

<논 문>

인체 진동을 고려한 국내의 대중 교통 수단의 진동 환경 평가에 관한 연구 A Study on the Evaluation of Vibration's Environment in the Korean Public Transportations Based on the Human Vibration

김진기* · 홍동표** · 최병재* · 정완섭*

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

(2001년 6월 23일 접수 : 2001년 8월 30일 심사완료)

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 nationwide railway trains and the express bus. Two types of railway train's, Saemaulho and Mugunghwaho, and the express bus were chosen to measure how much the whole-body vibrations on the contact area of the back, hip and feet are exposed to the subject. Measured vibration signals were analysed to assess the ride conditions quantitatively and qualitatively. Analysed results are illustrated to unveil how much typical public transportation systems in Korea expose whole-body vibration to passengers. Futhermore, the performance evaluation of their seats were carried out to examine their effectiveness in reducing vibration exposure 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 전달되고 그 사람은 전신 진동에 노출된다. 이러한 전신 진동은 사람의 안락함(comfort), 활동성(performance of activities), 건강(performance of health)에 영향을 미치게 되는데 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 노출되어있다.

ISO2631-1(1997)⁽⁵⁾에서는 상기의 전신 진동의 영향을 평가할 수 있는 방법을 제공하고 있는데 인체의 진동축, 진동 측정 및 평가 방법 그리고 가중 함수, 진동 노출 한계들을 규정하고 있다.

* 정희원, 한국표준과학연구원, 음향진동그룹

E-mail : wansup@kriss.re.kr

Tel : (042) 868-5302, Fax : (042) 868-5028

** 정희원, 전북대학교, 정밀기계공학과
(자동차신기술연구소)

본 연구에서는 ISO2631-1에 근거하여 현대인들이 진동에 얼마만큼 노출되어 있는지 추정하고자 한국인 남성 1명을 선정, 주행 중인 철도 차량의 객차와 우등 고속버스에 탑승하여 인체에 피폭되는 진동량을 각각 측정하였고 각각의 의자(seat)의 성능을 비교·분석하였다.

2. 실험 방법

기차와 버스에 앉아 있는 사람의 전신 진동 피폭량을 측정하기 위해 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 피시험자는 키 173 cm, 몸무게 79 kg, 27세의 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 회전, R_y 축- y 축에 대한 회전, R_z - z 축에 대한 회전) 그리고 등에서의 3축(x 축-전후, y 축-좌우, z 축-상하)으로 구성된다.

인체는 진동의 주파수와 진동이 피폭되어지는 위치와 방향에 따라 다르게 느낀다. 주파수에 따라 느

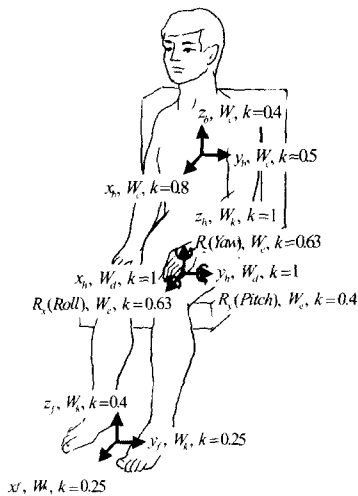


Fig. 1 A 12-axis basicentric co-ordinate system of human body(The first terms are axes, the second terms are weighting functions and the third terms are multiplying factors).⁽⁵⁾

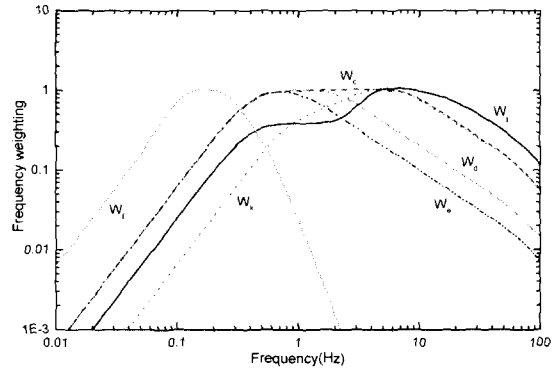


Fig. 2 Weighting functions for each axis⁽⁵⁾

끼는 정도를 보정해 주는 것이 '주파수 가중함수 (frequency weighting functions)'이고 위치와 방향에 따라 다르게 느끼는 것을 보정해 주는 것이 '곱셈인자(multiplying factor)'이다.

각 축에서 측정된 가속도를 주파수와 진동의 방향, 그리고 인체의 위치에 따라 다르게 감응하는 인체의 응답 특성에 맞게 변환하기 위해 '주파수 가중 함수'를 필터로 만들어 필터링을 하였고 거기에 '곱셈인자'를 곱하여 가속도를 '가중화 가속도(a_w)'로 변환한다. Fig. 1에서는 각 축에 해당되는 주파수 가중 함수와 곱셈인자(multiplying factor)를 함께 보여주고 있다. 첫 번째 항은 인체의 진동축을 나타내며 두 번째 항은 주파수 가중함수를 그리고 마지막으로 곱셈인자 순으로 나타내었다. Fig. 2에서는 주파수 가중함수 곡선을 보여 주고 있다.

2.2 실험 장치

발과 등에서의 진동 측정은 3축용 시트 가속도계 (Analog Devices)를 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 recorder, SONY-PC216A model)에 저장된다.

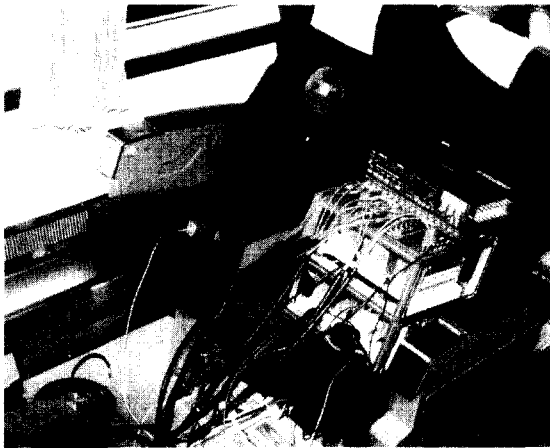


Fig. 3 Experimental set-up for measurement of whole-body vibration

2.3 실험 조건

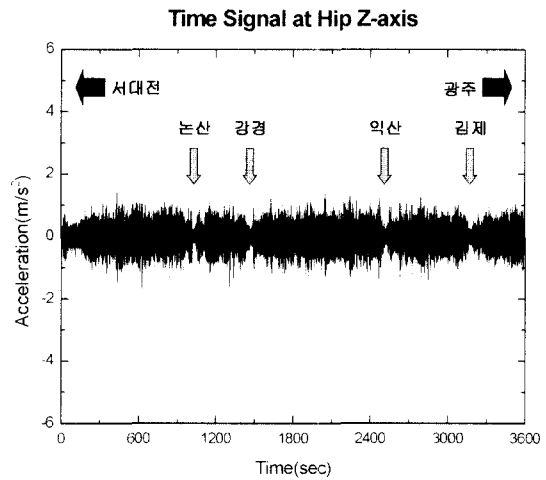
철도 차량은 새마을호와 무궁화호, 버스는 우등 고속버스를 선정하였다. 기차에서의 측정은 기차가 대전과 광주 사이의 호남선 구간, 경부선의 서울과 대전 구간 그리고 대전과 대구 구간에서 주행할 때 하였으며 버스는 중부고속도로의 대전과 서울 구간에서 측정하였다.

데이터의 측정 시간은 1시간이며 기차나 버스가 멈추는 동안에는 측정하지 않았으며, 기차의 경우에는 진행 방향으로 사람이 의자에 앉아 측정을 하였다. 측정하는 동안, 사람은 허리와 어깨를 편 상태로 편하게 등받이(back rest)에 기댄 자세를 하고 있다. 머리는 머리 받침대(head rest)에 편안하게 기댄다. 그리고 시트의 등받이는 가능한 한도 내에서 수직으로 세워서 실험을 수행하였다.

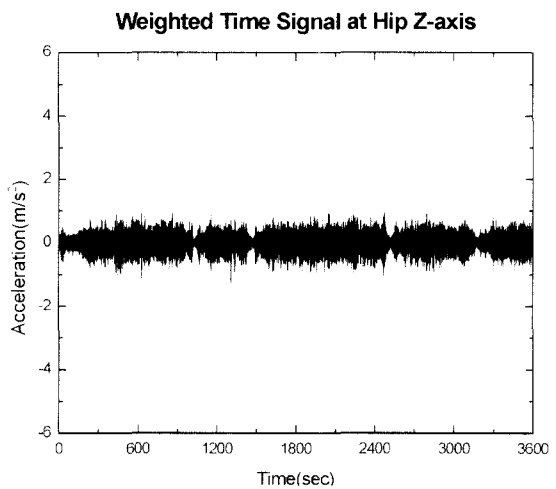
2.4 신호 처리

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

먼저 전신 진동의 관심 주파수 범위는 0.1~100 Hz 이므로 그 내역에 해당되는 대역통과(band-pass) 필터를 사용하여 데이터를 필터링하고 그 후에 각 축에 해당되는 주파수 가중 함수를 필터 형태로 만들어 데



(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, Honam-line)

이터를 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)은 식 (1)에 의해 계산이 되며, 이 파고율이 9보다 작을 때 진동 환경에 대한 기본적인 평가 방법은 수식 (2)와 같은 가중화된 가속도의 실효치(r.m.s., root-mean-square)를 사용한다.

$$Crest\ Factor = \frac{peak\ acceleration}{r.m.s.\ acceleration} \quad (1)$$

식 (2)는 각 축에 대한 평가 방법이고 전체 진동 값 ($a_{overall}$)은 각 축의 진동값의 제곱합의 평방근으로 수식 (3)과 같다.

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

$$a_{overall} = \left[\sum_i a_{wi}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

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 대개의 경우 4제곱 진동 피폭값(fourth power vibration dose value)를 사용한다. 이것을 약칭으로 진동 피폭값 또는 VDV (vibration dose value)라고도 한다. VDV 는 가속도의 제곱의 시간 평균을 사용하는 대신에 4제곱 가속도 시간 평균을 사용하고 실효치보다 최대값에 매우 민감하다. 4제곱 진동 피폭값의 단위는 $m/s^{4.75}$ 이다. 식 (4)는 각 축에 대한 VDV 를 계산하는 식을, 식 (5)는 전체 VDV (overall VDV)를 계산하는 식을 나타내었다.

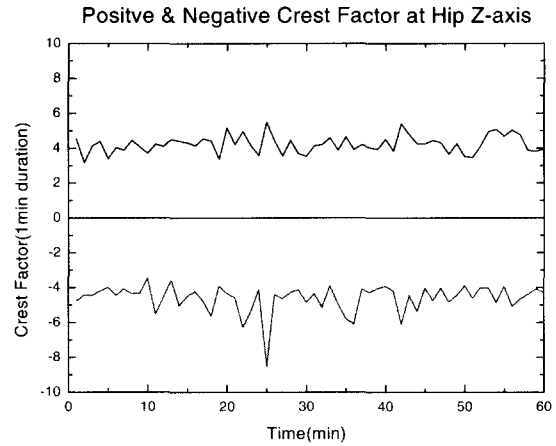
$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

$$VDV_{overall} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

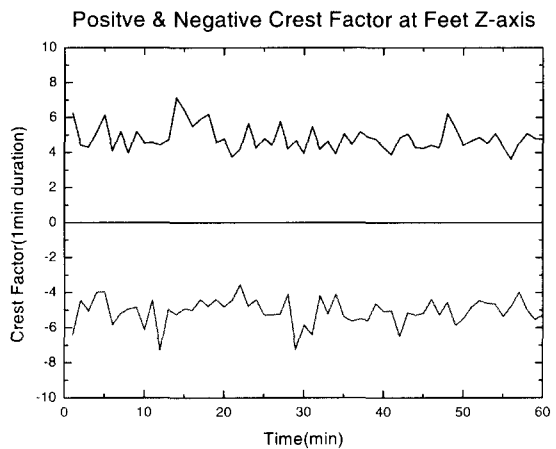
여기서 $a_w(t)$ 는 주파수 가중화 가속도이고 T 는 측정 시간(sec)이다. i 는 12 종류의 진동 측정축을 의미한다.

본 연구에서 측정된 데이터의 파고율(crest factor)이 Fig. 5에서 보여주는 것처럼, 4~6 범위 안에 있기 때문에 실효치를 사용하였고 경우에 따라서 파고율이 9가 넘는 경우가 있어 VDV 도 함께 구하였으나, 주로 실효치를 가지고 설명할 것이다.

ISO2631-1에서는 운송 차량의 가중화 가속도의 전체 진동값(실효치)에 따라 승차감(ride quality 또는 ride comfort)의 정도를 정의하고 있다. 물론 사람과



(a) Mugunghwaho, Honam-line, Daejeon→Kwangju



(b) Saemaulho, Kyongbu-line, Seoul→Daejeon

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

Table 1 Scale of vibration discomfort⁽⁵⁾

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

환경에 따라 차이가 있기는 하지만 일반적인 인체 반응에 따라 Table 1과 같이 등급을 나누었다.

의자의 성능을 평가하는 방법으로 M. J. Griffin⁽²⁾은 SEAT(seat effective amplitude transmissibility)를 제안하였다. SEAT 값은 파고율이 작을 때만 사용이 가능하며 의자에서의 z-축(상하)의 가중화된 가속도의 실효치(rms)과 바닥에서의 z-축의 가중화된 가속도(곱셈인자를 곱하지 않은 상태)의 실효치의 비로 나타낸다. 단위는 퍼센트(%)이다. SEAT 값이 100 %보다도 크게 되면 의자의 승차감이 바닥의 승차감보다 좋지 않다는 의미가 된다.

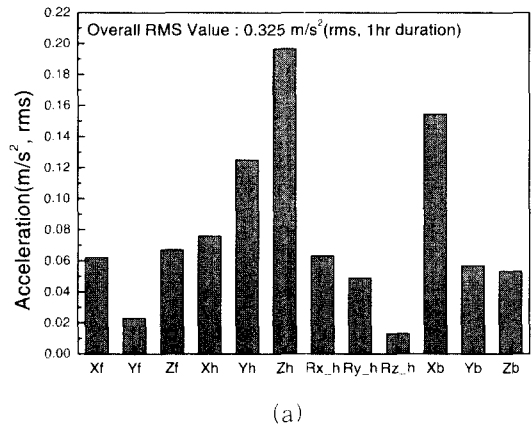
$$SEAT(\%) = \frac{\text{ride comfort on sea}}{\text{ride comfort on flo}} \times 100 \quad (6)$$

3. 실험 결과 및 고찰

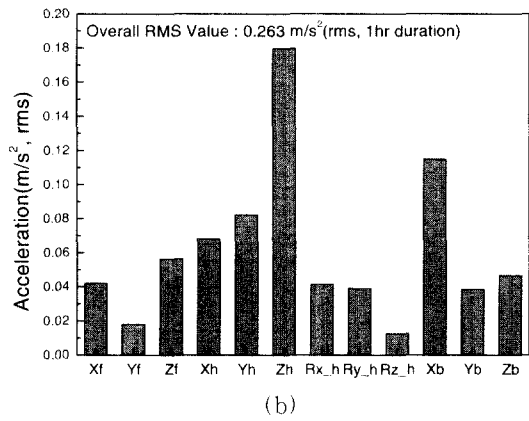
Fig. 4~6까지의 그림들은 무궁화호 기차가 호남선(대전⇒광주)을 주행하는 중 데이터를 분석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4는 1시간 동안의 데이터를 영덩이의 z-축(수직축)에서 취득하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 데이터에 가중함수를 사용하기 전인 영덩이에서의 가속도이고 Fig. 4(b)는 데이터에 가중함수를 적용시키고 곱셈 인자(multiplying factor)를 곱하여 얻은 가중화 가속도이다. Fig. 4로부터 각 기차역에 도달하거나 출발할 때는 가속도 크기가 확실히 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 1시간 동안의 파고율을 시간 변화에 따라 보여주고 있다. 양의 값은 '양의 파고율(positive crest factor)'이고 음의 값은 '음의 파고율(negative crest factor)'이다. 이것은 1분 동안의 실효값으로 1분 동안에 발생한 양의 최대 피크값(최대값)과 음의 최대 피크값(최소값)을 나눈 값이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 파고율이 4~6 범위 안에 있게 된다. 물론 경우에 따라서는 충격이 발생하는 경우가 있어 2~3회 정도 파고율(crest factor)이 커지는 일이 발생하기도 하였지만 Fig. 5에는 도시하지는 않았다. 그러므로 파고율이 9보다 작기 때문에 실효값(r.m.s.)으로 승차감을 평가해도 무방하다. Fig. 5(a)는 무궁화호, 호남선에서 측정된 데이터의 파고율이며, Fig. 5(b)는 새마을호, 경부선에서 측정된 값이다.

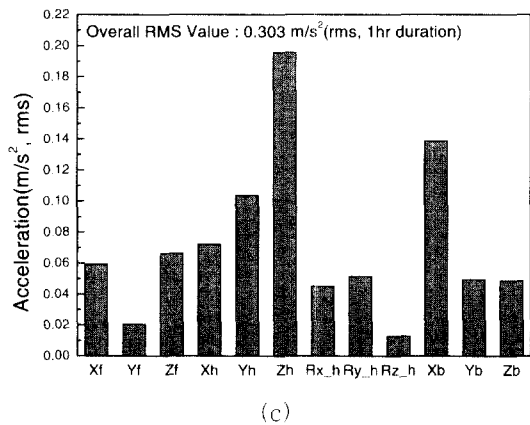
Ride Comfort Values
(Saemaulho, Kyongbu-line, Seoul->Daejon, Male1)



Ride Comfort Values
(Saemaulho, Honam-line, Daejon->Kwangju, Male1)



Ride Comfort Values
(Saemaulho, Kyongbu-line, Daejon->Daegu, Male1)



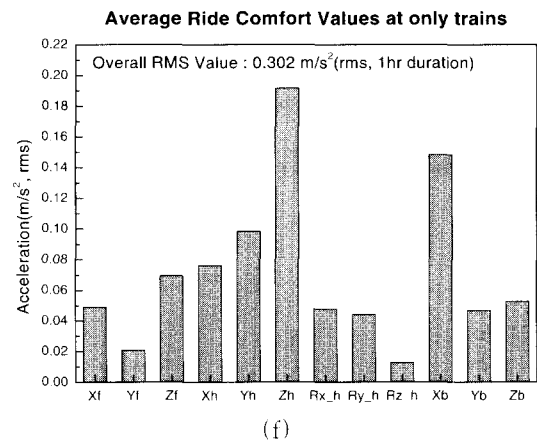
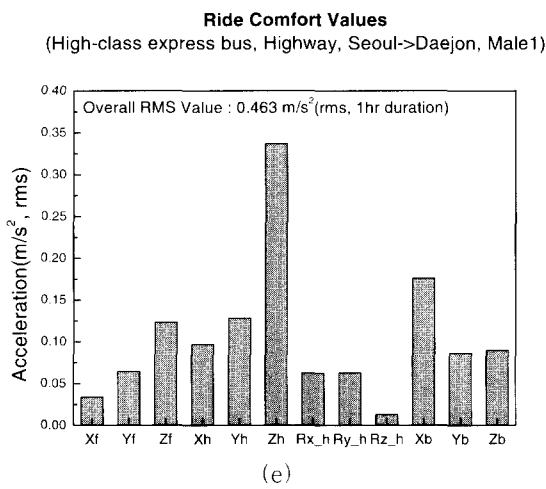
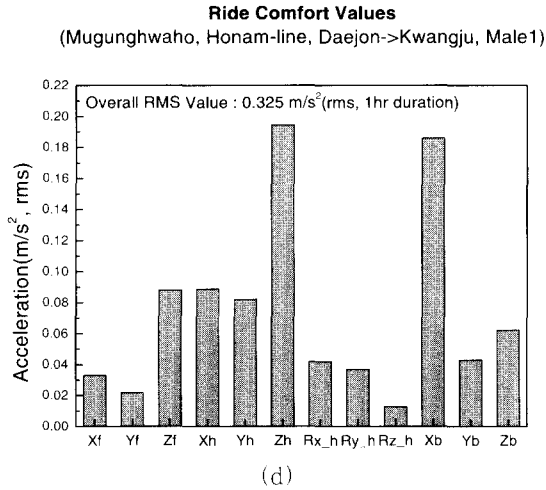


Fig. 6 Comparison of component ride values for 12 axes of vibration for the subject of a passenger railway

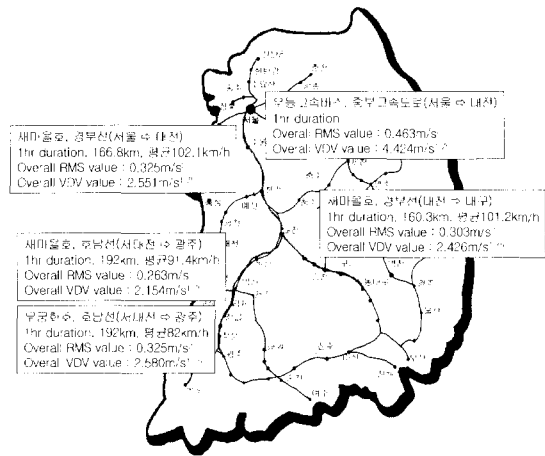


Fig. 7 Overall ride comfort value on the seat of passenger trains and a bus

Fig. 6은 인체의 12 진동축 별로 실효치를 도시한 것으로 기존의 연구 결과⁽²⁾에서와 마찬가지로 엉덩이의 수직축(z-축) 성분이 가장 크며, 그 다음으로는 등의 x-축(전후방향) 성분이 큰 것을 확인 할 수 있다. 뿐만 아니라 엉덩이의 x-축과 y-축도 비교적 큰 값을 가지는데 경우에 따라 조금씩 바뀌고 있다. Fig. 6(a)와 (c)는 동일 기차의 동일 좌석에서 실험을 수행한 것으로 전체 실효값이 각각 0.325 m/s², 0.303 m/s²으로 큰 차이가 있는 것으로 노선의 상태에 따른 영향이 큼을 알 수 있었다.

Fig. 7은 실험 조건(기차, 버스)과 구간 별로 실효치와 VDV를 나타낸 것이다. 새마을호, 경부선의 서울과 대전 구간에서는 실효치가 0.325 m/s²으로 'a little uncomfortable'이다. 새마을호, 전라선의 서대전과 광주 구간에서는 0.263 m/s²으로 'not uncomfortable'으로 아주 양호한 상태이다. 동일 구간에서 부궁화호는 0.325 m/s²으로 'a little uncomfortable'이다. 그리고 새마을호, 경부선의 대전과 대구 구간에서는 0.303 m/s²으로 'not uncomfortable'이다. 마지막으로 우등고속버스로 중부고속도로, 서울과 대전 구간을 달릴 때는 실효값이 0.463 m/s²으로 기차에 비해 진동량이 크지만 등급은 'a little uncomfortable'로 나왔다. Fig. 6(f)는 기차에서 측정된 진동값만을 평균한 것으로 피시험자는 기차에서의 시험을 통해 1시간 동안 평균 0.302 m/s²의 가속도로 진동에 노출되었음을 알 수 있다.

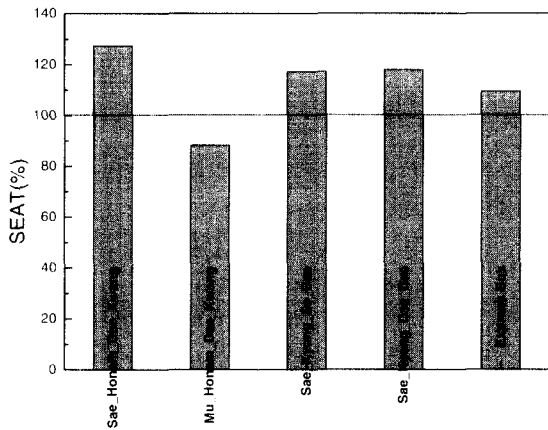
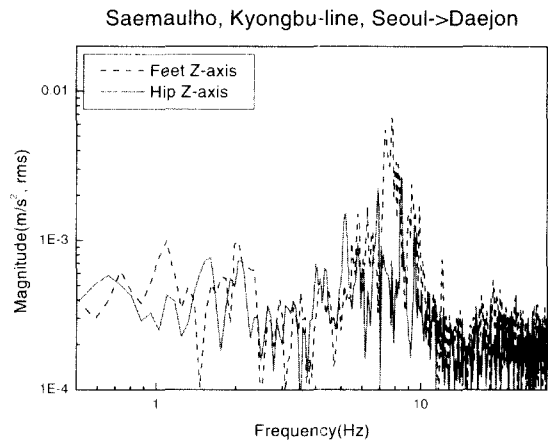


Fig. 8 Comparison of SEAT values

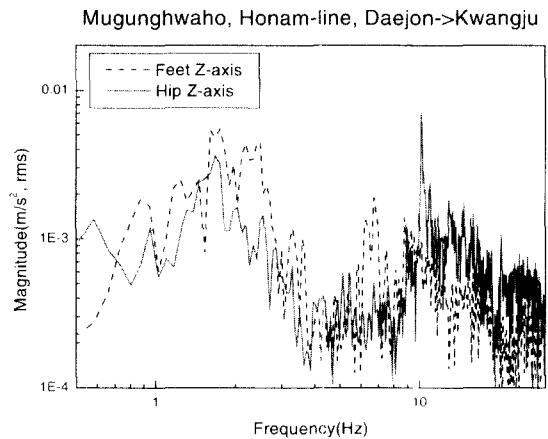
상기와 같이 국내의 육상 교통망 중 대표적인 곳에서 전신 진동 피폭량을 측정된 결과, 교통 수단을 이용하는 국민의 건강에는 크게 손상을 미치지 않는 정도인 'not uncomfortable'과 'a little uncomfortable'의 승차감 등급이 나왔다.

Fig. 8은 철도 차량과 버스의 의자의 성능을 비교한 것으로 'Sae_Honam_Dae_Kwang'은 새마을호, 호남선, 대전에서 광주 구간을 'Mu_Honam_Dae_Kwang'는 무궁화호로 같은 구간에서 실험한 것의 비한다. 이하 각각의 표기는 다음과 같은 실험 조건을 의미한다. 'Sae_Kyong_Se_Dae'-새마을호, 경부선, 서울-대전구간, 'Sae_Kyong_Dae_Dae'-새마을호, 경부선, 대전-대구구간, 'Express Bus'-우등 고속버스.

새마을호와 버스는 SEAT 값이 100 %를 넘고 있으며, 무궁화호만이 88 %이다. 보통 외국 승용차의 경우 SEAT 값이 60~80 %인 것을 보면 의자의 성능이 많이 떨어짐을 볼 수 있다. 물론 기차의 의자의 경우에는 기차에서 주되게 발생하는 저주파 성분을 의자에서 감쇠하는 데에는 한계가 있어 100 %보다 큰 경우가 종종 있다.¹¹⁾ Fig. 9는 새마을호와 무궁화호의 발 z-축과 엉덩이 z-축의 가속도를 주파수 분석한 결과이다. 결과로부터 새마을호의 의자는 기차에서 발생하는 진동을 효과적으로 제진하지 못하고 엉덩이에서의 z-축 가속도가 발의 z-축의 가속도와 거의 같은 상태를 보이고 반면에 무궁화호는 1~10 Hz 범위 내에서 효과적으로 제진하여 가속도가 줄었음을 확인할 수가 있다.



(a) Saemaulho, Kyongbu-line, Seoul→Daejon



(b) Mugunghwaho, Honam-line, Daejon→Kwangju

Fig. 9 Results of FFT at Feet's and Hip's Z-axis

4. 결 론

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. 그리고 각 차량의 의자의 성능을 SEAT 값으로 비교·분석하였다.

실험 방법과 데이터 처리 및 평가 방법은 ISO2631-1(1997)에서 규정하고 있는 방안을 따라 수행하였다. 경부선의 서울-대전 구간과 대전-대구 구간은 똑같은 기차와 똑같은 피시험자로 실험을 수행한 결과, 실효값에서 많은 차이를 보이고 있었는데 이는 서울

쪽으로 갈수록 진동 피폭량이 증가함을 통하여 노선의 상태가 철도 차량의 진동에 많은 영향을 미치고 있음을 확인할 수가 있었다. 그리고 새마을호와 무궁화를 비교한 결과, 새마을호가 승차감에서 더 좋지만, 의자의 성능은 무궁화호의 의자가 더 좋았다. 그 이유는 무궁화호의 의자가 기차에서 발생하고 인체에 영향을 많이 주는 4~8 Hz의 주파수 범위를 효과적으로 제진하고 있는 반면에 새마을호의 의자는 똑같은 대역에서의 진동을 제대로 제진하지 못하고 있기 때문이다. 또 기차와 버스의 승차감을 비교해 보면, 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'의 범주에 포함된다. 이는 국내 기차와 고속버스의 진동 환경이 비교적 우수하다고 말할 수 있다. 그리고 의자를 인체 진동을 고려하여 설계를 한다고 한다면 진동에 대한 더욱 좋은 환경을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Fahv F. J. and Walker J. G., 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.