

## 한국형 고속전철의 차체 진동특성 분석

### Analysis of Characteristics of Body Vibrations for Korean High Speed Train

김 영 국<sup>†</sup> · 박 찬 경\* · 김 석 원\*\* · 박 태 원\*\*\*

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

(2003년 4월 15일 접수 : 2003년 6월 10일 심사완료)

**Key Words** : Body Vibration(차체진동), Korean High Speed Train(KHST, 한국형 고속전철), On-line Test(시운전 시험), Ride Comfort(승차감), Ride Index(승차감 지수), Frequency Weighting Curve(주파수 보정곡선), Vibration Limits(진동한계), Accelerometer(가속도계), Inclinator(경사계)

#### ABSTRACT

The prototype of Korean high speed train(KHST), composed of two power cars, two motorized cars and three trailer cars, has been designed, fabricated and tested. In this paper, the body vibration has been reviewed from the viewpoint of the vehicle's safety, the ride comfort and the vibration limits for components and sub-assemblies mounted on the car-body using by analytical method and experimental method. The on-line test of KHST has been carried out up to 260 km/h in the KTX line and the results of the on-line test show that KHST has no problems in the vehicle's safety, the comfort ride and the vibration limits at this speed. And the characteristics of body vibrations has been predicted at 300 km/h and 350 km/h by fitting curve about the measured acceleration signals.

#### 1. 서 론

철도 교통은 다른 교통수단에 비해 승객과 화물을 많이 수송할 수 있을 뿐만 아니라 안전성, 정시성(定時性) 및 환경 친화성 등의 장점을 갖고 있기 때문에 많은 국가에서는 자동차 증가에 따른 심각한 환경오염과 도로정체 문제에 대한 해결책을 철도 교통에서 찾고 있다. 프랑스, 독일, 일본 등의 철도 선진국이 중심이 되어 안전성과 승차감이 뛰어난 고속철도를 개발하려고 부단히 노력하여 고속철도의 상용화라는 결실을 맺었다. 국내적으로는 경부고속철도 및 호남고속철도의 건설사업이 현재 진행 중이다. 경부고속철도

건설사업은 프랑스에서 개발되어 운행되고 있는 고속철도 차량으로 운행될 예정이며, 호남고속철도에 운행될 고속철도 차량은 아직 결정되지 않은 상태이다. 이러한 건설사업과는 별도로 프랑스에서 이전된 기술을 기반으로 독자적인 한국형 고속철도를 개발하기 위한 연구사업이 G7사업의 일환으로 진행되어 7량 1편성의 한국형 고속철도 시제차량이 제작되었으며, 이 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항에 만족되는지를 판단하기 위해 경부고속철도 시운전 구간인 남서울역 기점 95 km 지점(천안역사) ~ 136 km 지점(문곡)의 총 41 km 구간에서 시운전 시험이 수행되었다. 시운전 시험은 주행성능, 대차주행성능, 차체진동성능, 제동성능 등이 포함된 16개의 성능(세부시험 45개)을 확인하기 위해 차상 시험(열차 내부, 11개 성능의 31개 세부시험)과 지상 시험(열차 외부, 5개 성능의 14개 세부시험)으로 구분되어 실시되었고, 전체적인 예측항목은 약 80개로 약 400개 정도의 많은 신호들이 측정되어 한국형 고속철도 시제차량의 성능평가에 사용되었다.

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원  
E-mail : ygkim@krti.re.kr  
Tel : (031) 460-5612, Fax : (031)460-5649  
\* 정회원, 한국철도기술연구원  
\*\* 한국철도기술연구원  
\*\*\* 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

철도 교통은 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 휠/케도 접촉, 구동모터, 콤프레서 및 각종 전기부품(대용량 차단기, 주회로 차단기, 전원 콘택터, 변압기 등)에 의한 기계적인 진동<sup>(1, 2, 3)</sup>과 이로 인한 소음이 발생된다. 이렇게 발생한 진동은 승객의 승차감을 악화시키고 차량에 장착된 각종 부품과 기기를 파손시키는 원인이 되기도 한다. 또한, 심한 진동은 고속철도 차량의 주행 안전성에 심각한 문제를 발생시킬 수도 있다. 따라서, 이러한 진동의 발생원인과 전달기구를 정확히 이해하고 진동을 감소시킴으로써 승객에 대한 승차감의 향상과 철도 차량의 주행 안전성을 확보할 수 있으며, 이것이 달성될 때 다른 교통수단에 대한 철도 교통의 경쟁력은 더욱 강화될 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구에서는 한국형 고속철도 시제차량에 대해 차체에서 측정된 가속도의 분석을 통해 차체 진동특성을 파악하였고, 차체 진동이 한국형 고속철도 시제차량에 대해 차량의 주행 안전성, 승객의 승차감 및 차량부품 및 기기에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 철도차량의 진동특성 평가

### 2.1 진동평가 기준

철도차량에 대한 차체진동은 차량부품에 대한 진동한계,<sup>(4)</sup> 철도차량의 주행 안전성<sup>(1, 2)</sup> 및 승차감<sup>(5, 6, 7)</sup>으로 나누어 평가되어야 한다. 차량부품에 대한 진동한계는 철도차량에 대한 전후, 좌우 및 수직의 3방향에 대해 가속도의 피크-피크치(peak to peak)가 5~100 Hz 대역에서 0.4 g 이하가 되도록 한국형 고속전철 시제차량의 기본사양과 경부고속철도 계약서에 규정되어 있다. 철도차량의 주행 안정성을 평가하기 위한 기준은 한국형 고속전철 시제차 기본사양에 명확히 규정되어 있는 것은 없으나, 경부고속철도의 경우는 고속철도 차량의 운행속도를 증가시키기 위한 주행 안전성의 평가조건으로 프랑스 알스톰(Alstom)에서 제공한 기준<sup>(8)</sup>을 사용하고 있다. 이 기준은 좌우방향에 대해서만 평가하며 3~5 Hz의 밴드 필터(band filter)를 통과시킨 상태에서 좌우 방향 가속도의 피크치가 2.5 m/sec<sup>2</sup>을 1.5 sec 이상 초과하지 않은 경우에만 고속철도 차량의 운영속도를 향상시킬 수 있도록 규정하고 있다. 또한, 승차감의 평가는 한국형 고속전철 시제차량의 기본사양에 UIC 513R 규격<sup>(6)</sup>에

따라 평가하도록 명시되어 있다.

### 2.2 UIC 513R 승차감 평가방법 및 평가기준

#### (1) 평가방법

Fig. 1은 철도차량에 대한 승차감의 평가지수를 계산하는 흐름도를 나타낸 것이다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도 센서로 측정된 진동 가속도 신호를 저주파 밴드 필터를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블록(5 sec 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 푸리에 변환을 사용하여 주파수 영역으로 변환시킨 후에 필요한 주파수 범위(UIC 평가범위 : 0.4~80 Hz)에서 각 주파수에 대한 진동 가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개

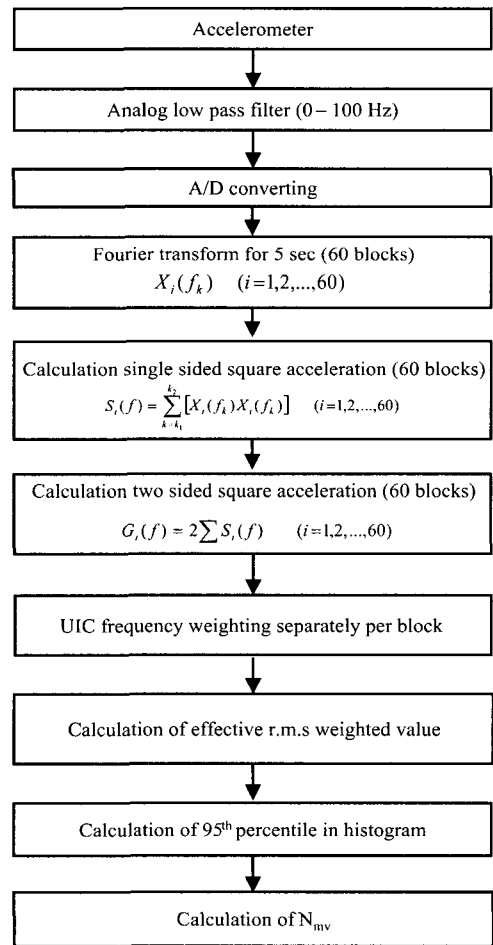


Fig. 1 Flow chart of the ride comfort evaluation procedure for railway vehicles

블록에 대해 각 주파수에 대한 진동 가속도의 파워를 계산하고, 계산된 60개 블록의 진동파워에 대해 주파수 보정을 행한 후에 실효값(root mean square)을 구한다. 60개 진동 가속도의 실효값에 대한 누적빈도가 95%일 때의 실효값을 사용하여 승차감 지수를 계산하게 된다.

(2) 주파수 보정곡선

동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이가 있으며, 이를 함수화시킨 것이 주파수 보정곡선이다.

Fig. 2는 수직 방향 및 수평 방향에 대한 주파수 보정곡선으로 수직 방향은 4~16.5 Hz에서, 수평 방향은 0.6~2 Hz(주파수 보정치 0.9이상)에서 가장 민감함을 알 수 있다.

(3) 평가기준

UIC규격에 의한 평가는 x, y, z 방향에 대해 해당 방향의 적합한 주파수 보정이 완료된 60개 블록의 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값을 사용하여 식 (1)로 부터 승차감 지수를 구한 후, Table 1의 평가기준에 따라 승차감을 평가하게 된다.

$$N_{MV} = 6\sqrt{(A_{w0.95})^2 + (A_{w3.95})^2 + (A_{w29.5})^2} \quad (1)$$

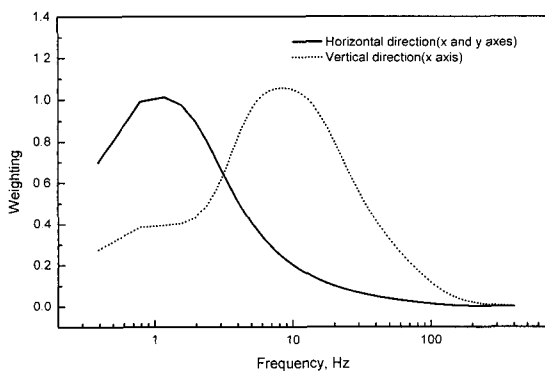


Fig. 2 UIC frequency weight function

Table 1 UIC evaluation scale

Ride index(N)	Ride comfort
~ 1	Very comfortable
1 ~ 2	Comfortable
2 ~ 4	Medium
4 ~ 5	Uncomfortable
5 ~	Very uncomfortable

### 3. 차체 진동특성 평가

#### 3.1 시험 계측시스템

차체진동 성능시험은 앞에서 설명한 바와 같이 7량 1편성으로 제작된 한국형 고속철도 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항에 만족되는 지를 판단하기 위한 목적으로 다른 성능시험과 함께 수행되었기 때문에 승차감 시험을 제외한 차체 진동성능은 시제차량에 설치된 시운전 시험 전용 분산형 계측시스템을 이용하여 수행되었다.

시운전 시험동안에 측정할 신호수는 약 400개 정도로 많을 뿐만 아니라 측정 위치가 시제차량의 전체 (약 140 m)에 산포되어 있기 때문에 한 장소에 집중된 측정 시스템으로는 신호선의 처리, 노이즈 등의 문제점으로 정확한 신호의 계측과 평가가 불가능하다. 따라서, 한국형 고속철도 시제차량의 시운전 시험 및 평가를 위한 기본 계측 시스템은 복수의 측정 모듈과 이들을 동기화시킬 수 있는 분산형 계측시스템으로

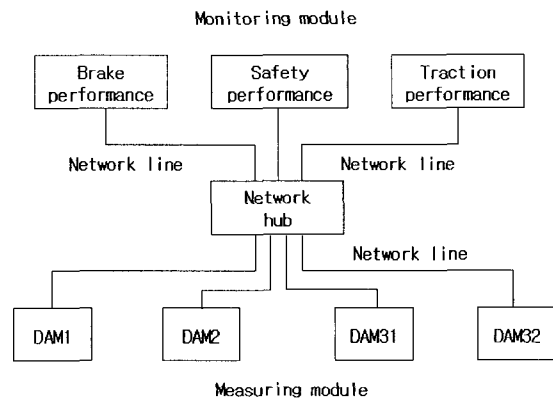


Fig. 3 Schematic diagram of measuring system for on-line test

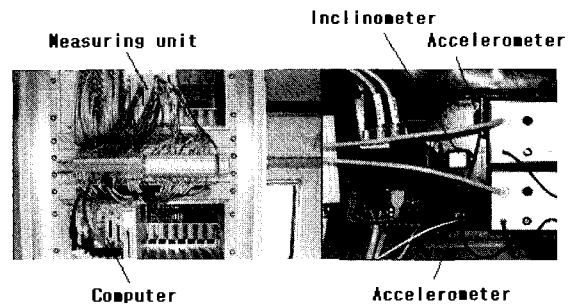


Fig. 4 Experimental set-up and sensors for body vibration test

구축하여 사용하였다. 이 분산형 계측시스템은 Fig. 3과 같이 4개의 계측모듈과 3개의 모니터링 모듈(monitoring module)로 구성되며, 1개의 모니터링 모듈은 4개의 계측모듈과 2개의 모니터링 모듈을 제어하도록 설계되어 있다. Fig. 4는 분산형 계측시스템의 일부와 사용된 센서를 나타낸 것이다. 이와는 별도로 승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 5의 승차감 측정시스템<sup>9)</sup>을 사용하였고, 그에 대한 자세한 사양은 Table 2와 같다. 또한, 차체 진동특성을 파악하기 위해 사용된 센서는 1축 가속도계, 3축 가속도계 및 경사계 등이 사용되었다.

### 3.2 진동 특성 평가 분석

Fig. 6은 한국형 고속철도 시제차량이 경부고속철도 시험선로를 주행할 때, 주행속도에 따른 객차용 휠 셸(W51), 대차(BT5) 및 차체(TT3)에서 측정된

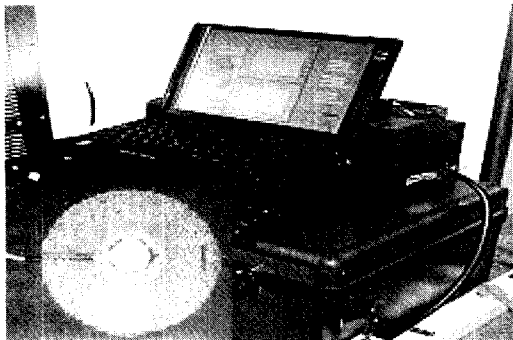
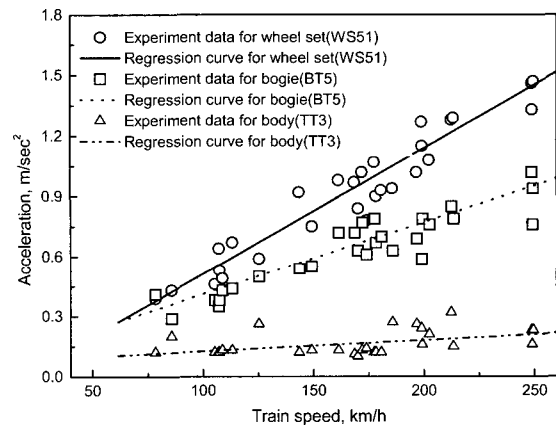


Fig. 5 Experimental set-up and sensor for ride comfort test

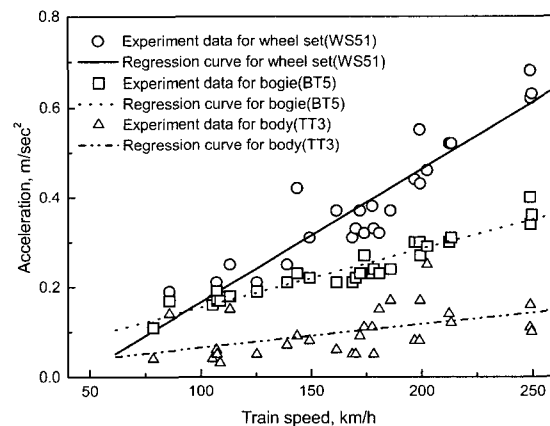
Table 2 Specifications of ride comfort measuring system

No	Item	Specification	Function
1	FFT board	- Input 8 ch	- AC amplifier - DC amplifier - ICP amplifier - Filter - A/D converter - FFT analyzer
		- 100 mv-16 V Input	
		- AC, DC, ICP Amp	
		- 90 dB Aliasing filter	
		- 16 bits ADC	
		- Bandwidth: 5 Hz ~ 80 kHz	
		- Sampling speed : 2x Bandwidth	
- FFT speed : 5 ms for 1 K			
2	Accelerometer	- 3-axis seated type	- Measurement of acceleration
		- ICP type	
		- Sensitivity : 1 mV /m/s <sup>2</sup>	

수직 방향과 좌우 방향의 가속도 실효치를 나타낸 것으로 심볼(□, ○ 및 △)은 실제의 측정결과이며, 실선, 점선 및 이점 쇄선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선이다. 휠 셸에서 측정된 가속도 신호가 대차에서의 가속도 신호보다 확실히 크며, 차체에서의 가속도 신호는 대차에서의 가속도 신호보다도 작다. 이는 휠과 궤도의 접촉에 의해 발생된 휠 셸의 진동은 1차 현가 장치를 통해 대차로 전달되며, 2차 현가 장치를 통해 차체로 전달되기 때문에 휠 셸, 대차 및 차체의 순서로 가속도 신호가 작아지게 된다. 또한, 주행속도가 증가함에 따라 휠 셸, 대차 및 차체에서 측정된 수직 및 좌우 방향의 가속도 신호는 증가하며, 1차 현가 장치와 2차 현가 장치를 통한 진동 감소효과도 증가함을 알 수 있다.



(a) Vertical direction



(b) Lateral direction

Fig. 6 Accelerations(r.m.s) for wheel set, bogie and body according to train speed

Fig. 7은 한국형 고속철도 시제차량이 경부고속철도 시험선로를 150 km/h의 속도로 주행할 때 시험선로의 일부구간에서의 좌우 방향의 가속도 신호로 10 Hz 이상의 주파수 성분이 제거된 측정 결과와 해석 결과이며, 선로조건에 대해 해석 결과와 측정 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 해석은 철도차량의 동역학 전용해석 프로그램인 VAMPIRE S/W<sup>(10)</sup>를 사용하여 수행하였다. 한국형 고속철도 시제차량을 해석용 차량모델로 사용하였고, 레일 불규칙 데이터는 경부고속철도 시험선(남서울 기점 106.3~136.3 km) 구간의 검측 결과<sup>(11)</sup>를 사용하였다. 특히, 곡선부에서 철도차량의 동역학에 영향을 주는 곡률반경, 캔트 및 원심력이 좌우 방향의 가속도에 미치는 효과가 매우 유사하게 나타나고 있다. 캔트는 한쪽 레일에 대한 상대쪽 레일의 상대높이를 말한다.<sup>(11)</sup> 이들의 효과를

좀 더 자세히 분석하기 위해 고속철도 차량의 주행속도 변화에 따른 좌우 방향의 가속도 신호를 Fig. 8에 나타내었다.

경부고속철도의 고속선로는 곡선부가 0.03 Hz 이하의 낮은 주파수 특성을 갖고 있기 때문에 좌우 방향의 가속도 신호를 측정할 때 가속도계의 선정시 주의가 요구되며, 일반적으로 가속도 측정에 많은 사용되는 ICP형의 가속도계는 1 Hz 미만의 가속도 신호를 측정할 수 없기 때문에 이를 사용해서는 곡선부에서의 좌우 가속도의 효과를 확인할 수 없다. 곡선부에서의 좌우 가속도의 효과를 확인하기 위해 캐퍼시티브(capacitive)형 가속도계를 사용하였으며, Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 좌우 방향의 가속도 효과가 곡선부에서 잘 나타나있다. 곡선부(R7000)에서 캔트는 곡선부에서 고속철도 차량의 주행속도 300 km/h에서 원심력 효과와 중력 효과가 상쇄되도록 설정되

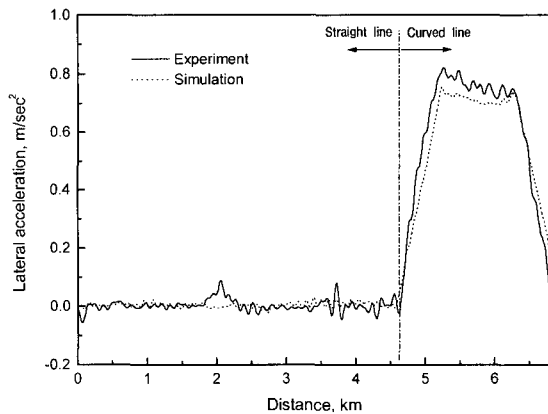


Fig. 7 Lateral acceleration for body(TT3) at train speed 150 km/h

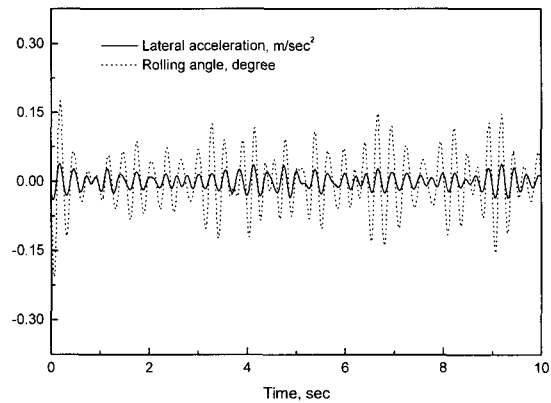


Fig. 9 Lateral acceleration and rolling angle according to time

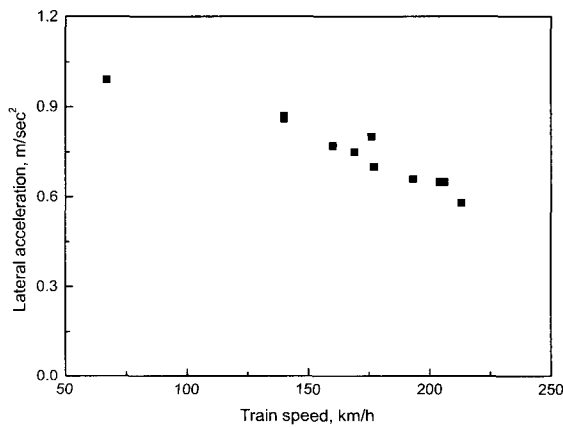


Fig. 8 Lateral accelerations according to train speeds at curve(R7000)

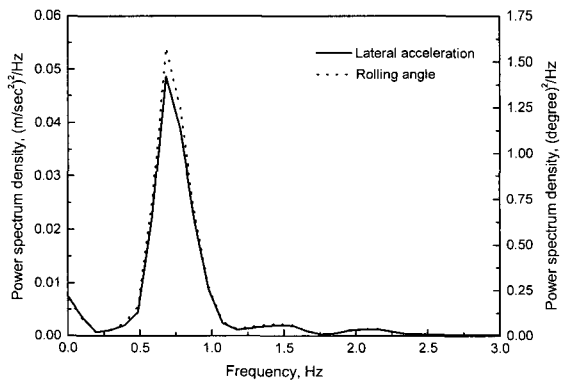


Fig. 10 Power spectrum density of lateral acceleration and rolling angle

어 있기 때문에 이 속도보다 낮을 때는 캔트 오버 상태가 되어 좌우 방향의 가속도는 고속철도 차량의 회전중심으로 향하며, Fig. 8에서 보는 바와 같이 주행속도가 증가함에 따라 감소하게 된다.

Fig. 9는 시간의 변화에 따른 TT3 차체 바닥에서 측정된 좌우 방향의 가속도 신호와 롤링 각도의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 10은 시간에 대한 이들 신호를 주파수 영역으로 변환시킨 결과이다. Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 좌우 방향의 가속도 신호는 롤링 각도와 거의 동일한 파장과 주파수 특성을 갖고 위상차는 거의 없다. Fig. 11은 TT3 차체의 롤링 각도에 대한 좌우 방향의 가속도 신호로 심볼(■)은 실제의 측정결과를, 실선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선을 나타내는데, 이 회귀곡선에서 좌우 방향의 가속도 신호는 차체의 롤링 각도와 기울기가

0.167인 비례관계에 있음을 알 수 있다. 이들 결과로부터 좌우 방향의 가속도 신호에 대한 특성은 차체의 롤링에 의해 결정된다는 것이 확인되었고, 이 회귀곡선으로부터 차체의 롤링 각도를 이용하여 좌우 방향의 가속도 신호를 예측하는 것이 가능하게 된다.

Fig. 12는 TT3 차체에 대한 고속철도 차량의 주행속도에 따른 좌우 방향의 가속도 신호로 심볼(■)은 실제의 측정결과이며, 실선은 측정결과를 이용한 회귀곡선이다. 230 km/h 이하의 주행속도에서는 실제 측정된 차체의 좌우 방향의 가속도 신호는  $0.7 \text{ m/sec}^2$  이하로 한국형 고속철도 차량의 주행안전성을 평가하기 위한 기준보다 훨씬 작다. 또한, 회귀곡선에 의해 350 km/h의 주행속도에서 차체에 대한 좌우 방향의 가속도 신호는  $1.32 \text{ m/sec}^2$  정도로 예측되기 때문에

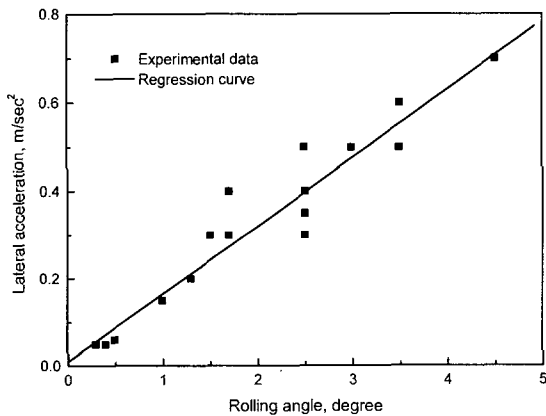


Fig. 11 Relation between lateral acceleration and roll angle

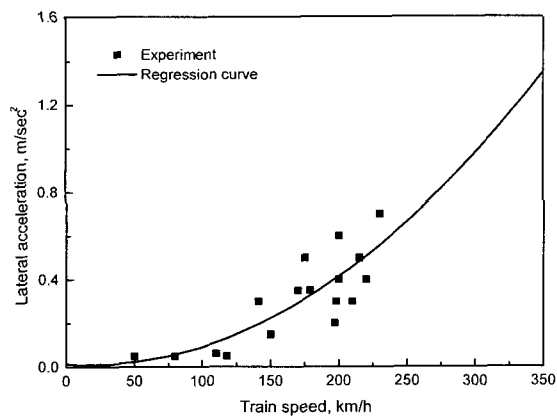


Fig. 12 Maximum lateral accelerations of body (TT3) according to train speeds

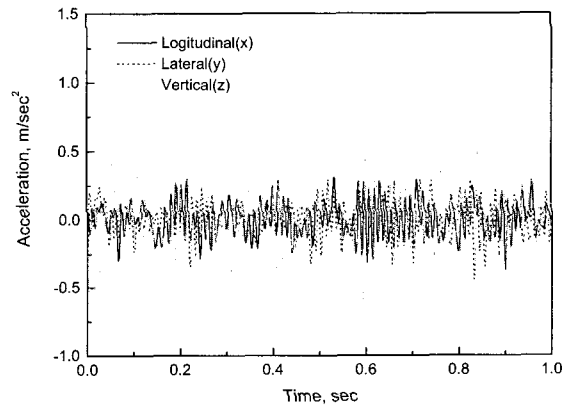


Fig. 13 Accelerations of body(TT3) in the three directions after passing 5~100 Hz band-filter

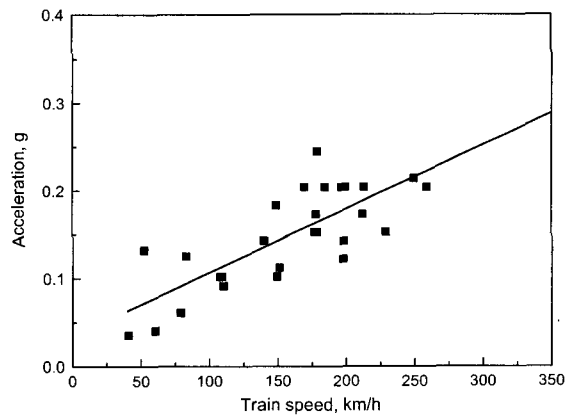


Fig. 14 Vertical accelerations of body(TT3) according to train speeds after passing 5~100 Hz band-filter

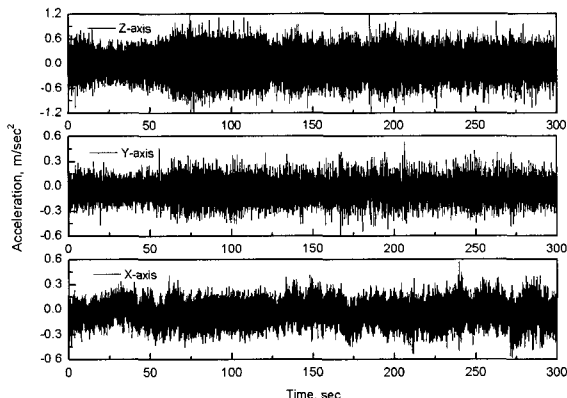
350 km/h에서도 주행 안전성은 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나, 특정한 주행속도에서 궤과 궤도의 형상, 대차의 기하학적인 조건, 휠의 마모, 환경조건의 변화 등에 의한 사행동(hunting motion)이 발생할 수 있기 때문에 좌우 방향의 가속도 신호가 증가할 수 있으며, 사행동이 발생한 경우에는 고속철도 차량에 대해 주행 안전성을 보장할 수 없게 된다. 따라서, 실제로 고속철도 차량의 주행속도를 증가시키면서 사행동이 일어나는 지에 대해 평가할 필요성이 있다고 판단된다.

Fig. 13은 한국형 고속철도 시제차량이 경부고속철도 시험선로를 197.9 km/h로 주행할 때, TT3 객차에서 측정된 5~100 Hz 대역에서의 전후 방향, 좌우 방향 및 수직 방향의 가속도이다. 수직 방향의 가속도가 다른 방향보다 크게 나타나므로 차량부품이 수직 방향의 진동에 대해 견딜 수 있다면 다른 방향의 진

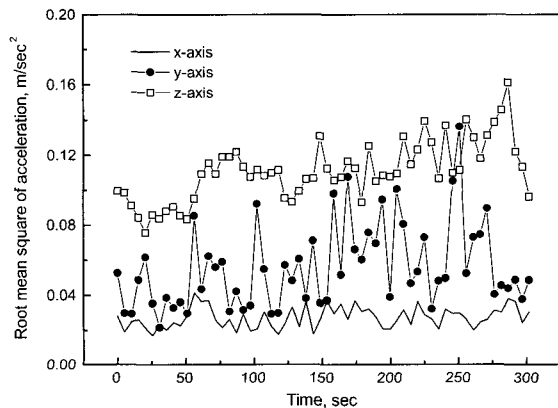
동은 문제가 되지 않기 때문에 진동한계를 수직 방향에 대해서만 검토하였으며, Fig. 14는 주행속도의 변화에 따른 수직 방향의 가속도 피크-피크치이다. 심볼(■)은 실제의 측정결과를, 실선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선으로 측정된 260 km/h 이하의 주행속도에서 0.4 g인 진동한계를 벗어나지 않으며, 350 km/h의 주행속도에서의 수직 방향의 가속도를 회귀곡선을 통해 예측해도 진동한계를 벗어나지 않는다.

Fig. 15는 한국형 고속철도 시제차량이 경부고속철도 시험선로에서 최대 252.3 km/h, 최소 225.6 km/h, 평균 244.1 km/h의 속도로 주행하고 있을 때 TT3 차체 바닥에서 측정된 가속도 신호로 Fig. 15(a)는 측정치들, Fig. 15(b)는 약 5 sec 간격으로 계산된 가속도 신호의 실효치를 나타낸 것으로 수직 방향의 가속도 신호가 다른 방향보다 크므로 승차감의 좋고 나쁨은 수직 방향의 가속도에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

Fig. 16은 한국형 고속철도 차량의 주행속도 변화에 따른 승차감 지수로 심볼(■)은 Fig. 15(a)의 실제로 측정된 가속도 신호에 의해 계산된 승차감 지수를, 실선은 이 승차감 지수를 통해 얻어진 회귀곡선을, 심볼(△)은 한국형 고속철도 차량이 350 km/h로 주행할 때 해석적으로 구해진 승차감 지수를 나타낸다. 250 km/h 이하의 주행속도에서는 실제 측정된 승차감 지수가 2 이하로 승객이 안락하게 느끼는 수준이며, 승차감 회귀곡선의 결과를 통해 300 km/h와 350 km/h의 주행속도에서 승차감 지수는 각각 1.81과 2.74 정도로 예측된다. 이것으로부터 300 km/h의 주행속도에서는 승객이 안락한 승차감을 느끼지만,



(a) Original signal



(b) Root mean square signal

Fig. 15 Acceleration at 244.1 km/h

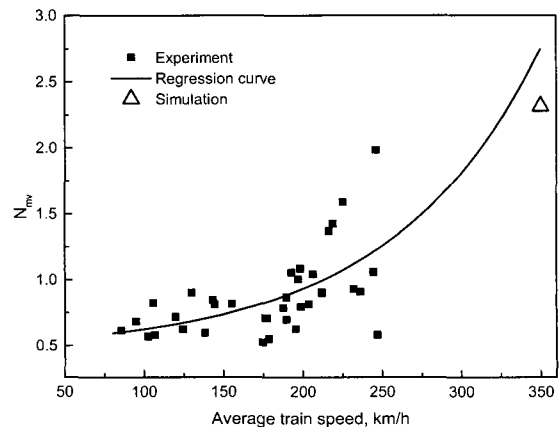


Fig. 16 Total ride index according to train speed

350 km/h에서는 승객은 승차감이 보통이라고 느낄 것이다. 또한, 350 km/h의 주행속도에서 승차감 지수를 해석결과와 측정결과를 비교해보면 해석결과는 승차감 지수가 2.31인 반면에 측정결과는 2.74로 측정결과가 약간 크지만 거의 비슷한 수준이다.

Fig. 17은 고속철도 차량의 주행방향에 따른 승차감 지수이다. 160 km/h 미만의 주행속도에서는 고속철도 차량의 주행방향에 따라 승차감 지수가 변화하지 않지만, 160 km/h 이상의 주행속도에서는 서울 방향으로 주행할 때의 승차감 지수가 부산 방향인 경우보다 훨씬 크다. 한국형 고속철도 차량은 동력전달이 push-pull형태로 이루어지고 있고, 현가 장치가 좌우 및 전후 방향으로 대칭으로 설계되어 있기 때문에 만일 고속철도 차량이 같은 전후부의 견인력을 갖는다면 주행방향에 따라 승차감 지수가 거의 변화하지 않

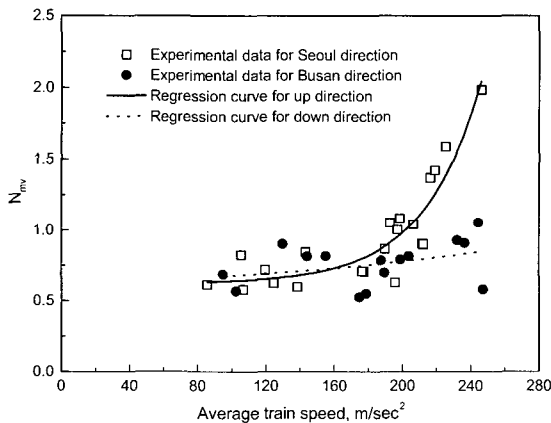


Fig. 17 Comparison of ride indices according to travel direction

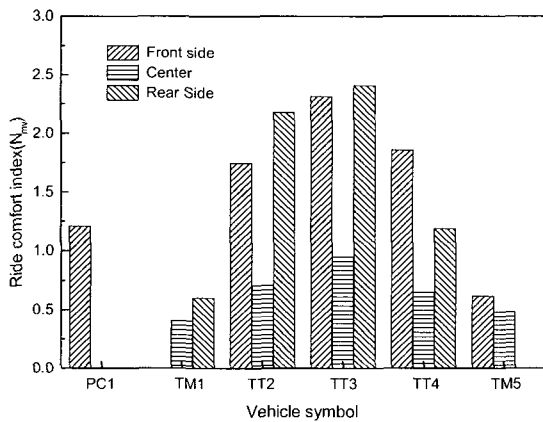


Fig. 18 Ride comfort index at each evaluation position

을 것이다. 그러나, 개발된 고속철도 차량이 시제차량이기 때문에 모든 부품이 아직 안정화되지 못한 상태에서 시운전 시험이 실시되었기 때문에 실제적으로 고속철도 차량은 전·후단부의 견인력이 불균형한 상태에서 시운전 시험을 수행할 수밖에 없었다. 이 견인력의 불균형 때문에 고속철도 차량에 대한 승차감 지수가 고속에서 차량의 진행방향에 따라 차이가 나는 것으로 추측된다.

Fig. 18은 해석을 통해 계산된 한국형 고속전철의 승차감 지수로 총 14지점에 대해 승차감을 해석하였으며, 14개의 상세한 해석위치는 PC1 동력차는 운전실 바닥의 1지점, TT2, TT3 및 TT4 객차는 전위/후위 및 중간의 차체바닥 3지점, TM1과 TM2 동력객차는 동력실을 제외한 중간과 전위나 후위의 차체바닥 2지점이다. 대부분의 차체에 대해 전위/후위에서의 승차감 지수가 중간위치에서 보다 큰 데, 이는 차체가 차체의 중앙에 대해 피칭(pitching) 현상이 일어나고 있음을 말해준다. 또한, TT3 객차의 승차감 지수가 다른 차량에 비해 크며, 이는 차체의 지지방식에 의해 생긴 현상으로 판단된다. TT3 객차의 양단은 관절형 대차의 공기스프링에 의해 단순 4점 지지로 되어 있지만, 다른 객차의 경우는 한 단은 관절형 연결장치에 의한 1점 지지, 다른 쪽은 관절형 대차의 공기스프링에 의한 2점 지지로 총 3점의 단순 지지로 되어 있다. 따라서, TT3 객차는 4점 지지에 의해 불안정해지기 때문에 다른 객차보다 승차감 지수가 크게 된다.

실제로 승차감의 측정은 TT3 차체의 전위 위치와 TT2 차체의 후위 위치에서 수행되었으며, Fig. 16과

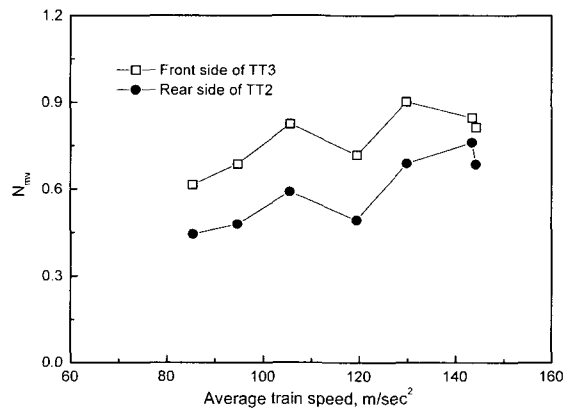


Fig. 19 Comparison of ride indices between TT2 and TT3



Fig. 17의 결과는 TT3 차체의 전위 위치에서 측정된 승차감 지수이다. Fig. 19는 객차 TT3의 전위부와 TT2의 후위부에서 측정된 가속도 신호로부터 계산된 승차감 지수로 TT3 차체의 전위 위치에서의 승차감 지수가 TT2 차체의 후위 위치보다 크고 Fig. 18의 해석 결과와 같은 경향을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 시제 차량이 260 km/h 이하의 주행속도에서는 고속철도 차량의 주행 안전성과 승객의 승차감에 문제가 없는 것으로 판단되며, 3방향의 가속도가 진동한계를 넘지 않기 때문에 차량부품이 손상되지 않을 것으로 판단된다.

(2) 회귀곡선을 통해 350 km/h에서의 진동특성을 예측해 보면 이 주행속도에서도 고속철도 차량의 주행 안전성과 승객의 승차감은 큰 문제가 없을 것으로 판단되며, 차량부품도 손상되지 않을 것이다. 그러나, 승차감은 300 km/h에서는 승객이 안락하게 느끼지만 350 km/h에서는 보통인 승차감으로 다소 승차감이 떨어진다. 또한, 특정한 주행속도에서 사행동이 일어날 수 있으며, 사행동이 일어나는 경우는 고속철도 차량의 주행 안전성과 승객의 승차감은 악화되기 때문에 고속철도 차량의 속도향상시에 사행동의 발생여부에 주의해야만 한다.

(3) 향후 보다 높은 운행속도에서의 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 차량의 주행 안전성, 승객의 승차감 및 차량부품에 대한 진동한계에 대한 철저한 검증이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업 및 고속철도 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 김영국 등, 2002, "신경회로망 모델을 이용한 철도 현가장치 설계변수 최적화," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 7 호, pp. 527~533.
- (2) Garg, V. K., et. al., 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.
- (3) Cleon, L. M., et. al., 1996, Evaluation of Passenger Comfort in Railway Vehicles, Journal of Low Frequency Noise and Vibration, Vol. 15, No. 2, pp. 53~69.
- (4) 한국고속철도건설공단, 1994, 경부고속철도 계약서, Vol. 1.
- (5) 김영국 등, 2002, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 3 호, pp. 204~212.
- (6) International Union of Railways, 1994, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R.
- (7) Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212, Part F.
- (8) Alstom Transport S. A., 2000, Progressive Increase of Speed Test Procedure, WBS No.: K611-1-E5230-ER+T-009.
- (9) 김영국 등, 1999, "철도용 승차감 측정시스템 개발," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 120~125.
- (10) AEA Technology, 1998, VAMPIRE v.3.5 Users Manual.
- (11) 김영국 등, 2001, "바람이 고속전철의 동적 안전성에 미치는 영향 분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 6 호, pp. 349~356.