

ORIGINAL ARTICLE

실시간 대화형 화산재 확산 예측 시스템에 의한 화산재 확산 예측

김해동* · 이전희¹⁾

계명대학교 지구환경학과, ¹⁾기상청 관측기반국 지진정책과

Case Studies of Predicting Volcanic Ash by Interactive Realtime Simulator

Hae-Dong Kim*, Jun-Hee Lee¹⁾

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

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

Abstract

Analyzing the observational data of volcanic activities around the northern part of Korean peninsula, the odds of volcano eruption increases continuously. For example, the cumulative seismic moment and frequency observed near Mt. Baekdu show a sudden increased values. In this study, predicting the diffusion of volcanic ash for two cases were carried out by using interactive realtime simulator, which was developed during last 2 years as a research and development project. The first case is Sakurajima volcano (VEI=3) erupted in August 2013. The second case is assumed as the volcanic eruption at Mt. Baekdu (VEI=7) under landing circumstance of typhoon Maemi (August 2003) in Korean peninsula. The synoptic condition and ash diffusion for the two cases were simulated by WRF(Weather Research and Forecast) model and Lagrangian dispersion model, respectively. Comparing the simulated result of the first case (i.e., Sakurajima volcano) with satellite image, the diffusion pattern show acceptable result. The interactive realtime simulator can be available to support decision making under volcanic disaster around East Asia by predicting several days of ash dispersion within several minutes with ordinary desktop personal computer.

Key words : Volcanic disaster, Volcanic ash, Mt. Baekdu, WRF model, Lagrangian model

1. 서론

2010년 아이슬란드 화산 폭발로 화산재가 20 km 상공으로 치솟아 유럽 전역으로 확산되었으며, 10 만여 편의 항공기 운항이 차질을 빚는 항공 대란을 겪어 약 17 억 달러 피해 발생하였다. 국토해양부의 발표에 의하면 우리나라에서도 인천공항 출도착 여객기 총 88 편(약 29,000 명) 및 화물 운송기 총 55 편 (총 4,060 톤)이 결항되었다.

한반도 주변에서도 화산재해의 징후가 관측되고 있다. 최근 백두산 지역 화산·지진 관측자료 분석에 의하면 백두산 일대의 지진활동이 계속 증가하여 화산 폭발의 조짐을 보이고 있다(Fig. 1). 백두산 화산 폭발 시 아이슬란드 화산 폭발 규모의 1,000 배 이상이며, 우리나라, 중국, 일본, 러시아가 주요 피해국, 그리고 미국과 유럽은 간접 피해국이 될 것으로 예상된다(Kim과 Lee, 2014). 또한, 최근 한반도 주변 화산 폭발(일본 신모에다케 화산 2011

Received 5 November, 2014; Revised 10 December, 2014;

Accepted 11 December, 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.

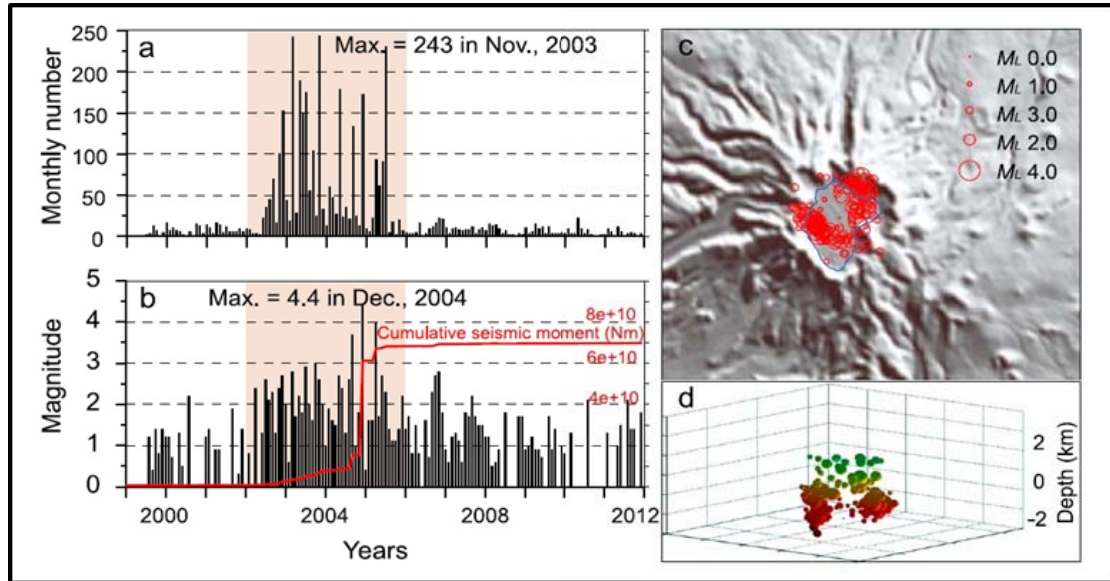


Fig. 1. Observational data showing monthly number (a), magnitude (b), horizontal(c) and vertical(d) origin of seismic activities around Mt. Baekdu (China Meteorological Administration, 2012).

년 1월 29일 폭발, 사쿠라지마 화산 2013년 8월 18일 폭발)로 인한 환경재난이 빈발하고 있어(Furukawa, 2011) 환경재난에 대한 대국민적 관심이 급증하고 있다. 인체

백두산 화산이 분화한다면 분출 형태일지 아니면 폭발 형태일지에 따라 주변국들의 피해 규모가 달라질 수 있다(Lee와 Jang, 2014; Lee 등, 2011, 2012, 2014). 일반적으로 화산 분화는 분출과 폭발 2가지로 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 폭발시 분출될 화산성 쇄설물은 항공기 운항 및 물류대란, 호흡기 질환, 농작물 냉해, 정밀기기 산업 피해 등 인명피해와 함께 막대한 경제적 피해가 예상된다. 그러나 백두산

화산 분화시 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.

본 연구에서는 지난 2년간 지진기술개발사업으로 개발한 “실시간 대화형 백두산 화산재 확산 예측 시스템”을 소개하고, 2가지 화산 사례(백두산, 사쿠라지마)에 대한 예측 및 위성자료에 의한 비교 검증 결과를 보이고자 한다.

2. 대화형 화산재 확산 예측 시스템 개발

본 연구에서 개발한 대화형 화산재 확산 예측 시스템은 다음과 같이 4단계(입자 확산 계산 → 화산재 분출량 계산 → 입자 농도 계산 → 3D 표출)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 입자

의 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 and Bunker, 1998; Kao, 1989; Mellor and Yamada, 1974, 1982; Newhall, 1982)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 입자의 위치를 계산하는 식이다.

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

여기서,

$$U_{pi} = U_i + u_i \tag{2}$$

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

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

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

U_{pi} 는 x_i 방향의 입자의 속도, U_i 는 평균 속도, u_i 는 난류 속도, ζ 는 난수로 평균값이 0이고, 단위 분산인 가우스 분포로 부터 얻어 진다. t_{Lx_i} 는 u_i 의 라그랑지안 적분 시간, σ_{u_i} 는 속도 요동 u_i 의 표준 편차이다. δ_{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 포함되어 있다. 동일한 소스에서 출발한 입자들이 동일한 바람 벡터장을 따른다 해

도 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 화산분화 규모에 따라 분화구에서 얼마만큼의 화산재가 분출했는지 그 양을 알아야 한다. 화산 분화의 규모에 따라 화산재 분출량을 가늠하기 위해서는 다음의 화산재 연직 분포 관계식을 이용한다.

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

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

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

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

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

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

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

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 화산 분화 규모에 따라 확산 계산에 투입할 입자의 양을 가늠할 수 있다. 분화 규모를 계산하는

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

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

단계에서 얻어진 값은 입자 확산 단계 계산에 투입할 입자 개수를 결정하거나 농도 계산 단계에서 확산 소스의 농도 초기 값을 결정하는 데 이용된다.

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 얻어지려면 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 and Bunker, 1998)을 적용하면 수백 개 정도의 입자수로도 상당히 정확도가 높은 농도 분포를 계산할 수 있다. 입자의 농도 분포를 계산 하는 식은 다음과 같다.

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

$$\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z_k + Z - 2z_g)^2}{\sigma_{z_k}^2}\right) \Bigg\} \tag{9}$$

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

$$Q = \rho \times V(0) \tag{10}$$

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 번째 입자의 위치이고, σ_{x_k}, σ_{y_k}, σ_{z_k}는 각각 가우스 분포의 위치 표준 편차이고, z_g는 지표면의 고도이다.

표준편차는 예컨대 σ_y의 경우 다음 식으로 계산한다.

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

$$\sigma_y = \sigma_v t \text{ for } t \leq 2t_{Ly} \tag{12}$$

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

식(11)은 시간간격의 선택에 따라 식(12)와 식(13)로

더 단순화할 수 있다. 식(12)와 식(13)는 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 경험 치로 수평성분 $\sigma_u, \sigma_v = 2m/s$ 로 $t_{Lx}, t_{Ly} = 10,000s$ 로 둘 수 있다. 표준편차의 수직성분은 $\sigma_w = 0.02m/s, t_{Lz} = 20s$ 로 둘 수 있는데 수평 성분에 대해서 상대적으로 매우 작은 값이므로 수직 성분은 무시할 수 있다.

2.4. 실시간 대화형 3D 표출

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 실시간 대화형 화산재 확산 예측 시스템의 구성도를 나타낸다. 화산재 확산을 예측하기 위해 필요한 기상자료는 수치모델 결과, 또는 기후자료를 사용한다. 기상진단모델과 확산모델은 각각 3차원변분법과 라그랑지안 알고리즘으로 구현하였다. 일반 컴퓨터 사양에서 72시간 화산재 확산 예측을 위해 소요되는 시간은 약 5분 정도이다. 또한, 프로그램의 호환성을 높이기 위해 C++언어로 멀티 플랫폼을 지원하는 QT(핀란드 노키아사에서 개발한 멀티플랫폼 환경을 지원하는 프로그래밍 도구) 개발 환경에서 개발되었다. QT 개발 환경에서 구현된 프로그램은 기본적으로 Windows, Linux, Mac OS X 의 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 위성 사진 맵 상에 화산재의 농도 분포를 직관적으로 파악할 수 있는 형태로 하였다. 농도 분포는 명암이나 색깔로 구분해서 나타내었다.

이 시스템의 차별화된 주요 특징은 1) 기상조건(임의의 기상조건, 기상청 수치모델결과, 기후자료 등)과 확산 폭발지수(VEI)를 시뮬레이션 도중에 실시간으로 변경하여 시뮬레이션에 반영 가능하며, 2) ArcGIS(미국 ESRI사에서 개발한 공간지리정보분석 소프트웨어)와 같은 라이브러리를 사용하지 않고 (주)그린시뮬레이션에서 2011년에 독자적으로 개발하였으며, 3) 수치시뮬레이션과 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.

3. 화산재 확산 예측 사례

Fig. 3는 본 연구에서 개발된 화산재 확산을 실시간 대화형으로 시뮬레이션 가능한 소프트웨어이다. 이 시스템은 시뮬레이션과 3D 표출을 실시간으로 동시에 수행

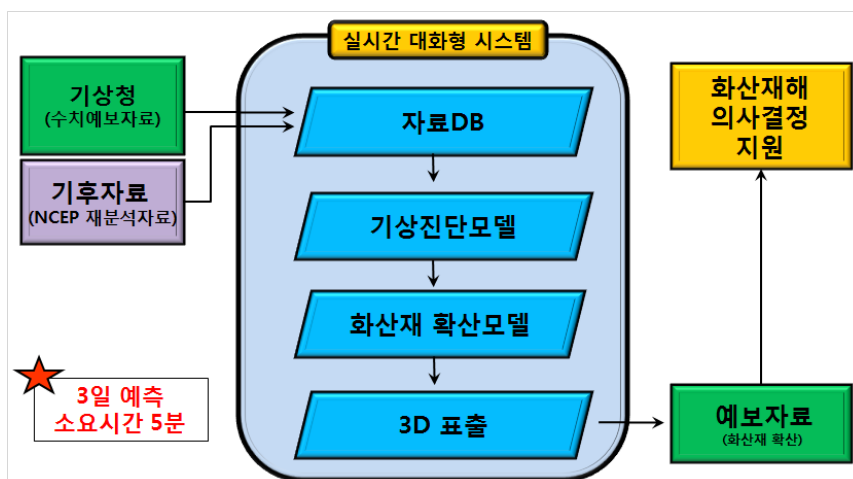


Fig. 2. Schematic diagram of interactive realtime simulator for predicting volcanic ash.

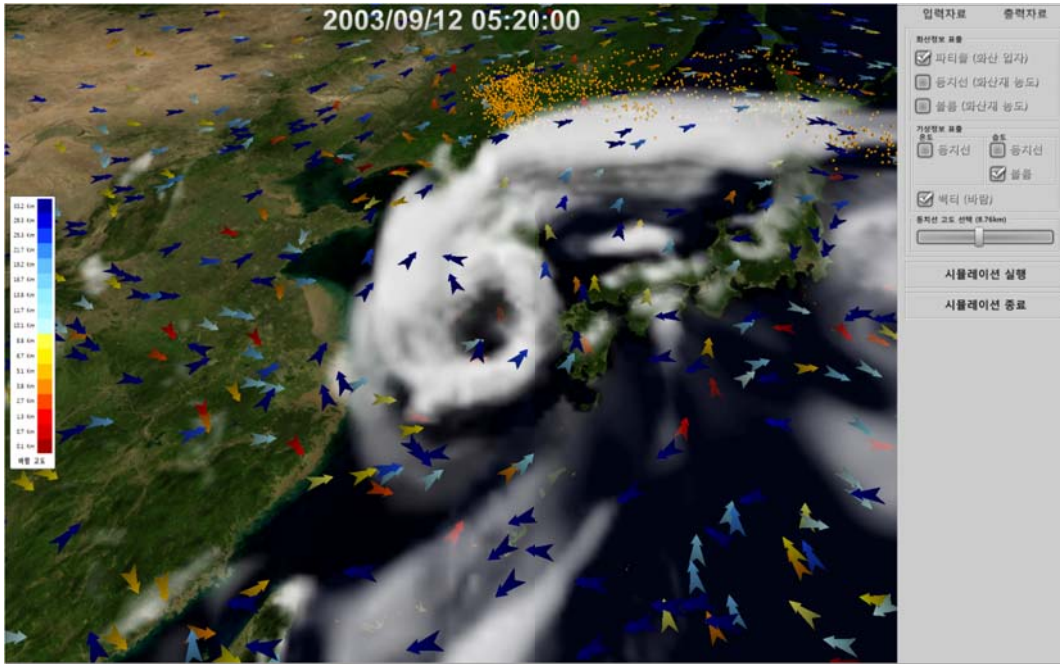


Fig. 3. Predicting the dispersion of volcano ash around Mt. Baekdu under landing circumstance of typhoon Maemi (12 August 2003) in Korean peninsula.

가능하다. 현재 화면에 표출된 결과는 백두산 화산이 태풍 매미가 한반도에 상륙할 시점(2003년 9월 12일 오전 5시)에 분화하였다고 가정하고 화산재(백두산 북쪽 상공에 분포한 입자들) 확산을 예측한 결과를 3D로 표출한 예이다. 백두산 북쪽 상공에 분포한 입자들은 화산재이며, 나선 모양으로 분포하는 구름을 통해 태풍의 중심을

알 수 있다. 태풍 중심 주변의 하층 대기에서는 저기압성 회전을 하는 바람이 불지만, 상층에서는 북동방향으로 바람이 불어 나가는 것을 볼 수 있다. 태풍의 세력이 강하여 한반도 북부지방에 산재해 있는 화산재가 남쪽으로 내려오지 못하고 북동쪽으로 확산되어 감을 볼 수 있다. 매년 3~11월 사이 북서태평양에서 발생하는 태풍 중 한

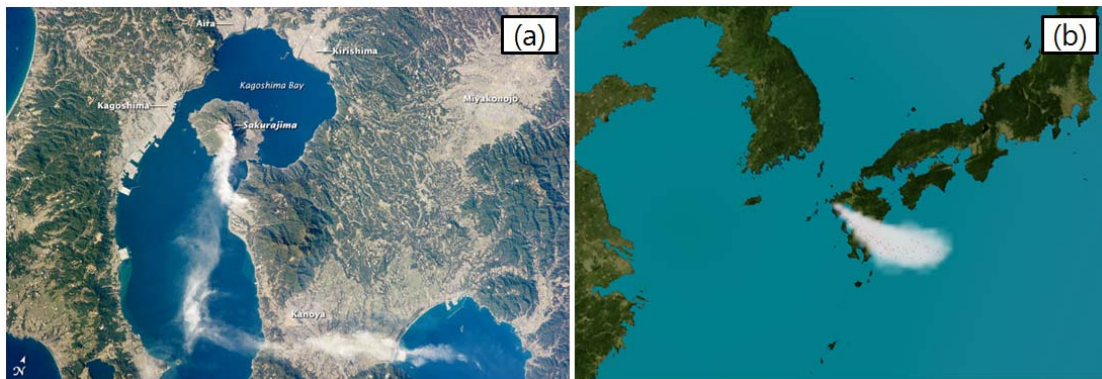


Fig. 4. Evaluating the predictability of Lagrangian dispersion model(b) with satellite image(a). Satellite images and predicted result of volcano ash around Mt. Sakurajima (18 August, 2013) are shown left and right panels, respectively.

반도에 영향을 미치는 태풍은 약 13개이다. 따라서 태풍이 한반도에 영향을 주는 시기에 백두산 화산이 분화할 경우 우리나라의 화산재 피해는 크게 줄어들 것으로 사료된다.

Fig. 4는 일본 사쿠라지마에서 분화한 화산의 확산 예측 결과를 나타낸다. COMS(Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 기상 위성의 관측 결과(2013년 8월 18일)에 의하면 화산 분출물이 가고시마에서 남쪽으로 폭넓게 띠 모양을 이루며 퍼지다가 다시 동쪽으로 확산되는 것을 볼 수 있다. 화산재의 남쪽으로 폭 넓은 분포는 시뮬레이션 결과와 일치함을 볼 수 있다.

4. 결론

백두산 화산(또는 한반도 주변 다른 화산) 폭발 시 고층 대기 중으로 분출되는 화산재는 바람에 의해 장거리 전송되어 남한으로 유입될 가능성이 높다. 화산재는 인체 폐 조직과 항공·교통·수자원·전자제품 등에 치명적인 손상을 준다. 따라서, 자연재해로부터 국민의 안전을 확보하기 위해서는 과학적인 대응 체계 구축이 필요하다. 본 연구에서 개발된 실시간대화형 화산재 확산 예측 시스템은 한반도 주변 화산 분화시 신속한 화산재 확산 예측을 수행하여 의사결정에 필요한 정보를 제공 가능하다. 이 시스템은 화산재해에 대한 즉각적이고 과학적인 대응 능력을 향상시키는데 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER-2012-8050)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Furukawa, R., 2011, Eruption of Shinmoe-dake volcano, Kirishima volcano group 2011. AIST TODAY, 11, 15.
- Green Simulation Co., Ltd., 2011, Interactive Simulator. Technical Report, 120pp
- Hurst, A. W., 1994, ASHFALL-a computer program for estimation volcanic ash fallout, Institute of Geological & Nuclear Sciences, Report and Users Guide.
- Kao., C. Y., and Yamada, T., 1989: Numerical Simulations of a Stratocumulus-Capped Boundary Layer Over Land Using a Turbulence Closure Model, JAS, 46, 832-848.
- Kim, H.D. and Lee, H.M., 2014, Developing interactive simulator for predicting volcanic ash, Journal of Environmental Science International, 23, 527-532.
- Lee, S.H. and Yun, S.H., 2011, Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. Journal of Korean Earth Science Society, 32, 360-372.
- Lee, S.H., Jang E.S., Lee, H.M., 2012, A case analysis of volcanic ash dispersion under various volcanic explosivity index of the Mt. Baekdu. Journal of Korean Earth Science Society, 33, 280-293.
- Lee, S.H., Jang E.S., Yun, S.H., 2014, Numerical simulation of volcanic ash dispersion and deposition during 2011 eruption of Mt. Kirishima. Journal of Korean Earth Science Society, 35, 237-248.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1982, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, Rev. Geophys. Space., 20, 851-875.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1974, A Hierarchy of Turbulence-Closure Models for Planetary Boundary Layers, JAS, 31, 1791-1860.
- Newhall, Christopher G., Stephen, S., 1982, The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. Journal of Geophysical Research, 87, 1231 - 1238.
- Yamada, T. and Bunker, K. 1998, Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brucesh Creek data simulation, JAM.