

인공위성 관측자료와 궤적분석을 이용한 Eyjafjallajökull 화산재 감시와 예측

Monitoring and Forecasting the Eyjafjallajökull Volcanic Ash using Combination of Satellite and Trajectory Analysis

이 권 호*

경일대학교 공간정보공학과

(2014년 2월 21일 접수, 2014년 3월 7일 수정, 2014년 3월 25일 채택)

Kwon Ho Lee*

Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University

(Received 21 February 2014, revised 7 March 2014, accepted 25 March 2014)

Abstract

A new technique, namely the combination of satellite and trajectory analysis (CSTA), for exploring the spatio-temporal distribution information of volcanic ash plume (VAP) from volcanic eruption. CSTA uses the satellite derived ash property data and a matching forward-trajectories, which can generate airmass history pattern for specific VAP. In detail, VAP properties such as ash mask, aerosol optical thickness at 11 μm (AOT_{11}), ash layer height, and effective radius from the Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) satellite were retrieved, and used to estimate the possibility of the ash forecasting in local atmosphere near volcano. The use of CSTA for Iceland's Eyjafjallajökull volcano erupted in May 2010 reveals remarkable spatial coherence for some VAP source-transport pattern. The CSTA forecasted points of VAP are consistent with the area of MODIS retrieved VAP. The success rate of the 24 hour VAP forecast result was about 77.8% in this study. Finally, the use of CSTA could provide promising results for VAP monitoring and forecasting by satellite observation data and verification with long term measurement dataset.

Key words : Volcanic ash plume, Satellite, Trajectory

1. 서 론

화산폭발 시 분화구로부터 대기중으로 배출된 화산재 (Volcanic Ash) 입자는 토양과 마그마, 각종 화산

가스성분 (SO_2 , HF, 수증기 등)이 혼합된 형태로서, 다량의 화산재가 배출될 경우 국경을 초월하는 심각한 자연 재해가 초래될 수 있다. 역사상 가장 큰 화산폭발 사례였던 Pinatubo 화산과 El Chichon 화산폭발은 대규모의 화산재를 지구 대기 중으로 방출하여 전 지구적인 기후변화에 영향을 미치기도 하였다 (Mishchenko *et al.*, 2007). 그리고 최근의 발생한 아

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-850-7383, E-mail : khlee@kiu.ac.kr

이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산폭발은 인근지역에서의 인명피해와 더불어 전 유럽지역의 항공마비를 초래했다. 여기서 발생한 막대한 양의 화산재는 전 유럽에서 관측이 되었으며, 화산재로 인한 관측결과 및 영향이 많은 연구에서 다루어지기도 하였다.

O'Dowd *et al.* (2012)는 아일랜드의 지상 관측소에서 관측된 Eyjafjallajökull 화산재에 대한 물리적, 화학적, 광학적 특성에 대한 종합적인 관측결과를 제시하였다. Derimian *et al.* (2012)는 프랑스에서 지상 복사관측 장비로 관측된 Eyjafjallajökull 화산재가 지역 대기 및 복사강제효과에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 연구 결과들은 단일 지점에서 관측된 화산재 입자 성분에 대한 상세한 라이브러리를 제공하지만, 화산재의 공간적 분포나 시간적 변화에 대한 정보를 획득할 수 없는 단점이 존재한다. 한편, Johnson *et al.* (2012)와 Schumann *et al.* (2011)는 항공관측을 통하여 각 지역별 화산재의 광학특성과 질량농도 및 가스 성분에 대한 농도분포를 측정하였다. 그리고 Millington *et al.* (2012)는 영국 기상청에서 개발한 Numerical Atmospheric dispersion Modeling Environment (NAME)모델과 Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) 영상자료를 이용하여 화산재 분포 특성을 분석하였다. 인공위성 관측 자료는 화산재 실지 관측의 어려움을 극복할 수 있고, 넓은 지역을 측정할 수 있는 장점 때문에, 화산재로 인한 지역 대기환경 변화 및 중장거리 이동 현황의 감시에도 인공위성 관측 자료를 유용하게 사용할 수 있다.

인공위성은 광범위한 지역을 관측함으로써 인하여 대기 에어로솔을 모니터링하기 위한 수단으로 사용되고 있으며 (Lee, 2013a, 2012), 경로 예측 모델과 함께 대기질 예측과 관련된 연구에서 사용되기도 하였다 (Lee *et al.*, 2006). 인공위성 관측자료를 이용한 화

산재 탐지방법은 위성탐재 센서의 특징에 따라 다양한 알고리즘이 개발되었으며, 탐지 정확도가 향상되고 있다 (Francis *et al.*, 2012; Ellord *et al.*, 2003; Prata, 1989). 그리고 실제 화산폭발로 인한 화산재의 영향을 파악하기 위하여 실지 관측이나 위성원격탐사 방법이 필요한 실정이므로, 화산재 입자 성분의 미세 물리 특성과 광학특성이 위성 원격 탐사에 미치는 영향에 대한 결과 (Lee and Jang, 2014a) 및 대형 화산폭발 사례에 관한 선행 연구도 수행되었다 (Lee and Jang, 2014b).

본 연구에서는 인공위성 관측자료와 궤적분석 자료를 이용한 화산재 구름의 감시 및 예측을 위한 방법을 제안하였으며, 2010년 5월에 폭발한 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산으로부터 발생한 화산재 구름에 대한 사례연구결과를 분석하였다. 이를 위하여 지구 관측위성인 Terra와 Aqua 위성의 탐재센서인 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 관측 자료로부터 화산재 특성정보를 산출하였으며, 특정 시간과 지리적 위치에서의 궤적분석을 수행하여 현재의 화산재 구름의 미래 이동경로를 예측하였다. 예측된 화산재 구름 정보는 다시 위성자료와 비교분석을 수행하여 정확도를 정량화하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 자료의 종류와 관측 기간 및 범위 요소는 표 1과 같이 MODIS 자료와 기상모델 자료를 포함하며, 상세한 설명은 다음과 같다.

2.1 MODIS 위성자료

MODIS는 미국 항공우주국(NASA)에서 계획된 지

Table 1. List of data and observation parameters used in this study.

Data	Period	Area	Resolution	Parameters
MOD02, MYD02	2010/04/15 ~ 2010/05/12	N50° ~ N70°, W0° ~ W30°	1 km	Calibrated radiance
MOD03, MYD03	2010/04/15 ~ 2010/05/12	N50° ~ N70°, W0° ~ W30°	1 km	Latitude, Longitude, Sun zenith angle, Satellite zenith angle, Relative azimuth angle, Elevation
NCEP reanalysis	2010/04/15 ~ 2010/05/12	Global	Every 6 hr, 2.5°	Air temperature profile
GDAS	2010/04/15 ~ 2010/05/12	Global	Every 3 hr, 1.0°	Extinction, Color ratio, and Depolarization ratio profiles

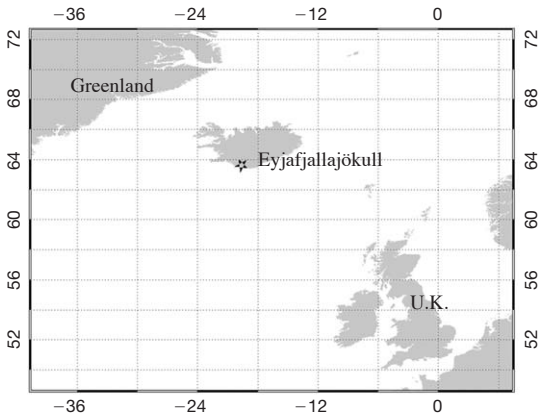


Fig. 1. Map of the study area (48.63N~72.62N, 43.62W~4.38E). Eyjafjallajökull volcano is indicated by star.

구관측 위성계획 (Earth Observing System)의 일환으로 1999년에 발사된 TERRA위성과 2002년에 발사된 AQUA위성에 탑재된 다파장 복사계 (multi spectral radiometer)이다. 본 연구에서 사용된 MODIS 자료는 위성이 관측하는 직하점에서 약 1 km의 공간해상도를 가지는 원시자료인 level 1 calibrated radiance 자료 (코드명 MOD02, MYD02)이다. MODIS 자료는 현재 NASA MODIS 자료 검색 시스템인 LAADS Web (<http://ladswb.nascom.nasa.gov/data/>)으로부터 획득하였다. MODIS 관측자료의 범위는 2010년 4월 15일부터 5월 12일 동안 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산이 위치한 지역을 포함하는 북위 60.63±12도, 서경 19.62±24도에 해당하는 영역이다(그림 1 참조).

2.2 궤적 분석 모델 및 입력자료

본 연구에서 궤적분석을 위하여 사용된 모델은 미국 해양 대기청 (NOAA)에서 제공하는 Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 모델 (버전 4.7) (Draxler and Rolph, 2003; Rolph, 2003)이다. HYSPLIT 모델의 전진궤적 (Forward trajectory) 수행을 위하여 필요한 기상모델 입력자료는 미국 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공되는 기상 예측 모델결과인 The Global Data Assimilation System (GDAS) 자료를 사용하였다. GDAS 자료는 현재 NOAA의 기상예측모델 자료 저장용 FTP서버 (<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives>

/gdas1)에서 획득하였다. GDAS는 매일 3시간 간격으로 하루 4회 (00, 06, 12, 18 UTC) 자료를 생산하고 있으며, 공간해상도는 경위도 1도의 등간격으로 경도 360개, 위도 181개의 격자단위로 구성되어 있다.

2.3 Combination of Satellite and Trajectory Analysis (CSTA)

Combination of Satellite and Trajectory Analysis (CSTA)는 위성자료와 궤적분석자료를 이용하여 화산재 구름의 현재 및 미래의 위치정보를 분석하기 위하여 개발된 알고리즘이다. CSTA는 화산재 감시 정보 산출을 위한 위성자료 처리부분, 화산재 이동경로 예측을 위한 궤적분석 부분, 결과물의 가시화 부분으로 구성되어 있으며, 그림 2는 전체적인 자료처리 과정을 나타낸다.

CSTA에서 첫 단계는 MODIS 위성자료로부터 위성관측시간과 복사량 자료를 이용하여 가시광 채널 자료는 반사도(reflectance)로, 적외선 채널 자료는 밝기온도(brightness temperature)의 물리량으로 전환하는 과정을 거친다. 그리고 이 물리량은 Lee *et al.* (2014)이 위성자료로부터 화산재의 산출을 위하여 개발된 하이브리드 알고리즘을 이용하여 화산재 마스크(ash mask)와 레이어 고도(H_{ash}), 그리고 입자 광학두께 (Aerosol Optical Thickness; AOT)와 유효반경(R_{eff})값을 생산한다. 적외채널의 사용으로 인한 장점으로는, 우선 야간에도 관측이 가능한 점과, 적외채널에 민감하지 못한 미세입자성분의 영향을 최소화할 수 있는 점이 있다. 하이브리드 알고리즘은 화산재 탐지를 위하여 주로 3.7 μm , 10.8 μm , 12.0 μm 을 가지는 적외선 채널의 밝기온도차를 이용하며, 화산재로 탐지된 픽셀은 화산재 마스크로 저장된다. 이를 위하여 위성영상의 각 픽셀별 밝기온도 자료로부터 다음의 식 (1) (Prata, 1989)과 식 (2) (Ellord, 2003)을 만족하는 테스트를 수행한다.

$$BTD_{RA} = BT_{11} - BT_{12} < -0.5K \tag{1}$$

$$BTD_{TVAP} = 60 + 10(BT_{12} - BT_{11}) + 3(BT_{3.7} - BT_{11}) > 70K \tag{2}$$

여기서 $BT_{3.7}$, BT_{11} , BT_{12} 는 각각 3.7 μm , 10.8 μm , 12.0 μm 에서의 밝기온도값이다. 기본적으로, 화산재 탐지는 식(1)과 식(2)의 조건을 모두 만족시키는 화소 단

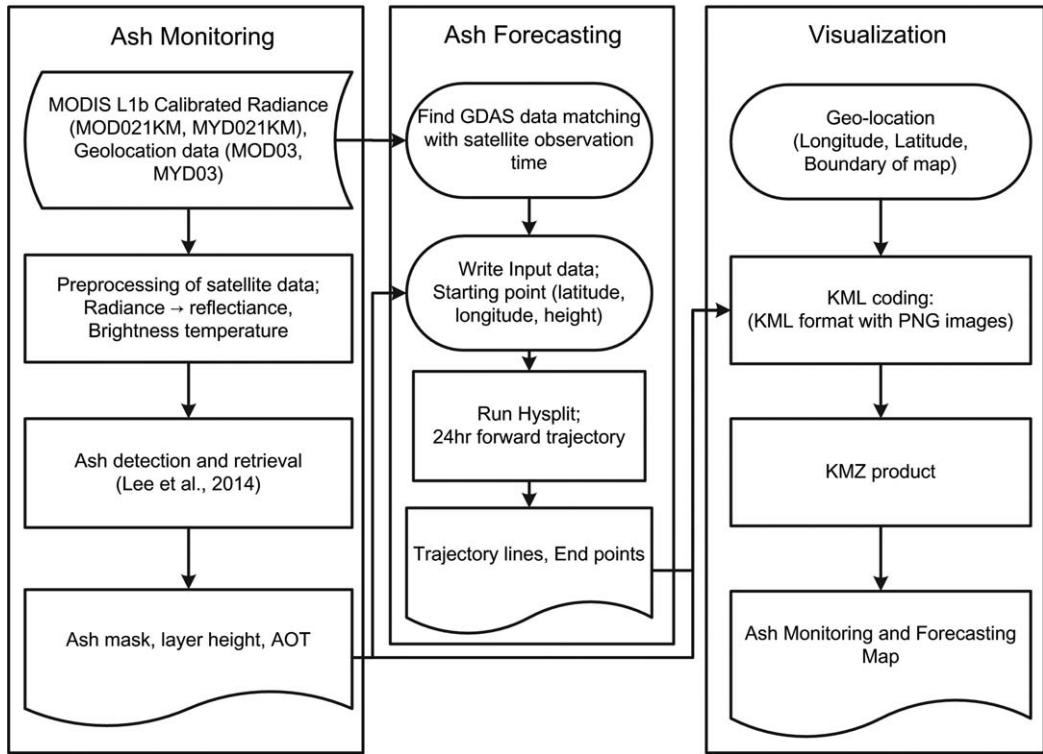


Fig. 2. Flow chart for data processing in CSTA.

위의 밝기온도차 기법을 사용한다. 그리고 여기서 탐지된 화산재 화소는 화산재 입자의 특성정보를 산출하기 위하여 다음의 과정을 거친다. 우선, 복사전달 모델을 이용하여 미리 계산된 조건표(Look-Up Table; LUT)를 이용하여 위성이 관측한 복사량과 조건표와의 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Difference; RMSD)(식(3))를 구하여 RMSD값이 가장 작은 경우를 선택하여 화산재의 고도와 AOT를 역으로 산출할 수 있게 된다.

$$RMSD = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{(BT_i^{calc} - BT_i^{obs})^2}{BT_i^{obs}}} + \sqrt{\frac{(BTD_{RA}^{calc} - BTD_{RA}^{obs})^2}{BTD_{RA}^{obs}}} \quad (3)$$

여기서, N은 식(3)에서 사용된 채널의 총 수로서 본 연구에서는 3.7 μm, 10.8 μm, 12.0 μm의 세 개의 채널 자료(N=3)가 사용되었다. 위 첨자 calc와 obs는 각각 계산된 값과 관측된 값을 의미한다. 본 연구에서 사용된 하이브리드 알고리즘은 대형 화산 폭발사례에 대

하여 적용되었으며, 다른 위성산출물(Envisat Absorbing Aerosol Index (AAI)와 Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) Vertical Feature Mask (VFM) 자료)과의 비교검증을 통하여 화산재 탐지 정확도가 검증되었다(Lee et al., 2014).

두 번째 단계에서는 이전의 위성자료 처리를 통하여 산출된 화산재 정보를 토대로 궤적분석을 수행한다. 이때 궤적분석 모델의 수행은 이전 단계에서의 MODIS 위성자료 분석결과로부터 화산재 구름의 위치정보(위도, 경도, 고도)와 시간정보(위성관측시간)를 전달받아서 24시간 후의 등온위(isentropic) 전진 궤적(forward trajectory)분석을 수행하였다. 모델링 결과에서 궤적의 최종 도착지는 현재의 화산재 구름이 이동하여 도착하는 지점으로 가정하였다.

마지막으로 가시화 단계에서는 위성자료로 분석된 화산재 정보와 궤적분석 결과를 동시에 화면에 표출한다. 여기서 사용된 방법은 위치정보와 속성정보를 동

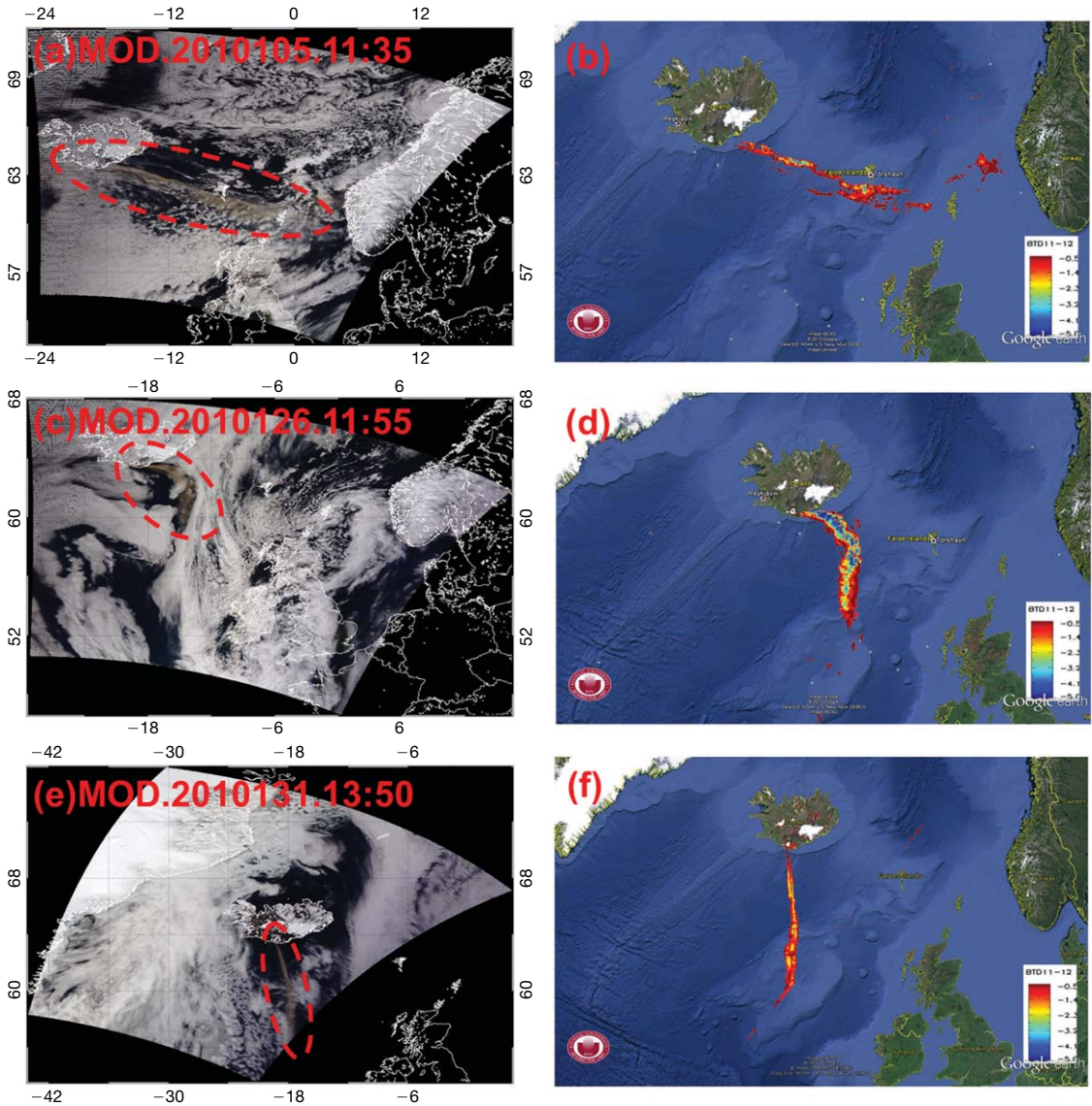


Fig. 3. MODIS color composite images (left) and volcanic ash pixels determined by CSTA (right) for (a, b) 15 April 2010 UTC11:35, (c, d) 6 May 2010 UTC11:55, and (e, f) 11 May 2010 UTC13:50, respectively.

시에 가지는 결과물로부터 구글어스(Google Earth™)에서 사용되는 Keyhole Markup Language (KML)파일로 코딩된다. 생성된 KML파일은 구글어스를 통하여 쉽게 화면상에 가시화할 수 있는 특성을 가지므로, 사용자가 화산이 폭발한 지역뿐만 아니라 화산재가 위치한 시공간적인 정보를 보다 쉽게 이해할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MODIS 화산재 탐지

화산재 예보를 위한 국제기구인 화산재 예보 센터(Volcanic Ash Advisory Centre; VAAC)의 Eyjafjallajökull 화산재 보고서에 의하면, 2010년 4월과 5월 동안의 기간 중에서 비교적 큰 규모의 폭발이 여러 번

발생한 것으로 기록되었다. 본 연구에서는 전체 연구 기간 중 2010년 4월 14일~18일, 2010년 5월 5일~7일, 2010년 5월 10일~11일에 발생한 폭발사례를 3개의 이벤트 기간으로 설정하였다.

그림 3은 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산 사례에 대하여 CSTA를 적용하여 탐지된 화산재 분석결과 사례로서 분화구로부터 배출되고 있는 화산재 구름의 형태가 잘 나타나는 경우인 2010년 4월 15일 UTC11:35, 2010년 5월 6일 UTC11:55, 2010년 5월 11일 UTC13:50에 관측된 위성자료를 선택적으로 나타내었다. MODIS 위성자료로부터 산출된 화산재 마스크는 화산재에 해당하는 영역만이 강조된 결과로서 칼라는 적외채널 온도차를 나타낸다. 그리고 MODIS 칼라합성영상(color composite image)은 가시광선 영역의 채널을 이용하여 인간의 눈으로 볼 수 있는 자연색에 가까운 색으로 재 합성하여 생성된 영상정보를 제공한다(Lee, 2013b). MODIS 칼라합성영상과 화산재 탐지 결과의 비교를 통하여 화산재 구름과 일반 기상학적 구름의 차이를 정성적으로 파악할 수 있으며, 위성 자료의 분석결과는 화산재 구름을 비교적 정

확히 탐지되었음을 알 수 있다.

2010년 4월 15일~19일의 위성영상에 나타난 화산재는 편서풍을 타고 주로 동쪽으로 이동하고 있지만, 이후 2010년 4월 17일에 발생한 저기압의 후면을 따라 남쪽으로 방향을 바꾸어 이동하였다. 2010년 5월 5일~6일 기간 동안의 화산재 구름은 남진하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 5월 10일~11일의 화산재구름 남쪽으로 약 2,000 km에 걸쳐 이동하고 있는 모습이 관측되었다. 이러한 화산재 구름의 장거리 이동 특성은 화산에서 배출된 화산재의 배출조건과 기상 조건에 따라 주변지역에 미치는 영향이 다르게 나타난다.

3. 2 MODIS 화산재 광학, 물리적 특성

그림 4는 그림 3과 동일한 기간에 아이슬랜드의 Eyjafjallajökull 화산재 사례에 대하여 CSTA를 적용하여 산출된 화산재 AOT_{11} , H_{ash} , R_{eff} 결과이다. 2010년 4월 16일은 화산재의 이동방향이 동쪽을 향하고 있으며, MODIS 위성영상에서 확인된 평균값은 약 $AOT_{11}=0.51 \pm 0.30$, $H_{ash}=1.96 \pm 1.19$ km, $R_{eff}=4.20 \pm$

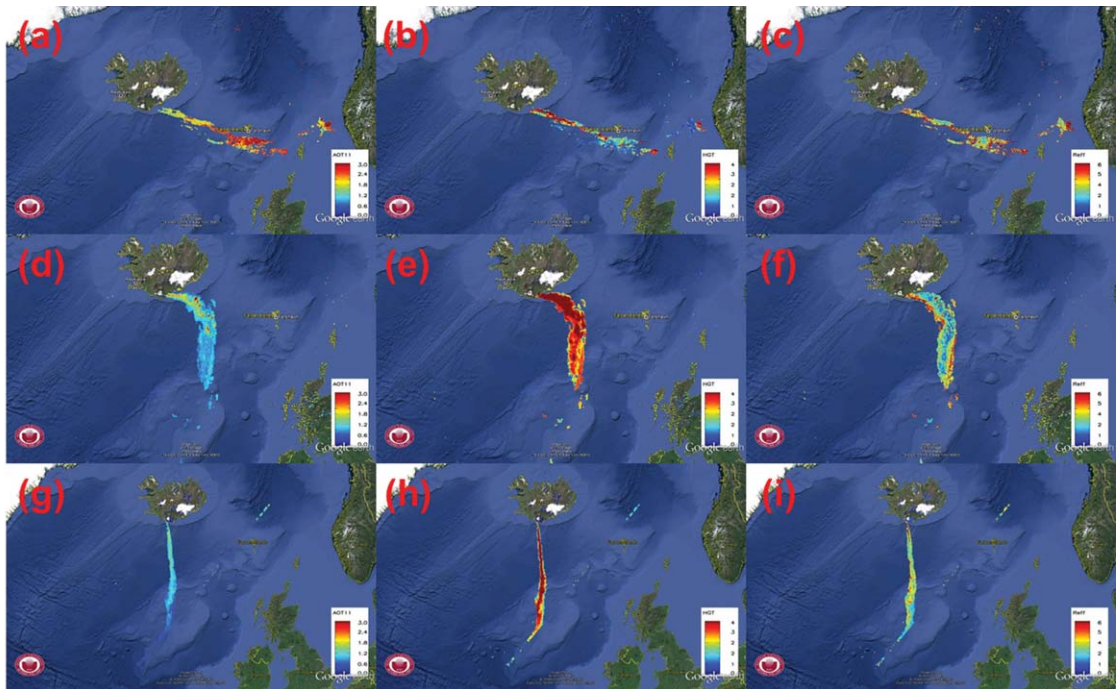


Fig. 4. MODIS retrieved AOT_{11} , (left), layer height (middle), and effective radius (right)_for (a, b, c) 16 April 2010 UTC11:35, (d, e, f) 6 May 2010 UTC11:55, and (g, h, i) 11 May 2010 UTC13:50, respectively.

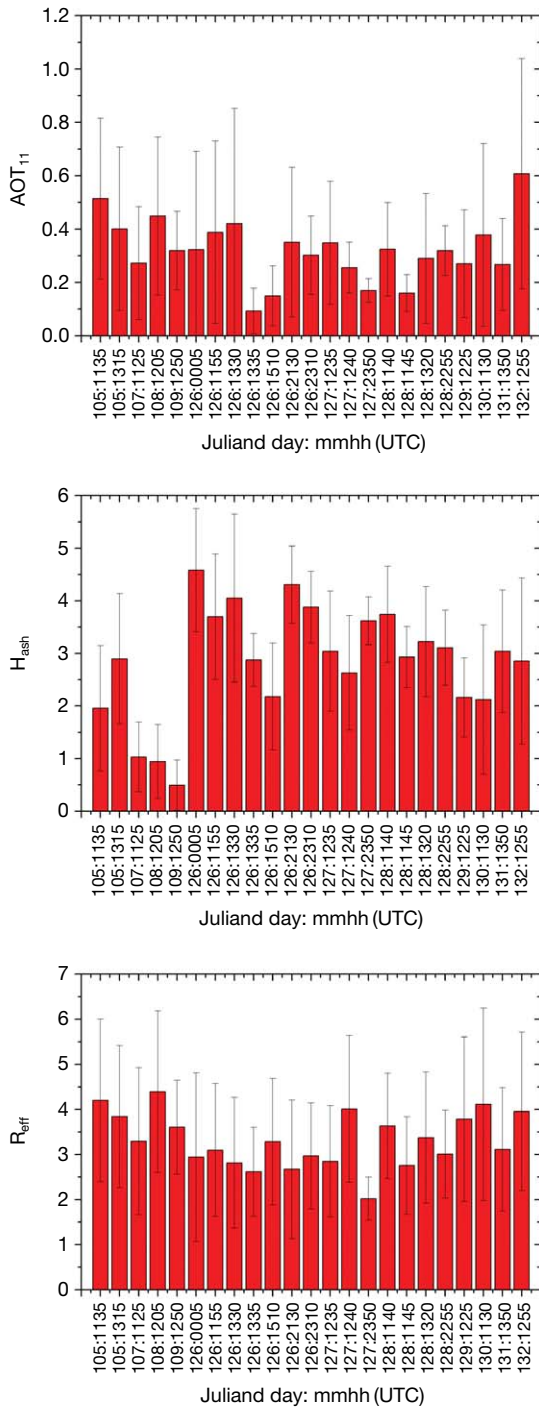


Fig. 5. Time series of the MODIS retrieved AOT₁₁, H_{ash}, effective radius for Eyjafjallajökull volcanic ash observed from 15 April to 12 May 2010.

1.80 μm, 화산재 구름의 넓이가 약 17,497 km로 산출되었다. 2010년 5월 7일의 화산재 구름의 경우는 AOT₁₁값이 약 0.39±0.34로서 상대적으로 적으나, 화산재의 고도는 약 4km~5km 부근(전체 평균 3.70±1.19)에서 정동-남향 방향으로 굽은 형태로 약 29,445 km²의 비교적 넓은 영역에 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 그리고 2010년 5월 10일의 경우는 화산재 구름의 특성값은 각각 AOT₁₁=0.27±0.17, H_{ash}=3.04±1.16 km, R_{eff}=3.12±1.37 μm으로 산출되었다. 화산재의 AOT₁₁값은 가장 작게 나타났으며, 화산재 구름의 영역은 약 8,794 km²이었다. 분화구로부터 지속적으로 약하게 배출된 화산재가 정남 방향으로 이동하였음을 알 수 있다.

그림 5는 전체 연구기간 동안의 Eyjafjallajökull 화산재의 AOT₁₁, 고도, 유효반경의 시계열 분포를 나타낸다. 이 기간 동안의 평균 분석값은 AOT₁₁=0.32±0.11, H_{ash}=2.84±1.06 km, R_{eff}=3.32±0.60 μm, 화산재가 영향을 나타낸 영역은 평균 20,447±19,135 km²으로 상당히 넓은 지역에 걸쳐 화산재 구름이 분포했던 것으로 나타났으며 화산재 구름이 분포했던 영역에 대한 일변 변화도 크게 나타났다.

3.3 화산재 이동 예측

본 연구에서는 화산폭발 이후 대기중으로 배출된 화산재 구름의 예측을 위하여 위성자료로부터 실제 관측된 화산재 구름의 속성 정보를 입력자료로 하는 궤적분석모델링을 수행하였다. 그림 6은 화산재 구름의 예측을 위한 단계별 과정을 나타낸다. 우선, 이전의 MODIS 화산재 탐지 과정에서 획득한 화산재 구름의 위치정보로부터 9*9개의 화소로 구성된 크기를 가지는 격자(grid)를 생성한다. 이때, 9*9개의 화소 중 화산재로 탐지된 픽셀이 적어도 60개 이상(약 75%)인 경우만 사용한다. 그리고 각 격자의 중심점을 출발점으로 하는 전진궤적분석을 수행하여 각 궤적이 도달하는 최종 지점으로부터 24시간 이후에 화산재 구름이 이동하게 될 지점을 예측한다. 즉, 전진궤적 분석결과는 화산재가 위치한 지점으로부터 향후 24시간 동안의 공기의 이동 궤적을 나타내므로, 현재의 MODIS 화산재 탐지 결과로부터 화산재의 분포양상을 확인 후, 다음날의 화산재의 분포양상을 예측할 수 있는 중요한 수단이 된다. 그리고 예측된 화산재 구름의 위치정보는 다음날 위성으로부터

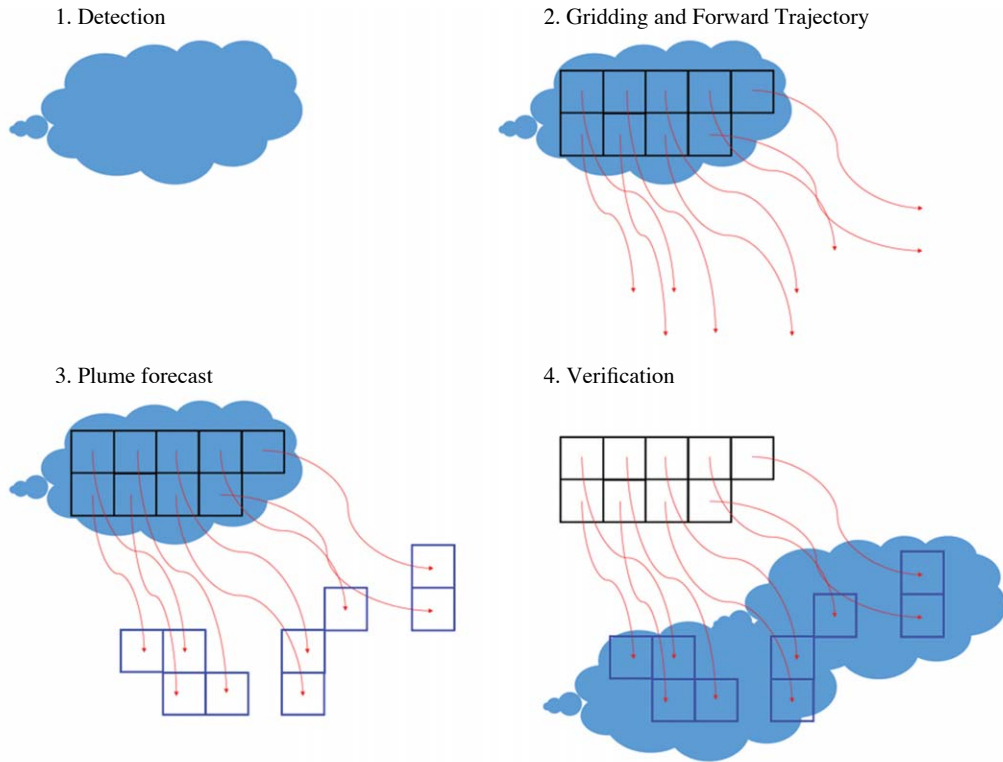


Fig. 6. Illustration of 24 hr Forecast for volcanic ash plume from satellite determined ash pixels and forward trajectory modelling.

실제 관측된 화산재 구름의 정보와 비교를 통하여 검증이 가능하다.

그림 7은 2010년 4월 15일 MODIS 화산재 탐지 결과(푸른점)와 예측된 화산재의 위치정보(붉은점)를 나타낸다. 주어진 현재시간의 위성관측자료로부터 24시간 이후의 전진케적 분석결과를 통하여 얻은 화산재의 예측정보를 통하여 화산재 구름의 영향 범위를 예측할 수 있다. 이 경우, Eyjafjallajökull 화산재 구름은 동남쪽으로 이동하여 24시간 이후에는 영국 동부와 네덜란드에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 화산재 영향 범위를 위성자료와 비교하면, 대상 지역에 대한 화산재 경보와 같은 부분에서 응용될 수 있을 것이다.

화산재 예측결과의 정확도 검증을 위하여, 예측된 화산재의 위치와 위성으로 관측된 화산재의 위치가 동일한 지점을 나타내는 격자의 수(N_{mat})와 전체 예측된 격자의 수(N_{for})의 비율 (Forecast to Measure-

ment Ratio; FMR)을 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$FMR = N_{mat} / N_{for} \times 100 (\%) \quad (4)$$

본 연구에서 Eyjafjallajökull 화산재 예측을 위하여 CSAT 기법을 사용하여 MODIS 영상자료를 분석한 결과, 전체 총 25일의 사례일 중에 대하여 FMR을 계산한 결과, 약 77.8%의 정확도를 가지는 것으로 확인하였다. 이러한 결과를 통하여 화산재 감시 및 예측에 있어 위성자료와 궤적분석자료의 통합 분석 기법이 매우 효율적으로 사용될 수 있는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

대규모 화산폭발로 인하여 대기중으로 배출된 화산재 구름의 모니터링은 화산재로 인한 자연 재해의

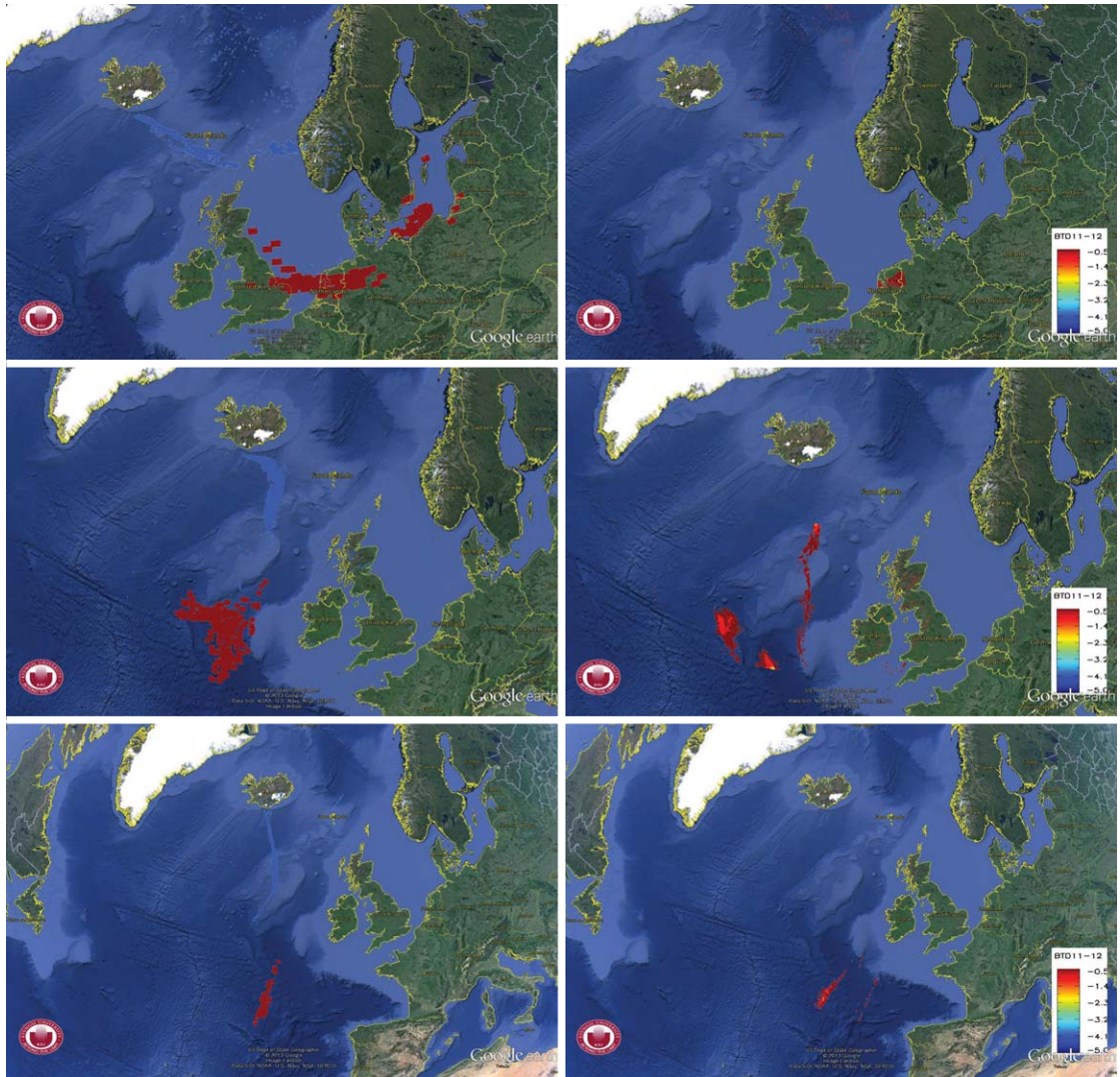


Fig. 7. (left) MODIS detected (blue area) and 24-hr forecasted (red area) volcanic ash plume and (right) next-day MODIS ash image for (top) 16 April 2010, (middle) 6 May 2010, and (bottom) 11 May 2010, respectively.

예방과 경감을 위하여 필수적이다. 인공위성 관측과 모델링 분석 자료는 현지 관측에 대한 어려움을 극복할 수 있으며, 준 실시간으로 광역 대기환경 감시에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 인공위성관측자료와 궤적분석 모델 자료를 이용하여 화산재를 효과적으로 모니터링 및 예측할 수 있는 CSTA 기법을 제안하였으며, 2010년에 폭발한 아이슬란드 Eyjafjallajökull 화산에 대하여 화산재 감시 및 예측 결과를 분석한 주

요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) MODIS 관측자료로부터 분석된 칼라합성영상과 화산재 탐지 결과의 분석을 통하여 각 시기별 Eyjafjallajökull 화산재의 분포 및 이동 특성 정보를 정량적, 정성적으로 획득하였다. MODIS 칼라합성 영상으로부터 자연색에 가까운 화산재 구름에 대한 가시적인 영상 정보를 확인하였으며, 적외채널 차 기법을 이용한 화산재 탐지 결과는 위성영상

- 에서 화산재탄의 영역을 표시할 수 있음으로서 화산재에 대한 공간 분포 정보를 획득할 수 있었다.
- (2) MODIS 관측자료로부터 산출된 화산재가 위치한 지점으로부터 24시간 동안의 전진 궤적모델 분석결과는 현재의 화산재 구름의 위치로부터 미래의 화산재 구름의 예상 이동경로 특성이 예측할 수 있었다.
- (3) 그리고, 화산재 구름의 이동 예측결과는 약 77.8%의 예측 정확도를 나타내었으며, 기존의 지점 관측 및 복잡한 모델링을 사용한 예측 방법의 한계를 극복하고 할 수 있는 가능성을 보였다.
- (4) 본 연구의 단점으로는 위성관측자료와 궤적분석에서 사용된 기상예측모델 간의 시간차이로서, 실제 기상조건이 모델링결과와 다른 양상을 보이게 되면 오차가 커진다는 점이다. 향후, 고해상도의 연속관측이 가능한 인공위성 자료의 사용이 가능하고, 기상예측모델의 정확도가 개선된다면, CSTA의 정확도를 보다 향상 할 수 있는 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 백두산 화산대응 기술개발 사업인 화산재 피해예측 기술개발[NEMA-백두산-2012-1-1]과제의 지원으로 이루어졌습니다.

References

- Derimian, Y., O. Dubovik, D. Tanre, 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. and G.D. Rolph (2003) HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- 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.
- 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 Eyjafjallajull eruption, *J. Geophys. Res.*, 117, D00U09, doi:10.1029/2011JD016788.
- Johnson, B., K. Turnbull, P. Brown, R. Burgess, J. Dorsey, A.J. Baran, H. Webster, J. Haywood, R. Cotton, Z. Ulanowski, E. Hesse, A. Woolley, and P. Rosenberg (2012) In situ observations of volcanic ash clouds from the FAAM aircraft during the eruption of Eyjafjallajökull in 2010, *J. Geophys. Res.*, 117, D00U24, doi:10.1029/2011JD016760.
- Lee, K.H. (2012) Aerosol direct radiative forcing by three dimensional observations from passive- and active-satellite sensors, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(2), 159-171, DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.159>. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.H. (2013a) Three dimensional monitoring of the Asian dust by the COMS/GOCI and CALIPSO satellites observation data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(2), 199-210, DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.199>. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.H. (2013b) Creating atmospheric scattering corrected true color image from the COMS/GOCI Data, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 16(1), 36-46, <http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2013.16.1.036>. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.-H. and E.-S. Jang (2014a) Sensitivity analysis of volcanic ash inherent optical properties to the remote sensed radiation, *Korean J. of Remote Sensing*, (in print). (in Korean with English abstract)
- Lee, K.-H. and E.-S. Jang (2014b) Monitoring of the volcanic ash using satellite observation and trajectory analysis model, *Korean J. of Remote Sensing*, (in print). (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), 85-862. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.H., M.S. Wong, S.-R. Chung, and E. Sohn (2014) Improved volcanic ash detection based on a hybrid reverse absorption technique, *Atmospheric Research*, 143, 31-41.
- Millington, S.C., R.W. Saunders, P.N. Francis, and H.N. Web-

- ster (2012) Simulated volcanic ash imagery: A method to compare NAME ash concentration forecasts with SEVIRI imagery for the Eyjafjallajökull eruption in 2010, *J. Geophys. Res.*, 117, D00U17, doi:10.1029/2011JD016770.
- Mishchenko, M.I., I.V. Geogdzhayev, W.B. Rossow, B. Cairns, B.E. Carlson, A.A. Lacis, L. Liu, and L.D. Travis (2007) Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend, *Science*, 315(1543), doi:10.1126/science.1136709.
- O'Dowd, C., D. Ceburnis, J. Ovadnevaite, G. Martucci, J. Bialek, C. Monahan, H. Berresheim, A. Vaishya, T. Grigas, S.G. Jennings, P. McVeigh, S. Varghese, R. Flanagan, D. Martin, E. Moran, K. Lambkin, T. Semmler, C. Perrino, and R. McGrath (2012) The Eyjafjallajökull ash plume-Part I: Physical, chemical and optical characteristics, *Atmos. Environ.*, 48, 129-142.
- Prata, A.J. (1989) Observations of volcanic ash clouds in the 10-12-micron window using AVHRR/2 Data, *Int. J. Remote Sens.*, 10, 751-761.
- Rolph, G.D. (2003) Real-time Environmental Applications and Display System (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Schumann, U., B. Weinzierl, O. Reitebuch, H. Schlager, A. Minikin, C. Forster, R. Baumann, T. Sailer, K. Graf, H. Mannstein, C. Voigt, S. Rahm, R. Simmet, M. Scheibe, M. Lichtenstern, P. Stock, H. Rüba, D. Schäuble, A. Tafferner, M. Rautenhaus, T. Gerz, H. Ziereis, M. Krautstrunk, C. Mallaun, J.-F. Gayet, K. Lieke, K. Kandler, M. Ebert, S. Weinbruch, A. Stohl, J. Gasteiger, S. Groß, V. Freudenthaler, M. Wiegner, A. Ansmann, M. Tesche, H. Olafsson, and K. Sturm (2011) Airborne observations of the Eyjafjalla volcano ash cloud over Europe during air space closure in April and May 2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2245-2279, doi:10.5194/acp-11-2245-2011.