

지하철 전동차에서의 전신진동 특성에 관한 연구

° 정상욱*, 이상훈*, 박상규**

A Study on Whole Body Vibration in Subway System

Sang Wook Jeong, Sang Hoon Lee and Sang Kyu Park

1. 서론

국민생활의 향상과 함께 교통기관이나 건축물 등의 소음·진동에 대한 관심이 어느 때보다 커지고 있는 시점에서 지하철 내부와 외부에서의 진동의 영향은 최근 연구의 대상이 되고 있다. 일반적으로 전동차의 진동 발생 원인은 구동 장치인 엔진의 회전 수, 바퀴와 철로의 마찰, 공기와 차체의 마찰, 전후 차체 연결 부위에 의한 전달 등으로 크게 구분할 수 있다. 또한 철로 위를 운행하는 전동차의 진동은 도로 위를 운행하는 자동차와 마찬가지로 여러 가지 외부 인자들에 많이 의존한다[1]. 이들 외부 인자로는 승객 수, 철로의 노화 상태, 운행 노선 및 구간, 운행 차량, 운행 시간, 다른 차량과의 교행(交行), 지상을 운행할 때 날씨(바람, 눈, 비)의 영향, 운전자의 습관 등을 들 수 있다[2-3]. 더욱이 전동차는 각 차량이 직렬로 연결되어 있으며 선로의 연결 및 침목 지지대의 종류에 따라 진동 특성이 다르게 나타나게 된다. 이러한 여러 조건이 복합되어서 외적으로는 전동차 주변의 건물이나 주민들에게 환경적인 피해를 입히게 되며 내부적으로는 승객의 승차감에 영향을 미치거나 승무원의 작업 조건을 저하시키게 된다. 이러한 진동이 인체로 전해지면 외부 진동의 크기가 작다 하더라도 생리적으로 골격계, 근육계, 신경계, 심근계, 호흡계, 중추신경계, 신진대사의 장애를 일으킨다. 또한 과업수행의 측면에서 시각, 청각, 촉각, 정신운동의 수

행이나 인식 수행 (cognitive performance) 방해, 불면증의 증상이 나타난다[4]. 대부분의 교통수단은 높은 수준의 진동이 발생하는 경우가 드물지만 낮은 가속도 레벨의 진동이라 할지라도 장기간 노출되거나 신체 각 부위의 공진 주파수와 같은 주파수를 갖는 진동에 노출되는 경우 작업환경의 저하와 승차감의 감소를 나타내게 된다. 이러한 상황에도 불구하고 많은 승객들이 이용하고 있는 지하철이나 철도의 진동에 대한 국내 자료가 부족한 상황이며 승객의 승차감과 승무원의 작업 환경에 미치는 영향에 대한 연구는 별로 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 수도권 대량운송 수단인 지하철 전동차의 진동을 측정하고 인체에 미치는 영향을 평가 하였으며 전동차의 진동 특성이 인체 각 부위에 전달되는 형태를 분석·평가 함으로써 승객과 승무원의 승차감 및 작업환경 향상은 물론 차후 개발되는 고속전철 및 비접지 차량(非接地車輛, zero-ground pressure vehicle) 등의 개발에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 대상 및 측정 방법

2.1 대상 지하철 노선 및 구간

본 연구에서는 서울의 1, 2, 3, 4호선 4개 노선을 대상으로 측정을 수행하였으며 시내 중심부에서 30 분 거리인 반경 15 km 이내를 통과하는 구간을 선택하였다. 측정 결과의 재현성을 위하여 실험은 예비, 1차, 2차, 검증실험으로 나누어 수행하였다. 예비실험에서 증폭기와 변환기, 기록기 등 측정장비의 조건을 실제 측정상황에 맞게

* 연세대학교 산업환경과 대학원

** 정희원, 연세대학교 산업환경과

조정 하였다. 2차 실험에서는 1차 실험을 반복하였으며 일부 구간에서 카세트 테이프(SK 90과 SF 60)의 감도와 피실험자를 달리하여(키 178 cm, 몸무게 70 kg의 23세 남자 및 키 159 cm, 몸무게 48 kg의 23세 여자) 측정하였다. 그러나 카세트 테이프 혹은 피실험자의 교체와 같은 변수로 인한 결과의 차이가 크지 않았기 때문에 1차 실험에서 측정된 결과만을 분석하였다.

서울 도심 구간 지하철 노선과 본 실험의 대상 구간을 Table 1에 나타내었다. 1, 2, 4 호선의 경우 지상과 지하, 교량 위를 운행하는 복합된 구간에서 측정을 하였으며 3 호선은 모두 지하 구간에서 측정하였다. 승객은 측정 대상 전동차 1 량에 최소 50 명 최대 200 명이 탑승하였다. 진동 측정은 각 노선에 대하여 신호대기, 서행, 타 차량과의 교행 등 외부 인자들에 의한 간섭이 적은 9~12개의 구간(정거장)을 설정하여 각각 30분씩 기록하였다.

2.2 실험 자세 모델 및 조건

1) 실험 자세 모델

본 실험에서는 지하철 전동차 바닥에서의 진동을 측정하기 위하여 가속도계를 전동차의 바닥(floor)에 설치하였으며, 인체에 전달되는 형태를 규명하기 위하여 좌골부분(ischial tuberosities)과 머리 부분(head)에 가속도계를 부착하였다. 본 실험에서 승객이 좌석에 앉은 자세에서 등을 등받이에 기대고 있을 때(back-seat on)와 기대지 않았을 때(back-seat off)의 5 가지 자세 모델, 그리고 서 있는 자세를 기준으로 1 가지 자세 모델을 설정하였다. Fig.1은 전동차에 승차한 승객의 자세에 따른 진동의 영향을 비교하기 위해 설정한 6 가지 자세를 나타내며, 순서에 따라 모델의 번호를 지정하였다. 전동차의 바닥, 피실험자의 좌골 부위 및 머리 부위에 삼축 가속도계를 각각 하나씩 설치하여 동시에 9개의 채널을 사용할 경우 모델의 수는 서 있는 모델 1개와 앉아 있는 자세에서 등받이에 기대는 경우와 기대지 않은 경우 모

델 2 개로 모두 3 가지 모델로써 충분하다. 그러나 본 실험에서는 진동 신호를 녹음하는 테이프 레코더가 6개의 채널을 사용하므로 구성상 1 가지 자세에 대하여 가속도계의 설치 위치를 두 가지로 조합하였다. 따라서 전동차의 바닥을 기준으로 하여 4 가지 모델, 그리고 좌골 부위를 기준으로 하여 2가지 모델의 모두 6가지 모델을 설정하였다.

2) 측정 조건

지하철 각 노선에 대하여 각각 30분씩 측정하였으며 신호 대기, 서행, 타 차량과의 교행 등 외부 인자들에 의해 영향이 적은 구간을 선정하여 각각 30초 동안의 신호를 분석하였다[1]. 전동차 내에서 피실험자와 측정자의 위치는 운전석이 있는 첫번째 차량이며 피실험자는 23세의 남자로 키 178 cm, 몸무게는 70 kg이다. 각 방향에 따른 진동치를 비교하기 위해서 Fig.2와 같이 국제표준기구의 ISO 2631에 명시된 인체 진동에 대한 좌표축을 이용하였다. 앉아 있는 모델의 경우 지하철의 좌석 배치로 인해 서 있는 모델을 기준으로 오른쪽으로 90° 돌아 앉아 측정하였다. 1 번 모델의 경우 조종석 후면 약 2 m 위치에서 +X 방향이 전동차의 진행 방향과 일치하게, 그리고 2~6번 모델은 전동차의 진행 방향 기준으로 왼쪽 좌석 첫번째 위치에 앉아 +Y 방향이 전동차의 진행 방향과 일치하게 설정하였다.

3) 전신 진동 평가 기준

회전기계, 구조물 등에 의해 인체로 전해지는 진동의 크기를 규제하고 있는 국제 표준은 ISO 2631, BS(British Standard) 6841로써 m/s^2 RMS의 단위를 사용하고 있으며 우리나라는 아직 진동이 인체에 미치는 영향의 평가에 대한 기준이 마련되지 않았다. 지금까지 자동차와 같은 교통수단의 좌석에 따른 승차감 연구가 대부분 4~8 Hz 부근의 진동을 제어함을 목표로 두고 있는데 이는 좌석과 머리 부위의 수직 방향 가속도만을 고려한 것이다. 그러나 국제 기준에서는 전후, 좌우 방향의

낮은 가속도 수준으로도 쉽게 안정감의 감소를 경험할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 따라서 교통수단의 승차감 연구는 X, Y, Z 세 방향을 모두 고려하는 것이 바람직하며 이 경우 다음의 두 가지 방법으로 승차감을 평가할 수 있다[5]. 첫 번째는 의자의 한 부위에서 측정된 진동 신호의 단순 물리량을 이용하는 방법으로써 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$RMS_{OA} = \sqrt{\sum RMS_{comp}^2}$$

$$= \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

여기서 RMS_{OA} 는 전체값(overall)을 의미하며 a_x, a_y, a_z 는 X, Y, Z 방향에서 측정된 가속도 실효치값이다. 두 번째는 첫 번째에서 측정된 가속도 값에 주파수 보정치와 축방향 보정치를 고려한 값으로써 다음과 같이 정의된다.

$$RSS_a = \sqrt{1.4 a_{w,x}^2 + 1.4 a_{w,y}^2 + a_{w,z}^2}$$

여기서 $a_{w,x}, a_{w,y}, a_{w,z}$ 는 X, Y, Z 방향의 진동가속도 실효치로서 주파수 가중된 값(frequency weighted value)이며 계수 1.4는 X, Y 축방향의 보정치(axis multiplying factor)를 나타낸다. 이렇게 계산된 RSS 값을 Fig.3의 ISO에서 정한 폭로 기준을 통해 하루 동안의 진동 노출 허용 시간을 산출할 수 있다.

2.3 실험 방법

1) 실험 기구 및 장치

전동차 바닥의 진동과 인체에 전달되는 영향을 측정하기 위해서 삼축가속도계, SAE pad 형 가속도계, 증폭기, 인체 진동계, 테이프 레코더 등을 사용하였으며 녹음된 자료는 실험실에서 FFT(fast fourier transform) 신호 분석기를 이용하여 정밀 분석 하였다. 측정 및 분석장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 각 노선별 전동차 바닥의 진동 수준

차량 진동을 바닥에 설치된 삼축 가속도계를 이용하여 측정하였으며 차량의 진동 좌표는 Fig.5 와 같다. 각 노선에서 측정된 전동차 바닥의 진동 수준은 Fig.6에 나타내었다. 평균값은 1, 2, 3, 6 번 모델에서 바닥에 설치된 가속도계에서 출력된 신호를 분석하여 각각을 기록한 후 산술평균을 하였다. 전 노선에 걸쳐 진동의 양상과 크기는 비슷한 경향을 나타내며 3 호선의 상하방향의 진동이 제일 크며 차량의 전후방향이 가장 적고 상하 방향이 가장 높은 수준을 나타내었다. 4개 노선의 평균값은 차량의 전후방향으로 0.12 m/s^2 , 좌우방향으로 0.16 m/s^2 , 상하방향으로 0.31 m/s^2 이었으며 상하 방향의 진동 가속도가 좌우 방향의 약 2배, 전후 방향의 약 3 배 가량 높게 나타났다. 차량의 전후 방향 가속은 주로 가속, 감속에 의한 관성에 의해 발생하며 좌우 방향의 가속은 좁은 바퀴 폭에 의한 전동차의 롤링 운동 그리고 선외 구간 주행에 의한 원심력에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 또한 상하 방향의 가속은 선로의 가공 상태 및 선로 이음새 부분에서 바퀴와 선로의 접촉 변화에 의해 발생한다고 판단된다.

3.2 서 있는 자세(standing)

피실험자의 +X 방향을 전동차의 진행 방향과 일치시킨 상태로 머리부분의 진동을 측정된 결과를 Fig.7에 나타내었다. 3호선의 수직 방향을 제외한 전 노선에서 진동의 양상과 크기는 비슷하게 나타났다. 평균값은 전후 방향 0.09 m/s^2 , 좌우 방향 0.29 m/s^2 , 상하 방향 0.18 m/s^2 정도의 수준으로 인체의 좌우 방향, 상하 방향, 전후 방향의 순서로 나타났다.

3.3 등을 기대고 앉은 자세(back-seat on)

피실험자가 3, 5 번 모델과 같이 좌석에 앉아 등을 기대고 있는 자세를 취할 경우 전신 진동 좌표계의 +Y 방향이 전동차의 진행 방향과 일치한

다. 5 번 모델에서 좌골 부위에 설치된 T 가속도계의 출력을 분석한 결과를 Fig.8에 나타내었다. 평균값은 인체의 좌우 방향 가속도 0.13 m/s^2 , 전후 방향 가속도 0.18 m/s^2 , 상하 방향 가속도 0.17 m/s^2 로 각각 나타났다. 측정 결과 각 노선에서 나타난 가속도 크기는 인체의 전후 방향과 상하 방향이 좌우 방향에 비해 대체로 크게 나타나고 있으며 서 있는 자세의 머리 부분의 진동 특성(Fig. 7)과 비슷한 양상을 보이고 있다.

3, 5 번 모델에서 머리에 설치한 P 가속도계의 출력을 분석한 결과를 Fig.9에 나타내었다. 평균값은 인체의 좌우 방향 가속도 0.38 m/s^2 , 전후 방향 가속도 0.07 m/s^2 , 상하 방향 가속도 0.15 m/s^2 로 각각 나타났다. 그래프의 양상은 3호선의 상하 방향을 제외하고 좌우 방향으로 가장 많이 증폭되었으며 전후 방향과 상하 방향은 대부분 감소되었다.

3.4 기대지 않은 자세(back-seat off)

피실험자가 등받이에 기대지 않고 앉아 있는 경우 4, 6 번 자세 모델에서 좌골 부위에 각각 설치된 T, P 가속도계의 출력을 분석한 결과, 진동 특성은 Fig.10과 같다. 평균값은 좌우 방향 0.18 m/s^2 , 전후 방향 0.11 m/s^2 , 상하 방향 0.16 m/s^2 로 각각 나타났다. 등을 기대고 앉아 있는 자세와 비교했을 때 좌우 방향에 대한 크기는 38.5 % 가량 증가하였으며 전후 방향은 38.9 % 가량 감소하였고 상하 방향은 5.9 % 정도 감소하였다.

2, 4 번 모델에서 머리에 설치한 P 가속도계의 출력을 분석한 결과를 Fig.11에 나타내었다. 평균값은 좌우 방향 0.32 , 전후 방향 가속도 0.06 , 상하 방향 가속도 0.16 m/s^2 로 각각 나타났으며 등을 기대고 앉은 경우의 머리 진동과 전체적으로 비슷한 양상을 나타내고 있다. 그래프의 양상은 3 호선의 상하 방향을 제외하고 등을 기대고 앉아 있는 경우와 비교했을 때 좌우 방향으로 15.8 % 감소되었으며 전후 방향과 수직 방향은 거의 비슷한 값을 보이고 있다.

3.5 주파수 분석

전동차의 진동 특성을 살펴보기 위해 주파수 영역에서 각 노선의 진동 신호를 살펴본 결과 가장 큰 진동치는 2.5~10 Hz 구간, 20~40 Hz 구간에서 나타난다. 등을 기대고 앉은 자세 모델에 대한 각 방향의 진동 수준을 주파수 대역에서 분석한 결과 중 대표적인 것을 Fig.12에 나타내었다. 좌우 방향의 주파수 분석 결과를 보면 20~40 Hz 구간에서는 진동가속도의 감소 경향을 볼 수 있으나 전후 방향의 경우 약 5 Hz 부근에서 증가 경향을 확인할 수 있다.

3.6 승차감 평가

전신 진동 평가 기준에 의해 승차감 평가 지표로써 각 방향에 대한 진동을 고려한 실효치(RMSoverall)값을 계산하였다. Table 2에 각 노선과 모델에 따른 요소들의 가속도 값과 승차감 평가 지표를 정리하였다.

RMSoverall 값을 통한 승차감 지수를 보면 전동차 바닥의 경우 서 있는 자세 0.35 m/s^2 , 등을 기대고 앉아 있는 자세 0.35 m/s^2 , 등을 기대고 있지 않은 자세 0.31 m/s^2 으로 거의 일정한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이에 따른 좌골 부분의 반응 역시 등을 기대고 앉아 있는 자세에서 0.28 m/s^2 , 등을 기대지 않고 앉아 있는 자세에서 0.26 m/s^2 으로 거의 같은 수준임을 알 수 있다. 좌골 부위에서의 진동값은 바닥에 비해서 약간 감소하여 승차감이 향상되는 경향을 보이고 있으나 그 효과는 크지 않다. 또한 실험 장치로 인하여 주파수 가중치 및 축방향 가중치를 고려하지 못하였으므로 Fig.3과의 단순 비교는 다소 무리가 있으나 좌골에서의 진동을 0.28 m/s^2 으로 간주하면 1 시간 정도 탑승시 쾌감이 감퇴하고, 승무원 같이 7~8 시간 계속 탑승하면 피로 감퇴 한계에 접근하는 것으로 예측된다.

4. 결론

본 연구에서는 서울 지하철 전동차 바닥의 진동

과 이것이 인체에 미치는 영향에 대하여 측정 평가하였으며 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

1)정속 주행하는 지하철 전동차 바닥의 평균 진동 수준은 전동차의 진행 방향, 폭 방향, 상하 방향이 각각 0.12, 0.16, 0.31 m/s² 로 상하 방향의 진동 수준이 가장 큰 것으로 나타났다.

2)서 있는 자세에서 머리 부위의 가속도 수준은 전후 방향에서 약간 감소되었으며 좌우 방향으로 40 % 정도 증가하였고 상하 방향으로는 40 % 정도 감소하였다.

3)등을 기대고 앉아 있는 경우 좌골 부위에서는 인체의 전후, 상하 방향보다 좌우 방향 진동값이 약간 작게 나타나는데 비해 머리 부분에서는 좌우 방향 진동이 크게 증가되었다. 등을 기대지 않고 앉아 있는 경우도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이는 좌골 부분에서의 좌석 마찰과 등 부분에서의 등받이의 구속이 있는 반면 좌우 방향의 운동은 자유롭고 목 부분의 강성이 약하므로 머리 부분의 진동이 증폭되었다고 판단되나 시험구간의 선로 형태가 일정하지 않으므로 지속적인 연구가 필요하다.

4)RMSoverall 값을 통해 바닥에 대한 좌골 부위의 승차감을 평가한 결과 등을 기대고 앉아 있는 자세와 기대지 않고 앉은 자세의 경우 비슷한 정도의 승차감 향상 결과를 보였다. 좌골에서의 진동을 0.28 m/s²으로 간주하면 1 시간 정도 탑승시 쾌감이 감퇴하고, 승무원 같이 7~8 시간 계속 탑승하면 피로 감퇴 한계에 접근하는 것으로 예측된다.

참고 문헌

[1]Griffin MJ : The Evaluation of Vehicle Vibration and Seats, Applied Ergonomics, 1978:9 (1):15-21.

[2]Pope H, Wilder DG, Jorneus L:The Response of the Seated Human to Sinusoidal Vibration and Impact, J. of Biomechanical Engineering,

1987:109:279-284

[3]Paddan S, Griffin MJ:Transmission of Roll/Pitch Seat Vibration to the Head,Ergonomics, 1994:37(9):1513-1531.

[4]Griffin MJ:Handbook of Human Vibration, New York, Academic Press,1990

[5]정완섭, 우춘규, 박세진, 김수현 : 자동차의 자류의 진동 전달특성에 대한 실험적 연구. 한국소음진동공학회 1996년도 추계학술대회는문집, 1996: 365-370.

Table 1. Target lines and sections in the experiments

Line	Model	측정구간	비고
1 호선	1	노량진~용산	교량, 자갈철로
	2	용산~남영	자갈철로
	3	남영~서울역	교행, 지상에서 지하로
	4	서울역~시청	교행 2 회, 고속주행
	5	종각~종로 3 가	교행, 서행
	6	종로 3 가~종로 5 가	구간이 짧음
2 호선	1	충정로~아현	수평방향 흔들림
	2	아현~이대	진행방향 흔들림
	3	이대~신촌	곡선주로
	4	신촌~홍대입구	교행, 곡선주로
	5	홍대입구~합정	교행, 수평방향 흔들림
	6	당산~영등포구청	교행, 지상에서 지하로
3 호선	1	안국~경복궁	중간속도
	2	경복궁~독립문	고속주행
	3	독립문~무악재	중간속도
	4	무악재~홍제	고속주행
	5	홍제~녹번	고속주행
	6	녹번~불광	중간속도
4 호선	1	충무로~명동	중간속도
	2	회현~서울역	고속주행

Table 2. Acceleration levels and ride quality of subway system

Posture	Target	Direction			RMS _{Overall} (m/s ² RMS)
		Right & Left	Front & Back	Up & Down	
Back-seat on (Ischial)	Line 1	0.15	0.12	0.14	0.24
	Line 2	0.15	0.20	0.17	0.30
	Line 3	0.13	0.23	0.22	0.34
	Line 4	0.11	0.15	0.14	0.23
	MEAN	0.13	0.18	0.17	0.28
Back-seat off (Ischial)	Line 1	0.22	0.12	0.21	0.33
	Line 2	0.27	0.16	0.22	0.38
	Line 3	0.23	0.19	0.16	0.34
	Line 4	0.17	0.10	0.18	0.27
	MEAN	0.18	0.11	0.16	0.26
Standing (Floor)	Line 1	0.17	0.13	0.30	0.37
	Line 2	0.22	0.14	0.31	0.41
	Line 3	0.13	0.09	0.34	0.38
	Line 4	0.14	0.08	0.22	0.27
	MEAN	0.16	0.11	0.29	0.35
Back-seat on (Floor)	Line 1	0.15	0.15	0.28	0.35
	Line 2	0.10	0.14	0.24	0.30
	Line 3	0.11	0.16	0.44	0.48
	Line 4	0.10	0.14	0.23	0.29
	MEAN	0.12	0.15	0.30	0.35
Back-seat off (Floor)	Line 1	0.16	0.18	0.37	0.44
	Line 2	0.13	0.17	0.30	0.37
	Line 3	0.11	0.14	0.43	0.47
	Line 4	0.10	0.14	0.23	0.29
	MEAN	0.10	0.13	0.27	0.31

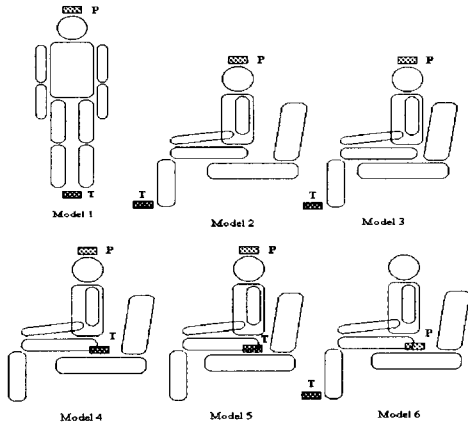


Figure 1. Diagram of standing & seated models.

T:Tri-axial accelerometer, P:Tri-axial accelerometer in pad.

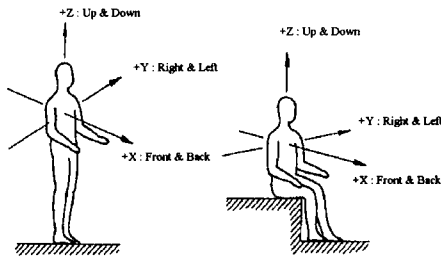


Figure 2. Coordinate systems for human vibration as defined in ISO 2631.

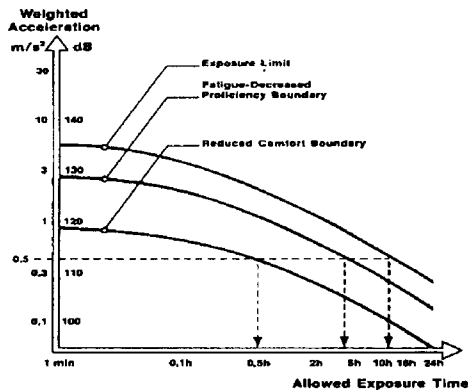


Figure 3. The ISO dose system for whole-body vibration

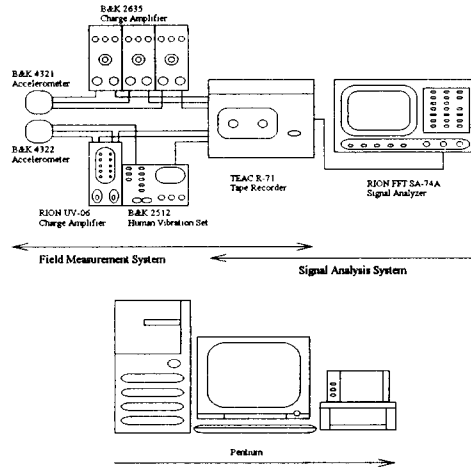


Figure 4. Schematic diagram of instrument setup

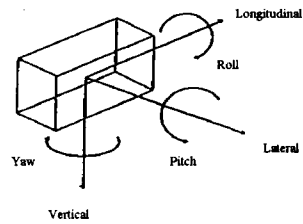


Figure 5. Coordinate system of subway train

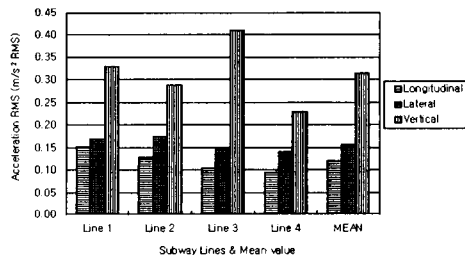


Figure 6. Vibration level of subway floor

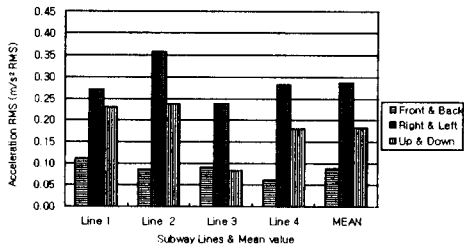


Figure 7. Vibration level of head in standing model

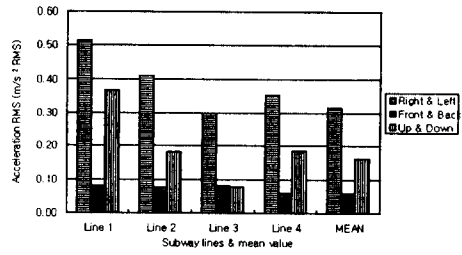


Figure 11. Vibration level of head in back-seat off model

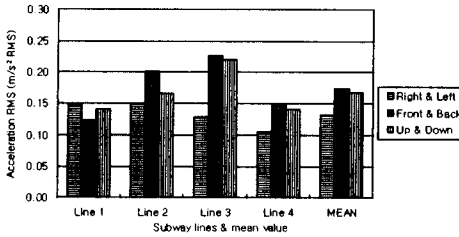
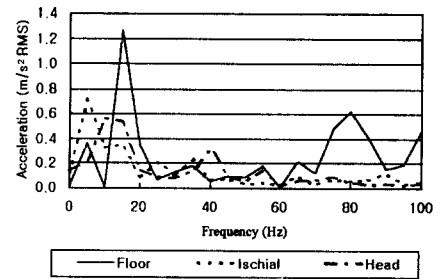
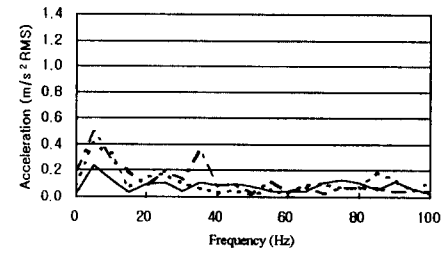
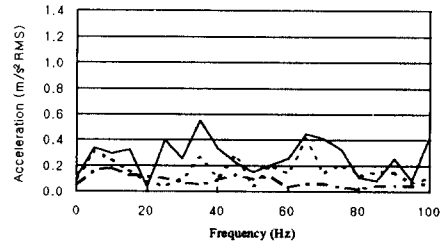


Figure 8. Vibration level of ischial in back-seat on model



(Top):right & left, (Middle) : front & back
(bottom) : up & down

Figure 12. Variations in the transmission of vibration to ischial and head in 3 and 5 sections of line 2

Figure 9. Vibration level of head in back-seat on model

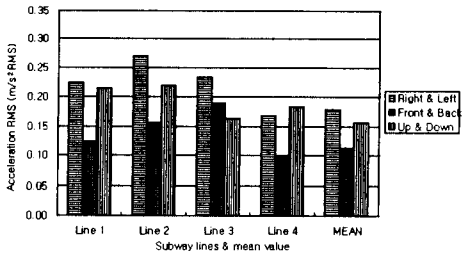


Figure 10. Vibration level of ischial in back-seat off model