

6축 힘측정판을 이용한 수직방향 전신진동에 대한 겉보기질량 및 겉보기편심질량에 대한 고찰

Study of Apparent Mass and Apparent Eccentric Mass to Vertical Whole-body Vibration by Using Strain-gage Type Six-axis Force Plate

전 경 진*·김 민 석**·안 세 진†·정 의 봉***·유 완 석***

Gyeong-Jin Jeon, Min-Seok Kim, Se-Jin Ahn, Weui-Bong Jeong and Wan-Suk Yoo

(2011년 6월 7일 접수 ; 2011년 9월 19일 심사완료)

Key Words : Whole-body Vibration(전신진동), Apparent Mass(겉보기질량), Cross-axis Apparent Mass(교차축 겉보기질량), Apparent Eccentric Mass(겉보기편심질량), Idle Vibration(정차진동)

ABSTRACT

When whole-body is exposed to vertical vibration, asymmetry shape of human body affects the response on the translational(fore-aft, lateral, vertical) and rotational(roll, pitch, yaw) motion. While the translational motion has been studied with various titles, it has been rare to study the rotational motion of human body exposed to vertical excitation because of lack of experimental equipment. This study was performed by using a 6-axis force plate installing strain gage type sensors for the rotational response. Sixteen male subjects were exposed to vertical vibration on rigid seat in order to investigate apparent mass of three translational motion and apparent eccentric mass of three rotational motion. Random signal was generated to make excitation vibration which was on an effective frequency range of 3~40 Hz, and magnitude of 0.224 m/s² r.m.s. The frequency range and magnitude used was selected for the vibration of passenger vehicle on idling condition. As the result, cross-axis apparent masses of fore-and-aft and lateral direction were not significant showing 20 % and 3 % of vertical apparent mass relatively. And apparent eccentric mass of pitch motion was dominant when compared to that of roll and yaw motion, which is reasoned by asymmetry direction of human body sitting on a seat.

1. 서 론

각종 운송수단에 탑승한 사람은 의자와 엉덩이의

접촉면을 따라 진동이 전달되는 수직방향 전신진동(vertical whole-body vibration)에 노출된다. 수직방향 전신진동에 노출된 인체의 주파수응답 중 수직방향의 응답특성을 겉보기질량(apparent mass)으로 정의한다⁽¹⁾.

앉은 자세에서 수직방향 전신진동에 노출된 인체의 겉보기 질량은 ISO 5982에 규정되어 있으며, 여기에서는 세 가지 질량(55 kg, 75 kg, 90 kg)에 대하여 0.5~20 Hz의 주파수범위에서 겉보기질량의 크기와 위상값을 제시하고 있다⁽²⁾. 이러한 표준화된 인체특성들 외에도 Nawayseh⁽³⁾와 Rakheja⁽⁴⁾ 등은 0.25~3.0 m/s² r.m.s.의 가진크기와 0.2~20 Hz의 주

† 교신저자; 정희원, 르노삼성자동차 품질해석팀
E-mail : sejin.ahn@renaultsamsungM.com
Tel : (051)979-9551

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 현대중공업 제품개발연구소 건설장비연구실

*** 정희원, 부산대학교 기계공학부

이 논문의 일부는 2011년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

과수 범위의 정현파 또는 랜덤신호를 이용하여 인체의 반응특성 분석을 위한 실험적 연구를 시도하였다. 그 결과 인체의 공진주파수는 4~6 Hz에서 나타나며 2차 피크는 8~13 Hz에서 부분적으로 나타나는 것으로 보고하였다. 그리고 Cheung^(5,6) 등은 한국인의 수직방향 전신진동에 대한 수직방향 응답특성을 실험적으로 연구하여 ISO 5982와 비교하였다. 그 결과 한국인은 ISO 5982에 비하여 위상값이 상대적으로 크게 나타나며 걸보기질량의 크기에서도 12 Hz 이상의 주파수 영역에서 ISO 5982에 비해 20% 정도 적은 값을 가졌으며, 이는 서양인과 한국인의 신체와 골격의 차이에 의해 나타나는 결과라고 설명하였다. Kitazaki⁽⁷⁾ 등은 유한요소 모델을 이용하여 수직방향의 걸보기질량과 척추, 골반, 내장, 머리의 거동과의 연관성에 대하여 분석하였다. 그 결과 5.06 Hz에서 걸보기질량의 1차 공진모드가 나타났으며, 5.77 Hz에서 골반과 엉덩이 부분의 전단력에 의한 전후방향 모드가 나타난다고 보고하였다. Nawayseh^(8,9)와 Mansfield⁽¹⁰⁾ 등 수직방향 진동에 대한 걸보기질량과 더불어, 인체의 형상적 비대칭 특징으로 인해 나타나는 전후방향 응답을 연구하였으며, 이것을 전후방향 교차축 걸보기질량(*fore-aft cross-axis apparent mass*)으로 명명하여 나타내었다.

이 연구에서 교차축 걸보기질량은 5 Hz 부근에서 공진이 나타나며 정적질량의 60% 정도의 크기로 나타난다고 보고하였다. 그리고 좌우방향 교차축 걸보기질량(*lateral cross-axis apparent mass*)은 전후방향에 비하여 미미한 것으로 나타났다⁽⁸⁾. Rakheja⁽¹¹⁾ 등은 수직방향 진동에 대한 병진방향(전후, 좌우, 수직)의 응답특성을 분석하여 전후방향 피크는 수직방향 피크에 비해 15~20% 정도로 낮아지며 좌우방향의 피크는 5% 정도로 낮아진다고 보고하였다. Matsumoto⁽¹²⁾ 등은 4개의 자유도를 가지는 *lumped parameter model*과 질량편심에 따른 회전자유도를 추가한 모델을 이용하여 걸보기질량의 공진주파수인 5 Hz의 진동모드를 해석하였다. 그 결과 *bending mode*는 척추에 의한 것으로 설명하였으며, 골반과 다리에 의해 수직방향 모드와 상체에 의한 피치방향 진동모드가 나타난다고 보고하였다. Jeon⁽¹³⁾ 등은 기존 연구와는 달리 수직방향 진동에 대하여 인체가 앞뒤로 회전하는 응답특성, 즉 *pitch motion*을 측정하고 분석하였으며, 이를 걸보기편심질량(*apparent*

eccentric mass)이라고 정의하였다. 걸보기편심질량은 6 Hz와 12 Hz에서 피크를 가지며, 상체의 고유진동수 영역인 5~10 Hz에서는 착석자세에 따른 차이가 적었다. 반면에 허리의 고유진동수 영역인 10~12 Hz는 앉은 자세에 따른 그 차이가 다소 있었으며, 인체의 전후방향 비대칭에 영향을 미치는 착석자세에 따라 걸보기편심질량의 변화는 뚜렷하게 나타난다고 보고하였다.

수직방향 전신진동에 노출된 인체는 형상적인 특징에 의한 비대칭성과 질량편심으로 인하여 병진방향(전후, 좌우, 수직) 뿐만 아니라 회전방향(롤, 피치, 요)으로 그 응답이 발생하게 된다. 하지만, 기존의 연구들은 병진방향의 응답특성에 대한 분석을 시도하였으나 회전방향의 응답특성에 관한 연구⁽⁸⁻¹¹⁾는 측정장비의 한계성 등의 이유로 연구가 활발히 진행되지 못한 실정이었다. Matsumoto⁽¹²⁾와 Jeon⁽¹³⁾의 연구결과에서 보듯이 수직방향 진동에 대한 인체의 거동을 조금 더 정확하게 묘사하기 위해서는 질량편심과 비대칭에 의한 회전방향의 응답특성에 대한 연구가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 수직방향 전신진동에 노출된 인체에 대하여 세 방향의 병진응답특성과 세 방향의 회전응답특성을 실험적으로 분석하고자 한다.

전자식 단축가진기(IMV-i220)를 이용하여 3~40 Hz 주파수 범위를 가지며, 크기가 $0.224 \text{ m/s}^2 \text{ r.m.s.}$ 인 랜덤신호의 진동으로 16명의 피시험자들을 가진 하였다. 그리고 세 방향의 병진력과 세 방향의 모멘트를 측정할 수 있는 스트레인게이지 타입의 힘측정판을 이용하여 인체 반응특성을 측정하고 분석하였다. 여기서, 기존의 연구와 같이 수직방향의 응답특성은 걸보기질량이라 하고 전후방향과 좌우방향의 응답특성은 교차축 걸보기질량이라 하였다. 또한, 수직방향 진동에 대한 회전방향 응답특성은 걸보기편심질량으로 구분하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

(1) 힘측정판

가진기 상부에 설치된 힘측정판(AMTI OR 6-7)^(14,15)은 Fig. 1과 같이 4개의 원통형 마운트(*mount*) 각각에 두께가 얇은 스트레인게이지가 부착되어 상부판

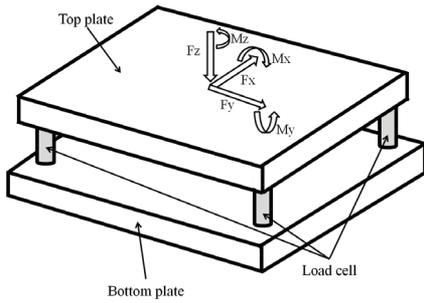


Fig. 1 Perspective view of force platform mounting four load cells

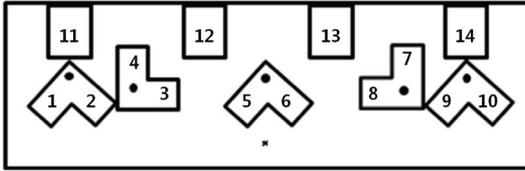


Fig. 2 Layout of strain gages on unwrapped cylindrical load cell

(top plate)와 하부판(bottom plate)의 상대적인 힘의 변화를 측정한다. Fig. 2는 4개의 원통기둥에 부착된 스트레인게이지의 부착방법과 측정원리를 나타내고 있다. 세 개의 원통에 부착된 1, 2, 5, 6, 9, 10번 스트레인게이지는 전단변형률을 측정하게 되며, 두 개의 원통에 부착된 3, 4, 7, 8번 스트레인게이지는 수직방향 압축에 의한 변형을 측정한다. 이때 전단 변형률을 이용하여 수평력을 계산하고 수직방향 변형을 이용하여 수직력을 계산하게 된다. 네 개의 원통에 각각 부착된 11~14번 스트레인게이지는 수직축의 인장 압축에 따른 변형량으로 부터 roll 축과 pitch축의 모멘트를 계산한다. Yaw축의 모멘트는 네 곳에 부착된 원통형 로드셀의 상대 변형량으로 부터 계산하여 구한다. 이렇게 계산된 6축 힘 신호의 전압 변동량은 신호증폭기(MSA-6)에 의해 증폭되어 컴퓨터로 전송된다. 이 연구에 사용된 힘측정판(AMTI OR 6-7)의 상세사양은 Table 1에 나타내었다.

(2) 가진시스템

이 연구에서는 수직방향 진동을 발생시키기 위하여 전자식(electro-dynamic type) 단축가진기(IMV i-220)를 이용하였다. 전자식 단축가진기는 Fig. 3에서

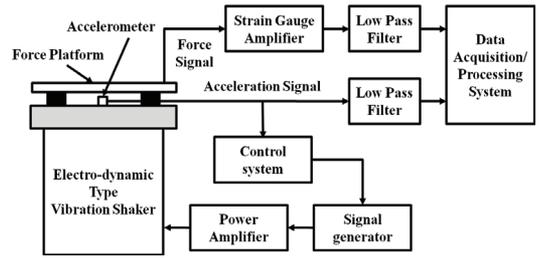


Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

보는 것처럼 control system에 설정된 가속도신호가 signal generator와 power amplifier를 거쳐 가진기에 입력되면, 신호에 부합하는 전류를 코일에 흐르게 하여 상하방향으로 진동을 발생하게 된다. 이때 가진기 상부에 부착된 1축 가속도계의 신호는 control system으로 피드백되어 설정된 가속도의 크기와 주파수를 제어한다. 여기서 사용된 피드백용 가속도계는 저주파영역에서 안정적인 응답특성을 가지는 스트레인게이지 타입(strain gauge type) ICP가속도계(kistler 8310B10)이다. 이 연구에서 사용된 가진기 IMV i-220의 상세사양은 Table 2에 나타내었다.

(3) 신호처리

이 연구에서는 ISO 2631-1⁽¹⁶⁾의 착석한 인체의 좌표계를 기준으로 진후방향(X-direction), 좌우방향(Y-direction), 수직방향(Z-direction)을 정의하였고, 이러한 좌표계를 기준으로 세 방향 병진력과 세 방향 모멘트의 응답특성을 힘측정판으로 측정하고 분석하였다. 가진기를 제어하는 입력과 힘측정판에 의해 측정된 출력은 NI사의 LabVIEW를 이용하여 디지털 신호처리하였다. 그리고 Mathworks사의 Matlab을 이용하여 데이터 해석 및 통계분석을 일괄처리 하였다.

2.2 실험

16명의 남성으로 구성된 피시험자들은 임의로 선정되었으며, 이들의 신체적 특성에 대한 통계적 데이터는 Table 3에 나타내었다.

피시험자는 80초 동안 진동하는 가진기 위에 정해진 착석자세를 유지하도록 하였으며, 그 동안 출력된 신호는 과도신호가 포함된 처음과 끝의 10초를 제외한 60초 길이의 신호를 인체의 반응특성 분석에 이용하였다. 이때 frequency span은 1,000 Hz이며

frequency resolution은 0.5 Hz로 하였다. A/D변환된 시간신호의 데이터는 해닝창함수(hanning window function)를 적용하여 스펙트럼으로 변환하였으며, 95 % 중첩(overlap)하여 스펙트럼 평균(spectrum averaging)하여 최종 결과로 반영하였다.

Table 1 Specification of force platform

Model	AMTI OR 6-7
Fx, Fy capacity	4,450 N
Fz capacity	8,900 N
Mx, My capacity	2,300 Nm
Mz capacity	1,100 Nm
Fx, Fy Natural frequency	370 Hz
Fz Natural frequency	530 Hz
Crosstalk	Less than 2 %

Table 2 Specification of vibration shaker

Model	IMV i-220
Type	Electro-dynamic
Frequency range	3 ~ 3,300 Hz
Maximum displacement	51 mm p-p
Maximum payload	200 kg
Rated force	5.6 kN (random)

Table 3 Statistical data of sixteen subjects

Item	Average	SD	Max/min
Weight(kg)	71.8	11.1	104.0/60.0
Height(cm)	173.0	3.2	180.0/169.5
Age(yr)	27.9	2.6	44/25

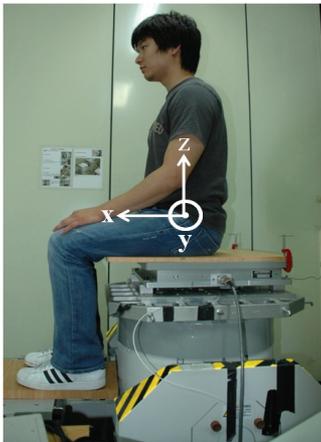


Fig. 4 Photographic representation of shaker and subject sitting on the rigid seat

피시험자는 실험이 시작될 때 Fig. 4와 같이 양손을 무릎 위에 가지런히 놓고, 허리를 곧게 세우고 정면을 응시하는 자세를 취하도록 유도하였으며, 실험이 진행되는 동안에는 자발적인 움직임은 하지 않도록 주문하였다. 피시험자가 시트에 착석할 때는 신체의 무게중심과 힘측정판의 무게중심을 일치시키기 위하여 힘측정판의 모멘트 신호가 0이 되는 지점에 착석 할 수 있도록 유도하였다. 피시험자는 허벅지가 수평시트에 편안한 느낌으로 닿고, 발은 발판 위에 가지런히 놓여진 상태로 무릎과 허벅지는 약 90°를 유지하는 average thigh contact 자세를 유지할 수 있도록 하였다. 평판시트는 단단한 나무재질을 이용하여 제작되었으며, 이 연구의 관심주파수 영역에서 강체 거동함과 동시에 착석감을 좋게 하였다. 이 연구에서는 실험과 분석의 단순화를 위해 시트의 등받이는 고려하지 않았다.

인체 반응특성에 관한 기존의 연구에서는 대부분이 1차와 2차 공진이 나타나는 20 Hz 미만의 주파수 영역을 관심영역으로 하였으나, 이 연구에서는 차량의 아이들(idle) 진동 등을 고려하여 주파수 영역대를 확대하여 3~40 Hz의 주파수 범위로 하였다. 그리고, 가진력의 크기는 0.224 m/s² r.m.s.의 랜덤신호로 하였다.

2.3 분석

인체에 실제로 가해진 진동, 즉 수직방향 가속도 입력을 분석하기 위해 가진기의 플랫폼에 단단하게 고정된 강체시트에 부착한 가속도계로부터 신호를 획득하였다. 그리고 인체와 강체시트 사이에서 발생하는 상대적인 힘은 힘측정판의 출력으로 계산하였다.

랜덤신호 가진으로 구하는 인체의 걸보기질량 또는 교차축 걸보기질량은 가속도 입력에 대한 힘응답의 스펙트럼으로 계산되며, 그 관계식은 다음과 같다^(1,8,9).

$$H(f) = \frac{S_{af}(f)}{S_{aa}(f)} \tag{1}$$

여기서, S_{aa} 는 가속도 신호의 파워스펙트럼이고 S_{af} 는 수직방향 가속도와 3축의 병진력 신호로 구한 크로스스펙트럼을 의미한다. 위의 식에서 수직방향 힘 응답에 대한 것을 걸보기 질량이라 하고, 가

진방향과 서로 교차하는 좌우, 전후방향 힘 응답과의 관계는 교차축 걸보기질량이라 한다. 이 연구에서 명명하고 있는 걸보기편심질량은 수직방향 가속도에 대한 3축의 모멘트의 관계로부터 계산된다. 이것은 인체의 비대칭성에 의해 발생하며, 관계식은 다음과 같다⁽¹³⁾.

$$M(f) = \frac{S_{am}(f)}{S_{aa}(f)} \quad (2)$$

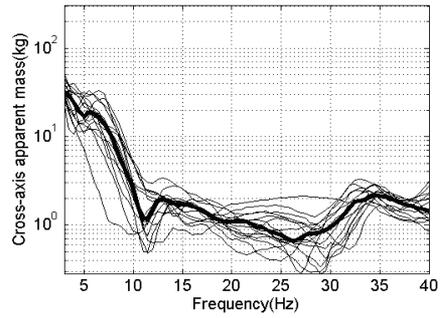
여기서, S_{am} 는 수직방향 가속도와 3축의 모멘트 신호의 크로스스펙트럼을 의미한다.

3. 실험 결과

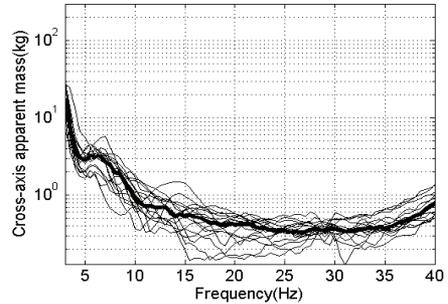
3.1 걸보기질량

16명의 피시험자 각각에 대한 걸보기질량과 교차축 걸보기질량을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 굵은 실선은 16명의 피시험자에 대한 주파수별 중간값(median value)을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)의 전후방향 교차축 걸보기질량은 피시험자에 따라 다소 차이가 있으나 대체적으로 4~7 Hz 부근에서 피크를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)의 좌우방향 교차축 걸보기질량은 5~7 Hz 부근에서 공진이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)의 수직방향의 걸보기질량은 피시험자의 신체적 특성에 따라 다소 차이가 있으나 대체적으로 4~6 Hz에서 공진이 나타나며 부분적으로 8~13 Hz에서 2차 피크를 가진다. 이것은 기존의 연구결과⁽³⁻⁷⁾와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 수직방향 가속도에 대한 전후, 좌우 및 수직 방향의 힘응답 특성을 비교하기 위하여 각각의 중간값을 Fig. 6에 나타내었다. 수직방향의 걸보기질량은 전후, 좌우방향의 교차축 걸보기질량에 비해 상대적으로 매우 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 6 Hz 근처의 피크값을 비교하면, 전후방향 교차축 걸보기질량은 수직방향 걸보기질량의 20% 정도의 크기이고, 좌우방향 교차축 걸보기질량은 걸보기질량의 약 3% 정도의 크기임을 알 수 있다.

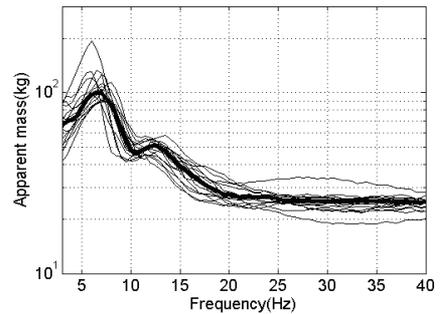
이것은 기존의 연구결과⁽¹¹⁾와 잘 일치하는 결과이다. 이 연구에서는 각 방향에 대한 인체 반응특성의 크기 순위에 대한 일관성을 통계분석하기 위해 비모수통계기법(nonparametric statistics method)의 하나인



(a) Cross-axis apparent mass of fore-and-aft direction



(b) Cross-axis apparent mass of lateral direction



(c) Apparent mass of vertical direction

Fig. 5 Translational human responses of sixteen subjects

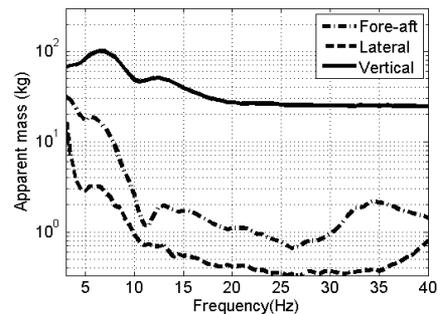
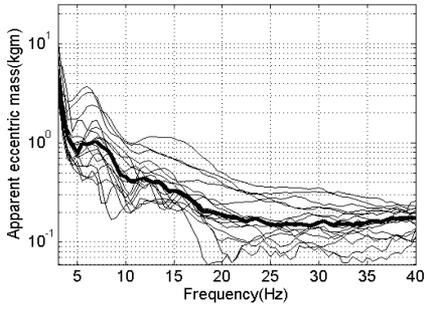
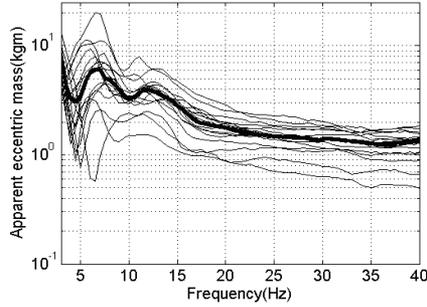


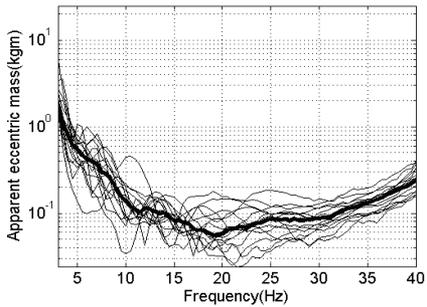
Fig. 6 Comparison of median curve between three kinds of translational human responses



(a) Apparent eccentric mass of roll axis



(b) Apparent eccentric mass of pitch axis



(c) Apparent eccentric mass of yaw axis

Fig. 7 Rotational human responses of sixteen subjects

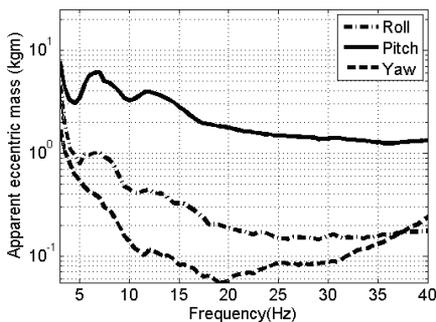


Fig. 8 Comparison of median curve between three kinds of rotational human responses

프리드만 검증(Friedman test)^(17,18)을 실시하였다. 그 결과 값으로 모든 주파수 영역에서 p-value가 0.001 이하의 값으로 나와, 거의 모든 피시험자의 걸보기 질량이 교차축 걸보기질량에 비해 큰 값을 가짐을 알 수 있었다.

3.2 걸보기편심질량

16명의 피시험자 각각에 대한 걸보기편심질량을 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 굵은 실선은 16명의 피시험자에 대한 주파수별 중간값을 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)에서 roll축의 걸보기편심질량은 피시험자에 따라 다소 차이가 있으나 대체적으로 7 Hz 부근에서 피크를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 7(b)의 pitch축의 걸보기편심질량은 다른 축의 걸보기편심질량에 비해 대체적으로 크고 뚜렷한 공진 피크를 가지고 있음을 알 수 있다. 1차 피크는 7 Hz 근처에 있고, 2차 피크는 12 Hz 근방에서 있음을 알 수 있다. 이는 골반과 엉덩이 부분의 전단력에 의한 전후방향 모드가 나타난다고 보고한 Kitazaki⁽⁷⁾의 연구결과와 척추에 의한 bending mode 및 상체에 의한 피치방향의 진동모드가 발생한다고 보고한 Matsumoto⁽¹²⁾의 연구결과에 의해 발생하는 공진지점임을 알 수 있다. Fig. 7(c)의 yaw축의 걸보기편심질량은 크기도 작을 뿐 아니라 관심영역의 주파수 범위 내에서는 공진성의 피크가 나타나지 않았다. 또한 수직방향의 진동에 대하여 roll, pitch 그리고 yaw축의 인체의 반응특성을 비교하기 위하여 각각의 중간값을 Fig. 8에 나타내었다. Pitch축의 걸보기편심질량의 1차 피크에 비해 roll축의 걸보기편심질량은 17% 정도의 크기가 됨을 알 수 있었다. 또한 프리드만 검증(Friedman test)^(17,18)을 통하여 모든 주파수영역에서 p-value가 0.001 이하의 중요도를 가지고 roll축 걸보기편심질량이 다른 축의 걸보기편심질량보다 큰 것으로 통계분석 되었다.

4. 결 론

이 연구에서는 차량의 아이들 진동을 고려하여 3~40 Hz의 주파수영역에 대하여 0.224 m/s^2 r.m.s. 크기의 수직방향 랜덤 진동을 이용하여 16명의 피시험자에 대한 6축 방향의 인체반응특성을 연구하

였다. 세방향의 병진응답은 수직방향 걸보기질량에 비해 전후 및 좌우방향의 교차축 걸보기질량은 매우 작은 값을 알 수 있었다. 따라서 상하방향의 전신진동에 대한 병진방향의 응답특성은 수직방향의 걸보기 질량이 지배적임을 알 수 있었다. 그리고 세방향의 회전응답에서는 pitch축의 걸보기편심질량이 roll과 yaw축의 걸보기편심질량에 비해 매우 크게 됨을 알 수 있었다. 이것은 앉은 자세의 인체는 전후방향의 비대칭이 큼으로 인해 상하방향 진동에 연동(coupling)되며 허리의 밴딩모드 및 골반과 다리에 의한 수직방향의 모드와 상체에 의한 영향으로 인하여 pitch축 걸보기편심질량이 크게 됨을 알 수 있다.

향후 연구에서는 더 다양한 착석자세와 다양한 가진력에 대한 6축 응답특성을 관찰할 필요가 있고, 아울러 각각의 인체반응의 특성의 변화가 불편함에는 어떤 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

(1) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Elsevier Academic Press, London.

(2) ISO 5982, 2001, Mechanical Vibration and Shock - Range of Idealized Values to Characterize Seated-body Biodynamic Response under Vertical Vibration, International Organization for Standardization, Geneva.

(3) Mansfield, N. J. and Griffin, M. J., 2000, Non-linearities in Apparent Mass and Transmissibility During Exposure to Whole-body Vertical Vibration, Journal of Biomechanics, Vol.33, Issue 8, pp. 933~941.

(4) Rakheja, S., Stiharu, I. and Boileau, P. E., 2002, Seated Occupant Apparent Mass Characteristics under Automotive Postures and Vertical Vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol.253, Issue 1, pp. 57~75.

(5) Cheung, W. S., Kim, Y. T., Kwon, H. S. and Hong, D. P., 2003, Experimental Investigation of the Response Characteristics of Korean - Seated Subjects under Vertical Vibration: (I) Apparent Mass,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 645~650.

(6) Cheung, W. S., Kim, Y. T., Kwon, H. S. and Hong, D. P., 2003, Experimental Investigation of the Response Characteristics of Korean - Seated Subjects under Vertical Vibration: (II) Mechanical Impedance, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 713~719.

(7) Kitazaki, S. and Griffin, M. J., 1997, A Model Analysis of Whole-body Vertical Vibration, Using a Finite Element Model of the Human Body, Journal of Sound and Vibration, Vol. 200, Issue 1, pp. 83~103.

(8) 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, Issue 3, pp. 503~523.

(9) 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, Issue 1-2, pp. 719~730.

(10) Mansfield, N. J. and Maeda, S., 2006, Comparison of the Apparent Masses and Cross-axis Apparent Masses of Seated Humans Exposed to Single- and Dual-axis Whole-body Vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 298, Issue 3, pp. 841~853.

(11) Rakheja, S., Dong, R. G., Parra, S., Boileau, P. E., Marcotte, P. and Warren, C., 2010, Biodynamics of the Human Body under Whole-body Vibration: Synthesis of the Reported Data, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 40, Issue 6, pp. 710~732.

(12) Matsumoto, Y. and Griffin, M. J., 2001, Modelling the Dynamic Mechanisms Associated with the Principal Resonance of the Seated Human Body, Clinical Biomechanics, Vol. 16 Supplement, No. 1, pp. S31~S44.

(13) Jeon, G. J., Kim, M. S., Ahn, S. J., Jeong, W. B. and Yoo, W. S., 2010, Human Response to

Idle Vibration of Passenger Vehicle Related to Seating Posture, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 1121~1127.

(14) Carignan, F. J. and Cook N. H., 1982, Force Measuring Platform and Load Cell There for Using Strain Gages to Measure Shear Forces, U.S. Patent, No. 4,493,220.

(15) Carignan, F. J. and Cook N. H., 1983, Force Platform Construction and Method of Operating Same, U.S. Patent, No. 4,498,429.

(16) ISO 2631-1, 1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration - Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva.

(17) Howitt, D. and Cramer, D., 2005, Introduction to Statistics in Psychology, Pearson Education limited, Essex.

(18) Siegel, S. and Castellan, N. J., 1988, Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences, McGrawHill, NewYork.