

신설터널의 위치에 따른 기존 병렬터널의 영향 분석

윤지석¹ · 김한얼² · 남경민³ · 정예림¹ · 조재은¹ · 유한규^{4*}

¹학생회원, 한양대학교 스마트시티공학과 석사과정

²학생회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사수료

³정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사수료

⁴정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

Analysis of the influence of existing parallel tunnels according to the location of the new tunnel

Ji-Seok Yun¹ · Han-Eol Kim² · Kyoung-Min Nam³ · Ye-Rim Jung¹ · Jae-Eun Cho¹ · Han-Kyu Yoo^{4*}

¹Master Student, Dept. of Smartcity Engineering, Hanyang University

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

³Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University

⁴Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

*Corresponding Author : Han-Kyu Yoo, hankyu@hanyang.ac.kr

Abstract

Recently, ground structures have reached saturation, and underground construction using underground structures such as tunnels has been in the spotlight as a way to solve increasing traffic difficulties and environmental problems. However, due to the increasing number of underground structures, close construction is inevitable for continuous underground development. When a new underground structure is constructed closely, stability may become weak due to the influence on the existing tunnel, which may cause collapse. Therefore, analyzing the stability of existing tunnels due to new structures is an essential consideration. In this study, the effect of excavating new tunnels under parallel tunnels on existing parallel tunnels was analyzed using numerical analysis. Using the Displacement Control Model (DCM), the volume loss generated during construction was simulated into three case (0.5%, 1.0%, and 1.5%). Based on the center of the pillar, the distance where the new tunnel is located was set to 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m, and the space for each distance were set to 5 (0D₁, 0.37D₁, 0.75D₁, 1.13D₁, 1.5D₁). In general, as the volume loss increased and the distance approached, the maximum displacement and angular displacement increased, and the strength/stress ratio to evaluate the stability of the pillar also decreased. As a result, when the distance between the new tunnel and the center of the pillar is 5 m, the space is 0D₁, and the volume loss is 1.5%, the stability of the existing parallel tunnel is the weakest.

Keywords: Parallel tunnels, Displacement, Strength-stress ratio, Volume loss, Displacement control model

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(2)193-215(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.2.193>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received February 11, 2022

Revised February 23, 2022

Accepted February 23, 2022



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

최근 지상구조물이 포화상태에 이르렀고 증가하는 교통난과 환경문제를 해결하기 위한 방안으로 터널과 같은 지하구조물을 활용한 지하화 건설이 각광 받고 있다. 그러나 증가하는 지하구조물로 인해 지속적인 지하화 개발을 위해서는 근접 시공이 불가피한 상황이다. 새로운 지하구조물을 근접 시공할 시 기존구조물에 미치는 영향으로 인해 안정성이 취약해져 붕괴를 일으킬 수 있다. 따라서 기존구조물의 안정성을 분석하는 것은 필수적으로 고려해야 하는 사항이다. 본 연구에서는 지하구조물인 병렬터널의 하부에 신설터널을 굴착하여 근접시공으로 인한 기존 병렬터널에 미치는 영향을 수치해석을 사용하여 분석하였다. 변위조절모델(Displacement Control Model, DCM)을 이용하여 시공 시 발생하는 지반손실률을 세 가지(0.5%, 1.0%, 1.5%)로 모사하였다. 필라 중심을 기준으로 신설터널이 위치하는 거리를 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m로 설정하고 각 거리별로 간격을 5가지($0D_1$, $0.37D_1$, $0.75D_1$, $1.13D_1$, $1.5D_1$)로 설정하였다. 일반적으로 지반손실률이 증가하고 거리가 근접할수록 최대변위, 각변위가 증가하였고 필라의 안정성을 평가하는 강도/응력비 또한 감소하였다. 결과적으로 신설터널과 필라 중심과의 거리가 5 m, 간격이 $0D_1$, 지반손실률이 1.5%인 경우 기존 병렬터널의 안정성이 가장 취약한 것으로 나타났다.

주요어: 병렬터널, 변위, 강도/응력비, 지반손실률, 변위조절모델

1. 서론

최근 도심지에서 지상구조물이 포화상태에 이르렀으며, 증가하고 있는 교통난과 각종 환경문제를 해결하고자 지하화 건설이 각광 받고 있는 추세이다. 해외에서는 프랑스의 France A86 West Beltway Tunnels, 일본의 동경 중앙환상선, 미국의 Big Dig, 스페인의 M30 프로젝트 등 지하공간을 활용하여 지하도로를 운영 중에 있으며, 국내에서는 경부고속도로, 동부간선도로, 서부간선도로의 지하화를 추진 중에 있다. 지하구조물의 수요가 증가하는 상황에서 지하공간을 지속적으로 활용하기 위해서는 근접 시공을 통한 지하화 개발이 불가피하다. 근접 시공을 통한 지하화 건설은 굴착으로 인한 지표침하나 주변 지반의 거동으로 인하여 기존 구조물에 영향을 미치며 심한 경우에는 붕괴까지 발생할 수 있어 철저한 안정성 검토가 필수적이다.

Yoo and Song (2006)은 기존터널에 근접하게 신설터널을 시공할 경우 신설터널의 위치에 따라 기존터널 라이닝에 미치는 영향성을 분석하였다. 기존터널의 천단부를 기준으로 0° , 45° , 90° , 135° , 180° 로 위치에 변화를 주었으며 최대모멘트와 응력이 발생하는 신설터널의 위치가 기존터널과 135° 일 경우 기존터널 라이닝에 가장 큰 영향을 미치며 안정성이 취약한 것을 확인하였고 좌, 우측으로 수평하게 굴착될 경우 안정적인 경향이 나타나는 것을 확인하였다. Kim et al. (2006)은 기존 단선 철도터널에서 신설터널을 굴착할 경우 기존터널의 안정성을 분석하였다. 신설터널이 굴착될 경우 기존터널은 신설터널이 시공되는 쪽으로 당겨지듯 변형되었고, 신설터널이 기존터널에 근접할수록 기존터널 라이닝에 작용하는 압력이 증가하기 때문에 위치, 지반조건, 터널의 크기 등을 철저히 고려해야만 한다고 하였다. Nam et al. (2017)은 복층터널에서 분기터널을 굴착할 경우 기존 공동구에 미치는 영향성을 수치해석을 통해 분석하였다. 이격거리가 가깝고 지반손실률이 클수록 각변위, 부재력 등 공동

구의 안정성에 미치는 영향이 크게 나타나는 것을 확인하였다. Kim et al. (2017)은 기존터널 인근에 분기터널을 굴착할 경우 굴착위치와 지반손실률에 따른 기존터널에 미치는 안정성을 분석하였다. 지반손실률이 증가할수록 안정성이 취약해지며, 분기터널이 기존터널의 직하부에 있을 경우 터널 라이닝의 파괴범위가 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다. Xue and Zhang (2020)은 기존터널 인근에 신설터널을 건설할 경우 신설터널의 위치와 굴착면의 지지력이 기존터널에 미치는 영향성을 분석하였다. 신설터널의 위치가 기존터널과 근접할수록 기존터널의 세그먼트 변형이 커지는 것을 확인하였고, 이격거리가 기존터널의 변형을 제어하기 위한 중요한 요소인 것을 확인하였다. Na et al. (2020)은 3차원 수치해석을 통해 굴착공법과 벤치길이를 다르게 설정하여 대단면 터널에서 확폭을 통해 분기터널을 굴착하는 근접 시공에서 분기 후 구간에서의 안정성을 분석하였다. 그 결과 확폭구간은 큰 응력변화를 유발하나 벤치길이에 따른 영향은 다소 미미한 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 또한 선행굴착의 영향을 반영할 경우 2차원 수치해석을 진행했을 경우보다 강도/응력비 값이 감소하는 것을 확인하였다.

근접 시공과 관련된 선행연구들은 기존 단일구조물과 인접하게 신설터널을 굴착하는 경우에 대한 연구들이 주로 이루어졌으며, 복합적인 구조물에 대한 연구는 미미하였다. 따라서 본 연구에서는 복합구조물인 병렬터널의 하부에 신설터널을 굴착하여 근접시공 시 신설터널의 굴착 위치와 지반손실률에 따른 기존 병렬터널의 안정성 분석을 목표로 수행하였다. 필라의 중심을 기준으로 신설터널의 거리를 다섯 가지(5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m)로 나누고, 각 거리마다 간격을 다섯 가지($0D_1$, $0.37D_1$, $0.75D_1$, $1.13D_1$, $1.5D_1$)로 설정하였다. 또한 신설터널이 굴착됨에 따라 발생하는 지반손실률을 각 경우마다 세 가지(0.5%, 1.0%, 1.5%)로 적용하였다. 이를 통해 총 75개의 2차원 수치해석을 수행하여 각 병렬터널에 미치는 영향과 필라의 안정성을 분석하였다.

2. 지반손실률 및 기존 병렬터널의 안정성 평가 방법

2.1 지반손실률의 개념

터널 시공 시 지반을 굴착함에 따라 지반손실은 필연적으로 발생한다. 지반손실은 지반침하를 유발하고 인접한 구조물에 영향을 미치며 손상까지 발생할 수 있다. 따라서 지반손실은 터널을 굴착함에 있어 고려해야할 중요한 요소이다.

지반침하곡선을 예측하는 가장 대표적인 방법은 Peck (1969)이 제안한 Gaussian 곡선으로 현재까지 다양한 현장자료와 실험을 통하여 검증되었다. 지반침하곡선은 식 (1)과 같이 최대침하량(S_{max})과 변곡점(i)의 함수로 나타낼 수 있다. 식 (1)을 적분함으로써 지반침하곡선의 단위 길이 당 부피를 계산할 수 있으며(Kim et al., 2014) 최종적으로 지반손실률은 식 (3)과 같이 굴착부피에 대한 침하곡선의 부피비로 나타낼 수 있다.

$$S_v(x) = S_{max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v(x)dx = \sqrt{2\pi}(S_{\max} \cdot i) \quad (2)$$

$$V_L(\%) = \frac{4V_s}{\pi D^2} \cdot 100 \approx \frac{4V_t}{\pi D^2} \cdot 100 \quad (3)$$

여기서, S_v : 침하량

S_{\max} : 터널 중심에서의 최대침하량

i : 변곡점

x : 터널 중심으로부터의 수평거리

D : 최종 터널의 직경

V_s : 침하곡선의 부피

V_t : 터널의 지반손실량

V_L : 지반손실률

지반손실률은 이론적으로 지반침하곡선을 통해 계산한 지반손실량과 동일하지만, 지반종류에 따라 터널 시공 시 터널 주변에서 발생하는 지반손실량이 지표면에 전달되는 과정에서 수축이나 팽창되는 정도에 따라 실제 값에 변화가 있을 수 있다(Fig. 1).

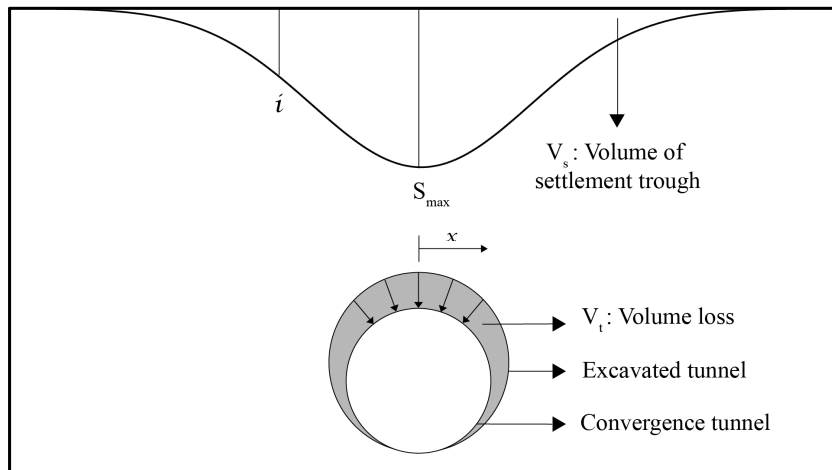


Fig. 1. Concept of volume loss

2.2 기존 병렬터널의 안정성 평가 방법

기존터널 인근에서 신설터널을 굴착할 경우 주변 지반의 변형은 필연적으로 발생한다. 이는 기존터널의 안정성에 영향을 미치며 심각한 경우 붕괴를 유발할 수 있으므로 철저한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 병렬터널의 안정성을 평가하기 위해 최대변위와 각변위를 활용하여 각 터널마다의 안정성을 분석하였다. 또한 신설터널 굴착으로 인한 기존 병렬터널 필라의 안정성을 분석하기 위해 강도/응력비를 활용한 분석을 수행하였다.

2.2.1 기존터널의 안정성 평가 기준

기존 지하구조물에 근접하게 새로운 구조물을 건설할 경우 지표침하와 같은 주변 지반의 거동으로 인해 부등침하와 변위가 발생하게 되어 기존 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. Li and Yuan (2012)은 신설터널을 굴착했을 시 기존터널의 안정성 평가를 위해 최대변위를 활용한 터널의 안정성 평가 기준을 제시하였고(Table 1), Bjerrum (1963)은 기존구조물의 안정성을 평가하기 위해 부등침하를 통한 각변위 한계를 제시하였다(Fig. 2).

Table 1. Deformation criteria of existing tunnel (Li and Yuan, 2012)

Case	Limit
1	The maximum settlement and horizontal displacement - no more than 20 mm
2	The radius of deformation curve along the longitudinal direction of the existing tunnel - no less than 15,000 m
3	The slope of deformation curve along the longitudinal direction of the existing tunnel - no more than 1/2

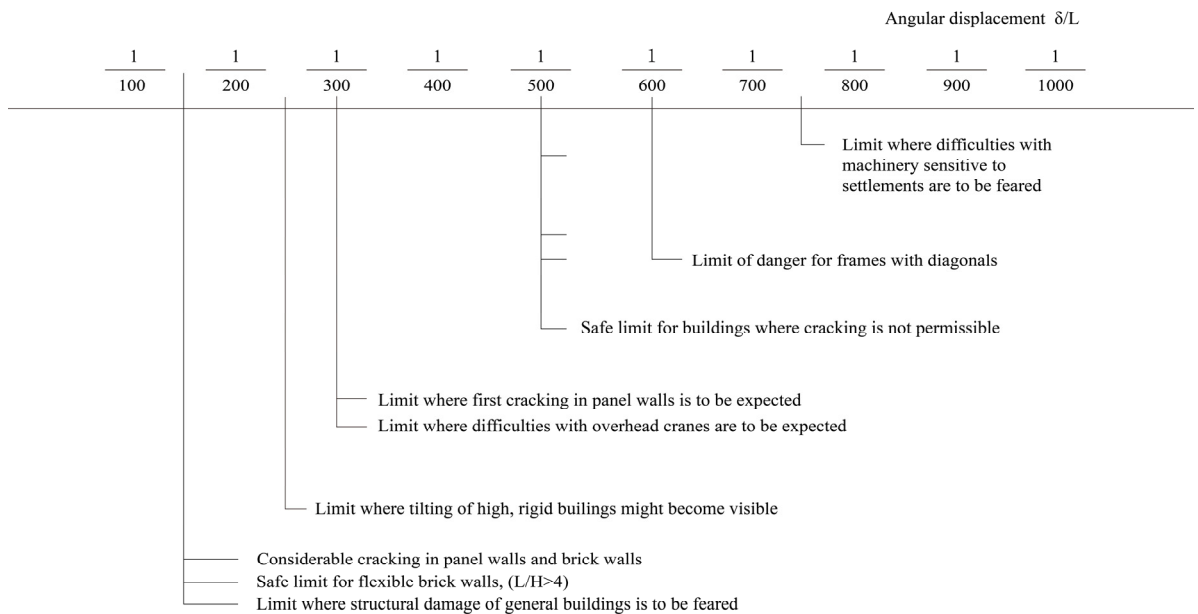


Fig. 2. Limits related to angular displacements (Bjerrum, 1963)

본 연구에서는 신설터널의 위치에 따른 각 기존터널의 안정성을 분석하기 위해 최대변위와 각변위 평가 기준을 적용하여 연구를 수행하였다.

2.2.2 병렬터널 필라의 안정성 평가 방법

병렬터널에 대한 선행연구들은(Byun et al., 2010; Yoo and Kim, 2011; Kim and Kim, 2013) 병렬터널의 안정성을 분석하기 위해 필라의 안정성 연구를 수행하였다. 필라는 병렬터널에 작용하는 하중을 지지해주는 역할로서 기존 병렬터널의 인근에 신설터널을 굴착할 경우 필라에서의 응력집중 현상으로 파괴될 우려가 있어 병렬터널의 안정성을 확보하기 위해서는 필라의 안정성 검토는 필수적이다. 필라의 안정성을 평가하기 위한 방법은 Peck (1969) 과 Matsuda et al. (1998)의 경험적 방법과 수치해석 결과를 활용하여 강도/응력비를 계산하는 방법이 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 얻은 필라의 주응력을 사용하여 강도/응력비를 산정하고 안정성 분석을 수행하였다.

Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도/응력비는 전단응력과 전단강도로 표현할 수 있다. 수치해석을 통해 필라에 작용하는 주응력을 이용하여 강도/응력비를 구할 수 있으며, 구속응력(σ_3)에 대한 소성파괴는 식 (4)과 같으며, 이때 필요한 암반의 일축압축강도(σ_{cm})는 식 (5)와 같다. 또한 주응력선의 기울기(k)는 식 (6)과 같으며, 최종적인 강도/응력비에 대한 안전율 선정은 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad (4)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

$$F.S. = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (7)$$

여기서, σ_{1f} : 파괴 시 축방향 응력

σ_1 : 최대주응력

σ_3 : 구속응력

σ_{cm} : 암반의 일축압축 강도

k : 주응력선의 기울기

c : 암반의 점착력

ϕ : 암반의 내부마찰각

강도/응력비가 1.0보다 작을 경우 필라가 불안정하고, 강도/응력비가 1.0 이상인 경우 안정하다고 판단한다. 하지만 지속적인 필라의 안정을 위해서는 1.5 이상의 강도/응력비의 값이 요구된다(Hoek and Brown, 1980).

3. DCM (Displacement Control Model) 방법을 활용한 수치해석 모델링

본 연구에서는 신설터널 굴착으로 인한 기존 근접 병렬터널의 안정성을 분석하기 위해 FEM 프로그램인 MIDAS GTS-NX를 사용하여 2차원 수치해석을 진행하였다. 해석에 사용된 지반 물성치는 Mohr-Coulomb 탄·소성 모델로 설정하였고 사용된 지반의 역학적 특성은 Table 2와 같다. 기존 병렬터널에 사용된 콘크리트 라이닝의 단위중량은 25 kN/m^3 의 무근콘크리트(일축압축강도 40 MPa, 인장강도 4 MPa)를 사용하였고 두께는 0.4 m이며, 요소 특성은 보요소로 적용하였다.

Table 2. Physical properties of ground and concrete used for numerical analyses

Material	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Angle of friction (Deg.)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Model type
Weathered rock	20.0	35.0	32.0	200	0.3	Mohr-coulmb
Concrete	25.0	-	-	27,000	0.18	Elastic

기존에 주로 사용된 해석방법인 하중제어법(FCM)은 실제 관측값과 비교 했을 때, 인버트 부분에서 용기는 과하게 발생하고 최대지표침하량은 감소하며, 터널과 먼 지표에서까지 침하가 발생하였다. 본 연구에서는 하중제어법의 문제점을 보완하기 위해서 제안된 변위제어법(DCM)을 사용하여 수치해석을 수행하였다(Cheng et al., 2007). 변위제어법은 터널중심축의 한 지점을 향해 수렴하도록 터널굴착면의 절점(nodes)에 직접적인 변위를 입력하여 지반손실량을 모사할 수 있는 방법이다. 터널의 인버트부에서 침하가 일어나지 않는 한 정해진 지점은

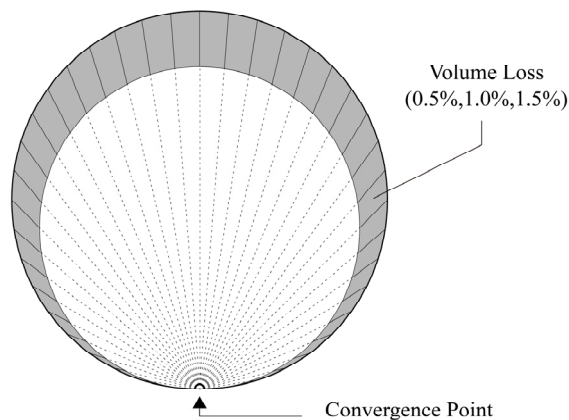


Fig. 3. A new tunnel model using displacement control method

인버트부 아래로 내려가지 않으므로, 터널의 중심과 인버트부 사이에서 수렴점이 정해진다. 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 신설터널을 40등분으로 나누고 신설터널 중심의 하부를 수렴점으로 설정하여 강제변위를 적용하였다. 각 절점(nodes)에서의 지반손실률을 세 가지(0.5%, 1.0%, 1.5%)로 적용하여 시공 시 발생하는 지반손실량을 모사하였다.

기존 병렬터널은 2차로 터널로 천단부로부터 지표면까지 토피고를 20 m로 설정하였다. 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 기존 병렬터널의 직경(D_1)의 4배 이상으로 좌우측 경계를 적용하였고, 신설터널의 직경은(D_2) 10 m로 적용하였다. 필라의 이격거리는 병렬터널의 직경(D_1)의 절반인 $0.5D_1$ 로 설정하여 근접 병렬터널을 표현하였다. 필라의 중심으로부터 신설터널의 거리(H)를 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m로 나누고 각 거리마다 간격(L)를 $0D_1$, $0.37D_1$, $0.75D_1$, $1.13D_1$, $1.5D_1$ 로 선정하여 신설터널의 위치 변화에 따른 기존터널과 필라의 안정성을 분석하였다. 그리고 각 경우마다 지반손실률을 0.5%, 1.0%, 1.5% 세 가지로 적용하여 총 75가지의 해석을 수행하였다 (Fig. 4).

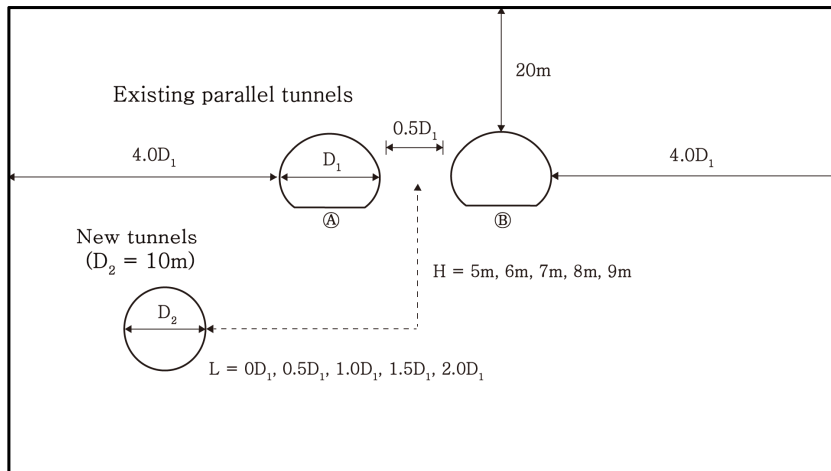


Fig. 4. Model according to the change of location of the new tunnel

4. 수치해석 결과 및 분석

4.1 신설터널 굴착위치에 따른 기존 병렬터널의 안정성 평가

4.1.1 최대변위 기준에 따른 안정성 평가

Li and Yuan (2012)은 신설터널을 굴착할 경우 기존터널의 안정성 평가를 위해 20 mm를 기준으로 최대침하량과 수평변위에 대한 안정성 검토를 수행하였다. 본 연구에서는 신설터널이 굴착되는 위치와 시공 시 발생하는 지반손실률에 따른 기존터널의 안정성을 분석하기 위하여 위와 같은 변위 기준을 적용하였다. 5가지의 이격거리, 5가지의 간격과 3가지 지반손실률을 적용하여 총 75가지의 수치해석 결과를 분석하여 각 해석 케이스마다 발생

한 최대변위값을 20 mm 기준과 비교하기 위해 그래프로 도출하였다.

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 5 m일 때 신설터널과 근접한 기존터널(A)의 경우 지반손실률이 증가함에 따라 최대변위가 증가하는 경향이 나타났으며, 신설터널의 중심이 인버트 끝 하부에 위치하였을 때($0.37D_1$, $1.13D_1$) 최대변위가 가장 크게 발생하는 것을 확인하였다(Fig. 5(a)). 신설터널의 위치가 상대적으로 먼 기존터널(B)의 경우 지반손실률이 증가하고 신설터널이 인접하게 위치할수록 최대변위가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5(b)). 이때 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가하는 경우 변위증가량은 평균 1.43배 정도 크게 나타났으며, 1.0%에서 1.5%로 증가하는 경우 평균 1.21배 증가하였다. 안정성평가의 경우 신설터널과 인접한 터널(A)은 지반손실률이 0.5%일 때 모든 조건에서 허용 기준을 초과하지 않아 안정하다 판단되며, 지반손실률 1.0%, 1.5%인 경우 $0D_1$, $0.37D_1$, $1.13D_1$, $1.5D_1$ 에 위치할 시 기준을 초과하여 불안정할 것으로 판단된다(Fig. 5(a)). 신설터널과 상대적으로 먼 기존터널(B)의 경우 간격이 $0D_1$ 일 때 지반손실률 1.0%, 1.5%인 경우만 범위를 초과하였다(Fig. 5(b)).

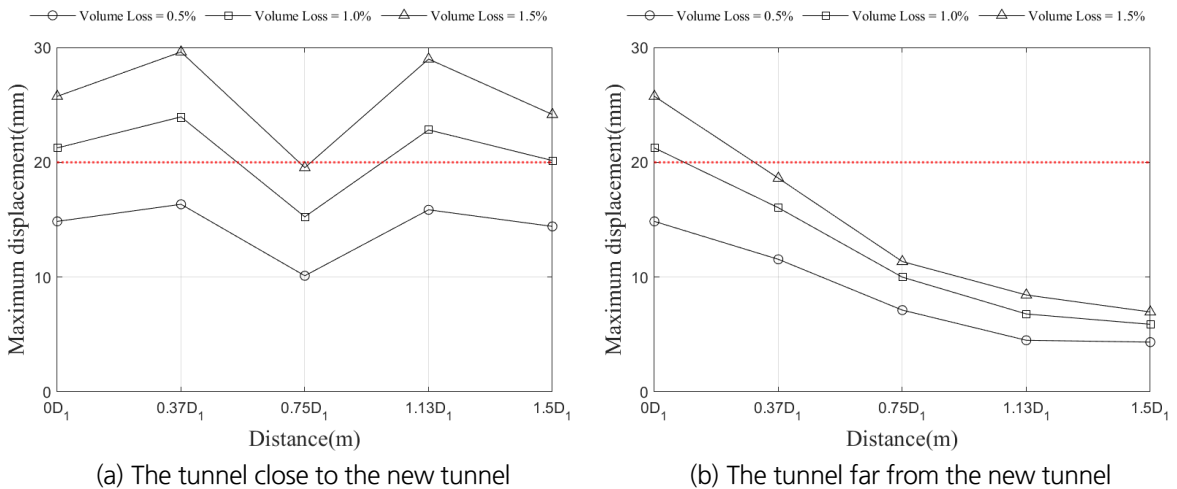


Fig. 5. Maximum displacement at a distance of 5 m

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 6 m에 대한 분석결과, 5 m인 경우와 동일하게 지반손실률이 증가할수록 최대변위가 증가하였고 이격거리가 증가함에 따라 전체적으로 최대변위가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6). 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가함에 따라 변위증가량은 평균 1.44배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가하는 경우 평균 1.20배 증가하였다. 안정성평가는 신설터널과 근접한 기존터널(A)은 지반손실률이 1.0%인 경우 신설터널의 간격이 $0.37D_1$ 에서만 기준을 초과하였으며 1.5%인 경우 5 m와 동일한 결과가 나타났고(Fig. 6(a)), 신설터널과 상대적으로 먼 기존터널(B)의 경우 간격이 $0D_1$ 이고 1.5%인 경우만 허용 기준을 초과하였다(Fig. 6(b)).

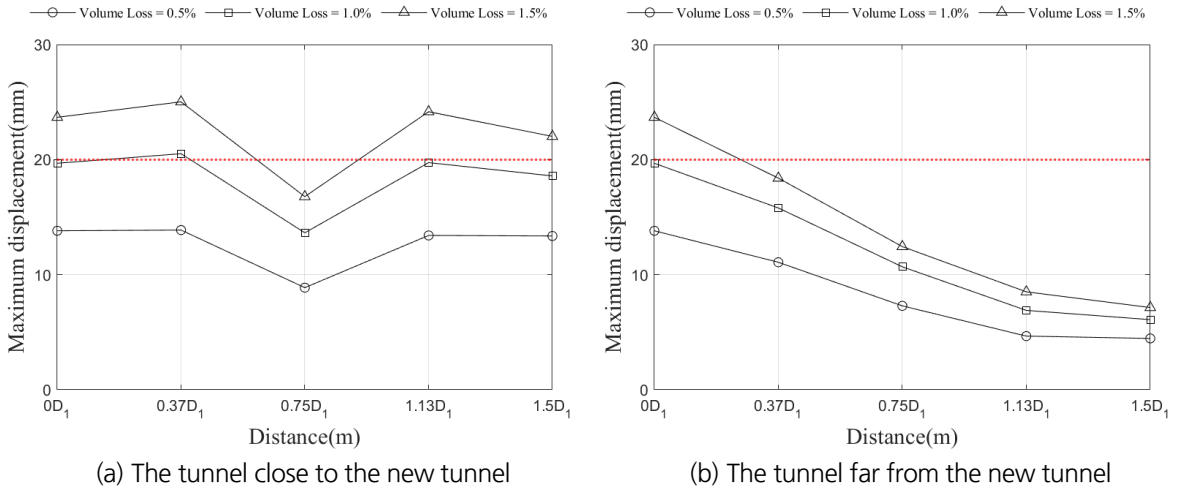


Fig. 6. Maximum displacement at a distance of 6 m

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 7 m인 경우 동일하게 지반손실률이 증가함에 따라 최대변위가 증가하는 경향이 나타났다.(Fig. 7). 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가함에 따라 평균 1.42배 정도 변위증가량이 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.20배 정도 크게 나타났다. 안정성평가의 경우 전체적으로 6 m인 경우보다 최대변위가 감소하였다. 신설터널과 근접한 터널(A)의 경우 지반손실률이 0.5%, 1.0%일 때 모든 조건에서 안정성평가 기준 범위를 초과하지 않았으며, 지반손실률이 1.5%인 경우 0.75D₁를 제외하고 기준을 초과하였다(Fig. 7(a)). 신설터널과 상대적으로 거리가 먼 터널(B)의 경우 6 m와 동일하게 간격이 0D₁이고 지반손실률이 1.5%인 경우만 허용 기준을 초과하였다(Fig. 7(b)).

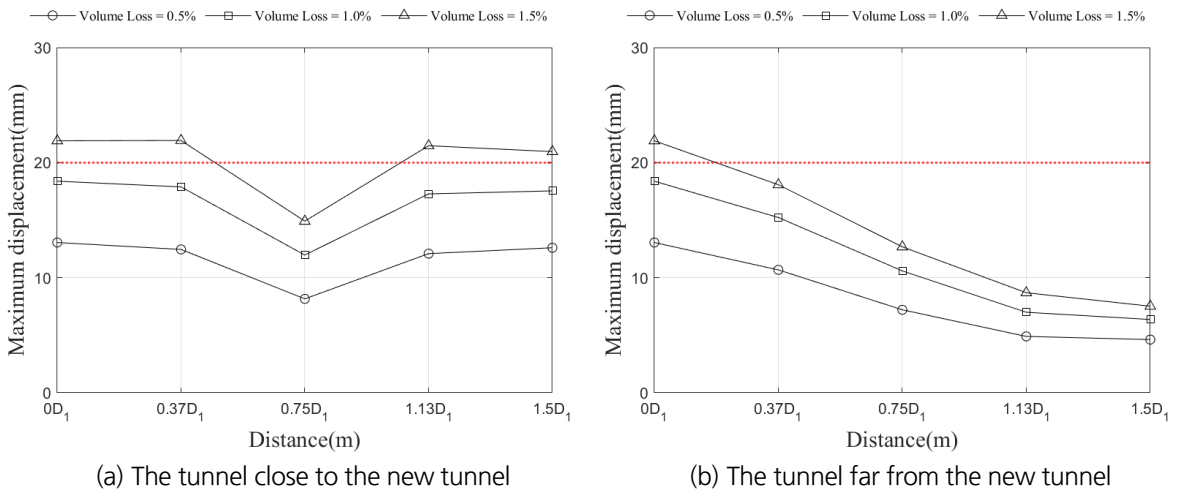


Fig. 7. Maximum displacement at a distance of 7 m

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 8 m인 경우 7 m와 마찬가지로 지반손실률이 증가할수록 최대변위가 증가하는 경향을 보였다. 변위증가량은 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 평균 1.40배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.20배가 증가하였다. 최대변위값은 7 m 보다 전체적으로 감소하였으며 안정성평가의 경우 기존터널(A)과 기존터널(B) 모두 동일하게 간격이 $0D_1$ 이고 지반손실률이 1.5%인 경우만 허용 기준을 초과하였다(Fig. 8).

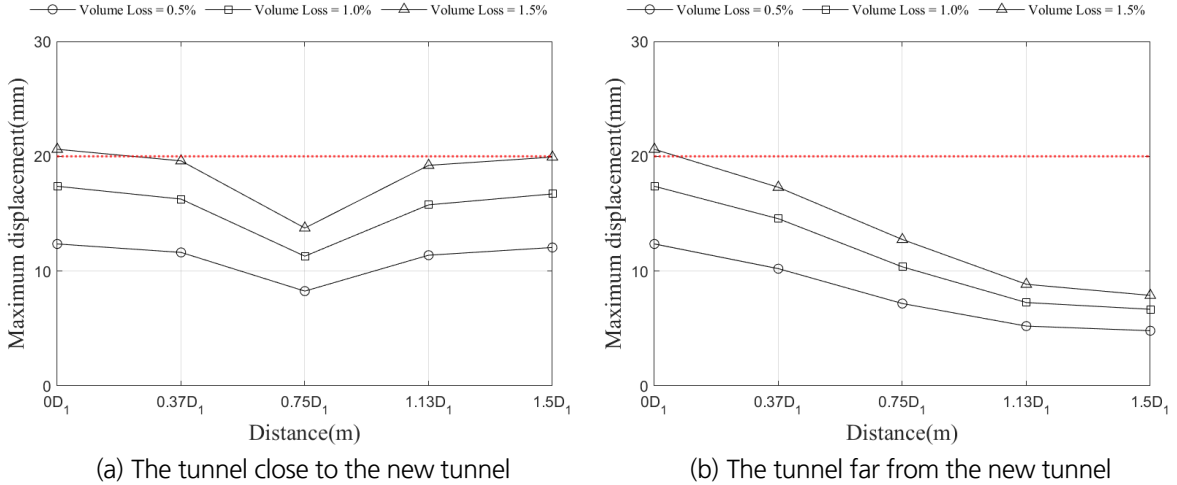


Fig. 8. Maximum displacement at a distance of 8 m

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 9 m인 경우 8 m와 동일하게 지반손실률이 증가할수록 최대변위가 증가하였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 때 변위증가량은 평균 1.38배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.18배 정도 크게 나타났다. 안정성평가의 경우 8 m 보다 최대변위가 감소하였으며 기존터널(A)과 기존터널(B) 모두 모든 조건에서 안정성평가 기준 범위를 초과하지 않는 결과가 나타났다(Fig. 9).

신설터널과 근접한 기존터널(A)의 경우 신설터널의 위치가 $0.75D_1$ 즉 인버트 직하부에 위치할 시 가장 안정적인 것으로 나타났으며, 이격거리가 5 m, 6 m, 7 m인 경우 기존터널의 인버트 끝 하부($0.37D_1$, $1.13D_1$)에 신설터널이 위치할 시 가장 취약한 것으로 판단된다. 그리고 이격거리가 8 m인 경우부터 신설터널이 기존터널의 측하부($0D_1$, $1.5D_1$)에 위치할 시 가장 취약한 것으로 나타났다. 또한 신설터널과 상대적으로 거리가 먼 기존터널(B)의 경우 거리와 간격이 증가할수록 최대변위가 감소하는 경향이 나타났으며 점차 수렴되어지는 양상을 보였다. 신설터널의 이격거리가 기존터널과 크게 멀어질 경우, 신설터널의 굴착이 기존터널에 미치는 영향은 매우 작아지는 것으로 판단된다. 지반손실률의 증가에 따른 변위 증가량은 0.5%에서 1.0%로 증가할 시 평균 1.41배 증가하였고 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우 평균 1.20배 정도 증가하였다. 시공 시 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 보다 변위관리에 유의해야 할 것으로 판단된다.

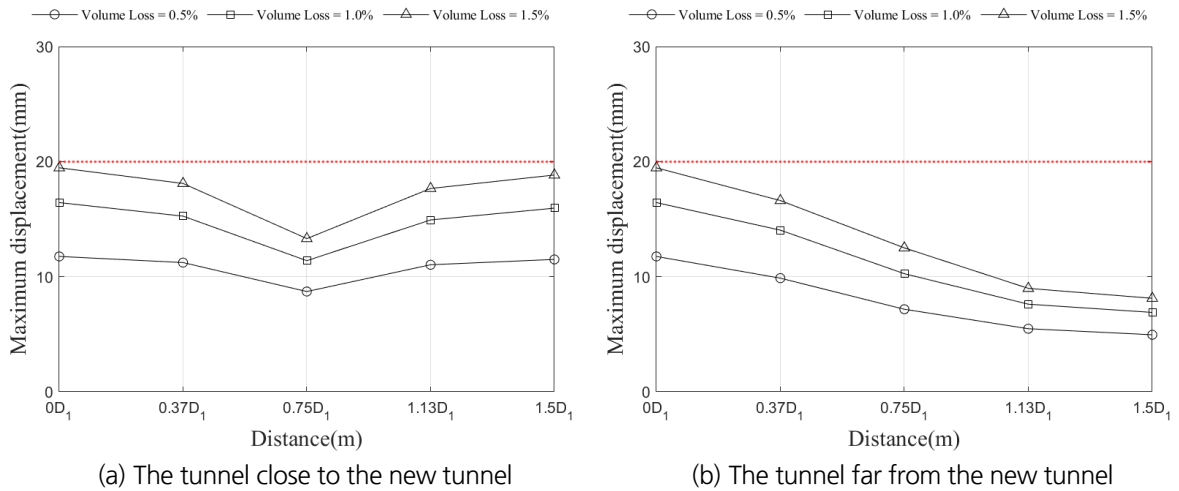


Fig. 9. Maximum displacement at a distance of 9 m

4.1.2 각변위 기준에 따른 안정성 평가

Fig. 10은 신설터널의 간격에 따른 각 기존터널의 대표적인 변위양상과 변형 형상이다. 신설터널과 근접한 기존터널에서는 신설터널의 위치에 따라 변형 형상에 차이가 나타났으며, 신설터널과 상대적으로 거리가 먼 기존터널일 경우 신설터널과 이격거리가 멀어질수록 변위가 감소하며 일정한 변형 형상을 보였다. 또한 두 기존터널 모두 신설터널 인근에 위치한 인버트 부분에서 신설터널이 굴착된 방향으로 기울어지는 모습으로 변형되었으며 부등침하가 발생하는 것을 확인하였다.

수치해석을 수행한 결과로 기존 병렬터널의 부등침하량과 각변위를 계산하여 기존 병렬터널의 안정성 분석을 진행하였다. 부등침하량은 최대침하량과 최소침하량의 차이이며(식 (8)), 각변위는 부등침하량을 최대침하량이 발생한 지점과 최소침하량이 발생한 지점 사이의 거리로 나눈 값이다(식 (9)). 앞서 2장에서 언급한 Bjerrum의 각변위 한계(Fig. 2)에서 건물에 균열이 없도록 하는 한계인 1/500 (=0.002)을 기준으로 안정성 평가를 수행하였다.

$$\text{부등침하량} (\delta) = (\text{최대침하량}) - (\text{최소침하량}) \quad (8)$$

$$\text{각변위} (\text{Angular displacement}) = \frac{\text{부등침하량} (\delta)}{L} \quad (9)$$

신설터널과 필라 중심과의 거리가 5 m일 때 신설터널과 근접한 기존터널(A)에서 간격이 0.75D₁인 경우를 제외하고 지반손실률이 증가함에 따라 각변위가 증가하는 경향이 나타났으며, 신설터널의 중심이 인버트 끝 하부에 위치하였을 때(0.37D₁, 1.13D₁) 각변위가 가장 크게 발생하는 것을 확인하였다(Fig. 11(a)). 신설터널의 위치가 상대적으로 먼 기존터널(B)의 경우 지반손실률이 증가하고 가까이 위치할수록 각변위가 증가하는 경향을 보

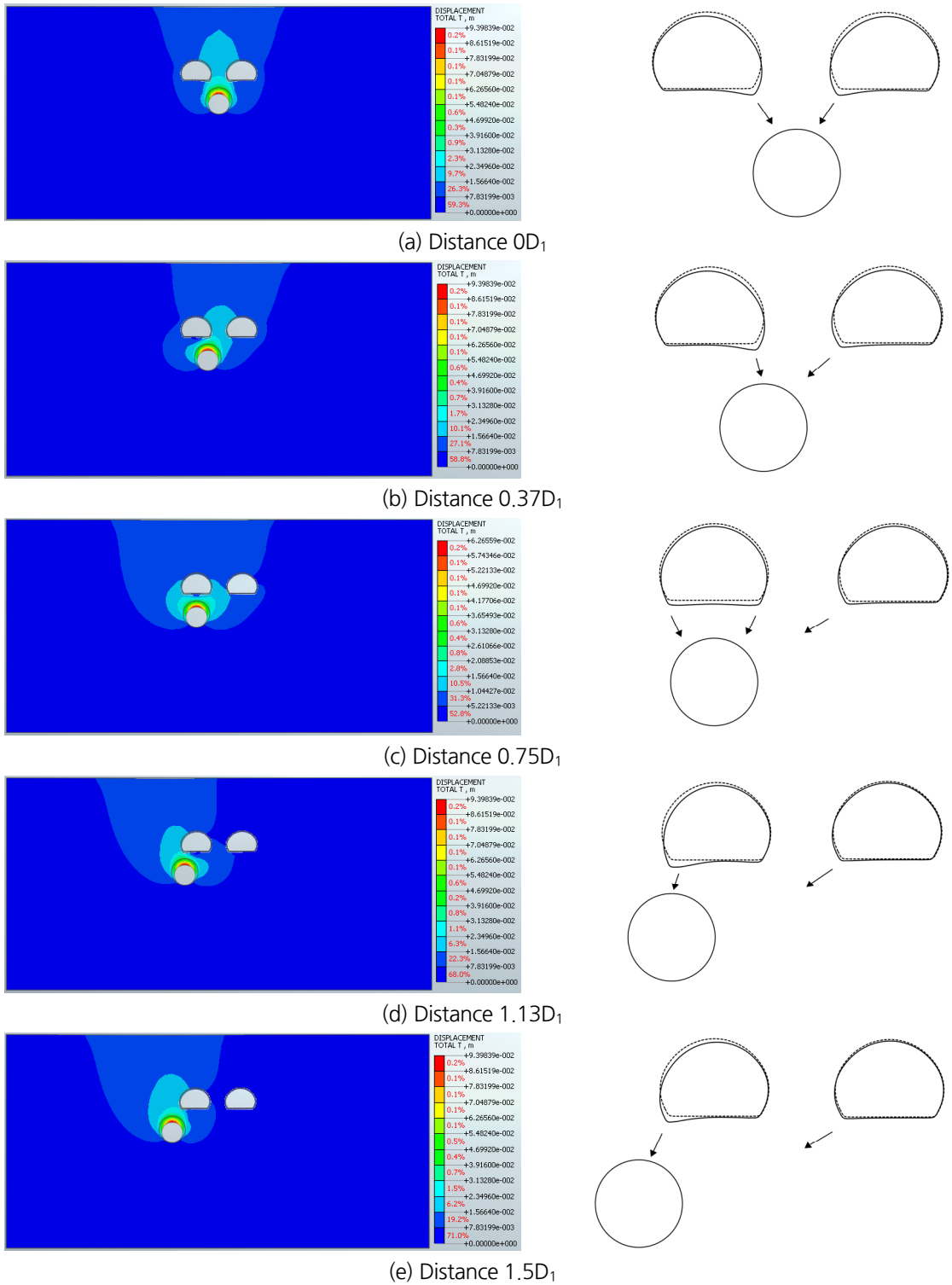


Fig. 10. The shape of the existing tunnel changed after excavation of the new tunnel at a distance of 6 m

였다(Fig. 11(b)). 이때 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가하는 경우 변위증가량은 평균 1.38배 정도 크게 나타났다으며, 1.0%에서 1.5%로 증가하는 경우 평균 1.25배 증가하였다. 안정성평가의 경우 신설터널과 인접한 기존터널(A)의 경우 신설터널이 $0.75D_1$ 에 위치한 경우 지반손실률에 관계없이 각변위 한계 기준을 초과하지 않았으며, 신설터널과 상대적으로 먼 기존터널(B)의 경우 신설터널의 위치가 $0D_1$ 인 경우 지반손실률 1.0%, 1.5%인 경우만 범위를 초과하였다.

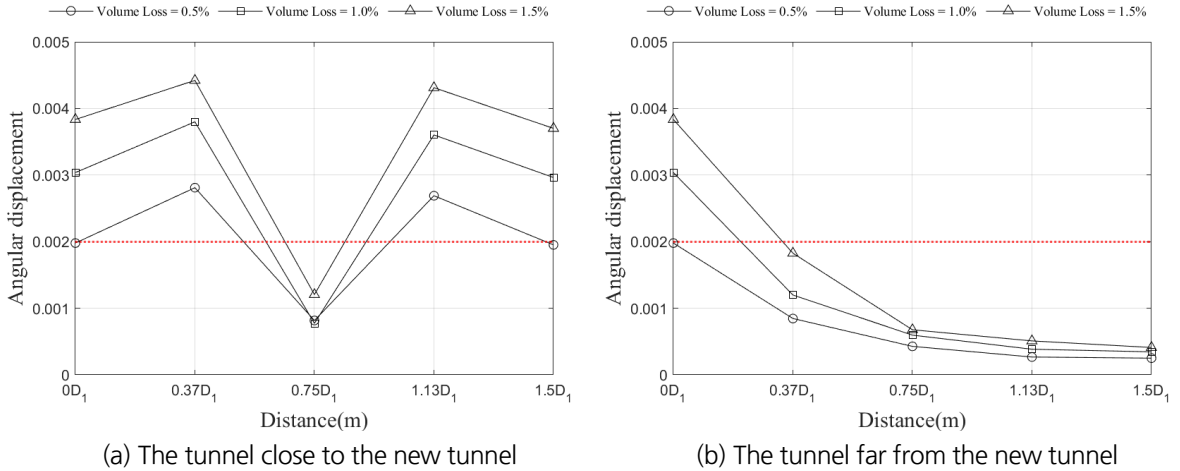


Fig. 11. Angular displacement at a distance of 5 m

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 6 m에 대한 분석결과, 5 m인 경우와 동일하게 간격이 $0.75D_1$ 인 경우를 제외하고 지반손실률이 증가할수록 각변위가 증가하였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가함에 따라 변위

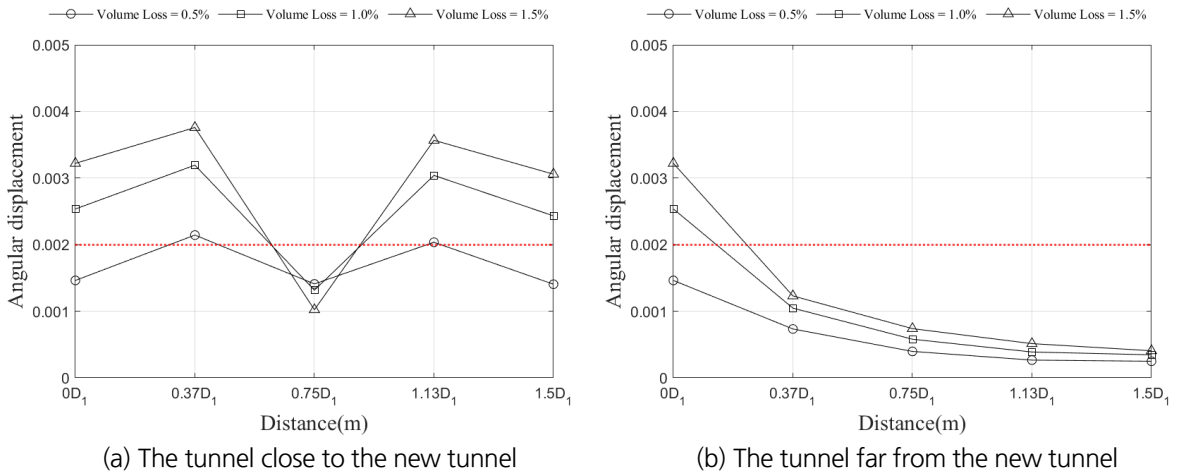


Fig. 12. Angular displacement at a distance of 6 m

증가량은 평균 1.47배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가하는 경우 평균 1.17배 증가하였다. 안정성평가는 5 m인 경우와 동일한 결과가 나타났으며 전체적으로 필라 중심과의 거리가 증가함에 따라 각변위가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 12).

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 7 m인 경우 5 m, 6 m와 다르게 모든 간격에서 지반손실률이 증가함에 따라 최대변위가 증가하는 경향을 보였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가함에 따라 변위증가량은 평균 1.55배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.23배 정도 크게 나타났다. 안정성평가의 경우 전체적으로 6 m인 경우보다 각변위가 감소하였고, 지반손실률이 0.5%일 때 모든 조건에서 안정성평가 기준 범위를 초과하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 13).

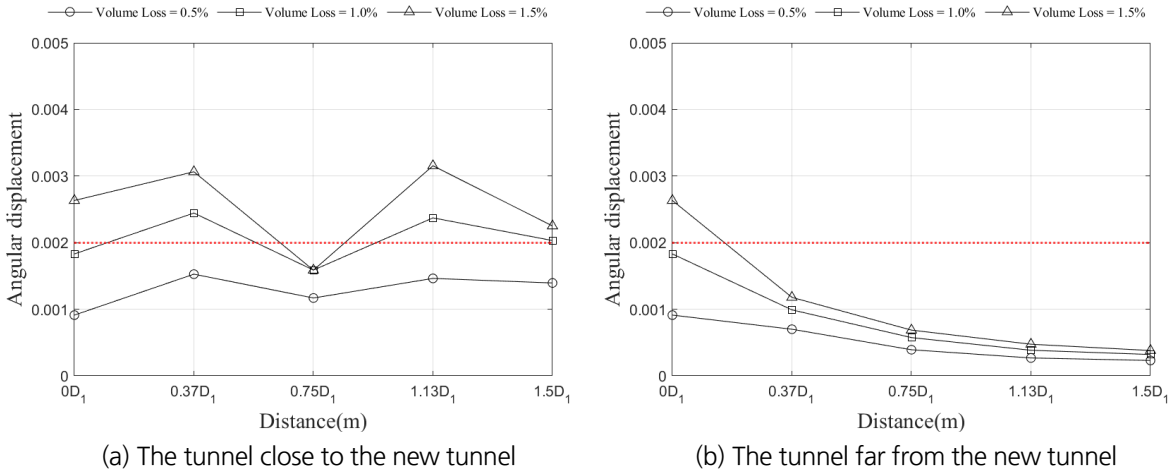


Fig. 13. Angular displacement at a distance of 7 m

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 8 m인 경우 7 m와 마찬가지로 지반손실률이 증가할수록 각변위가 증가하였다. 이때 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 변위증가량은 평균 1.80배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.41배가 증가하였다. 안정성평가의 경우 이격거리가 7 m인 경우보다 안전율이 증가하였으며 8 m부터 지반손실률이 1.0%일 때 모든 조건에서 기준 범위를 초과하지 않으며 0.37D₁, 1.13D₁이고 지반손실률 1.5%인 경우만 기준범위를 초과하였다(Fig. 14).

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 9 m인 경우 8 m 보다 안전율이 증가하였으며, 8 m와 동일하게 지반손실률이 증가할수록 각변위가 증가하는 양상을 보였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가함에 따라 변위증가량은 평균 1.45배 정도 증가하였고, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.55배 정도 크게 나타났다. 전체적인 각변위는 8 m 보다 감소하였으며 모든 조건에서 안정성평가 기준 범위를 초과하지 않는 결과가 나타났다(Fig. 15).

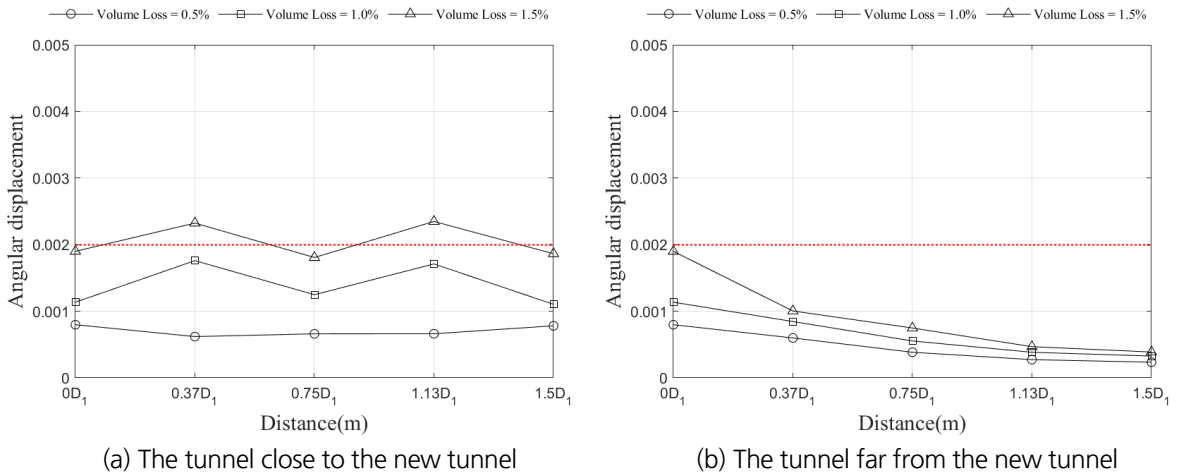


Fig. 14. Angular displacement at a distance of 8 m

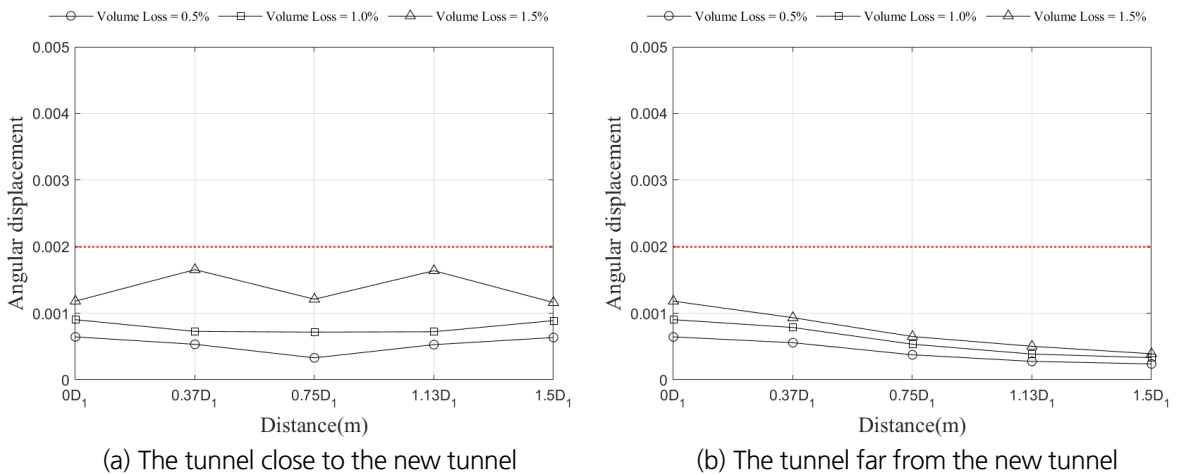


Fig. 15. Angular displacement at a distance of 9 m

신설터널과 근접한 기존터널(A)의 경우 신설터널의 위치가 $0.75D_1$ 즉 인버트 직하부에 위치할 시 가장 안정적인 결과를 보였다. 이격거리가 5 m, 6 m, 7 m의 경우 간격이 $0.37D_1$, $1.13D_1$ 즉 인버트 끝 하부에 신설터널이 위치할 수 가장 취약한 것으로 나타났으며, 이격거리가 8 m, 9 m인 경우 지반손실률에 따라 상이한 결과가 나타났다. 8 m인 경우 지반손실률이 0.5%일 시 간격이 $0D_1$, $1.5D_1$ 즉 측하부에서 안정성이 가장 취약한 것으로 나타났으며, 지반손실률이 1.0%, 1.5%에서는 간격이 $0.37D_1$, $1.13D_1$ 인 경우 가장 취약한 결과가 나타났다. 9 m인 경우 지반손실률이 0.5%, 1.0%일 시 간격이 $0D_1$, $1.5D_1$ 일 때 안정성이 가장 취약하였으며, 지반손실률이 1.5%에서는 간격이 $0.37D_1$, $1.13D_1$ 에서 가장 취약한 결과를 보였다.

전체적으로 지반손실률이 증가할수록 각변위가 증가하는 양상이 나타났다. 이는 지반손실률 증가량이 기존터

널의 변형에 영향을 미쳐 부등침하량의 증가로 나타나는 영향이라 판단할 수 있다. 신설터널과 근접한 기존터널(A)에서 신설터널의 거리가 5 m이고 간격이 $0.75D_1$ 인 경우 지반손실률이 0.5%인 경우 1.0%일 때 보다 각변위가 증가하였으며, 6 m의 경우 지반손실률이 증가할수록 각변위가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 11(a), Fig. 12(a)). 이는 기존터널 직하부에 변위제어법의 수렴점인 신설터널의 중심이 위치하게 되어 지반손실률이 증가함에 따라 기존터널 중심에서의 침하 증가량이 측면에서의 침하 증가량보다 크게 증가하여 부등침하량의 감소로 발생한 현상으로 판단된다. 신설터널의 위치가 기존터널 직하부($0.75D_1$)에 위치하고 이격거리가 작을 경우 각변위는 지반손실률의 변화에 유의해야 할 것으로 판단된다. 신설터널과 상대적으로 거리가 먼 기존터널(B)의 경우 최대변위와 동일하게 이격거리와 간격이 증가할수록 각변위가 감소하는 경향이 나타났으며 점차 수렴되어지는 양상이 나타났다. 결과적으로 신설터널의 위치가 상대적으로 크게 멀어질 경우 기존터널에 미치는 영향이 매우 미미해지는 것으로 판단된다. 전체적인 지반손실률에 의한 평균 각변위 증가량은 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 약 1.53배 증가하였고 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우 약 1.32배 정도 증가하였다. 앞서 언급한 최대변위 증가량과 마찬가지로 각변위도 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가하는 경우 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 보다 안정성에 주의를 기울일 필요가 있다고 판단된다.

4.2 신설터널 굴착위치에 따른 필라의 안정성 평가

4.2.1 강도/응력비를 활용한 필라의 안정성 평가

신설터널의 굴착으로 주변 지반의 거동과 응력의 변화는 필라의 안정성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 목표구조물인 병렬터널 사이에 존재하는 필라의 안정성을 강도/응력비를 활용하여 분석하였다. Hoek and Brown (1980)이 언급한 지속적인 필라의 안정을 위한 강도/응력비값인 1.5를 기준으로 필라 중심에서의 강도/응력비를 구하여 Fig. 16과 같이 그래프로 도출하였다.

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 5 m에 대한 강도/응력비 분석 결과, 지반손실률이 증가할수록 안전율이 감소하는 경향을 보였으며 간격이 멀어질수록 안전율이 증가하는 경향이 나타났다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가하는 경우 강도/응력비는 평균 1.26배 감소하였으며, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.16배 감소하였다. 신설터널이 필라의 중심($0D_1$)에 위치하고 지반손실률이 1.0%와 1.5%인 경우 강도/응력비 허용 기준인 1.5를 초과하지 못해 불안정할 것으로 판단된다(Fig. 16(a)).

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 6 m인 경우 5 m인 경우와 마찬가지로 지반손실률이 증가할수록 안전율이 감소하며 간격이 멀어질수록 안전율이 증가하는 경향을 보였다. 전체적인 안전율은 5 m인 경우보다 증가하였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가하는 경우 강도/응력비 증가량은 1.31배 정도 감소하였으며, 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.15배 감소하였다. 신설터널이 필라의 중심($0D_1$)에 위치했을 때 지반손실률이 1.0%와 1.5%인 경우 5 m인 경우와 동일하게 강도/응력비 허용 기준인 1.5를 초과하지 못해 불안정할 것으로 판단된다(Fig. 16(b)).

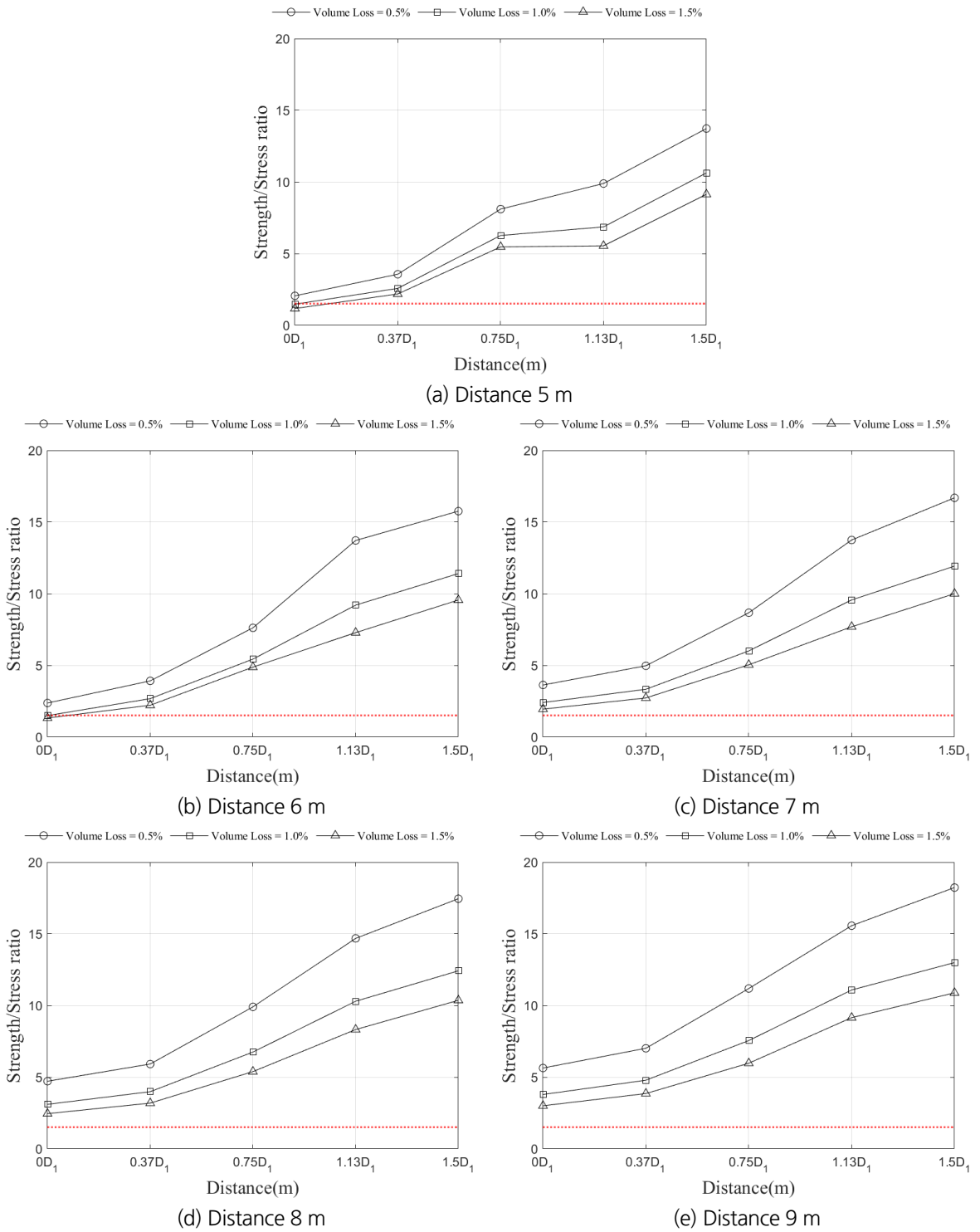


Fig. 16. The strength/stress ratio of the pillar

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 7 m인 경우 6 m인 경우보다 안전율이 증가했으며, 지반손실률이 증가할수록 안전율이 감소하고 간격이 멀어질수록 안전율이 증가하는 경향을 보였다. 강도/응력비 증가량은 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 시 평균 1.31배 감소하였고 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.17배 감소하였다. 안전율의 경우 모든 조건에서 허용 기준을 만족시켜 안정할 것으로 판단된다(Fig. 16(c)).

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 8 m인 경우 7 m보다 안전율이 증가했으며, 마찬가지로 지반손실률이 증가할수록 안전율이 감소하며 간격이 멀어질수록 안전율이 증가하는 경향을 보였다. 강도/응력비 증가량은 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 때 평균 1.31배 감소하였고 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우 평균 1.19배 감소하였다. 안전율은 모든 조건에서 기준 안전율인 1.5를 확보하여 안정할 것으로 판단된다(Fig. 16(d)).

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 9 m인 경우 8 m인 경우 보다 안전율이 증가했으며, 마찬가지로 지반손실률이 증가할수록 안전율이 감소하며 간격이 멀어질수록 안전율이 증가하는 경향을 보였다. 강도/응력비 증가량은 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 시 평균 1.31배 감소하였고 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.19배 감소하였다. 안전율의 경우 모든 조건에서 안전율 기준을 만족시켜 안정할 것으로 판단된다(Fig. 16(e)).

신설터널과 필라 중심과의 이격거리가 7 m 이상인 경우부터는 모든 조건에서 안전율 기준인 1.5를 확보하는 결과를 보였다. 신설터널의 위치가 필라와 근접할수록 필라 중심에서의 최대주응력은 증가하고 최소주응력은 감소하는 영향으로 인하여 이격거리와 간격이 멀어질수록 안전율이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 지반손실률이 증가할수록 안전율이 감소하는 경향이 나타났으며, 마찬가지로 지반손실률이 증가할수록 최대주응력은 증가하고 최소주응력은 감소로 인한 결과로 판단된다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 평균 1.30배 감소하였고 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.17배 감소하였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 보다 안전율의 감소량이 크게 발생하므로 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 안정성에 주의를 기울여야 한다.

4.3 신설터널 굴착위치에 따른 기존 병렬터널의 안정성 평가 결과

신설터널 굴착 위치에 따른 기존 병렬터널의 안정성을 평가하기 위해 4.1, 4.2절에서 검토한 최대변위, 각변위, 강도/응력비에 대한 종합적인 결과를 분석하였다. 이를 통해 각 지반손실률 별로 기존 병렬터널의 안정성을 확보할 수 있는 신설터널의 위치를 도출하였다(Table 3, Table 4, Table 5).

신설터널의 위치가 기존터널의 직하부($0.75D_1$)에 위치하였을 경우 모든 조건에서 안정한 결과가 나왔으며, 지반손실률이 0.5%인 경우 7 m, 지반손실률이 1.0%인 경우 8 m, 지반손실률이 1.5%인 경우 9 m부터 간격에 관계 없이 안정적인 것으로 나타났다.

Table 3. The stability evaluation result of the existing parallel tunnel in new tunnel's volume loss 0.5%

Distance (m) \ Space (m)	5	6	7	8	9
0D ₁	o	o	o	o	o
0.37D ₁	x	x	o	o	o
0.75D ₁	o	o	o	o	o
1.13D ₁	x	x	o	o	o
1.5D ₁	o	o	o	o	o

o : Stable, x : Unstable

Table 4. The stability evaluation result of the existing parallel tunnel in new tunnel's volume loss 1.0%

Distance (m) \ Space (m)	5	6	7	8	9
0D ₁	x	x	o	o	o
0.37D ₁	x	x	x	o	o
0.75D ₁	o	o	o	o	o
1.13D ₁	x	x	x	o	o
1.5D ₁	x	x	x	o	o

o : Stable, x : Unstable

Table 5. The stability evaluation result of the existing parallel tunnel in new tunnel's volume loss 1.5%

Distance (m) \ Space (m)	5	6	7	8	9
0D ₁	x	x	x	x	o
0.37D ₁	x	x	x	x	o
0.75D ₁	o	o	o	o	o
1.13D ₁	x	x	x	x	o
1.5D ₁	x	x	x	o	o

o : Stable, x : Unstable

Fig. 17은 Table 3, Table 4, Table 5의 결과를 막대그래프로 도식화한 것이다. 신설터널의 위치에 따른 기존 병렬터널의 안정성은 지반손실률이 증가할수록 안정성이 결여되는 경향을 보였다. 지반손실률이 0.5%인 경우 4가지 조건에서 불안정한 것으로 나타났으며, 지반손실률이 1.0%인 경우 11가지 조건에서 불안정한 것으로 나타났고, 지반손실률이 1.5%인 경우 15가지 조건에서 불안정한 것으로 나타났다. 이를 통해 앞서 언급한 최대변위, 각 변위, 강도/응력비의 분석결과와 마찬가지로 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우 보다 기존 병렬터널에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

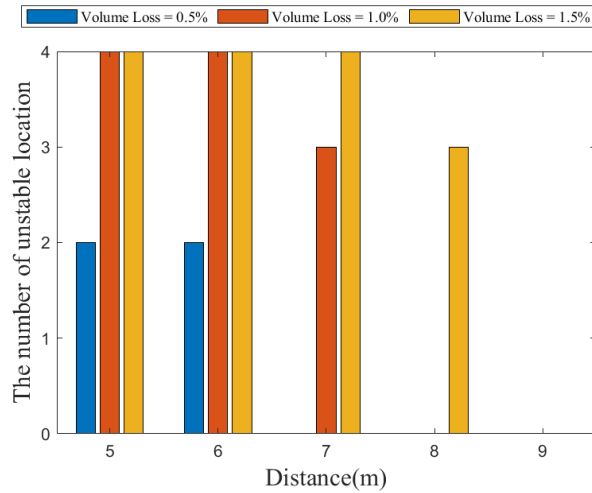


Fig. 17. The number of unstable location

5. 결론

본 연구에서는 신설터널의 굴착으로 인한 기존 병렬터널의 영향을 평가하기 위하여 신설터널의 위치와 지반손실률을 주요 변수로 수치해석을 진행하였다. 안정성 평가 기준에 초점을 맞추어 기존터널의 안정성과 필라의 안정성을 분석하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 필라 중심과의 거리가 9 m 이상일 경우부터 모든 조건에서 최대변위와 각변위 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 각 기존터널에서 발생하는 최대변위와 각변위는 거리가 인접하고 지반손실률이 클수록 안정성이 취약한 것으로 나타났다. 신설터널과 상대적으로 인접한 기존터널(A)의 경우 신설터널이 직하부($0.75D_1$)에 위치했을 시 가장 안정적으로 나타났으며 신설터널과 상대적으로 먼 기존터널(B)의 경우 신설터널과 거리와 간격이 멀어질수록 수렴하는 양상을 보이며 영향을 거의 주지 않는 것으로 나타났다.
2. 필라의 안정성은 신설터널이 필라의 중심과 인접하고 지반손실률이 클수록 안정성이 취약한 것으로 나타났다. 필라 중심과의 거리가 8 m 이상부터는 모든 조건에서 필라의 안정성이 확보되나, 필라의 중심($0D_1$)에서 7 m 이하인 경우는 지반손실률이 1.0% 이상일 때 기준 안전율 1.5를 만족하지 못하여 안정성이 결여되므로 지반손실률에 유의하여 시공해야 할 것으로 판단된다.
3. 신설터널과 인접한 기존터널(A) 직하부($0.75D_1$)에 신설터널이 위치했을 때 보다 인버트 끝 하부($0.37D_1$, $1.13D_1$)와 측하부($0D_1$, $1.5D_1$)에 위치하였을 경우 최대변위의 증가로 인하여 각변위가 크게 발생하는 경향을 보였다. 따라서 기존터널에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 신설터널의 굴착에 따른 변위관리에 주의를 기울여야 한다. 또한 신설터널과 인접한 기존터널(A)의 경우 5 m와 6 m에서 지반손실률에 따라 각변위 양상이 일정하지 않는 것으로 나타났다. 신설터널의 위치가 기존터널 직하부($0.75D_1$)에 위치하고 이격거리가 작

을 경우 각변위는 지반손실률의 변화에 주의해야 할 것으로 판단된다.

4. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 보다 최대변위, 각변위는 증가하며 강도/응력비는 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 최대변위는 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 시 평균 1.41배 증가하였으며 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우 평균 1.20배 증가하였다. 각변위는 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 평균 1.53배 증가하였으며 1.0%에서 1.5%로 증가할 시 평균 1.32배 증가하였다. 강도/응력비의 경우 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 때 평균 1.30배 감소하였으며 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우 평균 1.17배 감소하였다. 따라서 시공 시 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 기존터널과 필라의 안정성에 주의를 기울여야 한다.
5. 시공 시 유용하게 사용할 수 있는 각 지반손실률마다 기존 병렬터널의 안정성을 확보할 수 있는 신설터널의 위치를 도출하였다. 지반손실률이 0.5%일 경우 7 m, 지반손실률이 1.0%일 시 8 m, 지반손실률이 1.5%일 경우 9 m 부터 신설터널의 거리와 간격에 관계없이 모든 조건에서 안정적인 것으로 판단된다.
6. 본 연구에서 수행한 해석 결과를 바탕으로 신설터널의 굴착으로 인한 기존 병렬터널의 안정성을 검토한 결과, 각 기존터널에서의 안정성이 모두 취약하며 강도/응력비가 가장 취약한 신설터널의 위치가 필라의 중심($0D_1$)에서 거리가 5 m이고 지반손실률이 1.5%일 경우 가장 안정성이 취약한 것으로 나타났다. 또한 신설터널과 인접한 터널(A)의 경우 신설터널이 인버트 끝 하부($0.37D_1$, $1.13D_1$)와 측하부($0D_1$, $1.5D_1$)에 위치하였을 때, 직하부($0.75D_1$)에 위치했을 시 보다 안정성이 취약한 것으로 나타났다. 따라서 시공 시 지반손실률에 유의하여 기존터널 직하부($0.75D_1$)에 신설터널을 시공하는 것이 기존터널과 필라의 안정성을 확보하기에 가장 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2C2003636).

저자 기여도

윤지석은 데이터 해석, 데이터 분석, 원고작성을 하였고, 김한열은 데이터 수집을 하였고, 남경민은 데이터 해석을 하였고, 정예림과 조재은은 데이터 분석 및 원고 검토를 하였고, 유한규는 연구개념 및 설계를 하였다.

References

1. Bjerrum, L. (1963), "Allowable settlement of structures", Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, Vol. 2, pp. 135-137.

2. Byun, Y.S., Kim, H.G., Lee, S.S., Chun, B.S. (2010), "A study on pillar behavior of twin parallel tunnels by numerical approach", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 11, No. 8, pp. 49-55.
3. Cheng, C.Y., Dasari, G.R., Chow, Y.K., Leung, C.F. (2007), "Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, No. 4, pp. 450-466.
4. Hoek, E., Brown, E.T. (1980), *Underground Excavation in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 202-203.
5. Kim, H.E., Kim, J.J., Lee, J.K., Yoo, H.K. (2017), "Stability analysis of an existing tunnel due to the excavation of a divergence tunnel emerging from double-deck tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 5, pp. 779-797.
6. Kim, P.G., Kim, J.W. (2013), "Scale model studies for stability estimation of twin tunnels with small clearance", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 23, No. 2, pp. 130-140.
7. Kim, S.J., Kim, M.S., Kim, J.C., Yoo, Y.I., Oh, J.B., Oh, S.J. (2006), "Tunnel safety diagnosis in near-excavation by in-depth inspection of tunnel", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 16, No. 4, pp. 347-356.
8. Kim, Y.J., Im, C.G., Kang, S.G., Lee, Y.J. (2014), "A study on surface settlement characteristics according to the cohesive soil depth through laboratory model tests", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 6, pp. 507-520.
9. Li, X.G., Yuan, D.J. (2012), "Response of a double-decked metro tunnel to shield driving of twin closely under-crossing tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 28, pp. 18-30.
10. Matsuda, T., Terada, K., Igarashi, M., Miura, K. (1998), "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground", *Tunnels and Metropolises*, Vol. 16, No. 2, pp. 1193-1198.
11. Na, Y.S., Kim, Y.H., Lee, K.I., Kim, Y.S., Kim, B.J. (2020), "Effect of widening excavation in divergence section of a double-deck tunnel on its stability", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 22, No. 4, pp. 435-450.
12. Nam, K.M., Choi, M.K., Kim, J.J., Jafri, T.H., Yoo, H.K. (2017), "Stability analysis of an existing utility tunnel due to the excavation of a divergence tunnel emerging from double-deck tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 2, pp. 231-248.
13. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft grouting", *Proceedings of the 7th ICSMFE*, Mexico, State-of-the-art Report, pp. 225-290.
14. Xue, F., Zhang, M. (2020), "Stability of the excavation face on a shield tunnel crossing beneath an existing tunnel", *Geotechnical Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 96-102.
15. Yoo, C.S., Song, A.R. (2006), "Effects of tunnel construction on an existing tunnel lining", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 8, No. 4, pp. 307-324.
16. Yoo, K.H., Kim, J.G. (2011), "Evaluation of the influence of pillar width on the stability of a twin tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 2, pp. 115-131.