

차량산업에서의 인체진동

장 한 기*

(고등기술연구원 소음진동기술센터)

1. 머리말

‘인체진동(human vibration)’은 진동에 대한 인체의 반응(human response to vibration)의 출임 말로써, 환경으로서의 진동 및 충격이 인체에 미치는 물리적, 심리적 영향을 측정, 평가하는 것을 주요 연구대상으로 한다. 인체진동 분야의 주요 연구개발은 객관적인 물리량의 산출뿐만 아니라 주관적인 느낌을 수치화하는 작업을 포함하기 때문에 기계진동, 생체역학(biodynamics)과 기본적인 역학과 심리측정학(psychometrics), 심리물리학(psychophysics), 인간공학(ergonomics) 등과 같이 다양한 종류의 학문이 요구된다.

인체진동이 이슈가 되는 환경으로는 크게 탑승환경, 주거환경, 작업환경을 들 수 있는데 일반인이 가장 쉽게 접하는 것이 바로 탑승환경이며, 이 중에서도 차량은 일상 생활에서 거의 매일 접하는 환경이다. 본 원고에서는 차량산업에서 인체진동 기술이 왜 필요하고, 또 어떻게 응용될 수 있는가를 소개하고자 한다. 이에 앞서, 차량 산업과 관

련된 인체진동에 대한 이해를 돕기 위해 기술적인 사안들을 먼저 서술하고자 한다.

2. 인체 진동의 분류

차량 환경에서 발생한 진동이 인체에 영향을 미치는 메커니즘은 진동의 주파수나 진폭 뿐만 아니라 사람의 자세나 진동 전달 부위 등의 인자에 의해 크게 영향을 받는다. 소음의 경우 감각기관이 귀에 국한되어 주파수 가중치도 비교적 간단히 정의되지만 진동의 경우 신체부위와 자세, 그리고 진동의 작용방향에 따라 서로 다른 주파수 가중 특성을 보인다. 따라서, 인체진동에 체계적으로 접근하려면 영향인자별로 나누어서 다루는 것이 바람직하다.

2.1 자세에 따른 분류; 전신 진동과 국부 진동

(1) 전신 진동(whole-body vibration)

탑승환경이나 주거환경과 같이 진동이 신체 전체에 전달될 때를 전신 진동이라 하고, 그림 1에 도시한 바와 같이 착석 자세, 기립 자세, 누운 자세로 나누어서 접근하게 된다. 착석 자세는 차량에서 가장 기본이 되는 자

* E-mail : hkjang@iae.re.kr

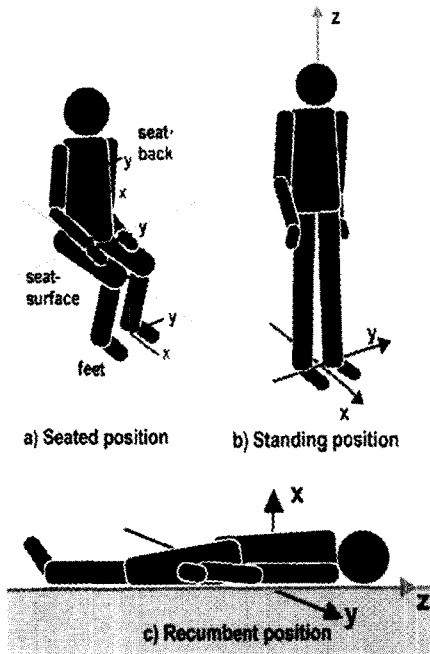


그림 1 기본 자세와 기준 좌표계

세이며 신체진동 분야에서 가장 보편적으로 다뤄지는 자세이다. 기립 자세는 버스나 열차, 또는 선박에서 서 있는 경우나 해상 구조물에서 거주 또는 작업하는 경우를, 그리고 누운 자세는 열차나 선박과 같은 장시간 운송수단이나 거주 환경에서 취침하는 경우를 대표한다.

(2) 국부진동(local vibration)

진동이 신체의 일부에 전달되어 국부적으로 영향을 미치는 경우를 국부진동이라고 하는데, 차량에서 조향 휠을 쥐고 있는 손으로 전달되는 진동이나 페달을 밟고 있는 발 바닥으로 타고 들어오는 진동을 들 수 있겠다. 국부진동은 전신진동에 비해 관심 주파수 범위가 높고 신체 일부에만 영향을 미치지만 진동량이 큰 경우 작업 수행(task performance) 능력을 현격히 저하시키므로

중요하게 다뤄지고 있다.

2.2 주파수에 따른 분류

차량에서 문제가 되는 신체진동은 주파수별로 1 Hz미만의 저주파수 운동(low frequency motion)과 1~80 Hz 구역의 진동(vibration)으로 나눌 수 있다.^(1, 2) 전신 진동의 경우 인체가 진동에 의해 영향을 받는 주파수 범위의 상한치에 대해, ISO2631-1에서는 80 Hz를 제시하고 있으나 이는 다양한 진동환경을 대변하기 위해 보수적으로 정해진 수치라 할 수 있다. 차량에서 가장 보편적인 착석 상태의 전신진동에 대해서는 상한 주파수를 30~50 Hz 정도까지 분석하는 경우가 일반적이다. 그러나 조향장치와 관련된 수완계(hand-arm system) 진동의 경우는 100 Hz 이상까지 고려하기도 한다. 그림 2는 진동에 대한 인체의 주파수별 민감도를 나타내는 대표적인 가중치 곡선을 보여주고 있다.^(2, 3)

(1) 저주파수 운동에 의한 멀미증상(motion sickness)

멀미증상은, 매우 낮은 주파수(1 Hz이하)의 움직임과 관련하여, 귀의 전정기관에서 감지된 양과 시각적으로 감지된 양의 복합 작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 신체의 움직임이 없이 시각의 변화만으로도 멀미증상이 발생할 수 있는데, 가상현실(VR: virtual reality) 장비를 사용할 때 나타나는 어지러움 증이 좋은 예이다.⁽¹⁾

멀미 증상은 진동에 의한 불쾌감과 달리 일단 증상이 나타나면 물리적, 심리적 측면에서 작업수행 능력이 급격히 떨어지며 회복하는데도 상당한 시간이 소요된다. 따라서 차량의 탑승자에게 있어서 멀미증상은 경우에 따라 진동보다도 훨씬 심각하게 고려되

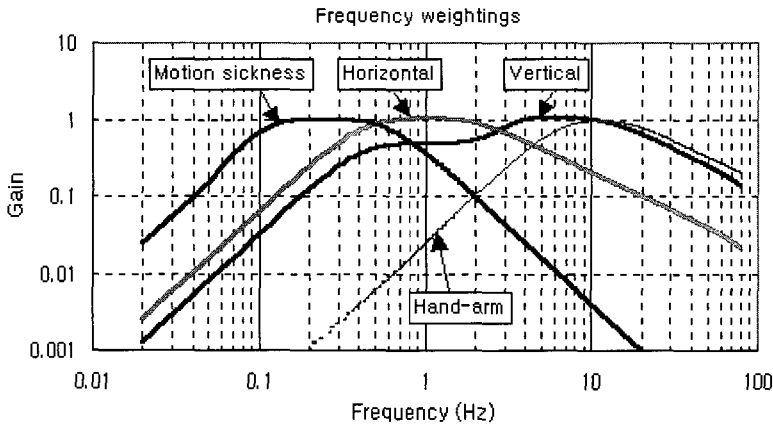


그림 2 인체진동에서 중요하게 다루는 주파수 가중치

어야 한다. 1 Hz이하의 매우 낮은 주파수의 운동은 감속 및 가속 시, 코너링 시의 거동이라든가 공기스프링 장착 버스가 불균일한 노면을 통과한 후 나타나는 잔류진동 등의 형태로 나타난다 버스의 경우, 고 주파수 진동의 전달률을 낮추기 위해 공기스프링을 사용하여 차량의 공진 주파수를 낮추는데, 지나치게 낮아짐으로 해서 멀미현상과 관련된 저 주파수 거동이 유발되기도 한다. 특히, 이런 특성을 갖는 버스를 거칠게 운전한다면 멀미 발생률이 매우 높아지게 된다.

(2) 진동에 의한 불쾌감(discomfort)

저주파수 운동에 의한 멀미증상은 효과가 비교적 늦게 나타나는 반면 1 Hz 이상의 진동은 인체에 즉각적인 불쾌감을 유발시킨다. 진동이 인체에 주는 불쾌감은 신체 전체 또는 일부의 공진에 의해 증폭된다. 따라서 인체의 공진이 어떤 주파수에서 발생하는지 아는 것이 매우 중요하다. 그림 3에는 인체의 공진 주파수와 차량에서 발생하기 쉬운 진동의 주파수 정보를 함께 도시하였다. 차량에서 심각하게 고려해야 할 진동 주파수

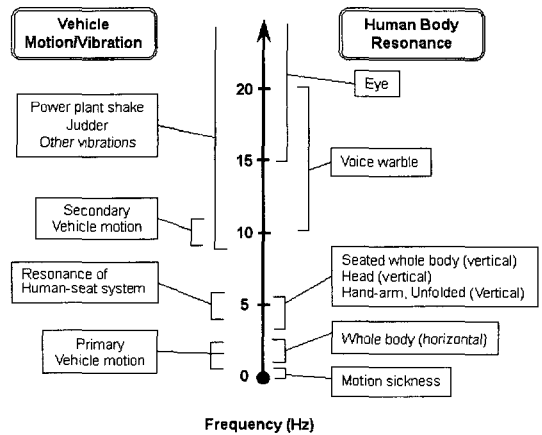


그림 3 차량진동 주파수와 인체 공진 주파수

대역으로는, i)착석한 상태에서 인체의 공진이 존재하는 5 Hz부근과, ii)현가장치의 2차 공진이나 엔진의 셰이크(shake) 등이 나타나는 10 Hz 전후의 진동, 그리고 iii)차량 거동 중에서 가장 변위가 가장 큰 1차 공진(primary resonance)과 관련된 1~2 Hz 영역을 들 수 있다. 이들 진동 역시 인체에 전달되는 범위에 따라 전신진동과 국부진동으로 나누어 접근할 수 있다.

• 전신진동

착석한 상태에서 전신 진동의 공진은 수직방향(5 Hz 부근)과 횡방향(1~3 Hz)으로 각각 존재한다. 수직방향으로의 공진은 비교적 거친 노면을 중, 저속으로 주행할 때 잘 나타나며, 횡방향의 거동은 차량이 회전하거나 감, 가속 시, 그리고 좌우가 비대칭인 노면을 통과할 때 나타난다. 이 두 가지 거동은 진폭은 크지만 차량의 주행과정에서 발생하는 빈도는 상대적으로 낮다.

노출 시간으로 볼 때, 가장 빈도가 높은 주행조건은 차량이 포장된 노면을 주행하는 것이다. 포장도로를 정속 주행하는 경우 시트 지지부(seat rail)에서의 진동은 주행조건에 따라 차이가 있겠으나 그림 4와 같은 양상을 보인다. 1 Hz 부근에서의 1차 운동과 10 Hz 부근에서의 진동에너지가 차량거동 전체의 상당부분을 차지함을 알 수 있다. 인체가 느끼는 진동의 주파수 특성은 수직방향의 경우 4~10 Hz 영역에서 민감도가 높은 것으로 알려져 있기 때문에, 저주파수에서의 피크 진동보다는 10 Hz 주위의 진동의 영향이 더 크다고 할 수 있으며, 이 영역의 진동을 줄이는 것이 승차감 개선에 있어서 효과적일 것이다. 10 Hz 이후의 진동을 낮

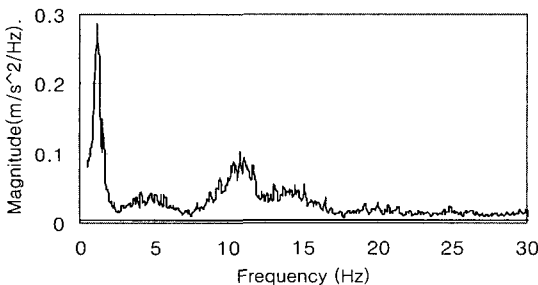


그림 4 포장도로 정속 주행 시 시트레일에서 측정된 가속도

추는 현실적인 방법의 하나는 시트 폼의 동특성을 바꾸는 방안이 있을 수 있다.⁽⁴⁾ 1 Hz 주위의 거동은 현가 장치 특성을 변경해야 제어가 가능한데, 차량의 기본적인 성능과 관련되므로 임의로 조정하기 어렵다.

• 국부진동 : 수완계, 발, 머리에서의 진동

조향계에서 발생하는 진동은 진동의 유형에 따라 조향 축에 대해 회전하는 진동(shimmy), 조향 휠 전체가 병진 운동하는 진동(shake)을 들 수 있다. 최근에 선진 외국에서는 조향 휠의 진동에 대한 영향 평가가 매우 중요한 이슈로 부각되고 있다. 기존의 수완계 진동에 대한 주파수 가중곡선이 ISO 5349에 제시되어 있으나, 동력공구의 핸들을 주 대상으로 하고 있어서 차량의 조향 휠을 잡고 있는 경우와 차이가 크다. 이와 같은 이유로, 차량 조향계에 대한 수완계의 주파수 가중곡선을 도출하는 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도, 고등기술 연구원에서 조향 휠의 진동유형 별로 주파수 가중치를 추출하는 연구가 수행되고 있다.

차량에서 머리의 진동은 단순한 불쾌감뿐만 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. 그러나 일반적인 주행조건에서는 엉덩이로 전달된 진동이 머리까지 전달되면서 많은 감쇠가 일어나므로 심각하게 고려되지 않는 것이 현실이다.

신체 부위 중에서 발은 진동에 대한 민감도가 비교적 낮다. 착석한 상태에서의 전신진동과 비교해 볼 때, 1/4정도의 민감도를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 그러나 저주파수에서의 진동은 상체와 허벅지의 상대

변위가 커서 허벅지의 각운동을 유발하여 불쾌감을 증폭시킬 수 있는데, 주로 버스의 운전석과 같은 현가장치 장착 시트에서 문제가 된다. 승용차의 경우 문제가 되는 것은 페달 진동과 현가장치의 2차 공진 및 엔진 공진 주파수와 관련되어 바닥으로 전달되는 10 Hz 부근의 진동을 들 수 있다.

3. 차량산업에서의 인체진동 기술 응용

인체진동 기술은 차량의 안락성 향상 측면에서 특히 그 활용가치가 높은 기술로서, 그 활용분야를 정리하면 다음과 같다.

(1) 승차감 평가

운송수단에서의 승차감은 인체에 전달되는 진동에 의해 지대한 영향을 받는다. 과거에는 주관적인 판단에 의해 승차감을 평가하는 것이 일반적이었지만, 제품의 설계 및 개선을 위해서 객관적이고 정량적인 정보의 feedback에 대한 필요성이 높아지고 있는 것이 현실이다. 특히, 차량의 운동성능을 좌우하는 현가장치는 수많은 파트로 구성되어 있으며, 각 파트의 설계인자 변화에 따라 차량의 승차감과 조종성이 변화한다. 따라서 각 파트의 설계인자가 운전자의 체감 진동량 또는 안락성에 미치는 영향을 정량화 한다면 매우 유용한 정보가 될 것이다. 이와 같은 과정을 통해, 조정성에는 큰 영향을 미치지 않으면서 안락성에 영향이 큰 설계인자의 조합을 찾아내는 것도 가능하다.



그림 5 차량 진동과 승차감

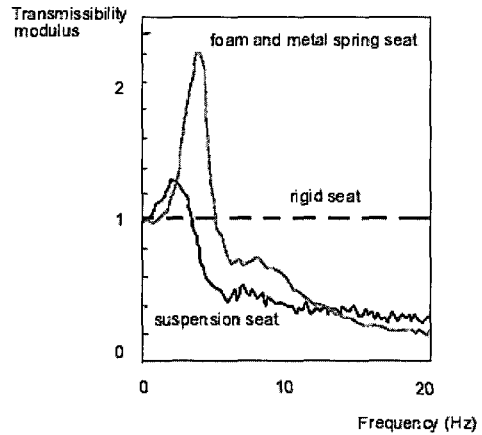


그림 6 시트 종류별 진동 전달 특성

(2) 고안락성 시트 개발

시트는 신체의 정적인 지지뿐만 아니라 동적인 거동을 흡수하는 기능을 갖는 인간 공학적 제품이다. 과거에는 정적 지지 특성이 주 관심사였으나 1990년대 이후에는 시트의 진동전달 특성이 안락성을 결정하는 핵심 인자로 다뤄지고 있으며, 시트업계의 관련 연구 개발의 주된 흐름도 시트의 동특성 개선에 초점이 맞춰지고 있다.⁽⁵⁾ 특히, 장시간 운전 시나 진동이 상대적으로 큰 차량의 경우 시트의 역할은 매우 크다. 안락성이 높은 시트를 개발하기 위해서는 사람이 어떻게 느끼는 지를 정량적으로 판단하는 것이 최우선 과제이며, 전 세계의 인체진동 전문가들이 가장 많은 노력을 기울이는 분야이기도 하다.

(3) 산업차량의 작업성 평가

산업차량은 탑승환경이 자동차에 비해 열악하기 때문에 작업자의 피로와 이에 따른 작업효율의 저하가 특히 문제가 된다. 따라서 선진국에서는 작업환경에서의 피폭 진동

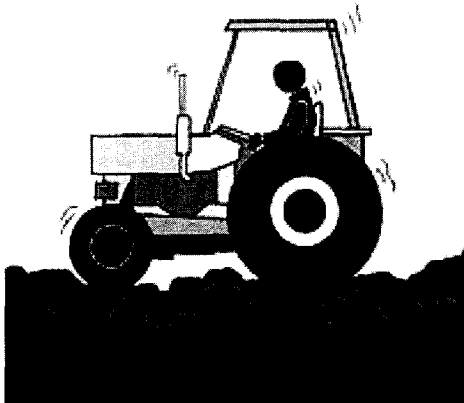


그림 산업용 차량에서의 진동

을 법규로 규제하는 경우가 많다. 특히, 유럽지역에서는 CEN이란 인증 규격을 통과해야만 상용제품을 판매할 수 있도록 하고 있다. 제품 개선뿐만 아니라 수출 대상지역의 규제를 충족시키기 위해서도 인체진동의 측정 및 평가 기술이 매우 중요하다.⁽⁶⁾

(4) 조향계와 페달 진동의 평가 및 개선

조향장치에서의 진동은 상대적인 영향이 전신진동에 비해 작지만, 지속적으로 신체와 접촉하므로 일정량 이상의 진동은 안락성뿐 아니라 운전성(drivability)에도 영향을 미친다. 조향장치의 진동을 다루는데 있어서 핵심은 어떤 주파수의 진동이 불쾌감을 주는 지 정량적으로 비교하는 것과, 서로 다른 유형의 진동에 대해 상대적인 중요도를 결정하는 것이다. 일례로, shimmy와 shake의 진동량이 같을 때 어떤 것을 우선적으로 줄이는 것이 타당한지를 판단하는 것이 매우 중요하다.

(5) 멀미현상의 규명 및 예방

멀미현상과 관련된 진동은 주로 1 Hz 미

만의 저주파수 진동이므로 선박에서 가장 빈번히 발생하지만 경우에 따라서는 버스나 열차 등에서도 문제가 된다. 진동이나 소음은 환경이 중단되었을 때 그 효과도 사라지지만, 멀미의 경우 일단 발생하면 장시간 그 효과가 지속되고, 구토나 메스꺼움, 어지러움 증과 같은 물리적인 증상을 수반하므로 발생가능성을 심각하게 체크 할 필요가 있으며, 특히, 장시간 이동 교통 수단에서는 멀미 발생 가능성을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

(6) 소음과 진동의 상대적 중요도 평가

많은 경우에 인체 환경으로서 소음과 진동은 공존하는 경우가 많다. 이와 같은 경우 안락성을 확보하기 위해서 소음을 줄이는 것이 효과적인지 진동을 줄이는 것이 효과적인지를 판단하는 것이 매우 중요하다. 특히, 차량에서는 소음과 진동이 동시에 중요한 저감 대상이 되므로 이를 판단하는 것이 매우 중요하다.⁽⁷⁾ 그림 8은 소음과 진동을 안락성 측면에서 1:1로 영향 평가하여 작성

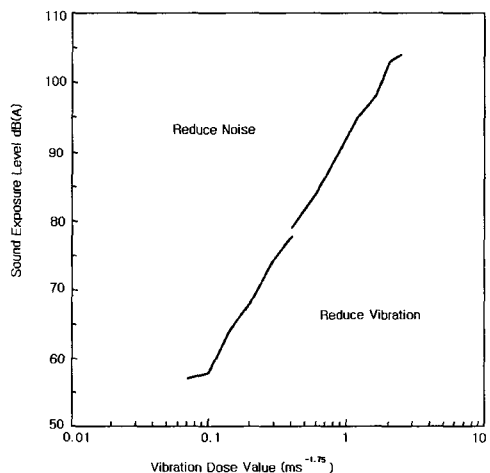


그림 8 소음과 진동의 등 안락성 곡선 추출 예⁽¹⁾

한 등 안락성 곡선(equi-comfort contour)이다. 소음과 진동의 상대적인 중요도를 평가하기 위해서는 주관평가 기법이 요구되는데, 진동에 대한 주관평가는 인체진동의 중요한 기술 중의 하나이다.

4. 맺음말

차량 산업의 발달과 함께 더 좋은 차를 만들기 위해 점점 더 많은 기술이 요구된다. 초기에는 안전성과 성능 확보 기술이 중요했지만, 기반기술이 어느 정도 확보된 후에는 차량의 부가가치를 높이는 기술이 요구된다. 우리나라의 자동차 산업도 질적, 양적인 측면에서 선진국과 경쟁하는 기술수준에 이르렀으나, 안락성 향상 기술 측면에서는 상대적으로 열세인 것이 사실이다. 안락성의 향상은 차량의 부가가치를 높이고 브랜드 이미지를 높이는 매우 효과적인 수단이며, 특히 인체진동 기술은 정숙한 차량을 만드는 데 있어서 핵심이 되는 기술 중의 하나이다. 2000년도의 세계 자동차 산업 보고서를 보면 전세계의 자동차 관련 업종 중에서 매출액 대비 순수 연구개발비 비율이 가장 높은 업체는 유럽 최대의 시트 생산업체인 Faurecia라는 회사로서 매출액 대비 8%가 넘는다. 생산단가를 높이는 연구투자비를 많이 지출하면서도 경쟁력이 유지되는 것은, '사람이 타는 차량'의 안락성 향상 기술이 충분한 투자 가치가 있음을 반증하는 것이 아닐까 한다.

본 원고에서는 차량에서 발생하는 진동을 이해하는데 필요한 기술적인 사안들을 정리하였으며, 구체적으로 어떻게 응용될 수 있

는지에 대해서도 간략히 소개하였다. 차량의 실내 소음 수준은 이미 일상 생활에서 노출되는 소음수준과 별 차이가 없어졌지만, 차량에서의 진동은 아직도 상대적으로 높은 수준에 머물고 있다. 필자는 인체진동 기술이 차량진동을 해결하는 열쇠가 되는 기술로서 또, 차량 안락성 향상을 위한 효과적인 수단으로서 널리 확산되기를 기대해 마지 않는다.

참고문헌

- (1) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press.
- (2) International Organization for Standardization, Mechanical Vibration and Shock-evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration (ISO 2631-1), 1997.
- (3) International Organization for Standardization, Mechanical Vibration-guidelines for the Measurement and Assessment of Human Exposure to Hand-transmitted Vibration (ISO 5349), 1986.
- (4) 고등기술연구원, 2001, "북미수출형 중형차의 고안락성 시트 개발," 산업기반기술과제 (A00-991-2202-06-1-2) 최종보고서.
- (5) 장한기, 2001, "고안락성 시트개발기술 동향," 한국자동차공학회지, 제 23권, 제 5호.
- (6) 장한기, 1998, "산업용 차량에서 인체진동에 관한 유럽의 규제동향," 한국소음진동공학회지, 제 8권, 제 6호, pp. 1009~1014.
- (7) 장한기, 2002, "차량 안락성 개선의 우선순위," 한국자동차공학회지, 제 24권, 제 2호.