

# 수직방향 전신 충격진동의 불편함 평가를 위한 주파수가중곡선 개발

## Development of Frequency Weighting Shape for Evaluation of Discomfort due to Vertical Whole-body Shock Vibration

안 세 진† · M. J. Griffin\* · 정 의 봉\*\*

Se Jin Ahn, Michael J. Griffin and Weui Bong Jeong

(2006년 4월 17일 접수 ; 2006년 5월 30일 심사완료)

**Key Words :** Discomfort(불편함), Frequency Weighting Function(주파수가중함수), Equivalent Comfort Contour(등안락성곡선), Shock Vibration(충격진동), Whole-body Vibration(전신진동), Vibration Dose Value(진동누적값)

### ABSTRACT

Shock vibrations are usually experienced in vehicles excited by impulsive input, such as bumps. The frequency weighting functions of the current standards in ISO 2631 and BS 6841 are to help objectively predict the amount of discomfort of stationary vibration. This experimental study was designed to develop frequency weighting shape for shock vibration having various fundamental frequencies from 0.5 to 16 Hz. The shocks were produced from the response of single degree-of-freedom model to a half-sine force input. Fifteen subjects used the magnitude estimation method to judge the discomfort of vertical shock vibration generated on the rigid seat mounted on the simulator. The magnitudes of the shocks, expressed in terms of both peak-to-peak value and un-weighted vibration dose values (VDVs), were correlated with magnitude estimates of the discomfort. The frequency weighting shapes from the correlation were developed and investigated having nonlinearity due to the magnitude of the shock.

### 1. 서 론

여러 가지 자세(posture)에 대한 전신진동(whole-body vibration)의 불편함(discomfort)을 객관적으로 예측하기 위하여 ISO 2631 국제표준 또는 BS 6841 영국표준에서 규정하고 있는 주파수가중함수(frequency weighting function)를 사용한다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 주파수가중함수는 정상상태(stationary) 진동에

인체가 노출되는 경우를 가정하여 실시한 실험으로부터 얻은 인체반응 결과를 반영한 것이다. 그러므로 정상주행 중인 차량의 시트에서 발생하는 진동에 대하여 이러한 주파수 가중함수를 적용하여 계산한 객관적인 물리량은 승객이 느끼는 주관적인 불편함과 높은 상관성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그런데 충격 또는 과도 진동의 경우에는 기존의 표준주파수가중함수를 적용하는 데 있어서 몇몇 연구에서 의문을 제기해 왔고, 과도신호에 알맞은 주파수가중함수뿐만 아니라 향상된 계산 방법을 개발하기 위한 노력이 여러 가지 방법으로 진행되어 왔다.<sup>(3~5)</sup>

충격진동의 불편함을 예측하는 향상된 방법을 개

† 책임저자; 정회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : sjahn@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-3088, Fax : (051) 517-3805

\* ISVR, University of Southampton, UK

\*\* 정회원, 부산대학교 기계공학부

발하기 위한 기존의 연구에서는 실험에 사용된 충격진동의 종류와 특성에 따라 제각기 다른 결론을 내리고 있다. 예를 들어 1자유도 충격응답신호를 수직방향 전신진동의 자극으로 사용한 연구에서는 국제표준의 주파수가중함수를 적용하여 계산한 VDV (vibration dose value)가 주관적 불편함과 높은 상관관계를 나타내었고<sup>(6)</sup>, 80초 동안의 랜덤 백그라운드 진동에 한 주기(one cycle)의 정현파신호를 간헐적으로 중첩한 충격진동을 이용한 연구에서도 VDV값이 다른 방법으로 계산한 물리량보다 충격진동의 불편함과 높은 상관도를 나타내었다.<sup>(7)</sup>

반면에 Spang은 오프로드(off-road)를 주행하는 차량에서 추출한 충격신호를 이용한 인체반응실험에서는 러닝 실효값(running rms)이 진동에 대한 불편함의 정도와 가장 높은 상관도를 나타내었고<sup>(8)</sup>, 다양한 장애물을 넘는 트랙터(tractor)에서 발생하는 충격진동에 대한 현장실험(field test)을 실시한 Wikstrom 등은 실효누적값(dose value based on an rms)이 상대적으로 높은 상관도 나타내었다.<sup>(5)</sup> 그리고 Jonsson and Johansson은 포크 리프트(forklift)의 중량과 주행속도를 조절하면서 일정한 장애물을 넘을 때 발생하는 다양한 충격진동에 대해서는 최대과도진동값(maximum transient vibration value)이 불편함과 높은 상관성을 나타내었다.<sup>(9)</sup>

이 연구에서는 1 자유도 진동모델에 반사인파(half-sine)의 가진력이 입력되었을 때 나타나는 가속도 응답신호를 인체진동 실험의 충격진동신호로 이용하였다. 반사인파 가진력의 주기와 진동모델의 질량과 강성 그리고 감쇠를 조정하여 다양한 기본주파수(fundamental frequency)를 갖는 충격진동신호를 만들었다. 이러한 충격진동이 앉은 자세로 있는 평가자에게 상하방향으로 노출되었을 때, 평가자가 느끼는 주관적인 불편함과 충격진동의 물리적인 크기와의 상관관계를 도출하고, 나아가 충격진동에 대한 주파수가중곡선을 개발하는 것이 이 연구의 목표이다. 이 연구의 인체진동 실험을 위해 “충격진동의 불편함은 충격진동의 기본주파수에 의존한다”라는 가설(hypothesis)을 설정하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 충격진동

실제 차량에서 발생하는 충격진동은 매우 복잡하고 다양한 형태로 나타난다. 특히 범프와 같은 장애물을 통과할 때 발생하는 시트의 수직방향 충격진동은 차량의 서스펜션과 타이어 그리고 시트의 특성에 의존하며, 시간이 지남에 따라 감쇠하는 진동이다.<sup>(5,9)</sup> 이 연구에서는 장애물을 통과하는 차량의 시트에서 발생하는 충격감쇠진동의 단순화된 신호를 모의(simulation)하기 위하여 Fig. 1과 같이 1 자유도 진동모델과 반사인파 가진력을 이용하였다. 이때 반사인파 가진력 입력에 해닝창함수(hanning window)를 적용하여 충격진동 신호의 시작점을 부드럽게 하였다.

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

여기서  $A$ 와  $t_0$ 는 반사인파 가진력의 크기와 지속시간을 나타낸다.

이 연구에서는 진동모델의 질량과 강성 그리고 반사인파 가진력의 지속시간을 조정하여 다양한 기본주파수를 갖는 충격진동을 만들었다. 그리고 충격진동의 물리적인 크기는 최대값과 최소값의 차이인 피크피크(peak-to-peak)값 또는 4승 누적합의 4승근인 진동누적값(vibration dose value : VDV)로 나타내었다. 충격진동의 크기는 반사인파 가진력의 크기로 조정하였다.

이 연구의 인체진동 실험에 사용된 충격진동의 기본주파수는 0.5 ~ 16.0 Hz 사이에 1/3옥타브 간격으로 16가지이고, 각각의 기본주파수에 대하여 VDV값으로 0.35 ~ 2.89 ms<sup>-1.75</sup> 사이에 5가지 크기(즉, 1.7<sup>-2</sup>, 1.7<sup>-1</sup>, 1.0, 1.7 and 1.72 ms<sup>-1.75</sup>)이다.

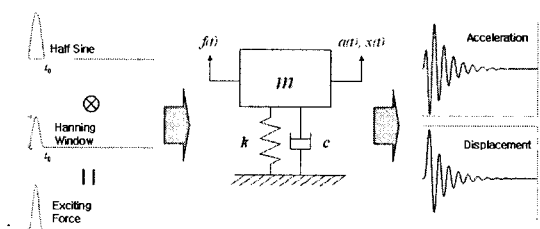


Fig. 1 Shock response of single degree of freedom model to hanning-windowed half-sine input

진동모델의 감쇠비는 모든 기본주파수에 대하여 0.1로 고정하였고, 충격진동의 지속시간은 기본주파수에 의존한다. Fig. 2는 이 연구에서 사용된 충격진동을 기본주파수 별로 예시한 것이다.

### 2.2 실험장비 및 평가자

상하방향 충격진동 자극(stimulus)을 생성하기 위하여 ISVR (institute of sound and vibration research)이 보유하고 있는 유압 시뮬레이터(hydraulic simulator)를 이용하였다. 발생한 충격진동의 불편함을 주관적으로 평가하는 평가자(subjects)들은 모두 15명의 남자이고, 나이는 22 ~ 39세 (평균: 30.2)이고, 몸무게는 54 ~ 105 kg (평균: 75 kg)이고, 신장은 168 ~ 186 cm (평균: 175.8 cm)이었다. 평가자는 시뮬레이터에 설치된 등받이가 없는 강체 의자에 편안하게 직립한(upright) 자세로 앉고, 허벅지는 수평으로 하고 정강이는 수직이 되도록 하였다.

시뮬레이터의 상대변위와 작동음으로 인한 평가오차를 줄이기 위하여 평가자는 눈가리개(eye mask)와 헤드폰(headphone)을 착용하였다. 가속도계(setra system, 141A type)를 사용하여 강체 시트의 상하방향 진동을 측정하였고, 측정된 가속도 신호는 130 Hz의 엔티-앨리어징(anti-aliasing) 필터를 적용한 후 400 데이터/초로 샘플링하여 디지털신호로 변환하였다. 그리고 0.5 ~ 16.0 Hz의 기본주파수를 가지는 충격진동의 물리적 크기, 즉 피크피크값 VDV

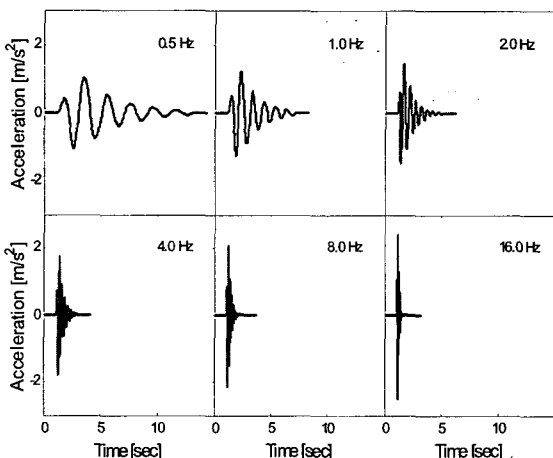


Fig. 2 Waveforms of shock vibration having unit unweighted VDV

를 계산하기 전에 고주파 왜란(noise)을 제거하기 위하여 40 Hz 저주파통과필터(low-pass filter)를 적용하였다.

이 연구의 실험은 ISVR에서 규정하고 있는 인체 실험의 안전과 윤리(human experimentation safety and ethics)에서 규정하는 각종 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 감각(sensation)의 상대적인 크기를 평가하는 크기 평가법(magnitude estimation method)을 이용하였다. 모든 평가자들은 실험을 시작하기 전에 크기 평가법을 숙달하기 위하여 종이에 그려진 크기가 다른 두 원의 지름을 비교하여 평가하는 연습을 실시하였다.

Fig. 3은 크기 평가법의 절차에 따라 평가자에게 전달되는 기준 및 시험 충격진동의 순서와 방법을 예시한 것이다. 크기 평가법에서 기준 자극은 기본주파수가 2.5 Hz이고 크기가  $1.0 \text{ ms}^{-1.75}$  (VDV)인 충격진동으로 하였다. 기준 충격진동은 약 4초 동안 발생하고, 2초간 중지한 후 시험 충격진동을 발생하였다. 이때 시험 충격진동의 지속시간은 기본주파수에 따라 달라지며 최단 0.2초에서 최장 15초이다.

크기 평가법에 의하여 기준 충격진동과 시험 충격진동을 연속하여 경험한 평가자는 기준 충격진동의 불편함을 100으로 지정하였을 때 시험 충격진동 불편함의 정도를 숫자로 표현하도록 하였다.

충격진동의 물리적인 크기는 주파수 가중하지 않은 피크피크값과 VDV값으로 측정하고, 국제표준의 주파수가중함수를 적용한 VDV값도 함께 측정하

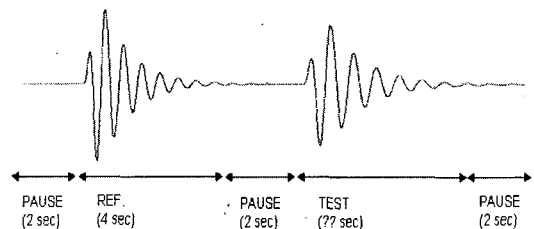


Fig. 3 Example of reference and test shock vibrations in magnitude estimation method

었다. 앉은 자세의 상하방향 전신진동에 대한 ISO와 BS에서 각각 규정하고 있는  $W_k$ 와  $W_b$ 는 저주파수에서의 미미한 차이를 제외하고 매우 유사하다.<sup>(10)</sup> 이 연구에서  $W_b$  주파수가중함수를 충격진동의 가속도 신호에 적용하여 VDV를 구하였다. 그리고 충격진동의 불편함과 여러 가지 물리량과의 상관관계를 용이하게 비교 관찰하기 위하여 다음 식과 같이 기준 충격진동의 물리량을 이용하여 정규화(normalized)하였다.

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

여기서  $\varphi_{\text{test}}$ 는 시험 충격진동의 물리량이고  $\varphi_{\text{ref}}$ 는 기준 충격진동의 물리량을 나타낸다. 이때 기준 충격진동의 물리량은 주파수가중하지 않은 VDV값으로  $1.0 \text{ ms}^{-1.75}$ 이고 피크피크값으로는  $3.1 \text{ ms}^{-2}$ 이며,  $W_b$  주파수가중함수를 적용한 VDV값으로는 약  $0.5 \text{ ms}^{-1.75}$ 이 된다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 주관평가

16 가지 기본주파수에 대한 5 가지의 크기, 즉 80 가지의 충격진동에 대하여 15명의 평가자가 크기 평가법으로 평가한 불편함을 정규화된 3가지 물리량과의 함수관계를 Fig. 4에 나타내었다. 주파수

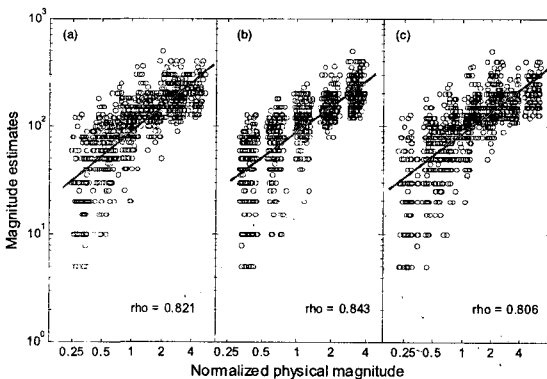


Fig. 4 Spearman's correlation coefficients between subjective ratings of shock vibration and: (a) normalized peak-to-peak value, (b) normalized unweighted VDV, (c) normalized  $W_b$  weighted VDV

가중하지 않은 피크피크값과 VDV 그리고  $W_b$  가중한 VDV 값과 주관적인 불편함 사이의 서열 상관도를 나타내는 Spearman 상관계수는 각각 0.821, 0.843 그리고 0.806으로 나타났다. 이것으로부터 충격진동의 객관적인 3가지 물리량의 크기 증가는 주관적인 불편함 증가와 통계적으로 중요한(significant) 상관성이 있음을 알 수 있다( $p < 0.001$ : Spearman). 그리고 국제표준에서 규정하고 있는 주파수가중함수인  $W_b$ 를 적용한 충격진동의 물리량이 불편함과 상관관계를 향상시키지 못 함을 알 수 있다.

#### 3.2 등안락성 곡선

각각의 평가자가 16가지 기본주파수에서 5가지 크기에 대하여 크기 평가한 일례를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 이 연구의 충격진동의 물리량은 계산방법에 따라 정량적인 값은 달라 지지만 상대적인 크기의 비는 변하지 않고 일정하다. 그러므로 충격진동의 크기 평가값과 물리적 크기에 로그를 취한 후 최소자승법으로 구한 회귀직선(regression line)의 기울기는 물리량을 계산하는 방법에 상관없이 동일하다. 이 연구에서는 16가지 기본주파수에 대하여 회귀직선 기울기를 구하고, 평가자 각자에 대한 그 기울기 값을 심리물리학 법칙인 Stevens 지수법칙(Stevens' power law)의 지수값,  $n$ 으로 이용하였다.

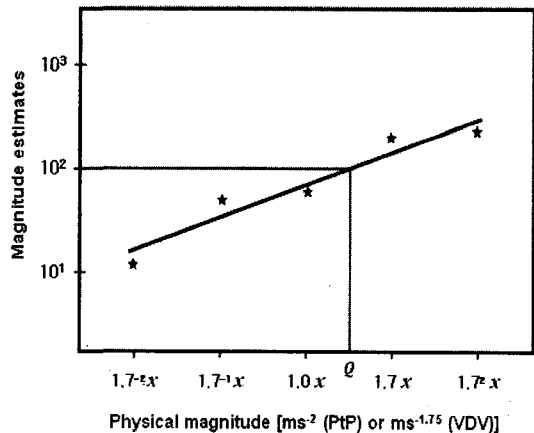


Fig. 5 Plot of magnitude estimates against physical magnitudes of shock vibration ( $x=3.1 \text{ ms}^{-2}$  in peak-to-peak,  $x=1.0 \text{ ms}^{-1.75}$  in unweighted VDV, or  $x=0.5 \text{ ms}^{-1.75}$  in  $W_b$  weighted VDV)

$$\Psi = k \varphi^n \quad (3)$$

$$\log_{10} \Psi = n \log_{10} \varphi + \log_{10} k \quad (4)$$

여기서  $\Psi$  는 자극량  $\varphi$  에 대한 감각량을 의미하며, 지수  $n$  은 자극(충격진동)의 크기가 증가할 때 감각(불편함)이 증가하는 비율을 의미한다. 15명의 평가자에 대하여 구한 지수법칙 지수값은 기본주파수가 증가함에 따라 지수값은 감소하는 통계수치를 보였다( $p < 0.0001$ ; Spearman). Fig. 6에 나타낸 기본주파수별 지수값의 중간값(median value)은 최고 1.2 (0.5Hz)에서 최저 0.4 (6.3Hz) 정도가 되었다.

Fig. 5의 Q점은 기준 충격진동과 동일한 불편함을 유발하는 시험 충격진동의 물리적인 크기, 즉 등안락성 크기(equivalent comfort magnitude)를 나타낸다. 모든 기본주파수에 대하여 등안락성 크기를 나타낸 것이 등안락성 곡선(equivalent comfort contour)인데, 충격진동의 크기를 표현하는 물리량에 따라 곡선의 모양은 달라지게 된다. 이 연구에서는 충격진동의 크기를 계산하는 물리량의 종류에 따른 등안락성 곡선의 모양을 비교하기 위하여 기준 충격진동의 크기(100)로 정규화된 크기 평가값을 이용하였다.

충격진동의 크기를 표현하는 3가지 물리량에 따라 곡선의 모양이 달라짐을 Fig. 7로부터 알 수 있다. 충격진동의 지속시간과 무관하게 계산되는 피크 피크 값에 의한 등안락성 곡선은 진동량을 축적하여

계산한 VDV에 비하여 지속시간이 긴 저주파 영역에서는 낮게 되고, 지속시간이 짧은 고주파 영역에서는 높게 됨을 관찰할 수 있다.

주파수가중하지 않은 피크피크값으로 구한 등안락성 곡선에서는 1.0 Hz 이하의 저주파수와 인체 고유 진동수 영역에 해당하는 4~8 Hz에서 낮은 값을 나타내었고, 주파수가중하지 않은 VDV값에 의한 것은 3.2 Hz 이상의 기본주파수에서 낮은 값을 나타내었다. 표준 주파수가중함수  $W_b$  를 적용하려 구한 등안락성 곡선은 저주파수에서 고주파수로 갈수록 증가하는 모양이다. 이것으로부터 표준 주파수가중함수는 저주파수의 충격진동에 대한 불편함을 실제보다 낮게 평가하고 있고, 고주파수 충격진동에 대해서는 상대적으로 높게 평가하고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 충격진동을 위한 주파수가중곡선

충격진동의 크기 증가에 따른 불편함이 증가하는 비율을 나타내는 Stevens 지수법칙의 지수값이 기본주파수에 의존하는 것을 Fig. 6에서 보았다. 그리고 충격진동의 크기를 표현하는 물리량에 따라 등안락성 곡선의 모양이 달라지는 것을 Fig. 7에서 확인하였다. 이 연구에서는 Stevens 지수법칙의 지수값과 등안락성 곡선을 이용하여 아래 식과 같이 충격진동에 적용되는 주파수가중함수를 개발하였다.

$$W_s(f) = \frac{1}{E(f)} \times M^{n(f)} \quad (5)$$

여기서,  $f$  는 충격진동의 기본주파수를 의미하고,

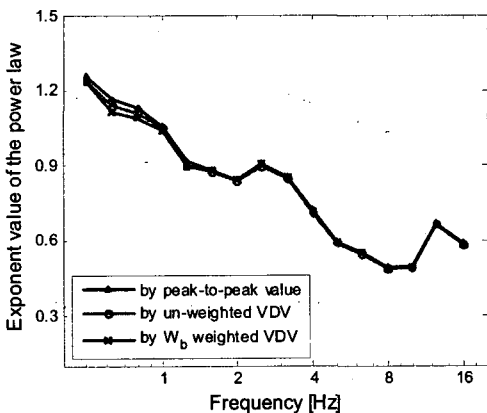


Fig. 6 Exponent values of the Stevens' power law for shock vibration

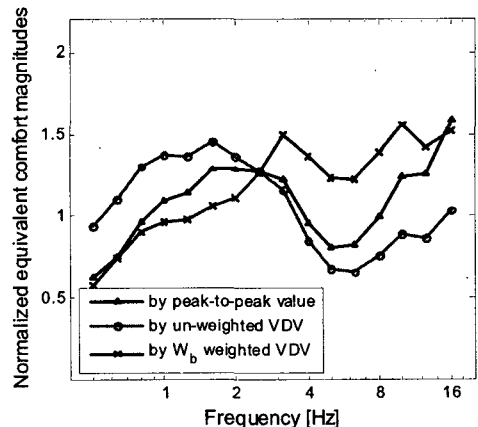


Fig. 7 Normalized equivalent comfort contours of shock vibration

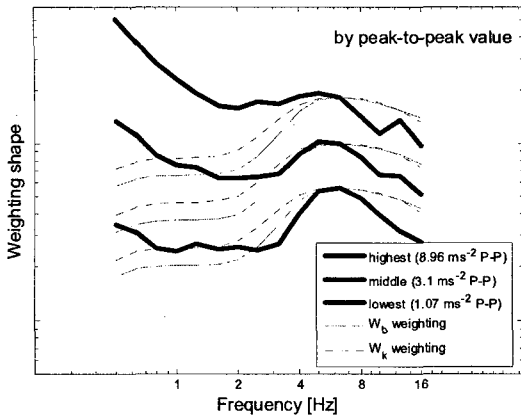


Fig. 8 Frequency weighting shapes for shock-type vibration compared with  $W_b$  of BS 6841 and  $W_k$  of ISO 2631 (obtained by using peak-to-peak value)

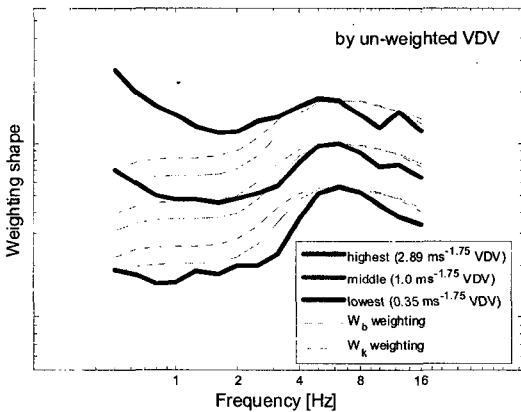


Fig. 9 Frequency weighting shapes for shock-type vibration compared with  $W_b$  of BS 6841 and  $W_k$  of ISO 2631 (obtained by using un-weighted VDV)

$E(f)$ 와  $n(f)$ 는 충격진동의 기본주파수에 따른 등안락성 곡선과 Stevens 지수법칙의 지수값을 의미한다. 그리고  $M$ 은 기본 충격진동의 물리량에 대한 관심 충격진동의 물리량의 비(ratio)를 의미한다. 이때 기본 충격진동의 물리량은  $1.0 \text{ ms}^{-1.75}(\text{VDV})$  또는  $3.1 \text{ ms}^{-2}(\text{peak-to-peak})$ 이다.

피크피크값과 VDV를 이용하여 구한 충격진동을 위한 주파수가중 곡선을 국제표준의 주파수가중함수와 비교하여 Fig. 8과 9에 각각 나타내었다. 충격진동의 크기가 작을 경우에 대해서는 국제표준의 주파수가중함수와 이 연구에서 구한 주파수가중 곡선은

매우 유사함을 알 수 있다. 하지만 충격진동의 크기가 클 경우에는 국제표준의 주파수가중함수는 저주파 충격진동을 낮게 평가하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

동일한 크기의 물리량을 가지는 충격진동 대하여 인체가 느끼는 불편함은 충격진동의 기본주파수에 따라 달라지고, 1 Hz 이하의 저주파수와 인체의 공진영역인 4 ~ 10 Hz 영역의 주파수에서 상대적으로 큰 불편함을 느끼는 것을 알 수 있었다. 충격진동의 물리적인 크기가 증가함에 따른 불편함의 증가 비율은 기본주파수가 낮을수록 크고, 높은 기본주파수에서는 그 비율이 작음을 알 수 있었다. 충격진동의 크기가 작을 경우에는 국제표준의 주파수가중함수를 적용하는 것이 바람직하지만, 충격진동의 크기가 커질수록 국제표준의 주파수가중함수는 저주파수의 충격진동을 너무 낮게 평가함을 알 수 있었다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- (1) International Organization for Standardization, 1997, Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration, ISO 2631-1.
- (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, Vol. 230, No. 4, pp. 964 ~ 970.
- (4) Dupuis, H., Hartung, E. and Haverkamp, M., 1991, "Acute Effects of Transient Vertical

Whole-body Vibration," Occupational and Environmental Health, Vol. 63, pp. 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, Vol. 7, pp. 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, Vol. 147, No. 4, pp. 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, Vol. 94, No. 4, pp. 2157 ~ 2164.

(8) Spang, K., 1997, "Assessment of Whole-

body Vibration Containing Single Event Shocks," Noise Control Engineering Journal, Vol. 45, No. 1, pp. 19 ~ 25.

(9) Jonsson, P. and Johansson, O., 2005, "Prediction of Vehicle Discomfort from Transient Vibration," Journal of Sound and Vibration, Vol. 282, pp. 1043 ~ 1064.

(10) Griffin, M. J., 1998, "A Comparison of Standardized Methods for Predicting the Hazards of Whole-body Vibration and Repeated Shocks," Journal Acoustical Society of America, Vol. 215, No. 4, pp. 883 ~ 914.

(11) Cheung, W. S., Park, Y. H. and Griffin M. J., 2000, "Comparison and Analysis of Standardised Methods for Predicting the Hazards of Whole-body Vibration and Repeated Shocks," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 160 ~ 167.