

시운전 시험을 통한 한국형 고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가

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

김영국¹ · 김석원¹ · 박찬경¹ · 김기환¹ · 목진용¹

Young-Guk Kim, Seog-Won Kim, Chan-Kyoung Park, Ki-Hwan Kim and Jin-Yong Mok

Key Words : *Body Vibration(차체진동), Natural Mode(고유모드), Kinematic mode(동적모드), Jerk(저크), Korean High Speed Train(HSR350, 한국형 고속전철), On-Line Test(시운전 시험), Vibration Limits(진동한계)*

ABSTRACT

The prototype of Korean high speed train (HSR350), 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 and the vibration limits for components and sub-assemblies mounted on the car-body using by the experimental method. And, the dynamic characteristics, such as jerk, natural mode and kinematic mode, have been reviewed. The KHST has been run to 300 km/h in the KTX line and the results of on-line test show that it has no problems in the vehicle's safety and the vibration limits. And the characteristics of body vibrations has been predicted at 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 제작되어, 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항[1]에 만족되는 지

를 판단하기 위해 시운전 시험이 수행되었다. 시운전 시험은 경부 고속철도 시운전 구간에서 진행되었으며, 주행성능, 대차주행성능, 차체진동성능, 제동성능 등이 포함된 16개의 성능(세부시험 45개)을 확인하기 위해 차상 시험(열차 내부, 11개 성능의 31개 세부 시험)과 지상 시험(열차 외부, 5개 성능의 14개 세부 시험)으로 구분되어 실시되었다. 전체적인 계측항목은 약 80개로 약 400개 정도의 신호들을 측정하여 한국형 고속철도 시제차량의 성능평가에 사용하였다 [2, 3].

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

1 한국철도기술연구원

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 진동이 한국형 고속철도 시제차량의 주행 안전성과 장착된 부품 및 기기에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 이러한 과정에서 선로의 곡선부의 영향과 저크특성을 분석하였고 한국형 고속철도 차량에 대한 차체의 동적모드와 고유모드를 찾았다.

2. 진동특성 평가

철도차량의 차체진동 평가는 철도차량의 주행 안전성[4, 5]과 철도차량에 장착되어 있는 부품 및 기기에 대한 진동한계[1, 7]로 구분하여 평가되어야 한다.

2.1 주행 안전성 평가

철도차량의 주행 안전성은 일반적으로 탈선계수, 운중 감소, 레일 작용력 등에 의해 평가하며[4, 5, 9], 해석적인 방법으로는 이들을 쉽게 적용하여 평가하는 것이 가능하지만, 실제의 시운전 시험을 통한 평가에서는 이들을 적용하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 철도차량의 주행 안정성을 차체진동을 이용하여 평가하였다. 한국형 고속전철 시제차 기본사양에는 주행 안전성의 평가를 위한 차체진동에 대해 규정되어 있지 않지만, 경부 고속철도의 경우에는 운행속도를 증가시키기 위한 주행 안전성의 평가조건으로 프랑스 알스톰 (Alstom)에서 제공한 평가기준 [8]을 사용하고 있다. 이 기준에서는 대차와 차체의 좌우방향 가속도를 사용하여 평가하도록 규정되어 있으며, 3 ~ 5 Hz의 밴드 필터 (Band filter)를 통과시킨 상태에서 좌우 방향 가속도의 피크치가 차체는 2.5 m/sec², 대차는 6 m/sec²를 1.5 sec 이상 초과하지 않은 경우에만 운행속도를 증가시킬 수 있다. 따라서, 주행 안전성 평가를 위한 차체진동 평가기준은 경부 고속철도의 운행속도를 증가시키는 데 사용된

기준을 적용하였다.

2.2 진동한계 평가

철도차량의 차체에 장착되어 있는 각종 부품과 기기를 파손시키는 원인이 되는 차체진동에 대한 진동한계는 한국형 고속전철 시제차량의 기본사양과 경부 고속철도 계약서에 규정되어 있으며, 전후, 좌우 및 수직의 3방향에 대해 가속도의 피크-피크치 (Peak to Peak)가 5 ~ 100 Hz 대역에서 0.4g 이하가 되도록 되어 있다.

3. 시운전 시험을 통한 차체 진동특성 평가

3.1 한국형 고속전철 시제차량 및 시운전 시험선로

한국형 고속철도 시제차량(HSR350)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 7량(동력차 + 동력객차 + 객차 3량 + 동력객차 + 동력차) 1편성으로 구성된다. 대차는 동력차 대차, 동력객차 대차 및 관절형 대차의 3종류로 총 10대의 대차가 7량의 차체를 지지하고 있으며, 이들은 1차 현가 장치와 2차 현가 장치로 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.

현재 시운전 중인 경부 고속철도의 시운전 구간은 Fig. 2와 같이 시운전 구간의 전체 길이가 남서울역 기점 86 km지점에서 143.2 km지점까지 총 57.2 km이며, 이 구간에는 터널과 교량이 이어져 있으며 천안역과 오송역이 존재한다. 또한 최대 종구배는 15‰이며 최대 곡선반경은 7000 m로 3곳에 존재한다. 한국형 고속전철의 시운전 시험은 남서울역 기점 95 km 지점 (천안역사) ~ 136 km 지점 (문곡)의 약 41 km 구간에서 주로 진행되었다. Fig. 3은 남서울 기점 106.3~136.3 km구간인 30 km에 대한 레일의 검측

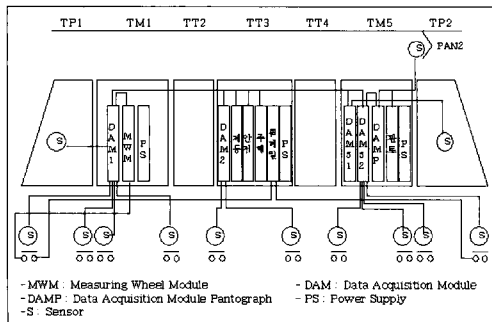


Fig. 4 Configuration and arrangement of measuring system

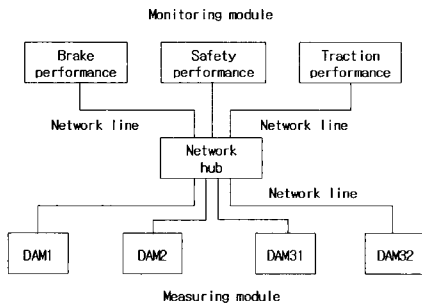


Fig. 5 Schematic diagram of measuring system

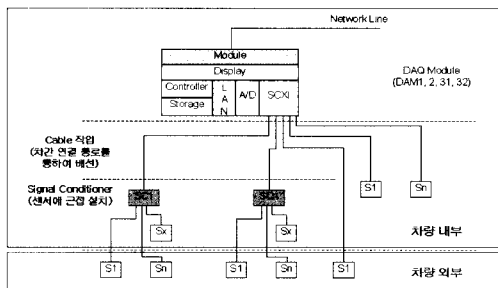


Fig. 6 Schematic diagram for each DAM

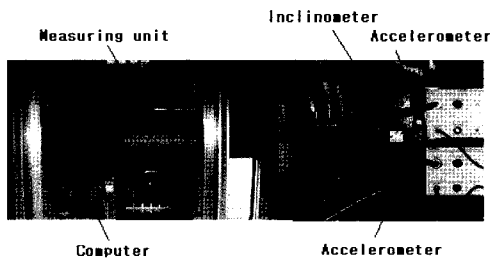


Fig. 7 Experimental set-up and sensors for body vibration test

3.3 시운전 시험 결과 분석

Fig. 8은 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 시험선 선로를 200 km/h의 평균속도(표준편차: 0.76 km/h)로 주행할 때, 시간에 대한 휠 셀(WS51), 대차(BT5) 및 차체(TT3)에서 측정된 수직방향 가속도 신호를 10 Hz 저주파 밴드로 필터링한 결과이며, Fig. 9는 시제차량의 주행속도 변화에 따른 객차에서 측정된 수직방향 가속도 실효치로 표시기호 ○, □ 및 △는 휠 셀(WS51), 대차(BT5) 및 차체(TT3)에서 각각 측정된 수직방향 가속도이다. 휠 셀, 대차 및 차체에서 측정된 가속도 신호는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 최대치로는 신호 크기의 비교가 어렵지만, Fig. 9의 실효치로는 쉽게 비교할 수 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 휠 셀에서 측정된 가속도 신호가 대차에서의 가속도 신호보다 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 가속도 신호는 증가하며, 1차 현가 장치와 2차 현가 장치를 통한 진동 감소효과도 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서는 생략되었으나, 측정된 수평방향 가속도도 수직방향 가속도와 동일한 경향을 나타내었다.

Fig. 10은 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 시험선로를 주행할 때, 남서울 기점 129 km ~ 134 km 사이의 곡선부에서의 고속철도 차량의 주행속도변화를 나타낸 것이며, Fig. 11은 그 때의 1 Hz 이상의 주파수 성분이 제거된 차체 좌우방향의 가속도 신호이며, 곡선부 효과가 좌우방향의 가속도의 변화로 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 7000 m인 곡선부에서는 약 145.1 mm의 캔트가 설정되어 있기 때문에 고속철도 차량의 균형속도, 즉 원심력 효과와 캔트에 의한 중력 효과가 상쇄되는 주행속도는 300 km/h이므로 고속철도 차량의 주행속도가 이 속도보다 낮을 때에는 캔트초과 상태가 되어 좌우방향 가속도는 고속철도 차량의 회전중심으로 향하며, 반대의 경우에는 캔트 부족 상태가 되어 회전중심에서 바깥 방향으로 향하게 된다. Fig. 11의 경우는 주행속도가 200 km/h 이하이므로 캔트 초과 상태로 좌우

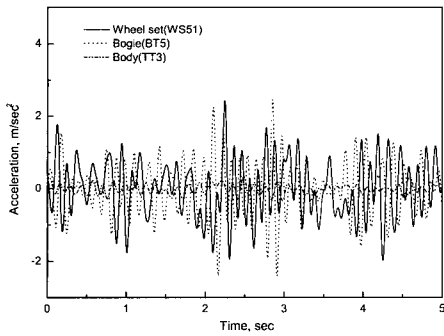


Fig. 8 Vertical max. accelerations for wheel set, bogie and body at train speed 200 km/h

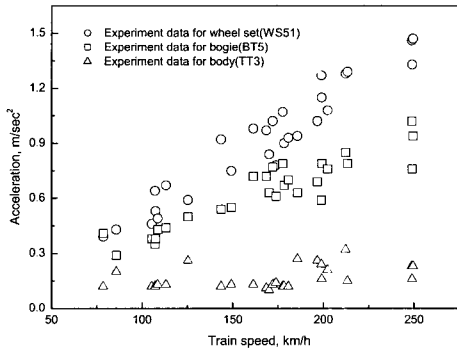


Fig. 9 Vertical rms accelerations for wheel set, bogie and body according to train speed

방향 가속도가 회전중심을 향한다. Fig. 12는 곡선부에서의 곡률반경, 캔트 및 원심력의 관계를 자세히 분석하기 위해 고속철도 차량의 주행속도에 대한 좌우방향 가속도의 크기 변화를 나타내었다. 실제의 시운전 시험이 균형속도보다 낮은 속도에서 진행되었으므로 주행속도가 증가함에 따라 좌우방향 가속도의 크기가 감소함을 확인할 수 있었다.

Fig. 13은 고속철도 차량이 시험선로를 주행할 때 발생하는 차체에서의 전후방향 가속도와 저크를 나타낸 것이다. Fig. 13(b)와 Fig. 13(c)는 Fig. 13(a)의 속도선도에서 견인구간과 제동구간에 대한 전후방향의 가속도와 저크의 변화이며, Fig. 13(b)와 Fig. 13(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 속도증가 즉 견인시에는 전후방향의 가속도가 0보다 크며, 속도감소 즉 제동시에는 0보다 작다. 또한, 저크의 경우는 전후방향의 가

속도의 변화에 따라 변화됨을 알 수 있으며, 견인과 제동의 두 경우 모두 저크가 0.15 m/sec^3 를 초과하지 않는다. 저크의 최대치에 대한 기준은 한국형 고속철도 차량에서는 규정되어 있지 않으나, 경부 고속철도의 경우에는 저크 최대 제한치가 0.5 m/sec^3 으로 규정되어 있고 실제 측정치는 이보다 훨씬 작다.

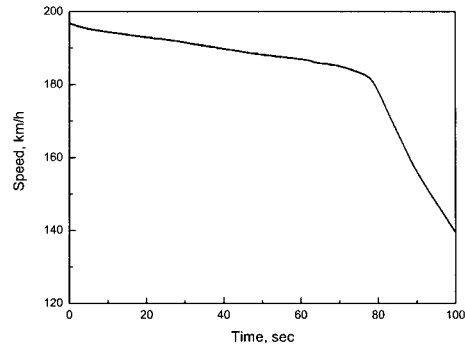


Fig. 10 Train speed variation

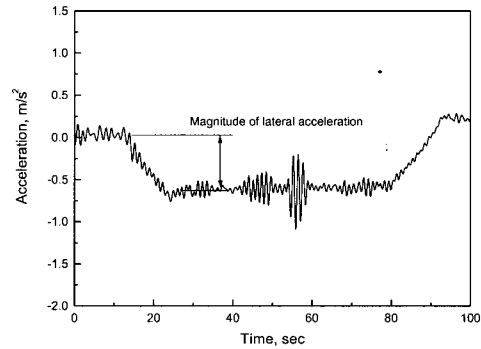


Fig. 11 Lateral acceleration according to train speed variation

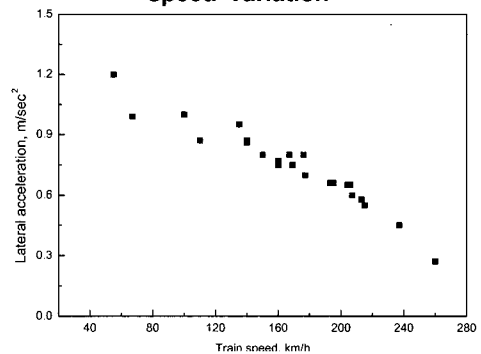
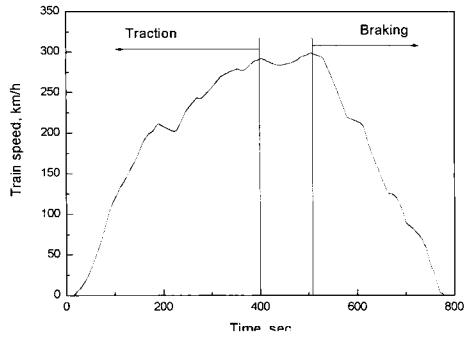
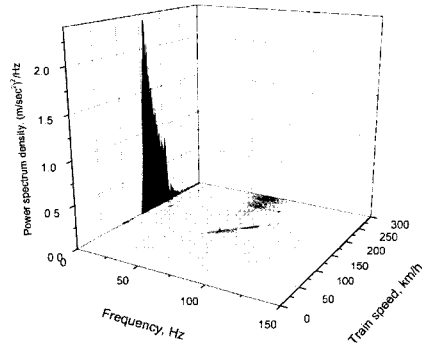


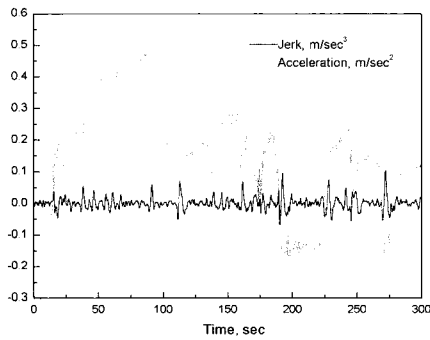
Fig. 12 Magnitude of lateral accelerations according to train speeds at curved line (R7000)



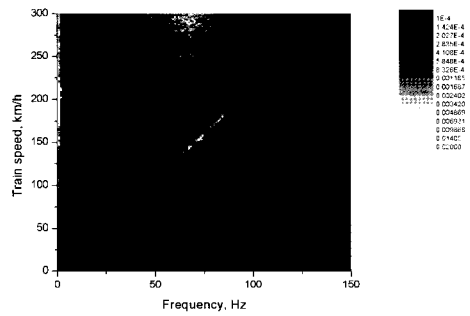
(a) Time vs. train speed



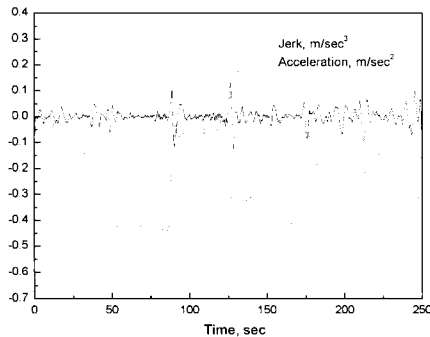
(a) 3D map surface plot



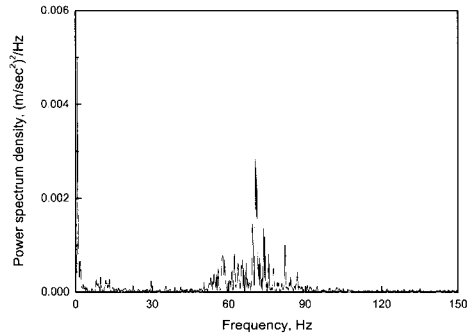
(b) During traction



(b) Frequency vs. train speed



(c) During Braking



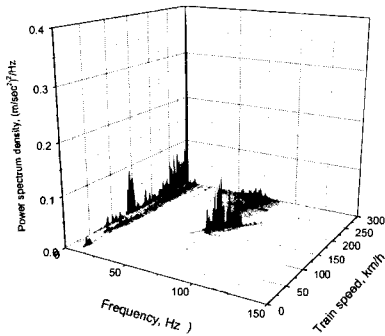
(c) Power spectrum density vs. frequency at train speed 150 m/sec²

Fig. 13 Longitudinal acceleration and jerk according to time

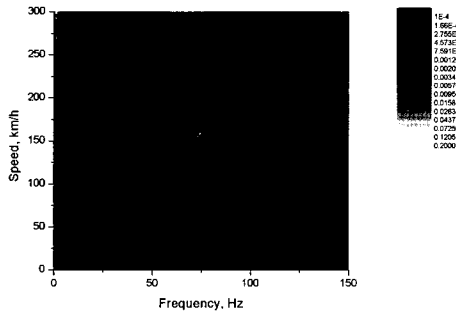
Fig. 14 Lateral acceleration variation according to train speed and frequency

Fig. 14와 Fig. 15는 고속철도 차량의 주행선도가 Fig. 13(a)와 같을 때, 좌우방향 가속도와 상하방향 가속도에 대해 속도변화와 주파수의 변화에 대한 파워 스펙트럼 밀도의 변화를 각각 나타낸 것으로 좌우방향과 상하방향 모두 주파수 특성이 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, 속도변화에 대해 주파수가 선형적으로 뚜렷하게 변화하는 동적모드가 나타나고

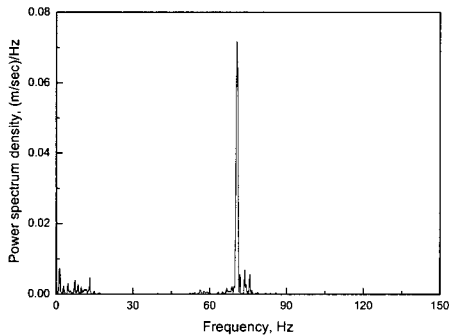
주행속도 100 ~ 200 km/h, 주파수 50 ~ 100 Hz 부근에서 파워 스펙트럼 밀도가 크게 나타남을 볼 수 있다. 동적모드 주파수는 주행속도와 밀접한 관계가 있으며, 주행속도가 변함에 따라 주파수도 선형적으로 변한다. 예를 들면 0.6 m 간격으로 부설되어 있는 침목을 고속철도 차량이 300 km/h의 주행속도로 주행할 때, 주파수는 약 140 Hz가 된다. 또한, 고속



(a) 3D map surface plot



(b) Frequency vs. train speed



(c) Power spectrum density vs. frequency at train speed 150 m/sec²

Fig. 15 Vertical acceleration variation according to train speed and frequency

철도 차량의 주행속도의 변화에 관계없이 주파수가 변화하지 않는 고유모드도 확인할 수 있으며, 좌우방향의 경우는 0 ~ 2 Hz, 10 Hz, 60 ~ 90 Hz 대에, 상하방향은 0 ~ 4 Hz, 8 ~ 13 Hz, 60 ~ 80 Hz대에 존재하고 있다.

Fig. 16은 TT3 차체에 대한 고속철도 차량의 주행

속도에 따른 3 ~ 5 Hz 대역에서의 좌우방향 가속도 최대치로 ■은 실제의 측정결과이며, 실선은 측정결과를 이용한 회귀곡선이다. 250 km/h 이하의 주행속도에서 실제 측정된 차체의 좌우방향 가속도 신호는 0.7 m/sec² 이하로 한국형 고속철도 차량의 주행 안전성을 평가하기 위한 기준보다 훨씬 작다. 또한, 회귀곡선에 의해 350 km/h의 주행속도에서 차체에 대한 좌우방향 가속도 신호는 1.32 m/sec² 정도로 예측되기 때문에 350 km/h에서도 주행 안전성은 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 17은 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 시험선로를 197.9 km/h로 주행할 때, TT3 객차에서 측정된 5~100 Hz 대역에서의 전후방향, 좌우방향 및 수직방향의 가속도이다. 수직방향 가속도가 다른 방향보다 크게 나타나므로 차량부품이 수직방향의 진동에 대해 견딜 수 있다면 다른 방향의 진동은 문제가 되지 않기 때문에 진동한계를 수직방향에 대해서만 검토하는 것이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 18은 주행속도의 변화에 따른 수직 방향의 가속도 피크-피크치이다. ■은 실제의 측정결과를, 실선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선으로 측정된 280 km/h 이하의 주행속도에서 0.4g인 진동한계를 벗어나지 않으며, 350 km/h의 주행속도에서의 수직방향의 가속도를 회귀곡선을 통해 예측해도 진동한계를 벗어나지 않는다.

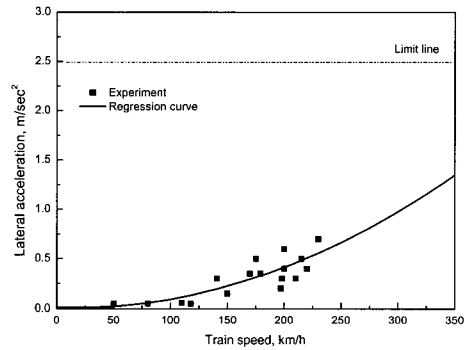


Fig. 16 Maximum lateral accelerations of body according to train speeds

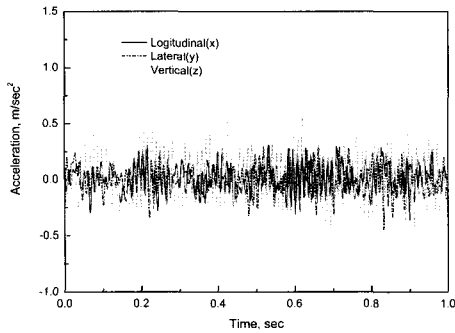


Fig. 17 Accelerations of body in the three direction

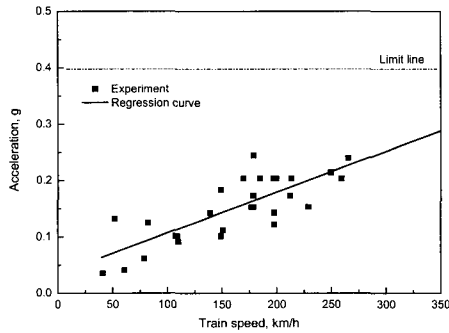


Fig. 18 Vertical accelerations of body according to train speed

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고속철도 차량의 주행속도가 증가함에 따라 휠셀, 대차 및 차체에서 측정된 가속도 신호는 증가하지만, 1차 현가 장치와 2차 현가 장치의 진동 감소 효과도 증가한다.

(2) 견인시에 전후방향의 가속도가 0보다 크고 제동시는 반대의 현상을 나타내며, 전후방향의 가속도의 변화에 따라 저크가 변화된다. 견인과 제동의 두 경우 모두 저크가 0.15 m/sec^3 을 초과하지 않으며, 경부 고속철도의 최대 제한치(0.5 m/sec^3) 보다 훨씬 작다.

(3) 좌우방향과 상하방향에 대한 주파수 특성이 비슷하며, 동적모드와 고유모드가 확인할 수 있었다. 침묵간격에 의한 것으로 추측되는 동적모드는 고속철도 차량의 주행속도의 변화에 따라 주파수가 선형적으로 변화하며, 고유모드는 좌우방향이 0 ~ 2 Hz, 10 Hz, 60 ~ 90 Hz 대에, 상하방향이 0 ~ 4 Hz, 8 ~ 13 Hz, 60 ~ 80 Hz대에 존재하고 있다.

(4) 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 시제차량의 주행 안전성에 문제가 없음을 확인하였고, 차량부품도 손상되지 않을 것으로 판단된다.

(5) 회귀곡선을 통해 350 km/h에서의 진동특성을 예측해 보면 이 주행속도에서도 고속철도 차량의 주행 안전성과 차량부품의 진동에 대한 문제가 없을 것으로 판단되지만, 350 km/h의 실제 운행속도에서의 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 차량의 주행 안전성과 차량부품에 대한 진동한계에 대한 철저한 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (1998), 고속전철시스템 기본사양.
2. 한국철도기술연구원 (2001), 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 연차보고서.
3. 한국철도기술연구원 (2002), 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 최종보고서.
4. 김영국 등 (2002), "신경회로망 모델을 이용한 철도 현가장치 설계변수 최적화", 소음진동공학회는문집, 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.
9. (재)철도종합기술연구소 (1993), 재래철도운전속도향상 시험매뉴얼/해설