

수치해석을 통한 철도노반 인접 굴착 시 궤도틀림 분석

Numerical Analysis of Track Irregularity in Excavation Adjacent to Railway Trackbed

이 석 준¹⁾ · 오 동 욱²⁾ · 장 성 민³⁾ · 반즈락츠가랍⁴⁾ · 정 혁 상[†]

Seokjun Lee · Dongwook Oh · Seongmin Jang · Batchimeg Banzragchgarav · Hyuksang Jung

Received: November 8th, 2023; Revised: November 10th, 2023; Accepted: November 24th, 2023

ABSTRACT : In this paper, a track irregularity according to adjacent deep excavation of railway was analyzed using three-dimensional numerical analysis. The construction for excavation adjacent to the railway track is likely to have a negative impact on train operations. Despite mandatory assessments of the stability and impact on adjacent structures during construction, reports continue to indicate ongoing settlement and track irregularity resulting from construction. Changes in the groundwater level and stress state of the ground due to excavation are pointed out as causes for settlement and track irregularity in structures adjacent to the excavation. In this study, therefore, numerical analysis was conducted taking into account factors that induce track irregularity during adjacent excavation work as variables. The KRL-2012 standard train load was applied to simulate operating trains. As a results, The position of the train load, the distance from the excavation point, had a significant impact on track irregularity, and there was a significant occurrence of track misalignment when the train load was applied. The impact of the groundwater level was not significant.

Keywords : Track irregularity, Train load, Excavation, Numerical analysis

요 지 : 본 논문에서는 3차원 수치해석을 통해 철도 노반에 인접한 굴착공사 시 궤도의 틀림을 분석하였다. 철도 노반에 인접한 굴착 공사는 열차 주행에 영향을 미칠 가능성이 높아 공사 시 인접 구조물의 안정성 및 영향성 검토를 필수로 수행하고 있지만, 그럼에도 불구하고 공사에 따른 침하 및 궤도틀림이 지속적으로 보고되고 있다. 굴착공사로 인한 지하수위, 지반의 응력 상태 변화 등은 인접 굴착 공사에 따른 구조물의 침하와 궤도틀림의 원인으로 지적되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 인접 굴착 공사 시 궤도틀림을 유발하는 인자를 변수로 고려하여 수치해석을 수행하였으며 운행 열차를 모사하기 위해 KRL-2012 표준 열차하중을 적용하였다. 분석 결과, 열차하중의 위치, 굴착지점과의 거리가 궤도틀림에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 열차 하중이 작용할 때 궤도 틀림이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 지하수위의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

주요어 : 궤도틀림, 열차하중, 굴착, 수치해석

1. 서 론

최근 국내 철도 시설물 주위 건설 및 개발이 증가하여 기존 선과 인접한 공사가 증가하고 있다(Choi et al., 2022). 열차운행선 인접 흠막이 공사는 지반 응력을 변화시켜 철도 구조물의 용기 및 침하를 초래하고 궤도틀림을 유발한다(Jeon & Lee, 2018). 또한 지반침하에 의해 철도노반 침하 또는 궤도틀림 등을 유발하여 열차사고를 발생시킨다(Jung, 2019). Jeon et al.(2018)에 따르면 기존 철도 구조물과 인접한 신축 구조물 공사에 따른 철도 구조물의 안전성이 요구되고 있다고 언급하였다. Kim et al.(2022)은 철도운행선 주변에서 지반 굴착 시 지반 응력 재분배 및 지하수위 변화

등으로 철도 시설물에 영향을 미치게 되어 지반침하 및 궤도틀림 등의 사례가 빈번하게 발생하고 있음을 언급하였다. Kim et al.(2022)은 운행 중인 열차의 탈선 등 철도 안전사고를 유발할 수 있어 인명피해뿐만 아니라 경제적인 손실까지 발생될 수 있음을 언급하였다. 서울교통공사는 철도보호지구 내 굴착공사로 인한 철도 시설물의 안전성 확인을 위해 인접 굴착공사장 관리예규와 근접시공 관리 매뉴얼을 제시하고 있으며 관리 매뉴얼에 따라 영향성 검토가 수행되고 있다(Lim et al., 2023). 현재 철도노반 인접 굴착공사 시 발생하는 궤도틀림에 대해서 연구들이 수행되고 있으나 철도노반 인접 굴착공사 시 굴착 깊이, 굴착 면적, 지하수위, 열차 하중 위치 등 궤도틀림 발생 원인을 고려한 복합적인 연구

1) Graduate Student (Master Course), Dept. of Railway Construction and Safety Engineering, Dongyang University

2) Reserch Professor, Department of Railway Construction and Safety Engineering, Dongyang University

3) Ph.D Course, Dept. of Construction Engineering, Dongyang University

4) Graduate Student (Master Course), Dept. of Railway Construction and Safety Engineering, Dongyang University

† Professor, Dept. of Railway Construction and Safety Engineering, Dongyang University (Corresponding Author : yoricom@dyu.ac.kr)

가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 궤도틀림 발생 원인을 분석하여 사전에 열차사고를 방지하고자 궤도에 영향을 미치는 변수들을 고려하여 3차원 수치해석을 통해 철도 노반 인접 굴착 공사 시 발생하는 궤도틀림을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 철도보호지구 정의

철도보호지구는 철도경계선(가장 바깥쪽 궤도의 끝선)으로부터 30m 이내의 지역을 의미하며 도시철도 중 노면전차의 경우에는 10m 이내의 지역을 의미한다. 철도 시설물들을 보호하기 위해서 가장 외측 궤도로부터 30m 이내에서 이루어지는 행위들에 대해 열차운행의 안전성과 철도시설의 영향성을 검토 및 점검하도록 되어있다(Oh, 2022). 철도보호지구 내 행위 중 철도인접공사는 건설 및 유지보수 작업을 위하여 열차의 운행을 지장하거나 지장할 우려가 있는 작업으로 한국철도공사 사규에 정의하고 있다(Park et al., 2014).

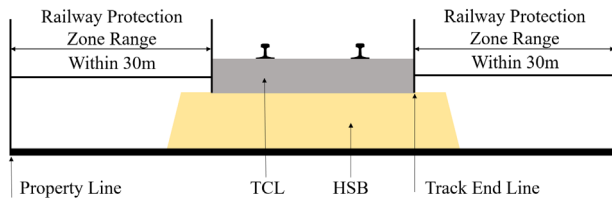


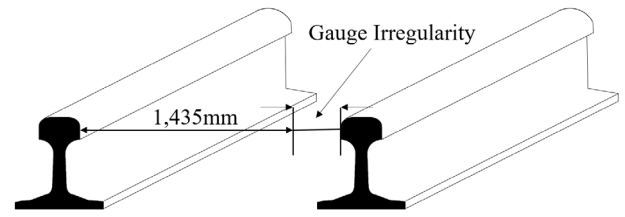
Fig. 1. Concrete track Railway Protection Zone

2.2 궤도틀림 정의 및 종류

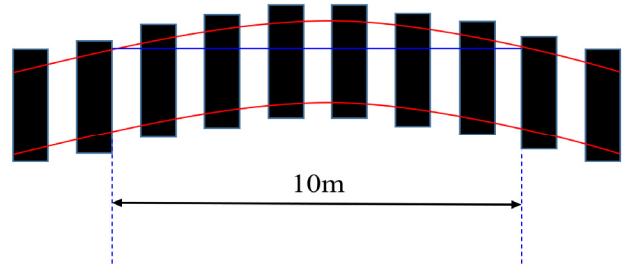
궤도틀림은 구조물의 변형 및 열차의 반복하중으로 인해 궤도의 주행면에 발생하는 부정합을 의미하며 궤간틀림, 방향틀림, 고저틀림, 수평틀림, 평면성틀림으로 구성되어 있다. 궤간틀림은 레일이 규정된 치수를 벗어나 있는 상태로 좌·우 레일 간격의 틀림이 발생한 것을 말하며 방향틀림은 궤간 측정선에 있어서 레일 방향의 좌·우 굴곡 차를 말한다. 수평틀림은 레일 직각 방향의 레일 면의 높이 차를 말하며 고저틀림은 한쪽 레일의 길이 방향에 대한 레일 면의 높이 차를 말한다. 끝으로 평면성틀림은 궤도의 일정 간격에 수평틀림 변화를 뜻한다(Jeon & Lee, 2018).

2.3 연구동향

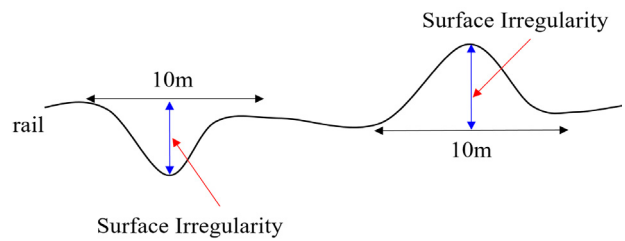
Jeon & Lee(2018)은 도시철도 인접 지역 굴착공사 시 발생하는 지반침하 및 지하수위 변화가 궤도틀림을 유발하여 도시



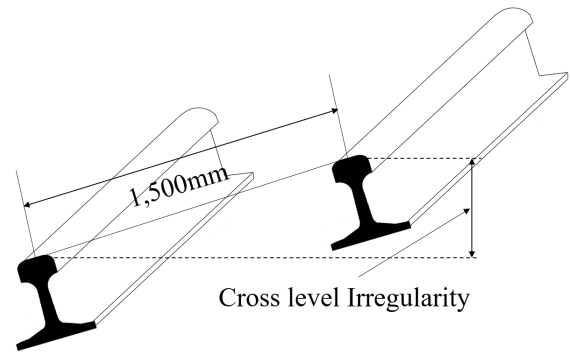
(a) Gauge irregularity



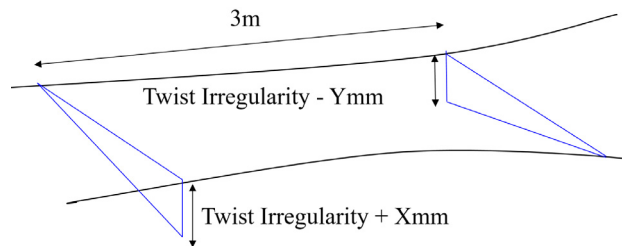
(b) Alignment irregularity



(c) Surface irregularity



(d) Cross level irregularity



(e) Twist irregularity

Fig. 2. Track irregularity type

철도 인접지반 대규모 굴착공사 시 지하수위에 따른 궤도틀림을 분석하고자 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 사용하여 Mohr-Coulomb 파괴모형을 적용하였으며 지하수위에 따른 궤도의 변형을

파악하기 위해 지하수의 위치를 6가지 경우로 수치해석을 수행하였다. 그 결과 굴착 시 지하수위에 따른 궤도틀림 발생은 궤간틀림, 수평틀림과 평면성틀림에는 크게 영향을 미치지 않았으나 고저틀림과 방향틀림은 큰 틀림이 발생하여 일부 도시철도 운용기관의 허용 기준치를 초과하는 것으로 확인하였다. 또한 지하수위에 따른 궤도틀림은 지하수위가 상승할수록 증가하였다. 이를 통해 간극수압에 의한 철도시설물의 영향이 지대한 것으로 언급하였으며 궤도틀림으로 인해 발생하는 사고를 사전에 방지하기 위해 수행한 수치해석과 실시간 모니터링을 실시하는 것이 바람직하다고 언급하였다.

Nam et al.(2022)은 철도시설물에 인접한 굴착공사로 인해 철로의 안정성에 문제를 야기하여 기존 지상철도 인접 굴착 시 안정성 검토를 위한 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 실트질 모래 성분인 지반조건과 지표로부터 3m 아래에 존재하는 지하수위 조건을 적용하였으며 궤도로부터 약 11m 떨어진 지점에서 6.7m 굴착하였다. 그 결과 궤도틀림 중 궤간틀림이 0.15mm로 가장 크게 나타났다. 따라서 인접 지상철도에 미치는 영향은 미소한 것으로 확인하였다. 이를 통해 지상철도 인접 굴착 시 안정성 확보에는 문제가 없는 것으로 언급하였다.

Kim et al.(2022)은 기존 운행선 주변에서 대형 굴착 시 굴착 단계별 궤도틀림 수준을 파악하고자 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 궤도와 수평 약 13.3m 이격하여 지반을 굴착하였으며, 굴착심도는 약 21.4m 굴착하였다. 그 결과 굴착에 따른 궤도틀림 중 연직 변위 특성을 가진 고저틀림이 크게 발생하였으나 전체적인 변형특성은 수평 변위가 지배적인 것으로 확인하였다. 이는 굴착공사 현장이 선로의 측면에 위치하는 측방굴착의 영향인 것으로 언급하였다. 또한 현재 발생한 궤도틀림을 바탕으로 인접 굴착에 따른 추가적인 변위 특성이 발생하는 위치별로 중요도를 구분하여 관리가 필요한 것으로 시사하였다.

Ahn et al.(2022)은 철도 구조물에 인접한 굴착공사에 따른 궤도틀림에 대하여 안정성 분석 검토를 하고자 3차원 수치해석을 수행하였으며, 시공 시 측정되는 계측데이터와 비교·분석하였다. 수치해석에서 철도 구조물과 흙막이 벽체가 약 13.6m 이격 되어있으며, 최대 굴착 깊이는 12.9m로 모델링을 모사하여 수행하였다. 그 결과 계측 결과는 고저틀림 0.555mm, 수평틀림 0.579mm 확인되었으며 수치해석은 고저틀림 0.288mm, 수평틀림 0.008mm 확인되었다. 이는 수치해석 시 반영되지 못한 인자 중 굴착에 따른 진동, 레일의 온도변화 등에 따른 궤도틀림 계측데이터에서 수치해석값보다 다소 증가한 것으로 언급하였다.

현재까지 연구들에는 철도노반에 인접한 굴착공사 시 지하수위, 굴착깊이, 이격거리 및 지반조건에 따른 궤도틀림에 대해 주로 연구가 이뤄져 왔다. 본 연구에서는 언급된 연구들에서 궤도 변위 및 궤도 틀림에 영향을 미치는 인자들을 반영하고 철도노반에 인접한 굴착공사 시 발생하는 궤도 틀림을 인자의 종류에 따라 비교·분석하였다.

3. 수치해석

3.1 개요

본 연구에서는 철도노반에 인접한 굴착공사 시 발생하는 궤도틀림을 분석하기 위해 수행한 3차원 수치해석에 대한 내용을 다루었다. 철도노반에서의 궤도틀림 발생원인 인자들에 대한 영향수준을 파악하기 위해 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D를 활용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. PLAXIS 3D는 지반공학 분야에서 다양한 문제의 안전성 및 구조물의 변형을 분석하는데 널리 활용되고 있는 프로그램이다(Brinkgreve et al., 2016). Jeon & Lee(2018)에 따르면 지하수위 변화는 궤도틀림을 유발하는 원인이라고 언급한 바 있으며, 지반 굴착 시 지하수위는 지반 응력 변화에 원인이 되어 궤도틀림을 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 궤도틀림 발생원인 인자 중 지하수위, 열차하중 위치 등을 고려하여 수치해석을 수행하였다.

3.2 구성 모델 및 재료 물성

성토노반 및 원지반에는 일반적으로 많이 사용하고 있는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb(MC) 모델로 적용하여 비배수 조건에 대하여 해석하였으며 Rail, TCL, HSB는 영구 변형이 일어나지 않고 선형 탄성인 Linear-Elastic(LE) 모델로 적용하였다. 수치해석의 절차로는 원지반, 철도노반, 콘크리트 궤도, 레일 순으로 철도설계기준에 맞게 모델링을 모사하였으며 원지반은 인접 굴착공사를 고려하여 풍화토층으로 모사하여 국가철도공단(2012)의 KR C-12050에서 산정한 풍화토 물성으로 적용하였다. 또한 Oh et al.(2023)이 선행 연구에서 적용한 매개변수 및 물성을 설정하였으며, 변수에 따른 Case study를 통해 궤도에 발생하는 궤도틀림량을 분석하였다. Table 1은 수치해석에 적용된 궤도 및 철도노반의 물성을 나타내고 있으며, Table 2는 원지반의 물성을 나타내고 있다. 또한 Fig. 3에서 모델링 모식도를 보여주고 있다.

Table 1. Material properties railway trackbed and ground for numerical analysis

Name	Reinforced track bed	Upper track bed	Weathered soil
Model	Mohr-Coulomb		
γ (kN/m ³)	20	20	20
E (MPa)	120	80	20
ν	0.2	0.2	0.35
ϕ (°)	40	35	30
c (MPa)	0	0	0.03

Table 2. Material properties of railway track for numerical analysis

Name	Rail	TCL	HSB
Model	Linear Elastic		
γ (kN/m ³)	70	24.5	23
E (MPa)	210,000	34,000	12,900
ν	-	0.2	0.2

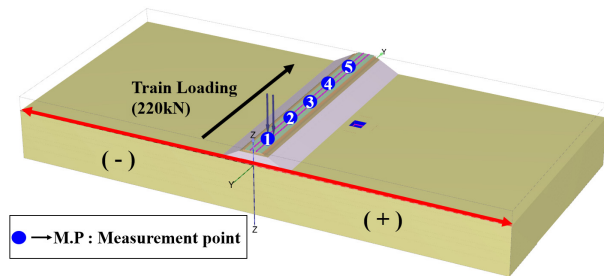


Fig. 3. 3D numerical modelling

3.3 모델링 및 해석조건

수치해석의 조건으로는 궤도틀림 발생원인 인자 중 지하 수위, 열차하중 위치 등이 있으며 원지반, 철도노반, 콘크리트 궤도의 길이는 58m로 모델링하였다. 또한 z-max는 자유 상태를 z-min는 수평, 연직 방향으로 경계조건을 형성하였으며 x_max, x_min, y_max, y_min는 모두 수평 방향의 변위를 구속하였다. 열차하중은 국가철도공단(2017)의 하중편에서 산정한 KRL-2012 표준열차하중(여객, 화물 혼용선)으로 적용하였으며, 좌·우 레일에 각각 110kN를 적용하고 열차 진행 방향으로 이동시켜 열차의 이동하중을 모사하였다. 철도노반에서 굴착 위치는 이격거리가 약 10m(9.9m)인 지점으로 굴착공사를 모사하였으며, 굴착 면적은 3m × 3m로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 열차하중 위치(T.P : Train loading Point), 측정 위치(M.P : Measurement Point) 모두 number 1(8m), number 2(18m), number 3(28m), number 4(38m), number 5(48m)로 동일한 위치로 선정하였다. 굴착 과정에서 1m 씩 총 9단계로 굴착하였으며 총 1단계, 4단계, 7단계 굴착 후 흙막이벽 각각 3개의 앵커를 설치하였다. Table 3은 수치해석 조건을 나타내고 있으며 Fig. 4는 수치

Table 3. Conditions of numerical analysis

Division	Input parameter
Ground water level (m)	0 / -10 / -15 / -20
Train loading (kN)	220
Excavation depth (m)	9
Ground condition	Weathered soil

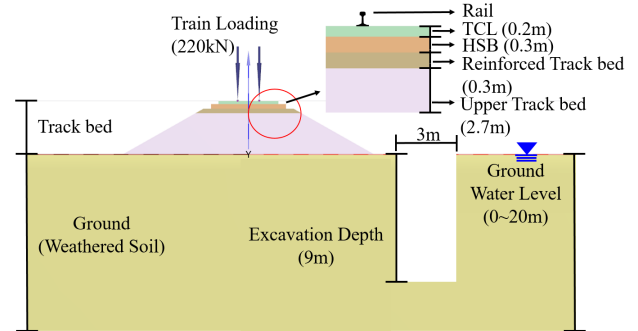


Fig. 4. Condition for numerical analysis

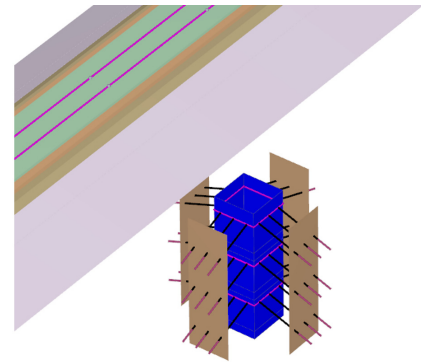


Fig. 5. Retaining wall and anchor numerical modelling

해석의 조건 및 제원, Fig. 5는 흙막이벽과 앵커의 모델링을 보여주고 있다.

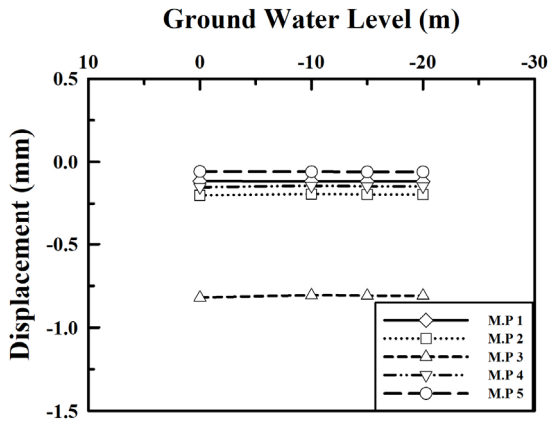
4. 수치해석 결과 분석

4.1 열차 위치에 따른 궤도 변위 분석

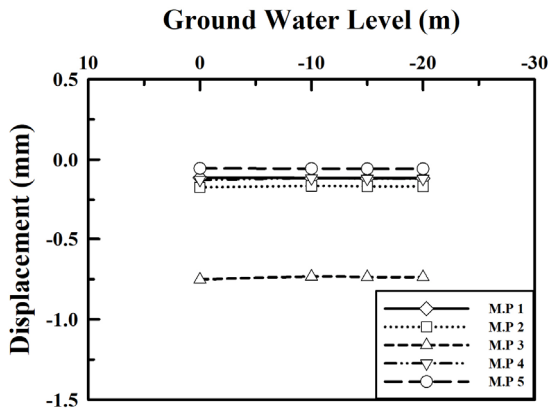
본 연구에서는 철도노반에 인접한 굴착공사를 적용한 지점의 기준으로 10m 씩 떨어진 지점을 측정하였다.

좌·우 레일의 연직 변위는 열차하중이 적용된 지점과 굴착 지점에 인접한 측정 위치에서 가장 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났으며, 지하수위의 변화에 크게 영향이 나타나지 않았다. 이는 레일의 연직 변위는 굴착 지점 위치에 따른 영향이 큰 것으로 판단되며 열차하중의 위치에 따라 그 지점에서의 레일의 연직 변위가 크게 나타났다. Fig. 5는 좌·우 레일의 연직 변위를 보여주고 있다.

좌·우 레일의 수평 변위도 연직 변위와 같이 지하수위 변화에 따른 레일의 영향이 작았으며 열차가 있는 위치에서 가장 큰 수평 변위가 발생하였다. 한편 레일의 수평 변위는 연직 변위에 비해 상대적으로 작게 나타났으며, 측정 위치에 따라 좌·우 레일의 수평 변위가 발생하는 방향이 각각 다르게 나타났다. 이는 열차하중으로 발생한 좌·우 비틀림 현상이 나타난 것으로 판단된다. Fig. 6은 좌·우 레일의 수평 변위를 보여주고 있다.



(a) Left rail



(b) Right rail

Fig. 6. T.P 28m_Vertical displacement

4.2 열차위치에 따른 궤도틀림 분석

궤간틀림의 경우 모든 지하수위 조건에서 일정한 경향을 확인하였으며, 열차가 위치한 지점을 제외한 다른 지점 모두 약 0mm에 근접한 값이 나타난 것으로 확인하였다. 좌·우 레일의 수평 변위에 영향을 받는 틀림으로써 가장 작은 틀림량이 나타났다. 이에 인접 굴착공사 시 궤간틀림에는 영향이 미미할 것으로 판단된다.

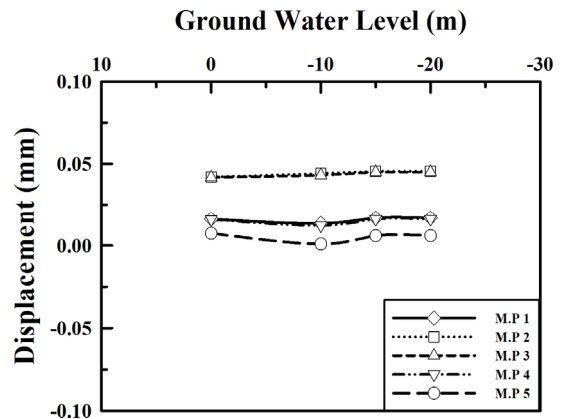
방향틀림의 경우 다른 M.P와 달리 M.P 5지점에서의 방향틀림이 다른 방향으로 나타난 것으로 확인하였다. 이는 열차하중이 굴착 지점에 인접할 때 수평 변위가 비교적 크게

발생하여 열차하중이 적용된 지점에서 발생한 수평 변위와 다른 방향으로 M.P 5지점에서 발생한 것으로 판단된다.

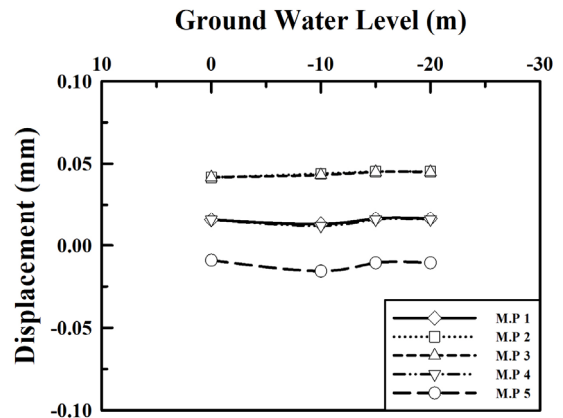
고저틀림의 경우 최대 -0.78mm로 궤도틀림 종류 중 가장 큰 틀림이 발생하였으며, 좌·우 연직 변위와 유사한 경향이 나타났다. 반면 열차하중이 굴착 지점에 인접한 경우를 제외한 다른 측정 위치에서는 비교적 고저틀림이 발생하지 않았다. 이에 열차하중에 위치에 따라 틀림량이 확연한 차이를 확인하였다. 고저틀림은 굴착 위치와 열차하중의 영향을 직접 받는 것으로 판단된다.

수평틀림의 경우 각각의 지하수위 조건에서 발생하는 틀림이 0mm에 근접하는 틀림량으로 지하수위에 따른 수평틀림의 차이는 미미하였다. 연직 변위에 비해 수평틀림량이 낮게 발생하는 것은 좌·우 레일의 연직 변위의 차이가 미미하기 때문인 것으로 판단된다.

평면성틀림의 경우 수평틀림과 유사한 경향이 나타났으며 굴착 지점과 인접 할수록 틀림이 크게 나타났다. 평면성틀림은 궤도의 일정 간격(-5m)에 수평틀림 변화량으로서 수평틀림과 유사한 경향이 나타난 것으로 판단된다. Fig. 7은 궤도틀림을 보여주고 있다.



(a) Left rail



(b) Right rail

Fig. 7. T.P 28m_Horizontal displacement

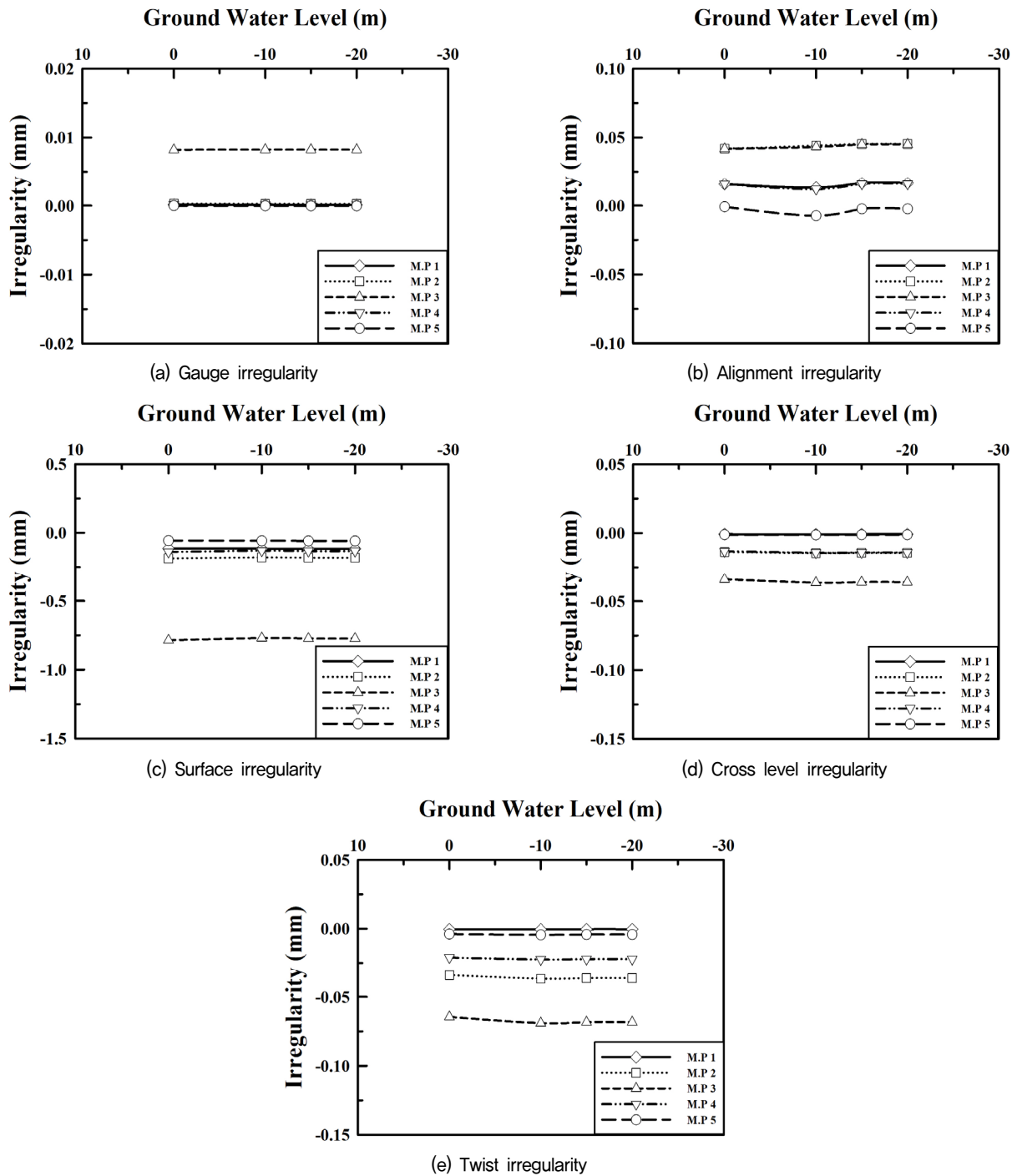


Fig. 8. T.P 28m_Track irregularity

5. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통한 철도노반 인접 굴착 시 궤도틀림을 분석하였으며, 굴착공사 시 변수에 따라 발생하는 각각의 궤도틀림을 분석한 내용을 다루었다. 수치해석 결과를 바탕으로 통해 열차하중과 굴착 지점이 레일에 영향을 미치게 되어 궤도틀림이 발생한 것으로 판단되며 발생하는 궤도틀림으로 인한 열차의 주행안정성에 영향을 미칠 것

으로 판단된다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 굴착공사 이후 열차하중을 적용하였을 때 최대 연직 변위, 최대 연직 변위는 굴착 지점과 인접한 위치 및 열차의 위치에 따라 변위가 증가하는 것으로 확인하였다. 이는 굴착 지점의 위치와 열차하중이 적용된 위치가 레일 변위에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 굴착공사 지점을 열차가 지나가게 될 경우 열차를 서행하여 궤도틀림

로 인한 열차사고를 예방해야 될 것으로 판단된다.

- (2) 열차 위치에 따른 궤도 변위를 분석한 결과, 연직 변위와는 달리 수평 변위에서는 열차하중에 따른 측정 위치별 변위 차이가 미미하게 나타났으며, 발생하는 수평 변위의 방향이 레일 위치별로 다르게 나타나는 것으로 확인하였다. 레일 변위는 하중방향에 영향이 가장 크며 레일 비틀림 현상으로 인해 수평 변위 방향이 다르게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 비틀림 현상으로 인해 열차의 사행동이 발생될 우려가 있다고 판단된다.
- (3) 열차 위치에 따른 궤도틀림을 분석한 결과, 고저틀림을 제외한 다른 종류의 궤도틀림은 약 0.1mm 이하의 틀림량이 나타났으며, 열차와 멀어질수록 약 0mm에 근접한 틀림량을 확인하였다. 또한 고저틀림은 최대 약 1mm의 틀림량이 발생하였다. 궤도틀림은 운행하는 열차의 하중방향에 영향을 받아 각각의 틀림이 발생하는 것으로 판단되며, 그 중 연직 방향의 특성과 연계되는 고저틀림이 가장 큰 틀림량이 발생한 것으로 판단된다.
- (4) 모든 지하수위의 변화에 따른 궤도 변위 및 궤도틀림은 차이가 미미하였으며 모든 조건에서 유사한 경향이 나타났다. 이는 굴착 깊이와 굴착 면적의 크기가 작은 소규모 굴착으로 이루어진 공사로 지하수위의 변화에 차이가 없는 것으로 판단된다.
- (5) 상기와 같은 결론들을 종합한 결과 열차하중위치와 굴착위치에 따른 궤도 변위 문제가 있으므로 본 연구와 같이 철도노반에 인접한 굴착공사 시 궤도에 미치는 영향을 예측하여 안전한 운행이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문을 통해 철도노반에 인접한 굴착공사 시 주요인자로 생각하는 지하수위 및 열차하중 위치에 대하여 향후 연구 시 실제 계측결과와 비교·분석이 필요하다고 판단된다. 이외에도 인접 굴착공사 시 레일에 영향을 미치는 인자는 이격거리, 굴착 깊이, 굴착 면적 등 더 다양하며 이에 대한 인자들을 고려하여 철도노반 인접 굴착 시 발생하는 궤도틀림을 추후 연구를 통해 진행하고자 한다.

감사의 글

This research was by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (RS-2022-00144026).

References

1. Ahn, M. H., Lee, J. H. and Kwon, Y. H. (2022), A case on the stability analysis and measurement of ground structures (railway stations) by the adjacent underground excavation, Conference of the Korean Geosynthetics Society, pp. 131~132 (In Korean).
2. Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. and Swolfs, W. M. (2016), PLAXIS 3D-Reference Manual, PLAXIS 3D 2020 user's manual, the Netherlands.
3. Choi, J. Y., Park, D. R., Chung, J. S. and Kim, S. H. (2021), Dynamic wheel-rail force-based track-irregularity evaluation for ballasted track on serviced railway by adjacent excavation, Applied Sciences, Vol. 12, No. 1, pp. 375.
4. Jeon, S. S. and Lee, S. S. (2018), Track stability assessment for deep excavations in adjacent to urban railways, Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 6, pp. 614~627 (In Korean).
5. Jeon, S. S., Park, Y. K., Lee, S. J. and Yoon, K. W. (2018), Stability assessment of roadbed affected by cavities adjacent to urban railways, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 21, No. 1, pp. 66~77 (In Korean).
6. Jung, S. J. (2019), A Study on the Application of Continuous Steel-Piles Wall for Railway Roadbed, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology (In Korean).
7. Jung, S. J. and Cho, K. H. (2018), A study on the application of the heat-type steel pipe in the excavation of the railway roadbed, Conference of the Korean Society for Railway, pp. 179~181 (In Korean).
8. Kim, H. S., Choi, J. Y. and Chung, J. S. (2022), A study on track deformation characteristics of turnout system by adjacent excavation work on urban transit, The Journal of the Convergence on Culture Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 477~482 (In Korean).
9. Korea National Railway (2012), KR C-12050 (In Korean).
10. Korea National Railway (2017), KR C-08020 (In Korean).
11. Lim, J. H., Lee, H., Kim, S. H. and Kim, D. G. (2023), Underground safety evaluation and construction case study in excavation conditions near urban railway, Conference of the Korean Geosynthetics Society, pp. 95~96 (In Korean).
12. Nam, J. H., Kim, J. C., Kim, W. H., Lee, K. I. and Chang, Y. C. (2022), A case on stability analysis of railway by retaining walls excavation construction, Conference of the Korean Geosynthetics Society, pp. 125~126 (In Korean).
13. Oh, D. W., Kim, G. H., Yoon, H. H. and Jung, H. S. (2023), Discussion on settlement characteristics of railway trackbed considering soft ground using numerical analysis, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 26, No. 2, pp. 102~118 (In Korean).
14. Oh, J. H. (2022), A Study on the Establishment of Detailed Review Criteria for Activities in Railway Protection Areas, Master's Thesis, Korea University (In Korean).
15. Park, H. K., Park, D. H., Ahn, Y. H., Park, S. H., Sang, W. H. and Nam, G. H. (2014), A study on the enhancement plans of safety management in adjacent line open working : focused on foreign countries, Conference of the Korean Society for Railway, pp. 897~905 (In Korean).