

RESEARCH NOTE

## 실시간 대화형 화산재 확산 예측 시스템 개발

김해동\* · 이호만<sup>1)</sup>

계명대학교 지구환경학과, <sup>1)</sup>기상청 관측기반국 지진정책과

### Developing Interactive Simulator for Predicting Volcanic Ash

Hae-Dong Kim\*, Ho-Man Lee<sup>1)</sup>

Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

<sup>1)</sup>Earthquake Policy Division/Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

#### Abstract

According to the analysis of volcanic observation data around Korean peninsula, the activities of volcano increase continuously. For example, the volcanic eruption of Mt. Sakurajima is an example, and Mt. Baekdu can be another example potentially. In these regards, developing unified system including realtime prediction and 3D visualization of volcano ash are important to prepare the volcanic disaster systematically. In this technical report, an interactive simulator embedding dispersion algorithm and 3D visualization engine is developed. This system can contribute to the realtime prediction of volcanic disaster scientifically.

**Key words** : Volcanic observation, Mt. Baekdu, Volcanic disaster

#### 1. 서론

최근 백두산 일대의 관측자료에 의하면 화산성 지진의 발생 빈도와 강도가 증가한 것으로 나타나며, GPS 관측자료에서도 백두산 천지 일대의 지표면이 마그마의 상승에 의해 부풀어 오르고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 백두산이 폭발할 경우 피해는 2010년 4월 아이슬란드 화산 폭발의 10~100배에 달할 수 있으며 한반도, 중국, 일본 및 러시아가 주요 피해국이 될 것으로 전망하고 있다.

백두산 화산이 분화한다면 분출 형태일지 아니면 폭발 형태일지에 따라 주변국들의 피해 규모가 달라질 수 있다. 일반적으로 화산 분화는 분출과 폭발 2가

지로 분류되며, 전자는 현무암질 암석층 지역에서 그리고 후자는 백두산과 같은 유문암질 암석층 지역에서 주로 발생한다. 백두산 화산 분화가 위험한 이유도 폭발성 분화일 가능성이 높기 때문이며, 따라서 화산재를 뿜어내는 격렬한 화산활동이 예상된다. 백두산 화산이 분화한다면 그 피해 규모는 화산분화규모를 나타내는 화산폭발지수(VEI; Volcano Explosivity Index)에 따라 다르다. 만약 소규모 분화(VEI < 2)일 경우의 피해는 국지적으로 한정될 가능성이 크다. 그러나 분화규모가 클 경우(VEI > 2) 그 피해는 한반도를 비롯한 중국과 일본을 포함한 동북아시아 지역에 영향을 미칠 가능성이 크다. 특히, 백두산 화산 폭발 시 분출될 화산성 쇄설물은 항공기 운항 및 물류대란,

Received 26 November, 2013; Revised 24 January, 2013;

Accepted 4 February, 2014

\*Corresponding author: Hae-Dong Kim, Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

Phone: +82-53-580-5930

E-mail: khd@kmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

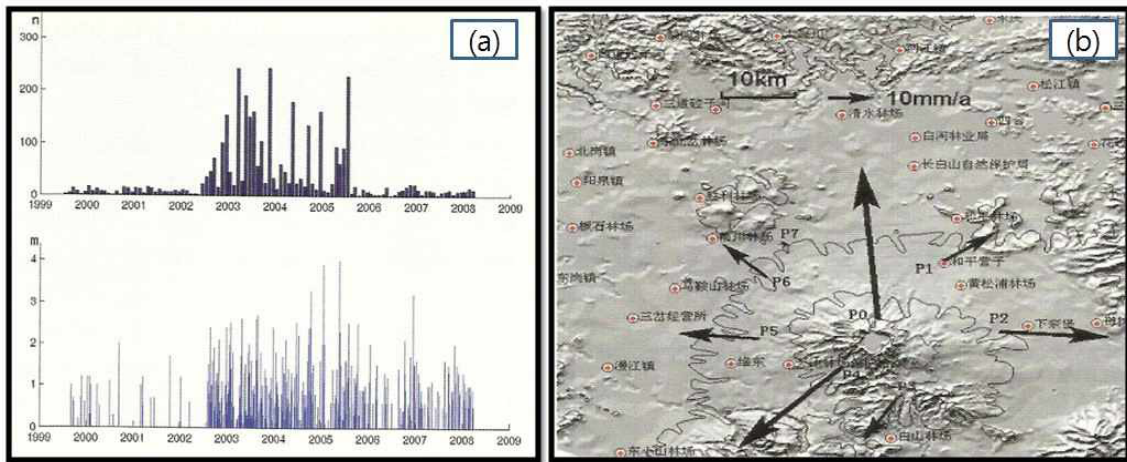


Fig. 1. Observational data of volcano activities around Mt. Baekdu. (a) the frequency and magnitude of earthquake increase, (b) GPS recording show the expanding of surface caused ascending magma (Observational Bureau of China Meteorological Administration).

호흡기 질환, 농작물 냉해, 정밀기기 산업 피해 등 인명피해와 함께 막대한 경제적 피해가 예상된다. 예를 들면, 백두산 화산이 폭발할 경우 그 피해 규모는 2010년 4월 아이슬란드 화산 폭발 시 피해 규모의 10~100배에 달할 것으로 예상된다. 특히, 동북아시아 지역이 세계 경제의 열쇠를 쥐고 있는 현실을 감안해 볼 때 백두산 화산 분화가 전 세계에 미칠 영향은 매우 클 것으로 예상된다. 그러나 백두산 화산 분화 시 직접적인 피해(용암류, 암설류, 화산이류 등)는 주로 북한과 중국지역에 한정되며, 남한지역은 미세먼지 농도가 강해지고 항공운항에 영향을 받은 등 간접적인 영향을 받을 것으로 보인다. 비록, 화산분화로 인한 대재앙은 실제 발생하기 전까지 그 시기와 규모를 예측하기 어렵지만, 일단 화산재해가 발생하면 취약부문(항공기 운항 관제)에 대한 신속한 대응이 중요하다. 이를 위해 기존의 순차적인 예보절차와는 달리 실무자의 예보 경험과 기상실황자료를 즉각적으로 예보 시스템에 반영 가능한 대화형 화산재 예측 시스템의 개발이 필요하다.

## 2. 화산재 확산 예측 알고리즘

화산이 분화한 경우 신속한 화산재 확산 예측을 위해서는 실황 바람자료의 확보가 중요하다. 본 연구의

화산재 확산 예측 알고리즘을 다음과 같이 3단계(입자 확산 계산→ 화산재 분출량 계산→ 입자 농도 계산)로 구성되어 있다.

### 2.1. 입자 확산 예측 알고리즘

화산재 확산 모델의 첫 번째 단계는 기후 자료에서 얻어진 수평의 바람 장( $u, v$  성분)을 이용하여 화산재 입자의 움직임을 계산하는 것이다. 화산재의 확산은 대기 바람 장에 의한 역학적인 영향을 가장 크게 받는다. 본 연구에서는 화학 작용이나 습도와 같은 다른 영향은 고려하지 않았다. 화산재 입자는 그 화학적 조성이 단일한 종류의 입자가 아니지만 역학적인 관점에서는 화산재 입자의 밀도와 크기만 고려하면 된다. 본 예측 모델에서는 화산재 입자와 대기성분 사이에 화학적 반응은 없다고 가정한다.

화산재의 확산 모델은 오로지 바람장에 따른 역학적인 영향만 고려한다. 입자의 확산 예측은 Yamada의 RAPTAD(random particle transport and diffusion) 알고리즘(Yamada, 1988)을 적용한다. RAPTAD 모델은 바람 장을 따라 움직이는 입자의 위치를 계산하는 방법으로 대기의 요동 즉 난류에 의한 입자의 복잡한 움직임도 고려할 수 있다. 이 모델은 난류에 따른 입자의 움직임을 랜덤한 입자의 움직임으로 근사한다. 아래의 수식들(1~5)은 바람 벡터장에 따라 입자

의 위치를 계산하는 식이다.

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + U_{pi} \Delta t \quad (1)$$

여기서,

$$U_{pi} = U_i + u_i \quad (2)$$

$$u_i(t + \Delta t) = au_i(t) + b\sigma_{u_i}\zeta + \delta_{i3}(1-a)t_{Lx_i} \frac{\partial}{\partial x_i}(\sigma_{u_i}^2) \quad (3)$$

$$a = \exp(-\Delta t/t_{Lx_i}) \quad (4)$$

$$b = (1-a^2)^{1/2} \quad (5)$$

$U_{pi}$ 는  $x_i$  방향의 입자의 속도,  $U_i$ 는 평균 속도,  $u_i$ 는 난류 속도,  $\zeta$ 는 난수로 평균값이 0이고, 단위 분산인 가우스 분포로 부터 얻어 진다.  $t_{Lx_i}$ 는  $u_i$ 의 라그랑지안 적분 시간,  $\sigma_{u_i}$ 는 속도 요동  $u_i$ 의 표준 편차이다.  $\delta_{i3}$ 는 디랙-델타이고, 라그랑지안 시간 스케일  $t_{Lz}, t_{Lx}, t_{Ly}$ 는 난류 속도와 시간 스케일의 함수이다.

입자의 움직임을 계산하는 식에는 가우스 분포를 따르는 랜덤한 속도 편차 항이 포함되어있다. 동일한 소스에서 출발한 입자들이 동일한 바람 벡터장을 따른다 해도 식(1)에 추가된 난류 속도 성분  $u_i$ 로 인해 각각의 개별 입자들 사이에 속도 편차가 발생하고 결국 점점 흩어지며 확산하게 된다. 입자 확산에 사용되는 입자의 개수는 계산 시간을 고려하여 수백 개 정도 수준으로 한다.

### 2.2. 화산재 분출량 계산 알고리즘

화산재 확산 예측을 위한 두 번째 단계는 화산재의 분출량을 계산하는 것이다. 화산재 입자의 농도를 계산하기 위해서는 개별적인 입자의 움직임을 계산하는

것과 확산분화 규모에 따라 분화구에서 얼마만큼의 화산재가 분출했는지 그 양을 알아야 한다. 확산 분화의 규모에 따라 화산재 분출량을 가능하기 위해서는 다음의 화산재 연직 분포 관계식을 이용한다.

화산재의 연직 농도 분포는 다음과 같이 경험식 (Hurst and Suzuki, 1994)을 사용하여 계산된다.

$$V(z) = k V_0 (1 - \frac{z}{Z}) e^{-A(1-z/Z)} \quad (6)$$

여기서,  $V_0$ 는 전체 분화 부피,  $Z$ 는 분화 기둥 높이,  $k$ 는 A(~5)에 대한 경험 상수이다.

그리고, 확산 분화 전체 부피는 다음과 같이 Hurst 경험식(1994)을 통해서 계산된다.

$$\log_{10} M = (Z + 60.5) / 7.18 \quad (7)$$

확산 분화 시 화산 구름의 최대 높이( $Z$ )를 관측하면 식(7)로부터 확산 분화 시 전체 질량( $M$ ) 계산이 가능하다.  $M$ 과  $Z$ 의 단위는 각각 kg과 km이다. 따라서, 전체 분화 부피( $V_0$ )는 아래와 같이 산정된다. 화산재의 밀도가  $800 \text{ kg/m}^3$  주어진다면  $V_0$ 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_0 = \frac{M}{800 \text{ kg/m}^3} \quad (8)$$

예를 들면,  $Z=30 \text{ km}$ 이면,  $M=4 \times 10^{12} \text{ kg}$ 이므로,  $V_0=5 \text{ km}^3$ 이다.

위의 식을 바탕으로 얻어진 화산재의 총 질량  $M$ 과 전체 분화 부피  $V_0$ 는 확산 분화 규모에 따라 확산 계산에 투입할 입자의 양을 가능할 수 있다. 분화 규모를 계산하는 단계에서 얻어진 값은 입자 확산 단계 계산에 투입할 입자 개수를 결정하거나 농도 계산 단계에서 확산 소스의 농도 초기 값을 결정하는 데 이용된다.

**Table 1.** The index of volcano explosivity(Newhall, 1982)

VEI	Ejecta volume	Description	Plume	Frequency	Examples
0	<10,000 m <sup>3</sup>	Effusive	<100 m	constant	Mauna Loa Mt.
1	>10,000 m <sup>3</sup>	Gentle	100-1000 m	daily	Stromboli volcano
2	>1,000,000 m <sup>3</sup>	Explosive	1-5 km	weekly	Galeras(1993)
3	>10,000,000 m <sup>3</sup>	Severe	3-15 km	few months	Kortaksky Mt.
4	>0.1 km <sup>3</sup>	Cataclysmic	10-25 km	≥ 10 yrs	Mount Pelee(1902)
5	>1 km <sup>3</sup>	Super	>25 km	≥ 50 yrs	Mount St. Helens(1980)
6	>10 km <sup>3</sup>	colossal	>25 km	≥ 100 yrs	Pinatubo(1991)
7	>100 km <sup>3</sup>	super-colossal	>25 km	≥ 1,000 yrs	Tambora(1815)
8	>1,000 km <sup>3</sup>	mega-colossal	>25 km	≥ 10,000 yrs	Toba(73,000년 전)

화산 분화 규모는 0~8까지 9단계의 화산 분화 지수 VEI로 주어진다. 화산재 분화지수는 Table. 1과 같다.

### 2.3. 화산재 농도 변환 알고리즘

화산재 확산 예측의 마지막단계는 화산재의 농도를 계산하는 것이다. 화산재 입자들의 움직임을 계산해서 입자들의 위치를 갱신하게 되면 시간의 흐름에 따라 입자들이 공간상에 흩어져서 분포하게 되고 이런 입자들의 분포를 계산하면 각 지점에서의 농도를 계산할 수 있다. 이론적인 관점에서 이러한 농도 계산의 결과가 연속적인 분포에 충분히 가깝게 얻어지면 아주 많은 입자를 방출해서 계산을 수행해야 한다. 하지만 입자의 수가 많아지면 계산 량이 많아지기 때문에 적은 수의 입자라도 연속적인 결과에 근접하는 농도 계산 방법이 필요하다.

입자의 농도 계산에 Yamada의 방법(Yamada, 1988)을 적용하면 수백 개 정도의 입자수로도 상당히 정확도가 높은 농도 분포를 계산할 수 있다. 입자의 농도 분포를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\chi(X, Y, Z) = \frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_k} \sigma_{y_k} \sigma_{z_k}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_k - X)^2}{\sigma_{x_k}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_k - Y)^2}{\sigma_{y_k}^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z_k - Z)^2}{\sigma_{z_k}^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z_k + Z - 2z_g)^2}{\sigma_{z_k}^2}\right) \right\} \quad (9)$$

$Q$ 는 분화구에서 방출되는 화산재의 방출량으로 화산재 밀도와 식(10)에서 계산된 분화 지점의 분화 부피  $V(0)$ 를 곱한 값이다.

$$Q = \rho \times V(0) \quad (10)$$

주어진 격자 공간 안에 분포하는 입자들의 평균적인 분포를 계산해서 이를 농도 계산의 기초로 삼는다. 이 때 입자들의 분포는 가우스 분포를 따른다고 가정한다. 앞의 입자의 움직임 계산에서 속도의 랜덤 항에 가우스 분포를 도입했기 때문에 타당한 가정이다.  $(x_k, y_k, z_k)$ 는  $k$ 번 째 입자의 위치이고,  $\sigma_{x_k}, \sigma_{y_k}, \sigma_{z_k}$ 는 각각 가우스 분포의 위치 표준 편차이고,  $z_g$ 는 지표면의 고도이다.

표준편차는 예컨대  $\sigma_y$ 의 경우 다음 식으로 계산한다.

$$\sigma_y^2 = 2\sigma_v^2 \int_0^t \int_0^{\zeta} R(\zeta) d\zeta dt = 2\sigma_v^2 t_{Ly} \left( t + t_{Ly} \exp\left(-\frac{t}{t_{Ly}}\right) - t_{Ly} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_y = \sigma_v t \quad \text{for } t \leq 2t_{Ly} \quad (12)$$

$$\sigma_y^2 = 2t_{Ly} \sigma_v^2 t \quad \text{for } t > 2t_{Ly} \quad (13)$$

식(11)은 시간간격의 선택에 따라 식(12)와 식(13)로 더 단순화 할 수 있다. 식(12)와 식(13)은 위치에 대한 표준편차의 각 성분  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 를 속도 표준편차  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 와  $t_{Lx}, t_{Ly}, t_{Lz}$ 로부터 구한다. 각 표준편차 값은 일종의 경험치로 수평성분  $\sigma_u, \sigma_v = 2 \text{ m/s}$ 로  $t_{Lx}, t_{Ly} = 10,000 \text{ s}$ 로 둘 수 있다. 표준편차의 수직성분은  $\sigma_w = 0.02 \text{ m/s}$ ,  $t_{Lz} = 20 \text{ s}$ 로 둘 수 있는데 수평 성분에 대해서 상대적으로 매우 작은 값이므로 수직 성분은 무시할 수 있다.

### 3. 대화형 화산재 확산 예측 시스템

본 연구에서 개발한 시스템은 데스크탑 환경에서 DB자료를 자체적으로 보유하고 독립적으로 구동 가능하다. 또한, 화산 분화 상황 발생 시 컴퓨터 네트워크 시스템에 장애가 있다 하더라도 프로그램이 독립적으로 실행될 수 있도록 하였다. 본 시스템은 C++언어로 멀티 플랫폼을 지원하는 QT(핀란드 노키아사에서 개발한 멀티플랫폼 환경을 지원하는 프로그래밍 도구) 개발 환경에서 개발한다. QT 개발 환경에서 구현된 프로그램은 기본적으로 Windows, Linux, MacOS X의 세 가지 운영체제 환경을 모두 지원할 수 있기 때문에 동일한 프로그램 소스코드를 기반으로 다양한 컴퓨팅 환경에서 구동 가능한 프로그램을 구현하였다. 유저 인터페이스는 GUI(Graphical user interface)를 지원하며, 현업 기상자료, 또는 기후자료를 손쉽게 직관적으로 확산모델의 배경장으로 선택 가능하게 하였다. 또한, 프로그램이 실행되는 도중에 예보관의 예보경험을 예보 시스템에 대화 형식으로 반영 가능하게 한다. 화산재 확산 농도 맵의 표출은 한반도 전역의 위성사진 맵 상에 화산재의 농도 분포를 직관적으로 파악할 수 있는 형태로 하였다. 농도 분포는 명암이나 색깔로 구분해서 나타내었다.

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 화산재 확산을 실시한

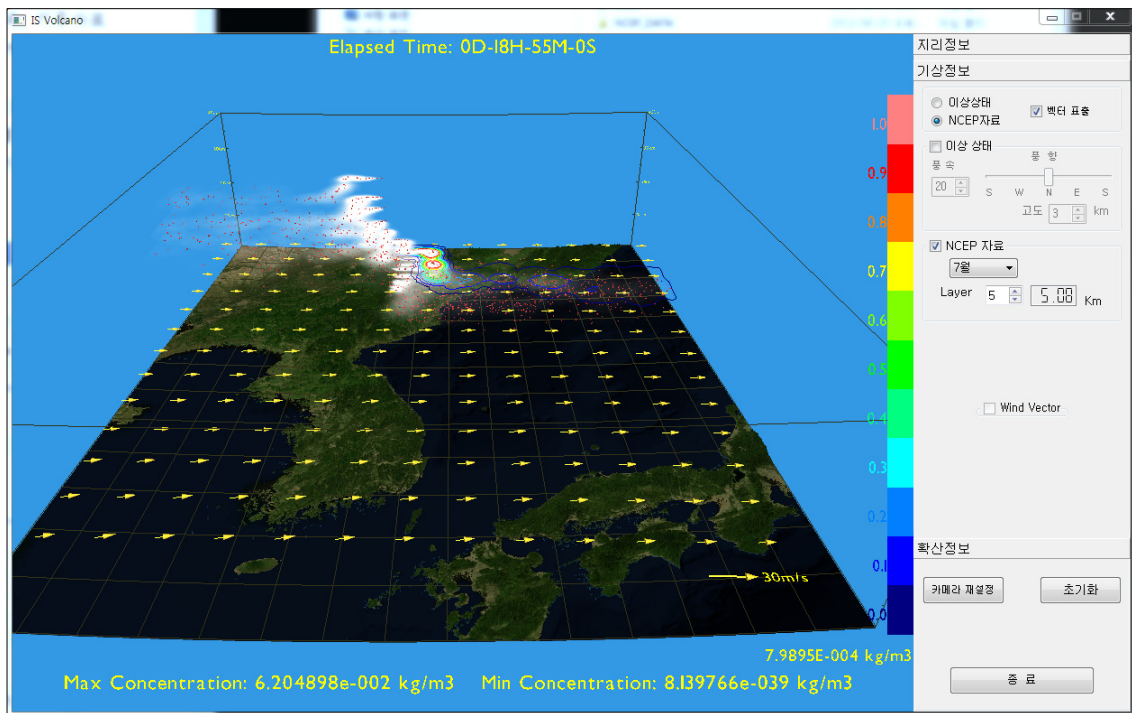


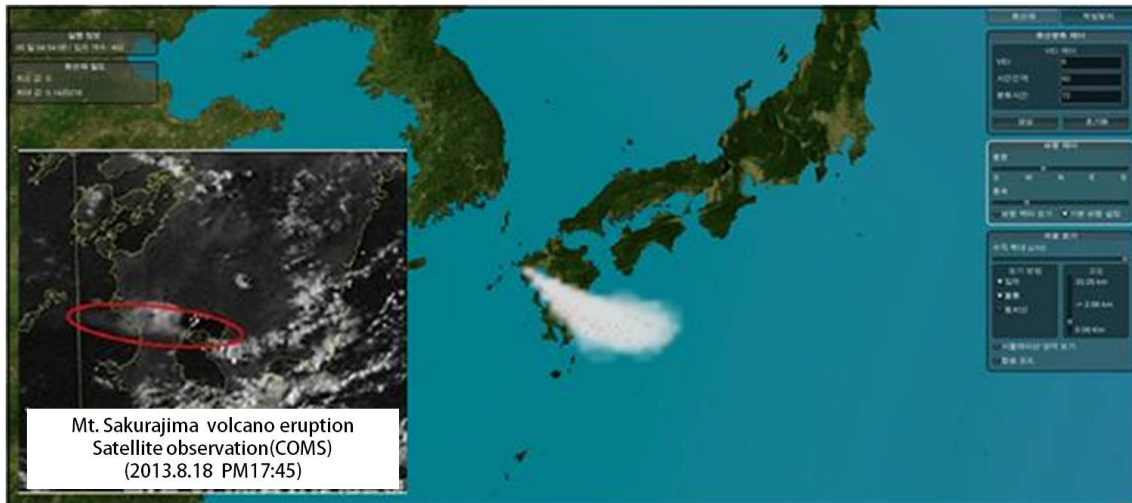
Fig. 2. Prediction and 3D visualization of volcano ash around Mt. Baekdu by interactive simulator

대화형으로 시뮬레이션 가능한 소프트웨어이다(주그린시뮬레이션, 2011). 이 시스템은 시뮬레이션과 3D 표출을 실시간으로 동시에 수행하며, 현재 화면에 표출된 결과는 화산 분화 26시간 32분경과 후의 한반도 상공에서 화산재의 3D 공간 분포를 나타낸다. 이 시스템의 차별화된 주요 특징은 1) 기상조건(임의의 기상조건, 기상청 수치모델결과, 기후자료 등)과 화산폭발지수(VEI)를 시뮬레이션 도중에 실시간으로 변경하여 시뮬레이션에 반영 가능하며, 2) ArcGIS(미국 ESRI사에서 개발한 공간지리정보분석 소프트웨어)와 같은 라이브러리를 사용하지 않고(주그린시뮬레이션에서 2011년에 독자적으로 개발하였으며, 3) 수치 시뮬레이션과 표출을 대화형식으로 동시에 수행하며, 4) 5일 정도의 시뮬레이션 결과를 노트북 사양에서도 5분 이내에 볼 수 있다. 5) 기상모델과 대기확산 모델에 대한 사전 지식이 없는 사용자도 편리하게 사용 가능하다.

Fig. 3은 최근 일본 사쿠라지마산에서 분화한 화산의 확산 예측 결과를 나타낸다. COMS(Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 기상 위성의 관측 결과에 의하면 ① 화산분화 직전(16:30 영상) 대류운열이 사쿠라지마산 동서로 지향류를 따라 형성, ② 화산분화 직후(16:45 영상)에는 사쿠라지마산 서편에서 북쪽으로 대류운이 급격히 발달, ③ 화산분화 후 30분경(17:00 영상), 1시간 경(17:45 영상)에는 화산 분출물이 가고시마에서 서쪽으로 폭넓게 띠모양을 이루며 퍼지는 모습으로 추정된다. 화산재의 서쪽으로 폭넓은 분포는 시뮬레이션 결과와 일치함을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

백두산 화산 재해 발생 시 피해 예측 기술을 이용한 정확한 사전 예측과 이에 따른 신속 정확한 대응책 수립은 과학적인 국가위기관리적인 측면에서 매우 중요하다. 따라서 백두산 화산 재해 저감을 위해 상황이 발생할 경우 실시간 예측 및 3D 표출을 통해 효율적이



**Fig. 3.** Prediction and visualization of volcano ash around Mt. Sakurajima by interactive simulator. Satellite observational image placed at the low left corner show south-eastward dispersion of volcano ash, which is similar to the simulated result.

고 체계적인 정보생산 전달이 가능한 화산재 확산 대응 시스템 구축이 필요하다. 본 연구에서는 화산재 확산 알고리즘 및 3D 표출 엔진을 탑재한 실시간 대화형 백두산 화산재 확산 예측 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 화산재해에 대한 즉각적이고 과학적인 대응 능력을 향상시키는데 기여할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER\_2013-8050)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- Green Simulation Co., Ltd., 2011, Interactive Simulator. Technical Report, Vo. 1, 120pp.
- Hurst, A. W., 1994, ASHFALL-a computer program for estimation volcanic as fallout, Institute of Geological & Nuclear Sciences, Report and Users Guide.
- Newhall, Christopher G., Self, Stephen, 1982, The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism.. Journal of Geophysical Research, 87, 1231-1238.
- Yamada and Bunker, 1998, Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Bruc=sh Creek data simulation, JAM.