
 Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

저온 지하저장을 위한 암반의 냉열거동 특성

정 소 결
한국암반공학회장,
한국지질자원연구원



Rock Engineering Laboratory 

목 차

**Part I. 저온하의 암석물성 평가를 위한
실험실 시험**

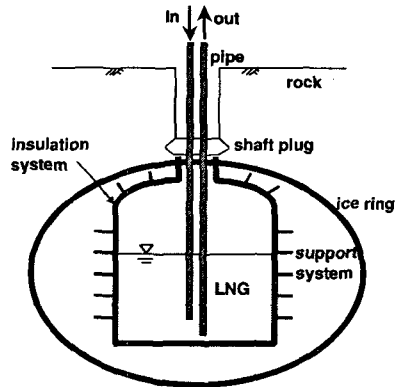
**Part II. Pilot Plant 계측결과와 열역학적
수치해석**

**Part III. 균열 발생/확장 메커니즘을 위한
파괴역학해석**

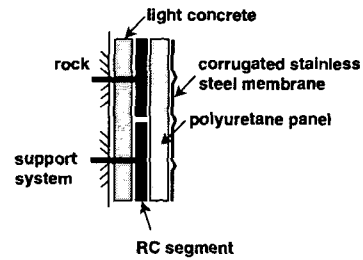
 Rock Engineering Laboratory  한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

저온 지하공동 저장개념

냉각된 LNG의 극저온도(-162℃)가 단열시스템을 통하여 암반에 적절한 온도경사가 형성되도록 하며 극저온에 의한 공동 주변에 일정한 두께의 ice ring을 형성하여 2차 기밀을 확보하는 방식



< LNG 지하공동식 저장시설 >



< TECHNIGAZ 단열시스템 >

Part I. 저온하의 암석물성 평가를 위한 실험실 시험

실험내용

- ❖ 냉각속도에 따른 인장강도의 변화
 - 암반의 냉각속도가 강도에 미치는 영향 파악

- ❖ 저온에서의 파괴인성값 측정
 - 균열확대계수 산출

- ❖ 포화절리암석의 동결팽창력 측정
 - 동결팽창계수 산정

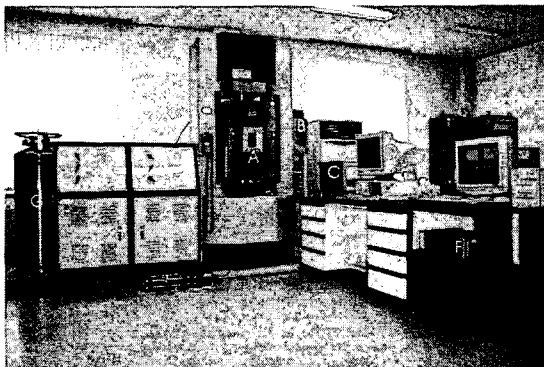


Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

실험장비 (1)



Interlaken 암석시험기의 전체적인 모습

- A : Environmental chamber
- B : Temperature controller
- C : DDC4000 controller
- D : System control PC
- E : Data acquisition PC
- F : Dynamic strain amplifier
- G : L-N₂ tank



Rock Engineering
Laboratory

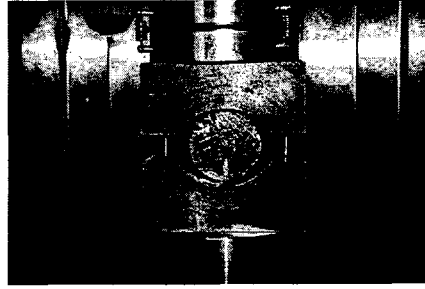


한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

실험장비 (2)

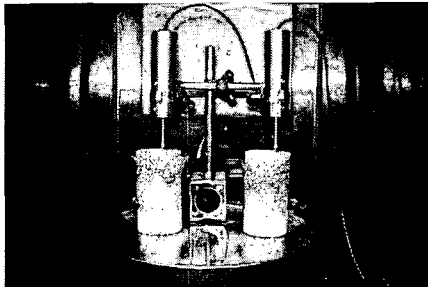


고온, 저온용 시험조(environmental chamber)

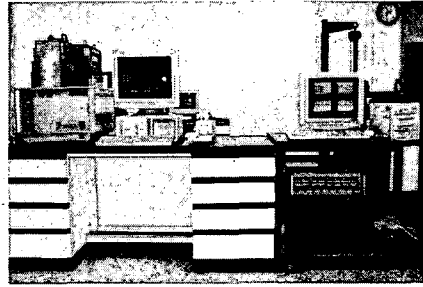


고온, 저온용 시험조 내부에
간접인장시험 시료가 설치된 모습

실험장비 (3)



고온, 저온용 시험조 내부에
절리평창시험 시료가 설치된 모습



시스템 제어장치와 자료획득 장치

시험방법 (온도조절)

❖ 간접인장시험

- 100°C까지 각각 2, 30, 60, 90, 120, 150, 166°C/min의 속도로 냉각시킨 후 상온에서 시험

❖ 파괴인성시험

- 2°C/min의 속도로 냉각시켜 각각 +20°C, 0°C, -30°C, -60°C에서 시험을 수행

❖ 포화 절리암석의 동결팽창력 측정

- 2°C/min의 속도로 냉각시키다가 각각 0°C, -20°C, -40°C, -60°C에서 약 1시간 정도씩 온도를 유지시키고 다시 냉각 시키는 방법으로 진행



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지반연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

시험방법 (간접인장시험)

❖ 완전 건조시료

- 105°C 오븐에서 24시간 이상 건조

❖ 완전 포화시료 파괴인성시험

- 침수조에서 완전 침수시킨 후 48시간 이상 침수
- 랩으로 물기의 증발을 차단 후 시험

❖ 시험

- 압열인장시험(Brazilian test)
- 재하속도 : 0.002mm/sec



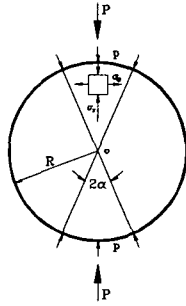
Rock Engineering
Laboratory



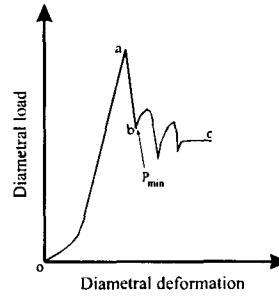
한국지질지반연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

시험방법 (파괴인성 측정)

❖ Guo et al(1993)등이 제안한 BDT 시험편 사용



BDT 디스크 시험편



BDT 시험편의 전형적인 파괴곡선

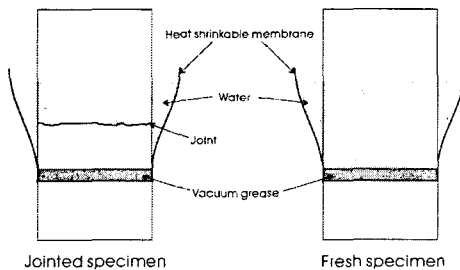


Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

시험방법 (절리의 팽창 측정)



1. 절리를 포함하는 상하 부분에 약 5cm 길이의 열수축멤브레인(Heat shrinkable membrane)
2. 아래 부분에 진공그리스 (Vacuum grease)를 얇게 도포
3. 열수축멤브레인에 열을 가하여 시료의 표면에 압착
4. 열수축멤브레인과 시료 사이의 공간에 절리내에 간극수가 포화될 때까지 물을 공급
7. 절리에 간극수가 포화 되었다고 판단이 되면 LVDT를 설치하고 실험을 수행

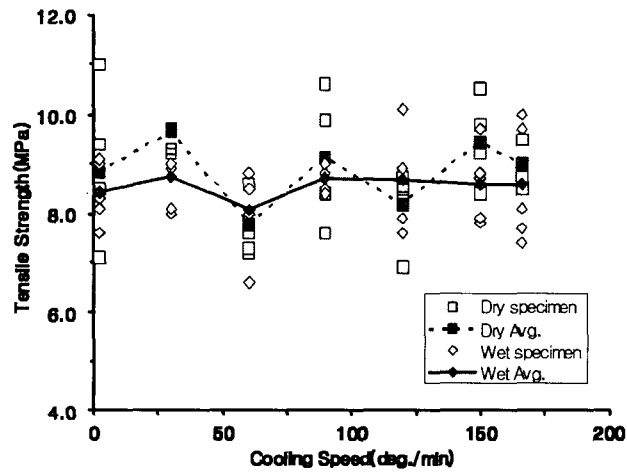


Rock Engineering
Laboratory



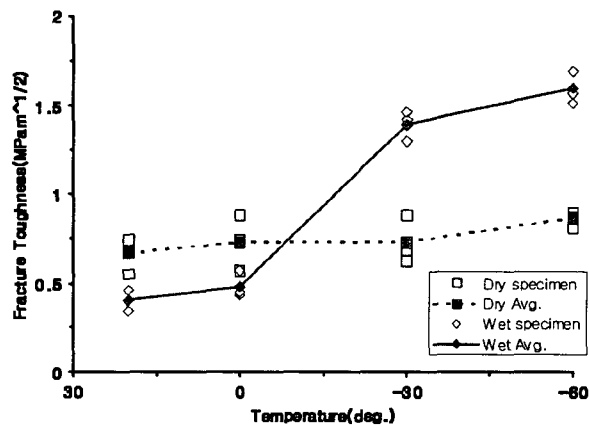
한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

시험결과 (간접인장강도)



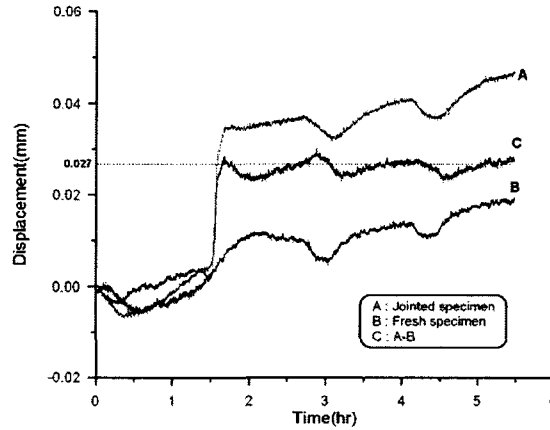
냉각속도변화에 따른 간접인장강도 변화

시험결과 (파괴인성)



저온상태에서의 파괴인성

시험결과 (포화절리의 동결팽창)



온도변화에 따른 포화절리의 팽창



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지반연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

결론

❖ 냉각속도에 따른 인장강도의 변화

- 건조, 포화시료 모두 뚜렷한 강도변화 없음
- 시험 시료의 수(각 5개)가 부족하고, 동결-융해과정이 1회로 한정

❖ 저온에서의 파괴인성값 측정

- 완전건조 : 0°C와 -30°C 정도에서는 약 10% 정도 증가,
-60°C에서는 약 30%가 증가
- 완전포화 : 0°C에서는 약간의 증가, 간극수가 결빙된 것으로 판단되는 -30°C와 -60°C에서는 3.5 ~ 4배가 증가

❖ 포화 절리암석의 동결팽창력 측정

- 팽창을 직접 측정하지 않고 0.027mm의 변위를 측정
- 물이 얼음으로 상변화 할 때 발생한 부피 팽창이고, 얼음의 상태에서 온도의 저하에 따른 변위는 거의 측정되지 않았다(절리의 간극이 너무 작음)



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지반연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

Part II. 계측결과와 열역학적 수치해석



Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

연구내용

- ❖ 열역학 해석 (Thermo-Mechanical Analysis)
- ❖ 2차원 개별요소해석 (UDEEC)

- ❖ 암반의 열물성 변화 해석
 - 열전도도, 비열, 열팽창계수 변화
- ❖ 불연속면의 영향 해석
- ❖ Constitutive Model에 따른 해석
 - 탄성, 탄소성



Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

Thermal Analysis in UDEC

❖ Fourier's law

$$Q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

Q_i = flux in the i -direction (W/m^2);
 k_{ij} = thermal conductivity tensor ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$); and
 T = temperature.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{\text{net}}}{C_p M}$$

Q_{net} = net heat flow into mass (M);
 C_p = specific heat ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$); and
 M = mass (kg).



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

❖ Thermal-Stress Coupling

$$\Delta\sigma_{ij} = -\delta_{ij} 3K^* \alpha \Delta T$$

$\Delta\sigma_{ij}$ = change in stress ij ;

δ_{ij} = Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1$ for $i = j$ and 0 for $i \neq j$);

K^* = K (for plane strain);

= $6KG/(3K + 4G)$ for plane stress, where K is bulk modulus and G is shear modulus;

α = linear thermal expansion coefficient; and

ΔT = temperature change.

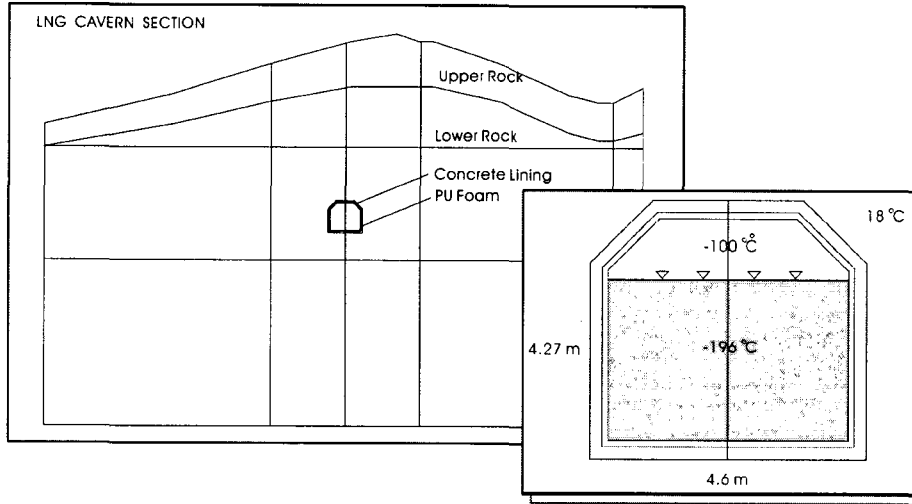


Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

해석단면



입력물성_mechanical properties

❖ 암반 및 구조물

항목	Density	Bulk modulus	Shear modulus	Friction angle	Cohesion	Tensile strength	Dilation angle
지층	kg/m ³	Pa	Pa	°	Pa	Pa	°
Upper rock	2500	2.94e9	1.28e9	20	1.5e5	7.3e6	20
Lower rock	2660	1.54e10	7.94e9	26	3.1e5	7.3e6	26
Concrete	2500	1.53e10	9.20e9	30	8.0e6	2.4e6	30
PU foam	65	1.28e7	9.58e6	70	1.0e10	1.0e10	0

입력물성_mechanical properties

❖ 불연속면

	Normal stiffness	Shear stiffness	Cohesion	Tensile strength	Friction angle	Dilation angle
	Pa/m	Pa/m	Pa	Pa	°	°
Fictitious joint	5.2e11	5.2e11	1.0e20	1.0e20	90	0
Rock / Concrete contact	2.0e8	5.0e8	0	0	10	0
Rock joint	1.9e9	5.4e9	5.0e4	0	41.2	0

입력물성_thermal properties

❖ 비열

온도(°C)	비열(J/kgK)	온도(°C)	비열(J/kgK)
-160	286.7	-40	622.0
-140	365.4	-20	666.0
-120	430.8	0	700.7
-100	492.5	20	728.2
-80	538.0	40	760.6
-60	588.9		

❖ 열팽창계수

온도(°C)	열팽창계수 (x10 ⁻⁶ /C)	온도(°C)	열팽창계수 (x10 ⁻⁶ /C)
-90	2.923	-30	5.371
-80	3.331	-20	5.779
-70	3.739	-10	6.187
-60	4.147	0	6.595
-50	4.555	10	7.003
-40	4.963	20	7.411

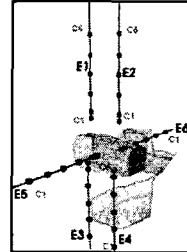
❖ 열전도도

온도(°C)	열전도도 (W/m·K)
23	2.382

계측결과 분석

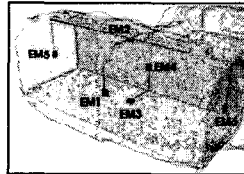
❖ 암반

- 계측위치 : 상부(E1, E2), 하부(E3, E4) 측벽(E5, E6)
- 계측항목 : 변위, 온도



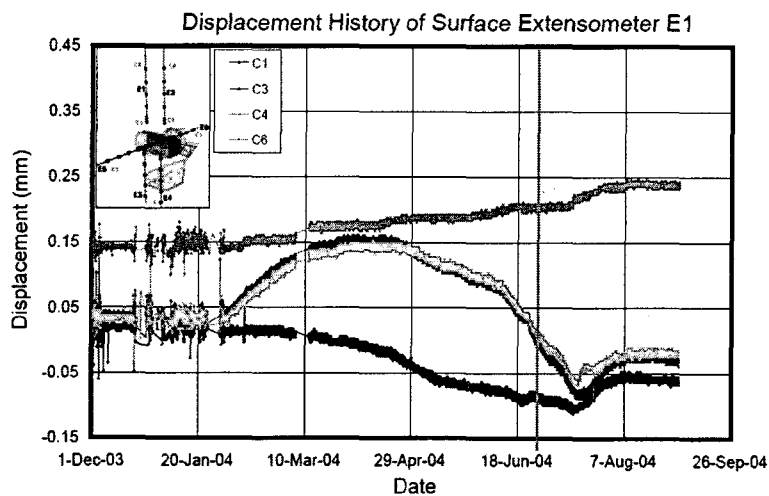
❖ 콘크리트 라이닝

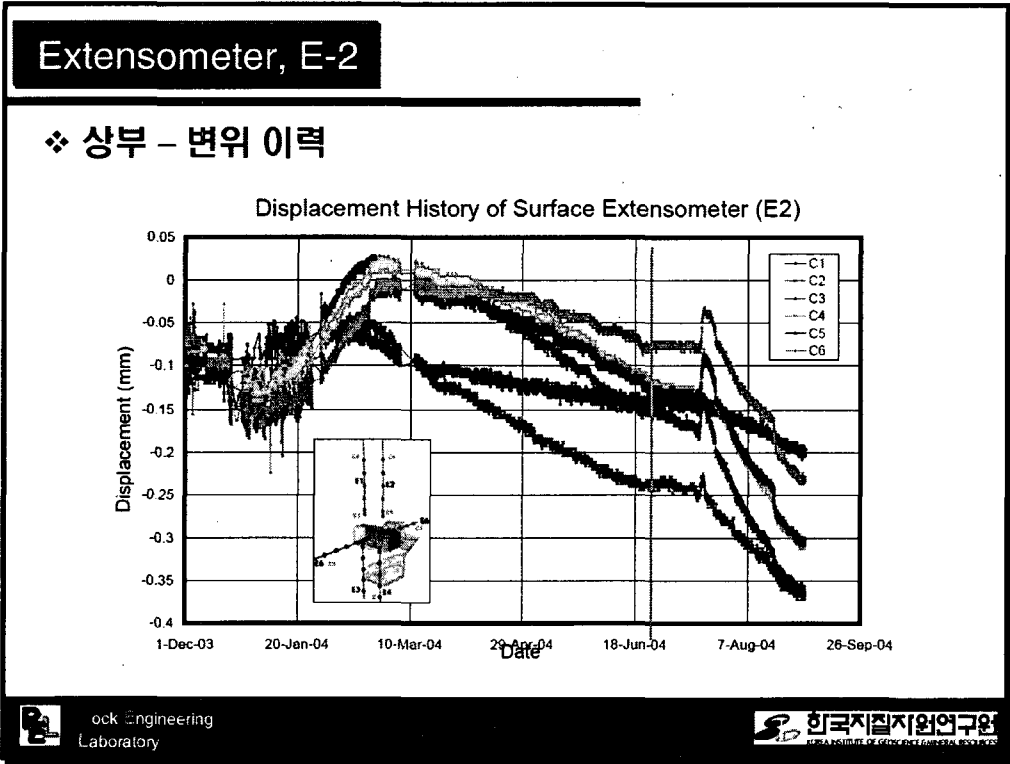
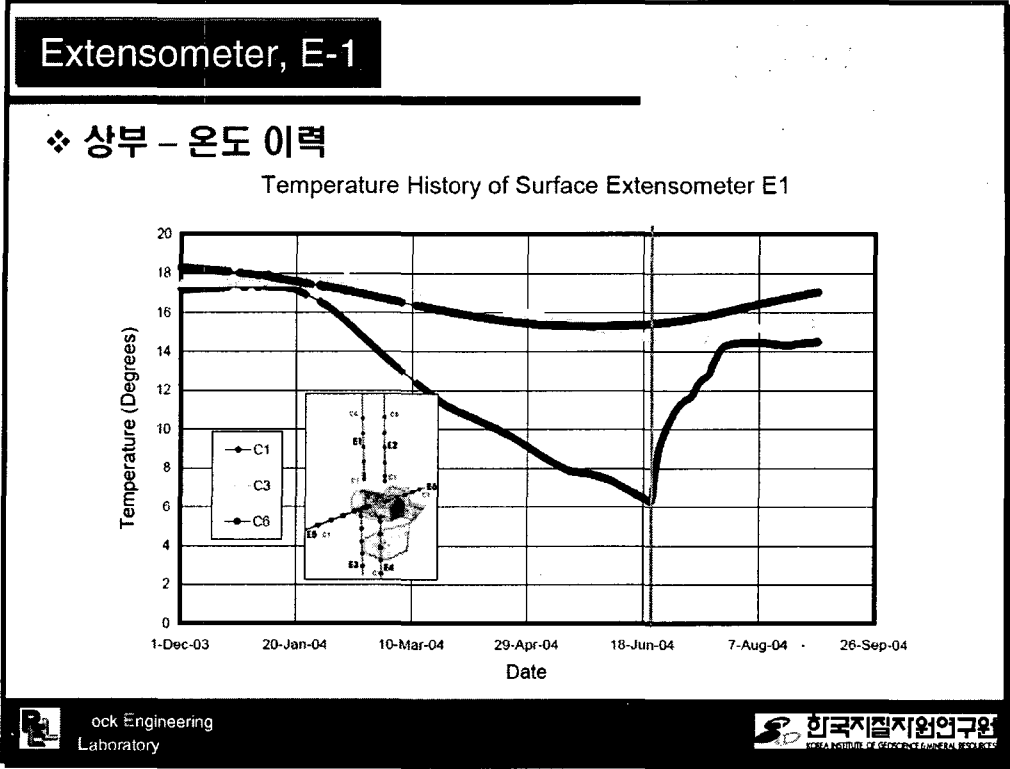
- 계측위치 : 천반(EM2), 측벽(EM1, EM4), 바닥(EM3)
- 계측항목 : 변형률, 온도



Extensometer, E-1

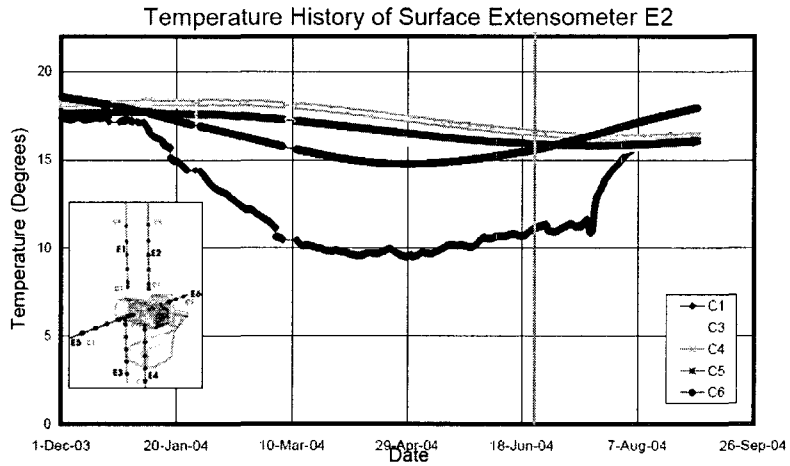
❖ 상부 - 변위 이력





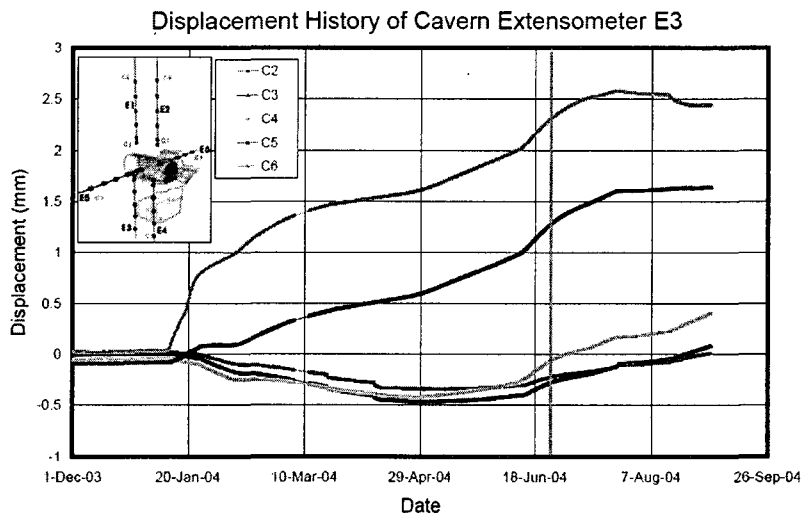
Extensometer, E-2

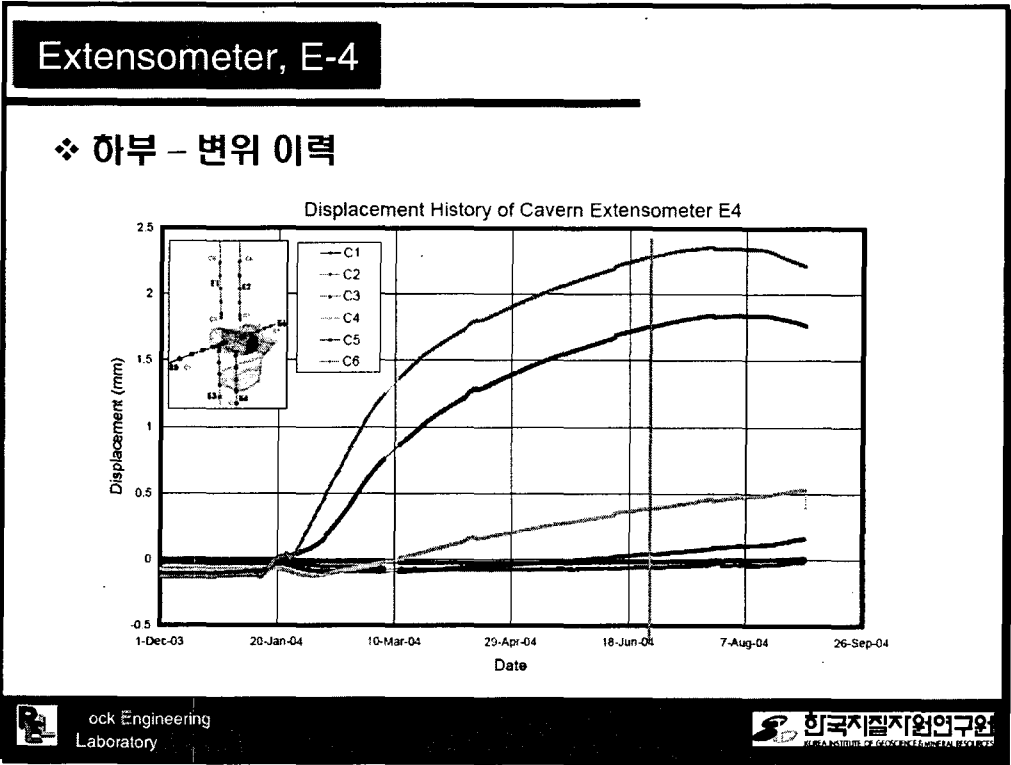
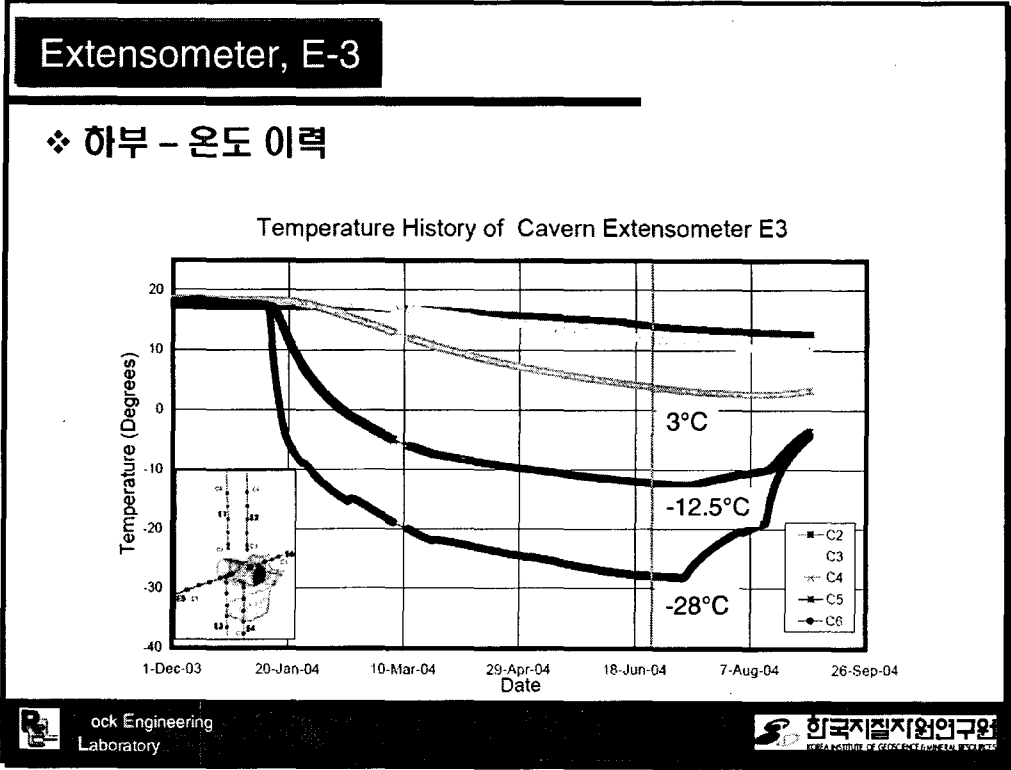
❖ 상부 - 온도 이력



Extensometer, E-3

❖ 하부 - 변위 이력

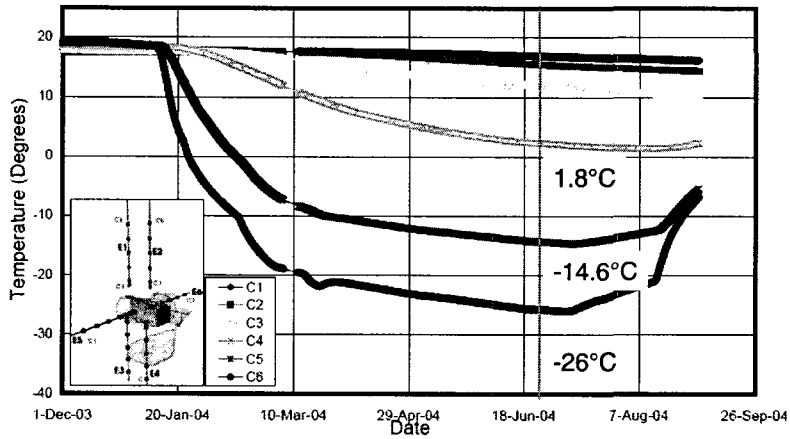




Extensometer, E-4

❖ 하부 - 온도 이력

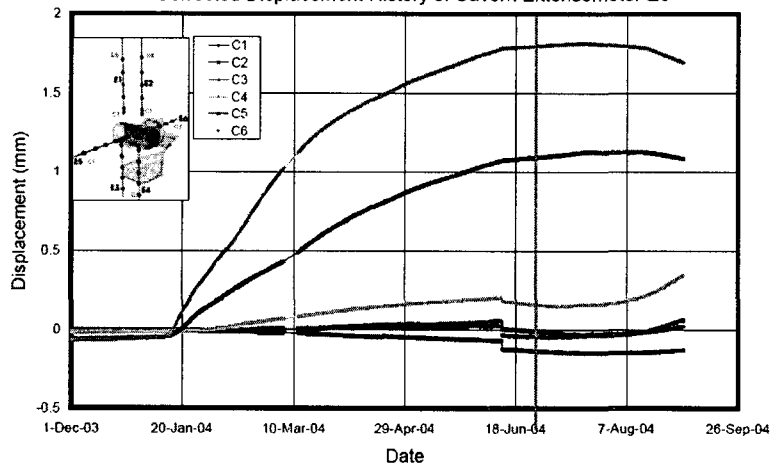
Temperature History of Cavern Extensometer E4

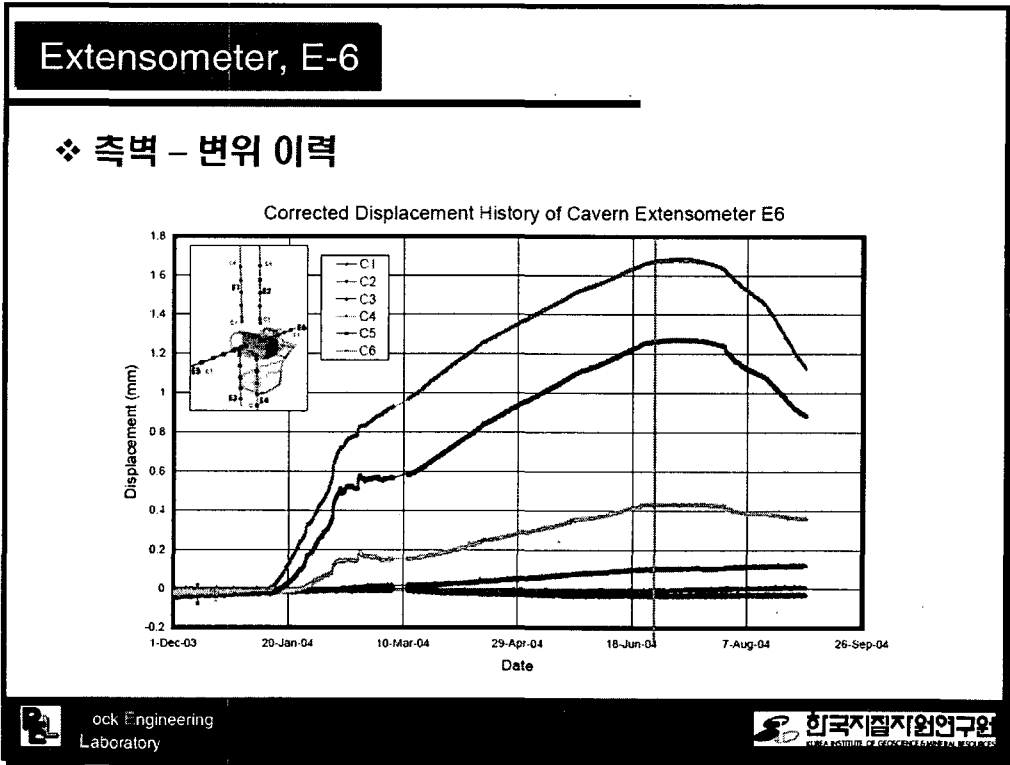
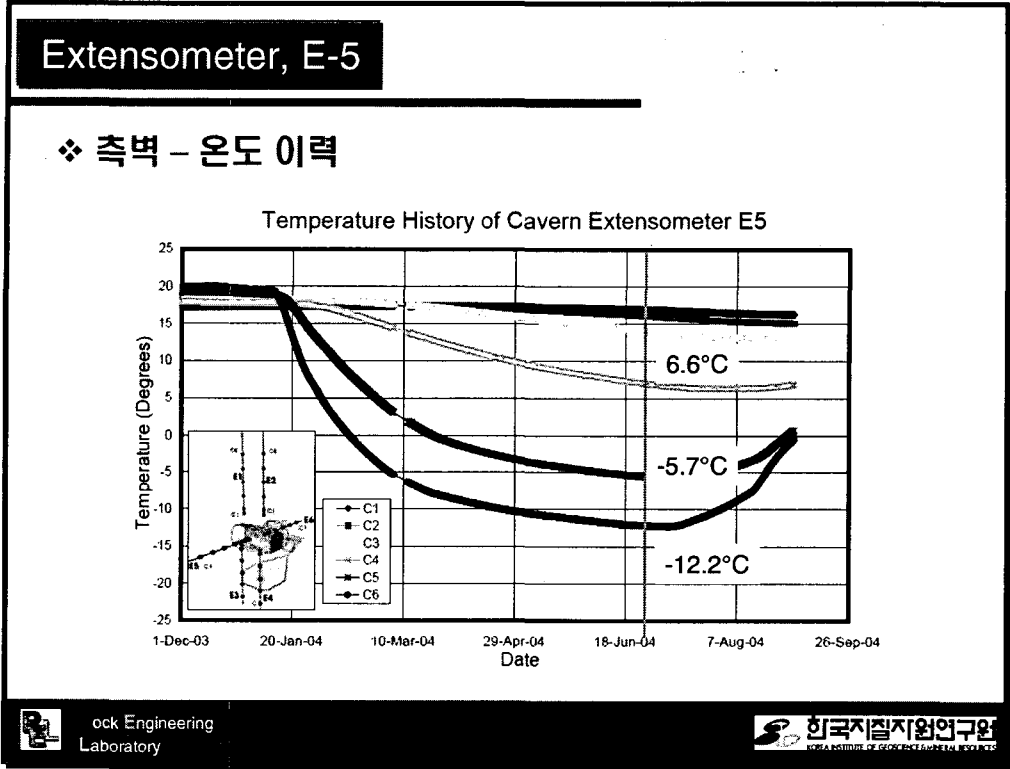


Extensometer, E-5

❖ 측벽 - 변위 이력

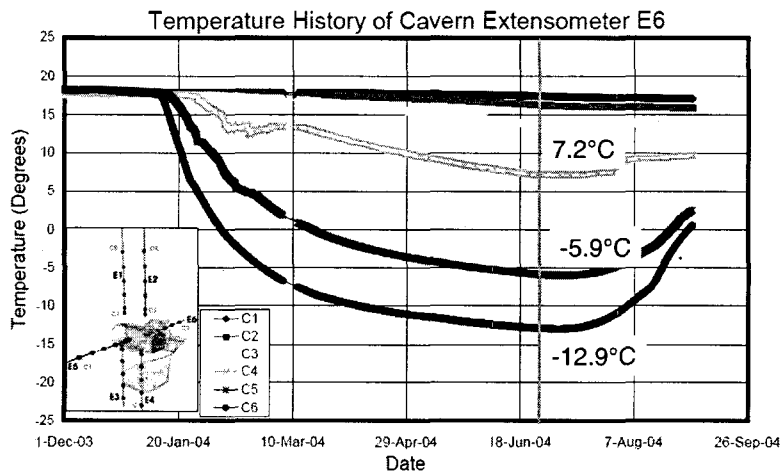
Corrected Displacement History of Cavern Extensometer E5





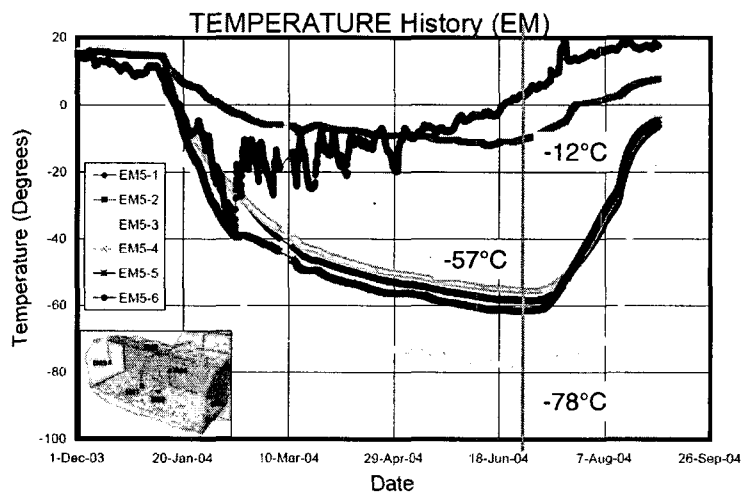
Extensometer, E-6

❖ 측벽 - 온도 이력



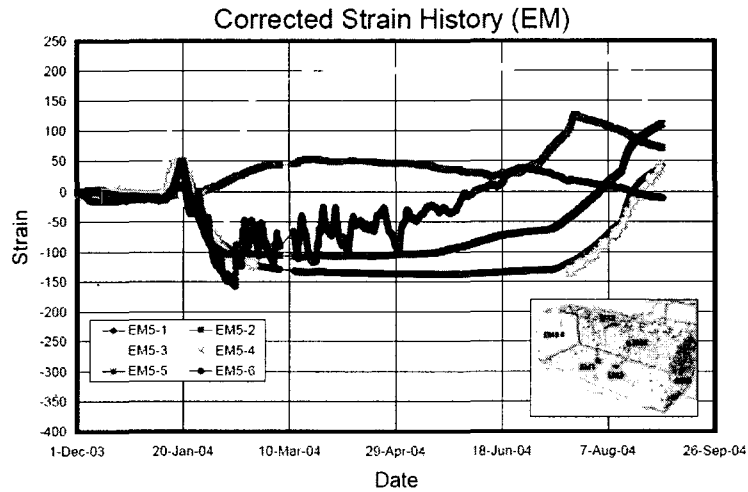
콘크리트 라이닝

❖ 온도 이력



Extensometer, E-6

❖ 변형률



계측결과 - 종합

❖ 암반

- 0°C 전파길이 : 하부 3.6-3.7m, 측벽 4m
- 공동에서 가까운 곳에서는 암반쪽으로
먼 곳에서는 공동쪽으로 향하는 변위발생

❖ 콘크리트 라이닝

- 온도 : 천반(-12 °C), 바닥(-80 °C), 측벽(-57 °C)
- 변형 : 천반과 바닥은 공동쪽으로, 측벽은 암반쪽으로 변형

열물성 변화 해석

❖ 해석 순서

: 초기평형상태 해석 -> Cavern 굴착 -> T-M Coupling 해석

❖ T-M Coupling

: 일정 시간 냉각 후 역학적 평형상태 도달 과정을 반복 수행

❖ 해석 모델

- Mohr-Coulomb
- 절리 없는 경우
- 경과 시간 : 24주



Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering & Environment

❖ 입력 물성

Case	k (W/m ·K)	Cp (J/kg·K)	a (10 ⁻⁶ /°C)	비고
1	2.63	710	6.64	기존 연구
2	2.382	728.2	7.411	20 °C
3	2.382	492.5	2.923	-90 °C
4	2.382	561.8	5.167	평균

❖ History

- 상부 : (PU/Conc, Conc내부, Conc/Rock), 1.1m, 2.1m, 4.9m, (7.9m, 10.7m, 13.7m)
- 하부 : (PU/Conc, Conc내부, Conc/Rock), 0.4m, 1.4m, 4.2m, 7.2m, (10.0m, 13.0m)
- 측벽 : (PU/Conc, Conc내부, Conc/Rock), 0.6m, 1.6m, 4.4m, 7.4m, (10.2m, 13.2m)

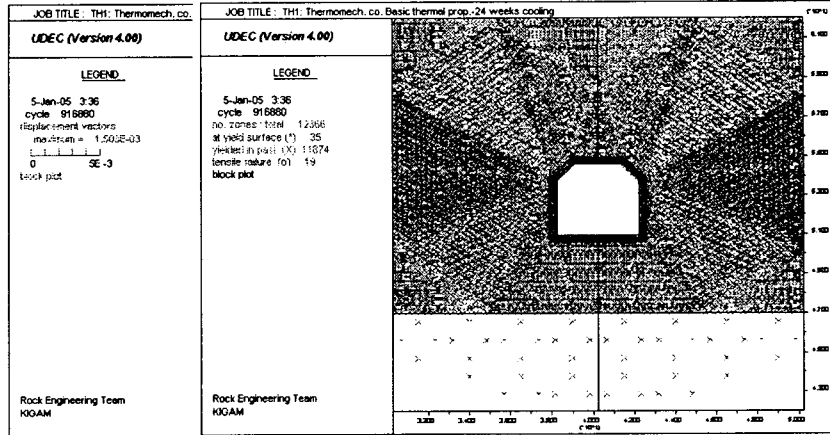


Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering & Environment

❖ 해석 결과 – Case 1

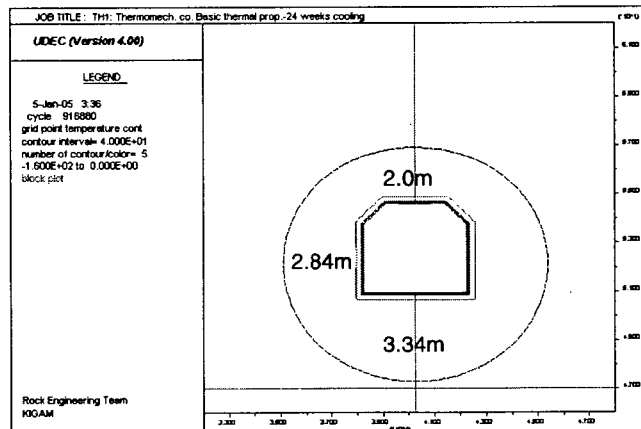


Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

❖ 해석 결과 – Case 1

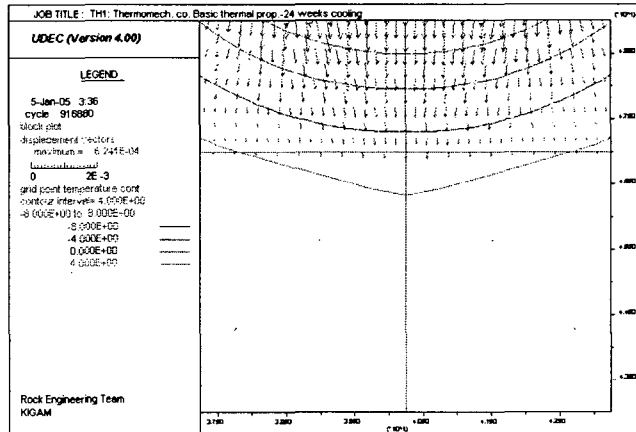


Rock Engineering
Laboratory

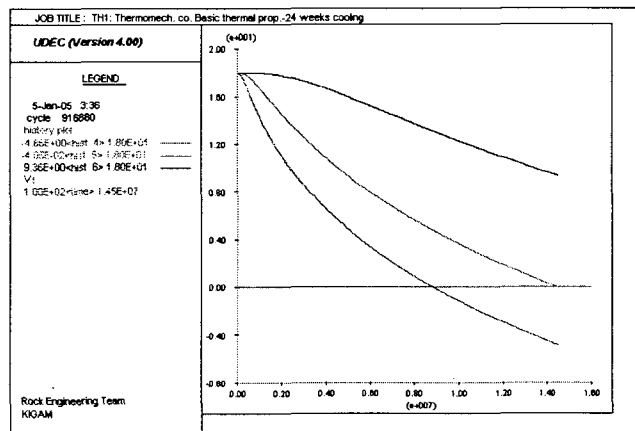


한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

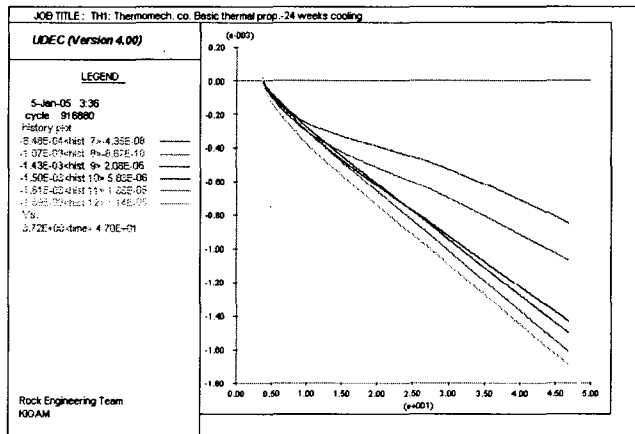
❖ 해석 결과 - Case 1



❖ 상부 - 온도



❖ 상부 - 변위

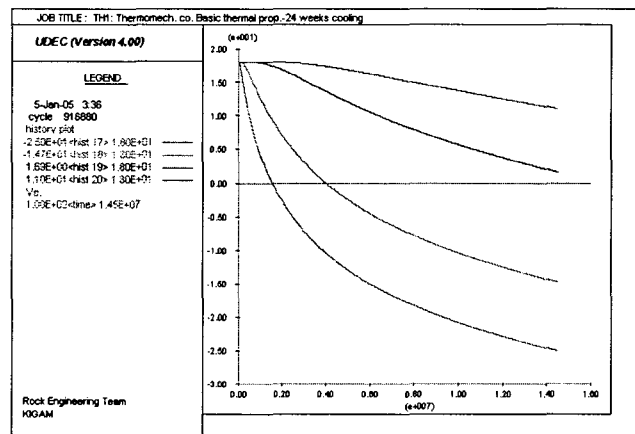


Rock Engineering
 Laboratory



한국지질지원연구원
 KOREA INSTITUTE OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

❖ 하부 - 온도

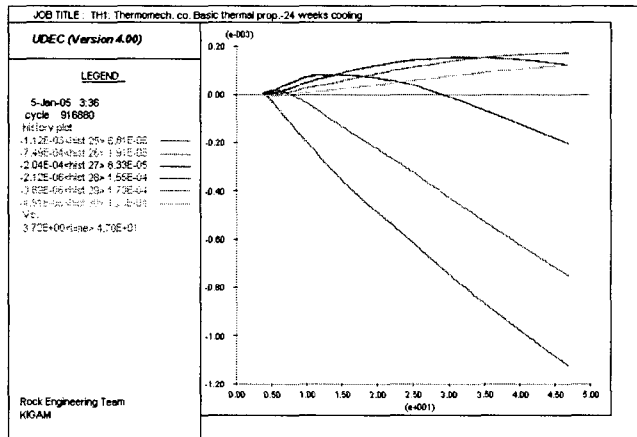


Rock Engineering
 Laboratory

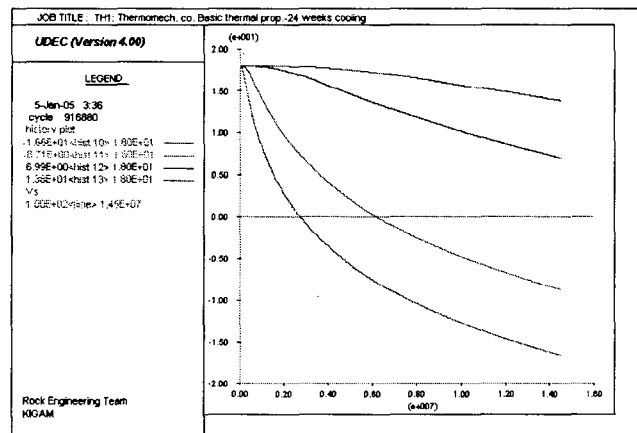


한국지질지원연구원
 KOREA INSTITUTE OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

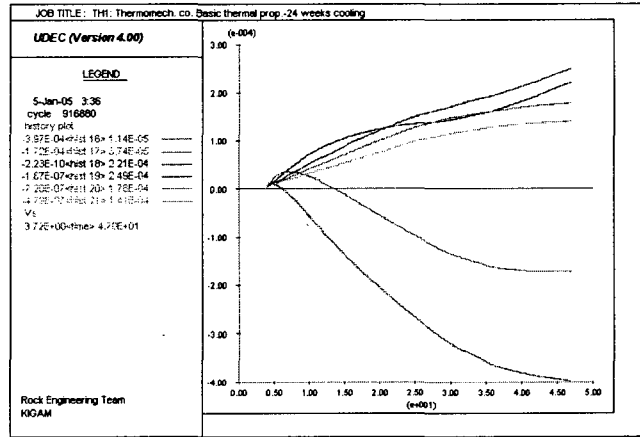
❖ 하부 - 변위



❖ 측벽 - 온도



❖ 측벽 - 변위

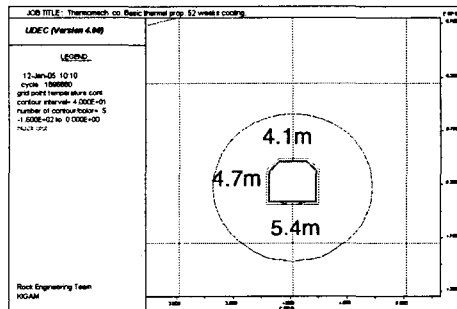
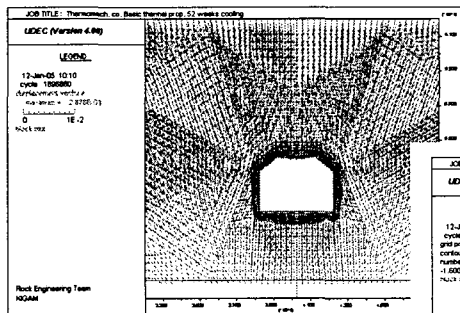


ock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

❖ 해석 결과 - Case 1, 52주 해석

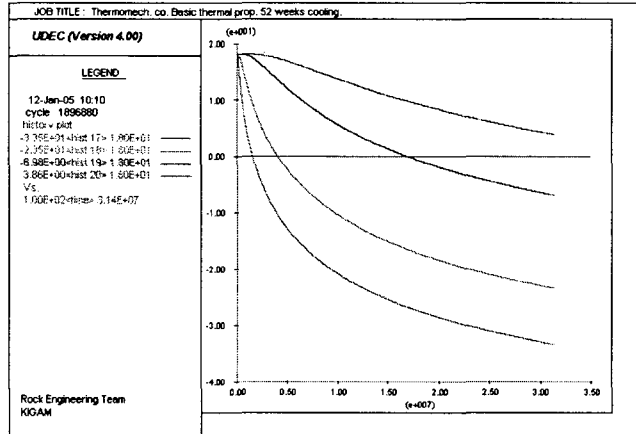


ock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

❖ 하부 - 온도

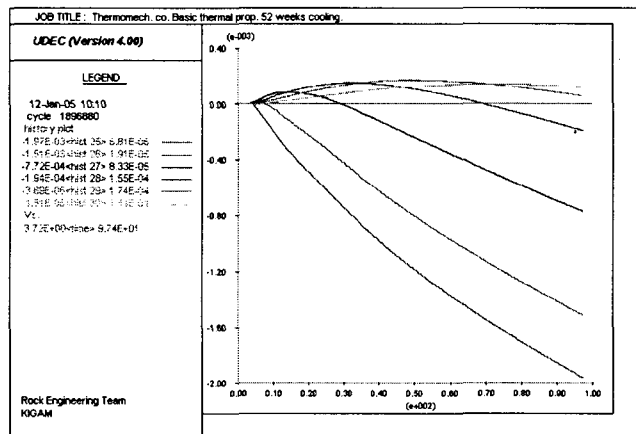


Rock Engineering
 Laboratory



한국지질지원연구원
 KIGAM

❖ 하부 - 변위

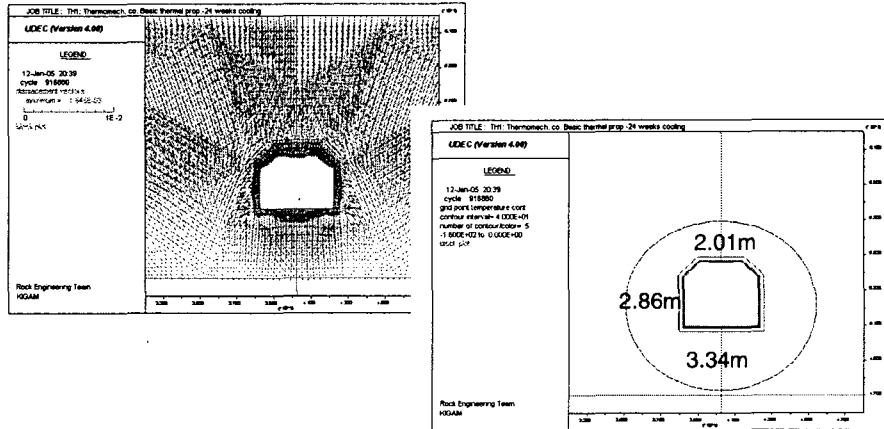


Rock Engineering
 Laboratory

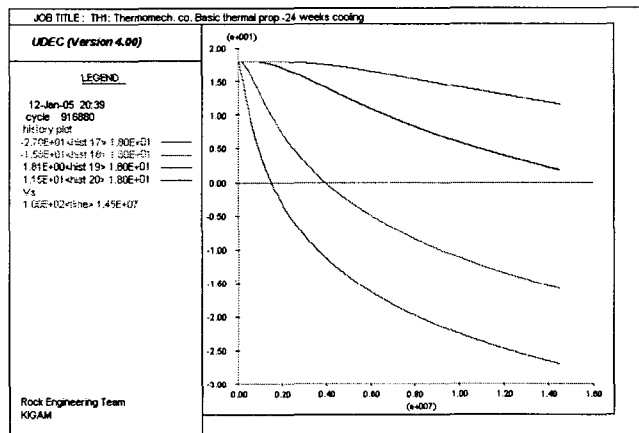


한국지질지원연구원
 KIGAM

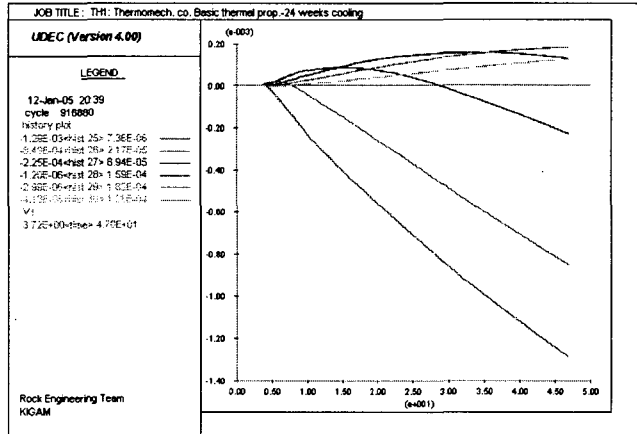
❖ 해석 결과 - Case 2



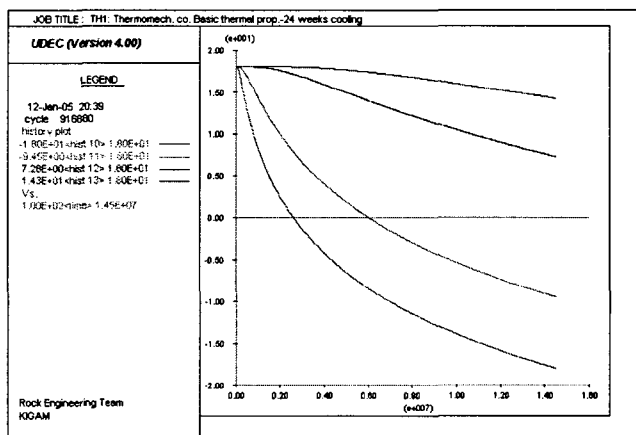
❖ 하부 온도



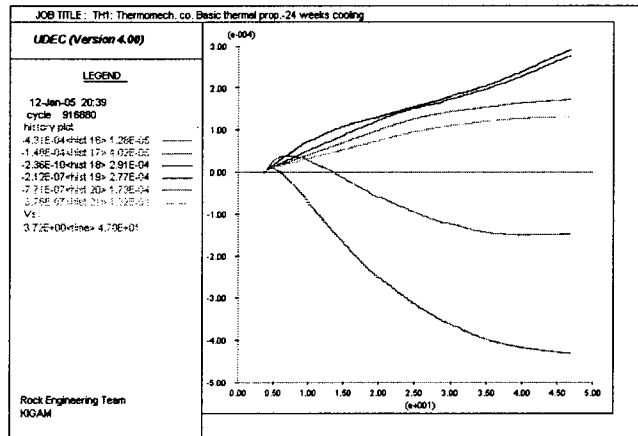
❖ 이부 - 변위



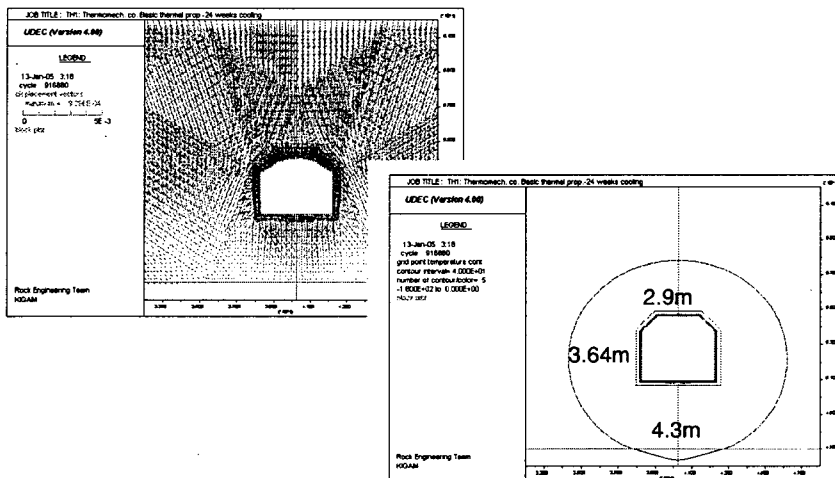
❖ 측벽 - 온도



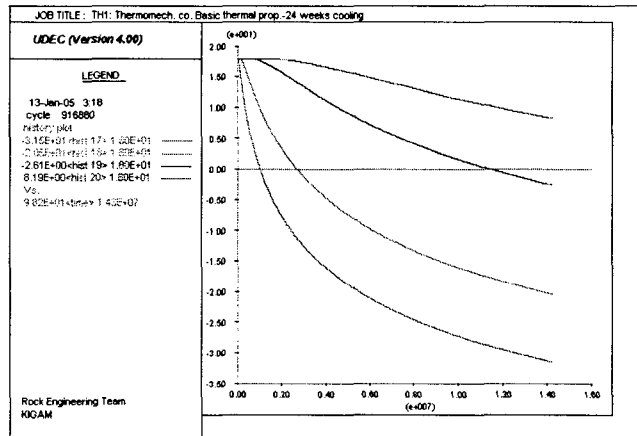
❖ 측벽 - 변위



❖ 해석 결과 - Case 3



❖ 이부 - 온도

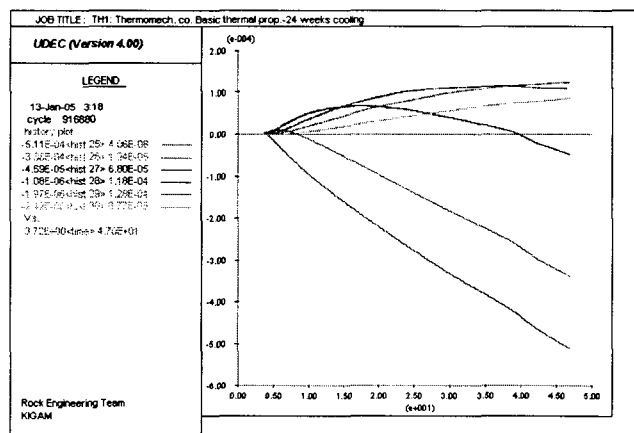


Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

❖ 이부 - 변위

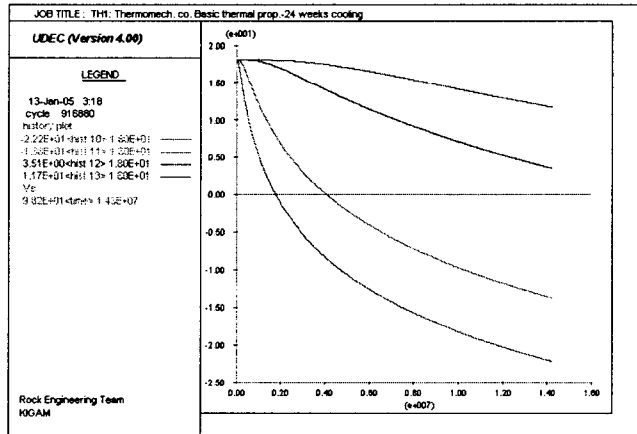


Rock Engineering
Laboratory

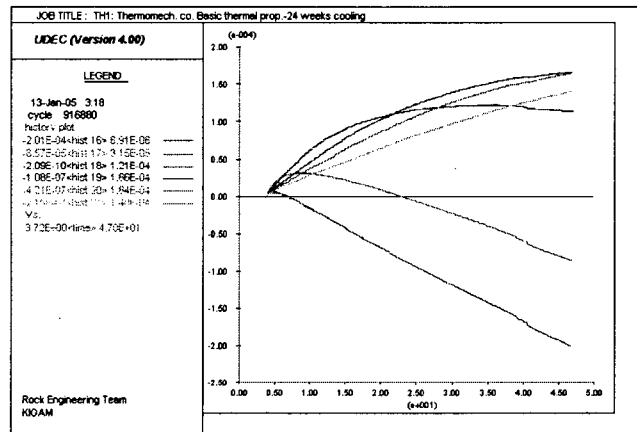


한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

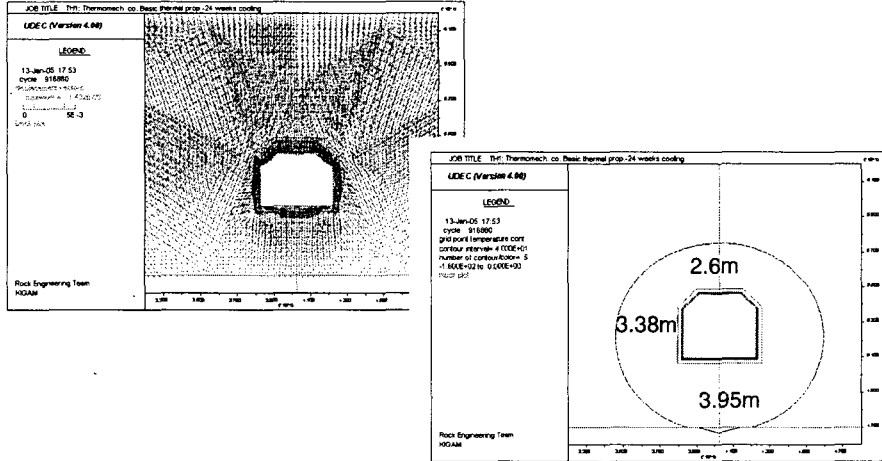
❖ 측벽 - 온도



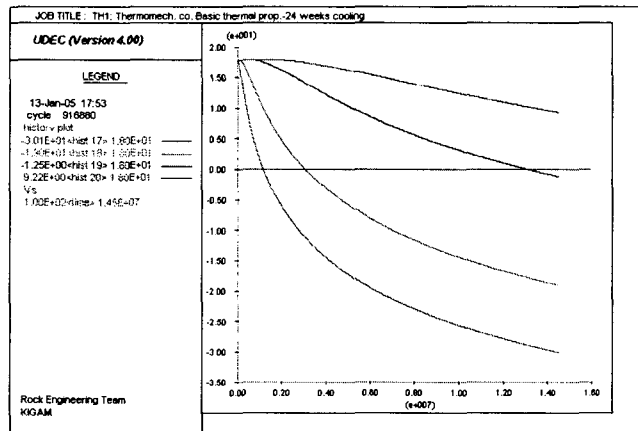
❖ 측벽 - 변위



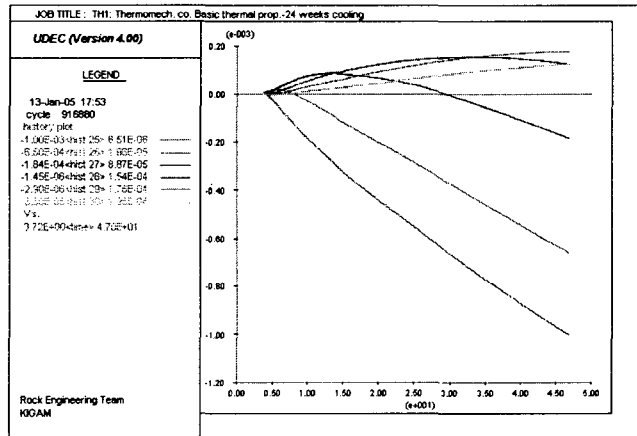
❖ 해석 결과 - Case 4



❖ 이부-온도



❖ 이부 - 변위

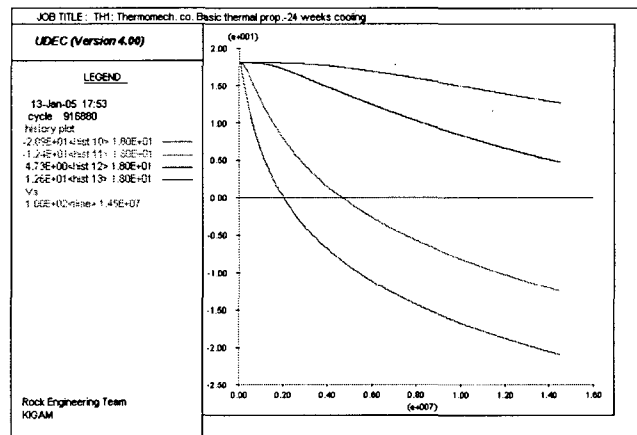


ock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

❖ 측벽 - 온도

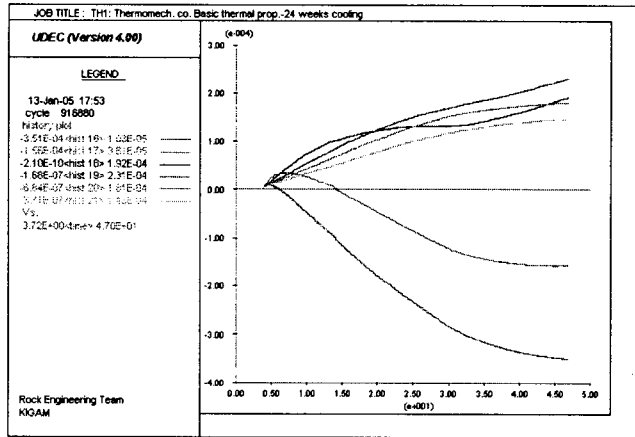


ock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

❖ 측벽 - 변위



열물성 변화 해석 _ 결과

❖ 해석결과

Case	절리최대전단 변위(mm)	절리최대수직 변위(mm)	0°C등온선(m)			최대변위(mm)
			상부	하부	측벽	
1	0.74	1.227	2.0	3.34	2.84	1.503
2	0.96	1.433	2.01	3.34	2.86	1.645
3	0.35	0.565	2.9	4.3	3.64	0.930
4	0.58	1.037	2.6	3.95	3.38	1.432
계측			-	3.6-3.7	4	

- 열물성(Cp, α)이 클수록, 발생변위는 크고, 0°C 전파길이는 적음.
 - 0°C 전파길이는 계측결과와 유사한 결과를 보임.
 - 변위발생양상은 계측결과와 유사함.
- : 공동에서 가까운 곳에서는 암반쪽으로, 먼 곳에서는 공동쪽으로 향하는 변위발생 변위발생량은 계측결과와 절반정도 발생함.

불연속면 영향 해석

❖ 해석 순서

: 초기평형상태 해석 -> Cavern 굴착 -> T-M Coupling 해석

❖ T-M Coupling

: 일정 시간 냉각 후 역학적 평형상태 도달 과정을 반복 수행

❖ 해석 모델

- Mohr-Coulomb
- 현장조사 결과로부터 2조의 절리군 고려
- 경과 시간 : 24주

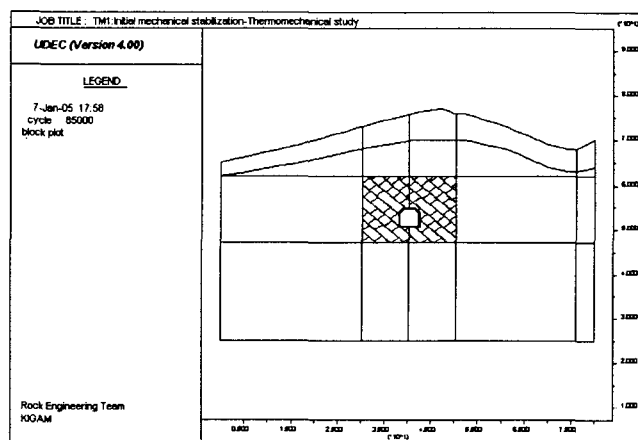


Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering

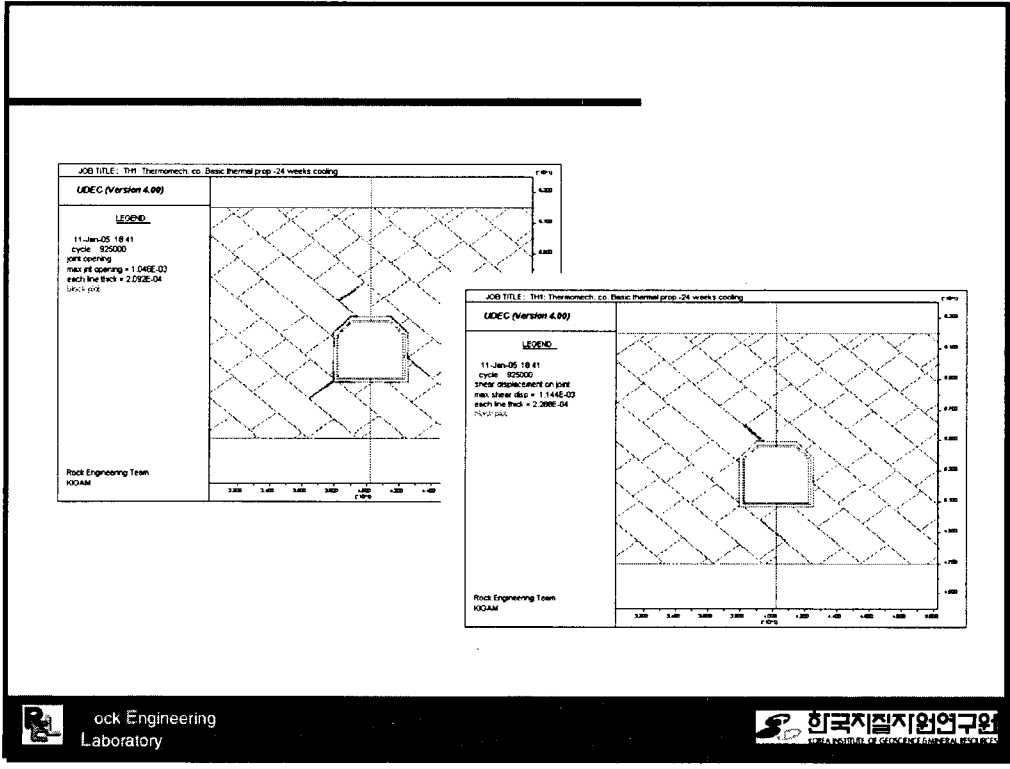
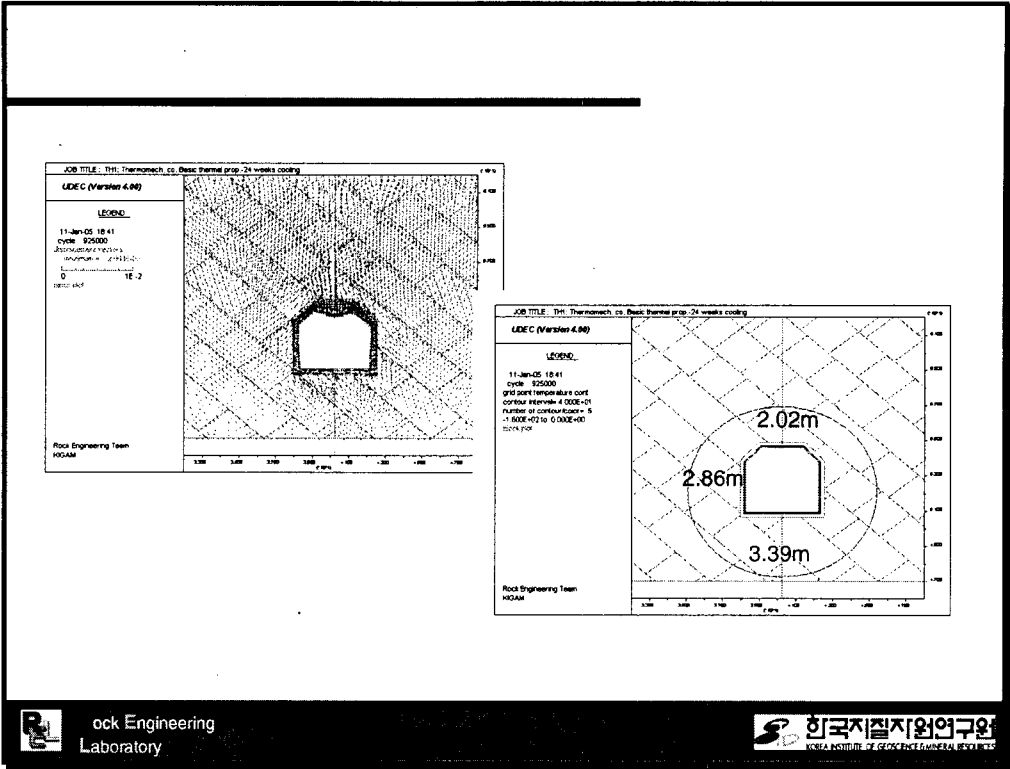
❖ 해석 모델



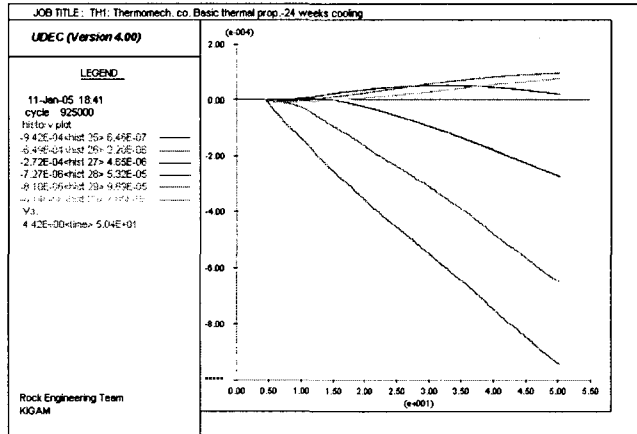
Rock Engineering
Laboratory



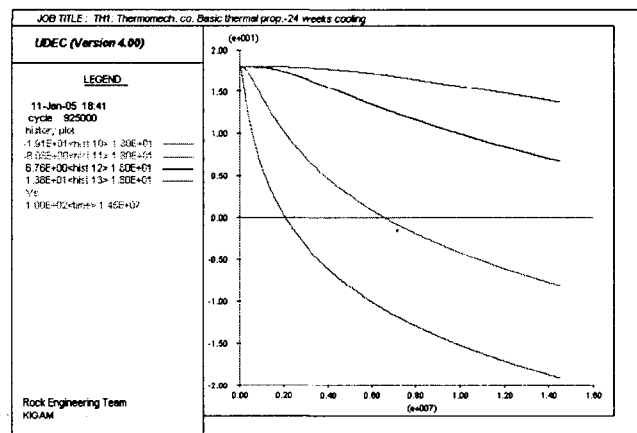
한국지질자원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering



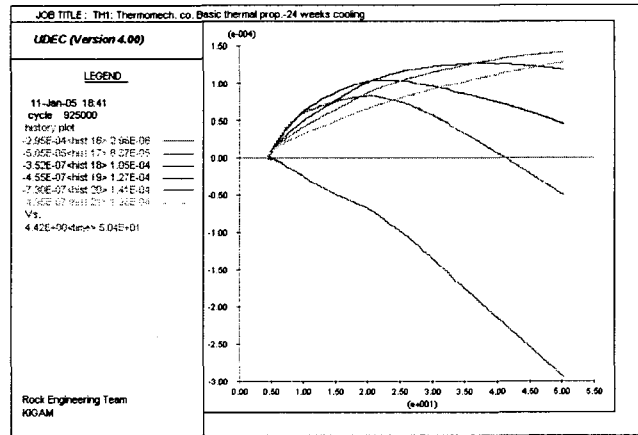
❖ 이부 - 변위



❖ 측벽 - 온도



❖ 측벽 - 변위



불연속면 영향 해석 결과

❖ 해석결과

- 0°C 전파길이는 절리 없는 경우와 유사한 결과를 보임.
- 절리의 최대 전단변위가 크게 발생.
- 라이닝부의 인장파괴영역의 증가.

수치해석 _ 종합결과

❖ 해석결과

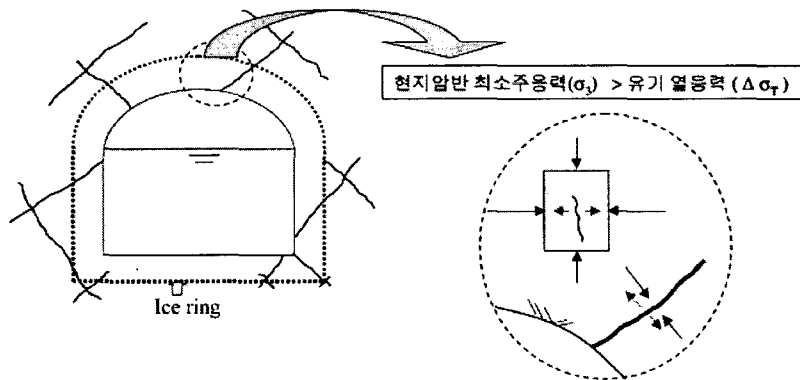
Case	절리최대전단 변위(mm)	절리최대수직 변위(mm)	0°C등온선(m)			최대변위(mm)
			상부	하부	측벽	
1	0.74	1.227	2.0	3.34	2.84	1.503
2	0.96	1.433	2.01	3.34	2.86	1.645
3	0.35	0.565	2.9	4.3	3.64	0.930
4	0.58	1.037	2.6	3.95	3.38	1.432
5	1.144	1.046	2.02	3.39	2.86	2.098
계측			-	3.6-3.7	4	

❖ 해석결과

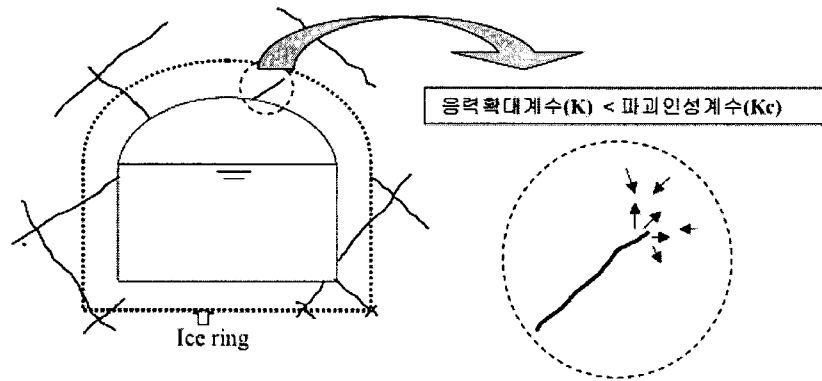
- 열물성(C_p , α)이 클수록, 발생변위는 크고, 0°C 전파길이는 적음.
- 0°C 전파길이는 계측결과와 유사한 결과를 보임.
- 변위발생양상은 계측결과와 유사함.
: 공동에서 가까운 곳에서는 암반쪽으로, 먼 곳에서는 공동쪽으로 향하는 변위발생
- 변위발생량은 계측결과의 절반정도 발생함.
- 절리면을 고려한 해석의 경우, 절리면의 전단변위가 증가하는 등 변위발생은 증가함.
- 그러나, 온도전파는 유사한 결과를 보임.

Part III. 균열 발생/확장 메커니즘을 위한 파괴역학 해석

균열발생조건



균열확장조건



❖ 파괴역학적 접근

→ 절리내 동결팽창압이 균열확장에 큰 영향을 미침

파괴역학 수치해석

❖ 목적

: 암반내 온도저하에 따른 균열발생 및 확장 매커니즘의 규명

❖ 입자결합모델의 특징

- 모델의 구성방정식이 필요 없음
- 균열발생은 입자간 결합력을 초과할 때 발생
- 파괴 해석시, 초기 균열이 필요 없음

❖ PFC 입자로 구성된 재료에서의 점진적인 heat conduction 과 storage뿐만 아니라 열에 의해 유도된 변위와 힘의 발달 또한 모사 가능함.

수치해석의 조건

- ❖ 열-역학 상호작용은 암석의 열팽창계수를 통하여 온도 변화에 의한 열응력 계산에만 적용됨. 즉 응력변화에 의한 온도 변화는 고려되지 못함.
- ❖ 해석시 가정조건
 - 암석 내부에 아무런 초기 균열이 없음
 - 온도저하는 암석 전체에 동시에 일어남
 - 인장강도(실험치)에 맞는 Micro-Properties 사용
 - 암반물성은 온도에 관계없이 일정함



Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

열 해석의 기본이론

❖ 기본 4가지 열물성

- 밀도, (kg/m^3)
- 비열, ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)
- 선형열팽창계수, ($1/^\circ\text{C}$)
- 단위길이당 열저항, ($^\circ\text{C}/\text{Wm}$)

❖ 열 변형률 (thermal strain)

: 입자의 열팽창 및 입자를 결합하는 결합재료의 열팽창에 의해 발생됨.

$$\Delta R = \alpha R \Delta T \quad \alpha : \text{선형열팽창계수}$$



Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

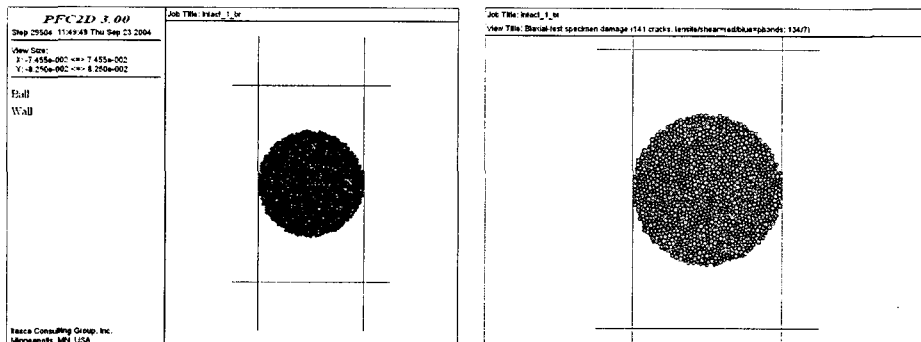
❖ 열 응력 (thermal stress)

4면이 모두 구속된 경계를 가진 모델에 ΔT 의 일정한 온도변화가 가해진다면, 구속으로 인해 팽창에 대응하는 thermally-induced stress 이 발생됨.

❖ 등방 탄성 연속체내에 발생하는 열유도 응력의 이론해

$$\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = -\alpha_t \Delta TE / (1-\nu)$$

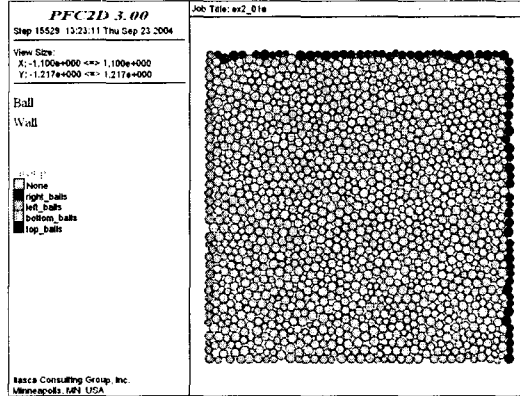
간접인장시험 모델링



❖ 암석의 인장강도 7.7MPa (실험치)에 맞게 PFC2D의 Micro-properties를 결정 → Trial & Error 기법

열-응력 해석

- ❖ 모델 영역 : 2m x 2m
- ❖ 경계조건 : 상하좌우 경계면
변위 구속
- ❖ 초기응력조건 : 모델 내부엔 초기
응력이 존재하지 않음
- ❖ 온도 저하에 따른 열응력의 값은?
- ❖ 신선암에서 균열이 생기는 온도저
하($\Delta T^{\circ}\text{C}$)는 얼마인지?



< 열-응력 해석에 사용된 PFC 모델 >

온도저하에 따른 열응력 계산

온도저하 (ΔT)	열팽창계수 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	2.62	3.711	5.78
-40 $^{\circ}\text{C}$	3.95MPa, 3.89MPa	5.33MPa, 5.24MPa	7.93MPa, 7.80MPa
-50 $^{\circ}\text{C}$	4.78MPa, 4.70MPa	6.49MPa, 6.39MPa	9.74MPa, 9.59MPa
-60 $^{\circ}\text{C}$	5.60MPa, 5.51MPa	7.66MPa, 7.54MPa	11.56MPa, 11.38MPa
-70 $^{\circ}\text{C}$	6.42MPa, 6.32MPa	8.82MPa, 8.69MPa	13.37MPa, 13.17MPa
-80 $^{\circ}\text{C}$	7.25MPa, 7.13MPa	9.99MPa, 9.83MPa	15.19MPa, 14.95MPa
-90 $^{\circ}\text{C}$	8.07MPa, 7.94MPa	11.15MPa, 10.98MPa	17.00MPa, 16.74MPa
-100 $^{\circ}\text{C}$	8.89MPa, 8.75MPa	12.32MPa, 12.13MPa	18.82MPa, 18.53MPa

주) S_{xx} (수평방향 응력), S_{yy} (수직방향 응력) 순으로 기재

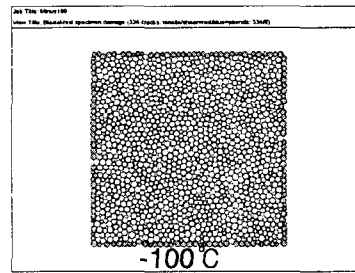
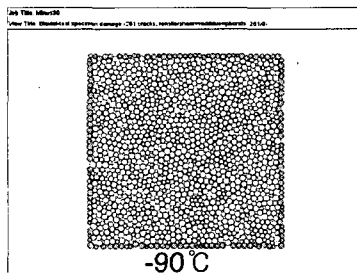
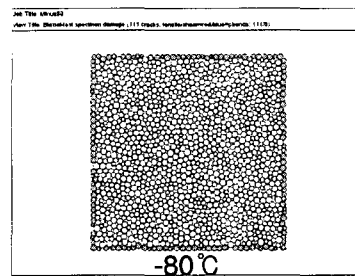
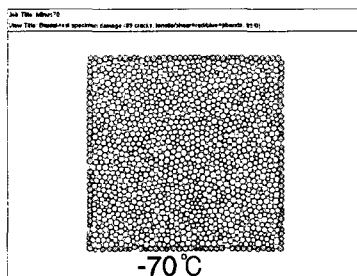
축압계수에 따른 열응력 계산

수직응력: 1.3 MPa

온도저하	K = 0.5	K = 1.0	K = 2.0
-50℃	6.07MPa, 5.70MPa	5.79MPa, 5.71MPa	5.15MPa, 5.72MPa
-60℃	7.24MPa, 6.85MPa	6.95MPa, 6.85MPa	6.31MPa, 6.87MPa
-70℃	8.40MPa, 7.80MPa	8.12MPa, 8.01MPa	7.48MPa, 8.02MPa
-80℃	9.54MPa, 9.13MPa	9.26MPa, 9.14MPa	8.62MPa, 9.15MPa

주) S_{xx} (수평방향 응력), S_{yy} (수직방향 응력) 순으로 기재

신선함 암반의 파괴해석



해석 결과 _ 신선암

- ❖ 온도 저하량이 -70°C 를 초과하면서 모델 전체적으로 균열이 생성되는 양상을 보임.
- ❖ 이는 열팽창계수가 $3.711 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 발생 열응력이 인장강도 7.7MPa 를 넘어서는 온도 저하량인 -70°C 와 매우 잘 일치하는 경향임.
- ❖ 이로부터, 현지 암반의 인장강도를 정확히 구한다면 새로운 냉열 균열이 발생하는 개략적인 온도저하범위를 추정할 수 있음을 의미함.



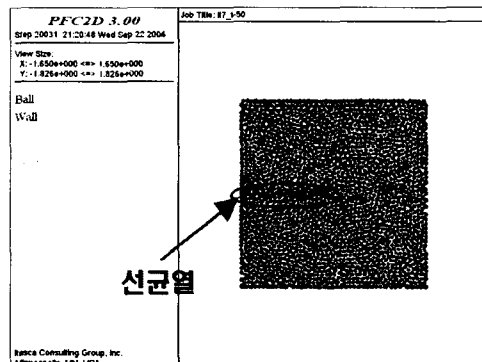
Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering Research

기존균열의 파괴해석

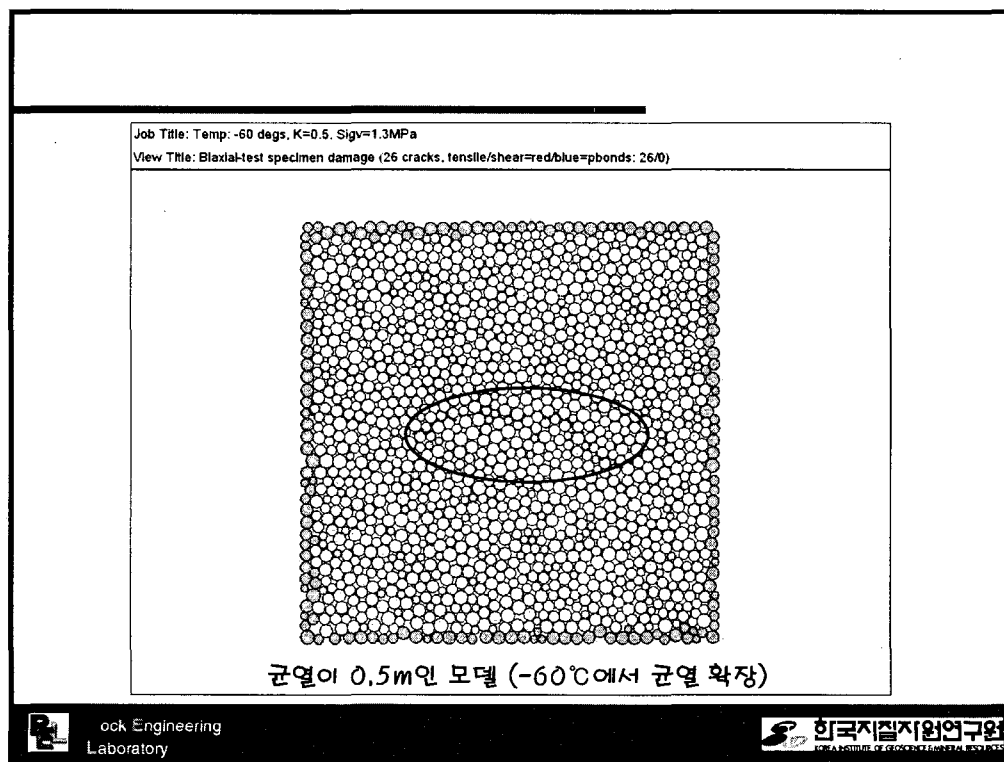
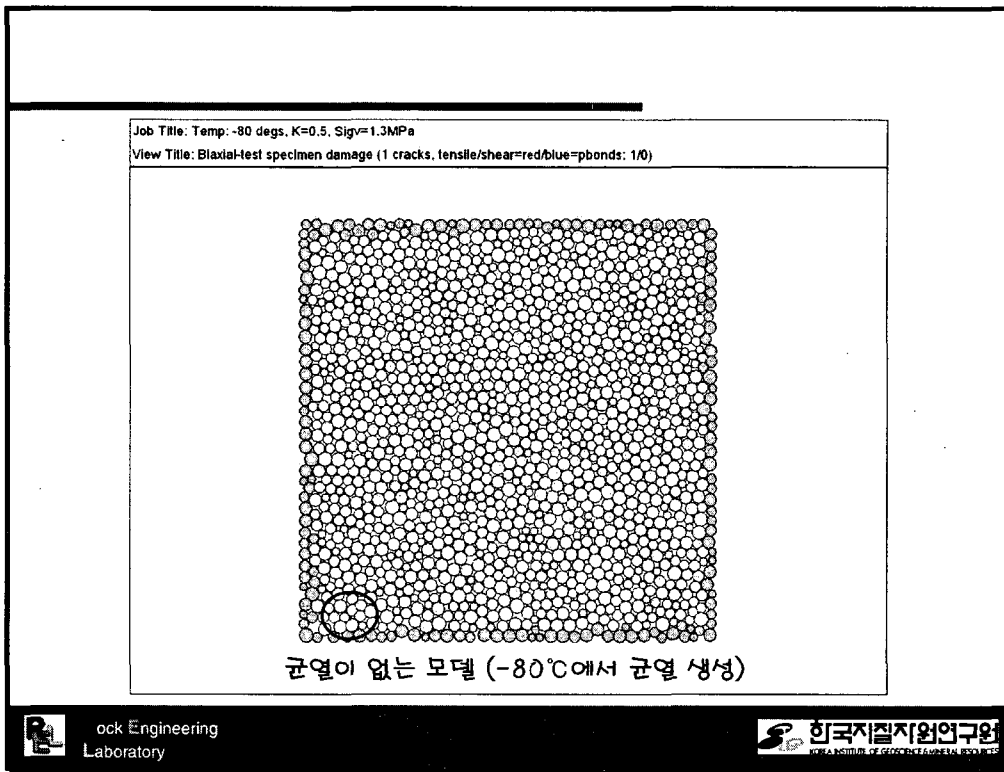
- ❖ 기존 균열의 존재여부 및 길이가 온도저하에 따른 기존 균열의 확장 여부에 미치는 영향 파악
- ❖ 3가지 경우
 - 기존 균열이 없는 경우
 - 기존 균열이 0.5m인 경우(모델폭의 $\frac{1}{4}$)
 - 기존 균열이 1.0m인 경우(모델폭의 $\frac{1}{2}$)

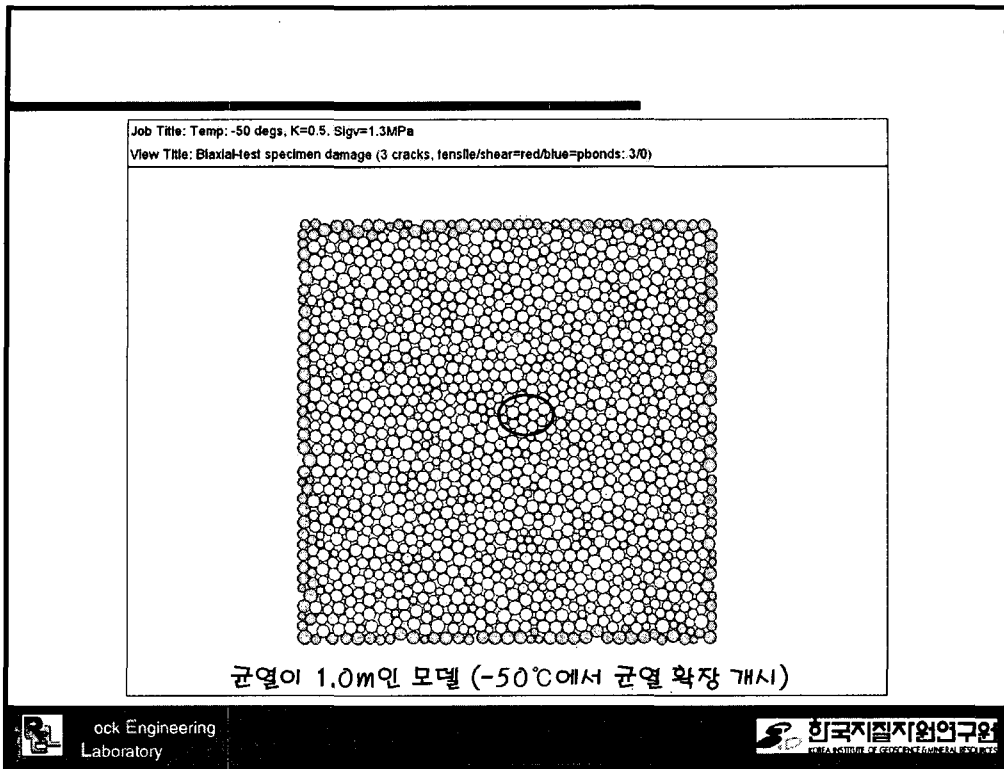


Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering Research



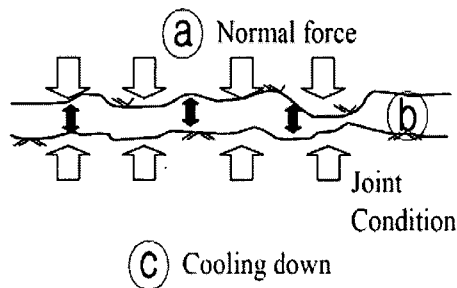


해석 결과 — 기존균열

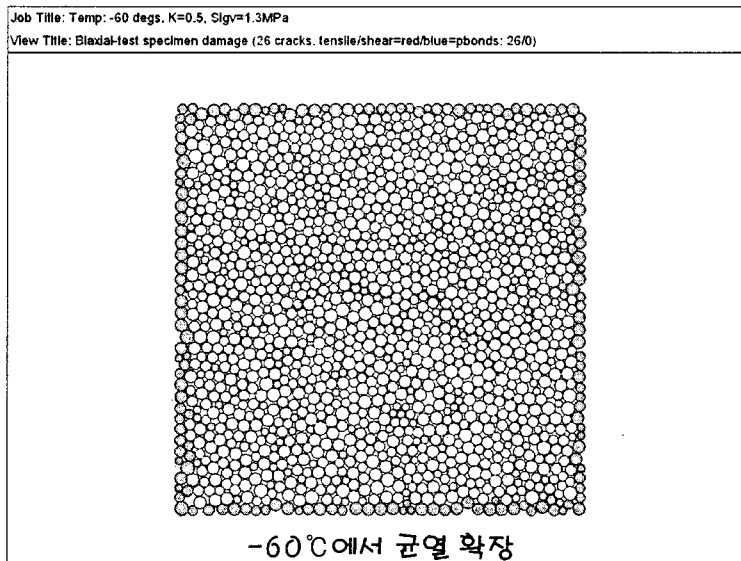
- ❖ 균열이 존재함에 따라, 그리고 균열 길이가 길어짐에 따라 더 높은 온도에서 균열이 생성되거나 확장됨.
- ❖ 이는 균열내 물성이 주변 암반에 비하여 매우 낮은 상태이므로 암반의 열 수축에 의해 발생된 변위로 인하여 쉽게 기존 균열이 벌어지고, 이로 인해 기존 균열 첨단부에 응력이 집중되어 균열이 점차 확장되기 때문인 것으로 판단됨.
- ❖ 따라서 LNG 저장공동의 위치는 가능하면 절리가 적은 신선한 암반에 위치하도록 하여 온도저하에 따른 저장공동의 안정성에 유리하도록 하는 것이 바람직함.

절리내 동결팽창압의 영향 분석

- ❖ 기존 균열의 존재여부 및 길이가 온도저하에 따른 기존 균열의 확장 여부에 미치는 영향 파악
- ❖ 절리내 동결팽창압이 0, 1, 2, 4MPa인 경우에 대하여 해석을 수행



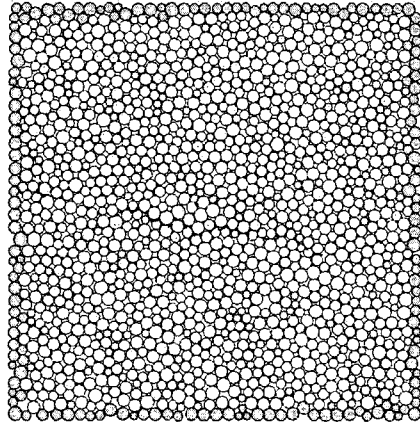
❖ 동결팽창압 = 0 MPa



❖ 동결팽창압 = 1 MPa

Job Title: Temp: -50 degs, K=0.5, Sigv=1.3MPa

View Title: Biaxial-test specimen damage (33 cracks, tensile/shear=red/blue=pbonds: 33/0)

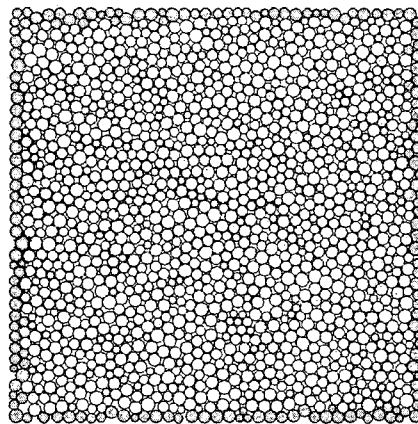


-50°C에서 균열 확장

❖ 동결팽창압 = 2 MPa

Job Title: Temp: -50 degs, K=0.5, Sigv=1.3MPa

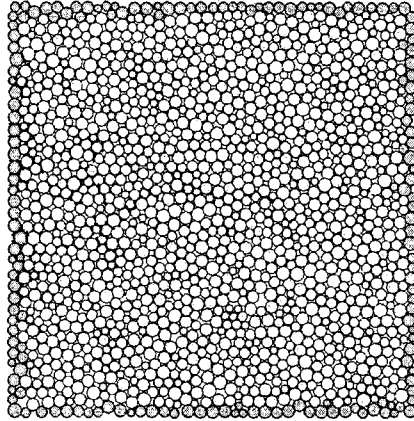
View Title: Biaxial-test specimen damage (55 cracks, tensile/shear=red/blue=pbonds: 55/0)



-50°C에서 균열 확장

❖ 동결팽창압 = 4 MPa

Job Title: Temp: -50 degs, K=0.5, Slgr=1.3MPa
View Title: Biaxial-test specimen damage (87 cracks, tensile/shear=red/blue=bonds: 82/5)



-50℃에서 균열 확장

해석결과 _ 절리내 동결팽창압 영향분석

- ❖ 동결팽창압이 커짐에 따라 균열 발생온도는 높아지고, 균열영상 또한 변화함. 즉, 동결팽창압이 커질수록 기존 균열의 끝에서 수직균열 또한 발생하기 시작함.
- ❖ 동결팽창압이 작용하는 경우 균열 발생온도가 -50℃ 이상으로 올라감을 감안할 때, LNG 저장공동에 인접한 암반내 절리내에 지하수가 존재한다면 어느 정도 안정성에 나쁜 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단됨.
- ❖ 즉, 동결팽창압은 LNG 저장공동의 안정성에 악영향을 미치는 균열의 생성 및 확장에 기여하는 측면이 있으므로, 가능한 저장공동 주위암반내 절리는 동결팽창압이 작용하지 않도록 공사중 배수가 완벽하게 이루어져야 함.
- ❖ 또한 동결팽창압은 절리에 작용하는 응력수준에 따라서 달라질 수 있으며, 이러한 특성을 감안할 때 일정한 범위의 수직응력하(LNG 저장공동의 일반적인 심도는 -50 ~ -100m내외임을 감안)에서 절리내 동결팽창압이 어느 정도의 크기로 작용하는지를 실험실 또는 현장에서 측정할 필요가 있음.

열팽창계수의 영향분석

❖ 암반내 열응력에 영향을 미치는 주요 변수중의 하나인 열팽창계수가 균열 생성 및 확장에 미치는 영향을 살펴보기 위하여

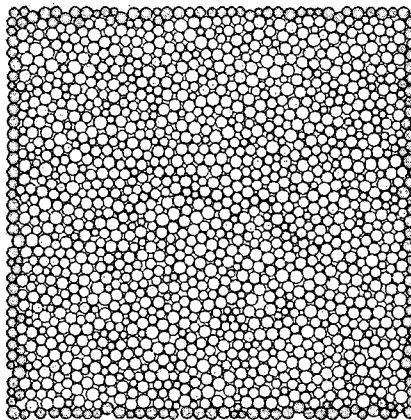
$$\text{열팽창계수} = 2.62, 3.711, 5.78 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

<온도에 따른 열팽창계수의 변화>

온도(°C)	열팽창계수($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	온도(°C)	열팽창계수($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
20	7.411	-40	4.963
10	7.003	-50	4.555
0	6.595	-60	4.147
-10	6.187	-70	3.739
-20	5.779	-80	3.331
-30	5.371	-90	2.923

❖ 열팽창계수 = $2.62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Job Title: Temp: -80 degs, K=0.5, Sigv=1.3MPa
View Title: Biaxial-test specimen damage (26 cracks, tensile/shear=red/blue=pbonds: 26/0)

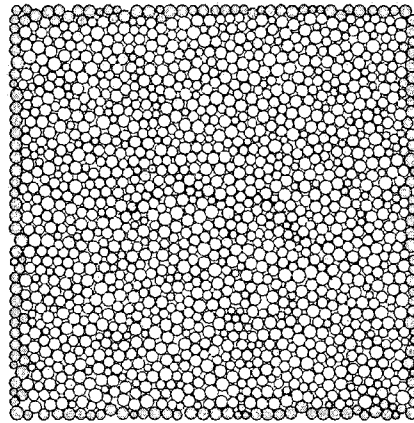


-80°C에서 균열 확장

❖ 열팽창계수 = $3.711 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Job Title: Temp: -60 degs, K=0.5, Sigv=1.3MPa

View Title: Biaxial-test specimen damage (26 cracks, tensile/shear=red/blue=pbonds: 26/0)



-60°C에서 균열 확장



Rock Engineering
Laboratory

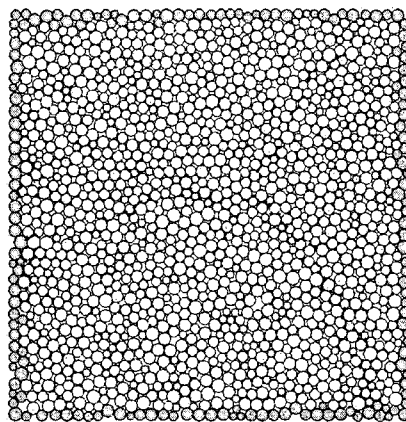


한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

❖ 열팽창계수 = $5.78 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Job Title: Temp: -50 degs, K=0.5, Sigv=1.3MPa

View Title: Biaxial-test specimen damage (76 cracks, tensile/shear=red/blue=pbonds: 76/0)



-50°C에서 균열 확장



Rock Engineering
Laboratory



한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

해석결과 _ 열팽창계수 영향분석

❖ 열팽창계수가 $2.62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 경우엔 -80°C 에서 균열이 나타나으나, 열팽창계수가 2배 이상인 $5.78 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 경우엔 -50°C 에서도 균열이 나타남.

❖ 이는 온도저하로 발생된 열응력이 암반의 인장강도인 7.7MPa 를 넘어설 때 균열이 발생하는 것을 의미함.

온도저하 (ΔT)	열팽창계수($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	2.62	3.711	5.78
-40°C	3.95MPa, 3.89MPa	5.33MPa, 5.24MPa	7.93MPa, 7.80MPa
-50°C	4.78MPa, 4.70MPa	6.49MPa, 6.39MPa	9.74MPa, 9.59MPa
-60°C	5.60MPa, 5.51MPa	7.66MPa, 7.54MPa	11.56MPa, 11.38MPa
-70°C	6.42MPa, 6.32MPa	8.82MPa, 8.69MPa	13.37MPa, 13.17MPa
-80°C	7.25MPa, 7.13MPa	9.99MPa, 9.83MPa	15.19MPa, 14.95MPa
-90°C	8.07MPa, 7.94MPa	11.15MPa, 10.98MPa	17.00MPa, 16.74MPa
-100°C	8.89MPa, 8.75MPa	12.32MPa, 12.13MPa	18.82MPa, 18.53MPa



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering & Environment

❖ 이로부터, 열팽창계수가 클수록 균열이 발생하기 시작하는 온도는 점차 높아짐을 알 수 있음.

❖ 따라서, 온도범위에 따라 달라지는 암반의 열팽창계수 값을 정확히 구해야만 암반의 균열 생성 및 확장이 발생할 수 있는 온도 저하량을 추정할 수 있음.

❖ 이는 실제 LNG 저장공동의 설계 및 운영에 있어서 매우 중요한 자료로써 사용될 수 있음.



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
Korea Institute of Geotechnical Engineering & Environment

향후 제언



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
KOREA INSTITUTE OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

열물성시험

❖ 냉각속도에 따른 인장강도의 변화

- 시험시료의 개수를 10개 이상
- 동결-융해과정을 5-10회 반복

❖ 포화절리암석의 동결팽창력 측정

- 절리의 팽창을 직접 측정하기는 곤란
- 물이 얼음으로 상변화 할 때 압력을 측정

❖ 완전포화 상태 시료의 열팽창계수 측정

- 온도가 내려가면 암반은 수축하지만 간극수는 팽창함
- 전체 포화암반에 대한 팽창계수 추정



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지원연구원
KOREA INSTITUTE OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

파괴역학 해석

❖ 암반의 냉열 균열 생성/확장 기준 설정

- 영향인자 파악 (현지응력, 동결 팽창압, 암반의 인장강도, 암반의 열물성 등)
- 균열 생성 및 확장의 메커니즘의 차이점은?

❖ 온도전파에 따른 파괴해석



Rock Engineering
Laboratory



한국지질지반연구원
Korea Research Institute of Geotechnical Engineering

저온 지하저장을 위한 암반의 냉열거동특성 Characterization of rock masses under cryogenic conditions

정소걸¹⁾, So-Keul Chung

¹⁾ 한국암반공학회장, 한국지질자원연구원, President, Korean Society for Rock Mechanics

요약문

극저온의 저장물을 저장하게 되면 주위 암반의 온도가 점차 낮아지게 되고, 이로 인한 암반의 냉열수축으로 열응력이 발생하게 된다. 발생한 열응력은 암반내에 새로운 균열을 생성하거나 기존 균열을 확장시킴으로써 저장공동 및 주위 암반의 안정성을 저하시킬 것이다. 이 때 저장공동 주위 암반내 냉열 균열의 생성과 암반 절리의 냉열 수축에 따른 개구 또는 확장으로 인해 저장시설 및 주위 암반의 역학적 안정성에 영향을 미치게 된다.

저온 저장시설 주위에 있는 암반내에 냉열로 인한 균열이 발생하거나 암반 절리가 냉열 수축에 따라 개구 또는 확장되어 저장 시스템 외부의 콘크리트 세그먼트 내하력 이상이 되면 저장 시스템의 파괴를 유발할 수 있으며, 저장공동 냉각에 따른 지하수 포화 암반의 동결 팽창압이 암반 균열의 발생과 진전에 큰 영향을 미칠 수 있다.

저온 상태의 경우 고온 환경과는 반대로 암반 내에 인장응력이 형성되는 것이 일반적이다. 압축강도에 비해 현저히 작은 인장강도를 가지는 암석 재료의 경우, 저온 열하중(thermal load)에 의한 영향이 매우 중요하며 이때의 인장 변형거동 및 파괴특성에 대한 정확한 이해가 요구된다. 특히 균열의 생성과 확장에 관련된 파괴역학(fracture mechanics)적 연구를 통하여 저온 열하중에 대한 암석과 암반의 안정성을 평가하는 것이 필요하다.

따라서 저장 암반의 냉열 균열 생성/확장에 영향을 주는 변수를 산정하고 냉열 균열의 생성/확장 메커니즘을 규명함으로써 저온 저장공동의 암반 균열 생성/확장 억제기준을 설정해야 한다.

또한 저장암반내 냉열 균열의 생성 억제와 기존 절리의 개구/확장 억제를 위한 공학적 안전 설계기준의 개발이 중요하다. 본 연구에서는 실규모 저온 저장공동에 대한 암반의 열-수리-역학적 거동의 해석기법 개발을 위하여 다음과 같이 실험실 시험, 전산해석 및 Pilot plant 운영중의 현장 계측 등이 실시되었다.

첫째, 암석의 냉열 균열 생성에 미치는 영향 변수의 실험적 산정을 위하여 Pilot plant 부지 암석의 시추 코어를 대상으로 냉각속도에 따른 인장강도 변화 및 냉각에 따른 절리내 간극수의 결빙으로 인한 팽창 등을 측정하였다. 냉각속도에 따른 인장강도시험 결과, 완전건조 시료

나 완전포화상태에서 냉각시킨 두 시료 모두 냉각속도에 따른 뚜렷한 인장강도의 변화는 관측할 수 없었다. 이는 시험 시료의 불균질성 및 동결-융해 과정이 1회에 한정되었기 때문에 냉각속도에 따른 인장강도의 변화가 명확히 나타나지 않은 것으로 추정된다. 또한 절리의 유무에 따른 두 종류의 시편을 준비하여 수직 하중이 없는 조건하에서 절리내 간극수의 동결에 따른 변위를 측정하고, 이 변위 차이로부터 동결 팽창압을 측정하고자 하였다.

둘째, 암석의 냉열 균열 생성/확장에 미치는 영향변수의 실험적 및 수치해석적 연구를 수행하였다. 실험적 연구에서는 Mode I에 대한 파괴인성 계수를 측정하여 완전건조시료 및 포화시료에 대해 파괴인성이 증가 되는 것을 확인한 바 있으며, 수치해석적 연구에서는 개별요소법 코드인 PFC^{2D}를 이용한 균열 발생 및 전파에 관련된 파괴역학적 해석을 실시하여 저온 저장공동 주위 암반의 열-응력 조건하에서 균열의 발생 및 기존 균열의 확장여부를 판단할 수 있는 이론적 기준을 제시하고자 하였다.

셋째, 저온 저장공동 주위 암반의 균열 발생 및 확장에 대한 억제기준을 개발하기 위하여 Pilot 운영중에 실시된 계측결과를 이용한 저장공동 주변의 열 및 열역학적 거동을 평가하고자 하였다. 이를 위해 불연속체 해석코드인 UDEC에 의한 수치모델링을 수행하였다. 한편 암반의 공극률이 열-수리 해석에서 매우 중요한 변수임을 고려할 때 절리암반의 공극률을 산정하는 방안이 필요하여 이에 대한 분석을 수행하였다.

이러한 연구를 통하여 지하 극저온 물질 저장기술의 국내 최초의 실증적 개발 및 국내 저온 지하저장시설의 확충 추진을 가속화함으로써 향후 저온 관련 물질의 지하 저장/처분 분야에의 기술 응용 및 선도화에 기여할 수 있을 것으로 본다.