



# 고속열차 좌석 및 입석 조건에 따른 승차감 평가 Ride Comfort Evaluation for Seated and Standing Human in High-speed Trains

김 덕 만\* · 김 득 하\* · 최 성 훈\*\* · 박 준 홍†

Deokman Kim\*, Deukha Kim\*, Sunghoon Choi\*\* and Junhong Park†

(Received October 23, 2017 ; Revised December 12, 2018 ; Accepted December 12, 2018)

**Key Words** : Ride Comfort(승차감), Seated/standing(좌석/입석), High-speed Train(고속열차), Human Vibration(인체 진동)

## ABSTRACT

Various factors including vibration levels influenced ride comfort recognized by passengers during transits by high-speed trains. The vibration level was measured on the floor of the train. The measurement on the surface on the seat cushion and the seatback is also being considered for evaluations. The frequency weightings were applied to evaluate the ride comfort. In this study, three axis vibration on the passenger body was measured to analyze the human body vibration and its effect on the ride comfort. The vibration levels were measured for passengers in the seated and the standing positions. The vibrations of the seat and the human body were measured at constant speed of 300 km/h. The frequency weightings defined in ISO 2631-1 were applied to the body vibration levels for finding the ride comfort. The ride comfort in the seated position was compared to that in the standing position using the proposed level. The comparison shows information about the importance of the vibration measurement locations for ride comfort evaluation.

## 1. 서 론

철도 기술의 향상과 열차의 주행 속도 증가로 인해 고속열차에 대한 승객들의 기대감과 요구 사항이 증가하면서 차량의 승차감이 중요한 요소로 대두되고 있다. 승차감은 진동, 소음, 시트의 디자인, 착좌감, 자세, 차량 내부 구조, 온도, 습도 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다<sup>(1,2)</sup>. 승차감에 대한 평가는 물리적인 인자와 주관적인 느낌에 대한 복합적인 요소가 고려되

어 이루어진다. 열차의 주행 속도가 증가하면서 열차 및 승객에게 전달되는 진동이 커진다. 따라서 승차감을 평가하는데 동적인 요소가 중요해진다<sup>(3,4)</sup>. 고속열차의 성능이 향상됨에 따라 고속 주행 시 발생하는 진동 인자를 기반으로 하는 승차감 평가가 이루어져야 한다<sup>(5,6)</sup>.

진동 레벨을 기반으로 철도 차량의 승차감을 평가하는 방법 중 진동 가속도의 실효값(r.m.s.)으로 평가하는 ISO 2631-1과 통계적인 방법으로 평가하는 UIC 513이 있다. 국가기술표준원은 KS R 9216:2000에서

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University  
E-mail : parkj@hanyang.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

\*\* Member, Korea Railroad Research Institute

# A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2018 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

철도 차량의 승차감에 대한 평가법을 제시하고 있다. 여러 열차 승차감 평가법은 측정 위치와 방법은 비슷하지만 인체의 민감도 보정 곡선이 조금씩 다르다. 하지만 ISO, UIC, EN에서 사용된 민감도를 분석한 연구에서 주행 열차의 승차감 지수 평가 결과 편차가 7.6% 이내로 발생하는 것을 확인할 수 있었다<sup>(7)</sup>.

고속 주행 시 열차 바닥에서 발생하는 진동은 수직 방향의 진동이 가장 크게 발생하지만 고속 주행 시 횡 방향 진동도 승차감에 영향을 미친다. 충격성 신호에 대한 승차감을 확인해 보면 동일한 진동 크기에서 횡 방향 진동에 대해 더 불편하다고 평가하며 저주파수 대역에서 더 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있었다<sup>(2)</sup>.

직선 구간과 곡선 구간의 선로를 연결하는 완화 곡선 구간에서 좌석과 입석에 대한 평가 결과 좌석의 승차감이 입석에 비해 상대적으로 우수하게 나타났다<sup>(8)</sup>. 좌좌 시 승객의 승차감에 대한 인지 특성을 분석하기 위해, 시트와 인체의 진동 특성을 수학적으로 모델링하여 승차감에 영향을 미치는 인자를 분석하는 연구가 많이 진행되었다. 1자유도나 2자유도 시스템으로 모델링하여 좌좌 조건과 스탠딩 조건에서의 자세 변화에 대한 진동 응답을 분석한 연구<sup>(9,10)</sup>와 47개 변수를 사용하여 시트와 인체의 진동 특성을 수학적으로 분석한 연구<sup>(11)</sup> 등이 있다.

인체 진동은 주행 중 승차감에 많은 영향을 미치며, ISO 등 여러 규정에서 진동 응답 크기를 사용하여 단일 수치로 승차감을 표현하는 평가법을 제시하고 있다. 이런 규정에서 좌석 조건의 승차감을 평가하기 위해 바닥 진동, 시트 쿠션과 시트백에 대한 진동 응답을 사용하며, 입석 조건에서는 바닥 진동을 사용한다. 인체 각 부위는 고유의 공진주파수가 있으며 진동에 대한 민감도가 서로 다르게 영향을 미치는 특징을 보인다<sup>(12)</sup>.

이 연구에서는 고속열차에서 발생하는 진동 응답과 좌석 및 입석 조건에서의 인체 진동 특성을 확인하기 위하여 모든 방향에 대한 진동 응답을 측정하였다. 시트와 인체의 주파수 특성을 분석하였고 주요 공진주파수에 의한 시트-인체 사이에서 발생하는 상호작용을 확인하였다. 주요 인체 부위에서 발생하는 인체 진동 응답과 ISO 등에서 활용되는 인체 민감도 함수를 활용하여 승차감을 평가하고 좌석 및 입석 조건의 승차감 평가 점수를 비교하였다.

## 2. 실험 및 평가 방법

### 2.1 실험 장치 구축 및 측정 위치 선정

열차 주행 중 승객의 승차 조건에 따른 인체 진동 신호 측정 실험을 HEMU-430X 차량 특실에서 진행하였다. 실험은 호남선(오송 ↔ 모암IEC) 구간의 상/하행 선로에서 300 km/h 고속주행 조건으로 진행하였으며 속도 편차는 5 km/h 이내였다. 정속 구간에서 25 초 동안 진동 신호를 측정하여 데이터를 분석하였다. 이때 열차로부터 승객에게 직접적으로 전달되는 진동 신호를 측정하기 위해 Fig. 1(c)와 같은 3축 가속도 측정 패드를 제작하였다. 가속도계가 하중을 받게 되면 기준 전압이 달라지기 때문에 측정 오차가 발생하게 된다. 측정 패드는 승객의 피부에 직접적으로 접촉하는 아크릴 면 위에 3축 가속도계를 부착하고, 고무 패킹으로 착석 시 발생할 수 있는 가속도계 눌림과 같은 현상을 방지하도록 제작하였다. 가속도계는 Endevco사의 isotron accelerometer model 65으로 저주파수 영역 측정이 가능하였으며, 각 축 방향 민감도는 10.3 mV/m/s<sup>2</sup> ~ 10.7 mV/m/s<sup>2</sup>이다. 이 측정 패드는 승차감 평

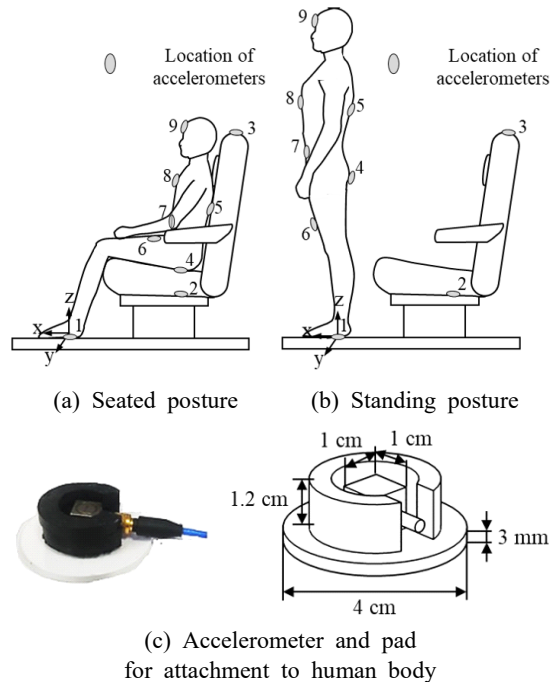


Fig.1 Experimental setup in high-speed train to measure vibration of human body and seat

가에 일반적으로 사용되는 시트 패드 타입과 달리 소 형으로 제작되어 인체에 직접적으로 접촉하여 인체 진 동 신호를 직접 계측할 수 있다는 장점이 있다. 측정 패드는 피실험자의 머리, 가슴, 배, 허벅지, 엉덩이와 열 차 바닥, 시트 쿠션, 시트백에 직접 부착하여 열차 및 인체 진동신호를 측정하였다. 피실험자는 신장 175 cm, 체중 71 kg의 남성으로 KS R 9216 조건을 만족한다. 이 실험에서 진동 응답 측정을 위해 NI 장비가 사용되 었다. 계측 샘플링 주파수는 1600 Hz이고 시험의 재 현성을 확보하기 위해 각 실험조건 별 3회 반복 측정 을 진행하였다. 착석 자세의 피실험자는 손을 무릎에 얹고 등받이에 등을 기대고 시선은 정면을 응시하였 다. 입석 자세에서는 다리를 어깨너비로 벌리고 허리 를 곧게 펴고 정면을 응시하였다.

**2.2 진동 및 안락감 평가 방법**

진동은 시간에 따라 진폭이 변하기 때문에 진동을 평가하는 방법으로 주어진 시간 동안에 가해진 진동 의 평균값을 구하는  $L_{eq}$ (equivalent vibration level)를 많이 사용한다.  $L_{eq}$ 는 시간 영역과 주파수 영역에서 구할 수 있다. 시간 영역에 대해서 진동 실효치(r.m.s.) 를 계산하면

$$x_{r.m.s.} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

이다. 여기서  $x(t)$ 은 시간 영역에서 가속도 응답 신호 이고  $T$ 는 측정시간을 의미한다. 등가 진동 레벨  $L_{eq}$  를 구하면

$$L_{eq} \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \frac{x_{r.m.s.}}{x_0} \tag{2}$$

이다. 여기서  $x_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 은 KS R 9216에서 사용 하는 진동 기준값을 적용하였다.

ISO 2631-1에서는 인체의 진동 평가를 위해 인체 민감도 함수가 적용된 주파수 영역의 진동 응답 신호 의 실효치를 이용하여 진동 노출량을 계산한다. 실효 치를 계산하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$a_{w,i} = \left( \int_{f_1}^{f_2} W_i^2(f) P_i(f) df \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

여기서,  $i = x, y, z$ ,  $W_i$ 는 주파수 보정 곡선,  $P_i$ 는 가 속도의 파워 스펙트럼 밀도,  $f_1$ 과  $f_2$ 는 계산하는 주 파수 범위이다. ISO 2631-1의 주파수 보정 곡선은 수평 방향과 수직 방향에 대해 각각 0.6 Hz ~ 2 Hz와 4 Hz ~ 12 Hz에서 가장 민감하게 나타난다.

주파수 보정과 진동 방향을 고려한 가속도 실효값은

$$a_{abs} = (k_x a_{w,x} + k_y a_{w,y} + k_z a_{w,z})^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

로 계산된다. 여기서,  $k_x, k_y, k_z$ 는 축 방향 보정 계수이 다.

ISO 규정은 다음과 같이 입석 상태의 승차감을 간 단하게 평가하기 위해 바닥에서 측정된 진동 가속도 의 실효값을 사용하였다.

$$a_{ISO,standing} = a_{v,feet} \tag{5}$$

그리고 착좌 상태의 승차감은 바닥, 시트 쿠션, 시 트백에서 측정된 진동 가속도의 실효값에 대한 제곱 합계곱근을(SRSS: square root of the sum of the squares) 사용하였다.

$$a_{ISO,seated} = \left( a_{abs,feet}^2 + a_{abs,seat \text{ cushion}}^2 + a_{abs,seatback}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

ISO의 규정을 사용한 승차감 평가로는 실제 인체에 전달되는 진동 특성을 대변하기에 한계가 있다. 인체 에 전달되는 진동 신호는 자세 및 인체 부위의 공진주 파수에 따라 다르게 나타난다. 이런 한계를 보완하기 위해 인체 각 부위의 진동을 측정하고 인체 민감도 함수를 적용한 실효값을 사용하여 인체의 진동 특성 을 분석하였다. ISO 규정에서는 좌석과 입석 조건의 승차감을 평가하기 위한 진동 측정 위치, 주파수 보정 곡선, 축 방향 보정 계수가 다르기 때문에 이를 적용 하여 직접적으로 비교하기 어렵다. 따라서 좌석과 입 석의 승차감을 평가하고 비교하기 위해 주파수 보정 곡선은 수평 방향( $x, y$ -axis)과 수직 방향( $z$ -axis)에 기 본적으로 사용되는  $W_d$ 과  $W_k$ 를 적용하였고 축 방향 보정 계수( $k_x, k_y, k_z$ )는 1로 동일하게 적용하였다. 승차 감을 대변할 수 있는 인체 진동 크기를 도출하기 위 해 각 위치에 대한 진동 실효값의 SRSS를 계산하였 다. 인체 진동 레벨은

$$a_{\text{Body}} = \left( \sum_i a_{\text{abs},i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

이다. 여기서,  $i = 1, 4-9$ 는 인체 각 부위의 진동 측정 위치이다.

### 3. 진동 측정 및 승차감 평가

#### 3.1 진동 특성 분석

Fig. 3은 고속 주행 시 열차 바닥에서 발생하는 3축 방향의 가속도 신호의 주파수 응답이다. 전 주파수 대역에서 수직 방향 진동이 수평 방향 진동에 비해 10 dB 정도 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 열차 구조의 특성에 따라 공진주파수가 발생하는데 3축 방향에 대한 공진주파수를 확인할 수 있다.  $x$ 와  $z$ 축 방향의 공

진은 2.3 Hz에서 발생하며  $y$ 축 방향의 공진은 1.3 Hz에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 저주파수에서 발생하는 공진의 경우 주행 조건에 따라 0.5 Hz 정도의 편차를 보인다. 31.1 Hz에서 3축 방향 모두 공진이 발생하는데, 동력 엔진이 꺼진 상태에서도 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 내부 시스템(모터, 공조기 등)에 의한 조화 성분으로 추정된다. 열차 바닥의 평행 방향( $x, y$ 축) 공진은 인체 민감도 함수의 수평방향 가중치 최대값 범위와 비슷한 범위에서 나타난다. 이는 열차 공진에 의한 진동이 승객에게 불편함을 유발하는데 영향이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 4(a)와 (b)는 좌석과 입석 조건에서 고속 주행 시 열차 바닥의 수직 방향으로 발생하는 진동에 대한

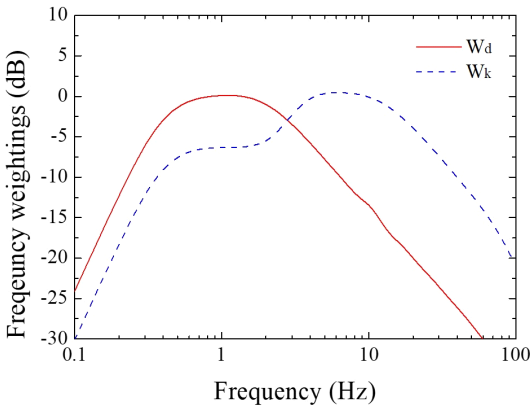


Fig. 2 Frequency weighting curves for horizontal ( $W_d$ ) and vertical ( $W_k$ ) directions in ISO 2631-1

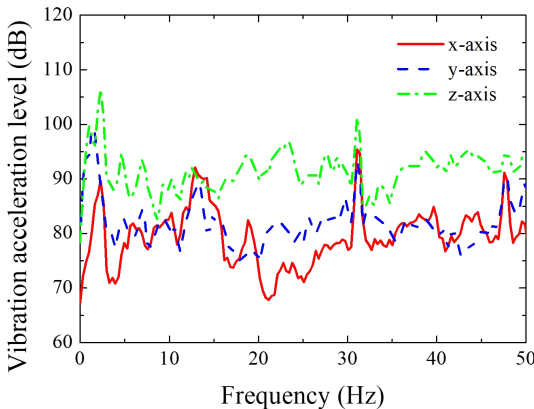
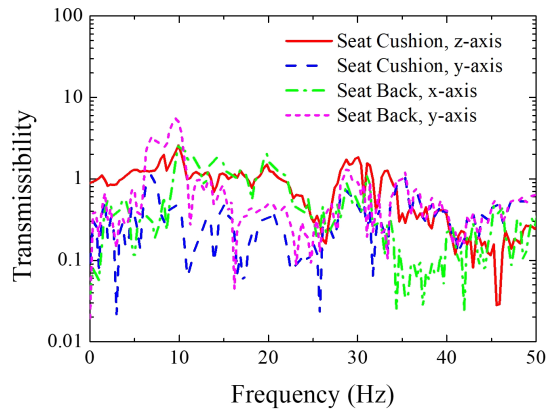
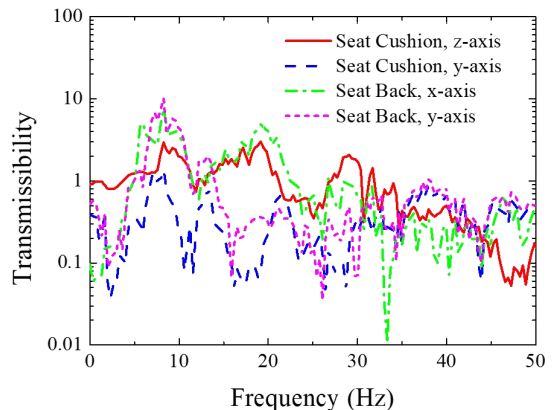


Fig. 3 Vibration acceleration level of three axis accelerometers on the floor of the train



(a) In seated positions



(b) In standing positions

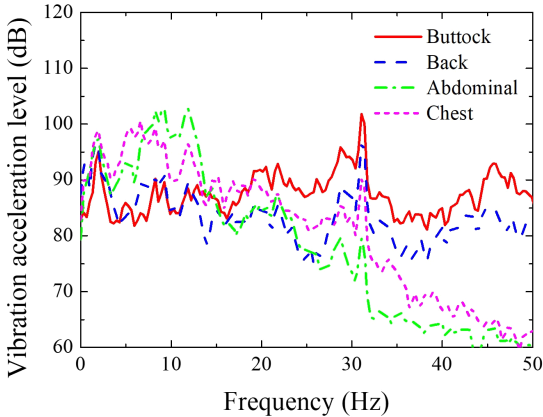
Fig. 4 Transmissibility from vertical direction on the floor of the train to vertical and horizontal direction on the surface of the seat cushion and the seat back

시트 쿠션과 시트백의 수직 및 수평 방향 진동에 대한 전달률이다. 시트 쿠션의 수직 방향 전달률은 30 Hz 이하에서 1보다 크게 나타난다. 이것은 시트 쿠션의 진동 특성으로 인해 열차 바닥의 진동보다 시트 쿠션에서의 진동이 더 크게 발생한다는 것을 보여준다. 시트의 공진주파수는 8.3 Hz, 19.2 Hz, 29.0 Hz이다. 전달률을 보면 시트백의 공진주파수인 8.3 Hz에서 수평 방향의 진동 응답 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 시트백의 수평 방향 진동이 수직 방향 진동과 시트 쿠션의 진동에 비해 크게 나타나는 것을 보여준다.

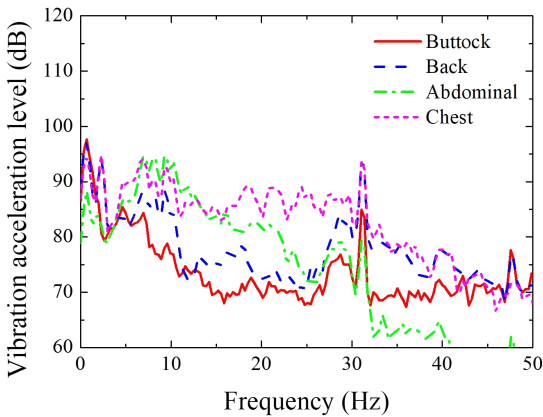
Figs. 5, 6, 7의 (a)와 (b)는 좌석과 입석 상태의  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축 방향 진동 크기를 나타낸 것이다. 좌석 상태의 경우 시트와 접촉해 있는 부분의 인체 진동 응답이 50 Hz 까지 비슷한 크기로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이

는 시트 쿠션과 시트백에 접촉해 있는 부분을 통해서 입석 조건인 경우에 비해 진동 전달이 많이 발생하는 것을 의미한다.

입석(비좌좌) 상태에서 시트백의  $y$ 축 공진주파수는 8.3 Hz에서 발생하였지만 좌석 상태에서는 시트백과 인체의 상호작용이 발생하여  $y$ 축 공진주파수는 9.6 Hz로 1.3 Hz 이격되었다. 시트백과 접촉해 있는 인체의 진동 응답 함수(Fig. 6(a))를 보면 9.6 Hz에서 진동 응답이 가장 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 시트백을 지지하고 있는 시트 쿠션 역시 동일한 주파수 영역에서 공진이 발생하며 인체의 진동 응답 역시 크게 발생하게 된다. 이는 좌석 상태에서 진동 응답이 전반적으로 크게 발생하므로 승차감에 안 좋은 영향을 미치게 됨을 의미한다.

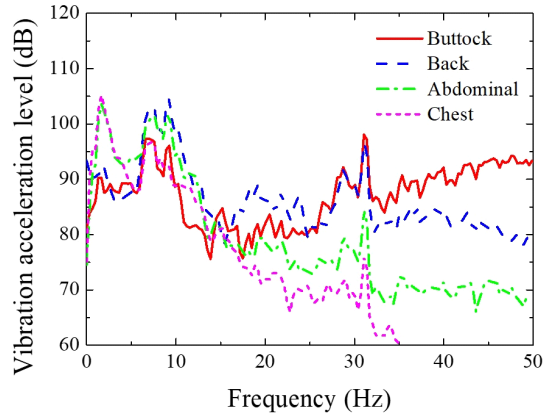


(a) In seated human bodies

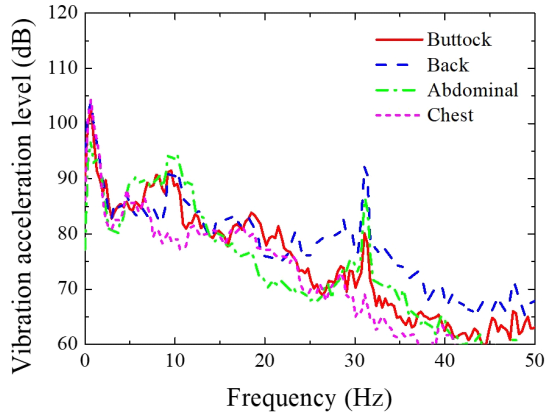


(b) In standing human bodies

**Fig. 5** Vibration acceleration level of  $x$ -axis in human bodies

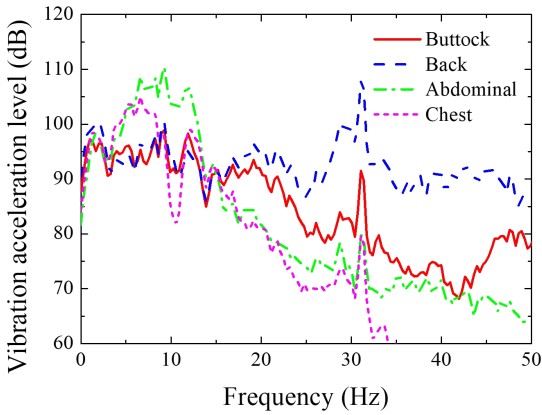


(a) In seated human bodies

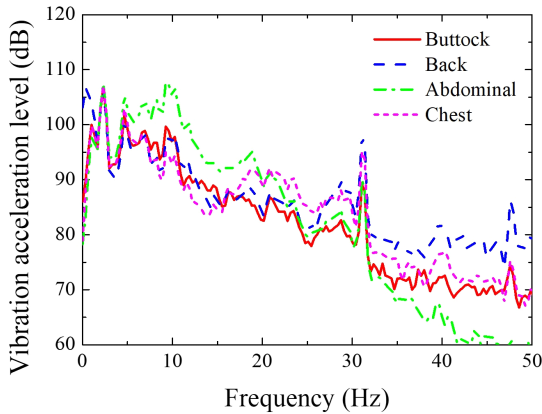


(b) In standing human bodies

**Fig. 6** Vibration acceleration level of  $y$ -axis in human bodies



(a) In seated human bodies



(b) In standing human bodies

Fig. 7 Vibration acceleration level of z-axis in human bodies

### 3.2 좌석/입석 승차감 평가

Table 1과 Table 2에서는 좌석과 입석 조건에서 측정된 진동 크기를 각 위치와 방향 별로 정리하였다. 여기서 SVM(sum vector magnitude)은 3축 방향 가속도의 벡터 합이다. 열차의 승차감을 평가하기 위해 인체진동 레벨을 구하였다. 인체 진동 레벨은 식 (7)과 같이 1, 4 ~ 9번 가속도계에서 측정된 진동 실효값의 SRSS를 사용하여 구하였다. 3회 측정된 진동 레벨의 평균과 표준편차는 좌석에서  $1.047 \pm 0.023 \text{ m/s}^2$ 이며 입석에서  $0.810 \pm 0.063 \text{ m/s}^2$ 로 계산되었다. 측정된 데이터의 편차가 크게 발생하지 않아 실험의 재현성이 높으며 좌석보다 입석에서 편차가 조금 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. Table 1과 Table 2에서 열차 바닥에서 들어오는 진동 크기가 좌석 상태에서 더 작게 발생하는데도 인체 진동 레벨은 좌석 상태에서 더 크게 나타났다. 이는 인체로 전달되는 진동 경로가

Table 1 Weighted vibration level for seated position

Acc. No.	Location	X-dir. (m/s <sup>2</sup> )	Y-dir. (m/s <sup>2</sup> )	Z-dir. (m/s <sup>2</sup> )	SVM (m/s <sup>2</sup> )
1	Floor	0.032	0.085	0.165	0.187
2	Seat cushion	0.036	0.073	0.214	0.229
3	Seat back	0.066	0.129	0.223	0.266
4	Buttock	0.053	0.054	0.200	0.214
5	Back	0.071	0.082	0.244	0.267
6	Thigh	0.068	0.151	0.477	0.504
7	Abdominal	0.099	0.156	0.584	0.612
8	Chest	0.107	0.173	0.336	0.392
9	Head	0.089	0.332	0.244	0.422

Table 2 Weighted vibration level for standing position

Acc. No.	Location	X-dir. (m/s <sup>2</sup> )	Y-dir. (m/s <sup>2</sup> )	Z-dir. (m/s <sup>2</sup> )	SVM (m/s <sup>2</sup> )
1	Floor	0.026	0.086	0.184	0.206
2	Seat cushion	0.035	0.076	0.263	0.276
3	Seat back	0.115	0.166	0.236	0.311
4	Buttock	0.061	0.093	0.241	0.266
5	Back	0.063	0.118	0.231	0.267
6	Thigh	0.118	0.089	0.319	0.351
7	Abdominal	0.037	0.067	0.460	0.466
8	Chest	0.062	0.119	0.231	0.266
9	Head	0.094	0.154	0.207	0.275

입석 상태보다 좌석 상태에서 더 많이 존재하며 시트와의 상호작용으로 시트의 진동에너지가 승객에게 전달되기 때문에 판단된다. 실제로 시트 쿠션과 시트백의 진동 크기는 좌석 상태에서 더 작게 발생한다. ISO 2631-1 기준의 승차감 지수는 좌석에서  $0.262 \pm 0.010 \text{ m/s}^2$ 이며 입석에서  $0.278 \pm 0.049 \text{ m/s}^2$ 로 평가되었다. 하지만 ISO 평가 방법은 좌석과 입석의 측정 기준이 다르기 때문에 좌석과 입석의 승차감을 직접적으로 비교하기 어렵다.

### 4. 결론

열차 주행 중 승객이 느끼는 승차감을 평가하기 위해 기존에 사용했던 열차 바닥, 시트 쿠션과 시트백의 접촉 부분뿐만 아니라 인체 각 부위로 전달되는 진동 응답을 측정하고 주파수 영역에서의 민감도 함수를 적용한 평가 점수를 제시하였다. 좌석 상태에서 승객은 시트 쿠션과 시트백과 접촉하게 되어 바닥의 진동 외에

도 외부 진동을 더 많은 영역에서 전달받게 된다. 시트의 진동 특성에 영향을 받아 30 Hz 이하에서는 바닥 진동에 비해 인체로 전달되는 진동은 더 커진다. 결과적으로 좌석과 입석의 인체 진동 레벨을 비교하면 좌석의 승차감이 더 안 좋게 나타난다. 입석 상태에서는 인체 민감도 함수의 특징으로 인해 열차의 공진주파수나 가속 시 발생하는 2 Hz 이하의 진동 응답에 취약할 것으로 예측된다. 이 연구에서는 고속의 정속 주행 조건에서 좌석 및 입석 승차감을 비교하였지만 향후 가속 상태의 인체 진동 응답 특성과 승차감에 대한 추가적인 연구가 진행된다면 고속열차 승차감을 종합적으로 평가하는데 도움이 될 것이다.

## 후 기

이 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(18RTRP-C139247-02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- (1) Grujicic, M., Pandurangan, B., Arakere, G., Bell, W., He, T. and Xie, X., 2009, Seat-cushion and Soft-tissue Material Modeling and a Finite Element Investigation of the Seating Comfort for Passenger-vehicle Occupants, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 10, pp. 4273-4285.
- (2) Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 212, No. 1, pp. 61-72.
- (3) Kargarnovin, M., Younesian, D., Thompson, D. and Jones, C., 2005, Ride Comfort of High-speed Trains Travelling Over Railway Bridges, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, No. 3, pp. 173-197.
- (4) Ebe, K. and Griffin, M. J., 2000, Qualitative Models of Seat Discomfort Including Static and Dynamic Factors, *Ergonomics*, Vol. 43, No. 6, pp. 771-790.
- (5) Kim, Y. G., Kim, S. W., Mok, J. Y., Kim, S. S. and Kim, K. H., 2007, Estimation of Ride Comfort for Korean High Speed Train at High Speed, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 2, pp. 146-152.
- (6) Kim, J. M., Park, J. H., Ahn, S. J. and Jeong, W. B., 2015, Evaluation of Human Exposure to Vibration on Domestic High-speed Train Using ISO 2631-1, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*,

Vol. 25, No. 4, pp. 266-274.

- (7) Kim, Y., Park, C., Kim, S., Kim, K. and Paik, J., 2010, Analysis of the Frequency Weighting Curve for the Evaluation of Ride Comfort, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 6, pp. 552-558.
- (8) Choi, I. Y., 2015, Analysis of Comfort on Transition Curve Based on the Measured Data, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 5, pp. 3573-3578.
- (9) Wei, L. and Griffin, M., 1998, Mathematical Models for the Apparent Mass of the Seated Human Body Exposed to Vertical Vibration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 212, No. 5, pp. 855-874.
- (10) Matsumoto, Y. and Griffin, M., 2003, Mathematical Models for the Apparent Masses of Standing Subjects Exposed to Vertical Whole-body Vibration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 260, No. 3, pp. 431-451.
- (11) Brogioli, M., Gobbi, M., Mastinu, G. and Pennati, M., 2011, Parameter Sensitivity Analysis of a Passenger/seat Model for Ride Comfort Assessment, *Experimental Mechanics*, Vol. 51, No. 8, pp. 1237-1249.
- (12) Heißing, B. and Ersoy, M., 2011, Ride Comfort and NVH, In *Chassis Handbook*, Springer, Wiesbaden, pp. 421-448.



**Deokman Kim** received B.S. degree in the mechanical engineering from Hanyang University in 2011. He received his Ph.D degree in mechanical engineering from Hanyang University in 2018. He is currently a postdoctoral researcher at Hanyang University. His research interests include structure vibration analysis and ride comfort.

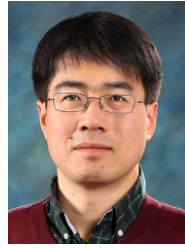


**Deukha Kim** received B.S. degree in the mechanical engineering from Hanyang University in 2017. Now he is currently a student for unified master's and doctor's course at the department of mechanical convergence engineering, Hanyang University. His research interests include human vibration and structure-borne noise analysis.



**Sunghoon Choi** received the B.S. degree in mechanical engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1990, and the M.S. and Ph.D. degrees in theoretical and applied mechanics from Northwestern University in 1992

and 1995, respectively. He joined the technical staff of Samsung Advanced Institute of Technology and worked for five years in the computational science and engineering group. Then, he joined KAIST as a Research Professor in the Department of Mechanical Engineering. Since 2002, he has been with Korea Railroad Research Institute, where he is involved in the development project of the high-speed train system. His research activities focus on structural acoustics and vibration, and he is currently working on the identification and mitigation of noise and vibration of rail vehicles.



**Junhong Park** received his B.S. and M.S. from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1991 and 1993, respectively. He worked at the Samsung Electronics Co. Ltd. from 1993 to 1998. He received his Ph.D. from

Purdue University in 2002. He is currently a professor of the Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interests include signal processing, wave analysis, and noise control for improving the acoustic and dynamic comfort of automobiles, trains, and residential buildings.