

한국형 틸팅열차 곡선부 성능시험 연구

이수길

한국철도기술연구원

The Study of Performance Test of Conventional Curve Line for 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 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 향상시킬 수 있으나, 전력 공급 측면에서는 차량이 기울기 때문에 안정적으로 전력을 공급할 수 없고 이선이 많이 발생할 수 있다. 그러므로 적절한 틸팅제어를 통하여 곡선통과를 빠르고 안전하게 운행하여야 한다. 그러므로 본논문에서는 틸팅열차의 안전을 확보하기 위해 기존 열차에 성능시험을 만족함과 동시에 곡선부 틸팅열차의 성능시험에 대한 연구를 하였다.

2. 본 론

2.1 틸팅시스템 원리

틸팅열차는 틸팅의 원리에 따라, 틸팅차량은 노선에 곡선부가 많을수록 그 위력을 많이 발휘하는 반면, 고속선선과 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 차체틸팅에 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 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)

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

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

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

(1)과 (2)식으로부터

$$b = H \cdot (\tan\alpha - \tan\theta) \tag{3}$$

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

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

$$\tan\theta = \frac{C}{G} \tag{5}$$

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.

$$S = \frac{G/2}{b} \tag{6}$$

식(6)에 (3), (4), (5)식을 대입하면

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

캔트와 안전율을 알고 있을때 곡선통과속도를 구하는 식은 식(7)로부터

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

국내 경부선의 경우 전복에 대한 안전율을 식(7)에 의하여 유추하여 식 (8)과 같이 구해진다. 여기에서 곡선반경별 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.

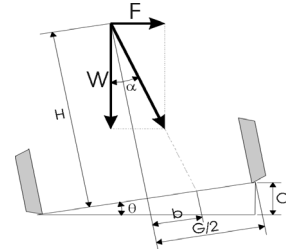


그림 1 곡선부 원심력과 중력의 합력관계

그림 2은 대차 도면과 틸팅액추에이터의 취부상태를 나타낸 것이다. 그림에서 볼수 있듯이 틸팅액추에이터의 직선운동이 링크암구조에 의해 회전운동으로 변환된다. 그러므로 직선과 회전운동의 변환 과정에서 틸팅각의 오차가 발생할 있다. 이런 오차를 사전에 감지하고 최소한의 오차를 발생하기 위해 아래와 같은 틸팅대차 인터페이스 시험을 실시하였다.

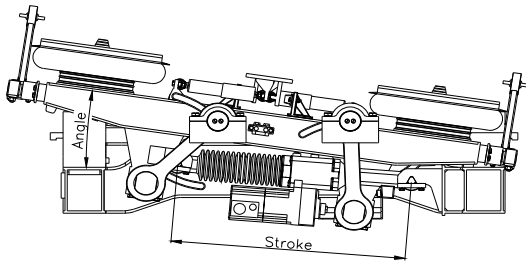


그림 2 틸팅엑추에이터 취부도(Push 방향)

### 2.2 틸팅열차 곡선부 시험

틸팅열차의 곡선부 시험은 먼저 가장 양호한 노선을 틸팅열차의 일반 속도에서 검측하여 선정하였다. 시험노선은 호남선 서대전↔충정리 구간을 선정하였으며, 최고증속시험 속도는 시험대상 곡선부의 틸팅열차 최고가능속도에 따라 4단계로 증속시험을 수행하였다. 곡선개소에 대한 궤도안전성 및 전차선 안전성 평가의 병행을 위하여 600R과 800R에 대한 곡선부 증속시험을 수행하였다. 틸팅열차 곡선부 시험개소는 각 곡선반경에 따라 2개소를 선정하였으며 1개소만이 최고속도 증속구간이며 다른 1개소는 인접개소로써 최고속도 증속을 위해 가감속 구간으로 활용하여 시험하였다. 다음그림3은 곡선부 증속시험을 수행한 600R 곡선선로 현황이다.



그림 3. 틸팅열차 600R/800R 곡선선로 현황

다음의 표는 호남선 곡선부 증속시험 구간 정보를 곡선장 및 캔트 완화 곡선길이 등이 표시된 것이다. 이는 틸팅열차의 틸팅특성에 대해 민간한 사항이므로 정밀 계측후 시험하였다.

시험개소번호	곡선 반경	진행방향	위치(KP)		연장 (m)	완화 곡선장	캔트 량 (mm)	원곡선길이	현운행속도	시험최고속도
			부터	까지						
600-1	-상	상선	70.184	71.004	820	140	140	540	100	143
		하선	70.194	71.019	825	140	140	545	100	143
	-하	상선	71.287	71.597	310	130	130	50	100	130
		하선	71.297	71.617	320	130	130	60	100	130
800-1	-상	상선	123.886	124.396	510	200	150	110	125	145
		하선	123.886	124.396	510	200	150	110	125	145
	-하	상선	125.250	125.805	555	200	140	155	125	165
		하선	125.250	125.805	555	200	140	155	125	165

틸팅열차의 증속시험은 함열역에서 부터 운행속도 120km/h로 상태로 600R-2 증속 개소를 선두차량이 진입한 후 P7으로 가속을 시작하여 130km/h를 유지하며, 선두차량이 600R-2을 빠져나올 때 다시 P7으로 가속을 수행하여 두 번째 600R-1 곡선을 진입하는 속도가 143km/h가 되도록 가속한다. 두 번째 개소를 143km/h로 완전히 지나간 후 시험을 종료한다.

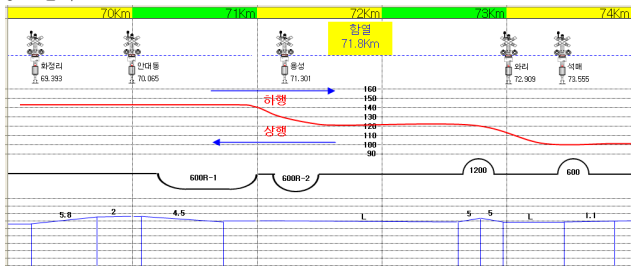


그림4 600R 상/하행 40km/h 증속시험 운전시험

틸팅열차의 800R 증속시험 구간 시작 위치에서 약 50m 전부터 증속시험 운행속도 165km/h로 증속한 상태로 첫 번째 800R-2 증속 개소를 진입한 후 후부차량이 곡선을 빠져나오는 순간 B3로 감속을 시작하여 두 번째 800R-1 곡선을 진입하는 속도가 145km/h 이하가 되도록 감속한다. 800R-1 곡선을 완전히 지나간 후 시험을 종료한다.

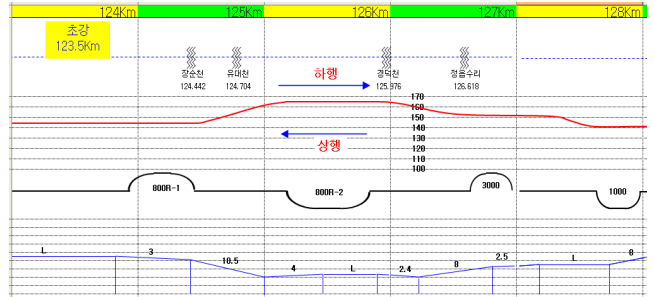


그림5 800R 상/하행 40km/h 증속시험 운전시험

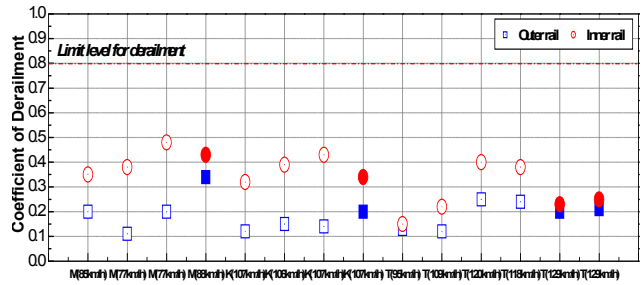


그림6 열차탈선계수 분포현황

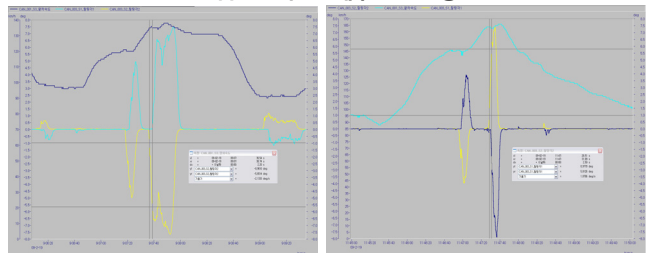


그림 7. 600R/800R 곡선에서의 틸팅시스템 동작특성

그림 6은 열차탈선계수를 측정하여 열차주행안전성을 평가한 것이다. 전복계수보다 안정됨을 알수 있다. 그림 7은 600R/800R 곡선에서 틸팅동작특성을 검측하였다. 600R의 경우 곡선조건이 완벽하지 않아 중간에 틸팅이 오실레이션을 하고 있지만 차체가 느끼는 량은 미미하다. 800R의 경우 본 곡선이 짧아 충분한 틸팅성능을 계측할 수는 없었다. 그러나 틸팅특성은 잘 보여주고 있다.

### 3. 결 론

본논문에서는 틸팅열차의 곡선부 성능시험에 대한 연구를 수행하였다. 일반차량의 경우 특별히 곡선에서의 시험을 수행하지 않으나 틸팅열차의 경우 곡선에대한 전복 및 탈선에 대한 연구를 수행하여야 한다. 곡선부 증속시험을 위한 틸팅주행 시 승차감을 측정을 통하여 틸팅성능을 평가한 바 시험 곡선개소인 R600(주행속도 140km/h), R800(주행속도 165km/h)에 대해 설계된 틸팅값과 실측된 틸팅 값을 비교하였을 때 차체틸팅제어, 차체 틸팅제어 각속도, 틸팅 판도그래프 제어각이 평가기준에 만족하여 지속적인 틸팅 8도 도달시험을 통한 틸팅시스템 성능 안정성 확보가 필요하다. 또한 전구간에 대한 곡선 접합성 평가를 할 수 있는 방법을 연구하여야 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] V. K. Grag and R. V. Dukkipati, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press, 1984.