

ISO 2631-1을 이용한 국내 고속철도차량의 인체진동 노출량 평가

Evaluation of Human Exposure to Vibration on Domestic High-speed Train using ISO 2631-1

김 지 만* · 박 진 한* · 안 세 진† · 정 의 봉**
Ji Man Kim, Jin Han Park, Se Jin Ahn and Weui Bong Jeong

(Received January 7, 2015 ; Revised March 6, 2015 ; Accepted March 26, 2015)

Key Words : High Speed Train(고속철도차량), Frequency Weighting Curve(주파수 보정곡선), Root Mean Square Value(실효치), Vibration Dose Value(진동 피폭량), Human Vibration(인체진동), Health caution zone(건강 주의 영역)

ABSTRACT

Vibration exposure of domestic high speed trains(KTX and ITX-saemaulho) to passenger traveling on the Gyung-Bu line was measured to evaluate health effect which is based on ISO 2631-1. The vibration exposure was compared with the frequency weighted root mean square(r.m.s.) and vibration dose value(VDV) of the two trains' vibration. It is concluded that vibration exposure of the two train during round trip of Busan-Seoul in single day is evaluated to be safe for the passenger's health according to the health guidance caution defined on ISO 2631-1. Futhermore KTX's vibration exposure is found to be significantly lower than ITX-saemaulho thanks to lower vibration magnitude as well as shorter trip time.

1. 서 론

철도 교통은 다른 교통수단에 비해 승객과 화물을 많이 수송할 수 있을 뿐만 아니라 안전성 및 정시성(定時性), 환경 친화성 등의 장점을 갖고 있다. 철도 차량을 다른 교통수단과의 경쟁력을 강화시키기 위해서는 열차의 속도 및 여객수송의 품질 향상이 필요하며, 여객수송의 품질을 평가하고 향상시키기 위하여 승차감과 연관되어 인체진동에 대한 연

구가 요구되고 있다⁽¹⁾. 철도 차량의 인체진동 평가는 세계적으로 통용되고 있는 ISO 2631-1, UIC 513R, ISO 10056, CEN ENV12299 등의 국제규격 등의 방법으로 수행되고 있다.

Kim⁽²⁾의 연구는 고속철도차량이 경부선과 호남선의 고속선로와 기존선로를 운행 할 때의 인체진동 특성을 비교 분석하였다. Kim⁽³⁾의 연구는 고속철도 차량의 인체진동 분석 및 평가를 위해 UIC 513R을 적용하여 한국형 고속열차 시제차량이 310 kph 이상의 고속영역에서 승차감 기준을 만족하는 것을 확

† Corresponding Author ; Member, Div. of Mechanical & Electrical Engineering, Uiduk university
E-mail : sjahn@uu.ac.kr
Tel : +82 54 760-1668, Fax : +82 54 760-1669

* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

** Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

인하였다.

Kim⁽⁴⁾의 연구는 KTX 도입 이후 환자들의 의료 이용 변화를 조사하였는데 KTX 도입 전에 비해 서울지역의 의료이용량이 큰 증가세를 보였다고 보고하였다. 국내 고속철도차량을 이용하는 의료 목적의 소비자 욕구를 충족시키기 위해서는 고속철도 차량을 이용하여 이동 중에 노출되는 인체진동의 영향과 특성을 분석하여 탑승자의 건강에 미치는 정도를 파악하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 국내의 대표적인 고속철도차량인 KTX와 ITX 새마을호에 탑승하여 서울과 부산을 하루 만에 왕복하였을 때 승객에게 노출되는 진동량을 측정하고, ISO 2631-1⁽⁵⁾ 규정에 따라 건강 영향도를 평가 및 비교하는 것을 목적으로 두고 있다. 인체진동 영향도를 평가하기 위한 일반적인 방법으로는 노출된 진동의 r.m.s.값과 노출된 시간을 계산하여 사용하지만 충격성 과도신호가 주요한 특성이 되는 진동신호에 대해서는 4승 관계법에 의한 진동누적 값에 해당하는 VDV(vibration dose value)값을 사용하기도 한다^(6,7). 이 연구에서는 앞의 두 가지 값을 모두 구하여 건강 영향도를 평가하고 그 결과에 대한 비교와 분석을 수행하였다.

2. ISO 2631-1에 따른 인체진동 평가 방법

ISO 2631-1에서는 전신 진동에 노출된 인체에 대하여 건강(health), 안락감(comfort), 지각(perception), 그리고 멀미(motion sickness)라는 4가지 관점의 영향도를 평가하기 위한 측정방법과 진동량 평가 방법을 정의하고 있다. 착석한 인체에 진동이 전달되는 경로는 크게 발바닥과 엉덩이 그리고 등받이며, 각각의 위치에서의 좌표계는 Fig. 1과 같다. 고속철도 차량의 시트에 착석한 승객은 앞의 3가지 진동경로에 대하여 진동에 노출되지만, 척추의 손상에 주된 영향을 미치는 엉덩이 위치의 진동이 승객의 건강과 연관된 주된 진동이다. ISO 2631-1에서는 엉덩이 진동값을 건강 영향도 평가에 주된 값으로 반영하고 등받이 진동은 무시하거나 진동량의 0.8의 가중치로 합산하여 반영하도록 하고 있다.

2.1 인체진동 주파수 보정

인체의 전신이 진동에 노출될 경우에 진동체와

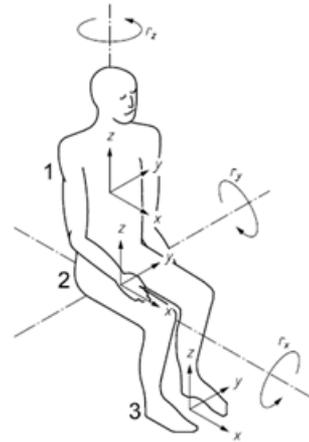


Fig. 1 Measurement points and axis for whole-body vibration of seated human(1: seat-back, 2: seat-surface, 3: feet)

Table 1 Frequency weighting functions and multiplying factors applied for health guidance in accordance with ISO 2631-1

Measurement direction	Frequency weighting function	Multiplying factor
X	W_d	1.4
Y	W_d	1.4
Z	W_k	1

접촉하는 인체 부위의 위치와 방향뿐만 아니라 진동의 주파수에 따라 인체에 미치는 영향도는 다르게 나타난다. ISO 2631-1에서는 진동 노출량에 대한 건강 영향도 평가를 위하여 시트 표면에서 진동의 방향별 주파수 가중함수(frequency weighting function)을 규정하고 각각의 좌표 방향에 따른 가중치(multiplying factor)를 Table 1과 같이 두고 있다. 시트 표면에서의 상하진동(Z-axis)보다는 전후(X-axis)와 좌우(Y-axis)의 진동에 대한 가중값이 1.4배이다. Fig. 2는 ISO 2631-1에서 규정하고 있는 전신진동에 대한 주요 주파수 가중함수인 W_d 와 W_k 를 나타내고 있다.

2.2 인체진동 평가 방법

ISO 2631-1에서 규정하는 기본적인 인체진동 평가방법은 식 (1)과 같이 주파수 가중된 가속도 신호의

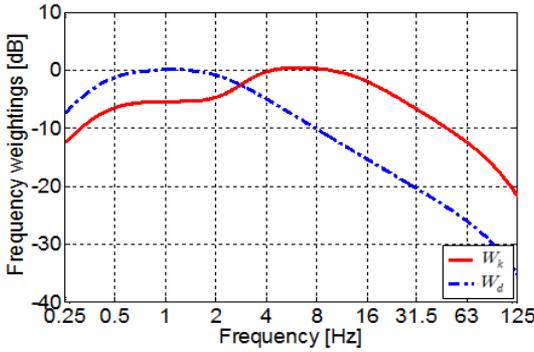


Fig. 2 Frequency weighting curves for vertical and horizontal whole-body vibration in accordance with ISO 2631-1

실효치(r.m.s.)를 이용하여 진동노출량을 계산하는 것이다.

$$\text{Frequency weighted } r.m.s. = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, $a_w(t)$ 는 주파수 가중된 가속도 시간신호이고, T 는 진동에 노출된 시간 또는 측정 시간을 의미한다. 그런데 인체에 노출된 진동신호의 특성이 정상적(stationary)이지 않고 과도적인 신호를 포함하고 있을 경우에는 식 (2)와 같이 crest factor를 계산한다.

$$\text{Crest factor} = \frac{\text{Peak value}}{r.m.s. \text{ value}} \quad (2)$$

ISO 2631-1에서는 Crest factor가 9 이상이 되는 충격성 진동에 대해서는 식 (3)과 같이 가속도 신호의 4승 제곱을 반영하는 VDV값으로 진동노출량을 계산하도록 권고한다. 식 (3)의 VDV값은 지속시간이 짧더라도 인체에 영향을 크게 미치는 충격성 진동을 평가하는 데 있어서 더욱 적절한 방법이다.

$$VDV = \left[\int_0^T a_w(t)^4 dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

여기서, $a_w(t)$ 는 주파수 가중된 가속도 값, T 는 측정 시간을 나타낸다. 시트 표면에서 측정된 3축의 진동량은 식 (4), 식 (5)와 같이 합산할 수 있으며, 어떤 축에서의 진동값에 비해 다른 축의 진동값이 25%보

다 작을 경우에는 계산에서 제외할 수도 있다⁽⁸⁾.

$$r.m.s._{total} = \left(k_x^2 \cdot r.m.s._x^2 + k_y^2 \cdot r.m.s._y^2 + k_z^2 \cdot r.m.s._z^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$VDV_{total} = \left(k_x^4 \cdot VDV_x^4 + k_y^4 \cdot VDV_y^4 + k_z^4 \cdot VDV_z^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

여기서, k_x, k_y, k_z 는 Table 1의 진동 좌표축에 대한 가중값을 나타낸다.

2.3 건강 영향도 평가방법

인체진동이 건강에 미치는 영향은 인체에 노출되는 진동의 크기와 주파수 그리고 진동 방향뿐만 아니라 진동이 지속되는 시간에 의해 평가된다. 인체는 장시간 진동에 노출되면 요추와 신경 시스템에 손상이 발생하며 근육 통증이 증가하게 된다. Fig. 3은 ISO 2631-1에 규정하고 있는 진동에 노출된 시간과 주파수가중된 진동량에 따라 건강(health)에 미치는 영향의 정도를 나타내는 건강 주의구간을 도시한 것이다. 인체에 노출된 진동량이 점선과 실선 각각에 대하여 두 개의 선 사이의 영역에 있을 경우에는 잠재적 건강위험(potential health risk) 상태에 있는 것이고, 구간 아래의 있을 경우는 건강에 미치는 영향도가 거의 없는 정도이며, 구간 위에 있을 경우에는 건강상 위험수준에 있음을 의미한다. Fig. 3에서 점선은 식 (5)의 관계식으로 결정된 건강 주의구간이며, 실선은 식 (6)에 의해 결정된 구간을 표시한 것이다. 즉 crest factor가 9 이상인 진동신호에 대해서는 실선의 구간을 적용한다.

$$a_{\omega 1} T_1^{1/2} = a_{\omega 2} T_2^{1/2} \quad (5)$$

$$a_{\omega 1} T_1^{1/4} = a_{\omega 2} T_2^{1/4} \quad (6)$$

Fig 3에서와 같이 주파수 가중된 가속도의 r.m.s. 값과 지속된 시간으로부터 다음의 식 (7)을 이용하여 VDV값을 계산할 수 있는데, 이것을 예측 VDV(estimated VDV)값이라 한다. 단 이 식은 가속도 신호에 포함된 과도신호가 중요하지 않을 정도일 때 적용할 수 있다.

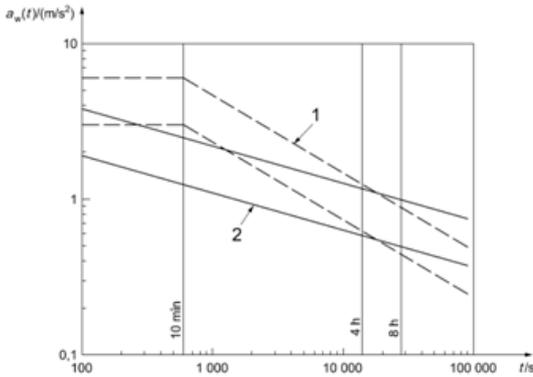


Fig. 3 Health guidance caution zones in ISO 2631-1

$$eVDV = 1.4a_w T^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Fig. 3에서 실선으로 표시된 건강 주의구간의 하한선은 식 (7)에 의해 계산된 eVDV값으로 $8.5 \text{ m/s}^{1.75}$ 이고 상한선은 $17 \text{ m/s}^{1.75}$ 이다. ISO 2631-1에서는 인체진동 건강 영향도를 평가할 때 주파수가중된 r.m.s.와 지속시간을 이용하는 것을 기본으로 하고, 높은 crest factor의 진동에 대해서는 VDV값을 부가적으로 계산하여 비교 평가하는 방법을 권하고 있다.

3. 고속철도 진동량 측정

3.1 시험차량 및 시험선로

이 실험은 KTX와 ITX 새마을호를 대상으로 경부선을 따라 서울과 부산을 왕복하는 동안에 시트에 착석한 승객이 진동에 노출되는 양을 측정하고 평가하기 위하여 실시되었다. 경부선은 고속선로(high speed lane)와 기존선로(conventional lane)가 있으며, KTX는 주로 고속선로를 따라 운행하고 ITX 새마을호는 기존선로를 따라 운행하고 있다. Table 2는 KTX와 ITX 새마을호가 서울과 부산을 운행할 때 걸리는 시간과 거리를 나타내고 있다. 고속선로를 주행하는 KTX와 기존선로를 운행하는 ITX 새마을호의 운행거리의 차이는 불과 18 km 정도 이지 만 운행 시간은 2시간 10분의 차이가 있다. Fig. 4는 이 연구에서 선정한 경부선의 고속선로와 기존선로를 표시하여 나타낸 것이다. 고속선로는 부산-신경

Table 2 Run information of railway vehicles

Vehicles	Operating lane	Distance	Run time
KTX	High speed lane	423.8km	2hr 44min
ITX-Saemaeulho	Conventional lane	441.7km	4hr 55min

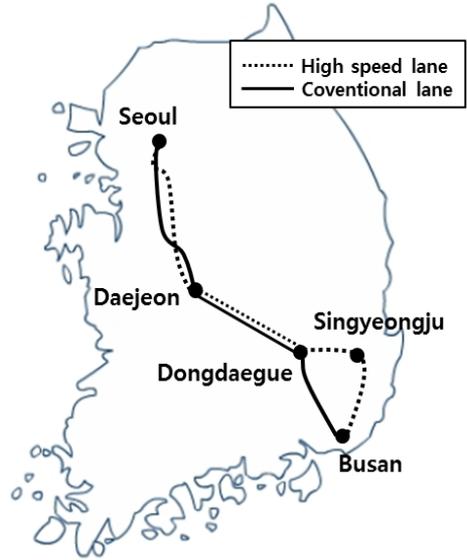


Fig. 4 High speed lane and conventional lane of Kyungbu line

주-동대구-대전-광명-서울을 경유하는 선로이며, 기존 선로는 부산-동대구-대전-수원-서울을 경유하는 선로이다.

3.2 측정방법

국내 철도차량 인체진동을 평가하는 규격인 KS R 9216에서 따라 좌석위치 및 피시험자 조건으로 실험을 수행하였다. KS R 9216에 명시된 피시험자 조건은 여성의 경우 $50.4 \text{ kg} \sim 55.6 \text{ kg}$ 이고 남성의 경우 $64.6 \text{ kg} \sim 71.4 \text{ kg}$ 이다. 이 연구에서 좌석위치는 철도차량의 중앙 위치를 선정하였고, 피시험자의 체중은 70 kg 인 남성으로 선택하였다⁹⁾. 건강영향도 평가의 주된 측정 위치인 엉덩이(seat-surface)에서의 진동을 측정하기 위해 3축 가속도계가 장착된 시트패드(B&K, Type 4322)¹⁰⁾를 Fig. 5와 같이 시트와 엉덩이 사이에 장착하였다. ISO 2631-1에서는 건강과

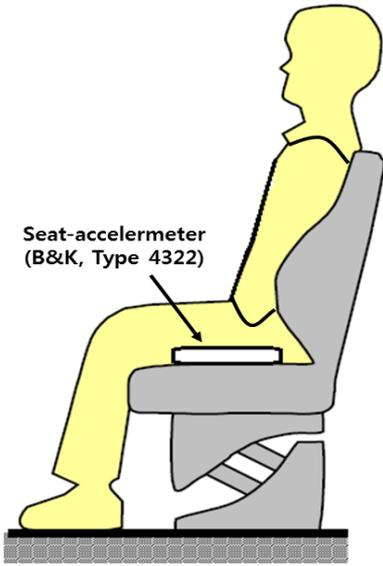


Fig. 5 Seating posture and 3-axis seat pad accelerometer mounted between seat surface and human body

승차감의 평가를 위해 0.5 Hz~80 Hz 주파수 범위의 진동신호를 측정하도록 권고하고 있다. 이 시험에서는 인체진동 주파수범위와 디지털 신호분석에서의 Nyquist 주파수를 고려하여 신호획득 시의 샘플링 주파수를 256 Hz로 설정하였다. 시트 착석자세의 전신진동 신호를 계측하는 동안 피시험자는 Fig. 5와 같이 정면을 응시하고 요부는 등판에 기대어 편안한 상태로 유지하도록 하였다.

3.3 신호처리 방법

측정하여 얻은 가속도 시간신호로부터 인체반응 특성의 주파수가중함수를 적용한 주파수 가중된 가속도(frequency weighted acceleration)를 얻기 위한 방법은 두 가지가 있다. 첫째는 주파수가중함수에 따라 설계된 디지털필터를 시간신호에 직접 적용하는 방법이고, 두 번째는 Fig. 6과 가속도신호를 주파수영역으로 변환하여 주파수가중함수를 곱하고, 다시 시간영역으로 되돌리는 방법이 있다⁽¹¹⁾. 이 연구에서는 주파수가중함수를 직관적으로 적용하는 두 번째 방법을 채택하여 신호처리를 실시하였다.

Fig. 7은 KTX와 ITX 새마을호가 부산에서 서울까지 운행하는 동안에 측정한 Seat surface의 z방향 진동을 신호처리하여 구한 각각의 주파수 가중된 가

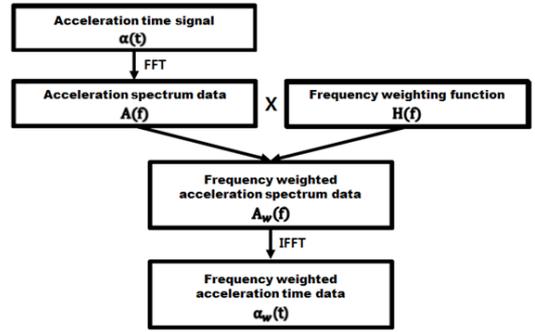
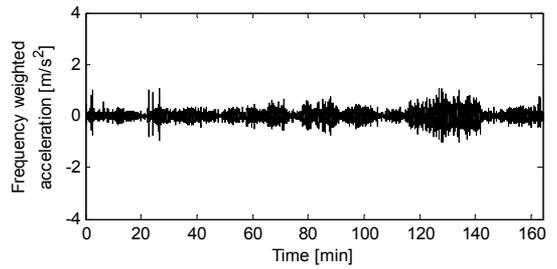
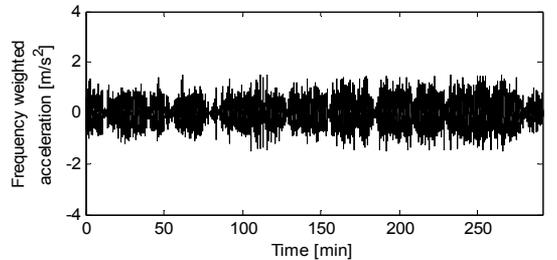


Fig. 6 Signal processing scheme for applying frequency weighting function to acceleration signal



(a) KTX



(b) ITX-saemaaulho

Fig. 7 Frequency weighted acceleration of KTX and ITX-saemaaulho operated from Busan to Seoul

속도 시간영역 신호를 예시하여 나타내었다.

4. 건강 영향도 평가 결과

국내 고속철도차량이 서울과 부산을 운행하는 동안 seat surface에서 발생한 진동이 승객의 건강에 미치는 영향도를 계산하기 위하여 먼저 각각의 고속철도차량에 대한 crest factor를 계산하여 Table 3에

Table 3 Crest factor calculation of seat surface vibration during operating between Busan and Seoul

		KTX		ITX-saemaulho	
Frequency weighted values	Axis	North-bound lane	South-bound lane	North-bound lane	South-bound lane
R.m.s. (m/s^2)	x	0.029	0.024	0.048	0.046
	y	0.046	0.06	0.078	0.084
	z	0.091	0.105	0.172	0.164
Peak (m/s^2)	x	0.243	0.275	0.397	0.392
	y	0.722	0.747	0.939	0.978
	z	1.057	1.099	1.466	1.424
Crest factor	x	8.379	11.458	8.271	8.522
	y	15.696	12.45	12.038	11.643
	z	11.615	10.467	8.523	8.683

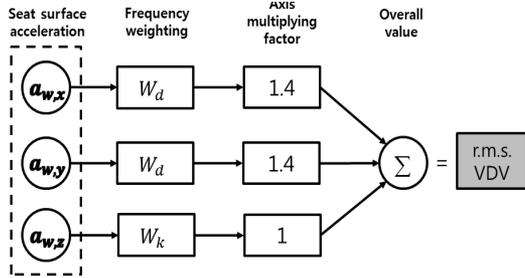
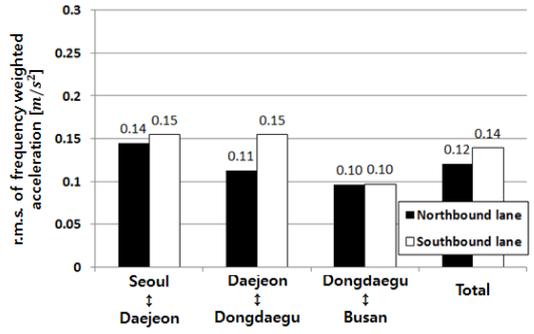
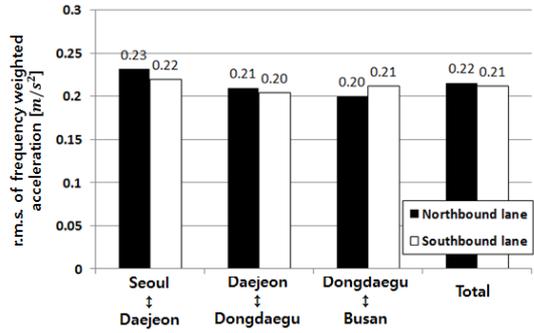


Fig. 8 Flow diagram of calculating the total r.m.s. and VDV value from frequency weighted acceleration signal

나타내었다. ITX 새마을호의 peak값이 KTX에 비해 높게 나오지만 r.m.s.값으로 나눈 crest factor값은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 두 가지 차량 모두 crest factor가 9 이상이 됨으로써 VDV에 의한 평가도 필요하다. 그러므로 이 연구에서는 ISO 2631-1에서 권고하는 기본적인 방법으로 주파수 가중된 r.m.s.를 이용하여 건강 영향도를 평가와 함께 VDV법에 의한 평가를 실시하여 두 가지 방법에 의한 결과를 비교하기로 하였다. Fig. 8은 측정된 가속도 신호에 대하여 인체의 특성을 반영하는 주파수 가중함수를 이용하여 보정한 후, 진동 축에 따른 가중치를 적용하여 식 (1)과 식 (3) 그리고 식 (4)와 식 (5)에 의해 전체 r.m.s.와 VDV를 계산하는 과정을 도식적으로 나타내었다.



(a) KTX



(b) ITX-saemaulho

Fig. 9 R.m.s. values of frequency weighted acceleration calculated on major travel section and in total

4.1 R.M.S.를 이용한 건강 영향도 평가

Fig. 9는 경부선 상의 주요 도시를 잇는 구간별 상행과 하행 방향에 대한 진동 노출량을 주파수 가중된 r.m.s.값으로 비교하여 나타낸 것이다. KTX 차량은 상행 및 하행 방향에 따른 진동량에 다소의 차이를 보이며, 대전과 동대구 사이 구간에서 상하행선의 차이가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. ITX 새마을호의 경우는 전체 구간에서 상행과 하행에 따른 진동량의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 전체 구간에 대한 상하행의 주파수 가중된 r.m.s.값은 ITX 새마을호는 0.22 m/s^2 으로 측정되어 KTX의 0.13 m/s^2 에 비해 약 1.7배 정도 높았다.

Table 2를 참고하면 하루 동안에 서울과 부산을 왕복 여행하는 시간은 KTX는 5시간 28분이고 ITX 새마을호는 9시간 50분이다. Fig. 3의 ISO 2631-1 건강가이드 그래프를 이용하여 각각의 여행시간에 대한 건강 위험구간의 하한선의 값은 5시간 28분에 대하여 0.6 m/s^2 이고, 9시간 50분에 대하여 0.4 m/s^2

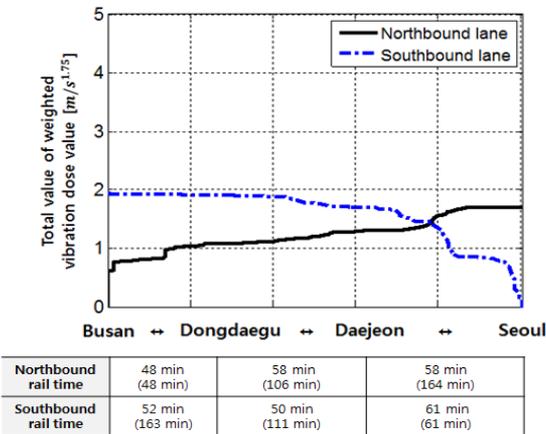
임을 감안하면 두 가지 고속차량 모두가 진동 노출 량에 의한 건강 영향도는 위험 수준이 아님을 알 수 있다. 하지만 ITX 새마을호는 KTX에 비하여 진동의 크기가 클 뿐만 아니라 진동 노출시간이 많음으로 인해 건강 영향도의 위험수준에 훨씬 근접함을 알 수 있다.

4.2 VDV를 이용한 건강 영향도 평가

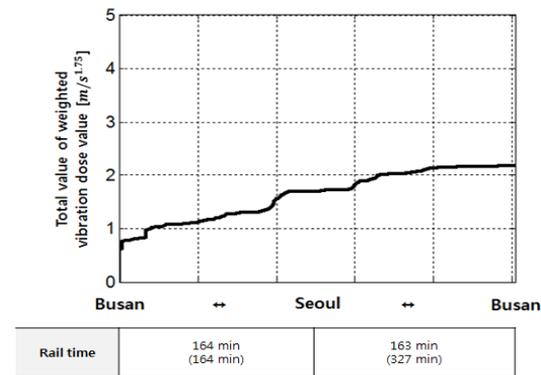
ISO 2631-1에서는 crest factor가 9 이상이 되는 진동신호에 대해서는 r.m.s에 의한 기본 평가와 더불어 가속도 4제곱의 시간 누적합 계산식인 VDV값을 계산하여 비교평가하는 것을 권고하고 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 KTX와 ITX 새마을호가 서울과 부산을 운행하는 동안에 발생하는 진동노출량에 대한 VDV값의 변화를 나타낸 것이다. 각각의 그림에서

(a)는 상행과 하행에 대한 VDV값을 나타낸 것이고, (b)는 상행과 하행으로 왕복하였을 때 VDV값의 총합을 나타낸 것이다. Fig. 10의 KTX의 경우는 VDV값이 급하게 상승하는 특정한 구간이 관찰되는 반면에 Fig. 11의 ITX새마을호의 경우는 운행시간이 증가함에 따라 VDV값이 점진적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 3에서 두 실선으로 표시된 구간의 하한선 (action limit)의 VDV값은 $8.5 \text{ m/s}^{1.75}$ 이고 상한선 (exposure limit)은 $17 \text{ m/s}^{1.75}$ 으로 진동노출에 의한 건강 영향도의 위험구간을 표시하고 있다. 이 연구에서 서울과 부산을 왕복하면서 측정된 KTX의 누적 VDV값은 $2.2 \text{ m/s}^{1.75}$ 이고 ITX 새마을호는 $3.9 \text{ m/s}^{1.75}$ 이다. 두 가지 차량 모두가 건강 위험구간보다는 낮은 진동노출량이 측정되었지만, KTX는 ITX 새마을호에 비해 약 56% 정도임을 알 수 있다.

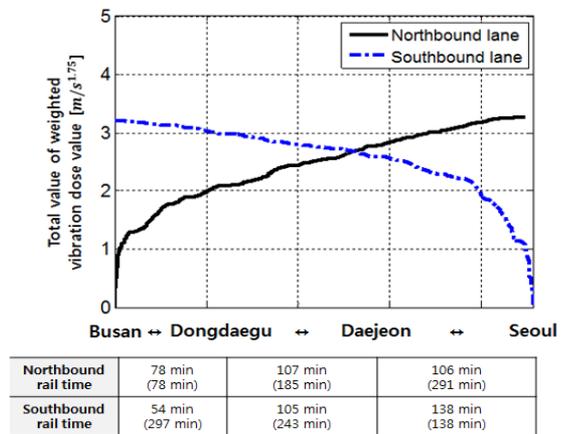


(a) One way

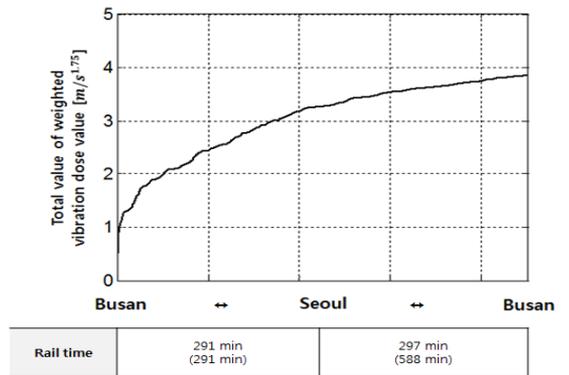


(b) Round trip

Fig. 10 Cumulated VDV of KTX operating between Busan and Seoul



(a) One way



(b) Round trip

Fig. 11 Cumulated VDV of ITX-saemaulho operating between Busan and Seoul

5. 결 론

이 연구는 국내의 대표적인 철도차량인 KTX와 ITX새마을을 이용하는 승객에게 노출되는 진동량을 ISO 2631-1의 절차에 따라 측정하고, 측정된 결과를 이용하여 각각의 철도차량에 대한 건강 영향도를 평가하였다. 각각의 철도차량에 대하여 하루 동안에 서울과 부산을 왕복한 경우에 승객에게 노출된 진동량은 ISO 2631-1 기준으로 평가하였을 때 건강상 위험한 수준에까지 이르지 않음을 확인하였다. 그리고 KTX는 ITX 새마을호에 비해 운행 중 진동의 크기가 작을 뿐만 아니라 고속운행에 따른 진동노출 시간이 짧음으로 인해 서울-부산을 여행하는 승객에게 미치는 진동에 의한 건강 영향도는 상대적으로 유리한 수준에 있음을 정량적 값으로 확인하였다.

인체진동의 노출량 측정은 철도차량의 객실과 좌석의 위치에 따라 차이가 있을 뿐만 아니라 피시험자의 인체특성에 따라 편차가 발생할 수 있기 때문에 더욱 보편적이고 객관적인 평가결과를 얻기 위해서는 더 많은 시험을 통한 통계적인 분석이 뒤 따라야 할 것이다.

References

(1) Park, K. B., 2013, The Study for an Effect on the Human Body due to the Natural Frequency of Carbody of Rolling Stock, The Korean Society for Railway, Proceeding of the KSR Annual Autumn Conference, pp. 177~184.

(2) Kim, Y. G., Kim, S. W., Park, C. K., Kim, K. H. and Park, T. W., 2004, Analysis on the Characteristics of the Ride Comfort for High Speed Trains on the High Speed Line/conventional Line, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 999~1006.

(3) Kim, Y. G., Kim, S. W., Mok, J. Y., Kim, K. H. and Park, T. W., 2004, Analysis and Evaluation of Ride Comfort for High Speed Train using Statistical Method According to UIC 513R, Transaction of the Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 4, pp. 332~338.

(4) Kim, J. H., Lee, J. H. and Lee, J. H., 2010, Changes in Healthcare Utilizations of Cancer Patients

Since the Launch of KTX, Transaction of the Korean Society for Railway, Vol. 13, No. 2, pp. 236~243.

(5) ISO 2631-1, 1997, Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration – Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva.

(6) Boileau, P.-E., Turcot, D. and Scory, H., 1989, Evaluation of Whole-body Vibration Exposure Using a Fourth Power Method and Comparison with ISO 2631, Journal of Sound and Vibration, Vol. 129, No. 1, pp. 143~154.

(7) Thamsuwan, O., Blood, R. P., Ching, R. P., Boyle, L. and Johnson, P. W. 2013, Whole Body Vibration Exposures in Bus Drivers: A Comparison between a High-floor Coach and a Low-floor City Bus, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 43, No. 1, pp. 9~17.

(8) Dong, R. G., Welcome, D. E. and McDowell, T. W., 2012, Some Important Oversights in the Assessment of Whole-body Vibration Exposure based on ISO-2631-1, Applied Ergonomics, Vol. 43, No. 1, pp. 268~269.

(9) KS R 9216, 2010, Railway Rolling Stock – Test and Evaluation Method for Passenger Comfort, Korean Industrial Standards, Korea.

(10) ISO 10326-1, 1992, Mechanical Vibration – Laboratory Method for Evaluating Vehicle Seat Vibration – Part 1: Basic Requirements, International Organization for Standardization, Geneva.

(11) Son, I. S., Kim, J. H. and Kang, Y. J., 2009, Comparison and Analysis for Evaluation of Ride and SEAT Index through Theoretical Seat-human Body Model and Vehicle Test, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 1~9.



Jiman Kim is received B.S. degrees from Changwon National University in 2013 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in Ride Comfort.



Jinhan Park is received B.S. degrees from Pusan National University in 2015 and he is currently majoring noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in Ride Comfort and

Human vibration.



SeJin Ahn is received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Pusan National University in 1994, 1996, and 2003, respectively. Dr. Ahn is currently a professor at the department of energy & electricity in Uiduk University. His

research interest is in human vibration.



Weuibong Jeong received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong

is currently a professor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element analysis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.