

교차터널 시공 시 도시철도 궤도 안정성 평가

Stability Analysis of Track in Urban Railways During Construction of Intersection Tunnel

이상승*, 박영곤**, 이성진**, 윤경원*, 이동근*, 전상수*†

Sang-Seung Lee*, Young-Kon Park**, Sung-Jin Lee**

Kyeong-Won Yoon*, Dong-Geun Lee*, Sang-Soo Jeon*†

Abstract Management institutions for urban railways have constructed transfer station in high floating population areas to provide an easy transfer for passengers. Most of tunnels in transfer station are constructed across above and below each other. The construction of the tunnels and superstructures induces the stress variation of ground in adjacent to the existing urban railways, the transformation of underground structures, and finally results in track irregularity. Track irregularity results in a rough ride, a wearing of rail, and even train derailment. In this study, the commercial program, FLAC3D, which is a three-dimensional finite-difference numerical code is used to do stability analysis of track by estimating track irregularity as the weight of superstructures is applied on ground surface and the intersection tunnel is constructed below the existing tunnel. Numerical results show that vertical and horizontal transformations are induced by the construction of intersection tunnels. Track irregularity is mainly induced by the vertical transformation .

Keywords : Urban railway, Intersection tunnel, Upper structure, Track irregularity, Stability

초 록 도시철도 운용기관은 인구의 유동이 많은 구간에 환승역을 건설하여 탑승자의 이동을 편리하게 하고 있다. 이러한 환승 구간의 터널은 대부분 상, 하부로 엇갈려 시공하는 교차터널이며 터널 위 지상에는 높은 인구 유동성으로 인하여 고층 구조물이 지속적으로 시공되고 있다. 교차터널 및 지상구조물 시공은 기존 도시철도 주변 지반의 응력을 변화시켜 지하 구조물의 변형을 초래, 궤도틀림을 유발한다. 궤도틀림은 승차감 저하 및 레일 마모를 발생시키며 열차의 탈선까지 발생시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 유한 차분해석 상용프로그램 FLAC3D를 이용, 지표면 상부에 구조물 하중이 재하 된 경우 도시 철도 하부 교차터널 시공에 따른 궤도틀림량을 산정하여 궤도안정성 평가를 수행하였다. 수치해석 결과 교차터널 시공에 의한 도시철도 궤도의 수직 및 수평 변형을 유발시키며 수직변형에 의한 궤도틀림이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

주요어 : 도시철도, 교차터널, 상부구조물, 궤도틀림, 안정성

1. 서 론

도시철도 운용기관은 인구의 유동이 많은 구간에 환승역을 건설하여 탑승자의 이동을 편리하게 하고 있다. 현재 준공 예정 노선까지 포함한 국내 도시철도 환승역 개소는 대전 6곳

† 교신저자: 인제대학교 공과대학 토목도시공학부(ssj@inje.ac.kr)

* 인제대학교 공과대학 토목도시공학부

** 한국철도기술연구원

대구 3곳, 광주 5곳, 부산 8곳, 서울 56곳으로서 도시인구 증가에 맞물려 점점 증가하고 있는 추세이다. 환승역의 구조는 十자형, T자형, L자형, 평행 형이 있으며 이중 교차터널의 형태를 가지는 十자형, T자형, L자형이 상대적으로 많이 시공되어 있다. 환승역의 주요 목적은 인구 유동이 많은 지역에 탑승자의 이동을 편리하게 하기 위하여 존재한다. 그러므로 환승역 주변 지역은 높은 인구 유동성으로 인해 각종 목적을 지닌 고층구조물이 지속적으로 시공되고 있다. 이러한 교차터널 및 지상구조물 시공으로 인한 지반 응력 변화는 기존 지하 구조물의 변형을 유발, 구조물 내에 시공된 궤도의 변형인 궤도틀림을 초래 한다. 궤도틀림은 선로의 변형으로 인해 발생하는 요소로서 차량 진동, 승차감 저하, 레일 마모 등의 문제점을 야기하며 계획적인 점검 및 보수가 이루어지지 않을 시 열차를 전복시킬 수 있는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 상용프로그램 FLAC3D를 이용하여 터널 표준시방서에 기재된 복선 터널 및 구조물 하중에 따른 도시철도 터널 내부의 궤도틀림량을 산정하고 국내 궤도틀림 기준을 적용한 안정성 평가를 수행하였다.

2. 도시철도 인접굴착공사 안전영역

인구의 증가로 인하여 새로운 도시철도 노선이 증설되면서 기존 터널구조물에 인접한 신규 터널구조물의 교차 시공 사례가 증가하고 있다. 그러므로 기존 터널구조물의 안정성을 확보하기 위하여 신규 구조물과 일정한 이격거리를 두는 안전영역(Safety zone)을 규정하여 운용하고 있다. Fig. 1은 서울도시철도공사의 인접 굴착공사 안전영역[1]을 나타내며 크게 3가지 등급으로 나뉜다. S등급은 기존 터널구조물 외측선 0.0~6.0m 이내의 구간을 나타내며 굴착이 금지되어 있으나 부득이하게 진행될 경우 외부 전문기관의 안전검토의 승인을 받은 후 진행하도록 되어있다. A등급은 구조물 외측선으로부터 터널구조물 최대직경의 2배(2D) 이내 범위이며 주 1회 안전진단 및 시공감리를 진행하도록 규정되어 있다. 끝으로 B등급은 A등급 이외의 범위로 월 1회 이상 안전진단 및 시공감리를 진행하도록 규정되어 있다. 본 연구에서는 A등급에 해당하는 구조물 외측선 10m 지점에 직경 10m의 터널구조물을 시공 하여 최근 급증하는 근접 교차터널 시공 사례를 적용하였다.

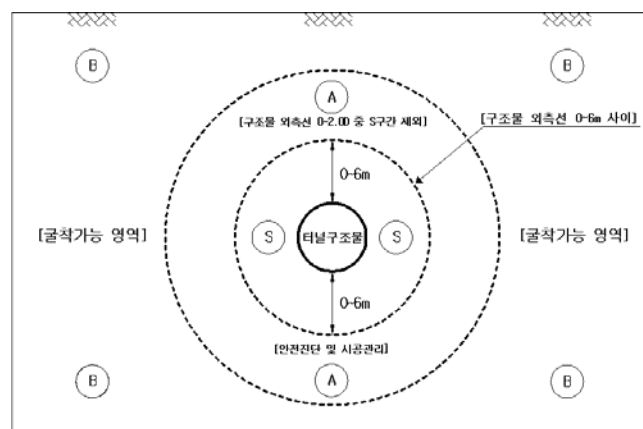


Fig. 1 Safety zone of seoul metropolitan rapid transit corporation

3. 궤도틀림

궤도틀림(Track irregularity)은 열차의 운행 및 구조물의 변형으로 인하여 차량의 주행 면에 발생하는 부정합을 뜻한다. 궤도틀림은 크게 궤간틀림, 줄틀림, 면틀림, 수평틀림, 평면성틀림으로 구성된다. 궤간틀림은 좌·우 레일간격의 틀림을 말하고 줄틀림은 레일의 횡 방향 굴곡 차를 뜻한다. 면틀림은 한쪽 레일의 종방향 높이차를 의미하며 수평틀림은 좌·우 레일의 높이차를 뜻한다. 끝으로 평면성틀림은 궤도의 일정 간격에서 수평 틀림 변화를 의미한다[2]. 본 연구에 적용된 궤도틀림 안정성 검토는 국내 도시철도 주요 운용기관인 서울메트로, 서울도시철도공사, 대전도시철도공사, 광주도시철도공사 그리고 부산교통공사에서 제정한 궤도틀림 기준[3-8]을 적용하였다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 조건

본 연구에서는 지상구조물 하중 재하 및 교차터널 시공으로 인한 터널구조물의 궤도틀림 안정성을 평가하기 위하여 프로그램인 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴모델을[11] 적용하였다. 수치해석 모델의 크기는 폭 50m, 길이 50m, 깊이 51m이다. 지표면으로부터 기존터널 상부까지 깊이는 10m이며 기존터널에서 10m 하부에 교차터널을 시공하였다. 지표면 구조물 상재하중 증가에 따른 궤도틀림 변위 발생량을 분석하기 위하여 터널 중앙부 144m² 면적에 층당 15Kpa의 하중을 적용, 20층 건물 하중 (300Kpa(Case I)), 30층 건물 하중 (450Kpa(Case II)), 40층 건물 하중 (600Kpa(Case III))을 적용한 총 3개 모델의 수치해석을 수행하였다. 수치해석 모식도는 Fig. 2에 나타내었고 3차원 수치해석 모델은 Fig. 3에 나타내었다.

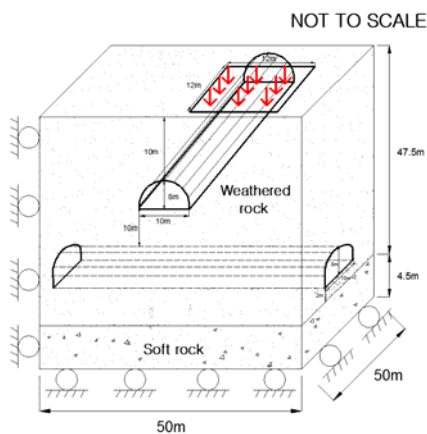


Fig. 2 Configuration of numerical analysis

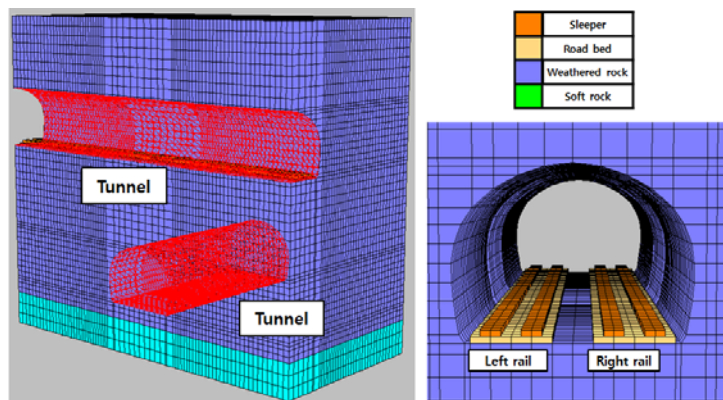


Fig. 3 Three-dimensional view of numerical analysis

4.2 지반 및 터널 특성

기존 및 신규 시공되는 터널은 동일한 종류의 터널이며 표준시방서에 기재된 복선티널[9]을 적용하였다. Table 1은 복선티널의 물리적 특성을 나타낸다. 본 연구의 지반은 풍화암, 연암으로 구성되었고 물리적 특성은 대전도시철도 1호선 00구간 현장 시료를 채취, 실내 시험을 통하여 산정된 물성[10]과 기존 문헌에 제시되어있는 물성을 이용하였으며 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of tunnel

	Unit weight (t/m ³)	Elastic modulus (t/m ²)	Poisson's ratio (ν)	Thickness (m)
Shotcrete	2.55	2.2 × 10 ⁵	0.23	0.3
Concrete lining	2.70	2.7 × 10 ⁵	0.24	0.4

Table 2 Physical properties of soil

	Unit weight (t/m ³)	Elastic modulus (t/m ²)	Poisson's ratio (ν)	Friction angle (m)	Cohesion (t/m ²)
Weathered rock	2.00	11,000	0.31	38	6.00
Soft rock	2.20	70,000	0.30	40	8.00

4.3 수치해석 결과

궤도틀림 변위 측정은 양방향 선로 10m 지점을 기점으로 측정하였다. 구조물하중 재하 및 교차터널 시공은 기존 터널구조물 중앙 상, 하부에서 발생하였다. 그러므로 두 가지 위험 영향 인자에 의한 구조물의 변형은 수직 방향으로 크게 발생하였고 수평 방향의 변형은 2mm 이내로 미소하게 발생하였다. 그러므로 궤도의 수평변형으로 인하여 발생하는 궤간틀림과 줄틀림의 경우 매우 미소한 변위가 발생하여 충분한 안정성을 확보한 것으로 나타났다. 구조물하중이 재하 된 경우 면틀림 변위를 나타내는 Fig. 4 (a)의 Case I 과 Case II가 허용기준 9mm를 초과하는 것을 알 수 있고 Case III는 구조물하중의 증가로 인하여 모든 도시철도 운용기관의 기준을 초과한 것으로 나타났다. 평면성틀림 변위를 나타내는 Fig. 4 (b)에서는 Case I 과 Case II의 발생 변위가 최소 허용기준 13mm를 초과, Case III는 허용기준 15mm를 초과한 것으로 나타났다. 수평틀림 변위 발생을 나타내는 Fig. 4 (c) 에서도 구조물하중 증가 시 변위 발생량이 증가하였으나 가장 많은 하중이 재하 된 Case III의 경우에서도 10.6mm의 변위가 발생, 서울 메트로, 광주도시철도공사 허용 기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 구조물하중 재하 및 교차터널 시공 완료 후의 궤도틀림 변위를 나타내는 Fig. 5 (a), (b), (c)를 살펴보면 교차터널 시공으로 인하여 궤도틀림 변위가 증가한 것을 알 수 있다. 교차터널 시공 이후의 면틀림 변위를 나타내는 Fig. 4 (a)를 살펴보면 세 가지 모든 Case에서 평균 20%의 변위가 증가, Fig. 4 (a)의 변위 발생과는 달리 Case II가 모든 도시철도 운용기관의 기준을 초과함을 알 수 있다. 평면성틀림 변위를 나타내는 Fig. 5 (b)는 변위 발생량이 평균 19%로 큰 폭으로 증가하였다. Case II의 경우 평면성틀림 또한 구조물하중만 재하 된 경우 허용기준을 만족하였으나 교

차 터널 시공으로 인하여 16.1mm의 변위가 발생하여 허용기준 15mm를 초과한 것으로 나타났다. 끝으로 수평틀림의 변위를 나타내는 Fig. 5 (c)를 살펴보면 면틀림, 평면성틀림과 마찬가지로 교차터널 시공으로 인해 지반변위가 증가하였으나 가장 큰 변위가 발생한 Case III에서도 허용기준 13mm를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 구조물하중 증가로 인한 각 궤도틀림의 최대 변위 증가는 면틀림이 75%, 평면성틀림이 55%, 수평틀림이 8% 증가하였다. 교차터널 시공으로 인한 최대 변위 증가는 면틀림 30%, 평면성틀림 26%, 수평틀림이 10%인 것으로 나타나 구조물하중 증가로 인한 궤도틀림 변위 증가율이 큰 것으로 나타났다.

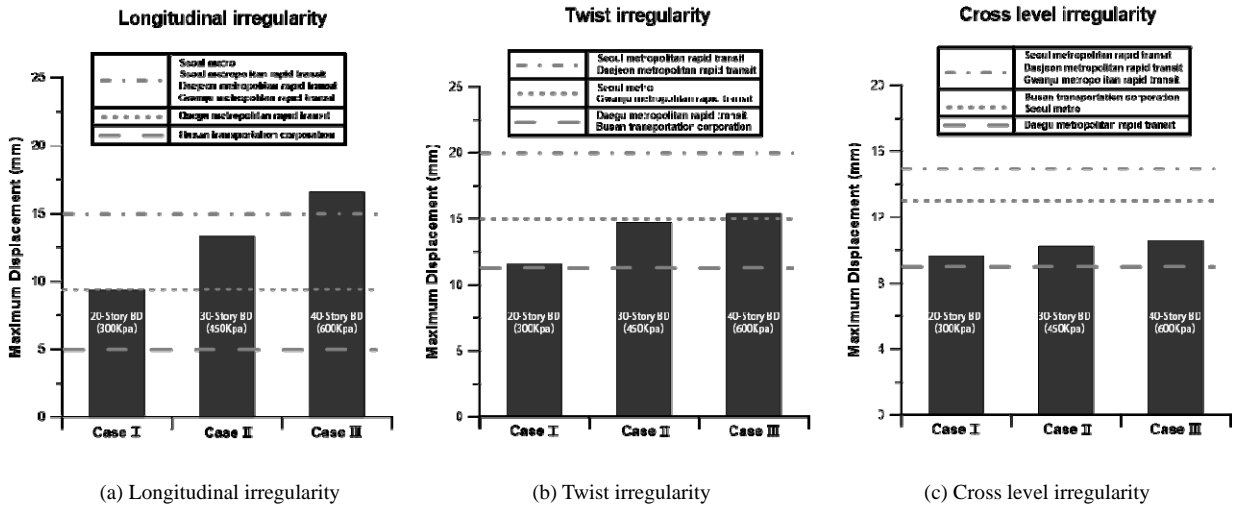


Fig. 4 Maximum displacement induced by track irregularity associated with super structure

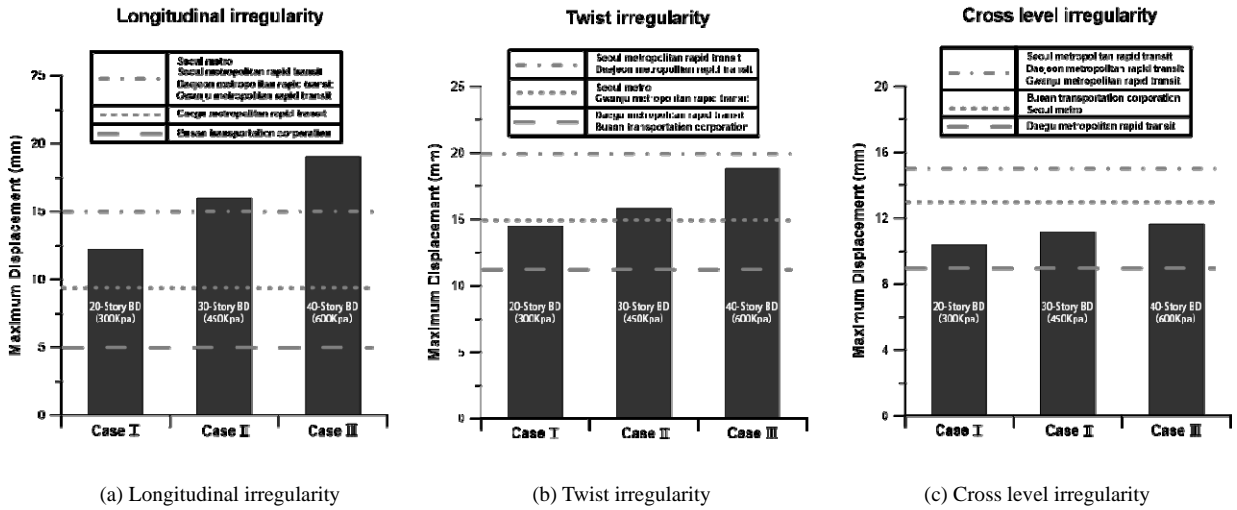


Fig. 5 Maximum displacement induced by track irregularity associated with super structure and construction of intersection tunnel

5. 결 론

본 연구에서는 기존터널 상, 하부에 각각 다양한 지상구조물 하중 재하 및 교차터널 시공 시 기존 터널의 궤도 변형을 산정하고 국내 도시철도 궤도틀림 기준을 적용한 기존터널의 궤도 안정성 평가를 수행하였다. 구조물하중 재하 및 교차터널 시공에 따른 줄틀림, 궤간틀림에는 미소한 영향을 미치나 수직 변위로 인하여 발생하는 면틀림, 평면성틀림, 수평틀림에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 도시철도 수직 구조물 및 교차터널 시공 시 수직 변위로 인하여 발생하는 궤도틀림에 대한 안정성을 확보하기 위해 터널 직경을 고려한 안전영역 확보와 침하를 방지하는 Pile 보강 공법 등 구조물로 인한 지반 변형을 감소시킬 수 있는 안전한 공법을 선정해야 한다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업의 일환으로 수행하였음. [융합연구단-14-2-ETRI, 사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발]

참고문헌

- [1] Seoul metropolitan express transit corporation (2011) *Management in practice of excavation near urban railway*, Seoul metropolitan express transit corporation, Seoul, Korea, pp. 97-104
- [2] The Korea society of railway (2008) *2008 Railway glossary*, The Korean society of railway, Seoul, Korea, pp.149-157
- [3] Seoul metro (2014) *Railway administration regulations*, Seoul metro, Seoul, Korea, pp 3-5.
- [4] Seoul metropolitan rapid transit corporation (2014) *Railway administration regulations*, Seoul metropolitan rapid transit corporation, Seoul, Korea, pp. 23-25.
- [5] Daejeon metropolitan express transit corporation (2014) *Railway administration regulations*, Daejeon metropolitan express transit corporation, Daejeon, Korea, pp. 12-16.
- [6] Gwangju metropolitan rapid transit corporation (2014) *Railway administration regulations*, Gwangju metropolitan rapid transit corporation, Gwangju, Korea, pp. 12-13.
- [7] Daegu metropolitan rapid transit corporation (2014) *Railway administration regulations*, Daegu metropolitan rapid transit corporation, Daegu, Korea, pp. 11-15.
- [8] Busan transportation corporation (2013) *Railway administration regulations*, Busan transportation corporation, Busan, Korea, pp. 12-15.
- [9] Ministry of land, infrastructure, and transport (2009) *Standard specification a tunnel*, Ministry of land, infrastructure, and transport, Sejong metropolitan autonomous city, Korea, pp. 111-125
- [10] Sunjin engineering corporation (1997) *Rail section 7 geotechnical research*, Daejeon metropolitan rapid transit corporation, Daejeon, Korea, pp 45-62.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. (2002) *FLAC3D Manual : Theory and background*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.