동력 분산형 한국형 틸팅열차 시험 데이터 연구

이기식, 한성호, 송용수
한국철도기술연구원

A study of Running Test for Korean Tiling Train eXpress(TTX)

Lee Gi-sik, Han Seong-ho, Song Yongsoo
Korea Railroad Research Institute

Abstract - Tilting train has been developed to increase the operational speed of the trains on conventional lines which have many curves. This train are tilted at curves to compensate for unbalanced carbody centrifugal acceleration to a greater extent than compensation produced by the track cant, so that passengers do not feel centrifugal acceleration and thus trains can run at higher speed at curves. This paper developed tilting train to evaluate train performance of TTX(korean tilting train express) with maximum operation speed 160 km/h on Ho_nam Conventional Rail[1].

1. 서 론

국내에서 처음 연구 되는 동력 분산식 한국형 틸팅열차의 신뢰성 평가에 있어서 주요한 논점은 주행속도향상 및 열차의 곡선부 주행시 원심력에 의한 차량 탈선방지과 승차감 감소에 그 목적이 있다. 본 논문은 틸팅기술을 적용하는 180km/h급 틸팅 전기차량(TTX: Titing Train Express)의 개발에 관한 것입니다.

한국형 틸팅 열차의 개발은 2006년 12월 6량 전체 조립을 완료했습니다. 한국형 틸팅열차는 궤도의 부담력을 최소화 할 수 있도록 차체의 경량화와 기기배치의 최적화가 중요하며 일반차량에 없는 대차에 털팅메카니즘과 틸팅판토그라프 메카니즘, 틸팅전기장치등이 추가로 설치 했습니다. 틸팅기술은 차량내에서도 대차, 차체, 전기장치, 판토그라프 등과 긴밀하게 인터페이스가 이루어져야 성능을 만족할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 집전 성능 데이터, 압상력, 틸팅성능 데이터, 주행 성능 데이터 분석을 기반으로 동력분산형 한국형 틸팅열차 시스템의 신뢰성 평가에 역점을 두고자 한다.

2. 본 론

2.1 판토그라프의 집전성능 데이터

한국형 틸팅열차의 곡선부 중속시험 중 평균 접촉력 및 이선특성 등 집전성능 측정결과를 분석하고, 전차선 등 시설물에 대한 안전성을 검토하고자 한다. 평가기준은 아래 표2.1.1과 같다.

표2.1.1 집전성능평가 기준표

항목	편위량	압상량	접촉력		
			평균접촉력 (F_{mean})	최대접촉력 ($F_{mean}+3\sigma$)	최소접촉력 ($F_{mean}-3\sigma$)
평가기준	집전판 중앙 ±400mm 이내	지지점에서 50mm 이내	190 N 이하	300 N 이하	0 N 이상

2.1.1 편위량

편위량은 곡선부에서의 속도향상 시 판토그라프 집전판에서 전차선이 벗어날 수 있으므로 차상에서 촬영한 비디오 화면분석 그림2.1.1을 통하여 집전판과 전차선의 접촉 위치를 확인한 결과 곡선부에서 집전판 중앙에서 ±400mm이내에 들어오는 것으로 확인되었다.

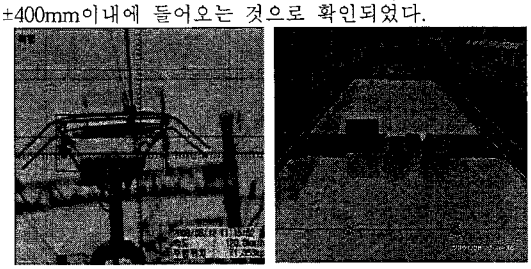

그림 2.1.1 편위 확인 영상 및 감시카메라 설치 상태

2.1.2 압상량

압상량은 전차선 전주에 설치된 고속모션 캡쳐 즉 텔레메트리 시스템에 의하여 열차 통과 시 전차선수직 변위를 측정한 결과 열차가 측정지점을 지날시 속도가 121km/h 주행시 지지점 최대 압상량이 15mm 미만임을 확인할 수 있었다.

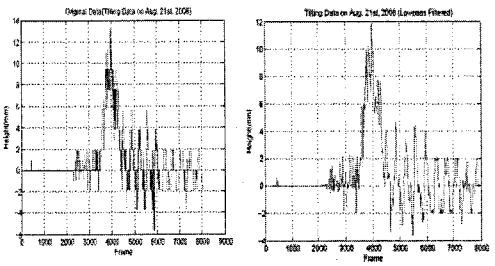

그림 2.1.2 지지점에서의 전차선 압상량
(우:Low-pass Filter 적용, 좌:Original)

2.1.3 접촉력

접촉력은 판토그라프의 팬헤드에 설치된 Strain Gauge와 가속도 센서를 통해 스프링 반력과 가속도 변화량을 측정한다. 측정한 결과 곡선반경 600R과 800R에서 아래 표2.1.2와 같이 만족함을 나타냈다.

표2.1.2 접촉력 측정결과

접촉력			
	평균접촉력 (F_{mean})	최대접촉력 ($F_{mean+3\sigma}$)	최소접촉력 ($F_{mean-3\sigma}$)
600R	118 N (190N 이하)	158 N (300N 이하)	78 N (0N 이상)
800R	132 N (190N 이하)	185 N (300N 이하)	79 N (0N 이상)

2.2 틸팅성능 측정 데이터

한국형 틸팅열차 한빛200의 곡선부 증속시험을 위한 곡선부 주행 시 승차감을 측정하여 틸팅성능을 평가하여 증속시험의 결과를 도출하고 추가 증속시험의 예상결과를 도출하고자 한다. 틸팅열차 곡선부 증속시험에 대한 틸팅시스템 평가기준은 영국로이드 레지스터레일 인증기관으로부터 검증된 틸팅인증시험에 적용되는 기준을 적용한다.

표 2.2.1 틸팅인증시험 기준

곡선반경	열차 증속 속도	캔트고려 계산틸팅각	계측틸팅각	평가
600R, 800R	일반열차 허용속도를 근거로 부족캔트량을 고려한 틸팅 8도 도달 속도	계산값 틸팅각 제시	IMC CAN 프로토콜 분석장비로 계측	상호 틸팅각은 오차범위 ±0.5도

현재 증속 추진되고 있는 R600, R800 곡선에 대해 설계된 틸팅값과 실측된 틸팅 값을 토대로 차체틸팅제어각, 차체 틸팅제어 각속도, 틸팅 판토그라프 제어각을 분석한 것이다. 분석결과는 설계틸팅각 및 각속도가 측정값과 규정범위 이내에 만족하는가와 완화곡선부에서의 승차감에 대한 평가 기준으로서 European Prestandard prENV 12299에 따른 승차감 지수, P_{CT} (Comfort index on Curve Transitions)를 이용하여 횡가속도와 롤각속도 변화율을 계산한 값이 규정치 이내에 있어 주행에 문제가 없어야 한다. 또한 국내선로의 경우 횡가속도 승차감 제한기준은 0.8m/s^2 으로 관리하고 있으며, 외국의 경우 1m/s^2 로 규정하고 있어 국내 곡선부 속도 향상은 외국의 경우 보다 훨씬 높다.

2.2.1 차체 틸팅제어각

차체 틸팅제어각은 각곡선별 부설캔트량을 고려한 계산치 틸팅각과 계측된 틸팅각도를 비교하여 오차범위 기준을 만족함을 확인한다.

표2.2.2 차체 틸팅제어각 측정결과

곡선반경 [m]	주행속도 [km/h]	부설캔트량 [mm]	캔트부족량 [mm]	횡가속도 [m/s2]	설계틸팅각 [deg]	실측틸팅각 [deg]	승차감지수 PCT < 5
600	120	140	143	0.94	3.8	4.0	0.44
800	145	140	170	1.11	4.5	4.6	0.38

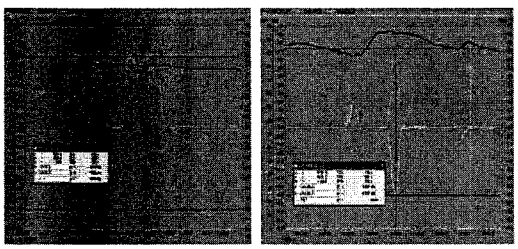

그림 2.2.1 틸팅대차 엑츄에이터 구동 계측 틸팅각

2.2.2 차체 틸팅제어 각속도

차체 틸팅제어 각속도는 곡선구간에서 틸팅 시작시점과 최종 틸팅 도달시점에서의 틸팅 각속도를 비교하여 ±4°/sec 임을 확인한다.

표2.2.3 차체 틸팅제어 각속도 측정결과

곡선반경 [m]	주행속도 [km/h]	부설캔트량 [mm]	캔트부족량 [mm]	횡가속도 [m/s2]	설계틸팅각 [deg]	실측틸팅각 [deg]	승차감지수 PCT < 5
600	110	140	98	0.64	1.12	1.05	-
800	145	140	170	1.11	1.11	1.15	-

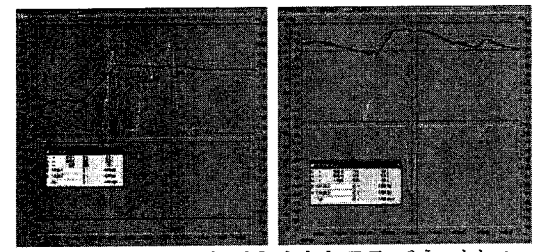

그림 2.2.2 틸팅대차 엑츄에이터 구동 계측 각속도

2.2.3 틸팅 판토그라프 제어각

틸팅 판토그라프 제어각 각곡선별 기준캔트량을 고려한 계산치 틸팅각과 계측된 틸팅각도를 비교하여 오차범위 기준을 만족함을 확인한다.

표2.2.4 틸팅 판토그라프 제어각 측정결과

곡선반경 [m]	주행속도 [km/h]	부설캔트량 [mm]	캔트부족량 [mm]	횡가속도 [m/s2]	설계틸팅각 [deg]	실측틸팅각 [deg]	승차감지수 PCT < 5
600	110	140	98	0.64	2.3	2.2	-
800	145	140	170	1.11	4.0	4.0	-

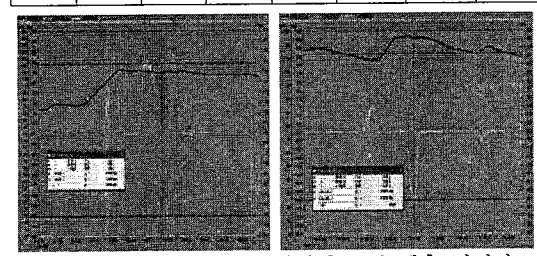

그림 2.2.3 틸팅대차 엑츄에이터 구동 계측 틸팅각

2.3 주행안전성 및 주행거동 데이터

안전성 및 주행거동 데이터는 차륜/레일 작용력 측정장치와 축상가속도계 및 대차 프레임 가속도계, 차체 내부 바닥에 설치한 차체가속도계를 이용하여 곡선부 증속시험구간에서 현제한속도보다 20km/h 증속운행결과에 대한 틸팅열차의 주행안전성을 분석하여 열차의 증속시험시 안전성과 차체의 주행거동에 대한 결과를 도출하고자 한다.

2.3.1 주행안전성 데이터

주행 안전성 데이터는 아래 표2.3.1의 주행안전성 기준을 바탕으로 분석하여 열차가 곡선부를 운행할 때 안전성의 결과값을 알아본다.

표2.3.1 주행안전성 기준

항목 / 기준	횡압	탈선계수	전복안전도
철도차량 안전기준에 관한 규칙	제30조 ○빈도누적확률 100%:50% ○빈도누적확률 0.1%:80%	제31조 Y = Po/3 + 10 Y : 1축당 횡압 Po : 정적 축중	제32조 ○빈도누적확률 100%: 0.8 ○빈도누적확률 0.1%: 1.1 ○최대값: 1.2	-
UIC518 UIC518-1	-	Y2m=Po/3+10 Y : 1축당 횡압 Po : 정적 축중	$\left(\frac{Q}{P}\right)_{2m}$:0.8	$\eta=\frac{\sum Q_A-\sum Q_B}{\sum Q_A+\sum Q_B}$: 1 이내

차륜/레일 작용력 측정 장치에 의해 측정된 데이터를 이용하여 주행 안전성을 분석한 결과 증속대상인 곡선구간에서 외궤측의 윤중을 굽힘하중에 의한 윤중 계산식에 의하여 산출한 결과 600R구간에서 내궤측과 외궤측의 윤중 변화가 심하게 나타났다. 횡압은 600R구간에서 최대 2.897톤이 발생하여 10 km/h 증속시보다 0.2톤 정도 증가하였으며, 800R 지점에서는 2.616톤의 최대횡압이 발생하여 10 km/h 증속시보다 0.8톤 정도 증가하였다. 곡선반경 2종류를 비교해 볼 때 600R 구간에서 보다 큰 횡압이 발생하는 것으로 나타났다. 탈선계수의 최대값은 600R 구간에서 0.327, 800R 구간에서 0.343으로 나타났다. 철도차량 안전기준에 관한 규칙 및 UIC 518에 의거한 허용기준을 적용할 때 현재까지의 주행안전성 양호한 것으로 나타났다. 아래 그림2.3.1과 그림2.3.2는 주행안전성 데이터 분석 그래프를 보여주고 있다.

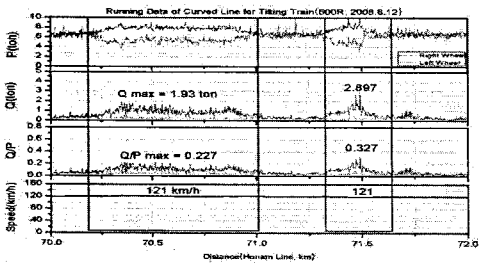

그림2.3.1 600R 곡선부 주행시 윤중, 횡압, 탈선계수

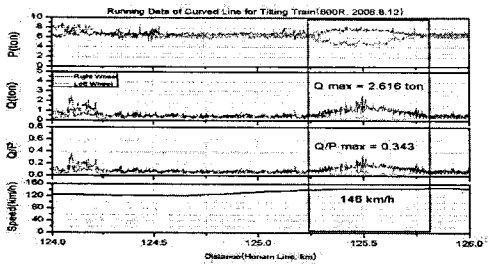

그림2.3.2 800R 곡선부 주행시 윤중, 횡압, 탈선계수

2.3.2 주행거동 데이터

주행거동은 차체 바닥에 설치된 차체 가속도계를 이용하여 측정된 데이터를 이용하여 아래의 표2.3.2의 주행거동 기준에 의거하여 주행거동에 대한 평가를 실시하여 열차가 곡선부를 주행 시 안전성을 평가한다.

표2.3.2 주행거동 기준

차종	Mcp				M				T			
평가 항목	차체횡		차체상하		차체횡		차체상하		차체횡		차체상하	
허용 기준	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS
	2.5	0.5	2.5	0.75	2.5	0.5	2.5	0.75	2.5	0.5	2.5	0.75

주행거동 안전성 평가 결과 아래 표2.3.3과 같은 결과가 나왔다. 한국형 틸팅열차의 각 객차의 종류별루 데이터를 분석한 결과 각 곡선부에서 전체적으로 기준치를 만족함을 볼 수 있다.

표2.3.3 주행거동 결과

차종	Mcp				M				T			
평가 항목	차체횡		차체상하		차체횡		차체상하		차체횡		차체상하	
허용 기준	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS
	2.5	0.5	2.5	0.75	2.5	0.5	2.5	0.75	2.5	0.5	2.5	0.75
600R	0.55	0.23	0.95	0.25	0.79	0.41	1.05	0.27	0.76	0.21	1.03	0.26
800R	0.44	0.25	1.22	0.41	0.79	0.37	1.10	0.36	0.56	0.17	0.92	0.30

3. 결 론

집전성능 데이터 분석 결과를 도출한 결과 곡선부에서 한국형 틸팅열차 한빛200이 증속을 하여도 편위 및 압상량, 접촉력은 기준을 만족하여 추가 증속도 가능할것으로 보인다. 집전성능 데이터분석 시 추가적으로 취득된 판토그라프의 압상력 자료분석을 통해 요청된 다소 하향되어 있는 정적압상력 조정을 수행하여 최종 정적압상력을 70 ~ 75N로 수정하여 양호한 결과를 취득할수 있도록 할 것이다.

또한 곡선부 증속시험을 위한 틸팅주행 시 승차감을 측정을 통하여 틸팅성능을 평가한 바 시험 곡선개소인 600R (주행속도 120km/h)과 800R(주행속도 145km/h) 에 대해 설계된 틸팅값과 실측된 틸팅 값을 비교하였을 때 차체틸팅제어각, 차체 틸팅제어 각속도, 틸팅 판토그라프 제어각이 평가기준에 만족하였으며, 추가 곡선부 증속시에도 설계틸팅값이 조건에 모두 만족함할 것으로 예상된다.

주행안전성 및 주행거동은 철도차량 안전기준에 관한 규칙 및 UIC 518에 의거한 허용기준을 적용할 때 현재까지의 주행안전성 및 주행거동에 대한 평가는 양호한 것으로 나타났으므로 추가 증속이 가능한 것으로 데이터 분석 결과 사료된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 미래철도기술개발사업으로 지원된 "한국형 틸팅열차 신뢰성 및 인프라시스템 안전성 평가 연구"과제의 연구결과 중 일부입니다.

[참 고 문 헌]

[1] 김석원외 5명(2004), "틸팅차량 성능시험 및 평가기술에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, pp.272-274

[2] 김석원외 4명(2006), "틸팅차량 종합계측시스템 개발에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, pp.671-676

[3] UIC 158, UIC 518-1

[4] 이민수외 3명(2005), "TTX 판토그라프 틸팅 구조물의 경량화 설계", 한국철도학회논문집, 2005권