

## 대전 LNG Pilot Cavern 주변암반의 온도 분포 및 거동 계측결과

이대혁, 이희석, 김호영 (SK건설주식회사 Geotask팀)  
박의섭, 정소걸 (한국지질자원연구원 지반안전연구부)

### 1. 서론

SK건설, Geostock 및 Technigaz 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 4월부터 12월까지 Pilot 저장 공동 시공이 마무리 되었다. 통상의 LNG(액화온도  $-162^{\circ}\text{C}$ )는 저장시설 건설에 제약조건이 많으므로, 대신 LN<sub>2</sub>(액화온도  $-196^{\circ}\text{C}$ )를 저장물로 선정하였다. 2004년 1월중 공동의 냉각 및 액화질소(LN<sub>2</sub>) 주입을 포함한 시운전이 이루어져 2004년 7월 5일까지 지속적인 냉각이 이루어졌다. 또한, 6월 10일부터 공동 주위의 지하수위를 공동 바닥 이하까지 저하시키기 위해 가동중인 배수시스템을 단계적으로 중단하여, 7월 8일 모든 배수공의 중단이 이루어졌다. 저장공동내 액화질소는 자연적으로 기화가 이루어져 8월 12일경 공동 내부가 완전히 비워졌다. 현재는 주변 암반 온도가 상승하고 있는 해빙 단계로서 완전한 온도 회복이 이루어질때까지 지속적인 모니터링을 실시할 예정이다.

본 논문은 운영단계에 있어 암반공학적 주요 계측 결과를 수록하고 있다. 암반의 열적, 열역학적, 수리적 거동 모니터링을 위한 계측시스템, 공동 주변 지하수의 원활한 배수를 위한 배수시스템, 콘크리트 라이닝 시공 및 라이닝 배면 충전 그라우팅, 액화질소를 저장하고 열적 보냉구조를 구성하는 Containment 시스템, 기밀성 시험, 시운전으로부터 상업화 저장 공동을 대비한 설계 핵심사항을 도출하고 있고, 현재는 운영 계측자료를 기본 및 실시 설계 단계에서의 예측결과와 비교 검토하고 있는 중이다.

### 2. 암반 계측시스템

암반 계측시스템의 설치는 저장공동 콘크리트 및 주변 암반에 계측을 수행함으로써 저장 공동의 냉각 및 해빙시 온도변화에 따른 콘크리트, 암반 및 지하수의 거동을 측정하고자 하는데 그 목적이 있었다.

Table 1과 같이, 저온으로 인한 Containment, 콘크리트, 록볼트, 암반, 절리의 변위를 측정하기 위하여 콘크리트 응력계 6개, 록볼트 축력계 4개, 6축점의 Extensometer 6개, 암반 절리의 개구를 측정하는 균열측정계 5개가 설치되었다. 또한, 암반 지하수의 흐름으로 인한 지하수압의 변화를 측정하기 위하여 Porepressure cell 4개가 설치되었다.

Table 1. Geotechnical instruments installed in the Taejon LNG Pilot Cavern.

	Purpose	Instrument	Quantity	Description
CAVERN	Rock displacement	Multipoint Borehole Extensometer	2 holes×6 points 2 holes×6 points	horizontal(15m) vertical(15m)
	Rock Joint opening	Vibrating Wire Jointmeter	5 EA	Joint
	Rockbolt axial force	Instrumented Rock Bolt	4 EA × 2.5m	Arch
	Concrete stress	Embedded Strain Gage	6 EA	Con'c lining
SURFACE	Rock settlement	Multipoint Borehole Extensometer	1 holes×6 points 1 holes×6 points	vertical(18.5m) vertical(17.5m)
	Rock horizontal displacement	Digitilt Inclinator Probe	2 holes (40m x 2holes)	
	Ground settlement	Survey pole	9 EA	
	Rock temperature	Resistance Temperature Detector	2 holes x 7 points	mounted on the inclinometer casing
	Porepressure	Vibrating Wire Piezometer	4 holes	vertical

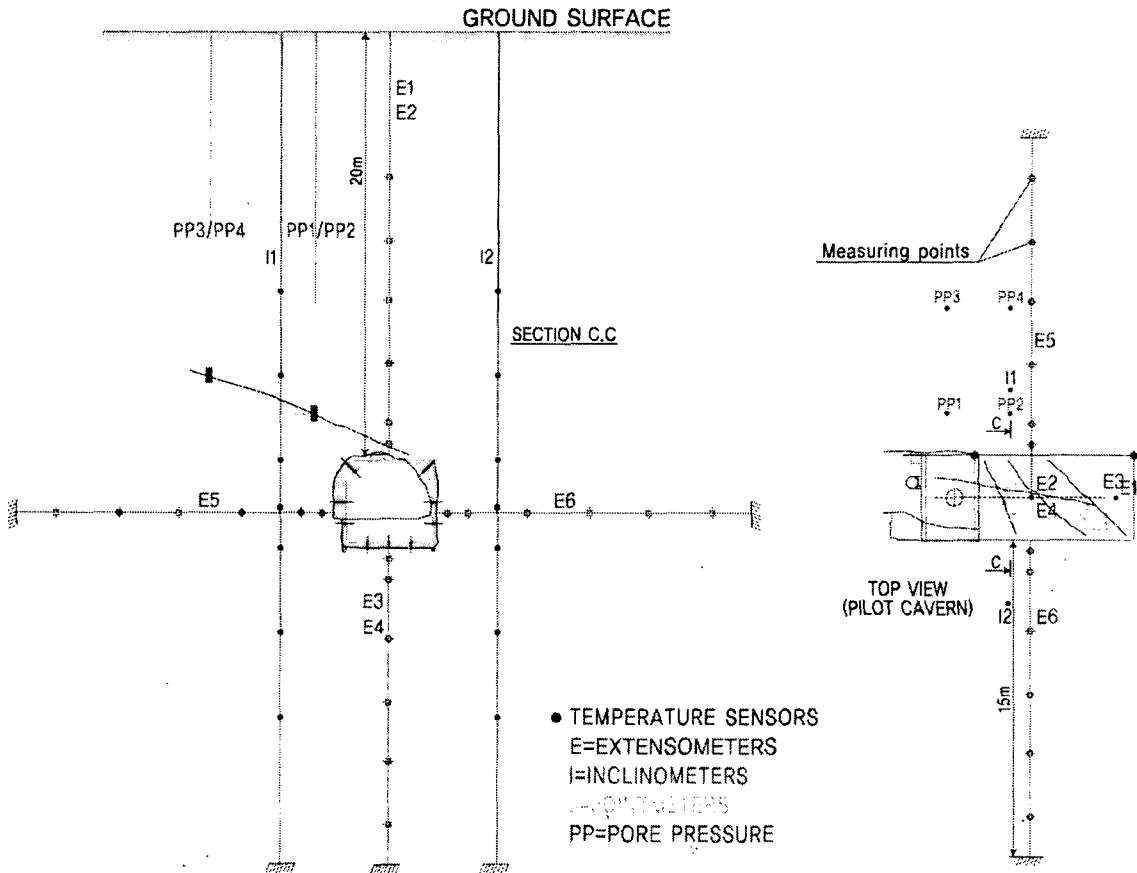


Fig. 1. Geotechnical instrumentation in Taejon LNG Pilot Cavern.

또한, 지표 침하를 측정하기 위한 조사용 Pole이 9개 지점에 설치되었다. 모든 계측기는 Thermocouple을 장착하여 온도 측정을 병행 하였다. Fig. 1은 대표적인 단면에서의 계측기 설치 모식도이다.

### 3. 계측 결과 분석

#### 3.1 기화율(Boil Off Gas rate)

Pilot 저장 공동 주변 암반은 냉각 전 초기 온도가 15 ~ 19℃ 범위로 측정되었다. 저장된 액화질소는 온도가 -196℃로서 주변 암반 온도에 비해 200℃ 이상의 온도차를 보이므로 액화질소가 지속적으로 기화된다. 기화된 가스는 저장 공동의 압력을 상승시키므로 일정 압력을 유지하기 위해 파이프라인을 이용하여 배기해야 한다. 따라서 저장된 액화질소의 기화(Boil-Off Gas, 이하 BOG)량은 저장 공동의 저장효율을 지시하는 중요한 지표가 된다. 기화율은 예측 가능해야 하며 요구된 기화율에 맞추어 모든 제반 Containment 시스템 설계가 이루어진다. 따라서 Pilot 저장공동 또한 운영단계에서 주기적으로 기화율 시험이 이루어졌으며, 이론적 계산 결과, 수치해석 결과와 비교 평가되었다. 그 결과는 Fig.2 와 같다.

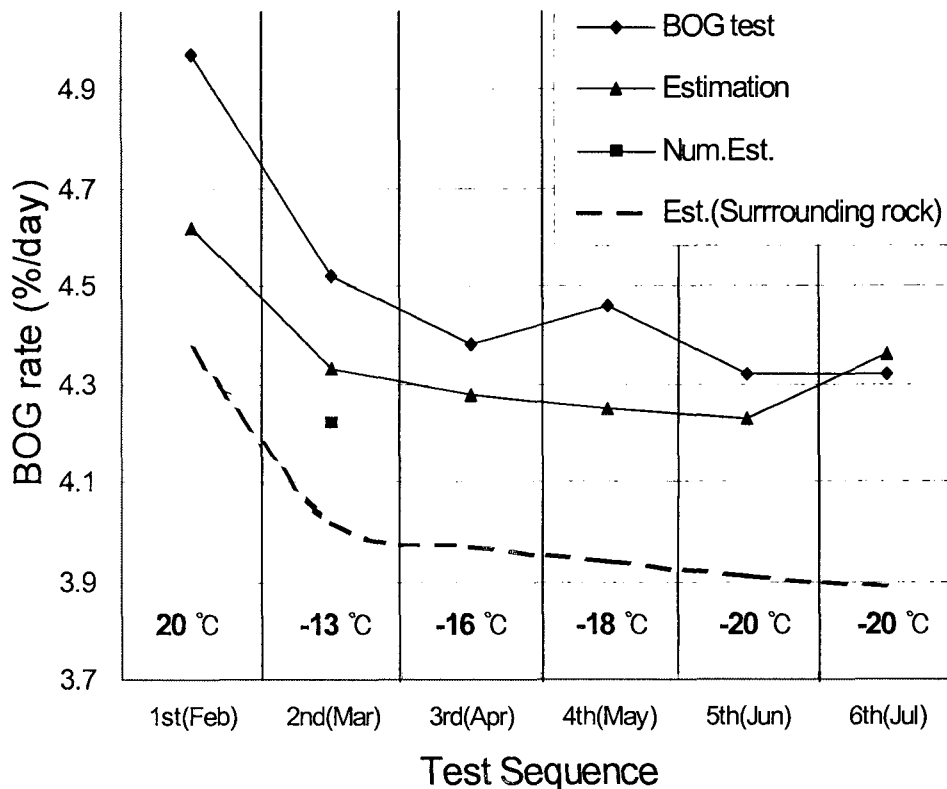


Fig.2. The variation of Boil Off Gas rate during the operation period of the Pilot. "Estimation" means results obtained by theoretical calculation. The dotted line means results by the calculation assuming that rock surrounds fully the cavern. Temperatures in the figure indicate the average measured value in rock surface.

첫 번째 시험은 저장 공동 내부 전체 높이의 98% 수준인 3.264m 액화질소 액위에서 수행하였고, 두 번째 시험부터는 88% 수준인 2.61m 액위에서 수행하였다. Fig. 2.에서 보는 바와 같이, 주변 암반이 냉각됨에 따라 저장물질과의 온도 차이가 감소한 결과 기화율은 줄어들어 안정화 되었다(초기의 86% 수준). 주변 암반 벽면 초기 온도가 약 -10 ℃일 때부터 BOG가 안정화되기 시작하여 -20 ℃에서는 완전히 안정화 되었다. 열유입량 계산을 통한 해석적 열전달 계산 결과는 예러 0.2%/day 크기로서 비교적 실제 시험결과와 일치하였다. 두 번째 시험 단계에서의 수치해석 결과는 위의 두 가지 경우보다 작고, 실측 결과에 비해 6% 작았다. 현재 저장 공동은 표면적의 약 13%가 대기에 노출되어 있어(Fig.3 참조), 이 부위에서의 열유입량이 매우 크다. 만약, 저장 공동이 완전히 암반에 의해 둘러 쌓인다면, 해석적 결과는 점선과 같고, 기화율은 약 10% 이상 감소하는 것으로 계산되었다.

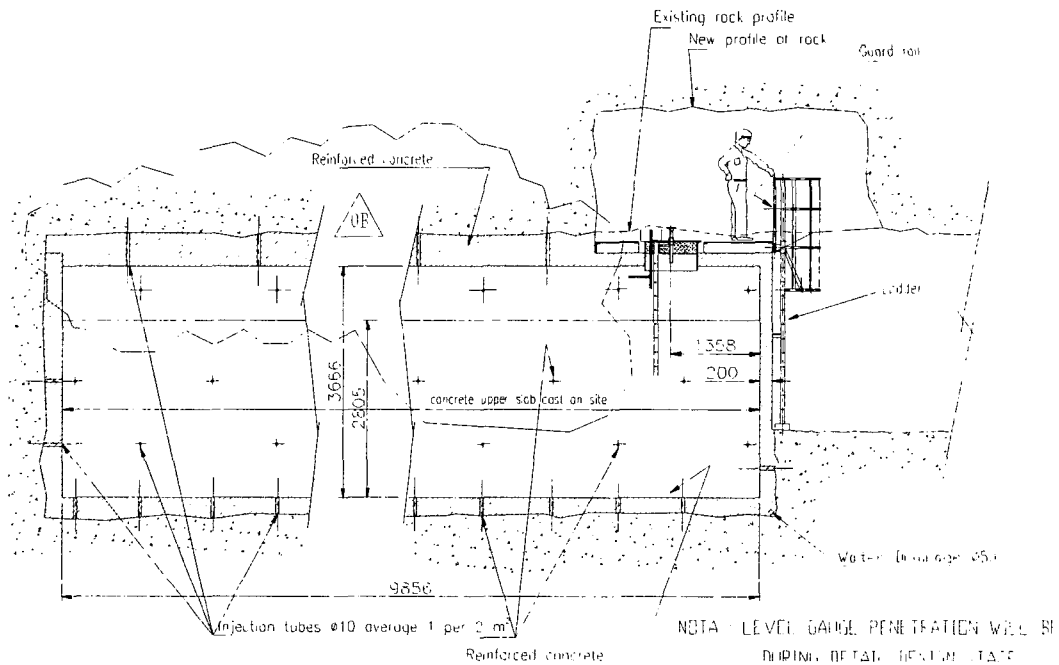


Fig. 3. Longitudinal section of the Taejon Pilot Cavern

### 3.2 저장공동 주변 암반의 온도 분포

Fig.4 는 2004년 7월 10일(운영 시작 후 182일후, 액화질소 충전 5일후) 및 8월 10일(운영 시작 후 212일후, 저장공동 저장물질 완전 기화 후 2일 후) 현재 저장공동 주변 암반의 온도 분포 측정치를 나타낸 것이다. 액화 질소 충전 중단 시점에는 공동 벽면에서 바닥으로 4.4m, 측벽에서 4.0m, 천정부에서 3.2m까지 0℃ 등온선이 전파하였다. 저장 물질 완전 기화후 냉각 물질이 전혀 없어진 시점에서는 공동 벽면에서 바닥으로 4.4m, 측벽에서 4.0m, 천정부에서 1.8m까지 0℃ 등온선이 전파해 있어, 충전 없이 저장물질의 자연 기화 기간 동안 바닥 및 측벽 암반에서 0℃ 등온선은 지속적으로 유지되었다는 것을 알 수 있다.

따라서 이 기간 동안 0℃ 근처 차수빙벽 층이 형성되어 내부로의 지하수 침투가 거의 발생하지 않았다는 사실을 알 수 있다. 천정부는 당초부터 액이 닿지 않는 부분으로서 기화 기체의 열전달이 이루어짐으로서 냉각 Stress가 약한 부분으로서, 완전히 기화되는 기간 동안 4.6 cm/day 의 속도로 0℃ 등온선이 공동쪽으로 후퇴하였다.

부지 지질 조사 당시, 저장공동 좌측 암반 수리전도도가  $10^{-5} \sim 10^{-7}$  m/sec, 우측암반이  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  m/sec 였고, 좌측암반 시추 코어 RQD가 86 이상이었고, 우측암반 시추 코어 RQD가 80 정도였다. 또한 공동 상부 지하수 흐름이 공동 벽면의 절리 발달 특성에 기인하여, NW(공동 좌측)에서 SE(공동 우측)방향으로 대부분의 지하수 흐름이 발생하는 것으로 관측되었다(이대혁 외,2003). 위의 결과로부터, 저장공동 좌측암반내 개구성 절리가 우측암반에 비해 발달해 있어, 전체적으로 암반 공극율이 증가하고, 열전파가 늦어지는 결과를 나타내는 것으로 사료된다. 이는 지상 계측공 시추시에도 현장 기술자에 의해 확인되었다.

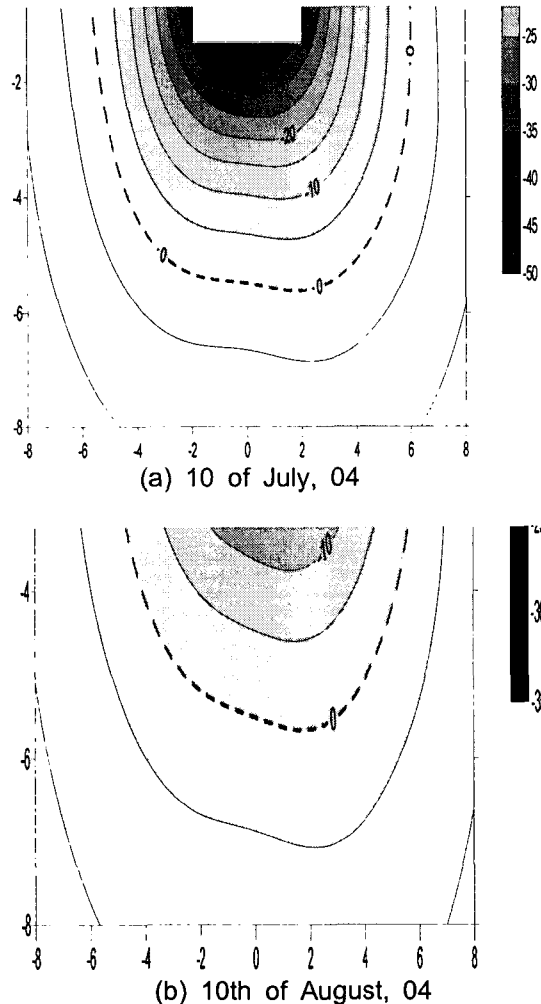


Fig. 4. Temperature profile in rock around the Cavern. Dotted line indicates zero degree contour. Interval of each contour is 5 degree.

Fig. 5는 암반벽면에서의 시간에 따른 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림과 같이 암반에서의 온도 저하는 시간에 따라 점점 정상상태로 안정화되어, 액화질소 충전 중단 직전에는 거의 암반 온도가 일정하였다. 암반 벽면의 온도는 최대  $-27^{\circ}\text{C}$ 까지 저하하였으며, 기화 기체에 의한 대류 열전달이 발생하는 천정부에서는 최대  $-7^{\circ}\text{C}$ 까지 온도 저하가 발생하였다. 그러나 Fig. 5는 암반 벽면에 설치된 균열측정계에서의 온도 측정 자료이고 모든 자료를 종합할 때, 암반 벽면에서 최대  $-35^{\circ}\text{C}$ 까지 온도가 저하된 것으로 추정된다. 액화질소 중단후 암반의 온도는 다시 온도가 증가하는 회복단계로서, 온도 저하 속도보다 회복 속도가 더 빠르다. 물론 온도 저하는 지수함수 형태로 감소하였지만 평균  $0.24^{\circ}\text{C}/\text{day}$  하강하였고, 회복단계에서는 이보다 빠른  $0.30^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 로 상승하였다.

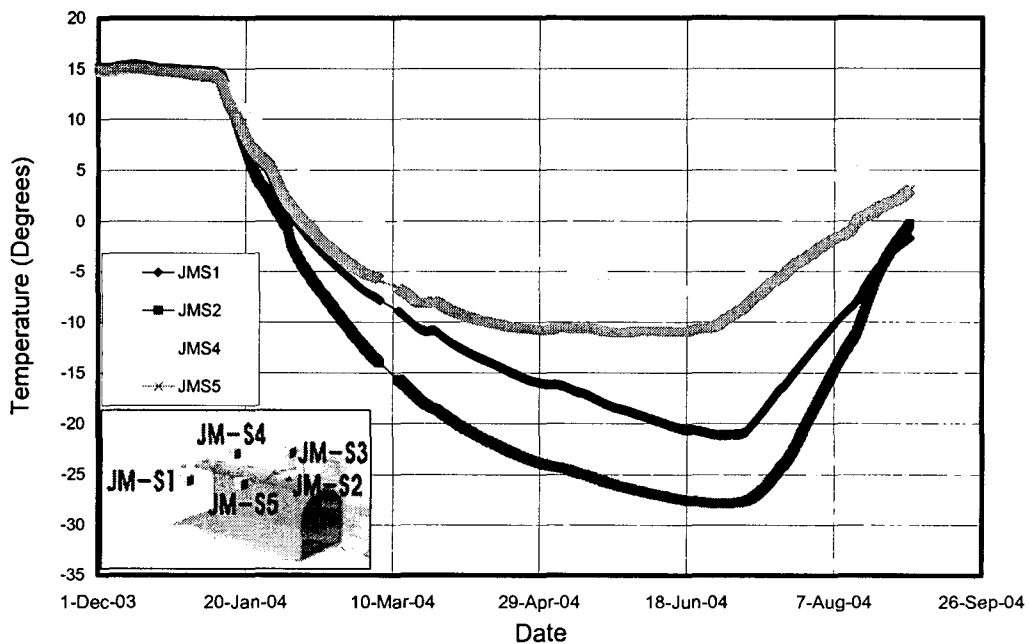


Fig. 5. Temperature history on the rock surface at the cooling and thawing stag.

저장공동 벽면으로부터 여러 심도에서 온도 분포 실제 계측치와 설계 단계에서의 온도 분포 예측치를 비교한 그림은 Fig.6과 같다. 그림과 같이 계측치와 설계치는 냉각단계 및 회복단계에서 모두 잘 일치하고 있다.

실험실 시험 결과 암석 박편의 열전도도(시험법, KSL 3306)는  $-40^{\circ}\text{C} \sim +27^{\circ}\text{C}$  범위에서 측정결과  $2.52 \sim 2.71 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ 였고, 비열은 같은 온도 범위에서  $622 \sim 728 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{C}$ 였다(이대혁외, 2003). 또한 같은 부지에서의 식품지하냉장냉동저장 Pilot 연구 결과 신중호외(1999)는 계측자료로부터 부지의 열전도도를  $2.08 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ 로 추정하였다. 위의 자료를 종합하여 설계 단계에서는 다음과 같이 열전도도와 비열을 조합한 암반 열물성을 구분하여 수치해석에 반영했었다(이대혁외,2003).

기본 열물성(Basic set) :  $k=2.63 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $C_p = 710 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

저 열확산도(Low diffusivity) :  $k=2.08 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $C_p = 885 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

고 열확산도(High diffusivity) :  $k=2.71 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $C_p = 634 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Fig.6 은 기본 열물성 자료를 이용하여 구한 수치해석 예측치와 열물성을 나타낸 것으로서 다른 열물성 균을 이용한 해석보다 기본 열물성 자료를 이용한 예측치가 가장 계측치와 유사하였다. 이로부터, 주변 암반이 배수시스템에 의해 완전 배수되는 이러한 LNG 저장 개념에서는 건조한 암반에서의 열물성 시험 자료가 비교적 현장과 잘 일치하며, 지하수에 의한 잠열을 고려해야 하는 다른 저장 개념과는 상이함을 알 수 있다.

암반의 급격한 냉각은 유기 열 인장응력을 발생시키며, 오히려 가열하는 것보다 암반에 열충격을 가할 수 있다고 보고되고 있다(Kingery et al,1976). 암반의 열충격을 발생시키는데 필요한 온도차는 다음과 같다. 평균 온도가 변하기 전에, 암반 벽면 온도가 갑자기 이 온도 수준에 도달해버리면 발생하는 열충격 조건이다.

$$\Delta T_f = \frac{\sigma_f \lambda (1-\nu)}{E \alpha}$$

여기서,  $\sigma_f$ 는 신선암의 인장강도(MPa),  $\lambda$ 는 열전도도(W/m°C),  $\alpha$ 는 열팽창계수( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), E와  $\nu$ 는 탄성계수(MPa)와 포아송비이다.  $\lambda=2.63 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $\alpha=70 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (3.3절 기술됨),  $\sigma_f=8 \text{ MPa}$ ,  $E=20.3 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.28$ 의 현장 자료를 고려하면,  $11^\circ\text{C}$ 로서 Fig.5와 Fig.6을 비교해 볼때 급격한 열구배가 형성되지 않고, 평균 하강 온도가  $0.24^\circ\text{C/day}$ 이므로 암반은 열충격이 없었을 것으로 판단된다.

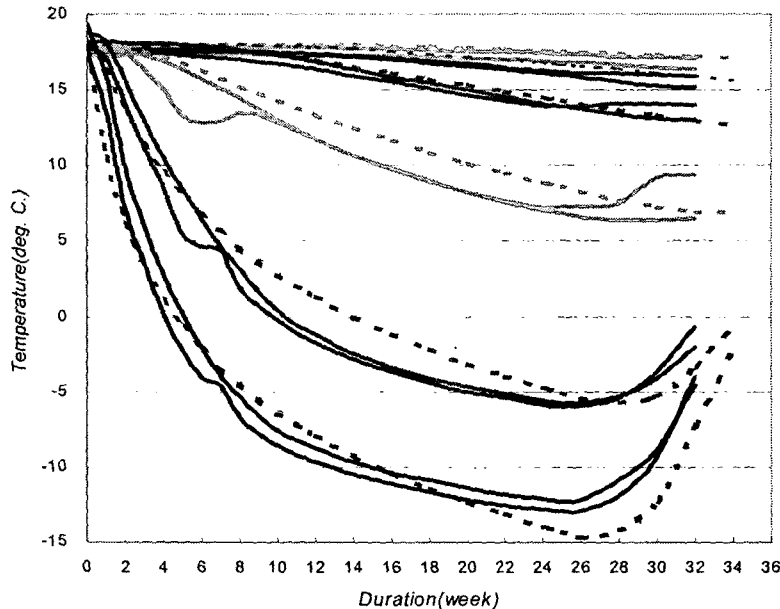


Fig.6. Temperature comparison between measurements and estimations in Taejon LNG Pilot Cavern(continuous: measurements, dotted: estimation)

### 3.3 암반 변위 계측 결과

Fig. 7은 운영 시작 후 현재까지 측벽 및 바닥 암반에서의 암반변위계·변위 자료를 나타내고 있다. 여기서 (+) 변위는 암반쪽으로 향하는 변위이고 (-) 변위는 공동쪽으로 향하는 변위이다. 그래프의 선 옆에 공동 암반 벽면으로부터 측정점의 거리를 나타내었다.

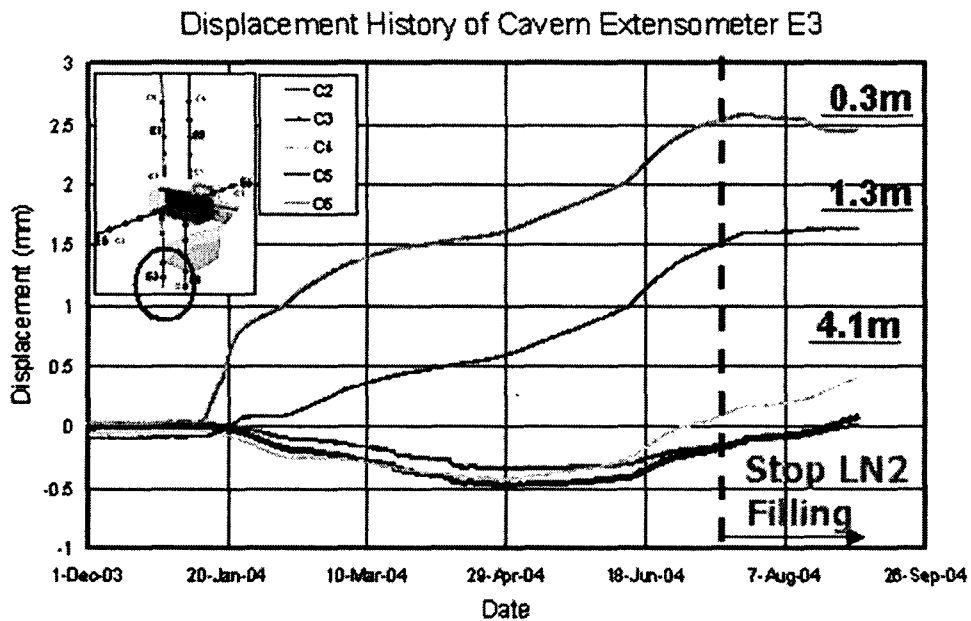
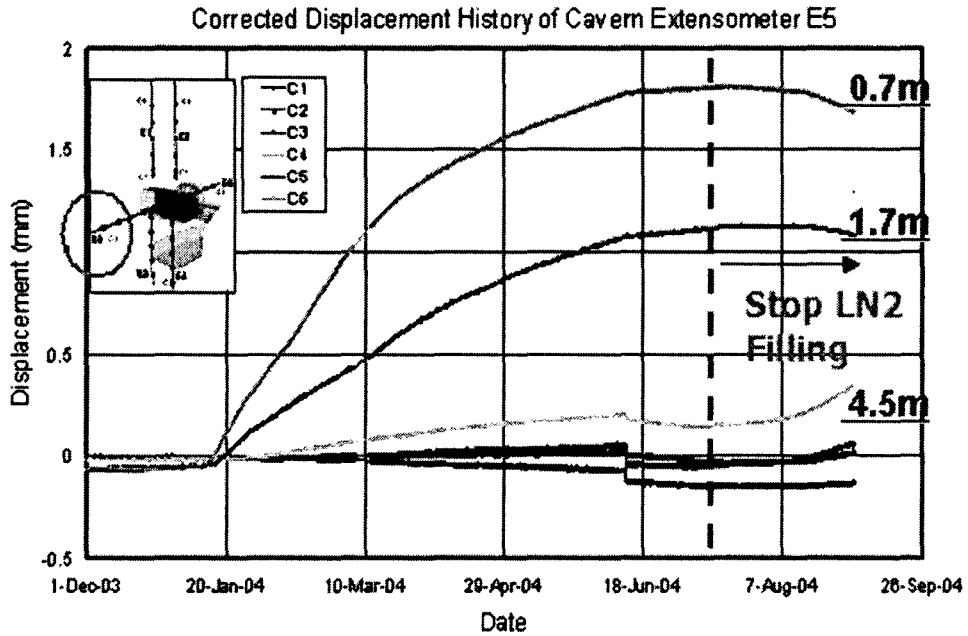


Fig. 7. Rock displacements at various distances from rock surface.  
Upper and lower figures are for side and bottom rock respectively.



Fig. 7에서 보는 바와 같이, 공동에서 가까운 암반변위는 열응력에 의한 수축으로 공동 으로부터 암반으로 수축하는 (+)변위벡터를 보이고 있고, 먼 곳은 공동쪽으로 향하는 변위 이나 0℃ 등온선이 접근함에 따라 (-)변위 증가가 현저히 줄어들어 (+)변위쪽으로 바뀌는 양 상을 보이고 있다.

공동 바닥에서 0.3m 지점의 변위는 LN2 충전을 중단하기 직전, 177일 경과 시점에서 최대 (+)2.6 mm 발생하였고, 공동 측벽에서 0.7m 지점의 변위는 운영 후 177일 경과 시점 에서 최대 (+)1.8mm 발생하였다. 심도에 따라 변위가 선형적으로 감소함을 알 수 있었고, 이에 따라 암반 벽면의 변위는 4 ~ 5mm 범위에 존재할 것이라는 것을 추측할 수 있다. 이 값은 공동 반지름의 약 0.2% 값이다.

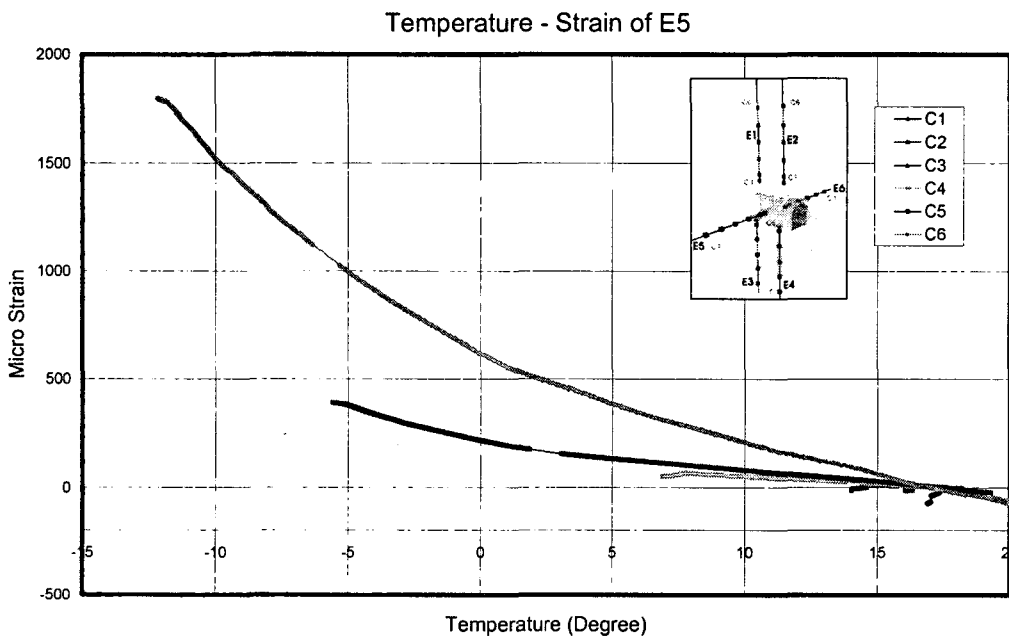


Fig. 8. Rock strain around the cavern due to the cooling-down

Fig.8에서 보는 바와 같이, 0 ~ (-)10 °C 범위에서, 벽면에서 가장 가까운 0.7m 지점의 열팽창계수는 87  $\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$ 이지만, 벽면에서 멀어질수록 33  $\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$ 로 줄어든다. 모든 지 점에서의 평균값은, 벽면에서 0.5m 거리에서 평균 70  $\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$ , 1.5m 거리에서 평균 30  $\mu\text{ strain}/^{\circ}\text{C}$ 이다. 열팽창계수는 0°C 전후에서 비선형적인 관계를 보이며, 0°C 이하에서 암반 matrix내 공극수가 빙결되면서 매질 수축/팽창 특성이 달라지는 것으로 사료된다. 이에 반 해, 건조 시편에 대한 열팽창계수 측정 결과는 온도 변화에 상관없이 선형적이었다(이대혁, 2003). 부지암반은 Q 값이 12.5인 비교적 양호한 암반(이대혁,2004)으로서 실규모 저장공동 대상 암반에서의 열역학적 반응을 이해하는데 지표가 된다. 암석코어에 대한 열팽창계수는 0 ~ (-)10 °C 범위에서 평균 6.3으로서, 실제 암반의 열팽창계수가 5~11배 더 크다는 것을 알 수 있다. 아직 0°C에 근처 온도에 도달하지 않는 4m 이상의 깊은 심도에서의 암반 열팽 창계수가 실제 암석코어에 대한 실험치와 유사함을 알 수 있었다.

### 3.4 절리 개구 변위 계측 결과

Fig. 9는 저장공동의 냉각 및 LN2 충전 중단 후 해빙단계에서의 절리 개구 변위를 나타낸 그림이다. 대부분의 절리들이 그림과 같은 거동을 하였으며 대표적으로 JMS2 균열 측정계의 자료를 나타낸 것이다.

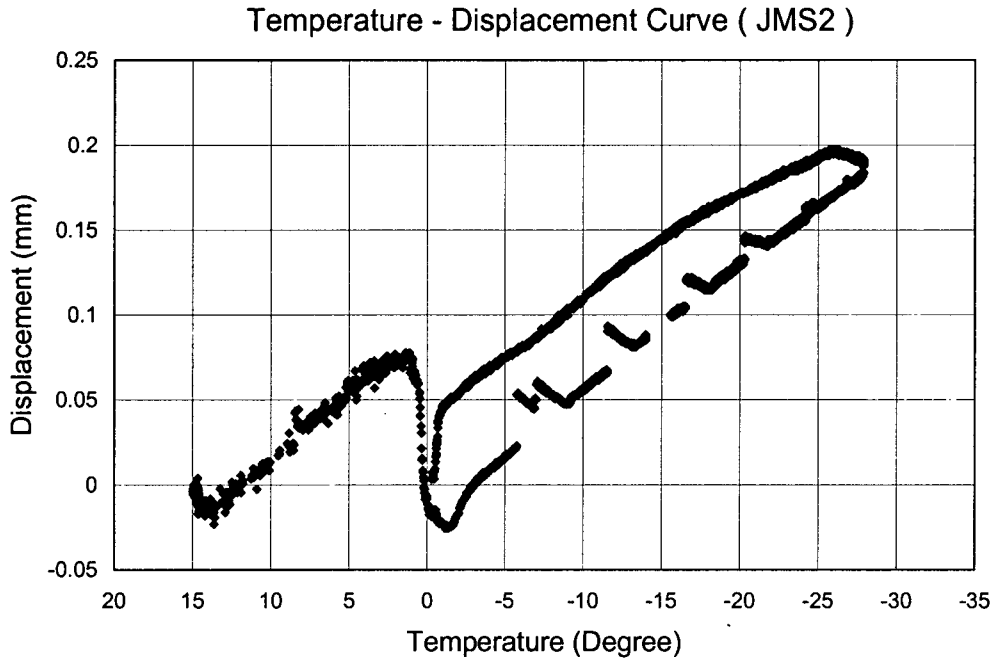


Fig. 9. Hysteresis of rock joint opening with the variation of temperature on the excavation surface both in cooling and thawing stage.

Fig. 9와같이, 암반의 온도가 저하됨에 따라 절리 틈새는 전반적으로 개구되었고, 온도 회복단계에서는 다시 닫히는 거동을 보이고 있다. 절리 틈새의 개구와 닫힘은 매우 탄성적인 거동을 보이는데, 흥미로운 사실은 냉각단계 0 °C 근처에서 일시적으로 닫히는 상이한 거동을 보인다.

이와 같은 0 °C 근처 온도에서의 절리 틈새 거동에 관한 원인은 현재까지 크게 두 가지 가능성을 검토하고 있다. 굴착면을 관통하고 있는 절리의 깊은 심도와 굴착면 가까운 위치에서의 상이한 거동 때문일 수 있다. 즉 하나의 절리의 굴착면 가까운 위치에서는 지하수가 모두 배수되어 남아 있지 않으나, 그 절리의 상대적으로 깊은 심도쪽에서는 절리면 절리 흡착수가 남아 있을 수 있다. 깊은 심도쪽에서 냉각단계 0°C 근처에서 얼음이 생성되면서 9% 부피 팽창으로 절리 틈새를 개구시키려 하면, 굴착면 가까운 위치에서는 일시적으로 닫히는 현상이 발생할 수 있다. 해빙단계에서는 얼음이 깨지면서 일시적으로 0 °C 근처 온도에서 상대적으로 빠르게 일시적으로 절리 틈새가 닫힐 수 있다. 다른 한 가지 가능성은 균열측정계 설치 보호 박스내부의 이상 거동에 관한 것으로서 현재까지 검토중에 있다.

### 3.5 록볼트 축력 계측 결과

Fig. 10은 저장공동의 냉각 및 LN2 충전 중단 후 해빙단계에서의 록볼트 축력을 나타낸 그림이다.

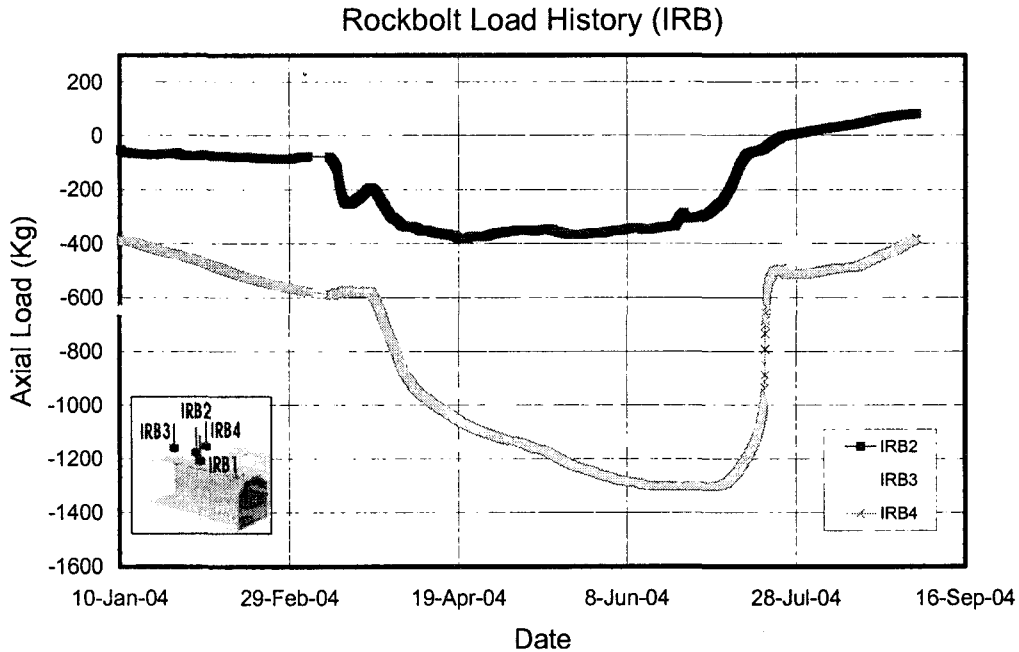


Fig. 10. The evolution of rockbolt axial force with the variation of rock temperature.

Fig. 10과 같이 록볼트 축력은 시간에 따라 즉 암반이 냉각됨에 따라 (-) 즉 인장력이 지속적으로 증가하다가 LN2 중단후 암반 온도 회복단계에서는 록볼트 축력이 사라지는 경향을 보이고 있다. 록볼트 인장력이 발생하는 것은 3.3절의 암반 변위 계측 결과의 경향에 비추어볼때 당연한 현상이다. 즉 굴착면에서 암반쪽으로 팽창하는 변위를 보이고 그 크기는 굴착면에서 가장 크고 암반쪽으로 갈수록 점점 작아지는 경향이였다. 암반쪽으로 향하는 열 팽창으로 인하여 록볼트 축력 또한 인장력이 발생하였다.

록볼트 축인장력의 크기는 LN2 중단 전 최대 1.3 ton-f를 보여 인발하중에 비해 1/10 수준의 매우 작은 값을 나타내었다. 따라서 저장 공동 지보재는 -30℃까지 떨어지는 굴착면 온도에도 불구하고 충분한 지보력을 발휘하고 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.6 지표 침하 계측 결과

지표 침하 계측은 저장공동 상부 지표에서 동서남북 방향으로 저장공동으로부터 20m 지점까지 총 9개의 침하핀을 설치하여 주기적으로 측량하였다. 그러나 지표침하량이 상대적으로 측량기 해상도를 고려할 때 매우 작아 큰 변동이 측정되지 않았다. 그러나 지중 지중 변위계 결과로부터 지표에서 5m 심도에서 침하량은 0.03mm ~ 0.15 mm 범위로 측정되었다. 따라서 냉각에 따른 지표 침하량은 매우 작은 것으로 판명되었다.

### 3.7 암반 Porepressure 계측 결과

저장공동 주변 암반의 배수에 따른 지하수위의 변동 및 수리지질학적 현상에 대해서는 본 논문의 범위를 벗어나므로 암반내 시추공에서의 porepressure 값을 수두로 환산한 계측 결과만을 나타내면 Fig. 11과 같다.

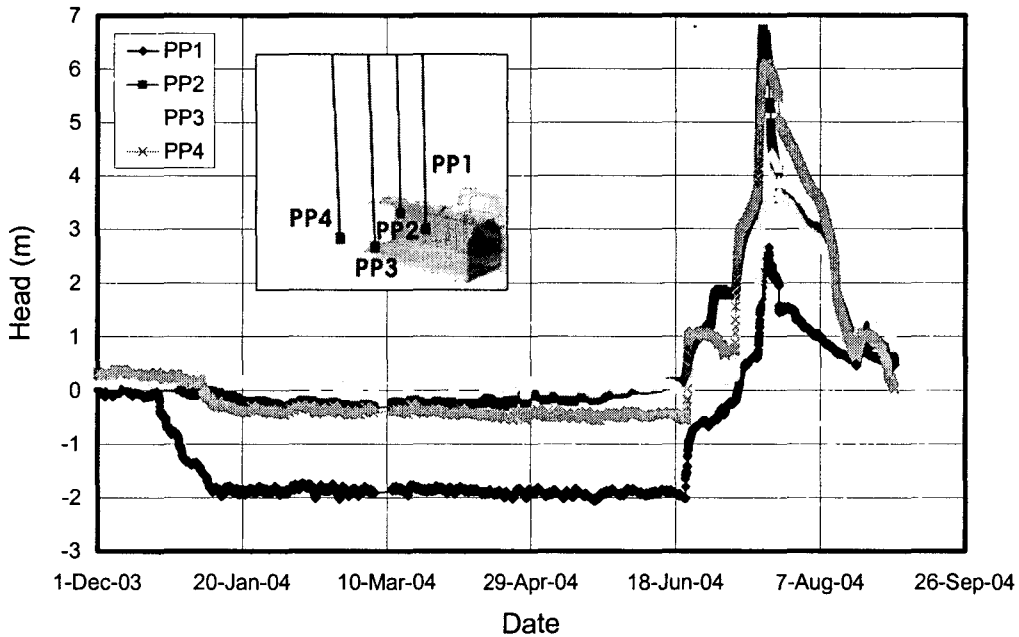


Fig. 11 Porepressure evolution of rock around the Pilot cavern

Fig. 11에서 Porepressure 측정 위치가 즉 수두 0값이 거의 저장공동 천정과  $\pm 0.5m$  이내로서 유사 하다. PP1과 PP2는 저장 공동으로부터 평면상에서 약 1m, PP3와 PP4는 약 4m 떨어진 위치에서 설치되었다. 그림과 같이 배수가 중단된 6월 10일 이전까지 간극수압 수두는 수두 0이거나 (-)값을 보이고 있었고 배수 중단 후 장마철 시작과 함께 저장공동 천정에서 약 6m 이상 까지 수두가 작용하다가 이 후 7월 23일 배수 재 시작과 함께 수두가 감소하였다. 6월 10일에서 7월 23일까지는 저장공동 주변 암반에 Ice ring 을 인위적으로 형성시키기 위한 시간이었고, 충분히 Ice ring이 형성되었다고 판단된 시점에서 배수를 재 착수 하였다.

지면상 본 논문에서는 생략하였지만 지하수위 관측 결과 배수 중단 이전까지는 공동 바닥 약 -3m 이하 심도까지 지하수위가 하강하였다가 배수 중단 후 장마철의 시작과 함께 급격히 지하수위가 상승하여 공동 천정 6m 까지 도달하였다. 지하수위 회복을 위한 인위적인 물 주입을 피하고 자연적인 강우 함양에 의해 지하수위 회복을 이루고자 하는데 성공하였다.

### 3.8 노출 콘크리트에서 주변에서의 온도 추이

저장공동 콘크리트가 주변 암반에 의해 둘러 쌓인 부위와 대기에 노출된 부위에서의 온도 차이를 알기 위하여 노출된 콘크리트 주변에서의 온도를 주기적으로 측정하였다. 즉 콘크리트 내면 온도, 콘크리트 외면 온도(대기와의 접촉면), 대기 온도(진입터널 내부 대기) 및 저장공동 내부의 액화질소 액위를 동시에 Fig. 12에 나타내었다.

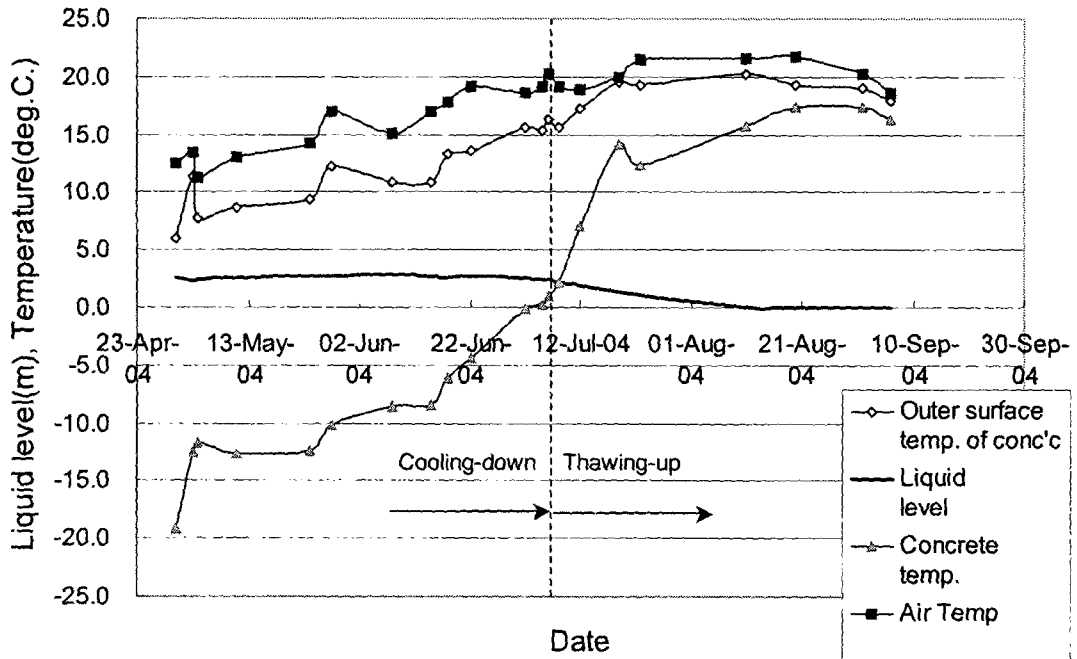


Fig. 12. The history of temperatures on inner and outer surface of concrete, and in air around the concrete during cooling and thawing phase.

Fig.12와 같이 저장공동 냉각 단계에서는 콘크리트 내면과 외면의 온도차는 약 20℃이지만, 콘크리트 외면과 대기의 온도차는 약 5℃ 차이였다. 그러나 해빙단계에 접어들어서는 저장공동 내부의 저장물질이 없어지면서 콘크리트 내외면의 온도차는 거의 사라졌다. 이에 반해 암반에 의해 둘러 쌓인 부위에서는 콘크리트 온도와 벽면 온도의 차이가 매우 적었고 최대 -30℃에 도달하였었다.

이와 같이 노출된 콘크리트에서의 열유입량은 암반으로 둘러쌓인 부위에 비해 20% 이상 큰 것으로 평가되고, 실제 실규모 저장공동이 지상 탱크에 비해 운영비가 크게 절감될 수 있음을 의미하고 있다.

#### 4. 결론

① 대전 LNG Pilot 저장공동 주위 암반에서의 냉각에 따른 온도 전파 및 분포를 계측한 결과, 0℃ 등온선은 바닥부에서는 굴착면으로부터 4.4 m, 측벽부에서는 4m, 천정부에서는 3.2m까지 전파하였다. 이는 Pilot 설계단계에서의 수치해석 결과와 매우 일치하였다.

② 저장공동 주변 암반의 변위 벡터는 저장공동의 냉각에 따른 열수축으로 암반쪽으로 향하였다. 저장공동 주변 암반이 -30℃까지 온도가 저하하여도 벽면으로부터 0.3m 심도에서 2.6mm 발생하였다. 냉각이 종료되고 온도 회복단계에서 암반 변위가 회복되는 정도를 파악하기 위해서는 지속적인 모니터링이 요구된다. 중요한 점은 주변 암반 변위가 공동 쪽으로 향하지 않고 암반쪽으로 향한다는 점이다. 이는 콘크리트와 Containment system으로 이루어진 저장공동 안정성에 주변 암반의 냉각이 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

③ 실제 암반의 열팽창계수는 실험실 시험값의 약 5~11배에 해당하였다. 물론 0℃ 이상의 온도를 나타내는 4m 이상의 깊은 심도에서는 실험실 시험값과 유사하였다.

④ 저장공동 암반 벽면 절리 틈새는 암반이 냉각됨에 따라 개구되어 최대 0.2mm까지 개구되었고, 온도 회복단계에서 다시 닫혀지는 거동을 보여 냉각되기 원래 수준으로 도달하였다. 냉각단계 0℃ 근처에서 일시적으로 절리가 닫히는 현상에 대해서는 그 원인을 파악하고 있으나, 벽면 근처와 깊은 심도에서의 거동 차이로 인한 것으로 사료된다.

⑤ 지표침하량은 매우 미미하였고, 록볼트 지보재에 작용하는 축력은 최대 1.3 ton-f의 작은 인장력이 발생하였다.

⑥ 대전 LNG Pilot Cavern에 대한 저장공동 냉각에 따른 주변 암반의 온도 및 거동 모니터링 결과 콘크리트 라이닝 및 Containment system으로 이루어진 저장 개념은 저장공동 안정성에 전혀 문제가 없는 것으로 파악되었다.

#### 참고문헌

신중호, 박연준, 김호영, 박찬, 1999, 아치형 냉동저장공동 주위 암반의 열전도 특성 및 열물성 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 9. 1, 27~35.

이대혁, 김호영, 한공창, 신중호, 박찬, 2003, 대전 북공식 LNG 지하동굴 Pilot 저장 공동 주변 열역학적 수치해석 사례, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, 31~41

이대혁, 이철욱, 이희석, 김호영, 정소결, 한공창, 2004, 대전 LNG Pilot Cavern 건설공사 요약 및 초기 계측자료 분석 결과 - 암반공학적 측면을 중심으로, 한국암반공학회 추계 학술발표회 논문집.

한국지질자원연구원, 2003, LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영 결과 분석 연구 1차년도 보고서, 78~ 127

Kingery, W.D., Bowen, H.K. and Uhlmann, D.R., 1976, Introduction to Ceramics, A Wiley-Interscience Publications, New York.

SKEC, Geostock, Technigaz, Taejon LNG Pilot Cavern-Engineering Drawing, 72 Volumes.

SKEC, 2004, Commissioning Report, TAE//D/1300-A. 1~32.