

# 고속선/기존선 운행에 따른 고속철도 차량의 승차감 특성 분석

## Analysis on the Characteristics of the Ride Comfort for High Speed Trains on the High Speed Line/Conventional Line

김영국† · 김석원\* · 박찬경\*\* · 김기환\* · 박태원\*\*\*

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

(2004년 6월 14일 접수 : 2004년 9월 24일 심사완료)

**Key Words** : High Speed Train(고속철도 차량), On-line Test(시운전 시험), Ride Comfort(승차감), Ride Index(승차감 지수), Frequency Weighting Curve(주파수 보정곡선), RMS(실효치), Statistical Method(통계적 방법), High Speed Line(고속선로), Conventional Line(기존선로)

### ABSTRACT

Recently, the ride comfort problem becomes increasingly important because of today's needs for train speedup. 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). In Korea, the service run of the high speed train has been made since the 1st of April, 2004. The commercial high-speed trains must be run on the compound lines which are composed of high-speed line and conventional line. The high speed lines in both Kyoungbu line and Honam line have 57.5% and 33.8%, respectively. In this paper, the ride comfort has been reviewed by the various experimental methods when the high-speed trains are operated on both Kyoungbu line and Honam line. The results show that the high-speed train has no problems from the viewpoint of the comfort ride during the operation on the high speed line and conventional line.

### 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 수준이

상으로 향상시키는 것이 필수적이다. 승차감은 인간의 감각기관을 통해 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 감응량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다.<sup>(1~4)</sup> 철도분야의 승차감은 다양한 평가방법으로 각종 규격에서 제시하고 있으며,<sup>(5~13)</sup> 가속도 실효값 이용방법,<sup>(6, 7, 11, 12)</sup> 가속도 신호의 통계적 평가방법,<sup>(8~11)</sup> 'Sperling'이 제안한 Wz 방법<sup>(13)</sup> 등이 주로 사용되고 있다. 이들은 서로 다른 승차감 측정과 평가방법을 제안하고 있으며, 이들 중 일부는 철도차량에 대한 승차감 평가기준도 제시하고 있다. 이

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원  
E-mail : ygkim@krri.re.kr  
Tel : (031) 460-5612, Fax : (031)460-5649

\* 한국철도기술연구원  
\*\* 정희원, 한국철도기술연구원  
\*\*\* 아주대학교 기계공학과

연구에서는 국제표준위원회(ISO) 규격과 국제철도 협회(UIC, international union of railways)의 규격에서 제안한 두 가지 방법을 이용한다.

2004년 국내에서도 고속철도가 개통되어 국민의 철도에 대한 관심이 어느 때보다도 높은 상태로 고속철도 차량(KTX)이 경부선(서울~부산)과 호남선(용산~목포)을 하루에 수십 회씩 운행하고 있다. 고속철도 차량이 운행되는 경부선과 호남선은 Fig.1에서 보는 바와 같이 고속선로와 기존선로로 구성되어 있으며, 현재 고속선로가 경부선의 경우에 총 연장길이 약 409 km 중 57.5%, 호남선의 경우에 총 연장길이 약 403 km 중 33.8%를 차지하고 있기 때문에 고속철도 차량은 고속선로와 기존선로를 연계하여 운행할 수 밖에 없는 상태이다. 그러나, 고속선로와 기존선로에서는 승차감에 영향을 주는 진동의 원인<sup>(8, 13)</sup>이 되는 레일 불규칙도, 레일 이음매, 분기기, 교량, 곡선부, 캔트 등의 선로조건과 열차 운행속도 및 운행조건 등의 차이 때문에 고속선로와 기존선로에서 승객이 느끼는 승차감은 차이가 있게 된다. 따라서, 고속철도차량이 고속선로와 기존선로의 연계운행을 위한 승차감의 평가가 반드시 수행되어야 하며, 이를 위해 KTX와 한국형 고속철도 시제차량(HSR 350x)을 고속선로와 기존선로에서 반복적으로 연계운행을 시행하여 승객의 승차감을 평가하였다.

방법 등이 있다. 가속도 실효값 이용방법은 ISO 2631/1, ISO2631/4, KS R 9216 등에서, 통계적 방법은 ISO 10056, UIC 513R, ENV 12299, KS R 9216 등에서 제안하고 있다. 또한, Wz 방법은 'Sperling'에 의해 제안된 방법으로 50년 이상 철도에서 사용해 왔던 승차감 평가방법이다.

Fig.2는 철도 승차감의 대표적인 3가지 평가방법에 대한 평가 흐름도를 나타낸 것이다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도센서로 직접 측정되거나 테이프 레코더에 저장된 진동 가속도 신호를 저주파 밴드필터를 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 푸리에변환을 사용하여 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 주파수 범위(ISO 규격: 0.5~80 Hz, Wz 평가: 0.5~30 Hz, UIC 규격: 0.4~80 Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도 파워를 구한다. x, y, z 방향에 대한 블록의 진동가속도 파워를 해당 평가법에 따른 Fig.3의 주파수 보정곡선을 통한 주파수 보정을 행한 후에 각 방향에 대한 진동가속도 실효값을 식 (1)로부터 구한다. 이 가속도 실효값을 이용하여 각 평가법에서 제안하는 평가지수를 구하게 된다.

## 2. 승차감 평가방법 및 평가기준

### 2.1 평가방법

앞에서 설명한 바와 같이 철도차량 승차감의 평가 방법에 대한 많은 규격과 문헌에 제안되어 있는 데 그 대표적인 것이 ISO 규격과 UIC 규격이다. 이들 규격 및 문헌에서 제안한 대표적인 평가방법으로는 가속도 실효값(rms) 이용방법, 통계적 방법 및 Wz

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

여기서,  $G_i$ 는 가속도 파워,  $B_i$ 는 주파수 Fig.3의 보정 곡선으로 z방향의 경우는 Fig.3(a)를, x, y방향의 경우는 Fig.3(b)를 사용한다.

여기서는 이 논문에서 사용된 가속도 실효값 이용 방법과 통계적 방법에 대해서만 설명한다.

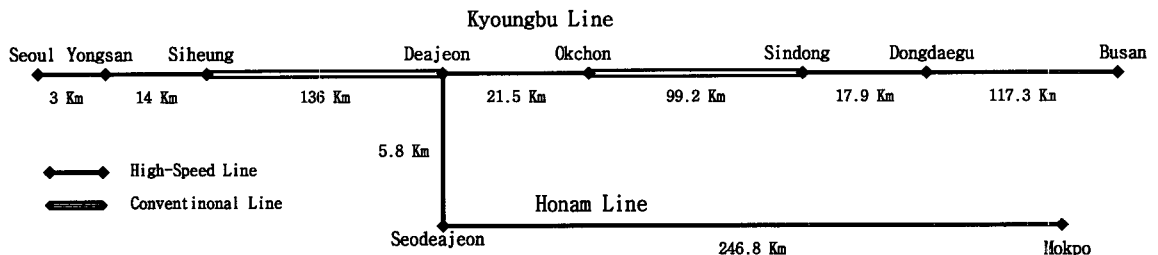


Fig. 1 High-speed line and conventional line

(1) 실효값을 이용한 평가방법

실효값을 이용한 평가방법은 기본적으로 특정한 시간동안 측정되어 주파수 보정된 진동 가속도의 실효값을 이용하여 평가한다. 즉, 측정구간에 따라 적당히 선택된 블록수(예를 들면, 5분 동안 승차감 평가를 하고 싶은 경우에는 60개 블록 선택)에 따라 x, y, z 방향에 대한 해당 측정구간의 가속도 실효값을 구하여 승차감의 평가를 하게 된다. 또한, 이 실효값을 이용하여 식 (2)에 의해 구해지는 승차감 레벨(RCL, ride comfort level)을 사용하여 평가하는 경우도 있다. (11, 12)

$$RCL_i = 20 \log_{10} (a_{r.m.s.i} / a_{ref}) \quad (i = x, y, z) \quad (2)$$

여기서,  $a_{ref}$  : 기준가속도(=10<sup>-6</sup> m/sec<sup>2</sup>)

(2) 통계적인 평가방법

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 승차감 지수  $N_{mv}$ 를 식 (3)과 같이 구한다.

$$N_{mv} = 6\sqrt{(A_{wx95})^2 + (A_{wy95})^2 + (A_{wz95})^2} \quad (3)$$

2.2 주파수 보정곡선

동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이를 나타내며, 이를 함수화시킨 것이 주파수 보정곡선으로 철도 승차감 평가법마다 Fig. 3에서 보는 바와 같이 서로 다른 주파수 보정곡선을 사용하고 있다. ISO 규정에 정의된 주파수 보정곡선은 수직방향과 수평방향에 대해  $W_b$ 와  $W_d$ 로 정의되어 있으며, 이 보정곡선은 수직방향과 수평방향에 대해 4~12 Hz와 0.6~2 Hz에서 민감(주파수 보정값 0.9이상)하다. 또한, UIC 규정에서 주파수 보정곡선은 수직방향과 수평방향에 대해  $W_b-W_a$ 와  $W_d-W_a$ 로 정의되어 있는데, 수직방향은 4~16.5 Hz에서, 수평방향은 0.6~2 Hz에서 민감하며, 수평방향은 ISO 규정과 동일한 주파수 보정곡선이고 수직방향은 ISO 규정과 거의 유사한 형태이지만, 주파수 보정치가 8~60 Hz의 주파수 범위에서 ISO 규정보다 약간 크다.

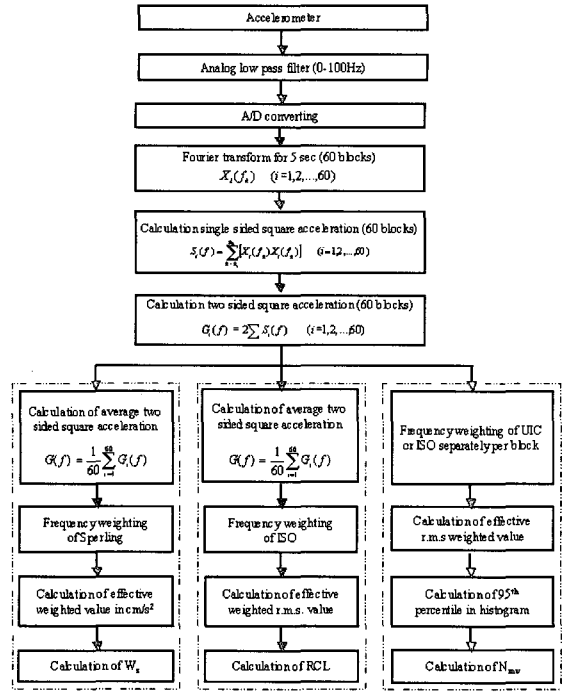
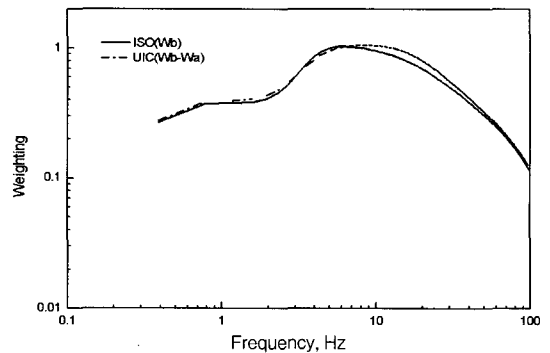
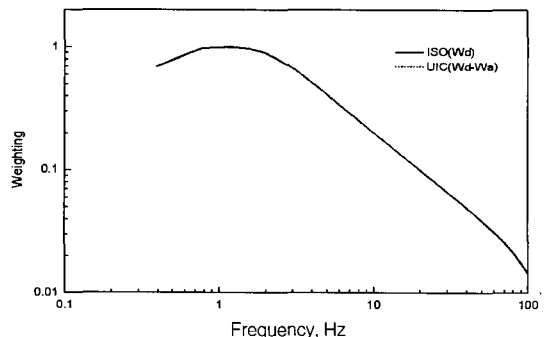


Fig. 2 Flow chart of a accessing ride comfort



(a) For vertical direction



(b) For lateral direction

Fig. 3 Frequency weighting curve

### 2.3 평가기준

서론에서 살펴본 바와 같이 철도차량의 승차감 평가방법과 기준은 다양하며, 평가주체에 따라 다른 평가기준을 적용하여 승차감을 평가하고 있다.

경부고속철도의 승차감에 대한 평가기준은 고속철도 차량이 고속선로를 운행하는 경우에 대해 정의하고 있으나, 기존선로에 대해 정의된 승차감 평가 기준은 없다. 고속선로에서의 승차감 평가기준은 열차 속도 300 km/h에서 10분 동안의 가속도 실효치(1분 간격) 평균이 ISO2631/1(1985) 규격의 2시간 피로능틀한계를 기준을 넘지 않도록 하고 있다. 이 2시간 피로능틀한계의 기준을 가속도 실효값으로 나타내면 상하방향은  $0.257 \text{ m/sec}^2$ 이고 수평방향은  $0.183 \text{ m/sec}^2$ 이다.

기존선로에서의 승차감은 국내의 경우 주로 승차감 레벨을 사용하여 평가하도록 기존철도 차량의 발주사 양에 명기되어 있으며,<sup>(12)</sup> 이 승차감 레벨은 103 dB 이하에서는 승차감이 매우 좋고 103~108 dB에서는 승차감이 좋은 것으로 정의되어 있다.

경부고속철도와 별개인 G7 사업의 일환으로 국내에서 개발된 한국형 고속철도차량에 대한 승차감 평가는 시방서에 UIC 513R 규격의 "Deluxe rolling stock" 기준으로 평가하도록 정의되어 있다.

### 3. 승차감 평가 및 고찰

#### 3.1 시운전 시험용 계측시스템

승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 4의 승차감 측정시스템<sup>(11)</sup>을 사용하였으며, 이에 대한 자세한 사양은 Table 1과 같다. 이 승차감 측정시스템은 앞에서 설명한 대표적인 3가지 승차감 평가방법으로 평가가 가능하도록 설계되어 있으며, 가속도의 측정은 3축 가속도계를 사용하여 이루어진다.

가속도 센서는 ICP형으로 FFT 보드에서 20 V, 2.4 mA 전원이 공급된다. 사용된 승차감 측정시스템은 샘플링 주파수가 400 Hz, 2048개의 데이터를 사용하여 푸리에변환을 수행하기 때문에 실제로 앞에서 정의한 1블럭은 5.12초이며, 1분은 12개 블럭(61.44 초), 5분은 60개 블럭(5.12분)을 말한다.

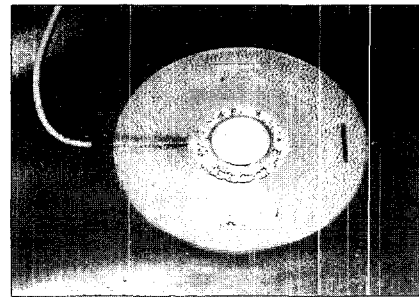
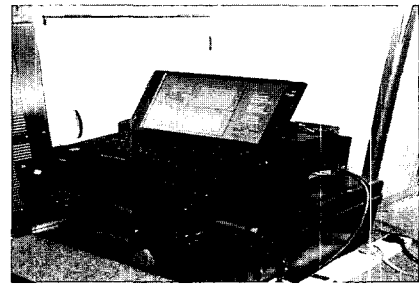
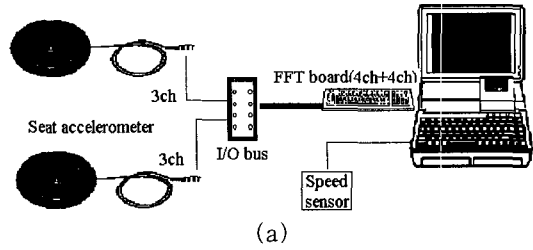


Fig. 4 Measuring system for ride comfort test  
(a) Schematic diagram, (b) Experimental set-up, (c) 3-axis seated accelerometer

Table 1 Specifications of ride comfort measuring system

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

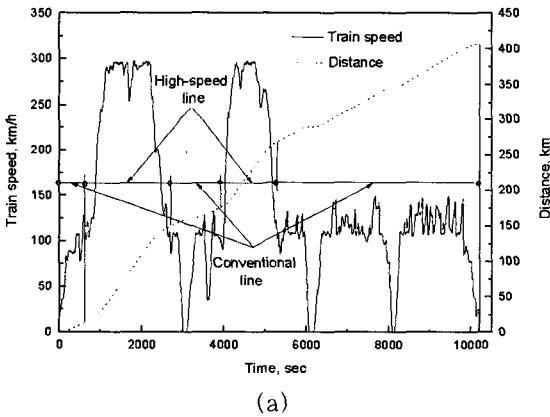
### 3.2 승차감 결과 분석

Fig. 5는 고속철도 차량이 경부선과 호남선을 연계하여 운행한 한 예로써 열차의 주행속도와 이동거리 선도를 나타낸 것이다. 고속철도 차량이 Fig. 1의 고속선로 구간(시흥~대전 조차장, 옥천~신동)에서는 고속철도 차량이 300 km/h의 속도로 주행하였으며, 기존선로 구간에서는 호남선의 경우 최대 160 km/h, 경부선의 경우 최대 150 km/h까지의 속도로 주행하였음을 알 수 있다.

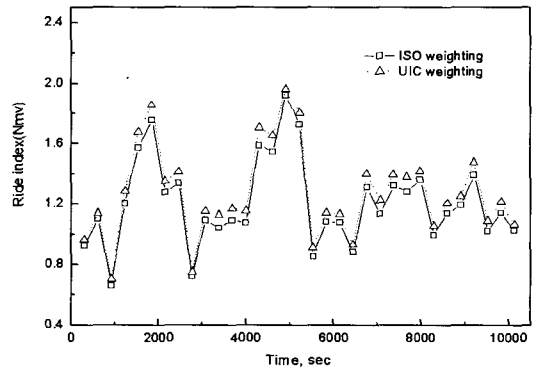
Fig. 6과 Fig. 7은 고속철도 차량이 경부선과 호남선을 Fig. 5의 나타낸 속도로 주행할 때에 승차감을 평가한 결과이다. Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)는 UIC 규격과 ISO 규격의 통계적 방법으로 평가한 승차감 지수로 고속선로와 기존선로 모두 UIC 규격을 적용한 경우가 ISO 규격을 적용한 경우 보다 크게 나타남을 알

수 있으며, 이 원인은 두 경우에 적용하는 보정곡선의 차이 때문이라고 판단된다. 즉, Fig. 3의 주파수 보정곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 상하방향에 대해 8 Hz 이상의 주파수에서 UIC 규격의 주파수 보정치가 ISO 규격의 주파수 보정치보다 크며, 실제로 고속철도 차량은 Fig. 9의 주파수 특성 곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 5~15 Hz의 주파수에서 큰 가속도를 갖기 때문에 UIC 규격을 적용한 경우가 ISO 규격을 적용한 경우보다 크게 된다.

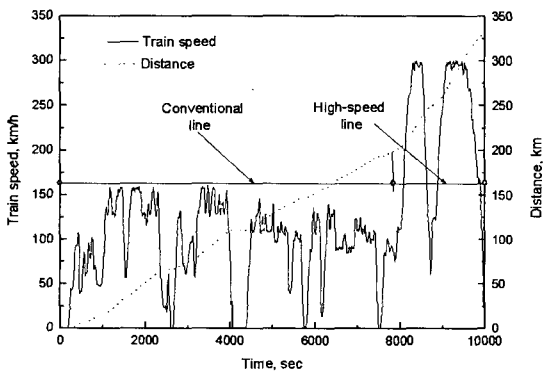
또한, 측정된 최대 승차감 지수는 UIC 규격에 따라 평가한 경우에 나타나며, 그 값은 1.96(Fig. 6(a) 참조)으로 UIC 513R 규격의 "Deluxe rolling stock" 기준인 2를 초과하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)는 약 1분 간격(61.44초)의 가속도 실효값으로 승차감을 평가한 결과로 고속철도 차량은 좌우방



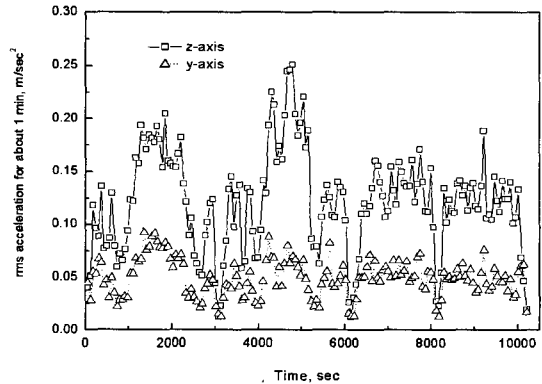
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Train speed and traveling distance. (a) Kyoungbu line, (b) Honam line

Fig. 6 Ride comfort in the Kyoungbu line. (a) by statistical method, (b) by rms method

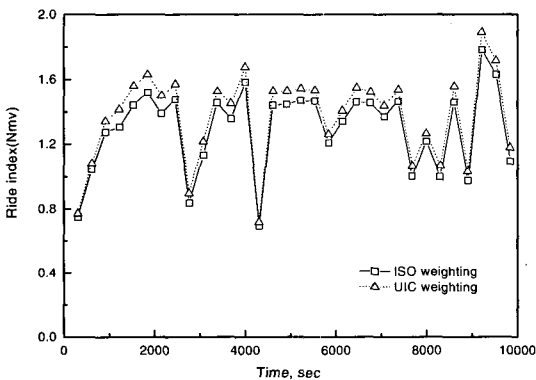
항보다 상하방향의 진동에 대해 약 2배 이상의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 측정된 가속도 실효값은 1분 간격의 결과임에도 불구하고 경부 고속철도의 한계치를 초과하지 않으며, 10분 간격에 대한 가속도 실효값은 더 작아질 것이다.

Fig. 8은 고속철도 차량이 기존선(경부선(신동-부산), 호남선(광주-서대전))을 운행할 때의 승차감을 승차감레벨로 평가한 결과로 경부선 전 기존선 구간과 호남선의 일부 기존선 구간을 제외하고 승차감레벨이 103 dB 이하로 승차감이 아주 좋은 상태를 나타낸다. 호남선의 일부 기존선 구간의 경우는 승차감레벨이 105 dB 이하로 승차감이 좋은 상태(103 dB~108 dB)임을 알 수 있다.

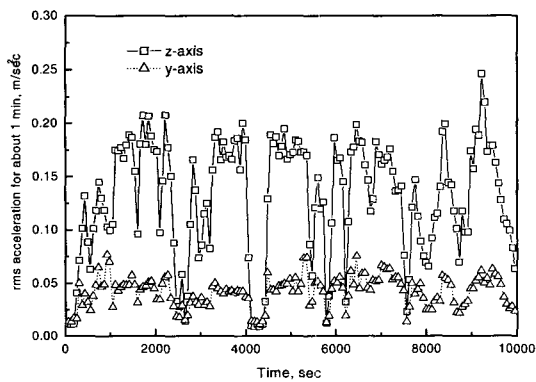
Fig. 9는 고속철도 차량이 고속선로를 294.5 km/h, 기존선로를 143.6 km/h로 주행하는 경우에 고속철도

차량의 상하방향에 대해 주파수 특성을 분석한 결과로 고속철도 차량이 고속선로와 기존선로를 주행할 때 거의 유사한 주파수 특성을 갖으며, 고속철도 차량은 고유주파수가 대략 1.2 Hz, 3.1 Hz, 7.8 Hz, 10.9 Hz임을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 UIC 규격의 통계적 방법에 따른 승차감 지수와 가속도 실효값에 의한 방법으로 평가된 고속철도 차량의 승차감 결과를 주행속도에 대해 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 고속선로와 기존선로에 대한 선로조건이 고속철도 차량에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것이 어려웠지만, Fig. 10과 Fig. 11을 통해 고속선로와 기존선로에서의 선로 조건이 고속철도 차량의 승차감에 미치는 영향을 좀더 자세히 확인할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11에서 심볼 □ 과 심볼 △ 은 고속선로와 기존선로에 대한 실제의 측정

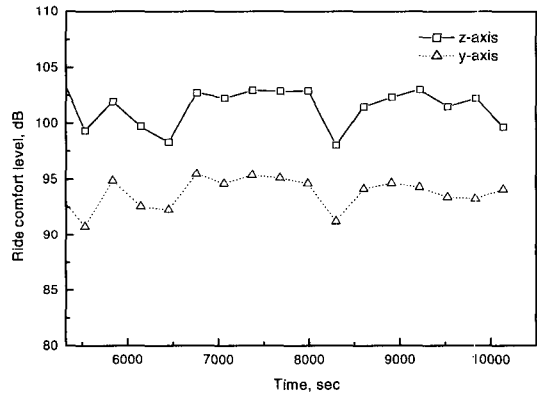


(a)

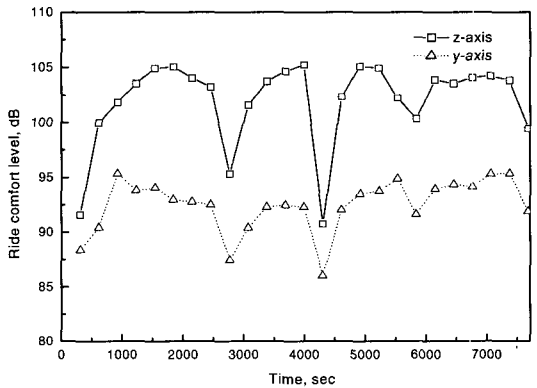


(b)

Fig. 7 Ride comfort in the Honam line, (a) by statistical method, (b) by rms method



(a)



(b)

Fig. 8 Ride comfort level(RCL) in the conventional, (a) youngbu(Sindong-Busan), (b) Honam(Kwangju-seodeajoen)

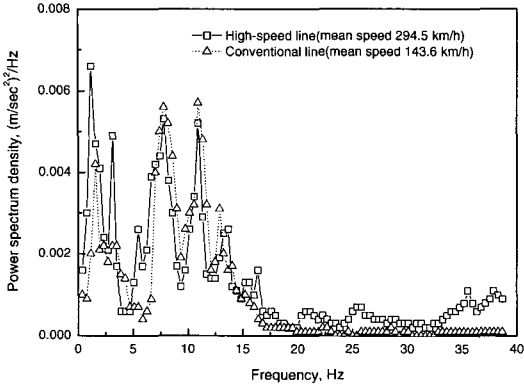


Fig.9 Power spectrum density at High-speed line and Conventional line

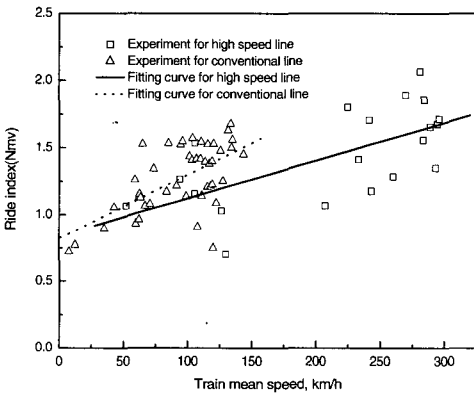


Fig.10 Evaluation for ride comfort by statistical method

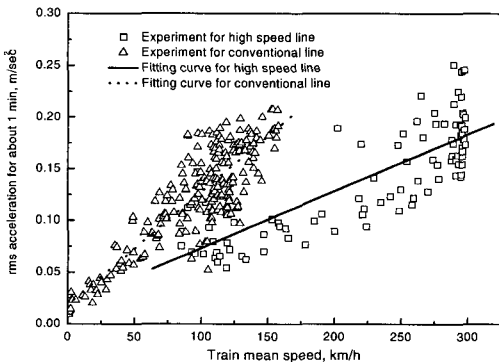


Fig.11 Evaluation for ride comfort by rms method

결과이며, 실선과 일점쇄선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선으로 결과에서 볼 수 있듯이 고속선의 선로조건이 기존선보다 훨씬 좋다. 즉, 고속철도 차

량이 고속선로를 300 km/h로 주행할 때의 승차감은 기존선로에서는 150~170 km/h로 주행할 때와 동일하다. 이는 실제로 기존선로는 고속선로보다 좋지 않은 선로조건(600R이하의 곡률반경, 분기기, 판형교량, 레일 이음매, 정도가 불량한 불규칙도, 빈번한 운행속도 제한 등)을 갖고 있기 때문이다.

#### 4. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고속선/기존선의 연계시험을 통해 고속선로와 기존선로가 복합적으로 연결되어 있는 경부선 및 호남선을 운행하는 고속철도 차량에 대해 가속도 실효값 이용방법과 통계적 방법으로 승차감의 평가를 행하였으며, 두 경우 모두가 승차감 기준에 만족함을 확인 할 수 있었다. 또한, 승차감 레벨을 이용하여 고속철도 차량이 기존선로를 주행할 때의 승차감도 평가하였으며, 그 결과 역시 만족할 만한 수준이었다.

(2) 기존선로에서의 승차감이 고속선로에서의 승차감보다 나쁘다는 것을 시험결과로 입증하였으며, 그 결과는 고속선로를 300 km/h로 주행할 때와 기존선로를 150~170 km/h로 주행할 때가 승차감이 거의 동일하다. 이는 기존선로가 600 R 이하의 곡률반경, 분기기, 판형교량, 레일 이음매, 정도가 불량한 불규칙도 등의 선로조건과 빈번한 운행속도 제한, 역구내 통과 등의 운행조건이 고속선로에 비해 나쁘기 때문이다.

(3) 고속철도 차량에 주파수 특성의 분석 결과, 고속선로와 기존선로에서의 주파수 특성이 거의 동일하며, 고유주파수는 대략 1.2 Hz, 3.1 Hz, 7.8 Hz, 10.9 Hz임을 알 수 있었다.

(4) ISO 규격과 UIC 규격을 적용한 통계적 방법의 의한 고속철도 차량의 승차감 평가결과, 주파수 보정곡선의 차이 때문에 UIC 규격에 의한 것이 ISO 규격에 의한 것보다 승차감 지수가 상대적으로 큼을 확인할 수 있었다.

(5) 기존선로에서의 승차감 측정결과가 기준치에 대해 충분한 여유를 갖고 있으며, 승차감만을 고려해 볼 때 고속철도 차량의 기존선로에서의 속도를 증가시키는 것이 가능할 수 있지만, 실제의 고속철도 차량에 대한 속도 증가는 승차감 뿐만 아니라 차량의

안전성, 차륜 마모 등의 다른 제반 요소들을 종합적으로 고려되어야 하기 때문에 신중히 다루어져야 할 것이다.

## 후 기

이 연구는 고속철도 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 김영국 등, 1999, 철도용 승차감 측정시스템 개발, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 120~125.
- (2) 김영국 등, 2002, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석", 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 3 호, pp. 204~212.
- (3) 김진기 등, 2001, "인체진동을 고려한 국내의 대중 교통 수단의 진동 환경 평가에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 7 호, pp. 267~274.
- (4) 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.
- (5) Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F, pp. 61~72.
- (6) International Organization for Standardization(ISO), 1997, ISO Code 2631-1.
- (7) International Organization for Standardization(ISO), 2001, ISO Code 2631-4.
- (8) International Organization for Standardization(ISO), 2001, ISO Code 10056.
- (9) International Union of Railways, 1994, UIC Code 513R.
- (10) European Committee for Standardization, 1997, ENV 12299.
- (11) 한국표준협회, 2000, KS R9216.
- (12) 철도청, 1989, 철도기술연보 부록Ⅲ 철도 차량의 주행 안전성 평가 방법(안), Vol. 23, No.1.
- (13) Garg, V. K., et al., 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.