

서울 지하철역사 주변의 진동전파특성에 관한 연구

(2호선 강남역, 교대역, 3호선 교대역)

* 김석홍*, 이성춘*, 김준호*

(A Study on the Characteristics of Vibration Propagation in Seoul Subway Line 2,3)

(Seok-Hong Kim, Seong-Choon Lee and Jun-Ho Kim)

1. 서론

최근 서울에서는 날로 심각해지는 교통난 해소대책으로 현재 운행중인 1-4호선 외에 5-8호선의 공사가 한창 진행중이다. 이러한 지하철 통과 인접지역에서는 지하철 운행 진동으로 인하여 상부나 인접 건물에 진동 영향이 우려되는 경우가 많으며 이에 대한 대책으로 지하철 궤도부를 방진하거나 상부의 건물을 지하철 구조체로부터 진동 절연하는 방법이 검토되고 있다. 이러한 대책 수립시에는 대책후의 진동예측이 필요하며 지하철의 진동특성 입력 데이터 확보가 필수적이다.

본 연구에서는 이러한 필요성에 따라 서울의 2호선 강남역과 교대역, 3호선 교대역 궤도부 주변 바닥과 벽체, 플랫폼, 표파는층의 바닥에서 지하철 통과시의 전후, 좌우, 상하방향의 진동을 측정 분석하여 추후 지하철 진동저감대책 수립에 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 지하철 진동측정 개요

2.1 지하철 궤도부 구조 개요

지하철 역사 내부의 궤도구조와 역사와 역사 사이의 궤도구조는 큰 차이가 있으며 이를 정리하면 표 1. 과 같다. 측정대상인 지하철 2호선과 3호선 궤도부 구조는 거의 비슷하다.

표 1. 지하철 부위별 궤도부 구조의 차이 비교

구 분	역사 내부	역사와 역사 사이
레 일	장대 용접 레일	일반 레일 이음
바 닥	콘크리트	자갈
침 목	목재	콘크리트

2.2 측정 개요

본 측정은 신축 지하철 역사 상부에 건설되는 복합건물의 방진에 사용하기 위한 지하철진동 데이터를 수집하기 위한 목적으로 이루어졌으며 역사와 역사 사이의 구간에서는 측정을 하지 못하고 접근과 대피가 비교적 용이한 역사의 플랫폼 끝부분을 측정대상 지역으로 선정하였다.

측정은 1993년 5월 25일 - 5월 26일의 평일에 실시하였으며 측정기간중의 온도는 22-25°C, 습도는 60% 정도였다. 표 2.에 지하철 진동 측정개요를 나타낸다.

표 2. 지하철 진동측정 개요

역사	지역	위치	위치 색인 기호	측정 방향			
				X	Y	Z	
2호선 강남역	궤도부 주변	측벽	2RW	○	○	○	
		레일 중앙 바닥	2RF	○	○	○	
		내선, 외선 사이 바닥	2RFM	○	○	○	
		내선, 외선 사이 기둥	2RFC	○	○	○	
	플랫폼	측벽	2PW	○	○	○	
		바닥	2PF	○	○	○	
	표파는층 플랫폼 1개층상부	슬라브 단부 바닥	2TFE	○	○	○	
		슬라브 중앙 바닥	2TFC	×	×	○	
	2호선 교대역	궤도부 주변	측벽	T2RW	○	○	○
			도착선레일 중앙바닥	T2RF1	○	○	○
출발선레일 중앙바닥			T2RF2	○	○	○	
내외선 사이 바닥			T2RFM	○	○	○	
플랫폼		측벽	T2PW	○	○	×	
		바닥	T2PF	×	×	○	
표파는층 플랫폼 1개층상부		슬라브 단부 바닥	T2TFE	○	○	○	
		슬라브 중앙 바닥	T2TFC	×	×	○	
3호선 교대역		궤도부 주변	측벽1(역사끝에서35m)	3RW1	○	○	○
			측벽2(역사끝 위치)	3RW2	○	○	○
	레일 중앙 바닥		3RF	○	○	○	
	플랫폼	바닥	3PF	○	○	○	
		표파는층 플랫폼 2개층상부	슬라브 단부 바닥	3TFE	×	○	○
	슬라브 중앙 바닥		3TFC	×	×	○	

○ : 측정실시 × : 측정 미실시

그림 1. - 그림 3. 은 각각 2호선 강남역, 2호선 교대역, 3호선 교대역의 진동측정 위치를 나타낸 것이다. 진동측정은 대부분의 각 측정위치에서 열차진행 전후 X방향, 열차진행 좌우 Y방향, 상하 Z방향의 3방향에 대하여 실시하였으며 1개 측정점에서 5회 이상 반복 측정하였다.

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소, 정희원

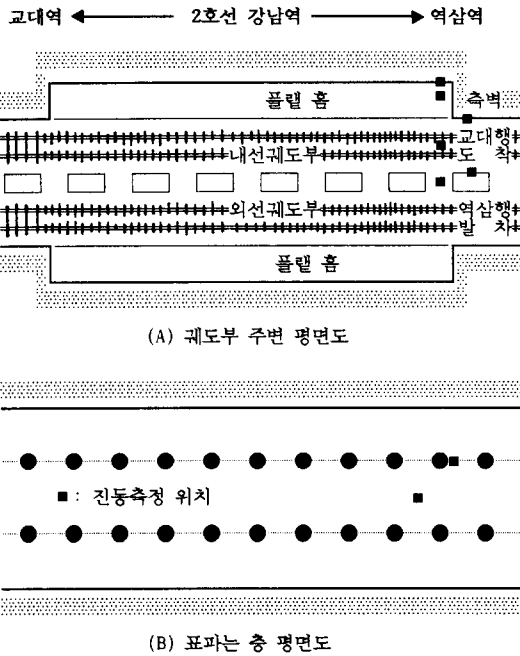


그림 1. 2호선 강남역 진동 측정위치

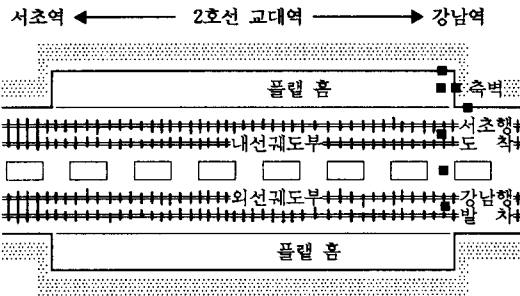


그림 2. 2호선 고대역 진동 측정위치

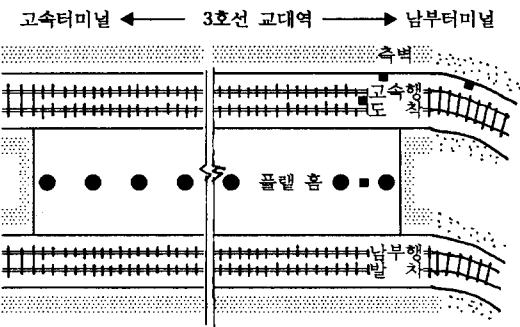


그림 3. 3호선 고대역 진동 측정위치

진동가속도 센서는 콘크리트 구조체에 30mm 정육면체의 금속을 순간접착제로 고정한 후 이 위에 자석으로 부착하였다.

진동신호는 현장에서 테이프 레코딩한 후 실험실에서 FFT를 이용하여 Peak Averaging하여 협대역 주파수 분석을 하였으며 이 협대역 진동가속도 데이터를 컴퓨터에 전송하여 1/3 옥타브 대역 진동가속도로 변환하였다. 진동측정 분석 시스템은 그림 4.와 같이 구성하였다.

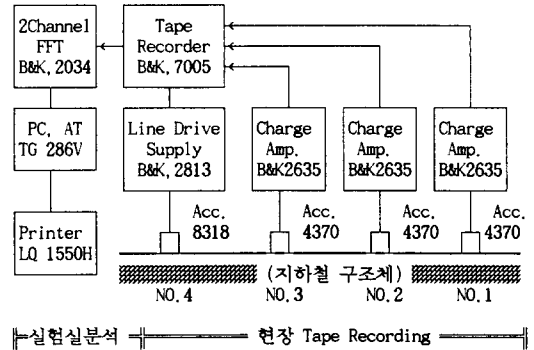


그림 4. 지하철진동 측정분석 시스템 구성도

3. 지하철 진동 측정결과 및 분석

3.1 시간변동 특성

지하철 역사에서 발생하는 진동은 지하철의 진입, 출발속도 차량 및 레일의 유지보수 상태에 따라 각 열차별로 상당한 차이를 가지고 있다. 그림 5.는 지하철 2호선 고대역의 레일설치 콘크리트 바닥의 진동 시간변화 특성을 나타낸 것으로 (A) (B), (C) 그래프는 각각 서초행열차 진입시, 강남행열차 출발시 서초행열차 도착후 강남행열차 출발시의 경우를 나타낸다.

열차 도착, 출발 및 교차 모든 경우에 뚜렷한 진동주기 변화특성을 보이고 있으며 이는 역사내부의 장대 용접레일 바깥쪽의 역사와 역사 사이 레일에 설치되어 있는 기존의 일반레일 이음에서 열차바퀴가 지나갈 때 발생하는 충격진동으로 그 충격횟수가 열차 차량수와 같은 10개 정도로 나타나고 있다.

진동크기는 열차 도착 초기와 열차 출발 끝부분에서 큰 값을 보여 열차속도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 도착 시보다 출발시에 더 큰 진동이 발생하는 것으로 나타났다.

3.2 진동측정 위치별 Overall 진동크기 변화

그림 6. (A), (B), (C)는 각각 2호선 강남역, 2호선 고대역 3호선 고대역의 측정위치별 측정반복횟수에 따른 Overall진동 변화 특성을 나타낸다. 2호선 강남역과 2호선 고대역의 경우 전후 X방향과 좌우 Y방향 진동은 대부분의 위치에서 20gal 이하의 값을 보이고 있으며 3호선 고대역의 경우에는 X, Y 방향 진동이 최대 30gal 정도의 값을 보이고 있다. 2호선 강남역, 고대역의 상하 Z방향 진동은 위치별, 측정반복횟수별로 큰 차이를 보이고 크기도 최대 178 에 이르고 있으나 3호선 고대역의 Z방향 진동은 비교적 적은 진동크기를 보이고 있다.

이는 지하철 구조체의 지반 인접여부와 콘크리트, 타일, 테라조 물갈기 바닥 마감면등의 마감면 구조차이에 따른 것으로 판단된다.

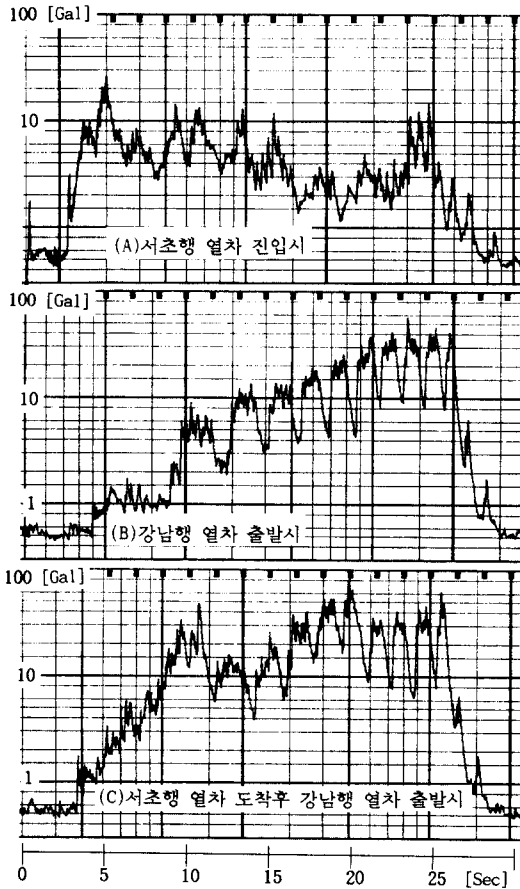


그림 5. 궤도부바닥 진동의 시간변동 특성 (2호선 교대역)

3.3 열차별 진동크기 변화

동일방향의 동일차량수 편성열차라 하더라도 각 열차의 기계적 특성, 운전속도, 승차인원 및 운전형태 등에 따라 지하철 진동은 크게 달라진다.

그림 7은 2호선 교대역 궤도부 콘크리트 바닥과 표파는층 슬라브 단부 즉 기둥옆에서 측정된 반복측정에 따른 진동크기 변화를 각 방향별로 나타낸 것이다. 궤도부 바닥이나 표파는층 바닥 모두 열차에 따라 Overall 진동크기가 2-4배 정도의 큰 차이를 보이고 있다. 이는 열차의 운행상황이 역사에 진입하는 경우, 상대편 열차가 출발하는 경우, 양방향 열차가 교차하는 경우 등의 운행상황 차이 이외에도 열차마다 진입시 운행속도가 50-70km/Hr 정도로 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다. 주파수 특성도 대략적인 경향은 비슷하나 반복측정에 따라 약간씩 달라지고 있는 것으로 나타났으며 (C), (F) 그래프의 상하 Z방향 진동 피크치가 다르게 나타나는 것은 열차의 도착출발에 따른 것으로 본선열차 도착시에는 60Hz 에서, 상대편 열차 출발시에는 50Hz 에서 피크값을 보이고 있다.

따라서 지하철 진동을 측정평가 하여 방진설계 데이터로 사용하기 위해서는 충분한 반복측정에 의하여 가장 큰 진동치를 찾아낼 필요가 있음을 알 수 있다.

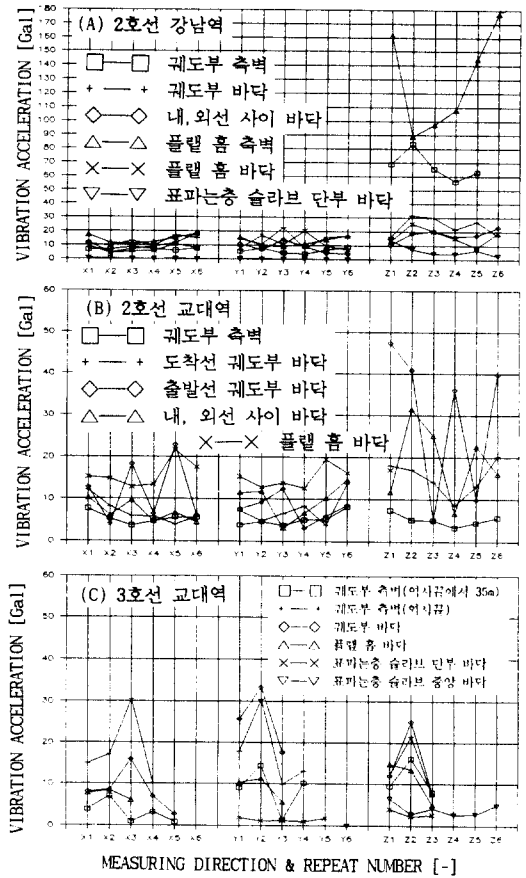


그림 6. 측정 위치별 Overall 진동크기 변화

3.4 역사간 유사위치 진동크기 및 주파수 특성 비교

그림 8. (A)-(D)는 3개 역사의 유사한 위치에서 진동크기 및 1/3 옥타브 대역 주파수 특성을 비교하여 나타낸 것으로 각 측정점의 데이터는 반복 측정된 것을 평균한 것이다.

(A) 그래프의 궤도부 콘크리트 바닥 상하 Z방향 진동의 경우 2호선 교대역에서는 40 - 100Hz 대역에서 피크값을 보이고 있고 2호선 강남역 및 3호선 교대역에서는 100Hz 이상 주파수에서 높은 값을 보이고 있다. 이는 역사별로 지하철 구조체의 강성, Masse 등 진동특성이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

진동크기는 2호선 교대역의 경우 출발선 바닥, 내, 외선 사이 바닥, 도착선 바닥순으로 크게 나타나 도착시의 진동보다 출발시의 진동이 더 큰 것을 알 수 있으며 이는 열차속도에 따른 것으로 생각된다.

(B) 그래프의 궤도부 측벽 좌우 Y방향 진동의 경우 대부분 50Hz 이상에서 큰 값을 보이고 3호선 역사끝 부분의 120 Hz의 피크치는 곡선궤도의 영향과 측벽이 구조체와 떨어져 있는 등의 영향으로 판단된다.

(C), (D) 그래프의 표파는층 슬라브 단부와 중앙 상하 Z방향 진동의 경우 2호선 교대역, 2호선 강남역, 3호선 교대역순으로 높게 나타났다.

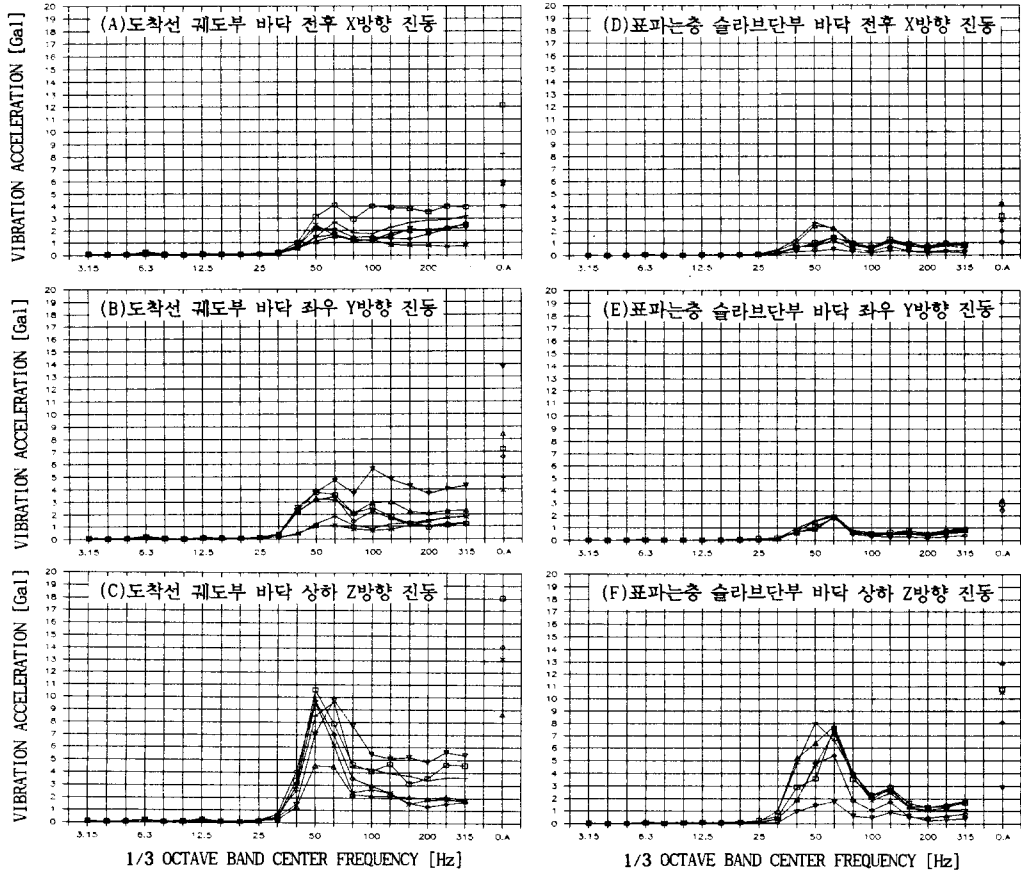


그림 7. 반복측정에 따른 열차별 진동크기 변화 (2호선 교대역)

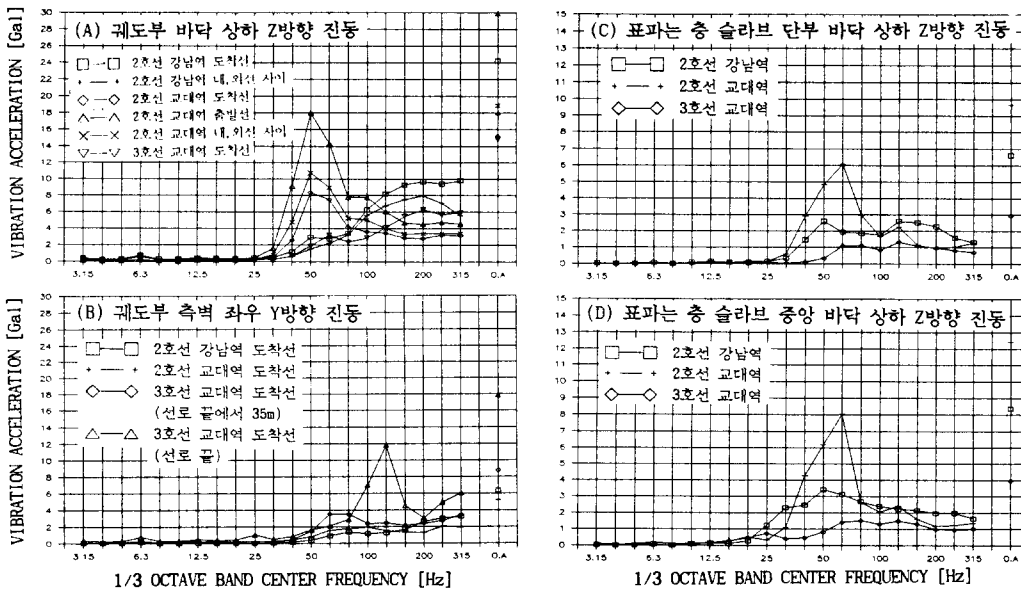


그림 8. 역사간 1/3 옥타브 대역별 진동특성 비교

3.5 궤도로부터의 거리에 따른 진동감쇠 (2,3호선 교대역)

그림 9. (A)-(F)는 2호선 교대역과 3호선 교대역에서의 궤도부, 플랫폼 홈, 표파는 층에 이르는 궤도부로부터의 거리에 따른 각 방향별 진동감쇠 특성을 나타낸 것이다.

대체적으로 궤도부, 플랫폼 바다, 표파는 층 바다 순으로 진동이 적어지는 것으로 나타났으나 궤도부에서 거리가 멀다고 하여 반드시 뚜렷한 진동감쇠를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 이는 열차의 폭 및 길이 등의 치수가 궤도부로부터 각 측정점까지의 수평, 수직방향으로의 최대거리에 비하여 상대적으로 크고 지하철 구조체의 콘크리트 구조가 궤도부 바다, 측벽, 플랫폼 홈 모두 일체로 되어 있기 때문으로 생각된다.

또한 거리에 따라서 주파수 대역별로 일정하게 거리 감쇠가 일어나지 않는 것은 마감면의 재료가 상이하고 마감면이 후면 구조체에 부착되어 있는 상태도 서로 틀려 가속도센서를 설치한 측정점구조체의 진동특성 즉 모빌리티가 다르고 이에 따라 같은 진동에너지를 받더라도 그 진동응답이 다르게 나타나는 것으로 생각된다.

이들 진동방향별로 살펴보면 전후 X방향과 좌우 Y방향 진동은 궤도부 측벽 및 플랫폼 홈 측벽에서 상대적으로 크게 나타나고 상하 Z방향은 궤도부 바다에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

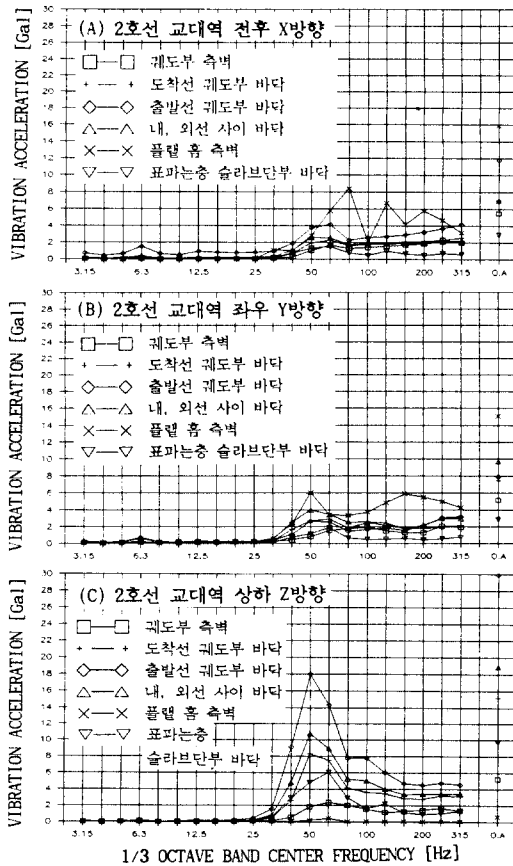


그림 9. 궤도로부터의 거리에 따른 진동감쇠(2,3호선 교대역)

3.6 방향별 진동특성 비교 (2호선 강남역, 2호선 교대역)

그림 10. (A)-(F)는 2호선 강남역과 2호선 교대역의 도착선 궤도부 바다, 궤도부 측벽, 표파는층 슬라브 단부에서의 각 방향별 진동특성을 비교하여 나타낸 것이다.

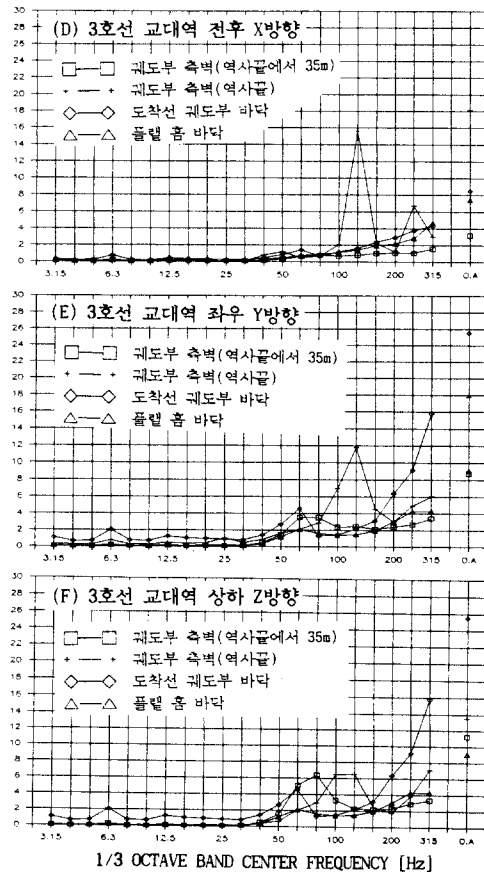
대부분의 위치에서 상하 Z방향이 가장 큰 진동치를 보이고 전후 X방향과 좌우 Y방향은 거의 비슷한 크기를 갖는 것으로 나타났다.

진동방향별 주파수 특성은 2호선 강남역의 경우는 일관성이 없으나 2호선 교대역의 경우에는 각 방향별로 비슷한 주파수 특성을 가지며 피크주파수는 50, 60Hz 인 것으로 나타났다.

4. 결론

1) 지하철 진동의 시간 변동을 고찰한 결과 진동크기는 열차 도착 초기와 열차 출발 끝부분에서 큰 값을 보이는 것으로 나타나 열차속도와 밀접한 관계가 있으며 도착시보다 출발시에 더 큰 진동이 발생하는 것을 알 수 있었다.

2) Overall 진동치는 대부분의 위치에서 30gal 이하의 값을 보이고 있으나 2호선 출발선 바다에서는 Z방향으로 최대 48



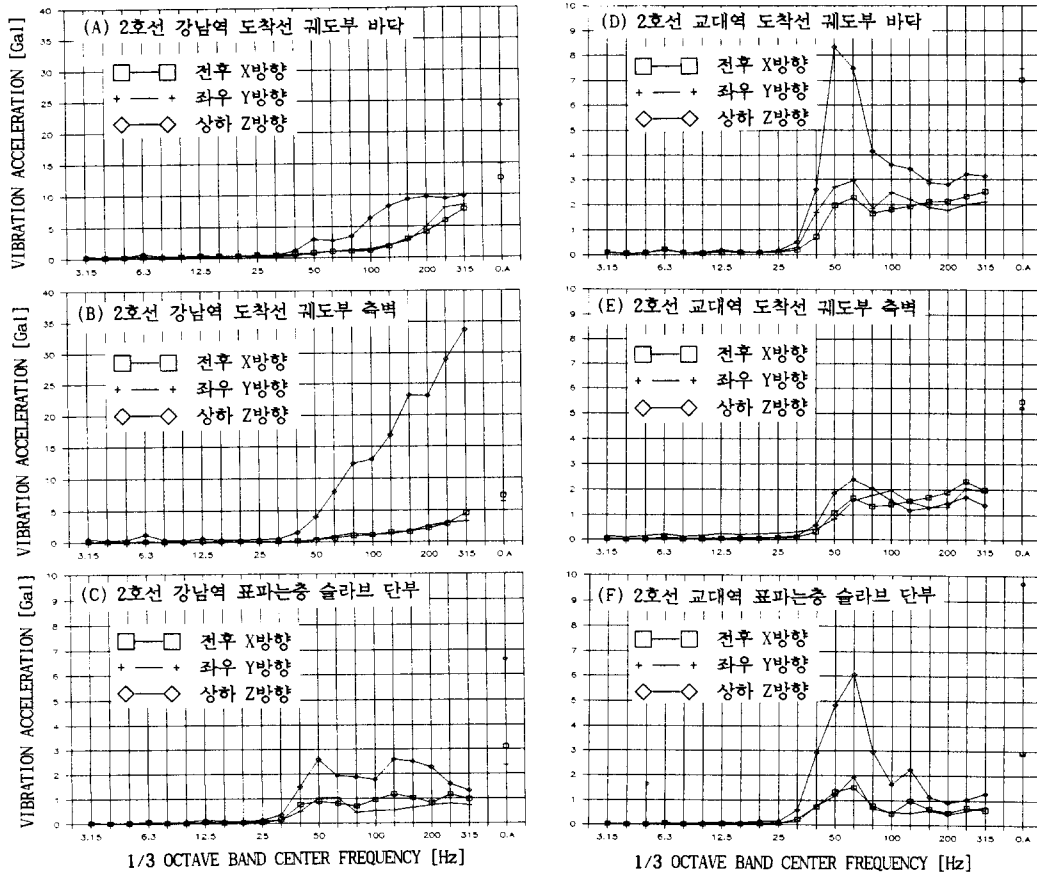


그림 10. 방향별 진동특성 비교 (2호선 강남역, 2호선 교대역)

gal, 2호선 강남역 측벽에서는 Z방향으로 최대 178gal 의 높은 값을 보이고 있는 곳도 있다.

3) 반복측정에 의하여 열차별 진동크기 변화를 살펴본 결과 동일장소에서 최소치와 최대치의 크기가 2-4배 정도의 큰 차이를 보이고 있다.

4) 궤도부 콘크리트 바닥 상하 Z방향 진동은 역사별로 피크 주파수가 다르고 크기도 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났으며 이는 역사별로 지하철 구조체의 강성, Masse 등 진동특성이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

5) 거리감쇠를 검토한 결과 대체적으로 궤도부, 플랫폼 바닥 표파는 층 바닥 순으로 진동이 적어지는 것으로 나타났다.

6) 진동방향별 주파수 특성은 2호선 강남역의 경우는 일관성이 없으나 2호선 교대역의 경우에는 각 방향별로 비슷한 주파수특성을 가지며 피크주파수는 50, 60Hz인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Jun-ichi Yoshihara, Propagation Properties of Subway-induced Vibration, 大林組技術研究所報, No. 43, PP. 21-28
2. K.H. CHUA, T. BALENDRA, Groundborne Vibrations due to Trains in Tunnels, Earthquake Eng. and Structural Dynamics, Vol. 21, PP. 445-460, 1992
3. T. Balendra, Steady-State Vibration of Subway-Soil Building System, J. of Eng. Mechanics, Vol. 115, No. 1 PP. 145-161, Jan. 1989
4. T.M. Dawn and C.G. Stanworth, Ground Vibrations from Passing Trains, J. of Sound and Vibration, 66(3) PP. 355-362, 1979
5. O. von Estorff, Dynamic Response of Tunnel Structures Structural Dynamics, ISBN9061911660
6. 김석홍, 이성춘, 김준호, 경부선 철도 소음진동의 전파특성에 관한 기초연구, 한국소음진동공학회지 제 3 권 제 1 호 PP. 47-55, 1993