

## 지하 LNG 저장기지에서의 Ice Ring 생성 시 절리간극 변화에 대한 연구

정우철, 김택곤, 이진무, 김호영, SK건설주식회사  
박의섭, 정소걸, 한국지질자원연구원

### 1. 서론

LNG 운반선 및 지상탱크의 멤브레인에 사용되는 단열 내조(containment) 시스템에 새롭게 개발된 지하수 배수 및 동결링(Ice Ring) 개념을 결합하여 개발된 복공식 LNG 지하 저장 기술은 다년간의 부단한 연구개발로 인해 현재 상용화 단계에 와 있는 상태로(이대혁 외, 2004a, Lee et al., 2006), 실규모 프로젝트의 수행에 있어 보다 경제적인 시공과 최초로 수행되는 사업에 대한 Risk의 최소화를 위한 세부적인 연구가 필요하였다.

복공식 LNG 지하 암반 저장의 핵심기술 중 하나인 동결링 형성 기술은 지하 암반과 지하수의 열특성과 수리지질특성의 복합적인 메카니즘에 의해 규명이 가능한 기술로, 대전 LNG Pilot Plant의 설계, 시공 및 운영을 통해 실증 적용되었으며, 여기서 얻어진 계측결과와 수치해석 결과와의 비교한 연구 논문들을 통해 검증된 바 있다(정우철 외, 2006, 정용복 외, 2006, Jeong et al., 2006).

기존 연구를 통해 동결링 설계의 핵심은 ① LNG 주입 후 0℃ 등온선 전과 거리 ② 동결링 생성 시 0℃ 등온선 내 지하수 침투 거리 ③ 동결링 생성 시, 생성 후 절리 간극에 미치는 영향으로 요약될 수 있다. LNG 주입 후 0℃ 등온선 전과 거리는 배수시스템 가동 기간 설계에 영향을 주며, 암반의 열특성(열전도도, 열용량)과 LNG 및 저장공동 주변 암반의 초기온도에 의해 예측될 수 있다는 것이 확인되었다(정우철 외, 2006). Ice Ring 생성 시 0℃ 등온선 내 지하수 침투거리는 저장공동 내에 설치된 내조시스템과 공동 주변 암반의 안정성이 동결팽창압에 의해 영향을 받을 수 있다는 점에서 설계 시 필수적으로 확인되어야 할 사항이며, 배수 종료 후 지하수 상승속도와 절리의 간극에 주로 영향을 받는 것으로 확인되었다(정우철 외, 2007)

동결링 생성 시와 생성 후에 절리 간극에 미치는 영향은 저장공동 주변 암반의 안정성에 영향을 주는 주요 설계 요소로, 본 논문에서는 이에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 동결링 형성 시 절리 간극에 미치는 영향

### 3.1 동결링 형성과 상변화

동결링 형성의 개념은 그림 1에서 잘 설명되어 있다. 공동 주변과 하부에 배수공을 설치하여 굴착과 함께 공동 주변의 지하수를 완전 배수시키고, 공동 내부에 내조시스템을 완성한 후  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 극저온의 LNG를 저장 운영하게 되면 공동 주변 암반의 온도가 점차 낮아지게 된다. 지하수가 동결하게 되는 온도인  $0^{\circ}\text{C}$ 의 등온선은 저장시간이 증가할수록 공동 주변으로 전파되어 나가게 되며, 공동과 충분한 거리까지 전파되었을 때, 지하수 배수를 점진적으로 중단하면 지하수가 상승하여  $0^{\circ}\text{C}$  등온선과 만나 동결되어 동결링이 형성되게 된다.

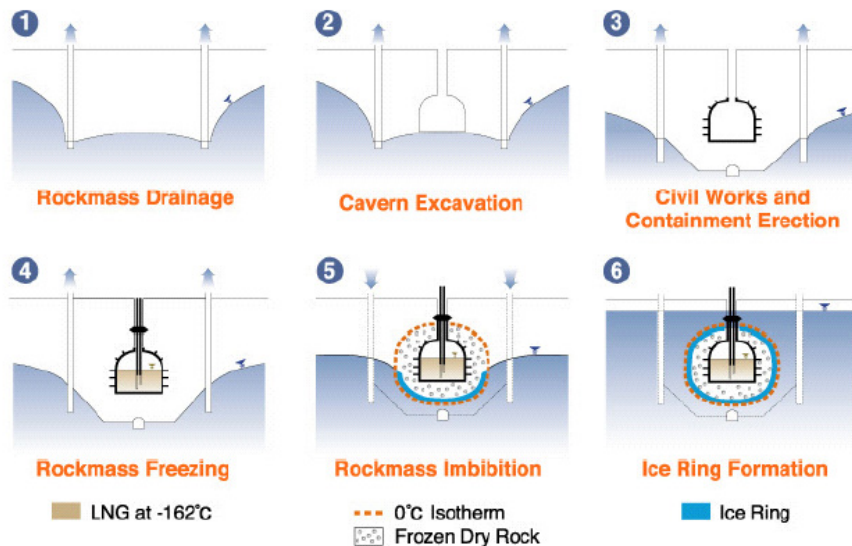


그림 1. 동결링 형성 개요도

동결링 형성 시 상변화에 관련하여 예상되는 현상에는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 Cryo-suction으로 그림 2와 같이 Water(지하수)와 Ice(얼음)가 공존하는 구간에서 지하수가 얼음으로 상변화 할 때 발생하는 흡인력(suction pressure)을 말한다. 여기서 물과 얼음이 공존하는 구간은  $0^{\circ}\text{C}$  등온선에서부터  $0^{\circ}\text{C}$  등온선 안쪽 지하수가 침투하는 구간까지이며, 기존 연구에서는 지하수가 침투하여 동결 완료된 구간의 암반온도를 ‘지하수 동결온도’로 명명하였다(정우철 외, 2007). 지하수 동결온도에 대한 국내외 연구결과에 따르면  $-3^{\circ}\text{C} \sim -2.5^{\circ}\text{C}$  정도인 것으로 알려져 있으나(이규상 외, 2004), 이는 배수 종료 후 절리면 내 지하수의 상승속도와 절리면의 평균 간극에 따라 달라질 수 있다(정우철 외, 2007).

동결이 형성 시 나타나는 다른 하나의 현상은 지하수가 얼음으로 완전히 상변화된 후 9% 부피가 팽창하는 Swelling 효과이다. 물은 다른 액체와는 달리 얼음

으로 상변화 할 때 층을 이룬 분자 간 간격이 벌어지면서 부피가 팽창하게 되는데, 완전히 밀폐된 상태에서 상변화를 하게 되면 팽창하려는 힘이 엄청난 압력으로 작용하게 된다. 하지만 그림 2에서와 같이 동결링 생성 시에는 저장공동 쪽의 절리면 내에는 대기압 상태로 압력이 작용하지 않게 되고, 이러한 Swelling 효과에 의해 절리가 벌어지는 현상이 발생하기 보다는 상변화 하면서 저장공동 방향으로 팽창할 것으로 예상된다.

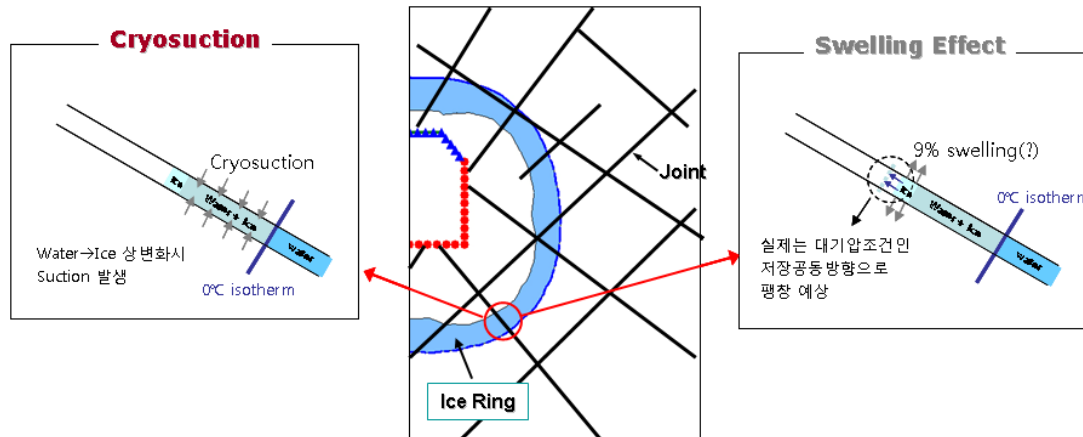


그림 2. 동결링 형성 시 상변화와 관련하여 발생하는 현상

### 3.2 다공질 매질(Porous media)에서의 Cryo-suction

Cryo-suction이란 액체가 고체로 응고 시 상변화된 질량에 비례하여 잠열(Latent heat)이 발생하고, 배출하는 에너지만큼 분자 내 에너지(Potential energy)가 감소하여 응축 현상이 발생하는 것을 말한다. 겨울철에 지표면(토사층)이 동결될 때, 토사층 내 공극수(Pore water)의 상변화로 인해 하부 지하수의 삼투압 증가현상이 나타나는데, 이러한 현상이 Cryo-suction의 대표적인 사례이다. 그림 3에서 지하수위 상부 토사층에 남아있던 공극수가 동결되면서 흡인력이 발생하고, 지하수위가 이러한 흡인력으로 인해 일정 높이로 상승하게 된다.

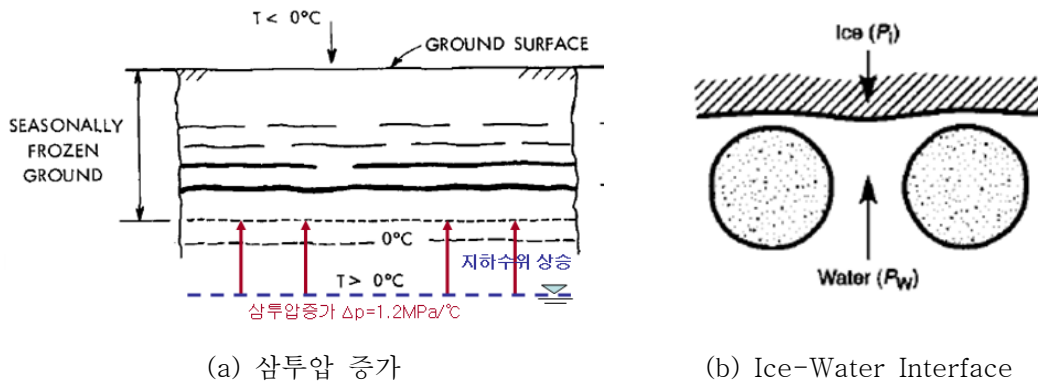


그림 3. Cryo-suction에 의한 삼투압 증가

Black(1995)은 다공질 매질에서 온도변화에 따른 물과 얼음의 압력변화에 관한 연구를 통해 Cryo-suction을 정량적으로 규명하였다. 이 연구에서는 Gibbs equation에서 아래와 같이 유도된 Clapeyron equation을 적용하였다.

물과 얼음의 Chemical potential( $\mu$ )은 Gibbs equation에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_w = V_w dP_w - S_w dT \quad (1)$$

$$\mu_i = V_i dP_i - S_i dT \quad (2)$$

여기서, V와 S는 각각 몰부피와 엔트로피이며, P와 T는 각각 절대압력 및 절대온도이다.

그림 4에서처럼 물-얼음의 경계(Interface)에서는 물과 얼음의 평형조건(Equilibrium condition)에 의해  $\mu_w = \mu_i$ 가 되며 아래와 같이 Clapeyron 일반식이 유도될 수 있다.

$$V_w dP_w - V_i dP_i = (S_w - S_i) dT = \frac{\Delta H_{wi}}{T_0} dT \quad (3)$$

여기서,  $\Delta H_{wi}$ 는  $T_0(273.15K)$ 에서의 물-얼음 fusion의 몰 열량(molar heat)이다.

섭씨 단위 온도( $\theta = T - T_0$ ), 물과 얼음의 게이지 압력( $u = p - p_0$ ), 잠열( $h = \Delta h_{wi} / V_w$ )을 이용하여 식을 정리하면,

$$du_w - \frac{du_i}{\gamma_i} = \frac{h}{T_0} d\theta \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는 물-얼음 fusion의 단위부피당 잠열(volumetric latent heat)이며,  $\gamma_i$ 는 얼음의 비중으로  $V_w / V_i$ 와 같다.

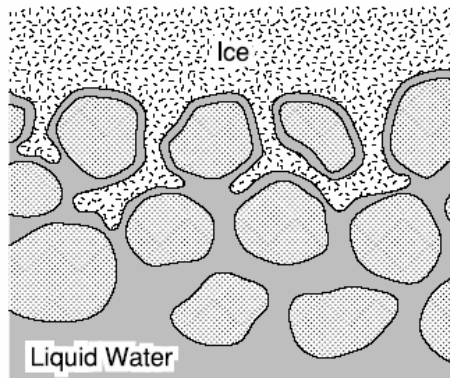


그림 4. 다공질 매질에서의 물-얼음 Interface

Black은 다공질 매질에서 상기 정의된 Clapeyron 일반식을 적용하기 위해 각 Case별로 이론식을 단순화한 Miller et al.(1960)의 실험 결과를 활용하였다(그림 5 참조). 이 실험에서는 총 5개의 case에 대해 가정하여 Clapeyron 일반식을 정리하였으며, 이 중 주요 세 가지 case를 요약하면 다음과 같다.

$$\text{CASE 1 : } d\theta = f(du_i, du_w), du_i = du_w \quad (5)$$

$$\frac{dU}{d\theta} = \frac{h\gamma_i}{T_0} \frac{1}{\gamma_i - 1} = -13.49 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$$

$$\text{CASE 2 : } d\theta = f(du_w, du_i), u_w = \text{constant} \quad (6)$$

$$\frac{du_i}{d\theta} = \frac{-h\gamma_i}{T_0} = -1.12 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$$

$$\text{CASE 3 : } d\theta = f(du_w, du_i), u_i = \text{constant} \quad (7)$$

$$\frac{du_w}{d\theta} = \frac{h}{T_0} = 1.22 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$$

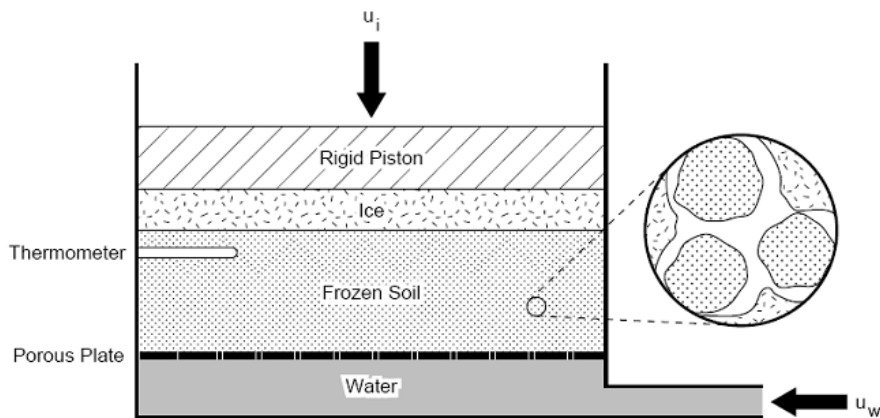


그림 5. 다공질 매질에서의 Cryo-suction 실험 개요도 (Miller et al.,1960)

### 3.3 동결링 형성 시 절리 간극에 미치는 영향

지하 LNG 저장기지에서 지하수의 상변화에 의해 저장공동 주변 암반에 미치는 영향은 다음의 두가지로 요약될 수 있다. 하나는 LNG 주입 후 저장공동 주변에 잔류 지하수(Residual water)가 남아있어 동결팽창압이 발생하는 경우이고, 다른 하나는 배수 종료 후 지하수 복원으로 동결링 생성 시 Cryo-suction이 발생하는 경우이다.

첫 번째 경우는 그림 6a에서처럼 일부 구간에 잔류수가 남아있는 경우를 나타내는데, 이런 경우가 발생하는 이유로는 국부적으로 절리가 밀폐된 상태를 이루어서 배수시스템의 영향이 미치지 못하거나, 배수가 전구간 충분히 되었어도 상

부에서의 함양률이 커서 LNG 주입 후에도 계속 상부에서 물이 유입되는 경우가거나, 절리면 내 점토가 다량 충전되어 배수 후에도 절리면 내 비보유율(Specific retention)이 큰 경우를 예상할 수 있다. 남아있는 잔류수가 소량인 경우는 일반적으로 동결팽창압이 큰 영향을 미치지 못하지만, 국부적으로라도 밀폐된 상태, 즉 포화상태로 잔류수가 남아있는 경우는 큰 압력의 동결팽창압이 작용하게 되어 암반의 안정성에 영향을 미칠 수도 있다. 이때의 물-얼음간의 평형 상태는 상기 제시된 CASE 1에 해당하며, 동결팽창압은  $-13.49 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ 의 압력이 작용하게 된다.

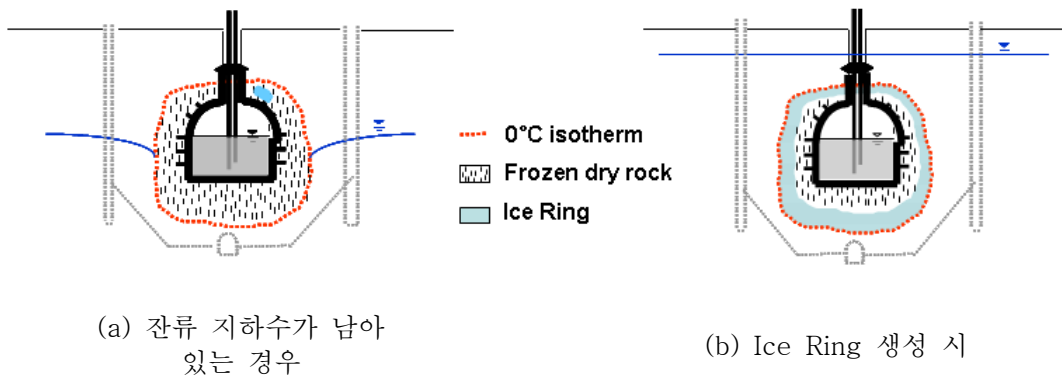


그림 6. 동결링 형성 시 Cryo-suction이 발생하는 경우

두 번째 경우는 그림 6b에서처럼 배수 종료 후 지하수가 상승하여 Ice Ring이 생성될 때 Cryo-suction이 발생하게 된다. 배수시스템이 중단되면 지하수가 공동방향으로 상승하게 되는데, 이때 LNG 주입으로  $0^{\circ}\text{C}$  이하로 냉각되어 있는 암반으로 다량의 지하수가 침투하게 된다. 상승하는 지하수가 얼음으로 상변화 하면서 생기는 잠열로 인해 Cryo-suction이 발생하게 되는데, 이는 절리내 지하수에 음의 간극수압이 작용하게 하여 절리 간극의 크기를 줄여주는 효과를 보이게 된다. 동결링 생성 시의 Cryo-suction은 동결링의 두께, 즉 ‘지하수 동결온도’에 도달할 때까지 지하수가 침투하는 거리가 커짐에 따라 많은 양의 지하수가 상변화 하게 되므로, 그 영향도 역시 커지게 된다.

### 3. 동결링 형성 시 Cryo-suction의 효과에 대한 모델링

#### 3.1 Cryo-suction의 정량화

지하 LNG 저장기지에서의 지하수 유동은 암반 절리면을 따라 흐르게 되는데, 상기에 제시된 Clapeyron 일반식을 적용하기 위해 동결링 형성 과정을 그림 7과 같이 단순화시켰다.

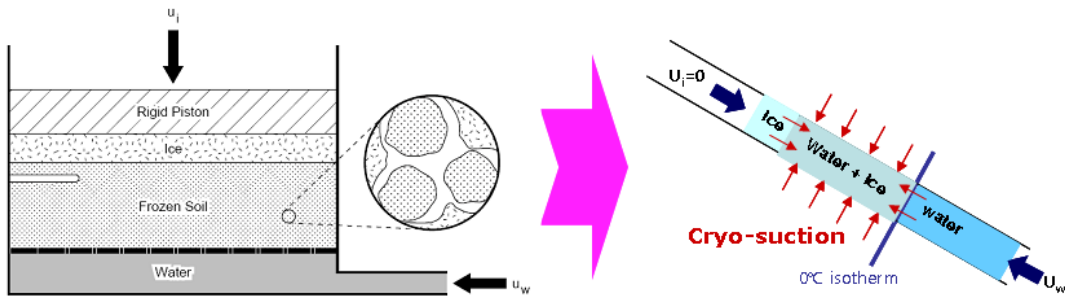


그림 7. 동결링 형성 과정의 단순화

상기에 언급한 바와 같이 상승하는 지하수가 0°C 등온선을 지나면 바로 동결되는 것이 아니라 일정 온도구간에서 물과 얼음이 공존하는 구간이 나타나고, 상승하는 지하수위가 이러한 구간이 끝나는 부분, 즉 ‘지하수 동결온도’에 도달하게 되면 완전히 얼음으로 상변화하게 된다. 이때부터는 지하수 동결 구간이 그림 7과 같이 물, 물-얼음(fusion), 얼음의 세 구간으로 나누어져 나타나게 된다. Ice Ring이 형성되는 시점 직후에서는 물-얼음 fusion 구간이 그림 7에서 모사된 것처럼 0°C 등온선과 어느 정도 거리를 두고 형성되지만, 시간이 지남에 따라 남아 있는 지하수가 완전히 얼음으로 바뀌며 물-얼음이 공존하는 구간은 점점 줄어들게 된다.

이렇게 물-얼음이 공존하는 구간에서 물이 얼음으로 상변화하는 과정에서 Cryo-suction이 발생하는데, 그림 7에서처럼 이는 순간적으로 절리면의 간극을 줄여주는 효과로 작용하게 된다. 또한, 상승하는 지하수압에 추가적인 압력이 작용하여 Ice Ring의 두께를 증대시키는 효과도 주게 된다.

그림 7의 동결링 형성과정은 Miller 등의 실험에서 단순화 시킨 Case 중 CASE 3( $u_i = constant$ )에 해당되며, 이 조건에서 계산된 Cryo-suction ( $\frac{du_w}{d\theta} = 1.22 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$ )를 바탕으로 수치해석을 수행하였다.

### 3.2 단순 절리모델 해석

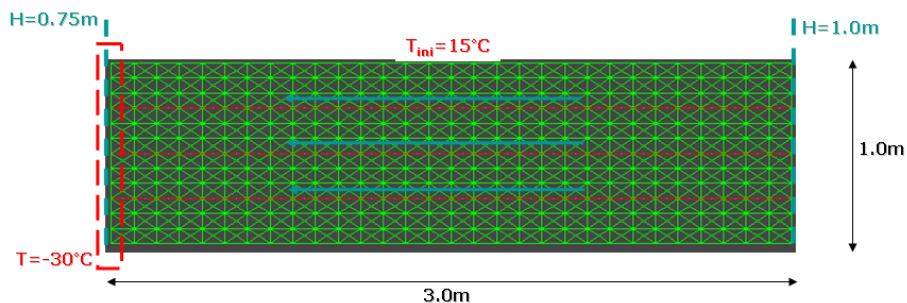


그림 8 해석 모델

Cryo-suction의 효과를 확인하기 위해 절리 개수가 3개인 단순 절리모델을 만

들어 샘플 해석을 수행하였다(그림 8 참조).

사용된 해석 Code는 UDEC(ver.4.0)이며, T-H-M 연동해석을 수행하였다. Cryo-suction 효과를 명확히 확인하기 위해  $-20^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$  구간에서 상변화하는 것으로 가정하였고, 그림 10과 같이  $0^{\circ}\text{C} \sim -2.5^{\circ}\text{C}$  구간에서 투수계수가 선형으로 감소하는 것으로 가정하여 해석하였다.

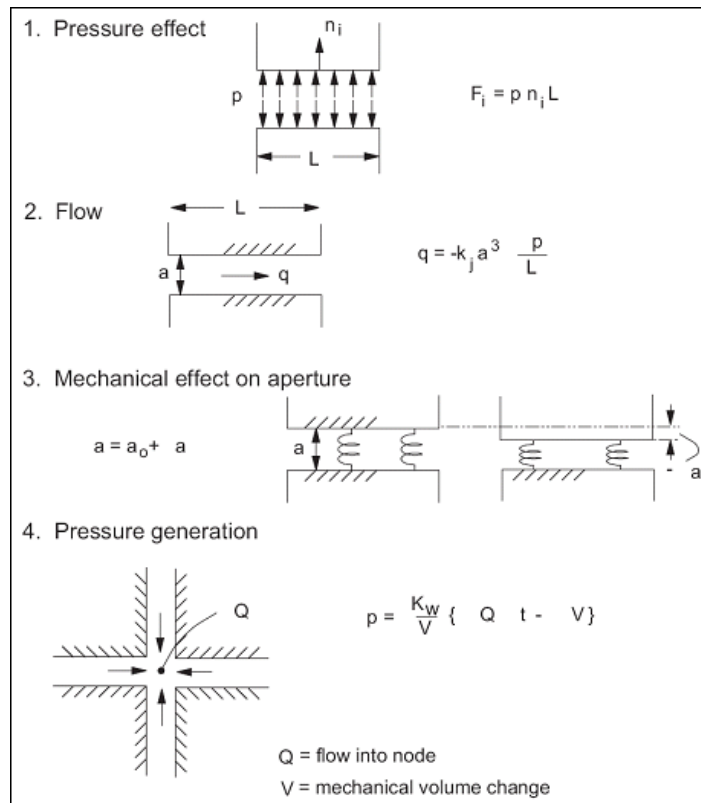


그림 9. UDEC에서의 THM 연동 해석

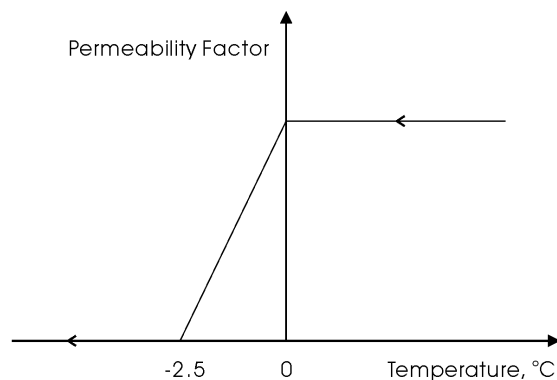


그림 10. 상변화 시 투수계수 변화

또한, 상기의 CASE 3 조건에 의해 Cryo-suction은 다음과 같이 계산되어 해



석에 반영되었다.

$$\text{If } -20^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C} \ \& \ \text{pore pressure(PP)} > 0 \quad (8)$$

$$\frac{du_w}{d\theta} = 1.22 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$$

$$\text{PP}' = \text{PP} + du_w < 0$$

UDEC 내에서 간극수압(Pore pressure)을 0이하로 저감시키기 위해 Two phase compressible flow model을 적용하여 해석하였으며, 해석시간은 20 시간 동안 수행하였다.

해석결과, 그림 11과 같이  $-20^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$  구간에서 상변화가 일어나 Cryo-suction이 발생하는 것이 확인되었다. 해석 모델 중앙부 절리에서의 간극 변위(Joint normal displacement)를 확인해 본 결과, 0.4mm 정도의 변위로 간극이 줄어든 것이 확인되었다.

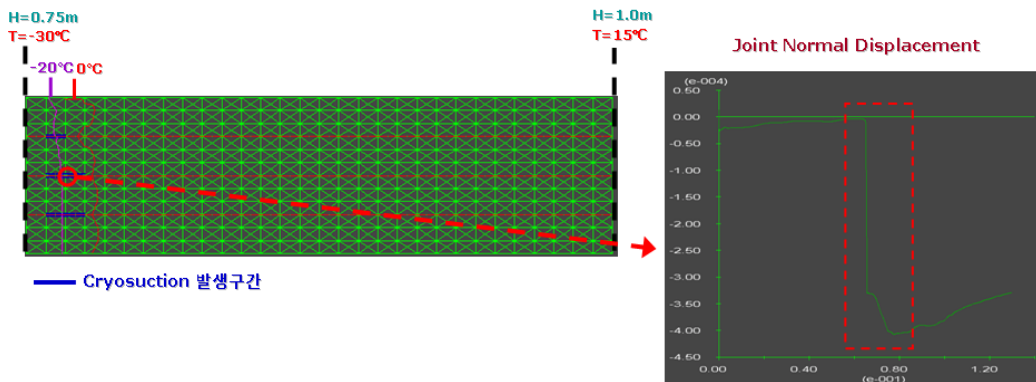


그림 11. 단순 절리모델 해석결과

### 3.3 대전 Pilot Plant 사례 해석

상기에 제시된 이론과 해석 결과를 바탕으로 2004년 대전 한국지질자원연구원 내에서 시공/운영을 완료한 LNG 지하저장 Pilot Plant 시설 사례에 대한 해석을 수행하였다. 또한, 운영기간 동안 공동 천단부 절리에 Jointmeter를 설치하여 측정한 절리간극 변화를 해석결과와 비교하였다. 해석 모델은 그림 12와 같다.

운영기간 중 저장공동 상부에 설치한 Jointmeter 계측 결과  $0^{\circ}\text{C}$  구간에서 suction 현상이 확인되었다. 그림 13에서 나타난 것처럼, LNG 주입 후 저장공동 주변 암반이 냉각되면서 냉열수축에 의해 절리간극이 온도변화에 비례하여 일정하게 벌어지다  $0^{\circ}\text{C}$  구간에서 급격하게 간극이 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이는 배수 종료 후 절리 내의 지하수가 유입되고 상변화에 의해 Cryo-suction이 발생하는 것으로 추정된다. 이후  $0^{\circ}\text{C}$  이하로 저장공동 주변 암반이 냉각되면  $0^{\circ}\text{C}$  이상 구간에서와 마찬가지로 온도가 하강함에 따라 냉열수축으로 인해 절리 간극이 벌어지는 것을 알 수 있다.

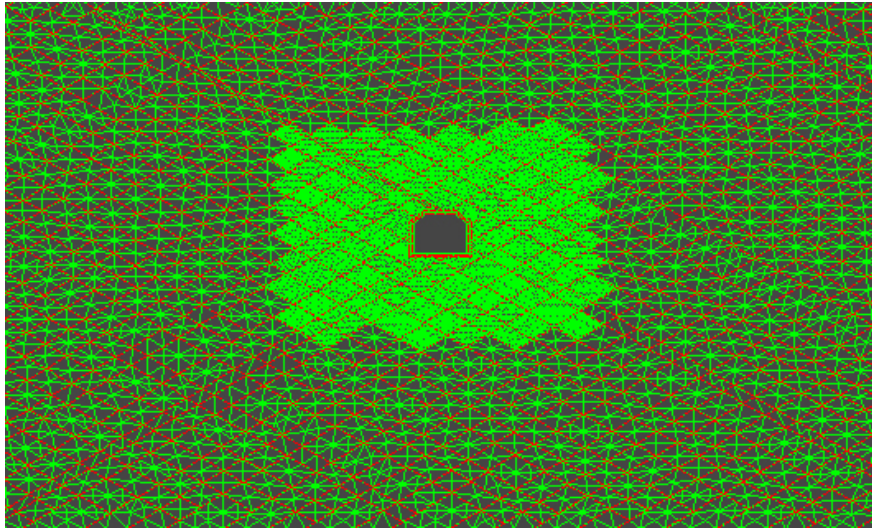


그림 12 대전 Pilot Plant 사례 해석 모델

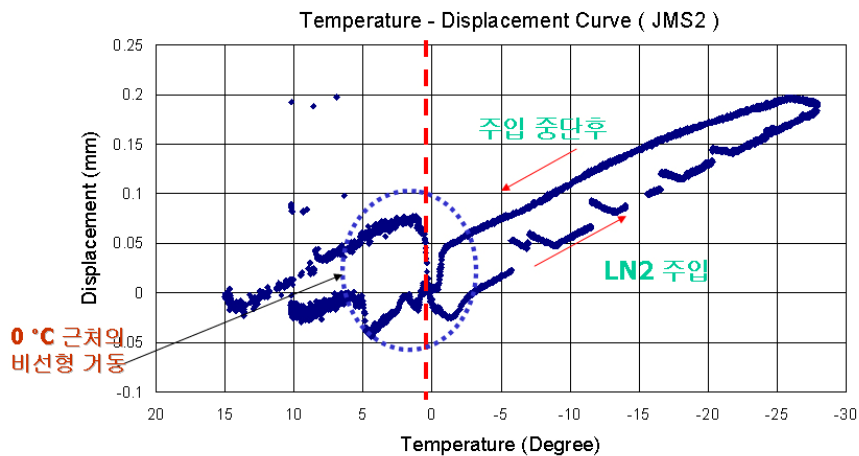


그림 13. 대전 Pilot Plant Jointmeter 계측결과

지하수 동결온도는 암반구간  $-2.5^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였고, 앞선 단순 질리모델과 마찬가지로  $0^{\circ}\text{C} \sim -2.5^{\circ}\text{C}$  구간에서 투수계수가 선형으로 감소하는 것으로 가정하여 해석하였다. 또한, 본 해석에서는 계산시간의 단축을 위해 Single phase steady state flow model로 적용하여 해석하였으며, 앞선 해석에서 다음과 같이 Cryo-suction 구성방정식을 수정하였다.

$$\text{If } -2.5^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C} \ \& \ \text{pore pressure(PP)} > 0 \tag{9}$$

$$\frac{du_w}{d\theta} = 1.22 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$$

$$F_{cryo} = du_w \times L_{cryo} \times n_i$$

여기서,  $F_{cryo}$  는 단위 절리길이 당 Cryo-suction에 의해 작용하는 인장력이고,  $L_{cryo}$ 는 Cryo-suction이 작용하는 단위 절리길이이다.

해석 순서는 그림 14와 같이 총 4개의 Stage로 나누어 수행하였다. 우선 저장 공동 굴착 및 초기화 시키고, 배수시스템을 가동하여 저장공동 하부까지 지하수위를 하강시키며, 내조시스템 설치 후 LN2 공급을 시작하여 지하공동 주변 암반을 냉각시키고, 배수시스템을 중지하여 동결랑을 생성시키는 순서로 해석을 수행하였다. Stage 4에서는 T-H-M 연동해석을 수행하였으며, 1일 간격으로 역학적-수리학적 해석과 열해석을 반복하여 수행하였다.

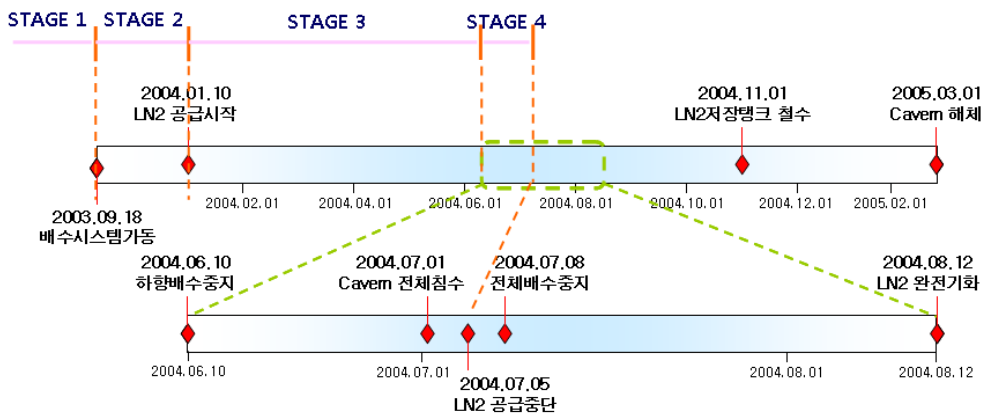


그림 14 대전 Pilot Plant 운영 절차

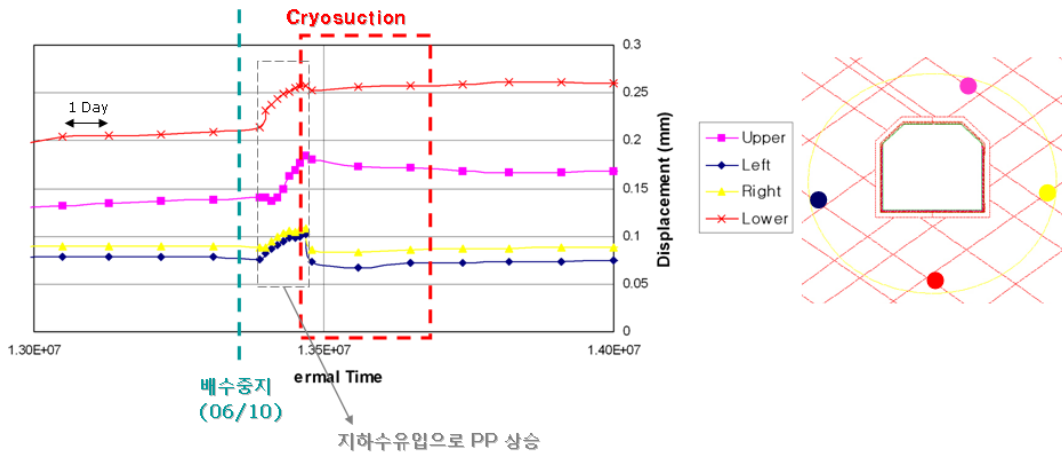


그림 15. 대전 Pilot Plant 사례 해석 결과-1  
(Joint displacement Vs. Time)

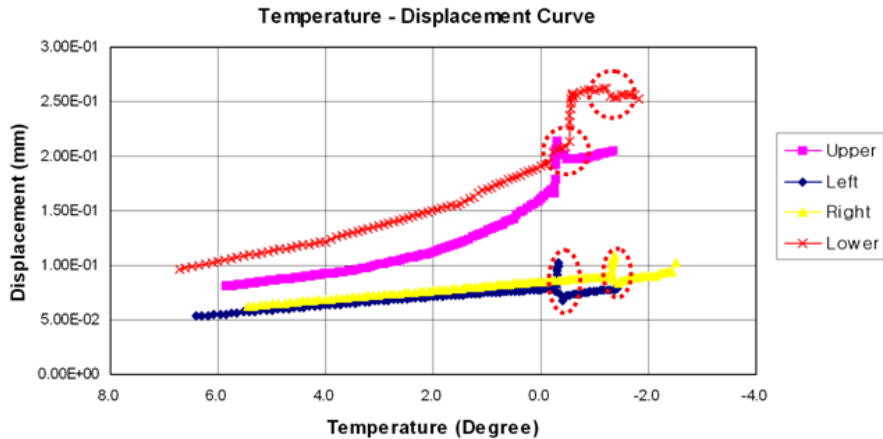


그림 16. 대전 Pilot Plant 사례 해석 결과-2  
(Joint displacement Vs. Temperature)

그림 15와 16은 이렇게 수행한 해석 결과를 보여주고 있다. 해석기간 동안 저장공동의 상단, 하단, 우측, 좌측부 절리의 4 point에서 간극 변화를 측정하였다. 그림 15에서 배수가 중단된 6월 10일 이후 절리간극은 다소 증가하였다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 지하수위 상승으로 인한 절리 내 간극수압 증가와 Cryo-suction이 순차적으로 나타난 결과이다. 실제 지하 LNG 저장기지에서는 지하수위 상승으로 인한 간극수압 증가와 Cryo-suction이 동시에 나타날 것으로 예상되나, 본 해석에서는 1일 단위로 역학적-수리학적 해석과 열해석이 반복되어 수행되었으므로 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

그림 16은 온도에 따른 절리 간극의 변화를 보여주고 있다. 해석 결과, 계측결과와 마찬가지로 온도가 감소함에 따라 암반수축으로 인해 절리간극이 점점 커지다가 0°C 아래로 떨어지면서 Cryo-suction 효과로 인해 절리간극이 순간적으로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 Cryo-suction 효과는  $-2.5^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$  구간에서 절리 간극이 0.01~0.035mm 감소한 것으로 나타나, 저장공동에는 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 해석에 의한 절리간극 변화가 저장공동 상부에서 계측한 결과에 비해 다소 작게 나타났는데, 이는 계측 위치와 해석결과를 측정된 위치가 차이가 있고 Pilot plant 운영당시에는 해석결과에 비해 동결링 형성 시 저장공동에 근접한 구간까지 지하수가 침투하여 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 복공식 LNG 지하 저장기지의 핵심요소 중 하나인 동결링의 형성 시 Cryo-suction 현상에 의해 절리 간극에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 상용 해석 프로그램인 UDEC을 이용한 T-H-M 연동해석을 통해 단일 절리

모델과 대전 Pilot Plant 사례에 대하여 수치 모델링 해석을 수행하였다.

동결링 생성 과정에서 다량의 지하수가 복원되어 상변화됨으로 인해 생기는 Cryo-suction은 순간적으로 절리간극에 영향을 미칠 수 있다. 다공질 매질에서 정의된 Clapeyron 일반식을 사용하여 동결링 형성 시 발생하는 Cryo-suction을 정량화 한 후, UDEC 을 이용한 Discrete element modeling에 적용하여 동결링 형성과정에서의 절리 간극 변화를 모사하였다. 대전 Pilot plant 사례에 대한 해석 결과, Cryo-suction 효과가 나타남을 확인할 수 있었으나, 저장공동 주변에서 절리간극이 0.01~0.035mm 감소하는 것으로 나타나 실제 저장공동에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2008년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 이규상, 2004, 지하암반 냉동 저장고 주변의 온도분포에 관한 현장 계측 및 수치 해석, 서울대학교 박사학위논문, p.161.
2. 이대혁, 이철욱, 김문상, 유재원, 김호영, 2004a, 대전 LNG Pilot Cavern 건설공사 요약, 한국터널공학회 2004 정기학술발표회 논문집 4.22-23, p.307-318.
3. 정용복, 박찬, 정소걸, 정우철, 김호영, 2006, 극저온 지하저장고 주변 ice ring 생성 모델링을 위한 열-수리 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제 16권, 3호 p.241-250.
4. 정우철, 김택곤, 이진무, 박의섭, 정소걸, 2007, 지하 LNG 저장기지에서 절리면 내 Ice Ring 형성에 관한 열-수리 연동해석, 한국터널공학회 2007년 특별심포지엄 논문집, p.149-162.
5. 정우철, 이희석, 이대혁, 김호영, 최영태, 2006, 대전 LNG Pilot Cavern에서의 배수 시스템 평가 및 Ice-ring 형성에 관한 냉열, 수리 연동 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제 16권 1호 p.38-49.
6. Black, P.B., 1995, Applications of the Clapeyron equation to water and ice in porous media. Crrel Report 95-6. U.S Army Corps of Engineers
7. Jeong, W.C., Woo, S.W., Lee, H.S., Lee, D.H., Lee, J.M., Choi, Y.T., Jung, Y.B. Park, E.S. and Jeong, S.K, 2006, Coupled Heat Transfer and Water Flow Analysis on Ice Ring Formation around a

Underground LNG Storage Caver". Proceedings of the GEOPROC 2006 International Symposium, Weiya Xu (ed). May, 22-25, 2006, Nanjing China, p.602-625.

8. Lee, H.S., Lee, D.H., Kim, H.Y. and Choi, Y.T., 2006a, Design Criteria for Thermo-mechanical Stability of Rock Mass around Lined Rock Cavern for Underground LNG Storage, Tunnelling & Underground Space Technology. 21, p.337.
9. Miller, R.D., Baker J.H. and Kolaian, J.H., 1960, Particlesize, overburden pressure, pore water pressure and freezing temperature of ice lenses in soil, Proceedings, Seventh International congress of Soil Science, Madison, Wisconsin, p. 122-129.