

‘01 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

심지층 처분장의 구조 안정성 평가를 위한 3차원 모델링 및 민감도 분석

Three-Dimensional Modelling and Sensitivity analysis for the Stability Assessment of Deep Underground Repository

권 상기, 박정화, 최 종원, 강 철형

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

심지층 고준위 방사성 폐기물 처분시설의 역학적 안정성 평가를 위해 3차원 코드인 FLAC3D 이용한 해석이 실시되었으며 민감도 분석을 통해 응력비, 심도, 터널크기, 불연속면의 간격 및 물성 등이 주요 파라미터로 선정되었다. 이들 주요 파라미터들이 안정성에 미치는 영향 및 상호간의 영향을 fractional factorial design을 통해 분석하였다. 또한 불연속 암반에서의 불연속면의 분포 및 물성, 암반의 물성, 응력비 등이 처분터널 및 처분공의 안정성 해석을 위해 다양한 조건하에서 3DEC을 이용한 모델링이 실시되었다.

Abstract

For the mechanical stability assessment of underground high-level waste repository, computer simulations using the three-dimensional simulation code, FLAC3D, were carried out and important parameters including stress ratio, depth, tunnel size, joint space, and joint properties were chosen from the sensitivity analysis of the results. The main effect as well as the interaction effect between the important parameters could be analyzed using fractional factorial design. In order to analyze the stability of deposition tunnel and deposition hole in discontinuous rock mass, different modellings were performed under different conditions using 3DEC. From this, the influence of joint distribution and properties, rock properties, and stress ratio could be determined.

I. 서론

고준위 방사성 폐기물은 인간과 격리를 시키기 위하여 지하 수백 미터의 심부에 처분하는 것이 일반적인 방법으로 받아들여지고 있다. 방사성 폐기물을 지하의 심부 암반에 처분하기 위해 굴착되는 지하구조물은 처분장의 건설, 운영 및 감시 기간동안 역학적 안정성을 확보할 수 있도록 설계되어야 하며 이를 위해서는 처분장 지하구조물의 역학적 거동을 이해해야 한다. 처분장 개념설계에서 고려되는 지하구조물의 안정성을 평가하는데 필요한 파라미터들 중 처분장의 설계 안전성 및 성능에 심각하게 영향을 미치는 파라미터의 경우, 실험실 및 현지에서의 측정, 안정성 해석 및 해석 분석에 많은 주의를 요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 처분모암중의 하나로 고려되고 있는 화강암반에 심지층 처분장이 건설된다는 가정하에서 가장 중요하게 취급하여야 할 파라미터를 결정하기 위해 터널의 역학적 안정성 관점에서 부지 및 설계 파라미터들에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

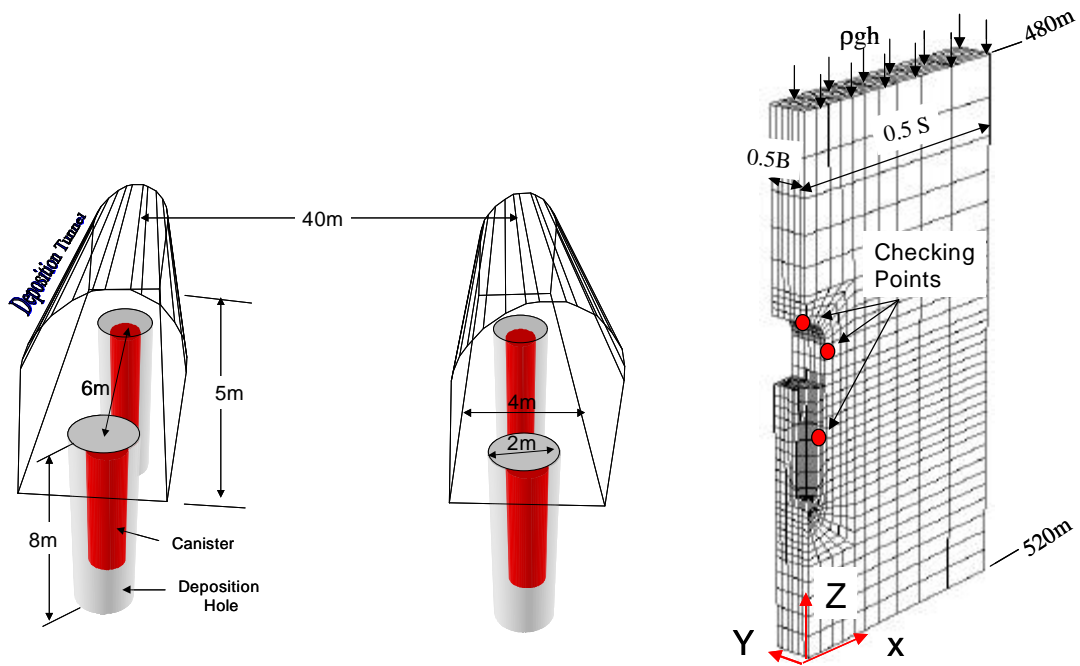
민감도 분석에서는 각 파라미터들에 대해 기준 처분 개념에서 고려하고 있는 값들을 중심으로 일반적으로 고려되는 최대, 최소 범위를 고려한 값을 선정하였으며 3차원 해석용 상용코드인 FLAC3D를 사용하여 터널 주위의 암반의 역학적 안정성을 평가하였다. 입력 파라미터들이 터널 안정성에 미치는 영향의 크기와 비중에 따라 중요 파라미터를 도출하였다. 중요 파라미터들의 경우 각각이 처분장의 안정성에 미치는 영향에 대한 분석과 함께 각 파라미터들 간의 상호작용에 대한 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 민감도 분석에서 결정된 중요 파라미터들에 대해 실험계획법의 하나인 일부실시법(fractional factorial design)을 이용하여 입력인자들 간의 상호작용을 비교 분석하였다.

또한 불균질 암반내의 처분장의 안정성을 평가하기 위해서는 불연속면을 고려한 해석의 수행은 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 불연속면을 고려한 역학적해석에 적합한 3DEC 을 이용하여 처분터널과 처분공 부근 암반의 역학적 안정성을 해석함으로써 처분장의 개념을 설정하는데 기여하고자 하였다.

II. 처분장의 역학적 해석 및 중요 파라미터의 선정

1. FLAC3D 를 이용한 역학적 해석

현재 고려되고 있는 기준 처분 개념에 따르면 500m 지하 화강암반에 40m 간격으로 처분터널이 굴착되며 각 처분터널에는 약 2m 직경의 처분공이 6m 간격으로 터널 바닥에 수직으로 굴착된다. 그림 1은 본 해석에서 기준 처분 개념으로 고려된 처분터널과 처분공을 보여주고 있다. 표 1은 스웨덴의 화강암을 기초로 작성되어 미국 Sandia National Lab (SNL)과 처분 개념설계를 하는데 사용한 데이터들이다[1]. 이 표를 중심으로 기준치에서 최소치와 최대치의 범위를 갖는 파라미터들에 대해 계산을 수행하였다. 화강암반은 등방성 균질 암반으로 가정하였으며 Mohr-Coulomb 소성모델을 사용하였으며 불연속면에 대한 영향을 고려하기 위해 Fossum [2]이 제시한 다음 식을 사용하였다.



(a) 처분터널 및 처분공의 개략도

(b) 경계조건 및 측정지점

그림 1. 민감도 분석에 사용된 (a) 처분장의 개략도 (b) 경계조건 및 측정지점

표 1. 민감도 분석에 사용된 물성치 및 그의 범위

	Parameter	Unit	Min.	Mean	Max
Variables	탄성계수 (E)	Gpa	50	60	70
	포아송비 (ν)		0.2	0.25	0.3
	밀도(ρ)	Kg/m ³	2600	2700	2800
	응력비 (σ_H/σ_v)(K)		0.5	1.0	2.0
	마찰각 (ϕ)	Degree	20	30	40
	인장강도 및 점착력	Mpa	10	15	20
	처분장 심도 (Z)	m	300	500	700
	터널 폭 (W)	m	-	4	5
	터널 높이 (H)	m	4.5	5	5.5
	터널 간격 (S)	m	30	40	50
	처분공 간격 (B)	m	5	6	7
	절리 간격 (J)	m	0.2	0.6	1.0
	절리면 강성 (Kn&Ks)	Gpa/m	50 5	100 10	150 15
Constants	모델 크기	m	40		
	처분공 직경	m	2		

Effective bulk modulus

$$K_m = \frac{1}{9} E \left[\frac{3(1+\nu)sk_n + 2E}{(1+\nu)(1-2\nu)sk_n + (1-\nu)E} \right] \dots\dots\dots(1)$$

Effective shear modulus

$$G_m = \frac{1}{30} \left[\frac{E}{(1+\nu)} \frac{9(1+\nu)(1-2\nu)sk_n + (7-5\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)sk_n + (1-\nu)E} \right] + \frac{2}{5} \frac{Esk_s}{2(1+\nu)sk_s + E} \dots(2)$$

여기서 E는 암석의 탄성계수이고, ν 는 포아송비이며, s 는 불연속면 간격, k_n k_s 은 불연속면의 수직강성과 전단강성이다.

2. 중요 파라미터의 선정

모델링의 조건을 바꾸어 가면서 각 경우에 대해 그림 1 (b)의 세 측정지점에서의 최대 주응력, von-mises 응력 및 변위의 변화를 기준으로 각 파라미터 별로 영향을 분석하였다.

a. 탄성계수의 영향 : 탄성계수가 60GPa에서 50GPa로 감소되는 경우 변위는 약 20% 증가하였다. 하지만 탄성계수의 변화가 응력에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 2는 탄성계수의 변화에 따른 변위의 변화를 보여준다. 탄성계수 값이 증가함에 따라 변위는 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 터널 벽의 경우에 0.013mm/GPa, 처분공의 경우 0.004mm/GPa로 변위가 큰 쪽에서 탄성계수의 영향이 크게 나타나고 있다.

b. 포아송비의 영향 : 포아송 비가 0.2에서 0.3 으로 40% 변할 때 최대 주응력과 von-mises stress는 약 2%의 변화를 보여준다. 즉 본 연구에서 고려한 변화 범위내에서는 포아송비가 응력에 미치는 영향은 아주 작은 것으로 나타난다. 변위의 경우 포아송 비가 증가함에 따라 약 4% 증가하며 터널 천정과 처분공에서의 변위가 조금 높게 나타난다.

c. 밀도의 영향 : 밀도를 2700Kg/m³ 에서 2800Kg/m³ 으로 약 3.7% 증가함에 따라 최대 주응력, von-mises stress 및 변위도 약 4% 증가하고 있다. 이는 밀도의 증가에 의해 현지응력이 선형적으로 증가되기 때문이다.

d. 현지응력비의 영향 : 현지응력비 (K)는 지층이 갖고 있는 수직응력과 수평응력의 비로서 K가 1에서 2로 증가하는 것은 수직응력은 그대로 둔 상태에서 수평응력만 2배로 증가한다는 것을 뜻하며 K가 1에서 0.5로 감소하는 것은 수평응력만 절반으로 감소시켰다는 것을 의미한다. K가 1에서 2로 증가할 때 터널 벽에서의 최대 주응력은 15 MPa에서 19 MPa로 증가하고 0.5로 감소하면 18 MPa로 증가한다. 즉 터널 벽에서의 최대 주응력은 K가 증가하거나 감소해도 K=1 일 때보다 각각 25% 및 19% 정도씩 증가하는 것으로 나타났다. K의 변화에 따른 각 위치에서의 변위 변화는 그림 3에 나타나 있다. 터널 벽에서는 K가 2로 증가하면 변위가 약 2배 정도, 0.5로 감소하면 약 절반 정도로 감소하고 처분공에서는 K가 2로 증가하면 변위가 85% 정도 증가하고, 0.5로 감소하면 20%정도 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 터널 천장에서는 K가 2로 증가하면 변위가 약 58% 감소하고, K가 0.5로 감소하면 약 22%정도 증가하고 있다. K의 값이 감소하는 경우에도 변위가 증가하는 것은 K의 감소에 따라 수평응력에 의한 봉압효과 (confining effect)가 감소하기 때문으로 판단

된다. 따라서 K가 증가하면 처분장은 전체적으로 안정성에 문제가 발생할 가능성이 높고, K가 감소하는 경우에는 터널 벽에서의 안정성에 문제가 될 수 있지만 터널 천장이나 처분공의 안정성은 향상될 것으로 예상된다. 이와 같이 현지응력의 비인 K는 부지에 따라 값의 변화가 심하며 응력의 집중과 변위의 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나므로 부지 선정 및 처분장 설계를 위해서는 대상 부지에서의 현지응력을 정확히 측정하고 이를 설계, 건설, 운영에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

e. 마찰각(Friction angle), 점착력(Cohesion) 및 인장강도(Tensile strength)의 영향 : 내부 마찰각이 20도에서 40도로 변화하고 점착력과 인장강도가 10 - 20 MPa 로 변하는 경우 각 측정 위치에서의 최대 주응력, von-mises stress 및 변위 변화는 미미한 것으로 나타났다. 이들 파라미터들은 소성영역의 발생 여부를 결정하고 소성영역이 발생하는 경우의 암반의 거동을 결정하는 것이기 때문에 소성영역의 발생이 없거나 적은 경우 이들 파라미터들의 영향은 미미하게 나타나게 된다. 본 해석에서 사용된 암석 강도의 경우 실험실에서 무결합 화강암을 사용하여 측정된 값들을 사용하였기 때문에 실제 현장에서의 암반의 강도보다 훨씬 높은 값이라고 볼 수 있다. 실제 현장에서의 암반의 강도는 scale effect 와 물에 포화된 조건 등으로 인해 무결합 암석 강도보다 낮은 값을 갖는다. 따라서 무결합 암석의 강도가 아닌 현지 암반의 암석강도를 고려한다면 소성영역이 발생할 수 있으며 그럴 경우 이들 파라미터의 영향도 증가할 것으로 판단된다.

f. 터널 간격의 영향 : 터널 간격이 30m, 40m, 50m로 10m 단위로 변화하는 경우에 각 측정지점에서 변위의 증감은 약 2% - 5% 정도로 나타나며 최대 주응력 및 von-mises stress 의 변화 또한 미미한 것으로 나타났다. 이는 터널의 간격이 50m에서 30m로 감소하더라도 터널의 역학적 안정성에는 큰 영향이 없다는 것을 의미한다.

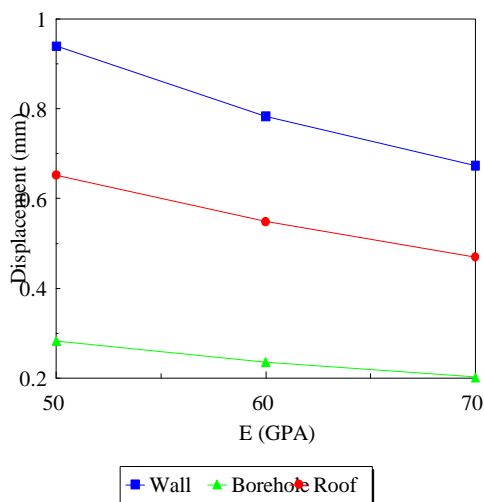


그림 2. 탄성계수와 변위의 관계

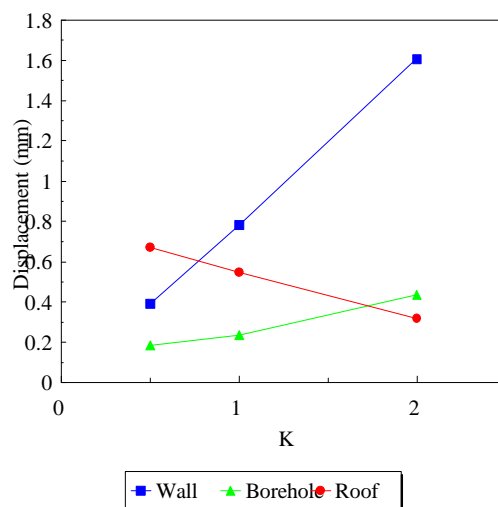


그림 3. 응력비 변화에 따른 변위변화

g. 처분공 간격의 영향 : 처분공 간격이 5 m에서 8 m 까지 1m 단위로 변화할 때 변위의 증감은 2% 내외이며 응력의 변화도 1%내외로 작게 변화하고 있다. 즉 처분공 간격이 8m에서 5m로 바뀌어도 터널의 역학적 안정성에는 큰 변화가 없을 것으로 판단된다.

h. 불연속면 간격의 영향 : 불연속면에 대한 영향을 보기 위해 K_n 은 100GPa/m, K_s 는 10GPa/m로 고정시킨 상태에서 불연속면 간격을 0.2 m에서 1 m 까지 변화시키면서 해석을 실시하였다. 불연속면 간격이 0.2m일 때의 변위는 무결암에 비해 약 78% 증가하였다. 불연속면 간격의 변화에 따른 변위의 증가는 식 (1)과 (2)에서와 같이 불연속면에 의해 암반의 탄성계수가 감소로 설명된다. 지하 공동에 불연속면이 교차하는 경우에는 불연속면을 따르는 변위가 절대적인 영향을 미칠 것이기 때문에 불연속면에서의 최대 변위는 본 모델의 결과보다 훨씬 클 것으로 예상되며 따라서 불연속면 간격의 영향도 커질 것으로 생각된다.

불연속면 간격의 변화는 변위와는 달리 응력에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타나는데 이는 불연속면 간격의 영향이 암반의 탄성계수에 보정되는 방식으로 고려되었기 때문에 탄성계수의 변화가 응력에 영향을 미치지 않기 때문이다.

i. 불연속면 강성의 영향 : 불연속면 간격을 0.6m로 고정시키고 불연속면 강성(K_n 및 K_s)값을 50GPa/m 및 5GPa/m으로 가정하면 무결암 경우에 비해 변위가 약 70% 증가하였다. 불연속면 간격과 같이 이들의 영향도 불연속면을 직접 고려한 경우에서 좀더 크게 나타날 것으로 예상된다.

j. 터널 폭의 영향 : 터널 폭을 표준 경우인 4m에서 5m로 25% 증가시킨 경우 변위는 터널 천장에서 약 27%, 처분공에서 약 18% 증가한 반면에 터널 벽에서는 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 터널 높이가 동일하기 때문인 것으로 생각된다. 응력의 변화는 그리 크지는 않지만 터널 폭이 5m로 늘어남에 따라 최대 주응력이 터널 벽면에서 약 9% 증가하고, 터널 천장에서 약 5% 감소하였으며, 처분공에서는 약 1%정도의 변화를 보인다.

k. 터널 높이의 영향 : 터널 높이가 5m에서 5.5m로 10% 증가하는 경우가 터널 벽에서 최대 주응력은 약 17% 증가하고, 변위는 약 6%로 증가하였지만 터널 천장과 처분공에서의 이들 값의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 즉 터널 높이의 변화는 터널 벽에서 응력 및 변위에 입력 값과 상응하는 변화를 일으키고 있으므로 역학적으로 비교적 중요한 인자로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

l. 처분장 심도의 영향 : 처분장 심도가 500m에서 700m로 40% 늘어난 경우와 300m로 줄어드는 경우에 대해 해석을 실시하였다. 깊이가 700m로 증가함에 따라 응력과 변위가 약 40% 정도 증가하고, 300m로 감소함에 따라 40% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 즉 처분장 깊이가 40% 증가 또는 감소함에 따라 현지응력도 약 40%증가 또는 감소하게 되고 결과적으로 변위와 응력도 40% 증가 또는 감소하게 되었다. 이와 같이 심도의 영향은 응력과 변위의 변화가 심도의 변화량에 동일하게 반영되기 때문에 300m -700m 사이에서의 역학적 물리량의 예측이 가능하다. 본 해석의 영역에서는 소성영역의 발생이 거의 없기 때문에 이와 같은 선형적 관계가 성립하는 것으로 나타나지만 소성영역이 발생할 경우에 처분장 심도의 증가에 따른 영향은 응력보다는 변위에 더 크게 나타날 것으로 예상된다.

III. 중요 파라미터의 영향 분석

1. Fractional factorial design

FLAC3D를 이용한 3차원 해석결과를 통해 표 2와 같은 7개의 중요 파라미터들이 선정되었다. 암석강도의 경우 intact rock 의 강도가 아니라 현지암반의 강도가 사용된다면 소성영역이 나타날 가능성이 크고 이에 따라 다른 파라미터들이 처분공 및 처분터널에 미치는 영향에 변화를 줄 것으로 예상되어 포함시켰다. 이들 파라미터 각각의 영향뿐만 아니라 상호 작용의 영향을 효과적으로 파악하기 위해 실험계획법의 하나인 일부실시법 (Fractional factorial design)을 사용하여 실험계획을 세우고 계산을 수행하였다. Factorial design은 인자의 효과와 인자들 간의 상호 작용을 포함한 모든 요인의 효과를 추정할 수 있어 각 파라미터 및 이들 상호작용의 효과를 실험하는데 널리 사용하는 방법이다[3][4]. Factorial design에서 파라미터의 수가 증가하면 필요한 실험의 수는 빠른 속도로 증가한다. 표2에서처럼 파라미터의 수가 7개이고 2수준 실험인 경우에 시행되어야 할 모델링 횟수는 2^7 이 되어 128번을 수행하여야 하지만 일부실시법을 이용하면 모델링 횟수를 적게 하면서도 필요한 정보를 효과적으로 얻을 수 있다. 본 해석에서는 1/4 일부실시법을 사용하여 32 번의 모델링만으로 주영향 (main effect)과 2요소 교호작용 (interaction effect)을 찾아낼 수 있었다.

표 2. Fractional factorial design에 사용된 중요 파라미터

Parameter	a	b	c	d	e	f	g
	응력비	심도 (m)	터널폭 & 높이 (m)	절리간격 (m)	Kn & KS (Gpa/m)	마찰각 (°)	암석강도 (MPa)
최대값	0.5	300	4 & 5	0.2	50 & 5	20	5
최소값	2	700	6 & 7	1	150 & 15	40	10

2. 결과 분석 및 고찰

중요 파라미터가 처분공과 처분터널의 안정성에 미치는 주효과와 2요소 교호효과를 변위 및 응력 관점에서 분석하였다.

a. 변위에 대한 영향 분석

그림 4는 세 측정위치에서 주요 파라미터가 변위에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 양의 영향은 파라미터의 증가에 따라 변위도 증가함을 뜻하고 음의 영향은 변위가 감소함을 뜻한다. 그림12 에서 알 수 있듯이 a, b, c 파라미터 즉 응력비, 심도 및 터널의 크기를 나타내는 파라미터는 그 값이 증가하면 영향은 양의 값을 나타내어 변위가 증가함을 보이고 있다. 반면에 d, e, f, g 파라미터는 그 값이 증가하면 영향은 음의 값을 나타내어 변위가 감소함을 보이고 있음을 알 수 있다. 응력비는 주로 터널 벽과 처분공의 변위에 영향을 주

는 반면 심도는 세 위치 모두에 거의 영향을 주고 터널 폭과 높이의 변화는 주로 터널 천장의 변위에 영향을 주는 것으로 나타났다. 균열에 대한 효과를 나타내는 d 및 e의 파라미터의 증가는 변위를 감소시키는 경향을 나타내지만 영향을 크게 미치는 것은 아니다. 암석 물성을 나타내는 f 및 g의 파라미터의 증가는 변위를 감소시키는 경향을 나타내고 있지만 균열의 영향보다는 크다.

파라미터간의 2요소의 상호작용에 대한 영향을 알아보기 위해 2요소 효과를 그림 5에 도시하였다. 양의 영향은 상호 작용의 관계가 비례한다는 뜻이고 음의 효과는 반비례한다는 뜻을 나타낸다. 파라미터 a 와 b 간의 상호 효과는 강한 양의 영향으로 파라미터 a 의 영향은 파라미터 b 의 증가에 따라 증가한다는 의미를 갖고 있다. 그러나 a의 영향은 c, d, e의 증가에 따라 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타나며 f, g의 증가에 따라서는 감소하는 것으로 나타나지만 f 및 g의 영향이 크게 나타나는 것은 아니었다. 주효과의 두 번째 크기인 b는 a가 증가함에 따라 강하게 증가하지만 다른 파라미터들의 증가에 따라서는 증가 및 감소의 폭이 작아서 별 영향이 없는 것으로 판단할 수 있다. 파라미터 a와 f 및 g, 파라미터 b와 f 및 g의 2요소 상호 영향은 거의 비슷한 양상을 나타내고 있어 f와 g는 a와 b에 의해 거의 비슷한 영향을 받고 있는 것처럼 보이고 있다. cd의 2요소 상호영향은 음의 영향을 나타내어 한쪽의 영향은 다른 쪽의 파라미터를 증가시키면 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 2요소 교호작용에 의한 상호 영향을 정리하면 a 및 b의 상호 작용에 비해 다른 파라미터의 상호 작용은 중요하지 않은 것으로 생각할 수 있다. 또 주효과인 그림4와 비교할 때 2요소 교호작용에 의한 상호 효과인 ab 의 영향은 주효과인 a의 영향에 비해 절반 정도 작게 나타나고 있다.

b. 파괴 형태의 영향

각 계산에 대해 Mohr-coulomb의 파괴 조건에 따라 소성영역의 발달을 조사하고 이들을 4종류로 분류하였다. 소성영역의 발달에 대해 각 파라미터가 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 소성영역의 크기에 따라 0에서 4까지의 점수를 주었다.

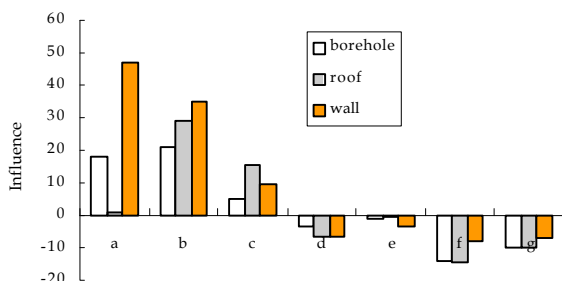


그림 4. 변위 변화에 미치는 각 파라미터의 주영향

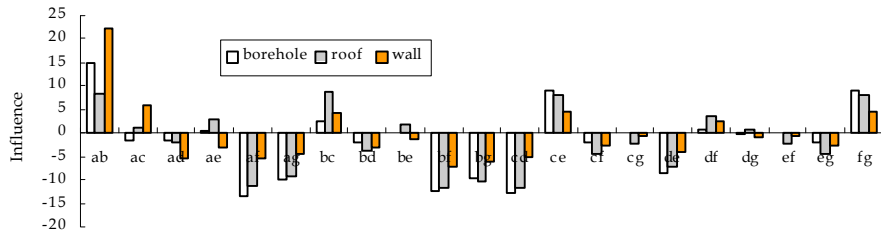


그림 5. 변위 변화에 미치는 각 파라미터간의 2요소 교호작용

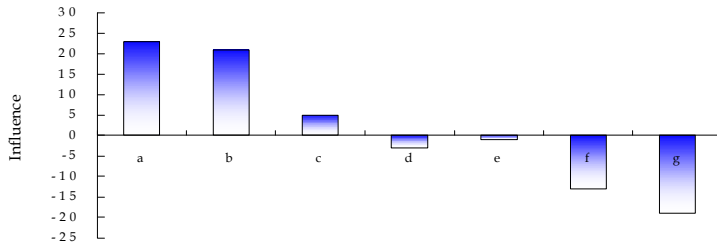


그림 6. 소성영역의 발달에 미치는 각 파라미터의 주영향

- 0 점 : 소성영역이 나타나지 않는 경우
- 1 점 : 몇 개의 소성영역이 나타나는 경우
- 2 점 : 다수의 소성영역이 나타나는 경우
- 3 점 : 터널과 처분공 주위 거의 모두에 소성영역이 나타나는 경우
- 4 점 : 터널과 처분공을 포함한 것보다 더 넓은 영역에 소성영역이 나타나는 경우

그림6은 소성영역의 발달에 대한 각 주요 파라미터의 영향을 보여주고 있다. 파라미터 a와 b는 강한 양의 영향을 보이는 반면에 f와 g는 강한 음의 영향을 보이고 있다. 즉 소성영역의 발달에 대해 a와 b의 파라미터가 증가하면 소성영역이 생길 가능성은 높아지는 반면에 f와 g의 파라미터가 증가하면 소성영역이 생길 가능성이 낮아진다는 뜻으로 말한다.

소성영역의 발달에 대한 2요소 상호효과를 평가하기 위해 파라미터간의 교호작용에 의한 상호효과를 그림7에 도시하였다. 이 그림에서 a에 대한 각 파라미터의 교호작용에 의한 상호 영향은 ab와 af를 제외하고는 미미한 것으로 볼 수 있다. 상호 영향 ab와 af도 파라미터 각각의 주효과와 비교하면 10% 정도로 미미한 것으로 볼 수 있어 이들 각 파라미터는 서로의 교호 효과가 적은 것으로 판단된다. 파라미터 b에 대한 다른 파라미터의 교호작용에 의한 영향도 미미한 것으로 나타난다. 교호작용 cd는 어느 정도의 상호영향을 나타내어 터널의 폭 및 높이의 증가 또는 불연속면 간격의 증가에 따라 소성영역이 생길 가능성 있다고 해석할 수 있다. 2요소 교호작용 de의 값이 높은 것은 소성영역 발달에 대한 불연속면 강성의 영향은 불연속면 강성의 증가에 따라 증가한다는 것을 뜻하며 따라서 소성영역의 발달에 대한 불연속면의 영향은 불연속면을 고려하는 모델에서 상세히 검토되어야 할 것이다.

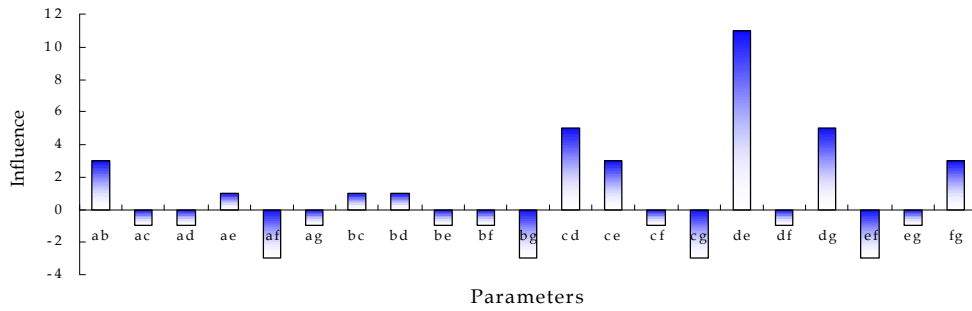


그림 7. 소성영역의 발달에 미치는 각 파라미터의 교호작용

IV. 3DEC 을 이용한 불연속 암반에서의 구조 안정성 평가

3DEC (Distinct Element Code) 은 불연속면이 존재하는 사면이나 지하구조물의 안정성 해석을 수행하기 위한 목적으로 개발된 코드로서 절리, 단층, 균열과 같은 불연속면들의 영향이 고려될 수 있기 때문에 토목 및 광산, 폐기물 처분장, 방위산업계 등에서의 다양한 문제들을 해결하는데 이용되고 있다[5]. 본 연구에서는 불연속면이 존재하는 암반 내에 설치되는 처분터널과 처분공에서 불연속면이 처분장 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위해 다음과 같은 다양한 조건들에서 해석을 실시하였다.

a. 모델에 포함되는 불연속면의 수 : 동일한 크기 (40mx40mx40m) 의 블록 내에 포함되는 불연속면의 수가 변화할 때의 공동에서의 거동을 파악하기 위해 불연속면의 수를 1개에서 15개 까지 증가시키면서 해석을 수행하였다. 각 경우에서 불연속면의 경사, 경사방향과 위치는 랜덤하게 선택되었다. 불연속면의 수가 증가함에 따른 처분터널과 처분공 부근에서의 X,Y,Z 각 방향에서의 최대변위 변화를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 불연속면의 수가 7개 까지는 최대변위에 큰 변화를 보이지 않고 조금씩 증가하는 경향을 보이다가 8개 이상의 경우에서 큰 변화를 보인다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 X 축 방향의 변위 변화가 크게 나타나며 터널방향 (Z 방향)으로의 변위변화는 불연속면의 수에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 15개까지의 불연속면이 존재할 때 가능한 최대 변위는 0.01 m로서 처분터널의 크기에 비해 매우 낮은 변위를 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 불연속면의 수가 늘어나는 경우 변위도 증가할 것이라는 예상을 할 수 있다.

b. 불연속면의 경사 : 해석에 사용된 불연속면의 경사에 따른 처분터널과 처분공에서의 영향을 보기 위해 불연속면의 경사를 20도에서 80도 까지 바꾸어가면서 해석을 실시하였다. 모델에는 5개의 불연속면이 포함되는 것으로 하였으며 각 불연속면의 위치와 경사방향은 랜덤하게 선정되었다. 각 불연속면의 경사각은 1도씩의 차이를 가지도록 하였다. 즉 경사각이 40도인 경우 불연속면의 위치와 경사방향은 랜덤하게 결정하고 각 불연속면은 40-44 도의 경사각을 가지는 것으로 가정하였다.

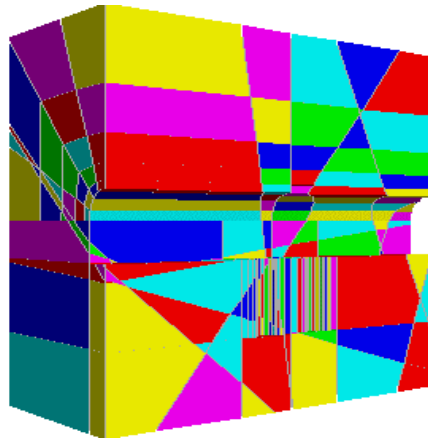


그림 8. 불연속 암반에 대한 3DEC 모델링 예

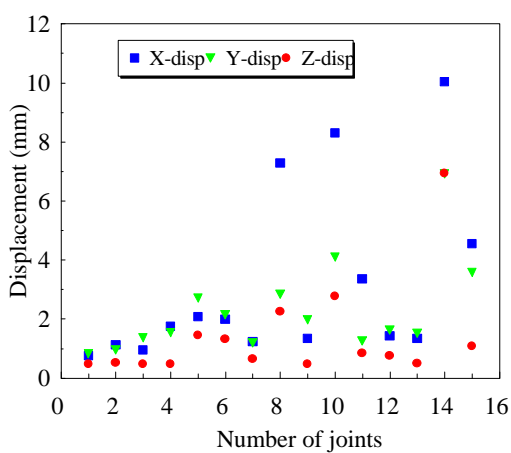


그림 9. 절리면의 수에 따른 변위변화

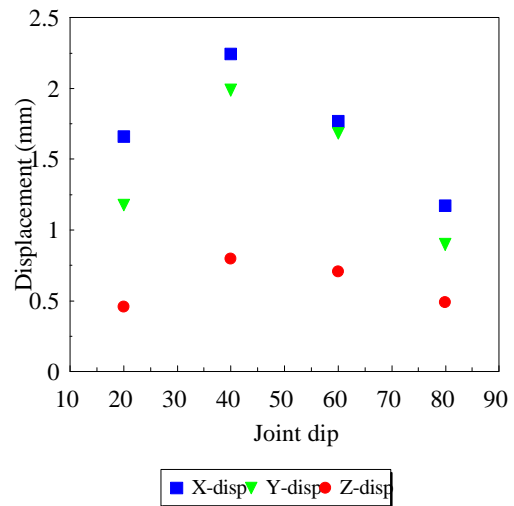
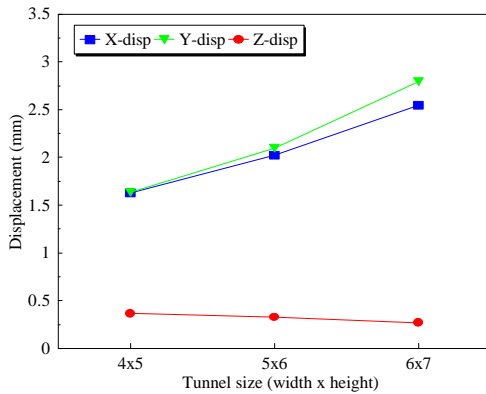


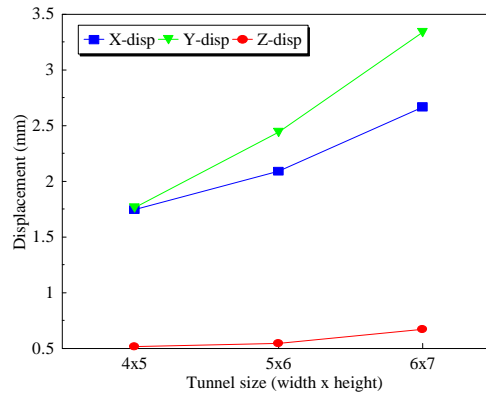
그림 10. 절리면 경사에 따른 변위변화

불연속면의 경사각이 바뀌에 따른 모델에서 최대 변위 변화를 그림 10에 나타내었다. 경사각이 40도인 경우 가장 큰 변위를 보여주고 있다. 경사각이 20도인 경우와 60도인 경우의 변위값은 비슷하게 나타나며 80도인 경우 가장 낮은 변위값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 불연속면의 수가 5개로 고정된 상태에서 경사각 80도인 경우 불연속면이 처분터널이나 처분공과 교차할 수 있는 확률이 낮아지기 때문이다.

c. 처분터널의 크기 : 처분터널의 크기가 변하는 경우 변위의 변화를 보기 위해 3 종류의 터널 크기 (4mx5m, 5mx6m, 6mx7m)에 대하여 불연속면의 고려되지 않은 경우와 불연속면이 5개 포함된 경우에 대해 각각 해석을 실시하였다. 불연속면이 고려되지 않은 경우 터널크기가 변위에 미치는 영향은 그림 11(a)에 보여지고 있다.



(a) 균질 암반의 경우



(b) 불연속 암반의 경우

그림 11. 처분터널의 크기 변화에 따른 변위변화

전체적으로 불연속면이 고려되지 않는 경우에 비해 변위가 약간씩 높게 나타나며 터널 크기가 4mx5m에서 6mx7m 로 증가하는 경우 변위의 증가폭도 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 11(b)는 불연속면이 포함되는 경우 터널크기의 증가에 따른 변위변화를 보여준다. 불연속면이 고려되는 경우 터널크기에 따른 변위변화가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

d. 불연속면의 물성 : 불연속면의 거동을 결정하는 여러가지 물성들 중에서 가장 중요한 것으로 여겨지는 수직강성 (Kn)과 수평강성 (Ks) 가 변위에 미치는 영향을 해석하였다. 터널의 크기는 6mx7m로 하였으며 5개의 불연속면이 포함되는 경우를 대상으로 하였다. Ks 는 10 GPa/m로 둔 상태에서 Kn 값을 50 GPa/m에서 150 GPa/m로 증가시킨 경우 Y 방향의 최대변위는 4.5 mm에서 4.1 mm 로 감소하는 것으로 나타난다. Kn 값을 100 GPa/m로 두고 Ks 값만 5 GPa/m에서 15 GPa/m로 증가시킨 경우의 변위 변화는 두드러지지 않음을 알 수 있다. Kn 과 Ks 값의 변화가 3배 정도이지만 이에 따른 변위의 변화는 10 % 내외로서 미미하다는 사실을 알 수 있다.

e. 암반의 물성 : 그림 12에서는 암반을 구성하는 암석의 상태에 따른 영향을 파악하기 위해 RMR 이 65정도인 Good rock 과 85 정도인 Very good rock 암반에서의 소성영역의 발생가능성을 안전계수로 표시하였다. RMR 은 암반분류법중 널리 사용되는 방법으로 값이 높을수록 암반이 양호하다는 것을 의미한다. 두 경우 모두 단축압축 강도는 110MPa 로 가정하였다. 그림에서는 안전계수가 5 이하인 주응력 분포만을 보여주고 있다. Very good rock 인 경우에 비해 Good rock 인 경우의 소성영역의 발달이 조금 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 처분터널의 경우 터널 벽면보다는 천정부위에서 특히 절리면 가까이에서 소성영역의 발달이 예상되며 처분공에서는 교차되는 절리면 상부에서의 소성영역의 발달이 집중적으로 나타나고 있다.

f. 응력비의 영향 : 수평응력대 수직응력의 비인 K 값이 불연속면이 고려된 상태에서 처분장에 미치는 영향을 파악하기 위해 K 값이 0.5, 1, 2 인 경우에 대해 6mx7m 터널 주위에

5개의 불연속면이 위치하는 경우의 해석을 실시하였다. 각 경우에 대해 불연속면의 분포를 바꾸면서 3번의 해석을 실시하였다. 그림 13은 K 값의 변화에 따른 최대변위의 변화를 보여주고 있다. K 값이 2 인 경우의 변위가 K=1 인 경우에 비해 2배 정도로 상대적으로 매우 큰 값을 나타내고 있다. 하지만 K=0.5 인 경우 K=1 인 경우에 비해 수평응력이 반으로 줄었지만 변위에는 큰 차이를 보이지 않고 있으며 경우에 따라서는 K=1 인 경우보다 약간 높은 변위를 보이고 있다. 이러한 경향은 K=0.5 의 경우 수평응력은 감소하였지만 deviatoric stress 가 증가한 때문으로 판단된다.

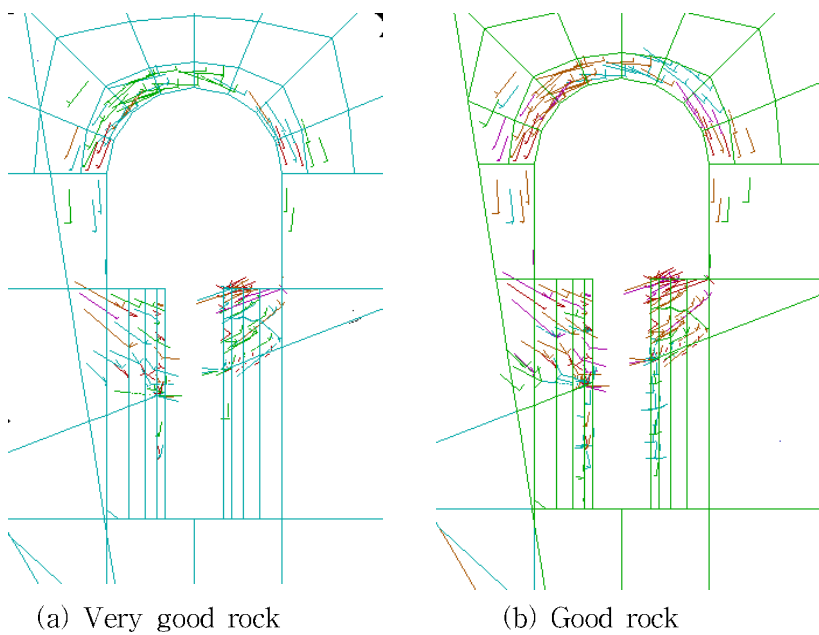


그림 12. 암반의 물성에 따른 처분터널 주변에서의 역학적 안전계수 분포

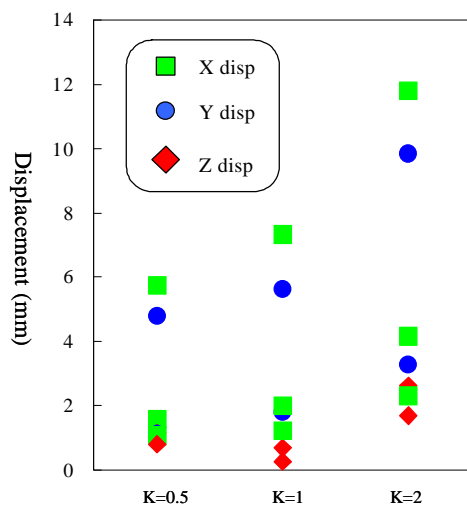


그림 13. 응력비에 따른 변위변화

V. 결론

고준위 폐기물 처분장의 굴착에 따른 암반의 역학적 안정성을 평가하기 위해 3차원 해석 코드인 FLAC3D을 이용하여 다양한 조건에서의 모델링을 실시하였다. 처분터널 및 처분공의 안정성에 영향을 미칠 것으로 판단되는 13개의 파라미터들에 대해 응력과 변위관점에서 민감도 분석을 실시하여 영향도가 큰 파라미터로 (1) 현지응력비 (2) 처분장 심도 (3) 터널 크기 (4) 불연속면 간격 (5) 불연속면 강성 (6) 암석강도 (7) 마찰각을 선정하였다. 이들 파라미터들이 처분터널의 벽면과 천장, 처분공의 역학적 안정성에 미치는 영향 및 각 파라미터들간의 상호영향을 파악하기 위해 일부실시법을 적용한 모델링 작업을 수행하였다. 또한 불연속면이 처분장 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위해 3DEC을 이용한 해석이 수행되었다. 3DEC을 이용한 해석에서는 불연속면의 빈도 및 경사, 불연속면의 물성과 암반물성 그리고 현지응력비의 영향이 분석되었다. 이를 통해 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있었다.

1) 지하처분장의 역학적 안정성에 영향을 미치는 파라미터들 중에서 표1에서와 같이 각 파라미터들의 값이 변하는 경우 현지응력비(K)와 처분장 심도의 영향이 가장 큰 것으로 평가되었다. 반면 탄성계수, 포아송 비, 암반 밀도, 처분공 간격 및 터널 간격의 영향은 상대적으로 크지 않은 것으로 평가되었다.

2) 현지응력비의 경우 K=1에서 K=2로 증가하는 경우, 즉 수평응력이 수직응력의 2배로 되는 경우, 처분장 안정성이 전체적으로 감소하는 것으로 나타난다. K=0.5로 감소하는 경우 터널 천장이나 처분공의 안정성은 향상되지만 터널 벽면에서의 안정성은 감소할 것으로 예상된다. 3DEC 해석에서도 응력비가 1에서 2로 증가함에 따라 처분터널 부근에서의 변위 증가가 있었다. 하지만 수평응력이 1/2로 줄어드는 경우, 즉 K=0.5인 경우, K=1과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 최대, 최소 주응력의 차이를 나타내는 deviatoric stress의 값이 K=0.5에서 크기 때문인 것으로 판단된다.

3) 무결합 화강암의 암석강도를 사용한 경우 주어진 기준모델의 경우 소성영역의 발달이 없었으며 이에 따라 암석강도와 내부마찰각의 영향은 보이지 않았다. 하지만 암석강도를 반으로 감소시켰을 때 이들 파라미터의 영향을 알 수 있었다. 실제 현지암반의 강도는 scale effect나 포화상태 등으로 인해 무결합 암석의 강도보다 훨씬 낮게 나타난다. 무결합 암석강도를 사용하는 경우 처분장 심도가 300m에서 700m 사이에 있는 경우 심도의 증가분만큼의 응력 및 변위증가가 있는 것으로 나타났다. 즉 처분장 심도가 500m에서 700m로 40% 증가하면 응력 및 변위도 40% 씩 증가하게 된다.

4) 중요 파라미터의 2요소 교호작용에 대한 영향 분석에서 변위에 대한 경우에 특히 터널 벽에서의 현지응력비의 영향이 심도의 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 터널 천장과 처분공에서의 최대 주응력에 대한 현지응력비의 영향은 마찰각의 증가에 따라 증가함을 알 수 있었다.

5) 소성영역의 발달에 대한 각 파라미터의 영향 분석에서 소성영역의 발달에 현지응력비와 심도는 강한 양의 영향을 보인 반면 암반 강도와 마찰각은 강한 음의 영향을 나타내는

것을 알 수 있었다. 파라미터간 상호효과에서 소성영역의 발달에 대한 불연속면 강성의 영향은 불연속면 간격의 증가에 따라 증가한다는 결론을 도출할 수 있었다.

6) 처분터널의 크기가 미치는 영향은 불연속면을 고려한 해석에서 불연속면이 포함되지 않은 해석에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 이는 처분터널의 크기를 결정하는데 처분장 모암의 불연속면 특성을 고려할 필요가 있음을 말해준다. 해석에 포함되는 절리의 수와 경사와 같은 절리분포가 처분장의 안정성에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 3DEC을 이용한 해석에서 고려한 정도의 절리의 수에서는, 수직강성과 전단강성과 같은 불연속면의 물성의 영향은 크지 않다.

7) 양호한 암반 (Good quality rock) 인 경우 안전계수 3 이하인 곳은 처분터널과 처분공 인접한 곳에서만 특히 불연속면과 교차되는 지점 부근에서 집중적으로 나타난다. 굴착공간에서 거리가 1m 이상인 경우 대부분의 지역에서 안전계수가 5 이상으로 나타나는 것으로 보아 현재의 예비처분개념에서의 처분장의 역학적 안정성은 충분히 보장될 수 있을 것으로 보인다. 하지만 실제 암반에서의 불연속면이 본 해석에서 고려된 불연속면의 수보다 많을 것으로 예상되기 때문에 불연속면의 수에 따른 다른 인자들의 영향변화를 분석하기 위한 추가적인 해석이 있어야만 최종적인 판단을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고 자료

1. Chulhyung Kang, et.al., "Preliminary conceptual design and performance assessment of a deep geological repository for high-level waste in the republic of korea", KAERI-SNL jointed study report, pp 2-73, Sept.28, 2000.
2. Fossum, A.F., "Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass", Int.J. rock mech. min. sci. and geomech. Abstr. vol 22, pp467-470, 1985.
3. 박성현, "현대 실험계획법", 민영사, 1999.
4. Douglas C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", John Wiley & Sons, 1984.
5. Itasca, 1998, 3DEC Users Guide, Itasca Consulting Group, Inc.