

곡선선로 속도향상을 위한 열차틸팅제어장치에 관한 연구

·이수길, 한성호, 송용수, 한영재, 이우동
한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

The Study of Tilting Control System for Curve Line Speed-Up

Su-Gil Lee, Seong-Ho Han, Yong Soo Song, Young-Jae Han, Woo-Dong 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

틸팅 차량 개발은 국내 기존선의 차량의 주행속도 향상으로 여행시간을 단축하여 국민의 삶의 질과 국가경제 향상에 기여하기 위함이다. 이를 위해 틸팅 제어 기술을 국산화하고 부가가치를 창출하기 위해 틸팅 제어 시스템을 설계 및 제작하여 실제 차량에 적용하여 그 타당성을 입증하고자 한다. 틸팅 제어 기술은 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 매력적이다. 이는 통합된 현가 장치 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 주행속도의 크기에 따라 결정되는 횡방향 가속도와 선로의 캔트량에 따른 틸팅 각도 결정
 - 완화곡선과 주행속도에 따른 틸팅 속도를 결정
 - 정확한 틸팅 량이 기계적으로 움직임이 되었는지를 판단하고 측정하는 피드백 제어시스템 결정
- 구동체의 동력학 성질을 고려한 구동체 드라이버 설계와 틸팅 량을 결정하는 중앙연산장치와의 연계성 및 하드웨어 인터페이스 문제를 초기에 고려하여야 한다. 또한 틸팅 제어 시스템의 신뢰성과 내구성을 고려한 시스템의

이중화 및 열악한 환경을 고려한 토털 시스템 엔지니어링 기술이 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 발전할 수 있는 계기가 될 것으로 예상된다. 보통 틸팅 제어 시스템에는 유압식 틸팅 제어 시스템과 전기 기계식 틸팅 제어 시스템으로 나누어지는데 유압식은 용량 및 크기가 비대해 지는 경향이 있으므로 본 연구에서는 크기와 용량 면을 고려하여 전기 기계식 틸팅 시스템이 이용된다. 제안 된 제어 시스템은 횡방향 및 수직방향 현가 장치 제어를 가진 통합적인 능동 차량 몸체 틸팅에 대해 다루며, 곡선부 인식은 차상에서 감지하는 유압 방식으로 초점을 맞추었다. 또한 전기 기계적인 틸팅 제어 시스템은 CAN(Control Area Network) 통신을 이용 감지장치들로부터의 신호들을 받아들여 차량 틸팅 제어 장치로부터 틸팅 명령과 복원 명령 신호들을 필요한 명령 신호들을 열차 틸팅 제어 장치로 내보내게 된다.

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 궤도조건이나 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 전복하

려 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)

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

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

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 안전율 S는 $b = G/2$ 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 곡선 통과 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 부설 캔트량을 적용하였으며, 차륜/레일 접촉점간 거리는 G는 1,500 mm, 차량 무게중심높이는 무게중심이 높은 차량을 기준으로 하여 약 2,000 mm를 적용하였다.

3. 열차틸팅제어장치

틸팅 기계 장치는 크게 차체 틸팅 기계장치와 판도그래프 틸팅 기계장치로 구분되며, 그림 X는 틸팅 기계장치의 차량 취부도를 나타낸 것이다. 6량 1편성을 구성되고 있는 틸팅차량은 선두부와 후두부에 각각 틸팅 센서를 취부하여 선로 곡선을 감지하고 있으며, Mcp 차량에는 판도그래프 틸팅 기계장치가 취부되어 있어 열차길이 및 열차속도에 따라 판도그래프를 틸팅 제어한다. 틸팅에 관련된 모든 데이터를 T.M.S. (열차 제어 시스템)에 RS-485 통신으로 전송되며, 열차 틸팅 제어장치는 틸팅 센서와 GPS 센서, 타코메타센서 등을 이용하여, 틸팅각을 계산하여 차량 틸팅 제어 장치에 전송한다.

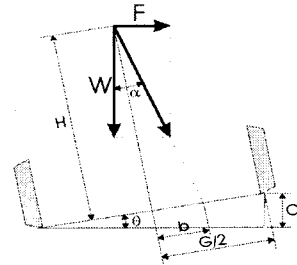


그림 1. 곡선부 원심력과 중력의 합력관계

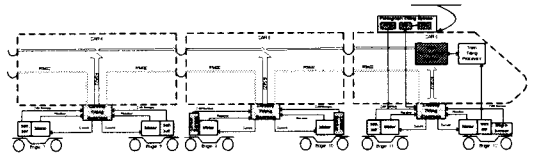
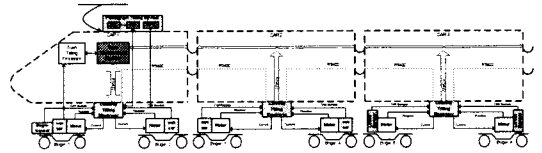


그림 2. 틸팅제어장치 시스템 취부도

열차 제어 시스템(Train Management System: TMS)은 첫 번째 차량의 차체 틸팅 기계장치와 상호 작용하는 RS422 통신을 경유하여 관련 명령을 모니터링 하는 컴퓨터이다. 처음과 마지막 차 사이의 차량 틸팅 제어장치들은 선두차와 후두차 속의 열차 틸팅 제어 장치와 연결되어진다. 선두 차와 후두차의 차체 틸팅 기계장치(Carbody Tilting Electronic)는 CAN 통신을 경유하여 다음 대차의 차량 틸팅 제어 장치에 연결되어 진다.

틸팅차량의 안전을 위해 SECLOOP는 차체 틸팅 기계장치 내부의 제어장치 인터페이스이다. 병렬의 Optocouplers에 의해서 실현되어 진다. 이 장치는 중앙 처리장치와, 주 차단기 그리고 변환장치에 의해서 인터페이스 되어있다. 만약 SECLOOP가 차체틸팅시스템 작업을 닫고 있거나, 만약 SECLOOP가 열려 있다면, 운행 상태 어떠한 전력도 없는 상태에서도 차체는 초기위치로 움직이게 된다. TMS는 작동 신호(12VDC)를 SECLOOP를 닫기 위하여 주어야 할 것이다. 모든 차의 SECLOOP는 TMS에 병렬로 연결되어 있다.

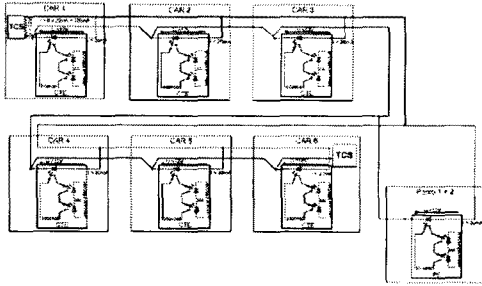


그림 3. SECLOOP(안전폐회로도)

그림 4는 차량 틸팅 제어장치의 프로그램 내부 흐름도를 나타낸 것으로 시스템 초기화 동작에서 하드웨어 테스트가 수행된다.

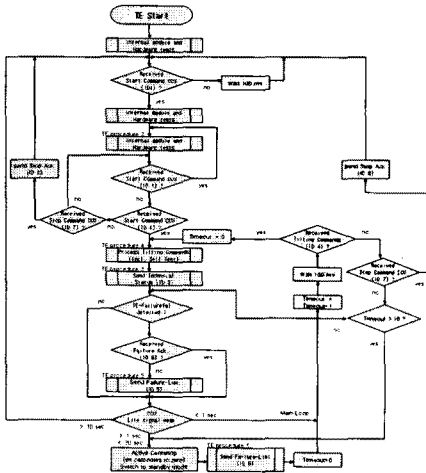


그림 4. 차량틸팅프로세서의 프로그램 내부 흐름도

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 차량틸팅명령을 수행한다. 4차년도 이후 틸팅제어장치는 차량틸팅 제어장치의 제작 및 시험, 관련 장치와의 인터페이스, 본선시운전시 틸팅 시험으로 틸팅제어장치를 완성하여야 한다. 열차틸팅 제어장치개발은 향후에 시작품이 제작되어 차량틸팅 제어장치와의 인터페이스 시험을 거쳐, 열차제어진단장치와의 인터페이스 통해 최종 개발이 완성된다. 이를 위해 차량 틸팅 제어장치는 국내 선로에 적합한 프로그램을 개발하기 위해 선로조건을 충분히 검토하여 프로그램에 반영하여야 한다. 또한 열차 틸팅 제어장치는 틸팅각을 계산하여 차량틸팅 제어장치에

전송하는 기능을 수행하기 위해 선로조건이 열악한 중앙선 및 장항선에서 선로조건을 Bogie Sensor 로 취득될 수 있는 시스템을 구축하여, 국내의 선로조건을 충분히 고려한 제어프로그램을 개발할 예정이다.

[참고 문헌]

[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 판토그래프 and Overhead Equipment: Practical Application of a New Theoretical Technique", Proc.I.Mech.Vol 197 No.13, 1983