

고준위폐기물 처분장의 최적 공동간격 및 처분공간격을 결정하기 위한 역학적 안정성 해석

박병윤¹⁾ · 권상기¹⁾

Mechanical Stability Analysis of a High-Level Waste Repository for Determining Optimum Cavern and Deposition Hole Spacing

Byoung Yoon Park and Sangki Kwon

ABSTRACT Based on the preliminary results from the therm analysis, which is currently carrying, three-dimensional computer simulations using a finite element code, ABAQUS Ver. 5.8, were designed to determine the mechanically stable cavern and deposition hole spacing. Linear elastic modeling for the cases with different cavern and deposition hole spacing were carried out under three different in situ stress conditions. From the simulations, the response of the rock to the stress redistribution after the excavation of the openings could be investigated. Also the optimum cavern and deposition hole spacing could be estimated based on the factor of safety. When the in situ stresses determined from the actual stress measurements in Korea were used, the case with cavern spacing of 40 m and deposition hole spacing of 3 m was in very stable condition, because the factor of safety was calculated as 3.42. When the in situ stress conditions for Sweden and Canada were used, the factors of safety were 1.19 and 1.27, respectively. Even though the factors of safety are relatively low compared to the previous case, they seem to be in stable condition, since the factors of safety are still higher than 1.0. From these results, it was concluded that the rock will not fail even after the stress redistribution.

Key words : cavern spacing, deposition hole spacing, stress contour, mechanical stability, disposal repository, rock, stress redistribution, high level radwaste

초 록 : 역학적으로 안정한 공동 및 처분공 간격을 결정하기 위해, 현재 수행 중인 열 해석의 중간 결과를 근거로 범용 해석 프로그램인 ABAQUS 버전 5.8을 이용해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 세 가지 초기지압을 조건으로 공동간격과 처분공 간격을 바꿔가면서 선형탄성해석을 수행하였고, 그 결과를 분석하여 굴착 후 응력재분배에 의한 암반의 거동은 어떤 경향을 가지고 있으며, 적절한 공동 간격 및 처분공 간격은 어느 정도가 좋은지를 분석하였다. 또한 각 경우 역학적 안전계수는 어느 정도인지도 계산하였다. 국내지압분포를 근거로 도출한 초기지압 하에서는 공동간격 40 m, 처분공간격 3 m인 경우 안전계수 3.42가 계산되어 아주 안정한 결과를 얻었고, 스웨덴이나 캐나다의 초기지압 경험식의 경우의 안전계수는 각각 1.19와 1.27로 비교적 낮은 값이지만 1 이상의 값이므로 응력재분배로 인한 파괴는 일어나지 않는다는 결과를 얻었다.

핵심어 : 공동 간격, 처분공 간격, 응력분포도, 역학적 안정성, 처분장, 암반, 응력재분배, 고준위방사성폐기물

1. 서 론

고준위방사성폐기물 처분장이 갖추어야 할 핵심적인 기능은 폐기물로 지하수가 접근하는 속도나 방사성 핵종이 생태계로 이동하는 속도를 느리게 하고, 열 때문에 처분장의 성능저하가 진행되는 과정을 억제하기 위해 인공방벽이나 자연방벽의 온도 증가를 장기적으로 제한하는

것이다. 때문에 처분장 부지의 지질학적 및 수리지질학적인 조건은 처분장 설계를 지배하는 요인이 된다.

처분장 설계에 영향을 주는 부지조건으로는 현장응력, 지열에 의한 온도경사, 응력조건을 일시적으로 변경시킬

1)정회원, 한국원자력 연구소
원고 접수일 : 2000년 5월 26일
원고심사완료일 : 2000년 6월 10일

수 있는 사건(빙하이동, 지진 등), 암반 내의 균열 정도, 암반 타입의 물리적 거동 특성치 및 균열대 등이다. 이와 함께 암반의 강도 및 변형 특성치, 열 전달 특성치 등과 같은 물성치들은 처분장 내의 폐기물에 의한 열 분포, 처분장의 깊이 및 크기, 처분공동의 형상과 방향을 결정짓는 요소가 된다.

현재 국내에서는 처분장이 갖추어야 할 핵심적인 기능을 만족하면서 정해진 부지 내에 되도록 많은 폐기물을 처분할 수 있도록 하는 처분장 배치 방안을 마련 중에 있다. 처분장 배치를 위해서는 열적-역학적 요건을 만족하는 적절한 처분공동 간격 및 공동 내의 처분공 간격을 결정하여야 한다.

처분공동 간격을 결정하는데 고려해야 할 주요 인자는 다음과 같다:

- 안전성 평가의 관점에서
 - 수리적으로 변경된 굴착영향지역과 처분장 공동을 통하는 지하수 유동속도
 - 열적 하중 영향
- 공학적 관점에서
 - 공동 안정성
 - 운영 안전성
 - 건설비용 및 운영비용

이상의 사항들을 전제로 역학적으로 안정한 공동 및 처분공 간격을 결정하기 위해, 범용 해석 프로그램인 ABAQUS 버전 5.8을 이용해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 세 가지 초기지압을 조건으로 공동간격과 처분공 간격을 바꿔가면서 선형탄성해석을 수행하였고, 그 결과를 분석하여 굴착 후 응력재분배에 의한 암반의 거동은 어떤 경향을 가지고 있으며, 적절한 공동 간격 및 처분공 간격은 어느 정도가 좋은지를 분석하였다. 또한 각 경우 역학적인 안전계수는 어느 정도인지도 계산하였다.

해석의 전제조건으로 다음과 같은 몇 가지 가정사항을 설정하였다:

- 처분공동은 지하 500 m에 위치한다.
- 처분공동이 건설될 부지는 결정질 화강암으로 이루어져 있다.
- 암반 내에 균열은 없고, 등방성이며, 균질하다.
- 열적 조건을 만족하는 처분공동의 최소 간격은 30 m이고, 처분공의 최소 간격은 3 m이다.
- 공동 및 처분공 굴착과정의 응력변화는 무시한다.
- 온도에 의한 물성치의 변화는 무시한다.

2. 해석 목적

응력을 받고 있는 탄성체에 구멍(hole)을 뚫으면 구멍 주변에 응력재분배가 일어나, 국부적인 응력집중이 발생한다¹⁾. 최대응력집중은 구멍 경계에서 형성된다. 지하에 굴착하는 구조물의 경우, 공동의 형상이나 초기지압이 작용하는 방향에 따라 응력집중의 크기나 위치가 달라진다. 집중된 응력이 공동 주위의 무결암의 강도를 초과하면 크랙이나 부서짐의 형태로 국부적인 파쇄가 일어날 수 있다.

여기서는 설정한 몇 가지 간격으로 지하 500 m에 처분공동과 처분공을 굴착했을 때 초기지압을 받고 있던 심부 암반이 응력재분배에 의해 어떻게 거동하고 응력분포는 어떻게 변하는지를 해석하고, 주어진 암반 강도에 비추어 파괴가 일어나는지의 여부를 밝히며, 파괴가 일어나지 않는다면 어느 정도 안전하고 또한 구조적으로 가장 취약한 부분은 어느 곳인지를 확인하고자 한다. 그리고 이를 근거로 역학적으로 안정한 처분공동 간격 및 처분공 간격을 결정하고자 한다.

3. 입력데이터

3.1. 일반 사항

본 연구에서는 처분장 부지가 정해지지 않은 상태에 있으므로, 부지 특성 데이터 대신 스웨덴에서 권고한 화강암에 대한 대표적인 물성치를 사용하였다²⁾.

심도는 현재 국내에서 고려 중인 지하 500 m를 기준으로 하였고, 초기지압은 다음 3가지 경우를 고려하였다:

- 한반도 현장데이터를 근거로 도출한 심도에 따라 변하는 수평 및 수직지압 식을 사용한 경우
- 스웨덴에서 제시한 수평 및 수직지압 식을 사용한 경우
- 캐나다에서 사용한 수평 및 수직지압 식을 사용한 경우

현재 부지가 정해지지 않은 상태에서 초기지압으로 어떤 특정한 값을 사용한다는 것은 무리일 뿐만 아니라 그 결과의 이용성 면에서도 큰 의미가 없다. 다만 처분공동의 간격 및 처분공의 간격이 어느 정도까지 역학적 안정성에 문제가 없을 것인가를 예측하고자 하는 것이 본 해석의 목적이므로 위 3가지 지압조건을 고려하였고, 각 경우로부터의 해석 결과는 향후 처분장 배치를 고려할 때 포괄적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

지하 500 m 암반에 건설되는 처분공동의 폭은 4 m, 높이는 5 m의 마제형 공동으로, 바닥에는 적당한 간격으로 직경 2.08 m의 처분공이 깊이 7.96 m로 천공된다는 것을 가정하였다.

사용후핵연료의 붕괴열에 의한 영향을 분석하기 위한 열해석 결과에 의하면 벤토나이트의 온도가 100°C를 넘지 않는다는 조건으로 인해 처분장 공동 간격 및 처분공의 간격은 그 한계가 공동 간격 30 m의 경우 처분공 간격은 6 m, 공동간격 40 m의 경우 처분공 간격은 3 m로 잠정 결론지어졌다. 이를 근거로 처분공 간격은 3 m를 하한 값으로 하고, 처분 공동 간격은 30 m를 하한 값으로 하여 다음 세 가지 경우를 주 해석 대상으로 하였다.

- 공동간격 40 m, 처분공 간격 6 m
- 공동간격 30 m, 처분공 간격 6 m
- 공동간격 40 m, 처분공 간격 3 m

3.2. 초기지압조건

지금까지 국내 자체적으로 조사된 초기지압 측정 자료의 분석으로부터, 심도에 따른 수직응력 및 평균 수평응력 분포는 다음과 같이 수식화된다³¹⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 1.36 + 0.0233 \cdot Z \text{ (MPa)} \\ \sigma_{H_{avg}} &= 2.78 + 0.0183 \cdot Z \text{ (MPa)} \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 국내자료를 분석한 바에 의하면 깊이 500 m 정도에서 두 수평응력간의 비는 2.0을 넘지 않으므로⁴¹⁾ 본 해석에서는 가장 극단적인 결과를 줄 수 있는 두 수평응력간의 비를 2.0으로 가정하여 수직응력(σ_v)과 최대($\sigma_{H_{max}}$) 및 최소($\sigma_{H_{min}}$) 수평응력식을 다음과 같이 유도하였다:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 1.36 + 0.0233 \cdot Z \text{ (MPa)} \\ \sigma_{H_{max}} &= \frac{4}{3} \sigma_{H_{avg}} = 3.71 + 0.0244 \cdot Z \text{ (MPa)} \\ \sigma_{H_{min}} &= \frac{2}{3} \sigma_{H_{avg}} = 1.85 + 0.0122 \cdot Z \text{ (MPa)} \end{aligned} \quad (2)$$

이를 근거로 깊이 500 m에서의 두 수평주응력 및 수직주응력을 계산하면,

$$\begin{aligned} \sigma_{H_{max}} &= 15.91 \text{ MPa} \\ \sigma_{H_{min}} &= 7.95 \text{ MPa} \\ \sigma_v &= 13.01 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3)$$

이 되며, 수직응력에 대한 수평응력의 비인 측압계수(側壓係數) K 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} K_{max} &= \frac{\sigma_{H_{max}}}{\sigma_v} = 1.223 \\ K_{min} &= \frac{\sigma_{H_{min}}}{\sigma_v} = 0.611 \end{aligned} \quad (4)$$

스웨덴에서 제시한 수직응력(σ_3)은²⁾:

$$\sigma_3 = 2700 \cdot 9.81 \cdot Z \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

이고, 최대(σ_1) 및 최소(σ_2) 수평응력은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= 2.5 + \sigma_3 \\ \sigma_1 &= 5.0 + 2\sigma_3 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, σ_1 = 최대주응력, 수평으로 가정(MPa)

σ_2 = 중간주응력, 수평으로 가정(MPa)

σ_3 = 최소주응력, 수직으로 가정(MPa)

Z = 깊이(m)

이를 근거로 깊이 500 m에서의 두 수평주응력 및 수직주응력을 계산하면,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 31.5 \text{ MPa} \\ \sigma_2 &= 15.7 \text{ MPa} \\ \sigma_3 &= 13.2 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (7)$$

이 되며, 수직응력에 대한 수평응력의 비인 측압계수 K 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} K_{max} &= \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 2.378 \\ K_{min} &= \frac{\sigma_2}{\sigma_3} = 1.189 \end{aligned} \quad (8)$$

캐나다의 경우, Tsui와 Tsai⁶¹⁾는 500 m 깊이의 처분 볼트(vault)의 해석을 위해 Herget⁷⁾이 제시한 최대/최소 수평응력 비를 적용하여 Herget의 평균 수평응력 데이터를 최대수평응력과 최소수평응력으로 다시 분리하였다. 그 결과 최대(σ_1) 및 최소(σ_2) 수평응력식은 다음과 같이 유도되었다:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0.0419Z + 13.44 \text{ (깊이 0~900~m)} \\ \sigma_1 &= 0.0123Z + 40.25 \text{ (깊이 900 m 아래)} \\ \sigma_2 &= 0.0323Z + 6.28 \text{ (깊이 0~900m)} \\ \sigma_2 &= 0.0099Z + 26.57 \text{ (깊이 900 m아래)} \end{aligned} \quad (9)$$

수직응력(σ_3)은 :

$$\sigma_3 = 0.0265Z \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{H_{max}}, \text{ 최대주응력, 수평으로 가정 (MPa)} \\ \sigma_2 &= \sigma_{H_{min}}, \text{ 중간주응력, 수평으로 가정 (MPa)} \\ \sigma_3 &= \sigma_v, \text{ 최소주응력, 수직으로 가정 (MPa)} \\ Z &= \text{깊이 (m)} \end{aligned}$$

따라서 현장응력은,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 34.4 \text{ MPa} \\ \sigma_2 &= 22.4 \text{ MPa} \\ \sigma_3 &= 13.2 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로 수직응력에 대한 수평응력의 비인 축압계수 K는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} K_{max} &= \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 2.598 \\ K_{min} &= \frac{\sigma_2}{\sigma_3} = 1.694 \end{aligned} \quad (12)$$

이상 세 가지 경우를 초기지압으로 설정하여 해석을 수행하였는데, 향후 실제 처분장이 건설될 부지의 초기지압 조건은 이들 내에 포함될 것이라고 판단하며, 이 조건들에 의한 해석결과는 처분장 공동 간격 및 홀 간격의 건전성을 포괄적으로 점검할 수 있는 근거가 될 것이다. 이상의 초기지압조건을 요약하면 Table 1과 같다.

3.3. 압반 물성치

스웨덴 SKB에서 제시한 무결암 결정질암반에 대한 대표적인 물성 특성치는 Table 2와 같다. 이 목록은 스웨덴에서 볼 수 있는 전형적인 암반에 대한 대표값을 구하기 위해 SKB에서 수집 편찬한 데이터로부터 도출한 것이다.

한편, 국내의 초기지압을 적용한 해석에서 사용한 암반의 밀도는 2,655 kg/m³이고 그 외의 물성치는 Table 2에 있는 값을 그대로 적용하였다. 그리고 캐나다의 초기지압을 적용한 해석에서는 Table 2에서 제시한 값을 그대로 적용하였다.

Table 1. Initial earth pressure and stress ratio

	Korean ⁶⁾	Swedish ⁵⁾	Canadian ¹⁾
Vertical Stress(MPa)	13.01	13.2	13.2
Max. Hori. Str.(MPa)	15.91	31.5	34.4
Min. Hori. Str.(MPa)	7.95	15.7	22.4
Max. K	1.223	2.378	2.598
Min. K	0.611	1.189	1.694

Table 2. Recommended intact rock properties of crystalline rock from Sweden⁵⁾

Properties	Unit	Recommended	Range
Elastic modulus (E)	GPa	60	40~70
Poisson's ratio (ν)	-	0.25	0.2~0.3
UCS	MPa	200	150~250
Internal friction angle	°	38	35~40
Density	kg/m ³	2700	2600~2800

4. 해석모델

Fig. 1은 공동 간격이 40 m이고, 처분공 간격은 6 m인 해석모델을 대표적으로 보인 것이다. 모델의 상부경계는 공동 천장으로부터 31 m지점을 택했고, 하부경계는 공동 바닥으로부터 32 m지점을 택했다. 이는 유한요소해석을 위한 해석모델의 경계는 공동 최대 폭의 4배 이상을 취한다는 일반적인 기준⁸⁾에 따른 것으로 여기서는 좀 더 여유 있게 6배 정도를 취했다.

모델의 좌우 면이나 전후 면은 대칭경계조건을 취했다. 이는 공동과 처분공이 일정한 간격으로 무한히 굴착되어 있다고 가정된 것으로 해석대상 공동 및 처분공은 그 중

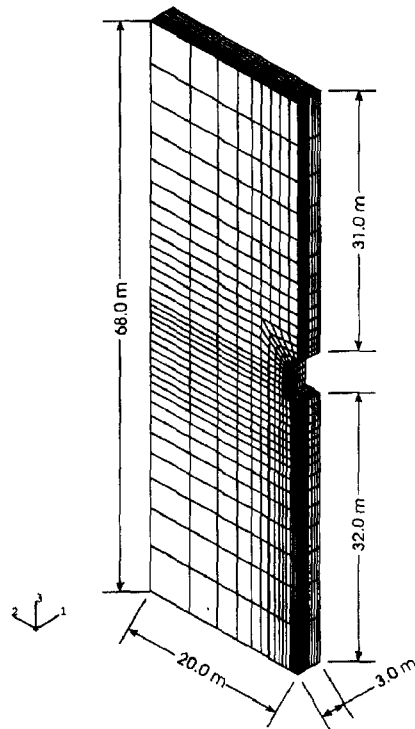


Fig. 1. Typical FEM Model

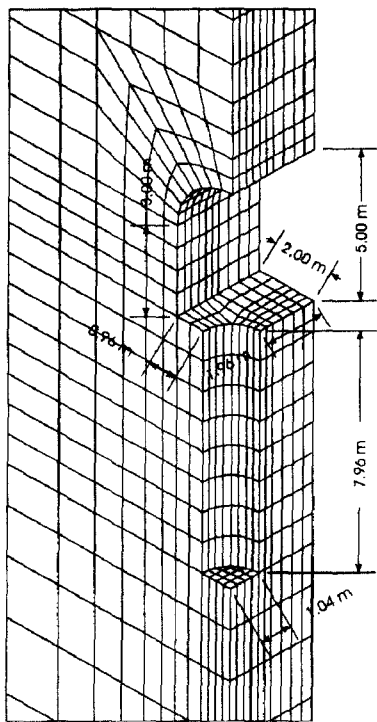


Fig. 2. Dimension of cavern and deposition hole

심에 위치하고 있다는 것을 의미한다. 실제 처분장의 외곽에 있는 공동이나 처분공은 중심부에 있는 것보다 구조적으로 안정하다는 공학적 판단에 따른 것이다.

Fig. 2는 공동과 처분공의 상세한 치수를 3차원으로 보인 것이다. 유한요소는 3차원 연속체 응력/변위를 계산할 수 있는 8노드 육면체 요소인 C3D8 타입⁹⁾을 선택하였다. 요소를 이루고 있는 재료는 화강암으로 등방성이고 균질한 재료로 가정하였다.

해석은 3단계로 수행하였다. 먼저 스텝 1에서는 지반의 초기응력상태를 시뮬레이션 하였다. Table 1의 초기 지압 및 축압계수를 입력하여 모델이 공동 굴착전의 지반상태가 되도록 하는 초기조건을 구축하였다. 스텝 2에서는 공동만을 굴착하여 응력의 변화를 살폈고, 스텝 3에서는 처분공까지 굴착하여 응력의 변화를 살폈다. 본 해석은 시공과정에서 발생하는 상황을 예측하여 설계에 반영하는 단계가 아니기 때문에 굴착과정에서 발생할 수 있는 여러 가지 자세한 상황은 시뮬레이션하지 않았다.

본 해석에서는 처분공동 축이 최대수평응력방향에 수직인 방향으로 놓여있다고 가정하였다. 그러나 공동의 구조적인 안정성을 높이기 위해서는 처분 공동의 방향을

최대수평응력방향과 평행하게 놓이도록 설계해야 한다. 이렇게 하면 공동 단면에 작용하는 수평응력 대 수직응력의 비가 최소가 되고 두 편차응력(deviatoric stress)이 줄어들어 같은 조건에서 공동 주변의 응력집중을 최소화할 수 있기 때문이다. 그러나 실제로는 응력조건만이 공동 방향을 결정하지는 않기 때문에 본 해석에서는 가장 극단적인 결과를 줄 수 있는 공동 방향을 선택하였다.

단일 균열들이나 균열군들은 처분장이 건설될 예상 부지에 따라 크게 변하기 때문에, 본 해석에서는 구체적으로 고려하지 않았다.

5. 굴착 후 응력 거동

Table 3은 ABAQUS OUTPUT을 정리한 것으로 스텝 2의 공동만 굴착한 경우와 스텝 3의 공동 및 처분공을 굴착한 경우의 최대압축 및 최대인장 주응력이 걸리는 점과 주응력 차가 최대인 점에서의 1차 및 3차 주응력을 요약하였다. 여기서 음수는 압축응력을 의미하고, 양수는 인장응력을 의미하며 단위는 Pa(Pascal)이다. 노드의 위치는 Fig. 3에 보인 바와 같다.

Fig. 4는 스웨덴에서 권고한 초기지압상태에서 공동과 처분공을 굴착한 후의 응력재분배에 의한 변위를 200배 과장하여 도시한 것이다. 처분공 간격 3 m의 경우가 가장 많은 변형이 발생하였고 처분공은 공동 축을 장축으로 하는 타원형태로 변형이 일어나는 것을 관찰 할 수 있다. 공동 벽면은 예상대로 공동 안쪽으로 많은 변위가 발생하는 것을 관찰 할 수 있다.

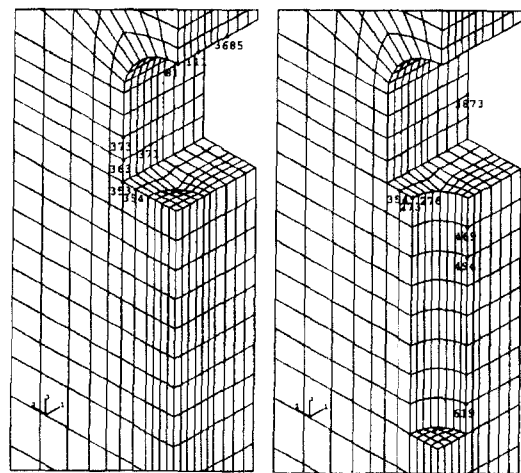


Fig. 3. Location and number of key nodes

Table 3. Summary of analysis results

Step 2 : After cavern excavation											단위 : Pa(=1.0197E-05 kgf/cm ²)
Initial earth pressure	Cavern spacing (m)	Nodes with maximum compressional stress			Nodes with maximum tensile stress			Nodes with maximum deviatoric stress			
		σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node	
Korean	30	-3.5829E+07	-2.1566E+06	3685	-2.3023E+07	1.7080E+05	363	-3.5829E+07	-2.1566E+06	3685	
	40	-3.6597E+07	-2.1655E+06	3685	-2.2873E+07	1.7745E+05	363	-3.6597E+07	-2.1655E+06	3685	
Swedish	30	-7.8423E+07	-2.9004E+06	3685	-2.1213E+07	9.2048E+05	363	-7.8397E+07	-2.8754E+06	3685	
	40	-8.0243E+07	-2.9201E+06	3685	-5.9137E+06	1.1137E+06	373	-8.0243E+07	-2.9201E+06	3685	
Canadian	30	-8.6429E+07	-3.0322E+06	3685	-1.1621E+07	2.4876E+06	373	-8.6429E+07	-3.0322E+06	3685	
	40	-8.8447E+07	-3.0539E+06	3685	-1.1469E+07	3.2670E+06	373	-8.8447E+07	-3.0539E+06	3685	

Step 3 : After cavern and deposition hole											
Initial earth pressure	Cavern spacing (m)	Hole spacing (m)	Nodes with maximum compressional stress			Nodes with maximum tensile stress			Nodes with maximum deviatoric stress		
			σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node
Korean	40	3	-6.5737E+07	-1.6532E+06	469	-2.6598E+07	1.9585E+06	276	-6.5737E+07	-1.6532E+06	469
	30	6	-5.0784E+07	-8.0695E+05	469	-1.5283E+07	8.1325E+05	354	-5.0784E+07	-8.0695E+05	469
	40	6	-5.2088E+07	-8.3100E+05	469	-2.3217E+07	8.2858E+05	276	-5.2088E+07	-8.3100E+05	469
Swedish	40	3	-1.3672E+08	-3.6454E+06	469	-5.8475E+07	5.7150E+06	276	-1.3672E+08	-3.6454E+06	469
	30	6	-1.0495E+08	-2.1245E+06	469	-5.1042E+07	3.0683E+06	276	-1.0495E+08	-2.1245E+06	469
	40	6	-1.0794E+08	-2.1785E+06	469	-5.2422E+07	3.2757E+06	276	-1.0794E+08	-2.1785E+06	469
Canadian	40	3	-1.4949E+08	-4.0609E+06	469	-6.7245E+07	5.2956E+06	276	-1.4949E+08	-4.0609E+06	469
	30	6	-1.1234E+08	-2.7275E+06	469	-1.1593E+07	3.4688E+06	3873	-1.1234E+08	-2.7275E+06	469
	40	6	-1.1564E+08	-2.7874E+06	469	-1.1407E+07	4.4820E+06	3873	-1.1564E+08	-2.7874E+06	469

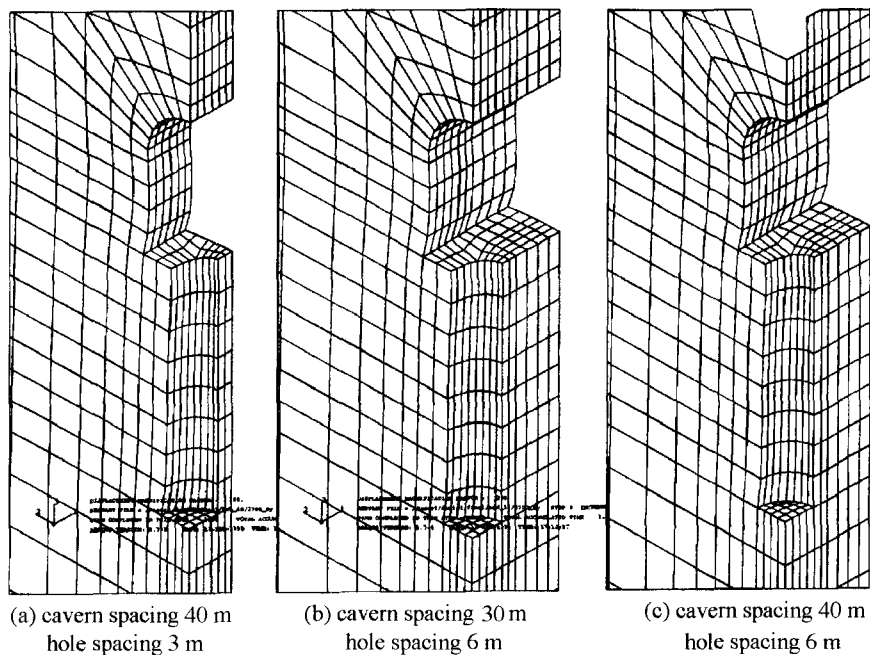


Fig. 4. Deformation around the cavern and deposition hole after excavation with 200 times magnification under the in situ stress condition in Canada.

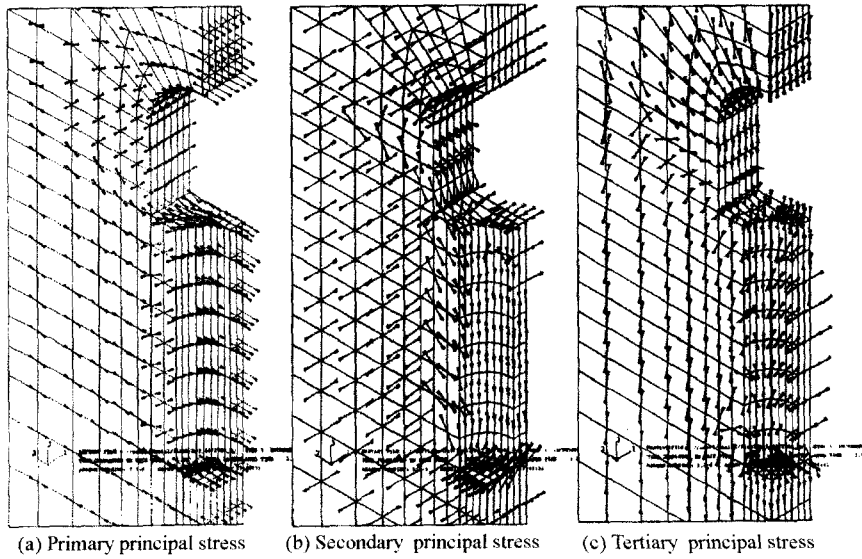


Fig. 5. Magnitude of principal stresses at each node after the excavation of cavern and deposition hole under the in situ stress condition in Canada (cavern spacing 40 m and deposition hole spacing 3 m).

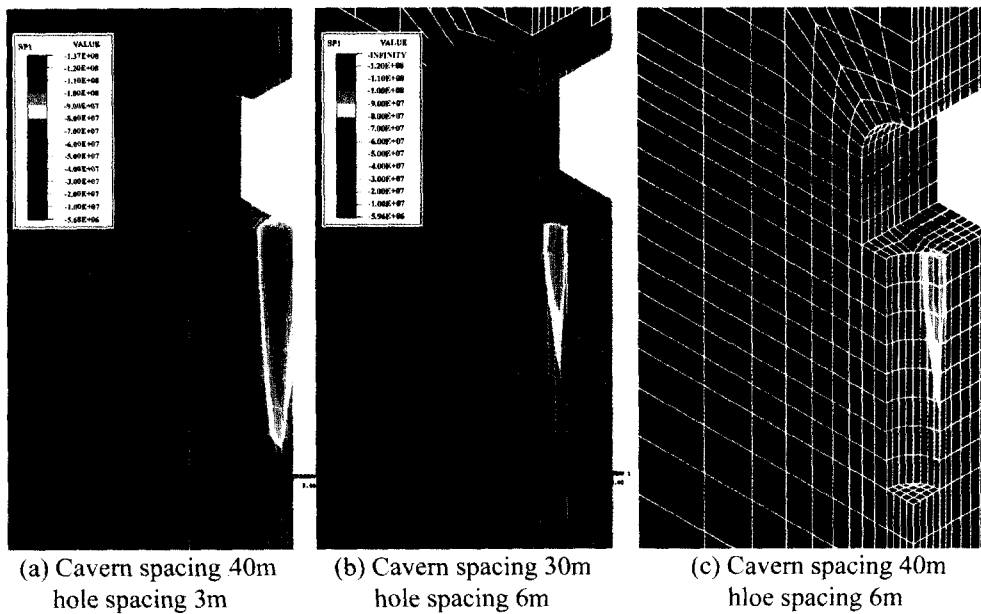


Fig. 6. Primary principal stress contour after the excavation of cavern and deposition hole under the in situ stress condition recommended by Sweden.

Fig. 5는 캐나다에서 적용한 초기지압상태에서 공동 및 처분공을 굴착한 후의 각 노드에서의 주응력 벡터를 도시한 것이다. 1차, 2차, 3차 주응력은 서로 직교하며, 노드마다 방향이 변하는 것을 관찰할 수 있다. 여기서는 특히 노드 469와 276(Fig. 3 참조)에서 크랙이 갈 가능성이

가장 높다. 즉 무결암일 경우 암반에 크랙이 가는 방향을 이 그림으로 예측할 수 있다. 여기서 2차 주응력 벡터가 1차 주응력 벡터보다 길게 보이는 이유는 보는 점(view point)의 위치에 따라 길이가 달라 보이기 때문이다.

Fig. 6은 스웨덴에서 권고한 초기지압 상태에서 굴착한

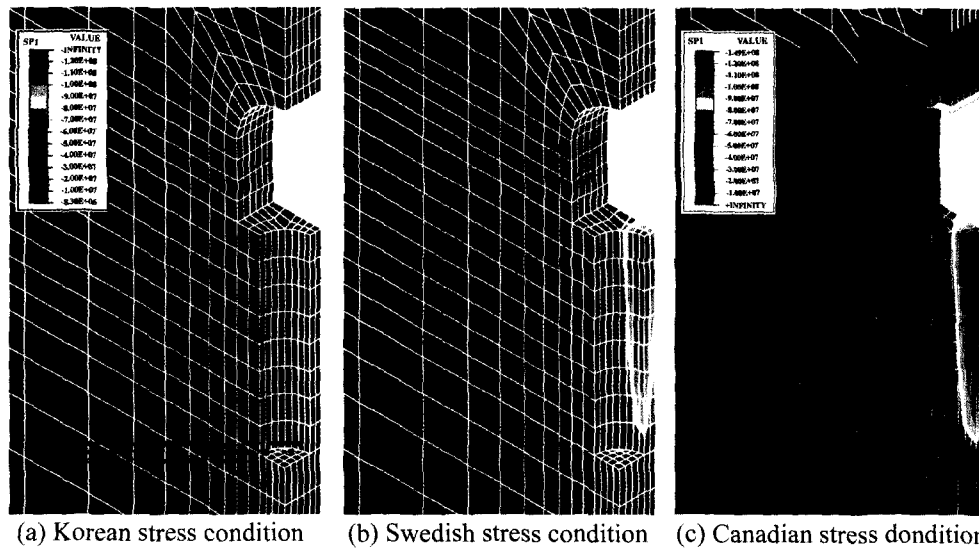


Fig. 7. Comparison between the primary principal stress contours after the excavation of the cavern and deposition hole using different in situ stress conditions

공동간격과 처분공 간격이 변함에 따라 달라지는 1차주 응력 분포도를 같은 스케일로 조절하여 도시한 것이다. 공동간격이 40 m이고 처분공 간격이 3 m인 경우(a)가 현저하게 빨간 색 부분이 많이 나타난 것을 볼 수 있다. 그림 (b)와 (c)의 경우 분포도는 거의 비슷한 양상을 보이는데 처분공 간격이 6 m인 경우 공동간격이 40 m에서 30 m로 줄어든다고 해서 역학적 안정성에는 크게 변화가 없다는 것을 말한다. 이는 중요한 결과로 만일 공동간격 30 m에서 방사성폐기물 붕괴열에 의한 영향이 모든 부분에서 안전하다고 입증되었다면, 역학적으로는 이 간격을 선택해도 무방하며, 이는 같은 처분장 부지 면적에서 보다 많은 폐기물을 처분할 수 있다는 것을 의미한다. 즉 처분공 간격을 6 m로 했을 때 공동 간격 40 m보다는 30 m를 선택함으로써 약 25% 더 많은 방사성폐기물을 처분할 수 있다. 하지만 공동간격을 40 m로 그대로 두고, 처분공 간격을 3 m로 줄이면 처분량은 두 배로 늘일 수 있지만 역학적 안정성은 상당히 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Table 1과 같이 세 가지 초기지압을 각각 가한 뒤 공동간격 40 m, 처분공간격 3 m로 공동 및 처분공을 굴착한 후 응력재분배에 의한 1차 주응력의 변화를 스케일을 같이하여 비교한 것이다. 국내 지압분포를 근거로 도출한 초기지압 결과에는 빨간 부분이 나타나지 않았다. 즉 낮은 1차주응력 분포를 보이며, 그만큼 암반

파괴의 가능성이 적다는 것을 알 수 있다. 스웨덴의 경우나 캐나다의 경우 붉은 부분이 많은데 그만큼 많은 압축 응력이 처분공 사이에 집중적으로 걸리고 있으며, 이 부분이 파손될 가능성이 높다는 것을 짐작할 수 있다. 특히 두 수평 초기지압이 가장 높은 캐나다의 경우가 스웨덴의 경우보다 훨씬 많은 압축응력을 받으며, 파손가능성이 가장 높다는 것을 알 수 있다.

결국 초기지압분포는 굴착이후 응력재분배로 인한 지하 암반구조물의 안정성에 결정적인 영향을 미치며, 실제 처분장 부지가 확정되면 역학적 관점에서는 가장 신중히 측정되어야 하며 우선 얻어야 할 필수적인 데이터라는 것을 알 수 있다.

5. 결과 분석

본 절에서는 4절에서 기술한 해석 결과를 바탕으로 주어진 초기지압 하에서 굴착으로 인한 응력재분배에 의해 암반이 파괴되는지의 여부를 판단하고, 또한 파괴되지 않는다면 어느 정도의 안전계수를 가지고 있는지를 분석 기술하고자 한다. 암반 파괴 여부를 진단하기 위한 파괴 기준식은 Hoek-Brown 파괴기준식⁸⁾을 사용하였다.

5.1. 암석 파괴기준

암석의 파괴이론은 현재까지 여러 전문가들에 의해 많

이 발표되었지만, 여기서는 그 중 암석역학분야에서 가장 보편적으로 사용하고 비교적 간편한 Hoek-Brown이 제시한 파괴기준식을 근거로 해석결과를 분석하였다.

Hoek-Brown 파괴기준식은 개념적으로 Griffith 이론^{10,11)}에 근거를 두지만 암석절리 및 파쇄암석까지 포함하여 넓은 범위의 암석강도를 적용하기 위해 시행착오적으로 유도한 경험식을 제안한 것으로 파괴기준식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (14)$$

여기서,

σ_1, σ_3 = 시험 시편에 작용하는 최대 및 최소주응력

σ_c = 신선한 암석시편의 단축압축강도

m = 암석의 성질, 즉 주로 내부마찰각, 구성입자의 결합성 등에 좌우되는 상수 (심하게 교란된 암반 (0.001)~무결암화강암(30)⁴¹⁾)

s = 암석의 성질, 즉 응력을 가하기 전의 시험편의 파손상태로 인한 인장강도에의 영향에 좌우되는 상수 (절리암반(0)~무결암(1)⁴¹⁾)

$$m = m_1 \exp \frac{RMR-100}{14 I_m}$$

m_1 = 무결암에 대한 m 값

I_m = 무교란 암반이나 TBM공동 암반에서 1, 교란된

암반이나 발파진동에 노출된 암반에서 2

$$s = \exp \frac{RMR-100}{6 I_s}$$

I_s = 무교란 암반의 경우 1, 교란된 암반의 경우 1.5

$RMR = 9 \ln Q + 44$

RMR = Bieniawski의 암반분류법¹²⁾에 의한 값

Q = Barton의 Q분류법¹³⁾에 의한 값

본 연구에서는 해석으로부터 구한 취약부에서의 최대 및 최소 주응력을 식 (14)에 대입하고 무결암 화강암에 해당하는 상수 값 $m=30, s=1$ 을 대입해 파괴시 최대압축강도를 계산하고, 그 점에서 해석결과로부터 도출된 1차주응력(σ_1)과 비교하여 안전계수를 구했다.

5.2 Hoek-Brown의 파괴기준식에 의한 안정성 검토

Table 4와 Table 5는 식 (4)에 Table 3에 있는 값들을 대입하여 파괴가 일어나는 1차주응력 값을 계산하고, 이 값과 그 점에서 ABAQUS 해석결과로부터 얻은 1차주응력 값을 비교하여 안전계수를 구하였다. 암석의 단축압축강도는 Table 2에서 언급한 200 MPa값을 사용하였다. Table 4는 공동만 굴착했을 때의 계산결과이고, Table 5는 공동과 처분공 모두를 굴착했을 때의 계산결과이다.

해석결과를 Hoek-Brown 파괴기준식에 의해 분석한

Table 4. Mechanical safety factor after excavating cavern only

Initial earth pressure	Cavern spacing (m)	Node with max. principal stress (compressional)			Node with min. principal stress (tensile)			Node with min. principal stress (tensile)		
		σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node
		단위 : Pa (= 1.0197E-05 kgf/cm ²)								
Korean	30	-3.5829E+07	-2.1566E+06	3685	-2.3023E+07	1.7080E+05	363	-3.5829E+07	-2.1566E+06	3685
	40	-3.6597E+07	-2.1655E+06	3685	-2.2873E+07	1.7745E+05	363	-3.6597E+07	-2.1655E+06	3685
Swedish	30	-7.8423E+07	-2.9004E+06	3685	-2.1213E+07	9.2048E+05	363	-7.8397E+07	-2.8754E+06	3685
	40	-8.0243E+07	-2.9201E+06	3685	-5.9137E+06	1.1137E+06	373	-8.0243E+07	-2.9201E+06	3685
Canadian	30	-8.6429E+07	-3.0322E+06	3685	-1.1621E+07	2.4876E+06	373	-8.6429E+07	-3.0322E+06	3685
	40	-8.8447E+07	-3.0539E+06	3685	-1.1469E+07	3.2670E+06	373	-8.8447E+07	-3.0539E+06	3685

Initial earth pressure	Cavern spacing (m)	σ_1 at failure	Factor of safety	Node	σ_1 at failure	Factor of safety	Node	σ_1 at failure	Factor of safety	Node
	40	2.3237E+08	6.35	3685	1.9714E+08	8.62	363	2.3237E+08	6.35	3685
Swedish	30	2.4249E+08	3.09	3685	1.8476E+08	8.71	363	2.4215E+08	3.09	3685
	40	2.4275E+08	3.03	3685	1.8142E+08	30.68	373	2.4275E+08	3.03	3685
Canadian	30	2.4426E+08	2.83	3685	1.5586E+08	13.41	373	2.4426E+08	2.83	3685
	40	2.4456E+08	2.77	3685	1.3955E+08	12.17	373	2.4456E+08	2.77	3685

Table 5. Mechanical safety factor after excavating both cavern and deposition holes

Initial earth pressure	Cavern spacing (m)	Hole spacing (m)	Node with max. principal stress (compressional)			Node with min. principal stress (tensile)			Node with min. principal stress (tensile)		
			σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node	σ_1	σ_3	Node
Korean	40	3	-6.5737E+07	-1.6532E+06	469	-2.6598E+07	1.9585E+06	276	-6.5737E+07	-1.6532E+06	469
	30	6	-5.0784E+07	-8.0695E+05	469	-1.5283E+07	8.1325E+05	354	-5.0784E+07	-8.0695E+05	469
	40	6	-5.2088E+07	-8.3100E+05	469	-2.3217E+07	8.2858E+05	276	-5.2088E+07	-8.3100E+05	469
Swedish	40	3	-1.3672E+08	-3.6454E+06	469	-5.8475E+07	5.7150E+06	276	-1.3672E+08	-3.6454E+06	469
	30	6	-1.0495E+08	-2.1245E+06	469	-5.1042E+07	3.0683E+06	276	-1.0495E+08	-2.1245E+06	469
	40	6	-1.0794E+08	-2.1785E+06	469	-5.2422E+07	3.2757E+06	276	-1.0794E+08	-2.1785E+06	469
Canadian	40	3	-1.4949E+08	-4.0609E+06	469	-6.7245E+07	5.2956E+06	276	-1.4949E+08	-4.0609E+06	469
	30	6	-1.1234E+08	-2.7275E+06	469	-1.1593E+07	3.4688E+06	3873	-1.1234E+08	-2.7275E+06	469
	40	6	-1.1564E+08	-2.7874E+06	469	-1.1407E+07	4.4820E+06	3873	-1.1564E+08	-2.7874E+06	469
Korean	40	3	2.2508E+08	3.42	469	1.6612E+08	6.25	276	2.2508E+08	3.42	469
	30	6	2.1257E+08	4.19	469	1.8659E+08	12.21	354	2.1257E+08	4.19	469
	40	6	2.1293E+08	4.09	469	1.8633E+08	8.03	276	2.1293E+08	4.09	469
Swedish	40	3	2.5239E+08	1.85	469	6.9850E+07	1.19	276	2.5239E+08	1.85	469
	30	6	2.3179E+08	2.21	469	1.4387E+08	2.82	276	2.3179E+08	2.21	469
	40	6	2.3255E+08	2.15	469	1.3936E+08	2.66	276	2.3255E+08	2.15	469
Canadian	40	3	2.5776E+08	1.72	469	8.5404E+07	1.27	276	2.5776E+08	1.72	469
	30	6	2.4014E+08	2.14	469	1.3505E+08	11.65	3873	2.4014E+08	2.14	469
	40	6	2.4096E+08	2.08	469	1.1001E+08	9.64	3873	2.4096E+08	2.08	469

결과는 다음과 같다:

계산되기 때문이다.

공동만 굴착한 경우

- 안전계수는 전반적으로 2.77 이상의 큰 값을 보임으로 구조적으로는 안정하다는 것을 알 수 있다.
- 세 가지 초기지압 모두 최대압축 주응력이 걸리는 점에서 가장 낮은 안전계수가 계산되었다.
- 최대 압축주응력이 걸리는 점은 모두 노드 3685로 공동 천장의 중앙부위이다.
- 캐나다에서 적용한 초기지압에 의한 해석결과가 가장 낮은 안전계수가 계산되었는데 이는 캐나다 초기 수평지압이 가장 크기 때문이다. 즉 공동만 굴착한 경우 초기 수평지압의 크기가 구조적 안정성에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.
- 최대압축주응력이 걸리는 점에서 공동간격이 40 m보다 30 m일 때 근소하나마 더 큰 안전계수를 보인다. 이는 어느 정도 이상의 공동 간격에서는 공동 간격이 줄어들면 굴착으로 인해 증가하는 필라에서의 수직응력보다는 응력재분배로 인한 수평응력의 감소가 더욱 많아지면서 이들의 조합으로 계산되는 1차주응력은 공동 간격이 적을 때 오히려 적은 값이

공동과 처분공 모두를 굴착한 경우

- 세 가지 초기지압 모두 공동간격이 40 m, 처분공간격이 3 m에서 가장 낮은 안전계수가 계산되었다. 이는 처분공이 굴착된 경우, 공동 간격보다는 처분공간격이 더 주요 요소로 작용한다고 추정할 수 있다.
- 국내지압분포를 근거로 도출한 초기지압의 해석결과는 공동간격 40 m, 처분공간격 3 m인 경우 최대 압축주응력이 걸리는 노드 469에서 3.42가 계산되었다. 이는 아주 높은 값으로 응력재분배에 의한 구조적인 안정성에는 문제가 없는 것으로 결론지을 수 있다.
- 스웨덴이나 캐나다 초기지압으로 계산한 경우 모두 최대 인장응력이 걸리는 점 노드 276에서 가장 낮은 안전계수가 계산되었는데 각각 1.19와 1.27로 비교적 낮은 값이다. 그러나 1 이상의 값이므로 응력재분배로 인한 파괴는 일어나지 않는다.
- 수평지압이 낮은 스웨덴의 경우가 캐나다의 경우보다 더 낮은 안전계수를 보였는데 이는 두 수평지압의 편차가 캐나다의 경우보다 크기 때문에 단면이 원형인 처분공 주위에서의 응력집중도가 크게 나타

났기 때문이다.

6. 결 론

현재 국내에서는 고준위방사성폐기물처분장이 갖추어야 할 기능을 만족하면서 정해진 부지 내에 되도록 많은 폐기물을 처분할 수 있는 처분장 배치방안을 마련 중에 있다. 본 연구에서는 이러한 작업의 일환으로 가상 부지의 세 가지 초기지압조건 하에서 지하 500 m에 설정한 몇 가지 간격으로 처분공동과 처분공을 굴착했을 때 초기지압을 받고 있던 심지층 암반이 응력재분배에 의해 어떻게 거동하고 응력분포는 어떻게 변하는지를 해석하였다. 또한 주어진 암반 강도에 비추어 파괴가 일어나는지의 여부를 밝히며, 파괴가 일어나지 않는다면 어느 정도 안전하고 구조적으로 가장 취약한 부분은 어느 곳인지도 확인하였다.

본 연구의 해석결과에 의하면, 국내지압분포를 근거로 도출한 초기지압 하에서는 공동간격 40 m, 처분공간격 3 m인 경우 안전계수 3.42가 계산되어 아주 안정한 결과를 얻었고, 스웨덴이나 캐나다의 초기지압 경험식의 경우의 안전계수는 각각 1.19와 1.27로 비교적 낮은 값이지만 1 이상의 값이므로 응력재분배로 인한 파괴는 일어나지 않는다는 결과를 얻었다.

초기지압분포는 굴착이후 응력재분배로 인한 지하 암반구조물의 안정성에 결정적인 영향을 미치며, 실제 처분장 부지가 확정되면 역학적 관점에서는 가장 신중히 측정되어야 하며 우선 얻어야 할 필수적인 데이터라는 것을 알 수 있다. 암석역학 분야에서 초기지압 측정은 아주 중요한 분야로 여러 가지 측정 방법이 개발되고 있다. 그러나 지하 500 m 이상 깊숙한 곳의 초기지압을 측정하기란 그리 쉬운 일이 아니며 그 측정오차 또한 심하다. 때문에 심지층에 방사성폐기물을 처분하고자 한다면 이 분야의 기술개발에도 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

여기서는 예비해석 단계로 여러 가지 부지 특성적인 데이터가 주어지지 않아 등방성 균질한 무결암을 모암으로 하는 선형탄성해석만을 수행하였다. 향후 해석에 필요한 모든 데이터를 얻는다면, 처분용기를 정치(定置)하고 되메움재(backfill) 및 완충재(buffer) 등을 채운 뒤 습윤 팽창(swelling)이나 열팽창으로 인해 주변응력이 변한 상태에서의 응력해석을 수행할 필요가 있다. 또한 균열이 고려된 모델링에 대한 연구도 필요하다. 이를 위해서는 부지선정 전이라도 재료의 변형 특성치, 열적인 특성치,

균열 관련 데이터 등에 대한 보편적인 여러 가지 데이터를 모으고 정리할 필요가 있다.

또한 본 해석에서는 항복점을 넘어서 암반 및 밀봉재의 복잡한 거동을 정량화하고 모델링 하기 위한 자료나 지식이 불충분하기 때문에 항복진행해석은 수행하지 않았다. 향후 이에 대한 연구도 이루어지기를 기대한다.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구비에 의해 이루어진 연구결과로서 관련자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1979, Fundamentals of Rock Mechanics, third edition, Chapman and Hall Limited, London
2. SKB, 1999, Review and Comments-KAERI's Concept Study for Spent Fuel Disposal, submitted by SKB to KAERI under contract of 1997-10-01
3. 임한욱, 이정인, 1991, 심도에 따른 암반내 초기응력의 변화와 그 경향성, 터널과 지하공간, 1.1, 91-101
4. 이희근, 양형식, 1997, 응용암석역학, 서울대학교출판부
5. Simmons, G.R., Baumgartner, P., 1994, The Disposal of Canada's Nuclear Fuel waste: Engineering for a disposal Facility, AECL Research, Whiteshell Laboratories, AECL-10715, COG-93-5
6. Tsui, K.K., Tsai, A., 1994, Three-dimensional Thermal and Thermo-mechanical Analyses for the Near-field of a Disposal Vault with the Borehole Emplacement Option, Ontario Hydro Report NWESD N-03788-940014
7. Herget, G., 1987, Stress Assumptions for Underground Excavations in the Canadian Shield, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 24, 95-97
8. Hoek, E., Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, 527p.
9. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998, ABAQUS/Standard User's Manual Volume I, II III", Verson 5.8
10. Griffith, A.A., 1921, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. roy. Soc. London, A 221, 103-198
11. Griffith, A.A., 1924, The Theory of Rupture, Proceed. 1st Int. cong. Applied Mech., Delft, 55-63
12. Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering Classification of Jointed rock Masses, Trans. S. Afr. Inst. civ. eng. 15, 335-344

13. Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974, Engineering classification of Rock Masses for the Design of

Tunnel Support, Rock Mech. rock Eng., 6.4, 189-236



박 병 운

1982년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과, 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 토목공학과, 공학석사
2000년 서울대학교 공과대학 토목공학과, 공학박사

Tel : 042-868-8376

E-mail : bypark@nanum.kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위 폐기물 처분기술개발팀,
Post-Dr.



권 상 기

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학석사
1996년 미국 Missouri-Rolla 대학교 Mining Engineering, 공학박사

Tel : 042-868-2632

E-mail : swonsk@nanum.kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위 폐기물 처분기술개발팀,
Post-Dr.
