

아치형 냉동저장공동 주위암반의 비정상상태 열전도 특성 및 열물성 평가

신중호¹⁾ · 박연준²⁾ · 김호영³⁾ · 박 찬¹⁾

Transient Heat Conduction in Rock Mass Around Arch Shape Cold Storage Cavern and Estimation of In-situ Thermal Properties

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

ABSTRACT The characteristics of heat conduction for the heat source boundary like an arch shape cavern are different from those for the semi-infinite or circular boundary which can be driven theoretically. A new form of transient heat conduction equation in rock mass around the arch shape cavern is evaluated with analyzing the pattern of the rock temperature distribution measured at the cold storage pilot plant. The new equation, which is driven by adopting a shape function, $SF = \sqrt{\log x_0 / \log(x_0 + x)}$ to the solution for a semi-infinite boundary, has the semi-radial form of temperature variation with distance. And, thermal properties of rock mass are estimated by comparing the rock temperature distributions by this equation with those by measurement. Thermal conductivity and specific heat of rock mass are estimated as giving the difference of 20~25% compared to those of laboratory scale. This difference seems to be caused by discontinuity like joint and water content in rock mass.

Key words : transient heat conduction, underground cold storage, rock temperature, arch shape heat boundary, in-situ thermal property

초 록 아치형 공동의 열원 경계에 대한 열전도 특성은 반무한평면이나 원형공동에 대한 열전도 특성과는 다른 양상을 나타낸다. 본 연구에서는 지하 냉동저장 pilot plant의 운영을 통하여 측정된 저장공동 주위암반내 온도분포패턴의 분석을 통하여 아치형 공동의 열원 경계를 갖는 새로운 열전도식을 유도하였다. 측정된 암반온도 분포패턴은 선형적 변화와 로그함수적 변화의 중간적인 양상을 보였으며, 이로부터 아치형 공동에 대한 열전도식을 기존의 선형적인 열전도 기본식에 semi-radial 형태의 형상함수, $SF = \sqrt{\log x_0 / \log(x_0 + x)}$ 를 도입하여 도출하였다. 그리고, 열전도에 미치는 열물성 변수들의 영향도 분석 및 도출된 열전도식과 현장측정에 의한 암반온도 분포양상의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하였다. 추정된 암반의 열전도도와 비열은 실내시험에 의한 무결 암석의 열물성과 비교해 20~25%의 차이를 보였다. 이는 암반내의 절리와 지하수의 영향에 기인한 것으로 판단되는데, 앞으로 현지암반에 대한 이들 영향요소의 조사와 열물성의 측정 및 비교분석을 통하여 정량적인 상관관계의 규명이 이루어져야 할 것이다.

핵심어 : 비정상상태 열전도, 지하냉동저장, 암반온도, 아치형 열원경계, 현지암반 열물성

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. 또한 지상환경문제와 더불어 지하암반의 차폐성, 안전성과 연계하여 방사성폐기물 처분장으로서의 활용에 관한 연구도 세계적으로 이루어

지고 있다. 이러한 분야에 있어서 암반의 열물성 및 열유동 특성은 매우 중요한 요소로서, 이는 장기적인 에너지절약 및 지하구조물의 열역학적 안정성의 정확한 평가와 직접적 연관이 된다.

1) 정회원, 한국자원연구소 자원연구부 선임연구원
2) 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수
3) 정회원, SK건설(주) 부장
원고 접수일 : 1998년 11월 6일
원고 심사 완료일 : 1998년 12월 20일

암반을 비롯한 어떤 재료내의 열유동에 관한 이론적 연구는 많은 학자들에 의해 이루어져 왔고, 특정 경계 조건을 갖는 경우에 대한 비정상상태 및 정상상태의 열유동 관계식들이 정립되어 있다(Carlslaw 외, 1989; Geankoplis, 1993; Lange, 1985; McCabe, 1976; Mills, 1995; Özisik, 1977). 최근에는 식품류의 지하 저온냉동저장 및 암반의 냉열유동에 관한 실증 연구도 이루어지고 있다(Bollingmo, 1993; Broch 외, 1994; Dorum, 1977; Kim 외, 1994; Park 외, 1997; Tressler, 1986). 실제 지하에 건설되는 터널이나 공동은 완전 원형이 아닌 아치형이 일반적이는데, 이 경우는 이론적으로 밝혀져 있는 반무한 평면 내의 선형적인 열유동이나 원형공동 주위의 방사상 열유동과는 다른 양상을 가진다.

또한, 현지암반은 절리와 같은 불연속면이나 지하수를 내포하고 있는데, 이들 요소들은 암반의 열전도도나 비열 등의 열물성에 큰 영향을 미치므로, 실내시험으로 측정되는 무결 암석의 열물성과는 차이가 있다. Pribnow 등(1995)은 암석과 물의 혼합체에 대한 열전도도를 측정하여 함수비의 영향을 분석하였으며, Fujita 등(1995)은 수리열역학적 수치해석에서 열전도도와 비열을 함수비에 비례적인 관계로 규정하여 적용한 바도 있다.

이러한 암반 열물성의 절리분포도 및 지하수와와의 상관관계, 그리고 아치형과 같은 일반적 형태의 공동 내부에 열원(heat source)을 갖는 경우의 주위 암반내 열유동 특성 등은 보다 정량적으로 규명되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 지하 냉장냉동저장 pilot plant를 운영하면서 계측된 저장실 주위암반내의 온도분포자료과 이론적 열전도에 의한 온도분포패턴의 비교를 통하여, 아치형 공동의 열원 경계조건을 갖는 새로운 열전도식을 도출하였다. 그리고, 암반내의 열전도와 온도분포에 미치는 열물성 변수들의 영향도 분석 및 도출된 열전도식과 현장계측에 의한 암반온도 분포양상의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하고, 실내시험으로 측정된 무결 암석의 열물성과의 차이를 검토하였다.

2. 비정상상태의 열전도

2.1 열전도의 기본식

지하 암반내에 임의의 열원을 갖는 공동이 있을 때, 그 주위로의 열유동은 암반의 초기 온도와 공동내 온도간의 차이에 의한 암반 내부에서의 전도, 그리고 공동

벽면과 내부 공기와의 접촉면에서 발생하는 표면전도에 의하여 발생한다. 복사열의 영향은 지표면에 국한되므로 지하 공동의 경우에는 무시될 수 있다. 지하냉동 저장 공동의 경우, 이러한 열유동은 저장실의 냉각기동 초기에 암반자체의 온도변화와 열전도가 함께 일어나는 비정상상태(transient state)의 과정을 거쳐 시간이 경과하면서 점차 열전도만 일어나는 정상상태(steady state)에 도달하게 된다.

전도에 의한 열유동의 기본식은 Fourier의 법칙에 따라 (1)식과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 q_i 는 i 방향으로의 단위면적당 열유동량(w/m^2)이며, k_{ij} 는 열전도 계수텐서(w/m^2C)이고 T 는 온도이다.

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (1)$$

비정상상태의 열유동에서는 일부 열이 매질 자체에 축적되어 매질의 온도 변화를 유발하게 되는데, 온도의 변화와 열유동량의 관계는 (2)식과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{net}}{C_p m} = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

여기서 Q_{net} 는 매질에 유입되는 실제 열량 즉, 유입량과 유출량의 차이이며, ρ 는 매질의 밀도(kg/m^3), C_p 는 매질의 비열($J/kg^{\circ}C$), m 은 매질의 질량(kg)이다. 이 두 식이 열유동의 기본식이며, 두 식을 합치면 (3)식으로 되고 이를 열확산 방정식(diffusion equation)이라 한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p \rho} \left\{ k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (3)$$

매질의 열전도가 등방성이라면 (3)식은 다음의 (4)식으로 표현되는데, α 는 열확산계수(thermal diffusivity)로서 m^2/sec 의 차원을 가지며 이는 매질의 열전도 속도를 나타내는 척도가 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{k}{C_p \cdot \rho} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \\ &= \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

비정상상태에서는 열의 유동이 매질 자체의 온도변화를 수반하므로 열유속(heat flux)은 매질내에서 일정하지 않게 된다. 등방성 매질의 경우 (4)식에 의하여 매질내의 온도 분포가 구해지는데, 이의 일반해는 특정한

형태와 경계조건을 갖는 경우에 한해서 얻을 수 있다.

2.2 반무한평면 및 원형공동 주위의 열전도

상기 (4)식의 특수해를 얻기 위한 가장 기본적인 경우로서, 지표와 같은 경계를 갖는 반무한평면 형태의 암반을 생각할 수 있다. 이 경우에 경계면 열원의 온도를 T_i , 암반의 초기온도를 T_0 라 할 때, 암반표면경계로부터 거리 x 지점에서 경과시간 t 일 때의 온도 T 는 앞의 (4)식을 주어진 경계조건 하에서 적분함으로써 다음의 (5)식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{T-T_0}{T_i-T_0} = [1 - \text{erf}(z_1)] - e^{z_2(2z_1+z_2)} \cdot [1 - \text{erf}(z_1+z_2)]$$

$$= \text{erfc}(z_1) - e^{z_2(2z_1+z_2)} \cdot \text{erfc}(z_1+z_2) \quad (5)$$

여기서, $z_1 = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$, $z_2 = \frac{h}{k}\sqrt{\alpha t}$ 로 정의되며 무차원이고, k 는 암반의 열전도도, h 는 표면 열전달계수, α 는 열확산계수, 그리고 erfc 는 오차 함수이다.

x 가 작은 범위에서는 $\text{erfc}(x)$ 는 (6)식으로 계산되며, 이때 이 무한급수는 수렴한다. (6)식이 수렴하지 않는 큰 범위의 x 에 대해서는 (7)식을 이용하여 $\text{erfc}(x)$ 를 계산한다. 이 경우에 $\text{erfc}(x)$ 의 무한급수는 수렴하지 않으며, 제 n 번째 항까지 택하여 계산할 때 n 번째 항 이후의 나머지에 해당하는 오차가 n 번째 항보다 크지 않도록 결정한다.

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)n!} \quad (6)$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erfc}(x)$$

$$= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$$

$$= 1 - \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^3} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-3)}{2^{n-1} x^{2n-1}} + \dots \right] \quad (7)$$

그리고, 거리에 따른 온도 변화율 및 시간에 따른 온도 변화율은 각각 (5)식을 시간 및 거리에 대하여 미분함으로써 (8)식 및 (9)식과 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -(T_i - T_0) \cdot \frac{h}{k} \cdot e^{z_2(2z_1+z_2)} \cdot \text{erfc}(z_1+z_2) \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(T_i - T_0)$$

$$\left[\frac{h^2}{k^2} \alpha \cdot e^{z_2(2z_1+z_2)} \cdot \text{erfc}(z_1+z_2) - \frac{h\sqrt{\alpha}}{k\sqrt{\pi t}} \cdot e^{-z_1^2} \right] \quad (9)$$

이상의 식들로부터 비정상 상태의 열유동의 경우, 암반표면에 전달되는 단위 면적당의 열유량은 (1)식에 의거하여 (10)식 또는 (11)식과 같이 계산된다.

$$q = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}$$

$$= (T_i - T_0) \cdot h \cdot e^{\frac{h^2}{k^2} \alpha t} \cdot \text{erfc} \left(\frac{h}{k} \sqrt{\alpha t} \right) \quad (10)$$

$$q = h(T_i - T_{x=0}) \quad (11)$$

또 하나의 이론적 특수해를 얻을 수 있는 경우로는 원형실린더나 원형공동 형태가 있다. 원형공동 내부에 열원이 있을 때 주위의 열전도는 방사상으로 일어난다

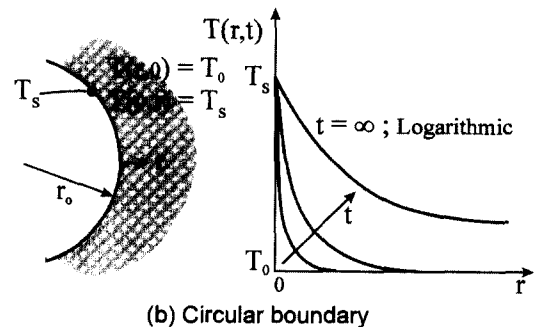
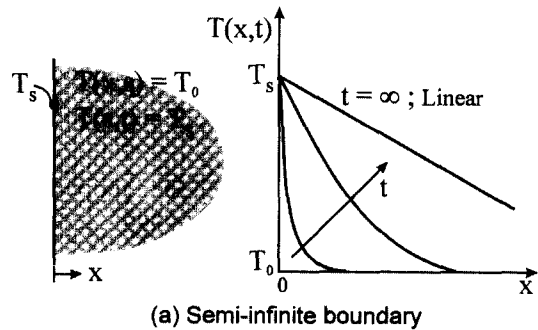


Fig. 1. Heat conduction patterns with boundary conditions

다. Fig. 1은 반무한평면 및 원형공동 주위의 열유동에 따른 온도분포패턴을 비교하여 나타낸 것이다. 정상상태에 도달함에 따라 반무한평면에서는 열원 경계로부터의 거리에 따른 온도분포가 선형적이며, 원형공동의 경우는 방사상으로 로그함수적인 변화패턴을 보인다.

3. 지하냉동저장 pilot plant의 압반온도 계측

지하냉동저장 pilot plant는 한국자원연구소 내 야산에 건설되어 있으며, 압반은 조립질의 복운모 화강암이다. Pilot plant는 냉장실, 냉동실, 실험계측실, 기계실, 그리고 통로로 이루어져 있다. 이중 냉각이 이루어지는 냉장실과 냉동실의 규모는 각각 4.5 m×3 m×8 m(W×H×L) 및 4.5 m×3 m×10 m(W×H×L)이다. 건설 심도는 저장실의 천정을 기준으로 하여 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 암반 내에 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. 2와 같다. 암

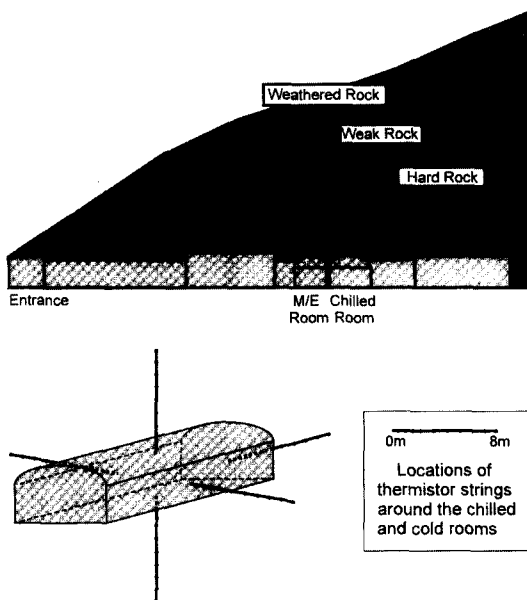


Fig. 2. Section view of cold storage pilot plant and installation of thermistor strings

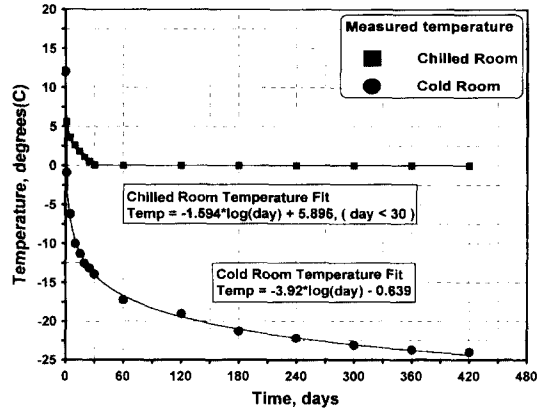


Fig. 3. Room Temperature drop in the chilled and cold rooms with cooling

반온도 측정용 thermistor string의 최대 설치 깊이는 저장실 벽면으로부터 8 m 이고, 이 사이에 0.5 m 또는 1.0 m 간격으로 총 10개의 측점이 설치되어 있다.

냉동실의 냉각은 1996년 5월 20일에 시작되었고, 냉장실의 냉각은 105일 후인 9월 2일에 시작되었다. 각 저장실의 운영온도는 냉장실이 0°C, 냉동실이 -25°C로 설정되었다. 냉각시작후 각 저장실의 실내온도 계측결과는 Fig. 3과 같다. 냉장실의 실내온도는 약 1개월 후에 설정온도인 0°C에 도달하였다. 냉동실의 실내온도는 냉각 시작후 약 4개월이 지나서 -20°C 까지 저하되었고 점차 저하 정도가 둔화되면서 1년후에는 -24°C에 접근하는 양상을 보였다. 냉동실의 실내온도가 설정온도인 -25°C에 도달하지 못한 것은, 설치된 냉동기의 용량(10 HP)이 냉동실의 실제적 열부하에 비해 충분하지 못했던 것으로 판단된다.

저장실의 냉각에 따른 주위 암반내 온도저하 계측결과의 예로서, 냉장실의 우측벽부 및 냉동실의 천정부에서의 거리에 따른 온도분포를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 냉장실의 경우, 벽면에서 0.5 m 지점의 암반온도는 냉장실 냉각시작 후 약 4개월이 지나면서 4°C까지 저하되었고 거의 안정화된 양상을 보였다. 벽면 가까이에서의 온도저하율은 약 2°C/m이고, 벽면에서 멀어질수록 점차 감소하여 8 m 깊이에서는 0.5°C/m로 나타났다. 냉장실 천정부의 벽면에서 상부쪽으로 8 m 지점의 암반온도는 계절적인 변화를 보였는데, 이는 이 지점에서 상부 지표까지의 거리가 10 m 이내여서 외부 기온변화의 영향을 받았기 때문으로 보인다. 냉동실의 경우, 냉각시작 후 1년이 경과되면서 벽면에서 0.5 m 지점의 암반온

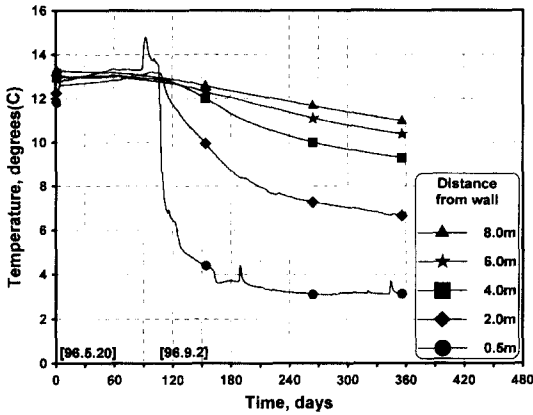


Fig. 4. Rock temperature distribution at the right side of the chilled room

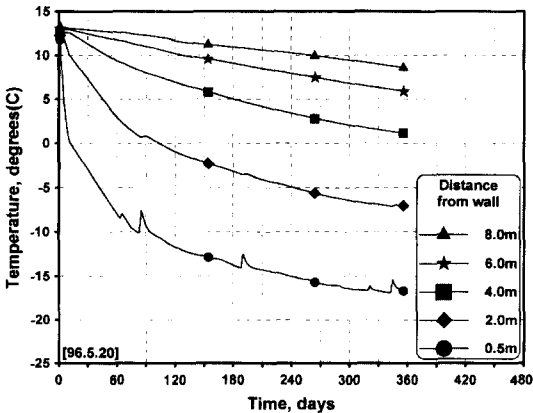


Fig. 5. Rock temperature distribution at the roof of the cold room

도는 -17°C, 8 m 깊이에서는 9°C까지 저하되었지만 아직 안정화된 양상은 보이지 않았다. 거리에 따른 온도저하율은 벽면 근처에서는 12°C/m이고 멀어질수록 점차 저하되어 8 m 깊이에서는 약 1.5°C/m로 나타났다.

4. Pilot plant 공동에 대한 열전도식 도출

앞의 (5)식으로 표현되는 열전도식은 반무한평면 내의 선형적 열유동에 대한 것으로서 원형이나 다른 형태의 열원 경계에 대해서는 그대로 적용할 수가 없다. 여기서는 이 기본식에 어떠한 형상함수(SF)를 도입함으로써 각 열원 경계에 부합되는 열전도식을 (12)식과 같이 정의하였다. 여기서 반무한 평면 내의 선형적 열전도의 경우는 SF=1, 원형공동 주위의 방사상 열전도의 경우는 단위면적당 열유량이 log(거리)에 반비례하므로

$SF = \frac{\log r_0}{\log(r_0 + r)}$ (r_0 는 원형공동의 반경, r 은 벽면에서의 방사상 거리)로 규정할 수 있다. 본 연구에서 다루는 지하 냉동저장 pilot plant의 아치형 공동의 경우에는 이 두가지 패턴의 중간적인 양상을 보인다는 것은 직관적으로 알 수가 있지만 특정한 경계 조건을 규정할 수가 없으므로, 여기서는 (12)식에 여러 가지 형상함수를 적용한 계산치와 현장 계측치의 비교를 통하여 적합한 형상함수를 결정하는 과정을 거쳤다.

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - e^{\frac{h}{k} \left(x + \frac{h}{k} \alpha t \right)} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h}{k} \sqrt{\alpha t} \right) \right] \cdot SF \quad (12)$$

즉, 계측된 암반온도분포패턴을 표현할 수 있는 수학적 함수들에는 polynomial, 지수함수, 로그함수 등이 있는데, 원형공동경계의 방사상 열전도패턴이 로그함수형태(Fig. 1(b) 참조)이므로 이와와의 연관성을 고려하여 형상함수의 기본 형태를 로그함수형태로 선택하였다. 그리고 이 기본적 로그함수에 지수를 도입하여 $(\log x)^a$ 의 형태로 형상함수를 설정하고, 계측결과가 linear 및 로그함수적 변화패턴의 중간 형태를 보이므로 $-1 < a < 0$ 의 범위내에서 계측결과 패턴에 가장 근접한 형태를 갖는 a 값을 선정하였다. 최종적으로 $a = -\frac{1}{2}$ 로 결정되었는데 즉, 로그함수의 제곱근의 형태로 언어졌다.

형상함수 도출과정에서 이용된 열물성은 일차적으로 실내시험에서 얻어진 값(뒤의 5.1절 참조)을 적용하였고, 뒤의 6절에서 기술한 현장계측과 비교를 통한 암반 열물성 추정 과정속에서 재검증을 하였다. 이상과 같은 과정 및 경계조건을 고려하여 최종적으로 결정된 최적 형상함수는 (13)식으로 언어졌다. 그리고 비교를 위해 Fig. 6에 반무한평면조건, 원형공동조건, 그리고 도출된 형상함수를 적용한 아치단면공동조건 3가지 형상함수에 대한 이론적 계산치와 pilot plant 주위의 암반 온도 계측결과를 함께 나타내었다. Fig. 6에서 도출된 형상함수를 적용한 열전도식으로 계산된 온도분포패턴은 semi-radial로 명명하여 나타낸 것이다.

$$SF = \sqrt{\frac{\log x_0}{\log(x_0 + x)}} \quad (13)$$

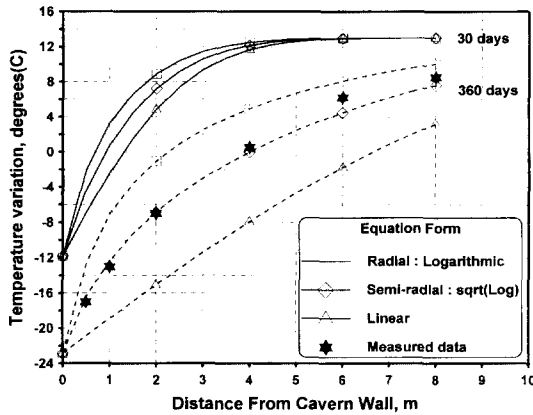


Fig. 6. Comparison of heat conduction equations with various shape functions

여기서, x_0 는 저장실 단면적에 상응하는 면적을 갖는 원에 대한 등가 반경이며, x 는 벽면에서의 거리이다.

5. 열물성 및 열전파에 미치는 영향도 분석

5.1 화강암의 열물성

실내시험을 통하여 지하 냉동저장 pilot plant가 건설된 암반인 복운모 화강암의 열물성을 측정하였다. 열전도도는 -20°C ~상온, 비열은 30°C ~ 100°C , 열팽창계수는 20°C ~ 100°C 의 온도범위에서 측정되었는데, 그 결과는 Table 1과 같다. 열전도도는 -20°C ~ 0°C 범위에서 큰 변화가 없었다. 비열과 열팽창계수는 온도에 비례하는 양상을 보였는데(온도에 대해 선형적 관계를 보이는 측정 결과 그래프 등의 자세한 내용은 김호영 등(1997)의 기발행 연구보고서 참조), 이로부터 선형회귀분석으로 추정된 0°C 부근에서의 비열은 $710 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ 로 계산되었다. 참고로 Table 2에 몇가지 재료에 대한 열물성 자료를 수록하였다(Carslaw 외, 1989).

Table 1. Thermal properties of granite by laboratory test

Thermal property		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

Table 2. Thermal properties of various materials

Materials	Temperature K	Thermal conductivity W/mK	Specific heat J/kgK
Water	275	0.556	4217
	285	0.580	4192
Air	270	0.025	1009
Ice	273	2.22	1930
Dry soil	300	1.00	1900
Wet soil	300	2.00	2200

5.2 열전파에 미치는 영향도

현지암반의 열물성은 내포된 절리나 지하수의 영향으로 인해 실내시험으로 측정되는 무결 암석의 열물성과는 차이가 있다. 무결 암석의 열물성을 기초로 하여 암반 온도계측결과의 분석을 통해 암반 열물성을 평가하기 위해서는 먼저 각 열물성이 암반 내의 열전파 및 온도분포에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 앞에서 유도된 새로운 열전도식을 이용하여 각 열물성의 변화에 따른 상대적 영향도를 분석하였다. 각 열물성의 분석 범위는, 열전도도는 절리가 있으면 낮아지고 물이 있으면 높아지므로 실험실 측정치보다 낮은 경우와 높은 경우를 모두 고려하여 $2.0\sim 3.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, 비열은 절리와 물이 있으면 높아지므로 실험실 측정치보다 높은 쪽만을 고려하여 $710\sim 1710 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, 그리고 표면 열전달계수는 기존 자료(Geankoplis, 1993)로부터 정채공기와 대류공기의 특성을 포함할 수 있도록 $5\sim 15 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 하였다.

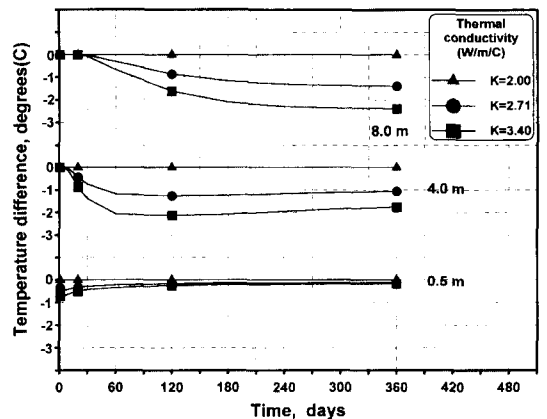


Fig. 7. Influence of thermal conductivity on temperature distribution trend

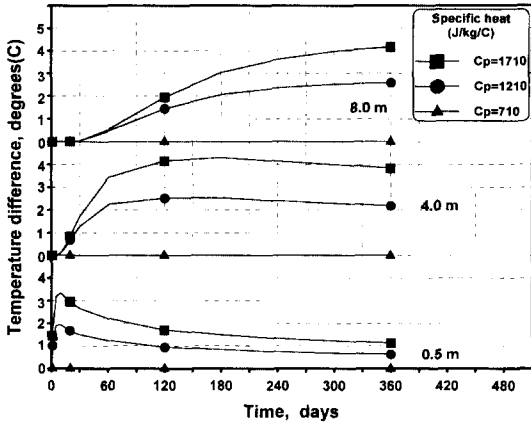


Fig. 8. Influence of specific heat on temperature distribution trend

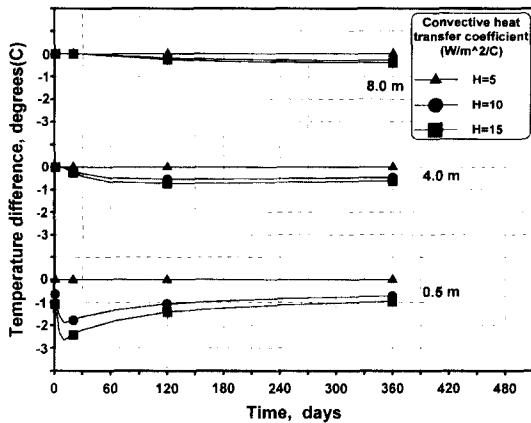


Fig. 9. Influence of convective heat transfer coefficient on temperature distribution trend

각 열물성별 영향도 분석 결과는 Fig. 7~Fig. 9와 같다. 열전도도는 벽면에서 비교적 먼 거리에서의 온도에 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다. 비열은 냉각 초기단계에서는 벽면에 가까운 영역에서, 그리고 장기적으로는 먼 거리에서 영향을 크게 미치는 것으로 나타났다. 그리고 표면 열전달계수는 냉각 초기단계에서 벽면에 가까운 영역에서의 암반온도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

6. 암반 열물성의 추정 및 검토

실내시험에서 얻어진 열물성 자료의 현지암반 열물성으로의 적용성을 평가하기 위하여, 앞에서 유도된 새로운 열전도식에 실험실 열물성 자료를 적용하여 계산된

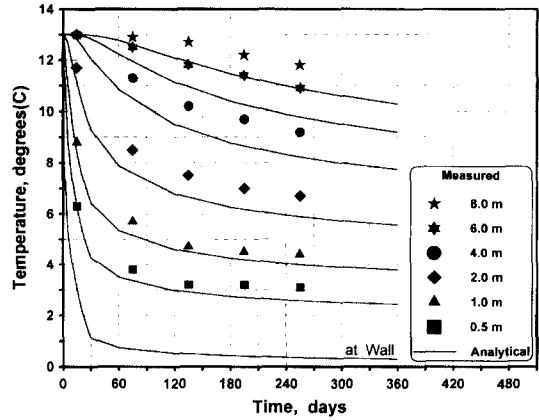


Fig. 10. Comparison of rock temperature trends by calculation using intact thermal properties and by measurement for the chilled room

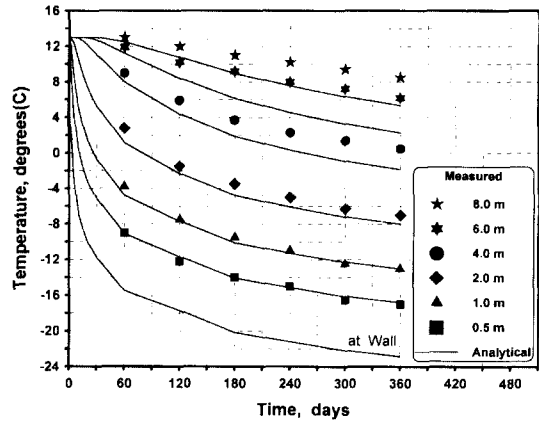


Fig. 11. Comparison of rock temperature trends by calculation using intact thermal properties and by measurement for the cold room

온도분포 결과와 실제 계측된 암반온도분포를 비교하였다(Fig. 10 및 Fig. 11 참조). 추정된 열물성은 온도에 따라 변화가 있는데, 저장실 및 주위암반의 온도변화 범위를 고려하여 0°C 부근에서의 열물성을 대표값으로 선택하여 계산에 적용하였다. 즉, 열전도도는 2.71 W/m²C, 비열은 710 J/kg°C로 하였고 표면 열전달계수는 기존 자료(Geankoplis, 1993)를 참고하여 정체공기와 대류공기의 경계 범위에 해당되는 10 W/m²C를 적용하였다. 실내시험에서 측정된 열물성을 적용한 계산치와 계측치간에는 차이가 있으며 특히 시간이 경과하고 거리가 멀어질수록 보다 뚜렷하게 나타났다. 이는 곧 실내시험에서 측정된 열물성을 그대로 암반의 열물성으로 적용하기에는 무리가 있음을 보여주는 것이다.

이상의 결과를 토대로, 실내시험에 의한 열물성 및 상대적 영향도, pilot plant 공동에 대한 열전도식, 암반온도 계측자료 등을 종합적으로 비교하여 현장 암반의 열물성을 추정하였다. 그 과정은, 먼저 실내시험에 의한 열물성 조합을 초기치로 하여 주어진 열물성 조합에 대한 계산결과와 계측치와의 비교를 통해 나타나는 차이의 발생 시기와 거리 및 그 크기를 파악한다. 그리고, 각 열물성이 시간과 거리에 따라 암반온도분포에 미치는 영향도 분석 자료(앞의 5.2절 참조)로부터, 발생된 차이에 상대적으로 많은 영향을 미치는 열물성을 판정하여 발생된 차이의 크기에 따라 결정된 변화량 만큼 증감시켜가면서 재차 비교, 수정한다. 이러한 과정을 반복하면서 최종적으로 계측결과에 가장 근접하는 계산결

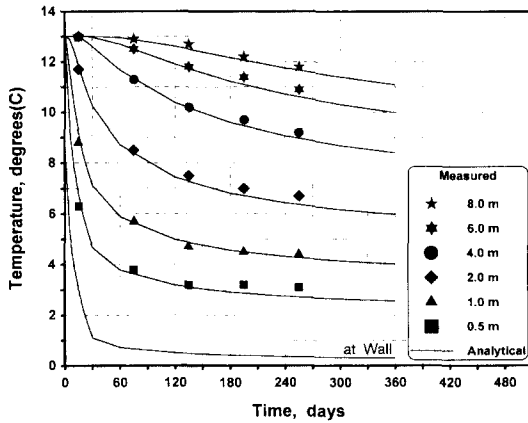


Fig. 12. Temperature distribution for the adjusted thermal properties of rock mass for the chilled room

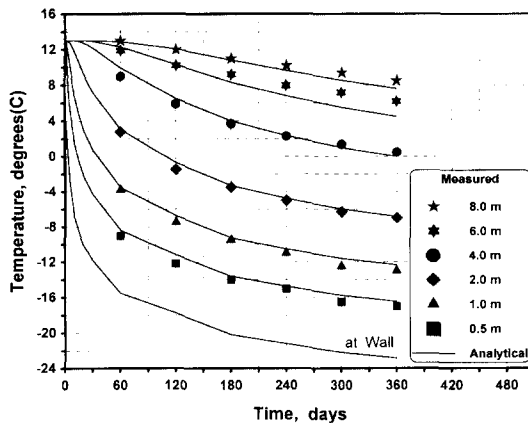


Fig. 13. Temperature distribution for the adjusted thermal properties of rock mass for the cold room

과를 나타내는 열물성 조합을 도출하였다.

이로부터 도출된 최종 결과는 Fig. 12 및 Fig. 13과 같으며, 이 때의 열물성은 열전도도가 2.08 W/m°C, 비열이 885 J/kg°C, 표면열전달계수가 10 W/m²°C로 얻어졌다. 최종 결정된 열전도도는 실내시험에 의한 무결암석의 열전도도에 비해 약 23% 작으며, 비열은 무결암석의 비열에 비해 약 25% 크게 나타났다. 이러한 차이는 이미 언급한 바와 같이 암반내의 절리와 지하수의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

이와 관련한 연구 보고로서, Pribnow 등(1995)은 gneiss와 amphibolite의 두 암석에 대하여 암석과 물의 상대적 혼합비에 따른 열전도도의 변화를 측정하여, 건조상태 즉, 암석이 100% 일 때에 비해 암석과 물의 부피 혼합비가 80%:20%가 되면 열전도도는 각각 32~36% 및 23~26% 감소된 것으로 보고한 바 있다. 그는 혼합체의 열전도도, λ 의 계산식으로 기하평균모델에서는 $\lambda = \lambda_r^\phi \cdot \lambda_w^{1-\phi}$, 층서모델에서는 $\lambda = \lambda_r^{0.5} \cdot \lambda_w^{0.5}$ 을 이용하였다. 여기서, λ_r 는 암석의 열전도도, λ_w 는 물의 열전도도, ϕ 는 물의 부피혼합비율이며, 층서모델에서 λ_U 는 상한치(층서에 평행한 방향)로서 혼합비에 따른 암석과 물의 열전도도의 산술평균치, λ_L 은 하한치(층서에 직각 방향)로서 이들의 조화평균치이다. 그리고, Fujita 등(1995)은 방사성폐기물 지하처분과 관련한 수리열역학적 수치해석에서 함수비에 따른 열전도도, λ 와 비열, C 를 $\lambda = 0.33 + 3.1 \theta$ W/m°C, $C = (0.2 \rho_a + \theta) / (\rho_a + \theta)^2$ kJ/kg°C로 고려한 바 있다. 여기서, 함수비가 0 일 때의 값 즉, $\lambda = 0.33$ 및 $C = 0.2 / \rho_a$ 가 자연건조상태인 무결암석(intact rock)의 열물성 값이며, ρ_a 는 건조 밀도, θ 는 함수비이다.

이상의 연구 보고에서와 같이 암반의 열전도도와 비열은 절리분포와 함수비에 어느 정도 비례적인 관계를 가지는 것으로 볼 수 있는데, 보다 정확한 암반 열물성의 평가를 위해서는 현지암반의 절리분포와 함수비의 정량적인 측정 및 실제 현지암반내의 열물성 측정을 통하여 이러한 영향요소의 상관관계를 규명해 나가야 할 것이다.

7. 결 론

본 연구에서는 지하 냉장냉동저장 pilot plant를 운영하면서 계측된 저장실 주위암반내의 온도분포패턴과 이론적 열전도에 의한 온도분포패턴의 비교를 통하여,

pilot plant의 아치형 공동의 열원 경계를 갖는 열전도식을 도출하였다. 그리고, 암반내의 열전도와 온도분포에 미치는 열물성 변수들의 영향도 분석 및 도출된 열전도식과 현장계측에 의한 암반온도 분포양상의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하고, 실내시험으로 측정된 무결 암석의 열물성과의 차이를 검토하였다.

계측된 암반온도의 거리에 따른 분포패턴은 선형적 변화와 로그함수적 변화의 중간적인 양상을 나타내었다. 이를 토대로, 기존의 선형적인 열전도 기본식에 형상함수를 도입하여 pilot plant의 아치형 공동에 대한 새로운 열전도식을 유도하였으며, 최적 형상함수는 semi-radial의 형태인 $\sqrt{\log x_0 / \log(x_0 + x)}$ 로 얻어졌다. 이 형상함수의 적합성 검증을 위한 실제적 방법으로 계측결과와 비교해 보면, 도출된 열전도식은 아치형 냉동저장 공동의 벽면부터 8 m 거리까지의 영역에 대한 1년간의 암반온도 계측결과와 잘 부합하였다. 즉, 도출된 형상함수는 아치형 공동벽면에서 비교적 멀지 않은 영역에서는 아치형 경계의 특성을 잘 표현하는 것으로 나타났다. 한편, 공벽으로부터 거리가 멀어질수록 아치형 열원 경계의 영향은 점차 줄어들게 되고 완전 방사상의 열전도 형태에 접근해 갈 것이다. 도출된 형상함수를 적용한 열전도식이 이러한 아치형 공동 주위의 모든 공간 영역 및 시간 영역에 대한 열전도 특성을 표현할 수 있는가에 대해서는, 현재로는 비교해 볼 수 있는 계측자료가 없지만 앞으로 계측자료 획득이 이루어지면 실제적인 적합성 검증이 가능할 것이다.

열전도와 온도분포패턴에 미치는 열물성의 영향도를 보면, 열전도도는 벽면에서 비교적 먼 거리에서, 비열은 냉각 초기단계에서는 벽면 가까이 그리고 장기적으로는 먼 거리에서, 표면열전달계수는 냉각 초기단계의 벽면에 가까운 영역에서 암반온도에 영향을 많이 미치는 것으로 분석되었다.

유도된 열전도식으로 계산한 온도분포 결과와 실제 계측된 암반온도분포의 비교를 통하여 암반의 열물성을 추정하였다. 추정된 열전도도는 실내시험에 의한 무결 암석의 열전도도에 비해 약 23% 작으며, 비열은 무결 암석의 비열에 비해 약 25% 크게 나타났다. 이러한 차이는 암반내의 절리와 지하수의 영향에 기인한 것으로 판단된다. 암반의 열전도도와 비열은 절리분포도와 함수비에 어느 정도 비례적인 관계가 있음을 알 수 있는데, 절리분포와 함수비의 정량적인 조사 및 현지암반

의 열물성 측정 등을 통하여 이러한 영향요소의 상관관계에 대한 연구가 있어야 할 것이다.

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. Geankoplis, C.J., 1993, Transport Process and Unit Operations, Prentice-Hall Inc., 921p.
4. Lange, N.A., 1985, Handbook of Chemistry, 13th ed., Vol. 10, pp. 117-121.
5. McCabe, W.L. and J.C. Smith, 1976, Unit of Operations of Chemical Engineering, 3rd ed., pp. 265-286, pp. 371-395.
6. Mills, A.F., 1995, Basic Heat and Mass Transfer, Richard D. Irwin Inc., 921p.
7. Özisik, M.N., 1977, Basic Heat Transfer, McGraw-Hill Ltd, pp. 19-112, pp. 205-233.
8. Bollingmo, P., 1993, Cold storage plant in rock cavern, Norwegian Underground Storage, pp. 91-92.
9. Broch, E., P. Frivik and M. Dorum, 1994, Storing of food and drinking water in rock caverns in Norway, '94 Int'l Symp. for Grain Elevator and Underground Food Storage, pp. 283-317.
10. Dorum, M., 1977, Energy economy in Rock Stores, Rockstore 77, pp. 73-77.
11. 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.
12. Park, Y., J.H. Synn, C. Park & 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.
13. Tressler, D.K. and W.B. Van Arsdell, 1986, Commercial food freezing operations fresh foods in the freezing preservation of foods, AVI. Publ. Co., 347p.
14. Pribnow, Daniel F.C. and John H. Sass, 1995, Determination of thermal conductivity for deep boreholes, Journal of Geophysical Research, Vol. 100(B6), pp. 9981-9994.
15. Fujita, T., Y. Moro, K. Hara, A. Kobayashi and Y. Ohnishi, 1995, Experiment and numerical analysis of test case 3(Big-Ben laboratory T-H-Mexperiment), DECOVALEX-Mathematical Models of Coupled T-H-M Processes for Nuclear Waste Repositories, SKI Report 95:80, pp. 30-56.