

# 수직방향 진동에 대한 인체의 6축 방향 반응특성분석

## Six-axis Biodynamic Response to Vertical Whole-body Vibration

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

**Key Words :** Whole-body vibration(전신진동), Apparent mass(겉보기질량), Cross-axis apparent mass(교차축 겉보기질량), Apparent eccentric mass(겉보기편심질량)

### ABSTRACT

Seated human subjects have been exposed to vertical vibration so as to investigate six-axis biodynamic response. Sixteen males were exposed to random vertical vibration in the frequency range(3~40Hz) at one vibration magnitude( $0.224\text{m/s}^2$  r.m.s.). Forces were measured in the vertical, fore-and-aft, lateral, roll, pitch and yaw direction on the seat. The median of cross-axis apparent mass magnitude in the fore-and-aft direction could reach up to 20% of the apparent mass magnitude at resonance frequency. And the median of apparent eccentric mass magnitude in the roll direction could reach up to 15% of the apparent eccentric mass magnitude in the pitch direction at resonance frequency. But cross-axis apparent mass in the lateral direction and apparent eccentric mass in the yaw direction showed very small.

### 1. 서 론

산업의 고도발전에 따라 사람들은 더 쾌적하고 안전한 생활을 추구하는 반면 인체는 운송수단 또는 주변환경에 따라 매일 원하지 않는 진동에 노출되게 된다. 이러한 진동은 인체의 물리적, 심리적 불편함에 영향을 미치고 질병을 유발시킨다. 또한, 사람들의 생활의식이 향상되고 소음진동기술이 발달함에 따라 제품선택에 있어 중요한 항목이 되고 있다. 운송수단에 탑승한 인체는 의자와 엉덩이의 접촉면을 따라 진동이 전달되는 수직방향 전신진동(vertical whole-body vibration)에 노출된다. 수직방향 전신진동에 노출된 인체의 주파수에 따른 생체역학적인 수직

방향의 응답특성은 겉보기질량으로 정의한다<sup>(1)</sup>. 수직방향 전신진동에 노출된 인체가 앉은 자세에서의 겉보기 질량은 ISO 5982에 규정되어 있으며 대표적인 3종류의 질량(55kg, 75kg, 90kg)에 대한 0.5Hz~20Hz의 주파수범위에서 겉보기질량의 크기와 위상값을 제시하고 있다<sup>(2)</sup>. 이러한 방법들은 일반적으로 수직방향 진동에 노출된 인체의 수직방향 반응특성을 나타낼 때 사용된다. Nawayseh<sup>(3)</sup>와 Rakheja<sup>(4)</sup>등은  $0.25\sim 3.0\text{m/s}^2$  r.m.s.의 가진크기와 0.2~20Hz의 주파수범위의 정현파 또는 랜덤신호를 이용하여 실험적 연구를 시도하였다. 그 결과 인체의 공진주파수는 4~6Hz에서 나타나며 부분적으로 2차 피크는 8~13Hz에서 나타나는 것으로 조사되고 있다. Cheung<sup>(5,6)</sup>등은 한국인의 수직방향 전신진동에 대한 수직방향 응답특성을 실험적으로 연구하여 ISO 5982와 비교하였다. 그 결과 한국인은 ISO 5982에 비하여 위상값이 크게 나타나며 겉보기질량의 경우 10Hz이상에서 적지 않은 차이가 나타났고, 이는 서양인과 한국인의 체격차이에서 나타나는 결과라 설명하였다. Kitazaki<sup>(7)</sup>등은 유한요소모델을 이용하여 수직방향 진

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

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 기계기술연구원

\*\*\* 정희원, 부산대학교 기계공학부

동에 대한 걸보기질량과 척추, 골반, 내장, 머리의 거동을 분석하였다. 그 결과 5.06Hz에서 걸보기질량의 1차 공진모드가 나타났으며 5.77Hz에서 골반의 거동과 골반아래쪽의 엉덩이부분과 시트사이의 전단력에 의한 변형으로 인하여 전후방향의 모드가 나타난다고 보고하였다. Nawayseh<sup>(8,9)</sup>와 Mansfield<sup>(10)</sup> 등은 수직방향 진동에 대한 수직방향 걸보기질량은 4~6Hz에서 공진이 나타났고 2차 피크는 7~14Hz에서 나타난다고 보고하였다. 또한, 인체의 형상적 특징으로 인해 전후방향으로 비대칭적인 반응특성이 나타나며 이를 전후방향의 교차축 걸보기질량(fore-and-aft cross-axis apparent mass)으로 나타내었다. 전후방향의 교차축 걸보기질량은 5Hz부근에서 공진이 나타나며 정적질량의 60% 정도의 크기로 나타난다고 보고하였다. 좌우방향의 교차축 걸보기질량(lateral cross-axis apparent mass)은 그 특성이 나타나지 않았다<sup>(8)</sup>. Rakheja<sup>(11)</sup> 등은 수직방향 진동에 대한 3방향병진(전후, 좌우, 수직)방향의 응답특성을 분석하여 전후방향 피크는 수직방향 피크에 비해 15~20% 정도로 낮아지며 좌우방향의 피크는 5% 정도로 낮아진다고 보고하였다. Matsumoto<sup>(12)</sup> 등은 4개의 자유도를 가지는 lumped parameter model과 질량편심에 따른 회전자유도를 추가한 모델을 이용하여 걸보기질량의 공진주파수인 5Hz의 진동모드를 해석한 결과 bending mode는 척추에 의한 것으로 설명하였다. 또한 골반과 다리의 수직방향 모드와 상체의 피치방향 진동모드가 나타난다고 보고하였다. 수직방향의 전진진동에 대한 3방향 병진방향의 인체의 반응특성을 분석한 기존의 실험적 연구와 달리 Jeon<sup>(13)</sup> 등은 인체의 전후방향 비대칭성에 의한 피치방향의 인체반응특성을 분석하고, 이를 걸보기편심질량(apparent eccentric mass)이라고 정의하였다. 걸보기편심질량은 6Hz와 12Hz에서 피크를 가지고 상체의 고유진동수 영역인 5~10Hz에서는 착석자세에 따른 차이가 적은 반면 허리의 고유진동수 영역인 10~12Hz는 그 차이가 다소 있으며, 착석자세에 따라 인체의 전후방향의 비대칭성으로 인해 걸보기편심질량이 걸보기질량보다 명확한 차이가 드러난다고 보고하였다.

수직방향 전진진동에 노출된 인체는 형상적인 특징에 의한 비대칭성과 질량편심으로 인하여 병진방향(전후, 좌우, 수직)과 회전방향(롤, 피치, 요)의 반응특성이 나타나게 된다. 하지만, 기존의 연구들은

병진방향의 응답특성에 대한 분석을 시도하였으나 회전방향의 응답특성에 관한 연구<sup>(8-11)</sup>는 측정장비의 한계성에 의하여 연구가 활발히 진행되지 못하고 있는 실정이다. Matsumoto<sup>(12)</sup>와 Jeon<sup>(13)</sup>의 연구결과에서 보듯이 수직방향 진동에 대한 인체의 거동을 조금더 정확하게 묘사하기 위해서는 질량편심에 따른 회전방향의 응답특성에 대한 연구가 필요하다. 따라서 이 논문에서는 수직방향 전진진동에 노출된 인체에 대하여 3방향의 병진응답특성과 3방향의 회전응답특성을 실험적으로 분석하고자 한다. 전자식 단축가진기(IMV-i220)를 이용하여 3~40Hz주파수 범위에서 0.224m/s<sup>2</sup> r.m.s.의 진동크기를 가지는 랜덤신호를 가진하였으며, 3방향의 병진력과 3방향의 모멘트를 측정할 수 있는 스트레인게이지 타입의 힘측정판을 이용하여 인체의 반응특성을 분석하였다. 여기서, 기존의 연구와 같이 수직방향 진동에 대한 수직방향의 응답특성은 걸보기질량이라 하였고 수직방향과 교차하는 전후방향과 좌우방향의 응답특성은 교차축걸보기질량이라 하였다. 또한, 회전방향의 응답특성은 걸보기편심질량으로 구분하여 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

이 논문에서는 Fig. 1에서 보는 것처럼 수직방향 임의진동(random vibration)을 발생시키기 위하여 코일에 전류를 흘려 만들어지는 자기장에 의한 힘을 이용하는 전자식(Electro-dynamic type) 단축가진기(IMV i-220)을 이용하였다. IMV i-220은 가진기 상부에 부착된 가속도계(kistler 8310B)의 신호를 실시간으로 피드백 제어하여 진동의 크기와 주파수를 제어 목표치를 유지 할 수 있도록 한다. IMV i-220의 상세사양은 Table 1에 나타내었다. 가진기 상부에 부착된 가속도계는 저주파영역에서 안정적인 응답특성을

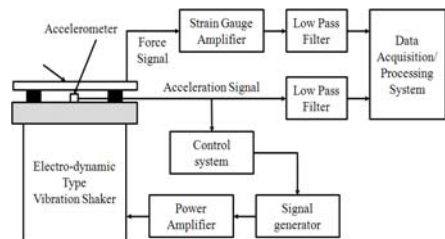


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

가지는 스트레인 게이지 타입(strain gauge type) ICP 가속도계 kistler 8310B10을 이용하였다. 가진기 상부에 설치된 힘 측정관(AMTI OR 6-7)은 4개의 마운트(mount)마다 두께가 얇은 원통에 스트레인게이지(3-axis transducer)를 부착시켜 외부의 힘에 의해 스트레인게이지가 변형을 하게 되면 전기적 저항값이 변함에 따라 출력전압이 달라지는 원리를 이용한다. 원통에 부착된 스트레인게이지는 수평력과 수직력 전단응력에 따른 전압을 측정하여 3방향의 병진력과 3방향의 회전력을 계산하게 된다. 여기서 발생한 6개의 전압신호(voltage signal)는 증폭기(MSA-6)를 통하여 컴퓨터와 연결되어 데이터수집이 가능하도록 만들어준다. AMTI OR 6-7의 상세사양은 Table 2에 나타내었다.

이 논문에서는 ISO 2631-1<sup>(14)</sup>의 인체 좌표계를 기준으로 착석한 인체의 전후방향(X-direction), 좌우방향(Y-direction), 수직방향(Z-direction)으로 정의하고 힘 측정관에서 측정되는 3방향의 병진력과 3방향의 회전력에 대한 인체의 응답특성을 분석하였다. 입력신호와 응답신호의 계측 및 신호처리는 NI사의 Labview를 이용하였으며 후처리(post processing)는 Mathworks사의 Matlab을 이용하였다.

## 2.2 실험

피시험자는 임의로 선정된 16명의 남성으로 구성되어 있으며 이들의 신체적 특성에 대한 통계적 데이터는 Table 3에 나타내었다.

피시험자는 실험이 시작될 때 Fig. 2와 같이 양손을 무릎위에 가지런히 놓고, 허리를 곧게 세우고 정면을 응시하는 자세를 취하도록 유도하였으며 실험이 진행되는 동안 자발적인 움직임은 하지 않도록 주문하였다. 피시험자가 시트에 착석할 때 신체의 무게중심과 힘측정관의 무게중심이 일치시키기 위하여 힘측정관의 모멘트 성분이 0이 되는 지점에 착석하도록 하였다. 피시험자는 허벅지가 수평시트에 편안한 느낌으로 닿고, 발바닥은 발판위에 가지런히 놓여지는 상태로 무릎과 허벅지는 대략 90°를 유지하는 Average thigh contact 자세를 유지할 수 있도록 가변형 발판을 제작하였다. 평판시트는 단단한 나무 재질로 제작하여 본 연구의 가진주파수 범위에서 강제 거동이 될 수 있도록 함과 동시에 피시험자가 착석하였을 때 거부감이 적게 되도록 하였다. 착석자

세와 시트의 등받이는 인체의 반응특성에 영향을 미치는 인자<sup>(8,13)</sup>이지만, 이 연구에서는 Average thigh contact 자세에 대한 3방향 병진력과 3방향 회전력에 대한 인체의 반응특성만을 분석하고자 이들의 영향을 고려하지 않았다.

기존의 수직방향 진동에 대한 인체의 반응특성에 관한 연구는 20Hz미만의 주파수 영역에서 수행되었으나, 본 연구에서는 차량의 아이들(idle) 진동을 고

**Table 1** Specification of a vibration shaker generating random vibration

Model	IMV Corporation i220
Type	Electro-dynamic
Rated force	5.6 kN (random)
Frequency range	3 ~ 3,300 Hz
Maximum displacement	1 mm p-p
Maximum payload	200 kg

**Table 2** Specification of force platform

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

**Table 3** Physical characteristics of 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. 2** Photographic representation of vibration shaker and subject sitting on the rigid seat

러하여 3~40Hz의 주파수 범위와 0.224m/s<sup>2</sup> r.m.s.의 가진크기를 갖는 랜덤신호를 이용하여 연구를 진행하였다.

피시험자를 80초 동안 진동에 노출시켰으며 과도 신호인 시작과 끝의 10초를 제외한 60초 동안의 신호를 이용하여 인체의 반응특성을 분석하였다. 이때 Frequency span은 1,000Hz이며 Frequency resolution은 0.5Hz로 하였다. A/D변환된 데이터는 해닝창함수(hanning window function)를 적용하여 스펙트럼으로 변환하였으며, 95% 중첩(overlap)한 스펙트럼을 평균화(spectrum averaging)하였다.

### 2.3 분석

수직방향 진동에 대한 인체의 반응특성을 분석하기 위하여 가진기 플랫폼과 일체로 장착된 강체시트의 가속도를 측정하였고, 피시험자가 착석하고 있는 힘 측정 판에서 발생하는 힘의 양을 측정하였다. 랜덤가진으로 구하는 걸보기질량 또는 교차축걸보기질량은 가속도와 병진력의 관계를 표현한 것으로 다음과 같이 계산한다<sup>(1, 8-9)</sup>.

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

여기서  $S_{aa}$ 는 가속도 신호의 파워스펙트럼이고  $S_{af}$ 는 가속도와 병진력의 크로스스펙트럼을 의미한다. 여기서 병진력 중 수직방향의 힘과의 관계는 걸보기질량이라 하고, 가진방향과 서로 교차하는 병진력(좌우, 전후방향)과의 관계는 교차축걸보기질량이라 한다.

걸보기편심질량은 인체의 비대칭으로 인해 발생하는 모멘트와 가속도에 대한 관계를 표현한 것으로 다음과 같이 계산한다<sup>(13)</sup>.

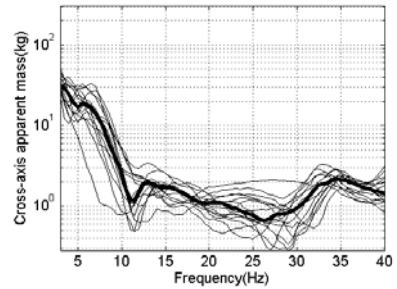
$$M(f) = \frac{S_{am}(f)}{S_{aa}(f)} \quad (2)$$

여기서  $S_{am}$ 는 모멘트 신호와 가속도 신호의 크로스스펙트럼을 의미한다.

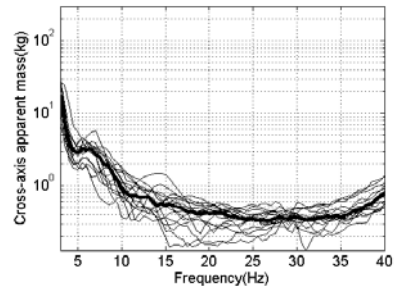
## 3. 실험결과

### 3.1 걸보기질량

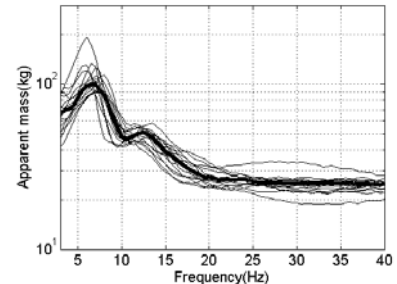
16명의 피시험자에 대한 걸보기질량과 교차축걸보



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



(b) Cross-axis apparent mass of the lateral direction



(c) Apparent mass of the vertical direction

**Fig. 3** Individual cross-axis apparent mass and apparent mass of 16 subjects to vertical vibration and its median value

기질량을 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 굵은 실선은 16명의 피시험자에 대한 주파수별 중간값을 나타낸 것이다. 수직방향의 걸보기질량은 피시험자의 신체적 특성에 따라 다소 차이가 있으나 대체적으로 4~6Hz에서 공진이 나타나며 부분적으로 8~13Hz에서 2차 피크를 가진다는 기존의 연구결과<sup>(3-7)</sup>와 잘 일치하였다. 또한 수직방향의 진동에 대한 전후, 좌우, 수직방향의 인체의 반응특성을 비교하기 위하여 각각의 중간값을 Fig. 4에 나타내었다. 수직방향의 걸보기질량에 비해 전후, 좌우방향의 교차축걸보기질

량이 매우 작은 것을 알 수 있었고, 전후, 좌우방향의 교차축겉보기질량은 겉보기질량의 공진주파수와 동일한 주파수에서 피크를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 공진주파수에서 겉보기질량에 비해 전후방향 교차축겉보기질량은 20%, 좌우방향 교차축겉보기질량은 3% 정도의 크기를 갖는 것을 알 수 있으며 이는 기존의 연구결과<sup>(11)</sup>와 잘 일치하였다. 각 방향 인체반응특성의 상관성을 분석하기 위하여 비모수통계 기법(nonparametric statistics method)의 하나인 프리드만 검증(Friedman test)<sup>(15)</sup>을 실시한 결과 모든 주파수 영역에서 p-value가 0.001이하의 값을 나타내었다.

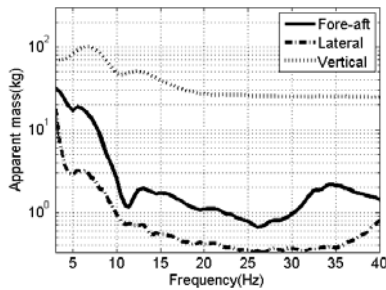


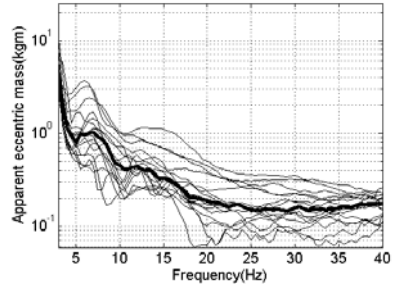
Fig. 4 Median of apparent mass of 16 subjects according to 3-axis translational direction

### 3.2 겉보기편심질량

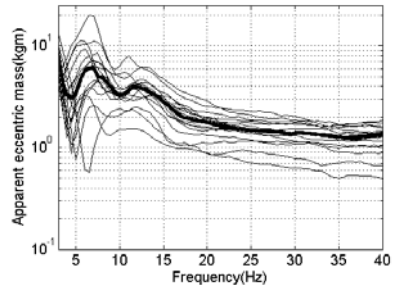
16명의 피시험자에 대한 겉보기편심질량을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 굵은 실선은 16명의 피시험자에 대한 주파수별 중간값을 나타낸 것이다. 롤방향의 겉보기편심질량은 피시험자의 신체적 특성에 따라 다소 차이가 있으나 대체적으로 7Hz부근에서 피크를 가지는 것을 확인하였다. 피치방향의 겉보기편심질량은 롤방향의 겉보기편심질량과 비슷한 주파수에서 최대피크를 가지며 부분적으로 12Hz에서 2차 피크주파수를 가지고 있음을 알 수 있었다. 요방향의 겉보기편심질량은 뚜렷한 특성을 보이지 않았다. Fig. 6에서 1차 피크 주파수에서 피치방향의 겉보기편심질량에 비해 롤방향의 겉보기편심질량은 17% 정도의 크기를 갖는 것을 알 수 있었다. 프리드만 검증<sup>(15)</sup>을 실시한 결과 모든 주파수영역에서 p-value가 0.001이하의 값을 나타내었다.

## 4. 결 론

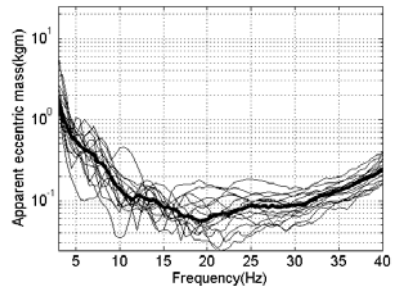
본 연구에서는 3~40Hz, 0.224m/s<sup>2</sup> r.m.s.의 수직방



(a) Apparent eccentric mass of the roll direction



(b) Apparent eccentric mass of the pitch direction



(c) Apparent eccentric mass of the yaw direction

Fig. 5 Individual apparent eccentric mass of 16 subjects to vertical vibration and its median value

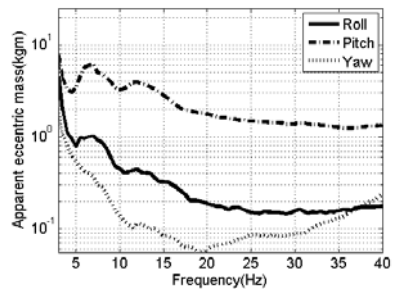


Fig. 6 Median of apparent eccentric mass of 16 subjects according to 3-axis rotational direction

향 진동에 노출된 16명의 피시험자에 대한 6축방향의 인체반응특성을 연구하였다. 3방향의 병진응답은 걸보기질량에 비해 전후방향 걸보기질량은 20%, 좌우방향 걸보기질량은 3%의 크기를 가지고 3방향의 회전응답은 피치방향의 걸보기편심질량에 비해 롤방향이 17 % 정도의 크기를 갖는 것을 알 수 있었다. 또한, 요방향의 걸보기편심질량은 뚜렷한 특성이 나타나지 않았다. 향후 연구에서는 더 다양한 자세와 다양한 크기의 진동에 대해서는 이 연구의 결과와 어떤 차이를 보이는지를 알아볼 필요가 있고 아울러 인체반응의 특성치의 증가와 감소에 따른 불편함과 상관성을 분석하는 연구도 필요하리라 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 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) 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.
- (15) Howitt, D. and Cramer, D., 2005, Introduction to statistics in psychology, Pearson Education limited, Essex.