

지하냉동저장공동 주위암반의 열전도 특성 및 열부하 평가

신중호¹⁾ · 박 찬¹⁾ · 박연준²⁾ · 김호영³⁾

Heat Conduction in Rock Mass Around Underground Cold Storage Cavern and Estimation of Heat Loads

Joong-Ho Synn, Chan Park, Yeon-Jun Park and Ho-Yeong Kim

1. 서 론

지하암반은 계절적 대기온도 변화의 영향을 거의 받지 않는 온도조건 및 뛰어난 단열성으로 인해 물류의 저온냉동저장이나 액화연료의 저장 등을 위한 좋은 대상으로 인식되고 있다. 이러한 분야에 있어서 암반의 열물성 및 열유동 특성은 매우 중요한 요소로서, 이는 장기적인 에너지절약 및 지하구조물의 열역학적 안정성의 정확한 평가와 직접적 연관이 된다.

암반을 비롯한 어떤 재료내의 열유동에 관한 이론적 연구는 많은 학자들에 의해 이루어져 왔고, 특정 경계조건을 갖는 경우에 대한 비정상상태 및 정상상태의 열유동 관계식들이 정립되어 있다. 최근에는 식품류의 지하 저온냉동 저장 및 암반의 냉열유동에 관한 실증 연구도 이루어지고 있다. 실제 지하에 건설되는 터널이나 공동은 완전 원형이 아닌 아치형이 일반적이는데, 이 경우는 이론적으로 밝혀져 있는 반무한평면내의 선형적인 열유동이나 원형공동 주위의 방사상 열유동과는 다른 양상을 가진다.

본 연구에서는 지하 냉장냉동저장 pilot plant를 운영하면서 계측된 저장실 주위암반내의 온도분포자료와 이론적 열전도에 의한 온도분포패턴의 비교를 통하여, 아치형 공동의 열원 경계조건을 갖는 새로운 열전도식을 도출하였다. 그리고, 암반내의 열전파와 온도분포에 미치는 열물성 변수들의 영향도 분석 및 도출된 열전도식과 현장계측에 의한 암반온도 분포양상의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하였다. 그리고 지하냉동저장공동의 열부하 변화추이를 평가하였다.

2. 비정상상태의 열전도

매질의 열전도가 등방성일 때 일반적인 열확산방정식(diffusion equation)은 다음과 같이 표현된다. 여기서, k_0 는 열전도도($w/m^{\circ}C$)이고 ρ 는 매질의 밀도(kg/m^3), C_p 는 매질의 비열($J/kg^{\circ}C$), T 는 온도, 그리고 α 는 열확산계수(thermal diffusivity)로서 m^2/sec 의 차원을 가지며 매질의 열전도 속도를 나타내는 척도가 된다.

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

상기 식의 특수해를 얻기 위한 가장 기본적인 경우로서, 지표와 같은 경계를 갖는 반무한 평면 형태의 암반을 생각할 수 있다. 이 경우에 경계면 열원의 온도를 T_1 , 암반의 초기온도를 T_0 라 할 때, 암반표면경계로부터 거리 x 지점

1) 정희원, 한국자원연구소 자원연구부 선임연구원
2) 정희원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수
3) 정희원, SK건설(주) 부장

에서 경과시간 t 일 때의 온도 T 는 앞의 (1)식을 주어진 경계조건하에서 적분함으로써 다음의 (2)식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{T - T_o}{T_1 - T_o} = [1 - \text{erf}(z_1)] - e^{-z_2^2(2z_1 + z_2)} \cdot [1 - \text{erf}(z_1 + z_2)] \quad (2)$$

여기서, $z_1 = x / (2\sqrt{\alpha t})$, $z_2 = (h\sqrt{\alpha t}) / k$ 로 정의되며 무차원이고, k 는 암반의 열전도도, h 는 표면열전달계수, α 는 열확산계수, 그리고 erf 는 오차 함수이다. x 가 작은 범위에서는 $\text{erf}(x)$ 는 (3)식으로 계산되며, (3)식이 수렴하지 않는 큰 범위의 x 에 대해서는 (4)식을 이용하여 $\text{erf}(x)$ 를 계산한다.

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\zeta^2} d\zeta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)n!} \quad (3)$$

$$\text{erf}(x) = 1 - \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^3} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-3)}{2^{n-1} x^{2n-1}} + \dots \right] \quad (4)$$

3. 지하냉동저장 pilot plant의 암반온도 계측

지하냉동저장 pilot plant는 한국자원연구소내 야산에 건설되어 있으며, 심도는 저장실의 천정을 기준으로 하여

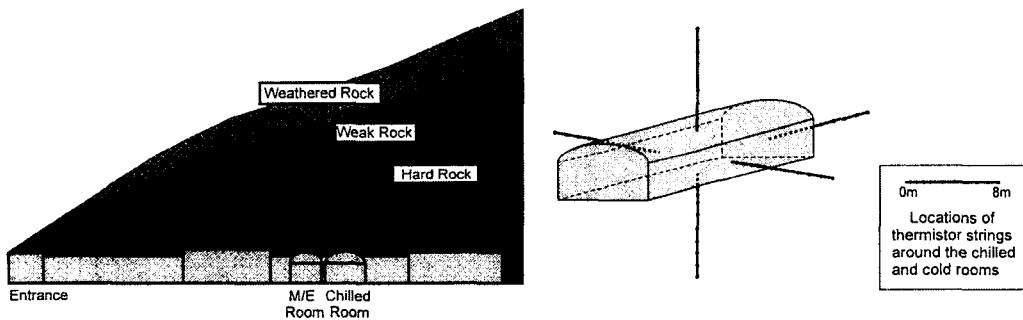


Fig. 1. Section view of cold storage pilot plant and installation of thermistor strings

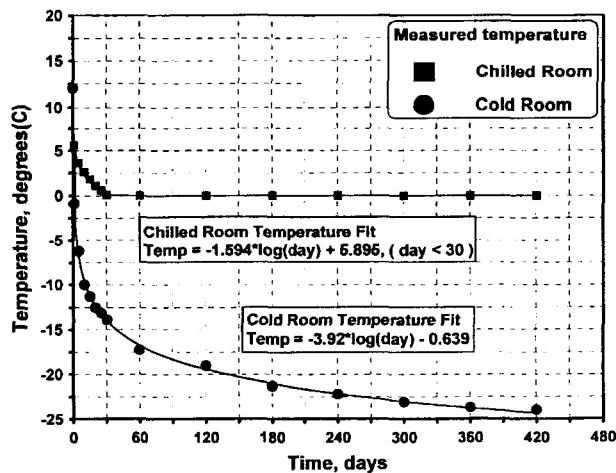


Fig. 2. Room Temperature drop in the chilled and cold rooms with cooling

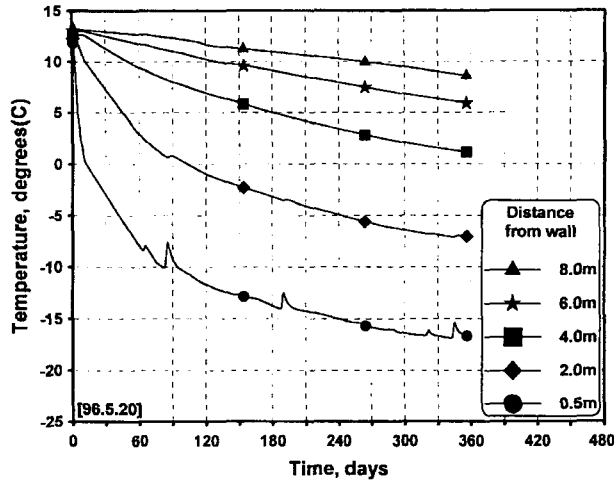


Fig. 3. Rock temperature distribution at the roof of the cold room

냉장실이 지표로부터 약 12 m 하부, 그리고 냉동실이 약 20 m 하부에 위치하고 있다. 두 개 저장실의 냉각에 따른 주위 암반의 열역학적 반응을 조사하기 위하여 냉장실과 냉동실, 그리고 실험실 주위의 암반내에 지중변위계(multi-point borehole extensometer), 지중온도계(thermistor string), 간극수압계(piezometer) 등을 설치하였다. 지하냉동저장 pilot plant의 전체적인 단면도 및 암반온도 계측을 위한 지중온도계의 설치 지점은 Fig. 1과 같다. 암반온도 측정용 thermistor string의 최대 설치 깊이는 저장실 벽면으로부터 8 m 이다.

각 저장실의 운영온도는 냉장실이 0°C, 냉동실이 -25°C로 설정되었는데 Fig. 2는 냉각시작후 각 저장실의 실내온도 계측결과이다. 그리고 저장실의 냉각에 따른 냉동실 천정부에서의 거리에 따른 온도분포를 한 예로서 Fig. 3에 나타내었다.

4. Pilot plant 공동에 대한 열전도식 도출

앞의 (2)식으로 표현되는 열전도식은 반무한평면내의 선형적 열유동에 대한 것으로서 원형이나 다른 형태의 열원 경계에 대해서는 그대로 적용할 수가 없다. 여기서는 이 기본식에 (5)식과 같이 형상함수(SF)를 도입함으로써 각 열원 경계에 부합되는 열전도식을 정의하였다. 여기서 반무한 평면내의 선형적 열전도의 경우는 SF = 1, 원형 공동 주위의 방사상 열전도의 경우는 단위면적당 열유량이 log(거리)에 반비례하므로 SF = log r₀ / log (r₀ + r)로 된다.

지하냉동저장 pilot plant의 아치형 공동의 경우에는 이 두가지 패턴의 중간적인 양상을 보여서 여기서는 (5)식에 몇가지 가능한 형상함수를 적용한 계산치와 현장 계측치의 비교를 통하여 적합한 형상함수를 결정하였다. 도출

된 최적 형상함수는 $SF = \sqrt{\frac{\log x_0}{\log(x_0 + x)}}$ 이며, x₀는 저장실 단면적에 상응하는 면적을 갖는 원에 대한 등가 반경이고 x는 벽면에서의 거리이다.

$$\frac{T - T_0}{T_i - T_0} = \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - e^{\frac{h}{k} \left(x + \frac{h}{k} \alpha t \right)} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h}{k} \sqrt{\alpha t} \right) \right] \cdot SF \quad (5)$$

비교를 위해 Fig. 4에 반무한평면조건, 원형공동조건 및 도출된 형상함수를 적용한 아치단면공동조건 3가지 형상함수에 대한 이론적 계산치와 pilot plant 주위의 암반온도 계측결과를 함께 나타내었다.

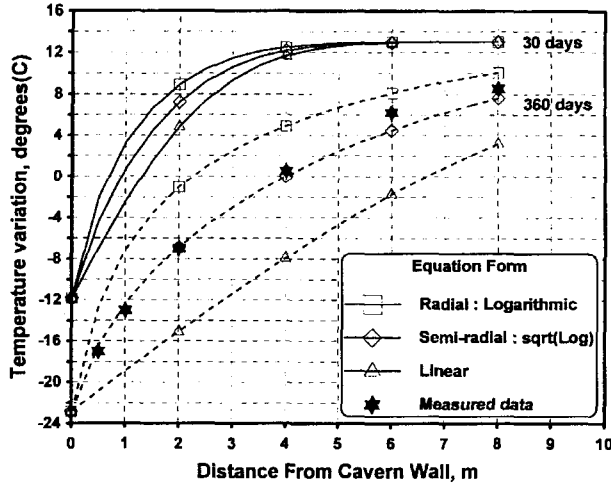


Fig. 4. Comparison of heat conduction equations with various shape functions

5. 무결암석의 열물성 측정 및 암반의 열물성 추정

5.1 무결암석의 열물성

실내시험을 통하여 지하 냉동저장 pilot plant가 건설된 암반인 복운모 화강암의 열물성을 측정하였는데, 그 결과는 Table 1과 같다. 열전도도는 $-20^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 범위에서 큰 변화가 없었고, 비열과 열팽창계수는 온도에 비례하는 양상을 보였는데 이로부터 선형회귀분석으로 추정된 0°C 부근에서의 비열은 $710 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ 로 계산되었다.

5.2 암반 열물성의 추정

실내시험에서 얻어진 열물성 자료의 현지암반 열물성으로의 적용성을 평가하기 위하여 앞서 유도된 열전도식 및 현장계측에 의한 암반온도분포를 비교하였다. 실내시험에 의한 열물성을 적용한 계산치와 계측치간에는 특히 시간이 경과하고 거리가 멀어질수록 차이가 뚜렷하게 나타났는데, 이는 실내시험에서 측정된 열물성을 그대로 암반의 열물성으로 적용하기에는 무리가 있음을 보여주는 것이다.

무결 암석의 열물성을 기초로 하여 암반온도 계측결과와 분석을 통해 암반 열물성을 평가하기 위해서는 먼저 각 열물성이 암반내의 열전과 및 온도분포에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 앞서 유도된 열전도식을 이용하여 열전도도, 비열, 표면열전달계수 등의 각 열물성의 상대적 영향도를 분석하였는데, 그 예로서 열전도도의 영향도는 Fig. 5와 같다.

이상의 결과를 토대로, 실내시험에 의한 열물성 및 상대적 영향도, pilot plant 공동에 대한 열전도식, 암반온도 계측자료 등을 종합적으로 비교하여 현장 암반의 열물성을 추정하였다. 이로부터 도출된 최종 결과는 Fig. 6과 같으며, 이 때의 열물성은 열전도도가 $2.08 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, 비열이 $885 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, 표면열전달계수가 $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 얻어졌다. 최종 결정된 열전도도는 실내시험에 의한 무결 암석의 열전도도에 비해 약 23% 작으며, 비열은 무결 암석의 비열에 비해 약 25% 크게 나타났다. 이 차이는 암반내의 절리와 지하수의 영향에 기인한 것으로 판단되며, 보다 정확한

Table 1. Thermal properties of granite by laboratory test

Thermal properties		Temperature range, $^{\circ}\text{C}$
Thermal conductivity ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	2.71~2.52	-20~27
Specific heat ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)	760~850	35~100
Thermal expansion coefficient ($\times 10^6 / ^{\circ}\text{C}$)	6.65~10.63	20~100

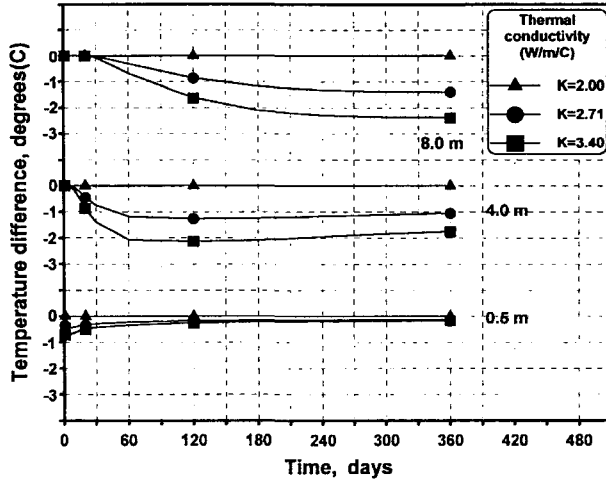


Fig. 5. Influence of thermal conductivity on temperature distribution trend

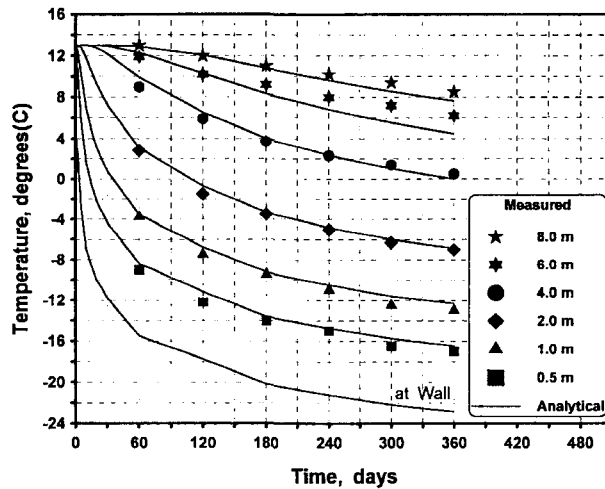


Fig. 6. Temperature distribution for the adjusted thermal properties of rock mass for the cold room

암반 열물성의 평가를 위해서는 현지암반의 절리분포와 함수비의 정량적인 측정 및 실제 현지암반내의 열물성 측정을 통하여 이러한 영향요소의 상관관계를 규명해야 한다.

6. Pilot plant의 열부하 및 냉동능력 평가

지하냉동저장 pilot plant의 냉장실은 3HP, 냉동실은 10HP의 냉동기를 사용하였다. Fig. 2에서 보듯이 냉장실은 약 1개월만에 목표온도인 0°C에 도달하여 이후 일정하게 유지가 되었으나, 냉동실은 1년이 경과하여도 목표온도인 -25°C에 도달하지 않았다. 이는 냉동실의 열부하가 냉동능력을 초과하는 것을 의미한다.

실제 전력량의 계속결과에서도 냉장실의 경우에 약 1년 후에는 전력량이 50% 정도로 감소하였으나, 냉동실의 경우는 변화가 없었다. 또한 이러한 분석은 앞서 도출된 열전도식, 추정된 암반 열물성, 그리고 열부하 발생요인 등을 고려한 해석적 방법으로도 예측되었다.

7. 결 론

본 연구에서는 지하 냉장냉동저장 pilot plant를 운영하면서 예측된 저장실 주위암반내의 온도분포패턴과 이론적 열전도에 의한 온도분포패턴의 비교를 통하여, pilot plant의 아치형 공동의 열원 경계를 갖는 열전도식을 도출하였다. 암반내 열전파에 미치는 열물성 변수들의 영향도 분석 및 도출된 열전도식과 현장계측에 의한 암반온도 분포양상의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하였다. 이를 토대로 pilot plant의 열부하 추이 분석 및 냉동능력을 평가하였다.

계측된 암반온도의 거리에 따른 분포패턴은 선형적 변화와 로그함수적 변화의 중간적인 양상을 나타내었다. 이를 토대로, 기존의 선형적인 열전도 기본식에 semi-radial 형태의 형상함수를 도입하여 pilot plant의 아치형 공동에 대한 새로운 열전도식을 유도하였다. 유도된 열전도식으로 계산한 온도분포 결과와 실제 계측된 암반온도분포의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하였는데, 열전도도와 비열은 20% 내외의 차이를 보였다. 이는 암반내의 절리와 지하수의 영향에 기인한 것으로 판단되었다.

Pilot plant 운영에 따른 소요전력량의 예측결과, 냉장실의 경우는 약 1년 후에는 전력량이 50% 정도로 감소하였으나, 냉동실의 경우는 변화가 없어서 냉동실의 열부하는 냉동기 냉동능력을 초과하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김호영 외, 1997, 에너지 절약형 지하 냉장 및 냉동저장 설계기술개발, 통상산업부 보고서, 282p.
2. Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger, 1989, Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, pp. 50-91.
3. Kim, H.Y., Y.J. Park and K.C. Nam, 1994, Feasibility study for underground frozen meat storage, '94 Int'l Symp. for Grain Elevator and Underground Food Storage, pp. 319-351.
4. Park, Y., J.H. Synn, C. Park and H.Y. Kim, 1997, Analysis of thermo-mechanical behavior of underground cold storage cavern, 1st Asian Rock Mechanics Symp.-Environmental and Safety Concerns in Underground Construction, pp. 731-736.
5. Pribnow, Daniel F.C. and John H. Sass, 1995, Determination of thermal conductivity for deep boreholes, Journal of Geophysical Research, 100(B6), pp. 9981-9994.