

대전 복공식 LNG 지하동굴 Pilot 저장 공동 주변 열역학적 수치해석 사례

이대혁¹⁾, 김호영¹⁾, 한공창²⁾, 신중호²⁾, 박찬²⁾

¹⁾SK건설, ²⁾한국지질자원연구원

1. 서론

천연가스는 도시가스용의 기초생활연료로서 뿐만 아니라 전력생산 및 산업용으로서 절대적인 에너지원으로 자리잡고 있으며, 특히 지구환경문제와 관련하여 청정에너지로서 더욱 부각되고 있다. 1990년대 이후의 LNG 수요 통계에 의하면 그 추세는 기하급수적으로 증가하고 있으며, 이러한 수요에 대응하기 위하여 저장시설의 건설 또한 지속적으로 이루어지고 있다. 지금까지 국내에 시공된 LNG 저장시설은 모두 지상탱크식(Above-ground) 및 개착지하탱크식(In-ground)인데, 단위 저장규모의 제한이나 지상부지 보상 문제뿐만 아니라 최근에 들어 환경 및 안전 측면에서 역효과를 유발하는 것으로 인식되어지고 있다. 국내에서도 1999년도에 처음으로 개착지하식 저장시설의 건설이 되고 있지만, 선진 외국에서는 오래 전부터 기술 개발을 통하여 저장공간을 점차 지상에서, 개착지하식, 그리고 지하 동굴식으로 옮겨가고 있는 추세이다.

한편, 선진 외국에서 1970년대 이후로 무복공(Unlined) 암반내에 LNG를 저장하고자 하는 시도가 있어왔지만, 대부분 성공적이지 못했다. 주변 암반이 -162°C 의 극저온에 노출되어 열균열(Thermal crack)이 발생하였으며, 그 결과 저장 가스의 누출 및 열유속(Heat flux)의 증가를 불러일으킴으로서, 과도한 기화(Boil-off)에 따라 결국 저장을 포기하였다.

한편, Geostock, SN Technigaz 및 SK건설 3사는 복공식(Lined) LNG 지하저장 시설의 상용화를 위하여 수년 동안 개념 개발을 수행하였으며, 그 결과 2002년 대전에 Pilot plant를 건설하기로 합의하였다. 이후 2002년부터 약 1년간 기본 및 실시 설계가 수행되었으며, 2003년 현재 Pilot 저장공동 시공초기 단계에 있다.

본 논문은 SK건설과 Geostock사가 수행한 다양한 설계 검토 사항 중 저장공동 주변 암반의 열역학적 거동 해석 결과를 요약한 것이다. Claesson(2001)의 이론해 및 UDEC을 이용한 해석 결과를 비교하였으며, 주변 암반내 열응력 분포 변화 및 변위 거동에 주안점을 두고 토의되었다.

2. 부지 암반 물성

2.1 열 및 열역학적 물성

부지 암반(흑운모 화강암)의 열물성은 Table 1과 같다. 열전도도는 포화시편에 대해 측정된 값으로서 실험조건의 제한으로 $+25^{\circ}\text{C}$ 에서 측정되었다. $+20\sim-40^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 건조

시편에 대한 열전도도는 이대혁(2002)에 국외 측정 화강암 자료와 함께 비교되어 있다. 포화 시편의 열전도도는 같은 온도의 건조시편 열전도도 2.52 W/m°C에 비해 6% 감소하였다. 비열은 +20°C ~ -40°C 온도 범위에서, 온도감소에 따라 선형적인 감소를 보였으며 15% 가량 감소하였다.

암석 코어 시편을 이용한 열팽창계수 측정법(한국지질자원연구원,2001)에 따라 측정한 결과, +20°C에서 $7.41 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 에 비해 -40°C에서 $4.96 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 34%이상 크게 감소하였다.

Table 1. Thermal and thermo-mechanical properties of rock at Daejeon LNG Pilot cavern.

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m°C)	Specific heat (J/Kg °C)	Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
+25	2.38	728	7.41
0		700	6.96
-20		666	5.78
-40		622	4.96

2.2 역학적 물성

부지 암반에서 채취한 건조시편에 대한 역학적 물성은 신중호(1999)에 소개되어 있다. 금번에는 포화시편에 대해 +20~-60°C의 온도범위에서 암석의 인장강도, 압축강도, 탄성계수, 포아송비가 측정되었다. 포화시편의 압축강도는 건조시편에 비해 10~30%가량 저하하였으며, 온도가 저하할 수록 강도가 급격히 증가하여 +25°C에 비해 -60°C에서는 50%정도 증가하였다. 이는 건조시편의 증가율 35%에 비해 훨씬 크다. 그러나 암석의 탄성계수는 포화시편의 경우 온도저하에 따라 2% 이내의 편차로 비교적 일정하였다. 냉열암반내 유기 열응력의 발생에 따라 열균열의 발생 및 인장파괴에 가장 큰 영향을 받는 저온하 포화 암석의 인장강도 결과를 Table 2에 표시하였다. 또한 Fig.1에 국외의 포화 화강암석에 대한 인장강도 측정결과와 비교하였다. Table 2에서 보는 바와 같이, +20~-20°C의 범위에서는 포화시편의 인장강도가 건조시편에 비해 작으나 그 이하의 온도에서는 건조시편의 강도를 초과하였다. 이는 포화시편내 물의 동결과 깊은 관련을 갖으며, -20°C이하에서는 오히려 얼음이 강도 증가에 영향을 미친 것으로 추정된다. 또한 Fig.1과 같이 국외 시험 자료와 비교하여 부지 암석의 온도의존성이 매우 높은 것으로 평가되었다. 시험 시편의 공극율이 가장 작음에도 불구하고 이러한 높은 온도 의존성은 국외 자료(Glamheden,2001)와 비교하여 가장 작은 강도 특성 때문인 것으로 추정된다.

Table 2. Tensile strength of rock at Daejeon LNG Pilot cavern.

unit : MPa

Temperature (°C)	water saturated condition	Temperature (°C)	dry condition
+20	4.6±1.2	+20	7.7±0.48
0	6.0±0.8	0	7.4±0.58
-30	9.8±1.7	-20	8.0±0.91
-60	10.6±0.9	-40	8.5±0.19
		-60	9.4±1.19

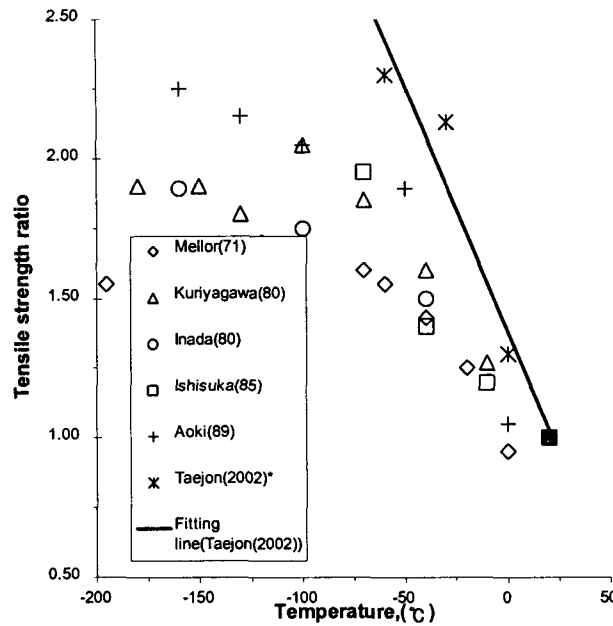


Fig.1 Tensile strength comparison with varying temperatures under saturated condition.
 :Vertical axis represents ratios compared to tensile strength at room temperature.

3. Claesson 해석해를 이용한 암반 거동 해석

Claesson(2001)에 의해 제안된 식은 공동 기하를 단순화시켜 구로 표현하고, 일정 표면 온도 경계조건에 대한 해를 사용하였다. 또한 열역학적 해를 고려하여 선형 열탄성학적인 근사해석을 위한 해로서 구형 저장공동의 경우에 대한 완전 explicit한 해석해로서 표현되었다. 저장공동의 온도를 단계적으로 감소시키고, 냉각을 멈춘 상태에서는 공동을 가로지르는 열유속은 0으로 고려한다.

암반에서의 초기온도는 $r_0 < r < \infty$ 에서 0(비교란 온도 T_0 에서 교란된 온도와의 차이가 초기조건에서는 0)이고, 내부 경계온도의 n개의 단계적 변화(Step change)에 대한 반경방향의 온도분포 해는 (1)식과 같다(이대혁, 2002). 첫번째 단계는 시간 $t = t_0 = 0$ 에서 $T_1 - T_0$ 이고, 암반의 초기 온도는 모든 단계에서 0이다(비교란 온도 T_0 에서 교란된 온도와의 차이가 초기조건에서는 0). 마지막 단계($t_{N-1} < t < t_N$) 동안 온도는 중첩에 의해 구한다.

$$T_{Ns}(r, t) = \sum_{n=1}^N (T_n - T_{n-1}) \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - r_0}{\sqrt{4a(t - t_{n-1})}}\right), \quad t_{N-1} < t < t_N \quad (1)$$

여기서 T_n 은 다음 시간단계에서의 공동벽면 온도이고, r_0 는 구 벽면 등가 반경이며, a 는 열확산도(heat diffusivity)이다. 아래첨자 s는 해가 경계에서의 하나의 온도 단계에 해당

된다는 의미이다.

Timoshenko & Goodier(1970)에 따라 구 대칭에 대한 열탄성해 즉 내공변위 및 반경방향 응력은 적절한 경계조건을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다(Claesson,2001).

$$u(r, t) = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \cdot r \cdot \tilde{T}(r, t) \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \cdot [T(r, t) - 2 \cdot \tilde{T}(r, t)], \quad \epsilon_t = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \cdot \tilde{T}(r, t) \quad (3)$$

$$\sigma_r = -\frac{E\alpha}{1-\nu} \cdot 2 \cdot \tilde{T}(r, t), \quad \sigma_t = \frac{E\alpha}{1-\nu} [\tilde{T}(r, t) - T(r, t)] \quad (4)$$

여기서 우변의 적분 함수 $\tilde{T}(r, t)$ 는 (5)식과 같고, E, ν, α 는 각각 암반의 탄성계수, 포아송비, 열팽창계수이다.

$$\tilde{T}(r, t) = \frac{1}{r^3} \int_{r_0}^r (r')^2 T(r', t) dr' \quad (5)$$

4. 해석해 및 수치모델에 의한 암반 거동 예측 결과

4.1 Claesson의 열탄성 해석해를 적용한 경우

먼저 대전 LNG Pilot Cavern 주변암반의 거리에 따른 온도분포를 Claesson(2001)의 해석해를 이용하여 구하였다. 현지 암반의 변형계수는 주변 시추코어의 RMR평가로부터 결정된 $E=20.3\text{GPa}$ 를 사용하였으며, 나머지 역학적 물성 및 열물성은 실험실 시험값을 사용하였다. 해석 Case는 열물성의 조합을 통한 열확산도의 크기에 따라 3 경우로 분리하였다.

Basic set, $k=2.63 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, $C_p=710 \text{ J/Kg/}^\circ\text{C}$
 Low diffusivity, $k=2.08 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, $C_p=885 \text{ J/Kg/}^\circ\text{C}$
 High diffusivity, $k=2.71 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, $C_p=634 \text{ J/Kg/}^\circ\text{C}$

또한, 결과 비교의 편의를 위해 다음과 같은 무차원 항을 도입하였다.

$$\epsilon_1 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot \Delta T_1, \quad u_1 = \epsilon_1 \cdot r_0, \quad \sigma_1 = \frac{E}{(1-\nu)} \cdot \alpha \cdot \Delta T_1 \quad (6)$$

여기서 ΔT_1 은 내부 경계에 가해진 총 온도 저하량이다. 위에서 구한 무차원량으로 해석된 역학적 거동량을 나누어 비교 평가하였다.

모든 해석은 계산식의 복잡함을 피하기 위해 MathCad 프로그램을 활용하였다.

냉각 시간에 따라 내부 경계에 가해지는 온도는 FLAC 및 UDEC 모델에서 계산된 온도치를 사용하였으며 Table 3과 같다. 내부 경계에 가해지는 온도 입력치의 정확도는 수치모

델의 결과치와 설계사들의 기존 경험을 바탕으로 타당성이 검증되었다.

Table 3. Temperatures prescribed in this study at Daejeon LNG Pilot cavern.

Temperature step	ts0	ts1	ts2	ts3	ts4	ts5	ts6
Time(day)	-999	7	28	56	112	168	365
Temperatures(°C)	12	0.45	-6.1	-11.2	-16.4	-19.9	-22.9

Fig. 2는 Basic 열물성에 대해, 구 벽면으로부터 거리에 따른 변위 profile를 나타낸 것이다. 수직축은 무차원 항으로서 (6)식에서 구한 $u_1(1.522\text{mm})$ 으로 나눈 값이다. 1년 냉각후 구 벽면으로부터 4m 떨어진 거리에서 대략 0.44mm의 최대 반경방향 변위를 보였으며, 다른 열물성 해석 Case에서도 유사한 값을 보였다. 시간 경과에 따라 최대변위가 발생하는 거리가 구 벽면으로부터 점점 멀어지는 것을 알 수 있다.

구 벽면으로부터 거리에 따른 반경방향의 응력을 구한 결과, 1년 냉각후 구 벽면으로부터 2m 떨어진 거리에서 약 (+)2MPa의 최대 인장응력을 나타내었다. 다른 열물성 조합의 경우에도 유사하였다. Fig. 3은 Basic 열물성에 대해, 구 벽면으로부터 거리에 따른 접선응력 profile를 나타낸 것이다. 수직축은 (6)식에서 구한 $\sigma_1(6.524\text{MPa})$ 로 나눈 무차원 값이다. (+)은 인장, (-)은 압축응력이다. 1년 냉각후 구 벽면으로부터 구 벽면에서 (+)6.54MPa의 최대 인장응력을 나타내었다. 다른 열물성 조합의 경우에도 유사하였다.

흥미로운 사실은 최대 인장응력이 암석의 인장강도 시험값인 7.3MPa에 비교하여 크다는 것이다. 그러나, 강도의 절반인 4MPa 이상의 영역은 구 벽면으로부터 1.5m 이내에 불과하다. 어쨌든, 이러한 큰 인장 접선응력은 공동 주변의 암반에 새로운 균열을 발생시키거나 반경방향 절리들을 벌어지게 할 수 있다, 그러나 이 해석해는 탄성모델로서 현지암반의 초기 응력을 고려하고 있지 않다는 사실에 유의해야 한다.

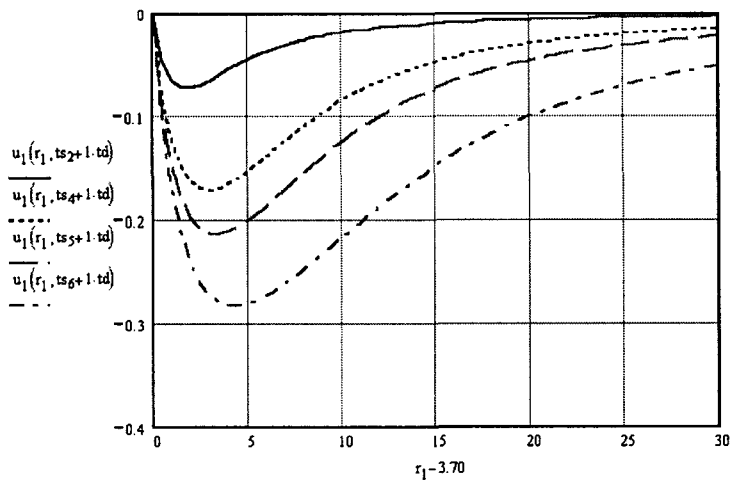


Fig.2 Displacement profile during the cooling-down of the cavern(Basic set).

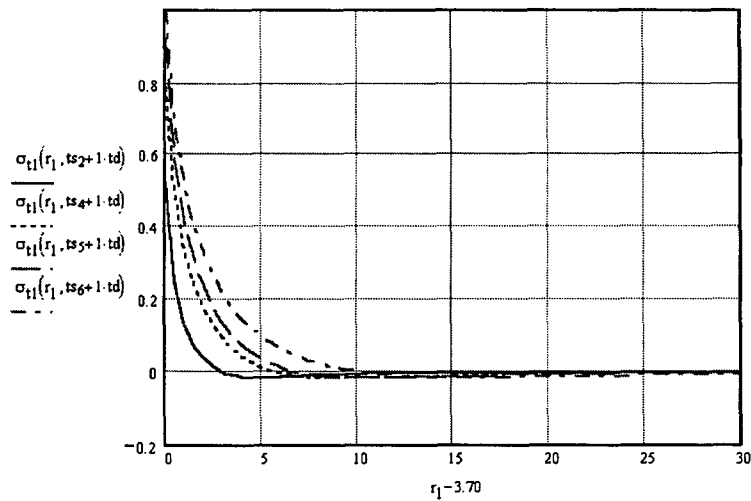


Fig.3 Tangential stress profile during the cooling-down of the cavern(Basic set).

4.2 UDEC model을 이용한 경우

본 해석은 극저온 물질의 저장에 따른 주변 암반의 역학적 거동 및 공동을 관통하는 하나의 큰 절리의 거동을 모사할 목적으로 수행하였다. 대전 LNG Pilot Cavern설계에 따라 20cm의 콘크리트 라이닝 및 10cm 두께의 PU foam 보냉재가 포함되었으며 현지 암반의 초기응력을 고려하였다.

각종 공동 막장 조사, 절리량 통계처리, 수압시험, 수리간섭시험을 통하여 저장 공동 천정을 종방향 대각선으로 가로지르는 경사 42°의 절리가 역학적, 수리학적 거동 측면에서 가장 주요한 절리로 평가되어 UDEC 모델에 반영하였다.

암석의 물성은 2절에서 소개하였으며, 콘크리트 및 PU foam의 열 및 역학적 물성은 일반적인 값을 사용하였다. 절리의 역학적 물성은 지반 조사시 수행한 각종 시험 결과로부터 도출되었다. 또한 암반과 콘크리트 접촉면의 물성은 미끄러짐과 벌어짐이 가능하도록 선택하였다.

Table 4. Thermal and mechanical material properties at Daejon LNG Pilot cavern.

	Thermal			Mechanical						
	α	k	Cp	ρ	E	nu	c	ϕ	T	Dilat.
	(10 ⁻⁶ /°C)	(W/m°C)	(J/kg°C)	(kg/m ³)	(GPa)		(MPa)	(°)	(MPa)	(°)
Rock	6.64	2.63	710	2660	20.3	0.28	0.31	26	7.3	26
Con'c	6.64	2.63	710	2550	23.0	0.25	8.0	30	2.4	30
PU	-	0.02	1674	65	0.023	0.20	10000	70	10000	0

Table 5. Joint properties at Daejon LNG Pilot cavern.

	Kn (GPa/m)	Ks (GPa/m)	Cohesion (MPa)	Friction (°)	Tensile str. (MPa)	Dilatancy (°)
Rock/rock	1.9	5.42	0.05	41.2	0	0
Rock/con's	0.2	0.5	0	10.0	0	0

응력 초기화 및 공동 굴착후 힘의 평형상태에 도달했을때, 초기온도를 12℃로 설정하였다. 그 후 공동 내부 PU foam 내면에 저장 극저온 물질 온도 -196℃를 가하였다.

열역학적 커플링은 다음과 같이 두 가지 경우를 고려하여 적용하였다.

커플링 (a) : 주어진 시간까지 small increment로 역학적 열적 과정을 반복 수행하였다. 즉 1일 냉각 후 역학적 평형 상태에 도달시키는 과정을 반복하였다. 이는 여러 종류의 시간 증가량에 대한 반복 시행착오 해석 결과, 가장 안정한 상태(역학적 균형, 열균열 측면)를 보이는 값이었다.

커플링 (b) : 어느 주어진 시간까지 열적 계산을 수행후 해당하는 역학적 균형상태를 찾아가는 방식으로 계산을 수행하였다. 즉 1주, 2주, 4주, 8주, 12주, 16주, 20주, 24주로 수행하였다.

Mohr-Coulomb 파괴모델을 사용한 커플링 (a) 및 (b)의 해석 결과, 무근 콘크리트 라이닝 층이 열하중에 의해 부분적으로 균열이 발생하였다. 커플링 (a)의 경우 대부분의 균열은 주 절리와 공동이 만나는 천정에 집중되었고 일부 바닥부분에서 발생하였다. 커플링 (b)의 경우 대부분의 균열은 바닥과 측벽이 만나는 코너부에 집중되었다. 추가 구조해석 결과를 반영하여 철근 콘크리트 라이닝이 추가로 설계되었다.

Fig.4 및 Fig.5는 각각 커플링 (a) 및 (b)에 대한 주응력도를 나타낸 것이다. 커플링 (a)의 경우, 암반의 최대 인장 응력은 바닥과 벽체 사이 코너부에서 최대 0.61 MPa의 인장응력이 발생하였으며, 커플링 (b)의 경우 0℃ 등온선 근처인 공동 벽면으로부터 약 4m 떨어진 부위에서 최대 0.48 MPa의 인장응력이 발생하였다. 이 값은 해석해의 결과인 6.54 MPa의 인장 응력과 비교하여 크게 감소한 값이다. 이러한 차이의 원인을 알기 위하여 절리가 없는 경우 및 암반의 물성을 암석의 강도정수만큼 크게 주는 경우 2가지 경우를 추가로 수행하였다. 절리를 제거한 연속체 모델 및 Mohr-Coulomb 파괴모델을 똑같이 사용한 경우, 커플링 (a)의 결과와 유사하게 최대 0.62 MPa의 인장응력이 발생하였다. 그러나 암반의 물성을 크게 준 두 번째 추가 해석 결과, 최대 7.2 MPa의 최대인장응력이 발생하였으며, 최대 내공변위는 천정에서 0.43mm로 발생하였다. 이러한 열응력 및 내공변위는 Claesson의 이론해 결과와 매우 유사하다.

커플링 (a)의 경우, 공동으로부터 멀리 떨어진 주 절리 끝단 주변 암반에서 국부적으로 전단파괴가 발생하였으며, 커플링 (b)의 경우, 0℃ 등온선 주변 전 영역에서 많은 인장 및 전단 파괴가 발생하였다. 따라서 커플링 (b)와 같이, 지나친 열재하 후 역학적 균형상태를 찾아가는 경우, 한번의 커플링에 열재하량이 많아짐으로서 0℃ 등온선 암반에서 인장파괴가 발생하는 현상을 초래하였다.

커플링 (a) 및 (b)의 경우 공동 천정에서의 최대변위는 각각 2.3mm 및 2.9mm 였고, 주 절리의 최대 벌어짐은 각각 1.8mm 및 0.3mm였고, 주 절리의 전단변위는 각각 최대 1.1m 및 0.1mm이하였다. 또한 두 경우 모두 암반과 콘크리트의 벌어짐은 최대 약 2.09mm였다. 특히 주 절리의 수직변위와 전단변위가 커플링 (a) 및 (b)의 경우에 대해 큰 차이를 보이는 이유는 위에서 설명한 바와 같이 커플링 열재하 방식의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

인장 주응력의 범위는 커플링 (a)의 경우 공동 상부 13m, 하부 8m 범위이며, 커플링 (b)의 경우 공동 상부 7m, 하부 8m 범위였다.

주 절리가 벌어지는 범위는 Fig. 6과 같이 +5°C이하의 범위로서 공동 천정 근처에서 가장 크며 공동 벽면에서 멀어질 수록 감소하였다.

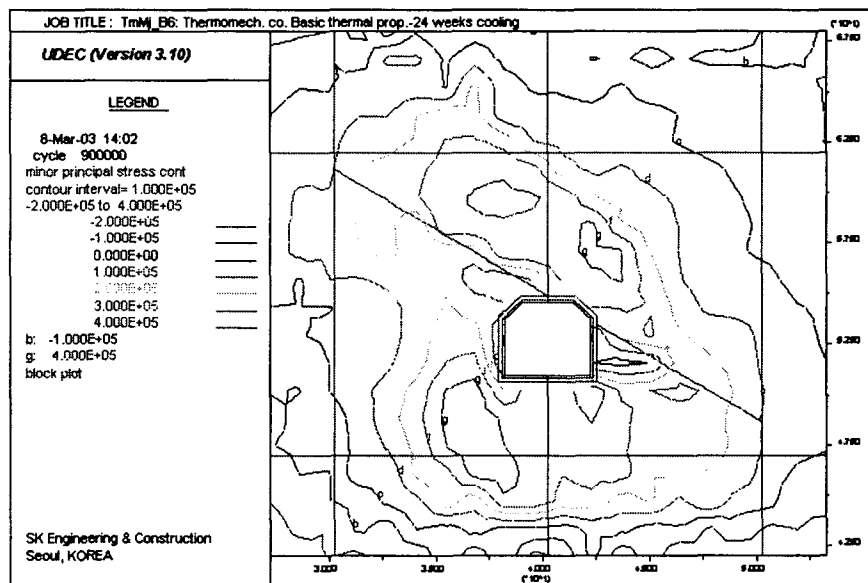


Fig.4 Minor principal stress profile after the cooling-down of 24 weeks- Coupling (a).

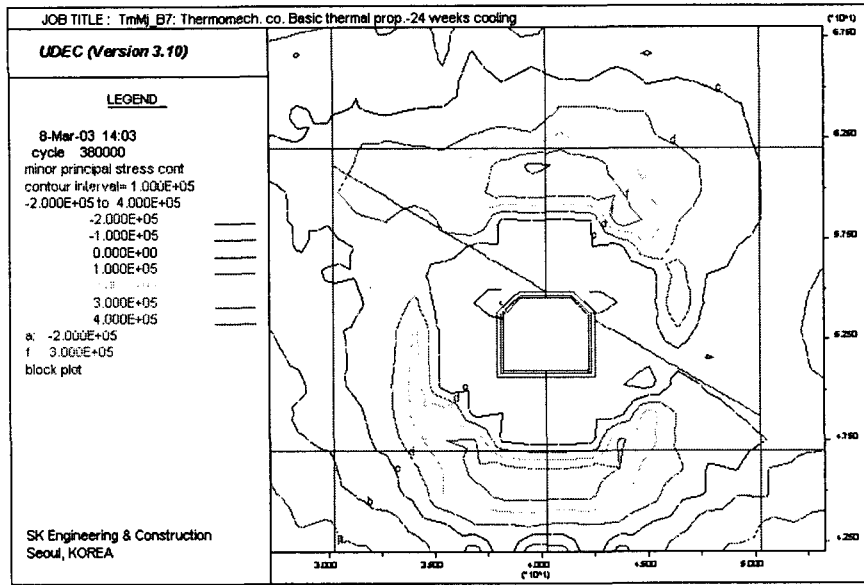


Fig.5 Minor principal stress profile after the cooling-down of 24 weeks- Coupling (b).

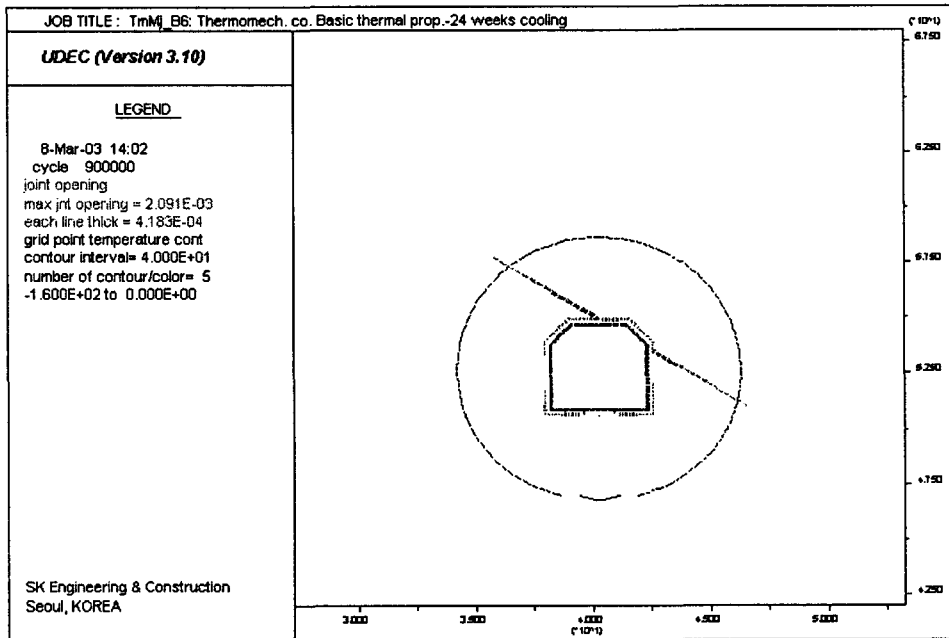


Fig.6 Opening of a joint after the cooling-down of 24 weeks- Coupling (a)
: Circle represents the zero degree contour.

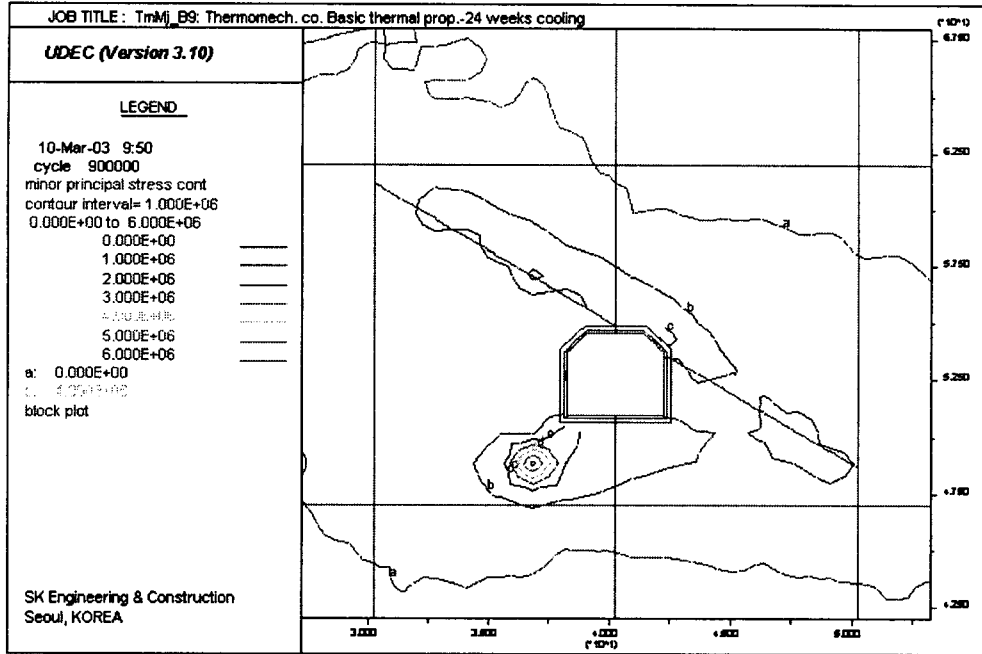


Fig.7 Minor principal stress profile after the cooling-down of 24 weeks for elastic model

4. 결론

Claesson의 이론해, UDEC모형을 이용하여 대전 LNG Pilot 지하공동내에 극저온 저장물질 -196°C 를 저장한 냉각 24주 후 암반의 역학적 거동을 요약하면 다음과 같다.

	구성 모델	최대 변위 (mm)	최대 인장응력 (MPa)	절리 최대 수직변위 (mm)	절리 최대 전단변위 (mm)	인장영역 범위 (m, 평균)	파괴영역
Claesson 이론해	탄성	0.3	6.5	-	-	8	-
UDEC 해석 Coupling(a)	탄소성 (Mohr-Coulomb)	2.3	0.6	1.8	1.1	11	절리주변
UDEC 해석 Coupling(b)	탄소성 (Mohr-Coulomb)	2.9	0.4	0.3	0.1	8	0°C 등온 선 주변
UDEC 해석 Coupling(a)	탄성	2.2	7.3	2.1	0.8	11	-

① 열하중에 의한 주변 암반의 응력상태는, 크지는 않다 하더라도 국부적으로 파괴가 발생하면 주변암반의 인장응력을 극적으로 저하시켰다(Fig.4와 Fig.7비교 참조). 초기응력을 고려하지 못하는 탄성 이론해 및 초기응력을 고려한 탄성 수치해를 비교한 결과, 절리의 유

무에 상관없이 인장강도에 상응할만큼 큰 인장응력을 발생시켰으며, Pilot 저장공동이 지표하 20여m 심도에 설치되는 관계로 초기응력을 고려치 않은 이론해와 고려한 수치해 사이에 인장응력 크기에 있어서 큰 차이를 보이지는 않았다. 실제 Prototype의 경우 지표하 50여m 이하의 심도에 설치되므로 초기응력의 영향이 있으리라 추정되나, 극저온 열재하로 인하여 열응력이 초기응력을 상회할만큼 충분하리라 사료된다.

② 저장공동이 냉각되는 동안 주변 암반의 파괴가 발생하지 않아 큰 인장응력을 초래한다 하더라도, 인장강도의 1/2을 상회하는 인장 범위는 국부적으로 저장공동 주변에서만 발생하였다.

③ 작은 시간동안의 열재하를 통한 열역학적 커플링의 경우가 절리를 고려한 암반 거동 측면에서 설득력이 있었으며, 큰 시간 step의 열재하를 통한 커플링은 비 현실적인 암반 파괴 특성을 보여, 커플링시 안정한 열재하가 중요함을 알 수 있었다. 즉 암반이 파괴에는 아직 크게 미치지 못하는 경우에는 큰 온도재하가 가능하나, 파괴에 가까운 경우에는 열재하 step이 매우 작아야 한다.

④ 절리의 벌어짐이 발생하는 영역은 온도 +5°C 이하의 범위였다.

⑤ 본 이론해 및 수치해석 결과를 통하여 대전 LNG Pilot 저장공동에는 지중변위계 6 set, 경사계 2 set, 절리변위계 4 set, 반경방향 콘크리트 응력계 4set 등이 설치되어 주변 암반의 거동 및 절리 변위를 모니터링할 계획이다.

참고문헌

신중호, 박연준, 김호영, 박찬, 1999, 아치형 냉동저장공동 주위암반의 열전도 특성 및 열물성 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 9.1, 27~35.

이대혁, 김호영, 2002, 냉동저장 공동 주변의 온도 분포 예측을 위한 해석해 및 수치모델 적용에 관한 연구, 2002년 한국암반공학회 추계학술발표회, 60~69.

한국지질자원연구원, 2001, 지하암반내 고온저온 저장기술 연구, KR-01(연차)-08, 65~109

Claesson, J., 2001, Thermoelastic Solution outside a Spherical Cavity, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1~70.

Glamheden, R., 2001, Thermo-mechanical Behavior of Refrigerated Caverns in Hard Rock, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1~70.

SKEC(a), 2002, The Complementary Site Investigation Report - Thermal and mechanical properties of rock around the Taejon LNG Pilot Cavern, 1~39.

SKEC(b), 2002, Thermoelastic Solution of Claesson, TAE/R/N/1010-B, Taejon LNG Pilot Cavern, 1~14.

SKEC(c), 2002, Additional 2D Thermo-mechanical Calculation with UDEC, TAE/R/N/1014-A, Taejon LNG Pilot Cavern, 1~48.

Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., 1970. Theory of Elasticity. 3rd Int. Student. Ed., McGraw-Hill.