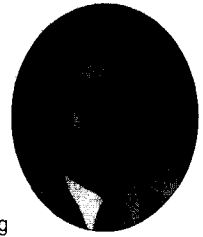


차량 개발시 고려할 인체진동

Human Vibration in Vehicle Development

장 한 기 · 고등기술연구원 책임연구원
Han-kee Jang · Institute for Advanced Engineering



차량 개발시 인체진동의 중요성

차량이 갖춰야 할 3대 요소를 주행성, 안전성, 안락성이라고 한다. 과거로부터 지속되어온 기술개발의 결과로 주행성과 안전성 관련 기술은 이미 안정화단계에 접어들었다고 할 수 있으며 최근에 들어 상대적으로 안락성의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 동급 차량들 간의 기본성능의 차이가 거의 없어진 상황에서 탑승자의 안락성, 즉 승차감은 차량의 품질을 평가하는데 있어서 매우 중요한 요인이기 때문이다. 차량의 승차감 개선이라는 소기의 목적을 달성하기 위해서는 차량이라는 동적 환경이 탑승자에게 어떠한 방식으로 영향을 미치는 지에 대한 기초 지식이 있어야 할 뿐만 아니라 어떻게 정량화하고 또, 어떻게 평가할 것인가에 대한 기준도 정립되어 있어야 한다.

차량 개발 담당자는 차량의 동적 성능을 승차감(Ride Comfort)과 조정성(Handling)으로 평가하게 된다. 대부분의 경우 전문 운전자들이 대상 차량을 주행하면서 정해진 평가방법에 따라 점수를 매기는 주관평가방법을 활용한다. 그러나 주관평가방법에 의한 결과는 평가자에 따라 차이가 날 수 있고(Inter-Subject Variability), 또 같은 평가자라도

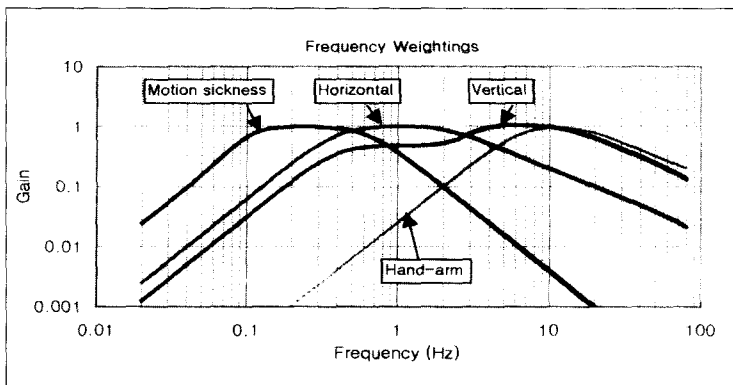
환경이나 평가자의 상태에 따라서도 그 결과에 차이가 날 수 있다(Intersubject Variability). 차량 개발 단계에서 엔지니어들은 상황의 변화에 영향을 받지 않는 정량적인 평가결과를 원하게 되고 또 직면한 문제점을 해결하기 위해 주관적인 느낌(Feel)뿐만 아니라 객관적인 사실(Fact)을 요구하게 된다. 이와 같은 요구에 부응하기 위해 선진 자동차 회사들은 차량의 거동이 탑승자에게 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 연구를 1960년대부터 진행해 왔으며 상당 부분 결실을 거두고 있다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 말할 것도 없이 차량의 거동을 어떻게 하면 인체가 느끼는 양으로 정량화시킬 것인가의 문제이다. 다시 말해서 차량의 어떤 거동이 탑승자를 얼마나 불편하게 만드는지를 파악하는 것이다.

1. 차량 환경내에서 인체진동의 분류

인체에 영향을 미치는 차량의 거동을 나누는 가장 중요한 기준은 주파수이다. ISO의 인체진동관련 규격에서는 인체에 영향을 미치는 거동을 저주파수 운동(0.63Hz이하)과 진동(1~80Hz)으로 나누고 있다¹⁾.

ISO2631-1에서는 주파수별로 인체에 미치는 영향

을 <그림 1>과 같이 가중치로 정의하여 제시하고 있다. 0.63Hz 이하의 저주파수 운동은 외부 거동(주로 수평방향)에 대하여 자세를 유지하기 위해 힘쓰게 되므로 물리적인 피로감을 줄 뿐만 아니라 멀미증상을 유발한다. 착석상태의 수평방향과 수직방향으로의 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]. 이들 진동을 대상별로 분류하면 다음과 같다.



<그림 1> 인체에 대한 주파수 가중치

1.1 저주파수 운동에 의한 멀미증상 (Motion Sickness)

광범위한 의미의 멀미증상을 영어로 'Motion Sickness'로 표기하는데 우리가 일반적으로 알고 있는 것보다 증상의 범위나 발생 메카니즘의 매우 복잡하다. 멀미증상은 크게 세가지 메카니즘에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 하나는 매우 낮은 주파수(1Hz이하)의 움직임이 귀의 전정기관에서 감지되어 신경계로 전달되는 것이고 또 하나는 시야에서 낮

은 주파수로 이동하는 대상이 시각적으로 감지되어 신경계로 전달되는 것이다. 또 하나는 몸 전체에 분포된 시각에 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 두가지 요인이 상승작용을 일으키기도 한다^[3]. 가상현실(VR:Virtual Reality) 장비를 사용할 때 나타나는 어지러움 증이 첫번째 경우에 해당하는 일종의 멀미 현상이다.

멀미의 증상으로는 흔히 알려진 구토(Vomiting)

이외에도 졸림(Yawning), 호흡이 사(Irregular Bre-athing), 땀흘림(Sweat-ing), 두통(Headache), 어지러움(Dizziness), 입 마름(Drowsiness) 등 매우 다양한다^[3].

멀미 증상은 진동에 의한 불쾌감과 달리 일단 증상이 나타나면 물리적, 심리적 측면에서 작업수행능력이 급격히 떨어지며 회복하는데도 상당한 시간이 소요된다. 따라서 차량의 탑승자에게 있어서 멀미증상

은 진동보다도 훨씬 심각하게 고려되어야 한다. 이 현상은 1Hz이하의 낮은 주파수의 운동과 관련된다. 차량에서는 급발진, 급제동시라든가 급격한 코너링 때에 차량 전반에 저주파수 운동이 나타나며 공기 스프링이 장착된 고급성 버스가 불균일한 노면을 통과한 후 나타나는 잔류진동이 대표적인 예이다. 버스의 경우, 주행시 고주파수에서의 전달률을 낮추기 위해 공기스프링을 사용하여 차량의 공진 주파수를 낮추는데 지나치게 낮아짐으로 해서 멀미현상과 관련된 저주파수 거동이 쉽게 나타난다. 특히 이런 특성을

강좌

갖는 버스를 거칠게 운전한다거나 주행과정에 코너링이 잦다면 탑승자에게서의 멀미현상 발생율은 매우 높아진다고 하겠다. 따라서 버스에서 피치와 롤에 대한 공진 주파수는 운행조건을 고려해서 결정해야 하며 공진주파수를 낮출 경우에는 멀미현상의 발생 가능성이 높아진다는 것을 염두에 두어야 한다.

1.2 진동에 의해 발생하는 불쾌감 (Discomfort)

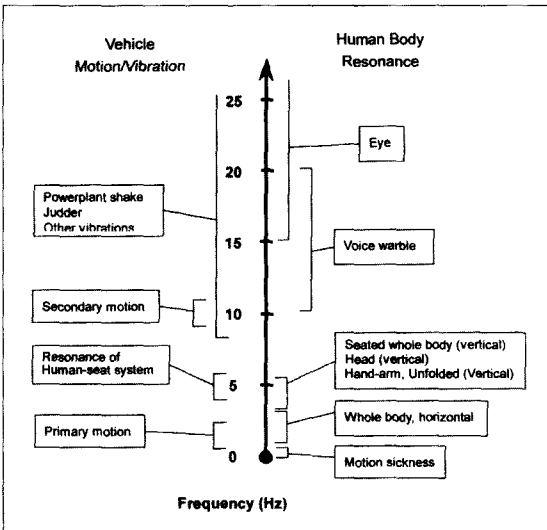
저주파수 운동에 의한 멀미증상은 효과가 비교적 늦게 나타나는 반면 진동은 인체에 즉각적인 불쾌감을 유발시킨다. 진동이 인체에 주는 불쾌감을 신체 전체 또는 일부의 공진에 의해 증폭된다. 따라서 인체의 공진이 어떤 주파수에서 발생하는지 아는 것이 매우 중요하다. <그림 1>에는 신체의 불편함을 유발하는 진동의 주파수의 차량에서 발생하기 쉬운 진동의 주파수 정보를 개략적으로 도시하였다. 차량에서 심각하게 고려해야 할 진동 주파수 대역으로는 착석한 상태에서 인체의 공진이 존재하는 5Hz 부근과 현 가장치의 2차 공진이나 엔진의 셰리크(Shake) 등이

나타나는 10Hz 전후의 진동, 그리고 차량 거동 중에서 가장 변위가 큰 1차 공진(Primary Resonance)과 관련된 1~2Hz 영역을 들 수 있다. 이들 진동은 진동이 전달되는 범위에 따라 전신진동과 국부진동으로 나누어 접근할 수 있겠다.

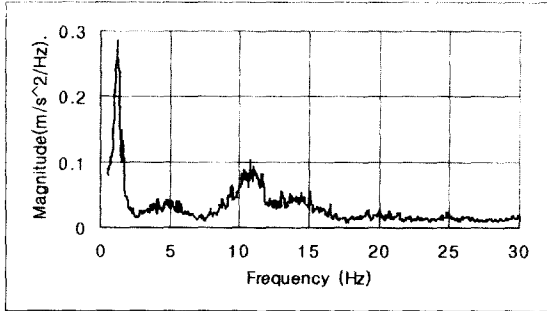
전신진동

전신진동의 고려대상으로는 서있는 자세와 앉아 있는 자세가 있는데 여기서는 후자에 국한해서 언급하기로 한다. 전신 진동은 특성상 10Hz이하의 주파수 영역에서 뚜렷하게 나타난다. 이 영역에서 가장 대표적인 공진은 착석한 상태에서의 수직방향(5Hz 부근)과 횡방향(1~3Hz)으로 각각 발생한다. 수직 방향으로의 공진은 비교적 거친 노면을 중, 저속으로 주행할 때 잘 나타나며 횡방향의 거동은 차량이 회전하거나 급발진, 급제동할 때 그리고 좌우가 비대칭인 노면을 통과할 때 나타난다. 이 두가지 거동은 진폭은 크지만 차량의 주행과정에서 발생하는 빈도는 상대적으로 낮다고 하겠다.

진동에 노출되는 시간으로 볼 때 가장 빈도가 높은 주행조건은 포장된 노면을 주행하는 것이다. 운전석 바닥에서의 진동은 주행조건에 따라 차이가 있겠으나 <그림 3>과 같은 양상을 보인다. 1Hz 부근에서의 1차 운동(Primary Motion)과 10Hz 부근에서의 진동에너지가 차량거동 전체의 상당부분을 차지한다. 인체가 느끼는 진동의 주파수 특성은 수직방향의 경우 4~10Hz 영역에서 가장 민감도가 큰 것으로 알려져 있기 때문에 저주파수에서의 피크 진동보다는 10Hz 주위에서 퍼져있는 진동의 영향이 더 크다고 할 수 있으며 이 영역의 진동을 줄이는 것이 효과적이다. 더군다나 1Hz 주위에서의 거동을 제어하려면 현가장치 특성을 변경해야 하는데 차량의 기본적인 성능과 관련되므로 임의로 조정할 수 없다. 10Hz 이후의 주파수 영역의 진동을 낮추는 방법의 하나로 시트의 동특성을 바꾸는 것이 효과적일 수 있다^[4].



<그림 2> 차량에서 고려해야 할 인체진동 관련 주파수 특성



〈그림 3〉 정속 주행시 시트레일에서 측정된 가속도

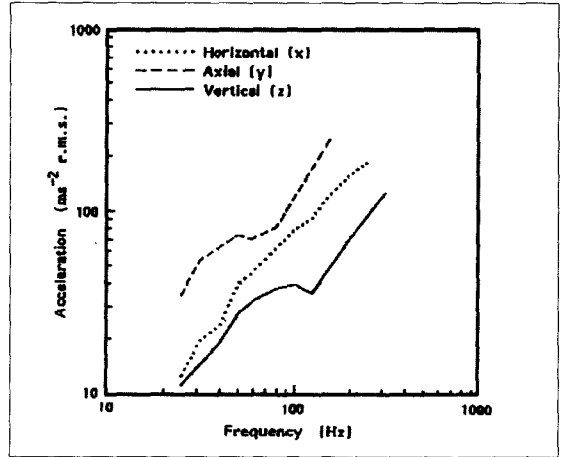
국부진동

차량 탑승자에게 전달되는 국부진동으로는 조향장치를 통해 손으로 전달되는 수완계 (Hand-Arm System) 진동과 발로 전달되는 진동과 같이 직접적인 접촉에 의한 것이 있다. 진동에 의한 불편감을 줄이기 위해서는 당연히 접촉 부위의 진동량을 줄이면 된다. 그러나 무조건 진동을 낮추는 것보다는 가장 효과적인 방향과 주파수 대역의 진동을 낮추는 것이 중요하다. 또 시스템 특성을 바꿨을 때 즉 진동 피크가 이동할 때 인체에 대한 영향이 어떻게 나타날 지를 예측할 필요도 있기 때문에 전신진동 뿐만 아니라 국부진동의 특성을 고찰해볼 필요가 있다.

• 수완계 (Hand-Arm)의 진동

수완계 진동에 대한 측정과 평가에 대해서는 ISO5349에 정리되어 있는데 원통형 핸들을 쥐고 있는 'Hand-Grip' 자세와 반구형에 손을 얹은 'Flat-Palm' 자세로 나누어져 있다. 조향장치를 쥐고 있다면 전자의 경우가 오토차량의 스틱에 손을 얹고 있다면 후자의 경우에 가까울 것이다. 〈그림 4〉에는 손바닥으로 구면을 누르고 있을 때(누르는 힘:36N), 3방향으로의 진동에 대한 등안락성 곡선(Equi-Comfort Contour)을 20Hz이상의 영역에 대해 도시한 것이다^[1]. 세 방향 중에서 수직방향의 진동에 가장 민감하고, 이어서 팔길이 방향(Axial), 좌우방

향(Horizontal) 순서로 나타나고 있다. 주파수가 낮을수록 더 민감함을 알 수 있다. 수완계 진동은 정적인 힘을 가하는 방향으로의 불편함이 가장 크고 또 가하는 힘이 클수록 고주파수의 진동의 잘 전달되는 특성을 갖고 있다^[5].



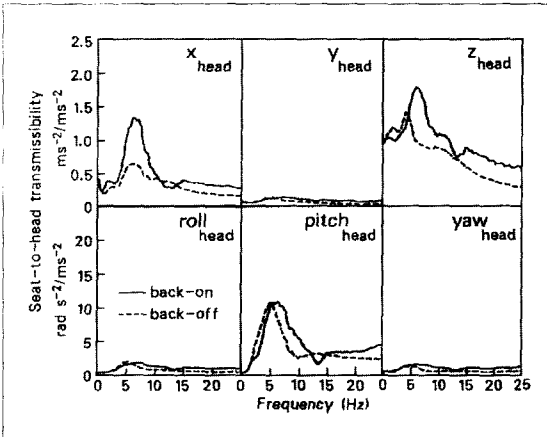
〈그림 4〉 Flat-Palm Grip 상태에서 3방향 진동에 대한 등 안락성 곡선

수완계 진동을 평가하는데 있어서 또 하나의 중요한 인자는 바로 손의 온도이다. 진동이 손에 주는 불편함은 신경조직에 대한 간섭, 근육에 대한 영향, 혈액순환 장애 등으로 나눌 수 있는데 온도가 떨어진 경우 혈액순환이 급격히 저해되어 손 저림 현상이 쉽게 나타난다. 특히 진동하는 물체를 잡고 있을 때 접촉부 또는 손 주위의 온도가 낮아지면 진동에 대한 불편함이 급속하게 증대한다. 따라서 운전대를 잡고 있는 손 위치 바로 앞에 에어컨 토출구를 배치하는 것은 바람직하지 못하다고 할 수 있다.

• 머리의 진동

차량에서 머리의 진동은 단순한 불편감뿐만 아니라 시각과 작업 수행능력에 대한 간섭을 유발하므로 매우 중요하다. 차량의 승차감 평가항목 중 하나인 Roll Rock(또는 Head Toss)에 가장 큰 영향을 미치는 것도 바로 머리의 흔들림이다. 머리의 흔들림은

상체의 수직방향에 의해서도 전후방향과 피치 방향으로의 진동이 발생하는데 <그림 5>에는 수직방향 진동에 대한 6방향으로의 전달함수를 도시하였다^[3].



<그림 5> 시트 수직방향 진동과 머리의 6방향으로의 진동의 전달함수

머리에서의 진동을 측정하는 방법은 헬멧을 사용할 수도 있지만 골격에서 직접 측정하는 것이 바람직하기 때문에 물개(Bite Bar)를 이빨에 문 상태에서 측정하는 것이 가장 바람직하다^[3].

• 발의 진동

신체 부위 중에서 진동에 대한 민감도가 가장 낮은 부분이 발이다. 착석한 상태에서의 전신진동과 비교해 볼 때, 1/4정도의 민감도를 나타내는 것으로 알려져 있다^[3,7]. 그러나 저주파수에서의 진동은 상체와 허벅지의 상대거동의 커서 허벅지의 각운동을 유발하여 불쾌감을 증폭시킬 수 있는데 주로 버스의 운전석과 같은 현가장치 장착 시트에서 문제가 된다^[8]. 그러나 승용차의 경우에는 저주파수의 발운동은 큰 문제가 되지 않는다. 문제가 되는 것은 10Hz 부근에서인데 승용차의 시트는 5Hz부근의 공진점 이상의 주파수에서는 인체로의 전달 진동량이 급격히 줄어드는 반면 바닥 진동은 그대로이기 때문에 상체와 발에서의 체감 진동량이 비슷한 수준이 되기 때문이다. 물론 더

높은 주파수에서는 발의 체감진동량은 상체보다 커지겠지만 주파수 가중치 특성상 20Hz 이상의 진동은 영향자체가 매우 적어서 무시 할 만 한다. 따라서 10~20Hz 영역의 진동이 중요하다고 하겠다.

3. 차량 개발분야에서의 응용

일반 기계 구조물에서와 마찬가지로 차량에서도 진동이 문제가 되는 경우는 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는, 진동이 특정 부품이나 시스템의 성능이나 내구성을 저해하는 경우이고 또 하는 탑승자를 불편하게 만드는 경우이다. 차량에서 탑승자의 불편함과 직접 관련 있는 분야는 다음과 같이 정리할 수 있는데 이 분야의 설계나 개선과정에서 인체진동은 중요한 판단기준이 된다고 하겠다.

• 현가장치 튜닝

현가장치는 차량 전체의 거동을 좌우하는 부분으로서 안락성뿐만 아니라 조종성과 안정성을 결정하므로 기본적인 설계는 주어진 가이드라인에 따라 결정되지만 튜닝과정에서 세부적인 설계인자 결정시에는 인체의 체감진동량의 중요한 고려사항이 된다. 특히 2차 거동(Secondary Motion)에 대한 부쉬나 마운트 등의 강성을 결정할 때 유용한 평가기준이 될 수 있다.

• 시트의 설계 및 평가

시트의 안락성은 정적인 것과 동적인 것으로 나누어서 생각할 수 있는데 1990년대 이전까지만 해도 체압분포와 프로파일 설계로 대표되는 정적인 측면의 안락성이 주요 관심사였으나, 1990년대 이후에는 시트의 진동 전달특성이 시트의 품질을 결정하는 중요한 인자가 되었다. 특히 10여 년전부터는 인체의 주파수 가중치를 고려한 시트의 동특성 평가지수인 S.E.A.T값(Seat Effective Amplitude Trans-

missibility)이 도입되어 전세계적으로 활용되고 있다⁹⁾.

• 조향장치와 페달 진동의 평가 및 개선

조향장치에서의 진동은 상대적인 영향이 전신진동에 비해 작지만 지속적으로 신체와 접촉하므로 일정량 이상의 진동은 운전성(Driveability)에 영향을 미친다. 조향장치의 진동을 다루는데 있어서 핵심은 손으로 전달되는 진동을 어떻게 정량화하느냐이다. 체감진동 중에 우선 순위가 가장 떨어지지만 전술한 바와 같이 10~20Hz에서의 체감진동량이 두드러지므로 바닥의 판(Plate) 진동이나 페달 진동을 저감할 때 이 주파수 대역에 유의해야 한다.

• 승차감 평가지수 개발

차량이 시험평가 담당자의 첫번째 목표는 대상 차량의 동적인 특성을 얼마나 정확하고 일관성 있고 또 신뢰성 있게 평가하느냐이다. 주관평가방법이 가장 풍부한 정보를 제공한다는 점에 있어서는 이론의 여지가 없으나 기본적인 사항들이 충족되어야만 의미 있는 정보를 얻을 수 있다. 첫째는 전문평가자가 시장(Market)을 구성하는 고객의 성향을 대표하도록 선정되고 훈련되어 있어야 한다. 둘째는 평가진행과정이 평가과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하는 방향으로 운영되고 있어야 한다. 이와같은 선행조건이 상당부분 충족된다 하더라도 모두(冒頭)에 밝혔던 오차(Inter- and Intra-Subject Variability)를 제거하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 선진외국에서는 1970년대부터 차량 승차감지수 개발을 지속적으로 수행해오고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 객관적인 승차감지수(Objective Ride Quality Index)라고 불리는 이 지수는 주관평가에 비해 약점을 지니고 있음에도 불구하고 주관평가방법의 보조수단으로서 그 중요성이 부각되고 있다. 이 분야에서도 인체진동의 정량화 평가 기법이 핵심사항이라 하겠다.

• 가상 모델링

최근에 대형업체를 중심으로 개발기간 단축을 위해 가상 모델링(Virtual Modeling) 관련 프로젝트들이 진행되고 있다. 차량 동역학의 시뮬레이션뿐만 아니라 차량의 진동과 소음이 연성된(Coupled) 모델에 이르기까지 소프트웨어 상에서 세밀한 모형을 시도함으로써 개발하려는 차량의 거동을 미리 예측하는 기법이다. 과거에는 모형과 실제 차량과의 거리감이 컸지만 최근에는 상당히 정확한 거동의 예측이 이루어지고 있다. 이와같은 가상 모델링에 서도 동역학적 특성과 관련된 설계인자를 결정할 때 안락성의 평가기준으로서 인체진동이 주요 인자가 될 수 있다.

4. 나가는 말

인체가 느끼는 진동을 정량적으로 분석하는 작업이 차량개발담당자에게 있어서 무엇보다 중요한 것은 사실이지만 이에 대한 반론도 적지 않다. 가장 자주 거론되는 사안으로는 진동에 대한 영향이 사람마다 다르다는 것이다. 분명히 맞는 말이다. 물리적으로 생각을 해보아도 사람마다 질량이 다르고 강성이 다르게 때문에 동역학적 특성이 다른 것이 사실이다. 하지만 이와 같은 주장은 인간공학자(Ergonomist)들에게는 설득력이 부족한 것이다. 왜냐하면 어떤 제품이든간에 체형이 모두 다른 사람이 사용하고 있기 때문이다. 어차피 사람과 관련있는 모든 제품에서 유사한 상황이 발생하지만 통계적인 접근 방법으로 많은 문제점이 성공적으로 해소되고 있다. 운전석의 레이아웃 설계를 일례로 들면 모집단의 50%ile에 해당하는 사람을 대상으로 기본적인 설계를 하고 여성 5%ile부터 남성 95%ile에 해당하는 신체 사이즈를 커버하도록 설계하는 것이 보통이다. 여기서 여성중에서도 5%ile이하인 경우와 95%ile 이상의 신체사이즈를 갖는 경우는 경제성을 이유로 배제할 수밖에

없다.

진동에 의한 인체의 영향을 정량화하는 작업도 마찬가지이다. 선진업체에서는 이미 오래전부터 인체진동에 대한 데이터베이스를 구축해오고 있다. 여차피 시장을 확대하고자 한다면 각 시장(Market)에 맞는 설계를 해야 한다고 생각한다. 필자는 고안락성 시트 개발 프로젝트를 수행하기 위한 자료 조사를 하다가 1965년에 발행된 미국자료를 접한 적이 있는데 3,700여명의 한국 성인에 대한 59가지 신체 사이즈를 측정하여 통계자료화한 것이었다. 물론 뭔가를 팔기 위해서 한 작업임에 틀림이 없다. 우리나라의 자동차 회사들도 이제는 성능을 따지는 단계를 이미 벗어났고 시장을 확장하는 단계에 와있는 지금 차량의 품질을 한단계 Up-Grade 하려면 인체진동의 중요성을 다시 생각해야 하지 않을까?

〈참고 문헌〉

1. International Organization for Standardization, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration(ISO 2631-1), 1997.
2. International Organization for Standardization, Mechanical Vibration-Guidelines for the Measurement and Assessment of Human Exposure to Hand-transmitted Vibration(ISO 5349), 1986.
3. M. J. Griffin, Handbook of Human Vibration, Academic Press, 1990.
4. J. H. Vartesian, R. R. Thompson, "The Dynamic Characteristics of Automobile Seats with Human Occupants," SAE Technical Paper No.770249, 1977.
5. G. S. Paddan, "Effect of Pull Force on the Transmission of Vibration through the Finger to the Fingernail," UK Group Meeting on Human Response to Vibration, pp459-470, 1997.
6. M. Bovenzi "Medical Aspects of the Hand-arm Vibration Syndrome," Journal of Industrial Ergonomics," 6, pp.61-73, 1990.
7. British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock (BS 6841), British Standards Institution, 1989.
8. H.-K. Jang, M. J. Griffin, "Effect of Phase, Frequency, Magnitude and Posture on Discomfort Associated with Differential Vertical Vibration at the Seat and Feet," Journal of Sound and Vibration, 229(2),pp273-286, 2000.
9. M. R. Kinkelaar, B. L. Neal, G. Crocco, The Influence of Polyurethane Foam Dynamics on the Vibration Isolation Character of Full Foam Seats, SAE Technical Paper No.980657, 1988.
10. C. C. Smith, "The Prediction of Passenger Riding Comfort from Acceleration Data," Research Report 16, Dept. of Transportation, The Univ. of Texas at Austin, 1976.
11. Y. Kozawa, and et al, "A New Ride Comfort Meter," SAE Technical Paper No.860430, 1986.
12. S. Cucuz, "Evaluation of Ride Comfort," Intl. J. of Vehicle Design, Vol.15, Nos.3-5, pp.318-325, 1994.

〈장한기 책임연구원 : hkjang@iae.re.kr〉