

# 고속철도 승차감 평가에 통계적 기법의 적용

## Application of statistical method for ride evaluation of high speed train

김영국\*      박찬경\*\*      안성권\*\*      김기환\*\*  
Kim, Young Guk   Park, Chan Kyeoung   Ahn, Sung Kwon   Kim, Ki Hwan

---

### ABSTRACT

The ride comfort is more important according to 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.

In this paper, the ride indices, which are measured in the Korean high speed train, have been analyzed and reviewed by applying the statistical methodology such as t-test, variance analysis(ANOVA) and regression analysis.

---

### 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/레일 접촉(wheel/rail contact), 구동모터(traction motor), 콤프레서(compressor), 각종 전기접점 등에 의한 기계적인 진동[1, 2]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[3, 4], 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[5]

시운전 시험을 통해 획득된 승차감 데이터는 통계 데이터라고 말할 수 있으며, 이러한 통계 데이터를 분석하는 방법으로는 기술통계학과 추측통계학으로 구분된다. 기술통계학은 시험을 통해 얻어진 자료를

---

\* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : ygkim@krri.re.kr

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

\*\* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

표, 그래프 또는 평균 분산 등으로 분류하여 정리하고 기술하는 것으로 일반적으로 많이 사용되어온 방법이며, 추측통계학은 한 모집단으로부터 추출한 표본 속에 내포된 정보를 통해 그 모집단의 특성에 대한 어떤 결론을 추출하는 것으로 추정, 가설검증, 분산분석, 상관분석, 회귀분석 등이 포함된다[1].

본 논문에서는 310 km/h 이하에서 승차감 시험을 통해 획득된 한국형 고속열차에 대한 승차감 지수 데이터를 활용하여 신뢰구간 추정, t-검정, 분산분석(ANOVA), 회귀분석 등의 통계적인 방법론을 적용하여 분석 및 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[3, 4]. 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 신호외곽에 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)로부터 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.

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

## 3. 통계적 기법을 적용한 한국형 고속열차의 승차감 분석

### 3.1. 한국형 고속열차 시제차량 및 승차감 계측시스템

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.

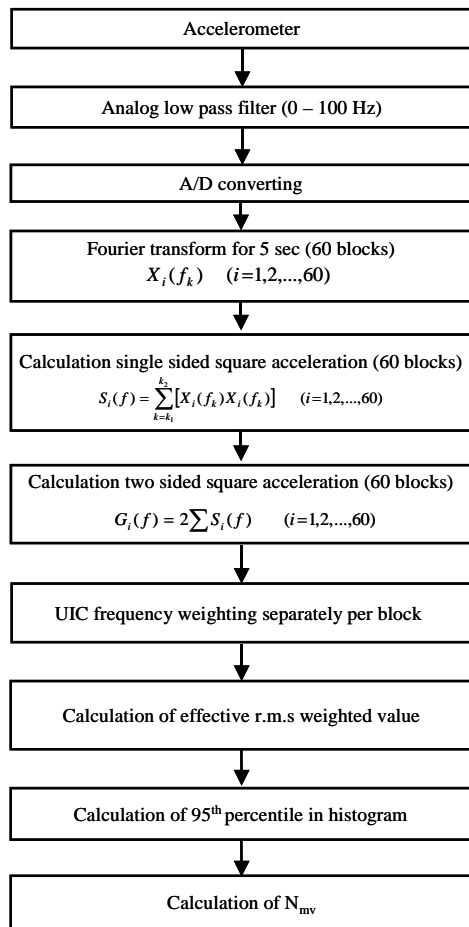
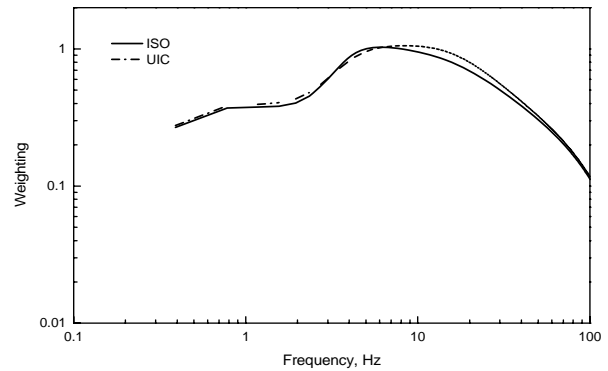
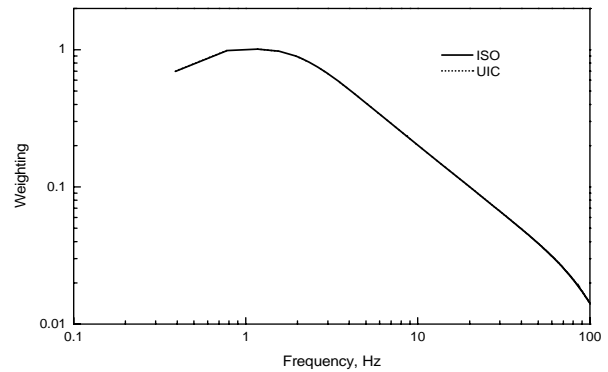


Fig. 1 Flowchart of ride comfort evaluation



(a) For vertical direction



(b) For lateral and longitudinal direction

Fig. 2 Frequency weighting curve

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

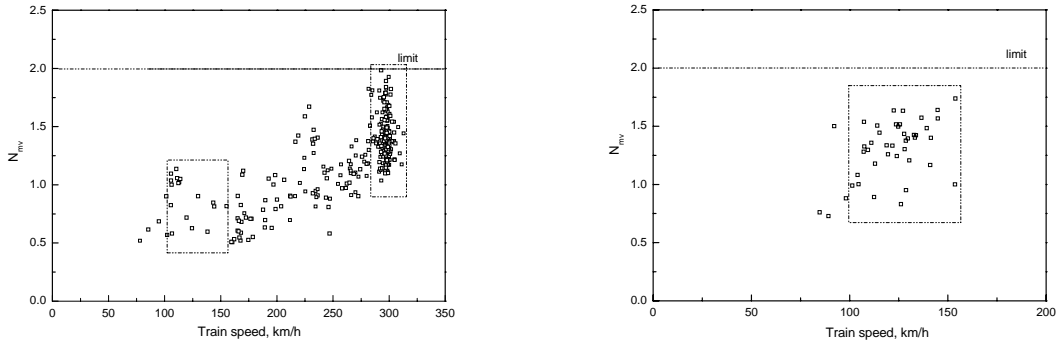


Fig. 4 Experimental set-up

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

### 3.2. 승차감 분석에 통계적 기법 적용

Fig. 5는 시운전 시험과정에서 획득된 승차감 지수를 나타낸 것으로 (a)는 고속선, (b)는 기존선에 대한 결과이며, 그림에서 보는 바와 같이 동일한 열차의 주행속도에서의 승차감 지수가 산포하고 있는 있다. 이는 승차감 지수를 획득하는 5분간의 열차의 주행속도 변화, 승차감 지수를 측정하는 선로구간에 대한 궤도 데이터의 차이, 기온과 기후 등의 날씨와 계절변화 등에 의해 발생한 것으로 추측된다.



(a) high speed line

(b) conventional line

Fig. 5 Ride indices for high speed and conventional lines

본 논문에서는 Fig. 5의 승차감 데이터를 열차의 주행속도에 대해 고속선은 100 ~ 155km/h와 290km/h 이상으로, 기존선은 100 ~ 155km/h으로 분류하고 이들의 관계를 t-검정을 적용하여 비교분석한다. 또한, 고속선 290km/h 이상의 승차감 데이터를 계절별로 분류하여 분산분석(ANOVA)를 통해 비교분석한다. 마지막으로 고속선의 승차감 데이터를 회귀분석을 통해 열차의 주행속도와 승차감지수의 관계를 규명한다.

Table 1은 고속선 100 ~ 155km/h와 290km/h 이상 및 기존선 100 ~ 155km/h일 때의 기술통계치와 고속선과 기존선에 대한 t-검정을 수행한 결과를 나타낸 것이다. t-검정은 추측통계법의 하나로 2개의 모집단에 대한 평균을 비교하기 위해 사용하는 방법이다. Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 기존선 100 ~ 155km/h과 고속선 100 ~ 155km/h인 경우와 기존선 100 ~ 155km/h와 고속선 290km/h 이상인 경우에 대해 t-검정의 결과, p값이 각각 0.5052와 0.1258로 95% 신뢰수준일 때의 p값 임계치 0.025보다 크기 때문에 두 경우 모두 귀무가설을 만족한다. 이에 따라 기존선 100 ~ 155km/h에서의 승차감은 고속선 290km/h 이상인 경우와 동일한 수준이며, 고속선 100 ~ 155km/h인 경우에 비해 승차감지수가 0.5정도가 크다고 말할 수 있다.

Table 1 T-test results of ride indices for track conditions

Data	High speed line (290km/h above)	High speed line (100 ~ 152km/h)	Conventional line (100 ~ 152km/h)
Number of samples	175	18	40
Mean values $\mu$ of ride indices (standard deviation)	1.39 (0.19)	0.88 (0.19)	1.34 (0.22)
$H_0$ : Null hypothesis	$\mu_{Conventional_{100-152}} - \mu_{High_{100-152}} = 0.5$		$\mu_{High_{290\ above}} - \mu_{Conventional_{100-152}} = 0$
t-test statistic	-0.67		-1.537
p-value	<b>0.5052</b>		<b>0.1258</b>
Decision at 5% significance	Not rejected		Not rejected

Fig. 6은 고속선 290km/h 이상의 승차감 지수를 계절에 따라 분류하고 산포도를 나타낸 것이며, Table 2는 계절에 따라 분류된 승차감 지수를 비교한 분산분석(ANOVA)의 결과이다. ANOVA은 셋 이상인 모집단에 대해 평균을 동시에 비교할 때 사용하는 방법이다. Table 2에서 보는 바와 같이 분산분석의 결과, p값이 0.0035로 5% 신뢰수준일 때의 p값 임계치 0.05보다 작기 때문에 귀무가설을 만족하지 못한다. 즉, 계절에 따른 승차감 지수의 평균은 동일하지 않다고 말할 수 있다. 계절에 따른 승차감 지수를 살펴보면 95% 신뢰수준에서 봄, 여름, 가을은 비슷한 수준이지만 겨울은 봄에 비해 0.218 ~ 0.499, 여름에 비해 0.179 ~ 0.437, 가을에 비해 0.215 ~ 0.462가 크다.

Fig. 7은 Fig. 5 (a)의 승차감 지수, 이들로부터 구한 회귀곡선 및 회귀곡선에 대한 95% 신뢰 한계치 곡선을 나타낸 것이다. 회귀곡선은 Fig. 5 (a)의 산점도로부터 승차감 지수가 열차의 주행속도에 대해 지수적으로 상승하는 것으로 가정하여 구하였으며 식 (3)과 같이 표현된다. 이 회귀식의 유효성은 회귀곡선에 대한 결정계수와 잔차 특성을 통해 검토하였다. Fig 8은 회귀식에 의한 예측치와 실제 시험치의 차이인 잔차가 정규분포를 잘 따르는지를 알 수 있는 Q-Q 선도를 나타낸 것이며, Fig. 9는 잔차에 대한 산점도를 나타낸 것이다. 이 회귀곡선의 결정계수는 0.53으로 다소 작지만 3.2절에서 설명한 바와 같은 원인에 의해 승차감 지수가 널리 산포되어 있으나 잔차가 거의 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 정규곡선을 따르고 잔차의 양수치와 음수치의 비율이 거의 비슷하므로 이 회귀곡선은 유효한 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 열차의 주행속도 350km/h에서의 승차감 지수는 95% 신뢰구간에서 1.63 ~ 2.01으로 예측된다.

$$y = 0.5067 + 0.0727 \times e^{\frac{x}{120.2791}} \quad \text{--- (3)}$$

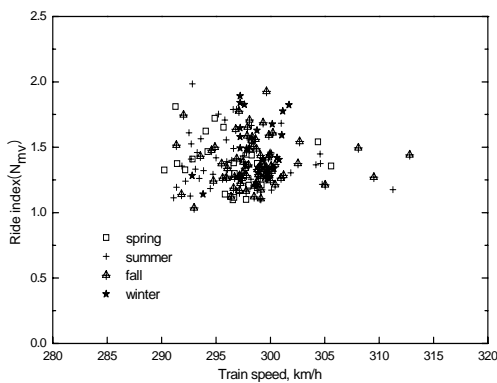


Fig. 6 Comparisons of Ride indices for seasons

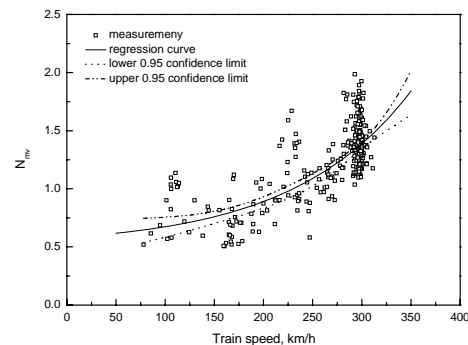


Fig. 7 Distributions of ride comfort indices and a regression curve

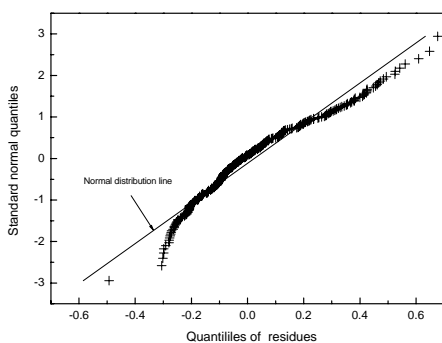


Fig. 8 Q-Q plot for residues

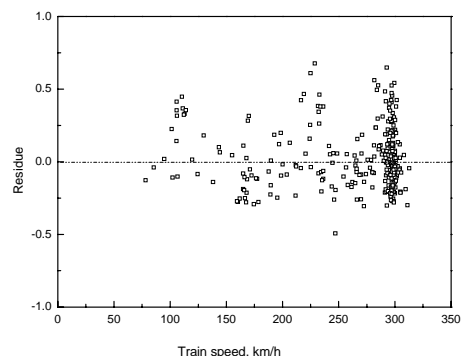


Fig. 9 Scatter plot for residues

Table 2 ANOVA result of ride indices for seasons

Season	Spring	Summer	Fall	Winter	
Number of samples	31	52	75	20	
Mean values $\mu$ of ride indices (standard deviation)	1.36 (0.18)	1.38 (0.20)	1.37 (0.17)	1.54 (0.22)	
Mean values of speed	296.7	297.6	298.6	298.4	
$H_0$ : Null hypothesis	$\mu_{spring} = \mu_{summer} = \mu_{fall} = \mu_{winter}$				
	DoF	Sum of squares	Mean square	F-value	p-value
Between group	3	0.5039	0.1680	4.7033	0.0035
Within group	174	6.2134	0.0357	-	-
Decision at 5% significance	Rejected				

#### 4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 한국형 고속열차에 대한 승차감 분석에 신뢰구간 추정, t-검정, 분산분석(ANOVA), 회귀분석 등 추측통계학의 방법론을 적용하여 분석하므로써 보다 신뢰성을 갖는 분석결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 고속선과 기존선의 승차감 지수를 t-검정을 비교하였으며, 100 ~ 155km/h에서의 승차감은 95% 신뢰구간에서 고속선 290km/h 이상인 경우와 동일한 수준임이 확인되었다.
- (3) 계절에 따른 승차감 지수를 분산분석(ANOVA)을 적용하여 분석하였으며, 95% 신뢰구간에서 겨울의 측정된 승차감 지수가 다른 계절에 비해 크고 나머지 계절의 승차감 지수는 비슷한 수준임을 확인할 수 있었다.
- (4) 고속선의 측정된 승차감 지수로부터 회귀곡선은 구하고 회귀곡선의 유효성을 판단하였다. 열차의 주행속도 350km/h에서의 승차감 지수는 이 회귀곡선으로부터 95% 신뢰구간에서 예측하는 것이 가능하다.

#### 감사의 글

본 연구는 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Suzuki, H., "Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F, 1998.
- [2] 김영국 등, "시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가," 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, 한국철도학회, 2003.
- [3] International Union of Railways, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R, 1994.
- [4] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997.
- [5] G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
- [6] 강금식, EXCEL 활용 현대통계학, 박영사, 1999.
- [7] 류근관, 통계학, 법문사, 2005.
- [8] 노형진, 한글SPSSWIN에 의한 다변량 데이터의 통계분석, 도서출판석정, 1999.