

# 사질토지반에서 2 Arch 터널의 거동

## Behavior of 2 Arch Tunnel in Sand

이상덕\*<sup>1</sup>, 전은숙<sup>2</sup>

Lee, Sang-Duk • Cheon, Eun-Sook

### Abstract

This study is focused on finding out the mechanical behavior of pillars and the ground adjacent to the tunnel depending on the central tunnel size and the invert during the construction of 2 arch tunnels in the sandy ground. Model tests were performed in the trap door system, which was composed of 3 separately movable plates. Central pillar was installed on the central movable plate to measure the pillar loads during the excavation of pilot tunnel and the main tunnel. The load-transfer and the loosening load were measured at the bottom plates adjacent to the 2 arch tunnels. The ground settlement and displacement of the tunnel lining were also measured. As results, not only pillar load but also the load transfer mechanism was influenced by the construction sequences, central tunnel size, and the invert.

**Keywords:** 2 arch tunnel, pillars, trap door test, load transfer, arching effect, loosening zone, constraint conditions of the lining footings

### 요 지

사질토지반에서 2 Arch 터널을 굴착할 때에 중앙터널의 굴착규모와 인버트 폐합에 따른 중앙필러 및 터널 주변지반의 거동특성을 규명하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 3개로 분리되어 수직이동이 가능한 가동판 위에 중앙필러와 모형라이닝을 설치하고 모형지반 조성 후에 가동판을 강하시켜서 중앙터널굴착을 표현하였고, 중앙터널굴착 후에 좌·우측 터널을 굴착하였으며 굴착이 완료된 2 Arch 터널 전체에 대한 가동판을 움직여서 2 Arch 터널굴착에 따른 하중전이 및 지반이완 형태는 물론 중앙필러에 작용하는 하중의 변화를 관찰하였다. 실험 중에 가동판, 중앙필러 및 바닥판에 작용하는 이완하중 및 전이하중을 측정하였고, 모형터널의 내부와 지중 및 지표에 변위계를 설치하여 모형터널의 내공변위 및 지반의 변위를 측정하였다. 본 연구결과 시공순서와 라이닝의 기초부 구속조건에 따라 중앙필러가 부담하게 되는 하중의 변화를 확인하였고 2 Arch 터널굴착에 따른 하중전이 및 지반이완형태를 확인하였다.

**주요어:** 2 아치 터널, 중앙터널, 트랩도어 실험, 하중전이, 아칭, 이완영역

## 1. 서론

현재까지 국내에 시공된 도로터널은 2차로 병렬로 이

루어진 산악터널이 주종을 이루고 있으나 최근에는 자연 환경 훼손 최소화, 주변지장물의 보호 및 입·출구부 구조물과의 연계성 확보를 위하여 대단면 터널 또는 2

\*1 정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수(Isangduk@ajou.ac.kr)  
 2 비회원, 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

Arch 터널을 채택하는 사례가 증가하고 있다.

일반적으로 지반 및 토피조건이 양호하고 일방향 4차 도로로 구성되는 경우에는 대단면 터널을 적용하고, 지반 및 토피조건이 불리하거나 양방향 4차도로 구성되는 경우에는 터널안정성 및 운전자 주행성 등에 유리한 2 Arch 터널이 적용되고 있다.

이와 같이 2 Arch 터널이 적용되는 경우에는 터널의 경제적인 측면보다는 병설터널의 구조적 안정성 확보가 중요시되는데, 아직까지 국내에서는 근접병설터널에 대한 시공실적 및 설계사례가 부족할 뿐만 아니라 그 역학적 거동에 대한 연구가 미흡하기 때문에 구조적 안정성에 대한 확신을 갖지 못하여, 자신 있게 적용하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 주로 시공되고 있는 2 Arch 1 Pilot 터널에서의 중앙필러부 거동 및 지반과의 상호 역학적 거동을 파악하고자 모형실험을 수행하였고, 모형실험 단면에 대하여 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

## 2. 모형실험

2 Arch 터널을 적용하면 굴착단면 및 자연훼손을 최소화하고, 인접도로의 연계성을 용이하게 확보할 수 있기 때문에 특히 도심지에서 그 적용이 증가하고 있다. 도심지에서 터널은 토피가 작은 토사터널이 주종을 이루고 천단·측벽·바닥아치의 형성이 어려워서 대개의 경우에는 터널의 안정성을 높이기 위하여 바닥에 인버트를 설치하게 된다.

본 연구에서는 실제 2 Arch 터널단면을 1/50로 축소 한 모형실험을 수행하였다. 이를 위하여 모형터널의 폭(40cm, 1D)에 해당하는 가동판을 제작하고 그 위에 모형터널 라이닝을 설치하였다. 특히 가동판은 3개의 판으로 분리하여 각 판의 개별적인 수직이동을 가능하게 하였으며 가동판의 1/3에 해당하는 중앙 Pilot 터널부를 강하시킴으로써 실제 Pilot 터널 굴착 및 굴착단면 크기에 의한 영향을 반영하였다. 라이닝의 기초부 구속조건은 인버트 폐합한 고정조건과 인버트를 폐합하지 않은 힌지조건으로 구분하여 실험하였으며 인버트 폐합 유·

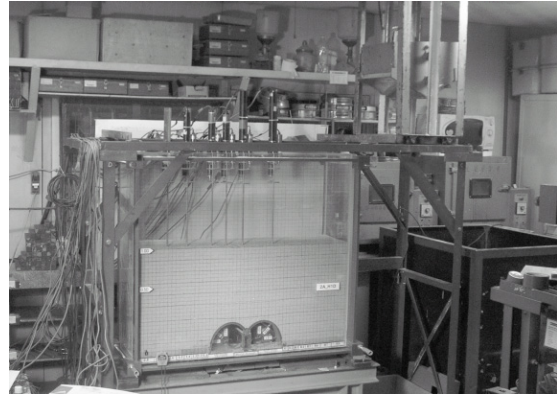


사진 1. 모형실험 전경

무에 따른 중앙필러의 거동과 터널 주변지반과의 상호 역학적 거동을 비교하였다.

### 2.1 모형토조

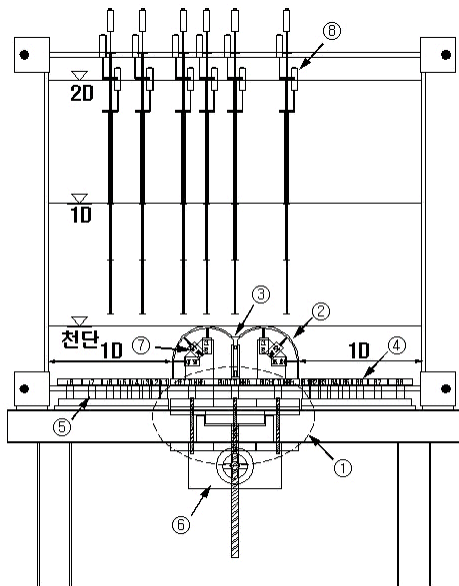
모형토조는 300mm□, 200mm□, 100mm (폭□깊이 □높이)로 제작하여 모형터널 측벽에서 좌·우로 1D, 천단에서 2D까지의 지반을 조성할 수 있도록 하였으며, 벽체는 실험지반의 전 과정을 외부에서 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴판을 이용하여 제작하였다. 벽면과 아크릴 판 사이의 마찰을 줄이기 위해 유리판을 지반과 아크릴 판 사이에 부착하였고 모형지반에 의한 재료의 변형을 방지하기 위하여 외부에 16mm□30mm의 평철 (steel flat bars)을 이용한 프레임으로 단단히 구속하였다.

가동판과 바닥판은 시험하중 (최대 100kg)에 비하여 강성이 크고 성형이 쉬운 베이클라이트판 (폐놀수지 재료로 단위중량 1.25~1.30tf/m<sup>3</sup>, 인장강도 490~560kgf/cm<sup>2</sup>, 압축강도 700~2,100kgf/cm<sup>2</sup>)을 사용하였다. 가동판은 실제 터널시공에서의 Pilot 터널 굴착을 모형화하기 위하여 Pilot 터널부, Right 및 Left 터널부 (각각 300mm□34mm)의 세 개의 분리된 시스템 (전체 가동판 길이 400mm, 1D)으로 제작하였고 특히 Pilot 터널부는 Pilot 터널의 굴착단면 크기에 따른 영향을 보기 위하여 가동판의 크기를 조절할 수 있게 하였다. 바닥판은 하중의 민감한 변화를 측정하기 위하여 터널에 인접한 곳은 작은 크기로 하고 터널에서 멀어질수록 크

계 하여 300mm □30, 40, 50, 65, 80mm로 제작하여 크기가 작은 판부터 점차 커지는 순서로 배치하였다. 각 판의 하부에는 로드셀을 부착하여 실험 중 하중의 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 가동판 강하시에는 마찰이 없도록 하였고 일정한 속도 (1mm/min)와 변위를 유지할 수 있도록 제작하였다.

## 2.2 모형터널

모형터널의 라이닝은 실제 터널에서의 라이닝 거동을



- ① Trap door 시스템 (Pilot, Right, Left 터널부 / 300mm□34mm)
  - ② 모형터널 라이닝
  - ③ 중앙필러 (Load Cell 2EA, 100kgf)
  - ④ 하중측정용 바닥판 (300mm□30, 40, 50, 65, 80mm)
  - ⑤ 하중측정용 Load Cell (100kgf)
  - ⑥ 기어박스
  - ⑦ 내공변위계
  - ⑧ 지중 및 지표 변위계
- ※ D : Diameter (40cm)

그림 1. 모형터널 및 모형토조

확인할 수 있도록 상사율을 고려하여 제작하였다. 결정된 길이, 질량 및 시간의 상사율을 내공변위와 지보재 압력의 관계식에 적용한 결과 모형실험에 사용하게 될 라이닝은 0.4mm 두께의 아연도금강판 (탄성계수 :  $2.11 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>)을 사용하여 제작하였다.

모형터널 라이닝의 기초부는 인버트를 폐합한 경우는 고정단으로, 인버트를 폐합하지 않는 경우는 힌지단으로 하여 바닥아치 형성 유·무에 따른 중앙필러부의 거동을 확인하였다.

Pilot 터널부 가동판 중앙에 100kgf 용량의 로드셀 두 개를 설치하여 2 Arch 터널의 중앙필러가 받는 축력을 측정하였다.

Right · Left 터널 내부에 내공변위계를 라이닝의 천정, 천정에서 45° 기울어진 어깨 및 측벽에 좌·우 대칭으로 설치하여 터널굴착과 상재하중에 의해 발생하는 내공변위를 측정하였다.

## 2.3 모형지반

모형지반은 입경이 작은 주문진 자연사를 사용하여 조성하였으며 조성된 모형지반의 특성을 알기 위하여 입도 분포시험 (KS F 2301), 최대·최소 건조단위중량시험 (DIN 18126), 비중시험 (KS F 2343) 등의 기본물성 시험을 수행하였다. 시험 결과, 시료의 기본물성은 표 1과 같다. 모형지반의 단위중량은  $1.69 \text{ tf/m}^3$ , 상대밀도는 74%이며 직접전단시험 (KS F 2348) 결과, 내부마찰각은  $37^\circ$  점착력은 0이다.

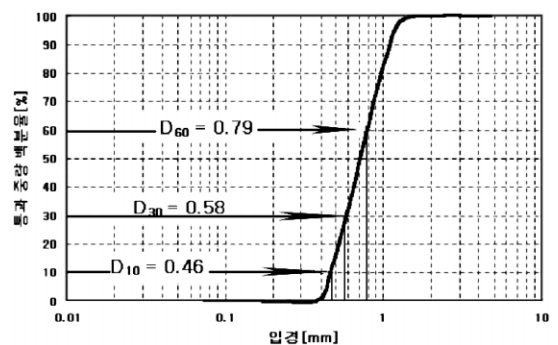


그림 2. 모형지반의 입경가적곡선

표 1. 모형지반의 물리적 시험 결과

물리적 특성	결 과
입도분포	$D_{10} = 0.46, C_u = 0.68$ $C_c = 0.79$
최대 · 최소 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 1.79 \text{tf/m}^3$ $\gamma_{dmin} = 1.46 \text{tf/m}^3$
비 중	2.61
통일분류법에 의한 지반 분류	SP

### 2.4 지반변위 측정

Pilot 터널굴착 및 Right · Left 터널굴착으로 인한 지반의 변위를 측정하기 위하여 중앙필러를 중심으로 0.23D, 0.19D, 0.33D, 0.26D의 간격을 두고 좌 · 우 대칭으로 지표 9개소 및 지중 18개소 (총 27개소)에 변위계를 설치하였다. 지표 및 지중변위계의 측정위치는 주동파괴각도와 아칭이론에 의한 이완높이를 고려하여 결정하였다 (그림 3).

### 2.5 하중전이 측정

터널굴착으로 인하여 지중응력이 재분재됨에 따라 주변지반은 새로운 응력상태가 된다. 즉, 터널상부지반에 이완영역이 형성되고, 굴착면의 변위가 지속되면 이러한

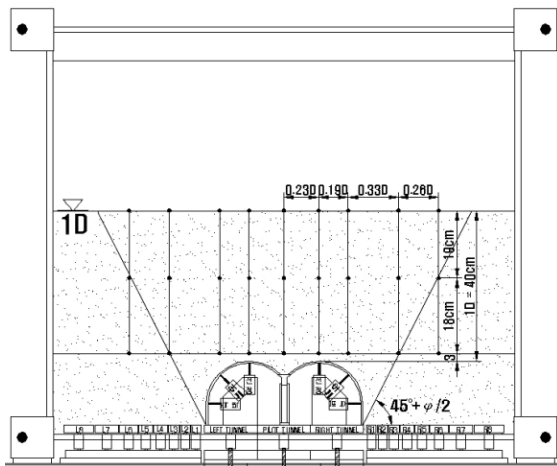


그림 3. 지반변위 계측위치

영역이 확대되고 변위가 더 계속되면 지보공에 하중으로 작용한다. 이완영역의 상부경계는 아치 (Arch) 형태로 형성되며 그 상부하중은 주변지반으로 전이된다. 따라서 이러한 하중전이를 측정하기 위하여 가동판 좌 · 우의 바닥판을 세분화하여 하중변화를 측정하였다.

### 3. 실험방법

모형실험에서는 2 Arch 1 Pilot 터널의 실제 시공순서를 반영하여 각 단계별 중앙필러의 하중과 주변지반의 거동을 확인하였다.

가동판 위에 모형터널 라이닝과 중앙필러를 설치한 뒤 강사장치를 이용하여 모형지반을 균질하게 조성하였다.

중앙필러는 중앙 Pilot 터널부 가동판 위에 고정하였고 모형터널 라이닝은 Right · Left 터널부 가동판 위에 라이닝 기초 구속조건에 따라 힌지조건과 고정조건으로 설치하였다. 모형터널 라이닝 내부는 모형지반과 동일한 단위중량으로 조성하였다.

중앙필러부 하중이 '0'에 수렴할 때까지 중앙 Pilot 터널부 가동판을 강하시킴으로써 실제 Pilot 터널굴착을 모형화하였다. 본 터널굴착은 충분한 안정화 시간을 가진 후에 강하판을 고정시키고 Right · Left 터널라이닝 내부를 기초 구속조건이 고정조건에서는 전단면굴착으로 Right 터널 굴착 후 Left 터널을 굴착하였고 힌지조건에서는 구조적 안정성을 고려하여 상 · 하 반단면 즉,



그림 4. 실험순서

4단계(Right 터널 상부→Left 터널 상부→Right 터널 하부→Left 터널 하부)에 걸쳐 굴착하였다.

또한, 상재하중에 의한 중앙필러의 거동을 확인하기 위하여 터널을 굴착한 후에 1.7kgf의 각철을 일정한 간격으로 설치하여 한번에 0.79kgf/cm씩의 등분포하중을 총 4단계에 걸쳐서 재하하였다.

등분포하중 제하 후 중앙 Pilot 터널과 Right · Left 터널이 설치된 전체 가동판을 강하하여 터널굴착으로 인한 이완영역의 형성과 아칭효과에 의한 하중전이 및 지반변위를 일정한 간격으로 뿌려놓은 염색사와 중앙필러 및 24개의 바닥판에 설치한 로드셀로 확인하였다.

모든 실험은 각 단계별로 안정화 시간을 두어 하중이 충분히 수렴하도록 하였다.

## 4. 수치해석

본 연구에서 수행한 모형실험에 대하여 비선형 유한요소 프로그램인 PENTAGON -3D를 이용하여 수치해석을 실시하였고 해석단면과 해석영역, 물성치 및 해석단계는 모형실험과 동일하게 적용하였다.

수치해석결과는 실험결과와 비교하였다.

### 4.1 유한요소 모델링

수치해석에 사용된 3차원 유한요소 mesh는 그림 5와 같으며 터널 라이닝과 중앙필러부는 각각 shell 요소와 육면체 요소로 모델링하였다.

수치해석에 적용된 물성은 모형실험에 적용한 모형지반 및 모형라이닝과 같은 값을 적용하였다(표 2, 3).

## 5. 결과 및 분석

### 5.1 중앙필러의 역학적 거동

터널의 이격이 불가능하고 지반상태가 대단면 터널로 굴착하기가 매우 어렵거나 비경제적인 경우에 터널의 안정성 확보를 위해 중앙필러를 터널 중앙에 설치하게 되

표 2. 모형지반 입력물성치

	Sand	Pillar
단위중량 $tf/m^3$	1.69	7.85
변형계수 $10^3tf/m^2$	3	20,000
포아송 비	0.4	0.3
내부 마찰각 $^\circ$	36.9	45
점착력 $tf/m^2$	0	1350

표 3. 모형라이닝 입력물성치

	모형라이닝
단위중량 $tf/m^3$	7.85
탄성계수 $10^3tf/m^2$	21,100
포아송 비	0.3
라이닝 두께 mm	0.4

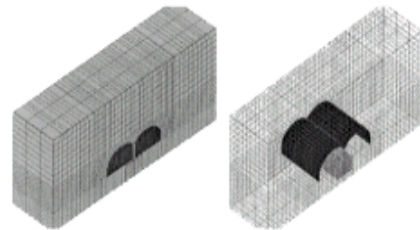


그림 5. 3차원 유한요소 mesh

는데 이때 중앙필러에 작용하는 하중은 Pilot 터널의 크기 및 굴착단계에 따라 달라진다. 그러나 아직까지 중앙필러에 작용하는 하중산정에 관한 설계방법이 정립되어 있지 않은 실정이다

따라서 본 연구에서는 국내에서 주로 시공되고 있는 기존 2 Arch 1 Pilot 형태를 갖는 터널의 역학적 거동특성을 규명하고자 수행하였다.

시공단계에 따라 중앙필러에 작용하는 하중변화를 기초 고정 · 힌지조건인 경우에 대하여 연속적으로 나타내면 그림 6과 같이 중앙필러의 작용하중은 두 가지 경우가 비슷한 경향을 보였으나 고정조건인 경우가 힌지조건인 경우에 비하여 중앙필러부 작용하중이 다소 작게 측정되었다. 모형지반 단계별 조성시 (토피고 0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D) 중앙필러의 작용하중은 선형적으로 증가하여 지반조성 완료후에 최대치를 나타내었다.

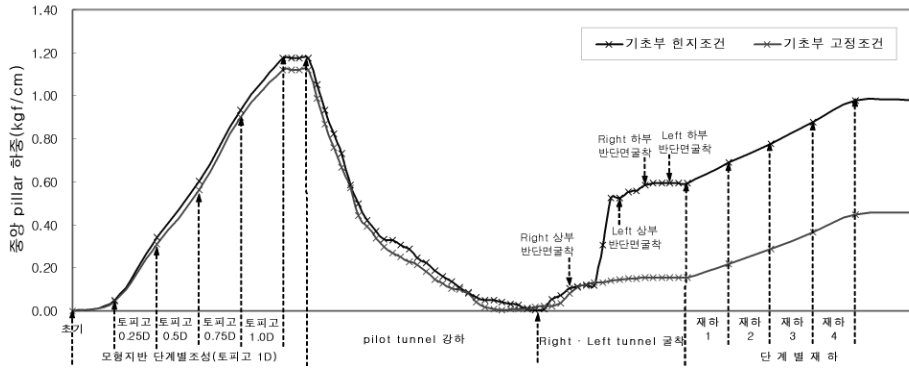


그림 6. 시공단계별 중앙필러 작용하중 (모형실험)

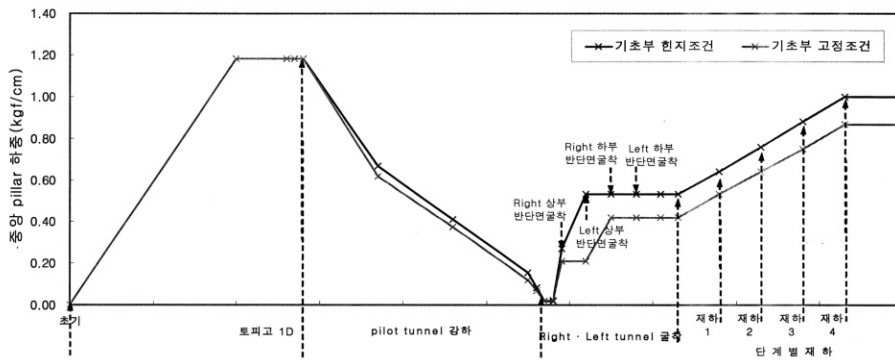


그림 7. 시공단계별 중앙필러 작용하중 (수치해석)

Pilot 터널굴착을 모사하기 위해서, 중앙 Pilot 터널부 가동판을 0.1mm 씩 강하시켜서 중앙필러 작용하중을 최대치에서 서서히 감소시켜 '0'에 수렴시켰다. 기초부 고정조건인 경우 수직변위 2.2mm 발생 후 수렴하였으며 단계별 하중 수렴시간은 6분이 소요되었다. 반면에 기초부 힌지조건인 경우는 수직변위 2.7mm 발생 후 중앙필러 작용하중이 수렴하였으며 단계별 하중 수렴시간은 다소 길어 10분이 소요되었다 (그림 8).

기초부 고정조건에서 「Right 터널 → Left 터널」 순서로 전단면굴착할 때에 중앙필러 작용하중은 완만하게 증가하였다. 반면에 기초부 힌지조건인 경우에는 「Right 터널 상부 → Left 터널 상부 → Right 터널 하부 → Left 터널 하부」 순서로 반단면굴착을 적용하였음에도 불구하고 중앙필러 작용하중은 Right 터널 상부 반단면굴착 이후 급격하게 증가하였다 (그림

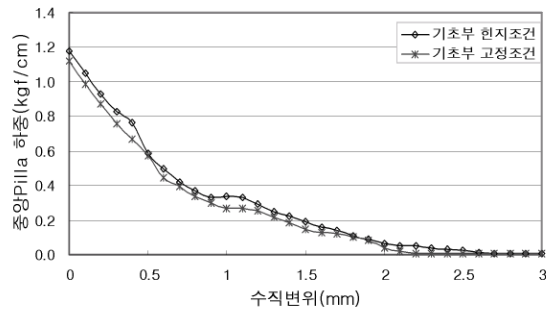


그림 8. Pilot 터널부 강하에 따른 중앙필러 작용하중 (모형실험)

6, 7).

상재하중은 각 단계별로 0.79kg/cm 씩 총 4단계로 나누어 가하였다. 재하시 중앙필러에 작용하는 하중은

단계별 재하에 따라 (총 4단계 재하) 일정한 비율로 증가하였다. 중앙필러에 전달되는 하중은 기초부 고정조건인 경우 중앙필러를 중심으로 0.23D에서 0.26D에 해당하는 폭의 등분포하중이, 기초부 힌지조건인 경우에는 0.33D에서 0.34D에 해당하는 폭의 등분포하중이 중앙필러에 작용하는 것으로 나타났다 (그림 10, 11).

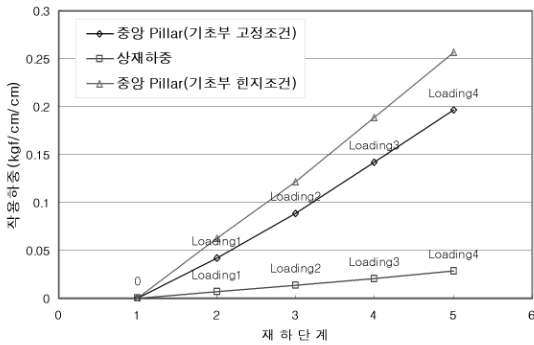


그림 9. 상재하중에 의한 중앙필러 작용하중

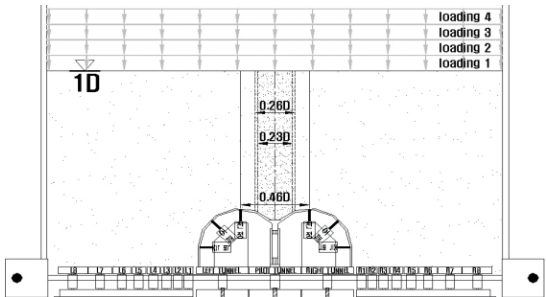


그림 10. 중앙필러에 작용하는 하중-기초부 고정조건 (모형 실험)

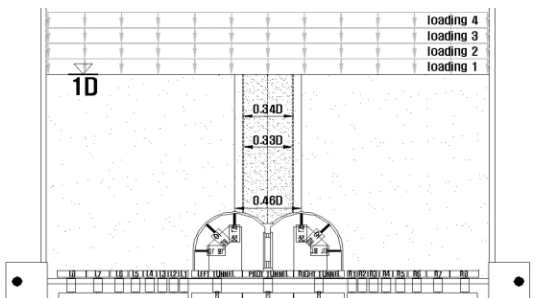


그림 11. 중앙필러에 작용하는 하중-기초부 힌지조건 (모형 실험)

## 5.2 주변지반으로의 하중전이

바닥판에 작용하는 연직토압은 실험 중 바닥판에 가해진 하중을 바닥판의 면적으로 나눈 값으로 하였다.

Pilot 터널부를 강하하면 Right · Left 터널부에 작용하는 하중은 서서히 증가하였다. 이와 함께 가동판에 인접한 순서대로 바닥판의 하중도 증가하여 중앙필러부의 토압이 최저점 즉, '0'에 도달하였을 때 최대가 되었다.

지반이 이완됨에 따라 주변지반으로 하중이 전이되는 경향은 모형터널 라이닝의 기초부 구속조건에 따라 다르게 나타났다. 기초부 고정조건인 경우 중앙 Pilot 터널부가 강하됨에 따라 고정되어 있는 Right · Left 터널부의 하중증가가 고르게 발생하고 가동판 주변 바닥판의 하중증가가 고르게 분산되었다. 반면에 기초부 힌지조건인 경우에는 가동판에 바로 인접해 있는 바닥판에서 하중증가가 최대 발생하고 모형터널 라이닝 측벽에서 0.25D 떨어진 지점까지 하중증가가 집중되다가 그 이후부터는 수렴하는 경향을 나타내었다 (그림 10, 11).

따라서 터널굴착에 따른 하중전이 범위는 기초부 힌지조건은 넓지 않았으나 기초부 고정조건에서는 넓은 범위로 나타났다.

중앙필러 작용하중이 '0'에 수렴할 때까지 Pilot 터널부를 강하한 후 충분히 안정화 시간을 가진 뒤에 기초부 구속조건에 따라 Right · Left 터널을 굴착하였다. 기초부 고정조건인 경우 Right · Left 터널을 전단면굴착한 결과 중앙필러부 작용하중은 증가하였다. 기초부 힌지조건인 경우에는 Right 터널의 상부반단면 굴착 후 중앙필러의 작용하중이 급격하게 증가하였으며 가동판에 인접해 있는 바닥판에 작용하는 하중 역시 증가하였다. 하중증가는 라이닝 측벽에서 0.5D 내에 집중되었고 0.75D 지점에 이르러서는 수렴하였다 (그림 14, 15).

## 5.3 지반변위

터널굴착으로 인한 이완영역의 형성과 아칭현상을 측정하기 위하여 지정한 지표 9개소, 지중 18개소에서 연직변위를 측정하였고 염색사를 모형지반 조성중에 일정한 간격으로 뿌려 지반의 이완거동을 확인하였다. 기초부 고정조건과 기초부 힌지조건에서 지중 및 지표의 변

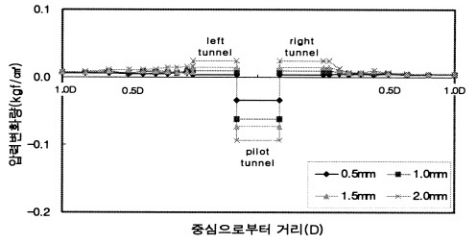


그림 12. Pilot 터널부 강하에 따른 중앙필러의 압력변화-기초부 고정조건 (모형실험)

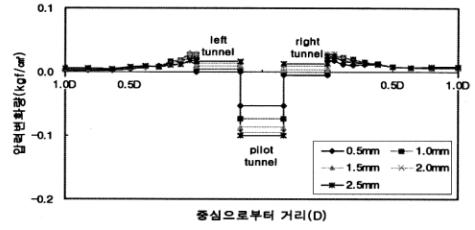


그림 13. Pilot 터널부 강하에 따른 중앙필러의 압력변화-기초부 힌지조건 (모형실험)

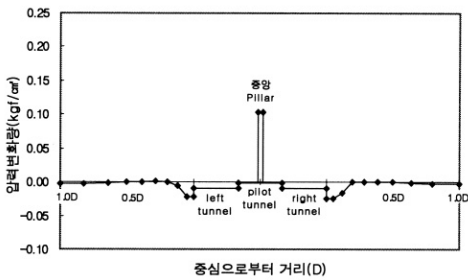


그림 14. 좌·우 터널 굴착으로 인한 중앙필러의 압력변화-기초부 고정조건 (모형실험)

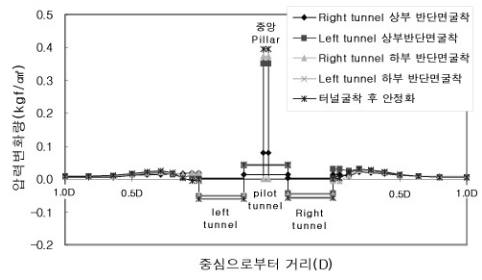


그림 15. 좌·우 터널 굴착으로 인한 중앙필러의 압력변화-기초부 힌지조건 (모형실험)

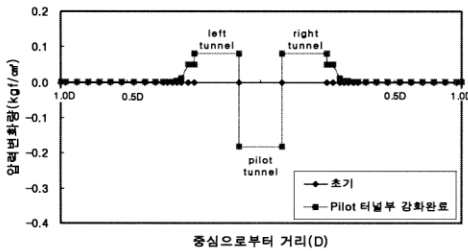


그림 16. Pilot 터널부 강하에 따른 중앙필러의 압력변화-기초부 고정조건 (수치해석)

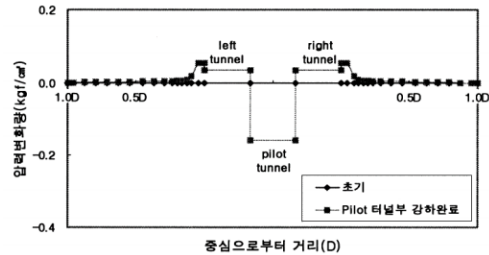


그림 17. Pilot 터널부 강하에 따른 중앙필러의 압력변화-기초부 힌지조건 (수치해석)

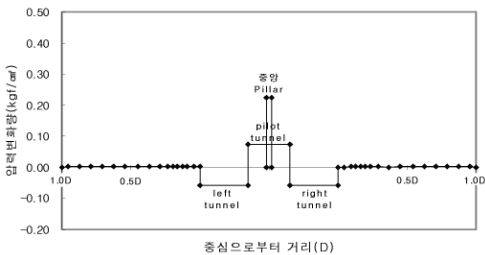


그림 18. 좌·우 터널 굴착으로 인한 중앙필러의 압력변화-기초부 고정조건 (수치해석)

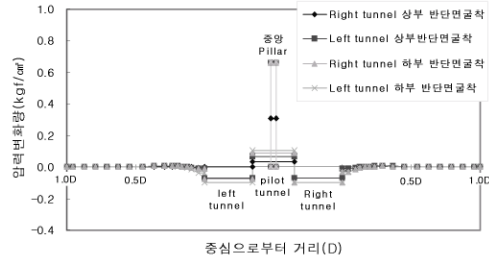


그림 19. 좌·우 터널 굴착으로 인한 중앙필러의 압력변화-기초부 힌지조건 (수치해석)



위는 유사한 경향을 나타내었고 기초부 고정조건인 경우에 변위가 작게 발생하였다. 기초부 구속조건에 따른 변위의 차이는 실험종료 후 지반의 변위가 수렴한 상태에서의 염색사의 변형으로부터 예상할 수 있는 지반이완형태로도 확인할 수 있다.

### 5.4 내공변위

모형터널의 라이닝 내부 측, 천정, 천정에서 45° 기울어진 어깨 및 측벽 (좌·우 대칭 6개소)에 내공변위계를 설치하여 각 시공단계별 발생하는 내공변위를 측정하였다. 기초부 고정조건인 경우의 시공단계별 내공변위 거동

은 천단부에서는 좌·우 터널이 같은 거동을 보였으나 어깨부와 측벽부에서는 서로 반대의 거동을 보였다. 천단부의 내공변위는 Pilot 터널과 좌·우 본 터널 굴착시 단면확대방향으로 증가하였고 단계별 재하 및 제하시에는 단면축소방향으로 감소하다가 다시 증가하였다. 반면에 측벽부 내공변위는 굴착순서에 따라 서로 반대의 거동을 나타내었는데 우측측벽에서는 우측터널 굴착시 단면확대방향으로 증가하다가 좌측터널 굴착시에는 단면축소방향으로 감소하였고 단계별 재하 및 제하에 따라 단면축소방향으로 감소, 단

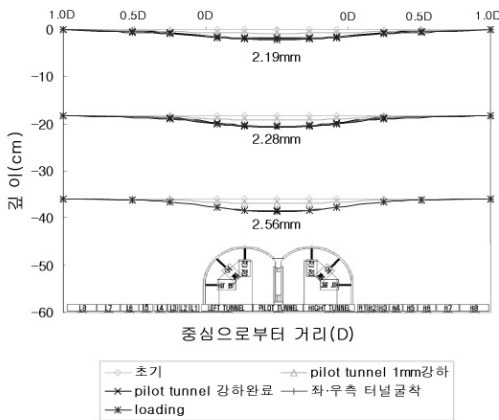


그림 20. 단계별 지반변위-기초부 고정조건 (모형실험)

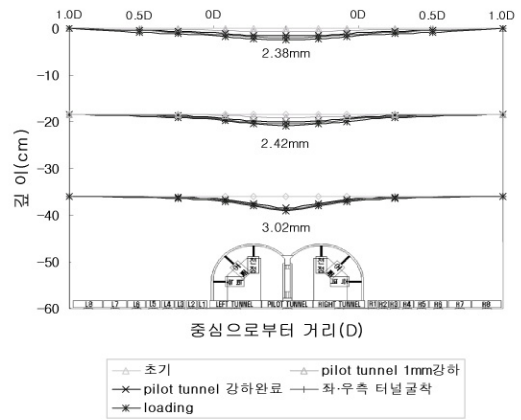


그림 21. 단계별 지반변위-기초부 힌지조건 (모형실험)

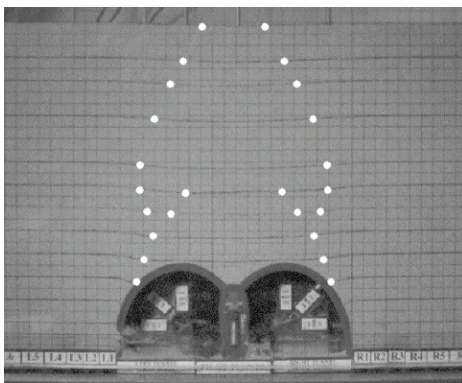


사진 2. 지반이완형태 (기초부 고정조건)

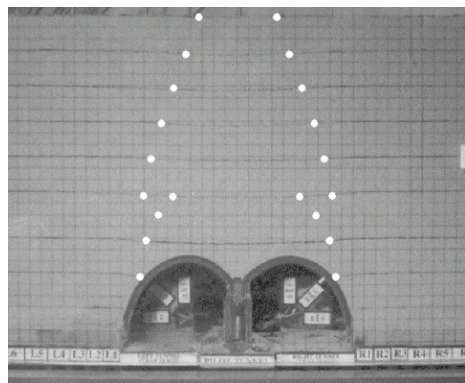


사진 3. 지반이완형태 (기초부 힌지조건)

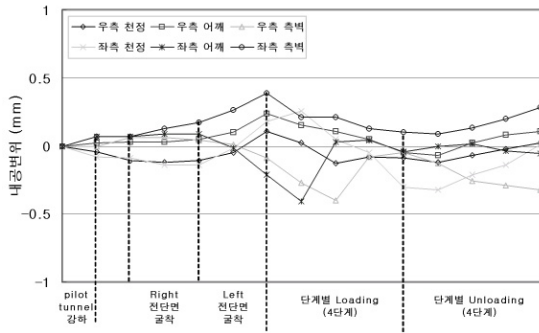


그림 22. 시공단계별 내공변위 (모형실험-기초부 고정조건)

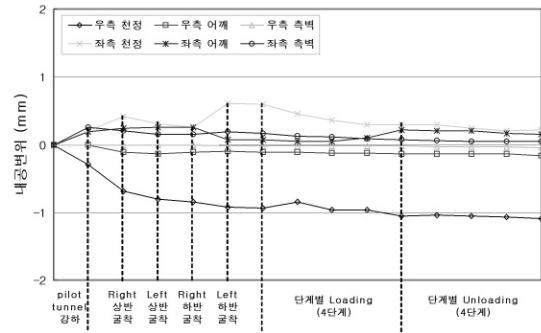


그림 23. 시공단계별 내공변위 (모형실험-기초부 힌지조건)

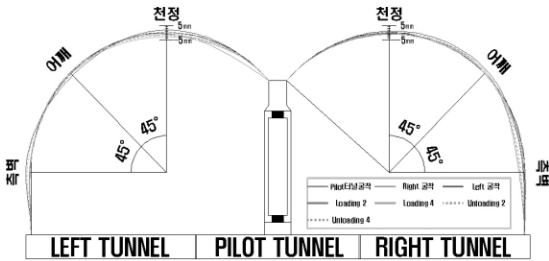


그림 24. 시공단계별 내공변위 (모형실험-기초부 고정조건)

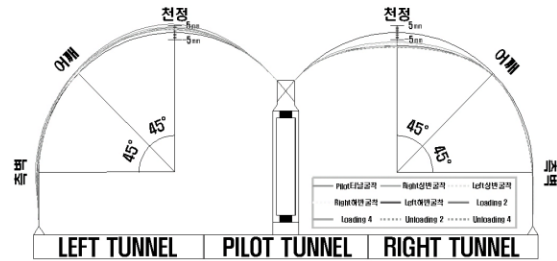


그림 25. 시공단계별 내공변위 (모형실험-기초부 힌지조건)

계별 제하에 따라서는 다시 증가하였다. 어깨부 내공변위에서 우측어깨는 좌측측벽과, 좌측어깨는 우측측벽과 유사한 거동을 보였다. 기초부 힌지조건인 경우 시공단계별 내공변위 거동은 천단부는 전 시공단계에서 단면축소방향으로 발생하였고 어깨부와 측벽부의 경우 천단부에 비하여 내공변위의 변화량은 미소하였으나 어깨부는 단면확대방향으로, 측벽부는 단면축소방향으로 발생하였다.

기초부 구속조건에 따라 발생된 내공변위를 비교하면 고정조건에서는 힌지조건에 비하여 시공단계별 변화폭이 크게 발생하였으나 내공변위의 절대치는 작게 측정되었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 2 Arch 1 Pilot 터널을 모델링하고 사질토지반을 조성하여 실제 시공순서를 고려한 실험순서

에 따라 모형실험을 수행하였다. 특히 인버트 폐합 유·무에 따른 중앙필러와 주변지반의 상호 역학적 거동을 규명하기 위하여 모형터널 라이닝의 기초부 구속조건을 고정조건과 힌지조건으로 나누어 실험하였다.

모형실험 결과 각 단계별 측정값 및 연속적인 거동으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중앙필러 작용하중은 토피고 1D까지 모형지반을 조성한 직후에 최대치를 나타내었다가 Pilot 터널을 굴착함에 따라 '0' 수렴하고 본 터널인 좌·우 터널 굴착과 상재하중 재하에 의해 다시 증가하였다.
2. 중앙필러에 작용하는 하중은 기초부 고정조건인 경우와 기초부 힌지조건인 경우 비슷한 경향을 나타내었고 다만 기초부 고정조건인 경우가 대체로 작은 값을 보였다. 그러나 본 터널(좌·우 터널) 굴착시 기초부 힌지조건인 경우에 급격한 하중증가를 보였다.
3. Pilot 터널부 강하시 필러작용하중의 수렴시간은 기초부 고정조건보다 힌지조건에서 긴 시간이 소요되었

다. 중앙필러 작용하중이 수렴하기까지의 강하높이는 현지조건에서 크게 측정되었다.

4. Pilot 터널부 강하에 따른 하중전이거동은 기초부 고정조건인 경우 Right·Left 터널부에서 하중증가가 최대 발생하였고 예상터널 주변 바닥판의 하중증가는 고르게 분포되었다. 반면에 기초부 현지조건인 경우의 하중증가는 좌·우 터널부에서 최대 발생하였고 예상터널 측벽에서 좌·우 0.25D 떨어진 지점까지 집중되었다.
5. 상재하중은 단계별로 0.79kg/cm의 등분포하중을 4회에 걸쳐 재하하였으며 기초부 고정조건인 경우 중앙의 0.23D에서 0.26D 폭에 해당하는 등분포하중이, 기초부 현지조건인 경우에는 0.33D에서 0.34D 폭에 해당하는 등분포하중이 중앙필러에 작용하였다.
6. 본 터널굴착으로 인한 하중전이는 터널측벽에서 0.5D 이내에 집중되었고 0.75D보다 멀리 떨어진 곳에서는 하중전이가 거의 일어나지 않았다.
7. 터널의 주변지반변위는 두 가지 경우 비슷한 경향을 나타내었고 기초부 고정조건인 경우 변위값이 작게 측정되었는데 이는 염색사의 변형으로 예상할 수 있는 지반이완영역의 범위가 기초부 현지조건에 비하여 넓게 형성한 것으로부터 확인할 수 있었다.
8. Pilot 터널 및 본 터널 굴착시 터널 라이닝의 천단부 내공변위는 기초부 고정조건에서는 단면확대방향으로 기초부 현지조건에서는 단면축소방향으로 발생하였다.
9. 터널 라이닝의 내공변위는 기초부 고정조건인 경우 시공단계에 따라 내공변위의 변화폭이 현지조건에 비하여 크게 발생하였으나 내공변위 절대치는 작게 측정되었다.

## 참고문헌

1. 이상덕, 최수일, 구자갑 (1994), “안정된 지하구조물의 설계 및 시공”, 도서출판 새론.
2. 이상덕 (1997), “기본토질시험-원리와 방법”, 도서출판 새론.
3. 이상덕 (1998), “토질역학”, 도서출판 새론.
4. 권혁민 (2001), “사질토 지반에서 터널굴착에 의한 하중전이”, 석사학위논문, 아주대학교.
5. 이상덕, 권혁민, 변광욱, 강세구 (2002), “Influence of the discontinuity planes on the shallow tunnel behavior”, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, ITA, pp. 58-66.
6. 이상덕, 변광욱, 유건선 (2002), “불연속면이 존재하는 지반에서 터널굴착에 의한 하중전이”, 터널기술, 4권 1호, pp. 71-78.
7. 김양운, 이상덕 (2003), “불연속면을 포함한 사질토 지반에서 터널 굴착에 따른 하중전이”, 터널기술, 5권 3호, pp. 217-225.
8. 아주대학교 토목기술연구소 (2003), “2 Arch 터널의 역학적 거동특성에 관한 연구”.
9. 두사건설(주), (주) 대진구조엔지니어링 (2003), “석수동 도시계획도로 개설공사 터널검토보고서”.
10. Terzaghi, K. (1936), “Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door”, Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Cambridge, Vol. 1.
11. Terzaghi, K. (1943), “Theoretical soil mechanics”, John Wiley & Sons, New York.
12. Zvi Getzler (1970), “Analysis of arching pressures in ideal elastic soil”, Journal of soil mechanics and foundations, Vol. 96, No. SM4.
13. Richard L. Handy (1985), “The arch in soil arching”, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 111, No. 3.
14. T. I. Addenbrooke (2001), “Twin Tunnel Interaction : Surface and Subsurface Effects”, The Journal of Geomechanics, Vol. 1.
15. 임영국 역 (1999), “알기쉬운 터널역학”, 원기술, pp. 447-456.
16. 홍성영 역 (2002), “터널의 설계이론”, 탐구문화사, pp. 111-127.
17. 윤지선, 박종관 (2003), “토목기술자를 위한 암반역학”, 구미서관, pp. 448-451.
18. B. H. G. Brady and E. T. Brown, “Rock Mechanics for underground mining”, Chapman & Hall, pp. 196-199.
19. Ono, K., Yamade M. (1993) “Analysis of the arching action in granular mass”, Geotechnique, Vol. 43, No. 1.
20. Kouthabeloulis, N. C. and Griffiths, D. V. (1989) “Numerical modeling of the trap door problem”, Geotechnique, Vol. 39, No. 1.
21. Kingsley O. Harrop-Williams. (1989) “The arch in soil arching”, Journal of Geotechnical Engineering

---

Division, ASCE, Vol. 111, No. 3.  
22. Vardoulakis, I., Graf, B. and Gudehus, G. (1981)  
“Trap-door problem with Dry Sand : A Staeical

Approach based upon Model Test Kinematics”,  
Int. J. Num. Analy. Meth. Geomech., Vol. 5.



**이상덕**

아주대학교 건설시스템공학과 교수  
lsangduk@ajou.ac.kr



**전은숙**

아주대학교 건설교통공학과  
석사과정  
sooka79@hotmail.com