

전신진동과 부분진동에 대한 인간의 응답특성

장호경

경산대학교 물리학과

초 록

이 논문에서는 전신 과 손-팔에 전달된 진동에 대해 사람들의 주관적 진동 응답특성을 연구하였다. 인간의 진동 노출 한계를 정의하기 위하여 ISO Standard 2631 에서 지정한 일련의 진동 한계 실험 측정치를 조사하였다. 이 기준에 따라 진동에 대한 인간의 진동 응답 계산을 위한 방법이 설명되었다.

1. 서 론

인간이 이룩한 고도의 산업과 과학의 발전은 인간에게 다양한 형태의 각종 공해를 유발한다. 그 중 소음, 진동에 의한 문제가 최근 사회적으로 큰 관심의 요인으로 작용하고 있다. 인간생활에서 실제로 느끼는 진동 발생원으로는 지진등의 자연적인 원인과 수송차량, 건설, 생산작업에서 발생한 인위적 원인으로 구별된다.

특히 인체에 가해지는 진동은 전신진동(whole-body vibration)과 부분진동(hand-arm vibration)등으로 크게 구분되며, 전신진동은 비행기, 기차, 자동차 등의 진동이 인체에 전달되는 현상으로 환경에 따라 다양하게 나타난다. 전신진동에 대한 인간의 응답특성으로는 행동의 퇴화(degraded comport), 행동의 방해(interference with activities), 건강의 손상(impaired health), 소진동의 인지(perception of low-magnitude vibration), 동통의 발생(occurrence of motion sickness)등의 형태로 크게 분류된다.⁽¹⁾ 부분진동은 공기헤머, 글라인더 등의 진동공구를 사용하였을 경우 신체의 일 부분 즉 손에 한정되어 진동이 전달되며, 뼈와 관절등의 피해 및 혈관운동신경장애등의 영향을 일으킨다. 인체는 기계적 구조로 볼 때 아주 복잡한 선형적, 비선형적 요소를 포함하며, 진동전달은 주파수에 따라 큰 차이가 있으며, 또한 반응도 인간마다 아주 다르다. 따라서 진동과 충격에 대한 인간의 응답을 고려할 때 기계적, 인체적 효과를 함께 고려할 필요가 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 연구에서는 여러 공해진동 요소가 인체의 각 부위에 미치는 영향을 크게 전신진동(whole body vibration) 과 부분진동(hand-arm vibration)으로 나누어 주파수의 변화에 따른 진동의 전달특성과 응답의 크기를 문헌적으로 조사하였다.

2. 전신진동(whole-body vibration)의 전달 특성

인체상의 진동효과는 인체를 통해 들어온 진동의 크기와 방법에 의존한다.⁽³⁾ 인체에 전달된 진동이 자세의 변화로 인하여 유해한 효과를 갖는 진동으로 변하는 경향이 있다. 전 주파수 범위에 대하여 인체의 위치와 진동 전달특성을 이해함으로써 진동의 절연효과를

가져올 수 있다.⁽⁴⁾ 실제 이 방법은 복잡하며, 전신진동을 평가하기 위한 다양한 기준이 보고되었다. 그러나 인체상에 알려진 모든 진동효과를 정확하게 예측할 수 있는 기준은 아직 제시되지 않고 있으며, 대부분 기준은 응답에 큰 영향을 미치는 변수에 의해 언급하고 있다. ISO-2631(International Organization for standardization, 1974, 1978, 1985a)에서는 여러 방향에서 발생한 진동 크기의 표현을 위해 직교좌표를 규정했다.⁽¹⁾⁽⁵⁾

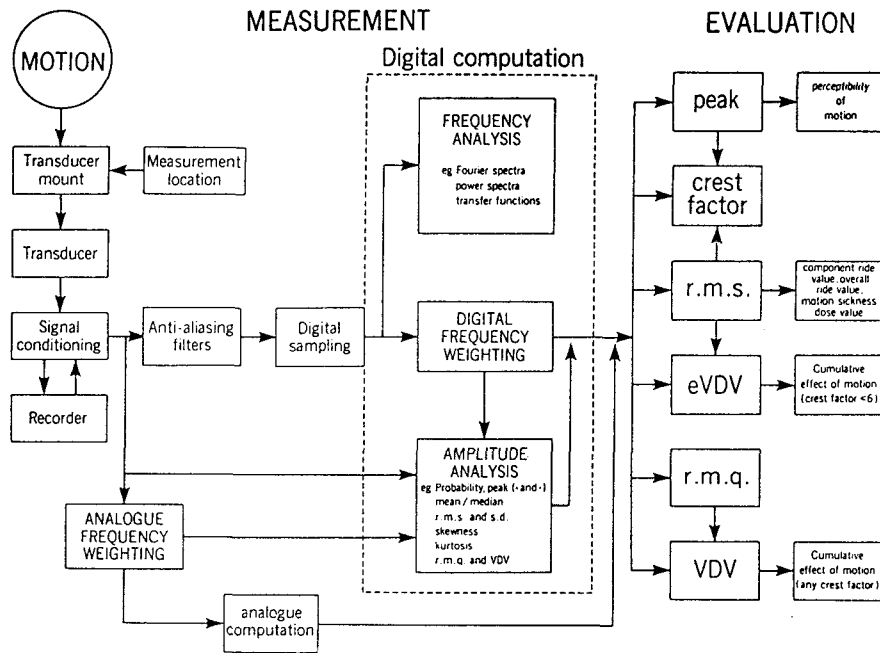


Fig.1 Conceptual illustration of the measurement and evaluation of vibration with respect to human response.

Fig.1 은 진동분석과 측정 데이터를 구하는 원리로서 고려된 여러 요소 사이의 관계를 설명한다. 진동신호의 파고율 (crest factor)과 첨예도 (kurtosis)는 (1), (2)식과 같다. (3)식에서 $a(t)$ 는 주파수 보정 가속도(frequency weighted acceleration)이다.⁽²⁾⁽⁵⁾

$$\text{crest factor} = \frac{\text{peak level}}{60\text{sec}L_{eq}} \quad (1)$$

$$\text{kurtosis} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (X - \bar{X})^4 P(X) dX}{\sigma^4} \quad (2)$$

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{a(t)}{10^{-6}} \right)^2 dt \quad (3)$$

인간의 진동은 1/3 옥타브의 실효 가속도 단위로서 측정되고, 진동 레벨은 데시벨 단위로서 대수(Logarithmic) 좌표이다. 보정 진동 레벨(weighted vibration level)은 보정된 m/s^2 로 표현되며 단위는 데시벨이다. 인체에 영향을 주는 진동 주파수 범위는 대략 0.5 Hz-100

Hz이다.

기계적 구조로서 인체를 고려할 때 저주파수와 낮은 진동 레벨일 때, 선형 럼프 파라미터 (lumped parameter) 구조에 가깝게 된다.⁽⁶⁾ 진동과 충격효과에 대해 이 구조의 가장 중요한 부분중의 하나는 흉배구조(thorax-abdomen system)로 표기된 부분이다. Fig.2 는 수직으로 진동하는 단 위에 서 있는 인체를 나타내는 기계적 시스템으로 60 Hz-90 Hz 지역에서 안구공명을 나타내는 요동(disturbance)이 나타나고, 아래 턱뼈 (jaw-skull) 구조의 공명 효과는 100 Hz-200 Hz 사이에서 발견됐다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾ Fig.2 에서 보여준 것처럼 100 Hz 이상에서는 단순한 럼프 파라미터 모델은 매우 유용하지 않다. 따라서 복잡한 연속 구조 방법을 적용할 필요가 있다.⁽²⁾⁽³⁾

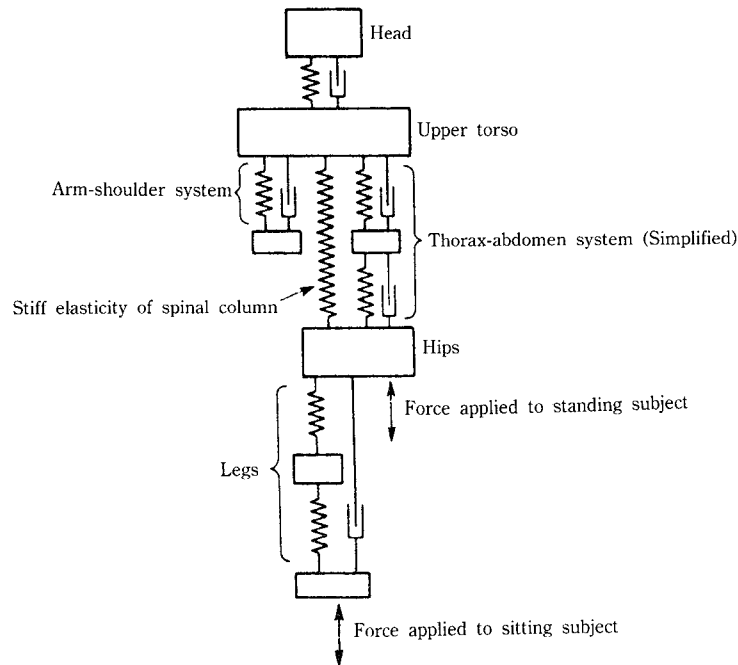


Fig.2 Simplified mechanical system representing the human body standing on a vertically vibrating platform.

Fig.3 과 Fig.4 는 사람이 서 있을 때와 앉아 있을 때 받침대에 대한 신체 각부분의 가속도 진동률의 크기를 나타낸 것으로 3 Hz-6 Hz 범위에서 현저한 공진효과를 나타내고 있으며, 서 있을 때와 앉아 있을 때의 진동절연 효과는 매우 다르다. Fig.3 에서 20 Hz-30 Hz 범위에서는 두번째 공진효과가 발생하며, Fig.4 와 매우 차이가 났다. 발바닥이나 엉덩이에 가해진 진동이 머리에 전달될 때 20 Hz 까지는 5 dB, 30 Hz 까지는 약 10 dB 정도 감쇠한다. 또한 주파수가 증가함에 따라 감쇠도 급격히 커진다. 이는 근육 및 신체의 연부조직에서 고주파 진동이 흡수되기 때문이다.^{(4) (6)}

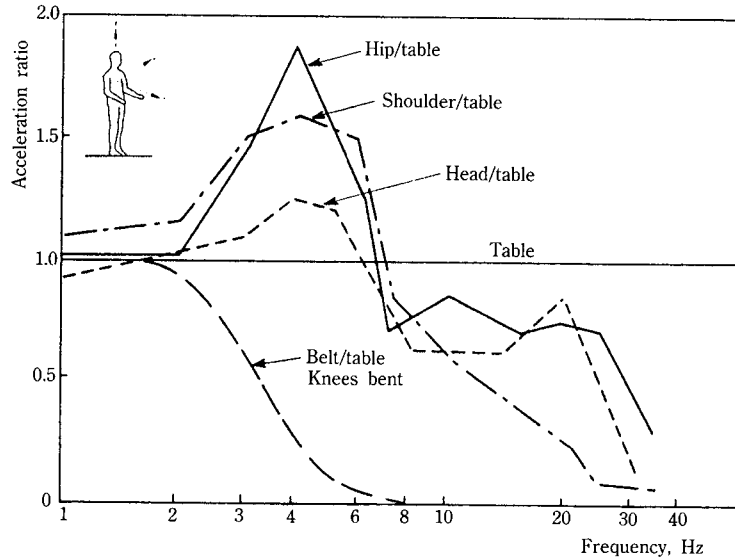


Fig.3 Transmissibility of vertical from table to various parts of the body of a standing human subject as a function of frequency.

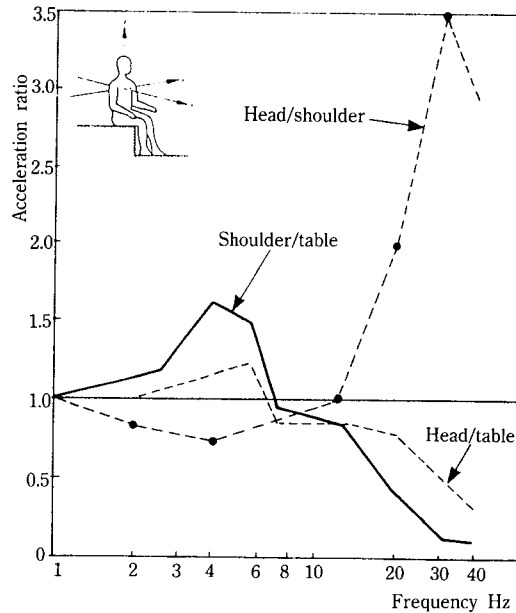


Fig.4 Transmissibility of vertical from table to various parts of a seated human subject as a function of frequency.

Fig.5 와 Fig.6 은 1 Hz-80 Hz 범위의 주파수에 대한 수직과 측면 진동에 대한 진동 임계 곡선을 나타낸 그래프로서, 지시된 축에서 있거나 앉아 있는 사람의 몸통 (torso)에 전달된 진동을 실험하였다. 1 Hz 이하의 주파수에서 진동은 여러형태로 전달되어 발생하고

동통(kinetosis, motion sickness)과 같은 효과를 발생시킨다.⁽⁸⁾ 80 Hz 이상 일때 인체의 감각과 영향은 진동이 전달되는 반응점의 위치와 면적, 옷 그리고 신발에 의한 감쇠에 매우 의존한다.⁽⁹⁾ 이런 외부요소는 크게 80 Hz 이상의 주파수에서 주로 영향을 받는 피부나 표면조직의 응답에 영향을 준다. 또한 그래프에서 피로 감쇠 효율 (fatigue-decreased proficiency)을 나타내는 실효 가속 레벨을 초과할 경우 상당한 피로와 일효율을 감쇠시킨다. 작업 방해의 정도는 작업의 복잡성과 소재에 의존하지만 그래프는 방해에 대한 일반적 범위를 나타낸다.

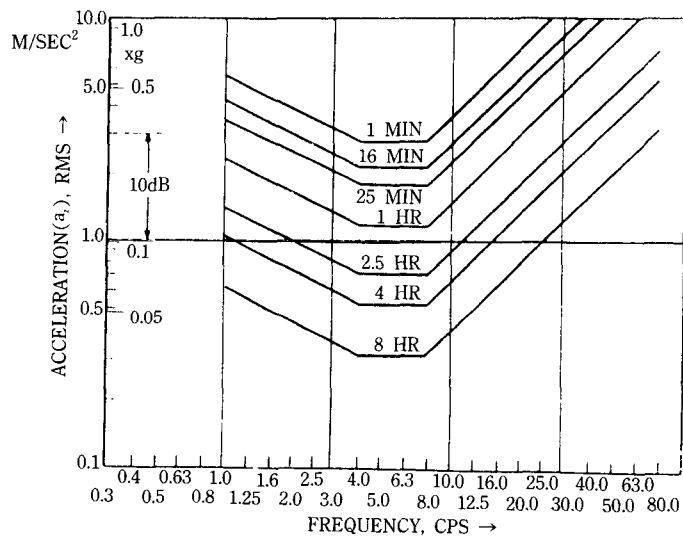


Fig.5 Vertical vibration exposure criteria curves defining equal fatigue-decreased proficiency boundaries.

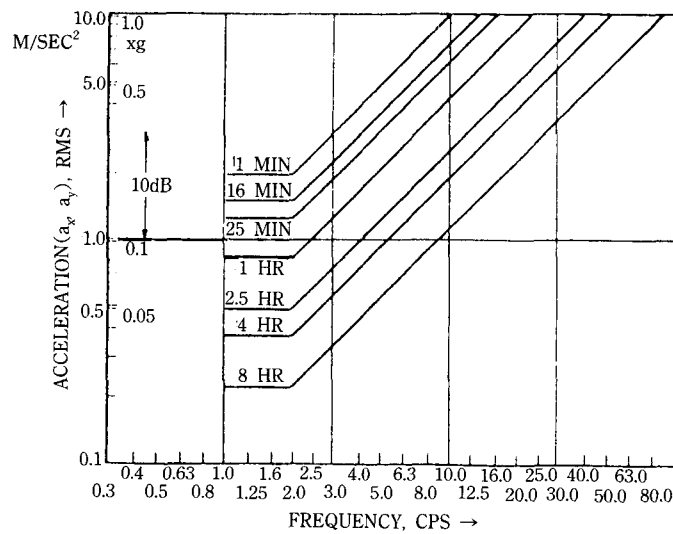


Fig.6 Lateral vibration exposure criteria curves defining equal fatigue-decreased proficiency boundaries.

이 기준은 생체적 혹은 심리적 한계를 양적으로 구분하는 확고한 경계보다는 기준 혹은 경향곡선(trend curve)의 성격을 띄는데, 그것은 노동으로 인한 평균적 스트레스를 받는 보통 사람들에 대한 그래프이다. 좌우 흔들림(yaw), 회전(roll) 그리고 상하 흔들림(pitch)의 회전 중심은 반응점에서 인체까지 떨어져 있으며, 병진운동으로 충분히 근사될 수 있다.⁽¹¹⁾ 그러나 대부분의 현재 연구는 궁극적으로 Fig.5 및 Fig.6 과 비슷한 임계 곡선의 정의에 기준을 둔다.

3. 부분진동(hand-arm vibration)의 전달 특성

부분진동은 손, 머리의 신체의 일부가 진동면과 접촉할 때 발생한다. 여기서 손-팔 진동은 두번째로 인체 전달에서 고려되는 중요한 부분이며, 몸체 진동과는 다르다. 앉아 있거나 서 있는 몸체에 전달된 진동은 동통, 불편함, 일효율의 감소 등을 일으키는 반면에, 진동 레벨과 노출시간이 충분히 크다면 손-팔에 적용된 진동은 부분적으로 신체에 피해를 발생시킨다.⁽⁴⁾

ISO 5349에서 매일 진동에 대한 총 노출은 임의의 주기동안 등가에너지 주파수 보정 가속도(energy-equivalent frequency-weighted acceleration)의 견지에서 표현됐다. 그 방법은 4시간 간격의 등가에너지 값인 $a_{hw}(eq, 4h)$ 를 이용해서 설명된다.

$$a_{hw}(eq, 4h) = \left(\frac{1}{T_{(4)}} \int_{t=0}^{t=T} [a_{hw}(t)]^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서 $T_{(4)}$ 는 14400 s, $a_{hw}(t)$ 는 주파수 보정 가속도(ms^{-2})의 순간값이며, T는 진동 노출이 발생하는 동안 시간의 주기이다. 만약 실효 주파수 보정 가속도가 t_1 시간의 주기 동안 a_{hw1} 이고, t_2 일때 a_{hw2} ... 이라고 가정하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} [a_{hw}(eq, 4h)]^2 \cdot T_{(4)} &= (a_{hw1})^2 t_1 + (a_{hw2})^2 t_2 + \dots + (a_{hwn})^2 t_n \\ a_{hw}(eq, 4h) &= \left(\frac{1}{T_{(4)}} [(a_{hw1})^2 t_1 + (a_{hw2})^2 t_2 + \dots] \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 t 시간동안 일정한 실효 주파수 보정 가속도 a_{hw} 의 한 주기동안의 노출은 다음과 같다.

$$a_{hw}(eq, 4h) = a_{hw} \left[\frac{1}{T_{(4)}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

낮은 진동 주파수(10 Hz)가 손에 전달될 때 진동감각은 몸통, 목, 머리의 윗부분까지 감각을 느끼며, 주파수가 증가하여 100 Hz-150 Hz 일때 진동감각은 팔 아래로 이동하여 주로 손가락에 집중한다. 그리고 150 Hz-200 Hz의 주파수에서는 직접 진동 도구와 접촉한 손과 손가락 부분에 한정된다.⁽³⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾ 흔히 이용되는 진동도구의 진동 레벨은 오랫동안 작동될 때 피해를 일으킬 만큼 충분히 크다. 진동도구를 잡은 손에서 인체에 전달된 진동은 낮은 레벨에서 일효율의 감소를 일으킨다. 보다 높은 레벨과 노출 시간이 길 때 혈관, 관절 그리고 순환계에 영향을 끼치는 질병이 생기며, 손가락 혹은 손에 점진적인 순환의 불규칙을 유도한다. 심한 경우에 이것은 영구한 피해를 유도한다. 현재 과도한 진동에 의한 질병의

문제를 의학과 공학 연구자에 의해 광범위하게 조사되고 있으며, ISO(5349)에서 실제 측정된 진동노출의 피해 위험을 수록하고 있다. Fig.7의 (a)는 손과 손목의 뼈의 구조도이며, (b)는 8 HZ 에서 1 KHZ 주파수 범위에 대한 기준 레벨이다.⁽²⁾⁽⁴⁾

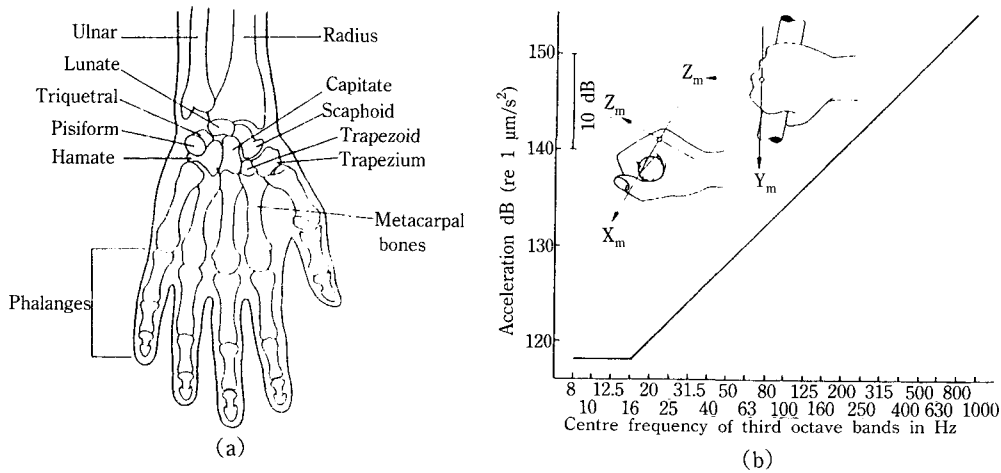


Fig.7 (a) Bones of the hand and wrist
(b) Exposure guidelines for vibration transmitted to the hand.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 공해진동 요소가 인체의 각 부위에 미치는 영향을 크게 전신진동(whole body vibration) 과 부분진동(hand-arm vibration)으로 나누어 주파수의 변화에 따른 응답의 크기를 조사하였다.

1) 몸 전체의 진동은 앉아 있을 때와 서 있을 때 신체 각부의 가속도 진동률의 크기는 3-6 Hz 범위에서 현저한 공진효과를 나타내고 있으며, 서 있을 때와 앉아 있을 때의 진동절연 효과는 매우 달랐다. 20 Hz-30 Hz 범위에서 두번째 공진효과가 발생하며 앉아 있을 때와 매우 큰 차이가 났다.

2) 근육 및 신체의 연부조직에서 고주파 진동이 흡수되기 때문에 발바닥이나 엉덩이에 가해진 진동이 머리에 전달되는 것은 20 Hz 까지는 5 dB, 30 Hz 까지는 약 10 dB 정도 감소한다. 또한 주파수가 증가함에 따라 감소도 급격히 커진다.

3) 낮은 진동 주파수인 10 Hz로 손에 전달되어 온 진동감각은 몸통, 목, 머리의 윗부분까지 감각을 느끼며, 주파수가 증가하여 100 Hz-150 Hz 일때 진동감각은 팔 아래로 이동하여 주로 손가락에 집중한다. 그리고 150 Hz-200 Hz 의 주파수에서는 직접 진동 도구와 접촉한 손과 손가락 부분에 한정된다.

참고문헌

1. M.J.Griffin, "Handbook of human vibration", Academic Press (1990)
2. Jens Trampe Broch, "Mechanical vibration and shock measurements", B&K(1984)
3. M.A.Schmize and A.K.Simons, "Man's response to low-frequency vibration", ASME, 59(A200) (1959)
4. Reynolds.D.D, "Hand-arm vibration parts I, II, and III", J.Sound Vib., 2, 237-282 (1977)
5. "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration", ISO 2631-1974(E), (1974)
6. C.R.O.Briant and A.I.King, "Visual acuity decrements associated with whole-body $\pm g_z$ vibration stress", Aerospace Medicine, 41, 79-82 (1970)
7. 정일록, "소음, 진동학", 신평출판사 (1989)
8. C.F.Abram, "A study of the transmission of high frequency vibration in the human arm", M.S. Thesis, North Calolina State University (1968)
9. D.D.Reynolds, "Vibration interaction of the human-arm system with vibrating power tools(especially chain saws)", Ph.D.Disertation Pursude university (1972)
10. Bystrom.G., Nilsson.A and Olsson.E, "Development of artificial hands for use in chain saw vibration measurement", J.Sound Vib., 82, 111-117 (1982)
11. Fairley.T.E and Griffin.M.J, "Predicting the discomfort caused by simultaneous vertical and fore-and-aft whole-body vibration", J.Sound Vib., 124, 141-156 (1988)
12. Mcleod.R.W and Griffin.M.J, "A review of the effects of whole-body translational vibration on continuous manual control performance", J.Sound Vib., 133, 55-115 (1989a)

Response Characteristics of Human by Whole-body Vibration and Hand-arm Vibration

Ho-Gyeong Chang
Department of physics, Kyungsan University

Abstract

In this paper, the vibration response characteristics of individual's subjective are studied to whole-body and hand-arm induced vibration. For defining limits of vibration exposure to human, experimental data are investigated in a set of vibration criteria specified in ISO Standard 2631. Instrumentation requirements for evaluation of the responses of humans to vibration according to these criteria are described.