

## Particle Flow Code 2D의 미시변수와 열전도도의 상관관계 분석

이창수, 전석원, 권상기\*,

서울대학교, 서울특별시 관악구 대학동

\*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

[cslee@snu.ac.kr](mailto:cslee@snu.ac.kr)

### 1. 서론

고준위 방사성 폐기물(High Level Radioactive Waste)의 처분에 있어서 처분지역 암반(심부결정질 암석)의 역학적인 특성뿐만 아니라 열적인 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다. 이에 따라 암반의 열 특성에 관한 실험적, 해석적 연구가 많이 수행되어 왔으며, 수치해석적 방법으로는 개별요소법을 기반으로 하여 Itasca Consulting Group에서 개발한 상용 프로그램인 PFC2D를 사용한 다양한 실내시험에 대한 모사가 이루어진 바 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 역학적인 거동특성에 대한 연구를 토대로 암석의 열물성과 다양한 입력변수와의 상관관계를 분석하였다.

### 2. 본론

본 연구에서는 PFC2D에서 입력변수로 사용되는 미시변수가 암석의 열 물성과 어떠한 상관관계가 있는지에 대해 살펴보고자 하였다. PFC2D에서 사용되는 열 관련 미시변수는 입자들의 비열( $C$ , J/kg $^{\circ}C$ ), 열팽창계수( $\alpha$ , 1/ $^{\circ}C$ ) 그리고 열저항계수( $n$ ,  $^{\circ}C/Wm$ )가 있다. 하지만 미시변수 비열과 열팽창계수는 거시물성의 비열과 열팽창계수와 같으므로(PFC2D Manual, 2004) 미시변수인 열저항계수에 대해서 암석의 거시물성과의 상관관계를 살펴보기로 한다.

#### 2.1 열전도도시험

PFC2D를 이용하여 정상 상태에서의 Divided bar test를 수치해석으로 모사하여 암석 시험편의 열전도도를 측정하였다. 수치해석에서 사용된 암석시험편의 직경은 50 mm이고 길이는 100 mm이다.

상부와 하부의 온도를 100 $^{\circ}C$ 와 40 $^{\circ}C$ 로 일정하게 유지하면서 열평형 상태에 도달하였을 때, 열전도도를 직접 측정하여 보았다. 사용된 열전도도

계산식은 식(1)과 같다.

$$q'' = K \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

여기서  $q''$ 는 heat flux(W/m $^2$ )이고  $K$ 는 열전도도(W/m $^{\circ}C$ )를 의미하며,  $L$ 은 시험편의 길이(m) 그리고  $T$ 는 온도( $^{\circ}C$ )를 이다.

수치해석에서 heat flux는 하부의 입자들에서 계산된 값을 이용하여 열전도도  $K$ 를 구하기로 하였다.

#### 2.2 열전도도에 미치는 미시변수의 영향성 평가

미시변수가 거시물성에 미치는 영향을 파악하기 위해서 각각의 미시변수들을 바꾸어 가면서 거시물성에 미치는 영향을 조사해야 한다. 미시변수가 거시 물성에 미치는 영향에 대한 민감도 분석과 각 인자들 사이의 영향을 분석하기 위해서 실험계획법의 하나인 부분배치법(FFD, Fractional Factorial Design)을 적용하였다. 또한 부분배치법에 의해 실행된 각각의 시험은 총 10회를 수행하여 구한 평균값을 시험의 결과값으로 사용하였다. 민감도 분석을 위해 사용한 미시변수와 각각의 입력값은 Table 1에 제시한 바와 같으며, 민감도 분석은 상용통계프로그램인 NCSS 2007을 이용하여 수행하였다.

Table 1. Micro-parameters used in the simulation

Micro-parameter	Levels	
	Low	High
A. Ball radius (mm)	0.3	0.7
B. Ball density (kg/m $^3$ )	2300	3300
C. Specific heat (J/kg $^{\circ}C$ )	500	1500
D. Coefficient of linear thermal expansion (10 $^{-6}$ / $^{\circ}C$ )	1.0	10.0
E. Thermal resistance ( $^{\circ}C/Wm$ )	100	500

민감도 분석과 분산분석을 실시한 결과, 열전도도는 최소 입자 반지름(A)과 입자간의 열 저항계

수(E)가 커질수록 감소하는 것으로 나타났다.

2.3 열전도도와 미시변수와의 상관관계 분석

열전도도에 영향을 미치는 것으로 판단되는 두 가지 미시변수들(최소 입자 반지름(A), 입자간의 열 저항계수(E))을 이용하여 열전도도와의 상관관계를 좀 더 명확히 살펴보고자 두 가지 미시변수를 모두 3수준(-1, 0, 1)으로 하여 수치해석을 수행하고 회귀분석을 실시하였다. 사용된 미시변수들은 Table 2에 나타나있다.

Table 2. Micro-parameters used in sensitivity analysis

Micro-parameter	Factor Levels		
	-1	0	+1
A. Ball radius (mm)	0.3	0.5	0.7
E. Thermal resistance (°C/Wm)	500	1000	1500

상용통계 프로그램인 NCSS를 이용하여 미시변수와 열전도도사이의 상관관계를 비선형 회귀분석한 결과는 식(2)과 같이 나타났다.

$$y = \frac{22.821^2}{x_1 \cdot x_2} \tag{2}$$

여기서  $x_1$ 은 최소 입자 반지름(A)이며,  $x_2$ 는 입자의 열 저항계수(E)이다. 열전도도에 대해 미시변수를 사용한 회귀분석식의 결정계수  $R^2$ 은 0.99 이상으로 매우 큰 값을 보였다. 이는 추후에 열-역학 상호작용을 해석할 때 암석의 거시물성을 알고 해석영역에 적합한 입자의 최소반지름이 결정되면 나머지 미시변수인 입자의 열 저항계수가 자동으로 계산되어 질 수 있음을 의미한다.

Äspö Rock과 대전화강암의 열전도도는 SKB 보고서(2007)와 서울대에서 수행한 보고서(2002)에 각각 2.60과 2.66으로 보고된 바 있다. Äspö Rock과 대전화강암에 대해 열·역학적인 상호작용을 최소 입자 반지름이 0.5 mm로 수행하고자 한다면 결정된 미시변수인 최소입자 반지름(0.5 mm)과 구하고자 하는 거시물성인 열전도도(Äspö Rock: 2.60 W/m°C, 대전화강암: 2.66 W/m°C)를 회귀식에 대입하여 입자의 열 저항계수(Äspö Rock: 400.164 °C/Wm, 대전 화강암: 391.578 °C/Wm)를 계산할 수 있다.

결정된 최소 입자반지름(0.5 mm)과 계산된 입자의 열 저항계수(400.164 °C/Wm, 391.578 °C/Wm)를 이용하여 실제 수치해석을 수행하여 본 결과 Äspö Rock의 경우 수치해석 결과 2.65로 나

타나 목표치인 2.60과 약 1.76% 차이가 났으며 대전 화강암의 경우 2.70으로 나타나 목표치인 2.66과 약 1.54% 크게 나타났다.

3. 결론

PFC2D를 이용하여 정상 상태의 열전도도 시험을 모사하였다. 또한 민감도 분석을 수행하여 열전도도에 영향을 미치는 미시변수인 최소입자 반지름(A)과 입자간의 열 저항계수(E)를 구하였다. 또한 회귀분석을 수행하여 열전도도와 두 미시변수의 상관관계를 분석하여 비선형 회귀식을 도출하였다.

4. 감사의 글

본 연구는 한국원자력연구원의 위탁과제(20090062-294) “균열암반에서의 THM 거동 특성 연구”의 지원을 받아 수행하였습니다.

5. 참고문헌

[1] PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions), 2004, Version 3.1, Minneapolis: Itasca Consulting Group.  
 [2] SKB, 2007, Äspö Pillar Stability Experiment. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading, SKB TR-07-01  
 [3] 전석원 외, 2002, 암반의 수리인자에 미치는 열적·역학적 영향에 대한 실험적 검증, 기술보고서, KAERI/CM-494/2001, 서울대학교