한국 철도학회논문집
제10권 제2호 2007년 / PP.146~152

고속에서 한국형 고속철도 차량의 승차감 추정

Estimation of Ride Comfort for Korean High Speed Train at High Speed

김영국† · 김석원* · 목진용* · 김상수* · 김기환*
Young-Guk Kim · Seog-Won Kim · Jin-Yong Mok · Sang-Su Kim · Ki-Hwan Kim

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 impossible for HSR 350x to run at constant speeds above 310km/h during 5 minutes required in UIC 513R because of the same operational condition as KTX and the design limitation of infrastructures. The ride indices data had been acquired from 80 to 310km/h through the on-line test. The present study has suggested the methodology for the estimation of the ride indices at high speed above 310km/h by using those obtained below 310km/h and reviewed the ride comfort for HSR 350x in these speeds.

Keywords : Korean high speed train(HSR 350x), statistical method, on-line test, ride comfort, ride index(Nmv), determination coefficient
한국형 고속열차, 통계적 방법, 시운전 시험, 승차감, 승차감 지수, 결정계수

1. 서 론

철도차량의 승차감(ride comfort of railway vehicles)은 진동, 음향소음, 냄새, 온도, 습도, 시각적 자극, 의자 디자인 등과 같은 많은 요인들에 의해 영향을 받지만, 모든 요인들을 동시에 고려하여 철도차량의 승차감을 판단하는 것은 어렵다. 철도차량의 승차감은 일반적으로 다른 요인에 비해 상대적으로 큰 영향을 미치는 차량에서 발생되는 진동을 사용하여 평가하며, 그 세기(크기)에 따라 승객이 느끼는 승차감이 결정된다[1-4]. 철도차량에서 발생하는 진동은 현가장치(suspension)와 휠형상(wheel profile)과 같은 차량 특성, 레일형상(rail profile), 레일 불규칙도(rail irregularities), 캔트(cant)와 곡선(curvature) 등 선로특성, 빈번한 급가속 및 급제동, 속도제한 등과 같은 운행조건에 따라 크기(세기)가 결정된다. 진동은 변위, 속도, 가속도 등으로 표현할 수 있으나 측정하기가 쉬운 장점 때문에 가속도를 많이 사용하고 있다. 또한, 진동에 대한 인간의 느낌은 소음과 마찬가지로 세기뿐만 아니라 주파수에 따라서도 차이가 있기 때문에 철도차량의 승차감을 평가하기 위해서는 진동에 대한 인간의 감응도를 고려하여야 한다[3-8].

철도차량의 승차감은 열차의 전체 운행거리나 시간에 대해 진동 가속도의 실효값(r.m.s)으로 평가하는 장시간(long-term) 승차감과 급가속이나 급제동시, 곡선에서 발생하는 진동 가속도의 피크값으로 평가하는 순간(monentary) 승차감이 있다[4, 5]. 장시간 승차감의 평가는 세계적으로 통용될 수 있는 방법이 여러 가지가 있으며, 그 대표적인 것으로는 UIC 513R, CEN ENV 12299, ISO 10056, ISO 2631-1

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단
E-mail : ygkim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5612 / FAX : (031)460-5649
* 한국철도기술연구원

등의 국제규격과 스퍼링(Sperling)에 의해 제안된 평가법이 있다. 그러나, 순간 승차감은 나라마다 차량조건, 선로조건 및 차량운행조건의 차이가 있고 승차감에 대한 각국의 관심사항이 다르기 때문에 세계적으로 적용할 수 있는 국제규격이 없다. 예를 들면, 한국과 일본과 같은 도시 대중교통과 산악지형이 많은 나라에서는 순간 승차감이 관심사항이 될 수 있지만 그렇지 않은 나라도 많다. 따라서, 철도차량의 순간 승차감은 독자적인 평가방법을 개발하여 평가하여 왔다.

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. 350km/h급의 7량 1편성인 한국형 고속열차 시제차량(HSR 350x)은 2002년 8월부터 시운전 시험을 시작하였으며, 개발된 시제차량에 대한 기능과 성능이 설계 요구사항[9]에 만족되는지에 관점을 두었던 성능입증시험의 단계를 거쳐 현재에는 열차의 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위한 시운전 시험을 진행하고 있다.

승차감시험은 시제차량에 대한 성능입증을 위해 차체진동 성능시험의 일부로 수행되었으며, 2004년까지는 정기적으로 수행하였으나, 현재는 필요한 경우에 한해 비정기적으로 수행하고 있다. 한국형 고속철도 시제차량의 장시간 승차감 시험은 UIC 513R에서 규정하고 있는 통계적인 방법에 따라 KTX 영업선로에서 열차의 평균속도 80～310km/h로 진행되었으나, 열차를 운행할 수 있는 환경조건이 UIC 513R에 따른 승차감 시험의 조건을 만족되지 않았기 때문에 310km/h 이상의 주행속도에서는 수행할 수가 없었다.

본 논문에서는 2002년부터 2006년까지 실시된 승차감 시험을 바탕으로 획득된 승차감 지수 데이터를 활용하여 영업선로의 한계 때문에 수행할 수 없었던 310km/h 이상에서의 승차감을 추정할 수 있는 방법을 제안하고, 그 추정 방법을 사용하여 고속에서 한국형 고속열차 시제차량의 승차감을 평가하였다.

2. 통계적 방법에 따른 장시간 승차감 평가방법

철도차량의 장기간 승차감의 평가를 위한 통계적인 방법은 UIC 513R(CEN UIC와 동일), ISO 10056 등의 규격에 정의되어 있으며, 주파수 보정곡선이나 평가기준의 적용여부 등의 일부 사항을 제외하고 동일한 평가 절차에 따라 승차감을 평가하고 있다[6-8]. 한국형 고속열차의 승차감은 UIC 513R 규격에 따르도록 설계 요구사항으로 명시되어 있다[9].

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 신호를 저주파 밴드필터(lowpass filter)를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블록(약 5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 퓨리에 변환을 사용하여 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 주파수 범위에서 각 주파수에 대한 진동가속도 파워를 구한다. x, y, z 방향에 대한 블록의 진동가속도 파워를 해당 평가방법에 따른 Fig. 2의 주파수 보정곡선을 통한 주파수 보정을 행한 후에 각 방향에 대한 진동가속도 실효값을 식(1)로 부터 구한다.

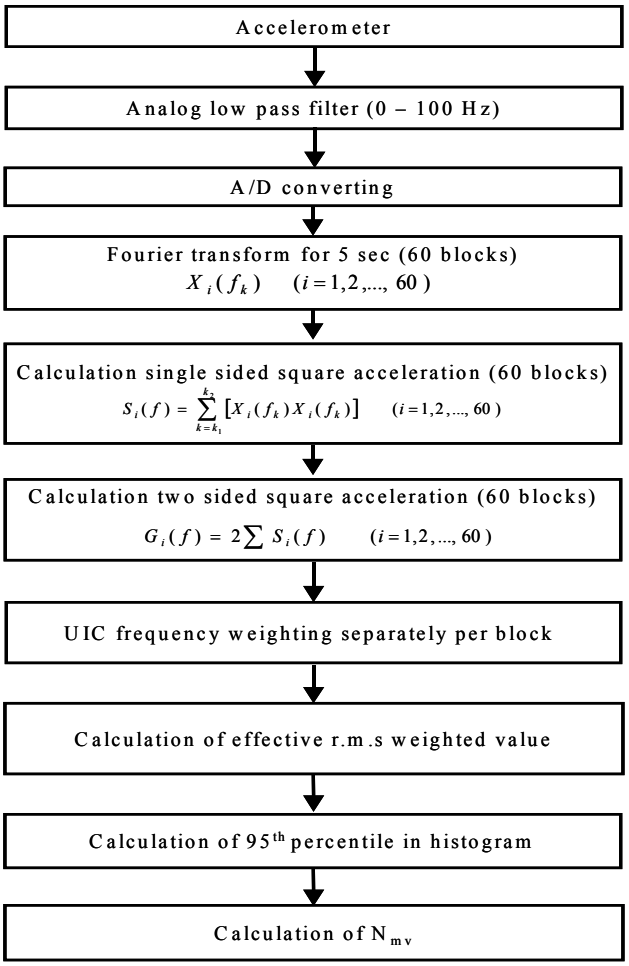

Fig. 1. Flow chart of the ride comfort evaluation procedure for railway vehicles using UIC 513R

$$a_{r.m.s.i} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G_i(f) B_i^2(f) df} \quad (i = x, y, z) \qquad (1)$$

여기서, G_i는 가속도 파워, B_i는 주파수 보정 곡선으로 Fig. 2와 같다. f_1, f_2는 적용 주파수 범위로 UIC에서는 0.4Hz, 80Hz이며 ISO에서는 0.5Hz, 80Hz이다. 식 (1)에 의해 계산된 x, y, z 방향에 대한 5초 간격의 진동가속도 실효값 60개(연속 5분 동안) 중에 누적빈도가 95%인 실효값(A_{wx95}, A_{wy95}, A_{wz95})을 찾은 후 식(2)에 의해 승차감 지수 N_{mv}를 구하여 철도차량의 승차감을 평가한다.

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

3. 승차감 시험

3.1 시험조건

한국형 고속열차 시제차량의 기능과 성능이 설계 요구사항을 만족시키는지를 확인하기 위한 성능시험은 2002년 8월에 시작되어 2004년까지 진행되었으며, 현재는 열차의 신뢰성을 확보하기 위한 신뢰성시험 진행되고 있다. 이 기간 동안에 한국형 고속열차 시제차량은 357회의 시운전 시험이 수행되어 2004년에 352km/h 주행에 성공하였으며, 총 누적거리가 164,000km에 이르렀다.

한국형 고속열차 시제차량은 7량(동력차+동력객차+객차 3량+동력객차+동력차) 1편성인 동력집중식의 푸쉬-풀(push-pull)형태로 구성된다. 열차의 주행안전성과 승객의 승차감을 향상시키기 위해 객차와 객차 사이에 관절형 대차와 2차 현가장치로 공기스프링을 채택하고 있다.

한국형 고속열차 시제차량에 대한 승차감 시험은 KP 22(광명)－KP 145(신탄진) 구간의 고속선로에서 주로 진행되었으며, 특별한 경우에는 KTX가 운행되는 기존선이 포함된 전체 영업선로에서 진행되었다. KTX의 영업운전이 시작되기 이전인 2004년 3월까지는 통계적인 승차감 평가방법에서 요구하는 5분간 일정한 열차의 주행속도를 유지하면서 다양한 주행속도에서 한국형 고속열차 시제차량의 시운전 시험이 수행되었으나, 그 이후에는 영업선로의 제한 때문에 KTX의 영업운전속도와 동일한 주행속도에서만 시운전 시험을 진행할 수밖에 없었다.

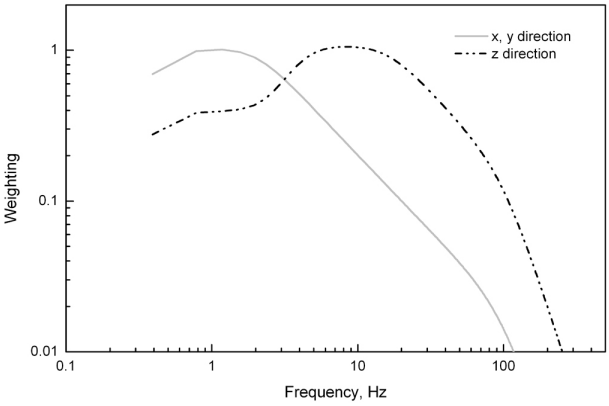

Fig. 2. Frequency weighting curve

3.2 승차감 평가용 계측시스템

통계적인 방법으로 장시간 승차감을 평가하기 위해서 x, y, z 방향의 가속도와 열차의 주행속도 신호를 측정하여 철도차량의 승차감을 평가할 수 있는 계측시스템 및 사용한 센서는 Fig. 3과 같다. 이 계측시스템은 샘플링 주파수가 400Hz이고, 2048개의 데이터를 사용하여 DSP에서 퓨리에 변환을 수행하기 때문에 2장에서 정의한 1블럭은 실제로 5초가 아닌 5.12초이며, 통계적 방법에 사용된 60개 블록은 5.12분에 해당한다[10]. 승차감의 평가 위치는 중간객차(TT3)의 후단부 차량바닥에서 측정하였다.

3.3 승차감 지수의 계산

Fig. 4는 열차의 일정한 주행속도에서 x, y, z 방향에 대해 5초 간격으로 계산된 특정구간의 60개 진동가속도 실효값과 이들로부터 누적빈도 95%인 실효값을 구한 한 예를 나타낸 것으로 이 실효값들로부터 승차감 지수가 구해지며, 열차의 주행속도에 대한 승차감의 상관관계를 파악하기 위해 선택된 구간의 평균 주행속도도 필요하다. 본 논문에서 특별한 언급이 없는 경우에 열차의 주행속도는 구간 평균 주행

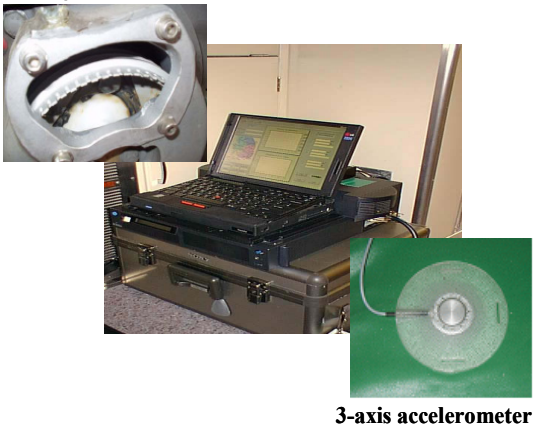

Fig. 3. Sensors and experimental set-up of measuring system

속도를 말한다. Table 1은 2002~2006년 동안에 승차감 시험을 통해 획득된 승차감 지수의 개수를 나타낸 것으로 승차감 시험이 고속선과 기존선, 공차(W_1)와 영차(W_2)로 분류되어 수행되었다. Fig. 5는 고속선로에서 공차상태인 차량에서 획득한 306개 승차감 지수 데이터를 나타낸 것으로 승차감 지수 데이터는 50% 정도의 데이터가 열차의 주행속도 280~300km/h에 분포하고 있으나 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준인 2이하를 만족하고 있음을 알 수 있다.

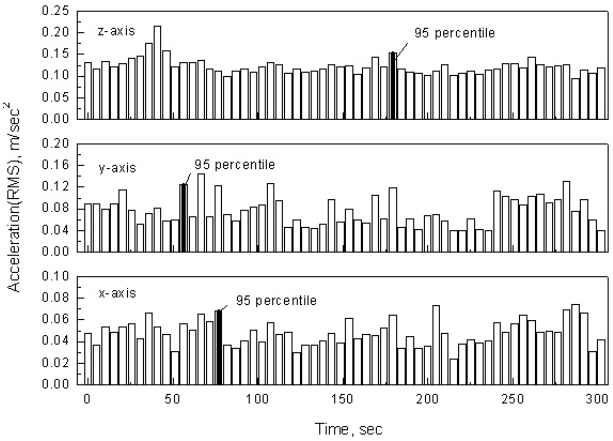

Fig. 4. Distribution histogram of the RMS values during 5 minutes

Table 1. Number of ride index(N_{mv}) data obtained from tests

	High speed line		Conventional line	
Load condition	W_1	W_2	W_1	W_2
Number of data	306	4	44	8

* W_1 : tare weight in running order
W_2 : train-set weight at normal load

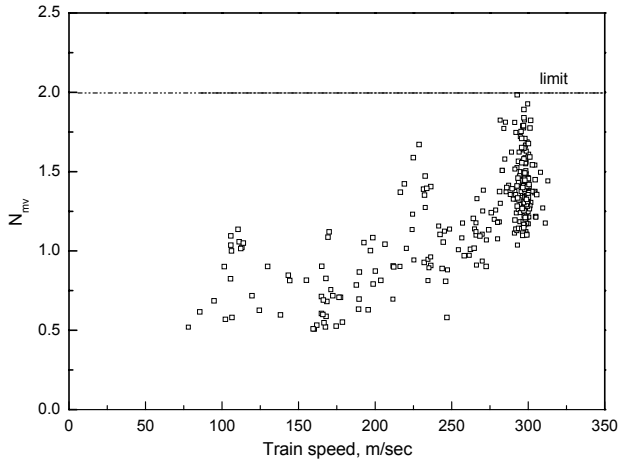

Fig. 5. Ride indices data according to train speed

4. 고속에서의 승차감 추정 및 결과 분석

4.1 승차감 시험의 한계성 검토

한국형 고속열차는 주행속도가 350km/h로 설계되었으므로 이 주행속도에서 승차감 측면에서의 성능을 만족하여야 한다. 그러나, 경부 고속선로는 열차의 허용 주행속도를 영업운전 속도인 300km/h보다 최대 10%까지 허용되도록 궤도, 토목, 신호 등 시설물이 설정되어있기 때문에 310km/h 이상의 주행속도에서 승차감 시험에서 요구하는 5분 이상 동안의 시운전 시험이 불가능하다. Fig. 6은 한국형 고속열차 시제차량에 대해 340km/h로 증속시험을 수행한 경우에 대한 열차의 주행속도를 나타낸 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 최고속도는 337km/h를 기록하였지만 실제로 330km/h 이상으로 주행한 시간은 약 62sec에 불과하다.

승차감 지수를 구하기 위해 요구되는 5분(최고속도 포함) 동안의 데이터를 선택하면 이 구간의 최소속도와 최고속도는 각각 288km/h와 337km/h이고 평균 주행속도는 309km/h에 불과하다. Fig. 7은 한국형 고속철도 시제차량이 320, 330, 340km/h로 운행할 때에 획득된 승차감 지수와 이 구간의 최고속도, 최저속도 및 평균속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 320km/h일 때를 기준으로 330, 340km/h일 때에 평균속도는 각각 0.8%, 1.4%가 증가하는 데 비해 최고속도와 최저속도의 차이는 각각 16%, 50%가 증가한다. 이상의 결과로 부터 한국형 고속철도 시제차량을 310km/h 이상의 고속에서 승차감은 실제의 시운전 시험으로는 확인할 수 없기 때문에 다른 방법을 모색하여야 한다.

4.2 고속에서의 승차감 추정

Fig. 8은 고속선로, 공차상태에서 획득한 Fig. 5의 승차감 지수 데이터와 이들 데이터로부터 결정된 회귀곡선이다. 회귀곡선의 유용성은 식 (3)으로 정의되는 결정계수(R^2)로 판단할 수 있는 데, 이 회귀곡선은 결정계수가 0.543에 불과하므로 이 회귀곡선을 사용하여 고속에서 승차감을 예측하는 것은 문제가 있는 것으로 생각된다. 이와 같이 결정계수가 작게 된 이유는 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 열차의 주행속도에서도 승차감 지수 데이터가 널리 산포되어 있기 때문이다. 이러한 승차감 지수 데이터의 산포는 승차감 시험이 임의의 선로구간에서 수행됨에 따른 궤도 불규칙도, 곡선, 구배, 터널, 교량 등 선로조건과 운행속도, 견인, 제동, 타행 등 운전조건의 차이에서 비롯된 것으로 추측된다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

여기서, y_i는 회귀곡선을 위한 실제 데이터, $\bar{y}$는 데이터의 평균, $\hat{y}$은 회귀곡선에 의한 추정치이다.

Fig. 5에 나타낸 회귀곡선보다 큰 결정계수를 갖는 회귀곡선을 구하기 위한 방법으로 승차감 시험 데이터를 일정한 구간으로 분류하고 식 (4)로 정의되는 각 구간의 평균값을 적용하였다. Table 2는 승차감 시험 데이터를 분류하는 4가지 조건을 나타낸 것이며, 이 조건들은 승차감 시험 데이터가 각 분류 구간에 대해 적절히 분포하도록 분류조건을 반복적으로 변경하면서 적합한 분류조건을 찾아내었다.

Fig. 9는 Fig. 5에 306개의 승차감 지수 데이터 각각에 대한 주행속도(v_i)와 주행속도에 대한 표준 편차(SD)를 나타낸 것이다. Fig. 9 상단의 그림에서 보는 바와 같이 주행속도에 대한 표준 편차가 1.11～26.93km/h이며, 이 표준편차가 커질수록 승차감 지수를 구하기 위해 선택된 5분 동안에 열차의 주행속도의 변화가 많음을 의미한다. Table 2에서 case 1은 전체 승차감 지수 데이터를 선택한 경우이고 case 4는 특정 주행속도(80, 100, …, 320km/h)에 대해 ±5km/h 범위내의 승차감 지수 데이터를 선택한 경우이다. case 2와 case 3은 case 1의 데이터에서 열차의 주행속도 편차가 작도록 제한한 경우로 case 2는 주행속도에 대한 표준편차가 각각의 주행속도에 대해 3%이내인 승차감 지수 데이터를, case 3은 주행속도에 대해 표준편차가 5km/h이내인 승차감 지수 데이터를 선택하도록 한 것이다.

$$\bar{v}_j = \frac{\sum n_j \times v_{ji}}{\sum n_j}, \qquad \overline{N_{mv_j}} = \frac{\sum n_j \times N_{mv_{ji}}}{\sum n_j} \quad (4)$$

여기서, $\bar{v}_j$, $\overline{N_{mv_j}}$는 각 분류 구간의 주행속도 평균, 승차감 지수 평균을 나타내며, n_j, v_{ji}, $N_{mv_{ji}}$는 각 분류 구간에 포함된 데이터 개수, 주행속도 데이터, 승차감 지수 데이터를 나타낸다.

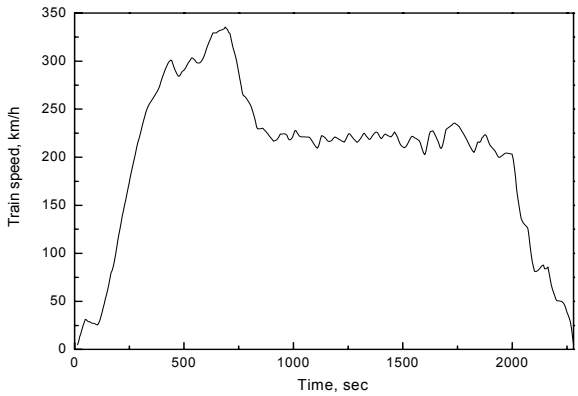

Fig. 6. Train speed data measured at maximum 337km/h

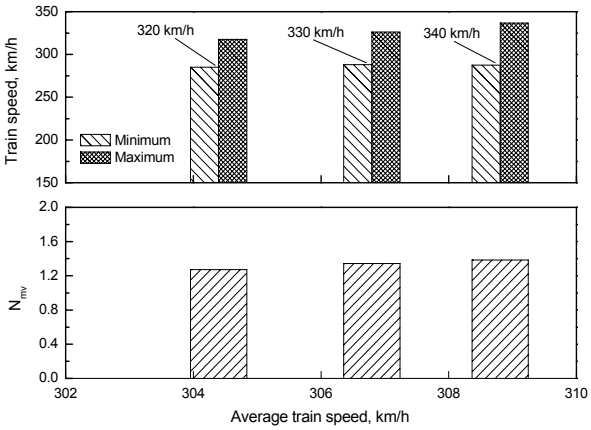

Fig. 7. Max/min speeds and ride index in high speed range during speed up test

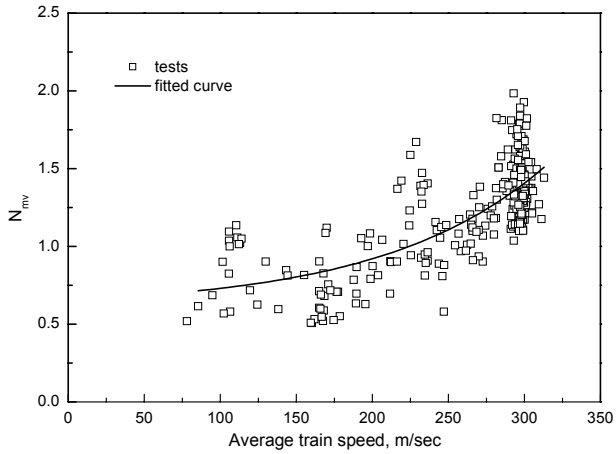

Fig. 8. Ride indices distributions and fitted curve

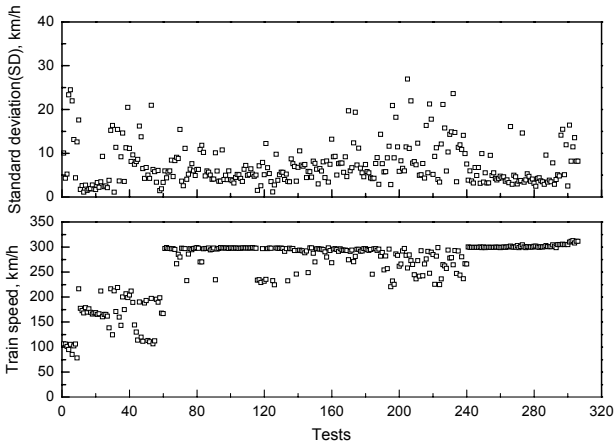

Fig. 9. Train speed and standard deviation for each data

Table 2. Classifying conditions for data

Case 1	Case 2
All data, AND $(v_k-10) \le v_i < (v_k+10)$ where, $k=80, 100, \cdots\cdots, 320$	$SD < (3\ \%)\times v_i$, AND $(v_k-10) \le v_i < (v_k+10)$ where, $k=80, 100, \cdots\cdots, 320$
Case 3	**Case 4**
$SD < 5$, AND $(v_k-10) \le v_i < (v_k+10)$ where, $k=80, 100, \cdots\cdots, 320$	All data, AND $(v_k-5) \le v_i < (v_k+5)$ where, $k=80, 100, \cdots\cdots, 320$

Table 3. Averaged ride index, averaged train speed and total number of data used

Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
$\sum n_j$	$\overline{v_j}$, km/h	$\overline{N_{mv_j}}$	$\sum n_j$	$\overline{v_j}$, km/h	$\overline{N_{mv_j}}$	$\sum n_j$	$\overline{v_j}$, km/h	$\overline{N_{mv_j}}$	$\sum n_j$	$\overline{v_j}$, km/h	$\overline{N_{mv_j}}$
306	86.09	0.61	203	-	-	123	-	-	195	-	-
	108.77	0.92		-	-		108.78	1.07		101.85	0.74
	130.82	0.71		138.22	0.60		138.22	0.60		121.96	0.67
	150.61	0.75		159.59	0.51		159.59	0.51		141.97	0.75
	168.90	0.69		169.25	0.70		169.25	0.70		161.15	0.61
	193.17	0.84		193.86	0.83		193.86	0.83		177.50	0.66
	210.85	0.99		211.97	0.90		211.97	0.90		198.92	0.87
	230.95	1.18		229.04	1.33		228.71	1.32		220.19	1.18
	248.67	1.00		248.56	1.00		244.92	0.92		239.56	1.05
	269.54	1.12		265.72	1.13		265.97	1.12		261.19	1.07
	295.36	1.40		296.22	1.39		297.73	1.42		280.97	1.37
	303.31	1.38		302.33	1.39		301.10	1.43		298.73	1.39

Table 3은 Table 2의 조건에 따라 획득된 306개의 승차감 지수 데이터를 분류하고 각 분류 구간에 대해 평균값을 정리한 결과이다. Fig. 10은 Table 3에 4가지의 분류조건에 대해 각 구간의 주행속도 평균과 승차감 지수 평균과 이들 데이터로부터 결정된 회귀곡선을 나타낸 것이며, Fig. 11은 각 분류조건에 대한 회귀곡선의 결정계수를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 case 3의 결정계수 0.637로 획득된 승차감 지수 데이터를 사용한 경우보다는 크지만 결정계수가 0.845~0.854인 다른 경우보다 훨씬 작기 때문에 승차감 지수를 예측하기 위한 회귀곡선에서 제외시켰다.

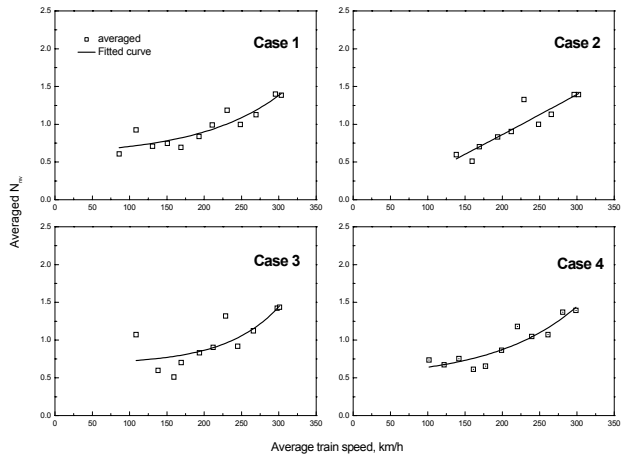

Fig. 10. Ride indices distributions and fitted curve for each case

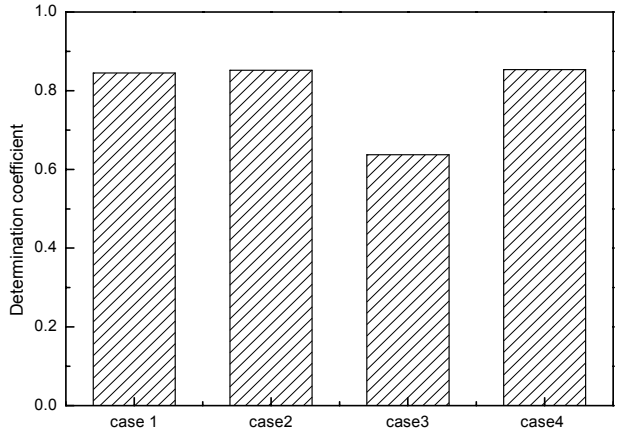

Fig. 11. comparison of determination coefficients for each case

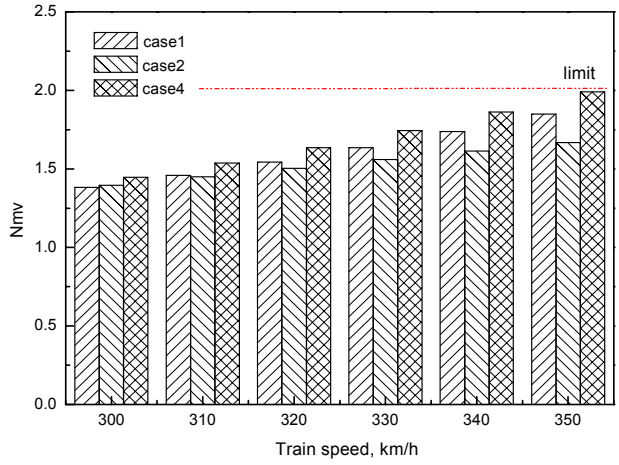

Fig. 12. Prediction of ride indices at high train speed

Fig. 12는 case 3을 제외한 3가지 경우에 대해 Fig. 10의 회귀곡선을 적용하여 열차의 주행속도가 310km/h 이상인

고속에서 승차감 지수를 추정한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 예측된 case 4의 승차감 지수가 다른 경우보다 모든 주행속도에서 크기 때문에 고속에서 한국형 고속열차의 승차감 지수를 추정하는 데 case 4의 회귀곡선의 적용이 가장 불리한 조건에 해당하게 된다. 따라서 case 4의 회귀곡선을 적용하여 한국형 고속열차의 승차감을 평가하면 310～350km/h의 고속에서 UIC 513R에 제시된 “Deluxe rolling stock”의 승차감 기준을 만족함을 알 수 있다.

5. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 한국형 고속철도 시제차량의 승차감을 통계적인 방법으로 평가하기 위해 승차감 시험을 통해 열차의 주행속도 80～310km/h 범위에서 306개의 승차감 지수 데이터를 획득하였다.

(2) 여러 가지의 사용 제한조건으로 시운전 시험을 통해 일정한 속도 이상에서 승차감 시험을 하는 것은 불가능하기 때문에 310km/h 이상의 주행속도에서 승차감을 평가하기 위한 대안을 찾아야 한다. 본 논문에서는 실제 승차감 시험을 통해 획득된 승차감 지수 데이터의 평균을 이용하여 신뢰성 있는 회귀곡선을 찾는 방법을 제안하였다.

(3) 제안한 방법으로 가장 높은 신뢰성을 갖는 회귀곡선을 결정하고 그 회귀곡선으로 고속에서 한국형 고속열차 시제차량의 승차감 지수를 추정하였다. 그 추정 결과로 한국형 고속열차 시제차량의 승차감은 310km/h 이상의 고속영역에서도 UIC 513R에 제시된 “Deluxe rolling stock”의 승차감 기준을 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

◉ 참고문헌

1. 김영국 등, 2004, “UIC 513R에 따른 통계적 방법을 이용한 고속철도 차량의 승차감 분석 및 평가”, 한국철도학회논문집, 제7권, 제4호, pp.332～338.
2. 김영국 등, 2002, “철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석”, 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, pp.204～212.
3. Y.G. Kim, et al., 2003, “Correlation of Evaluation Methods of Ride Comfort for Railway Vehicles”, Proc. Instn. Mech. Engrs(IMechE), Vol. 217 Part F, pp.73～88.
4. Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F, pp.61～72.
5. Y.G. Kim, et al., 2006, “Evaluation of the Ride Comfort for High Speed Trains in Korea”, Key Engineering Materials, 321-323, pp.1589～1592.
6. International Organization for Standardization(ISO), 2001, ISO Code 10056.
7. International Union of Railways, 1994, UIC Code 513R.
8. International Organization for Standardization(ISO), 1997, ISO Code 2631-1.
9. G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
10. 김영국 등, 2004, “다기능성을 갖는 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발,” 센서학회지, 제13권, 제5호, 한국센서학회, pp.369～377.

(2007년 3월 19일 논문접수, 2007년 4월 2일 심사완료)