

UIC 513R에 따른 통계적 방법을 이용한 고속철도 차량의 승차감 분석 및 평가

Analysis and Evaluation of Ride Comfort for High Speed Train using Statistical Method according to UIC 513R

김영국¹ · 김석원¹ · 목진용¹ · 김기환¹ · 박태원²

Young-Guk Kim · Seog-Won Kim · Jin-Yong Mok · Ki-Hwan Kim · Tae-Won Park

Abstract

The two projects about the high speed train have been performed in Korea, one project is the commercial run of high speed train(KTX) from Seoul to Busan and the other is the development of original high speed train(HSR 350x). As the successful results, the service run of KTX had been launched on the 1st of April, 2004 and HSR 350x had been fabricated in June, 2002 and has been tested in the Kyoungbu line and Honam line since then. The railway has the track irregularities which cause vibrations, such as rail joints, turnout, level crossing, transition curves and super-elevation ramps, and variations in the track level(z-axis) and the gauge(y-axis). Generally, the ride comfort for railway is evaluated by using the vibrations. In this paper, the ride comfort indices according to UIC 513R and ISO 10056 have been reviewed when the high-speed trains are operated on both Kyoungbu line and Honam line. Also, the ride characteristics for KTX and HSR 350x on the high speed line and the conventional line have been analyzed and evaluated. The results show that the high-speed train has no problem from the viewpoint of the comfort ride on the high speed line and the conventional line and the ride index for HSR 350x is same as that for KTX in the high speed(300 km/h).

Keywords : High Speed Train(고속철도 차량), Statistical Method(통계적 방법), On-Line Test(시운전 시험), Ride Comfort(승차감), Ride Index(승차감 지수), Frequency Weighting Curve(주파수 보정곡선), RMS(실효치)

1. 서론

100년 이상의 철도 역사를 갖고 있는 우리나라는 드디어 2004년 4월 모든 국민들의 관심속에 고속철도가 개통되어 철도에 대한 국민의 관심이 어느 때보다도 높은 상태로 고속철도 차량(KTX)이 경부선(서울-부산)과 호남선(용산-목포)을 하루에 수십 회씩 300km/h의 속도로 운행하고 있다. 또한, 이와는 별도로 국내 기술로 350km/h로 주행할 수 있는 고속철도 시스템의 확보라는 당찬 목표로 시작된 한국형 고속철도 개발사업이 성공적으로 진행되어 개발된 한국형 고속철도 시제차량(HSR 350x)이 KTX가 운영되고 있는 고속철도 영업선로에서 시운전 시험이 진행되고 있으며,

현재(2004. 11. 20. 기준) 최고속도 330km/h의 주행과 개발 차량의 실용화를 위한 신뢰성 시험이 진행되어 누적 주행거리가 약 38,000km에 이르렀다.

고속철도 차량이 운영되고 있는 경부선과 호남선은 고속선로와 기존선로가 복합된 선로로 경부선은 총 연장길이 약 409km 중 57.5%, 호남선은 총 연장길이 약 403km 중 33.8%가 고속선로로 구성되어 있기 때문에 고속선로와 기존선로의 연계에 따른 고속철도 차량에 대한 안전성의 확보가 필요하며, 이와 함께 승객의 승차감 확보도 중요하다. 철도차량에서는 일반적으로 승차감은 차량의 진동 가속도를 측정된 후 인간의 등가 감응량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있으며[1-4], 철도차량의 진동 가속도를 발생시키는 요인은 레일 불규칙도, 레일 이음매, 분기기, 교량, 곡선부, 캔트 등의 선로 조건과 열차 운행속도 및 운행조건 등이다[4,8].

1 한국철도기술연구원
2 아주대학교 기계공학과

철도에서의 승차감 평가는 “ISO 2631규격”[7]과 Sperling이 제안한 “승차감 지수(Wz)”[8]로 평가하는 Wz 평가법이 오랫동안 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 국제철도협회(International Union of Railways, UIC)와 국제표준위원회(International Standardization Committee, ISO)에서 UIC 513R[6]과 ISO 10056[5], ISO 2631-4 등의 규격을 새로이 제정하였다. 이들 규격과 문헌에서는 철도차량의 승차감 평가 방법으로 가속도 실효값(rms) 이용방법, 진동 가속도를 사용한 통계적 방법 및 Wz 방법 등을 제안하고 있다. 이렇듯 다양한 철도차량의 승차감 평가방법에 대해 철도의 사용주체마다 각기 다른 승차감 평가방법을 적용하고 있으나 차후에는 평가방법과 평가기준을 명확히 제시하고 있는 UIC 513R 규격에 따른 통계적 방법이 철도차량의 승차감의 평가방법으로 많이 사용될 것으로 예상된다.

본 논문에서는 국내의 고속철도 차량(KTX, HSR 350x)이 경부선과 호남선을 주행시에 발생하는 진동 가속도를 측정하고, 이를 이용하여 UIC 513R과 ISO 10056 규격에서 제시한 통계적 방법에 의한 승차감 평가방법의 차이를 고찰하고, 고속선로와 기존선로에서의 KTX와 HSR 350x에 대한 승차감을 UIC 513R에 따라 분석 및 평가하고자 한다.

2. 통계적 방법에 따른 승차감 평가 분석

서론에서 언급한 바와 같이 UIC 513R과 ISO 10056 규격에서는 철도의 승차감 평가방법으로 통계적인 방법으로 평가하도록 규정하고 있으며, 측정장비, 측정 위치, 승차감 지수 등 동일한 평가절차에 따라 승차감을 평가하도록 되어 있다. 그러나, 두 규격에서는 서로 다른 주파수 보정곡선의 사용과 평가기준의 제시 여부 등의 차이를 갖고 있다. 즉, UIC 513R에서는 명확한 평가기준을 제시하고 있으나 ISO 10056에서는 평가기준을 제시하지 않고 있다[5, 6].

2.1 평가방법

Fig. 1은 UIC 513R 규격에 규정된 철도 차량의 통계적인 승차감 평가방법에 대한 평가 흐름도를 나타낸 것이다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도 센서로 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(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 푸리에 변환을 사용하여 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 0.4~80Hz 주파수 범위(ISO 10056의 경우는 0.5~

80Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도 파워를 구한다. x, y, z 방향에 대한 블록의 진동가속도 파워를 해당 평가법에 따른 Fig. 2의 주파수 보정곡선을 통한 주파수 보정을 행한 후에 각 방향에 대한 진동가속도 실효값을 식 (1)로 부터 구한다.

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

여기서, G_i 는 가속도 파워, B_i 는 Fig. 2의 주파수 보정 곡선으로 z방향의 경우는 Fig. 2(a)를, x, y방향의 경우는 Fig. 2(b)를 사용한다.

통계적인 평가방법은 x, y, z 방향에 대해 식 (1)에 의해 계산된 5초 간격의 진동가속도 실효값 60개(연속 5분 동안)를 이용하며, 이 60개 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값(A_{wx95} , A_{wy95} , A_{wz95})을 사용하여 UIC 규격의 단순화 방

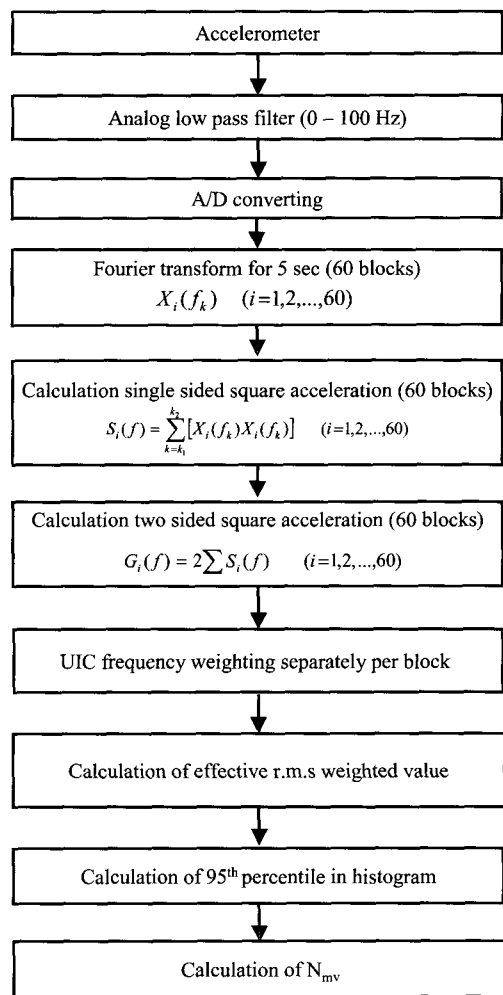


Fig. 1. Flow chart of the ride comfort evaluation procedure for railway vehicles using UIC 513R

Table 1. UIC evaluation scale

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

법(simplified method)에 의해 승차감 지수 Nmv를 식 (2)와 같이 구하며, 이 승차감 지수를 이용하여 Table 1에서 제시된 철도차량의 승차감을 평가하게 된다. 이 단순화 방법은 입석과 좌석 두 경우에 적용할 수 있다.

$$N_{mv} = 6\sqrt{(A_{wz95})^2 + (A_{wz95})^2 + (A_{wz25})^2} \quad (2)$$

ISO 10056 규격에 규정된 철도 차량의 통계적인 승차감 평가방법의 평가절차도 앞에서 설명한 것과 동일하지만, 이 규격에는 평가기준이 없고 UIC의 주파수 보정곡선을 ISO 주파수 보정곡선을 적용하는 것만 차이가 있을 뿐이다.

2.2 주파수 보정곡선

동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이를 나타내며, 이를 함수화시킨 것이 주파수 보정곡선으로 UIC 513R과 ISO 10056 규격에 따른 주파수 보정곡선은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. UIC 규격에서 주파수 보정곡선은 수직방향과 수평방향에 대해 W_b - W_a 와 W_d - W_a 로 정의되어 있는데, 수직방향은 4~16.5Hz에서, 수평방향은 0.6~2Hz에서 민감하다. 또한, ISO 규격에는 수직방향과 수평방향에 대한 주파수 보정곡선은 W_b 와 W_d 로 정의되어 있으며, 수직방향과 수평방향에 대해 4~12Hz와 0.6~2Hz에서 민감(주파수 보정값 0.9이상)하다. 수평방향에 대해서는 UIC와 ISO 규격이 동일한 주파수 보정곡선을 사용하며, 수직방향에 대해서는 형태는 거의 유사한 형태이지만 UIC 규격의 주파수 보정치가 8~60Hz의 주파수 범위에서 ISO 규정보다 약간 크다.

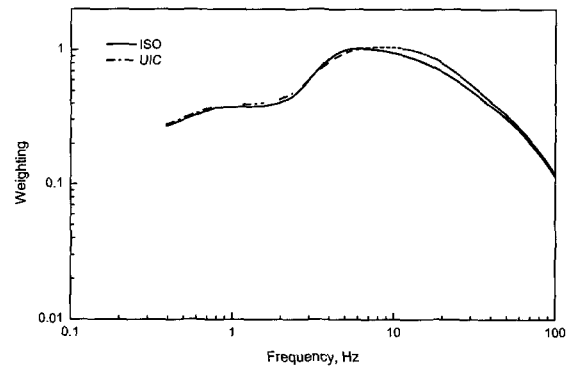
3. 시운전 시험을 통한 승차감 특성 평가

3.1 고속철도 차량 및 운행선로

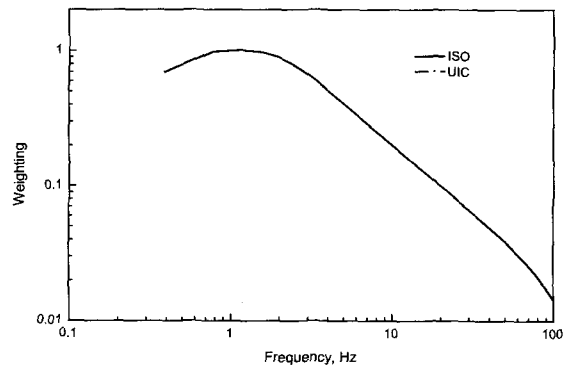
국내에서의 고속철도 차량은 영업 운행 중인 각 편성 20량(동력차+동력객차+객차 16량+동력객차+동력차)으로 구성된 46편성의 KTX와 시운전 시험을 수행 중인 7량(동력차+동력객차+객차 3량+동력객차+동력차) 1편성으로 구성된 HSR 350x가 있다. 이 두 고속차량은 구조적 형태는 비

슷하지만, 객차 재질, 견인모터, 제동방식 등의 차이가 있다. 대차는 동력차 대차, 동력객차 대차 및 관절형 대차로 분류되며, 이들 대차가 차체를 지지하는 구조로 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[9].

고속철도 차량이 고속선로와 기존선로가 복합된 선로를 운행해야 하는 데, 고속선로의 경우는 최대 곡선반경은 7000m, 최대 종구배 25%, 성토구간, 터널구간과 교량구간으로 나누어지며, 고속분기기가 설치되어 있으나, 선로조건이 고속철도 차량이 350km/h까지 운행될 수 있도록 설계되어 있다. 그러나, 기존선의 경우는 작은 곡선반경(400m인 곳도 있음), 빈번한 역사 통과, 편형교, 분기기 등 고속선로에 비해 열악한



(a) For vertical direction



(b) For lateral and longitudinal direction

Fig. 2. Frequency weighting curve

선로조건으로 고속철도 차량이 160km/h 이하에서 운행되고 있다.

3.2 승차감 평가용 계측 시스템 및 평가 위치

승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 3의 승차감 측정시스템[1]을 사용하였으며, 빠른 푸리에 변환(FFT)의 제한 조건(데이터 개수는 2^n , n은 정수) 때문에 2장에서 정의한 1블럭의 시간은 실제로 규격에서 정의된 5초가 아닌 5.12초이다. 즉, 이 승차감 측정시스템의 샘플링 주파수는 400Hz이고, FFT 데이터는 1024개이므로 1번의 FFT를 수행하는 데 필

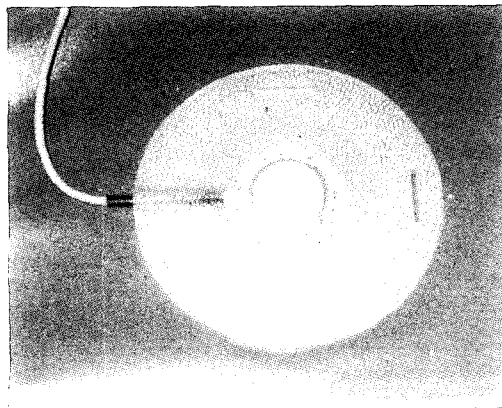
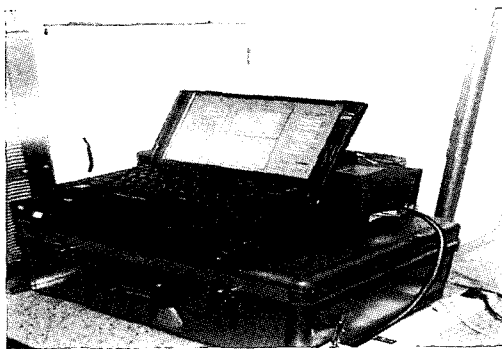
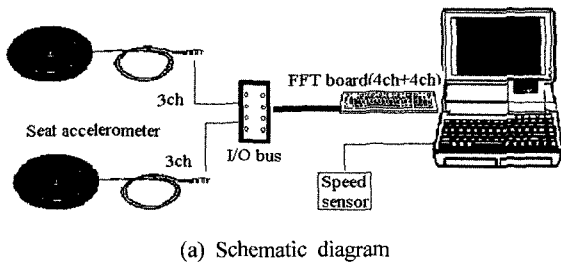


Fig. 3. Measuring system for ride comfort test

요한 계측시간은 2.56초이며, 2번의 FFT 결과를 평균화(averaging)하여 사용하였기 때문에 1블럭은 5.12초이고, 통계적 방법에 사용된 60개 블럭은 5.12분에 해당한다.

KTX와 HSR350x의 승차감은 일반객실의 차체바닥에서 가속도를 측정하여 이를 이용하여 평가하였다.

3.3 승차감 평가 결과 분석

3.3.1 UIC 513R과 ISO 10056에 따른 승차감 분석

Fig. 4는 KTX가 경부선을 운행한 한 예로써 (a)는 열차의 주행속도와 이동거리 선도를 (b)는 UIC 513R과 ISO 10056 규격에 따른 통계적 승차감 평가결과를 나타낸 것이다. KTX가 고속선로 구간(시흥-대전 조차장, 옥천-신동)에서는 300km/h의 속도로 주행하였으며, 기존선로 구간에서는 최대 150km/h까지의 속도로 주행하였음을 알 수 있다. UIC 513R과 ISO 10056 규격의 통계적 방법으로 평가한 승차감 지수는 고속선로와 기존선로 모두 UIC 경우가 ISO 경우 보다 크게 나타남을 알 수 있으며, 이 원인은 Fig. 5의 KTX에서 측정된 주파수 특성곡선과 Fig. 6의 적용된 특정 주파수

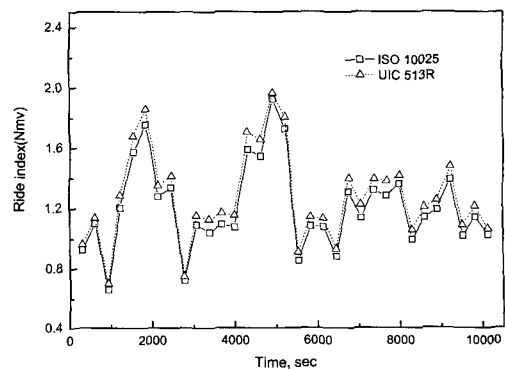
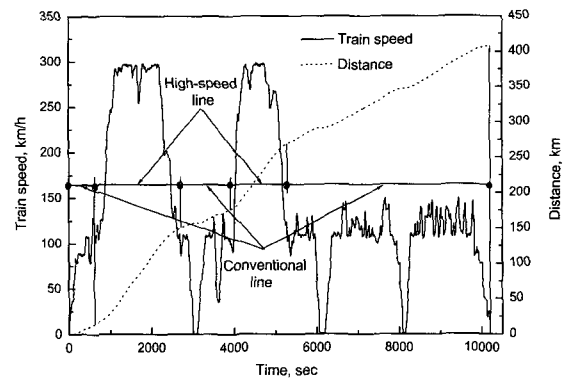


Fig. 4. Comparison of Ride comfort by statistical method for KTX in the Kyongbu line,

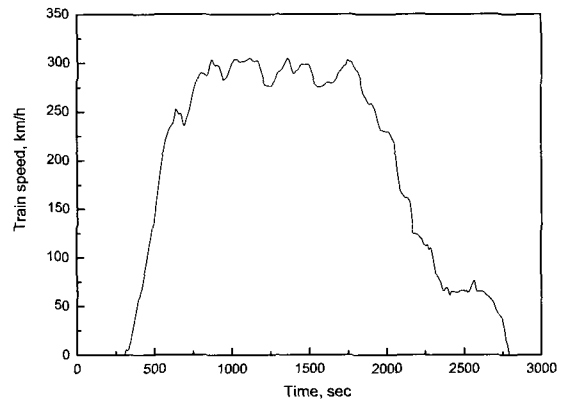
구간에서의 보정곡선에 대한 검토를 통해 규명할 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 상하방향에 대해 8Hz 이상의 주파수에서 UIC 규격의 주파수 보정치가 ISO 규격의 주파수 보정치보다 크며, 실제로 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 KTX는 5~15Hz의 주파수에서 큰 가속도를 갖기 때문에 UIC 규격을 적용한 경우가 ISO 규격을 적용한 경우보다 크게 된다.

3.3.2 국내 고속철도 차량의 승차감 분석 및 평가

Fig. 7은 광명에서 서대전 구간에서 주행하는 HSR 350x에 대한 승차감 지수를 평가한 한 예로 (a), (b) 및 (c)는 각각 그 구간에서의 주행속도선도, TT3 차체 바닥 전위부에서 측정된 가속도 신호로 약 5sec 간격으로 계산된 진동 가속도 신호의 실효치 및 이를 이용해 계산된 승차감 지수를 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)에서 고속선로를 주행속도 300km/h의 속도로 주행하고 있음을 알 수 있으며, Fig. 7 (b)은 5.12 sec 간격으로 계산된 x, y 및 z 방향의 가속도 실효치로 수직 방향의 가속도 신호가 다른 방향보다 크기 때문에 승차감의

종교 나뉘는 수직 방향의 가속도에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 7 (c)에서 승차감 지수는 최대 1.54로 이는 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준인 2보다 훨씬 작음을 알 수 있다.

Fig. 8은 국내의 고속철도 차량(KTX, HSR 350x)이 경부선 및 호남선을 주행할 때에 측정된 진동 가속도를 이용하여



(a) Train speed

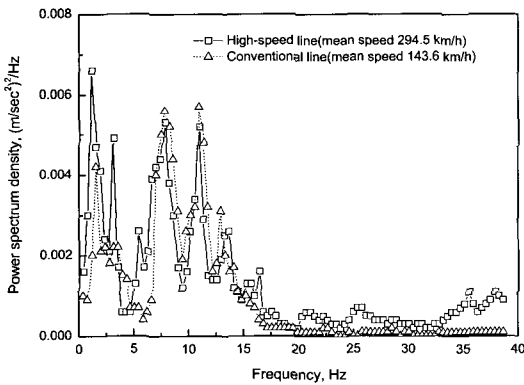
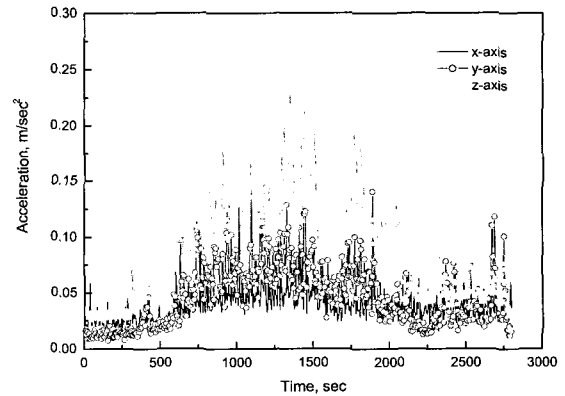


Fig. 5. Power spectrum density for KTX



(b) rms accelerations for 5.12 sec in the x, y and z directions

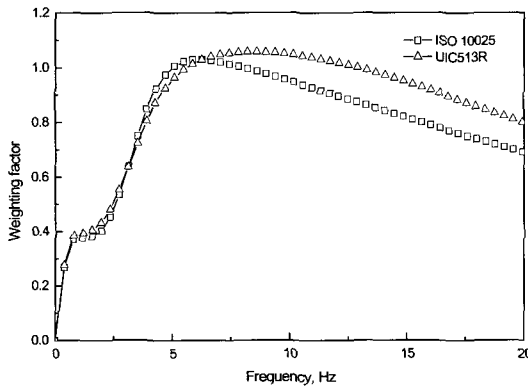
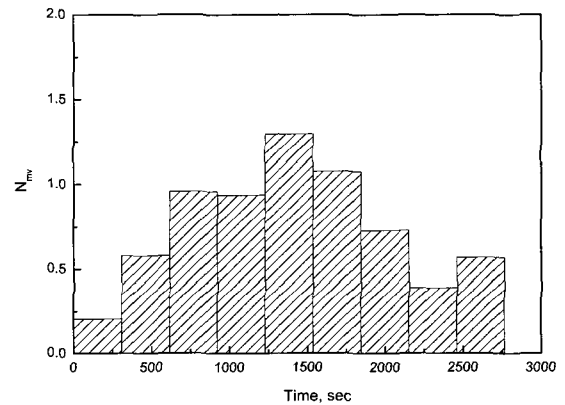


Fig. 6. Detailed frequency weighting curve



(c) Ride index

Fig. 7. Results(Kwangmyoung-Seodaejeon)

통계적인 방법으로 승차감 평가지수를 구한 것이다. KTX는 46편성 중 1편성을 선정하였고, 측정 위치는 18호차의 차체 바닥 중간위치에서 수행되었으며, HSR 350x의 경우에는 TT3의 차체바닥 전위 위치에서 측정된 진동 가속도를 이용하였다. 기존선로에서는 Fig. 8 (a)에서 보는 바와 같이 경부선과 호남선에 따른 승차감 지수의 거의 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, HSR 350x가 KTX보다 승차감 지수가 작기 때문에 승차감은 HSR 350x가 KTX에 비해 우위에 있다.

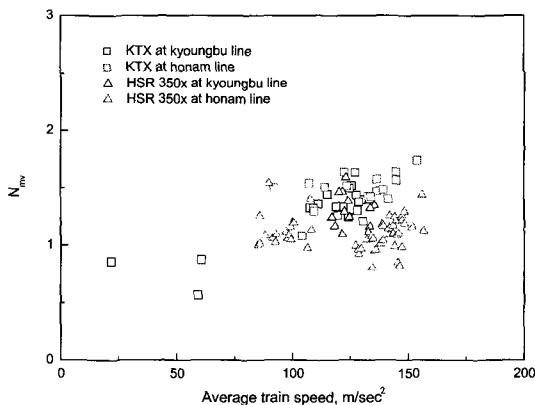
또한, 고속선로에서는 Fig. 8 (b)에서 보는 바와 같이 고속인 300km/h 범위의 주행속도에서는 HSR 350x와 KTX의 승차감 지수는 거의 비슷한 수준임을 알 수 있다. 그러나, 200km/h 이하의 주행속도에서는 기존선로에서와 같이 HSR 350x가 KTX에 비해 우위에 있다. 기존선로에서의 승차감 지수는 150~160km/h의 주행속도임에도 불구하고 고속선에서 300km/h의 주행속도인 경우의 승차감 지수와 거의 동일한 수준으로 이는 앞에서 설명했던 기존선로 조건이 고속선로보다 나쁘다는 것을 지적하는 단적인 예라 할 수 있다.

이들 결과를 종합하면, 300km/h 주행속도 범위에서는 HSR 350x와 KTX가 비슷한 수준의 승차감 특성을 갖지만, 200 km/h 이하에서는 HSR 350x가 KTX에 비해 승차감 특성이 양호(주행속도 160~170km/h인 경우의 평균 승차감 지수, KTX: 0.86, HSR350x: 0.64)하므로 기존선에서는 승차감 입장에서 HSR 350x가 우수(주행속도 100 이상인 경우의 평균 승차감 지수, KTX: 1.42, HSR350x: 1.14)에 있다. 이는 HSR350x과 KTX는 차체의 재질 및 구조가 다르기 때문이라 생각된다. 또한, HSR 350x와 KTX 모두 경부선과 호남선의 고속선로과 기존선로 모두에서 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준인 2보다 훨씬 작은 범위로 양호한 승차감 특성을 갖음을 시운전 시험을 통한 승차감 평가로 입증하였다.

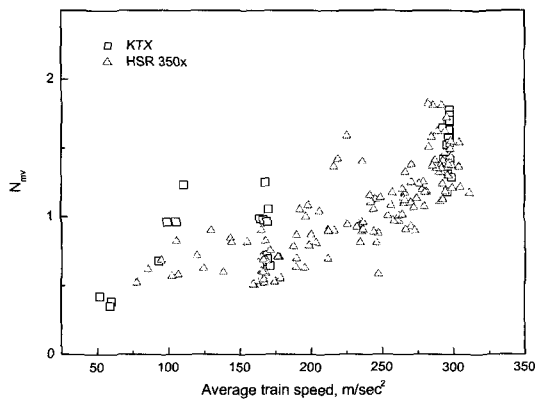
4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) ISO 10056과 UIC 513R 규격에서는 통계적 방법으로 동일한 절차로 철도차량의 승차감을 평가하도록 되어 있으나, 실제의 승차감 시험을 통해 승차감의 평가를 수행한 결과, 주파수 보정곡선의 차이와 고속철도에서 발생하는 진동 주파수 특성 때문에 UIC 513R에 의해 평가된 승차감 지수가 ISO 10056에 의한 승차감 지수가 상대적으로 큼을 확인할 수 있었다.
- (2) 고속 주행속도인 300km/h의 범위의 주행속도에서는 KTX와 HSR 350x가 거의 동일한 승차감 지수를 갖지만, 200km/h 이하의 주행속도에서는 HSR 350x가 KTX보다 승차감 특성에서 우위에 있음이 고속선로와 기존선로에서의 시운전 시험을 통해 확인되었다.
- (3) 경부선과 호남선의 기존선로에서의 승차감 시험에서는 KTX와 HSR 350x에 대해 경부선과 호남선의 선로 차이에 따른 승차감 지수의 변화는 거의 없이 동일한 수준의 승차감 특성임을 확인할 수 있었다.
- (4) 기존선로와 고속선로의 주행에 따른 차이는 KTX와 HSR 350x 모두 승차감 지수가 고속철도 차량이 고속선로를 300km/h로 주행할 때와 기존선로를 150~160km/h로 주행할 때가 거의 동일하다. 즉, 기존선로가 400R의 곡률반경, 분기기, 판형교량, 레일 이음매, 정도가 불량한 불규칙도 등의 선로조건과 빈번한 운행속도 제한, 역구내 통과 등의 운행조건이 고속선로에 비해 나쁘다는 것을 승차감 시험으로 입증하였다. 그러나, HSR 350x와 KTX 모두 경부선과 호남선의 고속선로와 기존선로 모두에서



(a) Conventional line



(b) High speed line

Fig. 8. Ride indices for high speed train

UIC 513R에 제시된 “Deluxe rolling stock”의 승차감 기준인 2보다 작은 범위로 양호한 승차감 특성을 갖고 있다.

- (5) 향후 보다 KTX에 대한 더 많은 승차감 시험을 수행하여 KTX의 46편성에 대한 편성의 차이에 따른 승차감 지수의 변화를 포함한 승차감 특성의 파악이 필요하며, 이를 통해 확보된 KTX와 HSR 350x의 승차감 특성의 차이를 종합적으로 검토해 볼 필요성이 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영국 등, 1999, 철도용 승차감 측정시스템 개발, 한국소음진동 공학회 추계학술대회논문집, pp.120-125.
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. International Organization for Standardization(ISO), 2001, ISO Code 10056.
6. International Union of Railways, 1994, UIC Code 513R.
7. International Organization for Standardization(ISO), 1997, ISO Code 2631-1.
8. Garg, V. K., et al., 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.
9. 김영국 등, 2003, “시운전시험을 통한 한국형 고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가”, 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, pp.286-293.