

## 삼병렬 터널의 안정성 검토를 위한 모형실험 연구

김종우<sup>1)\*</sup>, 배우석<sup>1)</sup>

### A Study for the Stability Investigation of Three Parallel Tunnels Using Scaled Model Tests

Jong-Woo Kim, Woo-Seok Bae

**Abstract** In this study, scaled model tests were performed to investigate the stability of three parallel tunnels. Seven types of test models which had respectively different pillar widths, tunnel sectional shapes, support conditions and ground conditions were experimented, where crack initiating pressures and deformation behaviors around tunnels were investigated. In order to evaluate the effect of pillar widths on stability, various models were experimented. As results, the models with shallower pillar widths proved to be unstable because of lower crack initiating pressures and more tunnel convergences than the models with thicker pillar widths. In order to find the effect of tunnel sectional shape on stability, the models with arched, semi-arched and rectangular tunnels were experimented. Among them rectangular tunnel model was the most unstable, where the arched tunnel model with small radius of roof curvature was more stable than semi-arched one. The model with rockbolt showed higher crack initiating pressure and less roof lowering than the unsupported model. The deformation behaviors of tunnels in the anisotropic ground model were quite different from those in the isotropic ground model. Furthermore, the results of FLAC analysis were qualitatively coincident with the experimental results.

**Key words** Scaled model test, Three parallel tunnel, Stability, Deformation behavior, Tunnel shape

**초 록** 삼병렬 터널은 3개의 터널이 서로 나란히 배열되는 형태의 터널이다. 본 연구에서는 터널간 이격거리, 터널단면 형상, 지보조건, 지반조건 등이 서로 다른 7가지 삼병렬 터널 모형들에 대한 축소모형실험을 통하여 모형별 균열개시압력과 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였다. 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 낮은 압력 수준에서 필러의 파괴가 일어나고 터널의 내공변형량도 증가하여 터널의 안정성은 감소하였다. 터널단면의 형상이 아치형, 편평아치형, 사각형인 모형들 중에서 사각형 단면을 가진 터널의 안정성이 가장 작았으며, 천반곡률 반경이 작은 아치형 터널이 편평아치형 터널보다 안정성이 우수하였다. 터널의 천장부에 모형 록볼트를 설치한 모형은 무지보 터널 모형에 비하여 균열개시압력이 클 뿐만 아니라 천단침하량도 적게 나타나 지보의 효과를 확인할 수 있었다. 이방성 암반내 터널 모형은 등방성 모형과 매우 다른 변형거동을 나타내었으며, FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

**핵심어** 축소모형실험, 삼병렬 터널, 안정성, 변형거동, 터널 형상

#### 1. 서론

병렬터널(parallel tunnel)은 수 개의 터널이 서로 나란히 배열되는 형태의 터널이다. 국내의 경우 도로, 철도, 지하철 등의 교통 터널에서 상행 및 하행 터널이 나

란히 배열되는 쌍굴터널(twin tunnel)의 형태가 일반화되고 있는데, 이러한 쌍굴터널은 병렬터널의 일종으로 볼 수 있다. 한편, 교통 터널 이외에 석유류 지하비축시설, 핵폐기물 처분공동, 다목적댐의 여수로 터널 등에 있어서도 병렬터널 시공이 증가하고 있다.

삼병렬 터널(three parallel tunnel)은 3개의 터널이 서로 나란히 배열되는 형태의 터널로서 터널간 필러(pillar)가 2개인 경우이다. 이 터널은 최근 활발히 계획되고 있는 다목적댐의 여수로 터널에서 흔히 고려되고 있는 형태이기도 하다.

<sup>1)</sup> 청주대학교 토목환경공학과

\* 교신저자 : jwkim@cju.ac.kr

접수일 : 2008년 7월 31일

심사 완료일 : 2008년 8월 14일

게재 확정일 : 2008년 8월 18일

삼병렬 터널의 설계에 있어 터널상호간의 이격거리는 매우 중요한 요소이다. 이는 지반의 조건이나 시공법에 따라 달라지는데, 보통 쌍굴터널의 설계 경험을 토대로 이루어지고 있다. 그러나 삼병렬 터널과 쌍굴터널은 필러의 개수가 다르기 때문에 주변지반의 응력분포와 변형거동이 매우 다르다.

삼병렬 터널에 관한 시공이나 설계사례는 매우 부족한 편이며 그에 관한 연구도 미흡한 형편이다. 국내의 경우 쌍굴터널 주변지반의 응력분포와 변형거동이 수치해석적인 방법(위성동 외, 1996, 김학문, 1997)이나 모형실험(김종우 외, 2004, 장부식 외, 2006)을 통해 연구된 바 있으나, 삼병렬 터널에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 3개 이상의 복수 공동에 대한 응력분포는 고전적인 지류이론(tributary theory)과 광탄성 해석을 통해 구해줄 수도 있지만(Hoek, 1980), 이는 다양한 현장 압반의 조건을 대변하지는 못한다. 따라서 삼병렬 터널 주변 지반의 변형거동을 직접 확인하기 위해서는 보다 실증적인 실험적 연구가 요구된다.

삼병렬 터널에 관한 실험적인 방법으로 축소모형실험이 고려될 수 있다. 이 실험은 차원해석에 근거한 물리적인 실험법으로서(Hobbs, 1966), 수치해석에 비해 사진으로 실험결과를 가시적으로 관찰할 수 있는 장점이 있어 지반 구조물 설계의 보조자료로 활용되고 있다(김종우 외, 2004).

본 연구에서는 터널간 이격거리, 터널단면 형상, 지보조건, 지반조건이 서로 다른 7가지 삼병렬 터널 모형에 대한 축소모형실험을 통하여 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였다. 첫째, 터널의 폭을 D라고 할 때, 터널간의 이격거리를 1D, 0.5D, 0.25D 등의 3가지로 변화시켜 가면서 모형실험을 실시하였다. 둘째, 터널단면의 형상을 아치형, 편평아치형, 사각형 등의 3가지로 변화시킨 후 실험을 하였다. 셋째, 터널 천장부에 모형 록볼트 지보를 설치한 경우에 대해 실험을 하였으며 마지막으로 이방성 압반을 모델링한 후에 같은 실험을 실시하였다. 이와 같은 실험을 통해 삼병렬 터널에서 터널간 이격거리, 터널단면 형상, 지보조건, 지반조건 등이 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 또한, 지반해석용 프로그램인 FLAC을 사용하여 실험결과를 검토하였다.

## 2. 실험 모형

### 2.1 차원해석

축소모형실험에서 현장성을 충분히 재현하기 위해서는, 현장의 모든 재반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 축소율을 산정하고 이에 따른 적합한 모형재료를 사

용하는 것이 매우 중요하다. Table 1은 본 연구에서 고려한 현장 압반의 물성을 나타낸 것이다.

차원해석을 실시할 때 세 가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]이라고 하면 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(김종우 외, 2004).

Fig. 1은 본 연구에서 고려된 현장 터널단면(6 m×4.8 m)과 축소모형에서의 터널단면(50 mm×40 mm)을 나타낸 것으로, 이와 같이 본 실험에서 길이[L]에 대한 축소율은 1/120로 하였다. 다음으로 중력가속도[LT<sup>-2</sup>]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/10.95가 된다.

한편, 현장 압반의 밀도는 Table 1과 같이 2.7 g/cm<sup>3</sup>인데 비해 본 실험에서 실제로 사용한 모형재료의 밀도는 1.6 g/cm<sup>3</sup>이었으므로 밀도[ML<sup>-3</sup>]에 대한 축소율은 1/1.69이며, 이로부터 질량[M]에 대한 축소율을 산정하면 1/2916000으로 나타났다.

이와 같이 산정된 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율을 근거로 하여 현장 압반의 강도[ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]에 대한 축소율을 구하면 1/203로 나타났다. Table 2는 본 실험의 축소율을 정리한 것이다.

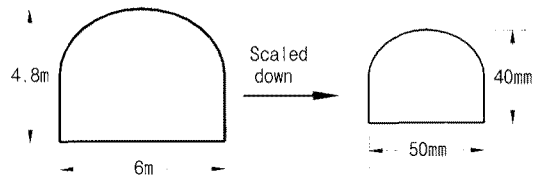


Fig. 1. Dimension of tunnel sections

Table 1. Assumed physical properties of rocks

Physical properties	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
Value	2.7	1000

Table 2. The scale factors of models

Physical properties	Dimension	Scale factors
Length	[L]	1/120
Time	[T]	1/10.95
Mass	[M]	1/2916000
Density	[ML <sup>-3</sup> ]	1/1.69
Strength	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	1/203

2.2 모형재료

축소모형실험에 사용되는 모형재료는 대상 암반의 물리적 특성을 충분히 대변할 수 있는 것이라야 한다. 본 연구 대상 암반의 일축압축강도는 Table 1과 같이 1000 kgf/cm<sup>2</sup>로 가정하였는데, 여기에 강도 축소율인 1/203을 적용하면 실제로 모형실험에 사용되어야 하는 모형재료는 4.93 kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 갖는 물질인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이러한 물성을 갖는 재료로서 모래, 석고, 물의 중량배합비가 140:60:100인 혼합물을 사용하였으며, 이 혼합물의 밀도가 1.6 g/cm<sup>3</sup>일 때 일축압축강도가 약 4.93 kgf/cm<sup>2</sup>를 나타내는 것을 확인하였다. 실제로 이 혼합물은 중량배합비와 밀도에 따라 다양한 강도를 나타내는 재료인데, 김중우 외(2004)와 정형래 외(2006)는 이 모형재료에 관한 물리적 특성을 자세히 보고한 바 있다.

2.3 실험모형의 종류

본 연구에서는 터널간 이격거리, 터널단면 형상, 지반조건, 지반조건 등이 터널 주변지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 Table 3과 같은 7가지 실험모형을 제작하였다. Fig. 2는 실험모형들의 규격을 나타낸 것이다.

7가지 실험모형의 세부사항은 다음과 같다. 첫째, 삼병렬 터널에 있어 터널간 이격거리의 영향을 연구하기 위하여 1, 2, 3번 모형과 같이 이격거리 또는 필러 폭(pillar width)을 1D(50 mm), 0.5D(25 mm), 0.25D(13 mm)로 변화시킨 모형들에 대해 실험을 실시하였고, 이때 터널의 파괴양상과 터널 주변지반의 변형거동을 알아보았다. 둘째, 터널간 이격거리를 0.5D로 고정시킨 상태에서 터널단면의 형상을 아치형(2번 모형), 편평아치형(4번 모형), 사각형(5번 모형) 등의 3가지로 변화시킨 모

Table 3. Details of tested models

Model No.	Pillar width	Tunnel shape	Tunnel support	Model type
1	1D	Arched	None	Isotropic
2	0.5D	Arched	None	Isotropic
3	0.25D	Arched	None	Isotropic
4	0.5D	Semi-arched	None	Isotropic
5	0.5D	Rectangular	None	Isotropic
6	0.5D	Arched	Rockbolt	Isotropic
7	0.9D	Arched	None	Anisotropic

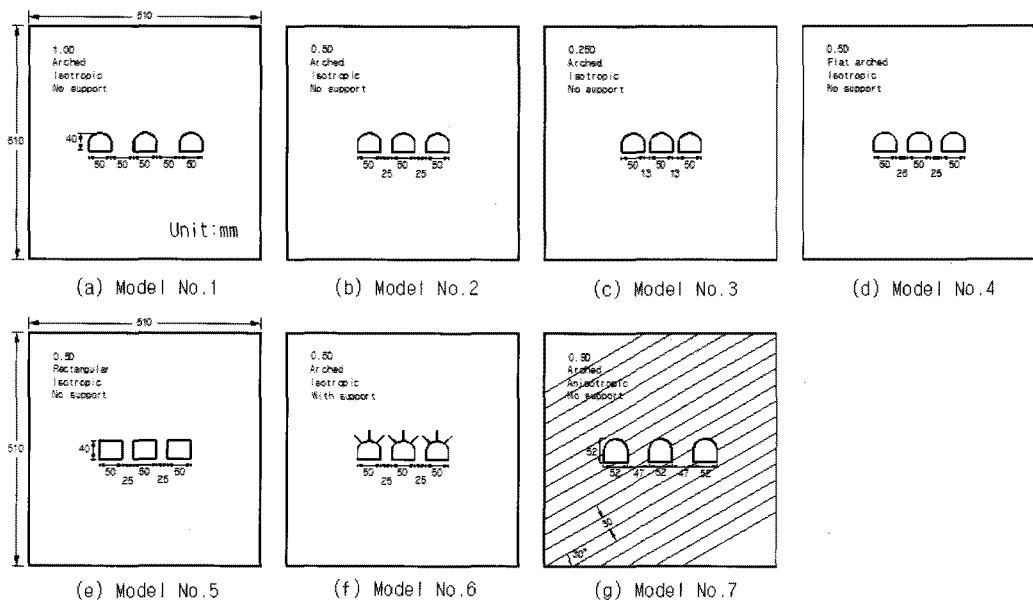


Fig. 2. Dimensions of seven different models

형들에 대해 실험을 실시함으로써 터널단면의 형상이 미치는 영향을 조사하였다. 셋째, 터널 지보의 영향을 조사하기 위하여 터널 천장부에 록볼트를 설치한 모형(6번 모형)에 대해 실험을 하였으며, 마지막으로 이방성 압반을 모델링한 7번 모형을 실험함으로써 불연속면이 발달한 이방성 모형이 등방성 모형과 어떠한 차이를 보이는지를 관찰하였다.

## 2.4 모형 시험체의 제작

모래, 석고, 물의 중량배합비가 140:60:100인 혼합물을 사용하여 Fig. 2의 7가지 모형 시험체를 제작하였다. 모형시험체의 규격은 510 mm×510 mm×76 mm이며 제작방법은 다음과 같다.

먼저 모래, 석고, 물을 골고루 혼합한 후 합판으로 제작한 육면체 성형틀에 천천히 주입하였다. 다음으로 이 혼합물이 응결된 후에 탈형하고 곧이어 전기건조기에 넣었다. 여기서 일정 기간 동안 105℃로 건조를 시켜 시험체의 밀도가 1.68 g/cm<sup>3</sup>가 될 때 시험체를 건조기 밖으로 꺼내고, 이후에 밀도가 1.6 g/cm<sup>3</sup>가 될 때까지 자연양생을 시킨 후 비로소 실험을 실시하였다.

한편, 1~6번 모형은 위와 같은 방법으로 모형시험체 제작이 이루어졌으나, 7번 모형은 이방성 모형이므로 제작방법이 약간 달랐다. 즉, 7번 모형은 두께 30 mm의 얇은 슬랩을 먼저 만들고 나서 이들을 적층체로 쌓아 올려 제작하였는데, 이 과정에서 많은 시행착오를 거듭하였다. 이것은 모래, 석고, 물의 중량배합비가 140:60:100인 혼합물이 두께 30 mm인 얇은 슬랩 형태를 유지할 만큼 강하지 않았기 때문이며, 결과적으로 본 실험에서는 모래, 석고, 물의 중량배합비가 135:65:100인 혼합물로 7번 모형을 제작하였다. 이방성 모형시험체의 자

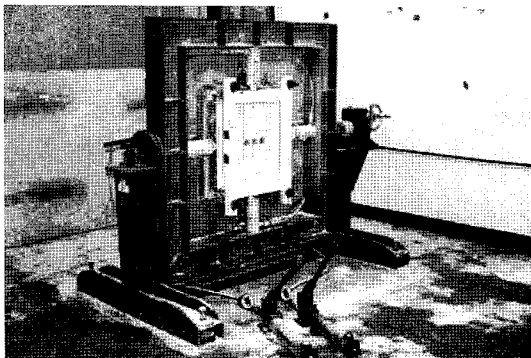
세한 제작방법은 정형래 외(2006)에 의해 보고된 바 있으며 본 논문에서는 생략한다.

## 3. 실험장치 및 방법

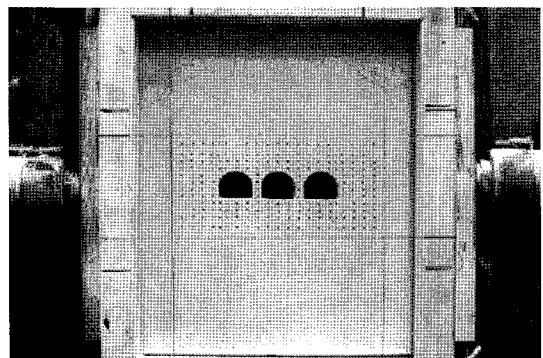
본 실험에 사용된 실험장치는 수직하중과 수평하중을 각각 조절할 수 있는 유압식 이축 압축장치이다. Fig. 3(a)는 실험장치의 모습을 나타낸 것으로, 이 장치의 크기는 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 두께 20 cm이다. 여기에는 25톤 용량의 램 4개가 서로 마주보며 배치되어 있어 모형시험체에 수직하중과 수평하중을 각각 가할 수 있도록 되어있다. 4개의 램은 두 개의 핸드펌프에 의해 작동되며, 모형시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프에 부착되어 있는 디지털 압력계로부터 측정된다.

한편, 현장 압반은 일반적으로 삼축압축능력 상태에 놓여있으나, 본 실험과 같은 평면 변형을 조건에서는 수직응력과 수평응력만 존재하는 이축응력 상태로 단순화 할 수 있다. 수직응력과 수평응력의 크기는 장소에 따라 매우 다르며, 우리나라의 경우 축압계수(수직응력에 대한 수평응력의 비)는 지역에 따라 다양하게 나타나는 특징이 있다. 한편, 축압계수가 터널의 변형거동에 미치는 영향은 매우 크지만(정형래 외, 2006), 본 연구에서는 실험의 일관성을 기하기 위하여 모든 모형에 대해 축압계수(K)를 1.7로 가정하였다. 즉, 본 실험에서는 7가지 모형시험체에 작용하는 수평하중을 수직하중에 비해 1.7배 크게 하여 이축압축실험을 실시하였다. 실험의 방법 및 순서는 다음과 같다.

- (1) 모형시험체를 실험장치에 설치하고 시험체의 모든 면을 정형한다.
- (2) 모형 터널을 Fig. 2의 규격대로 굴착한다. 단, 6번



(a) Test apparatus



(b) Front view of test model No.3

Fig. 3. The biaxial testing machine for scaled model tests

- 모형의 경우에는 사무용 칩판을 모형터널 천장부의 소정의 위치에 삽입함으로써 록볼트를 모델링한다.
- (3) 터널 주변의 변위를 측정하기 위하여 모형시험체의 표면에 계측점을 표시한다.
  - (4) 두께 10 mm인 아크릴판을 사용하여 모형시험체를 터널 축방향으로 고정시킴으로써 평면 변형을 조건을 구현한다. Fig. 3(b)는 이 단계에서 3번 모형의 모습을 나타낸 것이다.
  - (5) 모형시험체의 상·하, 좌·우에 위치한 네 개의 램에 하중을 연속적으로 작용시키면서 모형터널 주위의 변형거동을 관찰한다.
  - (6) 실험 중에는 수시로 사진을 촬영하고 균열 발달 상황을 조사하였는데, 이때 변위의 측정오차는 1회소당 0.2 mm로 나타났다.

**4. 실험결과 및 검토**

본 연구에서는 터널간 이격거리, 터널단면 형상, 지보 조건, 지반조건 등과 같은 4가지 요소가 서로 다른 총 7가지 모형에 대하여 축소모형실험을 실시하였다. 실험을 통해 하중에 따른 각 모형의 변형거동과 균열발생양상을 조사하였으며, 이 4가지 요소가 터널 주변지반의 변형거동 및 터널 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

**4.1 터널간 이격거리의 영향**

삼병렬 터널에서 터널간 이격거리가 터널의 변형거동 및 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2의 1, 2, 3번 모형을 실험하였다. 1, 2, 3번 모형에서 터널간 이격거리 또는 필러 폭은 각각 1D, 0.5D, 0.25D 등이다.

이 세 가지 모형들은 필러 폭이 서로 다른 관계로 하중에 따른 변형거동이 서로 다른 형태로 나타났다. Fig. 4는 이 중에서 3번 모형의 실험결과로서, 하중 증가에

따라 발생한 터널 주변의 변형과정을 파노라마 사진의 형태로 나타낸 것이다. 3번 모형은 다른 모형에 비해 터널간 이격거리가 가장 작은 모형인 관계로, 파괴 하중은 가장 작은 반면에 변형량은 가장 크게 나타났다.

Fig. 4(a)는 3번 모형에서 최초의 균열이 발생한 시점에 촬영한 사진이다. 여기서 최초의 균열은 수직압력 2.1 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 3.6 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때, 좌측 터널의 좌측벽과 좌하부 모서리에서 발생되었으며, 우측터널의 우측벽과 양쪽 필러에서도 미세한 균열이 발견되었다. 이 모형은 지속적인 하중 증가에 따라 Fig. 4(b), (c)와 같이 변형하였다. 3번 모형은 수직압력 2.9 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 4.9 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때가 최대 압력으로서, 이보다 큰 하중을 지지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었는데, Fig. 4(d)는 실험 최종 상태를 나타낸 것이다. 이와 같이 3번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 수직압력 기준으로 2.1 kgf/cm<sup>2</sup>와 2.9 kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타났다.

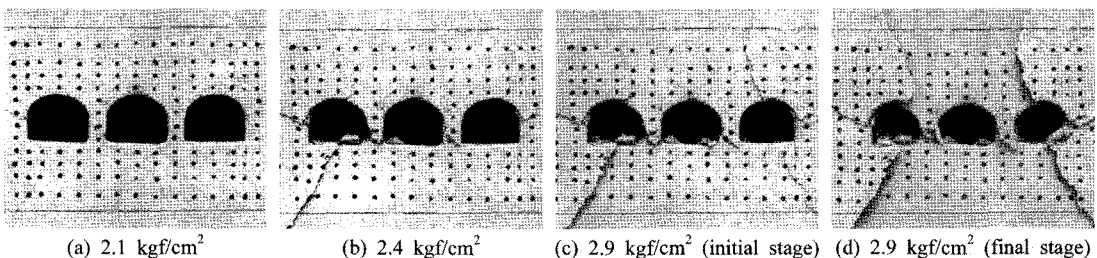
Table 4는 터널간 이격거리가 서로 다른 1, 2, 3번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 균열개시압력은 터널간 이격거리가 커질수록 증가하는 경향을 보이고 있어 터널간 이격거리가 커질수록 삼병렬 터널의 안정성은 증가하는 것을 알 수 있었다.

Table 5는 최종 압력상태에서 1, 2, 3번 모형의 파괴

**Table 4.** Testing pressures of models with different pillar widths

Model No.	Pillar width	Crack initiating pressure <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Final pressure <sup>2)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	1.0D	2.9	3.5
2	0.5D	2.5	3.5
3	0.25D	2.1	2.9

<sup>1), 2)</sup> These values are vertical pressures, whereas horizontal pressures are under K=1.7 conditions



**Fig. 4.** Deformation behaviors of model No.3 in biaxial loading condition (Values indicate vertical pressures)

사진과 변형도를 나타낸 것으로서, 1, 2번 모형은 수직 압력 기준으로 3.5 kgf/cm<sup>2</sup>, 3번 모형은 2.9 kgf/cm<sup>2</sup>이 작용한 경우이다. 터널 부근의 변형도에서 실선은 파괴 전의 초기 모습을 나타낸 것이고 점선은 파괴 후에 터널이 변형된 모습을 스케치한 것이다. 세 가지 모형의 변형도에서 좌우측 터널이 각각 중앙터널 방향으로 변위하고 있으며 터널의 수평방향 변형량이 수직방향 변형량보다 크게 나타난 것은 본 실험이 K=1.7의 조건대로 실시된 것에 기인하며, 이는 다른 모든 모형에서도 같이 나타났다.

세 가지 모형의 특징은 다음과 같다. 1번 모형은 파괴 사진에서 터널 사이의 필러부에서 상대적으로 큰 균열이 발생하지 않았으며, 터널 부근의 변형량도 다른 모형에 비해 가장 적게 나타났다. 변형도에서 파괴 후 터널의 내공단면적(점선)은 초기 단면적(실선)과 비교하였을 때 약 30% 축소되었다. 한편, 내공단면적의 변화는 변형도를 그림 파일 형태로 저장한 후에 AutoCAD로 불러와서 분석하여 구하였다.

2번 모형은 1번 모형에 비해 spalling 현상을 동반한 필러부의 균열이 크게 발생하였고, 파괴 후 터널의 내공단면적은 초기와 비교하였을 때 약 40% 축소되었다. 3번 모형은 1, 2번 모형에 비해 작은 압력이 가해졌음에도 불구하고 필러부에서 큰 균열이 발생하였으며, 변위도 매우 커서 파괴 후 터널의 내공단면적은 초기와 비교하여 약 45% 축소되었다.

이와 같이 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 필러의 파괴가 잘 일어나고 터널의 내공변형량도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Table 4와 같이 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 균열개시압력도 작은 것을 감안

하면, 터널간 이격거리가 작아질수록 삼병렬 터널의 안정성은 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 터널 단면형상의 영향

삼병렬 터널에서 터널 단면의 형상이 터널의 변형거동 및 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2의 2, 4, 5번 모형을 각각 실험하였다. 이 세 가지 모형에서 터널간 이격거리는 모두 0.5D이며, 터널 단면의 형상은 각각 아치형(2번 모형), 편평아치형(4번 모형), 사각형(5번 모형) 등이다. Fig. 5는 이 세 가지 터널의 단면을 비교한 것이다.

2, 4, 5번 모형들은 같은 크기의 터널간 이격거리를 가지지만 터널 단면의 형상이 서로 다르므로 파괴양상이나 변형거동이 서로 다른 형태로 나타났다. Fig. 6은 이 중에서 5번 모형(사각형 삼병렬 터널)의 실험결과로서, 하중 증가에 따라 발생한 터널 주변의 변형과정을 파노라마 사진의 형태로 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)는 5번 모형에서 최초의 균열이 발생한 시점에 촬영한 사진이다. 이때는 수직압력 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>와 수

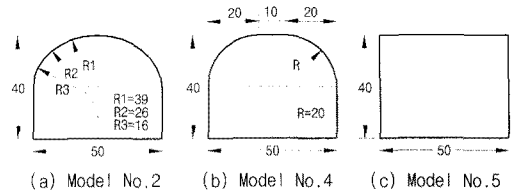


Fig. 5. Comparison of three different tunnel sections (Unit:mm)

Table 5. The experimental results of model No. 1, 2, 3 with different pillar widths

Comparison	Model No.1	Model No.2	Model No.3
Failure photograph			
Deformation around tunnels			
Applied pressures	$\sigma_v = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_v = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_v = 2.9 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 4.9 \text{ kgf/cm}^2$

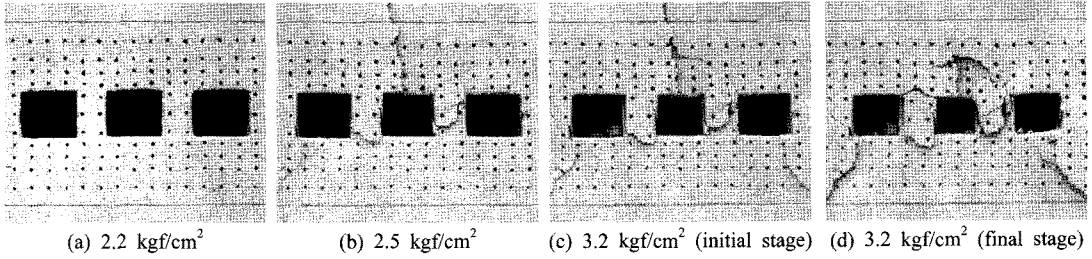


Fig. 6. Deformation behaviors of model No.5 in biaxial loading condition (Values indicate vertical pressures)

평압력 3.7 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때로서, 중앙터널 천장부에서 수직방향의 미세균열이 발생함과 동시에 우측 필러에서도 미세한 균열이 발견되었다. Fig. 6(b)는 수직압력 2.5 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 4.3 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때로서, 중앙터널 천장부와 양쪽 필러의 균열이 명확히 관찰되었다. Fig. 6(c)는 수직압력 3.2 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 5.4 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때로서, 전단계에서 발생한 균열이 계속적으로 발전하였고 좌측터널에서는 낙반이 발생하였다. 5번 모형은 수직압력 3.2 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 5.4 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때가 최대 압력으로서, 이보다 큰 하중을 지지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었는데, Fig. 6(d)는 실험 최종 상태를 나타낸 것이다. 이와 같이 5번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 수직압력 기준으로 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>와 3.2 kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타났다.

Table 6은 단면형상이 서로 다른 2, 4, 5번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 균열개시압력은 아치형, 편평아치형, 사각형 터널의 순서대로 감소하는 경향을 보이고 있어 천반곡

률반경이 작은 아치형 터널일수록 삼병렬 터널의 안정성은 향상되는 것을 알 수 있었다.

Table 7은 최종 압력상태에서 2, 4, 5번 모형의 파괴사진과 변형양상을 나타낸 것으로서, 2, 4번 모형은 수직압력 기준으로 3.5 kgf/cm<sup>2</sup>, 5번 모형은 3.2 kgf/cm<sup>2</sup>이 작용한 경우이다. 세 가지 모형의 파괴사진에서 모형들은 모두 필러가 파괴되었으며 이로 인해 대규모 내

Table 6. Testing pressures of models with different tunnel shapes

Model No.	Tunnel shape	Crack initiating pressure <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Final pressure <sup>2)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
2	Arched	2.5	3.5
4	Semi-arched	2.4	3.5
5	Rectangular	2.2	3.2

<sup>1), 2)</sup> These values are vertical pressures, whereas horizontal pressures are under K=1.7 conditions

Table 7. The experimental results of model No. 2, 4, 5 with different tunnel shapes

Comparison	Model No.2	Model No.4	Model No.5
Failure photograph			
Deformation around tunnels			
Applied pressures	$\sigma_v = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_v = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_v = 3.2 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 5.4 \text{ kgf/cm}^2$

공변형을 나타내었다.

한편, 전술한 바와 같이 변형도에서 터널의 수평방향 변형량이 수직방향 변형량보다 크게 나타난 것은 본 실험이  $K=1.7$ 의 조건대로 실시된 것에 기인한다. 세 가지 모형의 변형량을 비교하면, 2번 모형(아치형)은 파괴 후 터널의 내공단면적(점선)이 초기 단면적(실선)에 비해 약 40% 축소되었지만, 4번 모형(편평아치형)은 동일한 하중 조건에서 약 44% 축소되었다. 이에 비해 5번 모형(사각형)은 2, 4번 모형에 비해 작은 크기의 하중이 가해졌음에도 불구하고 변위가 매우 커서 파괴 후 터널의 내공단면적은 초기와 비교하여 약 45% 축소되었다.

이와 같이 터널의 내공변형량은 터널단면의 형상이 아치형, 편평아치형, 사각형 터널의 순서대로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Table 6의 균열개시압력을 감안 하더라도, 아치형 단면을 가진 삼병렬 터널의 안정성이 가장 우수한 것을 알 수 있었다.

사각형 단면 터널의 안정성이 가장 적게 나타난 것은 사각형 단면의 모서리 부분에서 생기는 응력집중 현상에 기인한 것으로 판단된다. 이는 Hobbs(1969)에 의해 이론 및 실험적으로 밝혀진 바 있으며, 국내의 여러 연구에서도 입증된 바 있다. 또한 김중우(1996)는 천반곡률반경에 따른 아치형 공동의 변형거동에 관한 연구에서 천반곡률반경이 커질수록, 다시 말해서 아치형 터널의 천장부가 납작할수록 터널의 변형량은 증가하는 것으로 보고하였으며, 이는 본 실험에서 2번 모형(아치형)에 비해 4번 모형(편평아치형)의 변형이 더 크게 나타난 사실과 부합한다.

### 4.3 록볼트 지보의 영향

삼병렬 터널에서 록볼트 지보의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2의 2번과 6번 모형을 각각 실험하였다. 여기서 2번 모형은 무지보 터널인데 비하여 6번 모형은 터널 천장부에 모형 록볼트를 설치한 경우이며, 이외의 모든 규격은 서로 같다.

실제로 6번 모형은 현장 길이 3 m인 록볼트를 터널 천장부에 2 m 간격으로 교대로 설치하는 것을 모델링한 것인데, Table 2의 길이에 관한 축소를  $1/120$ 을 적용하면 길이 3 m, 설치 간격 2 m인 현장 록볼트는 길이 25 mm, 설치 간격 17 mm인 모형 록볼트로 축소된다.

본 실험에서는 이와 같은 모형 록볼트를 축소모형 실험에 구현하기 위하여 직경 0.85 mm, 길이 25 mm인 사무용 침핀을 17 mm 간격으로 모형 터널의 천장부에 소정의 위치대로 삽입하였다. Fig. 7은 모형 록볼트의 규격과 설치 모습을 나타낸 것이다.

모형 록볼트를 설치한 6번 모형은 수직압력  $2.6 \text{ kgf/cm}^2$

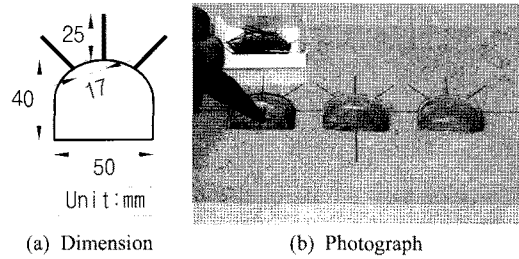


Fig. 7. Modelling of rockbolts

Table 8. Testing pressures of models with different tunnel support conditions

Model No.	Tunnel support	Crack initiating pressure <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Final pressure <sup>2)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
2	None	2.5	3.5
6	Rockbolt	2.6	3.5

<sup>1), 2)</sup> These values are vertical pressures, whereas horizontal pressures are under  $K=1.7$  conditions

와 수평압력  $4.4 \text{ kgf/cm}^2$ 이 가해질 때 최초로 균열이 발생하였으며, 실험 최종압력은 2번 모형과 마찬가지로 수직압력  $3.5 \text{ kgf/cm}^2$ 와 수평압력  $6.0 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 하였다.

Table 8은 무지보 터널인 2번 모형과 록볼트 지보 터널인 6번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 록볼트 지보 터널의 균열개시압력은 무지보 터널보다 다소 크게 나타나 록볼트를 설치하면 삼병렬 터널의 안정성은 향상되는 것을 알 수 있었다.

Table 9는 최종 압력상태에서 2, 6, 7번 모형의 파괴 사진과 변형양상을 나타낸 것이다. 여기서, 7번 모형에 관한 사항은 4.4절에서 후술하고자 하며, 본 절에서는 무지보 터널인 2번 모형과 록볼트 지보 터널인 6번 모형에 대한 실험결과를 비교한다.

Table 9에서 2번과 6번 모형에 작용한 압력의 크기는 서로 같다. 2번 모형은 파괴사진에서 spalling 현상을 동반한 필러부의 균열이 크게 발생하였고, 파괴 후 터널의 내공단면적은 초기와 비교하였을 때 약 40% 축소되었다. 이에 비하여 록볼트 지보 터널인 6번 모형은 필러부의 파괴가 다소 적으며, 파괴 후 터널은 초기와 비교하였을 때 단면적이 약 32% 축소되었다. 특히 변형도를 관찰하면 6번 모형은 2번 모형에 비해 삼병렬 터널 중에서 중앙터널에서의 천장부 변위(천단침하)가 매우 감소하였음을 볼 수 있다.

이와 같이 록볼트 지보 터널은 무지보 터널에 비해



**Table 9.** The experimental results of model No. 2, 6, 7 with different tunnel support and ground conditions

Comparison	Model No.2	Model No.6	Model No.7
Failure photograph			
Deformation around tunnels			
Applied pressures	$\sigma_v = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_v = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_v = 2.2 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_h = 3.7 \text{ kgf/cm}^2$

균열개시압력이 클 뿐만 아니라 천단침하를 비롯한 내공변형량도 비교적 적게 나타나 록볼트 지보의 효과를 실험으로써 검증할 수 있었다.

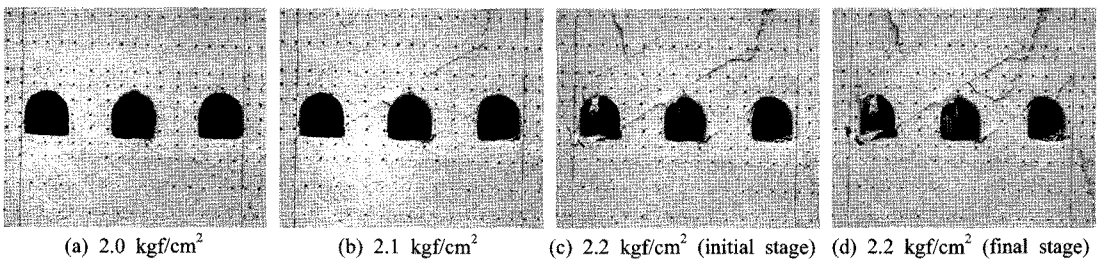
한편, 록볼트 지보는 블록상 암반이나 층상암반에서 압괴 매달림 효과 또는 빔 형성 효과를 기대할 수 있는 지보재이지만, 본 실험에서는 등방성 암반을 모델링하였기 때문에 이와 같은 지보효과를 검증할 수는 없었다. 실제로 본 실험에서 적용한 록볼트 모형실험은 시도적인 연구로서 국내외에서 거의 실시된 바가 없기 때문에 여러 가지 문제점이 있을 것으로 사료된다. 또한 블록상 내지는 층상 모형 암반에 대한 추가적인 실험 연구가 필요하며, 록볼트 뿐만 아니라 슛크리트나 강지보를 모델링하는 연구도 필요할 것으로 사료된다.

**4.4 이방성 암반의 영향**

현지 암반은 절리, 층리, 단층 등의 불연속면이 발달하여 있기 때문에 등방성이라고보다는 이방성을 나타낸다. 본 연구에서는 Fig. 2(g)와 같이 불연속면각이 30°각

도로 경사진 이방성 암반을 모델링한 7번 모형을 실험함으로써 불연속면이 발달한 이방성 모형이 등방성 모형과 어떠한 차이를 보이는지를 관찰하였다.

Fig. 8은 7번 모형에서 하중 증가에 따른 터널 주변의 변형과정을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 수직압력 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 3.4 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때로서, 좌측터널의 우하부 모서리, 중앙터널의 우하부 모서리 그리고 중앙터널의 천장부에서 미세한 균열이 발생하였다. Fig. 8(b)는 수직압력 2.1 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 3.6 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때로서, 불연속면을 따른 전단변위가 발생하여 세 터널사이가 균열로써 연결되었으며, 중앙터널의 천장부에서는 낙반현상이 발생하였다. Fig. 8(c)는 수직압력 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 3.7 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때로서, 기존의 균열은 계속적으로 발전하였으며 좌측터널에서도 천장부 낙반현상이 나타났다. 7번 모형은 수직압력 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 3.7 kgf/cm<sup>2</sup>이 가해질 때가 최대 압력으로서, 이보다 큰 하중을 지지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었는데, Fig. 8(d)는 실험 최종 상태를 나타낸 것이다. 삼병렬 터널은



**Fig. 8.** Deformation behaviors of model No.7 in biaxial loading condition (Values indicate vertical pressures)

모두 원형에 비해 심하게 파괴되어 단면이 축소되었으며, 불연속면을 따른 전단변위가 크게 발생함으로 인해 터널의 변형은 주로 불연속면 방향으로 발생하였다. 7번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 수직압력 기준으로 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>와 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타났다.

Table 10은 등방성 모형(2번 모형)과 이방성 모형(7번 모형)의 균열개시압력과 실험 최종압력을 비교한 것이다. 여기서 이방성 모형의 균열개시압력은 등방성 모형보다 작게 나타나 이방성 암반에서 삼병렬 터널의 안정성은 보다 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 이 두 가지 모형은 Fig. 2와 같이 터널간 이격거리와 터널단면의 형태가 약간 다를 뿐만 아니라 4.2절에서 언급한 바와 같이 모형재료의 배합비도 약간 다르기 때문에, 이 두 가지 모형을 정량적으로 서로 비교하기는 어렵다는 것을 부연해 두는 바이다. 즉, 7번 모형의 실험결과는 불연속면균이 발달한 이방성 암반에서 삼병렬 터널의 변형거동이 등방성 암반과 어떠한 차이를 보이는지를 알아보기 위한 정성적인 측면에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고적으로 등방성 모형(2번 모형)과 이방성 모형(7번 모형)의 실험결과를 Table 9에서 나타낸 바 있다. Table 9의 파괴사진으로부터 7번 모형은 2번 모형에 비해 불연속면을 따른 전단변위가 우세하게 나타났음을 볼 수 있다. 또한, 변형도에서 2번 모형은 파괴 후 터널의 단면적이 약 40% 축소된 반면에 7번 모형은 약 31% 밖에 축소되지 않았지만 Table 9의 하단에 나타낸 바와 같이 하중조건이 매우 다르기 때문에 역시 정량적인 비교는 하기 어렵다. 실제로 2번 모형의 균열개시압력이 2.5 kgf/cm<sup>2</sup>인 것을 감안하면, 7번 모형이 파괴되어 단면적이 31% 만큼 축소되었을 때의 하중 조건(2.2 kgf/cm<sup>2</sup>)에서 2번 모형은 균열조차도 생기지 않았음을 알 수 있다. 따라서 등방성 모형인 2번 모형이 이방성 모형인 7번 모형에 비해 터널 안정성이 매우 우수하다고 사료된다.

이와 같이 불연속면이 발달한 이방성 모형은 등방성

모형에 비해 균열개시압력이 작고 같은 하중조건에서 터널의 변형량도 커서, 이방성 암반내 삼병렬 터널의 안정성은 등방성 암반에 비해 비교적 감소할 것으로 생각된다.

### 5. 수치해석

본 연구에서 실시한 모형실험의 결과를 검토하기 위하여 FLAC을 사용한 탄소성 해석을 실시하였다. 실험 모형과 동일한 7가지 해석 모델을 구성하였으며, 모델의 물성과 경계조건은 실제 실험과 동일하게 적용하여 수치해석을 실시하였다. 해석 모델의 입력 물성은 Table 11과 같다.

FLAC은 연속체 해석기법의 일종이다. 즉, 여기서 해석 모델은 가해진 하중에 따라 연속체를 유지하면서 변형하며, 균열이 생겨 파괴된 후 요소가 모암으로부터 이탈하는 경우를 해석하지는 못한다. 따라서 본 연구에서는 모형실험 결과의 타당성을 조사할 목적으로, 7가지 모형별로 균열개시압력보다 작은 수준의 하중을 가하고 이때 발생하는 터널의 변형과 소성영역을 조사하였다.

Fig. 9는 4번 모형(사각형 터널)에 균열개시압력보다 작은 수준인 수직압력 1.7 kgf/cm<sup>2</sup>와 수평압력 2.9 kgf/cm<sup>2</sup>를 가할 경우에 발생한 변형을 100배 확대하여 나타낸 것이다. 여기서 좌우측 터널은 각각 중앙터널

Table 11. Input parameters

Physical properties	Values
Density	1.6 g/cm <sup>3</sup>
Young's modulus	3800 kgf/cm <sup>2</sup>
Cohesion	0.86 kgf/cm <sup>2</sup>
Frictional angle	27°

Table 10. Testing pressures of isotropic and anisotropic models

Model No.	Model type	Crack initiating pressure <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Final pressure <sup>2)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
2	Isotropic	2.5	3.5
7	Anisotropic	2.0	2.2

1), 2) These values are vertical pressures, whereas horizontal pressures are under K=1.7 conditions

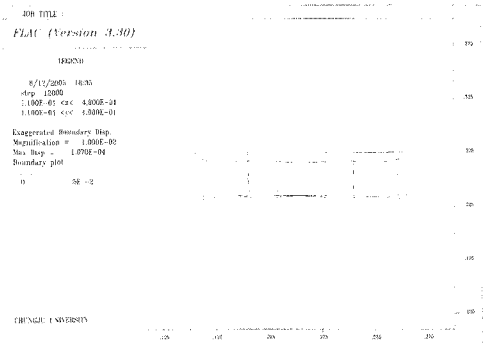


Fig. 9. Deformation of Model No.4 by FLAC

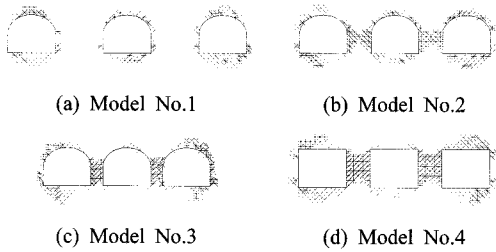


Fig. 10. Plastic zone around three parallel tunnels

방향으로 변형하고 세 가지 터널이 모두 아래방향으로 변형하는 것을 볼 수 있는데, 이는 Table 7에서 나타난 5번 모형의 실험결과 변형도와 매우 유사하다. 이와 같은 유사성으로 인해 본 연구에서 실시한 모형실험 결과는 타당성이 있다고 생각된다.

Fig. 10은 1, 2, 3, 4번 모형에 수직압력  $1.7 \text{ kgf/cm}^2$ 와 수평압력  $2.9 \text{ kgf/cm}^2$ 를 가할 경우에 발생한 소성영역 분포도를 나타낸 것이다. 여기서 터널간 이격거리가 가장 큰 1번 모형을 제외한 모든 모형에서 필러부가 소성영역으로 전환되었음을 볼 수 있다. 이는 실험 결과와 부합한 것으로서 터널간 이격거리가 작을수록 삼병렬 터널의 안정성이 저하됨을 의미한다.

또한 Fig. 10 (b), (d)에 나타난 2번과 4번 모형의 소성영역을 비교하면 사각형 터널의 소성영역이 더 넓은 것을 볼 수 있는데, 이 역시 실험 결과와 부합한 것으로서 천반곡률반경이 작은 아치형 삼병렬 터널의 안정성이 가장 우수함을 입증하고 있다.

## 6. 결론

삼병렬 터널은 3개의 터널이 서로 나란히 배열되는 형태의 터널이다. 본 연구에서는 터널간 이격거리, 터널 단면 형상, 지보조건, 지반조건 등이 서로 다른 7가지 삼병렬 터널 모형들에 대한 축소모형실험을 통하여 모형별 균열개시압력과 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였으며, 이 조건들이 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 삼병렬 터널간 이격거리 또는 필러 폭을 1D, 0.5D, 0.25D로 변화시킨 3가지 모형들에 대한 실험에서 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 낮은 압력수준에서 필러의 파괴가 일어나고 터널의 내공변형량도 증

가하여 터널의 안정성은 감소하는 것으로 나타났다.

- 2) 터널단면의 형상을 아치형, 편평아치형, 사각형으로 변화시킨 3가지 모형들에 대한 실험에서 사각형 단면을 가진 터널이 가장 작은 균열개시압력과 큰 내공변형량을 보여 터널 안정성이 가장 작게 나타났다. 또한, 천반곡률반경이 작은 아치형 터널이 편평아치형 터널보다 안정성이 우수한 것으로 나타났다.
- 3) 삼병렬 터널의 천장부에 모형 록볼트를 설치한 모형은 무지보 터널 모형에 비하여 균열개시압력이 클 뿐만 아니라 천단침하를 비롯한 변형량도 비교적 적게 나타나 록볼트 지보의 효과를 실험적으로 확인할 수 있었다.
- 4) 불연속면균이  $30^\circ$ 각도로 경사진 이방성 암반내 터널 모형은 등방성 모형에 비해 낮은 압력수준에서 균열이 생겼고, 불연속면을 따른 전단변위가 크게 발생함으로 인해 터널의 변형은 주로 불연속면 방향으로 발생하였다. 또한, 이방성 모형은 같은 하중조건에서 터널의 변형량도 더 커서, 이방성 암반내 삼병렬 터널의 안정성은 보다 감소하는 것으로 나타났다.
- 5) FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

## 참고문헌

1. E. Hoek and E.T. Brown, 1980, Underground excavation in rock, The Institute of Mining and Metallurgy, London, 112-126.
2. D. W. Hobbs, 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 3, 101-127.
3. D. W. Hobbs, 1969, Scale model study of strata movement around mine roadways. IV. roadway shape and size, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 6, 365-404.
4. 위성동, 임희택, 송충한, 1996, 3D-FEM을 이용한 단선병렬터널의 안정성해석, 대한토목학회논문집, 16.3, 275-286.
5. 김학문, 1997, 쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과, 한국암반공학학회지, 7.2, 136-142.
6. 김종우, 박지용, 2004, 쌍굴터널 주변지반의 변형거동에 관한 모형실험 연구, 한국암반공학학회지, 14.5, 381-390.
7. 장부식, 황정순, 이상오, 윤배식, 김홍택, 2006, 축소모형실험을 통한 병렬터널 보강필라의 거동특성평가에 관한 연구, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 789.
8. 정형래, 김종우, 2006, 이방성 암반의 방향성과 축압조건을 고려한 터널 모형실험 연구, 한국암반공학학회지, 16.4, 313-325.
9. 김종우, 1996, 천반곡률반경에 따른 아치형공동의 변형거동에 관한 연구, 한국암반공학학회지, 6.1, 10-18.



**김종우**

1986년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 043-229-8471

E-mail: jwkim@cju.ac.kr

현재 청주대학교 토목환경공학과 교수



**배우석**

1995년 충북대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1997년 충북대학교 공과대학 토목공학과  
공학석사  
2001년 충북대학교 공과대학 토목공학과  
공학박사

Tel: 043-229-8473

E-mail: wsbae@cju.ac.kr

현재 청주대학교 토목환경공학과 전임  
강사