

진동이 인체에 미치는 영향

이 상 태

(육군사관학교 교수부 물리학과)

1. 머리말

진동은 인류가 존재하기 시작한 때부터 인류와 함께 존재하였다고 보아야 하겠다. 왜냐하면 인간은 동물이기에 움직임이 있고, 움직임은 진동을 유발하기 때문이다. 인류가 돌로된 도끼를 들고 사냥을 위해 들을 뛰어 다니는 때에는 진동이 인체에 큰 문제를 야기시키지는 않았었다. 하지만 인류의 도구는 점차 동력화되어 강하고 거친 진동을 만들게 되고, 이 도구와 더불어 생활하는 인체는 편안함을 추구하여 갈수록 약해지는 추세에 놓여있다. 이와같은 추세에 의하여 인체에 가해지는 진동은 점점 심각한 문제를 모두 부정적인 면으로 인체에 작용하지는 않는다. 유도와 같이 몸을 떨어뜨리는 운동은 진동에 의해 장을 튼튼히 한다고 많은 사람들이 믿고 있고, 대공원에서 볼 수 있는 추락하는 열차나 회전하는 물레에 몸을 싣고 진동을 즐기는 경우도 있으며, 안마와 같은 특정부위의 적당한 진동은 피로를 풀어 주기도 한다.

이와같이 진동은 인체와 아주 밀접한 관계를 갖고 있으나, 진동이 인체에 미치는 영향을 학문적으로 연구하게 된 시기는 그리 멀지 않다. 제2차 세계대전시에 탱크의 승무원이 진동에 의해 부상을 당하게 되고, 비행기의 조종사들이 진동에 의해 효과적인 공중전을 수행할 수 없게 되자 이러한 것을 해결할 군사적인 목적으로 연구가 진행되었다. 현재에는 산업계에서 진동이 생산능률 저하, 피로, 불량율, 직업병등과 연결되어 상당한 비중을 두고 연구를 진행하고 있다.

진동이 인체에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 원인에 해당되는 진동과 결과에 해당되는 인체를 모두 연구하고 이해하여야 하는데, 인간을 이해하는 것이 진동을 이해하는 것보다 훨씬 더 어려운 문제다. 왜냐하면 진동은 자연적인 요소가 강해, 그 원리나 특성이 변화하지 않고 고정적이며 예외가 없는 반면에 인간은 그 반응이 개인적으로 다르며, 같은 개인이라도 상황에 따라 심리적 요소가 작용하여 그 반응이 다르기 때문이다. 따라서 진동이 인체에 미치는 영향을

실험하고 기술하기 위해서는 통계적인 방법을 도입하여야만 하고 그 결론도 통계적 한계가 허용되는 범위 안에서만 가능하다는 것을 항상 고려한다. 또한 이러한 통계적 방법을 도입하여 결정된 규정치라 하더라도 시대가 변하면서 변화될 가능성도 많이 있다.

진동이 인체에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 진동을 실상 상황에서 인체에 실험한 후 설명할 수도 있으나, 너무 많은 변수들이 동시에 작용하므로 결론을 내리기가 힘들다. 따라서 진동의 변수와 인체의 변수 그리고 인체가 놓여있는 환경의 변수들을 통제하여 실험한 후 설명하는 것이 좀더 단순하며 분명한 결론을 얻을 수 있어 보편적으로 많이 사용되고 있다.

진동이 인체에 미치는 영향을 기술하는 목적도, 진동에 의한 불편함(멀미, 동기저하(degradation of motivation), 진동에 의한 피로, 업무능률의 저하(관측, 판독, 결정, 추적(tracking), 건강과 병(white fingers) 그리고 부상(척추부상, 머리손상)과 사망등 다양하다.

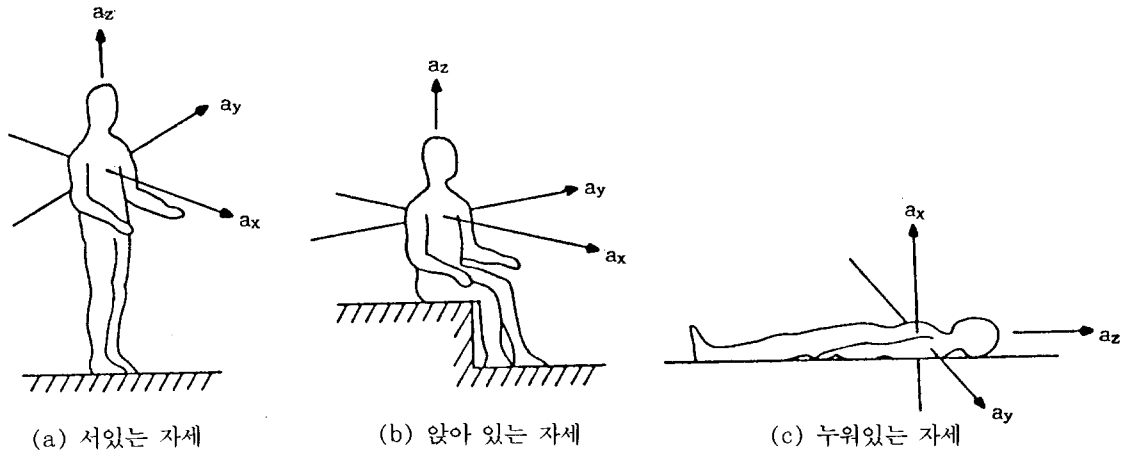


그림 1 인체의 심장을 기준으로 하는 진동의 진동축

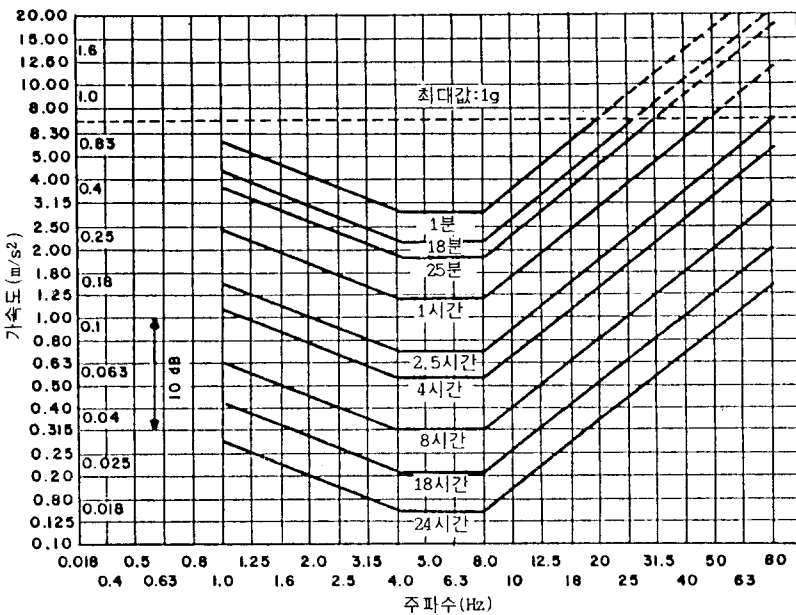


그림 2 ISO 2631에서 규정하는 수직축(Z-축)방향의 진동에 대한 인체의 반응(앉은자세에 대한 특성임).

2. 진동의 구분

진동은 동적 특성을 규정하는 여러가지 변수를 정하는 방법에 따라 구분된다. 진동의 특성변수로는 진폭, 주파수, 지속시간, 진동 type, 진동축 등이 있다. 진동진폭은 대단히 중요한 요소로서, 진동의 에너지를 결정한다. 진폭은 진동의 가속도, 속도, 변위등의 크기로 기술되며, 소음과 같이 데시벨(dB)을 주로 쓰는데 데시벨로 나타낼때

의 각각의 기준값들은 나라에 따라 다르나 주로 국제 표준 규격을 많이 쓴다. 진동은 주파수에 의해 구분되는데, 기준이되는 영역은 20Hz~20kHz이다. 진동축은 인체와의 관계에 의해 결정되는데, 인체의 심장을 원점으로 하여 6개의 진동축(3개의 직선축과 3개의 회전축)으로 구분되며 그림 1에서 보는 바와 같다. 그림에서 (a)는 서있는 자세를, (b)는 앉아있는 자세를, (c)는 누워있는 자세에 대한

진동 좌표축을 보여주고 있다. 진동을 시간적 변화로 구분하면, 시간이 지나도 진동의 형태가 변하지 않는 단순진동(Sinusoidal vibration)과 불규칙 진동(Random vibration)으로 나눌 수 있다. 불규칙 진동은 다시 과도형태(Transient)와 반복되는 순간형태(Impulsive type)로 구분된다.

3. 주파수와 인체 반응

주파수가 인체에 어떠한 영향을 미치는가는 인체의 자세, 진동이 가해지는 부위, 진동이 가해지는 기간, 진동축 등과 연관되어 고려되어야만 한다. 대부분의 경우 주파수가 높은 경우에는 주로 인체의 일부가, 주파수가 낮은 경우에는 주로 인체 전부가 진동에 노출되어 문제가 된다. 앉은 자세에서, 엉덩이로부터 진동을 가했을 경우에 인체가 어떻게 반응 하는가를 주파수 별로 구분하여 보면, 1Hz 이하인 경우에는 주로 멀리(Motion sickness)를 유발한다. 따라서 시골버스를 타고 비포장도로를 달릴때 보다 고속버스를 타고 고속도로를 달리는 경우에 멀리가 더 심하다.

수직인 Z-축 방향의 진동이 인체에 미치는 영향은 그림 2에 나타나 있다. 그림 2는 앉은 자세에서

Z-축 방향의 진동을 엉덩이로부터 가할 때 인체의 반응을 진폭과 시간 그리고 주파수의 함수로 ISO (International Standard of Organization)의 규정에 의해 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 Z-축 방향의 진동 주파수 4~8Hz에서 인간은 진동에 가장 민감한 반응을 보이며 이 주파수대역 이상과 이하의 대역에서는 반응이 약하므로 차량등 운송기계의 설계에서 이 주파수대에서의 완충장치의 공진은 가능한 피하고 있다. 4~8Hz에서의 진동이 인체에 가장 강한 영향을 주는 이유는 인체가 Z-축 진동 4~8Hz에서 공진(Resonance)을 일으키며 인간의 뇌에 가장 많은 진동을 전달하기 때문이다. 진동을 가해 인체가 피로를 느끼기 시작하는 시간과 진폭의 관계를 보면 4~8Hz 사이의 주파수대에서 자승평균 평방근(Root Mean Square)의 가속도가 0.315일때 8시간 동안 진동을 가하면 피로를 느끼기 시작하며, 최대 1분동안 진동을 가해 피로를 느끼기 시작하는 진동의 진폭은 RMS 가속도가 약 2.8이다.

X-축 또는 Y-축 진동인 경우는 Z-축과 인체 반응이 달라 2Hz이하의 진동에 가장 민감한 반응을 보이며 주파수가 증가함에 따라 반응이 무뎈진다. 그림 3은 X-축, Y-축 등 수평방향으로의 진동이 인체에 미치는 영향을 보여주고 있다. 진동에 노출되어 피로를 느끼기 시작하는 노출 시간도 진폭에 따라 다르나 Z-축의 진동에 비해 쉽게 피로를 느낀다. 예를들어 최대 1분동안 진동을 가해 피로를 느끼기 시작하는 진동의 진폭은 RMS 가속도가 2.0으로 Z-축의 2.8보다 작다. 따라서 차를 타고 여행을 하는 경우 눕거나 비스듬히 기대어가면 똑바로 앉아서 가는 경

우보다 진동에 의한 피로를 더 느끼는데 그 이유는 대부분 차량의 완충장치가 2Hz 이하의 공진 주파수를 갖고 있고 더욱이 인체가 이 주파수 대역에서 진동에 약하기 때문이다. 위에서 그림 2와 3을 바탕으로 설명한 것은 진동에 의해 사람이 피로를 느끼기 시작하는 가속도의 크기를 정한 것이나, 인간이 불편하게 느끼기 시작하는 가속도의 크기는 같은 시간에서 위에서 정해진 가속도 값을 3.15로 나눈 값이 되며, 건강과 안전을 고려하여 인체에 가할 수 있는 최대한의 가속도는 같은 시간동안 진동에 노출시 위에서 정한 가속도 값에 2를 곱한 값이 된다.

인체의 전부가 진동에 노출 되었을 때와는 달리 인체의 일부가 진동에 노출시는 고주파 대역에서 주로 문제가 된다. 인체는 하나의 체로 이루어진 것이 아니므로 인체의 각 부분은 그림 4에서 보는 바

와 같이 각각의 부분이 스프링과 댐퍼로 연결된 질량들로 볼 수 있다. 이러한 인체의 각 부분은 연결 부분의 스프링, 댐퍼 특성에 의해 각각 다른 공진 주파수를 갖고 있다. 인간이 가장 민감하게 반응을 보이는 Z-축의 4~8Hz에서 인체의 복부가 공진하며, 눈동자가 공진하는 주파수 대역은 30~80Hz이다. 눈동자의 공진 주파수 대역은 인간의 업무 수행이 추적 활동이나 관측을 하는 경우에는 치명적으로 방해가 되므로 이러한 업무 수행의 경우 가능한 피해야 한다. 인체 피부의 공진 주파수 대역에 대한 연구도 활발히 진행중에 있는데 피부의 파괴나(군사적 목적) 수술환자의 피부 보호 목적으로 사용된다.

주파수 대역에서의 또 하나의 연구 방향은 인체의 한 부분에 진동을 가했을 경우 인체의 다른 부분에 진동이 전달되는 정도와 주파수

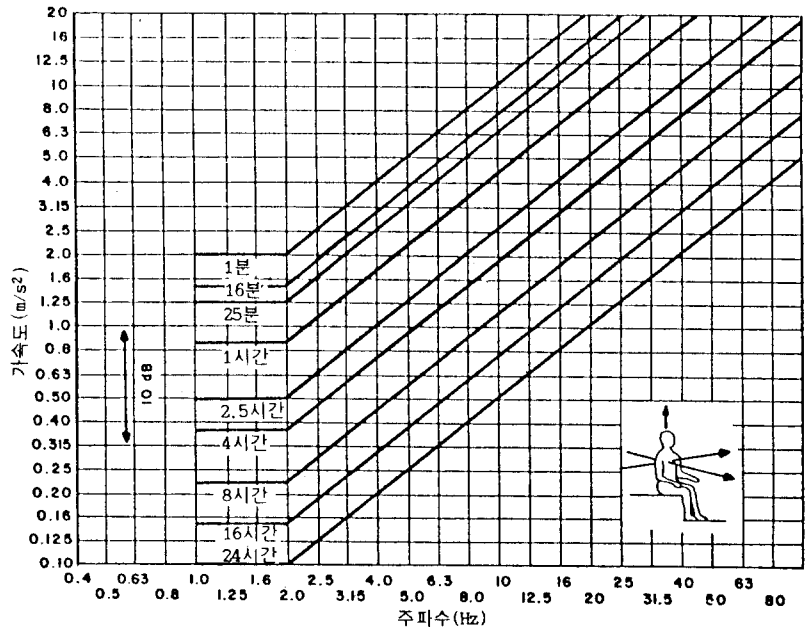


그림 3 ISO 2631에서 규정하는 X-축 Y-축 방향의 진동에 대한 인체의 반응

4. 인체의 반응

4.1 진동축과 인체 반응

그림 1에서 이미 진동축을 정의하였고, 진동축이 주파수와 복합적인 작용에 의해 인체에 영향을 미친다는 것은 이미 설명하였다. 여러 진동축의 진동이 조합되어 한꺼번에 인체에 가해질 때 인체의 반응은 비행기와 우주선에서의 인체 반응을 기술하기 위해 미국의 Shoemaker가 주로 연구하였었는데, 주로 주관적인 평가방식을 도입하였다. 진동축과 인체반응에 대해서도 많은 연구가 진행되었는데 실험 결과에 따르면 대부분의 경우 인체는 X-축, Y-축의 진동에서보다 Z-축의 진동에서 상대적으로 강한 것으로 나타나며, 회전 진동의 경우는 Roll이나 Yaw 회전축의 진동에서보다 Pitch 회전축의 진동에서 강한 것으로 나타났다.

4.2 진동의 지속시간과 인체의 반응

진동이 가해질 수 있는 지속시간은 진동의 진폭과 주파수에 의해 영향을 받는다. 진동이 일정하게 가해지는 경우와 진동의 진폭이 수시로 변하는 경우가 있는데 진동이 일정하게 가해지는 경우를 기준으로 하여 진동이 주어진 시간동안에 평균 얼마만큼 진동이 가해졌는가를 판단하는 방법으로 Leq(Equivalent Vibration Level)값을 사용하게 된다. 대부분 Leq 값을 계산할 때에 RMS 값으로 사용하나 근래에 들어서 Crest Factor가 큰 경우에는 RMQ(Root Mean Quadrant) 값을 사용하자는 주장이 늘고 있다. 또한 진동의 진폭과 주파수를 고려한 진동노출의 제한시간을 ISO 2631에 규정하여 놓았으나, 이러한 규약이 주관적 판단을 근거로 한 것이므로, 국가나 시대

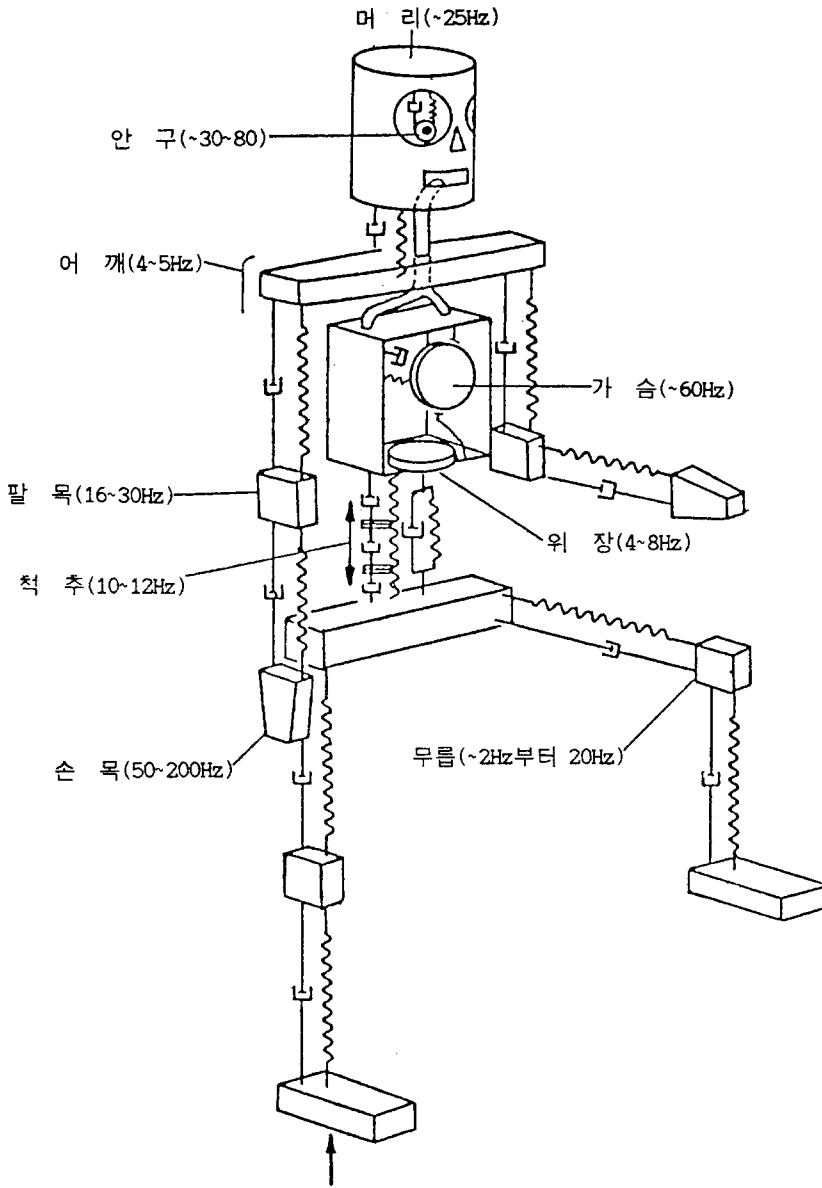


그림 4 진동에 대한 인체의 반응을 연구하기 위한 인체 각 부분간의 연결 모형도

와의 관계를 찾는 일인데, 이것은 그림 4에서 본 진동에 대한 인체의 연결 모형도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 그림 5에는 이러한 인체 내부에서의 진동의 전달정도를 전달율(Transmissibility)로 나타낸 것인데 인체의 진동 특성을 모형화 하거나 Computer Simulation을 하는데 중요한 자료가 되고 있다.

인체의 진동 특성을 모형화 하거나 Computer를 사용하여 Simulation을 하는 이유는 첫째 실제의 인간을 사용하기에 위험부담이 많은 정도의 진동을 가할 수 있고, 둘째 위험한 상황에서의 진동에 대한 반응을 조사할 수 있으며, 셋째로는 실제 인간을 사용하는 것보다 비용이 적게 들기 때문이다.

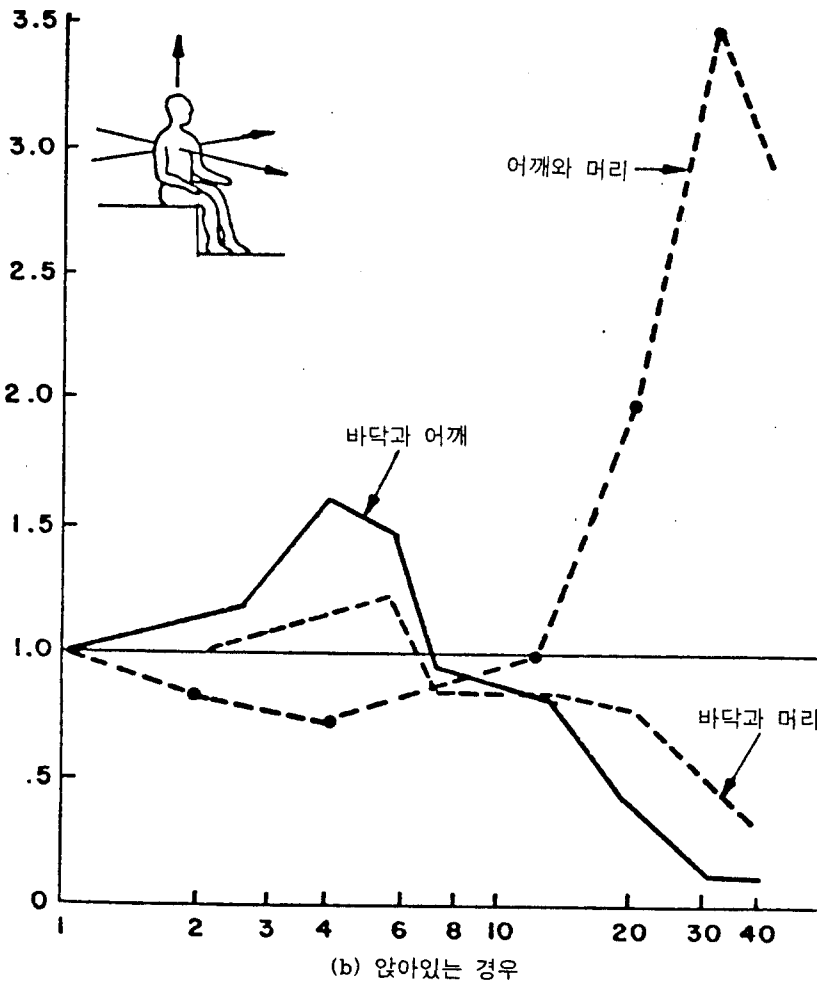
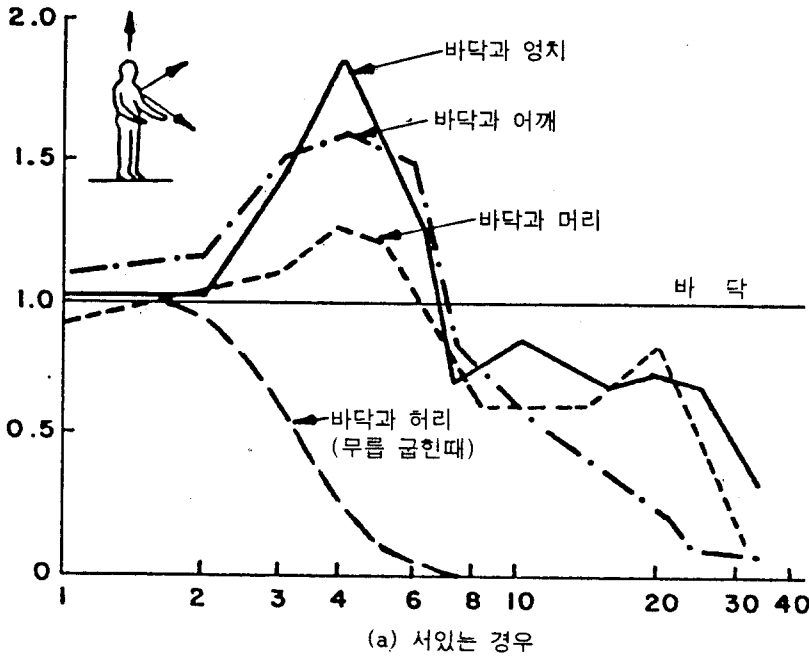


그림 5 인체 각 부분간의 전달율

가 바뀌면 주관적 판단의 정도가 달라 그것의 타당성에 대해 의의를 제기하는 학자들이 늘고 있는 실정이다. 인체는 진동이 가해지는 순간에도 영향을 받고, 진동을 제거한 후에도 인체는 먼저 노출되었던 진동 영향을 받아 문제를 야기 시킨다. 이러한 현상을 Post-Vibration-Effect라 하는데 이러한 현상에 대한 연구도 적용 범위에 맞추어 연구가 진행 중이다.

4.3 진동 환경과 인체 반응

인체가 진동에 노출되면 인체는 적응을 하기위해 스스로 노력을 하게 된다. 따라서 진동에 노출시 인체는 무의식적인 반응을 보여 심장의 활동이 활발해져서, 산소의 사용량이 증가하고, 체온이 올라간다. 만일 진동이 인체에 가해지면서 산소나 주변의 온도가 인체의 적응 활동에 적합하지 않으면 인체는 진동에 더욱 심한 영향을 받게 된다. 이와 같이 진동이 가해지는 곳의 환경이 인체에 불리하면 진동은 인체에 더 심한 영향을 끼치게 되는데, 이와같이 영향을 끼치는 환경변수에는 소음, 온도, 습도, 광도, 공기의 신선도등이 있다. 인체는 진동에 노출시 진동의 영향을 최소화 하기 위해 의식적 반응을 보이게 되는데, 그것은 자세나 근육의 이완을 조정하고 물체를 잡거나 기대기도 하여 진동의 전달을 최소화 하거나 순간 순간의 휴식을 취하기도 한다. 이와 같이 진동 하에서 진동에 대해 저항하거나, 순간순간의 휴식을 취할 수 있는 보조 기구(팔걸이, 발판, 등받이, 가슴받이, 머리받이 등)의 역할도 많이 연구 되고 있다. 보조 기구중 등받이나 머리받이의 경우는 진동을 인체의 뇌에 그대로 전달하기 때문에 사용하는데 많은 주의를 필요로 한다.

4.4 진동이 인체에 노출시 심리적 영향

진동이 인체에 노출시의 심리적 영향은 가장 연구하기가 힘든 분야이며 아울러 연구도 많이 진행되어 지지 않은 분야이다. 인체의 변수에 해당되는 자세, 나이 또는 건강 상태, 진동이 가해지는 인체부위 등이 모두 심리적으로 작용하여 진동에 대한 인간의 반응을 변화 시키며, 이러한 변수들도 수시로 그 상태를 변화 시킴으로서 실험시 통제하기도 어렵다. 인간은 인체에 진동을 가하여 즐거움을 느끼는 수도 있고, 어린아이는 요람이 흔들려야 잘자며, 또 반면에 작은 진동에서도 방해로 받고 불쾌해하는 경

우도 있다. 이와 같은 심리적 반응은 개인과 시대 그리고 장소에 따라 복잡하게 변화하므로 심리학과 의 연계를 지어 복합적으로 연구되어야 한다.

5. 맺 음 말

인체에 진동이 미치는 영향에 대해 대략적으로 기술하였는데, 아직 이 분야는 한국에서 많이 개발되어 있지 않음을 느낀다. 멀지 않은 미래에는 아침은 서울에서 점심은 미국에서 먹을 수 있는 비행기가 나온다 하고, 길도 없는 들에서 75km/h 이상의 속도를 갖은 탱크는 이미 사용되고 있다. 문제는 이

러한 기계들의 제작에 의한 한계가 아니라 이러한 기계에 들어가서 견뎌야 할 인간의 한계에 의한 기계 제작의 한계가 오히려 생각된다. 인간의 진동에 대한 심리적 영향과 초음파나 초 저음파의 영향, 소음 형태의 진동에 대한 영향, 등이 좀 더 많이 연구되어야 한다는 생각이 다. 아울러 진동을 부정적인 방향으로만 생각하여 이제까지는 진동의 방지나 인체에 미치는 해를 주로 연구 하여 왔으나 긍정적 이용에도 눈을 돌려 인체에 미치는 유익한 영향과 유익한 진동의 발생도 연구 되어야 할 때가 아닌가 생각한다.