

전신진동이 인간성능에 미치는 영향

(Effects of Whole-body Vibration on Human Performance)

이남식[○], 박세진, 김철중*

(Nahm-Sik Lee, Se-Jin Park, Chul-Jung Kim)

ABSTRACT

This paper reviews the previous researches related to the effects of whole-body vibration on human performance. The physiological effects of vibration were reviewed in the first part, and the effects of vibration on vision and manual control performance were discussed. The relationships between vibration and ride quality were also discussed. ISO-2631 was briefly reviewed, and cautions and limitations were discussed to avoid misinterpretations when we accommodate Korean population to this standard. Further researches were recommended to get better understanding of response characteristics of Korean to whole-body vibration.

1. 서론

차량, 선박, 또는 항공기와 같은 운송수단에서는 지면, 파도, 기류와의 접촉으로 인하여 진동이 반드시 수반된다. 특히 육상운송수단에 있어서는 도로의 여건, 운전속도, 차체 및 좌석의 완충장치등의 여건에 따라 인체에 전달되는 진동의 효과는 각기 달라질 수 있다. 인체의 각 부위는 Fig. 1[1]과 같이 고유한 공진주파수(natural frequency)를 가지고 있어 인체에 전달되는 진동의 주파수 특성에 따라 민감도가 다르다. 특히 4~8 Hz 대역에서 가장 민감하기 때문에 차량을 설계할 때에는 되도록 인체가 민감히 반응하는 주파수대역을 피할 수 있도록 완충장치를 설계하는 것이 바람직하다.

인간이 진동을 감지할 수 있는 역치(threshold)는 Fig. 2에서의 여러 진동축에 대하여 대개 0.01 m/sec²rms 정도이다[2]. 이러한 역치 이상에서 인간이 주관적으로 느끼는 진동의 강도는 입력진동의 크기에

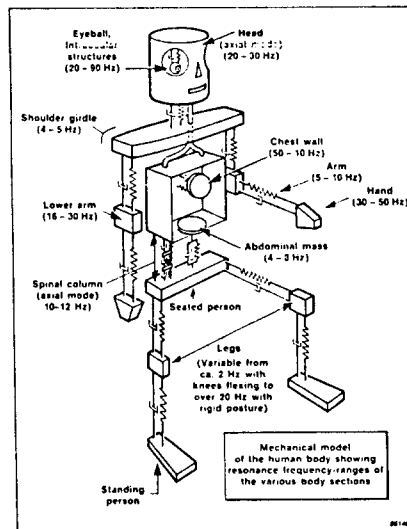


Fig. 1. Mechanical model of the human body showing resonance frequency-ranges of the various body sections.

* 한국표준연구소 인간공학연구소

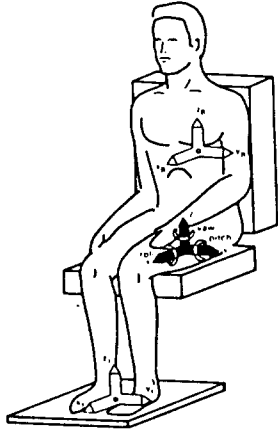


Fig. 2. Vibration axes of a seated person.

지수적으로 비례한다(Stevens power law)[3,4]. 높은 수준의 진동(vibration)이나 또는 충격(shock)에 지속적으로 또는 반복적으로 신체의 부분이나 전체가 노출될때 생체조직의 손상이 있을수 있으며, 일시적으로는 건강에 영향을 주지 않는 수준이라도 임무수행능력을 저하시키거나 불쾌감을 유발하여 작업능률을 저하시킬 수도 있다. 그러나 이러한 진동의 효과에 영향을 미치는 인자(진동주파수, 진동의 방향, 지속시간, 접촉부위, 개인차 등)가 다양하므로, 이제까지의 연구들이 충분히 모든 공급증을 풀어주기에는 미흡함이 많다고 할수 있다. 본 논문에서는 전신진동이 인체에 미치는 영향, 즉 작업자의 안전이나 작업성능에 관한 이제까지의 연구들과 관련 국제표준을 살펴봄으로써, 앞으로의 차량설계에 있어 진동문제외 중요성을 부각시키며 아울러 한국인의 진동특성에 대한 연구의 필요성을 인식시키고자 한다.

2. 전신진동의 인체생리학적 영향

미국의 NIOSH에서 시외버스, 장거리 화물운송트럭 및 중장비 운전자들을 대상으로한 건강에 관한 조사에 의하면, 1448명의 시외버스 운전자의 경우 대조군인

일반 사무직에 비하여 현저히 높은 비율의 순환기, 소화기 질환 및 요통을 나타냈으며, 작업자세, 식사습관, 전신진동이 그 주요원인이라고 지적 되었다 [5]. 3205명의 장거리화물 운송트럭 운전자의 경우에 있어서도 항공관계사와 비교하여 척추의 변형, 요통, 치질등이 현저하게 많이 발견되었으며[6], 중장비 운전자의 경우 생식기질환, 협심증, 또는 내분비이상인 비만증이 전신진동의 영향으로 발생된다고 보고하였다[7,8]. 헬리콥터조종사의 경우 요통이 매우 빈번히 보고되고 있는데 이는 헬리콥터의 진동에 장시간 노출되는 것과 관계가 있다고 보고 되고 있다 [9,10]. Kelsey[11,12]에 의하면 장거리 트럭운전자의 경우 추간판(디스크) 질환의 확률이 세배나 높은 것으로 보고되었다.

Guignard와 King[13]은 전신진동의 생리학적 영향을 다음과 같이 분류하였다.

(a) 근육활동 및 자세유지에 미치는 영향

1-30 Hz 범위에서의 전신진동은 자세유지의 부담을 증가시킨다. 또한 10-200 Hz 대역의 진동하에서는 근육의 반사(jerk reflex) 기능이 저하된다.

(b) 순환기계통에 미치는 영향

20 Hz 미만의 진동에 노출될때 심박수가 증가하는 경향이 있으며 국소진동에서와는 달리 말초혈관 수축 반응은 영향을 받지 않는다.

(c) 심폐기능에 미치는 영향

전신진동은 인체가 외부자극에 대하여 경계하도록 하므로 산소소비량을 증가시키며, 폐환기(pulmonary ventilation) 및 호흡수를 증가 시키며, 1-10 Hz, 4.9 m/sec²(0.5G)rms 이상에서는 과도호흡(hyperventilation)이 발생한다. 이와같은 현상은 횡경막의 운동이 공진현상에 의해 증폭되며, 호흡과 관련된 체성감관(proprioceptors)이 진동때문에 불필요한 반사를 나타내기 때문인 것으로 알려져 있다.

(d) 대사 및 내분비계에 대한 영향

인체에 가해지는 다른 스트레스와 마찬가지로의 반응

물질이 혈액 및 뇨의 생화학적 검사에서 검출되었다.

(e) 중추신경계에 대한 영향

특히 동유럽의 연구자들은 진동이 중추신경계를 피로하게 하며 소화불량, 구토, 시력저하등을 유발한다고 보고하고 있다.

(f) 소화기에 대한 영향

NINSH와 미공군항공의학연구소의 동물실험에서 12 Hz, 14.7 m/sec²의 진동을 매일 5시간씩, 주당 5일간, 130시간에 걸쳐 가한결과 대조군(무진동)에서는 전혀 발견할 수 없었던 소화기내의 다량의 출혈현상이 모든실험동물에서 확인되었다. 비슷한 연구결과가 다른실험자에 의해서도 확인되었다.

(g) 멀미(motion-thickness)

저주파 (0.63 Hz 이하)의 수직방향 (Z축)의 진동은 멀미를 유발한다. 특히 0.1~0.3 Hz의 경우 1 m/sec² (0.1G)rms 정도의 낮은 진동수준에서도 10 % 정도가 구토를 일으킬 수 있다. 여성이나 나이가 어릴수록 민감하며 전정기관에 영향을 미침으로써 발생된다.

이상에서와 같이 전신진동의 외학적 또는 역학적(epidemiological)인 현상이 완전하게 밝혀진 것은 아니나 인체의 건강에 부정적인 효과를 주는 것임을 확실히 알려주고 있다. 그러나 현재의 결과만을 가지고는 인간의 진동에 대한 내구력을 정확히 예측하기는 어렵다고 할 수 있다.

3. 시성능과 수동제어에 미치는 영향

소음, 조명, 또는 열환경과 더불어 기계적 진동은 인간의 작업성능을 저하시키는 스트레스의 요인으로 인식되어 왔으며 전신진동하에서 작업성능이 변화하는데 대한 많은 연구가 진행되었다. 특히 차탕이나 항공기 내부에서의 인간의 작업특성은 운전이 필요한 정보를 계기로 부터 판독하고(시성능: vision) 핸들이나 조종간을 통하여 목표한 방향으로 조종해 나가는

것(수동제어: manual control)이다. 따라서 전신진동이 시성능과 수동제어 성능에 미치는 영향은 차탕설계에 필요한 기본적인 정보를 제공해 줄수 있다.

전신진동은 진동의 강도에 비례하여 시성능을 저하시키며 특히 10~25 Hz 대역에서 민감하게 저하된다(Fig.3)[14,15]. 그러나 근접한 계기를 판독할 때는 3~4 Hz 이하에서는 계기만 진동하는가 또는 인체와 계기가 동시에 진동하느냐에 따라 진동효과가 다르게 나타나며(계기만 진동하는 쪽이 판독오차가 훨씬 크다)[16], 15 Hz 이상에서는 어느쪽이 흔들리는가에 무관하게 1.6 m/sec²에서 35%, 2.5 m/sec²에서 50% 이상 판독오차가 증가하였다[17].

이외에도 진동하에서의 시성능에 영향을 미치는 요인들은 Table 1과 같이 정리될 수 있다.

수동제어에 대한 연구는 주로 연속추적작업(continuous tracking)을 중심으로 이루어졌다. 대체로 3~8 Hz의 낮은 주파수대역에서의 전신진동에서 추적작업성능이 저하되며(Fig. 4) 이때 수동제어시스템의 제어계수(control order)에 따라 진동의 효과가 다르게 나타난다. 즉 속도제어(1st order)는 위치제어(zero order) 시스템에 비하여 진동의 직접적 영향은 덜 받으나 교차의 제어시스템으로 갈수록 진동의 간접적 영향(진동으로 인한 판단, 인식능력의 저하등)은 더 받는다[23,24]. 또한 전신진동은 수동제어에 있어

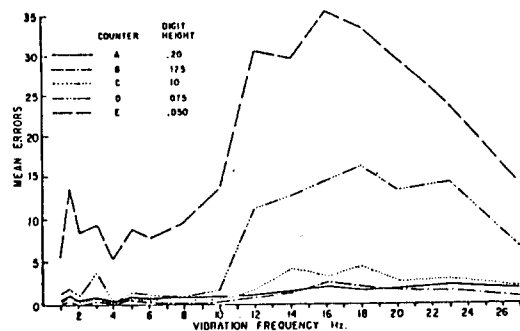


Fig. 3. Counter reading errors as a function of vibration frequency and digit size.

Table 1. Factors affecting visual performance during vibration

요 인	시성능에 미치는 영향
진동전달부위	• 시성능은 전신진동탕중 머리와 눈에 전달되는 진동탕에 따라 저하된다[17].
시거리	• 시거리가 멀어짐에 따라 상하 또는 좌우진동(translational vibration)에 의한 시성능 저하는 감소된다[17,18] • 회전진동(rotational vibration)의 경우에는 시거리와는 무관하게 저하된다[18].
글자의 크기	• 글자의 높이를 최적치보다 줄일 경우에는(10 minarc 보다 작은 글자를 사용할 경우) 판독오차가 크게 증가한다[19]
글자모양	• 7x9 dot 문자가 5x7 dot 문자보다 현저히 잘 판독된다[20]
대비(contrast)	• 글자와 배경사이의 대비가 크면 오히려 진동하에서의 시성능이 저하된다[20].
진동파형	• sine파의 진동이 복합주파수의 진동보다 시성능을 더욱 크게 저하시킨다[17,21].
진동속	• 두속이 동시에 진동되어 회전진동이 발생되면 시성능이 더욱 저하된다[21].

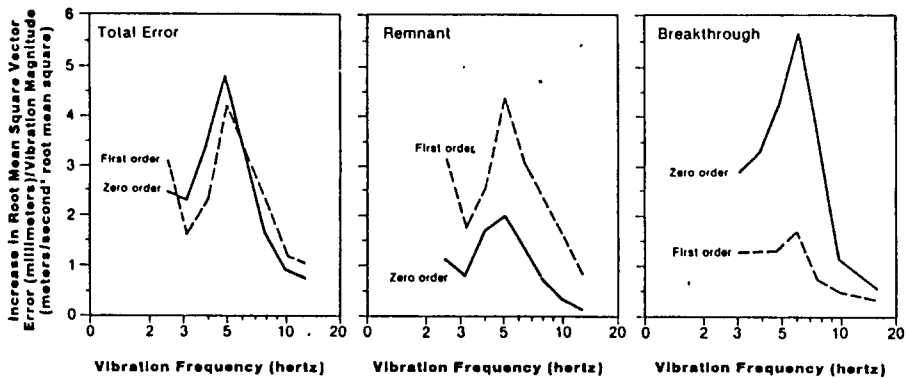


Fig. 4. Increase in root mean square tracking error/vibration acceleration level observed during z-axis whole-body vibration.

잔류효과(residual effect)를 보인다[35]. 즉 진동이 멈춘후에서 상당기간 추적오차가 그대로 남아 있다. 전신진동의 영향을 줄이기 위하여 조이스틱 대신 측면조종간과 팔지지대(side stick & arm rest)를 사용한 경우 50% 이상의 추적오차를 향상시킨 경우도 있다[22]. 일반적으로 전신진동하에서 수동제어능력에 영향을 미치는 요인들은 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

그러나 대개 이러한 연구들이 매우 제한적인 상황에서 이루어졌다는 점에 유의하여 한다. 주로 실험실에서 건강한 남자 피실험자들을 위주로 대부분 단순주파수의 수직진동으로, 실험하였으므로 대체적인 인간의 반응 특성을 알 수는 있으나 복합주파수에 의한 진동, 다축진동 등 보다 현실에 근접된 상황에 대해서는 앞으로 더 많은 연구가 이루어져야 하겠다.

Table 2. Factors affecting manual control during vibration

요 인	수동제어 능력에 미치는 영향
조종민감도	• 진동하에서는 조종민감도(control gain)를 낮추는 것이 제어오차를 줄일 수 있다[25].
조종장치와 종류	• 동력성조종장치(isometric control)의 경우 5 Hz 이상에서의 진동영향이 크게 나타나는 점에서 조이스틱(joystick)과 다르다[24].
진동이 전달되는 부위	• 조종장치를 사용하는 팔이나 다리에 얼마나 진동이 전달되는가에 따라 진동에 의한 성능감소가 결정된다[25].

4. 전신진동과 주관적 반응

전신진동에 대한 대표적인 주관적 반응은 불편함(uncomfort)이다. 불편함의 정도는 진동의 강도 및 주파수에 따라 변화하는데 주관적으로 동일하게 느끼는 불편감을 유발하는 진동수준을 주파수 별로 연결하면 동안탁도곡선(equal-comfort contours)을 얻을 수 있다. Fig. 5는 NASA에서 2,200명을 대상으로 조사한 동안탁도 곡선이다[26]. 객관적인 측정을 위하여 50%의 피험자가 불편함을 느끼기 시작하는 수준을 1DISC라 정의하고 이보다 2배인 강도를 2DISC 하였다. 우선은 하나의 축에 대한 sine 파형의 진동에 대한 연구로 시작하여 다축진동으로 확장하였으며 실제로 여객기의 탑승감을 평가하는데 적용시키기 위해서는 실내소음 및 진동노출 시간에 대한 보정이 필요하였다. Griffin 등 [27]은 다축진동과 승차감의 관계를 정립하기 위한 연구를 통하여 Fig. 6과 같은 동안탁 곡선을 X축과 Y축에 대하여서도 제시하였으며, Parson과 Griffin [28]은 자동차의 승차감을 평가하기 위하여 Fig. 7과 같은 평가모형을 제시 하였으며 각 진동축에서 입력되는 진동을 가중하는 방법들을 주관적 평가와 비교한 결과 각축의 입력진동의 rms(root mean square)가 가장 좋은 방법이라는 결과를 얻었다. 그러나 주관적 반응의 측정에서 염두에 두어야 할 사항은 실제에 있어 탑승자의 심리적으로인 (기대 또는 경험)이 민감하게 영향을 미칠 수 있다는 점이다[29].

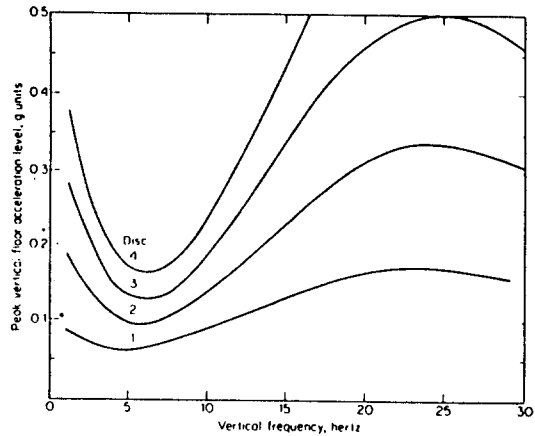


Fig. 5. Equal-discomfort curves for seated subjects experiencing sinusoidal vertical vibration.

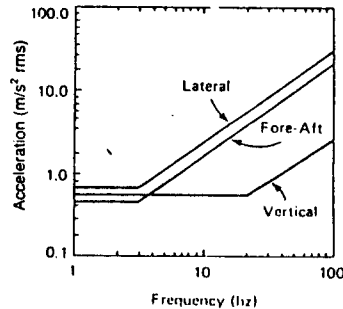


Fig. 6. Simplified equal-comfort contours for fore-aft, lateral, and vertical vibration applied to the seat pan of a hard seat

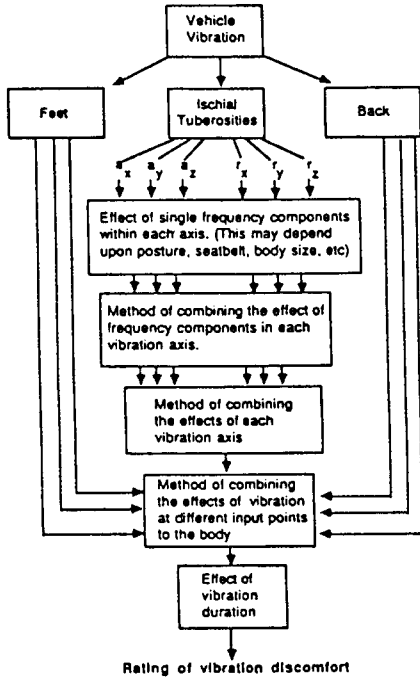


Fig. 7. Model of vibration discomfort prediction.

5. 전신진동에 관한 노출한계 - ISO 2631 [30]

국제표준기구 (ISO) 에서는 1964년 부터 10년간의 노력 끝에 1974년에 ISO 2631-Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration을 전신진동에 관련된 국제표준으로 내어 놓게 되었다. 이 표준은 진동으로 인한 피로에 의하여 작업성능이 저하되는 수준(FDP: fatigue decreased proficiency), 안락감이 저하되는 수준(RC: reduced comfort), 및 노출한계 수준(EL: exposure limit)의 전신진동을 주파수 (1~80 Hz)와 노출지속시간(1 min~24 h)별로 규정하고 있다. (Fig. 8)

ISO 2631의 특징은 각 주파수에 대한 인체의 민감도를

* Exposure limit는 통증을 느끼는 역치 (pain + threshold)의 절반수준 (50% level) 이라고 ISO 2631에 정의되어 있다.

고려하여 Z방향의 상하진동의 경우에는 4~8 Hz 영역이 가장 민감한 U형로 되어 있으며 노출지속시간이나 FDP, RC 또는 EL 수준에 무관하게 동일한 모양을 가지고 있다. 또한 FDP, RC, EL 사이의 관계는 RC는 FDP 수준보다 10 dB (또는 3.15배) 낮으며, EL은 FDP보다 6 dB (2.1배) 높은 진동수준이다.

다축진동일 경우에는 다음과 같은 vector sum을 대응치로 사용한다.

$$a = \sqrt{1.4 a_x^2 + 1.4 a_y^2 + a_z^2}$$

미국에서는 NIOSH에서 FDP 수준에서 여러가지 시험을 거쳐[31] ISO의 FDP 수준은 작업수행이나 생리적인 현상에 영향을 미치지 않는다는 결론을 내려 1979년에 ISO 2631을 그대로 ANSI(s3.18-1979)와 ASA 38-1979로 채택 하였다.

그러나 다음과 같은 이유에서 많은 반론 역시 제기되고 있다 [32,33].

- (1) RC, FDP에 대한 1시간 이내의 노출수준이 너무 높게 규정되어 있다.
- (2) 개인차(신체의 크기, 피로수준 등)가 전혀 고려되어 있지 않다.
- (3) 각각의 진동축에 대한 진동효과가 단순히 선형 결합으로 나타내어 진다고 가정하였다.

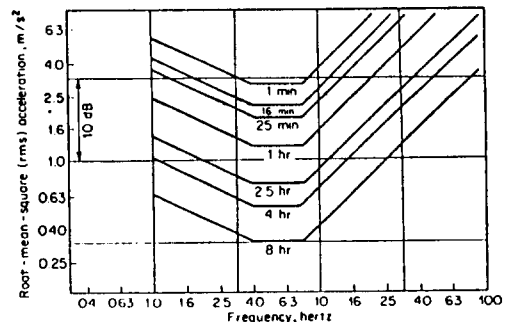


Fig. 8. The fatigue-decreased proficiency boundary for vertical vibration contained in ISO 2631.

- (4) 안락, 작업성능, 작업안전 수준에 대하여 동일한 형태의 주파수 가중치를 사용한다.
- (5) 노출시간 - 진동강도 사이에 상충효과 (trade-off)를 뒷받침 할 만한 실험적인 근거가 미흡하다.

따라서 ISO-2631이 가지고 있는 전체적인 흐름은 올바른 방향으로 진행된다고 볼 수 있으나 아직도 많은 보완과 개선이 요구된다고 하겠다.

6. 토의 및 결론

이상을 통하여 살펴본 바와 같이 많은 연구에도 불구하고 전진진동이 인체에 미치는 영향에 관련된 인자가 매우 많은 관계로 아직 불투명한 부분들이 많이 남아 있다. 특히 전진진동의 노출한계에 관한 기준은 전반적으로 ISO-2631에 의존하고 있다. 그러나 이러한 표준이 서구인을 대상으로 만들어 졌으며, 개인차를 고려하고 있지 못함으로 한국인에게 이를 적용하기 위해서는 적합성 검토가 필요하다고 본다. Griffin [34]은 피험자의 신체크기와 주관적으로 느끼는 진동의 크기사이에는 상관관계가 있으며 수직진동의 경우 저주파영역에서는 몸집이 큰 사람이 작은 사람보다 덜 민감하다. 높은 주파수에서는 오히려 더욱 민감하다는 결론을 얻었다. 따라서 한국인을 대상으로 동안락도 곡선을 구해본다면 ISO-2631의 주파수 가중치를 그대로 받아들일 것인가 또는 보정하여 사용할 것인가를 결정할 수 있을 것으로 본다. 또 특수차량의 경우에는 crest factor가 큰 (충격이 많이 포함된) 진동패턴을 보이는데 이런 경우에는 ISO-2631을 그대로 사용할 수 없으며 이러한 차량들이 발생시키는 진동성분을 잘 분석하여 이에 대한 적절한 해결책유 찾도록 하는 것이 바람직하다.

REFERENCES

1. Rasmussen, G., Human body vibration exposure and its measurement, Technical Review, Bruel & Kjaer, 1, 1982, 3-31.

2. Gundry, A.J., Thresholds of perception for periodic linear motion, Aviation, Space and Env. Med., 1978, 49, 679-686.

3. Fothergill, L.C., and Griffin, M.J., The subjective magnitude of whole-body vibration, Ergonomics, 1977, 20, 531-533.

4. Shoenberger, R.W., and Harris, C.S. Psychophysical assessment of whole-body vibration, Human Factors, 1971, 13, 41-50.

5. Gruber, G.J., Relationship between whole-body vibration and morbidity patterns among interstate truck drivers, U.S. DHEW/NIOSH Public. No. 77-167, 1976.

6. Gruber, G.J. and Ziperman, H.H., Relationship between whole-body vibration and morbidity patterns among motor coach operators, U.S. DHEW/NIOSH Public. No. 75-104, 1974.

7. Milby, T.H. and Spear, R.C., Relationship between whole-body vibration and morbidity patterns among heavy equipment operators, U.S. DHEW/NIOSH Public. No. 74-131, 1974.

8. Spear, R.C., et al., Morbidity patterns among heavy equipment operators exposed to whole-body vibration: Follow-up to a 1974 study, U.S. DHEW/NIOSH Public. No. 77-120, 1976.

9. Seris, H. and Auffret, R., Measurement of low frequency vibration in big helicopters and their transmission to the pilot, NASA Technical Translation Report NASA-TTF-471, 1967.

10. Shanahan, D.F. and Reading, T.E., Helicopter pilot back pain: A preliminary study, Aviation Space and Envir. Medicine, 1984, 55, 117-121.

11. Kelsey, J.L., An epidemiological study of the relationship between occupations and acute herniated lumbar intervertebral discs, Int. J. Epid., 1975, 4, 197-205.

12. Kelsey, J.L. and Hardy, R.J., Driving of motor vehicles as a risk factor for acute herniated intervertebral discs, Amer. J. Epid., 1975, 102, 63-73.

13. Guignard, J.C. and King, P.F., Aeromedical aspects of vibration and noise, AGARDograph No. 17, NATO, Technical Editing and Reproduction Ltd, Charlotte St. London, 1972.

14. Teare, R.J. and Parks, D.L., Visual performance during whole-body vibration (D3-3512) Seattle, Wash., Boeing Corp., 1963.

15. Grether, W.F., Vibration and human performance, Human Factors, 1971, 13(3), 203-216.

16. Moseley, M.J., and Griffin, M.J., Effects of display vibration and whole-body vibration on visual performance, Ergonomics, 1986, 29, 977-983.

17. Lewis, C.H., and Griffin, M.J., Predicting the effects of vertical vibration frequency, combinations of frequencies and viewing distance on reading of numeric displays, Journal of Sound and Vibration, 1980, 70, 355-377.

18. Wilson, R.V., Display collimation under whole-body vibration, Human Factors, 1974, 16, 186-195.

19. Lewis, C.H., and Griffin, M.J., The effect of character size on the legibility of a numeric display during vertical whole-body vibration, J. of Sound and Vibration, 1979, 67, 562-565.

20. Moseley, M.J. and Griffin, M.J., A design guide for visual displays and manual control in

- vibration environment, The Univ. of Southampton, 1986.
21. Lewis, C.H., and Griffin, M.J., Predicting the effects of vibration frequency and axis and seating condition on the reading of numeric displays, *Ergonomics*, 1980, 23, 485-507.
 22. Griffin, M.J., and Lewis, C.H. A review of the effects of vibration on visual acuity and continuous manual control, Part II: Continuous manual control, *J. of Sound and Vibration*, 1978, 56, 415-457.
 23. Lewis, C.H., and Griffin, M.J., Predicting the effects of dual frequency vertical vibration on continuous manual control performance, *Ergonomics*, 1978, 21, 637-650.
 24. Lewis, C.H., and Griffin, M.J., Mechanisms of the effects of vibration frequency, level and duration on continuous manual control performance, *Ergonomics*, 1979, 22, 855-889.
 25. Griffin, M.J., and Lewis, C.H., A review of the effects of vibration on visual acuity and continuous manual control, Part I: Visual acuity, *J. of sound and Vibration*, 1978, 56, 383-413
 26. Leather wood, et al., A design tool for estimating passenger ride discomfort within complex ride environments, *Human Factors*, 1980, 22, 291-312
 27. Griffin, M.J., Whiteham, E.M., and Parsons, K.C., Vibration and comfort I: Traslational seat vibration, *Ergonomics*, 1982, 26, 603-630
 28. Parsons, K.C., and Griffin, M.J., Methods for predicting passenger vibration discomfort, SAE Paper 831029, 1983.
 29. Richards Land Jacobson, I. Ride quality assessment IV, *Ergonomics*, 1977, 20, 499-519.
 30. International Organization for Standardization, Guide for the evaluatun of human exposure to whole-body vibration (ISO-2631), 1985, Geneva, ISO.
 31. Guignard, J.C. et al., Experimental Evaluation of International Standard (ISO 2631) for whole-body vibration exposure, Univ. of Dayton, UDRI-TR-76-79, 1976.
 32. Sadover, J., A standard on human response to vibration-One of a new breed? *Applied Ergonomics*, 1979, 10, 33-37.
 33. Osborne, D., whole-body vibration and international standard ISO 2631: A critique, *Human Factors*, 1983. 25, 55-69.
 34. Griffin, M.J. and whitham, E.M., Vibration and comfort: I. Translational seat vibration, *Ergonomics*, 1982, 25(7), 603-630.
 35. Hornick, kR., Vibration in Bioastronautics data book (2nd Ed), NASA, 1973.