

한국형 고속열차에 대한 고속(310 km/h 이상) 영역에서의 승차감 예측 및 평가

Prediction and evaluation of ride comfort at high speed above 310 km/h for Korean high speed train

김영국* 김석원** 목진용** 김상수**
Kim, Young Guk Kim, Seog Won Mok, Jin Yong Kim, Sang Su

ABSTRACT

The ride comfort is more important in the train speedup. Generally, it is defined as the vehicle vibration. There are many studies on evaluation method of ride comfort for railway. But the ride comfort for Korean high speed train(HSR 350x) has been assessed by statistical method according to UIC 513R. It is very difficult for HSR 350x to run at constant speeds above 310 km/h during 5 minutes required in UIC 513R because of the same operational condition as KTX and the infrastructures. In this paper, the ride index at high speed above 310 km/h has been predicted by using those obtained below 310 km/h and the comfort for HSR 350x has been reviewed in these speeds.

1. 서론

철도 교통은 다른 교통수단에 비해 승객과 화물의 대량 수송이 가능할 뿐만 아니라 안전성, 정시성(定時性) 및 환경 친화성 등의 장점을 갖고 있다. 철도를 다른 교통수단과의 경쟁력을 강화시키기 위해서는 열차의 속도 및 여객수송의 품질 향상 등이 필요하다. 특히, 승객이 여객수송의 품질에 대해 최종적으로 평가한다는 점을 감안할 때 승차감을 일정한 수준이상으로 향상시키는 것이 필수적이다. 철도 교통은 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 휠/궤도 접촉(wheel/rail contact), 구동모터(traction motor), 콤프레서(compressor), 각종 전기접점 등에 의한 기계적인 진동[2-4]과 이로 인한 소음이 발생된다. 이렇게 발생된 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. 일반적으로 철도에서는 측정된 진동가속도를 인간의 등가 감응량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다[5-8]. 철도분야의 승차감은 여러 가지의 평가방법이 각종 규격에서 제시되고 있으나[4-8], 한국형 고속열차(Korean high speed train, HSR 350x)는 국제철도협회(UIC, International Union of Railways)에서 규정한 UIC 513R 규격[6]에 따라 승차감을 평가하도록 되어 있다[1].

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : ygkim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5612 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

20세기 말에 맞이한 세계적인 철도 르네상스와 더불어 국내 철도도 경부고속철도(Korea Train eXpress, KTX)의 개통과 한국형 고속열차의 독자 개발로 인해 고속철도의 운영과 기술개발이 한 단계 도약하는 기회가 마련되었다. 고속철도의 개통은 미약한 국내 철도기술로 인해 해외에서 도입된 기술로 이루어졌지만, 철도 선진국 수준의 철도기술을 확보하기 위하여 국가의 전략적 차원에서 고속철도기술 개발사업이 진행되어 350 km/h급의 7량 1편성인 한국형 고속열차 시제차량이 제작되어 5년여에 걸친 시운전 시험이 진행되고 있다. 시운전 시험 초기에는 개발된 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항 [1]에 만족되는 지에 주안점을 두었으나, 시제차량의 성능이 점차 안정화됨에 따라 신뢰성을 확보하기 위해 시운전 시험이 진행되고 있다. 시제차량의 차체진동성능시험의 일부로 수행되고 있는 승차감 시험은 시험 초기에는 시제차량의 성능의 확인을 위해 시운전 시험시에 정기적으로 수행하였으나, 현재는 필요한 경우에 한해 비정기적으로 수행하고 있다.

한국형 고속열차의 시운전시험은 KTX 영업선로에서 KTX의 영업운전과 동일한 운행조건으로 진행되고 있으며, 경부고속선로의 부설되어 있는 궤도, 토목, 신호 등 시설물들에 대한 허용속도의 한계 때문에 310 km/h 이상의 주행속도로 고속열차를 운행하기 어려운 상황이다. 특히, 310 km/h 이상의 주행속도에서 UIC 513R 규격의 승차감 평가 조건인 5분 동안에 일정한 주행속도를 유지하는 것은 거의 불가능하기 때문에 시운전 시험을 통해 310 km/h 이상의 고속에서 한국형 고속열차의 승차감은 평가할 수가 없다. 본 논문에서는 310 km/h 이하에서 승차감 시험을 통해 획득된 승차감 지수 데이터를 활용하여 310 km/h 이상의 고속에 대한 승차감 지수를 예측하여 한국형 고속열차의 승차감을 고속에서 평가하고자 한다.

2. UIC 513R에 따른 승차감 평가 분석

철도에서의 승차감 평가는 "ISO 2631규격"과 Sperling이 제안한 "승차감 지수(Wz)"로 평가하는 Wz 평가법이 오랫동안 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 국제철도협회(International Union of Railways, UIC)와 국제표준위원회(International Standardization Committee, ISO)가 UIC 513R과 ISO 10056, ISO 2631-4 등의 규격을 새로이 제정하였다[6-7]. 한국형 고속열차 시제차량에 대한 승차감 평가는 설계 요구사항에 제시되어 있으며, UIC 513R에 따른 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준을 적용하도록 되어 있다. Fig. 1은 UIC 513R 규격에 규정된 철도 차량의 통계적인 승차감 평가방법에 대한 평가 흐름도를 나타낸 것이다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도센서로 직접 측정되거나 테이프 레코더에 저장된 진동가속도 신호는 저주파 밴드필터(lowpass filter)로 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블럭(5초 동안 측정 데이터)의 신호는 푸리에 변환을 통해 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 0.4 ~ 80 Hz 주파수 범위에서 각 주파수에 대한 진동가속도 파워를 구한다. x, y, z 방향에 대한 블록의 진동가속도 파워는 해당 평가법에 따라 Fig. 2의 주파수 보정곡선을 통해 주파수 보정을 행한 후에 각 방향에 대한 진동 가속도 실효값을 식(1)로 부터 구한다.

$$a_{r.m.s.i} = \sqrt{\int_{0.5}^{80} G_i(f) B_i^2(f) df} \quad (i = x, y, z) \quad \text{--- (1)}$$

여기서, G_i 는 가속도 파워, B_i 는 Fig. 5의 주파수 보정 곡선이다. 통계적인 평가방법은 x, y, z 방향에 대해 식 (1)에 의해 계산된 5초 간격의 진동가속도 실효값 60개(연속 5분 동안)를 이용하여 구한 누적 빈도가 95%인 실효값($A_{wx95}, A_{wy95}, A_{wz95}$)을 이용하여 승차감 지수 N_{mv} 는 식(2)와 같이 구해지며, 이 승차감 지수로 철도차량의 승차감을 평가하게 된다.

$$N_{mv} = 6\sqrt{(A_{wx95})^2 + (A_{wy95})^2 + (A_{wz95})^2} \quad \text{--- (2)}$$

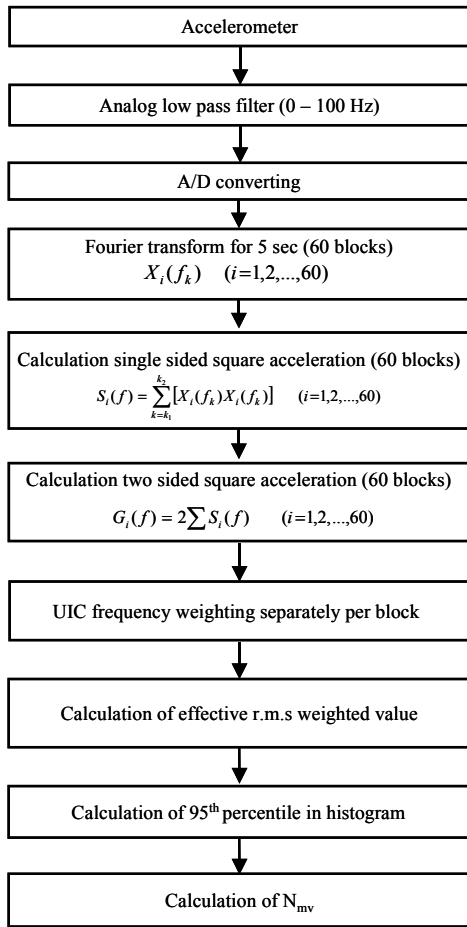
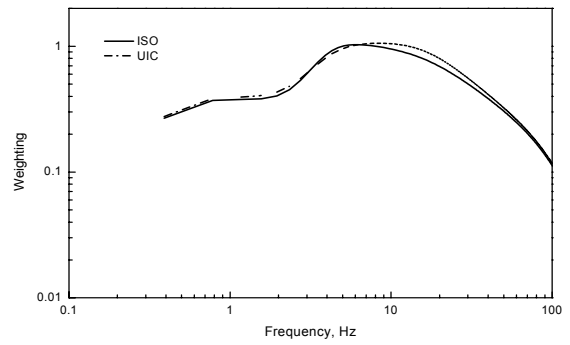
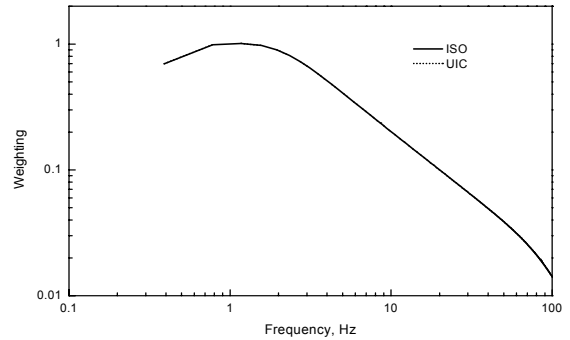


Fig. 1 Flowchart of ride comfort evaluation



(a) For vertical direction



(b) For lateral and longitudinal direction

Fig. 2 Frequency weighting curve

3. 고속영역(310 km/h 이상)에서의 한국형 고속열차의 승차감 예측 및 평가

3.1. 한국형 고속열차 시제차량

한국형 고속열차 시제차량(HSR 350x)은 Fig. 3에서 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. 이들 현가 장치의 성능은 승객의 승차감을 악화시키는 데에 가장 큰 영향을 주는 휠/궤도 접촉에 의해 발생하는 진동을 감쇄시키는 중요한 역할을 한다. 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 [4].

3.2. 고속에서 승차감의 측정 및 평가에 대한 한계성 고찰

승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 개발하여 확보하고 있는 Fig. 4의 승차감 측정시스템을 사용하였다. 이 승차감 측정시스템은 샘플링 주파수가 400 Hz이고, 2,048개의 데이터를 사용하여 DSP에서 푸리에 변환을 수행하기 때문에 2장에서 정의한 1블럭은 실제로 5초가 아닌



Fig. 3 Prototype of Korean high speed train



Fig. 4 Experimental set-up

5.12초이며, 통계적 방법에 사용된 60개 블록은 5.12분에 해당한다[5]. 또한, 이 논문에서 사용된 승차감의 평가 위치는 중간객차(TT3)의 후단부 차량바닥이다.

Fig. 5는 한국형 고속열차의 속도 달성 과정을 나타낸 것으로 2004년 12월 16일 국내에서 처음으로 350 km/h 주행에 성공하여 일본, 독일, 프랑스 등의 철도 선진국과 같은 수준의 고속열차를 국내에서도 확보하게 되었다. Fig. 6은 한국형 고속열차가 340 km/h로 증속할 때의 주행속도곡선을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 최고속도는 337 km/h를 기록하였지만 330 km/h 이상으로 주행한 시간은 약 62 sec에 불과하며, 이는 궤도, 토목 등 시설물들에 대한 허용속도의 한계 때문에 긴 시간동안의 시운전시험이 불가능하였음을 말해주고 있다. UIC 513R 규격에서 요구하는 최고속도를 포함한 5분(300초)간의 주행속도를 살펴보면 최소속도와 최고속도는 각각 288 km/h와 최고속도 337 km/h이었고, 이때의 평균속도는 309 km/h로 이들을 승차감 지수와 함께 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 한국형 고속열차가 310, 320, 330 km/h로 증속하는 경우에도 340 km/h로 증속할 때와 마찬가지로 최고속도를 5분간 유지하는 것이 불가능하였고, 각 경우에 대해서도 최고속도를 포함한 5분(300초) 구간의 최고속도, 최저속도, 평균속도 및 승차감 지수를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 310, 320, 330, 340 km/h로 증속됨에도 불구하고 실제 시운전 시험조건의 한계로 인해 평균속도는 최고속도에 비해 훨씬 낮고 더 높은 속도로 증속됨에도 불구하고 평균속도의 변화폭이 작다는 것을 알 수 있다. 따라서, 고속영역에서 승차감은 실제 시운전 시험조건의 한계로 인해 시운전 시험과정에서 직접 측정하여 평가하는 것이 어렵기 때문에 다른 방법으로 고속영역에 대한 승차감을 평가할 필요가 있다.

Fig. 8은 시운전 시험과정에서 획득된 승차감 지수를 나타낸 것으로 심볼(□)은 293개의 승차감 시험 결과로, 심볼(★)은 20 km/h 간격으로 주행속도와 승차감 지수의 평균을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 측정된 승차감 지수의 대부분이 주행속도 300 km/h 근처에 분포하고 있는 데, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 한국형 고속열차의 시운전 시험이 KTX의 영업운전과 동일하게 진행되었기 때문이며, 승차감 지수는 기준인 UIC 513R의 "Deluxe rolling stock" 한계인 2보다 작음을 알 수 있다.

3.3. 고속영역에서의 한국형 고속열차의 승차감 예측 및 평가

3.2에서 고찰한 바와 같이 고속영역에서 승차감은 실제 시운전 시험조건의 한계로 인해 시운전 시험 결과로 직접적으로 평가하는 것이 어렵기 때문에 Fig. 8에 나타낸 293개 승차감 지수 데이터를 이용하여 이에 대한 회귀곡선을 구한 후에 해당하는 고속영역의 주행속도에서 승차감 지수를 예측하여 평가할 수 밖에 없다. Fig. 9는 Fig. 8의 현재까지 측정된 293개 승차감 지수와 이들 승차감 지수로부터 구한 회귀곡선을 나타낸 것으로 회귀곡선식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$N_{mv} = 0.6434 + 0.02907 \times e^{\frac{v}{91.92}} \quad \text{--- (3)}$$

여기서, N_{mv} 는 승차감 지수, V 는 열차 주행속도를 말한다.

Fig. 10은 구해진 회귀곡선으로부터 310 km/h 이상의 고속에 대해 승차감 지수를 예측한 결과를 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 열차의 주행속도 350 km/h인 경우에 승차감 지수가 1.95로 승차감 평가 기준인 UIC 513R의 "Deluxe rolling stock" 한계 2보다 작으므로 평가 기준을 만족한다.

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 310 km/h 이상의 고속영역에서 승차감은 실제 시운전 시험조건의 한계로 인해 시운전 시험과정에서 직접 측정하여 평가하는 것이 어렵기 때문에 다른 방법으로 고속영역에 대한 승차감을 평가해야 할 것이다.

(2) 시운전 시험을 통해 측정된 293개 승차감 지수 데이터를 이용하여 회귀곡선을 구하여 고속영역의 주행속도에서 한국형 고속열차 시제차량의 승차감 지수를 예측하고 평가하였다. 310 km/h 이상의 고속영역에서도 한국형 고속열차 시제차량의 승차감은 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준인 2보다 작은 범위로 양호한 승차감 특성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
- [2] 김영국 등, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석," 소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, 한국소음진동공학회, 2002.
- [3] Suzuki, H., "Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F, 1998.
- [4] 김영국 등, "시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가," 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, 한국철도학회, 2003.
- [5] 김영국 등, "다기능성을 갖는 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발," 센서학회지, 제13권, 제5호, 한국센서학회, 2004.
- [6] International Union of Railways, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R, 1994.
- [7] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
- [8] 김영국 등, "국내 고속철도 차량의 승차감에 대한 고찰," 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, 2003.

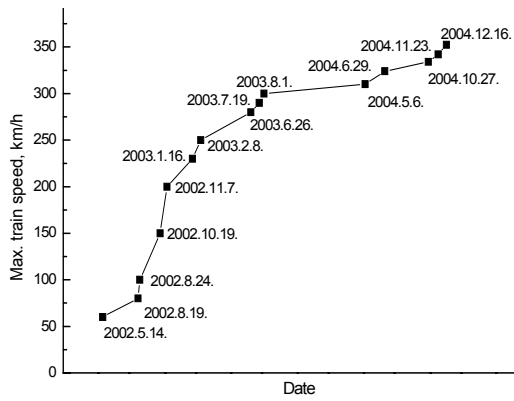


Fig. 5 Variation of max. speed for HSR 350x

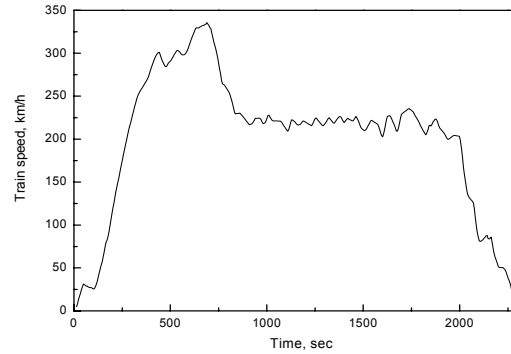


Fig. 6 Train speed(maximum 337 km/h)

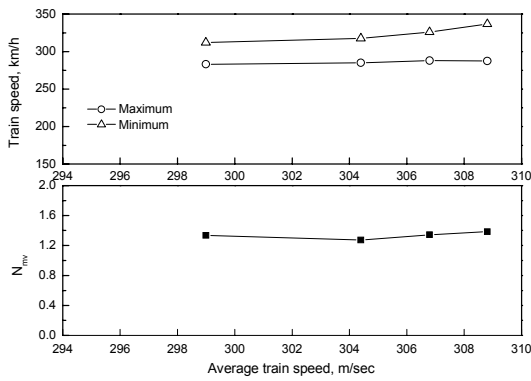


Fig. 7 Variations of ride index and maximum/minimum speed according to speed increasement

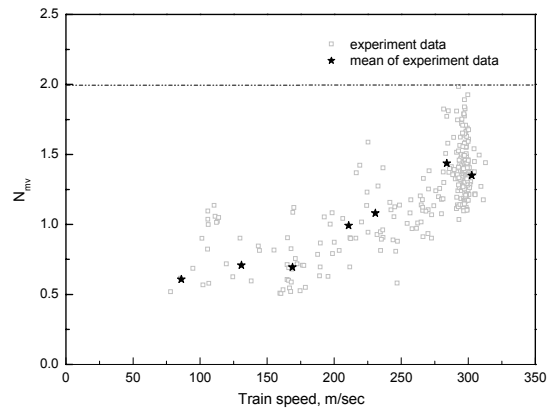


Fig. 8 Comparison of experimental results ar mean results for ride index

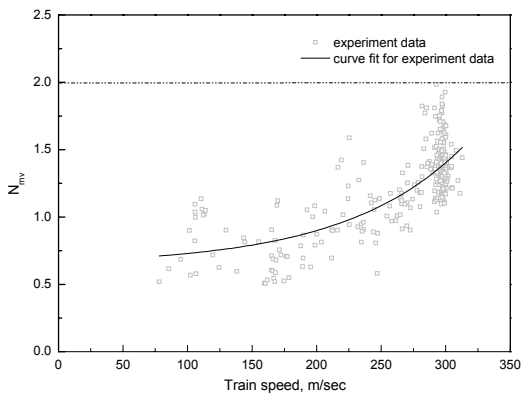


Fig. 9 Comparison of experimental results and curve fitted results for ride index

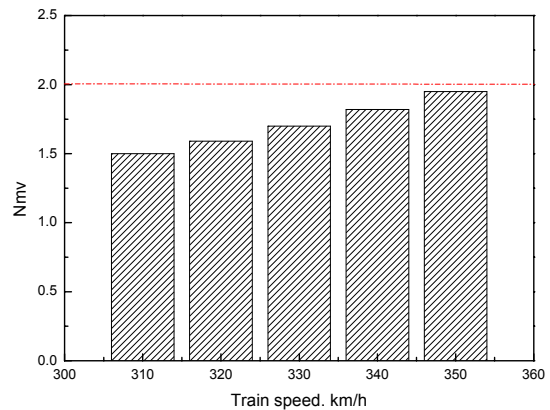


Fig. 10 Prediction of ride index at high speed above 300 km/h