

<논 문>

전신 피폭 진동 및 반복 충격에 의한 위험 예측 표준 방안들의 비교 분석

Comparison and Analysis of Standardised Methods for Predicting the Hazards of Whole-body Vibration and Repeated Shocks

정 완 섭* · 박 용 화* · Michael J. Griffin**

Wan-Sup Cheung, Yong-Hwa Park and Michael J. Griffin

(1999년 11월 20일 접수 ; 2000년 1월 15일 심사완료)

Key Words : Human Vibration(인체진동), Whole-body Vibration Exposure(전신진동피폭), Human Response to Vibration & Shock (진동 및 충격의 인체 영향)

ABSTRACT

This paper addresses issues encountered in using the ISO and national standard codes to assess the hazards of whole-body vibration and repeat shocks. Their assessment methods are given in ISO 2631-1 (1974,1985,1997) and BS 6841 (1987) that are now available to us. Two standard codes can yield unfortunately different assessment results even for a single measured vibration signal. Possible reasons for such different results are pointed out and, furthermore, related questions that should be re-examined in the future are raised in this paper

1. 서 론

현재 인체관련 진동 및 충격 분야를 연구하고 있는 과학자들과 국제/국내 표준안들을 제정 및 수정 보완하고 있는 그룹간의 견해차이 때문에 적지않은 문제점과 혼란이 발생하고 있다. 이러한 문제점을 파악하기 위하여 영국 ISVR Griffin 교수와 본 연구팀이 공동으로 자료 조사 및 기존 사례 연구를 수행한 바 있다⁽¹⁾. 본 논문에서는 산업계에 가장 널리 사용되고 있는 ISO 2631-1과 BS 6841 표준안이 제시하고 있는 인체 피폭 진동 측정 축과 피폭 진동량의 환산 및 평가 방법에 대한 비교 분석을 통해서 두 표준안이 서로 일치하지 않는 문제점들을 소

개한다. 사실, 이들 표준안의 차이점은 피고용인과 고용인 사이의 인체 피폭관련 분쟁, 기계 공급자와 사용자의 법적 분쟁 등이 있을 때에 많은 문제점을 야기 시킬 수 있다. 특히, 보건과 안전에 대한 손실을 방지하기 위하여 표준안들의 적절치 못한 수식과 문서상의 오류들은 반드시 시정되어야 하며, 이러한 사항은 향후 표준안이 지향해야 할 방향이기도 하다.

2. ISO 2631-1과 BS 6841의 역사적 배경

ISO 2631-1 표준안 (1974,1985)⁽²⁾: 1966년 초안이 준비되어 1974년 처음 출판되었다. 그리고, 1978년 도표 및 그림들의 오류 수정이 다시 시작되어 1982년 개정안이 제안되었으며, 1985년 실효치 (r.m.s.) 가속도 양, 두 주파수 가중합수, 그리고 피폭 시간 의존성에 대한 평가 방안을 포함한 수정안이 출판되었다.

BS 6841 표준안⁽³⁾: 본 표준안은 ISO 2631-1 (1985)안

* 정희원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹

** Human Factors Research Group, ISVR, The University of Southampton, UK

에 반대하며 영국이 제시한 표준안으로 1987년 출판되었다. ISO 2631-1 (1985)안과는 달리 진동과 반복 충격을 함께 고려할 수 있는 일반화된 측정 및 평가 방안을 제시하고 있다. 보다 일반화 된 전신 피폭 진동 및 충격의 측정/평가 필요성에 따라 6 종류의 두 주파수 가중합수, 실효치 및 피폭 진동 누적량 (VDV, vibration dose value), 그리고 0.1~0.5 Hz의 주파수 범위의 진동의 멀미(motion sickness)에 대한 영향의 평가 방안 또한 제안하고 있다. 이와 같이 일반화된 전신피폭 진동 측정 및 평가 방안은 일반 산업계에서 ISO 관련 규격보다 높은 선호도와 신뢰도를 얻고 있다. 특히, Crest Factor (진동 피크 값과 실효치의 비)가 6 이상인 경우, 피폭 시간과 진동량에 대한 보건 및 안전성 평가는 실효치 보다는 진동 피폭량 (VDV, vibration dose value)을 사용한 평가 방안을 추천하고 있다. 지난 10여년간 관련 분야의 과학적 발전에 따라 본 규격 또한 수정 및 보완이 곧 이루어질 것으로 사료된다.

ISO 2631-1 표준안 (1997)⁽⁴⁾: 본 규격은 이전 표준안 (ISO 2631-1, 1985)의 대폭적 개정 내용을 담고 있다. 이는 과거 표준안(ISO 2631-1, 1985)과 BS 6841 (1987)안의 내용을 함께 포함하고 있어, 인쇄된 페이지 분량이 대폭 증가되었다. 즉, 두 표준안이 갖고 있던 측정 및 평가 안을 조합함으로써 양측의 평가 방안을 활용할 수는 있지만, 두 안의 단점을 해결하지 않은 단순 편집에 머무르고 있다는 한계점을 갖고 있다. 특히, 두 평가 방안 에 따라 환산된 최종 결과를 비교해 보면 모순점과 혼동되는 점 들이 있을 수 있다. 따라서, 본 표준안의 조속한 수정 및 보완책 마련이 매우 시급한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보다 구체적으로 고찰한다.

3. 전신피폭 진동의 독립 변수들

본 절에서는 기존 ISO 2631-1과 BS 6841 규격에서 채택된 기본 진동량 측정 및 평가에서 사용되는 독립변수 인자들 즉, 진동 측정 축, 주파수 가중 함수(frequency weighting function), 측정 축별 배가 인자(multiplication factors), 진동량 크기 및 피폭 시간 환산 및 평가에 관련된 차이점과 문제점을 고찰한다.

3.1 진동 측정 축

ISO 2631-1(1985) 및 ISO 8041(1990)(5)에 따른 인체 피폭 진동 측정 축은 병진 3 축 (앞뒤 x-축, 좌우 y-축, 상하 z-축)에 한정되어 있으며, 앉은 자세는 엉덩이, 서 있는 자세는 발, 누운 자세는 등 부위의 병진 3축을 각각 그 측정 축으로 정의하고 있다. 본 규격은 앞뒤(x-

축)와 좌우(y-축)의 평면 진동 성분과 상하 진동 성분(z-축)에 대한 두 종류의 주파수 가중합수 (ISO 8041-1990 참고) 사용을 규정하였다. 특히, 앞뒤 및 좌우 축의 진동 성분은 상하 방향 진동 보다 1.4 배 높은 축별 배가 인자를 각각 곱하여 축별 인체 피폭 진동량 환산 규칙을 규정하고 있다. 그리고, 동시 3 축으로 피폭된 진동량의 벡터 합(vector sum)은 다음과 같이 환산한다.

$$a_{vs} = \sqrt{(1.4 \cdot a_{w,x})^2 + (1.4 \cdot a_{w,y})^2 + (a_{w,z})^2} \quad (1)$$

위 식에서 a_{vs} 는 동시 3축 진동 가속도 성분의 벡터 합을 나타내며, $\{a_{w,x}, a_{w,y}, a_{w,z}\}$ 는 각 측정 축에 대응되는 주파수 가중합수를 각각 적용한 진동 가속도 성분의 실효치 (r.m.s.)이다. 본 ISO 규격에서는 식 (1)의 결과를 단지 안락도 혹은 작업효율 평가에 적용할 수는 있으나, 건강 및 안전 평가에 이용할 수 있다는 명백한 표현이 없다. 특히, 수평 진동 성분 $\{a_{w,x}, a_{w,y}\}$ 에 대한 1.4 배의 높은 가중치를 부가해야 하는 이유에 대한 설명과 건강 및 안전 평가에 대한 명백한 평가 방안을 규정하지 못한 한계점을 갖고 있다.

반면에 BS 6841(1987) 표준안은 모든 인체의 접촉 가능 부위, 즉 발의 병진 3축, 엉덩이의 병진 3축과 회전 3축, 그리고 등 부위의 병진 3 축으로 구성된 총 12 축의 진동 측정을 규정하고 있다. 이는 가장 일반화된 전신 피폭 진동 측정 축으로, 서 있는 자세의 발 부위 병진 3 축 뿐만 아니라 누워있는 자세의 등 부위에서 병진 3축 진동 또한 인체 접촉부 전체 12 측정 계로부터 적용할 수 있다. 그리고, 총 12 측정 축에 대응되는 주파수 가중합수와 상대적 배가인자를 각각 정의하고 있다. 따라서, ISO 규격 사용 시 직면하는 측정 및 평가 과정의 불명확한 부분에 대한 요소가 없기 때문에 사용자는 안락도 뿐 아니라 건강 및 안전에 대한 평가 또한 하나의 통일된 절차에 따라 수행할 수 있다. 특히, 건강 및 안전에 대한 평가치는 누적 피폭 진동량(VDV)의 사용을 정의하고 있으며, 이는 장시간의 진동 뿐 아니라 반복 충격 진동 피폭에 대한 영향 평가를 수행할 수 있다. 그리고, 다 축의 영향을 동시에 고려하기 때문에 예를 들어 두 축에 같은 VDV 환산치를 갖는 진동이 각각 가해질 경우, 환산된 전체의 피폭 진동량은 한 축에만 동일한 진동이 가해질 때보다 $2^{1/4}$ 배 만큼 증가하게 된다.

1997년 2회에 걸쳐, ISO 2631-1의 새로운 규격이 소개되었다. Table 1은 각 표준 규격별 보건 및 안전 평가를 위한 피폭 진동 측정 축과 가중합수를 비교하고 있다. 우선, 새로운 ISO 규격은 서 있는 자세와 누운 자세의 측정 평가에 대한 방안은 정의하고 있지 않고 있으며,

Table 1 Comparison between three standards for health effects

Axis	ISO 2631-1 (1985) & ISO 8041 (1990)	BS 6841 (1987)	ISO 2631-1 (1997)
Seated persons:			
x-axis, seat surface	1.4 W_d	W_d	1.4 W_d
y-axis, seat surface	1.4 W_d	W_d	1.4 W_d
z-axis, seat surface	W_g	W_b	W_k
x-axis, seat-back		0.8 W_c	0.8 $W_c(1)$
Standing persons:			
x-axis, floor	1.4 W_d	W_c	Weighting function & multiplication factor not specified
y-axis, floor	1.4 W_d	W_d	
z-axis, floor	W_g	W_b	
Recumbent persons:			
x-axis, seat surface	1.4 W_d	---	Weighting function & multiplication factor not specified
y-axis, seat surface	1.4 W_d	---	
z-axis, seat surface	W_g	---	
Horizontal	---	W_d (recommended)	
Vertical	---	W_b (recommended)	

Notes: (1) Measurement encouraged but not used in assessment

앉은 자세는 이전의 규격(1985년)과 다른점이 없다. 단지, 상하 진동 측정 축의 주파수 가중합수 수정(W_g 에서 W_k 로 수정, Table 1 참고)과 등판 접촉부의 전후 방향 진동의 평가에 대해서 "encouraged but not used"란 매우 추상적 어휘를 사용하고 있다. 여전히, 엉덩이 접촉부위의 전후/좌우 방향 진동에 대한 배가 인자 1.4를 사용하기 때문에 수평 방향의 진동이 상하 방향 진동보다 40%의 높은 가중치를 부여받게 된다. 그리고, 다수의 측정 축에 대하여는 최대 측정 축에 대응되는 진동 환산치만을 사용하도록 정의하고 있다. 따라서, 두 측정축의 피폭 진동 환산치가 동일할지라도 안전 및 보건에 관련된 평가치는 일정하게 된다.

3.2 진동 주파수

3.1절에서 언급한 Table 1에서 관찰할 수 있듯이 주파수 가중합수가 ISO 2631-1 1985안과 1997년 안이 서로 다르며, 또한 BS 6841(1997)과도 서로 같지 않다. 이것이 현장 사용자가 인체 피폭 진동 측정 및 분석에서 실제 직면할 수 있는 가장 큰 문제점 중의 하나이다. 그러나, 이러한 차이점들이 발생하는 이유와 이러한 차이점에 따른 사용상의 문제점을 지적하지 않는 이유는 명확히 밝혀 놓고 있지 않다. 이러한 문제점은 향후 표준안의 개선점 마련에 필수적으로 고려되어야 할 사항이다.

ISO 2631-1(1985)안은 1~80 Hz의 주파수 대역에 대한 1/3 옥타브 대역별 주파수 가중합수만을 정의하였으

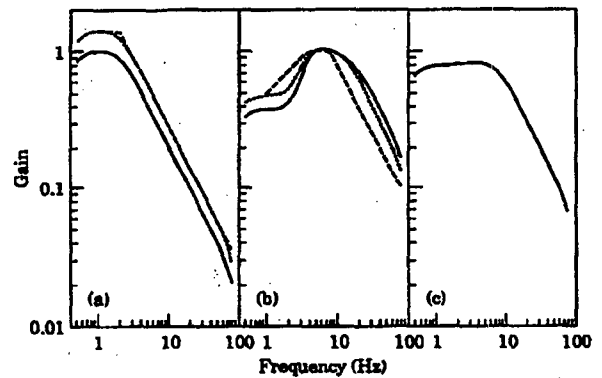


Fig. 1 Comparison of frequency weighting functions with multiplication factors: (a) x- and y-axis seat vibration, (b) z-axis seat vibration, (c) x-axis backrest vibration. (Dashed line=ISO 2631-1(1985), dotted line=ISO 2631-1(1997), solid line = BS 6841)

며, 주파수 영역의 필터 특성에 대한 정의는 1990년 ISO 8041⁽⁵⁾안에서 구체적으로 제안되었다 (Table 1 참고). 따라서, ISO 8041(1990)안에서 제시한 주파수 영역의 응답 특성을 만족하는 아날로그 혹은 디지털 필터를 이용하여 시간 영역의 진동 신호에 주파수 가중합수를 적용할 수 있게 되었다. 수평 진동 성분인 x-축과 y-축의 주파수 가중합수 (Table 1의 W_d , Fig. 1-(a))는 1~2 Hz에서 주파수에 선형적으로 비례하며 2~80 Hz 대역에서

는 주파수에 역 비례하는 특성을 보이고 있으며, 수평 두 축에 대하여는 1.4 배가 인자를 곱하게 된다. 그리고, 상하 방향 z-축의 주파수 가중함수 (Table 1의 W_g , Fig. 1-(b))는 4~8 Hz에서 주파수에 선형적으로 비례하며 이 외의 대역인 1 ~ 4 Hz 와 8 ~ 80 Hz 대역에서는 주파수가 증가할 때 역 비례하는 특성을 보인다.

BS 6841(1987) 표준안은 12 축에 대하여 각각 주파수 가중함수를 처음으로 필터 전달함수로 정의한 표준안이며, 각 진동 측정 축에 따른 주파수 전달 함수를 디지털 혹은 아날로그 필터로 쉽게 실현할 수 있도록 제안하였다. Table 1에 보인 바와 같이 인체 피폭 진동의 안전 및 건강에 대한 영향 평가를 위하여 앉은 자세, 선 자세, 그리고 누운 자세에 대한 진동 측정 축과 이들 축에 대한 주파수 가중함수 및 배가인자를 각각 정의하고 있으며, 이들 주파수 가중함수의 전달특성은 Fig. 1에 보이고 있으며 ISO 규격과의 차이점 또한 Fig. 1에서 관찰할 수 있다. 수평 진동성분에 대한 차이점은 ISO 2631-1 규격에서 채택하고 있는 배가인자 1.4의 차이점만 있을 뿐 주파수 응답 특성은 같다. 그러나, Fig. 1(b)에서 확인할 수 있듯이 상하 방향의 z-축에 대한 가중함수 (Table 1의 W_b)는 적지 않은 차이점을 보이고 있다. 특히, 2~5 Hz 대역에서 일정한 감응을 보이며, 5~8 Hz에서는 감도 증가를, 8~16 Hz 대역에서는 매우 낮은 감소를, 그리고 16~80 Hz 영역에서는 주파수에 역 비례하는 특성을 보인다. 5~80 Hz 대역에서는 인체의 apparent mass에 대한 실험 결과 보다 더욱 민감한 특성을 보이며, 이는 등뼈의 진동 전달률이 5 Hz 이상에서 낮지 않다는 점 때문에 사료된다. 또한, 주관적 평가에서도 이러한 결과는 확인된 바 있다⁽⁶⁾. 그리고, BS 6841은 이러한 사실 때문에 상기 주파수 가중함수가 안락도 뿐 아니라 인체 건강 및 안전성 평가에도 적용될 수 있다는 견해를 견지하고 있다. 그리고, ISO 안과는 달리, 등 지지부의 앞뒤 진동 또한 인체 건강 및 안전성 평가에 포함하도록 하고 있다. (Table 1과 Fig. 1(c) 참고).

최근 출판된 ISO 2631-1(1997)안에서 채택하고 있는 주파수 가중함수는 이전의 ISO 규격을 대폭 수정한 것이다. 안락도 평가에서는 BS 6841(1987)과 같이 12 측정 축과 유사한 주파수 가중함수 (영덩이의 상하 진동에 대한 W_k 는 제외)를 채택하고 있다. 그러나, 인체 건강 및 안전성 평가 방안은 Table 1에 보인 바와 같이 이전의 ISO 2631-1(1985)과 ISO 8041(1990)을 혼합한 안을 수정한 내용을 담고 있다. 특히, 앉은 자세의 상하 방향 z-축의 새로운 주파수 가중함수 W_k 를 채택하고 있다. 이는 Fig. 1(b)의 점선으로 표시된 특성을 갖고 있으며, 1

Hz 이하의 저주파 진동에 대하여 높은 가중치를 부여했으며 1~5 Hz 범위에서는 BS 6841(1987) 표준안 보다 약 20% 높은 가중치를 부여하고 있다. 그리고, 20 Hz 이상의 대역에서는 무려 25% 정도로 BS 6841(1987) 표준안보다 낮은 가중치를 또한 부여하고 있다. 이러한 차이점은 새로운 ISO 2631-1(1997)안의 사용자가 반드시 숙지해야 할 내용이다. 물론 이전의 ISO 규격과의 차이점 또한 주의 깊은 검토가 필요하다. 또한, 인체 건강 및 안전성 평가는 단지 앉은 자세에만 국한되어 있다는 한계점(서 있는 자세나 누워있는 자세에 대한 평가 방안은 규정하지 않음)과 수평 진동 성분에 대한 1.4배가 인자(안락도 평가 시는 1.0 임)에 대한 적용에도 유의를 요한다 (Table 1 참고).

3.3 진동 진폭과 피폭 시간

인체 건강 및 안전성 평가에 필요한 피폭 진동 가속도 (exposed vibration severity)는 진동 진폭과 피폭 시간의 상대적 가중치 적용 방법에 대한 정의를 내려야 한다. 특히, 간헐적인 과도한 진동의 피폭, 시변(time-varying) 진동의 진폭, 충격 진동 등에 대한 종합적 평가 방안이 필요하다. 인체 접촉부를 통하여 전달되는 피폭 진동 신호의 단순 실효치(r.m.s.) 측정 값으로 진동 가속도를 평가하는 데는 한계점이 있다. Fig. 2는 ISO 2631-1 관련 규격들과 BS 6941 규격에서 제시한 결과를 도식화 한 것이다.

최근 ISO 표준안은 아직도 실효치(r.m.s.) 측정치에 기반을 둔 피폭 진동 시간과 진폭의 관계 즉 " $a_{w, overall} \times t^{1/2} = \text{constant}$ "에 대응되는 개념을 사용하고 있다. 여기

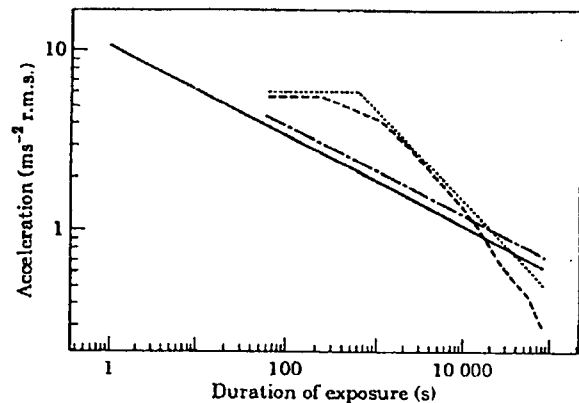


Fig. 2 Exposure limits suggested by four standards: Dashed line=ISO 2631-1(1985), Dotted line=ISO 2631-1(1997), solid line=BS 6841(15 VDV Action level), dot-dashed line=ISO 2631-1(17 VDV Limit)

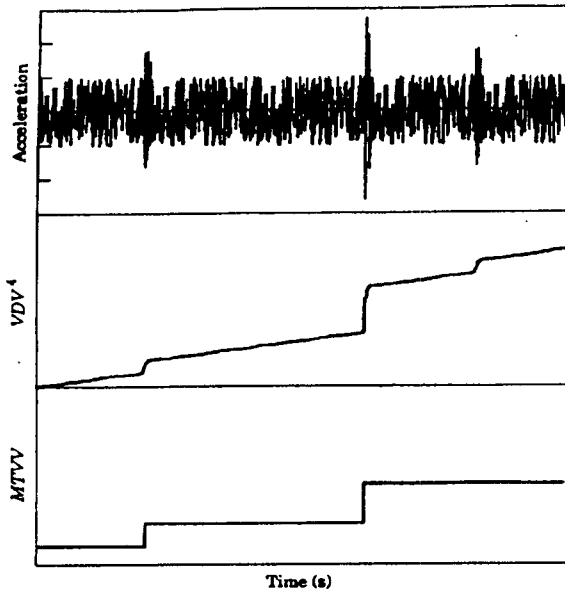


Fig. 3 Illustration of the formulation of vibration dose value, VDV, and a maximum transient vibration value, MTVV, for a vibration containing occasional shocks

서 $a_{w, overall}$ 는 주파수 가중함수를 고려한 모든 진동 가속도의 실효치이고 t 는 진동 피폭 소요 시간이다. 그러나, 이전의 ISO 규격(Fig. 2의 파선)은 매우 복잡한 시간 의존성을 갖는 특성을 사용하였다. ISO 2631-1(1985) 규격에서는 1~4분 이내의 측정 시간에 대하여는 최대 피폭 진동이 $5.6 \text{ m/s}^2 \text{ r.m.s}$ 가 넘지 않도록 규정하고 있으며 24시간의 피폭 시간에 대하여는 0.224 혹은 $0.28 \text{ m/s}^2 \text{ r.m.s}$ 가 넘지 않도록 규정하였다. 그러나, 최근의 ISO 2631-1(1997) 안은 10분 이내의 피폭 시간에 대하여는 $5.6 \text{ m/s}^2 \text{ r.m.s}$ 가 넘지 않도록 규정하고 있으며 그 이상의 피폭 시간에 대한 허용 한계 진동 레벨 $a_L = 5.6 (t_0/t)^{1/2}$ ($t_0 = 10 \text{ min}$)을 정의하고 있다. 이러한 피폭 시간과 허용 진동 레벨의 " $a_{w, overall} \times t^{1/2} = \text{constant}$ " 관계는 Cr (crest factor = peak / r.m.s.)의 값에 따라 적용상의 한계점을 갖는다. 1985년 ISO 2631-1 규격은 crest factor가 3.0이하에서 그리고 1997년 ISO 2631-1 규격에서는 crest factor가 9.0이하에서 각각 적용하기를 권장하고 있다.

BS 6841(1987) 규격은 기본적으로 진동 진폭의 크기는 실효치(r.m.s.)값으로 정의하고 있다. 그러나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 충격 진동이나 과격한 간헐적 진동과 같이 짧은 피폭 시간을 갖는 진동에 대해서는 기존의 실효치 평가 방법을 사용할 경우에 최대 피크 치보다 상대

적으로 낮은 실효치를 부여한다는 한계점을 지적하고 있다. 따라서 그러한 경우에는 실효치가 아닌 누적 피폭 진동량을 이용한 평가 방안을 제안하고 있다. 피크 진동 진폭과 실효치의 비인 Cr 값이 6.0 이상인 경우는 아래의 진동 피폭량(VDV)을 사용할 것을 정하고 있다.

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

윗식에서 $a_w(t)$ 는 시간 t 에서의 주파수 가중함수를 고려한 진동 가속도이고 T 는 진동 피폭 소요 시간이다. Fig. 3은 계산된 진동 피폭량의 한 예를 나타낸다. 만약, Cr 값이 6.0 이하인 진동 신호일 경우, 실효치(r.m.s) 값으로부터 등가 진동 피폭량(eVDV, equivalent vibration dose value), 즉 $eVDV = [(1.4 \times a_{w, rms})^4 \times T]^{1/4}$ 를 환산한 값을 사용하기를 권장하고 있으나, 실제 진동 신호로부터 식 (2)를 이용한 직접 환산을 더욱 선호하고 있다. 피폭 진동이 간헐적으로 일어나는 경우는 각 피폭 시간 별 VDV 값들의 4승 합에 1/4승 근으로부터 환산된다. 이러한 피폭 진동량을 이용한 평가 방안은 간단 명료한 환산 절차 뿐 아니라, 과도한 충격 및 간헐적 피크 진동에 대한 피폭의 영향을 평가하는데 있어서 일관성 있는 평가를 수행할 수 있는 장점이 있다. 특히, BS 6841 (1987)은 활동성 한계 피폭량 $VDC_{activity} = 15 \text{ m/s}^{1.75}$ 을 제안하고 있으며(Fig. 2 실선 참고), 이를 초과하는 빈도가 많을 경우 정기적 검진과 피폭 진동량의 저감 방안에 대한 강구가 필요하다고 권고하고 있다.

1997년 새로이 개정된 ISO 2631-1 표준안은 두 가지의 진폭-피폭 시간 환산 방법을 규정하고 있다. 우선 기초적 평가 절차("Basic Evaluation Method")로 crest factor가 9.0이하인 경우, 실효치를 이용한 피폭 진동 한계를 평가하는 방법(Fig. 2 점선 참고)이며, 이는 다시 1~10분 이내의 피폭 한계는 $5.6 \text{ m/s}^2 \text{ r.m.s}$ 의 일정한 값으로 규정하고 있으며 피폭 시간이 10분 이상인 경우는 $a_L = 5.6 \times (t_0/t)^{1/2}$ ($t_0 = 10 \text{ min}$)의 환산 결과에 따라 피폭 한계를 규정하고 있다. 그리고, crest factor가 9.0이상인 경우 앞서 언급한 "Basic Evaluation Method"는 감소된 피폭 진동 값을 제공하기 때문에 또 다른 "Maximum Transient Vibration Value: MTVV"라는 2 종류의 "Running r.m.s" 환산 방법을 제안하고 있다.

$$MTVV = \max_t \left[\int_{t-\tau}^t a_w(\tau)^2 d\tau / T \right]^{1/2} \quad \text{or} \quad (3)$$

$$MTVV = \max_t \left[\int_{-\infty}^t a_w(\tau)^2 \cdot \exp((\tau-t)/T) d\tau / T \right]^{1/2}$$

윗식에서 τ 는 적분 변수, $a_w(\tau)$ 는 시간 τ 에서의 주

파수 가중함수를 고려한 진동 가속도, T 는 진동 피폭 소요 시간이고 t 는 측정하는 순간의 시간이다. 식 (3)에서 전자는 선형 평균을 그리고 후자는 지수함수 평균을 각각 보이고 있으며, MTVV의 측정 주기는 음향기기의 1초 실효치 추정 방법과 같이 환산하기를 권장하고 있다. Fig. 3은 계산된 MTVV의 한 예를 보여준다. MTVV는 측정 구간 중 가장 높은 진동 진폭을 갖는 1초 동안의 실효치이다. 따라서 다수의 반복 충격 진동에 대하여도 최고 진동 실효치의 단일 값으로 대표될 뿐 반복되는 피폭 회수에 대한 누적량을 고려할 수는 없다. 특히, 1초 동안의 실효치 환산 방법은 1 Hz이하의 저주파 진동 신호에 대한 MTVV 환산에 매우 큰 오차를 발생시킬 수 있다는 점을 사용자는 항상 유의해야 한다.

신 개정판 ISO 2631-1(1997)은 "Running r.m.s" 환산 방법에 부가적으로 식 (2)에 보인 VDV값 환산 방법을 정의하고 있다. 만약, $MTVV / a_{w,rms} > 1.5$ 혹은 $VDV / (T^{1/4} \cdot a_{w,rms}) > 1.7$ 인 경우 VDV값 환산치를 부가적으로 추정하기를 권장하고 있다. 물론 $MTVV / a_{w,rms}$ 가 1.5 이하일 경우 실효치를 사용하기를 권장하고 있다. 또한, $VDV / eVDV < 1.25$ 일 경우, 최종 평가치는 VDV가 아닌 실효치를 사용하기를 암시적으로 의미하고 있다. 따라서, 측정된 진동 신호의 특성, 예를 들어 crest factor 등에 따라 최종 평가치는 실효치, MTVV, 혹은 VDV량으로 선정된다는 점을 알 수 있다. 이러한 점 때문에 신 개정판 ISO 2631-1(1997)는 측정자 및 평가 결과를 참고하는 모든 이에게 혼동을 야기할 수 있을 뿐 아니라 일관된 평가 결과를 얻기는데 있어서 기술적 문제점과 현실적 사용 한계점을 갖고 있다고 사료된다. 특히, 실효치 및 MTVV 환산 값을 이용한 건강 및 안전성에 대한 평가에서는, 측정 시간의 임의적 선정에 따라 평가치를 기대 이하로 감소시킬 수 있다는 인위적 조작성이 개입될 수 있는 한계점을 갖고 있다. 그러나, VDV 환산치를 이용할 경우에는 이러한 측정 시간대 선정에 의한 인위적 평가치 감소는 최소화 될 수 있다.

4. 전신피폭 진동의 종속 변수들

전신 피폭 진동이 인체에 미치는 영향의 관점에서 볼 때, 종속 변수는 인체 국소 부위의 발병 확률과 정도를 나타내는 양이거나, 혹은 진동 피폭 전체 그룹 중 임의 몇 % 발병되기 직전까지의 누적 피폭 시간(cumulative exposure duration)이라 사료된다. 아직 관련 분야의 학문적 이해 부족으로 표준 규격들조차 이러한 종속 변수들에 관한 자세한 지침을 제시하지 못하고 있다.

ISO 2631-1(1985)안은 피폭한계(exposure limit)를 고통 감지 시작 진동 레벨("Threshold Level of Pain")의 50%로 규정하고 있다. 8~24시간 동안의 피폭 한계는 약간 낮거나 적절하다고 인정하지만, 1~4분 동안의 피폭 한계인 5.6 m/s^2 실효치는 너무 높아 실용성이 없다고 사료된다. 잠재적 위험을 수반하고 있다고 사료되는 짧은 시간의 실제 진동환경의 측정치가 이 보다 낮기 때문이다. 그러나, BS 6841(1987)안은 인간 기본 활동성(읽기, 쓰기, 먹고 마시기, 듣기 등)의 한계 값을 피폭 진동량 $VDV = 15 \text{ m/s}^{1.75}$ 로 규정하고 있으며, 이보다 높은 피폭 진동의 반복적인 피폭은 건강 손실의 위험이 있을 수 있음을 지적하고 이러한 경우 정기적 검진을 추천하고 있다.

최근 ISO 2631-1(1997)안은 Fig. 4와 같이 실효치 r.m.s)와 피폭 진동량(VDV)에 따른 건강 지도 경고 레벨("Health Guidance Caution Level")을 제안하고 있다. 우선, 실효치(r.m.s)에 대한 상/하한 선에 해당되는 진동 레벨은 각각 5.6 m/s^2 과 2.8 m/s^2 에 해당된다고 사료된다. 그리고, 피폭 진동량(VDV)에 따른 건강 지도 경고 레벨의 상/하한 레벨은 $17 \text{ m/s}^{1.75}$ 과 $8.5 \text{ m/s}^{1.75}$ 로 정의한 듯하다. 그러나, 두 건강 지도 경고 레벨에 대한 정확한 수식이나 수치를 명백히 기술하지 않았으며, 단지 본 표준안은 명료하지 못한 그림만을 제시하고 있다. 따라서, 사용자는 선을 그려 대략적 추정치 만을 사용할 수 밖에 없는 실정이다. 그리고, 상/하한 선의 용도와 사용 방법 또한 명확히 기술하고 있지 않았다. 본 저자는 우선 상한선을 건강 보전 최소허용 한계선으로 그리고 하한선은 피폭 진동에 의한 건강 손실 위험을 수반하지 않는 한계선으로 각각 생각하고 있을 뿐, 실제 ISO 2631-1(1997) 표준안은 이에 대한 아무런 언급이 없다.

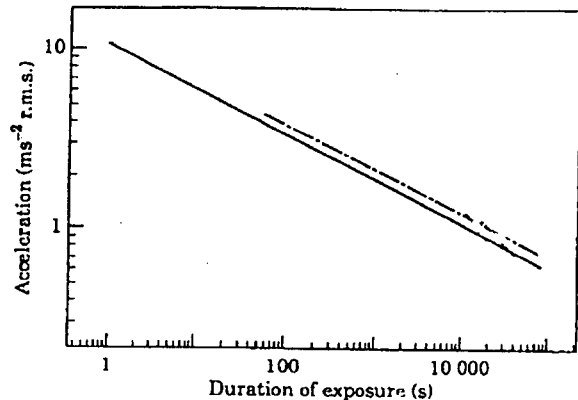


Fig. 4 Health guidance caution zones specified in ISO 2631-1(1997) and the $15 \text{ m/s}^{1.75}$ action level in BS 6841(1987) Line

또한, 앞서 소개한 바와 같이 최대 과도 진동 값 (MTVV)과 위의 상/하한 선과는 어떠한 관계를 갖는지에 대한 어떠한 언급이 없다. 마지막으로 언급되어야 할 부분이 Fig. 4에서 관측되는 실효치 건강 지도 경고 상/하한선과 VDV 건강 지도 경고 상/하한선이 서로 일치하지 않는다는 점이다. 6시간 이하의 피폭 시간에서는 실효치 건강 지도 경고 상/하한선이 VDV 건강 지도 경고 상/하한선보다 높으며, 8시간 이후에는 반대로 VDV 건강 지도 경고 상/하한선이 보다 높다는 것을 알 수 있다.

5. 전신 피폭 진동에 대한 토의 및 요약

앞서 살펴 본 바와 같이 새로이 소개된 ISO 2631-1 (1997)과 BS 6841(1987) 표준안을 이용한 인체 피폭 진동 측정, 환산 및 평가 과정에서 실 사용자가 직면하는 가장 주된 문제점은 엉덩이 부위 상하 z-축의 서로 다른 주파수 가중함수, 앞뒤 x-축과 좌우 y-축에 대한 배가 인자가 1.4인 점, 그리고, 시변(time varying) 진동 신호 (충격 및 간헐적 진동 등)에 대한 서로 다른 환산 방법 등에서 유발됨을 확인할 수 있었다. 그리고, 신 개정안 ISO 2631-1 (1997)은 서로 다른 인체 피폭 진동 환산치 (실효치, MTVV, VSD, eVDV)를 사용하여 평가 할 수 있기 때문에 평가자의 환산치 선정에 따라 서로 일치하지 않는 모순된 평가 결과 보고서를 작성할 수 있다는 점과, 그리고 명확한 환산 절차 및 항목들에 대한 보고서 작성 지침을 규정하고 있지 않다는 문제점을 지적하였다.

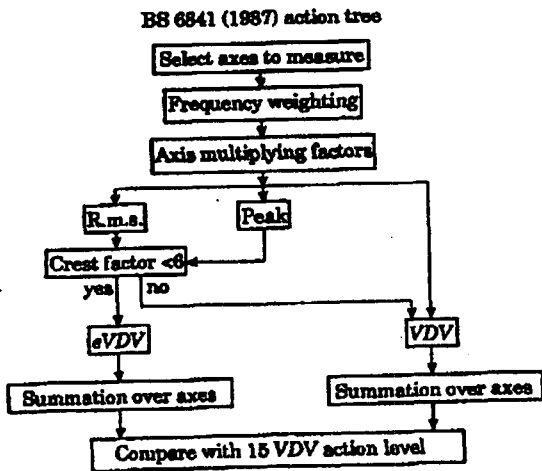


Fig. 5 Method of evaluation and assessment of exposed whole body vibration and shocks defined in BS 6841 (1987)

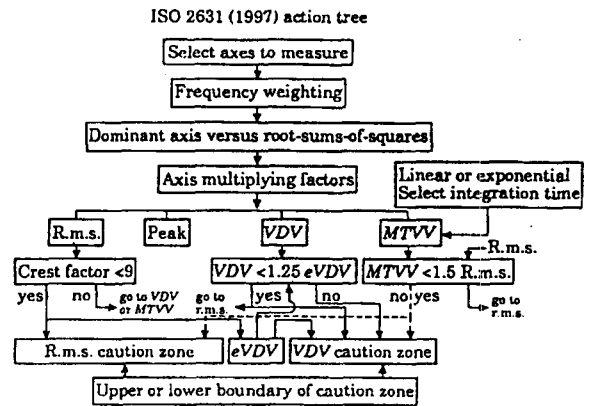


Fig. 6 Method of evaluation and assessment of exposed whole body vibration defined in ISO 2631-1 (1987). Note that the summation over multiple axes is not clearly defined

Fig. 5와 Fig. 6은 BS 6841(1987) 표준안과 ISO 2631-1 (1997) 표준안에서 제시하고 있는 진동 측정치의 평가 방법의 절차에 관한 도식을 나타낸다. 이들 비교로부터 최근 출판된 ISO 2631-1(1997)안은 실효치(r.m.s), crest factor, MTVV, VDV, eVDV에 관련된 계산 과정과 이들 결과치의 비교/분석에 따라 평가 결과를 얻는 과정이 매우 복잡함을 알 수 있다. 그러나, 10년 전에 출판된 BS 6841(1987) 표준안은 이 보다 간단 명료한 환산 및 평가 절차를 정의하고 있다는 점을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 짧지 않은 10 년간의 세월을 통하여 그와 같이 복잡하고 명료하지 못한 표준안이 채택된 것이 매우 안타깝다.

6. 결 론

BS 6841(1987) 표준안이 소개된 이후 10여년이 지나 새로이 개정된 ISO 2631-1(1997) 표준안은 실 사용자에게 환산 및 평가 방법의 복잡성과 서로 일치하지 않는 평가 결과를 도출할 수 있다는 문제점을 안고 있다. 새로이 ISO 2631-1(1997) 표준안에 추가된 12 진동 측정 축 채택과 평가 방안은 BS 6841(1987) 표준안과 크게 다르지 않지만, ISO 2631-1(1997) 표준안은 많은 부분에서 서로 일치하지 않는 평가 결과를 유발하는 요인들을 내포하고 있다. 향후 ISO 2631-1관련 수정안은 가능한 짧은 시간 내에 BS 6841(1987) 표준안과 같이 간결성과 명확한 환산 및 평가 방안들의 도출, 안락도 평가와 건강 및 안전 평가에 대한 통일된 방안 도출, 그리고 가혹한 진동 및 반복 충격 피폭에 대한 안전 조치 방안이 절실히 요구된다는 점을 본 논문은 강조한다.

후 기

본 연구는 감성공학 3 단계 과제 중 “소음·진동이 인체에 미치는 영향 연구” 과제의 지원을 받아 수행된 일부 연구 내용이다.

참 고 문 헌

(1) 정완섭 외 7인, 1998, “감성측정 시뮬레이터 개발 중 음향진동 환경 제시 기술,” KRISS-98-109-IR, 한국표준과학연구원.

(2) International Organization for Standardization, 1985, Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part 1:

General Requirements, ISO 2631-1.

(3) British Standards Institution, 1987, British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Shock, BS 6841.

(4) International Organization for Standardization, 1997, Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part 1: General Requirements, ISO 2631-1.

(5) International Organization for Standardization, 1990, Human Response to Vibration-Measuring Instrumentation, ISO 8041.

(6) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press, London, U. K.