

## 이중 복합터널 상부구조물의 진동에 대한 안정성 평가 Estimation of Structure Stability on the Ground to Vibration from Dual Composite Tunnels

신승목(S.M. Shin)<sup>1)</sup>, 장연수(Y.S. Jang)<sup>2)</sup>, 이우진(W.J. Lee)<sup>3)</sup>, 권순정(SJ. Kwon)<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 새길엔지니어링 부사장, Vice president, Saegil Engineering Co. Ltd.

<sup>2)</sup> 동국대학교 사회환경시스템공학과 교수\*, Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Dongguk University

<sup>3)</sup> 고려대학교 건축사회환경시스템공학부 교수, Professor, Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

<sup>4)</sup> 동국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Master student, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Dongguk University

**Synopsis** : The site of interest is a residence redevelopment area which has excavation construction with cut-off walls. The site is located over Dong-Mang-Bong tunnel and Seoul No. 6 subway tunnel. This study analyzed numerically the influence of vibrations from No. 6 subway tunnel to the basement of the redeveloped apartment away from the distance about 11m. Kyoung-bu highspeed railway's time history model with linearly reduced maximum acceleration is applied to take into the subway maximum speed of 75km/h. The maximum velocity of vibration for the cross section of the interest was estimated as 0.28cm/sec which satisfied the allowable standard of 0.5cm/sec for apartment and residence of Seoul.

**Keywords** : vibration, subway tunnel, time history, residence redevelopment,

### 1. 서 언

최근 도심지의 재개발 및 뉴타운 사업이 활성화 됨에 따라 주택구조물이 터널구조물이 있는 상부에 건축되는 등 사회기반시설물과 민간 건축물의 상호작용에 대한 해석이 필요한 공사가 많아지고 있다. 이러한 지역의 사례로 본 논문에 수록된 대상지역은 OO 구역 주택재개발 사업 지역으로 흙막이 굴토공사와 굴착면 하부 동망봉 터널 및 지하철 6호선 터널이 진행될 예정이다.

지역내에 자동차용터널과 지하철 터널이 동시에 존재하며 이들 터널에서 발생하는 진동이 아파트(지상15층, 지하3층) 건설을 위한 굴착지역의 안정성과 공사완료후 주택구조물에 미치는 영향을 동적 수치해석을 통하여 평가하였다. 해석을 위한 단면은 동망봉 도로 터널 구조물 상단과 재개발 아파트 지하층과는 약 11.0m의 이격거리를 두고 경암층에 위치하는 도로 터널 구조물에 건물하중이 재하되는 가장 취약한 조건의 단면을 선정하였다.

## 2. 현장 개요

대상 지역은 OO 4구역 재개발 아파트 신축공사로 지상 15층과 지하 3층의 규모로 설계 시공될 예정이다. 대상지역의 굴착은 H-Pile+ 토류판으로 구성된 흙막이 구조물을 Strut, Anchor 및 Raker로 수행될 예정이다.

재개발 계획부지 하부로 동망봉 터널 및 지하철 6호선이 관통하고 있으며, 동망봉 도로 터널 구조물 상단과 재개발 아파트 지하층과는 약 11.0m의 이격거리를 두고 경암층에 위치하는 도로 터널 구조물에 건물하중이 재하되므로 장기적인 터널구조물의 안정성을 감안하여 그림 1과 2의 단면과 같이 검토구간을 선정하였다.

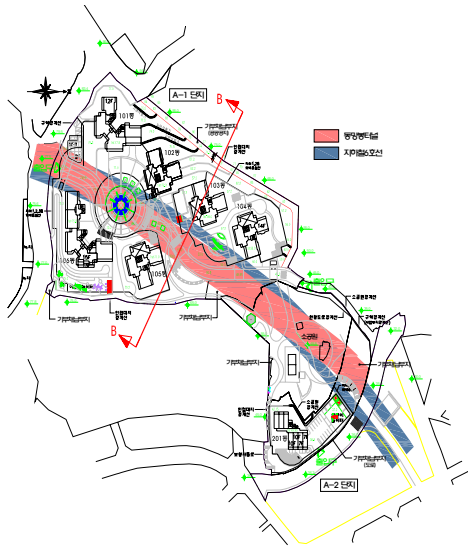


그림 1 검토구간 평면도

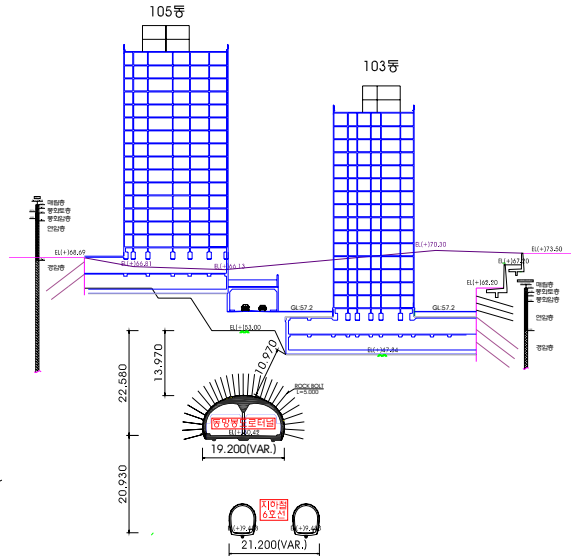


그림 2. 검토구간 단면도

## 3. 지반정수

대상지역의 분석을 위하여 3공의 시추조사를 수행하였으며 그 결과 표 1과 같이 토피가 얇은 암질의 기초로 구성되어 있는 것으로 파악되었다.

표 1. 대상지역의 시추에 따른 지층 두께 개요

(두께 : 단위. m)

지층 공 번	매립토		풍화토	풍화암	연 암	경 암	합 계	S.P.T
	모래	자갈						
NH-1	0.80	-	1.00	1.70	8.50	73.00	85.00	2
NH-2	-	1.80	-	0.70	4.10	43.40	50.00	1
NH-3	1.00	-	4.00	3.70	4.30	37.00	50.00	5
합 계	1.80	1.80	5.00	6.10	16.90	153.40	185.00	8

조사구간 내에 시추공에 Down Hole 시험을 수행하여 지층의 심도별 탄성과 속도를 측정하고 그결과 계산되어진 지반의 동적특성치를 표 2에 나타내었다.

표 2 탄성파 속도로부터 산출된 동적 지반정수

구분	공변	지층	Vs (m/s)	Vp (m/s)	포아송비	전단탄성율 (kg/cm <sup>2</sup> )	체적탄성율 (kg/cm <sup>2</sup> )	동탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	
구조물 구간	NH-1	매립토	208	556	0.42	6.64E+ 02	3.84E+ 03	1.88E+ 03	
		풍화암	357	750	0.35	2.34E+ 03	7.20E+ 03	6.34E+ 03	
		연 암	751	1399	0.30	1.33E+ 04	2.83E+ 04	3.44E+ 04	
		경 암	2180	3780	0.25	1.28E+ 05	2.13E+ 05	3.19E+ 05	
	NH-3	풍화토	286	632	0.37	1.25E+ 03	4.44E+ 03	3.43E+ 03	
		풍화암	357	750	0.35	2.35E+ 03	7.22E+ 03	6.35E+ 03	
		연 암	699	1307	0.30	1.15E+ 04	2.48E+ 04	2.99E+ 04	
		경 암	2193	3800	0.25	1.30E+ 05	2.17E+ 05	3.25E+ 05	
	지층별 평균	매립토	매립토	208	556	0.42	6.64E+ 02	3.84E+ 03	1.88E+ 03
			풍화토	286	632	0.37	1.25E+ 03	4.44E+ 03	3.43E+ 03
		풍화암	풍화암	357	750	0.35	2.35E+ 03	7.21E+ 03	6.35E+ 03
			연 암	725	1353	0.30	1.24E+ 04	2.65E+ 04	3.21E+ 04
물성치	경 암	경 암	2186	3790	0.25	1.29E+ 05	2.15E+ 05	3.22E+ 05	

대상구간의 진동효과 해석에 적용할 지반정수를 기존문헌, 실내 및 현장시험 결과, 경험식 및 기존 설계자료 등으로 검토하여 표 3과 같이 결정하였다.

표 3 각 지층별 설계 토질정수 요약

지 층	ywet ( t/m <sup>3</sup> )	ysat ( t/m <sup>3</sup> )	c ( t/m <sup>2</sup> )	ø (deg)	kh ( t/m <sup>3</sup> )	ES ( t/m <sup>2</sup> )	ν
매 립 층	1.7	1.8	0.0	25	1,500	1,500	0.40
풍 화 토 층	1.9	2.0	1.0	27	3,500	3,000	0.35
풍 화 암	2.0	2.1	3.0	30	4,500	10,000	0.30
연 암	2.3	2.4	30.0	35	6,000	200,000	0.25
경 암	2.5	2.6	75.0	45	10,000	1,000,000	0.22

#### 4. 진동해석

본 OO구역 재개발아파트 신축공사 예정부지는 동망봉 터널 및 지하철 6호선 상부에 위치하고 있어 본 공사 후 열차의 진동이 허용범위 이내에 있는지 검토하였다. 본 과업구간의 해석은 MIDAS/GTS(Geotechnical & Tunnel analysis System)를 이용하여 수행하였다. MIDAS/GTS 프로그램은 고난도 접속부 터널해석, 지하수 침투해석, 응력-침투 연계 유효응력해석, 연약지반 성토 및 압밀해석, 굴착 및 가시설해석, 지진 및 발파 진동해석 그리고 라이닝 구조해석 등을 수행할 수 있으며 시공 단계를 고려하기 위한 다양한 재료모델과 응력-변형 모델을 탑재하고 있다. 해석에 적용한 재료별 모델은 표 4와 같다.

표 4 해석적용 재료모델과 응력-변형 구성모델

재 료	재료모델	응력-변형 구성모델
콘크리트 구조물	Linear Elastic	Most Simple
가설 토류벽 및 지보재		
지 반	Mohr-Coulomb	Elasto-Plastic

#### 4.1 해석 영역 및 경계조건

수치해석 범위의 설정은 주관심부분(터널, 공동등)의 계산결과에 경계조건의 영향이 미치지 않도록 하기 위해서 매우 중요하다. 즉 터널 굴착에 따른 지반의 응력 영향권 전 영역을 해석 영역으로 설정하여야 한다. 본 과업에서의 해석범위는 상부는 지표면 측방 3.0D 이상 및 하부 2.0H이상으로 설정하였다. 해석 영역에 대한 경계조건은 좌·우측 및 하부는 물리로 연결하여, 측벽경계에서는 y방향 변위는 허용하고 x 방향 변위는 구속하였으며, 하부경계에서는 x 방향의 변위는 허용하고 y 방향의 변위는 구속하였다. 또한 하부의 양모서리는 x, y 방향의 모든 변위를 구속하고 회전만 허용하는 힌지조건으로 하였다.

#### 4.2 시간이력해석

MIDAS/GTS의 시간이력해석(time history analysis)에 사용된 동적평형 방정식은 식 (1)과 같다.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = p(t) \quad (1)$$

여기서,  $[M]$  : 질량행렬(mass matrix),  $[C]$  : 감쇠행렬(damping matrix)

$[K]$  : 강성행렬(stiffness matrix),  $p(t)$  : 동적하중(dynamic load)

이고  $u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t)$ 는 각각 변위, 속도, 가속도를 의미한다.

시간이력해석은 구조물에 동적하중이 작용할 경우에 구조물의 동적 특성과 가해지는 하중을 사용하여 임의의 시간에 대한 구조물 거동(변위, 부재력 등)을 동적 평형방정식의 해를 이용해 계산하는 것이다. MIDAS/GTS에서는 시간이력해석을 위해 모드중첩법(modal superposition method)을 사용하고 있다.

#### 4.3 진동해석순서

동하중에 의한 진동해석을 위해서는 고유치해석과 시간이력해석을 병행해야한다. 고유치해석은 구조물 고유의 동적 특성을 분석하는데 사용되며, 자유진동적 해석이라고도 한다. 고유치해석을 통해 얻어진 구조물의 고유모드 또는 고유주기를 찾아내어 시간이력해석을 수행한다. 시간이력해석은 구조물에 동적하중이 작용할 경우에 구조물의 동적 특성과 가해지는 하중을 사용하여 임의의 시간에 대한 구조물의 거동을 동적 평형방정식의 해를 이용해 계산한다.

##### 1) 고유치해석시 구속조건

고유치 해석을 위해서는 탄성경계를 사용하여 지점조건을 정의하였다. Surface Spring으로 탄성경계를 구성하고 Spring 상수는 도로교설계기준(하부구조편)의 지반반력계수에 따라 산정하였다.

$$\text{연직지반반력계수} : k_v = k_{v0} \cdot \left(\frac{B_v}{30}\right)^{-3/4} \quad (kgf/cm^3)$$

$$\text{수평지반반력계수} : k_h = k_{h0} \cdot \left(\frac{B_h}{30}\right)^{-3/4} \quad (kgf/cm^3)$$

$$\text{여기서, } k_{v0} = \frac{1}{30} \cdot \alpha \cdot E_0, \quad B_v = \sqrt{A_v}, \quad B_h = \sqrt{A_h}$$

## 2) 시간이력해석시 구속조건

지반과 같은 무한한 매질을 모델링할 때에는 정해석에서는 충분한 해석범위를 설정하여 해석하면 되지만, 동해석에서는 일반적인 경계를 잡을 경우 파가 반사되는 효과가 생기기 때문에 큰 오차가 유발될 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 해석에서는 1972년 Lysmer와 Wass가 제안한 점성경계(viscous Boundary)를 적용하였다. 점성경계를 정의하기 위해서는 해당 지반 물성치에 대한 x,y,z,방향에 대하여 Damper값을 산정하여 해석에 반영하였다. Damper값을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$P\text{파에 대하여 } C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = W \cdot A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{W \cdot 9.81}} = c_p \cdot A$$

$$S\text{파에 대하여 } C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = W \cdot A \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9.81}} = c_s \cdot A$$

$$\text{여기서, } \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$\lambda$  : 체적탄성계수 (tonf/m<sup>2</sup>),  $G$  : 전단탄성계수 (tonf/m<sup>2</sup>),  $E$  : 탄성계수  
 $\nu$  : 포아송비,  $A$  : 단면적 (m<sup>2</sup>)

## 3) 열차이동하중 산정

진동해석 입력변수에 경부 고속철의 시속 150km/h(LS-22)으로 운용한 경우 가속도 time history model을 지하철 6호선은 최대시속을 75km/h(실제최대시속 73km/h)로 가정하여 최대가속도를 선형적으로 50%, 동망봉터널은 최대시속을 80km/h이나 차량하중(DB-24)인 점을 감안하여 25%를 다음과 같은 추론에 의하여 적용하였다.

원칙적으로는 차량과 지하철의 운용시 진동에 대한 가속도 time history를 실험적으로 구하여 적용하여야 하나 현재 자료가 없는 관계로 Das(1993)을 이용하여 최대가속도  $a_0$ 와 속도는 선형관계에 근사한 것으로 추론하였다(한국지반공학회, 2008). 그림 3은 본 해석에 사용된 열차이동하중의 시간이력곡선이다.

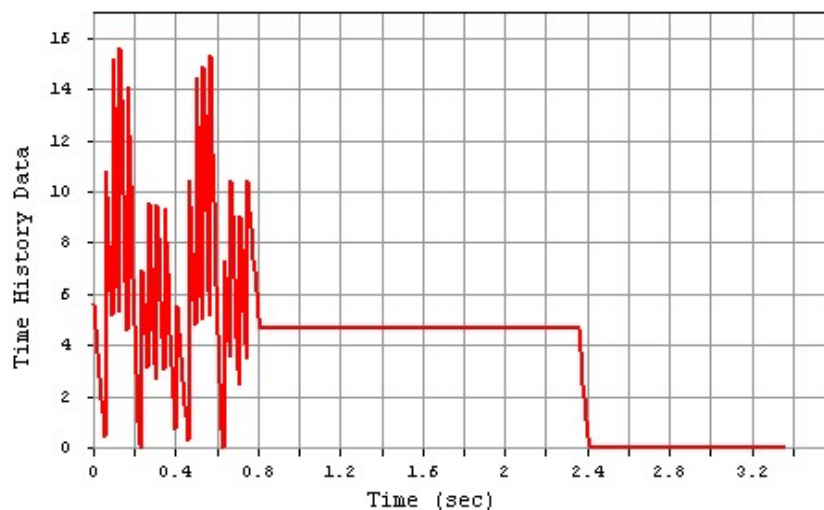


그림 3 해석에 사용된 LS-22 열차이동하중(시속150km/h인 경우) (ton)

#### 4.4 수치해석 모델링

진동해석을 위한 수치해석 모델링도는 그림 4와 같다. 지하철 6호선의 차량 진동이 영향을 미칠 수 있는 지점 8곳을 선정하여 각각의 진동속도를 수치해석에 의하여 분석하였다.

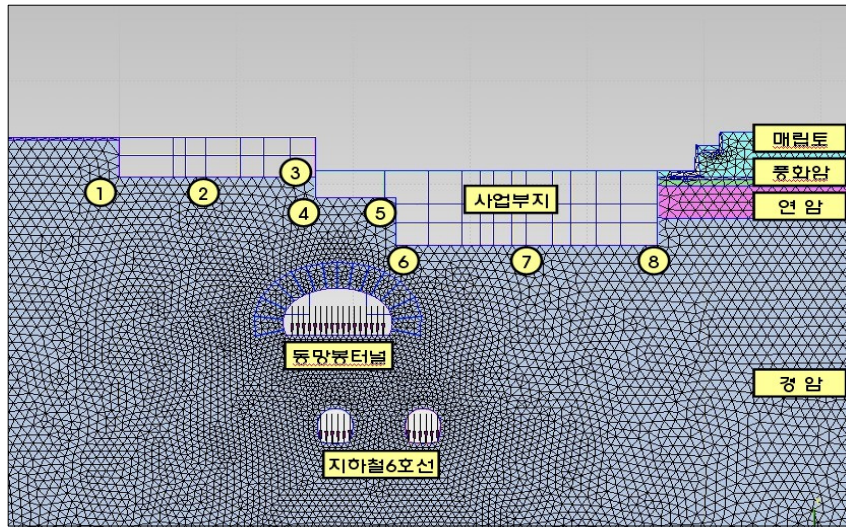


그림 4 진동해석 모델링도(상기 명기된 번호는 검토위치번호)

#### 4.5 위치별 진동해석 결과

본 공사 완료 후 동망봉 터널 및 지하철 6호선의 차량운행에 따른 사업부지 내 구조물의 진동시간에 따른 진동량을 검토한 결과를 표 5에 요약하였으며 지점중 최대진동속도를 나타낸 중앙부 5지점의 진동 시간이력곡선을 그림 5에 나타내었다. 그 결과 본 공사 완료 후 동망봉 터널 및 지하철 6호선의 차량운행에 따른 사업부지 내 구조물의 진동시간에 따른 진동량을 검토한 결과 최대 0.1983 cm/sec로서 허용기준치인 0.5cm/sec 이내로 안정한 것으로 나타났다.

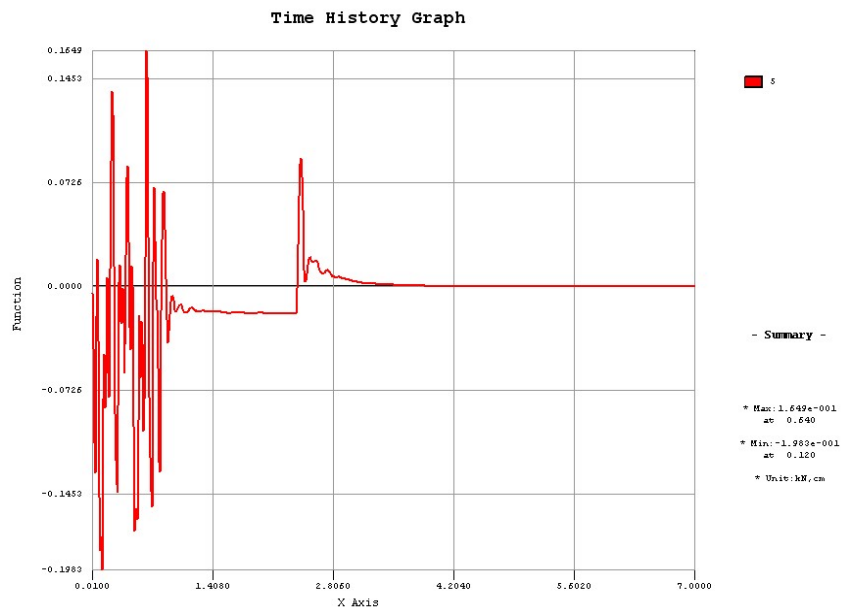


그림 5 현장 중앙부(검토위치 #5)에서 시간경과에 따른 진동파형

표 5 전체 검토위치별 진동속도의 요약 (기준 진동속도 0.5(cm/sec))

지점 No.	최대 진동속도 (cm/sec)	0.5 cm/sec
1	0.1176	
2	0.1447	
3	0.1767	
4	0.1740	
5	0.1983	
6	0.1983	
7	0.1128	
8	0.1983	

## 5. 결 언

해석대상 구역 재개발 아파트 신축공사에 따른 기존 터널의 영향 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 현장 지반은 지표로부터 매립층, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 층서구조로 형성되어 있으며 토피가 얇은 암반층으로 구성되어 있다. 현장굴착면과 인접하여 본 부지를 관통하고 있는 동망봉터널과 지하철 6호선 터널구조물은 경암층에 위치한다.
- 2) 사업부지 공사완료 후 동망봉터널 및 지하철6호선의 차량운행에 따른 사업부지내 건물의 진동검토결과 B-B 단면에서 최대 0.1983cm/sec이며, 서울시 지하철 시방기준에 의거한 주택 및 아파트 허용진동치 기준인 0.5cm/sec 이내로 진동에 의한 구조물의 피해는 거의 없을 것으로 판단되었다.
- 3) 수치해석은 지반 구조물의 해석에 대한 최선의 방법임에도 불구하고, 현장상황 및 지반 상태를 완벽히 모델링 할 수 없는 한계가 있다. 따라서 굴토공사 시 공사 관리 상태에 따라서 본 검토 결과와 다소 상이한 결과가 나타날 수 있으므로, 계획계획에 의한 계획관리를 실시하고, 계획결과를 설계와 시공에 반영시켜 안전한 공사가 이루어지도록 하여야 한다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(2005) 건설교통부 건축구조설계기준
2. 한국지반공학회(2008) 보문4구역 주택재개발아파트 신축공사에 따른 터널 안정성 검토
3. Das, B.M.(1993) Principles of soil dynamics, PWS-Kent Pub. Co. p. 304-307.