

물리마당결합해석체계에 의한 심부지열마당특성평가

최광우, 리은희

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《다른 나라의 선진과학기술성과들을 우리 실정에 맞게 제때에 받아들이도록 하여야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 43페이지)

세계적으로 화산분출은 인류에게 커다란 재난을 가져다주고있으므로 화산지역의 심부지열분포특성을 정확히 해명하는것은 중요한 문제로 제기되고있다.

지금까지 화산지역들에 대한 지질학적 및 지구물리관측을 진행하고 그것에 대한 1차원적인 해석[2]은 많이 진행되었지만 화산지역 심부지열마당의 변화특성을 3차원적으로 해석한 연구결과와는 발표된것이 없다. 그러므로 우리는 화산지역의 지표온도분포특성과 물리마당결합해석체계(COMSOL Multiphysics)를 리용하여 심부지열마당의 변화특성을 평가하였다.

1. 심부지열마당에 대한 수학적모형

암장으로부터 방출되는 방대한 열에너지는 지각내부의 지층이나 지질구조 등을 통하여 지구의 겉면으로 흘러나와 대기로로 발산된다. 즉 암장에 의하여 지각내부에 열마당이 형성되는데 이것을 심부지열마당 또는 지온마당이라고 한다.

심부지열마당은 열에너지분포와 그 흐름특성을 나타내는 물리적마당이므로 지각내부에서의 지열분포상태를 시간에 따르는 온도분포 T 로 표시할수 있다.[1]

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

여기서 x, y, z 는 지각내부의 공간자리표이고 t 는 시간이다.

심부지열마당의 열분포특성은 물리마당결합해석체계의 열전도모형을 리용하여 평가할수 있다.

물리마당결합해석체계의 열전도모형을 리용하면 지층과 같은 고체매질에서의 열전도과정과 암장 또는 공극에서 류체의 열대류과정을 동시에 모의할수 있다.

물리마당결합해석체계에서 열전도방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_{ts} C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-K_{eq} \nabla T) = Q_H + Q_G + Q_C + Q_R \quad (2)$$

여기서 δ_{ts} 는 선택계수, C_{eq} 는 단위체적당 열포텐샬(열흐름량), T 는 온도, K_{eq} 는 열전도계수, Q_H, Q_G, Q_C, Q_R 는 각각 일반열원천, 지열원천, 대류열원천, 복사열원천의 열량이다.

지열원천의 열량 Q_G 는 다음과 같이 결정한다.

$$Q_G = \rho_{geo} q_{geo} \exp(z_{geo}/h_{geo}) \quad (3)$$

여기서 ρ_{geo} 는 지열밀도, q_{geo} 는 단위질량당 방사성원천의 열량, z_{geo} 는 모형의 깊이이며

h_{geo} 는 길이척도이다.

대류열원천의 열량 Q_C 는 다음과 같이 결정한다.

$$Q_C = h(T_{\text{inf}} - T) \quad (4)$$

여기서 T_{inf} 는 주변온도이며 T 는 고찰점에서의 온도이다.

지구표면에서 복사열원천의 열량 Q_R 는 다음과 같이 결정한다.

$$Q_R = \sigma \varepsilon (T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (5)$$

여기서 T_{amb} 는 주변온도, σ 는 볼츠만상수, ε 은 지표복사률이다.

2. 심부지열마당의 정상열전도과정모의

물리마당결합해석체계에서는 열전도수학모형의 경계조건, 물리적성질 등을 설정한데 기초하여 모형을 유한체차법 또는 유한요소법으로 모의하고 각이한 도면형식(등값선도, 색도, 자름면도 등)으로 현시하여 분석할수 있다.

우리는 H지역의 심부온도분포를 예측하기 위하여 현재의 안정상태를 정상과정으로 보고 물리마당결합해석체계에서 3차원정상열전도과정을 모의하였다.

먼저 연구지역의 3차원심부구조와 암장모형에 기초하여 물리마당결합해석체계에서 3차원모형을 작성하였다.

화도의 중심을 직각자리표계의 중심과 일치시키고 연구지역을 x , y 축방향에서는 각각 $-8\,000 \sim 8\,000\text{m}$, z 축방향에서는 지표면을 0m 로 하고 암장 1의 윗면($-12\,000\text{m}$)에서부터 $1\,000\text{m}$ 까지로 설정하였다.

연구지역의 3차원심부구조에 기초하여 z 축방향에서 $-1\,000\text{m}$ 부터 지표면까지를 상부암석구역, $-3\,000 \sim -1\,000\text{m}$ 를 열수층구역, $-12\,000 \sim -3\,000\text{m}$ 를 하부암석구역으로 구분하였다. 그리고 연구지역의 암장모형에 기초하여 계산구역의 아래경계면은 암장 1의 윗면으로, 암장 2는 긴반경이 $4\,000\text{m}$ 이고 짧은반경이 500m 인 3차원타원체인데 그것의 중심깊이는 $-8\,000\text{m}$, 화도는 직경이 300m 이고 높이가 $-12\,000\text{m} \sim -7\,000\text{m}$ 인 원기둥으로 설계하였다.(그림 1)

다음 물리마당결합해석체계의 열전도모형(Heat Transfer Conduction)을 리용하여 물리적성질과 경계조건을 다음과 같이 설정하였다.

우선 열전도방정식풀이에 필요한 암장 주머니의 밀도 $2\,200\text{kg/m}^3$, 비열 $800\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 열전도계수 $2.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 열흐름량은 20mW 로, 암석층의 밀도 $2\,600\text{kg/m}^3$, 비열 $740\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 열전도계수 $2.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 로 설정하였다.

또한 경계조건으로서 지표로부터 $-1\,000\text{m}$ 까지의 온도를 현지추공조사자료에 기초하여 다음과 같이 표시하였다.[2]

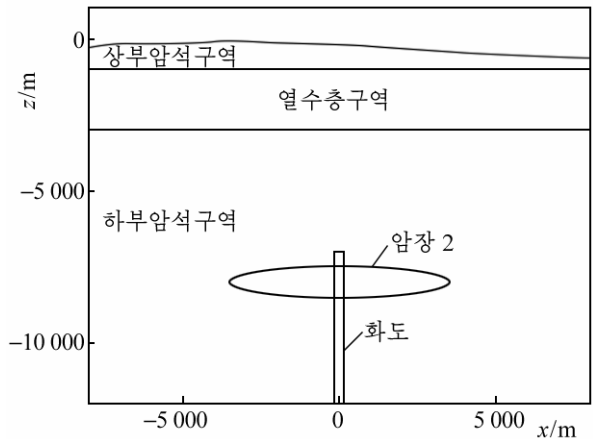


그림 1. 심부구조와 암장모형

$$T = -0.1568z + 3.0534 \quad (6)$$

그리고 열수층구역의 온도를 $-2\ 200\text{m}$ 에서는 463K , $-3\ 000\text{m}$ 에서는 553K , 암장 2와 화도의 결면온도를 $1\ 173\text{K}$, 암장 1(깊이 $-12\ 000\text{m}$)의 내부와 결면에서의 온도를 $1\ 273\text{K}$ 으로 설정하였다.

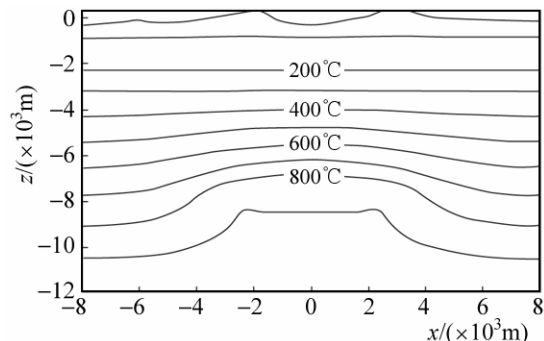


그림 2. 연구지역 평면자리표(0, 0)을 중심으로 동서방향자름면에서의 온도분포

다음 유한요소법을 리용하여 열전도모형에 대한 모의를 진행하였다.(그림 2)

그림 2에서 보는바와 같이 암장 1의 옷면($-12\ 000\text{m}$)부터 화도끝점($-7\ 000\text{m}$)까지는 온도가 $800\sim 1\ 000^\circ\text{C}$ 로서 그 변화가 완만하지만 화도와 열수층사이구역과 열수층과 지표사이구역에서는 온도변화가 심하다. 계산결과에 의하면 화도와 열수층사이구역에서 온도구배는 $12\sim 14^\circ\text{C}/100\text{m}$ 이며 열수층과 지표사이구역에서 온도구배는 평균 $17^\circ\text{C}/100\text{m}$ 이다.

맺 는 말

- 1) 물리마당결합해석체계에서 심부지열마당을 평가할수 있는 수학적모형을 제기하였다.
- 2) 심부지열계의 지표 및 암장온도분포특성에 기초하여 각이한 깊이에서의 심부온도분포변화특성을 평가하였다.

참 고 문 헌

- [1] COMSOL Multiphysics: Earth Science Module User's Guide, 69~74, COMSOL, 2007.
- [2] Jiandong Xu; Introduction of Changbaishan Volcano, Changbaishan Volcano International Workshop, 4~20, 2015.

주체105(2016)년 7월 5일 원고접수

Estimation of Characteristics of Deep Geothermal Field by COMSOL Multiphysics

Choe Kwang U, Ri Un Hui

We selected the heat transfer conduction in COMSOL Multiphysics as model for estimating change characteristics of temperatures in deep geothermal field and estimated its characteristics.

And we estimated the change characteristics of deep temperatures in various depth based on the distribution characteristics of surface and magma temperatures in deep geothermal field.

Key words: heat transfer conduction, deep geothermal field, COMSOL Multiphysics