

한국형 고속전철의 350Km/h 주행에 대한 진동 가속도 분석

Analysis of the Dynamic Vibration for Korean High Speed Train at Speed 350 Km/h

박찬경* 김기환* 목진용* 김영국* 김석원*
Chankyong Park Kiwhan Kim JinYong Mok Youngguk Kim Seogwon Kim

ABSTRACT

The characteristics of dynamic vibration are generally analyzed by an acceleration of a car body of high speed train and the acceleration can be applied to evaluation of running safety. The test of process and the analysis method about it are well explained on UIC Code 518 OR which is the spacial international standard about running safety and dynamic behavior on the line test for railway vehicle. Korean High Speed Train designed to operate at speed 350km/h has been tested on high speed line since it was developed in 2002 and it recorded the highest speed 352.4km/h at the 16th Dec. 2004 in Korea. This paper includes the analysis of running behavior of this train at speed 350km/h and also the analysis of dynamic safety is presented in it, extending to the range of high speed while the UIC 518 limit the speed below 200km/h.

1. 서론

한국형 고속전철은 선도기술개발사업의 일환으로 2002년에 개발을 완료하여 광명-동대구 구간의 고속선과 서대전-목포 구간의 기존선에서 신뢰성 시험을 위한 주행시험 중에 있다. 현재 고속본선 시험은 300Km/h의 속도로 KTX와 동일한 상업 운행 속도로 주행하고 있으며 2004년 12월 16일에는 352.4Km/h의 속도를 기록한 바 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. 이에 대한 기준으로는 국제철도연맹에서 제정한 UIC 518 OR⁽²⁾ 기준을 적용할 수 있으며 여기에는 시험절차 및 분석방법론에 대하여 명시하고 있으며 철도차량의 특성이 고려되어 있다. 그러나 가속도계를 이용한 분석 방법론은 동적거동의 경우 300Km/h 이상의 속도대역에서도 적용할 수 있는 반면 안전성의 경우 속도 200Km/h 이하의 속도에서 평가하게 되어 있어 한국형 고속전철의 350Km/h의 속도에 대한 가속도계를 이용한 안전성 평가에는 문제점을 갖고 있다. 그러나 방법론상으로 한국형 고속전철의 동적 성능 수준을 살펴보기 위한 참고 기준으로 적용할 수는 있으며 향후 300Km/h 이상의 속도에서도 가속도를 이용한 평가 기준이 필요하다는 관점에서 본 연구는 기본적인 경향을 제시할 수 있을 것이다.

*. 정희원, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

2. 수행시험 개요

한국형 고속전철이 350Km/h의 속도로 시운전 시험한 노선은 Fig. 1과 같이 고속 시선의 서울역 기점 KP 115Km~119Km 구간이며 이구간은 4%의 구배와 터널 및 토공구간으로 이루어져 있다. 또한, 차량의 동적 특성을 계측하기 위하여 Fig. 2와 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 74개 장착하였다⁽³⁾. 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⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

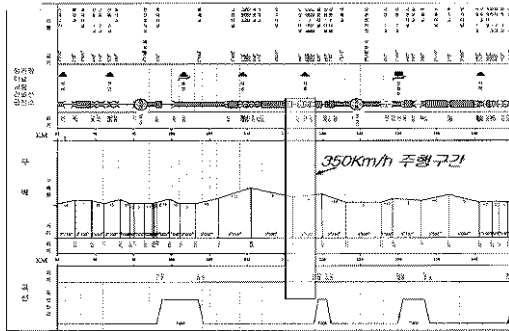


Fig. 1 Diagram of test line including the region of running at 350Km/h.

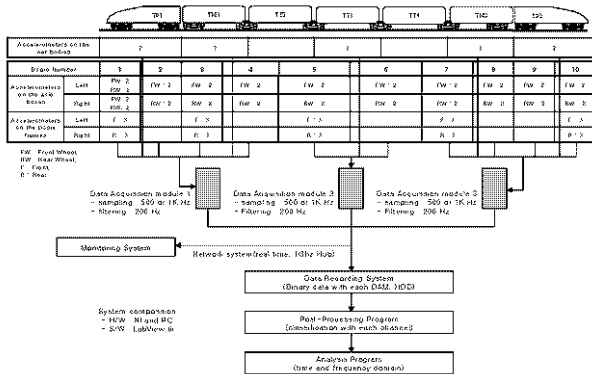
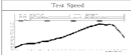

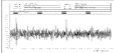


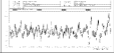


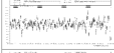
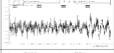
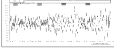
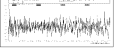


Fig. 2 The composition of the data acquisition systems for KHST dynamics

3. 가속도 계측을 통한 주행 동적 성능 분석

Fig.2에서의 같이 장착된 가속도계은 이용하여 각 차축과 대지에서 측정된 가속도 값을 중의 대와 및 차축과 연결대와 및 각 차축에 대하여 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 The graph of test results about the acceleration of bodies and bogies at 350Km/h

Test Speed		Location(Kilometer Post)	
			
Trailer Car and Bogie(TTS, BT5)		Motorized Car and Bogie(TM1, BM2)	
	Bogie Lateral Acceleration (Safety)		
	Body Lateral Acceleration (Safety)		
	Body Vertical Acceleration (Safety)		
	Body Lateral Acceleration (Behaviour)		
	Body Vertical Acceleration (Behaviour)		

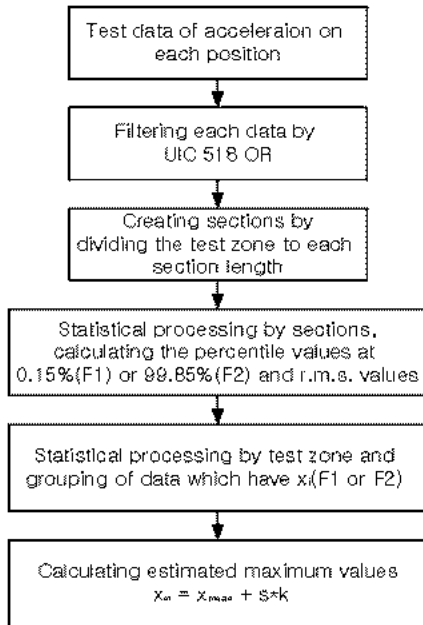


Fig.15 The flow chart of data processing for UIC 518 OR

계산토록 하였다. 이 예측값은 UIC 518 OR에 규정된 제한 기준값과 비교하여 안전성과 주행 거동을 판정토록 하였다.

$$X_m = X_{m,mean} + s \cdot k \quad (1)$$

여기서, k는 평가항목 및 가속도 특성에 따른 지수로서 안전성관련 항목은 3이며 주행거동관련 항목은 2.2를 사용토록 하고 있다. Fig. 15에서 나타내고 있는 일련의 흐름도는 본 연구에서는 LabView를 이용하여 프로그램을 개발하였으며 시스템적으로 데이터 처리를 할 수 있도록 고안하였다.

한국형 고속열차가 350Km/h로 주행한 Table 1.의 데이터를 각 section에 대하여 통계값을 구하고 이를 이용하여 식(1)를 적용하면 각 가속도 구분별로 UIC 518 OR의 기준에 대하여 평가될 수 있으며 그 결과를 살펴보면 Table 2.와 같다. Table 2.는 총 24개의 Section에 대하여 99.85%에 해당되는 값을 막대 그래프로 도시하였으며 식(1)에 적용되는 $X_{m,mean}$ 과 s값을 계산하여 제시하였다. 또한 예측값인 X_m 을 기준값과 그 수준을 비교하기 위하여 제시하였으며 이를 종합하여 Table 3.에 작성토록 하였다. 여기서 안전성 관련 대차 횡가속도는 대차 중량(Mb)에 따라 식(2)와 같이 기준값을 계산해야 하며 관절대차와 동력대차가 각각 7.7884, 7.7613 ton을 적용하였다.

$$\text{Limit Value} = 12 - Mb/5 \quad (2)$$

또한 차체의 정상 횡가속도는 곡선반경 7,000m의 곡선을 통과 시에 20Hz Low pass filter 적용하여 그 평균값으로 계산하였으며 곡선 통과속도는 평균 334.25Km/h였으며 최고속도는 348.9 Km/h였다. Table 3.에서 살펴본 350Km/h 주행 속도대역에서 가속도 계측 결과를 이용한 한국형 고속전철 동적 거동수준은 기준보다 현저하게 낮은 수준을 나타내고 있어 양호한 것으로 판단되며 그 이상의 속도 주행도 가능할 것으로 판단되고 있다.

Table 1에서 보이는 각 가속도값들은 UIC 518 OR에서 제시하는 평가항목으로서 Fig 3.에서 보는바와 같이 각 데이터들의 처리 방법에 따라 필터를 적용한 값이다. 필터는 안전성을 위한 데이터의 경우 대차 및 차체 횡가속도는 10Hz와 6Hz Low Pass Filter를 각각 적용하였으며 차체 상가속도는 0.4~4.0Hz의 Band Pass Filter를 적용하였다. 또한 동적거동을 위한 데이터는 차체 상하 및 횡기속도 모두 0.4~10.0Hz의 Band Pass Filter를 적용 하여 도시하였다.

또한 본 연구에서 적용한 section 길이는 100m로 하였으며 총 section의 개수는 24개를 사용하였다. 이는 실제 UIC 518 OR에서 제시한 500m, 25개 이상의 조건에는 미치지 못하지만 350Km/h 속도에서의 시험구간이 짧기 때문에 최대한 근접된 조건을 유지토록 하였다. 이러한 결과는 과거 300Km/h 이상의 속도로 주행한 장거리 시험에서의 충족된 조건으로 수행한 경우에서 비교해본 결과 크게 차이를 나타내고 있지는 않은 것으로 나타났다. 각 section에서 계산된 통계값은 전체 시험구간에서 취합하며 취합된 값의 평균값($X_{m,mean}$)과 표준편차(s)를 이용하여 예측값(X_m)을 식 (1)과 같이

Table 2 The graph of statistical processing results about Table 1's data

Trailer Car and Bogie(TT3, BT5)		Motorized Car and Bogie(TM1, BM3)
	<p>Bogie Lateral Acceleration (Safety)</p>	
	<p>Body Lateral Acceleration (Safety)</p>	
	<p>Body Vertical Acceleration (Safety)</p>	
	<p>Body Lateral max. Acceleration (Running Behaviour)</p>	
	<p>Body Lateral max. Acceleration (Running Behaviour)</p>	
	<p>Body Lateral r.m.s. Acceleration (Running Behaviour)</p>	
	<p>Body Lateral r.m.s. Acceleration (Running Behaviour)</p>	

Table 3. 350Km/h 주행 시 한국형 고속열차의 동전 수준 결과

항 목		기 준(m/s ²)		결 과(m/s ²)		
객차 및 관절대차 (TT3, BT5)	안전성	대차 횡 가속도	10.44232		4.58042	
		차체 횡 가속도	3.0		0.56593	
		차체 상하 가속도	3.0		0.70205	
	주행 거동		Max.	R.M.S.	Max.	R.M.S.
		차체 횡 가속도	2.5	0.5	0.52787	0.22728
		차체 상하 가속도	2.5	0.75	0.67068	0.33362
	차체 정상 횡 가속도	1.5		0.41		
동력차 및 동력대차 (TM1, BM3)	안전성	대차 횡 가속도	10.4477		3.50732	
		차체 횡 가속도	3.0		0.49721	
		차체 상하 가속도	3.0		0.33824	
	주행 거동		Max.	R.M.S.	Max.	R.M.S.
		차체 횡 가속도	2.5	0.5	0.46946	0.16989
		차체 상하 가속도	2.5	0.75	0.44988	0.18398
	차체 정상 횡 가속도	1.5		0.53		

4. 결론

본 연구에서는 2004년 12월 16일에 한국형 고속전철이 국내에서 최초로 350Km/h로 주행했을 때 동적 분석내용을 담고 있다. 분석은 UIC 518 OR의 가속도계를 이용한 분석 방법론을 이용하였으며 본 논문에서는 이에 대한 데이터 처리 과정과 분석 방법론 및 그 결과를 제시하였다.

분석방법은 통계적 개념이 도입되어 매우 복잡한 절차를 갖고 있으며 본 연구에서는 이에 대한 분석을 시스템적으로 처리할 수 있도록 프로그램을 개발하여 사용하였다. 분석 결과로는 한국형 고속열차의 350Km/h 속도 대역 주행 시에 매우 양호한 수준을 유지하는 것으로 나타나고 있으며, 제시된 기준보다 매우 낮은 수준을 나타내고 있어 그 이상의 속도로 주행 가능할 것으로 판단되고 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. 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."
3. 박찬경 외 2인, 2003, "한국형 고속전철의 진동가속도 시험 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
4. 김석원 외 4인, 2002, 고속전철 시운전 시험 및 평가용 측정시스템 개발(I)-하드웨어, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 169-173.
5. 김석원 외 4인, 2002, 고속전철 시운전 시험 및 평가용 측정시스템 개발(II)-소프트웨어, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 174-181.