

## 대각선 병설터널 굴착에 따른 응력과 변위특성

### The Characteristics of Stress and Displacement due to the Diagonal Parallel Tunnel Excavation

김 영 수<sup>†</sup> · 박 송 자<sup>1)</sup>

Kim, Youngsu · Pack, Songja

**ABSTRACT :** In this paper it was focused on the characteristics of displacement and stress due to the construction of diagonal twin tunnel. In this research, the characteristics have been analyzed with the presumption that the tunnel's diameter (D) is 13m and the ground was formed by weathered rock. In analysis, the width of pillar is 2.0D, 2.5D, 3.0D, the height of soil cover is 3D, 4D, 5D, and the installation angle of diagonal twin tunnel has been changed into 15°, 30°, 45°. And the program used in this analysis is FLAC which is widely used in solution problems of ground engineering in order to gain and analyze occurring shotcrete and rockbolt stress and nearby ground displacement according to pillar width, the height of soil cover and installation angle of diagonal twin tunnel. As a result, in the weathered rock grounds, when the width of pillar is more than 2.0D, the height of soil cover is over 5.0D, and the installation angle of diagonal twin tunnel is lower, they lessen effects on the ground and favorable on the stability of tunnel.

**Keywords :** Diagonal, Parallel tunnel, Characteristics of stress

**요 지 :** 본 연구는 대각선 병설터널의 건설로 인한 응력과 변위 특성을 연구하였다. 이 연구에서 그 특성들이 터널의 직경(D)는 13m 그리고 지반은 풍화암으로 가정하여 해석하였다. 해석에서 pillar 폭은 2.0D, 2.5D, 3.0D, 토피고는 3D, 4D, 5D, 그리고 대각선 병설터널의 설치각도 15°, 30°, 45°로 변화시켰다. 그리고 해석에 사용한 프로그램은 지반 공학적 문제해석에 널리 사용되고 있는 FLAC을 사용하여 발생하는 슛크리트 및 록볼트 응력과 주변지반 변위를 대각선 병설터널의 pillar 폭, 토피고, 그리고 설치각도에 따라 구하고 분석하였다. 그 결과 풍화암 지반에서는 pillar 폭 2.0D이상, 토피고 5.0D이상, 그리고 대각선 병설터널의 설치각도가 적을수록 주변 지반에 영향을 덜 미치고 터널의 안정에 유리한 것으로 나타났다.

**주요어 :** 대각선, 병설터널, 응력특성

## 1. 서 론

최근 대도시의 성장과 더불어 사회기반시설과 각종 편의 시설 등에 대한 지하 공간 사용이 급격히 증가하고 있는 실정이다. 그 동안 도심지에서 터널시공 기술과 교통이 제한되어 있었기 때문에 양방향 교통의 단일 터널이 시공되었다. 교통체증을 피하기 위하여 단일 터널에 대하여 그리고 대규모 단면의 터널이 시공되고 있다. 그러나 대규모 단면의 터널 시공에 대한 기술, 굴착된 토사 및 암반의 버력 그리고 주변에 미치는 영향이 병설터널 시공보다도 크므로 요즘 두개의 작은 단면의 일 방향 터널이 더 선호되고 있다. 터널을 2개 이상 병설로 시공하는 경우 터널의 단면크기와 굴착대상 지반의 공학적 특성을 감안하여 터널 굴착공사로 인하여 주변지반에 영향을 미치지 않도록 시공되어야 할 것이다. 국내에서 박지용(2004)은 병설터널 굴착에 따른 주변지반의 변형거동에 관한 연구로 pillar 폭과 지반조건에 따

른 터널의 변형거동을 연구하였다. 정재우(1996)는 토피고와 pillar 폭에 따른 쌍굴터널 시공 중 주변지반의 거동에 관한 연구를 하였다. 장부식(2006)은 근접 병설터널 pillar의 거동특성 평가에 관한 연구를 하였다. 김종우 등(2004)은 축소모형 실험을 수행하였으며 김학문(1997)은 쌍굴터널 시공 중 주변지반의 거동에 관한 연구를 하였다. 국외에서는 Addenbrooke과 Potts(1996)는 병설터널에 대하여 수치해석방법을 통하여 수평병설터널 및 수직병설터널의 지표침하형태를 고찰하였다. Ng 등 (2004)은 단단한 점토지반에 건설된 병설터널 사이의 상호작용을 평가하기 위하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

Dhar 등(1981)은 일축하중 하에서 다른 방향과 위치에 있는 병설터널의 파괴 메커니즘을 연구하기 위하여 모형시험을 수행하였다.

Adachi 등(1993)은 여러 개의 터널 사이의 상호작용을 이해하기 위하여 모형시험을 수행하였다. Wu 등(2004)은 좁

† 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 교수(kimysu@knu.ac.kr)

1) 비회원, 한국건설안전관리공단 기술사

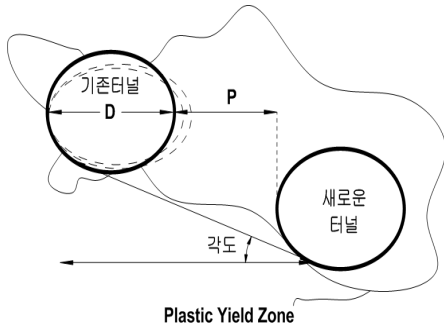


그림 1. 대각선 병설터널 사이의 상호 거동

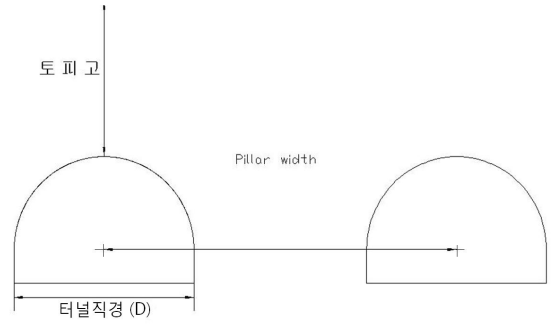


그림 2. 수치해석 단면

은 간격의 병설터널에서 발파와 계측을 통한 진동제어의 효과를 연구하였다.

상기 논문들은 대부분 병설터널에 관한 연구들이다. 대각선 병설터널의 설계와 시공 시 기본적으로 검토되어야 할 사항은 두 터널의 기하학적 위치 즉, 경사각, pillar 폭(P), 그리고 토피고 등이 있을 것이다. 그러므로 대각선 병설터널의 설계와 시공에 많은 도움이 될 역학적 메커니즘과 상호작용에 대한 연구가 요구되고 있다.

## 2. 연구내용 및 범위

병설터널은 상행과 하행터널이 수평으로 배치된 국내 터널의 가장 보편적인 형태이지만 병설터널의 pillar 폭, 토피고를 충분히 확보하지 못하여 안정에 문제가 발생하는 경우가 종종 발생하고 있다.

그림 1에서와 같이 두 터널의 영향범위가 중첩된다면 두 터널 사이에는 상호 거동이 발생할 것이다.

본 연구는 대각선 병설터널의 합리적인 설계와 시공이 이루어질 수 있도록 하기 위하여 pillar 폭, 토피고, 그리고 설치각도에 따라 발생하는 슛크리트 및 록볼트 응력과 주변 지반 변위를 연구하였다.

본 연구에서는 터널의 직경(D)는 13m 그리고 지반은 풍화암으로 가정하였다. pillar 폭은 2.0D, 2.5D, 3.0D, 토피고는 3D, 4D, 5D, 그리고 대각선 병설터널의 설치각도는 15°, 30°, 45°로 변화시켜 해석하였다. 그리고 슛크리트 및 록볼트 응력과 주변지반 변위를 대각선 병설터널의 pillar 폭, 토피고, 그리고 설치각도에 따라 비교 분석하였다.

## 3. 수치해석

### 3.1 해석 단면 및 경계조건

본 연구에서 수치해석은 지반 공학적 문제해석에 널리 사용되고 있는 상용프로그램인 FLAC을 사용하였다. 그리고 탄소성모형을 적용하였으며, 해석 단면은 그림 2와 같은 경계조건은 좌우 측벽과 하부 모두 3D로 가정하였다.

### 3.2 해석에 사용된 입력자료

본 연구의 터널해석에서 지반조건은 경주지역의 화강 풍화암에 대한 각종 자료를 참고하여 표 1과 표 2와 같은 입력 자료를 적용하였다. 그리고 표 3과 같이 대각선 병설터널의 pillar 폭, 토피고, 그리고 설치각도에 따라 해석하였다.

표 1. 지반 입력 물성

지반	단위 중량 $\gamma(t/m^3)$	탄성 계수 $E(t/m^2)$	포아송비 (v)	점착력 $C(t/m^2)$	내부 마찰각 $\phi(\text{degree})$	측압계수 (k)
풍화암	2.10	20,000	0.33	2	35	0.49

표 2. 지보부재의 기본 물성

구분	탄성 계수 $E(t/m^2)$	단면적 ( $m^2$ )	포아송비 v	단면2차모멘트 ( $m^4$ )	항복강도	K	S
shot crete	soft shot crete	$5 \times 10^5$	0.15	$2.81 \times 10^{-4}$	-	-	-
	hard shot crete	$1.5 \times 10^6$	0.15	$2.81 \times 10^{-4}$	-	-	-
rock bolt	$2.1 \times 10^7$	$5.067 \times 10^{-4}$	-	-	171.5	$1.37 \times 10^7$	590

표 3. 해석 내용

Pillar 폭	2D, 2.5D, 3D
토 피 고	3D, 4D, 5D
경사 각도	15°, 30°, 45°

### 3.3 하중분담률

지반은 깊이에 따라 균등하게 증가하는 응력을 내재하고 있다. 이러한 초기 지중 응력을 갖는 지반에 공동 등을 시공하여 교란시키게 되면 공동주위의 응력이 매우 증가하게 되며 공동 주위로 응력의 협재가 발생하게 된다. 터널막장에서 3차원적인 응력과 하중조건은 막장부분과 굴착된 터널 주변지반의 강성과 매우 밀접한 관계가 있으며 지반강성은 굴착 면에서 가까울수록 감소되어 완전히 굴착된 곳에는 없다. 이런 지반응력과 하중조건에 대한 지반강성의 영향력을 이해함으로써 모형의 단순화를 기할 수 있다. 표 4는 본 연구에서 적용된 굴착 단계별 각각의 하중분담률이다.

표 4. 시공순서 및 하중분담률

해석단계	시공순서	하중 분담률 (%)	단면형상	
0	원지반 (초기응력상태)	-		
1	1차터널 상반굴착	40		
2	1차터널 soft s/c+r/b	70		
3	1차터널 hard s/c	100		
4	1차터널 하반굴착	40		
5	1차터널 soft s/c+r/b	70		
6	1차터널 hard s/c	100		
7	2차터널 상반굴착	40		
8	2차터널 soft s/c+r/b	70		
9	2차터널 hard s/c	100		
10	2차터널 하반굴착	40		
11	2차터널 soft s/c+r/b	70		
12	2차터널 hard s/c	100		

### 3.4 축압계수의 선정

지반 내 임의의 한 점에 작용하는 초기응력의 크기를 직각좌표로 표시하여 연직성분을  $\sigma_z$ , 이에 직각되는 방향의 수평응력성분을 각각  $\sigma_x, \sigma_y$ 라 하면 암반의 포아슨비( $\nu$ )를 고려 다음과 같은 식으로 표기된다.

$$\sigma_z = \rho gh = \gamma h \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z = K\sigma_z \quad (2)$$

위의 식에서 축압계수는  $K = \frac{\nu}{1-\nu}$  식을 이용하여 산정하였다.

### 3.5 지보의 적용

수치해석에 있어서 해석 결과는 슛크리트 및 락볼트 등의 지보재에 발생하는 응력에 따라 많은 차이를 보일 수 있으므로 지보의 모델링에도 세심한 주의가 요구된다. 일반적으로 지보는 주변 지반과 같이 연속체 요소로 모델링하는 방법, beam 요소 혹은 truss 요소와 같은 구조 요소로 모델링하는 방법, 주변 지반의 물성치를 향상시키는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 두 번째 방법을 선정하였다. 이 방법을 적용할 경우 지보 설계에 필요한 부재력이 자동적으로 출력되며, 절점수 또한 증가하지 않는다는 이점이 있다.

## 4. 수치해석 결과

### 4.1 슛크리트 응력

#### 4.1.1 Pillar 폭에 따른 영향

그림 3은 pillar 폭 2.0D, 2.5D 그리고 3.0D에 따른 최대

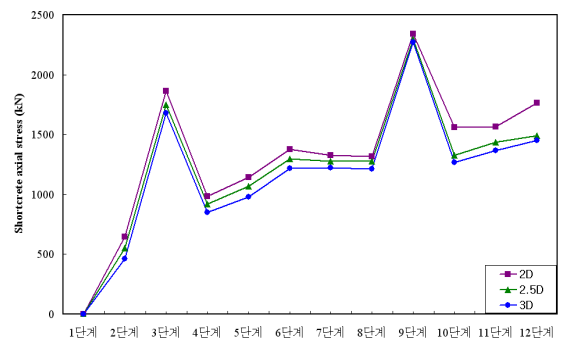
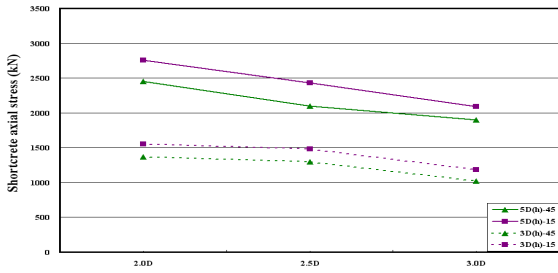
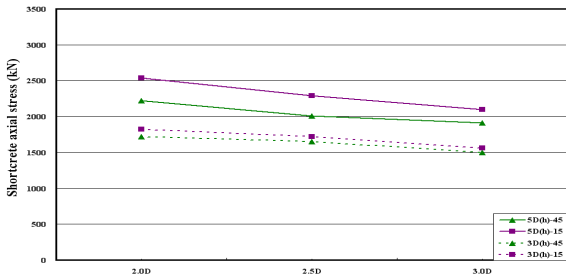


그림 3. pillar 폭에 따른 단계별 슛크리트 응력

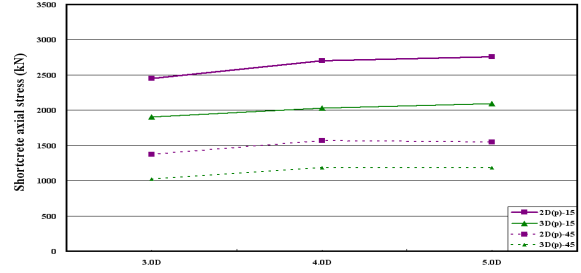


(a) 1차터널 굴착 후 (3단계)

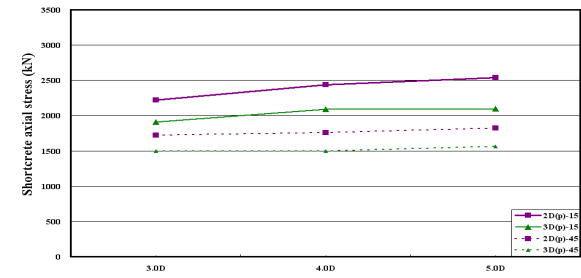


(b) 2차터널 굴착 후 (9단계)

그림 4. pillar 폭에 따른 숏크리트 최대응력



(a) 1차터널 굴착 후 (3단계)



(b) 2차터널 굴착 후 (9단계)

그림 6. 토포고에 따른 숏크리트 최대응력

숏크리트 응력을 12단계로 나타내고 있다. 그림 3에서와 같이 3단계는 약 1,750kN까지 상승 후 4단계에 하강을 하여, 다시 4단계에서 8단계까지 소폭으로 상승을 거쳐서 9단계 (약 2,300kN)에 급상승 후에 9단계에서 10단계까지 다시 급하강을 한 뒤에 10단계에서 12단계까지 소폭으로 상승을 하였다. 그림 4는 pillar 폭에 따른 3단계와 9단계의 최대 숏크리트 응력을 보여주고 있다.

#### 4.1.2 토포고에 따른 영향

그림 5에서 토포고 3D, 4D, 그리고 5D에 따른 최대 숏크리트 응력을 12단계로 나타내고 있다. 그림 5도 그림 3과 거의 같은 경향을 나타냈으며 3단계와 9단계에서 최대 숏크리트 응력은 각각(약 1,900kN, 약 2,400kN)으로 나타났다. 그림 6은 토포고에 따른 3단계와 9단계에서 최대 숏크리트 응력을 보여주고 있다.

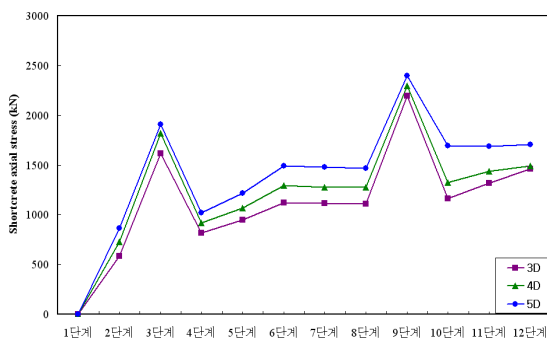


그림 5. 토포고에 따른 단계별 숏크리트 응력

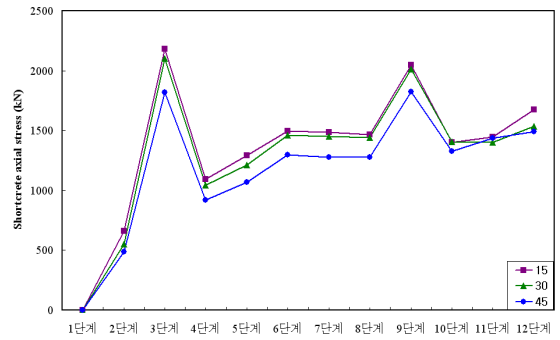
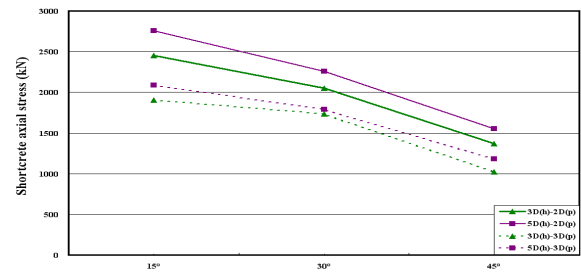
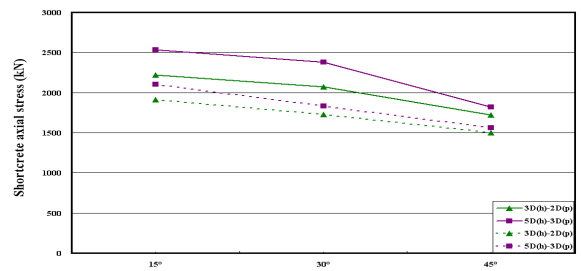


그림 7. 경사각도에 따른 단계별 숏크리트 응력



(a) 1차터널 굴착 후 (3단계)



(b) 2차터널 굴착 후 (9단계)

그림 8. 경사각도에 따른 숏크리트 최대응력

### 4.1.3 경사각도에 따른 영향

그림 7에서는 경사각도 15°, 30° 그리고 45°에 따른 슛크리트 응력을 12단계로 나타내고 있다. 그림 7도 그림 3, 그림 5와 거의 같은 경향을 나타냈으며 3단계와 9단계에서 슛크리트 응력은 각각(약 2,300kN, 약 2,000kN)로 나타났다. 그림 8은 경사각도에 따른 3단계와 9단계에서 슛크리트 응력을 보여주고 있다.

## 4.2 락볼트 응력

### 4.2.1 Pillar 폭에 따른 영향

그림 9는 pillar 폭 2D, 2.5D, 그리고 3D에 따른 최대 락볼트 응력을 12단계로 나타내고 있다. 그림 9에서와 같이 최대 락볼트 응력이 2단계에서부터 4단계까지 응력이 점차 급상승하고, 4단계에서 9단계까지 일정 응력으로 유지가 되다가, 9단계에서 10단계까지 다시 한번 상승하여 11단계부터 응력이 수렴되었다.

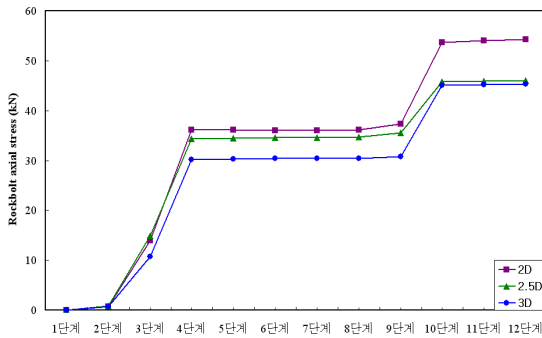


그림 9. Pillar 폭에 따른 단계별 락볼트 응력

그림 10은 6단계와 12단계의 최대 락볼트 응력을 나타내고 있다.

### 4.2.2 토피고에 따른 영향

그림 11은 토피고 3D, 4D, 그리고 5D에 따른 최대 락볼트 응력을 12단계로 나타내고 있다. 그림 11에서도 그림 8과 같은 경향을 보여주고 있으며 6단계와 12단계의 최대 락볼트 응력은 각각 40kN, 60kN으로 나타났다. 그림 12는 6단계와 12단계의 최대 락볼트 응력을 나타내고 있다.

### 4.2.3 경사각도에 따른 영향

그림 13은 경사각도 15°, 30° 그리고 45°에 따른 최대 락볼트 응력을 12단계로 나타내고 있다. 그림 13도 그림 9, 그림 11과 거의 같은 경향을 나타냈으며 6단계와 12단계에서 최대 락볼트 응력은 각각 35kN, 45kN으로 나타났다. 그림 14는 6단계와 12단계의 최대 락볼트 응력을 나타내고 있다.

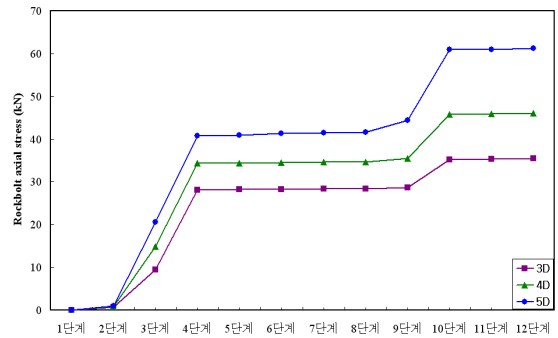
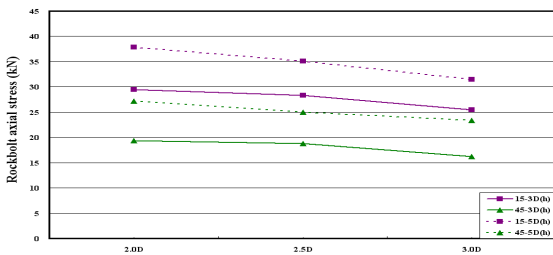
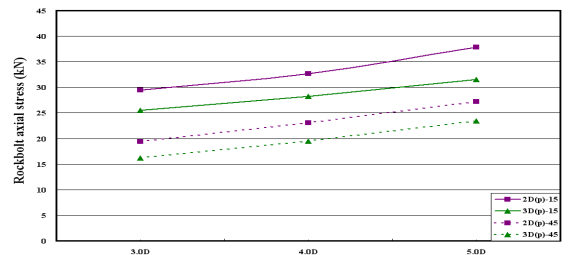


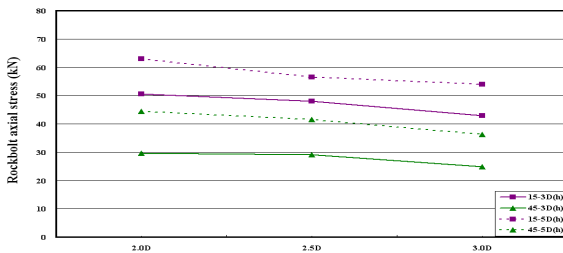
그림 11. 토피고에 따른 단계별 락볼트 응력



(a) 1차터널 굴착 후 (6단계)

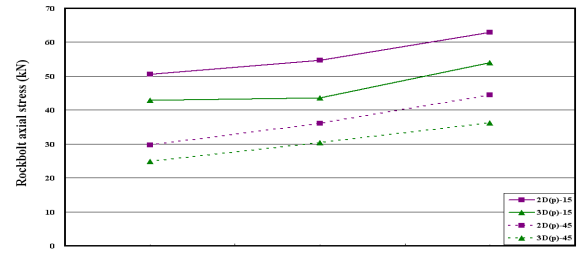


(a) 1차터널 굴착 후 (6단계)



(b) 2차터널 굴착 후 (12단계)

그림 10. pillar 폭에 따른 락볼트 최대응력



(b) 2차터널 굴착 후 (12단계)

그림 12. 토피고에 따른 락볼트 최대응력

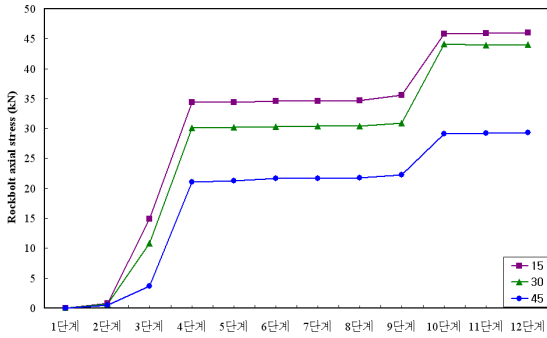


그림 13. 경사각도에 따른 단계별 락볼트 응력

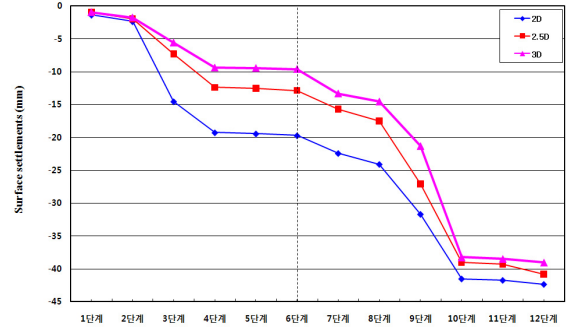
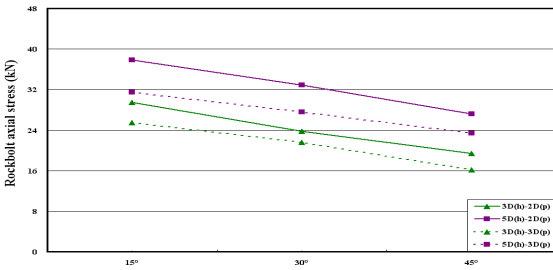
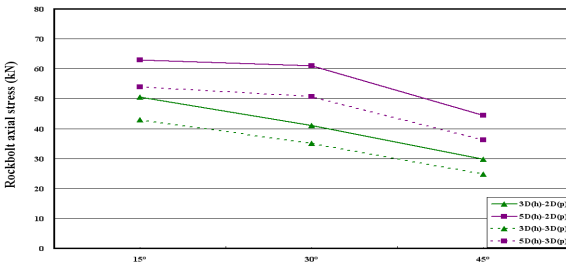


그림 15. Pillar 폭에 따른 단계별 최대 지표침하

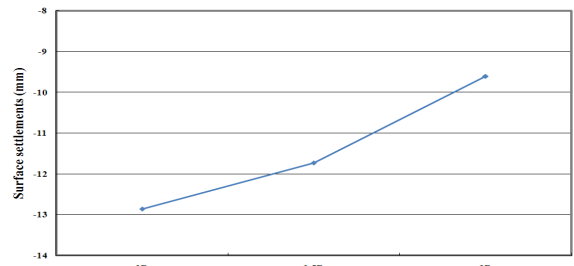


(a) 1차터널 굴착 후 (6단계)

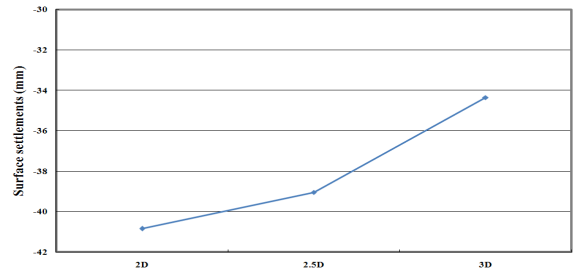


(b) 2차터널 굴착 후 (12단계)

그림 14. 경사각도에 따른 락볼트 최대응력



(a) 1차터널 굴착 시(6단계)



(b) 2차터널 굴착 시(12단계)

그림 16. Pillar 폭에 따른 최대 지표침하

### 4.3 지표침하

#### 4.3.1 Pillar 폭에 따른 영향

그림 15는 pillar 폭 2D, 2.5D, 그리고 3D에 따른 단계별 최대 지표침하를 나타내고 있다. 그림 15에서와 같이 2단계에서 4단계까지 급격히 증가하였고 4단계에서 6단계까지 거의 변화가 없었다. 그리고 6단계에서 8단계까지 완만하게, 8단계에서 10단계까지 급격히 증가하였고 10단계에서 12단계까지는 거의 변화가 없었다. 표 5와 그림 16은 pillar 폭에 따른 6단계와 12단계의 최대 지표침하이며 12단계의

표 5. Pillar 폭에 따른 최대 지표침하(mm)

pillar 폭	단계		
	6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)
2.0D	13	41	32
2.5D	12	39	31
3.0D	10	34	29

최대 지표침하는 2.0D일 때 41, 2.5D는 39, 그리고 3.0D는 34mm로 나타났다. 최대 지표침하 12단계에 대한 6단계의 비는 각각 32, 31 그리고 29(%)로 나타났다.

#### 4.3.2 토피고에 따른 영향

그림 17은 토피고 2D, 2.5D, 그리고 3D에 따른 단계별 최대 지표침하를 나타내고 있다. 그림 17은 그림 15와 거의 같은 경향을 나타냈다. 표 6과 그림 18은 토피고에 따른 6단계와 12단계의 최대 지표침하이며 12단계의 최대 지표침하는 3.0D일 때 33, 4D는 41, 그리고 5.0D는 54mm로 나타났

표 6. 토피고에 따른 최대 지표침하(mm)

토피고	단계		
	6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)
3.0D	11	33	33
4.0D	13	41	32
5.0D	16	54	30

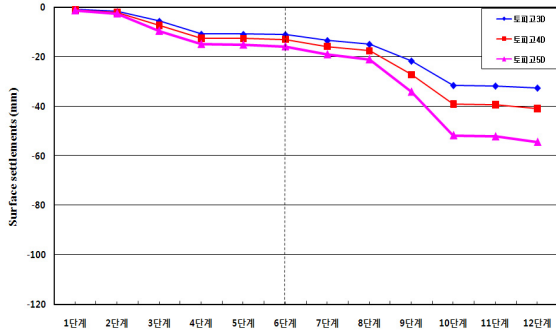


그림 17. 토피고에 따른 단계별 최대 지표침하

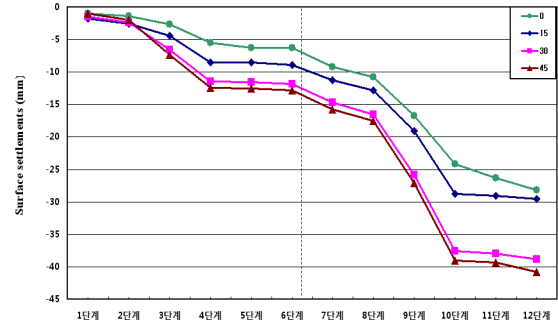
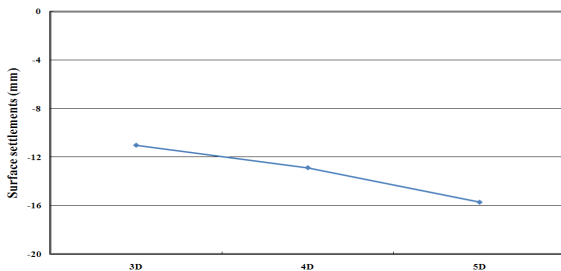
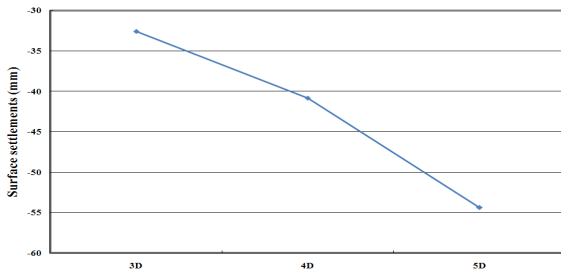


그림 19. 경사각도에 따른 단계별 최대 지표침하

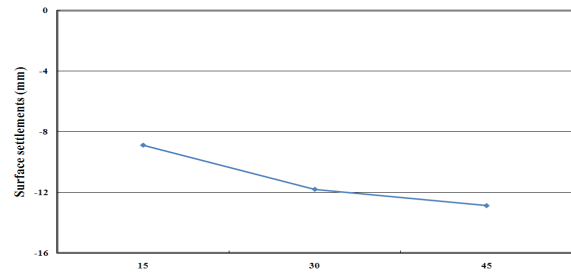


(a) 1차터널 굴착 시(6단계)

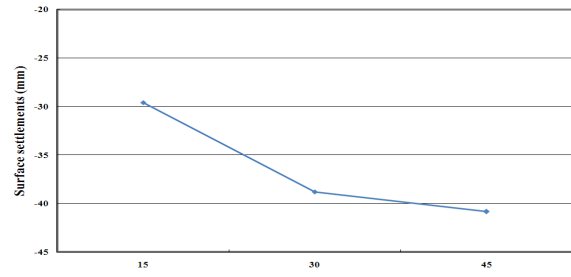


(b) 2차터널 굴착 시(12단계)

그림 18. 토피고에 따른 최대 지표침하



(a) 1차터널 굴착 시(6단계)



(b) 2차터널 굴착 시(12단계)

그림 20. 경사각도에 따른 최대 지표침하

다. 최대 지표침하 12단계에 대한 6단계의 비는 각각 33, 32 그리고 30(%)로 나타났다.

#### 4.3.3 경사각도에 따른 영향

그림 19는 경사각도 0°, 15°, 30° 그리고 45°에 따른 최대 지표침하를 나타내고 있다. 그림 19는 그림 15, 17과 거의 같은 경향을 나타냈다. 표 7과 그림 20은 경사각도 0°, 15°, 30° 그리고 45°에 따른 6단계와 12단계의 최대 지표침하이 며 12단계의 최대 지표침하는 각각 28, 30, 39, 그리고

표 7. 경사각도에 따른 최대 지표침하(mm)

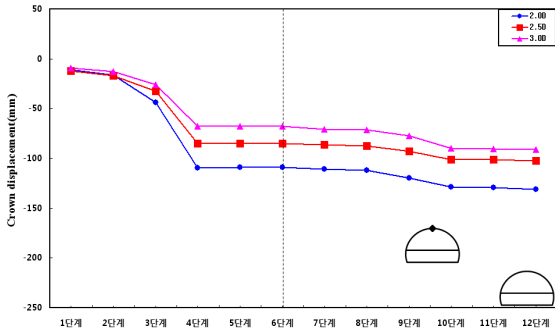
경사각도 \ 단계	6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)
0°	6	28	21
15°	9	30	30
30°	12	39	31
45°	13	41	32

41mm로 나타났다. 최대 지표침하 12단계에 대한 6단계의 비는 각각 21, 30, 31, 그리고 32(%)로 나타났다.

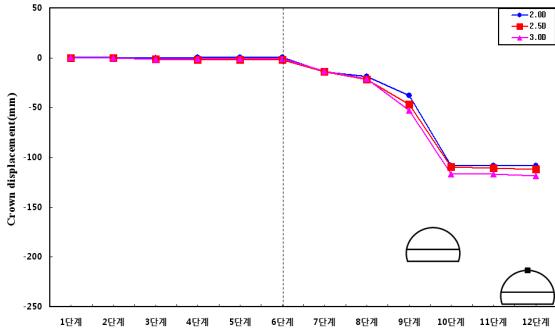
#### 4.4 천단침하

##### 4.4.1 Pillar 폭에 따른 영향

그림 21은 pillar 폭 2D, 2.5D, 그리고 3D에 따른 천단침하를 나타내고 있다. 그림 21에서와 같이 pillar 1차 터널(좌측)은 1단계에서 3단계까지 천단침하는 완만하게 증가하였으며, 3단계에서 4단계는 급격히 증가하였다. 그리고 4단계 이후부터 7단계까지 변화가 없었다. 7단계 이후부터 10단계 까지 약간 증가를 하다가, 10단계 이후부터 거의 변화가 없었다. 2차 터널(우측)은 1단계에서 6단계까지 거의 변화가 없었다. 6단계에서 9단계는 완만하게 증가하였고 9단계에서 10단계는 급격히 증가하였다. 그리고 10단계 이후부터 12단계까지 변화가 없었다.

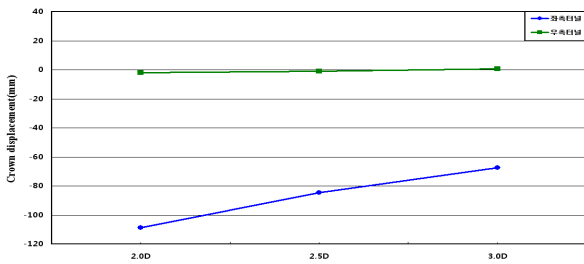


(a) 좌측터널

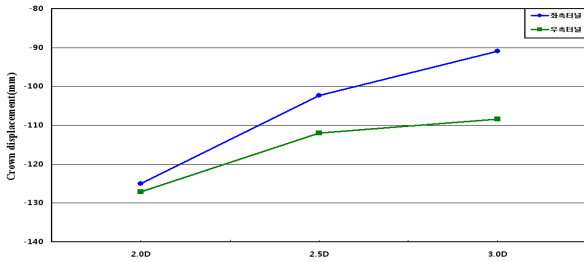


(b) 우측터널

그림 21. Pillar 폭에 따른 단계별 천단침하



(a) 1차터널 굴착 시(6단계)



(b) 2차터널 굴착 시(12단계)

그림 22. Pillar 폭에 따른 천단침하

표 8. Pillar 폭에 따른 천단침하(mm)

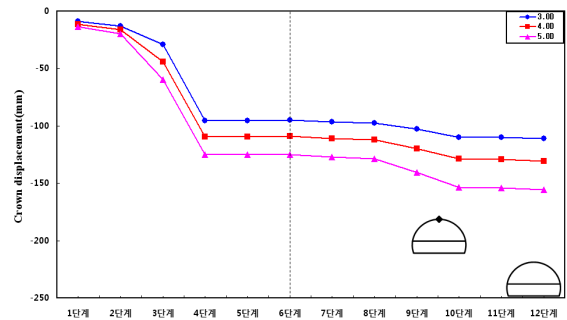
pillar 폭	단계		
	6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)
2.0D	109	131	83
2.5D	85	102	83
3.0D	68	91	75

표 8과 그림 22는 pillar 폭 2D, 2.5D, 그리고 3D에 따른 6단계와 12단계의 천단침하이며 12단계의 천단침하는 각각 131, 102, 그리고 91mm로 나타났다. 천단침하 12단계에 대한 6단계의 비는 각각 83, 82, 그리고 75(%)로 나타났다.

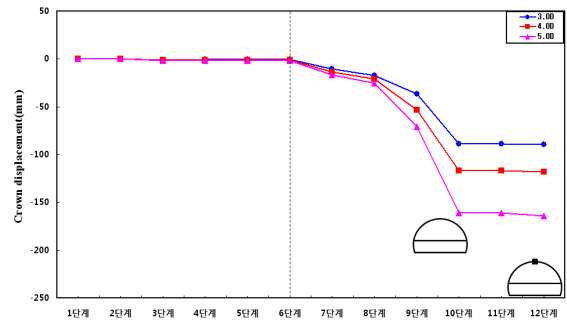
#### 4.4.2 토피고에 따른 영향

그림 23은 토피고 3D, 4D, 그리고 5D에 따른 천단침하를 나타내고 있다. 그림 23에서 1차 터널(좌측)은 1단계에서 3단계까지 완만하게 증가하였으며, 3단계에서 4단계는 급격히 증가하였다. 그리고 4단계부터 6단계까지 거의 변화가 없었다. 6단계부터 8단계까지 거의 변화가 없다가, 8단계부터 10단계까지 침하는 약간 증가하였고 10단계 이후부터 거의 변화가 없었다.

2차 터널(우측)은 1단계에서 6단계까지 거의 변화가 없었다. 6단계에서 9단계는 완만하게 증가하였고 9단계에서 10단계는 급격히 증가하였다. 그리고 10단계 이후부터 12단계까지 변화가 없었다.



(a) 좌측터널



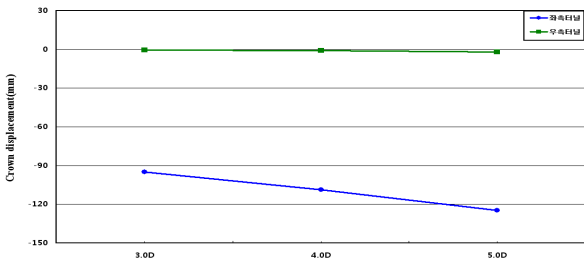
(b) 우측터널

그림 23. 토피고에 따른 천단침하

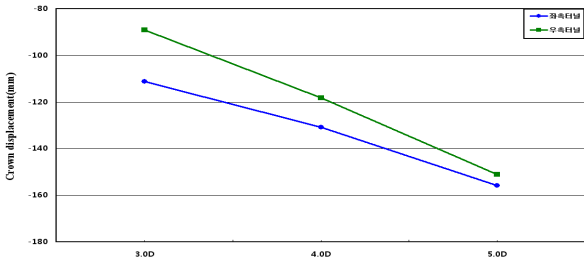
표 9. 토피고에 따른 천단침하(mm)

토피고	단계		
	6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)
3.0D	95	111	86
4.0D	109	131	83
5.0D	125	156	80





(a) 1차터널 굴착 시(6단계)



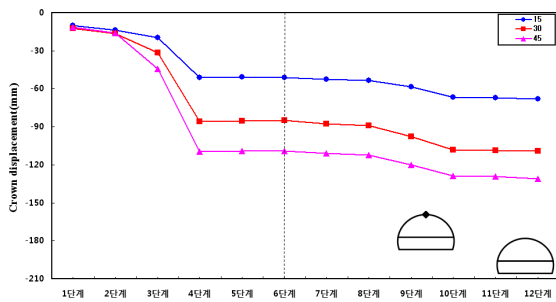
(b) 2차터널 굴착 시(12단계)

그림 24. 토피고에 따른 천단침하량

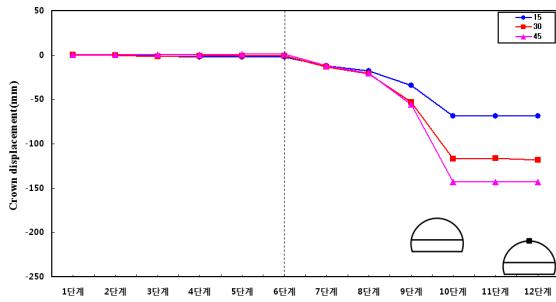
표 9와 그림 24는 토피고 3D, 4D, 그리고 5D에 따른 6단계와 12단계의 천단침하이며 12단계의 천단침하는 각각 111, 131, 그리고 156mm로 나타났다. 천단침하 12단계에 대한 6단계의 비는 각각 86, 83, 그리고 80(%)으로 나타났다.

#### 4.4.3 경사각도에 따른 영향

그림 25는 경사각도 15°, 30° 그리고 45°에 따른 천단침하를 나타내고 있다. 그림 25(a), (b)에서와 같이 1차 터널



(a) 좌측터널

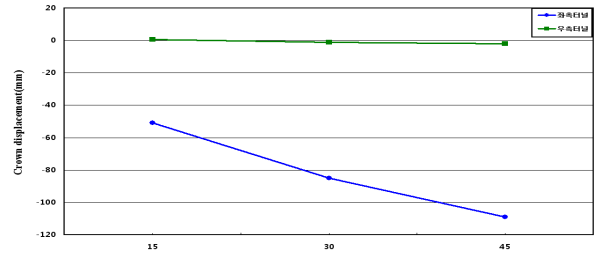


(b) 우측터널

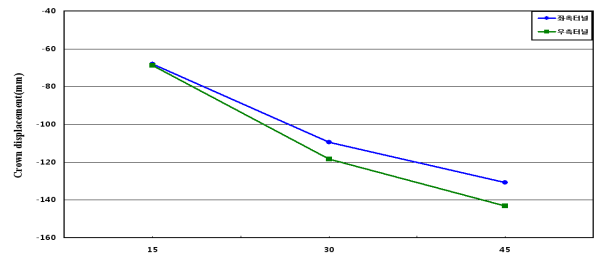
그림 25. 경사각도에 따른 굴착 시 천단침하

표 10. 경사각도에 따른 천단침하(mm)

경사각도 \ 단계	6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)
15°	51	68	75
30°	85	109	78
45°	109	131	83



(a) 1차터널 굴착 시(6단계)



(b) 2차터널 굴착 시(12단계)

그림 26. 경사각도에 따른 천단침하

(좌측)과 2차 터널(우측)은 그림 26(a), (b)와 같은 경향을 나타냈다.

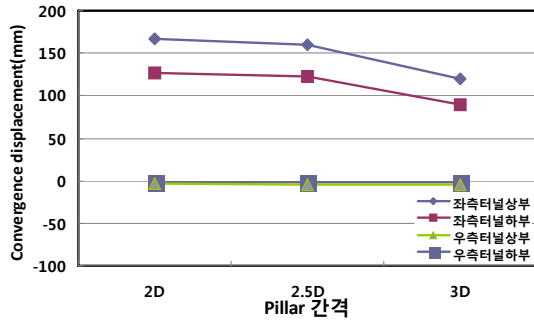
#### 4.5 내공변위

##### 4.5.1 Pillar 폭에 따른 영향

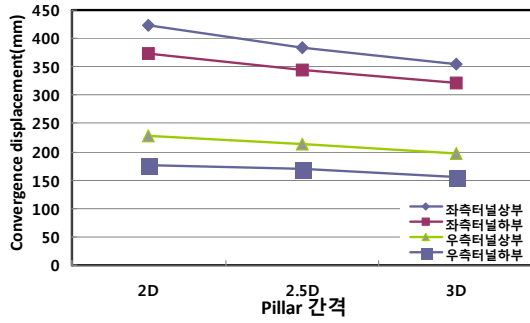
그림 27은 pillar 폭 2D, 2.5D, 그리고 3D에 따른 내공변위

표 11. Pillar 폭에 따른 내공변위(mm)

구분		6단계	12단계	6단계 / 12단계(%)	
2.0D	1차터널	CH 1	39	49	79
		CH 2	131	146	90
	2차터널	CH 1	0	51	0
		CH 2	0	177	0
2.5D	1차터널	CH 1	37	38	98
		CH 2	127	132	96
	2차터널	CH 1	0	44	0
		CH 2	0	169	0
3.0D	1차터널	CH 1	30	33	90
		CH 2	95	124	79
	2차터널	CH 1	0	42	0
		CH 2	0	156	0

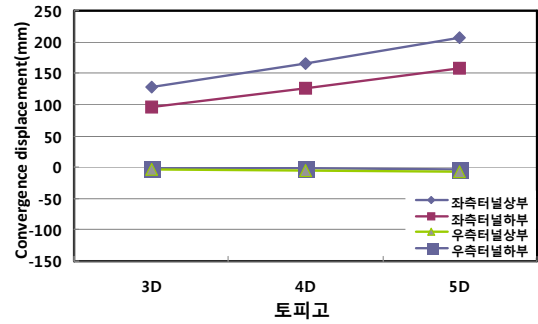


(a) 1차터널 굴착 후(6단계)

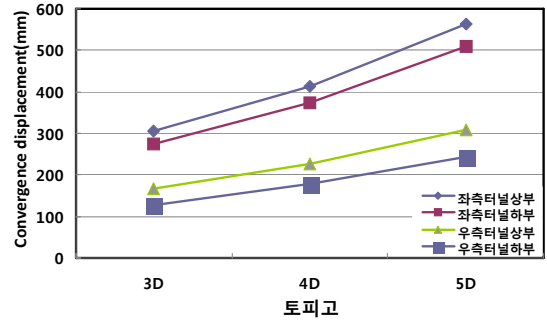


(b) 2차터널 굴착 후(12단계)

그림 27. Pillar 폭에 따른 내공변위



(a) 1차터널 굴착 후(6단계)



(b) 2차터널 굴착 후(12단계)

그림 28. 토피고에 따른 내공변위

위를 나타내고 있다. 그림 27(a)에서와 같이 pillar 폭이 2.0D에서 2.5D까지는 1차터널 굴착 후(6단계) 내공변위는 완만하게 감소하였으나 2.5D에서 3D까지는 급격히 감소하였다. 그리고 그림 27(b)에서와 같이 2차터널 굴착 후(12단계) pillar 폭이 2.0D에서 3D까지의 내공변위의 감소율은 좌측터널이 더 크게 나타났다.

#### 4.5.2 토피고에 따른 영향

그림 28은 토피고 3D, 4D, 그리고 5D에 따른 내공변위를 나타내고 있다. 그림 28(a)에서와 같이 토피고 3.0D에서 5D

까지 1차터널 굴착 후(6단계) 내공변위는 일정한 비율로 증가하였다. 그리고 그림 28(b)에서와 같이 2차터널 굴착 후(12단계) 토피고 3D에서 5D까지 내공변위의 증가율은 점점 크게 나타났고 좌측터널이 우측터널 보다 더 크게 나타났다.

#### 4.5.3 경사각도에 따른 영향

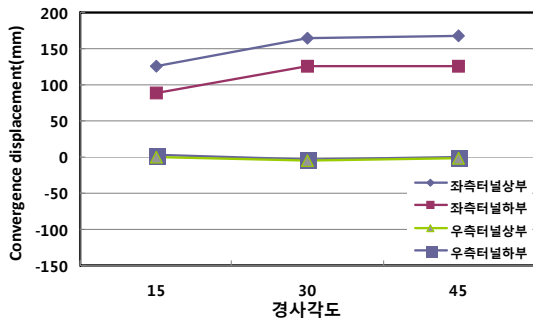
그림 29는 경사각도 15°, 30° 그리고 45°에 따른 내공변위를 나타내고 있다. 그림 29(a)에서와 같이 경사각도 15°에서 30°까지는 1차터널 굴착 후(6단계) 내공변위는 급격히 증가하였으나 30°에서 45°까지는 완만하게 증가하였다. 그

표 12. 토피고에 따른 내공변위(mm)

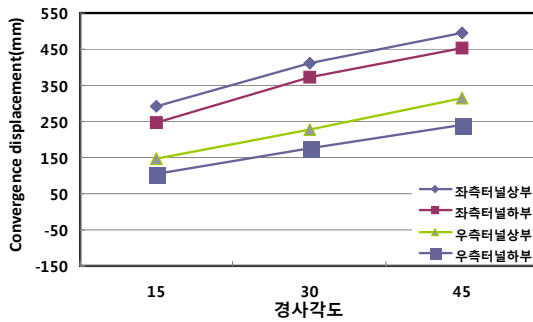
구 분		6단계	12단계	6단계/ 12단계(%)	
3.0D	1차터널	CH 1	31	31	102
		CH 2	100	108	93
	2차터널	CH 1	0	40	0
		CH 2	0	128	0
4.0D	1차터널	CH 1	39	40	99
		CH 2	131	146	90
	2차터널	CH 1	0	51	0
		CH 2	0	177	0
5.0D	1차터널	CH 1	48	53	91
		CH 2	165	201	82
	2차터널	CH 1	0	65	0
		CH 2	0	245	0

표 13. 경사각도에 따른 내공변위(mm)

구 분		6단계	12단계	6단계/ 12단계(%)	
15°	1차터널	CH 1	38	44	85
		CH 2	88	99	88
	2차터널	CH 1	0	43	0
		CH 2	0	105	0
30°	1차터널	CH 1	39	39	99
		CH 2	131	146	90
	2차터널	CH 1	0	51	0
		CH 2	0	177	0
45°	1차터널	CH 1	41	41	100
		CH 2	128	139	92
	2차터널	CH 1	0	76	0
		CH 2	0	239	0



(a) 1차터널 굴착 후(6단계)



(b) 2차터널 굴착 후(12단계)

그림 29. 경사각도에 따른 내공변위

리고 그림 29(b)에서와 같이 2차터널 굴착 후(12단계) 경사각도 15°에서 30°까지의 내공변위의 증가율은 좌측터널이 더 크게 나타났으나 15°에서 30°까지의 좌측, 우측터널이 거의 같게 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구는 화강 풍화암 지반의 터널에서 터널의 직경(D)는 13m로 가정하였고 pillar 폭은 2.0D, 2.5D, 3.0D, 토피고는 3D, 4D, 5D, 그리고 대각선 병설터널의 설치각도 15°, 30°, 45°로 변화시켜 터널해석을 수행하였으며 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 숏크리트 응력은 Pillar 폭, 토피고 그리고 병설터널의 설치각도를 다르게 한 경우 모두 3단계와 9단계에서 갑자기 가파르게 감소하는 경향을 보였다.
- (2) 락볼트 응력은 Pillar 폭, 토피고 그리고 병설터널의 설치각도를 다르게 한 경우 모두 4단계와 10단계에서 갑자기 가파르게 증가하는 경향을 나타냈다.
- (3) Pillar 폭과 병설터널의 설치각도가 토피고 보다 숏크리트 응력 및 락볼트 응력에 더 많은 영향을 미쳤다.
- (4) 지표침하의 12단계에 대한 6단계의 비는 Pillar 폭(2D, 2.5D, 3D), 토피고(3D, 4D, 5D), 그리고 병설터널의 설

치각도( 0°,15°,30°,45°)에 따라 각각 32%~29%, 33%~30%, 그리고 21%~32%의 범위로 나타났다. 이와같은 결과에서 Pillar 폭이 토피고와 병설터널의 설치각도 보다 지표침하에 더 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

- (5) 천단침하의 12단계에 대한 6단계의 비는 Pillar 폭, 토피고, 그리고 병설터널의 설치각도에 따라 각각 83%~75%, 86%~80%, 그리고 75%~83%의 범위로 나타났다. 이는 토피고가 Pillar 폭과 병설터널의 설치각도 보다 천단침하에 더 적은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.
- (6) 1차 터널(좌측)의 12단계에 대한 6단계의 내공변위의 비는 Pillar 폭, 토피고, 그리고 병설터널의 설치각도에 따라 각각 90%~79%, 93%~82%, 그리고 88%~92%의 범위로 나타났다.

이상의 결론에서 화강 풍화암 지반에서 병설터널 굴착 시 Pillar 폭은 2.5D이상, 토피고는 4D이상 확보하는 것이 터널 및 주변 지반의 안정성 확보에 바람직하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 김종우, 박지용(2004), 쌍굴터널 주변지반의 변형거동에 관한 모형실험 연구, *터널과 지하공간*, Vol. 14, No. 5, pp. 381~390.
2. 김학문(1997), 쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭 효과, *터널과 지하공간*, Vol. 7, No. 2, pp. 137~142.
3. 박지용(2004), 병설터널 굴착에 따른 주변지반의 변형거동에 관한 연구, 석사학위논문, 청주대학교, pp. 28~52.
4. 장부식(2006), 근접 병설터널 pillar의 거동특성 평가에 관한 연구, 박사학위논문, 홍익대학교, pp. 17~27.
5. 정재우(1996), 쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동에 관한 연구, 석사학위논문, 단국대학교, pp. 3~16.
6. Adachi, T., Kimura M., Osada, H.(1993), Interaction between Multitunnels under Construction, In: *Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, pp. 51~60.
7. Addenbrooke, T. I. and Potts, D. M. (1996), Twin Tunnel Construction, Ground Movements and Lining Behavior, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, pp. 441~446.
8. Dhar, B.B., Ratan, S., Sharma, D.K., Rao, P. M.(1981), Model Study of Fracture around Underground Excavations, In: *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*, pp. 267~271
9. Ng, C.W.W., Lee, K.M., Tang, D.K.W. (2004), Three-dimensional Numerical Investigations of the New Austrian Tunneling Method (NATM) Twin Tunnel Interactions, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 523~539.
10. Wu, C.S., Li, J.X., Chen, X., Xu, Z.P.( 2004), Blasting in Twin Tunnels with Small Spacing and its Vibration Control, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, p. 518.

(접수일: 2011. 7. 26 심사일: 2011. 8. 1 심사완료일: 2011. 9. 27)