

## 축소모형실험을 통한 근접터널의 거동에 관한 연구

# A Study on the Behavior of a Closely-Spaced Tunnel by Using Scaled Model Tests

안현호<sup>1)</sup>, Hyun-Ho Ahn, 최정인<sup>1)</sup>, Jung-In Choi, 이석원<sup>2)</sup>, Seok-Won Lee, 심성현<sup>3)</sup>, Seong-Hyeon Shim

<sup>1)</sup> 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University

<sup>2)</sup> 건국대학교 사회환경시스템공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University

<sup>3)</sup> 삼성물산 건설부문 토목 ENG팀 차장, Deputy General Manager, Civil ENG Team, Samsung Corporation

**SYNOPSIS** : Lots of roadway tunnel have been almost constructed in forms of closely-spaced tunnel in Korea. If closely-spaced tunnel is not constructed at a sufficient distance between tunnels, the problem of stability can occur. However, the case that can not secure a sufficient distance between tunnels can occur due to a difficulty in buying a lot and an issue of popular complaint and environmental disruption. Generally, tunnels are not influenced by each other when a center distance between tunnels is two times longer than tunnel diameter under the complete elastic ground and five times under the soft ground. In this study, the scaled model tests of closely-spaced tunnel by using homogeneous material were performed and induced displacements were measured around the tunnel openings during excavation. The influence of distance between tunnels on the behavior of closely-spaced tunnel was investigated.

**Key words** : closely-spaced tunnel, scaled model tests, tunnel behavior, twin tunnel

## 1. 서 론

- 도로 건설시 최근 용지확보의 제한과 선형문제 및 환경훼손 최소화 등을 고려하여 터널의 시공이 증가하고 있다. 이로 인해 터널 건설기술도 발전되어 최근의 터널은 대단면화 되고 터널 간 이격거리가 근접된 형태로 건설되고 있는 추세이다. 병설터널은 상행터널과 하행터널이 수평으로 배치된 국내 터널의 가장 보편적인 형태이다. 병설터널은 터널 간 이격거리를 충분히 확보하지 않으면 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 그러나 최근 용지 확보의 어려움과 선형문제, 환경파괴 우려 등으로 터널 간 이격거리를 충분히 확보하지 못하는 경우가 종종 발생하고 있다. 이러한 어려움으로 인해 설계를 근접터널이나 2-Arch 터널로 적용하는 사례가 많아지고 있다. 하지만 이러한 터널 상호간의 거동에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 근접터널 이격거리에 대하여 지반이 완전탄성체일 경우에는 중심 간격이 굴착폭(D)의 2배, 지반이 연약지층인 경우 5배 이상으로 하면 터널 상호간에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 근접터널에서 터널 간 이격거리의 변화에 따른 굴착단계별 터널 상호간의 거동을 축소모형실험을 통해 분석하였다.
- 본 연구의 목표는 근접터널을 건설할 때 굴착과정 시 발생하는 터널 상호간의 거동을 분석하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 2차원 축소모형실험을 수행하였다. 모형 재료로 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하여 지반을 모사하였고, 터널굴착은 원형터널로 굴착과정을 모사하였다. 터널 상호간

의 거동을 분석하기 위하여 터널 주변에 포인트를 마킹하여 포인트들의 변위량을 측정하였다. 변위량은 굴착단계별로 측정하여 굴착 과정 중의 터널 거동을 파악하고자 하였다. 이와 같은 방법으로 터널 중심 간격을 달리하여 4가지 모델에 대하여 실험을 수행하였다.

## 2. 축소모형실험

### 2.1 모형재료

본 실험에 사용된 모형재료는 모래:석고:물의 혼합물로서 이 재료는 이전의 연구 성과에서 많은 장점이 알려진 바 있어 축소모형실험에 널리 사용되고 있다(김중우 등, 2004; 전석원 등, 2003; 안현호 등, 2006). 본 연구에서 설정한 모형재료의 목표 강도는  $0.28MPa$  이고, 이와 같은 모형을 만들기 위하여 각 재료의 배합비를 달리하여 일축압축강도 시험을 실시하였는데, 모래:석고:물의 중량비가 1: 1: 2.5 인 공시체의 단위중량이  $7.2kN/m^3$ 이 되었을 때 원하는 강도를 얻을 수 있었다.

### 2.2 차원해석

원지반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소모형실험을 실시할 때 현장조건이 충분히 구현될 수 있도록 하기 위해서는 원지반과 축소모형간의 상사성(차원 해석)을 실시해야 한다. 세 가지 기본 차원을 길이[L], 질량[M], 시간[T] 이라고 할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정한 후 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 응력, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1969; 전석원 등, 2003).

길이에 대한 축소율은 현장 터널의 폭을  $14m$ 로 가정하고 모형의 크기( $1,000 \times 600 \times 100mm$ )를 고려하여 터널의 상·하좌·우로 1.5D 이상만큼 지반이 존재할 수 있도록 모형 터널의 폭을  $140mm$ 로 정하여 1/100로 하였다.

시간에 대한 축소율은 중력가속도 일정 원리가 사용된다. 즉, 중력가속도  $[LT^{-2}]$ 는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식 (1)에 의하여 시간[T]의 축소율은 1/10이 된다.

$$\frac{L}{T^2} = 1 \quad (1)$$

모래+ 석고+ 물의 혼합물의 밀도는  $7.2kN/m^3$  이고 원지반의 밀도를  $21.4kN/m^3$  로 가정하면 식 (2)에 의하여 밀도  $[ML^{-3}]$ 에 대한 축소율은 1/2.97이 된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{7.2}{21.4} = \frac{1}{2.97} \quad (2)$$

여기서 길이[L]의 축소율은 1/100이므로 식 (2)에서 질량[M]의 축소율은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$M = \frac{1}{2.97} \times L^3 = \frac{1}{2.97} \times \left(\frac{1}{100}\right)^3 = \frac{1}{2.97 \times 10^6} \quad (3)$$

여기까지 기본 차원인 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 결정되었다. 따라서 응력, 탄성계수, 강도 등  $[ML^{-1}T^{-2}]$ 의 축소율은 식 (4)와 같이 1/297로 구하여진다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{2.97 \times 10^6}\right)}{\left(\frac{1}{100}\right) \times \left(\frac{1}{10}\right)^2} = \frac{1}{297} \quad (4)$$

### 2.3 실험 방법 및 해석 프로그램

본 연구에 사용된 모형실험장치는 그림 1과 같이 2,290×1,930×710mm(가로×세로×폭) 크기로 제작되었다. 하부면은 철판으로 고정되어 있고 전·후면은 아크릴을 먼저 대고 프레임을 추가로 설치하여 하중 가압에 따른 아크릴의 휨을 방지하여 평면 변형률 조건을 적용하였다. 하중은 좌·우 측면과 상부면의 가압판으로 가압하였다. 즉, 상부에 1개, 좌·우 측면에 각각 1개씩, 총 3개의 가압장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 상부의 하중 가압장치는 서보 컨트롤 시스템이고, 측면은 유압식인데 좌·우 실린더를 하나의 유압잭에 연결하여 좌·우의 하중 가압량이 동일하도록 하였다. 그리고 유압잭은 실린더가 크지 않으면 미세한 압력조절이 어려운 단점이 있는데 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유압잭에 압력셀과 유량을 조절할 수 있는 밸브를 설치하여 보다 정확하고 미세한 컨트롤이 가능하도록 하였다.

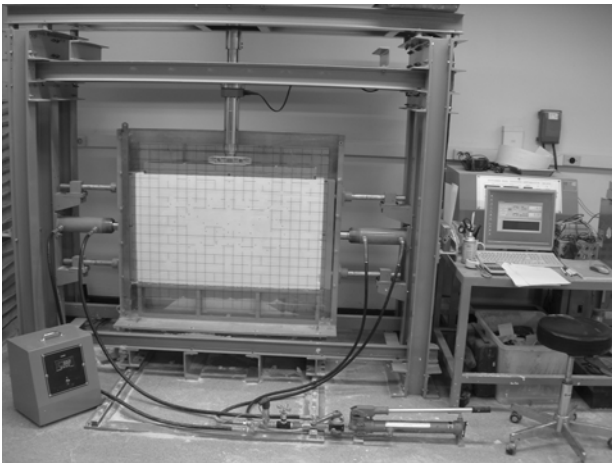


그림 1. 2차원 축소모형실험 장치

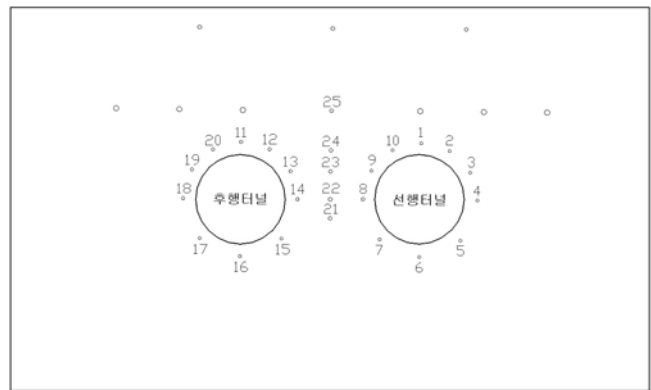


그림 2. 포인트 위치도

- 1: 선행터널 천단부      21: 필터중앙부에서 3cm 아래
- 4: 선행터널 우측벽부    22: 필터중앙부
- 6: 선행터널 바닥부    23: 필터중앙부에서 5cm 위
- 8: 선행터널 좌측벽부    24: 필터중앙부에서 8cm 위
- 11: 후행터널 천단부    25: 필터중앙부에서 14cm 위
- 14: 후행터널 우측벽부
- 16: 후행터널 바닥부
- 18: 후행터널 좌측벽부

가장 먼저 모형을 배합비에 맞게 제작하여 단위중량이 7.2kN/m<sup>3</sup>이 될 때까지 양생시켰다. 전면의 아크릴을 제거한 후 실험장치에 모형을 거치시키고 변위를 측정하기 위하여 그림 2와 같이 포인트를 찍었다. 이는 사진측량 software인 PhotoModeler Pro 5를 이용하여 모형의 변위를 측정하기 위한 것이다. 이 작업이 완료되면 전면의 아크릴을 조립하고 모형에 하중을 가압하게 된다.

하중은 측압계수(K) 조건에 따라 상부와 좌·우 측 방향으로 가압하는데 최종하중을 14단계로 나누어 각 단계 사이에는 일정 시간을 두고 단계별로 하중을 가압한다. 본 실험에서는 모형의 강도를 고려하여 최종 하중으로 상부는 14kN, 측 방향 하중은 9.8kN으로 설정하였다. 최종 하중에 도달한 후 모형의 안

정화를 위하여 1시간 정도 기다린다. 안정화 단계 후 터널을 굴착하게 되는데 선행터널과 후행터널로 나누어 원형으로 굴착하였고 굴착도구로 드릴을 이용하였다. 선행터널 굴착이 완료되면 다시 1시간 정도 안정화 단계를 거쳐 후행터널을 굴착한다. 같은 방법으로 후행터널 굴착이 완료되면 1시간 정도 안정화 단계를 거친다.

터널이 견딜 수 있는 최대 하중을 파악하기 위해 상부하중 가압량을 1kN씩 단계별로 증가시켰다. 측압계수 조건에 따라 측 방향 하중도 동시에 증가시켰다.

실험의 전 과정에 있어 각 단계마다 디지털 카메라로 사진촬영을 하여 PhotoModeler Pro 5로 변형양상을 분석했다. PhotoModeler Pro 5는 삼각측량 원리를 이용하여 타겟의 위치를 추적해내는 프로그램으로써 일반적인 고해상도 카메라를 이용할 때 1/5000의 정확도를 보이며, 본 연구에서는 최소 계측한계를 0.01mm로 설정하였다. 또한 AutoCAD는 물론 3D 렌더링 하는 대부분의 소프트웨어로 파일 전송이 가능해 그 적용 범위가 매우 넓다는 장점이 있다.

### 3. 모형실험 결과

본 연구에서 수행한 4가지 모델에 대한 실험조건을 표 1에 나타내었다.

표 1. 각 모델별 실험조건

	터널 중심 간격	측압계수(K)
Model 1	1.2D	1.0
Model 2	1.5D	1.0
Model 3	2.0D	1.0
Model 4	3.0D	1.0

Model 1~4에 대하여 굴착단계별 변위 벡터와 변위량을 실험 결과로 나타내었다. 본 실험을 위해 제작된 모형은 비교적 균질하나 실험시 온도, 습도 등의 환경적 요인으로 인해 강도의 차이가 다소 발생하였다. 따라서 이러한 문제점을 실험 결과에 반영하기 위하여 상부의 컨트롤 서보가 움직인 변위량을 기준으로 각 포인트들의 변위량을 정규화(normalization)하였다. 다시 말해, 각 모델들의 상부 가압판의 변위량을 표준 모델로 선정된 Model 1의 상부 가압판에 표시한 점의 변위량과 동일하게 맞추고, 모델별 서보의 변위량을 Model 1에서 서보가 움직인 변위량으로 나누어 각각의 점들에 곱해주었다. 마지막으로 모형의 균열 양상을 나타내었다.

#### 3.1 굴착단계별 변위 벡터

Model 1~4까지 각 모델에 대하여 굴착단계별 포인트들의 변위 양상을 그림 3~18에 벡터로 나타내었다. 실제 실험에서 포인트들의 변위량이 매우 작기 때문에 벡터를 16배로 확대하였다. 각 모델별로 선행터널 굴착으로 인해 발생된 변위 벡터, 후행터널 굴착으로 발생된 변위 벡터, 터널 굴착으로 인해 발생된 총변위 벡터, 파괴 직전까지 발생된 총변위 벡터의 4가지 그림으로 나타내었다.

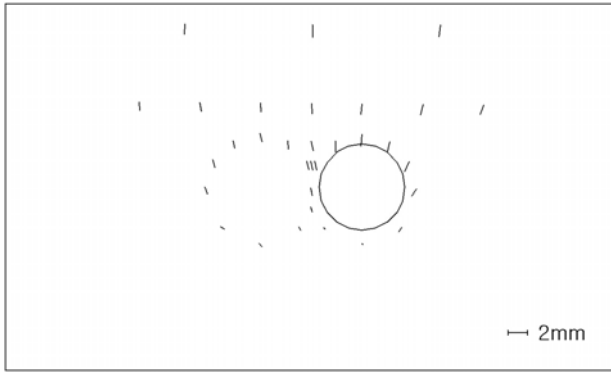


그림 3. 선행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 1)

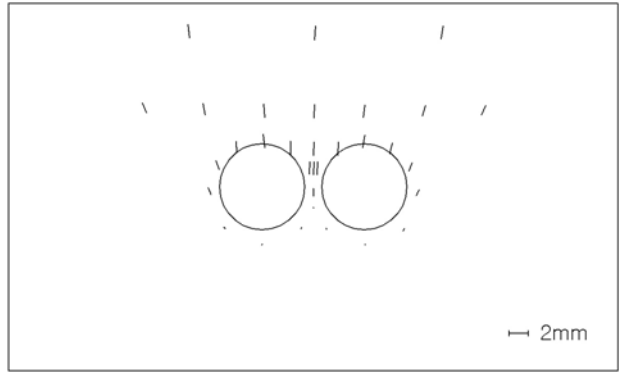


그림 4. 후행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 1)

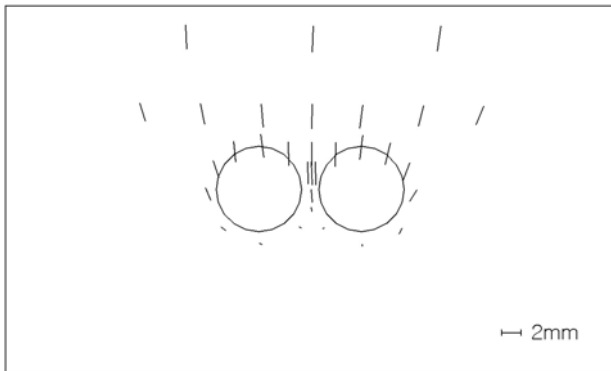


그림 5. 터널 굴착으로 인해 발생한 총변위 벡터 (Model 1)

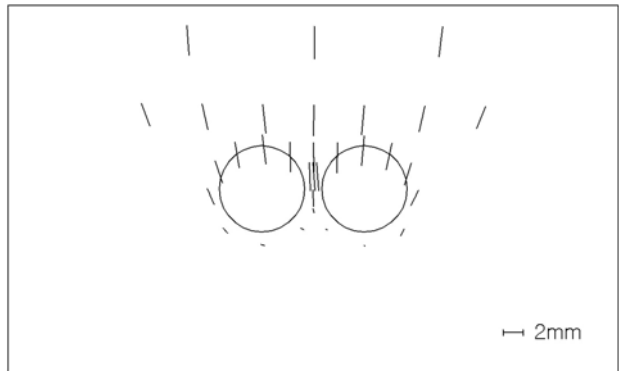


그림 6. 파괴 직전까지 발생한 총변위 벡터 (Model 1)

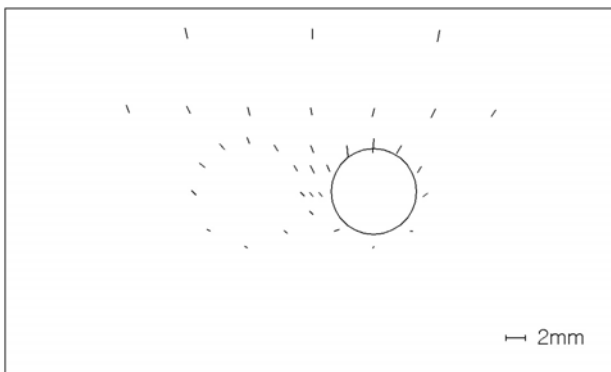


그림 7. 선행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 2)

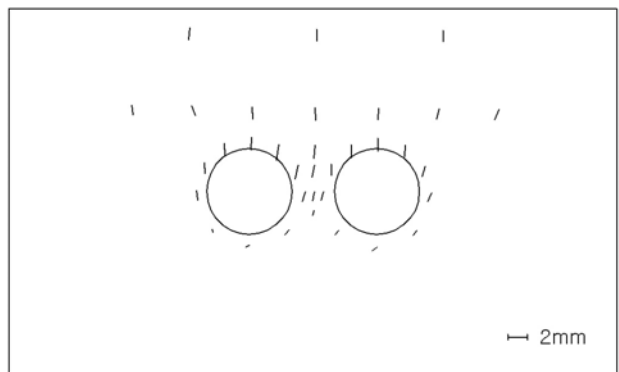


그림 8. 후행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 2)

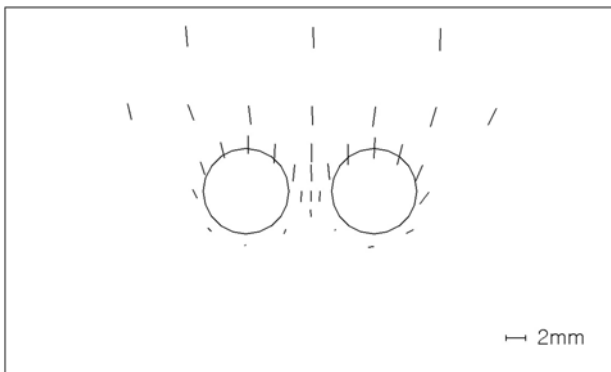


그림 9. 터널 굴착으로 인해 발생한 총변위 벡터 (Model 2)

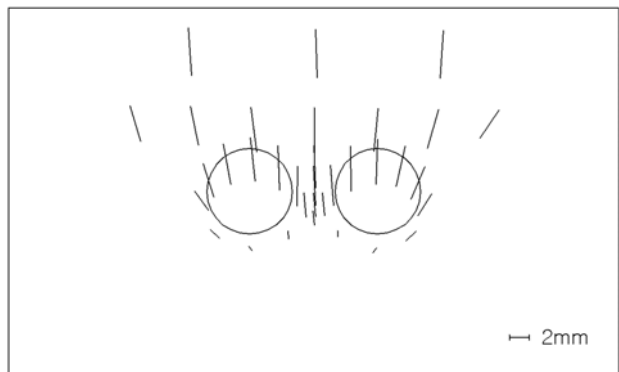


그림 10. 파괴 직전까지 발생한 총변위 벡터 (Model 2)

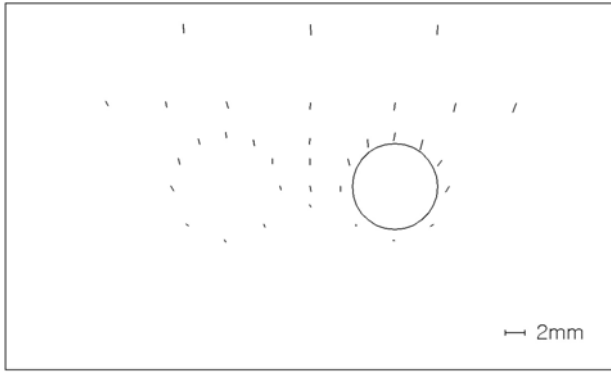


그림 11. 선행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 3)

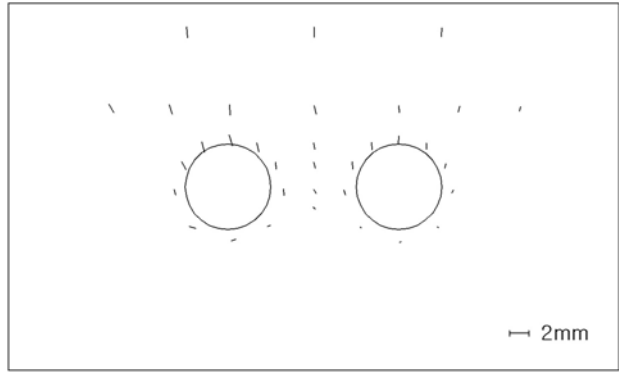


그림 12. 후행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 3)

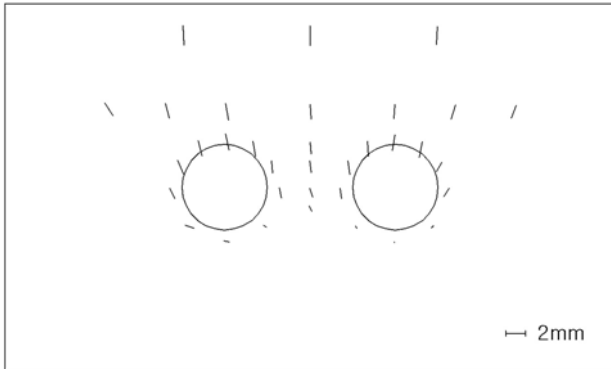


그림 13. 터널 굴착으로 인해 발생한 총변위 벡터 (Model 3)

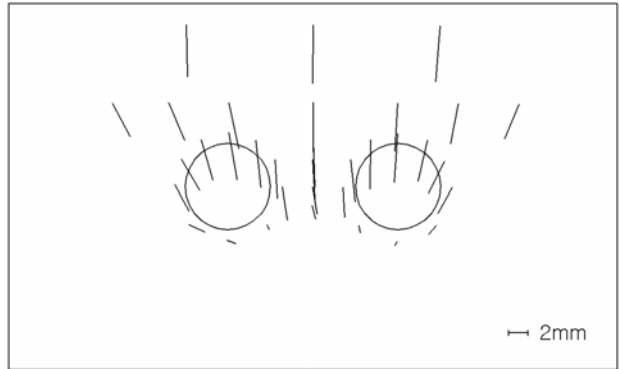


그림 14. 파괴 직전까지 발생한 총변위 벡터 (Model 3)

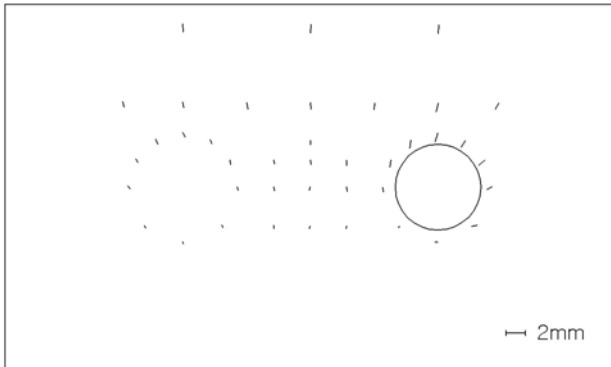


그림 15. 선행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 4)

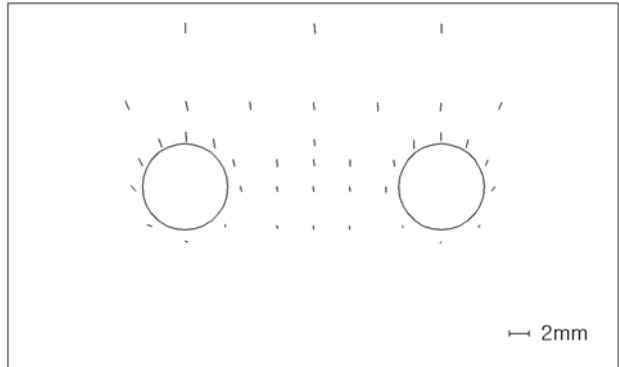


그림 16. 후행터널 굴착으로 인해 발생한 변위 벡터 (Model 4)

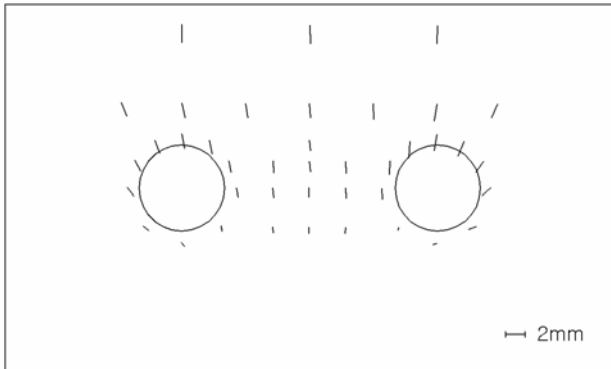


그림 17. 터널 굴착으로 인해 발생한 총변위 벡터 (Model 4)

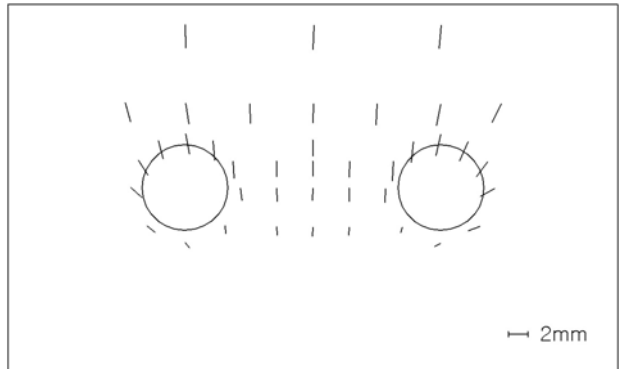


그림 18. 파괴 직전까지 발생한 총변위 벡터 (Model 4)

분석 결과, 터널 중심 간격이 1.2D로 좁은 경우 변위량이 제대로 증가하지 못하는 상황, 즉 매우 낮은 하중에서 필라 부분의 갑작스런 파괴가 발생하여 변형이 이루어지지 못한 것을 알 수 있다. 이는 두 개 터널의 이격거리가 작은 경우 병설 터널의 두 개의 터널 관점이 아닌 하나의 터널과 같은 거동을 하는 것으로 판단된다. 이렇게 터널 간의 필라 부분이 파괴되는 것은 이격 거리가 1.5D일 때까지 발견되다가 2.0D를 넘어서면 그 영향 정도가 매우 감소함을 알 수 있다. 즉 터널 상호간의 영향이 감소함을 알 수 있다.

이를 정리하여 보면 터널 중심 간격이 1.2D인 경우, 선행 및 후행 2개 터널의 천단부와 23, 24 위치의 변위량이 유사함을 볼 때 즉 터널 천정부 위치에서의 변위량이 전체적으로 유사한 것을 볼 때 하나의 터널 거동으로 보아도 될 것으로 판단된다. 터널 중심 간격이 1.5D인 경우, 필라 폭이 충분히 확보되지 않아서 1.2D의 경우와 유사하게 천정부 위치에서의 변위량이 전체적으로 같이 변형되나 1.2D의 경우보다는 필라 폭을 확보하여 천정부보다는 23, 24 위치에서 다소 적은 변위량을 보이고 있다. 터널 중심 간격이 2.0D인 경우, 필라 폭이 어느 정도 확보 되어 각 터널의 천정부에서 변위량이 가장 많이 발생하고 상대적으로 23, 24 위치에서의 변위량이 적게 발생하였다. 터널 중심 간격이 3.0D인 경우, 필라 부분인 23, 24 위치에서 변위량이 적고 전체적으로 모든 지점에서 변위량이 유사한 것을 볼 때 두 개의 터널은 완전히 독립적인 터널 거동을 하는 것으로 판단된다.

### 3.2 초기 균열 및 최종 파괴 양상

터널 중심 간격에 따른 초기 균열 및 최종 파괴 양상을 그림 19~26에 분석하였다. Model 1~4에 대하여 각 모델별로 균열 및 파괴 양상을 분석해보면, Model 1은 후행터널 굴착을 완료하고 30분 경과 후 필러중양부에 미세균열이 발생하였고, 상부하중이 17kN이 되었을 때 선행 및 후행터널 측벽부에 균열이 발생하여 17.7kN이 되었을 때 최종 파괴되었다. Model 2는 상부하중이 18kN이 되었을 때 필러중양부에 초기균열이 발생하여 19kN에서 최종 파괴되었다. Model 3은 상부하중이 19kN이 되었을 때 모형 상단 끝부분에서 초기균열이 발생하였고, 하중을 증가시킨 결과, 하중 증가에 따라 모형 상단 끝부분의 균열이 터널 좌·우 측벽부와 이어져 상부하중이 20.8kN이 되었을 때 필러중양부의 균열과 동시에 최종 파괴되었다. Model 4는 상부하중이 17kN이 되었을 때 모형 상단 끝부분에서 초기균열이 발생하였고, 상부하중이 17.7kN이 되었을 때 최종 파괴되었다.

Model 1과 2는 초기균열이 필러중양부에서 시작된 반면 Model 3과 4는 모형의 상단 끝부분에서 균열이 시작되어 선행 및 후행터널 측벽부의 균열과 이어졌다. 최종 파괴 양상은 4개의 모델이 모두 같은 경향을 나타내었다. Model 4의 경우 최종 파괴 하중이 작게 발생되었는데 이는 터널 중심 간격이 증가할수록 터널이 모형 토조 측면의 경계면과 가까워져 측 방향 하중 전달량이 커졌기 때문이다. 따라서 다른 모델보다 작은 하중에서 최종 파괴되었다.

터널 중심 간격에 따른 균열 및 파괴 양상을 분석한 결과, 이격거리가 커질수록 초기 균열 및 최종 파괴를 일으키는 하중이 증가함을 알 수 있다.

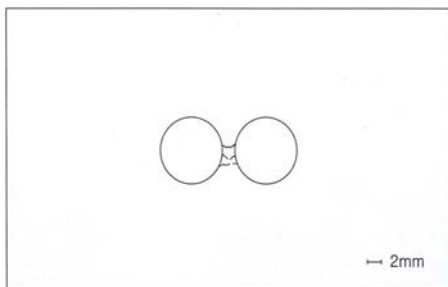


그림 19. 초기 균열 양상 (Model 1)

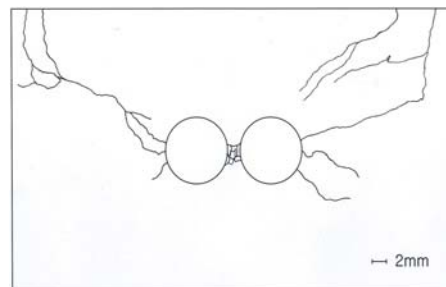


그림 20. 최종 파괴 양상 (Model 1)

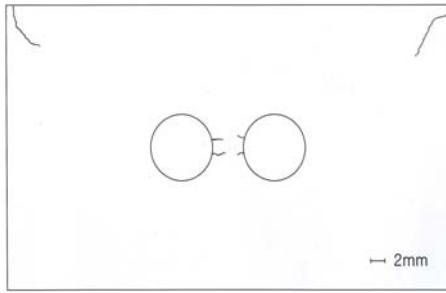


그림 21. 초기 균열 양상 (Model 2)

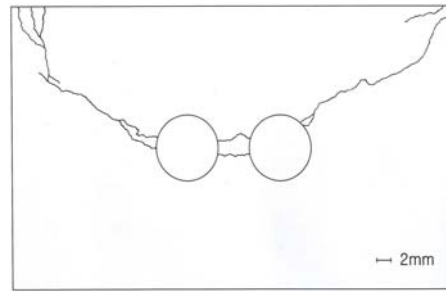


그림 22. 최종 파괴 양상 (Model 2)

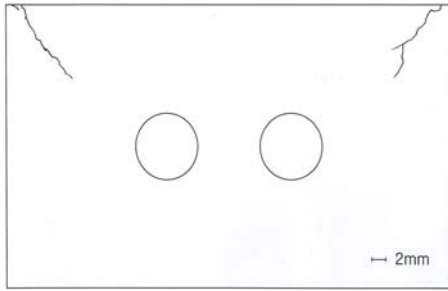


그림 23. 초기 균열 양상 (Model 3)

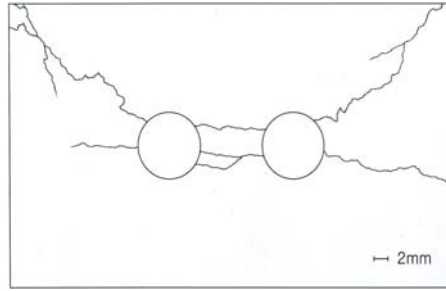


그림 24. 최종 파괴 양상 (Model 3)

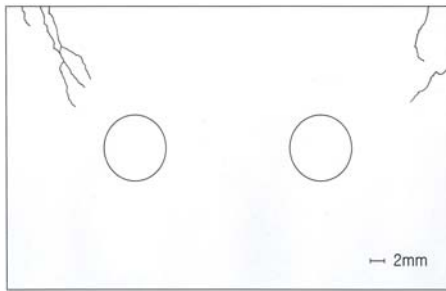


그림 25. 초기 균열 양상 (Model 4)

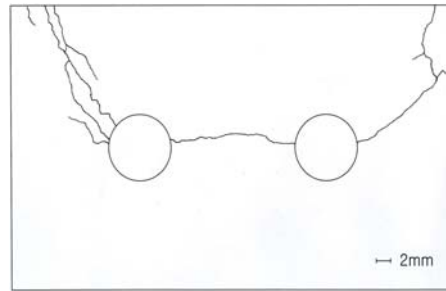


그림 26. 최종 파괴 양상 (Model 4)

### 3.3 터널 중심 간격에 따른 터널의 거동 분석

터널 중심 간격에 따른 후행터널 굴착완료 시점까지 주요 포인트들의 총 변위량을 비교·분석하였다. 먼저 선행터널 천단부, 후행터널 천단부, 필러중앙부의 세 지점을 비교한 그래프를 그림 27에 나타내었다.

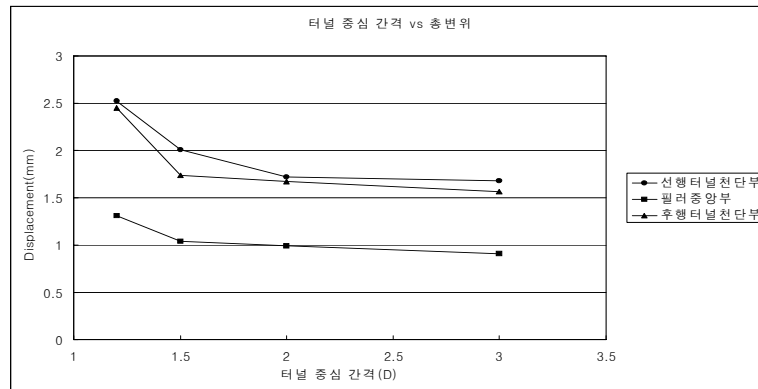


그림 27. 터널 중심 간격에 따른 총변위 (1)



그림 27에서 보는 바와 같이 터널 중심 간격이 증가할수록 전체적인 총변위 발생량이 감소하였고, 선행터널 천단부와 후행터널 천단부 변위량의 차이가 좁혀지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 터널 중심 간격이 1.2D인 경우에는 필러부에 집중되는 응력을 견디지 못해 주저앉아 선행터널 천단부와 후행터널 천단부의 변위량이 거의 같아졌다.

터널 중심 간격이 1.5D인 경우에는 선행터널 천단부의 변위가 후행터널 천단부의 변위보다 다소 크게 발생하였다. 이는 후행터널 굴착에 의한 응력의 재분배 현상으로 인해 선행터널 천단부의 변위량을 증가시켰기 때문이다.

반면, 터널 중심 간격이 2.0D인 경우에는 후행터널 굴착으로 인한 선행터널 천단부의 추가적인 변위 발생량이 거의 없음을 확인할 수 있다. 이는 터널 중심 간격이 3.0D인 경우에서도 확인할 수 있었다. 따라서 터널 중심 간격 2.0D 이상에서는 병설터널 상호간의 간섭효과가 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

한편, 필러중양부가 천단부보다 변위량이 작은 이유는 터널 형상이 원형이기 때문인 것으로 판단된다. 다시 말해 필러중양부 아래는 일반적인 터널 필러부분의 형상과 달리 필러를 지지하는 형상으로 되어 있어 필러 부분의 변위 분석을 위해서는 필러중양부가 아닌 필러중양부에서 위에 있는 포인트들을 분석해야 한다. 따라서 필러부분의 변위 분석을 위해 필러중양부에서 위로 각각 5, 8, 14cm 떨어진 포인트들을 선정하여 그림 28에 나타내었다.

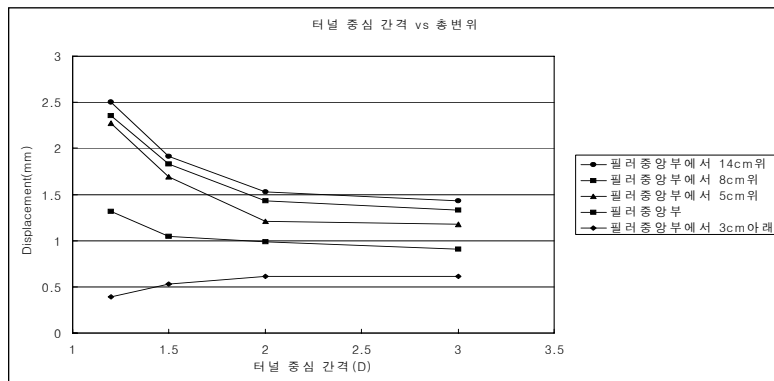


그림 28. 터널 중심 간격에 따른 총변위 (2)

분석 결과, 중앙부에서 위로 갈수록 변위량이 커지지만 5cm 위의 지점이나 14cm 위의 지점이나 모두 경향이 같다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 필러중양부에서 3cm 아래의 포인트는 터널 중심 간격이 1.2D인 경우에 가장 작은 변위량을 나타내었는데 이는 후행터널 굴착 도중 필러 중앙부에 미세 균열이 발생하였는데 이로 인하여 응력이 아래 지점까지 전달되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 터널 중심 간격에 따른 실험 단계별 주요 포인트들의 변위량 분석 결과, 선행터널 굴착으로 인해 선행터널 주변의 변위량이 증가하였고, 후행터널 굴착으로 인해 선행터널 주변에 추가적인 변위량이 발생하였고, 후행터널 또한 변위량이 증가하였다. 발생한 총변위량은 터널 중심 간격이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었고, 파괴 직전까지의 변위량은 터널 중심 간격이 증가할수록 반대로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 터널 중심 간격이 증가할수록 필러부의 지지효과가 커져 높은 하중까지 터널이 파괴되지 않고 버틸 수 있기 때문인 것으로 판단되었다.
- (2) 터널 중심 간격에 따른 선행터널 천단부, 후행터널 천단부의 총변위량 분석 결과, 선행터널 천단부에서 발생한 총변위량 중 후행터널 굴착으로 인해 발생한 추가적인 변위량은 터널 중심 간격이 증가

할수록 작아지는 경향을 나타내었다. 이는 선행터널이 터널 중심 간격이 증가할수록 후행터널 굴착으로 인한 영향을 덜 받는다는 것을 의미한다. 본 실험에서는 터널 중심 간격이 2.0D 이상일 경우 선행터널에 영향을 주지 않았다.

- (3) 초기 균열 및 파괴 양상 분석 결과, Model 1과 2는 초기균열이 필러중앙부에서 시작된 반면 Model 3과 4는 모형의 상단 끝부분에서 균열이 시작되어 선행 및 후행터널 측벽부의 균열과 이어졌다. 따라서 터널 중심 간격이 감소할수록 필러부의 안정성이 떨어지는 것으로 나타났다. 최종 파괴 양상은 4개의 모델이 모두 같은 경향을 나타내었다.
- (4) 단, 모사재료를 사용한 모형실험결과는 일반적으로 산출되는 변위 및 하중을 실제 현장에 직접적으로 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 다만 몇 개의 모델에 대한 실험 결과의 상대비교를 통하여 상호간의 정성적 비교만이 가능하다고 판단된다. 따라서 본 논문에서 제시되는 실험 결과는 상호 비교 또는 정성적인 경향만을 나타내는 한계를 가지고 있음을 밝혀두고자 한다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. 김종우, 전석원, 서영호 (2004), “지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구”, **한국암반공학회지**, 제 14권, 제 1호, pp. 43-53.
2. 안현호, 서병욱, 이석원, 김동현 (2006), “모형실험을 통한 편토압이 터널의 안정성에 미치는 영향”, *2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp. 554-557.
3. 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근 (2003), “석회암 공동이 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구”, **한국지구시스템공학회지**, Vol. 40, No. 3, pp. 147-158.
4. Hobbs, D.W. (1969), "Scale model study of strata movement around mine roadways. IV. roadway shape and size", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomech. Abstr**, 6, pp. 305-404.