

틸팅차량의 최대 동적운동범위 산정 연구

A study to determine the Kinematic Envelope of Tilting train

김남포*
Kim, Nam-Po

구병춘*
Goo, Byeong-choon

ABSTRACT

Tilting train is the best solution to provide faster passenger service on conventional railway lines without too costly modification of infrastructure. Kinematic envelope gauging is very important when applying tilting trains to conventional railways with limited clearance. Due to tilting motion, the kinematic envelope of tilting train is larger than that of non-tilting train. This study was done to estimate the maximum dimension of tilting train being suitable for Korean conventional lines. In this study the two worst cases of tilting train movement was assumed and related suspension displacements, geometrical overthrow of train on curve, wear of wheel & rail were combined to determine kinematic envelope.

1. 서론

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. 본 연구는 철도기술개발 사업의 일환으로 틸팅차량의 최대운동범위(Kinematic Envelope)를 예측해 봄으로써 국내 기존선 시설물과의 간섭 없이 운행할 수 있는 틸팅차량의 외곽 치수를 결정하기 위해 수행되었다. 본 논문은 상기의 목적으로 수행된 틸팅차량의 최대운동범위 계산방법과 그 결과에 대해 기술한다.

2. 최대 동적운동범위 계산방법

철도차량은 최대운동 범위가 발생하더라도, 궤도 및 선로구축물, 신호 설비 등과 어떠한 간섭도 발생하지 않아야 한다. 차량 설계 시 이러한 요소를 충분히 고려하여 현가장치 스톱퍼 간격, 차체의 단면 형상을 결정하여야 한다. 특히 틸팅차량의 경우 곡선부에서의 틸팅 경사에 의해 일반 차량보다 차체의 운동범위가 커서 운동한계 및 시설물과의 간섭 여부를 보다 면밀히 검토하여 설계되어야 한다. 차량의 최대 동적운동범위의 계산은 정상운행조건 중 발생할 수 있는 최악 조건이 고려되어야 하며, 그 항목은 다음과 같다.

- 차량이 주행을 하게되면 궤도의 입력이 차량을 동요시키게 되며, 차량은 현가장치 상에서 운동을 하게 됨

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정희원

- 곡선 궤도에서는 궤도의 기하학적 특성상 차량의 편기(overthrow)가 발생됨
- 궤도의 변형, 차량 구성품의 노화 및 마멸, 차륜 및 레일의 마모

차량의 최대 운동량은 대부분 곡선 상에서 발생되며, 틸팅차량의 경우에는 더욱 그러하다. 곡선 주행 시 차량의 변위 해석에는 곡선 주행의 특성 상 준정적(steady-state) 해석방법이 사용되며, 외력은 캔트에 의해 보상되지 못한 캔트 부족량(cant deficiency) 또는 캔트 초과량(cant excess)이 된다.

일반적으로 차량의 운동방정식은 행렬형태로서 \underline{X} 는 일반좌표 벡터행렬, \underline{F} 는 외력 벡터행렬이라 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$[m]\underline{\ddot{X}} + [c]\underline{\dot{X}} + [k]\underline{X} = \underline{F} \quad (1)$$

곡선부 최대운동범위 해석의 운동방정식은 준정적 상태의 가정과, 외력이 캔트에 의해 보상되지 않는 초과 원심력이 되므로 식(2)와 같이 단순화된다.

$$[k]\underline{X} = [m] \theta_a \quad (2)$$

여기에서 θ_a 는 캔트 부족량으로 단위는 radian 이다.

대상 차량에 대해 (2)와 같은 운동 방정식을 수립하고, 곡선통과 조건에 해당하는 캔트 부족량을 입력함으로써 차량, 특히 차체의 횡방향 및 롤(roll) 변위에 대한 최대치를 산출할 수 있다. 이상과 같이 산출된 변위는 곡선부 주행 시 정상상태 변위이기 때문에 궤도의 변형에서 유기되는 동적 변위량이 고려되어야 한다. 이 동적 변위는 궤도의 실제 틀림량을 고려하고 (1)의 식에 의해 계산하여야 하나, 궤도 틀림의 악조건을 산정하기가 여의치 않기 때문에 (2)의 식에 동적 변위분을 경험에 의거 등가 캔트부족량으로 입력하여 산출한다.

3. 시설물 및 선로조건

차량최대 운동 시 간섭이 우려되는 곳은 곡선터널로서 그림 1에서 보는 바와 같이 전차선 지지브라켓과 각종 케이블 지지구이다.

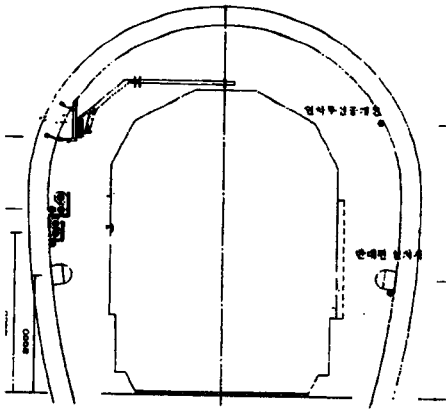


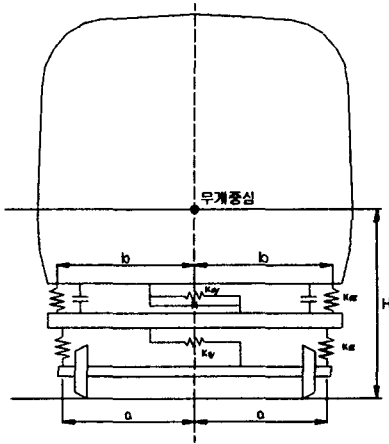
그림 1. 시설물 현황

최소평면 곡선반경은 영동선의 250R을(영동선 산골 및 심포 제4 터널) 적용하였다. 통과속도 조건은 캔트에 의해 보상되지 못하고 차량의 횡방향 외력으로 작용되는 캔트 부족량으로 기술될 수 있다. 일반적으로 차량의 곡선 제한속도는 곡선반경과 캔트를 감안하여 캔트 부족량이 100mm 또는 100/1500 radian 이내가 되도록 설정되어 있다. 틸팅 차량의 경우 곡선 제한속도가 일반차량 보다 약 30% 정도 높게 설정된다.

4. 차량모델 및 운동 특성

틸팅차량의 현가장치 특성으로는 중량이 유사한 고급 여객열차의 수준을 적용하였으며, 그 수치가 아래에 기술되어 있다.

- 1차 현가장치 좌우방향 강성(K1y) : 8.00 MN/m (차축당)
- 1차 현가장치 상하방향 강성(K1z) : 1.52 MN/m (축상당)
- 2차 현가장치 좌우방향 강성(K2y) : 0.48 MN/m (대차당)



- 2차 현가장치 상하방향 강성(K2z) : 0.40 MN/m (공기 스프링 1세트당)
- 2차 현가장치 좌우방향 Bumpstop 간격 : 30 mm
Bumpstop 접촉 후에는 완충고무에 의한 비선형 변위특성 감안
- 안티 롤 장치 롤 강성 : 2.5 MN/m/rad (대차당)
- 차체 중량 : 58톤 (구동차 만차조건)
- 차체 무게중심고(H) : 약 1.6 m
- 1차 현가장치 간격(2a) : 1,956 mm
- 2차 현가장치 간격(2b) : 1,600 mm
- 차체 길이 : 23,030 mm
- 대차간 거리 : 15,900 mm

그림 2. 최대운동 해석모델

차량이 곡선을 통과할 경우 캔트 부족량에 해당하는 원심력을 받게된다. 이 캔트에 의해 보상되지 않는 초과 원심력에 의해 차량의 각 현가장치에서는 변위가 발생하게 된다. 차량의 최대운동 범위계산에 있어서는 차체의 횡방향 및 Roll 변위가 고려대상이 된다. 그림 3과 그림 4는 캔트 부족량을 변화시켜가며 차체 무게중심에서의 횡 변위와 Roll 각을 계산하여 도표화한 것이다.

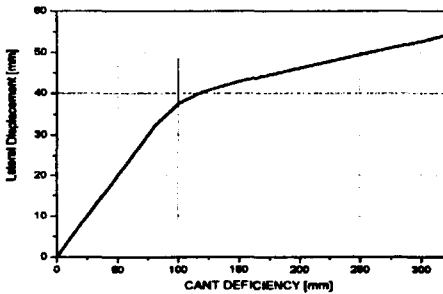


그림 3. 캔트부족량-횡 변위 선도

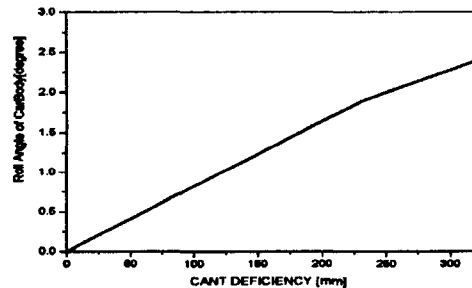


그림 4. 캔트부족량-Roll 각 선도

5. 최대운동 범위 계산

틸팅차량은 차체의 경사에 의해 차체 내 승객이 느끼는 횡방향 가속도를 상쇄하여 보다 높은 속도로 곡선을 통과할 수 있도록 한 차량이다. 본 연구에서 검토되는 틸팅차량은 국외의 일반적 틸팅차량과 같이 최대 틸팅 각도가 8도이다. 최대 틸팅시 레일 면에서 본 차체의 경사각은 8도에서 차량 현가장치의 롤 각 약 2도 정도를 차감하여야 한다. 따라서 레일 면에서 본 차체의 틸팅각도는 약 6도가 되며, 이를 캔트 부족량으로 환산하면,

$$Cd(\text{tilt}) = 1500 \times \sin 6^\circ = 157 \text{ mm}$$

틸팅차량이 상기와 같이 최대 틸팅각으로 주행하는 속도는 레일 면에서 본 차량의 캔트 부족량은 일반차량 캔트부족허용량 100 mm 에 틸팅차량의 캔트부족량 157 mm를 합한 것과 동가가 된다. 따라서 레일 면에서 본 틸팅차량의 최대 캔트 부족량은 257 mm 가 된다. 따라서 본 연구에서는 최대 등가 캔트부족량을 257 mm로 가정하고 최대 운동범위를 계산하였다.

1) 횡방향 변위 계산(곡선의측 +)

- ◆ 궤도 오차에 의한 차륜/ 레일간 횡변위

= 궤도 줄틀림 + 차륜/레일간 유간 + 차륜/ 레일간 마모
 = 16 + 8 + 20 = 44 mm

- ◆ 차량제작 오차(차체 및 조립오차, 무게중심 편기량 등 감안) :
 약 10 mm 고려
- ◆ 등가 캔트부족량에 의한 차량 현가장치의 최대 횡변위 : 50 mm
 등가 캔트부족량 257 mm 시 현가장치의 횡변위는 그림 3으로부터 50 mm가 됨
- ◆ 총 횡방향 변위량 : 104 mm
 = 44 + 10 + 50 = 104

2) Roll 각변위 계산(곡선의측 +)

- ◆ 등가 캔트부족량에 의한 차량 현가장치의 최대 롤 각변위 : 2.0 °
 등가 캔트부족량 257 mm 시 현가장치의 롤변위는 그림 4로부터 2.0 °가 됨
- ◆ 차체 틸팅 이루어진 경우 최대 롤 각변위 : -6 °
 차체 최대 틸팅 각 -8 ° + 현가장치 롤 각 2 ° = -6 °

3) 차체 Yaw 각변위에 의한 횡변위 추가

곡선 진입 또는 진출 시에 전·후위 대차 상부의 최대 횡변위가 서로 반대방향으로 발생할 수 있으며, 이 때 차체의 요 각이 최대가 된다. 이 요 각변위에 의한 횡변위 추가는 차량 단부에만 일어난다. (요 각변위 회전중심은 차량 중심이 됨)

틸팅 제어가 포함된 틸팅차량에 있어서 최대 운동이 발생하는 경우는 정상적인 경우와 틸팅 제어가 실패하여 틸팅동작이 이루어지지 않는 경우의 두 경우이다.

CASE 1: 정상적으로 최대 틸팅 동작이 이루어진 경우

캔트 부족량 257 mm로 주행하며, 최대 차체 틸팅각 8도가 이루어진 경우

CASE 2: 틸팅 제어가 실패한 경우

캔트 부족량 257 mm로 주행하며, 차체 틸팅각이 0도 인 경우

상기 예측 결과로 250 R 곡선 상에서의 차량 운동범위를 예측하여 보았으며, 그 결과가 표 1과 같다. 두 가지 CASE는 곡선통과속도가 동일하기 때문에 횡 변위는 동일하게 발생되며, 틸팅에 의한 차이로 Roll 각만이 차이가 발생된다.

여기에서 횡변위의 부호는 곡선 외측방향을 +, 내측방향을 -로 정의하였고, 롤 각은 곡선 외측으로 회전하는 것을 +, 곡선 내측으로 회전하는 것을 -로 정의 하였다.

표 1. 틸팅차량 최대운동량 계산결과

CASE	횡 변위 [mm]						Roll 각
	차량 끝단부				대차 중심부	차량 중심부	
	운동량	차량 편기	차체 Yaw	합 계	운동량	차량 편기	
CASE 1	104	139	46.7	289.7	104	-126.4	- 6 °
CASE 2	104	139	46.7	289.7	104	-126.4	+ 2 °

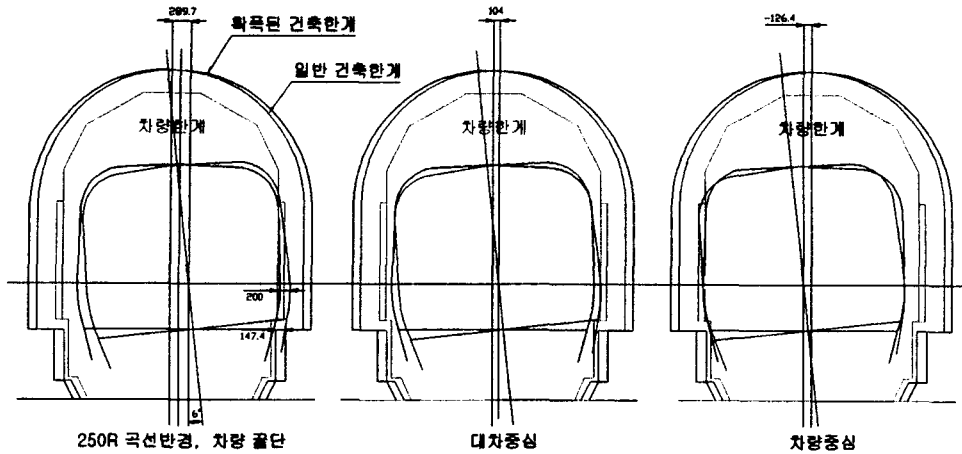


그림 5. 틸팅차량 최대운동 계산결과(CASE 1)

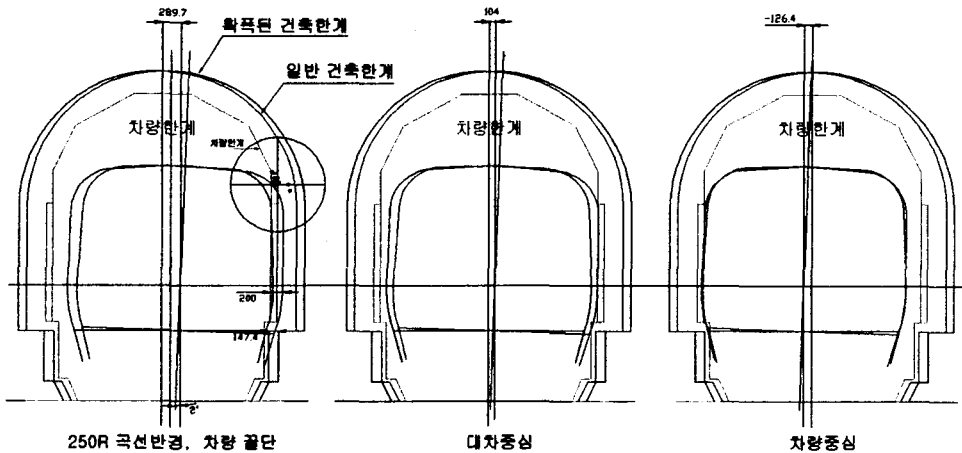


그림 6. 틸팅차량 최대운동 계산결과(CASE 2)

6. 결론

반경 250m의 급곡선에서는 현가장치에 의한 변위보다 곡선부에서의 기하학적 차량 편기(overthrow)량이 더 크게 나타났다. 따라서 차량 편기에 영향을 미치는 차량 길이 및 대차간 거리는 현재 새마을호 수준인 23,030 mm와 15,900 mm 이상으로 증가하는 것이 어려운 것으로 판단되었고, 또한 기존 역설비 및 차량 정비설비와의 호환성을 고려하여 현 기존차량의 수치를 준용토록 하였다.

차체 단면의 최대 폭은 3000 mm로 하고, 차체 상부와 하부는 틸팅 각에 변위가 더 발생하므로 최대 폭에서 약 200 mm 줄인 치수를 적용하는 것으로 하였다.

본 연구를 통해 한국형 틸팅차량의 최대 외곽 치수에 대한 가이드라인을 확보할 수 있었다.

참고문헌

1. 김남포, "틸팅차량 운영을 위한 기술·경제적 타당성 연구" 한국철도기술연구원, 2001
2. B M Eickhoff "Structure gauging -maximizing the use of clearance", Journal of Rail and Rapid Transit Part F, IMechE 1996