

## 터널 분기부 암반 필러의 거동 연구

### Numerical Analysis of Rock Pillar in Tunnel Diverging Area

강재기<sup>1</sup>, 이철규<sup>2</sup>, 이강일<sup>3\*</sup>

Jae-Gi Kang<sup>1</sup>, Choul-Kyu Lee<sup>2</sup>, Kang-Il Lee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Non-member, Ph.D, Deputy General Manager, Hong-ik Engineering & Consultants Co. Ltd, 15F, Anyang Construction Tower, 187 Simin-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 431-811, Republic of Korea

<sup>2</sup>Non-member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This study assessed the behavior of rock pillar in tunnel diverging area by using a three dimensional numerical analysis. Based on parameters affecting the behavior of rock pillar, this study evaluated different safety factors according to pillar width, depth and rock conditions. It turned out that as the rock pillar width increases, the change curve of safety factors in accordance with depth and rock conditions shows more of the nonlinear behavior. By the assessment of the minimum safety factor, a safety factor chart on the behavior of rock pillar in tunnel diverging area was suggested.

#### 요 지

3

가

가 가

**Keywords** : Tunnel diverging area, Rock pillar, Numerical Analysis, Safety factor chart

### 1. 서 론

서울시는 포화된 도심 도로의 교통량 감축, 인간중심의 친환경 도로망 구축, 서울전역 30분 이내 이동가능한 도로망 구축을 목표로 U-Smartway 계획을 추진하고 있다. 포화상태에 다다르고 있는 대도시의 천층 및 중층 지하공간 이외에 도심도의 지하공간을 활용함으로써 사업비의 상당부분을 차지하는 용지보상비를 최소화하겠다는 개념이다. 그러나 아직까지 국내에서 시공실적 및 설계사례의 부족

으로 체계적인 검토가 이루어지지 않은 실정이며, 터널 분기부의 역학적인 거동에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

도심지 상습 지·정체 해소를 위한 지하도로 노선 계획 시 교통량 분산을 위하여 유출(분류, diverging) 및 유입(합류, merging)부를 터널 내에 설치하여 인터체인지(IC) 역할을 담당하게 하고 있다. 해외에서는 선진국을 중심으로 대도시의 교통체증을 해소함과 동시에 지상 녹지공간을 확보하기 위해 다양한 도심지 지하도로의 건설을 활발히 진행하고 있다. 대표적인 사례로 서울 제물포터널, 미국 보스턴의 Big Dig 프로젝트, 프랑스 파리의 A86, 스페인 마드리드의 M30 등을 들 수 있다.

터널 내 분기부의 설계시 필러의 폭은 분류 및 합류되는 각도와 상관성을 가지며, 이에 따라 도로의 선형, 공사비,

Received 20 Mar. 2015, Revised 1 Jun. 2015, Accepted 3 Jun. 2015

\*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. I. Lee)

주행성, 시공성 등에 커다란 영향을 미치고 있다. 터널 내 분기부에서 분기되는 병렬 터널간 이격거리는 대부분의 경우 0.5D 이내에서 암반 필러가 형성된다. 따라서 본 연구에서는 터널 내 분기부에서 분기되는 병렬터널간의 암반 필러 이격거리 변화에 따른 필러부의 발생응력 변화경향에 대한 거동특성에 대한 연구를 수행하였다.

수치해석은 암반 필러를 활용한 근접 병렬터널을 포함한 터널 분기부 확폭터널로 하였다. 근접 병렬터널의 경우 병렬터널 분기부에서 최소 이격거리를 갖게 되고 대단면 확폭터널의 경우 터널 상부 토피고, 지반조건 등으로 인한 국부적인 응력집중 등 다양한 불안정 요소들이 상존하는 구간이다(Popit et al., 2008a, 2008b). 이러한 이유로 터널 분기부에 위치하는 대단면 확폭터널의 경우 다양한 불안정요소를 고려하여 시공방법을 계획하게 되고 별도의 지보패턴과 보강공법을 적용하기 때문에 거동 특성을 일률적으로 기준화 할 수 없다. 그러므로 터널 분기부 확폭터널은 암반 필러의 이격거리가 최대 폭을 가지는 단면으로 고정하고, 터널 분기부 확폭터널에서 발생하는 암반 필러를 대상으로 매개변수 해석을 수행하여 그에 따른 거동특성을 평가하였다.

터널의 굴착방법은 터널 분기부 근접 병렬터널의 굴진에 따른 간섭효과와 지반거동을 분석하기 위하여 시공순서에 준하여 해석단계를 터널 분기부 확폭터널 시공단계, 근접 병렬터널 지보재 설치로 구분하고 선행터널 굴착완료 후 후행터널을 굴착하는 것으로 굴착순서를 정하여 연구하였으며 수치해석에 적용한 주요 매개변수로는 암반 필러의 이격거리, 토피고, 암반조건을 적용하여 안전율 평가를 통해 거동 특성을 연구하였다.

## 2. 암반 필러의 안정성 평가 방법

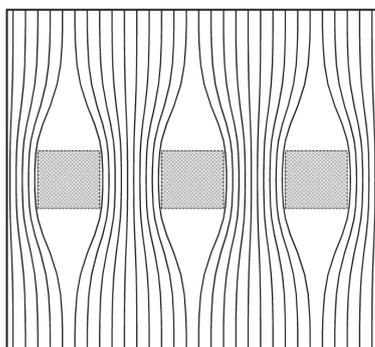
필러의 안정성을 평가하기 위한 방법으로는 Peck(1969) 방법과 경험식에 의한 개략검토인 지류론(Tributary theory)과 Matsuda et al.,(1997) 방법, Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 파괴접근도, 강도/응력비에 의한 안전율 등이 있다.

Peck(1969)은 평행하게 배치된 근접터널에 있어서 터널간격 및 크기에 따른 터널의 변형을 지침으로 제시하였다. 지류론(Tributary theory)은 Fig. 1과 같이 병렬터널 사이의 필러에서 응력전달은 교각사이의 물의 흐름과 매우 유사한 관계가 있다. 이것은 서로 인접한 공동 사이의 필러에 대한 응력선 분기 및 연직응력의 집중도 등을 취급하는 이론이다. 평균 필러응력은 각각의 필러가 지지하고 있는 암반의 중량을 각 필러의 단면적으로 나눈 값이다(Hoek and Brown, 1980). Matsuda et al.,(1997) 등은 토피고(H)가 1D 이하인 얇은 근접 터널의 경우 Fig. 2와 같이 암반 필러부의 응력상태를 일축압축강도와 필러부에 작용하는 응력의 비로 안정성을 검토할 수 있다고 하였다.

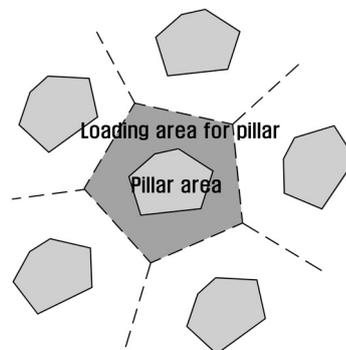
파괴 접근도는 암반의 응력원이 파괴포락선에 어느 정도 접근하였는가에 따라 파괴 및 파괴 가능성을 판단할 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 파괴접근도(R)로 표현할 수 있다.

$$R = \min\left[\frac{d_1}{D_1}, \frac{d_2}{D_2}\right] \quad (1)$$

여기서,  $D_1$ 과  $D_2$ 는 유효응력과 압축과 인장영역 파괴포락선까지의 거리를 나타내는 응력접근도이고  $d_1$ 과  $d_2$ 는 그 때 응력원에서 포락선까지의 거리를 나타내는 파괴여

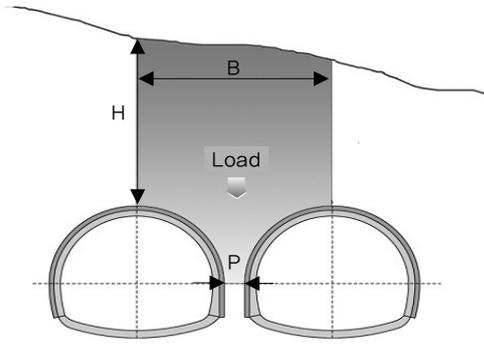


(a) Flow lines with 3 piers



(b) Average vertical stress with irregular pillar

Fig. 1. Concept of tributary theory (Hoek and Brown, 1980)

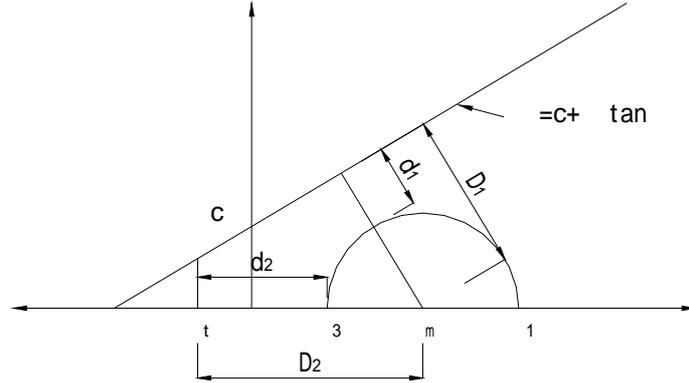


$$H > D, P_r = \gamma \times D \times \frac{B}{P}$$

$$H < D, P_r = \gamma \times H \times \frac{B}{P}$$

$D$ : Tunnel width(m),  $H$ : Overburden(m)  
 $B$ : Width of redistributed stress(m)  
 $P$ : Pillar width(m),  $P_r$ : Redistributed stress

Fig. 2. Stresses at pillar of near parallel tunnels (Matsuda et al., 1997)



$D_1$ : Stress distance to failure envelope,  $d_1$ : Failure margin

Fig. 3. Concept of failure proximity by Mohr-Coulomb failure criteria

유도이다(Fig. 3).

암반이 최고로 안정한 상태는 파괴접근도  $R$ 이 1.0으로 정수압 상태일 때이고, 파괴접근도  $R$ 이 0 이면 완전 파쇄 암을 나타낸다. 또한, 식 (2)와 같은 안전율(FS) 개념으로도 표현할 수 있으며, 안전율이 1.0 이하이면 암반이 파괴 되기 쉬운 불안정한 상태로 간주한다.

$$FS = \frac{D_1}{r} = \frac{D_1}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} = \frac{\left( \frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \sin \phi$$

$$= \frac{\left( \frac{2c}{\tan \phi} + \sigma_1 + \sigma_3 \right)}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin \phi \quad (2)$$

여기서,  $r$ 은 Mohr 응력원의 반경,  $c$ 는 암반의 점착력,  $\phi$ 는 내부마찰각이다.

강도/응력비에 의한 안전율은 구속압력( $\sigma_3$ )에 따라 소성 파괴가 시작되고, Mohr-Coulomb 파괴기준을 따른다고 가정하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

여기서,  $\sigma_1$ 은 파괴 시의 축방향 응력,  $\sigma_3$ 은 구속응력,  $\sigma_{cm}$ 은 일축압축강도,  $k$ 는 주응력선의 기울기이다.

Fig. 4는 암반 필러의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 진행성 파괴나 응력 전이과정을 고려하여 필러 중앙 단면에서의 평균 강도/응력비가 1.0 이하가 되면 필러 전체가 불안해지는 것으로 판단한다(Hoek and Brown, 1980).

### 3. 수치해석을 통한 암반 필러의 거동 평가

#### 3.1 해석방법

일반적으로 터널의 본선 구간에서 지상으로의 분기부는 바깥쪽, 안쪽, 상호의 3가지 형식으로 나타난다(Table 1). 바깥쪽 또는 안쪽으로의 분기는 비대칭 형식의 분기(편측 분기)이므로 해석 경우에 대하여 정량화하기가 쉽지 않아

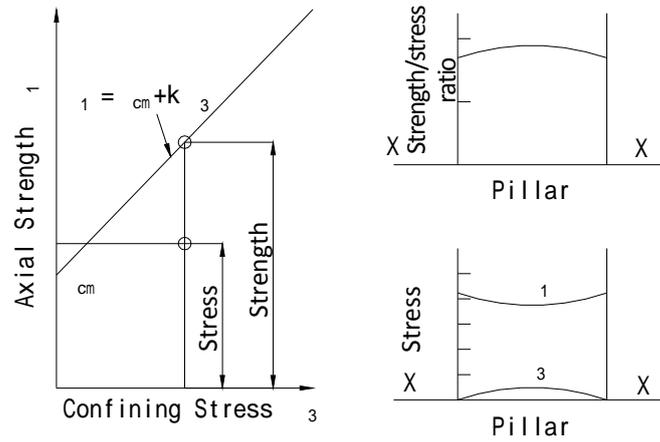


Fig. 4. Strength/stress ratio at pillar

Table 1. Combination of basic traffic lines (Major traffic line : ↑, Minor traffic line : ↗)

	Right ramp	Left ramp	Combination of connection end	
Diverging	D-1 	D-2 	D-3a 	D-3b 
Merging	M-1 	M-2 	M-3a 	M-3b 

Table 2. Input data for physical characteristics of rock mass

Input Class	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Internal friction angle(°)	Modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)	RMR
Class I	27.0	4,000	45	25,000	0.21	81 이상
Class II	26.0	2,000	42	15,000	0.22	80 ~ 61
Class III	25.0	1,000	38	7,000	0.25	60 ~ 41
Class IV	24.0	500	34	2,000	0.29	40 ~ 21
Class V	21.0	150	31	500	0.30	20 이하

본 논문에서는 대칭적인 분기 형식을 나타낼 수 있는 상호의 분기방법(양측 분기)을 이용하여 안정성을 평가하였다.

확폭터널 분기부의 근접 병렬터널은 국내·외 설계사례를 검토한 결과 대부분 10°~20° 내외이다. 또한 터널 분기부의 설계속도(40km/h, 50km/h, 60km/h)에 따른 정지시거(40m, 55m, 70m)의 영향을 고려하여 2개의 1차로 터널 분기각도를 15°로 적용하였다.

2차로 병렬터널에서 1차로와 1차로의 분기시 필러의 이격거리에 따른 영향을 보기 위해 터널간 이격거리가 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.5D 일 때에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 도심지 대심도 터널의 경우 40m 이하의 심도를 기준으로 도로선형이 계획되는 것에 착안하여 토피코가 2.0D,

3.0D, 4.0D 일 때에 대하여 해석을 수행하였다.

도로터널 분기부 암반 필러의 거동특성 평가에 있어 지반물성이 터널주변의 거동에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 본 검토에서는 합리적인 터널해석을 위해서 기존의 도로터널 20개 이상의 과업에 적용된 강도특성과 대심도 도심지 터널에 적용된 강도특성을 비교하여 수치해석의 입력자료로 적용하였다(Table 2).

### 3.2 해석조건

터널해석에서는 해석코자 하는 터널구조물을 중심으로 제한된 해석영역을 설정한다. 일반적으로 설정되는 해석

Table 3. Boundary conditions for numerical analysis

Boundary	Displacement condition		Support
sides	x direction ⇔ fixed	z direction ⇔ free	roller
bottom	x direction ⇔ free	z direction ⇔ fixed	roller
bottom corners	x direction ⇔ fixed	z direction ⇔ fixed	hinge

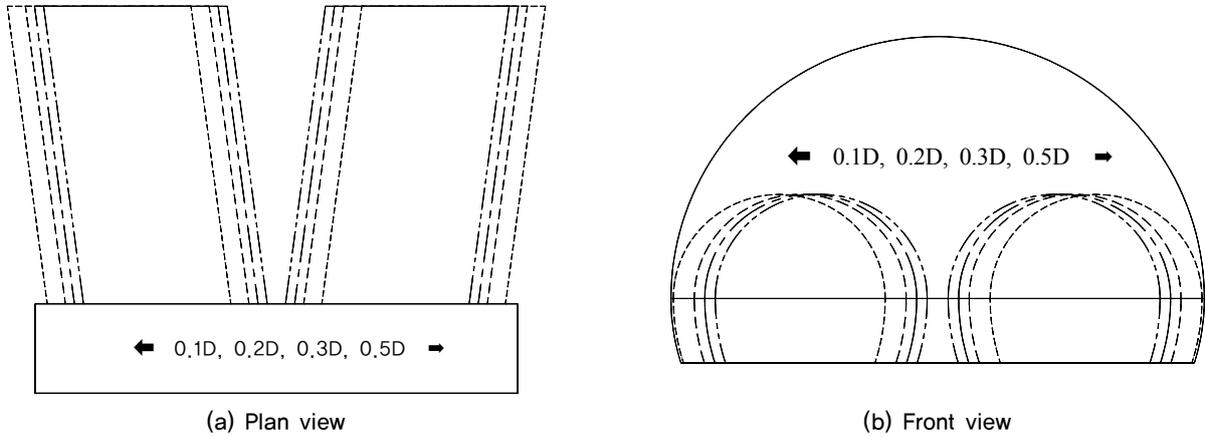


Fig. 5. Sections of tunnel branch and pillars at different distances

영역은 터널구조물 굴착에 따라 재분배 되는 응력에 영향을 미치지 않는 범위로 설정하여야 한다. 따라서 굴착코자하는 터널구조물의 폭이나 높이의 3~5배 이상의 거리까지 해석영역을 설정해 주어야 한다. 본 검토에서는 수치해석 모델 범위를 상부는 지표면(토피고 2D, 3D, 5D), 좌우 경계는 4D, 하부영역은 3D로 설정하였다. 수치해석에 적용한 경계 조건은 다음 Table 3과 같다.

기존의 연구사례를 분석한 결과 Kim et al.,(2007a)은 암반 필러의 거동이 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 지보재의 설치를 생략하였으며, Kim et al.,(2007b)은 병렬 터널 필러부의 텐션볼트 보강에 대하여 연구를 수행하였다. 초근접 터널의 포털(Portal, 병렬터널 갱구)에 대해서도 유사한 연구가 이루어진 바 있으나(Kim et al., 2012) 분기부 보다는 구조가 단순하고 따라서 변수도 적다. 본 검토에서는 터널 분기부 확폭터널에 대한 중방향 아칭효과가 분기부 근접 병렬터널의 암반 필러 거동에 잘 나타날 수 있도록 하기 위하여 지보재로 슛크리트 보강효과만을 고려하였다.

본 연구에서는 암반 필러의 3차원적 거동을 평가하기 위하여 MIDAS-GTS 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 각 Step별 세부 시공 순서는 터널 분기부 확폭 터널 시공단계 ⇒ 좌측(선행)터널 굴착단계 ⇒ 좌측(선행)터널 연성 슛크리트 타설단계 ⇒ 좌측(선행)터널 강성 슛크리트 타설단계 ⇒ 우측(후행)터널 굴착단계 ⇒ 우측(후

행)터널 연성 슛크리트 타설단계 ⇒ 우측(후행)터널 강성 슛크리트 타설 순으로 시공되도록 해석을 수행하였다.

터널내 분기부에서 본선 확폭 2차로터널에서 근접 병렬 1차로터널로 분기할 때, 암반 필러의 이격거리에 따른 터널 분기부 확폭터널 단면은 Fig. 5와 같다.

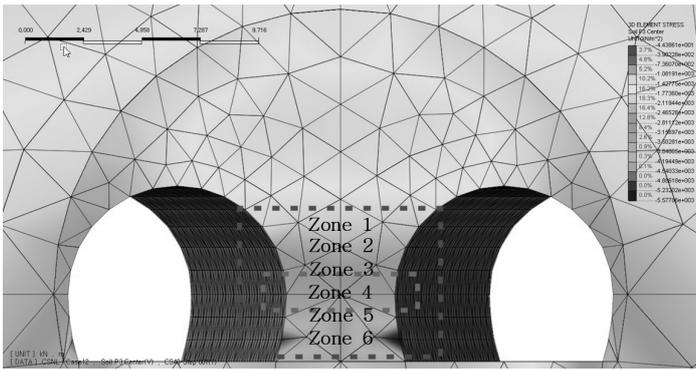
### 3.3 암반 필러의 안정성 평가

#### 3.3.1 안정성 평가 방법

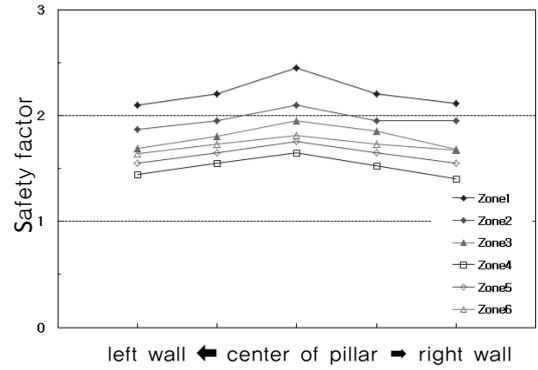
필러폭이 작은 근접 병렬터널의 경우 필러부 전체가 하나의 구조체로 거동하게 되고 곡면형태의 필러 형상으로 인해 가장 낮은 안전율 분포를 보인 최소 필러폭 구간이 불안정해지면 필러 전체가 불안정해지는 것으로 가정하였다.

본 검토에서는 필러 전체의 평균응력을 이용하여 필러의 안전율을 산정하였으며, 암반 필러의 횡단면도상의 각 측정점에서 발생하는 최대·최소 주응력을 측정 후 파괴접근도 방법으로 안전율을 검토하였다. 안전율은 최대주응력이 크게 발생하는 상대적으로 응력이 집중되는 최외곽 측정점에서 낮게 나타났으며 필러의 중심에서 측벽으로 진행할수록 낮은 경향을 보였다(Hoek and Brown, 1980).

Fig. 6에서 보는바와 같이 암반 필러 응력 검토 위치를 Zone 1~Zone 6까지 구분하여 암반 필러 응력 검토 위치별 안전율 분포를 검토하였다. Zone 1이 가장 높은 안전율 분포를 보이고 있으며 Zone 4가 가장 낮은 안전율 분포를



(a) Calculation zones



(b) Safety factor at zones

Fig. 6. Calculation zones of rock pillar of the tunnel branch and FS at the zones

보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 최소 필러폭 구간(Zone 4)에서 발생하는 주응력의 평균값을 파괴접근도 방법에 적용하여 안전율을 평가하였으며 이를 토대로 암반 필러의 거동특성을 평가하였다.

### 3.3.2 매개변수 변화에 따른 거동 특성

터널내 분기부 확폭터널 근접 병렬터널의 암반 필러 이격거리, 토피고, 암반조건이 변화하게 되면 암반 필러의 거동특성도 달라진다. 본 검토에서는 파괴접근도 방법에 의해 계산된 안전율을 분석하여 암반 필러의 거동특성을 분석하였다.

암반 필러의 이격거리 변화에 따른 종방향 및 횡방향 아칭효과를 검토하기 위해 터널내 분기부 확폭터널 굴착 후 근접 병렬터널 굴착 시점부에서부터 이격거리가 종방향으로 일정한 각도를 가지면서 점진적으로 증가하도록 해석모델을 구성하였으며 안전율 평가는 각 해석 case에서 최종 시공단계의 수렴된 최대·최소주응력을 적용하였다. 또한 굴착이 진행되는 단계에서 응력이 전이되는 동안 암반 필러에 과도한 응력이 집중되어 굴착이후에도 응력이 수렴하지 못하고 발산한다면 암반 필러가 터널을 지지하지 못하고 붕락한 결과라고 간주하였으며, 수렴된 최대·최소주응력으로 계산한 안전율 값이 최소안전율 1.0을 기준으로 1.0이하의 결과를 나타낼 경우 진행성 파괴의 위험이 높은 것으로 평가하였다.

Fig. 7은 암반등급별 필러의 이격거리와 토피고 변화에 따른 안전율 변화 곡선이다. 안전율 변화곡선은 필러의 이격거리가 증가할수록 점진적으로 수렴해가는 비선형 로그 형태의 분포 경향이 나타났다. 그리고 토피고가 증가하거

나 암반등급이 불량할수록 안전율이 작아져 동일한 안전율을 확보할 수 있는 암반 필러의 최소 이격거리는 증가하였다.

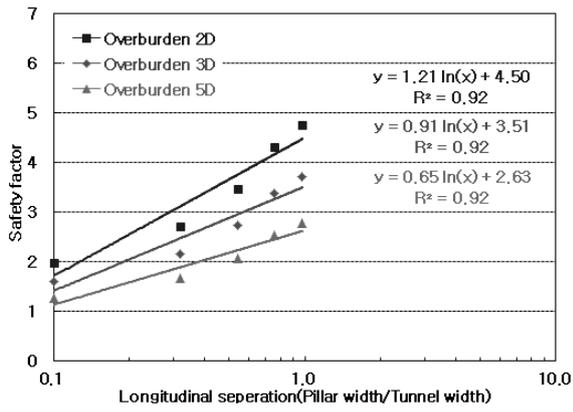
토피고 2D에서 최소 안전율 1.0 이상을 확보하기 위한 암반 필러의 최소 이격거리는 0.151D(암반등급 2), 0.186D(암반등급 3), 0.226D(암반등급 4)로 나타났다. 토피고 3D에서는 0.165D(암반등급 2), 0.216D(암반등급 3), 0.276D(암반등급 4)로 나타났으며, 토피고 5D에서는 0.198D(암반등급 2), 0.267D(암반등급 3), 0.354D(암반등급 4)로 각각 나타났다.

### 3.3.3 터널 분기부 안전율 도표

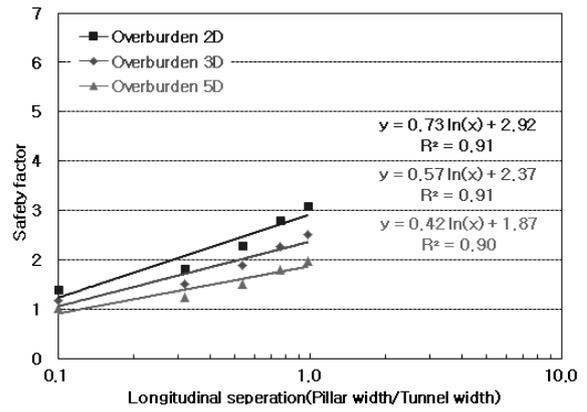
터널 분기부 근접 병렬터널 암반 필러의 지반거동을 합리적으로 예측하기 위하여 매개변수를 암반 필러 이격거리, 토피고, 암반등급으로 단순화하였으며, 터널 분기부 근접 병렬터널 암반 필러의 거동을 예측할 수 있는 암반등급별 안전율 도표를 제안하였다.

터널 분기부에서 암반 필러 이격거리, 토피고, 암반등급의 매개변수 변화에 따른 암반 필러의 안전율은 일정한 경향을 보여주었다. 안전율 도표에는 최소안전율 1.0을 기준으로 매개변수 변화에 따른 최소 이격거리를 제시하였으며, Fig. 7과 같이 수치해석을 통해 계산된 안전율을 바탕으로 비선형 회귀분석을 실시하여 최소안전율 1.0과 1.5의 안전율을 갖는 터널 분기부 암반 필러의 최소 이격거리를 산정하였다(Table 4).

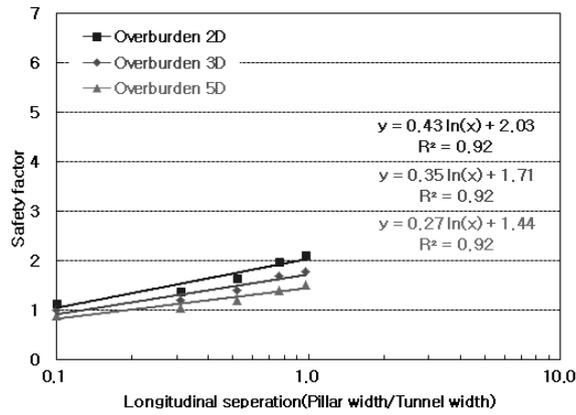
또한 매개변수 변화에 따른 터널 분기부 암반 필러의 최소 이격거리를 바탕으로 Fig. 8과 같이 하나의 안전율 도표로 정리하였다. x축은 암반등급, y축은 이격거리(필러



(a) class 2



(b) class 3



(c) class 4

Fig. 7. Trend of FS change at rock pillar of tunnel branch

Table 4. Minimum separation for rock pillar of tunnel branch

Overburden	Safety factor	Rock class		
		class 2	class 3	class 4
2D	1.0	0.151	0.186	0.226
	1.5	0.193	0.277	0.422
3D	1.0	0.165	0.216	0.276
	1.5	0.229	0.357	0.588
5D	1.0	0.198	0.267	0.354
	1.5	0.309	0.520	0.926

\* separation: pillar width (PW) / tunnel width (D), D: tunnel width (=9.0 m)

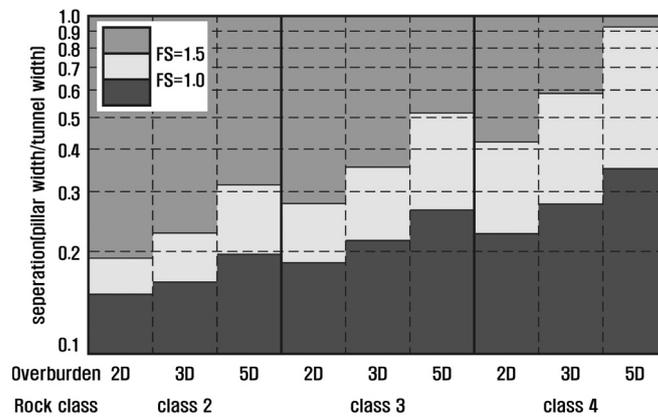


Fig. 8. Safety diagram for rock pillar at tunnel branch

폭/터널직경)이며, 토피고는 안전율 선도로 표기하였다. 제안된 터널 분기부 암반 필러의 안전율 도표는 안전율 1.0과 1.5의 범위를 기준으로 1.0 이하의 구간은 암반 필러가 불안정한 거동을 보이며 진행성 파괴의 위험이 높은 구간이며, 1.0~1.5 사이는 최소안전율 이상의 거동을 보이지만 보강이 필요한 구간이며, 1.5 이상은 영구지보로서 안정한 구간으로 판단할 수 있는 구간이다. 안전율 도표를 통해 매개변수 조건에 따른 터널 분기부 암반 필러의 안정성 확보 여부와 최소 이격거리를 확인할 수 있다.

본 검토에서 제시한 안전율 도표는 굴착방법, 터널 단면 형상 등의 요소가 고려되지 않은 제한적인 조건에서의 결과로서 역학적 특성에 따른 결과에 국한되며, 굴착 방법 등의 사항에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터널 분기부 확폭터널에서 근접 병렬터널 암반 필러에 대한 거동 특성을 분석하였다. 기존의 일반적인 포털부(Portal) 근접 병렬터널에 대한 시공 및 연구 사례에 국한된 연구 대상을 확폭터널을 가지는 터널 분기부 근접 병렬터널의 암반 필러로 대상을 확장하여 암반 필러의 거동 특성에 영향을 미치는 기하학적 역학적 변수를 선정하여 3차원 수치해석방법으로 거동특성을 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 암반등급별 필러의 이격거리와 토피고 변화에 따른 안전율 변화 곡선은 필러의 이격거리가 증가할수록 점진적으로 수렴해가는 비선형 로그 형태의 분포 경향이 나타났다. 그리고 토피고가 증가하거나 암반등급이 불량할수록 안전율이 작아져 동일한 안전율을 확보할 수 있는 암반 필러의 최소 이격거리는 증가하였다.
- (2) 터널 분기부 근접 병렬터널 암반 필러의 최소 이격거리와 안전율을 도표로서 제안하였다.

- (3) 본 연구에서 제시된 안전율 도표는 터널 분기부 확폭터널 근접 병렬터널 적용시 예비설계단계에서 암반 필러의 안정성 검토 및 보강공법의 적용여부, 근접 병렬터널간의 최소 이격거리 결정 등에 폭넓은 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 암반 필러의 형상 및 보강공법을 고려한 정량적 설계기법이 정립되지 않은 현실을 고려할 때 실무에 효과적으로 적용할 수 있는 하나의 대안으로 판단된다.

#### References

1. Do-Sik Kim and Young-Geun Kim (2007a), "A study on the stability analysis for asymmetry parallel tunnel with rock pillar", *Tunnelling Technology*, Vol.9, No.4, pp.387-401.
2. Hoek, E. I. and E. T. Brown (1980), "Underground Excavations in Rock", IMM, London.
3. Matsuda, T., E. Toyosato, M. Igarashi, Y. Nashimoto and T. Sugiyama, (1997), "A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method", *Procd. Studies on Tunnel Eng.* Vol.7.
4. Peck, R. B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", *Procd. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Mexico, State-of-the-Art Report 3, pp.225-290.
5. Popit, A. and Rant, J. (2008a), "Construction of the Sentvid tunnel, RMZ- Materials and Geoenvironment", 55.2, pp.259-276.
6. Popit, A. and Rant, J. (2008b), "Construction of the Sentvid tunnel with the caverns in Ljubljana", Slovenia, *World Tunnel Congress 2008-Underground Facilities for Better Environment and Safety-India*, pp.1401-1415.
7. Won-Beom Kim, Hyung-Sik Yang and Tae-Wook Ha (2012), "An Assessment of Rock Pillar Behavior in Very Near Parallel Tunnel", *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol.22, No.1, pp.60-68.
8. Yang-Woon Kim, Sang-Hoon Jung, Se-Gu Kang and Kyung-Chul Ahn (2007b), "A Numerical Study on the Behavior Characteristics and Reinforcement Effects of Pillar in Twin Tunnels due to Tension Bolts Installation", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, pp.2947-2950.