

틸팅차량의 멀미특성에 대한 고찰

The investigation on motion sickness for tilting train

김남포* 신중환**
Kim, Nam-Po Shin, Jong-Han

ABSTRACT

As tilting train is the effective solution to provide faster passenger service on conventional railway lines without too costly modification of infrastructure, it is expected that tilting train will be put into service for Korean conventional Railway Lines. Very few passengers may suffer from motion sickness on conventional train and high speed train. But some sickness among passengers of tilting trains have been reported. Up to now, a standardized motion sickness index was mainly developed in the shipping domain. Therefore, there was a need for railway motion sickness index in order to predict and evaluate the motion sickness which is likely to be experienced by passengers. This paper is the preliminary investigation to propose the technical index related to motion sickness and nausea phenomena for the tilting train development and operation.

1. 서 론

틸팅차량은 차체의 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선부를 빠른 속도로 주행할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 틸팅차량은 곡선부가 많은 기존선에서 하부구조의 큰 투자 없이 운행시간을 효과적으로 단축시킬 수 있어 국외 14개국에서 운영되고 있는 실정이다. 국내에서도 경부고속철도 개통에 따른 국토의 균형발전과 철도 경쟁력 제고를 위해 기존선에 틸팅차량 서비스 제공을 적극적으로 검토하고 있으며, 철도청은 철도기술개발사업을 통해 국내 기존선 환경에 맞는 틸팅차량의 개발을 추진하고 있다.

교통수단 이용승객의 멀미현상은 주로 선박에서만 문제가 되어왔고, 철도차량에서는 관심 밖이었다. 그러나 자세제어형 틸팅차량의 경우 멀미현상이 적잖이 보고되고 있고, 이에 대한 메카니즘이나 해소방법이 아직도 해결해야할 기술과제로 남아있다. 본 논문은 국내 틸팅차량의 개발 및 운행에 대비하여 틸팅 시스템의 최적화 및 성능평가 시 활용할 수 있는 멀미현상에 대한 기술적 평가지표의 제시에 대한 것으로 국외의 연구사례를 토대로 고찰한 내용이다.

2. 틸팅의 원리 및 멀미 유발요인

틸팅의 원리는 그림 1과 같이 곡선부 주행 시 차체를 곡선의 안쪽으로 기울이게 함으로써, 승객이 느끼는 원심가속도 성분을 증력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시키는 것이다.

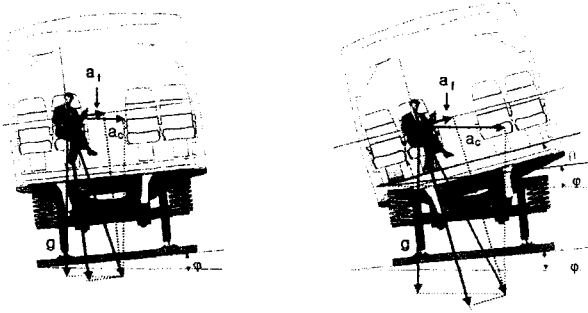
$$\text{차량 원심가속도는 } a_c = \frac{V^2}{R}$$

승객이 느끼는 횡방향 가속도, 즉 차체에 평행한 원심가속도의 성분은

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원

** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 연구원

일반차량인 경우 $a_f = a_c - g \cdot \phi$ 이며, 틸팅차량인 경우 $a_f = a_c - g \cdot (\phi + \theta)$ 가 된다.



일반차량

틸팅차량

그림 1. 틸팅차량의 원리

즉 동일한 속도로 주행한다고 가정할 경우 틸팅차량은 일반차량보다 $g \cdot \theta$ 만큼 횡방향 가속도가 저하된다.

여기에서 a_f : 승객이 느끼는 횡방향 가속도

a_c : 차량 원심 가속도

g : 중력 가속도

Ψ : 캔트 각 [rad]

θ : 차체 틸팅 각 [rad]

V : 곡선 주행속도 [m/s]

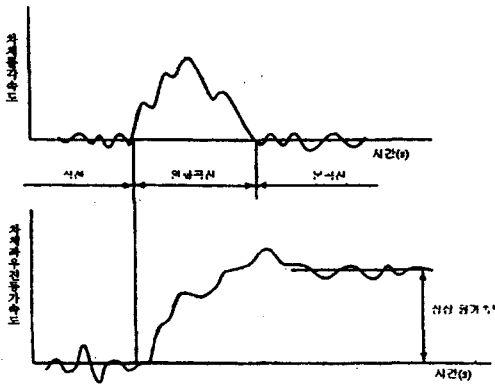


그림 2. 곡선상의 횡가속도 및 롤 각속도

틸팅차량은 차체 경사에 의해 본곡선상에서의 정상상태 횡 가속도(steady state lateral acceleration)는 저감할 수 있으나, 그림 2에서 보는 바와 같이 완화곡선상에서는 캔트 제감과 차체의 틸팅 각속도가 중첩되기 때문에 일반차량보다 롤 각속도가 증가된다.

선박에서의 경험에 의하면 멀미현상은 0.5 Hz 미만의 저주파진동에 기인한다고 한다. 틸팅차량의 멀미 유발요인은 몇가지로 예상되고 있지만 그 메커니즘이 명확히 규명되지는 않은 상태이다. 첫째로 틸팅장치 구성상 0.5Hz 부근 및 그 이하의 횡방향 및 롤 진동 고유진동수를 갖기 때문에 인체에 멀미를 유발

시키는 주파수대의 진동이 발생한다는 것이다. 둘째로는 곡선상에서 승객이 시각으로 느끼는 경사도와 승객에 가해지는 횡가속도의 차이 때문에, 즉 시각정보와 신체정보의 불일치에 의해 멀미가 유기될 수 있다는 것이다. 세 번째로는 완화곡선상에서 롤 각속도가 일반차량보다 높고, 완화곡선이 짧을 경우 멀미 주파수대의 저주파 롤 진동으로 인체에 영향을 준다. 이상과 같은 곡선과 틸팅에 관련된 진동에 노출되는 시간, 즉 곡선의 빈도와 운행거리가 멀미에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

3. 멀미관련 지표

3.1 ISO 2631

멀미현상은 철도분야에서는 아직까지 완전하게 규명되지 못한 현상이다. 멀미의 발생조건이 Forstberg, Griffin 등에 의해 연구되어 왔으나, 주로 배멀미와 관련된 상하방향 가속도에 대한 것이었다. 멀미현상에 대한 척도로 제안된 지수 중에 하나가 MSDV(Motion Sickness Dose Value)로서 다음 식으로 표현된다.

$$MSDV = \sqrt{\int_0^T a^2(t) dt}$$

여기에서 $a(t)$ 는 ISO 2631의 Wf 가중치 필터(weighting filter)(그림 3)에 의해 필터링된 가속도

이다. ISO 2631 MSDV는 상하진동이 멀미의 주요 원인이 되는 해양선박의 경우에서 멀미의 발생률을 성공적으로 예측하였다. 그러나 이는 상하방향 운동에 관련된 것으로 저주파 좌우진동과 롤회

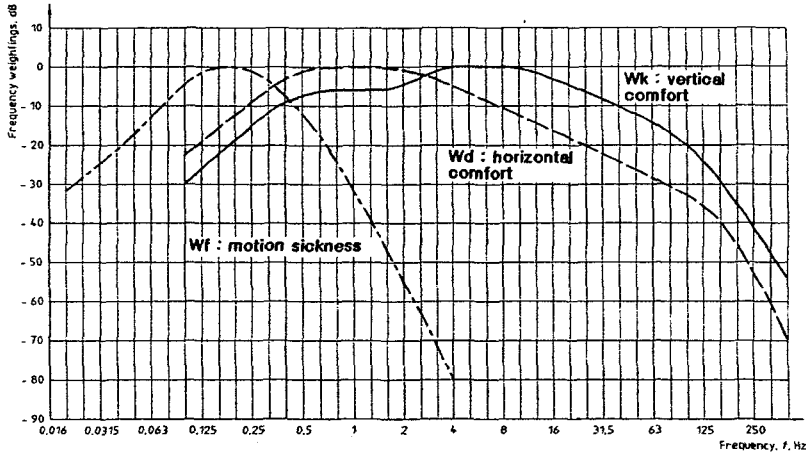


그림 3 . ISO 2631의 가중치 필터

3.2 국외연구사례

멀미에 대한 횡방향과 롤(roll) 운동의 영향을 분석하기 위해 프랑스의 SNCF와 연국의 ISVR (소음진동연구원)가 공동으로 연구를 진행하였고, 다음 단계에서 수평선 인지(시각적 멀미자극)에 대한 영향이 포함되어졌다.

1) 초기 실험실 실험

여러 실험 조건(방향, 진동, 크기, 착석상태)에 대해, 18세부터 25세까지의 남성 피실험자를 30분동안 진동에 일정하게 노출시키고 매분마다 7개로 나누어진 표1의 증상 평가 등급에 따라 그들의 증상을 평가하였다.

표 1 . 증상 평가 등급

평가 등급	대응 느낌
0	징후가 없음
1	매우경미한 징후
2	가벼운징후, 위장이 거북하지만 구토는 아님
3	가벼운 멀미(메스꺼움)
4	중간정도의 멀미
5	약간심한 멀미, 실험은 계속 수행가능
6	약간심한 멀미, 실험을 멈추고싶다.



그림 4 . 횡방향-롤 시뮬레이터

- 좌석상태와 시각에 따른 영향

낮은 등받이를 가진 의자에서 전후의 움직임이 가장 큰 motion sickness 발생률을 나타냈다. 좌석상태에 따른 영향이 시각적 상태(눈을 감고, 뜬 상태)보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

- 진동 방향과 주파수의 영향

0.2와 0.8 Hz 사이에서, 같은 진폭의 진동에 대해 주파수와 진동방향 (전후, 좌우)은 비슷한 영

향을 미친다.

- 진동방향과 진폭의 영향

동일 진폭에서 진동방향(전후, 좌우)은 비슷한 영향을 미친다. 0.315Hz의 일정 주파수 진동에서 motion sickness는 진폭의 크기와 노출시간에 따라서 증가하였다.

- 0.25Hz 상하 및 좌우진동의 영향

이 주파수에서 상하진동이 좌우진동보다 멀미에의 영향이 강하였다.

- 롤 진동만의 영향

롤 진동만으로는 멀미에의 영향이 크지 않은 것으로 보인다. 그러나 롤 진동이 다른 방향의 진동과 조합될 때는 멀미에 기여할 것 수도 있다.

2) 실차실험

TGV-PO1 시제열차의 실험에서 틸팅 중지에서 틸팅에 의해 캔트부족량을 증가시켜가며 계속된 실험을 통해 멀미현상에 대해 다음의 사실이 확인되었다.

- 속도의 증가와 병행하여 틸팅을 사용하는 것은 틸팅을 사용하지 않는 것 보다 더 많은 멀미를 발생시킨다. 주행시험 기간 동안에 200명중 7명의 승객이 구토까지 하는 울렁거림을 느꼈다. 이런 특수한 경우는 오직 아침 동안에만 발생하였다. 이것은 바이오리듬의 영향을 시사한다. 캔트부족량의 증가는 멀미율을 증가시킨다. 틸팅을 작동중지한 상태에서 220mm의 캔트부족량을 가지고 한 시험에서는 멀미는 발생하지 않았으나 높은 동적 불편함을 발생시켰다.

- 일련의 급곡선이 포함되는 철도노선에서 멀미의 증상들(두통, 발한, 침이고임, 나른함, 위의 거북감, 구토등)이 증가한다. 캔트부족량이 큰 구간에서는 증가하였다 캔트 부족량이 적은 구간에서는 감소하는 것으로 나타났다.

- 여성은 남성보다 멀미에 훨씬 더 민감하다.

- 좋은 경치는 멀미 발생률을 감소시킨다. 그리고 주행하는 방향을 보고있는 승객의 멀미율이 낮다.

- 상하방향 MSDV 값, 캔트부족량 그리고 롤 진동에 적용된 MSDV(상하방향 Wf로 필터링)의 증가는 멀미율을 증가시킨다. 반면 횡 방향 MSDV와 전후방향 MSDV는 멀미의 발생률과 서로 연관이 적은 것으로 관찰되었다.

3) 횡방향 진동 및 롤 회전운동의 조합에 의한 멀미와의 관계

그림4와 같은 횡진동-롤 회전운동 시뮬레이터 상에서 임상실험을 통해 횡방향진동 및 롤 회전에 의한 승객이 느끼는 횡가속도의 보상율에 따른 멀미에의 영향을 실험하였다. 횡진동 주파수와 횡진동을 롤 회전에 의해 보상하는 비율에 따른 멀미 증상에의 영향이 그림 5와 그림6에 나타나 있다.

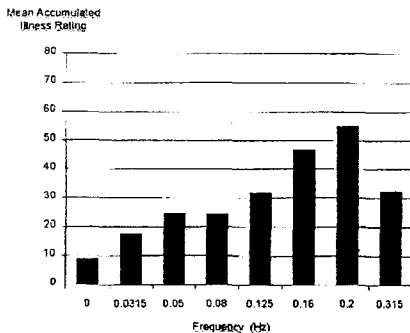


그림 5. 횡진동 주파수의 영향

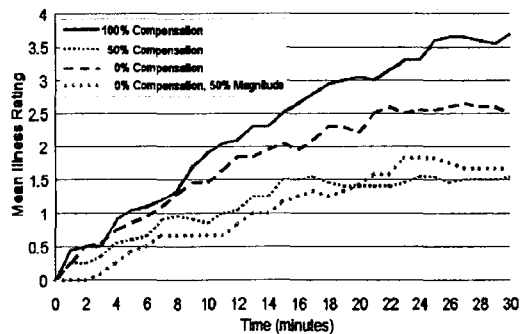


그림 6. 횡진동 보상량과 노출시간의 영향

4. 틸팅차량의 멀미지수

상기와 같이 국외의 실험결과를 고찰해 보면, 멀미 관련 진동변수는 상하방향 진동가속도(a_z), 횡방향 진동가속도(a_y)와 롤(roll) 가속도(a_r), 진동에 대한 가중치(weighting filter), 인적요소와 진동에 노출된 시간 등이다. 즉 이를 토대로 멀미지수의 함수식은 다음과 같이 표현이 가능하다.

멀미지수 = f{motion variables(a_z, a_y, a_r), weighting function, human factors, duration time}

멀미현상은 진동에 노출된 시간의 영향이 중요한 변수중의 하나이므로, dose value와 같은 누적 측정량으로 정의되어야 한다. 아울러 실제 여행에서는 운행시간 또는 측정 평가시간 전부가 멀미 진동의 노출시간이 아니므로 여행시간 중간 중간의 멀미에 대한 회복(leakage of nausea)시간을 고려하여야 한다. 또한 철도차량의 상하방향 진동은 멀미와 관련된 저주파 진동의 발생이 무시할 만한 수준이기 때문에 상하방향 진동가속도 변수는 무시할 만하다.

따라서 틸팅차량에 대한 멀미에 대한 dose value(MSDV, motion sickness dose value)는 다음과 같이 일반화시킬 수 있을 것이다.

$$MSDV(t) = \left[\int_0^t (c_y \cdot a_y^2(\tau) + c_r \cdot a_r^2(\tau)) \cdot e^{c_L(t-\tau)} d\tau \right]$$

여기에서 c_y, c_r 은 상수, c_L 은 멀미회복관련 시간상수

a_y 는 멀미 가중치 함수로 필터링 된 횡방향 진동가속도

a_r 는 멀미 가중치 함수로 필터링 된 롤 진동가속도

5. 결론

- ISO 2631 MSDV는 상하진동이 멀미의 주요 원인이 되는 해양선박의 경우에서 멀미의 발생률을 성공적으로 예측하였다. 그러나 이는 상하방향 운동에 관련된 것으로 저주파 좌우진동과 롤 회전운동을 고려해야하는 철도차량의 멀미현상을 예측하는 데는 적절하지 않다.

- 국외 시험결과에 의하면 정상 횡가속도의 100% 완전한 보상은 승차감에 역효과를 낸다는 것이다. 이러한 불쾌감은 인간의 시각시스템과 감지시스템에 의해 처리되는 정보사이의 일치가 되지 않기 때문에 발생하는 것으로 믿어지고 있다. 이러한 이유로 정상횡가속도를 70~80% 정도만 보상하여 운행하고 있음을 파악하였다.

- 국외 틸팅차량 연구사례를 기초로 틸팅차량에 적용가능한 멀미관련 지수의 일반화된 식을 수립 제시하였다.

6. 향후 연구방향

국외 사례를 보면 틸팅차량의 이용 시 일부 승객들이 멀미, 정확히 말하면 메스꺼움(sickness) 증상을 경험하였다. 비록 적은 수의 승객만이 멀미 증상을 경험했지만, 이것은 틸팅차량에 의한 여행시간 단축이 승객의 승차감 저하 없이 실현되어야 한다는 점에서 중대하게 다루어야 할 문제이다.

본 논문에서는 국외 사례를 기초로 틸팅차량의 멀미 특성과 멀미 증상을 표현하기 위한 기술 지수를 고찰 해 본 것으로, 틸팅차량의 국내 기존선예의 성공적 적용을 위해서 한국인의 정서와 신체구조에 맞는 멀미 관련 지수와 허용 기준을 수립하기 위한 시뮬레이터 임상실험 연구가 수반되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김남포, "곡선부 고속주행용 대차설계기술개발" 한국철도기술연구원, 2000.12
2. Francois QUETIN, M.J.GRIFFIN, "Research about Motion Sickness", WCRR 2001
3. Johan Förstberg, "Regression models for provoking motion sickness", WCRR 2001