한국소음진동공학회 2009년 추계학술대회논문집, pp.656~660

착석자세 인체의 상하/전후/피치 가진 시험

Experiment for Seated Human Body to Vertical/Fore-and-aft/Pitch Excitation

김종완* · 김기선* · 김광준†

Jongwan Kim, Ki-Sun Kim, Kwang-joon Kim

Key Words : Seated posture(착석 자세), Whole-body Vibration(전신 진동) Apparent mass(겉보기 질량), Vertical(수직), Fore-and-aft(전후), Pitch(피치)

ABSTRACT

Various dynamic models of seated posture human body have been developed because the importance about the ride comfort assessment of vehicles is highly emphasized from day to day. The dynamic models of human body make possible the simulation of ride comfort assessment by applied to the vehicle dynamic model.

Recently, the importance of ride comfort is also regarded to working vehicles such as excavators and the research of the ride comfort assessment for working vehicle is required. Only vertical vibration dominantly occurs on the seat of the private car driving with constant velocity. In contrast, vertical/fore-and-aft/pitch vibration seriously occurs on the seat of the working excavator. So, the dynamic models of seated human body applied to working vehicles should describe the dynamic characteristics for vertical/fore-and-aft/pitch direction.

In this paper, the dynamic characteristics of seated human body are represented as apparent inertia matrix. The apparent inertia matrix is obtained by the vertical/fore-and-aft/pitch excitation of seated human body. 6 resonance frequencies are observed in apparent inertia matrix. This result can be applied to develop the dynamic model for seated posture human body.

1. 서 론

차량(Vehicle) 진동은 탑승자에게 피로 및 불쾌감을 유발하므로, 차량 개발 시 진동에 관한 승차감 평가가 요구된다. 기존에는 주로 시운전자(test driver)가 탑승하여 평가해왔으나, 이는 시운전자의 주관이 개입될 수 있는 방법으로 일관성 및 정량화 측면에서 한계점을 갖는다. 이를 극복하기 위해, 시운전자의 진동 특성을 대체할 수 있는 착석자세 인체의 동적 모형 개발 및 승차감 평가를 위한 진동 계측/분석 방법의 개발이 이뤄져 왔다. 이로서 개발된 인체의 동적 모형은 설계 단계의 차량 모형에 적용되어 승차감을 예측하고 설계 개선 안을 도출하는데 활용할 수 있어, 차량 개발의 주기 단축 및 비용 절감에 기여할 수 있다는 장점이 있다.

한편, 승차감 평가를 위한 진동 계측/분석 절차를 제안하는 ISO-2631 에서는, 시트에서 착석자세 인체로 전달되는 진동을 등받이(seat back) 병진 3 방향, 시트 쿠션(seat cushion) 병진 3 방향과 회전 3 방향 그리고 발판(foot rest)에서의 병진 3 방향 등 12 개로 정의하고 있다.[1] 정속 주행 승용차(automobile)의 경우, 시트 쿠션 상하 방향 진동의 기여도가 52%로 가장 높아[2] 시트 쿠션 상하 방향에 대한 착석자세 인체 진동 모형이 주로 개발되어 왔다.[3,4] 그러나 굴삭기(excavator)의 경우, 붐-암-버킷(boom-arm-bucket)으로 이뤄진 작업 장치의 피치 동작과 실 작업 시 버킷 팁(tip)에 작용하는 전후(fore-and-aft, x)/상하(vertical, z) 방향 외력에 의하여 시트 쿠션에서의 상하/전후 방향 및 피치(pitch) 진동이 지배적으로 발생한다.[5] 따라서 굴삭기의 승차감 평가를 위한 착석자세 인체 동적 모형은 상하/전후/피치에 대한 진동 특성을 필요로 한다.

본 연구에서는 인체가 착석한 시트를 상하/전후/피치 가진하여 얻은 겉보기 관성 행렬 및 전달률 행렬을 바탕으로 인체의 진동 특성을 파악하여, 착석자세 인체 진동 모형 개발의 초석을 마련코자 한다. 여기서, 겉보기 관성 행렬이란 겉보기 질량을 일반화한 것으로, 시트 쿠션에서의 수직/수평/피치 운동과 수직/수평 힘 및 모멘트의 관계를 나타내는 주파수 응답함수이다.

2. 착석자세 인체에 대한 상하/전후/피치 가진 실험

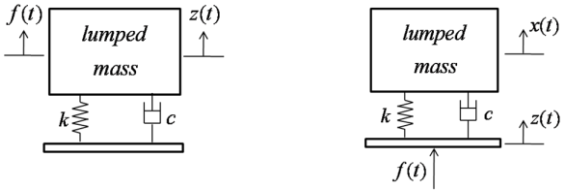
2.1 착석자세 인체의 진동 특성 측정

(1) 겉보기 관성 행렬

Fig 2.1(a)의 진동계 특성은 집중 질량에 대한 힘 입력과 가속도 출력 간 주파수 응답 함수로서 파악

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술원
E-mail : kjkim@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-3024, Fax : (042) 350-3210
* 한국과학기술원

할 수 있다. 그러나 인체의 경우, 전신 진동을 유발하기 위해 특정 부위를 가진기로 직접 가진하는 것은 상해에 대한 염려 등으로 어렵다. 따라서 Fig 2.1 (b)와 같이 인체가 착석한 시트에 대응되는 기초(base)에 대하여 가속도 가진과 힘 응답으로 정의되는 겉보기 질량을 측정하여 인체의 진동 특성을 파악하는 것이 바람직하다.



(a) force excitation (b) base excitation

Fig 2.1 1DOF. mass-spring-damper system

여기서, 겉보기 질량이란 식 (2.1)로서 $M(j\omega)$은 겉보기 질량, $F(j\omega)$, $a(j\omega)$는 각각 기초에서 정의된 힘과 가속도를 의미한다.

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

본 연구에서는 식(2.1)의 겉보기 질량을 상하/전후 방향 및 피치(pitch)에 대한 것으로 확장한 겉보기 관성 행렬 식 (2.2)을 측정하여, 인체의 진동 특성을 파악하고자 한다.

$$\begin{bmatrix} H_{a_zF_z} & H_{a_xF_z} & H_{\alpha_yF_z} \\ H_{a_zF_x} & H_{a_xF_x} & H_{\alpha_yF_x} \\ H_{a_zM_y} & H_{a_xM_y} & H_{\alpha_yM_y} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_z \\ a_x \\ \alpha_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_z \\ F_x \\ M_y \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

(2) 인체 상부 피치 가속도 전달률 행렬

겉보기 질량은 시트와의 접촉면에 대한 입/출력 관계로 정의되기 때문에 상체(upper-body)의 진동 특성 파악에는 한계가 있다. 따라서 상체의 거동을 파악하기 위해 기초의 상하/전후/피치 가진과 상체의 피치 각가속도 응답 간 관계를 식(2.3)의 전달률 행렬로서 파악하고자 한다.

$$\begin{bmatrix} TR_{a_z\alpha_{body}} & TR_{a_x\alpha_{body}} & TR_{\alpha_y\alpha_{body}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_z & a_x & \alpha_y \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \alpha_{body} \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

2.2 실험 장치 구성

인체의 겉보기 관성 행렬 및 상체 피치 각가속도 전달률 행렬 계산에 필요한 힘과 가속도를 측정하고자 시트 형태의 실험장치를 Fig.2.2 과 같이 구성하였다.

가진기는 한국기계연구원에서 보유하고 있는 MTS 사의 6 자유도 가진기를 이용하였다. 가진기의 최대 적재 하중은 30 ton 이며, 상하방향으로 1.5g의 가속도까지 가진이 가능하다.

착석 시트의 높이는 20~30 대 한국인 남성의 평균치[6]를 반영하여 0.46m 로 제작하였다. 가속도 측정을 위해 3 축 가속도계(PCB 356B08, PCB 356A16)를 적용하였다. 상판의 가속도를 측정하기 위해 가속도계를 힘 센서의 측정 중심과 일치시켜 상판에 설치하였고, 상체 피치 가속도 측정을 위하여 요추부와 요추에서 수직 위 척추 상부에 가속도계를 부착하였다. 측정된 가속도 신호로부터 상판의 상하/전후 가속도 및 피치 각가속도 그리고 상체의 피치 각가속도를 다음과 같이 구하였다.

$$a_z = \frac{a_{z_1} + a_{z_2}}{2} \tag{2.4}$$

$$a_x = \frac{a_{x_1} + a_{x_2}}{2} \tag{2.5}$$

$$\alpha_{y_y} = \frac{a_{z_2} - a_{z_1}}{l}, \alpha_{body} = \frac{a_{x_{4_{x_4}}} - a_{x_3}}{l_{body}} \tag{2.6}$$

시트에서의 상하/전후 방향 힘과 피치 방향 모멘트를 측정하기 위하여, 3 축 힘 센서(Kistler 9257, 9067)의 측정 중심을 0.33m 간격으로 배치하고, 19.3Kg 의 사각 상판에 볼트로 고정하였다. 측정된 힘 신호로부터 사각 상판의 관성력을 제거하여 방향별 힘/모멘트를 식(2.7~9)로서 얻었다.

$$F_z = F_{z_1} + F_{z_2} - m_{plate}a_z \tag{2.7}$$

$$F_x = F_{x_1} + F_{x_2} - m_{plate}a_x \tag{2.8}$$

$$M_y = [l/2(F_{z_2} - F_{z_1}) - h(F_{x_1} + F_{x_2})] - I_{plate}\alpha_y \tag{2.9}$$

2.3 실험 조건

(1) 피실험자

20~30 대 한국 남성의 평균 체격(172.5cm, 70.1kg)[6]과 유사한 피실험자(175cm, 72kg)를 선정하였다.

(2) 가진 조건

굴삭작업을 수행하는 궤도차량 굴삭기 시트에서는 상하/전후 방향 진동[5,7] 및 붐-암-버켓의 피치 동작에 의한 피치 진동이 주요하게 나타난다. 또한 굴삭기 시트에서 인체로 전달되는 진동의 주파수 성분의 대부분은 20Hz 이하이며, 굴삭기가 굴삭/암반 긁기/지균/주행 작업 시 시트에서의 상하/전후 방향 가속도 및 차실 지붕(cab. top)에서의 피치 각가속도 수준은 Table 2.1 과 같다.[7] 따라서 본 연구에서는 상하/전후/피치에 대하여, 1~20Hz 의 주파수 성분을 갖는 랜덤 신호를, 각 작업 별 진동 수준의 평균으로 적용하였다. 구현한 각 방향 별 가진 신호의 파워 스펙트럼 밀도(Power spectral density)를 Fig 2.3 나타내었다.

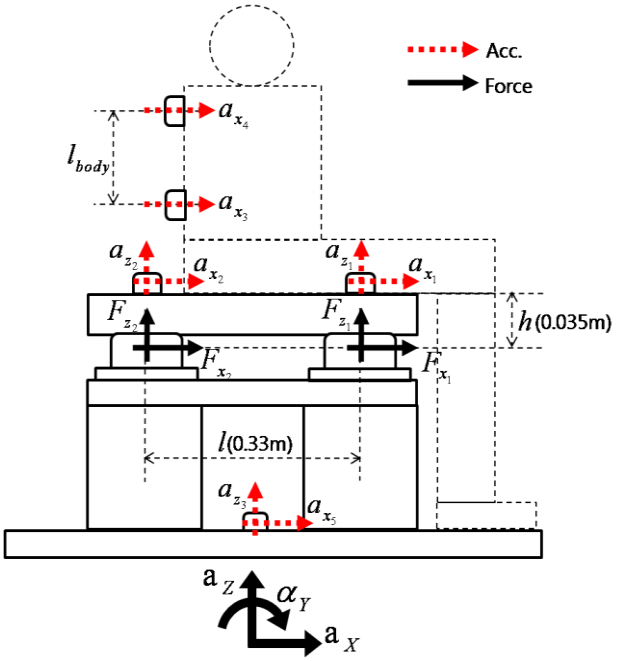
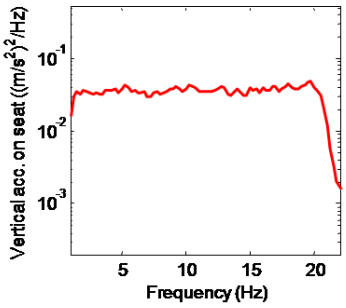


Fig. 2.2 Experimental setup

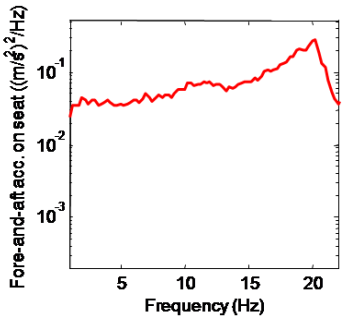
Table 2.1 (Angular) acceleration r.m.s. in x, z, pitch direction on seat of excavator for each working condition

(frequency range 1~20Hz)

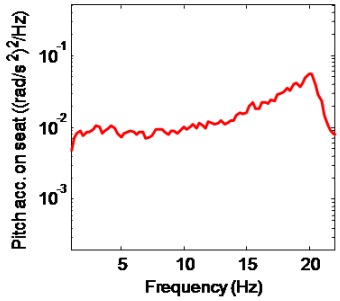
Direction	x (m/s^2)	z (m/s^2)	pitch (rad/s^2)
Excavating	0.774	0.703	0.404
Scratching	1.344	1.215	0.834
Contouring	1.221	1.180	0.444
Travelling	0.512	0.422	0.319
Average	0.917	0.857	0.502



(a) z direction, 0.846 m/s^2 r.m.s.



(b) x direction, 0.922 m/s^2 r.m.s.



(c) pitch 0.516 rad/s^2 r.m.s.

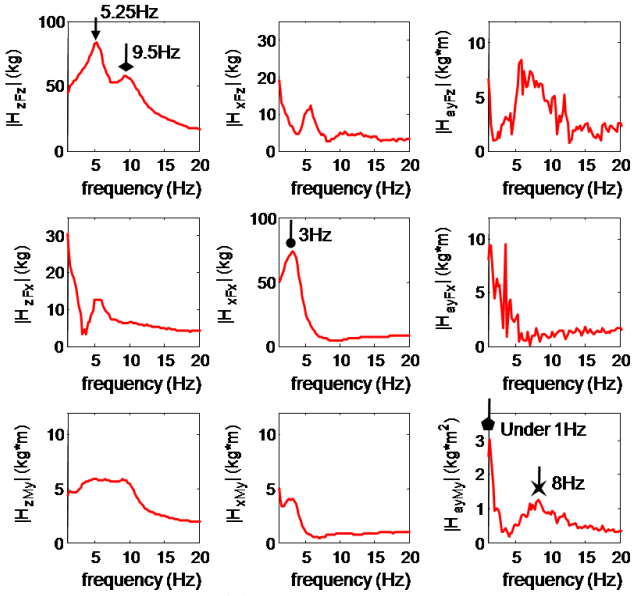
Fig 2.3 Power spectral density of (angular) acceleration on seat

3. 착석 자세 인체의 겉보기 관성 행렬 및 상체 전달률 행렬 측정 결과

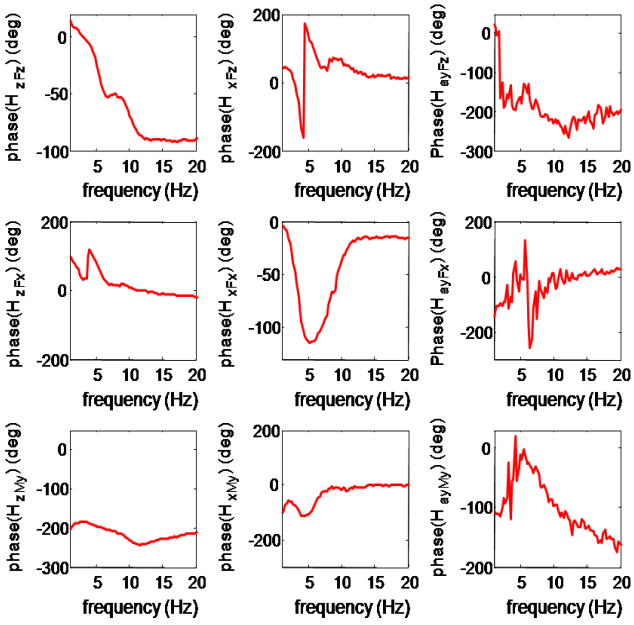
상하/전후/피치 방향에 대한 착석 자세 인체의 겉보기 관성 행렬 Fig.2.4 및 상체 피치 전달률 행렬 Fig 2.5 을 얻었다.

겉보기 관성 행렬 중 (1,1) 요소인 수직 방향 겉보기 질량의 크기를 살펴보면, 0 Hz 에서는 상체의 무게 약 50kg 로 수렴하고 5.25Hz 와 9.25Hz 의 공진 주파수를 보인다. 겉보기 관성 행렬의 (2,2) 요소인 전후 방향 겉보기 질량의 크기를 살펴보면, 0Hz 에서 상체의 무게로 수렴하며 3Hz 의 공진 주파수를 보인다. 피치에 대한 겉보기 회전 관성 모멘트를 의미하는 (3,3) 요소를 살펴보면, 8Hz 에서 넓은 대역의 피

크가 발생하는데, 이는 상체 피치 전달률 행렬의 (3.1) 요소에서 보이는 11.75Hz 의 공진 주파수와 8Hz 의 공진 주파수가 중첩된 것으로 사료된다. 또한 1Hz 근방에서 크기가 증가하는 경향을 보이는데, 앞의 (1,1), (2,2) 요소와 마찬가지로 0Hz 에서는 특정한 값으로 수렴할 것임을 감안하면, 1Hz 이하에 공진 주파수가 존재하는 것으로 판단된다. 이로서 총 6 개의 모드가 1Hz 이하, 3Hz, 5.25Hz, 8Hz, 9.25Hz, 11.75Hz 에 존재함을 파악하였다.

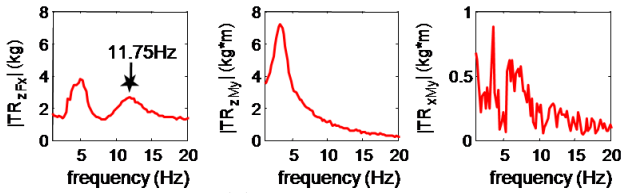


(a) magnitude

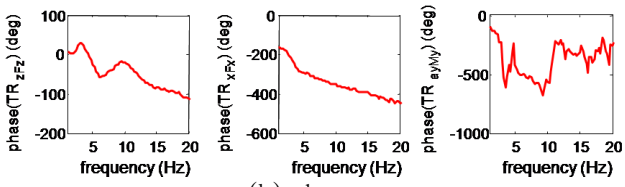


(b) phase

Fig 2.4 apparent inertia matrix for seated posture human body



(a) magnitude



(b) phase

Fig 2.5 Upper-body pitch transmissibility matrix for Seated posture human body

4. 결 론

- 기존 문헌[5,7]의 굴삭기 진동 계측 결과로부터 착석 자세 인체의 상하/전후/피치에 대한 진동 특성 파악의 필요성을 언급하였다.
- 20~30 대 한국 남성 표준 체형에 가까운 피실험자 1 인에 대하여, 상하/전후/피치 가진을 적용하여 겉보기 관성 행렬 및 전달률 행렬을 측정하였다.
- 20Hz 이하의 관심 주파수에 대하여, 1Hz 이하, 3Hz, 5.25Hz, 8Hz, 9.5Hz, 11.75Hz 를 공진주파수로 갖는 6 개 모드를 파악하였다.

참 고 문 헌

(1) International Organization for Standardization 1997 International Standard 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration.

(2) 한국 자동차 공학회, 1996, 자동차 기술 핸드북 - 시험, 평가편, pp. 148~153

(3) International Standard 5982/DIS, 2000, Mechanical vibration and Shock - Range of idealized values to characterize seated-body biodynamic response under vertical vibration.

(4) Nawayseh, N. and Griffin, M.J., 2009, A model of the vertical apparent mass and the fore-and-aft cross_axis apparent mass of the human body during vertical whole-body vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 319, pp. 719-730

(5) 연정택, 2000, 도시지하철 및 굴삭기 관련 운전자의 전신진동 비교평가, 연세대학교 석사학위 논문

(6) 산업자원부 기술표준원, 2003, 제 5 차 한국인 인체

치수조사 사업보고서(2 차년도 최종 보고서)
(7) ㈜ 볼보건설기계코리아, 2009, 굴삭기 Cabin Vibration 및 Operator Comfort 를 위한 주요 Component Specification 을 결정할 수 있는 Tool 개발
(8) Griffin, M.J., 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press, London, pp36, pp359~367
(9) White, S. W., Davies, P., Bajaj, A., 1998, Dynamic Modeling and Measurement of Occupied Car Seats and Seating Foam, HL 98_22, Report #2616-1
(10) Fairly T. E., and Griffin, M. J., 1989, " The Apparent Mass of the Seated Human Body Vertical Vibration," Journal of Biomechanics, Vol. 22, No. 2, pp. 81 - 94