

전기식 틸팅차량의 틸팅제어장치 구성방안 연구

\*이수길, 한성호, 송용수, 이우동, <sup>o</sup>한영재,  
한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, <sup>o</sup>고속철도기술개발사업단

The Study of Tilting Control System for EMU Tilting Vehicle

Su-Gil Lee, Seong-Ho Han, Yong Soo Song, Woo-Dong Lee, <sup>o</sup>Young-Jae Han,  
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 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. 틸팅 차량을 적용하면 기존선에서 차량의 속도를 30% 정도 향상시킬수 있으나, 전력공급 측면에서는 차량이 기울기 때문에 안정적으로 전력을 공급할 수 없고 이선이 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 중대를 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 적게들며 곡선부를 고속으로 주행할 수 있는 틸팅차량의 도입과 이와 관련된 하부구조를 개량하

는 방법이다. 현재 전세계적으로 13개국에서 틸팅차량을 적용하고 있으며, 틸팅 기술의 성숙과 경제성의 입증, 경제적 여건변화에 따라 틸팅차량의 적용은 급속히 확산되고 있다.

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.

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)

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

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

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  $\infty$ 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. 여기에서 곡선 반경별 현 제한속도 규정을 적용하였고, 캔트는 실제 부설캔트량을 적용하였으며, 차륜/레일 접촉점간 거리는  $G$ 는 1,500 mm, 차량 무게중심높이는 무게중심이 높은 차량을 기준으로 하여 약 2,000 mm를 적용하였다.

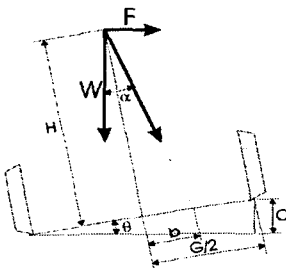


그림 1 곡선부 원심력과 중력의 합력관계

### 3. 틸팅제어장치 기술연구

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 부가 가치를 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 방

향과 고도를 조양함과 더불어 우주 발사체의 원적조정에 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. 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.

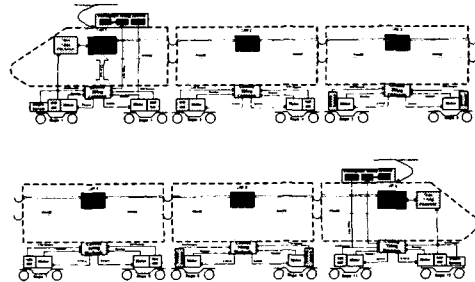


그림 2. 틸팅차량 틸팅시스템 구성도

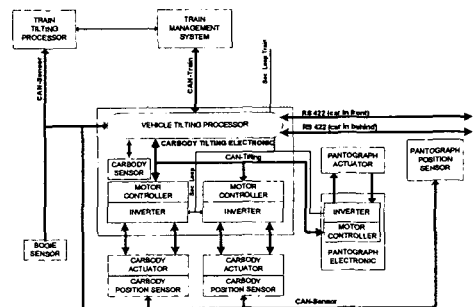


그림 3. 틸팅차량 인터페이스 블럭도

열차 제어 시스템(Train Management System: TMS)은 관련 첫 번째 차량의 차체 틸팅 제어장치와 상호 작용하는 CAN 통신을 경유하여 관련 명령을 주는 컴퓨터이다. 처음과 마지막 차 사이의 차체 틸팅 제어장치들은 소속 차 속에서 열차 조절 시스템과 연결되어진다. 각각의 차의 차체 틸팅 제어장치(Carbody Tilting

Electronic)는 RS422 통신을 경유하여 다음 차에 연결되어진다. 이 부분은 전기 기계적인 틸팅 시스템의 장비 인터페이스를 정의하고 있다. 이 전기 기계적인 틸팅 시스템은 CAN 통신을 이용 열차 조절 시스템으로부터의 필요한 명령 신호들과 대차 감지기 통한 열차 틸팅 처리 장치로부터의 필요 틸팅 명령 신호를 받아들인다. 대차 감지기는 바퀴 축 방향의 횡차 가속도를 측정하기 위해 앞뒤 차량의 대차 프레임에 장착된다. 이 신호는 열차 틸팅 처리장치 내에서 처리되어지고 액추에이터를 위한 틸팅 명령 신호로서 사용되어진다. 각각의 액추에이터는 요구되어진 위치로 이동하며 차량 처리장치에서는 실제 위치로 되돌아오는 신호를 보낸다. 측정되거나 명령 되어진 값의 차이는 모터 조절기 속에서 동력학적으로 수정되어진다.

다음은 틸팅제어를 수행하였을 경우 전원용량문제에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과를 아래와 같이 나타내었다.

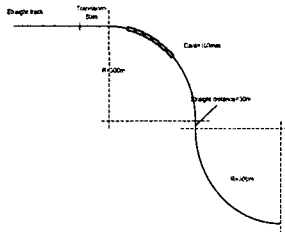


그림 4. 틸팅전원용량 시뮬레이션

시뮬레이션 조건은 곡선반경 300m 에 직선선로 구간 30m 다시 반대방향으로 곡선반경 300m 인 최악조건에서의 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 캔트는 100mm 이며 transition curve 가 60m 이다. 틸팅차량 6량 1편성이 100km/h 로 운전하고 있으며, 틸팅각은 최대로 8도 선정하여 시뮬레이션 하였다.

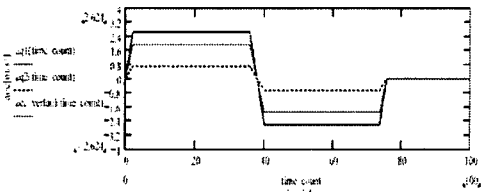
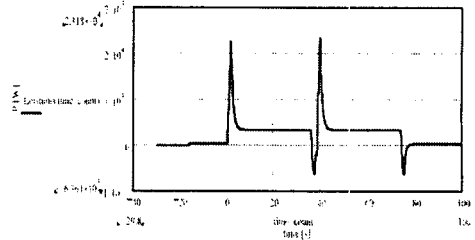


그림 5. 틸팅주행 시뮬레이션 횡가속도

그림 5 는 횡가속도의 시뮬레이션 결과를 나타내는 것으로 틸팅동작후 횡가속도가 감소한 것을 알수가 있었다. 1차 곡선에서 주행한 시간은 약 40초 이고 2차 곡선에서도 약 40초로 최종 80초정도의 시간동안 곡선을 주행하였다.그림 6은 틸팅동작시 소비전력을 시뮬레이션한 그림이다. 초기 틸팅동작시 많은 전력이 소비된다. 시뮬레이션결과로는 약 23kW 정도의 소비전력이 발생하였다. 틸팅유지시에도 전력이 많이 소비되는데 약 4kw 정도의 전력이다. 그리고 틸팅복귀시 회생전력이 발생하는데 약 7kw 정도의 회생전력이 생산된다. 이 전력은 가선으로 회생시키는 것은 SIV 시스템에 많은 회로가 추가되어 실제로는 틸팅전용 배터리를 사용하여 회생전력을 수용하였다. 또한 이 배터리는 틸팅전력을 안정적으로 공급하여 틸팅시스템의 안전성을 향상시킬 수 있다.



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.

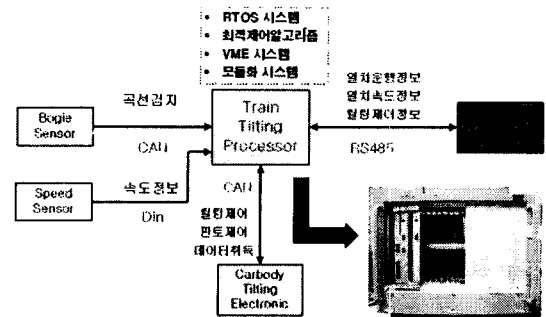


그림 7. 틸팅제어장치 블록도

#### 4. 결론 및 향후연구계획

본 논문에서는 자이로스코프 및 가속도센서를 이용한 전기차량 틸팅제어시스템에 관한 연구를 수행하였다. 차체의 틸팅을 실행하기 위해서 각각의 대차는 액추에이터와 차체 틸팅 제어장치와 함께 각각의 대차에서 공급되어진다. TCS(차량제어시스템)과 차체 틸팅 제어장치 사이의 인터페이스는 CAN 통신을 경유하여 실행되어진다. 모든 센서데이터(자이로스코프 및 가속도센서, 스피드센서 등) 차량틸팅제어장치로 입력되어 차량이 곡선에 진입함을 인식하고 틸팅제어장치의 프로그램에 의해 차량 틸팅명령을 수행한다. 본 논문의 결과를 이용하여 국내 고속 전동차 틸팅제어장치에 탑재하여 그 결과를 측정할 예정이다.

#### 참고문헌

- [1] 한국철도차량(주), "대차개발(1단계 보고서)", G7 고속전철개발사업 연구보고서, 1999. 10
- [2] 김남포 외, "대차 시스템 개발", 철도기술개발사업 보고서, 2002. 3
- [3] 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