

# 수평 불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동

## Behavior of shallow 2-Arch tunnel due to excavation under horizontal discontinuity plane

전은숙\*<sup>1</sup>, 김홍문<sup>2</sup>, 이상덕<sup>3</sup>

Cheon, Eun-Sook · Kim, Hong-Moon · Lee, Sang-Duk

### Abstract

In this study, the behavior of shallow 2-Arch tunnel due to excavation under horizontal discontinuity plane was verified experimentally. The model tests were carried out by varying the overburden height and the location of the discontinuity plane. The model tests followed exactly the real 2-Arch tunnel construction stages. As a result, it is discovered that stress-transfer mechanism and loosening area around the 2-Arch tunnel depends on the overburden heights and the location of the discontinuity plane. And central pillar load is also dependent on overburden height, location of discontinuity plane and construction stages.

**Keywords:** 2-Arch tunnel, horizontal discontinuity plane, stress-transfer, loosening area, central pillar

### 요 지

본 연구에서는 수평 불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동을 실험적으로 규명하고자 하였다. 이를 위하여 토피고와 불연속면의 위치를 변화시켜가며 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 실제 2-Arch 터널의 Pilot 터널굴착에서 본선터널굴착에 이르는 시공단계가 반영된 실험순서에 따라 진행되었다. 연구결과로부터 토피고에 따른 2-Arch 터널 주변지반의 하중전이 메커니즘의 변화와 불연속면 위치에 따른 이완영역의 분포 및 범위의 변화를 확인하였다. 또한 시공단계에 따른 중앙필러의 역학적 거동을 규명하였으며 불연속면 위치가 터널에 근접할수록 중앙필러 작용하중이 증가하는 것을 확인하였다.

**주요어:** 2-Arch 터널, 수평 불연속면, 하중전이, 이완영역, 중앙필러

## 1. 서론

2-Arch 터널과 같은 병설터널을 설계할 때에는 터널

의 경제적 측면보다는 구조적 안정성의 확보가 중요한 과제이다. 그러나 우리나라는 아직까지 근접병설터널에 대한 시공실적 및 설계사례가 부족하며 구조적 안정성에

\*1 정회원, (주)건화엔지니어링 사원 (sooka79@hotmail.com)

2 정회원, 아주대학교 건설교통공학과 박사과정

3 정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

대한 확신도 부족한 실정이다. 이러한 현실적인 이유로 현재 국내에서 시공되고 있는 2-Arch 터널의 경우 그 역학적 거동을 고려한 지보재 설계 및 지반보강 설계가 이루어지지 못하고 있으며 2-Arch 터널의 중요 구조물인 중앙필러 작용하중 및 단면 제원 등에 대한 설계방법도 확립되어 있지 않다.

터널 굴착대상인 지반은 불균질하고 절리, 단층 등의 불연속면이 존재하는 경우가 많으며 이러한 지반에서 터널 및 주변지반의 거동은 불연속면의 분포 형태 및 특성에 의해 지배된다. 현재 개별요소법을 이용한 불연속체 해석으로 터널설계가 이루어지고 있기는 하나 터널과 불연속면의 상대위치 및 불연속면의 거동에 대한 고려는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 시공단계에 따른 모형실험을 통하여 2-Arch 터널의 역학적 거동특성을 규명하고자 하였으며 토피고와 수평 불연속면의 위치를 변화시켜 불연속면의 전단거동에 의하여 주변지반에 발생하는 하중전이와 응력재분배로 인한 토압의 분포를 확인하였다.

## 2. 모형실험

### 2.1 실험개요

터널굴착시 지반의 거동에 관한 연구는 일반적으로 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 수행할 수 있다. 실험

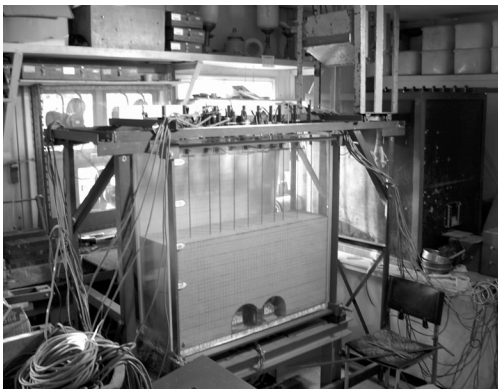


그림 1. 모형실험기

적인 방법은 원형실험 (Prototype Test)과 축소 모형실험 (Reduced Model Test)으로 구별할 수 있다. 원형실험은 현장의 조건을 그대로 재현시킴으로써 실제 지반의 거동을 정확히 모사할 수 있으나, 다양한 경계조건, 지형조건, 지반물성 등을 변화시켜야 하는 경우에는 경제적인 문제가 발생한다. 한편, 축소된 모형실험은 실제와 근접한 지반상태를 이상적으로 모델링하여 다양한 실험조건을 변화시키면서 경제적으로 실험을 수행할 수 있으며 지반의 파괴메커니즘을 확인하고 정량적인 결과를 도출할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 2-Arch 터널을 1/50 크기로 축소한 모형실험을 수행함으로써 수평 불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위하여 중앙필러를 포함한 좌·우 터널을 제작하고 모형터널을 지지하고 있는 바닥판을 가동판으로 제작함으로써 지반변형이 용이하도록 하였으며, 분리된 각 판에 설치한 로드셀 (Load Cell)을 이용하여 굴착에 따른 이완하중 및 전이하중을 측정하였다. 지표 및 지중 침하는 일정한 심도별로 설치한 침하판 및 변위계 (LVDT)를 이용하여 측정하였다 (그림 2).

모형실험은 Pilot 터널굴착에서 본선터널굴착으로 이어지는 시공단계에 따라 Pilot 터널, 선행터널 (우측터널) 상부반단면, 후행터널 (좌측터널) 상부반단면, 선행터널 하부반단면, 후행터널 하부반단면의 굴착순서로 진행하

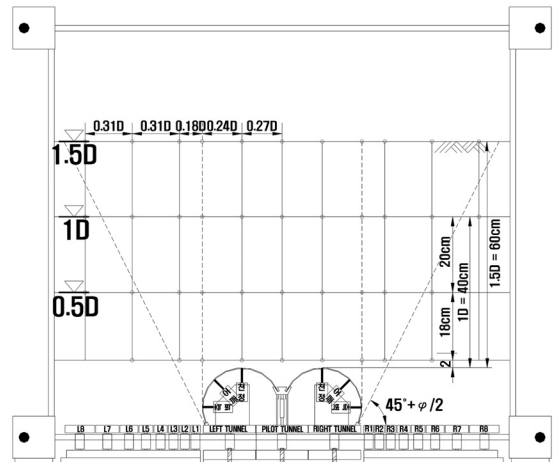


그림 2. 지표 및 지중 침하 심도별 위치

였으며 원지반의 토피고와 2-Arch 터널 상부지반에 존재하는 불연속면의 심도변화에 따라 2-Arch 터널 및 주변지반의 거동을 확인하였다.

표 1은 실험변수에 따른 실험명을 나타낸 것이며 그림 3과 4는 토피고에 따른 수평 불연속면의 위치를 나타낸 것이다.

표 1. 실험변수

토 피 고		1.0D	[1D]	1.5D	[1.5D]
불연속면 위치					
불연속면 없음.	[NJ]	1DNJ		15DNJ	
터널 천단	[CJ]	1DCJ		15DCJ	
터널상부 15cm	[15J]	1D15J		15D15J	
터널상부 30cm	[30J]	1D30J		15D30J	

D : 터널 폭 (400mm)

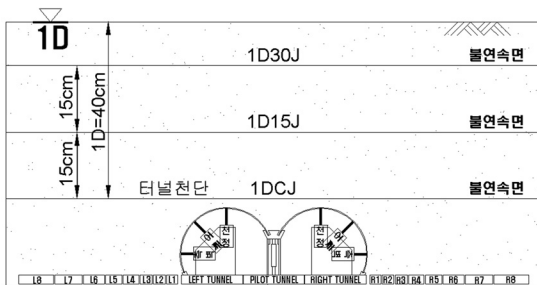


그림 3. 수평 불연속면의 위치 (토피고 : 1D)

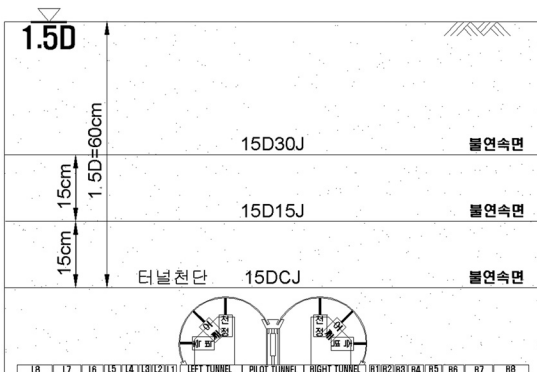
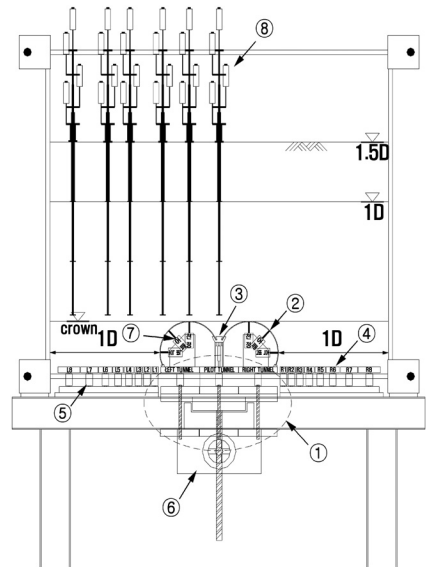


그림 4. 수평 불연속면의 위치 (토피고 : 1.5D)

## 2.2 모형토조

모형토조는 300mm×1,200mm×1,100mm (폭×길이×높이)로 제작하여 모형터널 측벽에서 좌·우로 1D, 천단에서 2D까지 지반을 조성할 수 있도록 하였으며, 벽체는 실험의 전 과정을 외부에서 관찰할 수 있도록 투명 아크릴판을 이용하여 제작하였다. 벽면과 아크릴판 사이의 마찰을 줄이기 위해 유리판을 지반과 아크릴판 사이에 부착하였고 모형지반에 의한 재료의 변형을 방지하기 위하여 외부에 16mm×80mm의 평철 (steel flat bars)을 이용한 프레임으로 단단히 구속하였다 (그림 5).



- ① Trap door 시스템 (Pilot, Right, Left 터널부/ 132mm×300mm)
- ② 모형터널 라이닝
- ③ 중앙필러 (Load Cell 2EA, 100kgf)
- ④ 하중측정용 바닥판 (30, 40, 50, 65, 80mm×300mm)
- ⑤ 하중측정용 Load Cell (100kgf)
- ⑥ 기어박스
- ⑦ 내공변위계
- ⑧ 지표 및 지중 변위계

※ D : Diameter (400mm)

그림 5. 모형터널 및 모형토조

가동판과 바닥판은 시험하중 (최대 100kgf)에 비하여 강성이 크고 성형이 쉬운 베이클라이트판 (폐놀수지 재료, 단위중량 12.5~13.0kN/m<sup>3</sup>, 인장강도 49~56MPa, 압축강도 70~210MPa)을 사용하였다. 가동판은 시공단계에 따라 Pilot 터널굴착을 위한 Pilot 터널부 (132mm×300mm)와 본선터널에 해당하는 Right 및 Left 터널부 (각각 132mm×300mm)의 세 개의 분리된 시스템 (전체 가동판 길이 400mm, 1D)으로 제작하였다. 주변 바닥판은 30, 40, 50, 65, 80mm×300mm의 크기로 제작하였고 하중의 민감한 변화를 측정할 수 있도록 터널 인접부에는 조밀하게 배치하였다. 각 판에는 로드셀을 부착하여 실험단계에 따른 하중의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

가동판의 연직변위는 직선운동 베어링인 Linear Guide를 가동판 측면 4개소에 좌·우 대칭으로 설치하여 마찰이 최소화되도록 하였으며 일정한 속도 유지 및 변위 조정이 용이하도록 기어박스를 제작하였다.

모형토조의 뒷면 벽체에는 바닥으로부터 좌·우 터널 높이에 해당하는 위치에 개폐가 용이한 작업구를 설치하여 지반조성 단계에서는 작업구를 차단하고 본선터널굴착 단계에서는 작업구를 개방하여 좌·우 터널내부의 지반을 제거할 수 있도록 하였다.

### 2.3 모형터널

축소 모형실험 (Reduced Model Test)에서 정량적인 결과를 도출하기 위하여 지반상태와 터널구조물의 축소율을 결정하는 것은 매우 중요한 과정으로 모형실험상에서 실제 지반상태 및 터널구조물을 모사함에 있어 상사성 원리를 충족시켜야 한다.

본 연구에서는 식 (1)과 같이 지반상태와 터널구조물의 제원이 고려된 '상대강성비'를 도입하여 모형터널 라이닝의 두께를 결정함으로써 상사성 원리를 충족시키고자 하였다.

$$\alpha = \frac{E_k \times R^3}{E_B \times I} \quad (1)$$

- $\alpha$  : 상대강성비
- $E_k$  : 지반의 탄성계수
- $E_B$  : 라이닝의 탄성계수
- $R$  : 터널의 반경
- $I$  : 라이닝의 단위길이당 단면 2차 모멘트

터널 단면의 크기는 2-Arch 1 Pilot 표준단면을 1/50로 축소하여 결정하였으며 터널라이닝 재료는 굴착에 따른 변형특성이 용이하도록 S41 강철판 (탄성계수 : 1.96×10<sup>8</sup>kN/m<sup>2</sup>)으로 하였다. 실제 터널과 모형터널의 지반상태 및 라이닝에 따른 상대강성비를 표 2에 나타내었다.

모형지반은 단위중량을 측정하여 구한 상대밀도로부터 '조밀한 (Dense)' 정도의 지반으로 판단하였으며 (B. M. Das, 1994), 상대강성비를 만족시키는 모형터널 라이닝 두께를 계산한 결과, 1.0mm로 결정하였다.

좌·우 터널의 기초는 힌지조건으로 하여 가동판을 지지하도록 하였으며 가동판 하부에는 하중측정용 로드셀 (Load Cell)을 수직으로 설치하여 라이닝 기초부 축력을 측정하였다. 세 개의 분리된 가동판 중에서 중앙에 위치한 Pilot 터널부 가동판 위에는 중앙필러 기능을 담당하도록 두 개의 로드셀 (Load Cell)을 전·후로 설치하였다.

### 2.4 불연속면

본 모형실험의 불연속면은 충분히 유연한 폴리에틸렌 필름을 50×300mm (가로×세로) 크기로 잘라 일정한 간격이 겹쳐지게 하여 세 겹으로 제작하였다. 또한 필름 사이에는 마찰이 작용하지 않도록 그리스 (Grease)와 오일 (Oil)이 혼합된 윤활제를 도포함으로써 전단저항력이 원지반보다 작은 불연속면의 특성이 반영되도록 하였다.

불연속면은 모형토조 길이와 폭 (1,200mm×300mm)의 크기로 제작하여 지반조성중에 수평으로 설치함으로써 터널굴착시 수평 불연속면으로 인한 영향이 하부지반에 균등하게 작용할 수 있도록 하였다.

표 2. 상대강성비

	$\alpha$	$E_k$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_B$ (kN/m <sup>2</sup> )	R (m)	I (cm <sup>4</sup> )	비 고
실제 터널	27,000	140,000	1.50×10 <sup>7</sup>	10	3.41×10 <sup>-4</sup>	풍화암, 슛크리트
모형 터널	25,000	52,000	1.96×10 <sup>8</sup>	0.2	8.33×10 <sup>-11</sup>	사질토, 강철

## 2.5 모형지반

모형지반은 입경이 0.42~1.70mm인 주문진 자연사를 이용하여 조성하였으며 심도별로 균질하게 조성되도록 샌드커튼 (Sand Curtain) 방식의 강사기를 이용하였다.

모형지반의 물리적 특성 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 입도분포시험 (KS F 2301), 최대·최소 건조단위중량시험 (DIN 18126), 비중시험 (KS F 2343) 및 직접전단시험 (KS F 2348)을 수행하였다.

입도분포시험을 통한 입경가적곡선은 그림 6과 같으며 모형지반의 물리적 시험 결과는 표 3과 같다.

직접전단시험 결과, 모형지반의 점착력은 '0', 내부마찰각은 37.4°로 나타났다.

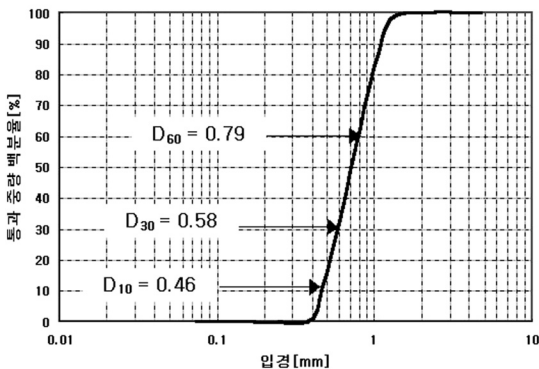


그림 6. 모형지반의 입경가적곡선

표 3. 모형지반의 물리적 시험 결과

물리적 특성	결 과
입도분포	$D_{10} = 0.46$ , $C_u = 1.72$ , $C_c = 0.93$
최대·최소 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 17.9\text{kN/m}^3$ , $\gamma_{dmin} = 14.6\text{kN/m}^3$
비 중	$G_s = 2.61$
통일분류법에 의한 지반 분류	SP

## 3. 실험결과

### 3.1 Pilot 터널 굴착에 따른 하중전이

Pilot 터널굴착은 중앙부 가동판을 중앙필러 작용하중이 '0'에 수렴할 때까지 강하함으로써 모사하였다. 중앙 필러는 지반조성 전 Pilot 터널부 강하판 위에 미리 설치하였다.

그림 7은 중앙필러 작용하중 감소량과 터널 주변 바닥판 하중증가량을 나타낸 것으로 가동판 강하에 따라 감소한 하중이 주변지반으로 전이되어 주변 바닥판의 하중증가로 이어졌음을 알 수 있다 (아칭효과, Arching Effect).

불연속면이 존재하지 않는 경우, 하중증가량은 Pilot 터널 좌·우 가장 인접한 바닥판에서 가장 크고 터널에서 멀어질수록 감소하여 좌·우 0.75D 지점에서부터 '0'에 수렴하였다. 반면에 터널 상부에 수평 불연속면이 존재하는 경우에 Pilot 터널굴착에 따른 전이하중은 수평 불연속면이 터널에 가까울수록 터널 인접부에 집중되고 수평 불연속면이 터널에서 멀어지게 되면 불연속면이 없는 경우와 비슷한 하중전이 분포를 나타내었다 (그림 8).

### 3.2 본선 터널 굴착에 따른 하중전이

본선터널굴착은 모형토조 뒷 벽체에 설치된 작업구를 이용하여 좌·우 터널 내부의 모래를 굴착함으로써 모사하였다.

본선터널굴착에 따라 좌·우 터널라이닝의 축력은 감소하였으며 중앙필러 및 좌·우 주변바닥으로는 하중증가가 발생하였다. 라이닝 축력의 감소는 굴착단계에 따

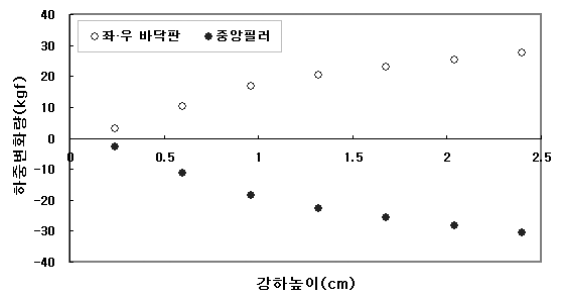
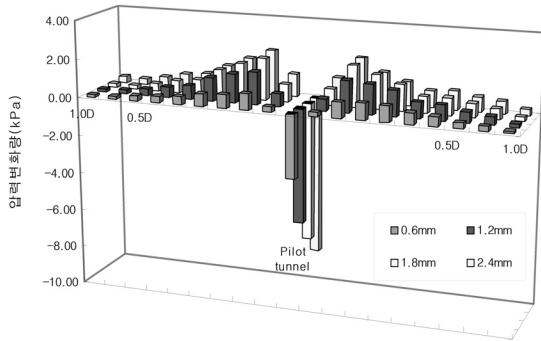
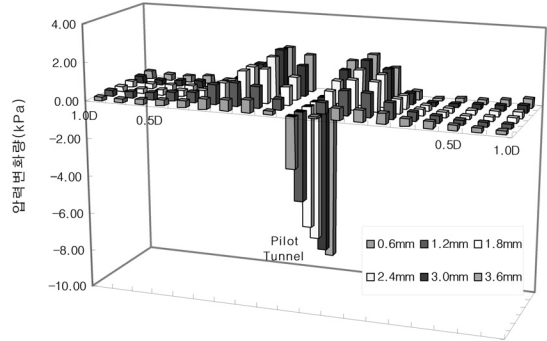


그림 7. 하중변화량 (좌·우 바닥판-중앙필러)



(a) 1DNJ (불연속면이 없는 경우)



(b) 1DCJ (불연속면 위치 : 터널천단)

그림 8. Pilot 터널굴착에 따른 하중전이 (토피고 : 1D)

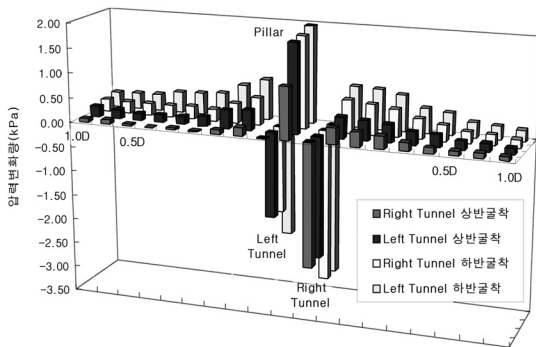
라 발생하였으나 후행터널굴착에 의하여 주변지반으로 전이된 하중이 선행터널 라이닝의 축력증가를 야기하기도 하였다. 이는 이격거리가 매우 축소된 형태인 2-Arch 터널의 구조적 특성으로 인하여 발생한 현상으로 좌·우 터널굴착에 따라 발생한 간섭효과라 할 수 있다.

본선터널굴착에 의한 단계별 하중전이를 분석한 결과, 2차 굴착단계인 좌측터널 상부 반단면 굴착단계에서 최종 굴착후 발생한 하중전이량의 약 90%가 진행되었음을 확인하였다. 이로부터 2-Arch 터널시공시 본선터널 상부 반단면 굴착단계가 지중 및 중앙필러, 터널라이닝의 응력변화가 가장 많이 발생하는 단계로 판단할 수 있으며 중앙필러와 지보재 설치시 주의할 필요가 있다.

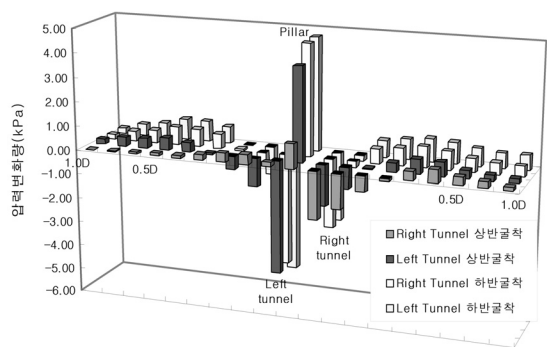
토피고와 수평 불연속면 위치에 따른 하중전이는 토피고

고를 기준으로 그 양상이 다르게 나타났다. 토피고 1D에서 불연속면이 없는 경우 하중전이량은 좌·우 터널에 인접한 주변 바닥판에서 가장 크게 발생한 이후 좌·우 터널에서 멀어질수록 감소하다가 수렴하는 양상을 나타내었으나 터널 상부에 불연속면이 존재함에 따라 하중전이 범위는 좌·우로 이동하여 터널에서 멀어지는 경향을 나타내었다. 이는 이완영역이 좌·우 터널 폭 (1D) 보다 넓게 형성되었음을 의미하는 것으로 이러한 하중전이 경향은 불연속면의 위치가 터널천단에서 멀어질수록 뚜렷하게 나타났다. 반면에 토피고 1.5D에서는 수평 불연속면이 존재하는 경우 전체적인 하중전이는 수평 불연속면이 없는 경우와 비슷하게 발생하였다 (그림 9, 10).

본선터널인 좌·우 터널굴착에 따른 좌·우 터널 상부

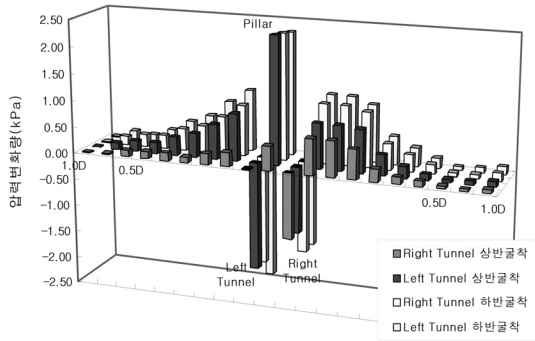


(a) 중앙필러-라이닝 축력-주변지반 (1DNJ)

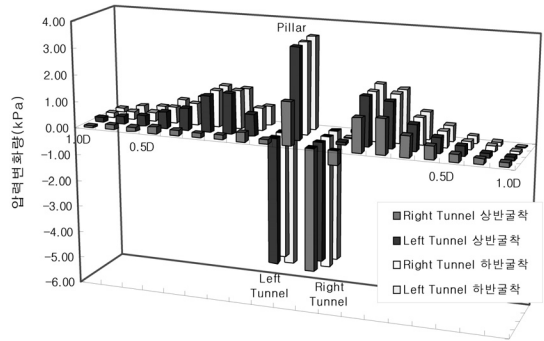


(b) 중앙필러-라이닝 축력-주변지반 (1D30J)

그림 9. 본선터널굴착에 따른 하중전이 (토피고 : 1D)



(a) 중앙필러-라이닝 축력-주변지반 (15DNJ)



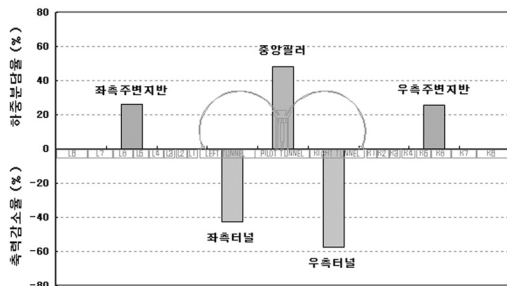
(b) 중앙필러-라이닝 축력-주변지반 (15DCJ)

그림 10. 본선터널굴착에 따른 하중전이 (토피고 : 1.5D)

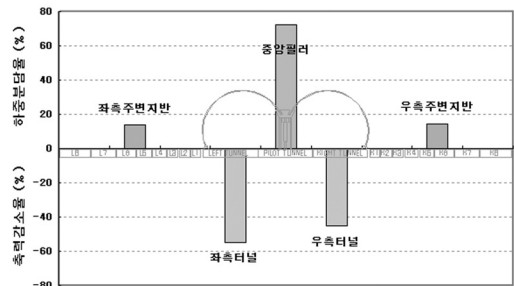
지반의 이완으로 인하여 연직토압의 감소가 야기되었으며 이는 실험에서 좌·우 터널라이닝 기초부 축력의 감소로 확인할 수 있었다. 좌·우 터널에 발생한 축력은 단계별 굴착에 따라 차이를 나타내었으며 최종 굴착후 축력 감소량을 비교한 결과, 후행터널인 좌측터널의 축력 감소량이 선행터널인 우측터널에 비하여 크게 발생한

것을 확인하였다.

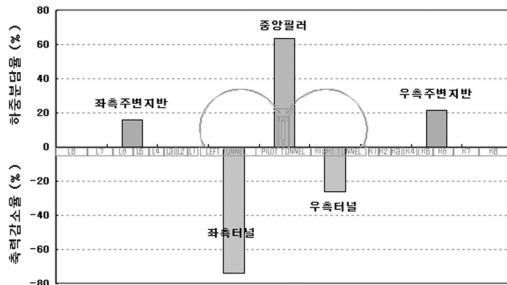
또한 좌·우 터널라이닝에 작용하는 축력의 차이는 중앙필러 및 좌·우 주변지반으로 전이된 하중과 연계하여 비교할 수 있으며 이를 위하여 수평 불연속면 위치에 따른 축력감소량과 하중전이량과의 관계를 하중분담율의 개념으로 그림 11에 나타내었다.



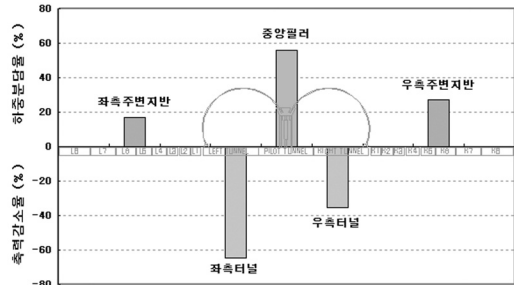
(a) 1DNJ (불연속면이 없는 경우)



(b) 1DCJ (불연속면 위치 : 터널천단)



(c) 1D15J (불연속면 위치 : 터널천단에서 15cm)



(d) 1D30J (불연속면 위치 : 터널천단에서 30cm)

그림 7. 본선터널굴착에 따른 하중전이 (토피고 : 1D)

본선터널굴착에 따른 중앙필러의 하중분담율은 불연속면이 없는 경우, 전이된 하중의 약 50%로 나머지 50%의 하중은 좌·우 지반이 나누어 분담하였다. 그러나 2-Arch 터널 상부에 불연속면이 존재하는 경우에는 중앙필러 하중 분담율이 증가하였으며 수평 불연속면이 2-Arch 터널 천단에 위치한 경우에 가장 크게 측정되었고 터널에서 멀어질수록 감소하였다. 이는 수평 불연속면이 터널에 근접할수록 이완하중이 중앙필러에 집중됨을 의미하는 것으로 지반조사 결과 터널 상부에 불연속면이 존재하는 것으로 추정되는 경우에는 2-Arch 터널 중앙필러의 충분한 강도가 확보되도록 설계되어야 할 것이다.

### 3.3 본선 터널 굴착에 따른 중앙필러 거동

본 연구에서는 본선터널 최종 굴착후 중앙필러에 작용하는 하중 ( $P_i$ )에 대한 원지반 초기하중 ( $P_0$ )의 비 ( $P_i/P_0$ )를 적용함으로써 본선터널굴착에 따른 중앙필러 작용하중을 토피고 및 불연속면 위치에 따라 제시하였다. 이 무차원 비 ( $P_i/P_0$ )는 ‘중앙필러 작용하중비’로 정의하였다.

표 4와 그림 12는 실험변수에 따른 중앙필러 작용하중비를 나타낸 것이다. 수평 불연속면이 존재함에 따라 중앙필러 작용하중비는 증가하였고 불연속면 위치에 따른 작용하중비 증가경향은 토피고에 따라 차이를 보였다. 토피고 1D에서 불연속면이 없는 경우 (1DNJ) 중앙필러 작용하중비는 최소값인 0.29를 나타내었으며 수평 불연

표 4. 본선터널굴착에 따른 중앙필러 작용하중비 ( $P_i/P_0$ )

실험명	토피고 (cm)	불연속면위치 (cm)	중앙필러 작용하중비
1DNJ	40	-	0.29
1DCJ	40	0	0.35
1D15J	40	15	0.44
1D30J	40	30	0.74
15DNJ	60	-	0.25
15DCJ	60	0	0.39
15D15J	60	15	0.35
15D30J	60	30	0.25

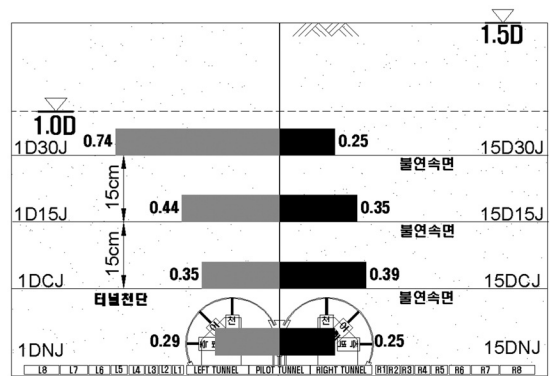


그림 12. 본선터널굴착에 따른 중앙필러 작용하중비 ( $P_i/P_0$ )

속면이 터널천단에서 가장 멀리 떨어진 경우 (1D30J) 최대값인 0.74를 나타내었다. 토피고 1D에서는 수평 불연속면이 터널상부로 이동함에 따라 즉, 불연속면 상부 토피고가 줄어들에 따라 본선터널굴착에 따른 중앙필러 작용하중이 증가하였다. 토피고 1.5D에서 불연속면이 없는 경우 (15DNJ) 중앙필러 작용하중비는 최소값인 0.25를 나타내었으며 이 값을 토피고 1D에서 불연속면이 없는 경우의 0.29와 비교하면 토피고가 증가할수록 상부 토피에 대한 중앙필러 작용하중이 감소함을 알 수 있다. 토피고 1.5D에서는 수평 불연속면 위치가 터널에 가장 인접한 터널천단인 경우 (15DCJ)의 중앙필러 작용하중비가 0.39로 최대값을 나타내었고 불연속면이 상하이동함에 따라 감소하여 터널상부 30cm에 위치한 경우 (15D30J) 0.25의 중앙필러 작용하중비를 보였다. 이 값은 불연속면이 없는 경우 (15DNJ)와 같은 값으로 토피고 1.5D에서는 토피고 1D에서와 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 중앙필러 작용하중은 불연속면의 위치뿐만 아니라 토피고에 따라서 즉, 불연속면 하부 터널까지의 거리와 상부 지표까지의 거리와도 관계가 있는 것으로 판단된다.

### 3.4 지표 및 지중침하

Pilot 터널굴착 및 본선터널굴착에 따른 터널 상부지반의 깊이별 침하경향을 파악하기 위하여 심도에 따라 0.5D (20cm) 간격으로 침하판을 설치하였으며 침하판



의 변위로부터 지표 및 지중 침하를 측정하였다. 또한 지반조성시 일정한 간격(6cm)으로 염색사를 뿌려 기존 사질토 지반과 구분이 되는 얇은 층이 형성되도록 함으로써 터널굴착으로 인한 주변지반의 전체적인 변형을 확인할 수 있도록 하였다. 시공단계에 따라 측정된 지표 및 지중 침하량과 염색사의 변형형상으로부터 토피고 및 수평 불연속면 위치에 따른 이완영역을 확인하였다.

Pilot 터널굴착에 따라 발생한 이완영역은 좌·우 터널 천정 사이 한정된 영역에 중앙필러를 중심으로 좌·우 대칭의 분포를 보인 반면 본선티널굴착에 따라 발생한 이완영역은 4단계의 단계별 굴착에 따라 좌·우 터널 상부지반에 비대칭분포를 나타내었다.

지중 및 지표침하량은 터널 상부 불연속면의 위치가 터널천단에서 멀어질수록 즉, 지표에 가까워질수록 크게 발생하였으며 불연속면을 기준으로 상부지반과 하부지반의 침하경향이 다르게 나타났다. 즉, 불연속면 하부지반은 터널중심에서 최대 침하량을 나타내고 좌·우로 급격하게 감소하는 정규분포함수 형태를 나타낸 반면 불연속면 상부지반은 하부에 비하여 상대적으로 작은 침하량이 발생하였으며 좌·우로 완만하게 감소하는 정규분포함수 형태를 나타내었다.

### 3.5 내공변위

본선티널굴착시 시공단계에 따라 발생하는 터널 내공단면 변화량을 확인하기 위하여 내공변위를 측정하였다. 내공변위는 내공변위 측정용 LVDT를 지반 조성 전 모형 터널 내부에 반경방향으로 설치하여 측정하였으며 측정 위치는 좌·우 터널 천정, 어깨 및 측벽으로 하였다. 본 논문에서는 내공단면 축소방향을 양(+)으로 하였다.

전체적인 내공변위는 내공단면 축소방향(+)으로 발생하였으며 측정위치별 변위량은 천정, 어깨, 측벽의 순서로 감소하였다.

선행터널 상부 반단면 굴착후에 발생한 우측터널(선행터널)의 내공변위는 최종 굴착시 내공변위량의 약 50~70%가 발생하였으며 좌측터널(후행터널)의 내공변위는 거의 발생하지 않았다. 반면에 후행터널 상부 반단면 굴착후에는 좌측터널 내공변위량이 급격히 증가하여 최종 굴착시 내공변위량의 약 80~90%가 발생하였다. 최종 굴착 완료후

선행터널과 후행터널의 내공변위량은 대체로 좌·우 터널에서 비슷하게 발생하였으나 수평 불연속면이 터널에 근접하여 위치한 경우 우측터널에 비하여 후행터널인 좌측터널에서 크게 발생하였다.

불연속면 위치에 따른 내공변위 발생량은 토피고에 따라 차이를 나타내었다. 토피고 1D에서는 불연속면이 터널에서 멀어질수록 즉, 지표에 가장 근접했을 때 최대값을 보인 반면 토피고 1.5D에서는 불연속면의 위치가 터널 상부지반으로 이동함에 따라 증가하는 경향을 보이다가 터널과 불연속면의 거리가 어느 한도 이상(0.75D)이 된 후에는 불연속면이 없는 지반과 비슷한 값을 나타내었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 수평 불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동을 실험적으로 규명하고자 하였으며 이를 위하여 토피고와 불연속면의 위치를 변화시켜 가며 모형실험을 수행하였다. 연구 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. Pilot 터널굴착에 따른 주변지반 하중증가는 좌·우 0.25D 이내에 집중되어 발생하였으며 0.75D에서 수렴하였다. 그러나 수평 불연속면이 터널 상부에 존재하는 경우에는 좌·우 0.12D 이내에 집중되어 발생하였으며 0.5D에서 수렴하였다.
2. 본선티널굴착에 따라 라이닝의 축력은 감소하였으며 감소된 하중은 중앙필러와 주변지반으로 전이되었다. 최종굴착후 라이닝에 발생한 축력의 변화를 주변지반 연직토압의 변화와 함께 분석한 결과, 후행터널(좌측터널)의 축력이 선행터널(우측터널)에 비하여 크게 감소하였으며 주변지반의 하중증가는 우측지반이 좌측에 비하여 크게 발생하였다.
3. 2-Arch 터널은 이격거리가 매우 축소된 근접병설터널로 선행터널과 후행터널의 단계별 굴착에 따라 간섭효과가 발생하게 된다. 그 결과, 중앙필러 작용하중이 크게 증가하였으며 후행터널굴착시에는 선행터널의 축력이 증가하는 현상이 발생하였다.
4. 최종 굴착후 중앙필러와 주변지반으로 전이된 하중은 비슷하게 분포하였다. 그러나 수평 불연속면이 터

널 상부에 존재함에 따라 중앙필러 작용하중이 주변 지반보다 증가하였으며 터널에 근접할수록 중앙필러에 집중되었다. 또한 이러한 경향은 토피고 1.5D에 비하여 1D에서 더욱 뚜렷하였다.

5. 지표 및 지중 침하량과 염색사의 변형형상으로부터 수평 불연속면 위치에 따른 이완영역을 분석하였다. 그 결과, 불연속면이 터널천단에 위치한 경우의 이완영역은 불연속면이 없는 지반과 비슷하게 형성되었으며 불연속면이 터널상부로 이동함에 따라 수평 불연속면을 기준으로 상부지반의 이완영역이 하부지반에 비하여 좌·우 주변지반으로 넓게 확대되었다.
6. 좌·우 터널의 내공변위량을 비교하면 후행터널(좌측터널)의 내공변위가 선행터널(우측터널)에 비하여 크게 발생하였으며, 측정위치별 내공변위량은 천정, 어깨, 측벽의 순서로 감소하였다. 또한 수평 불연속면의 위치에 따른 내공변위는 불연속면이 없는 지반에서 가장 작게 발생하였으며 수평 불연속면이 터널상부로 이동함에 따라 증가하였다.

## 감사의 글

“건설교통부가 출현하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년 건설핵심기술연구개발사업 대형·대단면 지하공간 창출을 위한 지하공간 건설 기술에 의한 것임”에 심심한 사의를 표합니다.

## 참고문헌

1. 권혁민(2001), “사질토 지반에서 터널굴착에 의한 하중 전이”, 석사학위 논문, 아주대학교 대학원
2. 이상덕 외 1명 (2003), “사질토 지반에서 2 Arch 터널의 거동”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 171~182
3. 이상덕 외 2명 (2004), “라이닝 강성에 따른 2 Arch 터널 필러부의 거동”, 대한토목학회 전문학회세미나, Vol. 4H
4. 이정상 (2004), “사질토지반에 건설한 2Arch 터널의 거동”, 석사학위 논문, 아주대학교 대학원
5. E. Soliman et al.(1993), “Two-and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 1, pp.13~18
6. T. Matsuda, et al., “A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method”, Proceeding of Studies on Tunnel Engineering, Vol. 7single drift and central pier method”, Proceeding of Studies on Tunnel Engineering, of Bored Tunnels, Earthquake Engineering and Structure Dynamics 27, pp. 283-300.
7. Penzien, J.(2000). Seismically Induced Raking of Tunnel Linings, Earthquake Engineering and Structure Dynamics 29, pp. 683-691.
8. Savin, G.N.(1961) Stress Concentration around Holes. Pergamon Press, London.
9. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.(1970). Theory of Elasticity. McGraw-Hill Publishing Company, New York.



**전은숙**

(주)건화엔지니어링 사원  
sooka79@hatmail.com



**김홍문**

아주대학교 건설교통학과 박사과정  
hmkim@ajou.ac.kr



**이상덕**

아주대학교 환경건설교통공학부 교수  
lsangduk@ajou.ac.kr