

저주파수 진동이 인체에 미치는 영향과 응용 (ISO 2631-3 내용을 중심으로)

장한기

Effect of Low Frequency Vibration on Human and Its Application

Han-Kee Jang

1. 서론

인체에 영향을 미치는 진동을 분류하는데 가장 중요한 기준은 주파수이다. ISO의 인체진동관련 규격에서는 인체에 영향을 미치는 거동을 저주파수 운동(0.63Hz이하)과 진동(1~80Hz)으로 나누고 있다[1]. ISO2631에서는 주파수별로 인체에 미치는 영향을 그림1과 같이 가중치로 정의하여 제시하고 있다. 저주파수 영역의 운동은 외부 거동(주로 수평방향)에 대하여 자세를 유지하기 위해 힘쓰게 되므로 물리적인 피로감을 줄 뿐만 아니라 'Motion sickness'란 증상을 유발한다.

이에 반해 진동은, 주로 1Hz 부근부터 그 이상의 주파수에 걸쳐 신체 전체 또는 일부에서의 즉각적이고 직접적인 불편함(Discomfort)을 유발한다. 특히, 4~10Hz 영역의 수직방향 진동은 착석상태에서 민감도가 매우 높기 때문에 차량에서 가장 신경을 써야 한다. 마지막으로 10~20Hz에서 민감도가 가장 높은 진동은 수완계(Hand-arm system)의 진동으로써 ISO5349에 별도로 주파수 가중치가 제안되어 있다[2].

본문에서는 이들 진동 중에서 가장 주파수 대역이 낮고 Motion sickness 관련 주파수에 대해 그 특성을 살펴보기로 한다.

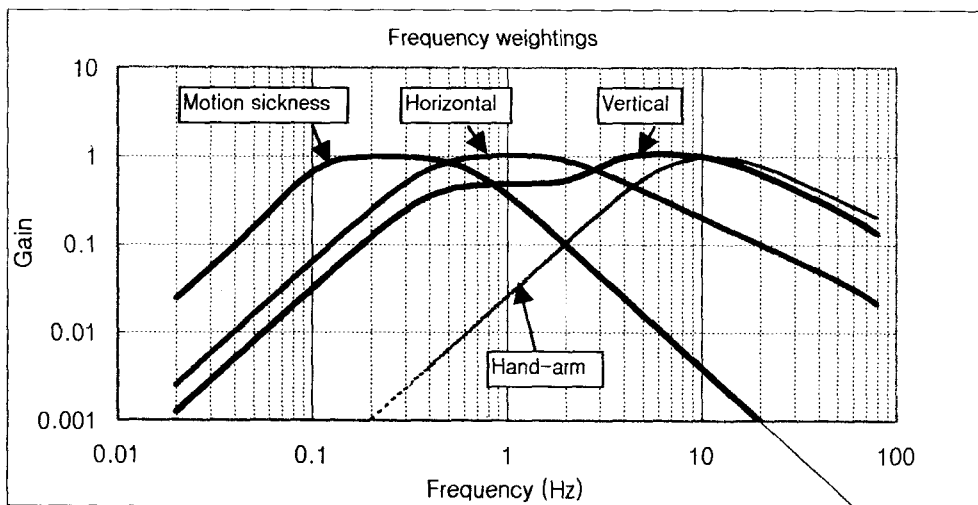


그림 1 인체에 대한 주파수 가중치

2. 저주파수 운동에 의한 멀미증상(Motion sickness)

2.1 멀미증상의 양상

인체진동 규격에 사용되는 용어를 정리한 ISO 5805에는 진동을 저주파수 운동(Low frequency motion)과 진동(Vibration)으로 분류하고 있다[3]. 저주파수 거동이 항상 주기적으로 나타나지 않기 때문에 진동이란 표현 대신 운동(motion)이란 용어를 사용하였다. 이 저주파수 거동이 일으키는 가장 큰 문제는 바로 'Motion sickness'인데, 비행기, 선박, 버스, 트럭 같이 장시간 탑승 환경에서 발생률이 높다. 광범위한 의미의 멀미증상을 영어로 'Motion sickness'라고 표기하는데 우리가 일반적으로 알고 있는 것보다 증상의 범위나 발생 메카니즘이 매우 복잡하며, 크게 세가지 메카니즘에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다[4].

하나는 매우 낮은 주파수(1Hz이하)의 움직임이 귀의 전정기관에서 감지되어 신경계로 전달되는 것이고, 또 하나는, 시야에서 낮은 주파수로 이동하는 대상이 시각적으로 감지되어 신경계로 전달되는 것이다. 또 하나는 몸 전체에 분포된 지각에 의해 거동을 감지하는 것이다. 이와 같이 서로 다른 방식으로 인식된 운동과 특정시간 이전에 기억된 것과 차이가 나고, 이 운동이 낮은 주파수로 일정시간 지속되면 멀미현상이 발생한다. 따라서, 신체의 움직임이 없이 시각의 변화만으로도 멀미증상이 발생할 수도 있으며, 반대로 눈을 감은 상태에서도 멀미 증상이 발생할 수 있다. 그리고, 두 가지 요인이 상승작용을 일으키기도 한다[3]. 가상현실(VR:Virtual reality) 장비를 사용할 때 나타나는 어지러움 증이 첫번째 경우에 해당하는 현상이다.

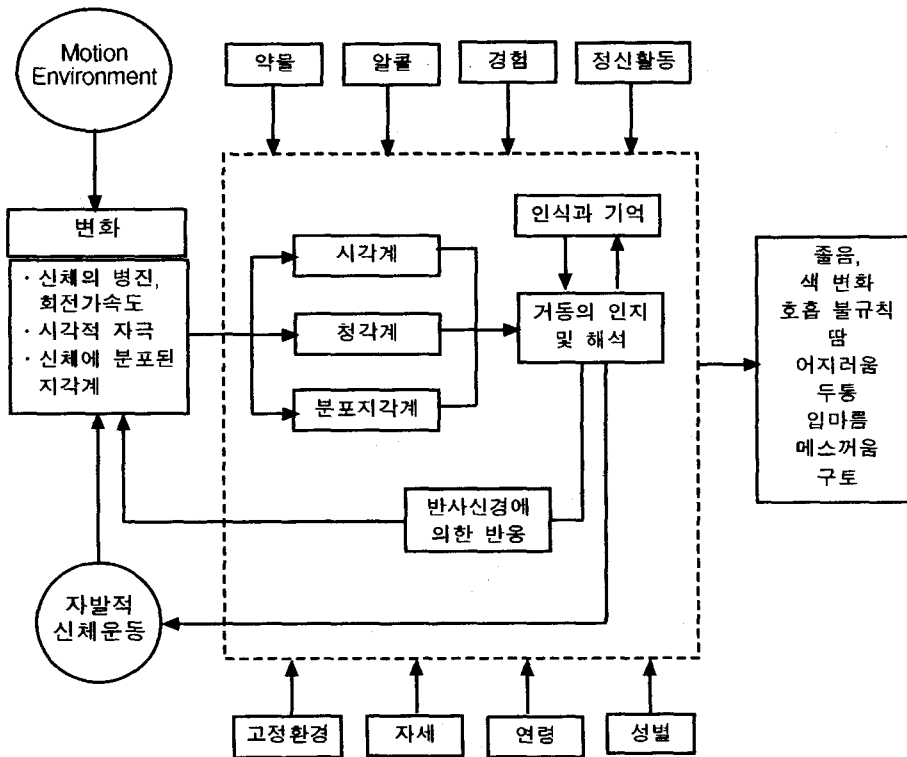


그림 2 Motion sickness 발생에 대한 개념도 [4]

멀미의 증상으로는 흔히 알려진 구토(vomiting) 이외에도 졸림(yawning), 호흡이상(irregular breathing), 땀흘림(sweating), 두통(headache), 어지러움(dizziness), 입 마름(drowsiness)등 매우 다양하다[3]. 멀미 증상은 진동에 의한 불쾌감과 달리 일단 증상이 나타나면 물리적, 심리적 측면에서 작업수행능력이 급격히 떨어지며 회복하는데도 상당한 시간이 소요된다. 따라서 운송 수단 탑승자에게 있어서 멀미증상은 진동보다도 훨씬 심각하게 고려되어야 한다.

2.2 멀미증상이 발생하는 환경

멀미 증상은 0.63Hz이하의 낮은 주파수의 운동과 관련하여 발생하는 것으로 알려져 있다[ISO 2631-3]. 이 주파수 대역의 운동이 가장 잘 나타나는 선박에서 가장 심하고, 비행기나 철도차량, 그리고 버스나 트럭에서도 이동 조건에 따라 나타나는 것으로 보고되어 있다. 승용차의 경우는 이와 같은 진동이 거의 발생하지 않지만 급발진, 급제동시라든가 급격한 코너링 때에 차량 전반에 저주파수 운동이 나타나며, 공기 스프링이 장착된 고급형 버스가 불균일한 노면을 통과한 후 나타나는 잔류진동이 대표적인 예이다.

3. 저주파수 운동의 영향평가

3.1 저주파수 운동의 정량적 평가

Lawther와 Griffin[5]은 저주파수 운동이나 진동에 의한 인체의 증상을 다음과 같은 식으로 정량화하였는데, 일반 진동의 경우 (n=4), 저주파수 진동의 경우 (n=2)를 적용할 것을 주장하고 있다.

$$\text{motion dose} = \left[\int a^n(t) dt \right]^{1/n} \quad (1)$$

Alexander[6], McCauley[7], Lawther[8]등은 motion dose의 증가에 따른 구토 발생율을 결정하는 실험을 수행하였으며, 그림3과 같이 대동소이하게 얻어졌다.

Griffin등은 그림 3의 결과를 이용하여 motion dose에 의해 구토가 발생할 비율(Vomiting incidence)을 식(2)와 같이 제안하였다. 여기서 K는 1/3을 사용하였다.

$$\text{Vomiting incidence}(\%) = K \times \text{motion dose} \quad (2)$$

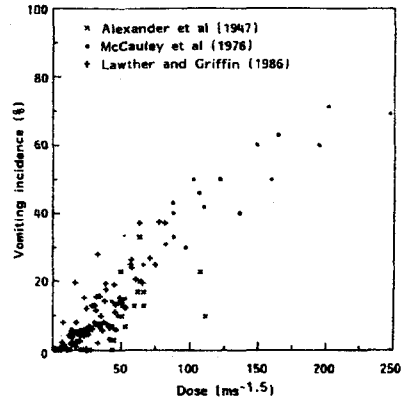


그림 3 Motion dose와 구토발생율과의 관계

식 (1)과 (2)는 BS 6841(1987)에서 현재 활용되고 있다[9].

0부터 3까지의 4단계의 스케일을 이용한 주관 평가에 대해 '고통 호소 평가치(Illness rating)'을 motion dose를 이용한 수식을 제안하기도 하였는데 식(3)을 제안하였으며 상수 k는 1/50을 적용하였다.

$$\text{Illness rating} = k \times \text{motion dose} \quad (3)$$

여기서, 고통 호소 평가치(Illness rating)의 단계는 다음과 같다.

- 0: 아무렇지도 않은 상태
- 1: 약간 불편한 상태
- 2: 불편한 상태
- 3: 매우 심각한 상태

Andrew와 Lloyd[10]는 선박의 거동에 대해 주관적인 거동의 크기를 다음과 같은 식으로 제안하기도 하였다.

$$SM = A \left[\frac{a}{g} \right]^{1.43} \quad (4)$$

여기서 A는 주파수 가중치로서 다음과 같이 정의된다.

$$A = 30 + 13.53(\log f)^2 \quad (5)$$

또, a는 수직방향으로의 가속도이고, g와 f는 각

각 중력가속도와 주파수이다. 랜덤한 거동의 경우에는 a 를 가속도의 r.m.s.값을 이용하고 주파수 보정을 통해 대표값을 계산한다.

3.2 ISO에서 제시된 가이드라인

ISO 2631-3(1985)에는 0.1~0.63Hz 범위에 해당하는 운동이 인체에 유발하는 진동을 평가하는 방법을 제시하고 있다. 다른 인체 진동 분야와 달리 시험과 데이터 확보가 어렵기 때문에, 그림 4와 같이 '심각한 불편함을 발생시키는 범위 (Severe discomfort boundaries)'에 대한 가이드라인만이 제시되어 있을 뿐이다. 다른 규격에서와 같이 불편함이 발생하는 영역(Reduced comfort boundary)의 제시라든가 불편함에 의해 작업수행이 어려워지게 되는(Decreased proficiency) 영역이 구체적으로 제시되고 있지 않다. 단지 대략적인 값으로 0.25g 정도가 작업수행을 불가능하게 하는 수준으로 제시되어 있을 뿐이다.

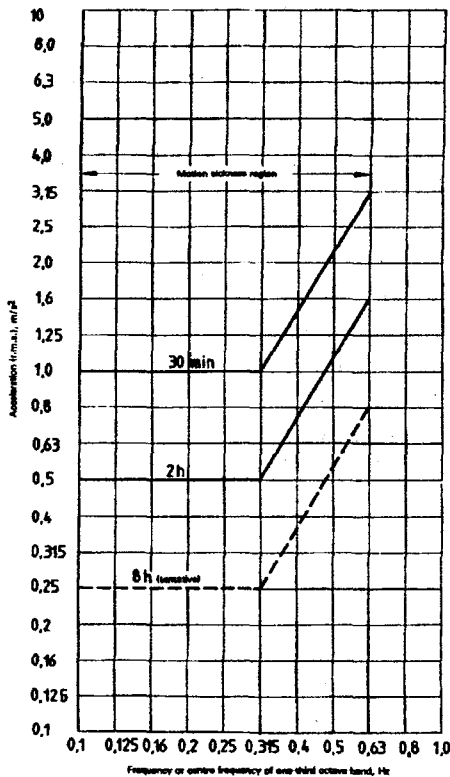


그림 4 심각한 불편함을 주는 영역

그림 4의 결과도 수직 방향의 전신진동에 대해 적용이 가능하며, 롤(roll)과 피치(pitch)방향의 가속도가 공존할 때에는 제시된 수준보다 25% 정도 낮춰서 적용하도록 권고되어 있다. 또, 자주 여행하는 사람의 경우 Motion sickness에 더 민감해 지므로 제시된 값보다 20% 낮춰서 적용하도록 권고한다. Motion sickness에 관련된 기준치들은 모집단의 90%가 불편함을 호소하는 수준으로 설정되어 있는데, 개인차가 존재하기 때문에 통계적인 신뢰수준이 90%에 머무는 것이다.

4. 저주파수 인체진동의 응용분야

진동이 인체에 미치는 영향이 즉각적으로 나타나는데 반해, 저주파수 거동에 의한 영향은 상대적으로 일정한 시간이 진행된 후에 나타난다. 그렇지만 일단 증상이 나타나면 인체에 물리적으로 심각한 악영향을 발생시키기 때문에 인체환경으로서 상당한 유의가 요망되는 대상이다. 다음과 같이 저주파수 거동이 발생하는 환경이나 제품을 설계함에 있어서 멀미증상 발생을 염두에 두어야 한다.

· 차량 동특성 설계

일반 승용차에 있어서는 멀미 증상과 관련된 주파수의 거동이 잘 나타나지 않는다. 노면 자체가 주기성을 갖는 장파형로(Long wave road)의 경우를 제외하고는 수직방향의 저주파수 거동이 잘 나타나지 않는다. 그러나, 몇 가지 경우에 대해서는 1Hz이하의 저주파수 거동이 문제가 된다.

버스의 경우, 고 주파수 진동을 저감시키기 위해 에어 스프링 등을 이용하여 탑승공간의 마운팅 주파수를 매우 낮게 가져가는 경우가 있다. 이 경우, 노면의 불균일성에 의해 피치나 바운스, 혹은 롤 거동이 긴 주기를 갖고 나타날 가능성이 높다. 특히, 뒷 좌석의 경우 수직 방향으로의 거동이 크게 발생한다. 장시간 탑승시 탑승자의 멀미 발생율이 높아지게 된다.

대형 트럭의 경우도 운전자에게 전달되는 진동을 차단시키기 위해 Cab을 마운팅하고 운전석에 서스펜션 시트를 설치하는 예가 흔히 있다. 두 가지 경우 모두 시스템이 갖는 공진주파수를 2Hz 전후에 두지만 감쇠를 매우 크게 하기 때문에, 이보다 낮은 주파수의 가진력도 증폭시키는 역할을 하게 된다. 따라서, 저주파수 거동에 의한

피로가 발생할 소지가 크다고 하겠다.

· 운송수단에서의 Motion sickness 평가

장시간 탑승하는 운송 수단의 경우, 탑승자들에게서 Motion sickness가 발생하여 진행되는 것을 예방하기 위해서 탑승환경에서 나타나는 저주파수 거동을 정량적으로 평가할 필요성이 있다. 차량의 경우에는 탑승자 그룹 내에서 불편함의 발생률이 증가하기 전에 차량을 세우고 휴식을 취함으로써 안락성을 확보할 수 있기 때문이다. 비행기나 선박 같은 경우에는 탑승을 임의로 중단할 수 없지만 걸어다닌다거나 주위를 환기시킴으로써 증상을 다소 완화시킬 수 있다.

· 가상 모델링(Virtual reality)

Motion sickness는 실제로 지지환경에 거동이 발생하지 않아도 나타날 수 있는데, 대표적인 경우가 바로 가상 현실 장치를 사용하는 경우이다. 최근에 들어서 공간상의 시뮬레이션을 위해서 가상현실이 자주 사용되는데, 가상현실 장치를 일정한 시간 이상 사용하면 현기증을 비롯해서 Motion sickness의 여러가지 증상이 나타난다. 따라서, 가상현실 장치에서 motion sickness 증상이 나타나는 데까지 걸리는 시간을 추정함으로써 이상 증상이 발생하는 시점을 미리 알려줌으로써 사용을 일시 중단하도록 유도할 수 있다.

5. 결론

본문에서는 저주파수 거동이 어떻게 인체에 불편함을 미치는지 그 발생 메카니즘과 구체적 증상에 대해 알아보았다. 'Motion sickness'라고 불리우는 이 증상은 사람에 따라 그 발생 경로나 정도의 편차가 있지만, 충분한 수의 실험을 통해 정량적인 수식으로 평가가 가능하다. 여기서는 BS 6841이나 ISO 2631등에서 제안되어 있는 motion sickness 평가방법을 비교하여 정리하였다. 특히, BS 6841에서는 가속도를 이용한 'motion dose'양을 계산하여 구도의 발생율이나 통증 평가치를 추정하는 수식을 제안하였다. ISO에서는 BS와 달리 정량적으로 평가하는 수식은 제공하지 않고 있으며, 단지 '심각한 증상이 발생하는' 주파수와 가속도의 범위를 개략적으로 제시하고 있을 뿐이다.

마지막 부분에서는 저주파수 인체진동 관련 기술을 활용할 수 있는 분야와 그 활용가능성에 대해 정리하였다.

참고문헌

- [1] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration, 1997.
- [2] ISO 5349, Mechanical Vibration-Guidelines for the Measurement and Assessment of Human Exposure to Hand-transmitted Vibration, 1986.
- [3] ISO 5805, Mechanical vibration and shock affecting man-Vocabulary, 1981.
- [4] M. J. Griffin, Handbook of Human Vibration, Academic Press, 1990.
- [5] A. Lawther and M. J. Griffin, "Prediction of the Incidence of Motion Sickness from the Magnitude, Frequency and Duration of Vertical Oscillation," The Journal of the Acoustical Society of America, 82, pp.957-966, 1987.
- [6] S. J. Alexander and et al., "Studies of Motion Sickness; XVI, The effects upon sickness rates of waves and various frequencies but identical acceleration," Journal of Experimental Psychology, 37, pp.440-447, 1947.
- [7] M. E. McCauley, J. W. Royal, C. D. Wylie, "Motion Sickness Incidence: Exploratory Habituation, Pitch and Roll, and the Refinement of Mathematical Model," Technical Report No. 1733-2, AD-A024 709. Human Factors Research Inc., Goleta, California, 1976.
- [8] A. Lawther and et al, "The motion of a ship at sea and cosequent motion sickness amongst passengers," Ergonomics, 29, pp.535-552, 1986.
- [9] British Standard Guide to Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock (BS 6841), British Standards Institution, 1989.
- [10] R. N. Andrew and A. R. J. M. Lloyd, "Full-scale Comparative Measurements of the Behavior of Two Frigates in Severe Head Seas," Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 123, pp.1-31, 1981.