

시운전 시험을 통한 한국형 고속전철의 차체진동 특성

Characteristics of Body Vibration for Korean High Speed Train through On-line Test

김영국* 김석원* 박찬경* 김기환*
Kim, Young-guk Kim, Seog-won Park, Chan-Kyeong Kim, Ki-hwan

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 by the domestic researchers. In this paper, the body vibration has been reviewed from the viewpoint of the vehicle's safety and the vibration limits for components and sub-assemblies mounted on the car-body using by the experimental method. The on-line test of KHST has been carried out up to 260 km/h in the KTX line and proved that KHST has no problems in the vehicle's safety 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

300 km/h (시속 300 km)이상의 고속철도가 개발됨에 따라 세계적으로는 철도의 르네상스를 맞이하고 있다. 이와 함께 100년 이상의 철도 역사를 갖고 있는 국내의 경우도 철도를 한 단계 도약시키기 위해 2004년 4월에 개통을 목표로 300 km/h 급의 고속열차를 프랑스로부터 도입하여 현재 시험선 구간에서 시험운전 중에 있다. 또한, 이와는 별도로 국가의 전략적 사업으로 추진중인 선도기술개발(G7)사업 중의 하나인 고속전철기술개발사업으로 7량 1편성의 한국형 고속철도 시제차량이 제작되었으며, 이 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항[1]에 만족되는 지를 판단하기 위해 경부 고속철도 시운전 구간인 동서울역 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 제척항목은 약 80개로 약 400개 정도의 많은 신호들이 측정되어 한국형 고속철도 시제차량의 성능평가에 사용되었다[2, 3].

철도 교통은 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 휠/궤도 접촉 (Wheel/Rail Contract), 구동모터 (Traction motor), 콤프레서 (Compressor), 각종 전기접점 등에 의한 기계적인 진동[4, 5, 6]과 이로 인한 소음이 발생된다. 이렇게 발생된 진동은 승객의 승차감을 악화시키고 차량에 장착된 각종 부품

* 한국철도기술연구원 고속전철기술개발사업단

과 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 시제차량의 주행 안전성과 장착된 부품 및 기기에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 차체 진동평가 기준

철도차량의 차체 진동평가는 철도차량의 주행 안전성[4, 5]과 철도차량에 장착되어 있는 부품 및 기기에 대한 진동한계[1, 7]를 함께 검토해야 한다. 철도차량의 주행 안정성을 평가하기 위한 차체진동의 기준에 대해서는 한국형 고속전철 시제차 기본사양에는 명확히 규정되어 있지 않지만, 경부 고속철도에서는 고속철도 차량의 운행속도를 증가시키기 위한 주행 안전성의 평가조건으로 프랑스 알스톰(Alstom)에서 제공한 기준[8]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^2 을 1.5 sec 이상 초과하지 않은 경우에만 고속철도 차량의 운행속도를 향상시킬 수 있도록 규정하고 있다. 차량부품에 대한 진동한계는 철도차량에 대한 전후, 좌우 및 수직의 3방향에 대해 가속도의 피크-피크치(Peak to Peak)가 5 ~ 100 Hz 대역에서 0.4g 이하가 되도록 한국형 고속전철 시제차량의 기본 사양과 경부 고속철도 계약서에 규정되어 있다. 따라서, 차체의 진동평가 기준으로 주행 안전성은 경부 고속철도의 운행속도를 증가시키는 데 사용되었던 알스톰에서 제공한 기준을 사용하고 차량부품에 대한 진동한계는 한국형 고속전철 시제차량의 기본 사양과 경부 고속철도 계약서에 명기된 기준을 사용하였다.

3. 시운전 시험을 통한 차체 진동특성 평가

3.1 시운전 시험용 계측시스템

7량 1편성으로 제작된 한국형 고속철도 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항에 만족되는지를 판단하기 위한 목적으로 차체진동 성능은 다른 성능시험과 함께 수행되었으며, 시제차량에 설치된 Fig. 1과 같은 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 분포되어 있기 때문에 한 장소에 집중된 측정 시스템으로는 신호선의 처리, 노이즈 등의 문제점으로 인해 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 구축하여 사용하였다. 이 분산형 계측시스템은 Fig. 2와 같이 4개의 계측모듈과 3개의 모니터링 모듈(Monitoring module)로 구성되며, 1개의 모니터링 모듈은 4개의 계측모듈과 2개의 모니터링 모듈을 제어하도록 설계되어 있다. Fig. 3은 계측모듈을 상세히 나타낸 것이며, Fig. 4는 분산형 계측시스템의 일부와 사용된 센서로 1축 가속도계, 경사계 등의 센서가 사용되었다.

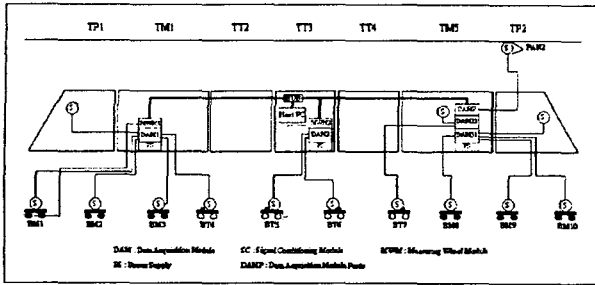


Fig. 1 Configuration and arrangement of measuring system

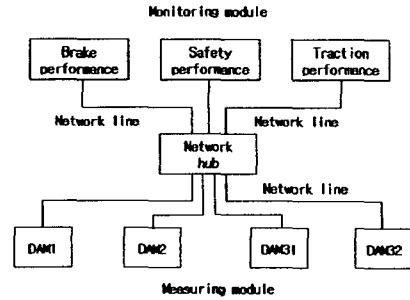


Fig. 2 Schematic diagram of measuring system for on-line test

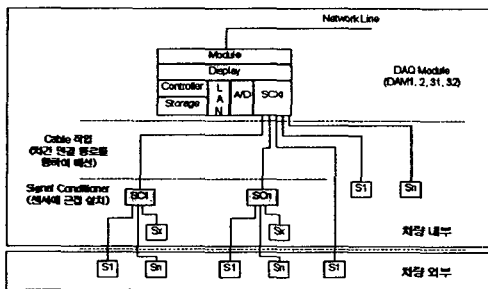


Fig. 3 Detail schematic diagram for each module

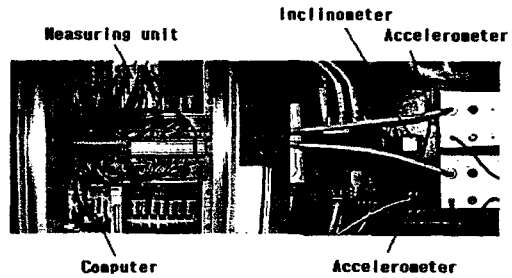


Fig. 4 Experimental set-up and sensors for body vibration test

3.2 시운전 시험 결과 분석

Fig. 5는 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 시험선로를 주행할 때, 주행속도에 따른 객차용 휠 셀 (WS51), 대차 (BT5) 및 차체 (TT3)에서 측정된 수직 방향과 좌우 방향의 가속도 실효치를 나타낸 것으로 표기기호 (□, ○ 및 △)은 실제의 측정결과이며, 실선, 점선 및 이점 쇄선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선이다. 휠 셀에서 측정된 가속도 신호가 대차에서의 가속도 신호보다 확실히 크며, 차체에서의 가속도 신호는 대차에서의 가속도 신호보다도 작다. 이는 휠과 궤도의 접촉에 의해 발생된 휠 셀의 진동은 1차 현가 장치를 통해 대차로 전달되며, 2차 현가 장치를 통해 차체로 전달되기 때문에 휠 셀, 대차 및 차체의 순서로 가속도 신호가 작아지게 된다. 또한, 주행속도가 증가함에 따라 휠 셀, 대차 및 차체에서 측정된 수직 및 좌우 방향의 가속도 신호는 증가하며, 1차 현가 장치와 2차 현가 장치를 통한 진동 감소효과도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 시험선로를 150 km/h의 속도로 주행할 때 시험선로의 일부구간에서의 10 Hz 이상의 주파수 성분이 제거된 좌우 방향의 가속도 신호이며, 곡선부의 효과 잘 나타나 있음을 알 수 있다. 경부 고속철도의 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 사용하였으

며, 측정된 좌우 방향의 가속도 신호에는 곡선부 효과가 잘 나타나있다. 또한, 곡선부에서 곡률반경, 캔트 및 원심력이 좌우 방향의 가속도에 미치는 영향을 좀 더 자세히 분석하기 위해 고속철도 차량의 주행속도 변화에 따른 좌우 방향의 가속도 신호를 Fig. 7에 나타내었다. 곡선부 (R7000)에서 캔트는 곡선부에서 고속철도 차량의 주행속도 300 km/h에서 원심력 효과와 중력 효과가 상쇄되도록 설정되어 있기 때문에 이 속도보다 낮을 때는 캔트 오버 상태가 되어 좌우 방향의 가속도는 고속철도 차량의 회전중심으로 향하며, 주행속도가 증가함에 따라 감소하게 된다.

Fig. 8은 TT3 차체에 대한 고속철도 차량의 주행속도에 따른 좌우 방향의 가속도 신호로 ■은 실제 측정결과이며, 실선은 측정결과를 이용한 회귀곡선이다. 230 km/h 이하의 주행속도에서는 실제 측정된 차체의 좌우 방향의 가속도 신호는 0.7 m/sec^2 이하로 한국형 고속철도 차량의 주행 안전성을 평가하기 위한 기준보다 훨씬 작다. 또한, 회귀곡선에 의해 350 km/h의 주행속도에서 차체에 대한 좌우 방향의 가속도 신호는 1.32 m/sec^2 정도로 예측되기 때문에 350 km/h에서도 주행 안전성은 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나, 특정한 주행속도에서 휠과 궤도의 형상, 대차의 기하학적인 조건, 휠의 마모, 환경조건의 변화 등에 의한 사행동 (Hunting motion)이 발생할 수 있기 때문에 좌우

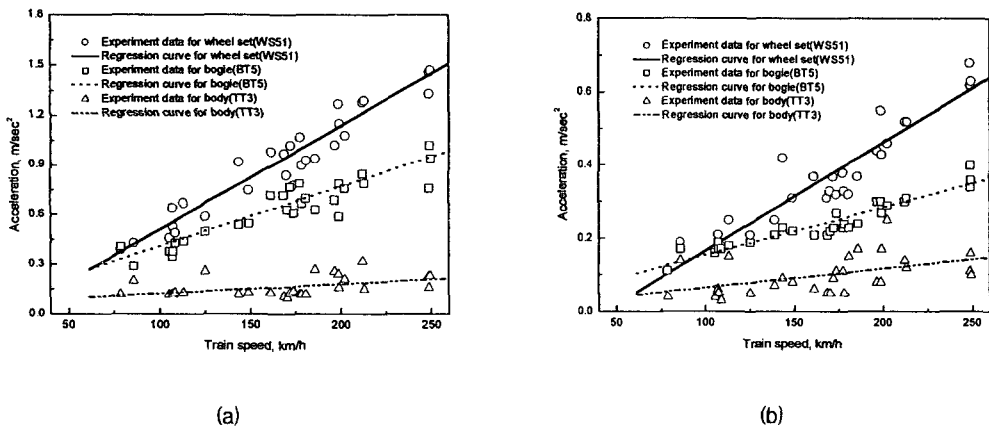


Fig. 5 Accelerations (r.m.s) for wheel set, bogie and body according to train speed, (a) Vertical direction, (b) Lateral direction

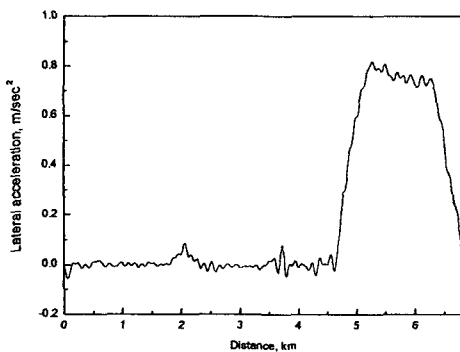


Fig. 6 Lateral acceleration for body (TT3) at train speed 150 km/h

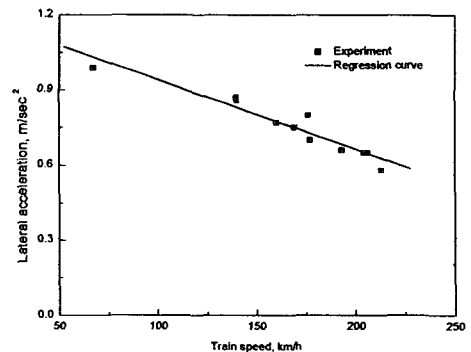


Fig. 7 Lateral accelerations according to train speeds at curve (R7000)

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. 9는 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 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 진동은 문제가 되지 않기 때문에 진동한계를 수직 방향에 대해서만 검토하였으며, Fig. 10은 주행속도의 변화에 따른 수직 방향의 가속도 피크-피크치이다. ■은 실제의 측정결과를, 실선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선으로 측정된 260 km/h 이하의 주행속도에서 0.4g인 진동한계를 벗어나지 않으며, 350 km/h의 주행속도에서의 수직 방향의 가속도를 회귀곡선을 통해 예측해도 진동한계를 벗어나지 않는다.

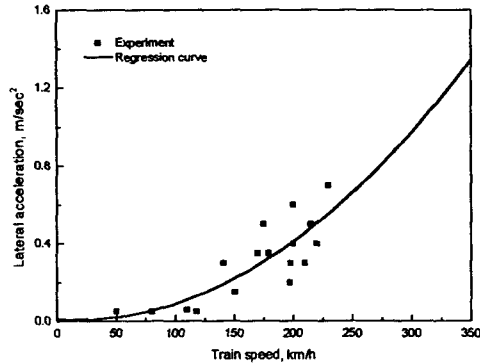


Fig. 8 Maximum lateral accelerations of body (TT3) according to train speeds

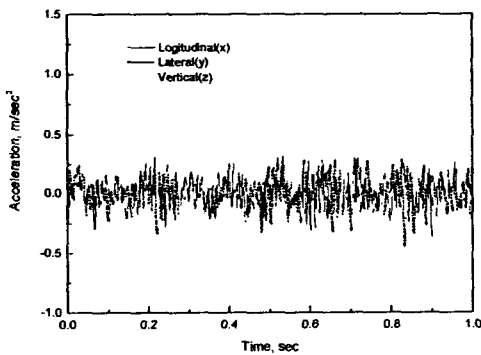


Fig. 9 Accelerations of body (TT3) in the three directions after passing 5 ~ 100 Hz band-filter

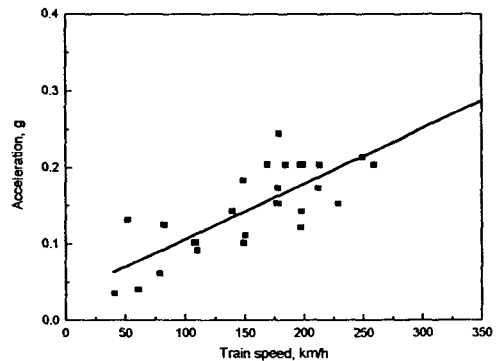


Fig. 10 Vertical accelerations of body (TT3) according to train speeds after passing 5 ~ 100 Hz band-filter

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 시제차량이 260 km/h 이하의 주행속도에서는 고속철도 차량의 주행 안전성은 문제가 없으며, 3방향의 가속도가 진동한계를 넘지 않기 때문에 차량부품은 손상되지 않을 것으로 판단된다.

(2) 회귀곡선을 통해 350 km/h에서의 진동특성을 예측해 보면 이 주행속도에서도 고속철도 차량의 주행 안전성과 차량부품의 진동에 대한 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나, 특정한 주행속도에서 사행동이 일어날 수 있으며, 사행동이 일어나는 경우는 고속철도 차량의 주행 안전성에 문제가 있기 때문에 고속철도 차량의 속도향상시에 사행동의 발생여부에 주의해야만 한다.

(3) 향후 보다 높은 운행속도에서의 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 차량의 주행 안전성과 차량부품에 대한 진동한계에 대한 철저한 검증이 필요하다.

후기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업 및 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (1998), 고속전철시스템 기본사양.
2. 한국철도기술연구원 (1999), 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 연차보고서.
3. 한국철도기술연구원 (2000), 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 연차보고서.
4. 김영국 등 (2002), "신경회로망 모델을 이용한 철도 현가장치 설계변수 최적화", 소음진동공학회 논문집, 제12권, 제7호, 한국소음진동공학회.
5. Garg, V. K., et al. (1984), Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.
6. Cleon, L. M., et al. (1996), Evaluation of Passenger Comfort in Railway Vehicles, Journal of Low Frequency Noise and Vibration , Vol. 15, No. 2.
7. 한국고속철도건설공단 (1994), 경부고속철도 계약서, Vol.1.
8. Alstom Transport S. A. (2000), Progressive Increase of Speed Test Procedure, WBS No.: K611-1-E5230-ER+T-009.