

## 지하암반 냉동저장고 주변의 온도분포 예측을 위한 수치해석

이규상<sup>1)</sup>\*, 이정인<sup>2)</sup>

### A Numerical Analysis to Predict the Temperature Distribution around a Cold Storage Cavern

Gyu-Sang Lee and Chung-In Lee

**Abstract** To predict the temperature distribution around a underground rock storage cavern, two- and three-dimensional numerical analysis using FLAC was conducted. The effects of groundwater and latent heat on thermal properties were considered in numerical calculation. The temperature estimated by FLAC are compared with the temperature measured for 5-year operation at Gonjjiam storage cavern. Estimated and measured temperatures showed great discrepancy when thermal properties from laboratory tests were used and showed good agreement when the effects from 20% of volumetric water fraction and latent heat were considered. However, the discrepancy still increased with operation time due to the heat flow from ground surface. Three-dimensional numerical models were established to closely approximate the boundary condition of the test site, and numerical results better agreement when groundwater and latent heat effects were considered.

**KeyWords** Temperature distribution, Thermal property, Numerical analysis, Freezing storage

**초 록** 지하암반 냉동저장고 주변의 온도분포를 예측하기 위하여, FLAC을 이용한 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석 수행 시 암반 열물성에 대한 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려하였으며, 2차원 및 3차원 수치해석 결과와 5년간의 지하암반 온도계측 자료를 비교하였다. 2차원 수치해석 결과 실험실 물성을 이용한 경우는 계측 결과와 큰 오차를 나타내었으며, 지하수 부피비 20% 및 동결잠열을 고려한 수치해석 결과가 계측 결과와 가장 작은 오차를 나타내었다. 하지만, 냉동기 가동시간이 증가하면서 지표면으로의 열 유동의 영향으로 커지는 오차는 커지는 경향을 나타내었다. 지표면의 영향을 고려하는 3차원 수치모델을 정립하여 수치해석을 수행한 결과, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 수치모델이 계측 결과가 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

**핵심어** 온도분포, 열물성, 수치해석, 냉동저장

## 1. 서 론

지하암반에 건설되는 냉동저장고의 냉동기 용량을 결정하거나 운영할 때 필요한 소요 에너지를 계산할 때 가장 필요한 요소는 저장고 온도를 적정 온도로 유지하기 위해 소요되는 열 손실의 결정이다. 열 손실은 냉동기 가동 상황에 따른 냉동저장고 주변의 온도분포를 정확히 예측할 수 있는 수치해석을 통하여 계산될 수 있다. 지하암반 저장고 주변의 초기 온도분포 예측을 위하여 특정 경계 조건을 갖는 경우에 대한 비정상 및 정상 상태의 열전달 관계식들이 정립되어 왔지만, 모든

경우 암반 열물성이 일정한 조건에서 정립되었다(Carslaw & Jaeger, 1956, Geankoplis, 1993). 국내에서 수행된 연구는 저장고의 형태에 따른 형상함수의 도입(신중호 등, 1999), 짧은 기간 동안의 계측치와 해석치의 비교 분석(이대혁 & 김호영, 2002), 비정상 열전도에 근거한 이론해의 도출(이양 등, 2004) 등 초기 온도분포 예측을 위한 이론해 및 수치해석적 방법들이 제시되었지만, 지하수 및 동결잠열의 영향은 고려되지 않았다. 다공질 암반이 지하수로 채워질 경우 암반의 등가 비열 및 열전도도는 지하수의 영향으로 증가 또는 감소할 것이고, 지하수가 상변화 할 때 필요한 동결잠열의 영향으로 추가적인 에너지가 소모되므로, 정확한 온도분포 예측은 지하수 및 동결잠열의 영향이 고려 되어야 한다. 국내에서 측정된 암석의 열전도도는 0°C이하로 내려가면서 상온에서 측정된 값에 비해 5~25% 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 비열 또한 온도와 선형

<sup>1)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실 주임연구원

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

\*교신저자(Corresponding Author): leegs@karico.co.kr

접수일: 2004년 8월 10일

심사 완료일: 2004년 8월 20일

적인 비례관계에 있는 것으로 보고 되었다(농어촌진흥공사, 1996, SK건설, 1997). 따라서 냉동 저장고 주변의 열전달 특성 및 온도분포를 예측하기 위해서는 열전도도와 비열의 온도의존성, 공극을 채우는 지하수 및 동결잠열의 효과가 암반의 비열에 같이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 지하암반 저장고 주변의 온도분포 예측을 위해 FLAC을 이용한 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였으며, 수치해석 수행 시 암반 열물성에 대한 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려하였다. 수치해석 결과와 5년간의 곤지암 지하암반 저장고 계측 자료를 비교하여 모델의 적합성을 검증하였으며, 2차원 수치해석 결과와 3차원 수치해석 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 열전달 이론

### 2.1 열전달의 기본 방정식

지하 암반에 열원의 경계로 작용하는 공동이 있을 때, 암반 저장고 주변의 온도분포를 예측하기 위해서는 열유동의 변화와 암반 온도와의 관계의 기본열전달 방정식인 식 (1)을 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,  $k$ 는 열전도도(W/mK),  $C_p$ 는 매질의 비열(J/kgK),  $\rho$ 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. 상변화에 필요한 에너지는 암반의 온도변화와는 관련 없는 추가적인 에너지이다. 따라서 정확한 온도분포를 예측하기 위해서는 지하수의 상변화의 영향을 온도 분포를 예측하는 식에 포함하여야 한다. 유체에서 고체로의 상변화 문제를 설명하기 위하여 반무한 평면  $0 \leq x < \infty$  사이의 유체가 어는점 온도  $T_m$ 보다 높은 온도의  $T_l$ 로 분포하고 있는 경우를 고려하자(Fig. 1). 이때, 경계면  $x=0$ 에서 온도가 어는점 이하의 온도인  $T_0$ 로 낮추어지면, 시간이 경과함에 따라 유체는 경계면에서부터 점차 고체로 변화하기 시작하고, 유체와 고체의 경계면인  $S(t)$ 도 시간에 따라 변화한다. 이때 유체의 유동이 없고 매질 내에서 에너지의 발생이 없다고 가정하면, 유체와 고체를 통한 열유동은 전도를 통해서만 이루어지고, 고체 및

액체상태의 온도장을 동시에 표현하는 열유동 방정식은 식 (2)로 표현된다.

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

여기서,  $C_e$ 는 단위부피의 매질온도를 1°C 상승시키는데 필요한 등가 열용량(equivalent thermal capacity, J/m<sup>3</sup>K)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, 열용량과 열전도도는 각각 식 (3)과 (4)로 정의 된다(Bonacina et al., 1973, Zhang et al., 1999).

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

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

여기서,  $C_l, C_s, k_l, k_s$ 는 각각 다공질 매체 내의 공극을 채우는 물질이 고체, 유체 상태에서의 열용량과 열전도도이고,  $L$ 은 단위체적당 동결잠열(J/m<sup>3</sup>)이다.

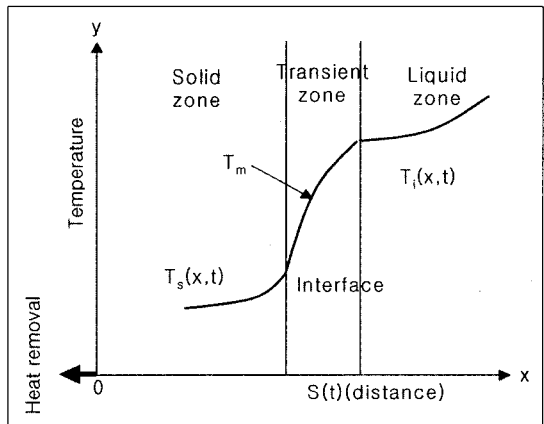


Fig. 1. One-dimensional phase change problem

**2.3 암반의 열물성 보정**

암반과 같은 다공질 매체 내에서의 열전도도는 공극 속에 존재하는 지하수의 영향을 받는다. 지하수의 영향이 고려된 열전도도의 측정에는 비용과 시간이 많이 들기 때문에 일반적으로 얇은 시편을 이용한 측정 결과를 쓴다. 그러나 현지 암반이 얇은 시편으로 제작되면 그 안에 포함되어 있던 공극에 대한 영향(공극률, 포화도, 투수계수 등)을 잃어버리게 되므로, 얇은 시편으로 측정된 열전도도를 공극의 영향이 포함된 열전도도로 변환하는 평균 암반 열전도도(mean rock thermal conductivity) 개념이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 선행 연구자들이 암반 내 지하수가 불규칙하게 분포하는 경우 좋은 결과를 주는 것으로 보고한 식 (5)과 같은 기하평균 모델을 이용하였다(Woodside & Messmer, 1961, Sass et al., 1971, Pribnow & Sass, 1995).

$$k_G = k_M^{1-\phi} k_W^\phi \tag{5}$$

여기서,  $k_G$ 는 기하평균 모델에서 계산한 열전도도이고, 첨자 M과 W는 각각 매질과 물을 의미하며,  $\phi$ 는 공극률을 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 & Buntebarth, 1998).

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

여기서,  $\phi$ 는 공극률, c는 암반의 비열,  $\rho$ 는 밀도, 'tot'는 암반, 'mtx'는 매질, 'por'는 공극을 의미한다.

**3. 온도분포 예측을 위한 2차원 수치해석**

2차원 수치모델링은 지하수 및 동결잠열의 영향을 수치해석 결과와 계측자료의 오차로 비교·검토할 수 있도록, 실내 시험 결과를 이용한 경우, 지하수의 영향만

고려한 경우, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우 등 3가지 경우로 나누어 수행하였다.

**3.1 해석 모델의 설정**

2차원 수치해석은 국내에서 기반해석용으로 널리 이용되고 있는 FLAC 2D ver 3.3을 이용하여 수행하였으며, 해석을 위한 그리드는 저장 터널 전체를 포함하고, 입구의 온도변화의 영향을 고려하기 위하여 좌, 우 폭이 310 m, 전, 후폭이 200 m로 설정하였다. 해석에 사용된 암반의 기본 열물성은 실내시험의 결과로 얻어진 값을 이용하였으며, 저장고 내 암반의 표면 열전달계수는 저장공동의 유속을 고려하여 6.8 W/m<sup>2</sup>°C로, 지표면의 표면 열전달계수는 경기도 이천지역의 평균 풍속을 고려하여 11.35 W/m<sup>2</sup>°C로 결정하였다. 모델의 경계조건 중 지표면의 온도 변화는 이천기상대의 30년간의 월 평균 온도를 시간의 경과에 따라 변화시켜 가면서 적용하였고, 암반 저장고 벽면의 온도조건은 5년간 측정된 저장고 내부온도를 월별로 평균하여 적용하였다. 터널 벽면에서 내부로의 열유량은 표면열전달 식인 식 (7)을 이용하여 계산하였다.

$$q_n = h(T - T_e) \tag{7}$$

여기서,  $q_n$ 은 경계면에 수직으로 작용하는 열유량(W/m<sup>2</sup>), h는 표면 열전달계수(W/m<sup>2</sup>°C), T는 경계면의 암반의 온도이며,  $T_e$ 는 경계면에 접하는 공기의 온도이다.

Table 1은 해석 모델에 사용한 기본 열물성 자료로, 해석 수행 시 지하수의 영향이 고려되지 않은 경우는 실험실에서 측정된 열물성 자료를 이용하였으며, 지하수 및 동결 잠열의 영향이 고려된 경우는 지하수 및 얼음의 온도에 따른 보정된 열물성을 이용하였다. 보정된 열물성은 암반, 지하수 및 얼음의 물성값을 식 (5)와 (6)을 이용하여 암반의 온도 상태에 따라 계산된 결과로 (Table 2), 수치해석 수행 중 암반의 온도에 따라 해당되는 열물성을 FLAC의 내장함수인 FISH를 이용하여 적용하였다. FISH 함수를 이용하여 해석 그리드의 온

**Table 1.** Basic thermal properties of rock and water

Property	Rock	Groundwater	Ice	Remark
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,810	1,000	920	
Thermal conductivity (W/m °C)	4.99	0.58	1.88	at 12°C
		0.556		at 0°C
Specific heat (J/kg °C)	736	4,192	2,040	at 12°C
	719	4,217		at 0°C

**Table 2.** Calculated thermal properties of rock mass considering the groundwater and latent heat effect

Volumetric water fraction	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> °C)	Specific heat (J/kg°C)	Temperature range	Modification method
10%	2,629	4.02	867	> 0°C	Groundwater only
	2,625	4.27	7,190	-1°C ~ 0°C	G.W & latent heat
	"	"	4,637	-2°C ~ -1°C	"
	"	"	3,361	-3°C ~ -2°C	"
20%	2,621	4.53	765	< -3°C	Groundwater only
	2,448	3.24	1,018	> 0°C	Groundwater only
	2,440	3.67	14,642	-1°C ~ 0°C	G.W & latent heat
	"	"	9,150	-2°C ~ -1°C	"
20%	"	"	6,404	-3°C ~ -2°C	"
	2,432	4.10	819	< -3°C	Groundwater only

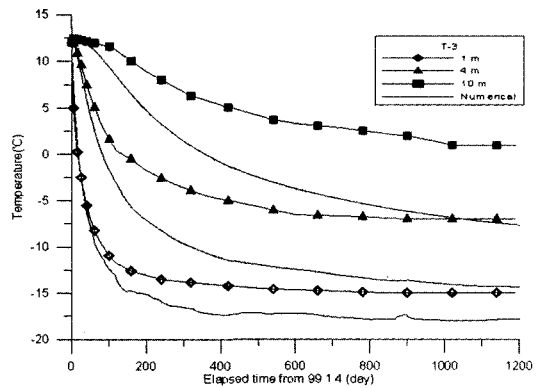
도 값을 읽고, 읽은 온도의 범위가 Table 2에 제시된 온도 범위에 해당하면 그에 상응하는 열물성 값으로 변환시켰다.

**3.2 해석 결과**

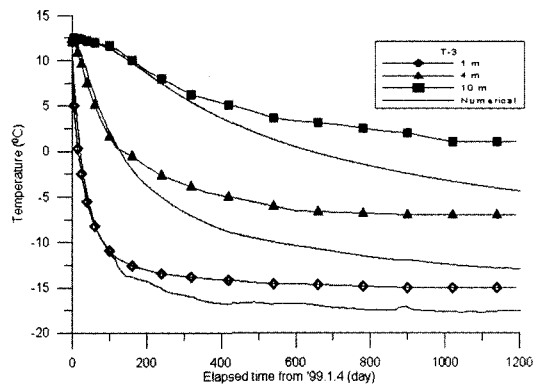
Fig. 2는 실험실에서 구해진 비열과 열전도도를 이용하여 수행한 수치해석 결과와 암반저장고 측벽에 설치된 계측기의 온도자료를 비교한 것이다. 암반온도 계측은 2m, 6m에서도 수행되었으나, 전체적으로 비슷한 변화 경향을 보여주기 비교 대상은 1m, 4m, 10m를 선택하였다. Fig. 2에서 계측 결과는 냉동기 가동시간에 따라 온도가 하강하는 경향을 나타내고 있으나 경과일수 약 100 ~ 400일(벽면으로부터 1m, 10m의 경우) 이후부터는 온도변화가 거의 없는 평형상태를 나타내고 있다. 하지만, 수치해석 결과는 그 이후에도 온도가 계속 하강하는 경향을 나타내고 있어 두 값의 오차는 점차 크게 나타나고 있다. 냉동기 가동 초기에 나타나는 두 값의 오차는 열물성의 차이에서 비롯된 것으로 판단되며, 이후 해석에서는 열물성의 차이를 보정하여 두 값의 차이를 줄이고자 하였다. 열물성의 보정은 먼저 열전도도를 변화시켜 가면서 두 값의 차이를 검토하였다. 열전도도를 줄여서 수치해석을 수행하면 오차가 줄어드는 경향을 나타내었으나, 열전도도 값이 실험실 결과의 1/10까지 줄여도 일정 수준 이상에서는 두 값의 차이는 더 이상 감소하지 않았다. 이로부터 두 값의 차이가 열전도도뿐만 아니라 다른 요인에 의해 기인한 것으로 판단하여, 열전도도와 아울러 비열의 값을 변화시켜 가면서 차이를 검토하였다. 열전도도 값의 감소와 아울러 비열의 값을 증가시켰을 때 두 값의 오차는 줄어드는 경향을 나타내었다. 따라서, 계측 자료와 수치해석 결과를 일치시키기 위해서는 두 열물성의 적절한 조합이 필요하다. 열전도도의 감소 및 비열의 증가는 암반

내의 지하수의 함유량의 증대로 설명될 수 있으며, 이후의 검토에서는 지하수의 함유량의 변화에 따른 두 값의 차이를 검토하였다.

Fig. 3은 암반 내 지하수가 부피비로 20% 존재하는



**Fig. 2.** Comparison of measured data and results of numerical analysis using dry condition



**Fig. 3.** Comparison of measured data and results of numerical analysis considering 20% volumetric water fraction

상황을 고려하여 비열과 열전도도를 보정한 값을 이용한 수치해석 결과이다. Fig. 2와 비교하여 두 값의 오차는 많이 감소하였으나 여전히 큰 오차를 나타내고 있다. 곤지암 지하암반 저장고 주변의 암반을 냉동시키는 예냉 과정에서 저장고의 온도는 일정 온도까지는 급격하게 낮아지다가 이후 저장고의 온도 감소가 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 암반 내의 지하수 동결에 따른 추가적인 에너지의 소모로 판단되며, 이를 고려하기 위하여 지하수 및 동결잠열의 영향을 동시에 고려하는 해석을 수행하였다. Fig. 4는 암반 내 지하수 부피비 20% 및 동결잠열의 영향을 고려한 수치해석 결과이다. 앞의 두 경우보다 오차가 많이 감소한 경향을 나타낸다. 그러나, 냉동기 가동 초기에는 두 값이 일치되는 경향을 나타내고 있으나 이후 시간이 경과하면서 두 값의 오차는 점차 확대되는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5와 6은 수치해석 결과와 계측자료의 차이를 측정기간의 값으로 평균하여 오차를 도기한 것이다. 시간의 경과에 따른 오차의 변화경향을 고찰하기 위하여, 냉동기 가동 후 1년, 4년 후의 계측자료와 수치해석 결과의 오차를 도기한 것이다. 2차원 수치해석 결과를 실험실 물성을 사용한 경우, 지하수의 영향만 고려한 경우, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우에 대해 각각 지하수 부피비 10%, 20%인 경우에 대해 오차의 변화 경향을 비교하였다. 오차의 증감 경향은 1년 후의 결과와 4년 후의 결과 모두 실험실 물성을 이용한 경우가 가장 큰 오차를 나타내었고, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우가 가장 작은 오차를 나타내었다. 지하수 부피비 20%인 경우 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 경우 냉동기 가동 1년 후의 오차가 1°C 내외로 감소하는 것을 알 수 있지만, 냉동기 가동 4년 후의 결과는 4°C가

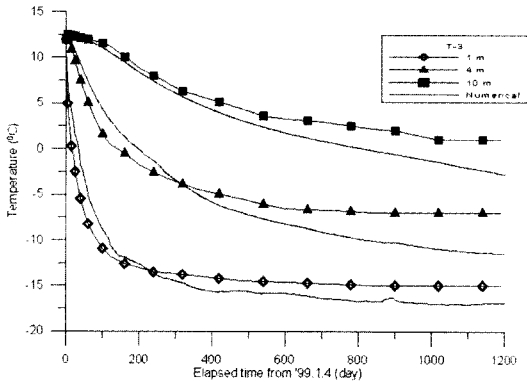


Fig. 4. Comparison of measured data and results of numerical analysis considering 20% volumetric water fraction and latent heat effect

지 증가하는 것을 알 수 있다.

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 경과시간이 4년에 이르면 오차가 4°C 정도로 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 열 물성 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.

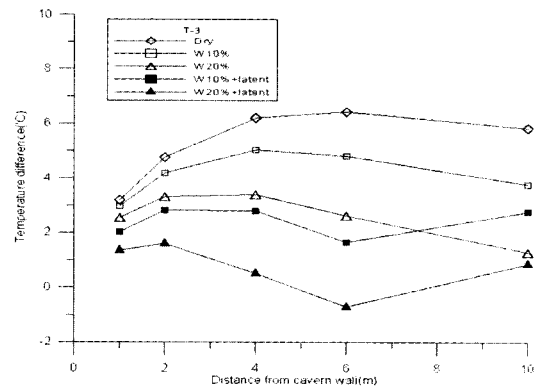


Fig. 5. Differences in temperature for each volumetric water content after 1-year operation

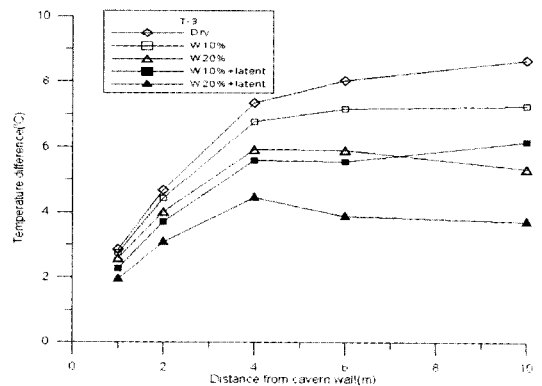


Fig. 6. Differences in temperature for each volumetric water content after 4-year operation

4. 온도분포 예측을 위한 3차원 수치해석

앞서 서술한 바와 같이 지하암반 저장고 주변의 온도 분포를 결정하는 주요한 요인 중의 하나로서 지표면의 영향이 중요하다. 하지만 2차원 해석으로는 정확히 지표면의 영향을 고려할 수 없으므로 3차원 해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 2차원 해석을 수행한 FLAC 2D 프로그램을 3차원 해석으로 확장한 FLAC3D ver 2.0 프로그램을 사용하였으며, 프로그램에서 표현하는 열 유동 방정식과 열 확산 방정식은 2차원 모델과 동일하다.

4.1 해석 모델의 설정

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 반영되도록 생성하였다(Fig. 7). 대상 암반의 열역학적 특성을 나타내는

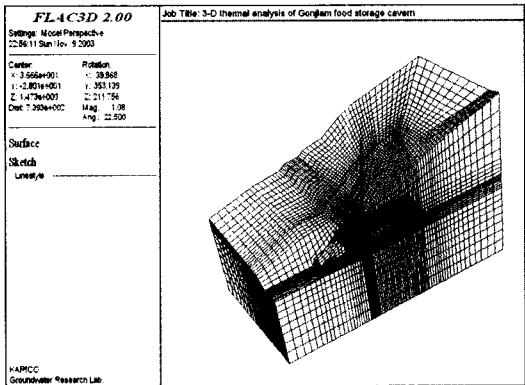


Fig. 7. Three-dimensional finite difference mesh

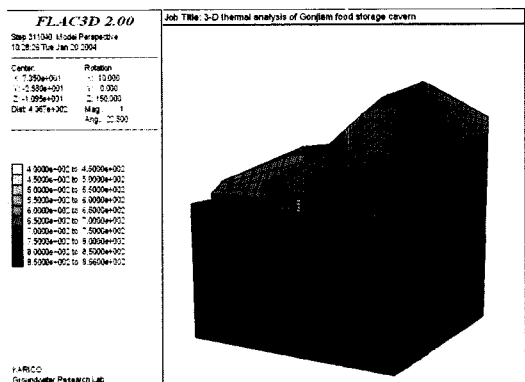


Fig. 8. Separation of zones by thermal properties

입력변수는 2차원 모델과 동일하게 설정하였고, 저장고 주변의 지하수의 영향을 고려하기 위하여 Fig. 8과 같이 두 지역으로 나누어 열 물성 변화를 고려하였다. 모델의 하부 진한색으로 표현되는 구역은 지하수면 하부 구간으로 지하수의 영향에 의한 열 물성 보정이 이루어지는 구간이며, 상부 옅은색 영역은 지하수면 상부구간으로 열 물성은 실험실에서 측정된 값을 사용하여 해석하였다.

4.2 해석 결과

Fig. 9는 지하수 부피비 20%와 동결잠열의 영향을 고려한 3차원 수치해석 결과와 계측자료를 비교한 것이다. 2차원 해석과 비교하여 시간의 경과에 따른 오차의 증가 경향은 나타나지 않고 있으며, 2차원 해석 결과에 비해 오차가 감소하는 경향을 나타낸다. 열물성 변화에 따른 수치해석 결과와 계측자료의 오차를 비교하기 위

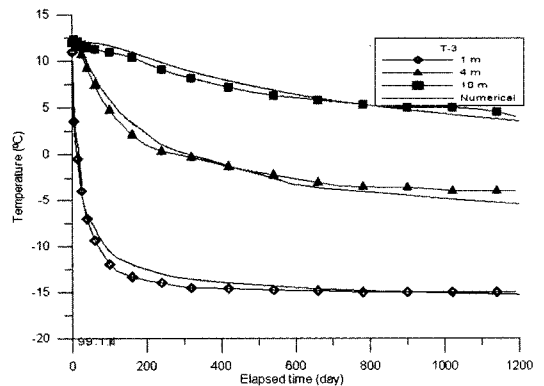


Fig. 9. Comparison of measured data and results of three-dimensional numerical analysis considering 20% volumetric water fraction and latent heat effect

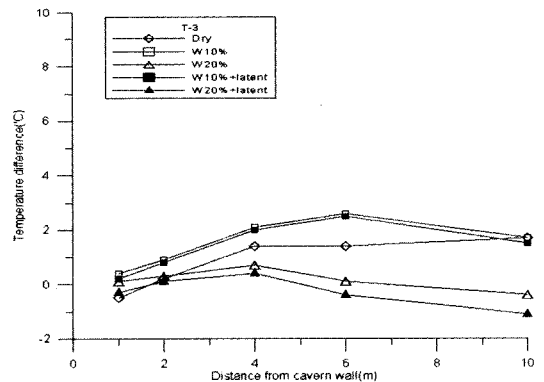


Fig. 10. Differences in temperature for each volumetric water content by three-dimensional numerical analysis

하여, 냉동기 가동 4년 후의 계측자료와 수치해석 결과의 오차를 계산하였다. Fig. 10에서 실험실 물성을 이용한 결과와 지하수 부피비가 각각 10%, 20%인 경우에서 구한 열물성을 사용한 수치해석 결과는 계측자료와 약 2°C내외의 오차를 나타내고 있다. 반면에, 지하수 및 동결잠열의 영향을 고려한 결과는 오차가 1°C 내외로 감소하였다. 2차원 해석 결과인 Fig. 6에서 지하수 부피비가 20%인 경우인 4°C와 비교하여 오차가 25%로 감소하였다.

이상에서와 같이 열 물성을 변화시킨 2차원 및 3차원 수치해석 결과와 계측자료를 비교한 결과, 암반저장고 주변의 냉동기 가동 초기의 온도분포는 열물성의 변화로 오차를 감소시킬 수 있지만, 일정시간이 경과하면 냉동저장고와 지표면의 열 유동에 의하여 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 지표면과의 열 유동을 고려한 3차원 수치해석에서는 2차원 수치해석에 비해 오차가 크게 감소하여 지표면과의 열유동이 저장고의 열 손실에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서, 냉동저장고의 냉동기 부하량 계산은 운영 초기에는 암반 열물성 변화를 통한 2차원 수치해석으로 수행될 수 있지만, 온도가 안정화된 이후의 열부하량 계산은 열물성 변화를 통한 3차원 수치해석을 통하여 정확하게 수행될 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 수치해석에 의하여 냉동 저장고 주변의 온도를 예측하기 위하여 지하수와 동결잠열의 영향을 고려하는 2차원 해석과 지형의 영향까지 고려하는 3차원 수치해석에 대해 비교 검토 하였다. 수치해석 결과와 5년간의 실측자료를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 곤지암 지하암반 저장고 암반 온도 계측자료와 2차원 수치해석 결과를 지하수의 영향이 없는 경우, 지하수만 고려한 경우, 지하수와 동결잠열을 동시에 고려한 경우로 나누어 예측이 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 암반 내 포함된 지하수 부피비가 증가하면서 오차는 줄어드는 경향을 나타내었으며, 지하수와 동결잠열 동시에 고려한 경우의 오차가 가장 작게 나타났다.
- 2) 2차원 수치해석에서의 오차를 분석한 결과, 냉동 경

과일수가 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 받게되는 시점을 지나면 2차원 수치해석으로는 정확한 온도분포 예측이 이루어질 수 없으므로 3차원 수치모델링이 필요하다.
- 4) 3차원 수치해석 자료와 계측자료를 비교한 결과, 경과시간이 증가하여도 오차가 커지는 경향은 나타나지 않으며 지하수 부피비 20%와 동결잠열이 고려된 해석결과는 1°C 내외의 오차를 나타내었다.

이상에서와 같이 지하냉동 저장고 주변 암반의 온도분포를 예측하기 위해서는 냉동기 가동초기에는 지하수와 동결잠열의 영향이 수치해석에 고려되어야 하며, 장기간의 예측에서는 지하수 및 동결잠열의 영향 뿐 아니라 외기의 영향이 동시에 고려되어야 한다.

## 참고문헌

1. 농어촌진흥공사, 1996, 곤지암 지하저장 터미널 건설공사 지질조사 및 구조안정 해석 보고서.
2. 신중호, 박연준, 김호영, 박찬, 1999, 아치형 냉동저장공동 주위 암반의 비정상상태 열전도 특성 및 열물성 평가, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 9.1, 27-35.
3. 이대혁, 김호영, 2002, 냉동저장 공동 주변의 온도분포 예측을 위한 해석해 및 수치모델 적용에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 12.3, 142-151.
4. 이양, 이승도, 문현구, 2004, 저온가스 저장공동 주위 암반의 온도분포 예측에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 14.1, 16-25.
5. SK건설주식회사, 1997, 에너지절약형 지하 냉장 및 냉동 저장 설계기술개발에 관한 최종보고서, 통산산업부, 1-281.
6. Bonacina, C., G. Comini, and A. Fassinio, 1973, Numerical solution of phase change problems, Int. J. Heat Mass Transfer 16(6):1852-1832.
7. Carslaw, H. S. and J. C., Jaeger, 1956, Conduction of heat in solids, Clarendon Press.
8. Geankoplis, C. J., 1993, Transport process and unit operations, 3rd ed. Prentice-Hall, 921.
9. Pribnow, D. and J. H., Sass, 1995, Determination of the thermal conductivity for deep boreholes. J. Geophys. Res., 100, 9981-9994.
10. Sass, J. H., H. H., Lachenbruch, and R., Munroe, 1971,

Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat flow determination, *J. Geophys. Res.*, 76, 3391-3401.

11. Troschke, B. and H., Burkhardt, 1998, Thermal conductivity models for two-phase systems, *Phys. Chem. Earth*, 23, 351-355.
12. Woodside, W., and J., Messmer, 1961, Thermal con-

ductivity of porous media, Part I: Unconsolidated sands & Part II: Consolidated sands. *J. Appl. Phys.*, 32, 1688-1768.

13. Zhang, X., Y., Lai, W., Yu, and S., Zhang, 1999. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels. *Cold Regions Science and Technology*, 29, 89-96.

### 이 규 상



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2004년 서울대학교 대학원  
지구환경시스템공학과 공학박사  
Tel: 031-400-1852  
E-mail: leegs@karico.co.kr  
현재 농업기반공사 농어촌연구원  
지하수연구실 주임연구원

### 이 정 인



1963년 서울대학교 공과대학 광산학과  
공학사  
1965년 서울대학교 대학원 광산학과  
공학석사  
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學)  
대학원 자원공학과 공학박사  
Tel: 02-880-7221  
E-mail: cilee@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부  
교수