

ORIGINAL ARTICLE

병렬터널 배치에서 터널 굴착이 기존 철도 선로에 미치는 영향에 관한 반경험적 접근

안성권^{1*}, 김대상², 강윤석², 김태훈³

¹한국철도기술연구원 선임연구원, ²한국철도기술연구원 수석연구원, ³한국철도기술연구원 책임연구원

Semi-empirical Approach to Investigate Tunnelling-induced Ground Movements and their Effects on at-grade Rail Track in Twin Side-by-side Tunnel Layouts

Sung Kwon Ahn^{1*}, Dae Sang Kim², Yun Suk Kang², and Tae-Hoon Kim³

¹Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

²Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute

³Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute

*Corresponding author: ska977@gmail.com

Received: October 8, 2024

Revised: October 16, 2024

Accepted: October 18, 2024

ABSTRACT

There has been increased interest, media coverage, and debate over constructing new underground structures to replace existing at-grade rail tracks. This new scheme aims to free up space to provide cities with room for more housing with green amenities. Due to urbanisation, tunnel engineers have encountered greenfield ground conditions in cities on only a few occasions. However, the new scheme provides opportunities to investigate a unique scenario where new tunnels are driven parallel to the existing rail tracks on the surface with little ground cover in soft ground. This paper presents findings obtained from a semi-empirical approach that aims to investigate the likely track irregularity associated with tunnelling-induced ground movements. This paper presents contour maps that show track rotation according to the relative position of the new tunnel and existing rail tracks. Tunnel engineers would consult these maps for their tunnel route design for the scheme.

Keywords: Twin side-by-side Tunnel, Gaussian distribution theory, Track irregularity, Ground settlement, Soft ground

초록

지상에 위치한 기존의 철도 선로를 대체하기 위한 새로운 지하 구조물 건설에 대한 관심, 언론 보도, 및 논쟁이 증가하고 있다. 이 새로운 사업 계획은 도시에 더 많은 주택과 녹색 편의시설을 제공하기 위한 공간 확보를 목표로 한다. 도심은 이미 밀집되어 있기 때문에 터널 기술자가 개발되지 않은 자연 그대로의 지반 조건을 맞닥뜨리는 경우는 거의 없다. 반면, 이 새로운 사업 계획은 토사 조건에서 새 터널이 작은 토피를 사이에 두고 지표면에 있는 기존 선로에 평행하게 시공되는 독특한 시나리오를 제공한다. 본 논문은 터널 굴착에 따라 선로에 발생할 것으로 예상되는 궤도 틀림을 산정하기 위해 반경험적 접근 방법을 이용해 수행된 연구에 관해 기술한 내용을 수록한다. 본 논문은 새 터널과 기존 선로의 상대 위치에 따



른 선로의 회전을 도시한 등고선도를 제시한다. 터널 기술자는 본 논문이 제시하는 등고선도를 철도지하화 사업 관련 터널 노선 설계에 참고할 수 있다.

핵심어: 단선병렬터널, 가우스 분포 이론, 궤도 틀림, 지반 침하, 연약 지반

1. 서론

여러 가지 공간적인 제약 때문에 철도지하화에 따른 새 터널의 노선은 대체로 기존 선로의 하부를 따라갈 수밖에 없겠지만 새 터널과 기존 궤도 간 수평 거리, 터널의 깊이 및 간격(단선병렬터널 시)에 따라 터널 굴착에 따른 지반의 변형이 궤도에 미치는 영향은 달라질 수 있다는 점에 착안했다. 이에, 본 논문에 새 터널과 기존 철도 선로 간 위치 관계의 변화에 따라 터널 굴착에 따른 지반의 변형이 기존 선로에서 발생하는 궤도 틀림에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 평가해본 과정 및 결과에 관해 기술한 내용을 수록했다.

철도지하화에 따른 지반 변형 이슈에서는 새로운 터널이 작은 토피고를 가지고 지표면에 위치한 기존 철도 시설물의 아래를 통과하므로 터널의 심도가 얕기 때문에 지반 조건을 토사라고 가정함에 무리가 없어 보였다. 따라서 본 연구에서는 가우스 분포 이론(Gaussian distribution theory)에 바탕을 둔 반경험적(Semi-empirical) 분석 방법을 적용해 터널 굴착에 따른 지반 침하가 지표에 위치한 기존 철도 선로에 미치는 영향에 관해 분석했다. 여기서 가우스 분포 이론이란 토사 지반 조건에서 터널 굴착으로 인해 터널의 상부에서 발생한 지반의 침하 형상이 정규 분포(Normal distribution curve)를 따른다는 가정에 기초한다. 여타의 반경험적 분석 방법과 마찬가지로 가우스 분포 이론은 어떠한 토질 역학적 이론에도 근거를 두고 있지는 않지만, 1969년에 제안된 이후 오랜 기간 동안 수많은 연구를 통해 유용성이 검증되었으므로 본 철도지하화에 따른 지반 변형 이슈에 이 분석 방법을 적용함이 타당한지에 관해서는 이론의 여지가 없을 것이다(Peck, 1969, Cording and Hansmire, 1975, Attewell et al., 1986).

철도지하화에서는 새로 시공된 터널이 지표에 위치한 기존 철도 선로를 대체하므로 새 터널과 기존 선로가 나란히 진행할 수밖에 없다. 또한, 터널의 길이가 터널의 폭이나 높이에 비해 비교가 안 될 정도로 크다. 따라서, 본 연구에서는 터널 굴착으로 인한 지반 변형에서 터널의 길이 방향의 성분은 고려하지 않고 터널 굴착으로 인한 지반의 변형이 터널의 횡단면에서 발생하는 2차원의 움직임이라고 가정했다. 한편, 터널의 횡단면에 발생하는 2차원의 지반 변형은 다시 수직 방향과 수평 방향 성분으로 분리될 수 있겠으나, 본 연구는 철도지하화 사업 구상 단계에서 일차적으로 실시하는 예비 영향 평가를 목적으로 하므로 편의를 위해 상대적으로 기존 선로의 틀림에 더 큰 영향을 미치는 수직 성분(침하)만을 이용해 터널 굴착에 따른 지반의 변형이 기존 궤도를 얼마나 회전(부등 침하)시키는지 산정하고 그 결과를 분석했다.

이후에 이어지는 본 논문의 본문부에는 연구 변수 설정을 위해 TBM 등 굴착 기술로 시공된 도심 지하철 터널의 형식(배치) 및 단면 크기 현황에 관해 조사하고 분석한 내용을 수록했다. 또한, 궤도 틀림을 산정하기 위해 적용한 가우스 분포 이론에 기초한 반경험적 방법을 이용해 지반 변형 및 궤도 틀림 산정하는 과정에 관해 기술한 내용을 수록했다. 본 연구의 주요 분석 결과인 궤도 틀림은 등고선도를 이용해 도시했다. 이를 통해, 터널과 궤도 간 위치 관계에 따라 얼마만큼의 궤도 틀림이 발생할 것인지 예측해 볼 수 있다. 토론부에는 본 연구의 결과를 바탕으로 추가로 시행할 수 있는 보충 분석 방안에 관해 기술했다. 선로의 강성을 고려해 기존의 분석 결과를 보정하는 방안이다. 경우에 따라서는 기존 선로(자갈 도상)의 탄성계수가 원지반의 탄성계수에 최대 8배 정도까지 이를 수 있으므로(Kurhan et al., 2023) 도상 위에 있는 침목 및 레일이 원지반의 움직임을 따라 그대로 움직일 것이라는 가정은 보수적인 접근일 수밖에 없다. 따라서, 자갈 도상의 강성을 고려해 2차적인 평가를 시행하는 방안에 관한 고찰은 의미가 있어 보였다. 결론부에는 본 연구의 주요 결과를 요약해 정리하고 활용 방안에 관해 기술한 내용을 수록했다.

2. 본론

2.1 지하철 터널 현황

역간 거리가 가깝기 때문에 빈번한 정차가 이루어져 속도를 내기 어려운 도심의 지하철 터널은 직경이 비교적 작아서 장거리 이동을 위해 고속 운행이 가능하도록 큰 단면으로 설계된 광역 및 고속철도용 터널과 구분된다. Table 1은 20세기 이후 완공되어 현재 운용 중인 도심 지하철 터널의 외경을 보여준다. 철도지하화 이슈에서는 지표면에 기존 선로 구축물이 존재하므로 개착방식의 터널은 조사 대상에서 제외했다. 터널 내 선로 배치에 따라 단선병렬(Single-track twin side-by-side)과 복선(Double-track) 터널로 분류했다. 여기서 단선병렬터널이란 나란히 진행되는 동일한 단면을 가진 두 개의 터널이 각각 하나의 선로만을 포함하는 경우를 의미하며, 복선 터널이란 하나의 터널이 양방향으로 진행되는 두 개의 선로를 모두 포함하는 경우를 말한다(Fig. 1). 터널 굴착으로 인한 지반의 변형은 터널 단면의 크기뿐만 아니라 터널의 형식 및 선로의 배치와 밀접한 관련이 있으므로 이를 파악하는 것이 중요하다.

Table 1. Metro tunnels

Layout	Outside diameter [m]	Ctc spacing [m]	Year of completion	Construction method	City	Line	Location	Source
Single-track twin sbs	4.1	16.0	1906	Cut and cover	London	Piccadilly	Central London	Cooper, 2001
	7.7	18.1	1996	NATM	Seoul	5	Mapo ~ Yeouido	Seo et al., 2001
	6.0	13.2	2004	EPB shield	Shenzhen	4	Shangmeilin	Jin, et al., 2018
	7.8	15.8	2009	Slurry shield	Seoul	9	Yeouido	Lee, et al., 2011
	6.0	15.0	2014	EPB shield	Changsha	2	Yingwanzhen	Chen, et al., 2018
	7.1	18~20	2015	EPB & Slurry shield	London	Elizabeth	Central London	Tucker, 2017
	6.0	15.6	2016	EPB shield	Shenzhen	9	Shangmeilin	Jin, et al., 2018
	6.6	-	2017	EPB shield	Singapore	DTL3	East region	Su et al., 2017
	6.3	17.0	2019	EPB shield	Changsha	4	Yingwanzhen	Chen et al., 2018
	6.2	-	2019	Slurry shield	Lanzhou	1	Yellow river	Cao et al., 2019
Double-track	12.1	-	2010	EPB shield	Barcelona	9	Barcelona city	Gettu et al., 2006
	10.2	-	2015	EPB shield	Beijing	14	Dongfengbeiqiao ~ Jingshunlu	Li et al., 2016

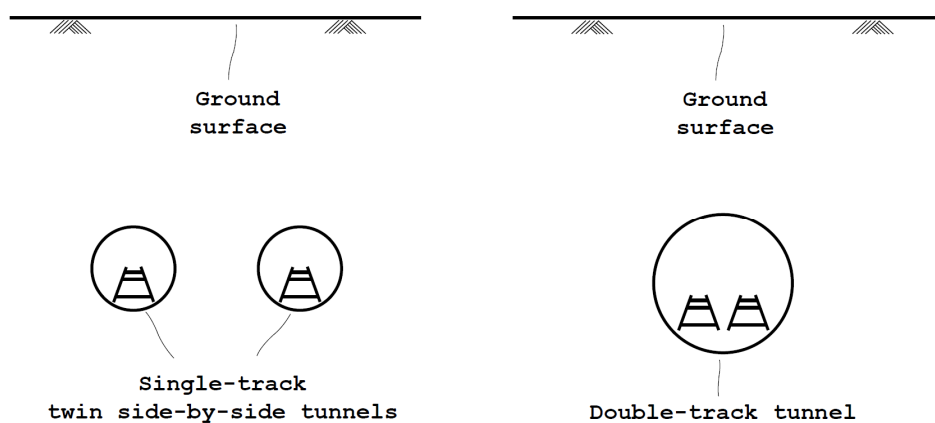


Fig. 1. Schematics for typical urban railway tunnel layouts

1990년대 이후 지난 30여년 동안 도심의 토사 지반에 시공된 대부분의 단선병렬 터널에는 바깥지름이 6~8 m에 이르는 Shield TBM이 주로 사용된 것으로 파악됐다. 한강 하저를 통과하는 서울지하철 5호선 마포~여의도 구간에는 불규칙적이고 열악한 지반 조건 때문에 예외적으로 NATM 공법이 적용되기도 했다. 2009년에 완공된 서울지하철 9호선 여의도 국회의사당 구간에는 외경이 7.8 m에 이르는 Shield TBM이 사용됐다. 2000년 이후 Shenzhen 등 중국 대도시 지하철 공사에서도 바깥지름이 6.0~6.3 m에 이르는 Shield TBM이 사용된 것으로 파악됐다. 런던 Elizabeth line을 만든 Crossrail 프로젝트에서는 바깥지름이 7.1 m에 이르는 Shield TBM이 사용됐다. 한편, 1900년대 초에 만들어진 런던 지하철 Piccadilly Line의 경우 터널의 외경이 4.1 m에 불과했는데 이것은 인력 굴착에 의존하던 당시 기술 수준의 한계 때문으로 보인다. 터널 간 중심 간격(Centre-to-centre spacing)은 13~18 m였다. 본 현황 분석으로 지하철 터널의 외경이 약 6 m이고 터널 간격이 터널 외경의 2~3배에 이른다는 점을 확인할 수 있었다.

기존 지하구조물로 인한 간섭 등 공간적인 제약 때문에 지하철용 터널에 복선 터널이 적용된 사례도 있었다. 바르셀로나 지하철 9호선에서는 바깥지름이 12.1 m에 이르는 중대형 EPB shield가 사용됐고, 베이징 지하철 14호선에는 바깥지름이 10.2 m에 이르는 EPB shield가 사용됐다.

2.2 가우스 분포 이론

가우스 분포 이론을 이용한 반경험적 지반 침하 산정 방법은 땅속의 터널 막장에서 발생한 지반 손실량(Volume loss, V_L)이 막장의 상부에 생긴 침하 곡선의 단위 길이당 부피(Volume of settlement trough per unit length, V_S)와 같다는 가정에서 출발한다(Eq. 1). 지반손실량이란 굴착 시 발생한 여굴(Over-excavation)의 양을 나타내는 지표이다. 이 방법을 이용하면 지반 손실량 등 간단한 몇 개의 파라미터만으로 터널 굴착에 따른 지반의 침하 양상을 사전에 평가해 볼 수 있다. 지반 손실량을 가정해 침하 곡선의 단위 길이당 부피를 계산한 후(Eq. 2) 최대 침하량(S_{max})을 산정하는 것이다(Eq. 3). 여기서 최대 침하량 산정을 위해서는 지반 손실 이외에도 침하곡선 너비 파라미터(Trough width parameter, i)가 필요한데 Eq. 4를 이용해 구할 수 있다. Eq. 4에서 K 는 0.5를 적용하는 것이 일반적이다(O'Reilly and New, 1982). 이후 최대 침하량과 침하곡선 너비 파라미터를 이용해 터널의 횡단면을 따라 발생하는 지반의 침하 정도를 예측해 볼 수 있다(Eq. 5). 따라서, 지반 손실량만 적절히 가정할 수 있다면 터널 굴착에 따른 지반의 침하를 사전에 평가할 수 있게 된다. 참고로 Shield TBM을 이용할 경우 터널 굴착에 따른 지반 손실량은 일반적으로 1~3%에 이르는 것으로 알려져 있다(Standing and Burland, 2006). 한편, 이 방법으로 사후 평가도 가능하다. 계측을 통해 얻은 데이터로 침하 곡선을 형성하고 침하곡선의 면적을 이용해 지반 손실량을 역산하는 것이다. 도심지 터널의 경우 밀집 지역인 경우가 많아 터널 경로에 계측기를 설치할 유희 부지 선정이 쉽지는 않겠지만 이러한 사후 평가를 통해 공사 중에 발생한 문제점을 파악하고 개선 방안을 모색할 수 있다.

$$V_L \approx V_S \quad (1)$$

$$V_S = V_L \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2)$$

$$S_{max} = \frac{V_S}{\sqrt{2\pi} i} \quad (3)$$

$$i = Kz_0 \quad (4)$$

$$S = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (5)$$

Where, V_L : Volume loss

V_S : Volume of settlement trough per unit length

D : Tunnel diameter

S_{\max} : Maximum settlement

i : Trough width parameter (Distance to point of inflection)

K : Soil factor

z_0 : Tunnel depth

S : Settlement

2.3 연구 변수

본 연구에서는 단선병렬터널 배치를 가정해 새로운 터널과 기존 철도 선로의 위치 관계에 따른 궤도의 회전에 관해 평가했다. 새 터널과 기존 선로의 수평 이격거리(Offset), 터널의 깊이(Tunnel depth), 및 터널 간격(Spacing)을 연구 변수로 설정했다(Table 2, Fig. 2). 여기서 터널과 선로의 수평 이격거리란 단선병렬터널의 터널간 중심선에서 선로 중심선 사이 거리를 말한다. 범위는 터널 지름(D)의 0~3.5배로 설정했다. 예를 들어, 이격 거리가 0이라는 것은 터널간 중심선이 선로 중심선과 일치해 기존 선로의 직하부에 새 터널이 지나가는 경우를 의미한다. 이격 거리가 3.5D라는 것은 터널간 중심선이 선로 중심선에서 왼쪽으로 터널 직경의 3.5배만큼 떨어져 있는 것을 의미한다. 본 연구에서는 편의상 터널을 기준으로 선로가 왼쪽편으로 이격되는 경우만을 고려했다. 철도 지하화 이슈의 특성을 고려해 터널 깊이는 터널 직경의 1.5~3.0 배로 설정했다. 지하철 터널 현황을 고려해 터널 간격은 터널 직경의 1.5~3.0배로 설정했다. 터널 지름은 지하철 터널 현황 조사 결과에 따라 6 m를 사용했다. 또한, 터널 시공 품질에 따른 영향을 평가하기 위해 지반 손실량(Volume loss)도 연구 변수로 설정했다. 범위는 1~2%였다. 기존 선로 간격은 4 m로 설정했다.

Table 2. Research variable

Variable	Value	No. of cases
Offset (o)	0.0D, 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D, 3.5D	8
Tunnel depth (z_0)	1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D	4
Spacing (s)	1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D	4
Volume loss (V_L)	1.0%, 2.0%	2
	Total no. of cases	256

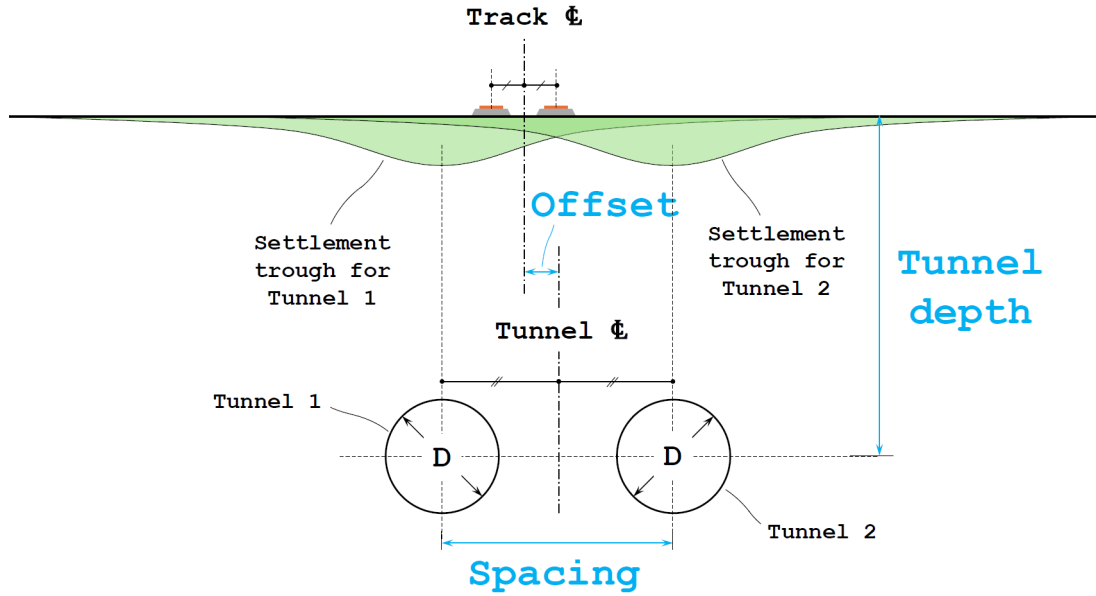


Fig. 2. Research variable

2.4 지반 변형에 따른 선로의 회전

지표면에 있는 철도 선로의 회전을 평가하기 위해 가우스 분포 이론을 통해 산정한 지반 침하 곡선을 이용해 선로를 구성하고 있는 각 레일 위치에서 발생하는 침하량을 구했다(Fig. 3). 단선병렬터널로 인해 발생하는 침하량을 산정하기 위해 중첩의 원리를 적용했다. 예를 들어, 선로 1(Track 1)을 기준으로 설명하면, 왼쪽 레일의 침하량(S_L)을 구하기 위해 이 레일이 위치한 지점에서 첫 번째 터널(T1)로 인해 발생한 침하량(S_L^1)과 두 번째 터널(T2)로 인해 발생한 침하량(S_L^2)을 합산했다(Eq. 6). 오른쪽에 있는 레일의 침하량(S_R)도 동일한 방법으로 구했다(Eq. 7). 본 연구에서 말하는 선로의 회전이란 선로를 구성하는 좌우 레일에서 발생한 침하량의 차이로서 좌우 레일 상부 면의 고저(高低) 틀림으로 정의되는 궤도의 수평 틀림과 동일한 개념이다. 따라서, 오른쪽 레일에서 발생한 침하량에서 왼쪽에서 발생한 침하량을 제함으로써 해당 선로의 회전량을 산정했다(Eq. 8).

$$S_L = (S_L^1 + S_L^2) \tag{6}$$

$$S_R = (S_R^1 + S_R^2) \tag{7}$$

$$R = S_R - S_L \tag{8}$$

Where, S_L : Settlement at left rail

S_R : Settlement at right rail

S_L^1 : Settlement at left rail for Tunnel 1

S_R^1 : Settlement at right rail for Tunnel 1

S_L^2 : Settlement at left rail for Tunnel 2

S_R^2 : Settlement at right rail for Tunnel 2

R : Track rotation

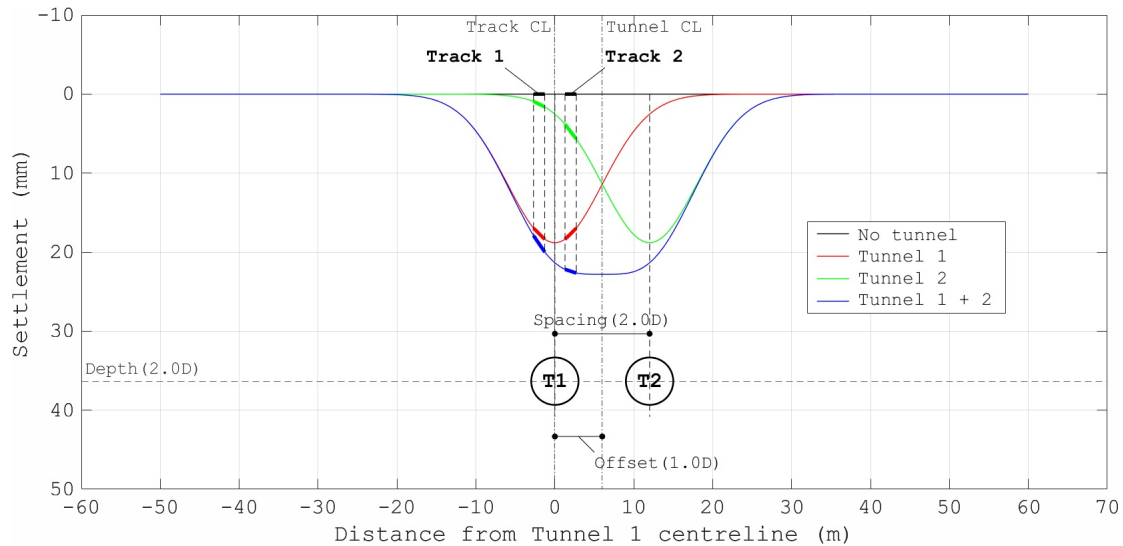


Fig. 3. Typical settlement troughs and track settlement ($\sigma = 1.0D$, $z_0 = 2.0D$, $s = 2.0D$, $V_L = 1.0\%$)

2.5 분석 결과

Figs. 4-5는 터널 굴착에 따른 지반 변형으로 인해 상부 선로에 발생할 것으로 예상되는 궤도의 수평 틀림을 도시한 등고선도로써 연구 변수로 설정한 새 터널과 기존 선로의 위치 관계 변화 및 지반 손실량의 증감에 따른 선로의 회전량을 확인할 수 있다. 여기서, 등고선에 표기된 숫자가 회전량이며 단위는 밀리미터(mm)이다. 회전량을 각도로 표시하면 1 mm는 약 0.04° 에 해당된다. Fig. 4는 지반 손실량이 1.0%인 경우이고, Fig. 5는 지반 손실량이 2.0%인 경우이다. 각 Figure는 터널 간격(Spacing, s)에 따라 4개의 Subfigure로 구성된다. 예를 들어, Fig. 4(a)는 터널 간격이 터널 직경의 1.5배(1.5D)인 배치에서 1.0%의 지반 손실량을 발생시키는 품질로 터널이 시공되었다고 가정할 때 터널과 선로의 수평 이격거리(Offset, o) 및 터널의 깊이(Tunnel depth, z_0)에 따라 상부 선로에서 발생할 것으로 예상되는 궤도의 회전량을 보여주고 있다. 마찬가지로, Figs. 4(b) ~ 4(d)는 터널 간격이 2.0 ~ 3.0D일 때 상부 선로에서 발생할 것으로 예상되는 궤도의 회전량을 보여준다.

지반 손실량 1%를 가정할 때 상부 선로에서 발생할 것으로 예상되는 궤도의 수평 틀림은 $-4 \sim 5$ mm ($-0.15^\circ \sim 0.19^\circ$) 수준인 것으로 평가되었다(Fig. 4). 여기서 양(+)의 회전량은 오른쪽 레일에서 왼쪽 레일에서보다 더 큰 침하가 발생한 것을 의미하므로(Eq. 8) 선로가 시계방향으로 회전했음을 나타내며, 음(-)의 회전량은 같은 논리로 선로가 반시계 방향으로 회전했음을 나타낸다. 한편, 지반 손실량을 2%로 가정할 때 예상되는 회전량은 $-9 \sim 10$ mm ($-0.33^\circ \sim 0.36^\circ$) 수준으로(Fig. 5) 지반 손실량 커짐에 따라 전체적인 회전량도 커진다는 것을 확인할 수 있었다. 선로유지관리지침에서는 10 mm 수준의 수평틀림을 주의기준으로 규정하고 있다(Korea National Railway, 2022). 여기서 주의기준이란 보수는 필요하지 않으나 관찰이 필요한 단계를 말한다. 수평틀림이 20 mm에 이르면 3개월 내에 보수작업을 시행하도록 하고 있다.

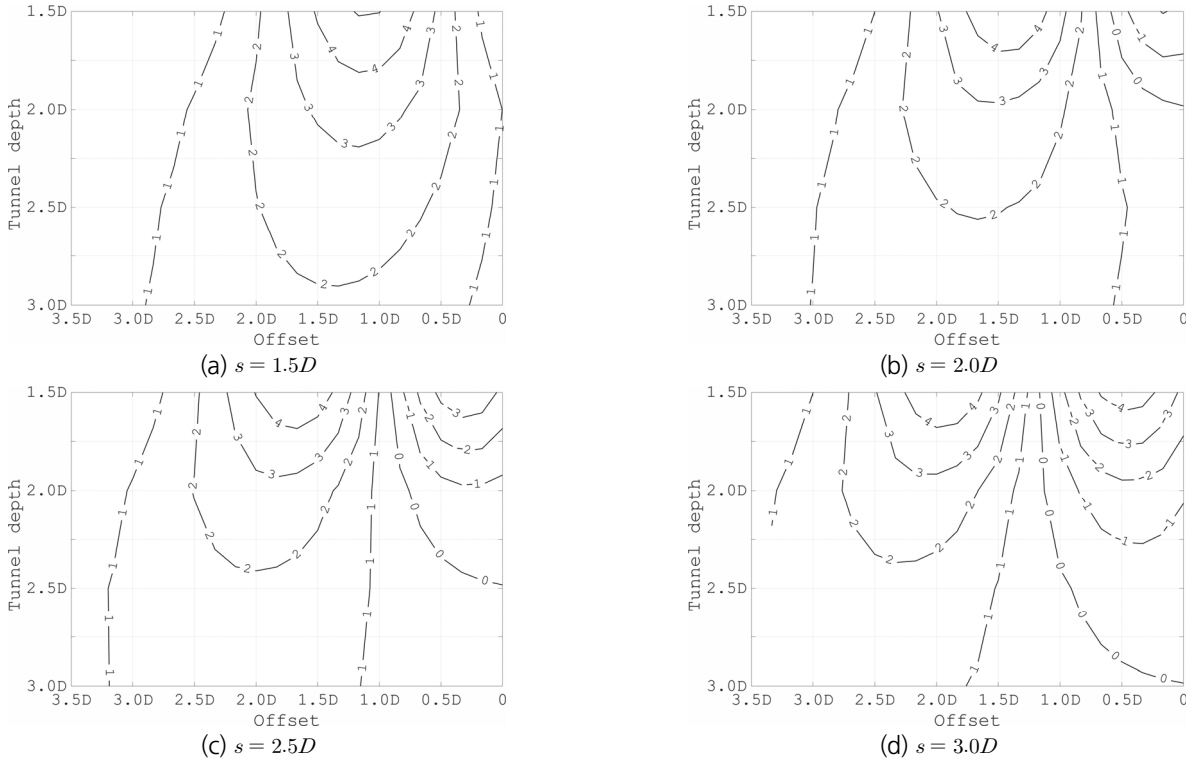


Fig. 4. Track rotation for $V_L = 1.0\%$

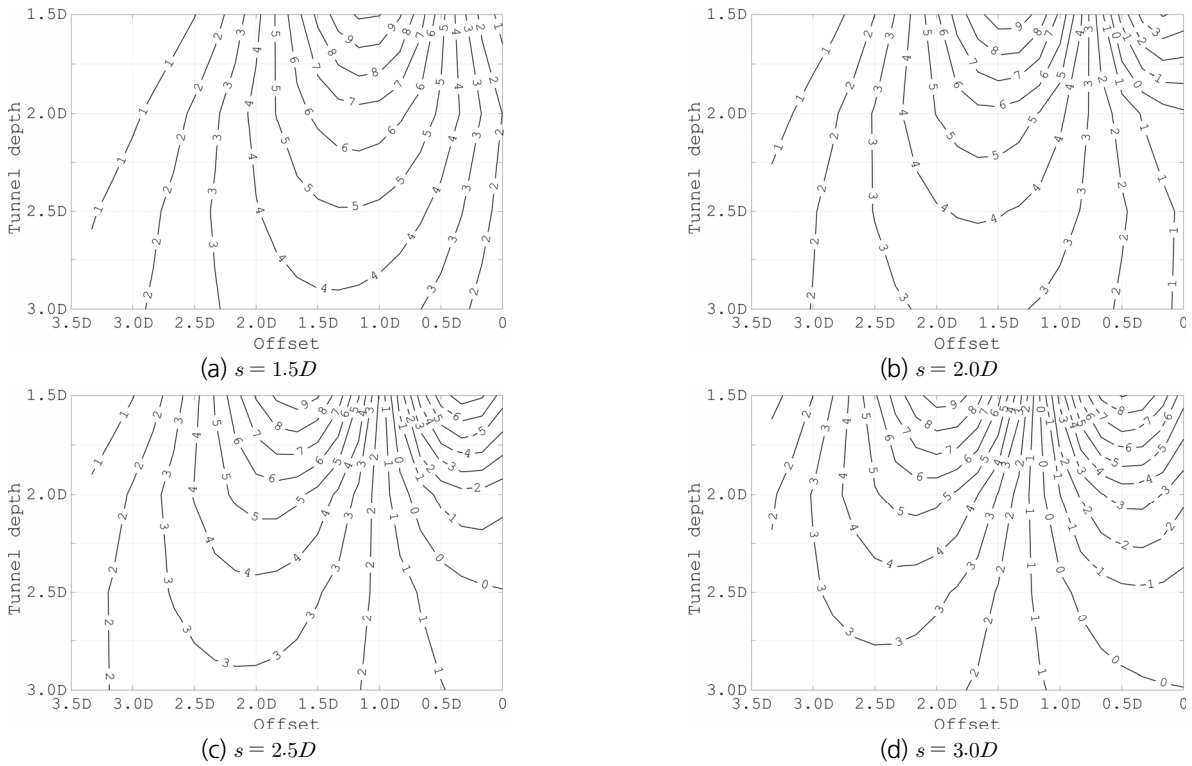


Fig. 5. Track rotation for $V_L = 2.0\%$

수직 위치 관계에 따른 회전량의 변화를 관찰해 보면, 터널의 깊이가 1.5 ~ 2.0D 정도의 작은 토피고를 가질 때 2.5 ~ 3.0D 정도의 큰 토피고를 가질 때보다 더 큰 회전량을 보였음을 확인할 수 있었다. 이것은 본 연구에서 적용한 가우스 분포 이론이 터널 굴착에 따른 지반 손실의 크기가 토피고와 무관하게 일정하다고 가정하기 때문이다. 즉, 토피고가 커져서 터널이 깊어질수록 침하곡선의 너비가 커지기 때문에 지반 손실량을 일정하게 유지하기 위해서는 침하량이 작아져야 하며, 반대로 토피고가 작아져서 터널이 얕아질수록 침하곡선의 너비가 작아지기 때문에 침하량이 커져야 한다. 이 때문에 터널이 깊어질수록 회전량이 감소하고 얕아질수록 회전량이 증가하는 것이다. 수평 위치 관계에 따른 회전량 변화를 관찰해 보면, 최대 양(+)의 회전이 발생한 지점은 수평 이격거리가 1.0 ~ 2.0D 구간으로 터널 간격이 벌어짐에 따라 최대 회전이 발생하는 수평 이격거리가 커졌다. 터널 간격이 벌어짐에 따라 음(-)의 회전도 함께 관찰되었다. 최대 음(-)의 회전이 발생한 지점은 수평 이격거리가 0.25D 정도인 지점이었다. 따라서 본 연구가 제시한 등고선도를 이용해 터널과 선로의 수평 이격거리에 따른 궤도의 회전량을 파악함으로써 최대 회전이 발생하는 위치를 찾아낼 수 있다.

Figs. 4 ~ 5에서 특히 주목해야 할 사실은 회전량이 0인 지점이 존재한다는 사실이다. 지반 침하는 발생하지만 궤도 틀림은 발생하지 않는다는 것으로 선로를 구성하는 양쪽 레일에 발생한 침하량이 같았다는 뜻이다. 터널 간격이 벌어질수록(s 가 커질수록) 회전량이 0인 영역이 넓어지는 것을 확인할 수 있다.

3. 토론

단순화에 따른 오류 및 오차 없이 실제로 땅속에서 일어나는 현상을 가감 없이 재현하는 방법은 실험실 실험밖에 없지만, 시간과 비용적인 제약 때문에 사용이 극히 제한적일 수밖에 없다. 차선책으로 모형실험이나 수치해석을 고려해 볼 수 있지만 이 역시 적지 않은 비용과 시간이 소요되기 때문에 적용이 쉽지 않다(Choi et al., 2019). 따라서 건설 사업 구상 단계에서 이러한 값비싼 실험 방법을 사용하는 방안은 정당성을 인정받기 어렵다. 이 때문에 본 연구에서는 비용과 시간이 많이 들고 전문적인 운용지식이 필요한 모형실험이나 수치해석보다는 간단한 산식만으로 누구나 손쉽게 사용할 수 있는 반경험적인 방법을 적용했다. 반경험적인 방법에서는 이론적인 모델을 기반으로 실험데이터를 이용해 모델을 규정하는 파라미터를 찾아나가고 이를 상황에 맞게 조절함으로써 정확도를 높인다. 따라서, 순수 이론적 접근을 사용할 경우 요구되는 복잡한 계산 과정을 피할 수 있기 때문에 자연과학 및 공학 분야에서 많이 적용되고 있는 것이다. 본 연구는 이러한 반경험적 방법을 적용했기 때문에 터널 및 선로 간 위치 관계의 변화 및 지반 손실량의 증감에 따른 기존 선로의 회전에 관해 평가하기 위해 수행된 총 256개의 사례에 대한 분석을 비교적 짧은 기간 내에 완료할 수 있었다(Table 2).

본 연구에서 사용한 반경험적 방법에 적용된 이론적인 모델은 가우스 분포(Gaussian distribution)였다. 터널 굴착으로 인해 터널의 횡단면을 따라서 발생한 지반 침하의 형상이 정규 분포 커브를 거꾸로 뒤집어 놓은 형상을 따른다는 것이다. 오랜 시간에 걸쳐 수많은 연구자에 의해 검증되었기 때문에 가우스 분포 이론의 유효성에는 반론의 여지가 없어 보였다. 가우스 분포를 이용한 반경험적 방법의 장점은 소수의 파라미터만을 요구하는 단순성에 있다. 그러나 이 단순성 때문에 지반 조건이 복잡해지거나 터널 이외에 다른 구조물이 존재하는 경우 적용이 쉽지 않다. 특히, 우리나라와 같이 조립질인 화강암의 화학적 풍화에 따라 기반암 위에 연암, 풍화암 및 풍화토가 복합적으로 발달한 지역에 터널을 사공하는 경우 토사 조건을 전제로 하는 가우스 분포 이론을 적용하기 어렵다. 반면, 본 연구에서 검토하는 철도지하화 관련 새로운 터널 굴착에 따른 지반의 변형 및 이에 기인한 기존 선로의 회전에 관한

이슈에서는 새로운 터널의 노선이 기존 선로의 노선을 작은 토피고를 가지고 따라가기 때문에 지반 조건을 토사라고 가정하고 가우스 분포 이론을 적용함에 무리가 없다고 판단했다.

본 연구에서는 원지반에 발생한 침하가 궤도로 그대로 전달된다는 가정을 바탕으로 선로의 회전량을 산정했다. 도상 자갈, 침목, 및 레일 등 선로 구성품의 존재를 고려하지 않는 보수적인 접근이지만 건설 사업 구상 단계에서 요구되는 예비 평가 자료로 활용하기에는 충분하다고 판단했다. 한편, 예비 평가에서 과도한 회전이 발생한 지점에 대해 원지반과 선로 구축물로의 상호작용 효과를 고려한 추가적인 검토를 수행할 수 있다. 이를 위해 수치해석 소프트웨어를 사용할 수도 있겠으나 본 연구의 연구 결과를 활용하는 방안도 있다. 원지반 위에 놓인 기존 구조물을 단순 보(Simple beam)라고 가정하여 지반과 구조물의 상호작용 효과를 고려할 수 있도록 제안된 디자인 차트를 이용하는 것이다(Burland, 2001). 이 차트를 이용하면 본 연구와 같이 개발되지 않은 자연 그대로의 지반 조건을 가정해 반경험적인 방법을 통해 산정한 결과치를 터널과 선로의 위치 관계 및 터널과 선로의 강성 차이를 고려해 보정할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 가우스 분포 이론에 근거한 반경험적 방법으로 터널 굴착에 따라 터널의 상부에 있는 기존 선로에서 발생할 것으로 예상되는 궤도의 수평 틀림을 등고선도를 이용해 도시했다. 이 등고선도로 터널과 궤도의 위치 관계 및 시공 품질에 따라 어느 정도의 궤도 틀림이 발생할 것인지 정량적으로 파악할 수 있다. 특히, 본 연구가 제안하는 등고선도를 통해 터널과 선로의 수평 이격거리, 터널의 깊이, 및 터널 간격을 적절히 조절함으로써 궤도 틀림을 최소화할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과를 철도지하화 사업 구상 단계에서 새 터널 노선 설계 시 예비 영향평가 자료로 참고할 수 있다.

또한, 본 논문에는 외경이 6 m인 단선병렬터널 배치를 가정해 지반의 침하 및 선로의 회전에 관해 평가한 결과뿐만 아니라 과정에 관해 기술한 내용이 수록되어 있다. 따라서, 철도지하화 이슈 담당 터널 엔지니어는 여러 가지 다양한 터널 배치 및 단면 크기에 따른 궤도 틀림에 관해 본 논문을 참고해 평가해 볼 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(디지털 기반 운행철도 입체화 안전성 향상 기술개발, PK2402A2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Attewell, P.B., Yeates, J., and Selby, A.R., 1986, Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, Blackie, 1st edition, p.317.
- Burland, J.B., 2001, Assessment methods used in design, In J.B. Burland, J.R. Standing & F.M. Jardine (Eds.), Building response to tunnelling - Case studies from construction of the Jubilee line extension, London, 1, 23-44, Thomas Telford Ltd.

- Cao, S., Cui, J., Fang, Y., and Deng, R., 2019, Performance of slurry TBM tunnelling in sandy cobble ground – A case study in Lanzhou, *Tunnel Engineering*, 23, 3207-3217.
- Chen, R.-P., Lin, X.-T., Kang, X., Zhong, Z.-Q., Liu, Y., Zhang, P., and Wu, H.-N., 2018, Deformation and stress characteristics of existing twin tunnels induced by close-distance EPBS under-crossing, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82, 468-481.
- Choi, J., Park, D., and Chung, J., 2019, Evaluation of track irregularity effect due to adjacent excavation on serviced railway line, *The Journal of the Convergence on Culture Technology*, 5(4), 401-406.
- Cooper, M.L., 2001, Tunnel-induced ground movements and their effects on existing tunnels and tunnel linings, PhD thesis, The University of Birmingham.
- Cording, E.J., and Hansmire, W.H., 1975, Displacement around soft ground tunnels, *Proceedings of the 5th Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 571-663.
- Gettu, R., Barragan, B., Garcia, T., Ortiz, J., and Justa, R., 2006, Fiber concrete tunnel lining: construction of a subway line in Barcelona, *Concrete International*, 28(8), 63-69.
- Jin, D., Yuan, D., Li, X., and Zheng, H., 2018, An in-tunnel grouting protection method for excavating twin tunnels beneath an existing tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 27-35.
- Korea National Railway, 2022, Track Maintenance Guidelines, Article 9: Track Irregularity Management Standards.
- Kurhan, D., Kurhan, M., Horvath, B., and Fischer, S., 2023, Determining the deformation characteristics of railway ballast by mathematical modeling of elastic wave propagation, *Applied Mechanics*, 4(2), 803-815.
- Lee, S.W., Chang, S.H., Park, K.H., and Kim, C.Y., 2011, TBM performance and development state in Korea, *Procedia Engineering*, 14, 3170-3175.
- Li, X., Yuan, D., Guo, Y., and Cai, Z., 2016, Use of a 10.22 m diameter EPB shield: a case study in Beijing subway construction, *SpringerPlus*, 5, 1-15.
- O'Reilly, M.P., and New, B.M., 1982, Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction, *Tunnelling 82'*, Ed. Jones, M.J., 173-181.
- Peck, R.B., 1969, Deep excavation and tunneling in soft ground, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, State-of-Art Report, 225-290.
- Seo, K.C., Kim, J.W., and Park, N.S., 2001, Subway tunnel under the Han river, Seoul, *Structural Engineering International*, 11(1), 25-28.
- Standing, J., and Burland, J., 2006, Unexpected tunnelling volume losses in the Westminster area, London, *Geotechnique*, 56(1), 11-26.
- Su, T., Zhang, Y., and Goh, K.H., 2017, Field performance of twin bored tunnelling in different geological conditions – Construction of MRT downtown line 3 in Singapore, *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1777-1780.
- Tucker, W., 2017, Crossrail project: the execution strategy for delivering London's Elizabeth line, *Proceedings of the Civil Engineers*, 170(CE5), 1600021.