

## 천반 곡률반경에 따른 아치형 공동의 변형거동에 관한 연구\*

김종우<sup>1)</sup>

### Deformation Behaviors of Arched Openings Related with Roof Curvature

Jong-Woo Kim\*

**ABSTRACT** Arched openings are generally excavated in underground construction works. Since stress distribution around openings depends on geological structure in rock mass, any shape of arched openings fully conformed with in-situ stress condition should be recommended to maintain mechanical safety of structures. Shape of arched openings is specified by both roof curvature and height-width ratio, and especially this report presents deformation behaviors related with roof curvature. Scale model tests and numerical studies of various shaped openings are conducted, where rectangular opening shows the greatest convergence. Through the analyses of various arched openings, as radius of roof curvature is increased, roof lowering and sidewall closure are remarkably increased, whereas floor heaving is increased little by little. By the way, it is useful that displacements of openings are roughly estimated in the stage of preliminary investigation. To find out elastic displacements of arched openings with any roof curvature, regression formula and charts by least square method are represented. In addition elastoplastic deformation behaviors of arched openings concerning associated and non-associated flow rule are discussed.

### 1. 서 론

지하 암반 내에 공동이 굴착되면, 주변 암반에는 초기 지압의 재분배에 의한 응력 집중이 발생하여 공동 단면의 축소 변형 및 파괴가 유발된다.

일반적으로 응력집중을 가장 최소화하는 공동의 모양은 원형으로 알려져 있으나 이는 탄성암반내에 정수압 하중을 받는 조건이 내재된 것이다. 또한, 원형공동은 TBM 등의 전단면 기계굴착법으로 시공할 경우는 굴착작업이 편리하나, 부분 기계굴착이나 발파를 이용할 경우 시공이 다소 어렵고 공동내 BOX 구조물을 설치할 때는 유효 굴착 단면적이 적게 되는 단점이 있다.

한편, 공동의 단순한 형태로는 석탄광의 연층갱도에서 흔히 사용되고 있는 사다리꼴 형이 있으나 모서리 부분에서 응력 집중이 과도하게 발생하기 때문에 위의 중간적인 형태인 아치형 공동이 널리 사용되고 있다.

그러나, 현지암반은 다양한 지질구조와 응력조건을 가지고 있으므로 공동의 역학적 안정성을 확보하기 위해서는 확실적인 규격의 아치 공동을 사용하는 것은 부적합하며 각 현장조건에 맞는 규격을 사용하는 것이 필요하다. 또한, 공동 굴착으로 인한 변위발생량을 산정하여 예비설계에 반영하는 것이 요망된다.

암반 중에 굴착되는 공동의 형태에 따른 응력분포와 변형거동을 조사하는 방법으로서 탄성학적 이론해를 구하는 방법과 축소모형실험 또는 수치해석에 의한 시뮬레이션 방법 등이 고려될 수 있다. 이 중에서 탄성학적 이론해는 Heller, Brock, and Bart(1958) 등에 의해 제안되었고, 축소 모형 실험은 Hobbs(1966), Everling(1964) 등에 의해 발전되었으며 국내에서도

\* 이 논문은 '94~95학년도 청주대학교 학술연구조성비(특별과제)에 의하여 연구되었음.

\* 1996년 3월 2일 접수

1) 정회원, 청주대학교 자원공학과 전임강사

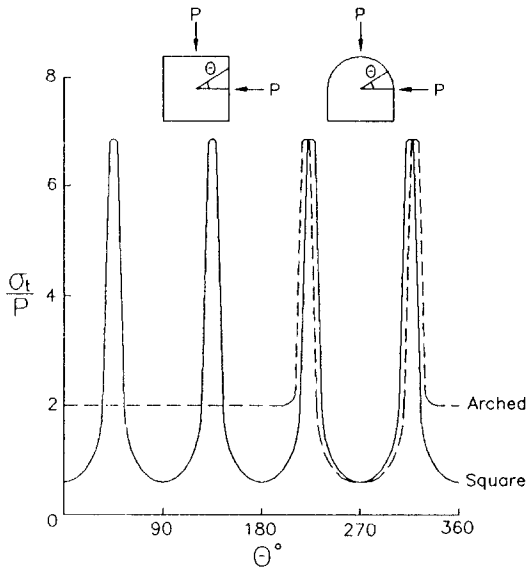


Fig. 1. Stress distribution of square and arched openings in hydrostatic stress field (After Hobbs).

실시된 바 있다. 또한 공동의 수치모델링 기법은 유한 요소법을 비롯한 여러가지 해석법이 개발되어 사용되고 있다.

본 연구에서는 현장에서 널리 사용되고 있는 아치형 공동의 변위발생량을 파악하기 위하여, 천반 곡률반경의 변화에 따른 여러가지 형태를 가진 아치형 공동에 대해 탄성 해석과 탄소성 해석을 실시하여 각 공동의 변형거동을 조사하였다. 또한, 천반 곡률반경을 매개변수로 하여 탄성 변위발생량을 산정하는 용도로서 최소자승법을 이용한 회귀식과 도표를 제안하였다.

## 2. 응력분포이론

현지암반은 다양한 지질구조에 따른 초기지압 상태하에 있으며, 여기에 공동이 굴착되면 주변 암반에는 응력 재분배 현상이 발생한다. 탄성 암반내에 단순한 수학적 형상을 가진 공동 주변의 응력분포 및 변형거동에 관해서 많은 이론해가 제시되어 있다.

Fig. 1은 정수압 상태에서 정사각형 공동과 반원형 아치 공동의 응력집중치를 공동 중심각의 함수로 표시한 것이다.<sup>1)</sup> 그림에서 보듯이, 응력집중은 공동의 형태에 의존하며, 보다 안전한 경도를 설계하기 위해서는 응력집중이 발생하는 뾰족한 모서리 부분을 가능한

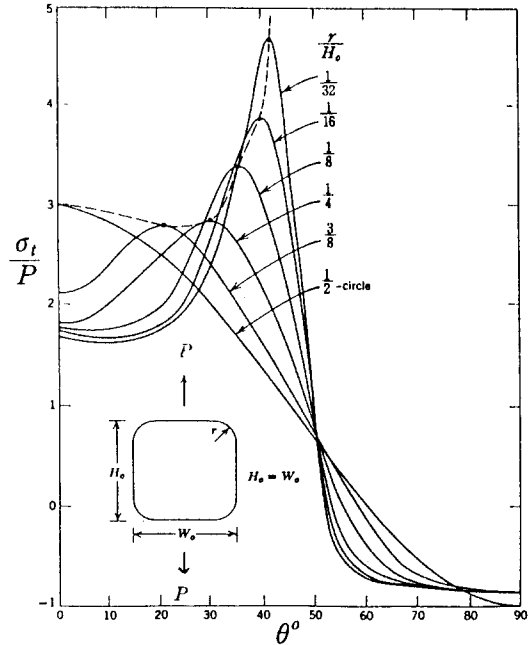


Fig. 2. Boundary stress for squares with rounded corner in uniaxial stress field (After Brock).

피해야 한다.

한편, Brock은 complex variable method를 사용하여 모서리의 곡률을 고려한 사각형 공동 주변의 응력분포를 조사하였다. Fig. 2는 일축응력하에서의 응력집중치를 모서리의 곡률반경의 함수로서 나타낸 것이다.<sup>2)</sup> 그림에서 최소 응력집중치는 공동 높이에 대한 곡률반경이 3/8인 것에서 발생하였음을 볼 수 있는데, 이는 사각형 공동의 형태를 적절히 선택하면 반원형 아치 공동보다 더 작은 응력집중치를 나타낼 수도 있다는 것을 보여 주는 예이다. 이와 같은 현상은 정수압 조건하에서 원형 공동이 최소 응력집중을 나타낸다는 일반적인 개념과 비교하여 주목할 만한 것으로서, 현장 터널의 응력집중 현상은 각 현장의 하중조건에 따른다는 것을 암시한다. 따라서, 응력집중을 최소화할 수 있는 최적의 공동 형상을 설계하기 위해서는 현장의 지질구조에 기인한 하중조건을 사전에 파악해야 한다.

## 3. 축소모형실험

단순한 수학적 형상이 아닌 일반적인 형태의 공동의 해석에 있어서 탄성학적 이론해는 그 한계가 있으므로 광탄성 재료나 근사 물질을 이용한 축소모형실험으로

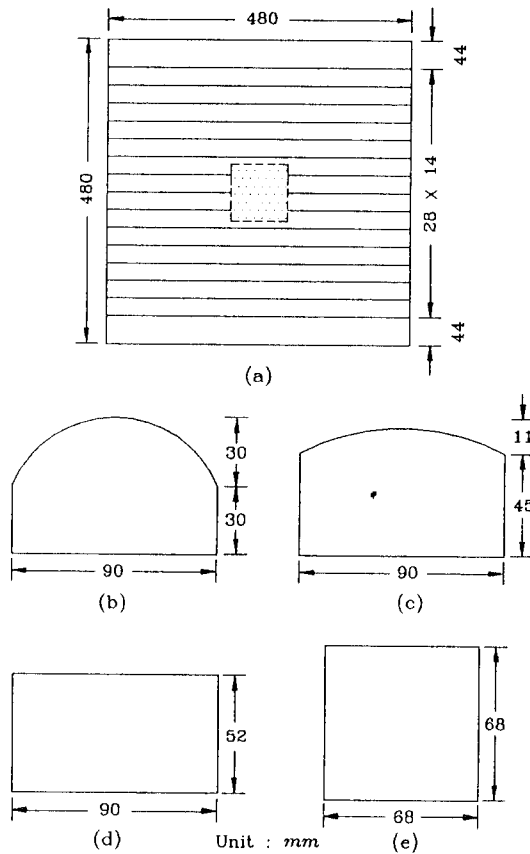


Fig. 3. Dimensions of physical models, (a) General view where dotted region represents opening site, (b) Model 1, (c) Model 2, (d) Model 3, (e) Model 4.

여러가지 형태의 공동을 해석하는 방법이 제안되었다.

이 중에서 석고 혼합물을 이용한 축소모형실험은 평면변형을 조건하에서 현장의 모든 조건들을 축소율로 환산하여 현장 상태를 그대로 재현하는 실험법으로서 시간, 비용, 노력 등이 비교적 적게 드는 장점이 있으나, 압박을 완전히 근사시킬 수 있는 물질을 고려하기 어렵기 때문에 정량적인 해석보다는 정성적인 해석에 치우치는 단점이 있다.

이 실험법을 이용하여 공동의 형상에 따른 공동 변형 거동을 연구한 예로서, Hobbs(1969)는 사각형 공동의 단면축소율이 원형 또는 아치형 공동의 변위보다 크게 나타남을 보였으며,<sup>1)</sup> 이희근, 김중우(1988)는 층상매질 내의 공동 변형거동을 조사한 바 있으며<sup>3)</sup> 이를 요약하면 다음과 같다.

Table 1. Four different shaped openings

Model	Shape	$W_0$ <sup>1)</sup> [mm]	$H_0$ <sup>2)</sup> [mm]	$r$ <sup>3)</sup> [mm]	$A$ <sup>4)</sup> [mm <sup>2</sup> ]
1	Arch	90	60	48.8	4624
2	Arch	90	56	97.5	4685
3	Rectangular	90	52	$\infty$	4680
4	Square	68	68	$\infty$	4624

<sup>1)</sup> $W_0$ : initial width      <sup>2)</sup> $H_0$ : initial height  
<sup>3)</sup> $r$ : radius of curvature      <sup>4)</sup> $A$ : sectional area

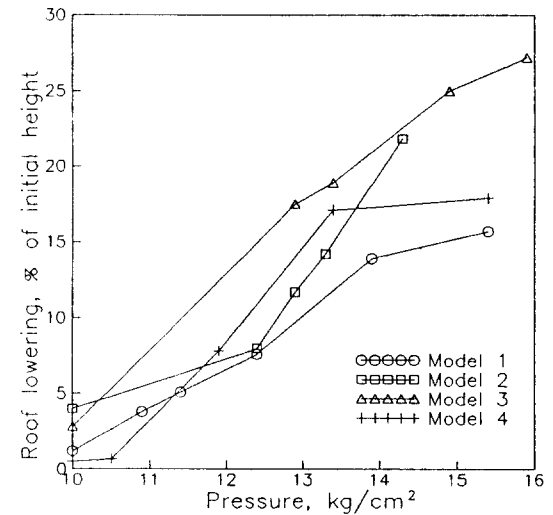


Fig. 4. Variation of roof lowering with applied pressure

이 연구에서 사용된 근사 물질재료는 석고, 모래, 물의 중량비가 각각 50%, 17%, 33%인 혼합물이고, 길이에 대한 축소율은 1/44이며, 거의 같은 단면적을 가지는 4가지 공동 형상에 대한 실험이 실시되었다. 각 모형의 제원은 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 전체 모형을 나타낸 것으로 중앙부 점선내의 영역은 그림 (b),(c),(d)(e)와 같은 4가지 공동이 위치하는 지점을 나타낸 것이다. Table 1은 이들의 폭, 높이, 곡률반경, 단면적을 표시한 것으로 Model 1과 2는 천반 곡률반경이 서로 다른 아치형 공동이고 Model 3은 직사각형, Model 4는 정사각형 공동이다.

모형체에 대해 수직압력과 수평압력을 같은 크기로 가하면서 공동의 여러 지점에서의 변위를 측정하였고, 가해진 압력에 대한 공동의 천정부 변위를 나타내면 Fig. 4와 같다.

전반적으로 아치형 공동보다 사각형 공동의 변위가 더 크게 발생하였고 직사각형 공동에서 최대 변위가 측정되

었다. 또한, 아치형 공동인 Model 1과 2를 비교하면, 곡률반경이 작은 Model 1에서 최소변위가 나타났다.

#### 4. 탄성해석

##### 4.1 해석개요

아치형 공동은 토목 및 광산 터널에서 가장 흔히 사용되는 공동 형태로서 아치부의 곡률반경과 높이 대 폭의 비율에 의해 그 형태가 결정된다. 임의의 형상을 가진 아치형 공동의 변형량은 공동의 크기, 암반의 각종 물성치, 외력, 암반내 불연속면, 공동굴착에 따른 소성영역내 암반의 체적팽창 등과 관련하기 때문에, 그 변형량을 예상하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 임의의 형상을 가진 아치형 공동의 변위발생량을 예상할 목적으로, 천반 곡률반경의 변화에 따른 여러가지 형태의 아치형 공동에서의 변형거동을 조사하였다.

해석을 단순화하기 위해 여러가지 하중조건하에서의 탄성해석 및 탄소성해석이 수행되었다. 사용된 프로그램은 유한차분법을 이용한 구조해석 프로그램인 FLAC으로서<sup>4)</sup> 이는 지반공학 분야에서 널리 사용되고 있다.

##### 4.2 모델의 설정

탄성암반내 원형공동 주위의 응력과 변위는 Kirsch 해에 의해 구해질 수 있다. 이에 따르면, 영률 E, 포아송비  $\nu$ 인 암반내에 위치한 반경 a인 원형공동에 수평 응력  $P_x$ 와 수직응력  $P_y$ 가 작용할 경우, 원 중심으로부터 거리 r, 각도  $\theta$ 인 지점에서의 반경방향 변위( $U_r$ )는 (1)식과 같다.

$$U_r = \frac{1+\nu}{E} \frac{P_x+P_y}{2} \frac{a^2}{r} + \frac{1+\nu}{E} \frac{P_x-P_y}{2} \frac{a^2}{r} (4(1-\nu) \frac{a^2}{r^2}) \cos 2\theta \quad (1)$$

Fig. 5는 원형 공동의 해석을 위한 요소망을 나타낸 것으로, 공동의 반경은 3 m이고, 주변암반은 단위중량  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , 영률  $10^6 \text{ kg/cm}^2$ , 포아송비 0.25으로 설정하였다. 축압계수 K가 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0인 5가지 하중조건하에서의 해석이 수행되었으며, 이때 수직응력은  $27 \text{ kg/cm}^2$ 으로 하였다.

이론적 변위와 수치해석 결과를 비교하면, 정수압( $K=1$ ) 조건하에서 (1)식을 이용한 공동벽면의 변위는 1.

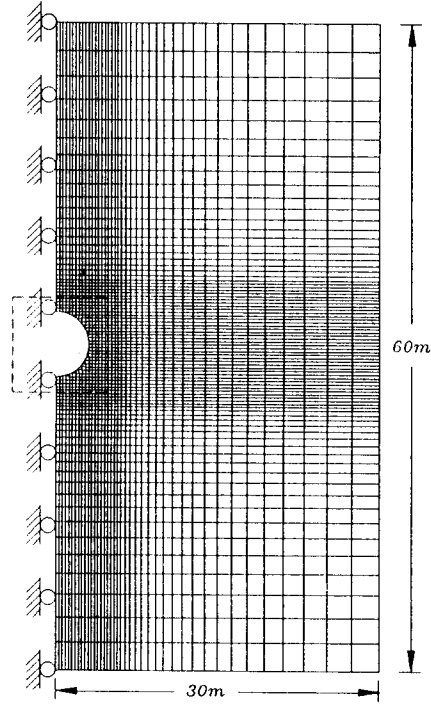


Fig. 5. Mesh for circular opening.

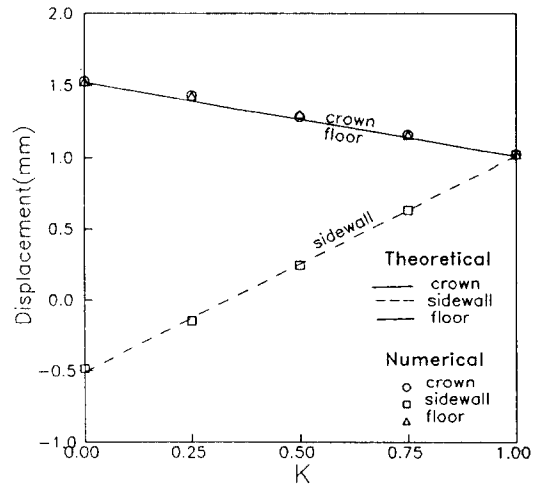


Fig. 6. Comparison of theoretical and numerical results

0125 mm가 계산되며, 수치해석 결과는 1.0210 mm로 나타났다.

Fig. 6은 축압계수 K에 따른 이론적 변위와 수치해석 결과를 비교한 것으로, 공동의 천정부 및 바닥부와 측벽부에서의 변위는 모두 99% 이상의 일치성을 보이

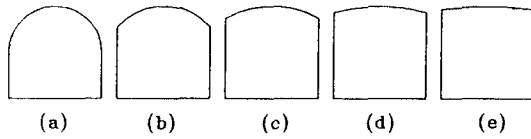


Fig. 7. Five different openings with various roof curvatures.

Table 2. Five different shaped openings

Model	$r^1$ [m]	$r/W_0$	$A^2$ [m <sup>2</sup> ]
1	3	0.5	32.137
2	4	0.667	33.636
3	6	1	34.438
4	12	2	35.098
5	24	4	35.569

<sup>1)</sup>r: radius of curvature

<sup>2)</sup>A: sectional area

므로, 적용된 프로그램 및 요소망의 적정성을 알 수 있다. 따라서, 이상의 프로그램과 요소망을 사용하여, 아치형 공동의 해석이 수행되었다.

천반 아치부의 곡률반경에 따른 영향을 조사하기 위해 5개 공동에 대해 해석이 실시되었다. Fig.7은 각 공동의 형상을 나타낸 것으로, 해석 공동들은 모두 폭( $W_0$ ) 6 m, 높이( $H_0$ ) 6 m 인 정사각형 공동에 내접하는 것으로 하였으며, Table 2는 이들의 규격을 나타낸 것이다. 각 공동의 해석요소망은 Fig. 5의 점선 내의 부분이 Fig. 7의 5개 공동 모양으로 대체되어 구성된다.

여러가지 하중조건 하에서 각 공동의 변형거동을 조사하기 위해 천정부, 측벽부, 바닥부의 변위가 각각 구해졌다.

### 4.3 정수압 하중조건

현지암반의 응력상태 및 하중조건은 주변 지질구조와 관련하여 매우 복잡하므로, 단순한 고찰을 위해 먼저 정수압 하중조건이 고려되었다.

탄성암반내 정수압  $P_0$ 가 작용하는 원형공동 벽면의 반경방향 변위( $U_{r0}$ )는 (1)식으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$U_{r0} = \frac{1+\nu}{E} P_0 a \tag{2}$$

일반적으로 정수압 상태하에서 원형 공동은 공동벽면에서의 최대 응력집중 계수가 2로서, 다른 여러가지 형상의 공동보다 작으므로 가장 작은 변위를 나타낸다.

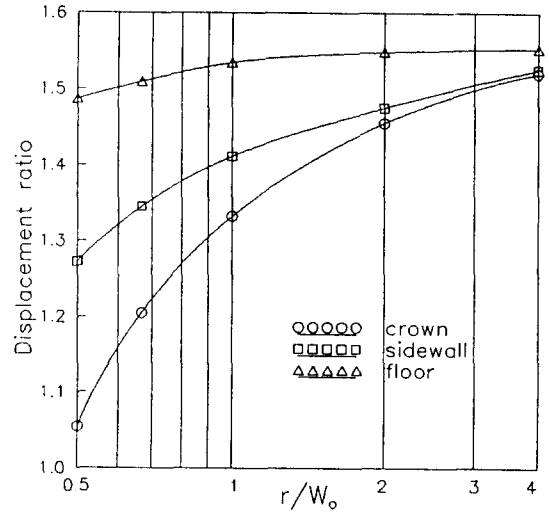


Fig. 8. Displacement distribution around arched openings in elastic rock.

이에 비해, 아치형 공동에 대하여 해석을 실시한 결과, 천정의 곡률반경이 커질수록 천정 변위와 측벽 변위는 크게 증가하였으나 바닥 변위는 약간씩 증가하였다.

한편, 정수압 하중하에서 임의의 곡률반경을 가진 아치형 공동에서의 천정부, 측벽부, 바닥부의 변위해석 결과를 정규화하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 여기서 횡축은 아치부의 곡률반경을 공동의 초기 폭으로 나눈 값으로 하고, 종축은 원형 공동 벽면의 반경방향 변위에 대한 비율로서 표시하였다. 예를 들어, Fig. 8에서  $r/W_0$  값이 1.0인 공동(Fig. 7(c)참고)에서의 천정부의 변위는 원형공동에서의 변위보다 1.411배 큰 변위가 발생한 것이다.

즉, Fig. 8을 이용하면 임의의 곡률을 가진 정수압 조건인 아치형 공동에서의 탄성변위 발생량을 계산할 수 있는데, 이를 최소자승법을 사용한 회귀식으로 나타내면 (3)식과 같다. 여기서  $U_r$ 은 아치형 공동의 벽면에서 반경방향의 변위를 나타내고, a, b, n은 회귀 상수이다.

$$U_r = U_{r0} \cdot \exp \left( a \left( \frac{r}{W_0} \right)^n + b \right) \tag{3}$$

(3)식의 회귀 상수값은 천정부에서는  $a=-0.1509$ ,  $b=0.4486$ ,  $n=-1.3373$ 이고, 측벽부에서는  $a=-0.1032$ ,  $b=0.4544$ ,  $n=-0.9749$ 이며, 바닥부에서는  $a=-0.0140$ ,  $b=0.4494$ ,  $n=-1.7162$ 이다.

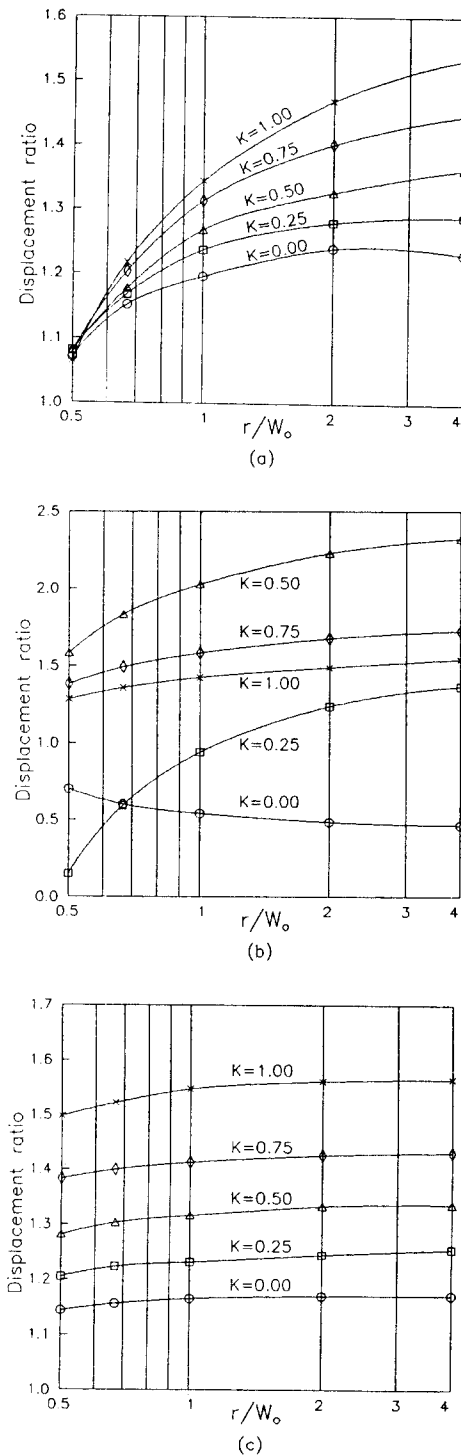


Fig. 9. Variation of displacement ratio with  $r/W_o$  and geostatic stress ratio,  $K$ , (a) Crown, (b) Sidewall, (c) Floor.

#### 4.4 일반적인 하중조건

일반적인 암반의 응력상태는 수평응력 대 수직응력의 비인 축압계수  $K$ 에 의해 특정지워진다.

축압계수  $K$ 를 고려하여  $P_y=P$ ,  $P_x=KP$ 로 나타내면, 원형공동의 천정부 및 바닥부의 반경방향 변위( $U_{rc}$  또는  $U_{rf}$ )와 측벽부의 변위( $U_{rs}$ )는 (1)식으로 부터 각각 (4),(5)식과 같다.

$$U_{rc} \text{ or } U_{rf} = \frac{1+\nu}{2E} P a [(K+1)-(K-1)(3-4\nu)] \quad (4)$$

$$U_{rs} = \frac{1+\nu}{2E} P a [(K+1)+(K-1)(3-4\nu)] \quad (5)$$

Table 2와 같은 5가지 아치형 공동에 대해 각각  $K=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 인 하중조건으로 해석이 실시되었으며, 이때 구해진 천정부, 측벽부, 바닥부의 변위를 전절과 같은 방법으로 정규화하여 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9를 전반적으로 설명하면 다음과 같다.

먼저, Fig. 9(a)에서 보면, 천정부에서의 원형 공동 변위에 대한 변위 비율은 천정 곡률반경이 커질수록 증가하였고, 또 축압계수가 커질수록 증가하였다. Fig. 9(b)에서 측벽부의 변위비율은  $K=0$ 인 경우를 제외하고는 천정 곡률반경이 커질수록 증가하였으며,  $K=0.5$ 일 때 가장 크게 나타났다. 그리고 Fig. 9(c)에서 바닥부의 변위비율은 천정 곡률반경이 커질수록 약간씩 증가하되,  $r/W_o$ 가 2이상일 경우 거의 일정하였고, 또 축압계수가 커질수록 증가하였다.

Fig. 9를 이용하면, 임의의 축압계수와 곡률을 가진 아치형 공동에서의 탄성변위 발생량을 대략적으로 산정할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4.5 응용과 검토

상기의 결과를 이용하여 정사각형에 내접하는 임의 형태를 가진 아치형 공동 벽면의 탄성변위를 계산하는 두가지 응용 예를 들어 본다.

먼저, 영률  $10^4 \text{ kg/cm}^2$ , 포아송비 0.3이고 정수압  $100 \text{ kg/cm}^2$ 을 받는 탄성암반내에 폭과 높이가 10 m이고 천반 곡률반경이 7 m인 아치형 공동이 굴착될 경우 발생하는 탄성변위를 구하기 위해서는 다음과 같은 계산절차를 수행하면 된다.

1단계) (2)식으로 반경 5 m인 원형공동의 변위를 계산하면,  $U_{rc}=6.5 \text{ cm}$ 이다.

2단계) (3)식으로 아치형 공동의 변위를 추정하면, 천

정부=7.982 cm, 측벽부=8.847 cm, 바닥부=9.926 cm 이다.

다음으로, 상기의 공동에 수직응력 100 kg/cm<sup>2</sup>, 수평 응력 50 kg/cm<sup>2</sup>이 작용할 경우를 생각하면 다음과 같다.

1단계) (4), (5)식으로 원형공동에서 천정부, 측벽부, 바닥부의 변위를 계산하면, 각각

$U_{rc}=7.8$  cm,  $U_{rs}=1.95$  cm,  $U_{rf}=7.8$  cm이다.

2단계) Fig. 9(a),(b),(c)에서  $K=0.5$ 일때 변위비율을 구하면, 천정부=1.21, 측벽부=1.85, 바닥부=1.31 이다.

3단계) 마지막으로 각 지점의 예상변위는 위 두항을 곱하여 구해지며, 천정부=9.438 cm, 측벽부=3.608 cm, 바닥부=10.218 cm이다.

한편, 위의 예에 대한 타당성을 검증하기 위하여 공학적으로 널리 사용되는 여러가지 프로그램들을 이용하여 수치해석이 수행되었으며, Table 3은 그 결과를 나타낸 것으로서, 산출된 변위는 위의 회귀결과로부터 구해진 변위와 거의 부합함을 알 수 있다.

따라서, 위와 같은 간단한 계산에 의해 아치형 공동의 탄성변위를 예상할 수 있으며 또한, 이는 아치형 공동의 예비설계 자료로서 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

5.1 해석개요

현지암반은 탄성이라기 보다는 탄소성 암반에 가까우며, 특히 공동굴착으로 인한 소성영역이 공동의 초기 반경보다 1.2배 이상 확산될 경우 공동벽면의 변위는

Table 3. Comparison between regressional and numerical displacements(Unit:cm)

(a) When $\sigma_x=\sigma_y=100$ kg/cm <sup>2</sup>				
Classification	Crown	Sidewall	Floor	
Regressional	7.982	8.847	9.926	
Numerical	FLAC	7.933	8.028	10.190
	ABAQUS	6.780	8.421	10.120
	SAP90	7.297	7.953	9.272
(b) When $\sigma_x=50$ kg/cm <sup>2</sup> , $\sigma_y=100$ kg/cm <sup>2</sup>				
Classification	Crown	Sidewall	Floor	
Regressional	9.438	3.608	10.218	
Numerical	FLAC	9.839	2.854	10.940
	ABAQUS	7.795	3.684	10.740
	SAP90	8.842	2.729	10.317

소성영역내 암반의 체적팽창으로 인해 발생하는 소성 변위에 주로 관련한다.<sup>5)</sup> 따라서, 전향에서 제시된 탄성 변위는 아치형 공동에서 발생하는 최소 변위로 볼 수 있으며, Fig. 7과 같은 5개 아치형 공동에 대한 탄소성 해석이 추가적으로 수행되었다.

5.2 모델의 설정과 검토

암반의 여러가지 파괴조건 중에서 Mohr-Coulomb 조건은 지반구조물의 탄소성 해석에 널리 사용되고 있으며 이는 비연상(팽창각 $\psi=0^\circ$ ) 또는 연상(팽창각 $\psi=\text{마찰각}\phi$ ) 유동법칙을 고려하고 있다.

Salencon(1969)에 의하면<sup>6)</sup> 점착력  $c$ , 내부마찰각  $\phi$  인 암반내에 정수압  $P_0$ 를 받는 반경  $a$ 인 원형공동에서 소성영역의 반경  $R_0$ 는 (6)식과 같다.

$$R_0 = a \left( \frac{2}{K_p+1} \cdot \frac{P_0 + \frac{q}{K_p-1}}{\frac{q}{K_p-1}} \right)^{1/(K_p-1)} \tag{6}$$

여기서,  $K_p = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$

$q = 2 \cdot c \cdot \tan(45 + \phi/2)$

또한, 소성영역내에 포함된 공동벽면에서의 반경방향 변위( $U_r$ )는 (7)식과 같다.

$$U_r = \frac{1+\nu}{E} a \cdot \chi \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \chi = & (2\nu-1)(P_0 + \frac{q}{K_p-1}) \\ & + \left( \frac{(1-\nu)(K_p^2-1)}{K_p+K_{ps}} \right) \cdot \left( \frac{q}{K_p-1} \right) \cdot \left( \frac{R_0}{a} \right)^{(K_p+K_{ps})} \\ & + \left( (1-\nu) \frac{(K_p K_{ps} + 1)}{(K_p + K_{ps})} - \nu \right) \cdot \left( \frac{q}{K_p-1} \right) \end{aligned}$$

여기서,  $K_{ps} = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi}$

먼저, 반경 3 m인 원형공동에 대한 탄소성 해석이 실시되었다. 해석을 위한 암반의 물성치는 전술한 탄성해석에서의 입력자료를 그대로 적용하되 점착력  $c=5$  kg/cm<sup>2</sup>, 내부마찰각  $=30$ 을 가정하였다.

이러한 조건에서 (6), (7)식을 적용하면 소성영역의 반경  $R_0=4.305$  m이고, 비연상 유동법칙을 적용할때 공동벽면의 변위  $U_r=1.559$  mm, 연상 유동법칙을 적용할때  $U_r=2.490$  mm의 이론적 변위가 계산되는데, 이들

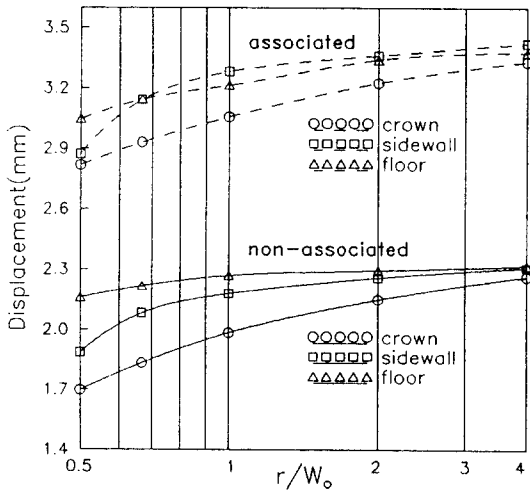


Fig. 10. Displacement distribution around arched openings in elasto-plastic rock.

변위값은 전절에서 계산된 탄성변위 1.1025 mm의 1.54배와 2.26배에 해당한다.

한편, Fig. 5의 원형 공동에 대한 비연상 및 연상 유동법칙을 고려한 탄소성 해석을 실시한 결과, 공동벽면의 변위는 각각 1.573 mm, 2.491 mm의 변위가 계산되어, 탄성해석에서와 같이 99%의 신뢰도로서 적용된 프로그램 및 요소망의 적정성을 알 수 있었다.

### 5.3 천반 곡률반경의 영향

탄소성 해석에 있어서도 천반 곡률반경에 따른 영향을 조사하기 위해 Fig. 7과 같은 5개 공동에 대해 해석이 실시되었고, 각각 천정부, 측벽부, 바닥부의 변위가 조사되었다. Fig. 10은 해석결과를 나타낸 것으로 실선과 점선은 각각 비연상 및 연상 유동법칙을 적용할 경우이다.

그림에서 천반의 곡률반경이 커질수록 천정 변위와 측벽 변위는 크게 증가하는 반면, 바닥 변위는 약간씩 증가함을 볼 수 있다. 또한, 팽창각(dilatancy)을 고려하는 연상 유동법칙을 적용할 경우의 변위는 비연상 유동법칙을 적용할 경우의 변위보다 크게 나타났다.

한편, 각 지점의 변위는 (7)식에서와 같이 소성영역의 반경  $R_o$ 와 관련하므로 각 해석공동의 소성영역 분포를 조사하면 Fig. 11과 같다. 그림(a)는  $r/W_o$  값이 0.5인 공동(Fig. 7(a)참고)이고, 그림(b)는  $r/W_o$  값이 2.0인 공동(Fig. 7(d)참고)이며, 그림(c),(d)는 각각 원형

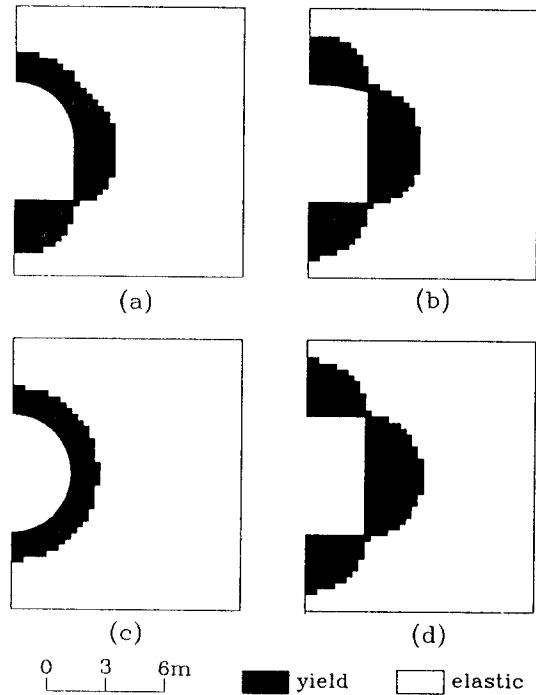


Fig. 11. Distribution of yield zone around different shaped openings, (a) arched,  $r/W_o=0.5$ , (b) arched,  $r/W_o=2.0$ , (c) circular, (d) Square.

공동과 정사각형 공동의 소성영역 분포도이다.

그림에서 볼 수 있듯이 아치형 공동의 소성영역은 원형과 정사각형 공동의 중간적인 형태를 가지고 있다. 또한, 그림(a)와 (b)를 비교하면, 천반 곡률반경이 클수록 천정부와 측벽부에서 소성영역이 증가하고 있으며 이는 천정 및 측벽변위를 증가시키는 요인이 된다고 할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 여러가지 형태를 가진 아치형 공동에 대하여 천반 곡률반경의 변화에 따른 공동의 변형거동을 조사하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 축소모형실험에서 아치형 공동보다 사각형 공동의 단면축소량이 크게 발생하였고, 곡률반경이 작은 아치형 공동에서 최소변위가 나타났다.
- 2) 여러가지 곡률반경을 가진 아치형 공동에 대해 정



수압 조건하의 탄성해석을 수행하였다. 이때 천반 곡률 반경이 커질수록 천정 변위와 측벽 변위는 크게 증가하였으나 바닥 변위는 약간씩 증가하였다. 또한, 각 해석에서 구한 천정부, 측벽부, 바닥부의 변위를 정규화하고, 이를 최소자승법을 이용한 회귀식으로 나타내었다 ((2), (3)식 참고).

3) 측압계수  $K$ 를 고려한 탄성해석을 수행하여 임의의 곡률을 가진 아치형 공동에서의 탄성변위 발생량을 대략적으로 산정할 수 있는 도표를 작성하였다(Fig. 9 참고).

4) 이상의 회귀식 및 도표를 이용하면 간단한 계산에 의해 아치형 공동의 탄성변위를 예상할 수 있으며, 이는 아치형 공동의 예비설계 자료로서 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

5) 여러가지 곡률반경을 가진 아치형 공동에 대해 탄소성 해석을 수행한 결과, 천반의 곡률반경이 커질수록 천정 변위와 측벽 변위는 크게 증가하는 반면, 바닥 변위는 약간 증가하였으며, 연상 유동법칙을 적용할 경우의 변위는 비연상 유동법칙보다 크게 나타났다.

## 사 사

본 연구와 관련하여 ABAQUS 수치해석에 도움을

주신 한국원자력연구소의 장근무 박사께 심심한 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. D.W.Hobbs, 1969, Scale Model Study of Strata Movement around Mine Roadways - IV. Roadway Shape and Size : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v.6, p.365-404.
2. Obert L. and Duvall W.I., 1967, Rock Mechanics and Design of Structures in Rock, Ch. 5 : Wiley
3. 김종우, 이희근, 1988, 층상암반내 갱도의 변형거동에 관한 연구 : 대한광산학회지, 25권, 5호, p.320-331.
4. FLAC Manual, 1993, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, U.S.A.
5. Engineer Manual [EM 1110-2-2901], 1978, Engineering and Design - Tunnels and Shafts in Rock : Department of the Army Corps of Engineers, U.S.A., p.k-68.
6. Salencon J., 1969, Contraction Quas-Statique D'une Cautite a Symetric Spherique Ou Cylindrique Dans Un Milieu Elastoplastique : Annales Des Ports Et Chaussees, v.4, p.231-236.