

지하공동굴착의 수치해석방법 적용기준 설정연구 A Study on the Numerical Modeling Criteria for Underground Openings

이 경 진(Lee, Kyung-Jin)

한국원자력연구소

요약/Abstract

본 연구에서는 지하공동의 해석적용기준을 제시하기 위하여 암반의 역학적 특성과 지하 공동에 작용하는 초기응력을 검토하였고, 지하암반을 선형 탄성의 균질한 암석으로 가정하여 공동주위의 거동을 검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 지하암반공동의 유한요소경계는 공동의 중심으로 부터 공동 반지름의 6배이상 으로 하여야 한다.
- 원형공동의 경우, 수직응력과 수평응력의 비인 K_0 값이 증가함에 따라 공동측면에서는 변형이 공동의 중심방향으로 증가하고, 공동상부에서는 공동의 중심방향으로 변형이 감소한다. 또한 K_0 값이 1/4보다 작을 경우 공동주변암반체에서 인장영역이 발생함을 알 수 있었다.
- 마제형(Horse-Shoe Shape)인 공동 I과 Powerstation 형인 공동 II에 발생하는 변위는 원공동과 거의 비슷한 경향을 나타내고, 공동 I, II에 발생하는 응력집중은 공동의 벽면과 바닥의 교차부에서 발생하며, 공동 II에서 보다 큰 응력집중이 발생함을 알 수 있었다.

The purpose of this study is to propose the numerical modelling criteria for underground opening, rock mass continuum is regarded as homogeneous rock behaved linear elastic. The results of this study are summarized as follows:

- Boundaries of the finite element mesh should be located at least 6 radii away from the center of the opening.
- For circular openings, tension only developed when K_0 was less than one-fourth.

As the ratio of initial horizontal to vertical stress increased, the inward springline movement increased and the inward crown movement decreased.

- The displacement patterns developing for opening I shaped horse-shoe and opening II shaped powerstation are similar to those for circular openings. For both type opening I and opening II, stress concentrations develop at the intersection of the wall and floor. Greater stress concentrations are found for the type opening II.

서 언

국내의 원자력발전 비중이 증가함에 따라 원자력발전의 부산물인 방사성폐기물의 양이 매년 증가하고 있어서 정부주도하에 방사성폐기물의 처분을 위한 대책을 수립하여 방사성폐기물 처분장시설의 건설을 추진중이다.

방사성폐기물을 처분하는 방법은 여러가지가 연구되어 왔지만 지층내 깊은 곳의 양호한 암반을 굴착하여 처분장을 건설한 후 방사성폐기물을 처분하는 동굴처분방법이 가장 안전한 것으로 알려져 있다. 특히 우리나라와 같이 인구밀도가 높고 국토가 협소하며 양호한 암반을 가진 지층이 분포되어 있는 곳에서는 동굴처분방법이 가장 적합한 것으로 판단되어 이를 적극적으로 검토하고 있다.

지하암반공동을 굴착하여 방사성폐기물 처분시설로 활용할 경우 공동주변의 공학적 안정성을 확보하기 위해서는 암반공동의 계획 단계에서 부지조사를 충분히 수행한 후에 공동의 단면형상과 굴착방법을 선정하게 된다.

지하암반을 굴착하여 건설하는 암반공동은 지상에 축조되는 일반 구조물과 달리 중요한 몇가지 특징을 가지고있다.

대표적인 특징으로는 공동구조체의 크기에 비하여 응력의 영향이 미치는 영역의 크기가 상당히 크다는 점과 암반체의 역학적 특성이

매우 복잡하다는 점이다. 그리고 지하공동의 구조거동은 굴착전 암반체에 재하되어 있었던 초기응력의 크기와 공동굴착에 따라 발생하는 공동주변에서의 응력재분배에 가장 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 지하공동굴착에 따른 암반의 거동을 파악하기 위하여 지하공동 해석영역의 결정, 포아슨비(Poisson's Ratio) 또는 초기응력(Initial Stress) 등이 지하공동에 미치는 영향, 지하공동 해석영역의 자중이 미치는 범위, 동굴의 형상에 따른 응력변화 등을 검토하였다.

공동주변에서의 응력변화

지하암반내에 공동을 굴착하면 굴착전 암반내의 평형에너지가 파괴되므로 새로운 평형상태를 유지하기 위하여 굴착된 공동주위에는 에너지의 재분배현상이 발생하게 된다. 이러한 에너지의 재분배는 굴착부주변에서 응력 집중 또는 이완 등의 현상을 유발시키며, 만일 새로운 응력장의 형성시 응력이 동굴주변 암반의 강도보다 크게 발생하였을 경우 암반은 항복상태에 도달하여 결국 파괴되는 결과를 초래한다. 여기서, 굴착전 즉 인위적인 변형이 가해지기 전에 암반에 존재하는 자연상

태의 응력을 초기응력(Initial Stress, Primary Stress, Virgin Stress)이라 하며, 굴착 등과 같은 인위적인 변형에 의하여 교란된 응력을 2차응력(Secondary Stress), 또는 유도응력(Induced Stress)이라 한다.

본 절에서는 굴착전 암반내에 존재하는 초기응력의 분포특성과 초기응력장내에 공동을 굴착하였을 경우 굴착으로 인하여 공동주변에서 발생하는 응력의 재분배현상을 검토하였다.

굴착전 지하암반의 초기응력

현장암반내의 초기응력은 암석의 생성과정과 생성이후의 모든 지질작용, 지각운동, 암석의 변형특성 뿐만 아니라 암반내의 수분, 지열, 그리고 인접암석과의 결속력 등에 따라서 그 크기와 방향이 매우 달라지게 된다.

초기응력의 연직성분

암반내 임의점에서 초기응력의 연직성분은 단층, 습곡 등과 같은 지질학적 운동에 의한 영향과 불연속면의 영향때문에 측정하는 위치에 따라 다양한 값을 나타낸다. 그러나 일반적으로 임의의 깊이에서 연직응력은 재하된 암반의 중량에 가장 큰 영향을 받기 때문에 탄성론에 의하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_v = \gamma y \quad (1)$$

여기서, γ 는 재하된 암반의 평균단위중량, y 는 지표면으로부터의 깊이, σ_v 는 깊이 y 에서의 연직응력이다.

초기응력의 수평성분

암반내 임의점에서 초기응력의 수평성분은 지반특성과 불연속면의 분포 등에 따라 크게 달라진다. 연직응력크기에 대한 수평응력 크기의 비로서 정의되는 초기응력계수 K_0 값은 현장측정으로부터 직접 구하거나 암반의 재료특성과 하중 및 경계조건 등을 이용하여 수치해석적으로 계산할 수 있지만 이는 많은 가정을 내포하고 있다.

초기응력의 수평성분에 대한 가장 간단한 계산방법은 탄성론에 의한 다음 식을 이용하는 방법이다.

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v = \left\{ \nu / (1 - \nu) \right\} \sigma_v \quad (2)$$

여기서, σ_h 는 수평응력을 의미하며, ν 는 포아슨비, σ_v 는 연직응력을 의미한다.

Fig. 1의 침식과 같은 지질학적 운동을 경험한 암반체의 깊이에 따른 초기응력계수 K 값은 Δy 만큼의 연직응력감소로 인하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$K = K_0 + \left\{ \left(K_0 - \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \Delta y \right\} \frac{1}{y} \quad (3)$$

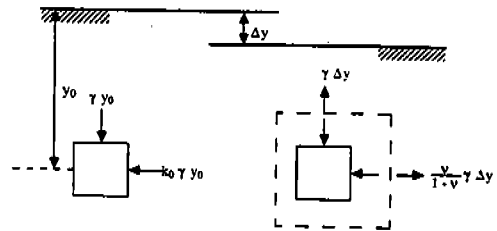


Fig. 1 The change of initial stress duing to corrosion

굴착후 공동주변의 응력분포

지하암반내에 공동을 굴착하였을 경우 암

반내의 초기응력은 굴착으로 인하여 교란되며 공동주변에 새로운 응력장을 형성하게 된다. 이때 굴착후에 발생하는 공동주변에서의 응력 교란은 굴착하고자 하는 공동의 형상과 크기, 지반특성, 굴착전 암반내의 초기응력상태 등과 밀접한 관련이 있다.

2차원 평면거동을 하는 탄성체지반에서의 공동굴착으로 인하여 발생하는 공동주변의 응력분포에 관한 이론적 연구는 Jaeger와 Cook, Obert와 Duvall, Kirsch, Greenspan, Denkhaus, Muskhelishvili 등과 같은 많은 학자들에 의하여 제시된 바 있다. 이들은 초기 응력장내에서 적절한 가정을 도입하여 구성한 평형방정식과 적합방정식을 경계조건과 재료의 구성관계를 사용함으로써 Fig. 2와 같이 수직 및 수평방향 등분포하중을 받고 있는 원형공동주변의 응력분포를 파악하였다. 이들의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

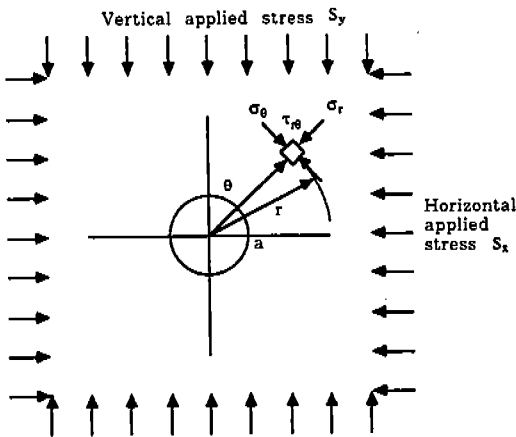


Fig. 2 Circular opening in a stressed elastic body

$$\sigma_r = \frac{(S_x + S_y)}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{(S_x - S_y)}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(S_x + S_y)}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{(S_x - S_y)}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{(S_x - S_y)}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (6)$$

$$u = \frac{1}{E} \left[\frac{S_x + S_y}{2} \left(r + \frac{a^2}{r}\right) + \frac{S_x - S_y}{2} \left(r - \frac{a^4}{r^3} + \frac{4a^2}{r}\right) \cos 2\theta \right] - \frac{\nu}{E} \left[\frac{S_x + S_y}{2} \left(r - \frac{a^2}{r}\right) - \frac{S_x - S_y}{2} \left(r - \frac{a^4}{r^3}\right) \cos 2\theta \right] \quad (7)$$

$$v = \frac{1}{E} \left[-\frac{S_x - S_y}{2} \left(r + \frac{2a^2}{r} + \frac{a^4}{r^3}\right) \sin 2\theta \right] - \frac{\nu}{E} \left[\frac{S_x - S_y}{2} \left(r - \frac{2a^2}{r} + \frac{a^4}{r^3}\right) \sin 2\theta \right] \quad (8)$$

여기서, σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$, u , v 는 각각 원형공동중심점으로 부터 (r, θ) 만큼 떨어진 점에서의 법선응력, 접선응력, 전단응력, 법선변위, 접선변위를 나타내고, ν 는 암반체의 포아손비를 나타내며, a 는 공동의 반경을 의미한다.

지하공동의 해석기준

지하암반공동은 초기응력의 분포상태, 암석의 재료특성 등에 따라 거동에 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 지하공동의 해석기준을 제시하기 위해서 지하암반을 선형 탄성(Linear Elastic)의 균질한 암석

(Homogeneous Rock)으로 가정하여 지하암반 공동의 구조해석을 수행하였다. 해석은 유한 요소법을 사용하여 작성된 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다.

해석영역의 크기

지하암반공동과 같은 무한영역문제를 해석할 경우 해석과정에서 고려하여야 할 중요한 사항중의 하나는 반무한영역 중에서 하중의 영향이 미치는 범위까지 포함되도록 해석 영역의 크기를 결정하는 일이다.

본 절에서는 Fig. 3에 나타난 지하암반공동의 합리적인 해석영역의 크기를 결정하기 위하여 해석영역은 지하공동의 반지름 $r=10m$, 전체 해석모델의 크기는 $3r(30m)$ 에서 $9r(90m)$ 까지 증가시키면서 검토하였다. 각 경우의 해석영역내에서 하중은 초기응력으로 수평과 수직방향으로 동일한 $\sigma_x = 1.0 t/m^2$, $\sigma_y = 1.0 t/m^2$ 를 작용시킨 상태에서 반지름 $r=10m$ 의 원형공동을 굴

착하였다. 해석모델의 경계조건은 Fig. 3에 나타난 바와 같고, 각 경우의 해석영역내에서 요소는 평면변형요소(Plane Strain Element)를 사용하였다.

Fig. 4는 해석영역을 증가시킴에 따라서 Fig. 3에 표시한 원형공동주변 절점 A에서 B까지의 수직변위를 나타낸 그림이다. 해석영역을 $3r(30m)$ 로 모형화하여 구한 동일점 B에서의 수직변위는 이론식을 이용하여 구한 동일점 B에서의 수직변위에 비하여 72.66%, $4r(40m)$ 인 경우는 83.2%, $5r(50m)$ 인 경우는 88.8%, $6r(60m)$ 인 경우는 92%, $9r(90m)$ 인 경우는 96%의 값을 나타내어서 해석영역을 $6r$ 이상으로 모형화했을 경우에는 이론해와 8% 이내의 차이를 나타내고 있다.

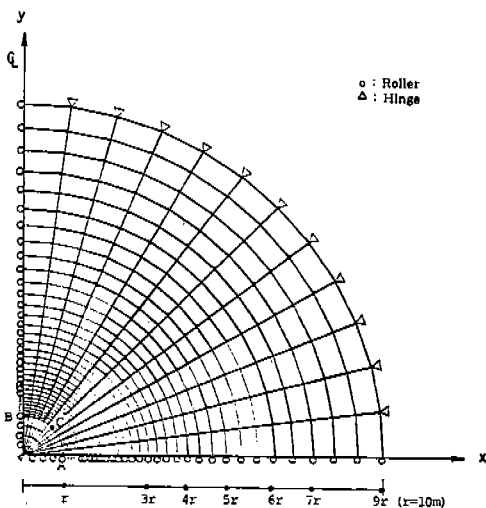


Fig. 3 Finite element mesh for opening

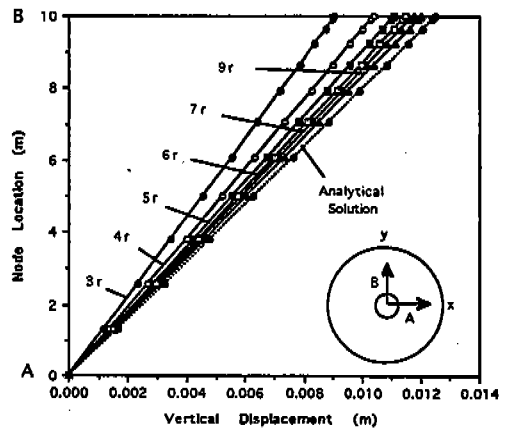


Fig. 4 Vertical displacements along the face of a opening

Fig. 5는 해석영역의 증가에 따라 원형 공동주변 절점 A에서 B까지의 수직응력을 나타낸 그림이다. 해석영역을 $3r(30m)$ 로 모형화하여 구한 절점 A에서의 수직응력은 이론식을 이용하여 구한 동일점에서의 수직응력에

비하여 78.8%, 5r(50m)인 경우는 90.6%, 6r(60m)인 경우는 93.5%, 9r(90m)인 경우는 97.8% 정도의 값을 나타내고 있다. 이상의 결과에서 해석영역을 6r이상으로 모형화할 때 수직변위는 이론해와 8%, 수직응력은 6%이내의 오차를 나타내고 있기 때문에 Fig. 3에 나타난 암반공동의 해석시 해석영역은 원형공동 반지름 r의 6배이상으로 모형화할 때 이론해에 근접한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

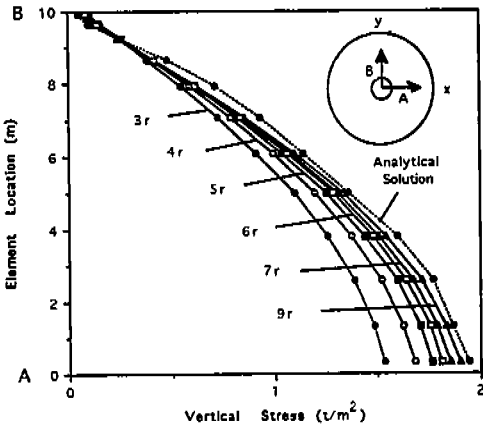


Fig. 5 Vertical stresses along the face of a opening

재료특성치의 영향

지하암반공동을 굴착할 때 공동주위에서 발생하는 응력, 변위 등의 거동은 암석의 재료특성에 의해서도 많은 영향을 받는다. 이러한 거동을 유한요소법을 이용하여 수치해석하고자 할 경우 공동주위의 거동은 암석의 포아슨비에 영향을 받는다고 알려져 있다.

본 절에서는 지하암반공동을 굴착할 때 재료특성치로서 포아슨비가 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 제1절에서 제시한 해석영역 6r(60m)을 기준으로 하여 해석하였고, 해석모델은 Fig. 6에 나타나 있다. Table. 1

에 나타난 암반의 재료특성값을 적용하였고 암석의 포아슨비가 0.1~0.4 범위에 걸쳐 분포하므로 초기응력이 일정한 상태에서 해석에 사용된 포아슨비는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 나누어서 각각 해석을 하였다.

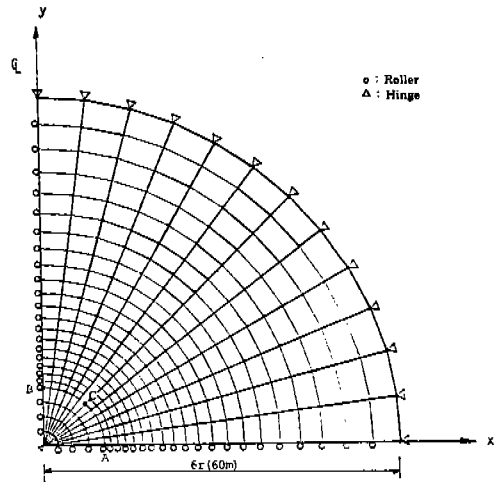


Fig. 6 Finite Element Mesh

Table 1. Material Properties

	Value
Elastic Modulus ($\times 10^6 \text{ t/m}^2$)	4.59
Poisson's Ratio	0.22
Density (t/m^3)	2.69

- Number of Nodes : 313
- Number of Elements : 288

Fig. 7은 포아슨비에 따라서 최대주응력을 초기최대주응력의 비로 나타낸 그림이다. 그림에서 σ_1 / σ_{v_i} 는 공동주위에서 포아슨비가 증가함에 따라 큰 변화는 나타나지 않고 있다. 포아슨비가 0.1인 경우가 포아슨비가 0.4인 경우에 비해 최대주응력비가 크게 나타나는데 이것은 원형공동굴착에 의해서 생긴 주응력의 변화가 포아슨비의 변화에 의해서

생기는 영향보다 크기 때문에 발생하는 것으로 보인다.

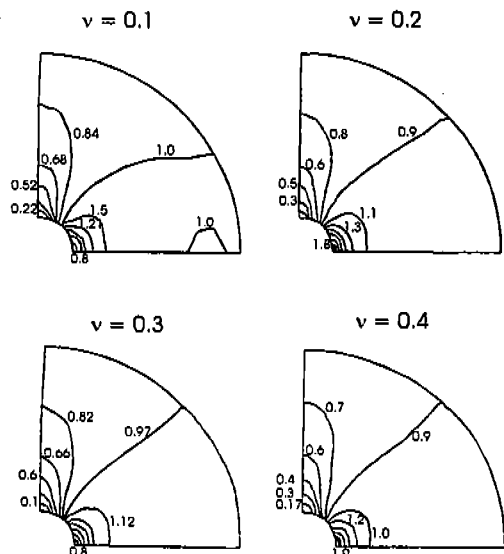


Fig. 7 Contours of σ_1 / σ_{v_i} for circular opening varying Poisson's ratio (σ_1 : the maximum principal stress, σ_{v_i} : the initial maximum principal stress)

해석영역내 심도에 의한 영향

지하암반공동과 같은 무한영역문제에서 해석영역이 결정될 경우 암반에 일정한 초기 응력이 작용하고 있는 상태에서 어느 일정한 깊이까지는 해석영역내의 자중(Gravity Stress)이 암반공동의 거동에 영향을 미치게 되지만 일정한 깊이 이하로 지하공동이 위치하게 되면 초기응력에 비해 해석영역내 자중의 영향이 미약해지는 경계가 존재하게 된다.

본 절에서는 이러한 자중의 영향이 미치는 경계를 파악하기 위해서 지표면으로 부터 원형공동중심까지의 깊이를 90m, 110m, 160m, 210m, 260m, 360m로 하여 해석을 하였다. 해석과정에서 초기최대주응력이 수직방

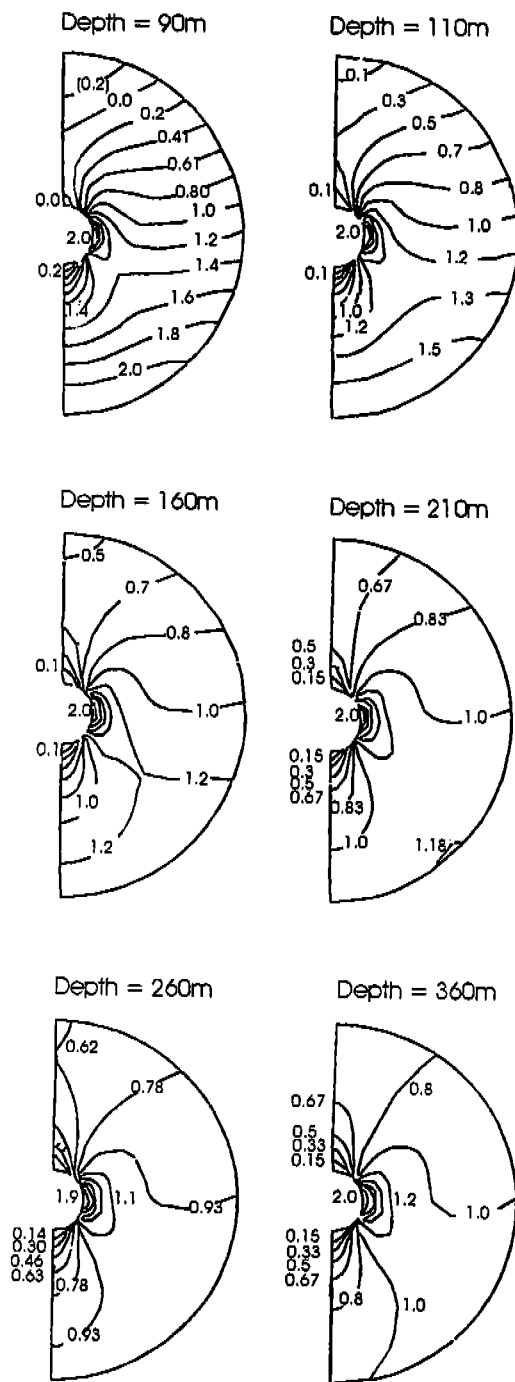


Fig. 8 Contours of σ_1 / σ_{v_i} for circular opening varying gravity stresses

향으로만 변화하게 하기 위하여 수직방향만 응력을 주고, 수평방향은 0으로 하였다. 해석에 사용한 재료특성치는 Table 1에 표시한 값을 사용하였다.

Fig. 8은 지하심도별 원형공동주변의 최대주응력을 초기응력의 비로 나타낸 그림이다. 지하심도/공동반경의 값이 9일 경우에는 초기 최대주응력에 비해 해석영역내 지중의 영향이 큼을 알 수 있다. 지하심도/공동반경의 값이 21 이상에서는 응력분포도가 거의 일정한 경향을 나타내고 있어서 해석영역내 지중의 영향이 초기응력에 비해 상대적으로 적게 나타나고 있다.

이상의 결과로 부터 원형공동이 지하심도/공동반경의 값이 21 이상에 위치할 경우에는 해석영역내 지중의 영향이 암반에 작용하는 초기응력보다 작아지는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

초기응력의 영향

지하암반내에 공동을 굴착하였을 경우 암반내의 초기응력은 굴착으로 인하여 교란되며, 공동주변에 새로운 응력장을 형성하게 된다. 이때 굴착후에 공동주변에서 발생하는 응력교란은 굴착하기전 암반에 작용하고 있는 초기응력과 밀접한 관련이 있다. 따라서 굴착으로 인한 공동주변암반의 응력변화를 파악하기 위해서는 공동의 기하학적 형태와 굴착지반특성에 따라 초기응력장에서 거동특성의 파악이 필요하다.

본 절에서는 초기응력이 지하암반공동의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 초기응력의 비(K_0 : 수평방향응력/수직방향응력)를 0에서 2까지 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 수직응력값은 제3절에서 해석

영역내 지중의 영향이 미약해지는 지하심도 210m에서의 값인 403.5 t/m^2 를 사용하였고, 포아슨비는 0.22를 사용하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 초기응력의 비(K_0): 0, 1/6, 1/4, 1, 2
- 수직응력 : 403.5 t/m^2
- 포아슨비 : 0.22

Fig. 9는 초기응력의 변화에 따라서 공동을 굴착했을 때 발생하는 최대주응력을 초기 최대주응력의 비로 나타낸 그림이다.

그림에서 원형공동주위의 응력분포를 살펴보면 초기응력비가 1.0 미만에서는 비슷한 응력분포를 나타내고 있다.

Table 2는 초기응력이 변화할 때 원형공동주위의 최대주응력을 표시한 것이다. 초기응력의 수평방향성분값이 커짐에 따라 공동주위의 점에서 최대주응력은 작아지며 초기응력의 비가 1/4 이하일 경우 점 C에서 인장응력이 발생하고 있다.

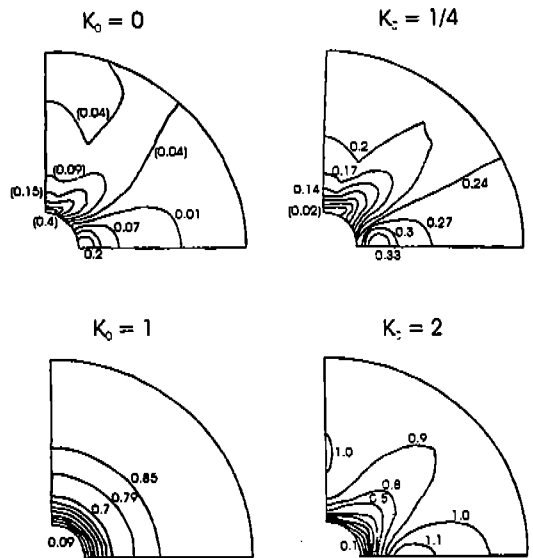


Fig. 9 Contours of σ_1 / σ_{v_i} for circular opening varying initial stresses

Table 3, 4는 초기응력별 원형공동주위의 수평, 수직변위를 나타낸 것이다. 공동의 상부 정점 B에서는 초기응력의 비가 커짐에 따라 수평변위와 수직변위의 절대값이 증가하고 있다.

Table 2. The maximum principal stresses along the face of a circular opening varying initial stresses

	The maximum principal stresses (t/m ²)				
	K ₀ =0.0	1/6	1/4	1.0	2.0
A	-18.62	-40.82	-21.30	-29.11	-38.42
B	23.13	-7.66	-11.22	-29.11	-40.37
C	281.20	111.60	29.20	-29.11	-47.88

Table 3. The horizontal displacements along the face of a circular opening varying initial stresses

	The horizontal displacements (x 10 ⁻⁴ m)				
	K ₀ =0.0	1/6	1/4	1.0	2.0
A	4.888	2.416	1.188	-9.913	-24.714
B	3.446	1.700	0.832	-7.010	-17.465
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 4. The vertical displacements along the face of a circular opening varying initial stresses

	The vertical displacements (x 10 ⁻⁴ m)				
	K ₀ =0.0	1/6	1/4	1.0	2.0
A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
B	-10.456	-9.880	-9.594	-7.010	-3.564
C	-14.801	-13.990	-13.990	-9.913	-5.025

공동의 형상

지하암반공동을 굴착할 경우 공동주위의 응력변화는 공동의 기하학적 형상에 크게 좌우된다. 본 절에서는 지하암반에서 공동을 굴착할 경우 공동의 기하학적 형상에 따른 공동의 거동변화를 파악하기 위해서 공동의 기하학적 형상에 따른 두 개의 모델 마제형 공동 I, 지하발전소형 공동 II를 가지고 해석을 수

행하였다. 해석은 초기응력 K₀ = 0, 1/4, 1, 2에 대해서 각각 수행하였고, 수직응력값은 지하심도 210m에서의 값인 403.5 t/m²를 사용하였으며, 포아슨비는 0.22를 사용하였다.

공동 I의 영향

공동 I은 마제형(Horse-Shoe Shape)공동으로서 Fig. 10에 표시한 공동단면을 해석에 사용하였고, 해석모델은 Fig. 11에 나타난 모델을 이용하였다. 해석시 검토한 공동주위의 절점은 Fig. 10에 표시한 A~E 점으로 공동의 밑변과 측벽, 정점에서의 구조거동을 분석하였다.

Fig. 12는 초기응력의 변화에 따라서 최소주응력을 초기최대주응력의 비로 나타낸 그림이다. 최대주응력 비의 응력분포는 원형의 공동과 전체적으로 그 경향이 비슷하게 나타나지만 공동하부에서는 응력집중이 나타나고 있다.

Table 5는 초기응력의 변화에 따른 공동주위에서의 최대주응력을 나타낸 것이다. 공동 하단의 점 A에서는 초기응력비가 1/4 이하에서 인장응력이 발생하고, 점 B와 E에서는 초기응력비가 0에서 인장응력이 발생하고 있다.

Table 6, 7은 초기응력의 변화에 따라서 공동주위의 수평, 수직변위를 나타낸 표이다. 공동의 하부인 A, B에서는 초기응력이 증가함에 따라서 수직변위가 적어지며, 점 A에서 K₀=0에 비해서 K₀=2일 경우의 수직변위는 61.3%이고, 공동의 상부정점 E에서 그 비율은 22.2%이다.

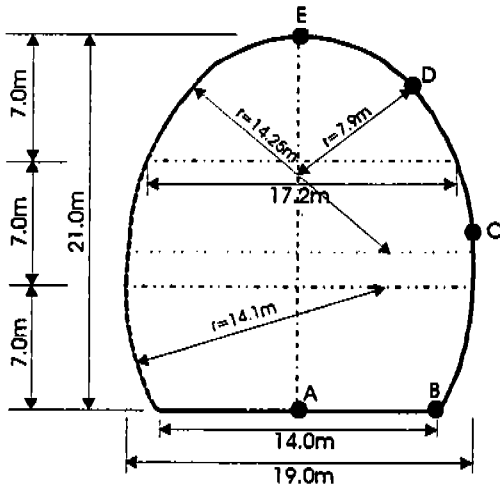


Fig. 10 The section of opening I shaped horse-shoe

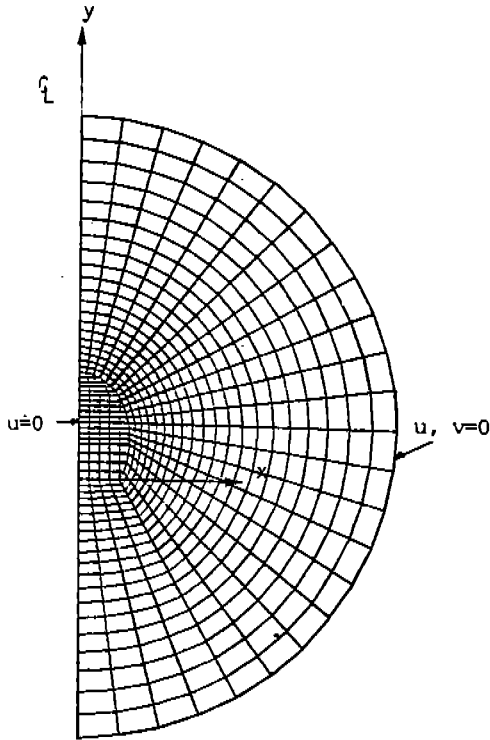


Fig. 11 The finite element mesh for opening I

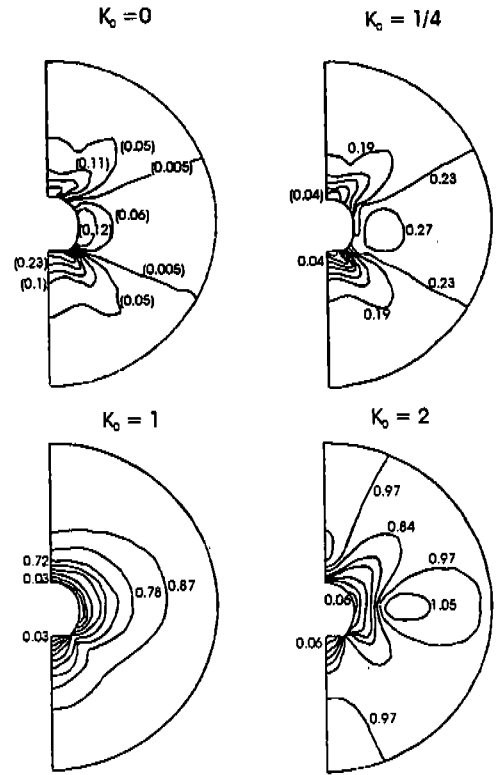


Fig. 12 Contours of σ_1 / σ_{v_i} for opening I varying initial stresses

Table 5. The maximum principal stresses along the face of a opening I varying initial stresses

	The maximum principal stresses (t/m^2)			
	$K_0=0.0$	1/4	1.0	2.0
A	279.1	114.5	-8.1	-8.9
B	22.7	-31.3	-118.8	-171.5
C	-9.4	-11.2	-16.5	-21.2
D	-4.9	-11.2	-24.7	-34.2
E	250.8	-1.0	-37.8	-63.0

Table 6. The horizontal displacements along the face of an opening | varying initial stresses

	The horizontal displacements($\times 10^{-4}$ m)			
	$K_0=0.0$	1/4	1.0	2.0
A	0.781	0.524	-0.248	-1.278
B	2.942	0.250	-7.824	-18.589
C	3.962	-0.134	-12.423	-28.808
D	2.997	-0.074	-9.285	-21.567
E	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 7. The vertical displacements along the face of an opening | varying initial stresses

	The vertical displacements($\times 10^{-4}$ m)			
	$K_0=0.0$	1/4	1.0	2.0
A	15.311	14.570	12.348	9.385
B	7.006	6.108	3.412	-0.182
C	-3.087	-2.914	-2.398	-1.709
D	-9.774	-8.854	-6.093	-2.413
E	-13.934	-12.579	-8.516	-3.099

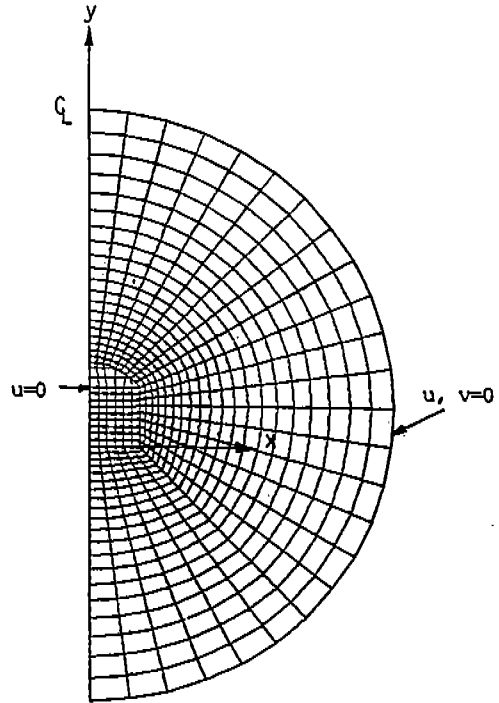


Fig. 14 The finite element mesh for opening II

공동 II의 영향

공동 II는 지하발전소형(Powerstation Shape) 공동으로서 해석에 사용한 공동 단면은 Fig. 13에 나타난 단면을 사용하였고, 해석모델은 Fig. 14에 나타난 모델을 사용하였다.

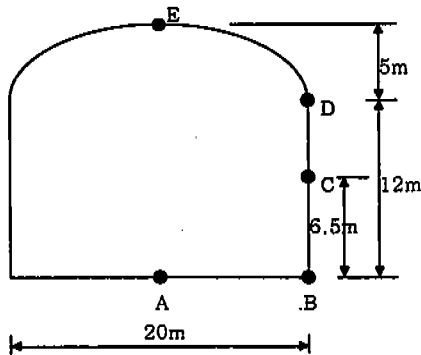


Fig. 13 The section of opening II

Fig. 15는 초기응력의 변화에 따라서 최대 주응력을 초기최대주응력의 비로 나타낸 그림이다. 초기응력의 변화에 따른 최소주응력의 응력분포는 공동 I과 전체적으로 그 경향이 비슷하게 나타나지만 공동 I에 비하여 응력집중이 보다 많이 나타나고 있다.

Table 8은 초기응력의 변화에 따른 공동 주위에서의 최대주응력을 나타낸 것으로 공동 하단의 점 A와 공동상부점 E에서 초기응력비가 1/4이하에서 인장응력이 발생하고 있다.

Table 9, 10은 초기응력의 변화에 따라서 공동주위의 수평, 수직변위를 나타낸 표이다. 공동의 하단점 A, B에서는 공동 I과 비슷하게 초기응력이 증가함에 따라서 수직변위가 적어지며, 점 A에서 $K_0=0$ 에 비해서 $K_0=2$ 일 경우의 수직변위는 75.8%이고, 공동상부점

E에서 그 비율은 45.9%이다.

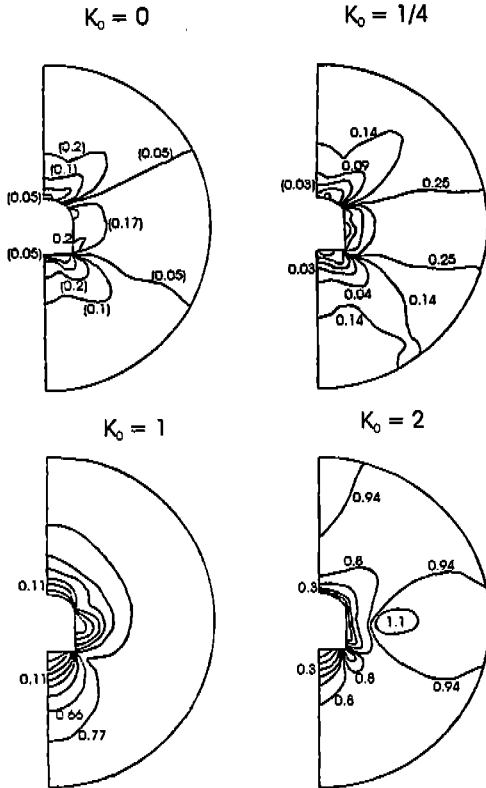


Fig. 15 Contours of $\sigma_1 / \sigma_v, i$ for opening II varying initial stresses

Table 8. The maximum principal stresses along the face of a opening II varying initial stresses

	The maximum principal stresses(t/m^2)			
	$K_0=0.0$	1/4	1.0	2.0
A	304.3	157.6	-8.1	-8.9
B	-28.7	-82.5	-171.3	-183.8
C	-2.4	-5.1	-12.7	-19.2
D	-30.0	-39.8	-60.0	-65.8
E	279.9	45.4	-23.7	-38.0

Table 9. The horizontal displacements along the face of a opening II varying initial stresses

	The horizontal displacements($\times 10^{-4}m$)			
	$K_0=0.0$	1/4	1.0	2.0
A	0.765	0.604	0.122	-0.521
B	3.075	0.572	-6.937	-16.948
C	3.368	-0.182	-10.831	-25.030
D	4.192	1.362	-7.126	-18.445
E	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 10. The vertical displacements along the face of a opening II varying initial stresses

	The vertical displacements($\times 10^{-4}m$)			
	$K_0=0.0$	1/4	1.0	2.0
A	17.115	16.598	15.080	12.981
B	3.943	3.279	1.288	-1.367
C	-1.277	-1.312	-1.416	-1.554
D	-8.218	-7.743	-6.318	-4.418
E	-15.874	-14.801	-11.583	-7.292

결론

본 연구에서는 저준위 방사성폐기물 처분을 위한 지하공동의 해석적용기준을 제시하기 위하여 지하암반공동의 굴착에 따른 공동주변 암반에서의 거동변화를 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

해석영역의 크기

지하암반공동의 합리적인 해석영역의 크기를 결정하기 위하여 해석하여 검증한 결과 유한요소계는 공동의 중심으로부터 공동의 반지름 r의 6배이상으로 할 경우 이론해와 근

접한 결과를 나타내었다.

재료특성치의 영향

초기응력이 작용하고 있는 상태에서 암석의 포아슨비가 공동주위의 거동에 미치는 영향을 검토한 결과, 주응력의 경우는 포아슨비에 따른 큰 차이가 보이지 않으며, 그 이유는 공동굴착의 영향이 포아슨비의 변화에 의한 영향보다 크기 때문으로 사료된다.

해석영역내 심도에 의한 영향

암반에 일정한 초기응력이 작용하고 있는 상태에서 지하심도에 따른 해석영역내 공동의 거동을 검토한 결과, 지하심도/공동반경의 값이 2이상에서는 지하심도가 변화함에 따라 해석영역내의 자중의 영향이 암반에 작용하는 초기응력보다 작아지는 경향을 나타낸다.

초기응력의 영향

공동주위의 거동에 미치는 초기응력의 영향을 검토한 결과, 초기응력 $K_0=1/4$ 이하일 경우 공동주위에 인장영역이 발생하는 것으로 나타났다.

공동의 형상

공동 I의 영향

공동주위의 거동에 기하학적 형상이 미치는 영향을 검토한 결과, 공동 I의 단면을 가진 모델은 전체적인 응력분포가 원형공동의 경우와 비슷하지만 공동의 하부 모서리부분에

서 응력집중이 발생하고, 원형공동과 유사하게 초기응력이 1/4이하에서 공동주위에 인장영역이 발생하여, 지하공동설계시 고려해야 할 것으로 여겨진다.

공동 II의 영향

공동 II의 단면을 가진 모델을 해석하여 검토하여 본 결과, 공동 I에 비하여 응력집중이 모서리부분에서 많이 발생하며, 초기응력이 1/4이하에서 인장영역이 발생하고 있다.

공동 I, II 두 단면을 비교해 본 결과 공동주위(공동중심에서 반경 $2a$ 이내)를 제외하고는 원형공동의 경우와 응력분포가 비슷하며, 공동 II에 비하여 공동 I의 경우가 응력집중이 적게 발생하여서 지하암반공동에 적용하기가 유리한 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- Jaeger, J.C., 1971, Friction of Rocks and Stability of Rock Slopes-Rankine Lecture, Geo-technique, Vol.21.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1976, Fundamentals of Rock Mechanics, 2nd Ed., Chapman and Hall, London.
- Obert, L. and Duvall, W.I., 1967, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley and Sons Press, New York, pp.98-108.
- Kirsch, G., 1988, Die Theorie der Elastizität und Die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, Veit. Ver. Deut. Ing., Vol.42, No.28, pp.797-807.
- Greenspan, M., 1944, Effect of a Small

Hole on the Stresses in a Uniformly Loaded Plate, Quarterly Applied Mathematics, Vol.2, pp.60-71.

Denkhaus, H.G., 1968, The Significance of Stress in Rock Mass, Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics, pp.263-271.

Muskhelishvili, N.I., 1953, Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, 4th ed., Nordhoff.

Kulhawy, F.H., 1975, Stress and Displacements around Openings in Homogeneous Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol. 12, pp.43-57.

이경진 :

한국원자력연구소 원자력환경관리센터

구조공학실

대전시 유성구 사서함 105,

305-600

TEL:(042)868-2056

FAX:(042)861-4824