인공위성 자료와 궤적분석 모델을 이용한 화산재 모니터링

이권호* · 장은숙†**

*경일대학교 공간정보공학과, **한중대학교 공학부

Monitoring of the Volcanic Ash Using Satellite Observation and Trajectory Analysis Model

Kwon-ho Lee * and Eun-Suk Jang†**

*Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University, **Faculty of Engineering, Hanzhong University

Abstract : Satellite remote sensing data have been valuable tool for volcanic ash monitoring. In this study, we present the results of application of satellite remote sensing data for monitoring of volcanic ash for three major volcanic eruption cases (2008 Chaitén, 2010 Eyjafjallajökull, and 2011 Shinmoedake volcanoes). Volcanic ash detection products based on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observation data using infrared brightness temperature difference technique were compared to the forward air mass trajectory analysis by the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLOT) model. There was good correlation between MODIS volcanic ash image and trajectory lines after the volcanic eruptions, which support the feasibility of using the integration of satellite observed and model derived data for volcanic ash forecasting.

Key Words : Satellite, remote sensing, volcanic ash, trajectory analysis, modeling

요약 : 인공위성 원격탐사 자료는 화산재 모니터링을 위한 중요한 도구로서 사용되어 왔다. 본 연구는 최근에 발생한 주요 화산폭발 사례(2008년 Chaitén 화산, 2010년 Eyjafjallajökull 화산, 2011년 Shinmoedake 화산)를 대상으로 인공위성자료를 이용한 화산재 모니터링과 궤적분석 모델링을 수행하였다. 이를 위하여 Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer(MODIS) 인공위성 관측자료로부터 적외선 밝기온도 차 기법을 적용하여 산출된 화산재 탐지 산출물과 HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory(HYSPLOT) 모델을 이용한 전진궤적분석자료를 상호 비교하였다. 그 결과, 인공위성을 이용한 화산재 탐지 산출물은 모델링한 궤적분석 결과와 상호간에 관련성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 인공위성 관측자료와 모델링의 통합분석자료가 화산재 감시 및 예측을 위하여 중요한 역할을 수행할 수 있는 가능성을 제시한다.

접수일(2013년 9월 28일), 수정일(1차 : 2013년 11월 25일), 게재확정일(2013년 11월 25일).

† 교신저자: 장은숙(esjang@hanzhong.ac.kr)

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

1. 서론

화산재 구름(Volcanic ash cloud)의 탐지와 특성 산출물은 화산재로 인하여 유발되는 각종 피해(예: 교통안전, 경제적 손실, 환경 및 보건, 기후, 국가안보 등) 예방 및 경감을 위한 목적에 있어 매우 중요한 영향을 미친다. 최근 가장 강력한 화산 폭발 사례인 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산(북위 63.633°, 동경 19.6°, 2010년 4월 14일 최초 폭발)은 인공위성과 지상 원격탐사 관측자료, 그리고 화산재 모델링 결과자료를 활용하여 화산재의 영향을 종합적으로 파악하는 계기가 되었다(Derimian *et al.*, 2012; Gasteiger *et al.*, 2011). 최근에는 한반도 북부에 위치한 백두산의 화산활동에 대한 전조증상이 발견됨에 따라(Yun and Cui, 1996; Yun and Lee, 2012), 백두산 화산 폭발에 대한 가상 시뮬레이션을 통한 연구가 진행되기도 하였다(Lee and Yun, 2011; Lee *et al.*, 2012).

화산재 입자는 인간의 호흡기 질환을 일으키기도 하며(Horwell and Baxter, 2006), 지구복사평형에 영향을 주어 지구 기후변화를 유도하는 물질로 작용할 수 있다(Hansen *et al.*, 1992). 따라서 상시 감시 및 환경 변화 예측을 위하여 화산재의 시·공간적 관측 및 모니터링은 필수적이다. 인공위성은 광범위한 지역의 화산재 모니터링 연구에 널리 사용되고 있는 수단으로써 대기 중의 입자 성분인 에어로솔을 모니터링 하는데 널리 사용되어 왔으며(Lee *et al.*, 2006a; 2006b; Lee *et al.*, 2004), 경로 예측 모델과 함께 대기질 예측과 관련된 연구에서 사용되기도 하였다(Lee *et al.*, 2006). 그리고 인공위성자료는 화산재 구름에 대한 정량적, 정성적, 정성적 탐지 및 평가하는데 사용되고 있다(Ellord *et al.*, 2003; Francis *et al.*, 2012). 1980년대 후반에 인공위성 탑재 센서의 적외선 영역의 채널 관측 자료를 이용하여 화산재를 탐지하는 방법이 처음으로 제안되었다(Prata, 1989a). 이러한 화산재 탐지 기법은 적외 채널중 대기의 광 흡수효과가 비교적 약한 대기의 창(Atmospheric Window) 영역인 파장 11 μm 과 12 μm 의 채널에서 밝기 온도(Brightness Temperature)의 차이를 이용하며, 화산재 구름은 적외 온도차가 기상학적 구름보다 낮은 음의 값을 가지는 특성을 이용한다.

적외 온도차를 이용한 화산재 탐지 기법의 단점은 Simpson *et al.*, (2000)과 Prata *et al.*, (2001)에 의하여 다음

과 같은 경우 화산재 탐지를 못하는 경우가 보고되었다. 1) 지표 근처의 강한 기온 역전 현상 발생시 화산재로 오인; 2) 사막과 같은 토지 피복과 광물질이 함유된 먼지 폭풍 발생시 화산재로 오인; 3) 성층권 기온 역전현상으로 대류권계면을 침범하는 운정 고도에서 화산재 오인; 4) 센서 잡음과 채널별 관측값 이상으로 화산재 오인(주로 구름 가장자리나 매우 온도가 낮은 픽셀에서 발생); 5) 매우 두꺼운 화산재 구름과 기상학적 구름이 섞여 있는 경우 화산재 탐지 불가; 6) 화산재 구름이 존재하는 데 수증기가 과 포화된 상태에서 화산재로 탐지 불가(주로 열대 지방에서 발생). 그럼에도 불구하고 적외 온도차를 이용한 화산재 탐지 방법은 현재 VAAC에서도 화산재 탐지를 위한 현업용으로 사용되고 있으며(Watkin, 2003), 현재까지 많은 변형된 알고리즘이 개발되고 있다. 이후, 화산재 입자의 미세 물리 특성 자료와 적외선 영역에서의 광학특성을 이용한 복사 전달 모델 결과를 이용하여 위성 관측값으로부터 화산재의 크기와 광학 두께를 찾아낼 수 있는 방법이 개발되었다(Wen and Rose, 1994). Pavolonis *et al.*(2006)은 4 채널(파장 0.65 μm , 3.75 μm , 11 μm , 12 μm) 화산재 탐지 기법을 개발하였다.

HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 모델(Draxler, 1999; Draxler and Hess, 1998; 1997)은 주로 대기오염이나 기상학적인 Air mass 의 이동 경로 추적 및 경로 예측에만 활용되어 왔으나, 입자상 또는 가스상 대기오염물질에 대한 라그랑지안 확산 시뮬레이션 기능이 포함되어 있어 유독 가스성분이나 화산재와 같은 입자상 물질의 이동 및 확산 연구가 가능하다. HYSPLIT 모델에 포함된 화산재 예측 모듈은 HYSPLIT을 개발한 미국 NOAA/ARL의 HYSPLIT 웹 페이지를 통하여 이 기능을 온라인에서 수행할 수 있는 서비스를 제공하고 있다(<http://ready.arl.noaa.gov/READYVolcAsh.php>). HYSPLIT 모델링 결과의 검증을 위하여 알라스카의 Spurr 화산(1992년 폭발, 북위 61.30°, 서경 152.25°), 인도네시아 Rinjani 화산(1994년 폭발, 남위 8.42°, 동경 116.47°), 캄차카 반도의 Klyuchevskoi 화산(1994년 폭발, 남위 56.06°, 동경 160.64°)의 사례에 대하여 비교하였으며 만족할 만한 수준의 모델링 결과를 나타내었다(Mastin *et al.*, 2009; Webley *et al.*, 2009; Stunder *et al.*, 2007; Tupper *et al.*, 2006; Heffter, 1996; Heffter and Stunder, 1993; Heffter *et al.*, 1990). Sawamura *et al.*(2012)은 2011년 6월

13일에 폭발한 Nabro 화산(북위 13.37°, 동경 41.7°)의 화산재 구름의 이동경로를 파악하기 위하여 HYSPLIT 모델을 이용한 전진궤적 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 화산재 구름의 효과적인 모니터링을 위하여 인공위성관측 자료와 HYSPLIT을 이용한 화산재 모델링 통합분석 시스템의 개발하였다. 이를 위하여 실제 최근의 주요 화산폭발 사례를 연구대상으로 하였으며, 인공위성 자료를 이용한 화산재 탐지 산출물 생성과 화산재 구름의 이동 경로 예측을 위한 전진궤적분석(forward trajectory analysis)을 동시에 산출할 수 있는 알고리즘을 개발하여 화산재 모니터링과 예측을 수행하였다. 본 연구의 목적은 이러한 활화산들로부터 배출되는 화산재 또는 화산가스를 효과적으로 감시함으로써 화산재에 대한 영향을 파악하고 미리 대비하여 화산재에 의한 피해를 줄임으로서 기상, 환경, 방재 분야에서 폭넓게 사용하기 위함이다.

2. 연구방법

1) 화산재 사례

본 연구는 최근 5년 동안(2008년 - 2013년)에 발생한 대형 화산폭발사례(Fig. 1, Table 1참조)를 대상으로 위성자료와 궤적분석 모델링을 수행하였다. 2008년 5월에 폭발한 칠레의 Chaitén 화산과 2010년 4월에 폭발한 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산은 화산폭발 지수

Fig. 1. Geological locations of three major volcanoes used in this study.

(Volcanic Explosivity Index: VEI) 가 4로 기록되었으며, 화산 폭발 규모와 화산재 분출 규모면에서 전 지구적으로도 매우 중요한 화산 폭발사례였다. 특히, Chaitén 화산은 기원전 7,420년에 폭발 기록 이후 약 9,000년 이상 화산활동이 기록되지 않았으며, 2008년 5월의 폭발로 인하여 화산재 구름이 10.7km - 16.8km 높이까지 올라간 것으로 기록되었다(Osores et. al, 2013). 그리고 한반도와 가까운 일본의 Shinmoedake 화산은 VEI 3등급으로 비교적 규모가 큰 사례이며, 2011년 1월-2월 동안에 약 2개월간 화산활동을 하였다. 이 화산 폭발 사례도 지난 50년 동안 가장 큰 폭발로 기록되었다.

화산재 탐지 및 모델링을 위하여 대표적인 지구관측 위성인 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성 관측 자료의 관측시간과 여기서 탐지된

Table 1. List of volcanic eruptions considered in the case study

Volcano name	Location(degree)	Elevation (m)	VEI*	Eruption time (ddmmyyyy, hh:mm)	Used MODIS data
Chaitén, Chile	42.92°S, 72.70°W	1,122	4	2 May 2008	MOD.20081241435 MOD.20081261420 MYD.20081241845 MYD.20081261830
Eyjafjallajökull, Iceland	63.63°N, 19.62°W	1,666	4	14 April 2010	MYD.20101051330 MYD.20101071315 MYD.20101071320 MYD.20101091305 MOD.20101051135 MOD.20101051315 MOD.20101091250
Shinmoedake, Japan	31.91°N, 130.88°E	1,421	3	3-5 Feb. 2011	MYD.20110340430 MOD.20110350155 MOD.20110360240

Table 2. List of data used in this study

Data source	Variable	Temporal Scale	Spatial resolution
MODIS L1(Terra/Aqua)	Radiance	Daily	1 km
MODIS geometry(Terra/Aqua)	Latitude, Longitude, Height, Satellite view angle, Sun zenith angle, relative azimuth angle	Daily	1 km
NCEP reanalysis	Temperature Profile	Daily	2.5 degree
GDAS	Meteorology	Daily	1.0 degree

Fig. 2. Schematic diagram for volcanic ash monitoring and modeling using MODIS data and HYSPLIT trajectory module.

화산재의 위치정보로부터 HYSPLIT 전진궤적 분석을 수행하였다. 이를 위하여 위성자료는 MODIS 자료와 NOAA에서 생산하고 있는 기상재분석 모델 자료인 National Weather Service's National Centers for Environmental Prediction(NCEP) reanalysis(Kalnay *et al.*, 1996), 그리고 HYSPLIT 모델 입력 자료로서 Global Data Assimilation System(GDAS) 기상모델자료를 사용하였다(Table 2참조).

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 화산재 탐지 및 이동 경로 예측을 위한 자료처리 과정을 도시한 순서도이다. 자료처리 과정은 위성자료로부터 칼라합성 영상 제작 및 화산재 탐지부분, 그리고 화산재 이동 경로 예측을 위한 궤적 분석 및 가시화 부분으로 크게 2부분으로 나누어져 있다. 각 부분별 자세한 설명은 다음과 같다.

2) 화산재 탐지

화산재 탐지를 위하여 사용된 인공위성 자료는 MODIS 로서, MODIS는 미국 항공우주국(NASA)의 지구관측 위성계획(Earth Observing System: EOS)의 일환

으로 발사되어 성공적인 임무를 수행하고 있는 두 위성(Terra 위성 1999년 발사, Aqua 위성 2002년에 발사)에 탑재된 동일한 센서이다. NASA에서는 현재까지 육지, 해양, 대기에 관한 44개의 표준 분석 자료를 정기적으로 생산하고 있으나(Kaufman *et al.*, 1997; Tanré *et al.*, 1997), 이 중 화산재에 관한 표준 산출물은 포함되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 MODIS의 원시자료인 Level 1 calibrated radiance(MOD02, MYD02)자료를 이용하여 화산재 탐지를 수행하였다. 여기서 MOD02와 MYD02는 Terra 위성과 Aqua 위성 자료의 코드 네임이다. 그리고 위성자료 분석에 있어 영상의 각 픽셀별 기하 정보(경위도, 위성 관측각, 위성방위각, 태양고도각, 태양방위각 등)에 대한 정보는 MODIS 기하정보를 포함하는 독립된 자료인 MOD03과 MYD03를 이용하였으며, 모든 MODIS 자료는 NASA MODIS 자료 검색 시스템 LAADS Web (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>)으로부터 획득하였다.

MODIS자료를 이용한 화산재 탐지 과정은 식(1)과 같이 2채널 적외채널 밝기온도차 기법을 기본적으로 적용하였다. 이 방법의 특징은 8 - 14 μm 의 파장대 채널에서 화산재 입자가 짧은 파장에서 더 강하게 적외선 복사량을 흡수하지만, 수증기나 빙정운은 긴 적외선파장에서 더욱 강하게 흡수하는 특성을 이용한다. 주로, 대기의 창 영역인 11 μm 과 12 μm 의 각 채널에서 밝기 온도를 이용하는데, 이와 관련된 이론적 분석방법(Prata, 1989b), 복사 전달 모델링(Wen and Rose, 1994) 및 위성 기반의 분석연구(Prata, 1989a)는 모두 규소산화물을 포함한 화산재 구름의 경우 밝기온도차는 음수일 때 나타나며, 기상학적 구름에 대해서는 밝기 온도차($T_{11}-T_{12}$)가 양수임을 나타내었다. 따라서, 화산재 구름의 판별을 위하여 식(1)과 같이 적외차 밝기온도에 대한 경계값(BTD_{11-12})을 사용한다.

$$\text{BTD}_{11-12} = \text{BT}_{11} - \text{BT}_{12} \quad (1)$$

이상적인 환경 조건에서 화산재로 탐지되기 위하여 BTD_{11-12} 의 값은 0 K이어야 하지만, 센서 캘리브레이션의 불확실성, 시야각 정렬 오차, 수증기 효과, 그리고 인접 픽셀 효과와 같은 원인 때문에, 경계값의 값이 범위는 -0.5 K와 +0.5 K 사이의 값을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 불확실성을 최대한 줄이기 위하여 최소한 범위인 -0.5 K를 적용하였다.

위에서 사용된 BTD_{11-12} 경계값을 이용한 화산재 탐지 방법은 오탐지 가능성이 존재하므로, Ellrod *et al.*(2003)가 소개한 3채널 밝기온도차(Three-channel Volcanic Ash Product: TVAP)를 이용한 화산재 탐지 방법을 추가로 적용하였다. 이 방법은 11 μm 과 12 μm 의 채널에 3.9 μm 채널 자료를 추가하여 계산된 밝기온도차 함수를 다음의 식(2)와 같이 사용하였으며, Ellrod *et al.*(2003)이 추천한 경계값으로서 60을 사용하였다.

$$\text{TVAP} = 60 + 10 \times \text{BTD}_{12-11} + \text{BTD}_{3.7-11} \quad (2)$$

3) 화산재 경로 예측

이전 단계에서 인공위성 관측 자료를 이용한 화산재 탐지 결과, 화산재 픽셀에 해당하는 지점의 경위도와 화산재 고도 정보를 추출할 수 있다. 이 정보는 궤적분석모델인 HYSPLIT(Version 4.7) 모델의 입력자료로 변환되어, 전진궤적(Forward trajectory) 분석을 수행하여 화산재

를 포함한 공기가 이동하게 되는 경로를 예측할 수 있게 된다. 화산재 이동 경로 예측을 위하여 24시간 동안의 전진궤적모델 결과와 함께 궤적 경로의 시간 단위별 도착점에 관한 위치정보를 토대로 가상의 화산재 구름을 재구성 하였다.

HYSPLIT 모델 수행을 위한 기상자료는 미국 NOAA/ARL에서 제공되는 GDAS 자료를 이용하였다. 자료의 획득은 NOAA 자료 저장용 FTP서버(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>)에서 직접 다운이 가능하다. GDAS기상 모델은 하루 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 정기적으로 수행되고 있으며, 각 시간대별로 3시간, 6시간, 9시간 예측 자료를 생산한다. GDAS의 공간해상도는 경위도 1도 간격으로 경도 360개, 위도 181개의 격자단위로 구성되어 있다.

3. 결 과

1) 인공위성을 이용한 화산재 탐지

인공위성 관측자료로부터 화산재 구름을 탐지하는 것은 영상 자료내에서 화산재에 해당하는 픽셀을 완벽히 분리한 결과이다. Fig. 3-5에는 Table 1에서 언급된 주요 화산 폭발 사례에 대한 화산재 구름의 가시적인 영상 정보를 확인할 수 있는 MODIS RGB 칼라합성영상(color composite image)과 화산재 탐지 결과를 나타내었다. 가시광선 영역의 3 채널(Red = 660 nm, Green = 550 nm, Blue = 470 nm)을 이용하는 RGB 칼라합성 영상의 경우, 파장대에 따른 광 흡수나 산란으로 인한 대상의 색(color)을 통한 식별이 가능하다. 예를 들면, 탄소입자를 포함하는 구름은 짙은 검은색이나 검 회색을 나타내며, 수증기와 얼음을 포함하는 구름은 주로 밝은 백색으로 나타낸다. 토양 및 마그마의 성분이 혼합된 상태인 화산재는 갈색을 나타낸다. 이러한 결과물은 주간에 위성으로 관측하였을 때, 쉽게 발견이 되며 기상학적 구름과 차이가 있는 점을 광학적으로 구별이 가능하다. 그러나 주간 동안에 가시채널 영상 자료만으로 화산재 구름을 구별하는 것은 모호한 경우가 있으며, 태양광선이 없는 야간에는 화산재 식별이 불가능한 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 화산재가 흡수하거나 방사하

는 에너지를 주야간 관계없이 관측 가능한 적외선 채널 자료의 사용은 필수적이다. 따라서 본 연구에서 사용된 화산재 탐지 기법은 인공위성 자료 중 적외선 영상 자료를 기본으로 하며, 그 결과물은 칼라합성영상과 동일한 자료를 이용하여 결과물을 생성하였다. 그리고 화산재 픽셀로 설정된 적외선도차 값의 범위에 따라 칼라테이블을 이용한 색을 할당하였다.

Fig. 3은 2008년 5월 3일과 5월 5일 칠레의 Chaitén 화산폭발 사례에 대한 화산재 탐지 결과이다. Chaitén 화산의 최초 폭발은 2008년 5월 2일이며, 이 때 발생된 화산재 구름은 고도 약 21 km 까지 상승하였으며 남남동 방향으로 수평이동하였다(Osores *et al.*, 2013). MODIS 칼라합성영상에서는 Chaitén 화산 분화구에서 시작된 화산재 구름이 남서 방향으로 길게 이어져 있는 모습이 발

Fig. 3. MODIS color composite images (above) and volcanic ash detection results (below) during May 2008 Chaitén volcano eruption. Yellow arrows represents the location of Chaitén volcano.

Fig. 4. (a) Terra- and (b) Aqua-MODIS color composite images and volcanic ash detection results during 15-19 April 2010 Eyjafjallajökull volcano eruption.

견된다. 2008년 5월 3일 MODIS 화산재 탐지 결과는 칼라합성영상에서 나타나는 화산재 구름의 넓은 영역이 일치하지 않는 현상이 발견된다. 이것은 화산 분출로 인한 화산재 구름의 구성이 순수한 화산재 입자라기 보다는 화산가스 성분인 SO_2 가스 또는 수증기 성분이 화산재 구름의 주성분을 이루어 적외온도차 기법으로는 일반 구름과 분리가 안 되기 때문인 것으로 보인다. 그러나 2008년 5월 5일의 경우엔 화산재 입자의 증가로 화산재 구름의 영역이 보다 커졌으며, 편서풍을 타고 동쪽으로 이동 및 확산하고 있는 모습이 잘 나타나고 있다.

Fig. 4는 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산 폭발사례로서, 2010년 3월부터 간헐적 지진과 함께 4월 14일에 본격적인 폭발을 하여 대규모 화산재를 대기중으로 배출하여 상당기간 유럽지역의 항공 마비의 주 원인이 되었다. Fig. 4는의 MODIS 칼라합성 영상은 2010년 4월 15일 - 4월 19일 위성영상에서 화산재가 비교적 잘 나타난 경우로서, Eyjafjallajökull 분화구로부터 대량의 화산재가 기류를 타고 이동하고 있는 모습을 발견할 수 있다. 그리고 화산재 구름이 구름과 겹쳐있는 곳에서 화산재에 의한 신호가 우세한 것은 화산재 구름이 일반 구름보다 높은 고도에서 이동하고 있는 것을 의미한다. 실제로 화산재의 수직 고도는 4월 15일에는 약 12 km에 도달하였으나(Zakšek *et al.*, 2013), 4월 17일에는 약 5 km까지 상승한 것으로 보고되었다(ESA, 2010). 화산재의 이동 방향은 2010년 4월 15일에 12 km의 고도까지 상승한 화산재는 편서풍을 타고 동쪽으로 이동하고 있지만, 2010년 4월 17일에는 이 때 발생한 저기압의 후면을 따라 남쪽으로 이동하고 있다.

Fig. 5는 2011년 2월에 발생한 일본 Shinmoedake 화산 폭발 사례에 대한 화산재 탐지 결과이다. Shinmoedake 화산 폭발은 이전의 두 사례보다는 다소 약한 화산폭발 지수를 가지고 있으나, 한반도 부근에서 발생한 강력한 화산폭발 사례이다. 칼라합성영상 결과에서는 2011년 2월 3일에 Shinmoedake 화산 분화구로부터 화산재 구름이 길게 동쪽으로 이동하면서 다음날인 2011년 2월 4일에는 화산 분화구에서 발생된 화산재 구름이 대기 중에서 표류하고 있는 것이 잘 나타나고 있다. 그리고 2011년 2월 5일에는 화산재가 다른 구름과 섞여서 다소 약해진 모습이 보인다.

Fig. 5. (a) Terra- and (b) Aqua-MODIS color composite images and volcanic ash detection results during February 2011 Shinmoedake volcano eruption.

2) 화산재 이동 경로 모델링

본 연구의 대상인 3가지 경우의 화산폭발 사례에 대하여 HYSPLIT 전진궤적 모델링을 수행하였다. 여기서 고도 입력 조건은 고도 1 - 20 km 사이의 1 km 간격의 궤적 분석을 수행하였다. HYSPLIT 전진궤적 분석결과는 화산 분화구에서 향후 24시간 동안의 공기의 이동 궤적을 나타내므로, 현재의 MODIS 위성 자료로부터 화산재의 분포양상을 확인 후 다음날의 화산재의 이동양상을 추측할 수 있는 수단이 될 수 있다.

Fig. 6은 2008년 5월 3일 - 5일 동안의 매 시간별 Chaitén 화산에 대한 전진궤적 분석결과로서 모든 궤적선이 동쪽으로 향해 있으므로, Chaitén 화산 폭발로 인하여 생성된 화산재 구름은 기류의 방향과 동일하게 이동할 것을 예상할 수 있다. 그리고 고도 15 km 이상의 궤적은 정동쪽으로 향해 있지만, 이보다 낮은 고도의 궤적은 남동 방향을 향하고 있다. 따라서 화산재 발생시 고도에 따라 이동경로가 다를 것으로 예상된다. Fig. 3의 MODIS 위성 분석결과와 비교하면, 실제 화산재 구름의

Fig. 6. Selected results of the 24 hour HYSPLIT forward trajectory analysis beginning from Chaitén volcano summit at every hour on 3-5 May 2008. Colors denote the height of the trajectory lines, and the interval symbol (+) is the location of the air mass every four hour.

이동 방향과 궤적선의 방향이 일치하는 고도는 약 10 - 12 km 부근의 궤적선과 일치하고 있다.

2010년 4월 15일과 16일 동안의 매 시간별 Eyjafjallajökull 화산폭발에 대한 전진궤적 분석결과는 Fig. 7과 같다. Chaitén 화산의 경우와는 다르게 Eyjafjallajökull 화산폭발 사례의 궤적선은 고도가 높을수록 남쪽 방향으로 점차 이동경로가 다르게 나타남을 알 수 있다. 그리고 고도 1 km의 궤적선은 2010년 4월 15일 12UTC에 정동향의 이동경로를 나타냈으나, 이후 점차 이동경로가 남향으로 바뀌면서 2010년 4월 16일 20UTC 경에는 정남향으로 변화했다. 이러한 결과는 만일 화산재가 1 km 고도에서 이동한다면 이 기간 동안의 화산재로 인한 영향 범위가 매우 넓어질 수 있음을 의미한다. Fig. 4의 MODIS 화산재 탐지 결과와 비교하면, 실제 화산재 구름의 형태는 2010년 4월 15일에는 동남향을 가르키고 있지만, 19일

에는 정남향으로 분포되어 있으므로, 화산재의 고도가 1 - 3 km 부근에서 이동하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 2011년 2월 4일과 5일 동안의 매 시간별 Shinmoedake 화산폭발에 대한 전진궤적 분석결과는 모든 고도의 궤적선이 동쪽으로 향해 있으며, 이는 화산재 구름이 동쪽으로 이동할 수 있음을 알 수 있다. 이와는 다르게 화산재의 고도가 1 km 이하인 경우는 2월 5일의 궤적선은 남향으로 나타나고 있다. Fig. 5의 MODIS 위성 분석결과와 비교하면, 실제 화산재 구름의 형태와 이동 방향이 일치하고 있다. 2월 3일의 MODIS 영상에서는 화산재 구름이 직선의 형태로 동쪽으로 이동하고 있지만, 2월 4일 오후에는 다소 남쪽방향으로 흔들리다가 점차 확산되고 있는 양상으로 미루어보면, 화산재 구름의 고도가 점차 낮아지면서 저층의 남향 기류를 타고 이동한 것으로 사료된다.

Fig. 7. Selected results of the 24 hour HYSPLIT forward trajectory analysis beginning from Eyjafjallajökull volcano summit at every hour on 15-16 April 2010. Colors denote the height of the trajectory lines, and the interval symbol (+) is the location of the air mass every four hour.

Fig. 8. Selected results of the 24 hour HYSPLIT forward trajectory analysis beginning from Shinmoedake volcano summit at every hour on 3-4 February 2011. Colors denote the height of the trajectory lines, and the interval symbol (+) is the location of the air mass every four hour.

4. 결론

화산활동으로 인하여 대기중으로 배출된 화산재 입자의 모니터링은 화산재로 인한 재해 예방 및 경감을 위하여 필수적이다. 인공위성 관측 자료는 현지 관측에 대한 위험성이 없으며, 보다 효과적으로 광역 대기환경 감시에 사용될 수 있으므로, 최근에 발생하였던 주요 화산 폭발 사례(2008년 칠레의 Chaitén 화산, 2010년 아이슬란드 Eyjafjallajökull, 2011년 일본 Shinmoedake 화산)를 대상으로 화산재 감시 및 이동 경로 예측에 활용하고 그 결과를 분석하였다.

인공위성 관측 자료를 이용한 화산재 탐지를 위하여 MODIS 위성자료를 이용한 칼라합성영상과 적외 채널을 이용한 화산재 탐지 알고리즘을 적용한 결과, 화산 폭발 후 발생한 화산재 구름에 대한 정량적, 정성적 탐지가 가능하였다. 먼저 MODIS 칼라합성영상 제작 결과를 통하여 화산 폭발 이후 발생한 화산재 구름에 대한 가시적인 영상 정보를 확인하였다. MODIS 칼라합성영상은 가시광선 영역의 위성 채널을 사용하는 칼라합성 영상자료의 특성상 주간 동안의 화산재 영상정보만 생성 가능한 단점이 있는 반면, 자연색에 가까운 영상정보를 제공하므로 화산재 구름에 대한 대략적 공간 분포 정보를 획득할 수 있었다. 그리고 적외온도차 기법을 적용한 화산재 탐지 결과를 통하여 위성영상자료로부터 화산재에 해당하는 픽셀을 분리한 결과는 화산재에 해당하는 영역에 대한 정보를 잘 나타내는 것으로 확인되었다. 그리고 화산 분화구로부터 24시간 동안의 전진 궤적모델 분석결과와 함께 위성에서 탐지된 화산재 구름의 위치로부터 화산재 구름의 예상 이동경로의 특성을 예측하였다. 이를 토대로 화산재의 시공간적 분포 및 화산재 이동 경로 예측에 대한 응용 가능성을 확인하였으며 이러한 결과물은 향후, 화산재 감시 시스템 개발에 관한 기초 자료로서 유용할 것이다.

사 사

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2012-5080)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Derimian, Y., O. Dubovik, D. Tanré, P. Goloub, T. Lapyonok, and A. Mortier, 2012. Optical properties and radiative forcing of the Eyjafjallajökull volcanic ash layer observed over Lille, France, in 2010, *J. Geophys. Res.*, 117: D00U25, doi:10.1029/2011JD016815.
- Draxler, R.R., 1999. *HYSPLIT4 user's guide*. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1997. *Description of the HYSPLIT_4 modeling system*. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, pp. 24.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition, *Aust. Meteor. Mag.*, 47: 295-308.
- Ellrod, G.P., B.H. Connell, and D.W. Hillger, 2003. Improved detection of airborne volcanic ash using multi-spectral infrared satellite data, *J. Geophys. Res.*, 108(D12), DOI: 10.1029/2002JD002802.
- ESA(European Space Agency), 2010. Ash plume of Eyjafjallajökull volcano monitored, *Science Daily*, 22 Apr. 2010.
- Francis, P.N., M.C. Cooke, and R.W. Saunders, 2012. Retrieval of physical properties of volcanic ash using Meteosat: A case study from the 2010 Eyjafjallajökull eruption, *J. Geophys. Res.*, 117, D00U09, doi:10.1029/2011JD016788.
- Gasteiger, J., S. Groß, V. Freudenthaler, and M. Wiegner, 2011. Volcanic ash from Iceland over Munich: mass concentration retrieved from ground-based remote sensing measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 2209-2223, doi:10.5194/acp-11-2209-2011.
- Hansen, J., A. Lacis, R. Ruedy, and M. Sato, 1992. Potential climate impact of Mount-Pinatubo eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 19(2): 215-218,

- doi:10.1029/91GL02788.
- Heffter, J.L. and B.J. Stunder, 1993. Volcanic ash forecast transport and dispersion(VAFTAD) model, *Wea Forecasting*, 8: 534-541.
- Heffter, J.L., 1996. Volcanic ash model verification using a Klyuchevskoi eruption, *Geophy. Res. Letters*, 23(12): 1489-1492.
- Heffter, J.L., B.J.B. Stunder, and G.D. Rolph, 1990. Long-range forecast trajectories of volcanic ash from Redoubt volcano eruptions, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71(12): 1731-1738.
- Horwell, C.J. and P.J. Baxter, 2006. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation., *Bulletin of Volcanology*, 69: 1-24.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-470.
- Kaufman, Y.J., D. Tanré, L.A. Remer, E.F. Vermote, D.A. Chu, and B.N. Holben, 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS-MODIS, *J. Geophys. Res.*, 102: 17,051-17,061.
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006a. Application of MODIS Aerosol Data for Aerosol Type Classification, *Korean J. of Remote Sensing*, 22(6): 495-505 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006b. Atmospheric aerosol detection and its removal for satellite data, *Korean J. of Remote Sensing*, 22(5): 1-5.
- Lee, K.H., C.S. Hong, and Y.J. Kim, 2004. Atmospheric Aerosol Monitoring Over Northeast Asia During 2001 from MODIS and TOMS data, *Korean J. of Remote Sensing*, 20(2): 77-89 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., D.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006. Application of MODIS satellite observation data for air quality forecast, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6): 851-862 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.H. and Yun, S.H. Yun, 2011. Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 32(4): 360-372 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.H., E.S. Jang, and H.M. Lee, 2012. A case analysis of volcanic ash dispersion under various volcanic explosivity index of the Mt. Baegdu. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 33(3): 280-293 (in Korean with English abstract).
- Mastin, L.G., M. Guffanti, R. Servranckx, V. Webley, S. Barsotti, K. Dean, A. Durant, J.W. Ewert, A. Neri, W.I. Rose, D. Schneider, L. Siebert, B. Stunder, G. Swanson, A. Tupper, A. Volentik, and C.F. Waythomas, 2009. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1-2): 10-21.
- Osores, M.S., A. Folch, E. Collini, G. Villarosa, A. Durant, G. Pujol, and J.G. Viramonte, 2013. Validation of the FALL3D model for the 2008 Chaitén eruption using field and satellite data, *Andean Geology*, 40(2): 262-276, doi: 10.5027/andgeoV40n2-a05.
- Pavolonis, M.J., W.F. Feltz, A.K. Heidinger, and G.M. Gallina, 2006. A daytime complement to the reverse absorption technique for improved automated detection of volcanic ash, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23: 1422-1444.
- Prata, A.J., 1989a. Observations of volcanic ash clouds in the 10-12-micron window using AVHRR/2 Data, *Int. J. Remote Sens.*, 10: 751-761.
- Prata, A.J., 1989b. Radiative transfer calculations for

- volcanic ash clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 16(11): 1293-1296.
- Prata, A.J., G.J.S. Bluth, W.I. Rose, D.J. Schneider, and A.C. Tupper, 2001. Comments on failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique *Rem. Sensing Environ*, 78: 341-346.
- Sawamura P., J. Vernier, J. Barnes, T. Berkoff, E. Welton, L. Alados-Arboledas, F. Navas-Guzman, G. Pappalardo, L. Mona, and F. Madonna, 2012. Stratospheric AOD after the 2011 eruption of Nabro volcano measured by lidars over the Northern Hemisphere, *Environ. Res. Lett.*, 7(3), doi:10.1088/1748-9326/7/3/034013.
- Simpson, J.J., G. Hufford, D. Pieri, and J. Berg, 2000. Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique, *Remote Sens. Environ.*, 72: 191-217.
- Stunder, B.J.B., J.L. Heffter, and R.R. Draxler, 2007. Airborne Volcanic Ash Forecast Area Reliability, *Weather and Forecasting*, 22: 1132-1139, DOI: 10.1175/WAF1042.1.
- Tanré, D., Y.J. Kaufman, M. Herman, and S. Mattoo, 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances, *J. Geophys. Res.*, 102, 16971-16988.
- Tupper, A., J. Davey, P. Stewart, B. Stunder, R. Servranckx, and F. Prata, 2006. Aircraft encounters with volcanic clouds over Micronesia, Oceania, 2002/03, *Australian Meteorological Magazine*, 55: 289-299.
- Watkin, S.C., 2003. The application of AVHRR data for the detection of volcanic ash in a Volcanic Ash Advisory Centre, *Meteorol. Appl.*, 10: 301-311.
- Webley, P.W., B.J.B. Stunder, and K.G. Dean, 2009. Preliminary sensitivity study of eruption source parameters for operational volcanic ash cloud transport and dispersion models – A case study of the August 1992 eruption of the Crater Peak vent, Mount Spurr, Alaska, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186: 108-119.
- Wen, S. and W.I. Rose, 1994. Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic ash clouds using AVHRR bands 4 and 5, *J. Geophys. Res.*, 99: 5421-5431.
- Yun, S.H and J.H. Lee, 2012. Analysis of unrest signs of activity at the Baegdusan volcano, *J. Petrol. Soc. Korea*, 21(1): 1-12 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H. and Z.C. Cui, 1996. Historical eruption records on the Cheonji caldera volcano in the Mt . Paektu, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 17(5): 376-382 (in Korean with English abstract).
- Zakšek, K., M. Hort, J. Zaletelj, and B. Langmann, 2013. Monitoring volcanic ash cloud top height through simultaneous retrieval of optical data from polar orbiting and geostationary satellites, *Atmos. Chem. Phys.*, 13: 2589-2606, doi:10.5194/acp-13-2589-2013.