

## 인접지반 깊은 굴착시 도시철도 궤도 안정성 평가

### Assessment of Track Stability for Urban Railway in Adjacent to Deep Excavation

이상승\*, 이성진\*\*, 박영곤\*\*, 전상수\*†

Sang-Seung Lee\*, Sung-Jin Lee\*\*, Yeong-Gon Park\*\*, Sang-Soo Jeon\*†

**Abstract** Most of facilities of urban railway are constructed in underground and, as a deep excavation for a high rise building construction is undergoing adjacent to the urban railway, the strength of soil is changed by the ground loss. Settlement and heaving of underground structures causes a track transformation and irregularity. Track irregularity is very important factor because it reduces a comfortable ride and driving stability and, if continuous check and repairs are not carried out, it causes a derailment and overturning of train. In this study, stability assessments using a commercial three-dimensional finite difference model, FLAC3D, are carried out to examine a track irregularity of underground box structures associated with the ground characteristics based on the standards of track irregularity provided by each metropolitan as a deep excavation undergoes adjacent to the urban railway. Track gauge irregularity associated with ground variation is relatively very small but alignment irregularity, cross level irregularity, longitudinal irregularity, and twist irregularity are 56%, 55%, 76%, and 75%, respectively.

**Keywords** : Urban railway, Deep excavation, Numerical analysis, Track irregularity, Stability

**초 록** 대부분의 시설이 지중에 시공된 도시철도는 인접 지역 공사 진행 시 동반되는 굴착공사로 인하여 지반이완에 따른 응력변화를 갖게 된다. 이는 지하구조물의 침하 및 융기로 이어져 구조물 내에 시공된 궤도의 선로변형을 초래하며 궤도틀림을 유발한다. 궤도틀림은 승차감 저하 및 주행 안정성을 감소시키며 지속적인 점검 및 보수가 이루어지지 않을 경우 차량의 탈선과 전복을 발생시킬 수 있는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하여 도시철도 인접지반 대규모 굴착 발생 시 지반 특성에 따른 박스구조물 내에 시공된 궤도틀림량 산정 후 국내 도시철도 궤도틀림 기준을 적용하여 안정성 평가를 수행하였다. 굴착시 지반조건 변화에 의한 궤간틀림의 변위 차는 매우 미소하게 발생하였으나 줄틀림, 수평틀림, 면틀림, 평면성틀림은 각각 56%, 55%, 76%, 75%가 발생하였다.

**주요어** : 도시철도, 깊은 굴착, 수치해석, 궤도틀림, 안정성

## 1. 서 론

1970년대 후반을 기점으로 시작된 우리나라 도시철도 역사는 2016년 현재 영업 궤도 663.4km, 추가 영업 궤도 계획 1,266.8km에 이르며 국민 생활 운영에 중추적인 역할[1]을

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

\* 인제대학교 공과대학 토목도시공학부

\*\* 한국철도기술연구원

하고 있다. 기존에 시공된 도시철도는 운행 기간에 비례하여 여러 외부 위험요인에 노출되며 궤도 안정성에 부정적인 영향을 미치고 있다. 특히 인접 지역 공사 진행 시 동반되는 근접 굴착은 지반 응력 이완을 발생시켜 도시철도 구조물의 침하 및 용기를 야기하고 구조물 내에 시공된 궤도의 선로 변형을 초래하여 궤도틀림을 유발한다. 궤도틀림은 승차감 저하 및 주행 안정성 감소의 주된 원인이며 지속적인 점검 및 보수가 이루어지지 않을 경우 차량의 탈선과 전복을 발생시킬 수 있는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 유한 차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 대전도시철도에 시공된 박스구조물과 국내 도시철도에 시공되고 있는 Landing vehicle tracked(LVT)궤도, 최근 국내 굴착 현장에서 많이 사용하는 흙막이가시설(토류벽, C.I.P, Strut)을 적용하여 도시철도 인접지반 대규모 굴착 발생 시 지반 특성에 따른 박스구조물 내에 시공된 궤도틀림량을 산정 하고 국내 도시철도 궤도틀림 기준을 적용하여 안정성 평가를 수행하였다.

## 2. 궤도틀림

### 2.1 궤도틀림 정의 및 종류

궤도틀림(Track Irregularity)은 궤도가 열차의 반복하중 및 구조물의 변형으로 인하여 차량 주행 면에 생기는 부정합을 뜻한다. 국내 도시철도 운용기관에서 지정한 궤도틀림의 종류는 5가지이며 궤간틀림, 줄틀림, 면틀림, 수평틀림, 평면성틀림으로 구성되어 있다. 궤간틀림은 궤도의 규정된 치수를 벗어나 있는 상태로서 좌·우 레일간격의 틀림이 발생한 것을 말하며 줄틀림은 궤간 측정 선에 있어서 레일 방향의 좌·우 굴곡 차를 말한다. 면틀림은 한쪽 레일의 길이 방향에 대한 레일 면의 높이차를 뜻하며 수평틀림은 레일의 직각 방향에 있어 좌·우레일 면의 높이차를 말한다. 끝으로 평면성틀림은 궤도의 일정 간격에 있어서 수평틀림의 변화[2]를 뜻한다.

### 2.2 국내 도시철도 궤도틀림 기준

본 연구에 적용된 궤도틀림 안정성 검토기준은 국내 도시철도 주요 운용기관인 서울메트로, 서울도시철도공사, 대전도시철도공사, 광주도시철도공사 그리고 부산교통공사에서 제정한 궤도틀림 기준[3-8]을 적용하였다.

대부분의 기관에서 제정한 궤간틀림, 면틀림, 줄틀림의 기준은 매우 유사하나 부산교통공사와 대구도시철도공사에서 제정한 기준은 상대적으로 작으며 수평틀림, 평면성 틀림 기준은 각 기관마다 서로 유사하다. 기관마다 궤도틀림 기준 차이는 존재하나 초기 제정 시 과거 철도청 기준을 근간으로 하였으므로 큰 차이가 없다.

### 3. 구조물 및 지반특성

#### 3.1 터널 및 흙막이가시설

지중에 시공된 도시철도 지하 박스구조물은 대전도시철도에 시공된 박스구조물과 동일한 구조물을 적용 하였으며[9] 흙막이가시설(토류벽, C.I.P, Strut)은 최근 공사현장에서 많이 사용하고 있는 부재를 선정하였다. Table 1은 이들 부재의 특성을 나타낸다.

Table 1 Physical properties of structure

	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (t/m <sup>2</sup> )	Area (m <sup>2</sup> )	Moment of inertia (m <sup>4</sup> )
Earth retaining wall	7.80	2.10×10 <sup>7</sup>	8.36×10 <sup>-3</sup>	1.33×10 <sup>-4</sup>
C.I.P	2.50	2.00×10 <sup>6</sup>	1.26×10 <sup>-1</sup>	1.26×10 <sup>-3</sup>
Strut	7.80	2.10×10 <sup>7</sup>	1.20×10 <sup>-2</sup>	2.01×10 <sup>-4</sup>
Side wall of box	2.30	2.32×10 <sup>6</sup>	3.00×10 <sup>-1</sup>	2.25×10 <sup>-3</sup>
Top slab of box	2.30	2.32×10 <sup>6</sup>	1.00×10 <sup>-1</sup>	8.33×10 <sup>-4</sup>
Bottom slab of box	2.30	2.32×10 <sup>6</sup>	6.75×10 <sup>-1</sup>	2.56×10 <sup>-2</sup>

#### 3.2 지반조건

본 연구의 지반구성은 풍화토, 풍화암, 연암, 그리고 지반특성 변화 구간으로 구성되었으며 수치해석에 사용된 지반 물성은 대전도시철도 1호선 00구간 현장 시료를 채취한 후 실내 시험을 통하여 얻은 물성과[10] 기존 문헌에 제시된 지반 물성으로서 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of soil

	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (t/m <sup>2</sup> )	Poison's ratio (ν)	Friction angle (°)	Cohesion (t/m <sup>2</sup> )
Case I	1.78	<b>2,400</b>	0.33	31	0.30
Case II	1.80	<b>3,600</b>	0.33	32	0.32
Case III	1.82	<b>4,800</b>	0.33	35	0.33
Weathered sand	1.83	7,200	0.33	37	0.35
Weathered rock	2.00	11,000	0.31	38	6.00
Soft rock	2.20	70,000	0.30	40	8.00

### 4. 수치해석

#### 4.1 수치해석 조건

도시철도 인접지반 깊은 굴착으로 인한 케도틀림 안정성을 평가하기 위해 상용프로그램인 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴모델[11]을 적용하였다. 원지반의 크기는 굴착의 폭과 깊이의 영향을 고려하여 폭 210m, 깊이 70m, 길이 50m로 하였으며 굴착의 폭은 20m, 길이 25m, 최대 깊이 38.6m이다. 굴착 우측면과 박스구조물 좌측 벽체의 이격 거리는 14m이며 박스구조물 상부슬래브와 지표면까지의 거리는 11m이다. 지중에 시공된 박스구조물은 폭 4m, 높이 6m이며 수치해석 모식도는 Fig. 1 그리고 3차원 수치해석 모델은 Fig. 2와 같다.

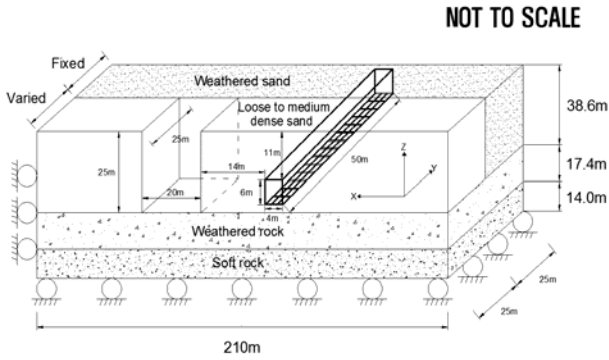


Fig. 1 Configuration of numerical analysis

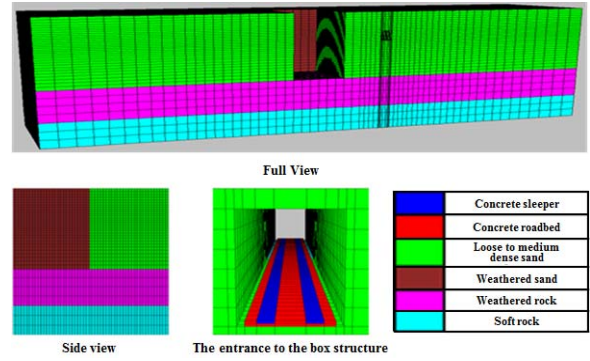


Fig. 2 Three-dimensional view of numerical analysis

#### 4.2 수치해석 결과

레일 10m 지점을 기점으로 측정한 수직, 수평 변위는 최대 굴착 깊이(38.6m)에서 가장 큰 변위가 발생하였고 지반 특성 변화구간의 지반 강성이 클수록 발생량이 감소하였다. 레일의 수평 변위를 매개변수로 하는 궤간틀림의 경우 Table 3에 나타나듯 굴착시 발생한 좌·우측 레일의 수평 변위 차가 매우 근소하여 궤간 변위에 거의 영향을 미치지 못하므로 궤간 틀림의 안정성이 확보된 것으로 나타났다. 레일 방향 수평면 좌·우 굴곡 차로 인하여 발생하는 줄틀림은 좌·우 레일 평균 변위 발생량이 Case I의 경우 5.55mm, Case II의 경우 3.25mm, Case III는 2.45mm로서 지반 조건에 따라 최대 56%의 변위 차이가 발생하였으나 최대 변위 발생량이 최소 줄틀림 기준인 7mm(부산교통공사)에 미치지 않아 줄틀림에 대한 안정성이 확보된 것으로 나타났다. 수평틀림은 레일 직각 방향의 수직 변위 차로 인하여 발생하는데 Table 3에 나타나듯이 한 방향에 대한 레일 수직 변위 차는 크게 발생하지만 같은 지점의 좌·우레일 수직 변위 차이는 미소하여 모두 2mm 내의 변위가 발생하여 충분한 안정성이 확보된 것으로 나타났다. 면틀림은 한 방향에 대한 레일 면의 수직 높이차로 인하여 발생한다. Case I의 면틀림 변위 발생량은 Fig. 3(a)에 나타 내었으며 굴착 1단계에서 모든 도시철도 운용기관의 허용 기준을 초과하였고 2, 3단계 굴착시 히빙(Heaving)으로 인하여 변위량이 감소하였다가 굴착 4, 5, 6단계로 진행될수록 다시 변위 발생량이 증가하였다. Case II와 Case III의 변위발생량은 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 나타내었으며 앞의 Case I과 동일한 변위 발생

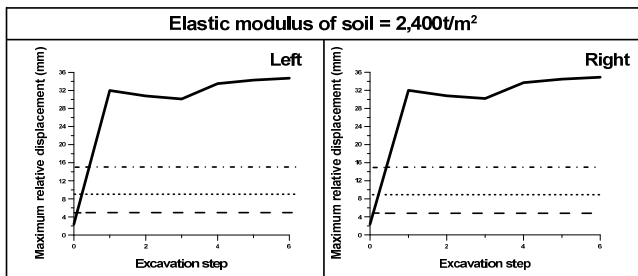
Table 3 Horizontal and vertical displacement generated at track for Case I, Case II, Case III

	Displacement (mm)	Track	Position (m)					
			0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
Case I	Horizontal	Left	-16.7	-14.8	-9.7	-4.2	-2.5	-2.2
		Right	-16.6	-14.7	-9.7	-4.1	-2.4	-2.2
	Vertical	Left	-81.1	-76.8	-65.1	-30.1	-25.8	-23.8
		Right	-79.2	-76.1	-64.8	-30.1	-25.7	-23.8
Case II	Horizontal	Left	-11.6	-9.9	-6.9	-3.6	-2.2	-1.8
		Right	-11.5	-9.9	-6.8	-3.6	-2.2	-1.7
	Vertical	Left	-50.4	-47.3	-41.0	-25.9	-22.6	-20.9
		Right	-50.1	-47.2	-41.0	-25.1	-22.5	-20.9
Case III	Horizontal	Left	-8.8	-8.0	-5.8	-3.4	-2.0	-1.8
		Right	-8.7	-7.8	-5.7	-3.2	-2.0	-1.8
	Vertical	Left	-40.6	-37.2	-32.6	-24.2	-20.6	-18.1
		Right	-40.3	-37.2	-32.2	-24.0	-20.5	-18.31

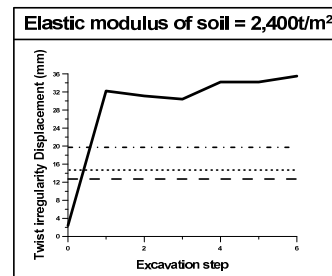
추세를 나타내지만 지반 탄성계수 증가함에 따라 변위 발생량이 현저하게 감소하였다. Case II의 경우 6단계 굴착에서 모든 기관에서 제시한 기준을 초과하는 변위가 발생하였으나 Case I과 비교하면 56% 변위가 감소하였고 Case III는 76% 감소한 변위가 발생하였다. 궤도의 일정 간격에서 수평 틀림의 변화를 뜻하는 평면성틀림은 Fig. 4에 나타나듯이 면틀림과 비슷한 추세의 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 평면성틀림 Case I의 경우 면틀림 Case I과 마찬가지로 6단계 굴착 시 모든 기관 기준을 초과하는 변위가 발생하였고 Case II는 Case I가 비교하면 55% 변위가 감소하여 상대적으로 중간 기준인 서울메트로, 광주, 대구 도시철도의 기준을 초과하였다. 마지막으로 Case III의 경우 Case I과 비교하여 75% 감소한 변위가 발생하여 모든 기관에서 제시한 기준을 초과하지 않았다.

.....	Seoul metro
.....	Seoul metropolitan rapid transit
.....	Daejeon metropolitan rapid transit
.....	Gwangju metropolitan rapid transit
.....	Daegu metropolitan rapid transit
----	Busan transportation corporation

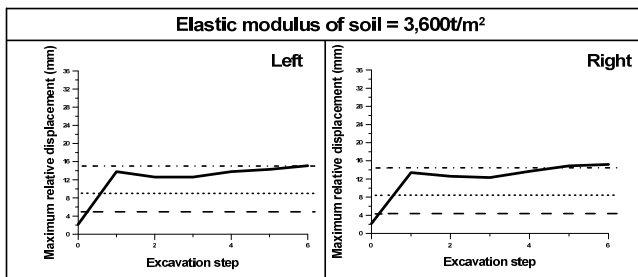
.....	Seoul metropolitan rapid transit
.....	Daejeon metropolitan rapid transit
.....	Seoul metro
.....	Gwangju metropolitan rapid transit
.....	Daegu metropolitan rapid transit
----	Busan transportation corporation



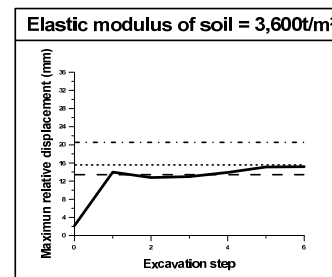
(a) Case I



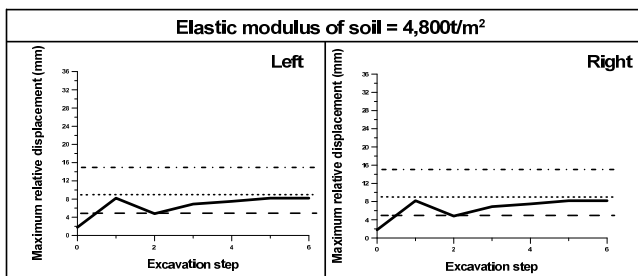
(a) Case I



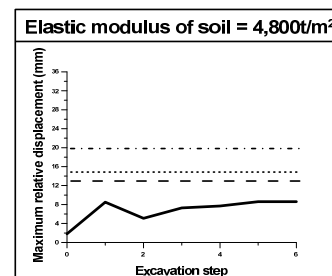
(b) Case II



(b) Case II



(c) Case III



(c) Case III

Fig. 3 Longitudinal irregularity of track

Fig. 4 Twist irregularity of track

## 5. 결 론

본 연구에서는 도시철도 인접지반 깊은 굴착 시 지반 특성에 따른 박스구조물 내에 시공된 궤도틀림 안정성 평가를 삼차원 수치해석을 통하여 수행하였다. 지반 특성 변화에 따라 인접지반 깊은 굴착으로 인한 궤도의 변형은 궤간틀림, 줄틀림, 수평틀림에는 큰 영향을 미치지 않았으나 궤도의 수직 변위로 인해 발생하는 면틀림, 평면성틀림의 변위 발생량이 틀림 기준에 근접하거나 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 도시철도 구조물 시공 시 면틀림, 평면성틀림에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 지반 강성의 변화가 큰 곳에는 강성이 약한 지반 치환, 또는 침하를 방지하는 Pile 보강공법 등 궤도의 변형을 감소시킬 수 있는 경제적이고 안전한 공법을 선정하여 구조물 시공이 이루어져야 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] H. S. Kim, J. K. Ryu, J. H. Min, D. U. Han, et al. (2011) Initial input cost analysis by different construction types of slab tracks in urban railway, *Autumn Conference & Annual Meeting of Korea Society for Railway*, Hoeng sung, Korea, pp.400-405.
- [2] The Korean 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, 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] Daejeon metropolitan express transit corporation (1995) *Daejeon subway line 2 design service*, Daejeon metropolitan express transit corporation, Daejeon, Korea, pp 4-12.
- [10] Sunjin engineering corporation (1997) *Rail section 7 geotechnical research*, Daejeon metropolitan transit corporation, Daejeon, Korea, pp 45-62.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. (2002) *FLAC3D Manual : Theory and background*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.