

# 이방성 암반의 방향성과 지압을 고려한 터널 모형실험 연구

정형래, 김종우 (청주대학교)

## 1. 서 론

암반은 절리, 층리, 열극, 편리 단층 등과 같은 다양한 불연속면의 영향으로 역학적 이방성을 나타낸다. 이러한 이방성 암반에 터널을 굴착하면 터널 주변에 응력이 집중되어 응력 재분배 현상이 이루어지면서 이방성 방향에 따라 터널 변형이 발생한다. 이와 같이 이방성 암반내 터널의 변형거동은 등방성 암반과 큰 차이를 나타내고 있으나, 이에 관한 국내의 연구사례는 대단히 미흡한 실정이다. 한편, 이방성 암반내 터널의 변형거동에 영향을 미치는 중요한 요소로서 축압계수를 들 수 있다. 일반적으로 지하 심부에서는 정수압 상태로 가정하여 해석을 하지만 지표면에 가까울수록 축압계수는 다양한 값을 가지기 때문에 낮은 심도에서 시공되는 도로 터널의 경우 축압계수는 터널의 변형 거동에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 이방성 암반에서 절리의 경사 방향이 터널 주변 지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지를 검토하였다. 이를 위해, 절리 경사 각도를  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$  인 7가지 경우로 변화시켜 가면서 축압계수가 1인 조건( $K=1$ )에서 모형실험을 실시하였다. 다음으로, 축압계수가 터널 주변 지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지를 검토하기 위하여 축압계수를 달리한 두 가지 조건( $K=0.5$ ,  $K=2$ )에 대해 각각 실험을 실시하였다. 이러한 실험을 통하여 이방성 암반내 터널 주변 지반의 수직변위와 수평변위에 따른 터널 변형거동 특성을 조사하였으며, 절리 방향 및 축압계수에 따른 터널 파괴양상에 대해서도 조사하였다.

## 2. 실험 모형

### 2.1 차원해석

현지암반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소모형실험을 실시할 때 현장성을 충분히 재현할 수 있도록 하기 위해서는, 현장의 모든 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 축소율을 산정하고 이에 따른 적합한 모형재료를 사용하는 것이 매우 중요하다.

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 차례

로 산정하게 된다(Hobbs, 1969)

Fig. 1은 본 연구에서 고려된 실제 터널단면(9m×6m)과 축소모형에서의 터널단면(10cm×6.7cm)을 나타낸 것으로, 이와 같이 본 실험에서 길이[L]에 대한 축소율은 1/90으로 하였다. 다음으로, 중력가속도[LT<sup>-2</sup>]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/9.49가 된다.

한편, 모형 시험체의 밀도는 1.4gf/cm<sup>3</sup>이고 대상지반의 밀도는 2.7gf/cm<sup>3</sup>이므로 밀도[ML<sup>-3</sup>]의 축소율은 식(1)과 같이 계산된다. 또한, 질량[M]의 축소율은 식(2)와 같이 계산된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{1.4}{2.7} = \frac{1}{1.93} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{1.93} \times L^3 = \frac{1}{1.93} \times \left(\frac{1}{90}\right)^3 = \frac{1}{1,405,929} \quad (2)$$

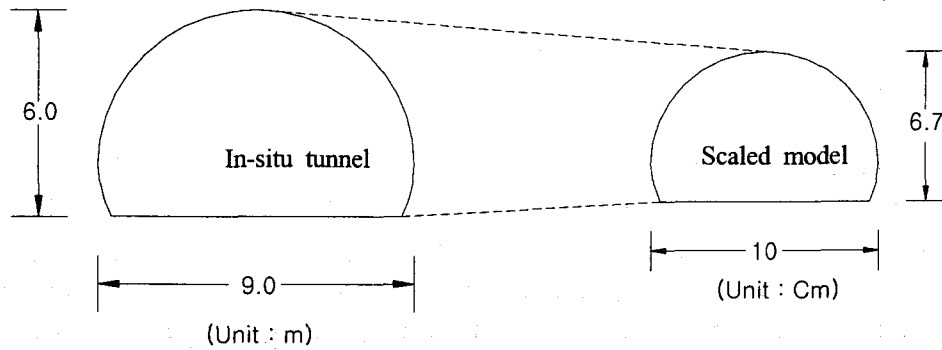


Fig. 1 Comparison of excavating sections between in-situ tunnel and scaled model

이와 같이 산정된 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율을 근거로 암반의 강도[ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]에 대한 축소율은 식(3)과 같이 산정된다. Table 1은 본 실험의 축소율을 정리한 것이다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{1,405,929}\right)}{\left(\frac{1}{90}\right) \times \left(\frac{1}{9.49}\right)^2} = \frac{1}{174} \quad (3)$$

Table 1. The scale factors of the test models

Physical properties	Dimension	In-situ tunnel	Scaled model	Scale factors
Length	[L]	Tunnel width : 9 m Tunnel height : 6 m	Tunnel width : 10cm Tunnel height : 6.7cm	1/90
Time	[T]	-	-	1/9.49
Mass	[M]	-	-	1/1,405,929
Density	[ML <sup>-3</sup> ]	2.7gf/cm <sup>3</sup>	1.4gf/cm <sup>3</sup>	1/1.93
Strength	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	600 ~ 1,200kgf/cm <sup>2</sup>	5.19kgf/cm <sup>2</sup>	1/174
Young's modulus	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	200,000 ~ 800,000kgf/cm <sup>2</sup>	2592kgf/cm <sup>2</sup>	1/174
Acceleration	[LT <sup>-2</sup> ]	-	-	1

## 2.2 모형재료의 특성

축소모형실험을 할 때 사용하는 모형재료는 대상 지반의 물리적인 특성을 충분히 대변할 수 있는 것이라야 한다. 본 연구 대상 암반의 일축압축강도는 Table 1에 제시한 바와 같이 600~1,200 kgf/cm<sup>2</sup>인데, 여기에 강도 축소율인 1/174를 적용하면 실제로 사용되어야 하는 모형재료는 3.45~6.90 kgf/cm<sup>2</sup>(평균값 5.18kgf/cm<sup>2</sup>)의 강도를 갖는 물질인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 상기의 물성을 갖는 모형 재료를 만들기 위해서 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하였는데, 이는 중량 배합비 및 건조로 온도에 따라 다양한 강도를 갖는 재료를 구성할 수 있는 장점이 있다(Coquard, 1994, 김종우 외, 2004).

본 실험에 부합하는 모래, 석고, 물의 배합비를 결정하기 위하여 다음과 같은 순서로 실내 물성 실험을 실시하였다. 우선 모래, 석고, 물의 비율을 결정하기 위해서 총 300g에서 물 100g을 고정시키고, 모래와 석고의 혼합비율을 달리한 13가지 종류의 혼합물에 대해 직경 50mm, 길이 100mm 규격의 원주형 시험편을 5개씩 제작하고, 이 시험편들을 일정시간 동안 건조로에서 건조시킨 후 시험편의 단위중량이 1.4t/m<sup>3</sup>이 될 때 일축압축시험을 실시하였다. Fig. 2는 실내 물성실험의 결과로서 배합비에 따른 일축압축강도의 변화를 그림으로 나타낸 것이며, 여기서 석고/물(P/W)의 비율이 증가할수록 일축압축강도가 급속히 증가하는 것을 볼 수 있다.

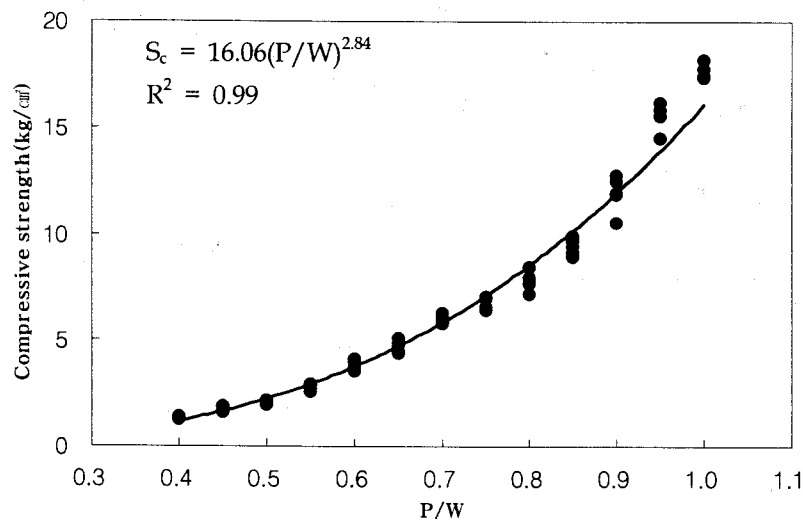


Fig. 2. Relation between compressive strength and plaster-water ratio when density

Fig. 2에서 일축압축강도( $S_c$ )와 P/W의 상관관계식은 다음과 같다.

$$S_c = 16.06 (P/W)^{2.84} \quad (4)$$

여기서,  $S_c$  : Compressive strength (kgf/cm<sup>2</sup>), P/W : Weight ratio of plaster to water.

한편, 전술한 바와 같이 본 실험의 모형재료로 사용해야하는 물질은 5.18 kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 갖는 물질이므로, 이에 적합한 P/W를 (4)식으로부터 구하면 0.67이다. 이와 같이 본 연구에서는 배합비가 133:67:100인 혼합물이 가장 적합한 모형재료임을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 상기의 배합비를 갖는 혼합물을 본 실험의 모형재료로 사용하였으며, 이

재료에 대하여 압열인장시험, 직접전단시험 등을 추가로 실시하였다. Fig. 3은 모형재료의 점착력과 내부마찰각을 구하기 위하여 직접전단 실험을 실시한 결과이다.

한편 Table 2는 모형재료의 제반 물성치를 요약 정리한 것이다.

Table 2. The physical properties of modelling material

Mix Sand : Plaster : Water (Proportion by weight)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	E (kgf/cm <sup>2</sup> )	Sc (kgf/cm <sup>2</sup> )	St (kgf/cm <sup>2</sup> )	C (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
133 : 67 : 100	1.4	487	5.18	0.65	1.19	35

Note)  $\gamma$  : Unit weight, E : Young's modulus, Sc : Compressive strength,  
St : Tensile strength, C : Cohesion,  $\phi$  : Internal friction angle

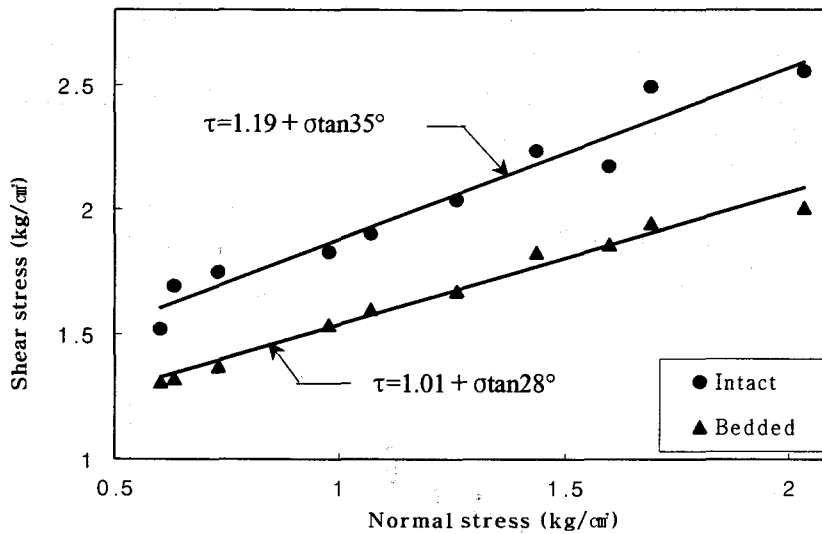


Fig. 3. Results of direct shear tests

### 2.3 실험모형의 종류

본 연구에서는 이방성 암반의 절리 방향과 축압조건이 터널 주변지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 Fig. 4와 같은 7가지 모형 시험체를 제작하였다.

먼저, 이방성 암반의 터널에 있어 절리 방향의 영향을 알아보기 위해 절리 각도를 0°, 10°, 30°, 45°, 50°, 70°, 90°의 7가지 경우로 방향성을 변화시켜가며 실험을 실시하였다. 다음으로 축압조건의 영향을 알아보기 위해 K=0.5, K=1, K=2로 달리한 3가지 조건에 대해 실험을 실시하면서 하중에 따른 터널 주변의 변형거동을 조사하였다. Table 3는 각 모형의 명칭을 나타낸 것으로서, 실험 모형은 J0K1, J10K1, ..., J90K2(절리경사 90°이고 K=2인 모형) 등과 같이 총 15개이다.

Table 3. Description of test models

Model No.	Joint angle	K=1	K=0.5	K=2
1	0°	J0K1	J0K0.5	J0K2
2	10°	J10K1	-	-
3	30°	J30K1	J30K0.5	J30K2
4	45°	J45K1	-	-
5	50°	J50K1	J50K0.5	J50K2
6	70°	J70K1	-	-
7	90°	J90K1	J90K0.5	J90K2

Note) The symbol "J90K2" means the test model of which joint angle is 90° and coefficient of rock pressure(K) is 2

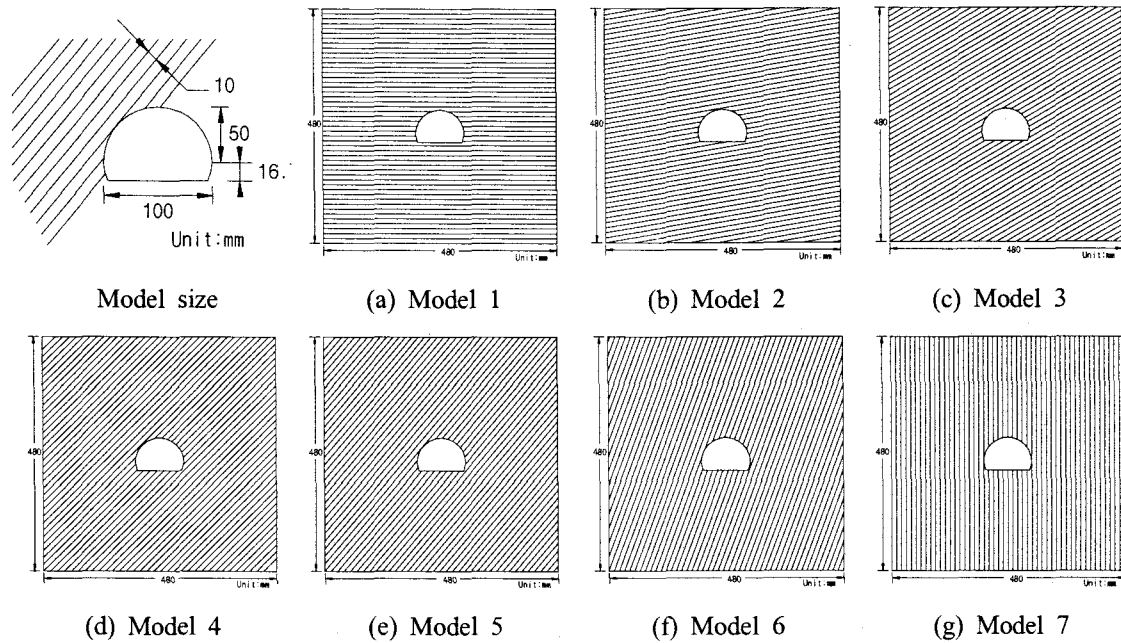


Fig. 4. Dimensions of seven different models

## 2.4 모형 시험체의 제작

모래, 석고, 물의 중량비가 133:67:100인 혼합물을 사용하여 모형 시험체를 제작하였으며, 사용한 모래는 주문진산 표준사이다. 모형 시험체는 480mm×480mm×76mm 규격이며, Fig. 5는 이방성 모형체를 만드는 과정을 모식적으로 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 5(a)는 Slab을 여러개 제작하는 과정이고, Fig. 5(b)는 제작된 Slab을 결합하는 것이며, Fig. 5(c)는 모형 시험체를 규격대로 제작하는 과정이며, 마지막 Fig. 5(d)는 완성된 모형 시험체의 모습이다.

완성된 모형 시험체의 양생 조건으로는 자연양생보다는 건조기에 의한 강제 조건방법을 사용하였다. 자연양생에서는 온도와 습도를 일정하게 유지하기 힘들며, 또한 본 연구에서의 단위중량 (1.4t/m<sup>3</sup>)을 맞추기가 힘들기 때문이다. 따라서 건조기에 시험체를 넣어 24시간 동안 105℃로 건조

를 시켜 시험체의 단위중량이 1.48t/m<sup>3</sup>가 될 때 시험체를 건조기 밖으로 빼낸 후, 단위중량 1.4t/m<sup>3</sup>가 될 때까지 일정 기간 자연양생을 시킨 후 비로소 실험을 실시하였다.

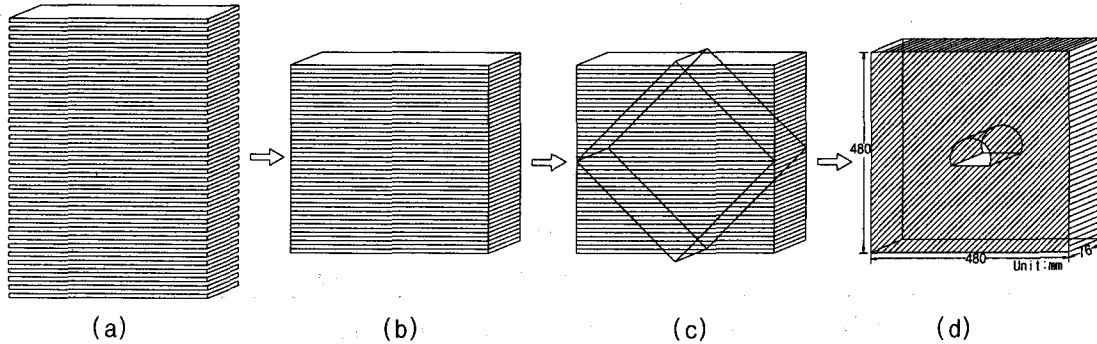


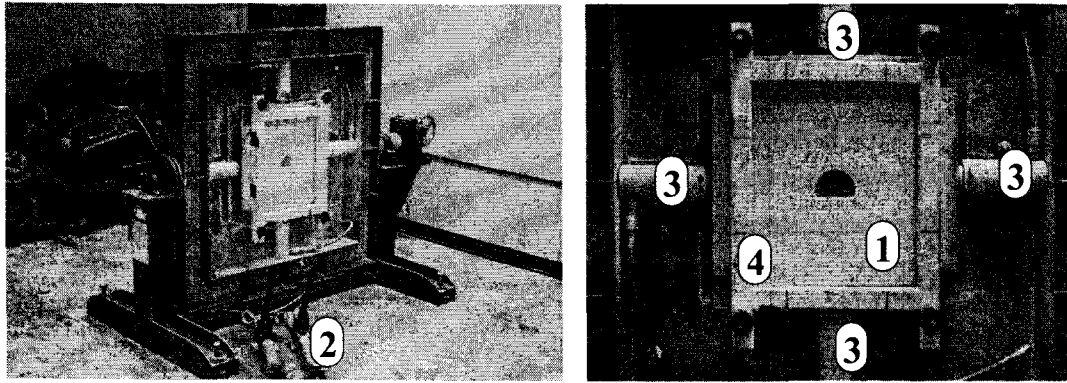
Fig. 5. A process of manufacturing the specimens

### 3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 축압과 측압을 조절할 수 있는 유압식 이축 압축장치로서 4방향에 25톤 용량의 램(ram)이 부착되어 있으며, 수직방향과 수평방향은 각각 하나의 핸드펌프에 의해 작동된다. 또한, 모형 시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프에 부착되어 있는 디지털 압력계로부터 측정하였다. 실험장치의 크기는 가로 1.5m, 세로 1.5m, 두께 20cm이며, 모형터널 주변의 변위는 고성능 디지털 카메라를 사용하여 측정하였으며, 이때 변위의 측정오차는 1화소당 0.2mm로 나타났다. Fig. 6(a)는 실험장치의 전체 모습을 나타낸 것이며, Fig. 6(b)는 모형시험체 주변을 확대 촬영한 사진이다.

모형실험의 방법 및 순서는 다음과 같다.

- (1) 시험체 설치 및 정형 : 모형 시험체를 실험장치에 설치하고 시험체의 모든 면을 정형한다.
- (2) 모형 터널 굴착 : 시험체에 약간의 하중을 가하여 터널을 굴착한다.
- (3) 계측점의 설정 : 모형 터널 주변의 변위를 측정하기 위하여 182개의 계측점을 표시한다.
- (4) 평면 변형률 조건의 설정 : 터널의 응력-변형 상태인 평면 변형률 조건을 모형실험에 적용하기 위하여, 시험체의 윗면을 두께 10mm인 아크릴판으로 고정시킴으로써 터널 축방향의 변위를 억제하도록 하였다.
- (5) 실험 장치의 회전 및 카메라 설치 : 모형 시험체의 하중을 가하기 전에 모형 시험체를 90°로 회전시킴으로써, 가압 실험 시에 중력을 자연적으로 포함하도록 하였고 현장의 상태를 그대로 재현하기 위해서 수직상태로 고정시킨 후 실험을 실시하였다.
- (6) 하중 재하 방법 : 두개의 핸드펌프를 사용하여 모형 시험체의 상·하, 좌·우에 위치한 네개의 램에 하중을 작용시키되, K의 조건대로 모형 시험체에 연속적인 하중을 재하하면서 하중 증가에 따른 모형터널 주위의 변형거동을 관찰하였다.
- (7) 결과 해석 : 가압 실험 중에는 수시로 사진을 촬영하고 균열 발달 상황을 기록하였으며, 실험 후에는 촬영된 사진들을 분석하여 파괴양상 및 측정 변위를 정량적으로 구하였다.



(a) Test apparatus

(b) Front view around a test model

Fig. 6. The biaxial testing machine :

- (1) test model, (2) hand pumps, (3) hydraulic rams,  
 (4) restraint to keep the test model in plane strain

#### 4. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 이방성 암반의 절리 경사와 축압조건에 따른 터널 변형거동 특성을 규명하기 위해 총 15개의 모형 시험체를 제작하여 실험을 실시하였다.

##### 4.1 이방성 암반의 절리 방향에 따른 변형거동

###### 4.1.1 파괴 및 변형양상

절리 경사 방향에 따른 터널의 변형거동을 알아보기 위하여 Fig. 4의 7가지 모형에 대해 축압 계수(K)를 모두 1로 적용하여 실험을 실시하였다.

Fig. 7은 7가지 모형에  $5.5 \text{ kgf/cm}^2$ 가 작용되었을 때의 사진 및 변위 벡터도를 순서대로 나타낸 것으로서, 이를 검토하면 다음과 같다. 단, J10K1 모형(절리경사  $10^\circ$ 이고  $K=1$ 인 모형)은  $5.5 \text{ kgf/cm}^2$ 가 되기 전인  $4.9 \text{ kgf/cm}^2$ 에서 모형이 완전파괴 되었기 때문에 이를 수록하였다.

- ① J0K1 : 터널 좌·우 측벽부에서 큰 균열이 발생하였으며, 터널 하반부에서는 반팽창(floor heaving) 현상이 관찰되었다. 또한, 파괴 후 터널의 면적은 초기 면적과 비교하였을 때 약 38% 축소하였다.
- ② J10K1 : 터널 하반에서 절리 방향에 따라 미끄러짐(sliding) 현상이 발생됨에 따라 반팽창이 크게 일어났다. 파괴 후 터널의 면적은 초기 면적과 비교하였을 때 약 48% 축소하였다.
- ③ J30K1 : 터널 천정부에서 수직 균열이 발생함과 동시에 절리 방향에 따른 미끄러짐 현상이 크게 발생됨을 사진 상으로 뚜렷하게 볼 수 있다. 파괴 후 터널의 면적은 약 41% 축소하였다.
- ④ J45K1 : 전체적으로 절리 경사 방향에 따라 미끄러짐이 발생하였으며, 천정부에서는 전단균열에 의한 썩기파괴 현상이 뚜렷하게 발생하였다. 파괴 후 터널의 면적은 약 44% 축소하였다.
- ⑤ J50K1 : 터널의 좌·우 측벽부에서 절리 경사 방향에 따라 균열이 발생하였으며, 터널 천정부에서는 수직변위가 크게 발생하였다. 파괴 후 터널의 면적은 약 43% 축소하였다.
- ⑥ J70K1 : 터널 좌측 측벽부에서 전단균열로 인한 낙반이 발생하였다. 파괴 후 터널의 면적은

약 24% 축소되었다.

- ⑦ J90K1 : 터널 좌우 측벽부는 수직압력에 의해 굴곡파괴가 뚜렷하게 발생하였으며, 터널 천정부에서 수직변위가 크게 발생하였다. 파괴 후 터널의 면적은 약 31% 축소하였다.

이방성 압반에서 지층간의 미끄러짐은 지층간에 작용하는 전단력이 마찰저항보다 클 때 발생한다. 즉, Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 지층간의 마찰각이  $\Phi$ 인 경우 터널의 접선과 층리에 수직이 이루는 각도가 이보다 큰 경우 접선방향응력에 의하여 미끄러짐이 발생하게 된다. 결과적으로 이러한 영역에서는 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 미끄러짐이 발생하거나 변곡(flexure)이 발생하게 된다.

이와 같은 현상은 10°, 30°, 45°, 50°인 모형에서 터널 천정부와 하반부에서 미끄러짐 현상이 관찰되어 시험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 절리 경사 방향이 수평이거나 이에 근접한 경사에서는 터널 하반부에 절리가 노출된 상태로 터널 바닥부에 위치한 Slab이 수평압력의 영향으로 굴곡 파괴됨에 따라 반팽창 현상이 크게 발생하는 것으로 판단되며, 그 중에서 10°와 30°가 가장 많이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

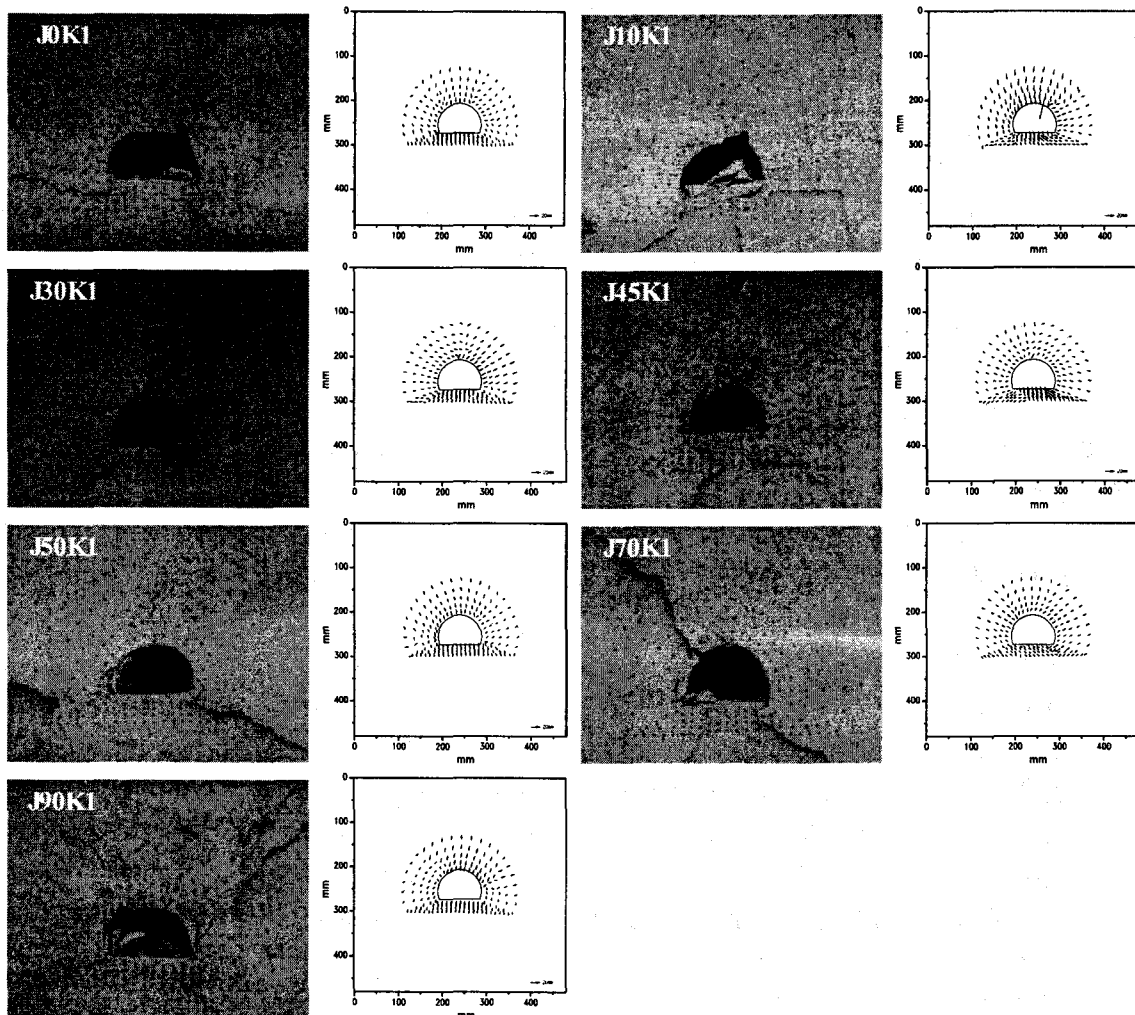


Fig. 7 The experimental results of seven models with different joint angles (photograph and displacement vector plots of seven different models)



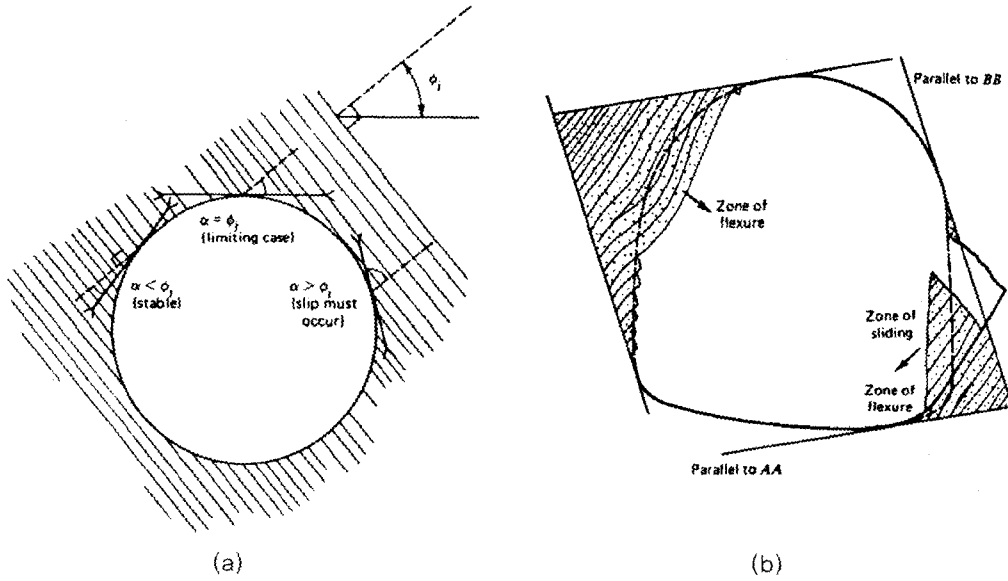


Fig. 8. Requirements for compatibility between the flow of stress around an opening and limiting friction between layers delimit regions of slip and regions of stability(After Goodman)

#### 4.1.2 수직 및 수평변위

터널주변의 변형거동을 보다 정량적으로 알아보기 위하여 Fig. 9와 같이 터널의 천정부와 하반부 및 좌·우 측벽부에 위치한 총 4개 측정점을 이용하여 모형별 변위를 조사하였다.

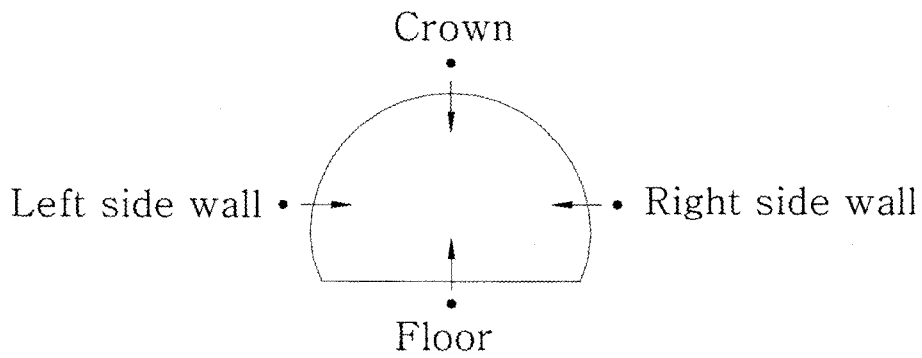


Fig. 9. Location of Four measuring points around tunnel and sign convention

Symbol of Joint angle	0°	10°	30°	45°	50°	70°	90°
	■	□	○	△	▽	◆	✱

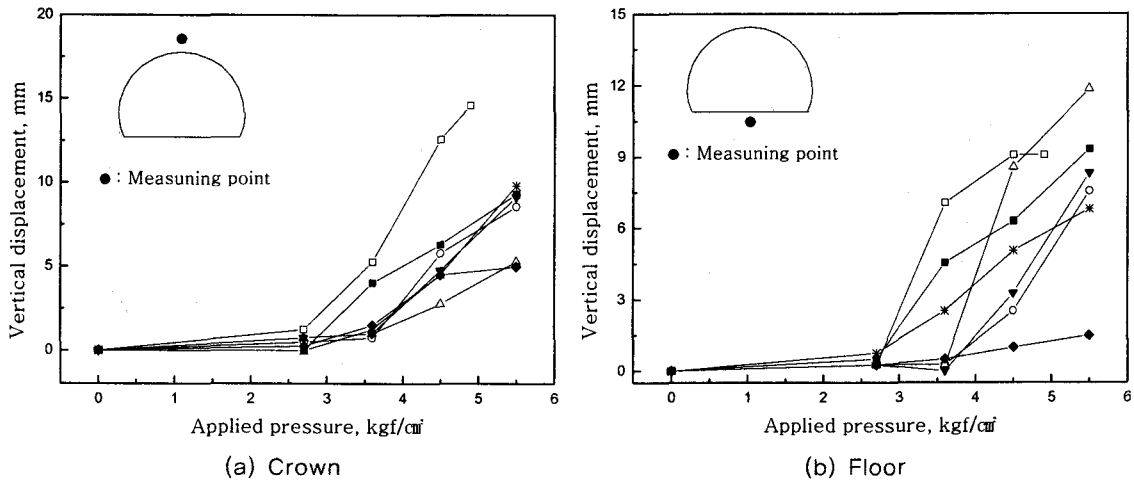


Fig. 10. Variation of vertical displacement with applied pressure

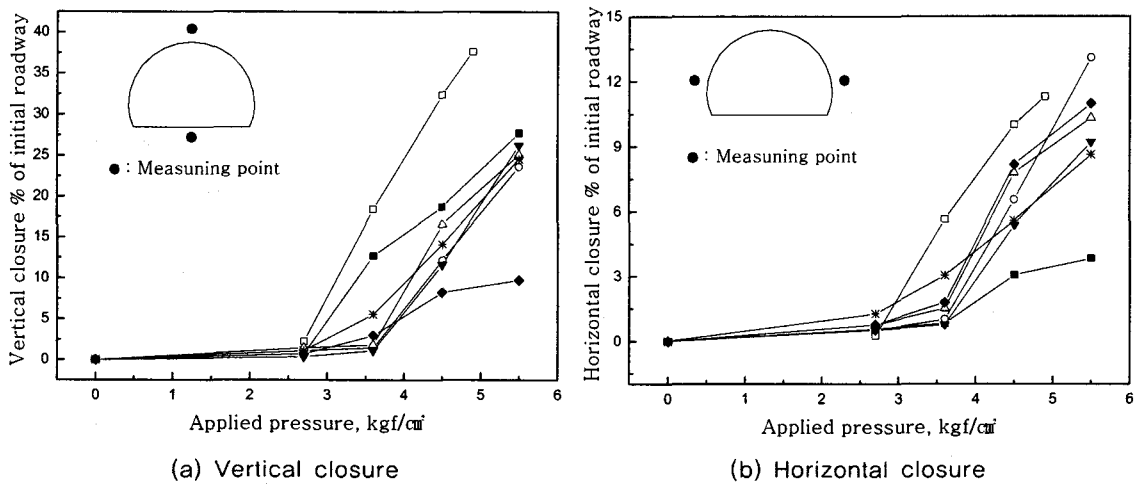


Fig. 11. Variation of tunnel convergence with applied pressure

Fig. 10은 7가지 모형에서 하중에 따른 천정부와 하반부의 수직변위를 나타낸 것이다. Fig.10(a)는 천정부의 수직변위를 나타낸 것으로, J10K1인 모형에 가해진 최종압력이 4.9kgf/cm<sup>2</sup>일 때 14.6 mm의 큰 변위가 발생함을 알 수 있다. 이는 절리 경사면이 터널 천정부에 노출된 것에 기인한다. Fig. 10(b)는 하반부의 수직변위를 나타낸 것으로, J45K1 모형이 11.84mm의 가장 큰 변위를 나타내었다. 이는 절리 경사 방향을 따라 미끄러짐이 발생된 것과 관련이 있으며, 또한 J0K1, J10K1, J20K1의 모형역시 약 9mm이상의 변위가 발생됨에 따라 터널 바닥부의 반팽창 현상이 두드러지게 나타났다.

한편, Fig. 11은 터널의 수직 및 수평 내공변위 발생량을 나타낸 것이다. Fig. 11(a)는 수직 내공변위로서 발생한 변위량을 터널 단면의 초기 높이에 대한 비율로 나타낸 것이다. 수직 내공변위가 가장 크게 발생한 모형은 J10K1이고, 다음으로는 J0K1의 모형으로, 절리방향이 수평에 가까

운 모형일수록 수직변위가 크게 발생하였다. 또한, Fig. 11(b)는 수평 내공변위로서 J30K1 모형에서 가장 크게 나타났다.

한편, 수평보다는 수직 방향으로의 내공변위가 크게 발생함에 따라 경사 지층에 본 연구와 같은 형상의 터널을 굴착할 때에는 층리면에 수직방향으로 록 볼트를 시공하고 터널 하반부에 인버터 등의 지보를 설치하여 층리면 사이에 압축영역을 발생시킴과 동시에 단면폐합을 실시하면 터널의 지속적인 유지에 도움을 준다고 생각된다.

## 4.2 측압조건에 따른 터널 변형거동

### 4.2.1 K=0.5와 K=1의 수직 변형거동

본 연구에서는 측압조건이 터널의 수직 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 절리 경사가 0°, 30°, 50°, 90°인 4가지 모형에 대해 각각 K=0.5와 K=1의 하중조건으로 실험을 실시하였다. Fig. 12는 실험의 결과로서, K=0.5(수직압력 5.43kgf/cm<sup>2</sup>, 수평압력 2.72kgf/cm<sup>2</sup>)와 K=1(수직압력 5.43kgf/cm<sup>2</sup>, 수평압력 5.43kgf/cm<sup>2</sup>)일 경우의 파괴 및 변형양상을 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 12에서 K=0.5와 K=1의 터널 변형양상은 대체적으로 터널 폭이 터널 높이보다 큰 납작한 형태로 나타났다. 또한, K=0.5인 모형은 K=1인 모형에 비해 수직방향 변위가 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 가해진 수직 및 수평 하중의 상대적 비율에 기인한 것으로 생각된다. 특히, K=0.5인 경우 0°, 30° 모형은 50°, 90° 모형에 비해 터널의 수직방향 변위가 매우 크게 발생하였다.

### 4.2.2 K=1과 K=2의 수평 변형거동

본 연구에서는 측압조건이 터널의 수평 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 절리 경사가 0°, 30°, 50°, 90°인 4가지 모형에 대해 각각 K=1과 K=2의 하중조건으로 실험을 실시하였다. Fig. 13은 실험 결과로서, K=1(수직압력 4.75kgf/cm<sup>2</sup>, 수평압력 4.75kgf/cm<sup>2</sup>)과 K=2(수직압력 2.38kgf/cm<sup>2</sup>, 수평압력 4.75kgf/cm<sup>2</sup>)일 경우의 파괴 및 변형양상을 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 13에서 K=1인 경우에는 0°, 30° 모형에서 반팽창 현상이 발생하였으나, K=2인 경우에는 0° 모형에서만 반팽창이 크게 발생하였다. 또한, K=1인 모든 모형에서는 절리면의 미끄러짐 현상이 발생하였고, 전체적으로 전단파괴가 발생하였으나, K=2인 모형에서는 0°, 90° 모형에서만 터널 변형이 진행되었을 뿐, 30°, 50° 모형은 변형이 크게 발생하지 않았다. K=1의 터널 모형은 대체적으로 납작한 모양으로 변형이 되었고, K=2의 터널 모형은 0°, 90°의 모형에서만 오목한 모양으로 변형되었다. 이와 같은 현상은 수직 및 수평 하중의 상대적 비율과 절리 경사에 기인한 것으로 판단된다.

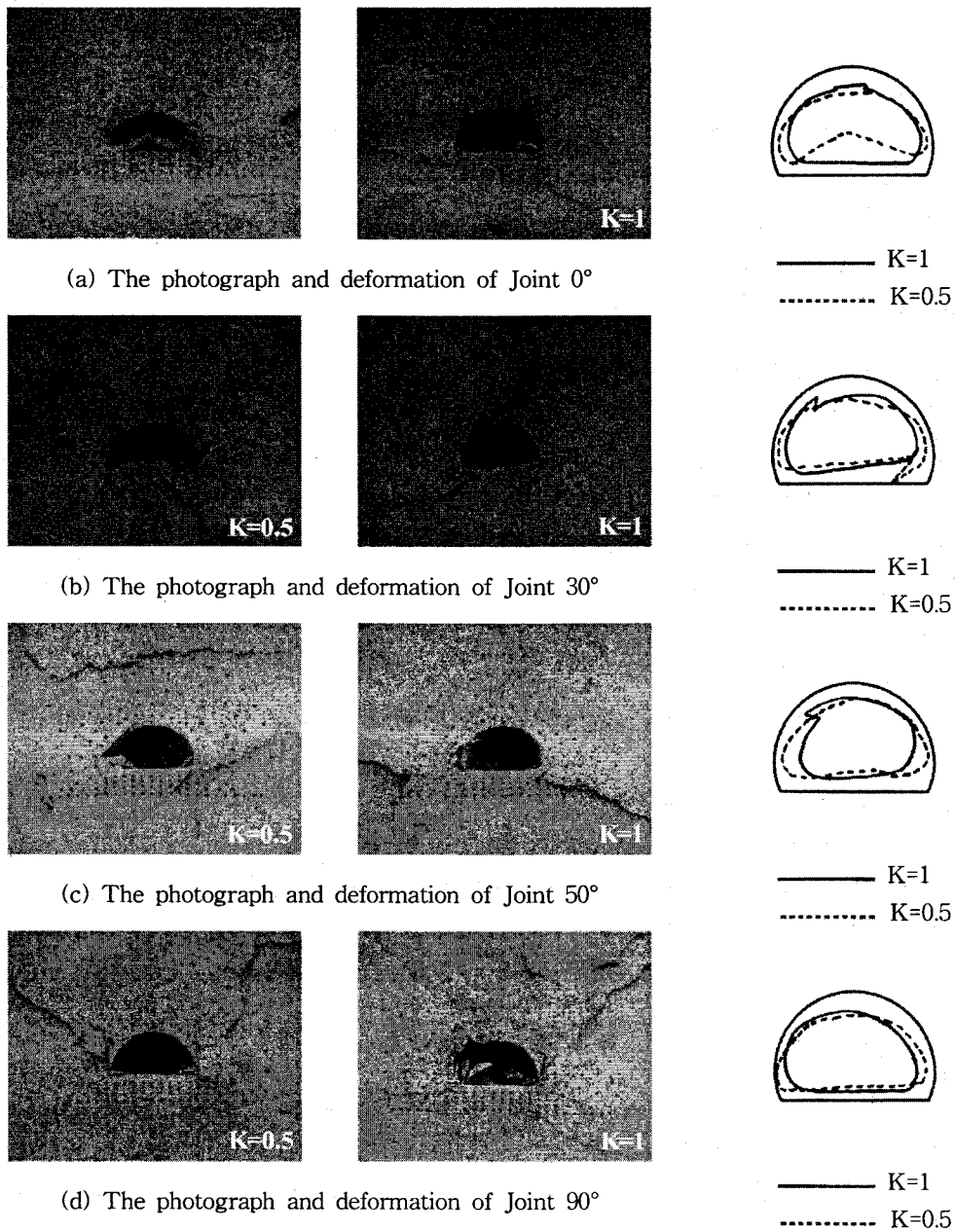


Fig. 12 The experimental results of four models with different K (K=0.5 and K=1)

### 4.3 절리 방향과 축압조건에 대한 검토

본 연구에서는 절리의 경사 방향과 축압조건이 터널의 변형거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 0°, 30°, 50°, 90°인 4가지 모형들에 대해 축압조건( K=0.5, K=1, K=2)을 달리하여 실험을 실시하였으며, 여기서 하중 단계별 수직 및 수평변위를 조사하였다. Fig. 14, Fig. 15은 가해진 하중에 따른 수직 및 수평 변형량을 모형별로 나타낸 것이다. 한편, 그림의 횡축에 표시한 "Applied pressure"는 모형에 가해진 수직압력과 수평압력의 평균값에 해당한다.

먼저, Fig. 14에서 0°, 30°의 모형을 다른 모형에 비해 비교적 큰 수직변위가 발생하였고, K=2 일 경우 절리 경사가 증가함에 따라 수직변위가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 다음으로, Fig.

15를 보면  $K=0.5$ 일 때 수평변위는 거의 발생하지 않았으나  $90^\circ$  모형에서는 6.27% 변형이 발생하였다. 이는 터널 좌·우 측벽부에 절리면이 노출됨에 따라 쉽게 파괴되어 다른 모형보다 변위가 크게 발생된 것으로 판단된다.

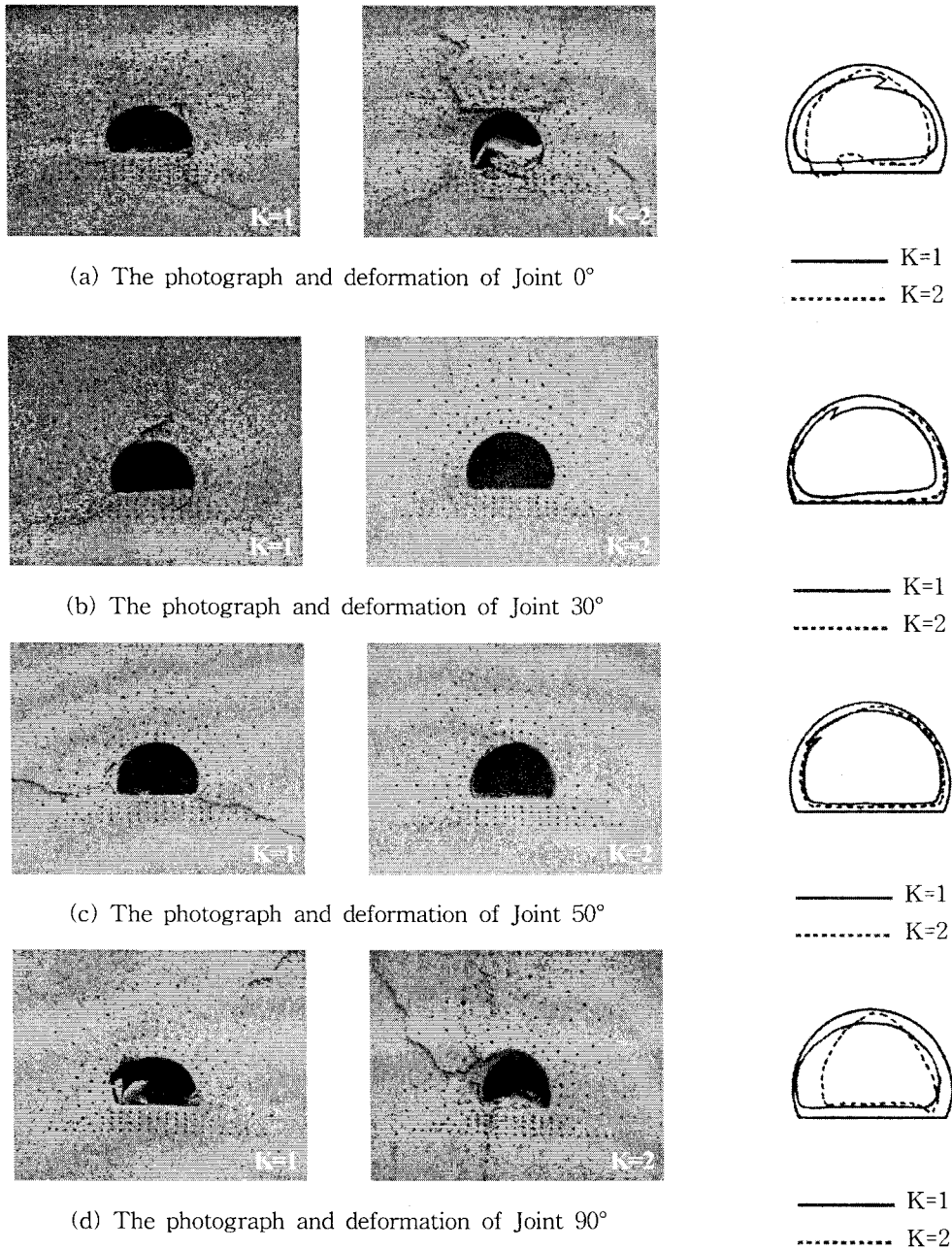
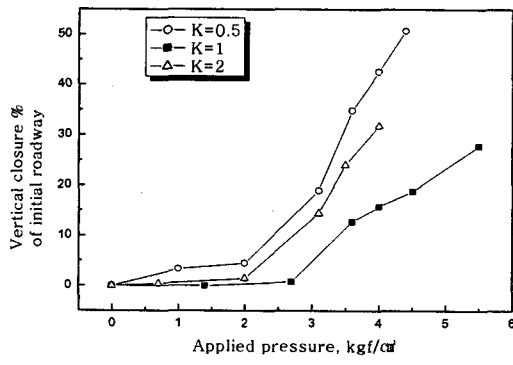


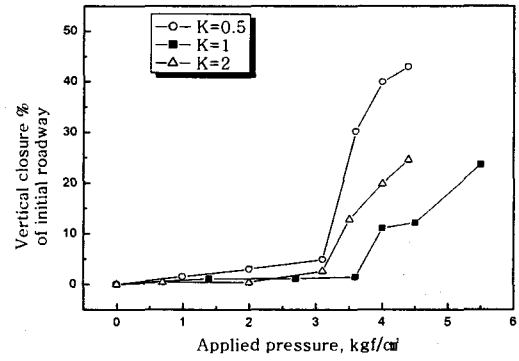
Fig. 13 The experimental results of four models with different K ( $K=1$  and  $K=2$ )

Fig. 14, Fig. 15를 전반적으로 검토하면,  $K=0.5$ 인 경우에는 수직방향의 내공변위가 크게 나타났고,  $K=2$ 인 경우에는 수평방향의 내공변위가 크게 발생하였다. 이는 가해진 수직 및 수평 하중의 상대적 비율에 기인한 것으로서 판단된다.

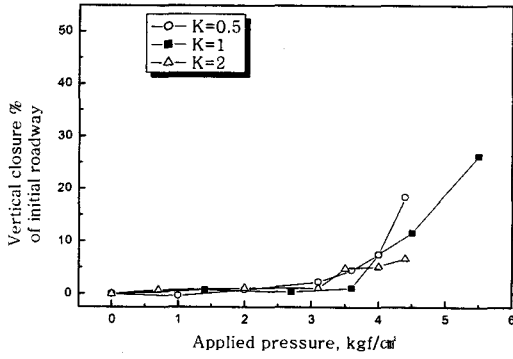
한편,  $50^\circ$ 의 모형은 수직과 수평의 내공 변형량이 다른 모형에 비해 작게 발생함에 따라 실험된 모형 중에서 가장 안정한 모형으로 생각된다.



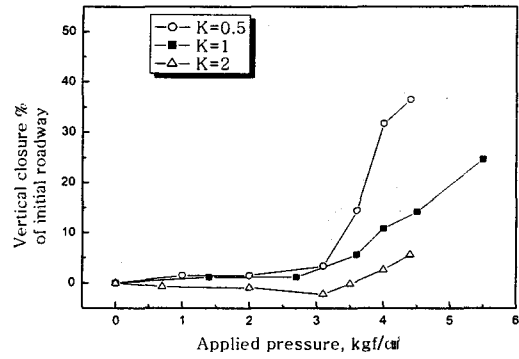
(a) Joint 0°



(b) Joint 30°

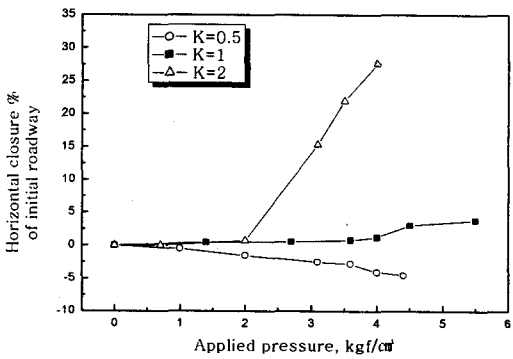


(c) Joint 50°

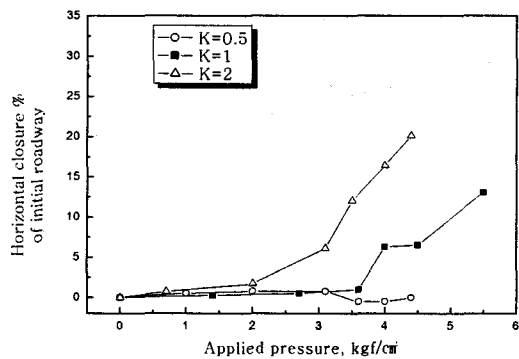


(d) Joint 90°

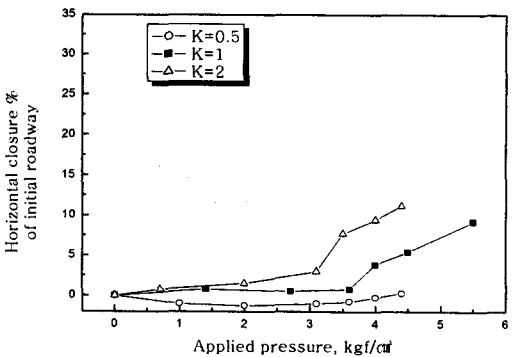
Fig. 14. Variation of vertical closure with applied pressure



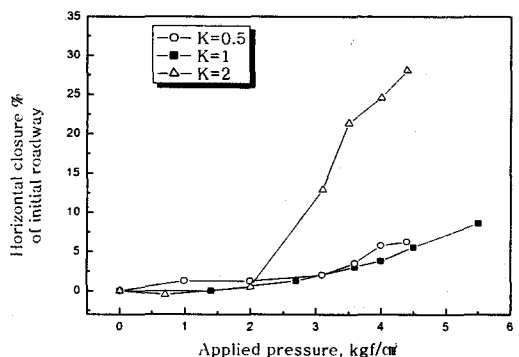
(a) Joint 0°



(b) Joint 30°



(c) Joint 50°



(d) Joint 90°

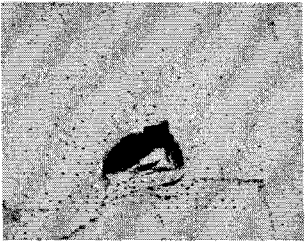
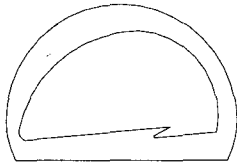
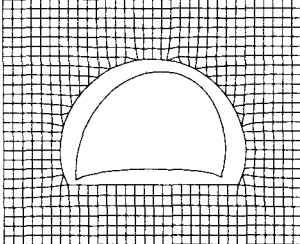
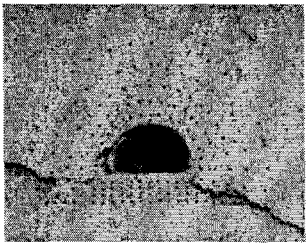
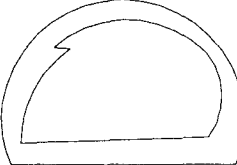
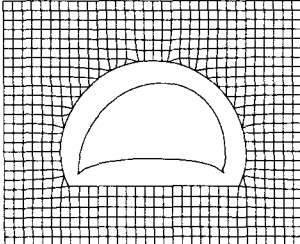
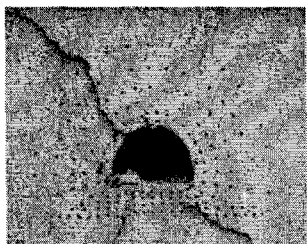
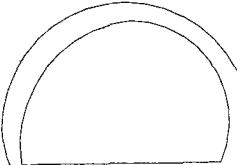
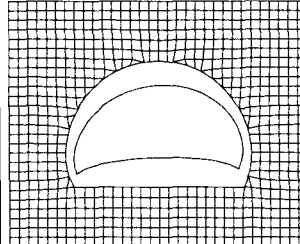
Fig. 15. Variation of horizontal closure with applied pressure

## 5. 수치해석

본 연구에서는 FLAC을 사용하여 수치해석을 실시하였으며, 사용된 해석 모델은 이방성 모델이다. 모형실험과 동일한 경계조건을 부여하기 위해 모형체의 상하좌우 네 경계면에 압력 경계조건을 적용하였고, 해석 모델의 물성과 경계조건 등은 실험치와 동일하게 적용하였다. 한편, FLAC은 연속체 해석기법의 일종으로서 파괴 후 요소가 모암으로부터 이탈하거나, 균열이 생성되는 것을 해석하지 못한다. 즉 실제 모형실험에서 가해진  $5.5 \text{ kgf/cm}^2$ 의 큰 압력을 이 수치모델에 적용하면, 실제 모형실험의 사진이나 개별요소법(DEM)과 같이 암반내의 일부 요소가 모암으로부터 이탈하는 것이 아니라, 연속체를 유지하면서 변형하므로 실험 결과와는 다른 해석결과를 도출하게 된다. 따라서 본 연구에서는 실험결과의 정성적인 분석을 위해 실제 실험 하중보다는 작은 크기의 하중 ( $3.5 \text{ kgf/cm}^2$ )을 해석모델에 적용시켜 해석을 실시하였다.

Table 4는 7가지 모형 중 3가지 모형(J10K1, J50K1, J70K1)의 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것으로서, 모형별로 실험후 사진, 변형양상 스케치, 수치해석 변형도를 각각 나타낸 것이다. 여기서 수치해석 변형도는 각 모형에  $3.5 \text{ kgf/cm}^2$ 를 가한 후 발생한 변형을 8배 확대하여 나타낸 것이며, 이를 실험결과인 변형양상 스케치와 비교하면 변형양상은 전반적으로 부합함으로서 본 실험의 타당성을 확인할 수 있었다.

Table 4. Comparison between test results and numerical analysis

Model	Test results		FLAC results
	Photograph	Deformation sketch	Deformation output
J10K1 (10°)			
J50K1 (50°)			
J70K1 (70°)			

## 6. 결 론

본 연구에서는 이방성 암반의 방향성 및 축압조건이 터널 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 축소모형 실험을 실시하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 모래, 석고, 물의 배합비는 달리한 13가지 종류의 모형재료에 대한 일축압축시험 결과 P/W의 비율이 증가할수록 강도와 변형계수는 증가하였다.
- (2) 모든 모형은 응력이 집중되는 곳에서 전단파괴가 발생하였다. 또한, 절리면이 터널에 노출되는 곳에서 최초의 균열이 발생함과 동시에 미끄러짐이 발생하여 이방성 암반에서 절리면의 경사 방향이 터널 변형거동에 큰 영향을 미친 것으로 나타났다.
- (3) 절리 경사가 30°보다 작은 모형에서는 터널 하반부에서 반팽창 현상이 두드러지게 발생하였으며, 45°와 50°의 모형에서는 터널 천정부와 하반부에서 절리면간의 미끄러짐에 기인한 파괴가 주로 발생하였다.
- (4) K=0.5인 경우에는 수직방향의 내공변위가 크게 나타났고, K=2인 경우에는 수평방향의 내공변위가 크게 발생하였다. 이는 가해진 수직 및 수평 하중의 상대적 비율에 기인한 것으로서 판단된다.
- (5) 절리 경사각 50°인 모형은 축압계수에 관계없이 수직 및 수평 내공변위가 가장 작게 나타나 실험된 모형 중에서 가장 안정적인 모형으로 생각된다.
- (6) 수치해석을 통한 터널 변형양상은 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

## ■ 참고문헌 ■

1. 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.
2. D.W. Hobbs, 1968, Scale model study of strata movement around mine roadways. I. The dependence of roadway closure upon rock strength, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 5, 219-235.
3. 윤용균, 신중호, 양형식, 이희근, 1987, 불연속암반내 공동주위의 변형거동에 관한 모형실험 및 수치해석, 대한광산학회지, 24.5, 299-309.
4. 김종우, 이희근, 1988, 층상암반내 갱도의 변형거동에 관한 연구, 대한광산학회지, 25.5, 320-331.
5. 이희근, 양형식, 1990, 이방성 암반내 공동굴착과정에서의 주위 암반거동에 관한 축척모형실험 및 수치해석, 한국자원공학회지, 27.6, 390-411.
6. 김종우, 전석원, 서영호, 2004, 지하채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구, 터널과 지하공간, 14.1, 43-53.
7. P. Coquard and R. Boistelle, 1994, Water and solvent effects on the strength of set plaster, Int. J. of Rock Mechanics and Min. Sci., 31.5, 517-524.
8. 이석천, 김영근, 이희근, 1992, 지압조건과 절리의 방향을 고려한 원형공동주위의 변형거동, 한국자원공학회지, 29.1, 1-9.