

# 운행조건에 따른 한국형 고속열차의 승차감에 관한 고찰

## Discussion of the ride comfort for Korean high speed train according to the operational conditions

김영국\*      김석원\*\*      목진용\*\*      김기환\*\*  
Kim, Young-Guk   Kim, Seog-Won   Mok, Jin-Yong   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. In the case of Korean high speed train(HSR 350x), the ride comfort has been assessed by statistical method according to UIC 513R. To verify the design requirements for the performance of HSR 350x, the qualification tests had been conducted from August 19, 2002 to December 2004 and the stabilization and reliability tests are carried out nowadays. Up to December 2006, total test runs and the accumulated milage of the train were 357 times and 164,000km, respectively. A total of 352 ride indices had been acquired through the on-line test from Aug. 2002 to Dec. 2006. In this paper, we have reviewed the characteristics of ride comfort for HSR 350x according to the operational conditions, such as load and track conditions, season and used time, by using the tests data.

### 1. 서 론

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/레도 접촉(wheel/rail contact), 구동모터(traction motor), 콤프레서(compressor), 각종 전기접점 등에 의한 기계적인 진동과 이로 인한 소음이 발생된다[1-4]. 이렇게 발생한 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 진동 가속도를 인간의 등가 감응량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다[3-8]. 철도분야의 승차감은 여러 가지의 평가방법이 각종 규격에서 제시되고 있으나[4-8], 한국형 고속열차(Korean high speed train, HSR 350x)는 국제철도협회(UIC, International Union of Railways)에서 규정한 UIC 513R 규격[7]에 따라 승차감을 평가하도록 되어 있다[9].

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. 350 km/h급의 7량 1편성인 한국형 고속열차 시제차량은 2002년 8월부터 시운전 시험을 시작하였으며, 개발된 시제차량에 대한 기능과 성능이 설계 요구사항[9]에 만족되는 지

\* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : ygkim@krri.re.kr

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

\*\* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

에 관점을 두었던 성능인증시험의 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 시제차량 (HSR 350x)의 장시간 승차감 시험은 UIC 513R에서 규정하고 있는 통계적인 방법에 따라 KTX 영업선로에서 열차의 평균속도 80 - 310 km/h로 진행되었으나, 열차를 운행할 수 있는 주변여건이 UIC 513R에 따른 승차감 시험의 조건을 만족하지 않았기 때문에 310 km/h 이상의 주행속도에서는 수행할 수가 없었다. 본 논문에서는 2002년부터 2006년까지 실시된 357회의 승차감 시험으로 획득한 승차감 지수 데이터를 바탕으로 하중조건, 선로조건, 계절, 경과수명 등 운영조건의 변화에 따른 한국형 고속철도 시제차량의 승차감을 분석하였다.

## 2. UIC 513R에 따른 승차감 평가 분석

승차감철도에서의 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[6-7]. 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 신호왜곡에 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 블럭의 진동가속도 파워는 해당 평가법에 따라 Fig. 2의 주파수 보정곡선을 통해 주파수 보정을 행한 후에 각 방향에 대한 진동 가속도 실효값을 식(1)로 부터 구한다.

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

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 누적빈도가 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. 승차감 시험

### 3.1 시험조건

한국형 고속열차 시제차량은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 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 현가 장치로 공기스프링을 채택하고 있다.

한국형 고속열차 시제차량은 KTX의 영업운전이 시작되기 이전인 2004년 3월까지의 통계적인 승차감 평가방법에서 요구하는 5분간 일정한 열차의 주행속도를 유지하면서 다양한 주행속도에서 시운전 시험을 수행하였으나, 그 이후에는 영업선로의 제한 때문에 특정한 열차의 주행속도에서만 시운전 시험을

진행할 수밖에 없었다.

### 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 400 Hz이고, 2048개의 데이터를 사용하여 DSP에서 푸리에 변환을 수행하기 때문에 2장에서 정의한 1블럭은 실제로 5초가 아닌 5.12초이며, 통계적 방법에 사용된 60개 블록은 5.12분에 해당한다[10]. 승차감의 평가 위치는 중간객차의 후단부 차량 바닥에서 측정하였다.

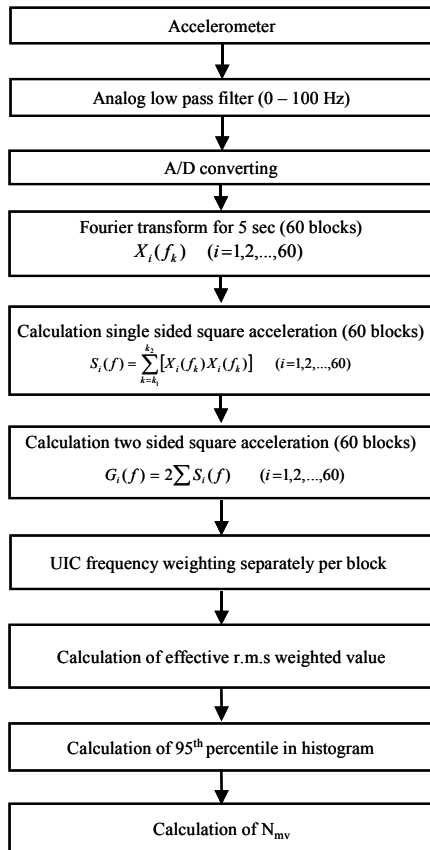


Fig. 1 Flowchart of ride comfort evaluation

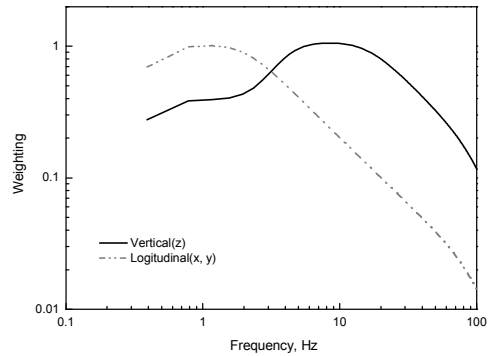


Fig. 2 Frequency weighting curve

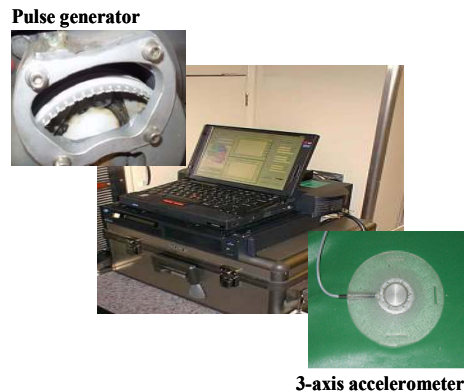


Fig. 3 Sensors and experimental set-up

### 3.3 승차감 지수의 계산

시운전 시험을 통해 5분 동안 측정된  $x, y, z$  방향의 진동 가속도를 이용하여 Fig. 1의 흐름도에 따라 승차감 지수를 구하였다. 또한, 열차의 주행속도에 대한 승차감의 상관관계를 파악하기 위해서 이 구간의 평균 주행속도가 필요하다. 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.

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				

#### 4. 승차감 시험 결과 분석

Fig. 4는 2002 ~ 2006년 동안 공차상태의 승차감 시험을 통해 획득된 승차감 지수를 열차의 주행속도에 대해 나타낸 것으로 고속선의 경우 306개, 기존선의 경우 44개가 획득되었다. 고속선의 경우는 약 50%의 데이터가 열차의 주행속도 280 ~ 300 km/h에, 기존선은 77%의 데이터가 열차의 주행속도 100 ~ 140 km/h에 집중되어 있음을 알 수 있다. 이는 KTX 개통된 2004년 4월 이후에는 한국형 고속열차 시제차량이 KTX 영업운행과 동일한 조건에서 운행된 상태에서 승차감 시험이 수행되었기 때문이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 승차감 지수는 고속선로과 기존선로 모두에서 2이하로 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준을 만족하고 있으나 동일한 열차의 주행속도에서 기존선일 때의 승차감 지수는 고속선보다 훨씬 크다. 즉, 고속철도 차량이 고속선로를 300 km/h로 주행할 때의 승차감은 기존선로에서는 140 ~ 150 km/h로 주행할 때와 거의 동일하다. 이는 실제로 기존선로는 고속선로보다 좋지 않은 선로조건(600R이하의 곡률반경, 분기기, 관형교량, 레일 이음매, 정도가 불량한 불규칙도, 빈번한 운행속도 제한 등)을 갖고 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 하중상태가 다른 경우에 대한 승차감 지수를 고속선로와 기존선로에 대해 열차의 특정한 주행속도에서 비교한 것이다. 영차조건에서의 승차감 시험이 KTX 개통 이후에 수행되었기 때문에 승차감 지수를 Table 1에서 보는 바와 같이 영차조건에서 다양한 열차의 주행속도에 대해 획득하지 못하여 특정한 주행속도에 대해서만 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 영차조건에서의 승차감 지수는 고속선로과 기존선로 모두에서 2이하로 UIC 513R에 제시된 "Deluxe rolling stock"의 승차감 기준을 만족하며 공차조건과 거의 차이가 없었다. 이는 영차조건과 공차조건의 하중의 차이가 약 1 %에 불과하기 때문에 하중조건은 고속철도 차량의 승차감에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

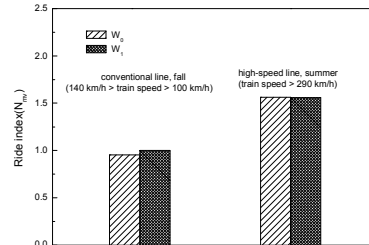
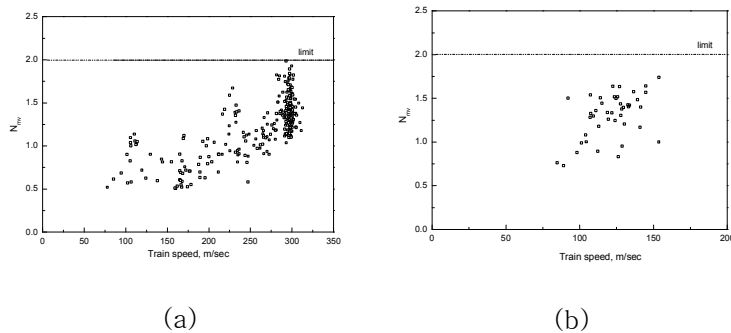
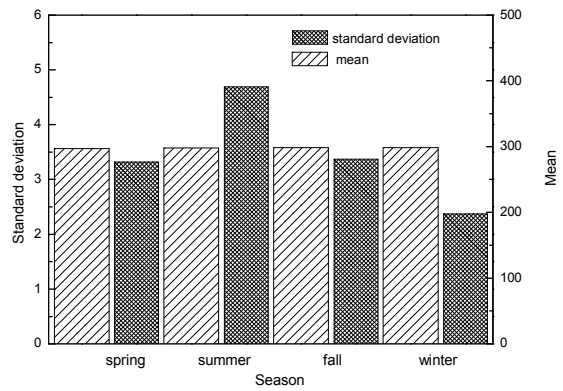
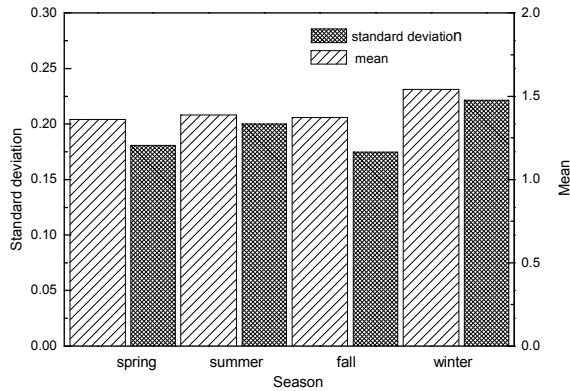


Fig. 4 Ride indices for high speed train, (a) high speed line, (b) conventional line

Fig. 5 Ride indices and train according to load conditions

Fig. 6과 Fig. 7은 계절변화에 따른 승차감 지수를 고속선로(열차 주행속도 : 290 km/h 이상)와 기존선로(열차 주행속도 : 110 - 142 km/h)에 대해 나타낸 것으로 평균 주행속도는 고속선로와 기존선로 모두 선택한 열차의 주행속도 범위에서 계절에 상관없이 거의 일정하다. 한국형 고속열차 시제차량의 공장 점검이 주로 봄에 이루어졌기 때문에 시운전 시험은 여름, 가을, 겨울에 수행되어, 봄에 획득한 승차감 지수가 다른 계절에 비해 데이터 개수가 적었다. Fig. 6 (a)와 Fig. 7 (a)에서 보는 바와 같이 겨울의 경우가 다른 계절에 비해 승차감 지수의 평균과 표준편차가 크다. 이는 대차에 설치되어 있는 현가 장치의 고무스프링, 공기스프링, 댐퍼 등과 선로의 노반의 강성이 다른 계절에 비해 겨울이 커지게 되기 때문이라 판단된다.

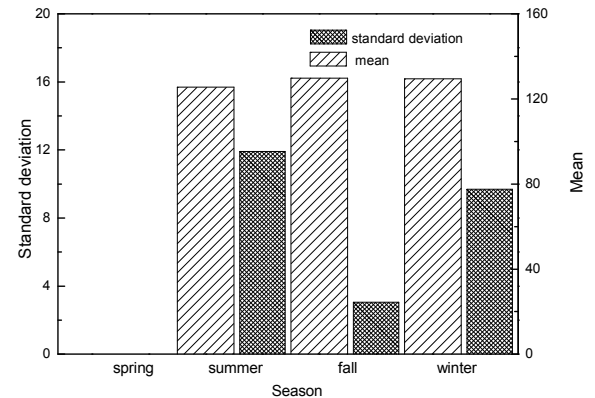
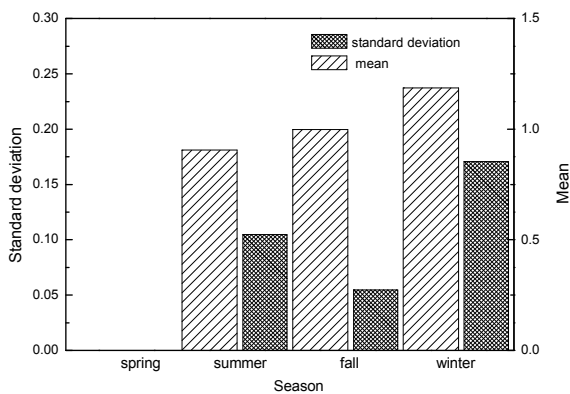
Fig. 8은 경과수명에 따른 승차감 지수를 고속선로(열차 주행속도 : 290 km/h 이상)에 대해, Fig. 9는 경과수명에 따른 최대와 최소인 열차의 주행속도를 나타낸 것이다. 2002년과 2003년에는 한국형 고속열차 시제차량의 주행속도가 Fig. 9에서 보는 바와 같이 290 km/h 미만이었으므로 Fig. 8에 포함시



(a)

(b)

Fig. 6 Ride indices and train speed according to variation of season in the high speed line, (a) Ride index, (b) Average train speed



(a)

(b)

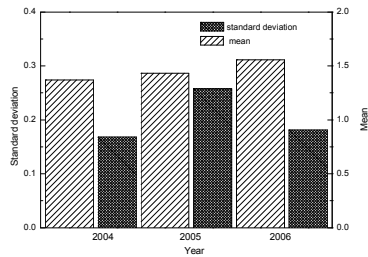
Fig. 7 Ride indices and train speed according to season in the conventional line, (a) Ride index, (b) Train speed

키지 않았다. Fig. 8 (b)에서 보는 바와 같이 평균 주행속도는 선택한 열차의 주행속도 범위에서 경과 수명에 상관없이 거의 일정하지만, 승차감 지수는 2004년에 비해 2005년과 2006년에 4 %와 13 %가 증가하였다. 이는 대차에 설치되어 있는 현가장치의 성능이 시간의 경과에 따라 떨어지는 것으로 추측할 수 있으나, 앞에서 설명한 바와 같이 UIC 513R에 제시된 “Deluxe rolling stock”의 승차감 기준을 만족하므로 문제가 되지 않는다고 판단된다.

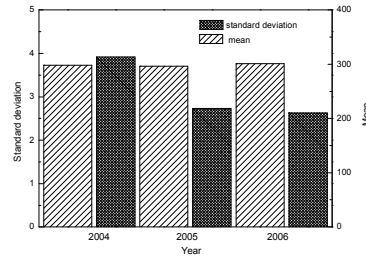
## 5. 결 론

(1) 한국형 고속철도 시제차량의 승차감을 통계적인 방법으로 평가하기 위해 다른 선로조건과 하중조건 상태에서 승차감 시험을 통해 열차의 주행속도 80 - 310 km/h범위에서 362개의 승차감 지수 데이터를 획득하였다.

(2) 승차감 지수 데이터로부터 한국형 고속철도 시제차량은 선로조건(고속선, 기존선), 하중조건(공차,



(a)



(b)

Fig. 8 Ride indices and train according to test year in the high speed line, (a) Ride index, (b) Train speed

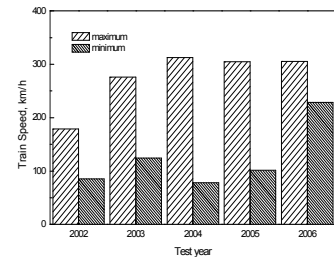


Fig. 9 Minimum and maximum train speeds according to test year

영차)에 상관없이 UIC 513R에 제시된 “Deluxe rolling stock”의 승차감 기준을 만족하므로 장시간 승차감 관점 승차감이 양호하다. 기존선로와 고속선로의 주행에 따른 승차감은 고속선로를 300 km/h로 주행할 때와 기존선로를 140 ~ 150 km/h로 주행할 때가 거의 동일한 수준이다. 즉, 기존선로는 400R의 곡률반경(curvature), 분기기(turnout), 관형교량, 레일 이음매(rail joint), 정도가 불량한 불규칙도 등의 선로조건과 빈번한 운행속도 제한, 역구내 통과 등의 운행조건이 고속선로에 비해 나쁘다는 것을 의미한다.

(3) 계절의 변화에 따른 승차감은 겨울의 경우가 다른 계절에 비해 선로조건에 상관없이 나쁘다. 이는 대차에 설치되어 있는 현가장치의 고무스프링, 공기스프링, 댐퍼 등과 선로의 노반의 강성이 다른 계절에 비해 겨울이 증가되었기 때문이라 추측된다.

## 감사의 글

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. 한국철도기술연구원 (1998), G7 고속전철 시제차량 기본사양.
10. 김영국 등 (2004), “다기능성을 갖는 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발,” 센서학회지, 제13권, 제5호, 한국센서학회, pp. 369-377.