

<논문>

한국인 앉은 자세에 대한 의자 진동의 머리 전달에 관한 실험적 연구

Experimental Investigation on the Transmission of Seat Vibration to the
Head for Korean-Seated Postures

박용화* · 정완섭*

Yong-Hwa Park and Wan-Sup Cheung

(2000년 8월 7일 접수 ; 2000년 10월 13일 심사완료)

Key Words: Human Vibration(인체진동), Seat-to-Head Transmissibility(머리 진동전달률), Intra-subject Variability(피실험자 내의 변화)

ABSTRACT

This paper addresses experimental results carried out to investigate the transmission of seat vibration to the head for Korean. Vertical seat vibration in the frequency range of 0.5-30 Hz was applied to a seated Korean male subject. To examine the intra-variable effects on transmissibility, five different postures and three different vibration excitation levels were considered. The applied acceleration and head accelerations of the seated subject were measured simultaneously by using a 6-axes bite-bar. Detailed experimental results of measured transmissibilities are illustrated for each posture and/or vibration excitation level, and they were compared to an International Standard. They are found to allow the identification of dynamic characteristics of Korean seated body for various real vibration environments. Furthermore, they are expected to be very useful in designing new seats for automotive and railway vehicles and in improving their vibration ride quality.

1. 서 론

인체에 전달 되는 차량의 진동은 불쾌한 승차감을 유발하거나 건강에 유해할 수 있으며 탑승자의 피로, 시계의 교란, 운전 방해 등을 야기할 수 있다. 특히 머리의 진동은 승차감과 밀접한 연관이 있으며 경우에 따라서 기본 활동성(activity, 독서, 필기, 음식물 섭취 등)과 작업효율(working proficiency)에 심각한 장애가 발생한다. 머리의 진동은 대부분이 탑승자와 직접적인 접촉이 이루어지는 의자의 진동에 의해 발생된다. 그러므로 진동의 원인인 의자의 진동이 인체의 특정부위까지 전달되는 양을 정성적, 정량적으로 파악하는 것이 중요하게 된다. 그러나 이 인체의 진동 전달률을 설명하는 메커니즘과 요소가 매우 복잡하므로

로 아직까지 명확한 이론이 정립되어 있지 못하며 실험과 통계적인 방법을 통하여 그 특성을 파악하는 연구가 진행 중에 있다.

앉은 자세에서의 의자의 상하 진동이 인체의 머리에 전달되는 양을 의미하는 머리진동전달률(vertical seat-to-head transmissibility-약칭 전달률)은 최근에 논문 발표했던⁽¹⁾ 인체의 동적질량과 더불어 측정이 용이하고 인체에 미치는 진동의 영향 평가 시 필요한 기초자료 중의 하나이므로 이에 관한 많은 실험과 보고가 있어 왔다⁽²⁾. Paddan과 Griffin은 12명을 대상으로 전달률을 측정 했다⁽³⁾. 이때 앉은 자세의 변화(intra-subject variability)와 피실험자의 변화(inter-subject variability)를 고려하여 전달률 변화의 경향을 파악하였다. 전달률은 머리의 측정 위치에 따라 다르게 측정되며 Paddan은 측정위치의 영향을 파악하였다⁽⁴⁾. 이때 측정된 6개의 선형가속도를 사용하여 머리의 특정 위치에서의 전달률을 계산하였다. 최근에 Paddan 등은 현재까지의 실험결과를 종합적으로 비교하여 전달률의 변화를

* 정희원, 한국표준과학연구원 음향진동연구실
E-mail : wansup@kriss.re.kr
Tel : (042)868-5302, Fax : (042)868-5028

이러한 요소들을 분석하였다⁽⁵⁾. 한편 ISO 7962 (1987)는 전달률의 국제 표준을 규정하고 있으며⁽⁶⁾ ISO/CD 5082(1999)는 최근까지의 실험결과를 추가하여 전달률 표준안과 전달률에 관한 수학적 모델을 제시하고 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 상하진동에 대한 한국인의 진동 전달률을 일련의 실험을 통해서 측정하고 그 특성을 파악하고자 한다. 단일한 피실험자의 앉은 자세와 진동의 크기 등이 전달률에 미치는 영향을 파악하였다. Bite-Bar에 장착된 6개의 가속도계를 사용하여 6자유도의 머리 가속도를 측정하였다. 수행했던 실험의 장치와 방법, 실험 조건 및 실험 결과를 정리하고 토의하고자 한다. 또한 실험 결과를 국제표준 안의 제시안과 비교하여 그 차이점을 고찰하고 원인을 분석한다.

2. 실험 방법

의자의 상하 진동에 피폭된 인체 머리 부위의 진동 전달률을 다음과 같은 방법으로 측정하였다. Fig. 1은 실험장치를 보여준다. 피실험자는 키 183 cm, 선 몸무게 73 kg, 앉은 몸무게 64 kg을 갖는 한국인 남성이다. 앉은 자세에서 의자를 상하로 가진하고 머리 부위에서 측정된 가속도를 엉덩이 위치에서 측정된 가속도로 나누어 전달률을 계산한다.

2.1 실험 장치

의자의 사양은 다음과 같다. 피실험자의 엉덩이는 평평



Fig. 1 Experimental set-up for the measurement of the vertical seat-to-head transmissibility of Korean-seated posture.

한 강체 바닥면(rigid flat seat)과 접촉하고 등받이(backrest)는 바닥면에서 수직으로 조립되어 있다. 두가지 높이의 발 받침대(footrest)에 대해서 실험을 수행하였으며 각각 의자의 바닥면에서 440 mm와 360 mm 아래의 위치에서 의자에 고정되어 있다. 의자는 1m의 최대 변위를 갖는 Electro-Hydraulic 가진기에 의해 상하방향으로 구동된다. 이때 0.5 Hz에서 30 Hz까지의 주파수 대역에서 균일한 가속도 PSD(Power Spectral Density)를 갖는 Gaussian Random 신호를 입력으로 주었다. 의자와 인체의 접촉부위에서의 상하방향 가속도는 바닥면(rigid flat seat)의 중심부 바로 아래에 탑재된 가속도계(Entran EGCSY-240D -10)를 사용하여 측정하였다.

머리의 가속도는 Fig. 2의 Bite-Bar를 사용하여 측정하였다. 머리의 6자유도 가속도를 측정하기 위하여 6개의 저주파용 선형 가속도계(Entran EGA-125(F)*-10D)가 특정한 간격($d_x=150\text{mm}$, $d_y=200\text{mm}$)을 두고 서로 떨어진 3개의 블록 내에 장착되어 있다. 피실험자는 블록1과 블록2 사이에 부착된 Dental Mould를 입으로 물어 Bite-Bar가 머리에 고정되도록 한다.

2.2 머리의 6자유도 운동

Bite-Bar에서 측정된 6개의 선형 가속도를 사용하여 머리의 6자유도(선형 3축 및 회전자유도 3축)에 해당하는 가속도를 계산한다. 본 논문에서는 이를 위해 머리를 강체로 간주하고 Rigid Body Kinematics를 사용한다. 본 실험에서 고려하는 30 Hz 이하의 주파수 범위는 머리의 기본 고유진동수 보다 충분히 낮으므로 머리를 강체라고 간주할 수 있다. 따라서 머리의 각각의 각가속도 성분은 측정위치

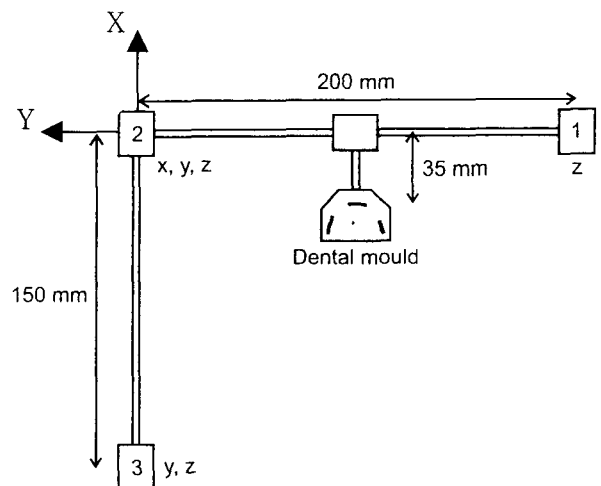


Fig. 2 A bite-bar with six translational accelerometers for measuring vibration in the three translational and three rotational axes of the head.

에 관계없이 동일하고 선형 3축가속도는 측정위치에 따라 변한다. 기존의 연구⁽³⁾에서는 측정된 6개의 가속도만을 사용하여 머리 가속도의 근사치를 계산하였다. 반면에 본 연구에서는 측정된 6개의 가속도 뿐 만이 아니라 이를 적분하여 구한 5개의 속도 성분을 추가로 사용하여 보다 정확한 머리 가속도를 구하였다⁽⁸⁾. Fig. 2와 같이 머리에 고정된 좌표축을 정의하고 Rigid Body Kinematics를 사용하면 머리의 각속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다^(8,9).

$$\omega_x = (v_{2z} - v_{1z}) / d_y \quad (1)$$

$$\omega_y = (v_{3z} - v_{2z}) / d_x \quad (2)$$

$$\omega_z = (v_{2y} - v_{3y}) / d_x \quad (3)$$

여기서 v_{ij} 는 i 번째 블록에서의 j -축 방향 속도이며 Bite-Bar에서 측정된 가속도를 수치 적분하여 얻는다. 식 (1)~(3)의 각속도와 측정된 가속도를 사용하여 다음과 같이 머리의 각가속도를 구할 수 있다^(8,9).

$$\alpha_x = (a_{2z} - a_{1z}) / d_y - \omega_y \omega_z \quad (4)$$

$$\alpha_y = (a_{3z} - a_{2z}) / d_x + \omega_x \omega_z \quad (5)$$

$$\alpha_z = (a_{2y} - a_{3y}) / d_x - \omega_x \omega_y \quad (6)$$

식 (1)~(6)의 각 $\mathbf{p} = p_x \hat{i} + p_y \hat{j} + p_z \hat{k}$ 에서의 가속도는 다음과 같이 나타내진다^(8, 9).

$$A_{px} = a_{2x} + (\alpha_y p_z - \alpha_z p_y) + \left\{ (\omega_y)^2 + (\omega_z)^2 \right\} p_x + \omega_x \omega_y p_y + \omega_x \omega_z p_z \quad (7)$$

$$A_{py} = a_{2y} + (\alpha_z p_x - \alpha_x p_z) + \left\{ (\omega_z)^2 + (\omega_x)^2 \right\} p_y + \omega_y \omega_z p_z + \omega_y \omega_x p_x \quad (8)$$

$$A_{pz} = a_{2z} + (\alpha_x p_y - \alpha_y p_x) + \left\{ (\omega_x)^2 + (\omega_y)^2 \right\} p_z + \omega_z \omega_x p_x + \omega_z \omega_y p_y \quad (9)$$

2.3 신호 처리

유압 가진기 제어단을 사용하여 가진기를 제어하고 신호 수신 장치 HVLab 데이터 처리 시스템을 사용하여 측정된 가속도 및 힘의 신호처리를 수행하였다. 샘플링 주파수는 150 Hz이며 40 Hz를 Cut-off로 하는 Anti-aliasing 필터를 사용하였다. 상하방향의 의자 가속도와 머리의 6자유도 각각의 가속도의 비로 정의된 전달률은 측정된 신호로부터 다음과 같이 Cross Spectral Density Method를 이용하여

구한다^(3,5).

$$T(f) = \frac{G_{io}(f)}{G_{ii}(f)} \quad (10)$$

여기서 $T(f)$ 는 전달률, $G_{io}(f)$ 는 측정된 의자와 머리의 가속도 간의 Cross Spectral Density Function, $G_{ii}(f)$ 는 의자 가속도의 Auto Spectral Density Function이다. 각각의 주파수 분석은 0.5 Hz에서 30 Hz까지의 주파수 대역에서 수행되었다.

2.4 실험 조건

본 논문에서는 Intra-subject Variability를 고려하여 진동의 크기와 앉은 자세의 두 가지 요인을 변화시키면서 전달률을 구하였다. 첫째로 0.5, 1.0, 2.0 m/s²의 세가지 실험치(r.m.s.)를 갖는 의자 가속도 입력에 대한 각각의 전달률을 측정하였다. 둘째로 피실험자의 앉은 자세는 다음과 같은 다섯 가지 자세를 고려하여 각각의 전달률을 측정하였다.

- (1) 'Normal' : sitting normally, upright
- (2) 'Slouched' : sitting with a slight stoop and shoulders held forward
- (3) 'Backrest upright' : leaning against the backrest with the hip in a back position
- (4) 'Backrest relaxed' : leaning against the backrest with a hip in a forward position
- (5) 'Higher footrest' : sitting normally with a higher footrest

등받이는 (1), (2), (5)의 자세에서는 사용되지 않았다. (1), (2), (3), (4)의 자세에서는 의자 바닥면으로부터 440 mm 아래에 위치한 발 받침대를 사용했으며 (5)의 자세에서는 의자 바닥면으로부터 360 mm 아래에 위치한 발 받침대를 사용했다. 자세 (4)에서의 엉덩이의 위치는 등받이로부터 100 mm에 위치해 있으며 나머지의 자세에서는 엉덩이가 등받이에 붙어있다. 이때 피 실험자는 정면을 바라보도록 하였으며 동일한 실험 조건을 60초간 유지하면서 가속도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 1 m/s² r.m.s.의 의자 상하 진동에 대한 각각의 자세의 전달률을 보여준다. 선가속도는 블록 2 ($\mathbf{p} = p_x \hat{i} + p_y \hat{j} + p_z \hat{k} = 0$)에서 측정된 값이고 각가속도는 식 (4)~(6)으로부터 계산된 값이다. 공통적으로 mid-sagittal

plane 내에서의 운동 즉 전후(Fore-and-aft : x-axis), 상하(Vertical : z-axis), 그리고 Pitch 운동(α_y)이 주로 유발됨을 알 수 있다. 반면에 좌우(Lateral : y-axis)운동과 Roll(α_x) 및 Yaw(α_z) 운동이 다른 운동에 비하여 작은 것을 관찰할 수 있다. 대부분 5 Hz 근방에서 Pitch 운동이 최대치를 가짐을 알 수 있고 5-7 Hz 근방에서 전후와 상하 운동이 최대치를 가짐을 알 수 있다.

3.1 앉은 자세와 전달률

Fig. 3에서, Normal Posture에서 Slouched Posture로 변화 하면서 5 Hz의 Pitch운동이 매우 커지고 반면에 상하운동이 줄어들음을 관찰 할 수 있다. 이는 목부위의 이완으로 머리 Pitch운동이 많이 유발되었다고 추측할 수 있다.

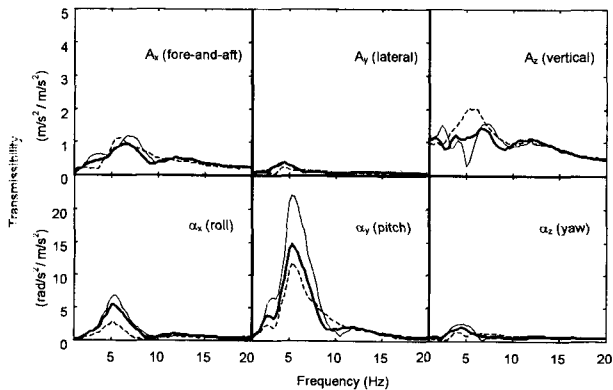


Fig. 3 Transmissibilities to the head measured at seat acceleration level 1 m/s^2 r.m.s. — normal posture; - - - slouched posture ; ····· higher footrest posture.

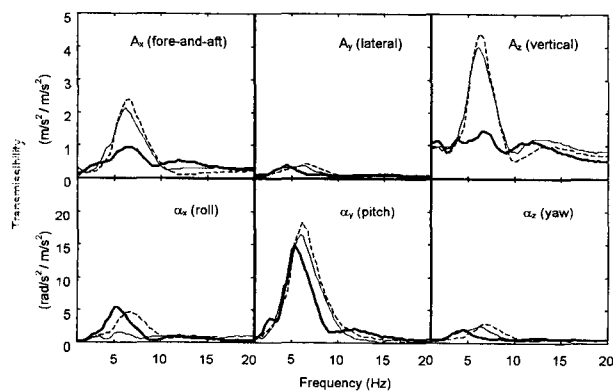


Fig. 4 Transmissibilities to the head measured at seat acceleration level 1 m/s^2 r.m.s. — normal posture; - - - backrest upright posture ; ····· backrest relaxed posture.

Fig. 3에서, Normal Posture에서 Higher Footrest Posture로 변화하면서 상하 운동은 5~6 Hz에서 선명한 최대치를 나타낸다. 이는 발의 위치가 올라가면서 엉덩이의 접지면적이 줄어들고 이로 인해서 근육의 장력 및 상체의 자세변화가 생기므로 인해서 유발되는 현상이라고 추측할 수 있다.

Fig. 4에서 등받이의 효과로서 앞뒤와 상하 운동이 증가됨을 관찰 할 수 있다. 특히 상하운동은 등받이를 사용하면서 매우 크게 증가한다. 이러한 경향은 피실험자가 이완하면서 (backrest relaxed posture) 더 커진다. 이 상하 운동 증가는 다수의 서양인 피실험자를 고려했던 다른 선행 연구⁽³⁾ 결과와 차이가 있으며 피실험자의 개인적인 신체구조, 측정위치 등에 의해 이러한 차이가 유발되었다고 추측할 수 있다.

3.2 의자의 진동레벨과 전달률

Fig. 5는 2.4절에서 언급한 세 가지의 가속도에 대한 Backrest Relaxed Posture에서의 전달률을 보여준다. 인체의 전달률은 비선형성이 두드러짐을 관찰 할 수 있다. 전반적으로 가속도의 크기가 증가할수록 최대치가 발생하는 주파수가 감소하고 최대치가 감소하는 경향을 모든 자세에서 공통적으로 관찰할 수 있으며 그간의 연구 결과와 일치하는 경향을 보여준다⁽²⁾. 이러한 경향은 피 실험자, 앉은 자세 등에 무관하게 관찰되며 근육의 긴장, 진동에 피폭된 근육의 활동 방식 등 매우 복잡한 원인에 기인하는 것으로 알려져 있다⁽²⁾.

3.3 ISO/CD 5982(1999)와 비교

ISO/CD 5982(1999)⁽⁷⁾는 앉은 자세에 대한 의자 진동의 머리로의 전달에 관한 국제 표준안을 제안하고 있다. 이

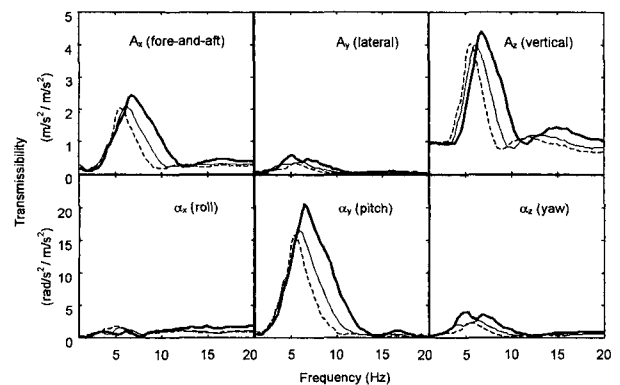


Fig. 5 Transmissibilities of the subject measured at three different vibration levels for backrest upright posture. — 0.5 m/s^2 r.m.s. ; - - - 1 m/s^2 r.m.s. ; ····· 2 m/s^2 r.m.s.

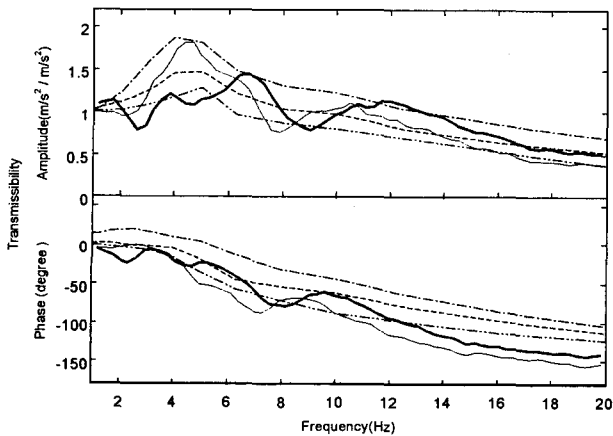


Fig. 6 Measured transmissibilities of the subject for normal posture and the seat-to-head transmissibilities of ISO/CD 5982. — measured at 1 m/s² r.m.s.; - - - measured at 2 m/s² r.m.s.; ····· mean of ISO/CD 5982; - · - · - upper limit of ISO/CD 5982; - - - - - lower limit of ISO/CD 5982.

표준안은 32명의 서양인 위주의 피실험자에 대한 통계결과를 토대로 하며 Normal Posture와 1~5 m/s²의 수직방향의 자운동에 대해서 머리의 수직방향의 전달률이 정의되어 있다. Fig. 6은 ISO/CD 5982(1999)에서 제안하는 전달률의 평균치, 최대 및 최소치와 본 실험에서 수행한 전달률을 비교한 결과이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 전달률의 크기는 3, 5, 8 Hz 근방에서 최소치보다 작고 위상은 주파수가 커질수록 최소치를 벗어나고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 차이점의 원인은, 첫째 상체 길이, 근육, 뼈구조 등의 피실험자의 신체적 특성이 평균적인 서양인의 특성과 차이가 있을 수 있다는 것이고, 둘째는 측정위치에 따라서 다른 결과가 나올 수 있다는 것이다. 본 논문에서 유도한 식 (7)~(9)에서 볼 수 있는 바와 같이 머리의 진동은 측정 위치에 따라서 달라진다. 한편, ISO/CD 5982(1999)에서는 측정위치에 대해서 명확히 규정하고 있지 않으므로 측정위치에 따른 혼동이 있을 가능성이 내재되어 있다. 셋째는 ISO/CD 5982(1999)에서 언급되고 있는 바와 같이 이 표준안이 경우에 따라 약간의 Over-estimation될 수 있다는 주의사항과 연관 있을 수 있다.

본 실험 결과가 단일 한국인에 대한 것이므로 실험의 결과를 국제 표준안과 직접 비교하는 것에 무리가 있다. 추후 본 연구팀은 보유한 실험장비를 이용하여 다수의 한국인을 대상으로 인체 진동의 Inter-subject Variability를 고려하고 통계처리를 통하여 한국인의 전달률의 표준안을 제시할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 일련의 실험을 통해서 의자의 상하 진동에 대한 한국인의 앉은 자세의 머리로의 진동 전달율을 측정하고 그 특성을 살펴보았다. Pitch운동이 지배적임과 5 Hz 근방에서 최대치를 가짐을 관찰하였다. 앉은 자세와 진동크기의 변화 등에 따라 최대 피크의 위치와 그 크기가 일정한 경향을 가지며 변화함을 관찰하였다. 실험 결과를 ISO/CD 5982(1999)와 비교하였으며 국제 표준안과 한국인에 대한 실험치가 특성주파수 대역에서 큰 차이가 있음을 관찰할 수 있었으므로 추후에 한국인에게 적합한 표준안 마련이 필요하다고 볼 수 있다. 실험 결과는 작업 환경에서 발생할 수 있는 한국인의 진동에 대한 안전/영향 평가 및 한국인에 적합한 표준안 제정의 기초자료 그리고 작업 환경 개선 등의 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 동일한 피실험자 내의 변화(Intra-subject variability⁽²⁾)에 주안점을 두었으며 본 연구팀은 추후의 실험을 통해서 다수의 피 실험자의 인체 반응의 변화(Inter-subject variability⁽²⁾)에 대한 실험을 계획하고 있다. 또한 측정 위치와 전달률의 관계에 관한 실험적 해석을 추후의 논문을 통해서 발표할 예정이다. 실험 결과는 국내 승용차의 승차감 개선을 위한 의사 설계에 매우 유용한 자료로 사용될 수 있다고 사료된다.

본 연구는 선도기술과제인 감성공학 중 "소음, 진동에 대한 인체 영향 연구"의 수탁과제로 영국의 ISVR Human Factors Research Group과 공동으로 수행된 연구내용의 일부이다.

참 고 문 헌

- (1) 박용화, 정완섭, 2000, "한국인 앉은 자세에 대한 동적 질량의 실험적 연구," 한국소음진동공학회지, 제 10 권, 제 6호, pp. 1017~1021.
- (2) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press, London: UK.
- (3) Paddan, G. S. and Griffin, M. J., 1988, "The Transmission of Translational Seat Vibration to the Head-I. Vertical Seat Vibration, Journal of Biomechanics, Vol. 21, pp. 191~197.
- (4) Paddan, G. S. and Griffin, M. J., 1992, The Transmission of Translational Seat Vibration to the Head: the Effect of Measurement Position at the Head, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers,

Par. H: Journal of Engineering in Medicine, Vol. 206, pp 159~168.

(5) Paddan, G. S. and Griffin, M. J., 1998, A Review of the Transmission of Translational Seat Vibration to the Head, Journal of Sound and Vibration, Vol 215, No. 4, pp. 863~882.

(6) International Organization for Standardization, 1987, Mechanical Vibration and Shock-Mechanical Transmissibility of the Human Body in the z direction, ISO 7962(E).

(7) International Organization for Standardization, 1999, Mechanical Vibration and Shock range of Idealized Values to Characterize seated-body Biodynamic Response under Vertical Vibration, ISO/CD 5982.

(8) Park, Y. H. and Cheung, W. S., 2000, Measurement Error Analysis for the Transmission of Vertical Seat Vibration to the Head, Journal of Sound and Vibration, under reviewing.

(9) Beer, F. P. and Johnstone, E. R. 1985, Vector Mechanics for Engineers: Dynamics, McGraw-Hill Book Co., 2nd edition.