

대전 LNG Pilot Cavern 건설공사 요약 및 초기 계측자료 분석 결과 - 암반공학적 측면을 중심으로

이대혁¹⁾, 이철욱¹⁾, 이희석¹⁾, 김호영¹⁾, 정소걸²⁾, 한공창²⁾

¹⁾SK건설주식회사 Geotask팀, ²⁾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. 2004년 1월중 공동의 냉각 및 액화질소 주입을 포함한 시운전이 이루어져 현재 운영중에 있다.

본 논문은 건설공사에 있어 암반공학적 주요 핵심 사항 및 2004년 1월부터 2월 말까지 운영 초기 계측자료를 검토한 일부 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, 초기 운영 계측자료를 기본 및 실시 설계 단계에서의 예측결과와 비교 검토하였다.

2. 굴착 및 계측시스템 설치

2.1 동굴 굴착

Pilot 저장 공동은 대전 대덕연구단지내 한국지질자원연구원 부지에 위치한 지하 냉장 및 냉동창고 연구용으로 활용하였던 지하시설을 증축하여 시공하였다. 저장 공동까지는 기존 수평터널을 통해 진입하며, 공동 천정은 지표에서 약 20m 깊이에 위치하고 있다. 공동은 높이 3.7m, 폭 4m의 육각형 단면 확보에 적합하게 발파 굴착하였으며 최종 단면에 대해 단면 측정기를 이용하여 측정한 결과는 Fig. 1과 같다.

굴착후 막장 조사 및 암반분류 결과는 다음과 같다. RQD 값은 80~100으로서 범위가 좁은 편이며, 절리군은 2개의 주 절리군과 Radom 절리로 구성되어 있으며 절리 거칠기 Jr값이 Undulating~Planar로 다양하였다. 3개 방향의 단층 12개를 제외한 모든 절리면은 충전물이 없이 깨끗하였다. 가장 빈번하게 출현한 Qm.f. 값 및 모든 조사 결과 Qtyp.range값의 범위는 아래와 같다.

$$Q_{typ.range} = \frac{100 \sim 80}{6 \sim 3} \times \frac{3 \sim 2}{3 \sim 1} \times \frac{0.66}{2.5} = 2.3 \sim 26.4 (poor \text{ to } good)$$

$$Q_{m.f.} = \frac{95}{3^*} \times \frac{3^*}{2} \times \frac{0.66}{2.5} = 12.5 (good)$$

이러한 Q값으로부터 Grimstad & Barton(1993)에 따라, 무지보 혹은 얇은 일반 슛크리트 (약 4cm) 및 록볼트 지보가 가능하나, 본 저장공동은 연구용 시설로서 저온으로 인한 암반 거동을 정확하게 측정하기 위해 슛크리트 타설 없이, 존재하는 주절리를 대상으로 록볼트 지보만을 시공하였다. 또한, 수치해석을 통해 열응력으로 인한 암반내 응력 집중 부위에 대해서도 길이 2 m 록볼트를 시공하였다.

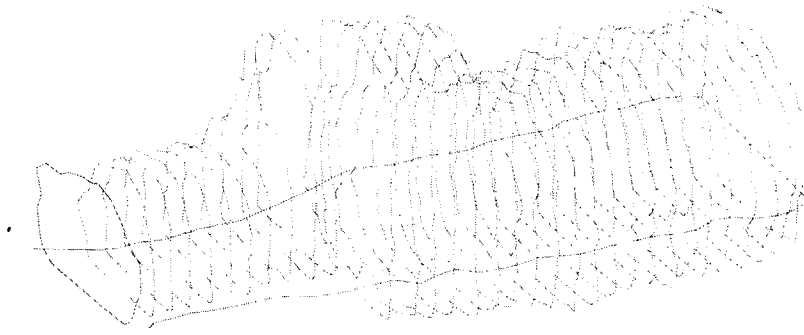


Fig.1 Excavation profile of Taejon LNG Pilot Cavern.

2.2 암반 계측시스템

암반 계측시스템의 설치는 저장공동 콘크리트 및 주변 암반에 계측을 수행함으로써 저장 공동의 동결 및 해동시 온도변화에 따른 콘크리트, 암반, 지하수의 거동을 측정하고자 하는데 그 목적이 있다.

Table 1과 같이, 저온으로 인한 Containment, 콘크리트, 록볼트, 암반, 절리의 변위를 측정하기 위하여 콘크리트 응력계 6개, 록볼트 축력계 4개, 6축점의 Extensometer 4개, 암반 절리의 개구를 측정하는 균열측정계 5개가 설치되었다. 또한, 암반 지하수의 흐름으로 인한 지하수압의 변화를 측정하기 위하여 Porepressure cell 4개가 설치되었다. 또한 지중 수평변위 측정을 위해 공동 좌우로 지표에서 2개의 경사계 Casing이 각각 40m 깊이로 설치되었으며, 지표 침하를 측정하기 위한 조사용 Pole이 9개 지점에 설치되었다. 모든 계측기는 Thermocouple을 장착하여 온도 측정을 병행하게 하였다.

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

	Purpose	Instrument	Quantity	Description
C A V E R N	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
S U R F A C E	Rock settlement	Multipoint Borehole Extensometer	1 holes×6 points 1 holes×6 points	vertical(18.5m) vertical(17.5m)
	Rock horizontal displacement	Digitilt Inclinometer 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

3. 배수시스템 설치 및 수리지질 시험

주변 암반은 Table 2와 같이 3개의 절리군이 나타나며 절리군 1에 해당하는 절리들이 가장 빈번하게 나타나고 있다. 그러나 절리군 1에 해당하는 절리들이 비록 소규모 단층이나 절리들이지만 절리 틈새 충전물이 많아 지하수 흐름을 크게 좌우하지 않고 있다. 오히려 Table 2와 같이 지하수 흐름을 결정적으로 좌우하는 N70E/20SE 방향의 개구성 절리가 공동 입구 천정 좌측부터 대각으로 가로질러 막장 우측까지 발달하고 있다. 지표 지형의 경사가 NE방향에서 SW방향으로 낮아지는 형상을 나타내어 지하수 흐름이 NE에서 SW방향으로 흐를 것 같지만 공동 내부의 이러한 절리특성에 좌우되어 NW에서 SE방향으로 대부분의 지하수 흐름이 발생하는 것으로 관측되었다(이대혁(b) 외,2003).

Table 2. Joint characteristics by joint survey of Taejon LNG Pilot Cavern (이대혁(b) 외,2003)

	Joint set 1	Joint set 2	Joint set 3	Water carrying main joint
Strike/dip	N71W/53SW	N45E/38NW	N8E/45SE	N70E/20SE
Mean spacing(cm)	41*	-	-	-
Mean persistency(cm)	210*	83*	75*	1000
Nature	Joint & Fault	Mostly joint	Mostly joint	Open joint

* The value was determined as a mean value following a log-normal distribution obtained by the statistical approach.

본 저장 공동은 실제 액화질소가스의 충전까지 주변 암반을 배수해야 하며 일련의 배수 시스템을 구축하였다(Fig. 2 참조). 따라서 배수시스템 설치전후, 다양한 배수공에 대해 패커 시험(수압시험)이 이루어졌으며, 일련의 수리간섭시험(Hydrogeological interference test)으로부터 주변 암반의 지하수 함유 능력, 배수공의 배수 효율성, 공동으로부터 지하수 유입량이 정밀한 프로그램에 따라 평가되었다. 수리간섭시험의 프로그램은 다음과 같다.

- Phase 1 : 모든 배수공을 물로 채워 잠그고 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량 측정.
- Phase 2 : 일부 배수공에 대해 배수를 수행하며 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량, 배수공 배수량 측정.
- Phase 3 : 모든 배수공에 대해 배수를 수행하며 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량, 배수공 배수량 측정.
- Phase 4 : 지상 주수공(Recharge hole)을 통해 최대 1 bar 압력으로 주수하며 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량, 배수공 배수량 측정

총 3회 수리지질시험이 24시간 중단없이 수행되었으며, 시험 종료 후에도 모든 측정은 지속되었다. 최초의 수리지질시험은 공동 굴착전에 수행하였고, 2차 시험은 라이닝 콘크리트 타설 전 공동 굴착 상태에서 수행하였고, 제 3차 시험은 콘크리트 라이닝 타설 및 배면 그라우팅후 수행되었다. 따라서, 계절별, 공동 굴착 전후, 라이닝 타설 전후의 자료가 상호 비교 평가되어 배수시스템이 지하수 유출량의 몇 %까지 배수시킬 수 있는지 조사되었다. 결과적으로 97% 지하수가 배수시스템에 의해 배수되는 것으로 평가되었지만, 집중 강우시에는 배수 효율성이 저하된다는 사실을 알 수 있었다(Lee et al.,2003).

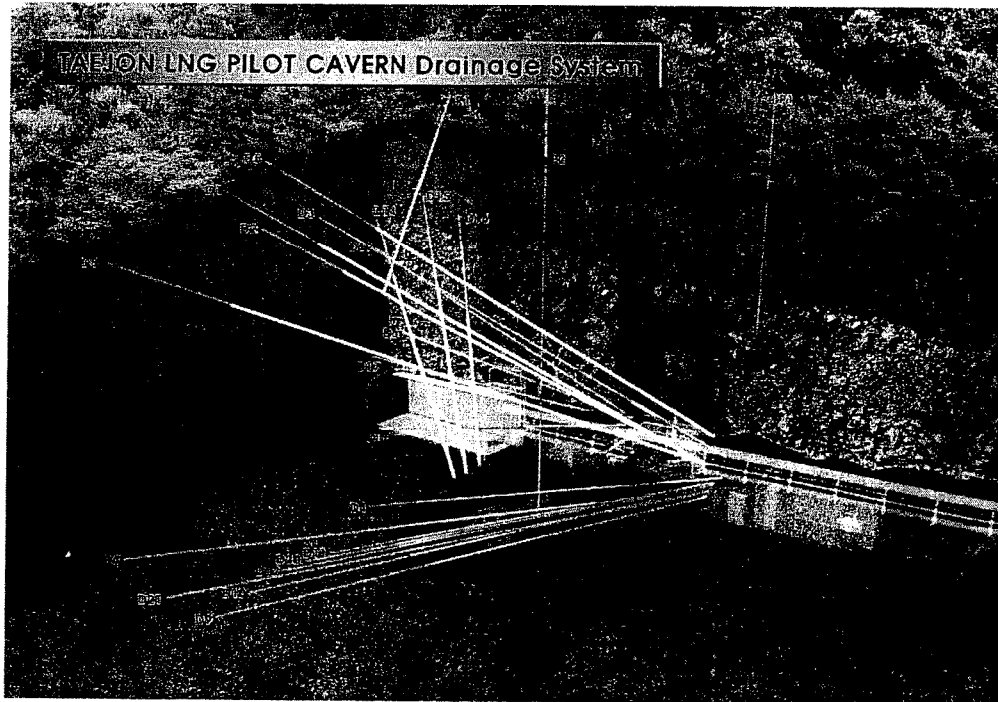


Fig.2 Taejon LNG Pilot Cavern Drainage System

4. 콘크리트 라이닝 타설 및 Containment 시스템 설치

4.1 콘크리트 라이닝 타설 및 라이닝 배면 그라우팅

저장 공동 콘크리트 라이닝 타설 공사는 일축압축강도가 40 MPa이고, 수직면 허용 오차 $\pm 10\text{mm}$, 수평면 허용오차 $\pm 6\text{mm}$ 등으로 매우 어려운 사양이 요구되었다. 라이닝 배면 암반에서 나오는 지하수를 배수하기 위해 굴착면 바닥에 D58mm(설계시 D50mm) 다공질 강관이 모서리를 따라 설치되었으며, Fig. 3과 같이 배면 그라우팅을 위해 거푸집 2m x 2m 정방형에 한 개씩의 그라우트 파이프가 매설되었다. SD350 D16mm 복철근이 22cm 콘크리트 두께로 배근되었으며, 철근깊이는 5cm로 하였다. Fig. 3의 윗그림에서 보는 바와 같이 45° 경사를 갖는 단면 Chamfer 부를 제외한 나머지는 코팅합판의 거푸집이 사용되었으며, Chamfer부는 강재거푸집을 사용하였다. 콘크리트 기본 배합비는 Table 3과 같다.

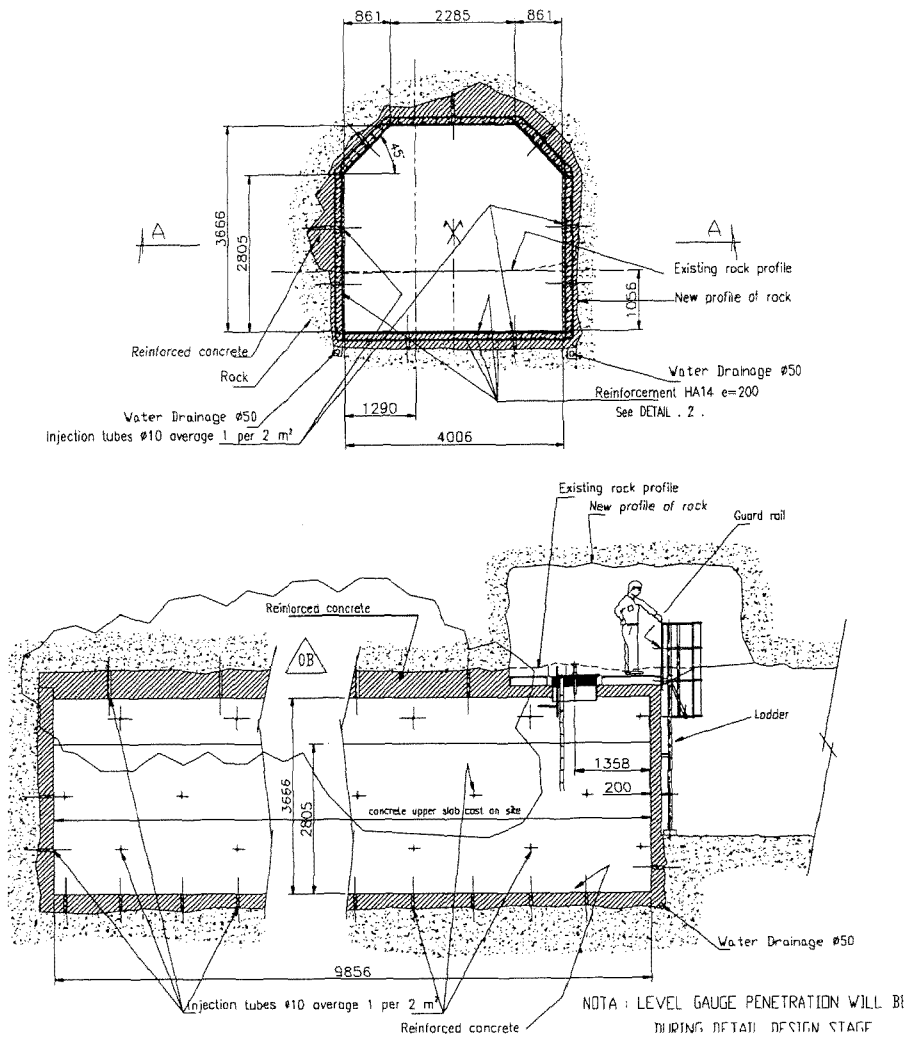


Fig.3 Taejon LNG Pilot Cavern Concrete Work

Table 3. Concrete Basic Design mix for Taejon LNG Pilot Cavern.

Normal Max. Agg. Size(mm)	Water/Cement Ratio by weight	Min. Cement in Concrete kg/m ³	Min. Compressive cube strength(N/mm ²)
20	0.43	385	40

라이닝 배면 그라우팅은 물시멘트비 1.1로서 벤토나이트 1.5% 함량으로서 최대 10 bar까지 수행하였다. Mash Cone을 이용한 점성도 시험 결과 45 sec 이하로서 점성이 매우 양호하였고, 침하량 시험 결과 2시간후 2% 이하로서 혼합이 매우 양호하였다.

본 Pilot 시공중 경험으로부터, 일축압축강도 40MPa을 유지하며 단위 시멘트량을 감소시키기 위한 방안, 적정 그라우팅 물량 선정방안 및 시공 조인트 방수 방안이 향후 실규모 상업화 시설 설계에 집중적으로 조명되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

4.2 Containment 시스템 설치

10cm 보냉재(Insulation panel) 및 1.2mm 두께 멤브레인(Corrugated Stainless Steel Membrane)이 조합된 Containment 시스템 공사는 약 3개월간 진행되었다. 먼저 깨끗이 청소된 콘크리트 면에 침투성 방수재를 도포하고 12시간을 대기한 후 도막 방수재를 2~3mm 두께로 도포하였다. 방수재는 콘크리트를 면을 통하여 침투하는 습기 및 지하수를 차단하기 위한 목적으로 시공되었다. 그리고 보냉재인 Poly urethane foam을 부착하기 위한 Stud bolt를 일정 간격으로 설치하였다. 각 볼트에 대해서는 인발강도 시험을 수행하였다. 이후 보냉재를 부착하였으며 멤브레인을 용접 이음 시공하였다.

Fig.4는 Containment 시공후 최종 모습을 보여준다.

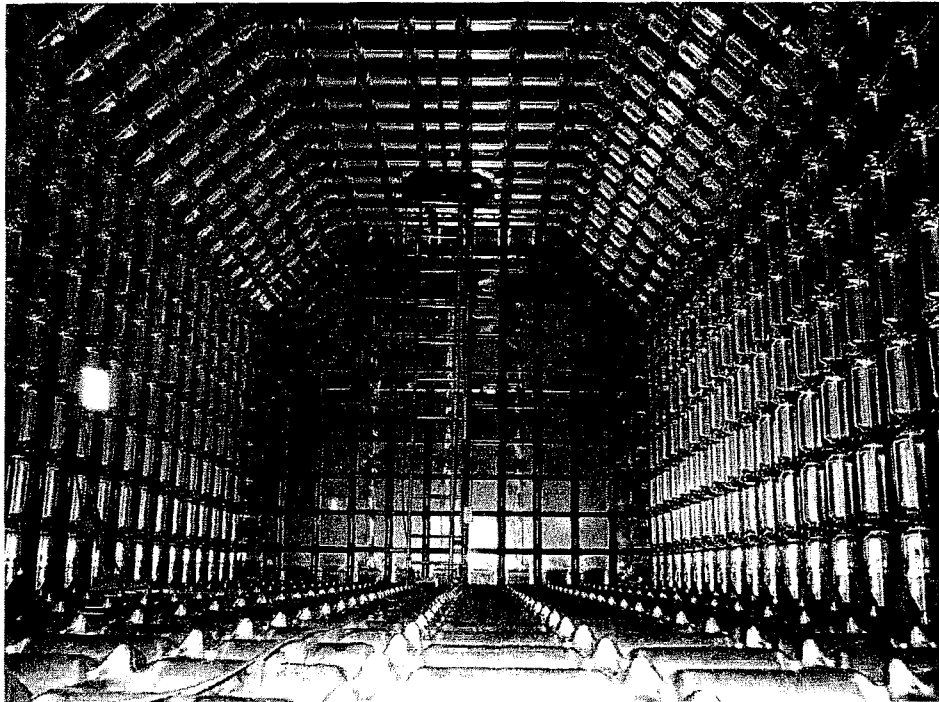


Fig.4 Complete erection of the containment system.

5. 시운전(Commissioning)

5.1 시운전

시운전 직전에 멤브레인을 포함한 Containment 시스템에 대한 기밀성 시험이 수행되었다. 그 결과 14개소의 leak 부위가 발견되었고, 보수 작업후 leak 부위는 더 이상 발생하지 않았다.

본 Pilot의 시운전은 2004년 1월 5일부터 1개월간 진행되었다. 먼저 저장공동 내부의 이슬점 온도를 -25도 이하로 저하시키는 Drying-out이 선행되었고, 저장공동내 멤브레인을 -196도까지 예냉시키는 작업을 수행하였다. 예냉작업은 저장공동 천정에 공동 축 방향으로 매달려 있는 1인치 파이프면에 미리 천공한 구멍을 통해 액을 분사시킴으로써 분사되자마자 가스상으로 기화되면서 서서히 공동 내부를 냉각시키는 과정이다. 예냉과정에서의 멤브레인 바닥면, 저장공동 내부 즉 멤브레인 내부의 온도 강하를 Fig.5에 나타내었다. 바닥 멤브레인이 -196도에 도달하면 액화질소 액은 더 이상 기화하지 않고 저질로 응결이 이루어졌다. 이후 운전 액위까지 지속적으로 액화질소 충전이 이루어졌다. Cavern 높이의 96%까지 충전 후, 충전라인을 완전히 차단하고, 저장 공동 내부압을 120 mbarg로 유지한 상태에서 저장 액화질소가 24시간동안 어느 정도 기화되는지를 시험하기 위한 Boil-off Gas 시험이 이루어졌다. 현재 2.6m 정도의 정상 액위를 지속적으로 유지하고 있으며, 2004년 3월 10일 현재 2개월 운영이 완료되었다.

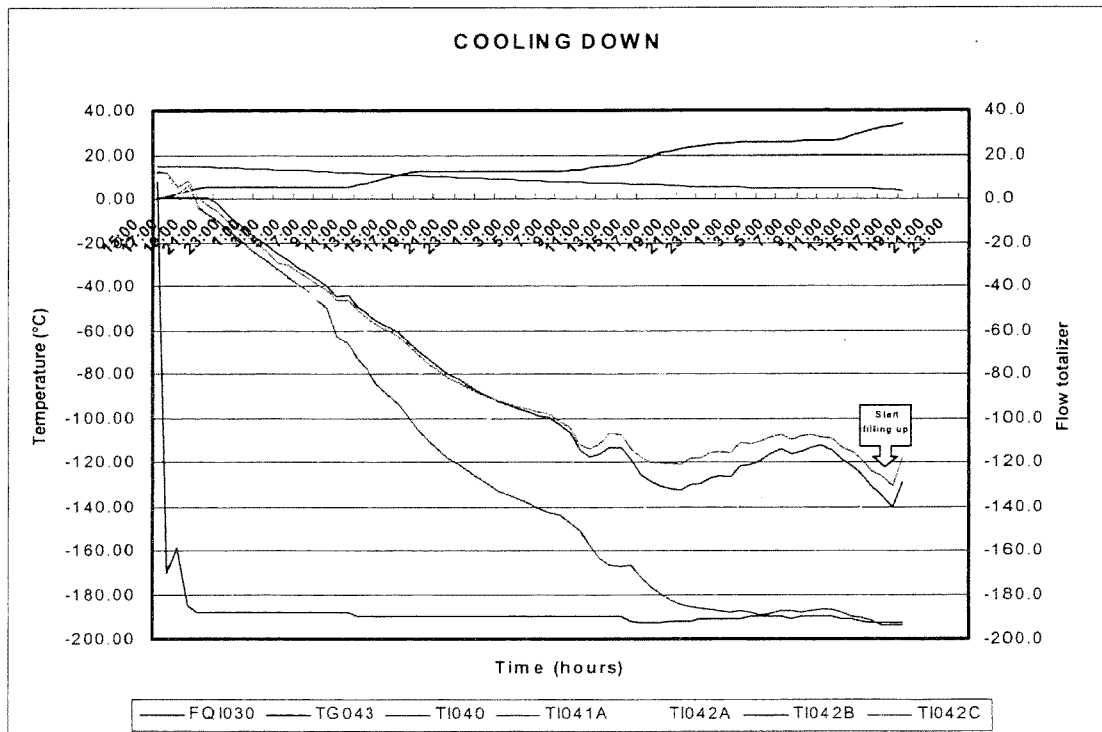


Fig.5 Cooling down monitoring results

6. 초기 계측 결과 분석

6.1 초기 기화율

Pilot 저장 공동 주변 암반은 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 정해진 기화율에 맞추어 모든 제반 Containment 시스템 설계가 이루어진다. 따라서 Pilot 저장공동 또한 저장 초기에 기화율 시험이 이루어졌으며, 이론적 계산 결과, FLAC2D 및 FLAC3D 결과와 비교 평가되었다. 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Initial Boil-Off Gas rate comparison with calculated and numerical estimation.

	Real test	Theoretical calculation*	FLAC2D	FLAC3D
BOG rate(%/day)	4.97	4.76	4.21	4.22

* The calculation is based upon the cavern dimension, surface area, manhole size and material thermal properties.

이론적 계산 결과, 전체 예상되는 열 유입량은 9000 Kcal/hr로서, Fig.3에서 보는 바와 같은 저장 공동 상부 맨홀을 통한 열 유입량이 전체 유입량의 25% 이상으로서 무시할 수 없는 양이었다. 맨홀은 실규모 상업화 시설 설계시에는 존재하지 않는 부분으로서 단지 Pilot 저장공동 내부 저장 모습을 관찰하기 위해 강화 유리창을 이용하여 설치한 것이다. Table 4에서 보는 바와 같이 실제 시험결과와 이론적 계산 결과 및 수치해석치가 비교적 유사하였고, 이로부터 기화율 예측이 가능하다는 사실을 알 수 있었다.

6.2 온도 분포 측정치 및 예측 결과와의 비교

Fig.6 은 2004년 3월 1일 현재 운영 시작후 51일 경과 시점의 Pilot 저장공동 주변 암반의 계측시스템에서 측정된 온도 분포를 나타낸 것이다. 현재 운영후 51일 경과시점에서 온도분포는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 공동 좌우측 암반이 약간 비대칭적인 분포를 보이고 있다. 0℃ 등온선은 바닥부에서 최대 2.8m까지 전파되었고, 저장공동 우측 암반이 좌측 암반에 비해 0℃ 전파 속도가 약간 빠른 것(최대 2.5℃)으로 파악된다.

부지지질 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 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.

Temperature distribution (1 Mar. 04)
By Radial Basis Function Interpolation

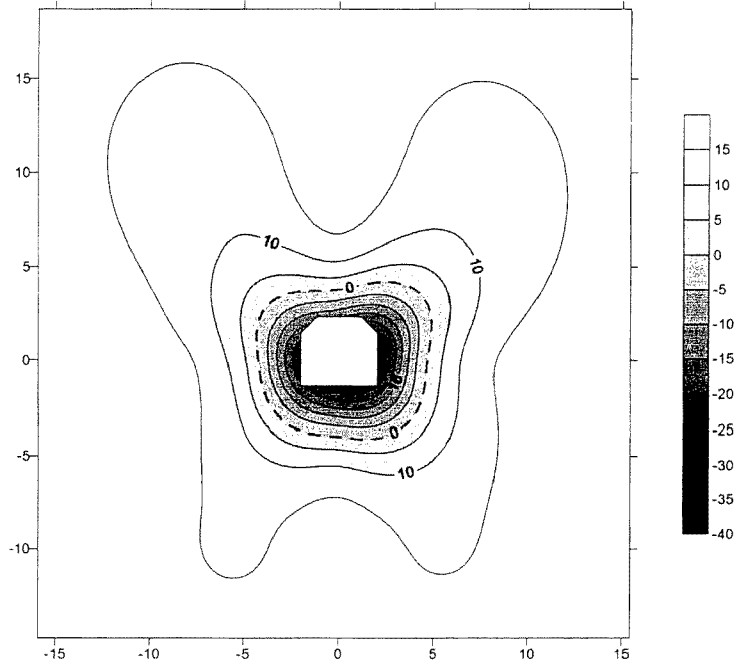


Fig.6 Temperature distribution of the 1st of March

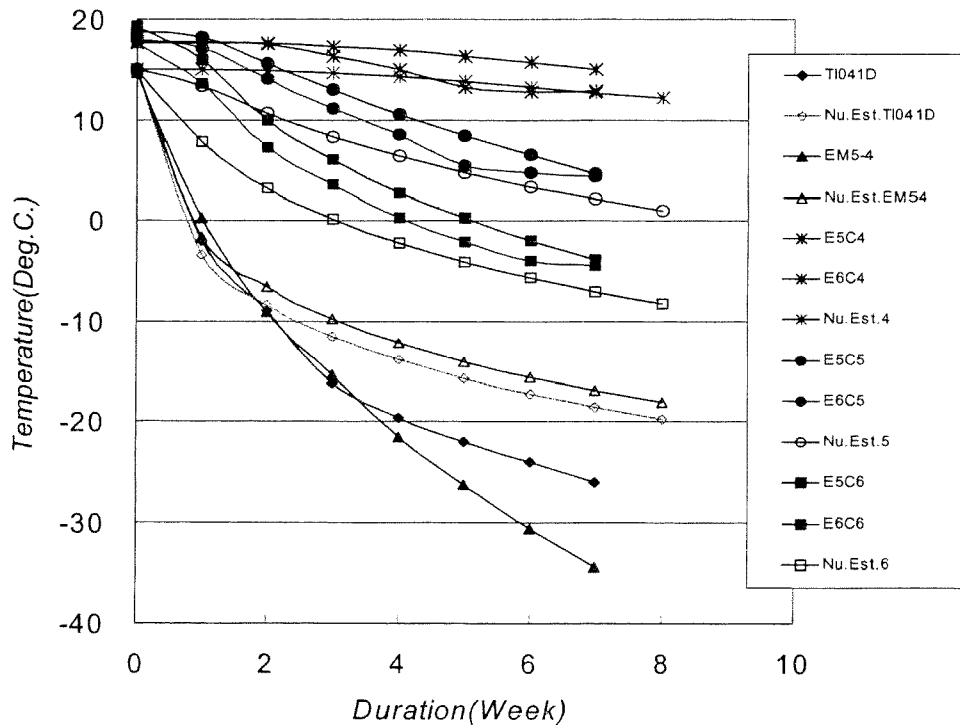


Fig. 7 Temperature comparison of real measurements and estimation for side rock
(Closed black symbol means measurements and white filled means estimation)

한국지질자원연구원(2003)에 따르면 암반의 함수비가 5%와 10%일 때, 0℃ 등온선 전파 거리의 차이가 액화질소 충전 4주후 0.1m, 8주후 0.17m 16주후 0.3m, 24주후 0.36m로 발생함이 보고 되었다. 현재 Pilot 저장공동 좌우 암반은 충전 7 주후 0℃ 등온선 거리 차이가 0.25m로서 한국지질자원연구원(2003) 연구 결과에 따라 5% 이상의 함수비 차이를 보이는 것으로 파악된다. 그러나 암반의 정확한 함수비는 절리 빈도, 벌어짐 정도, 출수량 등에 따라 결정해야 하므로 Pilot 부지 암반을 대상으로 이에 관한 심도 깊은 연구가 추가적으로 필요하다는 사실을 알 수 있다.

측벽 온도 분포 자료에 대해 FLAC2D에 의한 수치해석 결과와 비교한 그래프는 Fig. 7과 같다. 비교 측정점은 아래와 같다.

- TI041D, EM5-4 : 좌측벽 콘크리트면 온도 및 좌측벽 콘크리트 내부 온도
- E5C6, E6C6 : 공동으로부터 각각 좌우측 암반 0.6m 지점 온도
- E5C5, E6C5 : 공동으로부터 각각 좌우측 암반 1.6m 지점 온도
- E5C4, E6C4 : 공동으로부터 각각 좌우측 암반 4.4m 지점 온도
- Nu. Est : 각각의 측정자료에 대응하는 수치해석 예측 온도

콘크리트 표면 및 콘크리트 내부 온도는 수치해석치와 계측치 사이에 큰 차이를 보이고 있다. 더욱이, 운영후 4주 경과 시점에서는 콘크리트 표면 온도가 콘크리트 내부 온도보다 더 높아지는 현상이 발생하였다. 이러한 현상들에 대한 연구가 현재 지속되고 있다. 암반쪽 온도는 계측치와 측정치가 매우 유사함을 알 수 있어 수치해석에 의한 예측이 매우 타당하다는 것을 알 수 있었다. 수치해석치 초기 온도가 15℃이고 실제 측정점들의 초기온도가 18~19℃로 출발 온도는 다르지만 그 온도차이가 각 경과시간별로 계속 유사하게 유지되면서 온도가 저하되고 있다. 따라서 암반온도는 수치해석에 의해서도 비교적 유사하게 온도분포를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

지면상 본 논문에 언급되지 않았지만, 바닥 온도 분포 또한 수치해석치와 매우 유사하게 나타났다.

이에 반해, 저장공동 상부 암반은 온도 전파가 다른 영역에 비해 매우 느린 것으로 나타나고 있다. 이는 수치해석에 의해서도 이미 파악되었다. 저장공동 내부는 높이 3.4m 중 현재 2.6m 정도의 정상 액위를 유지하고 있어, 약 0.8m 정도의 가스상(Gas Sky)이 존재하고 있다. 가스상의 온도는 -150~ - 120℃로 액상에 비해 온도가 50~70℃ 이상 높다. 또한 멤브레인에 -196℃의 액이 직접 닿아 주로 열전도도만이 발생하는 바닥, 측벽 부위와는 달리, 가스상이 닿고 있는 천정부의 열 유입은 열대류 및 열전도가 동시에 이루어지므로 열 전달 메커니즘이 상이하다.

천정 상부 암반 온도 분포 자료에 대해 FLAC2D에 의한 수치해석 결과와 비교한 그래프는 Fig. 8과 같다. 비교 측정점은 아래와 같다.

- TI041B, EM5-2 : 천정 콘크리트면 온도 및 콘크리트 내부 온도
- E1C1, E2C1 : 공동 천정으로부터 암반 1.1m 지점 온도
- E1C2, E2C2 : 공동 천정으로부터 암반 2.1m 지점 온도
- E1C3, E2C3 : 공동 천정으로부터 암반 4.9m 지점 온도
- Nu. Est : 각각의 측정자료에 대응하는 수치해석 예측 온도

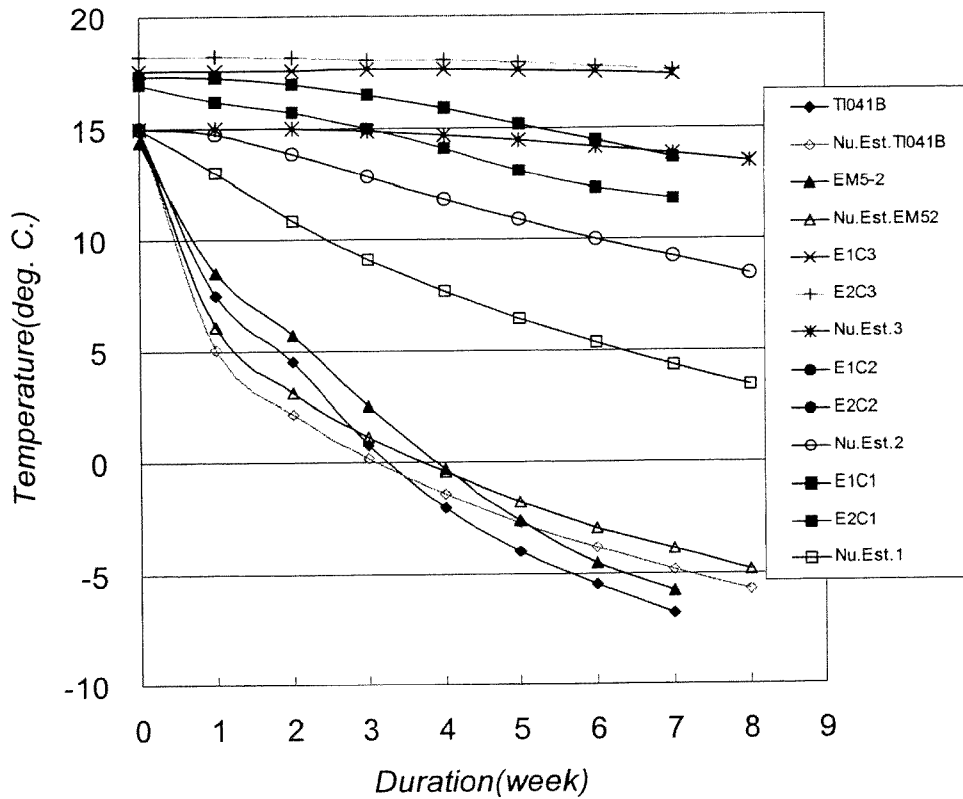


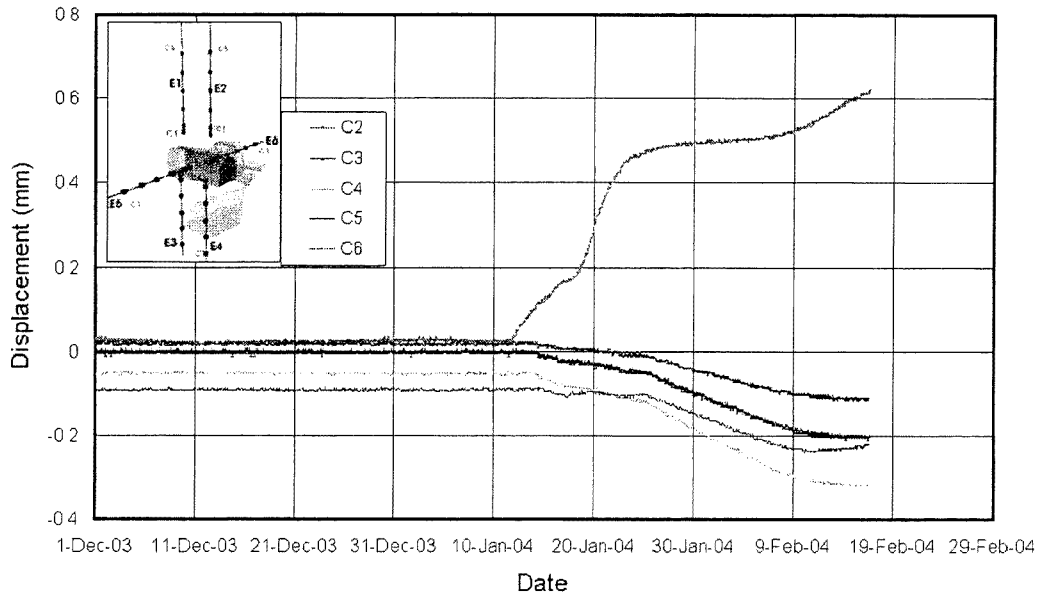
Fig. 8 Temperature comparison of real measurements and estimation for the rock above the cavern (Closed black symbol means measurements and white filled means estimation)

Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이, 콘크리트 온도 측정치는 예측치와 2~3°C 오차 범위로 유사하나, 암반내 실제 측정온도는 C3 측정에서 수치해석 예측치에 비해 10°C 이상 큰 온도를 보이고 있다. C4 측정점은 아직 온도 변화가 매우 미미하지만 비슷한 경향을 보일 것으로 예상된다. C2 측정점은 온도 센서가 고장으로 인하여 수치해석 예측치와 직접적인 비교가 불가능하다. 수치해석에서는 고정온도 조건만을 이용하여 가스상을 모사하고 있어 이러한 차이를 보이는 것으로 판단된다. 물론 지표 열대류로 인한 공동 상부 암반의 온도 분포 영향을 검토할 수 있으나, 지하 냉장 및 냉동 참고 파일럿 연구 및 기타 수치해석적 검토로부터 지표 열대류에 의한 영향은 매우 미미한 것으로 파악되었다.

결국, 천정 상부 암반 온도 분포의 정확한 예측을 위해서는 고정온도 조건과 대류 열전달 경계조건이 동시에 만족되는 추가 수치해석적 검토가 필요한 것으로 사료된다.

본 Pilot 연구 프로젝트는 0°C 등온선이 어느 정도 전파된 후 배수시스템을 중단함으로써 공동으로부터 어느 정도 떨어진 곳까지 건조 암반을 유지시키며 빙결층(Ice ring)을 형성해야 한다. 공동 천정 상부 암반의 빙결층은 강우에 의한 침투수에 견뎌내야 하므로 매우 중요하다.

Displacement History of Cavern Extensometer E3



Displacement History of Cavern Extensometer E5

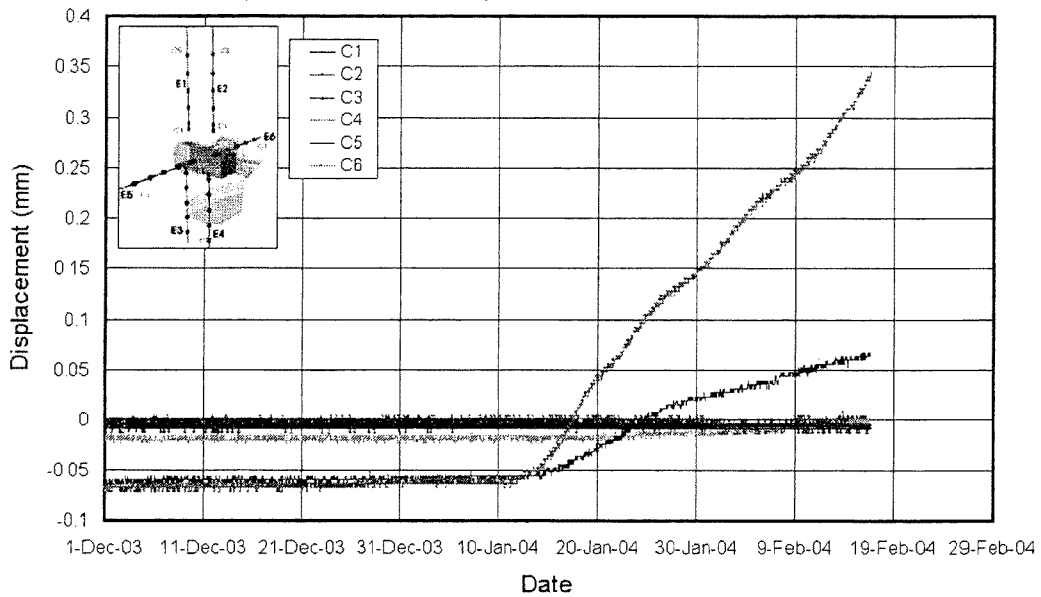


Fig. 9 Displacement measurements after 10th of January operation commencement.
 (E3 : rock below the cavern bottom, E5 : rock behind the cavern wall)

Displacement History of Surface Extensometer (E2)

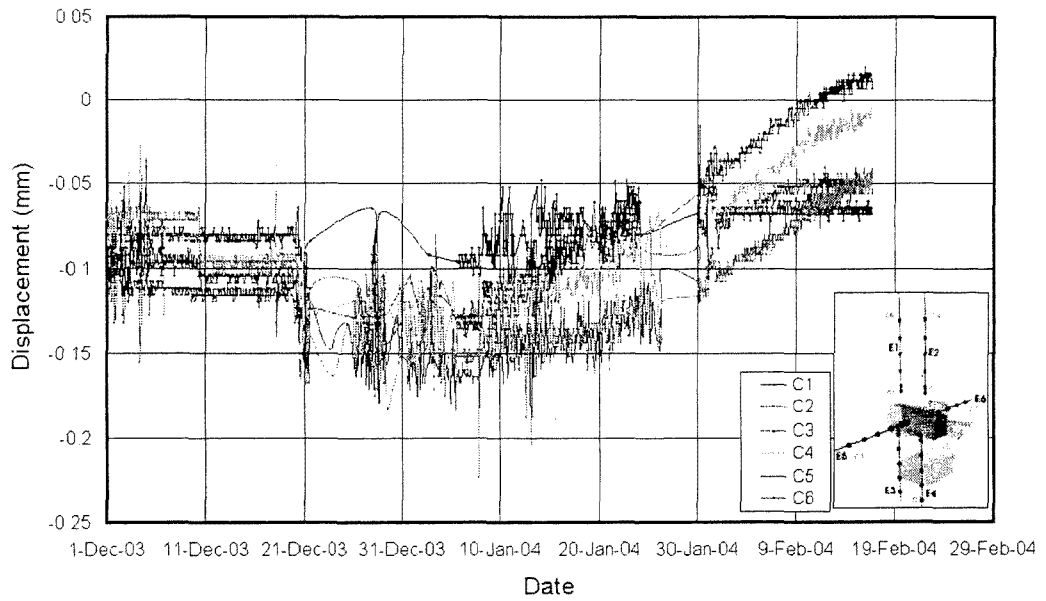


Fig. 10 Displacement measurements after 10th of January operation commencement.
(E2 : rock above the cavern roof)

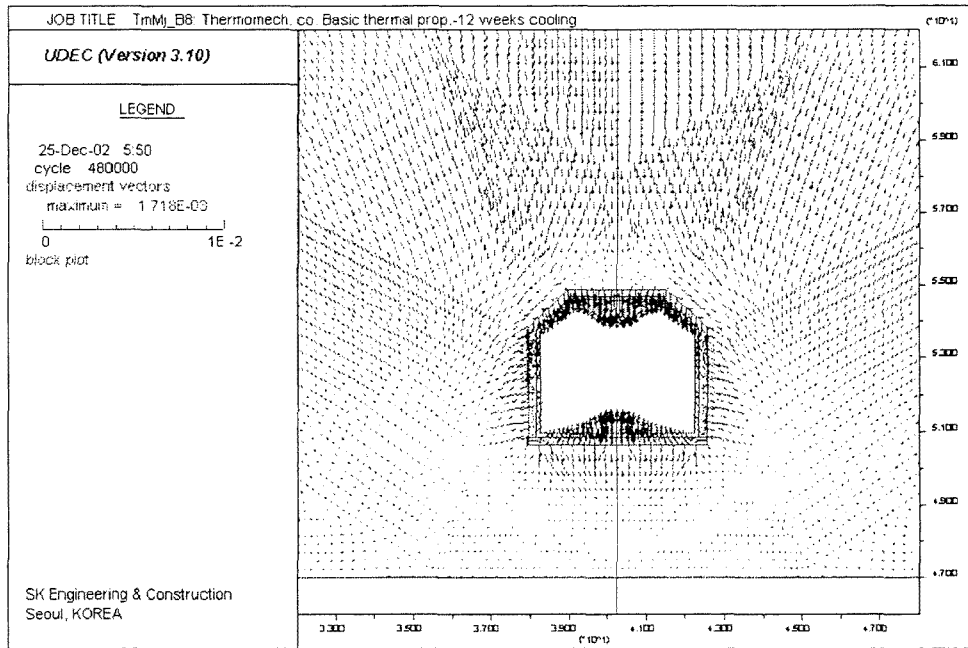


Fig. 11 Displacement Profile estimated by UDEC model

6.3 암반 변위 발생 현황

Fig. 9는 운영후 현재까지 바닥 및 측벽 암반 두 지점에서의 Extensometer 변위 자료를 나타내고 있다. 여기서 (+) 변위는 암반쪽으로 향하는 변위이고 (-) 변위는 공동쪽으로 향하는 변위이다. E3C6 는 공동 바닥으로부터 0.3m 지점, E5C6는 공동 측벽으로부터 0.7m 지점이다. 또한 E5C5 측점은 공동 측벽으로부터 1.6m 지점이다.

Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이, 공동에서 가까운 암반변위는 열응력에 의한 수축으로 공동으로부터 암반으로 팽창하는 변위벡터를 보이고 있고, 먼 곳은 공동쪽으로 향하는 변위이나 0℃ 등온선이 접근함에 따라 (-)변위 증가가 현저히 줄어들어 (+)변위쪽으로 바뀌는 양상을 보이고 있다.

공동 바닥에서 0.3m 지점의 변위는 운영 후 40일 경과 최대 (+)0.6 mm 발생하였고, 공동 측벽에서 0.7m 지점의 변위는 운영 후 40일 경과 최대 (+)0.35mm 발생하였다.

Fig. 10은 지상 Extensometer E2 변위자료를 나타내고 있다. 여기서 (+)변위는 침하를 의미한다. E2C1 는 공동 천정으로부터 1.1m 지점, E2C2는 공동 천정으로부터 2.1m 지점, E2C3 는 공동천정으로부터 4.9m 지점이다.

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이, Fig. 9의 측벽 및 바닥 변위 경향과 달리 모든 변위는 공동쪽으로 향하는 침하 변위를 보이고 있으며 그 크기는 최대 약 (+) 0.1mm 변위 증가량을 보이고 있다.

액화 질소 저장 후 시간에 따른 변위 측정치와 수치해석 예측치의 비교 검토가 아직 이루어지지 않았으나 수치해석에 의한 변위 벡터를 도시한 Fig. 11과 비교하면 다음과 같다. Fig.11에서 보는 바와 같이 공동 천정 상부 암반 변위는 모두 공동으로 향하지만, 공동으로부터 가까운 바닥 및 측벽 암반의 경우 모두 암반쪽으로 팽창하는 변위를 보이고 있다. 이는 Fig. 9 및 Fig. 10의 변위 측정치 방향과 동일함을 알 수 있다.

7. 결론

대전 LNG Pilot 저장공동 건설공사는 약 8개월동안 굴착, 보강, 계측시스템 구축, 수리지질 시험, Containment System공사, Plant 공사, 기밀성 시험 및 시운전이 이루어졌다. 본 프로젝트는 작업공간의 협소함으로 인하여 예상 공기보다 2개월이 추가 소요되었고 2004년 2월 10일부터 운영이 시작되었다. 향후 6개월간 동결이 계속되고, 이후 6개월간 해빙기간의 모니터링이 진행될 예정이다.

현재까지 액화질소의 기화량, 온도분포 및 변위벡터 방향은 수치해석 예측 결과와 매우 유사하였다. 그러나 콘크리트에서 예측치와 큰 온도차이를 보이고 있고, 공동 천정 상부 암반의 온도 분포에 관한 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

향후 계측자료에 대한 수집 및 분석이 이루어지면 지속적으로 본 학회에 연구 결과를 발표하고자 한다.

참고문헌

1. 이대혁(a), 김호영, 한공창, 신중호, 박찬, 2003, 대전 복공식 LNG 지하동굴 Pilot 저장 공동 주변 열역학적 수치해석 사례, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, p. 31~41
2. 이대혁(b), 이철욱, 김호영, 2003, RMR 및 Q 분류시 Jw 선정방법에 관한 사례 연구, 한국지반공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, p 67~81.
3. 한국지질자원연구원, 2003, LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영 결과 분석 연구 1차년도 보고서, p. 78~ 127
4. Grimstad, E. and Barton, N.,1993,Updating of the Q-system for NMT, Int. Sympo. on Sprayed Concrete - Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes.
5. Lee, D.H., Lee, C.W., Do, H.L., Kim, H.Y., Bodin, J., Amantini, E.,2003, A case study on the efficiency test of groundwater drainage system for Taejon LNG pilot cavern. International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration. p 711~715.
6. SKEC,Geostock,Technigaz, Taejon LNG Pilot Cavern-Engineering Drawing, 72 Volumes.
7. SKEC, 2004, Commissioning Report, TAE/I/D/1300-A. p 1~32.