

# 수직방향 충격 진동에 대한 인체동역학적 특성

## DYNAMICS OF HUMAN BODY RESPONDING TO SHOCK-TYPE VERTICAL WHOLE-BODY VIBRATION

안세진† · 윤성호\* · 장익순\* · 김중희\*

Se Jin Ahn, Seong Ho Yoon, Ik Soon Chang, and Joong Hee Kim

### ABSTRACT

Impulsive excitation on vehicles produces shock-type vibration on the seat, usually which has major frequencies and damping ratios dependent on the characteristics of the suspension, the tire, the seat cushion and so on. The response of single degree of freedom model to a half-sine force input was considered as simple shock-type vibration signal. The quasi-apparent-mass for fifteen subjects was obtained with the shock-type vibration generated on the rigid seat, so its nonlinearity was found over 6.3 Hz according to the difference of magnitude of the shocks.

### 1. 서 론

전신진동에 노출된 인체에 대한 겉보기질량(apparent mass)과 임피던스(Impedance)는 인체를 지지하고 있는 구조물로부터 인체로 전달되는 진동량의 주파수특성을 나타낸 것이다<sup>(1)</sup>. 인체의 겉보기질량은 생체동역학적 해석모델 개발뿐만 아니라 진동에 의한 불편함(discomfort)을 예측하기 위한 중요한 자료로 활용되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 앉은 자세에서 진동에 노출된 인체에 대한 겉보기질량의 이상적인 범위를 ISO/DIS-5982 에서 제안하고 있다<sup>(4)</sup>. 그런데 인체의 겉보기질량은 진동에 노출된 인체의 특성과 자세 그리고 진동의 크기와 방향 등에 의해 다양한 형태로 나타나는 것으로 조사되고 있다<sup>(5-8)</sup>.

Miwa 는 3-200Hz 범위의 주파수에 대한 상하방향 전신진동을 이용하여 다양한 자세에 따른 인체의 생체동역학적 특성의 차이를 연구하였다<sup>(5)</sup>. 이 연구에서 무릎 꿇은 자세(kneeling), 앉은 자세(sitting) 그리고 일어선 자세(standing)에 대한 겉보기질량에는 분명하게 구분되는 차이가 있는 것으로 보고하였다. 그리고 Rakheja 등은 자동차

에 앉은 자세를 고려하여 손의 위치, 시트의 기울기, 등받이의 기울기, 발의 위치, 등의 변화에 대한 인체의 겉보기질량의 차이를 연구하였다<sup>(6)</sup>. 여기서 승객을 고려하여 손을 무릎에 둔 경우와 운전자를 고려하여 손을 조향휠 위치에 둔 경우에 대한 인체 겉보기질량의 피크 주파수와 크기에서 뚜렷한 차이가 발견되었다.

진동의 크기에 따른 인체 겉보기질량의 비선형성(nonlinearity)에 관한 연구에서는 인체의 자세와 실험조건에 따라 매우 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 20Hz 이하의 주파수범위를 가지는 시트의 상하방향 랜덤진동을 이용한 Fairley and Griffin 의 실험에서는 진동의 크기가  $0.25 \text{ ms}^{-2}$  (r.m.s.)에서  $2.0 \text{ ms}^{-2}$  (r.m.s.)로 커지면 겉보기질량의 최대 피크의 주파수는 6 Hz 에서 4 Hz 로 낮아지는 비선형성을 보고하였다<sup>(7)</sup>. 그리고 Nawayseh and Griffin 은 랜덤진동(주파수범위: 0.25 - 25 Hz, 크기범위:  $0.125-1.25 \text{ ms}^{-2}$  r.m.s.)를 이용하여 다리(legs)가 시트에 놓이는 상태에 따른 인체 겉보기질량의 비선형성에 관한 연구를 하였다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 1 자유도 진동모델에 반사인파(half-sine)의 가진력이 입력되었을 때 나타나는 가속도 응답신호의 형태를 속타입 진동으로 정의하였고, 반사인파 가진력의 주기와 진동모델의 질량과 강성값을 조정하여 다양한 기본주파수를 갖는 속타입 진동신호를 만들었다. 그리고 속타입

† 책임저자; 르노삼성자동차 기술연구소 소음진동팀

E-mail : sejin.ahn@renaultsamsungM.com

Tel : (031) 289-8019, Fax : (031) 2893-7958

\* 르노삼성자동차

진동에 노출된 인체에 대한 준겉보기질량(quasi-apparent mass)을 구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 속타입 진동

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 따라 다양한 주파수와 감쇠를 가지는 진동이 된다. 본 연구에서는 장애물을 통과하는 차량의 시트에서 발생하는 충격감쇠진동의 단순화된 신호를 모의(simulation)하기 위하여 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 지속 시간을 나타낸다.

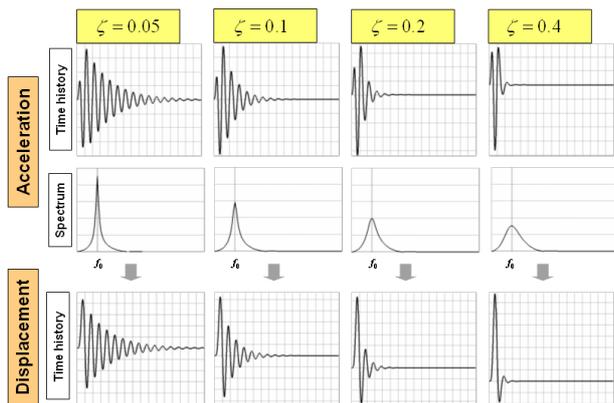


Figure 1 Shocks having different damping ratios, but the same nominal frequency and the same unweighted vibration dose value.

본 연구에서는 진동모델의 질량, 강성, 감쇠비와 반사인파 가진력의 지속시간을 조정하여 다양한 기본주파수와 감쇠를 갖는 속타입 진동을 만들었다. 그리고 속타입 진동의 물리적인 크기는 최대

값과 최소값의 차이인 피크피크(peak-to-peak)값 또는 4 승 누적합의 4 승 근인 진동누적값(vibration dose value: VDV)으로 나타내었다. 속타입 진동의 크기는 반사인파 가진력의 크기로 조정하였다.

본 연구의 인체진동 실험에 사용된 속타입 진동의 기본주파수는 0.5 - 16.0 Hz 사이에 1/3 옥타브 간격으로 16 가지이고, 각각의 기본주파수에 대하여 VDV 값은 0.35 - 2.89  $\text{ms}^{-1.75}$  사이에 5 가지 크기 (즉, 1.7<sup>2</sup>, 1.7<sup>-1</sup>, 1.0, 1.7, and 1.7<sup>2</sup>  $\text{ms}^{-1.75}$ )이다. 그리고 속타입 진동은 각각의 주파수에 대하여 4 가지 감쇠비(0.05, 0.1, 0.2, 0.4)를 가지며, 감쇠비가 가장 큰 0.4 에서는 위상이 역전된 속타입 진동을 본 실험에 추가하였다. 본 연구의 인체진동 실험에 사용된 속타입 진동의 가속도 및 변위 파형(waveform) 과 가속도 스펙트럼(spectrum)을 Fig. 1 에 나타내었다. 그림에서는 4 가지 감쇠비에 대하여 동일한 기본주파수와 VDV 를 가지는 속타입 진동의 파형과 스펙트럼을 비교하고 있다.

### 2.2 실험장비 및 피시험자

상하방향 속타입 진동은 ISVR (Institute of Sound and Vibration Research)이 보유하고 있는 유압 시뮬레이터(hydraulic simulator)에 의해 생성되었다. 시뮬레이터의 작동영역은  $\pm 1.0$  metre 변위 스트로크(stroke)와 0.2 Hz - 50 Hz 주파수범위이며, ISVR 에서 개발한 HVLab 시스템에 의해 제어된다.

시뮬레이터의 플랫폼에 고정된 강체 시트의 평판(600×400mm) 위에 힘 측정판(force platform: Kistler 9281 B)을 장착하여 강체 시트로부터 피시험자의 엉덩이로 전달되는 힘을 측정하였다. 힘 측정 판에 가속도계 (Setra System, 141A type)를 부착하여 강체 시트의 상하방향 가속도를 측정하였다. 측정된 힘 및 가속도 신호는 130 Hz 의 엔티-에어라이징(anti-aliasing) 필터를 적용한 후 400 샘플/초로 샘플링하여 디지털신호로 변환하였다. 그리고 0.5 - 16.0Hz 의 기본주파수를 가지는 속타입 진동의 가속도 및 힘 신호는 고주파 왜란(noise)을 제거하기 위하여 40 Hz 저주파통과필터(low-pass filter)를 적용하였다.

본 실험에 참가한 15 명의 남자 피시험자

(subjects)의 평균 나이는 30.2 세 (최저: 22, 최고: 39)이고, 평균 몸무게는 75 kg (최저: 54, 최고: 105) 이고, 평균 신장은 175.8 cm (최저: 168, 최고: 186) 이다. 피시험자는 시뮬레이터에 설치된 강체 의자에 편안하게 직립한(upright) 자세로 앉고, 허벅지는 수평으로 하고 정강이는 수직이 되도록 하였다. 본 연구의 실험은 ISVR 에서 규정하고 있는 인체 실험의 안전과 윤리(Human Experimentation Safety and Ethics)에서 규정하는 각종 심의에서 인정을 받은 후 실시하였다.

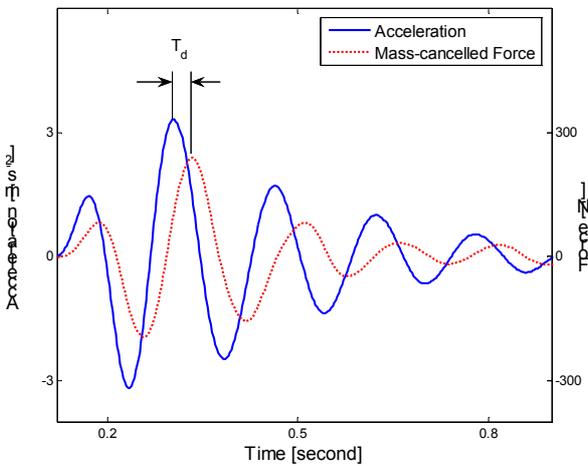


Figure 2 Acceleration and mass-cancelled force signal of a shock measured after low-pass filtering (frequency: 6.3 Hz; damping ratio: 0.1; magnitude:  $1.7 \text{ ms}^{-1.75}$ ).

### 3. 준겉보기질량의 정의

인체로 유입되는 진동량의 주파수 특성을 나타내는 겉보기질량(apparent mass)은 일반적으로 이산 주파수법(discrete frequency method)과 스펙트럼 분석법(spectral-analysis method)으로 측정된다<sup>(1)</sup>. 이산 주파수법은 관심 주파수의 정현파 진동으로 일정 시간 동안 가진하고 인체로 진동이 전달되는 위치에서의 가속도와 힘의 크기 비(ratio) 그리고 이들 간의 위상지연을 구하는 방법이다. 측정시간과 주파수 분해능에서 유리한 측면을 가지고 있는 스펙트럼 분석법은 정상상태 랜덤신호 진동을 인체에 가진하여 다음 식으로 겉보기질량을 구한다.

$$M(\omega) = \frac{S_{af}(\omega)}{S_{aa}(\omega)} \quad (2)$$

여기서,  $S_{af}(\omega)$ 는 진동이 인체로 전달되는 위치에서

의 가속도 신호와 힘 신호 사이의 상호밀도 스펙트럼(cross-spectral density)이고,  $S_{aa}(\omega)$ 는 가속도 신호의 파워밀도 스펙트럼(power spectral density)이다.

그런데 속타입 진동은 정현파 진동이 아닐 뿐만 아니라 정상상태가 아닌 과도신호이기 때문에 기존의 방법으로 겉보기질량을 구할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 진동체에서 인체로 전달되는 속타입 진동의 주파수에 따른 진동량을 나타내는 준 겉보기질량(quasi-apparent mass)과 위상지연을 정의하고 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$\text{Quasi-apparent-mass (kg)} = \frac{\left(\int F^4(t)dt\right)^{1/4}}{\left(\int A^4(t)dt\right)^{1/4}} \quad (3)$$

$$\text{Phase delay (degree)} = 360 \times \frac{T_d}{T_n} = 360 \times T_d \times f_n \quad (4)$$

여기서,  $A(t)$ 와  $F(t)$ 는 속타입 진동의 가속도와 힘 신호이고,  $f_n$ 과  $T_n$ 은 속타입 진동의 기본주파수와 주기를 의미한다. 그리고  $T_d$ 는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 가속도 속타입 진동신호가 최대가 되는 시간과 힘신호가 최대가 되는 시간 사이의 차이를 의미한다. 이때 측정된 힘 신호에서 힘 센서 위에 놓인 측정 판 질량(30 kg)을 제거하여 계산된 신호를 이용하였다. 각각의 기본주파수에서 속타입 진동의 측정된 힘 신호에서 측정판의 질량을 제거하는 식은 다음과 같다.

$$F(t) = F_s(t) - \frac{F_0(t)}{A_0(t)} A_s(t) \quad (5)$$

여기서,  $F_0(t)$ 와  $A_0(t)$ 는 피시험자가 탑승하지 않은 상태에서 측정한 각각의 기본주파수에 대한 속타입 진동의 힘 신호와 가속도신호이고,  $F_s(t)$ 와  $A_s(t)$ 는 피시험자가 탑승한 상태에서 측정한 힘 신호와 가속도 신호이다.

## 4. 실험결과 및 토론

### 4.1 속타입 진동 가속도 및 힘 신호

16 가지 기본주파수, 5 가지 크기, 4 가지 감쇠비와 역위상 1 가지, 총 400 가지의 속타입 진동을 15 명의 피시험자에게 노출하여 측정된 가속도 신호와 힘 신호의 크기를 Fig. 3 과 Fig. 4 에 각각 나타내었다. 본 연구에서는 속타입

크기를 나타낼 때, 가속도는 주파수 가중하지 않은 진동누적값(VDV: vibration dose value)으로 나타내었고, 힘은 가속도와 차원이 같아지도록 다음 식과 같이 4 승 누적합의 4 승근으로 나타내었다.

$$\text{Fourth root of integrated fourth power} = \left( \int F^4(t) dt \right)^{1/4} \quad (6)$$

각각의 기본주파수에서 측정된 가속도 신호의 크기는 실험 계획에서 목표로 한 크기와 다소 차이가 있는 것도 있음을 알 수 있다 (Fig. 3 참고). 이러한 차이는 유압시뮬레이터의 유체와 플랫폼으로 구성된 시스템의 특성이 진동 주파수에 따라 달라질 뿐만 아니라, 실험 시 주위 온도에 따라 유체의 특성이 영향을 받기 때문이다. 각각의 기본주파수에 대한 속타입 가속도 크기의 평균값에 대한 표준편차는 5 % 이내 인 것으로 확인되었으며, 본 연구에서는 동일한 주파수에서 가속도의 변화와 힘 크기의 변화는 비례한다는 가정하에 가속도 크기 편차에 의한 영향은 무시하였다.

속타입 진동의 힘 크기를 나타내는 Fig. 4 를 보면 15 명의 피시험자들의 각기 다른 몸무게 영향으로 인해 반력의 크기는 각각의 기본주파수에서 동일한 크기의 속타입 진동에 대해서도 다양한 범위의 크기를 나타내고 있다. 하지만 각각의 기본주파수에 대한 15 명의 평균값은 속타입 진동의 5 가지 크기로 분명히 구분되는 것을 볼 수 있다. 그리고 기본주파수가 4 Hz 이하일 때는 반력의 크기는 거의 변하지 않고, 5 Hz 근처에서 최대 값이 되며 그보다 높은 주파수에서는 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 반력이 작아지는 고주파수의 속타입 진동은 효과적으로 인체로 전달되지 않음을 알 수 있다.

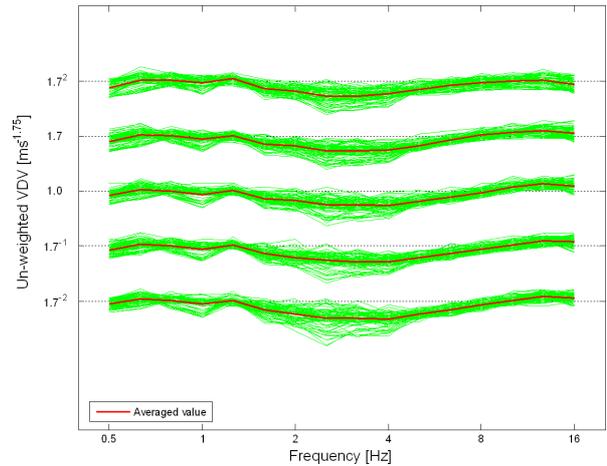


Figure 3 Unweighted VDV of all ‘test’ shocks delivered to fifteen subjects (five magnitudes of acceleration at sixteen frequencies, four damping ratios and one reversed direction shock).

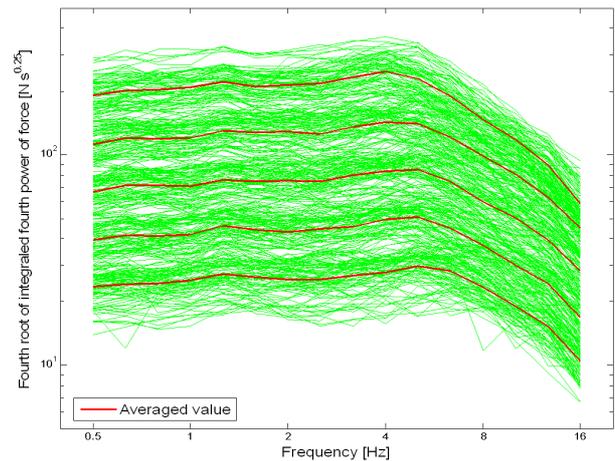


Figure 4 Fourth root of the integral of the fourth power of the mass-cancelled force of all the test shocks delivered to fifteen subjects (five magnitudes of acceleration at sixteen frequencies, four damping ratios and one reversed direction shock; values differ due to varying subject mass).

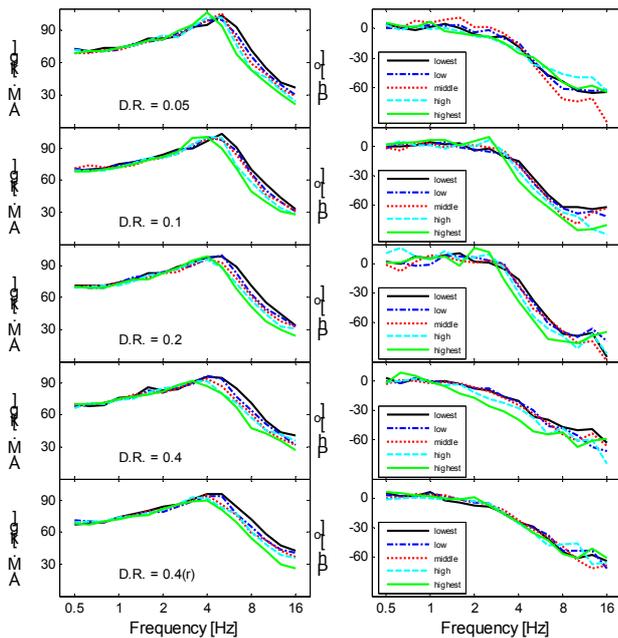


Figure 5 Effect of magnitude on 'quasi-apparent-mass' and 'phase delay' of shock (average value of fifteen subjects at each frequency, four damping ratios and a reversed direction shock).

#### 4.2 준걸보기질량의 비선형성

속타입 진동의 4 가지 감쇠비와 역위상에 대하여 진동 크기에 따른 피시험자 15 명에 대한 준걸보기질량의 평균값을 Fig. 5 에 나타내었다. 1.0 Hz 보다 낮은 기본주파수에서의 준걸보기질량은 73.5 kg (피시험자 평균 몸무게: 75 kg)으로 일정한 값을 보였고, 4-5 Hz 에서 최대값이 되고, 6.3 Hz 이상의 주파수에서는 점차적으로 감소하는 일반적인 경향을 보였다. 각각의 감쇠비에서 속타입 진동의 크기가 커질수록 준걸보기질량의 피크의 주파수와 크기는 감소하였다. 그리고 피크 주파수보다 높은 주파수 영역에서 준걸보기질량은 속타입 진동의 크기가 클 때 작게 나타났다. 즉 속타입 진동의 크기에 따른 비선형성이 4-5 Hz 보다 높은 주파수에서 나타났다.

### 5. 결론

속타입 진동의 인체 준걸보기질량은 기본주파수가 4-5 Hz 일 때 최대가 되고, 6.3 Hz 보다 높은

주파수에서는 점차적으로 감소하는 일반적인 특성을 보였다. 동일한 감쇠비를 가지는 속타입 진동에 대하여 진동의 크기에 따른 준걸보기 질량의 비선형성은 피크 주파수보다 높은 주파수 영역에 걸쳐서 나타났으며, 진동의 크기가 클수록 준걸보기질량의 피크 주파수와 크기는 작게 나타났다.

### 참고문헌

- (1) Griffin M.J. (1990) Handbook of human vibration. Published: Academic Press, London, ISBN: 0-12-303040-4.
- (2) Wei, L. and Griffin, M. J. (1998) Mathematical models for the apparent mass of the seated human body exposed to vertical vibration, Journal of Sound and Vibration 212(5), 855-874.
- (3) Lewis, C. H. and Griffin, M. J. (2002) Evaluating the vibration isolation of soft seat cushions using an active anthropodynamic dummy, Journal of Sound and Vibration 253(5), 295-311.
- (4) International Organization for Standardization 2000 Draft International Standard, ISO/DIS-5982. Mechanical vibration and shock-range of idealized values to characterize seated-body biodynamic response under vertical vibration.
- (5) Miwa, T. (1975) Mechanical impedance of human body in various postures, Ind. Health 13(1), 1-22.
- (6) Rakheja, S., Stiharu, I. and Boileau, P. (2002) Seated occupant apparent mass characteristics under automotive postures and vertical vibration, Journal of Sound and Vibration 253(1), 57-75.
- (7) Fairley, T. E. and Griffin, M. J. (1988) The apparent mass of the seated human body: vertical vibration, Journal of Biomechanics 22(2), 81-94.
- (8) Nawayseh, N. and Griffin M. J. (2003) Non-linear dual-axis biodynamic response to vertical whole-body vibration, Journal of Sound and Vibration 268, 503-523.