

냉동저장고 주변의 온도분포에 관한 현장 계측 및 수치해석

이규상¹⁾, 이정인²⁾¹⁾농업기반공사, ²⁾서울대학교

초록 : 지하냉동 저장고 주변의 온도분포를 예측하기 위하여 국내 최초로 건설된 상업적 규모의 지하암반 저장고인 '곤지암 지하암반 저장고'에 대한 약 5년간의 암반 온도 계측 결과와 FLAC을 이용한 2차원 및 3차원 수치해석 결과를 비교하였다. 수치해석 수행 시 지하수, 지하수의 동결잠열, 지표온도의 영향을 고려하였으며, 각각의 요소가 지하암반 온도분포에 미치는 영향을 계측자료와의 비교를 통하여 분석하였다. 각각의 경우에 대한 2차원 수치해석과 계측결과를 비교한 결과 지하수와 동결잠열을 같이 고려한 경우가 지하수의 영향만 고려한 경우에 비해 오차가 작게 나타났으며, 2차원 해석에서는 냉동기 가동 시간이 경과하면서 지표면의 영향으로 오차가 커지는 경향이 나타났다. 3차원 수치해석은 지표까지 거리의 영향을 고려하여 수행하였으며, 해석결과 2차원과 같이 지하수 및 동결잠열의 영향이 고려된 해석이 가장 작은 오차를 나타내었으며, 시간의 경과에 따른 오차의 증가는 없었다.

1. 서론

매체에서의 열전달은 전도, 복사, 대류를 통해 일어나지만, 지하냉동 저장고 주변에서의 열전달은 지하수의 흐름이 없다고 가정하면 전도를 통해서 주로 이루어진다. 다공질 매질에서의 열전달에 관한 이론적인 연구는 특정 경계 조건을 갖는 경우에 대한 비정상 및 정상상태의 열전달 관계식들이 정립되어왔다. 다공질 암반의 공극이 지하수로 채워진 경우 암반의 등가 비열 및 열전도도는 지하수의 영향으로 증가 또는 감소할 것이다. 따라서, 냉동 저장고 주변에서의 열전달 특성 및 온도분포를 예측하기 위해서는 열전도도와 비열의 온도의존성, 공극을 채우는 지하수 및 동결잠열의 효과가 암반의 비열에 같이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 결정질 암반인 경우 파쇄 정도가 심하여 암반 내에 포함된 지하수 부피비가 높아질 경우, 정확한 온도분포 예측을 위해서는 비열 및 열전도도에 대한 지하수의 영향이 고려되어야 하며, 아울러 물이 상변화할 때 필요한 동결잠열의 영향이 고려되어 함을 지하 냉동저장고장을 운영하면서 계측된 저장실 주변의 온도분포자료와 수치해석에 의한 비교검토를 통하여 제시하고자 한다.

2. 열전달 이론

2.1 열전달의 기본 방정식

암반 저장고 주변의 온도분포를 예측하기 위해서는 열유도의 변화와 암반 온도와의 관계

인 식 (1)를 이용한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

여기서, C_p 는 매질의 비열(J/kgK), ρ 는 매질의 밀도(kg/m^3)이며, $\frac{k}{C_p \rho}$ 는 열확산계수로서 m^2/s 의 차원을 가지면서 매질의 열전도 속도를 나타내는 척도가 된다.

2.2 지하수의 상변화를 포함한 열전달 이론

암반 저장고 주변의 지하수는 온도가 내려가면서 유체에서 고체로 상이 변화하게 된다. 지하수의 상변화는 많은 에너지가 필요하며, 따라서 정확한 온도분포 예측은 지하수의 상변화를 포함하여야 한다. 유체에서 고체로의 상변화 문제를 설명하기 위하여 그림 1과 같이 반무한 평면 $0 \leq x < \infty$ 사이의 유체가 어는점 T_m 보다 높은 T_i 로 분포하고 있는 경우를 고려하자. 이때, 경계면 $x=0$ 에서 온도가 어는점 이하의 온도인 T_0 로 낮추어지면, 시간이 경과함에 따라 유체는 경계면에서부터 고체로 변화하기 시작하고, 유체와 고체의 경계면인 $S(t)$ 도 경계면에서 멀어지기 시작한다. 이때 유체의 유동이 없고 매질 내에서 에너지의 발생이 없다고 가정하면, 유체와 고체를 통한 열유동은 전도를 통해서만 이루어지고, 고체 상태 및 액체상태의 온도장을 동시에 표현하는 열유동 방정식은 식 (2)로 표현된다.

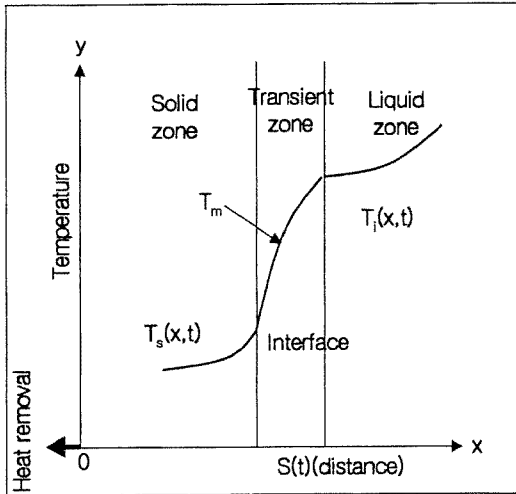


그림 1. 1차원 상변화 문제

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} = k_e \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

여기서, C_e 는 단위부피의 매질온도를 $1^\circ C$ 상승시키는데 필요한 등가 열용량(J/m^3K)으로 비열과 밀도의 곱이며, k_e 는 매질의 등가 열전도도이다. 열용량은 고체상태, 고체와 액체가 혼합된 상태, 액체상태에 따라 달라지며, 지하수의 상변화가 특정온도 $T_m \pm \Delta T$ 에서 일어나면, 식 (3)과 (4)로 정의된다(Zhang et al., 1999).

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

$$k_e = \begin{cases} k_s T < (T_m - \Delta T) \\ k_s + \frac{k_l - k_s}{2\Delta T} [T - T_m], & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ k_l T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (4)$$

여기서, C_l, C_s, k_l, k_s 는 각각 다공질 매체 내의 공극을 채우는 물질이 고체, 유체상태에서의 열용량과 열전도도이고, L 은 단위체적당 동결잠열(J/m³)이다.

2.3 암반의 열물성 보정

암반과 같은 다공질 매체 내에서의 열전도도는 공극 속에 존재하는 지하수의 영향을 받는다. 따라서, 열전도도를 측정하는 가장 정확한 방법은 현장에서 직접 측정하는 것이지만, 비용과 시간이 많이 들기 때문에 얇은 시편을 이용한 측정법을 많이 쓴다. 그러나, 현지 암반이 얇은 시편으로 제작되면 그 안에 포함되어 있던 공극에 대한 영향(공극율, 포화도, 투수계수 등)을 잃어버리게 되므로, 얇은 시편으로 측정된 열전도도를 현지 암반의 열전도도로 변환하기 위해 '평균 암반 열 전도도(mean rock thermal conductivity)'를 계산하는 모델들이 개발되었다. 본 연구에서는 암반 내 지하수가 불규칙하게 분포하는 경우 좋은 결과를 준 식 (5)과 같은 기하평균 모델을 이용하였다.

$$k_G = k_M^{\lambda} \cdot k_W^{\lambda} \quad (5)$$

여기서, k 는 기하평균 모델에서 계산한 열전도도이고, 첨자 M 과 W 는 각각 매질과 물을 의미하며, λ 는 공극율을 의미한다.

열전도도 모델의 경우는 지하수 및 매질에 의해 전도되는 온도변화를 보정하는 방법이지만, 밀도나 비열과 같이 부피비에 비례하는 물성은 식 (6)과 같은 혼합 법칙(mixing rule)이 널리 이용된다(Troschke and Buntebarth, 1998).

$$c_{tot} \rho_{tot} = (1 - \phi) c_{mtx} \rho_{mtx} + \phi c_{por} \rho_{por} \quad (6)$$

여기서, ϕ 는 공극율, c 는 암반의 비열, ρ 는 밀도, 'tot'는 암반, 'mtx'는 매질, 'por'는 공극을 의미한다.

3. 지하암반 저장고 자원

3.1 암반저장고 위치

곤지암 지하암반 저장고는 경기도 광주군 실촌면에 위치하고 있으며, 주 분포 암석은 선캠브리아기에 생성된 경기편마암 복합체이다. 곤지암 지하암반 저장고는 지표에서 15~50m 하부에 지상에서 수평으로 굴착되었으며, 저장실의 규모는 12×10×60m 2조와 12×8×50m 2조로 구성되어 있으며, 각 저장실의 온도를 조정하기 위하여 5개의 방으로 구분하여 북측부터 1, 2, 3, 4, 5번 저장고로 부른다.

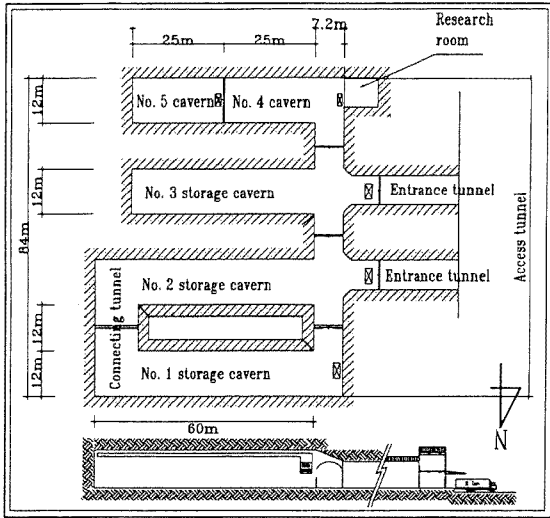


그림 2. 곤지암 지하암반 저장고 평면도

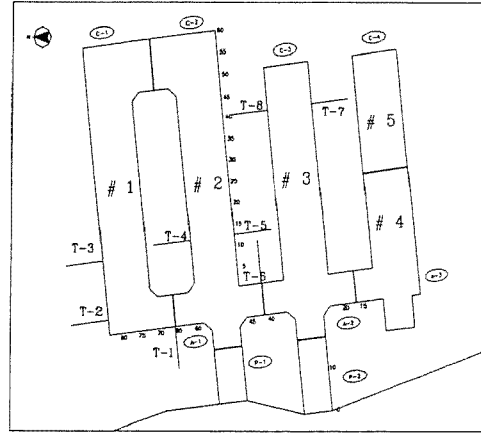


그림 3. 암반 온도 계측 지점

3.2 암석의 열역학적 성질

연구대상지인 곤지암 지역 암반의 열역학적 성질을 분석하기 위하여 지반조사용으로 시추한 조사공에서 얻은 시추코어를 이용하여 암반의 비열 및 열전도도를 한국 표준연구원에 의뢰하여 측정하였다. 비열 측정은 암석코어에서 직경 3mm, 두께 2~2.5mm의 작은 시편을 이용하여, 상온에서 100℃ 구간에서 반복적으로 측정하였다. 측정된 결과를 분석한 결과 암석의 비열은 온도에 따라 뚜렷한 선형관계를 가지는 것으로 나타났으며, 식 (7)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$c = 719.25 + 1.4124 T \quad (7)$$

여기서, c 는 비열(W/m^2), T 는 온도($^{\circ}C$)이며, 상관도는 0.9237이다. 이러한 선형의 상관성을 토대로 본 연구의 측정범위 이외의 온도범위에 대한 비열은 지하수의 영향이 없는 경우 식 (7)로 부터 계산하여 적용하였다.

암반의 열전도도는 암석 코어에서 $20 \times 10 \times 6mm$ 시편을 10개 제작하여 각각 상온에서 열전도도를 측정 후 평균을 취한 결과 $4.99 \pm 0.16 W/mK$ 로 나타났다.

3.3 암반 온도 계측

지하암반 저장고 주변의 암반 온도 변화 양상을 분석하기 위하여 총 8곳에 암반 온도 계측기를 설치하였다(그림 3). 각각의 계측기에는 벽면으로부터 각각 0.5m, 1m, 2m, 4m, 6m, 10m 지점의 온도를 측정하고, 측정된 암반 온도자료는 자동기록장치를 통하여 1일 6회 기록하였다. 또한, 각 암반 저장고내에 설치된 증발기(Unit cooler) 옆에 자동 온도장치를 설치하여 암반 저장고의 실내 온도 변화를 기록하여 향후 암반 계측자료와 비교가 가능하도록 하였다.

그림 4는 1 저장고 북측 벽면의 온도로 T-3 계측자료를 벽면으로부터 거리에 대한 온도 변화를 시간에 따라 기록한 것이며, 계측위치도에 표시된 A, B 점은 작은 그림에 표시한 A, B 지점과 동일한 위치를 나타낸다. 1 저장고의 냉동이 시작된 시기는 1999년 1월 4일 이고, 시간이 경과함에 따라 순차적으로 벽면온도가 내려가는 경향이 나타난다. 60일 경과 시점에서 암반 내 1m 지점의 온도는 -9℃를 나타내었고 6m 지점의 온도는 9℃로 당초 암반 온도인 12℃보다 약간 하강하였으며, 10m 지점의 온도는 12℃로서 냉동기 가동에 따른 영향을 받지 않았다. 냉동기 가동 1,200일 후는 2002년 4월 7일에 해당하는 시기로, 암반 내 1m 지점의 온도는 -15℃, 10m 지점의 온도는 1℃를 나타내고 있다. 그림 5는 1, 2 저장고 사이 암반의 온도로 T-4 계측기의 온도자료를 정리한 것으로, 경과시간은 2 저장고 예냉 시작 시점인 98년 12월 8일을 기준으로 계산하였다. 1 저장고와 2 저장고의 예냉 시기의 차이가 1개월로 냉동기 가동 후 60일 경과 후의 온도는 벽면에서 2m 지점이 3.9℃, 11m 지점의 온도가 -8.6℃로서 2 저장고 쪽 암반 온도가 더 낮게 나타나고 있으며, 1,220일 경과 시점에서는 -16℃와 -18℃로 차이가 많이 감소하였다. 벽면의 가운데 지점인 6m 지점의 온도가 가장 높게 나타나며 1,220일 경과 시점에서 -14.7℃를 나타낸다. 11m 지점의 온도는 경과시간 360일에서 -17.3℃를 1,220일에 -18℃로 거의 변화가 없지만, 2m 지점의 온도는 경과시간 360일에 -13.4℃를 나타내고, 1,220일에 -16℃로서 온도가 계속 내려가는 경향을 나타낸다.

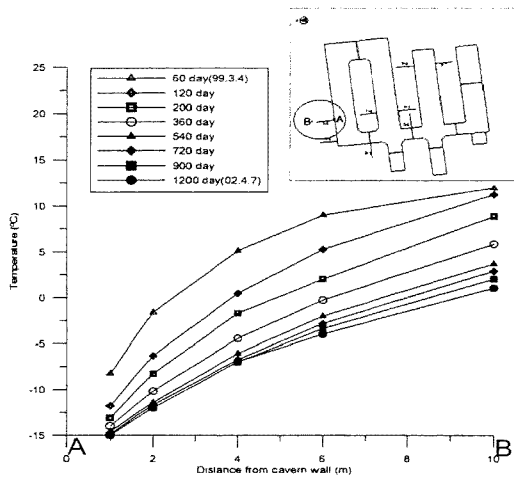


그림 4. 1 저장고 북측 암반에서의 시간의 경과에 따른 암반 온도 변화

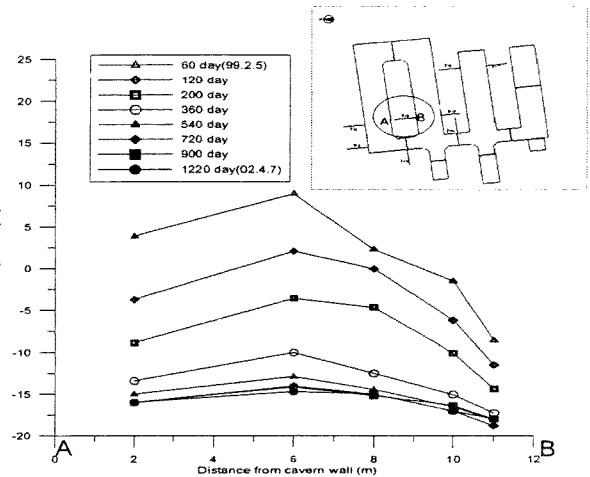


그림 5. 1, 2 저장고 사이 암반에서의 시간의 경과에 따른 암반 온도 변화

4. 온도분포 예측을 위한 2차원 수치해석

곤지암 지하암반 저장고에서 측정된 약 5년간의 온도 계측자료 및 초기 예냉 과정에서 저장고 내부 온도변화 경향을 분석한 결과, 저장고 주변의 온도분포는 암반 내에 분포하는 지하수 및 지하수의 동결잠열에 영향을 크게 받았다. 따라서, 2차원 수치모델링은 지하수 및 동결잠열의 영향을 수치해석에서 비교할 수 있도록, 실내 시험 결과를 이용한 경우, 지하수의 영향만 고려한 경우, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우 등 3가지 경우로 나누어 수행하였다.

4.1 해석 모델의 설정

2차원 수치해석은 국내에서 지반해석용으로 널리 이용되고 있는 ITASCA사의 FLAC 2D를 이용하여 수행하였으며, 해석을 위한 그리드는 저장 터널 입구의 온도변화의 영향을 고려하기 위하여 좌, 우폭이 310m, 전, 후폭이 200m의 해석 구간을 설정하였다. 해석에 사용된 암반의 기본 열물성은 실내시험의 결과로 얻어진 값을 선택하였으며, 저장고내 암반의 표면 열전달계수는 저장공동의 유속을 고려하여 6.8 W/m²°C로, 지표면의 표면 열전달계수는 경기도 이천지역의 평균 풍속을 고려하여 11.35 W/m²°C로 결정하였다.

표 1. 해석에 사용된 기본 열물성 값

물성	암반	지하수	얼음	비 고
밀도 (kg/m ³)	2,810	1,000	920	
열전도도 (W/m°C)	4.99	0.58	1.88	at 12°C at 0°C
비열 (J/kg°C)	736	4,192	2,040	at 12°C at 0°C
	719	4,217		

표 2. 지하수 및 동결잠열의 영향이 고려된 열물성 값

지하수 부피비	밀도 (kg/m ³)	열전도도 (W/m°C)	비열 (J/kg°C)	온도범위	열물성 보정 방법
10%	2,629	4.02	867	> 0°C	지하수만 고려
	2,625	4.27	7,190	-1°C ~ 0°C	지하수 및 동결잠열
	"	"	4,637	-2°C ~ -1°C	"
	"	"	3,361	-3°C ~ -2°C	"
	2,621	4.53	765	< -3°C	지하수만 고려
20%	2,448	3.24	1,018	> 0°C	지하수만 고려
	2,440	3.67	14,642	-1°C ~ 0°C	지하수 및 동결잠열
	"	"	9,150	-2°C ~ -1°C	"
	"	"	6,404	-3°C ~ -2°C	"
	2,432	4.10	819	< -3°C	지하수만 고려

모델의 경계조건 중 지표면의 온도 변화는 이천기상대의 30년간의 월평균 온도를 시간의 경과에 따라 변화시켜 가면서 적용하였고, 암반 저장고 벽면의 온도조건은 5년간 측정된 저장고 내부온도를 월별로 평균하여 적용하였다. 매질 내부로의 열유량은 식 (8)을 이용하여 적용된다.

$$q_n = h(T - T_e) \quad (8)$$

여기서, q_n 은 경계면에 수직으로 작용하는 열유량(W/m²)이고, h 는 표면 열전달계수(W/

m²°C)이고, T는 경계면의 암반의 온도이며, T_e 는 경계면에 접하는 공기의 온도이다. 표 1은 해석 모델에 입력한 열물성 자료로 각각의 물성값은 앞서 수행된 다양한 실험 및 계측 결과이며, 표2는 식 (5)와 (6)을 이용하여, 지하수 및 동결잠열의 영향이 암반의 온도 상태에 따라 고려된 보정된 열물성 값이다.

4.2 해석 결과

그림 6은 시험실에서 구해진 비열과 열전도도를 이용하여 수행한 수치해석 결과와, 1 저장고 측벽에 설치된 T-3 계측기의 온도자료를 비교한 것이다. 계측은 2m, 6m에서도 수행되었으나, 전체적으로 비슷한 변화 경향을 보여주어 그림에는 1m, 4m, 10m를 비교하였다. 비교 결과 두 값은 냉동기 가동 초기부터 많은 차이를 보여주고 있으며, 그 차이는 시간이 경과하면서 점차 커지는 경향을 나타낸다.

그림 7은 암반 내 지하수가 부피비로 20%있는 상황을 고려하여 비열과 열전도도를 보정한 값을 이용하여 수행한 수치해석 결과이다. 그림 6과 비교하여 두값의 차이는 많이 감소하였으나 여전히 큰 차이를 나타내고 있다.

그림 8은 암반 내 지하수 부피비 20% 및 동결잠열의 영향을 고려한 수치해석 결과이다. 앞의 두경우보다 오차가 많이 감소한 경향을 나타내어, 냉동기 가동 초기에는 두 값이 일치되는 경향을 나타내고 있으나 이후 시간이 경과하면서 두 값의 차이는 점차 크게 발생하고 있다.

그림 9는 수치해석 결과와 계측자료의 차이를 도시한 것이다. 해석에 수행된 시험실 물성을 사용한 경우, 지하수의 영향만 고려한 경우, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우에 대해 각각 지하수 부피비 10%, 20%인 경우를 1,200일 경과한 시점에서 비교하였다. 시험실 물성을 이용한 경우 두 값의 차이는 1m에서 3°C 발생하였으며, 10m에서는 8°C로 매우 크게 발생하였다. 두 값의 차이는 지하수 부피비 20%이고 동결잠열을 고려한 경우가 가장 작은 오차를 나타내었으며, 4m에서 최대 4.5°C의 오차를 나타내었다.

위의 결과를 분석하면 암반 저장고 주변의 온도분포는 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우가 계측자료와 가장 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 동결잠열의 영향이 고려된 경우라도 오차가 3°C 정도 크게 발생하고 있는데, 그 원인으로서는 경과일수가 일정시점을 지나면 계측자료는 지표면 외부 온도의 영향으로 일정온도를 유지하는 정상상태를 나타내지만, 2차원 수치해석은 지표면이 고려되지 않아 지표를 통한 열전도 효과가 무시되기 때문이다.

2차원 수치모델링 결과를 종합적으로 분석한 결과 암반 내 온도분포는 운영초기에는 열물성 자료의 보정을 통하여 예측 할 수 있지만, 경과시간이 일정 수준을 넘어서면, 지표면 외기의 영향을 많이 받아, 암반 온도 분포를 계측자료와 일치시키기는 어렵다. 이는 2차원 수치 모델링 외에 3차원 수치모델링의 필요성을 나타낸다.

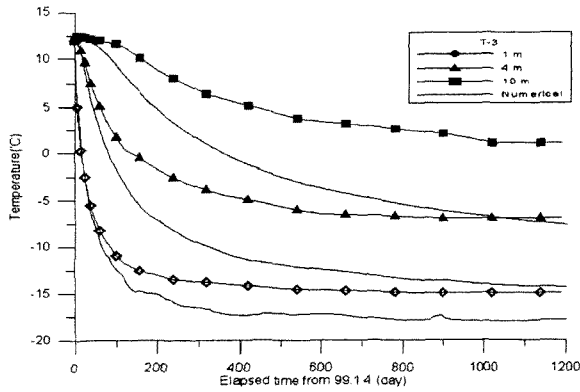


그림 6. 시험실 물성을 사용한 경우의 수치해석과 계측 자료 비교

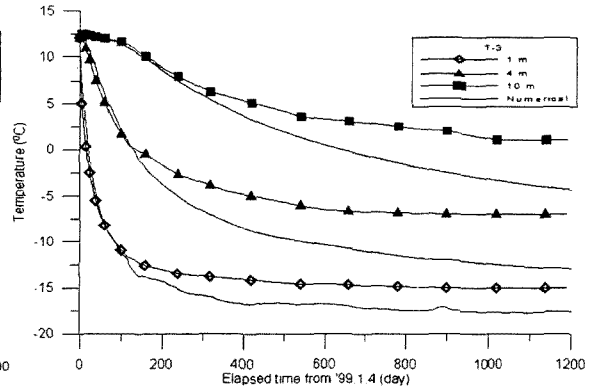


그림 7. 지하수 부피비 20%를 고려한 경우의 수치해석과 계측자료 비교

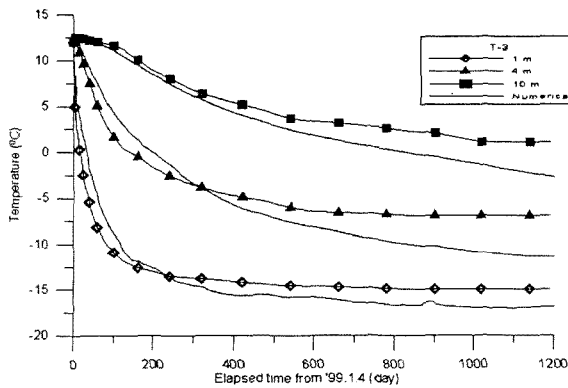


그림 8. 지하수 부피비 20% 및 동결잠열을 고려한 경우의 수치해석과 계측자료 비교

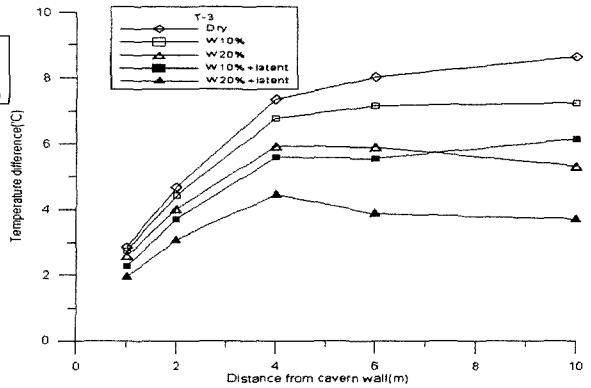


그림 9. 지하수 부피비 변화에 따른 수치해석과 계측자료의 차이

5. 온도분포 예측을 위한 3차원 수치해석

지하암반 저장고 주변의 온도분포를 결정하는 주요한 요인 중의 하나는 지표면의 영향으로 판단되어 3차원 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 2차원 해석을 수행한 FLAC 2D 프로그램을 3차원 해석으로 확장한 FLAC^{3D} 프로그램을 사용하였으며, 프로그램에서 표현하는 열 유동 방정식과 열 확산 방정식은 2차원 모델과 동일하다.

5.1 해석 모델의 설정

지표면의 영향이 고려된 3차원의 효과를 효율적으로 해석하기 위하여 1 저장고를 중심으로 하여 2 저장고 절반만 모델에 표현하는, 대칭 모델을 형상화하여 해석시간을 줄이면서 해석결과의 정확성을 도모하였다. 모델 생성 시 지표면까지의 거리의 영향이 정확하게 모델에 반영될 수 있도록, 지하암반 저장고의 표고를 몇 개의 구역으로 단순화하여 모델에 반영하여 저장 터널에서 지표면까지의 영향이 모델에 그대로 반영되도록 생성하였다(그림 10). 대상 암반의 열역학적 특성을 나타내는 입력변수는 2차원 모델과 동일하게 설정하였다.

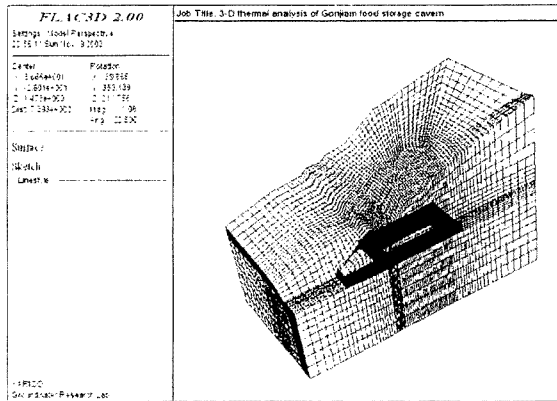


그림 10. 3차원 수치해석 모델

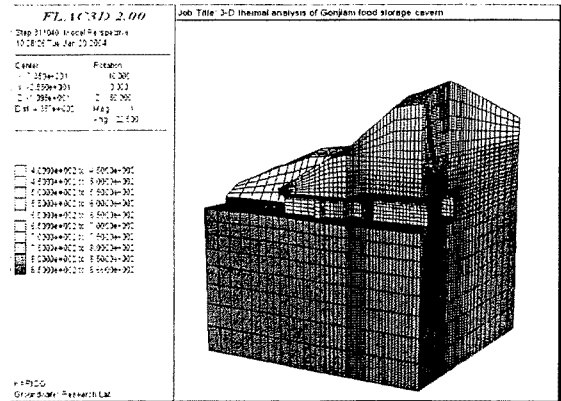


그림 11. 저장고 주변 지하수위 분포

암반 저장고 주변의 지하수위는 그림 11과 같이 2 지역으로 나누어 표현하였다. 모델의 하부 진한색으로 표현되는 구역은 지하수면 하부를 나타내며, 지하수의 영향에 의한 열 물성 보정이 이루어지는 구간이다. 상부 옅은색 영역은 지하수면 상부구간으로 열 물성은 시험실에서 측정된 값을 사용하여 해석하였다.

5.2 해석 결과

그림 12는 지하수 부피비 20%와 동결잠열의 영향을 고려한 3차원 수치해석과 계측자료를 비교한 것이다. 2차원 해석과 비교하여 시간이 경과하여도 두 값의 차이는 증가하지 않고 있으며, 2차원 해석에 비해 오차가 많이 감소하였다. 그림 13은 지하수 부피비 변화에 따른 3차원 수치해석과 계측자료의 차이를 도시한 것으로 2차원 해석에서는 최소 2°C에서 최대 9°C까지 발생하던 오차가 -1°C에서 3°C까지 감소하였다. 또한, 지하수 부피비가 변하여도 오차는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 2차원 해석과 마찬가지로 지하수 부피비가 증가하면서 오차도 감소하는 경향을 나타내며, 지하수 및 동결잠열을 같이 고려한 경우의 오차가 가장 작게 나타났다.

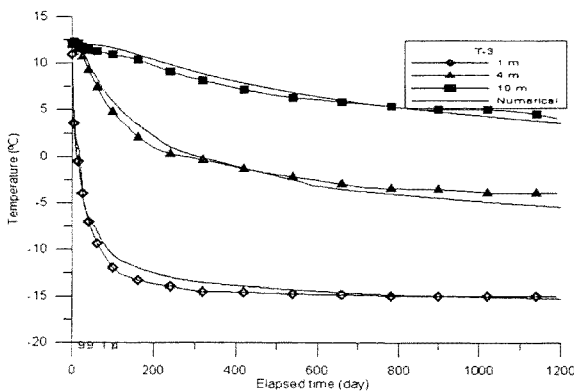


그림 12. 지하수 부피비 20% 및 동결잠열을 고려한 3차원 수치해석과 계측 자료 비교

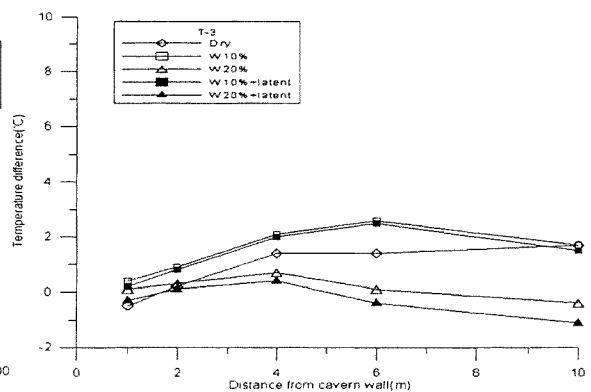


그림 13. 지하수 부피비 변화에 따른 3차원 수치해석과 계측자료의 차이

6. 결론

본 연구는 수치해석에 의하여 냉동 저장고 주변의 온도를 예측하기 위하여 지하수와 지하수의 동결잠열의 영향을 고려하는 2차원 해석과 지형의 영향까지 고려하는 3차원 수치해석에 대해 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 콘지암 지하암반 저장고 암반 온도 계측자료와 2차원 수치해석 결과를 지하수의 영향이 없는 경우, 지하수만 고려한 경우, 지하수와 동결잠열을 동시에 고려한 경우로 나누어 계측이 이루어진 전 기간에서 대하여 상호 비교한 결과, 지하수의 영향이 고려되지 않은 경우는 시간이 경과하면서 오차가 계속 커지는 경향으로 나타났다. 지하수의 영향만을 고려한 경우와 지하수와 동결잠열의 영향을 동시에 고려한 경우 모두 지하수 부피비가 증가하면서 오차는 줄어드는 경향을 나타내었으며, 지하수와 동결잠열 동시에 고려한 경우의 표준오차가 가장 작게 나타났다.

(2) 2차원 수치해석에서의 오차를 분석한 결과, 냉동 경과일수가 증가하면서 오차는 계속 증가하는 경향을 나타내며, 그 원인으로는 냉동 개시 후 일정시점을 지나면서 계측자료는 지표면 외부 온도와 평형을 이루어 일정온도를 유지하는 정상상태를 나타내지만, 2차원 수치해석은 외부 경계를 무한 암반으로 고려하여 지표면의 영향이 고려되지 않기 때문에 판단된다.

(3) 2차원 수치해석을 통한 암반 내 온도분포의 예측은 운영 초기에는 열물성 자료의 보정을 통하여 이루어질 수 있지만, 경과시간이 지표면 외기의 영향을 받게 되는 시점을 지나면 2차원 수치해석으로는 정확한 온도분포 예측이 이루어질 수 없으므로 3차원 수치모델링이 필요하다.

(4) 3차원 수치해석 자료와 계측자료를 비교한 결과, 경과시간이 증가하여도 표준오차가 커지는 경향은 나타나지 않으며 2차원에 비하여 크게 감소하였다.

참고문헌

1. 농어촌진흥공사, 1996, 콘지암 지하저장 터미널 건설공사 지질조사 및 구조안정 해석 보고서.
2. 농업기반공사, 2003, 콘지암 지하저장 터미널 운영백서.
3. 이규상, 김영웅, 2000, 콘지암 지하저장 운영사례, 터널과지하공간(한국암반공학회지), 10.1, 143-151.
4. Geankoplis, C.J., 1993, Transport process and unit operations, 3rd ed. Prentice-Hall, 921.
5. Troschke, B. and Burkhardt, H., 1998, Thermal conductivity models fro two-phase systems, Phys. Chem. Earth, 23, 351-355.
6. Zhang, X., Lai, Y., Yu, W., Zhang, S., 1999. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels. Cold Regions Science and Technology, 29, pp 89-96.