

한국형 고속열차 350km/h 증속에 따른 궤도성능평가

Evaluation of track performance corresponding to 350km/h speed increase of HSR

강윤석*, 김 은**, 김태욱***, 장승엽****, 나성훈*****
Kang, Yoon-Suk, Kim, Eun, Kim, Tae-Wook, Jang, Seung-Yup, Na, Sung-Hoon

ABSTRACT

For the Korean high speed railway rolling stock, which is developed through the G7 research project, various tests such as components test, prototype train test, on-line test have been carried out for years. In order to obtain the system stability, mutual interface between each part (rolling stock, track, bridge, electricity and signal) should be verified.

For this reason, track performance according to the speed increase of HSR has been monitored in field. Especially, through the analyses of accumulated data, structural and running stability of HSR has been evaluated.

With this viewpoint, this paper presents the track performance test method and the test results corresponding to 350km/h speed increase of HSR.

1. 서론

G7 고속전철 기술개발사업으로 개발된 한국형 고속전철(HSR)은 단품시험, 완성차 시험 등을 거쳐 본선에서 시운전 시험이 단계적으로 진행되어왔다. 이 시운전 시험에서 개발차량의 시스템 안정화를 위해서는 차량 외에 궤도, 교량, 전차선, 신호 등 각 시스템의 상호간 인터페이스 검증이 필요하였다. 이에 선로구축물 궤도분야에서도 개발차량이 속도를 증속함에 따라 궤도구조에 미치는 영향과 안전성을 고려할 필요가 있었으며 현장 지상측정을 통하여 궤도구조안전성과 주행안전성을 간접적으로 평가하였다.

궤도구조의 계측결과는 개발차량의 시험선 주행을 위한 선로사용권 확보를 위한 데이터로 제공되는데, 개발고속철도 시스템의 주행안전성 확인과 선로의 구조안전성을 파악하기 위해 윤중, 횡압, 레일 휨응력 등 항목을 측정하여 선로에 미치는 궤도부담력을 평가하였다.

궤도성능평가를 위한 현장계측은 2002년 8월 24일 이후서부터 실시된 이후 52개월간 측정이 이루어졌다. 처음 측정은 고속선 KP 124.76km지점에서 시속 50km/h에서 처음 수행된 이후 112km/h, 128km/h, 161km/h, 196km/h, 230km/h, 270km/h로 단계적으로 속도증가가 되었다. 2003년 8월 시속 300km 측정을 한 이후 10월에 330km/h, 11월에 340km/h를 거쳐 2004년 12월 16일 새벽 1시 24분경 운주터널 진출입부에서 350km/h의 속도 시 측정을 수행하였다.

본고에서는 한국형 고속열차의 350km/h 증속에 따른 궤도의 성능평가 방법 및 계측결과의 분석내용을 기술하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

**** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

***** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2. 궤도성능평가

차상에서 측정하는 데이터는 속도를 향상시키는 증속구간에서 연속하여 측정을 수행할 수 있지만 지상에서의 측정은 한 측정지점을 선정하여 그 지점에서 측정을 하기 때문에 전체 주행 구간에서의 궤도구조의 성능평가를 위한 계측을 하기는 사실상 불가능하다. 그러므로 주행구간에서의 궤도틀림 검측데이터가 모두 기준 값을 만족할 때 주행구간의 궤도가 일정한 궤도품질을 가진다고 가정 한 후 고속열차가 최고속도로 증속되는 구간에 궤도 검측위치를 선정하여 궤도성능을 평가하였다. 이와는 별도로 차상시험도 수행하였는데 전 구간에서는 UIC 가속도기준에 따라 차체 및 대차가속도, 차축가속도를 측정하여 주행안전성을 평가하였다.

2.1 궤도성능평가 항목 및 평가기준

열차 주행시 궤도의 성능은 일본의 주행 판정기준과 독일의 주행 판정기준을 참조하여 평가하였다.

열차주행 시 궤도성능평가를 위한 측정항목 및 판정기준			
Measuring Item			Criterion
Wheel load Lateral load	Rail stress	Acceleration (ballast)	JAPAN (新幹線 - 速度向上 判定基準)
Rail disp. (vertical)	Rail disp. (lateral)	Sleeper disp. (vertical)	Deutsch (DE-consulting on-line test)

그림 1. 열차주행시 궤도성능평가를 위한 측정항목 및 판정기준

일본은 1975년부터 1980년에 걸쳐 신칸센 종합시험선에서 속도향상시험을 수행하였으며 속도향상시험을 할 때 마다 다수의 궤도에 대해 동시에 속도향상 여부를 판정하기 위해 표 1과 같은 속도향상 판정기준을 적용한 바 있다. 신칸센 종합시험선(소산지구)에 대하여 1978년도 상선 210km/h 주행 시 속도향상판정기준, 1979년도 상선 300km/h 고속시험 시 속도향상 판정표준(안) 및 1980년 하선 260km/h 고속 시험 속도 향상 판정표준(안)이 만들어지면서 표 1의 기준이 완성되었다. 여기서 표 1의 표준값은 기존의 측정값과 설계값을 고려한 측정 시 극한 한계값을 의미하며, 참고값은 측정 시 통상 이 범위 내에 있는 값으로 평균값을 의미한다.

독일 기준은 DE-Consult의 용역결과로서 ICE 열차가 독일 선로에서 시속 350km/h까지의 속도상승을 하면서 결정된 기준이다. 그리고 축중 조건도 국내의 G7 차량과 KTX와 동일하기 때문에 이 기준을 HSR차량 속도 향상 시 주행판정기준으로 삼았다.

표 1. 일본과 독일의 고속열차 궤도측정기준

구 분		일본 신칸센 기준		독일고속철도 기준
		표준치	참고치	
운 중	최대치	300kN(30tf)	200kN(20tf)	
	최소치	25kN(2.5tf)	35kN(2.5tf)	
평 압		68kN(6.8tf)	40kN(4.0tf)	
레일수직변위		4mm	3mm	1.5mm
레일수평변위		2mm	1.5mm	1.5mm 이하
침목수직변위		3mm	2mm	1mm 이하
레일응력(편진폭)		150N/mm ²	100N/mm ²	70N/mm ²

2.2 궤도성능평가를 위한 현장계측

궤도에 대한 응력·변위는 스트레인 게이지 또는 변위계를 이용하고 그 출력을 증폭기를 통과하여 Data Acquisition System 으로 기록하여 분석하였다.

측정항목에 대한 센서의 배치는 그 목적에 따라 다르며, 측정 점을 표준화하여 측정하였다. 이 표준 측정 점을 그림 2에 나타내었다. 측정은 그 오차를 고려하여 2단면에 대하여 하고 있지만, 각 측정에 대해서는 필요에 따라 측정점을 추가하였다. 궤도 기본 계측망은 궤도의 상태를 계측 값으로 파악하기 위한 기본적인 센서 배치형태이다.

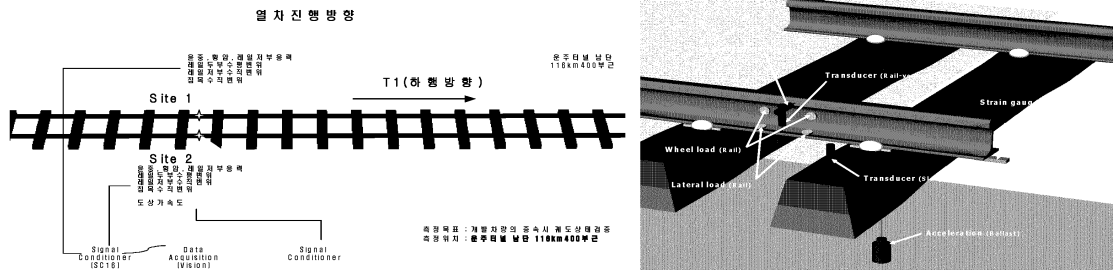


그림 2. 궤도성능평가를 위한 기본적인 현장 계측망

궤도성능평가를 위한 현장계측 방법은 다음과 같다. 지상에 대한 윤중의 측정은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착한 후 전단변형을 측정하였다.

횡압은 윤축의 전향과 캔트의 변화에 의한 원심력과 차량 사행 및 주행거동을 파악하기 위해서 측정하였다. 측정은 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 저부상면에서 내측에 스트레인 게이지를 부착하고 결선면 레일 중방향 휨의 영향을 배제시켜 전단력을 측정하였다.

레일응력은 노이즈와 온도변화에 대한 영향을 소거하여 감도를 높이기 위해서, 원하는 측정점에 1개의 스트레인게이지를 부착하고 1개의 더미게이지를 이용하여 2 게이지법을 사용하였다.

변위는 레일수직, 수평, 침목수직변위를 변위계를 이용하여 측정하였다. 주행 중인 열차의 레일과 침목을 측정함으로써 동적하중이 최고치일 때 그 영향을 평가할 수 있고, 레일두부 횡변위 측정값으로 레일 틸팅으로 인한 궤도의 최대 궤간 확폭을 측정할 수 있다.

2.3 현장계측결과 및 분석

이와 같은 방법으로 한국형 고속열차 주행시 윤중, 횡압, 레일저부응력, 레일수직변위, 레일두부 횡변위, 침목수직변위, 도상가속도를 측정하였으며, 그림 4에 열차속도별 각 측정항목의 결과치를 나타내었다. 그림 3은 한국형 고속열차의 348.2km/h 주행시 현장사진이다.



그림 3 한국형 고속열차의 실차주행시험 (348.2km/h)

단계별 측정은 대부분 직선구간에서 이루어져 윤중과 횡압은 속도의 증가에 따른 변화가 크지 않았으며, 기준 값 이내의 측정결과를 얻을 수 있었다. 그림 4에서 KTX 열차의 300km/h 속도에서의 동일항목 측정결과를 나타내었는데 한국형 고속열차 주행시 측정한 결과와 유사한 범위의 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

레일저부응력은 속도 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보이며, 최고 700kg/mm² 가까이 응력 값이 나타났지만, 이 결과는 기준인 800kg/mm²에 미치지 못하는 값으로 최고속도 주행시 레일저부응력은 기준값을 만족하고 있음을 확인하였다.

레일수평변위, 침묵수직변위는 윤중, 횡압과 마찬가지로 직선부에서 측정되었기 때문에 열차의 속도변화에 따른 큰 변화는 없었다. 일반적으로 레일 수직변위의 경우 속도증가에 따라 윤중이 증가되는 경향이 있는데 큰 변화는 없었다. 측정구간이 내리막 구배의 영향을 있었는지에 대해서는 향후 검증이 필요하다고 생각된다. 계측결과가 기준 값에 비해 상당히 작은 값을 나타내고 있지만 KTX 열차의 주행시 계측 값과 비교하여 유사한 결과를 나타내고 안전율을 가지고 있었다.

도상가속도는 열차속도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 특히 열차가 331.28km/h로 통과 시에 3.679g가 측정되어 다소 큰 값이 측정되었지만, 이 값은 선로진동이 열려되었던 강성변화구간(매트부설구간)에서 측정되었던 최대 가속도 4.337g에도 못 미치는 값으로 안전하다고 판단된다.

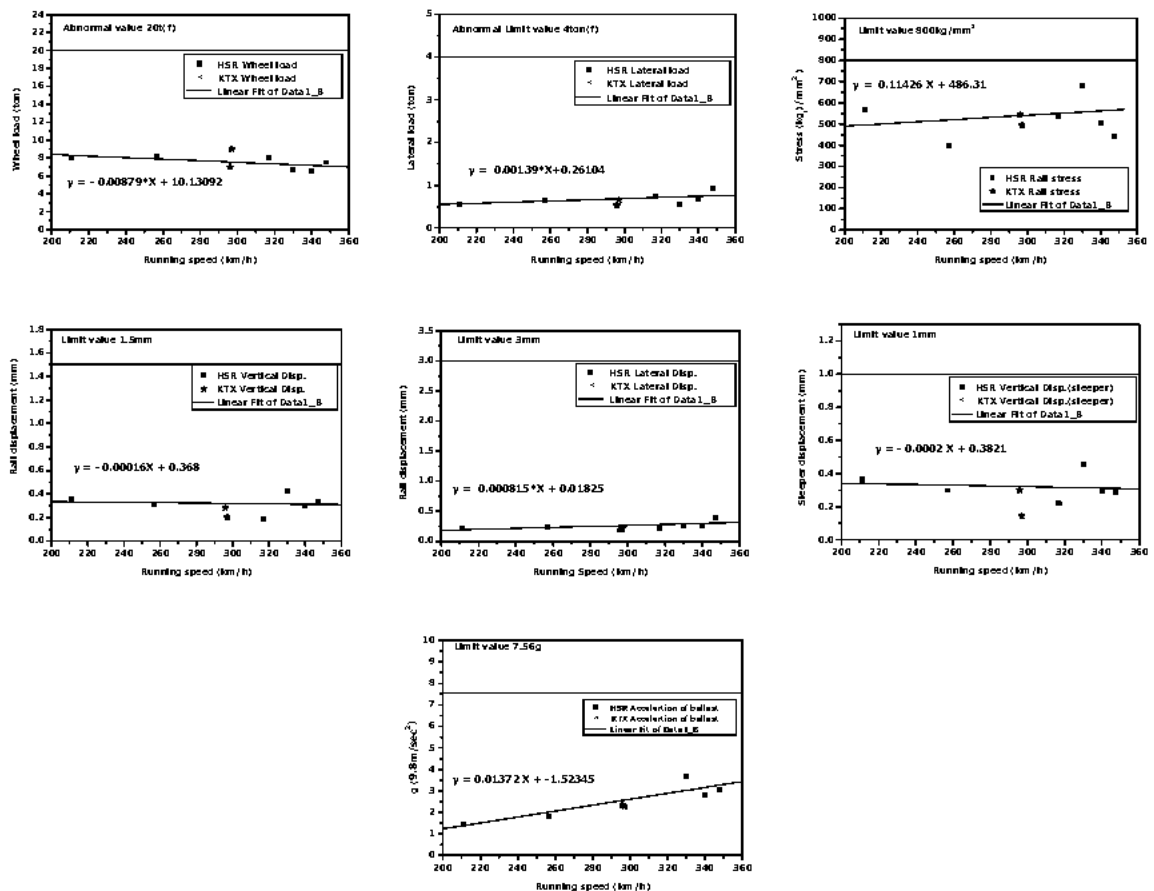


그림 4 열차속도 증가에 따른 각 계측항목의 변화

3. 결론

이상 고속열차 주행시 궤도성능평가 방법을 소개하였고, 한국형 고속철도의 350km/h까지의 증속시험에서 예측된 결과를 나타내었다. 또한 350km/h의 시운전 시에는 12월 동절기로서 레일절손, 궤도구성품의 취성파괴, 하부 도상지지계수의 감소 등의 요소가 잠재하여 많은 부담이 있었지만 평가결과는 기준 값 이하로 나타났다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 단계별 측정은 대부분 직선구간에서 이루어져 윤중과 횡압은 속도의 증가에 따른 변화가 크지 않았으며, 기준 값 이내의 측정결과를 얻을 수 있었다. 또한, KTX 열차의 300km/h 속도에서의 동일항목 측정결과를 나타내었는데 한국형 고속열차 주행시 측정한 결과와 유사한 범위의 값을 보였다.
- 레일저부응력은 속도 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있었다. 그러나 레일수평변위, 침목수직변위는 윤중, 횡압과 마찬가지로 직선부에서 측정되었기 때문에 크게 증가하지 않았다.
- 도상가속도는 열차속도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 특히 열차가 331.28km/h로 통과 시에 3.679g가 측정되었고 시속 200km/h 주행시 보다 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2003), “고속철도 선로구축물 안정화기술개발”, 한국철도기술연구원.
2. 한국철도기술연구원(2002), “고속철도 선로구축물 안정화기술개발”, 한국철도기술연구원.
3. 한국철도기술연구원(2002), “시운전시 궤도·노반시설물의 성능검증”
4. 강윤석, 김은, 박옥정(2003), “고속열차 주행시 곡선부의 궤도성능평가”
5. 나성훈, 서사범, 손기준, 김정환(2001) “교량 토공접속부에서 궤도강성변화에 대한 실험적 연구” 철도학회 춘계학술대회
6. 강기동, “궤도역학”
7. 서사범, “선로공학” 삶과 꿈
8. DE-Consult(1999), "On-Line Test", Korean Railroad Reserch Institute
9. Coenraad Esveld, "Modern Railway Track", MRT-Productions, 2001
10. 佐藤吉彦, (1989), “新軌道力學”, 鐵道現業社