

# 수치해석과 현장계측을 통한 병렬터널의 최소 필라폭과 보강에 대한 평가

안용관<sup>1</sup> · 공석민<sup>2</sup> · 이용주<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, (주)하이콘엔지니어링 부장

<sup>2</sup>학생회원, 서울과학기술대학교 공과대학 건설시스템공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 서울과학기술대학교 공과대학 건설시스템공학과 조교수

## Assessment of minimum pillar width and reinforcement of parallel tunnel using numerical analysis and field monitoring

Yong-Koan An<sup>1</sup>, Suk-Min Kong<sup>2</sup>, Yong-Joo Lee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Manager, Dept. of Geotechnical, Highcon Engineering Consultants

<sup>2</sup>Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology

<sup>3</sup>Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology. (ucesyjl@seoultech.ac.kr)

**ABSTRACT:** Nationally, tunnel and underground constructions are necessary for the environmental sustainability and the efficient use of land space. For the importance of eco-friendly circumstances, 2-arch or large road tunnel has been designed so far. However, such a 2-arch or large tunnel has problems in terms of cost, constructability, construction period, and maintenance. Therefore, in this study, tunnel behavior and stability of rock pillar according to the pillar width and cover depth for parallel tunnels are investigated by performing FE analysis and using empirical formula. According to the results, Rock pillar is reinforced for distributed vertical load by Tie-Bolt due to unpredicted ground deformation, and the reinforced rock pillar's behaviour from the FE analysis shows a quite good agreement with field measurement. According to ground conditions, if the pillar width of the parallel tunnels is reduced, it can be more efficient in use of the tunnel space compared to previous tunnels.

**Keywords:** Parallel tunnel, Numerical analysis, Empirical formula, Pillar width, Field measurement

**초 록:** 국가적으로 국토의 효율적 활용과 친환경성 등으로 인해 터널과 같은 지하공간 건설이 필요하다. 친환경적 요소의 중요성을 감안할 때, 산악지에 형성되는 도로건설에 대해 2-아치 및 대단면 터널로 계획되나 경제성, 시공성, 공사기간, 유지관리 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 2차로의 국도터널을 기준으로 현장조건과 지반조건을 고려하여 터널별 이격거리와 토피고를 변화시켜 경험식과 수치해석적으로 필라부의 안전성을 평가하였으며, 해석 프로그램으로 유한요소법을 적용한 Plaxis 2D를 활용하여 터널의 최소 필라폭 선정과 전체적인 터널의 거동특성을 분석하였다. 분석결과, Tie-Bolt에 의한 필라보강은 연직하중을 분산시켜 안정적인 근접병렬터널 계획이 가능하며, 터널 필라의 거동은 현장계측 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 지반조건에 따라 터널 필라폭을 축소시킨다면 이전의 터널에 비해 효율적인 터널 활용이 가능하다.

**주요어:** 병렬터널, 수치해석, 경험식, 필라폭 (필라 이격거리), 현장계측

\*Corresponding author: Yong-Joo Lee

E-mail: ucesyjl@seoultech.ac.kr

Received April 21, 2014; Revised May 9, 2014;

Accepted May 13, 2014

## 1. 서론

도심지에서 지상공간 부족으로 인해 지하공간 즉, 터널 및 지하주차장 등의 개발은 나날이 증가하는 추세이다. 또한 개발과 동시에 환경적 측면도 함께 고려되고 있다. 이와 관련하여 터널 및 지하공간 활용과 친환경적 요소의 중요성을 감안할 때 사면 깎기로 인한 문제점들을 개선하기 위해 산악지에 형성되는 도로건설에 대해서는 사면 깎기보다는 친환경성을 고려한 터널로 계획하고 있다. 이러한 예로 이화령고개 사면 절개지를 복개 터널로 복원하여 백두대간의 맥을 잇고, 생태환경적 천이를 도모하고 있다. 2009년 이전의 터널계획은 대부분 병렬 터널(parallel tunnel)로 계획하여 터널 간 이격거리를 필요 이상으로 증가시켜 과도한 갱구 비탈면을 형성하여 자연환경 훼손을 초래하고 있으나, 이후 개선대책으로 2-아치터널 또는 대단면 터널(1-arch)로 계획하여 갱구부의 깎기 면적을 축소하고 있는 실정이다. 그러나 2-아치터널 또는 대단면 터널은 다분할 굴착, 중앙터널 및 본선터널 굴착에 따른 시공의 장기화를 초래하며, 초기 투입비 과다에 따른 경제성 불리, 싸이클 타임 증가로 인한 공사기간 증가, 대단면으로 지반의 불연속면과 다 포함에 따른 터널 안정성 및 특수 터널로 인한 장기적인 유지관리 측면에서 불리한 것으로 보고되고 있다. 최근 이에 대한 대안으로 자연환경 훼손 방지와 최소 용지매입이 가능한 터널의 시공, 경제성을 개선하는 터널 간 필라(pillar)부 이격거리를 축소시킨 병렬터널이 계획 및 시행되고 있다. 그러나 현 시행되는 터널 간 필라(pillar)부 이격거리를 축소시킨 병렬터널은 약 0.5D(터널 폭)이상 시행되고 있어 터널의 1차 주지보재를 최대한 활용할 수 있는 초 근접된 터널 계획에 대한 연구가 필요하다. 하지만 기존 연구는 경험식과 수치해석에 의존한 예측이 전부인 실정이다(Kim, 2007, Sin, 2010). 따라서, 본 연구는 암질의 조건에 따라 필라부 폭을 대폭 근접시킬 때, 역학적 거동과 최소 근접 시공된 사례를 바탕으로 현장계측

자료와 수치해석 결과를 비교 평가하였으며, 기존 터널 배치계획(2D이상)에 대한 개선 방안을 이론식과 수치해석기법 및 실제 시공된 계측자료를 통하여 분석평가하였다.

## 2. 안정성 평가

두 터널이 근접되어 있다면 터널 사이에 상호거동이 발생하고 필라의 안전성에도 영향을 미치게 된다. 현재 실무에 쉽게 적용되고 있는 터널 필라부의 안전성 검토방법으로 경험식에 의한 Peck (1969)방법, 지류론 (Hoek and Brown, 1980), Matsuda (1997)방법 등이 있으나, 이는 다양한 지반의 불확실성과 터널의 시공조건을 합리적으로 고려하기에는 한계가 있어, 비교적 정밀한 검토가 가능한 수치해석에 의한 평가 방법을 보완적으로 적용하였다(Lee et al., 2013).

### 2.1 Peck(1969) 방법

두 터널의 변형에 대하여 변형량을 직접 추정하기 보다는 상대적 변형을 추정하는 것으로 초기 단계의 근접터널 설계 시 유용하게 이용할 수 있는 방법으로, 두 터널사이의 간격이 터널의 직경보다 상당히 클 경우에 있어서는 두 터널은 서로 각각의 독립된 터널로 거동할 것으로 간주되며, 근사적인 필라의 평균 작용응력 ( $S_p$ )과 필라부 일축압축강도 ( $\sigma_p$ )의 아래 식 (1)에서 (3)으로 상호관계를 추정할 수 있다.

$$S_p = \gamma \times H \times \left(1 + \frac{D}{P}\right) \quad (1)$$

$$\sigma_p = \frac{2 \times c \times \cos\psi}{1 - \sin\psi} \quad (2)$$

$$F_s = \frac{\text{필라 일축압축강도}(\sigma_p)}{\text{필라 응력}(S_p)} \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$  : 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)  
 $H$  : 토피고(m)  
 $D$  : 터널 폭(m)  
 $P$  : 필라 폭(m)  
 $c$  : 점착력(kN/m<sup>2</sup>)  
 $\Phi$  : 내부 마찰각

## 2.2 지류론(tributary theory)

지류론은 원활하게 이동하고 있는 흐름 속에 교각을 설치했을 경우와 같이 유속 증가의 정도는 교각과 교각사이의 폭과 전체 폭과의 비에 따라 결정된다는 이론으로서, 암반필라의 작용응력은 유효부담면적( $A_t$ )와 필라의 단면적( $A_p$ )를 고려하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$S_p = \frac{A_t}{A_p} \times \gamma \times H \quad (4)$$

여기서,  $S_p$  : 암반 필라 응력(kN/m<sup>2</sup>)  
 $A_t$  : 공동의 면적(m<sup>2</sup>)  
 $A_p$  : 필라의 면적(m<sup>2</sup>)  
 $\gamma$  : 지반의 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)  
 $H$  : 토피고(m)

## 2.3 Matsuda(1997) 방법

토피고( $H$ )가 1D 이하인 얇은 초 근접터널의 경우에는 암반 필라부의 응력상태를 일축압축상태로 가정할 수 있으며, 토피고( $H$ )와 터널 폭( $D$ )의 관계에 따라 일축압축강도와 필라부에 작용하는 응력의 비로 안전성을 검토할 수 있다. Fig. 1과 같이 음영으로 표시된 영역의 전하중이 중앙 필라부에 작용하는 것으로 제안하였으며, 중앙 필라부의 강도가 예상되어지는 응력보다 크게 나타나면 충분한 안전성을 확보할 수 있다(Hoek and Brown, 1980, Hoek and Brown, 1997).

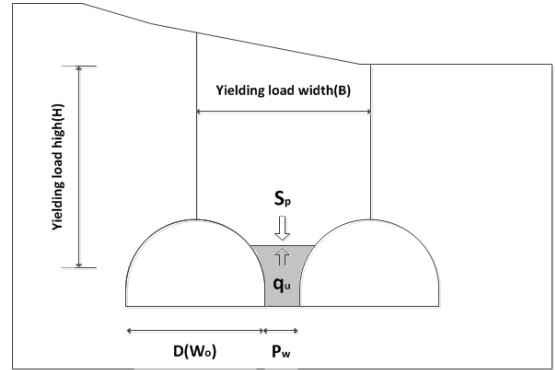


Fig. 1. Load acting on center pillar

$$\begin{aligned} H > D, \quad S_p &= \gamma \times D \times \frac{B}{P_w} \\ H < D, \quad S_p &= \gamma \times H \times \frac{B}{P_w} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $S_p$  : 이완하중(kN/m<sup>2</sup>)  
 $B$  : 이완하중 폭(m)  
 $P_w$  : 필라폭(m)  
 $D$  : 터널 직경(m)  
 $H$  : 이완하중 높이(m)  
 $q_u$  : 암반의 일축압축강도(kN/m<sup>2</sup>)

## 2.4 수치해석

수치해석에 의한 안정성 평가는 국도 2차로터널 단면을 중심으로 필라폭과 상재 높이를 변화시켜 CASE별로 각각 나누어 필라의 강도/응력비를 안전율 개념으로 산출하였다.

### 2.4.1 해석조건

터널의 형상은 Fig. 2의 표준단면도를 참고하여 국도 2차로 터널 단면으로 최대 굴착 폭 11.6 m 규모의 터널을 선정하였다. 굴착 방법 및 지보설계는 암반 II등급 및 암반 III등급으로 전단면 굴착하는 것으로 적용하였다. 필라폭은 1.0 m ~ 10.0 m로 변화시키고

토피고는 종단선형과 암반등급을 고려하여 최대 높이 30.0 m까지 검토대상으로 선정하여 모델링하였다.

해석 시 적용한 지반 특성치는 지반특성상 변수가 많아 정확한 측정은 곤란하나, 지반조사를 수행하여 얻은 결과를 가지고 Table 1, 2와 같이 적용하였다. 또한, 수치해석은 지반수치해석 프로그램인 Plaxis 2D (Plaxis 2002)를 이용하였으며, 지반 모델은 Mohr-Coulomb의 파괴조건으로 수행하였다.

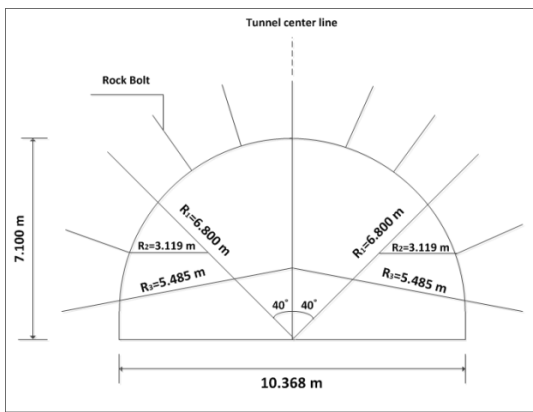


Fig. 2. Standard sectional plan

## 2.5 필라폭 결정방법

두 개의 터널이 근접할 경우에 대하여 상호 간섭효과에 의한 병렬터널 사이의 응력집중과 터널의 안전성 및 보강방법을 검토하기 위해서 경험적인 방법과 수치해석 방법에 의해 최소 필라폭을 결정할 수 있다. 우선 경험적 방법에 따라 최소 가능 필라폭을 선정하며, 수치해석을 통해 터널 거동을 필라부에 작용하는

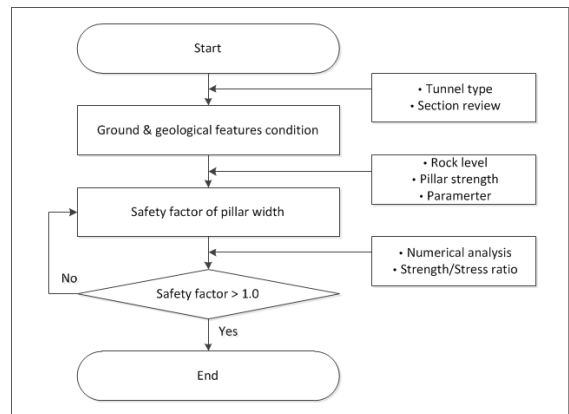


Fig. 3. Flowchart for pillar width

Table 1. Input parameters of ground

Parameters	Slickensides	Normal	Soft rock	Soft rock (shattered zone)	Weathered rock
Rock mass rating	TYPE- I	TYPE- II	TYPE- III	TYPE- IV	TYPE- V
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	26.5	26.0	25.0	24.0	20.0
Cohesion (kPa)	5,000	2,500	1,000	600	40
Friction angle (°)	45	40	38	36	35
Elastic modulus (MPa)	25,000	15,000	6,300	3,700	500
Poisson ratio (ν)	0.20	0.22	0.24	0.27	0.30
K	0.5 ~ 2.0				

Table 2. Input parameters of tunnel

	Soft Shotcrete	Hard Shotcrete	Rock Bolt (SD35, D25)	Tie Bolt (SD35, D32)
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	24	24	78.5	78.5
Area (m <sup>2</sup> )	-	-	5.067×E-4	7.942×E-4
Elastic modulus (MPa)	5,000	15,000	210,000	210,000
Yield strength (MPa)	-	-	350	350

주응력에 따라 평가하였다. 최소 필라폭 결정을 위한 해석 흐름은 Fig. 3과 같다.

### 2.6 안정성 평가 결과

전체적으로 경험식에 의한 필라 안전성은 필라폭에 따라 직선적 변화로 나타나며, 수치해석은 필라폭이 5.0 m 이내로 근접되는 경우 필라부에 응력이 집중되어 필라부의 안전성이 저하되는 경향을 보인다. Table 3은 경험식과 수치해석에 의한 최소 필라폭산정 결과이다. Table 1과 같은 지반조건에서 경험적 방법과 수치해석적 방법으로 최소 필라폭 산정 시 기준 안전율  $F_s=1.0$  이상을 만족하는 최소 필라폭은 경험식에 의해 1.6 m 이상, 수치해석은 1.0 m 이상 확보하여야 하는 것으로 평가되었다. 특히, 경험식 중 Peck방법이 지반의 물성변화, 즉 전단저항각의 영향에 따라 안전율을 변화가 심하며, 전반적으로 안전율 경향이 가장 작게 나타났다. 상대적으로 Matsuda방법은 안전율이 가장 크게 형성됨을 알 수 있으며, 지류론과 수치해석에 의한 안전율은 가장 유사한 결과를 도출함을 알 수 있다.

## 3. 시공사례에 의한 필라 및 터널 안전성 분석

### 3.1 해석범위

실제 시행되고 있는 11.6 m 규모의 2차로 도로

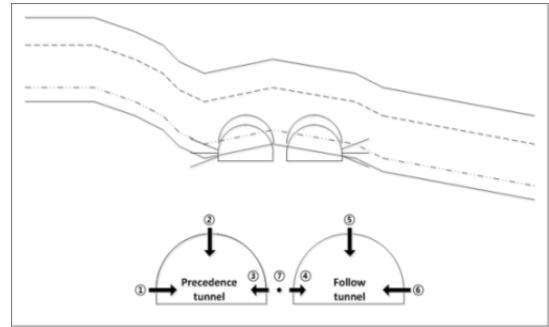


Fig. 4. Measuring points

터널로 지반의 해석경계는 응력 및 변위 오차 발생을 최소화하기 위하여 측방 4D이상 하부 4.0H이상으로 적용하였으며, 해석결과에 따른 터널 주변 지반의 발생응력 위치는 중앙필라를 기점으로 하는 좌측부(③), 필라부의 중앙(⑦), 우측부(④)로 설정하였다. 그 외 천단침하 및 내공변위 위치는 Fig 4와 같이 나타내었다.

### 3.2 CASE별 필라보강

필라부의 보강은 필라폭이  $P_w=2.0$  m 이하로 구성된 대표단면을 선정하였으며, 암반등급에 상관없이 상·하 반단면으로 해석 절차를 시행하였으며, 각 단계별 하중분배율은 굴착 후 40%, 연성 슛크리트 및 록볼트 설치 후 70%, 경성 슛크리트 설치 후 100%로 상·하 반단면 똑같이 적용하여 총 12단계로 구성하였다. 필라부 보강은 Table 4와 같이 CASE 1 무보강시와 CASE 2 Tie-Bolt에 의한 보강으로 나누어 안정해석을 실시하였다.

Table 3. Safety factor and minimum pillar width

	TYPE-II		TYPE-III	
	Safety factor	Minimum pillar width (m)	Safety factor	Minimum pillar width (m)
Peck	1.1	1.0	1.0	1.60
Tributary theory	1.3	1.0	1.1	1.0
Matsuda	3.4	1.0	1.9	1.0
Numerical analysis	1.41	1.0	1.24	1.0

**Table 4.** Comparison of reinforced and non-reinforced tunnel pillar

	CASE 1 : Non-reinforced	CASE 2 : Reinforced(Tie-Bolt)
Overview		
Stress mechanism		
Method	Steel fiber shotcrete	Steel fiber shotcrete + Tie-Bolt

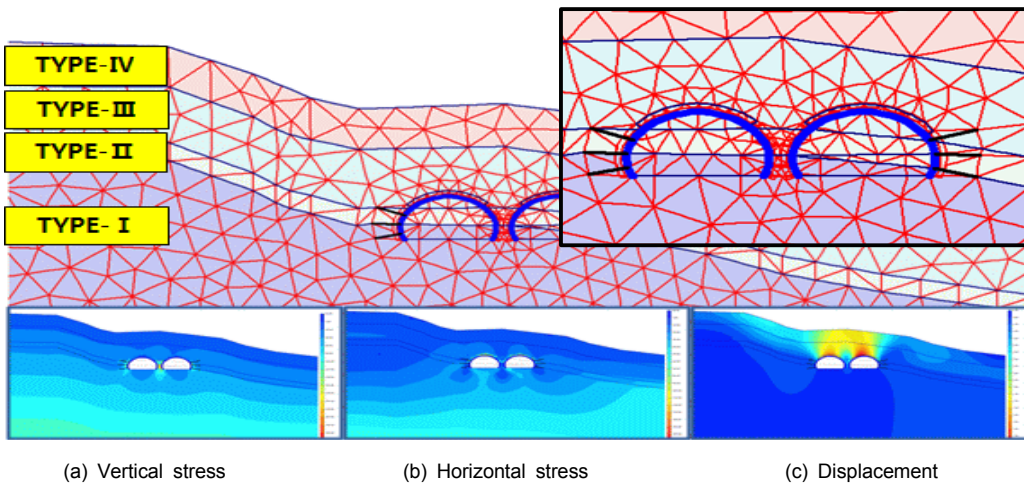
### 3.3 수치해석에 의한 필라부 보강방안 비교

#### 3.3.1 CASE 1: 무보강시

필라부가 기동체 역할로 상부하중을 지지하는 개념으로 암반강도가 크고, 무결암인 경우 안전하나, 터널 발파 시 암반의 손상과 이완하중 증가로 응력집중에

따른 터널 안전성의 유해요인으로 작용된다.

Fig. 5는 Plaxis 2D를 이용하여 수치해석한 결과이며, 모델링 조건은 타이볼트와 록볼트는 anchor, 숏크리트는 Plate로 해석하였다. 암반에 필라부를 무보강했을 때 터널 주변 지반에서축압계수에 따라 수직응력과 수평응력의 크기를 나타냈으며, 필라부를 중심



**Fig. 5.** Numerical analysis modeling and result (K=0.5)

으로 좌우측으로 비대칭의 응력의 차이가 발생하였다. 이는 원 지형이 편측으로 형성된 원인으로 판단되며, 수직 및 수평응력은 측압계수가 클수록 미소하게 응력이 증가하였다. 이는 지형적 요인으로 힘의 불균형에 따른 하중전이 영향요인으로 발생된 것으로 판단된다. 무보강시 필라부에 작용하는 응력은 수직응력과 수평응력의 증분으로 암반 필라부에 작용하는 강도/응력비는 Table 5와 같이 2.49~2.56로 변동 영향은 없는 경향을 타나낸다. 이는 수직응력 증가시

수평 구속응력도 상호 증가되므로 강도비의 증가는 일정하게 형성됨을 알 수 있다.

Table 6과 7은 무보강시의 천단 및 내공변위 결과이며, 터널의 천단침하는 측압계수가 증가 할수록 변위양상은 감소하며, 선행터널보다 후행터널이 천단침하가 크게 발생되었으나, 이러한 차이는 미소한 변위로 실질적인 차이는 거의 없는 것으로 평가되었다. 내공 변위는 측압계수의 증가에 따라 변위양상이 증가하며, 특히 선행터널은 우측벽 보다 좌측벽에서 발생하

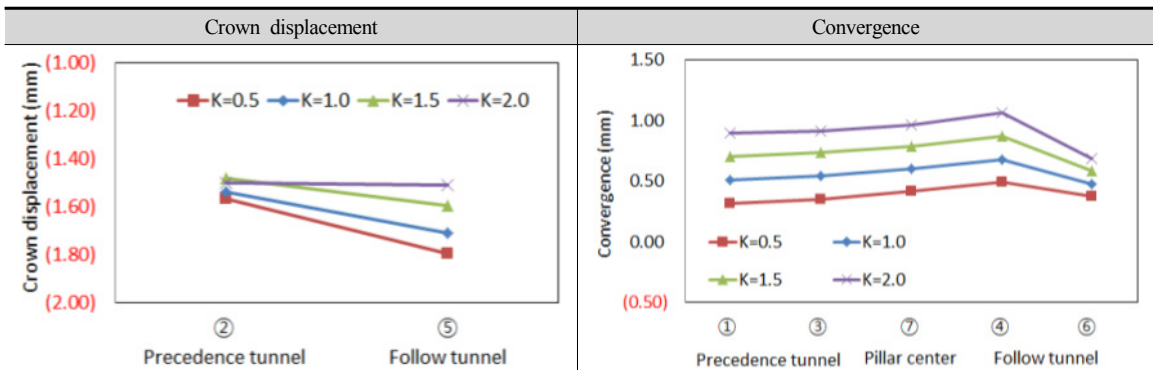
Table 5. Strength/stress ratio result

	Unconfined compressive strength ( $\sigma_m$ )	Slope (K)	Axial stress intensity ( $\sigma_{1r}$ )	Pillar stress (MPa)		Strength/stress ratio
				Vertical stress ( $\sigma_1$ )	Horizontal stress ( $\sigma_3$ )	
K=0.5	4.099	4.200	4.481	1.779	0.091	2.52
K=1.0	4.099	4.200	4.632	1.809	0.127	2.56
K=1.5	4.099	4.200	4.746	1.874	0.154	2.53
K=2.0	4.099	4.200	4.877	1.961	0.185	2.49

Table 6. Result of crown and convergence (Non-reinforced)

	Crown displacement (mm)		Convergence (mm)				
	Precedence tunnel	Follow tunnel	Precedence tunnel		Pillar center	Follow tunnel	
	②	⑤	①	③	⑦	④	⑥
K=0.5	-1.567	-1.792	0.315	0.352	0.414	0.492	0.376
K=1.0	-1.538	-1.710	0.505	0.539	0.598	0.680	0.476
K=1.5	-1.481	-1.592	0.697	0.729	0.785	0.875	0.582
K=2.0	-1.497	-1.511	0.890	0.907	0.963	1.061	0.687

Table 7. Tunnel crown and convergence displacement for K values



는 변위가 크며, 후행터널은 선행터널에 비해 변위양상이 전반적으로 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 이는 편측지형 요인과 필라부의 소성영향 증가요인이라 추정된다.

### 3.3.2 CASE 2: 필라부를 Tie-Bolt로 보강시

필라부에 Tie-Bolt로 보강하는 방법으로 구속압력에 의해 전단강도를 증가시키는 역학적 개념의 보강 방법으로 Tie-Bolt는 연직간격 1.0 m, 수평간격은 록볼트 간격과 동일하게 6개를 설치하였으며, 재원은 SD35 철근 직경 25 mm로 록볼트 재질과 동일하다. Tie-Bolt는 선행터널에서만 굴착 완료 후에 연성숏크리트+록볼트+필라부에 Tie-Bolt를 동시에 설치하는 것으로 해석하였다. Fig. 6은 해석 모델링과 필라부에

Tie-Bolt를 보강하였을 때의 터널 주변 지반의 응력결과이다.

암반 필라부를 Tie-Bolt로 보강했을 때 터널 주변 지반에서의 수직응력과 수평응력의 크기를 나타냈으며, 필라부를 중심으로 좌우측으로 비대칭의 응력의 차이가 발생하였다. 이는 원 지형이 편측으로 형성된 원인으로, 수직 및 수평응력은 측압계수가 클수록 미소하게 응력이 증가하였다. 이는 지형적 요인으로 힘의 불균형에 따른 하중전이에 의한 영향요인으로 수치적 변화가 발생한 것으로 평가되며, Table 8은 필라부에 작용하는 응력에 따른 강도/응력비 검토결과로 측압계수와 관계없이 일정하며, 수직응력 및 수평구속 응력증가로 강도/응력비는 무보강 시 보다 증가함을 알 수 있다.

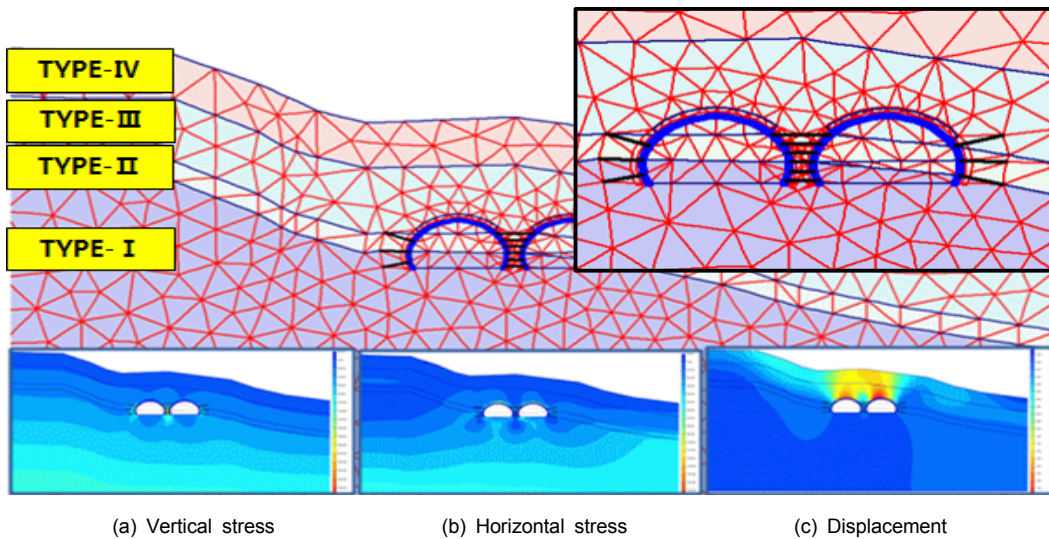


Fig. 6. Numerical analysis modeling and result (K=0.5)

Table 8. Strength/stress ratio result

	Unconfined compressive strength ( $\sigma_m$ )	Slope (K)	Axial stress intensity ( $\sigma_{1F}$ )	Pillar stress (MPa)		Strength/stress ratio
				Vertical stress ( $\sigma_1$ )	Horizontal stress ( $\sigma_3$ )	
K=0.5	4.099	4.200	4.393	1.4574	0.0701	3.01
K=1.0	4.099	4.200	4.442	1.5095	0.0818	2.94
K=1.5	4.099	4.200	4.595	1.5320	0.1182	3.00
K=2.0	4.099	4.200	4.723	1.5662	0.1486	3.02



**Table 9.** Result of crown and convergence (Reinforced with Tie-Bolt)

	Crown displacement (mm)		Convergence (mm)				
	Precedence tunnel	Follow tunnel	Precedence tunnel		Pillar center	Follow tunnel	
	②	⑤	①	③	⑦	④	⑥
K=0.5	-1.592	-1.832	0.390	0.329	0.402	0.489	0.38
K=1.0	-1.595	-1.717	0.676	0.482	0.584	0.679	0.48
K=1.5	-1.543	-1.604	0.961	0.596	0.770	0.871	0.585
K=2.0	-1.547	-1.527	1.230	0.712	0.952	1.06	0.68

**Table 10.** Tendency of tunnel crown and convergence displacement for K values

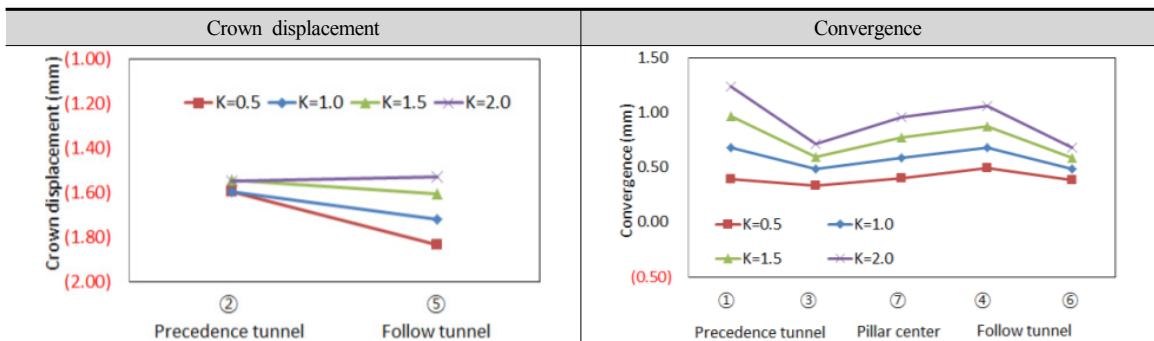


Table 9와 10은 보강시의 천단 및 내공변위 결과이며, 터널 천단침하는 측압계수가 K=0.5~2.0증가 시 변위 양상은 감소하며, 후행터널의 천단침하가 선행터널에 비해 다소 크게 나타나는 것으로 분석되었으나, 이는 선·후행터널의 시공단계에서 선행 굴착후 필라부에 타이볼트 시공시 터널에 미소변위의 영향요인으로 평가된다. 내공변위는 측압계수의 증가에 따라 변위양상이 증가하며, 특히 선행터널은 우측벽보다 좌측벽에서 발생하는 변위가 크며, 후행터널은 선행터널에 비해 변위양상이 전반적으로 크게 나타났다. 이는 편측지형과 필라부의 소성영역 증가 영향요인으로 추정된다.

### 3.3.3 보강방안 검토결과

수치해석 방법으로 터널의 역학적 거동을 비교 평가 시 최소 필라폭을 선정할 수 있는 조건으로는 암질, 암반강도, 상부 하중 등에 따라 터널 안전에 영향을

미치는 것으로 평가된다. CASE 1인 무보강 시와 CASE 2인 보강 시를 비교한 결과 필라부의 강도/응력비(=안전율)는 보강 시 무보강 시보다 약 17%정도의 강도/응력비(안전율)가 증가되는 것으로 평가되었다.

천단변위는 측압계수 증가 시 후행터널이 선행터널에 비해 다소 변위가 증가하며, 내공변위는 편토압의 지형적 요인으로 인하여 선행터널에서 후행터널 방향으로 변위의 증분이 발생되나 후행터널 시공시 응력의 재분배로 최외측의 변위는 측압증가와 편토압의 응력 감소로 내공변위의 증감 양상이 크지 않는 것으로 평가된다. 따라서 필라부의 CASE 1 무보강시와 CASE 2 보강 시로 나누어 역학적 거동에 대한 수치해석기법을 이용하여 평가할 때, 지반조건이 매우 양호한 TYPE-1의 조건으로 무보강시에도 터널 필라의 안전조건 1.0이상을 만족하는 것으로 평가되었으나, 실제 터널 굴착 시 발파 및 이완하중, 지반의 불확실한 요인 등에 따라 필라부의 손상영역을 고려한 보강이

이루어져야 한다. 특히, 산악터널에서 터널 간 필라폭이 2.0 m 이내로 시공된 사례는 극히 드물어 효율적인 보강을 통해 안전한 터널 계획이 필요하므로, CASE 2에 제시된 Tie-Bolt에 의한 필라보강은 연직하중 분산과 필라부 구속력을 증가시켜 원지반 강도증진 효과로 안전한 터널계획이 가능한 것으로 평가되었다.

#### 4. 현장계측에 의한 검증

터널의 거동과 지보체계의 기능은 시공 전 사전지반조사 및 시험자료를 바탕으로 안정한 지보공법을 계획하나, 이에 적용된 매개 변수가 그 결과에 미치는 영향은 절대적이라 할 수 있다. 시공 중의 지질상황을 계측으로 확인하고, 해석기법에 의한 결과와 비교분석하여 실제 현장에 맞도록 수정 보완하여 가장 효과적이며 안정된 시공을 도모하여야 한다. 본 연구에서는 수치해석 기법을 이용하여 CASE 2의 터널 거동에 대해 현장 터널시공에 따른 계측활동 자료와 상호

비교하여 터널의 안전성을 변위의 수렴상태로 평가하였다. 현장계측의 조건은 숏크리트 두께 25 cm, 압축강도 27 Mpa, 록볼트 길이 4.0 m (C.T.C = 1.5 m)로 수치해석과 동일한 조건으로 계측하였다.

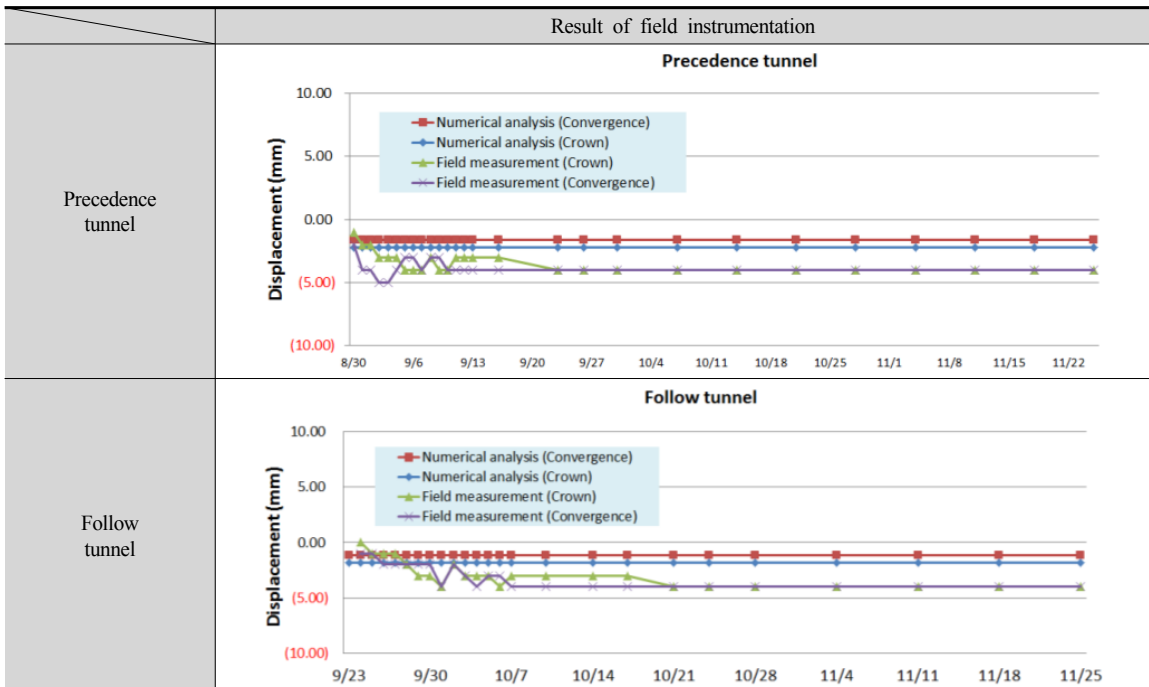
#### 4.1 현장계측

CASE 2에 의한 필라부 보강사례로 경험식 및 수치해석 기법에 의해 연구가 진행된 터널 주변 지반에 작용하는 천단 및 내공 변위를 기준으로 현장 계측활동과 비교 분석하므로 터널의 안전성을 확인할 수 있었다. Table 11은 구간별로 수치해석과 현장계측 결과를 비교하여 나타낸 데이터이다.

#### 4.2 검토결과

계측결과로 천단 및 내공변위는 전반적으로 필라폭에 관계없이 측정오차 범위 내에서 미소한 변동(천단

Table 11. Field instrumentation data with numerical analysis



최대 4 mm, 내공변위 5.0 mm 이내)을 하나, 현 계측 종료일 기준 시 변위는 수렴상태를 나타내고 있어 수치해석 결과와 비교한 결과, 변위에 대한 값은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 터널 전체 안전성은 지반의 불확실성 등 요인의 미지수로 인하여 터널의 안전성을 판단하기는 어려우나, 지속적인 계측활동에 통하여 변위 및 응력의 수렴여부를 확인 할 수 있는 Feed back이 필요하며, 이로 인한 터널의 장기적인 안전평가가 필요하다.

## 5. 결론

본 논문은 산악지 터널에서 암반 필라(pillar)부에 작용하는 외력에 대한 이격거리별 경험식과 수치해석적 기법을 활용하고, 근접터널의 암반 필라(pillar)부의 보강방안에 따라 터널의 역학적 거동을 분석과 현장 계측결과로 터널 안전성을 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최소 필라폭 결정을 위한 경험식과 수치해석결과 비교 시 전반적으로 수치해석 기법에 의한 강도/응력비가 기준안전율(1.0)보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 이는 수치해석 시 필라부에 작용하는 응력이 하중전이(load transfer) 되는 현상으로 발생 응력이 작게 작용하는 요인으로 추정된다.
2. 필라부의 지반조건(암반강도, 암질상태, 절리 등)에 따라 터널 안전성을 확보할 수 있으나, 실제 터널 굴착시 발파로 인한 지반이완 및 필라부의 이상 응력집중, 손상 등에 의한 국부적인 진행성 파괴가 발생할 수 있다.
3. 산악터널에서 터널 간 필라폭이 2.0 m 이내로 시공된 사례는 극히 드물어 효율적인 보강을 통해 안정적인 터널 계획이 필요하므로, CASE 2에 제시된 Tie-Bolt에 의한 필라보강은 연직하중을 분산시켜 안정적인 근접병렬터널 계획이 가능하다.
4. 현장 계측결과와 수치해석을 통한 예측치는 발생

변위에 대해 다소 차이는 있으나, 시간경과에 따라 수렴상태로 터널의 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

5. 터널 전체 안전성은 지반의 불확실성 등 요인의 미지수로 인하여 터널의 안전성을 판단하기는 어려우나 지속적인 계측활동에 통하여 변위 및 응력의 수렴여부를 확인 할 수 있는 Feed back이 필요하며, 이로 인한 터널의 장기적인 안전평가가 필요하다.
6. 본 연구를 통하여 터널의 필라폭은 지반조건에 따라 최소로 좁힐 수 있으며, 이로 인해 터널간 간섭으로 필라부 응력집중과다 요인이 되나, 터널 굴착 시 필라부 손상을 최소화 방안과 적절한 보강을 통하여 안정적인 터널이 가능하며, 현장 계측활동을 통하여 안전성 부분을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 연구의 방향은 국토의 효율적 활용을 위해 터널 필라의 손상을 최소화 할 수 있는 기술개발과 지속적인 연구가 진행되어야 한다.

## 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. Hoek, E.I., Brown, E.T. (1980), "Underground excavations in rock, the institution of mining and metallurgy", London, pp. 113, pp. 527
2. Hoek, E.I., Brown, E.T. (1997), "Practical estimates of rock mass strength", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No. 8, pp. 1,165-1,186.
3. Kim, D.S., Kim, Y.G. (2007), "A study on the stability analysis for asymmetry parallel tunnel with rock pillar", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 387-401.
4. Lee, M.H., Kim, B.j., Jang, Y.S., Yun, J.N., Park, H.G. (2013), "Behavior and pillar stability of enlarged existing parallel tunnels", Journal of Korean Tunnelling

- and Underground Space Association, Vol. 15, pp. 537-546.
5. Matsuda, T., Toyosato, E., Igarashi, M., Nashimoto, Y., Sugiyama, T. (1997), "A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method", Proceeding of Studies on Tunnel Engineering, Vol. 7.
  6. Peck, R.B. (1969), "Deep excavation and tunneling in soft ground", Proc. 7th International Conferences, Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 225-290.
  7. Plaxis (2002), Ver. 8.2, PLAXIS BV, (2002), The Netherlands.
  8. Sin, Y.W., Kim, Y.G. (2010), "Review of mechanical behaviors of pillar in large parallel tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 131-144.