

지하철 전동차에서의 전신진동 특성에 관한 연구

연세대학교 보건과학대학 산업환경학과

정 상 욱 · 박 상 규

-Abstract-

A Study on Whole Body Vibration in Subway System

Sang Wook Jeong · Sang Kyu Park

*Dept. of Industrial Environmental & Health,
College of Health Science, Yonsei University*

In this study, subway train vibration has been measured to characterize the whole body vibration of Seoul subway lines for various human postures. Results show that the floor vibration level of the subway trains in the vertical direction is higher than that in other directions. At the standing human posture, vibration level of the head in the right-left direction are increased while that in the vertical direction is decreased. It is assumed that the different flexibility of the human body and the rolling motion of the subway trains are the main cause. At the sitting posture with back seat on, vibration level in the right and left direction at the human ischial tuberosities is lower than that in other directions. Results also show that there were little difference between back-seat on model and back-seat off model. Transmissibility analysis shows how the subway vibration affects the response of a human body.

Key words : subway, acceleration, transmissibility, whole body vibration

I. 서 론

인구 1400만 이상의 거대 도시(metropolis)인 서울시는 지난 1974년 지하철 1호선 개통을 시작으로 1997년 8호선 총 12개 노선의 확장 공사가 마무리 될 예정이다. 많은 시민들이 이용하는 수도권 대량

여객 운송 수단으로서의 자리를 차지한 지하철은 지난 94년 한국 방문의 해 기간 중 외국인 설문 조사에서 가장 편리한 한국의 교통수단으로 선정되기도 하였다. 그러나 신도시나 서울 외곽 등지에서 도심까지 지하철로 출퇴근하는 사람을 기준으로 삼을 경우 왕복 하루 1 시간 이상 지하철에 탑승하게 되며 이 시간 동안 진동, 소음, 오염된 공기, 낮은 조도, 전자

* 이 논문은 1995년도 연세대학교 학술연구비의 일부로 수행되었음.

기장 등의 유해 인자와 안전 사고 유발 가능성 등의 위험 인자에 노출된다. 특히 국민생활의 향상과 함께 교통기관이나 건축물 등의 소음·진동에 대한 관심이 어느 때보다 커지고 있는 시점에서 지하철 내부와 외부에서의 진동 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(Griffin, 1978). 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(Pope 등, 1987; Paddan 등, 1994). 더우기 자동차, 비행기, 여객선 등 대부분의 교통수단은 동체가 하나로 구성되어 있기 때문에 어느 한 부위에서 발생한 가진력이 차체 전반에 걸쳐 고르게 나타나지만 전동차는 각 차량이 직렬로 연결되어 있으며 선로의 연결 및 침목 지지대의 종류에 따라 진동 특성이 다르게 나타나는 특성이 있다. 이러한 여러 조건이 복합되어서 외적으로는 전동차 주변의 건물이나 주민들에게 환경적인 피해를 입히게 되며 내부적으로는 승객의 승차감에 영향을 미치거나 승무원의 작업 조건을 저하시키게 된다.

진동에 의한 단기 노출(short-term exposure)은 생리적 영향이 아주 적어서 실제적으로 문제가 거의 없으며(Homick, 1973; Sanders, 1994) 노출 초기에 약간의 호흡량 상승, 심박수 증가, 근장력 증가 등의 증상이 나타나지만 이때 진동에 의한 혈액이나 내분비조성에 대한 영향은 없다(Gell과 Moeller, 1972; Sanders, 1994). 그러나 강한 장기적 전신 진동(long-term exposure)에 노출된 작업자는 척추와 말초신경계에 대한 위험이 증가하며, 강도와 노출 지속 시간에 따라 평균적으로 건강 위험이 증가하는 것으로 보인다(Seidel 과 Heide, 1986; Sanders, 1994).

전신 진동은 회전체 기계, 구조물 등에 의해 발생한 진동이 인체의 지지면적(supporting surface; 등, 엉덩이, 발)을 통해 인체 전반을 투과하는 진동으로 정의할 수 있으며 이러한 전신 진동은 안정감의 저하(degraded comfort), 활동의 방해(interference with activities), 건강악화(impaired health), 과민 반응(perception of low-magnitude vibration), 미(motion sickness) 등을 유발한다(Griffin, 1990). 이러한 전신 진동 영향을 정량화 하기 위해 진행된 연구 결과를 살펴보면 좌우 방향 가속에 대한 인체의 반응은 연구된 바가 드물며(Sanders, 1994) 상하 방향으로 2~5G(gravity; 중력가속도) 이상의 가속에 노출될때 혈액, 림프액과 같은 유연한 성분과 조직이 상하로 유동하여 안면 울혈(鬱血)이 발생하고(Fraser, 1973; Sanders 1994) 주변 시야에서 과녁 검출능력이 감소하는 현상이 나타난다(Zarriello 등, 1958; Sanders 1994). 또한 전후 방향의 가속을 받는 경우는 신체의 앞쪽 방향 가속에 대해서 몸을 뒤로 젖히려는 경향을 보이며 8G 이상의 가속에서는 산소 결핍으로 인한 호흡 곤란 증세를 보인다. 반면 신체 뒤쪽 방향으로의 가속에 노출되면 호흡은 쉬워지나 외향 압력에 의한 불쾌감은 앞쪽으로 가속되는 때와 같다. 따라서 무중력 상태와 같은 높은 수준의 가속도에 폭로될 위험이 있는 특이한 환경, 정밀한 작업을 요하는 작업장 또는 고속 주행, 대량 운송을 하는 교통 수단 등에는 이에 따른 적절한 보호대책이 필요하다. 또한 전신 진동에 의한 인체의 반응은 매우 다양하므로 가속도의 크기만으로 설명이 어려우며 주파수의 효과도 동시에 고려되어야 한다. 전신 진동에 노출된 인체의 각 부위는 진동의 크기 뿐만 아니라 주파수에 따라서도 각각 다르게 반응을 한다. 이와 같이 인체의 조직이 같은 크기의 진동임에도 불구하고 민감하게 반응하는 특정한 주파수를 공진 주파수라고 부르며 이러한 주파수의 진동이 인체로 전해지면 외부 진동의 크기가 작다 하더라도 생리적으로 골격계, 근육계, 신경계, 심근계, 호흡계, 중추신경계, 신진대사 기능의 장애를 일으킨다. 또한 과업 수행의 측면에서 시각, 청각, 촉각, 정신 운동 수행(psychomotor performance) 또는 인식

수행(cognitive performance) 방해, 불면증(vigilance) 등의 증상이 나타난다(Griffin,1990). 특히 앉아 있는 사람의 경우 4~8Hz 범위의 진동이 상체 전체를 공진 시키므로 가능한 한 이를 피하거나 세기를 줄여 주는 방향으로 저감 대책을 세워야 한다. 대부분의 교통 수단이나 작업 환경에서는 높은 수준의 수평 가속이 발생하는 경우가 드물지만 낮은 가속도 레벨의 진동이라 할지라도 장기간 노출되거나 신체 각 부위의 공진 주파수와 같은 주파수를 갖는 외부 진동에 노출되는 경우 작업환경의 저하와 승차감(ride quality)의 감소를 나타내게 된다. 그러나 이러한 상황에도 불구하고 많은 승객들이 이용하고 있는 지하철이나 철도의 진동에 대한 국내 자료가 부족한 상황이며 승객의 승차감과 승무원의 작업환경에 미치는 영향에 대한 연구는 별로 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우선적으로 수도권 대량운송 수단인 지하철 전동차의 진동을 측정하고 인체에 미치는 영향을 측정하였으며 전동차의 진동이 인체 각 부위에 미치는 영향을 분석 평가함으로써 승객과 승무원의 승차감 및 작업환경 향상은 물론 차후 개발되는 고속전철 및 비접지차량(非接地車輛, zero-ground pressure vehicle) 등의 개발에 필요한 기초 자료를 제공하고 자 한다.

II. 실험 대상 및 측정 방법

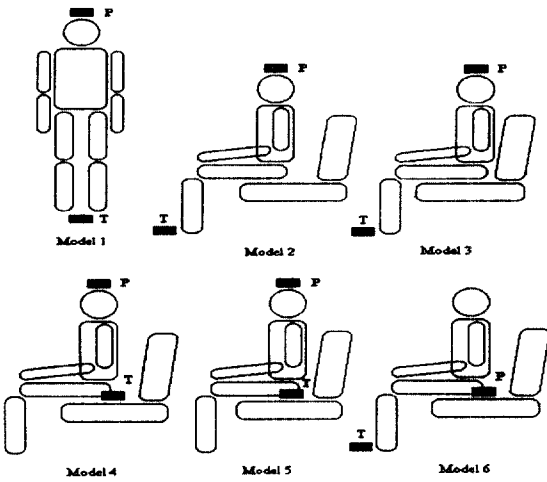
1. 대상 지하철 노선 및 구간

본 연구에서는 서울의 1, 2, 3, 4호선 4개 노선을 대상으로 측정을 수행하였으며 시내 중심부에서 30분 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 측정상황

에 맞게 조정 하였다. 2차 실험에서는 1차 실험을 반복하였으며 일부 구간에서 카세트 테이프(SK 90에서 SF 60)의 감도와 피실험자를 달리하여(키 178cm, 몸무게 70kg의 23세 남자 및 키 159cm, 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 구간은 표 1에 나타내었다. 1, 2, 4호선의 경우 지상과 지하, 교량 위를 운행하는 복합된 구간에서 측정을 하였으며 3호선은 모두 지하 구간에서 측정하였다. 승객은 측정 대상 전동차 1량에 최소 50명 최대 200명이 탑승하였다. 진동측정은 각 노선

Table 1. Target lines and sections in the experiments

Line	Model	측정구간	비 고
1호선	1	노량진 ~ 용산	교량, 자갈철로
	2	용산 ~ 남영	자갈철로
	3	남영 ~ 서울역	교행, 지상에서 지하로
	4	서울역 ~ 시청	교행 2회, 고속주행
	5	종각 ~ 종로3가	교행, 서행
	6	종로3가 ~ 종로5가	구간이 짧음
2호선	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
3호선	1	안국 ~ 경복궁	중간속도
	2	경복궁 ~ 독립문	고속주행
	3	독립문 ~ 무악재	중간속도
	4	무악재 ~ 홍제	고속주행
	5	홍제 ~ 녹번	고속주행
	6	녹번 ~ 불광	중간속도
4호선	1	충무로 ~ 명동	중간속도
	2	회현 ~ 서울역	고속주행
	3	서울역 ~ 숙대	고속주행
	4	숙대 ~ 삼각지	고속주행
	5	삼각지 ~ 신용산	고속주행
	6	이촌 ~ 동작	교량, 고속주행



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

Figure 1. Diagram of standing & seated models.

에 대하여 신호대기, 서행, 타 차량과의 교행 등 외부 인자들에 의한 간섭이 적은 9~12개의 구간(정거장)을 설정하여 각각 30분씩 기록하였다. 1번에서 6번까지의 모델에 대한 설명은 다음의 실험 자세 모델 및 조건 부분에 수록하였다.

2. 실험 자세 모델 및 조건

1) 실험 자세 모델

본 실험에서는 지하철 전동차 바닥에서의 진동을 측정하기 위하여 가속도계를 전동차의 바닥(floor)에 설치하였으며, 인체 내에 전달되는 형태를 규명하기 위하여 좌골 부분(ischial tuberosities)과 머리 부분(head)에 가속도계를 부착하였다. 또한 승객이 좌석에 앉은 자세에서 등을 등받이에 기대고 있을 때(back-seat on)와 기대지 않았을 때(backseat off)의 5가지 자세 모델, 그리고 서 있는 자세를 기준으로 1가지 자세 모델을 설정하였다. 그림 1은 전동차에 승차한 승객의 자세에 따른 진동의 영향을 비교하기 위해 설정한 6가지 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 모델 2개로 모두 3가지 모델로써 충분하다. 그러나

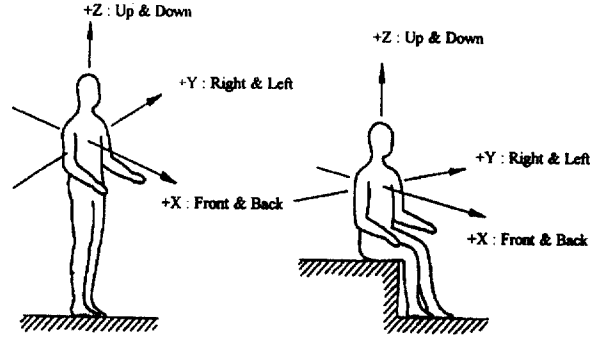


Figure 2. Coordinate systems for human vibration as defined in ISO 2631.

본 실험에서는 진동 신호를 녹음하는 테이프 레코더가 6개의 채널을 사용하므로 구성상 1가지 자세에 대하여 가속도계의 설치 위치를 두 가지로 조합하였다. 따라서 전동차의 바닥을 기준으로 하여 4가지 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(Griffin, 1978). 전동차 내에서 피실험자와 측정자의 위치는 운전석이 있는 첫번째 차량이며 피실험자는 23세의 남자로 키 178cm, 몸무게는 70kg이다. 각 방향에 따른 진동치를 비교하기 위해서 그림 2와 같이 국제표준기구(International Organization for Standardization, ISO 2631, 1985)에 명시된 인체 진동에 대한 좌표축을 이용하였다. 서 있는 모델의 경우 X 방향은 인체의 전후 방향(front & back)을, Y 방향은 인체의 좌우 방향(right & left)을, Z 방향은 인체의 상하 방향(up & down)으로 표시한다. 앉아 있는 모델의 경우 지하철의 좌석 배치로 인해 서 있는 모델을 기준으로 오른쪽으로 90° 돌아 앉아 측정하였다. 1번 모델의 경우 조종석 후면 약 2m 위치에서 +X 방향

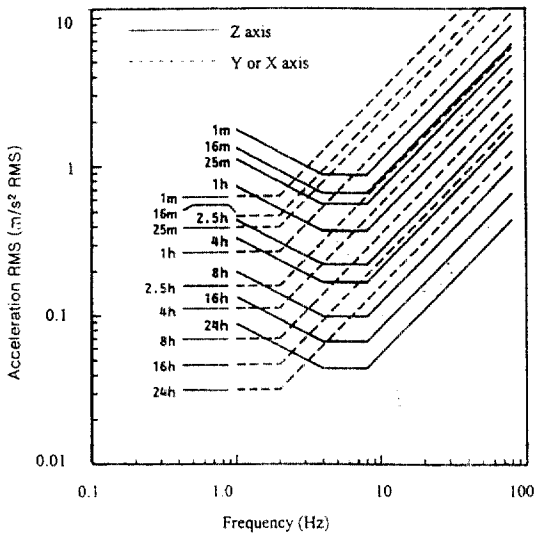


Figure 3. Reduced comfort boundaries for translational vibration as defined in ISO 2631

이 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 진동 크기에 대한 평가를 위해 국제표준기구(ISO 2631, 1985), 영국표준연구소(British Standards Institute, BSI 6841, 1987), 미국 산업위생사 협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGHI, 1996) 등에서 기준이나 방법을 제시하고 있으나 우리나라는 기준이 없는 상황이다. 본 연구에서는 1985년 ISO에서 발행한 전신진동 노출평가 지침서(ISO 2631, 1985)를 참고하였으며 그림 3에 기준축과 주파수에 따른 안정감 감소 수준(reduced comfort boundaries)을 나타내었다. 전후, 좌우 방향은 1~2 Hz, 상하 방향은 4~8 Hz의 외부 진동에 대해 가장 민감함을 보여주고 있다. 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 그림 3에서와

같이 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(정완섭, 1996). 첫번째는 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 실효치(RMS; root mean square)값이다. 두번째 방법은 첫번째 방법에서 측정된 가속도 값에 주파수 보정치와 축방향 보정치를 고려한 값으로써 다음과 같이 정의된다.

$$RSS_n = \sqrt{1.4 a_{u,v}^2 + 1.4 a_{u,y}^2 + a_{u,z}^2}$$

여기서 RSS_n 는 root sums of squares의 약자이다. $a_{u,v}, a_{u,y}, a_{u,z}$ 는 X, Y, Z 방향의 진동 가속도 실효치로서 주파수 가중된 값(frequency weighted value)이며 계수 1.4는 X, Y 축방향의 보정치(axis multiplying factor)를 나타낸다. 이렇게 계산된 RSS_n 값은 ISO 2631에서 정한 폭로 기준을 통해 하루 동안의 진동 노출 허용 시간을 산출할 수 있다.

3. 실험 방법

1) 실험 기구 및 장치

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

본 실험에서는 덴마크 B&K 사의 삼축가속도계(type 4321, T 가속도계로 표시)와 미국 자동차 학

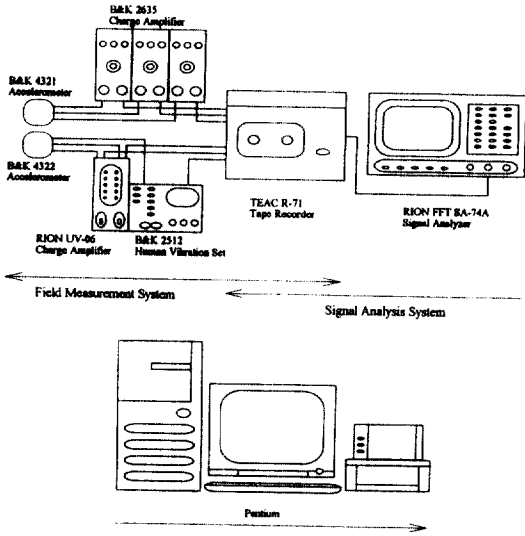


Figure 4. Schematic diagram of instrument setup.

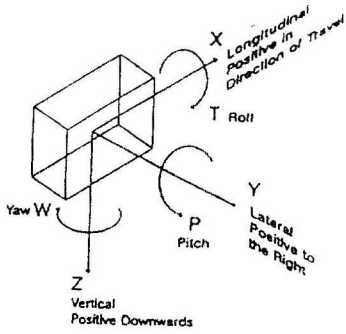
회(Society of Automotive Engineers: SAE)에서 제시한 SAE pad형 가속도계 (Griffin, 1990; ISO 7096, 1982a; B&K type 4322)의 내부에 있는 삼축 가속도계(P 가속도계로 표시)를 사용하였다. 머리 부분에 가속도계를 고정하기 위해 오토바이용 경량 밀착 헬멧을 사용하였으며(Griffin, 1990) 헬멧 위에 직경 2cm 둥근 철판을 고정시켜 가속도계 바닥의 자석으로 고정하였다. T 가속도계의 고정은 전동차 바닥과 좌석 시트 표면에 왁스(bee wax) 혹은 양면 접착 테이프로 고정하였다. T와 P가속도계의 6 방향에서 출력되는 가속도 신호를 증폭하기 위해 B&K사의 신호 증폭기(charge amplifier ; type 2635) 3대와 인체 진동계(humanresponse vibration meter: type 2512) 그리고 RION사의 신호 증폭기(모델 UV-06)를 사용하였다. T 가속도계에서 출력된 X, Y, Z 세 개의 신호를 type 2635 증폭기 3대에 연결하여 테이프 레코더의 1, 2, 3번 채널에 각각 할당하였다. P 가속도계에서 출력된 신호들 중 X, Z 신호는 UV-06 증폭기에 연결하여 4, 6번 채널에, 그리고 Y 신호는 type 2512 인체 진동계에 연결하여 5번 채널에 각각 할당하였다. 실험 상황을 기록하기 위하여 7번째 채널에 마이크로폰으로 실험 순서와

외부 요인들에 대한 설명을 녹음하여 재생시켰다. 증폭기와 FFT 신호 분석기의 초기설정을 위해서 RION사의 진동교정계(calibration exciter) VE-10 모델을 사용하였다. 교정 신호는 159.8 Hz, 10 m/s^2 RMS의 가속도 신호가 출력되었다. 측정 신호를 장기적으로 저장하고 향후 분석을 위해서 TEAC사의 FM 테이프 레코더 R-71 모델을 사용하였다. 카세트 테이프는 한국 스마트 사의 SK 90 normal position 7개, SF 60 normal position 4개를 사용하였다. FM 테이프 레코더에 녹음된 진동 데이터는 실험실 내에서 RION사의 SA-74A FFT 신호 분석기를 이용하여 진동 레벨과 주파수 분석을 수행하였다. 인체 진동계에서 분석한 결과를 출력하기 위해 B&K사의 2312 프린터(type 2312)를 이용하였으며 SA-77 신호 분석기의 결과출력은 RION CP-10R 프린터를 사용하였다. 실험 장비를 이동식으로 구성하기 위해 손수레(cart)에 싣고 이동할 때 바닥과의 마찰을 줄이기 위해 스폰지 팩을 이용하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 각 노선별 전동차 바닥의 진동 수준

차량 진동을 바닥에 설치된 삼축 가속도계를 이용하여 측정하였으며 차량의 진동 좌표는 그림 5와 같다. 각 노선에서 측정된 전동차 바닥의 진동 수준을 그림 6에 나타내었다. 평균값은 1, 2, 3, 6 번 모델에서 바닥에 설치된 T 가속도계에서 출력된 신호를 분석하여 각각을 기록한 후 산술평균(정일록, 1994)을 하였다. 전 노선에 걸쳐 진동의 양상과 크기는 비슷한 경향을 나타내며 3호선의 상하 방향의 진동이 제일 크며 차량의 전후 방향이 가장 적고 상하 방향이 가장 높은 수준을 나타내었다. 4개 노선의 평균값은 차량의 전후 방향으로 0.12 m/s^2 , 좌우 방향으로 0.16 m/s^2 , 상하 방향으로 0.31 m/s^2 이었으며 상하 방향의 진동 가속도가 좌우 방향의 약 2배, 전후 방향의 약 3배 가량 높게 나타났다. 차량의 전후 방향 가속은 주로 가속, 감속에 의한 관성에 의해 발생하며 좌우 방향의 가속은 좁은 바퀴 폭에 의한 전동



- + Longitudinal : positive in direction of travel;
- + Lateral : positive to the right
- + Vertical : positive downward
- + Roll : clockwise rotation of longitudinal direction
- + Pitch : clockwise rotation of lateral direction
- + Yaw : clockwise rotation of vertical direction

Figure 5. Coordinate system of subway train.

차의 롤링 운동 그리고 선회 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.

2. 서 있는 자세(standing)

피실험자의 +X 방향을 전동차의 진행 방향과 일치시킨 상태로 서 있는 자세에서 측정된 머리 부분의 진동 결과는 그림 7에 나타내었다. 2호선의 좌우 방향과 3호선의 수직 방향을 제외한 다른 노선에서 진동의 양상과 크기는 비슷하게 나타났다. 평균값은 전후 방향 0.09m/s^2 , 좌우 방향 0.29m/s^2 , 상하 방향 0.18m/s^2 정도의 수준으로으로서 바닥에서의 진동치와 비교할 때 전후 방향은 25% 정도 감소, 좌우 방향은 81% 정도 증가, 상하 방향은 42% 정도의 감소를 나타내었다. 상하 방향에 비하여 좌우 방향의 진동 증가율이 크게 나타난 이유는 차량이 진행할 때 인체의 다리나 허리 부분에서 상하 진동 일부를 흡수하는 반면 좌우방향으로는 차량의 롤링 운동에 의한 진동이 위쪽으로 갈수록 증가되기 때문이다.

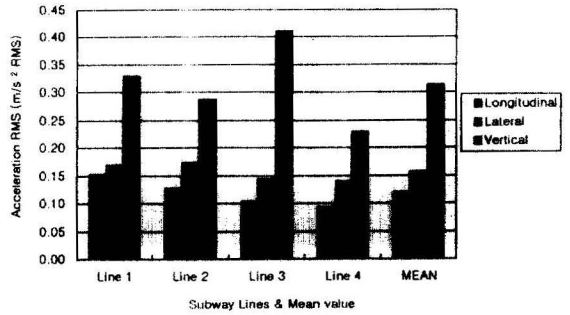


Figure 6. Vibration level of subway floor.

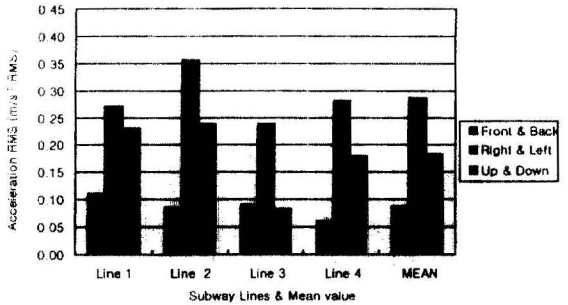


Figure 7. Vibration level of head in standing model.

3. 등을 기대고 앉은 자세(back-seat on)

피실험자가 3, 5번 모델과 같이 좌석에 앉아 등을 기대고 있는 자세를 취할 경우 전신 진동 좌표계의 +Y 방향이 전동차의 진행 방향과 일치한다. 5번 모델에서 좌골 부위에 설치된 T 가속도계의 출력을 분석한 결과를 그림 8에 나타내었다. 평균값은 인체의 좌우 방향 가속도 0.13m/s^2 , 전후 방향 가속도 0.18m/s^2 , 상하 방향 가속도 0.17m/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(그림 7)과 비슷한 양상을 보이고 있다. 3, 5번 모델에서 머리에 설치한 P 가속도계의 출력을 분석한 결과를 그림 9에 나타내었다. 평균값은 인체의 좌우 방향 가속도 0.38m/s^2 , 전후 방향 가속도 0.07m/s^2 , 상하 방향 가속도 0.15m/s^2 로 각각 나

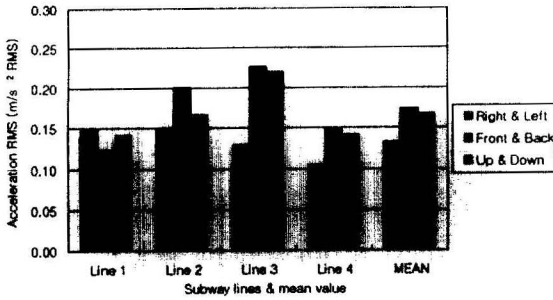


Figure 8. Vibration level of ischial in back-seat on model.

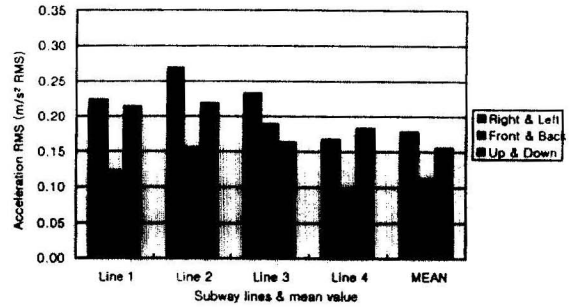


Figure 10. Vibration level of ischial in back-seat off model.

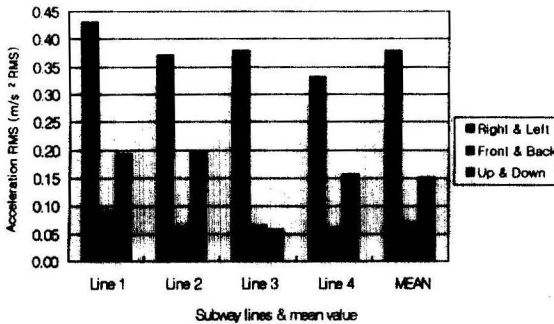


Figure 9. Vibration level of head in back-seat on model.

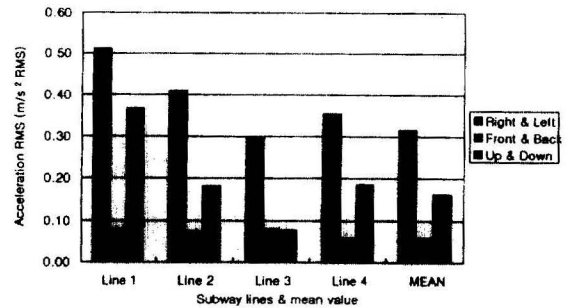


Figure 11. Vibration level of head in back-seat off model.

타났다. 그래프의 양상은 3호선의 상하 방향을 제외하고 좌우 방향으로 가장 많이 증폭되었으며 전후 방향과 상하 방향은 대부분 감소되었다.

4. 등을 기대지 않고 앉은 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 그림 10과 같다. 평균값은 좌우 방향 $0.18m/s^2$, 전후 방향 $0.11m/s^2$, 상하 방향 $0.16m/s^2$ 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 그림 11에 나타내었다. 평균값

은 좌우 방향 $0.32m/s^2$, 전후 방향 가속도 $0.06m/s^2$, 상하 방향 가속도 $0.16m/s^2$ 로 각각 나타났으며 등을 기대고 앉은 경우의 머리 진동과 전체적으로 비슷한 양상을 나타내고 있다. 그래프의 양상은 3호선의 상하 방향을 제외하고 등을 기대고 앉아 있는 경우와 비교했을 때 좌우 방향으로 15.8% 감소되었으며 전후 방향과 수직 방향은 거의 비슷한 값을 보이고 있다.

5. 진동의 인체내 전달

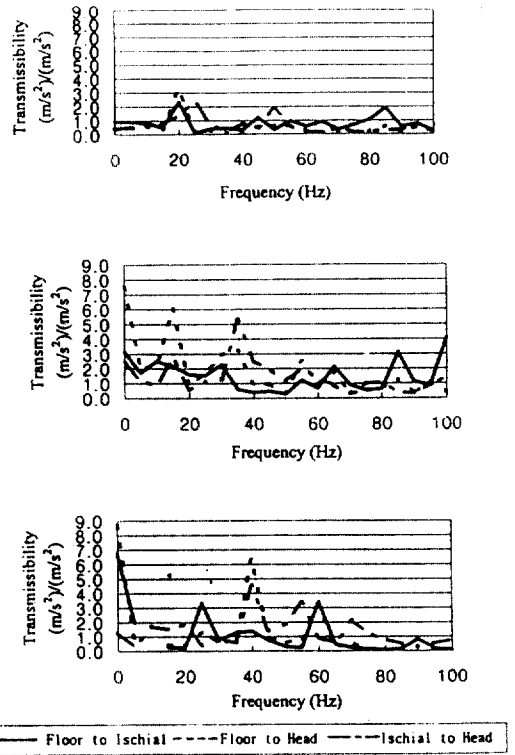
주파수 분석 결과를 토대로 진동의 인체 전달율을 계산한 결과를 그림 12에 나타내었다. 좌우 방향의 경우 20Hz 부근의 주파수에서 바닥에서 머리 부위, 바닥에 좌골 부위, 좌골에서 머리 부위 순으로 모두 1.0 이상의 전달율을 보이고 있다. 20Hz를 제외한 범위에서는 50Hz에서 좌골에서 머리 부위 그리고

70Hz에서 바닥에서 좌골 부위로의 전달율이 1.5 이상 나타날 뿐 대부분 범위에서 1.0 이하의 감소되는 경향을 나타내었다. 그러므로 등을 기대고 앉아 있는 자세의 좌우 방향 진동의 경우 20Hz 부근을 중점적으로 제진 설계하면 전동차의 승차감 향상에 효과가 있을 것으로 판단된다. 그러나 전후 방향의 경우 거의 대부분의 주파수 영역에 걸쳐 1.0 이상의 전달율을 나타내고 있으며 특히 40Hz 이하의 주파수 범위에서 바닥에서 머리 부위, 좌골에서 머리 부위로의 전달율이 5.0을 넘고 있다. 이는 실험 결과 3), 4) 절 앉아 있는 자세의 전후 방향 진동 수준의 원인에 기인함을 잘 나타내고 있다. 상하 방향의 경우 1Hz 이하의 범위에서 바닥에서 머리 부위, 바닥에서 좌골 부위로의 전달율이 6.0을 초과했으며 40Hz 부근 범위에서 바닥에서 머리 부위, 좌골에서 머리 부위로의 전달율이 4.0을 초과한 것으로 나타났다. 이는 지금까지의 여러 교통수단의 승차감에 관한 연구 결과들이 상하 방향 진동이 인체에 미치는 영향에 집중되었음에도 불구하고 지하철 전동차 좌석의 제진에 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

6. 승차감 평가

실험 방법 2), 3) 절의 전신 진동 평가 기준에 의해 승차감 평가 지표로서 각 방향에 대한 진동을 고려한 실효치(RMS overall)값을 계산하였다. 표 2에 각 노선과 모델에 따른 요소들의 가속도 값과 승차감 평가 지표를 정리하였다.

RMS overall 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. 이는 등을 기대고 앉아 있는 자세의 경우 0.07 m/s^2 정도, 등을 기대지 않고 앉은 경우 0.05 m/s^2 정도의 승차감 향상 결과를 보인다. 좌골 부위에서의 진동값은 바닥에 비해서 약간



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

Figure 12. Transmissibility of subway vibrations to body in 3 and 5 sections of line 2

감소하여 승차감이 향상되는 경향을 보이고 있으나 그 효과는 크지 않다. 또한 실험 장치로 인하여 주파수 가중치 및 축방향 가중치를 고려하지 못하였으므로 그림 6과의 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.

Table 2. Acceleration levels of subway system

Posture	Target	Acceleration m/s^2 by direction			RMSoverall (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	0.17	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

IV. 결 론

본 연구에서는 서울 지하철 전동차 바닥의 진동과 이것이 인체에 미치는 영향에 대하여 측정 평가하였으며 다음의 결과를 얻었다.

1. 정속 주행하는 지하철 전동차 바닥의 진동 양상과 크기는 실험 구간 전체에 걸쳐 비슷한 경향을 나타내며 3호선 상하 방향의 진동이 제일 크다. 4 개 노선의 평균값은 전동차의 진행 방

향, 폭 방향, 상하 방향이 각각 0.12, 0.16, $0.31m/s^2$ RMS로 상하 방향의 진동 수준이 가장 큰 것으로 나타났다.

2. 서 있는 자세에서 머리 부위의 가속도 수준은 평균값은 전후 방향 $0.09m/s^2$, 좌우 방향 $0.29m/s^2$, 상하 방향 $0.18m/s^2$ 정도의 수준으로로서 바닥에서의 진동치와 비교할 때 전후 방향은 25% 정도 감소, 좌우 방향은 81% 정도 증가, 상하 방향은 42% 정도의 감소를 나타내었다.

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. 이는 좌골 부분에서의 좌석 마찰과 등 부분에서의 등받이의 구속이 있는 반면 좌우 방향의 운동은 자유롭고 목 부분의 강성이 약하므로 머리 부분의 진동이 증폭되었기 때문이다.
4. 등을 기대지 않고 앉아 있는 경우 등을 기대는 경우에 비해 좌골 위치에서는 전후 방향보다 좌우 방향에서 진동이 크게 나타난다. 등을 기대는 경우에 비해 머리 부분 좌우 방향의 크기는 조금 감소되었으며 다른 방향의 경향은 비슷하며 전후, 상하의 크기는 등을 기대고 앉은 자세와 거의 같다.
5. 전달을 분석 결과 의자에 앉아 있는 자세에서 좌골에서 머리까지의 전달율은 상하 방향에서 전반적으로 가장 높은 값을 나타내고 있다.
6. RMS overall 값을 통해 바닥에 대한 좌골 부위의 승차감을 평가한 결과 등을 기대고 앉아 있는 자세의 경우 0.07m/s^2 정도의 승차감 향상, 그리고 등을 기대지 않고 앉은 자세의 경우 0.05m/s^2 정도 승차감의 향상 결과를 보였다. 좌골 부위에서의 진동값이 바닥에 비해서 약간 감소하여 승차감이 향상되는 경향을 보이고 있으나 그 효과는 크지 않다. 좌골에서의 진동을 0.28m/s^2 으로 간주하면 1 시간 정도 탑승시 쾌감이 감퇴하고, 승무원 같이 7~8시간 계속 탑승하면 피로 감퇴 한계에 접근하는 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

전성택 : 소음진동편람 진동편, 서울, 도서출판 동화기술, 1992

정완섭, 우춘규, 박세진, 김수현 : 자동차 의자류의 진동 전달특성에 대한 실험적 연구. 한국소음진동공학회 1996년도 추계학술대회논문집, 1996; 365-370.

정일록 : 소음 진동학, 서울, 신광출판사, 1994

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) : Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, 1996

Amirouche ML, Xie M, Patwardhan A : Optimization of the Contact Damping and Stiffness Coefficients to Minimize Human Body Vibration, J. of Biomechanical Engineering, 1994;116: 413-420

British Standards Institute : Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole Body Mechanical Vibration and Repeated Shock(BSI 6841), 2 Park Street, London W1A2BS. U.K., 1987

Dimarogonas AD, Haddad S : Vibration for Engineers, New York, Prentice Hall, 1992

Edwards T, Hayes WC, Posner I : Variation of Lumbar Spine Stiffness with Load, J. of Biomechanical Engineering, 1987;109:35-42

Foel VK, Park HS and Kong W : Investigation of Vibration Characteristics of the Ligamentous Lumbar Spine Using the Finite Element Approach, J. of Biomechanical Engineering, 1994;116:377-383.

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

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

International Organization for Standardization : Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration(ISO 2631) - Part 1 : General Requirements, 1 rue de Varembe, Case Postale 56, CH-1211, Geneve 20, Switzerland, 1985

Paddan S, Griffin MJ : The Transmission of Translational Seat Vibration to the Head - Part I Vertical Seat Vibration, J. of Biomechanics, 1987;(3) :191-197

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

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

Rao SS : *Mechanical Vibrations*, New York, Addison
Wesley, 1992

Sanders MS, McCormick EJ : *Human Factors in
Engineering and Design*, McGRAW-Hill Inc, Singapore,
1994