

고속철도차량의 가속도 값을 이용한 차량 동특성 분석

Dynamic analysis for High-speed train using acceleration value

김영모* 최성훈** 김기환** 박태원***
Kim, Young-Mo Choi, Sung-Hun Kim, Ki-Hwan Park, Tae-Won

ABSTRACT

Adopting articulated bogie system, the HSR350x and KTX have similar physical mechanical characteristic, but they show different dynamic characteristics due to different position of suspensions and those physical properties. The low level vibration frequency which effects on the ride comfort of passengers and the high level vibration frequency which is related to noise of vehicle have been measured by accelerometers mounted on Wheel sets, Bogies and Car bodies to analysis the dynamic characteristics of the High-Speed Trains. The KTX number 36 is utilized to measure the lateral and vertical acceleration value of car body, and total measurement system of HSR350x have been used to acquire acceleration data. The sampling frequency of data is 500Hz generally, but the Car body at TT2 of HSR350 has 1000Hz exceptionally.

1. 서론

KTX와 한국형고속열차는 관절형 대차 방식으로 여러 물리 기계적 유사성을 보이지만 현가장치와 댐퍼의 위치 및 물성치가 다르므로 인해 다른 주행 동특성을 보인다. 두 고속철도차량의 차량 주행특성을 비교 분석하기 위한 방법으로 차체, 대차, 차축에 가속도계를 부착하여 승객의 승차감에 직접적인 영향을 끼치는 저주파 영역에서 차량이 고속영역 운행 시 발생하는 차량의 진동을 분석하여 고속철도 차량의 진동 특성을 밝히고자 한다. KTX 36호 차량에 가속도계를 설치하여 상하·횡 방향의 가속도 데이터를 측정하였으며 한국형 고속열차에서는 종합 계측 시스템을 이용하여 차체, 대차, 차축의 가속도 데이터를 얻었다. 두 진동 데이터는 500Hz Sampling frequency를 갖으며 특실인 TT2 차체의 데이터만 1000Hz Sampling frequency를 갖는다. 차량의 저주파 영역의 시험절차 및 분석방법론은 일반적으로 국제철도연맹에서 제정한 UIC518[1]에 적용하여 살펴보았다. UIC518 OR에 명시된 안정성과 주행거동에 관한 기준 중 주행거동에 대해 평가하였다. 한국형 고속열차에 관한 주행거동 특성 분석은 주행 속도, Kilo Post(KP), 가속도 값을 Labview program에 적용하여 계산할 수 있으나 KTX 차량에서 주행 속도, Kilo Post(KP) data를 취득 할 수 없어서 UIC518 OR을 유사하게 적용가능하게 데이터를 Sampling 시간에 따라 구간을 나누는 분석기법을 사용하였다.

* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단, 비회원

E-mail : ymkim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5609 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

*** 아주대학교, 기계공학부

2. 주행 시험 및 비교 분석

한국형 고속열차(HSR350X)는 Fig 1.에서 보는 바와 같이 7량(동력차TP1 + 동력객차TM1 + 객차 3량 TT2-4 + 동력객차TM5 + 동력차TP2) 1편성으로 구성된다. 대차는 동력차 대차, 동력객차 대차 및 관절형 대차의 3종류로 총 10대의 대차가 7량의 차체를 지지하고 있으며, 이들은 1차 현가장치와 2차 현가장치로 구성되어 있다. 동력차는 2대의 동력차 대차에 의해 지지되어 있으며, 동력객차는 한쪽이 동력객차 대차가, 다른 쪽은 객차와 연결된 연결부를 관절형 대차가 지지하고 있다. 또한, 객차는 다른 객차와 연결된 연결부를 관절형 대차에 의해 양단이 지지되어 있다. 동력차와 동력객차는 서로 상대적인 운동을 할 때 발생하는 충격을 완충시키는 버퍼(Buffer)와 견인력을 전달하는 견인후크(Draw hook)로 연결된다. 객차와 객차는 주행 중에 발생하는 객차간의 상대운동이 허용되도록 고정링(fixed ring)과 이동링(carrier ring)이 조합된 관절형 연결장치로 연결되어 있다. KTX는 기본적으로 차량 편성을 제외하고 유사한 동역학적 구조를 갖으며 한국형 고속열차 동일한 관절형 대차 구조를 갖는다.



Fig 1. High Speed Rolling stock 350 eXperimental (HSR350x)

한국형 고속열차와 KTX의 주행시험 구간은 대전-동대구 사이에서 2007년 3월에 이루어 졌으며 고주파용 가속도계와 저주파 측정이 가능한 0.5-100Hz 영역용인 PCB의 DC Capacitive accelerometer를 사용했다. 기존에 한국형 고속열차에 설치된 가속도계는 Kistler 사의 ICP type 가속도계로 고주파 영역에서의 측정은 용이하나 저주파 영역의 측정에 적합하지 않아 새로이 가속도 계를 설치하여 측정 하였다. 한국형 고속열차에서의 차체 가속도 측정은 특실인 TT2의 중앙 하부 바닥 면에 설치하여 실시하였다. KTX의 경우 동력객차의 중앙에서 측정이 이루어 졌다. 이렇게 얻어진 가속도 값은 Fig 2.에서와 같이 UIC518 OR에 제시된 방법으로 평가된다.

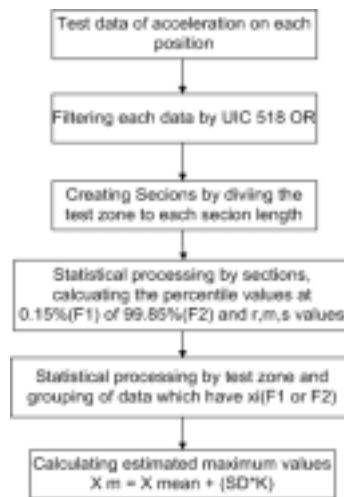


Fig 2. The flow cart of data processing for UIC 518 OR

필터는 주행거동 특성 데이터의 경우 차체 상하 및 횡 가속도 모두 0.4 - 10Hz의 Band Pass Filter를 적용하여 각 section의 길이는 한국형 고속열차의 측정 시스템에 의한 방법의 경우 500m로 하였으며 총 sections의 개수는 160개로 하였다. UIC518 OR에서 제시한 조건과 동일한 500m로 25개 이상의 조건을 충분히 충족한다. 각 section에서 계산된 통계값을 평균값(X mean)과 표준편차(SD)를 이용하여 예측값을 계산하여 UIC518 OR에 규정된 제한 기준값과 비교하여 주행거동을 판단하였다.

$$X_m = X_{mean} + (SD \times K) \quad (1)$$

여기서 K는 평가항목 및 가속도에 따른 지수로서 주행거동 관련 항목 값인 2.2 적용하여 사용했다.

KTX의 경우 속도 신호와 주행 거리 신호를 얻지 못하고 가속도 신호만으로 평가 하여만 했다. 따라서 UIC518 OR에 규정한 조건과 유사한 조건을 만들어 보았다. 본 연구의 시험 구간은 대전-동대구의 고속선 에서 일반적으로 280-300km/h로 운행되는 구간을 선택하였다. 이 속도 대역에서 열차의 속도를 약 80m/s로 5초에 하나의 section을 잡아 UIC518 OR의 조건에 조금 못 미치는 약 400m의 section 거리를 두었다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 가속도의 R,M,S 값과 MAX 값을 시간 축으로 나열한 것으로 타 원으로 표시된 영역의 가속도 값에 대한 평가가 이루어 졌다. 이 영역은 대전-동대구의 운행 구간 중 기존선에서 고속선으로 변하는 가선변경구간을 통과한 후의 고속으로 가속하는 구간을 보여준다.

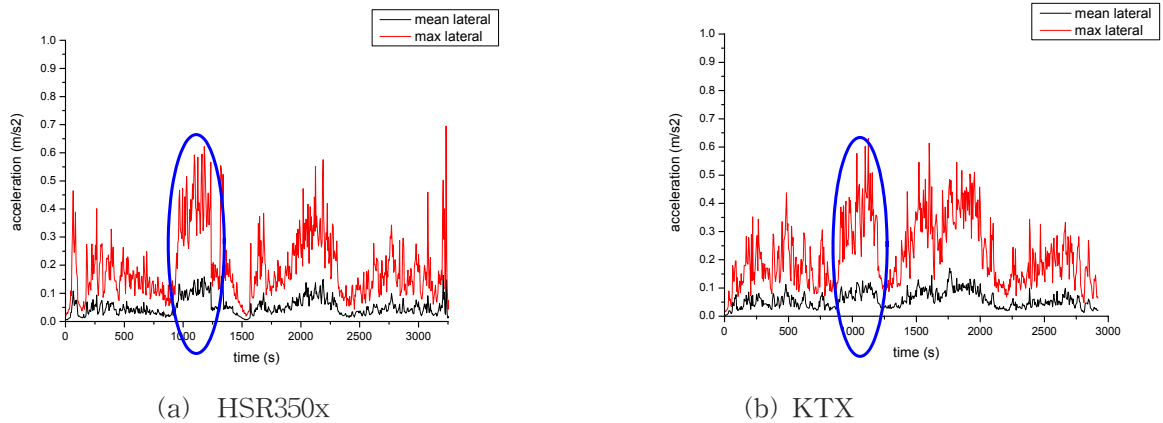
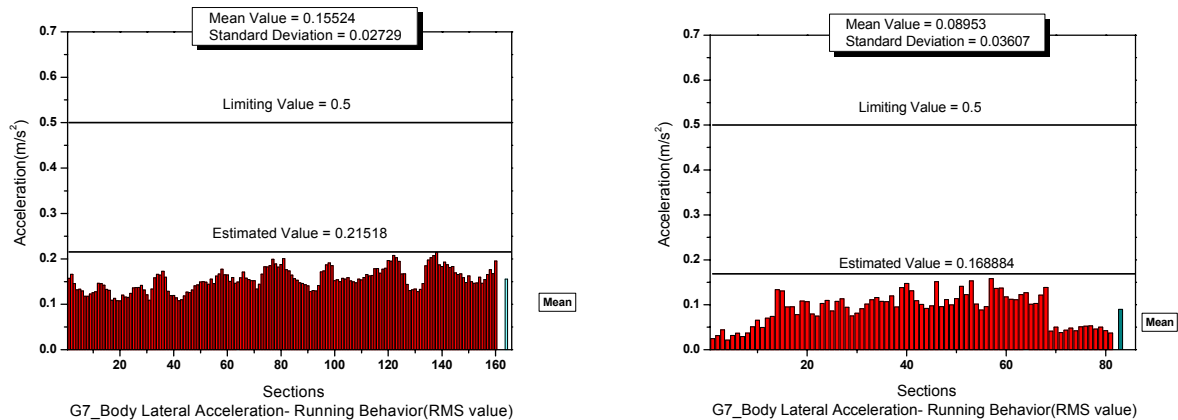


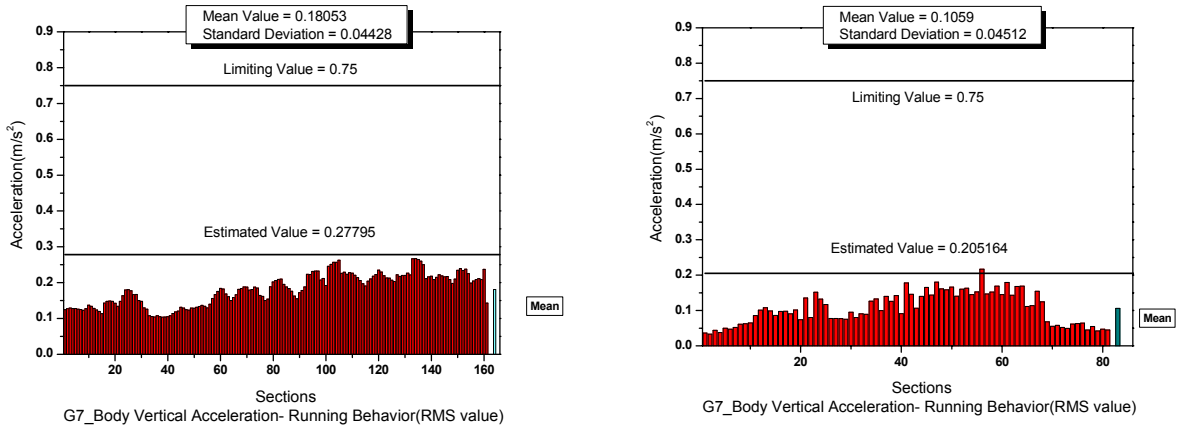
Fig 3. Lateral Acceleration R,M,S & Max value between Dae-Jeon to Dong Dae-Gu

아래 Fig. 4는 한국형 고속열차의 UIC518 OR에 의한 주행 동특성 평가 결과를 보여준다. section 구간을 500m로 두었을 때와 5초로 두었을 때의 차체 횡 가속도의 측정된 값을 보면 0.21518과 0.168884로 약 0.05의 차이를 보이니 UIC518 OR에서 제시한 한계치에 비교 했을 때 만족할 만한 결과를 보여준다. 여기서 수치의 차이는 가속도 값의 r,m,s level에서 볼 수 있듯이 (a)의 경우 (b)에서의 값 중 section 18-68 사이에 해당되는 값이 큰 구역을 선택하여 해석한 결과라 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 만족할 만한 값을 얻을 수 있다.



(a) 500m sections (b) 5 second section
Fig 4. Estimated Lateral direction value of HSR350x (Running Behavior)

다음 Fig. 5는 차체 상·하 가속도 값을 보여준다. 상·하 가속도의 값도 횡 가속도와 같은 현상이 있음을 보여주며 그 차이는 0.07정도로 작다.

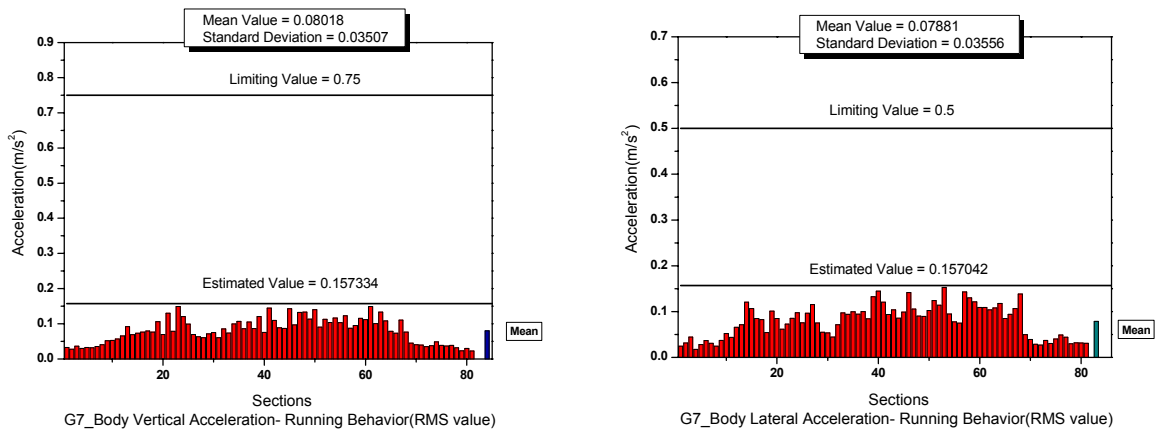


(a) 500m sections

(b) 5 second section

Fig 5. Estimated Vertical direction value of HSR350x (Running Behavior)

Filtering 주파수와 주행거동 특성 값의 관계를 알아보기 위해 UIC 518 OR 에 명시된 값과 달리 0.4 - 6Hz의 Band Pass Filter를 걸어 비교 분석하여 보았다. 결과는 기대했던 대로 Fig 6.에서 보는 바와 같이 횡 방향에선 0.16884에서 0.157042로 약 0.01만큼 상·하 방향에선 0.205164에서 1.57334로 약 0.04정도 계산 값이 줄었다. 특히 상·하 방향의 값이 더 줄어 든 것으로 보아 6-10Hz 사이에 해당하는 값이 횡 방향의 경우보다 많이 포함 되었다고 할 수 있고 횡가속도의 경우 그 사이 값이 적게 존재함을 알 수 있다.

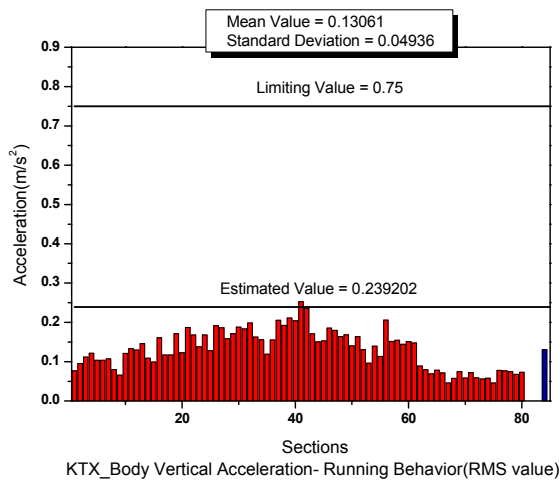


(a) Vertical

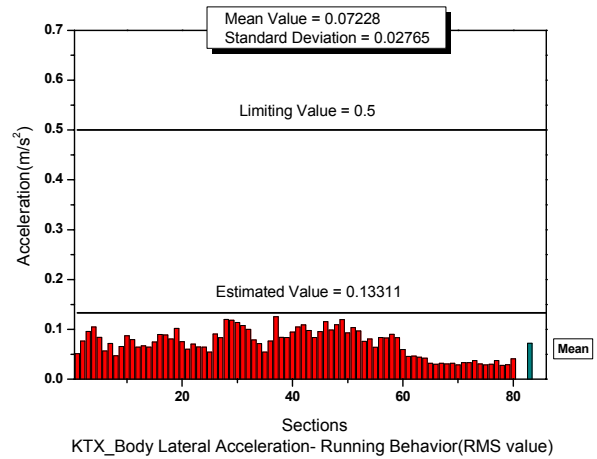
(b) Lateral

Fig 6. Estimated value of HSR350x by filtering 0.4-6Hz Band pass filter (Running Behavior)

Fig. 7은 KTX 주행 거동특성을 보여준다. Fig 5, Fig 6의 각 (b)의 한국형 고속열차의 값과 비교해 보면 상·하 방향의 경우 한국형 고속열차가 약 0.04정도 낮아 좀 더 안정적임을 보이고 횡 방향의 경우 약 0.03정도 더 높아 KTX가 안정적임을 보여준다.



(a) Vertical



(b) Lateral

Fig 7. Estimated value of KTX by filtering 0.4-10Hz Band pass filter (Running Behavior)

Table 1은 위에서 계산된 값들을 보여주며 모든 값들이 UIC 518 OR에 제시된 국제 기준 값에 KTX와 한국형 고속열차 모두 만족함을 보여준다.

Table 1. Running Behavior of High speed trains at speed of 280km/h to 300km/h

항 목		기 준 (m/s^2)	결 과 (m/s^2)			
객차	주행 거동	0.5	R,M,S			
			차체 횡 가속도	0.4-10Hz	KTX(5sec)	0.133110
					HSR350x(5sec)	0.168884
			0.4-6Hz	KTX(5sec)	-	
	HSR350x(5sec)	0.157042				
	차체 상하 가속도	0.75	R,M,S			
			0.4-10Hz	KTX(5sec)	0.239202	
				HSR350x(5sec)	0.205164	
0.4-6Hz			HSR350x(500m)	0.277950		
	KTX(5sec)	-				
HSR350x(5sec)	0.157334					

3. 결론

본 연구에서 기본적으로 UIC 518 OR의 가속도계를 이용한 분석 방법론을 이용하였으나 거리(KP)와 속도 정보가 없을 때 가속도계만으로 UIC 518 OR의 결과와 큰 차이 없이 주행 동특성을 평가하는 방법을 보여주었다. 500m와 5초로 section을 나눌 때의 값은 약간의 차이를 보여주지만 계산 과정의 차이라기보다 데이터의 계산 구간 차이로 간주된다.

현재 우리나라에는 KTX와 한국형 고속열차가 영업선로에서 운행되고 있으며 주 고속열차의 주행 성

능차이는 거의 없는 것으로 밝혀졌다. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 상·하 방향의 경우 한국형 고속열차가 약 0.04정도 낮아 좀 더 안정적임을 보이고 횡 방향의 경우 약 0.03정도 더 높아 KTX가 안정적임을 보여주지만 0.03과 0.04는 승객이 느끼기에 거의 분별할 수 없는 수치라 볼 수 있다. 두 고속철도 차량 모두 고속영역에서 주행 시에 매우 양호한 수준을 유지하는 것을 보여주며 국제 기준보다 매우 낮은 수준으로 뛰어난 주행 성능을 보여주는 것으로 나타낸다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 이루어 졌으며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박찬경 외 2인, “한국형 고속전철의 진동가속도 시험 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2003.
2. 박찬경 외 4인, “한국형 고속전철의 350km/h 주행에 대한 진동 가속도 분석”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2004
3. UIC code 518 OR, 2003, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic Behaviour-Safety-Track fatigue-Ride quality."