

한국형 고속전철의 주행시험과 이론해석 결과의 비교분석

Comparison between test and simulation results of vibration for Korean High Speed Train

박찬경* 김석원* 김영국* 목진용*
Chankyong Park Seogwon Kim Youngguk Kim Jinyong Mok

ABSTRACT

Korean High Speed Train (KHST) has been tested on high speed line in JungBu site since it was developed in 2002. The KHST figured 7 cars was modeled for dynamic simulation with Vampire program. and the data acquisition system was used to test successfully the on-line test for proving the dynamic performance of KHST. The comparison between test and simulation results for dynamic behavior of KHST was tried in this paper and it was very difficult because the environmental conditions and running conditions have an effect on the test results and these conditions are unable to be modeled for dynamic analysis. Also the parameters for data acquisition system for test are usually not same to simulation conditions. Therefor, in this paper the acceleration data after filtering with low pass filter below 1Hz were used to compare between test and simulation results because the low frequency range is useful to evaluate the dynamic performance for railway vehicle system, so as steady state curving acceleration. The results show that both are similar in low frequency range.

1. 서론

한국형 고속전철은 선도기술개발 사업의 일환으로 2002년에 개발을 완료하여 한국고속철도건설공단이 관리하고 있는 고속신선의 시험선에서 주행시험 중에 있다. 본 논문은 한국형 고속철도 차량에 대한 동역학 분야의 시험 장비 구성을 통하여 계측된 데이터를 이론 해석과 비교하는 데 그 목적이 있다. 철도차량의 동역학 해석이론은 여러 문헌에 많이 발표되어 왔으며(1,2), 현재는 다물체 동역학 이론에 근간한 상용 프로그램 또는 단독 프로그램으로 널리 활용하고 있다(3). 한국형 고속전철의 동역학 해석은 국내에서는 1998년에 처음으로 발표하였으며(4), 이후 고속전철 기술개발사업이 선도기술개발로 수행되면서 본격적인 연구가 가속화되었다(5,6). 고속철도차량은 현재 국내에서는 KTX가 본격적인 상업운전이 시작될 예정에 있으며 KTX의 기술도입으로 축적된 기술을 기반으로 한국형 고속전철 또한 개발에 성공하여 현재 시운전 시험 중에 있다. 그러나 이에 대한 연구는 이론해석 분야에서만 활발하게 진행되어 결과물이 발표되고 있어 실제 주행결과와의 상호 비교나 설계 시에 적용하였던 이론들의 검증은 아직 완벽하게 수행되지 않은 상태이다. 따라서 본 논문은 이에 대한 고찰의 일환으로 한국형 고속전철의 300Km/h 속도와 그 이하 속도에서 실시한 시운전 시험 계측 결과와 이론해석 결과를 곡선구간 통과 시에 정상 횡 가속도를 이용하여 비교하고 이에 대한 문제점을 고찰하였으며 향후 이에 대한 보완대책 수립의 기초를 마련하고자 한다.

*. 정희원, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

2. 이론해석 모델링 및 주행시험 개요

2.1 이론해석 모델링

철도차량의 동적거동 해석은 영국의 AEA Technology사의 철도차량 전용 해석프로그램인 Vampire를 사용하여 수행하였다.(7) 해석을 위한 시스템 편성모델과 좌표계는 Fig. 1과 같다. 차량시스템 편성모델은 한국형 고속전철 시제차량 편성인 동력차 + 동력객차 + 객차(3대) + 동력객차 + 동력차로 구성되었으며, 대차는 동력차용 동력대차 (PMB, Power Motor Bogie) 4대, 동력객차용 동력대차 (MTB, Motorized Trailer Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차 (ATB, Articulated Trailer Bogie) 4대로 구성되어져 있다. Fig. 2는 이러한 시스템 편성모델을 질량요소와 탄성요소의 특성치를 이용하여 Vampire S/W로 표현한 것이며 총 자유도는 242 DOF이다. 휠은 현재 한국형 고속철도 시제차량에 장착되어 시운전 시험을 수행하고 있는 휠을 철도차량 전용 휠 프로파일 게이지를 이용하여 계측한 데이터를 사용하였으며 Fig. 3과 같다. 레일은 경부고속전철용 신선에 적용하고 있는 UIC 60 레일에 따라 Fig. 4와 같은 프로파일로 모델링 하였다. 또한 주행 궤도 모델은 Fig. 5와 같이 시운전 시험 노선의 궤도 불규칙을 모델링 하여 사용하였다.

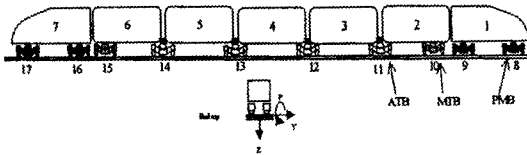


Fig. 1 Train model and axis system

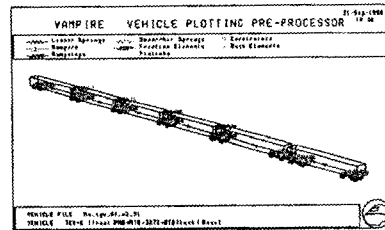


Fig. 2 Vampire Train Model

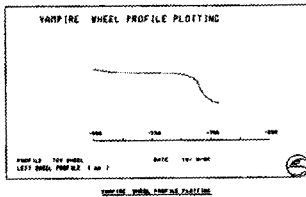


Fig. 3 Wheel Profile Model

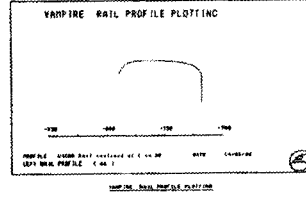


Fig. 4 Rail Profile Model

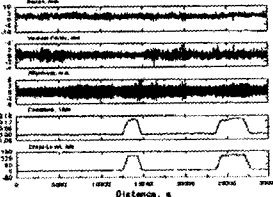


Fig. 5 Track irregularity model

2. 시험개요 및 시험계측시스템 구성

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 엑셀박스에 장착하였다. 차체에는 Kisler사의 저주파용 Charge type 가속도계를 총 13개 장착하였으며, 대차와 차축 엑셀박스에도 Kisler 사의 큰 영역의 가속도 계측이 가능한 ICP type 가속도계를 총 74개 장착하였다. 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.

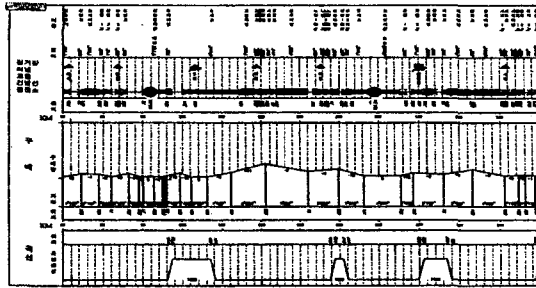


Fig. 6 Diagram of high speed test line in JungBu site

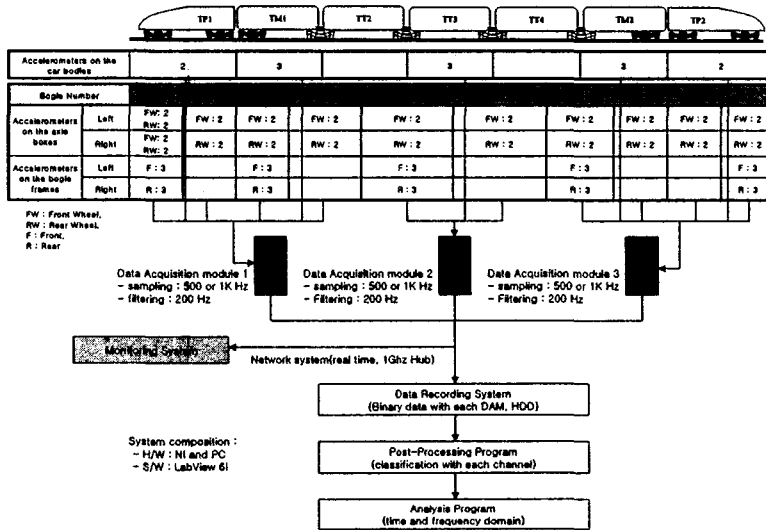


Fig. 7 The composition of the data acquisition systems for KHST dynamics

3. 시험결과 및 분석

본선 시운전 시험은 2003년 8월 23일 현재 KP 96 ~ 136 Km 지점을 왕복 운행하고 있으며 최고 운행속도는 300 Km/h 이고 곡선 반경 7000m 구간 3 부분을 포함하고 있다. 시운전 구간 주행 중에 측정된 계측 결과와 이론해석을 비교하기 위하여 각 계측 구간에서 곡선부 통과속도를 일치시켜 주행 시뮬레이션을 수행하였으며 차체와 대차의 정상 횡가속도를 비교하였다. 비교구간은 KP 118~121 구간(case1)과 KP 129~134 구간(case2)에 있는 곡선부를 선택하였으며 이 구간에서 7000R을 포함하고 있어 곡선구간에서의 속도에 따른 횡가속도의 변화를 파악할 수 있다. 또한 실 계측값의 경우 대부분 500Hz~1kHz Sampling과 200Hz Low pass Filter를 사용하여 계측하고 있어 이론해석의 적분 time step인 0.1kHz와는 차이를 보이고 있고 가속도계의 특성치 및 계측 오차 등의 영향, 궤도 불규칙 모델과 실제 궤도 상태의 오차 등에 의해 가공되지 않은 데이터로는 비교하기가 매우 어렵다. 따라서 결과비교를 위해서는 정상 횡가속도의 경우 1Hz 이하의 데이터를 이용하여 비교 분석하였다. 비교분석에 사용된 가속도계는 TT3의 차체와 TT3와 연결된 5번째의 대차 횡가속도를 이용하였다. 주행은 300Km/h로 곡선부 통과를 한 가장 최근에 시험한 주행 시험 데이터를 이용하였고 사용된 가속도계의 특성은 저주파용 가속도계를 사용하였다. 우선 약 300Km/h~250Km/h의 속도로 곡선부를 통과한 case1과 약 200Km/h~100Km/h의 속도로 곡선부를 통과한 case2의 경우에 있어서 속도는 Fig.8과 같이 실제 주행시험 시의 속도와 이론해석 속도를 유사하게 일치시켰으며, 곡선부에서 가속도 계측과 이론해석 값의 비교는 Fig. 3.9~3.12와 같다.

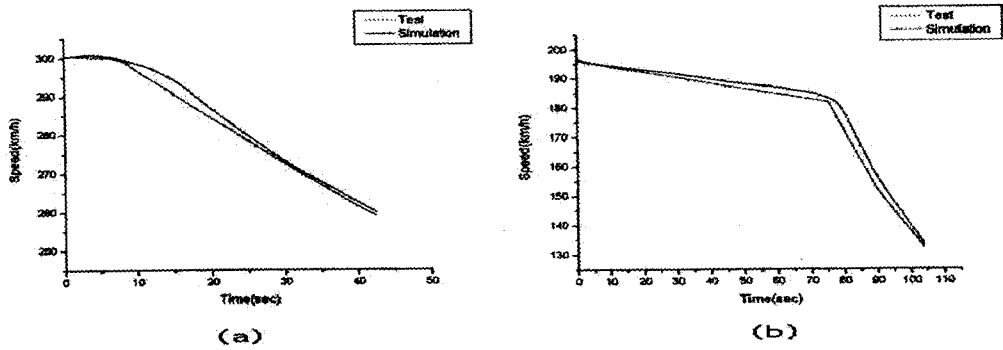


Fig. 8 Speed profile (a) case 1, (b) case2

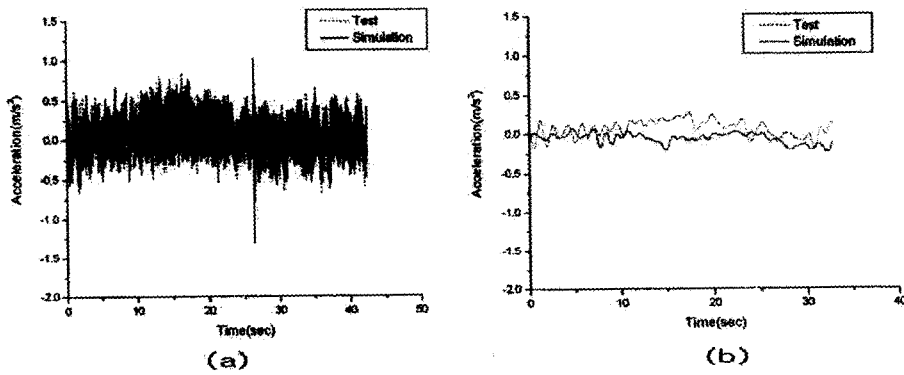


Fig. 9 Comparison between test and simulation results for TT3 body lateral acceleration about case 2 (a) Original data before filtering (b) modified data after filtering(1Hz LPF)

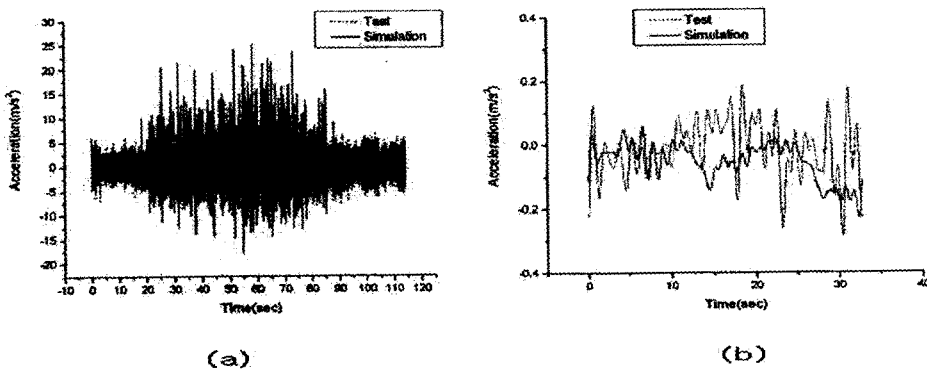


Fig. 10 Comparison between test and simulation results for the 5th bogie lateral acceleration about case 1. (a) Original data before filtering (b) modified data after filtering(1Hz LPF)

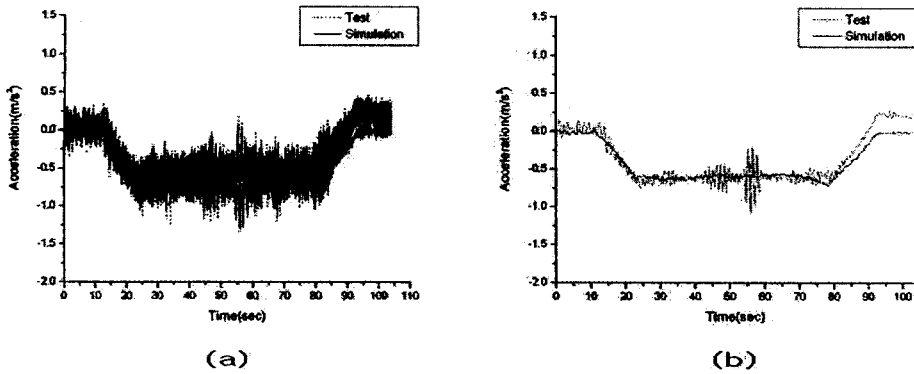


Fig. 11 Comparison between test and simulation results for TT3 body lateral acceleration about case 4. (a) Original data before filtering (b) modified data after filtering(1Hz LPF)

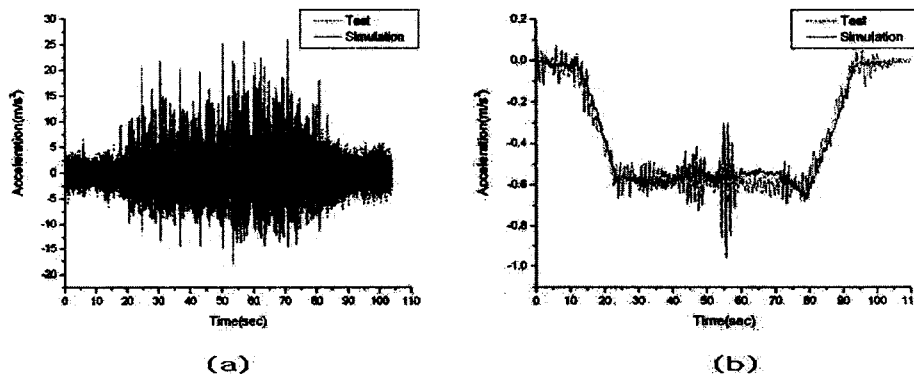


Fig. 12 Comparison between test and simulation results for the 5th bogie lateral acceleration about case 4. (a) Original data before filtering (b) modified data after filtering(1Hz LPF)

Fig. 3.9 ~3.12의 Case 1 및 Case 2에서 보듯이 실제 주행시험을 통한 가속도 값이 이론해석의 경우보다 변동이 크게 나타나고 있지만, 1Hz Low Pass Filter에서 알 수 있듯이 전체적인 정상 횡가속도 부분은 매우 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 1Hz Filtering을 한 후 실제 계측데이터와 이론해석결과가 차이나는 순간적인 일부 구간은 궤도 부설조건에서 기인한 KP 118~121 구간에서 토공변형구간의 존재와 KP 129 ~134 구간에서의 신축이음매 구간이 존재하고 있기 때문이며, 실제 계측데이터에서는 큰 값을 나타내고 있지만 이론해석에서는 이러한 특성 반영이 궤도 불규칙 모델에 반영되어 있지 않기 때문에 동일한 결과를 나타내고 있지는 않고 있다. 또한, 대차 횡가속도의 경우 곡선부 통과 시 이론해석 결과에서 나타나고 있는 높은 주파수대역의 peak 값들은 해석모델상에서 휠과 레일의 마찰이 매우 이상적인 가정으로 설정되어 있어 마찰력의 보전성이 실제보다는 매우 약하여 순간 가속도가 크게 발생하는 현상으로 판단되며 대부분의 철도 규격에서 사용되는 유효한 주파수대역이 30Hz 미만임을 감안할 때 이러한 현상은 실제 나타나는

현상으로는 볼 수 없는 것으로 판단된다.

상기의 이러한 근본적인 불일치를 기인하는 조건을 배제할 때 Case 2의 경우 현재 시운전 구간의 궤도 부설이 300Km/h에서 균형가속도를 유지토록 설계되어 있어 300Km/h이하의 속도에서 나타나고 있는 곡선부 통과 횡가속도의 변화는 이론해석과 실제 시험 데이터가 매우 잘 일치하는 것을 보이고 있으며 속도 감소에 따라 나타나는 변화도 Case 2의 Fig. 3.12의 (b)에서 70 ~ 80초 구간에 나타나는 가속도 변화 현상을 보면 매우 흡사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 균형 속도 부근으로 주행한 Case 1의 경우 Case2에서 나타나는 곡선부 횡가속도의 뚜렷한 변화가 없는 것은 균형속도에서 나타날 수 있는 결과인 횡가속도 변화가 없는 전형적 형태를 보여주고 있으며 이론해석과 시험결과의 일치성을 나타내고 있다.

결과적으로 고주파 성분의 경우는 시험 결과와 이론해석의 결과가 다소 차이를 보이고 있으나 실제 설계나 평가기준에 적용하는 주파수 대역은 아니기 때문에 큰 문제점을 갖고 있는 것은 아니라 판단되며, 본 논문에서는 1Hz 이하의 정상 횡 가속도로 이론해석과 시험계측값을 판단하였으며 유사한 결과를 나타내는 것으로 판단하였다.

4. 결론

본 연구에서 다루었던 이론해석과 시험결과의 비교분석을 종합하면 다음과 같다.

한국형 고속전철의 진동 가속도 계측 결과를 이용하여 시험주행 속도에 따른 이론해석을 수행한 결과 곡선부 통과시 저주파인 정상 횡가속도는 매우 유사한 일치를 보이고 있으나 고주파 성분은 차체의 경우 시험결과가 다소 크게 나타나고 있으며, 대차의 경우는 이론해석결과가 다소 크게 나타나고 있다. 이에 대한 불일치성은 향후 계속적인 연구가 진행되어야 하며 특히 신축이음매나 분기기등과 같이 궤도의 특수한 형태에 대한 궤도 모델이 이론해석에 요구되며 휠과 레일의 접촉특성에 대한 좀더 실질적인 적용이 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고문헌

1. Vijay K., Grag, Rao V. Dukkupati, 1984, Dynamics of Railway Vehicle System, Academic Press.
2. Rao V. Dukkupati, Joseph R. Amyot, 1988, Computer-Aided Simulation in Railway Dynamics, Marcel Dekker Inc.
3. E.H. Law and N.K. Cooperrider, 1974, A Survey of railway vehicle dynamics research, J. D 수. Sys., Meas. Control, Ser.G, pp 132-146
4. 김진태 외 2인, 2002, 주행 시험대에서의 고속전철 개발대차의 주행안정성 평가, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 835-844.
5. 김석원 외 4인, 2002, 고속전철 시운전 시험 및 평가용 측정시스템 개발(I)-하드웨어, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 169-173.
6. 김석원 외 4인, 2002, 고속전철 시운전 시험 및 평가용 측정시스템 개발(II)-소프트웨어, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 174-181.