

고속열차 주행시 곡선부의 궤도성능평가

A Study on the Evaluation of Curved Track to Speed Up of Railway Vehicle

강윤석*
Kang, Yun-Suk

김은**
Kim, Eun

박옥정***
Park, Ok-Jung

ABSTRACT

This study deals with the Evaluation of track system, when Newly developed Korea High Speed Train(KHST) by KRRI and KTX trains are running pass curved track of conventional line. In order to evaluate stability of track and vehicle running safety. the effect of curve radius, the field tests were performed at sharply curved track .

(국문요약)

이 연구의 목적은 호남선과 경부선의 기존선 전철화 선로의 곡선부에서 G7 개발차량과 KTX 차량이 속도를 증가해서 주행했을 경우 궤도구조의 성능평가와 주행안전성을 측정 분석하는 것이다. 구조안전성과 주행안전성 평가를 위해서 측정기준을 정립하였으며 계측망도를 구성하여 현장 계측을 수행하였다. 윤중, 횡압과 레일수직, 수평변위, 침목수직변위, 레일응력을 측정하였으며 이 결과를 토대로 궤도구조의 부담력과 열차 주행안전성을 평가하였다.

1. 서론

지난 4월부터 고속철도 상업운행이 서울-부산의 경부선과 서울-목포간 호남선에서 시작되었다. 지금의 고속열차는 경부선의 경우 서울-대구간의 고속선을 거쳐 대구-부산의 기존과 연계되어 있으며, 호남선은 서울-서대전 간의 고속선을 거쳐 서대전-익산-목포의 기존선에 연결되어있다. 현재 기존선의 경우 선로개량과 전철화가 이루어져서 많은 속도향상이 있었지만 고속선에 비해 제한된 곡선반경과 최급구배 등으로 인하여 곡선부 통과시 열차속도는 제한되어 있다.

향후 기존선을 대체할 고속전용 경부선과 호남선 건설이 추진되고 있지만 KTX가 기존선 통과하면서 얼마나 속도를 향상시킬 수 있는가는 영업측면에서 중요한 문제이다. 이를 위해서 곡선부

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

의 현장측정을 통해 그 성능을 평가하고 이를 토대로 곡선부 속도향상에 대해 분석이 필요하였다. 일반적으로 곡선통과속도(curve running speed) 결정시 고려할 사항은 크게 안전성, 승차감, 궤도 보수 측면에서 검토해야 한다. 이중에서 특히 안전성 측면에서는 차량의 전도에 대한 안전성, 차량의 주행안전성, 궤도구조의 횡방향 궤도부담력이 중요하다.

이 연구에서는 주로 안전성 측면에서만 검토하였다. 특히 궤도부담력과 탈선계수를 검토를 위해서 G7 개발차량과 KTX열차가 통과하는 경부,호남 기존선 R800m이하의 곡선구간을 선정하여 운중, 횡압, 수직·수평변위와 침목변위, 저부응력을 측정하였고 이를 분석하였다.

2. 기존선의 곡선부의 현황

2.1 기존선의 곡선부의 현황 및 측정장소

현재 고속철도(KTX)가 운행하는 경부선의 신동~부산의 연결선에서의 최소곡선반경은 R800m이었다. 호남선의 서대전~익산구간에는 R400m~R800m의 곡선이 있으며 각 곡선반경별 최고속도는 제한되어 있다. 익산~임성리(목포 이전역) 구간은 새로운 전철화 개량사업에 의해 R800m~R8000m 까지의 곡선반경이 있어 열차 속도향상에 적합한 환경이다.

이 연구는 고속철도가 상업운행하기 이전인 2003년 11월부터 2004년 3월 22일까지 이루어졌다. G7 고속철도 개발차량과 KTX 차량이 각각 경부, 호남선의 기존선 R800m이하의 곡선반경을 통과시에 궤도 부담력과 탈선계수를 측정하여 나온 결과이다. 곡선반경별 측정장소는 모두 4개소였으며 R400m구간, R600m구간, R800m구간에서 측정을 수행하였고 직선구간에서 계측도 수행하여 결과를 비교 분석하였다. 각각의 측정장소와 궤도구조 상태는 표 1과 같다.

표 1. 측정장소의 곡선반경 및 궤도구조 종류

구 분	상하행구분	장 소	궤도구조의 종류
직선구간 (G7 개발차량 통과)	하행선	호남선 대전이남 25.55km 지점(원정-두계간)	KS 50레일/PC침목 탄성체결구
R=400 곡선구간 (G7 개발차량 통과)	상행선	호남선 대전이남 22.35km 지점(원정-두계간)	KS 50레일/목침목 스파이크 체결구
R=600 곡선구간 (G7 개발차량 통과)	하행선	경부선 341.80km 지점(경산역)	KS 60레일/PC침목 탄성체결구
R=800 곡선구간 (KTX열차 통과)	하행선	호남선 익산이남 93.00km 지점	KS 60레일/PC침목 탄성체결구

2.2 측정기준의 정립

열차가 주행시 궤도구조의 안전성을 검증하기 위해서는 성능평가 기준이 필요하다. 측정을 위해서 표준측점을 선정하여 계측망을 구성하고 데이터를 획득하는 방법으로 연구를 수행하였다. 재하력을 알기 위해 운중, 횡압 게이지를 그림 1과 같이 궤도 외측에 3개, 궤도 내측에 2개씩을 부착하여 궤도 부담력 뿐만이 아니라 탈선계수를 측정하여 열차주행안전성을 판단할 수 있도록 하였다. 그림 2는 곡선부 현장에 설치된 센서이며 그림 3은 곡선부에 개발차량이 통과하는 모습이다.

표 2. 곡선구간 1측점당 계측항목

분 류	측정 세부 항목	측 점 수
응 력	레일휨응력(저부)	2
변 위	레일 수직변위	2
	침목 수직변위	2
	레일 두부 횡변위	2
하 중	궤도 내측 윤중	2
	궤도 외측 윤중	2
	궤도 내측 횡압	2
	궤도 외측 횡압	2
합		24

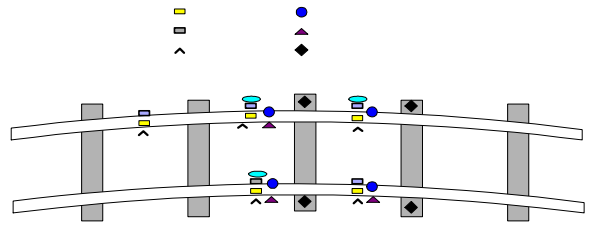


그림 1. 궤도구간의 센서배치도

이외에 레일 상하변위, 침목 변위와 레일하부에 저부응력을 측정하기 위한 센서를 설치하였다.

그리고 측정치의 판정을 위해서 일본의 신간선 고속열차의 측정기준을 준용하였다. 이 기준은 일본의 신간선의 종합시험선(소산지구)에서 1975년부터 1980년에 걸쳐 속도향상시험을 하면서 각종 시험궤도의 성능시험이 행한 결과를 바탕으로 제정되었다. 속도향상시험을 할 때마다 다양한 종류의 궤도에 대한 시험을 수행하였다. 이 시험기준을 근거로 고속열차의 속도향상의 가부가 정해졌다. 종합시험선에 대하여 1978년도 상선 210km/h, 속도향상판정기준, 1979년도 상선 300km/h 고속시험을 수행하였고 속도향상 판정표준(안) 및 1980년 하선 260km/h 고속시험속도향상 판정표준(안)등을 거쳐서 표 3과 같은 기준이 제시되었다. 이 기준과 우리 연구원에서 고속선에서의 KTX의 안전성을 판단했을 때 사용한 독일기준을 비교하였다. 위 기준에서 표준치는 기존의 측정치, 설계치를 고려하여 상세조사를 한 값으로 극한 한계치의 의미를 가지고 있으며 참고치는 측정시 통상 이 범위 내에 있는 값을 말하며 평균치의 의미를 가지고 있다.

표 3. 측정기준정립

구 분		표준치	참고치	KTX기준 (독일고속철도기준)
윤 중	최대치	300kN(30tf)	200kN(20tf)	200kN
	최소치	25kN(2.5tf)	35kN(2.5tf)	
횡 압		68kN(6.8tf)	40kN(4.0tf)	40kN
레일수직변위		4mm	3mm	1.5mm
레일수평변위		4mm	3mm	3mm 이하
침목수직변위		3mm	2mm	1mm 이하
레일응력		270N/mm ² (전진폭)	180N/mm ² (전진폭)	70N/mm ² (편진폭)



그림 2. 곡선부 현장에 설치된 센서



그림 3. 측점을 통과하는 개발차량

3. 계측 및 분석결과

3.1 곡선반경에 따른 궤도부담력

원정-두계간의 직선부의 기준속도는 130km/h이었지만 현장여건상 평균 101.4km/h정도로 주행하였다. R400m 구간 통과시에는 곡선부의 기준속도는 85km/h였으며 곡선부의 평균속도는 83.26km/h로 통과하였다. 이 때 발생한 윤중은 곡선부 외측윤중이 내측윤중에 비하여 크게 발생하여 곡선구간 균형속도 이상(켄트부족)이라고 생각된다. 횡압의 경우도 외측레일과 내측레일에 대해서 곡선외방의 횡압이 측정되는 것으로 나타났다. 곡선부에서의 일부 횡압은 표준치 68kN를 하회하는 46kN이 측정되었지만 참고치 40kN를 넘는 것으로 측정되었다. 이외 레일수직변위, 레일수평변위, 침목수직변위는 모두 기준 아래인 것으로 나타났다. 직선부 측정결과는 속도 114km/h 주행시 레일저부응력이 74.63N/mm² 기준치인 70N/mm²(독일기준)을 초과하였으나 일본 신간선기준인 최대 한계치(참고치)에는 못미치는 것으로 나타났다.

R600m 구간에서 제한속도는 110km/h이나 시험을 위해 개발차량이 시속 122.45km/h로 통과하였고 새마을호는 103.0km/h로 통과하였다. 이 때 발생한 윤중은 G7 개발차량과 새마을호가 117.2kN과 120.29kN이었다. 횡압은 31.5kN과 37.16kN이 발생하여 참고치 보다는 작은 것으로 나타났다. 이 때 발생한 윤중은 곡선부 외측윤중이 내측윤중에 비하여 다소 크게 발생하였다. 횡압은 외측레일과 내측레일에 대해서 곡선내방과 외방의 횡압이 교번하여 나타났으며 R400m구간보다 다소 안정적인 결과를 보였다. 이외 레일수직변위, 레일수평변위, 침목수직변위는 모두 하회하는 것으로 나타났으며 레일수평변위는 외방측 방향으로 측정되었다. 곡선구간에서 윤중, 횡압, 수직, 수평변위 모두 신간선 참고치를 하회하였다. 측정결과 레일저부응력은 109.6kN이 발생하였으며 참고치 이내에 들었다.

표 4. 호남선 원정-두계 구간 직선구간과 R400m구간 측정치

구분	표준치	참고치	직선구간 (개발차량통과)	R400m 구간 (개발차량통과)	R400m 구간 (새마을호통과)
윤중(kN)	300	200	108.12	111.73	118.90
횡압(kN)	68	40	5.49	46.00	43.00
레일수직변위(mm)	4	3	1.18	2.43	2.85
레일수평변위(mm)	4	3	0.33	1.81	2.28
침목수직변위(mm)	3	2	0.95	1.95	2.24
레일응력(N/mm ²)	270 (전진폭)	180 (전진폭)	88.6 (전진폭)	118.5 (전진폭)	130.5 (전진폭)

표 5. 경부선 경산 R600m구간 측정치

구분	표준치	참고치	R600m 구간 (G7 개발차량)	R600m 구간 (새마을호)
윤중(kN)	300	200	117.20	120.29
횡압(kN)	68	40	31.50	37.16
레일수직변위(mm)	4	3	1.70	1.61
레일수평변위(mm)	4	3	1.14	1.52
침목수직변위(mm)	3	2	1.64	1.76
레일응력(N/mm ²)	270 (전진폭)	180 (전진폭)	109.6 (전진폭)	110.14 (전진폭)

표 8. 곡선반경별 내외측 레일 윤중, 횡압 비교

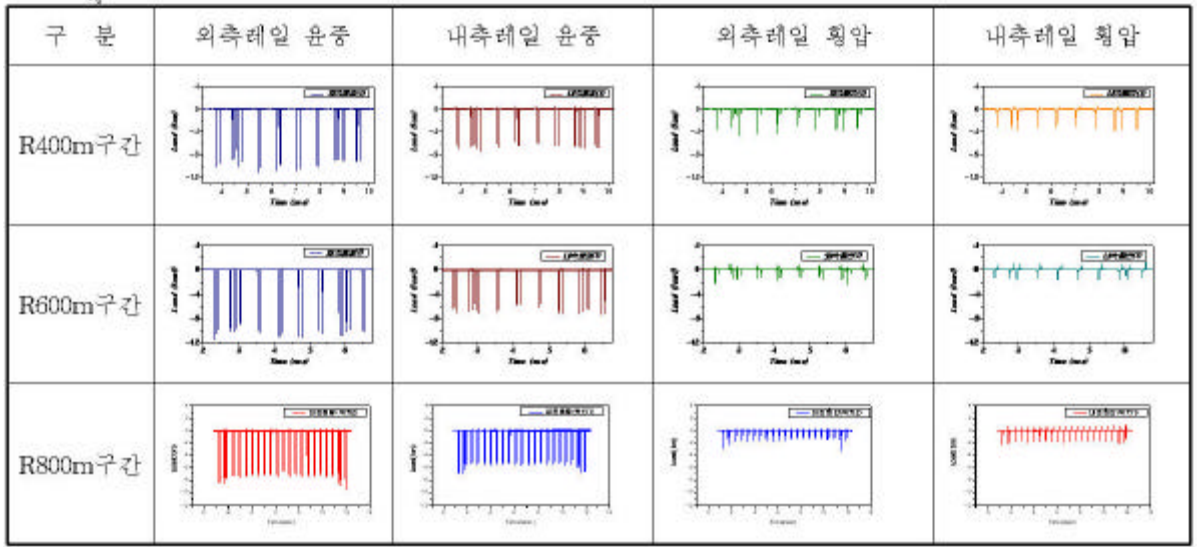


표 9. 외측레일의 탈선계수

※ 횡압: (+)외방 (-)내방 / 음영부분: 최소값

구분	외측윤중			외측횡압			탈선계수		
	동력차	동력객차	객차	동력차	동력객차	객차	동력차	동력객차	객차
R=400 (개발차량)	9.96	11.02	10.82	3.77	4.76	4.28	0.41	0.48	0.40
	8.72	9.01	9.82	0.58	0.82	0.90	0.06	0.09	0.09
R=600 (개발차량)	11.48	10.95	11.16	2.28	1.58	1.65	0.22	0.16	0.15
	9.86	9.08	10.09	0.34	0.91	0.98	0.03	0.10	0.09
R=800 (KTX)	7.36	7.39	9.60	1.79	1.62	3.16	0.25	0.23	0.40
	6.95	6.78	4.73	0.71	0.73	0.15	0.10	0.10	0.03

표 10. 내측레일의 탈선계수

※ 횡압: (+)외방 (-)내방 / 음영부분: 최소값

구분	내측윤중			내측횡압			탈선계수		
	동력차	동력객차	객차	동력차	동력객차	객차	동력차	동력객차	객차
R=400 (개발차량)	7.09	7.57	6.75	3.67	3.81	3.54	0.53	0.58	0.57
	6.32	6.06	5.68	-0.39	-0.45	-0.43	-0.06	-0.07	-0.07
R=600 (개발차량)	7.31	7.23	7.18	1.52	1.53	1.54	0.24	0.22	0.26
	6.28	6.76	5.55	-1.18	-0.94	-0.79	-0.16	-0.13	-0.13
R=800 (KTX)	7.00	6.00	5.71	2.05	1.69	2.28	0.31	0.35	0.45
	5.51	4.73	4.91	0.52	0.50	0.15	0.08	0.09	0.03

R400m 구간에서는 외측윤중과 횡압이 동력객차 쪽에서 발생하였는데 R600m구간에서 동력차에서 윤중, 횡압이 크게 발생하였다. 이에 반해서 R800m 구간에서는 객차 부에서 발생하였다. 외측레일의 탈선계수에서는 R 400m 구간에서 0.48이 측정되었다. R600m 동력차에서는 0.22의 최대치가 검출되었고 R800m 객차에서는 0.40이 측정되었다. 이는 임계탈선계수 1.2보다는 작은 값이지만 고속선 KTX에서 측정한 0.3이하의 탈선계수보다는 큰 값이 검출되어 R400m, R600m의 곡선구간에서의 속도증가는 열차 주행안전성 때문에 신중해야 할 것으로 판단된다. 각각의 곡선부마다 값을 비교하기 어려운 것은 각각의 궤도구조가 목침목, PC침목구조가 각각 틀리며 사용레일 역시 KS50과 KS60으로 틀리기 때문에 일률적인 비교검토가 어렵다고 생각된다.

4. 결론 및 향후과제

이 연구에서는 기존선 구간에 R400m~R800m구간 통과시 KTX열차와 G7열차 통과시의 궤도부담력과 주행안전성 측면에서의 현장계측을 수행하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 궤도부담력측면에서 검토하였을 경우 R400m구간에서 횡압이 측정기준에 비해서 크게 나타났다. 다른 검토항목이었던 레일수직변위, 수평변위와 침목변위 레일수직변위 및 레일저부응력도도 측정기준 이하로 나타났다. 대체적으로 목침목구간, 스파이크 구간의 R400m구간의 궤도부담력이 전반적으로 큰 것으로 나타나고 있었다. R800m구간에서는 KTX열차의 공차 및 만차시 측정을 수행하였는데 윤중,횡압이 각각 7.3%이 증가하였고 횡압이 30.6%까지 증가하였다. 수직변위와 레일수평변위도 각각 34.05%와 18%정도 큰 것으로 측정되었다.
- 주행안전성 측면에서 보았을 때 R400m 구간에서의 윤중은 곡선부 외측윤중이 내측윤중에 비하여 크게 발생하여 곡선구간 균형속도 이상(캔트부족)이라고 생각되었다. 횡압의 경우도 외측레일과 내측레일에 대해서 곡선외방의 횡압이 측정되는 것으로 나타났다. 이 때 발생한 R400m 구간에서는 외측윤중과 횡압이 동력객차 쪽에서 발생하였는데 R600m구간에서 동력차에서 윤중,횡압이 크게 발생하였다. 이에 반해서 R800m 구간에서는 객차 부에서 발생하였다. 외측레일의 탈선계수에서는 R 400m 구간에서 0.48이 측정되었다. R600m 동력차에서는 0.22의 최대치가 검출되었고 R800m 객차에서는 0.40이 측정되었다. 이는 임계탈선계수 1.2보다는 작은 값이지만 고속선 KTX에서 측정한 0.3이하의 탈선계수보다는 큰 값이 검출되어 R400m, R600m의 곡선구간에서의 속도 증가는 열차주행안전성 때문에 신중해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2001) “시운전시 궤도·노반시설물의 성능검증”, 한국고속철도건설공단
2. 한국철도기술연구원 양신추(2002). “장대레일 화차의 분기부 및 곡선구간 통과시 추가횡압발생 관한 연구” 한국철도학회 논문발표집
3. C. Esvelto(1989) Mordern Railway Track”, MRT-Production
4. 佐藤吉彦(1989) “新軌道力學“ 鐵道現業社