

절리 및 지하수가 암반의 열전파 특성에 미치는 영향

박연준¹⁾, 유광호¹⁾, 신희순²⁾, 신중호²⁾

The Effect of Rock Joints and Ground Water on the Thermal Flow through Rock Mass

Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You, Hee-Soon Shin and Joong-Ho Synn

Abstract. Thermal flow through jointed rock mass was analyzed by numerical methods. The effect of a single set of joints on the heat conduction was analyzed by one-dimensional model and compared with the analytical solution. When a joint is completely dry, the joint behaves as a thermal break inducing jumps in temperature distribution even at steady state. Therefore when joints are completely dry, individual joint has to be taken into consideration to get a good result. When joints are partially or fully saturated, the thermal conductivity of the joints increases drastically and the jumps in temperature distribution become less severe. Therefore the effect of joint in heat conduction can be well absorbed by continuum anisotropic model whose thermal properties represent overall thermal properties of the intact part and the discontinuities. Since the effect of joints becomes less important as the degree of the saturation increases, the overall thermal response of the rock mass also becomes close to isotropic. Therefore it can be concluded that a great effort has to be made to obtain a precise in-situ thermal properties in order to get a good prediction of the thermal response of a jointed rock mass.

KeyWords: Joint, Thermal Flow, Ground Water, Thermal Properties of Rock Mass

초 록. 절리암반에서의 열유동을 수치해석적으로 분석하였다. 1차원 모델 해석을 통하여 한 조의 절리군이 열전도에 미치는 영향을 비교 분석하고, 이론해와 비교하였다. 절리 내에 물이 전혀 없는 경우, 절리는 열 차단제의 역할을 하며 정상상태에서도 온도의 불연속이 관찰되었다. 따라서 암반 내 존재하는 절리가 완전 건조상태인 경우에는 개별적인 절리의 열차단 효과를 일일이 고려하여야 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 절리 내에 물이 부분적으로 혹은 완전히 포화된 경우에는 열차단 효과가 현저히 줄어들어 온도 분포에 미치는 영향이 현저히 감소하였다. 따라서 절리 암반을 통한 열전도는 암반을 무결암의 열적 성질과 불연속면의 열적 성질을 포함한 열적 이방성 연속체로 가정함으로써 가능하다 할 수 있다. 절리의 포화 정도가 증가할수록 절리가 열유동에 미치는 영향이 감소하므로 암반의 열전달 특성은 등방에 가까워지며, 따라서 복잡한 모델을 이용한 해석보다는 현지 암반의 열물성을 정확히 측정하는 것이 더욱 중요함을 알 수 있었다.

핵심어: 절리, 열유동, 지하수, 암반의 열물성

1. 서 론

상대적으로 좁은 국토에 4천만이 넘는 인구가 살고 있는 우리나라는 전 국토의 70% 이상이 산악인 국내의 지질학적 및 지형적인 여건에 따라 도로 및 철도용 터널의 구축이 활발히 진행되고 있다. 최근에는 지하에

너지 저장, 지하 식품 저장, 그리고 핵발전예 따른 핵 폐기물의 지하 저장과 관련하여 대규모 지하공동이 건설되고 있으며 앞으로도 더욱 활발히 건설될 것으로 보인다. 이러한 특수 목적의 지하 공동들은 종종 저장품의 특성에 따라 온도의 변환이 요구되며 정확한 열유동 설계를 위해서는 암반의 열전파 특성이 규명되어야 한다. 이와 관련하여 국외는 물론 국내에서도 안형준 외(1997), 이희석 외(1998), 황용수 외(1998) 등 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되었으나, 암반을 통한 열전달에 있어서 개별 절리의 영향과 절리의 포화 정도에

¹⁾정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

²⁾정회원, 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 책임연구원

접수일: 2002년 9월 8일

심사 완료일: 2002년 9월 16일

대한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 지하 암반 내에 고온 및 저온 물질을 저장함에 있어 열유동 평가를 위한 기초 자료로 절리암반의 열전파 특성을 연구하여 제시하고자 하였다. 이를 위하여 우선 무결암에 대한 기존의 연구결과와 연계하여 불연속면과 지하수가 열전파에 미치는 영향을 평가하고 궁극적으로 불연속면이 발달한 암반의 열전파 특성 평가 기법을 제시하고자 한다.

2. 열전도의 기본식

지하 암반 내에 임의의 열원을 갖는 공동이 있을 때, 그 주위로의 열유동은 암반의 초기 온도와 공동 내부 온도와의 차이에 의한 암반내부에서의 전도, 그리고 공동 벽면과 내부 공기와의 접촉면에서 발생하는 표면전도에 의하여 발생한다. 복사열의 영향은 지표면에 국한되므로 지하 공동의 경우에는 무시될 수 있다. 지하냉동저장 공동의 경우, 이러한 열유동은 저장실의 냉각가동 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 열전도계수 텐서(w/m^2)이고 T 는 온도이다.

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \tag{1}$$

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

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

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 열확산방정식(diffusion equation)이라 한다.

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

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.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p \cdot \rho} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \tag{4}$$

본 주제와 관련하여 1994년 문현구와 주광수는 방사성 폐기물의 열하중에 의한 절리 암반의 거동을 발표한 바 있다. 이들은 4조의 절리군의 영향을 고려한 비등방 등가 열전도 계수를 구하여 온도의 변화를 계산하고, 절리와 암석의 2상 모델을 혼성물로 간주하여 절리 암반의 등가 비등방 열팽창 계수를 구하여 해석에 사용하였다.

이와같은 방법에 의하여 문현구와 주광수는 열전도계수가 $2.6 W/m^{\circ}C$ 인 암반이 4조의 절리(평균 간극 $380 \mu m$)를 포함하고 있는 경우, 절리의 열전도 계수 $0.026 W/m^{\circ}C$ (암석의 $1/100$)를 적용하여 이방성의 등가 열전도계수를 구하였다.

그 결과 $k_{xx}=2.53 W/m^{\circ}C$, $k_{yy}=2.49 W/m^{\circ}C$ 를 얻었는데, 이 값을 무결암의 열전도 계수와 비교하면 최대 4.2%의 차이를 보여 불연속면이 열전도에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 나타났다. 4조의 절리군이 발달함에 따라 열전도계수의 이방성은 매우 미약하였음을 알 수 있으며, 2조 이하의 절리군이 발달한 경우 이방성은 더욱 강하게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

그러나 불연속면이 물로 포화되어있는지, 또한 절리의 실제 접촉면적에 따른 열전달 특성의 변화가 고려되어있는지의 여부는 기술되지 않아 실제 실험실 시험 및 현장시험 결과에 의한 검증이 절실히 요구된다.

3. 절리의 영향을 고려한 암반내 열유동 해석

본 장에서는 불연속면의 영향을 고려한 암반내 열유동 해석 기법을 기술하고 이상화된 경우들에 대하여 FLAC을 이용한 등가 연속체 해석을 수행하고 그 결과를 비교 검토하여 절리암반내 열유동 해석기법을 정립하고자 한다.

3.1 절리가 암반의 열물성에 미치는 영향

매질을 따른 열의 이동에는 대류와 전도, 그리고 복사가 있는데 암반 내부에서의 열유동은 전도만을 통해서만 이루어진다고 볼 수 있다. 전도는 또다시 표면 열전

Table 1. Thermal properties and boundary condition employed in the analyses.

Property or Condition	Corresponding values or condition
temperature of cavern interior	100 °C
temperature of surrounding rock	12 °C
cavern depth	deep enough to neglect the effect of surface temperature variation
thermal conductivity of intact rock	3.1 W/m °C (granite)
specific heat of intact rock	800 J/kg °C (granite)
thermal conductivity of ground water	0.569 W/m °C (plain water)
specific heat of ground water	4,185 J/kg °C (plain water)
thermal conductivity of air	0.024 W/m °C
specific heat of air	1,005 J/kg °C
average joint aperture	0.5 mm and 1 mm
average joint spacing	0.2 m, 0.1 m
ground water flow	slow enough to neglect convection
number of joint set	2 sets of perpendicularly intersection joint
dips of joint sets	#1:0° #2:90°

도(convection)와 매질 내부를 통한 전도로 나누어지는데, 표면열전도는 고체 매질과 유체 매질의 경계에서 발생하는 것으로 엄격히 이야기하면 불연속면의 두 면과 지하수의 경계에서 고려되어야 하나, 유체의 흐름이 매우 느린 지하수의 경우에는 그 영향이 매우 작을 것으로 추측할 수 있다. 따라서 불연속면은 전도 특성에만 영향을 미친다고 가정할 수 있다.

Danko와 Mousset-Jones(1991)에 의하면 수분 함량과 응력의 증가에 따라 열전도도가 15-50% 증가한다고 하였다. 이는 물의 열전달 계수가 0.569 W/m °C로 대부분의 암석에 비하여 작지만 공극과 균열 사이에 존재하는 공기의 열전달 계수보다는 상대적으로 높기 때문이다. 즉 응력이 증가할수록 균열이나 공극에 의해 단절되었던 부분의 실제 접촉부가 넓어지며, 물이 침투할 경우 공기에 의한 단절을 매워주는 역할을 한다는 것이다.

이러한 관점에서 살펴보면 절리는 분명 열전달을 방해할 것이나 암반내의 응력 수준과 수분 함량에 따라 유효 열전도도가 많은 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 반면 공동 내부로의 출수는 비교적 빠른 유체의 이동이므로 절리면 내에서 대류 열전달 효과를 발휘하게되며, 특히 공동 내부의 온도와 주변 암반의 온도가 다를 경우에는 지속적으로 열을 공급하거나 빼앗게된다.

3.2 불연속면의 영향을 고려한 1차원 해석

3.1절에 기술한 사항들을 모두 고려할 경우 문제가 매우 복잡해지는 반면, 현 상태에서 측정할 수 있는 자료는 너무도 제한적이므로 본 연구에서는 열적으로 등

방인 암반 내에 고온 물질이 저장된 경우와 절리 등에 의해 열적으로 이방성인 암반 내에 고온 물질이 저장된 경우에 대하여 FLAC으로 연속체 해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

정상 상태에서의 등가 열전도도는 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta x}{k} = \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} \text{ or } k = \frac{\Delta x k_1 k_2}{k_1 \Delta x_2 + k_2 \Delta x_1} \quad (5)$$

여기서 $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$ 이다.

수직 절리의 평균 간극은 1 mm, 평균 간격은 0.1 m 이고 간극은 공기로 차있다고 가정하면,

$$\begin{aligned} k_1 &= 3.1 \text{ W/m}^\circ\text{C} \\ k_2 &= 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C} \\ \Delta x &= 0.1 \text{ m} \\ \Delta x_1 &= 0.099 \text{ m} \\ \Delta x_2 &= 0.001 \text{ m} \end{aligned}$$

이를 (5) 식에 대입하면, x 방향의 등가 열전도도는,

$$k_{xx(\text{air})} = \frac{0.1 \times 3.1 \times 0.024}{3.1 \times 0.001 + 0.024 \times 0.099} = 1.359 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (6)$$

이 된다. 만일 이 간극이 물로 포화되었다면, $k_2 = 0.569 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 가 되므로

$$k_{xx(water)} = \frac{0.1 \times 3.1 \times 0.569}{3.1 \times 0.001 + 0.569 \times 0.099} = 2.968 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (7)$$

가 됨을 알 수 있다. 따라서 절리가 완전히 공기로 차 있을 경우, 무결암에 비하여 열전도계수는 절반 이하로 감소하며, 이 절리가 물로 포화된 경우에는 무결암보다는 낮으나 공기로 채워진 경우와 비교하면 2배 이상으로 증가함을 알 수 있다.

그러나 절리의 연속성(길이)은 무한대가 아니며, 절리의 양면이 일부 접촉하고 있으므로, 이를 고려하여 절리의 50%는 공기나 물, 나머지 50%는 암석으로 연결되었다고 가정하면, (5)식은 다음과 같이 변화된다.

$$\frac{\Delta x}{k} = \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{2k_2} + \frac{\Delta x_2}{2k_1} \quad (8)$$

$$\text{or } k = \frac{2\Delta x k_1 k_2}{(k_1 + k_2)\Delta x_2 + 2k_2\Delta x_1}$$

여기서 $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$

이 경우, 건조 상태에서는

$$k_{xx(air50)} = \frac{2 \times 0.1 \times 3.1 \times 0.024}{(3.1 + 0.024) \times 0.001 + 2 \times 0.024 \times 0.099} = 1.889 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (9)$$

물로 포화된 경우에는

$$k_{xx(water50)} = \frac{2 \times 0.1 \times 3.1 \times 0.569}{(3.1 + 0.569) \times 0.001 + 2 \times 0.569 \times 0.099} = 3.033 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (10)$$

가 된다.

위 과정을 수평 방향 절리에 적용할 수 있으며, 수평·수직방향 모두에 이를 적용하여 정리하면 Table 2

와 같다.

Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 물로 포화되지 않은 암반의 경우, 열전도 이방성이 뚜렷하지만, 물로 포화된 경우에 있어서는 등방에 가까운 성질을 보임을 알 수 있다. 이는 1차원 정상 열전도로 가정하였으므로 완전한 2차원 열전도의 경우 다소 달라질 수 있겠으나, 2차원 해석의 경우 더욱 등방에 가까운 거동을 보일 것으로 추측할 수 있다.

3.3 수치해석에 의한 검증

상기 자료를 바탕으로 불연속면의 영향을 개별적으로 고려한 경우와 불연속면의 영향을 고려한 등가 열전도도를 이용한 해석을 각각 수행하여 비교하였다. 간격 100 mm, 간극 1 mm인 수직 절리의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 1과 같은 모델을 작성하고, 수평 간격이 1 mm인 요소망을 작성하였다. 이 1차원 strip의 상부 및 하부 경계에는 단열 조건을 부과하였고, 좌우 경계는 3.2절에 수록된 바와 같은 온도 고정 경계조건을 부과하였으며 적용된 열물성은 Table 1에 수록된 값을 사용하였다.

Fig. 2는 절리 내부가 공기로만 차 있는 경우에 대한 해석 결과이다. 온도 경계조건을 부과한 후 약 30시간 후에 정상 상태에 이르는데, 이 때의 온도 분포를 살펴보면 암석의 무결암 부분에서는 선형적으로 감소하다가 불연속면을 만나게 되면 급격히 약 16도의 온도 감소를 보인다. 이는 절리 내부의 공기에 의한 일종의 단열 효과라고 볼 수 있다. 등가 열 물성을 가진 열적 연속체의 이론적인 온도 분포가 굽은 직선으로 표시되어 있는데, 대체로 실제보다 낮은 온도를 예측한다. 즉 각각의 절리를 기준으로 열원에 가까운 쪽에서는 실제보다 상당히 낮은 온도를, 열원에서 먼 쪽에서는 실제보다 약간 높은 온도를 예측한다. 열 응력에 의한 암반의 파괴가 주요 관심사일 경우 열원에 가까운 지역에서는 개별 절리에 의한 단열 효과를 실제로 고려할 필요성을 입증해주는 결과라 할 수 있다.

Table 2. Equivalent thermal conductivities of a jointed rock mass in various conditions.

Joint Condition	Air 100%	Water 100%	Air 50%	Water 50%
	Contact 0%	Contact 0%	Contact 50%	Contact 50%
Thermal Conductivity	Case I	Case II	Case III	Case IV
$k_{xx}(\text{W/m}^\circ\text{C})$	1.359	2.968	1.889	3.033
$k_{yy}(\text{W/m}^\circ\text{C})$	2.348	3.066	2.672	3.083
$\frac{k_{xx}}{k_{yy}}$	0.579	0.968	0.707	0.984

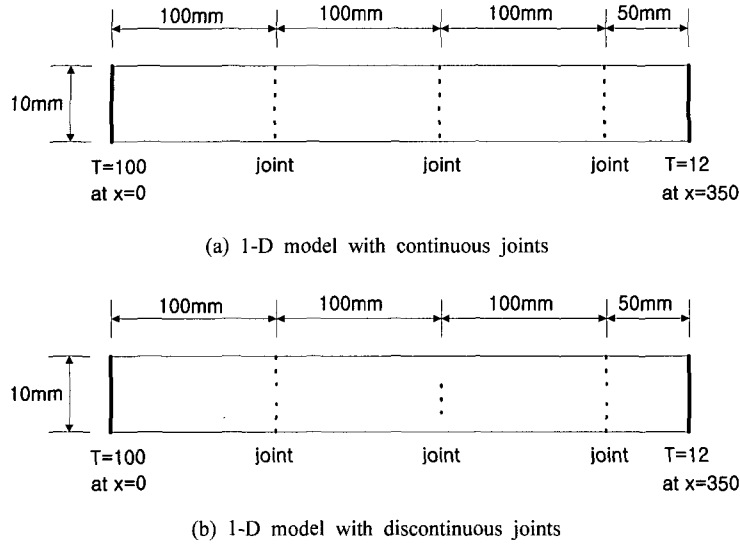


Fig.1. One dimensional model with regularly spaced joints.

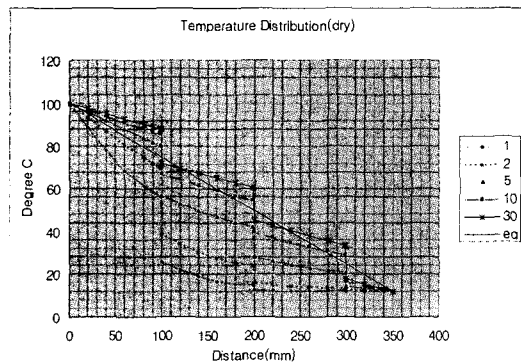


Fig. 2. Temperature distribution when regularly spaced continuous joints are filled with air(dry).

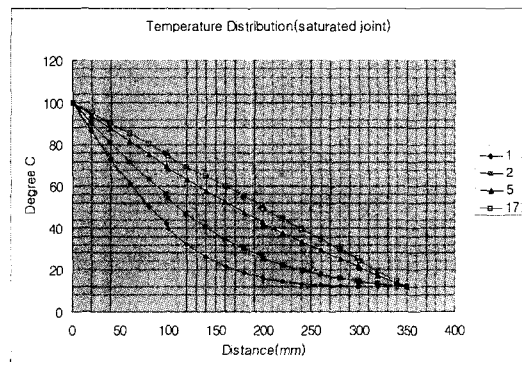


Fig. 3. Temperature distribution when regularly spaced continuous joints are filled with water(saturated).

Fig. 3은 절리에 물이 차있는 경우에 대한 해석 결과이다. 공기에 비하여 물의 열전도도는 훨씬 높으나 암석에 비하여는 낮으므로 절리를 경계로 약간의 온도 jump가 발생하지만 건조한 절리에 비하여 그 정도가 매우 낮다. 물의 비교적 높은 열 전도도로 인하여 정상 상태에 이르는 데 약 17시간이 소요되며, 이는 건조 절리의 경우의 약 절반에 해당한다. 정상 상태에서의 온도 분포는 이론적으로 계산이 가능하며, 수치해석 결과는 0.5% 이하의 오차를 보였다.

다음에는 Fig. 1(b)와 같이 절리의 절반은 끊기고 절반은 암석으로 연결된 경우에 대하여 해석하였다. 이때 절리의 내부는 건조상태로 공기만으로 채워져 있는 것으로 가정하였다. 해석 결과는 Fig. 4와 같이 절리를 경

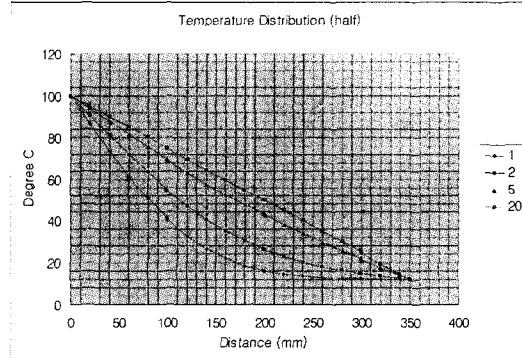


Fig. 4. Temperature distribution when regularly spaced discontinuous joints are filled with air(dry).

계로 아주 미약한 온도 jump를 보였다. 절리의 끊긴 부분으로 열전달이 잘 이루어지므로 정상 상태에 이르는 데 약 20시간이 소요되어 완전히 절리로 분할된 경우에 비하여 약 2/3 정도의 시간이 소요되었다. 이러한 경우에 대한 완벽한 이론 해는 없으나, 절리로 끊긴 구간 사이의 intact 부에서는 완벽한 선형성을 보이므로 해석결과는 정확하다고 판단된다.

이러한 사항을 종합해보면 연속성이 좋고 건조한 절리의 경우 개별 절리의 단열 효과가 매우 뚜렷하지만 연속성이 좋지 않은 경우에는 절리 내부가 건조한 경우라 할지라도 절리면에서의 온도 jump는 미약하여 등가 열물성을 가진 열적 연속체 해석도 무방함을 알 수 있다. 또한 절리의 내부가 물로 포화되어 있는 경우에는 물에 의한 열전도 개선 효과에 의하여 절리가 없는 경우와 비교할 때 약 3% 이내의 열전도도 차이만을 보임을 알 수 있다(Table 2. 참조).

또한 건조한 절리의 경우 절리의 방향성에 따라 비교적 뚜렷한 열적 이방성이 예상되나, Table 2에서 볼 수 있듯이 포화된 절리의 경우 열전도도 이방성 계수

$(\frac{k_{xx}}{k_{yy}})$ 가 거의 1에 가까워 열적 등방체로 간주하여 발생하는 오차는 매우 작을 것으로 판단된다.

4. 방사성 폐기물 저장 시설에 대한 해석 예

절리 암반 내의 열 전달과 관련된 적용 사례는 고온과 관련하여 고준위 방사성 폐기물의 지하저장과 관련된 것이 많고, 저온과 관련해서는 LNG/LPG 저장이나 지하 냉동 저장소의 사례가 있다. 본 연구에서는 지하 고준위 방사성 폐기물의 저장과 관련하여 현재 가장 유력시되고 있는 미국의 저장소 설계를 기준으로 해석하여 결과를 살펴보고자 한다. 이와 관련된 해석 예는 문헌구와 주광수(1994)의 논문에 상세히 기술되어있다. 본 연구에서는 이와 기하학적으로 동일한 모델에 대하여 열 경계 조건과 절리 및 지하수 조건을 단순화하여 해석을 수행하였다(Fig. 5).

Fig. 6에서는 암반과 완충재로 채워진 공동 및 Canister 주변의 열전도도를 Table 2의 case I에 대해 보여주고 있다. 또한 Fig. 7, 8에서는 처분 후 5년경과 시 암반은

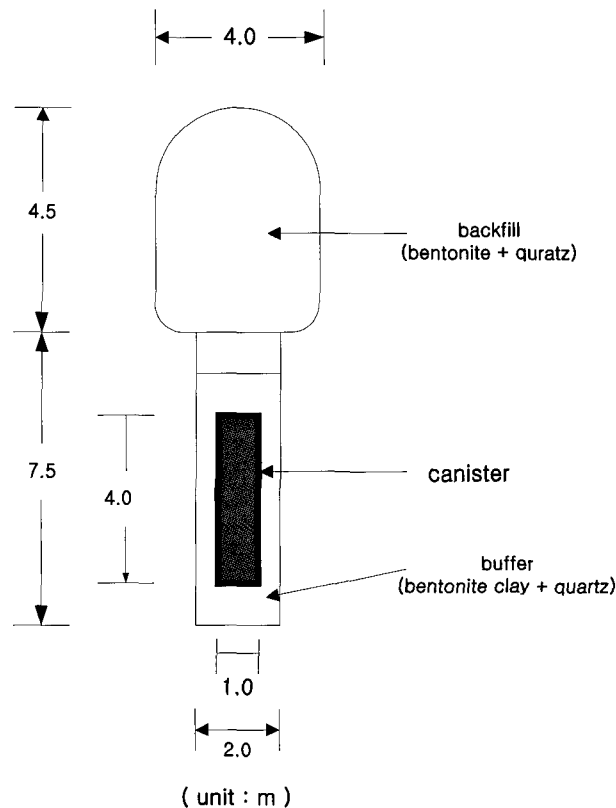


Fig. 5. An example radioactive waste repository with a canister placed in a vertical hole(Moon and Jue, 1994).

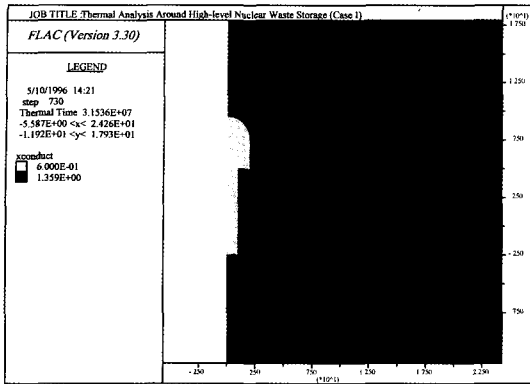


Fig. 6. Thermal conductivities of back-fill material and surrounding rock mass.

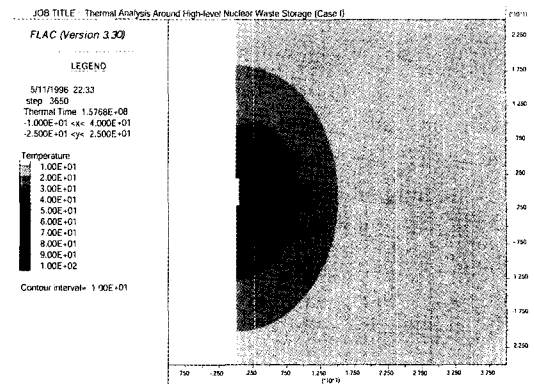


Fig. 7. Temperature distribution after 5 years of repository (Case I).

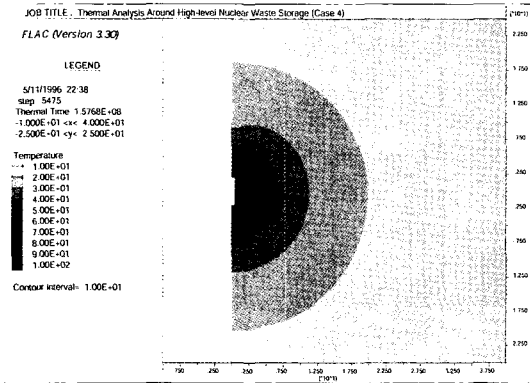


Fig. 8. Temperature distribution after 5 years of repository (Case IV).

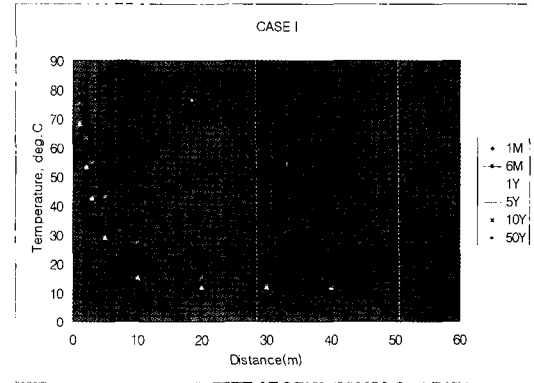


Fig. 9. Temperature distribution along the horizontal line passing through the center of canister (Case I).

도 변화를 Table 2의 case I 과 IV에 대해서 보여주고 있다.

Case I에서는 y-방향 열전도도가 x-방향 열전도도의 2배 정도이므로 수직방향으로는 열의 전도가 빠르고, 수평방향으로는 상대적으로 느린 것을 알 수 있다. 터널부를 열전도도가 낮은 완충재로 되매워 canister 상부의 등온선은 약간 찌그러진 모양이 되어있다. 실제 해석은 150년경과 후 까지 수행하였으나, 해석 범위가 너무 작아서 외부 경계에서의 온도가 초기온도보다 많이 상승하여 오차가 비교적 크게 나타났다.

Fig. 9는 처분 용기 중심부로부터의 거리에 따른 온도 분포 변화 추이를 도시한 것이다. 초기 1년 간은 canister로부터 10 m 이내의 영역만 온도가 상승하나, 점차 시간이 경과하면서 영향 범위가 확대되어 5년 후에는 30 m, 10년 후에는 약 40 m 정도가 됨을 알 수 있다. 본 경우에 있어서 수직 방향의 열전도도는 더 크므로 수직 방향으로의 영향범위는 더 빨리 성장할 것

로 생각된다.

Fig. 10과 11은 Case III와 Case IV에 대한 해석 결과를 도시한 것이다. 전체적인 경향은 Case I의 경우와 동일하나, 시간의 경과에 따른 영향범위의 성장이 열전도도의 증가에 비례하여 빨라짐을 알 수 있다.

Case III의 경우 초기 1년 간은 canister로부터 20 m 이내의 영역에서 온도의 상승이 관찰되며, 5년 후에는 40 m, 10년 후에는 50 m 이상의 영역까지 온도의 변화가 발생한다. Case IV의 경우 이러한 온도변화 영역의 확대는 더욱 빨라져 처분 후 5년이 경과하면 온도 변화 영역은 canister로부터 50 m 이상이 된다. Case I은 질리가 무한히 연속이라는 비현실적인 가정이나 이론적으로 질리가 암반 내에서의 열전달에 미칠 수 있는 최대 영향을 살펴보았다는데 그 의미가 있다. Case III는 불연속면의 trace 길이와 gap 길이가 1:1 인 경우로 비교적 현실성이 있는 가정이다. 이 경우 질리 내부는 건조한 것으로 가정하였으므로 질리에 의한 단열 효과는

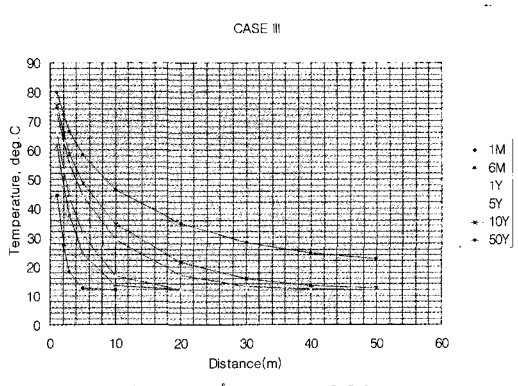


Fig. 10. Temperature distribution along the horizontal line passing through the center of canister (Case III).

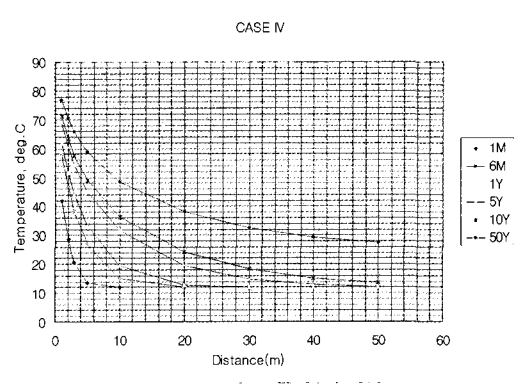


Fig. 11. Temperature distribution along the horizontal line passing through the center of canister (Case IV).

현저하다. Case IV의 경우 Case III와 절리 조건은 동일하나, 절리 내부가 100% 물로 포화된 경우이다. 국내의 지질조건을 고려하면 아마도 가장 현실성 있는 가정이 될 것으로 판단되는데, 이 경우 암반의 열전도 특성은 무결암과 그다지 차이가 나지 않는다. Case III와 비교해보면 최대 60%의 열전도도 증가를 보이므로(Table 2 참조) 암반의 열전도도 대신 무결암의 열전도 특성을 사용하여도 2% 이내의 오차만이 발생한다.

따라서 실제 부지에 대한 사전 예측 단계에서는 해석 대상 지역의 수리, 지질 특성을 잘 파악하면 비교적 작은 노력으로도 공학적인 판단 근거로는 충분히 활용될 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 절리가 발달한 암반 중에 온도의 변화를 유발하는 물질을 저장하는 경우 필연적으로 발생하는 열의 이동이 불연속면과 지하수에 의하여 어떠한 영향을 받게 되는지 알아보려고 하였다. 유한차분법을 이용한 구조해석 프로그램 FLAC의 열해석 기능을 사용하여 수치해석을 수행하고 1차원 열전도에 대한 이론해와 비교한 바, 그 정확성이 입증되었다.

불연속면의 간격과 간극, 그리고 지하수 상태에 따른 여러 가지 상황을 가정하여 이론적인 방법과 수치해석을 이용한 방법을 통하여 불연속면의 상태와 지하수에 의한 포화 정도에 따른 불연속면의 단열 효과를 제시하였고, 등가 열전도도의 계산 방법을 제시하였다.

불연속면의 연속성과 지하수에 의한 포화 정도를 변화시켜가며 해석을 수행한 결과, 연속성이 무한대인 완전 건조 절리의 경우, 절리는 열차단제로 작용하여 정상상태에서도 온도의 불연속이 발생함을 알 수 있었다.

그러나 절리가 부분적으로 또는 완전히 지하수로 포화된 경우, 절리의 열전도도는 급격히 상승하여 온도 불연속 정도는 미약하였다.

방사성 폐기물 지하 처분장에 대한 2차원 연속체 해석을 통하여 절리 발달 상태와 지하수 조건에 따른 암반의 열전도 특성을 조사하였으며, 열응력이 공동 주변에서 역학적 안정성에 미칠 수 있는 영향도 조사하였다. 불연속면의 trace 길이와 gap 길이가 1:1 이고 절리 내부가 100% 물로 포화된 경우 암반의 열전도 특성은 무결암과 그다지 차이가 나지 않으며, 암반의 열전도도 대신 무결암의 열전도 특성을 사용하여도 2% 이내의 오차만이 발생한다.

따라서 절리 암반을 통한 열전도는 암반을 무결암의 열적 성질과 불연속면의 열적 성질을 포함한 열적 이방성 연속체로 가정함으로써 가능하다 할 수 있으며, 초기 설계 단계에서 대상 암반의 지질학적 및 수리학적 특성이 규명되면, 무결암 시료에 대한 열물성 측정 자료를 사용하여도 양호한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

그러나 정확한 열 설계를 위해서는 현지 암반의 열물성을 직접 측정하여 해석에 반영하여야 하므로(Mousset-Jones, 1987), 향후 현지 암반에서 절리를 포함한 넓은 지역을 대표하는 열물성을 정확히 측정할 수 있는 방안을 모색하는 것이 중요할 것으로 생각된다. 다수의 절리군이 발달한 현지 암반에 대한 열물성이 정확히 측정될 경우, 지하수면 하부에서는 암반을 열적 등방체로 고려하여도 무방할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 문현구, 주광수, 1994, 방사성 폐기물의 열화중에 의한 절

- 리암반의 거동에 관한 수치해석적 연구, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 제4권, 제2호, 102-118.
2. 안형준, 이희근, 1997, 암석의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 수치해석적 연구, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 제7권, 제1호, 13-19.
 3. 이희석, 김명환, 이희근, 1998, 암반내 축열시스템의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석적 연구, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 제8권, 제1호, 17-25.
 4. 황용수, 김진웅, 강철형, 1998, 고준위 방사성폐기물을 처분장에서의 THM상호 반응의 수학적 모델 개발, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 제8권, 제1호, 26-36
 5. 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.
 6. Mousset-Jones, P., 1987, Determination of In Situ Rock Thermal Properties and Improved Simulation of the Underground Mine Climate. Ph.D. Dissertation, University of London.

박연준



1981년 서울대학교 공과대학
자원공학과, 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원
토목공학과, 공학박사
Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@mail.suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 조교수

유광호



1984년 연세대학교 공과대학
토목공학과 학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과
석사
1992년 미국 Minnesota대학교 대학원
토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2566
E-mail: khyou@mail.suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 조교수

신희순



1976년 서울대학교 공과대학
자원공학과, 공학사
1978년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학박사
1988년 영국 Newcastle 대학,
지반공학과 객원연구원
Tel: 042-868-3240
E-mail: shins@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원
탐사개발연구부 책임연구원

신중호



1983년 서울대학교 공과대학
자원공학과, 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학박사
Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
한국자원연구소, 탐사개발연구부,
선임연구원