

# 기존 대구경 파이프라인과 신설터널간의 상호작용

정선아<sup>1</sup>, 최정인<sup>2</sup>, 홍은수<sup>3</sup>, 천윤철<sup>4</sup>, 이석원<sup>5\*</sup>

## Interactions between pre-existing large pipelines and a new tunnel

Sun-Ah Jeong, Jung-In Choi, Eun-Soo Hong, Youn-Chul Chun, Seok-Won Lee

**Abstract** When a new tunnel is excavated by the drill and blast method near pre-existing underground structures or tunnels due to the region restricted condition such as urban area, the ground will be relaxed by the excavation. In this case, issues can be created in terms of stability of pre-existing underground structures. One of major factors determining the stability of pre-existing underground structures can be a separation distance between pre-existing underground structures and a newly excavated tunnel. The region of ground relaxation defined by the plastic zone due to new excavation can be varied by separation distance. In this study, in order to estimate an influence of new tunnel excavation in terms of separation distance on the stability of pre-existing large pipelines, two-dimensional scaled model tests using plaster were performed for six models which have a different separation distance. The results show that based on the analysis of induced displacement during tunnel construction, the displacement decreases as the separation distance between large pipeline and new tunnel is increased until the distance is 2.5 times of pipeline diameter. Beyond this point, however, the displacement has become stabilized.

**Keywords:** Interaction, large pipeline, two-dimensional scaled model test, tunnel behavior

**요 지** 도심지 등 지역적인 여건에 의하여 기존의 지하 공동 또는 터널에 근접하여 발파를 이용한 새로운 터널을 굴착할 경우, 새로운 터널의 굴착으로 인하여 지반이 이완되고 따라서 기존 지하 공동의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 기존 지하 공동의 안정성에 문제를 발생시킬 수 있는 가장 큰 요소로는 기존 지하 공동과 신설 터널의 이격거리가 될 수 있으며, 또한 신설 터널 굴착으로 인한 소성영역의 발생에 따른 지반 이완을 문제 삼을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 광역 상수관과 신설 터널의 이격거리에 따른 기존 광역 상수관의 안정성을 평가하기 위하여 이격거리가 다른 여섯 가지 모델에 대해 석고를 이용한 2차원 축소 모형실험을 실시하였다. 실험 결과는 터널 굴착과정과 파괴 단계에서 발생된 변위 벡터와 균열양상으로 표현하였다. 터널 굴착과정 중 발생하는 변위를 분석하면, 터널과 광역 상수관의 간격이 상수관 직경의 2.5배 (2.5D)까지는 이격거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그러나 중심 간격이 2.5D를 넘으면 추가변위는 발생하지 않았다.

**주요어:** 상호 작용, 대구경 파이프라인, 2차원 축소모형실험, 터널 거동

### 1. 서 론

도심지 등 지역적인 여건에 의하여 기존에 건설되어 있는 지하 공동구 또는 터널에 근접하여 발파 등을 이용하여 신설 터널을 굴착하여야 할 경우가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 경우 신설 터널의 굴착으로 인하여 안정화된 지반이 이완되고 따라서 기존 지하 공동구의 안정성에 문제가 발생 할 수 있다. 이러한 기존 지하 공동구의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 가장 큰 요소

로는 기존 공동구와 신설 터널간의 중심간 이격거리가 될 수 있으며 또한 신설 터널 굴착으로 인한 소성영역의 발생에 따른 지반 이완을 문제 삼을 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 기존 지하 공동구의 안정성에 문제를 발생 시킬 수 있는 조건을 미리 파악하고 적절한 대책 공법을 제시하여야 한다. 전석원 등(2003)은 석회암 공동이 신설 터널 안정성에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 연구를 수행하였으며, 안현호 등(2008)은 축소모형실험을 통하여 근접터널의 상호 거동에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 이러한 여러 가지의 근접터널 형태 중에서 기존 광역 상수관( $\phi$  2.2 m)에 근접하여 신설터널( $\phi$  11 m)이 건설되는 현장을 모사하여 신설터널과 기존 광역 상수관의 이격거리 변화에 따른 기존 광역 상수

<sup>1</sup>건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<sup>2</sup>건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<sup>3</sup>한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수

<sup>4</sup>삼성물산 국내토목사업부 전문

<sup>5</sup>건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

\*교신저자: 이석원 (E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

관의 안정성을 평가하고자 석고를 이용하여 2차원 축소 모형실험을 수행하였다. 최종 기존 광역 상수관과 신설 터널의 이격거리 변화에 따른 기존 광역 상수관의 안정성을 실험적으로 검토하고 이를 토대로 적정 이격거리를 제시하였다.

본 연구에서 축소 모형실험은 석고와 모래를 혼합한 재질을 사용하여 수행하였으며, 현장 조건은 상사성의 원리를 적용하여 모사하였다. 축소 모형실험은 신설터널과 기존 광역 상수관과의 이격거리 변화에 따라 6회 실시하고, 사용한 석고와 모래 혼합재질의 강도 특성을 파악하기 위하여 일축압축 강도 실험을 병행하였다.

## 2. 축소 모형 실험

### 2.1 현장 조건 및 실험 조건

본 연구의 대상 현장 조건은 아래 예시된 그림 1(연구를 위한 직접적인 대상 현장은 아니고 근접 터널 개념도를 제시하고자 하는 그림입)과 같이 예상 신설 터널에 근접하여 기존 광역 상수관이 존재하여 터널 굴착으로 인하여 상수관의 안정성이 문제 될 수 있는 상황으로 설정하였다. 즉, 상수관과 근접하여 신설터널이 굴착되게 되어 있으므로 상수관과 신설터널의 이격거리를 고려한 축소 모형실험을 수행하였다. 이러한 조건을 정량적으로 규명하기 위해서는 기존의 광역 상수관이 없는 경우의 굴착에 따른 신설터널 거동 또한 규명하여야 하므로, 이를 위하여 현장 지반조건에서 상수관이 없는 상황에서 신설터널이 굴착되는 상황도 2차원 축소모형으로 실험을 수행하였다.

이러한 조건을 고려하여 본 연구에서 수행한 축소 모형실험은 총 6가지 경우에 해당한다. 즉, 모델 1은 균질한 지반을 모사한 후 상수관이 없는 상태, 즉 현장 지반 조건에서 신설터널만을 굴착하는 과정을 모사한 2차원

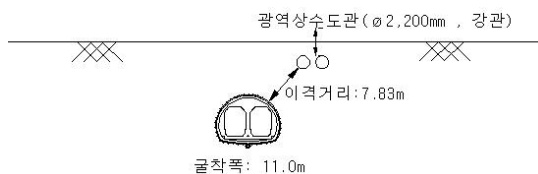


그림 1. 대상 현장 예시

축소 모형실험을 의미하고, 모델 2~6은 균질한 지반을 모사한 후 상수관과 터널사이의 이격거리를 각각, 0.5D, 1.0D, 2.0D, 3.0D, 5.0D(D: 상수관 직경)로 하여 신설 터널을 굴착하는 과정을 모사한 2차원 축소 모형실험을 수행하는 것을 의미한다. 이러한 6가지 모델에 대한 각 모형의 세부 사항은 표 1과 같다.

### 2.2 모형 재료 및 시편 제작

축소모형실험에 사용되는 재료로는 모래, 점토, slurry, 기타 혼합물 등이 있다. 모래를 이용한 모형실험은 국내에서 이미 많은 연구가 진행되었고, Chapman 등(2006)은 slurry로 지반을 모사하여 터널 상호간 거동을 분석한 바 있다. 이와 같이 모형재료로서 모래, 점토, slurry 등은 토사지반을 모사하기 위해 주로 사용되었다. 반면, 암반을 모사하기 위해서는 암석 시료, 석고, talc powder 등이 사용되었다. 국외의 경우, Fakhimi 등(2002)은 암반에서 원형 공동 주위의 파괴를 모사하기 위해 100×100×40 mm(가로×세로×폭) 크기의 sandstone specimen을 사용하였다. Adhikary 등(1997)은 암반사면에서의 토폴링 파괴 메커니즘을 규명하기 위하여 취성재료(brittle material)로서 모래와 석고의 혼합물을, 연성재료(ductile material)로서 fibre-cement sheeting을 사용하였다. 또한, Fossen and Gabrielsen(1996)은 단층을 모사하기 위한 모형 재료로서 기존에 사용해왔던 점토나 모래 대신 성형시간이 빠르고 성형 후의 내구성이 좋은 석고를 사용한 바 있다. 국내의 경우도 모래와 석고의 혼합물을 사용한 축소모형실험에 관한 연구(전석원 등, 2003; 김중우 등, 2004; 장부식 등, 2006; 안현호 등, 2008)가 이미 진행된 바 있다. 기타 혼합물로서 Chu 등(2007)은 모래, 석고, talc powder의 혼합물을 사용하여 지반조건이 다른

표 1. 각 모델별 실험 조건

모델	상수관 모사	이격 거리 <sup>1</sup>	축압계수(K)
1	×	N/A	1.0
2	o	0.5D	1.0
3	o	1.0D	1.0
4	o	2.0D	1.0
5	o	3.0D	1.0
6	o	5.0D	1.0

<sup>1</sup>D: 상수관 직경

다양한 지층을 모사하여 여러 지층을 가진 병설터널의 거동을 규명한 바 있다. 이러한 문헌조사 결과를 토대로 암반지반을 모사하기 위하여 본 연구에서도 모형재료로서 모래:석고:물의 중량비가 1:1:2.5인 혼합물을 사용하였다. 모래는 균일한 강도 발현을 위해 주문진 표준사를 사용하였고, 석고는 도자기성형용 석고를 사용하였다. 표준사와 석고의 혼합물을 물과 섞을 때 기포가 많이 발생되는데 기포 발생을 억제하는 소포제를 사용하여 이를 현저히 줄일 수 있었다.

시편 제작은 그림 2와 같은 철제 틀에 혼합물을 부은 후 그림 3과 같이 일정 함수비가 될 때까지 건조시켰다. 본 연구에서는 시편이 약 14%의 함수비를 가질 때 실험을 수행하였다. 시편의 강도는  $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$  크기의 공시체를 제작하여 일축압축강도시험을 실시하여 측정하였다. 본 연구에서 설정한 모형 시편의 목표 강도는  $0.28 \text{ MPa}$ 이며 공시체의 단위중량이  $7.17 \text{ kN/m}^3$ 이 되었을 때 원하는 강도를 얻을 수 있었다.

### 2.3 차원 해석

원지반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소 모형실험

을 실시할 때 현장조건이 충분히 구현될 수 있도록 하기 위해서는 원지반과 축소 모형간의 상사성(차원해석)을 실시해야 한다. 그러나 본 연구는 전술한 바와 같이 직접적인 대상 현장을 고려하고 있지 않기 때문에 현장 조건을 가정(터널 폭:  $1,100 \text{ cm}$ , 원 지반 밀도:  $20.58 \text{ kN/m}^3$ )하고 이를 토대로 차원해석을 수행하였다.

길이에 대한 축소율은 모형의 크기( $1000 \times 600 \times 100 \text{ mm}$ )를 고려하여 모형 터널의 폭을  $15 \text{ cm}$ 로 정하였으므로  $1/73$ 이 된다. 시간에 대한 축소율은 중력가속도 일정 원리가 사용되어  $1/8.56$ 이 된다. 모래+석고+물의 혼합물의 밀도가  $7.17 \text{ kN/m}^3$ 이므로 밀도  $[\text{ML}^{-3}]$ 에 대한 축소율은  $1/2.87$ 이 된다. 따라서, 질량 $[\text{M}]$ 의 축소율은  $1/(1.13 \times 10^6)$ 이 되고 응력, 탄성계수, 강도 등  $[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$ 의 축소율은  $1/211$ 이 된다. 이러한 차원 해석 결과를 표 2에 정리하였다.

### 2.4 실험 방법 및 해석 방법

본 연구에 사용된 모형실험 장치는 그림 4와 같이  $2,290 \times 1,930 \times 710 \text{ mm}$ (가로×세로×폭) 크기로 제작되었다. 하부면은 고정되어 있고 전·후면은 평면 변형률 조

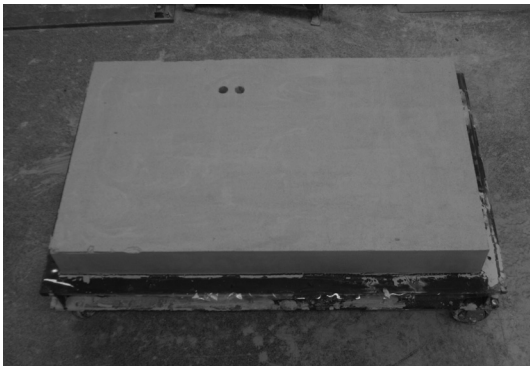


그림 2. 틀에서 분리하기 전의 시편



그림 3. 시편 건조 과정

표 2. 차원 해석 결과

	단위	원지반	축소모형	축소율
길이	[L]	터널 폭 = $1,100 \text{ cm}$	터널 폭 = $15 \text{ cm}$	$1/73$
시간	[T]			$1/8.56$
밀도	$[\text{ML}^{-3}]$	$20.58 \text{ kN/m}^3$	$7.17 \text{ kN/m}^3$	$1/2.87$
질량	[M]			$1/(1.13 \times 10^6)$
응력, 탄성계수, 강도	$[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$			$1/211$

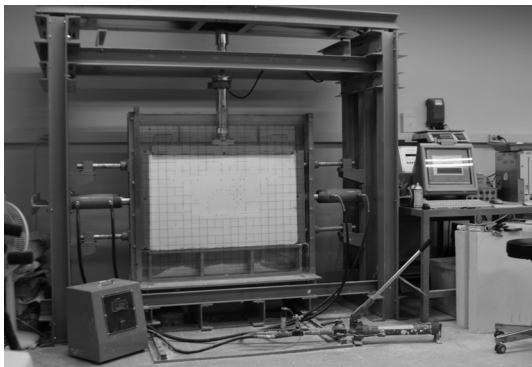
건을 적용하기 위하여 1.7 cm의 아크릴을 먼저 대고 프레임에 추가로 설치하여 하중 가압에 따른 아크릴의 휨을 방지하였다. 하중은 좌·우 측면과 상부면의 가압판으로 가압하였다. 즉, 상부에 1개, 좌·우 측면에 각각 1개씩, 총 3개의 가압장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 상부의 하중 가압장치는 서보 컨트롤 시스템이고, 측면은 유압식인데, 좌·우 실린더를 하나의 유압잭에 연결하여 좌·우의 하중 가압량이 동일하도록 하였다. 그리고 유압잭은 실린더가 크지 않으면 미세한 압력조절이 어려운 단점이 있는데 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유압잭에 압력셀과 유량을 조절할 수 있는 밸브를 설치하여 보다 정확하고 미세한 컨트롤이 가능하도록 하였다.

2차원 평면 변위를 추적하기 위해 기존의 변위계를 이용한 방법은 설치의 어려움과 좁은 계측 범위로 적용에는 한계가 있다. 본 실험에서는 상재 하중에 대해 각 부분의 정확한 변위와 거동 양상을 추적하기 위해 그림

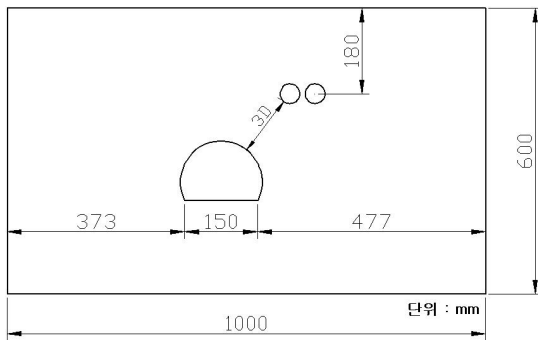
5와 같이 EOS Systems에서 개발한 사진측량 software인 PhotoModeler Pro 5를 사용하였다. PhotoModeler Pro 5는 삼각측량 원리를 이용하여 타겟의 위치를 추적해내는 프로그램으로 일반적인 고해상도 카메라를 이용할 때 1/5,000의 정확도를 보이며, 본 연구에서는 최소 계측한계를 0.01 mm로 설정하였다.

변위는 토조 평면에 계획에 따라 직경 5 mm의 포인트들을 찍고, 이를 실험 단계마다 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 저장한다. 포인트 계획은 실험 조건과 중요도에 따라 변화를 주었다. 단계마다 저장된 포인트의 상대적인 변위는 기준자와 실험시 토조 전면부 아크릴판의 모눈을 기준하여 절대좌표와 변위로 산출된다. 사진 촬영은 각 하중 단계마다 변위와 응력 전달을 위해 충분한 시간을 가진 후, 45° 간격으로 좌측, 정면, 우측 세 장으로 저장하여 정밀도의 향상을 기했다. 하중 단계별로 저장된 사진의 포인트는 PhotoModeler Pro 5 프로그램 내에서 3D 평면 좌표로 산출된다. 이는 상대적인 좌표인데 상기의 언급에서와 같이 기준자로 포인트 간의 절대 변위를 기록하고, 아크릴판의 고정 모눈점을 변위 비교를 위한 절대 좌표계로 이용하였다. 거동 경향 분석은 포인트 좌표데이터를 평면 캐드 파일로 추출하고 초기 하중 단계와 후의 각 하중 단계를 중첩하여 벡터 라인으로 표시하였다.

실험 방법은 가장 먼저 시편을 배합비(모래:석고:물 = 1:1:2.5)에 맞게 제작하여 단위중량이 7.17 kN/m<sup>3</sup>이 될



(a) 축소모형실험 장치



(b) 실험 제원(3D의 경우)

그림 4. 2차원 축소모형실험 장치

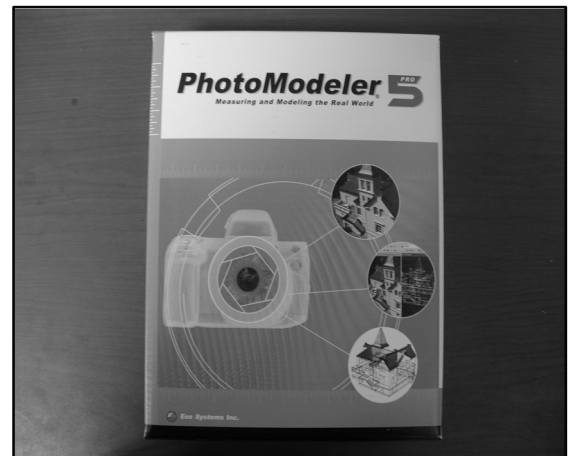
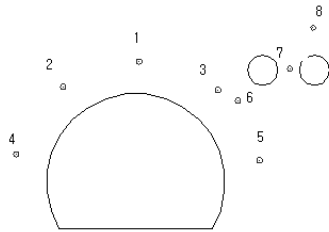


그림 5. PhotoModeler Pro 5



- 1: 터널 천단부,
- 2: 터널 좌측 상단부(45°),
- 3: 터널 우측 상단부(45°),
- 4: 터널 좌측벽부
- 5: 터널 우측벽부,
- 6: 터널과 상수관의 중앙부
- 7: 상수관의 중앙부
- 8: 상수관 중앙부에서 1 cm 위

그림 6. 포인트 위치도

때까지(약 20일) 실내 실온에서 양생시켰다. 전면의 아크릴을 제거한 후 실험 장치에 시편을 거치시키고 변위를 측정하기 위하여 그림 6과 같이 원형 포인트를 찍었다. 모델마다 신설터널과 상수관의 중심간 이격거리가 다르기 때문에 포인트의 위치 또한 다르지만 변위 분석을 위해 터널 주변을 기준으로 그림 6과 같이 포인트별로 번호를 부여하였다. 이 작업이 완료되면 전면의 아크릴을 조립하고 시편 모형에 하중을 가압하게 된다. 하중은 축압계수(K) 조건에 따라 상부와 좌·우측 방향으로 가압하는데 최종 하중을 14 단계로 나누어 각 단계 사이에는 일정 시간을 두고 단계별로 하중을 가압한다. 본 실험에서는 모형재료의 자체 강도 및 K=1.0인 조건을 고려하여 굴착 중 변위량을 측정하기 위한 최대하중으로 상부에 14 kN, 그리고 측 방향하중 역시 14 kN으로 설정하였다. 최대하중에 도달한 후 모형의 안정화를 위하여 1시간정도 기다린 후 신설터널을 굴착하게 되는데 기존의 상수관 하부에 정밀한 드릴을 이용하여 터널을 굴착하였다. 즉, 전단면굴착을 모사하기 위하여 터널 외곽부를 일정한 간격에 드릴을 이용하여 구멍을 낸 후 이를 반복적으로 수행하여 전단면이 굴착되도록 하였다. 기존의 상수관은 이미 건설되어 있는 강관으로 가정하였으므로, 하중가압 및 굴착에 따른 상수관 자체의 변형이 발생하지 않는 강성체로 모델링하였다. 따라서 0.2 cm 두께의 강성 프라스틱 원형관을 거푸집에 미리 설치하고 그 후 모형재료를 성형하여 모형 시편을 만들었다. 또한 지하수(물)의 영향은 본 연구에서 고려하지 않았다.

그림 7과 같이 신설터널 굴착이 완료되면 다시 1시간정도 안정화 단계를 거쳐 다음 단계인 하중 가압을 실시한다. 하중 가압은 터널 굴착에 따른 변형량을 측정한 후, 터널이 견딜 수 있는 최대 하중을 파악하기 위해 상부와 측방향 하중의 가압량을 1 kN씩 단계별로 증가시켰다.

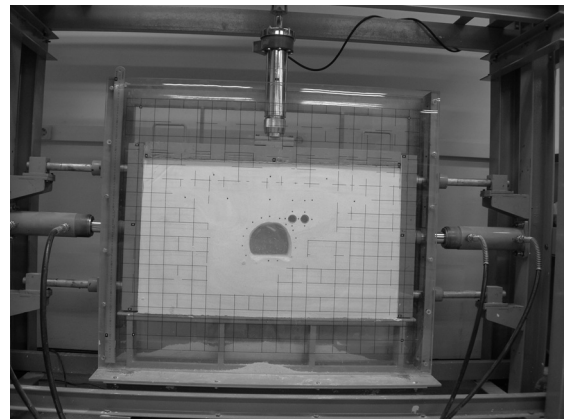


그림 7. 터널 굴착 완료

### 3. 모형 실험 결과

본 연구에서 수행한 6가지 모델에 대한 실험조건을 표 1에 나타내었다. 본 연구에서는 각 모델별로 굴착단계별 변위 벡터와 변위량을 실험 결과로 나타내었으며, 또한 초기 균열 양상 및 최종 파괴 시의 균열 형태를 나타내었다.

#### 3.1 굴착 단계별 변위 벡터

상기한 6가지 모델에 대하여 하중을 단계별로 증가시켜 그 때의 변형 양상을 사진으로 촬영하고 그림 8과 같이 벡터로 나타내었다. 즉, 현장 상황과 같게 상수관은 이미 설치되어 있다고 가정하여 모형 시편 성형과정에서 상수관을 형성하여 놓고, 시편을 하중가압 장치에 설치한 후에 상재하중을 모사하는 14 kN을 가압한 후, 첫 번째 변위 측정은 신설터널 굴착 직후에서 이루어졌다. 그 후 신설터널이 굴착된 상황에서 하중을 14 kN에서부

터 증가시켜 파괴가 이루어질 때 까지 하중증가 단계별로 변위를 측정하였다. 이때 변위 벡터는 실제 변위량이 작아 16배로 확대하여 나타내었다. 변위 측정 위치는 그림 6에서 제시한 포인트 이외에 필요한 부분을 추가하여 측정하였다. 본 실험에서는 모형의 강도를 고려하여 굴착 중 변위량을 측정하기 위한 최대 상재하중으로 14 kN을 설정하고, 측압은 측압계수를 적용하여 가압하였다. 대표적으로 상수관이 없는 모델 1과 이격거리가 0.5D

인 모델 2에 대해서는 4개의 하중 가압단계 전부를 그림 8의 (a) 및 (b)에 각각 수록하였으며, 모델 3~6은 굴착 직후 및 파괴 상태에 대해서만 각각 그림 8의 (c)~(f)에 수록하였다. 여기서 이격거리는 예를 들어, 1.0D의 이격거리란 상수관의 중심과 굴착터널의 중심을 직선으로 연결한 후, 이 연결선이 만나는 상수관 외곽부와 굴착터널 외곽부와의 거리가 상수관 직경의 1.0배가 됨을 의미한다.

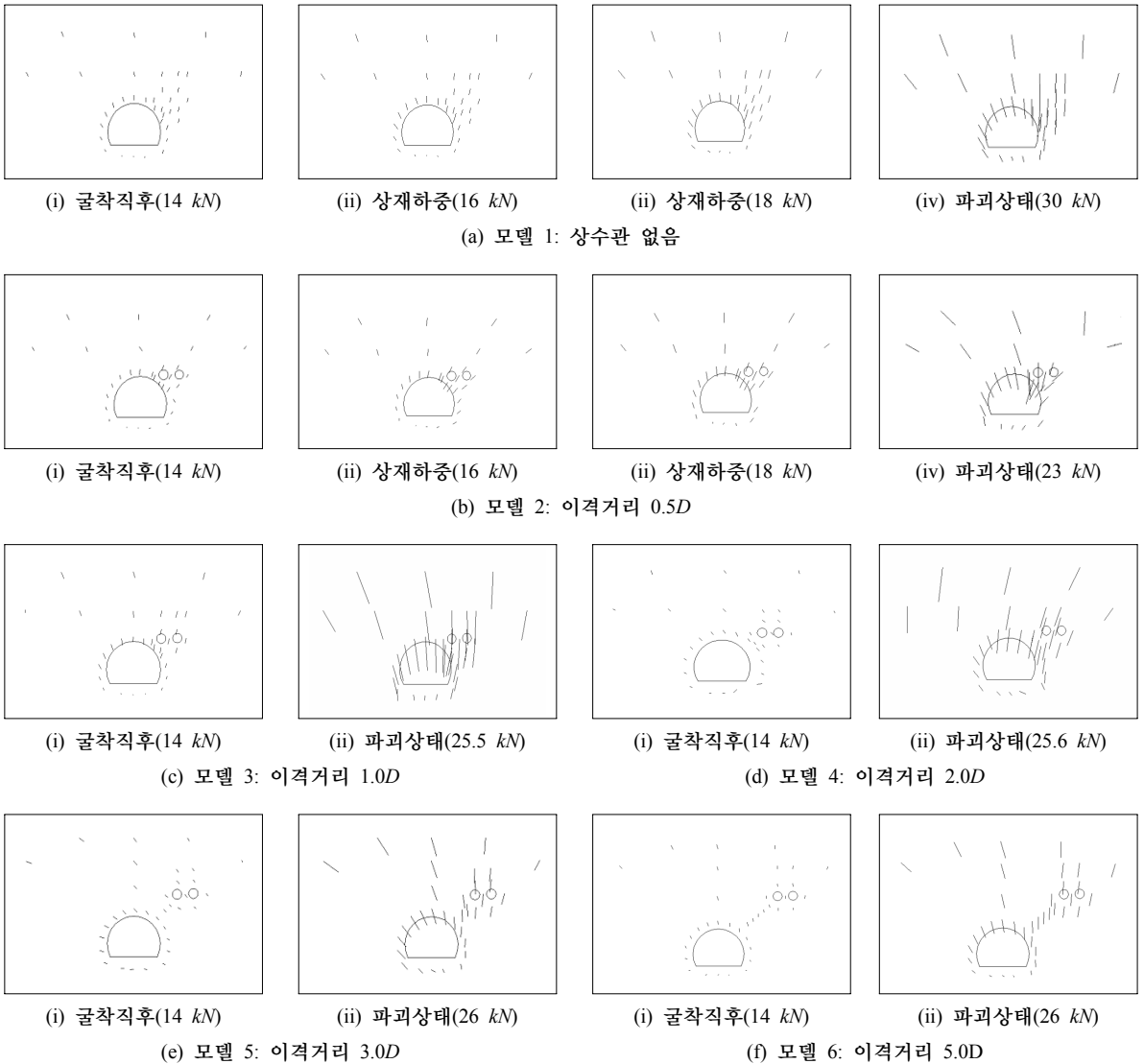


그림 8. 모델별 굴착 단계별 변위 벡터(실제 변위량의 16배 확대 변위)

### 3.2 신설 터널 굴착에 따른 변위 벡터

실제 현장을 가장 잘 모사하는 것은 최종 파괴 상태가 아닌 신설 터널의 굴착에 따른 변위 벡터이나, 그림 8에 나타난 바와 같이 각 변형량을 16배 확대하여도 하중 14 kN(신설터널 굴착직후 단계)에서는 변형량이 잘 구분되지 않으므로 실제 변위를 48배 확대한 변위 벡터를 그림 9에 모델별로 나타내었다.

### 3.3 굴착 단계별 변위량

모델 1~6에 대하여 하중가압 단계에 따른 주요 위치에서의 누적(총) 변위량(수직변위와 수평변위의 합력 변위벡터의 길이)을 그림 10과 같이 그래프로 나타내었다. 주요 위치는 그림 6에 나타난 바와 같이 1번~8번의 8개 지점을 선정하였다. 그리고 초기 상재하중과 축압계수 조건에 따른 축 방향 하중을 가압한 후 안정화 단계가 완료된 시점을 실험시작 단계로 설정하여, 이때의 변위량을 “0”으로 설정하고 각 하중 단계별로 측정된 누적 변위량을 그래프로 나타내었다. 따라서 그래프상의 하중 14 kN에서의 변위량은 상재하중에 따른 안정화 후에 신설터널 굴착에 의해서만 발생한 변위량을 나타낸다. 하중 단계별 변위량을 조사하여 본 결과, 신설터널과 상수관의 이격거리가 0.5D로 좁은 경우 변위량이 제대로

증가하지 못하는 상황, 즉 낮은 하중에서 신설터널과 상수관의 연결부분(신설터널과 상수관의 최단 이격거리 부분)에서 파괴가 발생하여 완전한 변형이 이루어지지 못하는 것을 알 수 있다. 이렇게 신설터널과 상수관의 연결부분이 파괴되는 것은 이격 거리가 2.0D일 때까지 발견되다가 2.0D를 넘어서면 그 영향 정도가 매우 감소함을 알 수 있다. 즉 신설터널과 상수관 상호간의 영향이 감소함을 알 수 있다.

이러한 발견을 상술하여 보면, 우선 모델 1과 같이 기존의 상수관이 없는 경우는 그림 10의 (a)와 같이 측정된 모든 지점에서 비슷한 변위량을 보이고 있다. 이는 터널 전체에서 비슷한 거동을 하고 있음을 의미한다. 그러나 신설터널과 상수관의 이격거리가 0.5D인 경우, 그림 10의 (b)와 같이 신설터널과 상수관의 연결부분인 3번과 6번 위치의 변위량이 비슷한 수치 정도로 크게 나오는 것을 볼 때, 즉 신설터널 우측 상단부 위치에서의 변위량이 전체적으로 유사한 것을 볼 때, 하나의 지하공간 거동으로 보아도 될 것으로 판단된다. 신설터널과 상수관의 이격거리가 1.0D인 경우, 신설터널과 상수관의 연결부분의 필라 폭이 충분히 확보되지 않아서 0.5D의 경우와 유사하게 신설터널 우측 상단부 위치에서의 변위량이 전체적으로 같이 변형되나 0.5D의 경우보다는

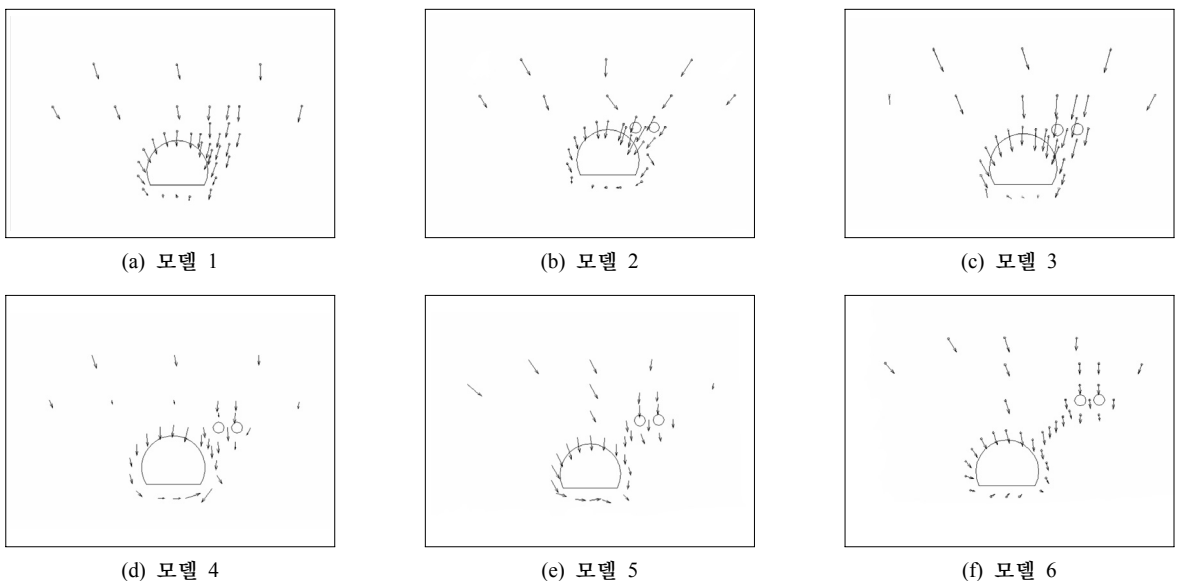
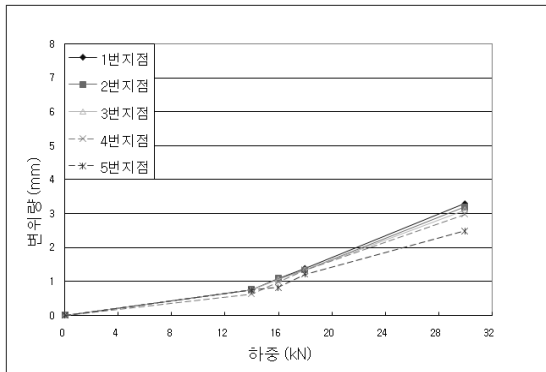
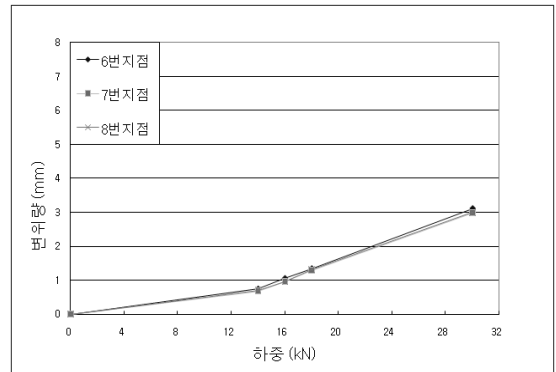


그림 9. 신설 터널 굴착 직후 모델별 변위 벡터(실제 변위량의 48배 확대 변위)

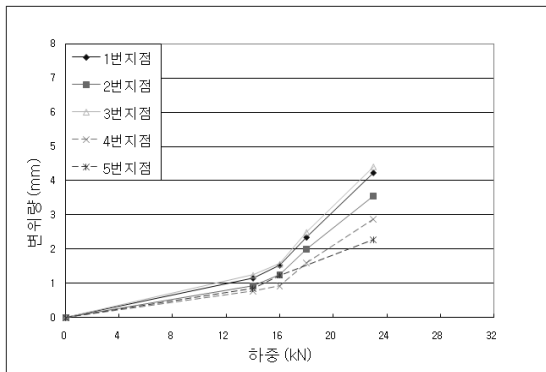


(i) 1~5번 지점

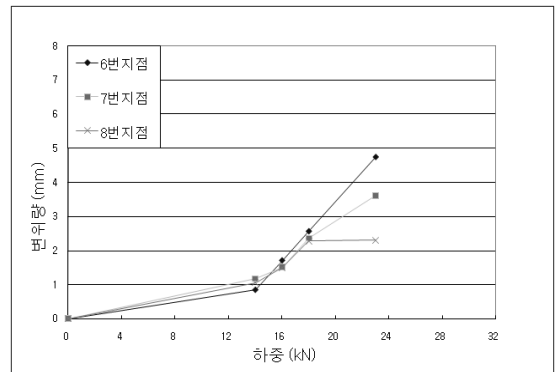


(ii) 6~8번 지점

(a) 모델 1

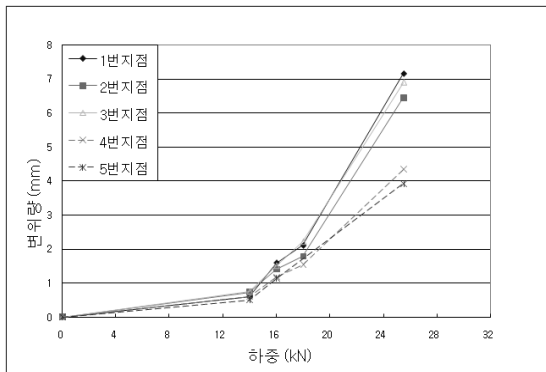


(i) 1~5번 지점

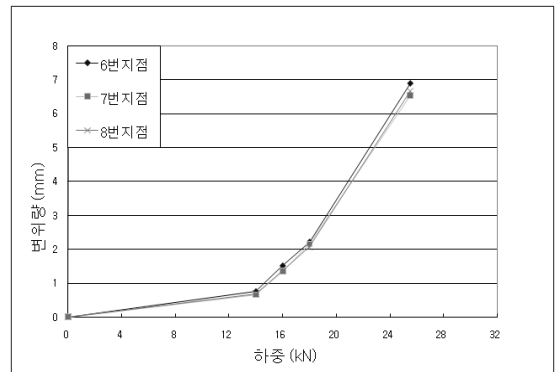


(ii) 6~8번 지점

(b) 모델 2



(i) 1~5번 지점



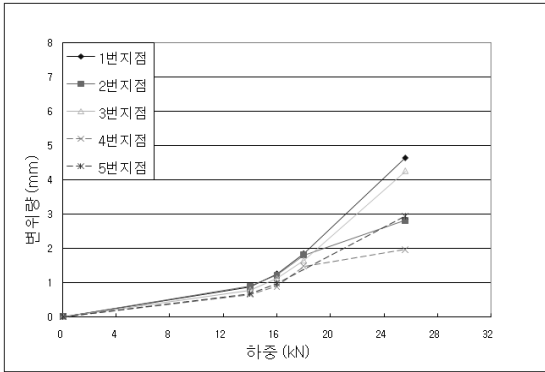
(ii) 6~8번 지점

(c) 모델 3

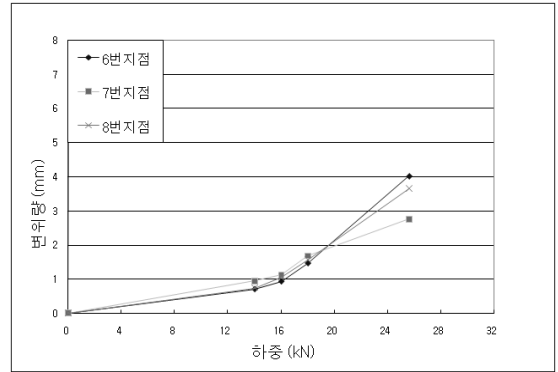
그림 10. 모델별 굴착 단계별 변위량

www.kci.go.kr



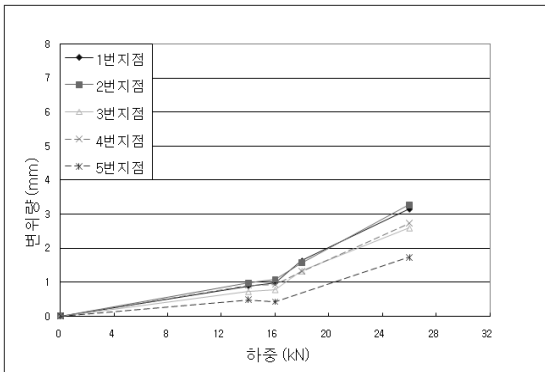


(i) 1~5번 지점

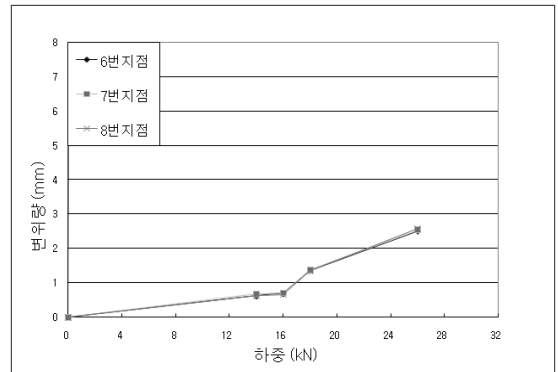


(ii) 6~8번 지점

(d) 모델 4

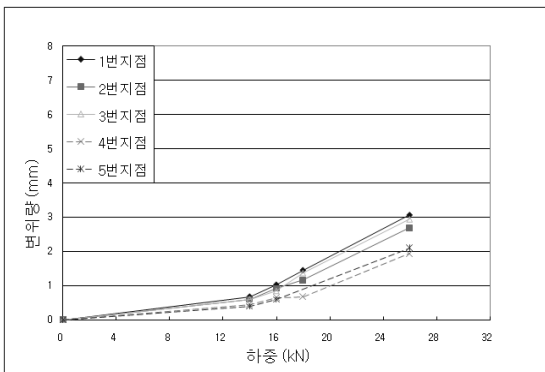


(i) 1~5번 지점

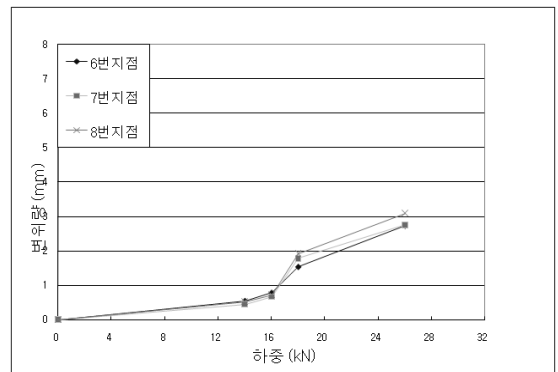


(ii) 6~8번 지점

(e) 모델 5



(i) 1~5번 지점



(ii) 6~8번 지점

(f) 모델 6

그림 10. 모델별 굴착 단계별 변위량 (계속)

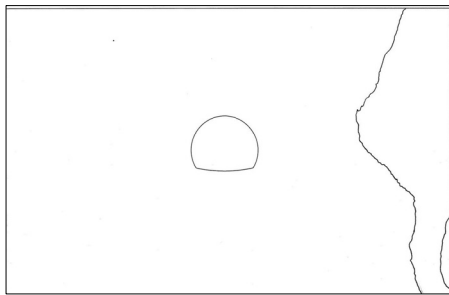
필라 폭을 확보하여 우측벽부보다는 신설터널의 천단부에서 다소 많은 변위가 발생하였다. 신설터널과 상수관의 이격거리가 2.0D인 경우, 필라 폭이 어느 정도 확보되어 전체적으로 0.5D와 1.0D에 비하여 변위량이 감소하였으나 신설터널과 상수관의 연결부분인 3번과 6번 위치에서 변위가 크게 발생하는 경향은 유사하였다.

그러나, 신설터널과 상수관의 이격거리가 3.0D 이상이 되면서 모델 1과 유사하게, 즉 상수관이 없는 경우와 유사하게 특정 위치에서의 변위가 크게 관측되는 지점이 없었다. 이는 신설터널과 상수관의 이격거리가 3.0D 이상에서는 기존의 상수관이 신설터널의 굴착에 영향을 미치지 않는다는 것을 나타내고 있다. 다시 말해, 신설터널과 상수관의 이격거리를 3.0D 이상 확보한다면 기존 상수관으로 인하여 신설터널의 추가적인 변위는 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 신설터널과 상수관의 두 개의 지하공간이 서로 간섭하지 않고 완전히 독립적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

### 3.4 초기 균열 및 최종 파괴 양상

터널의 안정성을 파악하는데 있어 균열 및 파괴 양상은 매우 중요한 자료가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 실험 모델(모델 1~6)에 대하여 각각 초기 균열 및 최종 파괴 양상을 그림 11에 나타내었다.

모델 1의 초기 균열 및 최종 파괴 양상은 그림 11의 (a)와 같이 모델 실험의 한계 상 측벽부에서 주로 발생하였으나 이는 결과적으로 큰 의미가 없는 데이터로 볼 수 있다. 이격거리를 0.5D로 한 모델 2의 초기 균열은 기존 상수관과 지표면과 연결되는 파괴 양상을 볼 수 있다. 그리고 이 균열이 진행되어 최종 상수관 사이의 균열을 발생시켰고 대부분의 균열이 신설터널과 상수관의 연결부분에서 발생하였다. 이는 연결부분이 안정성에 매우 취약함을 보여주는 결과라 판단된다. 이러한 현상은 상수관과 터널사이의 이격거리가 1.0D인 모델 3에서도 발견되었다. 이는 전술한 바와 같이 이격거리가 작은 경우 신설터널과 상수관의 연결부분에서 안정성이

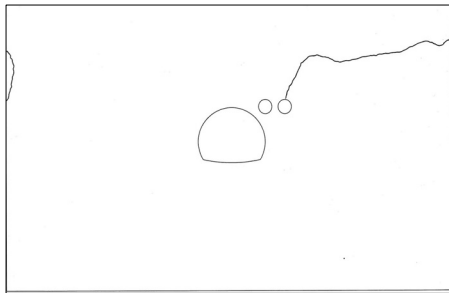


(i) 초기 균열 양상

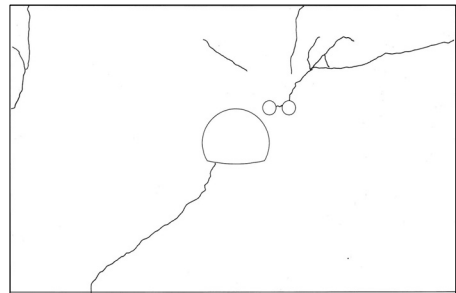


(ii) 파괴 양상

(a) 모델 1



(i) 초기 균열 양상

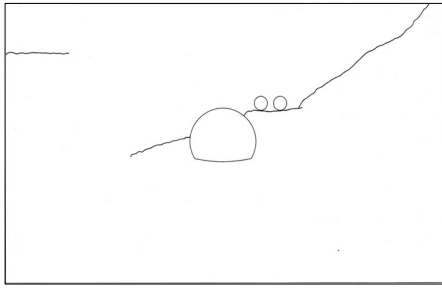


(ii) 파괴 양상

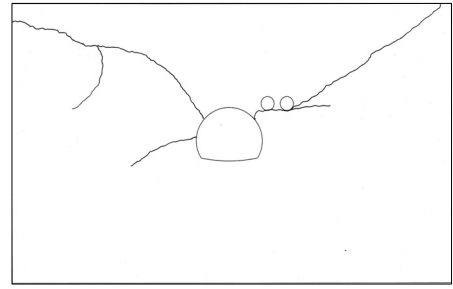
(b) 모델 2

그림 11. 모델별 균열 양상

www.kci.go.kr

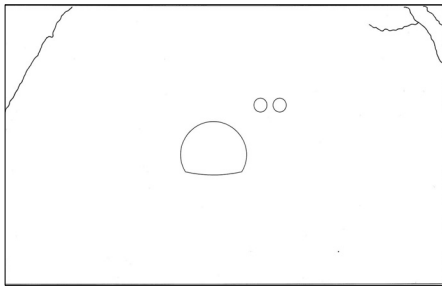


(i) 초기 균열 양상

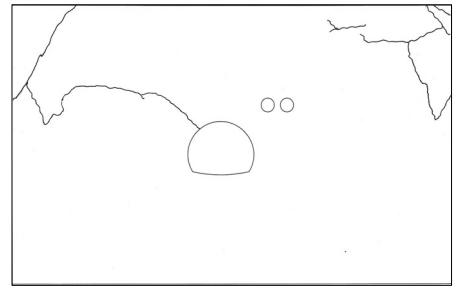


(ii) 파괴 양상

(c) 모델 3

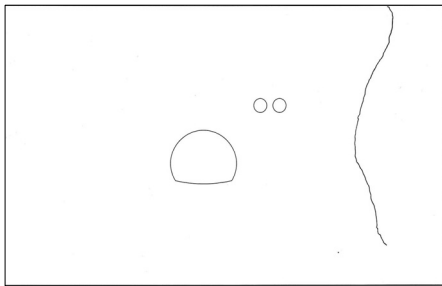


(i) 초기 균열 양상

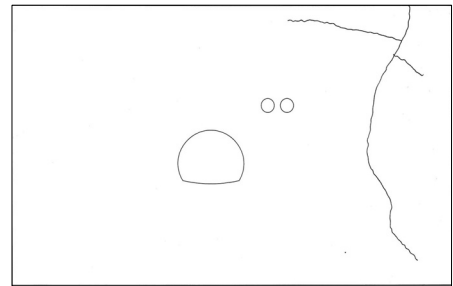


(ii) 파괴 양상

(d) 모델 4

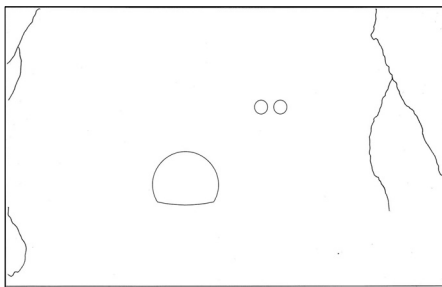


(i) 초기 균열 양상

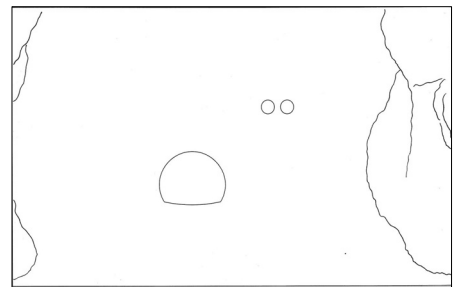


(ii) 파괴 양상

(e) 모델 5



(i) 초기 균열 양상



(ii) 파괴 양상

(f) 모델 6

그림 11. 모델별 균열 양상 (계속)

매우 취약함을 나타내고 있다. 그러나 상수관과 터널사이의 이격거리가 2.0D 이상인 모델 4~6의 결과를 보면 더 이상 균열의 진행이 신설터널과 상수관의 연결부분이 아니라 상수관이 없는 모델 1과 유사한 결과를 보이고 있다. 따라서 전술한 바와 같이 신설터널과 상수관의 이격거리가 어느 정도 확보되면 기존의 상수관이 신설터널 굴착에 추가적인 변위를 발생시키지 않아 각각의 독립된 개체로 볼 수 있다는 것을 나타내고 있다.

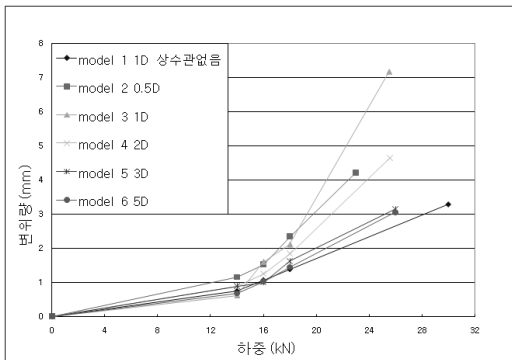
## 4. 결과 분석

### 4.1 모델 간 신설터널 굴착에 따른 변위량 분석

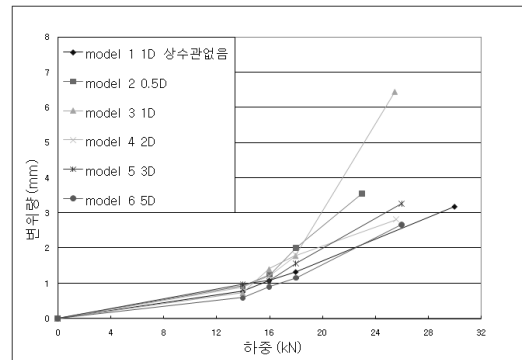
신설터널과 상수관의 이격거리에 따른 주요 지점에서의 변위량 분석을 위해 모델 1~6에 대하여 각 모델별로 측정된 여러 포인트들 중 터널의 거동 양상 분석에 중요한 5개의 지점을 선정하여 이격거리에 따른 하중 단계별

누적 변위량을 그림 12와 같이 그래프로 나타내었다. 주요 위치는 그림 6에서 보인 바와 같이 신설터널 주변 1번~5번의 5개 지점을 선정하였다. 그리고 초기 상재 하중과 측압계수 조건에 따른 측 방향 하중을 가압한 후 안정화 단계가 완료된 시점을 실험시작 단계로 선정하고, 이 단계를 0으로 하여 각 하중 단계별로 측정된 누적 변위량을 그래프로 나타내었다. 모든 그림에서 신설터널을 굴착하는 단계에서의 하중은 14 kN이며, 신설터널 굴착이 완료된 다음에 최종 파괴까지 단계적으로 하중을 증가시켜서 추가되는 변위를 측정하였다.

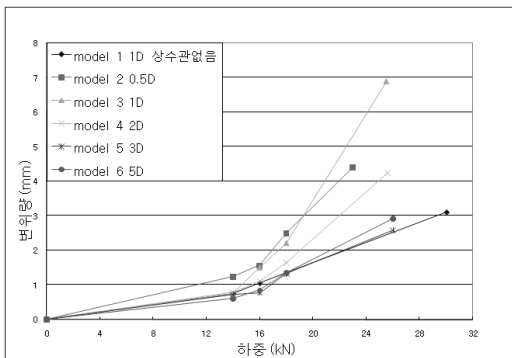
1번~5번 지점 모두에서 일반적으로 이격거리가 0.5D 인 모델 2에서 가장 큰 변위가 발생하였고, 상수관이 없는 모델 1에서 가장 작은 변위가 측정되었다. 보다 상세히 살펴보면, 그림 12의 (a)에 보인 바와 같이 신설터널 천단부인 1번 지점에서는 신설터널 굴착 단계인 14 kN까지는 이격거리 0.5D인 모델 2에서 가장 큰 변위가 발



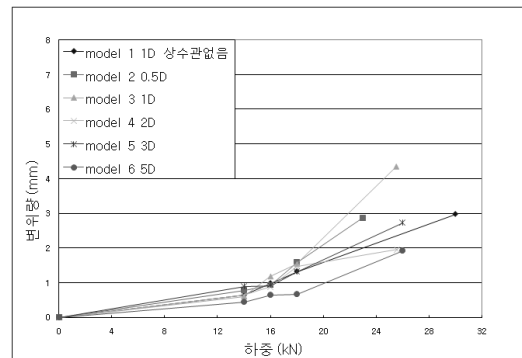
(a) 1번 지점



(b) 2번 지점

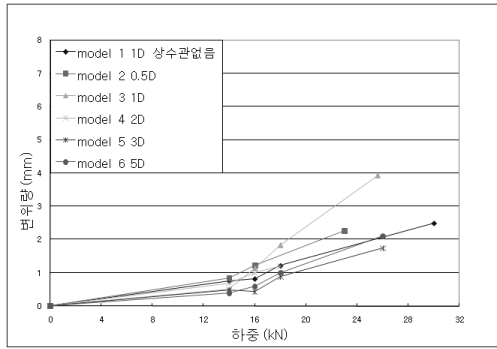


(c) 3번 지점



(d) 4번 지점

그림 12. 모델 변화에 따른 지점별 누적 변위량



(e) 5번 지점

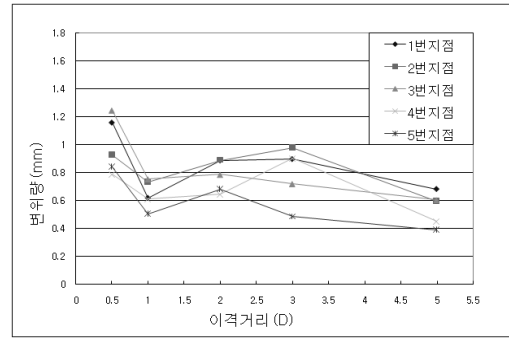
그림 12. 모델 변화에 따른 지점별 누적 변위량 (계속)

생하였고 최종 변위는 이격거리 1.0D인 모델 3에서 가장 큰 변위가 발생하였다. 그리고 이격거리가 2.0D인 모델 4에서도 0.5D와 1.0D의 경우와 비슷한 결과를 보여주었다. 이는 이격거리 2.0D까지는 상수관과 신설터널의 이격거리가 작아 낮은 하중에서도 파괴가 어느 정도 발생하고 큰 변형을 일으킨다는 것을 의미한다. 그러나 이격거리가 2.0D보다 커지면서 발생하는 변위는 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 전술한 바와 같이 이격거리가 2.0D 이상 확보가 된다면 기존 상수관은 신설터널에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 변위 양상은 상수관과 매우 근접한 지점인 3번 지점에서 동일할 결과를 얻었다.

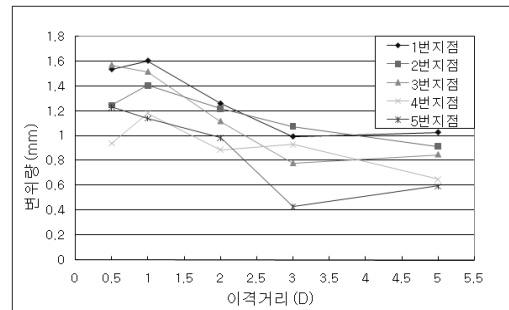
그러나 상수관과 멀리 떨어져 있는 신설터널 좌측 상단부인 2번 지점과 측벽부인 4번 지점의 경우는 다소 다른 변위양상을 보이고 있다. 즉, 0.5D인 경우와 1.0D인 경우는 다른 지점들과 유사한 경향을 보이나, 이격거리가 2.0D인 경우는 상대적으로 낮은 변위를 보이고 있다. 이는 상수관이 멀리 위치하기 때문에 이격거리가 1.0D 이상인 경우에 상수관이 신설터널에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 결국, 신설터널 전체적인 관점에서 볼 때는 이격거리가 최소 2.0D 이상을 유지해야 함을 알 수 있다.

#### 4.2 신설터널과 상수관의 이격거리에 따른 터널의 거동 분석

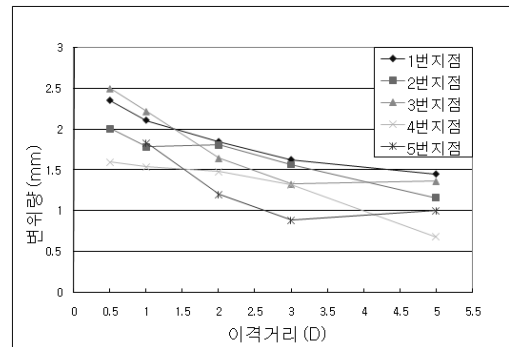
신설터널 굴착 직후(상재 하중 14 kN 단계), 상재하중 16 kN 단계, 그리고 상재하중 18 kN 단계에서 신설터널과



(a) 상재하중 14 kN 단계



(b) 상재하중 16 kN 단계



(c) 상재하중 18 kN 단계

그림 13. 이격거리에 따른 총 변위량

상수관의 이격거리에 따른 주요 지점(1번~5번)에서의 총 변위량 변화 양상을 그림 13과 같이 비교·분석하였다. 실제 건설현장에서는 그림 13의 (a)에서 보인 신설터널 굴착에 따른 변위 양상이 가장 중요한 요소라 판단된다.

그림 13의 (a)에서 알 수 있듯이 신설터널과 상수관이 상수관의 직경을 기준으로 1.0D(상수관과 터널의 중심 간격으로 기준을 한다면 2.0D) 이상 이격되면 일반적인

로 기존의 상수관이 신설터널의 굴착에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 상수관과 신설터널의 이격거리를 충분히 확보한다면 터널 굴착에 따른 상수관 및 신설터널의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 다만, 이것은 발파로 인한 신설 터널 주변 지반의 이완영역을 고려하지 않은 결과임을 주지하여야 한다.

그러나 그림 13의 (b) 및 (c)를 살펴보면 신설터널과 상수관이 상수관의 직경을 기준으로 2.0D~3.0D 이상 이격되어야 신설터널의 변위가 수렴함을 알 수 있다. 이는 굴착단계 이상의 하중에서는 좀 더 이격거리를 확보해야 한다는 것을 보여주고 있다. 결국 전체적인 하중 관점에서 본다면, 신설터널과 상수관이 상수관의 직경을 기준으로 보수적으로 평균 2.5D 이상 이격되어야 기존의 상수관이 신설터널에 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 신설터널과 기존 상수관과의 이격거리 변화에 따른 상수관 및 신설터널의 안정성을 석고를 이용한 2차원 축소 모형실험으로 검토하고, 이를 토대로 적정 이격거리를 제시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 이격거리 변화에 따른 신설터널 주변부의 변위를 관측하여 본 결과, 이격거리가 작아질수록 상수관과 인접한 부근의 터널주변(1, 3번 지점)에서 변위가 많이 발생하였다.
2. 이격거리 변화에 따른 초기 균열 및 최종 파괴 양상을 조사한 결과, 이격거리 2.0D 이상의 모델에서는 기존의 상수관이 없는 경우(모델 1)와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 기존 상수관이 신설터널의 굴착에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.
3. 이격거리에 따른 터널 주변 변위량을 관찰한 결과, 평균 2.5D 이상의 이격거리에서는 기존 상수관이 새로운 터널 굴착에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.
4. 결론적으로 기존 상수관과 신설 터널이 최소 2.5D 이상 이격 시에는 신설터널 굴착에 기존 상수관이 추가적인 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.
5. 단, 본 연구는 현장 조건을 많은 부분 가정하고 따라서 모형실험 결과를 직접적으로 현장에 적용하는 데는 한계가 있음을 밝혀두고 싶다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)에 의하여 지원된 연구로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김종우, 전석원, 서영호 (2004), “지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 논문집, 제 14권, 제 1호, pp. 43-53.
2. 안현호, 최정인, 심성현, 이석원 (2008), “축소모형실험을 통한 이격거리에 따른 근접터널의 거동”, 한국지반공학회 논문집, 제 24권, 제 7호, pp. 5-16.
3. 장부식, 황정순, 이상오, 윤배식, 김홍택 (2006), “축소 모형실험을 통한 병설터널 보강필라의 거동특성평가에 관한 연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 2176-2185.
4. 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근 (2003), “석회암 공동터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국지구시스템공학회지, Vol. 40, No. 3, pp. 147-158.
5. Adhikary, D. P., Dyskin, A. V., Jewell, R. J., and Stewart, D. P. (1997), “A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes”, Rock Mech. Rock Engrg., Vol. 30, No. 2, pp. 75-93.
6. Chapman, D. N., Ahn, S. K., Hunt, D. V. L. and Chan, A. H. C. (2006), “The use of model tests to investigate the ground displacements associated with multiple tunnel construction in soil”, Tunnelling and underground space technology, Vol. 21, No. 3/4, pp. 413-413.
7. Chu, B. L., Hsu, S. C., Chang, Y. L. and Lin, Y. S. (2007), “Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations”, Tunnelling and underground space technology, Vol. 22, No. 3, pp. 351-362.
8. Fakhimi, A., Carvalhoc, F., Ishidad, T. and Labuze, J. F. (2002), “Simulation of failure around a circular opening in rock”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39, pp. 507-515.
9. Fossen, H. and Gabrielsen, R. H. (1996), “Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster”, Journal of structural geology, Vol. 18, No. 5, pp. 673-687.

접수일(2009.1.30), 수정일(1차: 2009.2.27, 2차: 2009.3.10), 게재 확정일(2009.5.29)