



한국인의 진동에 대한 주관적 반응 특성과 국제표준

박 세 진

(한국표준과학연구원)

하국인의 진동에 대한 주관적 반응 특성 실험 결과 값이 ISO 5982에 제시된 값과 차이를 보이는 것으로 볼 때 한국인의 특성에 맞는 표준규격은 절대적으로 필요하다. 국제표준만으로는 설명되지 않는 많은 부분을 어떻게 해결해 나가야 할 것인가에 대해 깊게 생각해보아야 한다.

1. 머리말

경제가 발전함에 따라 물질적인 풍부함이 만족되자 사람들은 생활이나 마음의 질적인 풍부함을 추구하게 되어 삶의 질에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 삶의 질을 추구할 수 있게 하는 경제 발전의 진행과정에서 도로망의 확충, 교통량의 증가와 같은 다양한 사회간접자본시설의 확충과 대형공사 시행의 증가로 인하여 소음, 진동과 같은 환경 위해요인 유발시설 및 환경이 증가하고 있다. 특히 작업장에서 사용되는 진동공구의 급격한 증가는 생산적, 경제적 측면에서 상당한 기여를 하였으나 전동기나 공기압에 의한 진동공구의 발달과 보급은 작업자의 건강측면에서는 큰 피해를 초래하게 되었다.

진동은 최근 들어 급증하는 환경관련 위해요인 중에서 유독성 대기, 수질 오염과 비교해서는 그 중요도가 낮게 나타나지만 그 범위가 광범위한 지역에 걸쳐 있어 많은 사람들에게 노출되기 때문에 가장 근본적인 환경문제 중의 하나로 인식되어 가고 있다. 따라서 진동은 작업장에서 작업관련 위해요인으로 예방적 차원의 대비는 삶의 질 향상에 이젠 필수적인 조건이 되고 있다. 이에 일반 작업장에서부터 공공 시설물 등의 특정 공간

에 대한 쾌적 및 위해요인 등의 환경에 대한 척도를 제시할 수 있으면 일상생활 공간의 쾌적도 관리 및 예방적 차원의 조치를 취하는 좋은 근거가 될 수 있을 것이다. 특히, 환경에 의한 인체진동지표의 개발은 생산능률을 향상시켜줄 뿐만 아니라 근로자의 건강과 생명을 유지시켜주는 중요한 부분이다. 이를 위해서는 작업환경을 점검하여 작업자의 건강에 위해한 요인들을 발견하여 제거하도록 조인함으로써 작업과 관련하여 최적의 신체적, 정신적 건강을 유지할 수 있는 작업환경을 조성하여 생산능률을 향상시켜주는 것이 필요하다.

진동이 인체에 미치는 영향은 생리적인 피해와 심리적인 피해로 나눌 수 있다. 심리적인 측면에서의 진동 영향은 주관적인 평가 방법으로 개인이 갖고 있는 감성이나 분위기에 의해 크게 좌우되며 개인차가 크다. 대부분 진동의 인체영향평가에 관한 연구는 주로 사람의 진동에 대한 내구력이 진동레벨의 허용치를 결정하는 표준이라고 생각하여 진동에 대한 인체의 민감도를 측정하였으나 진동에 대한 주관적 반응은 지각적이거나 운동신경적인 것이기 보다는 안락도(comfort)평가를 의미한다. 안락감은 진동의 강도, 방향, 주파수 등의 특성 뿐 아니라 개인의 특성에 따라 다양한 형태로 나타난다. 현재 우리나라의 경우 신체적 특성이 다른 외국인

을 대상으로 한 실험결과를 그대로 받아들여 사용하고 있어 한국인의 신체적 특성을 고려한 진동에 대한 민감도 즉, 등안락도 곡선추출에 관한 연구가 요구된다.

2. 진동에 대한 인체의 주관적 반응의 특성 - 등안락도 곡선

인체에 피폭되는 진동은 강도, 주파수, 방향, 진동발생 메커니즘, 전파매개체, 개인의 특성과 성격 등에 따라 인간에게 매우 복잡한 감정을 초래하게 되며, 아직까지 명확하게 진동이 인체에 미치는 영향에 대한 정의가 되어 있지 않다. 전신 진동이 인체에 피폭되었을 때 여러 가지 영향이 나타날 수 있다. 0.5 Hz 이하의 낮은 주파수에 인체가 노출 되었을 때 멀미(motion sickness)가 나타날 수 있으며, 이는 주로 선박과 같은 운송기관에서 주로 발생할 수 있다. 0.5에서 80 Hz 영역에서의 진동은 건강(health), 안락감(comfort) 그리고 인지(perception)에 관련된 많은 문제점을 일으킨다. 또한 머리로 전달되는 진동은 시각 능력을 떨어뜨리고 손으로 전달되는 진동은 작업효율의 저하를 가져온다. 장시간의 강한 인체진동은 척추와 신경시스템에 영향을 미치게 되며, 척추 마모를 가져오게 되어 건강에 큰 손상을 입힐 수가 있다. 그리고 낮은 가능성으로 소화기관, 생식기관에 영향을 미친다고 보고되어 있다. 따라서 자동차나 기차 혹은 비행기, 선박 등과 같이 인체에 진동을 전달하여 불쾌감을 일으키는 환경에서의 진동을 줄이기 위한 연구가 많이 수행되어 왔다. 이때 인체에 전달되는 모든 진동을 줄이기 위해서는 많은 비용과 노력이 소요되지만, 인간이 민감하게 느끼는 대역의 진동을 효율적으로 줄일 수 있다면 적은 비용으로 큰 효과를 얻을 수 있다. 따라서 인간에게 좀 더 편안한 환경을 위해서 진동 주파수, 방향, 시간 그리고 진동량에 따라 인체에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어 왔다.

전신 진동이 초래하는 불쾌감, 피로감 및 인체 상해 등에 관한 연구는 1930년대부터 시작되었다. 특히 1966년 영국의 ISVR에서 지난 기간 동안 연구된 100여 개의 자료를 정리하여 인체 진동에 대한 연구를 체계적으로 시작하여 인체 진도에 대한 연구가 널리 알려지기 시작했다. 진동과 안락감에 대한 여러 연구 결과들을 토대로 국제표준기구에서는 ISO 2631을 1974년에 출판하였

다. 이 규격은 주파수 공간에서의 등안락도 곡선(equivalent comfort curve)을 정의하였다는데 의미가 있다. 등안락도 곡선은 인체의 주파수 영역에서의 민감도를 알아내기 위해서 1~100 Hz 범위의 정현 신호를 이용하여 인체가 최대로 견딜 수 있는 한계를 취하여 얻어지게 된다. 등안락도 곡선은 또한 불쾌감과 진동에 대한 인체의 인식 정도와 깊은 관련을 가지고 있다고 알려져 있다. 이러한 등안락도 곡선의 역을 이용하여 인간의 인식에 민감한 주파수 가중 함수(frequency weighting function)를 정의하게 된다. 이러한 연구의 결과로부터 수직방향으로는 4~8 Hz까지의 진동이, 앞뒤 방향과 측면 방향으로는 0.5~2 Hz까지의 진동이 인체에 가장 민감한 영역이라는 결과를 제시하였다. 진동 승차감 분야에서 1970년대 이후로 영국의 Griffin교수가 많은 연구를 수행하였는데, 그는 차량 주행 시의 불쾌감은 단순히 고유 진동수의 위치나 크기에 대한 영향보다는 전체 주파수 영역의 스펙트럼 면적의 중요성을 지적하였다.

안락감은 주관적인 특성을 가지고 있으므로 개개인의 안락도 정도는 동일한 진동조건이라도 사람에 따라 차이가 생길 수 있으므로 모든 사람에게 동일하게 적용될 수 있다고는 하기 어렵다. 그러나 등안락도 곡선과 주관적인 평가를 기초로 진동에 대한 안락감을 정량적으로 나타내기 위한 여러 방법이 제안되었다. 안락감과 관련된 지수는 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 Pradko에 의해 제안된 흡수 에너지(absorbed power) 방법으로, 인체에 전달되는 에너지의 총합으로 힘과 속도의 곱을 적분하여 불쾌감을 나타내게 된다. 두 번째 방법은 가속도 제곱 평균값을 이용해서 나타내는 방법이며, 낮은 진동수준에서는 제곱근(root mean square)을 충격과 같은 큰 진동수준에서는 가속도의 네 제곱근(root mean quard)을 이용하는 방법이 사용된다. ISO와 BS에서는 주파수 가중함수를 적용한 가중 가속도(weighted acceleration)의 제곱근으로 진동에 의해 인체에 초래되는 불쾌감, 진동 위험 구간 등을 규정하고 있다.

전신 진동에 대한 연구를 통해서 지금까지 인체 응답 특성에 대한 많은 규명이 이루어져 왔다. 이들 인체 진동특성에 관한 연구는 가진점 임피던스(driving point impedance), 겉보기 질량(apparent mass), 가속도 전달률(transmissibility)에 대한 연구를 통해서 이루어져 왔다.

가진점 임피던스와 결보기 질량은 인체에 전달되는 힘과 인체의 운동의 관계를 설명하는 것으로 인체에 전달되는(to the body) 특성과 관련이 있다. 그리고 가속도 전달함수는 인체를 통과한(through the body) 진동의 각 부분으로 전달 과정을 나타낸다. Coermann은 한 사람의 피실험자에 대해서 수직 방향의 인체 진동 결과를 이용해서 똑바로 앉은 자세(erect posture)의 고유 진동수가 근육에 힘을 주지 않은 자세(relaxed posture)의 고유 진동수 보다 1 Hz 정도 증가한다는 것을 발견하였다. Sandover는 진동형태가 다른 2개의 입력신호를 이용해서 차량 주행 시에 발생하는 진동 수준 정도에 대해서는 인체는 비교적 선형의 관계를 보인다는 것을 밝혔으며, 또한 진동의 크기가 일정수준 이상으로 커지면 인체의 고유 진동수가 조금 낮아져서 강성이 줄어든다는 것을 보였다. Fairley와 Griffin은 백색 잡음을 이용한 수직 방향의 랜덤 가진으로 발판, 등판, 자세, 근육의 긴장도, 진동 크기에 따른 변화를 살펴보았으며, 그 결과 등판의 사용, 똑바로 앉은 자세 그리고 근육의 긴장도에 따라 고유진동수의 변화를 가져온다는 사실을 발견하였다. 이러한 연구의 결과로 수직 방향에 대해 둔부와 가진판 사이에는 대략 4~6 Hz에서 첫 번째 공진이 나타난다는 것이 밝혀졌으며 또한 8~12 Hz 사이에 두 번째 공진이 있다는 것이 발견되었다. 하지만 이러한 인체 진동 특성은 매우 여러 가지 인자들과 관련이 있어 복잡한 특성을 나타낸다. 즉 사람에 따라서 나이, 성별, 무게, 크기 등과 같은 피실험자간의 차이가 있을 수 있으며, 동일한 사람에 대해서 측정할 경우에도 앉을 때 마다의 앉은 자세, 근육의 긴장도 등에 달라질 수 있다. 그러나, 이러한 인체 응답 특성이 신체에 미치는 진동 수준을 평가하는데 중요한 역할을 하는 것은 사실이지만 진동에 대한 반응은 지각적이거나 운동신경(motor)적인 것이라기보다는, 안락감(comfort)과 같이 다분히 주관적이다. Osborne 등의 연구 결과를 살펴보면 13 Hz에서 18 Hz 주파수 대역에서 전달특성이 개인의 주관적 반응에 큰 영향이 있었지만 물리적, 신체적 변수를 추가하였을 때에 그 효과가 37% 정도 밖에 되지 않은 것으로 나타났다. 즉, 개인특성뿐 아니라 다른 요소들도 진동에 대한 주관적인 반응에 영향을 주었다. 그 중 하나가 신체자세인데 자세별 전달특성 효과와 자세에 따른 작업수행능력에 관한 연구는 어느 정도 이루어졌다.

그러나 진동에 대한 자세별 주관적 반응에 대한 연구는 그렇게 많지 않은데 Chaney의 연구가 거의 최초이다. 그는 무릎을 벨트로 묶은 앉은 자세에서 동일 불쾌감 곡선을 구하였으며, 이와 유사한 연구가 Jones와 Saunders(1972)에 의하여 수행되었다. 또한, Harrah와 Shoenberger(1981)은 서로 다른 등받이 각도를 가진 의자에 누운 상태에서 진동에 대한 주관적인 반응을 측정하여 등각도별 느끼는 불편함의 차이를 제시하였고, 30°~40° 사이의 각도가 가장 불안한 상태임을 밝혔다. Osborne와 Boader는 자세에 따라서 전신진동에 대한 주관적 반응이 어떻게 달라지는지 연구하였는데 선 자세(standing), 허리를 펴고 앉은 자세(sitting upright), 쭈그린 자세(sitting slouched) 등 세 가지 자세에 따른 주관적 반응곡선을 구하였다. 그 결과 3가지 자세에 따른 곡선형태에서 유의적인 차이가 발생하였으며 앉은 자세에서의 진동수준이 선 자세에서 보다 낮게 나타났다. 두 가지 앉은 자세에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

국내의 관련연구는 1990년대 이후로 한국인의 기계적 응답특성 규명과 이에 기초한 인체 진동 모델 개발에 대한 연구 성과가 나타나고 있다. 상하진동에 대한 앉은 자세의 가진점 임피던스 측정에 대한 연구를 통하여 한국인의 진동특성이 국제표준규격 ISO 5982(1981년)에 제시된 값과 차이가 있음이 밝혀졌다. 이러한 연구결과는 전신진동에 대한 한국인의 주관적 반응특성 역시 서양인을 대상으로 한 실험의 결과로 얻어진 ISO 2631(1974,1985), BS 6841(1987), ISO 2631(1997)에 제시된 주파수 가중함수의 사용에 신중한 고려가 필요함을 보여준다.

등안락도 곡선에 대해 좀 더 자세하게 설명하자면 다음과 같다. 진동이 인체에 미치는 영향은 주파수 대역에 따라 달라지는데, 인간이 느끼는 진동의 양은 위치와 진동 가속도의 주파수 성분에 따라서 상대적인 인지를 하게 된다. 즉 동일한 피폭 부위라 하더라도 주파수가 달라지면 인지 정도가 다르게 된다. 이러한 정도를 정량화한 주파수 감응 곡선을 주파수 가중함수라고 정의한다. 이러한 주파수 가중함수는 각 주파수에서 동등하게 느끼는 가속도의 곡선 즉, 등안락도 곡선(equivalent comfort contour)을 구함으로써 결정할 수 있다. 등안락도 곡선은 사람의 주관적 평가에 의해 결정되기 때문에 진동에 대한 인체의 주관적 반응 특성으로 규정할

수 있다. 진동에 대한 주관적 반응 특성은 진동이 인체에 미치는 많은 영향과 관련이 있을 것으로 생각된다. 한국인의 물리적 또는 기계적 응답특성이 서양인을 대상으로 한 실험의 결과로 얻어진 ISO 5982에 제시된 값과 차이를 보이는 것으로 볼 때, 국제 표준 규격에 제시된 주파수 가중 함수의 사용에는 신중을 기하여야 할 것이다. 이러한 이유에서 현재의 한국인 등안락도 곡선이 ISO 규격과 얼마나 다른지를 살펴보고자 한다.

3. 한국인의 등안락도 곡선과 국제표준과의 비교

3.1 피실험자 및 실험장치

(1) 피실험자(Subjects)

피실험자 선별단계에서 부적합한 사람을 제외시킨 후 인체 실험 동의서에 서명한 20~50대 남성 50명에 대해서 실험을 진행하였다. 피실험자의 특성은 표 1에 나타내었다. 피실험자는 편한 자세(relaxed posture)로 앉

표 1 피실험자 특성

	Height (cm)	Sitting Height (cm)	Weight (kg)	Weight on seat (kg)	Age	BMI (kg/m ²) ⁴
min	160	122	57	41.2	23	19
mean	172.8	127	73.5	57.4	35.4	24.5
median	173	127	73	55.4	33.5	24
max	181	133	99.8	82.6	58	33
SD	5.1	2.4	9.8	8.9	9.3	3.3



그림 1 실험장비

록 하되, 실험 중에는 머리 움직임을 비롯한 자세 변화를 최소화 하도록 협조를 요청하였다.

(2) 실험 장치(Apparatus)

피실험자가 앉을 의자는 엉덩이를 받치는 평평한 강체 바닥면(rigid flat seat)과 수직 등받이(backrest)로 구성되어 있으며, 피실험자의 발은 강체 바닥면으로부터 400 mm 아래의 가진기(shaker) 테이블 면과 접촉한 상태가 유지되도록 하였다. 의자는 최대진폭이 0.25 m(10 inches), 최대 동적 힘이 100 kN, 최대 시편 하중이 1000 kg, 그리고 0.1 Hz~500 Hz의 진동 가진 주파수를 갖는 TEAM사의 유압가진기(Team model 80, Hydraulic shaker)에 의해 구동된다. 그림 1에 실험장치를 나타냈다. 실험 중 소음 수준은 65 ± 2 dB(A) 였으며 진동과는 무관하였다. 실험실 내의 온도는 23 ± 5 °C, 습도는 60 ± 5% RH 였다.

3.2 실험방법(Method)

등안락도 곡선을 구하는 방법은 크게 상대적인 방법(relative method)과 절대적인 방법(absolute method)로 나눌 수 있다. 절대적인 방법은 초기의 연구에서 많이 사용된 방법으로 감성을 표현할 수 있는 평가척도(rating scale)를 사용하였다. 이 연구에서는 상대적인 방법 중에서 constants stimuli 방법을 사용하였다. 이 방법에서 피실험자는 고정된 주파수와 크기를 갖는 기준진동(reference vibration)과 시험 진동(test vibration)을 비교하여 두 진동 사이의 불쾌감의 대소를 판단한다.

이 실험에서 기준진동은 10 Hz, 0.8 m/s²rms인 수직방향의 정현진동(simusoidal vibration)을 사용하였으며, 비교되는 시험 진동은 2.5~40 Hz 사이의 1/3 옥타브 주파수의 진동 12개를 택했다(기준진동 제외).

개인별 실험순서는 임의로 선정되었고, 오전과 오후 또는 시간별 효과를 없애기 위하여 실험주파수의 순서도 임의로 하였다. 기준진동(이하 '기준')과 비교되는 시험진동(이하, '시험')은 각각 10초씩 주어졌으며 "기준"과 "시험" 사이의 간격은 1~5초 정도였다.(그림 2) 피실험자는 "기준", "시험"이 표시된 버튼을 가지고 "기준"과 "시험"을 비교하여 더 불쾌한 진동을 표시하도록 하였다.

전체실험순서는 다음과 같다. ISO 2631(1997)의 주파수 가중함수를 이용하여 ISO기준에 맞는 등안락도 곡

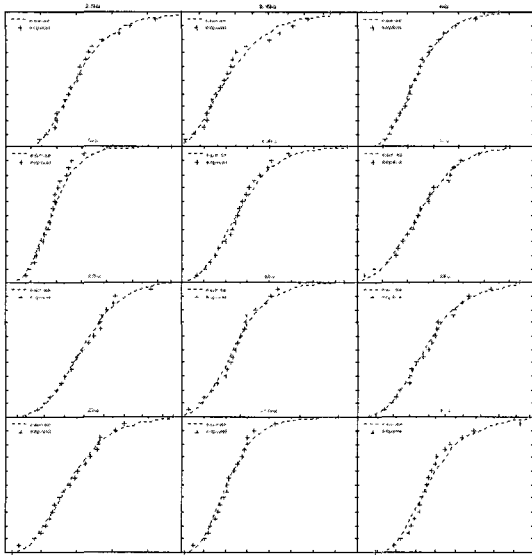


그림 4 시험 주파수에 대한 등안락도 수준 누적분포도

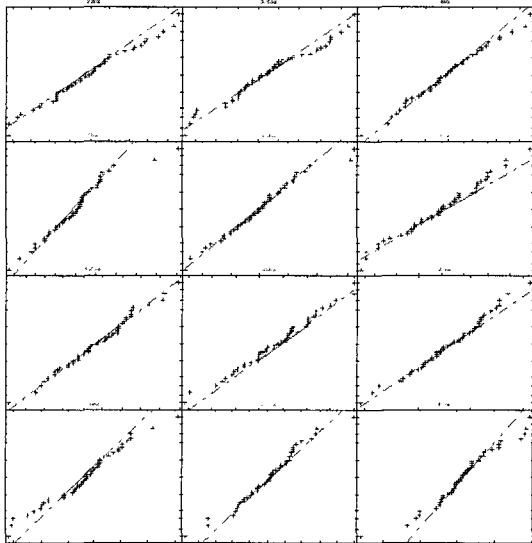


그림 5 X에 대한 정규성 검증

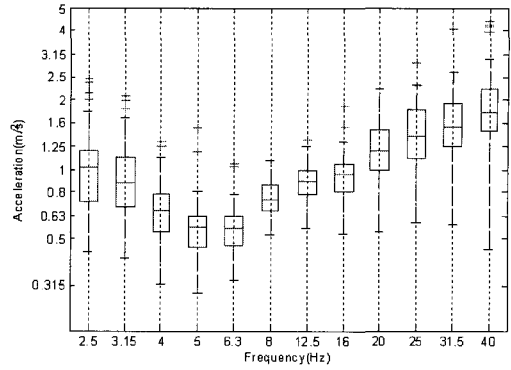


그림 6 등안락도 수준에 대한 상자 그래프

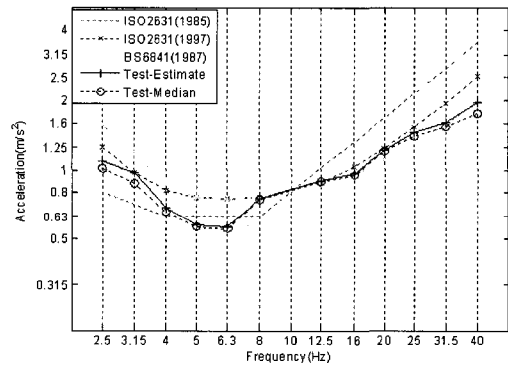


그림 7 등안락도 수준의 중앙값

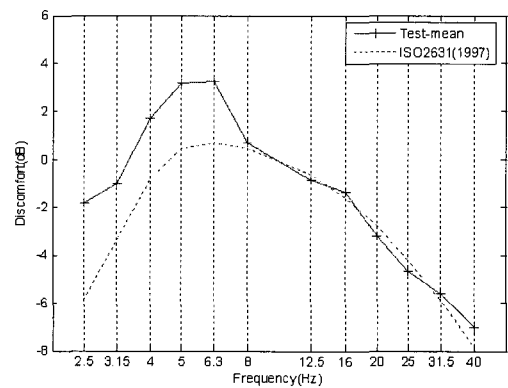


그림 8 실험 평균값과 ISO 2631(1997)의 비교

표 3 Paired t-test 결과


Test name	Test	Frequency(Hz)											
		2.5	3.15	4	5	6.3	8	12.5	16	20	25	31.5	40
t Test	P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.271	0.319	0.463	0.266	0.260	0.456	0.113
	H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

4. 맺음말

한국인의 특성에 맞는 표준규격은 절대적으로 필요하다. 국제표준만으로는 설명되지 않는 많은 부분을 어떻게 해결해 나가야할 것인가에 대해 깊게 생각해보아야 한다. 각 분야별로 필요한 한국표준과 인증된 규격들이 모여져 국제표준을 제정하는데 절대적으로 반영되어야 한다.

진동은 인간의 심리적인 측면에 영향을 미친다. 인간이 진동에 노출되었을 때 대상자의 나이나 건강상태 등의 신체적 특성, 자세, 진동이 가해지는 인체부위 등이 모두 심리적으로 작용하여 진동에 대한 인간의 반응을 변화시킨다. 또한 이러한 변수들은 그 자체가 수시로 상태를 변화시킴으로써 통제하기 어렵다. 이러한 인체 진동에 대한 연구는 국내외적으로 활발하게 이루어지고 있으나, 진동의 경우 인체를 진동에 노출시켰을 때의 인체 진동의 측정, 환산 그리고 평가에 대한 국제표준방안들에 대한 체계에 대한 내용이 대부분으로 실제 인체가 진동에 노출되었을 때 진동조건이나 시간적인 요인에 의한 인체의 임상학적인 측면의 분석을 통한 인체영향평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

그리고 현재 인체 진동관련 기술의 많은 부분은 수입에 의존하고 있어 앞서 서술한 것과 같이 인체 진동에 인간의 신체적 특성이 영향을 미친다는 점을 고려하여 서양인을 대상으로 제정된 기준과 척도를 그대로 적용시킨다는 점에서 문제가 있다. 또한 진동의 강도, 방향, 주파수, 진동발생 메커니즘, 전파매체에 의한 진동의

전달특성이 신체에 미치는 진동수준을 평가하는 중요한 역할을 하는 것은 사실이지만 진동에 대한 반응은 지각적이거나 운동신경적인 것이라기보다는 안락감과 같은 주관적 평가에 더 민감하다. 대상의 개인적인 연령 및 신체적 특성을 고려한 상태에서의 진동에 대한 주관적인 안락감에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 그러나 진동이 인체에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 원인에 해당되는 진동과 결과에 해당하는 인체를 모두 이해하여야 하는데 인간을 이해하는 것이 진동을 이해하는 것 보다 훨씬 더 어려운 문제이다. 진동은 자연적인 요소가 강해 그 원리나 특성이 변화하지 않고 고정적이며 예외가 없는 반면에 인간은 그 반응이 개인적으로 다르며, 같은 개인이라도 상황에 따라 심리적인 요소가 작용하여 그 반응이 다르기 때문에 진동이 인체에 미치는 영향을 기술하기 위해서는 통계적인 방법을 도입하여야만 하고 그 결론도 통계적 한계가 허용하는 범위 안에서만 가능하다는 것을 항상 고려해야 한다. 따라서, 진동이 인체에 미치는 영향 평가를 위해서는 기본적으로 장기간에 걸쳐 많은 정보와 실험데이터를 수집하고 이를 분석하는 일이 선행되어야 한다. 

✉ 필자

- 현재 한국표준과학연구원 삶의질표준부 보건그룹 그룹장
- 기술표준원 산업표준심의회 인간공학(ISO/TC 159)전문위원회 위원
- 충남대학교 기계설계공학과 겸임교수
- 대한인간공학회 이사
- 한국감성과학회 이사
- 연락처 : Tel) (042) 868-5450, Fax) (042) 868-5455
sjpark@kriss.re.kr