

한국형 틸팅열차 틸팅제어시스템 성능향상 연구

이수길
한국철도기술연구원

The Study of Tilting Control System Improvement of Korean Tilting Train

Su-Gil Lee
Korea Railroad Research Institute

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 pantograph cause environmental problems such as noise, radio wave malfunction. Therefore, the tilting on pantograph 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 대체시켜 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. 틸팅 차량을 적용하면 기존선에서 차량의 속도를 30% 정도 향상시킬 수 있으나, 전력 공급 측면에서는 차량이 기울기 때문에 안정적으로 전력을 공급할 수 없게 되는 경우가 많이 발생할 수 있다. 그러므로 적절한 틸팅제어를 통하여 곡선통과를 빠르고 안전하게 운행하여야 한다. 본 논문에서는 각종 지상 센서로부터 데이터를 입력받아 차량의 틸팅을 적절히 수행하도록 제어하는 장치에 관한 연구를 수행하였다. 물류가 국가경제에 미치는 영향은 경제가 발전할수록 더욱 증대되고 있다. 그러나 도로를 통한 수송은 늘어나는 수송수요를 감당하지 못하고 날이 갈수록 그 경제성이 떨어지고 있는 실정이다. 한편 정부도 이와 같이 심각한 수송수요를 도로교통만으로는 만족시킬 수 없다는 판단하에 철도를 통한 수송의 증대를 추구하고 있다. 신선의 건설은 막대한 투자비용이 발생하기 때문에 기존선 고속화는 신선을 건설하지 않고 기존선의 선로, 시설물, 신호설비를 최대한 활용하여, 즉 최소의 비용으로 최대의 효과를 거둘 수 있어 세계 여러 철도 운영자들의 높은 호응을 받고 있는 것이다. 일본, 유럽 등에서 채택하고 있는 기존선 고속화 방법은 하부구조에 비해 투자비가 적게 들며 곡선부를 고속으로 주행할 수 있는 틸팅차량의 도입과 이와 관련된 하부구조를 개량하는 방법이다. 현재 전세계적으로 13개국에서 틸팅차량을 적용하고 있으며, 틸팅 기술의 성숙과 경제성의 입증, 경제적 여건변화에 따라 틸팅차량의 적용은 급속히 확산되고 있다.

2. 본 론

2.1 틸팅시스템 원리

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 대체시켜 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.

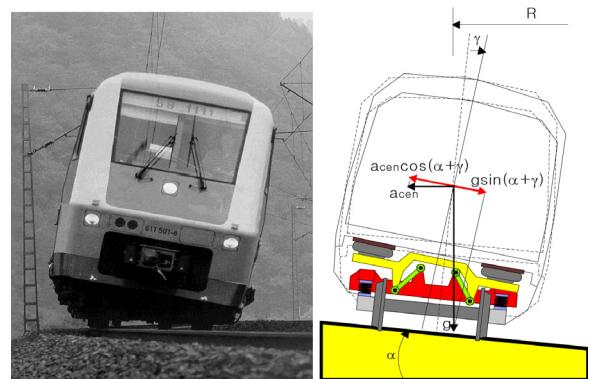


그림 1 틸팅차량의 횡가속도 저감의 원리

위와 같은 틸팅의 원리에 따라, 틸팅차량은 노선에 곡선부가 많을수록 그 위력을 많이 발휘하는 반면, 고속선과 같이 곡선부가 거의 없는 노선에서는 그 유용성이 많이 저감된다. 틸팅차량은 곡선부를 일반차량보다 높은 속도로 주행하고 이에 따라 원심력이 속도의 제곱에 비례하여 증가되기 때문에 전복에 대한 위험도가 상대적으로 높아진다. 또한 틸팅 방법에 따라서 차체 경사(틸팅)에 의해 무게중심이 곡선부 외측으로 이동되기 때문에 일반 차량에 비해 전복에 대한 복원 모멘트가 상대적으로 저하되기도 한다. 따라서 틸팅 차량의 설계 개발에 있어 전복에 대한 안전도는 면밀하게 검토되어야 한다. 차량전복은 곡선 통과시 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 옮겨짐에 따라 현저히 감소된다.

2.2 틸팅시스템 성능시험

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 제어함으로써 철도 차량 외의 항공기 방향과 고도를 조양함과 더불어 우주 발사체의 원격 조정에 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 매력적이다. 이는 통합된 현가장치 제어 기술이 발달함에 따라 성취되어질 수 있다. 기존선에서의 고속화는 곡선선로에서의 속도향상이 필히 요구되므로 따라서 속도향상에 따른 캔트 부족량을 정확히 보상은 물론 틸팅 제어 시스템에서는 틸팅 시작점과 틸팅 속도가 승차감에 중요한 역할을 한다. 아래와 같은 관련기술이 요구된다.

- 곡선선로 인입 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 피드백제어시스템 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. 사회 및 문화적 측면은 기존 선에서 주행속도 향상은 철도 이용률 및 지역발전의 많은 도움이 되고 문화적 파급효과가 클 것으로 예상된다. 더불어 기존선의 수송량 증가로 철도 수송 객이 증가하고 낙후지역을 고르게 발전 할 수 있는 계기가 될 것으로 예상된다. 보통 틸팅 시스템에는 유압식 틸팅 시스템과 전기 기계식 틸팅 시스템으로 나누어지는데 유압식은 전기식 용량 및 크기가 비대해 지는 경향이 있으므로 본 연구에서는 크기와 용량 면을 고려하여 전기 기계식 틸팅 시스템이 이용된다. 제안된 시스템은 횡방향 및 수직방향 현가장치 제어를 가진 통합적인 능동 차량 몸체 틸팅에 대해 다루며, 곡선부 인식은 차상에서 감지하는 유럽 방식으로 초점을 맞추었다. 또한 전기 기계적인 틸팅 시스템은 CAN(Control Area Network) 통신을 이용 감지 장치들로부터의 신호들을 받아들여 열차 틸팅 처리 장치로부터 틸팅 명령과 복원 명령 신호들을 필요한 명령 신호들을 열차 조절 시스템으로 내보내게 된다.



그림 3. 틸팅동작시험



그림 4. 틸팅열차 600R 곡선선로 현황

그림 3는 틸팅동작을 대차단품상태에서 제어하기 위한 시스템을 보여주고 있다. 이는 대차의 보기에서 틸팅이 이루어지기 때문에 정밀각도계를 볼스타에서 측정기록하였다. 그리고 그림 4는 틸팅제어를 위해 선정된 곡선 600R 현황이다. 그림5는 틸팅종합시험을 통한 데이터 측정결과로 양호한 제어특성을 보여주고 있다. 틸팅열차 틸팅시스템의 평가기준은 현재 영국 로이드사와 기술협의를 통한 시험기준을 작성하고 있다. 이는 현재 틸팅시스템에 대한 주행특성시험은 국제규격이 없어 개발자와 사용자의 협의에 의해 수행되고 있다. 다음은 본 연구에서 영국 인증기관인 로이드사와 협의하여 틸팅열차 틸팅시스템에 대한 평가를 수행한 것이다. 틸팅열차 곡선부 증속시험에 대한 틸팅시스템 평가기준은 영국로이드 레지스터레일 인증기관으로부터 검증된 틸팅인증시험에 적용되는 기준을 적용한다.

곡선 반경	열차 증속 속도	켄트고려 계산틸팅각	계측틸팅 각	평가
600R, 800R	일반열차 허용 속도를 근거로 부족켄트량을 고려한 틸팅 8도 도달 속도	계산값 틸팅각 제시	IMC CAN 프 로 토 클 분석 장비 로 계측	상호 틸팅각은 오차범위 ±0.5도

※선정된 선로의 조건에 따라 곡선반경 및 열차속도는 변경될 수 있음.

- 평가항목 및 방법

① 차체 틸팅제어각

각곡선별 부설켄트량을 고려한 계산치 틸팅각과 계측된 틸팅각도를 비교하여 오차범위 기준을 만족함을 확인한다.

② 차체 틸팅제어 각속도

곡선구간에서 틸팅시작시점과 최종 틸팅도달시점에서의 틸팅각속도를 비교하여 ±4°/sec 임을 확인한다.

③ 틸팅 판도그래프 제어각

각곡선별 기준켄트량을 고려한 계산치 틸팅각과 계측된 틸팅각도를 비교하여 오차범위 기준을 만족함을 확인한다.

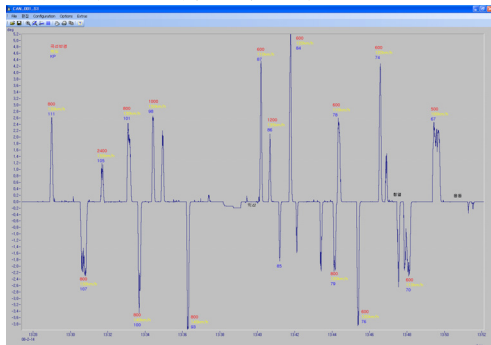


그림5 틸팅열차 중앙선 선로 틸팅동작특성 분석

구분	내용	600R		800R	
		기준	측정	기준	측정
+ 10km/h	지연시간	3.1s±0.5	3.02 s	2.5s±0.5	2.52 s
	틸팅속도	0.68±0.5	0.69	0.66±0.5	0.66
	틸팅각	2.7±0.5	2.76 도	2.8±0.5	2.85 도
+ 20km/h	지연시간	2.8s±0.5	2.69 s	2.4s±0.5	2.45 s
	동작속도	1.1±0.5	1.17	1.1±0.5	1.18
	틸팅각	3.9±0.5	3.88 도	4.4±0.5	4.37 도
+ 30km/h	지연시간	2.6s±0.5	2.69 s	2.2s±0.5	2.34 s
	동작속도	1.4±0.5	1.42	1.4±0.5	1.42
	틸팅각	6.4±0.5	6.2 도	6.3±0.5	6.24 도
+ 40km/h	지연시간	2.4s±0.5	2.2 s	2.4s±0.5	2.1 s
	동작속도	2.2±0.5	2.1	1.9±0.5	1.8
	틸팅각	7.5±0.5	7.25도	7.6±0.5	7.44도
틸팅오프시 복귀시간		5deg/s	2.32	-	-

상기와 같이 틸팅시스템의 각 동작특성은 기준치와 측정치가 매우 일치함을 알 수 있다. 이는 곡선을 가속도 센서로 감지하여 기준 틸팅각을 정하고 이를 수행하는 절차가 매우 정밀하게 제어되고 있어 아주 양호한 결과를 얻었다.

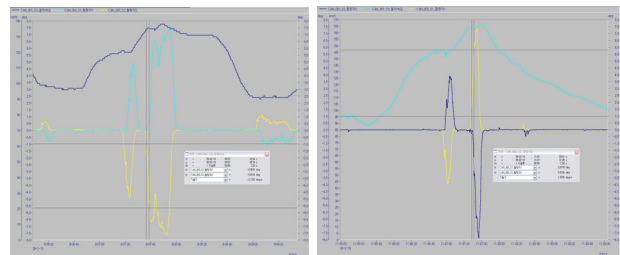


그림 6. 600R/800R 곡선에서의 틸팅시스템 동작특성

그림 6은 600R/800R 곡선에서 틸팅동작특성을 검증하였다. 600R의 경우 곡선조건이 완벽하지 않아 중간에 틸팅이 오실레이션을 하고 있지만 차체가 느끼는 양은 미미하다. 800R의 경우 본 곡선이 짧아 충분한 틸팅 성능을 계속할 수는 없었다.

3. 결 론

곡선부 증속시험을 위한 틸팅주행 시 승차감을 측정을 통하여 틸팅 성능을 평가한 바 시험 곡선개소인 R600(주행속도 140km/h), R800(주행속도 165km/h)에 대해 설계된 틸팅값과 실측된 틸팅 값을 비교하였을 때 차체틸팅제어각, 차체 틸팅제어 각속도, 틸팅 판도그래프 제어각이 평가기준에 만족하여 지속적인 틸팅 8도 도달시험을 통한 틸팅시스템 성능 안정성 확보가 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] 이수길 외, “한국형틸팅열차 틸팅제어시스템 연구” 하계학술대회 논문집 2008
 [2] Gosting, R.J and Hobbs, A.E.W., “The Interaction of 판도그래프 and Overhead Equipment: Practical Application of a New Theoretical Technique”, Proc.I.Mech.Vol 197 No.13., 1983
 [3] V. K. Grag and R. V. Dukkupati, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press, 1984.