

시트와 바닥 진동의 위상차가 안락성에 미치는 영향을 평가하기 위한 수식의 제안

Proposal of an Equation for the Evaluation of Discomfort of a Seated
Human Body Due to the Differential Vertical Vibration at the Seat
and the Floor

장 한 기[†]

Han-Kee Jang

(2002년 4월 18일 접수 : 2002년 7월 15일 심사완료)

Key Words : Perceptual Vibration(체감진동), Seat and Floor Vibration(시트와 바닥의 진동), Phase Effect
(위상의 효과), Modification Function(보정 함수), Suspension Seat(현가장치 장착 시트)

ABSTRACT

A modified equation for the evaluation of discomfort of a seated human body exposed to differential vibration at the seat and the floor was proposed in this paper. Through the review and analysis of the preceding studies, effect of phase difference between the seat and the floor vibration on discomfort were quantitatively identified. The phase effect was shown to be governed by not only phase difference between the two vibrations but both their frequency and the magnitude, which means the present equation for the evaluation of perceptual amount of vibration provided by ISO 2631-1 should be modified. The proposed equation was developed such that the correction function was multiplied to the present equation. The correction function consisted of three parts, each of them represented the effect by phase difference, frequency and vibration magnitude on discomfort respectively.

1. 서 론

차량에 착석한 인체는 시트, 바닥, 운전대 등 접촉 지점을 통해서 전달되는 다양한 유형의 진동에 노출된다. 각 지점과 방향을 통해 전달되는 진동은 탑승자의 불편함을 유발하는데, 이 중에서도 시트 쿠션에서의 세 방향, 시트 백에서의 전후 방향 그리고 바닥의 수직방향 성분이 불편함의 대부분을 좌우하는 것으로 알려져 있다.^(1~3) 진동에 의해 야기되는 인체의

불편함을 정량화하는 방법은, 60년대 이후 수많은 연구를 거쳐 BS 6841이나 ISO 2631-1과 같은 규격으로 일반화되었다.^(2, 3) 이들 규격에서는 진동의 전달 범위와 전달 방향에 대한 주파수 가중치를 정의함으로써 측정된 진동량을 체감량으로 환산하였으며, 여러 가지 진동이 동시에 존재할 때 각 체감량을 합산하여 대표값을 도출하는 방법을 제시하고 있다. 이들 규격의 특징은 체감진동량을 RMS(root mean square)나 RMQ(root mean quad)등의 형태로 계산함으로써 진동의 크기만을 고려한다는 것이다.

여러 지점 또는 방향으로의 진동이 신체에 동시에 가해질 때, 진동 사이의 위상차가 인체의 불편함에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다는 가정을 검증하기

[†] 책임저자, 정회원, 고등기술연구원
E-mail : hkjang@iae.re.kr
Tel : (031) 330-7435, Fax : (031)330-7116

위한 연구들이 시도되었다. Griffin과 Witham⁽⁴⁾, Fairley와 Griffin⁽⁵⁾은 착석한 상태의 상체에 상하-좌우 방향의 진동이 동시에 가해지는 경우와 상하-전후 방향의 진동이 동시에 가해지는 경우 각각에 대해 동시에 가해지는 두 진동 사이의 위상차가 인체의 반응에 영향을 미치는지 여부를 파악하였다. 이들 연구에서 내린 결론은, 한 지점(시트)에 서로 수직하는 두 방향의 진동이 위상차를 갖고 전달되는 경우에는 크기만을 고려하는 기존의 진동량 합산 방식을 적용해도 문제가 없다는 것이었다.

그러나 Suggs⁽⁶⁾와 Jang과 Griffin^(7~9)은, 착석한 인체의 서로 다른 두 지점에서 동일한 방향의 진동이 가해지는 경우, 즉 시트와 바닥에서의 수직 진동이 서로 다른 위상을 갖는 경우에, 사람이 느끼는 불편함은 위상차의 영향을 받는다는 실험 결과를 얻었다. 이와 같은 연구 결과는 기존에 활용되던 진동 에너지 합산식이 수정되어야 할 당위성을 제기하는 것이다. 착석한 자세에서 시트와 바닥 진동이 위상차를 갖는 경우는 현가장치 장착 시트(suspension seat)를 운전석에 사용하는 버스, 트럭, 굴삭기 등에서 흔히 나타나는데, 이들 차량에서의 승차감 평가 방법에 영향을 주게 된다.

본 논문에서는 시트와 바닥에서 위상차를 갖는 수직방향 진동이 인체에 작용할 때의 안락성 평가와 관련된 시험 연구들을 비교, 고찰함으로써, 기존의 체감 진동량 산출 방식을 보완한 새로운 형태의 수식을 제안하였다.

2. 체감 진동량 계산방법에 대한 고찰

사람이 느끼는 진동량은 물리적인 양과 차이가 있으며 특히 주파수의 영향을 많이 받는다. 소음에서 사용하는 A-가중치와 마찬가지로 진동에서도 주파수 가중치가 활용되는데, 진동 전달 영역과 전달 방향에 따라 각기 다른 주파수 가중치가 존재한다. ISO 2631-1에서는 주파수 가중치뿐만 아니라 한 방향 이상의 복합 진동에 대해서도 체감진동량 계산방법을 제시하고 있는데, 이를 개념적으로 도시하면 Fig. 1과 같다.⁽³⁾ 여기서 a_i 는 인체의 특정 지점 또는 특정 방향에 대해 측정된 가속도이고, W_i 는 각 성분해에 해당하는 주파수 가중치이다. $a_{i,w}$ 와 $a_{i,w}^*$ 는 각각 주파수 가중치가 적용된 가속도와 이 가속도 신호의 RMS값

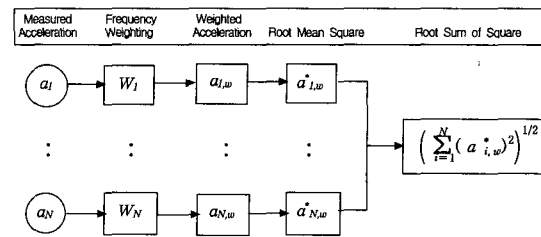


Fig. 1 Procedure for calculating perceptual vibration (ISO 2631-1)

을 나타낸다. 최종 단계에서는, 신체 각 지점에 전달되는 진동들의 영향을 종합적으로 평가하기 위해 각 성분의 RMS값을 제공하여 합한 뒤 제곱근을 취함으로써 대표값을 산출하는 과정을 거친다. 이와 같이 벡터 합 개념으로 합산하는 방법은 다른 국제 규격에서도 동일하게 적용되는데,^(2, 10) 각 진동량의 크기만을 고려하고 위상의 효과를 배제할 수 있다는 가정에 따른 것이다. 만일 각 진동 요소들 간의 위상차가 신체의 불편함에 미치는 영향을 무시할 수 없다면 기존의 체감 진동량 합산법은 개선되어야 한다.

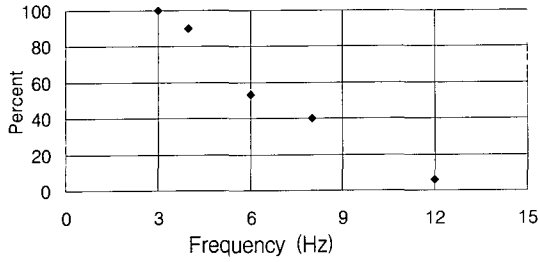
3. 진동의 위상차와 안락성의 상관관계에 대한 기존 연구 고찰

3.1 Suggs의 시험결과⁽⁶⁾

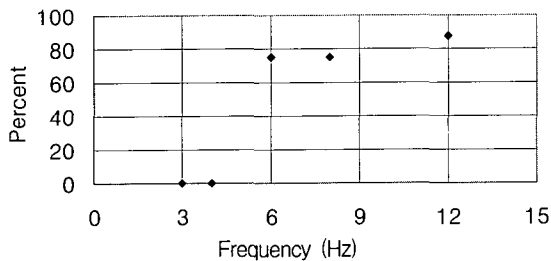
Suggs 등은 시트와 바닥 진동 사이에 위상차가 존재하는 경우에 대한 일련의 연구를 통해, 사람이 느끼는 불편함이 위상차에 의해 명백하게 달라진다는 실험결과를 얻었다. 그는 바닥이 정지하고 시트만 진동하는 경우와 바닥과 시트가 동일하게 움직이는 경우를 비교하였는데, 6 Hz 이상에서는 바닥이 진동하지 않는 경우를 선호하였으나 4 Hz 이하에서는 엉덩이와 발이 동일하게 진동하는 것을 선호한다는 결과를 도출하였다. 여기서 '선호한다'는 불편함이 적다는 것을 말한다. 이 결과는 시트와 바닥 진동의 크기뿐만 아니라 위상차도 인체 안락성에 영향을 준다는 것을 의미한다고 하겠다.

이 연구의 결과의 요점을 도시한 그림은 Fig. 2이다. 첫 번째 그림 (a)는 전체 피평가자 중에서 두 진동 사이의 180° 위상차를 인지하는 평가자의 수를 비율로서 주파수에 따라 도시한 것이다. 3 Hz에서는 100%, 4 Hz에서는 약 90%의 피평가자가 확연하게 위상차를 인지하였으나 6 Hz 이상에서는 위상차를 인

지한 피평가자가 절반 이하였다. 그림 (b)는 위상차가 있는 경우의 불편함이 위상차가 없는 경우와 차이가 나는지를 설문하여 얻은 답변을 정리한 것인데, 4 Hz까지는 모든 피평가자가 차이가 있다고 대답한 반



(a) Percent of subjects able to distinguish 180° phase difference as compared to in-phase motion



(b) Percent of subjects reporting no difference in the ride comfort of differential vibration

Fig. 2 Results of experiments by Suggs on the effect of phase between the seat and the feet on discomfort

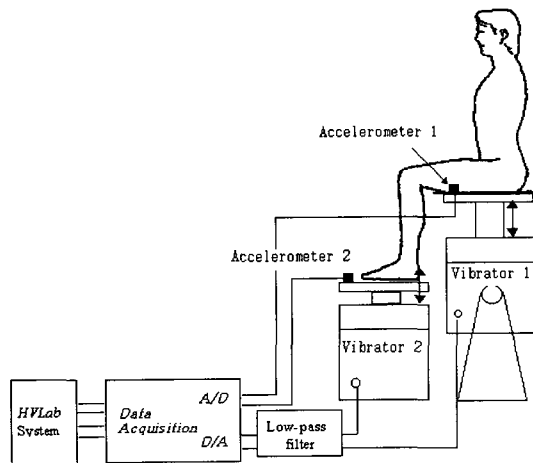


Fig. 3 Experimental set-up for the excitation at the seat and the feet

면 6 Hz와 8 Hz에서는 약 75 %가 차이가 없다고 답변하였다.

이 연구결과들을 종합하면, 4 Hz까지는 위상차가 승차감에 영향을 주지만, 6 Hz 이상에서는 거의 영향을 주지 않으며, 4~6 Hz 영역에서 위상차의 인지 여부에 대한 경계점(break point)이 존재한다는 것이다. 저자는 경계가 되는 주파수가 착석한 인체의 수직방향으로의 첫 번째 공진 주파수와 관련이 있다고 주장하였다.

3.2 Jang과 Griffin의 시험결과⁽⁷⁻⁹⁾

Jang과 Griffin은, Fig. 3과 같은 시험장치를 이용하여, 주파수와 진동의 크기, 자세 등의 진동 환경인자에 변화를 주면서 시트와 바닥 진동의 위상차가 인체의 안락성에 어떻게 영향을 미치는지를 실험적인 방법으로 고찰하였다.^(7, 8)

(1) 위상차의 효과

첫 번째 연구⁽⁷⁾에서는, 인체가 매우 민감한 4 Hz의 정현파 진동을 이용하여 5가지의 진동 진폭(0.25, 0.4, 0.63, 1.0, 1.6 m/s² r.m.s.)에서 위상차를 0°부터 180°까지 변화를 주면서 불편함의 변화 추이를 살펴 보았다. 진폭이 0.63 m/s² 이하이고, 위상차가 90° 이상에서 대부분의 평가자들은 위상차를 확연하게 느끼는 것으로 밝혀졌으며, 전반적으로 위상차가 증가할수록 불편함도 증가한다고 하였다. 이 시험으로부터 진동의 크기 이외에 위상차도 인체의 불편함을 결정하는 중요한 변수임을 확인할 수 있으며, 이는 Suggs⁽⁶⁾의 연구결과와 일치하는 것이다.

Fig. 4에는, 위상차가 없는 경우를 기준으로 하여 위상차가 각각 90°, 180°인 경우의 상대적인 불편함을 비율로 도시하였다. 이 그림을 보면 진폭이 각각 0.25, 0.4 m/s²인 경우는 위상차의 효과가 분명하게 나타나고 있으나 0.63 m/s² 이상에서는 효과가 미미한 것을 알 수 있다.

(2) 주파수와 진폭의 효과

Jang과 Griffin은 첫 번째 연구 결과의 확장으로서 5가지 주파수(2.5, 3.15, 4, 5, 6.3 Hz)와 5가지 진폭(0.25, 0.4, 0.63, 1.0, 1.6 m/s² r.m.s.)에서 두 진동사이의 위상차가 없는 경우와 180°인 경우에, 인체가 느끼는 불편함을 비교하였다.⁽⁸⁾ 이 실험의 관심 주파수 범위내에서는 주파수가 증가할수록 위상차의 효과가 줄어들며, 특히 5 Hz 이상에서는 두 진동 사이의 위상차 존재 효과를 식별하지 못하는 것으로 나타났다.

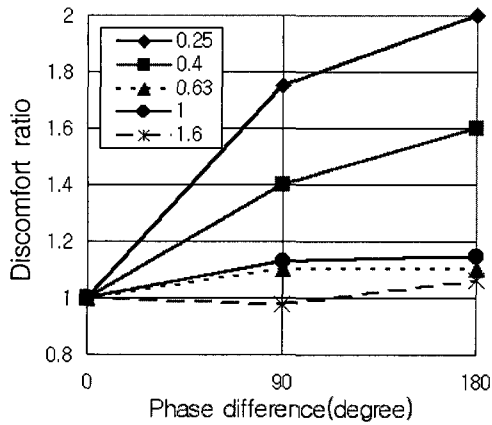


Fig. 4 Ratio of discomfort rating for the motion of phase difference of 90° and 180° to discomfort rating for in-phase motion at five vibration magnitudes(0.25, 0.4, 0.63, 1.0 and 1.6 m/s² r.m.s.)

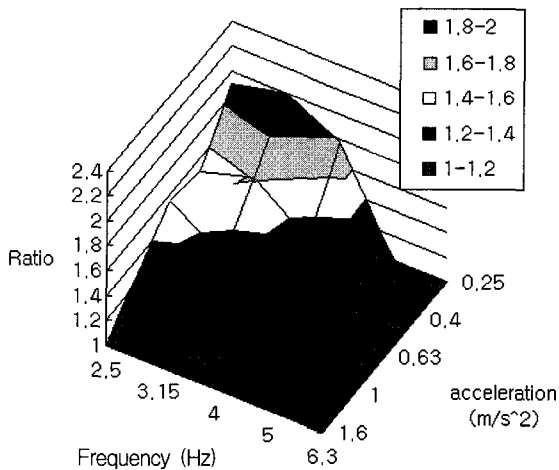


Fig. 5 Ratio of discomfort rating for the out-of-phase motion and discomfort rating for in-phase motion at five vibration magnitudes (0.25, 0.4, 0.63, 1.0 and 1.6 m/s² r.m.s.) and five vibration frequencies (2.5, 3.15, 4, 5, 6.3 Hz)

이 결과 역시 Suggs 등⁽⁶⁾의 연구결과와 일치하는 것이다. 진동의 크기에 의한 효과는 주파수에 따라 다소 차이가 있으나, 진폭이 0.63 m/s² 이하에서 위상차의 효과를 잘 느끼는 것으로 나타났으며, 진폭이 그 이상 증가하면 오히려 위상차에 대한 변별력이 떨어진다라는 결과를 얻었다. 이 실험에서 선정된 진폭 범위에서는 진폭이 오히려 작을수록 위상차의 효과가

큰 것으로 나타났다.

참고문헌 (9)에서는 주파수와 진폭의 변화에 따라 위상차가 0°인 경우와 180°인 경우의 상대적인 불편함을 도시한 바 있다. 위상차가 180°인 경우의 불편함의 크기를 0°인 경우로 나누면 위상차의 효과를 상대적인 양으로 알 수 있는데 이를 종합하여 도시한 것이 Fig. 5이다. 이 그림은 위상차가 있는 경우의 불편함이 위상차가 없는 경우보다 몇 배 증가하는지를 조건별로 보여 주고 있다. 진폭이 작을수록, 또 주파수가 낮을수록 상대적인 불편함이 증가하고 있으며 그 비율은 2배에 이르기도 하였다. 참고문헌 (9)에 도시한 평가 결과를 보면, 주파수가 2.5 Hz인 경우 진폭이 0.25 m/s²에서 0.63 m/s²으로 2.5배 가량 증가하였을 때, 상대적인 불편함이 2배 가량 증가함을 알 수 있다. 정리하면, 진폭을 0.25 m/s²로 고정시키고 위상차를 0°에서 180°로 증가시킨 것과 단순히 진폭을 2.5배 증가시킨 것이 유사한 효과를 나타내고 있다는 것이다.

4. 위상차의 효과를 고려한 체감진동량 계산식 제안

진동에 의한 인체의 반응(불편함)을 결정하는 심리물리학적 관련식은 식 (1)의 급수 형태로 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$\Psi = k \cdot \Phi^n \quad (1)$$

이 식에서 인체의 반응(Ψ), 즉 안락성과 진동의 크기(Φ)의 관계는 상수 k 와 n 에 의해 결정되는데, 진동의 경우 n 값은 진동의 유형에 따라 달라지겠지만 1.0 전후의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.^(1,4,5,7-9) 지수 n 이 1.0 전후의 값을 갖는다는 것은, 진동량이 두 배가 되면 사람이 느끼는 불편함도 두 배가 된다는 것을 의미한다. 3절에서 정리한 바와 같이, 위상차의 효과가 불편함을 두 배까지 차이 나게 한다면 체감진동량 계산 시에 위상차의 효과를 반드시 고려해야 한다. Fig. 1에 도시한 체감 진동량 계산방법을 식 (2)와 같이 정리할 수 있는데,^(1,3) 위상차의 효과를 고려하여 식 (3)과 같은 형태로 수정하는 것이 타당하다고 하겠다.

$$\text{Ride value} = \left(\sum_{i=1}^N (a_{i,w}^2)^{1/2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Modified Ride value

$$= \left(\sum_{i=1}^N (a_{i,w})^2 \right)^{1/2} \cdot M(\theta) \quad (3)$$

보정함수 $M(\theta)$ 는 위상각 θ 의 함수로 표현된다. 그러나, 위상차의 효과는 인체의 공진주파수 이하에서 유효하며, 또 진폭에 의해서도 영향을 받으므로 식 (3)의 보정 함수 $M(\theta)$ 는 식 (4)와 같이 위상차 (θ)뿐만 아니라 주파수(f)와 진폭의 크기(A)의 함수의 곱으로 표현하는 것이 타당하다.

$$M(\theta) = y_1(\theta) \cdot y_2(f) \cdot y_3(A) \quad (4)$$

4.1 위상차의 효과 보정

위상차의 효과는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 진폭에 따라 달라지고 있으나 형상은 유사하게 나타나고 있다. 두 가지 진동의 위상각은 180° 를 기준으로 좌우 대칭이므로 이 점을 꼭지점으로 하는 2차 함수로 피팅하는 것이 가능하다.

$$y_1(\theta) = -\frac{b}{180^2} (\theta - 180)^2 + b \quad (5)$$

여기서, b 는 위상각 180° 에서의 최대 비율로서 진폭이 0.25 m/s^2 인 경우 2.0이다.

4.2 주파수에 대한 보정

주파수에 대한 효과에 대한 시험결과를 정리해보면, Suggs의 연구결과에서는 3, 4, 6, 8 Hz에서의 시험 데이터가 있고, Jang 등의 시험에서는 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3 Hz에서의 시험 데이터가 있다. 두 시험에서 알 수 있는 것은 5 Hz 주위에 천이점이 있으며 이 주파수는 착석한 인체의 수직방향에 대한 공진 주파수와 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 첫 번째 공진 주파수는 성인의 80% (치중범위: 51~93 kg)가 4.8~5 Hz에 그 피크가 존재하므로⁽¹²⁾ 5 Hz를 기준으로 하여 Fig. 6과 같은 간단한 형태의 보정함수를 $y_2(f)$ 를 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$y_2(f) = \begin{cases} 1 & f \leq 4 \\ -\frac{1}{2}(x-4)+1 & 4 < f \leq 6 \\ 0 & f > 6 \end{cases} \quad (6)$$

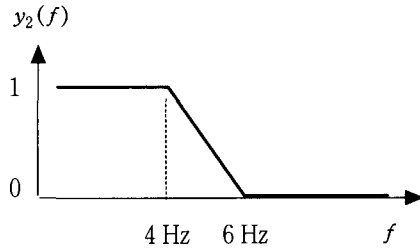


Fig. 6 Modification function with frequency

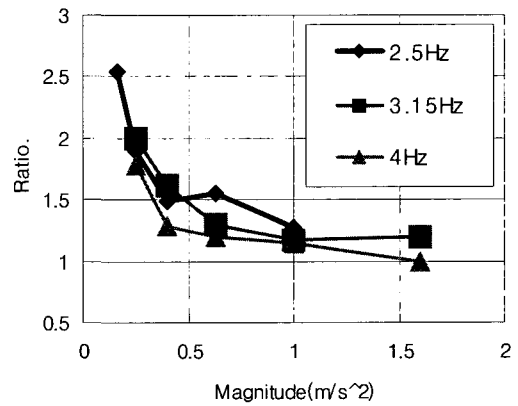


Fig. 7 Discomfort ratio by the out-of-phase motion to in-phase motion with the vibration magnitude A

4.3 진폭에 대한 보정

Fig. 5에 도시한 바와 같이 진폭의 증가에 따라 위상차 효과의 분별력이 떨어지고 있는데, 위상차의 변별력이 나타나는 4 Hz이하의 주파수에 대한 시험 결과를 진폭에 대해 정리하면 Fig. 7과 같다. 횡축은 동일한 위상을 갖는 진동에 의한 불편함과 위상차 180° 인 경우의 불편함의 상대적인 비이다. 이 그림에서 진폭에 대한 위상차의 변별력은 진폭 A 의 역수에 비례하는 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 진폭에 대한 보정함수 y_3 는 식 (7)과 같은 형태로 제안할 수 있다.

$$y_3(A) = \frac{c}{A} + d \quad (7)$$

여기서 c 와 d 는 상수이다.

5. 결 론

본 논문에서는, 시트와 바닥에서 신체로 전달되는 진동사이의 위상차가 존재할 때 착석한 인체의 안락성에 어떤 영향을 주는지에 대한 연구결과들을 분석하고, 이를 토대로 체감진동량을 산출하는 수정된 식을 제안하였다. 수정된 산출식은 진동의 크기만을 고려하는 기존의 체감진동량 계산식에 위상의 효과를 고려하는 보정 함수를 추가하는 방식으로 구성되었는데, 보정함수는 다시 위상각의 크기, 주파수, 진폭에 대한 보정치들을 변수로 하는 간단한 형태의 함수로 제시하였다.

현재까지는 위상차를 갖는 시트와 바닥에서의 진동이 인체의 안락성에 미치는 영향에 대한 연구가 매우 드물고, 데이터의 양 또한 충분치 못해서 본 논문에서는 정확한 경향을 충분히 나타낼 수 있는 수식을 제시하지는 못했다. 그럼에도 불구하고, 지금까지 나온 연구결과들만으로도 두 가지 진동의 위상차가 안락성 결정에 심각한 영향을 미친다는 결론을 내리기에 어려움 없고, 더욱이 위상차와 주파수, 진폭에 따른 전반적인 효과를 파악하는 것도 가능하다고 판단되어 새로운 수식을 제시하였다. 본 논문에서 제시하는 수식은 물론 분석대상이 된 시험의 주파수와 진폭 범위에서만 타당할 것으로 사료되며, 앞으로 지속적인 연구가 진행된다면 보다 폭넓은 환경인자 범위에서 정확한 경향을 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press.
- (2) British Standards Institution, BS 6841 1987, Guide to the Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock.
- (3) International Organization for Standardization, ISO 2631-1 1997, Mechanical Vibration and Shock-evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration, Part 1: General Requirements.
- (4) Griffin, M. J. and Whitham, E. M., 1997, "Assessing the Discomfort of Dual-axis Whole-body Vibration," Journal of Sound and Vibration, 54, pp. 107~116.
- (5) Fairley, T. E. and Griffin, M. J., 1988, "Predicting the Discomfort Caused by Simultaneous Vertical and Fore-and-aft Whole-body Vibration," Journal of Sound and Vibration 124(1), pp. 141~156.
- (6) Suggs, C. W., Abrams Jr. C. F., Entekin, R., Elfring, G. and Smith, J., 1976, "Differential Vibration of the Feet and Trunk of Humans in Transport Environments," NASA Report, NGR-34-002-189.
- (7) Jang, H.-K. and Griffin, M. J., 2000, "Effect of Phase, Frequency, Magnitude and Posture on Discomfort Associated with Differential Vertical Vibration at the Seat and Feet," Journal of Sound and Vibration, 229(2), pp. 273~286.
- (8) Jang, H.-K. and Griffin, M. J., 1999, "Effect of Phase of Differential Vertical Vibration at the Seat and Feet on Discomfort," Journal of Sound and Vibration., 223(5), pp. 785~794.
- (9) 장한기, Griffin, M. J., 1998, "인체진동의 주관적 평가에 관한 연구," 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 용평, pp. 69~74.
- (10) VDI-Gesellschaft Knstrultion und Entwicklung, VDI 2057: Assessment of the Effect of Mechanical Vibrations on Human Beings," Blatt 2, 3, 4.1-4.3, 1987.
- (11) Stevens, S. S., 1986, Psychophysics : Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects, Transactions, Inc.
- (12) International Organization for Standardization, ISO 5982 : Vibration and Shock- mechanical driving point impedance of human body, 1981.