

Cellular Automata를 이용한 용암류 모의 프로그램의 구현

이충환¹ · 홍동진¹ · 차의영^{1*} · 윤성효^{2*}

¹부산대학교 전기전자컴퓨터공학과, ²부산대학교 지구과학교육과

Implementation of Lava Flow Simulation Program Using Cellular Automata

Chung-Hwan Lee¹, Dong-jin Hong Lee¹, Eui-young Cha^{1*}, and Sung-Hyo Yun^{2*}

¹Department of Computer Science Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약: 본 논문에서는 화산 분화 시 분출되는 용암류의 피복 범위와 용암류의 두께를 모의하기 위한 용암류 시뮬레이션 프로그램을 구현한다. 지도 정보를 DEM과 같이 일정한 면적마다 관측된 값을 가진 '셀'로 나타내고 셀룰러 오토마타 모델을 적용한 용암류 모의 알고리즘을 수행하여 용암류의 흐름에 대해서 모의한다. 용암류의 정량적인 데이터를 얻기 위해 용암류의 유체 특성을 빙햄 소성유체(Bingham plastic fluid)로 정의하고, 유도된 식을 셀룰러 오토마타의 규칙에 사용한다. 프로그램에 대한 검증을 위해 USGS에서 제공하는 30m 해상도 DEM을 이용하였으며, Hawaii의 푸우오오 분화구(Pu'u'O'o crater) 지역에서 2016년 5월 24일에 발생한 용암류에 대해 실제로 용암류가 흐른 흔적과 시뮬레이션의 모의 결과를 비교하였다.

핵심어: 시뮬레이션, 용암류, 빙햄 소성 유체, 셀룰러 오토마타

Abstract: In this paper, we propose a lava flow simulation program to predict the range of lava flows area and thickness of lava flows during volcanic eruptions. The map information is represented as a 'cell' with observed values per fixed area such as DEM and a lava flow prediction algorithm using a cellular automata model is performed to predict the flow of lava flows. To obtain quantitative data of lava flows, fluid properties of lava flows are defined as Bingham plastic fluid and derived equation is applied to the rules of cellular automata. To verify the program, we use a 30m resolution DEM provided by USGS. We compared simulation results with real lava flows for the Pu'u'O'o crater area in Hawaii, which has erupted since May 24, 2016.

Keywords: Simulation, Lava flow, Bingham plastic fluid, Cellular automata

서 론

화산 활동으로 분출되는 화산 분출물은 화산 가스, 화성쇄설물, 용암류로 구분된다. 그 중 용암류는 지형을 따라 흐르기 때문에 자연환경과 인근 주거지역에 직접적인 피해를 줄 수 있는 근접재해로 평가된다. 따라서, 용암류의 분출시 용암류의 피복범위를 예측

하여 근접재해에 대비하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 용암류의 두께와 피복범위를 예측하여 화산지대 및 인근지역에 용암류로 인한 재해에 대비할 수 있도록 하는 프로그램을 설계하고자 한다. 프로그램은 실제 지형의 DEM 정보를 읽고, 미리 설정된 용암류의 온도, 점성, 밀도를 이용하여 예상 이동경로와 두께를 예측한다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 하와이 킬라우에아 화산의 동쪽 열곡대(eastern rift zone)에 위치한 푸우오오 분화구(Pu'u'O'o crater)에서 2016년 5월 24일에 발생한 실제 용암류 경로와 프로

*Corresponding author

Tel: +82-51-510-2219, +82-51-510-2723

E-mail: eycha@pusan.ac.kr, yunsh@pusan.ac.kr

그림의 결과를 비교하였다.

관련 연구

용암류 모델링

용암류 흐름 모의를 위해 프로그램에서 다루는 용암류의 특성을 정의한다. Fink and Griffiths(1998)에서 서로 다른 조성을 가진 용암류를 빙핵 소성유체로 정의하여 용암류의 형태학, 속도, 유변학에 대해 실험하여 실제 용암류와 유사한 성질을 가질 수 있다는 것을 실험적으로 입증하였다. 본 연구에서 제안하는 프로그램에서도 용암류의 특성을 빙핵 소성유체로 가정하고 용암류 모의를 진행한다. 빙핵 소성유체는 일정한 크기의 외력이 유체에 작용하는 경우에만 유동을 하는 유체로, 항복점 이후의 유동은 뉴턴 법칙을 따르는 것으로 알려져 있다. 용암류의 유동량에 대한 정량적인 계산을 위해 유동량 계산 공식을 사용한다. 용암류 유동량을 계산하는 과정에서 용암류의 두께(h)와 용암류 임계 두께(h_c)를 이용한다. 용암류 두께는 용암류가 한 지점에서 가지는 두께를 의미하며 용암류 임계 두께는 인접한 두 지점에서 항복응력과 점성에 의해 설정되는 용암류의 두께를 의미한다(Dragoni *et al.*, 1986, 1994). 임계 두께 이상의 용암류 두께가 계산되어야 인접한 두 지점 간의 용암류 전달이 가능하다. 용암류 임계 두께는 기울기에 의한 용암류 흐름을 고려한 계산식을 이용하며, 이에 따른 h_c 는 식 (1)과 같이 정의된다(Miyamoto and Sasaki, 1997).

$$h_c = \frac{S_y}{\rho g \left(\sin \alpha - \frac{\partial h}{\partial x} \cos \alpha \right)} \approx \frac{S_y \sqrt{\Delta z^2 + \Delta x^2}}{\rho g (\Delta z - \Delta h)} \quad (1)$$

여기서, Δz 는 인접한 두 셀 간의 고도차, Δh 는 용암류 두께 차이, Δx 는 인접한 두 셀 간의 거리이다. 고도차와 용암류 두께 차이를 계산하는 방식은 식 (4)에서 확인할 수 있다. 표 1은 식 (1)의 인자들을 나타낸 표이다.

앞서 설명한 용암류 두께와 임계 두께를 이용한 유동량 계산 공식은 빙핵 소성유체에 대한 Navier-Stokes 방정식을 통해 유도되며 용암류의 유동량 q 는 식 (2)과 같이 정의된다(Del Negro *et al.*, 2008). 인접한 두 셀 간의 고도차와 용암류 두께 차이는 용암류 임계 두께의 값을 결정하는 중요한 요인이 되며

Table 1. Definition of parameters used in Bingham plastic fluid

Symbols	Description
S_y	Yield Strength
ρ	Density
g	Gravity
η	Viscosity

이로 인해 용암류가 인접 셀로 전달되는 것을 제어할 수 있다. 따라서 그 차이가 클수록 식 (2)에서의 a 값이 식 전체에 미치는 영향이 커져 용암류 유동량을 결정하는데 많은 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

식 (3)은 항복응력(S_y)을 계산하는 식을 나타낸다(Ishihara *et al.*, 1990; Bilotta *et al.*, 2012). 용암류의 온도(T)에 따라 항복응력이 결정된다. 온도가 감소할수록 항복응력 값은 커지게 되고 결과적으로 식 (1)에 의해 용암류 임계 두께가 상승되어 용암류의 온도 변화에 따른 흐름을 제어하는 역할을 하게 된다. 용암류의 밀도(ρ)와 점성(η)은 온도에 따라 변화하는 값이 아닌 상수 값으로 가정하고 용암류 모의에 적용한다.

$$q = \frac{S_y h_{cr}^2 \Delta x}{3\eta} \left(a^3 - \frac{3}{2} a^2 + \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

where $a = h/h_c$.

$$\log S_y(T) = 13.0997 - 0.0089T \quad (3)$$

Cellular Automata

용암류가 진행되는 과정을 표현하기 위해 물리적 확산 모델에서 효과적인 성능을 보인 셀룰러 오토마타(Cellular Automata, CA) 모델을 이용한다. CA는 도시의 성장, 유체역학 등 복잡한 현상을 물리적인 관점에서 연구하고 표현하기 위한 확산 모델로서 많이 사용되어 왔다. 대표적으로 CAESAR, SCIDDICA과 같은 CA적용 모델이 있다(Yoon and Koh, 2012). 제안하는 방법에서 용암류가 진행되는 과정을 표현하기 위해 설계한 CA의 기본 규칙은 다음과 같다.

- 규칙적인 격자 형태의 셀로 구성이 되며, 각 셀은 유한 개수의 상태를 가진다.
- 모든 셀은 이웃들의 상태와 정해진 규칙에 의해

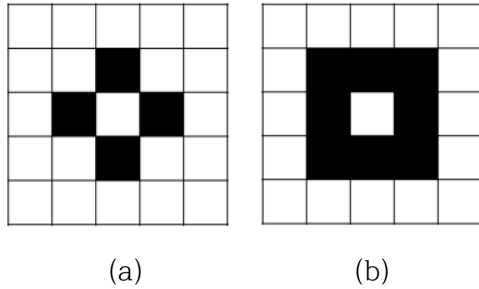


Fig. 1. Structure of neighborhood in Cellular Automata (Left: von Neumann neighborhood, Right: Moore neighborhood). In this program, we use the moore neighborhood structure.

다음 상태가 결정이 된다.

· 갱신은 모든 셀의 다음 상태가 결정 되었을 때 동시에 이루어진다.

셀룰러 오토마타에서 주로 사용하는 이웃 반경의 형태를 Fig. 1에 나타내었다. (a)는 상하좌우를 이웃으로 설정하는 폰 노이만 이웃(von Neumann neighborhood) 이고, (b)는 8방향을 이웃으로 삼는 무어 이웃(Moore neighborhood)이다. 용암류 흐름을 예측하기 위한 모델에서는 전 방향을 고려해야하기 때문에 무어 이웃이 적절하다.

예측 환경의 고도 정보 설계

Fig. 2는 제안하는 용암류 예측 프로그램에서 적용된 지형 모델을 나타낸다. 각 셀은 기본적으로 DEM에 기록된 고도 값(z)을 초기 고도 값으로 갖는다. 그리고 셀에 용암류가 존재하면 용암류의 두께(h)를 추

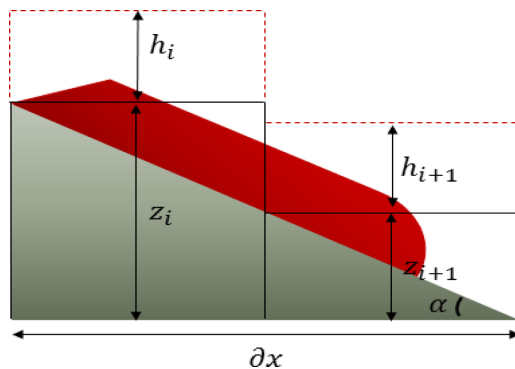


Fig. 2. Terrain Modeling in our lava flow simulation program(Red object: lava, z : Altitude, h : lava thickness).

가적으로 가지게 되고 이 높이에 따라 이웃으로 전달될 용암류의 양이나 두께를 결정한다.

프로그램 구성

프로그램의 전체적인 흐름은 먼저 DEM에서 분화 지역의 지형정보를 가져와 초기화 단계를 거친 후 CA 모델을 적용한 용암류 흐름 알고리즘을 이용하여 용암류 흐름에 대한 예측을 진행한다. 모의 과정이 끝나면 각 셀에 기록된 용암류 두께정보를 저장한다.

셀 상태

CA에서 각 셀은 지형의 고도(z), 용암류의 두께(h), 용암류 열량(Q) 그리고 용암의 온도(T)를 각 셀의 상태를 나타내기 위한 값으로 갖는다. 인접한 셀과 정해진 규칙에 의해서 현재 셀의 다음 상태가 결정이 되며, 이웃 셀 또한 다음 상태의 영향을 받게 된다.

CA 모델 기반 용암류 흐름 모의

앞서 제시한 CA모델의 기본 규칙을 용암류 시뮬레이션에 적용하면 다음과 같다.

확산: 각 셀에서 근접 이웃에 용암류 전달을 위해 3단계를 거쳐 전달과정이 진행이 된다.

step1. 현재 셀과 인접한 셀에 대해 식 (4)를 이용하여 후보 이웃 S 를 결정한다. $C_{0,0}$ 는 현재 셀이고 C_{ij} 는 이웃 셀이다.

$$S = \{C_{i,j} | \Delta z_{i,j} - \Delta h_{i,j} > 0\} \quad (4)$$

where $\Delta z = z(C_{0,0}) - z(C_{ij})$,
 $\Delta h = h(C_{ij}) - h(C_{0,0})$

step2. 후보 이웃 S 의 원소 중 현재 셀의 용암류 두께(h_0)가 용암류 임계 두께($h_{c,i}$)보다 큰 경우 최종 이웃 N 으로 선택한다.

$$N = \{C_{i,j} | h(C_{0,0}) > h_c(C_{0,(i,j)}) > 0\} \quad (5)$$

step3. 유동량 계산식(2)를 이용하여 최종 이웃에 전달할 용암류 유동량 $q(N)$ 를 계산한다. 이와 함께 용암류의 온도까지 함께 전달을 하는데, 먼저 식 (6)을 이용하여 현재 셀의 용암류 열량 $Q_{t+\Delta t}(C_{0,0})$ 을 계산한다. 여기서, $\Delta Q_{t,r}(C_{0,0})$ 은 공기 중으로 방출되는

Table 2. Typical parameters used in lava flow prediction program

Symbols	Description
ε	Emissivity
c_v	Specific heat
σ	Stefan-Boltzmann constant
A	Area

용암류의 복사열을 의미한다. 식 (6)을 통해 얻은 열량을 통해 현재 셀의 용암류 온도를 계산하고, 계산된 온도를 이웃에 전달하는 용암류의 온도로 한다.

$$Q_{t+1}(C_{0,0}) = Q_t(C_{0,0}) - \Delta Q_{t,r}(C_{0,0})$$

where

$$\Delta Q_{t,r}(C_{0,0}) = \varepsilon A \sigma T(C_{0,0})^4 \quad (6)$$

$$T(C_{0,0}) = \frac{Q_{t+1}(C_{0,0})}{\rho c_v h(C_{0,0}) A} \quad (7)$$

$$T(N) = T(C_{0,0})$$

식에서 사용된 변수들은 Table 2에서 나타내었다 (Vicari *et al.*, 2007).

갱신: 모든 셀이 확산 과정을 끝내고 난 후, 모든 셀이 동시에 갱신 과정을 진행한다. 유입된 용암류로 인한 셀 상태의 변화를 나타내기 위해 식 (8)-(11)로부터 각각 새로운 용암류의 부피(V_{t+1}), 용암류의 두께(h_{t+1}), 온도 (T_{t+1}), 열량(Q_{t+1})를 계산한다.

$$V_{t+1} = V_t + \sum q \quad (8)$$

$$h_{t+1} = \frac{V_{t+1} \Delta t}{A} \quad (9)$$

$$T_{t+1} = \frac{V_t}{V_{t+1}} T_t + \sum \frac{q_i}{V_{t+1}} T_i \quad (10)$$

$$Q_{t+1} = T_{t+1} \rho c_v h_t A \quad (11)$$

시뮬레이션 결과

제안하는 용암류 모의 프로그램에 대한 검증을 위해 하와이 푸우오오 분화구에서 2016년 5월 24일에 발생한 실제 용암류 경로를 비교하였다. 프로그램 검증을 위해 Table 3에 나타낸 값을 이용하여 모의하였다. 해당 지역에 대한 DEM 정보는 USGS에서 제공하는 30m 해상도 DEM을 얻어 용암류 모의에 사용하였다.

Fig. 3은 USGS에 기록된 시간에 따른 용암류 피복 범위와 제안하는 프로그램에서 모의된 용암류의 피복 범위를 구글맵 지형위에 나타낸 그림이다. 초기 용암류의 흐름을 비교하였을 때 실제 용암류 흐름은 남동쪽 방향을 향하고 있지만, 모의된 용암류의 초기 진행방향은 북동쪽을 향하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 시간의 경과에 따라 두 용암류 흐름 모두 남동쪽 방향으로 용암류가 진행되고 있으며 용암류 피복 지점 또한 유사함을 확인할 수 있다. 시간적인 측면으로 각 단계(step)마다 분출지점에서 용암류가 나온다고 가정하였을 때 이를 시간으로 환산하면 그림 3의 (d)는 5000초, (e) 10000초, (f)는 30000초로 실제와는 상이한 차이를 보인다. 이러한 차이의 가장 큰 원인으로 생각되는 것은 실제 용암류 분출률과 모의에서 사용된 분출률 간의 차이에서 비롯된 것으로 보이며 또 다른 원인으로 용암류가 식어 고체화가 진행된다면 점차 흐름이 정체되어 진행이 더뎌져야 하는데 현재 알고리즘에서는 용암류의 온도는 식 (6)에 의해 복사열에 의해서만 온도가 방출되고 있어 고체화가 진행되는데 오래 걸리는 것으로 생각된다.

Table 3. Simulation input parameters

Parameter	Value	Unit
DEM Resolution	30	m
Average eruption rate	10	$m^3 \cdot s^{-1}$
Lava density	2600	$kg \cdot m^{-3}$
Lava viscosity	100	$Pa \cdot s$
Eruption temperature	1600	K
Solidification temperature	900	K

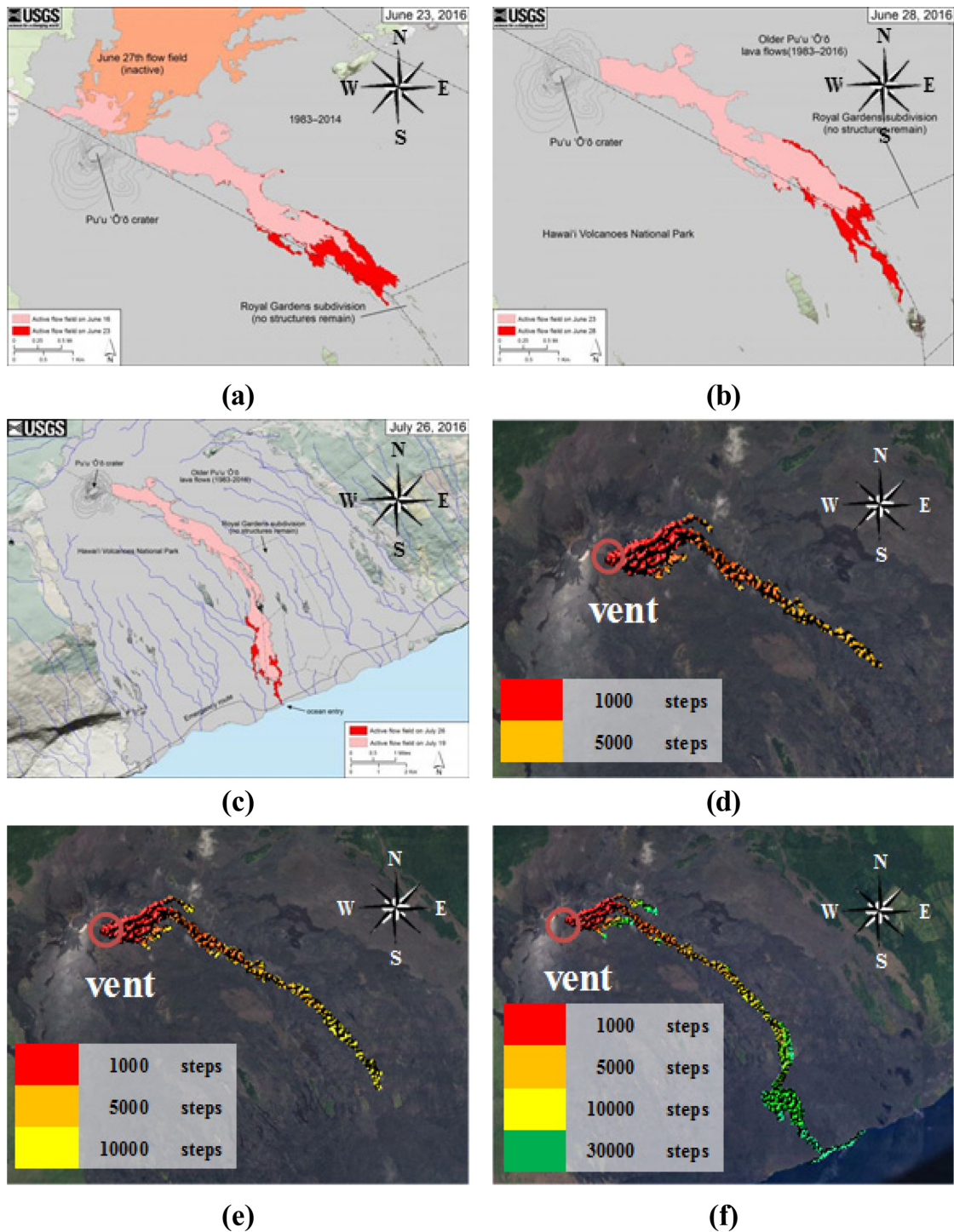


Fig. 3. Observed temporal evolution of lava flow emplacement and simulated lava flows on the Pu'u/O'o crater. (a)~(c): actual lava path, (d)~(f): simulated lava path. (a): 30 days after eruption, (b): 36 days after eruption, (c): 64 days after eruption, (d): 5000 steps, (e): 10000 steps, (f): 30000 steps.

결 론

본 논문에서는 화산 분화 시 분출되는 용암류의 피복범위와 두께를 모의하는 프로그램을 구현하였다. 구현한 프로그램은 CA기반 용암류 확산 모델을 이용하여 용암류 피복범위를 모의하였다. 실제로 용암류가 흐른 흔적과 구현한 프로그램을 통해 얻은 모의한 결과를 비교하였을 때, 유사한 방향성과 피복범위를 알 수 있었다. 하지만, 용암류 모의의 각 단계를 시간으로 환산하였을 때 실제와 많은 차이가 있었는데 이는 용암류가 분화구에서 분출되는 양과 시간이 일정하지 않고 대기의 온도, 토양조건 등 여러 변수를 고려하지 못한 부분에서 생기는 오차로 판단된다. 향후에는 수치화가 가능한 용암류 흐름에 관여하는 환경 조건들을 분석 및 추가하여 용암류의 두께 및 도달 시간, 피복범위에 대한 예측의 정확성을 높일 것이다.

사 사

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난 안전 기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구[MPSS-자연-2015-81]입니다. 본 논문을 읽고 건설적인 조언과 수정을 해 주신 김성욱 박사와 익명의 심사자에게 감사드립니다.

References

Bilotta, G., Cappello, A., Hérault, A., Vicari, A., Russo, G. and Del Negro, C., 2012, Sensitivity analysis of the MAGFLOW Cellular Automaton model for lava flow simulation. *Environmental Modelling & Software* 35, 122-131.
Del Negro, C., Fortuna, L., Hérault, A. and Vicari, A.,

2008, Simulations of the 2004 lava flow at Etna volcano using the magflow cellular automata model, *Bulletin of Volcanology*, 70, 805-812.
Dragoni, M., Bonafede, M. and Boschi, E., 1986. Downslope flow models of a Bingham liquid: implications for lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 30, 305-325.
Dragoni, M. and Tallarico, A., 1989, The effect of crystallization on the rheology and dynamics of lava flows, *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, 59, 241-252.
Fink, J.H. and Griffiths, R.W., 1998, Morphology, eruption rates, and rheology of lava domes: Insights from laboratory models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1978-2012), 103(B1), 527-545.
Ishihara K., Iguchi M. and Kamo K., 1990, Numerical simulation of lava flows on some volcanoes in Japan, (ed. Fink, Jonathan H.), *IAVCEI Proceedings in Volcanology, Lava flows and domes: emplacement mechanisms and hazard implications*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 174-207, 243p.
Miyamoto, H. and Sasaki, S., 1997, Simulating lava flows by an improved cellular automata method. *Computers & Geosciences* 23, 283-292.
Vicari, A., Hérault, A., Del Negro, C., Coltelli, M., Marsella, M. and Proietti C., 2007, Modeling of the 2001 lava flow at Etna volcano by a Cellular Automata approach. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1465-1471.
Yoon, D.H. and Koh, J.H., 2012, A Study on Analysis of Landslide Disaster Area using Cellular Automata : An Application to Umyeonsan, Seocho-Gu, Seoul, Korea. *Journal of Korea Spatial Information Society*, 20, 9-18. (in Korean with English abstract)

Received November 22, 2016

Review started December 2, 2016

Accepted February 6, 2017