

## 초근접 병설터널의 암반 필라 거동 평가

김원범<sup>1)</sup>, 양형식<sup>1)\*</sup>, 하태욱<sup>2)</sup>

### An Assessment of Rock Pillar Behavior in Very Near Parallel Tunnel

Won-Beom Kim, Hyung-Sik Yang, Tae-Wook Ha

**Abstract** Focusing on the load tunnel, this study assessed the behavior of rock pillars with less than 0.5D of the minimized distance between the two horizontal tunnels by using a three dimensional numerical analysis. Based on a parameter affecting the behavior of rock pillars, this study evaluated different safety factors according to pillar width, depth and rock conditions. It turned out that as the pillar width increases, the current curve of safety factors in accordance with depth and rock conditions shows more of the nonlinear behavior. Judging from the minimum safety factor, the study suggested a design chart, working on the minimized distance between the two horizontal tunnels.

**Key words** Near parallel tunnel, Rock pillar, Design chart

**초 록** 본 연구에서는 도로터널을 대상으로 최소 이격거리가 0.5D 이하인 근접 병설터널의 암반 필라 거동을 3차원 수치해석방법으로 검토하였다. 암반 필라의 거동에 영향을 미치는 매개변수로 이격거리와 심도(토포고) 및 암반조건의 변화에 따른 안전율을 평가하였다. 이격거리가 증가할수록 토포고와 암반조건에 따른 안전율 추세곡선은 비선형 거동을 보여 주었으며, 최소 안전율을 기준으로 최소 이격거리를 산정하여 설계도표를 제시하였다.

**핵심어** 근접 병설터널, 암반 필라, 설계도표

## 1. 서 론

최근 사회간접자본시설(SOC) 확충에 있어서 민간투자사업의 활성화 등으로 인하여 터널건설이 증가하고 있다. 특히 도심지 지역에서의 터널건설이 활발해짐에 따라 보다 복잡하고 다양한 요인들이 반영된 건설계획 및 시공이 이루어지도록 요구되고 있는 실정이다.

대표적으로 기존 노선과의 선형화, 주변 구조물과의 간섭에 따른 보호 및 용지 매입의 제한 등과 같은 제한적인 요인과 터널 주변의 민원 및 자연환경 훼손의 최소화 등과 같은 환경적인 요인을 들 수 있으며, 이에 대한 해결책으로 터널과 터널사이의 이격거리가 상당히 근접된 병설터널의 설계사례가 증가하고 있다.

그러나 현재까지의 국내 연구사례들은 병설터널의 거동이나 설계 영향인자 등에 대한 평가로서 실제 시공 상황을 제한적으로 고려할 수 밖에 없는 축소 모형실험(장부식 등, 2006)이나 2차원 수치해석(임수빈 등, 1994) 또는 일부 영향인자들만 고려한 3차원 수치해석 연구(김양운 등, 2007)에 국한되어 실무에 적용가능하고 정량적인 평가가 가능한 총체적인 기초 연구는 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 이격거리가 매우 근접한 병설터널의 도로터널 본선부를 대상으로 암반 필라의 거동에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 암반 필라의 안정성 평가 이론

### 2.1 병설터널 필라부의 응력

두 개의 터널을 근접하여 굴착하면 상호간섭 효과로 인하여 필라부에 응력이 집중하게 된다. 그림 1에서는 필라 폭( $W_p$ )에 따라 필라에 작용하는 응력의 집중양상

<sup>1)</sup> 전남대학교 에너지자원공학과

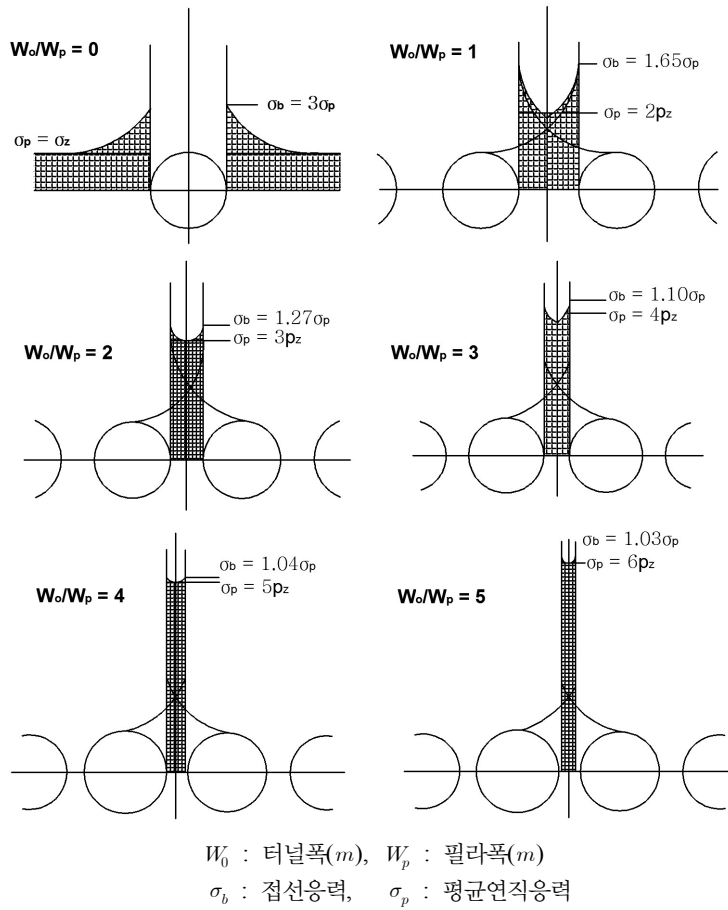
<sup>2)</sup> 하경엔지니어링 터널지반부

\* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2012년 2월 15일

심사 완료일 : 2012년 2월 23일

게재 확정일 : 2012년 2월 24일



$W_0$  : 터널폭(m),  $W_p$  : 필라폭(m)  
 $\sigma_b$  : 접선응력,  $\sigma_p$  : 평균연직응력

그림 1. 병설터널의 응력집중 양상

을 나타낸 것이다. 터널이 근접하여 필라 폭이 좁아질 수록 필라에 작용하는 평균연직응력  $\sigma_p$ 가 증가하고 접선응력과 연직응력의 비  $\sigma_b/\sigma_p$ 가 감소하게 된다(Hoek and Brown, 1980).

**2.2 암반 필라의 안정성 평가**

그림 1에서와 같이 터널간의 이격거리가 근접할수록 중앙 필라부에 집중되는 응력은 증가하게 되고, 이는 터널의 안정성에 영향을 미치는 요소로 작용할 수 있다. 이와 같은 병설터널의 필라부 안정성을 검토하는 방법으로는 Peck 방법, 지류론(Tributary theory), Matsuda 방법, 파괴접근도, 강도/응력비에 의한 안전율 등이 있다.

Peck(1969)은 평행하게 배치된 근접터널에 있어서 터널간격 및 크기에 따른 터널의 변형을 지침으로 제시 하였다. 지류론은 그림 2와 같이 원활하게 이동하고 있는 흐름 속에 교각을 설치했을 경우와 같이 유속 증가

의 정도는 교각과 교각사이의 폭과 전체 폭과의 비에 따라 결정된다는 이론으로서 지반내 공동의 굴착에 따른 서로 인접한 공동사이의 필라에 대한 응력선 분기 및 연직응력의 집중도 등을 다루는 이론이다. 지류론에서는 공동의 전 단면적과 필라의 면적비에 의하여 정해지는 평균 필라응력과 필라형상에 따라 결정되는 응력집중도에 따른 응력에 관한 사항으로 나눌 수 있다(Hoek and Brown, 1980). Matsuda 등(1997)은 토피고(H)가 1D 이하인 얇은 초근접 터널의 경우에는 암반 필라부의 응력상태를 일축압축강도와 필라부에 작용하는 응력의 비로 안정성을 검토할 수 있다고 하였다(그림 3).

파괴 접근도는 암반의 응력원이 파괴포락선에 어느 정도 접근하였는가에 따라 파괴 및 파괴 가능성을 판단할 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 파괴 접근도로 표현할 수 있다.  $D_1$ 은 응력 접근도를  $d_1$ 은 파괴 여유도를 의미한다.

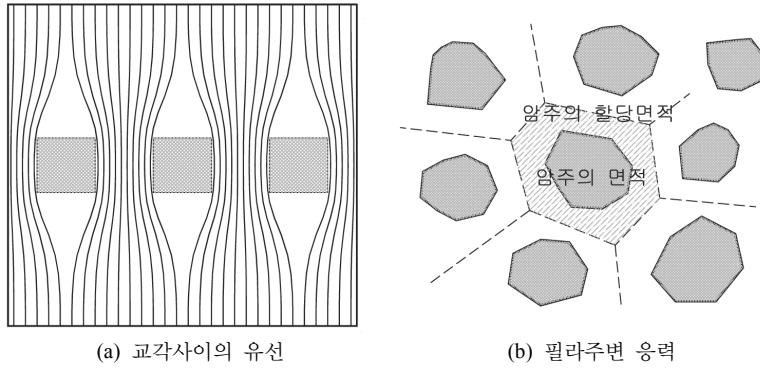


그림 2. 지류론 개념

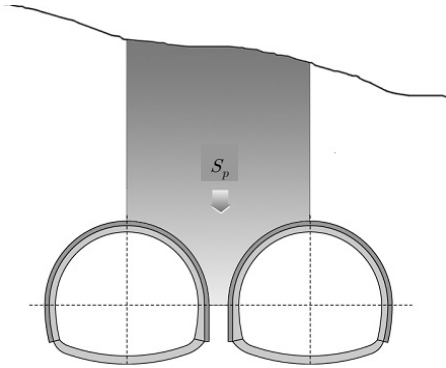


그림 3. 근접병설터널 중앙필라부에 작용하는 하중

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

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

$H$  : 토포고( $m$ )  
 $D$  : 터널폭( $m$ )  
 $B$  : 이완하중 폭( $m$ )  
 $P$  : 필라폭( $m$ )  
 $S_p$  : 이완응력

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

암반이 최고로 안정한 상태는 파괴접근도  $R$ 이 1.0인 정수압 상태일 때이고, 파괴접근도  $R$ 이 0이면 완전 파쇄암을 나타낸다. 식 (2)는 안전율 개념으로 표현한 것이며, 안전율이 1.0 이하이면 암반이 파괴되기 쉬운 불안정한 상태로 간주한다.

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

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

강도/응력비에 의한 안전율은 다양한 구속압력  $\sigma_3$ 에 대하여 소성파괴의 시작을 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 규명한다고 가정하여 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad \sigma_1 : \text{파괴시의 축방향 응력} \quad (3)$$

$$\sigma_3 : \text{구속응력}$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad \sigma_{cm} : \text{일축압축강도}$$

$$c : \text{암반의 점착강도}$$

$$k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad \phi : \text{암반의 마찰각}$$

$$K : \text{주응력선의 기울기}$$

그림 4는 암반 필라의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 점진적 파괴(progressive failure)나 응력 전이과정(stress transfer progress)을 고려하여 필라 중앙단면에서의 평균강도/응력비가 1.0 이하가 되면 필라 전체가 불안해지는 것으로 판단한다(Hoek and Brown, 1980).

### 3. 수치해석을 이용한 암반 필라의 안정성 평가

#### 3.1 모델 구성

단일터널 주변에 새로운 터널을 시공하거나 두 터널을 동시에 시공하는 경우에 두 터널의 근접거리에 따라 영향범위가 중첩되고 그 사이에는 상호거동이 발생하

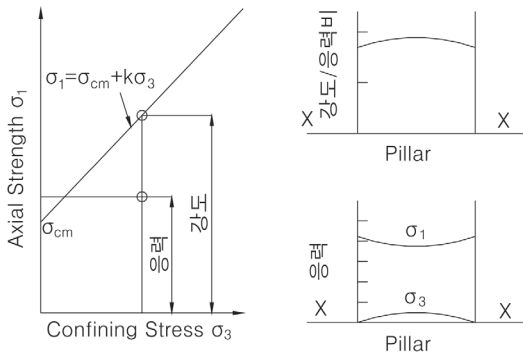


그림 4. 강도/응력비 곡선

게 된다. 본 연구에서는 암반 필라를 활용한 근접 병설 터널에서 도로터널의 본선부를 대상으로 수치해석을 이용하여 암반 필라의 안정성에 영향을 미치는 영향요소에 따른 경향을 평가하였다. 수치해석 방법은 평면변형을 조건이 적용 가능한 일반적인 터널과 달리 도로의 평면선형에 따라 두 터널의 이격거리가 증가하는 3차원 구조적인 문제와 종방향 및 횡방향 하중전이 현상(arching effect)을 고려하기 위해 지반의 비선형 거동을 모델링할 수 있는 3차원 유한차분 해석프로그램을 이용하였다. 해석에 적용한 주요 매개변수로는 터널간 이격거리, 토피고, 암반조건을 적용하여 안전을 평가를 통해 거동 특성을 살펴보았으며, 터널상부의 지층조건, 불연속면

의 영향, 터널크기 및 형상 등의 영향은 고려하지 않은 제한적인 조건에서 해석을 실시하였다.

본 연구에서는 현장에서 시공되는 근접 병설터널의 전체 및 필라부의 거동을 평가하기 위해 지보재의 영향을 고려하였고, 이를 위해 한국도로공사 '터널표준패턴'과 동일하게 터널단면과 지보재 조건을 적용하였다. 굴착방법으로는 암반등급에 따라 전단면 굴착 및 상하부 반단면 분할굴착을 실시하였으며, 선·후행터널의 굴진 간격은 전체 굴진 범위를 39 m인 롱벤치로 가정하였기 때문에 선행터널의 굴진이 완료된 후에 후행터널의 굴진을 진행하였고, 상하부 반단면 분할굴착의 경우에는 상부굴착 후 1D 이상 진행된 시점에 하부굴착이 진행되도록 정하였다. 그림 5는 굴착 및 지보재의 시공순서이다.

3.2 입력자료 산정

터널해석 시 주어진 암반물성은 터널주변의 거동에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 수치해석이 정확도를 높이기 위해서는 최대한 현지 암반특성을 고려하여 입력물성을 산정하여야 한다. 그러나 본 연구의 목적상 특정대상이 아닌 일반적인 암반 조건을 적용하기 위해 다음과 같은 방법으로 산정하였다. 국내 터널설계에서는 RMR 평가에 기초하여 암반을 5등급으로 분류한 결과를 수치해석에 보편적으로 적용하고 있다. 본 연구에서는 국내 관련 논문 10편과 설계보고서 25편에 대한 암

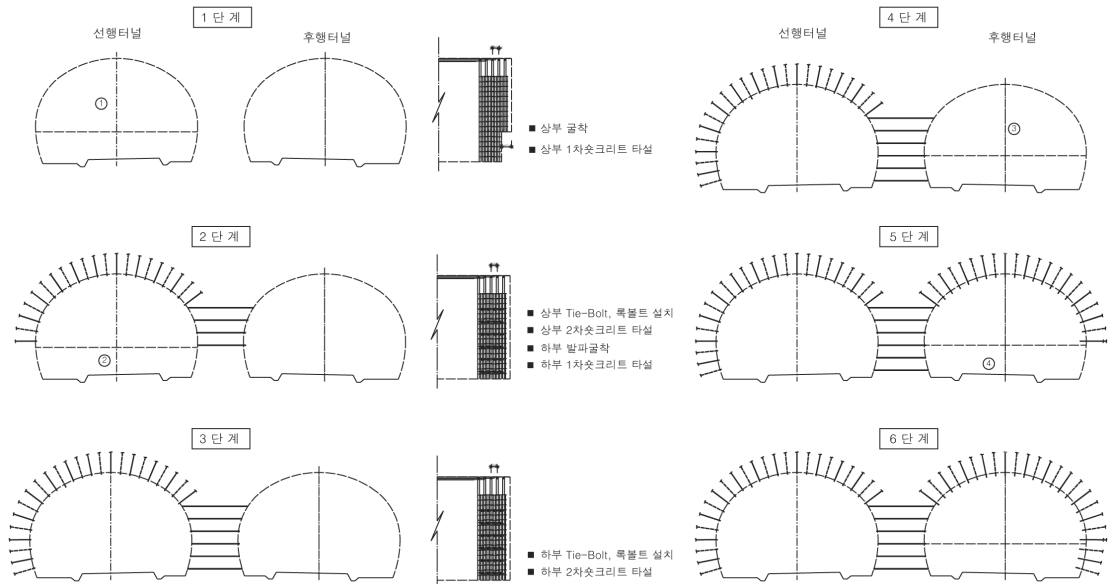
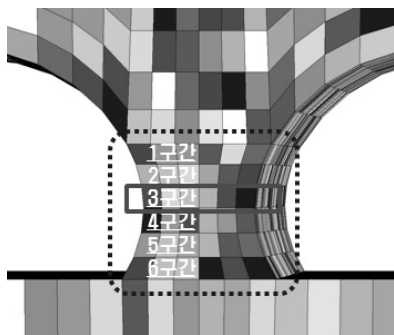


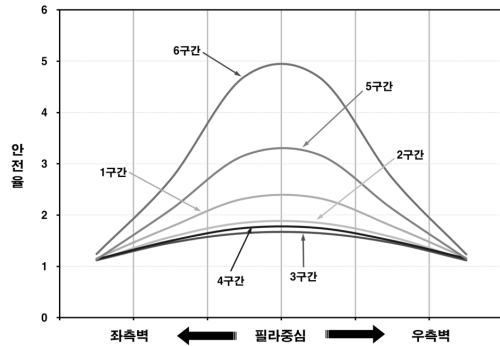
그림 5. 굴착 및 지보재 시공순서도(상·하 반단면 분할굴착 예시)

표 1. 수치해석에 적용된 암반의 물리·역학적 특성

적용물성	등급	I	II	III	IV	V
RMR 범위		100~81	80~61	60~41	40~21	<20
단위중량( $kN/m^3$ )		27	26	25	24	23
변형계수( $GPa$ )		50	40	10	5	2
포아송비		0.2	0.23	0.25	0.28	0.32
점착력( $MPa$ )		10	5	1	0.5	0.2
내부마찰각( $^\circ$ )		45	40	35	32	30



(a) 횡단면 측정



(b) 구간별 안전율곡선

그림 6. 측정별 안전율 평가(3등급, 토피고 1D, 필라폭 0.5D)

반의 물리·역학적 특성을 통계적으로 분석하여 표 1과 같이 수치해석의 입력 자료로 적용하였다.

### 3.3 암반 필라의 안정성 평가 방법

근접 병설터널에서는 두 터널사이의 이격거리가 매우 가깝기 때문에 터널의 안정성 확보를 위해서는 암반 필라에 대한 평가가 중요하다. 현재까지 정립된 이론 및 문헌들의 연구결과에서는 필라 전체의 평균응력을 이용하여 필라의 안전율을 평가하였다. 그러나 필라폭이 매우 근접해 있는 경우에는 국부적인 응력집중만으로도 필라부 전체가 불안전해질 수 있기 때문에 조금 더 보수적인 평가가 필요하다.

본 연구에서는 암반 필라의 횡단면을 6개 구간의 36개 측정점으로 구분하여 각 측정점에서 발생하는 최대·최소 주응력을 측정 후 파괴점근도 방법으로 안전율 분포를 검토하였다(그림 6). 안전율은 최대주응력이 크게 발생하는 상대적으로 응력이 집중되는 최외곽 측정점에서 낮게 나타났으며 필라의 중심에서 측벽으로 진행할수록 낮은 경향을 보였다(Hoek and Brown, 1980).

본 연구에서는 필라폭이 극히 작은 근접 병설터널의 경우 필라부 전체가 하나의 구조체로 거동하게 되고 곡

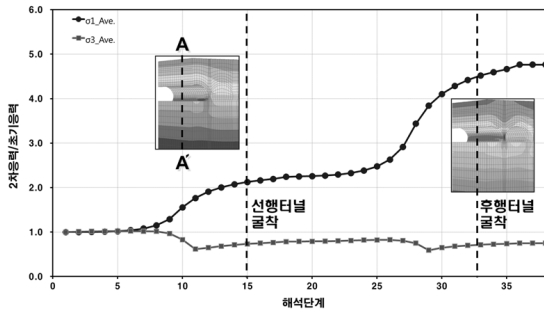
면형태의 필라형상으로 인해 가장 낮은 안전율 분포를 보인 최소 필라폭 구간이 불안정해지면 필라 전체가 불안정해지는 것으로 가정하였다. 이를 바탕으로 최소 필라폭 구간에서 발생하는 주응력의 평균값을 파괴점근도 방법에 적용하여 매개변수 변화에 따른 암반 필라의 거동특성을 검토하였다.

## 4. 암반 필라의 거동 특성분석

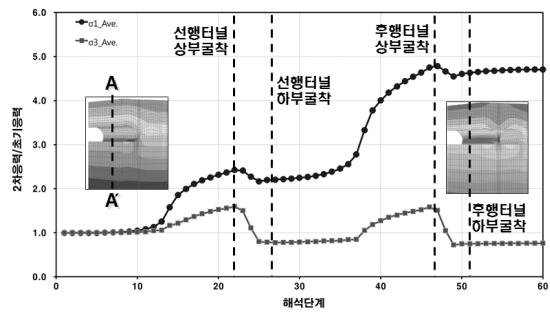
### 4.1 굴착 과정별 거동 특성

암반 필라의 거동 특성을 수치해석상 진행단계별로 발생하는 응력이력을 통해 검토하였다. 그림 7은 각각 전단면 굴착방식을 적용할 때와 상하분할 반단면 굴착방식을 적용하였을 때 암반 필라에 발생하는 주응력 양상이다.

선·후행 터널이 굴진하는 동안 응력은 종방향 아칭효과에 따라 막장전방에서부터 초기응력이 교란되기 시작하여 굴착시점에 응력이완이 최대로 발생한 후, 지보재 설치 이후에 수렴하는 양상을 보였다. 또한 초기응력 대비 2차 응력의 비는 선행터널 굴착 시 발생하는 응력변화보다 후행터널에서 발생하는 응력변화가 선·



(a) 전단면 굴착(2등급)



(b) 상하 반단면 분할 굴착(3등급)

그림 7. A-A' 단면에 대한 해석단계별 응력(2, 3등급, 이격거리 0.2D, 토피고 0.5D)

후행 터널의 상호간섭으로 인해 2배 이상 증가하였다.

#### 4.2 매개변수 변화에 따른 영향

근접 병설터널의 이격거리와 심도(토피고) 및 암반조건이 변화하게 되면 암반 필라의 거동 양상도 달라지게 된다. 본 연구에서는 필라의 안전율을 분석하여 암반 필라의 거동양상을 검토하였다.

본 연구에서는 이격거리 변화에 따른 횡방향 및 종방향 아칭효과를 반영하기 위해 굴착 시점부에서부터 이격거리가 점진적으로 증가하도록 해석모델을 구성하였으며 안전율 평가는 해석단면에서 최종적으로 수렴한 주응력을 적용하였다. 또한 굴착이 진행되는 단계에서 응력이 전이되는 동안 암반 필라에 과도한 응력이 집중되어 굴착이후에도 응력이 수렴하지 못하고 발산한다면 암반 필라가 터널을 지지하지 못하고 붕락한 결과라고 간주하였으며, 수렴한 주응력으로 계산한 안전율 값이 최소안전율 1을 기준으로 1 이하의 결과를 나타낼 경우, 진행성 파괴의 위험이 높은 것으로 평가하였다.

그림 8은 암반등급별 이격거리와 토피고 변화에 따른 안전율 경향곡선이다. 안전율 경향곡선은 최소 이격거리부터 이격거리 0.5D까지 급한 기울기를 보이며 증가하다가 이격거리 2D까지 점진적으로 기울기가 감소한 후에 2D이후에서 수렴해가는 로그 형태의 경향이 나타났다. 그리고 토피고가 증가할수록 또는 암반조건이 불량해질수록 최소이격거리는 증가하였고 경향곡선의 기울기가 감소하면서 그래프가 우측으로 하향하며 이동하였다.

1등급 암반에서는 이격거리 0.5D 이하에서 이격거리가 증가할수록 토피고별로 최대 10~30까지 안전율이 크게 변화하였으며, 토피고 2D까지 최소 안전율을 확보할 수 있는 이격거리는 0.1D로 나타났다. 2등급 암반에서는 1등급 암반보다 안전율은 감소하였지만 토피고

2D까지 최소 안전율을 확보할 수 있는 이격거리는 0.1D로 동일하게 나타났다. 3등급~5등급 암반까지는 이격거리 0.5D이하에서 이격거리가 증가할수록 토피고별로 안전율이 5 이하에서 변화하였으며, 토피고가 증가할수록 최소 안전율을 확보할 수 있는 이격거리는 0.12D에서 점진적으로 증가하여 최대 0.35D까지 나타났다.

### 5. 설계 도표 제시

#### 5.1 안전율에 따른 이격거리 산정

매개변수의 변화에 따라 암반 필라의 안전율은 일정한 경향곡선을 보여주었다. 설계도표에는 최소 안전율 1을 기준으로 매개변수 변화에 따른 최소 이격거리를 제시하였으며, 이는 그림 8의 결과와 같이 수치해석을 통해 계산한 안전율을 대상으로 비선형 회귀분석을 실시하여 최소 안전율과 1.5이상의 안전율을 갖는 이격거리를 산정하였다(표 2).

암반 필라 거동에 영향을 미치는 매개변수로는 터널 간의 이격거리, 토피고와 암반조건으로 단순화하였으며, 암반조건은 경우 국내 관련 문헌 및 설계보고서 사례를 기초하여 일반화된 값을 사용하였다.

#### 5.2 설계 도표 작도

본 연구에서는 터널 폭이 13 m정도인 2차선 도로터널을 대상으로 매개변수인 이격거리, 토피고, 암반조건의 상관관계에 따른 설계도표를 그림 9와 같이 제시하였다.  $x$ 축은 이격거리,  $y$ 축은 암반등급과 토피고이다.  $x$ 축의 최대 이격거리 범위는 안전율 1.5의 최대 이격거리가 1D이내에 위치하기 때문에 그 이상의 범위는 절삭하였다. 설계도표는 안전율 1과 1.5의 범위를 기준으로 다음과 같이 나타내었다. 매개변수 조건에 따라 암반 필라가 불안정한 거동을 보이며 진행성 파괴 위험이

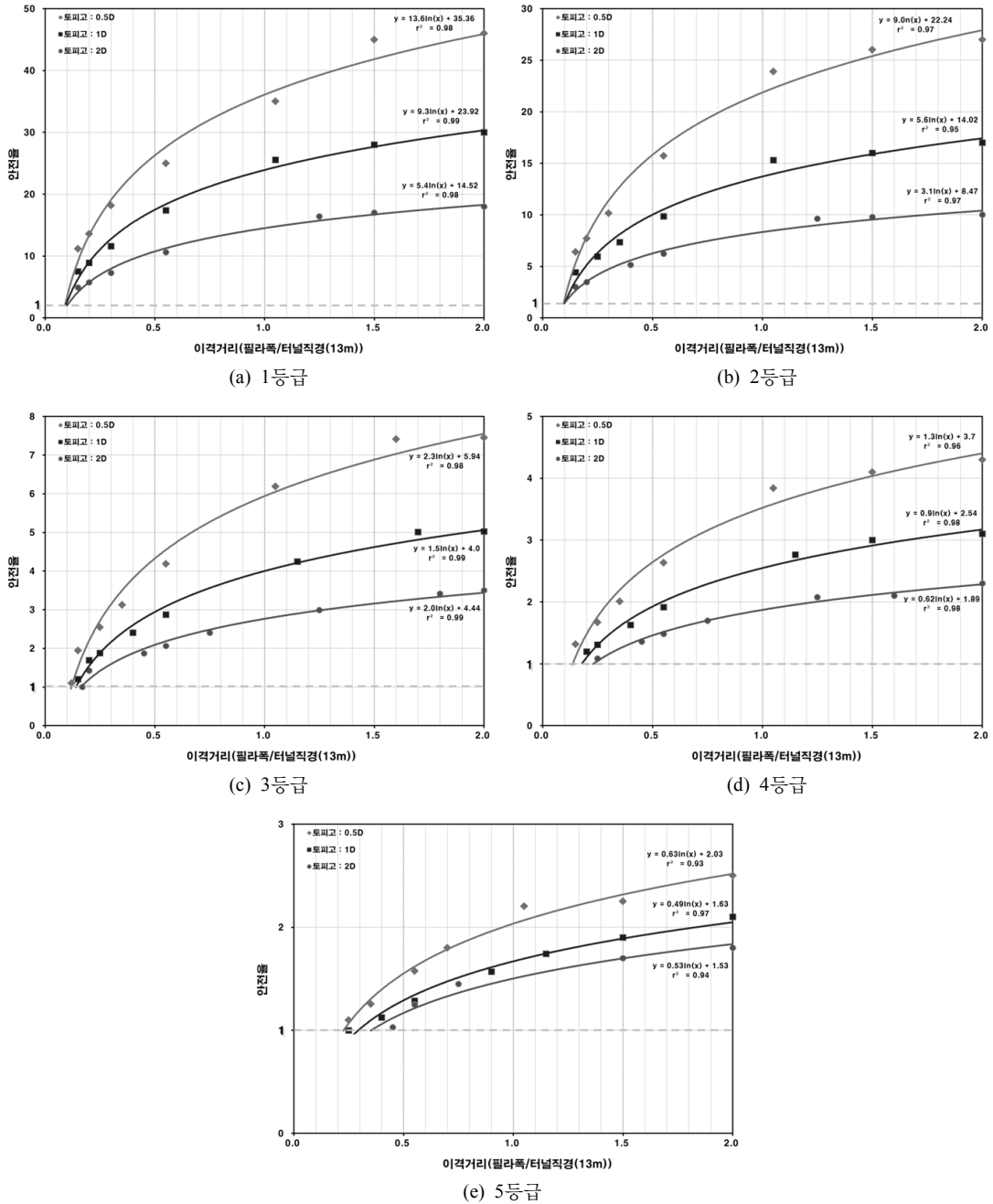


그림 8. 등급별 암반 필라의 안전을 경향곡선

높은 구간은 붉은 색으로 표현하였으며, 최소 안전율을 확보하였지만 어느정도 파괴의 위험을 내포하고 있는 주의구간을 노랑색으로 표현하였다. 그리고 안전율 1.5 이상의 구간을 녹색으로 표현함으로써 설계도표를 통

해 매개변수 조건에 따른 안정성 확보 여부와 최소 이격거리를 확인할 수 있다.

본 연구에서 제시한 설계도표는 굴착방법, 터널단면 형상 등의 요소가 고려되지 않은 제한적인 조건에서의

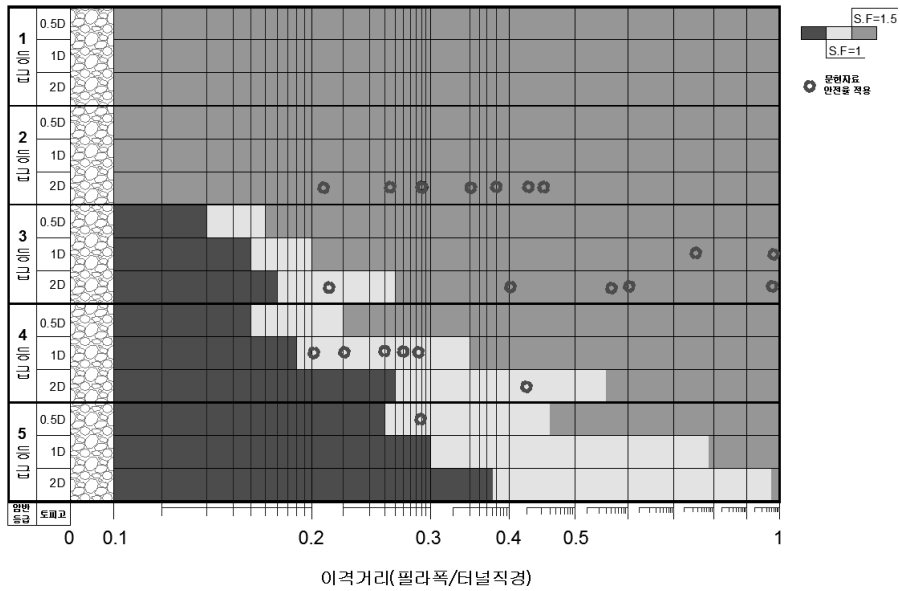


그림 9. 암반 필라의 안전율 설계도표

표 2. 매개변수 변화를 고려한 최소 이격거리

토피고	안전율	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급
0.5D	1.0	0.1	0.1	0.12	0.14	0.23
	1.5	0.1	0.1	0.15	0.21	0.43
1D	1.0	0.1	0.1	0.14	0.18	0.3
	1.5	0.1	0.1	0.2	0.32	0.77
2D	1.0	0.1	0.1	0.16	0.24	0.35
	1.5	0.1	0.1	0.24	0.53	0.95

※ 이격거리 : 필라폭(W)/터널직경(D), D : 터널직경(=13 m)

결과로서 역학적 특성에 따른 결과에 국한되며, 굴착 방법 등의 사항은 후속 연구결과를 바탕으로 설계도표에서 제시할 예정이다. 그림 9의 설계도표에는 국내 병설터널 시공사례 자료 및 문헌자료에서 제시하고 있는 안전율을 설계도표 상에 도시하여 본 설계도표의 타당성을 일부 검증하였다.

### 6. 결론

국내 근접 병설터널 시공사례 중 암반 필라를 지지점으로 활용한 사례가 드물고 또한 0.5D 이하에서 시공이 이루어진 사례는 극히 일부에 불과하다. 그동안 병설터널의 거동을 평가하기 위한 연구가 다소 이루어지긴 하였지만 실제 시공 상황을 제한적으로 고려할 수 밖에

없는 축소모형실험이나 병설터널의 단편적인 조건만 고려하여 수행한 수치해석 평가에 국한되었다. 그리고 설계단계에서 실시하는 예비 수치해석평가에서도 설계 대상에 국한되는 범위 안에서 주로 검토를 실시하게 되고, 해석자의 주관에 따라 임의의 기준으로 해석을 실시하기 때문에 일관된 예비평가가 이루어진다고 할 수 없는 실정이다.

본 연구에서는 종래 시공 및 연구 사례가 극히 일부에 불과한 최소 이격거리 0.5D 이하의 초근접 병설도르터널에서 암반 필라를 지지점으로 이용한 경우를 대상으로 필라의 거동 특성에 영향을 미치는 기하학적 역학적 변수를 선정하여 3차원 수치해석방법으로 거동특성을 평가하였다. 이를 바탕으로 근접 병설터널의 암반 필라에 안정성을 예측할 수 있는 설계도표로 제시하였다.



## 참고문헌

1. 김양운, 정상훈, 강세구, 안경철, 2007, 병설터널 필라부의 텐션볼트 보강에 따른 동특성 및 보강효과에 관한 연구, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2947-2950.
2. 임수빈, 이성민, 이제우, 백영식, 1994, 터널 굴착시 고려해야 할 주변 암반의 매개변수와 진행성과, 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 231-234.
3. 장부식, 황정순, 윤배식, 김홍택, 2006, 축소모형실험에 의한 병설터널 필라의 거동특성, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1577-1580
4. Hoek, E. I. and E. T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
5. 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, proceedings of Studies on Tunnel Engineering.
6. Peck, R. B., 1969, Deep excavations and tunneling in soft grounding Proc. 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the-art Report, pp. 225-290.



### 김 원 범

2002 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 2004 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사  
 2011 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사  
 Tel: 062-530-0824  
 E-mail: janus409@naver.com



### 양 형 식

1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
 1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사  
 Tel: 062-530-1724  
 E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
 현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수



### 하 태 옥

2000 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 2003 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사  
 2010 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사  
 Tel: 02-3287-9840  
 E-mail: htw8646@nate.com  
 현재 (주)하경엔지니어링 터널지반부 차장