

# 복층터널의 분기터널 굴착에 따른 기존터널의 안정성 분석

김한얼<sup>1</sup> · 김정주<sup>2</sup> · 이재국<sup>3</sup> · 유한규<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 석·박사통합과정

<sup>2</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사후연구원

<sup>3</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

<sup>4</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

## Stability analysis of an existing tunnel due to the excavation of a divergence tunnel emerging from double-deck tunnel

Han-eol Kim<sup>1</sup> · Jung-Joo Kim<sup>2</sup> · Jae-Kook Lee<sup>3</sup> · Han-Kyu Yoo<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Member, Post Doctor, Department of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>3</sup>Member, Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>4</sup>Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hanyang University

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

### Abstract

Recently, underground road construction is attracting attention because the ground transportation facilities in the urban area have reached the saturation level and traffic volume has increased and the air pollution has risen. Construction of underground roads is not only reduce trafficjam in downtown but also design the city eco-friendly, so existing roads as well as new roads go underground. It is essential to construct divergence tunnels that serve as IC (interchange) and JC (Junction) when constructing underpasses. Therefore, the analysis of the effect of the existing tunnel by the divergence tunnel should be considered. In this study, numerical analysis is performed to analyze the effect of existing tunnel on the excavation of the divergence tunnel. The divergence tunnels were set in 5 cases at 45° intervals in the clockwise direction starting from the lower part of the existing tunnel. In each case, numerical analyses were carried out by using the DCM (Displacement Controlled Model) for applying the volume loss of 0.5%, 1.0% and 1.5%. As a result, when the volume loss increased, the effect on displacement, fracture range, and effect on stability increased as well. In addition, it was confirmed that the divergence tunnel located directly underneath is the weakest for the stability, and the case where the divergence tunnel is located diagonally rather than the vertical and horizontal direction is found to be vulnerable to displacement and lining destruction.

**Keywords:** Divergence tunnel, Volume loss, Displacement, Tunnel lining, Stability analysis

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
19(5)779-797(2017)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.5.779>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 11, 2017

Revised September 5, 2017

Accepted September 12, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

최근 도심지의 지상교통시설이 포화수준에 이르렀을 뿐만 아니라 증가하는 교통량으로 인한 교통난과 미세먼지 등의 대기환경 오염의 심화로 인하여 지하도로건설이 각광을 받고 있다. 지하도로건설은 도심지 교통난 해소와 더불어 친환경적인 도시설계가 가능하기 때문에 신설도로 뿐만 아니라 기존도로 역시 지하화 되어 가는 추세이다. 지하도로건설시 IC(분기점)와 JC(나들목) 역할을 수행하는 분기터널의 건설은 필수적이라 할 수 있다. 따라서 분기터널에 의한 기존터널의 영향분석은 필수적으로 고려해야한다. 본 연구에서는 분기터널 굴착 시 기존터널에 미치는 영향을 수치해석을 통해 분석하였다. 분기터널을 기존터널의 직하부를 기점으로 하여 시계방향으로 45°간격으로 총 5가지의 경우를 설정하였으며, 각각의 경우에서 변위조절방법(Displacement Controlled Model)을 이용하여 지반손실률을 0.5%, 1.0% 그리고 1.5%을 적용하여 수치해석을 실시하였다. 그 결과, 지반손실률이 증가할수록 변위와 파괴범위, 그리고 안정성에 미치는 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 직하부에 위치한 분기터널이 가장 안정성에 취약한 것으로 확인 되었으며, 분기터널의 위치가 연직, 수평방향에 있을 경우보다 대각선방향에 위치할 경우가 변형과 라이닝 파괴 측면에서 불안정한 것으로 나타났다.

**주요어:** 분기터널, 지반손실률, 변위, 터널라이닝, 안정성 평가

## 1. 서 론

최근 도심지에서 지상에 건설 가능한 교통시설이 포화수준에 이르렀을 뿐만 아니라 증가하는 교통난과 배기가스에 의한 미세먼지의 심화 등으로 인하여 지하도로건설이 각광을 받고 있다. 부산시에서는 해운대에서 김해 신공항까지 도심지를 통과하는 지하고속도로로 계획하고 있다. 서울시에서는 서울의 명소 중 하나로 손에 꼽히는 광화문 광장의 주변 도로의 지하화를 검토 중에 있으며, 서부간선도로 중 영등포구 양평동~금천구 독산동 구간(10.33 km)의 지하화가 진행 되고 있고 동부간선도로 중 월계~대치IC 구간(20.8 km)의 지하화가 계획되어 있다. 지하도로건설은 도심지 교통난 해소는 물론이고 지상에서 친환경적인 도시설계가 가능하기 때문에 신설도로 뿐만 아니라 기존도로 역시 지하화 되어 가는 추세이다. 이러한 도로의 지하화가 증가함에 따라 복층터널이 화두에 오르고 있다. 서울시 서초구에서는 경부고속도로의 일부구간인 양재~한남IC 구간을 복층터널구조로 지하화하는 계획을 발표하였다.

복층터널을 지하도로로서 건설하기 위해서는 기존터널에서 분리되어 지상으로 빠져나가거나 다른 터널로 합류할 수 있는 분기터널이 필수적이다. 그 이유는 분기터널이 기존의 고속도로에서 국도나 지방도로 빠져나가는 IC(나들목)와 다른 고속도로로 합류할 수 있는 JC(분기점)같은 역할을 수행하기 때문이다. 분기터널의 위치변화와 굴착에 의해 기존터널에 영향이 가해지게 되며 이로 인해 기존터널의 변형과 균열이 발생할 수 있고 심한 경우 파괴까지 이어질 수 있다. 따라서 분기터널의 위치변화와 굴착에 의해 기존터널에 미치는 영향을 분석하는 것은 복층터널 설계 시 필수적이다.

Kim et al. (2004)는 근접되어 시공되는 단선병렬터널에서의 터널간의 이격거리를 1.2D에서 0.6D로 감소시키

며 수치해석을 실시하였으며 그 결과 건설교통부 도로설계편람에서 제시한 기준인 2~3D 정도의 이격거리가 타당하다고 판단하였다. Yoo and Song (2006)은 기존터널에 근접되어 시공되는 신설터널이 기존터널 라이닝에 미치는 영향을 분석하고자 수치해석을 수행하였다. 신설터널이 기존터널의 90°방향에 위치할 경우 기존터널에 미치는 영향이 가장 작고, 라이닝의 단면력은 신설터널 시공방향  $\theta$ 에서 최대,  $\theta \pm 60^\circ$ 에서 최소로 나타난다고 분석하였다. Kim et al. (2006)은 기존터널 인근에 터널을 신설할 경우 기존터널이 신설터널 쪽에 당겨지듯 변형하고, 신설터널이 기존터널에 근접할수록 주변지반이 완만하게 되어 기존터널 라이닝에 작용하는 토압이 증가한다고 분석하였다. Kim (2011)은 도심지 근접구조물 공사에 있어서 신설터널과 기존터널의 상대적 위치에 따른 영향 연구를 실시하였다. 신설터널이 기존터널의 상부, 하부 및 측면부로 근접하는 상대적 위치에 따라 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150°, 180°의 경우에서 지반조건(풍화도, 풍화암, 연암, 경암)과 측압계수 조건( $K_0=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ ) 그리고 기존터널의 심도조건(G.L.(-) 15 m, 30 m, 45 m)달리하여 분석하였고, 그 결과 지반조건과 심도조건에 의한 영향보다 측압계수에 의한 영향이 크며 최대 축력 및 모멘트의 발생위치는 조건과 관계없이 유사한 경향이 나타난다고 분석하였다. La and Kim (2016)는 복층터널인 기존터널에서 단층터널로 분기되는 구간의 터널 거동과 분기터널 간의 이격에 따른 필라 안정성을 검토하였고, 두 터널의 거리가 0.7D 이하인 경우는 각각의 단면으로 시공하는 것 보다 모자형태의 하나의 대단면으로 시공하는 것이 안정성 측면에 있어서 유리하며, 그 이하 간격으로 기존터널과 분기터널을 각각 굴착시 일반적인 보강 이상의 추가적인 보강조치가 필요하다고 판단하였다.

본 연구와 관련된 선행 연구들을 살펴본 결과, 터널간의 이격거리에 의한 안정성 평가가 주로 이루어 졌으며, 본 연구와 유사한 Yoo and Song (2006)과 Kim (2011)은 각각 기존터널과 신설터널의 위치에 따른 안정성 평가와 지반조건, 심도조건, 측압조건에 따른 안정성 평가를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 신설터널의 지반손실에 의해 기존터널에 미치는 영향 분석에 초점을 맞추었다. 기존터널과 분기터널간의 상대적 위치에 따라 5가지의 경우로 나누고 각각의 경우마다 지반손실률을 0.5%, 1.0%, 1.5%로 적용하였다. 이를 통하여 분기터널의 지반손실률의 영향에 의해 발생한 기존터널의 변형과 지표침하양상을 분석하여 안정성 분석을 실시하였다.

## 2. 지반손실률 개념 및 기존터널의 안정성 평가기준

### 2.1 터널 굴착으로 인한 지반손실률

터널 건설 시 지반을 굴착함에 따라 지반손실(lost ground)이 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 지반손실은 지표와 지중의 침하를 유발하게 되며 이는 인접구조물과 지중구조물의 영향을 주게 되며 구조물의 손상까지 이어질 수 있다(Fig. 1). 따라서 도심지 내에서의 터널 설계 시 지반손실은 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나이다.

터널 굴착에 의해 발생하는 지반침하의 형태는 Peck (1969)이 수많은 현장계측 자료를 분석하여 제안하였다. 이후 다양한 연구들(Attewell, 1974; Glossop and Farmer, 1979; O'Reilly and New, 1982)을 통하여 정립되었다. 이 중 Peck이 제안한 Gaussian 곡선이 가장 많이 사용되고 있다. Peck은 식 (1)에서 보이는 것처럼 지반침하곡선

을 최대침하량( $S_{max}$ )과 변곡점( $i$ )의 함수로 제안하였다. 변곡점  $i$ 의 위치는 최대침하량의 61%의 침하량이 발생하는 지점으로 정의하였다. 변곡점을 기준으로 침하곡선이 위로 볼록한 형태와 아래로 볼록한 형태로 나누어지며 이는 상부 및 지중구조물에 큰 영향을 미치게 된다.

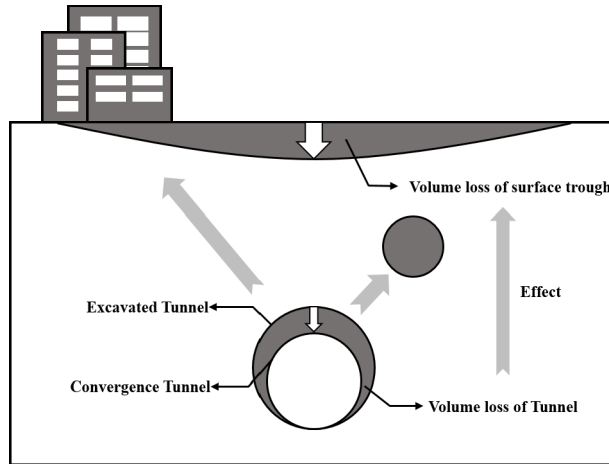


Fig. 1. Concept of volume loss (Nam et al., 2017)

식 (1)을 적분함으로써 침하곡선의 단위 길이당 부피를 구할 수 있으며(Kim et al., 2014), 식 (3)과 같이 굴착부피에 대한 침하곡선의 부피비로 지반손실률(Volume Loss, %)을 나타낼 수 있다. 이론적으로 지표침하 곡선으로부터 얻어진 지반손실량과 터널의 지반손실량은 같기 때문에 지반손실률을 표현하는 데에 있어서 침하곡선으로부터 얻어진 지반손실량 대신 터널의 지반손실량을 이용할 수 있다. 하지만 지반의 종류에 따라 터널의 지반손실에 대한 영향이 터널주변에서 지표면으로 전달되는 과정에서 지반이 팽창 또는 수축하여 값이 달라질 수 있다(식 (3)과 Fig. 1). 본 연구에서는 분기터널에서 발생하는 지반손실( $V_t$ )을 변수로 하여 기존터널에 미치는 영향을 분석하였다.

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

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

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

$S_v$ : 침하량,  $S_{max}$ : 터널중심에서의 최대 침하량,  $x$ : 터널중심으로부터의 수평거리,  $i$ : 변곡점,  $V_s$ : 침하곡선의 부피,  $V_L$ : 지반손실률(%),  $V_t$ : 터널의 지반손실량

## 2.2 기존터널의 변형에 대한 안정성 평가 기준

기존터널의 인근에서 새로운 터널이 건설될 경우 신설터널의 굴착과 이에 따른 지반변화로 인해 기존터널의 변형을 유발하며 안정성에도 큰 영향을 미치게 된다. 여러 선행연구들(Shirlaw et al., 2000; Doran et al., 2000; Li, 2010)은 기존터널의 변형을 통해 안정성을 평가할 수 있는 기준들을 제시해 왔다. Li and Yuan (2012)은 침하량뿐만 아니라 최대변위를 이용하여 복층터널에서의 안정성평가를 위한 변형기준을 제시하였다(Table 1).

Table 1. deformation Criteria of existing tunnel (Li and Yuan, 2012)

Case	Limit
The maximum settlement and horizontal displacement	$\leq 20$ mm
The radius of deformation curve along the longitudinal direction of the existing tunnel	$\geq 15,000$ m
The slope of deformation curve along the longitudinal direction of the existing tunnel	$\leq 1/2500$

## 3. 지반손실률을 적용한 수치해석

### 3.1 수치해석 모델링 및 DCM 방법 적용

본 연구에서는 수치해석을 수행하기 위해 FEM 프로그램인 MIDAS GTS-NX를 사용 하였다. 지반은 Mohr-Coulomb 탄·소성 모델을 적용하였고 풍화암으로 된 단일 지층조건으로 구성하였으며, 지반의 물리적 물성값은 Table 2의 값을 적용하였다.

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

Material	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Angle of friction (Deg.)	Modulus of elasticity (kPa)	Poisson's ratio	Model type
Weathered Rock	21.0	35.0	32.0	200,000	0.3	Mohr-coulmb
Concrete	25.0	-	-	27,000,000	0.18	Elastic

기존터널의 콘크리트 라이닝은 단위중량 25 kN/m<sup>3</sup>의 무근콘크리트를 사용하였고 일축압축강도와 인장강도는 각각 40 MPa과 4 MPa이며, 라이닝의 두께는 0.4 m로 설정하였다. 단위중량과 일축압축강도를 이용하여 콘크리트의 탄성계수를 구하였다(Neville, 1996).

Cheng et al. (2007)은 터널굴착에 의해 발생하는 지반손실을 적용하기 위해 하중제어법(Force Controlled Model, FCM)이 아닌 변위제어법(Displacement Controlled Model, DCM)을 사용하였다. DCM 방법은 굴착면에 직접 강제변위를 적용하여 터널의 지반손실을 모사하는 방법으로 기존 FCM 방법에서 발생하는 문제점들을 보완하고 제안되었다. DCM 방법은 최근 다양한 연구(Lee, 2008; Son and Yun, 2009; Son and Yun, 2010; Y. Hong et al., 2015; Zhang and Huang, 2016)에 사용되었으며 본 연구에서는 DCM 방법을 이용하여 3가지의 지반손실률(0.5%, 1.0%, 1.5%)을 해석에 적용하였다.

분기터널을 등간격으로 40등분하여 각 절점에 지반손실률 0.5%, 1.0%, 1.5%에 해당하는 증감좌표를 강제변위로 적용함으로써 터널의 지반손실량을 모사하였으며, 이를 수치해석에 주요 변수로 설정하였다. 이를 이용하여 Fig. 2와 같이 직경 8 m의 분기터널에 지반손실률을 수치해석상에 표현하였다.

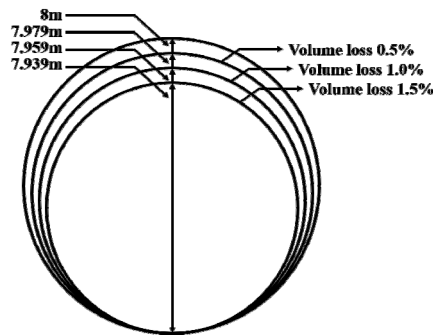


Fig. 2. Periphery of the divergence tunnel at varying volume loss

분기터널이 기존터널에서 분리되어 지상으로 분기되는 선형은 매우 복잡하기 때문에 3차원 해석조건보다 2차원 평면변형률 조건에서 수치해석을 수행하였다.

$$E_c = 0.07m_c^{1.5} \times \sqrt[3]{f_{cu}} \text{ (MPa)} \tag{4}$$

where,  $f_{cu} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$

### 3.2 해석 케이스

기존터널의 천단부에서 지표면까지의 토피고를 28 m로 설정하였고, 기존터널의 단면은 직경 10 m, 분기터널의 직경은 8 m로 적용하였다. 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 좌우측과 하단부의 지반경계를 직경의 5배 이상으로 하였으며, 기존터널에서 분리되는 각도를 기존터널 하단부인 0°에서 상단부인 180°까지 설정하여 분기터널이 지상으로 분기되면서 변화하는 터널간의 위치를 나타낼 수 있도록 하였다. 기존터널은 등간격으로 36등

분하여 10°마다 분기터널에 의해 발생하는 변위와 단면력을 관찰할 수 있도록 하였다.

기존터널과 분기터널의 이격거리는 5 m로 설정하였으며, 분기터널의 위치는 기존터널의 하단부를 0°로 하여 시계방향으로 45°간격으로 0°, 45°, 90°, 135°, 그리고 180°로 총 5가지의 경우를 선정하였다. 지반손실률은 0.5%, 1.0%, 1.5%로 총 3가지로 각각의 5가지 경우에서 적용하여 총 15개의 해석을 수행하였다(Fig. 3).

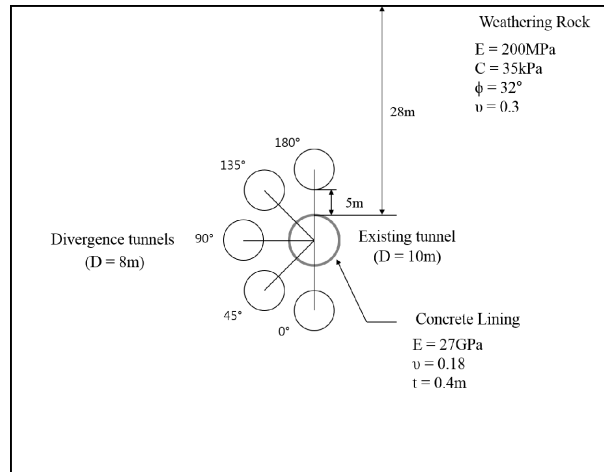


Fig. 3. Variation of the angle between the existing tunnel and the horizontal line of the divergence tunnel

## 4. 해석결과 및 분석

### 4.1 분기터널의 위치와 지반손실률에 따른 기존터널의 변형 분석

기존터널과 분기터널의 상대적 위치에 따라 직하부를 0°로 하고 직상부를 180°로 하여 45°간격으로 변화하여 수치해석을 진행하였다. 총 5가지의 상대적 위치에서 3가지의 지반손실률(0.5%, 1.0%, 1.5%)을 각각 적용하여 분기터널의 지반손실에 의해 미치는 기존터널의 변형을 분석하였다.

분기터널의 위치가 기존터널의 직하부(0°)에 위치할 경우에 지반손실률을 0.5%, 1.0%, 1.5%로 각각 적용하여 분석을 실시하였다. 지반손실률의 크기와 상관없이 기존터널은 분기터널 쪽으로 끌어당겨진 형태로 변형되었으며 최대변위는 분기터널 방향에서 발생하였다(Fig. 4). 기존터널의 천단변위는 지반손실률이 0.5%에서 1.5%로 증가하면서 5.132 mm에서 11.696 mm로 증가하였고 최대변위는 11.781 mm에서 25.592 mm로 증가하였다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 때 변위증가량이 1.0%에서 1.5%로 증가할 때보다 1.63배 정도 크게 나타났다. 또한 지반 손실률이 증가함에 따라 천단변위가 6.564 mm가 증가하면서 최대변위는 약 2.10배인 13.811 mm가 증가하였다. 이를 통해 분기터널이 기존터널의 직하부에 위치해 있을 경우 최대변위가 발생하는 기존터널의 바닥부가 천단부에 비해 비교적 취약하다고 판단할 수 있다.

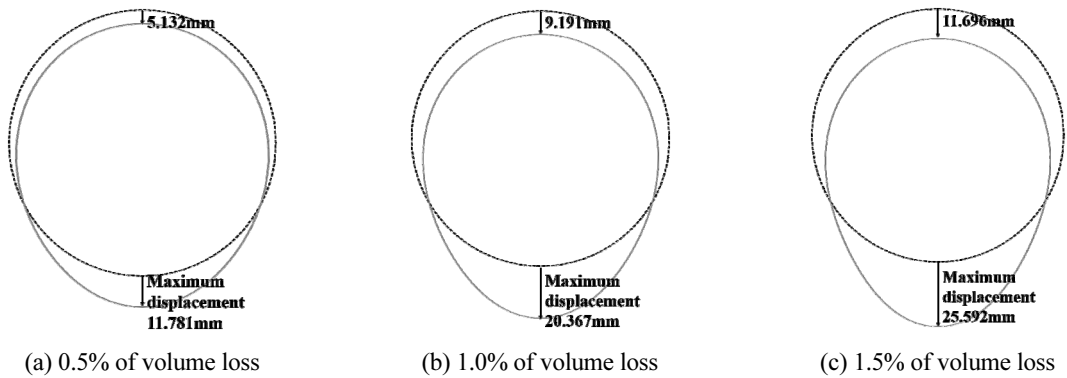


Fig. 4. Deformation of the existing tunnel when the divergence tunnel is located at 0°

분기터널이 기존터널의 측하부(45°)에 위치해 있을 경우는 직하부(0°)에 위치해 있을 경우와 마찬가지로 기존터널이 분기터널 쪽으로 당겨진 형상으로 변형되었다. 최대변위 역시 분기터널 방향에서 발생하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5). 지반손실률이 0.5%에서 1.5%로 증가함에 따라 천단변위는 6.314 mm에서 15.115 mm로 약 2.39배 증가하였다. 또한 최대변위는 8.719 mm에서 19.953 mm로 약 2.29배 증가하였으며 앞의 0°의 경우와 마찬가지로 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가하면서 발생한 변위증가량이 1.0%에서 1.5%로 증가할 때 발생하는 양보다 크게 나타났다. 0°의 경우는 평균적으로 천단변위가 최대변위의 0.45배가 발생하였으나 45°의 경우에는 0.74배 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 45°의 경우가 0°의 경우보다 비교적 천단침하에 취약할 것으로 예상된다.

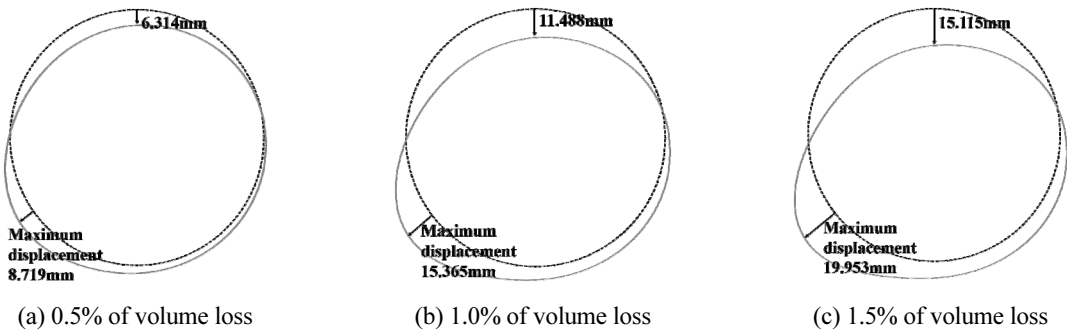


Fig. 5. Deformation of the existing tunnel when the divergence tunnel is located at 45°

분기터널과 기존터널이 동일 선상에 위치하게 되는 90°의 경우는 앞서 살펴본 0°와 45°의 경우와 같이 기존터널이 분기터널 쪽으로 당겨진 형태로 변형되었으나 전체적으로 아래쪽으로 침하된 양상을 보였다(Fig. 6). 또한 지반손실률이 0.5%에서 1.5%로 증가하면서 천단변위는 4.100 mm에서 약 1.80배 증가한 7.378 mm가 발생하였고 최대변위는 4.513 mm에서 8.407 mm로 약 1.86배 증가하였다. 90°의 경우 역시 지반손실률이 1.0%에서



1.5%로 증가할 때보다 0.5%에서 1.0%로 증가할 때 변위가 더 많이 증가한 것을 확인하였다. 지반손실률이 증가하면서 천단변위와 최대변위는 분기터널이 기존터널보다 아래쪽에 위치한 경우( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ )보다 비교적 증가폭이 적게 나타났으며, 앞의 두 경우에서는 분기터널방향에서 최대변위가 발생한 것과 달리 천단부 인근에서 최대변위가 발생하였다. 이를 통해서 분기터널이 기존터널보다 위쪽에 위치할 경우가 아래쪽에 위치할 경우보다 기존터널에 미치는 영향이 작은 것으로 판단할 수 있다.

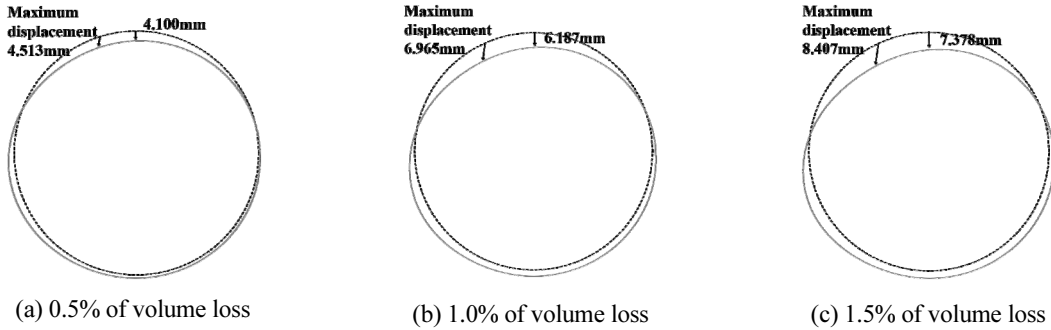


Fig. 6. Deformation of the existing tunnel when the divergence tunnel is located at  $90^\circ$

분기터널이 기존터널의 측상부( $135^\circ$ )에 위치한 경우는 앞서 살펴본 3가지 경우에서처럼 분기터널 쪽으로 당겨진 형태가 아닌 천단부가 압축된 형태로 변형되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7). 기존터널의 천단부에서 최대변위가 발생하였으며 지반손실률이 0.5%에서 1.5%로 증가하면서 3.825 mm에서 7.147 mm로 약 1.87배 증가하였다. 앞에 세 경우와 마찬가지로 변위증가량은 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우가 더 크게 나타났다.

기존터널의 직상부에 분기터널이 위치할 경우( $180^\circ$ )에는 Fig. 8에서 보이는 것처럼 분기터널의 지반손실에 의한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 발생한 변위 역시 앞서 살펴본 경우들과 비교해 보았을 때 매우 작은 값이 발생하였다. 분기터널이 기존터널의 직상부에 위치해 있을 경우 분기터널이 기존터널에 미치는 영향이 매우 작은 것으로 판단된다.

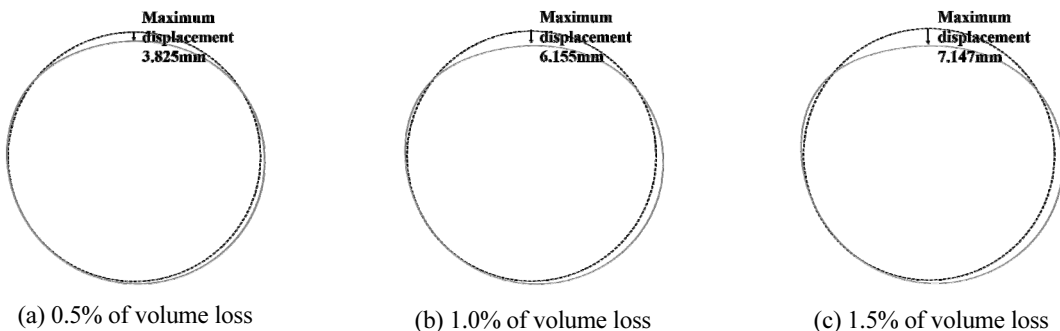


Fig. 7. Deformation of the existing tunnel when the divergence tunnel is located at  $135^\circ$

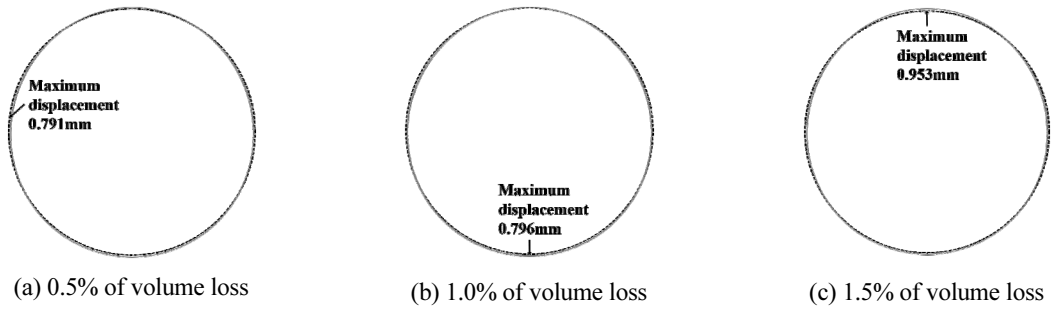
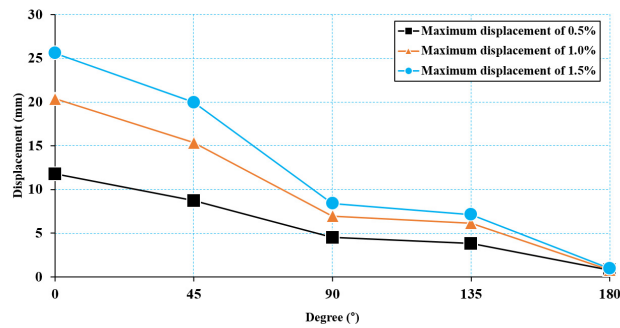
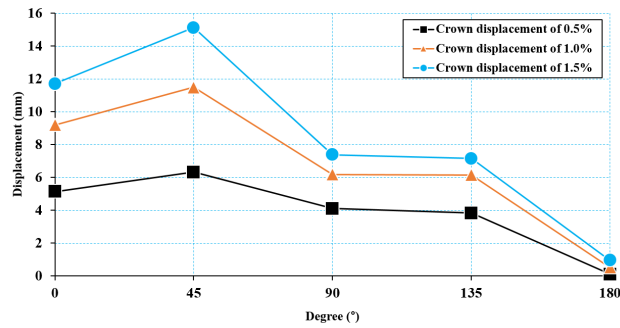


Fig. 8. Deformation of the existing tunnel when the divergence tunnel is located at 180°



(a) Maximum displacement



(b) Crown displacement

Fig. 9. Displacement depending on the location of the divergence tunnel

분기터널의 위치와 지반손실률에 따라 발생한 천단변위와 최대변위를 그래프로 도식화한 결과 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)를 살펴보면, 분기터널이 기존터널 직하부(0°)에 있을 경우에 최대변위가 가장 크게 발생했으며, 0°에서 180°로 이동하면서 최대변위는 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 또한 모든 경우에서 동일하게 지반손실률이 증가함에 따라 최대변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)에서도 마찬가지로 모든 경우에 지반손실률이 증가하면서 천단변위 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최대변위와 달리 분기터널이 기존터널 직하부(0°)에 위치할 경우 보다 측하부(45°)에 위치해 있을 경우에서 천단변위가 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 분기터널의 위치가 기존터널의 직하부( $0^\circ$ )보다 측하부( $45^\circ$ )에 있을 경우 기존터널의 천단부에 더 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

#### 4.2 분기터널의 지반손실률과 기존터널의 변형이 지표침하에 미치는 영향

분기터널의 위치와 지반손실률이 지표침하에 미치는 영향을 분석하였다. 분기터널과의 위치와 지반손실률에 따른 지표 침하곡선은 Fig. 10처럼 나타났다. 지표침하가 가장 크게 발생하는 곳은 분기터널의 중심부였으며 지

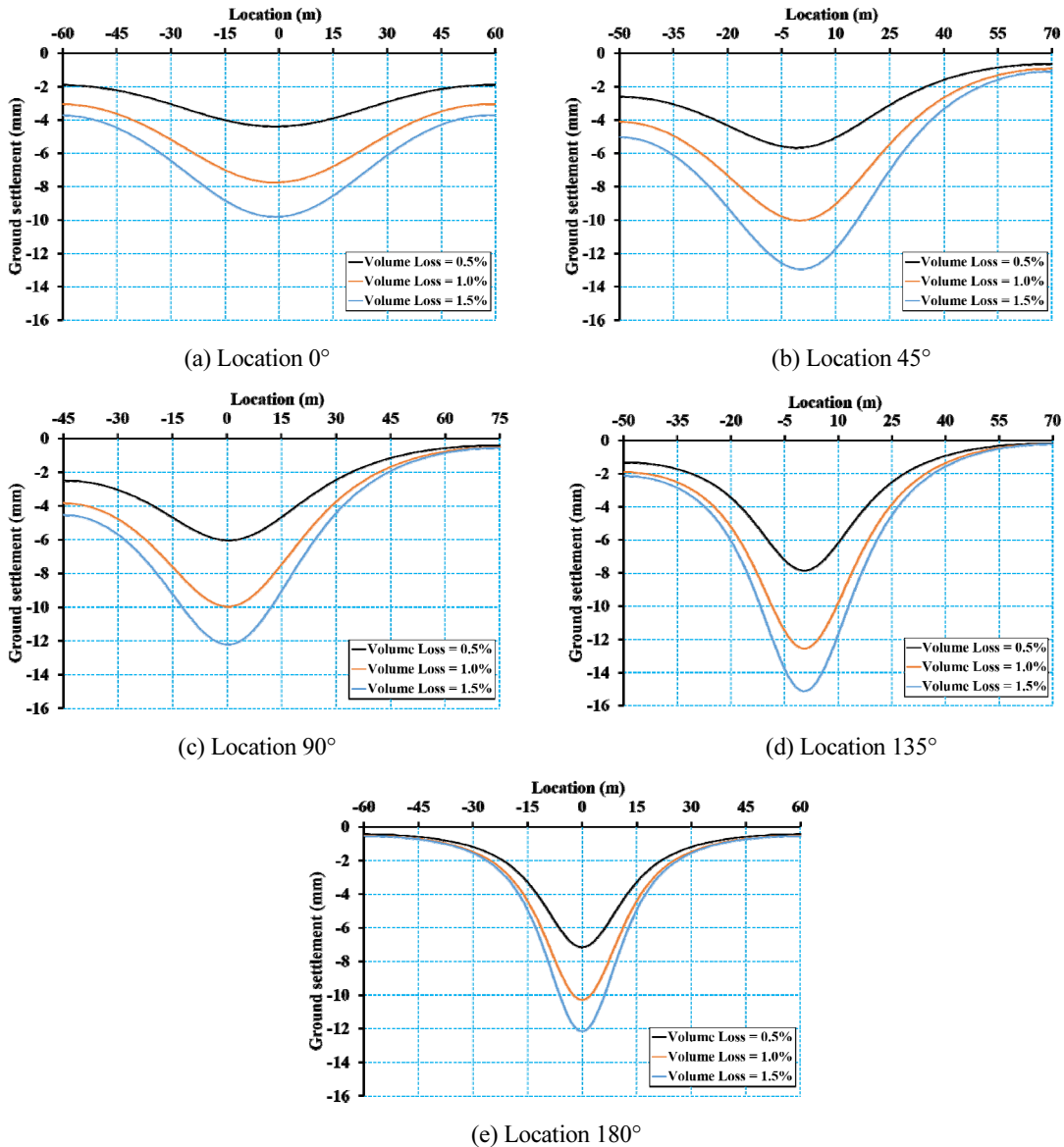


Fig. 10. Settlement trough according to location of divergence tunnel and volume loss

반손실률이 증가할수록 지표침하량 역시 증가하는 것이 확인되었다. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가 시 최대 지표침하는 평균 1.64배로 증가하였고 1.0%에서 1.5%증가 시 평균 1.23배 증가하는 것을 확인하였다. 일반적으로 토피고가 깊을수록 최대 지표 침하량은 줄어들고, 침하곡선은 보다 넓은 형태를 나타낸다. 직하부에 위치한 경우(0°)를 살펴보면, 인접 기존터널에 의해 지표침하량이 작아지고, 보다 넓은 형태의 침하곡선을 나타내게 되어 지표에서의 침하에 의한 피해는 적을 것으로 판단할 수 있다. 특히, 45°와 90°의 경우를 비교해 보면 토피고가 더 깊은 45°의 경우가 최대 지표침하량이 90°의 경우 보다 더 크게 나타났다. 이와 마찬가지로 135°와 180°의 경우를 비교하여도 135°의 경우에서 최대침하량이 180°의 경우 보다 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 분기터널의 지반손실에 의한 영향으로 발생한 기존터널의 천단침하와 관련된 것으로 판단된다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교해보면 동일한 지반손실률에서 발생한 천단침하량은 45°의 경우가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교해 본 결과 135°와 180°의 경우 역시 동일하였다. 즉, 분기터널의 지반손실을 뿐만 아니라 이로 인한 인접 기존터널의 천단변형이 지표침하 크기에 영향을 미치며, 비대칭적인 침하곡선을 야기하게 된다.

### 4.3 기존터널의 안정성 평가

#### 4.3.1 변위에 대한 안정성 평가

분기터널의 위치와 지반손실률에 의한 영향으로 기존터널에 변위가 발생하게 된다. 정도에 따라 변위로 인하여 터널의 안전에 큰 영향을 끼칠 뿐만 아니라, 과대변위로 발생한 라이닝의 균열 등으로 사용자가 심리적으로 불편을 느낄 수 있다. Li and Yuan (2012)은 중국 선전 지하철 Shekou Line이 Luobao Line의 하부를 통과하면서 발생하는 Luobao Line의 최대침하량과 수평변위에 대하여 20 mm를 기준으로 안정성 평가를 실시하였다. 본 연구에서 위 변위기준을 이용하여 안정성 분석을 실시한 결과 Fig. 9(a)와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 분기터널이 직하부(0°)에 위치할 때 1.5%의 지반손실률을 적용할 시 최대변위가 20 mm를 초과하는 것을 확인할 수 있고 분

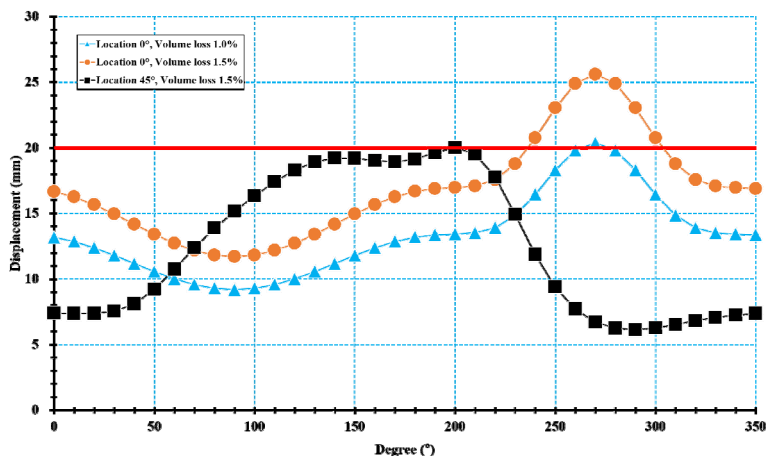


Fig. 11. Displacement at intervals of 10°

기터널의 위치가 동일하고 지반손실률을 1.0%로 적용한 경우와 분기터널이 측하부(45°)에 위치할 때 지반손실률을 1.5%로 적용한 경우는 최대변위가 20 mm에 근접한 것을 확인할 수 있다.

앞서 살펴본 3가지 경우에 대하여 각 절점에서 발생한 변위를 Fig. 11과 같은 그래프로 나타냈다. Fig. 11에서 보이는 것과 같이 분기터널의 위치가 0°이고 지반손실률이 1.5%일 경우, 기존터널의 240°-300°에서 발생한 변위가 20 mm를 초과하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 12(a)).

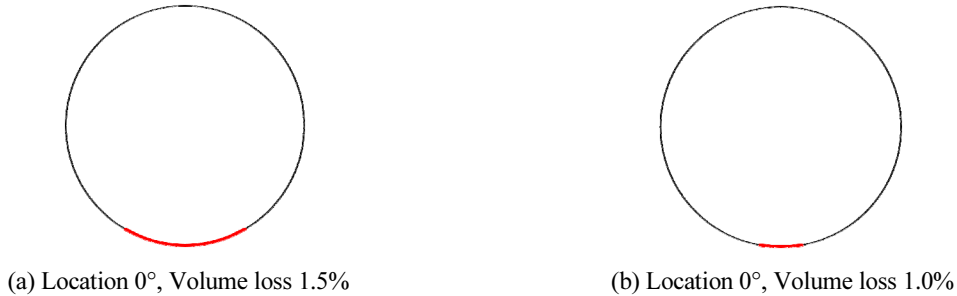


Fig. 12. Unsafe range based on displacement

분기터널의 위치가 0°, 지반손실률 1.0%의 경우는 Fig. 12에서 보이는 것과 같이 270°에서 발생한 변위만이 20 mm를 초과하였다. 따라서 기존터널의 270°에서 불안정할 것으로 판단된다(Fig. 12(b)). 260°와 280°에서 각각 19.791 mm와 19.790 mm의 변위가 발생하였으나 이는 기준치인 20 mm를 초과하지 않기 때문에 안정할 것으로 예상된다.

분기터널이 기존터널의 측하부(45°)에 위치하고 지반손실률이 1.5%인 경우는 Fig. 11에서 보이는 것과 같이 200°위치에서 19.991 mm의 변위가 발생하였지만 이는 기준치인 20 mm를 넘지 않기 때문에 안정한 것으로 판단된다.

#### 4.3.2 콘트리트 라이닝의 안정성 분석

분기터널의 위치와 지반손실률에 의한 영향으로 기존터널의 콘크리트 라이닝에는 축력과 전단력, 그리고 휨모멘트가 발생하게 된다. 이러한 단면력에 의하여 응력의 변화가 생기게 되고 이를 통해 라이닝에는 균열이 발생할 수 있게 되며 심각한 경우 파괴까지 이어질 수 있다. 이는 터널의 기능 상실은 물론이고 안정성 측면에 큰 영향을 줄 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 분기터널의 상대적 위치와 지반손실률 적용이 기존터널 라이닝의 안정성에 영향을 줄 것이라 판단하고 Carranza-Torres and Diederichs (2009)에서 사용된 축력-휨모멘트 다이어그램(Thrust-Bending moment diagram)을 사용하여 기존터널 라이닝의 안정성 분석을 실시하였다. 다이어그램에서 사용된 안전율은 AASHTO LRFD에 제시되어 있는 값을 사용하였으며, 무근콘크리트의 최대하중계수(LF) 값을 1.35로 하였고

부분저항계수(RF) 값은 0.55로 하여 안전률을 2.45로 설정하였다(FS=LF/RF).

총 5가지의 분기터널의 위치와 3가지의 지반손실률 적용에 의해 발생한 축력과 휨모멘트를 축력-휨모멘트 다이어그램으로 나타낸 결과 Fig. 13과 같이 나타났다. 본래 축력-휨모멘트 다이어그램은 압축파괴를 나타내는 상부선과 인장파괴를 나타내는 하부선으로 이루어진 마름모 형상으로 나타낸다. 하지만 본 연구의 해석사례에서는 인장에 의한 파괴만이 발생하였으므로 상부선을 제외한 Fig.13과 같은 형상으로 나타내었다. 분기터널이 기존터널의 직상부에 위치한 경우(180°)를 제외하고 전체적으로 지반손실률이 증가함에 따라 파괴범위가 확대되는 경향을 보였다.

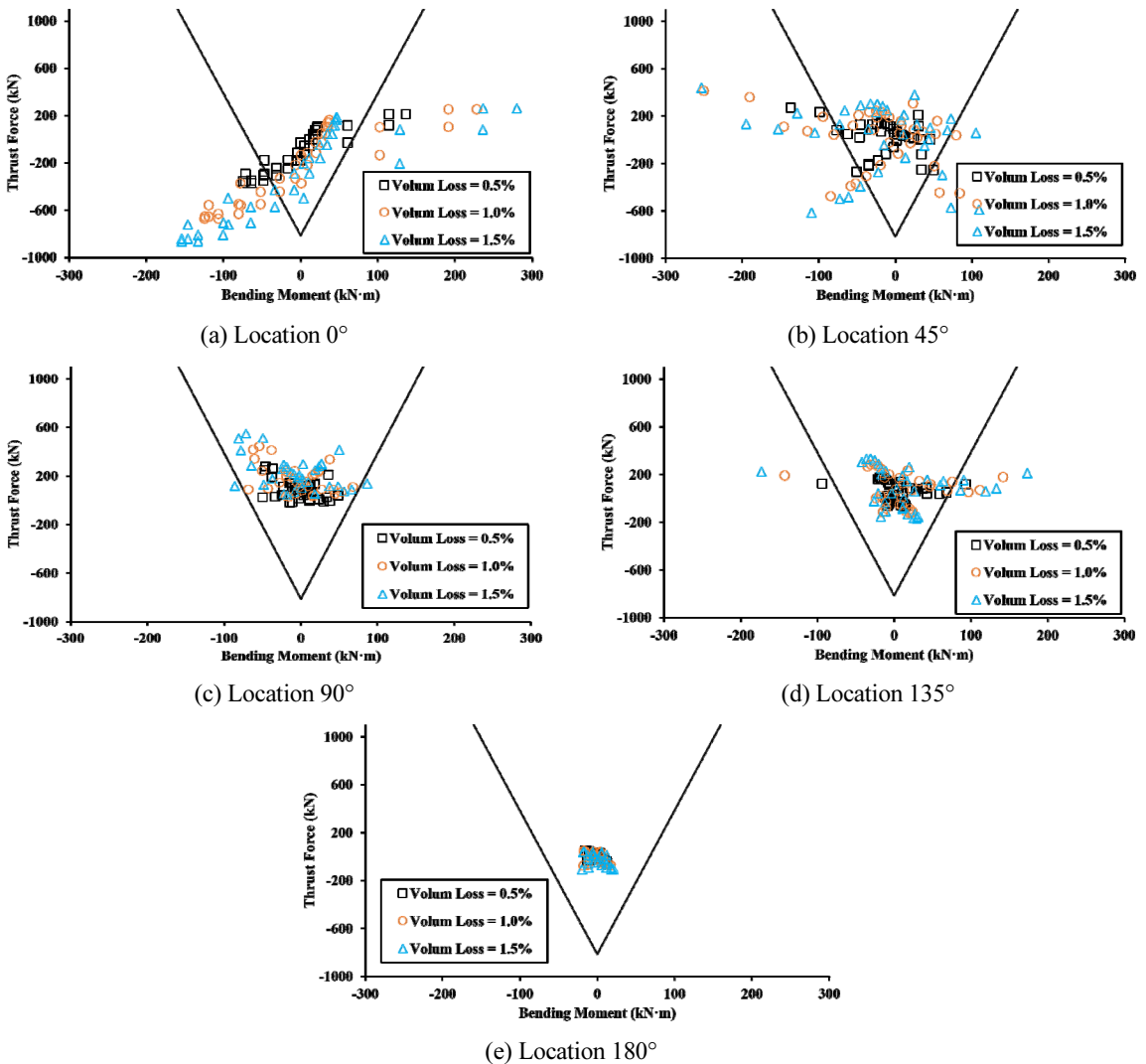


Fig. 13. Thrust force and bending moment relationship based on the location of the divergence tunnel

기존터널의 직하부에 분기터널이 위치할 경우( $0^\circ$ )에는 기존터널 라이닝은 분기터널에 가까운 위치인  $270^\circ$ 를 중심으로 하여  $220^\circ$ 와  $320^\circ$ 인근에서 대칭적인 형상으로 인장파괴가 발생하였다. 파괴범위는 점차 확대되었고 5가지 조건 중 파괴범위가 가장 넓게 발생하였으며, 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우에서의 확대된 파괴범위가 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우보다 약 2.5배 넓게 발생하는 것이 확인되었다(Fig. 14).

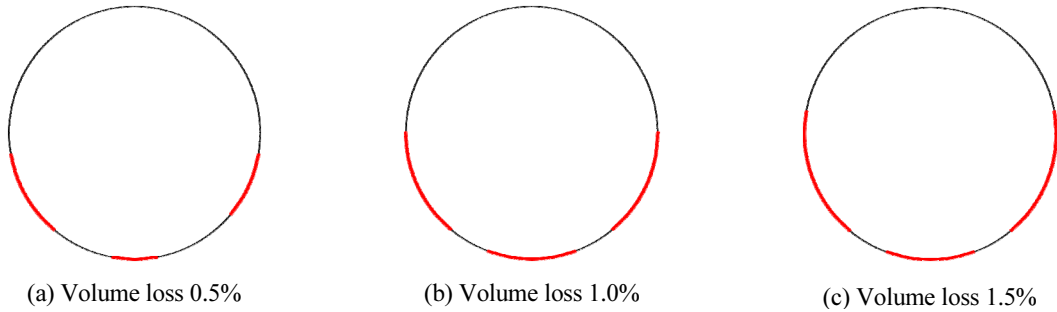


Fig. 14. Failure range of the tunnel lining when the divergence tunnel is located at  $0^\circ$

분기터널이 기존터널의 측하부( $45^\circ$ )에 위치한 경우에는 터널 라이닝의  $260^\circ$ 와  $220^\circ$ 부근에 인장파괴가 발생하였고 이를 기점으로 점차 파괴범위가 확대되었으며, 이 부근에서의 파괴범위는  $0^\circ$ 의 경우와 마찬가지로 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 때의 확대범위가 1.0%에서 1.5%로 증가할 때보다 크게 나타났다. 또한 지반손실률이 1.5%로 적용되었을 경우에 원래의 파괴범위인  $260^\circ$ 와  $220^\circ$ 의 반대방향인  $30^\circ$ - $60^\circ$ 범위에서도 인장파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 15).

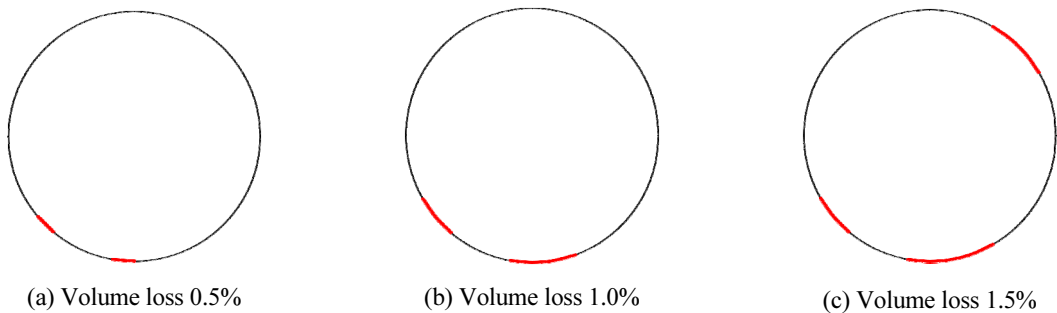


Fig. 15. Failure range of the tunnel lining when the divergence tunnel is located at  $45^\circ$

분기터널이 기존터널과 동일 심도에서 수평하게 위치한 경우( $90^\circ$ )는 앞서 살펴본 두 경우와는 다르게 0.5%와 1.0%의 지반손실률에서는 파괴가 발생하지 않았고 지반손실률이 1.5%로 증가했을 때  $130^\circ$ - $140^\circ$ 부근에서 인장파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 16).

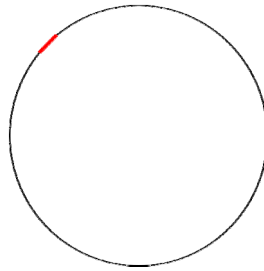


Fig. 16. Failure range of the tunnel lining when the divergence tunnel is located at 90°

기준터널의 측상부에 분기터널이 위치해 있을 경우(135°)는 150°와 110°를 기준으로 인장파괴가 발생하였으며 지반손실률이 증가함에 따라 100°에서 160°까지 파괴발생 범위가 확대되었다. 이 경우 역시 0°와 45°의 경우와 마찬가지로 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 때의 파괴확대범위가 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우보다 2배가량 큰 것을 확인할 수 있다(Fig.17).

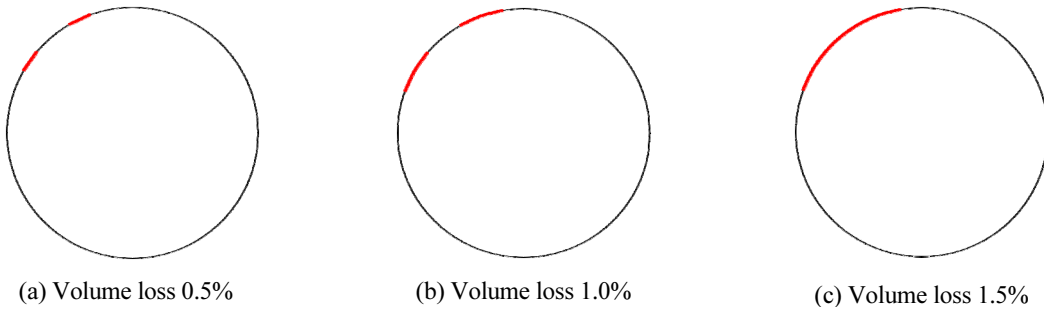


Fig. 17. Failure range of the tunnel lining when the divergence tunnel is located at 135°

분기터널이 기준터널의 직상부인 180°에 위치한 경우는 모든 지반손실률에서 안정한 것으로 나타났다. 이를 종합해보면 기준터널의 직하부에 위치한 분기터널의 영향이 가장 크게 작용하였고 대각선방향에 위치한 분기터널이 기준터널에 미치는 영향이 동일 수평선상에 위치한 분기터널의 영향보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 본선터널에서 분리된 분기터널의 변화하는 위치에 따른 기준터널에 안정성을 평가하기 위하여 기준터널과 분기터널의 각도와 지반손실률을 변수로 하여 수치해석을 수행하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 기준터널에 발생하는 최대변위, 천단변위 그리고 파괴범위는 지반손실률이 클수록 크게 나타났다. 분기터널이 기준터널의 직하부에 위치할 경우(0°) 안정성에 가장 취약한 것으로 나타났으며 직상부에 위치할 경



- 우(180°) 기존터널에 영향을 거의 주지 않는 것으로 나타났다.
2. 지반침하하는 분기터널의 중심부에서 가장 크게 나타나며 지반손실률이 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한 45°와 90°의 경우, 135°와 180°의 경우를 통해 토피고가 깊더라도 기존터널의 천단침하가 크게 발생한 경우 지반침하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 지반침하를 예방하기 위해서 분기터널의 지반손실 뿐만 아니라 기존터널의 천단침하관리도 주의를 기울여야 한다.
  3. 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가했을 경우가 1.0%에서 1.5%로 증가할 경우보다 천단변위는 평균 1.79배, 최대변위는 평균 1.78배 크게 나타났으며, 확대파괴범위 역시 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우가 더 크게 나타났다. 그러므로 분기터널의 지반손실률이 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우, 기존터널의 안정성에 주의를 기울여야 한다.
  4. 분기터널의 위치와 지반손실률에 따른 기존터널 라이닝의 예상파괴범위를 도출하였다. 터널 라이닝 파괴는 90°의 경우를 제외하고 모두 분기터널 인근에서 발생하였다. 분기터널이 기존터널의 직하부에 위치한 경우(0°)에 라이닝 파괴범위가 가장 크게 나타났으며, 최대 53%의 라이닝이 파괴되었다. 분기터널이 기존터널의 측하부에 위치한 경우(45°) 지반손실률이 1.5%로 증가함에 따라 기존 파괴범위의 반대쪽에도 파괴가 발생하였다. 이를 이용하여 기존터널 설계 시 분기터널의 위치에 따라 파괴가 예상되는 범위에 보강계획을 세울 수 있다.
  5. 본 연구에서 수행한 해석사례를 바탕으로 분기터널과 기존터널의 위치에 따른 안정성 검토를 실시한 결과, 분기터널의 위치가 기존터널의 직하부에 위치한 경우(0°)에 안정성에 가장 취약한 것으로 나타났다. 또한 분기터널이 수평, 연직방향에 위치한 경우(90°, 180°)보다 대각선방향에 위치한 경우(45°, 135°)가 지반침하, 기존터널의 변형과 라이닝의 안정성에 있어서 취약한 것으로 나타났다. 따라서 직하부와 측상하부에 분기터널이 위치할 경우 기존터널의 보강계획이 필요하며, 시공 시 기존터널의 안정성에 주의를 기울이며 진행해야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(17SCIP-B089409-04)’ 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Attewell, P.B. (1978), “Ground movements caused by tunnelling in soil” Proc. Int. Conf. on Large movements and Structures, Pentech Press, London, pp. 812-948.
2. Carranza-Torres, C., Diederichs, M. (2009), “Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets”, Tunnelling

- and Underground Space Technology, Vol. 24, No. 5, pp. 506-532.
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, pp. 450-466.
  4. Doran, S.R., Wood, T., Tham, S.K., Copsey, J.P., Shirlaw, J.N., Wen, D. (2000), "The assessment of limits for the movement of metro tunnels and trackwork due to adjacent construction. In: Zhao, J., Shirlaw, J.N., Krishnan, R. (Eds.)", *Tunnels and Underground Structures*, Balkema, Rotterdam, pp. 495-500.
  5. Glossop, N.H., Farmer, I.W. (1979), "Settlement associated with removal of compressed air pressure during tunnelling in alluvial clay", *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 67-72.
  6. Hong, Y., Soomro, M.A., Ng, C.W.W. (2015), "Settlement and load transfer mechanism of pile group due to side-by-side twin tunnelling", *Computers and Geotechnics*, Vol. 64, pp. 105-119.
  7. Kim, S.C. (2011), "Effects of construction of new tunnel adjacent to existing tunnel in a metropolitan area", Master's thesis, Korea University, Seoul, Republic of Korea.
  8. 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.
  9. Kim, Y.S., Song, J.H., Park, D.Y., Jung, D.G. (2004), "A study on behavior and characteristic of ground surface settlements of twin tunnel", *Journal of KSCE Conference*, Vol. 2004, No. 10, pp. 3583-3586.
  10. La, Y.S., Kim, B.J. (2016), "Effect of separation between main and divergent tunnels in divergence section of double-deck tunnel on the stability", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 45-54.
  11. Lee, Y.J. (2008), "A boundary line between shear strain formations associated with tunnelling adjacent to an existing piled foundation", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 10, No. 3, pp. 283-293.
  12. 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.
  13. Li, X.G. (2010), "Study on control standard of deformations of metro tunnels and track structure", *Railway Engineering* (4), pp. 84-88.
  14. 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.
  15. Neville, A.M. (1996), *Properties of Concrete*, Fourth and Final Edition Standards.
  16. O'Reilly, M.P., New, B.M. (1982), "Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction", 82 Symposium. Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 173-181.
  17. Peck, R.B. (1969), *Deep excavations and tunnelling in soft ground*. In Proc. 7th int. conf. on SMFE, pp. 225-290.
  18. Shirlaw, J.N., Tham-Lee, S.K., Wong, F.K., Ang-Wong, L.P., Chen, D.C., Osborne, N., Tan, C.G. (2000),

- “ Planning the monitoring required to confirm the movement and rotation of tunnels and trackwork duea to excavation and tunnelling. In: Zhao, J., Shirlaw, J.N., Krishnan, R. (Eds.)”, *Tunnels and Underground Structures*, Balkema, Rotterdam, pp. 489-494.
19. Son, M.R., Yun, J.C. (2009), “Numerical analysis of tunnelling-induced ground movements”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 11, No. 3, pp. 229-242.
  20. Son, M.R., Yun, J.C. (2010), “Comparison of ground movements in single ground layer and multiple ground layers due to nearby tunnel excavation”, *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 3C, pp. 167-174.
  21. 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.
  22. Zhang, Z.X., Huang, M. (2016), “Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunneling in Shanghai soft soil”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 56, pp. 121-132.