

# 화도에서 화산성가스흐름에 대한 계산류체력학적모의

김연호, 안철호

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《온천, 지하수, 지열탐사를 적극 벌려 지하수와 지열자원을 다 찾아내여 종합적으로 리용하도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제14권 503페이지)

지난 시기 화산지역의 밑에 놓인 심부지열계의 암장주머니와 화도에서 일어나는 복잡한 과정을 모의하기 위한 연구[2-5]가 많이 진행되였다.

계산류체력학은 넓은 범위에서 변하는 흐름속도를 가진 류체의 흐름계산과 각종 류체 기계에서의 흐름계산 및 성능예측, 열화학적과정을 동반하는 흐름과 지구대기권흐름에 대한 수값모의 등에 효과적으로 응용되고있다.[1]

본문에서는 류체흐름해석체계인 FLUENT를 리용하여 지구 심부지열계의 화도에서 화산성가스흐름과정을 모의하였다.

## 1. 지열계의 수학적 및 물리적모형화

화도에서 화산성가스흐름은 고온고압가스가 매우 치밀하고 불규칙적인 암석층을 통과하는 복잡한 과정이다. 일반적으로 고온고압가스흐름은 강한 함수 및 결수불련속성을 가진 2계편미분방정식으로 표시되는데 이러한 방정식의 수값해석은 계산류체력학분야에서 어려운 문제의 하나이다. 그러므로 화도에서 화산성가스흐름문제는 1차원 또는 2차원문제로 제한하여 취급하고있다.

우리는 화산성가스를 두가지 류체 즉 부시네스크류체(열팽창에 의한 뜰힘효과를 고려하는 비압축성류체)와 압축성리상류체로 모형화하였다.

FLUENT에서 리용하는 기본방정식들은 다음과 같다.

① 질량보존에 관한 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\mathbf{v}$ 는 속도벡토르,  $t$ 는 시간이다.

② 운동량보존에 관한 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \left[ (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

여기서  $p$ 는 압력,  $\mathbf{g}$ 는 중력가속도,  $\mathbf{F}$ 는 외력,  $\mu$ 는 동력학적점성계수,  $\mathbf{I}$ 는 단위텐소르이다.

③ 에네르기보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + \tau \cdot \mathbf{v}] + S_h$$

여기서  $k_{\text{eff}}$ 는 유효열전도도,  $T$ 는 온도,  $J_j$ 는  $j$ 종의 확산흐름세기,  $\tau$ 는 응력텐소르,  $S_h$ 는 원천의 에네르기이다. 그리고

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

이며  $h$ 는 열량이다.

연구지역에 대한 탐사자료들과 지질학적연구정형을 종합한데 기초하여 지열계모형을 직경 10 000m, 깊이 4 000m의 원기둥체로 작성하였다. 그리고 원기둥체의 중심에서 직경이 60m인 화도가 밑면에서부터 1 000m 위로 올라와 2개로 갈라지며 화산성가스출구들의 위치는 약 6 000m 떨어져있는것으로 설정하였다.

화도와 그 주변은 크기가 10m인 그물로, 나머지구역에서는 크기가 500~1 000m인 성긴 그물로 분할하였다. 그리고 GAMBIT에서 먼저 4면체그물로 전체 구역을 분할한 후 그물화일을 FLUENT에서 다시 다면체그물로 변환하였다.(그림 1) 그리하여 그물의 수를 24% 정도 줄임으로써 풀이의 수렴성을 개선하였다. 다면체그물로 변환하였을 때 그물의 총수는 447 698개이다.

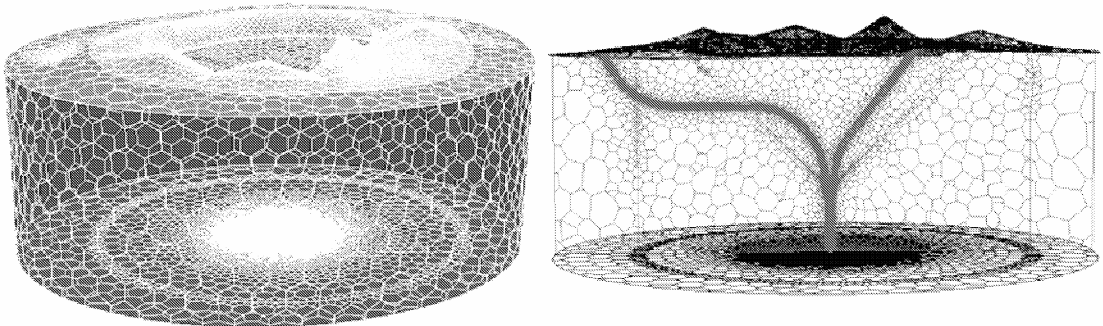


그림 1. 지열계의 기하학적모형

## 2. 화도과정에 대한 계산류체력학적모의

화도에서 화산성가스흐름을 FLUENT에서 모의하기 위하여 다음과 같은 풀이방식을 도입하였다.

① 화도안으로 압축성가스를 끌어들이기 위한 전처리를 진행하였다.

만일 심부지열계의 화도입구에 그 깊이에 해당하는 투과계수를 설정하고 모의를 진행하면 류체가 화도안으로 들어오지 못하고 입구경계면에서 강한 비약이 나타나거나 역흐름이 생긴다. 이러한 현상을 극복하기 위하여 FLUENT의 사용자정의함수기능을 리용하여 전처리프로그램을 작성하였는데 깊이에 따르는 온도 및 압력의 초기값설정부분, 화도 및 주변 암석층의 투과계수를 설정하기 위한 부분으로 구성하였다.

② 3 000m 깊이에서부터 지표로 올라오면서 투과계수가 점차 커지도록 하였다.

지층의 투과계수를 실제보다 훨씬 큰 값으로 설정하고 100번의 반복계산을 진행한 후 점차 그 값을 감소시키면서 모의하였다. 이때 화도입구의 압력은 처음에는 작은 값으로 설정하였다가 투과계수가 작아지는데 따라 증가시키도록 하였다.

이때 경계조건은 다음과 같이 설정하였다.

화도입구에는 압력입구경계조건을 설정하고 0.1~100MPa의 값을 초기값으로 주었다. 그리고 2개의 화도출구에 질량흐름세기경계조건을 주고 지표판측값 33kg/s를 고려하여 각각 16.5kg/s로 하였다. 지열계에서 화도를 제외한 나머지구역에는 벽경계조건을 설정하였다.

모의결과에 얻어진 화산성가스흐름의 밀도분포는 그림 2와 같다.

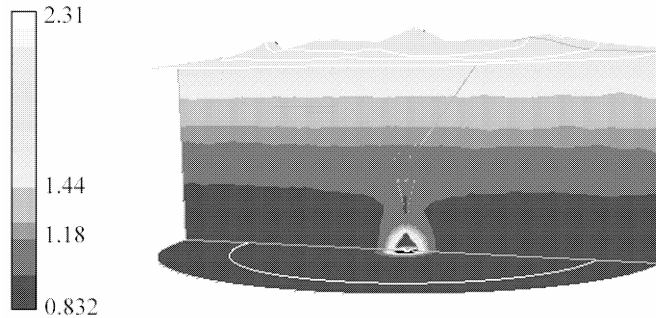


그림 2. 화산성가스흐름의 밀도(kg/m³)분포

그림 2에서 보는바와 같이 급격한 밀도구배는 화도입구근방에만 생긴다.

또한 화도안에서 화산성가스흐름의 속도분포는 그림 3과 같다.

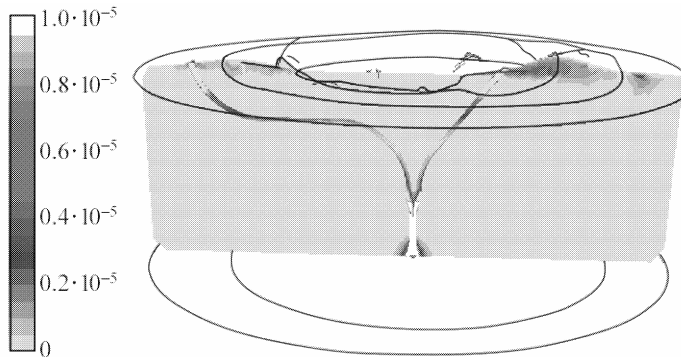


그림 3. 화산성가스흐름속도(m/s)에 대한 모의결과

그림 3에서 보는바와 같이 지표에서 방출되는 화산성가스량을 33kg/s로 설정하였을 때 화도에서 화산성가스흐름속도는 약  $10^{-5}$ m/s이다.

또한 온도변화특성을 모의한데 의하면 화도입구에 다른 구역보다 300K정도 더 높은 온도를 설정하여도 화도입구의 높은 온도는 화도주변의 지층에 큰 영향을 미치지 못하였으며 영향구역의 크기도 압력영향구역의 크기보다 훨씬 작았다.

## 맺 는 말

1) 화산성가스흐름의 밀도분포를 모의한 결과 급격한 밀도구배는 화도입구근방에만 생긴다.

2) 지표에서 화산성가스류출총량이 33kg/s이상을 초과하지 않는다면 심부에서 가스의 흐름속도는 약  $10^{-5}$ m/s로서 매우 천천히 흐르며 이러한 상태에서는 뜨거운 화산성가스에 의한 국부적인 열구역이 형성되지 않는다.

## 참 고 문 헌

- [1] 장대욱 등; 력학전서 13(계산류체력학과 응용), 김일성종합대학출판사, 5~31, 주체102(2013).
- [2] 박치봉 등; 백두화산, 김일성종합대학출판사, 110~145, 주체101(2012).
- [3] Erika Ronchin et al.; Computers & Geosciences, 52, 325, 2013.
- [4] S. J. Lane et al.; Fluid Motions in Volcanic Conduits, Geological Society of London, 33, 2008.
- [5] Dmitri Rouwet et al.; Volcanic Lakes, Springer, 125, 2015.

주체106(2017)년 1월 5일 원고접수

## CFD Simulation of Volcanic Gases Flow in Volcanic Conduits

*Kim Yon Ho, An Chol Ho*

We studied the possibility of CFD simulation for the flow process of volcanic gases in volcanic conduits of the geothermal system beneath of the “ $\text{H}$ ” volcanic area.

The research results revealed that the flow of volcanic gases would not considerably influence pressure and thermal fields around volcanic conduits and the flow rate was not fast enough to form the local thermal fields.

Key words: volcanic conduit, CFD simulation