

기초강좌

인체진동 ISO 2631-1

안 세 진

(위덕대학교)

지난 강좌에서 인체진동관련 국제표준기구의 조직과 표준의 제개정 절차, 그리고 전신진동(whole-body vibration)의 측정과 평가에 관련한 ISO 2631-1의 구성과 적용범위 등에 대하여 간략하게 소개하였다. 이 강좌에서는 ISO 2631-1을 이용하여 인체진동을 측정하고 평가하는 방법에 대하여 좀 더 면밀히 살펴보고자 한다. ISO 2631에서 규정하고 있는 전신진동의 주파수범위와 좌표축 그리고 주파수가중곡선에 대한 요약은 지난 강좌의 내용을 참고하기 바란다. 이 강좌는 2010년 소폭 개정된 ISO 2631-1(1997)/AMD1:2010의 내용을 반영하여 소개한다.

1. 머리말

ISO 2631-1은 전신진동(whole-body vibration)에 노출된 인체에 대하여 건강과 안락함, 진동 인지 가능성, 그리고 멀미(motion sickness) 현상을 정량화하여 평가하는 방법을 정의하고 있다. 즉 각종 차량 또는 산업현장의 기계류 등에서 발생하는 진동에 노출된 운전자 또는 작업자의 안락감(comfort)과 활동(activities) 그리고 건강(health)에 미치는 영향을 정량화하기 위한 측정 및 평가방법을 규정하고 있다. 이때 진동 신호의 형태는 주기적(periodic), 랜덤, 과도(transient) 기계진동을 포함하고 있으며, 일시적으로 충격성 진동이 발생하는 경우에 대해서는 별도의 방법으로 정의하고 있다.

2. Vibration Measurement

(1) Direction of vibration

ISO 2631-1에서는 앉은 자세, 선 자세, 누운 자

세의 인체로 진동이 전달되는 주요 위치와 좌표축을 정의하고 있으며, 각 위치와 좌표축에 따라 진동 가속도를 측정한다. 경사가 있는 시트(seat)의 경우에는 신체가 놓여진 상태를 기준으로 좌표축을 결정한다.

(2) Location of vibration

센서는 인체와 진동원이 접촉하는 위치의 진동을 효과적으로 측정할 수 있는 위치에 설치되어야 한다. 실질적인 위치는 진동에 노출된 피시험자 자신의 느낌과 판단을 반영하여 결정한다. 일반적으로 앉은 자세의 경우는 시트표면(seat surface), 등받이(seat back), 바닥(floor) 위치가 되며, 선 자세의 경우는 바닥이 되고, 누운 자세에서는 바닥이 신체를 받치고 있는 엉덩이와 등 그리고 머리가 주요 진동전달 위치가 된다. 앉은 자세에 대해서는 강체 시트인 경우에는 인체와 접촉하는 중심 위치에서 10 cm이내의 위치에 가속도계를 설치하고, 쿠션 시트의 경우에는 특수하게 제작된 가속도계(ISO 10326-1)를 시트표면과

등받이에 설치하여 측정한다.

(3) Signal conditioning and duration of measurement
측정한 진동신호는 관심분야에 따라 최대 주파수의 1.5배 주파수에서 -3 dB 컷오프(cutoff) 되는 low pass filter를 적용한다. 측정시간은 관심분야의 최소 주파수의 신호가 약 100주기 이상 포함될 수 있도록 한다. 즉 최소주파수가 1 Hz인 경우에는 108초 이상 신호를 획득한다.

3. Vibration Evaluation

(1) Basic evaluation method: Frequency weighted r.m.s.

ISO 2631의 진동평가법의 기본은 아래와 같이 정의되는 주파수가중된 r.m.s.(weighted root-mean-square)이다.

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

$a_w(t)$ 는 주파수가중된 가속도 시간값이며 병진성분에 대한 단위는 m/s^2 이고 회전성분 가속도에 대해서는 rad/s^2 이고, T 는 측정시간을 의미한다.

(2) Crest factor

주파수가중된 가속도 신호의 r.m.s.에 대한 최대 순간가속도의 비율을 “Crest factor”로 정의한다. ISO 2631에서는 crest factor가 9 이하인 경우의 진동은 앞에서 소개한 기본평가법인 주파수가중된 r.m.s.값으로 충분히 평가될 수 있지만, 9보다 큰 값을 가지는 피크성 진동은 인체 영향도를 고려한 추가적인 평가방법이 필요하며, 그 평가방법들은 다음의 (3)과 (4)절에 소개한다.

(3) Running r.m.s. method

간헐적인 속이나 과도진동을 평가하는 방법으로 다음 식과 같은 running r.m.s.를 권장한다.

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

이 식에서 관찰하는 진동의 특성에 따라 주파수가중된 순간가속도 $a_w(t)$ 는 적분시간 τ 와 순간시간 t_0 를 적절히 선택할 수 있다. 전체구간에서 running r.m.s.의 최대값을 MTVV(maximum transient vibration value)라 하고 아래와 같이 계산된다.

$$MTVV = \max[a_w(t_0)] \quad (3)$$

(4) Vibration dose value

진동에 포함된 피크성 신호에 민감한 경우에 대하여 r.m.s.의 2승근의 2승파워보다 다음과 같이 4승근의 4승파워(the fourth power vibration dose value: VDV) 사용을 권장한다.

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

(5) MTVV와 VDV사용 기준

주파수가중된 r.m.s. (a_w)가 아래의 값보다 초과할 때는 추가적인 평가법인 MTVV 또는 VDV를 사용하는 것이 적절하다.

$$\frac{MTVV}{a_w} = 1.5$$

$$\frac{VDV}{a_w T^{1/4}} = 1.75 \quad (5)$$

다만, MTVV 또는 VDV를 사용하더라도 보고서에는 기본평가법인 r.m.s.값도 함께 표시하는

기초강좌

것을 권장한다.

(6) Combining vibrations in more than one direction

하나의 위치에서 직교좌표계로 측정된 전체진동값 a_v 는

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

이때, k_x , k_y , k_z 는 각각의 축에 대한 가중값(multiplying factor)이며, 관심분야와 측정 위치와 좌표축에 따라 결정되어 진다.

4. Health

(1) Application

Health분야는 건강한 사람이 여행(travel)이나 작업(work) 또는 여가활동(leisure activity)을 하는 동안에 노출된 전선진동이 그 사람의 건강에 미치는 영향을 다루는 분야이다. ISO 2631은 앉은 자세에서 시트표면을 통하여 인체로 전달되는 0.5 Hz~80 Hz의 전선진동이 건강에 미치는 영향을 측정하고 평가하는 방법을 정의하고 있다.

(2) Evaluation of the vibration

진동이 건강에 미치는 영향을 평가할 때는 인체를 지지하고 있는 시트표면에서의 3축 병진방향 성분 주파수가중된 r.m.s. 중에서 최대값을 health 평가에 사용하는 것을 기준으로 사용한다. 다만 두 개 이상의 좌표축에서의 가속도 값이 비슷할 경우에는 각각의 가속도값을 제공하여 더하고 제곱근(root-sum-of-squares)한 값을 평가 기준으로 활용하기도 한다. 이때 각각의 축에 적용되는 주파수가중곡선과 가중값(multiplying factor)은 다음과 같다.

$$x - \text{axis} : W_d, k = 1, 4$$

$$y - \text{axis} : W_d, k = 1, 4$$

$$z - \text{axis} : W_k, k = 1$$

(7)

ISO 2631-1(1997)/AMD1:2010에서는 하루 진동노출량 $A_1(8)$ 을 새롭게 정의하고, 이것을 "Equivalent continuous acceleration over a period of 8 h"라 명명하였다. 진동이 지속된 시간 T_i 동안 측정하여 구한 각각의 방향에 대한 주파수가중 r.m.s.값(a_{wli})으로부터 $A_1(8)$ 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$A_1(8) = k_l \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_i a_{wli}^2 T_i} \quad (8)$$

여기서, T_0 는 기준시간 8시간(28,800초)이고, l 은 각각의 주파수 축 x , y , z 를 의미한다. k_l 은 각각의 좌표축에 대한 가중값인데 $k_x = k_y = 1.4$ 이고 $k_z = 1.0$ 이다.

(3) Guidance on the effects of vibration on health

그림 1은 진동에 노출된 시간에 따라 health에 미치는 영향의 정도를 나타내는 건강 주의구간을 도시한 것이다. 인체에 노출된 진동량이 점선

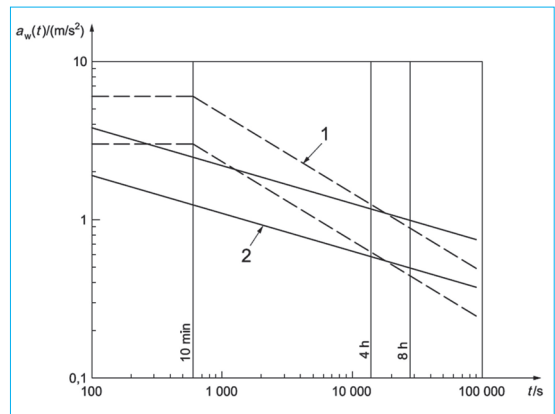


그림 1 Health guidance caution zone

과 실선 각각에 대하여 두 개의 선 사이의 영역에 있을 경우에는 잠재적 건강위험(potential health risk) 상태에 있는 것이고, 구간 아래의 있을 경우는 건강에 미치는 영향도가 거의 없는 정도이며, 구간 위에 있을 경우에는 건강위험이 일어날 가능성이 높은 정도이다. 그림 1에서 점선과 실선 각각이 이루는 구간은 4시간과 8시간에 노출된 인체에 대한 건강 영향도를 기준으로 작성되어진 것이다. 즉 4시간과 8시간 사이의 건강위험 구간을 먼저 결정한 후에 시간의 제곱근에 반비례하여 등가(equivalence)한 것은 점선으로 표시하고, 4제곱근에 반비례하여 등가한 것은 실선으로 표시하여 나타낸 것이다. 실선의 아래쪽 경계와 위쪽 경계에서의 eVDV(estimated vibration dose value)값은 각각 $8.5 \text{ m/s}^{1.75}$ 와 $17 \text{ m/s}^{1.75}$ 이다.

진동이 건강에 미치는 영향도 평가 방법을 요약 정리하면, 아래의 식과 같이 등가진동크기를 구하여 그림 1의 점선 또는 실선의 구간의 어디에 위치하는지를 비교하여 평가한다.

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{또는} \quad a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^4 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

그리고, crest factor가 9 이상인 진동에 대해서는 전체 구간에 대한 VDV값을 구하여 건강주의구간의 하한값($8.5 \text{ m/s}^{1.75}$)과 상한값($17 \text{ m/s}^{1.75}$)을 비교하여 평가하는 방법을 사용할 수도 있다.

5. Comfort

(1) Application

진동하는 시트에 앉은 사람의 안락감은 시트표면에서의 병진 3축 가속도성분이 주된 평가 성분으로 사용되지만, 경우에 따라서는 시트표면의 회전 3축 성분과 등받이의 병진 3축 그리고 발판에서의 병진 3축 가속도성분을 합산하여 평가에 이용하기도 한다. 이때 주파수의 범위는 0.5 Hz-80 Hz로 한다. 그리고 각각의 위치와 좌표축에 적용되는 주파수가중곡선과 가중값 k 는 다음과 같다.

- x -axis (supporting seat surface vibration): $W_d, k = 1$
- y -axis (supporting seat surface vibration): $W_d, k = 1$
- z -axis (supporting seat surface vibration): $W_k, k = 1$
- r_x -axis on supporting seat surface: $W_e, k = 0.63 \text{ m/rad}$
- r_y -axis on supporting seat surface: $W_e, k = 0.4 \text{ m/rad}$
- r_z -axis on supporting seat surface: $W_e, k = 0.2 \text{ m/rad}$

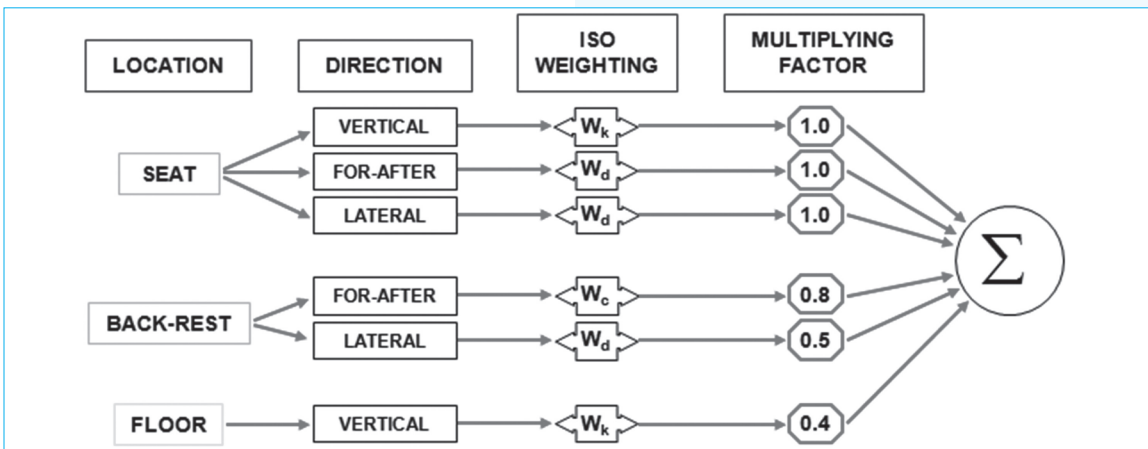


그림 2 안락감 평가 프로세스 예시

기초강좌

표 1 승객의 불편함 반응 정도

진동	평가
0.315 m/s ² 이하	불편하지 않음
0.315 m/s ² ~ 0.63 m/s ²	조금 불편함
0.5 m/s ² ~ 1 m/s ²	적당히 불편함
0.8 m/s ² ~ 1.6 m/s ²	불편함
1.25 m/s ² ~ 2.5 m/s ²	매우 불편함
2 m/s ² 이상	아주 불편함

x - axis on the backrest :	$W_c, k = 0.8$
y - axis on the backrest :	$W_d, k = 0.5$
z - axis on the backrest :	$W_g, k = 0.4$
x - axis at the feet :	$W_k, k = 0.25$
y - axis at the feet :	$W_k, k = 0.25$
z - axis at the feet :	$W_k, k = 0.4$

(10)

그림 2는 어떤 상황에서 안락감평가를 위한 전체 진동값을 구하는 과정의 예시를 나타내고 있다. 각각의 위치와 좌표축에 대한 합을 구할 때는 제곱합의 제곱근(root-sum-of-squares)값을 사용하며, 어떤 축의 값이 최대값의 25% 이하일 경우에는 그 축의 값은 제외하여 계산하기도 한다.

(2) Assessment of vibration

진동의 편안함 또는 불편함의 평가는 진동에 노출된 사람의 기대(expectation)수준과 그 당시에 수행하고 있는 활동(activities)의 종류, 그리고 주변의 온도와 소음의 정도 등에 따라 매우 다양하게 나타날 수 있다. 표 1은 대중교통(public

transport) 진동에 노출된 승객이 불편함으로 반응할 수 있는 정도를 나타낸 것이다.

5. Perception

진동을 인지하는 정도는 개인의 감각적 능력과 주위환경에 따라 다르지만, 진동을 감지하려는 일반인의 50%는 주파수가 증된 진동신호의 피크값이 0.015 m/s² 이상이 되면 진동을 감지할 수 있다. 그리고 25% 및 75%에 대해서는 각각 0.01 m/s² 과 0.02 m/s² 정도의 진동량이 될 때 진동을 감지한다. 진동의 지속시간이 1초 이내일 때는 지속시간에 증가에 따라 인지성이 다소 증가하지만, 1초 이상의 진동에 대해서는 지속시간이 진동 인지성에 미치는 영향은 거의 없다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Mansfield, N. J., 2005, Human Response to Vibration, CRC Press, London.
- (2) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Elsevier Academic Press, London.
- (3) ISO 2631-1, 1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration - Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva.