

# 시운전 시험을 통한 한국형 고속전철에 대한 승차감의 분석

## Analysis of Ride Comfort for Korean High Speed Train through On-line Test

김영국\* · 김석원\*\* · 박찬경\*\*

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

**Key Words** : Korean High Speed Train (KHST, 한국형 고속전철), On-Line Test (시운전 시험), Ride Comfort (승차감), Ride Index (승차감 지수), Frequency Weighting Curve (주파수 보정곡선), Accelerometer (가속도계)

### ABSTRACT

Recently, the ride comfort problem becomes increasingly important because of today's needs for train speedup. The concept of ride comfort is equivocal. Generally, it is defined as the body vibration. 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 ride comfort has been reviewed 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 from the viewpoint of the comfort ride at this speed. And the ride index for KHST has been predicted at 300 km/h and 350 km/h by fitting curve.

### 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 감정으로 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 감용량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다<sup>(1), (2), (3)</sup>. 철도분야에서는 승차감의 평가방법으로 "ISO 2631규격<sup>(4)</sup>" 및 Sperling에 의해 제안된 "승차감 지수(Wz 방법)<sup>(5)</sup>"가 주로 사용되고 있다. Wz 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 철도 환경으로 적용"이라는 연구의 결과<sup>(6)</sup>를 바탕으로 1995년에 독자적인 철도의 승차감 측정 및 평가방법에 대한 규격을 제정하였으며<sup>(7)</sup>, 국제표준위원회(ISO, International Standardization Committee) 및 유럽표준위원회(CEN, European Committee for Standardization)에서는 UIC 규격과 동일한 평가방

\* 한국철도기술연구원  
E-mail : ygkim@krii.re.kr  
Tel : (031) 400-5612, Fax : (031) 400-5649

\*\* 한국철도기술연구원

법을 사용한 새로운 철도 승차감의 측정 및 평가 방법에 대한 규정을 제정하였다. 이렇게 다양한 철도차량의 승차감 평가방법에 대해 현재까지는 철도의 사용주체마다 다른 승차감 평가방법을 적용하고 있었으나 차후에는 UIC 규격에서 규정한 평가방법의 사용이 확대될 것으로 예상된다.

머지 않은 장래에 개통예정인 경부 고속철도와 남북철도 등으로 국민의 철도에 대한 관심이 어느 때보다도 높은 상태에서 프랑스에서 이전된 기술을 기반으로 Fig.1과 같은 독자적인 7량 1편성의 한국형 고속철도 시제차량이 제작되어 경부 고속철도 시운전 구간인 동서울역 기점 95 km 지점(천안역사) ~ 136 km 지점(문곡)의 총 41 km 구간에서 시운전 시험이 수행되었다<sup>(8)</sup>. 이 시운전 시험은 시제차량이 설계 요구조건에서 제시한 기능과 성능이 만족되는 지를 판정하기 위해 주행성능, 대차주행성능, 차체진동성능, 제동성능 등이 포함된 16개의 성능(세부시험 45개)이 차상 시험(열차 내부, 11개 성능의 31개 세부시험)과 지상 시험(열차 외부, 5개 성능의 14개 세부시험)으로 구분되어 실시되었다. 승차감 시험은 차체진동성능의 일부로 시험이 이루어졌으며, 시제차량에 대한 승차감은 UIC 513R 규격에 의해 평가하도록 되어있다.

본 연구에서는 한국형 고속철도 시제차량을 시운전 시험을 통해 UIC 513R 규정에 의해 승객의 승차감을 평가하였다.

## 2. UIC 513R 승차감 평가방법 및 평가기준

### 2.1 평가방법

Fig. 2는 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 평가법: 0.4 ~ 80 Hz)에서 각 주파수에 대한 진동 가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블록에 대해 각 주파수에 대한 진동 가속도의 파워를 계산하고, 계

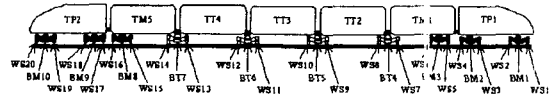


Fig. 1 Configuration of Korean high speed train (KHST)

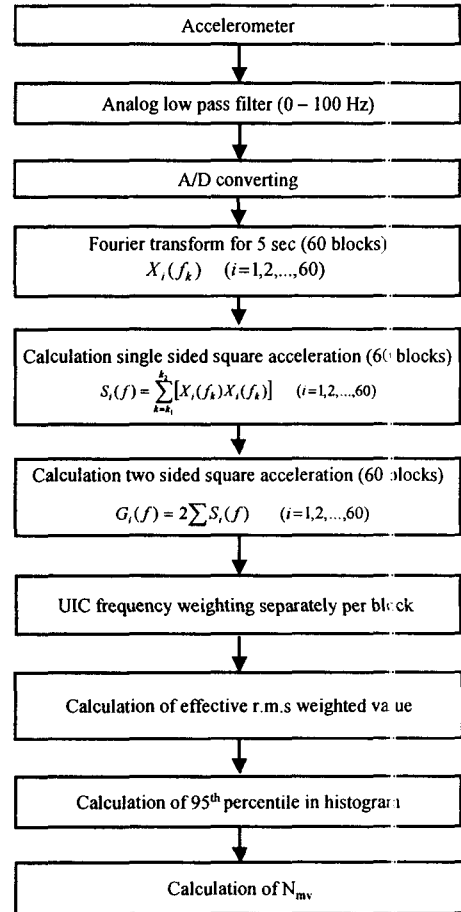


Fig. 2 Flow chart of the ride comfort evaluation procedure for railway vehicles

산된 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.

### 2.2 주파수 보정곡선

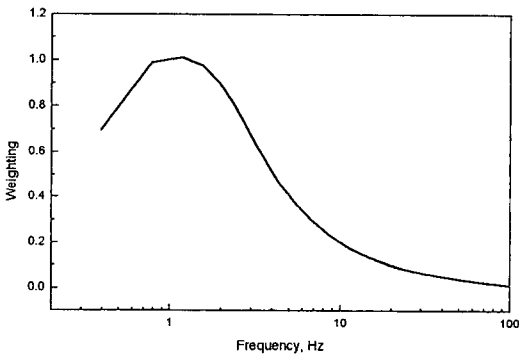
동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이가 있으며, 이를 함수화시킨 것이 주파수

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.

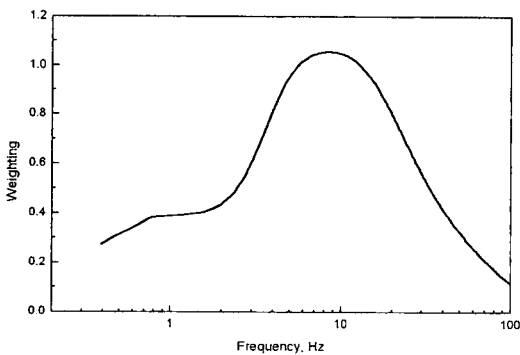
### 2.3 평가기준

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)로부터 승차감 지수를 구한 후, Table 1의 평가기준에 따라 승차감을 평가하게 된다.

$$N_{MV} = 6\sqrt{(A_{wz95})^2 + (A_{wy95})^2 + (A_{wx95})^2} \dots (1)$$



(a)



(b)

Fig. 3 UIC frequency weight function, (a) Lateral direction, (b) Vertical direction

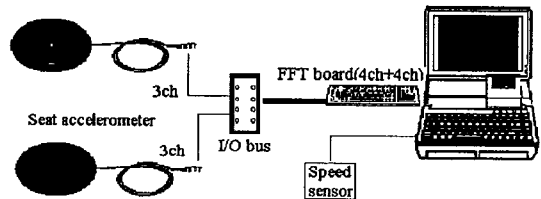
Table 1 UIC evaluation scale

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

### 3. 시운전 시험을 통한 승차감 평가

#### 3.1 시운전 시험용 계측시스템

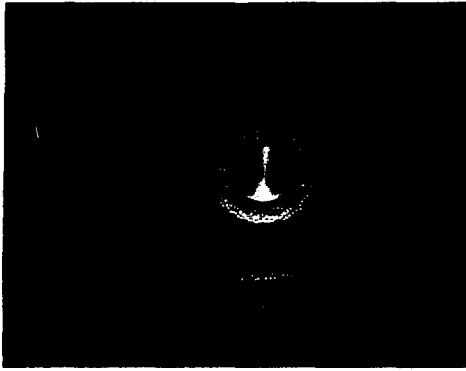
승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 4의 승차감 측정시스템<sup>(1)</sup>을 사용하였으며, 이에 대한 자세한 사양은 Table 2와 같다. 또한, 이 승차감 측정기는 UIC규격에 의한 승차감의 평가뿐만 아니라 ISO규격 및 "Sperling"에 의한 승차감의 평가도 가능하도록 설계되어 있다. 가속도 측정을 위해 사용된 센서는 3축 가속도계이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Measuring system for ride comfort test (a) Schematic diagram, (b) Experimental set-up, (c) 3-axes seated accelerometer

Table 2 Specifications of ride comfort measuring system

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

### 3.2 시운전 시험 결과 분석

Fig. 5는 한국형 고속철도 시제차량이 경부 고속철도 시험선로에서 최대 252.3 km/h, 최소 225.6 km/h, 평균 244.1 km/h의 속도로 주행하고 있을 때의 속도곡선이며, Fig. 6은 이 주행속도에서의 TT3 차체 바닥에서 측정된 가속도 신호로 Fig. 6 (a)는 측정치를, Fig. 6 (b)는 약 5 sec 간격으로 계산된 가속도 신호의 실효치를 나타낸 것으로 수직 방향의 가속도 신호가 다른 방향보다 크기 때문에 승차감의 좋고 나쁨은 수직 방향의 가속도에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 한국형 고속철도 차량의 주행속도 변화에 따른 승차감 지수로 ■은 Fig. 6 (a)의 실제로 측정된 가속도 신호에 의해 계산된 승차감 지수이고 실선은 이 승차감 지수를 통해 얻어진 회귀곡

선이다. 250 km/h 이하의 주행속도에서는 실제 측정된 승차감 지수가 2 이하로 승객이 안락하게 느끼는 수준이며, 승차감 회귀곡선을 이용하여 300 km/h와 350 km/h의 주행속도에서의 승차감 지수

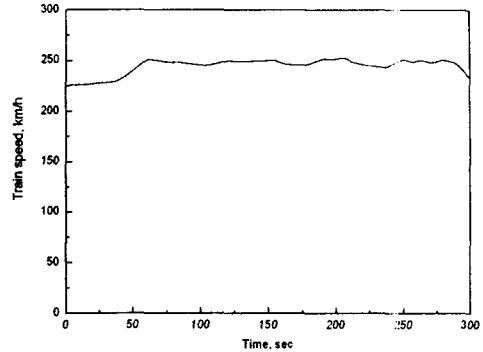
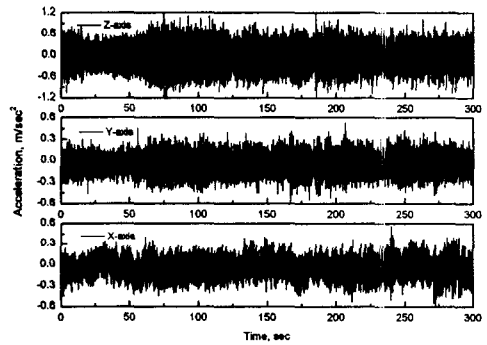
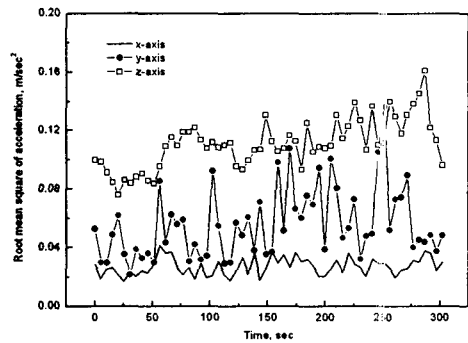


Fig. 5 Train speed variation according to time



(a)



(b)

Fig. 6 Acceleration at 244.1 km/h, (a) Original signal, (b) Root mean square signal

를 예측해 보면 각각 1.81과 2.74이다. 이것으로부터 300 km/h의 주행속도에서는 승객이 안락하게 승차감을 느끼지만, 350 km/h에서는 승객은 보통이라고 승차감을 느낄 것이다.

Fig. 8은 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 않을 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. 만일 개발된 고속철도 차량이 시제차량의 모든 부품이 안정화되어 측정된 승차감 지수가 부산 방향일 때와 같은 경향을 보인다면 승객이 느끼는 승차감은 Fig. 7의 회귀곡선을 통해 예측된 300 km/h와 350 km/h의 주행속도에서의 결과보다 훨씬 안락하게 될 것이다. 따라서, 빠른 시일 내에 개발된 시제차량에 대한 부품의 품질 안정화가 필요하다. 실제로 승차감의 측정은 TT3 차체의 전위 위치와 TT2 차체의 후위 위치에서 수행되었으며, Fig. 7과 Fig. 8은 TT3 차체의 전위 위치에서의 측정결과이다.

Fig. 9는 주행속도의 변화에 따른 객차 TT3의 전위부와 TT2의 후위부에서 측정된 가속도 신호로부터 계산된 승차감 지수이다. TT3 차체의 전위 위치에서의 승차감 지수가 TT2 차체의 후위 위치보다 큰데, 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 지수

가 크게 된다. 이 결과는 주행속도 350 km/h일 때의 객차 TT3의 전위부와 TT2의 후위부에서의 해석된 결과와 동일한 경향을 보여주고 있다.

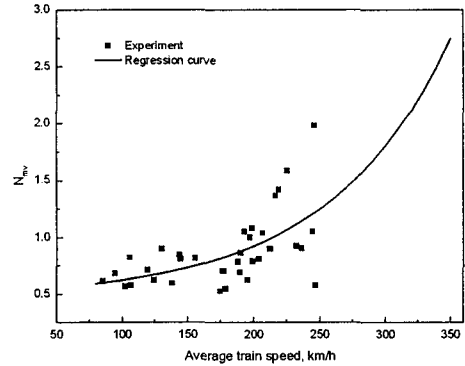


Fig. 7 Total ride index according to train speed

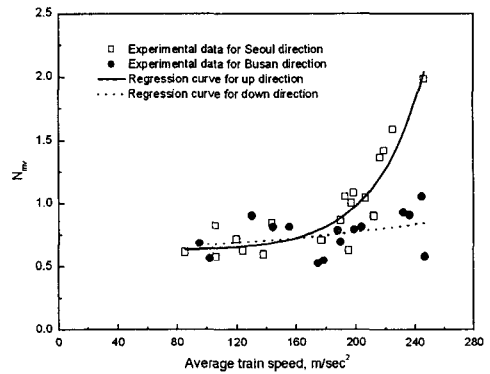


Fig. 8 Comparison of ride indices according to travel direction

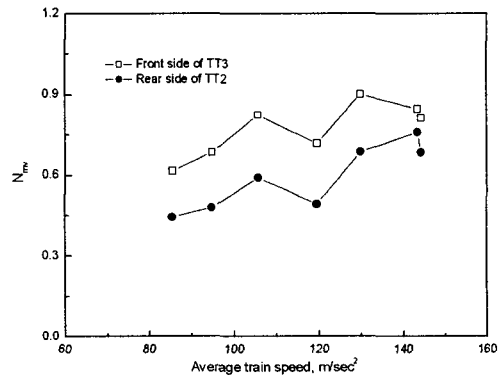


Fig. 9 Comparison of ride indices between TT2 and TT3

Code 513R.

#### 4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 시제차량이 260 km/h 이하의 주행속도에서는 승객의 승차감에 문제가 없는 것으로 판단된다.

(2) 회귀곡선을 통해 300km/h와 350 km/h에서의 승차감을 예측해 보면 300 km/h에서는 승객이 안락하게 느끼지만 350 km/h에서는 보통인 승차감으로 다소 승차감이 떨어진다. 그러나, 만일에 특정한 주행속도에서 사행동이 일어나면 승객의 승차감은 더욱 악화될 수 있기 때문에 고속철도 차량의 속도향상시에 사행동의 발생여부에 주의해야만 한다.

(3) 향후 보다 높은 운행속도에서의 시운전 시험을 통해 한국형 고속철도 차량에 대한 승객이 느끼는 실제의 승차감을 평가해야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 G7 고속전철 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

(1) 김영국 등, 1999, 철도용 승차감 측정시스템 개발, 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회.

(2) 김영국 등, 2002, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석", 소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, 한국소음진동공학회.

(3) Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F.

(4) International Organization for Standardization, 2001, ISO Code 2631-4

(5) Garg, V. K., et al., 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.

(6) European Rail Research Institute, 1993, "Application of ISO Standard to Railway Vehicles", B153/RP21

(7) International Union of Railways, 1994, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC

(8) 김영국 등, 2002, "신경회로망 모델을 이용한 철도 현가장치 설계변수 최적화", 소음진동공학회 논문집, 제12권, 제7호, 한국소음진동공학회.