

심지층 고준위 방사성 폐기물 처분장의 개념설계를 위한 구조적 안정성 해석

권상기¹⁾ · 장근무²⁾ · 강철형³⁾

Structural Analysis for the Conceptual Design of a High Level Radioactive Waste Repository in a Deep Deposit

Sang-Ki Kwon, Keun-Moo Chang and Chul-Hyung Kang

ABSTRACT Two-dimensional and three-dimensional DEM programs, UDEC and 3DEC, were used to investigate the mechanical stability of the conceptual design of deposition drift and deposition holes constructed in a crystalline rock mass. From the simulations, the influence of discontinuities, the number of deposition holes, and deposition hole interval on the stability of deposition drift and deposition holes could be determined. From the two-dimensional and three-dimensional analysis, it was concluded that three-dimensional analysis should be carried out for deriving reliable conclusions. Even though the deposition hole interval changed from 8 m to 3 m, which did not damage the mechanical stability of the deposition drift.

Key words : high level nuclear waste, deep repository, DEM, mechanical analysis, borehole spacing

초 록 결정질 암반에 설치되는 처분공과 처분터널의 구조적 안정성을 평가하기 위해 UDEC과 3DEC을 이용하여 2차원 해석과 3차원 해석의 결과를 비교 분석함으로써 불연속면의 존재, 처분공 사이의 간격 등이 처분터널과 처분공의 안정성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 2차원 및 3차원 불연속 해석모델에서 최대주응력 및 파괴발생 가능성이 큰 지점은 터널과 불연속면 사이의 암반이다. 또한 처분공을 포함하는 해석단면에 대한 2차원 및 3차원 해석결과, 합리적인 결과를 얻기 위해서는 3차원 해석이 필요함을 제시할 수 있었다. 그리고 처분공 간격이 8 m에서 3 m로 감소하더라도 처분터널의 역학적 안정성에는 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

핵심어 : 고준위 방사성 폐기물, 심지층처분장, DEM, 구조해석, 처분공간격

1. 서 론

과거 수십년간의 연구를 통해 심지층에 고준위 방사성 폐기물 처분장을 건설하는 것이 방사성 폐기물을 영구적으로 안전하게 처분할 수 있는 방법으로 여겨지고 있다. 심지층 처분장의 경우 수리전도도가 낮고 핵종에 오염된 지하수가 지표까지 도달하는데 많은 시간이 걸리기 때문에 안정성을 확보하는데 유리한 반면, 높은 지압으로 인해 지하 처분 공동들의 안정성을 확보하는데 어려움이 따르는 단점이 있게 된다. 즉, 공동 굴착전 평형상태에 있던 응력이 공동의 굴착후 일정 부분에 집중되거나 이완됨으로써 공동의 역학적 안전성을 해치는 결과를 초래할 수 있기 때문에 이를 평가하는 것이 공동의 설계단계에서 반드시 필요하다.

방사성 폐기물 처분장을 비롯한 지하구조물의 역학적 안정성 해석은 일반적으로 평면 변형을 개념에 근거한 2차원 단면 해석이 적용되고 있다. 2차원 안정성 해석은 3차원 해석에 비해서 해석절차가 신속, 간편하기 때문에 다양한 경계조건하에서의 구조적 안전성을 평가하는데 유리한 측면이 있다. 하지만 2차원 터널 안정성 해석에서는 불연속면의 방향은 터널의 진행방향과 동일한 것으로 가정하기 때문에 실제 현장조건에 부합하는 모델을 만드는 데 어려움이 있다. 즉 불연속 암반에서의 터널구조물의 안정성은 주요 불연속면의 역학적 특성, 불연속면의 경사

- 1) 정회원, 한국원자력연구소
 - 2) 정회원, 한국전력 원자력환경기술원
 - 3) 한국원자력연구소
- 원고 접수일 : 1999년 3월 5일
원고 심사 완료일 : 1999년 5월 1일

뿐만 아니라 터널과의 거리, 경사 방향등의 요소에도 영향을 받게 되는데 2차원 해석은 이러한 불연속면의 공간적 특성을 모델화하는데 제한이 따르며 따라서 해석 단면의 선택에 따라 3차원 해석결과와 차이를 보이게 된다.

본 연구에서는 불연속면의 기하학적 분포적 특성을 모델화하는데 유리한 개별요소법(DEM)을 이용하여 불연속면의 진행방향을 고려한 3차원 해석과 2차원 터널단면 해석을 수행하였다. 먼저 불연속면이 존재하지 않는 암반에 대해서 2차원과 3차원의 각각의 모델에 대해서 동일한 암반 물성과 경계조건하에서 해석을 실시하였으며, 다음 단계에서는 다수의 불연속면을 포함하는 해석을 실시하여 불연속면의 방향성을 고려한 3차원 해석과 2차원 해석을 상호 정량적으로 비교, 분석하고자 하였다.

고준위 방사성 폐기물의 처분장의 처분공(Deposition Hole) 사이의 간격은 폐기물의 발열량, 구조적 안정성, 굴착 영향권대에서의 지하수 유동로의 평가 등을 기준으로 결정이 되는데 본 연구에서는 처분공의 간격에 따른 역학적 안정성에 대한 해석을 수행하였다. 즉 처분공의 간격을 변화시키면서 구조물의 안정성을 평가함으로써 적절한 처분공의 간격에 대한 평가를 하고자 하였다. 처분공의 설치가 공동의 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위해 처분터널만을 고려한 모델과 처분공을 포함하는 모델에 대한 해석을 실시하였으며 불연속면이 공동과 처분공의 역학적 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위해 무절리면의 경우와 절리면을 포함하는 경우로 나누어 2차원과 3차원 해석을 실시하였으며 이를 통해 2차원 모델과 3차원 모델을 상호 비교 분석하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 프로그램은 UDEC Ver. 2.0 과 3DEC Ver. 1.5 이다.

2. 심부암반의 물성 및 역학적 안정성 판단 기준

국내 고준위 방사성 폐기물 처분시설의 개념으로는 처분장이 위치하는 심도는 지하 약 500 m 이상이며 처분터널간의 간격은 40 m, 처분터널의 길이는 약 200 m 정도이다. 이와 같이 방사성폐기물 처분시설은 일반적으로 지하 500 m~1000 m의 심부 암반층에 건설되며 따라서 처분시설의 설계를 위해서는 심부 암반의 물성에 대한 이해가 필요하다. 현재 국내 지하 심부 암반에 대한 자료가 부족하기 때문에 유사한 암반을 방사성폐기물 처분장 모암으로 고려중인 세계 각국에서 얻어진 심부 암반의 물성을 이용할 필요가 있다.

2.1 심부 암반의 물성

심부암반에 건설되는 지하공동의 구조적 안정성을 결정하는 주요 요인으로는 현지 응력, 암반의 물성, 불연속면의 분포 및 물성 등을 들 수 있다.

2.1.1 현지 응력 분포

세계 각지에서 다양한 응력 측정기법을 이용하여 지표면 부근에서부터 지하 수천 Km 지점까지의 초기응력을 측정하였다(Hoek and Brown, 1980). 이를 통해 얻은 결론으로는 (1) 수직응력은 암반자중에 의해 비교적 정확하게 결정될 수 있다. (2) 지표면 부근에서의 수평응력은 지각운동과 지반의 풍화 등의 원인으로 인해 일반적으로 수직응력보다 높은 값을 보이지만 지하 심부로 내려갈수록 정수압상태의 응력분포를 나타낸다. 임한욱과 이정인(1991)은 국내에서 측정된 응력측정자료로부터 수직응력 및 평균수평응력의 분포를 나타내는 다음 식을 구하였다.

$$\sigma_v = 1.36 + 0.0233 Z \quad (1)$$

$$\sigma_h = 2.78 + 0.0183 Z \quad (2)$$

여기서 σ_v , σ_h 는 수직, 수평응력(MPa)을, Z는 심도(m)를 나타낸다. 즉 고준위 방사성폐기물 처분시설의 건설 심도로서 고려중인 지하 500 m 지점에서의 수직응력은 13 MPa, 수평응력은 12 MPa로서 정수압상태와 유사한 응력분포를 가지는 것으로 나타난다. 이러한 현지응력의 측정자료에 기초하여 본 연구에서는 수직응력은 지중압을 고려하였으며 수평압은 수직압과 동일하다고 가정하였다.

2.1.2 암반의 강도

국내 고준위 폐기물 처분장 모암중의 하나로 고려중인 화강암은 석영과 장석을 주성분으로 하는 단단한 결정질 암석으로서 높은 강도와 낮은 공극률을 보인다. 화강암의 물성에 대해서는 스웨덴과 핀란드(Heikkila and Hakala, 1998; Tolppanen *et al.*, 1995) 등에서 많은 연구가 있어 왔다. Table 1은 스웨덴과 핀란드에서 주로 무결함 화강암 시험편을 이용하여 실험실 실험을 통해 얻어진 화강암

Table 1. Properties of intact granite

Properties	Unit	Sweden	Finland
Young's modulus	GPa	40~75	40~79
Poisson's ratio		0.2~0.3	0.18~0.36
Friction angle	degree	35~45	
Density	Kg/m ³	2600~2800	2600~2800
UCS*	MPa	150~250	92~254

*UCS : Unconfined compressive strength

의 물성을 보여주고 있다.

현지 암반의 강도는 실험실에서 무결함 시험편을 사용하여 측정된 강도와는 여러 가지 이유에서 서로 다른 수치를 보인다. Johansson (1993) 등의 연구에 따르면 현지암반의 강도는 실험실 강도의 절반 정도이고, 포화된 암석은 포화되지 않은 암석 강도보다 낮은 값을 보인다. 또한 실험실에서 측정되는 암석 강도는 시험편의 크기에 영향을 받는데 Hoek과 Brown(1980)은 10 mm에서 200 mm 까지의 무결함 시험편을 이용한 단축압축강도 시험을 통해 다음 식을 얻었다.

$$\sigma_c = \sigma_{c50} (50/d)^{0.18} \quad (3)$$

여기서 σ_c 는 단축압축강도, σ_{c50} 는 50 mm 직경의 암석편을 이용하여 측정된 단축압축강도를, 그리고 d는 시험편의 직경을 나타낸다. 불연속면 암반의 강도를 결정할 때는 불연속면과 공동면에 의해 형성되는 암석 블록의 크기를 이용하여 강도를 결정하게 된다(Simmons and Baumgartner 1994).

2.1.3 불연속면의 영향

실제 암반에는 단층, 절리 등 불연속면이 존재하며 처분장의 인접한 곳에 위치한 불연속면들은 지하수의 통로 역할을 할 뿐만 아니라 공동 주위의 응력분포에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 심도가 증가함에 따라 균열의 발생 빈도나 균열사이의 틈간격 등에도 차이를 보인다. Bianchi와 Snow(1968)에 따르면 심도가 증가함에 따라 균열의 발생빈도는 감소하며 균열의 틈간격은 현지응력의 증가로 인해 감소하는 경향을 보인다.

2.2 역학적 안정성 판단기준

방사성 폐기물 처분 후, 필요시 회수해야 하는 기간인 폐기물 처분 후 50년간 정도의 기간 동안 지하 처분장은 안전한 상태를 유지하여야 한다. 지하처분장의 안전성을 장기간 유지하기 위해서는 다음 요소들을 고려한 설계가 필요하다.

2.2.1 변위

공동의 굴착 후 발생하게 되는 암반의 변위는 암반의 안정성을 평가할 수 있는 가장 신뢰할 수 있는 자료가 된다. 방사성폐기물을 저장하는 처분공동주위 암반의 변위가 큰 경우 처분용기(Canister)에 기계적인 손상을 줄 수 있기 때문에 처분공동 주위에서의 변위가 적정 수준이하로 유지될 수 있도록 설계하는 것이 필요하다. 예를 들어 스웨덴에서는 처분공동 주변 암반의 변위가 10 mm 이하로 유

지되어야 한다고 규정하고 있다(Scott, 1983).

2.2.2 응력집중

지하 암반에 인공구조물이 만들어지면 기존의 평형상태에 있던 응력은 재분포되며 응력의 재분포시 특정 지점에 과도한 응력이 집중되는 경우 암석은 파괴된다. 암석의 인장강도는 압축강도나 전단강도에 비해 매우 낮기 때문에 낮은 인장력의 발생에 의해서도 공동 주위의 암반은 파괴되기 때문에 공동의 설계시 공동주위에 인장대가 발생하는가를 결정하는 것은 매우 중요하다. 공동 굴착후 최대주응력이 압축강도보다 높을 경우 압축력에 의해 깨어지는 암석편이 터널 표면에서 떨어져 나오게 되거나 경우에 따라 암석이 폭발적으로 붕괴되는 rock burst가 발생하기도 한다. 이러한 압축력에 의한 파괴형태를 결정하기 위해 다양한 방법이 사용되고 있다. Zhen-Yu (1988)는 중국의 지하구조물에서 발생하는 파괴양상을 조사하여 응력과 단축압축강도의 비로서 표현하였다. Table 2는 단축압축강도와 최대주응력의 비(UCS / σ_1)에 따른 암석의 파괴양상을 보여주고 있다. 또한 최대주응력과 최소주응력의 차이에 비례하는 전단응력이 전단강도 이상이 될 때는 전단파괴가 발생하게 되는데 Table 3은 최대, 최소주응력의 비에 따른 파괴 양상을 보여주고 있다.

이와 같이 공동의 안전성을 평가하기 위해서는 암석의 강도와 공동 굴착후 발생하는 응력을 고려하여야 한다. 스웨덴의 기준을 따를 경우 Fig. 1에서와 같이 지하처분장과 지표면 사이에 위치하는 70%의 암반에서 암석강도

Table 2. Rock burst classes(Zhen-Yu,1988)

Class	UCS / σ_1^*	Description	Notes
1	>13.5	No rock bursting	No noises
2	13.5~5.5	Low rock burst activity	Light noises
3	5.5~2.5	Moderate rock burst activity	Strong cracking noises
4	<2.5	High rock burst activity	Very strong cracking noises

* σ_1 : Maximum Principal Stress

Table 3. Intensity of rock burst(Tolppanen et al., 1995)

Class	σ_3^* / σ_1	σ_1 / UCS	Description
1	0.5	0.1	No rock bursting
2	0.4	0.2	Low rock burst activity
3	0.3	0.3	Moderate rock burst activity
4	0.2	0.4	High rock burst activity
5	0.1	0.5	Very high rock burst activity

* σ_3 : Minimum Principal Stress

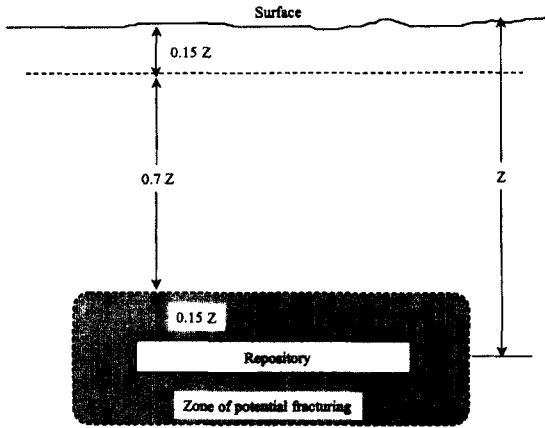


Fig. 1. Potential fracture zone around a repository in granitic rock.

에 대한 응력의 비가 1 이하로 유지되도록 해야한다 (Scott, 1983). 또한 공동에서부터 1.5 m에 위치하는 암반에서는 응력이 강도의 절반이하로 유지되도록 해야하며, pillar의 안전성을 확보하기 위해서는 pillar에서도 응력이 암석강도의 절반 이하로 유지되도록 해야 한다(Scott, 1983).

3. 지하 처분장의 역학적 안정성 해석

지하 고준위 방사성 폐기물 처분장의 역학적 안정성을 해석하기 위해 필요한 암반의 물성치들은 Table 1의 스웨덴의 화강암 물성 자료를 참고로 하였다. 그리고 해석에서 사용된 암석 및 절리의 물성은 Table 4과 Table 5와 같다. Table 6는 절리면 해석에 포함된 절리면들의 경사와 경사각 그리고 절리면의 수를 나타내고 있다. 본 해석에서는 경사각 30° 경사방향 160° 인 불연속면을 주불연속면으로 고려하였으며 이들의 간격은 5 m로 해석 모델 내에 8개가 존재하는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 절리면들을 포함하고 있는 모델을 보여주고 있다. 처분터널의

Table 4. Intact rock properties used in the simulations

Properties	Unit	Value
Young's modulus	GPa	60
Poisson's ratio		0.25
Friction angle	Degree	38
Density	kg / m ³	2700
Uniaxial compressive strength	MPa	200
Tensile strength	MPa	6.3
Cohesion	MPa	25

Table 5. Joint properties used in the simulations

Properties	Unit	Used value
Normal stiffness	GPa/m	100
Shear stiffness	GPa/m	0.1
Friction angle	Degree	30

Table 6. Joint sets used in the 3DEC simulations

Joint set	Dip	Dip direction	Number of joints
1	73	170	2
2	80	350	2
3	78	85	1
4	82	285	1
5	74	120	1
6	79	300	1
7	30	160	8

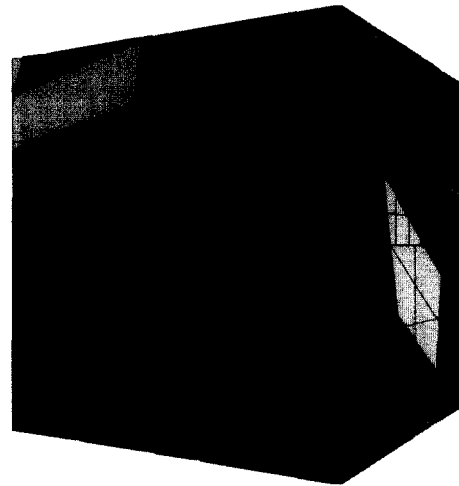


Fig. 2. Three-dimensional model with joint sets.

간격이 40 m 인 경우를 기준 모델로 하였기 때문에 모델의 크기는 40 m×40 m×40 m로 하였다. Fig. 3은 해석 모델에서 고려된 지하처분터널과 처분공의 모습을 보여주고 있다. 처분터널은 그림과 같은 마제형이며 단면의 크기는 높이가 5 m, 밑변의 길이는 4 m 이다. 방사성폐기물을 저장하기 위해 일정간격으로 처분터널 중심선을 따라 터널 바닥에 수직하게 굴착되는 처분공의 단면은 2.08 m, 길이는 7.96 m 이다. 공동 굴착전의 초기 수직응력은 암석의 밀도와 깊이를 고려하여 구하였으며 수평응력은 수직응력과 동일하다고 가정하였다. 따라서 처분터널이 위치하는 심도에서의 초기 응력은 약 13 MPa 이다.

3.1 2차원 해석단면의 역학적 안정성 해석

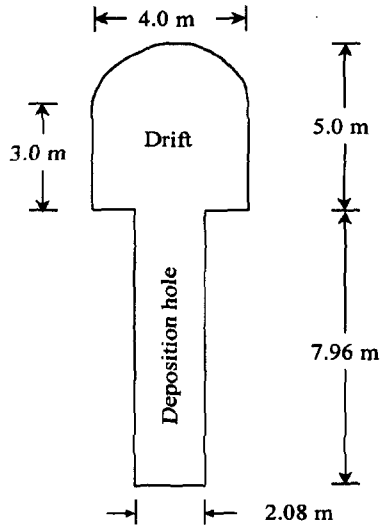


Fig. 3. Dimensions of drift and deposition hole.

2차원 해석에서는 Fig. 2의 3차원 해석모델의 전면부를 2차원 해석단면으로 설정하였으며 해석결과를 3차원 해석 결과와 비교하고자 하였다. 3차원 모델에서는 처분공을 포함하므로 2차원 모델에서는 처분공을 포함하지 않는 단면과 처분공을 포함하는 단면으로 나누어서 해석을 실시하였다. 이러한 불연속면을 포함하는 해석에 앞서서 불연속면이 없는 처분터널 단면의 해석을 실시하여 역시 불연속면이 없는 3차원 모델과의 해석 결과를 비교하고자 하였다.

3.1.1 불연속면이 없는 암반 모델에 대한 역학적 안정성 해석

불연속면과 처분공을 포함하지 않는 처분터널의 역학적 안정성 해석은 탄성 해석으로 수행되었다. Fig. 4는 처분터널 주위 암반의 응력 및 변위가 공동 벽면으로부터 멀어짐에 따라 변화하는 양상을 보여주기 위해 설정된 측정선의 위치를 보여주고 있다. 측정선의 길이는 5 m 이다. Fig. 5는 공동굴착 후 발생하는 최대주응력과 공동 굴착전의 초기지압의 비를 각 측정선에 대해서 보여주고 있다. 해석 모델은 좌우 대칭이므로 Fig. 5에서는 측정선 A-D만을 대상으로 하였다.

터널의 상부 (측정선 A)에서 발생하는 최대주응력은 초기지압의 약 2.4배이며 터널면에서 약 1 m 범위 내에서 급속히 감소하다가 약 5 m 범위를 벗어나면 초기응력 범위에 거의 도달함을 보여준다. 터널의 모서리(측정선 C)에서의 최대주응력은 초기응력의 약 2.7배로서 이 영역에서 가장 큰 응력집중이 발생하고 있음을 알 수 있다. 터

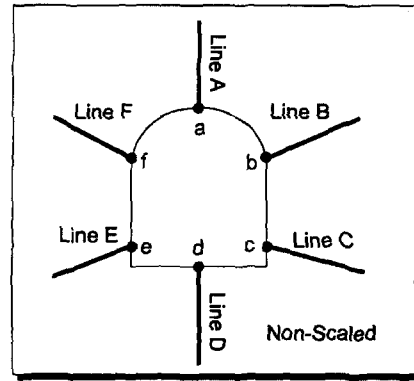


Fig. 4. Measuring lines and points.

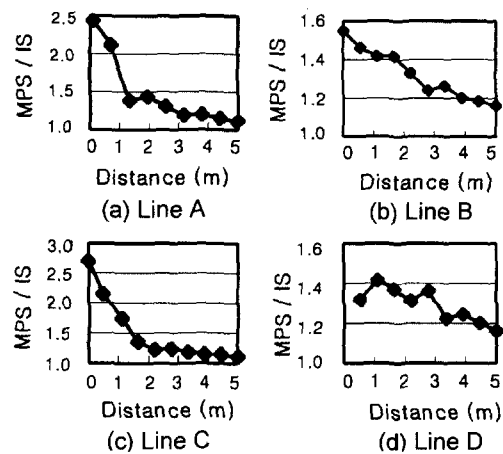


Fig. 5. Ratio of Max. principal stress to initial stress vs. distance from the tunnel wall (MPS : Maximum Principal Stress, IS : Initial Stress).

널하부 암반 (측정선 D)에서 발생하는 최대주응력은 초기 지압의 1.3~1.4배 정도로서 터널면에서 멀어짐에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 즉 터널 바닥으로부터 약 1 m 지점에서 가장 높은 응력치를 보이고 이후 다시 초기응력 범위로 감소하는 양상을 보이는데 이는 터널이 마제형이기 때문으로 사료된다.

최대 변위 발생지점은 Table 7 과 같이 터널 측벽부의 중심인 바닥면 상부 1.5 m 지점으로써 이 지점에서의 변위는 약 0.9 mm 이다. 그리고 터널바닥면의 중심에서 상부방향 변위는 약 0.8 mm, 터널 천정부 중심에서의 허부방향 변위는 약 0.5 mm로서 공동 주위에서의 변위가 매우 미세한 것으로 나타난다.

3.1.2 2차원 절리암반에서의 처분터널 및 처분공의 역

Table 7. Displacements in X and Y directions in the measuring points (Unit : mm)

Points	Displacements in X dir.	Displacements in Y dir.
a	-	-0.51
b	-0.87	-0.14
c	0.31	+0.27
d	-	+0.80

학적 안정성 해석

불연속면을 포함한 모델에서의 처분공의 영향을 파악하기 위해 처분공을 포함하는 단면과 처분공을 포함하지 않는 경우에 대해 각각 해석을 실시하여 비교하였다. 해석은 불연속면과 처분공의 영향으로 발생 가능한 소성영역의 파악을 위해 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 탄소성 해석을 실시하였다. 불연속면의 방향 및 분포는 Fig. 6과 같으며 이는 상기한 바와 같이 Fig. 2의 전면부에 드러나는 불연속면을 모델화 하였다.

그림 Fig. 7은 Fig. 4의 관측선을 따른 최대주응력의 변화를 보여준다. 처분공을 포함하지 않는 처분터널 단면의 해석결과, 불연속면의 영향으로 터널주위 암반에 작용하는 응력과 변위는 전반적으로 증가하는 양상이지만 소성 영역은 나타나지 않는다. 특징적인 변형거동 양상으로는 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 터널과 불연속면 사이의 암반에서 응력이 상대적으로 높은 값을 보여준다는 점이다. 즉 측정선 A에서 나타난 바와 같이 터널과 불연속면사이의 최대주응력은 초기지압의 약 5배 범위이며 불연속면을 벗어나면서 응력은 급속히 감소하는 양상을 보여 준다. 이러한 특징은 측정선 B와 F를 비교한 그림에서도 나타난다. 즉 터널 좌측에 존재하는 불연속면의 영향으로 우측에 비해서 2배 정도의 큰 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

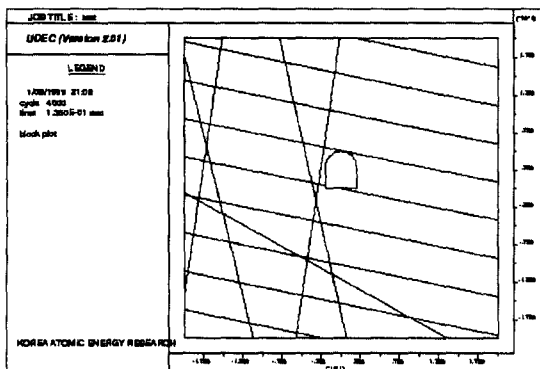


Fig. 6. Joint patterns around the tunnel.

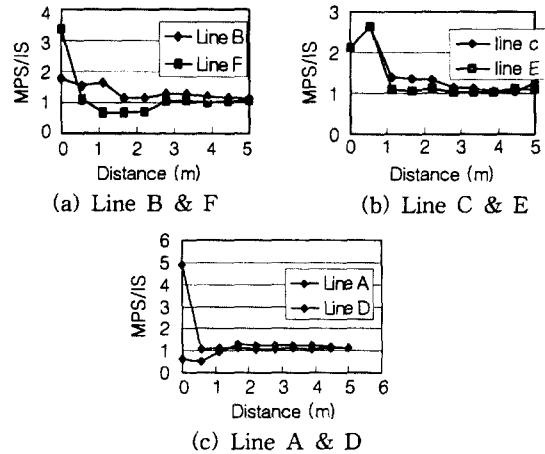


Fig. 7. Ratio of Max. principal stress to initial stress vs. distance from the tunnel wall (MPS : Maximum Principal Stress, IS : Initial Stress).

Table 8은 관측점에서의 변위를 보여준다. 터널 좌측의 불연속면과 터널이 이루는 블록의 존재로 인해서 좌측 영역에서의 변위가 우측 영역에 비해서 상대적으로 큰 양상을 보인다. 최고 변위 발생 지점은 터널과 불연속면이 교차하는 터널 좌측 지점이며 이 지점에서 매우 가까운 측정점 e에서의 수평변위는 약 9 mm 이다. 이 변위는 동일한 우측 지점에서 수평변위의 3배 이상이다. 그리고 터널 상부에서의 변위도 하부에 비해서 큰 값을 보여 준다.

Fig. 8은 처분공 단면의 주응력의 크기 및 방향을 보여 준다. 처분터널 해석단면 결과와 같이 터널상부에서 응력 집중이 가장 크게 발생한다. 처분공의 굴착으로 인한 터널상부에서의 주응력 변화는 거의 없으며 전체적인 응력 발생 양상은 처분터널 단면의 해석결과와 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나 처분공의 좌측 영역에서는 불연속면 및 터널로 이루어진 블록에서의 변위가 크게 발생되어 응력 개방이 크게 발생한다. Fig. 10은 Fig. 9에서의 계측선을 따른 최대 주응력대 초기 지압의 비를 거리에 따라

Table 8. Displacements in X and Y directions in the measuring points (unit : mm)

Points	Displacements in X-dir.	Displacements in Y-dir.
a	1.81	-2.49
b	-2.67	0.75
c	-2.71	1.31
d	0.83	1.73
e	8.76	0.18
f	5.90	-0.12

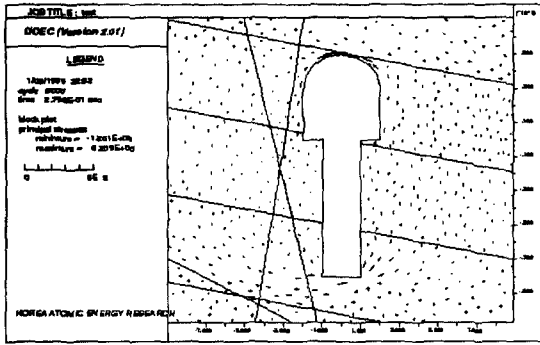


Fig. 8. Principal stresses around the tunnel and the deposition hole.

도시하였다. 처분공을 포함하지 않는 해석 단면의 결과인 Fig. 7(b)의 계측선 E와 동일한 계측선인 Fig. 10(a)의 계측선 G를 상호 비교하면, 처분공의 굴착으로 인해서 좌측 인접 블록의 움직임이 증가되어 응력 개방이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 11은 전체적인 변위발생을 20배 확대해서 도시하였다. 이미 기술한 바와 같이 처분공 좌측의 움직임이 가

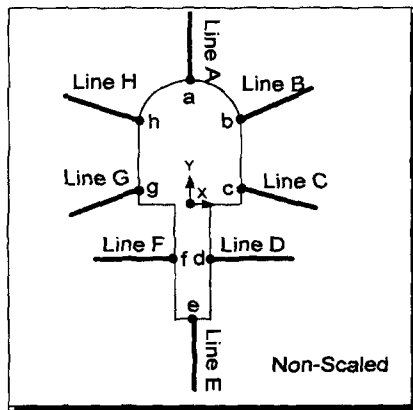


Fig. 9. Measuring lines and points around the tunnel and the deposition hole.

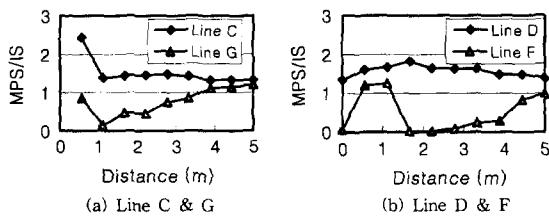


Fig. 10. Ratio of max. principal stress to initial stress vs. distance from tunnel.

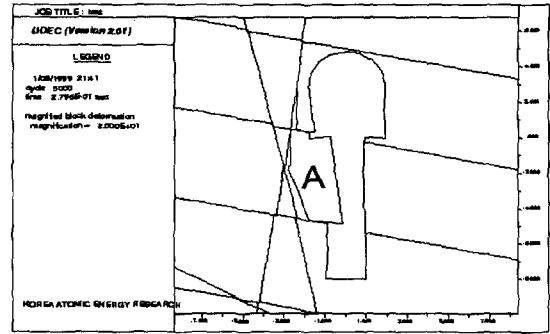


Fig. 11. Deformation of the tunnel and the deposition hole (magnification \approx 20 times).

Table 9. Displacements of the measuring points (unit : mm)

Points	Displacements in X-dir.	Displacements in Y-dir.
a	+3.28	-9.21
b	-3.81	-3.27
c	-2.83	-2.27
d	-4.81	-1.54
e	+1.57	+2.27
f	+35.3	+2.93
g	+24.3	-6.06
h	+9.44	-7.03

장 자유로운 “A” 블록을 이루는 불연속면과 터널의 교점에서 가장 큰 변위가 발생한다. Table 9에서와 같이 이 지점에서 가장 근접한 관측점 F에서의 수평변위는 약 35 mm이며 “A” 블록의 불연속면이 처분터널과 만나는 점에 근접한 관측점 g에서의 변위는 24.3 mm로서 다른 관측점에 비해서 상당히 큰 변위를 보여 준다.

처분공 단면의 해석 결과, 처분공의 굴착으로 인한 처분터널 주위의 소성 영역의 발생이나 응력의 변화가 크지 않으므로 처분공의 굴착 자체가 처분터널의 안정성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판명된다. 그러나 처분공의 간격을 고려할 수 없는 2차원 해석모델의 한계로 인해서 처분공으로의 블록의 움직임이 일정간격의 처분공을 가진 3차원 모델에 비해서 상대적으로 크기 때문에 변위는 실제보다 크게 계산된 것으로 볼 수 있다.

4. 3DEC을 이용한 해석결과

UDEEC을 이용한 2차원 해석에서 얻은 결론을 바탕으로 3DEC을 이용한 3차원 해석을 절리면을 포함하는 경우와

절리면을 포함하지 않는 경우로 나누어 실행하였다. 2차원 해석에서는 불가능한 처분공 간격에 따른 공동 안전성의 영향에 대하여 파악하기 위해 처분공 사이의 간격을 8 m, 6 m, 3 m 인 경우에 대해 해석을 실시하였으며 탄성 모델과 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 사용하였다.

4.1 무절리면 해석

처분공의 간격에 따른 구조물의 거동 변화를 관찰하기 위해 절리면을 고려하지 않은 상태에서 처분공의 간격을 바꾸어 가면서 3DEC을 이용하여 3차원 해석을 실시하였다. Fig. 12는 처분공의 간격이 6 m 일 때의 변위 분포를 보여주고 있다. 불연속면이 존재하지 않는 경우 최대 변위는 공동의 벽면에서 발생하며 이는 UDEC의 결과와 동일하다. 이 경우 공동 벽면에서 발생하는 최대변위는 약 0.9 mm로 매우 낮은 값을 보이고 있다. 공동 바닥에서 공동 안쪽으로 발생하는 변위가 공동 천장에서의 변위보다 약간 크게 나타나며 처분공 벽면을 따른 변위는 매우 낮게 나타난다. Fig. 13은 터널 중앙선을 따라 절단된 단면에서의 최대주응력의 분포를 보여준다. 불연속면이 고려된 해석과의 직접적인 비교를 위하여 동일한 분포를 사용하였는데 그림에서 보듯이 최대주응력이 처분터널의 천정과 바닥에서 30 MPa 이하로 일정하게 나타나고 있다.

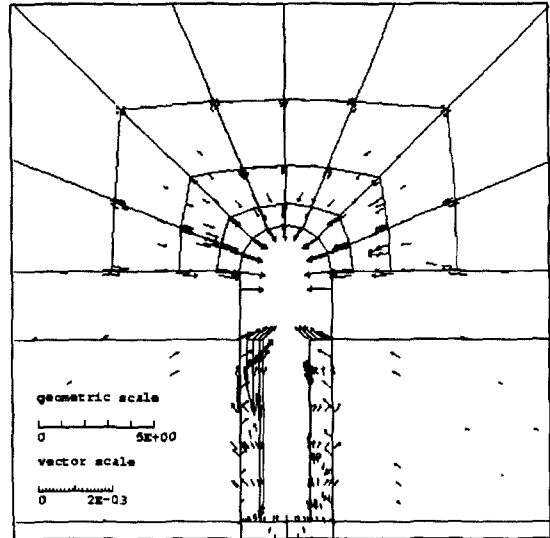


Fig. 12. Displacements around the tunnel and the deposition hole with 6 m hole interval without joints.

4.2 절리면 해석

절리면이 포함된 경우의 공동의 안정성을 평가하기 위해 무절리면 해석과 마찬가지로 처분공의 간격을 바꾸어

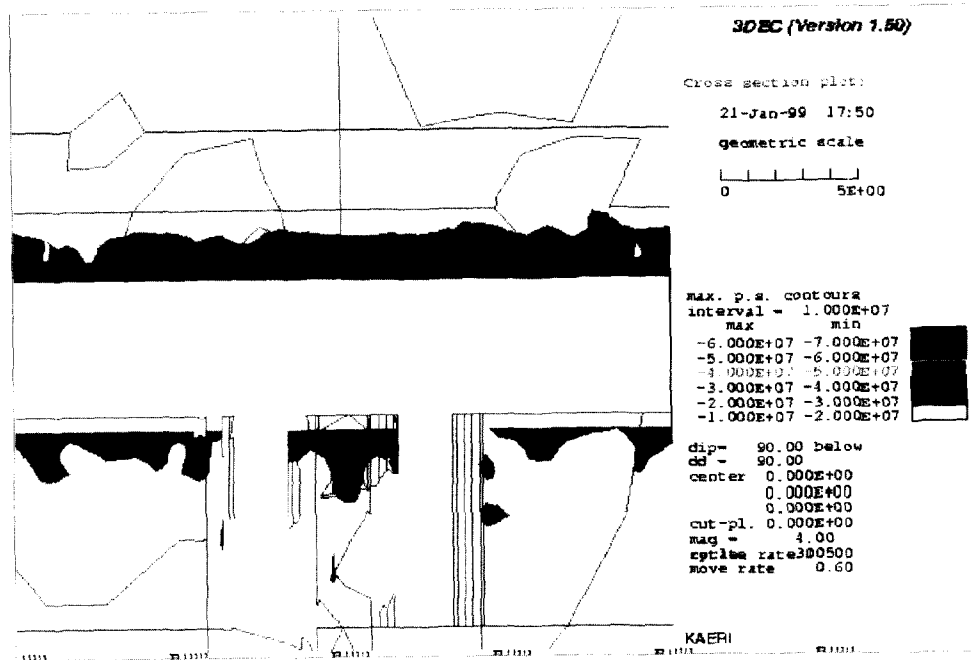


Fig. 13. Maximum principal stress distribution of the model with 6 m deposition hole interval without joints.



Fig. 14. Three-dimensional model with the deposition drift and deposition holes.

가면서 해석을 실시하였다. Fig. 14는 절리면을 포함한 모델의 처분터널과 처분공 그리고 절리면의 모습을 보여주고 있다. Fig. 15는 절리면이 존재하는 경우의 최대주응력의 분포를 처분터널 방향을 따라 보여주고 있다. 최대주응력은 불연속면과 공동면이 만나는 부근에서 매우

높게 나타나고 있다. 최대값은 약 60 MPa 정도로서 초기 응력의 약 4배 정도를 보인다. 절리면이 없는 경우 공동 천정과 바닥에서의 최대주응력의 분포가 처분터널을 따라 30 MPa 일정하게 나타나는 반면(Fig. 13), 절리면이 존재하는 경우 절리면의 위치에 따라 10 MPa에서 60 MPa 까지 심한 변화를 보여주고 있다.

Fig. 16은 공동주위 압반의 변위를 보여주고 있는데 2차원 해석에서와 같이 주불연속면을 따른 전단 변위에 의한 변위가 지배적인 영향을 미침을 알 수 있다. 최대 변위는 처분터널과 불연속면이 만나는 터널의 벽면에서 발생하며 4.5 mm의 최대변위를 나타낸다.

처분공 주위에서의 변위는 방사성 폐기물을 저장하는 canister의 안전성에 큰 영향을 미치지 때문에 중요하다 할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 처분공 주위에서는 불연속면이 처분공을 지나가는 경우에도 큰 변위를 보이지 않고 있는데 이는 불연속면을 따른 변위가 불연속면과 굴착면이 만드는 블록의 크기가 처분공의 크기에 비해 크기 때문으로 따라서 처분공 주위에서는 비록 불연속면이 지나가더라도 블록의 크기가 처분공보다 크다면 큰 변위가 발생하지는 않을 것으로 판단된다.

Table 10은 3DEC을 이용하여 다양한 조건하에서 실시한 해석 결과를 보여주고 있다. 처분공 사이의 간격이

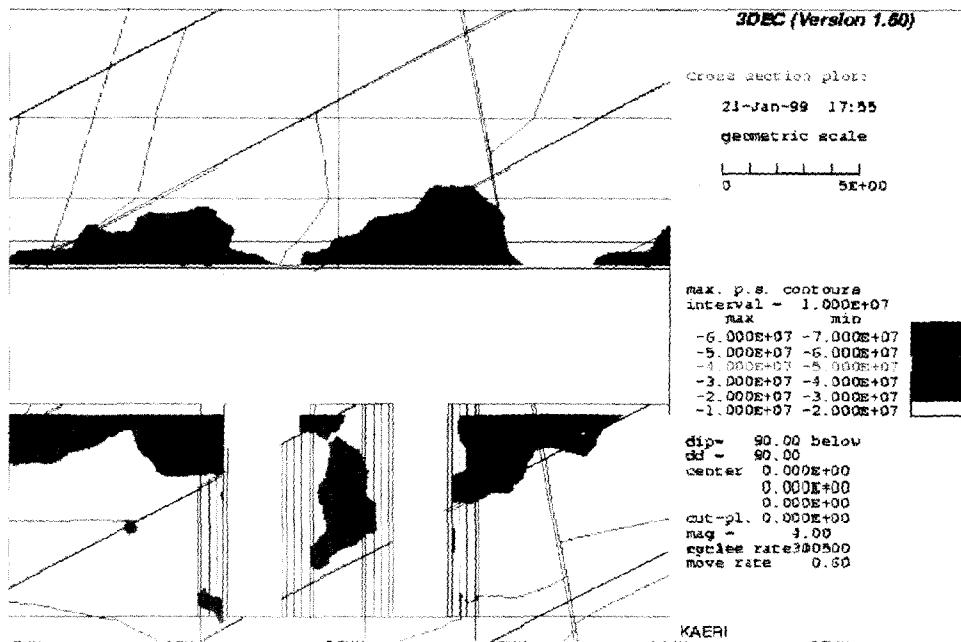


Fig. 15. Maximum principal stress distribution of the model with 6 m deposition hole interval with joints.

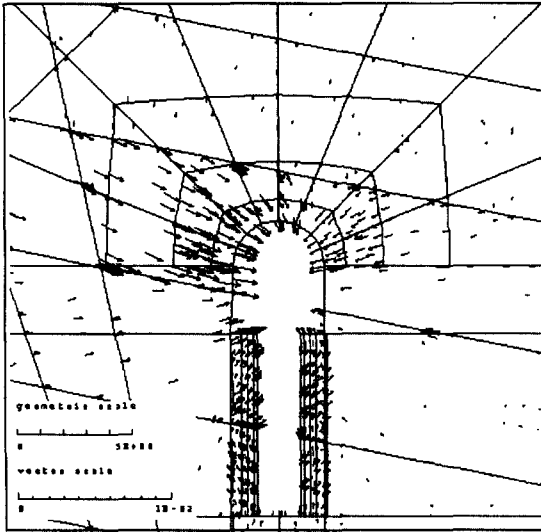


Fig. 16. Displacements around the drift and the deposition hole with 6 m hole interval with joints.

8 m에서 3 m로 줄어드는 경우 최대 주응력은 31 MPa에서 37.5 MPa로 증가하는 것으로 나타나지만 최대 변위에는 차이를 보이지 않는 것으로 나타난다. 이는 처분공의 간격이 줄어들더라도 최대 변위가 발생하는 처분터널의 벽면에는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 말한다. Case 1 과 Case 2, Case 8과 Case 9는 각각 탄성모델을 이용한 해석과 탄소성 모델을 이용한 해석의 차이를 보여주고 있는데 각각의 경우 최대 주응력은 탄성 모델을 사용한 경우가 탄소성 모델을 사용한 경우보다 약간 높게 나타난다. 하지만 최대 변위에는 차이를 보이지 않는다. 이는 공동의 굴착후 응력집중이 부분적으로 나타나더라도 소성대를 발생시키지는 않기 때문이다. 처분공의 개수가 증가함에 따른 응력 및 변위의 변화는 Case 4와 Case 5를 통

해 알 수 있는데, Table 10에서 보는 바와 같이 처분공이 없는 경우에 비해 처분공이 두 개 설치된 모델에서의 응력 및 변위의 증가는 미미하다는 것을 알 수 있다. 이는 처분공의 굴착으로 인해 처분터널의 안정성이 손상 받을 가능성이 매우 낮다는 것을 말해준다. Case 3, Case 6, Case 10에서 보듯이 불연속면이 고려되는 모델에서는 처분공 간격의 감소에 따른 최대주응력은 변화는 일정하지 않다. 이는 불연속면이 존재하는 경우에 발생하는 최대주응력은 불연속면과 공동면이 만나서 이루는 블록의 크기와 형상에 의해 결정되기 때문으로 판단된다. 최대주응력 및 최대변위에 가장 큰 영향을 미치는 것은 예상한 바와 같이 불연속면의 존재로서 Case 2와 Case 3, Case 9 과 Case 10에서 보듯이 불연속면이 고려된 모델에서는 불연속면을 고려하지 않은 모델에 비해 최대 주응력은 두 배 정도 증가하고 최대변위는 5배 정도 증가하는 것으로 나타난다. 이는 지하 심부구조물의 안정성을 결정하는 것은 불연속면의 존재라는 것을 보여주는 것이다. 따라서 지하심부에 건설되는 지하구조물의 설계를 위해서는 불연속면의 분포와 물성에 대해 정확히 파악해야하며 이들 물성과 분포를 포함하는 해석을 수행하여야 할 것으로 사료된다.

5. 2차원 해석과 3차원 해석의 결과 분석

5.1 변위 분포

평면 변형률을 가정하는 2차원 해석을 통해 3차원 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 반면 여러 가지 측면에서 차이를 보이기도 하였다. 예를 들어 2차원 해석과 3차원 해석에서의 변위 분포는 불연속면이 존재하지 않고 처분공이 없는 경우에 매우 유사한 해석결과를 나타내었

Table 10. Maximum principal stresses and maximum displacements for the cases

Case	Deposition hole interval (m)	Model type	Joints	Number of deposition holes	Max. principal stress(MPa)	Max. displacement (mm)
1	8	Elastic	No	2	31	0.9
2	8	Elasto-Plastic	No	2	28	0.9
3	8	Elasto-Plastic	Yes	2	55	4.5
4	6	Elastic	No	0	29	0.75
5	6	Elastic	No	2	32	0.9
6	6	Elasto-Plastic	Yes	2	60	4.5
7	6	Elasto-Plastic	No	3	29	0.9
8	3	Elastic	No	2	37.5	0.9
9	3	Elasto-Plastic	No	2	32.5	0.9
10	3	Elasto-Plastic	Yes	2	52.5	4.5

지만 불연속면이 존재하고 특히 처분공이 존재하는 경우에서는 해석 결과에 많은 차이를 나타내었다. 이는 2차원 해석에서 가정하는 평면 변형을 개념에 따라 불연속면의 방향이 터널 방향과 동일하게 가정되기 때문에 불연속면이 공동의 역학적 거동에 미치는 영향을 정확히 파악하기가 어렵기 때문이다. 2차원 해석과 3차원 해석의 가장 큰 차이는 불연속면이 고려된 모델에서 처분공이 존재하는 경우에 발생하였다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 처분공과 불연속면이 만나는 경우 2차원 해석은 처분공 안쪽으로 큰 변위가 발생하는 것으로 나타나나 3차원 해석 결과인 Fig. 16은 불연속면을 따른 처분공 안쪽에서의 변위가 거의 없음을 보여주고 있다. 이는 전술한 바와 같이 3차원 해석의 경우 실제 처분공의 크기를 모사할 수 있기 때문에 불연속면과 처분공이 만나더라도 불연속면에 의해 형성되는 블록의 크기가 처분공 직경보다 크다면 변위가 발생하지 않기 때문이다. 이와 같이 3차원 해석에서 계산되는 최대 변위는 4.5 mm로 공동의 벽면에서 불연속면과 만나는 곳에서 발생하는 것으로 나타나며 처분공 주위에서의 변위는 매우 낮은 값을 보이는 것으로 보아 변위에 의해 공동의 안정성이 손상 받을 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다. 단, 본 해석에서 사용한 불연속면의 간격은 주불연속면의 경우 5 m로서 처분공 직경에 비해 상대적으로 큰 값을 사용하였는데, 만약 불연속면의 간격이 매우 짧고 불연속면의 물성이 전단 변형을 야기할 가능성이 높은 경우에는 보다 큰 변위를 나타낼 것이다.

5.2 응력분포

전술한 바와 같이 공동주위 암반의 파괴거동을 예측하기 위해서는 암석의 강도와 최대주응력의 비 그리고 최대주응력과 최소주응력의 비를 고려하여야 한다. 불연속면이 존재하지 않고 처분공이 고려되지 않는 경우, 최대주응력은 2차원 해석의 경우 초기응력(13 MPa)의 약 2.7배, 즉 35 MPa이며 3차원 해석의 경우 29 MPa로 나타난다. 2차원 해석에 의한 응력집중(35 MPa)이 3차원 해석에 비해 큰 값을 보이고 것은 터널주변 모델요소의 크기에 따른 차이로 판단된다. 암석의 단축압축강도가 200 MPa 일 경우 단축압축강도에 최대주응력의 비는 약 5.7로서 Table 2에서 보듯이 rock burst의 발생가능성이 낮다. 하지만 불연속면이 고려되는 경우 최대주응력은 60 MPa 이상으로서 이는 단축압축강도에 최대주응력의 비가 3.3 정도로서 이 경우 rock burst의 발생이 어느 정도 예상되는 수치이다. 하지만 높은 응력이 발생하는 지점이

공동을 지나가는 불연속면의 부근에서 집중적으로 발생하는 것으로 보아 대규모의 파괴보다는 불연속면 부근에서의 소규모 파괴가 예상된다.

공동주위에서 발생하는 응력집중은 Fig. 5에서 보듯이 공동 벽면에서 멀어짐에 따라 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 공동에서 1.5 m 지점에서의 최대응력은 약 20 MPa로서 이는 파괴가 발생할 수 있는 영역이 공동 주변에 국한되고 있다는 것으로서 공동으로부터 1.5 m에 위치하는 암반에서의 응력이 암석강도의 절반이하로 유지되어야 한다는 스웨덴의 규정을 만족하는 것을 보여준다. 하지만, 실제 현장에서의 암석의 단축압축강도는 암석내의 균열, size effect 등의 영향으로 실험실에서 측정된 강도의 절반 정도로 보고(Johansson *et al.*, 1993; Hoek and Brown, 1980) 되고 암반강도가 시간에 따라 감소하는 경향(Schmidtke and Lajtai, 1985)이 있기 때문에 실제 공동의 설계시에는 이에 의한 효과를 고려하여야 할 것으로 생각된다.

6. 결 론

2차원과 3차원 개별요소법인 UDEC과 3DEC을 이용한 심지층 지하구조물의 구조적 안전성에 관한 연구를 수행한 결과, 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

1) UDEC을 이용한 불연속 해석모델에서 터널과 인접한 불연속면이 사이의 암반에서 응력집중도가 크게 발생하였다. 그리고 터널과 인접 불연속면으로 이루어진 암석 블록이 터널내부로의 움직임이 가능한 블록에서는 변위의 증가로 인한 응력개방이 발생하였다. 3DEC을 이용한 3차원 해석의 결과 최대주응력이 발생하는 곳과 파괴가 발생할 것으로 생각되는 곳은 불연속면과 공동이 만나는 곳과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다(Fig. 15). 이와 같이 암반의 변형거동과 공동의 안정성은 불연속면의 위치에 큰 영향을 받는다고 할 수 있으며 따라서 지하 암반내 공동의 안정성을 보다 정확히 평가하기 위해서는 불연속면의 분포를 정확히 조사하고 이를 해석에 포함시키는 것이 필요하다.

2) 처분공을 포함하는 2차원 해석의 결과 처분공의 굴착으로 인한 처분터널 주위에 소성영역의 발생이나 응력의 변화가 크지 않는 것으로 나타났다. 즉, 처분공의 굴착 자체가 처분터널의 안정성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 이는 3차원 해석에서 처분공의 수의 증가가 공동의 변위나 최대주응력의 증가에 미치는 영향이 미

미하다는 것으로도 증명된다. 또한 3DEC을 이용하여 다양한 조건하에서 실시한 해석결과에서 볼 수 있듯이 (Table 10), 처분공 사이의 간격이 8 m에서 3 m로 줄어드는 경우 처분터널에서의 최대 변위에는 차이를 보이지 않는 것으로 나타난다. 이는 처분공의 간격이 줄어들더라도 처분터널의 안정성에는 미치는 영향은 크지 않다는 것을 말한다.

3) 처분공을 포함하지 않은 해석에서는 2차원 해석과 3차원 해석결과는 유사하게 나타나지만 처분공과 불연속면을 고려한 해석에서는 처분공 주위에서의 변위는 3차원 해석에서는 2차원 해석에 비해 매우 낮은 수치를 보여주고 있다. 3차원 해석에서는 처분공의 크기와 불연속면에 의해 만들어지는 암반 블록의 크기를 고려할 수 있기 때문에 블록이 처분공 직경보다 큰 경우에는 큰 변위를 나타내지 않게 된다. 하지만 2차원 해석의 경우에는 원통형의 처분공을 실제적으로 모형화하는 것이 불가능하기 때문에 처분터널과 같은 방향으로 평면변형률을 가정하게 되며 결과적으로 불연속면이 처분공을 지나가는 경우 큰 변위를 나타내게 된다. 따라서 처분공과 처분터널을 함께 고려해야하는 해석모델에서는 3차원 모델을 이용하는 것이 필요하다.

4) 불연속면이 존재하는 경우 발생하는 최대주응력은 약 60 MPa로서 단축압축강도를 200 MPa로 가정할 경우 단축압축강도 대 최대주응력의 비가 3.3 정도로서 이 경우 Table 2에서 보듯이 rock burst가 발생할 가능성이 어느 정도 있는 것으로 나타난다. 하지만 응력집중이 일어나는 지점이 불연속면에 인접한 작은 영역으로서 공동의 전체적인 안정성을 해치지 않는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 임한욱, 이정인 1991, 심도에 따른 암반내 초기응력의 변화와 그 경향성, 터널과 지하공간, 한국암반역학회지 Vol. 1, pp. 91-101.
2. Bianchi, L. and Snow, D.T., 1968, Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, *Annals of Arid Zone*, 8(2), pp. 231-245.
3. Heikkila, E. and Hakala, M. 1998, Laboratory testing of Kivetty granite in borehole KI-KR10, Working Report 98-21e, Finland.
4. Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, *Underground excavations in rock*, Institute of Mining and Metallurgy, London.
5. Johansson, E. *et al.*, 1993, Rock mass behaviour around a nuclear waste repository in hard crystalline rock- overview based on numerical modelling, Work Report, TEKA-93-02.
6. Schmidtke, R.H. and Lajtai, E.Z., 1985, Technical note: The long-term strength of Lac du Bonnet granite. *Int. J. of Rock Mech. and Mining Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No. 6, pp. 461-465.
7. Scott, J.A., 1983, Limits on the thermal energy release from radioactive wastes in a mined geologic repository, Technical report ONI-4.
8. Simmons, G.R. and Baumgartner, P., 1994, The disposal of Canadas nuclear fuel waste: Engineering for a disposal facility, AECL Research, AECL-10715.
9. Tolppanen, P., Johansson, E. and Hakala, M., 1995, Rock mechanical analyses of *in-situ* stress/strength ratio at the TVO investigation sites Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, Published by Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-95-11, ISSN-0359-548X.
10. Zhen-yu, T., 1988, Support design of tunnels subjected to rockbursting, Proc. of 29th U.S. Symposium of Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, pp. 407-411.