 고려하여 20~40 Hz 범위에서의 수직방향 진동에 대한 인체응답을 연구하였다. 여기에서는 착석한 인체가 좌우방향 축을 중심으로 회전하는 pitch motion에 대한 인체반응특성을 겔보기편심질량(apparent eccentric mass)이라 정의하였으며, 13명의 피시험자에 대하여 착석자세에 따른 겔보기편심질량을 구한 결과를 보고 하였다. 겔보기편심질량의 중간값은 6 Hz와 12 Hz에서 피크를 가지며, 상체의 고유진동수 영역인 5~10 Hz에서는 착석자세에 따른 차이가 적었던 반면에 허리의 고유진동수 영역인 10~12 Hz는 앉은 자세에 따른 그 차이를 크게 보였다. 이것은 전후방향 비대칭은 착석자세에 따른 영향을 상대적으로 크게 받기 때문이라고 보고하였다.

정차진동에 많이 노출되어 있으면서 정차진동 성능에 대한 요구수준이 비교적 높은 택시기사 13명의 피시험자를 대상으로 정차진동의 주파수에 따른 불편함의 절대역치(absolute discomfort threshold)를 구하는 것을 이 연구의 목적으로 하였다. 여기서, 정차진동의 주파수 범위는 승용차량과 상용차량의 정차진동에 대하여 다양한 엔진형식을 고려하여 15~40 Hz로 하였다. 실험방법은 국제표준으로 ISO/FDIS 13097-1⁽⁸⁾에서 정의되어 있는 역치를 추정하는 방법중에서 three-down one-up에 따라 실시하였다. 이 연구에서 얻어진 정차진동 주파수별 절대역치 곡선은 전신진동 주파수 가중합수의 국제규격인 ISO 2631-1과 비교하여 보았다.

2. 실험방법

2.1 피시험자 및 실험절차

이 연구에서는 불편함 평가의 신뢰성과 일관성을 높이기 위해 배기량이 비슷한 중형승용 택시를 운행하며 운전 경력이 최소 5년 이상되는 개인택시 기사들을 대상으로하여 13명을 무작위로 섭외하였다. 피시험자들의 신체적 특성과 운전경력, 그리고 운전시간 등에 대한 통계적 데이터는 Table 1과 같다. 실험을 시작하기 전에 피시험자에게 이 연구의 목적과 진행순서, 그리고 불편함을 평가하는 방법에 대한 설명을 실시한 후 실험참가에 대한 동의서에

서명하도록 하였다. 가진기의 작동음과 주위의 암소음으로 인한 평가의 오차를 줄이기 위해 소음차단용 헤드폰을 착용하였으며, 편안한 복장으로 신발을 벗고 시트에 착석하도록 하였다. 이때 착석자세는 허벅지가 평평한 시트에 편안하게 접촉되는 average thigh contact 상태를 유지하며 허리를 곧게 세우고 정면을 응시하고 두 손은 무릎 위에 가지런히 하고 불필요한 움직임은 최대한 자제하도록 주문하였다. 평가자들은 예비실험 과정을 통해 15 Hz와 40 Hz의 진동을 시범적으로 경험함으로써 이 실험의 불편함 평가에 대한 감각과 방법을 익힐 수 있도록 하였다. 그리고 이 실험에서는 15 Hz와 40 Hz 사이에서 5 Hz 간격으로 나누어서 6가지 주파수에 대하여 불편함을 평가하도록 하였다. 그리고 피시험자들이 실험에서 집중력을 유지하기 위해 전체 실험을 2번의 세션으로 나누었으며, 각각의 세션은 20분 동안 실시하고 다음 세션을 시작하기 전에 약 10분간의 휴식 시간을 두었으며, ISO 13090-1⁽⁹⁾에서 규정한 인체진동 표준화 시험절차를 준수하며 실험을 진행하였다.

2.2 실험장치 및 가진신호

이 실험에서는 강체의자를 장착한 단축가진기(IMV i-220)를 이용하여 일반 승용차량에서 발생하는 아이들 진동을 고려한 상하방향 단일 주파수에 대한 진동을 재생하였다. 단축가진기의 상세 사양은 Table 2와 같으며, 15~40 Hz 주파수 범위에서 5 Hz 간격으로 나누어진 6가지 주파수를 가지는 다양한 크기의 정현파신호를 발생하기 위하여 NI사의 Labview와 PXI-1042Q를 이용하였다. 이 신호는 증폭기를 통하여 단축가진기에 입력되어 상하방향 변위를 가지는 진동을 발생시킨다. 이때 피시험자에게

노출된 진동의 실제 크기를 측정하기 위해 단축가진기 위에 장착되어 상하방향으로 진동하는 강체시트의 가속도를 측정하였다. 스트레인게이지 타입의 ICP가속도계를 이용하여 측정된 강체시트의 가속도 신호는 AD변환기를 거친 디지털 데이터는 Labview를 이용하여 후처리 과정을 수행하였다. 한 가지 실험 진동을 발생시켜 지속되는 시간은 8초이며, 신호 분석에 이용되는 신호는 시작과 끝에 존재하는 과도신호 1초씩을 제외한 중간의 6초 동안 신호를 유효한 것으로 사용하였다. 이때 유효한 진동신호의 정량적인 크기는 제곱평균값(root mean square)으로 계산하였다. 그리고 피시험자에게는 처음과 끝의 과도신호를 제외한 진동을 평가하도록 주문하였다.

가진기의 상부에 장착되는 강체시트는 단단한 나무재질로 제작하였으며, 발판의 높이를 가변하며 피시험자들의 다양한 신장에 대하여 착석자세가 average thigh contact으로 유지될 수 있도록 하였다. 시트의 등받이의 유무는 착석자세에 대한 불편함 평가하는 데 있어서 중요한 인자 중 한가지이나, 이 연구에서는 착석자세의 단순화를 위하여 등받이를 고려하지 않았다.

2.3 심리물리학 실험법

역치(threshold)는 일반적으로 서로 다른 두 자극의 차이를 식별하는 차이역치(difference threshold)와 자극의 유무를 식별하는 최소한의 자극 크기인 절대역치(absolute threshold)로 나눌 수 있다. ISO/FDIS 13097-1에서는 역치의 측정방법으로 베케시방법과 up-down method가 정의되어 있다. 베케시방법은 시간에 따라 증가 혹은 감소하는 연속적인 자극을 주어 이에 대한 역치를 찾는 방법이며 up-down 방법은 일정시간 동안 자극을 주고 이를 평가하고

Table 1 Statistical data of the taxi drivers employed as the experimental subject

Item	Average	SD	Max/min
Weight(kg)	74.8	10.2	94.0/61.0
Height(cm)	171.5	5.8	184.0/163.0
Age(yr)	48.8	4.1	54/41
Career(yr)	15.1	5.8	30/5
Driving(hr/day)	13.1	4.1	13/9
Vehicle age(yr)	4.5	2.1	8/1

Table 2 Specification of vibration shaker used in the experiment

Model	IMV corporation i-220
Type	Electro-dynamic
Rated force	5.6 kN
Frequency range	3 ~ 3,300 Hz
Maximum displacement	51 mm p-p
Maximum payload	200 kg

반응에 따라 자극의 크기를 달리하면서 역치를 찾아내게 된다. Morioka⁽⁹⁾ 등은 손가락이 진동을 느끼기 시작하는 역치를 베케시 방법과 심리물리학 실험(three-down one-up) 방법에 따른 결과의 차이를 비교하였다. 그 결과 베케시방법이 up-down방법에 비하여 역치를 3~6 dB정도 높게 평가하였으며 이는 연속적인 자극에 의한 감각 순응에 따른 결과라 보고하였다. 따라서 연속적인 자극에 의한 감각 순응의 영향을 배제하기 위하여 이 실험에서는 up-down방법을 적용하였다. Up-down method는 Dixon⁽¹⁰⁾에 의해 제안되었는데, 자극 변화량에 따른 역치측정의 오차를 줄이기 위하여 up-down 또는 down-up이 일어날 때마다 적용할 자극 변화량은 이전의 자극 변화량에 절반값으로 하여 실험을 진행하였다. Levitt⁽¹¹⁾는 250 Hz의 소리를 왼쪽과 오른쪽 시간지연을 주고 three-down one-up 방법을 적용하였다. 이때 시간지연의 변동량은 5.8 μsec로 두고 소리의 크기와 초기 시간지연을 크게 하여 three-down one-up 및 up-down방법을 적용하여 실험한 결과와 시간지연을 작게하여 three-down one-up 및 up-down방법을 적용하여 실험을 진행한 결과를 비교하였다. 소리 크기별로 시간지연을 감지하는 초기시간지연 별로 기울기를 비교한 결과 up-down방법보다 three-down one-up의 방법이 기울기의 차이가 적다고 보고하였다. 시간지연을 감지하는 기울기가 시간지연을 크게 한 결과와 작게 한 결과가 비슷하게 나와야 하는데 up-down방법을 적용한 결과의 기울기차이가 큰 것으로 보았을 때 up-down결과가 오차가 큰 것으로 판단하였다. 이는 피시험자의 결정에 따른 오차라고 보았으며 이러한

오차를 줄이기 위해서는 three-down one-up의 방법이 이러한 오차를 최소화 할 수 있다고 보고하였다.

Fig. 1은 three-down one-up 방법을 이용한 절대역치를 구하는 과정의 예를 보이고 있다. 그림에서 세로축은 목적에 따른 실험자극 크기에 따라 분류된 순서를 나타내며 가로축은 실험이 진행되는 횟수를 나타낸다. 자극에 대한 반응이 약하게 평가될 때마다 자극의 크기를 점차적으로 증가(one-up)하고, 특정한 크기의 자극에 대한 반응이 3회 연속으로 강하게 평가될 때는 자극의 크기를 감소(three-down)하는 규칙을 반복하여, 이러한 반전이 6번 진행되면 three-down one-up의 과정은 완성된다. 이렇게 구해진 6번의 반전이 일어났던 자극의 크기 중에서 첫 번째와 두 번째는 제외하고 나머지 반전 자극의 크기를 이용하여 불편함의 절대역치(A.D.T.: absolute difference threshold)를 구하는데, 계산식은 다음과 같다⁽¹³⁻¹⁵⁾.

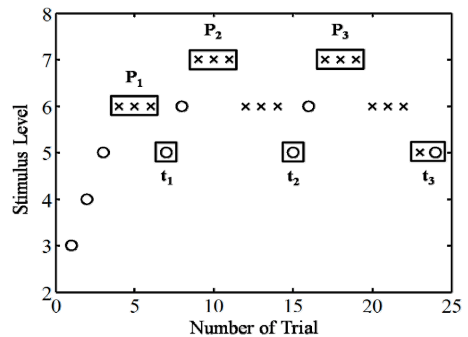


Fig. 1 Illustration of test protocol(O='comfort' response, X='discomfort' response). Responses used in the analysis are in boxes

Table 3 Ordinal level of stimulus and its magnitude used in the experiment

Ordinal level of stimulus	Control Stimulus(acceleration)		Actual stimulus(acceleration)	
	Magnitude (m/s ² r.m.s.)	Magnitude (dB, Ref. 10 ⁻⁶)	Averaged magnitude (m/s ² r.m.s.)	S.D. of actual magnitude (m/s ² r.m.s.)
1	0.025	88	0.021	0.016
2	0.035	91	0.037	0.002
3	0.050	94	0.048	0.003
4	0.071	97	0.066	0.004
5	0.100	100	0.093	0.006
6	0.141	103	0.131	0.010
7	0.200	106	0.181	0.013
8	0.281	109	0.245	0.008

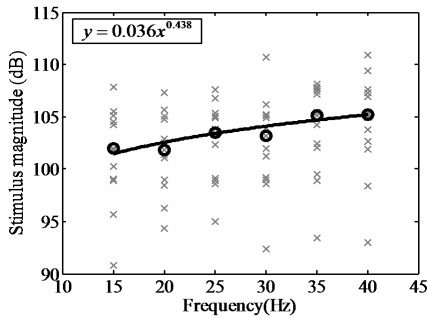


Fig. 4 Median of absolute discomfort thresholds of 13 subjects(x : individual, o : median, — : regression of medians)

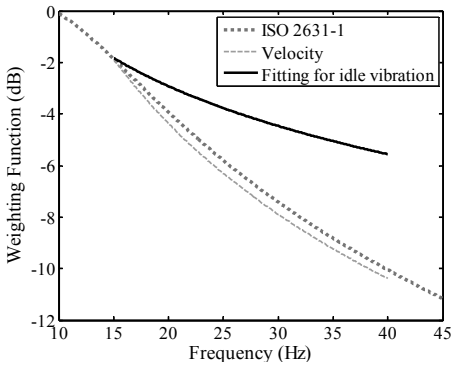


Fig. 5 Comparison of frequency weighting curves

reference는 10^{-6} 으로 설정하였다. 구한 식 (2)는 ISO 2631-1과 직관적으로 비교하기 위해 15 Hz에서 기준점이 되도록 평행이동한 것이다. Fig. 5는 이 연구에서 구한 식 (2)의 아이들 진동 불편함에 대한 주파수가중곡선과 ISO 2631-1에서 규정하는 착석자세에 대한 상하방향 전진진동에 대한 주파수가중함수(W_k)를 비교한 것이다. 그리고 참고로 주파수에 역비례하는 속도(velocity)곡선을 함께 비교하여 나타내었다. 그래프를 비교하여 보면 차량의 정차진동을 고려하여 실험으로 구한 주파수가중곡선이 ISO 2631-1에서 규정된 주파수가중곡선보다 기울기가 완만함을 알 수 있다. 이러한 차이는 피시험자들의 동서양의 차이에서 발생하였거나, 전진진동을 반영하여 표준화한 ISO 2631-1과는 달리 정차시 진동을 가정하여 실시한 이 시험의 특성이 원인이 되었을 것으로 판단된다. 그리고 시험 방법의 차이도 그 차이를 유발했을 가능성도 배제할 수 없다.

4. 결 론

이 연구에서는 13명의 택시운전 기사를 대상으로 실험한 승용차량 정차시 진동에 대한 민감도를 구하는 방법으로 선택한 one-up three-down은 차량의 정차진동의 불편함을 정량화하는 데 있어서 효과적이고 유용한 결과를 낼 수 있었다. One-up three-down의 방법으로 실험을 진행하는 과정에서 제어 신호로 준 가속도 자극의 크기와 실제로 재현된 자극의 크기는 다소 차이가 있었지만, 그 차이가 크지 않았고 실제 측정된 값을 이용하여 평가 프로세스를 진행함으로써 해서 실질적인 결과와의 오차를 줄일 수 있었다. 이 실험의 결과로 차량 정차시 불편함을 느끼는 진동의 크기는 대략적으로 100~105 dB임을 알 수 있었고, 주파수가 높아질수록 불편함을 느끼는 진동의 크기는 점차적으로 크지는 것을 알 수 있었다. 이것은 차량의 정차시 엔진 회전 회전수가 높을수록 동일한 크기의 진동에 대한 불편함의 평가에서 유리하다는 의미가 된다. 이 연구에서 구한 정차시 진동을 고려한 주파수가중함수와 ISO 2631-1 결과를 비교하였을 때, 그 기울기에서 다소 완만함을 알 수 있었다. 이것은 승용차의 정차시 진동에 대한 주파수가중함수를 적용하는 데 있어서 유용한 결과로 이용될 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 더욱 다양한 피시험자와 다양한 착석자세, 그리고 다양한 진동특성을 반영한 실험을 통해 더욱 세분화된 주파수가중곡선을 제시 할 필요성이 있으며, 이것은 차량의 정차진동을 사람이 느끼는 실제적인 불편함과 연관하여 효과적이고 실용적으로 활용할 수 있는 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

(1) Jeon, G. J., Kim, M. S., Ahn, S. J., Jeong, W. B. and Yoo, W. S., 2010, Human Response to Idle Vibration of Passenger Vehicle Related to Seating Posture, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 1121~1127.
 (2) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Elsevier Academic Press, London.

(3) ISO 2631-1, 1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration - Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva.

(4) BS 6841, 1987, Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock, UK.

(5) Cheung, W. S., Woo, C. K., Park, S. J. and Kim, S. H., 1997, Ride Quality Assessment of Automotive Seats by Simultaneous 3-axis Excitation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 143~152.

(6) Ahn, S. J. and Griffin, M. J., 2008, Effects of Frequency, Magnitude, Damping, and Direction on the Discomfort of Vertical Whole-body Mechanical Shocks, Journal of Sound and Vibration, Vol. 311, Issues 1~2, pp. 485~497.

(7) Ahn, S. J., 2010, Discomfort of Vertical Whole-body Shock-type Vibration in the Frequency Range of 0.5 to 16 Hz, International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, Issues 1~2, pp. 909~916.

(8) ISO 13091-1, 2001, Mechanical Vibration - Vibrotactile Perception Thresholds for the Assessment of Nerve Dysfunction, International Organization for Standardization, Sweden.

(9) ISO 13090-1, 1998, Mechanical Vibration and Shock-guidance on Safe Aspects of Tests and Experiments with People - Part 1 : Exposure to

Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock, International Organization for Standardization, Swiss.

(10) Morioka, M. and Griffin, M. J., 2009, Equivalent Comfort Contours for Vertical Vibration of Steering wheels : Effect of Vibration Magnitude, Grip Force, and Hand Position, Applied Ergonomics, Vol. 40, Issues 1~2, pp. 817~825.

(11) Dixon, W. J. and Mood, A. M., 1948, A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data, Journal of the American Statistical Association, Vol. 43, No. 241, pp. 109~126.

(12) Levitt, H., 1970, Transformed Up-down Methods in Psychoacoustics, Journal of the Acoustical Society America, Vol. 49, No. 2, pp. 467~477.

(13) Morioka, M. and Griffin, M. J., 2006, Magnitude-dependence of Equivalent Comfort Contours for Fore-and-Aft, Lateral and Vertical Whole-body Vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 298, Issues 3~5, pp. 755~772.

(14) Mansfield, N. J. and Griffin, M. J., 2000, Difference Thresholds for Automobile Seat Vibration, Applied Ergonomics, Vol. 31, Issue 3, pp. 255~261.

(15) Morioka, M. and Griffin, M. J., 2008, Absolute Thresholds for the Perception of Fore-and-aft, Lateral, and Vertical Vibration at the Hand, the Seat, and the Foot, Journal of Sound and Vibration, Vol. 314, Issues 1~2, pp. 357~370.