

수직 방향 진동에 대한 인체의 동적 응답 특성에 관한 연구

송수연* · 채창국* · 김광준* · 장한기** · 김승한**

A Study on Dynamic Response Characteristics of Seating Human Body Exposed to Vertical Vibration

Suyon Song, Chang-Kook Chae, Kwang-Joon Kim, Han-Kee Jang and Seung-Han Kim

Key Words : apparent mass(겉보기 질량), human body(인체), vertical vibration(수직 방향 진동), modeling(모형화)

Abstract

Dynamic characteristics of seated human body were investigated by measuring apparent masses of eight different seating subjects exposed to vertical vibration. Two types of vibration signals - one is random signals over 1 to 30Hz having flat spectral density and the other is signals measured on seat rail in passenger car under driving conditions - were employed. It was found that the apparent masses are highly dependent on vibration level rather than type of the vibration signals. Based on the apparent mass measurements, a mathematical model of the human body in seating posture was developed by using genetic algorithm. Three-degree-of-freedom model was satisfactory in describing apparent mass of seated human body.

1. 서 론

차량의 평가 기준에서 승차감이 차지하는 비중이 날로 커지고 있는 요즘, 설계 단계에서 이를 해결하기 위한 연구가 다각도로 이루어지고 있다. 그 중 차량의 진동 승차감과 관련하여, 시트를 통해 인체로 전달되는 진동량을 예측할 수 있도록 시트-인체계를 적절히 모형화 하려는 작업이 진행되어 왔다. 모형화에 대한 첫번째 시도는 인체를 단순히 집중 질량이나 여러 강체가 결합된 마네킨(mannequin)으로 가정한 것이었다. 그러나, 인체를 집중 질량과 마네킨으로 모형화 하면, 시트를 통한 진동 전달률 측정시 동일한 질량을 갖는 인체에 비해 높은 공진 주파수와 피크 값을 가진다는 한계가 있었다[1]. 더욱이 집중 질량이나 마네킨을 대상으로 시트의 진동 전달률을 측정하게 되면, 이를 차량 주행 중 탑승자가 평가하게 되는 안락성과 상호 연관지를 수 없으므로, 실제 인체를 대상으로 진동 응답 특성을 파악하여 이를 시트-인체계 모형화의 기초 자료로 활용하는 것이 차량용

시트 설계의 보다 현실적인 해결 방안이 되고 있다.

그러나, 인체는 그 구조가 매우 복잡하기 때문에, 일반 기계계와 같이 특정 부위를 가진하고 관심 있는 지점의 응답을 측정하는 데는 많은 어려움이 따른다. 일반적으로 받아들여지는, 진동에 대한 인체의 응답 특성 규명법이 정립되어 있지 못한 실정인데, 주로 실험에 의한 통계적인 방법으로 그 특성을 파악하고 있다. 이러한 방법 중 겉보기 질량은 인체 각 부위의 움직임에 묘사할 수 는 없지만, 인체로 진동이 전달되는 시작점인 시트와 인체 사이 접촉면에서의 포괄적인 인체 응답 특성을 묘사하므로, 차량에서 발생하는 진동에 대한 인체의 응답 특성을 분석할 수 있는 수단이 된다.

이에 본 연구에서는 겉보기 질량을 이용하여 외부 진동에 노출된 인체의 응답 특성을 파악하고자 한다. 두 가지 유형의 신호- 1~30Hz 의 주파수 성분을 가지는 랜덤 신호와 실제 주행 중 시트 레일에서 측정된 신호 -를 이용하여, 허리가 지면과 수직이 되도록 앉은 피실험자를 수직 방향으로 가진하여 수직 방향에 대한 겉보기 질량을 측정하였

* 한국과학기술원 기계공학과

** 동국기술연구원 제품시스템연구소

다. 다양한 체중 분포를 가지는 8 명의 피실험자를 대상으로 가진 수준을 변화시켜 가며 특성을 분석하였다. 끝으로, 측정된 인체의 걸보기 질량을 충분히 묘사할 수 있는 간단한 자유도의 인체 진동 모델을 제시하였다.

2. 인체의 걸보기 질량 측정

2.1 걸보기 질량을 이용한 인체 응답 특성화
 걸보기 질량은 가진점(driving-point)에서의 힘과 가속도의 함수로서 아래 식과 같이 표현된다.

$$M(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{a(j\omega)} \quad (2.1)$$

여기서, $M(j\omega)$ 는 걸보기 질량, $F(j\omega)$ 와 $a(j\omega)$ 는 각각 가진 점에서의 힘과 가속도를 나타낸다.

집중 질량에 힘이 입력으로 주어지는 일반 기계계의 경우 계의 응답 특성은 이너턴스(inertia)를 통해 파악할 수 있으며, 걸보기 질량은 식(2.2)에서와 같이 이너턴스의 역수로 표현할 수 있다.

$$A(j\omega) = \frac{-\omega^2 X(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{-\omega^2}{k - m\omega^2 + jc\omega} = \frac{1}{M(j\omega)} \quad (2.2)$$

여기서, $A(j\omega)$ 는 이너턴스를 나타낸다

기계계와 달리 인체는 특정 부위를 가진하고 관심있는 지점의 응답을 측정하는 것이 매우 어려우므로, 이너턴스를 이용해 응답 특성을 파악하는 것은 한계가 따른다.

그러나, Fig.2.1 과 같이 베이스(base)에 변위 가 아닌 힘이 입력으로 주어질 때 걸보기 질량은 식(2.3), (2.4)에서와 같이 계의 질량과 전달률의 곱으로 표현되므로, 이 경우 걸보기 질량은 계의 응답 특성을 나타낸다. 또한, 전달률의 피크 주파수 가계의 고유 진동수를 나타내므로 걸보기 질량의 피크 주파수도 고유 진동수라고 할 수 있다. 따라서 베이스 위에 인체가 앉아있는 경우, 베이스를 가진하여 얻은 걸보기 질량은 인체의 응답 특성을 나타내며, 걸보기 질량의 피크 주파수는 인체의 고유 진동수라고 할 수 있다.

$$\frac{X(j\omega)}{Z(j\omega)} = \frac{k + jc\omega}{k - m\omega^2 + jc\omega} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} M(j\omega) &= \frac{F(j\omega)}{-\omega^2 Z(j\omega)} \\ &= m \frac{k + jc\omega}{k - m\omega^2 + jc\omega} = m \frac{X(j\omega)}{Z(j\omega)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

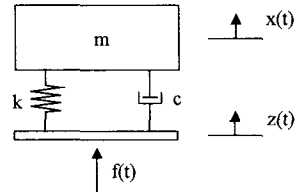


Fig.2.1 Spring-mass-damper system with base excitation

2.2 실험 장치 구성

Fig.2.2 는 인체의 걸보기 질량을 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 9.2kg 무게의 사각 상판과 4 개의 수직 기둥 사이에 4 개의 힘 센서를 삽입하여 동적 하중을 측정할 수 있도록 하였다. 사각 상판의 윗면으로부터 가진대(vibration table)까지의 수직 거리가 0.44m 가 되도록 하였는데, 이는 8 명의 피실험자가 상판 위에 편안히 앉았을 때 상판에서 발바닥까지의 높이를 실측하고 평균을 낸 값이다. 힘 신호와 동시에 가속도 신호를 측정하기 위하여 저주파 가속도계를 상판 윗면에 부착하였다.

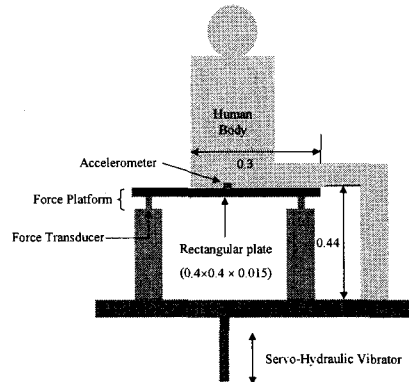


Fig.2.2 Experiment set-up for measurement of apparent mass of seated human body

2.3 실험 조건

2.3.1 피실험자의 선정

피실험자는 총 8 명으로 모두 남성이며 체중이 50~100kg 에 고르게 분포하도록 선정하였다. 이들의 신장과 체중을 Table 2.1 에 정리하였다.

걸보기 질량은 피실험자의 근육 긴장도, 자세, 다리 높이 등 여러 요인에 의해 변화할 수 있다.

따라서 이러한 피실험자의 변수를 최소화하기 위해 피실험자가 실험 중 취해야 할 자세에 대한 기준이 필요하다. 피실험자는 허리가 사각 상판에 대해 수직이 되도록 앉고 자세를 유지하기 위해 실험 중 의식적으로 허리에 힘을 주지는 않아야 한다. 눈은 전방을 향하고 양손은 허벅지 위에 올려 놓으며, 허벅지와 정강이는 90 도의 각도를 유지한다. 본 실험을 수행하기 전에 피실험자에게 실험 목적을 설명하고 실험 과정을 충분히 이해하도록 하여 자발적인 참여를 유도하였다.

Table 2.1 Height and weight for eight subjects

Subjects	height(cm)	weight(kg)
A	175	72
B	171	55
C	170	78
D	178	60
E	178	71
F	173	55
G	174	65
H	181	99
Mean(std)	175(3.78)	69.38(14.5)

2.3.2 가진 방향 및 관심 주파수 구간

차량에 탑승했을 때 인체는 6 자유도의 다양한 진동에 노출되며, 이로 인해 자세 유지의 부담을 증가, 심박수 증가, 허리 통증 유발 등과 같은 불쾌함을 경험하게 된다[2,3]. 그러나, 탑승자의 진동 안락성의 80% 정도가 시트를 통해 전달되는 진동의 영향을 받으며, 특히 시트의 수직 방향의 진동이 안락성에 가장 큰 영향을 준다[4]. 따라서 수직 방향 진동에 대한 인체 응답 특성을 우선적으로 살펴 보는 것이 바람직하다.

차량 운전 중 진동과 관련하여 인간이 불쾌감을 느낄 수 있는 영역은 0.5~80Hz 로 알려져 있다 [5]. 그러나, 기존의 연구를 살펴보면 30Hz 이상에서 인체로 전달되는 진동량은 ~30Hz 구간에 비해 매우 작기 때문에[6,7], 본 연구에서는 1.0~30Hz 가지를 관심 주파수 구간으로 선정하였다.

2.3.3 가진 파형 및 가진 수준

본 실험에 앞서 5 종의 차량에 대해 서로 다른 도로 조건과 주행 속도에서 시트 레일(seat rail) 위의 가속도를 측정하였다. Fig.2.3 은 차량 1 을 대상으로 측정한 가속도 스펙트럼의 예를, Table 2.2 는 대표적인 두 가지 주행 조건에서 측정된 1.0~30Hz 구간의 가속도 수준을 각 차종별로 정리하여 나타낸 것이다. 차종과 도로 조건에 따라 어느 정도

차이를 보이지만, 대체로 0.5~1.0 m/s² (r.m.s.) 사이에 존재함을 확인할 수 있다.

이에 본 연구에서는 0.5, 1.0 m/s² (r.m.s.)의 수준을 가지는 랜덤 진동을 선정하였으며, 가진 수준 변화에 대한 인체의 응답 특성 변화를 살펴보기 위해 2.0, 4.0 m/s² (r.m.s.)에 대해서도 실험을 수행하였다. Fig.2.4 는 가진 수준 1.0 m/s² (r.m.s.) 랜덤 입력의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)를 보여준다. 1~30Hz 구간에서 백색 잡음의 형태가 잘 구현되고 있음을 알 수 있다. 이들 입력과, 주행 중 차량에서 발생하는 진동에 대한 인체의 응답 특성을 비교해 보고자, 차량 1 이 콘크리트(concrete) 노면을 50 km/h 로 주행할 때와 아스팔트(asphalt) 노면을 90 km/h 로 주행할 때 측정된 가속도 신호를 입력으로 하여 실험을 수행하였다.

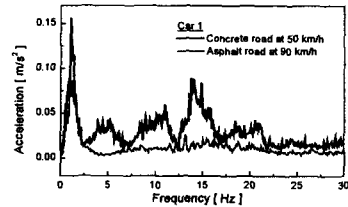


Fig.2.3 Linear spectrum of acceleration measured on seat rail under driving conditions

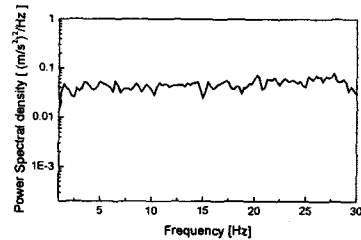


Fig.2.4 Power spectral density of 1.0 m/s² (r.m.s.) input acceleration

Table 2.2 Acceleration levels measured on seat rail of five kind of car (m/s² (r.m.s.))

	1	2	3	4	5
50km/h, concrete	0.8618	0.9311	1.0529	0.9705	1.0411
90km/h, asphalt	0.3860	0.6851	0.7937	0.7026	0.9472

2.4 몸무게 변화에 대한 걸보기 질량

가진 수준이 1.0 m/s² (r.m.s.)일 때 각 피실험자에 대한 걸보기 질량을 Fig.2.5 에 나타내었다. 피실험자의 몸무게에 따라 1 Hz 에서의 걸보기 질량이 큰 차이를 보일 뿐만 아니라, 공진 주파수에서

도 그 값이 큰 차이를 보인다. 이는 걸보기 질량이 가진 상태에서 피실험자의 동하중(dynamic weight)을 표현하는 것이므로, 피실험자의 몸무게(static weight)가 증가함에 따라 걸보기 질량이 증가했기 때문이다. 이처럼, 걸보기 질량이 피실험자의 몸무게에 큰 영향을 받으므로, 걸보기 질량에서 몸무게 효과를 제거하고자 1 Hz 에서의 값을 기준으로 정규화를 수행하였으며, 그 결과를 Fig.2.6 에 나타내었다.

몸무게 효과를 제거했음에도 불구하고, 진동에 대한 앉은 자세의 인체 응답 특성은 피실험자마다 각기 다르게 나타나는데, 이는 피실험자마다 나이, 건강상태, 자세, 키 등과 같은 여러 가지 복합적인 요인들에 차이가 있기 때문이다. 그러나, 모든 피실험자에 대해 4~6 Hz 근방에서 첫번째 공진이, 10~12 Hz 근방에서 두 번째 공진이 나타나는 현상은 대체적으로 동일하게 나타났다.

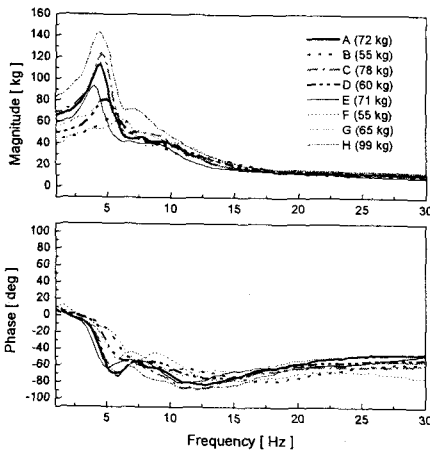


Fig.2.5 Apparent mass of subjects

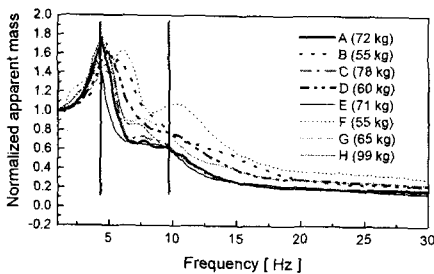


Fig.2.6 Normalized apparent mass of subjects

2.5 기초부 가진 수준 변화에 대한 걸보기 질량
모든 피실험자에 대해 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 m/s²

(r.m.s.)의 가진 수준에 대한 걸보기 질량을 측정하였다. 모든 피실험자에 대해 가진 수준이 증가할수록 첫번째 공진 주파수와 두 번째 공진 주파수가 감소하는 일관된 결과를 확인할 수 있었으며, 그 중 한 피실험자에 대한 실험 결과를 Fig.2.7 에 나타내었다.

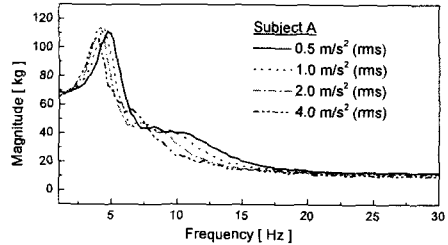


Fig.2.7 Apparent mass for various acceleration levels(0.5, 1.0, 2.0, 4.0 m/s² (r.m.s.))

Fig.2.8 에는 차량 1 이 주행 중일 때 시트 레일(seat rail)에서 측정된 가속도 신호를 이용하여 가진하였을 경우에 대한 걸보기 질량과 랜덤 가진을 하였을 경우에 대한 걸보기 질량을 나타내었다. 콘크리트에서 50 km/h 로 주행할 때와 아스팔트에서 90 km/h 로 주행할 때 1~30 Hz 주파수 구간에서의 가속도 수준은 각각 0.8618 m/s² (r.m.s.), 0.3860 m/s² (r.m.s.)이다(Table 2.2). 이 경우 걸보기 질량은 주행 중 차량에서 측정된 가속도 신호가 백색 잡음의 형태를 띠지 않음에도 불구하고, 모든 피실험자에 대해 랜덤 가진을 이용하여 0.5, 1.0 m/s² (r.m.s.) 대해 측정된 걸보기 질량과 유사한 경향을 보였다.

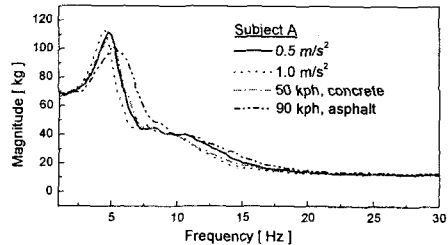


Fig.2.8 Comparison of apparent mass measured under random excitation and actual excitation of car

3. 인체 진동 모델

3.1 인체 진동 모델

인체의 걸보기 질량은 Fig.2.5 에서 보인 바와 같이 2 개의 공진점을 갖는 것을 쉽게 확인할 수 있는데, 이는 걸보기 질량을 묘사하기 위해서는 인체를 적어도 2 자유도 이상으로 모델링해야 함을 의미한다. 이 사실에 근거해 2 자유도 모델을 고려하게 되었다.

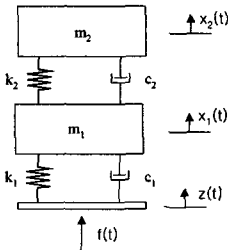


Fig.3.1 Two-degree-of-freedom model

그러나, 2 자유도 모델로는 걸보기 질량의 크기와 위상을 엄밀한 의미에서는 잘 묘사하지 못하며, 이는 다음 절에서 확인할 수 있다. 이러한 이유로 3 자유도 모델을 생각하게 되었다.

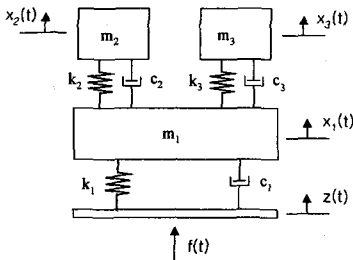


Fig.3.2 Three-degree-of-freedom model

3.2 곡선 접합

3.2.1 목적함수정의

인체의 걸보기 질량을 곡선 접합하기 위해서 최소 오차 자승법(least square error method)이용해식 (3.1)과 같은 목적 함수를 설정하였으며, 공진점 근처에서 더 나은 곡선 접합 결과를 얻기 위해 허수부에 가중치(weighting)를 사용하였다. 여기서 사용한 가중치는 공진점 부근에서의 걸보기 질량의 허수부에 대한 실수부의 제곱치를 기준으로 선정하였다.

$$error = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\left\{ M_{rf}(k) - M_{rm}(k) \right\}^2 + w \left\{ M_{if}(k) - M_{im}(k) \right\}^2 \right] \quad (3.1)$$

여기서, N 은 데이터 개수, w 는 가중치이며, $M_{rf}(k)$ 는 k 번째 주파수에서 곡선 접합에 의해 구해진 걸보기 질량의 실수부 값을, $M_{rm}(k)$ 는 k 번째 주파수에서의 측정된 실수부 값을 나타낸다. 마찬가지로, $M_{if}(k)$ 는 k 번째 주파수에서 곡선 접합에 의해 구해진 걸보기 질량의 허수부 값을, $M_{im}(k)$ 는 k 번째 주파수에서의 측정된 허수부 값을 의미한다.

0 Hz 에서의 인체의 걸보기 질량은 물리적으로 인체의 정하중을 의미한다. 그러나, 0 Hz 에서의 걸보기 질량을 측정할 수 없었기 때문에, 힘판 위에 걸린 각 피실험자의 정하중을 정의하는데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 연구에서는 낮은 주파수(0.5 Hz)에서의 걸보기 질량을 피실험자의 정하중으로 사용하기도 하였으나 [6], 본 연구에서는 가진기의 제한으로 인해 1~30 Hz 의 랜덤 가진을 사용하였기 때문에 낮은 주파수에서의 걸보기 질량을 피실험자의 정하중으로 사용하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라, Fig.3.3 에서와 같이 1.5 Hz 미만에서는 동일한 피실험자라 할지라도 실험 조건 변화에 따라 걸보기 질량이 비교적 큰 차이를 보이므로 본 연구에서는 Fig.3.4 와 같이 첫번째 피크가 나타나기 이전인 1.5~3.5 Hz 사이의 걸보기 질량을 곡선 접합하고, 외삽(extrapolation)을 통해 각 가진 수준에 대한 0 Hz 에서의 걸보기 질량을 추정하였으며, 이들의 평균치를 0 Hz 에서의 걸보기 질량, 즉 힘판 위에 걸린 각 피실험자의 정하중으로 정의하였다.

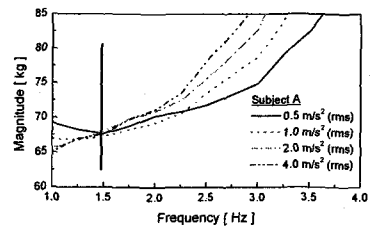


Fig.3.3 Apparent mass over low frequency range for various acceleration levels

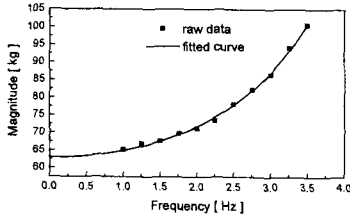


Fig. 3.4 Curve fitting for apparent mass in the frequency range of 1.5~3.5Hz

또한, 피실험자의 정하중은 실험 중 변하지 않으므로 식 (3.1)에 식 (3.2)와 같은 제한 조건 (constraint condition)을 추가하였다.

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ DOF: } m \\ 2 \text{ DOF: } m_1 + m_2 \\ 3 \text{ DOF: } m_1 + m_2 + m_3 \end{array} \right\} = \text{static weight of subject} \quad (3.2)$$

본 연구에서는 목적함수가 최소가 되도록 하는 최적해를 얻기 위해 유전자 알고리즘(genetic algorithm)[7,8]을 사용하였다.

3.2.2 곡선적합 결과

앞서 살펴본 2 자유도 모델은 Fig.3.5 에서 보듯이 15 Hz 이상에서 걸보기 질량의 크기와 위상을 제대로 묘사하지 못하는 한계를 갖는다.

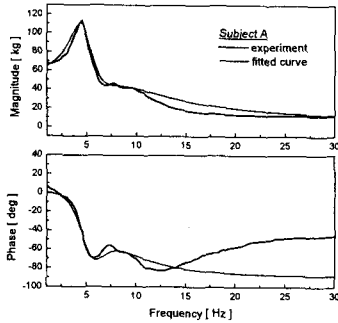
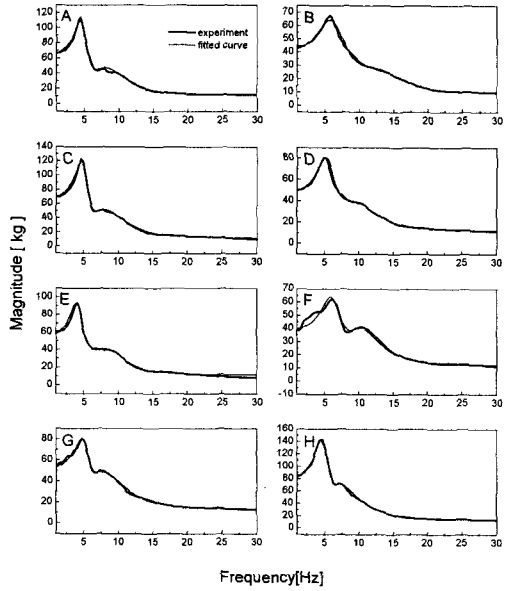


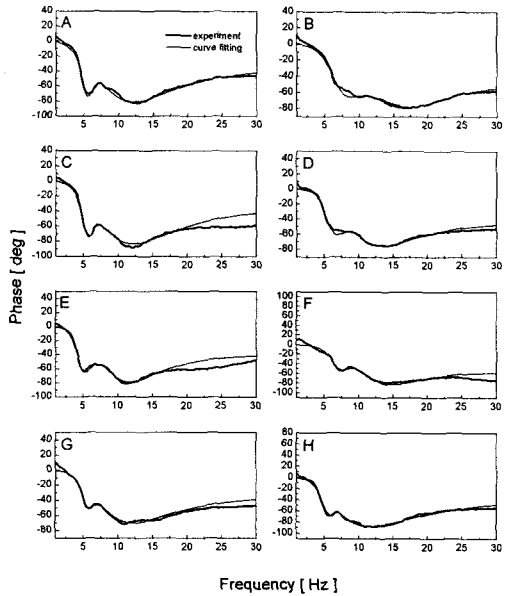
Fig.3.5 Comparison of apparent mass measured at acceleration level 1.0 m/s² (r.m.s.) and values fitted by using two-degree-of-freedom model

이러한 이유로 3 자유도 모델에 대한 곡선 적합을 수행하여 Fig.3.6 에 나타내었다. 3 자유도 모델은 2 자유도 모델과는 달리 전 주파수 구간에서 걸보기 질량의 크기와 위상을 비교적 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 향후에 인체의 응답 특성을 이용하여 시트의 수직방향 전달율을 예

측하고자 할 때, 앉은 자세의 인체를 3 자유도로 모델링하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig.3.6 Comparison of apparent mass measured at the acceleration level 1.0 m/s² (r.m.s.) and values fitted by using three-degree-of-freedom model

4. 결론

수직 방향 진동에 노출된 8 명의 피실험자를 대상으로 앉은 자세에 대한 걸보기 질량을 측정하였다. 본 연구 결과에서 걸보기 질량은 4~6Hz 사이에서 첫번째 공진이, 10~12Hz 사이에서 두번째 공진이 나타났으며, 가진 수준이 증가할수록 공진 주파수가 점차 낮은 주파수로 이동하는 일관된 현상을 보였다.

주행중인 차량에서 측정한 가속도 신호에 대해 걸보기 질량을 측정한 결과, 비슷한 r.m.s. 값을 갖는 백색잡음을 입력으로 사용한 경우와 유사한 결과를 보였으며, 가속도 수준 $1.0 \text{ m/s}^2(\text{r.m.s.})$ 에 대한 걸보기 질량을 곡선 접합해 봄으로써 수직 방향 진동에 노출된 앉은 자세의 인체는 3 자유도로 모델링하는 것이 타당함을 확인하였다.

후 기

본 연구(A00-991-2202-06-1-2)는 산업 자원부의 부분적인 지원하에 진행되었습니다.

참고문헌

- (1) S. D. Smith. "Limitations in Predicting Human Vibration Response Characteristics from Manikins and Rigid Body Masses", SAE paper 970598
- (2) M. J. Griffin, 1996, "Handbook of Human Vibration," Academic Press, London.
- (3) 이남식, 박세진, 김철중, 1990, "전신 진동이 인간성능에 미치는 영향," 추계학술대회, 한국소음진동공학회, pp. 91~98.
- (4) 한국자동차공학회, 1996, "자동차 기술 핸드북-기초, 이론편," pp. 283~285.
- (5) British Standards, BS 6841, 1987, "Measurement and Evaluation of Human Exposed to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock"
- (6) T. E. Fairly and M. J. Griffin, 1989, "The Apparent Mass of the Seated Human Body Vertical Vibration," Journal of Biomechanics, Vol. 22, No. 2, pp. 81~94.
- (7) W. White, P. Davies, A. Bajaj, 1998, "Dynamic Modeling and Measurement of Occupied Car Seats and Seating Foam," HL 98-22, Report#2616-1.
- (8) Z. Michalewicz, 1996, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs," Springer-Verlag.
- (9) 이준배, 1996, "유전자 알고리즘을 이용한 전채/다목적 최적화 알고리즘의 개발," 박사학위논문, 기계공학과, 한국과학기술원.