

## 이방성 암반내 쌍굴터널의 안정성에 대한 모형실험 연구

김종우\*, 김명균

## A Study on the Stability of Twin Tunnels in Anisotropic Rocks Using Scaled Model Tests

Jong Woo Kim\*, Myeong Kyun Kim

**Abstract** In this study, scaled model tests were performed to investigate the stability of twin tunnels constructed in anisotropic rocks with 30° inclined bedding planes under the condition of lateral pressure ratio, 2. Five types of test models which had respectively different pillar widths and shapes of tunnel sections were experimented, where both crack initiating pressures and deformation behaviors around tunnels were investigated. The models with shallower pillar width showed shear failure of pillar according to the existing bedding planes and they were cracked under lower pressure than the models with thicker pillar width. In order to find the effect of tunnel sectional shape on stability, the models with four centered arch section, circular section and semi-circular arch section were experimented. As results of the comparison of the crack initiating pressures and the deformation behaviors around tunnels, the semi-circular arched tunnel model was the most unstable whereas the circular tunnel model was the most stable among them. Furthermore, the results of FLAC analysis were qualitatively coincident with the experimental results.

**Key words** Scaled model test, Anisotropic rocks, Twin tunnels, Stability, Deformation behavior

**초 록** 본 연구에서는 30° 경사진 층리면을 가진 이방성 암반내 위치한 쌍굴터널에서 터널간 이격거리와 터널 단면의 형상이 서로 다른 다섯 가지 모형에 대해 축압계수 2의 하중조건으로 축소모형실험을 실시하였다. 실험을 통해 모형별 균열개시압력과 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였으며, 이 조건들이 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 필라에서는 층리면을 따른 전단파괴가 발생하였으며 낮은 압력수준에서 균열이 발생하여 터널의 안정성은 상대적으로 작은 것으로 평가되었다. 사심아치형, 원형, 반원아치형 터널 모형들에 대한 실험에서 반원아치형 터널이 가장 작은 균열개시압력을 보여 터널 안정성이 가장 작게 나타났으며, 원형 터널의 안정성이 가장 크게 나타났다. 또한, 사심아치형 터널의 변형거동은 원형 터널과 반원아치형 터널의 중간적인 형태를 나타내었으며 터널 안정성도 중간정도에 해당하였다. FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

**핵심어** 축소모형실험, 이방성 암반, 쌍굴터널, 안정성, 변형거동

## 1. 서론

도로, 철도, 수로 등의 지하화 사업에서의 터널은 용지매입의 제한과 환경훼손 방지 등의 이유로 상행 및 하행 터널이 나란히 배열되는 쌍굴터널의 형태로 시공되고 있다. 쌍굴터널에서 단일 터널 상호간의 이격거리는 지반의 조건이나 시공법에 따라 달라지지만, 최근에는 보강공법의 발달로 인해 터널 굴착 폭의 2배 이하로 시공되는 경우가 많다.

**Received:** Jun. 14, 2012

**Revised:** Jun. 21, 2012

**Accepted:** Jun. 21, 2012

**\*Corresponding Author:** Jong Woo Kim

Tel) +82432298471, Fax) +82432298466

E-Mail) jwkim@cju.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Cheongju Univ., Naedeok-dong, Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, SEOUL 360-764  
Rep. of KOREA

쌍굴터널의 적용 빈도가 늘어남에 따라 국내의 관련 연구들도 꾸준히 진행되고 있다. 쌍굴터널과 관련한 국내 연구는 주로 수치해석적인 방법을 동원한 연구들(김학문, 1997, 황정순 외, 2005, 백승철 외, 2009)이 많으며, 실제 쌍굴터널의 설계에서도 이 방법이 널리 적용되고 있다. 그러나 쌍굴터널 주변 지반의 변형거동과 터널 안정성 여부를 가시적으로 직접 확인하기 위해서는 보다 실증적인 실험적 연구가 필요하다.

터널의 축소모형실험은 Hobbs(1966), Goodman(1972) 등에 의해 소개되었고 국내에서도 쌍굴터널에 대한 물리적인 모형실험을 실시한 연구 사례가 몇 차례 보고된 바 있다. 이 중에서 김중우와 박지용(2004)은 모형실험을 통해 등방성 암반내 위치한 쌍굴터널 주변지반의 변형거동을 조사하였고, 장부식 외(2006)는 쌍굴터널간 보강필라의 거동에 대해 연구하였으며, 김중우(2012)는 기존터널 인근에 신설터널을 시공하여 비대칭 쌍굴터널이 만들어지는 경우에 대한 실험을 실시한 바 있다.

본 연구에서는 이방성 암반내 위치한 쌍굴터널에서 터널간 이격거리와 터널 단면의 형상이 서로 다른 다섯 가지 쌍굴터널 모형에 대한 축소모형실험을 통하여 터널 주변지반의 변형거동을 조사하고 터널의 안정성을 검토하였다. 이방성 암반을 모형실험에 적용하기 위하여 적층체 모형을 제작하였으며, 터널간의 이격거리를 0.5D, 1.0D, 1.57D 등의 세 가지로 변화시켜 가면서 실험을 실시함으로써 터널간 이격거리가 터널 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 다음으로, 1.57D 모형에 대해서는 터널 단면 규격을 사심아치형, 원형, 반원아치형 등의 세 가지로 변화시킨 세 가지 모형을 제작하고 실험함으로써 터널 단면 형상이 터널 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 지반해석용 프로그램인 FLAC을 사용하여 실험 결과를 검토하였다.

2. 실험 모형

2.1 현장조건 및 차원해석

본 연구에서는 이방성 암반에 Fig. 1과 같이 폭 3.06

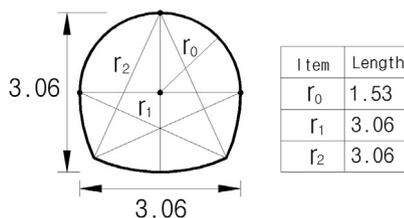


Fig. 1. Dimension of tunnel section(Unit:m)

m인 사심아치형 터널을 쌍굴터널의 형태로 굴착하는 경우를 모델링하였다. 현장 암석에 대한 실내 물성시험의 결과, 암석의 밀도는  $2.4 \text{ g/cm}^3$ 이고 일축압축강도는 53 MPa이었다. 또한 이 현장에서 이방성 지층은 터널 단면의 횡축을 기준으로  $30^\circ$  정도 경사져 있으며, 현지 초기지압을 측정된 결과 측압계수(K)는 2.0으로 나타났다.

축소모형실험을 실시할 때 현장성을 충분히 재현할 수 있도록 하기 위해서는, 현장의 모든 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 축소율을 산정하고 이에 따른 적합한 모형재료를 사용하여 축소모형을 제작해야한다. 세 가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]이라고 할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(전석원 외, 2003).

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 현장 터널단면과 축소모형에서의 터널단면을 나타낸 것으로, 이와 같이 본 실험에서는 길이[L]에 대한 축소율을 1/59로 하였다. 다음으로 중력가속도[ $LT^{-2}$ ]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/7.7이 된다.

한편, 현장 암반의 밀도는 전술한 바와 같이  $2.4 \text{ g/cm}^3$ 인데 비해 본 실험에서 실제로 사용한 모형재료의 밀도는  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 이었으므로 밀도[ $ML^{-3}$ ]에 대한 축소율은 1/1.5이며, 이로부터 질량[M]에 대한 축소율을 산정하면 1/305665로 나타났다. 이와 같이 산정된 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율을 근거로 하여 현장 암반의 강도[ $ML^{-1}T^{-2}$ ]에 대한 축소율을 구하면 1/88로 나타났다. Table 1은 본 실험의 축소율을 정리한 것이다.

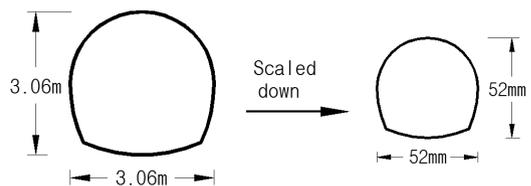


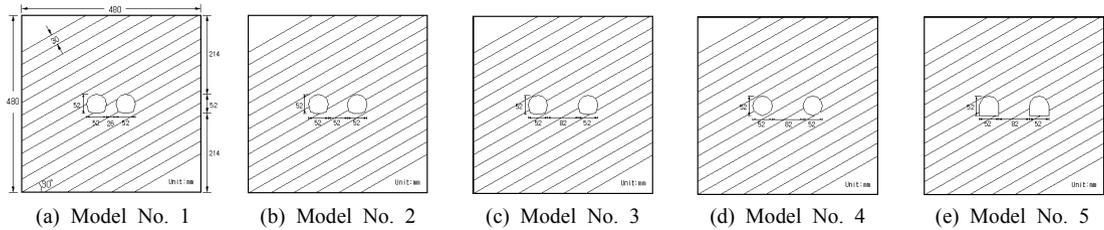
Fig. 2. Comparison of tunnel sections for calculating the scale factor of length

Table 1. The scale factors of models

Physical properties	Dimension	Scale factors
Length	[L]	1/59
Time	[T]	1/7.7
Mass	[M]	1/305665
Density	[ $ML^{-3}$ ]	1/1.5
Strength	[ $ML^{-1}T^{-2}$ ]	1/88

**Table 2.** The physical properties of modelling material

Mixture Sand : Plaster : Water	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
135 : 65 : 100	1.6	0.6	500	0.1	26



**Fig. 3.** Dimensions of five different models

**2.2 모형재료**

축소모형실험에 사용되는 모형재료는 대상 암반의 물리적 특성을 충분히 대변할 수 있는 것이라야 한다. 본 연구 대상 암반의 일축압축강도는 전술한 바와 같이 53 MPa이기 때문에 여기에 강도 축소율인 1/88을 적용하면 본 실험에서 실제로 사용되어야 하는 모형재료는 0.6 MPa의 일축압축강도를 갖는 물질인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이러한 물성을 갖는 모형 재료로서 특정한 밀도와 배합비를 가진 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하였다. 한편, 이 혼합물은 밀도와 중량 배합비에 따라 강도가 변화하는데, 밀도 1.6 g/cm<sup>3</sup>일 경우 이 혼합물의 일축압축강도는 식 (1)과 같다(김종우와 박지용, 2004, 김종우, 2012).

$$S_c = 2.01 (P/W)^{2.81} \tag{1}$$

여기서,  $S_c$  : Uniaxial compressive strength(MPa)

$P/W$  : Weight ratio of plaster to water

식 (1)에 의해 0.6 MPa의 강도를 가지는 혼합물의 배합비를 구하면 P/W는 0.65이다. 즉 모래, 석고, 물의 중량배합비가 135:65:100인 혼합물이 적합한 모형재료로 판단되었다. 한편, 본 실험에서는 이 혼합물로 수 개의 원주형 시험편을 제작한 후 일정 기간 건조 후 밀도가 1.6 g/cm<sup>3</sup>일 때 일축압축실험을 실시하여 소정의 강도를 나타내는 것을 다시 확인하였다. 또한 이 혼합물에 대한 추가적인 실내 물성실험을 통해 이 재료는 Table 2와 같은 물성을 가지는 것을 알 수 있었다.

또한, 이방성 특성을 구하기 위하여 가로 150 mm, 세

**Table 3.** Results of uniaxial compression tests for anisotropic properties

Specimens	Loading condition	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Horizontal layers		0.58	471
Vertical layers		0.61	525

로 150 mm, 두께 76 mm인 육면체 시험편에 대해 일축압축실험을 추가로 실시하였으며, Table 3은 실험결과를 나타낸 것이다.

**2.3 실험모형의 종류**

본 연구에서는 이방성 암반내 위치한 쌍굴터널에서 터널간 이격거리와 터널 단면의 형상이 터널 안정성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3과 같은 다섯 가지 실험모형을 제작하였다. 먼저 1, 2, 3번 모형과 같이 터널간의 이격거리를 0.5D(26 mm), 1.0D(52 mm), 1.57D(82 mm)등의 세 가지로 변화시켜 가면서 실험을 실시하였으며, 다음으로 1.57D 모형에 대해서는 3, 4, 5번 모형

과 같이 터널 단면 형상을 달리한 세 가지 모형을 제작하고 실험하였다. Table 4는 세 가지 터널 단면의 규격을 나타낸 것이다.

또한 2.1절에서 언급한 현장의 지반 조건과 초기지압 조건을 모형실험에 반영하기 위하여, 지층은 터널단면의 횡축을 기준으로 30° 경사지도록 모형체를 제작하였으며, 실험 중 축압계수(K) 2.0을 만족하는 하중조건을 실제로 적용하였다.

**2.4 모형시험체의 제작**

모래, 석고, 물의 중량비가 135:65:100인 혼합물을 사용하여 모형시험체를 제작하였다. 이때 모래는 주문진

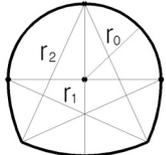
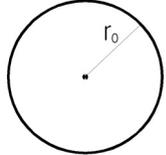
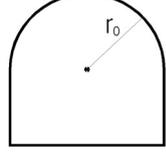
산 표준사, 석고는 ㈜문교산업의 도자기 형재용 석고를 사용하였다. 모형시험체는 480 mm × 480 mm × 76 mm 규격이며, 이방성 암반을 모사하기 위하여 30 mm 두께의 Slab을 여러 개 제작한 후 이들을 결합하고 재단하여 최종적으로 규격화된 시험체를 완성하였다. Fig. 4는 이러한 모형시험체 제작 과정을 모식적으로 나타낸 것이다(정형래와 김중우, 2006). 한편, 이와 같이 완성된 시험체를 일정 기간 건조시켜 밀도가 1.6 g/cm<sup>3</sup>이 될 때 비로소 실험을 실시하였다.

**3. 실험장치 및 방법**

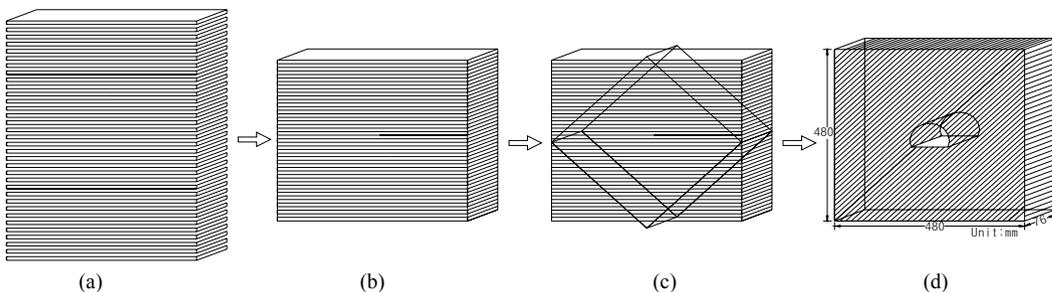
본 실험에 사용된 실험장치는 수직하중과 수평하중을 각각 조절할 수 있는 유압식 이축 압축장치로서 직교하는 네 방향에 25톤 용량의 램이 부착되어 있다. 수직 및 수평 하중은 각각의 핸드펌프에 의해 작동되며, 모형시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프에 부착되어 있는 압력계로부터 측정된다. 가압 실험 중 모형터널 주변의 변위는 고성능 디지털 카메라를 사용하여 측정하였으며, 이때 변위의 측정오차는 1화소당 0.2 mm로 나타났다. 실험의 방법 및 순서는 다음과 같다.

- (1) 이방성 모형시험체를 실험장치에 설치하고 Fig. 5(a)와 같이 시험체의 모든 면을 정형한다.
- (2) 시험체에 미량의 하중을 가하여 시험체를 실험장치에 고정한 후 Fig. 5(b)와 같이 모형 터널을 Fig. 3의 규격대로 굴착한다.
- (3) 하중 증가에 따른 터널 주변의 변위를 측정하기 위하여 모형시험체의 표면에 계측점들을 표시한다.
- (4) Fig. 5(c)와 같이 두께 10 mm인 투명 아크릴판을 모형시험체 위에 덮고 나서 모형시험체를 터널 축 방향으로 고정시킴으로써 평면 변형률 조건을 구현한다.
- (5) 이상의 과정은 Fig. 5(d)와 같이 실험장치를 수평으로 둔 상태에서 실시하였지만, 현장 상태를 그

**Table 4.** Dimensions of three different tunnels

Model No.	Shape	Drawing <sup>1)</sup>
3	Four centered arch	
4	Circle	
5	Semi-circular arch	

<sup>1)</sup> r<sub>0</sub>=26 mm, r<sub>1</sub>=52 mm, r<sub>2</sub>=52 mm



**Fig. 4.** A process of manufacturing the test model(정형래와 김중우, 2006)

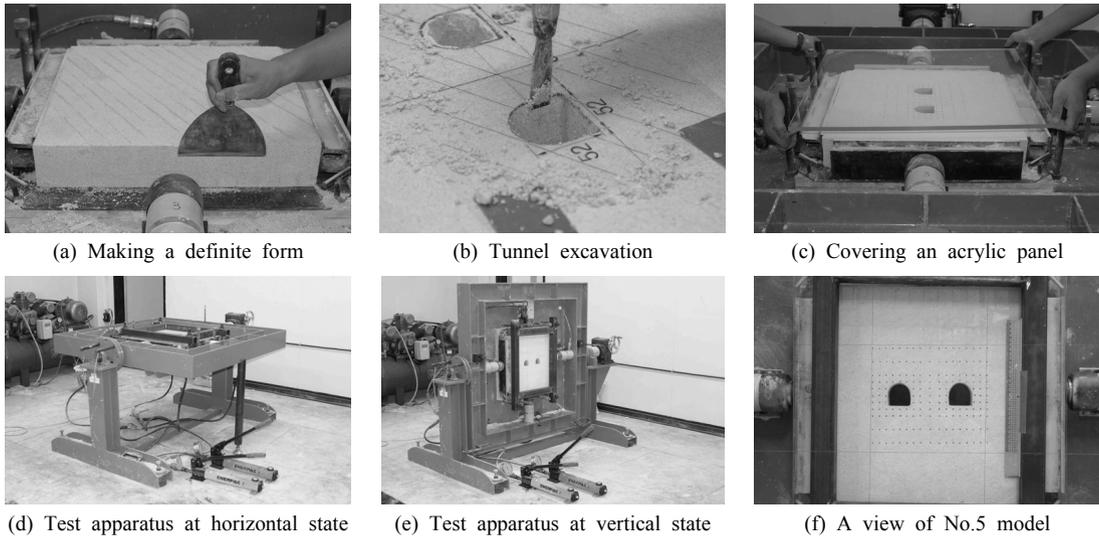


Fig. 5. Procedures of the scaled model tests of this study

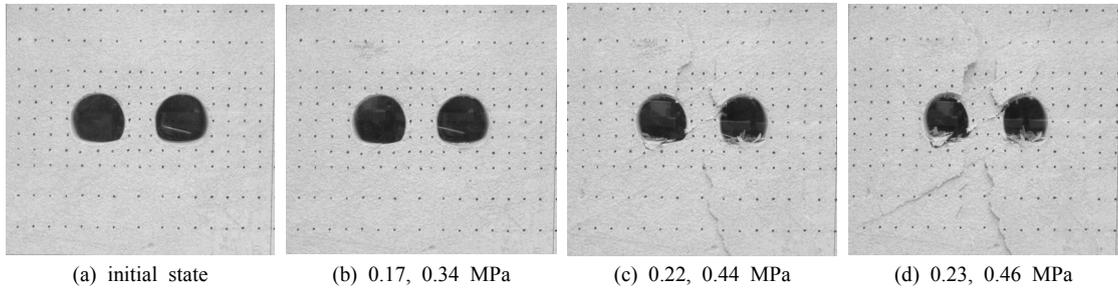


Fig. 6. Deformation behaviors of model No.1 in biaxial loading condition(Values indicate vertical and horizontal pressures, respectively)

대로 적용하기 위하여 Fig. 5(e)와 같이 실험장치를 수직으로 회전시킨다.

- (6) Fig. 5(e)에 나타난 두 개의 핸드펌프를 사용하여 모형시험체의 상하, 좌우에 위치한 네 개의 램에 하중을 작용시키되, 축압계수(K) 2.0을 만족하도록 수직하중에 비해 수평하중을 2배 크게 적용한다. 이와 같이 모형시험체에 연속적인 하중을 재하하면서 하중 증가에 따른 모형터널 주위의 변형거동을 관찰하였다. Fig. 5(f)는 5번 모형의 시험 전 모습을 나타낸 것으로 터널 주변에는 위(3)항에서 언급한 계측점이 나타나있다.

#### 4. 실험결과 및 검토

##### 4.1 터널간 이격거리의 영향

쌍굴터널간 이격거리 또는 필러 폭이 터널의 변형거

동 및 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3의 1, 2, 3번 모형을 실험하였다. 이 세 가지 모형에서 터널간 이격거리는 터널 폭을 D라고 할 때 0.5D, 1.0D, 1.57D 등이며 실험 중 축압계수는 모두 2.0을 유지하도록 하였다.

Fig. 6은 실험결과와의 한 가지 예로서, 1번 모형에서 하중 증가에 따라 발생한 터널 주변의 변형과정을 파노라마 사진의 형태로 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 초기 모습이며, Fig. 6(b)는 수직압력 0.17 MPa와 수평압력 0.34 MPa이 가해질 때로서, 최초의 균열이 발생한 시점에 촬영한 사진이다. 여기서 좌측터널의 천장부 및 바닥부, 우측터널의 천장부 및 바닥부에서 미세한 균열이 발견되었다. Fig. 6(c)는 수직압력 0.22 MPa와 수평압력 0.44 MPa이 가해질 때로서, 좌측터널과 우측터널을 연결하는 기존 층리면을 따라 전단변위가 발생하여 필러가 파괴되었다. 또한 좌측터널과 우측터널의 하반

이 파괴되어 용기하고 있으며, 천장부의 파쇄물이 낙반하여 바닥부에 쌓여있음을 볼 수 있다. 마지막으로 Fig. 6(d)는 수직압력 0.23 MPa와 수평압력 0.46 MPa이 가해질 때로서 이 모형은 더 이상의 하중을 지지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었으며, 변형은 주로 필라 방향으로 발생하였다.

이와 같이 터널간 이격거리가 0.5D인 1번 모형의 경우 필라에서는 지층 경계면을 따른 전단파괴가 발생하였으며 안정성 확보를 위해서는 필라의 보강이 필요함을 알 수 있었다. 한편, 1번 모형 이외에 다른 모든 모형에서도 하중이 증가함에 따라 쌍굴터널의 변형은 필라 방향으로 주로 발생하였고, 터널의 수직방향의 변형보다는 수평방향으로 더 큰 변형이 발생하였다.

Table 5는 세 가지 모형의 균열개시압력과 실험 최종 압력을 나타낸 것이다. 여기서 균열개시압력은 터널간 이격거리가 커질수록 증가하는 경향을 보이고 있어 터널간 이격거리가 커질수록 쌍굴터널의 안정성은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 등방성 암반내 쌍굴터널(김종우와 박지용, 2004)과 호층 암반내 쌍굴터널(김종우, 2012)에서 얻어진 모형실험의 결과와 부합하며, 이

로부터 터널간 이격거리의 증가는 대부분의 암반 조건에서 터널 안정성을 증가시키는 요인이 됨을 알 수 있었다.

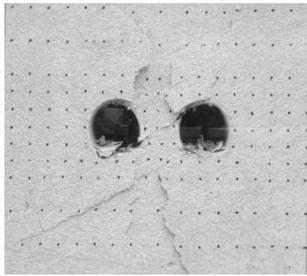
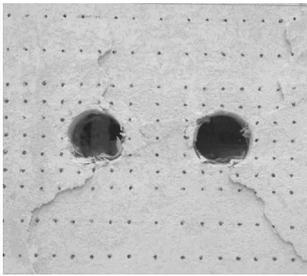
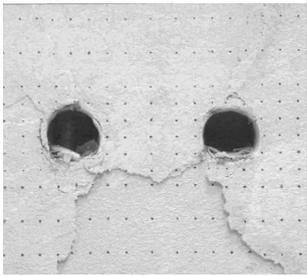
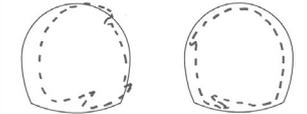
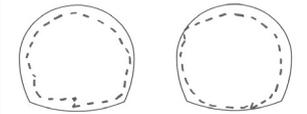
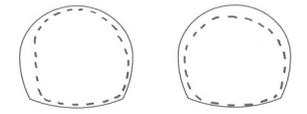
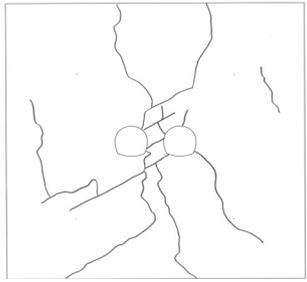
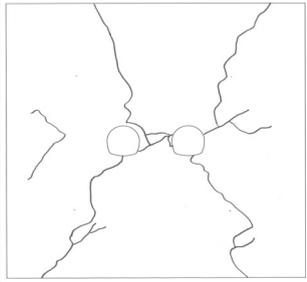
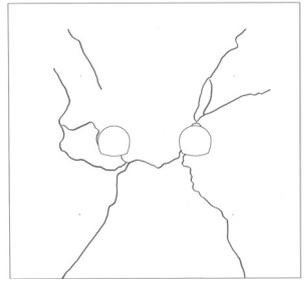
한편, Table 6은 터널간 이격거리가 서로 다른 세 가지 모형들에서 최대 하중이 작용할 때의 변형거동을 비교하여 나타낸 것이다. 먼저 모형별 사진을 보면, 1번 모형은 30° 경사진 층리면을 따라 터널 사이의 필라가 파괴되어 대규모 변형이 발생하였으며 2번 모형도 필라의 전단 파괴가 약간 일어났지만 3번 모형은 가장 큰

**Table 5.** Testing pressures of models with different pillar widths

Model No.	Pillar width	Crack initiating pressure <sup>1)</sup> (MPa)	Maximum pressure <sup>2)</sup> (MPa)
1	0.5D	0.17, 0.34	0.23, 0.46
2	1.0D	0.19, 0.38	0.26, 0.52
3	1.57D	0.21, 0.42	0.27, 0.54

<sup>1), 2)</sup> 1st and 2nd values indicate vertical and horizontal pressures, respectively

**Table 6.** The experimental results of model No. 1, 2, 3 with different pillar widths

Items	Model No.1	Model No.2	Model No.3
Pillar width	0.5D	1.0D	1.57D
Applied pressures	$\sigma_v=0.23\text{MPa}$ , $\sigma_h=0.46\text{MPa}$	$\sigma_v=0.26\text{MPa}$ , $\sigma_h=0.52\text{MPa}$	$\sigma_v=0.27\text{MPa}$ , $\sigma_h=0.54\text{MPa}$
Failure photograph			
Deformation around tunnels			
Modes of failure			

하중 조건임에도 불구하고 변형량은 비교적 작게 나타났음을 볼 수 있다. 이는 실험 전후 터널의 내공 단면 변화를 실선과 점선으로 나타낸 두 번째 그림에서도 확인할 수 있다. 또한 이 그림에서 좌우측 터널은 각각 중앙 필라 방향으로 변위하고 있으며 모든 모형에서 터널의 수평방향 변형량이 수직방향 변형량보다 크게 나타난 것은 실험조건인 축압계수 2.0에 기인한다. 마지막으로 모형별 파괴양상을 나타낸 세 번째 그림에서도 터널간 이격거리가 가장 작은 1번 모형은 필라의 전단 파괴가 가장 명확히 발생하였음을 볼 수 있다.

**4.2 터널 단면 형상의 영향**

터널 단면의 형상이 쌍굴터널의 변형거동 및 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3의 3, 4, 5번 모형을 각각 실험하였다. 이 세 가지 모형에서 터널간 이격거리는 모두 같지만 터널 단면은 Table 4와 같이 각각 사심아치형(3번 모형), 원형(4번 모형), 반원아치형(5번 모형) 등으로 서로 다른 형상을 가지고 있다.

Table 7은 세 가지 모형의 균열개시압력과 실험 최종 압력을 나타낸 것이다. 여기서 균열개시압력은 원형, 사

심아치형, 반원아치형 터널의 순서대로 감소하는 경향을 보이고 있어 원형 터널이 가장 안정하며 반원아치형이 가장 불안정한 것으로 나타났다.

Table 8은 터널 단면 형상이 서로 다른 세 가지 모형들에서 최대 하중이 작용할 때의 변형거동을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 아치형 터널인 3, 5번 모형은 좌우측 터널의 모서리 부분에서 균열이 발생하여 좌우측 터널간 필라가 파괴되었으나, 원형 터널은 단면 특성상

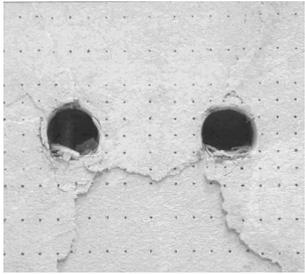
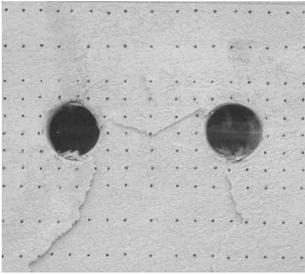
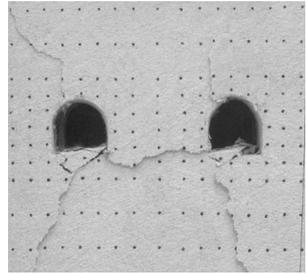
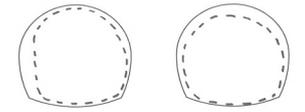
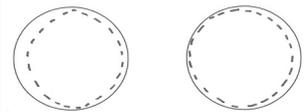
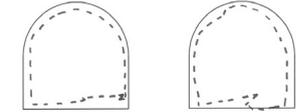
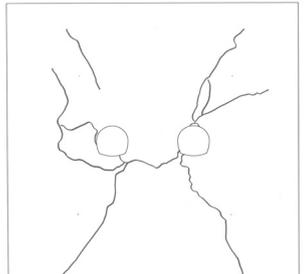
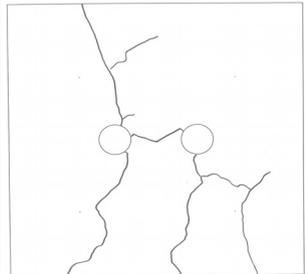
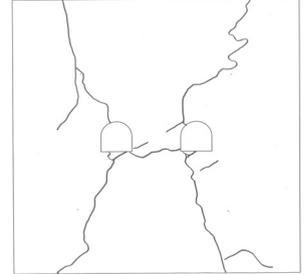
**Table 7.** Testing pressures of models with different tunnel shapes

Model No.	Tunnel shape <sup>1)</sup>	Crack initiating pressure <sup>2)</sup> (MPa)	Maximum pressure <sup>3)</sup> (MPa)
3	Fc. arch	0.21, 0.42	0.27, 0.54
4	Circle	0.22, 0.44	0.28, 0.56
5	Sc. arch	0.20, 0.40	0.26, 0.52

<sup>1)</sup> Four centered Arch, Semi-circular arch

<sup>2), 3)</sup> 1st and 2nd values indicate vertical and horizontal pressures, respectively

**Table 8.** The experimental results of model No. 3, 4, 5 with different tunnel shapes

Items	Model No.3	Model No.4	Model No.5
Tunnel shape	Four centered Arch	Circle	Semi-circular arch
Applied pressures	$\sigma_v=0.27\text{MPa}$ , $\sigma_h=0.54\text{MPa}$	$\sigma_v=0.28\text{MPa}$ , $\sigma_h=0.56\text{MPa}$	$\sigma_v=0.26\text{MPa}$ , $\sigma_h=0.52\text{MPa}$
Failure photograph			
Deformation around tunnels			
Modes of failure			

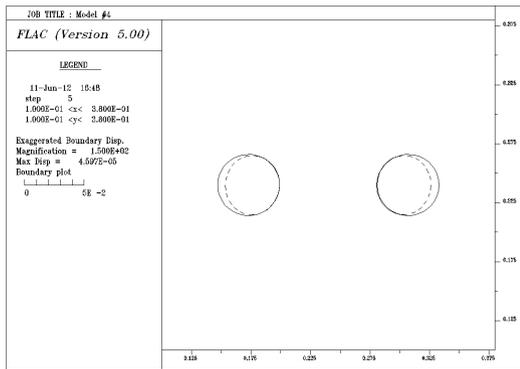


Fig. 7. Deformation of Model No.4 by FLAC

모서리가 없어 이러한 경향은 발견되지 않았다. 특히 반원아치형 터널인 5번 모형은 바닥부가 편평하고 모서리가 매우 뾰족하기 때문에 여기서의 응력집중으로 인해 터널 바닥부에서 대규모 파괴가 발생하였으며, 필라에서의 균열은 거의 수평방향으로 발달하여 30° 경사진 기존 층리면이 파괴에 미치는 영향은 적었다.

이와 같이 세 가지 모형의 파괴 균열 양상을 전체적으로 살펴보면 사심아치형 터널(3번 모형)은 원형 터널(4번 모형)과 반원아치형 터널(5번 모형) 변형거동의 중간적인 형태를 나타낸다고 할 수 있으며, 이는 단면의 기하학적 특성에 기인한다고 생각된다. 또한 Table 7에서 검토한 바와 같이 사심아치형 터널의 안정성도 원형 터널과 반원아치형 터널의 중간 정도에 해당하였다.

이러한 실험결과를 고려하면 본 연구에서 고려한 이방성 쌍굴터널에 있어서 터널단면의 형상은 원형에 가까울수록 균열개시압력이 크고 터널의 변형은 작게 나타나므로, 원형단면의 터널이 가장 안정적인 것으로 생각된다.

#### 4.3 수치해석을 이용한 실험결과 검토

모형실험의 결과를 수치해석적으로 검토하기 위하여 실험모형과 동일한 다섯 가지 해석 모델을 구성하고 FLAC을 사용한 이방성 해석을 실시하였다. 여기서 모델의 물성은 실제 모형재료에 대한 물성 실험결과를 적용하였으며, 경계조건도 모형실험에서의 조건과 동일하게 적용하였다. 한편, FLAC은 연속체 해석기법의 일종으로서, 해석 모델은 가해진 하중에 따라 연속체를 유지하면서 변형하기 때문에 파괴된 후 요소가 모암으로부터 이탈하는 경우를 해석하지는 못한다(정형래와 김중우(2006)). 따라서 본 연구에서는 모형실험 결과의 타당성을 정성적으로 조사할 목적으로, 모형별로 균열개시압

력보다 작은 수준의 하중을 가하고 이때 발생하는 터널의 변형을 조사하였다.

Fig. 7은 수치해석 결과의 한 가지 예로서, 4번 모형(원형 터널)에 대해 균열개시압력보다 작은 수준인 수직압력 0.1 MPa와 수평압력 0.2 MPa를 가할 경우에 발생한 변형을 150배 확대하여 점선으로 나타낸 것이다. 여기서 좌우측 터널은 각각 필라 방향으로 변형하고 터널의 수직방향 변형보다는 수평방향 변형이 더 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 한편, 해석결과인 Fig. 7은 실험결과인 Table 8의 변형도(4번 모형의 점선)와 매우 유사하다. 따라서 본 연구에서 실시한 모형실험의 결과는 타당성이 있다고 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 30° 경사진 층리면을 가진 이방성 암반내 위치한 쌍굴터널에서 터널간 이격거리와 터널 단면의 형상이 서로 다른 다섯 가지 모형에 대해 축압계수 2.0의 하중조건으로 축소모형실험을 실시하였다. 이를 통해 모형별 균열개시압력과 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였으며, 이 조건들이 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 하중이 증가함에 따라 쌍굴터널의 변형은 필라 방향으로 주로 발생하였고, 터널의 수직방향 변형보다는 수평방향 변형이 더 크게 발생하였다.
2. 터널간 이격거리를 0.5D, 1.0D, 1.57D로 변화시킨 세 가지 모형들에 대한 실험에서 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 낮은 압력수준에서 균열이 발생하여 터널의 안정성은 상대적으로 작은 것으로 평가되었다.
3. 터널간 이격거리가 작은 모형의 경우 필라에서는 층리면을 따른 전단파괴가 발생하였으며 안정성 확보를 위해서는 필라의 보강이 필요함을 알 수 있었다.
4. 터널단면을 사심아치형, 원형, 반원아치형으로 변화시킨 세 가지 모형들에 대한 실험에서 반원아치형 터널이 가장 작은 균열개시압력을 보여 터널 안정성이 가장 작게 나타났으며, 원형 터널의 안정성이 가장 크게 나타났다.
5. 사심아치형 터널의 변형거동은 원형 터널과 반원아치형 터널의 중간적인 형태를 나타내었으며, 터널 안정성도 중간정도에 해당하였다.
6. FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

## REFERENCES

1. Hak-moon Kim, 1997, Effect of interferences and gound movement by twin tunnelling, Tunnel and Underground Space, 7.2, 136-142.
2. Jung-Soon Hwang, Hong-Gyu Lee, Suk-Ho Park, Eung-Ki Lee, 2005, Suggestion of Stability Estimation Method for Pillar during Twin-Tunnel Excavation, proc. of Korean Society of Civil Engineers, 5610-5613.
3. Seungcheol Baek, Busik Jang, Taegy Lee, Sungmin Lee and Jungsoon Hwang, 2009, A study on the stability estimation procedure for Reinforced Pillar of Twin Tunnel, J. of Korean Geo-Environmental Society, 10.7, 81-91.
4. 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.
5. R. E. Goodman, H. E Heuze and G. J. Bureau, 1972, On modelling techniques for the study of tunnels in jointed rock, Fourteenth Symposium on Rock Mechanics, pp. 441-479.
6. Jong-Woo Kim, Ji-Yong Park, 2004, A study on the deformation behaviors around twin tunnels using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 14.5, 381-390.
7. Bu-Sik Jang, Jeong-Soon Hwang, Sang-Oh Lee, Bae-Sik Yoon and Hong-Taek Kim, 2006, A study on the estimation of the behaviors of the reinforced pillar between twin tunnels by small-scale model test, Proc. of Korean Geotechnical Society, 789.
8. Jong-Woo Kim, 2012, A study on the stability of asymmetrical twin tunnels in alternating rock layers using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 22.1, 22-31.
9. Seok-Won Jeon, Chang-Woo Hong, Jong-Woo Kim and Young-Keun Kim, 2003, Effect of a karstic lime cavern on the stability of tunnel - a scaled model test, J. of th Korean Society for Geosystem Engineering, 40.3, 147-158.
10. Hyung-Rae Jung and Jong-Woo Kim, 2006, Deformation Behaviors around Tunnel in Anisotropic Rocks Considering Joint Orientation and Rock Pressure Condition Using Scaled Model Tests, Tunnel and Underground Space, 16.4, 313-325.

**김 종 우**

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 토목공학과 교수

**김 명 군**

1978년 서울대학교 자원공학과 공학사  
 1980년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학석사  
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학박사

Tel: 043-229-8469  
 E-mail: mkkim@cju.ac.kr  
 현재 청주대학교 토목공학과 교수