

지하공동의 형상과 규모가 공동의 안정성에 미치는 영향 연구

A Study on the Shape and Size Effects on the Stability of Underground Openings

박 상 찬*¹

Park, Sang - Chan

문 현 구*²

Moon, Hyun - Koo

Abstract

In this study, the analytic solutions and numerical methods were used to estimate the shape and size effects on the stability of underground openings. The stability of underground openings was evaluated by scrutinizing the effects of the rock mass quality, the state of in-situ stresses and the lateral earth pressure coefficient on the displacement, the stress concentration and the plastic region developed in the vicinity of the openings.

The analytic solutions have shown that the stress concentration factor is inversely proportional to the radius of curvature of openings. Through parametric study on the various shapes and sizes of underground openings the characteristics of the controlling factors concerned with the stability were analyzed.

Then, the study was extended to the horseshoe-shaped openings commonly used for underground storage. Through the extended study the effects of the stress ratio and the height-to-width ratio of openings on the maximum displacement and plastic region developed around the openings were estimated. The results have shown that the height-to-width ratio of domestic storage caverns can be increased economically without stability problem, as far as the lateral earth pressure coefficient is appropriate.

요 지

본 연구에서는 지하공동의 형상과 규모가 공동의 안정성에 미치는 영향을 이론적 해석법과 수치 해석법을 이용하여 평가하였다.

지하 공동의 안정성에 영향을 미치는 제반요소들 중에서 암질, 초기응력의 크기 및 방향 그리고 축압계수가 공동주위에 발생하는 변위, 응력집중 그리고 소성영역의 크기와 범위에 미치는 영향을 중심으로 안정성을 평가하였다.

이론적 해석법을 이용하여 공동 벽면의 형상변화에 따른 응력집중계수의 변화를 분석하였으며 공동 벽면에서의 응력집중계수는 벽면의 곡률반경에 반비례하여 나타났다. 수치해석법을 이용한

*¹ 한양대학교 대학원 자원공학과 석사과정

*² 정희원, 한양대학교 공과대학 자원환경공학과 부교수

매개변수연구를 통하여 공동의 형상과 크기 변화에 따라서 제반요소들이 나타내는 특징들을 비교 평가하였다.

위 제반요소들이 나타내는 특징들을 지하비축공동 형상으로 널리 사용되고 있는 마제형 공동에 적용하여 측압계수와 공동단면의 비가 공동주위에 발생하는 최대변위의 변화 및 소성영역의 발달 양상에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구를 통하여 현재 건설되고 있는 국내 지하저장공동의 공동단면의 비는 공동이 위치할 현장의 측압계수조건에 따라서 안정성의 커다란 문제 없이도 공동의 높이 증가에 의한 공동의 단면적 증가가 경제적으로 가능함을 알 수 있었다.

Keywords : Underground opening, Shape, Size, Displacement, Stress concentration, Plastic region, Stability, Lateral earth pressure coefficient

1. 서 론

지하공간은 굴착에 의하여 형성된 공동의 주변압반 자체가 구조물의 역할을 하기 때문에 가용공간 내에서 전후, 좌우, 상하, 대각선 방향 등 임의의 방향으로 공동을 설계할 수 있는 장점이 있는 반면에 일단 굴착된 공동은 다시 원상태의 조건으로 복구할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 공동의 적절한 위치, 형상, 크기 등은 시공 전에 암반조건 및 이용 목적에 따라서 적절하게 설계에 반영되어야 한다. 특히 에너지 관련 저장시설은 다른 시설물에 비하여 공동의 단면이 클 뿐만 아니라 심도가 깊고 크기와 형상도 다양하기 때문에 시공성과 경제성뿐만 아니라 구조적인 안정성을 고려한 이상적인 단면의 형상과 규모 및 간격 등이 결정되어야 한다. 지하공동의 굴착시 공동의 안정성에 크게 영향을 미치는 공동의 파괴형태는 공동 굴착으로 인하여 발생하는 2차응력이 암반의 강도를 초과하여 발생하는 파괴와 단층이나 절리 등 암반내에 존재하는 불연속면이 굴착 후 공동면에 의해 블록을 형성하고 자중에 의해 떨어지거나 미끄러지는 파괴형태로 크게 나눌 수 있다. 즉 지하공동의 안정성은 공동 주위암반에 작용하는 응력과 암반의 강도특성 또는 암반의 구조적인 특징에 다르게 됨을 말하는 것이고 전자는 주로 초기현장응력이 큰 심부 암반에서 일어나고 후자는 주로 초기현장응력이 작은 천부 암반에서 일어나는 파괴형태이다.

공동의 형상에 관한 연구는 여러 저자들에 의하여 수행된바 있다. Cristescus(1995)와 Gercek(1993)은 이론식을 이용하여 모서리에 곡률을 갖는 사각형 공동주위의 응력해석을 통해서 곡률과 측압계수의 변화에 의한 영향을 분석하였고 원형공동이 아닌 형상에 대하여 이론적인 접근을 시도하였다. 그러나 분석가능한 대상공동의 형상이 한정되는 점이 문제로 지적될 수 있다. Boughrrouous & Reddish(1993)와 Hoek & Brown(1980)은 수치해석을 이용하여 다양한 형상에 대해 측압계수에 대한 변수연구를 통하여 형상과 측압계수의 변화가 공동주위의 응력상태에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. Boughrrouous는 공동형상에 의한 영향을 분석하였으나 선택한 모델의 수가 4가지로 한정되어 있기 때문에 다양한 형상의 변화에 의한 영향을 예측하는 데에는 한계가 있을 것으로 생각된다. Hoek & Brown은 많은 형상에 대하여 응력해석을 수행하였으나 한정된 측압계수를 사용하여 측압계수의 영향을 세밀하게 나타내지는 못하였다. 국내의 경우는 수치해석을 이용하여 아치형 공동의 천반곡률변화에 따른 굴착으로 인한 변위발생량을 회귀식과 도표를 이용하여 산정하는 연구가 수행된바 있다(김종우, 1996).

본 연구에서는 건설기술의 발달에 따라서 지하공동이 점점 심부에 위치하고 있으며 대형화, 다양화 추세에 있으므로 심부 암반에 건설되는 공동의 안정성 해석을 위하여 2차원 유한요소법과 경계요소법을 이용하였으며 다양한

공동의 형상과 크기 변화에 따른 공동주위의 응력과 변위 변화 및 소성영역의 발달양상을 해석하였다. 특히 다양한 공동의 형상을 분석하기 위하여 공동형상의 곡률을 파라미터화시켜 세밀한 곡률의 변화에 의한 영향을 분석하였다. 또한 공동단면의 비를 변화시킴으로써 공동의 형상과 크기를 동시에 변화시키는 방법을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 수행된 해석결과와 특징들을 지하저장공동의 형상으로 널리 사용되고 있는 마체형 공동에 적용하여 공동의 안정성에 관계하는 축압계수와 공동높이 변화와의 상관관계를 도출하였다. 안정성 평가의 기준은 공동 벽면에서 발생하는 최대변위와 공동주위 소성영역의 분포양상을 중심으로 평가하였다. 본 연구는 지하공동의 형상과 크기가 지질 및 암반조건에 따라서 다양하게 나타내고 있는 안정성에 관한 문제를 수치해석법을 이용한 광범위한 매개변수연구를 통하여 해석하였다. 기존의 단편적인 매개변수 연구와 달리 지하공동의 굴착시 공동의 형상과 크기를 결정하는데 고려되어야 할 주요 변수들의 영향을 비교 평가하여 공동의 형상 및 크기 변화와 공동의 안정성과의 상관관계를 도출하고 이를 이용하여 주어진 제반조건에 적합한 공동의 형상과 규모를 보다 쉽게 예측할 수 있는 기준을 마련하는데 그 목적이 있다.

2. 이론적 고찰

원형공동 주위의 응력 및 변위의 계산은 널리 알려진 Kirsch의 해를 이용하여 계산할 수 있으며 타원형 공동주위의 응력은 Bray의 해로 계산할 수 있다. 그 밖의 다른 기하학적 형상들에 대해서는 Greenspan 방법을 이용하여 공동주위의 응력해석이 가능하다(Obert & Duvall, 1967). 특히 Greenspan 방법은 공동 벽면의 곡률 변화, 공동의 장단축 방향 그리고 초기주응력 방향이 공동주위의 응력변화에 미치는 영향을 분석하는데 유용하다. 공동의 안정성 해석에서는 벽면에 작용하는 주응력이 가장 중요하므로 본 연구에서는 Greenspan 방법

을 이용하여 공동의 형상변화에 따른 공동 벽면에서의 접선응력 σ_t 를 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} & [(p^2+6rp)\sin^2\beta+(q^2+6rp)\cos^2\beta- \\ & 6r(p+q)\cos^2\beta+9r^2]\sigma_t \\ & = (S_x+S_y)(p^2\sin^2\beta+q^2\cos^2\beta-9r^2) \\ & - T_{xy}(p+q)^2\frac{p+q+6r}{p+q+2r}\sin 2\beta \\ & \frac{(p^2-q^2)(S_x+S_y)-(p+q)^2(S_x-S_y)}{p+q-2r} \\ & \times [(p-3r)\sin^2\beta-(q-3r)\cos^2\beta] \quad (1) \end{aligned}$$

여기서, S_x , S_y , T_{xy} 는 각 방향으로 작용하는 초기응력이며 p , q , r 은 각각 공동의 폭, 높이

표 1. Greenspan method를 이용한 응력계산에 사용되는 형상결정 상수

	p	q	r
Circular	1	1	0
Ellipse	2	1	0
Ovaloid	2.1	1.1	-0.10
Square with rounded corners	1	1	-0.14

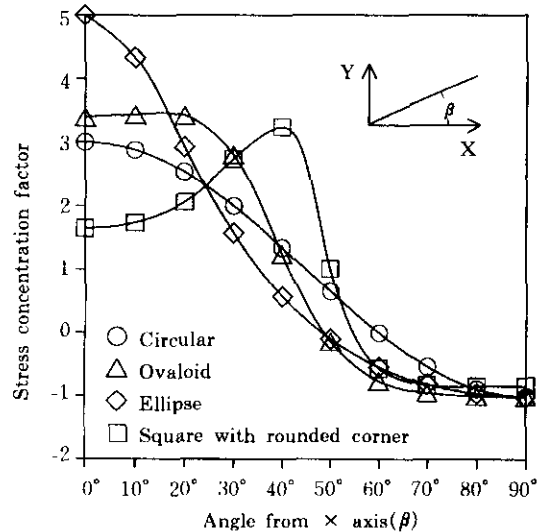


그림 1. $K=0$ 일때 공동의 형상에 따른 벽면에서의 응력집중의 변화

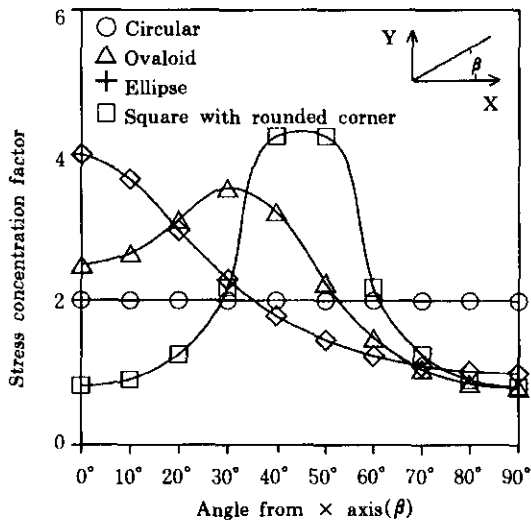
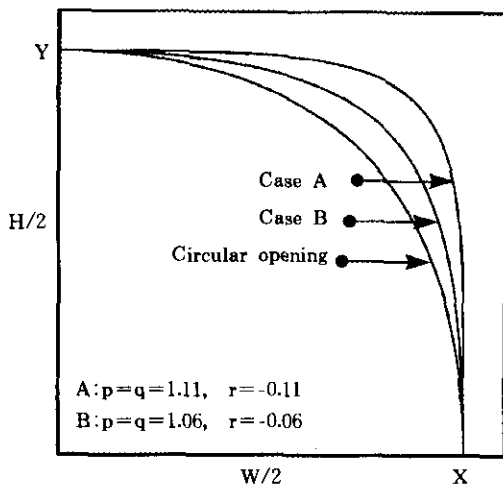


그림 2. $K=1$ 일때 공동의 형상에 따른 벽면에서의 응력집중의 변화

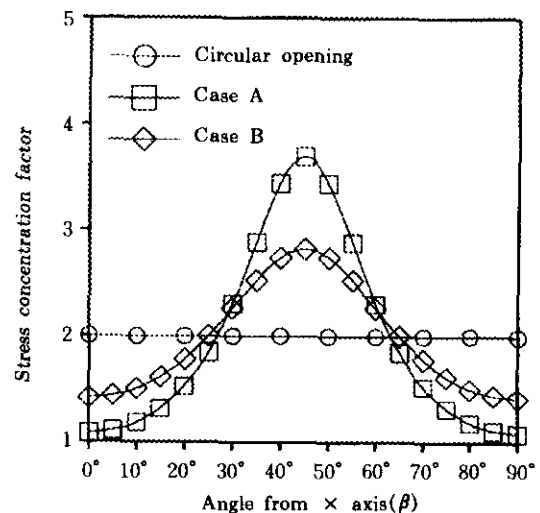
그리고 벽면의 곡률을 결정하는 상수이며 β 는 공동벽면의 수평축으로부터의 각도이다. 공동의 형상을 결정하는 상수 p, q, r 이 표 1과 같을 때 식 (1)에 의하여 계산된 공동 벽면에서의 응력집중 변화는 그림 1, 2와 같다.



(a) 공동 벽면의 1/4 모델

그림 1은 연직응력(S_y)만 작용하는 일축압축 상태로써 응력집중의 크기는 초기 연직응력에 의하여 대체로 공동의 측벽에서 크게 나타나고 천정부로 갈수록 작아지며 천정부에서는 인장응력이 발생하고 있다. 그러나 그림 1의 사각형 공동과 정수압상태인 그림 2의 경우에는 벽면의 곡률반경이 작은 부분에서 최대응력집중이 발생하고 있다. 이는 응력집중의 크기가 공동 벽면의 곡률반경과 밀접한 관계에 있음을 나타낸다. 따라서 표 1의 사각형 공동에 대해서 공동 모서리 부분의 곡률변화에 따른 응력집중의 크기 변화를 원형공동과 비교하여 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3은 공동 벽면의 곡률반경이 작아질수록 응력집중의 크기가 증가하고 있음을 나타낸다. 그림 2와 그림 3(b)는 탄성압반내 정수압 상태에서는 원형공동이 벽면에서의 응력집중 크기가 최소화되는 형상임을 증명하는 결과라 할 수 있지만 실제로 암반은 탄성체가 아니며 원형공동은 시공의 어려움이나 유효단면적의 감소라는 단점을 내재하고 있다. 따라서 암반의 다양한 지질구조와 응력조건 및 공동의 이용목적에 적합한 형상을 결정하기 위해서는 유



(b) 벽면에서의 응력집중($K=1$)

그림 3. 공동 벽면의 곡률변화에 따른 벽면에서의 응력집중의 변화

한요소법과 같은 수치해석적 기법을 통한 보다 세밀한 연구가 필요하다.

3. 수치해석적 연구

지하공동의 안정성 해석에 사용되는 수치해석법중 암반을 연속체로 해석하는 방법에는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법 등이 있다. 이 중 유한요소법은 근간 국내외에서 많이 사용되고 있는 보편화된 방법으로 암반의 비균질성, 비등방성, 시간의존성 등 다양한 지질조건 문제를 해결할 수 있지만 경계조건에 영향을 다소 크고 해석시 대용량의 컴퓨터를 필요로 하는 단점도 있다. 경계요소법은 컴퓨터의 사용 용량이 적고 입출력 자료가 비교적 간단하며 경계부가 관심의 대상일 때는 유용하지만 재료의 비선형적 거동이나 단계별 해석이 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 공동의 형상과 크기 변화에 따른 공동 주위의 응력과 변위의 변화 및 안전율에 기초한 소성영역의 발달 양상을 중심으로 공동의 역학적 안정성을 평가하였다. 먼저, 동일한 단면적의 원형, 마제형, 정사각형, 수평타원 그리고 수직타원의 5가지 형상에 대한 유한요소 탄성 및 탄소성 해석을 통하여 동일한 조건하에서 공동의 형상과 크기 변화가 나타내는 특징들을 비교하였다.

3.1 해석 프로그램의 개요

본 연구에 사용된 프로그램은 지하 공동의 안정성 해석을 위한 2차원 유한요소 프로그램으로써 초기응력하의 등방성 및 이방성 물질의 2차원 해석(평면변형률, 평면응력, 축대칭조건)이 가능하며 요소의 응력상태가 탄성한계를 넘을 경우 요소의 파괴거동을 소성파괴와 취성파괴 방법으로 분석할 수 있다. 소성파괴는 Drucker-Prager 파괴조건에 기초한 선형 및 비선형 파괴조건의 해석이 가능한 프로그램으로 알고리즘은 3축 이방성 소성이론에 그 기

초를 두고 있다(김득기, 1989).

본 연구의 모델실험은 암반을 등방, 균질, 탄소성체로 가정하고 평면변형률조건, 비선형 파괴조건 및 변위 경계조건을 사용하여 수행하였으며 본 프로그램에 사용된 파괴조건식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Y(\sigma)=[YJ_2]^{\frac{n}{2}}+YI_1-1 \quad (2)$$

여기서, n은 선형파괴식(n=1) 또는 비선형 2차 파괴식(n=2)을 결정하는 상수이며

$$YJ_2=[(1/2TC)(\sigma_y-\sigma_x)^2+(1/2TC)(\sigma_z-\sigma_x)^2+(1/2TC)(\sigma_x-\sigma_y)^2+(1/R)^2\tau_{yz}^2+(1/R)^2\tau_{zx}^2+(1/R)^2\tau_{xy}^2],$$

$$YI_1=(1/T-1/C)\sigma_x+(1/T-1/C)\sigma_y+(1/T-1/C)\sigma_z,$$

C는 일축압축강도, T는 일축인장강도, R은 전단강도이다. 파괴가 일어나는 조건은 $Y(\sigma)=0$ 이고 안전율(FS) 계산식은 식 (3)과 같다.

$$FS=[(1-YI_1)/YJ_2]^{\frac{2}{n}} \quad (3)$$

3.2 단면형상 및 크기의 영향

실험에 사용된 모델의 형상은 Model 1에서 Model 5까지로 그림 4와 같다. Model 1은 수로터널 또는 공동구 등에 사용되고 있으며 Model 2의 경우는 저장 공동이나 교통터널 등으로 이용되고 있는 형상이다. Model 4, 5는 장단축 방향에 따른 역학적 특성들을 비교하기 위하여 설정하였다. 모델의 단면적은 100, 144, 196, 256, 324, 400 m²로 변화시키며 해석하였다. 탄성해석에 사용된 암반의 물성은 탄성계수(E)는 40GPa, 전단계수(G)는 16GPa,

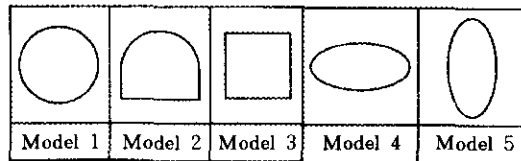


그림 4. 실험모델의 형상

포와송비(ν)는 0.25로서 RMR 70점인 암반의 물성을 가정하였다. 암반에 작용하는 연직응력과 수평응력이 2.7MPa로 일정한 정수압 상태

에서의 공동 천정과 측벽에서의 변위 변화는 그림 5와 같다.

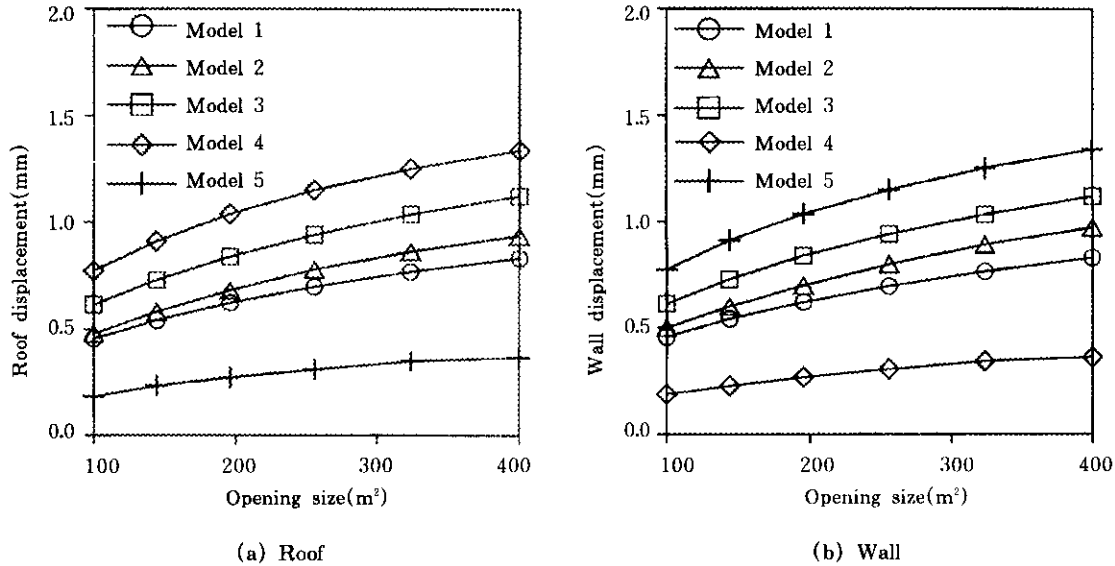


그림 5. 공동의 단면적 변화에 따른 천정과 벽면에서의 변위의 변화

원형공동의 벽면에서의 변위는 이론식에서는 공동의 반지름에 비례하여 선형적으로 나타난다. 그러므로 그림 5에서는 공동의 면적에 대해서 제곱근에 비례하여 나타나게 된다. 또한, 벽면의 곡률반경이 일정한 원형공동을 기준으로 생각하면 곡률반경이 무한대인 정사각형공동의 측벽과 천정에서의 변위는 원형공동보다 항상 크게 나타난다. 그러나 타원형공동의 경우는 장단축의 방향에 따라서 곡률반경이 달라지며 곡률반경이 작은 장축의 끝 부분에서의 변위가 원형공동보다 작게 나타난다. 그리고 이론식에서 벽면에서의 응력집중 크기가 곡률반경에 반비례하여 나타나는 것과는 대조적으로 벽면에서의 변위는 곡률반경에 비례하여 나타난다.

3.3 측압계수의 영향

암반내 작용하는 응력은 중첩된 암반의 중

량에 의한 연직응력과 측압계수에 따른 수평 응력으로 나타나고 있으므로 측압계수의 변화에 따른 공동 주위의 응력과 변위의 발달 양상을 분석하였다. 즉 연직응력을 일정하게 고정하고 수평방향의 응력을 임의로 변화시키며 측압계수를 변화시킬 때 공동주위에 발생하는 최대 주응력은 그림 6과 같고 최대변위는 그림 7과 같이 나타난다.

그림 6에서 Model 2, 3의 경우는 공동주위에 발생하는 최대응력집중계수가 측압계수의 증가에 따라서 증가하지만 다른 모델들의 경우는 최대응력집중계수가 측압계수의 변화에 따라서 감소하다가 증가하는 경향을 나타낸다. 왜냐하면 Model 2, 3의 경우는 최대응력집중이 항상 공동의 모서리부분에 작용하지만 다른 모델들의 경우는 측압계수의 변화에 따라서 최대응력집중이 발생하는 위치가 변하기 때문이다. 즉, Model 1은 $K=1$, Model 4는

$K=1.6$, Model 5는 $K=0.6$ 일 때 공동주위에 발생하는 최대응력집중계수가 가장 작게 나타난다.

측압계수가 1이하로 작을 경우는 연직응력 방향에 대해 곡률반경이 작은 부분에 응력집중이 발생하며 측압계수가 증가함에 따라 수평응력 방향에 대해서 곡률반경이 작은 공동의 천정부나 모서리 부분에서 응력집중이 발생한다. Model 4와 5는 측압계수가 1일 때를 기준으로 반대의 경향을 나타내고 있으며 최대주응력 방향으로 공동의 장축방향을 잡는 것이 응력집중을 최소화할 수 있음을 보여준다. 즉 공동의 형상과 측압계수에 따라 공동 주위에서 발생하는 최대응력집중계수의 크기와 발생 위치가 변화하고 있다.

그림 7은 공동 벽면에서 발생하는 최대변위가 가장 작게 나타날 때의 측압계수(표 2)와 측압계수의 변화에 따른 공동 벽면에서의 최대변위의 변화양상을 알 수 있다. 즉, Model 1에서 Model 3까지의 경우는 측압계수가 1에 가까운 경우 벽면에서의 최대변위가 가장 작게 나타나지만 Model 4, 5는 측압계수가 공동단면의 비 H/W 의 역수와 같을 때 가장 작은

최대변위를 나타내고 있다. 그림 6, 7의 결과를 종합하면 이미 알려진 바와 같이 주응력 방향으로 공동단면의 장축방향을 설정하고 주응력에 수직한 방향으로 작은 곡률반경을 갖는 형상이 상대적으로 응력집중크기와 변위를 제어할 수 있음을 나타낸다. 이는 측압계수가 응력과 변위로 표현되는 공동의 안정성에 대해서 공동의 형상이나 장축방향을 결정 하는데 중요한 변수임을 시사하고 있다. 또한 측압계수와 작용응력에 대하여 신뢰하기 어려운 경우에는 그림 6, 7에서 측압계수에 대한 응력 및 변위의 변화 폭이 가장 작게 나타나는 모델 4의 경우를 선택하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

표 2. 공동 벽면에서 최대변위가 최소화되는 측압계수

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
측압계수(K)	1	1.2	1	2	0.5

3.4 소성영역의 발달 양상

암반내에 존재하는 절리나 단층 또는 풍화정도 등은 일반적으로 암반의 강도를 저하시키

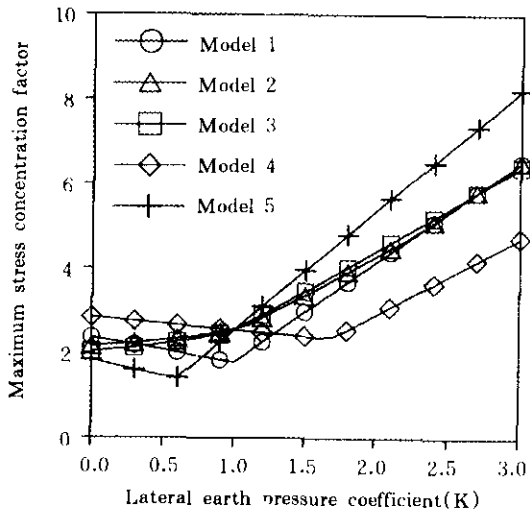


그림 6. 측압계수에 따른 공동주위에서의 최대응력집중의 변화

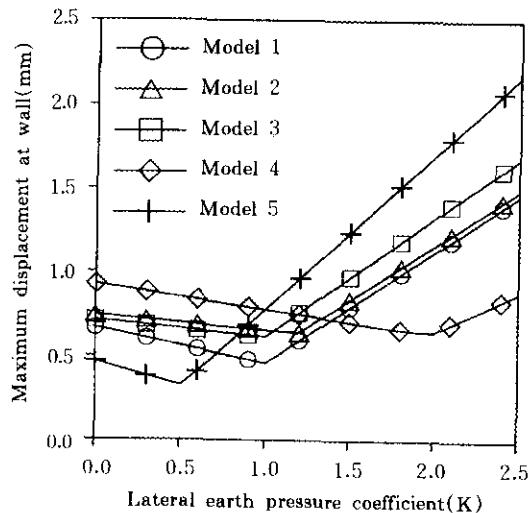


그림 7. 측압계수에 따른 공동 벽면에서의 최대변위의 변화

게 된다. 따라서 암반의 강도는 무결암의 강도보다 상당히 저하되므로 암반의 강도특성을 결정하기 위하여 지하 구조물의 보강을 목적으로 개발된 암반분류법을 이용하였다. 암반의 강도특성은 RMR분류법에서 제안하는 각 점수대의 암질에 대한 점착력과 내부마찰각을 중심으로 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 이용하여 전산해석을 위한 암반의 강도특성을 결정하였다. 본 연구에서는 안전율 2를 유지할 수 있는 조건에서도 암반의 점착력(cohesive strength)은 이제까지 암반분류법(RMR 값)으로 추정해온 점착력의 4배까지 증가시켜 사용할 수 있다는 Hönisch(1995)의 제안에 근거하여 점착력의 크기를 RMR에서 제안하는 점착력의 4배로 하여 모델실험을 위한 암반의 강도특성을 결정하였다. 암반의 일축압축강도 C, 인장강도 T는 식 (4)를 이용하여 결정하였다.

$$C = \frac{2c_m \cos \phi}{(1 - \sin \phi)}, T = \frac{2c_m \cos \phi}{(1 + \sin \phi)} \quad (4)$$

여기서, c_m 은 암반의 점착력, ϕ 는 내부마찰각이다. 탄성계수 E, 전단계수 G는 식 (5)를 이용하여 결정하였다.

$$\begin{aligned} E &= 2RMR - 100 \quad (RMR > 50) \\ E &= 10^{(RMR - 10)/40} \quad (RMR \leq 50), \\ G &= \frac{E}{2(1 + \nu)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 탄성계수 E의 단위는 GPa 이다.

또한, 암반내의 응력상태는 탄성이론과 다르기 때문에 지하암반 구조물의 2차응력에 영향을 미치는 초기응력은 측정지역의 지질구조 및 지형적인 특성에 따라서 상이하게 나타난다. 따라서 먼저 측압계수가 공동주위의 소성영역 발생에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 4의 모델형상에 대해서 RMR 50점인 암반물성을 적용한 탄소성해석을 수행하였다. 작용응력은 탄성해석에서와 같이 연직응력을 2.7MPa로 일정하게 유지하고 수평응력을 변화시켰으며 공동주위에 발생한 소성영역을 공동의 단면

적으로 정규화한 결과는 그림 8과 같이 나타난다. 소성면적의 계산은 요소의 응력상태가 탄성한계를 넘어서 소성거동을 나타내는 요소의 총 면적으로 계산하였다.

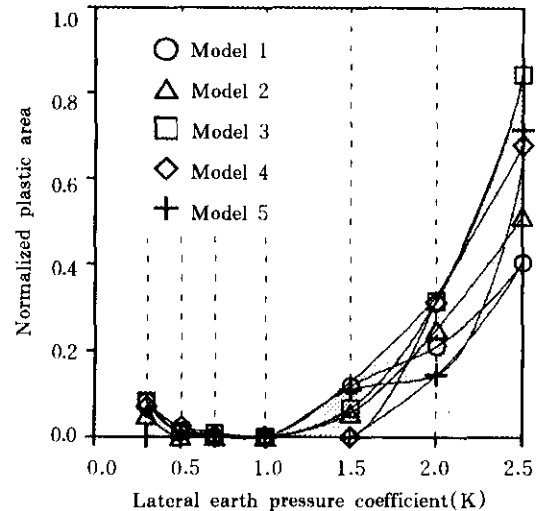
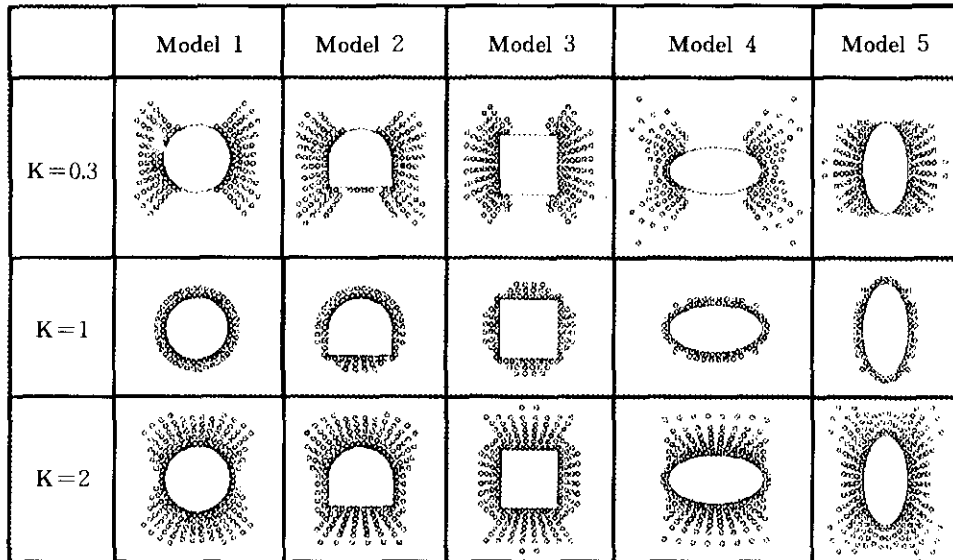


그림 8. 측압계수에 따른 공동주위의 정규화된 소성면적의 변화

그림 8에서 전체적으로 측압계수가 1에 가까울 때 공동주위에 발생하는 소성영역이 가장 적게 나타나고 있으며 측압계수가 1이상으로 증가함에 따라서 모든 Model들에 대해서 소성영역이 증가하고 있다. 그러나 소성영역의 면적이 최소화되는 공동의 형상이 변화하고 있다. 이는 측압계수에 따른 작용응력과 공동의 형상에 의하여 달라지는 2차응력의 크기에 의한 영향을 예상하고 소성영역의 분포위치를 해석하였다. 측압계수의 변화에 따라서 공동주위에 발생하는 소성영역의 분포 위치는 그림 9와 같다. 그림 9의 결과는 소성영역의 발달양상을 가시화하기 위하여 암반에 작용하는 연직응력을 8.1MPa로 설정하였으며 작용응력을 그림 8의 결과보다 3배 증가시켜 해석한 결과이다.



○ : Plastic element

그림 9. 축압계수에 따른 공동주위의 소성영역 분포양상의 변화

그림 9에서 축압계수가 1이하인 K가 0.3인 경우에는 수평응력보다 큰 초기연직응력에 의하여 공동의 측벽부에 응력이 집중된다. 그리고 측벽의 곡률에 따라서 응력집중 크기가 변하며 그 크기에 따라 측벽부의 안전율이 저하된다. 그러므로 소성영역은 측벽부를 중심으로 발달한다. 축압계수가 1인 경우는 공동 주위의 소성영역이 대체적으로 안정적으로 나타나고 있다. 축압계수가 1이상이 되면 연직응력과 수평응력의 영향을 모두 받게 되며 연직응력보다 큰 수평응력의 영향에 의하여 천정부와 바닥부의 안전율이 저하되어 소성영역이 발생한다. 그러나 축압계수나 측벽의 높이가 증가하게 되면 측벽부에도 소성영역이 발생하므로 전체적인 소성영역의 급격한 증가를 초래한다.

4. 지하 저장공동에의 적용

지하 저장시설은 다른 시설물에 비하여 공동의 단면이 크므로 구조적인 안정성과 함께 시

공성과 경제성을 고려한 이상적인 단면이 결정되어야 한다. 따라서 전장에서 분석한 설계변수들의 특징들을 현재 국내의 지하 유류비축공동으로 널리 사용되고 있는 마제형 공동에 적용하여 보았다. 해석에 사용된 공동의 모델은 그림 10과 같으며 현재 건설된 저장공동의 천정은 완전 원형이 아니지만 본 연구에서는 공동의 천정이 반원인 공동으로 해석을 수행하였다.

분석 방법은 측벽의 높이 변화가 공동주위에 발생하는 최대변위 변화에 미치는 영향 및 소성영역의 발달양상을 중심으로 안정성 해석을 수행하였다. 공동 천정의 심도 D_1 은 초기 공동의 위치 설계시에 결정되지만 공동 바닥까지의 심도 D_2 는 공동의 높이 H에 따라 변하게 된다. 즉 공동의 높이가 증가함은 공동 바닥부분이 점점 심부에 위치하게 됨을 나타내며 그만큼 작용하는 응력이 증가하게 된다. 또한 공동의 면적도 함께 증가하게 된다.

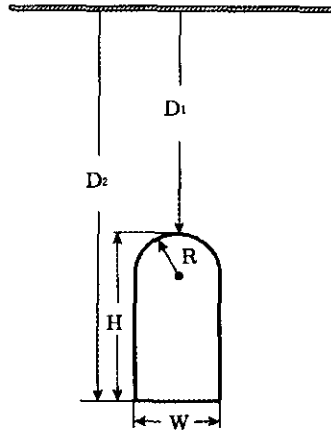


그림 10. 저장공동 해석모델의 개요

4.1 최대변위 발생위치의 변화

주어진 제반조건 내에서 공동의 높이 증가는 저장공동의 단면적 증가라는 경제적인 이점으로 작용할 수 있으나 그와 병행하여 발생하는 변위의 증가는 공동의 안정성뿐만 아니라 보강에 필요한 비용의 증가를 초래하게 된다. 따라서 공동 주위에서 발생하는 최대변위의 크기는 공동 높이의 증가에 따른 변위의 증가량이 그 중요성을 갖게 된다. 먼저 $D_1=100\text{m}$, $W=20\text{m}$ 그리고 $R=W/2$ 일 때 공동의 높이 H 의 변화에 대한 영향을 분석하기 위하여 공동의 폭과 높이의 비율인 공동단면의 비 H/W 를 변화시키며 해석을 수행하였다. 즉 공동의 높이만을 증가시키며 공동의 면적을 변화시켰다. 해석에 사용된 암반의 물성은 RMR 90인 암반 조건의 물성을 사용하였고 암반내 작용하는 초기응력은 심도에 따른 초기응력식인 식 (6)을 이용하였다.

$$\sigma_v = 0.027 \cdot Z$$

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \quad (6)$$

여기서, 응력의 단위는 MPa, Z 는 미터 단위의 심도, K 는 측압계수이다. 측압계수와 공동의 높이변화에 따른 최대변위의 발생위치 및 크기의 변화는 그림 11과 같다.

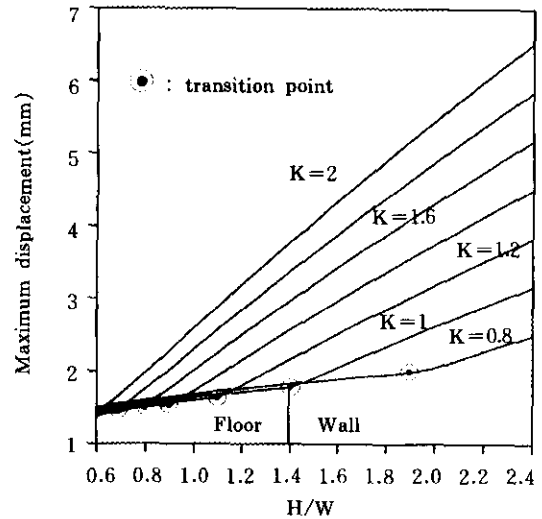


그림 11. 공동의 H/W 변화에 따른 최대변위의 변화

그림 11은 대표적으로 K 가 1일 때 공동의 높이와 폭의 비인 H/W 가 1.4이하이면 공동의 바닥에서 최대변위가 발생하고 H/W 가 1.4 이상이면 공동의 측벽에서 최대변위가 발생하게 된다. 공동의 높이가 증가함에 따라서 그림 11의 천이점을 중심으로 공동의 높이변화에 따라서 일정 정도의 측압계수 범위 내에서는 최대변위의 발생 위치가 변화한다. 즉 공동의 높이가 증가함에 따라서 최대변위의 발생 위치는 천이점을 중심으로 공동의 바닥에서 측벽으로 전환하고 있다. 그리고 측압계수가 증가함에 따라서 측벽에서 발생하는 H/W 의 증가에 따른 최대변위의 구배는 점점 증가하지만 공동의 바닥에서 최대변위가 발생하는 경우는 H/W 증가에 따른 변위구배가 공동 측벽에서 최대변위가 발생하는 경우의 변위구배보다 상당히 작게 나타나고 있다. 이는 공동의 설계시 주어진 측압계수의 조건에서 공동의 높이증가가 최대변위의 증가에 미치는 영향을 고려할 때에 가능한 최대변위의 발생위치는 공동의 바닥에 위치하도록 공동의 높이와 폭의 비율을 결정하는 것이 보다 유리함을 나타낸다.

그림 11의 결과는 최대변위의 발생위치가 항상 공동의 바닥이나 측벽에서 발생하고 있으며 축압계수에 대한 보다 세밀한 해석을 통하여 최대변위의 발생위치를 축압계수 및 공동의 H/W와 상관성을 나타내는 그림 12에서 결정할 수 있다.

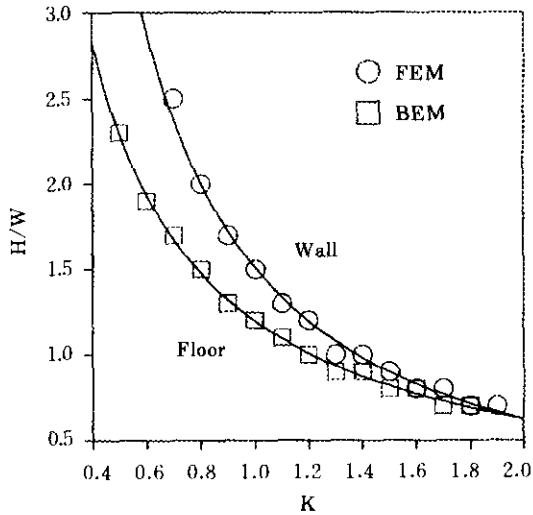


그림 12. 축압계수와 공동의 H/W 변화 및 최대변위 발생위치와의 관계

그림 12는 축압계수와 공동의 높이변화에 따른 최대변위 발생위치 변화의 경계를 나타내고 있다. 예를 들어 축압계수가 1이고 H/W가 1인 공동의 경우는 공동의 바닥에서 최대 변위가 발생하게 됨을 나타낸다. 그러나 같은 축압계수 조건에서 H/W가 2가되면 최대변위는 공동의 측벽에서 발생하게 된다. 그림 11에서 공동의 최대변위는 바닥에서 발생할 때가 측벽에서 발생하는 경우보다 공동의 높이 증가에 따른 변위의 증가량이 작으므로 그림 12에서 최대변위의 발생위치를 공동의 바닥에 위치시키기 위해서는 축압계수가 증가할수록 공동의 높이는 감소되어야함을 나타낸다. 즉, 주어진 축압계수 조건에서 공동의 측벽에 최대변위가 발생할 경우는 H/W가 그래프에 가깝게 위치

하도록 공동의 높이를 결정하여야 최대변위의 크기를 최소화할 수 있으며 그래프의 위쪽으로 멀어질수록 최대변위의 크기가 증가하게 된다. 그림 12를 이용하여 공동의 굴착시에 공동 벽면에서 발생할 최대변위의 위치를 축압계수 K와 공동단면의 비인 H/W를 이용하여 판단함으로써 주어진 축압계수의 조건에서 공동의 높이 증가에 따라서 발생하는 변위증가량을 최소화할 수 있는 공동의 높이를 판단할 수 있다.

4.2 소성영역의 발달양상

4.1절에서는 탄성해석을 통한 최대변위의 발생양상을 중심으로 해석을 수행하였다. 그러나 공동의 안정성은 공동주위에 작용하는 응력과 암반의 강도특성에 의하여 결정되는 암반의 소성상태에 의하여 보다 커다란 영향을 받게 된다. 따라서 탄소성 해석을 통하여 공동주위 소성영역의 발달양상을 분석하였다. 탄소성해석은 소성영역의 발달양상을 가시적으로 분석하기 위하여 공동 천정의 심도를 300m로 설정하여 초기응력을 증가하였고 암반물성은 RMR 80점인 암반조건으로 수행하였다. H/W와 축압계수의 변화에 따른 공동주위 소성영역의 크기는 그림 13과 같이 나타난다.

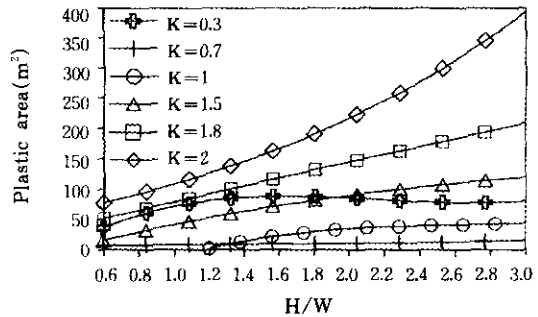


그림 13. 공동의 H/W와 축압계수가 공동주위의 소성영역 발생에 미치는 영향

그림 13에서 축압계수가 2인 경우는 H/W가 1이하인 경우에도 높은 수평응력에 의하여 천정과 바닥부에 소성영역이 발생하므로 전체

적으로 가장 많은 소성영역을 나타내고 있으며 공동의 높이가 증가하게 되면서 측벽부에도 소성영역이 발생하므로 소성영역의 면적구배가 가장 크게 나타난다. 축압계수가 1보다 큰 경우는 전체적으로 H/W의 증가에 따라서 소성영역의 면적이 증가하는 경향을 보이고 있다. 축압계수가 0.3인 경우는 H/W가 약 1.5인 경우를 중심으로 소성영역의 면적이 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 있으나 전체적으로 소성영역의 면적이 크게 나타나고 있다. 이는 H/W의 증가에 따라서 초기연직응력 방향으로 공동의 장축방향이 전환하게 되어서 나타나는 결과이며 또한 H/W가 증가함에 따라 공동주위에 작용하는 초기응력 중에서 봉압의 효과를 나타낼 수 있는 수평응력의 크기가 아주 작기 때문에 나타나는 결과이다. 공동의 H/W가 증가함에 따라서 축압계수가 1이하인 경우에는 소성영역의 증가량이 작거나 감소하고 있으며 축압계수가 0.7인 경우가 H/W의 증가에 대해서 소성영역의 발달이 가장 안정적으로 나타나고 있다. 공동의 단면적 증가와 그에 따라 발달하는 소성영역의 크기는 주어진 축압계수의 조건에 따라서 그 효율성이 달라질 수 있으므로 소성영역의 허용범위 내에서 최대의 굴착 단면적을 결정하여야 한다.

위 결과를 토대로 공동단면의 비 H/W와 축압계수 K를 일정범위 내에서 임의로 변화시키며 해석한 총 475개의 데이터 포인트를 이용하여 축압계수와 공동의 높이변화에 따른 공동주위 소성영역의 발생가능성을 나타내었다. 그림 14는 발생 가능한 절대적인 소성영역의 크기를 나타낸 것이고 그림 15는 발생한 소성영역의 크기를 공동의 단면적으로 정규화하여 나타낸 결과이다.

그림 14에서 H/W가 1 이하인 경우 즉, 공동의 폭이 공동 단면의 장축방향인 경우는 축압계수가 약 0.7에서 1.4일 때에 상대적으로 소성영역의 발생에 대해서 안정하고 H/W가 1 이상인 경우는 축압계수가 약 0.7에서 1사이일 때 보다 안정하다. 그러므로 전체적으로 소성영역의 커다란 증가 없이 공동의 높이 증가가

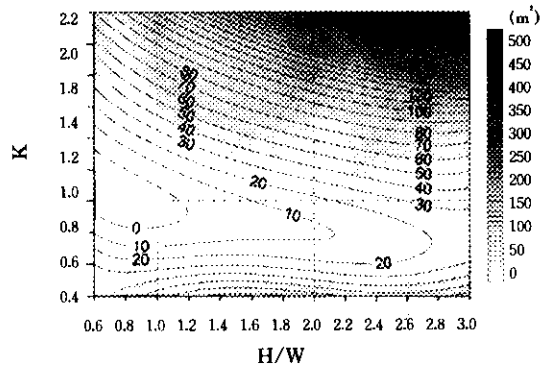


그림 14. 축압계수와 공동의 H/W 변화에 따른 공동주위의 소성면적의 분포

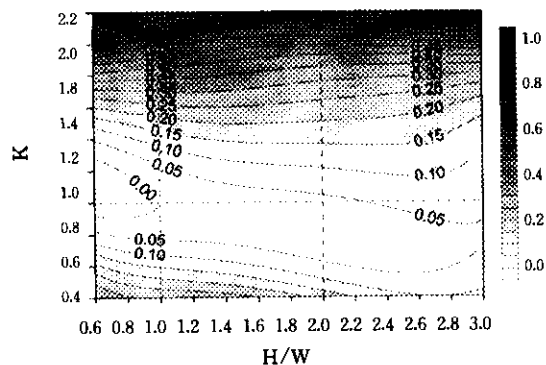


그림 15. 축압계수와 공동의 H/W 변화에 따른 공동주위의 정규화된 소성면적의 분포

가능한 축압계수의 범위는 약 0.7에서 1사이라고 할 수 있다. 그러나 축압계수가 1 이상이고 H/W가 2 이상인 경우와 같이 축압계수의 증가에 따라서 소성영역이 급격히 증가하는 경우를 볼 수 있으며 이는 공동의 측벽이 높아지고 축압계수가 커질 수록 공동의 측벽에 발생하는 소성영역이 증가하게 되어 나타나는 결과이다. 그림 15는 발생한 소성영역의 크기를 H/W에 따라서 변화하는 공동의 단면적으로 정규화한 크기를 나타낸 것으로 그림 14와 비교하여 축압계수가 약 0.7에서 1.4 사이에서는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 축압계수가 0.7이하로 아주 작거나 1.4이상으로 아주 큰 경우는

H/W를 1 이하로 작게 설정하거나 2이상으로 크게 설정하게 되면 공동의 굴착 단면적에 비하여 보강대상이 되는 소성영역이 상대적으로 크게 나타나므로 비경제적임을 의미한다. 암질이나 초기응력의 크기에 따라서 소성영역의 크기가 변화할 수 있지만 위 결과에서 가장 중요한 점은 축압계수가 큰 상황에서는 공동의 높이를 증가시켜서 공동의 단면적을 증가시키면 공동주위 소성영역의 범위가 크게 증가되므로 안정성의 문제뿐만 아니라 경제적으로도 비효율적일 수 있다는 것이다. 일반적으로 암반내 공동을 건설할 때 공동의 위치가 결정되면 암질, 초기응력 그리고 축압계수가 결정되어지므로 경제적인 굴착 단면적의 결정을 위해서는 H/W의 변화가 이용될 수 있다.

현재 국내에 건설된 지하저장공동의 경우를 본 연구 결과에 적용하여 보았다. 문헌에 나타난 국내의 지하 저장공동은 대개 RMR 70점에서 RMR 80점인 암반내에 위치하고 있으며 공동의 높이는 20m~30m, 공동의 폭은 15m~18m의 규모로 건설되고 있으므로 공동단면의 비인 H/W는 약 1.1에서 1.7사이에 있다(이회

근, 임한옥, 1993). 따라서 RMR 80점인 암반을 대상으로 수행한 위 결과에 국내의 지하 저장공동인 U-2, U-1, L-1 그리고 L-1추가기지에 대한 H/W와 축압계수의 조건을 적용하면 그림 16과 같이 나타난다. 각 공동이 위치하고 있는 암반내의 축압계수는 각각 1.5, 2.5 그리고 2.2 이다.

그림 16의 결과로 H/W의 증가에 따른 소성영역의 증가에 대해서 U-2 기지가 U-1 기지보다 안정한 상태라고 할 수 있다. 그림 16이 나타내고 있는 소성영역의 크기는 암질과 초기응력의 크기 및 공동의 정확한 형상에 따라서 달라질 수 있으므로 공동의 절대적인 안정성 평가를 위한 기준이 될 수는 없다. 그러나 L-1 기지와 동일한 제반조건에서 공동의 높이가 5m 증가되어 건설된 L-1추가기지의 경우는 L-1기지의 폭이 18m이고 단면적이 354m²이므로 공동의 단면적 증가율 약 23%에 대해서 소성영역의 증가율이 약 20%가 발생함을 예측할 수 있다. 이와 같이 본 연구를 통하여 도출한 결과는 동일한 제반조건 내에서 공동의 단면적 증가율에 따른 소성영역의 증가율을 예측함으로써 경제적인 단면의 결정에 도움을 줄 수 있다.

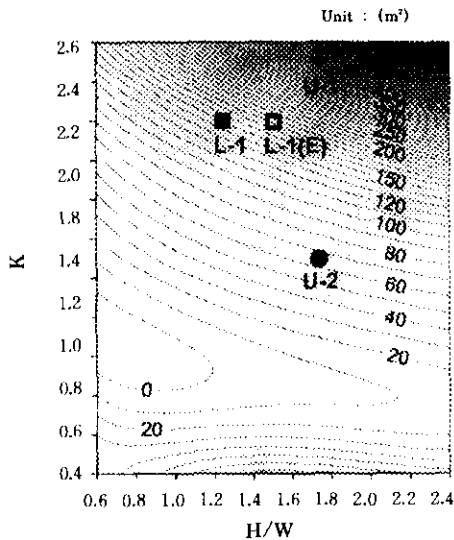


그림 16. 국내 지하저장공동의 축압계수와 H/W 변화 및 소성영역의 분포가능성 비교

5. 결 론

본 연구는 암반내 공동의 굴착으로 인하여 발생할 수 있는 공동주위의 응력집중, 변위 및 소성영역의 발달양상을 중심으로 수행되었으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

공동벽면의 곡률반경은 벽면에 작용하는 주응력과 변위의 크기를 변화시키며 일반적으로 벽면의 곡률반경이 클수록 벽면에 작용하는 주응력은 감소하고 변위는 증가하게 된다. 그러나 축압계수에 따라서 초기응력의 크기와 방향이 달라지므로 최대주응력의 크기와 방향에 따라서 응력집중과 변위가 제어되도록 공동단면의 장축방향 및 벽면의 곡률반경을 결정하여야 한다.

공동의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 암

반의 소성상태는 암질, 초기응력의 크기 및 측압계수의 영향을 크게 받으며 공동의 굴착으로 인하여 발생하는 2차응력의 크기와 암반의 강도특성에 의하여 소성영역의 발생위치 및 범위가 크게 변화하고 있다.

일반적인 지하 저장공동의 형상인 마제형 공동은 측압계수와 공동단면의 비에 따라서 최대변위의 발생위치가 변화하고 있다. 최대변위의 발생위치는 공동의 높이 증가에 따른 변위의 증가량이 바닥보다 측벽에서 상당히 크게 나타난다. 공동의 보강과 안정성의 문제를 고려하면 최대변위의 발생위치는 가능한 공동의 바닥에 위치하도록 공동단면의 비를 결정하는 것이 보다 유리하며 주어진 측압계수의 조건에서 공동의 측벽에서 최대변위가 발생할 경우에는 H/W 가 최대변위의 크기를 최소화할 수 있도록 결정되어야 한다.

공동 주위에 발생하는 소성영역의 크기는 암질과 초기응력의 크기뿐 아니라 측압계수와 H/W 에도 큰 영향을 받고 있으며 전체적으로 소성영역의 커다란 증가 없이 공동의 높이 증가가 가능한 측압계수의 범위는 약 0.7에서 1 사이로 나타났다. 암반내 공동을 건설할 때 공동의 위치가 결정되면 암질, 초기응력 그리고 측압계수가 결정되어지므로 경제적인 굴착단면적의 결정을 위해서는 H/W 의 변화가 이용될 수 있다. 측압계수가 아주 작은 경우는 공동단면의 비에 따라서 굴착단면적에 비하여 소성영역이 상대적으로 크게 나타나므로 비경제적이며 측압계수가 상당히 큰 상황에서는 공동의 높이를 증가시켜서 공동의 단면적을 증가시키면 공동주위 소성영역의 범위가 크게 증가되어 안정성의 문제뿐 아니라 경제적으로도 비효율적이다.

현재 국내에 건설된 유류비축공동의 경우를 본 연구 결과에 적용하여 본 결과 공동의 높이 증가에 따른 소성영역의 증가에 대해서는 U-2 기지가 U-1 기지보다 안정한 상태라고 할 수 있다. L-1기지와 동일한 제반조건에서 건설된 L-1추가기지의 경우는 공동의 단면적 증가율 약 23%에 대해서 소성영역의 증가율이 약

20%가 발생함을 예측할 수 있다. 소성영역의 크기는 암질과 초기응력의 크기 및 공동의 정확한 형상에 따라서 달라질 수 있으므로 위 결과는 공동의 절대적인 안정성 평가의 기준은 아닐지라도 동일한 제반조건 내에서 단면적 증가율에 따른 소성영역의 증가율을 예측함으로써 경제적인 저장공동단면의 결정에 도움을 줄 수 있으리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1996년 한양대학교 교내연구비지원으로 수행되었으며 한국자원연구소(류창하 박사)의 지원에도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김득기(1989), "현장응력, 공동의 형태 및 위치가 인접한 두 지하공동의 안정성에 미치는 영향", 석사학위논문, 한양대학교, pp.12~15.
2. 김종우(1996), "천반 곡률반경에 따른 아치형 공동의 변형거동에 관한 연구", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제6권, 11호, pp.10~18.
3. 이회근, 임한옥(1995), 터널·지하공간 굴착공학, 구미서관, pp.619~640.
4. 한국자원연구소(1997), 지하 저장공동의 최적형상과 규모에 관한 모델 연구.
5. Bieniawski, Z. T.(1989), *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, pp. 51~72.
6. Boughrrou, R. and Reddish D. J.(1993), "Effects of Shape, Rock Anisotropy and Stress Field upon the Development of Yield Zones around Tunnels in Rock", *Proc. of the International Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, Istanbul, pp.215~222.
7. Cristescus, N. D.(1995), "The Optimal Shape of Rectangular-like Caverns", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.32, No.34, pp.285~300.
8. Gercek, H.(1993), "Qualitative Prediction of Failures around Non-circular Openings",

- Proc. of the International Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, Istanbul, pp.727~732.
9. Gercek, H.(1996), "A Comparative Study of the Effect of In-situ Stress Field on the Stability of Underground Openings", *Proc. of EUROCK '96*, Torino, Vol.2, pp.869~874.
 10. Hoek, E. and Brown, E. T.(1980), *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, pp.87~126.
 11. Hönisch, K.(1995), "Keynote Lecture:Conclusions from 100 Constructed Power Caverns for Future Planning", *Safety and Environmental Issues in Rock Engineering, Proc. of EUROCK '93*, Portugal, Vol.2, pp.1013~1027.
 12. Obert, L. and Duvall, W.(1967), *Rock Mechanics and the Design of Structure in Rock*, John Wiley & Sons, New York, pp.113~129.

(접수일자 1998. 1. 5)