

도심지 터널 근접시공에 의한 기존 지하철 구조물 안정성 평가

한상민^{1*} · 이동혁² · 박두희³

¹정회원, DL E&C 토목사업본부 부장

²정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

³정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수

Stability evaluation of existing subway structure by adjacent excavation in urban tunnelling

Sangmin Han^{1*} · Donghuk Lee² · Duhee Park³

¹Team Manager, Division of Civil Engineering, DL Engineering and Construction

²Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

³Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

*Corresponding Author : Sangmin Han, smhan@dl.co.kr

Abstract

As the construction of trans infrastructure using the underground tunnel have been rapidly increased, various nearby excavation of existed underground facility including subway structure has been occurred in urban tunnelling. The concern and worry relating to the safety and stability of the existed facility by nearby excavation is becoming the key issues in urban tunnelling. In this study, it was conducted for existed the subway station structure at Seoul subway line which was closely located in the new Dongbuk urban metro railway to determine the behavior characteristics of station structure according to adjacent tunnel construction. Also, it was reviewed the evaluation of the safety zone and excavation method for subway structure. And after a review of damage evaluation, track irregularities and structural calculation by using a numerical analysis, stability of the subway structure according to nearby tunnel excavation was evaluated to be secured. This study is expected to be applied as useful reference in advance if you need to review the effects of existed structure according to nearby construction in complex urban tunnelling.

Keywords: Adjacent excavation, Urban tunnelling, Subway structure, Safety evaluation, Stability analysis

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
23(5)339-357(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.5.339>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 1, 2021

Revised September 17, 2021

Accepted September 17, 2021



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

도심지에서의 교통인프라 개발이 활발해 지고, 대심도 지하터널을 이용한 도시의 기반시설 확충으로 인하여 기존 운영되거나 설치된 시설물 또는 구조물 상호 간의 근접시공이 많이 이루어지고 있다. 이에 따라 근접시공으로 인한 시설물 또는 구조물에 미치는 안정성 확보여부는 중요한 이슈가 되고 있으며, 관련법에 의하여 지하터널공사에 따른 지하안전영향 평가를 반드시 수행하여야 한다. 본 연구에서는 근접시공으로 인한 정거장구조물의 거동특성을 파악하기 위해 동북선도시철도 터널이 계획된 노선 상부의 지하철 6호선 고려대역 정거장 구조물을 대상으로 신설터널에 의한 기존 구조물에 미치는 안전영향평가를 수행하였다. 이를 위하여 정거장구조물의 안전영역 평가 및 굴착방법에 대한 검토와 3차원 수치해석을 통한 상세검토를 수행하였다. 구조물 손상도 평가, 궤도 틀림 및 기존 구조물과 건물 안정성 평가 결과 근접터널공사에 따른 기존 정거장 구조물의 안정성은 확보되는 것으로 평가되었다. 본 연구는 도심지 터널공사에서 근접시공시 기존의 인접구조물에 미치는 영향을 사전에 검토하는 경우 기본적인 기초 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 근접시공, 터널, 정거장구조물, 안전영역, 손상도 평가

1. 서론

최근 도심지 구간에서의 수도권 급행철도사업(GTX)과 인덕원~동탄 도시철도 사업 등과 같은 교통인프라 건설이 적극적으로 추진되고 있다. 또한 도시의 각종 기반시설 확충과 국토의 효율적인 활용을 위해 도로, 철도, 지하철, 전력·통신시설 및 수로시설 등 대심도 터널을 이용한 도심지 지하공간 개발(urban underground development)이 확대되고 있다. 이로 인하여 지상 시설물과 지하 시설물 또는 지하 시설물 상호 간의 근접시공으로 인해 기존 시설물 또는 구조물의 안정성 확보여부가 중요한 관심사항으로서 시설물 관리자 및 거주민 등과 같은 이해당사자의 민원이 빈번하게 발생하고 있는 실정이다(Kim, 2021). 근접시공은 공사 정도가 난해하기 때문에 시공 진행에 따른 기존 구조물 및 주변 시설의 안전에 영향을 줄 수 있으므로 적극적인 대책이 수립되지 못할 경우 기존 구조물의 침하, 균열 및 누수 등 구조물의 안정성에 상당한 영향을 미칠 수 있으며, 시공 중 발파 진동과 소음 등과 같은 환경성에 대한 문제도 기존 구조물뿐만 아니라 주변 건물에도 심각한 영향을 줄 수 있다(KICT, 2019).

따라서 근접시공 시 구조물의 특징 및 주변지반 특성 등을 상세히 고려한 설계 및 시공방법이 적용되어야 하며, 굴착으로 인한 지반이완 및 응력교란이 최소화될 수 있도록 구조물 간의 상호 간섭을 최대한 배제할 수 있는 대책공법을 계획하고 시공 중 발생할 수 있는 문제점에 대해 사전에 충분한 검토가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 신설 터널공사에서 상부에 인접한 기존 정거장구조물이 위치하고 있는 경우 지반 굴착 및 터널공사에 따른 구조물 안정성에 미치는 영향을 해석적으로 상세 검토하였다. 검토 대상구간은 서울시 광역교통 개선대책으로 추진되고 있는 동북선 도시철도 터널 시공구간으로 기존 운행 중인 지하철 6 호선 고려대역 하부 통과구간이며, 신설 터널공사에 따른 기존 정거장 구조물의 안정성에 미치는 영향을 구조물 손상도 및 궤도 안전성 평가 등을 통하여 구체적으로 검토하고자 하였다.

2. 도심지 근접시공에 따른 기존 구조물 근접도 평가

2.1 도심지 근접시공의 특성

동북선 도시철도 터널 굴착구간 상부에 기존 지하철 6호선 고려대역이 운영되고 있는바, 신설 터널 굴착에 따른 기존 고려대역 구조물에 미치는 영향을 최소화하기 위해 구조물 상호간 충분한 이격거리를 확보하거나 필요시 적절한 보강 대책공법을 반영하도록 하여 기존 구조물에 미치는 영향을 최소화할 수 있고 운영 중인 구조물의 안정성을 영구적으로 확보할 수 있는 보다 철저한 안전관리 대책이 요구된다(MOLIT, 2020).

근접시공이 기존 구조물에 미치는 안정성은 지형, 지질 조건, 기존 구조물의 구조적 특성, 구조물 손상 정도, 공사 종류 및 시공방법 등의 다양한 조건에 영향을 받는다. 서울특별시 도시철도공사에서는 기존터널에 근접 시공할 경우 그 공사의 종류에 따라서 조건별 안전영역(safety zone)을 산정하였으며, 근접시공의 종류에는 터널의 병설, 터널의 교차, 터널상부의 개착, 터널상부의 성토, 터널상부의 구조물 기초, 터널 측부의 굴착, 터널근방의 앵커, 터널상부의 담수 및 지반진동 등으로 구분하고 있다(Seoul Metro, 2001). 도심지 터널공사에서의 근접시공은 가장 리스크가 큰 공사로서, 근접시공구간에서의 시공 순서는 서로 상이할 수 있지만 어느 경우든 터널 안정성 뿐만 아니라 인접 구조물 안정성에 위대한 영향을 미칠 수 있으므로 그 상호거동을 충분히 검토하여 리스크 요인을 사전에 제거하도록 하여 안전한 지하터널공사가 수행되도록 하여야 한다.

2.2 도심지 근접시공에 따른 안전영역 및 영향존

동북선 도시철도 터널 굴착구간 상부에 고려대역이 운영되고 있는바, 동북선 도시철도 터널 굴착에 따른 고려대역 구조물에 미치는 영향을 최소화하기 위해 구조물 상호간 충분한 이격거리를 확보하거나 필요시 적절한 보강 공법 적용으로 구조물에 대한 안정성 확보 계획이 필요하다. 근접시공 가능 범위인 안전영역은 국내에서 지하철 건설이 먼저 시행된 서울지하철과 부산지하철에서만 적용되고 있는 실정이다. 터널굴착으로 인해 영향을 받는 영역은 Fig. 1(a)과 같이 전통적으로 터널의 주동파괴 영역인 $45^\circ + \phi/2$ 를 기준으로 결정되어 왔다(Bjerrum, 1963).

터널과 터널 간의 근접 시공은 기존 터널 시공에 따른 이완영역이 발생하게 되고 이 영역내에 근접하여 새로운 터널을 시공할 경우 기존 터널에 영향을 미치게 된다. 따라서 신설 터널 시공시에는 필요할 경우 터널 주변을 보강하여 기존 구조물에 미치는 영향을 최소화하고 주의 깊게 시공하여 기존터널의 안정성을 확보해야 한다. Seoul Metro(2001)에서 제시하고 있는 터널안전보호권은 Fig. 1(b)와 같으며, “A”는 안전보호권, “B”는 중간영역권, “C”는 자유지대로 정의된다. 최근 빈번하게 발생되고 근접시공은 터널의 병설, 터널의 교차, 터널상부의 개착 및 개착박스 구조물의 근접시공 경우로 각 조건별 안전영역의 정량적인 평가는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

근접시공 범위는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 제한범위, 요주의 범위, 무조건 범위로 구분되며, 제한범위는 신설 구조물의 시공 시 적극적인 대책수립이 필요한 영역으로 구분하고 특히 제한범위와 기설 구조물 사이 공간은 보호층으로 규정하여 신설 구조물의 시공을 제한하고 있다. 그러나 현실적으로 신설 구조물의 계획을 수립함에

있어서 보호층을 침범하는 경우가 종종 발생하고 있으며, 이런 경우 경험적인 안전영역으로 평가하기보다는 지반조건 및 구조물 특성 등을 종합적으로 고려하여 현실적인 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

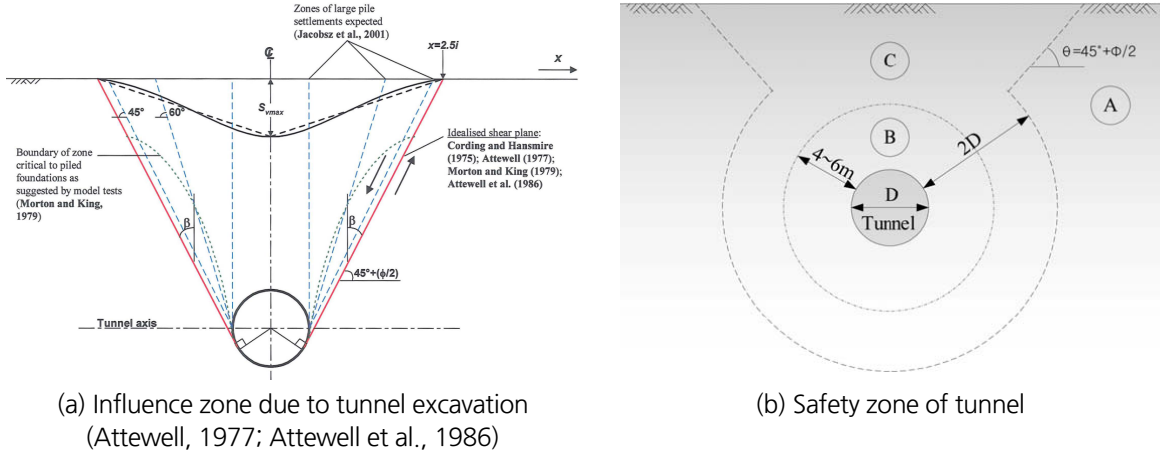


Fig. 1. Influence zone induced tunnel excavation

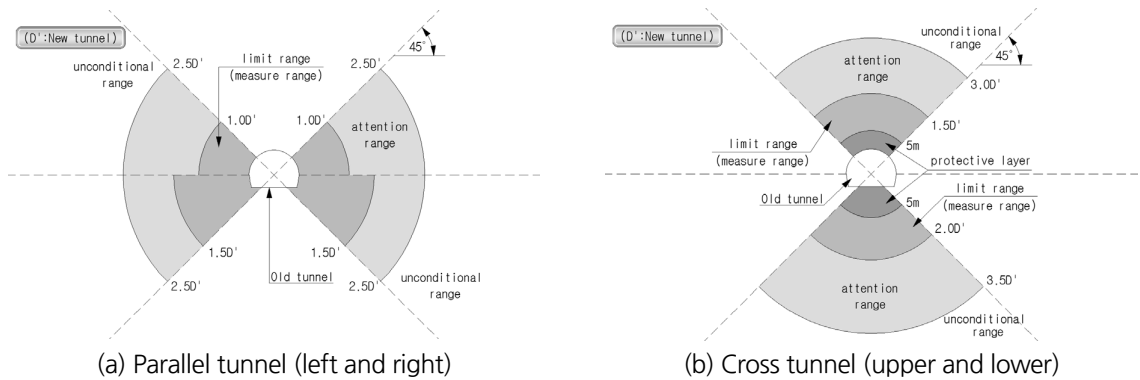


Fig. 2. Safety zone induced adjacent excavation in existing and new tunnel

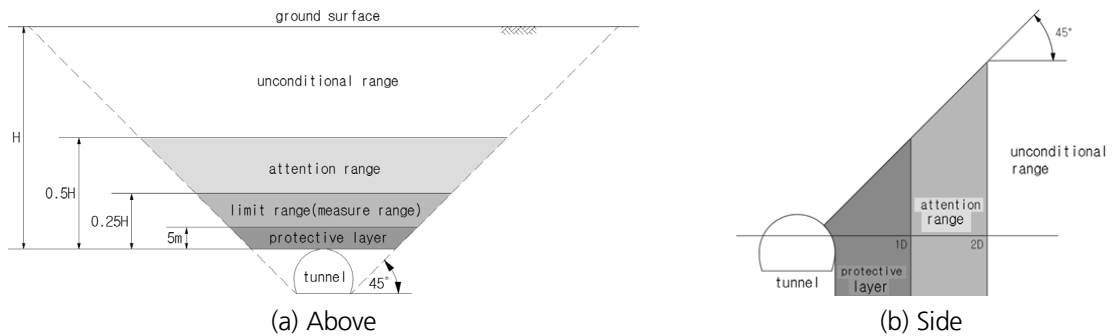


Fig. 3. Influence zone of above and side of tunnel structure induced tunnelling

2.3 도심지 근접터널 시공의 사례 검토

도심지 터널공사가 증가함에 따라 신설 터널과 상부구조물 근접시공 사례는 매우 다양하며, 지반 특성과 근접 공사 특성을 반영하여 상당한 난공사임에도 이를 기술적으로 해결하여 안전하게 공사를 마무리하여 왔다. 본 절에서는 도심지 터널공사에 관련하여 상부에 기존 구조물이 위치하고 그 하부로 신설 터널이 시공된 사례를 검토하여 도심지 근접 터널시공의 특징을 살펴보았다.

2.3.1 우이-신설 경전철 - 성신여대 정거장역 하부 터널 통과

우이-신설 경전철 노선 중 서울지하철 4호선 성신여대 정거장 하부 통과구간으로 정거장 하부에 전력구 및 통신구가 위치하고 있고, 최소 이격거리는 약 3.5 m이다(Fig. 4). 기존 정거장 안정성 확보를 위한 굴착 및 보강공법 등의 대책이 필요함에 따라 지보패턴을 상향 조정하여 상하분할 굴착 및 강관보강그라우팅을 적용하고 발파진동 영향 최소화를 위해 약 60 m 구간에 무진동 압파쇄 공법을 적용하였다.

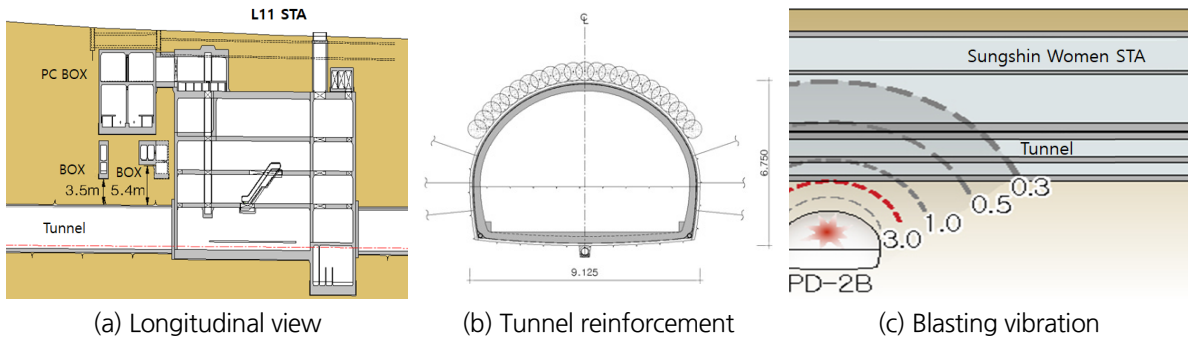


Fig. 4. Urban tunnelling under Sungshin Women's University station

2.3.2 경의선 용산-문산간 복선전철 - 개착박스 하부 터널 통과

경의선 용산-문산 간 복선전철 건설공사 구간 중 지하철 6호선과 공항철도 교차 통과구간으로 경의선은 얇은 심도의 개착공법으로 공항철도는 깊은 심도의 터널공법으로 계획되었으며, 그 사이에 지하철 6호선이 통과하고 있다. 경의선 개착구조물 하부와 지하철 6호선 상부의 최소 이격거리는 약 3.5 m로 도시철도공사에서 제시하는 안전영역 중 굴착이 금지된 구역에 해당하며, 간섭연장은 최대 34 m이다(Fig. 5). 경의선 개착 시공 시 엄지말뚝 선단부는 지하철 6호선과 약 1.9 m 이격되어 매우 근접하며, 경의선 개착시공으로 인하여 지하철 6호선 천단부에 상향변위가 발생할 것으로 예측되었다. 개착시공 중 보강대책으로 수직 지반보강그라우팅($\phi 500$ mm, C.T.C 1,000 mm)을 실시하고 지하수 유출에 의한 지반침하방지를 위해 차수공법을 적용하였다.

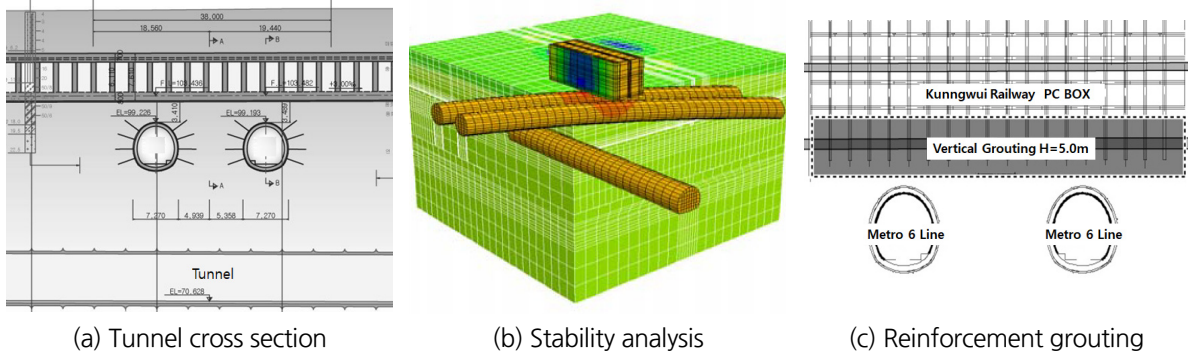


Fig. 5. Urban tunnelling under box structure in Kyungwui railway (Lee, 2004)

2.3.3 인천 지하철 - 경인고속도로 하부 터널통과

인천지하철 터널 공사는 서구 가정동에 계획되어 있는 도심지 재개발 계획인 루원시티를 통과하고 경인고속도로 간선화 및 지하화 계획과 주변 도시개발계획 등이 수립되어 있다. 특히 경인고속도로 하부 통과구간은 향후 경인고속도로 지하화 계획이 수립되어 있으므로 터널시공 완료 후 상부 터파기 및 지하차도 시공에 따른 안정성 확보가 필요하였다. 토사 및 풍화암 구간임을 감안하여 지하수 배수에 의한 토사구간 침하 및 지하수위 저하방지를 위해 차수 그라우팅을 실시하였다(Fig. 6). 또한, 천공과 동시에 강관보강재의 시공이 이루어지는 직천공 방식을 적용함으로써 천공 후 보강재 설치 중 천공붕괴 등의 문제를 예방하고, 시공시간을 최소화 하여 시공성을 확보하였다. 좌측상부에 경인고속도로 지하차도가 인접하여 시공되는 구간은 좌측벽 일부에 FRP 보강그라우팅을 추가 적용하여 강성을 증가시켰다.

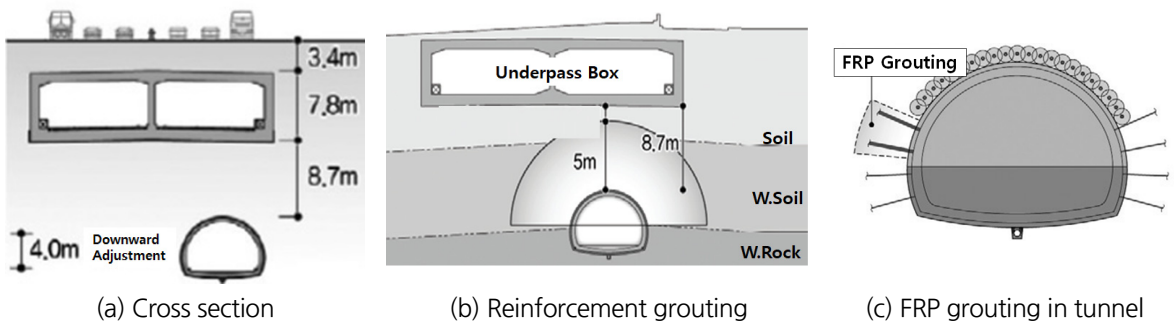


Fig. 6. Urban tunnelling under box structure in Kyungin expressway (Lee et al., 2010)

2.3.4 신분당선 - 건물 하부 터널통과

광교 뉴타운 C5BL 구역 및 신분당선 인접구간으로 광교 뉴타운 C5BL 구역 신축건물의 착공 후 최소 약 8.1 m 하부에 신분당선 SB05 정거장에서 차량기지로 진입하는 입·출고선이 시공된다. 신축건물 시공 중 신분당선 터널

굴착 시 터널 및 신축건물의 상호영향을 검토한 결과, 신축건물 및 신분당선 터널 시공 시 안정성을 확보하는 것으로 평가되었다. 비교적 양호한 지반을 통과하는 구간은 주입효과와 장기강도가 우수한 소구경 강관보강형 그라우팅을 적용하고 격자지보의 강성 증대를 위해 H형 강지보(H-100×100×6×8 이상)를 적용하고, 불량한 지반을 통과하는 구간은 대구경 강관다단그라우팅 및 축벽지지파일(필요시)을 적용하고 격자지보의 강성증대를 위해 강지보(H-125×125×6.5×9)를 적용하였다. 터널굴착공법은 발파진동으로 인한 지반이완 및 신축건물 영향 최소화를 위하여 기계굴착이 적용되었다(Fig. 7).

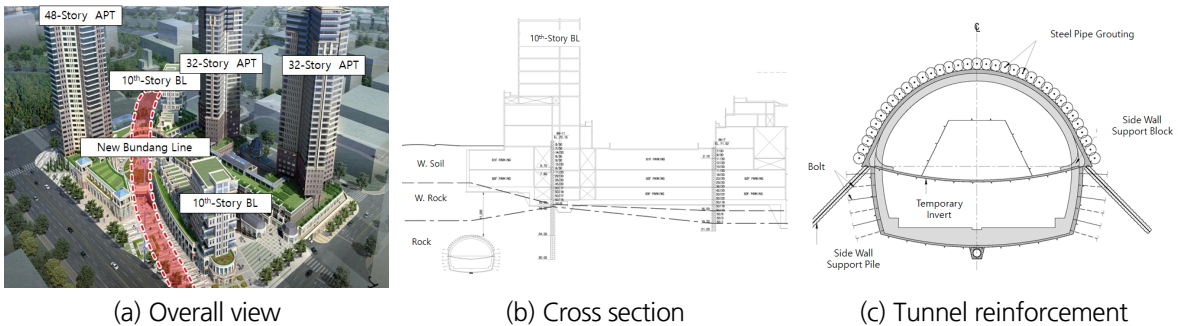


Fig. 7. Urban tunnelling under building structure in New Bundang railway (Shin et al., 2009)

3. 근접시공에 따른 정거장 구조물 안정성 평가

3.1 기존 및 신설 구조물 현황 및 근접도 평가

본 연구를 위한 검토구간은 동북선 도시철도 노선이 지나가는 지하철 6호선 고려대역 정거장 구간이다. 지하철 6호선 고려대역 정거장 구조물은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 지층조건, 주변 지장물, 지형 및 토피고 등에 따라 개착박스 구조물로 준공되었다.

고려대역 정거장 구조물에 인접한 동북선 도시철도 104 정거장의 종점부 터널 진입구간의 토사 및 풍화암에 대한 가시설 지보공법은 앵커체의 긴장력을 이용하여 토압을 지지하도록 설계되었으며, 앵커는 지하철 6호선 고려대역 정거장 구조물로부터 일정 간격 이격되어 보강되는 것으로 계획되었다.

지하철 6호선 고려대역 구간 인접구조물에 대한 근접도 평가결과, 구조물 기준 전반적으로 “A급”영역에 해당되는 것으로 평가되어, 설계 시 기존 구조물 안정성 확보를 위해 대책공법 적용 및 적용된 안정성 확보 방안에 대한 적정성 검토가 수행되어야 하며, 시공 중 상부 구조물 변위 및 변형 발생에 대한 계측을 주 1회 이상 실시 및 월 2회 이상 점검이 요구된다. 또한, 근접도 평가는 지하철 구조물 주변 공사에 따른 영향을 개략적으로 평가하는 방법이므로 신설 구조물의 형상, 하중, 시공조건 및 지반조건 등을 종합적으로 고려한 상세검토가 필요할 것으로 판단된다.

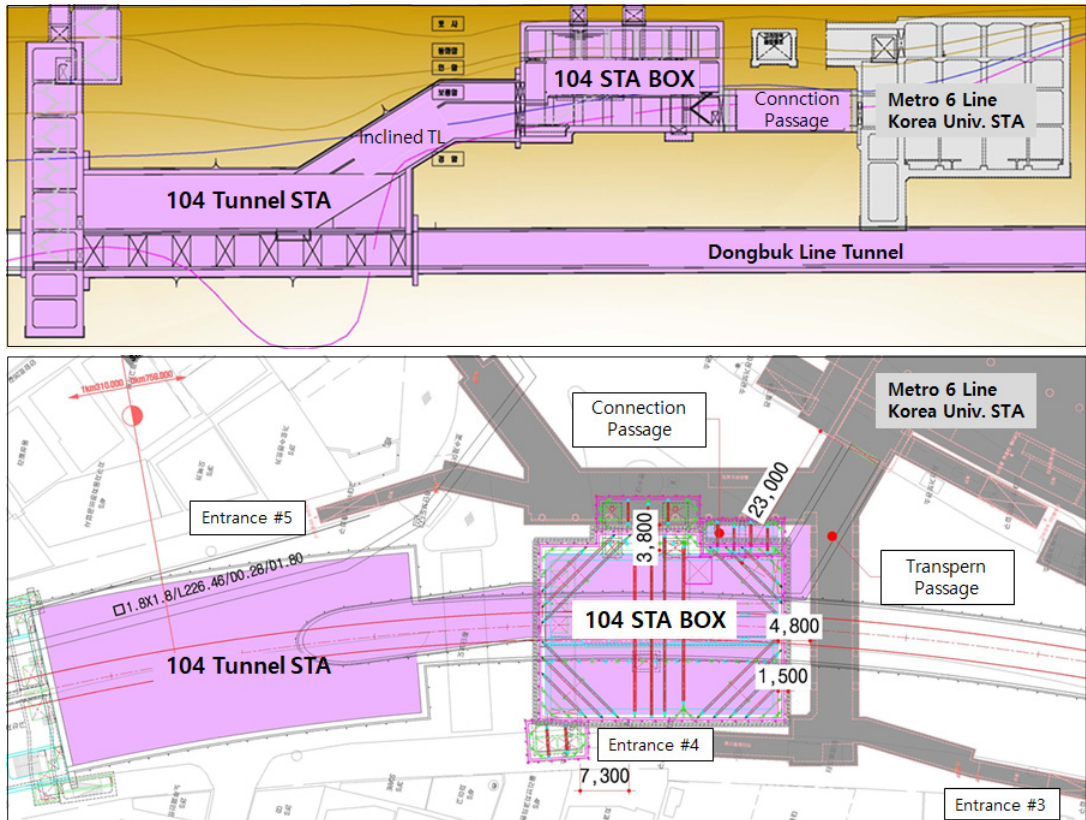


Fig. 8. Nearby construction at Korea University station in subway line 6

3.2 지질 및 지반특성 분석

동북선 도시철도 계획노선 설계 시 수행된 지반조사결과 지층분포 상태는 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암 및 기반암(연암 및 경암) 순으로 이루어져 있는 것으로 조사되었으며, 동북선 도시철도가 통과하는 기존 지하철 구조물의 기초지반은 대부분 연·경암의 기반암이 높게 출현하는 것으로 조사되었다. 기존 구조물의 기초 부 기반암 출현심도가 높아지는 경향은 인근 건설공사 설계자료 및 동북선 도시철도 104 정거장 터파기 시공 시 작성된 압검측 자료로부터 타당성을 확인하였다. 실내시험, 현장시험, 참고문헌 및 설계사례 조사를 통해 산정된 검토 대상구간의 설계지반정수는 Table 1과 같다.

Table 1. Geotechnical parameter for numerical analysis

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus E (MPa)	Poisson's ratio (ν)	Permeability (cm/sec)	
Deposit	17.0	20	0.0	4	0.38	3.20×10^{-5}	
Weathered soil	19.0	22	29.0	100	0.32	2.50×10^{-4}	
Weathered rock	21.0	30	32.0	300	0.30	7.50×10^{-5}	
Fractured zone	23.0	180	34.0	500	0.29	1.60×10^{-5}	
Soft rock	24.0	260	35.0	2,300	0.27	1.40×10^{-5}	
Medium rock	25.0	1,300	38.0	8,000	0.25	4.50×10^{-6}	
Hard rock	26.0	2,500	42.0	16,000	0.23	2.50×10^{-6}	
Shotcrete	Soft	23.5	-	-	5,000	0.20	-
	Hard		-	-	15,000	0.20	-
Rockbolt	78.5	-	-	210,000	0.20	-	

4. 인접굴착과 벽체철거를 고려한 기존 구조물 안전성 평가

4.1 기존 구조물 및 빌딩 손상도 평가 기준 검토

4.1.1 구조물 안정성 및 손상도 평가기준

터널굴착 단계별 손상평가를 위해서는 지표침하 거동을 이용하여 손상평가 인자인 각변위, 처짐비, 부등침하, 구조물의 최대침하량, 수평변형률 및 구조물에 발생 가능한 균열양상 등의 수치를 토대로 평가를 수행한다. 본 연구를 위한 대상구간에 위치하는 지하철 6호선 고려대역 구조물의 손상 정도를 경험적으로 평가하기 위한 손상도 평가인자에 대한 허용기준을 산정하였으며, Fig. 9와 같이 Burland and Wroth (1974), Cording and Hansmire (1975), Boscardin and Cording (1989), Burland (1997)이 제안한 간편 도표에 의한 손상도 평가를 수행하였다.

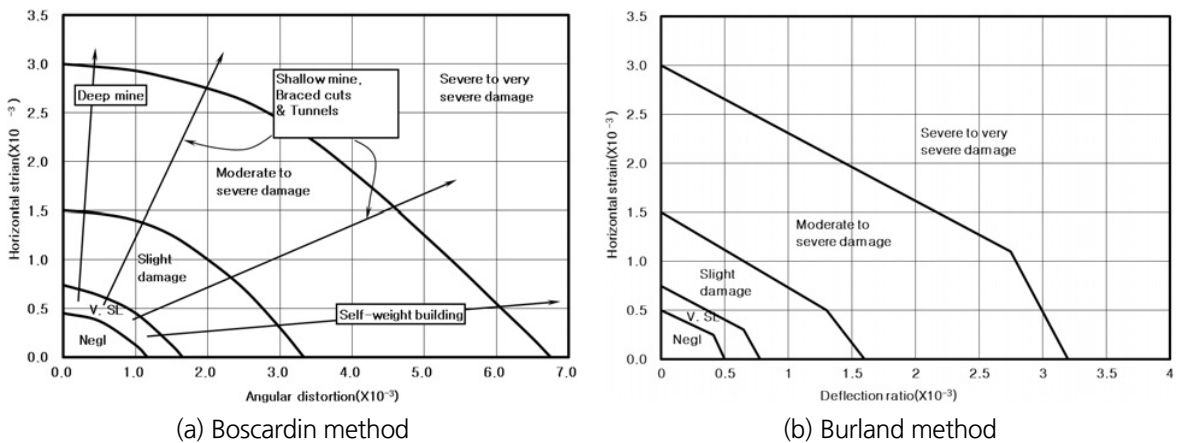


Fig. 9. Damage assessment according to the simple chart

4.1.2 궤도 틀림 평가기준

궤도틀림은 도상의 침하, 차량의 진동 등에 의하여 발생하는 파장이 비교적 짧은 영역의 선형의 오차를 의미하며, Fig. 10과 같이 먼틀림(고저틀림), 줄틀림(방향틀림), 궤간 틀림, 수평틀림 등이 있다. 궤도틀림에 대한 평가기준은 서울특별시도시철도공사(2020)의 궤도정비기준에서 제시하고 있는 지하철 선로 부등침하 기준으로 Table 2와 같다.

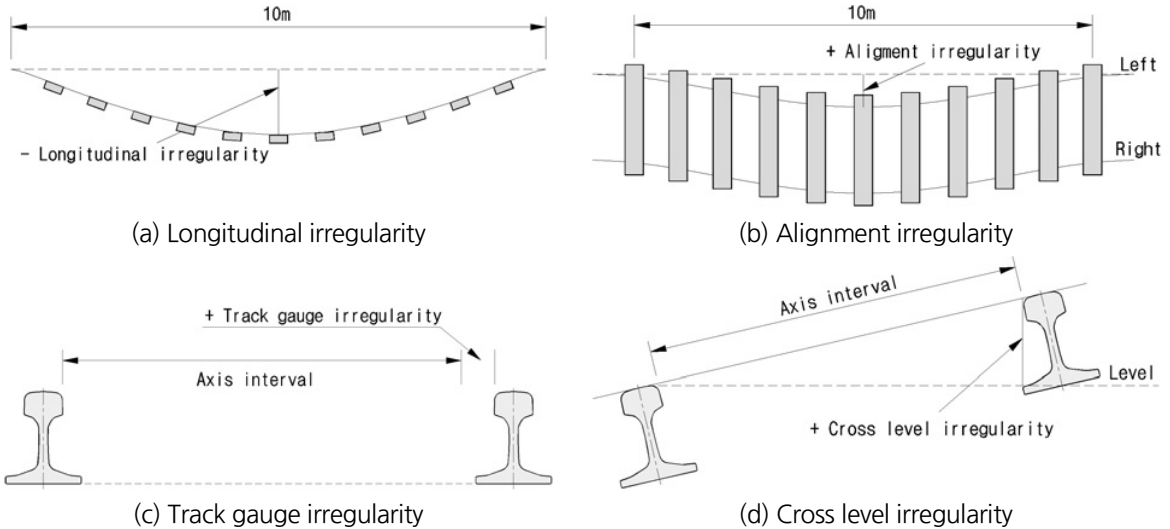


Fig. 10. Kinds and concepts of track irregularities (Seoul Metro, 2008)

Table 2. Track irregularities allowance (Seoul Metro, 2008)

Classification		Main line	Side line
Arrange standard (mm)	Track gauge	+10, -3	+10, -3
	Cross level	9	11
	Longitudinal	Straight 9 (rail length : 10 m) Curve 3 (rail length : 2 m)	Straight 11 (rail length : 10 m) Curve 4 (rail length : 2 m)
	Alignment 9	9 (rail length : 10 m)	11 (rail length : 10 m)

4.1.3 지반굴착에 의한 구조물 영향 평가기준

지반 및 터널굴착에 의한 가시설 벽체와 인접 구조물은 단순한 구조물 형태가 아니라 복잡한 형태이고 터널 시공단계별 인접 구조물의 안정성에 대해 이론적인 방법 등을 통해서 평가할 수 없으며, 이에 복잡한 구조물 형태를 가능한 반영하고 지반조건 및 터널시공단계를 함께 고려할 수 있는 3차원 해석 수행이 요구된다. 그리고 수치해석을 통해 시공단계별 구조물에 대한 연직변위, 지표침하의 발생경향에 대해 정량적 평가 및 구조물의 손상도 평

가가 요구된다. 이 같은 제반사항은 국토교통부의 「지하안전영향평가서 표준매뉴얼, 2020」에 규정하고 있으며, 가시설 및 인접 구조물에 대한 허용기준은 Table 3에 나타나 있다.

Table 3. Allowable standard of Earth retaining wall and adjacent structure (MOLIT, 2020)

Classification			Allowable standard
Earth retaining wall	Hard	$t \geq 60$ cm Concrete wall	$\leq 0.002 H$
	Medium	$t \approx 4$ cm Concrete wall	$\leq 0.0025 H$
	Soft	H-pile and earth retaining wall	$\leq 0.003 H$
Support	Axial force	Rockbolt	$\leq 0.5f_{ck} \times A_s$
Adjacent structure	Max. settlement		≤ 25 mm
	Angular displacement		2.00×10^{-3} (1/500)
	Lateral strain		1/2,000

4.2 기존 정거장 구조물 안정성 평가

4.2.1 벽체철거를 고려한 기존 구조물 안정성 검토

104정거장 환승통로는 비개착 구간으로 비개착시와 완공시에 하중재하가 같으므로 완공시를 3D 모델로 구성하여 구조물을 검토하였다. 해석 모델의 종방향 및 연직방향 단부는 진행 방향으로 대칭조건을 부여하였으며, 벽체 철거시 신설 구조물과 기존 구조물의 인접부는 압축전단 스프링을 적용하였다. 또한 구조물 하부슬래브에는 지반반력계수를 압축전단스프링으로 적용하였다. Fig. 11은 3차원 해석을 위한 모델링이 나타나 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 벽체철거부에 대하여 상세 구조검토를 수행하였다.

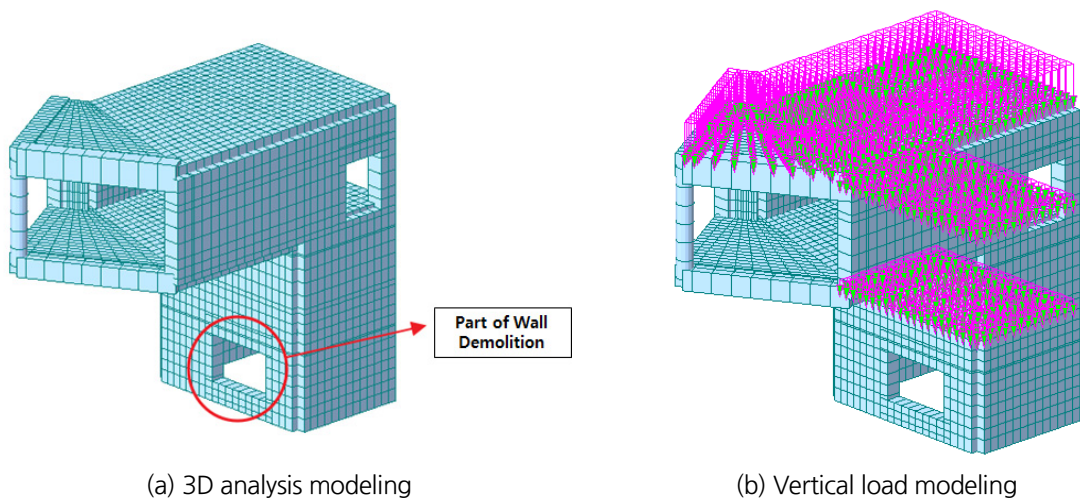


Fig. 11. 3D analysis modeling considering wall demolition for existing structure

가설중 구조물에 가해지는 하중의 경우 가시설에 토압을 적용한 버팀보 강성을 고려하여 안전성 검토를 수행하였다. 상세 구조검토 결과는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 구조물의 3차원 안전성 검토결과 벽체 철거로 인해 단면력 증감이 있으나 모든 단면에서 강도 안전율을 만족한 것으로 나타났으며, 6호선 고려대역 정거장 및 고려대역 연결통로 검토 결과 동북선 도시철도 신설로 인한 단면력 증감이 있으나 모든 단면에서 강도 안전율을 만족하는 것으로 나타났다.

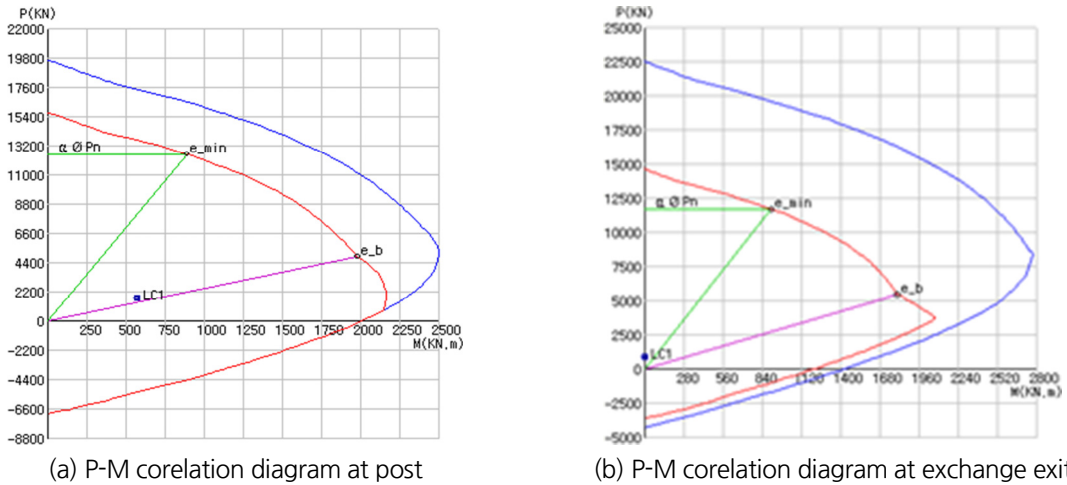


Fig. 12. Result of 3D numerical analysis considering wall demolition for existing structure

Table 4에는 3차원 수치해석결과 최소 안전율을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 고려대역 정거장 및 고려대역 연결통로 모두 안전율은 1.0 이상으로 확인되어 공사 중 및 공사이후에 안전성을 확보하는 것으로 평가되었다.

Table 4. Minimum safety factor by result of numerical analysis

Structure	Under construction		After construction	
	Bending strength	Shear strength	Bending strength	Shear strength
Korea University Station	1.05	1.07	1.98	1.07
Korea University Connection Box	1.21	1.25	1.06	1.35

4.2.2 104 정거장 가시설 및 인접구조물 안정성 평가

104터널정거장 구간 중 104정거장 굴착공사는 경사터널, 하수박스, 6호선 고려대역과 환승통로 등의 주요 인접구조물과의 최소 이격거리가 2.7 m 인 매우 근접시공으로 계획되어 있으며, 지반굴착으로 인해 지하철 6호선 고려대역의 환승통로, 주변건물의 안정성 영향이 클 것으로 판단하여 104정거장 가시설 구조, 6호선 고려대역사

와 환승통로, 주요 주변건물의 현황을 고려해 104정거장 전구간(연장 220 m)을 검토구간으로 선정하였고, 해석 결과를 통한 지반굴착 시 주변건물의 안정성을 평가하기 3차원 탄소성 수치해석을 수행하였다. 해석단면의 개요와 해석모델링은 Fig. 13에 나타내었다.

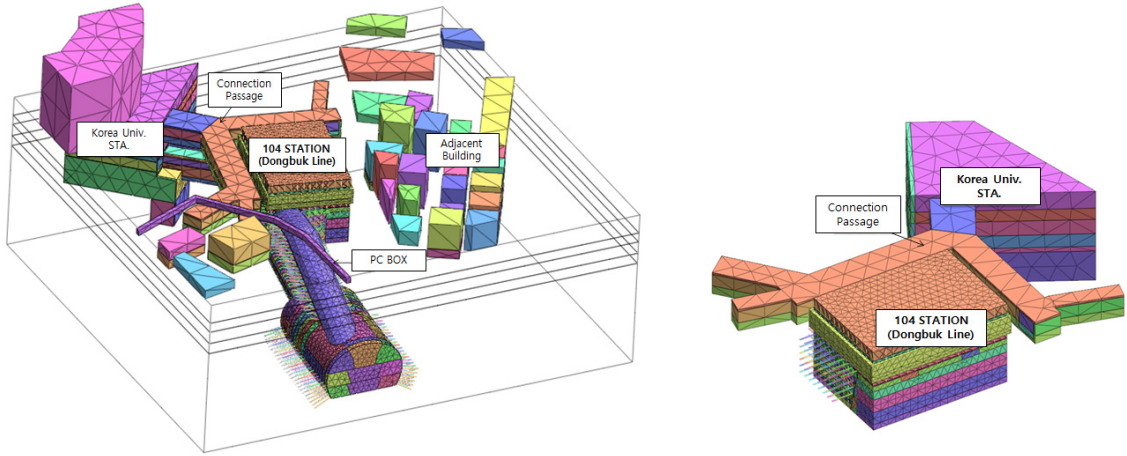


Fig. 13. 3D analysis modeling for adjacent structure

고려대역 본선박스 하부통과 구간의 104정거장 가시설에 대한 축점위치는 지반의 굴착심도와 지반조건 및 벽체의 버팀구조 등을 고려해 결정하였고, 단순한 구조물 형태가 아니라 복잡한 형태와 기존 구조물과 근접해 있어 지반굴착에 따른 벽체의 안정성 및 인접구조물의 안정성을 이론적인 방법 등으로 평가할 수 없으며 복잡한 구조물 형태를 가능한 반영하고 지반조건을 고려한 3차원 터널 안정성 해석을 수행하는 것이 바람직하므로 이에 3차원 해석을 수행하였다. 해석단면의 개요와 해석 모델링은 Fig. 14에 나타내었다.

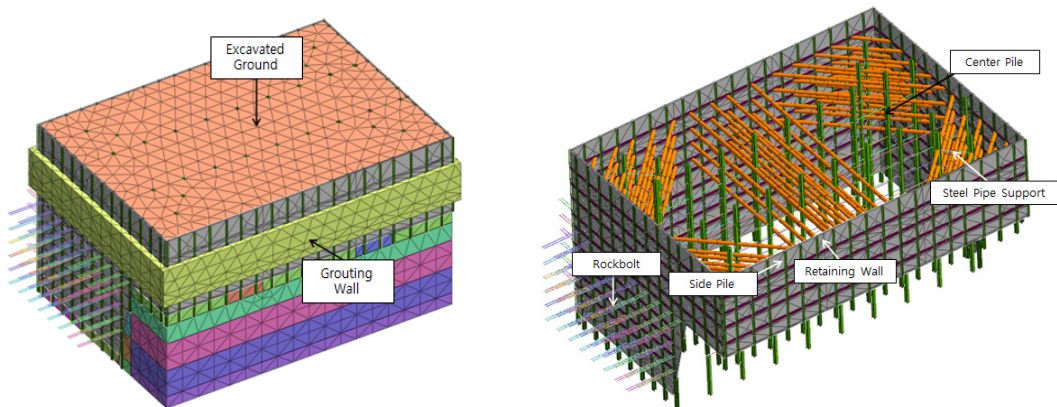


Fig. 14. 3D analysis modeling for earth retaining wall and support structure

본 안정성 해석은 104정거장에 계획된 흙막이벽체의 버팀구조와 지반굴착단계를 함께 고려한 3차원 시공단계 해석(응력해석)을 수행하였으며, 해석결과는 구조물의 안정성 판단에 활용하였고, 가시설벽체의 측점위치와 해석결과를 통해 예측된 흙막이벽체의 수평변위 및 지반의 주응력의 발생경향은 Fig. 15와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 측점위치별 발생한 벽체의 수평변위는 그림에서 보는 바와 같이 본선터널의 시공이 진행됨에 따라 증가한 후 변위와 부재력이 수렴하는 것으로 나타났다. 측점별 벽체변위는 측점 ①에서의 수평변위가 타 측점위치에서 평가된 변위보다 큰 것으로 나타났다. 지반 내 최대 주응력의 변화는 그림에서 보는 바와 같이 지반굴착시 응력이 증가한 후 수렴하는 것으로 나타났고, 최소 주응력의 변화는 지반굴착과정에서 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이 같은 해석결과를 통해 104정거장의 가시설벽체에 대한 안정성에 대한 평가결과는 Table 5에 나타난 바와 같고, 벽체에 발생한 변위는 허용 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

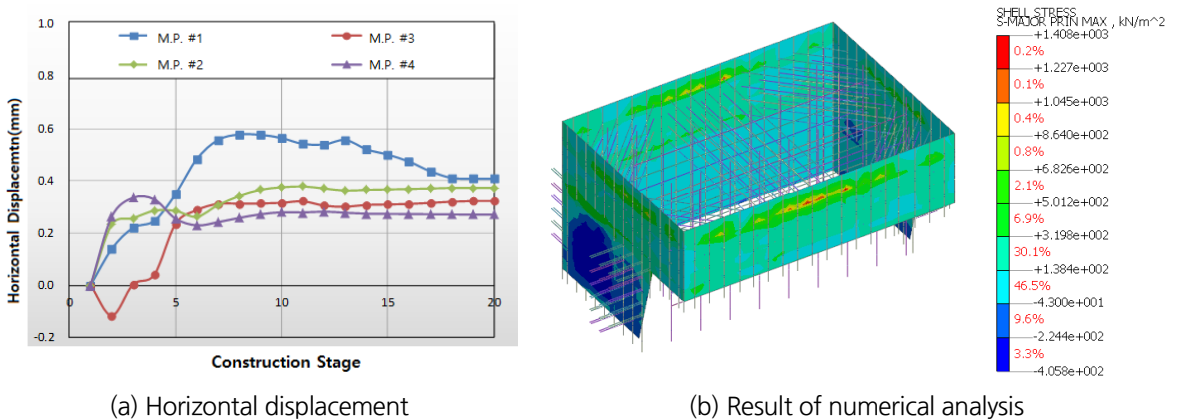


Fig. 15. 3D analysis result for stability earth retaining wall and support structure

Table 5. Summary of result of stability analysis for earth retaining wall and support structure

Classification		Excavation depth (H, m)	Max horizontal displacement (mm)	Allowable displacement (mm)	Stability analysis
Ground excavation	Point-1	22.34	0.5776	≤ 67.02	O.K
	Point-2		0.3233		O.K
	Point-3		0.3784		O.K
	Point-4		0.3360		O.K

4.2.3 가시설 벽체의 인접구조물에 대한 안정성 평가

104정거장 지반굴착으로 인해 연도변 주요 구조물 기초의 침하와 구조물의 변형이 발생할 수 있고 이로 인한 민원발생이 예상되므로, 지반반조건과 지반굴착 순서 등을 종합적으로 고려한 3차원 수치해석을 통해 인접구조물의 손상도를 평가하였으며, 해석단면의 개요와 해석 모델링은 Fig. 16에 나타난 바와 같다.

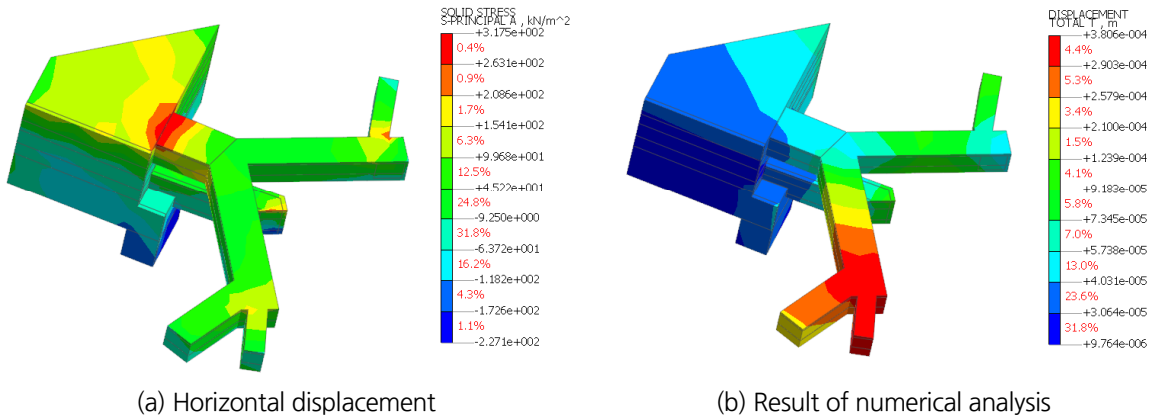


Fig. 16. Result of numerical analysis for adjacent structure

Fig. 17(a)는 수치해석결과로부터 예측된 시공단계별 고려대역 및 환승통로의 연직변위, 지표침하의 발생경향을 비교한 것이다. 또한 해석결과를 바탕으로 Boscardin & Cording 도표를 통해 구조물의 손상도를 평가한 것이다. 고려대역 및 환승통로의 연직변위 발생경향은 지반굴착이 진행됨에 따라 연직변위가 증가한 후 수렴되었으며, 이때 고려대역 환승통로의 최대 연직변위는 0.1286 mm 이었고, 가시설에 가장 인접한 측정점 ②에서 크게 발생하였다. 고려대역의 최대 연직변위는 0.0512 mm 이었고, 가시설에 가장 인접한 측정점 ④에서 크게 발생하였다. 구조물의 손상도를 평가한 바, Fig. 17(b)에 보인 바와 같이 “무시등급” 수준이었다. Table 6은 104정거장의 지반굴착이 완료된 경우의 고려대역 및 환승통로에 대한 해석결과를 보인 것이며, 이를 기준으로 구조물과 지표침하에 대한 안정성을 평가한 것이다. 평가결과, 구조물의 연직침하와 지표침하 모두 허용치를 만족하였으며, Boscardin & Cording 도표를 통해 평가한 바, 고려대역 및 환승통로의 구조적 안정성에 문제가 없음을 확인하였다.

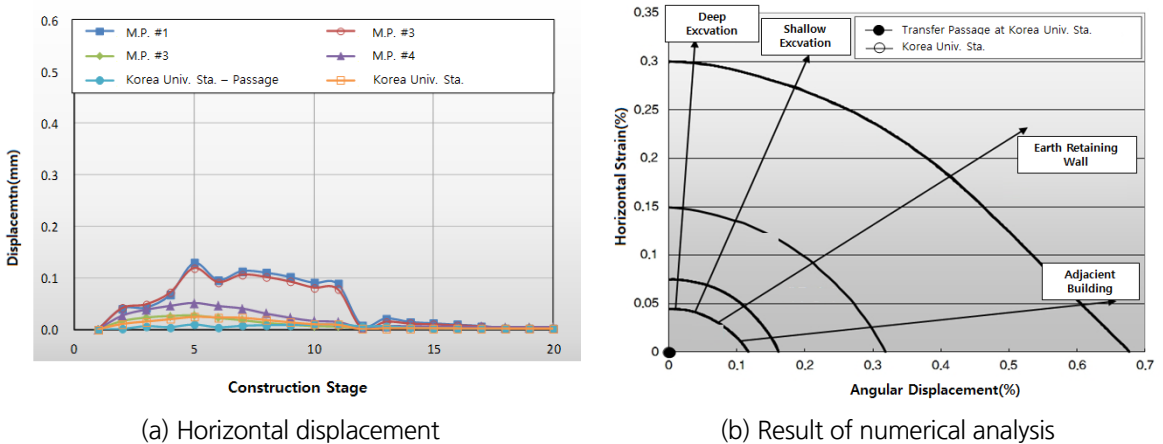


Fig. 17. Result of numerical analysis for adjacent structure and damage assessment

Table 6. Summary of result of damage assessment for adjacent structures

Classification	Max. settlement (mm)	Differential settlement (mm)	Angular displacement	Horizontal strain	Damage assessment criteria	Damage class
Korea University Connection Box	0.1286	0.0099	1/884,911.85	1/81,151.35	Settlement <25 mm Angular Disp.<1/500	Ignore
Korea University Station	0.0512	0.0242	1/1,221,396	1/13,678,373	Settlement <25 mm Angular Disp.<1/500	Ignore

4.3 104정거장 주변 건물 안정성 평가

104정거장 주변 건물 안정성에 대한 수치해석결과는 Fig. 18에서 보는 바와 같다. 또한 예측된 지반굴착단계별 104정거장의 주변건물에 대한 연직변위의 발생경향을 비교한 것을 Fig. 19(a)에 나타내었으며, Fig. 19(b)는 수치해석결과를 바탕으로 Boscardin & Cording 도표를 통해 구조물의 손상도를 평가한 것이다. 해석결과로부터 구한 주변건물의 연직변위는 주변건물-1과 2의 연직변위 발생경향은 지반굴착이 진행됨에 따라 연직변위가 증가한 후 대체로 변위가 수렴하는 것으로 나타났다. 주변건물-1의 최대 연직변위량은 0.0705 mm, 부등침하는 0.0008 mm이었고, 주변건물들 중 벽체에 가장 근접한 주변건물-2의 최대 연직변위량은 0.3988 mm이고, 부등침하는 0.0457 mm이었다. 이 같은 해석결과를 통해 평가된 주변건물의 침하량 및 각변위, 수평변형률 등은 Table 7과 같으며, 주변건물에 발생한 침하량은 모두 허용 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 또한 주변건물의 구조물 손상도를 평가한 결과 “무시등급” 수준이었고, 이에 104정거장 지반굴착시 가시설 벽체의 인접구조물은 구조적 안정성에 문제가 없음을 확인하였다.

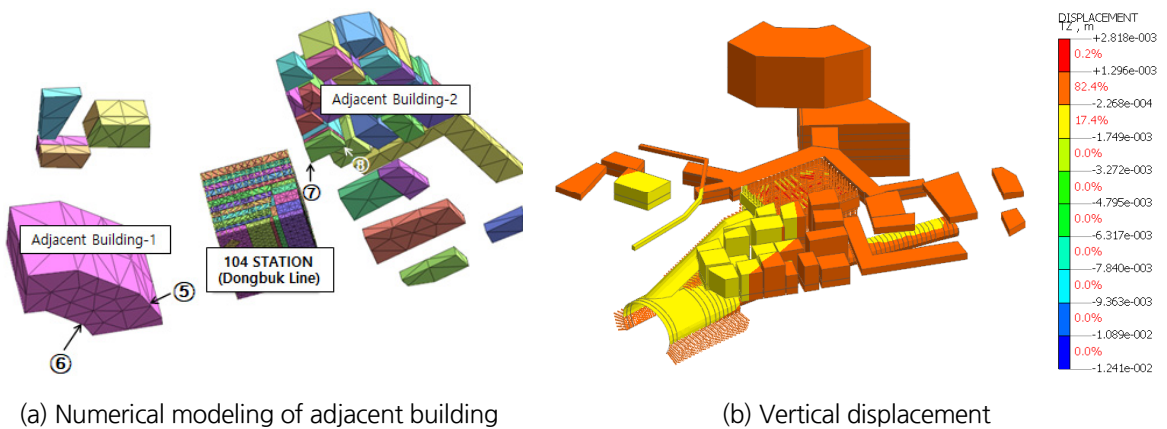


Fig. 18. Result of numerical analysis for adjacent structure

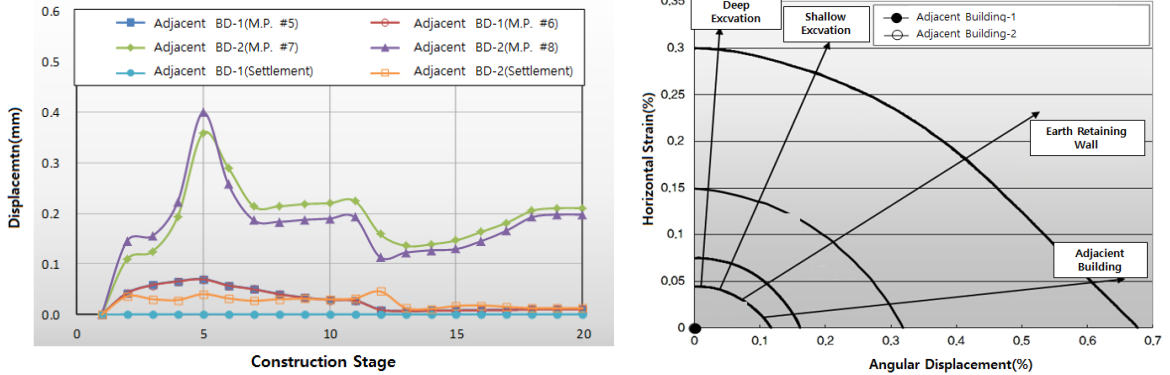


Fig. 19. Result of numerical analysis for adjacent structure and damage assessment

Table 7. Summary of result of damage assessment for adjacent buildings

Classification	Max. settlement (mm)	Differential settlement (mm)	Angular displacement	Horizontal strain	Damage assessment criteria	Damage class
Building-1	0.0705	0.0008	1/26,647,763	1/63,007.34	Settlement <25 mm Angular Disp.<1/500	Ignore
Building-2	0.3988	0.0457	1/255,930.14	1/36,335.4	Settlement <25 mm Angular Disp.<1/500	Ignore

5. 결론

본 연구에서는 도심지 터널의 근접시공에 따른 기존 정거장 구조물의 안정성에 미치는 영향에 대한 연구 수행을 위해 근접시공 관련기준 및 사례, 근접도 평가 및 정거장구조물 안정성 확보를 위한 최적의 터널 굴착 및 보강 방법을 검토하였으며, 정거장 직하부 터널 굴착에 따른 안정성 해석, 상세 구조검토를 통하여 현재 운행 중인 정거장 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하였다.

1. 지하철 6호선 고려대역 정거장 구조물의 안정성 확보를 위한 안전구역 설정을 위해 근접도 평가를 수행한 결과 A급 영역(안전진단 및 시공감리 주 1회 점검기준)에 해당되는 것으로 평가되었으나, 정거장구조물 기초지반 및 터널 주변지반이 경암이 분포하는 양호한 조건으로 터널시공에 따른 영향은 미소할 것으로 판단된다.
2. 정거장 터널 진입구간의 터파기 시공완료 시와 터널 굴착 시 인접건물의 변위는 허용기준을 만족하는 것으로 검토되었으며, 터널 굴착에 따른 정거장구조물의 손상도는 극미한 것으로 나타나 변형특성 영향은 크지 않은 것으로 평가되었다.
3. 도심지 도시철도의 신설 터널 굴착 및 벽체 철거에 따른 정거장구조물 부재력은 시공단계별 거의 유사한 값으

로 나타났으며, 설계 강도를 만족하여 기존 정거장 구조물의 안정성은 확보되는 것으로 검토되었다.

4. 도심지 도시철도의 근접시공 영향으로 인한 기존 정거장 구조물의 안정성을 확보하는 것으로 평가되었으나, 시공 중 정거장 구조물, 기존 지하철의 궤도 및 주변 인접건물에 대한 철저한 계측관리를 통하여 안정성 여부를 지속적으로 관리하도록 하여야 한다.

저자 기여도

한상민은 기초자료 수집과 검토 그리고 원고를 작성하였고, 이동혁은 자료 상세 분석과 해석을 하였고, 박두희는 연구 개념 및 설계, 원고 종합적으로 검토를 하였다.

References

1. Attewell, P.B. (1977), Ground movements caused by tunnelling in soil, Proceedings of the International Conference on Large Movements and Structures, London, pp. 812-948.
2. Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R. (1986), Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, Blackie, Glasgow, pp. 56-79.
3. Bjerrum, L. (1963), Allowable settlement of structures, Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Weisbaden, Germany, pp. 135-137.
4. Boscardin, M.D., Cording, E.J. (1989), Building response to excavation-induced settlement, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 115, No. GT1, pp. 1-21.
5. Burland, J.B. (1997), Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 1189-1201.
6. Burland, J.B., Wroth, C.P. (1974), Settlement of buildings and associated damage, Proceedings of a Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 611-654.
7. Cording, E.J., Hansmire, W.H. (1975), Displacements around soft ground tunnels, Proceedings of the 5th PanAmerican Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Session IV, pp. 571-632.
8. KICT (2019), A study on smart construction and maintenance of deep underground spaces to improve urban performance, Korea Institute of Construction and Technology, pp. 28-130.
9. Kim, Y.G. (2021), The impact and safety evaluation of tunnel construction in Uran Tunnelling, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 22, No. 3, pp.63-78.
10. Lee, S.R., Woo, S.W., Choi, C.S. (2010), Incheon metropolitan urban railroad line 2 (Construction section 206) project tunnel design case, Korean Society of Civil Engineers Magazine, Vol. 58, No. 7, pp. 33-40.
11. Lee, Y.J. (2004), Tunnelling adjacent to a row of loaded piles, Ph.D. Thesis, University College London, pp. 76-88.
12. MOLIT (2020), Standard manual for underground safety effect evaluation, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 1-222.

13. Seoul Metro (2001), Practical manual for adjacent construction in urban metro, pp. 1-222.
14. Seoul Metro (2008), Track maintenance regulations, Chapter 2, Track maintenance criteria [Attachment 5].
15. Shin, S.Y., Lee, J.S., Park, Y.G. (2009), A study on the stability of the existing subway structure due to nearby construction of new railway line, Conference of the Korean Society for Railway, Korean Society for Railway, pp. 2148-2165.