

전신 피폭 진동의 인체 영향 측정 및 평가 방안

°정 완섭*, 박 용화*, 은 희준*

* 음향진동 그룹 (한국표준과학연구원)

Measurement and Assessment Methods of Vibration Exposed to Whole-body and Its Effects

°Wan-Sup Cheung*, Yong-Hwa Park*, Hee-Joon Eun*

Key words: Human vibration(인체 진동), Whole-body Vibration(전신 진동), Vibration & Shock Exposure (진동 및 충격 피폭),

ABSTRACT

This paper introduces the brief guidelines on general aspects of tests and experiments with human subjects. Detailed methods for measuring whole-body vibration are reviewed for those tests and experiments and compared each other. Such comparison is found to be very useful in choosing adequate methods for human related tests and experiments. Of course, it is also expected to be very meaningful to our automotive research and industrial fields that are critical to the ride quality of their products with uncomfortable acoustic noise and vibration.

1. 서론

인간을 대상으로 하는 진동 실험은 인체 진동 피폭을 수반할 뿐 아니라 가진기의 비정상 작동, 실험자의 조작 미숙 등에 의한 피 실험자의 건강 손실 위험성을 내포한다. 인체 실험에 수반되는 장비의 안전 조치, 전반적 실험 전후 단계 절차, 그리고 피 실험자의 동의, 실험 조건에 대한 안전성 확보 방안 등에 대한 지침을 ISO 13090-1: 1998(E)안은 제시하고 있다. 본 연구팀은 1999년 7월 영국 ISVR의 Human Factors Research Group에서 현재 시행하고 있는 방안¹⁾과 ISO 13090-1: 1998(E)안을 각각 비교 검토하여 효율적 방안을 구축한 뒤 이를 사용하고 있다. 특히, 본 논문은 인체 진동 실험의 안전성에 대한 국내 연구진과 현장 실무자들의 이해 및 경험 부족에서 발생할 수 있는 위험요소의 최소화를 위하여, 관련 종사자들의 ISO 13090-1: 1998(E)안에 대한 교육과 그리고 실험 참여자는 반드시 ISO 13090-1: 1998(E)안을 준수해야 됨을 다시금 강조한다.

2. 인체 진동 측정 좌표 계

인체 진동 측정 시 목적에 따라 원하는 진동측정 점을 선정하게 된다. ISO 8727: 1997(E)안은 인체 진동 측정을 위한 생체 역학적 좌표 계 (Biodynamic coordinate system)을 제안하고 있다. Fig 1은

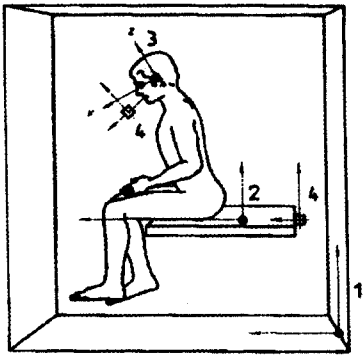


Fig. 1 Biodynamic coordinate system

각각의 방향으로 정의한다. 물론, 실험 시 이들 측정 좌표축에 따라 진동 측정을 수행한다.

생체 역학적 좌표 계의 예를 보이고 있으며, Fig 1의 숫자 “1”은 기준 (정지 혹은 이동) 좌표, 숫자 “2”는 진동 테이블과 같은 인체 접촉부 좌표 (Basicentric coordinate), 숫자 “3”은 인체 해부학적 좌표 (Anatomical coordinate), 그리고 “4”는 머리 및 의자와 같이 진동센서가 장착된 측정 좌표계 (Instrument coordinate)를 각각 나타내고 있다. 이러한 좌표 계에서 x-축은 앞뒤 방향, y-축은 좌우 방향, z-축은 상하 방향, roll은 x-축의 회전 방향, pitch는 y-축의 회전 방향, yaw는 z-축의 회전 방향을 각각 정의한다. 물론 양의 “+”-방향은 오른손 직각 좌표에 따라 세 손가락이 지시하는

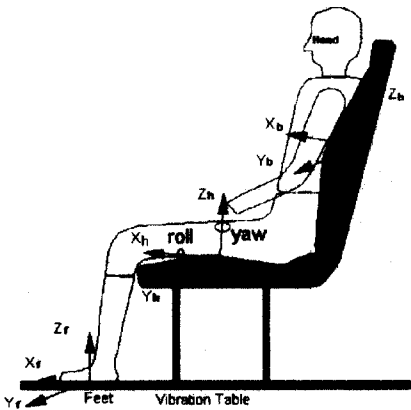


Fig. 2. 12-axis measurement system for whole-body vibration

전신진동(whole-body vibration)이란 인체와 기계 진동 요소가 접촉하는 발, 엉덩이, 등 부위에서의 전달 진동을 의미하며, Fig. 2은 가장 일반적으로 사용되는 12-축 진동 측정 축 좌표를 보이고 있다. 12축 측정 좌표는 발 3축, 엉덩이 6축 (병진 3축, 회전 3 축), 그리고 등 부위 3축으로 구성되어 있으며, 이는 영국 ISVR에서 고안된 방법^[2]이다. 현재 ISO 2631: 1997(E)와 BS 6841:1987의 표준 안에서 채택하고 있으며, 응용 분야로는 자동차, 항공, 그리고 국방관련 운송 체계의 인체진동에 측정 및 평가에 가장 널리 이용되고 있다. 특히, 국내 자동차, 타이어, 현가 장치, 의자 등의 진동 승차감 연구에 큰 활용도^[3]가 기대된다.

3. 전신 진동 측정 장치 및 방법

앞서 소개한 바와 같이 전신 진동은 많은 응용 분야를 포함하고 있다. ISO 표준안이 구축된 분야로는 인체의 진동 전달특성 실험, 농기계 및 산업용 중장비용 의자 진동 전달특성 실험, 그리고 도로 및 철도 등의 운송 차량의 인체 피폭 진동 측정 및 평가 부분이 있다. 우선 인체와 기계가 직접 접촉하는 부위 (발, 엉덩이, 등 부위로 구성, Fig. 2 참고)로 전달되는 인체 진동 측정 및 평가를 살펴보자. ISO 2631-1: 1997 (E)는 전신진동의 측정 및 평가 방법에 대한 일반론을 제시하고 있으며, 진동의 인체 영향을 피폭되는 진동의 양에 따라 안락도 한계 (Comfort limit), 활동성 및 작업 효율성 한계 (Activity and working proficiency limit), 그리고 보건 및 안전 한계 (Limit for health and safety)로 구분한다.

가전 제품, 철도 차량 및 승용차 등의 진동은 직접 제품의 품질 즉 진동 안락도에 관련된다. 특히, 국내 자동차 업계의 승차감 개선^[6-10]을 위한 연구 분야가 이러한 범주에 속한다. 그리고, 숙련된

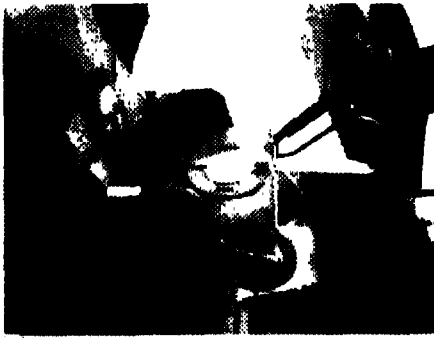


Fig. 3. Whole-body vibration measurement

피폭진동 측정 장치를 보이고 있다. 12축 인체피폭 진동측정 장치는 전신 진동 연구에 핵심적 역할을 하는 기본요소이며, 본 장치의 국산화를 완료하여 국내 대학과 산업체에서도 이미 이용하고 있다. 상기 진동 측정 장치를 이용하여 산업용 중장비 및 농기계 용 의자들에 대한 진동 시험 표준안, 즉 ISO 7096: 1994(E), ISO 5007: 1990(E), ISO 10326: 1992(E)에서 규정한 진동 실험과 SEAT (Seat Effective Amplitude Transmissibility) 평가를 충분히 수행할 수 있다.

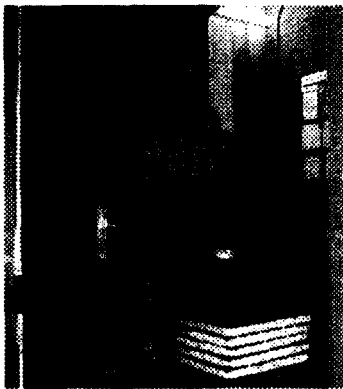


Fig. 4. Picture of biodynamic test

그리고 머리까지의 진동전달 특성 실험의 사진을 보이고 있다.

지금까지 소개한 내용과는 달리, 아직도 ISO안으로 표준화되지 못한 전신 진동 측정에 대한 내용을 고찰하자. 가장 대표적인 경우가 인체의 동적 질량 (Dynamic mass), 기계적 임피던스 (Mechanical impedance), 그리고 서 있는 자세 혹은 앉은 자세에 대한 머리까지의 진동전달 특성 (Vibration transmissibility to head)의 실험에 대한 측정 및 평가 표준안은 아직 없는 실정이다. 그러나, 국외 연구진은 자체적으로 진동 측정장치를 구성하여 사용하고 있는 실정이다. Fig 4는 본 연구팀이 1999년 7월 영국 ISVR에서 수행한 한/영 공동 전신 진동 실험과정에서 수행한 한국인의 동적 질량, 기계적 임피던스,

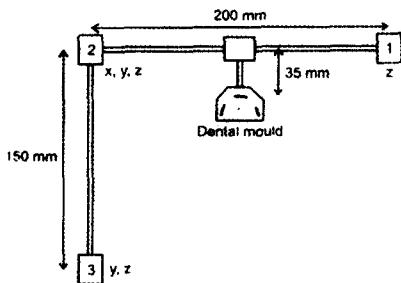


Fig. 5 "Bite bar" for measuring the 6-degree of freedom of head motion

사람의 동적 질량이나 기계적 임피던스의 측정을 위하여 인체 접촉부의 동적 힘을 측정하기 위하여 Force platform (3축 혹은 6축 힘/회전력 측정)을 사용하고 있다 (Fig. 4의 의자 상단부). 그리고, Fig. 5에 보인 바와 같이 6개의 진동 가속도계로 구성된 "Bite bar"^[2]를 이용하여 머리의 6자유도 운동 (앞 뒤, 좌우, 상하, roll, pitch, yaw)을 측정하고 있다. Fig.5 는 본 연구팀이 실험에 사용한 "Bite-bar"의 구조를 보이고 있다. 이러한 전신 진동 측정 장치와 관련된 방법은 아직도 ISO 표준 안으로 채택되지 않은

상태이다. 물론 향후 표준 안의 분야가 확대될 경우 이들 전신진동 측정장치 및 분석기법 또한 표준안이 제정될 것으로 사료된다.

1999년 7월 인체진동 연구분야에서 최고의 연구실적을 구축해온 영국 ISVR의 Griffin 교수 연구실을 방문하였을 때 최근 인체진동의 새로운 연구 분야는 인체 각 부위 즉 가슴, 등 뼈, 그리고 주요 관절 부위의 진동측정을 위한 시도를 수행하고 있었다. 그리고, 인체 평형기관에 대한 1 Hz 이하의 저주파 인체 진동 실험을 위한 저주파 진동센서의 활용도와 중요성을 Griffin 교수는 새삼 강조하였다.

4. 전신 진동의 평가 방법

앞서 소개한 전신 진동 측정 장치를 이용하여 측정된 진동 가속도 신호를 이용하여 인체의 영향을 평가하는 절차를 본 절에서 고찰한다. 전신 진동의 인체 영향을 ISO 2631-1(1999)에는 보건 (Health), 안락도 및 인지(Comfort and perception), 그리고 멀미(Motion sickness)로 구분하고 있으며, BS6841(1987)에는 활동성 한계 (Activity limit)선을 정하고 있다. 이러한 전신 진동 영향 평가에서 사용하는 평가 치들이 인체 접촉부에서 측정되는 단순 물리적 진동 가속도가 아닌 인체의 진동 감응도에 따라 환산되는 2차 평가 치라는 점이다. 이러한 2차 환산과정이 진동 분야 종사자에게 어려움을 부가하게 된다.

인체 감응량에 따른 환산과정은 진동 측정 부위 (발, 엉덩이, 등 부위)별 곱셈인자(Multiplying factor) 적용과 그리고 각 접촉 부위별 측정 축 (전후 x-축, 좌우 y-축, 상하 z-축)의 진동 주파수 성분에 따른 주파수 가중함수(Frequency weighting function)의 적용 과정으로 구성된다. 즉, 인체 접촉부에서 측정된 한 축 방향의 진동 (병진 혹은 회전) 가속도에 해당되는 곱셈인자와 주파수 가중함수를 각각 적용하여 인체 감응 등가 진동량을 얻게 된다. 전신 진동 측정에 선정된 인체 접촉부의 한 축 방향의 가속도 $a(t)$ 라 하면 인체 감응 등가 진동 신호 $a_w(t)$ 는 식 (1)과 같이 얻어진다. 식(1)에서 $w(t)$ 는 주파수 가중함수의 시간영역 응답함수이며, m_r 는 측정 축에 대응되는 곱셈 인자이다. 그리고, 식(1)에서 연산자 "*"는 Convolution 연산자이며, 본 연산은 아날로그 혹은 디지털 필터로 쉽게 환산된다 (ISO2631-1(1997)과 BS6841(1987)의 주파수 가중함수 참고). 즉, 단순 물리양적 측정치인 가속도 신호로부터 필터와 Gain amplifier를 이용하여 얻어지는 인체 감응 등가 진동 신호를 얻게 된다. 물론, 디지털 신호로 변환된 측정 가속도 신호로부터 디지털 필터 기법을 이용하여 인체 감응 등가 진동 신호를 얻을 수 있다. 사실 본 연구팀은 디지털 신호처리 기법을 이용하여 각 측정 축별 인체 감응 등가 진동 신호를 환산하는 기법을 이용하고 있다.

인체 진동의 평가는 각각의 측정 축에 대응되는 등가 감응 (혹은 가중화된) 진동 가속도 시간 신호로부터 환산되는

$$a_{rms} = \left[\int_0^T |a_w(t)|^2 dt / T \right]^{1/2} \text{ and } VDV = \left[\int_0^T |a_w(t)|^4 dt \right]^{1/4} \quad (2)$$

실효치(Root Mean Squares, r.m.s)와 진동 피폭량 (Vibration Dose Value, VDV) 값을 이용하며, 식 (2)와 같이

정의된다. 이러한 평가 치에 부수적으로 이용되는 평가 치로는 등가 감응 진동 가속도의 피크 값과 실효치의 비 (Crest factor = Peak value / 실효치)로 정의되는 극치 비 (Crest factor)가 있다. 이들 세 평가치는 ISO2631-1(1997)과 BS6841(1987)에서 공통으로 사용된다. 그러나, 최근 ISO2631-1(1997)에서는 추가된 평가 치를 정의하고 있다. 즉, 매 1초마다 연속으로 측정된 실효치중 최대 과도 진동 값 (Maximum Transient Vibration Value, MTVV), 그리고 측정 시간 시작에서 종료까지 가중화된 (Weighted) 진동 신호 제곱의 합인 MSDV (Motion Sickness Dose Value)가 있다.

안락도(Comfort) 혹은 승차감 지수 (Ride value) 평가에서는 발의 병진 3축 (x,y,z-축) 가속도, 엉덩이의 병진 3축(x,y,z-축)과 회전 3축 (Roll, Pitch Yaw) 가속도, 그리고 등 부위의 병진 3축 (x,y,z-축) 가속도를 각각의 측정 축에 따른 주파수 가중함수와 곱셈인자를 각각 적용하여 얻어진 등가 감응 진동 신호의 실효치 혹은 진동 피폭 값 (VDV)을 요소 승차감 지수 (Component ride value)이라 칭한다. 이들 각각의 측정 축별 실효치 들의 제곱 합에 대한 제곱근을 실효치 전체

Table 1. Overall ride value and its semantic scale

Overall Ride Values: m/s ² in r.m.s	Semantic Scale (English)
Less than 0.315	불쾌하지 않은(not uncomfortable)
0.315 ~ 0.63	약간 불쾌한 (a little uncomfortable)
0.5 ~ 1.0	다소 불쾌한 (fairly uncomfortable)
0.8 ~ 1.6	불쾌한 (uncomfortable)
1.25 ~ 2.5	매우 불쾌한 (very uncomfortable)
Greater than 2.0	지극히 불쾌한(extremely uncomfortable)

승차감 지수 (Overall ride value in r.m.s), 그리고 각 측정 축별 진동 피폭 값의 네 제곱 합의 네 제곱 근을 진동피폭 전체 승차감 값 (Overall ride value in VDV)이라 칭한다.

실효치 전체진동 승차감 값에 따라 6 등급의 어휘로 구분하고 있으며, Table 1과 같다.

사람의 진동 인식 한계(Perception limit)는 측정 축별 주파수 가중함수를 각각 적용한 진동신호의 피크 값으로 정의하며, 인식한계는 0.015 m/s² 피크 값으로 정하고 있다.

인간의 기본 활동성 (Activity limit) 침해에 대한 하한 한계를 BS6841(1987)안은 진동피폭 값인 VDV = 15 m/s^{1.75}로 규정하고 있으며, 모든 측정 축에 대한 전체 피폭 진동 값이 15.0를 초과할 경우 정기적 건강 진단과 피폭 진동량의 저감을 위한 대책의 마련을 권고하고 있다.

보건 (Health) 한계에 대한 방안으로 ISO 2631-1(1997)은 진동 실효치에 의한 평가 방법과 진동피폭 값인 VDV에 따른 방법을 각각 권장하고 있다. 본 규격에서는 엉덩이 접촉부의 병진 3축 가속도 각각에 주파수 가중함수와 곱셈인자(x, y 축은 1.4, z축은 1.0)를 적용하여 얻어진 진동 신호들에 국한하고 있으며, 실효치 평가 방법은 이들 가중화된 3축 진동 가속도 신호의 제곱 합에 대한 제곱근을 취한 값을 정의한다. 그리고, 피폭 진동 값인 VDV에 의한 평가 방법은 가중화된 3축 진동 가속도 신호의 네 제곱 합에 대한 네 제곱근을 취한 값으로 정의한다. 실효치에 의한 보건 상한 한계(upper limit)와 하한 한계(lower limit)는 각각 5.6 m/s²(r.m.s)와 2.8 m/s² (r.m.s) 규정하고 있으며, 하한을 넘으면 최소한 건강 손실의 잠재적 가능성을 의미하며,

상한 한계는 넘지 않기를 권고하는 진동 한계선으로 권장하고 있다. 그리고, 진동 피폭 값(VDV)에 의한 보건 상한 한계(upper limit)와 하한 한계(lower limit)를 각각 $17 \text{ m/s}^{1.75}$ 와 $2.8 \text{ m/s}^{1.75}$ 로 규정하고 있으며, 하한을 넘으면 최소한 건강 손실의 잠재적 가능성을 의미하며, 상한 한계는 넘지 않기를 권고하는 진동 피폭 상한선으로 권장하고 있다. 그러나, 현재의 ISO 2631-1(1997)안은 BS 6841(1987) 안과는 달리 보건 안전에 대한 평가 시 많은 문제점과 사용사의 주의점에 대한 내용이 이미 국내 학회에 보고된바 있다^[12].

5. 맺음말

본 논문에서는 사람을 실험 대상으로 하는 진동 실험 시 지켜야 될 안전 조치, 피 실험자 동의, 그리고 실험절차 등에 대한 관리방안을 소개하고 있다. 사실, 인체진동 측정 및 분석 기술분야는 아직 국내 정착화를 이루지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 사람을 대상으로 하는 인체진동 실험 시 반드시 고려하여야 할 안전과 보건에 대한 지침서 교육과 숙지에 대한 중요성이 특히 강조된다.

본 논문은 본 연구팀이 지금까지 진행한 전신 진동의 측정 및 분석, 평가 방법에 대한 연구 내용을 자세히 소개하였다. 또한 전신 피폭 인체진동 및 반복 충격에 대한 측정 표준 안들 뿐 아니라 아직 표준화단계에는 이르지 못한 새로운 인체진동 측정 방법들에 대한 체계적 분류와 고찰 내용을 간략히 언급하였다. 특히, 진동 안락도 및 인체 감응, 활동성 저해 여부 판별, 그리고 진동에 대한 보건 대책에 대한 인체 영향 평가 방안을 소개하였다

본 연구는 선도기술과제인 감성공학 중 “소음, 진동에 대한 인체 영향 연구”의 일환으로 수행된 연구내용의 일부이다.

Reference

- [1] Guide to Experimentation involving human subjects, ISVR Technical Memorandum No. 808, ISVR, University of Southampton, UK, 1996.
- [2] M.J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, London: UK, 1990.
- [3] 정완섭, 권휴상, 송권식, 김순협, "Assessment of the whole-body vibration exposed to helicopter pilots and analysis of its effects on their flight duration," *Inter-noise 99 (Fort Luaderdale:USA)*, Vol.2, 907-910, 1999
- [4] 정완섭, 서재갑, 김 철중, 은희준, "전신피폭 진동의 평가를 위한 12축 진동 측정 장치 개발," *한국소음진동공학회 춘계학술회의*, 25-28, 1996
- [5] 우춘규, 정완섭, 김수현, 박윤근, "인체 진동 모델의 진동 전달 특성에 관한 연구," *한국소음진동공학회*, 6(5), 625-633, 1996
- [6] 정완섭, 우춘규, 박세진, 김수현, "자동차 의자류의 진동 전달 특성에 관한 연구," *한국소음진동공학회 추계학술회의*, 365-370, 1996
- [7] 정완섭, 이두희, 황철호, 남현도, "Issues in weighting functions for the assessment of exposed whole-body vibration," *Inter-noise 96 (Liverpool: UK)*, Vol. 3, 1749-1752, 1996
- [8] 정완섭, 우춘규, 박세진, 김수현, "동시 3축 가진에 의한 자동차 의자류의 승차감 평가," *한국소음진동공학회*, 7(1), 143-152, 1997
- [9] 조영건, 정완섭, 박세진, 윤용상, "내구력도로와 요철도로에서 승용차의 승차감 지수 비교," *한국소음진동공학회*, 7(6), 1025- 1030, 1997
- [10] 정완섭, 조영건, 박세진, "국내의 승용차의 승차감 지수 비교 및 분석," *한국소음진동공학회 춘계학술회의*, 324-329, 1997
- [11] 박세진, 정완섭, 조영건, 윤용상, "Dynamic ride quality investigation for passanser cars," 98 SAE annual conference, 1998
- [12] 정완섭, 박용화, M.J. Griffin, "전신 피폭 진동 및 반복 충격에 의한 위험 예측 표준 방안들의 비교 분석," *한국소음진동공학회*, 10(1), 160-167, 2000