

국내 고속철도 차량의 승차감에 대한 고찰

A study on the ride comfort of high speed train in Korea

김영국* 박찬경* 김석원* 김기환* 이태형*
Kim, Young-guk Park, Chan-kyoung Kim, Seog-won Kim, Ki-hwan Lee, Tae-hyung

ABSTRACT

In this paper, we introduce the characteristics of ride comfort for KTX(Korea Train eXpress) and HSR 350(Korea High Speed Train project). The concept of term "ride comfort" is equivocal. Generally it is defined as the vehicle vibration. There are many studies on evaluation method of ride comfort for railway. In the case of KTX, the ride comfort has been evaluated according to ISO 2631 standard. But the ride comfort for HSR 350 has been assessed by UIC 513R. We have reviewed the ride comfort for KTX and HSR 350 by same method, such as ISO 2631 and UIC 513R, and compared the result of KTX with that of HSR 350

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 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. 승차감은 인간이 감정적으로 느낄 수 있는 다양한 요소(진동, 소음, 온도, 습도, 조도, 개인 공간, 좌석의 질감, 천장의 높이, 전망, 통풍 등)들이 복합적으로 결합되어 나타나지만, 이러한 제반 요소들을 모두 고려하여 정량적으로 승차감을 평가하는 것은 대단히 어려운 일이다. 일반적으로 철도에서는 측정된 진동가속도를 인간의 등가 감응량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다. 철도 분야에서는 승차감의 평가방법으로 "ISO 2631규격" 및 Sperling에 의해 제안된 "승차감 지수"가 주로 사용되고 있다. 이 방법은 철도환경에 대해 규정하고 있으나, ISO 2631 규격은 전신진동(Whole-body vibration)에 대한 일반적인 사항만을 규정하고 있을 뿐 적용환경에 대해서는 규정되어 있지 않다. 국제철도협회(UIC, International Union of Railways)에서는 유럽철도연구소(European Rail Research Institute, 이하 ERRI라고 함)에서 수행한 "ISO규격의 철도환경으로 적용"이라는 연구의 결과(6)를 바탕으로 1995년에 독자적인 철도의 승차감 평가방법 및 평가기준을 규정한 철도차량의 승차감과 관련된 규격을 제정하였으며, 유럽표준위원회(CEN, European Committee for Standardization)에서는 UIC 규격과 동일한 평가방법과 평가기준을 사용한 새로운 철도 승차감의 측정 및 평가방법에 대한 규정을 제정하였다. 국제표준위원회(ISO, International Standardization Committee)에서도 UIC 규격을 바탕으로 철도환경에서의 승차감에 대한 규격을 새로 제정하였다(10025)(2631-4). 그러나, ISO 규격에서 1997년 이후에 제안한 승차감 평가와 관련한 규정은 평가방법에 대해서만 규정하고 있을 뿐 평가기준에 대해서는 규정되어 있지 않다. UIC 규격에서는 통계적

* 한국철도기술연구원 고속전철기술개발사업단

인 방법에 의한 철도차량의 승차감 평가방법을 사용하도록 하고 있으며, ISO 규격에서는 기존의 방법인 가속도의 실효값을 이용하거나 UIC 규격과 동일한 방법인 통계적 방법으로 승차감을 평가하도록 하고 있다. 국내의 승차감 평가는 ISO 2631/1(1985)의 8시간 피로능틀한계를 기준으로 제정된 승차감 레벨이 철도 운영주체의 철도차량 제작시방에 명기되어 사용되어 왔으며, 한국표준규격(KS, Korea Standard)에서도 2000년 철도차량 승차감 평가에 대한 규정을 제정하였다. 이 규정에서는 통계적인 방법과 승차감 레벨을 사용하도록 하고 있으며, 통계적인 방법은 UIC와 동일한 평가방법과 평가기준을 사용하고 있지만 승차감 레벨에 대한 평가기준은 기준을 제시한 근거가 명확하지 않기 때문에 실제 적용에는 한계가 있다. 이렇듯 다양한 철도차량의 승차감 평가방법과 평가기준에 대해 현재까지는 철도의 사용주체마다 다른 승차감 평가방법을 적용하고 있었으나 차후에는 철도차량의 승차감에 대해 평가방법과 평가기준을 명확히 제시하고 있는 UIC 규격이 철도차량의 승차감의 평가에 많이 사용될 것으로 예상된다.

100년 이상의 철도역사를 갖고 있는 국내 철도에서는 대형 국책사업인 경부 고속철도건설 사업이 진행되어 프랑스에서 도입된 고속철도 차량(KTX)으로 300 km/h 상업운전의 개통을 앞두고 서울 ~ 대전 구간에서 시운전 시험 중에 있다. 또한, 이와는 별도로 프랑스에서 이전된 기술을 토대로 독자적인 고속철도 기술을 확보할 목적으로 350 km/h로 주행할 수 있는 고속철도 시스템을 개발하였으며, 개발된 시제차량(HSR 350)을 경부 고속철도 시운전 구간에서 시운전 시험을 실시하여 305 km/h의 주행속도의 달성과 주행거리 7300 km에 이르렀다. 이 두 고속철도 차량에 대한 승차감 평가 기준은 차이가 있으며, KTX의 경우는 ISO 2631/1(1985) 규격, HSR 350은 UIC 513R 규격으로 승차감을 평가하도록 되어 있다.

본 논문에서는 현재 시운전 시험 중인 KTX 차량과 HSR 350 차량에 대한 승차감 평가기준을 소개하고 경부 고속철도 선로에서의 두 고속철도 차량 운행에 따른 승차감의 측정 결과를 살펴보고자 한다.

2. 승차감 평가방법 및 평가기준

2.1 평가방법

Fig. 1은 철도의 승차감을 평가하기 위한 평가 흐름도를 나타낸다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도센서로 직접 측정되거나 테이프 레코더에 저장된 진동가속도 신호를 저주파 밴드필터를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블록(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 퓨리에변환을 사용하여 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 주파수 범위(ISO 평가법: 0.5~80Hz, Wz 평가법: 0.5~30Hz, UIC 평가법: 0.4~80Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블록에 대해 반복적으로 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 계산한다. 계산된 60개 블록의 진동파워를 해당 평가법에 따른 주파수 보정을 행한 후에 각 평가법에 따른 평가지수를 구하게 된다.

(1) 실효값을 이용한 평가방법

실효값을 이용한 평가방법은 기본적으로 특정한 시간동안 측정된 진동 가속도의 주파수 보정된 파워 실효값(제곱근)을 이용하며, 식(1)로 구할 수 있다. 즉, 측정구간에 따라 적당한 블록수를 선택

하여 그 측정구간에서 계산된 평균 파워에 해당 방향의 주파수 보정을 행한 후 실효값을 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 : 진동가속도 파워, B_i : 주파수 보정 함수

또한, 실효값을 이용한 승차감 레벨은 식(2)와 같이 계산된 실효값(a_{rms})과 기준가속도($a_{ref} = 10^{-6}$ m/sec²) 비의 대수값으로 정의된다.

$$dB = 20 \log_{10}(A_{urms} / A_{ref}) \quad \text{----- (2)}$$

(2) 통계적인 평가방법

통계적인 평가방법은 x, y, z 방향에 대해 해당 방향에 적합하게 주파수 보정된 60개 블록의 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값을 사용하여 식(3)으로부터 승차감 지수를 구한다.

$$N_{MV} = 6\sqrt{(A_{w0.95})^2 + (A_{w0.95})^2 + (A_{w0.95})^2},$$

$$N_{MVx} = 6 A_{w0.95}, N_{M Vy} = 6 A_{w0.95}, N_{M Vz} = 6 A_{w0.95} \quad \text{----- (3)}$$

2.2 주파수 보정곡선의 비교

동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이를 나타내며, 이를 함수화시킨 것이 주파수 보정곡선으로 철도 승차감 평가법마다 Fig. 2와 같이 서로 다른 주파수 보정곡선을 사용하고 있다. ISO 평가법에서는 ISO 2631-1(1997)에서 정의된 주파수 보정곡선이 사용되며, 수직방향과 수평방향에 대해 4~12Hz와 0.6~2Hz에서 민감(주파수 보정값 0.9이상)하다. 또한, UIC 평가법의 주파수 보정곡선에서는 수직방향은 4~16.5Hz에서, 수평방향은 0.6~2Hz에서 민감하며, 수평방향은 ISO 평가법과 동일한 주파수 보정곡선이고 수직방향은 ISO 평가법과 거의 유사한 형태를 갖지만, 0.6~3Hz와 8~16Hz에서 주파수 보정치가 약간 크다. 참고로 Wz 평가법에 대한 주파수 보정곡선은 ISO 및 UIC 평가법과는 큰 차이를 나타내며, 수직방향과 수평방향에 대한 주파수 보정곡선의 형태는 거의 유사하고 모두 3~7Hz 부근에서 민감하다.

2.3 승차감 평가기준

KTX의 경우에 승차감 평가방법은 계약서에 명기되어 있으며, 이 계약서에 따르면 ISO 2631/1 (1985) 규격의 2시간 피로능력한계를 기준으로 규정하고 있다. ISO 2631/1 (1985) 규격의 2시간 피로능력한계를 가속도의 실효값으로 계산하면 상하방향은 0.257 m/sec², 수평방향은 0.183 m/sec²이 된다. HSR 350의 경우는 승차감 평가방법은 시방서에 명기되어 있으며, UIC 513R 규격의 "Deluxe rolling stock" 기준인 승차감 지수가 2이하를 적용하여 평가하도록 되어 있다.

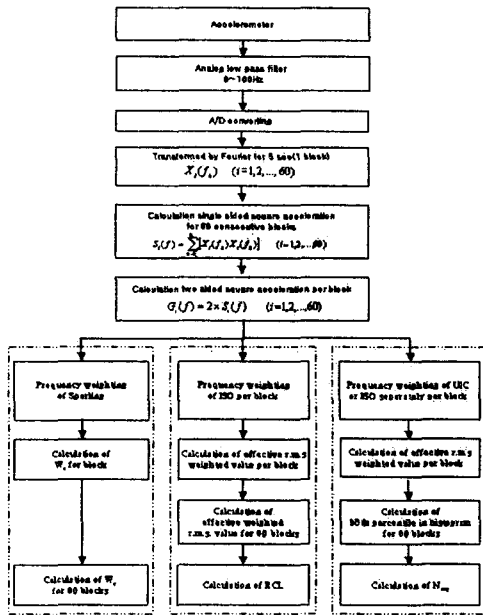
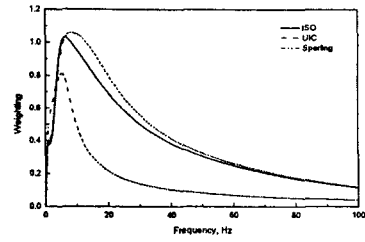
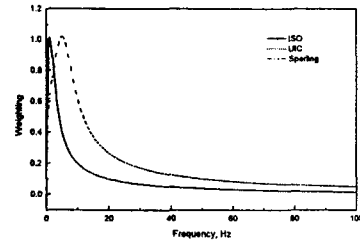


Fig. 1 Processing flow chart



(a) For vertical direction



(b) For lateral direction

Fig. 2 Frequency weight curve

2. 시운전 시험을 통한 승차감 평가에 대한 고찰

3.1 승차감 계측시스템

고속철도 차량(KTX와 HSR 350)의 승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 3의 승차감 측정시스템을 사용하였다. 또한, 이 승차감 측정기는 UIC 규격에 의한 승차감의 평가뿐만 아니라 ISO 규격 및 "Sperling"에 의한 승차감의 평가도 가능하도록 설계되어 있다. 가속도 측정을 위해 사용된 센서는 3축 가속도계이다.

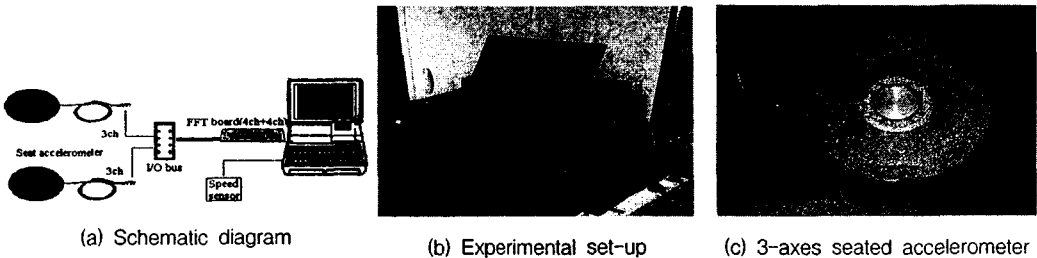


Fig. 3 Measuring system for ride comfort test

3.2 시운전 시험을 통한 승차감의 고찰

시운전 시험에 사용된 KTX 차량은 21호로 서울역에서 대전까지 시운전 시험이 진행되고 있기 때문에 고속철도 차량이 서울역과 광명사이의 기존선과 고속선을 주행하게된다. 시운전 시험 초기에는 서울역에 광명까지의 기존선 시험이 이루어졌으며, 그 후 시운전 시험구간을 대전까지 확대하였다. 이 과정에서 시운전 시험 중간에 객차 대차의 횡댐퍼가 추가되어 현재에는 이 상태로 시운전 시험이 진행되고 있다. HSR 350의 경우는 경부 고속철도의 시험선 구간(천안 ~ 시목)간에서 51회의 시운전 시험이 실시되었다.

Fig. 4 ~ Fig. 7은 KTX에 대한 승차감 시험결과로 가속도의 실효값을 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5는 KTX가 객차 대차의 횡댐퍼가 없는 상태로 기존선을 평균속도 105.4 km/h로, 고속선을 평균속도 298.0 km/h로 주행 할 때의 5.12 sec 간격의 가속도 실효값을 나타내며, Fig. 6은 KTX가 객차 대차의 횡댐퍼를 장착된 상태로 고속선을 평균속도 272.6 km/h로 주행 할 때의 5.12 sec 간격의 가속도 실효값이다. Fig. 4와 Fig. 5를 살펴보면 기존선에서는 주행속도가 낮음에도 불구하고 분기기, 레일간의 틈새 등의 영향으로 상하방향의 가속도가 고속선로를 고속으로 주행하는 경우보다도 큼을 볼 수 있다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 횡방향의 가속도가 KTX의 횡방향 기준치인 0.183보다 크지만, 객차 대차의 횡댐퍼가 추가함으로써 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 기준치이하로 안정화된다. Fig. 7은 객차 대차의 횡댐퍼가 장착된 상태로 고속선을 평균속도 285.6 km/h로 주행 하는 경우에 약 60 sec 간격의 가속도 실효값을 나타낸 것으로 모든 방향에 대해 KTX 승차감 기준 이내에 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 HSR 350이 고속선을 평균속도 272.6 km/h로 주행 할 때의 5.12 sec 간격의 가속도 실효값으로 Fig. 6의 KTX인 경우와 거의 비슷하거나 약간 작은 정도의 크기를 갖음을 알 수 있다.

Fig. 9는 KTX와 HSR 350에 대해 UIC 513R에 따라 승차감을 평가한 결과로 심볼(●)는 KTX가 객차 대차의 횡댐퍼가 장착된 상태의 결과이며, 심볼(□)와 실선은 HSR 350의 실제 측정결과와 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선이다. UIC 규격에 따른 평가에서도 실효값의 경우와 거의 비슷한 결과를 나타내며, "Deluxe rolling stock" 기준인 승차감 지수는 2이하로 승객이 안락하게 느끼는 한계 이내이다.

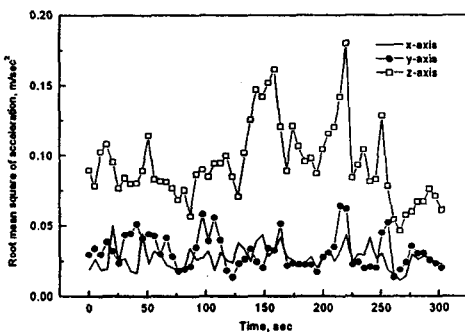


Fig. 4 r.m.s. acceleration(5.12sec) at 105.4 km/h in convention line without ATB lateral damper(KTX)

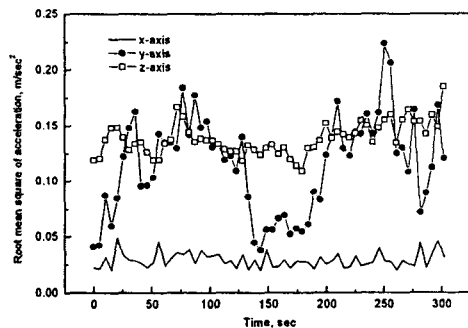


Fig. 5 r.m.s. acceleration(5.12sec) at 298.0 km/h in high speed line without ATB lateral damper(KTX)

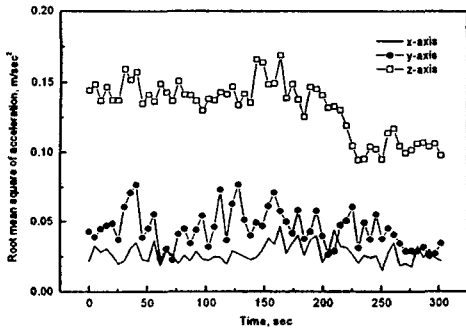


Fig. 6 r.m.s. acceleration(5.12sec) at 272.6 km/h in high speed line with ATB lateral damper(KTX)

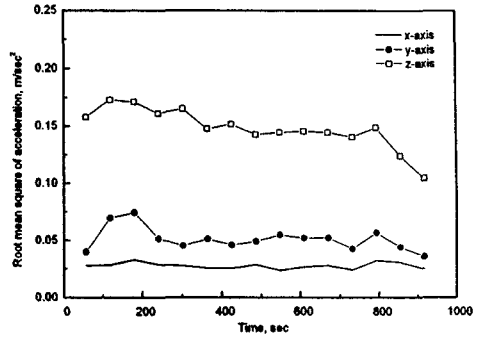


Fig. 7 r.m.s. acceleration(61.44 sec) at 285.6 km/h in high speed line with ATB lateral damper(KTX)

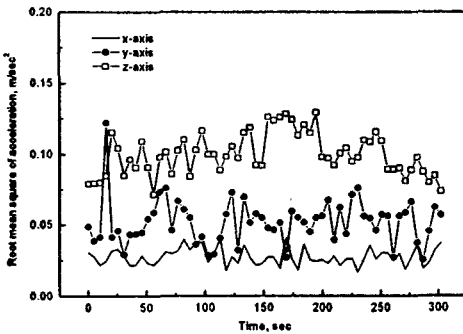


Fig. 8 r.m.s. acceleration(5.12sec) at 272.6 km/h in high speed line without ATB lateral damper(HSR 350)

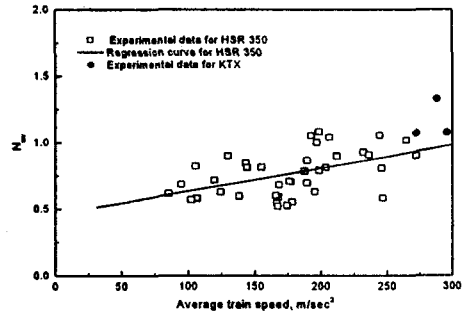


Fig. 9 Ride indices according to train speed

4. 결론

국내 철도교통의 혁신을 일으킬 고속철도 사업이 고속철도의 건설과 개발관점에서 국가의 중요사업으로 진행되어 결실을 맺을 시간이 점점 다가오고 있다. 이들의 결실인 KTX와 HSR 350가 시운전 시험 중에 있으며, 이들에 대해 승객의 입장에서의 시운전 시험을 통해 얻어진 승차감 측정 결과를 분석하였다. 두 경우가 서로 다른 승차감의 평가방법을 사용하고 있으나, 본 연구에서는 동일한 승차감 평가방법(ISO의 가속도 실효값을 이용하는 방법과 UIC에 의한 통계적 방법)으로 승차감의 평가를 실시하였으며, ISO와 UIC를 각각 적용한 경우에 대해 KTX와 HSR 350에서 고속선에서 측정된 결과가 거의 비슷한 수준으로 평가기준이내에 있음을 알 수 있었다. 또한, KTX의 경우에 객차 대차의 횡댐퍼의 장착이 승차감에 미치는 영향이 큼을 확인할 수 있었다.

후기

본 내용은 건설교통부의 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고문헌

1. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements, 1985.
2. ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
3. ISO 2631-3: Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 3: Evaluation of human exposure to whole-body z-axis vertical vibration in the frequency range 0.1~0.63Hz, 1985.
4. UIC 513 R: Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, 1994
5. CEN DRAFT prENV 12299: Railway applications ride comfort for passengers measurement and evaluation, 1997
6. Dynamics of railway vehicle systems, pp68-76, V.K.Carg, 1984, Academic Press
7. 김영국 등, 2002, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석", 소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, 한국소음진동공학회.
8. Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F.