

한국형 고속전철의 주행조건에 따른 진동특성 분석에 관한 연구

A Study on the Vibration Characteristics due to the Running Conditions for Korean High Speed Train

박찬경* 한영재* 김영국* 김석원* 최강윤*
Chankyong Park YoungJae Han Youngguk Kim Seogwon Kim Kangyun Choi

ABSTRACT

Korean High Speed Train (KHST) designed to operate at 350km/h has been tested on high speed line in JungBu site since it was developed in 2002. The dynamic performances of railway vehicle are generally stability, safety and ride comfort. The stability performance of KHST was proved that it is stable at 400Km/h through Roller Rig test. The safety and ride comfort need to be predicted the capability of it at 350km/h by the on-line test because KHST is testing at 300Km/h up to now. Therefore, in this paper, the safety and ride comfort at 350km/h are predicted the performance using the acceleration results at 300km/h and these results show that the KHST's dynamic performances are very good. Also, it illustrate the two cases occurred the abnormal vibration of KHST during some on-line tests. The first case is that the variation of vertical acceleration of wheel is analyzed when an abrasion occur on wheel. The second case is that the lateral acceleration of wheel, bogie and body are analyzed when the KHST is unstable at high speed. The occurrences of these special phenomena were due to the some faults of the suspension and braking systems and the faults were improved. In present, it is testing with safety.

1. 서론

한국형 고속전철은 선도기술개발 사업의 일환으로 2002년에 개발을 완료하여 한국고속철도건설공단이 관리하고 있는 고속신선의 시험선에서 주행시험 중에 있다. 현재 본선 시험은 300Km/h의 속도로 주행하고 있고 한국형 고속전철은 350Km/h의 최고 운행속도로 설계되어 있어 350Km/h에서의 동적 성능에 대한 판단을 예측할 필요성이 있다. 일반적으로 철도차량의 동적 성능은 안정성, 안전성, 승차감등이 있으며 이중 안정성은 본선 시운전 시험에서는 수행하기 어려우며 한국형 고속전철의 경우 본선시운전 시험 이전에 Roller Rig Test로 400Km/h의 속도에서도 안정성이 확보되는 것을 확인한 바 있다⁽¹⁾. 따라서 본선시운전 시험에서는 안전성과 승차감에 대한 성능분석을 가속도 계측결과를 이용하여 살펴보았다. 또한 본선시운전 시험에서 경험하였던 주행 시험중의 문제점 중에서 진동 분석을 통하여 알아볼 수 있는 찰상시의 가속도 현상과 고속에서의 불안정성이 발생하였을 때의 가속도 현상에 대하여 살펴보았다. 이러한 분석은 실제 발생하였던 상황에 대한 경험으로 일반적으로 경험하기 어렵기 때문에 본 학회를 통하여 공개하는 것이며 현재 이러한 문제점은 해결되어 일련의 시험이 안전하게 진행 중에 있다.

2. 주행시험 개요

시운전 시험노선은 Fig. 6과 같이 한국고속철도공단의 중부사무소에서 관리하고 있는 57Km 구간의 시험선 KP 96Km~136Km 구간에서 시험이 수행되고 있으며, 차량의 동적 특성을 계측하기 위하여 Fig. 6과 같이 가속도계를 열차의 차체와 대차 및 액슬박스에 장착하였다. 차체에는 Kisler사의 저주파용 Charge type 가속도계를 총 13개 장착하였으며, 대차와 차축 액슬박스에도

* 정희원, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

Kisler 사의 큰 영역의 가속도 계측이 가능한 ICP type 가속도계를 총 74개 장착하였다⁽²⁾. 가속도계에 의해 계측된 신호는 장착된 계측모듈(DAM1, 2, 3)에 설치된 신호 증폭기(Amplifier)와 A/D converter 및 필터를 통하여 디지털 데이터로 저장되며 저장을 위한 sampling frequency는 계측 모듈의 특성에 따라 500Hz와 1Kz로 구분하였고 디지털 필터는 200Hz를 사용하였다⁽³⁾⁽⁴⁾.

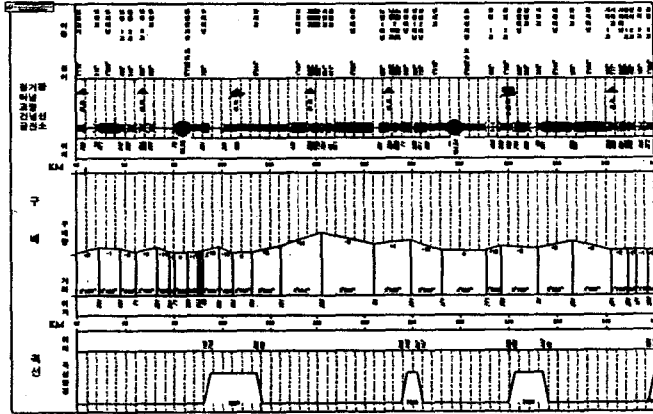


Fig. 1 Diagram of high speed test line in JungBu site

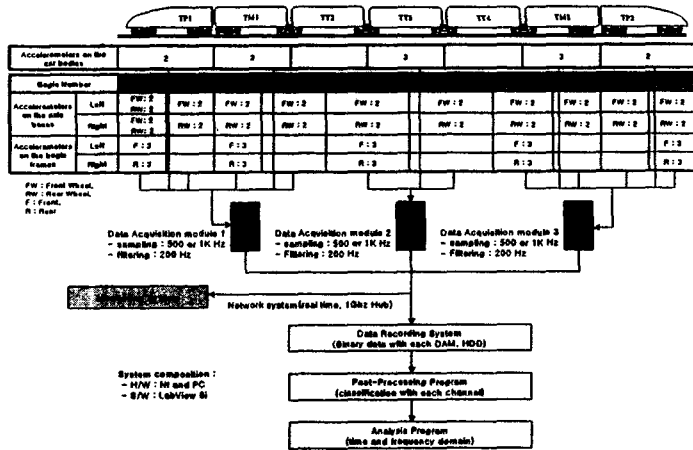


Fig. 2 The composition of the data acquisition systems for KHST dynamics

3. 가속도 계측을 통한 주행 동적 성능 예측

한국형 고속철도차량의 동적 주행성능은 안전성, 안정성, 승차감으로 표현될 수 있다. 여기서 안정성의 경우 극한속도인 임계속도까지 주행하여야 하기 때문에 실제 본선 시운전으로는 수행될 수 없으며, 대차 Roller Rig를 통하여 입증하였다⁽¹⁾. 주행안전성은 UIC518에 의한 시험방법이 있으나 이러한 방법은 횡, 래일 상호 작용력을 측정해야 하는 고가의 시험장비가 요구되며 본 연구에서 수행된 시험계측에서는 고려치 못하였다. 그러나 이러한 평가를 가속도 계측으로 대체할 수 있는 방법론이 경부 고속전철 도입으로 프랑스 알스톰사로부터 제시되었으며 실제로 고속시험 주행에서 속도향상에 대한 기준으로 적용되었다⁽⁵⁾. 따라서 본 논문에서는 이러한 방법론을 이용하여 대차와 차체의 주행안전성 평가를 수행하였으며 그 기준은 3~5Hz의 BPF(Band Pass Filter)를 통하여 1.5초 이상 지속된 횡 가속도 peak to peak값이 대차의 경우 6%, 차체의 경우는 2.5

1%이하로 규정하고 있다. 또한 승차감의 경우는 널리 사용되는 규격으로 UIC 513, ISO 2631등이 있으나^(6,7) 대부분 차체 가속도에 대한 rms(root mean square) 값을 적용하고 있어 차체의 상하 및 횡 방향에 대하여 적용하여 살펴보았다. 먼저 안전성에 대하여 살펴보면 시험주행한 가속도 측정결과를 차체와 대차에 대하여 일정구간의 평균 속도에 대한 최대값을 계산하여 속도에 대한 가속도 값으로 도시하면 Fig. 3 ~ 4와 같다.

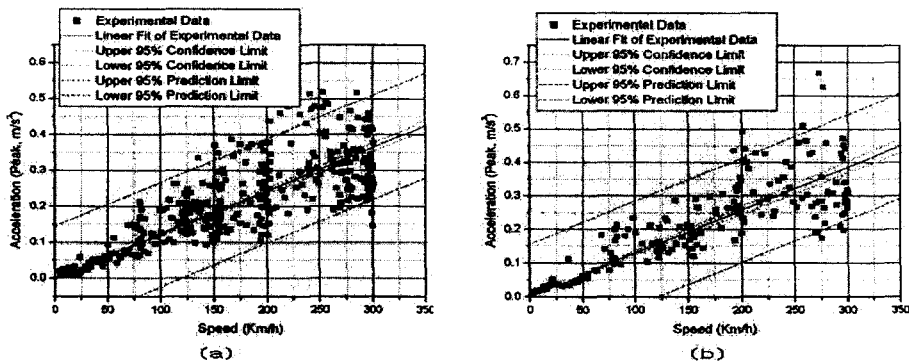


Fig. 3 Graph of speed vs. lateral peak acceleration
(a) articulated bogie(bt5), (b) power bogie(bm10)

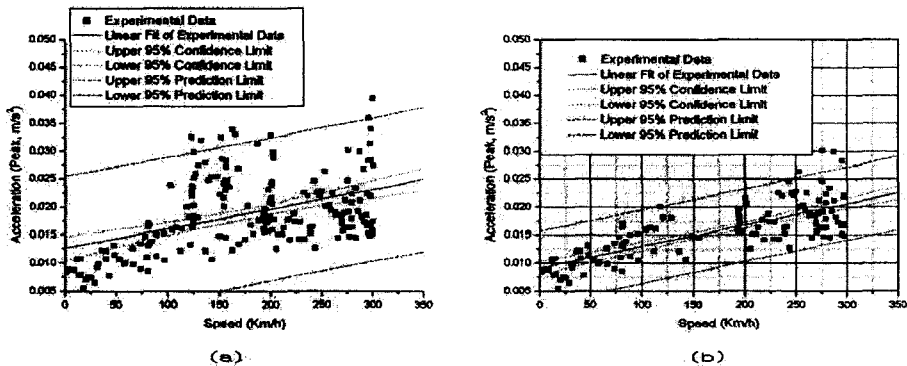
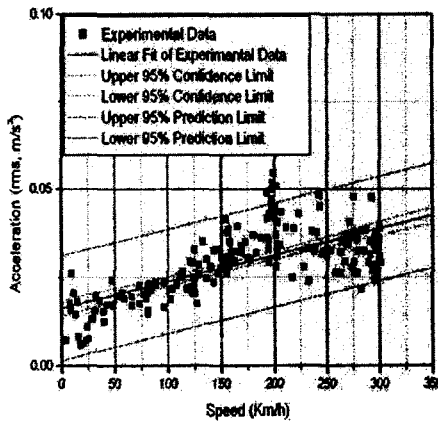
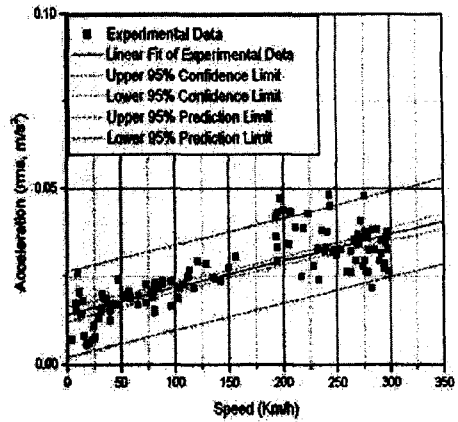


Fig. 4 Graph of speed vs. lateral peak acceleration for body(TT3)
(a) the total data, (b) the data excepted running on curve

여기서 예측된 데이터는 300Km/h까지의 속도이며 한국형 고속전철은 최고 운용속도가 350Km/h이기 때문에 선형방정식으로 적합시켜 표현하여 350Km/h까지 주행하였을 때의 값을 예측하여 보았다. 예측은 통계학적 방법으로 선형 적합방정식의 95% 신뢰성에 근간한 값과 95% 예측치로서 구분하였다. 대차의 경우 동력대차와 관철대차 2종류에 대하여 살펴보았으며 그 결과 300Km/h속도에서나 350Km/h 예측값이나 모두 1.0% 이하로 나타나고 있어 대차 안전성은 충분히 확보되는 것으로 나타나고 있다. 또한 차체의 경우를 살펴보기 위하여 차체 특성상 곡선부에 영향을 많이 받기 때문에 전체 데이터에 의한 적합선도와 적합 수준을 낮게 하는 곡선부 주행 데이터를 제외한 적합선도를 모두 구하여 표현하였으며 그 경우 0.05% 수준을 넘지 않는 것으로 나타나 역시 차체의 경우도 주행 안전성이 확보되는 것으로 나타났다. 또한 승차감의 경우 차체의 가속도 rms 값을 이용하여 속도에 대하여 상하 및 횡방향에 대하여 살펴보았으며 Fig. 5 및 6과 같다.



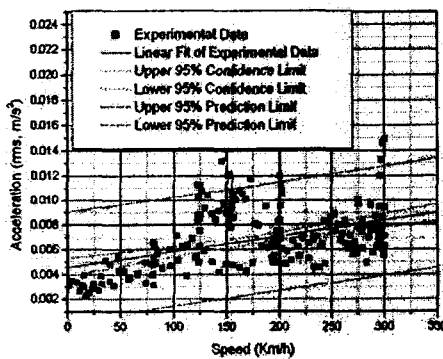
(a)



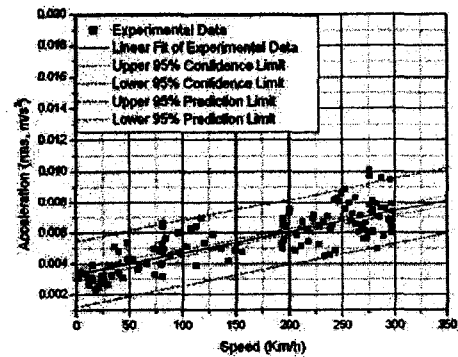
(b)

Fig. 5 Graph of speed vs. vertical rms acceleration for body(TT3)

(a) the total data, (b) the data excepted running on curve



(a)



(b)

Fig. 6 Graph of speed vs. lateral rms acceleration for body(TT3)

(a) the total data, (b) the data excepted running on curve

Fig. 5와 6에서 보듯이 속도에 대한 차체 rms 가속도를 계산하여 350Km/h 주행시의 승차감 수준을 예측하였으며 선형 적합식의 신뢰성을 살펴보기 위하여 곡선부 주행 데이터를 제외한 경우를 함께 도시하여 곡선부에서의 가속도 데이터 영향이 그리 크지 않지만 전체적으로는 크게 표현되고 있음을 예시하였다. 승차감의 경우 상하방향은 0.1% 수준을 넘지 않고 있으며 ISO 2631에 의해 환산된 가속도 rms 값 제한수준인 0.27% 이하라서 매우 안락함을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다. 횡방향의 경우도 0.02 이하로 0.183% 수준보다 매우 작아 동적 진동에 의한 승차감은 매우 양호한 수준으로 판단 될 수 있다.

4. 이상진동에 대한 가속도 계측 분석

본 연구에서는 한국형 고속전철 시운전 시험 중에 발생하였던 이상진동 즉 착상이 발생되었을 경우와 고속에서 불안정한 진동이 발생한 경우에 대한 계측결과와 이러한 현상이 발생되었을 경우 진동특성이 어떤 형

태를 보이는 가에 대하여 분석하고자 한다.

먼저 Fig. 7의 (a)에서와 같이 5번 대차의 2번째 차축(WS52)에서 찰상이 일어난 경우 Fig. 7의 (b)와 같은 상하 가속도 변화 계측결과를 볼 수 있다.

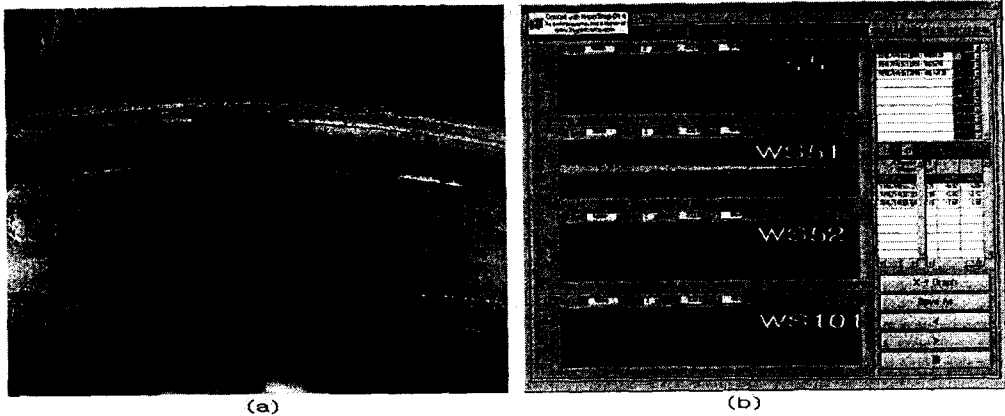
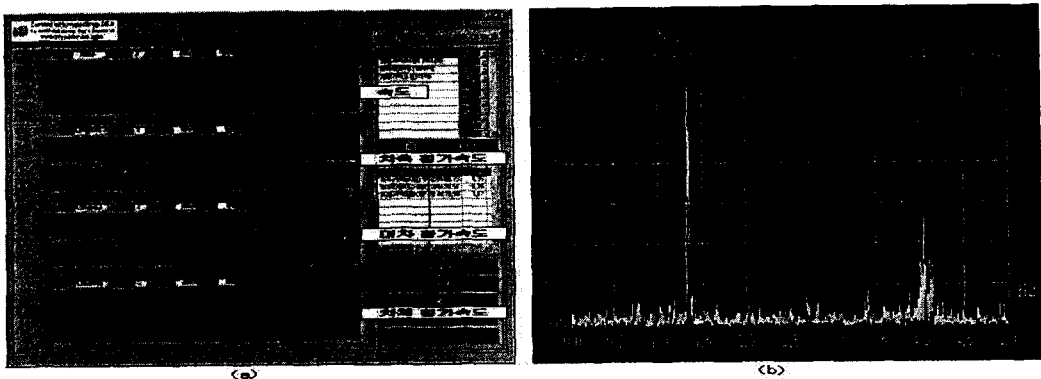


Fig. 7 An abrasion on wheel trade

(a) Photo, (b) vertical acceleration of wheel set

Fig. 7의 (b)에서 보듯이 찰상이 발생된 WS52 차축의 경우 정상 차축인 WS51과 WS101의 가속도 계측 결과와 다르게 휠의 1회전에 대한 순간 가속도 값이 속도에 따라 일정한 간격을 갖고 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 그 크기도 속도에 따라 다르게 나타나지만 전체적으로 정상 휠에서 계측된 값의 2배 이상을 연속적으로 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 찰상이 발생 유무는 계측 시스템상에서는 차축의 상하가속도 계측 결과로 확인이 가능할 것으로 판단된다.

다음으로 고속에서의 진동 불안정성을 보이는 경우에 대하여 살펴보면 한국형 고속전철 시운전 시험 중 고속에서 동력차의 이상진동이 발견되었으며 이러한 진동은 계측 시스템 상에서 Fig. 8의 (a)와 같이 속도 270Km/h에서 저 주파수의 진동이 크게 발생되어 250Km/h의 속도에서 감소하는 것을 차축, 대차 및 차체 횡 가속도로 알 수 있었으며 이에 대한 주파수 특성을 분석하면 Fig. 8의 (b), (c), (d)와 같이 1.34Hz에서 동일하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 진동은 실제 sway 진동으로 알려져 있으며, 현가장치의 특성과 휠과 레일의 접촉 특성에 나타나는 것으로 판단되며 한국형 고속전철 시험 시 댐퍼의 성능 특성을 조사한 결과 내구성에 문제점이 있어 전량 교체한 후 이에 대한 진동 문제를 해결할 수 있었다.



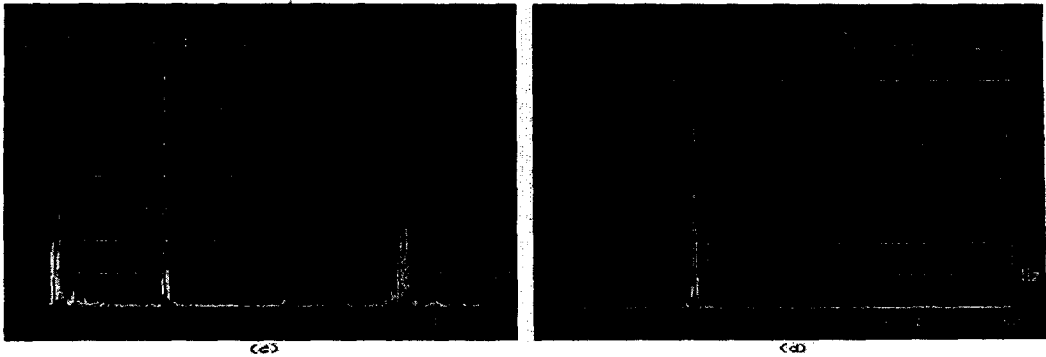


Fig. 8 Results of test and analysis data for the unstable condition of Power Car.

(a) Real acquisition data, (b) frequency analysis results for axle, (c) frequency analysis results for bogie, (d) frequency analysis results for car body

4. 결론

본 연구에서 다루었던 한국형 고속전철의 동특성 분석 내용을 종합하면 다음과 같다.

대차와 차체 가속도 계측을 통하여 주행 안전성과 승차감에 대한 350Km/h 속도에서의 수준 예측을 수행하였으며 전체적으로 적용 기준 이하의 값을 갖고 있는 것으로 예측되었다. 또한 지금까지 주행시험 중에 발생하였던 이상진동에 대한 2가지 경우 예찰 보였으며 찰상이 일난 경우 차축 상하방향 가속도의 변화가 일정한 주기를 갖고 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었으며, 고속에서의 주행 안정성에 문제가 발생한 경우 차축, 대차, 차체의 횡가속도에 동일한 주파수 대역의 저주파 성분이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 현상 규명을 기본으로 문제점을 보완하였으며 현재는 안전한 상태에서 주행시험을 진행중에 있다.

후기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고문헌

1. 김진태 외 2인, 2002, 주행 시험대에서의 고속전철 개발대차의 주행안정성 평가, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 835-844.
2. 박찬경 외 2인, "한국형 고속전철의 진동가속도 시험 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2003.
3. 김석원 외 4인, 2002, 고속전철 시운전 시험 및 평가용 측정시스템 개발(I)-하드웨어, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 169-173.
4. 김석원 외 4인, 2002, 고속전철 시운전 시험 및 평가용 측정시스템 개발(II)-소프트웨어, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 174-181.
5. ALSTOM TRANSPORT S.A., "Progressive Increase of Speed Test Procedure", 2000
6. ISO, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Part1: General Requirements, ISO Code 2631-1, 1997
7. UIC, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R, 1994