

물리마당결합해석체계에서 탈가스과정모의

최 광 우

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《환경보호, 자연보호관리사업을 잘하여야 합니다.》

화도에서 탈가스과정은 흔히 폭발성화산이 분출하기 직전에 일어난다. 탈가스과정에 대한 동력학적모의는 화산분출예보에 의한 환경보호, 자연보호관리사업에서 중요한 의의를 가진다.

선행연구[1, 2]에서는 2차원구조에서 암장의 탈가스과정모의와 3차원유한요소법에 의한 암장주변에서의 변형과정모의를 진행하였다.

본문에서는 3차원구조에서 암장의 정상적인 류입에 의한 탈가스과정을 모의하고 암장의 류입량과 점성, 탈가스량과 화도반경을 변화시키면서 탈가스과정을 고찰하였다.

1. 기체포화대에서 기포흐름모형

폭발성화산분출에서 암장주머니로부터 지표까지 화도로 상승하는 암장의 동력학적특성에 따라 화도는 3개의 대로 즉 균질대, 기체포화대, 쇠설화대로 나누어진다.(그림 1)

균질대는 암장주머니에서 화도로 이동하는 점성이 높고 균일한 암장용융체로 구성된다. 기체포화대는 암장용융체와 함께 기체포화된 액체로, 쇠설화대는 기포에서 분리된 가스로 구성된다.

암장주머니에서 암장압력 P_m 은 기포화압력 P_0 보다 크다. ($P_m > P_0$) 때문에 암장주머니에서는 암장에 기포가 생기지 않으며 암장의 밀도와 점성이 변하지 않고 일정하다.

암장이 균질대를 따라 이동함에 따라 암장압력 P_m 은 점차 작아진다.

균질대와 기체포화대의 경계에서부터 암장압력 P_m 은 기체의 기포화압력 P_0 보다 작아진다. ($P_m < P_0$) 즉 암장압력이 기포화압력보다 작기때문에 기포가 발생하게 된다.

기체포화대에서는 기포화작용이 강화되면서 기포가 새로 형성되어 기포수밀도(단위체적당 기포수)가 점차 커진다.

기체포화압력은 점성저항으로 작아지는 용융체압력보다 서서히 작아진다. 결국 과잉압력 $\Delta p = p_0 - p_m$ 이 어떤 림계값에 도달하면 기체포화대와 쇠설화대의 경계에서 가스가 분리된다.

기체포화대와 쇠설화대에서의 물리적현상들은 혼합물의 연속방정식 및 운동방정식, 분리된 가스성분의 연속방정식 등 여러가지 형식으로 표시될수 있다.

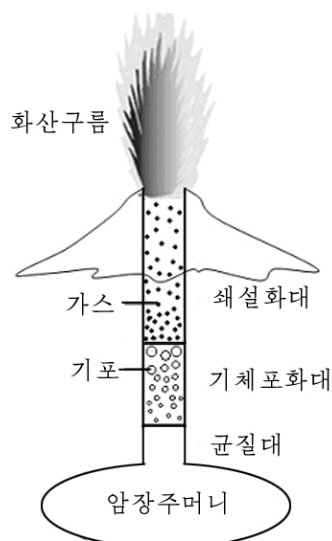


그림 1. 화도의 구분

론문에서는 탈가스과정을 모의하기 위하여 물리마당결합해석체계 COMSOL을 리용하였다. 암장주머니에서의 류체흐름은 다상계이므로 설정한 문제에 적합한 모형으로서 COMSOL의 기포흐름모형(Bubbly Flow)을 선정하였다. 이 모형은 기체-액체혼합체에 적합하다. 기포흐름모형은 다음과 같은 가정에 기초하고있다.

- ① 기체밀도는 액체밀도에 비하여 매우 작아서 무시할수 있다.
- ② 액체에 대한 기체의 이동은 점성과 압력에 의하여 결정된다.
- ③ 액체와 기체는 같은 압력마당을 가진다.

이상과 같은 가정들에 기초하여 류체의 운동방정식 및 연속방정식과 기체체적비에 의한 수송방정식을 표시할수 있다.

액체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_l \rho_l \frac{\partial \mathbf{u}_l}{\partial t} + \phi_l \rho_l \mathbf{u}_l \cdot \nabla \mathbf{u}_l = \\ = -\nabla p + \nabla \cdot [\phi_l (\eta_l + \mu_T) (\nabla \mathbf{u}_l + \nabla \mathbf{u}_l^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}_l) \mathbf{I})] + \phi_l \rho_l \mathbf{g} + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{u} 는 류체의 흐름속도(m/s), p 는 류체의 압력(Pa), ϕ_l 은 단위체적속의 액체체적비, ρ 는 밀도(kg/m³), \mathbf{g} 는 중력가속도(m/s²), \mathbf{F} 는 체적힘(N/m³), η 는 류체의 동력학적점성(Pa·s), μ_T 는 란류의 점성(Pa·s), \mathbf{I} 는 단위행렬이며 밀첨수 l 은 액체상을 표시하는 첨수이다.

식 (1)에서 첨수 l 대신에 g 로 바꾸면 기체의 운동방정식이 된다.

류체의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho_l \phi_l + \rho_g \phi_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \phi_l \mathbf{u}_l + \rho_g \phi_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (2)$$

그리고 기체체적비에 의한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_g \phi_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \phi_g \mathbf{u}_g) = -m_{gl} \quad (3)$$

여기서 m_{gl} 은 기체로부터 액체으로의 질량이동량이다.

기체체적비가 작은 경우($\phi_g < 0.1$)에 연속방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_l = 0 \quad (4)$$

COMSOL에서는 \mathbf{u}_l , p 와 $\tilde{\rho}_g = \rho_g \phi_g$ (유효기체밀도)를 풀이한다. 그리고 기체속도는 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{u}_g = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_{slip} + \mathbf{u}_{drift} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{u}_{slip} 는 액체에 대한 기체의 상대속도이며 \mathbf{u}_{drift} 는 란류모형을 리용할 때의 보충속도이다.

COMSOL에서는 이상기체법칙으로부터 기체밀도를 계산한다.

$$\rho_g = \frac{(p + p_{ref})M}{RT} \quad (6)$$

여기서 M 은 기체의 물질량(kg/mol), R 는 기체상수(J/(mol·K)), T 는 온도(K)이다. p_{ref} 는 표준대기압(Pa)으로서 10⁵Pa이다. 액체체적비는 $\phi_l = 1 - \phi_g$ 로 계산한다.

2. 기포흐름에 의한 탈가스과정모의

기포흐름에 의한 탈가스과정을 모의하기 위하여 암장주머니와 화도를 다음과 같이 설계하였다.(그림 2)

암장주머니는 중심깊이가 -8 000m, 긴 반경 4 000m, 짧은 반경 500m인 3차원타원체이다. 아래화도는 반경이 75m, 균질대와 기체포화대는 반경이 45m인 원기둥이다.

그리고 깊이방향으로 아래화도는 -12 000 ~ -8 500m구간에, 균질대는 -7 500m ~ -6 500m구간에, 기체포화대는 -6 500m ~ -5 000m구간에 놓여있다.

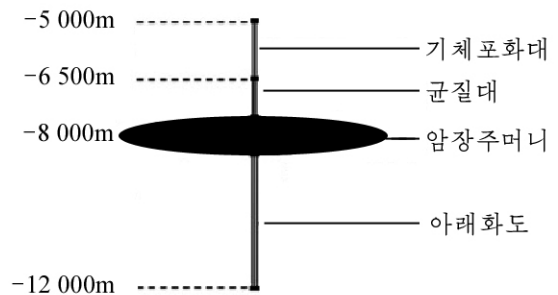


그림 2. 설계한 암장주머니와 화도

암장의 밀도는 $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$, 점성은 $\eta = 2 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 온도는 1173 K (900°C), 중력가속도 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 초기유효가스밀도는 $\rho_{\text{eff}} = 0 \text{ kg/m}^3$ 로 설정하였다. 그리고 헨리상수 $H = 5 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$, 물질이동결수 $k = 1.8 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$, 기체의 체적함량 $c = 5400 \text{ mol/m}^3$ 에 기초하여 기체로부터 액체로의 질량 이동량을 다음과 같이 계산하였다.

$$m_{gl} = \left(\frac{P}{5 \cdot 10^4} - 5400 \right) \cdot 1.8 \cdot 10^{-12}$$

화도에서 암장의 류입속도는 정적상태에서 지표면으로 배출되는 탈가스량 33 kg/s 에 대응한 휘발성물질이 류입되고있다고 보고 $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ 로 설정하였다. 기체포화대에서 액체류입속도는 균질대에서 액체류출속도와 같다고 보고 화도의 압력은 $p = -\rho g z$ (여기서 z 는 깊이, $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ 는 암장주변암석의 밀도)로 설정하였다.

기체포화대에서 압력과 온도분포는 60s이후에 정상압력, 정상온도상태에 이른다.

기체포화대모의는 화도출구에서의 류체흐름속도를 기체포화대입구에서의 기체속도로 주고 시간을 1일, 1년, 1 000년으로 점차 늘이면서 진행하였는데 앞의 수렴결과는 다음번 모의를 위한 초기조건으로 설정하였다. 모의결과에 의하면 1 000년동안에 화도끝위치 -5 000m에서 기체체적비는 0으로부터 0.0529로 증가하였다.

암장의 압력분포에 미치는 인자들의 영향을 평가하기 위하여 암장의 점성과 류입량, 화도반경, 탈가스량을 변화시키면서 모의를 진행하였다. 화도끝위치 -5 000m에서 모의결과들을 종합하면 다음과 같다.

① 화도반경이 45m, 암장의 점성이 $2 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 탈가스량이 33 kg/s 일 때 1 000년동안 압력은 거의 선형증가하여 12MPa정도 된다.

② 화도반경을 60m로 선정한 경우 1 000년동안 압력은 1.5MPa정도 커진다. 즉 화도반경이 45m일 때에 비하여 압력증가량이 훨씬 작아진다.

③ 암장의 점성을 $2 \cdot 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 로 선정한 경우에도 1 000년동안 압력은 ①의 경우와 비슷하다. 즉 암장의 점성은 화도압력에 크게 영향을 주지 않는다.

④ 암장의 류입속도를 $2 \cdot 10^{-4} \text{m/s}$ 로 선정한 경우에도 1 000년동안 압력은 ①의 경우와 비슷하다. 즉 암장의 류입속도도 화도압력에 크게 영향을 주지 않는다.

⑤ 탈가스량이 66kg/s일 때 1 000년동안 압력은 0.35MPa정도, 탈가스량이 99kg/s일 때 2.5MPa정도로 작아진다.

맺는 글

1) 1 000년동안에 화도에서 기체체적비는 0.052 9로 증가하였다.

2) 암장의 점성과 류입량은 암장에서의 압력분포에 큰 영향을 주지 않는다.

3) 화도의 반경이 45m로부터 60m로 커질 때 압력변화량은 8~10배정도 작아지며 탈가스를 2~3배로 늘이면 압력은 0.35~2.5MPa정도로 작아진다.

참고 문헌

[1] R. M. Mason; From Journal of Volcanology and Geothermal Research, 153, 148, 2006.

[2] E. Ronchin; Computers & Geosciences, 52, 325, 2013.

주체107(2018)년 4월 5일 원고접수

A Simulation for Outgassing Process in COMSOL Multiphysics

Choe Kwang U

We designed 3D magma chamber and conduit and selected the boundary and initial condition for the bubbly flow model in COMSOL multiphysics.

We estimated the interrelation of viscosity and inflow of magma, radius of the conduit, outgassing quantity and pressure in conduit.

Key words: outgassing, COMSOL multiphysics