

속타입 수직방향 전신진동에 대한 주관적 안락감에 관한 연구 STUDY OF SUBJECTIVE COMFORT ON SHOCK-TYPE VERTICAL WHOLE-BODY VIBRATION

안세진† · M. J. Griffin* · 정의봉**
Se Jin Ahn, M. J. Griffin and Weui Bong Jeong

ABSTRACT

Shock-type vibrations are usually experienced in vehicles excited by impulsive forces. Fifteen subjects used magnitude estimation to judge the discomfort of vertical shock-type vibration generated on a rigid seat. The shocks had different frequencies and magnitudes and were produced from the response of a 1 degree-of-freedom model to a half-sine force input. The magnitudes of the shocks, expressed in terms of both peak-to-peak value and un-weighted vibration dose values, VDV's, were correlated with magnitude estimates of the discomfort. In this study, equivalent comfort contour of shock-type vibration were obtained. From the contour, it was investigated that shock-type vibration at frequency below 0.8 Hz and between 4.0 Hz and 10.0 Hz is highly sensitive to the discomfort than at other frequencies.

1. 서론

전신진동(whole-body vibration)의 불편함(discomfort)을 객관적으로 예측하기 위해 ISO 2631 (1997) 국제표준 또는 BS 6841 (1987)의 영국표준에서 규정하고 있는 주파수가중함수(frequency weighting function)를 사용한다^(1,2). 이러한 주파수가중함수는 정현파(sinusoidal)의 정상적인(stationary) 신호에 대하여 실시한 인체반응결과를 반영한 것이다. 그러므로 정상주행 중인 차량의 시트에서 발생하는 진동에 대하여 이러한 주파수 가중함수를 적용하여 계산한 객관적인 물리량의 크기와 승객이 느끼는 주관적인 불편함의 정도에 대한 상관성은 향상되는 것으로 알려져 있다. 그런데 충격 또는 과도 진동에 대해서는 이러한 주파수가중함수의 적용에 대하여 몇몇 연구에서 의문을 제기해 왔고, 과도신호에 알맞은 주파수가중함수를 개발하기 위한 노력이 여러 가지 방법으로 진행되어 왔다⁽³⁻⁵⁾.

여러 가지 형태를 가지는 속(shock) 진동에 대한 불편함을 예측하는 방법을 개발하기 위한 연구에서는 사용된 속 진동의 종류와 특성에 따라 제

각기 다른 결론을 내리고 있다. 예를 들어 충격가진에 대한 1 자유도 응답신호를 수직방향 전신진동으로 사용한 연구에서는 표준의 주파수가중함수를 적용하여 계산한 VDV(vibration dose value)값이 주관적 불편함과 높은 상관관계를 나타낸다고 결론을 내렸다⁽⁶⁾. 그리고 80 초 동안의 랜덤 백그라운드 진동에 한 주기의 정현파신호를 간헐적으로 중첩한 속진동을 이용한 연구에서도 VDV 값이 다른 물리량보다 불편함과 높은 상관도를 나타내는 것으로 보고하고 있다⁽⁷⁾.

반면에 Spang 은 오프로드(off-road)를 주행하는 차량에서 추출한 충격신호를 이용한 실험에서는 'running r.m.s.' 가 가장 높은 상관도를 나타낸다고 결론을 내렸고⁽⁸⁾, 여러 가지 장애물을 넘는 트랙터(tractor)에서 발생하는 충격신호에 대한 현장실험을 실시한 Wikstrom 등은 'dose value based on an r.m.s.' 가 상대적으로 높은 상관도를 나타낸다고 하였다⁽⁵⁾. 그리고 Jonsson and Johansson 은 forklift 차량의 중량과 주행속도를 조절하면서 일정한 장애물을 넘을 때 발생하는 다양한 충격진동에 대해서는 'maximum transient vibration value' 가 상대적으로 높은 상관도를 나타낸다고 결론을 내리고 있다⁽⁹⁾.

본 연구에서는 반사인파(half-sine)의 가진력을 받는 1 자유도 진동모델의 가속도 응답을 속타입(shock-type) 진동으로 정의하고, 반사인파의 주기와 진동모델의 질량과 강성을 조정하여 다양한 기본주파수(fundamental frequency)를 갖는 속타

† 책임저자; 부산대학교 기계기술연구소
E-mail : sjahn@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-3088, Fax : (051) 513-3788

* ISVR, Southampton University, UK

**부산대학교 기계공학부

입 진동을 만들었다. 평가자가 이러한 속타입 수직방향 전신진동에 노출되었을 때 느끼는 불편함 정도와 속타입 진동의 물리적인 크기와 상관을 계를 도출하는 것이 본 연구의 목표이다. 본 실험을 위해 “속타입 진동에 대한 불편함의 크기와 가장 민감하게 느끼는 인체 부위는 속타입 진동의 크기와 주파수에 의존적이다” 라는 가설(hypothesis)을 설정하였다.

2. 실험방법

2.1 속타입 진동

실제 차량에서 발생하는 속진동은 매우 다양한 형태로 나타나지만, 범프와 같은 장애물을 통과할 때 시트에서 발생하는 수직방향 진동은 서스펜션과 타이어 그리고 시트의 특성에 의존하며, 시간에 따라 감쇠하는 진동형태를 가진다^(5,9). 본 연구에서는 장애물을 통과하는 차량 시트에서의 감쇠진동을 모의(simulation)한 속타입 진동을 만들기 위하여 Fig. 1 과 같이 1 자유도 진동모델과 반사인과 가진력을 이용하였다. 이때 반사인과 가진력의 시작점과 끝나는 점에서의 미분 불가능점은 현실적이지 않기 때문에 다음 식과 같이 반사인과 신호에 해닝 창함수(hanning window)를 적용한 가진력을 이용하였다.

$$H(t) = \begin{cases} A \sin\left(\pi \frac{t}{t_0}\right) \times \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0}\right) \right] & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 A 와 t_0 는 반사인과 가진력의 크기와 지속 시간을 나타낸다. 본 연구에서는 감쇠하는 속타입 진동의 기본주파수 진동모델의 질량과 강성 그리고 반사인과 가진의 지속시간을 이용하여 조정하였다.

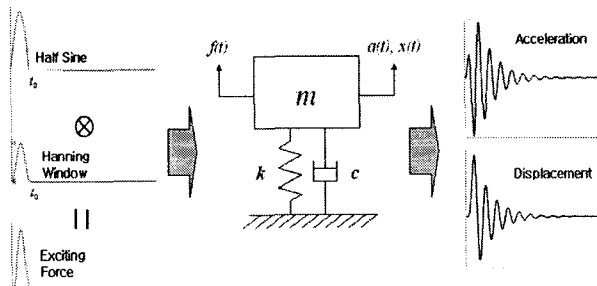


Fig. 1 Hanning windowed half-sine force input, 1 d.o.f. vibration model and shock-type response.

그리고 속타입 진동의 물리적인 크기는 최대값과 최소값의 차이인 ‘peak-to-peak’ 값 또는 4 승 누적합의 4 승 근인 vibration dose value(VDV)로 나타내었으며, 반사인과 가진력의 크기를 이용하여 속타입 진동의 크기를 조정하였다.

본 연구에서 이용한 속타입 진동의 기본주파수는 0.5 - 16.0 Hz 사이에 1/3 옥타브 간격으로 16 가지의 기본주파수를 가지고, 각각의 주파수에 대하여 VDV 값으로 0.35 - 2.89 ms^{-1.75} 사이에 5 가지 크기(즉, 1.7⁻², 1.7⁻¹, 1.0, 1.7, and 1.7² ms^{-1.75})를 가진다. 본 연구에서는 사용된 속타입 진동의 감쇠비는 모든 주파수에서 0.1 로 고정하였기 때문에 지속시간은 기본주파수에 의존한다. Fig. 2 는 본 연구에서 사용된 속타입 진동을 기본주파수 별로 예시한 것이다.

2.2 실험장비 및 평가자

상하방향 속타입 진동을 생성하기 위해 ISVR (Institute of Sound and Vibration Research)이 보유하고 있는 유압 시뮬레이터(hydraulic simulator)를 이용하였다. 속타입 진동의 불편함을 주관적으로 평가하는 평가자(subjects)들은 모두 15 명의 남자이고, 나이는 22-39 세 (평균: 30.2)이고, 몸무게는 54-105 kg (평균: 75kg)이고, 신장은 168-186 cm (평균: 175.8cm)이었다. 평가자는 시뮬레이터에 설치된 강체 의자에 편안하게 직립한(upright) 자세로 앉고, 허벅지는 수평으로 하고 정강이는 수직이 되도록 하였다.

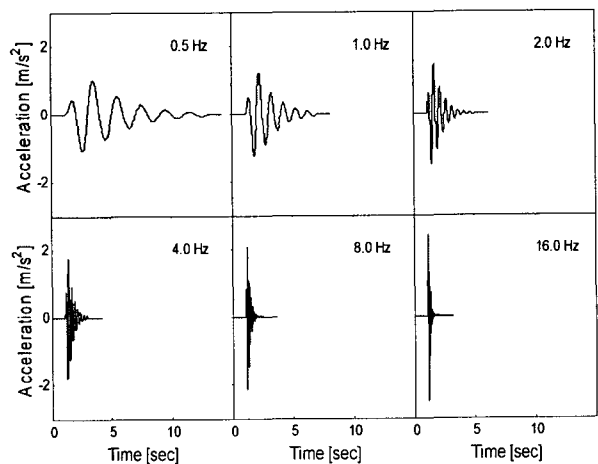


Fig. 3 Waveforms of shock-type vibration having unit unweighted VDV

시뮬레이터의 상대변위와 작동음에 의한 영향을 줄이기 위하여 평가자는 눈가리개(eye mask)와 헤드폰(headphone)을 착용하였다. 가속도계 (Setra System, 141A type)를 사용하여 강체 시트의 진동을 측정하였고, 가속도 신호는 130 Hz 의 엔티어라이징(antialiasing) 필터를 적용한 후 초당 400 개의 데이터로 샘플링하여 디지털신호로 변환하였다. 0.5 - 16.0Hz 의 기본주파수를 가지는 속타입 진동의 물리적인 크기, 즉 peak-to-peak 와 VDV 를 계산하기 전에 고주파 노이즈를 제거하기 위하여 40 Hz 저주파통과 필터를 적용하였다.

본 연구의 실험은 ISVR 에서 규정하고 있는 인체 실험에 대한 안전과 윤리(Human Experimentation Safety and Ethics)의 심의에서 인정을 받은 후 실시하였다.

2.3 실험절차

속타입 진동의 주관적 불편함을 평가하기 위한 심리물리학적(psychophysical) 방법으로 기준 자극(reference stimulus)과 시험 자극(test stimulus)을 비교하여 기준 자극에 대한 시험 자극의 상대적인 감각(sensation)의 크기를 평가하는 크기 예측법(magnitude estimation method)을 이용하였다. 모든 평가자들은 실험을 시작하기 전에 크기 예측법을 숙달하기 위하여 종이에 그려진 크기가 다른 두 원의 지름을 비교하여 평가하는 연습을 하였다.

Fig. 3 은 크기 예측법의 절차에 따라 평가자에게 전달되는 속타입 진동의 순서와 방법을 예시하고 있다. 본 실험에서는 기본주파수가 2.5 Hz 이고 크기가 $1.0 \text{ ms}^{-1.75}$ (VDV)인 속타입 진동을 기준으로 하였다. 약 4 초 동안 기준 속진동을 발생시키고 난 후 2 초간 정지하였다가 시험 속진동을 발생시켰다. 이때 시험 속진동의 지속시간은 기본주파수에 따라 달라지며 최단 0.2 초에서 최장 15 초이다.

크기 예측법에 의하여 기준 속과 시험 속을 연속하여 경험한 평가자는 기준 속의 불편함 정도를 100 으로 하였을 때 시험 속의 불편함의 정도를 숫자로 평가하였다. 그리고 평가자는 시험 속에 노출되었을 때 가장 불편하게 느낀 신체부위도 함께 평가하였다. 이때 신체부위는 발(feet), 다리(legs), 엉덩이(buttocks), 복부(abdomen), 가슴(chest), 등(back), 어깨(shoulders), 머리(head),

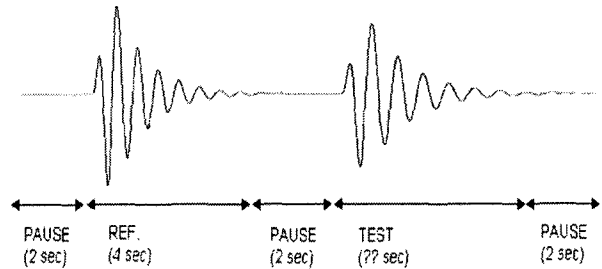


Fig. 3 Example of reference and test stimuli for magnitude estimation method.

또는 전신(whole-body)으로 구분하도록 하였고, 불편함을 느끼지 못한 경우에는 불편한 곳 없음(nowhere)로 평가 하였다.

속타입 진동의 객관적인 크기는 주파수 가중하지 않은 peak-to-peak 값과 VDV 값으로 측정하고, 국제표준의 주파수가중함수의 효과를 관찰하기 위하여 상하방향 전신진동의 M_b 주파수 가중함수를 적용한 VDV 도 함께 측정하였다. 그리고 속타입 진동의 객관적인 물리량의 크기와 주관적인 불편함의 평가에 대한 상관관계를 더욱 용이하게 관찰하고 비교하기 위하여 다음 식과 같이 기준 속타입 진동에 대한 정규화(normalized)한 물리량의 크기를 이용하였다.

$$\text{Normalized physical magnitude} = \frac{\phi_{\text{test}}}{\phi_{\text{ref}}} \quad (2)$$

여기서 ϕ_{test} 는 시험 속 신호의 물리적인 크기이고 ϕ_{ref} 는 기준 속 신호의 크기를 나타낸다. 이때 기준신호의 물리적인 크기는 주파수 가중하지 않은 VDV 값으로 $1.0 \text{ ms}^{-1.75}$ 이고 peak-to-peak 값으로 3.1 ms^{-2} 이며, M_b 가중함수를 적용한 VDV 값으로는 $0.5 \text{ ms}^{-1.75}$ 이 된다.

3. 실험결과

3.1 주관평가

16 가지 기본주파수에 대한 5 가지의 크기, 즉 80 가지의 속타입 진동에 대하여 15 명의 평가자가 크기 예측법으로 평가한 불편함을 정규화된 3 가지 물리량의 함수관계를 Fig 4 에 나타내었다. 주파수 가중하지 않은 peak-to-peak 와 VDV 그리고 M_b 가중한 VDV 값과 주관적인 불편함 사이의

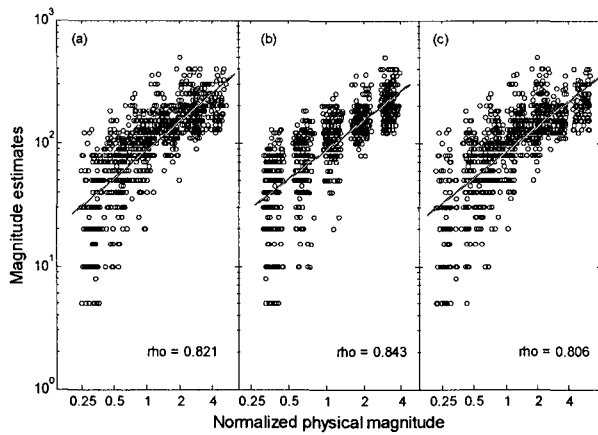


Fig. 4 Spearman's correlation coefficients between subjective ratings of shock-type vibration between: (a) normalized peak-to-peak value, (b) normalized unweighted VDV, (c) normalized \mathbb{W}_b weighted VDV

서열 상관도를 나타내는 Spearman 상관계수는 각각 0.821, 0.843 그리고 0.806 으로 나타났다. 속타입 진동의 객관적인 3 가지 물리량의 크기 증가는 주관적인 불편함의 증가와 중요한 상관성이 있음을 확인하였다($p < 0.001$). 그리고 \mathbb{W}_b 가중함수를 속타입 진동에 적용하였을 경우에는 상관도 향상에 크게 도움이 되지 않음을 알 수 있다.

속타입 진동을 느끼는 신체부위는 크게 3 가지 영역으로 나누어 구분하였다. 즉, 상체영역(복부, 가슴, 어깨, 머리)와 하체영역(발, 다리, 엉덩이, 허리), 그리고 특정 영역을 구분되지 않은 경우(전신, 불편함 없음)로 분류하였다. 속 타입 진동의 기본주파수와 크기가 진동을 느끼는 신체부위에 미치는 영향을 평가하기 위하여 sign test 를 이용하였다. Sign test 에서 하체영역은 음의 부호로 상체영역은 양의 부호로 하고 그 외의 경우는 sign test 항목에서 무시하였다.

Table 1 Most uncomfortable part of the body during shock-type vibration by using sign test; U: upper body ($p < 0.01$), u: upper body ($p < 0.05$), L: lower body ($p < 0.01$), l: lower body ($p < 0.05$), -: not significant.

magnitude	frequency																
	0.5	0.63	0.8	1.0	1.25	1.6	2.0	2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	
lowest	u	-	-	-	-	-	-	-	-	l	L	L	l	l	L	L	L
low	u	u	-	-	-	-	-	-	-	L	l	l	-	L	L	L	L
middle	u	u	-	u	-	-	-	-	-	-	-	-	-	l	L	l	L
high	u	u	u	u	u	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	L	L
highest	u	u	u	u	u	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 1 은 속타입 진동에 민감한 신체부위에 대한 sign test 결과를 나타내고 있다. 일반적인 경향으로 상체영역은 주로 낮은 기본주파수 큰 크기의 속진동을 느끼고, 하체영역은 높은 기본주파수 작은 크기의 속진동에 민감하다는 것을 알 수 있다.

3.2 등안락성 곡선

각각의 평가자가 16 가지 기본주파수에서 5 가지 크기에 대하여 크기 예측한 일례를 Fig. 5 에 나타내었다. 그림으로 보는 바와 같이 물리량의 종류에 따라 속타입 진동의 절대적인 크기는 달라지지만 상대적인 비는 변하지 않고 일정하다. 불편함의 크기 예측 값과 물리적 크기에 로그를 취한 후 구한 최소자승법의 회귀곡선의 기울기는 심리물리학 법칙인 Stevens 의 power law 의 지수 값으로 적용하였다.

$$\psi = k\phi^n \tag{3}$$

$$\log_{10}\psi = n \log_{10}\phi + \log_{10}k \tag{4}$$

Fig. 5 에서 가로축의 Q 점은 기준 속과 동일한 크기의 불편함을 유발하는 시험 속의 물리적인 크기, 즉 등안락성 크기를 나타낸다. 각각의 기본주파수에 대한 등안락성 크기를 이용하여 속타입 진동을 위한 등안락성곡선을 만들 수 있다. 본 연구에서는 속타입 진동의 물리량의 종류에 따른 등안락성곡선을 비교하기 위하여 기준 속으로 정규화한 등안락성곡선을 나타내었다. 15 명의 평가자들에 대한 정규화한 등안락성곡선과 Stevens 의 power law 지수의 중간값(median)을 Fig. 6 에 나타내었다.

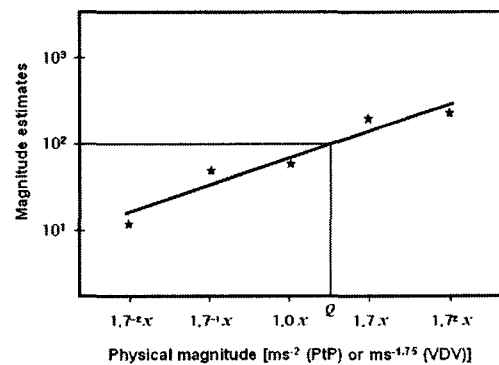


Fig. 5 Plot of magnitude estimates against physical magnitude ($x=3.1 \text{ ms}^{-2}$ in peak-to-peak, $x=1.0 \text{ ms}^{-1.75}$ in unweighted VDV, or $x=0.5 \text{ ms}^{-1.75}$ in \mathbb{W}_b weighted VDV)

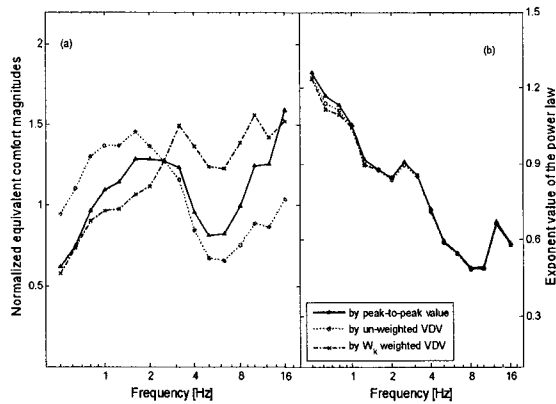


Fig. 6 a) normalized equivalent comfort contour of shock-type vibration (b) exponent value of the Steven's power law

속타입 진동의 동안락성곡선은 정상신호 진동과는 달리 진동의 크기를 정의하는 물리량의 종류에 따라 곡선의 모양이 달라 짐을 Fig. 6 으로부터 알 수 있다. 속타입 진동의 지속시간과 무관하게 측정되는 peak-to-peak 값에 의한 동안락성곡선은 축적하여 계산한 VDV 에 비하여 저주파 영역에서 작게 되고, 고주파 영역에서 크게 된다.

주파수가중하지 않은 peak-to-peak 값과 VDV 에 의한 동안락성곡선에서는 1.0 Hz 이하와 4.0 - 8.0 Hz 의 속타입 진동이 다른 주파수에 비하여 민감한 것을 알 수 있다. 그리고 W_b 주파수가중합수를 적용한 VDV 에 의한 곡선은 기본주파수에 대하여 일정한 값을 보이지 못하고 기본주파수가 높아질수록 증가하는 모양을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 정현신호에 적용되는 국제표준의 W_b 주파수가중합수는 속타입 진동과 같은 과도진동에는 적합하지 않음을 의미하는 것이다.

Stevens 의 power law 지수의 중간값은 속타입 진동의 기본주파수가 증가와 함께 약 1.2 부터 약 0.6 이하까지 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다 ($p < 0.0001$; Spearman).

4. 결론

객관적인 물리량으로 동일한 크기를 가지는 속타입 진동에 대한 불편함은 기본주파수에 따라 달라지고, 1 Hz 이하의 저주파수와 인체의 공진영역인 4-10Hz 영역의 주파수에서 상대적으로 불편함

을 크게 느끼는 것을 알 수 있었다. 속타입 진동 크기 변화에 따른 불편함이 증가하는 정도는 기본주파수가 낮을수록 크고, 높은 기본주파수에서는 불편함이 증가하는 비율이 작음을 알 수 있었다. 저주파수의 속타입 진동은 주로 상체부위에서 민감하게 느끼고, 고주파의 경우는 하체부위에서 불편함을 느끼는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1)International Organization for Standardization (1997) Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration. ISO 2631-1. International Organization for Standardization.
- (2)British Standards Institution (1987) Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. BS 6841. London: British Standards Institution.
- (3)Huston D. R., Zhao X. and Johnson C. C. (2000) Whole-body shock and vibration: Frequency and amplitude dependence of comfort. Journal of Sound and Vibration 230(4), 964 - 970.
- (4)Dupuis H., Hartung E. and Haverkamp M. (1991) Acute effects of transient vertical whole-body vibration. Occupational and Environmental Health 63, 261 - 265.
- (5)Wikstrom B. O., Kjellberg A. and Dallner M. (1991) Whole-body vibration: A comparison of different methods for the evaluation of mechanical shocks. International Journal of Industrial Ergonomics 7, 41 - 52.
- (6)Howarth H. V. C. and Griffin M. J. (1991) Subjective reaction to vertical mechanical shocks of various waveforms. Journal of Sound and Vibration 147(4), 395 - 408.
- (7)Ruffell C. M. and Griffin M. J. (1995) Effects of 1-Hz and 2-Hz transient vertical vibration on discomfort. Journal Acoustical Society of America 94(4), 2157 - 2164.
- (8)Spang K., (1997) Assessment of whole-body vibration containing single event shocks. Noise Control Engineering Journal 45(1), 19 - 25.
- (9)Jonsson P. and Johansson O. (2005) Prediction of vehicle discomfort from transient vibration. Journal of Sound and Vibration 282, 1043 - 1064.