

## 극저온 지하저장고 주변 ice-ring 생성 모델링을 위한 열-수리 해석

정용복, 정소걸 (한국지질자원연구원)

정우철, 김호영 (SK건설(주))

### 1. 서 론

본 연구는 극저온 저장물질인 액화천연가스(LNG)의 냉열전과 및 이에 따른 주변 암반내 지하수의 결빙으로 형성되는 Ice-ring의 형성과정 및 범위를 수치해석을 통하여 예측함으로써 실규모 LNG 저장공동 설계의 기초자료로 활용하고자 하는 것이다.

열-수리 연계해석(Hydro-Thermal coupled analysis)은 열전달과 지하수 유동을 동시에 고려한 것을 말하며 지하수의 동결 및 해빙에 의한 지하수 유동의 방향 및 속도 변화와 지하수 유입에 따른 암반의 온도변화를 동시에 고려하는 것이다. 본 연구에서 사용한 2차원 유한차분코드인 FLAC 5.0의 경우 지하수유동에 의한 열전달(advection) 로직이 추가되어 이러한 열-수리 모델링이 한결 용이해졌으나 아직까지 지하수의 상변화에 따른 잠열효과나 투수계수의 증감 등은 명시적으로 구현되지 않았기 때문에 본 연구에서는 FISH를 통해 이를 구현하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석은 먼저 열-수리적 특성을 상수로 가정한 CASE1, 열-수리적 특성의 온도의존성과 상변화에 필요한 잠열효과를 동시에 고려한 CASE2로 나누어 수치해석을 수행하였다.

수치해석 결과 열-수리 특성의 온도의존성을 고려한 경우 대전 LNG pilot 공동에서 계측한 온도 결과와 유사한 결과를 얻었으며 상변화보다는 지하수의 유동 속도 및 방향이 ice-ring 생성 위치 및 두께에 영향을 더 크게 미치는 것으로 나타났다.

### 2. 냉열 열-수리 해석 기본 이론

대류-확산(convective-diffusive) 열전달에 대한 에너지 보존식은 다음과 같다.

$$c^T \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}^T + \rho_0 c_w \mathbf{q}_w \cdot \nabla T - q_v^T = 0 \quad (2-1)$$

여기서 T는 온도,  $\mathbf{q}^T$ 는 열유속,  $\mathbf{q}_w$ 는 유체의 비유량(specific discharge),  $q_v^T$ 는 단위체적당 열원,  $\rho_0$ 와  $c_w$ 는 유체의 기준 밀도 및 비열,  $c^T$ 는 유효비열이다. 유효비열은 공극물과 포화도를 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$c^T = \rho C_v + nS\rho_0 c_w \quad (2-2)$$

여기서  $\rho$ 와  $C_v$ 는 고체 매트릭스의 체적탄성계수와 비열이며  $n$ 은 공극률,  $S$ 는 포화도이다. 약압축성 유체에 대한 질량보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = M \left( -\nabla \cdot \mathbf{q}^w - \alpha \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \beta \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2-3)$$

여기서  $M$ 은 Biot계수,  $\epsilon$ 은 체적변형률,  $\beta$ 는 다공질 매질의 체적팽창률이다. 여기서  $n\beta_f$ 가  $\beta$ 의 정의에 사용되지만 Boussinesq 근사의 경우 무시할 수 있으며 식 (2-3)의 우측 마지막 두 항은 역학적 상호작용을 고려할 경우에만 사용된다(Itasca, 2005).

열전달은 Fourier법칙으로 표현된다.

$$\mathbf{q}^T = -k^T \nabla T \quad (2-4)$$

여기서  $k^T$ 는 유효 열전도도이며 advection 모델링시 등방성으로 가정한다. 유효 열전도도는 고체와 유체의 열전도도를 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$k^T = k_s^T + nS k_w^T \quad (2-5)$$

유체유동은 Darcy 법칙으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{q}_w = -k \nabla (P - \rho_w \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \quad (2-6)$$

여기서  $k$ 는 유체이동계수( $\kappa/\mu_w$ ),  $\rho_w$ 는 유체 밀도이다. 이 식에서 유체밀도는 온도변화에 대해서 다음과 같은 선형관계를 가진다.

$$\rho_w = \rho_0 [1 - \beta_f (T - T_0)] \quad (2-7)$$

여기서  $\beta_f$ 는 유체의 체적팽창률이며  $T_0$ 는 기준온도이다. 이 식에서는 온도변화에 따른 유체밀도변화는 부력생성인 경우에만 유효한 Boussinesq 가정을 적용한 것이다.

### 3. 수치해석 및 결과

#### 3.1 해석 개요

해석 대상인 LNG 공동의 단면은 그림 3-1과 같이 멤브레인, PU foam, 콘크리트로 이루어져 있다. 본 해석에서 멤브레인은 두께가 얇고 열전도도가 크기 때문에 모델링에서 제외하였다. 공동의 중심부를 대칭축으로 하여 반단면만 해석에서 고려하였으며 공동 근접지역에 대해서 요소의 밀도를 높였다. 초기 지하수위는 측정된 지하수위를 부드럽게 연결하여 적용하였다. 암반의 초기온도

는 18°C이며 저장기지 내부에서 액체로 저장되는 높이까지는 -196°C의 온도경계조건을 적용하였고 가스 상태로 존재하는 상부면에 대해서는 대류 경계조건을 적용하였다. 이 경우 가스의 온도는 -100°C이며 대류열전달계수는 0.114W/m/K 로 적용하였다.

이러한 조건에 따라 3600개(60x60)의 요소로 구성된 *FLAC* 모델과 초기조건 및 경계조건을 그림 3-2에 표시하였다. 경계조건에서 P는 공극수압, S는 포화도, T는 온도가 고정된 것임을 의미한다.

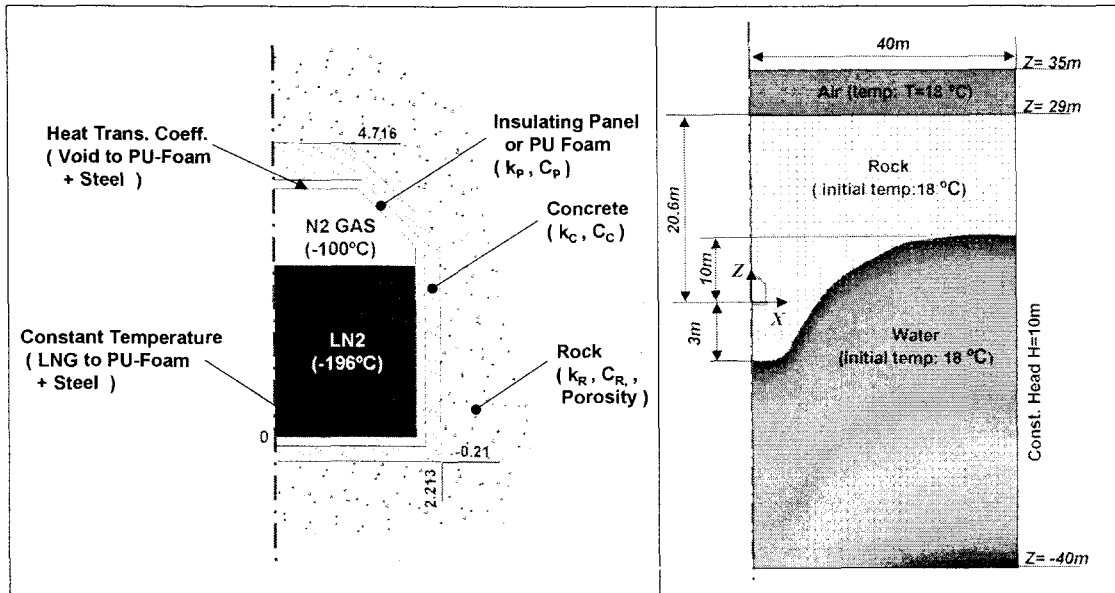


그림 3-1. Pilot LNG cavern 단면도 및 초기/경계조건

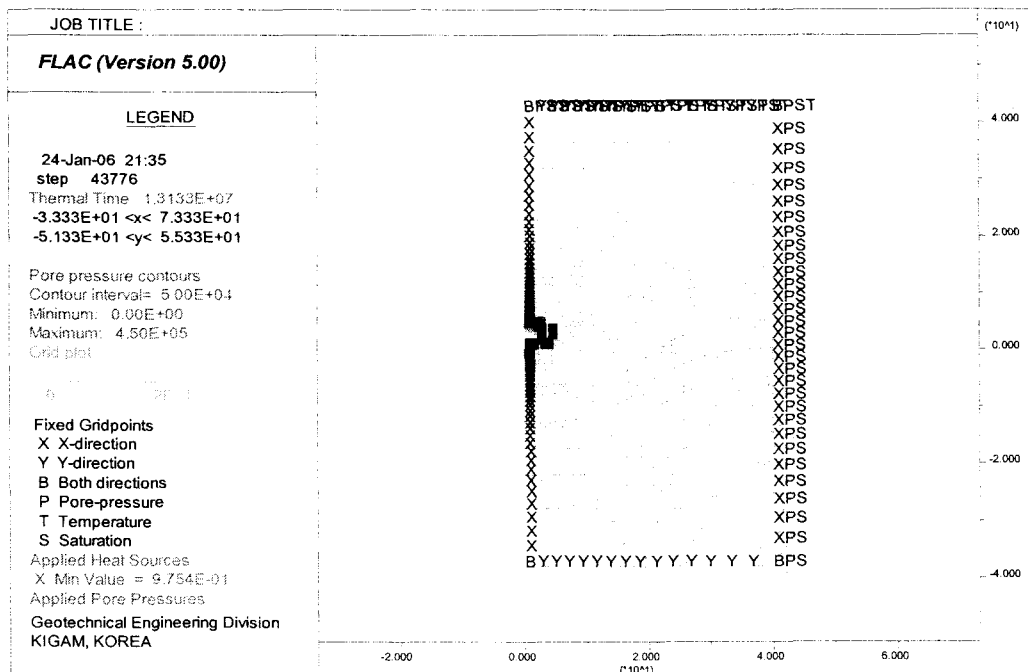


그림 3-2. *FLAC*에서 구현된 모델 및 초기/경계조건

대전 LNG 저장기지의 운영 단계는 그림 3-3과 같다. 본 해석에서도 이를 고려하여 LN2공급이 시작된 2004년 1월 10일부터 하향배수를 중지한 2004년 6월 10일까지는 열전달 해석만을 수행하였고 하향배수가 중단된 6월 10일부터 LN2가 완전히 기화된 8월 12일까지의 2개월에 대해서는 열-수리 상호작용을 해석하여 0℃ 등온선의 확장과 지하수 유입에 따른 ice-ring 형성을 추정하였다.

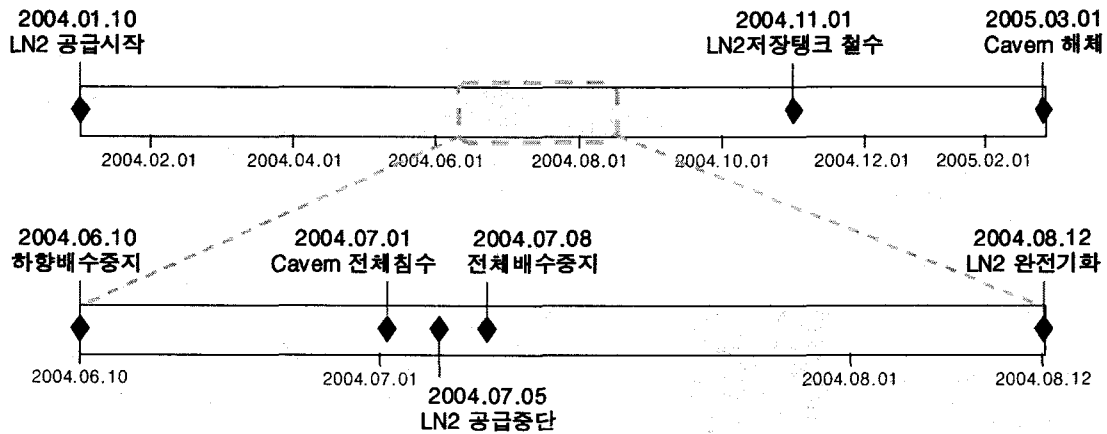


그림 3-3 대전 Pilot LNG 저장공동 운영일지

본 해석에서는 열-수리 관련 입력자료의 적용에 있어서 다음과 같이 두 단계로 구분하였다.

- 1) CASE1 : 열-수리 특성의 온도 의존성을 무시
- 2) CASE2 : 열-수리 특성의 온도 의존성 및 상변화에 필요한 잠열효과 고려

특별히 동결 열-수리 상호작용 모델링시 상변화에 따른 투수계수 감소를 고려해야 하나 FLAC에서는 이러한 기능을 제공하지 않고 있다. 본 해석에서는 콘지암 지하저장고 운영사례 분석 및 모델링을 통해 0℃~3℃ 사이에서 지하수가 결빙하는 것으로 보고한 이규상 (2004)의 결과를 적용하여 이 온도구간에서 투수계수가 감소하여 0으로 되는 것으로 모델링하였으나 이 부분은 추후 실험을 통해 보완을 할 필요가 있다. 또한 다공질 매질에서의 지하수 결빙과 불연속면에서의 지하수 결빙을 구분하여 연구를 진행하는 것이 요구된다.

### 3.2 CASE1 - 온도의존성 무시

CASE1은 암반 및 유체의 열-수리 특성이 온도와 관계없이 일정한 경우에 대한 해석이다. 사용한 열-수리 특성은 표 3-1에 표시하였으며 이는 기존의 다양한 현장 및 실내실험 결과로부터 결정된 것이다(한국지질자원연구원, 2004).

먼저 LN2주입이 시작된 2004년 1월 10일부터 하향배수가 중단된 6월 10일까지는 열전달 해석만 수행하였으며 이때의 0℃ 등온선은 그림 3-4와 같다. 저장공동 상부의 경우 비열이 작은 기체 상태의 LN2와 낮은 대류열전달계수로 인해 0℃ 등온선이 공동경계에서 0.1m에 형성되었으며 바닥으로는 약 2.01m, 측벽부는 1.39m까지 0℃ 등온선이 확장되었다.

표 3-1 해석모델의 열-수리 특성

Material	Solid (Porous medium)			Fluid (water)	
	Thermal conductivity (k, W/m/°C)	Volumetric heat capacity (CP, J/kg/°C)	Permeability (m <sup>2</sup> )	Volumetric heat capacity (CP, J/kg/°C)	Thermal conductivity (k, W/m/°C)
PU foam	0.0184	1674.0	5.366e-14	2040.0	0.56
Concrete	2.631	710.0	3.472e-14		
Rock	2.631	710.0	3.472e-14		

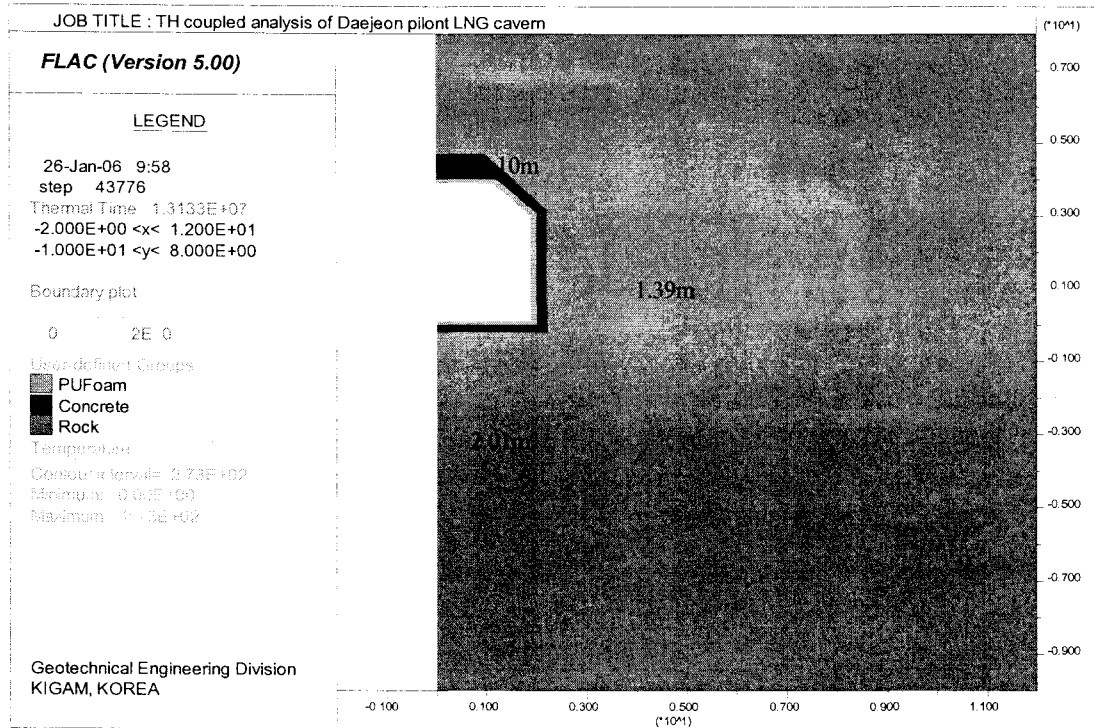


그림 3-4 LN2 주입 후 0°C 등온선 분포 (CASE1, 2004년 6월 10일)

다음으로 6월 10일부터 8월 10일까지 9주에 걸쳐 열-수리 상호작용에 대한 해석을 수행하였다. LN2공급이 중단된 7월 5일부터 LN2의 액위가 감소하여 8월 12일에는 모두 기체로 변환된 것으로 저장공동 내부 경계조건을 변화시키면서 해석을 수행하였다.

본 해석에서는 0°C 등온선과 자유수면이 둘러싸는 부분을 ice-ring으로 추정할 수 있다. 지하수가 동결함에 따라 ice-ring이 형성되며 이러한 ice-ring은 지하수 유동의 장애물이 되기 때문에 그림 3-5와 같이 지하수가 상향으로 유동하는 것을 알 수 있다. CASE1의 경우 형성된 ice-ring의 두께는 바닥부에서 최대 35cm로 나타났으며 상부로 갈수록 두께가 얇아졌다.

전반적으로 ice-ring의 두께가 기존의 해석결과(한국지질자원연구원, 2004)보다 얇은 것으로 조사되었는데 이는 동결여부를 체크하는 시간 단계와 동결온도 범위에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 동결여부를 체크하는 시간 간격이 커지면 일단 그 시간동안에 유동이 진행하기 때문에 ice-ring의 두께를 과대평가할 것이다. 따라서 이 부분은 실험을 통해 규명을 한 뒤 모델링을 해야 좀 더 정확한 ice-ring의 두께를 추정할 수 있을 것이다.

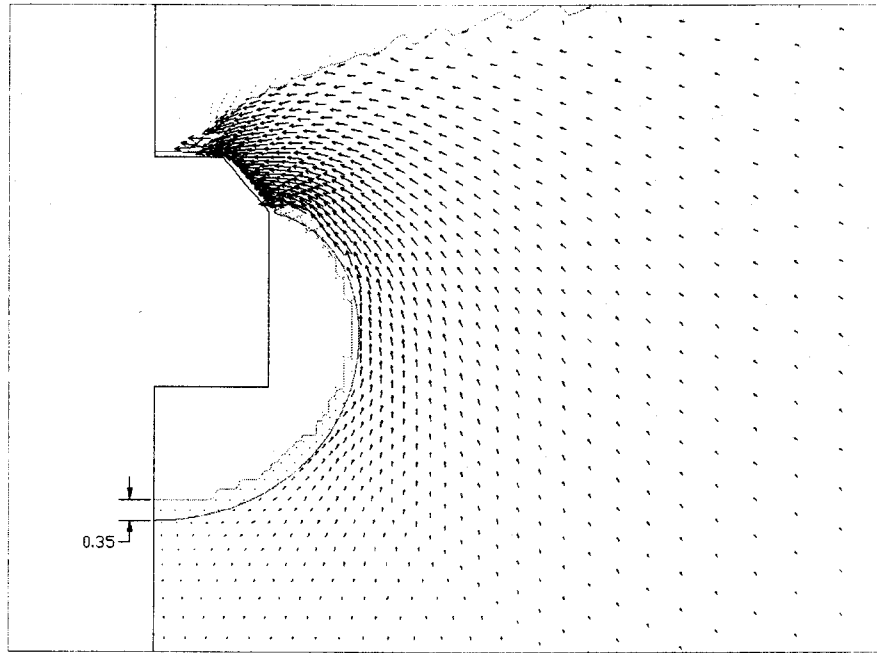


그림 3-5 ice-ring 형성에 따른 지하수 유동 벡터 분포

6월 10일부터 일주일 간격으로 0°C 등온선과 자유수면 및 유동 벡터를 그림 3-6에 표시하였다. 실제 계측결과 7월 1일에 저장공동이 침수된 것으로 나타났으며 해석 결과 4주 경과 후 저장공동 직상부까지 침수된 것으로 계측되었기 때문에 실제 지하수 유동보다 CASE1의 경우 지하수면 상승이 일주일 정도 지연된 것으로 나타났다. LN2 공급이 중단된 7월 5일(5주 경과)부터 LN2 액위가 낮아짐에 따라 이후부터 0°C 등온선의 확장이 멈추었다가 반대로 축소되었다. 2004년 8월 10일까지도 열적 평형상태에 도달한 것이 아니기 때문에 저온물질이 계속 공동에 존재할 경우 0°C 등온선은 확장될 것이며 이에 따라 ice-ring의 두께도 증가할 것이다. 본 해석에서는 지하수 동결에 따른 투수계수 감소만을 적용하였으며 해빙에 따른 투수계수 복원에 대해서는 고려하지 않았다. 따라서, 특수한 원인으로 LNG저장이 중단되었을 때 ice-ring의 축소 및 공동내부로의 지하수 침투 여부를 정확히 모델링하기 위해서는 이러한 부분이 실험 및 전산해석을 통하여 추가적으로 분석되어야 한다.

저장공동 주위에는 온도센서가 부착된 6개의 extensometer가 설치되어 저장공동 운영기간동안 온도 및 변위를 모니터링하였다. 계측기의 번호 및 위치는 그림 3-7과 같으며 본 연구에서는 상부의 E1, 측벽부의 E6, 바닥부의 E3 계측기의 온도 계측결과와 해석결과를 서로 비교하였다.

먼저 계측기 E6의 온도 변화를 시간에 따라 그림 3-8에 표시하였다. 히스토리 13~18은 E6의 C6~C1에 각각 대응된다. C6과 C5는 지하수가 유입되지 않는 영역(ice-ring 경계로 안쪽)에 위치하며 나머지 센서는 지하수가 새로 유입되는 영역에 설치되어 있다. 이로 인해 열-수리 연동해석이 시작되는 2004년 6월 10일부터 1주일이 경과하면서부터 C1~C4센서의 온도 감소비율이 다소 둔화되는 것을 알 수 있다. 이는 C1~C4센서가 설치된 영역으로 유입된 지하수가 추가적인 열을 공급하였기 때문이다. 반면 C5 및 C6센서가 설치된 영역으로는 지하수 유입이 거의 없기 때문에 추가적인 열 공급이 없으므로 온도 감소 패턴에 큰 변화가 없었다. 또한 LN2공급이 중단되면서부터 LN2 액위가 하강함에 따라 저장공동 주변의 온도가 상승하는 것으로 나타났다.

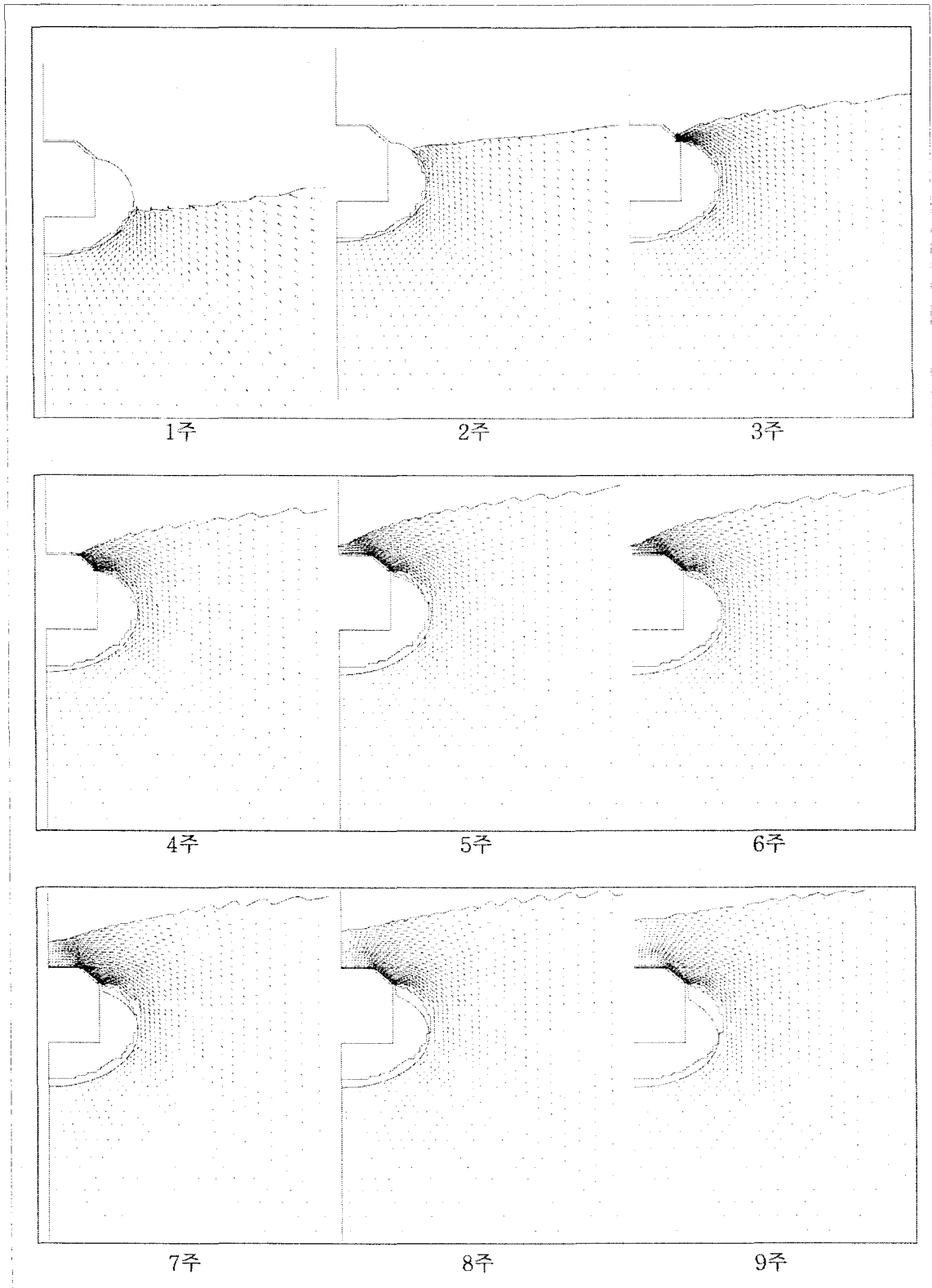


그림 3-6 열 물성의 온도 의존성 무시한 경우 배수중지 후 경과시간에 따른 자유수면, 지하수 유동 벡터 및 0°C 등온선 변화

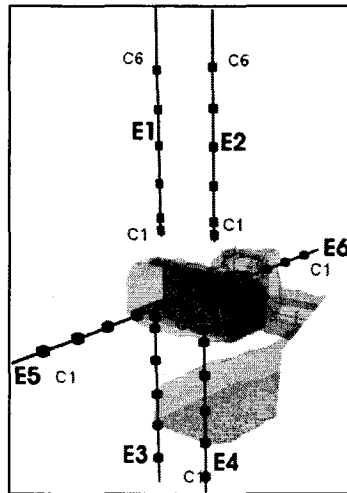


그림 3-7 계측기 설치 위치 및 번호

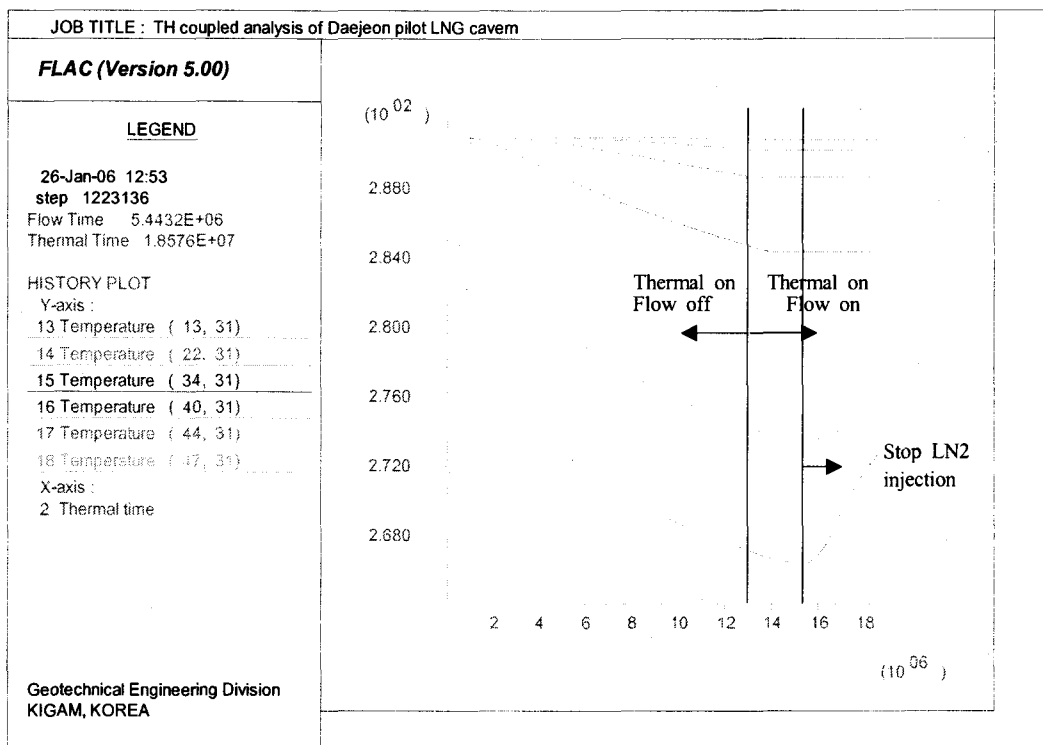
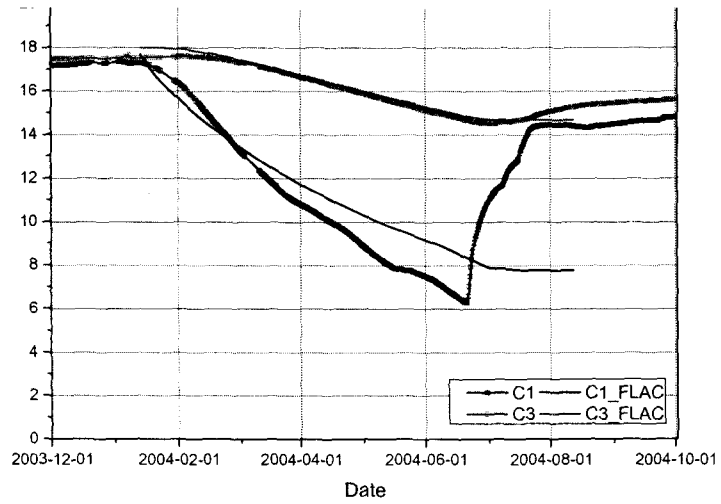


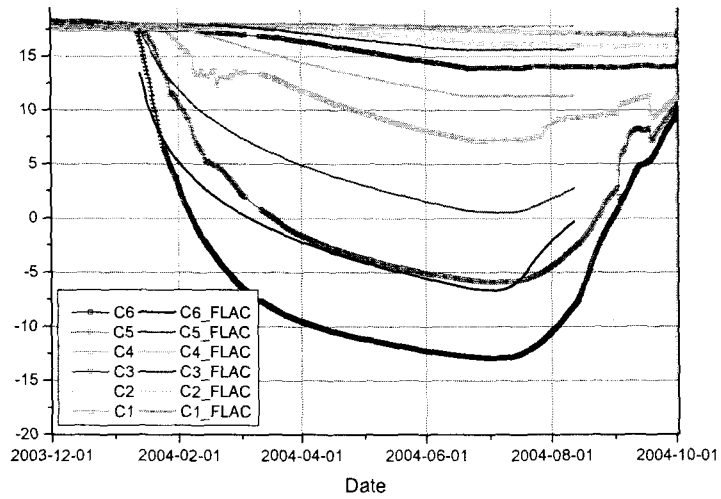
그림 3-8 계측기 E6의 온도 변화 모델링 결과

각 계측기에서 측정된 온도와 CASE1에서 수치해석을 통해 구한 온도를 그림 3-9에 표시하였다. 실제 계측된 온도와 수치해석을 통해 구한 온도가 변화 경향은 유사하지만 값에 있어서는 차이가 크게 나타났다. E6과 E3에서 공동에 가장 근접한 센서의 경우 그 차이가 각각 7℃ 및 10℃ 까지 나타났으나 공동 상부에 위치한 E1의 경우 차이가 2℃ 이내로 비교적 오차가 적었다. 측벽 및 바닥부의 경우 온도변화 폭이 크기 때문에 온도에 따른 열물성의 변화가 영향을 크게 미치지만 상부의 경우 온도변화폭이 작기 때문에 계측결과와 해석결과가 유사한 것으로 판단된다. CASE1 해석 및 분석 결과 계측 및 해석 결과에 있어서 큰 차이가 발생하였으며 이러한 차이는 온도에 따른 열 특성의 변화를 반영하지 않은 것으로 판단되어 다음 단계로 온도에 따른 열 물성 변화를 고려한 해석(CASE2)을 수행하였다.

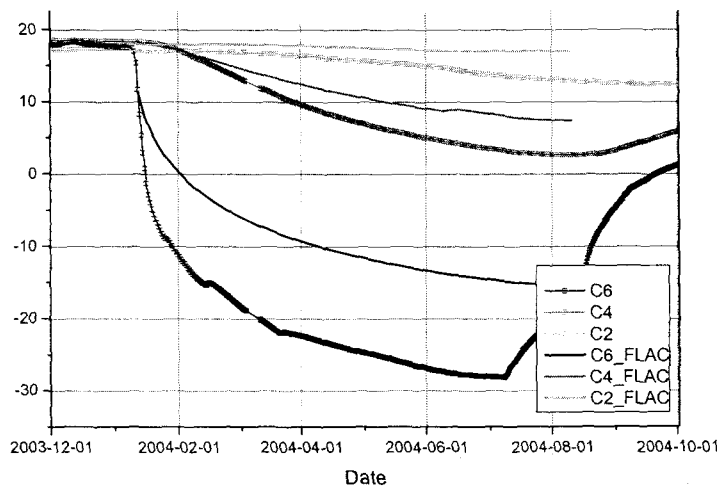




(a) 계측기 E1 (공동 상부)



(b) 계측기 E6 (공동 측벽부)



(c) 계측기 E3 (공동 하부)

그림 3-9 열 물성의 온도의존성을 고려하지 않은 경우의 온도 이력 비교

### 3.3 CASE2 - 온도의존성 및 상변화 고려한 경우

저장공동 외벽을 구성하는 PU foam과 콘크리트 중 PU foam의 온도에 따른 열전도도 변화가 크기 때문에 CASE2에서는 PU foam의 열전도도를 실험결과(그림 3-10)로부터 구한 값을 보간한 식으로 사용하였다. 또한 암반과 콘크리트의 경우에도 0°C를 기준으로 2.661W/m/°C에서 2.554W/m/°C로 변경하였다. 비열의 경우 변화폭이 열전도도에 비하여 상대적으로 적은 것으로 판단하여 일정한 것으로 하였다.

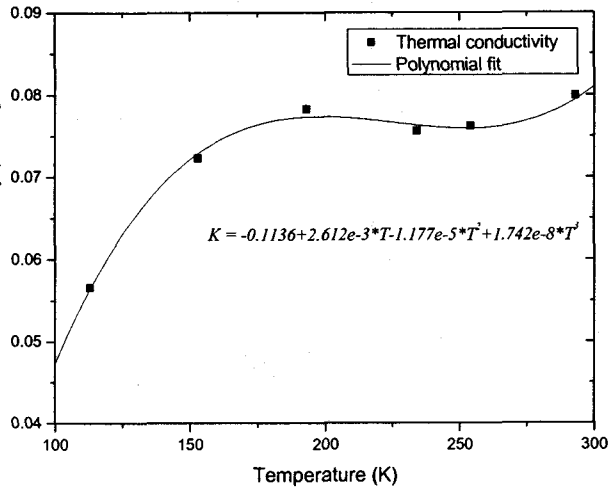


그림 3-10 PU foam의 온도에 따른 열전도도 변화

암반내의 지하수가 액체에서 고체로 상변화할 경우 추가적인 열(잠열)이 공급되어야 한다. 일반적인 상변화 문제는 이동경계(moving boundary) 문제로써 여러

연구자들이 수식화 및 해법을 제안하였다(Ozisik M. 1994). 이 외에 Zhang et al. (2002)은 기존의 수치해석 프로그램에서 입력 물성을 변화시켜 상변화를 고려할 수 있는 수식을 제안하였다. 이 방법은 상변화가 일정한 온도 범위( $T_m \pm \Delta T$ )에서 발생하고 액체 및 고체 상태의 지하수의 열전도도 및 비열이 온도에 영향을 받지 않는다고 가정하여 등가 열전도도(equivalent thermal conductivity) 및 등가 비열(equivalent heat capacity)을 다음과 같이 정의하여 적용하는 것이다.

$$C_e = \begin{cases} C_s & T < T_m - \Delta T \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_l + C_s}{2} & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ C_l & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (3-1)$$

$$k_e = \begin{cases} k_s & T < T_m - \Delta T \\ k_s + \frac{k_l - k_s}{2\Delta T} (T - T_m) & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ k_l & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (3-2)$$

여기서  $C_l, C_s, k_l, k_s$ 는 각각 유체의 고체 및 액체 상태에서의 비열과 열전도도이며 L은 동결잠열(J/kg)이다. 식 (3-1) 및 (3-2)에 근거하여 유체의 비열과 열전도도를 변화시키면 FLAC에서 식 (2-2) 및 (2-5)와 같이 암반과 암반내 유체를 고려하여 유효 비열 및 열전도도를 정의하여 실제 열전달 문제에 적용하게 된다.

CASE2에서는 위에서 언급한 것과 같이 온도에 따른 열-수리 특성 변화와 상변화에 따른 열전도도와 비열을 변화시키도록 FISH를 작성하였으며 나머지 조건은 CASE1과 동일하게 하였다.

2004년 6월 10일까지의 열해석 결과를 그림 3-10에 표시하였다. CASE1에 비하여 0°C 등온선이 측벽부 및 바닥부의 경우 약 1.0m 정도 더 확장되었다. 공동 상부의 경우는 CASE1과 거의 동일하게 나타났다. 이는 상온에서 -70°C 범위까지는 PU foam의 열전도도 변화가 그림 3-10과 같이 그리 크지 않기 때문이다. 그림 3-11의 등온선은 정상상태의 결과가 아니기 때문에 이후 열-수리 상호작용을 고려한 해석에서 좀 더 확장되게 된다. 계측결과를 분석할 때 0°C 등온선의 위치는

바닥부의 경우 저장공동 경계에서 최대 3.5m 정도, 측벽부는 최대 2.8m 정도 인 것으로 판단된다. 공동 상부의 경우 C1센서(공동 경계에서 1.1m 거리)의 온도가 6.8℃로 0℃ 등온선의 위치를 추정하기 어려우나 0.3m 이내일 것으로 추정된다.

6월 10일부터 열-수리 상호작용 해석한 결과는 CASE1과 유사하나 지하수위 상승높이에 있어서 CASE1에 비하여 일주일 정도 빠른 것으로 나타났다. 그림 3-12는 배수 중지 후 6주가 지났을 때의 0℃ 등온선 및 유동 벡터를 표시한 것이다. 실제 계측 결과는 2004년 7월 1일(배수 중지 후 3주 경과)에 공동 전체가 침수된 것으로 나타났으며 CASE2의 경우 3주째 공동 상부까지 지하수가 침투한 것으로 나타나 계측결과와 매우 유사한 결과를 얻었다. CASE2의 경우 CASE1에 비하여 0℃ 등온선이 더 크게 확장함에 따라 ice-ring이 공동에서 더 멀리 떨어진 위치에서 형성되며 이로 인해 지하수위의 상승이 그만큼 더 빨라진 것이다.

ice-ring의 두께는 6주 경과하였을 때 최대가 되었으며 이때 공동 하부에 생성된 ice-ring의 두께는 0.52m, 생성 위치는 공동바닥에서 2.7m 하부였다.

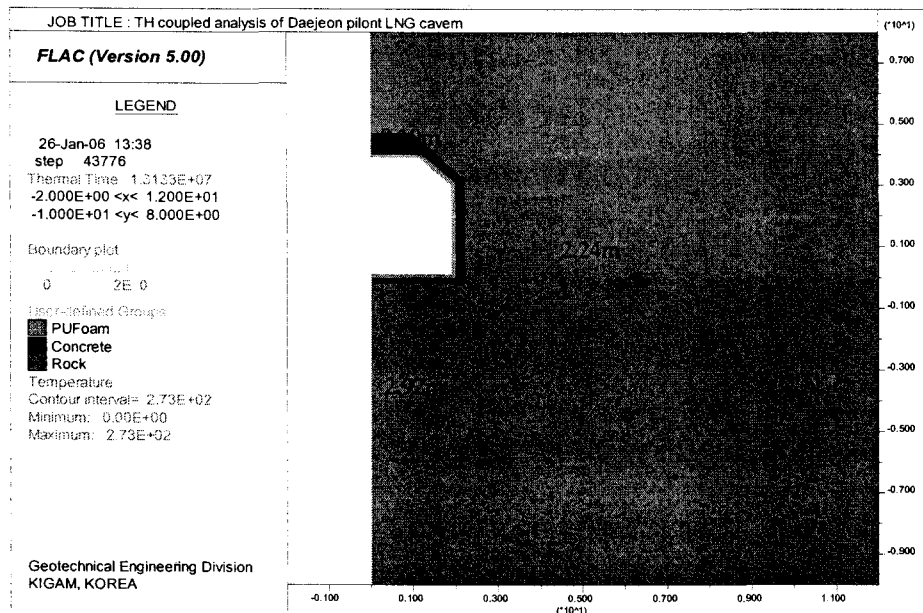


그림 3-11 LN2주입 후 0℃ 등온선 분포 (2004년 6월 10일, CASE2)

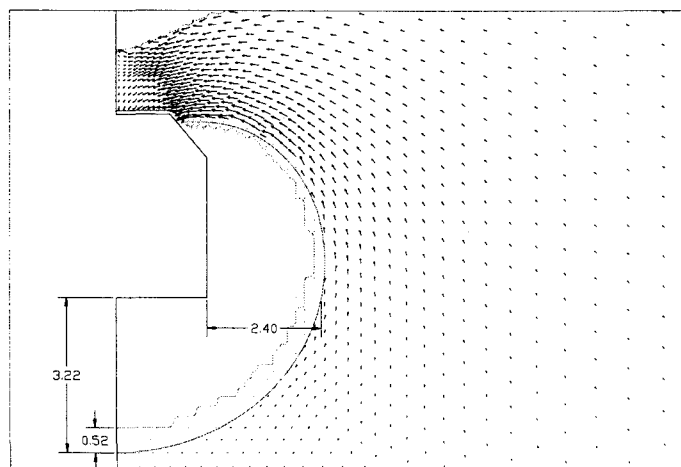
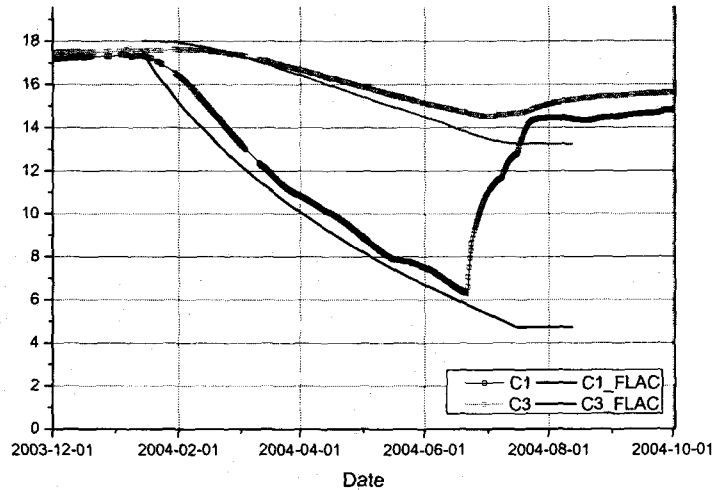


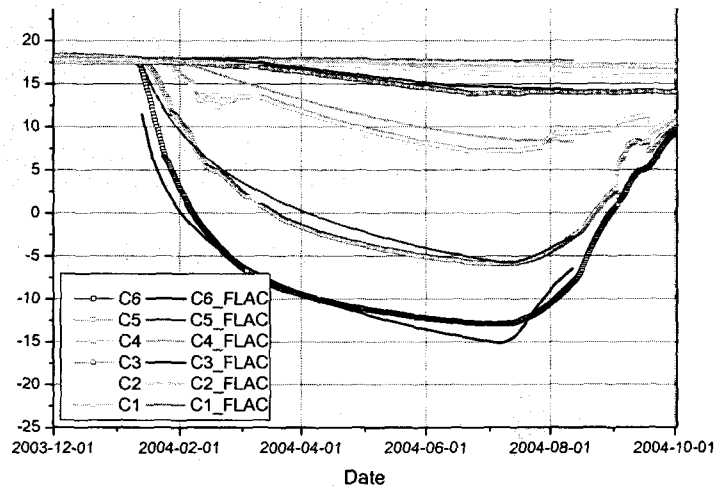
그림 3-12 상변화를 고려한 경우 ice-ring의 생성 위치 및 두께 (배수 중지 후 6주 경과)

온도의 경우 열 물성의 온도의존성과 상변화를 고려했을 때 실제 계측결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. CASE1의 경우 계측치와 많은 차이가 발생하였으나 CASE2의 경우 비교적 계측결과와 잘 일치하였다 (그림 3-13). 계측기 E1과 E6의 경우는 2℃ 이내에서 잘 일치하였으며 계측기 E3의 경우 4℃ 정도 차이를 보였다.

CASE1과 CASE2의 온도 예측결과에 있어서 차이가 많이 나기 때문에 LNG와 같은 극저온 물질을 저장하는 경우 열 물성의 온도의존성과 상변화를 고려해야 가능한 한 정확한 온도분포 및 ice-ring의 생성 위치를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

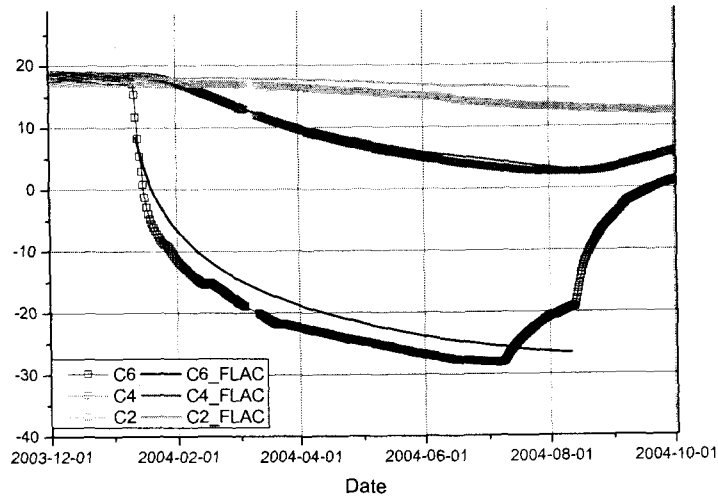


(a) 계측기 E1 (공동 상부)



(b) 계측기 E6 (공동 측벽부)

그림 3-13 열 물성의 온도의존성 및 지하수 상변화 고려한 경우 온도 이력



(c) 계측기 E3 (공동 하부)

그림 3-13 열 물성의 온도의존성 및 지하수 상변화 고려한 경우 온도 이력 (계속)

### 3.4 지하수위 검토

수치해석을 통해 구한 지하수위 변화를 저장공동 중심에서 수평거리로 11m 떨어진 지점에 위치한 P2공의 계측결과와 비교하여 그림 3-14에 표시하였다. CASE1의 경우 CASE2보다 조금 낮게 지하수위를 추정하였다. 이는 앞서 언급했듯이 ice-ring의 크기가 CASE1의 경우 CASE2나 CASE3보다 작게 추정하였기 때문에 포화영역이 상대적으로 커져서 지하수위가 약간 낮게 나타난 것이다.

모든 경우에 있어서 지하수위는 계측결과와 비교적 잘 일치하여 극저온 저장공동에 대한 열-수리 모델링의 타당성을 확인할 수 있었다.

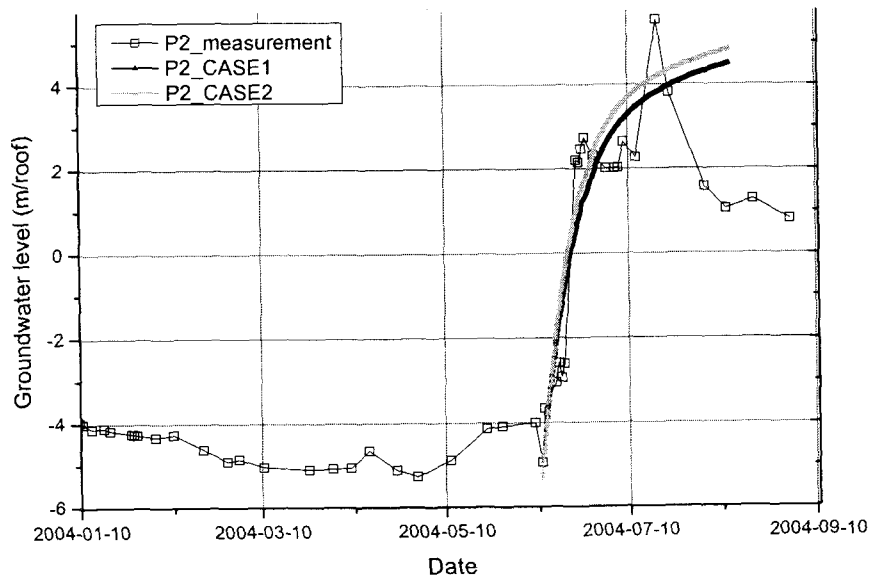


그림 3-14 지하수위 변화 모니터링 결과 및 수치해석 결과 비교

## 4. 결 론

본 연구에서는 파일럿 저장공동에 대한 열-수리 상호작용 해석을 수행하여 계측결과와 비교하였으며 이로부터 극저온 저장공동 주변의 열전달 및 지하수 유동 모델링의 방법 및 타당성을 확인하였다.

본 연구로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 극저온 상태를 모델링할 경우 저장공동 벽체, 암반 및 유체의 열 수리 특성의 온도의존성을 반드시 고려해야하며 특히, 모델링하고자 하는 온도 범위가 확장될수록 온도에 따른 재료의 특성 변화를 고려해야 한다.
- 2) 열-수리 상호작용 해석시 지하수 유동의 크기나 방향이 유체(지하수)의 상변화보다 온도 예측에 있어서 더 크게 영향을 주었다. 이는 LNG저장공동 운영개념의 특수성 때문에 발생한 것으로 판단된다. 즉, 0℃ 등온선이 건조암반내에 형성되며 이후 지하수가 유입되어 동결되기 때문에 지하수 효과를 배제할 수 있기 때문이다. 또한 상변화가 일어나는 구간은 0℃ 등온선 경계에 한정되기 때문에 온도 예측에 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.
- 3) 열-수리 특성의 온도의존성을 고려한 열-수리 상호작용 해석 결과 0℃ 등온선이 공동 바닥 부로 3.22m, 측벽부로는 2.41m까지 확장한 것으로 예측하였으며 계측결과와 유사하여 열-수리 상호작용 해석의 신뢰성을 확인하였다.
- 4) 열-수리 상호작용 해석을 통해 추정된 암반의 온도변화는 계측결과와 유사하게 나타났으며 공동하부(E3)에서 최대 4℃ 정도의 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 지표로터의 열전달, 공동내부의 정확한 열 경계 조건 등을 추가로 고려할 경우 줄어들 것으로 판단된다.

이상의 연구는 저장공동 주변 암반을 다공질 연속체로, 그리고 지하수가 암반내에서 동결하는 현상에 대해서 기존의 문헌자료를 참고하여 0℃ ~ -3℃ 범위에서 동결하는 것으로 가정하여 투수계수를 감소시키는 것으로 모델링하였으나 실험을 통해서 동결온도 범위 및 동결에 따른 투수계수 감소를 정량화시킬 필요가 있다. 그리고 현재는 열-수리 상호작용만을 고려하였으나 저장공동의 역학적 안정성을 평가하기 위해서는 역학적 거동도 포함해야 한다. FLAC의 경우 이러한 확장(T-H-M 모델링)이 용이하기 때문에 추후 열-수리-역학 상호작용 해석을 수행하고자 한다.

## ■ 참고문헌 ■

1. 이규상, 2004, 지하암반 냉동 저장고 주변의 온도분포에 관한 현장 계측 및 수치 해석, 서울대학교 박사학위논문, 161p.
2. 한국지질자원연구원, 2004, LNG지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plnat 운영 결과 분석 연구(최종보고서), 144p.
3. Itasca, 2005, FLAC Version 5.0 - Optional Features, Itasca Consulting Group, Inc.
4. Ozsik M. N., 1994, Finite Difference Methods in Heat Transfer, CRC Press, 412p.
5. Zhang X., Lai Y. , Yu W. & Zhang S., 2002, Non-linear analysis for the freezing-thawing situation of the rock surrounding the tunnel in cold regions under the conditions of different construction seasons, initial temperatures and insulations, Tunnelling and Underground Space Technology v(17), 315-325.