

승용차량 정차시 발생하는 진동에 대한 객관적 인체반응특성과 주관적 불편함평가의 상관성에 관한 연구

The Study of Correlation between Objective Human Response and Subjective Discomfort Evaluation of Idle Vibration on Passenger Vehicle

이 재 영* · 전 경 진** · 안 세 진† · 정 의 봉***

Jaeyoung Lee, Gyeongjin Jeon, Sejin Ahn and Weuibong Jeong

(2012년 2월 13일 접수 ; 2012년 5월 4일 심사완료)

Key Words : Idle Vibration(정차진동), Ride Comfort(승차감), Taxi Driver(택시기사), Correlation(상관관계), Human Vibration(인체진동)

ABSTRACT

Thirteen taxi drivers as the subject in the experiment were exposed to vertical vibration which is controlled on a rigid seat reflecting vibration on passenger vehicle. They were employed not only to get human response of objective measurement but also to make subjective evaluation of the vibration. The subjective evaluation was estimated using the absolute discomfort threshold of the controlled vibration, which was achieved with the three-down one-up method that is widely used in the field of psychophysics. As the result, apparent mass and apparent eccentric mass as objective human response tend to gradually decrease when frequency of the vibration increases. The absolute discomfort threshold was increased in case of increasing the frequency. Concludingly, the subjective discomfort evaluation is highly correlated with the objective human responses at the range of idle vibration on passenger vehicle.

1. 서 론

근래의 자동차 산업시장에서는 소비자 만족과 더불어 자동차 경쟁력을 높이기 위하여 자동차의 성능뿐만 아니라 승차감 향상에 대한 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다. 차량의 승차감에 대한 연구는 인체의 물리적 특성에 관한 것과 차량의

동특성에 반응하는 사람의 심리적인 현상으로 나누어 질 수 있다.

인체의 물리적 특성 중 전신진동에 노출된 인체의 주파수 특성을 알아보기 질량(AM: apparent mass)과 임피던스(impedance)로 정의하였으며⁽¹⁾, 이것들은 ISO-5982⁽²⁾에 국제 규격으로서 명시되어 있다. BS-6841⁽³⁾와 ISO-2631⁽⁴⁾에서는 전신진동의 주파수와 크기, 작용위치, 방향에 따른 인체반응의 전반적인 규격을 명시하고 있으며, 이것은 차량에서 발생하는 진동량으로부터 승차감을 분석하고 비교하기 위한 연구에 효과적으로 사용되고 있다.

Cheng⁽⁵⁾은 한국인의 인체진동의 전달특성을 파악하고자 진동의 크기와 앉은 자세의 두 가지 요인을

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

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** LG전자 EC사업부

*** 정희원, 부산대학교 기계공학부

변화하면서 실험을 수행하였다. Jeon⁽⁶⁾은 국내의 일반 승용차량이 정차중 일 때 발생하는 진동의 주파수(약 20~40 Hz)가 고려된 수직방향 진동에 대한 인체의 응답특성을 연구하였다. 이 연구에서 강체의 자에 착석한 피시험자의 인체가 앞뒤로 회전하는 pitch motion이 착석자세에 따른 인체특성을 잘 반영한다는 것을 밝혔으며, 이것을 겉보기 편심질량(AEM: apparent eccentric mass)으로 새롭게 정의하였다.

인체의 물리적 특성과 더불어 진동에 대한 주관적인 불편함을 정량적으로 평가하기 위한 연구분야는 국내외에서 활발히 발전하고 있다. Parsons⁽⁷⁾은 앉은 자세와 서 있는 자세에 대해서 주파수별로 인체가 진동을 인지할 수 있는 최소 가진력의 크기에 대해 연구하였으며, Morioka⁽⁸⁾는 2~315 Hz의 주파수 대역에서 3축 병진방향 진동가진에 대한 인체가 진동을 인지하는 정도에 대한 연구를 하였다. 여기서 진동에 대한 민감도에 대하여 수직방향 진동에서는 5~10 Hz에서 가장 컸으며, 전후방향과 좌우방향에서는 2 Hz에서 큰 것을 확인하였다. Mansfield⁽⁹⁾는 차량의 시트를 통해 전달되는 두 신호의 진동크기를 구별하는 상대역치(difference thresholds)를 three-down one-up method를 이용하여 구하였으며, Westhuizen⁽¹⁰⁾는 시트의 성능을 나타내는 SEAT(seat effective amplitude transmissibility) value와 시트의 상대 안락감을 평가하여 상관성 분석을 하였다. 여기서는 시트의 상대 안락감을 평가하기 위해 virtual seat method를 사용하였으며, 이것은 three-down one-up method에 기초를 두고 있다. Ahn⁽¹¹⁾은 0.5~16 Hz의 주파수 대역에서 충격신호 대한 불편함을 연구하였으며, 그 결과 동일한 크기의 진동에 대해 1 Hz 미만의 저주파수 영역과 인체의 공진주파수인 4~10 Hz에서 상대적으로 더 큰 불편함을 느끼는 것을 확인하였다. Yoo⁽¹²⁾는 실차 주행 시험으로 생성한 시트의 충격신호에 대한 주관평가와 객관평가의 상관도를 분석하였다.

이 연구에서는 승용차량의 정차진동을 고려한 수직방향 진동에 대한 인체 반응 특성(객관적 물리량)과 불편함의 절대역치(주관적 평가)를 택시기사들로 구성된 13명의 피시험자를 이용하여 획득하였으며, 이 둘 사이의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 피시험자

이 실험에서 사용된 실험장치의 개략적인 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 임의의 진동 신호를 발생시키기 위해 IMV Corporation사의 i-220 전기식 단축 가진기를 사용하였으며, 이 가진기의 상세사양은 Table 1에 정리하였다. 실험에서 사용한 가속도계는 저주파 대역에서 뛰어난 성능을 가지는 Kistler사의 8310B 단축 가속도계를 사용하였으며, 가진기에서 발생하는 진동의 실제 주파수와 크기가 안정적으로 제어 되도록 가속도 신호를 피드백 제어되도록 구성하였다. 가진기 상부에는 스트레인 게이지타입의 AMT사의 OR6-7 힘 측정판(force plate)를 설치하여

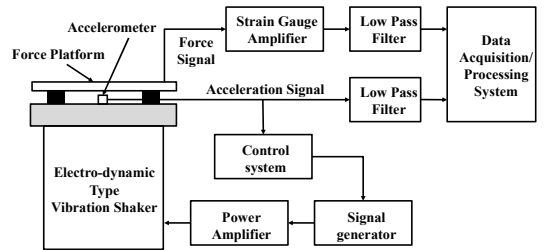


Fig. 1 Feedback control of exciter and data acquisition process on the experimental set-up

Table 1 Performance of the exciter used in the experiment

Model	IMV - i220
Type	Electro-dynamic
Rated force	5.6 kN
Frequency range	3~3,300 Hz
Maximum displacement	51 mm peak-to-peak
Maximum payload	200 kg

Table 2 Physical data and driving experience of the taxi drivers employed as subject

Item	Average	S.D.	Max/min
Weight(kg)	74.8	10.2	94/61
Height(cm)	171.5	5.8	184/163
Age(yr)	48.8	4.1	54/41
Career(yr)	15.1	5.8	30/5
Driving(hr/day)	13.1	4.1	17/9

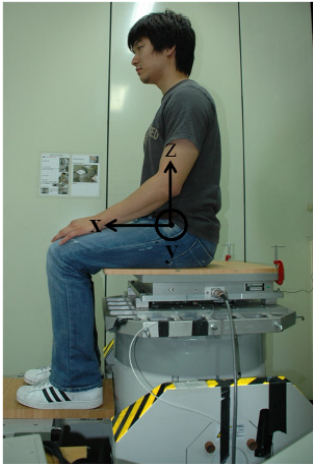


Fig. 2 Vibration exciter and subject sitting on the rigid seat

3축 병진방향의 힘과 3축 회전방향의 모멘트를 측정하였다.

피시험자는 부산 시내에서 개인택시를 운영하는 13명의 택시기사들로 선정하였으며, 키와 몸무게, 나이, 운전경력 등의 통계적 자료는 Table 2에 나타내었다. 피시험자의 착석자세는 Fig. 2와 같이 허벅지가 평평한 시트에 편안하게 접촉되는 average thigh contact 상태를 유지하였으며, 허리를 곧게 세우고 정면을 주시하도록 요구하고 실험 도중에 의도적인 움직임이 없도록 주문하였다. 평판시트는 가진기 위에 고정된 단단한 나무재질의 평판을 이용하여 제작되었다. 실험 데이터의 획득과 후처리를 위해 NI사의 Labview와 Mathwork사의 Matlab을 이용하였다.

2.2 인체의 반응특성: 객관적 물리량

이 연구에서 진동에 반응하는 인체의 객관적 물리량으로는 수직방향 가진에 대한 수직방향 병진응답인 겉보기 질량(apparent mass)⁽¹⁾과 피칭방향 회전응답인 겉보기 편심질량(apparent eccentric mass)⁽⁶⁾으로 하였다. 이때 병진과 회전에 대한 좌표축은 Fig. 2와 같이 ISO 2631-1에 나타난 기준에 준하여 설정하였다. 인체 반응특성을 구하기 위한 가진 조건은 승용차량의 정차진동의 크기와 주파수 영역이 고려되어, 20~40 Hz 주파수영역을 포함하는 0.224 m/s²r.m.s의 랜덤신호의 가진으로 하였다⁽¹⁴⁾. 앉은 자세에 대한 피시험자의 겉보기 질량은 60초간

측정된 상하방향의 가속도와 상하 병진방향 힘의 신호로부터 다음과 같이 구한다.

$$A.M.(f) = \frac{S_{a_z, f_z}(f)}{S_{a_z, a_z}(f)} \quad (1)$$

여기서 $S_{a_z, f_z}(f)$ 는 상하 방향의 가속도신호와 힘신호의 크로스스펙트럼이고, $S_{a_z, a_z}(f)$ 는 상하 방향의 가속도신호의 파워스펙트럼이다.

Jeon⁽⁶⁾이 제안한 겉보기 편심질량은 피칭 방향의 회전모멘트와 상하방향의 가속도 신호를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$A.E.M.(f) = \frac{S_{a_z, m_y}(f)}{S_{a_z, a_z}(f)} \quad (2)$$

여기서 m_y 는 Fig. 2에 나타난 y방향 피칭회전 모멘트를 의미하고 힘 측정판을 이용해서 측정할 수 있다.

2.3 불편함의 절대역치: 주관적 평가

이 연구에서는 단축 가진기를 이용해 정차진동 주파수 범위(20~40 Hz) 내에서 5 Hz 간격으로 나누어진 총 5가지 주파수의 가진신호에 대한 인체의 불편함의 절대역치를 구하였다.

이 실험에서는 연속자극에 의한 감각순응의 영향을 배제할 수 있을 뿐만 아니라 실험의 정확도가 높은 dixon이 최초로 제안한 심리 계측법인 three-down one-up method를 채택하여 불편함의 절대역치를 구하였다⁽¹³⁾. Three-down one-up method의 절차는 먼저 초기자극을 설정한 후 피시험자의 반응에 따라 자극의 크기를 증가 또는 감소를 반복하는 과정으로 실험이 진행된다. 즉, 시험 자극에 대해 피시험자가 불편함을 느끼지 못하는 경우 다음 자극의 크기를 이전 자극의 크기보다 3 dB 증가시키고(one-up), 이와는 반대로 시험 자극에 대해 불편함을 느낀다고 할 경우에는 동일한 자극을 반복하게 하고, 이러한 반복이 3번 연속되면 자극의 크기를 3 dB 감소시키는(three-down) 규칙을 반복적으로 시행한다. 이렇게 자극의 크기를 증가와 감소하는 과정에서 6번의 반전이 발생하면 해당 자극에 대한 실험은 종료된다. 이때 실험결과에서 초기 반전인 첫 번째와 두 번째 반전을 제외하고 나머지 4번의 반전

Table 3 Stimulus level of sinusoidal acceleration in r.m.s. and dB

Stimulus level	Acceleration	
	(m/s ² r.m.s.)	(dB, ref.10 ⁻⁶)
1	0.025	88
2	0.035	91
3	0.050	94
4	0.071	97
5	0.100	100
6	0.141	103
7	0.200	106
8	0.281	109
9	0.400	112
10	0.561	115

3. 실험결과

3.1 객관적 인체반응특성

이 시험에 참가한 13명의 택시기사에 대한 인체 반응특성 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 인체의 걸보기 질량을 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 인체의 걸보기 편심질량을 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 얇은 회색실선은 피시험자 개개인의 인체 반응값을 나타내고, 굵은 실선은 13명의 피시험자에 대한 중간값(median value)을 나타낸 것이다. 피시험자별로 다소 차이는 있으나 걸보기 질량의 경우 최대피크 주파수는 4~6 Hz에서 나타났으며, 부분적으로 나타나는 2차 피크는 10~13 Hz에서 나타났다. 걸보기 편심질량의 경우에는 7~8 Hz에서 1차피크가 나타났으며, 9~13 Hz에서 2차 피크가 나타났다. 이들 결과는 기존 연구와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다^(5,15-17).

승용차량의 정차진동에 관점을 둔 이 연구의 관심주파수 영역인 20~40 Hz를 중심으로 해서 보면, 주파수가 증가함에 따라 걸보기 질량과 걸보기 편심질량의 값은 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

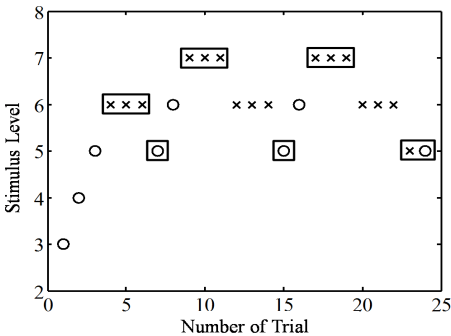


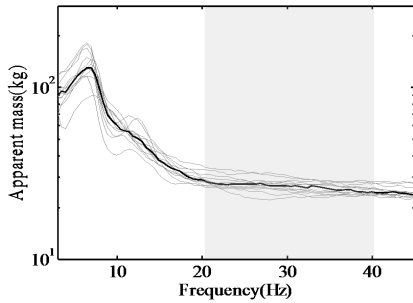
Fig. 3 Illustration of test protocol of three-down one-up method(○: in case of ‘comfort’ response, ×: in case of ‘discomfort’ response)

자극의 크기 평균값을 해당 자극의 절대역치로 결정한다⁽⁸⁾.

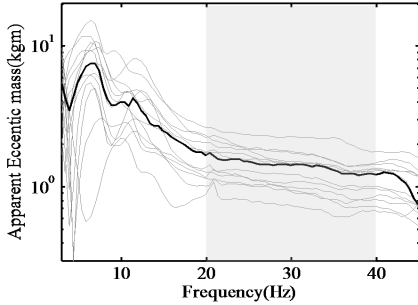
Fig. 3은 three-down one-up method 실험의 예시를 보이고 있으며, 가로 축은 평가의 진행횟수를 나타내고 세로 축은 각각의 진행에 따른 자극의 크기를 나타내고 있다. 불편함의 절대역치를 구하기 위해 사용된 진동자극은 정차진동 각각의 주파수에 대하여 Table 4와 같은 크기를 가지는 정현파 진동으로 사용하였다. 그리고 절대역치의 불편함으로 판단하는 기준은 “승용차량의 정차진동이라 하기에 불편함이 있다” 또는 “승용차량의 정차상태에서 이 정도의 진동에 한 시간 정도 노출되면 피곤할 것 같다”로 설정하였으며, 불편하지 않음의 판단기준으로 “승용차량의 정차진동으로 이 정도의 진동에는 불편함이 없다”로 설정하였다.

3.2 주관적 불편함의 역치

승용차량 정차시 진동 주파수 영역인 20~40 Hz에 대하여 5 Hz 간격으로 나는 5가지로 단계로 나누는 주파수에서의 13명의 피시험자들에 대한 주관적 불편함의 역치를 Fig. 5에 나타내었다. 불편함의 절대역치 각각의 주파수에서의 중간값은 가진주파수가 커질수록 불편함의 절대역치도 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 승용차량의 정차시에 발생하는 진동의 크기가 동일하더라도 주파수가 낮을수록 탑승자가 느끼는 불편함은 상대적으로 더 크다는 것을 의미한다. 즉, 이 연구의 결과로 예를 들자면, Table 4에서와 같이 20 Hz의 정차진동은 40 Hz의 정차진동보다 약 3.4 dB 더 탑승자가 불편하게 느낀다는 것을 의미한다. 승용차량의 개발자가 차량을 설계할 때 차량 정차시 발생하는 진동에 대한 승차감의 향상에 목표값을 설정할 때, 이러한 결과를 반영할 경우 더욱 실질적이고 경제적인 설계치를 설정할 수 있을 것이다.



(a) Apparent mass



(b) Apparent essentric mass

Fig. 4 Human response to vertical vibration(gray lines: individual values, black thick line: median value)

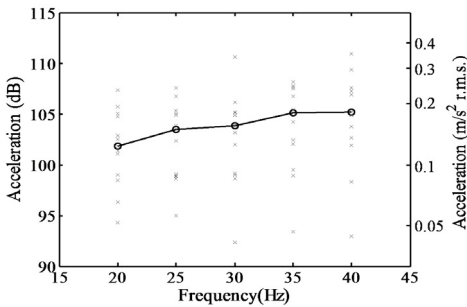
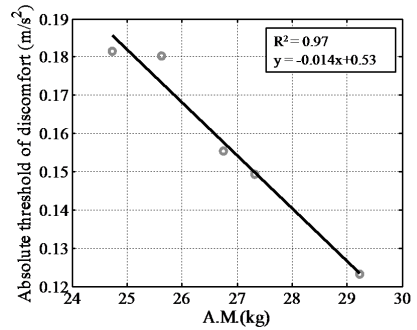


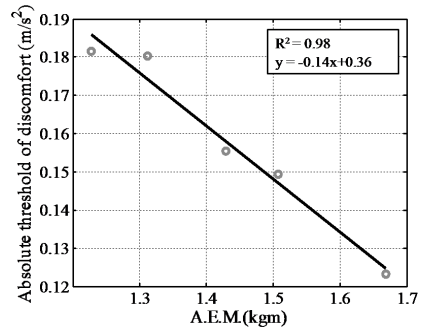
Fig. 5 Absolute thresholds values of discomfort in terms of idle vibration in passenger vehicle (×: individual values, ○: median values at each frequency)

3.3 인체반응특성과 불편함과의 상관관계

승용차량의 정차시 진동을 고려한 상하방향 가진에 대한 인체반응의 객관적 물리량과 불편함의 주관적 절대역치의 상관도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 걸보기 질량과 불편함의 절대역치의 상관도를 나타내고, Fig. 6(b)는 걸보기 편심 질량과의 상관도를 나타내고 있다. 각각의 그림에서 가로축은



(a) Apparent mass and absolute threshold of discomfort



(b) Apparent essentric mass and absolute threshold of dicomfort

Fig. 6 Correlation between objective human response and subjective evaluation of discomfort

Table 4 Subjective and objective median values at each frequency

Frequency (Hz)	20	25	30	35	40
A.M.(kg)	29.22	27.32	26.75	25.63	24.73
A.E.M(kgm)	1.67	1.51	1.43	1.31	1.23
Absolute threshold (m/s ² (dB))	0.123 (101.8)	0.159 (103.5)	0.155 (103.8)	0.180 (105.1)	0.182 (105.2)

13명의 피시험자들의 인체반응특성(걸보기 질량과 걸보기 편심질량)의 대표값으로 중간값이고, 세로축은 해당 주파수에서의 불편함의 절대역치의 중간값을 나타낸 것이다. 가진 주파수별 인체반응 특성값과 불편함의 절대역치값을 Table 4에 정리하였다. 두 가지 인체반응특성과 불편함 절대역치에 대한 상관도를 pearson correlation coefficient값으로 분석하였으며, 걸보기 질량과의 상관도는 0.97, 걸보

기 편심질량과의 상관도는 0.98로 계산되어 객관적인 반응과 주관적인 평가 사이에는 높은 상관성이 있음을 보였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 개발되는 차량용 시트의 정차시 진동의 안락성을 평가할 때, 비교적 시간과 비용이 적게 소요되면서도 실험의 객관적 신뢰도가 높은 인체반응 특성값을 안락성 평가의 지표로서 사용이 가능하다는 것을 의미한다.

4. 결 론

이 연구에서는 승용차량의 정차시 진동의 주파수 대역에서 객관적 인체반응의 물리량과 주관적 불편함의 절대역치에 대한 상관관계를 분석하였다. 객관적 인체반응의 지표로서 걸보기 질량과 걸보기 편심질량을 사용하였으며, 이는 정차시 진동을 고려한 $0.224 \text{ m/s}^2 \text{ r.m.s}$ 의 가진 크기를 가지는 3~40 Hz 대역의 랜덤신호의 상하방향 가진을 이용하여 13명의 피시험자로부터 구하였다. 주관적 평가의 지표로는 정차시 진동을 고려한 20~40 Hz 사이의 5가지 주파수에서 정현파 신호 가진에 대한 불편함의 절대역치를 이용하였으며, 이는 three-down one-up method를 통하여 구하였다. 주관적 평가와 객관적 인체반응 특성 확인 실험에는 동일한 피시험자를 이용하여 실험의 객관성을 확보하였다.

이 연구의 결과로는 객관적인 인체반응특성과 주관적인 불편함의 절대역치는 높은 상관성을 가지는 선형관계를 보였다. 이러한 결과는 승용차량의 시트를 개발할 때, 정차시 진동 주파수 영역에서의 성능을 검증하는 방법으로 객관적인 인체반응 특성을 이용할 수 있으며, 객관적 지표만으로도 충분히 경제적이고 신뢰성 높은 결론을 얻을 수 있음을 의미한다.

향후에는 정차시 진동의 다양한 크기와 시트의 등받이와 같이 실제 시트를 고려한 실험과 연구가 필요할 것이다.

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) BS 6841, 1987, Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock, UK.

(4) 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.

(5) Cheung, W. S., Kim, Y. T., Kwon H. S., 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) 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.

(7) Parsons, K. C. and Griffin, M. J., 1988, Whole-body Vibration Perception Thresholds, Journal of Sound and Vibration, Vol. 121, No. 2, pp. 237~258.

(8) Morioka, M. and Griffin, M. J., 2006, Magnitude-dependence of Equivalent Comfort Contours for Fore-and-aft, Lateral and Vertical Whole-body Vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 298, pp. 755~772.

(9) Mansfield, N. J. and Griffin, M. J., 2000, Difference Thresholds for Automobile Seat Vibration, Applied Ergonomics, Vol. 31, pp. 255~261.

(10) Anriette van der Westuizen and Johannes L. van Niekerk, 2006, Verification of Seat Effective Amplitude Transmissibility(SEAT) Value as a Reliable Metric to Predict Dynamic Seat Comfort, Journal of Sound and Vibration, Vol. 295, pp. 1060~1075.

(11) Ahn, S. J., 2010, Discomfort of Vertical Whole-body Shock-type Vibration in the Frequency Range of 0.5 to 16 Hz, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, pp. 909~916.

(12) Yoo, W. S., Kim, M. S., Jang, H. K. and Ahn, S. J., 2005, Correlation between Subjective and Objective Assessments of Shock Signals Excited on a Vehicle Passing Bumps, *Transactions of KSAE*, Vol 13, No. 2, pp. 29~36.

(13) Dixon, W. J. and Mood, A. M., 1948, A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 43, pp. 109~126.

(14) Park, D. W., Ahn, S. J. and Yoo, W. S., 2007, Study on Relationship Discomfort and Body Pressure Distribution on the Seat under Height of

Footrest and Angle of Seatpan, *Transactions of KSAE*, Vol. 15, No. 6, pp. 38~43.

(15) 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.

(16) Matsumoto, Y. and Griffin, M. J., 2002, Non-linear Characteristics in the Dynamic Responses of Seated Subjects Exposed to Vertical Whole-body Vibration, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 124, pp. 527~529.

(17) 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.