

## 한국형 고속전철의 주행진동 특성에 관한 연구

### A Study on the Dynamic Characteristics on the Test Line for Korean High Speed Train

박찬경\* · 김영국\*\* · 김석원\*\*

C. K. Park, Y. G. Kim and S. W. Kim

Key Words : Railway Dynamics(철도차량 동역학), Track Irregularity(궤도불규칙도), Korean High Speed Train(한국형 고속전철차량), Suspension(현가장치), High speed test line(고속주행시험선)

#### ABSTRACT

Korean High Speed Train(KHST) has been tested on the high speed test line in Osung site of Korea High Speed Rail Construction Authority (KHRC), since it was developed as G7 Project Plan in 2002. This paper introduces the dynamic test devices in KHST and shows the comparison between the results of test and theoretical computing results which derive from the new model for KHST dynamic behavior.

Previous computer simulation model for KHST was developed to review whether the vehicle system was satisfied with the dynamic performance requirements during the design procedure. But it should be applied the results of the parts test for suspension elements in order to compare between the results of computation and real test. Using VAMPIRE Program made by AEA Technology in UK, the new model also was modified. This paper shows that the static wheel loads calculated from new model is similar to test results. For test on high speed line, we prepared the test devices for evaluating the dynamic performances, which was consisted of the accelerometers(based on Kisler Co.) and the data acquisition systems (based on National instrument Co.), and test program coded by LabView 6i program. These test devices and programs are flexible to extension the channels for adding sensors and connect to the ethernet network. The acceleration of car bodies, bogie frames and axle boxes were compared between the results of computation and test at 150km/h. This paper shows that the results of test were high in high frequency band range but similar in low frequency band range. It might be considered that these differences were caused by the test which did not performed at constant speed for comparison analysis. Also, It will be able to understand the differences and make better results through a lot of tests planned in future.

#### 1. 서론

한국형 고속전철은 선도기술개발 사업의 일환으로 2002년에 개발을 완료하여 한국고속철도건설공단이 관리하고 있는 고속신선의 시험선에서 주행시험 중에 있다. 본 논문은 한국형 고속철도차량에 대한 동역학 분야의 시험 장비구성에 대하여 전반적으로 설명하고 이를 통하여 계측된 데이터를 이론 해석과 비교하는

데 그 목적이 있다. 아울러 본 논문의 내용은 일련의 시험이 계속하여 수행되고 있기 때문에 학술적 논문으로서의 발표목적 보다는 한국형 고속전철의 동적 주행시험이 어떻게 수행되고 있고 현재까지의 결과가 어떤 수준인가를 설명하는데 그 목적이 있다는 것을 서언에 미리 밝혀 두고자 한다.

철도차량의 동역학 해석이론은 여러 문헌에 많이 발표되어 왔으며<sup>(1,2)</sup>, 현재는 다물체 동역학 이론에 근간한 상용 프로그램 또는 단독 프로그램으로 널리 활용하고 있다<sup>(3)</sup>.

한국형 고속전철의 동역학 해석은 국내에서는 1998년에 처음으로 발표하였으며<sup>(4)</sup>, 이후 고속전철 기술개발사업이 선도기술개발로 수행되면서 본격적인 연구가 가속화되었다<sup>(5,6)</sup>. 고속철도차량은 현재 국내에서는

\* 정회원, 책임저자, 한국철도기술연구원  
E-mail : ckpark@krri.re.kr  
Tel : (031)460-5613, Fax : (031) 460-5649

\*\* 한국철도기술연구원

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 고찰로서 설계 시에 반영하고 검토되었던 결과들을 실제 주행상태에서의 결과와 비교하고 향후 이에 대한 보완대책 수립의 기초를 마련하고자 한다. 또한 본 논문에서는 종합 시운전시험을 통한 열차 편성 전체의 동적 특성을 예측하기 위하여 효율적인 네트워크를 이용한 시험장비를 구상하였고 이를 소개하며, 이를 이용하여 예측된 결과를 이론해석결과와 비교하였다.

## 2. 이론해석 모델링 및 주행시험 개요

### 2.1 이론해석 모델링

이전에 발표되었던 한국형 고속전철 차량의 동역학적 모델링은 설계 시 사용하였던 기준 특성을 이용하여 성능예측을 수행하였으나, 본 연구는 실제 한국형 고속전철을 고속 시운전 구간에서의 시험결과와 비교하기 위하여 실제 설계기준 특성과는 다소 차이가 있는 각 현수장치의 단품 시험결과를 토대로 재구성하여 모델링을 수정보완 하였다. 또한 고속전철의 휠 프로파일도 전용 측정기를 이용하여 예측한 데이터로 모델링을 보완하였으며 자유도에 의하여 제한을 받았던 차량 편성 모델도 6량 모델에서 실제 시제차량 편성인 7량 모델로 보완하였다. 철도차량의 동적거동 해석은 영국의 AEA Technology사의 철도차량 전용 해석프로그램인 Vampire를 사용하여 수행하였다.<sup>(7)</sup> 해석을 위한 시스템 편성모델과 좌표계는 Fig. 1과 같다. 차량시스템 편성모델은 동력차 + 동력객차 + 객차(3대) + 동력 객차 + 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 편성 모델을 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 예측한 데이터를 사용하였으며 Fig. 3과 같다.

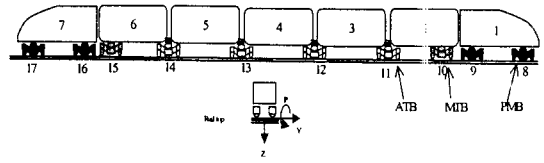


Fig. 1 Train model and axis system

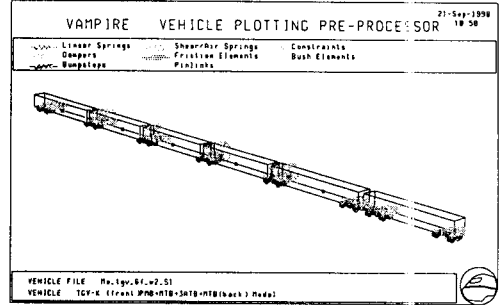


Fig. 2 Vampire Train Model

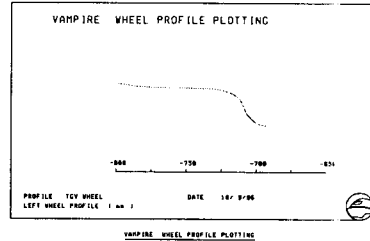


Fig. 3 Wheel Profile Model

레일은 경부고속전철용 신선에 적용하고 있는 UIC 60 레일에 따라 Fig. 4와 같은 프로파일로 모델링을 하였다.

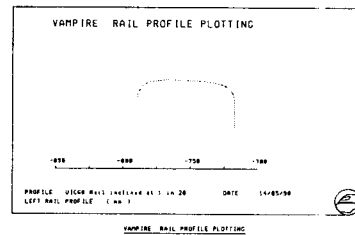


Fig. 4 Rail Profile Model

이렇게 구성된 모델에서 계산된 예측을 실제 차량에서 예측한 예측과 비교하면 Table 1과 같이 유사하게 나타나고 있다. 또한 본선 시운전 구간의 궤도 불규칙 모델은 궤도 검측차에 의한 예측 데이터를 이용하여 해석용 데이터로 변환하여 사용하였으며 Fig. 5와 같다. 여기서 곡선도는 7000m의 곡선 반경이 2곳이 존재하며 전체적으로 실제 부설 설계 기준을 만족하는 것으로 모델링이 되어 있음을 알 수 있다.

Table 1 Table of the wheel static loads of the calculation values and the testing values

No. of Axle	Calculation Values (Ton)	Testing Values (Ton)
1	16.6732	16.7350
2	16.6871	16.7600
3	16.3385	16.2750
4	16.3523	16.3650
5	15.5106	15.6350
6	15.4938	15.5175
7	15.0359	15.1240
8	15.0459	15.0650
9	15.8388	15.8375
10	15.7033	15.7925
11	14.9218	14.8130
12	15.0052	15.0345
13	15.1994	15.3065
14	15.2207	15.1335
15	16.5203	16.3915
16	16.5561	16.6520
17	16.3524	16.3450
18	16.3384	16.4100
19	16.6871	16.7050
20	16.6732	16.7650

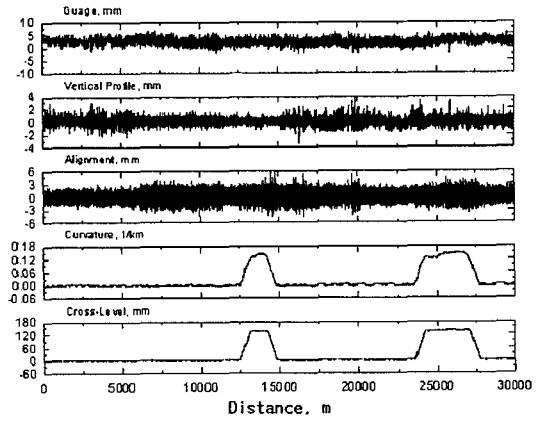



Fig. 5 Track irregularity model

### 2.2 계측시스템 구성 및 시운전 시험 개요

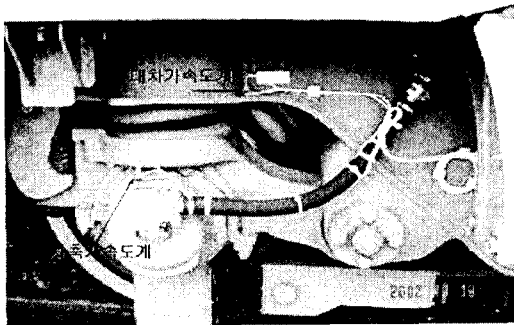
한국형 고속전철 차량의 시운전 시험 시 차량의 동적 특성을 계측하기 위하여 Fig. 6과 같이 가속도계를 열차의 차체와 대차 및 엑셀박스에 장착하였다.

차체에는 Kistler사의 저주파용 Charge type 가속도계를 총 13개 장착하였으며 대차와 차축 엑셀박스에도 Kistler 사의 큰 영역의 가속도 계측이 가능한 ICP type 가속도계를 총 74개를 장착하였다.

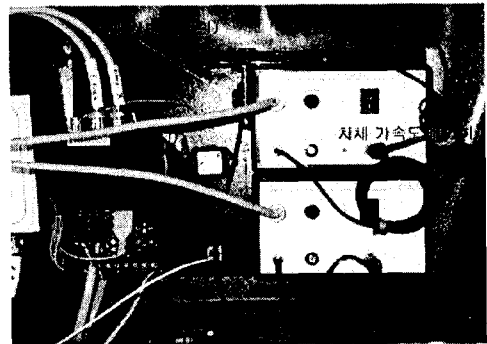


Accelerometers on the car bodies		2		3		3		3		2	
Bogie Number		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Accelerometers on the axle boxes	Left	FW: 2 RW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2
	Right	FW: 2 RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2
Accelerometers on the bogie frames	Left	F: 3		F: 3		F: 3		F: 3		F: 3	
	Right	R: 3		R: 3		R: 3		R: 3		R: 3	

FW : Front Wheel, RW : Rear Wheel, F : Front, R : Rear



a. Accelerometers on the Axle Boxes and Bogie Frames



b. Accelerometers on the Car Bodies

Fig. 6 Locations of the accelerometers mounted on the test train.

데이터 계측 및 저장은 Fig. 7과 같이 계측의 유연성이 높은 NI(National Instrument)사의 PXI 장비를 기반으로 구성하였으며, 사용된 프로그램은 Fig. 8과 같이 LabView 6i를 기반으로 자체 개발하여 사용하였다.

구성된 장비는 계측 효율성을 증대하기 위하여 7량 시제차량의 전,후 동력객차와 중간 객차에 장착하여 분산된 가속도계 장착지점으로부터 근접 계측토록 하여 노이즈를 최소화하도록 하였다.

시운전 시험은 고속철도건설공단에서 부설한 경부 고속철도 고속신선의 시험구간에서 수행하였으며 시험주행은 이종 약 30Km 구간에서 수행되었다.

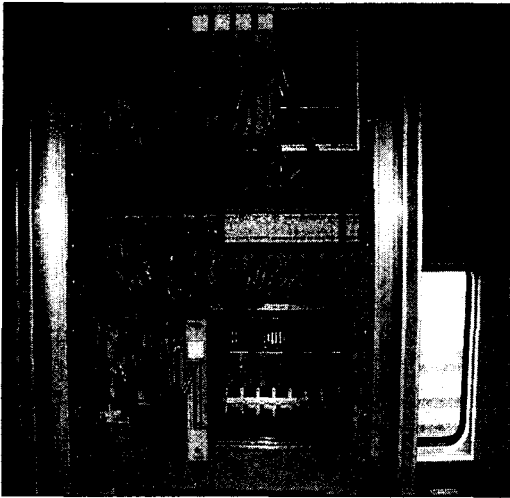


Fig. 7 Data Acquisition system (based NI PXI system)

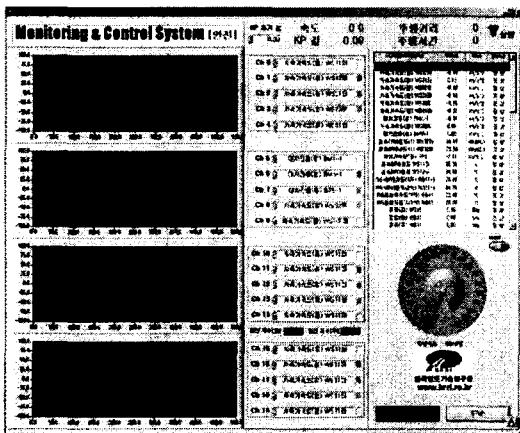


Fig. 8 Data Acquisition Program (based LabView 6i)

### 3. 이론해석과 시험결과 비교

2002년 10월 20일 현재 KP 110 ~ 128 Km 지점을 왕복 운행하고 있으며 최고 운행속도는 150 Km/h 이고 곡선 반경 7000m 구간을 한 부분을 포함하고 있다.

시운전 구간 주행 중에 측정된 계측 결과와 이론해석을 비교하기 위하여 각 계측 구간에서 150Km/h의 속도로 일정속도 주행된 구간인 7Km에서 가속도 결과와 해석된 결과를 비교하였다.

비교구간에는 4.5 ~ 7Km 구간에서 7000R을 포함하고 있어 곡선구간과 직선구간에서의 비교를 동시에 할 수 있다. 또한 실 계측값의 경우 대부분 500Hz Sampling과 200Hz Low pass Filter를 사용하고 있어 이론해석과 차이를 보이고 있으며, 성능비교를 위해서는 차체의 경우 10Hz 이하의 가속도가 유효하고, 대차 및 차축의 경우는 1 ~ 30Hz 이하의 값이 유효하게 사용되므로 각 비교 그래프에서는 실 계측 및 해석 비교 그래프와 Filter 후 그래프를 각각 도시하여 분석에 사용하였다. 차체가속도의 경우는 예로서 중간객차(TT3)의 경우를 예로 살펴보면 Fig.9 및 10과 같다.

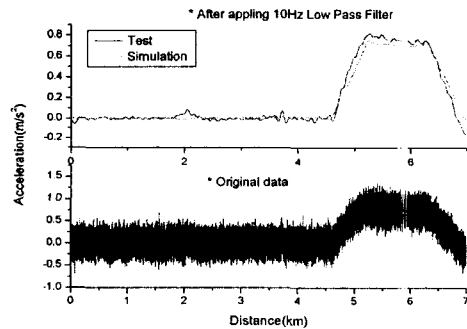


Fig. 9 Lateral acceleration of the car body (TT3)

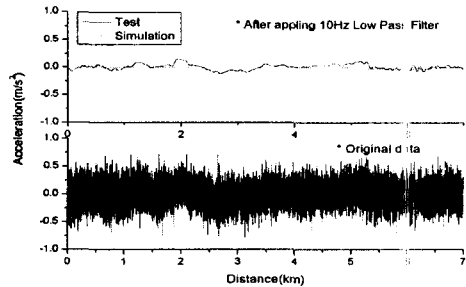


Fig. 10 Vertical acceleration of the car body (TT3)

대차 프레임 가속도의 경우는 예로서 전위 동력궤차 대차를 예로서 살펴보면 좌우방향의 경우 Fig. 11, 상하방향의 경우는 Fig. 12와 같다.

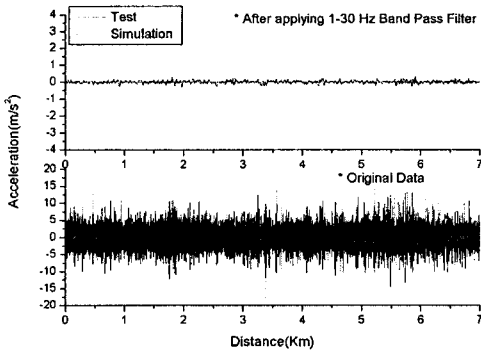


Fig 11 Lateral acceleration of the bogie frame (BM3)

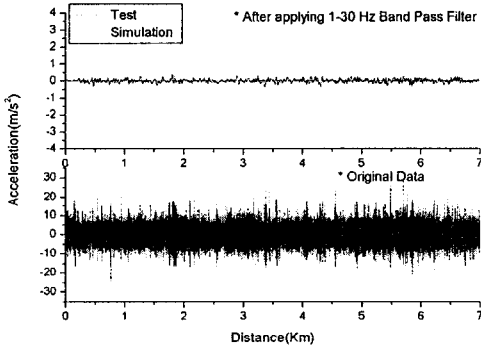


Fig. 12 Vertical acceleration of the bogie frame (BM3)

엑셀박스 가속도의 경우는 예로서 전위 3번째 차축을 예로서 살펴보면 좌우방향의 경우 Fig. 13, 상하방향의 경우는 Fig. 14와 같다.

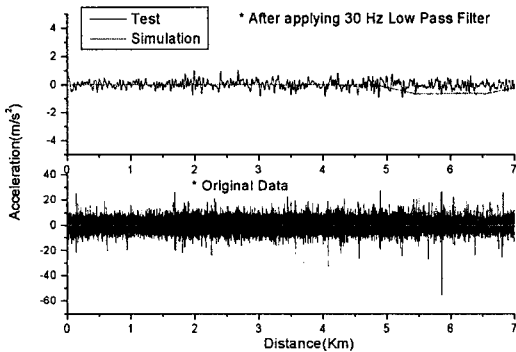


Fig. 13 Lateral acceleration of the Axle box (WS3)

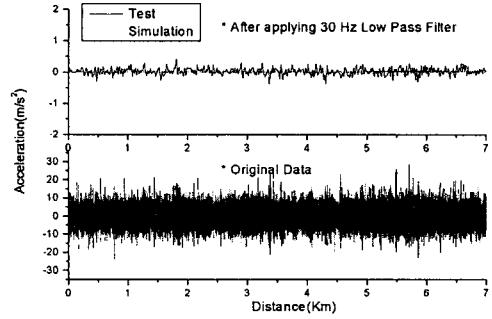


Fig. 14 Vertical acceleration of the Axle box (WS3)

Fig. 9 및 10에서 차체가속도의 경우 Filtering 전의 해석 및 계측 데이터는 전체적으로 평균성분은 일정하게 유사한 값을 유지하고 있으나 분산성분은 계측값이 크게 나타나고 있다. 특히 횡 가속도의 경우 곡선부위에서 발생하는 캔트 및 원심가속도에 의한 영향이 매우 유사하게 나타나고 있는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 11 및 12의 대차가속도는 전체적인 크기로 판단 시 직선구간에서는 해석값 보다 계측값이 크게 나타나고 있다. 곡선구간에서는 평균성분의 경우 이론 해석에서는 횡가속도가 영향을 받고 있으나 계측값에서는 영향이 없게 나타나고 있다. 이는 차체성분에서 나타나고 있는 횡가속도의 변화가 대차부에서 나타나지 않는 경우로 향후 계속하여 속도증가에 따른 영향을 분석해야 할 것으로 판단된다. 동력궤차 대차인 BM3의 경우 상하방향 가속도는 실제계측값과 이론해석값이 매우 유사하게 나타나고 있다. Fig. 4.13 및 14의 차축 가속도는 대차 가속도에서 살펴본 바와 같이 전체적으로 계측값이 이론해석값보다 크게 나타나고 있는 경향을 보이고 있으며 WS31의 상하 가속도의 경우는 비교적 일치하는 것으로 나타나고 있다.

현재 시운전 시험은 계속하여 진행되고 있으며 본 보고서에서 비교된 내용은 단지 한가지 속도대역에서 비교하였으며 향후 속도증가에 따라 계속하여 분석 비교를 수행할 예정에 있다. 또한 시운전 시험 환경이 이론해석과 비교를 위해서는 정속이 요구되나 현 시운전 시험 환경상 이를 유지하기가 매우 어려우며 이에 대한 영향도 고려되어야 할 것이다.

따라서 이론해석과 시운전 시험의 계측값과의 비교는 많은 데이터 수집후에 정확한 결과를 도출할 수 있으며, 이를 통하여 실제 이론해석의 보정계수를 추정할 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

이상의 결과를 통해 본 연구는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 한국형 고속전철의 현가장치 단품시험과 차량 실제 계측 데이터를 이용하여 시제차량 편성 전체에 대한 동적 모델링을 완성하였다.
- 2) 네트워크 기반의 효율적인 종합 시운전 계측 시스템을 구성하여 동적 특성에 대한 실제 계측을 수행하였다.
- 3) 국내에서는 처음으로 고속전철 차량의 동적 이론해석 결과와 실제 주행 계측결과를 비교 분석하였으며, 향후 이에 대한 데이터 축적과 주행 시험의 정교화를 통하여 좀더 정확한 비교 시험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 고속철도 기술개발 사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Vijay K., Grag, Rao V. Dukkipati, 1984. Dynamics of Railway Vehicle System, Academic Press.
- (2) Rao V. Dukkipati, 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. D수. Sys., Meas. Control, Ser.G, pp 132-146
- (4) 박찬경 외 3인, 1998, Vampire를 이용한 경부고속철도 차량의 동적 안정성 해석, 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집, pp510 - 516
- (5) 박찬경 외 3인, 2002, 반응표면 모델을 이용한 한국형 고속전철 현가장치의 효율적인 최적설계, 한국소음진동공학회논문집 제 12권 제6호, pp461-468
- (6) 김영국 외 3인, 2001, 바람이 고속전철의 동적 안전성에 미치는 영향 분석, 한국소음진동공학회논문집 제 11권 제 8호, pp349-456
- (7) BRR, 1998, VAMPIRE Users Manual.