

기존선 고속화를 위한 틸팅시스템 완성차 시험연구

The Study of Completion Vehicle Tilting System Test for Conventional Rail Speed-Up

이수길* 한성호** 송용수***
Lee Su-Gil Han Seong-Ho Song Yong-Soo

ABSTRACT

Tilting trains are now an established feature of railway operations throughout the world. For intercity traffic, tilt provides operators with increasing speeds, and therefore enhanced competitiveness, on existing routes where insufficient traffic or a lack of funds precludes the construction of a dedicated new high-speed railway. Applying the tilting train, we can expect 30% of speed up on existing lines, but the stability of the electric current would be low because of tilting the train. Also, the spark between the catenary and pantagraph cause environmental problems such as noise, radio wave malfunction. Therefore, the tilting on pantagraph for the power suppling device is very essential for stable electric power supply.

1. 서 론

본 논문은 기존선 고속화를 위한 틸팅차량용 틸팅제어기 개발을 목적으로 한다. 틸팅은 곡선부 주행시 차체를 곡선의 안쪽으로 기울이게 하는 기술로써 곡선부를 주행함으로써 발생하는 원심가속도를 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시켜 결과적으로 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 기술이다. 차량에 이와 같은 틸팅 기술을 적용하여 승차감의 향상뿐만 아니라 곡선부 통과속도를 증가시킬 수 있게 됨으로써 운행시간이 단축되며, 곡선부 통과시의 가 감속 빈도도 줄어들어 그 만큼의 에너지 소비도 줄일 수 있게 제작된 차량이 틸팅 차량이다. 일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도여건이나 차량의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어진 것이다. 즉, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정 값(국내의 경우는 0.08g)을 초과하지 않도록 제한되어진 것이다.

차량전복은 곡선 통과시에 원심력 및 횡진동 가속도와 측면에서 부는 강한 바람에 의한 힘이 차량 중량에 의한 복원 모멘트보다 클 경우 발생하게 된다. 이에 본논문은 완성된 차량에 대한 틸팅시스템의 안정성 확보를 위한 시험방법 및 그 시험 결과에 대해 연구하였다.

2. 틸팅시스템 기본원리

틸팅은 곡선부 주행시 차체를 Fig. 1에서와 같이 곡선의 안쪽으로 기울이게 하는 기술로써 곡선부를 주행함으로써 발생하는 원심가속도($a_{cen} = V^2/R$)의 횡방향 성분($a_{cen} \cos(\alpha + \gamma)$)을 중력가속도(g)의 횡방향 성분($g \sin(\alpha + \gamma)$)으로 감쇄시켜 결과적으로 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 기술이다. 차량에 이와 같은 틸팅 기술을 적용하면 승차감의 향상뿐만 아니라 곡선부 통과속도를 증가시킬 수 있게 되므로 운행시간이 단축되며, 곡선부 통과시의 가 감속 빈도도 줄어들어 그 만큼의 에너지 소비도 줄일 수 있게 된다. 틸팅은 곡선부에서 약 30%정도의 속도향상을 가능하게 해준다. 일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도여건이나 차량의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어진 것이다. 즉, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정 값(국내의 경우는 0.08g)을 초과하지 않도록 제한되어진 것이다.

* 한국철도기술연구원, 기존철도사업단, 정회원

E-mail : sglee@krrri.re.kr

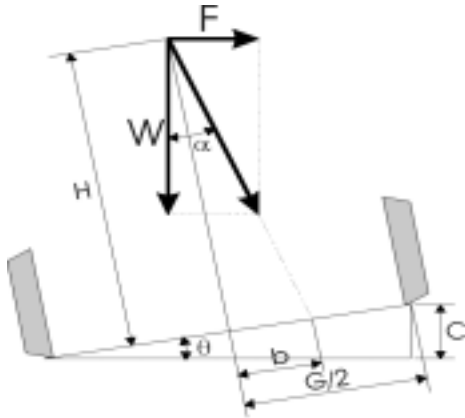
TEL : (031)460-5678 FAX : (031)460-5699

** 한국철도기술연구원, 기존철도사업단

*** 한국철도기술연구원, 기존철도사업단

차량전복은 곡선 통과시에 원심력 및 횡진동 가속도와 측면에서 부는 강한 바람에 의한 힘이 차량 중량에 의한 복원 모멘트보다 클 경우 발생하게 된다. 전복을 방지하는 복원 모멘트는 차량의 무게중심이 궤도중심에서 횡방향으로 옮겨감에 따라 현저히 감소된다. 차량중심의 횡방향 편기량은 차륜/레일간 유간, 1차 및 2차 현수장치의 횡방향 변위량, 대차 및 차체의 롤(roll)각, 차체 틸팅에 의한 변위 등의 함수이다. 곡선통과시 차량을 전복하려 하는 요인을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 정상(steady-state) 초과 원심력에 의한 전복 모멘트
- 2) 횡방향 및 롤(roll) 진동에 의한 동적 전복 모멘트
- 3) 풍압에 의한 전복 모멘트



국내에서는 다음과 같이 원심력과 중력만으로 전복에 대한 안전도 수식을 계산하고 있으며, 예측하기 어려운 진동이나 풍압 등에 의한 영향은 안전율에 포함하는 방법을 적용하고 있다.

- V : 열차속도 (km/h)
- S : 전복에 대한 안전율
- H : 레일면에서 차량의 무게중심 높이 (mm)
- R : 곡선반경 (m)
- G : 좌우 차륜/레일 접촉점간 거리 (mm)
- C : 캔트량 (mm)

그림 1 곡선부 원심력과 중력의 합력

$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{b}{H} \quad (1)$$

$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{\tan\alpha - \tan\theta}{1 + \tan\alpha \cdot \tan\theta} \approx \tan\alpha - \tan\theta \quad (2)$$

여기에서 $\tan\alpha \cdot \tan\theta \approx 0$ 로 간주

(1)과 (2)식으로부터

$$b = H \cdot (\tan\alpha - \tan\theta) \quad (3)$$

한편 $\tan\alpha$ 는 원심력과 중력의 비이고, $\tan\theta$ 는 캔트 각이므로

$$\tan\alpha = \frac{F}{W} = \frac{V^2}{127 \cdot R} \quad (4)$$

$$\tan\theta = \frac{C}{G} \quad (5)$$

전복에 대한 안전율S는 $b = G/2$ 에서 전복이 시작되므로 이때의 안전율이 1, $b = 0$ 이면 안전율이 ∞ 이므로 안전율은 b 와 $G/2$ 의 비율이다.

$$S = \frac{G/2}{b} \quad (6)$$

식(6)에 (3), (4), (5)식을 대입하면

$$S = \frac{G}{2H \cdot \left(\frac{V^2}{127 \cdot R} - \frac{C}{G} \right)} \quad (7)$$

캔트와 안전율을 알고 있을 때 곡선통과 속도를 구하는 식은 식(7)로부터

$$V = \sqrt{127 \cdot R \left(\frac{G}{2 \cdot S \cdot H} + \frac{C}{G} \right)} \quad (8)$$

국내 경부선의 경우 전복에 대한 안전율을 식(7)에 의하여 유추하여 식 (8)과 같이 구해진다. 여기에 곡선반경별 현 제한속도 규정을 적용하였고, 캔트는 실제 부설캔트량을 적용하였으며, 차륜/레일 접촉점간 거리는 G는 1,500 mm, 차량 무게중심높이는 무게중심이 높은 차량을 기준으로 하여 약 2,000

mm를 적용하였다.

3. 틸팅제어시스템

틸팅제어기 하드웨어 설계 및 검증기술 연구의 배경은 국내 기존선의 차량의 주행속도 향상으로 여행시간을 단축하여 국민의 삶의 질과 국가경제 향상에 기여하기 위함이다. 이 틸팅 제어기술을 국산화하고 부가가치를 창출하기 위해 틸팅제어기 하드웨어를 설계 및 제작하여 실제 차량에 적용하여 그 타당성을 입증하고자 한다. 틸팅제어기술은 자연계의 파라미터인 각속도, 가속도, 속도 및 위치를 적절히 제어함으로 철도차량 외의 항공기 방향과 고도를 조양함과 더불어 우주 발사체의 원격조정에 이르기까지 여러 분야의 기본적인 기술이다. 현가 장치의 통합된 제어 시스템에 대한 요구가 증가하고 있고 곡선 주행시 승객이 느끼는 횡방향 가속도를 상쇄시키는 틸팅 차량의 이점에 대해 많은 해를 걸쳐 실험되어졌다. 틸팅 차량은 매우 높은 곡선 주행 속도에서도 좋은 승차감을 유지하면서 여행시간을 단축시키는데 매력이 있다. 이는 통합된 현가장치 제어 기술이 발달함에 따라 성취되어질 수 있다. 기존선로에서의 고속화는 곡선선로에서의 속도향상이 필히 요구되므로 따라서 속도향상에 따른 캔트 부족량을 정확히 보상함은 물론 틸팅 제어 시스템에서는 틸팅 시작점과 틸팅 속도가 승차감에 중요한 역할을 한다. 아래와 같은 관련기술이 요구된다.

- 곡선선로 진입 및 출구를 정확히 인지하는 고속도 정밀위치 감지기술
- 곡선반경과 속도의 크기에 따라 결정되는 횡방향 가속도와 캔트량에 따른 틸팅각도 결정
- 완화곡선과 주행속도에 따른 틸팅하는 속도를 결정
- 정확한 틸팅량이 기계적으로 움직임이 되었는지를 판단하고 측정하는 피이드백제어시스템 결정

구동체의 동역학 성질을 고려한 구동체 드라이버 설계와 틸팅량을 결정하는 중앙연산장치와의 연계성 및 하드웨어 Interface문제를 초기에 고려하여야 한다. 또한 틸팅 시스템의 신뢰성과 내구성을 고려한 시스템의 이중화 및 열악한 환경을 고려한 토털 시스템 엔지니어링 기술의 요구된다. 열차 블록 도형은 6대 열차의 구성을 보여준다.

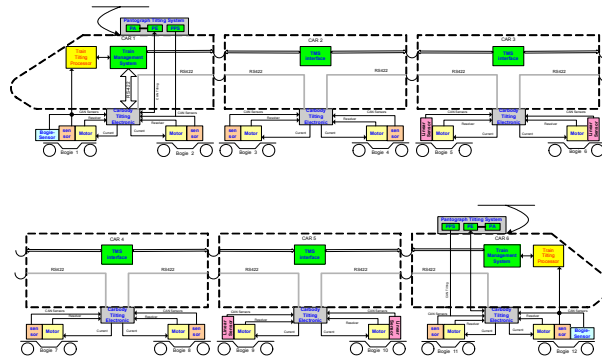


그림 2. 틸팅차량 틸팅시스템 구성도

시스템 초기 작동 시 차량 틸팅 처리장치는 차체 액추에이터1, 차체 액추에이터2 그리고 판토타그래프 액추에이터의 위치 감지기 정보를 점검한다. 초기화 후에 관련 구동기 조절기는 자신의 결정된 위치 값들과 함께 홀로 작동하게 된다. 액추에이터의 결정된 위치 값들은 비교와 감시를 위하여 부가적인 평가를 하게 된다.

4. 틸팅시스템 완성차시험

틸팅차량에서 틸팅시스템은 열차의 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 틸팅 시스템의 사양은 열차의 안전성측면에서의 추구방향과 일치해야 한다. 틸팅시스템 그 자체는 안정장치(fail-safe)가 아니며 전원차단상태(switch-off status)가 안전 상태이다. 곡선부를 고속으로 운행하는 동안 틸팅 시스템의 전원차단은 탈선안전도와 횡각속도에 의한 승객 측면에서 가장 중대한 사건중의 하나이다. 이러한 상황에서는 열차제어시스템이 이를 신속하게 감지하고 열차를 감속해야 한다. 따라서 열차 운행 중 발생할 수 있는 갑작스러운 틸팅시스템의 고장에 대한 검토는 틸팅차량에서는 반드시 검토되어야 할 항목이다. 틸팅열차 틸팅시스템 성능시험은 크게 시험조건에 따라 정적시험과 시운전시험으로 구분할 수 있다. 정적시험은 차량에 전원이 공급되는 설비를 갖춘 공장구내에서 차량을 정지한 상태에서 틸팅시스템만을 구동하는 시험이며, 시운전시험은 다양한 운전조건하에서 틸팅시스템의 성능을 확인하는 시험을 의미한다. 틸팅시스템 시험은 정적시험, 동적시험, 시운전 시험으로 구성되며 시험동안 다양한 운행조건하에서 시스템의 성능이 시험되어야 한다. 또한 정적시험은 틸팅시스템의 구성과 기능이 적절하게 수행

하는지를 시험하며, 동적시험은 틸팅차량이 시험노선에서 틸팅동작이 원활히 수행되는지를 시험한다. 시운전 시험은 틸팅차량의 투입예정 노선에 발생될수 있는 문제점을 사전에 파악하기 위한 시험으로 시운전시험 동안 안전성과 관련된 시험항목들이 충분히 검토될 수 있도록 계획해야 한다. 열차의 성능과 안전성에 영향을 미치는 인자들을 단계별로 증가시키면서 시험시 발생가능한 위험요소를 감소시켜야 한다. 틸팅시스템 시험에서 검토되어야하는 시험항목은 다음과 같다.

표 1. 틸팅시스템 성능시험 항목

성능시험 항목	완성차시험 (정적시험)	시운전시험 (동적시험)	비고
틸팅액추에이터 구동방향성 시험	◎		
틸팅구동시 기기간섭 시험	◎		
틸팅시스템 자동복귀 성능시험	◎	◎	
틸팅명령 적합성 시험	◎	◎	
틸팅명령에 대한 시스템 동작상태 검증시험	◎	◎	
틸팅구동시 승차감 성능시험		◎	



그림 3. 틸팅시스템 완성차시험 수행

5. 결론

본 논문에서는 전기차량 틸팅시스템의 완성차 시험에 관련한 시험항목 및 시험방법에 관한 연구를 수행하였다. 틸팅차량에서 틸팅시스템은 열차의 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 틸팅 시스템의 사양은 열차의 안전성측면에서의 추구방향과 일치해야 한다. 틸팅시스템 그 자체는 안정장치(fail-safe)가 아니며 전원차단상태(switch-off status)가 안전 상태이다. 곡선부를 고속으로 운행하는 동안 틸팅 시스템의 전원차단은 탈선안전도와 횡각속도에 의한 승객 측면에서 가장 중대한 사건중의 하나이다. 이러한 상황에서는 열차제어시스템이 이를 신속하게 감지하고 열차를 감속해야 한다. 따라서 열차 운행 중 발생할 수 있는 갑작스러운 틸팅시스템의 고장에 대한 검토는 틸팅차량에서는 반드시 검토되어야 할 항목이다. 이에 본논문에서는 틸팅차량의 본선시운전 시험을 위한 완성차시험을 수행중에 있다. 틸팅시스템의 안전성 및 성능 검증을 위해 완성차 시험열차를 수립하고 시험을 수행하여 안전성 및 성능을 검증하였다. 향후 본선시운전 시험에서는 틸팅동적시험을 통해 틸팅시스템 성능을 입증할 예정이다.

[1] 김남포 외, “틸팅시스템 기술개발”, 철도기술개발사업 보고서, 2005. 7

[2] Gosting, R.J and Hobbs, A.E.W., “The Interaction of 판토타그래프 and Overhead Equipment: Practical Application of a New Theoretical Technique”, Proc.I.Mech.Vol 197 No.13., 1983