

< 논문 >

쇼크타입 수직방향 전신진동에 대한 생체동역학적 반응의 비선형성

안세진[†] · Michael J. Griffin^{*} · 유완석^{**} · 정의봉^{**}
(2006년 5월 11일 접수, 2006년 12월 20일 심사완료)

Nonlinearity of Biodynamic Response to Shock-Type Vertical Whole-Body Vibration

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

Key Words : Human Vibration(인체진동), Whole-Body Vibration(전신진동), Nonlinearity(비선형), Quasi-Apparent-Mass(준겔보기질량), Biodynamic(생체동역학), Vibration Dose Value (VDV, 진동누적값)

Abstract

Impulsive excitation on vehicle produces shock-type vibration on the seat, 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. Quasi-apparent-mass for fifteen subjects was measured with the shock-type vibration generated on a rigid seat mounted on the simulator, so its nonlinearity was apparently found over 6.3 Hz according to the difference of magnitude of the shock.

1. 서 론

전신진동(whole-body vibration)에 노출된 인체에 대한 겔보기질량(apparent mass)과 임피던스(impedance)는 인체를 지지하고 있는 구조물로부터 인체로 전달되는 진동량에 대한 주파수특성을 나타낸 것이다.⁽¹⁻³⁾ 인체의 겔보기질량은 생체동역학적 해석 모델 개발 뿐만 아니라 진동에 의해 야기되는 각종 불편함(discomfort) 또는 건강(health) 문제 등을 예측하기 위한 중요한 자료로 활용되고 있다.⁽⁴⁻⁵⁾ 앉은 자세에서 진동에 노출된 인체에 대한 겔보기질량의 국제표준은 ISO/DIS-5982에서 규정하고 있다.⁽⁶⁾ 그런데 인체의 겔보기질량은 진동에 노출된 인체의 구조적 특성과 자세(posture) 그리고 진동의 크기와 방향 등에 의해 매우 다양하게 나타나는 것으로 조사되고

있다.⁽⁷⁻¹²⁾

Miwa는 3 - 200Hz 범위의 주파수에 대한 상하방향 전신진동을 이용하여 다양한 자세에 따른 인체의 생체동역학적 특성의 차이를 연구하였다.⁽⁷⁾ 이 연구에서 무릎을 꿇은 자세(kneeling), 앉은 자세(sitting) 그리고 일어선 자세(standing)에 대한 겔보기 질량에는 분명히 구분되는 차이가 있는 것으로 보고 하였다. 그리고 Rakheja 등은 자동차에 앉은 자세를 고려하여 손의 위치, 시트의 기울기, 등받이의 기울기, 발의 위치, 등의 변화에 대한 인체의 겔보기 질량의 차이를 연구하였다.⁽⁷⁾ 여기서 승객을 고려하여 손을 무릎에 둔 경우와 운전자를 고려하여 손을 조향휠 위치에 둔 경우에 대한 인체 겔보기 질량의 피크(peak) 주파수와 크기에서 뚜렷한 차이가 발견되었다.

진동의 크기에 따른 인체 겔보기질량의 비선형성(nonlinearity)에 관한 연구에서는 인체의 자세와 실험조건에 따라 매우 다양하게 나타나는 것으로 보고되었다. 20Hz 이하의 주파수범위를 가지는 상하 방향 랜덤진동을 이용한 Fairley and Griffin의 실험에서는 진동의 크기가 0.25 ms⁻²(r.m.s.)에서 2.0 ms⁻²

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소
E-mail: sjahn@pusan.ac.kr
TEL: (051)510-3088, FAX: (051)517-3805

^{*} ISVR, Southampton University, UK

^{**} 회원, 부산대학교 기계공학부

(r.m.s.)로 커지면 걸보기질량의 최대 피크의 주파수는 6 Hz 에서 4 Hz 로 낮아지는 비선형 특성을 보고 하였다.⁽⁹⁾ 그리고 Nawayseh 와 Griffin 은 랜덤진동 (주파수범위: 0.25 - 25 Hz, 크기범위: 0.125-1.25 ms⁻² r.m.s.)을 이용하여 다리(legs)가 시트에 놓이는 상태에 따른 인체 걸보기질량의 비선형성에 관한 연구를 하였다.⁽¹⁰⁾

인체 걸보기질량을 정상상태의 정현파 또는 랜덤 신호 진동을 이용하여 구한 기존의 연구와는 달리, 본 연구에서는 간단한 진동모델을 이용하여 일상에서 쉽게 경험하는 쇼크타입 진동을 먼저 정의하고 이것에 대한 인체 걸보기질량을 구하였다. 이때 쇼크타입 진동의 인체 걸보기질량은 기존의 걸보기 질량과는 엄밀한 의미에서 다소 차이가 있기 때문에 본 연구에서는 준걸보기질량(quasi-apparent mass) 이라고 명명하였다. 그리고 다양한 감쇠비와 역위상을 가지는 쇼크타입 진동의 인체 준걸보기 질량에 대하여 진동크기 변화에 따른 비선형 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 쇼크타입 진동

실제 차량에서 발생하는 충격진동은 매우 복잡하고 다양한 형태로 나타난다. 특히 노면의 범프와 같은 장애물을 통과할 때 발생하는 시트의 수직방향 충격진동은 차량의 서스펜션과 타이어 그리고 시트의 특성에 따라 다양한 주파수와 감쇠 특성을 가진다. 본 연구에서는 장애물을 통과하는 차량의 시트에서 발생하는 충격감쇠진동의 단순화된 신호를 모사(simulation)하기 위하여 1 자유도 진동모델과 반사인파(half-sine) 가진력을 이용하였다. 이때 반사인파 가진력은 다음 식과 같이 해닝 창함수(hanning window function)를 적용하여 충격응답신호의 시작점을 매끄럽게 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 가진신호의 크기와 지속 시간을 나타낸다.

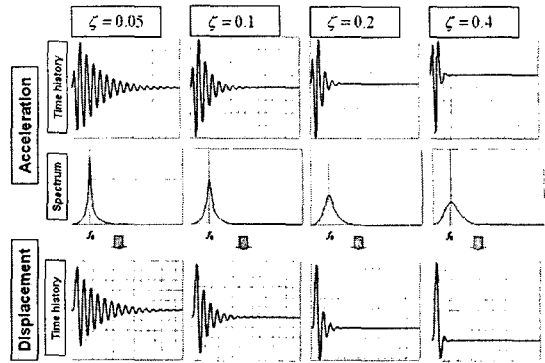


Fig. 1 Waveforms of shock-type vibrations having the same fundamental frequency and magnitude in VDV, but different damping ratios

본 연구에서는 1 자유도 진동모델의 질량, 강성, 감쇠비와 반사인파 가진력의 지속시간을 조정하여 다양한 기본주파수(fundamental frequency)와 감쇠 특성을 갖는 쇼크타입 진동 신호를 만들었다. 그리고 쇼크타입 진동의 크기(magnitude)는 신호의 최대값과 최소값의 차이인 피크피크(peak-to-peak) 값 또는 4 승 누적합의 4 승 근인 진동누적값(vibration dose value: VDV)로 나타내었다. 진동누적값(VDV)은 다음 식으로 구한다.

$$VDV = \left(\int A^4(t) dt \right)^{1/4} \quad (2)$$

여기서 $A(t)$ 는 가속도 시간신호이다. 이때 쇼크타입 진동의 크기는 반사인파 가진력의 크기로 조정하였다.

본 연구의 인체진동 실험에 사용된 쇼크타입 진동의 기본주파수는 0.5 - 16.0 Hz 사이에 1/3 옥타브 간격으로 16 가지이고, 각각의 기본주파수에 대하여 진동누적값이 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})인 쇼크타입 진동을 사용하였다. 그리고 각각의 기본주파수의 쇼크타입 진동은 4 가지 감쇠비(0.05, 0.1, 0.2, 0.4)를 가지며, 감쇠비가 가장 큰 0.4 에서는 위상이 역전된 쇼크타입 진동을 본 실험에 추가하였다. 본 연구의 인체진동 실험에 사용된 쇼크타입 진동의 가속도(acceleration) 및 변위(displacement)의 파형(waveform)과 가속도 스펙트럼(spectrum)을 Fig. 1

에 나타내었다. 그림에서는 기본주파수와 진동누적값이 동일한 쇼크타입 진동에 대하여 4 가지 감쇠비에 따른 파형을 비교하여 나타내고 있다.

2.2 실험장비 및 피시험자

영국 사우스햄턴 대학의 ISVR(Institute of Sound and Vibration Research)에서 보유하고 있는 유압 시뮬레이터(hydraulic simulator)를 이용하여 상하방향 쇼크타입 진동을 발생시켜 피시험자를 가진하였다. 시뮬레이터의 작동영역은 ± 1.0 m 변위 스트로크(stroke)와 0.2 Hz - 50 Hz 주파수범위이며, ISVR에서 개발한 HVLab 시스템에 의해 제어되었다.

시뮬레이터의 플랫폼(platform)에 고정된 강체 시트의 평판(600×400mm) 위에 힘 측정판(force platform: Kistler 9281 B)을 장착하여 강체 시트로부터 피시험자의 엉덩이로 전달되는 힘을 측정하였다. 힘 측정판 위에 부착된 가속도계(Setra System, 141A type)는 강체 시트의 상하방향 가속도를 측정하였다. 측정된 힘 및 가속도 신호는 130 Hz의 엔티-에어라이징(anti-aliasing) 필터를 적용한 후 400 샘플/초로 디지털신호를 획득하였다. 그리고 0.5 - 16.0Hz의 기본주파수를 가지는 쇼크타입 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 등받이가 없는 강체 의자에 직립한(upright) 자세로 앉고, 손은 무릎 위에 편안하게 놓고, 허벅지는 수평으로 하고 정강이는 수직이 되도록 하였다.

본 연구의 실험은 ISVR에서 규정하고 있는 인체 실험의 안전과 윤리(Human Experimentation Safety and Ethics)에서 규정하는 각종 심의에서 인정을 받은 후 실시하였다.

3. 쇼크타입 진동의 준겔보기질량

진동 구조물로부터 인체로 유입되는 진동량 또

는 진동 에너지의 주파수 특성을 나타내는 인체 겔보기질량은 일반적으로 이산주파수법(discrete frequency method)과 스펙트럼 분석법(spectral-analysis method)으로 측정된다.⁽¹⁾ 이산주파수법은 관심 주파수의 정현파 진동으로 일정 시간 동안 인체를 가진하고 진동이 전달되는 위치에서의 가속도와 반력(reaction force)의 크기 비(ratio), 그리고 이들 간의 위상지연을 구하는 방법이다. 스펙트럼 분석법은 관심 주파수 범위의 정상상태 랜덤신호 진동으로 인체를 가진하여 얻은 가속도 및 반력 신호를 이용하여 다음 식으로 구하는 방법이며, 측정시간과 주파수 분해능에서 이산주파수법에 비해 유리한 방법이다.

$$M(\omega) = \frac{S_{af}(\omega)}{S_{aa}(\omega)} \quad (3)$$

여기서, $S_{af}(\omega)$ 는 진동이 인체로 전달되는 위치에서의 가속도 신호와 반력 신호 사이의 상호스펙트럼 밀도(cross-spectral density)이고, $S_{aa}(\omega)$ 는 가속도 신호의 자기스펙트럼밀도(auto-spectral density)를 의미한다.

그런데 쇼크타입 진동은 정현파 진동이 아닐 뿐만 아니라 정상상태가 아닌 과도(transient) 신호이기 때문에 기존의 방법으로 겔보기질량을 구할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 구조물에서 인체로 전달되는 쇼크타입 진동량의 주파수특성을 다음과 같은 식으로 표현하고, 이것을 쇼크타입 진동의 준겔보기질량(quasi-apparent mass)이라고 명명하였다.

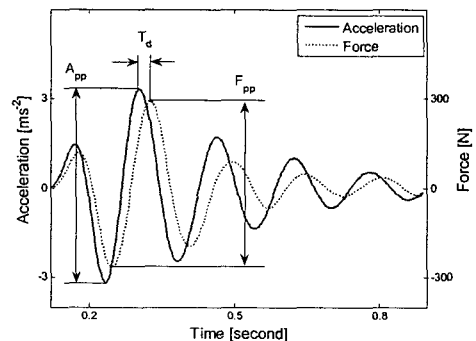


Fig. 2 Acceleration and mass-cancelled force signal of a shock measured after low-pass filtering (frequency: 6.3 Hz; damping ratio: 0.1; magnitude: $1.7 \text{ ms}^{-1.75}$)

$$\begin{aligned} \text{Quasi - apparent - mass} &= \frac{F_{pp}}{A_{pp}} \\ &= \frac{\left(\int F^4(t)dt\right)^{1/4}}{\left(\int A^4(t)dt\right)^{1/4}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{Phase delay (degree)} = 360 \times \frac{T_d}{T_n} = 360 \times T_d \times f_n \quad (5)$$

여기서, A_{pp} 와 F_{pp} 는 Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 쇼크타입 진동의 가속도와 힘 신호의 피크피크 값(peak-to-peak value)을 의미한다. 그리고 $A(t)$ 와 $F(t)$ 는 쇼크타입 진동의 가속도와 반력의 시간신호이고, f_n 과 T_n 은 쇼크타입 진동의 기본주파수와 주기를 의미한다. 그리고 T_d 는 Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 쇼크타입 진동의 가속도 피크 시간과 반력 신호의 피크 시간 사이의 간격을 의미한다. 그런데 이때 측정된 힘 신호는 강체 의자와 힘 측정판 사이에 장착된 힘 센서(force transducer)에서 측정된 것이기 때문에 측정 판의 질량(약 30 kg)이 제거 되어진 신호(mass-cancelled signal)를 계산하여 이용하여야 한다. 각각의 기본주파수에서 측정된 쇼크타입 진동의 힘 신호로부터 측정판의 질량을 제거하여 인체의 영향만을 고려한 반력 신호를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$F(t) = F_s(t) - \frac{F_0(t)}{A_0(t)} A_s(t) \quad (6)$$

여기서, $F_d(t)$ 와 $A_d(t)$ 는 피시험자가 탑승하지 않은 상태, 즉 측정판 자체 만의 질량에 대한 반력 신호와 가속도신호이고, $F_s(t)$ 와 $A_s(t)$ 는 피시험자가 탑승한 상태에서 측정된 반력 신호와 가속도 신호이다.

4. 실험결과 및 토론

4.1 쇼크타입 진동의 크기

정현파 또는 랜덤 신호의 정상상태 진동 크기(magnitude)를 표현하는 방법은 피크값(peak value)과 실효치(root mean square: r.m.s.) 등이 있으며, 이러한 진동크기는 지속시간과 함께 진동이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위하여 적절히 선택적으로 이용되고 있다. 하지만

쇼크타입 진동은 정상상태 진동과 동일한 방법으로 크기를 표현하기 어려울 뿐만 아니라 인체에 미치는 영향 또한 크게 다른 양상을 보이는 것으로 알려져 있다. 그래서 국제표준 ISO 또는 영국표준 BS 에서는 기존의 연구를 바탕으로 진동의 파고율(crest factor)이 높은 진동신호에 대해서는 진동누적값(VDV)의 사용을 권장하고 있다.^(9,10) 본 연구에서는 쇼크타입 진동의 크기를 표현하는 방법으로 직관적으로 크기를 가늠할 수 있는 피크피크 값과 진동량의 누적을 고려한 진동누적값을 사용하였다.

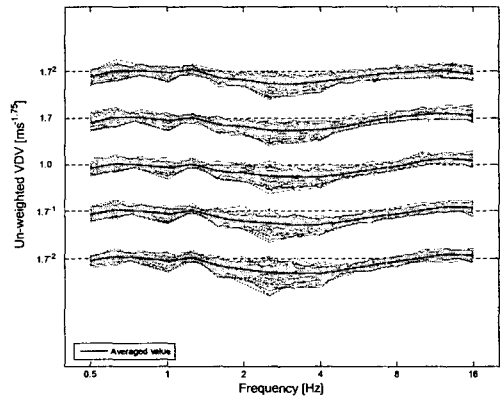


Fig. 3 VDV of the acceleration of the all shocks delivered to fifteen subjects (at sixteen frequencies, four damping ratios and one reversed direction)

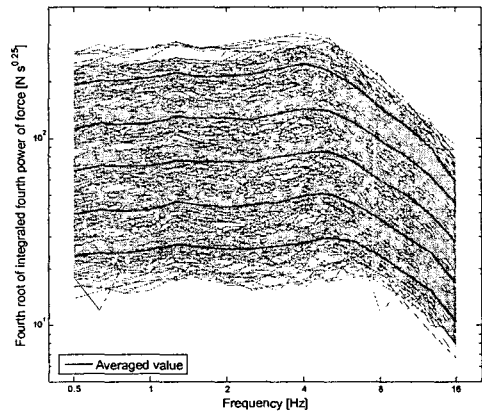


Fig. 4 Fourth root of the integrated fourth power of the mass-cancelled force of all the shocks delivered to fifteen subjects (at sixteen frequencies, four damping ratios and one reversed direction)

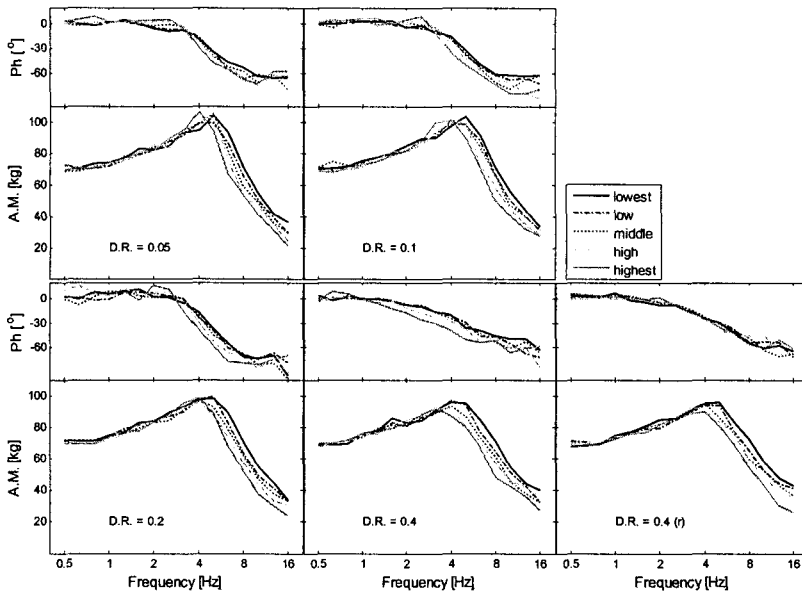


Fig. 5 Effect of magnitude on ‘quasi-apparent-mass’ and ‘phase delay’ of the shock (average value of fifteen subjects at each frequency, four damping ratios and a reversed direction shock)

16 가지 기본주파수, 5 가지 크기, 4 가지 감쇠비와 역위상 1 가지의 조합, 즉 총 400 가지의 쇼크타입 진동을 15 명의 피시험자에게 노출하여 측정된 가속도 신호의 진동누적값 크기를 Fig. 3 에 나타내었다. 유압 시뮬레이터 자체의 주파수응답 특성과 주위 온도 변화에 따른 시뮬레이터 유체특성의 변화 등으로 인해 정확하게 제어된 크기의 가속도를 얻을 수 없었으나, 가속도와 힘 신호의 크기 비(ratio)를 이용하여 구하는 준결보기질량을 계산하는 데에는 문제가 없는 정도로 판단되었다.

피시험자의 엉덩이와 진동 구조물(힘 측정판) 사이의 반력 크기를 나타낸 Fig. 4 를 보면 피시험자들의 체각기 다른 몸무게의 영향으로 인해 반력의 크기는 각각의 기본주파수에서 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 6.3 Hz 이상의 기본주파수 쇼크 타입 진동에 대해서는 주파수가 증가함에 따라 반력이 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 높은 기본주파수의 쇼크타입 진동은 낮은 주파수에 비해 진동전달이 효과적이지 않음을 예상할 수 있다.

4.2 준결보기질량의 비선형성

쇼크타입 진동의 4 가지 감쇠비와 역위상에 대

Table 1 Statistical effect of magnitude of the shock on the ‘quasi-apparent-mass’ and ‘phase delay’ (Friedman; **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, -: not significant)

damping ratio	frequency [Hz]																
	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	
A.M.	0.05	**	-	-	**	-	*	**	-	**	-	**	**	**	**	**	**
	0.1	*	**	**	-	-	-	**	**	-	**	**	**	**	**	**	**
	0.2	-	*	*	**	*	**	-	**	-	**	**	**	**	**	**	**
	0.4	*	-	-	-	-	**	**	-	-	**	**	**	**	**	**	**
Phase	0.05	*	**	**	-	-	**	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**
	0.1	-	**	**	-	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	0.2	**	**	*	-	-	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	0.4	*	**	-	-	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**
0.4 (r)	**	-	-	**	**	**	**	-	*	-	**	**	**	**	**	**	

하여 진동 크기에 따른 피시험자 15 명에 대한 준결보기질량의 크기(modulus)와 위상(phase)의 평균값을 Fig. 5 에 나타내었다. 0.63 Hz 보다 낮은 기본주파수의 준결보기질량은 73.5 kg(피시험자 평균 몸무게: 75 kg)으로 일정한 값을 보였고, 4-5 Hz 에서 최대 피크가 나타나고, 피크 주파수 이상의 주파수영역에서는 점차적으로 감소하는 일반적인 경향을 보였다. 그리고 속진동의 가속도와 반력 신호의 위상 차이는 감쇠비에 따라 다소 차이가 있으나, 위상차이가 뚜렷한 주파수 영역에서는 속진동의 크기가 클수록 위상차는

크게 됨을 알 수 있다.

Table 1 은 준결보기질량의 크기와 위상차에 대한 속진동의 크기 영향의 중요성(significance)을 통계 시험(statistical test)하여 나타낸 것이다. 여기서 p 값은 비변수 통계시험(nonparametric statistical test) 방법 중에 한가지인 "Friedman two-way analysis of variance by rank"⁽¹⁵⁾를 이용하여 구한 통계수치이다. p 값이 0.01 보다 작은 경우(**)는 99% 신뢰구간에서 쇼크 타입 진동의 크기 영향이 중요하다는 것을 의미한다. 그리고 p 값이 0.05 보다 작은 경우(*)는 95% 신뢰구간에서 진동 크기 영향의 중요성을 의미하며, 0.05 보다 큰 p 값의 경우(-)는 쇼크타입진동의 크기 변화는 준결보기질량의 변화에 대하여 중요한 영향이 없음을 의미한다. 특정한 쇼크타입 진동의 준결보기질량은 감쇠비에 따라 다소 차이는 있으나 4Hz 이상의 기본주파수 영역에서 크기의 영향이 중요함을 알 수 있다.

쇼크타입 진동의 크기에 대한 준결보기질량의 비선형성은 인체의 고유진동수(약 4-5Hz) 이상의 주파수 영역에서 관찰되었다. 이러한 생체동역학적 비선형 특성은 쇼크타입 진동의 감쇠비와 위상에 따라 다소 차이가 있었고, 또한 감쇠비는 쇼크타입 진동에 대한 준결보기질량의 공진(resonance) 주파수와 피크(peak)의 크기에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 15 명의 피시험자를 대상으로 쇼크타입 진동에 대한 인체 준결보기질량에 대한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 쇼크타입 진동에 대한 인체 준결보기질량의 크기는 기본주파수 4-5 Hz 일 때 최대가 되고, 6.3 Hz 보다 높은 주파수에서는 점차적으로 감소하는 일반적인 경향성을 보였다.

(2) 쇼크타입 진동의 크기에 따른 준결보기 질량이 비례적으로 증가하지 않는 생체동역학적 비선형성은 준결보기질량의 공진 주파수(약 4-5Hz)보다 높은 영역에서 관찰되었으며, 쇼크타입 진동의 감쇠비의 차이와 역위상은 이러한 비선형성에 다소 영향을 미침을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)의 지원(과제번호 M1-0203-00-0017-02J0000-00910)으로 이루어졌으므로, 지원기관에 감사드립니다. 그리고 이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Griffin M.J., 1990, Handbook of Human Vibration. Published: Academic Press, London, ISBN: 0-12-303040-4.
- (2) Jang, H. K., Kook, D. Y., Lee, J. K. and Choi, J. H., 2002, "Development of Start Feeling Index of a Forklift Truck," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 1, pp. 74~82.
- (3) Kim, J. C. and Lee, J. W., 1998, "Estimation of Vibration Power Using Estimated Mechanical Impedances," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 22, No. 5, pp. 929~937.
- (4) 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*, Vol. 212(5), pp. 855~874.
- (5) 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*, Vol. 253(5), pp. 295~311.
- (6) International Organization for Standardization, 2000, "Mechanical Vibration and Shock-Range of Idealized Values to Characterize Seated-Body Biodynamic Response Under Vertical Vibration," ISO/DIS-5982
- (7) Miwa, T., 1975, "Mechanical Impedance of Human Body in Various Postures," *Ind. Health*, Vol. 13(1), pp. 1~22.
- (8) Rakheja, S., Stiharu, I. and Boileau, P., 2002, "Seated Occupant Apparent Mass Characteristics Under Automotive Postures and Vertical Vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 253(1), pp. 57~75.
- (9) Fairley, T. E. and Griffin, M. J., 1988, "The Apparent Mass of the Seated Human Body: Vertical Vibration," *Journal of Biomechanics*, Vol. 22, No. 2, pp. 81~94.
- (10) Nawayseh, N. and Griffin M. J., 2003, "Non-Linear Dual-Axis Biodynamic Response to Vertical Whole-Body Vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 268, pp. 503~523.

- (11) Cheung, W. S., Kim, Y. T., Kwn, H. S. and Hong, D. P., 2003, "Experimental Investigation of the Response Characteristics of Korean-Seated Subjects Under Vertical Vibration:(I) Apparent Mass," *KSNVE*, Vol. 13, No. 8, pp. 645~650.
- (12) Cheung, W. S., Kim, Y. T., Kwn, H. S. and Hong, D. P., 2003, "Experimental Investigation of the Response Characteristics of Korean-seated Subjects Under Vertical Vibration: (II) Mechanical Impedances," *KSNVE*, Vol. 13, No. 9, pp. 713~719.
- (13) International Organization for Standardization, 1997, "Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration," ISO 2631-1.
- (14) British Standards Institution, 1987, "Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock," BS 6841.
- (15) Siegel, S. and Castellan, N. J., 1988, *Nonparametric Statistics: for the Behavioural Sciences*. Published: McGRAW-HILL International editions(New York), ISBN: 0-07-057357-3.