

우리나라 결정질암내 동굴처분장에 대한 수치해석

A Numerical analysis of Underground Repository Cavern in Korean Crystalline rocks

윤진신(Yoon, Kern Shin)

한국전력기술(주)

요 약

Universal Distinct Element Code 프로그램을 이용하여 우리나라의 결정질암의 대표적인 지질조건과 역학적성질을 입력하여 방사성 동굴처분장이 지하 하부 50m에 위치할 경우에 대하여 수치해석하였다. 수치모델의 기하학적 모델은 스웨덴의 중·저준위 방사성 폐기물 처분장(SFR)과 같은 크기와 배열을 적용하였다. 수치해석은 대표적인 동굴 단면, 5개 동굴이 굴착되었을 경우와 Silo 굴착하였을 경우에 응력집중, 변위, 안정성에 대하여 수치해석 하였다.

Abstract : A numerical analysis using Universal Distinct Element Code program for the nuclear waste disposal cavern has been performed for a typical Korean crystalline rock condition with same geometry of Swedish low and intermediate nuclear waste disposal repository(S.F.R). The stress concentration, displacement and safety factor for the typical single cross section of cavern, 5 caverns and a silo are analyzed.

서 언

중·저준위 방사성 폐기물처분장을 결정질 암 지역에 동굴처분될 경우를 예상하여 우리나라의 전형적인 지질조건에서 지하 50m 하부에 위치하였을 경우 동굴의 안정성에 대하여 검토하였다. 본 연구는 한국전력기술주식회사의 기술개발연구의 일환으로 수행된 "UDEC 프로그램을 이용한 한국의 방사성 폐기물처분장 설계연구" 보고서에서 발췌한 것이다. 본 연구는 우리나라에서 원자력발전소가 해안에 위치하며 내륙에 인구밀집지대가 많으므로 처분장이 운반관계로 해안 부근에 위치할 것을 가정하여 이와 유사한 스웨덴의 중·저준위 방사성 폐기물처분장을 모델로 하였다. 지질조건과 역학적 입력자료는 지표지질조사와 실내 및 야외실험 결과의 보수적인 값을 입력하여 수치해석하였다.

스웨덴의 중·저준위 방사성 폐기물처분장 (SFR)

스웨덴의 중·저준위 방사성 폐기물처분장은 현재 가동중인 Forsmark 원자력발전소 앞 발틱해 바다밑 60m에 위치한 지하동굴 처분장이다(I.A.E.A 1984). 이 처분장은 1983년 부터 건설 시작하여 88년 4월 부터 가동되고 있다.

이 부근의 지질은 캄브리아기 변성퇴적암, 변성화산암류와 Svecofennic age(1700~1900 m.y)의 화강암류, 편마암질화강암, Greens-tone, 산성암류가 분포하며 처분장은 화강암과 편마암질화강암대에 위치한다. 부지 부근에는 30~300m 폭을 갖는 3개의 지질구조대가 있으며 절리는 2개의 수직방향과 하나의 수평방향으로 우세하며 대개 녹니석·방해석이 절리 틈에 충전되어 있다. 화강암의 강도는 220~

330MPa이며 탄성율은 70~80GPa이다. 현지 응력은 주응력이 수평방향으로 그 크기는 8~10MPa(Silo 부근)이다. 지하수 상태는 지형이 평탄하므로 0.5m/km의 낮은 수두차를 갖고 암반에서의 투수율은 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ m/sec인 지역이다.

처분장(그림 1)은 현재 하나의 Silo와 4개의 수평동굴, 운반, 건설터널로 구성되어 있으며 현재 60,000m³의 저장능력이 있으나 110,000m³까지 확장할 수 있도록 설계되어 있다.

Silo 처분장은 중준위 폐기물이 저장되며 지하 60m에 직경 30m와 높이 70m의 원통 동굴로서 높이 53m와 직경 27.5m의 콘크리트 Silo가 설치되어 있다. Silo에는 2.5m×2.5m의 셀 57개와 1.25m×2.5m의 셀 12개를 저장한다. 수평동굴에 저장될 폐기물은 중·저준위 폐기물이며 그림 1에서 중준위 폐기물은 BMA, 저준위 폐기물은 BLA, 콘크리트 탱크들은 BTF에 저장된다.

BMA(Cavern for Medium Level Waste)는 길이 160m, 폭 19.5m, 높이 16.5m이며 중준위 폐기물을 저장하기 위한 콘크리트 Module이다. 저장실은 콘크리트 칸막이를 설치하여 15개의 방으로 나누고 폐기물은 원격조정되는 Overhead Crane에 의해 운반 저장된다. BLA(Cavern for Low Level Waste)는 철재상자나 드럼안에 밀폐시킨 저준위 폐기물을 저장하는데 이용되며 그 크기는 길이 160m, 폭 14.8m, 높이 9.5m의 동굴이 2개이다. 운반터널은 길이가 1,000m 이상이고 단면적이 60m²이며 수송을 위해 높이가 5.2m, 폭이 5.0m이다. 보통한개의 폐기물 통(Cask)을 운반하는 수송차량을 위하여 높이가 약 4.5m, 폭이 약 3.5m 이상이 필요하며 건설터널은 단면적이 50m²이다.

이들 저장소는 폐기물로 모두 채워진 후 완전히 폐쇄시킬 예정이며 각 출입구는 콘크리트 프리그로 막고 터널출입구는 암석으로 채워질 예정이고 지상건물은 철거될 계획이다.

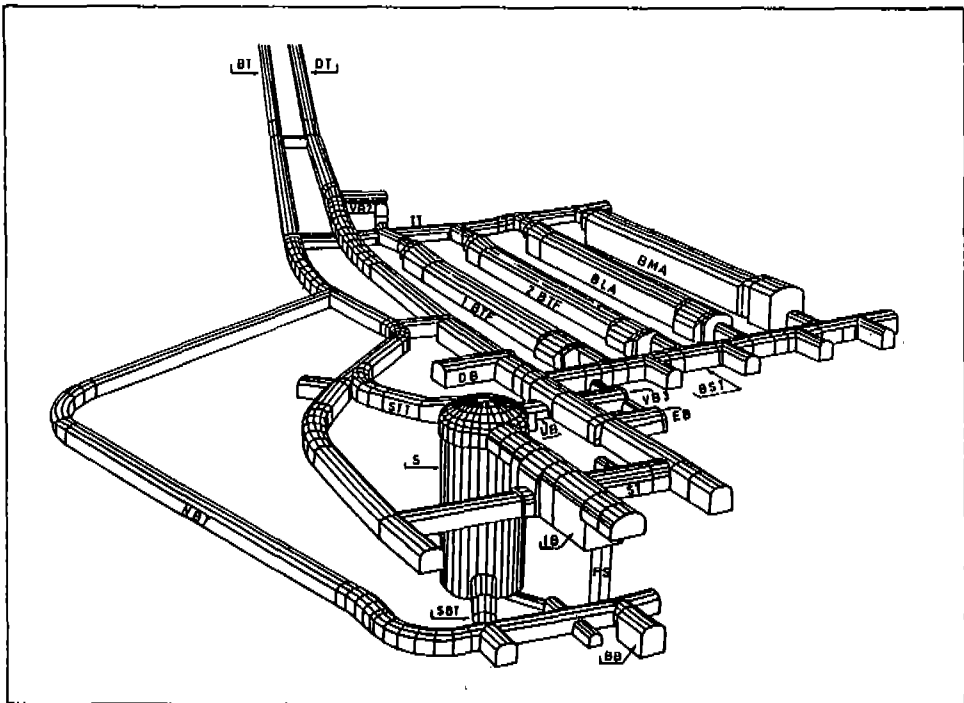


그림 1 스웨덴의 중·저준위 방사성 폐기물 처분장(S.F.R)

수치해석

스웨덴의 중·저준위 처분장동굴 및 Silo 단면과 동일한 크기와 배열에 우리나라의 지질 조건을 적용시켜 수치해석하였다. 즉 동굴중 제일 큰 단면에 대한 응력집중, 변위에 대하여 5개 동굴 굴착시의 응력집중, Silo 단면에 대한 변위, 불안정구간에 대한 보강등 4가지에 대하여 Universal Distinct Element Code(UDEC) 프로그램을 사용하여 수치해석하였다.

Universal Distinct Element Code(UDEC)

UDEC 프로그램은 Cundall(1971)에 의하여 개발된 개별요소(Distinct Element) 방법으로 Discontinuum mechanism 전산프로그램의 이론은 본 연구내용의 범위를 벗어나므로 참고문헌을 참조하기 바란다(Board 1989).

본 프로그램은 암반은 절리(불연속)에 의하여 분리된 block 사이에 상호변형에 대한 해석을 할 수 있도록 되어 있다. Block들의 내부는 유한 차분 삼각형으로 분할하여 뉴톤의 운동방정식에 의하여 변위, 응력 해석되며 Block간의 접촉면에 대한 거동은 Spring-Slide System에 의하여 변형과 마찰특성을 해석한다.

우리나라와 같이 결정질암석이 많은 암반에서 지하 굴착시 암반의 거동은 절리면을 따른 거동이 대부분일 것이므로 UDEC 프로그램은 우리나라 암반특성 해석에 적합한 수치모델이다. 따라서 본 연구에서 UDEC 프로그램을 사용하였다.

UDEC 프로그램에서 복잡한 절리도 쉽게 generate 시킬 수 있고 수치해석 결과도 쉽게 확대 도시할 수 있다.

UDEC을 이용한 암반동굴에 대한 안정성 수치해석을 위해서는 단면의 크기 및 모양, 절리의 방향, 기울기, 길이, 폭, 틈 등 절리의 특성과 암석 block의 역학적 성질, block과 block 사이를 경계로 한 절리에 대한 역학적 특성이 입력자료로 필요하다.

역학적 성질로는 일축압축강도, 탄성계수, 절리의 강성율(Stiffness)과 현지응력값이 필요하다. 본 수치해석에서는 Hoek and Brown의 전단 파괴이론(Hoek and Brown, 1980)에 의하여 안정성을 검토할 수 있게 되어 있다. 즉 Hoek and Brown의 파괴이론은 원응력과 암석의 강도와의 상관관계로 아래와 같은 식으로 표현된다.

본 수치해석에서는 Hoek and Brown의 전단파괴이론(Hoek and Brown, 1980)에 의하여 안정성을 검토할 수 있게 되어 있다. 즉 Hoek and Brown의 파괴이론은 원응력과 암석의 강도와의 상관관계로 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_3 \sigma_c + s \sigma_c^2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 σ_1 , σ_3 은 Principal Stress, σ_c 는 일축압축강도, m과 s는 암석의 종류와 절리에 따른 상수이다.

지하구조물의 단면크기

중·저준위 운반터널 Silo의 크기는 스웨덴 중·저준위 처분장의 크기와 동일한 단면으로 하였으며 동굴간의 간격은 동굴폭과 동일간격으로 하여 해석하였다. 아래표는 동굴크기 입력 자료이다.

구 분	폭(m)	높이(m)
운영터널(DT)	9 (8.7)	8 (7.9)
저준위 폐기물 처분동굴(BTF)	15(14.7)	10 (9.5)
중준위 폐기물 처분동굴(BMA)	20(19.6)	17(16.5)
중준위 폐기물 처분동굴(Silo)	30(직경 29.4~31.0)	60(68.7)

* ()은 스웨덴의 SFR 처분장의 크기

STATE OF STRESS

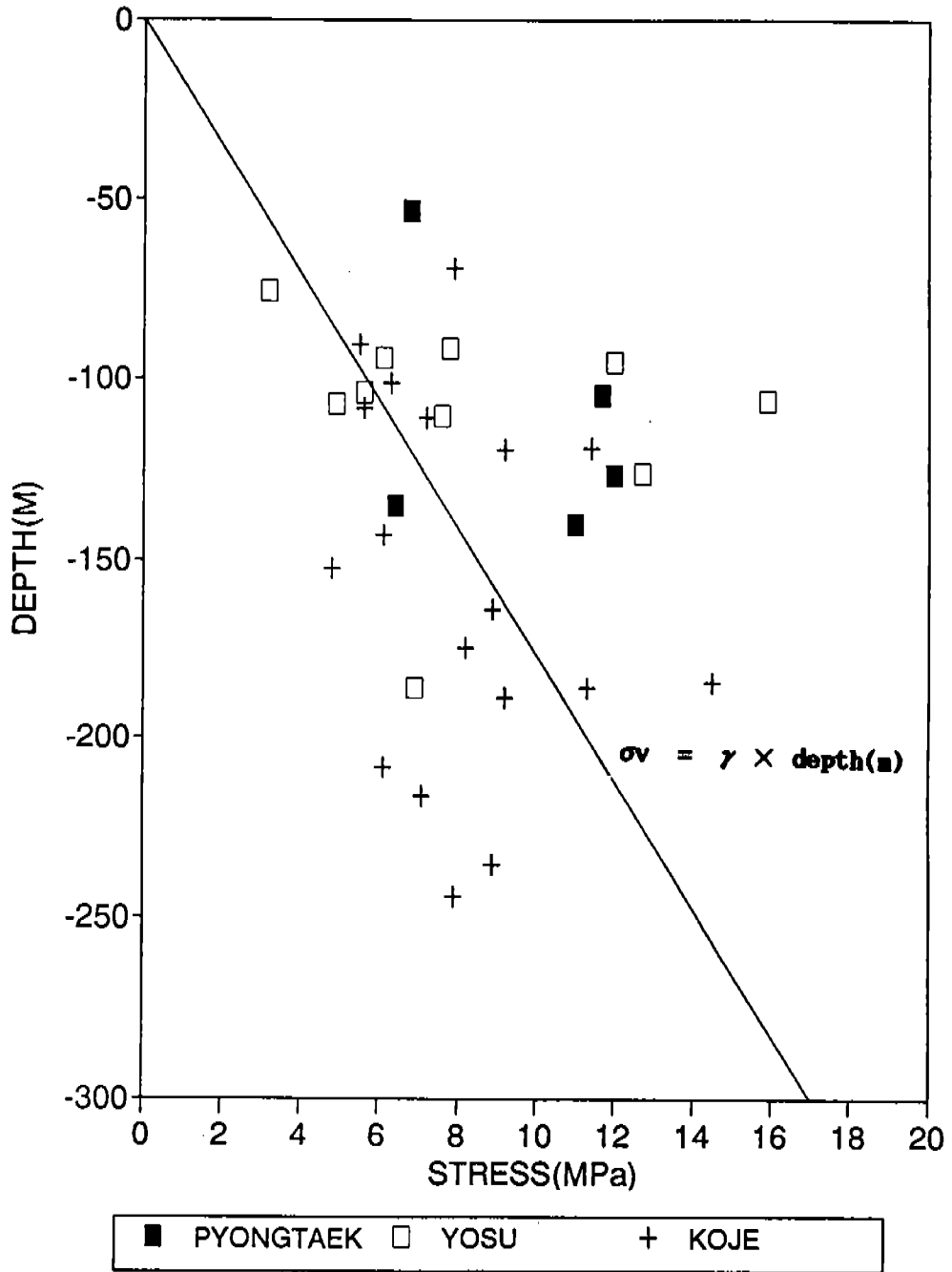


그림 2 현지수평응력 측정 결과

평택, 영광, 여수, 거제도, 영일, 울진 부근에서 암반굴착 또는 암반사면에 대한 지표지질 조사 결과에 의하여 절리의 경사는 대개 70°~90°의 고각도가 대부분이며, 절리의 폭은 1~3 m 폭이 대부분이다(윤건신의, 1990). 그러나 이들 절리는 대개 Closed된 상태이므로 1~3 m의 폭으로 모델을 잡는 것은 보수적이므로 실제 이들 지역에서 조사된 항내 지질조사 도면을 조사한 결과 Open된 절리나 파쇄대는 10 m 이상의 폭을 갖는 것이 대부분이므로 본 수치모델에서 절리의 폭을 5m로 하였고 두 방향의 절리가 80도로 경사되어 있고 이 절리 방향과 경사는 암반 전체에 연속적으로 분포하는 지반상태로 가정하여 모델로 하였다.

암석의 역학적 특성 입력자료

암석의 역학적 특성 입력자료는 신선한 암석에 대한 실내 및 야외시험을 위주로 한 자료의 값에 평균 값을 택하였다. 이들의 입력자료는 다음과 같다.

암석 일축압축강도	: 197MPa
암석 탄성율	: 33MPa
암석 포아슨비	: 0.24
절리의 전단율	: 10.3MPa
절리의 점착력	: 0
암석 마찰계수(tan ϕ)	: 0.487
절리의 전단강성율(Shear stiffness)	: 2.29MPa
절리의 연직강성율(Normal stiffness)	: 23.1MPa

절리의 전단강성율, 연직강성율 및 마찰계수는 Wisconsin 대학에서 Precision Shear Test Machine을 사용하여 화강섬록암의 시추코아를 시험한 결과를 정리한 값중 가장 적은 보수적인 값을 선택하였다. 암석의 탄성율은 현장의 시추공에서 측정된 공내변형시험(24 곳)의 평균 값이며 일축압축강도 및 탄성율은 실내시험(41개의)의 시험결과이다.

현지응력 값은 수입파쇄 응력측정(Hydraulic fracturing stress measurement) 방법에 의하여 측정된 값을 적용하였다. 응력측정은 평택, 여수, 거제도지역의 8개 시추공내에서 총 48지점에서 측정하였다. 그 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 수직응력 보다 수평응력이 대개 크다. 본 수치모델에서는 보수적인 모델에 대한 해석을 위하여 응력 값은 수직응력의 ($\sigma_v = \text{암석의비중} \times \text{깊이}$) 3배를 수평응력 값으로 입력하였다. 수치해석에서는 깊이가 증가함에 따라서 응력치가 증가되도록 프로그램되어 있다.

수치해석 결과 및 토의

대표적인 단면

5개의 단면중(그림 1) 가장 규모가 큰 폭 20 m, 높이 18m인 한 단면에 대하여 수치해석 하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 80°, 80° 경사의 절리가 발달되어 있고 절리폭이 5m인 단면에 대하여 50m에 따른 응력 변화를 입력하여 수치해석 결과를 비교하였다. 응력집중 분포는 그림 4에서 보는 바와 같이 동굴의 천장 부근에서는 압축응력 집중이 일어나는 반면 측벽에는 인장응력이 형성된다. 이는 수평응력이 수직응력 보다 3배이므로 동굴의 측벽에 일어나는 현상이다.

그림 4에서 보는 바와 같이 최대 원응력은 11.4MPa이고 최소 원응력은 -0.499MPa(인장)이다. 표 1에서 보는 바와같이 최대 수평응력은 9.82MPa이며, 최소 수평응력 0.27MPa(인장)이다. 최대수직응력은 5.49MPa이며 최소 수직응력은 -0.03MPa(인장)이다. 이들 응력은 암석의 일축압축강도 197MPa에 비하면 1/20이므로 안정되어 있다. 그러나 동굴 측벽에는 인장응력이 형성되므로 절리가 Open되어 있는 경우에는 절리를 따른 파괴가 일어날 가능성이 있으므로 보강이 필요할 것이다.

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, - 80)

UDEC(Version 1.64)

legend

cycle 5000
block plot

Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

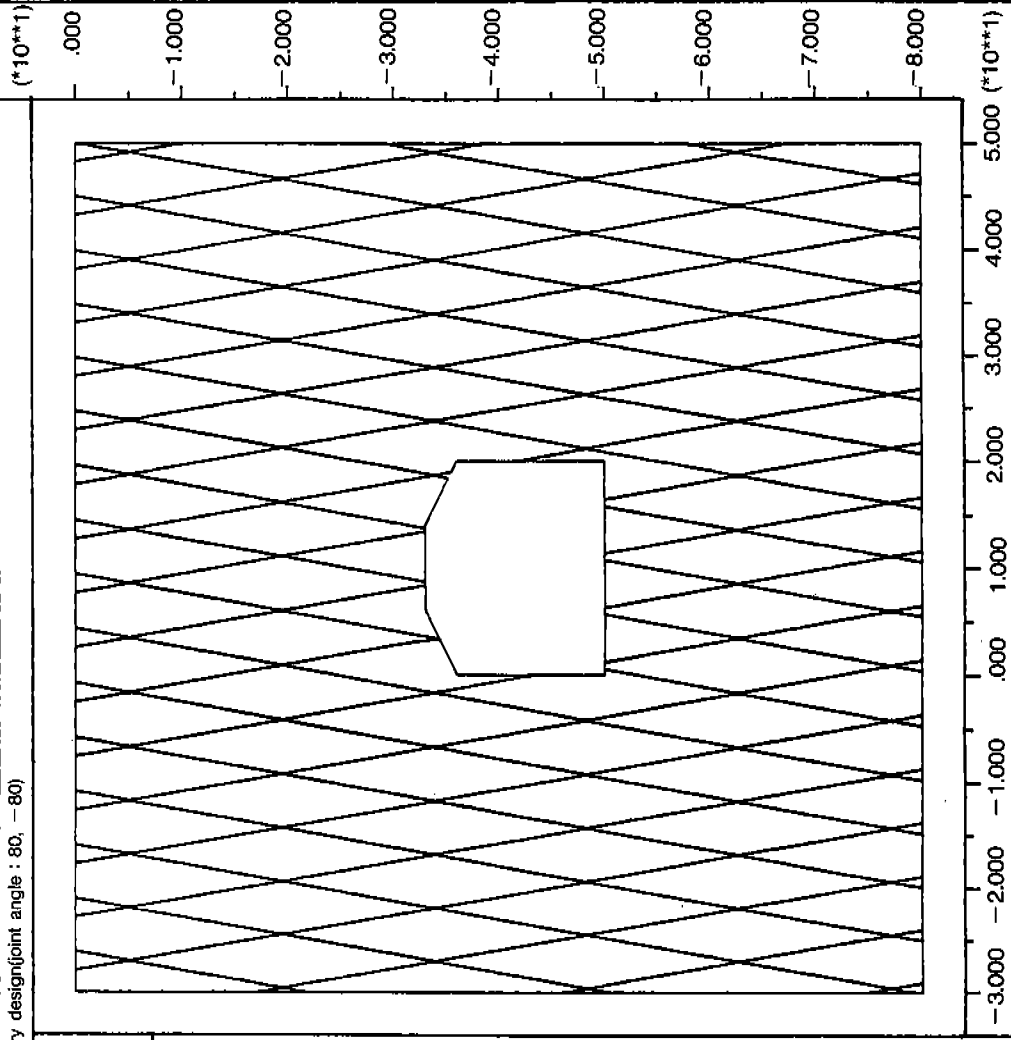


그림 3 동굴단면

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(version 1.64)

legend

cycle 5000

boundary plot

principal stresses

minimum = -1.140E+01

maximum = 4.995E-01



Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

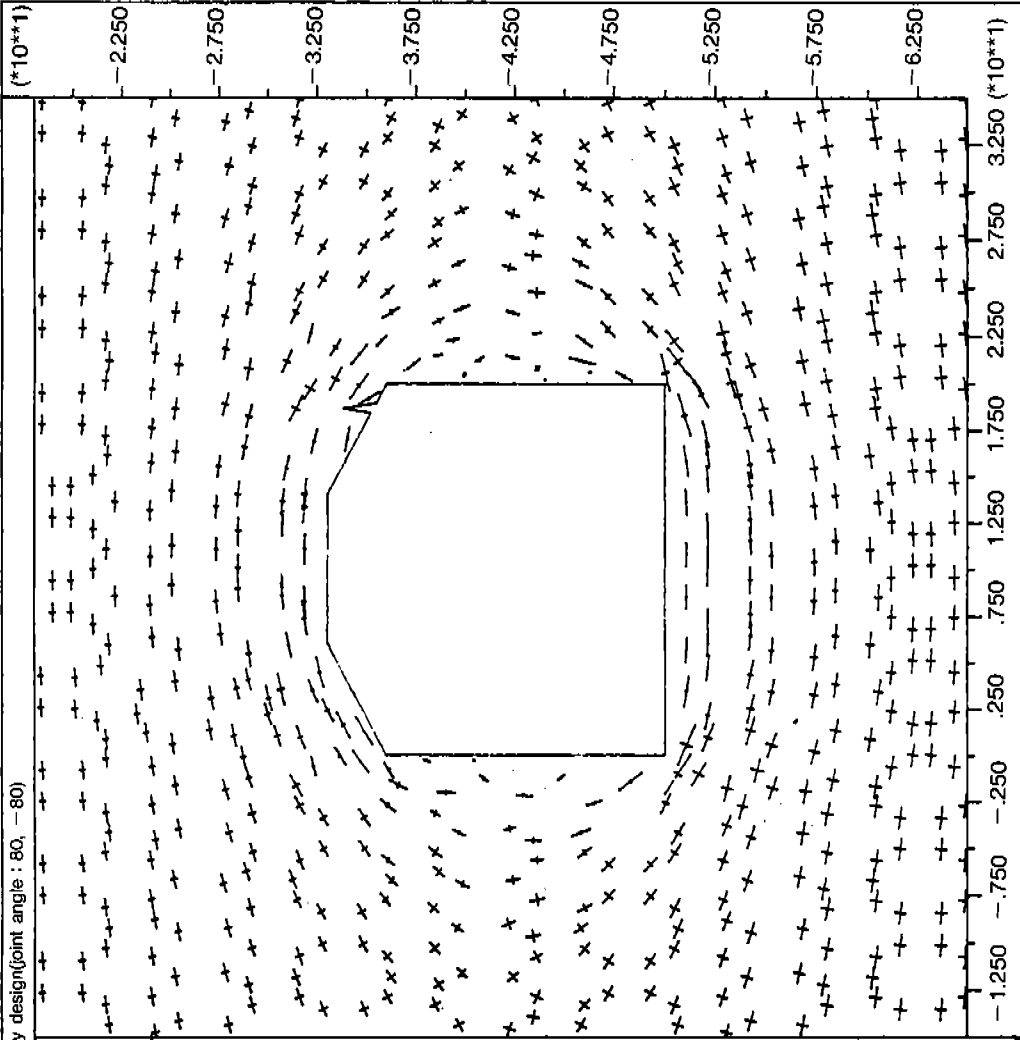


그림 4 응력 집중 분포도

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(Version 1.63)

legend

cycle 5000

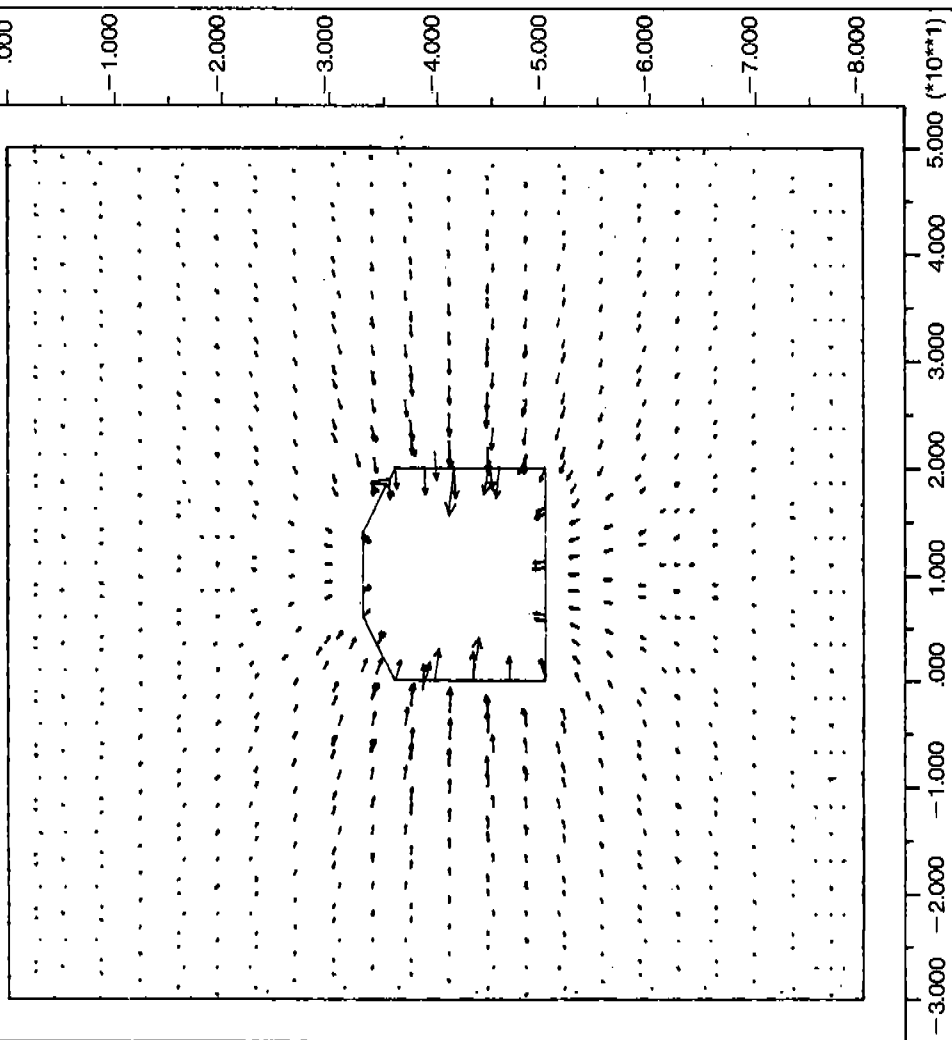
boundary plot

displacement vectors

maximum = 4.505E-03

0

2e -2



Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

그림 5 변위 벡터 분포도

변위는 그림 5에서 보는 바와 같이 최대 변위 vector는 4.61mm이며 최대 수평변위는 4.58mm 평균 수평변위는 0.39mm, 최대 수직변위는 1.26mm, 평균 수직변위는 0.15m이다(표 1). 그림 5에서 보는 바와 같이 변위는 주로 수평변위가 일어난다. 최대, 최소, 수평·수직 변위를 비교하여 보면 3배 정도의 변위 차이가 있다. 이는 응력비에 의한 결과이다.

본 해석에서는 보수적 값을 택하여 암반이 약간 풍화되고 절리의 폭이 1~3m인 경우로 가정하여 $m=2.5$, $s=0.004$ 로 가정하였으며 일축압축강도는 197MPa를 입력하였다.

UDEC에는 Hoek and Brown의 이론에 의한 암석강도와 응력의 비를 도출할 수 있도록 프로그램되어 있으며 이는 응력에 대한 안정성을 비교할 수 있는 하나의 방법이다. 그림 6은 50m 하부에 동굴이 위치할 경우에 암석강도와 응력의 비를 나타낸 그림이다. 보수적인 값임에도 불구하고 안정율이 2배 이상으로 암석강도가 응력보다 큰 것으로 나타나 안정된 상태이다.

5개 동굴에 대한 수치해석

5개 동굴 굴착에 따른 응력, 변위, 안정성을

표 1. 50m 하부에서의 응력·변위 비교표

구 분		수평응력 (MPa)	수직응력 (MPa)	수평변위 (mm)	수직변위 (mm)	전단변위 (mm)	연직변위 (Normal) displacement
50m	최 대	9.82	5.49	4.58	1.26	0.94	1.44
	최 소	-0.29	-0.03	0.39	0.15	0.37	0.28
	평 균	4.34	2.09	-	-	0.03	0.02

표 2. 50m 하부에서 5개동굴 굴착시의 응력, 변위

구 분		수평응력 (MPa)	수직응력 (MPa)	수평변위 (mm)	수직변위 (mm)	전단변위 (mm)	연직변위 (Normal) displacement
50m	최 대	5.050	4.74	2.30	3.50	4.06	1.443
	최 소	-1.218	-2.003	-	-	-	-
	평 균	2.136	1.503	0.12	0.16	0.02	0.01

검토하기 위하여 수치해석하였다.

그림 7에서 보는 바와 같이 두개의 절리가 80도, 80도 교차하며 5m 폭의 절리를 가진 지역에서 폭과 높이가 각각 9m×8m, 15m×10m, 15m×10m, 15m×13m, 20m×17m인 5개의 동굴이 15m, 15, 15, 20m 간격으로 굴착되었을 때의 모델에 대하여 수치해석을 실시하였다.

표 2에서 보는 바와 같이 50m 하부일 경우는 최대 수평·수직응력은 5.05MPa, 4.74MPa이며 최저 수평·수직응력은 -1.22MPa, -2.00MPa(인장응력)이다. 평균 수평·수직응력은 2.14MPa, 1.50MPa이다. 최대 수평·수직변위는 2.30mm, 3.50mm이며 암석의 강도와 응력의 비는 2배 이상으로 안정되어 있다.

Silo에 대한 수치해석

Silo에 대한 수치해석도 80도, 80도 경사를 가진 2개의 절리가 5m 폭으로 분포하는 지질 조건에서 직경 30m로 높이 60m의 원통상 Silo를 굴착하였을 때에 대한 암반의 응력변위, 안정성에 대하여 검토하였다(그림 8). 수치해석의 편이상 원통의 반에 해당되는 부분 즉 15m 폭, 60m 높이에 대하여 수치해석하였다.

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(Version 1.63)

legend

cycle 5000

boundary plot

hb-failure contours

contour interval = 2.000E+00

min = 2.000E+00 max = 1.000E+01

- 1 2.000E+00
- 2 4.000E+00
- 3 5.000E+00
- 4 8.000E+00
- 5 1.000E+01
- 6 >10 omitted

Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea.

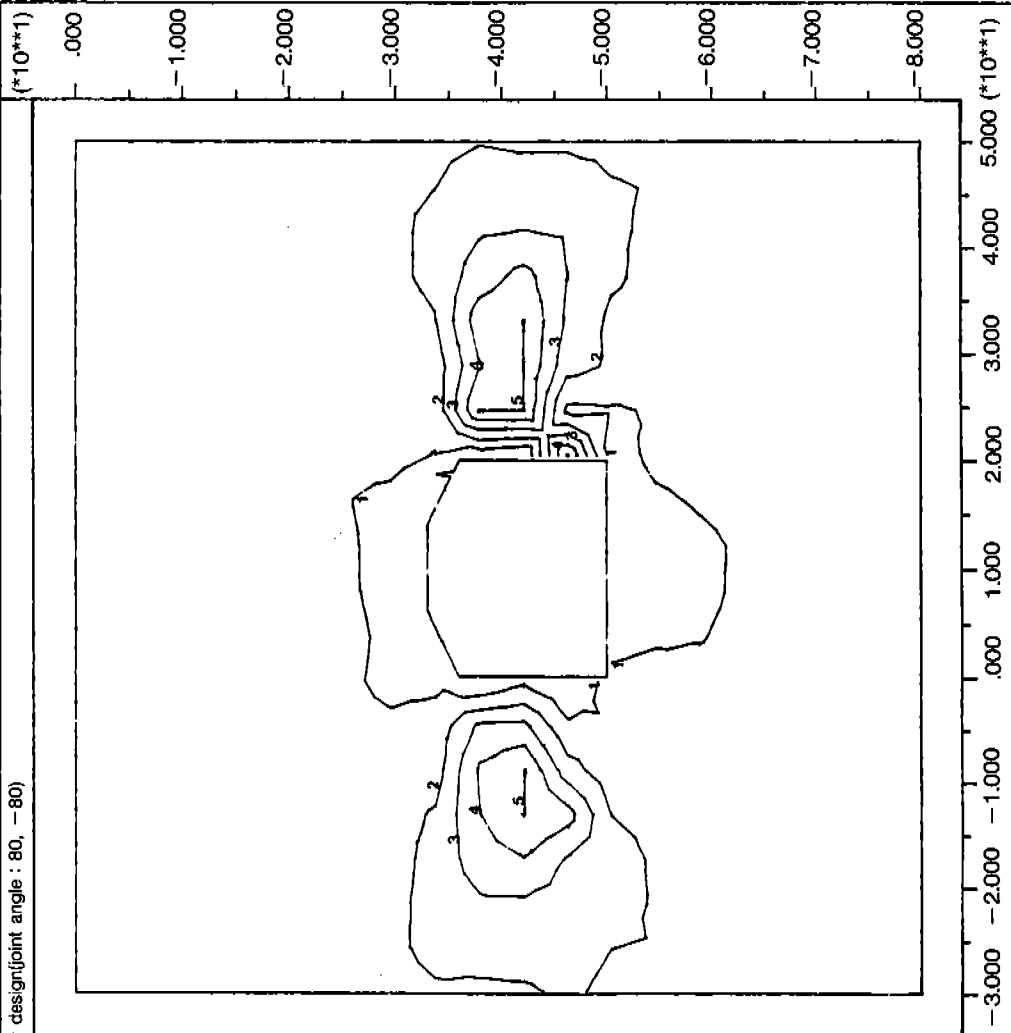


그림 6 Hoek & Brown 파괴이론에 의한 응력과 강도 비 분포도

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(Version 1.63)

legend

cycle 6700

boundary plot

max pr str contours

contour interval=5.000E-01

min=-2.500E+00 max=0.000E+00

- 1 - 2.500E+00
- 2 - 2.000E+00
- 3 - 1.500E+00
- 4 - 1.000E+00
- 5 - 5.000E+01
- 6 0.000E+00

Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

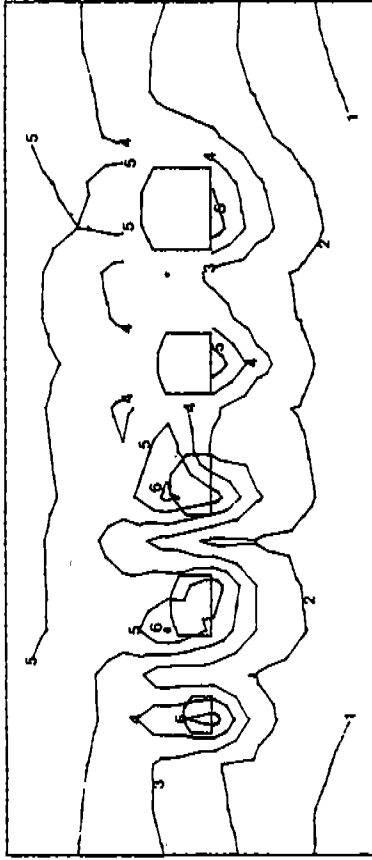


그림 7 5개 동굴 굴착에 따른 응력 분포도

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(Version 1.63)

legend

cycle 6700

boundary plot

block plot

displacement vectors

maximum = 4.220E - 01



Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

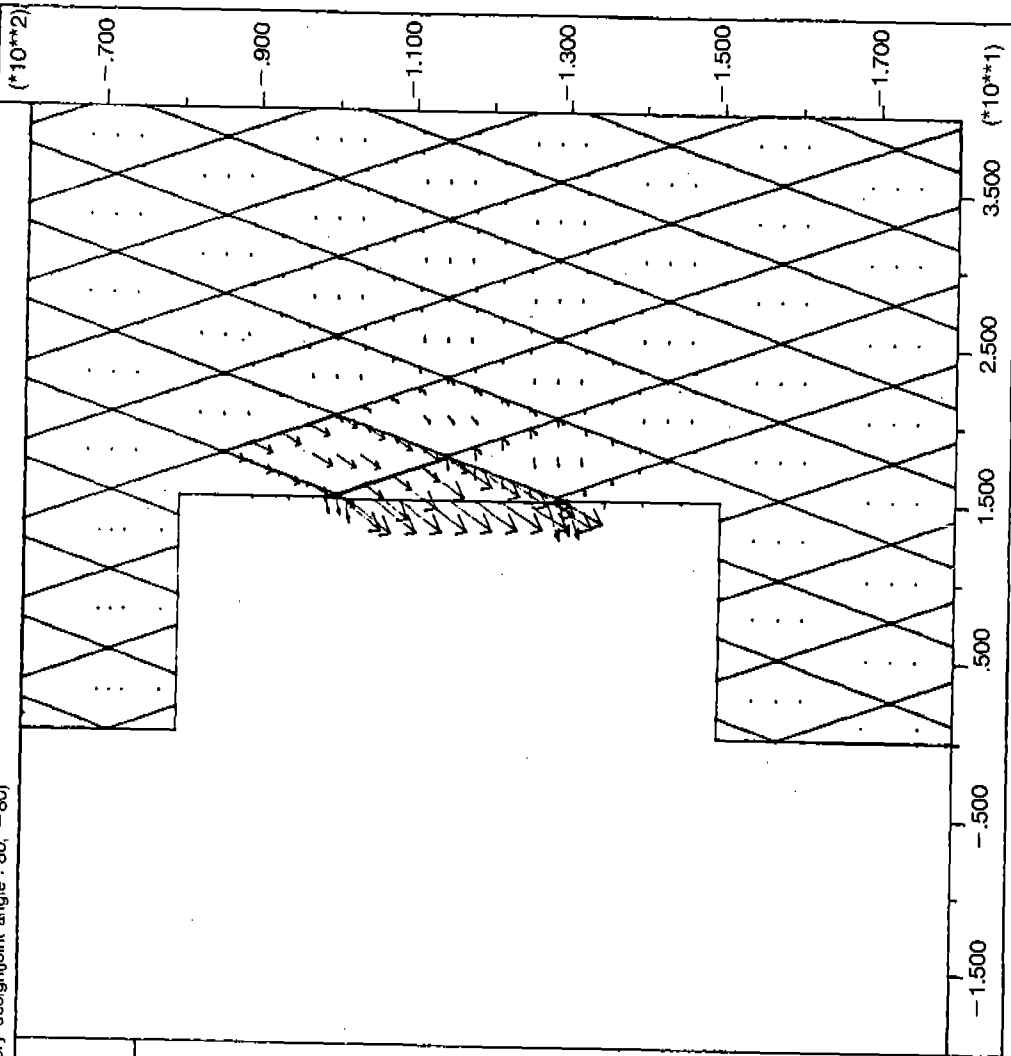


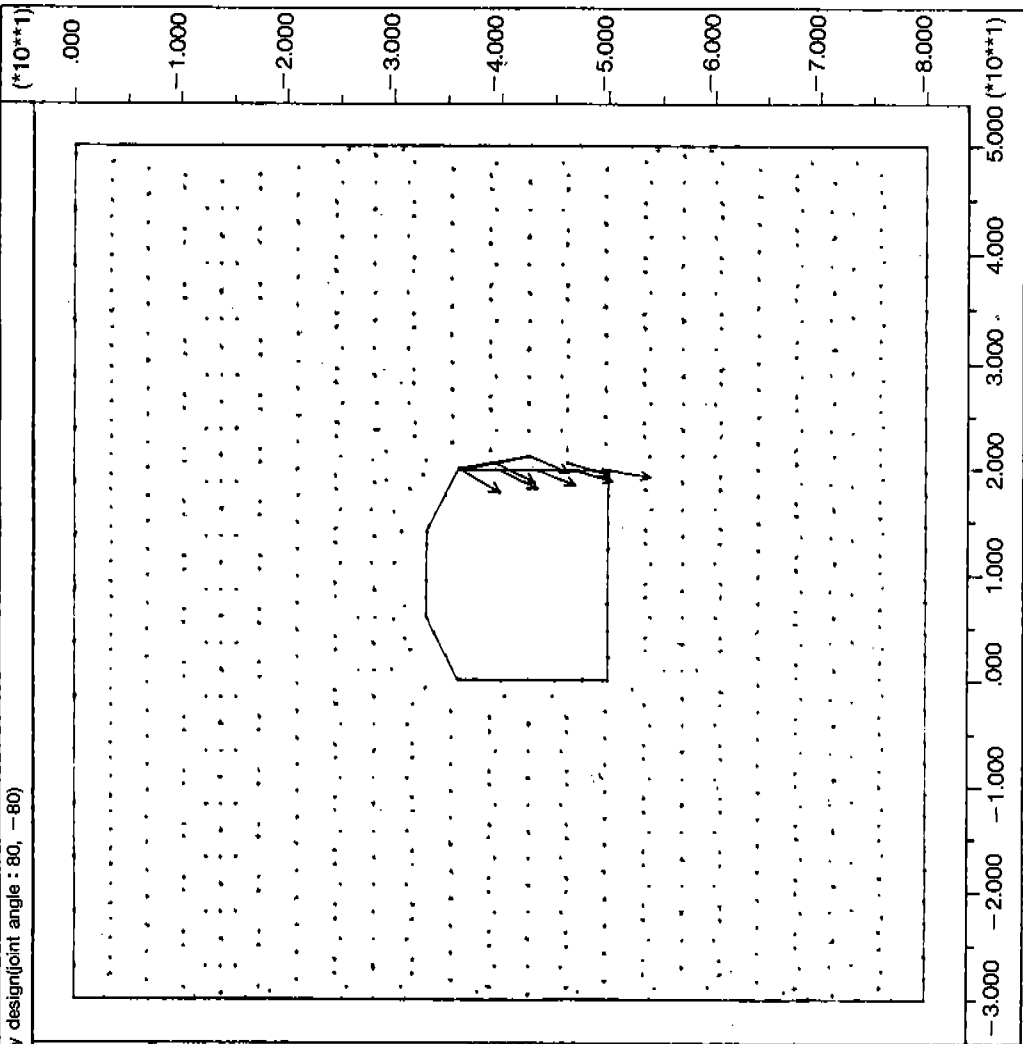
그림 8 Silo에 대한 변위 벡터량

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(version 1.63)

legend

cycle 9022
boundary plot
displacement vectors
maximum = 1.704E-01



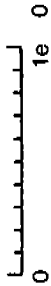
Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

그림 9 불안정 구간

UDEC(Version 1.63)

legend

cycle 2410
velocity vectors
maximum = 2.093E-01



Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

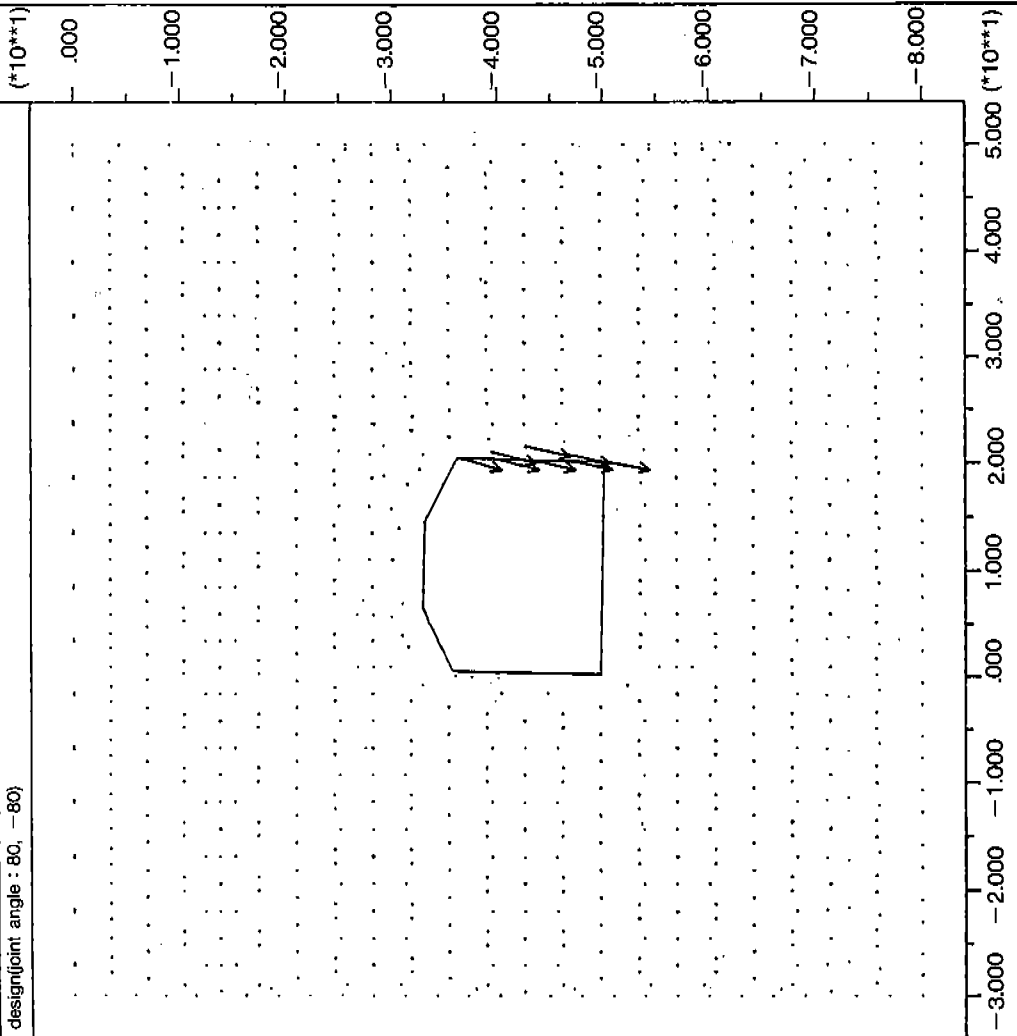


그림 10 불안정 구간의 velocity

job title : Numerical Analysis for repository design(joint angle : 80, -80)

UDEC(Version 1.64)

legend

cycle 2000
boundary plot
velocity vectors
maximum = 5.239E-07

0
2e-6

Korea Power Engineering Co.
Seoul, Korea

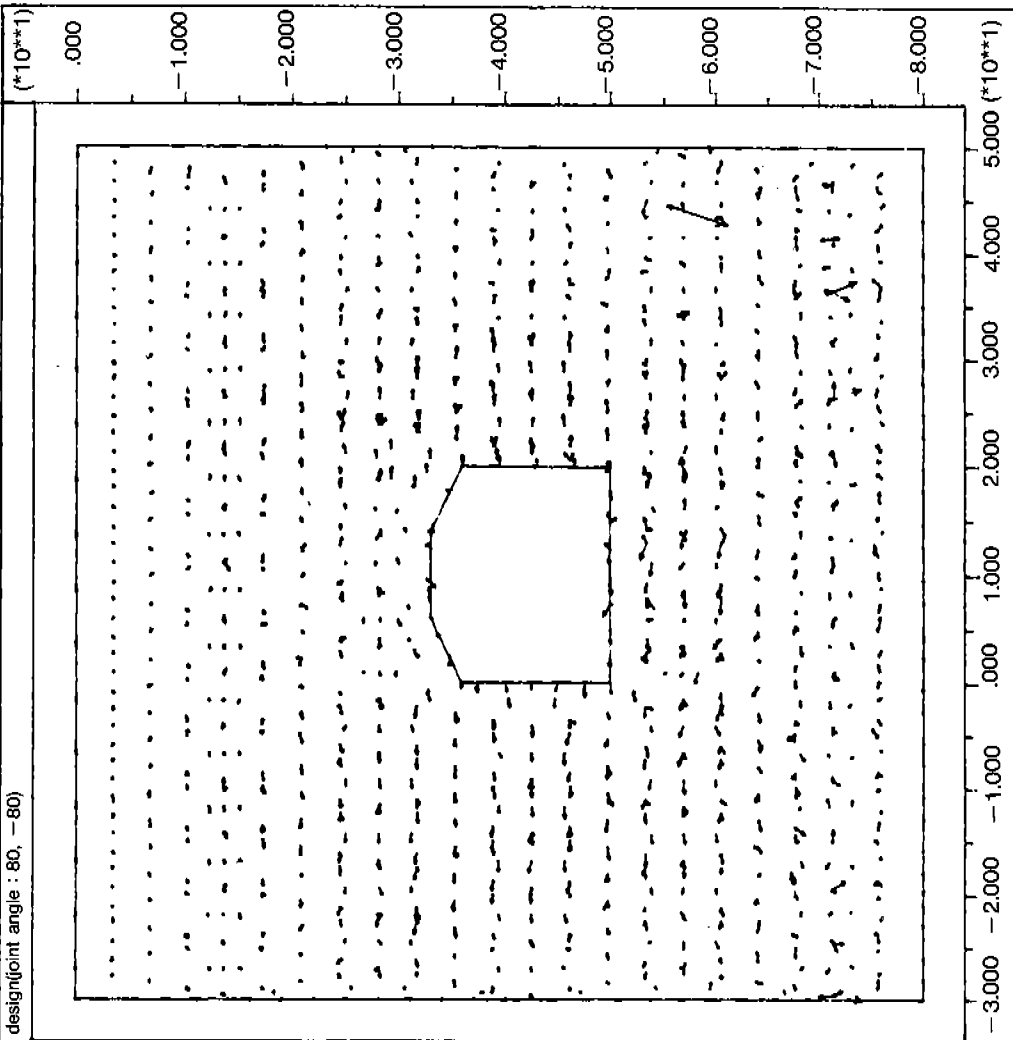


그림 11 Rock bolt후 velocity

수치해석 결과 최대 수평·수직응력은 16.12 MPa, 8.02MPa, 최소 수평·수직응력은 2.74 MPa, -5.76MPa(인장)이며 평균 수평·수직응력은 6.12MPa, 3.65MPa이다.

최대 수평·수직변위는 163mm, 396.6mm로 그림 8에서 보는 바와 같이 절리면을 따라서 변위가 크게 일어난다. 이에 대하여는 굴착단계에서 보강이 되어야 할 것이다.

이는 실제 굴착방법에 따라 단계별로 수치 해석하여 이에 따른 보강방법을 강구하고 보강하면서 굴착하는 것이 방법이나 본 해석에서는 불안정구간을 예측하기 위하여 전체 굴착단면에 대하여 수치해석하였다.

보 강

Silo에 대한 수치해석에서 보는 바와 같이 절리와 굴착면과의 가하학적 분포로부터 암체가 어느 부분에 위치하느냐에 따라서 불안정구간이 발생하므로 이와 같은 경우에는 보강이 필요하다. 그림 9에서는 인위적으로 절리의 방향과 굴착단면과 만나는 부분이 취약한 위치를 잡아서 수치해석한 결과, 변위가 측벽에 많이 일어나므로 보강이 필요하다.

UDEEC 프로그램에서는 Slag Bolt와 Cable Bolt를 해석할 수 있으나 금번 해석에서는 Slag Bolt에 의한 보강방법을 검토하였다. Axial Stiffness : 4.4×10^9 MN/M, Shear Stiffness : 6.47×10^9 MN/M, Active length 0.028m, Ultimate axial capacity : 246KN, Ultimate Shear capacity : 94KN인 Rock Bolt 2개를 가로질러 보강하여 수치해석하였다. 그림 10은 불안정시의 velocity를, 그림 11은 보강후 안정된 Velocity의 변화를 보여준 것이다.

결 언

본 연구에서 지질모델은 절리간격이 5m로 80도 경사를 갖는 두 방향의 절리가 암반 전체에 교차되는 암반상태에서 스웨덴의 중·저준위 방사성폐기물 처분장(S.F.R)과 유사한

깊이와 형태의 동굴처분이 실시될 경우에 Universal Distinct Element Code 프로그램을 이용하여 응력집중, 변위, 안정성에 대하여 검토하였다.

수치해석 결과 처분장의 안정성에 대하여는 전반적으로 안정되어 있으나 부분적으로 보강이 필요하다. 즉, 동굴측면에 따른 절리의 변위가 크게 발생한다. 특히 Silo의 경우에는 불안정구간이 발생한다. 이들은 동굴 굴착과 절리방향에 의한 기하학적인 관계에 따른 변위이다. 이들 불안정구간에는 단계적 굴착시에 보강하면 그 규모는 최소화할 수 있다.

이상과 같은 결론은 지질모델에서 선정된 바와 같이 5m간격의 절리가 두 방향으로 암반전반에 걸쳐서 계속적으로 연장되고 균일하게 분포한다는 가정이며 절리의 역학적 성질도 균일하다는 가정이다.

본 연구는 기초적인 개념을 갖기위하여 실시한 수치해석으로 보다 실제적인 설계를 위하여는 폐기물 처분지역의 지질조사를 실시하여 암반의 절리의 간격, 연장성, 방향, 거칠음, 충전물 등의, 절리 특성과 역학적 성질을 파악하여 수치해석을 하여야 한다.

그리고 현지응력의 크기와 방향과 지하수상태도 파악되어야 한다.

수치해석은 처분동굴의 적정규모와 방향에 대한 수치해석, 동굴과 동굴간의 응력집중에 대한 수치해석, 동굴굴착 단계에 대한 응력집중에 대한 수치해석, 지형기복에 따른 동굴의 위치에 대한 수치해석, 암반의 역학적 변화에 따른 안정성 수치해석, 암반의 지질조건 변화에 따른 수치해석이 동시에 수행되어 종합적인 안정성과 보강방법이 검토되어야 한다.

참고문헌

윤건신, 최영철(1990), UDEEC 프로그램을 이용한 한국의 방사성 폐기물처분장 설계연구, 114pp Board. M(1989). UDEEC(Universal Distinct Element Code) Version lcc 1.5. Report NUREG/CR-5429. US NRC

Cundall, P.A.(1971) A Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proc. of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Vol. I paper No. II-8.
Hoek, E and E.T.Brown(1980) Underground ex-

cavation in rock.
I.A.E.A.(1986) "The swedish final repository for reactor waste(SFR)" in Proc. of. Int. Symp. on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes, pp. 211-230.