

지하 LNG Pilot Cavern 주변암반의 Ice Ring 형성 수치모사

박의섭, 정소걸 (한국지질자원연구원 지반안전연구부)

김호영, 이대혁 (SK건설(주) Geotask팀)

1. 서 론

최근 천연액화가스(Liquefied Natural Gas)는 도시가스뿐만 아니라 전력생산 및 산업용으로 주된 에너지원으로 자리잡고 있으며, 특히 지구환경문제와 관련하여 청정에너지로서 더욱 부각되고 있다. 이와 같은 LNG 수요의 급증과 더불어 저장시설의 건설 또한 지속적으로 이루어지고 있다. 지금까지 국내에 시공된 LNG 저장시설은 모두 지상탱크식(Above-ground) 및 반지하식(In-ground)인데, 단위 저장규모의 제한이나 지상부지 보상 문제뿐만 아니라 환경 및 안전 측면에서 많은 문제점을 유발하는 것으로 인식되고 있다.

한편, 선진외국에선 1970년대 이후로 무복공(Unlined) 암반공동에 LNG를 저장하고자 하는 수많은 시도가 있었으나, 대부분 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었다. 그 이유는 주변 암반이 -162°C 의 극저온에 노출되어 열균열(Thermal crack)이 발생하였으며, 그로 인하여 저장가스의 누출 및 열유속(Heat flux)의 증가를 불러일으킴으로써 과도한 기화(Boil-off)가 발생하였기 때문이다(Dalstrom 1992, Glamheden & Lindblom 2002).

복공 암반공동(Lined Rock Cavern)에 LNG를 저장하는 새로운 개념이 제안되어 수년 동안 개념 개발이 수행되었고, 그 결과 2002년부터 한국지질자원연구원에 Pilot Plant를 건설하기로 결정하여 2003년부터 설계, 시공 및 운영이 진행되어 2005년 현재 Decommissioning 단계에 와 있다.

본 논문은 LNG 저장이후 배수 시스템이 중지된 6개월 동안 Pilot Cavern 주변 암반에서의 Ice Ring 형성에 관련된 메커니즘을 이해하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 열전달, 지하수 유동 및 Ice Ring 형성에 관련된 암반 및 구조물의 거동은 CFD코드의 일종인 FLOW3D를 이용하여 수치모사하였다.

2. 입력변수의 산정

2.1 고려 요소

1차원 수치모사로서 12가지 경우가 해석되었고, 폴리우레탄(PU) 패널의 온도의존적인 열전도도, 접촉물질의 형태(LNG 또는 가스) 및 등가의 단열재의 3가지 요소에 대하여 비교하였다.

- PU foam 패널의 일정 열전도도 또는 온도 의존적인 열전도도
- 내조 시스템과 접촉하는 LNG (채워진 부분) 또는 가스 (천장 부분)
- 등가의 단열재
 - 모든 단열요소의 개별적인 고려: steel + 폴리우레탄 foam + 콘크리트
 - Steel, 폴리우레탄 foam 및 콘크리트를 각 요소별로 가중치를 두어 구한 평균 열용량 및 밀도를 가진 단열체로서의 고려
 - 단열재로서 폴리우레탄 foam 및 콘크리트를 고려 (stainless steel 배제)

모든 해석결과는 내조시스템내의 콘크리트 스트레인 게이지, steel 멤브레인 뒷면의 온도계 및 주변 압반에 설치된 지중변위계의 온도 측정결과와 비교되었다.

표 1은 모든 재료에 대한 일정한 열 물성을 보여준다. 또한 표 2는 폴리우레탄 패널의 열전도도의 온도 의존성을 보여준다. 표 2에서 폴리우레탄 패널의 평균값인 0.025 W/m°C는 일반적인 설계개념에서 사용되는 un-reinforced 패널의 표준값보다 높은 것으로 나타났다.

Table 1. Typical thermal properties of containment system, concrete and rock

	Stainless steel ANSI-304, @-196°C	PU foam @-160°C	concrete @-173°C	Rock
Thermal conductivity, k (W/m°C)	8.42	0.0184	2.627	2.627
Specific heat (J/kg°C)	242	1,674	710	710
Density (kg/m³)	7,900	65	2,550	2,660

Table 2. Temperature dependencies of PU panel thermal conductivity (Reinforced PU foam)

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m°C)	Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m°C)
-160	0.0184	-39	0.0247
-120	0.0236	-19	0.0249
-80	0.0256	20	0.0260

2.2 결 과

폴리우레탄 foam 열전도도의 온도의존성을 반영한 해석을 통하여 계산된 온도는 계측결과와 더 일치하는 경향을 보여주었다. 따라서 이후의 2차원 및 3차원 수치모사는 폴리우레탄 foam 패널의 온도의존적 열전도도를 대입한 조건에서 수행하였다.

가스와 stainless steel 사이의 대류열전달계수(convective heat transfer coefficient) h 는 암반 온도를 가지고 보정하였을 때 $0.114\text{W/m}^2\text{C}$ 이었으나, 콘크리트 온도가 고려되었을 때는 $3\text{W/m}^2\text{C}$ 로 계산되었다. 지중변위계 E3-E6 계측결과를 가지고 계산한 결과와 비교한 결과, 사용된 수치모사 개념은 Pilot 주변의 열전달해석에 적절한 것으로 나타났다.

폴리우레탄 foam과 콘크리트의 등가체로부터의 결과는 초기의 짧은 냉각(cooling down) 기간 중엔 계측 및 모든 요소를 고려한 수치해석결과에 비교하여 최대 4C 정도 높은 온도를 보여주었다. 그러나 냉각 후 30일이 지난 후에는 모든 경우에 대하여 온도차이가 1C 미만으로 매우 비슷한 결과를 보여주었다. 또한 각 요소사이의 접촉면에서의 열저항을 살펴보았으나 온도차이의 관점에선 무시할 만 하였다.

3. 2차원 수치모사

3.1 수리전도도와 공극률

FLOW3D 코드에선, 완전히 결합된 열 및 다공질 지하수 유동 현상이 상변화(phase change)를 포함한 에너지 방정식(열 전달)과 일반적인 Navier-Stokes 방정식을 가지고 해결될 수 있다. 그러나 이러한 해를 위한 계수는 일반적인 CFD 모사에 사용되는 general drag coefficient에 근거한다. 수리 전도도와 같은 일반적인 수리물성을 구하기 위하여, pilot 주변의 Ice Ring 형성해석에 사용된 drag 용어와 수리 전도도(또는 투수계수)간의 관계가 구해졌고, 이들의 관계가 논의되었다.

Navier-Stokes 방정식에서, $b_x = C_{F3D}u$ 는 단지 한 방향(x 축)이 고려될 때 general drag 항목이다. drag coefficient는 다음과 같이 공극률의 함수로 정의될 수 있다:

$$C_{F3D} = a \cdot n^{-b} \quad (1)$$

여기서, a 와 b 는 임의의 상수이고, n 은 (암반의) 공극률이다.

상기의 두 수식의 단위는 각각 $C_{F3D} : [S^{-1}]$, $b_x : [LS^{-2}]$ 이다. 이러한 계수는 공극내의 유동에 저항하는 양을 나타낸다.

Bronisz와 Hirt(1996)가 FLOW3D, 수리전도도 $K(L/T)$ 및 투수계수 $k(L^2)$ 를 이용하여 공극매질의 불포화 유동에 관한 연구를 통하여 다음 관계를 제시하였다:

$$K = \frac{Fn_g}{C_d} \quad (2)$$

$$k = \frac{Fn\nu}{C_d} \quad (3)$$

여기서, $C_d (=C_{F3D})$ 는 drag coefficient, F는 유체가 차지한 체적의 비율(완전포화 F=1, 건조 F=0, 변이영역 $0 < F < 1$), n은 공극률, g는 중력가속도, 그리고 ν 는 유체의 동점성(kinematic viscosity)이다.

따라서 drag 항은 일반적인 수리변수로 쉽게 변환될 수 있다.

pilot cavern 모델링의 경우, 다음 값들은 현장자료로부터 보정된 후에 적용되었다.

$a = 1.0e^4$, $b=1.2$, n: 공극률 (=0.01, 0.02, 0.03)

적용될 drag 값은 공극률에 따라 계산될 수 있다.

다음 표 3은 Ice Ring 형성 모델링에 사용된 drag coefficient와 변환된 수리 전도도를 보여준다.

Table 3. Used drag coefficients for the modeling and converted hydraulic conductivity

Porosity	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1
C_{F3D}	2.51E+6	1.09E+6	6.72E+5	3.64E+5	1.58E+5
Converted K(m/s)	3.91E-8	1.79E-7	4.38E-7	1.35E-6	6.19E-6

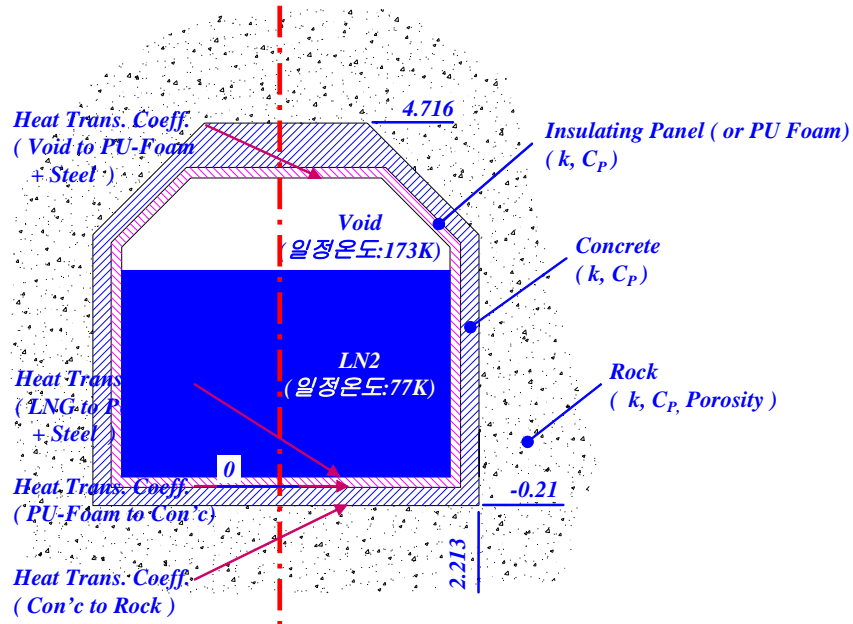
암반 배수시스템 설계에 따라 공동 심도 및 상부에서의 수리전도도의 범위는 $3E-7$ 부터 $2E-6$ m/s이다. 이 경우 pilot 암반의 수리 전도도를 고려하면, 공극률 0.02~0.05의 범위가 FLOW3D 수치모사에 고려될 수 있다.

3.2 수치모사 조건

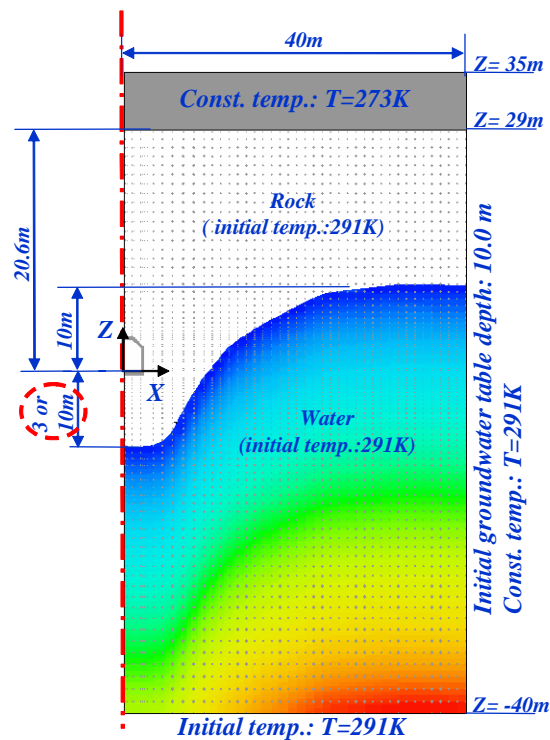
다음 그림 1은 수치모사에 사용된 공동영역과 전체 모델영역의 개략적인 모습을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수와 주변암반의 초기 온도는 291K(18℃)로, 지표면에 접하는 대기의 온도는 해석과의 비교시작 시점인 1월 10일의 대략적인 온도 273K(0℃)를 적용하였다. 대기의 온도는 공동 주변의 온도변화에 거의 영향을 주지 않음을 2차원 열전달 해석을 통해서 알 수 있었다. 지하수의 결빙온도는 0℃(273K)로 가정하였다. 경계면에서의 수위는 초기 측정수위를 기준으로 일정하게 유지되는 조건을 적용하였으며, 초기 지하수위는 측정점의 값을 부드럽게 이은 형태로 적용하였다. 연계해석에서 잠열과 지하수의 열량 또한 고려되었다.

암반내 비연계된(uncoupled) 열전달은 지하수 배수가 부분적으로 중지된 7월 10일까지만

고려되었다. 그 이후 7월 10일부터 8월 10일까지 열전달은 다공질 유동해석과 연계되었다. 정상 LN2 수위는 바닥 멤브레인으로부터 2.6m의 높이로 7월 5일까지 유지되었다. 7월 5일 이후, 액위는 일정한 비율로 감소하였고, 8월 10일경에 공동은 완전히 비었다.



(a) In cavern region



(b) Whole model region

Fig 1. Initial and boundary condition for 2D simulation

3.3 열전달 해석결과

해석을 통하여 계산된 온도는 현장 측정결과와 매우 비슷하였다. 가스와 stainless steel사이의 대류열전달계수는 $0.114 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로서, 공동상부의 암반온도를 이용하여 보정한 값이다. 그러나 공동상부의 콘크리트와 jointmeter JMS4로부터 측정된 온도를 사용하여 보정한 결과, 계수값은 $3 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 계산되었다.

콘크리트와 jointmeter의 온도가 실제 정확한 위치에서 측정된 점을 감안하면, $3 \text{ W/m}^2\text{C}$ 가 더욱 적절한 것으로 판단된다. 따라서 이후 연계해석은 이 값을 사용하여 수행되었다.

3.4 연계해석결과

더욱 가능성 있는 초기 지하수위를 구하기 위하여, 3% 공극률과 2가지 지하수위 조건(공동바닥으로부터 -3m와 -10m 이격거리)을 가지고 해석한 결과를 배수시스템이 중지된 후 1주일동안 측정된 지하수위와 비교하였다. -3m의 초기수위의 해석결과가 -10m 수위조건에 비하여 더욱 측정값에 가까운 것으로 나타났다.

유효 공극률 2%, 3% 및 4%의 조건에서 수행된 Ice Ring 형성과정 수치모사결과는 주로 각각의 지하수 온도분포에 초점을 맞추어 그림 2, 3 및 4에 나타내었다. 공동하부의 암반내 Ice Ring은 다른 부분에 비하여 훨씬 두껍게 나타났다. 심지어 암반의 공극률이 다르다할지라도, 지하수내 온도분포는 거의 유사하다. 이것은 지하수 유동이 공극률 2~4% 범위에서 매우 느리기 때문이다.

공극률 2%의 경우, 공동에서 떨어진 곳에 Ice Ring이 형성되어 지하수가 공동에 닿지 않았다. Ice Ring의 두께는 공동 상부에 비해 온도가 더 낮은 공동 하부에서 최대 2m 로 형성되었으나, 8월 10일까지 Ice Ring은 공동의 천장부분에 형성되지 않았다. Ice Ring형성 후엔 열전달에 의하여 두께는 점차 증가하는 경향을 보여준다.

암반의 공극률이 3%로 높아지면, Ice Ring은 공동 하부 모서리부분에 닿게 된다. 공동의 상부는 공동에서 떨어진 지점에 Ice Ring이 형성되어 지하수가 닿지 않는다. Ice Ring의 두께를 보면, 8월 10일에선 2%일 때와 비슷한 두께를 보여준다.

암반의 공극률이 4%로 증가했을 경우에는 지하수가 공동에 닿은 후, Ice Ring이 형성된다. 공동의 상부에선 지하수가 공동에 직접 닿지는 않지만, 매우 근접하여 Ice Ring이 형성됨을 알 수 있다.

본 해석에서 강우에 의한 침투는 고려하지 않았음을 감안한다면, 이를 고려할 경우 Ice Ring의 형상은 해석결과와 다소 다를 것으로 여겨진다.

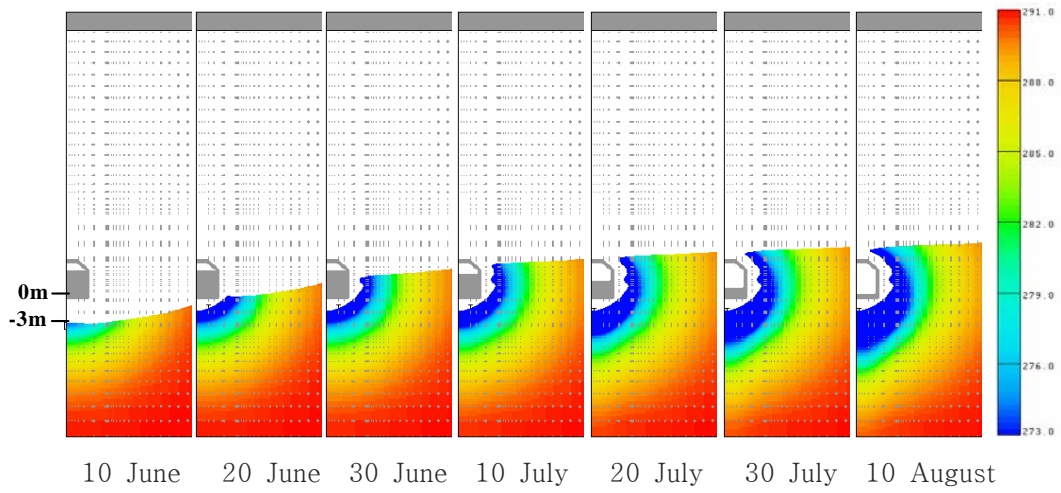


Fig 2. Formation of Ice Ring and groundwater temperature for porosity of 2%

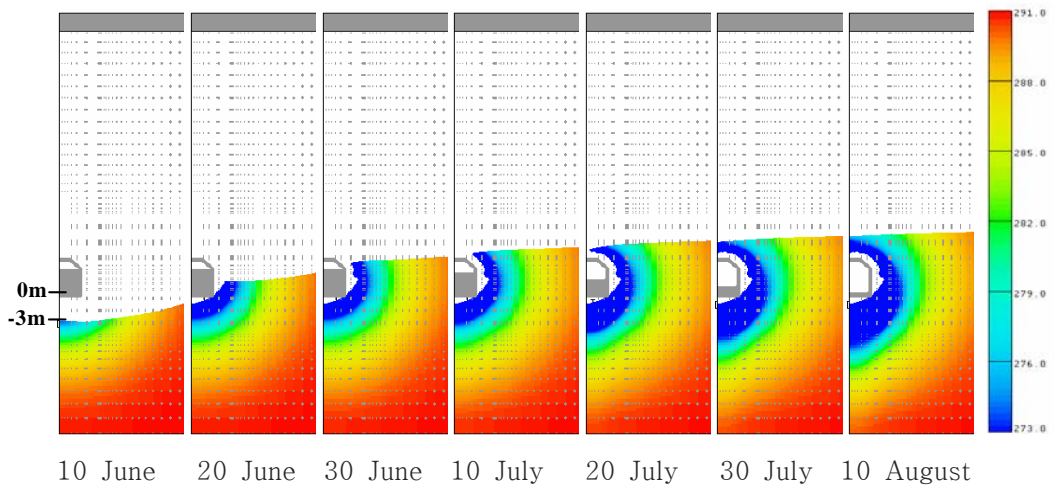


Fig 3. Formation of Ice Ring and groundwater temperature for porosity of 3%

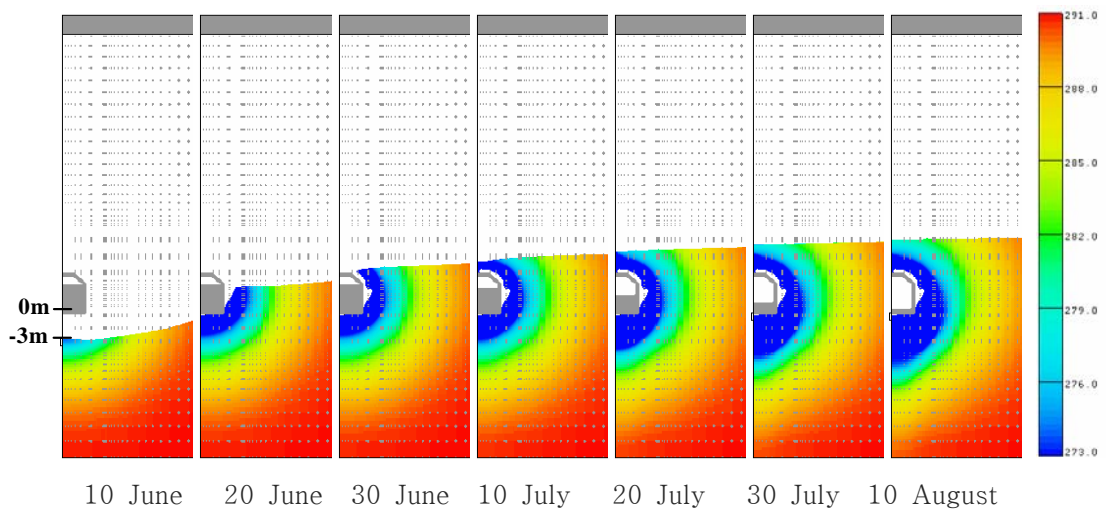


Fig 4. Formation of Ice Ring and groundwater temperature for porosity of 4%

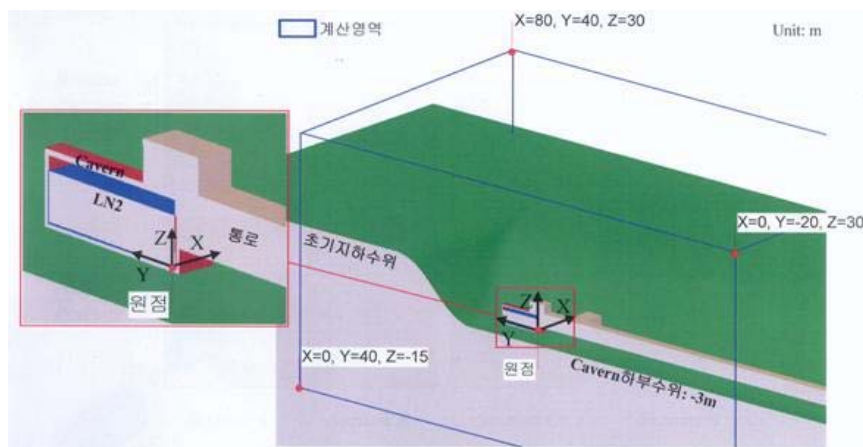
4. 3차원 수치모사

4.1 모델링 조건

3차원 수치모사에서서는 열전달과 응고문제를 고려한 유동계산을 실시하는데, 해석영역은 저장공동의 통로쪽 하단을 기준점으로 하고, 저장공동의 길이방향을 중심으로 대칭 해석한다. 그림 5 (a)는 실제 Pilot Plant의 3차원 조감도를 보여주며, (b)는 3차원 수치모사에 사용된 해석 개념을 보여준다. 저장공동 벽면의 단열재들은 하나의 부재로 적용한다. 즉, Steel, PU-Form 및 콘크리트의 열저항을 하나의 열저항체로 치환해서 해석에 적용한다.



(a)



(b)

Fig 5. (a) Bird's eye of view of LNG pilot cavern (b) Initial and boundary condition for 3-D simulation

지하수 배수가 부분적으로 중단된 7월 10일까지는 비연계 열전달 해석이 수행되었고, 그 이후 7월 10일부터 8월 10일까지 열전달과 다공질 유동이 연계된 해석이 수행되었다. 정상 LN2 수위는 바닥 멤브레인으로부터 2.6m의 높이로 7월 5일까지 유지되었다. 7월 5일 이후, 액위는 일정한 비율로 감소하였고, 8월 10일경에 공동은 완전히 비었다 (그림 6 참조). 지하수와 주변암반의 초기 온도는 291K(18°C)로, 또한 저장공동 내부로의 통로는 일정한 온도(18°C)를 적용한다. 지하수의 결빙온도는 0°C(273K)로 가정하였다. 초기 지하수위는 저장공동 직하부에서 아래로 -3m의 수위를, 지하수가 유입되는 경계면에서는 초기 수위가 유지될 수 있는 일정 수위조건을 적용하였다.

Pilot cavern에서 LNG 지하저장방식에 대한 검증을 위하여 다음과 같은 실증실험을 수행하였다.

- 기밀성 시험: 시공 완료된 저장공동 내조시스템의 기밀성 확인 (헬륨가스 이용)
- 질소 치환: 액화가스 주입시 공동 내 존재하는 공기의 액화를 방지함
- Cool Down 및 가스 주입: 액화가스를 서서히 주입하면서 바닥온도가 -190°C에 이를 때 본격적인 주입 개시
- 주변암반 동결: 최고 액위를 6개월간 유지시켜 저장공동 주변암반을 동결시킴
- 저장 액화질소의 기화: 자연적인 기화에 의해 저장공동을 비움
- 온도회복: 자연 상태로 온도가 회복될 때까지 해빙시킴

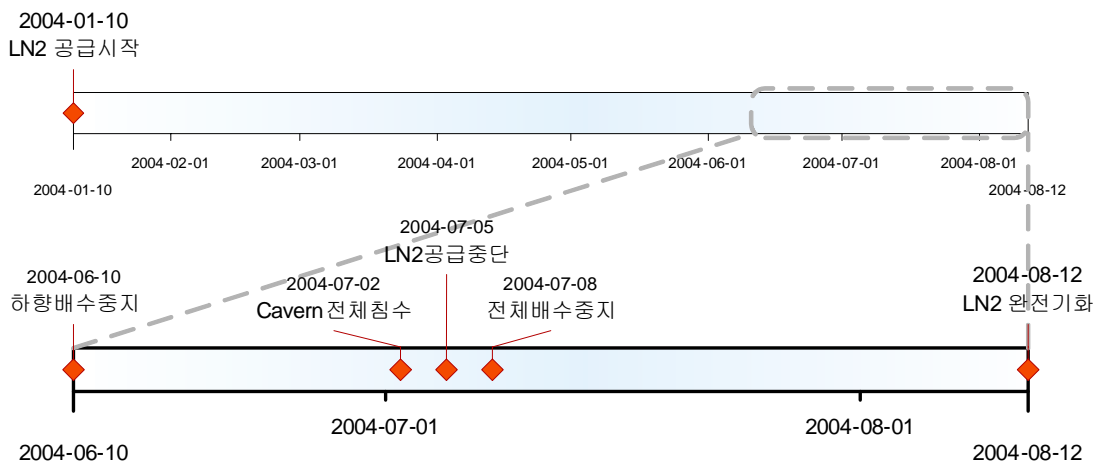


Fig 6. Schedule for LNG underground pilot cavern

연계해석을 수행하기 전, 북쪽 벽 앞의 지하수위는 2차원 수치모사에 사용된 해석단면과 동일한 것으로 가정하였다. 이것은 배수 시스템이 북쪽 벽앞의 암반에 대해서도 동일하게 유효하다는 것을 의미한다. 진입터널의 유무에 따른 영향은 공동 내부로의 통로가 있을 경우와 없을 경우 두 가지 경우에 대해서 해석하였다. 강우에 의한 지표면을 통한 침투는 고려하지 않는 것으로 하였다. 가스에 의해 채워진 멤브레인의 대류열전달계수는 2차원 수치모사에서 검증이 된 $3 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 가정하였다.

4.1 연계해석전의 온도분포

연계해석전의 온도분포를 나타내기 위한 각 단면은 그림 7과 같다. A단면은 남쪽 벽 근처의 단면을 나타내고, B 단면은 중앙부 단면, C 단면은 북쪽 벽 근처의 단면을 나타내는 반면, D 단면은 pilot cavern의 종방향 단면을 보여준다.

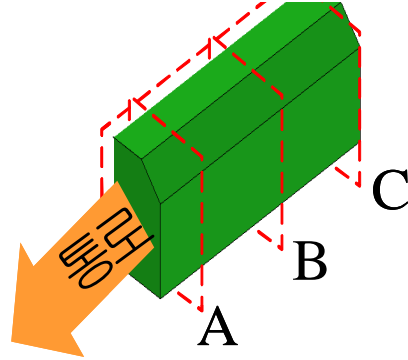


Fig 7. Each section for representing the result of 3-D simulation

일정한 대기온도를 가진 진입터널을 고려한 경우(with passage), 단면 A를 따르는 천장부 암반내 냉각(cooling-down)은 Ice Ring을 형성하기엔 충분하지 않았다. 단면 D에서 보는 바와 같이, 남쪽 벽 콘크리트와 접촉하는 암반내 냉각 또한 Ice Ring을 형성하기에 충분하지 않았다. 그러나 Ice Ring 형성 위치를 파악하기 위한 물리탐사의 초기자료 분석에 의하면, 남쪽 벽에 접하는 암반내에 얼음 고결화(Ice solidification)가 발생된 것으로 나타났다 (Fig 8. 참조). 상기의 해석결과로부터 공동 상부의 platform 근처 암반내 온도는 Ice Ring을 형성하기에 충분하지 않은 것으로 예측되나, 온도 분포는 측정결과와 매우 유사한 것으로 나타났다.

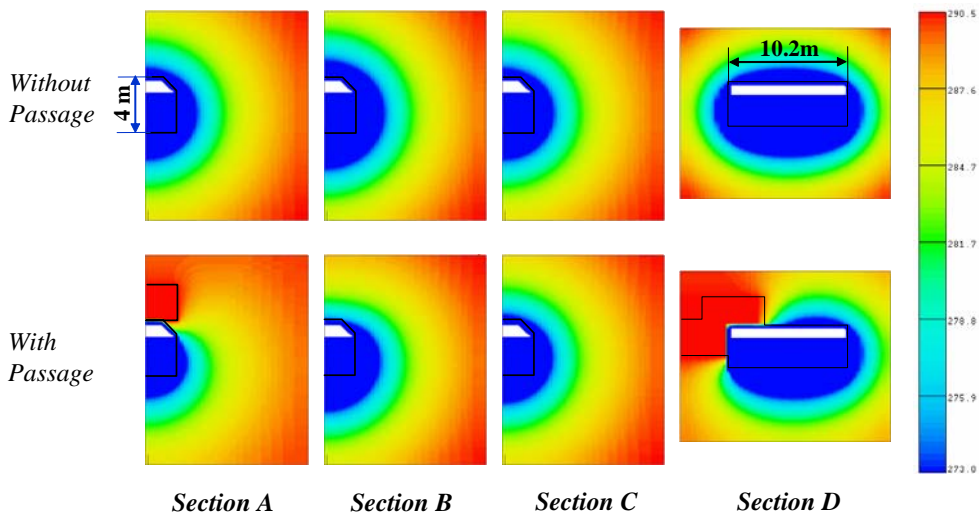


Fig 8. Initial temperature profile before starting coupled heat transfer-flow analysis

4.2 Ice Ring 형성 모사결과

유효공극률 1%와 3% 조건의 Ice Ring 형성과정이 그림 9과 10에 나타나 있으며, 진입터널이 고려되지 않았을 때 각각의 지하수 온도분포를 보여주고 있다. 3차원 해석의 경우, 배수 중지이후 주변 암반으로부터 사방에서 지하수 공급이 충분히 되었다고 가정하였기 때문에, 실제 상황과 2차원 해석에 비하여 3차원 해석에서 Ice ring이 공동에 더 가깝다.

공극률이 1%일 경우, Ice Ring 내부의 건조영역은 단지 단면 B에서만 최대 2m 두께로 형성되었고, 단면 A와 C에선 건조한 암반영역이 매우 좁게 나타났다. 공동의 측벽부와 하부에 지하수가 닿지 않는 영역이 발생하였다 (그림 9 참조).

공극률이 3%일 경우, Ice Ring 내부의 건조영역은 단지 단면 B에서만 최대 0.5m 두께로 형성되었으나, 단면 A와 C에선 건조한 암반영역이 나타나지 않았다. 공동의 길이방향 중앙부에는 넓은 영역에서 지하수가 닿지 않는 영역이 발생하지만, 끝부분에는 대부분의 영역에서 지하수가 공동에 닿았다 (그림 10 참조).

5. 결 론

LNG Pilot 부지에 여러 번 실시된 물리탐사 초기자료를 근거로 Ice Ring 형성의 2차원 수치모사를 비교한 결과, Ice Ring의 형성과정은 매우 유사함을 알 수 있었다. 이것은 다공질 매질의 유동해석이 배수 중단이후 지속적인 지하수 공급이 되는 것으로 가정하기 때문이다. 이러한 가정의 영향은 일반적으로 3차원 모델링의 필요성을 더욱 요구하게 만든다.

수치모사로부터 얻어진 열전달과 Ice Ring 형성에 관한 몇 가지 중요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 10cm 두께의 단열재를 가진 내조시스템의 경우엔, 가스를 포함하는 천장 멤브레인을 통한 대류열전달계수는 약 $3 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 계산되었다. 30cm 또는 40cm의 더 두꺼운 비보장 PU foam을 가진 내조시스템이 사용된다면, 계수값은 약 0.1 또는 $0.01 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 감소할 것이다. 이러한 열전달계수의 고려는 공동 상부의 암반에서는 매우 중요하기 때문에 합리적인 수치 해석적 방법을 통하여 표준 단열기준을 가진 전체 공동모델을 위한 적절한 계수 범위가 구해져야만 한다.
- 2) LNG 저장으로 인하여 발생된 암반의 온도저하로 공동 주변에 형성되는 Ice Ring은 지하수 배수 시스템이 효과적으로 작용함으로써 쉽게 형성될 수 있다. 이는 10^{-7} 에서 10^{-6} m/s 의 수리전도도를 가진 암반에서 0°C 등온선의 공동벽면으로부터의 평균 깊이가 공동 벽면으로부터 3 또는 4m에 이른다는 가정에 근거한 것이다.
- 3) 실험실 시험으로부터 구해진 건조암석의 열물성을 대입한 수치계산은 공동 주변 암반의 실제 온도분포를 효과적으로 예측할 수 있게 한다.
- 4) 0°C 등온선의 지속적인 전파를 유지하기 위해서는 공동 각 끝 면에 인접한 지하수는 효과적으로 배수되어야만 한다. 특히 어떠한 단열재 또는 등가의 재료도 공동의 각 끝 면에서 조심스럽게 적용되어야만 한다.

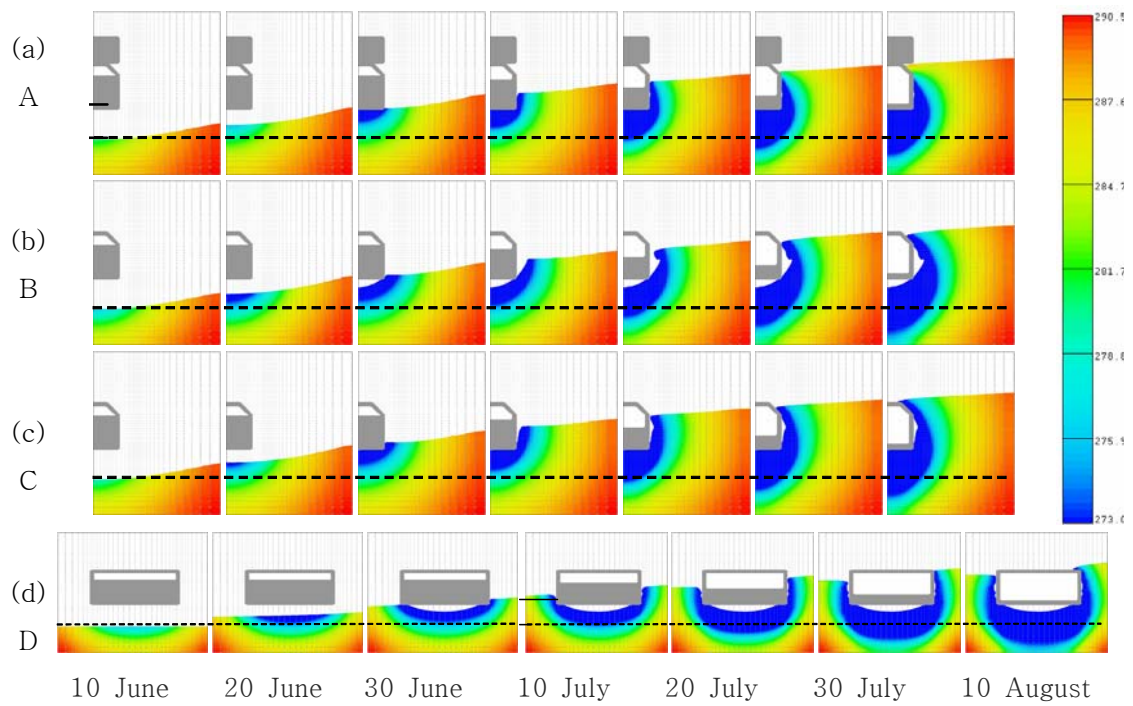


Fig 9. Process of ice ring formation and corresponding groundwater temperature for rock porosity of 1%

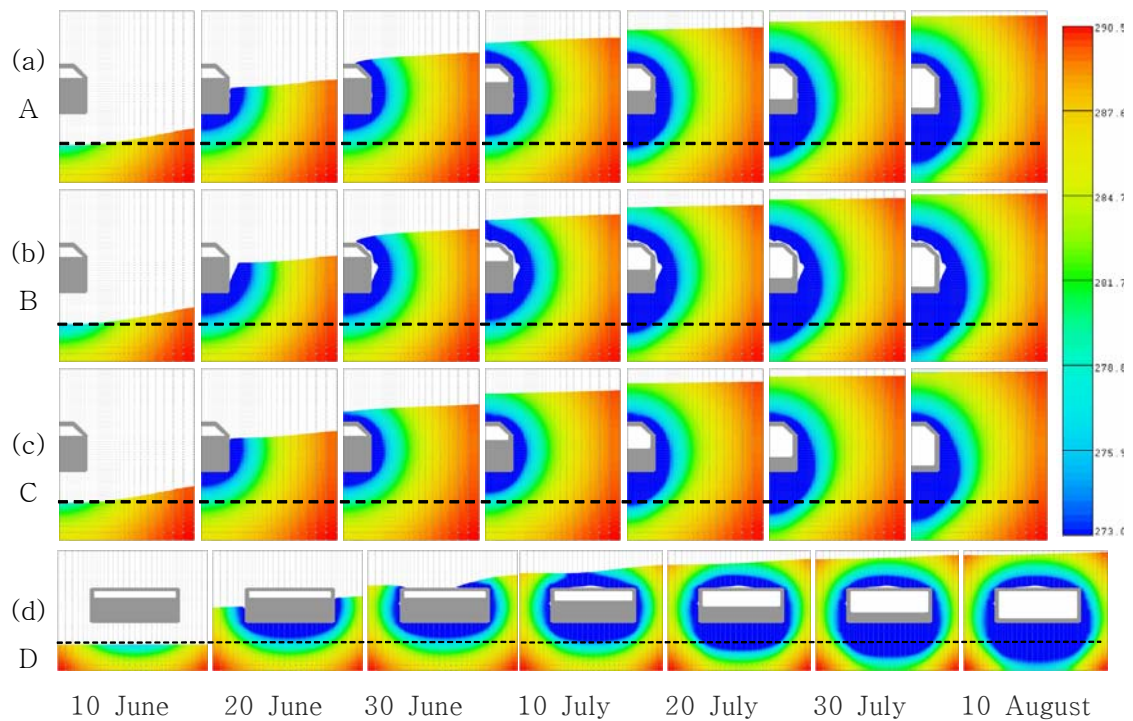


Fig 10. Process of ice ring formation and corresponding groundwater temperature for rock porosity of 3%

■ 참고문헌 ■

1. 이대혁, 이철욱, 이희석, 김호영, 정소걸, 한공창, 2004, 대전 LNG Pilot Cavern 건설공사 요약 및 초기 계측자료 분석 결과 - 암반공학적 측면을 중심으로, 2004 한국 암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.85-99.
2. 한국지질자원연구원, 2004, LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영 결과 분석 연구(2차년도), 144p.
3. Amantini, E. and Chanfreau, E., 2004, Development and construction of a pilot lined cavern for LNG underground storage. 14th International conferences & Exhibition on Liquefied Natural Gas, Doha, Qatar, March 21-25, 2004, PO-33.
4. Bronisz C.L. and Hirt C.W., 1991, Unsaturated flow in porous media - A Flow-3D extension, Technical Report, Flow Science, Inc., FSI-91-TN25R.
5. Dalström, L.O., 1992, Rock mechanical consequences of refrigeration - a study based on a pilot scale rock cavern. Ph.D Thesis, Chalmers University of technology, Gothenburg, Sweden.
6. Glamheden, R. and Lindblom, U., 2002, Thermal and mechanical behaviour of refrigerated caverns in hard rock. Tunnelling & Underground Space Tech. 17, pp. 341-353.
7. Kingery, W.D., Bowen, H.K and Uhlmann, D.R., 1976, Introduction to Ceramics, Wiley Inter-science Publication, New York.
8. Lee, D.H., Kim H.Y., Gatelier, N. and Amantini, E., 2003a, Numerical study on the estimation of the temperature profile and thermo-mechanical behaviour in rock around the Taejon LNG Pilot Cavern. International Symposium on the Fusion Tech. of Geosystem Eng., Rock Eng. And Geophys. Exploration, Seoul, Korea, Nov. 18-19, 2003, p.233-237.
9. Lee, D. H., Lee, C.W., Do, H.L., Kim H.Y., Bodin, and J. Amantini, E., 2003b, A case study on the efficiency test of groundwater drainage system for Taejon LNG Pilot Cavern. International Symposium on the Fusion Tech. of Geosystem Eng., Rock Eng. And Geophys. Exploration, Seoul, Korea, Nov. 18-19, 2003, p 711-715.