

철도의 경계문제로서 진동승차감의 이해

| 서 사 범 |
한국철도시설공단
중앙궤도기술단장



I. 머리말

생활수준의 향상과 이에 따른 사회생활의 스트레스 증대 등에 따라 “여유”나 “편안함”을 요구하는 목소리가 높아지고 있다. 철도 등의 공공수송에서도 안전이나 정확에 더하여 “보다 쾌적한 수송서비스”가 중요하게 되고 있으며(그림 1), 이에 따라 쾌적한 승차감이 요구되고 있다.

일반적으로, 승차감이란 “탈것에 탔을 때의 느낌”(그림 2)이며, 철도기술 분야의 경계문제로서 여러 분야가 관계된다. 본고에서 논의하려는 진동승차감에 관련되는 기술 분야에는 차량의 측면과 궤도의 측면 외에 진동이라고 하는 자극을 인간이 어떻게 느끼는가를 평가하는 인간공학적인 측면이 있다. 본고에서는 먼저 승차감이라고 하는 주관적인 감각을 수량화하는 문제에 관하여 논의한 다음에, 차량, 궤도, 인간공학적인 관점에 본 승차감에 관하여 논의한다.

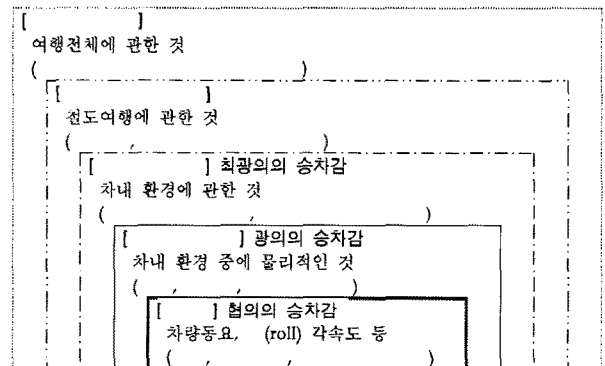


그림 2. 승차감의 정의와 구성요소

개발이 중요하게 되며, 승차감이라고 하는 주관적인 감각을 어떻게 수량화하는가도 중요한 문제로 된다. “이 열차의 승차감은 어느 정도 좋은가(또는 나쁜가)?”, “어떠한 유형의 진동이 보다 불쾌하게 느껴지는가?”라고 하는 것을 수치로 나타낼 수 있으면 그 후에 기술개발의 목표를 구체적으로 설정한다든지 개선효과를 파악한다든지 하는 일에 유용하다.

II. 진동승차감의 정량화

쾌적한 승차감을 제공하기 위해서는 진동을 줄이는 기술의

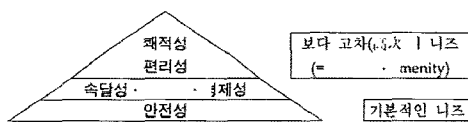


그림 1. 공공수송 서비스에 대한 이용자의 요구

1. 진동의크기

진동승차감의 평가에서는 먼저 진동의 성질을 어떻게 정량적으로 표현하는가가 문제로 된다. 예를 들어, 철도차량의 진동은 그림 3과 같은 좌표계로 표현할 수 있다. 그림 중의 x축, y축, z축 방향의 병진운동(직진진동)을 각각 전후진동, 좌우진동, 상하진동이라고 부르며, 이들의 각 축 주위의 회전진동을 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing)이라고 부른다. 이 중에서 승차감에 대한 영향이 특히 큰 것은 좌우진동, 상하진

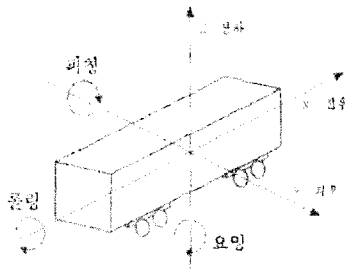
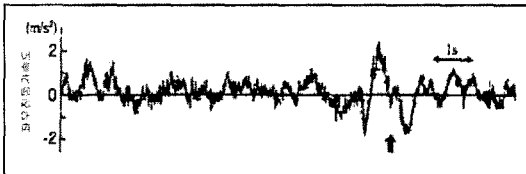


그림 3. 철도차량의 진동을 기술하는 좌표계



- 화살표는 건널목이나 분기기 주행 시에 생긴 순간적인 저대 진동을 나타낸다.
- 직선 양측의 최대진폭을 p~p 치, 편측 최대진폭을 피크 값이라 부른다.

그림 4. 철도차량 진동의 일례(차체바닥 면에서 측정된 좌우 진동가속도 파형)

동 및 물량이다. 진동의 크기는 일반적으로 가속도의 크기로 표기된다.

그림 4는 좌우 진동가속도의 변화에 관한 예를 나타낸다. 이와 같은 랜덤진동의 경우에는 어느 구간 내의 진동 대표치를 어떻게 정하는가가 하나의 과제로 된다. 예를 들어, 구간 내의 진동파형 중에서 최대진폭(그림 중의 화살표 개소)을 읽어 들인 피크 값이나 대상구간 내의 진동가속도 순간 값의 제곱합의 제곱근을 구한 실효치(r. m. s 값) 등의 대표치가 잘 알려져 있다(그림 5).

구간 내에서 다른 것에 비하여 돌출된 값이 하나라도 있으면 그것이 전체의 대표치로 되기 때문에 피크 값은 통계적으로 바람직한 지표가 아니다. 자동차나 선박 분야는 승차감의 평가에서 피크 실효치를 이용하는 것이 일반적이다. 그렇지만 피크 값은 어느 지점에서 저대(著大) 진동이 발생되었는가를 특정할 수 있어 철도의 보수 관리에 반영될 수 있는 점에서 유용한 지표로 되기 때문에 철도분야에서는 현재에도 피크 값을 활용하고 있다.

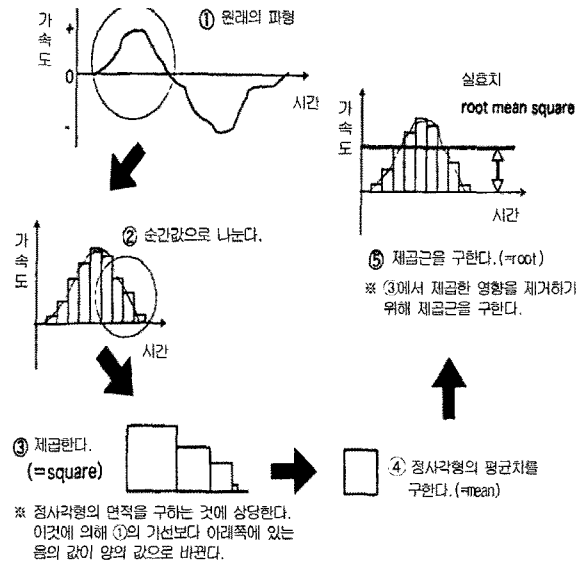


그림 5. 실효치의 의미

2. 주파수의 영향

진동의 성질을 나타내는 하나의 지표는 주파수이며, 1 초당 진동횟수로 그 차이를 나타낸다. 예를 들어, 철도차량은 강체와 탄성체의 성질을 아울러 갖고 있기 때문에 진동 발생원인의 차이에 착안하면 “동요”와 “상승(相乘)진동”을 구분할 수 있다. 동요는 주파수가 5 Hz 이하 정도의 느릿느릿한 흔들림으로 차체가 강체로서 운동하고 있는 것(그림 3)에 기인하는 것이다. 한편, 상승진동(6 Hz 이상, 통상은 10 Hz 이상)은 차체의 탄성체로서의 진동, 즉 차체자신의 탄성변형에 의한 것이다. 승차감에 대한 영향을 고려하기 위해서는 동요의 쪽이 중요하다. 그리고 1 Hz 이하의 대단히 낮은 주파수의 동요는 탈것과 관련되어 문제로 되는 일이 있다.

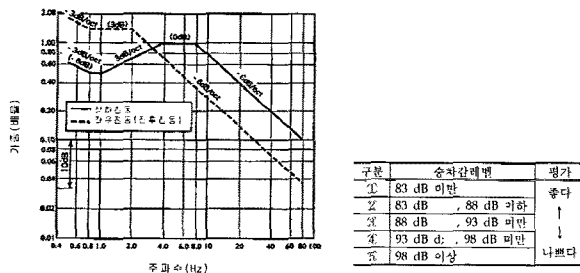
물리적으로는 같은 크기의 진동이라도 주파수가 다르면 인간이 느끼는 진동의 크기가 변화한다. 이것은 인체가 특정한 주파수의 진동에 공진하기 쉬운 점이 일인(一因)이다. 공진이란 어떤 물체가 특정한 주파수에서 가진되는 경우에 다른 주파수에 비하여 크게 진동하기 쉽게 되는 현상을 가리키는 것으로 공진을 일으키기 쉬운 주파수를 공진주파수(또는 고유진동수)라고 부른다. 물체에는 각각 고유의 공진주파수가 있으며 예를 들어 인간신체의 경우에 상하방향의 진동에 대하여는 4~8 Hz 부근이 공진주파수로 된다. 다른 주파수에 비하여

이 종류의 진동은 작더라도 보다 불쾌하기 느끼기 쉽다. 그리고 공진주파수에 어느 정도의 폭이 있는 것은 자세나 체격의 차이에 따라서 값이 변화하기 때문이다.

3. 주파수 보정곡선의 활용

이상과 같은 성질을 응용하면, 인간으로서 같은 강도로 느껴지는 진동을 각 주파수별로 선으로 연결함으로써 인간의 체감을 고려한 평가곡선으로서 이용할 수가 있다. “승차감계수”나 “승차감레벨” 등의 평가방법에도 이 고려방법이 도입되어 있다. 예를 들어 그림 6은 승차감레벨에 이용되고 있는 주파수 보정곡선을 나타낸 것이다.

국제적으로 가장 유명한 주파수 보정곡선은 국제표준화기구(ISO)에 의한 ISO 2631 규격이다. 전술의 승차감레벨도 ISO 2631의 1974년판을 참고로 정해진 것이다. 그리고 ISO는



· “dB/oct”란 1 옥타브 당 어떤 dB의 기울기를 가진 곡선인가를 나타낸다.

그림 6. 승차감레벨에 이용되는 주파수 보정곡선

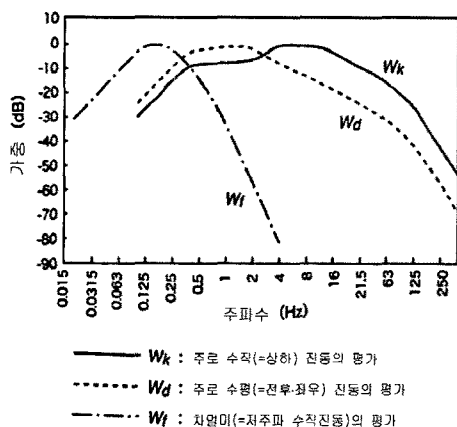


그림 7. 새로운 ISO 2631에서 제안된 주파수 보정곡선

1997년에 ISO 2631의 내용을 근본적으로 개정하였다(제Ⅵ장 참조). 새로운 주파수 보정곡선 중에 주요한 3 종류를 그림 7에 나타낸다.

그림 중에 실선(W_k)은 수직(= 상하)진동, 점선(W_d)은 수평(= 좌우 · 전후) 진동에 적용하는 보정곡선이다. 그림의 가로축은 주파수, 세로축은 가속치로서, 가장 민감한 주파수대(예를 들어 상하진동에서 4~8 Hz 부근)를 기준(=0)으로 한 경우에 다른 주파수에서는 상대적으로 어느 정도 할인하여 평가하여야 하는가를 나타내고 있다. 이전의 보정곡선에 비하여 전체가 매끄러운 곡선으로 연결되어 있는 점이 특징적이다.

한편, 그림 중의 1점 쇄선(W_f)은 차원미의 평가에 이용되는 특별한 보정곡선으로 1 Hz 이하의 저주파 상하진동만을 평가한다. 그렇지만 이 곡선은 배의 진동을 대상으로 하고 있기 때문에 철도차량에서 문제로 되는 롤링이나 좌우 진동의 평가에 적용할 수 있는가의 여부는 불명하며 현재 검토가 계속되고 있다. 현재의 경우에 롤링, 피칭, 요잉 등과 같은 회전진동의 평가에 적용하는 보정곡선은 제안되어 있지 않다.

4. 승차감의 평가지표

승차감의 평가지표에 대한 개발목적의 차이에 착안하면 종래의 각종 지표는 다음의 두 가지로 대별할 수 있다. 하나는 “사람이 느끼는 쾌—불쾌의 변화와 가장 높은 상관을 가진 진동특성의 물리적 변화를 정량화하여 물리량의 크기에서 승차감의 정도를 예측가능한 평가함수로 함”을 목적으로 하며, 또 하나는 “상품이나 서비스를 제공할 때에 필요한 설계표준을 얻음”을 목적으로 한다. 양자의 차이는 절대적인 것이 아니지만 그 목적의 차이에서 필요하게 되는 지표의 형태가 다르게 되는 경향이 있다.

승차감의 쾌—불쾌는 여러 가지의 진동특성이 영향을 주는 점에서 체감과의 상관성이 가장 높게 되도록 각종 진동특성의 가속 함을 구하여, 예를 들어 CEN과 같은 평가 식을 작성할 수가 있다. 그러나 이와 같이 표현하면 각각의 변수를 물리적으로 어느 정도 저감하면 승차감이 어떻게 변화하는가를 알기 어렵다고 하는 문제가 생긴다. 이 때문에 궤도의 관리나 차량의 설계에 반영하기 어려운 지표와 평가로 되는 경향이 있다.

설계·관리 면에서는 “롤 각속도 최대치($\dot{\theta}_b$)는 $5^\circ/s$, 롤 각 속도 최대치(θ_b)는 $15^\circ/s^2$, 좌우 정상가속도(y_a)는 $0.8 m/s^2$ 이하로 억제할 것”이라고 하는 허용치로 나타내는 쪽이 적합하다고 한다. 그렇지만 이와 같은 관리기준에서는 물리량의 변화에 따라 쾌—불쾌의 정도가 어떻게 변화하는지를 정량화하기가 곤란하다. 또한, 체감평가와의 상관도 그렇게 높게 되지 않는다.

이상에서 승객의 체감적인 양부를 나타내는 지표와 궤도관리나 차량설계에 유용한 지표는 반드시 같지 않음을 알 수 있다. 유럽에서는 관리·설계용의 기준과 체감 승차감의 평가 함수를 구별한 후에 승차감지표의 규격화가 진행되고 있다. 우리나라도 설계·관리지표로서의 승차감 외에 서비스의 종합 품질지표로서의 승차감 기준을 검토할 필요가 있다. 앞으로는 양 지표의 장점을 받아들임으로서 체감과의 상관도 높고 관리나 설계에 이바지하는 지표의 개발이 필요하다.

Ⅲ. 차량의 관점에서 본 승차감

승차감이란 “탈것에 탔을 때의 느낌”이며, 일상의 생활에서도 잘 이용되는 말이다. 이것을 철도에 대한 용어로서 명확한 정의를 내리기는 용이하지 않지만 통상은 표 1에 나타난 것처럼 진동, 소음, 좌석에 앉을 때의 느낌 외에 온도, 질감, 냄새, 조명, 실내 디자인 등까지를 포함한 폭 넓은 요인으로부터 영향을 받는 쾌적성으로 되며, 광의의 승차감으로서 포착되고 있다. 이들의 요인을 철도기술 분야의 경계문제로서 보면 예를 들어 소음문제의 경우에는 차량, 궤도, 가선, 구조물 등이 영향을 주고 있으며, 학문적으로도 기계, 토목, 전기, 심리, 생리 등의 분야가 관계되고 있다. 승차감에 관한 요인 중에서 가장 정량적으로 연구되고 있는 것은 진동이다.

차량의 진동을 발생시키는 외부교란에는 궤도에 기인하는 경우와 터널 내의 공기력에 의한 경우가 있지만 문제로 되는 것은 전자의 경우가 많다. 진동의 크기는 일반적으로 차체의 진동가속도를 이용하여 나타내며 여기에는 궤도의 가지런하지 않음에 기인하는 상하나 좌우의 진동 외에 곡선주행 중의 원심력으로 인해 생기는 좌우 정상가속도나 가·감속 시에 생기는 전후 가속도와 같이 일정시간 동안 계속하여 작용하는

표 1. 승차감에 영향을 주는 요인

바닥재료, 냄새, 질감, 소음, 진동, 온도, 습도, 조망, 조명, 좌석의 앉음 느낌, 공기 청정도, 차내의 청정도, 공간적 넓이, 시트피치, 시트 폭, 리크라이닝, 실내 디자인, 손잡이, 통로 폭 등
--

가속도도 포함된다. 또한, 가속도의 크기와 진동수에 의거하여 평가하는 것이나 가속도가 아닌 전후 축 주위의 회전속도(롤 각속도)의 크기에서 승차감을 평가하는 것도 있다. 평가기준은 차체가속도 등 물리량과 인간이 느끼는 정도를 다수의 피험자(被驗者)에게 앙케트 형으로 평가를 받아 결과를 집계·해석하여 사전에 준비된다. 평가기준이 만들어지면, 이후에는 피험자에 의하지 않고 얻어진 물리량과 기준을 비교하여 승차감을 판정한다. 잘 이용하는 평가방법에는 원곡선에서의 좌우 정상가속도 목표치 $0.78 m/s^2$, 완화곡선에서의 롤 각속도 목표치 $5^\circ/s$, 진동수와 가속도의 크기에 의거하는 승차감 선도(線圖)와 승차감 레벨이 있다.

바닥재료, 냄새, 질감, 소음, 진동, 온도, 습도, 조망, 조명, 좌석의 앉음 느낌, 공기 청정도, 차내의 청정도, 공간적 넓이, 시트피치, 시트 폭, 리크라이닝, 실내 디자인, 손잡이, 통로 폭 등

Ⅳ. 궤도의 관점에서 본 승차감

1. 궤도 입장에서의 승차감 관리

상기의 논의처럼, 승차감에는 객실의 소음, 냄새, 조명, 또는 좌석쿠션의 부드러움 등의 여러 가지 물리량이 영향을 주고 있지만 일반적으로는 “승차감이 나쁘다 = 흔들림이 크다”, “승차감이 좋다 = 흔들리지 않는다”라고 바꾸어 말하여도 지장이 없을 정도로 승차감과 진동은 밀접한 관계가 있다. 즉, 철도에서 협의의 승차감이란 차량의 주행에 따라 객실에서 발생하는 차량의 진동이라고 말하여도 좋으며(상기의 그림 2 참조), 선형, 궤도변위, 차량제원이나 차량의 상태에 따라 결정되는 차체의 진동가속도나 롤 각속도 등의 물리량으로 한정된다. 진동에 관한 물리량으로서 속도, 가속도, 저크(jerk) 등이 있지만 철도에서는 일반적으로 가속도가 이용된다. 이것은 뉴턴의 법칙에 따라 승객에게 작용하는 힘이 인간의 질량과 가속도의 합으로 나타내어지기 때문이다. 진동가속도 중에서

0.5Hz~2Hz 정도의 비교적 저주파수의 낮은 성분의 것은 “동요”라고 부르며, 이것이 승차감으로서 다루어진다.

상기의 그림 3이 나타낸 철도차량에 관한 6 종류의 진동 중에서 전후요동은 승차감에 크게 영향을 주지만 가감속 등의 운전방법이나 연결기의 구조에 의한 것이며 궤도 상태와는 관계가 없다. 요잉과 롤링은 좌우요동으로서 피칭은 상하동으로서 측정된다. 결국, 궤도보수 관계자가 승차감관리의 대상으로서 다루어야 하는 동요는 상하동과 좌우동의 2 가지로 된다.

“승차감은 승객에 대한 서비스 수준의 문제이며, 안전성과는 관계가 없다”고 하는 의견이 있지만, 승차감이란 차량운동의 물리량인 점에서 무관계라고 할 수 없고 오히려 승차감이 만족되면 대부분의 경우는 안전성이 만족된다고 생각하여야 할 것이다. 예외로서는 급곡선 저속주행 시의 탈선 등이다.

그런데, 차량의 진동원은 대부분의 경우에 레일위치의 틀림(이것을 지금까지 “궤도틀림”이라고 하였지만, 외국에서는 근래에 “궤도변위”라고 부른다)이다. 따라서 궤도의 입장에서 보아 좋은 승차감이란 “차량이 흔들리지 않는 궤도변위”와 동의이다. 이것을 실현하기 위해서는 다음을 알 필요가 있다.
 ① 궤도변위는 어떻게 측정되는가? ② 차량은 궤도변위에 대하여 어떻게 흔들리는가? ③ 차량의 흔들림을 작게 하기 위해서는 궤도변위의 측정데이터를 어떻게 읽으면 좋은가? ④ 구체적으로 궤도를 어떻게 보수하면 좋은가? 이와 같이 궤도의 입장에서 승차감을 고려하는 경우에도 차량에 관한 식견이 불가결하게 된다.

2. 궤도변위의 측정원리

궤도변위는 고저(면), 방향(줄), 수평, 궤간, 평면성의 5 항목이 측정되고 평가된다. 이 중에서 고저(면)와 방향(줄)은 일반적으로 10m 현 중앙종거법이라 부르는 방법으로 측정된다. 궤도검측차에서는 차내에 레이저 광선 등으로 기준 현을 만들어 10m 현 중앙종거법을 실현하고 있다.

10m 현 중앙종거법이란 수학적으로는 궤도변위의 2계(階)차분(差分)에 상당하기 때문에 이것으로 얻어지는 파형은 궤도변위의 실제파형이 아니고 궤도변위에 그림 8에 나타낸 특성의 필터처리를 한 파형으로 된다. 실제파형이 아님에도 불구하고 10m 현 중앙종거법이 측정방법으로서 이용되고 있는 이유는 후술하는 차량의 진동특성과 그림 8의 관계에 있다.

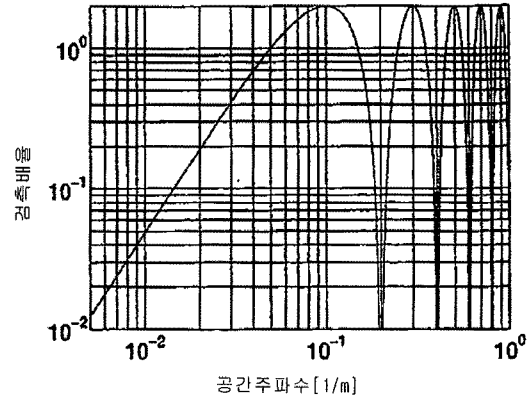


그림 8. 10 m 현 중앙종거법에서 공간주파수와 검측배율과의 관계

3. 철도차량의 진동특성과 10m 현 중앙종거법

그림 9에 궤도변위와 상하 진동가속도의 실제파형으로부터 동정(同定)한 일반철도차량의 상하진동 주파수응답함수를 나타낸다. 이 그림에서 진폭특성에 2 개의 피크가 있음을 알 수가 있다. 하나는 속도가 올라감에 따라 공간주파수축 상에서 낮은 쪽으로 이동하는 피크이다. 이 피크는 시간주파수로 약 1.2 Hz에 상당하며, 차체상하동의 1차 고유진동수이다. 또 하나는 속도가 변화하여도 공간주파수축 상에서 주파수가 변화하지 않는 피크로서 대차중심간 거리 등과 같은 차량의 치수에 기인한다. 이처럼 성질이 다른 복수의 공간주파수가 있는 점이 철도차량 진동의 특징이다.

그런데, 그림 8의 진폭특성이 1을 넘는 대역은 그림 9에서 속도 85 km/h의 검측배율이 크게 되는 대역과 유사하다. 즉, 일반철도에서 비교적 낮은 속도영역이라면 10m 현 중앙종거법은 차량의 고유진동수에 가까운 주파수의 궤도변위를 강조하여 검출하는 것으로 된다. 이것이 10m 현 중앙종거법을 이용하는 공학적인 이유이다.

4. 궤도검측 데이터의 평가방법

그림 9에서 130 km/h의 경우에 고유진동수가 0.04 [1/m] 부근에 있다. 이 대역에서는 그림 8로부터 10m 현 중앙종거법의 검측배율이 0.7배 정도이다. 즉, 이 속도대역으로 되면 10m 현 중앙종거법으로는 차량을 흔들리게 하는 궤도변위를 파악할 수 없게 된다. 따라서 이보다 긴 현의 중앙종거법을 병용하여 장파장 궤도변위를 평가한다. 고속철도의 경우에 30m 현의 중앙종거를 병용하며, 그림 10은 외국에서 사용하는 20

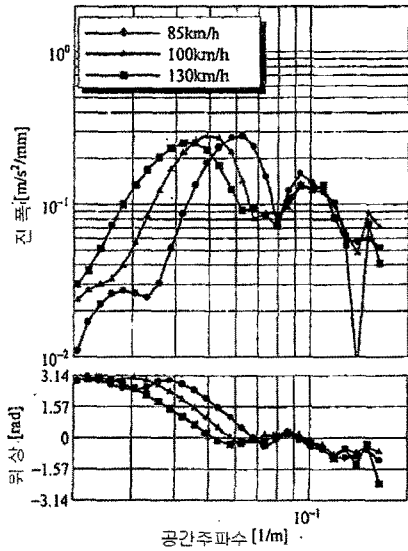


그림 9. 속도변화에 대한 주파수 응답함수 변화의 예

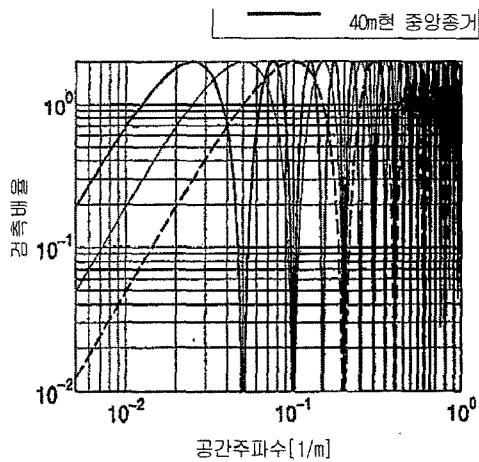


그림 10. 20 m 현 중앙중거법과 40 m 현 중앙중거법의 검측배율

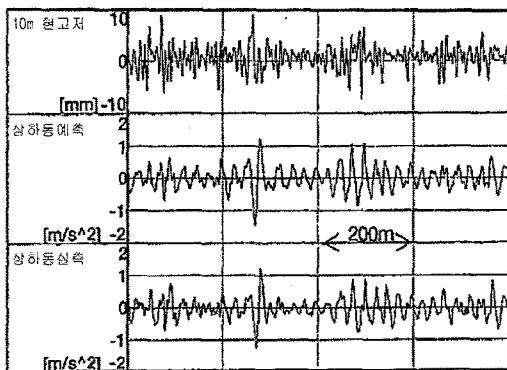


그림 11. 상하동 예측파형의 예(직선 130, km/h)

m와 40 m 현 중앙중거법의 검측배율을 나타낸다.

한편, 공간주파수축 상에서 차량의 주파수특성을 알고 있으므로 이것과 등가인 디지털필터를 이용하면, 궤도검측 데이터로부터 차량의 진동가속도를 예측할 수 있다. 그림 11에 예측파형의 예를 나타낸다. 이와 같은 파형을 이용하면, 검측 방법에 관계없이 차량이 실제로 흔들리는 개소를 파악할 수 있다.

5. 궤도의 보수방법

궤도보수 시에 이용하는 멀티플 타이 탬퍼(MTT)라는 대형 장비는 궤도검측차와 같은 모양으로 차내에 설치된 현을 기준으로 3점간의 상대변위를 측정하면서 궤도변위가 작게 되도록 레일을 이동시킨다. 일반철도에서 90 km/h 정도의 선구이라면, 이 방법으로 궤도변위가 충분히 작게 되지만, 열차가 고속으로 되면 이 방법으로는 효과가 없게 된다. 이것은 그림 8의 10m 현 중앙중거에서 주파수가 낮게 되면 검측배율이 작게 되는 것과 같은 원리이다.

이것에 대하여 10m 현 중앙중거법에 의거하는 궤도검측 데이터에 대하여 그림 8의 검측배율의 역수(逆數)의 특성을 가진 디지털필터 처리를 하여 궤도변위의 근사적인 실제형상을 얻는 방법이 개발되고 있다. 이 방법으로 얻어지는 근사파형을 “복원(원)파형”이라고 부른다. 궤도보수 시에는 복원파형의 진폭이 0으로 되도록 레일의 이동량을 정하여 MTT에 입력한다. 그 때에 건축한계 등으로 인한 이동량 제한에 따른 부동점 등을 고려하는 것도 가능하다.

6. 선로선형별 승차감의 평가

직선부에서는 궤도변위나 차량특성에 의존하여 동요를 평가하게 된다. 평가방법으로는 체감, 최대 관리치, 승차감계수와 승차감대별이 있다. 열차순회 시의 체감에 의한 검사는 승차감관리의 기본이다. 일반철도영역의 속도이라면 충분히 위치를 특정할 수 있고 동요발생개소 주변의 상황도 동시에 파악할 수 있으므로 원인을 추정하기도 하기 쉽다. 승차감은 최대치로 평가하는 것이 일반적이다. 궤도변위와의 대응이라고 하는 의미에서는 편(片)진폭으로 평가하여야 하지만 곡선중에서는 캔트 부족량에 따라 기선(제로 점, 중심선)이 변동하므로 읽어 들이기 쉬운 전(全)진폭으로 관리하는 경우도 있다.

승차감레벨은 제1장을 참조하라.

곡선부에서는 직선부와 달리 좌우정상가속도의 평가가 문제로 된다. 곡선통과 시에는 곡선반경과 열차속도에 대응하여 원심력이 작용하기 때문에 이것을 작게 하기 위하여 캔트를 설정하지만 열차속도가 균형속도보다도 높은 경우에는 캔트부족이 생긴다. 캔트부족이 생기면 원심력 때문에 차체가 대차에 대하여 곡선외측으로 경사한다. 이 동작은 캔트가 실질적으로 작게 되는 것과 같은 작용을 한다. 이 비율을 “차체 경사계수”라고 하며, 차량 스프링계의 특성에 의하지만 통상 0.2~0.3이다. 근래의 연구에 의하면, 곡선통과 시의 승차감은 좌우정상가속도의 크기뿐만이 아니고 좌우 진동가속도와와의 조합으로 평가하는 쪽이 승객의 평가와의 상관성이 높음이 밝혀졌다. 예를 들어, 좌우동이 1.2, 1.6, 2.0 m/s²이라면, 좌우정상가속도는 각각 1.0, 0.8, 0.6 m/s²까지 허용할 수 있다.

종(縱)곡선에는 완화곡선을 이용하지 않으므로 상하정상가속도의 불연속적인 변화의 원인으로 되지만 실태로서는 실재하는 궤도변위로 인한 상하진동가속도보다도 작은 정도이기 때문에 문제가 없다. 종곡선은 설계 시의 문제이며 일상보수에서는 통상의 고저(면) 궤도변위 관리가 적절히 행하여지면 충분하다고 생각된다.

V. 인간공학적인 관점에서 본 승차감

1. 승차감에 관한 인간공학적인 어프로치

승차감을 개선하기 위해서는 진동을 줄이는 기술의 개발이 불가결하다. 진동을 줄이려고 하여도 승객이 어느 유형의 진동을 가장 불쾌하게 느끼고, 또한 어느 정도까지 줄이면 좋은가가 밝혀지지 않으면 기술개발의 방향을 설정할 수 없다. 그러므로 승차감이라고 하는 인간의 애매한 감각과 진동과의 대응관계를 명확하게 하여 차량의 설계나 궤도관리에 유용한 평가지침이나 허용한도 값을 제안하기 위한 인간공학적인 어프로치가 필요하게 된다. 이하에서는 승차감에 영향을 주는 인간 측의 요인을 논의한다.

2. 승객의 자세

차내에 서 있는가, 앉아있는가에 따라서 흔들림을 느끼는

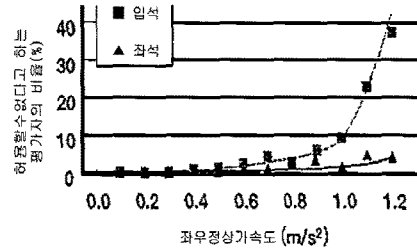


그림 12. 곡선 중의 원심력(가로축)과 불쾌감(세로축)과의 관계

정도가 대단히 다르다. 앉아있다면 거슬리지 않을 정도의 흔들림도 서있는 자세에서는 비틀거릴 만큼 큰 흔들림으로 느껴지는 경우가 있다. 이 때문에 승차감의 평가에서는 입석과 좌석의 구별이 필요하다. 예를 들어, 열차가 곡선구간을 주행할 때에 승객에게는 곡선의 외측 방향으로 잡아당기는 힘(원심력)이 작용한다. 이 원심력의 크기를 “좌우 정상가속도”라고 하는 지표로 나타내며 입석과 좌석승객의 불쾌감에 미치는 영향을 조사한 결과를 그림 12에 나타낸다.

좌석의 경우에는 가속도의 증가에 대하여 “승차감적으로 허용할 수 없다”고 하는 승객의 비율이 완만하게 증가하지만, 입석에서는 좌석에서보다 평가가 엄하며, 특히 1.0 m/s²를 넘길 즈음에서 “허용할 수 없다”고 하는 생각이 급증함을 알 수 있다. 이 때문에 승차감의 허용한도 값을 정할 때에는 이전부터 입석승객의 평가를 근거로 하는 것이 일반적이었다. 예로서 일본에서는 1963년에 “입석승객의 평가를 토대로 정상가속도를 0.78 m/s²(원래표기는 0.8 G) 이하로 억제함이 바람직하다”라는 기준을 정하였다. 이 지침의 제정부터 상당한 기간이 경과하였기 때문에 약 300 명의 승객(피험자)의 평가를 기초로 지표를 재검토한 결과, 곡선의 출입구 등에서 생기기 쉬운 과도적인 진동을 충분히 억제할 수 있으면 1.0 m/s² 정도까지의 좌우 진동가속도는 문제가 없음이 확인되고 있다. 그리고 흔들림의 증가에 따라 승차감이 악화하는 경향이 있는 점, 손잡이라고 하는 지지물의 유무에 따라 흔들림에 대한 내성이 크게 다른 점도 실험결과에서 확인되고 있다.

3. 진동의 방향

상기에서도 논의하였지만, 탈것의 진동은 그림 3에 나타낸 것처럼 전후, 좌우, 상하방향의 직선진동(병진진동 또는 왕복

운동이라고도 한다)과 각 축 둘레의 회전운동(피칭, 롤링, 요잉) 등의 6 종류의 운동으로 나타낸다. 문제로 되는 진동의 유형은 탈것마다 다르며, 자동차나 배에서는 상하동의 영향이 특히 증시된다. 한편, 철도차량의 승차감을 고려할 경우에는 좌우동요의 영향이 가장 현저하며, 다음으로 상하동이나 롤링이 문제로 된다.

4. 주파수의 차이

철도차량의 진동에는 느릿느릿한 큰 흔들림에서 잘게 나눈 흔들림까지 주기가 다른 여러 가지 흔들림이 혼재하고 있다. 지금까지의 연구에서 “물리적으로 같은 강도의 진동이더라도 주파수가 다르면 지각되는 진동의 크기가 다르다”는 점이 알려져 있다. 이 때문에 역으로 이 고려방법을 이용하여 사람이 같은 크기로 느껴지는 진동강도를 각 주파수마다 구한 등(等)감각곡선으로 진동을 평가하는 고려방법이 널리 지지되어 왔다. 일례로서 “승차감레벨”이라고 하는 평가법에 이용되는 등감각곡선(= 주파수 보정곡선)은 상기의 그림 6에 나타내었다. 상기에서도 논의하였지만 이 그림에서 상하진동의 경우에 4~8 Hz 부근의 진동이 가장 크게 느껴지는 것을 알 수 있다. 이것은 인체의 공진주파수에 거의 일치하고 있다. 또한, 최근의 연구에 의거하여 1 Hz 미만의 저주파 진동이 진자열차 등에서 멀미에 관계되어있음이 알려지고 그 중에서도 0.25~0.3 Hz 부근의 좌우 진동이 많이 포함되는 구간에서 멀미를 하는 승객의 비율이 높아짐이 확인되고 있다.

5. 관성력

열차가 급하게 출발하면서 있는 승객은 진행방향과 반대쪽으로 잡아당기는 것과 같은 힘을 느끼는 일이 있다. 급브레이크가 걸린 경우에는 역으로 진행방향 쪽으로 잡아당겨져 손잡이를 잡지 않고 있는 승객이 넘어져버리는 케이스도 있다. 물체가 그 상태를 유지하려고 하는 힘, 즉 관성력이 그 원인이다. 관성력의 영향을 “주기가 대단히 긴 진동”으로 간주하여 다룰 수도 있지만 통상은 일반적인 승차감과 구별하여 직선가속도나 정상가속도의 영향으로서 다룬다. 가속 시와 감속 시의 쌍방이 문제로 되지만, 주된 대상은 감속 시(브레이크작동 시)이다. 감속 시의 승차감은 전후방향의 가속도(단위 m/s^2)와 그 변화율(저크 · jerk라고 한다. 단위 m/s^3)로 규정되며, 승객

머리의 흔들림이 큰 브레이크 패턴에서는 승차감의 평가가 저하되는 점이 밝혀져 있다.

6. 승차시간

같은 크기의 진동을 1 분 동안만 체험하는 것과 1 시간 계속하여 체험하는 것은 느끼는 정도가 다르다. 일반적으로 승차시간이 길게 되면 진동의 영향이 서서히 누적되어 피로하게 된다고 추측된다. 다만, 진동이 인체에 미치는 영향에 관한 ISO(국제표준화기구) 규격의 해설에는 “승차시간과 흔들림으로 인한 피로 · 불쾌감과의 사이에 명백한 관계는 발견되지 않았다”고 기술되어 있다. 이 때문에 승차시간과 철도차량 승차감의 관계에 관한 검토가 현재에도 진행되고 있지만 대략적으로는 다음과 같은 것이 알려져 있다. 승차감의 평가시간이 짧은 경우에 승객은 그림 4에 나타낸 피크 값과 같은 순간적인 저대 진동에 착안하여 평가하는 경향이 있다. 큰 흔들림이 1 회 있으면, 전체적인 평가는 곧바로 저하한다. 한편, 평가시간이 길게 되면 저대 진동이 1 회 있는 정도로는 영향을 주지 않고 구간전체의 평균치적인 진동강도와 승객의 체감이 일치하게 된다. 전문적으로 말하면, 구간 내의 진동가속도의 실효치(= 제품 합의 제곱근)가 유효한 지표로 된다(그림 5). 따라서 궤도관리 등에 유용하게 되도록 순간적인 승차감을 다룰 때에는 피크 값을, 일정구간 승차한 때의 승차감을 종합적으로 평가할 때에는 실효치를 이용하고 있다.

VI. 진동승차감의 국제표준

ISO에는 개별의 과제를 심의하는 약 230의 기술위원회(technical Committee, TC)가 있고 더욱이 분과위원회(Sub-Committee, SC)와 작업그룹(Working Group, WG) 등의 하위조직이 설치되어 있다. TC 108은 “기계진동과 충격”에 관한 기술위원회로 그 SC 4가 “인체에의 진동영향”을 다루고 있다. 이 SC가 철도에 관계되는 것은 “승차감”의 측정과 평가에 관한 규격을 정하고 있는 일이다.

1974년에 성립된 ISO 2631은 그 중에서도 가장 대표적인 규격이다. 이 규격은 진동의 방향(전후, 좌우, 상하)나 사람의 자세(입석, 좌석), 진동을 경험한 시간의 길이 등을 고려하여

표 2. 열차진동의 측정과 승차감의 평가에 관한 주된 규격

규격코드	명칭	비고	대상
1 ISO 2631-1 구판(1974)	전신진동에 대한 인체폭로의 평가 - Part 1 : 총설	ISO에 의한 최초의 전신진동 평가지침	평가법
2 ISO 2631-1 개정판(1997)	전신진동에 대한 인체폭로의 평가 - Part 1 : 총설	상기 규격의 발본 개정판	평가법
3 ISO 2631-4(2001)	전신진동에 대한 인체폭로의 평가 - Part 4 : 철도시스템의 승객·직원에의 진동영향 평가	ISO 2631-1 개정판을 철도진동의 평가에 적용하는 것을 목적으로 정한 규격	평가법
4 ISO 10056 (2001)	철도진동의 측정과 해석법	평가가 아니고 측정을 대상으로 한 규격. ISO 2631 시리즈와의 정합성은 충분하지 않다.	측정법
5 ENV 12299 (1999)	철도에의 적용—승객의 승차감 - 측정방법	UIC(국제철도연합)의 보고서 등을 기초로 CEN이 정한 유럽 잠정규격(ENV)	측정법 평가법

진동으로 인한 불쾌도를 정량적으로 평가하기 위한 수속을 나타내고 있다. 상기와 같이 물리적으로는 같은 강도의 진동이라도 주파수에 따라 사람이 느끼는 정도가 다른 것에 입각한 “주파수보정필터”의 고려방법은 뒤에 여러 분야에 큰 영향을 주었다. 철도도 예외는 아니어서 오늘날에도 활용되고 있는 “승차감레벨”이라고 하는 지표는 그 규격을 기초로 제정되었다(상기의 그림 3 참조). ISO 2631은 1997년에 개정되어 정밀도가 한층 높아짐과 함께 2001년에는 철도차량의 승차감 평가 시에 배려하여야 할 점을 정리한 보조규격(ISO 2631-4)이 성립되었다. 규격을 더욱 좋은 것으로 하기 위하여 다음과 같은 논의가 이루어지고 있다. ① 저주파 진동이 차멸미의 발생에 미치는 영향의 평가, ② 승객의 퍼포먼스(독서, 수면, 보행, 음식 등)의 저해도를 지표로 한 진동환경의 평가, ③ 승무원의 요통 등의 건강영향 평가. 그 외에 열차진동의 측정법을 정한 ISO 10056 규격 등이 있다(표 2).

유럽에서는 ISO 2631을 철도에 적용하기 위한 프로젝트가 국제철도연합(UIC) 내에 설치되어 심의를 거듭하여 왔다. 그 결과를 기초로 유럽표준화위원회(CEN)가 열차진동의 측정과 평가에 관한 유럽표준규격(ENV 12299)을 1999년에 정하여 현재는 그 개정작업이 행하여지고 있다. 일정시간(통상은 20분 이상) 승차한 때의 승차감을 그 구간 전(全)진동의 95% 값(큰 쪽에서 5%)로 평가하는 지표 등 우리나라에는 없는 고

려방법도 도처에 있어 검토할만하다. “서비스의 질”을 국제적으로 표준화하여 EU 지역 내에서의 서비스레벨을 향상시킨다고 하는 기운은 향후도 한층 높아질 것이라고 생각된다.

VII. 맺음말

이상으로 철도에서의 경계영역에 관련되는 테마의 일례로서 진동승차감에 관하여 논의하였다. 속도향상이나 서비스향상을 위해 신차가 투입될 때에 궤도측에서는 아무래도 “눈에 맞았던 차량”에 대한 수동의 대응으로 되는 경향이 있다. 그러나 승차감은 궤도와 차량의 상호작용에 따라 정해지므로 차량의 설계단계부터 양자가 밀접하게 제휴하는 것이 바람직하다.

승객의 만족감은 “기대치”와 비교하여 결정되지만 시대와 함께 기대치가 높아지지만 하기 때문에 승차감의 평가와 향상이라고 하는 테마도 또한 끝나지 않은 과제로 된다. 차량·궤도·인간공학 등의 여러 분야 간에 서로의 영역을 넘는 학제(學際)적인 노력과 밀접한 제휴를 계속하여 승차감의 개선으로 이어짐이 기대된다. 또한, 향후에는 체감적인 양부를 나타내는 지표와 궤도관리·차량설계에 이용하는 지표 등, 양쪽 지표의 장점을 받아들임으로서 체감과의 상관도 높고 관리나 설계에 이바지하는 지표의 개발이 필요하다. S