

도시지하철 진동이 신축예정 건축물에 미치는 영향에 대한 사전환경평가 기법개발

Development of Pre-assessment Technique for Environmental Impact of Urban Subway Vibration on Newly Planned Buildings

박원형* · 박상규** · 이홍기***

Won-Hyung Park, Sang-Kyu Park and Hong-Ki Lee

Key Words : Environmental Impact(환경영향), Pre-Assessment(사전평가), Urban Subway(도시지하철), Vibration(진동)

ABSTRACT

Urban subways usually make environmental problems because subway vibrations are transmitted to building structures. However, when the buildings are designed, vibrations due to subway are not usually considered in advance. This results in many environmental vibration problems after buildings are constructed. This study was carried out to set up and evaluate a pre-assessment technique for the environmental impact of urban subway vibration on newly planned buildings near a subway line. For this purpose, semi-empirical method was set up and vibration measurements were made on site in accordance with construction schedule. Computer simulation was also performed using ANSYS software to predict the building vibration and compared with the measured results for evaluation of the pre-assessment technique.

1. 서론

지하철은 대부분 주요 건물 및 시설물이 집중되고 인구가 밀집되어 있는 도시의 중심부를 지나므로 지하철 주행으로 인한 진동이 복잡한 경로를 통해 지상에까지 전달되면서 지하철 노선에 인접한 구조물에 진동과 소음을 유발하여 구조적인 측면이나 환경적인 측면에서 여러 가지

문제점이 제기되었다. 특히 국민의 환경의식이 고양되고 쾌적한 생활추구의 욕구가 높아지면서 이러한 문제들에 대한 민원이 급증하고 있으나, 설계시에 지하철이나 열차 등 교통진동으로 인해 발생하는 진동에 대해서는 검토되고 있지 않아 완공후 많은 문제점들이 발생하고 있는 실정이다.

지하철 운행으로 인해 발생하는 진동이 구조물 손상 및 인체에 미치는 영향을 파악하기 위한 평가 방법에는 실험에 의한 방법과 이론을 통한 모델링 방법으로 대별할 수 있다. 그러나 진동원으로부터의 진동이 지반을 통해 건물에 입사할 경우, 지반의 불연속부와 불균질한 특성 때문에 이론적으로 지반 진동의 전파특성을 정확하게 예측하는 것은 거의 불가능하다. 최근 컴퓨터 모델링 기법의 발달에 따라

* 책임저자, 정회원, 연세대학교 대학원
E-mail : skpark@dragon.yonsei.ac.kr
Tel : (033)763-2838, Fax : (033)763-5224

** 정회원, 연세대학교

*** 정회원, (주)RMS

이론적으로 예측하는 기법이 많이 소개되고 있으나 현장 기술자의 입장에서 최소의 노력으로써 설계단계에서 효과적으로 지하철 주변 건물의 진동응답 특성을 예측할 수 있는 방법은 부족한 실정이다.

본 연구에서는 현장 진동 측정치와 컴퓨터 모델링 결과를 혼합한 준경험적 기법(Semi-Emperical Method)¹⁾을 이용하여 공사전 설계 초기 단계에서 구조물에 미치는 영향을 예측 평가하고자 한다. 이를 위하여 공사 시작 전 측정을 통해 지반 및 구조물 물성치, 지하철 진동원의 동적특성, 지표면에서의 진동레벨 데이터를 확보하였으며, 컴퓨터 해석 결과와 비교하여 모델을 완성하였다. 이 모델을 바탕으로 건물 완공후 예상되는 지하철 인접 구조물에서의 진동응답을 예측 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 절차

본 연구를 수행하기 위해서 공사 전 진동 측정을 수행하고 이 결과를 이용하여 컴퓨터 모델을 구성하였다. 구성된 모델을 이용하여 공사 후 예상되는 환경진동레벨을 예측 평가하였다. 모델의 검증은 위해서 공사 진행 단계별로 측정을 통하여 예측결과와 비교한다.

진동 측정의 경우, 지하철 주변 건물에 대해 지반, 기초 슬래브, 지하 1,2층, 지상 1층 바닥에서 공사단계별로 측정하고 지하철에서의 진동이 지반을 통하여 건물로 전달된 전달함수를 구하여 수직진동응답의 변화를 파악하였다. 측정 단계에 따라 해석을 수행하여 측정 결과치와 전달함수를 비교함으로써 해석방법의 타당성을 검증하고 효과적인 해석방법을 제시하였다. 제시된 해석방법을 이용하여 실제 구조물이 완공된 후에 예상되는 진동응답을 예측하였다.

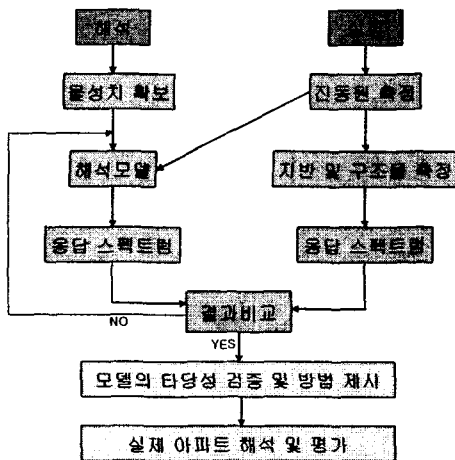


Fig. 1 Procedure

2.2 측정

(1) 측정 장비

진동 측정 및 분석에 사용되는 장비로는 신호를 측정하는 가속도계(Accelerometer), 변환된 신호를 입력범위로 조정하는 신호증폭기(Amplifier), 측정시 데이터를 녹음을 할 수 있는 녹음기(Recorder), 신호처리를 할 수 있는 분석장치(Analyzer)가 있다. 또한 측정의 정확성을 기하기 위해 steel를 소재로 한 가속도계 받침대 등이 있다.

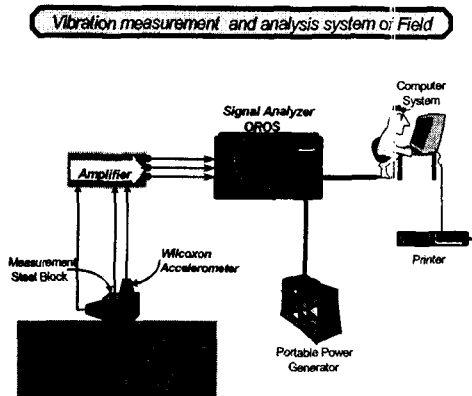


Fig. 2 Vibration measurement equipments

(2) 진동원 측정

지하철 3호선 열차의 진동량 및 진동원 특성을 파악하고, 컴퓨터 해석시에 진동원(Source) 자료로 이용하기 위해 침목 위 레일 가운데에 가속도계를 설치하고 터널 밖에서 수회에 걸쳐 측정·녹음하였다. 그리고, 지하철 운행으로 인한 영향을 비교·파악하기 위해 지하철이 운행되지 않을 때도 측정을 실시하였다.(Fig. 3 참조)

진동원 이외에 다른 진동(특히, 공사시 발생하는 진동)의 영향을 배제하기 위해서 측정은 밤 시간대와 새벽 시간대에 수행하였다. 측정의 정확성을 위해 가속도계 받침대를 사용하였으며 강력 접착제를 이용하여 침목 바닥에 고정시켰다. 측정된 가속도 응답은 Data Recorder를 이용하여 저장한 후 실험실에서 분석을 실시하였다.

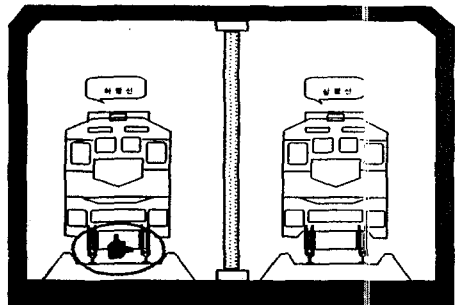


Fig. 3 Measurement location of subway vibration

지하철 1대가 통과할 때의 가속도를 시간영역에서 측정 후 푸리에 변환(FFT 변환)을 실시하여 주파수대역으로 변환하고, 가속도 실효치를 구하여 진동가속도 레벨 및 진동레벨을 구하였다. 실험 데이터는 1Hz에서 100Hz까지 분석하였다.

(3) 수진측 측정

지하철이 통과하는 구간과 가까운 곳에 위치해 있고 진동으로 인한 영향이 가장 클것으로 예상되는 지점 3곳을 선정하여 측정하였으며, 위치는 Fig.4와 같다.

NO1지점은 O동 아파트로 실제 주민들이 생활하도록 계획되어 있는 위치에서 측정하였으며, 지하철 터널 벽체와 아파트 구조물 외벽체와의 거리는 7.6m이며 벽체에서 측정지점까지의 거리는 8.0m로 총 이격거리는 15.6m이다. NO2지점은 지하주차장으로 실제 주민에게 미치는 영향은 미미하지만 지하철 운행구간과 가장 가까운 곳에 위치해 있어 구조물의 손상 측면을 고려하여 선정하였으며 이격거리는 총 11.0m이다. NO3지점은 NO2지점과 단면상으로 동일한 선상(Fig 4.6 참조)에 위치해 있어 수평거리별 감쇠 특성을 파악하기 위해 선정하였으며, 이격거리는 총 19.0m이다.

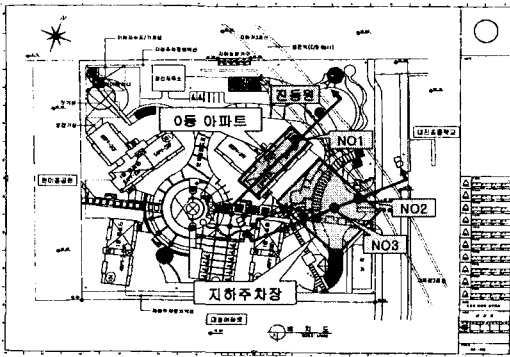


Fig. 4 Measurement locations of an apartment

3. 결과

3.1 측정 결과

지하철이 통과하는 동안 여러번의 측정을 통해 최대 영향을 파악하기 위해 가장 높은 값을 제시하였다(Table 1). 운지하철이 운행되지 않을 때는 1.1cm/s²로 나타났으나 운행시에는 가속도값이 58.6cm/s²로 증가하였다. 동일한 방법으로 아파트 구조물에서의 측정을 수행하였다.

Table 1 Measurement results at subway sleeper

구 분	overall		1/3 octave	
	가속도 (cm/s ²)	속도 (mm/s)	VAL (dB)	VL (dB(V))
운행시	58.6	2.39	94.0	79.6
미운행시	1.1	0.34	60.4	56.5

3.2 컴퓨터 모델링

지하철 운행으로 인하여 인접 구조물에 미치는 영향을 예측하고자 해석적인 방법으로 유한요소해석(FEM) 프로그램인 ANSYS 5.5를 이용하였으며 해석에 사용된 Element는 2D-PLANE42(Quad 4node)를 사용하였다. 구조물의 모델링은 지하철이 통과하는 구간과 가장 인접하는 2개구역 3개지점을 선정하여 적용하였으며, 측정지점과 동일한 위치에 대하여 수행하였다. 실제 운행되는 지하철 측정에서 나온 결과치를 이용하여 해석시 진동원(Source)으로 결정하였으며 구조물 모델링은 설계단면도를 이용하였다. 지반 모델링에 있어서는 각 단면별로 조사한 지질조사보고서를 참조하여 적용하였으며, 지질조사보고서를 바탕으로 하여 각종 조사자료의 대표적인 물성치를 참고로 지반 단면을 모델링하였다. Fig.5와 Table 2는 터파기공사가 완료된 시점에서의 예측 모델 및 결과이다.

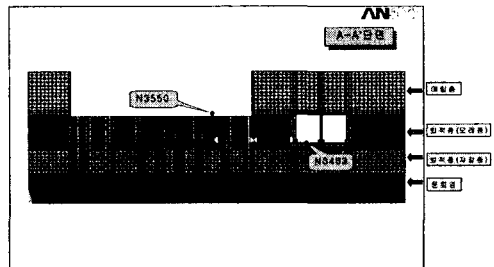


Fig. 5 Analytical model for 1st step

Table 2 Analytical results of 1st step

지 점	가속도 기준 탁월 주파수 (Hz)	최대 가속도 (cm/s ²)	over all	1/3 octave	
			가속 도 (cm/s ²)	dB	dB(V)
NO1	52.50	0.19	1.79	64.9	49.2
NO2	64.00	0.18	0.89	58.9	41.7
NO3	66.00	8.57×10 ⁻²	0.37	51.4	35.0

3.3 측정 및 해석 결과 비교

각 단계별로 측정된 결과와 해석 결과를 비교하였다.

Table 3 Comparison of analytical with measured results

구 분			1/3 octave band			
			dB	진동레벨		
				dB(V)	오차(%)	
1 단계	NO1	측정	61.1	46.2	6.1	
		해석	64.9	49.2		
	NO2	측정	56.6	40.1	3.8	
		해석	58.9	41.7		
	NO3	측정	47.6	31.8	9.1	
		해석	51.4	35.0		
2 단계	NO1	측정	46.7	32.7	4.9	
		해석	49.6	34.4		
	NO2	측정	42.2	31.0	1.9	
		해석	44.5	31.6		
	NO3	측정	32.7	21.8	4.8	
		해석	37.2	22.9		
3 단계	NO1	-1	측정	41.7	28.3	2.5
		해석	42.0	27.6		
	-2	측정	41.3	27.4	2.6	
		해석	41.7	26.7		
	NO2	-1	측정	47.2	32.5	4.7
			해석	48.4	34.1	
		-2	측정	57.3	41.7	3.5
			해석	58.7	43.2	
		-3	측정	50.3	37.1	6.1
			해석	52.9	39.5	
	NO3	-1	측정	35.9	25.0	7.7
			해석	40.0	27.1	
-2		측정	40.5	29.0	7.1	
		해석	43.6	31.2		
-3		측정	42.5	28.6	5.6	
		해석	42.7	30.3		

3.4 평가 방법 제시

3차례에 걸쳐 해석을 수행하여 1단계에서는 element type, size, 지하철 터널 구조물의 형상과 물성치(E, ρ, ν), 지반의 형상과 물성치, 댐핑계수, 경계조건 등의 여러 조건들을 적용하여 산출하였고 2단계에서는 구조물(아파트, 지하주차장)의 기초슬래브 형상, 물성치 등을 구하였으며 3단계에서는 지상 1층 바닥까지의 구조물 형상 등을 설계도와 기타 자료를 반영하여 해석방법의 타당성을 검증함으로써 지하철 진동에 의한 인접 건물의 사전 환경진동 영향 평가방법을 제시하였다.

실제 측정치와 해석결과치를 비교·검토함에 있어 각 해석시마다 전달함수를 비교하였다. 본 연구의 관점인 주파수에 따른 전달함수가 유사한 양상을 이루도록 해석모델을 변경함으로써 각 해석시에 적용한 조건들을 이용하여 최종적으로 해석방법을 구하였다. 이 해석방법을 바탕으로 기존 지하철이 운행되고 있는 구간 인접 지역에 아파트 등의 구조물이 건설될 경우 진동으로 인한 영향을 평가하기 위하여 다음과 같이 평가절차를 제시하였으며, 평가절차서의 개념도 및 흐름도를 작성하여 제시하였다.

- (1) 설계서, 지질조사 보고서 등 관련자료를 수집한다.
- (2) 각국의 여러 진동규제치와 우리나라 현장 실정에 맞는 합리적인 진동허용규제치를 결정한다.
- (3) 실제 운행되고 있는 지하철의 진동을 측정한다.
- (4) 설계 예정지에서 지하철 운행시에 진동원 측정과 동시에 지반에 전달된 진동을 측정한다.
- (5) 지하철 진동원과 지반진동의 결과치를 이용하여 전달함수를 구한다.
- (6) 해석 프로그램을 이용하여 측정 당시 상황과 유사한 모델을 생성한다.
- (7) 모델링 수행시 지반 및 구조물의 물성치를 확보한다.
- (8) 해석시 나온 결과치와 측정치의 전달함수를 비교한다.
- (9) 비교한 결과 유사하지 않을 경우, 유사한 양상을 이루도록 여러 해석모델을 구한다.
- (10) 유사할 경우, 최종 해석방법을 구하며 이를 이용하여 실제 구조물의 모델을 해석한다.
- (11) 해석을 수행하여 얻은 결과를 이용하여 지하철 운행으로 인한 진동으로 구조물 및 인체에 미치는 영향을 파악하고 평가한다.
- (12) 대책가능성과 경제성 등을 고려하여 적절한 방진대책을 수립한다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하철 주변 건물에 대한 지반, 기초슬래브, 지하 1,2층, 지상 1층 바닥에서 공사단계별로 진동을 측정하고 지하철에서 발생하는 진동이 지반을 통하여 건물로 전달된 진동의 전달함수를 구하여 수직진동응답의 변화를 파악하였다. 측정과 동시에 해석을 수행하여 측정 결과치와 전달함수를 비교함으로써 해석방법의 타당성을 검증하고 효과적인 해석방법을 제시하였다. 제시된 해석방법을 이용하여 실제 구조물이 완공된 후에 예상되는 진동응답을 예측하였다.