

인체 진동을 고려한 국내의 철도 차량의 진동 환경 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Vibration's Environment in a Korean Rail Vehicles based on the Human Vibration

°김진기* · 정완섭* · 홍동표**

Jin-Ki Kim, Wan-Sup Cheung and Dong-Pyo Hong

Key Words : Human Vibration(인체 진동), Ride Comfort(또는 Ride Quality, 승차감), Vibration exposure(진동 피폭), Vibration evaluation(진동 평가)

ABSTRACT

This paper introduces experimental results related to the vibration ride conditions that a korean male subject experienced in the railway trains and the express bus. Two types of railway train's, Samaulho and Mugunghwaho, and the express bus were chosen to measure how much the whole-body vibrations of the back, hip and feet are exposes to the subject. Measured vibration signals were analysed to assess the ride conditions quantitatively and qualitatively. Analysed results are illustrated to see how much typical public transportation systems in korea expose vibration to passengers.

1. 서론

인체에 전달되는 진동은 승차감, 작업 효율, 그리고 보건 및 안전에 영향을 미친다. 사람들은 운송 수단(자동차, 기차, 배, 비행기 등)과 산업 현장에서 사용하는 여러 장비들과 기계들로부터 진동을 경험하게 된다⁽¹⁾.

사람이 받는 진동은 전신 진동(whole-body vibration), 멀미(motion sickness) 그리고 손에 전달된 진동(hand transmitted vibration)으로 구분할 수 있으며 그 중 전신 진동은 사람이 진동하는 표면에 접촉하고 있을 때 발생한다. 여기에는 진동하는 표면에 사람이 앉아 있을 경우, 서 있을 경우 그리고 누워 있을 경우 모두 포함된다.

사람들이 운송 수단을 이용하는 경우 진동은 시트를 통해 앉아 있는 사람에게 전달되어 지고 그 사람은 전신 진동에 노출되어지게 된다. 이러한 전신 진동은 사람의 안락함(comfort), 활동성(performance of activities), 건강(performance of health)에 영향을 미친다. 구체적으로는 불쾌한 승차감과 피로감을 유발하거나 경우에 따라서는 기본 활동성(activities, 독서, 필기, 음식물 섭취 등)을 제한하고 작업 효율을 저해하기도 하며^{(2),(3)} 척추에 스트레스를 주어 건강 손상을 유발하기도 한다⁽⁴⁾. 현대인들은 이러한 진동에 여러 가지 형태로 항상 노출되어있다.

ISO2631-1(1997)에서는 상기의 전신 진동의 영향을 평가할 수 있는 방법을 제공하고 있는데 인체의 진동축, 진동 측정 및 평가 방법 그리고 가중함수들을 소개하고 있다.

본 연구에서는 ISO2631-1⁽⁵⁾에 근거하여 현대인

* 정회원, 한국표준과학연구원, 음향진동그룹

** 정회원, 전북대학교, 정밀기계공학과

들이 진동에 얼마만큼 노출되어 있는지 측정하고 자 한국인 남성 1명을 선정, 주행 중인 철도 차량의 객차에 탑승하여 인체에 피폭되는 진동량과 고속버스에서의 진동량을 각각 측정하였다.

2. 실험 방법

기차와 버스에 앉아 있는 사람의 전신 진동 피폭량을 측정하기 위해 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 피시험자는 키 173cm, 몸무게 79kg, 20대 후반의 건강한 한국인 남성이다.

2.1 인체의 전신 진동

앉아 있는 사람의 인체 피폭 진동축은 Fig. 1에서 나타낸 것처럼 12축이 있는데, 발에서 3축(x 축-전후, y 축-좌우, z 축-상하), 엉덩이에서 6축(x 축-전후, y 축-좌우, z 축-상하, R_x 축- x 축에 대한 회전축, R_y 축- y 축에 대한 회전축, R_z 축- z 축에 대한 회전축) 그리고 등에서 3축(x 축-전후, y 축-좌우, z 축-상하)으로 구성되어져 있다.

각 축에서 측정된 가속도는 주파수와 진동의 방향, 그리고 인체의 위치에 따라 다르게 감응하는 인체의 응답 특성에 맞게 변환되어진다. 이것은 인체의 감응 특성을 등가화한 '주파수 가중 함수'를 사용하게 되며 이렇게 변환된 가속도를 '가중화 가속도(a_w)'라 한다. Fig. 1에서는 각 축에 해당되는 주파수 가중 함수와 진동의 방향(진동축)에 따른 영향의 정도를 보정해 주는 곱셈인자(multiplying factor)를 함께 보여주고 있다. Fig. 2에서는 주파수 가중함수 곡선을 나타내 보여 주고 있다.

2.2 실험 장치

발과 등에서 진동 측정은 3축용 시트 가속도계를 사용하였고 엉덩이에서의 진동 측정은 병진 3축 가속도계(ANALOG DEVICES)와 회전 3축 각속도계(ATA, DYNACUBE)를 장착한 시트 가속도계를 사용하였다. 발의 시트 가속도계는 사람이 앉으면서 발을 올려놓게 되고 엉덩이의 시트 가속도계는 엉덩이 뼈 부분에 놓고 깔고 앉게 된다. 그리고 등의 시트 가속도계는 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 벨트를 이용해 시트의 등받이에 묶게 되고 사람이 앉으면서 등으로 누르게 된다.

상기의 각각의 가속도계는 앰프에 연결되어 있으며 데이터는 디지털 테이프 레코더(digital tape

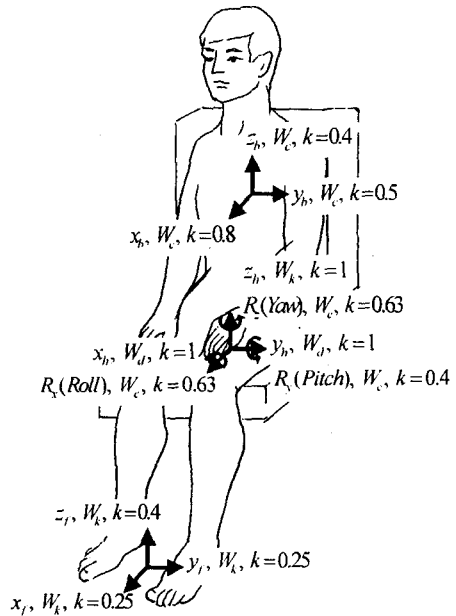


Fig. 1 A 12-axis basicentric co-ordinate system of human body(The first terms are axes, the second terms are weighting functions and the third terms are multiplying factors).

recorder, SONY-PC216A model)에 저장된다.

2.3 실험 조건

철도 차량은 새마을호와 무궁화호, 버스는 우등 고속버스를 선정하였다. 기차에서의 측정은 기차가 대전과 광주 사이의 전라선 구간, 경부선의 서울과 대전 구간 그리고 대전과 대구 구간에서 주행할 때 하였으며 버스는 중부고속도로의 대전과 서울 구간에서 측정하였다.

데이터의 측정 시간은 1시간이며 기차나 버스가

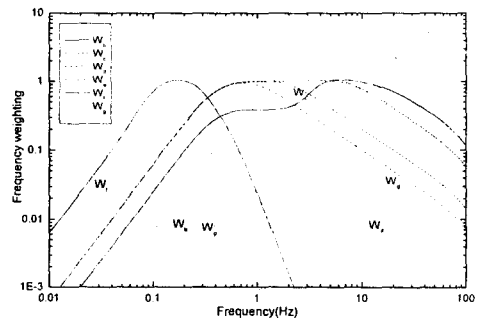


Fig. 2 Weighting functions for each axis

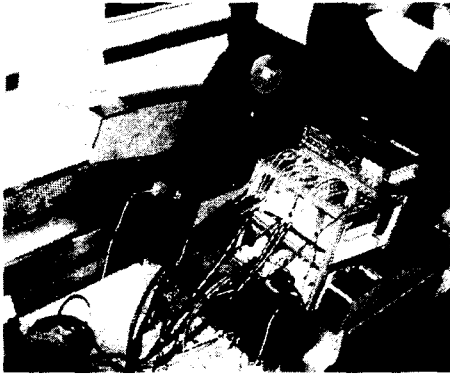


Fig. 3 Experimental set-up for measurement of whole-body vibration

멈추는 동안에는 측정하지 않았으며, 기차의 경우에는 진행 방향으로 사람이 의자에 앉아 측정을 하였다.

측정하는 동안 사람은 허리와 어깨를 편 상태로 편안하게 등받이(back rest)에 기댄 자세를 하고 있다. 머리는 머리 받침대(head rest)에 편안하게 기대낸다. 그리고 시트의 등받이는 가능한 한도 내에서 수직으로 세워서 실험을 수행하였다.

2. 4 신호 처리

측정된 데이터는 PCscan(SONY) 프로그램과 디지털 인터페이스 어댑터(SONY, PCIF260 model)를 이용하여 디지털 테이프 레코더로부터 PC에 저장하게 된다. 저장된 데이터는 MATLAB으로 작성된 프로그램에 의해 처리되어진다.

먼저 전신 진동의 관심 주파수 범위는 0.4~100Hz이므로 그 대역에 해당되는 대역통과(band-pass) 필터를 사용하여 데이터를 필터링하고 그 후에 각 축에 해당되는 주파수 가중 함수를 필터 형태로 만들어 데이터를 필터링하면 가중화된 가속도를 얻을 수 있게 된다. 이 과정에서 엉덩이의 회전 3축은 각속도에서 가속도로 변환된다. 그리고 각 축의 곱셈인자를 곱하게 되면 최종 가중화 가속도($a_w(t)$)를 구할 수 있게 된다.

파고율(crest factor)이 9보다 작을 때 진동 환경에 대한 기본적인 평가 방법은 수식 (1)과 같은 가중화된 가속도의 실효치(r.m.s., root-mean-square)를 사용한다. 이것은 각 축에 대한 평가 방법이고 전체 진동 값($a_{overall}$)은 각 축의 진동값의 제곱합의 평방근으로 수식 (2)와 같다.

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$a_{overall} = \left[\sum_i a_{wi}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 T 는 측정 시간으로 단위는 초(second)이다. i 는 12 종류의 진동 측정축을 의미한다.

만약 파고율이 9보다 클 경우에는 실효치를 사용하지 못하고 다른 방법을 사용해야 하는데 본 연구에서는 4제곱 진동 피폭값(fourth power vibration dose value)를 사용하였으며 약칭 진동 피폭값 또는 VDV(vibration dose value)라고 한다. VDV는 가속도의 제곱의 시간 평균을 사용하는 대신에 4제곱 가속도 시간 평균을 사용하고 실효치보다 최대값에 매우 민감하다. 4제곱 진동 피폭값의 단위는 $m/s^{1.75}$ 이다. 식 (3)과 (4)에 각 축에 대한 VDV를 계산하는 식과 전체 VDV(overall VDV)를 계산하는 식을 나타내었다.

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

$$VDV_{overall} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

여기서 $a_w(t)$ 는 주파수 가중화가 적용된 가속도이고 T 는 측정 시간이다. i 는 12 종류의 진동 측정축을 의미한다.

본 연구에서 측정된 데이터의 파고율(crest factor)이 대개의 경우 4~6이기 때문에 실효치를 사용하였고 경우에 따라서 파고율이 9가 넘는 경우가 있어 VDV도 함께 구하였다.

ISO2631-1에서는 운송 차량의 가중화 가속도의

Table 1 Scale of vibration discomfort

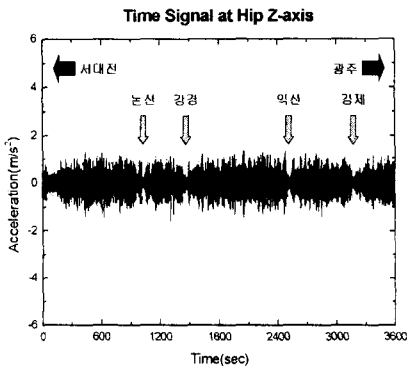
| RMS weighted acceleration(m/s^2) | vibration discomfort |
|--------------------------------------|-------------------------|
| less than 0.315 m/s^2 | not uncomfortable |
| 0.315 to 0.63 m/s^2 | a little uncomfortable |
| 0.5 to 1 m/s^2 | fairly uncomfortable |
| 0.8 to 1.6 m/s^2 | uncomfortable |
| 1.25 to 2.5 m/s^2 | very uncomfortable |
| greater than 2 m/s^2 | extremely uncomfortable |

전체 진동값(실효치)에 따라 승차감(ride quality 또는 ride comfort)의 정도를 정의하고 있다. 물론 사람과 환경에 따라 차이가 있기는 하지만 일반적인 인체 반응에 따라 Table 1과 같이 등급을 나누었다.

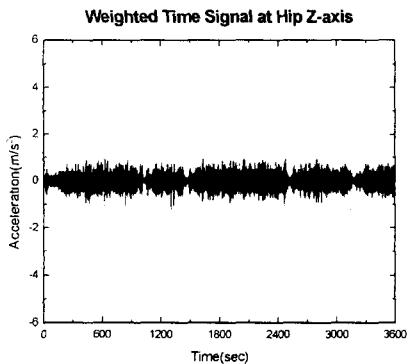
3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4~Fig. 6까지의 그림들은 무궁화호 기차가 전라선(대전⇒광주)을 주행하는 중 데이터를 분석한 결과를 나열한 것이다.

Fig. 4는 1시간 동안의 데이터를 엉덩이의 z-축(수직축)에서 취득하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 데이터에 가중함수를 사용하기 전인 엉덩이에서의 가속도이다. Fig. 4(b)는 데이터를 가중함수를 통과하고 곱셈 인자(multiplying factor)를 곱하여 얻은



(a) Acceleration time histories



(b) Weighted acceleration time histories

Fig. 4 Measured and weighted acceleration time histories at the z-axis of hip in a passenger railway(Mugunghwaho, Jeonra-line)

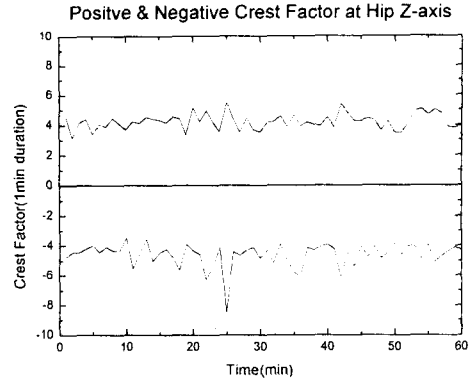


Fig. 5 Trend of the crest factor(time interval : 1 minute) of vertical(z-axis) seat vibration

신호이다. Fig. 4로부터 각 기차역에 도달하거나 출발할 때는 가속도 크기가 확실히 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 진동 환경 특성을 나타내는 파고율의 시간 변화를 보이고 있다. 양의 값은 'positive crest factor'이고 음의 값은 'negative crest factor'이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 대개의 경우는 4~6 범위 안에 있게 된다. 물론 경우에 따라서는 충격이 발생하는 경우가 있어 파고율(crest factor)이 커지는 일이 발생한다. 이런 일은 Fig. 5에는 도시되지는 않았지만, 한 시간 동안 평균 2~3번 정도 발생하였다. 그러므로 파고율이 9보다 작기 때문에 실효값(r.m.s.)으로 승차감을 평가해도 무방하다.

Fig. 6는 인체의 12 진동축 별로 rms 값을 도시

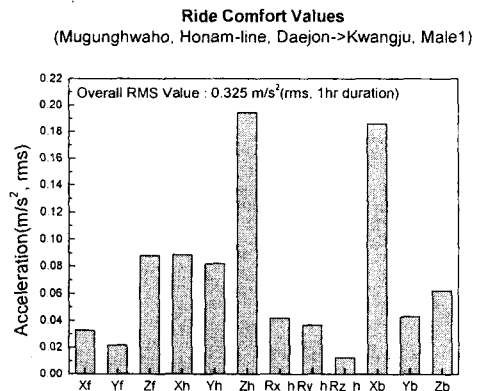


Fig. 6 Comparison of component ride values for 12 axes of vibration for the subject of a passenger railway

4. 결 론

한 것으로 기존의 연구 결과에서와 마찬가지로 영덩이의 수직축(z-축) 성분이 가장 크며, 그 다음으로는 등의 x-축(전후방향) 성분이 큰 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 영덩이의 x-축과 y-축도 비교적 큰 값을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 전체 실효값은 0.325 m/s^2 로 Table 1에서 'a little uncomfortable'임을 알 수 있다.

Fig. 7은 실험 조건(기차, 버스)과 구간 별로 rms 값과 VDV를 나타낸 것이다. 새마을호, 경부선의 서울과 대전 구간에서는 rms값이 0.325 m/s^2 으로 'a little uncomfortable'이다. 새마을호, 전라선의 서대전과 광주 구간에서는 0.263 m/s^2 으로 'not uncomfortable'으로 아주 양호함을 확인할 수 있다. 동일 구간에서 무궁화호는 0.325 m/s^2 으로 'a little uncomfortable'이다. 그리고 새마을호, 경부선의 대전과 대구 구간에서는 0.303 m/s^2 으로 'not uncomfortable'이다. 마지막으로 우등고속버스로 중부고속도로, 서울과 대전 구간을 달릴 때는 rms 값이 0.463 m/s^2 이다. 등급은 'a little uncomfortable'로 나왔다.

상기와 같이 국내의 육상 교통망 중 대표적인 곳을 실험한 결과, 교통 수단을 이용하는 국민의 건강에는 크게 손상을 미치지 않는 정도인 'not uncomfortable'과 'a little uncomfortable'의 승차감 등급이 나왔다.

본 연구에서는 일련의 실험을 통하여 국내의 육상 주요 교통망 중 일부분을 선택하여 대중 교통을 이용하는 사람들에게 진동이 실생활 중에 얼마만큼 피폭되는지와 각 차량의 승차감의 정도를 살펴보았다.

실험 방법과 데이터 처리 및 평가 방법은 ISO2631-1에서 제안하고 있는 방안을 따라 수행하였다. 경부선 구간은 똑같은 차량과 똑같은 피시험자로 실험을 수행한 결과 rms 값에서 많은 차이를 보이고 있는데 서울쪽으로 갈수록 진동 피폭량이 증가함을 확인할 수가 있다. 그리고 새마을호와 무궁화호를 비교한 결과, 새마을호가 승차감에서 더 좋음을 확인할 수 있었다. 또 기차와 버스의 승차감을 비교해 보면, 예상할 수 있는 것과 같이 버스가 훨씬 승차감이 좋지 못함을 확인할 수가 있었다.

전반적으로 대중 교통을 이용하는 사람에게 피폭되는 진동량은 $0.263 \sim 0.463 \text{ m/s}^2$ 으로 모두 'not uncomfortable'과 'a little uncomfortable'에 포함된다. 이것은 국내 기차와 고속버스의 진동 환경이 비교적 우수하다고 말할 수 있다.

참고문헌

- (1) F. J. Fahv and J. G. Walker, 1998, Fundamentals of Noise and Vibration, E&PN SPON, pp. 179~224.
- (2) Griffin, M. J, 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press, London, U.K.
- (3) 정완섭, 우춘규, 박세진, 김수현, 1997, "동시 3축 가진에 의한 자동차 의자류의 승차감 평가", 한국소음진동공학회지, Vol. 7, No. 1, pp. 143~152.
- (4) International Organization for Standardization, 2001, Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration Part I: General Requirements; Amendment 1, ISO 2631-1.
- (5) International Organization for Standardization, 1997, Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration Part I : General Requirements, ISO 2631-1.

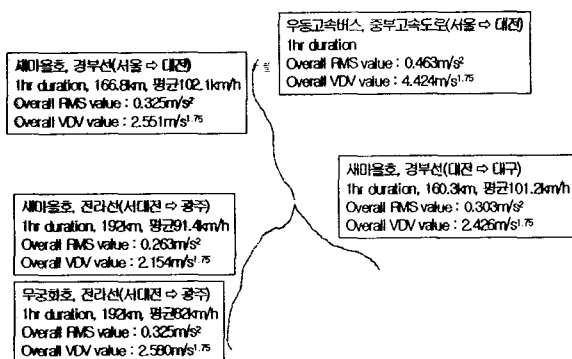


Fig. 7 Overall ride comfort value on the seat of passenger trains and a bus