

냉동저장 공동 주변의 온도분포 예측을 위한 해석해 및 수치모델 적용에 관한 연구

이대혁¹⁾, 김호영²⁾

Analytical and Numerical Model Study to Predict the Temperature Distribution Around an Underground Food Cold Storage Pilot Cavern

Dae-Hyuck Lee and Ho-Yeong Kim

Abstract. Claesson(2001)'s analytical solution, and two numerical models with Dirichlet and Neuman interior boundary condition respectively were investigated to estimate the transient temperature distribution with distances from the Taejon underground food cold storage pilot cavern. Claesson's solution, which is based on constant temperature boundary condition at the rock wall during a temperature decline step, showed relatively good agreement with temperature measurements in the rock mass in order of average error difference, 0.89°C without any adjustments on laboratory thermal properties to represent the rock mass. For the numerical model with heat flux through the rock wall, a boundary condition setting technique was newly proposed to overcome the difficulty of prescribing variable convective heat transfer coefficient and far-field air temperature inside the cavern as they may be certainly changed according to the cooling-down time. The results showed also good agreement with measurements in order of average error difference, 1.58°C, and were compared to those of the numerical model with fixed temperature at the rock wall. Finally, the most proper procedure to precisely predict the temperature profile around a cavern was proposed as a series of analysis steps including an analytical exact solution and numerical models.

KeyWords: Temperature Distribution, Convective Heat Transfer Coefficient, Heat Flux

초 록. 대전 식품냉동저장창고 파일럿 공동주위의 거리에 따른 비정상상태의 온도 분포를 산정하기 위해 Claesson(2001)의 해석해 및 Dirichlet과 Neuman 내부 경계조건을 갖는 수치모델들을 검토하였다. 온도 강하 단계 동안 일정 표면 온도 경계조건에 기초하고 있는 Claesson의 해석해를 활용한 결과, 실제 암반에서의 온도 계측결과를 오차 평균 0.89°C 수준으로서 비교적 정확히 예측할 수 있었는데, 0°C 근처의 실험실 암석 열물성을 입력하였고 현지 암반 조건을 표현하기 위한 특별한 물성 보정을 하지 않았다. 내부 공동 암반 벽면을 통한 열유속을 갖는 수치해석의 경우, 대류 열전달계수와 공동 내부 온도가 냉각시간에 따라 변화하기 때문에 경계조건을 가하기 어려운 단점을 극복하기 위해 새로운 경계조건 설정 기법을 제안하였다. 그 결과 오차 평균 1.58°C의 수준으로서 온도 계측치와 부합하였다. 또한 공동 벽면에서 고정 온도 조건을 갖는 수치해와 비교하였다. 마지막으로 Claesson의 해석해 및 다양한 내부 경계조건을 갖는 수치모델을 활용하여, 공동 주변의 온도 분포를 정확히 예측할 수 있는 일련의 해석 단계 프로그램을 제안하였다.

핵심어: 온도분포, 대류열전달계수, 열유속

1. 서 론

최근, 지하 식품 저장 냉장냉동창고, LNG 지하저장

시설, 고준위 핵폐기물 지하저장시설과 같이 저온 및 고온저장 시설에 대한 실용화 및 실용화 노력이 활발해지면서, 냉열 및 고열 암반의 거동 특성을 파악하고자 하는 노력이 꾸준히 이어지고 있다. 특히 저장물의 종류에 따른 암반의 열전달 특성 및 거리에 따른 온도 분포를 예측하는 것은 이러한 저장 시설의 설계단계에서 주요한 인자중의 하나이다.

¹⁾정회원, SK건설 주식회사 연구소 선임연구원

²⁾정회원, SK건설 주식회사 Geotask팀장

접수일: 2002년 6월 20일

심사 완료일: 2002년 7월 25일

암석 및 암반의 열물성과 관련해서, 열물성은 열전도도와 비열로 이루어진 열특성과 열팽창계수와 같은 열역학적 특성으로 구분할 수 있다. 열전도도와 비열은 실험실적으로 측정가능하고, 열전도도의 현지암반 측정법은 고온 관련 연구(Danko et al., 1991) 결과물로 REKA 방법이 제안되어 있다. 코아 시편에 대한 열팽창계수 측정법 또한 국내 관련 연구(한국지질자원연구원, 2001)의 결과물로서 제안되어 있다. 그러나 냉열암반에서의 열전도도 측정방법은 현재까지 개발되어 있지 않고 관련 설계분야에서는 실험실 측정값을 그대로 사용하거나 계측치와의 비교를 통한 임의의 보정과정을 통하여 현지암반의 지하수, 봉압, 절리조건을 반영한 역산치를 이용하는 실정이다(신중호 외, 1999, Synn et al., 1999).

냉열암반에서의 열전달 특성 및 온도분포를 예측하기 위해서 고려해야 할 변수들은 다음과 같다. 먼저 온도에 따른 열전도도와 비열의 온도의존성이 고려되어야 하며, 지하수가 고려되는 경우 잠열 효과가 암반의 비열과 같이 고려되어야 하며, 지하수 또는 봉압의 효과에 따른 열물성치의 변화가 고려되어야 한다(Glamheden, 2001). 또한 수치모델을 통한 설계단계에서는 공동벽면의 경계조건 및 지표면의 외기 온도에 따른 대류열전달 조건을 고려해야 한다(SK건설주식회사, 1997).

본 연구는 SK 건설이 지하 식품 저장 냉장냉동창고를 실용화하기에 앞서 대전 지질자원연구원 부지내에 시공하였던 Pilot의 냉장실 및 냉동실 주변의 온도 측정값과 부지의 암석 열물성값을 근거로 하여, 공동 주변 암반의 온도분포를 예측하기 위한 가장 효과적인 해석해 및 수치모델을 구하고자 하는데 그 목적이 있다. 따라

서 먼저 2절에서 여러가지 변수에 대한 기존 연구사례를 검토함으로써 암반의 온도분포를 예측하기 위해 가장 중요한 영향인자가 무엇인지를 판단하고, 궁극적으로 예측을 위한 해석해 및 수치모델의 선정과 합리적인 해석절차를 제안하였다.

2. 암반 온도 분포 예측을 위한 기존 연구 사례

2.1 열전도도의 온도 의존성

여러 연구자들이 건조시편과 포화시편에 대해 온도에 따른 열전도도의 변화량을 측정된 결과를 상온 측정결과와의 비로서 나타낸 결과가 Fig. 1에 표시되어 있다(Glamheden, 2001). 또한 Fig. 1은 대전 냉장냉동창고 Pilot에서 채취한 건조시편에 대해 측정된 결과를 동시에 나타내고 있다. 그림과 같이 건조시편의 경우 온도저하에 따라 열전도도가 증가하며, 증가율은 선형적으로서 대략 0.1%/°C 정도로서, 다른 연구자들의 실험결과와 유사하다. 참고로 모든 시험 대상 암석은 결정질 암석인 화강암에 대한 결과이다. 저온저장과 관련되어 있는 온도범위인 -50°C 범위까지의 열전도도 증가량은 5%~13% 수준으로서 온도의존성을 보인다. 그러나, 2.3절에서 언급한 바와 같이, Glamheden(2001)의 연구결과에 따르면 해석 온도 분포는 온도의존성을 고려하지 않은 경우에 비해 불과 1°C의 몇 분의 1정도로써, 엔지니어링 측면에서 암반내 온도분포에 큰 영향을 미칠만큼 중요한 인자가 아니라는 사실을 알 수 있다. 포화시편의 경우 약 -60°C 근처에서 비선형적으로 바뀌며, 증가율은 0.25%/°C 수준이다. 포화시편의 열전도도 증가

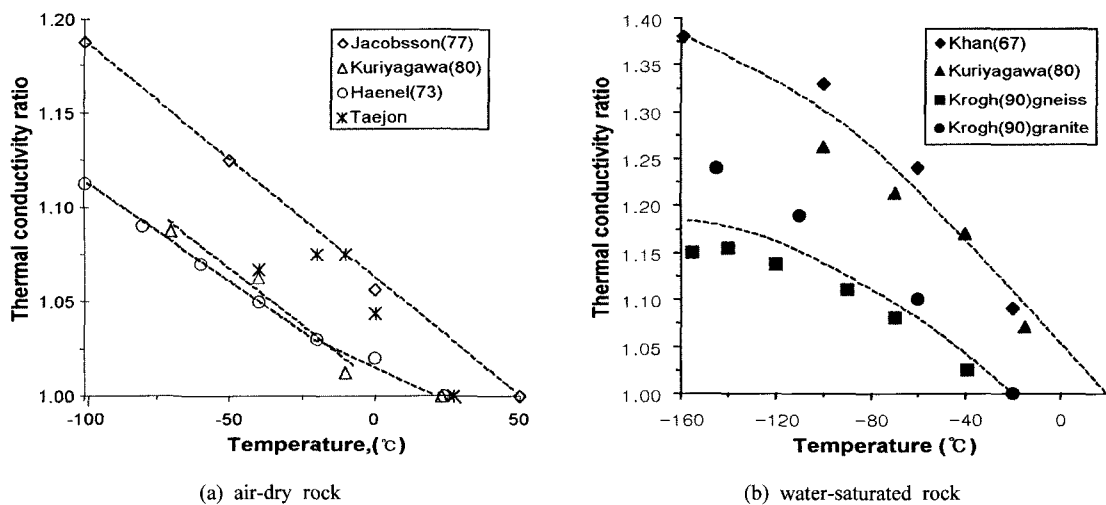


Fig. 1. Temperature dependency of thermal conductivity with Taejon data(after Glamheden, 2001).

율이 건조시편에 비해 큰 이유는 미세균열이 물로 포화되었기 때문이며, 비선형적인 경향은 매우 낮은 온도에서 새로운 균열이 발생하기 때문으로 추측된다.

2.2 대전 지하 식품 저장 냉장냉동창고 Pilot 연구 사례

대전 지하 식품 저장 냉장냉동창고 주변 암반내 온도 계측치를 이용한 암반 열물성 추정 및 온도 분포 예측 비교 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다(Choi et al., 2000, Synn et al., 1999, 신중호 외, 1999).

매질의 열전도도가 등방성인 경우 매질의 온도분포를 나타내는 열유동 열확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서 a 는 열확산계수(Thermal diffusivity, m^2/s)이다.

(1) 식의 정해는 특정한 형태와 경계조건을 갖는 경우에 대해 얻을 수 있다. 반무한 평면의 경우, 특수해는 3가지 경계조건(일정 표면 온도조건, 일정 표면 열유속 조건, 표면 열대류 조건)에 대해 알려져 있다(Carlslaw & Jaeger, 1959, Incropera & Dewitt, 1990).

이 세가지 조건의 해석해에 대해 신중호 외(1999) 등의 연구에서는 표면 열대류 조건에 대한 해를 사용하였다. 이 해로부터 반무한 평면 경계에서의 초기온도 $T(x,0) = T_i$ 와 경계에서 무한한 거리에 떨어진 유체 온도 T_∞ 와의 표면 열대류 전달에 의해 매질에서의 시간 및 거리에 따른 온도 분포 $T(x,t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{T(x,t) - T_i}{T_\infty - T_i} = \text{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right) - \exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2at}{k^2}\right) \text{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}} + \frac{h\sqrt{at}}{k}\right) \quad (2)$$

여기서 h 는 대류 열전달계수(Convective heat transfer coefficient, W/m^2C), k 는 열전도도(Thermal conductivity, W/mC), $\text{erfc}(x)$ 는 $1-\text{erf}(x)$ 로 정의되는 여오차함수(Complementary error function)로서 $\text{erf}(x)$ 는 $2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$ 로서 정의되는 오차함수(Error function)이다. 반무한 평면에서는 열원 경계로부터의 거리에 따른 온도분포가 선형적이며 원형공동의 경우는 방사상으로 로그함수적인 패턴을 보인다. 그러나, 신중호 외(1999) 등의 연구에서는 냉동실과 같은 아치형 경계조건의 경우 거리에 따른 온도 분포는 선형 및 로그함수 분포의 중간 형태를 보이므로 반무한 평면조건에 해당하는 (2)식에 새

로운 형상함수식(3)식과 같이 도입하였고(곱하여), 현장계측치와의 비교를 통한 열물성 추정 과정에서 재검증을 실시하였다.

$$SF(\text{Shape Function}) = \sqrt{\frac{\log x_0}{\log(x_0 + x)}} \quad (3)$$

여기서 x 는 공동 벽면에서의 거리이고 x_0 는 저장실 단면적에 상응하는 면적을 갖는 원에 대한 등가 반경이다.

개발된 (3)식을 이용하여 현장계측치와의 비교 결과 열전도도는 실내 실험치 $2.71 W/mC$ 보다 약 23% 작은 $2.08 W/mC$ 일때, 비열은 실험치 $710 J/kgC$ 보다 약 25% 큰 $885 J/kgC$ 일때 계측치에 가장 부합된다는 결과를 얻었다. 그리고 이러한 차이는 암반내의 절리와 지하수의 영향에 기인하는 것으로 판단된다고 하였다(신중호 외, 1999).

그러나 절리에 의한 영향을 제외하고 열물성에 크게 영향을 미치리라 예상되는 포화조건 및 봉압조건에 대해서는 엔지니어링 측면에서 그 영향을 다른 각도로 판단해야 할 것이다. 건조 및 포화시편에 대해 축하중의 증가가 열전도도에 미치는 영향을 나타낸 Walsh & Decker(1966)의 연구결과에 따르면, 건조시편의 경우 봉압이 100 MPa 정도로 까지 증가해야 열전도도 증가량이 약 20% 정도 상승하는 것을 알 수 있고, 포화시편의 경우에는 거의 미미한 영향을 주는 것으로 보고되었다. 또한 일반적인 지하저장시설의 심도를 고려할때 심도 50 m 미만에서 약 1.5 MPa 이하의 봉압을 고려한다면 더욱 봉압의 영향은 미미할 것으로 예상된다.

비열과는 달리 결정질 암석의 포화는 열전도도에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다(Scharli & Rybach, 1984). 그 결과 공극율 약 1%에서 건조시편의 열전도도에 비해 포화시편의 열전도도가 30% 이상 증가할 수 있다고 하였다. 그런데 현지암반의 공극율이 암석시편의 공극율보다 훨씬 증가하리라 예상되고, 대전 부지의 경우 공동 주변이 포화상태였으므로 열전도도가 크게 증가해야만 한다. 그러나 신중호 외(1999)의 연구결과를 보면, 건조시편에 대한 실험실 시험값보다 암반의 열전도도를 23% 작게 예측하였으므로 공극율의 증가 및 포화로 인한 열전도도의 상승분을 상쇄하고 오직 절리조건에 의해 열전도도가 크게 감소한 것이라는 약간의 무리한 추정을 초래한다. 그러므로 열전도도를 실험실 시험값보다 낮게 예측한 연구결과는 개발한 식의 계측치와의 적합을 위해 추정된 결과인 것으로 사료된다. 한편, 절리내에 충전된 지하수가 동결되면 열전도도가 더욱 증가할 것이다.

2.3 온도분포 예측을 위한 변수들에 관한 연구사례

냉열암반에서의 열전달 특성 및 온도 분포 특성을 예측하기 위해서 고려해야 할 변수들에 대한 연구사례들을 종합하면 다음과 같다.

Glamheden(2001)의 연구결과에 따르면, Fig.1과 같이 열전도도의 온도저하에 따른 변화를 반영하기 위하여 수치모델에 적용한 결과, 온도의존성을 고려하지 않은 경우에 비해 불과 1°C의 몇분의 1정도로써 주변암반의 온도를 상승시키는 결과를 가져왔다. 따라서 온도저하에 따른 열물성의 온도의존성은 주변암반의 온도분포를 예측하는데 결정적인 영향인자가 아니라는 사실을 알 수 있다.

또한 암반의 비열에 대한 포화도의 영향을 고려하기 위하여 Sundberg(1988)에 의해 제안된 (4)식을 이용하여 물과 얼음의 함량에 따른 비열을 수치모델에 반영하였다. 또한 온도 0~1°C의 범위에서 물의 잠열을 고려함으로써 비열과 잠열을 동시에 고려하였다.

$$c_p = c_{pm} + c_{pw} w_u + c_{pice}(w - w_u) \quad (4)$$

여기서 c_{pm} 은 광물의 비열(J/Kg°C), c_{pw} 는 물의 비열, c_{pice} 는 얼음의 비열, w 는 함수비이고 w_u 는 비동결 함수비이다. 그 결과, 결과적으로 냉각기간 및 해빙기간에 불과 1°C 정도의 온도 상승을 초래하여 엔지니어링 측면에서 결정적인 중요 영향인자가 아니라는 사실을 알 수 있다.

또 다른 변수로서, 공동 벽면을 통한 열유속(Heat flux) 및 벽면의 비정상상태의 온도와 관련된 경계조건과 지표면을 통한 외기 온도의 대류열전달 경계조건을 고려할 수 있다.

매질 내 고체 분자는 비교적 고정된 위치에 머물러 있으므로 고체를 통한 열전달은 주로 전도에 의해 발생하지만, 액체나 기체를 통한 열전달은 대규모 유체이동의 유무에 따라 대류 또는 전도에 의해 발생하게 된다. 즉 유체에서의 전도는 정지한 유체의 경우에는 대류의 특수한 경우라고 생각된다. 대류의 복잡성에도 불구하고 대류열전달율(\dot{q}_{conv})은 다음과 같은 Newton의 냉각법칙에 따른다.

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

여기서 T_s 는 고체표면의 온도(°C), T_∞ 는 표면으로부터 충분히 떨어진 유체의 온도(°C)이다. 그러나 저장공동의 경우 T_∞ 는 존재할 수 없으므로 공동내 공기 혹은

가스의 온도로서 대체할 수 있다.

Geankoplis(1993)에 따르면 대류 열전달계수는 정체 공기의 경우 2.8~23 W/m²°C, 대류공기의 경우 11.3~55 W/m²°C이다. 한편, SK건설주식회사(1997)에 따르면, 공동내부의 공기는 정체되어 있으나, 어느 정도 환기 Fan에 의해 대류가 되는 것으로 파악하여 10 W/m²°C로 선정하여 수치모델에 적용하였다. 이 값은 Glamheden(2001)의 연구결과에 따라 역산된 값인 10~18 W/m²°C 범위에 포함되므로 합리적인 수치인 것으로 파악된다. 그러나 대류 열전달계수는 Glamheden(2001)의 연구결과와 같이 시간에 따라 변화하는 고체표면의 온도와 시간에 따라 변화하는 저장공동 내의 온도에 좌우되어 변화되는 변수인 것으로 알려져 있다. 따라서 어느 시간 범위에서 대류 열전달계수가 얼마만큼의 값을 가질 수 있는지를 알 수 없기 때문에 수치모델에서 내부경계조건으로 사용하기 어렵다. 그러므로 (2)식과 같은 해석해를 구하기 위한 입력 상수로 사용하는데 있어 정확도가 결여되리라 예상되며, 그 영향정도를 알 수 없지만, 신중호 외(1999)의 연구결과에 어느 정도 영향을 미친 것으로 파악된다.

2.4 온도분포 예측을 위한 해석해

Clæsson(2001)에 의해 제안된 식은 공동 기하를 단순화시켜 구로 표현하고, 2.2절에서 언급한 바와 같이 (1)식에 대한 여러 해석해 중 일정 표면 온도 경계조건에 대한 해를 사용하였다. 또한 열역학적 해를 고려하여 선형 열탄성학적인 근사해석을 위한 해로서 구형 저장공동의 경우에 대한 완전 explicit한 해석해로서 표현되었다. 저장공동의 온도를 단계적으로 감소시키고, 냉각을 멈춘 상태에서는 공동을 가로지르는 열유속은 0으로 고려한다. 본 논문에서는 열탄성학적인 면에 초점을 두지 않았기 때문에 열분포 거동 측면에서만 요약 소개하면 다음과 같다.

암반에서의 초기온도는 $r_0 < r < \infty$ 에서 0(비교란 온도 T_0 에서 교란된 온도와의 차이가 초기조건에서는 0)이고, 내부 경계온도의 단계적 변화(Step change)에 대한 암반내 온도반응 $T(r, t)$ 는 구좌표 기준으로 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad r > r_0, \quad t > 0 \quad (6)$$

$$T(r, 0) = 0, \quad r_0 < r < \infty \quad (7)$$

$$T(r_0, t) = T_1 - T_0, \quad t > 0 \quad (8)$$

여기서 T_1 은 다음 시간단계에서의 공동벽면 온도이고,

r_0 는 구벽면 등가 반경이다.

온도 단계에 대한 해 $T=T_s(r, t)$ 는 Carslaw & Jaeger (1959)에 따르면, (1)식에 대한 여러 해석해 중 일정표면 온도조건에 대해 다음과 같이 알려져 있다.

$$T_s(r, t) = (T_1 - T_0) \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - r_0}{\sqrt{4at}}\right), \quad r \geq r_0, t > 0 \quad (9)$$

여기서 아래첨자 s는 해가 경계에서의 하나의 온도 단계에 해당된다는 의미이다.

절차의 간편화를 위해 다음과 같은 무차원량을 도입한다.

$$r' = \frac{r}{r_0}, \quad t' = \frac{4at}{r_0^2}, \quad T(r, t) = \Delta T_1 \cdot T'(r', t') \quad (10)$$

무차원 온도는 $\Delta T_1 = T_1 - T_0$ 로 (10) 및 (9)식을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$T_s'(r', t') = \frac{1}{r'} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r' - 1}{\sqrt{t'}}\right),$$

$$T_s(r, t) = (T_1 - T_0) \cdot T_s'(r/r_0, 4at/r_0^2) \quad (11)$$

N개의 온도단계에 대한 일반해는 다음과 같다. 구형 공동 벽면경계에서의 온도 $T_{cav}(t)$ 는 piece-wise constant 이다.

$$T_{cav}(t) = \begin{pmatrix} T_0 & t < 0 = t_0 \\ T_1 & t_0 < t < t_1 \\ \vdots & \vdots \\ T_N & t_{N-1} < t < t_N \end{pmatrix}$$

$$T(r_0, t) = \begin{pmatrix} \text{step } T_1 - T_0 & t = t_0 \\ \text{step } T_2 - T_1 & t = t_1 \\ \vdots & \vdots \\ \text{step } T_N - T_{N-1} & t = t_{N-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

첫번째 단계는 시간 $t = t_0 = 0$ 에서 $T_1 - T_0$ 이고, 압반의 초기 온도는 모든 단계에서 0이다(비교란 온도 T_0 에서 교란된 온도와의 차이가 초기조건에서는 0). 마지막 단계 ($t_{N-1} < t < t_N$) 동안 온도는 증침에 의해 구한다.

(12)식 및 (9)식으로부터 다음 식 (13)과 같다.

$$T_M(r, t) = \sum_{n=1}^N (T_n - T_{n-1}) \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - r_0}{\sqrt{4a(t - t_{n-1})}}\right), \quad t_{N-1} < t < t_N \quad (13)$$

또는 무차원 함수 $T_s'(r', t')$ 식 (11)로부터 다음 식 (14)와 같다.

$$T_M(r, t) = \sum_{n=1}^N (T_n - T_{n-1}) \cdot T_s'(r/r_0, 4a(t - t_{n-1})/r_0^2), \quad t_{N-1} < t < t_N \quad (14)$$

최종 (14)식으로부터 구형 공동 벽면온도의 단계적 변화에 기인한, 벽면으로부터의 반경방향 거리에 따른 온도분포를 구할 수 있다.

3. 해석해 및 수치모델에 의한 온도분포 예측 결과

지하냉동저장 Pilot Plant의 크기, 구성 및 주변 압반 조건에 대한 일반 사항은 신중호 외(1999)에 자세히 소개되어 있다.

3.1 Claesson의 해석해를 적용한 경우

대전 지하식품 저장 냉장냉동창고 Pilot의 냉동실 주변압반의 거리에 따른 온도분포를 계측치와 비교하기 위하여 2.4절에 소개한 Claesson(2001)의 해석해를 적용하였다. 현지 압반의 열전도도와 비열의 입력치는 실험실 시험치 중 -1°C 에서의 값을 사용하여, 각각 $2.63 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 및 $710 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ 로 결정하였다. 이 값은 현지 압반의 질리, 지하수, 봉압에 관한 영향을 언급한 2.2절의 내용에 따라 임의의 보정을 취하지 않고 실험실 시험값을 사용하였다. 본 논문이 온도분포를 예측하기 위한 열거동에 관한 목적이므로 역학적 물성을 소개하지 않는다.

해석해의 적용을 위하여 Mathcad 프로그램을 이용하였다. Mathcad는 수치해석과 모든 CAD 화일을 하나로 묶을 수 있는 툴로서, 작업화면의 어느 곳에서든지 원하는 수식과 텍스트를 입력, 수정하면서, 실제적인 수학적 식으로 표현되어 수식계산이 빠르고 정확하며 간편한 특성을 갖고 있다. 2.4절에 기술한 Claesson의 해석해를 Mathcad를 활용하여, 여러가지 온도 단계를 연속적으로 고려하고, 오차함수 등의 복잡한 수학적 계산을 Mathcad 함수를 이용하여 간편하게 활용하였다.

냉동실의 부피를 등가로 환산한 구의 반경은 3.18 m 였으며, 열전도도, 비열 및 압반 밀도(2660 kg/m^3)를 이용하여 열확산계수로 환산하여 입력하였다. 열확산계수는 열전도도를 비열과 밀도의 곱으로 나눈 값으로서,

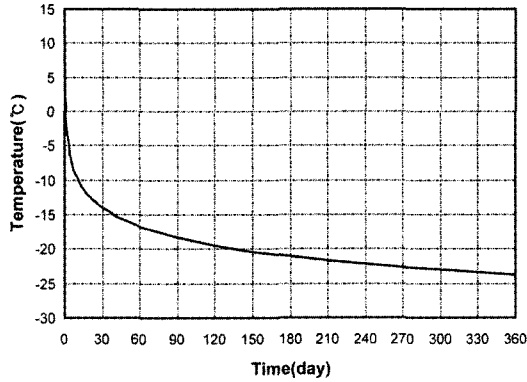


Fig. 2. Temperature measurements on the wall surface of the cold room of Taejon underground food storage pilot (after SK건설주식회사, 1997).

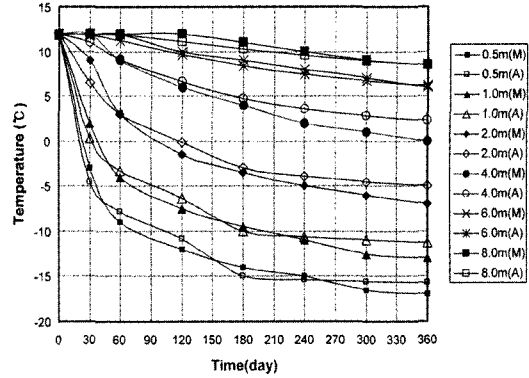


Fig. 3. Comparison of temperature measurements and estimated values by Claesson's analytical solution according to the distances from the cavern wall. Black symbols ("M") represent measurements and vacant symbols ("A") estimated analytical values.

Table 1. Temperature imposed on the sphere wall according to the cooling-down step for the application of Claesson(2001)'s solution.

step number	0	1	2	3	4	5	6
duration(day)	-999	0	15	30	60	120	360
Temperature (°C)	12.0	-1.0	-11.25	-13.97	-16.69	-21.56	-24.02

$1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}(=2.63/(710 \cdot 2660))$ 이었다.

실제 냉동실 가동중 자료인 냉동실 암반 벽면온도 자료는 Fig. 2와 같다. Fig. 2와 같은 실제 온도 계측자료를 6개의 온도변화 단계로 구분하여, Table 1과 같이 해석해의 단계별 경계조건으로 적용하였다.

저장공동인 냉동실 주변암반의 온도계측치와 해석해 결과를 비교하면 Fig. 3과 같다. 그림과 같이 실제 계측치와 거의 유사함으로서 정확하게 온도 분포를 예측하였다. 계측치와의 오차범위는 0~2.5°C이고, 오차의 평균은 0.89°C이다. 따라서 열물성값을 보정하지 않고서도 주변 암반의 온도분포를 비교적 정확하게 예측할 수 있다는 사실로부터, 현지암반의 지하수 포화로 인한 열전도도의 상승량과 현지암반에 분포하는 절리로 인한 열전도도의 감소량이 서로 상쇄하고 있다는 가설을 추정할 수 있다.

대전 식품 저장 냉장냉동창고 Pilot의 냉동실 주변 암반이 벽면으로부터 10 m 범위 이내에서 RMR 60이상의 양호한 암반으로 분류되었고, $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 수준의 수리전도도를 보이는 전형적인 결정질 화강암반인 점을 고려할때, 실험실 시험에 의해 측정된 열전도도와 비열값을 보정하지 않아도 비교적 주변 암반의 온도분포를 예측할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 그러나

대전 식품 저장 냉장냉동창고에 국한된 결과로서 실제 파쇄된 불량한 암반에 대해서도 정확히 온도 분포를 예측할 수 있을지는 미지이다.

내부 경계조건에 해당하는, 시간에 따른 암반 벽면온도가 입력자료로 주어져야 한다는 단점 및 국부적인 저장공동 주변의 3차원적 기하와 지표로부터의 대류 열전달을 고려하지 못하는 단점에도 불구하고, 예비 설계단계에서 예비해석자료로 Claesson의 해석해를 사용하는 것이 효율적일 수 있다고 판단된다.

2.2절에서와 같이 표면 열대류 경계조건을 고려한 해석해를 수정한 신중호 외(1999) 등의 연구결과에서는 계측치와의 부합을 위해 열물성을 보정해야만 했다. 그러나 Claesson의 해와 같이 일정 온도 경계조건을 사용하는 경우 열물성을 보정하지 않고서도 암반의 온도 분포를 정확히 예측할 수 있었다. 이러한 차이는, 표면 열대류 경계조건을 고려한 해석해의 경우 경계로부터 멀리 떨어진 유체의 온도 T_{∞} 의 선정의 모호함 및 입력 대류 열전달계수의 부정확성에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 Heat flux 내부 경계조건으로 수치모델을 적용한 경우 (Neuman 경계조건)

수치해석을 위하여 FLAC 3.2코드를 이용하였다. (5)

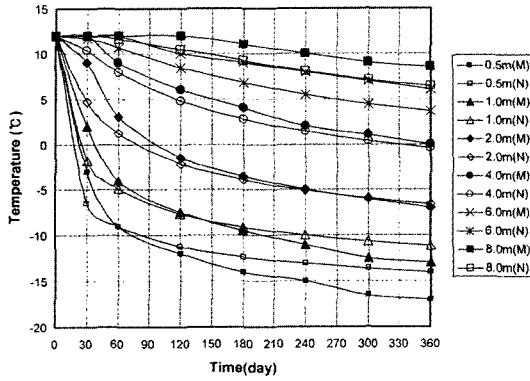


Fig. 4. Comparison of temperature measurements and estimated values by numerical model with interior heat flux boundary condition according to the distances from the cavern wall. Black symbols("M") represent measurements and vacant symbols("N") estimated numerical values.

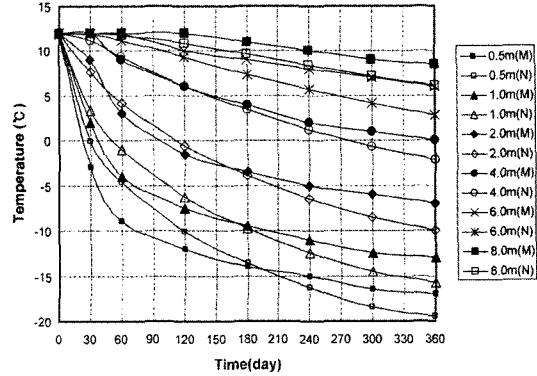


Fig. 5. Comparison of temperature measurements and estimated values by numerical model with interior fixed temperature boundary condition according to the distances from the cavern wall. Black symbols("M") represent measurements and vacant symbols("N") estimated numerical values.

식과 같이 대류 열전달계수를 이용하여 열유속(Heat flux)을 냉동실 벽면 경계조건으로 이용하고자 하였다. 그러나 시간에 따라 변화하는 고체표면의 온도와 시간에 따라 변화하는 저장공동 내의 온도에 기인한 열유속을 산출할 수 없고, 굴착 공동은 질점 및 유한 요소가 없으므로 저장공동 온도를 유한 차분 시간에 따라 변화시켜 적용할 수 없다. 또한 대류 열전달계수는 온도에 따라 변화하므로 특정값을 갖는 상수로 사용할 수도 없다.

따라서 본 논문에서는 저장공동인 냉동실의 설정 온도인 -25°C와 시간에 따라 변화하는 냉동실 암반 벽면의 온도 차이를 유한 차분 시간에 따라 지속적으로 변화시키는 방식으로 상수의 대류 열전달계수를 역산하고자 하였다. 암반 온도 계측치와 수치해석치의 오차를 최소로 줄이는 가장 적절한 대류 열전달계수를 시행착오(Trial and error) 방식으로 추정하였다. 이를 식으로 표현하면 식 (15)와 같다.

$$q_{conv} = h_{constant} \times (T_{tagetroom} - T_{rocksurface}) \quad (15)$$

수치해석 결과, 상수인 대류 열전달계수는 3.0 W/m²°C로 산출되었다. 저장공동인 냉동실 주변암반의 온도계측치와 수치해 결과를 비교하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4와 같이 실제 계측치와 거의 유사함으로서 비교적 정확하게 온도 분포를 예측하였다. 그러나 3.1절의 해석해 결과와 비교하여 예측오차가 커서 계측치와의 오차범위는 0.02~4.35°C이고, 오차의 평균은 1.45°C이다. 해석해 방법에 비해 오차평균은 60%이상 증가하였고, 최대 오차는 4배이상 증가하였다. 특히 냉동실 벽면으로

부터 6.0 m이상의 먼거리에서는 측정치와 예측치의 차이가 훨씬 증가하고 있다는 사실을 알 수 있다.

그러나 이 방법은 해석해 방법에 사용된 것과 같이, 공동 벽면에서의 정확한 실제 온도 계측자료 없이도 실제 암반의 온도분포를 비교적 근사하게 추정 가능하고, 실제 공동 기하를 반영하여 모델링이 수행되므로 기하학적 효과에 따른 차이를 알 수 있는 장점을 보이고 있다.

대류열전달계수로서 추정된 3.0 W/m²°C에 대한 근거를 역으로 추론하면 다음과 같다. 2.3절에서와 같이 대전 식품저장 냉장냉동창고의 냉동실의 조건에서 대략 10 W/m²°C 정도가 일반적인 대류열전달계수로 추정된다. 한편 초기 냉동실 온도가 냉동 후 1일 이내에 빠르게 0°C로 저하되고, 초기 1일 이내에 암반 벽면의 온도는 아직 시간지연 효과로 인하여 12°C의 온도가 유지되므로 대략 ΔT=12°C이다. 그러나 수치모델에서는 -25°C의 설정 온도와 초기 암반 벽면온도가 12°C이므로 ΔT≈ 37°C로서 실제 공동 조건에 비해 약 3.08배이다. 따라서 수치모델이 초기에 온도차가 크게 모델링되므로 그에 따라 실제 대류열전달계수는 대략 1/3배로 줄여 수치모델에 적용되어야 한다. 위와 같이 하면 대류 열전달계수는 3.3 W/m²°C이다. 놀랍게도 이 값은 수치 모델의 역해석으로부터 추정된 3.0 W/m²°C과 매우 유사함을 알 수 있다.

3.3 온도 내부 경계조건으로 수치모델을 적용한 경우 (Dirichlet 경계조건)

3.2절에 사용한 같은 FLAC 3.2 유한차분 코드를 이용하여 공동 벽면 온도를 온도 조건으로 수치해석한 경

우에 대한 결과는 다음과 같다. 유한차분 시간진행이 이루어지는 동안 내부 벽면의 온도는 설정온도인 -25°C로 유지된다.

저장공동인 냉동실 주변암반의 온도계측치와 수치해 결과를 비교하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5와 같이 120일 이전에는 실제 계측치와 큰 차이를 보이다가 120일 이후 비교적 정확하게 온도 분포를 예측하였다. 계측치와의 오차범위는 0.03~4.79°C이고, 오차의 평균은 1.58°C이다. 3.2절의 열유속 경계조건에 비해 오차평균은 10% 이상 증가하였고, 최대 오차 또한 10%증가에 불과하다. 그러나 120일 이전의 자료에서는 오차범위가 훨씬 커지므로 부정확한 예측결과를 낳고 있다. 따라서 120일 이후의 자료에서는 오차범위가 줄어드나, 그 이전의 상태에서는 오차가 모든 경우에 비해 가장 크다는 사실을 알 수 있다.

이 경계조건은 해석해 방법 및 열유속 경계조건에 비해 내부 경계조건을 가장 단순하게 구현할 수 있으나 측정치와 가장 큰 오차를 보이고 최대 5°C정도의 차이까지 벌어지는 단점을 보이고 있다.

3.4 공동 벽면온도의 예측 결과

마지막으로 실제 공동 벽면 온도를 입력자료로 활용한 해석해 방법을 제외하고 열유속 경계조건과 온도 경계조건을 사용한 경우에 대해 공동 벽면에서의 시간에 따른 온도 변화를 측정치인 계측치와 비교하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6과 같이 초기 30일 이전의 비정상상태의 경우 열유속경계조건을 이용한 경우와 계측치가 매우 정확하게 일치하고, 온도경계조건과는 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 60일 이후의 정상상태에 근접할

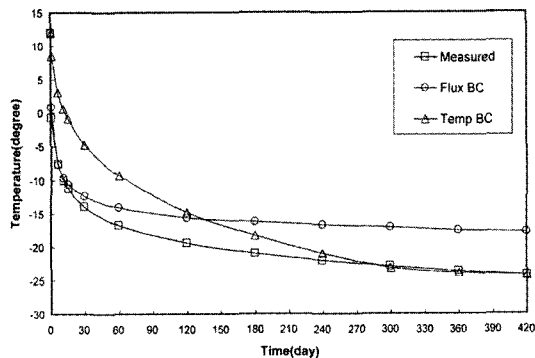


Fig. 6. Comparison of temperature measurements and estimated values by two numerical models with heat flux and interior fixed temperature boundary condition at the room wall surface.

수록 온도경계조건이 측정치와 유사하게 접근하고, 열유속 경계조건은 해는 일정하게 차이를 보임을 알 수 있다.

3.2절에서 사용한 열유속 경계조건의 열유속은 가상의 대류 열전달계수를 상수로 취급하기 위하여 초기 온도조건을 근거로 하여 산출된 혹은 역산된 값을 근거로 하고 있다. 따라서 냉동 후 초기에 가장 벽면 온도에 근사할 수 밖에 없다. 3.3절의 온도 경계조건은 설정온도를 근거로 하여 해석되므로 정상상태 즉 설정온도에 가까워질때만이 벽면온도 계측치에 거의 일치하게 되는 것이다.

4. 결 론

- 1) 냉동저장 공동 주변의 온도분포를 예측하기 위한 변수로서 암석과 암반의 열물성, 잠열, 경계조건, 지하수 및 봉압에 관한 효과를 관련 문헌에서 검토한 결과, 엔지니어링 측면에서 열전도도의 온도 의존성, 잠열 및 봉압 효과는 무시할만한 요소라는 것을 알 수 있었다.
- 2) 비정상상태의 온도변화를 단계적으로 입력하고, 공동을 구로 전환하여 온도분포를 계산할 수 있는, 표면 일정 온도조건에 해당하는 해석해를 근간으로 한 Claesson의 해석해를 도입한 결과 오차평균 0.89°C로 정확하게 실제 측정치와 근사하였다. 그러나 실제 공동 벽면 온도가 기지여야 한다는 제약이 있으므로 예비설계단계에서 사용할 수 있고, 경우에 따라서는 어느 수치모델 및 어느 해석해 보다 정확히 온도분포를 예측할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.
- 3) Claesson의 해석결과 암석 시편에 대한 열전도도와 비열의 값을 보정하지 않고서도 비교적 측정 온도를 정확히 예측하였다는 사실로부터, 경계조건의 변화가 온도분포 예측에 가장 중요한 영향 변수라는 사실을 알 수 있었다. 또한 대전 냉동창고 부지 암반의 경우 포화로 인한 열전도도의 증가와 절리와 같은 불연속면으로 인한 열전도도의 감소가 서로 완전히 상쇄되어 암석시편의 열물성의 보정이 불필요하다는 사실을 추정할 수 있었다.
- 4) 표면 열대류 경계조건을 근간으로 한 기존 해석해 및 수정 해석해는 몇가지 입력 정수의 부정확성 및 모호함과 반무한 평면조건에 한계로 다소 부정확한 해석해 결과를 초래할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 Claesson의 해석해와 같이 표면 일정 온도조건에 해당하는 해석해를 사용하는 것이 오히려 정확할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

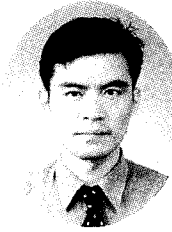
- 5) 수치해석 모델에서 열유속 경계조건을 사용한 경우에 대한 새로운 경계조건 설정 방법을 제안하였다. 비록 해석해 결과의 예측 정확도에 미치지 못하는 못하지만, 열물성의 보정 없이도 어느 정도 온도분포를 정확히 예측할 수 있었다. 수치해석 모델에서 온도 경계조건인 경우 정확도가 더욱 떨어지지만 암반벽면 온도의 경우 정상상태에 접어들었을때 열유속 경계조건에 비해 정확하게 예측하였다.
- 5) 냉동저장공동 주변 암반의 온도분포를 설계하기 위해서는 다음의 절차가 가장 바람직하다는 것을 알 수 있었다.
 - 열유속 경계조건을 이용한 수치해석을 통해 초기 공동벽면 온도강하를 산정한다.
 - 구한 암반벽면 온도를 입력한 해석해를 이용하여 거리에 따른 전형적인 온도분포를 추정한다.
 - 2차원 혹은 3차원 열유속 경계조건을 갖는 수치해석을 통하여 기하형상 조건에 따른 국부적인 온도분포를 구하고 열충격이 예상되는 비정상상태의 냉동 초기의 온도분포를 구한다.
 - 정상상태의 암반 벽면 근처의 온도를 추정하고자 하는 경우, 온도경계조건에 의해 구해지는 정상상태 값을 이용한다.

참고문헌

1. 신중호, 박연준, 김호영, 박찬, 1999, 아치형 냉동저장공동 주위암반의 열전도 특성 및 열물성 평가, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지) 9.1, 27-35.
2. 정용복, 2000, 저온하에서의 암석의 변형 거동 및 파괴특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 공학박사 학위 논문, 4-7.
3. 한국지질자원연구원, 2001, 지하암반내 고온·저온 저장 기술연구, 기간고유사업연구보고서(KR-01(연차)-08), 123-129.
4. SK건설주식회사, 1997, 에너지절약형 지하 냉장 및 냉동 저장 설계기술개발에 관한 최종보고서, 통산산업부, 1-281.
5. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959, Conduction of Heat

- in Solids, The Clarendon Press, Oxford.
6. Choi, S.O., Park, H.D., Park, Y.J. and Jang, H.D., 2000, Test Running of an Underground Food Storage Cavern in Korea, Tunnelling and Underground Space Technology, 14.1, 67-73.
7. Claesson, J., 2001, Thermoelastic Solution outside a Spherical Cavity, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1-70.
8. Danko, G. and P. Mousset-Jones, 1991, A Probe method for Measuring In Situ Rock Thermophysical Properties, Proceedings of the Second Annual High-level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas.
9. Geankoplis, C.J., 1993, Transport Process and Unit Operations, Prentice-Hall Inc., 1-921.
10. Glamheden, R., 2001, Thermo-mechanical Behavior of Refrigerated Caverns in Hard Rock, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1-70.
11. Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 1990, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons.
12. Schärli, U. and Ryback, L., 1984, On the Thermal Conductivity of Low Porosity Crystalline Rocks, Tectonophysics, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 103, 307-313.
13. Sundberg, J., 1988, Thermal Properties of Soils and Rocks, Ph.D thesis. Chalmers U. of Techn., Gothenburg.
14. Synn J.H., Park, C., Park, Y., Kim, H.Y., 1999, Analysis of Heat Transfer and Heat Load on Underground Cold Storage Cavern, 9th International Congress on Rock Mechanics, International Society of Rock Mechanics, Paris.
15. Park, H.D., Synn, J.H., Park, Y.J. and Kim, H.Y., 1999, A pilot study on the design of an underground food storage cavern in Korea, Tunnelling and Underground Space Technology, 14.1, 67-73.
16. Walsh, J.B., Decker E.R., 1966, Effect of Pressure and Saturating Fluid on the Thermal Conductivity of Compact Rock. J. Geoph. Res., 71, 3053-3061.

이 대 혁



1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-3700-8644
E-mail: dhlee-d@skec.co.kr
현재 SK건설(주)연구소 선임연구원

김 호 영



1980년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1982년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사
Tel: 02-3700-7481
E-mail: hykim-d@skec.co.kr
현재 SK건설(주)연구소 Geotask팀장