위성영상으로 확인된 한반도 방향 화산재 확산 사례 분석

Analysis of Japanese Volcanic Ash Dispersion on the Korean Peninsula using Satellite Imagery

선종선* · 안재광** · 이하성*** · 황의홍**** · 이덕기*****

Sun, Jongsun*, Ahn, Jae-kwang**, Lee, Haseong***, Hwang, Eui-Hong****, and Lee, Duk Kee*****

Abstract

A volcanic eruption is a kind of global natural disaster that can occur suddenly and cause great damage to humankind. During the eruption, the magma causes fatal damage to life and property in areas near the volcano, and nearby countries are affected by the spread of volcanic ash, causing secondary damage due to air and soil pollution. Near the Korean peninsula, there exists an active volcano that can spread volcanic ash over long distances by erupting above Volcanic Explosivity Index (VEI) 4. Volcanoes in Japan have been known to cause considerable volcanic ash damage on the Korean Peninsula during eruption. Accordingly, the Korea Meteorological Administration is developing technology to predict and monitor volcanic ash spread using satellite images. However, despite the fact that empirical models for volcanic ash diffusion range prediction are used during volcanic eruptions, continuous improvement is needed for accurate information prediction. In this study, satellite images were analyzed not for the predicted distance of volcanic ash clouds, but for the actual distance of volcanic ash dispersion in cases where the volcanic ashes dispersed in the direction of the Korean peninsula. Of the 3,880 volcanoes that erupted in Japan over the last four years, 111 cases were identified where the height and spread distance of the volcanic ash that erupted toward the Korean Peninsula can be confirmed. In addition, the actual volcanic eruption cases and modeling results were analyzed to determine the extent of volcanic ash spread, and a hypothetical scenario was tested to quantify the direct damage of the volcanic ash. From the analysis of the volcanic ash spread through the virtual simulations, it was found that the height of the volcanic ash, the direction of the wind, and wind speed during volcanic eruption were important factors.

Key words : Volcano Eruption, Volcanic Ash, HYSPLIT, Thermal Infrared

요 지

화산 폭발은 예측이 어려운 자연재해 중 하나로 분화시 화산 인근 지역은 마그마로 인한 치명적인 인명, 재산 피해를 야기시키고, 주변 국가에는 화산재의 확산으로 대기 및 토양 오염에 의한 2차 피해가 발생한다. 한반도 주변에는 화산 분화지수(VEI) 4 이상의 폭발로 장거리 화산재 확산이 가능한 활화산이 존재한다. 이 중 일본에 있는 화산이 갑작스럽게 분화할 경우 항공, 인체 등 한반도에까지 화산재로 인한 영향을 끼칠 수 있다. 이에 기상청에서는 위성영상을 활용한 화산재 확산 예측 및 감시 기술을 개발 중이다. 국내의 경우 화산 분화시 화산재 확산범위 예측을 위한 경험적 모델이 활용되고 있으나, 정확한 예측 정보 생산을 위한 지속적인 개선이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 일본에서 분화한 화산 중 한반도 방향으로 화산재가 확산된 사례를 수집하고, 위성영상을 이용하여 실제 확산 거리를 분석하였다. 최근 4년 동안 일본에서 분화한 화산 3,880건 중 한반도 방향으로 분화한 분연주 높이와 확산 거리가 확인 가능한 자료는 111건으로 집계되었다. 추가로 실제 화산 분화 사례를 시뮬레이션하여 수치해석적 분석 가능성을 검토하였다.

핵심용어 : 화산 분화, 화산재, 화산재 확산모델, 열적외선

*교신저자, 정회원, 기상청 지진화산연구과 연구원(Tel: +82-2-2181-0073, Fax: +82-2-841-7664, E-mail: sjsplus@korea.com)

Corresponding Author, Member, Researcher, Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration

**기상청 지진화산연구과 연구사

Researcher, Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration

***기상청 지진화산연구과 연구사

Researcher, Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration

****기상청 지진화산연구과 연구관

Senior Researcher, Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration

*****기상청 지진화산연구과 연구관

Senior Researcher, Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration

1. 서 론

한반도 주변에는 전조 증상 없이 분화지수(Volcanic Explosivity Index, 이하 VEI) 4 이상으로 폭발 가능한 활화산들이 존재한다. 예를 들어 일본 남부지방 규슈의 아소산과 기리시마야마(시라네)와 같이 한반도 반경 400 km 내에 위치하는 화산이 분화한다면 기류에 의해 화산재가 운반되어 사회 전반적인 측면에 영향을 받을 수 있다(Chang and Yun, 2017). 화산 분화 시에는 이산화황, 이산화탄소, 수증기 등의 화산가스와 화산분출물이 함께 분출되어 지표면에 퇴적되거나 대기에 방출된다. 화산 분출로 인한 화산재는 수 킬로미터 이상 퍼져 나가 직접적인 피해를 야기시킨다. 인체에는 화산재 0.1 mm의 피해에도 급성기도 질환이 증가하고 기존 천식 환자들의 증상을 악화시킬 수 있다(Shimizu et al., 2007). 0.5 mm 이상 화산재가 퇴적된다면 도로 교통이 마비되고, 토양 오염으로 1년간 벼농사의 추수가 불가능해진다(Wilson et al., 2011). 1 mm 이상의 화산재로 식생의 잎을 덮으면 광합성이 이루어지지 않고, 화산재 입자는 2차 이동으로 여러 겹의 마모 피해를 준다. 폐수처리장과 같은 산업시설의 고장을 유발할 수 있다(Wilson et al., 2014). 0~10 mm의 얇은 화산재의 투과성은 토양가스와 물의 교환에 영향을 줄 수 있는데, 화산재의 교결작용으로 토양의 수분 흡수와 가스의 교환을 감소시키고 토양의 복사에너지를 감소시켜 토양온도가 낮아질 수 있다(Craig et al., 2016). 하지만 기존 대부분의 연구는 화산재 확산 경로 예측(Miller and Casadevall, 2000)과 같은 대기 모델에 집중되어 있을 뿐 이로 인한 지표면에 퇴적된 화산분출물이나 실시간 피해 관측 등의 2차 피해 관련 연구는 미비한 실정이다(Sun et al., 2018).

화산재는 위성영상의 가시광선(Visible), 적외선(Infrared) 등 여러 파장 대역에서 탐지될 수 있지만, 파장 대역이 짧은 자외선(Ultraviolet) 영역은 지표 반사도가 다른 영역에 비해 작고 공간 해상도가 상대적으로 낮아 활용하기 어렵다(Choi et al., 2017). 이 외에도 근적외선(Near-Infrared) 파장 대역을 사용하여 밴드들의 차분 값으로 화산재 구름을 탐지하는 방안도 있지만, 고정된 임계값 방법을 사용하기에는 모든 시간대나 구름 종류에 따라 다르게 성립되어 한계점이 있다(Di Bello et al., 2004). 하지만 카메라와 지진계 같은 장비를 활용하여 실시간 관측이 불가능한 국내의 경우 인공위성을 이용하는 것이 가장 효율적인 대안이 될 수 있다.

이번 연구에서는 화산 암석의 화학성분 중의 하나인 규산염 성분을 흡수하는 특징이 있는 적외선 파장 대역을 활용하여 화산재의 이동 방향을 구분할 수 있는지 확인하였다. 또한, RGB 조합 영상으로 분석 가능한 가시광선 파장 대역을 함께 활용하였다. 이는 한반도 주변 활화산이 분화하였을 때 화산재 이동 방향의 통계 분석 결과로 우리나라 화산재 피해 확산 여부에 대한 기초 자료로 활용할 수 있다.

2. 자료수집 및 연구방법

2.1 화산재 주의보 전문

일본에서 분화하는 화산재의 확산 방향에 따라 한반도에 영향을 미칠 수 있는지 확인하기 위해 도쿄 화산재 주의보 센터(Volcanic Ash Advisories Center, 이하 VAAC)에서 발표하는 화산재 주의보 전문을 활용하였다. VAAC는 국제 민간 항공기구(International Civil Aviation Organization, 이하 ICAO)를 따른 정보로 Fig 1과 같이 동아시아 지역군에서 화산이 분화하면 화산 이름(고유번호), 전문 발표번호, 분화 국가, 화산의 고도, 유효시간, 관측 위성 센서, 그 외 분화 상세정보(분화일, 분연주 높이 등), 관측 시간, 화산재 예측 결과 및 다음 전문 예상 시간을 발표한다.

Fig. 1. Volcanic Ash Advisory Centers-Areas of Responsibility (JMA)

일본에서 분화된 화산 중 전문을 통해 한반도 방향으로 화산재가 분화한 사례를 조사하였다. 2015년부터 2018년까지 VAAC에서 화산 분화로 총 3,880건의 전문이 발표되었으며 이 중 한반도 방향인 북, 북동, 북서, 서, 남서 방향으로 화산재가 확산된 사례는 271건으로 집계되었다. VAAC 전문에는 화산재 예측 결과를 제외하고 화산재의 실제 확산 거리가 명시되어 있지 않아 이를 확인하기 위해 위성영상을 분석하였다.

2.2 위성영상 활용

일본 기상청(Japan Meteorological Agency, 이하 JMA)에서 2014년 10월 발사한 차세대 정지궤도 기상위성 히마와리 8호(Himawari-8)는 기존의 30분 단위의 전 지구 위성 영상 갱신을 10분으로 단축하였으며 일본 주변의 특정 지역은 2분 30초 간격으로 갱신이 가능해졌다. 위성영상의 공간 해상도가 0.5~2 km로 향상되었으며 관측 센서를 추가하여 가시광선 영상을 컬러로 관측할 수 있도록 개선되었다(Table 1). 또한, 시간별 기상상태에 따라 위성영상을 선택할 수 있어 화산 분화 후 관측이 쉬우며, 향상된 시간 해상도로 정기적인 관측 자료를 이용할 수 있다.

Table 1. Characteristics of Himawari-8 / AHI Spectral Bands (Bessho et al., 2016)

	Band	Wavelength (μm)	Spatial resolution (km)
Visible	1	0.47	1
	2	0.51	
	3	0.64	0.5
Near-infrared	4	0.86	1
	5	1.6	
Infrared	6	2.3	2
	7	3.9	
	8	6.2	
	9	6.9	
	10	7.3	
	11	8.6	
	12	9.6	
	13	10.4	
	14	11.2	
	15	12.4	
	16	13.3	

이 연구는 일본 화산재의 국내영향 분석을 위한 사례들을 대상으로 하며, 일본에서 한반도 방향으로 확산된 화산재의 확산모델 결과를 위성영상 분석을 통해 검증할 수 있다. 화산 분화 시 발표되는 VAAC의 화산재 주의보 전문을 기반으로 동일한 지역을 촬영한 위성영상으로 분석하여 화산재의 이동 방향을 확인하였다.

VAAC에서 발표한 분화 시간에 맞춰 위성영상을 육안으로 확인할 수 있는데, 화산재가 사방으로 확산되어 열리지거나 화산재 분화량이 적을 시에는 관측이 어렵고 주로 구름이 없는 기상상태에서만 분석할 수 있다. 일본에서 한반도 방향으로 화산재가 분화한 사례 271건 중 화산재의 이동 경로를 영상으로 육안 분석 가능한 사례는 총 111건으로 확인되었다(Table 2).

Table 2. Possible Case Analyzed the Diffusion Distance of the Volcanic Ash by Satellite Image

Volcano Name	Eruption Num.
ASO	1
Kirishimayama	1
Kuchinoerabujima	1
Sakurajima	91
Suwanosejima	17

2.3 화산재 확산 예측 모델

전 세계적으로 화산재 피해에 대응하는 체계를 갖추기 위해 화산재 확산모델을 통한 예측 정보를 구축하고 있다. 현재

기상청에서는 화산재 피해를 대비하여 VAAC에서 발표하는 전문과 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, 이하 NOAA)과 호주 기상청에서 개발한 HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT) 모델 결과를 바탕으로 화산정보, 화산재주의보, 화산재 경보를 발표한다. HYSPLIT 모델은 Lagrangian 접근 법과 Eulerian 방법론이 결합된 입자 확산 수치 모델로 방사 성 물질의 운송, 분산, 산발 연기, 바람에 날리는 먼지, 다양하게 이동하는 오염물질 및 화산재 등의 시뮬레이션을 계산하기 위한 시스템이다(Stein et al., 2015). 기상자료는 기상청에서 사용하고 있는 Unified Model (UM)의 기상장을 NOAA에서 HYSPLIT 모델에 사용하는 포맷인 ARL로 변환하여 사용한다. 화산재 확산모델은 화산의 위치, 고도, 분연주 높이, 분화 시간, 화산재 분출률(kg/s) 등에 관한 초기 입력값 정보가 필요하다. 여기서 화산의 분출량 정보는 화산재의 분연주 높이와 분출률의 경험적 상관관계를 이용하여 계산한다. 기존의 대규모 분화 사례뿐만 아니라 비교적 조사가 잘 이루어진 2000년대 이후의 연구논문을 바탕으로 도출된 경험적 상관관계식 Eq. (1)을 활용하였다(KMA, 2018).

$$f(x) = 7.526 \times x^{0.2505} \quad (R^2 = 0.7531) \quad (1)$$

여기서, x 는 화산재 분연주 높이(Ash Height), $f(x)$ 는 분출량(Mass Eruption Rate, Log Scale)이다. 관계식은 화산재 확산모델 구동 시 Fig. 2와 같이 입력값으로 사용된다. 현재 6시간 간격 기상장을 활용하고 있으며, 화산 분화 기간은 최소 1시간에서 최대 48시간까지 입력할 수 있다.

Fig. 2. Volcanic Ash Dispersion Simulation Using Hysplit Mode from Korea Meteorological Administration (KMA)

3. 위성영상 분석 결과

최근 4년간 일본에서 분화한 화산재 확산 방향에 따른 분석 결과 VAAC 기준 일본에서 분화한 화산 3,880건 중 한반도 방향 건수는 271건, 분연주 높이 및 이동 방향과 속도, 확산 거리를 확인 가능한 자료는 111건으로 집계되었다. Fig. 3에는 분화된 방향별 속성값을 적용하였다. 북동 방향이 22건으로 가장 많이 나타났으며, 북 방향 17건, 북서 방향 14건, 서 방향 14건, 그리고 가장 적게 나타난 방향이

남서 방향(10건)이다. 2015년 1월부터 2018년 12월까지 한반도 방향으로 분화한 화산들의 평균 분연주 높이는 2,700 m이고, 평균 확산 거리는 24.7 km이다. 분연주 높이가 가장 높은 분화는 사쿠라지마(2018년 7월 16일) 사례로 VAAC 전문에 6,000 m 분연주 높이로 분화하였으며, 위성영상으로 서 방향 5,000 m까지 확산된 것으로 확인되었다(Fig. 4). 4년 동안 확산 거리가 가장 큰 경우는 분연주 높이 4,500 m로 분화한 사쿠라지마(2017년 5월 29일) 분화 사례로 화산재의 확산 거리는 남서 방향으로 280 km까지 확인되었다.

(a) Volcanic ash height according to the direction of diffusion (b) Diffusion distance according to the volcanic ash direction
Fig. 3. The Eruption Direction of the Volcanoes Erupted Toward the Korea Peninsular on VAAC

(a) Himawari image of thermal infrared wavelength band 14 on May 29, 2017, 02:50 (UTC)

(b) Himawari image of thermal infrared wavelength band 14 on May 29, 2017, 03:10 (UTC)

(c) Himawari image of thermal infrared wavelength band 14 on May 29, 2017, 03:20 (UTC)

(d) COMS, GOCI level 2 RGB 07:30 (UTC)

Fig. 4. Measurement of the Direction of Volcanic Ash Spread due to SAKURAJIMA Eruption on May 29, 2017

화산재 방향이 계절적 영향을 받는지 확인하기 위해 VAAC 전문을 기준으로 한반도 방향으로 분화한 모든 경우인 271건에 대한 월별 분포도를 Fig. 5에 나타내었다. 4월과 5월이 64건, 51건으로 가장 많았고 1월과 12월이 4건, 0건으로 가장 적게 나타났다. 각 해의 분화 건수는 2018년 총 198건의 분화로 가장 많았고 2015년에는 27건, 2016년에는 21건, 2017년에는 25건으로 2018년도에 비해 적게 분화하였다. 위성영상으로 확인된 범위 외에 VAAC에서 발표된 전문을 기준으로 2015년부터 2017년까지의 3년간 분화 건과 비교하면 2018년 분화 건수는 150회 이상 증가하였다.

Fig. 5. The Monthly Eruption Numbers of Japanese Volcanic Ash Spread in the Direction of the Korean Peninsular from 2015 to 2018

최근 행정안전부는 활동성과 폭발성 높은 규장질 암석으로 구성된 화산, 과거 화산폭발지수(VEI) 4 이상으로 분화한 이력이 있는 경우, 그리고 수도권 1,500 km 내에 있는 27개(국내 제외)의 화산을 국내영향 가능한 화산으로 선정한 바 있다. 현재 기상청에서 발표하는 화산재 전문 기준은 지정된 일본의 27개 활화산이 분연주 높이 2,000 m 이상이고, 우리나라 방향으로 분화했을 때 한반도 영향성을 논의한다. 하지만 화산정보는 「국내에 영향 가능성이 예상되는 경우」로 발표

되는데 주변 활화산의 화산재 확산 및 피해에 관한 기준점이 모호한 한계점이 존재한다(Han et al., 2019). 분연주 높이 2,000 m 이상의 화산 분화 횟수는 활동성 있는 사쿠라지마, 스와노세지마와 같은 활화산에게는 빈번하며, 한반도 방향이라도 영향 가능성이 있다고 확신할 수 없는 실정이다. 따라서, 화산 분화 시 분연주 높이와 확산 방향뿐만 아니라 확산 거리, 분연주 이동 풍속 등 기상 환경이 종합적으로 간주하여야 한다(Mackie et al., 2016).

4. 화산재 확산 시뮬레이션

앞서 조사된 사쿠라지마 분화 사례(2017.5.29)를 화산재 확산모델로 구동하였다. 분화 지속시간은 최소값인 1시간, VAAC 전문에 따라 분연주 높이는 4,200 m, 분화 시간은 03:30 (UTC)으로 입력하였다. 그 결과는 Fig. 6(a)와 같이 화산재의 농도는 1,000 μg 이하로 측정되었고 6시간 후에는 사쿠라지마 화산에서 약 190 km 까지 확산된 결과가 산출되었다. 이는 위성영상으로 확인한 분석 결과와 같은 방향으로 분화를 하였고 확산 거리까지 유사한 것으로 나타났다. 위성영상에서 관측된 280 km의 결과를 고려하면 평균 기상장을 사용한 한계, 분화 지속시간에 의한 차이 등에 의해서 시뮬레이션에 의한 예측 결과는 차이가 있을 수 있다. Fig. 6(b)는 분화 지속시간을 2시간으로 기상 모델링을 수행한 결과로 동일한 분화 건에 대해 같은 분연주 높이지만 분화 지속 시간만 변경되어도 평균 기상장의 시간대가 다르고, 화산재의 확산 거리가 400 km 까지 모의되었다. 따라서, 화산재 확산의 가상 시뮬레이션을 통한 화산재 확산 가능성은 화산 분연주 높이와 화산 분화시 풍향 및 풍속설정이 중요한 것으로 나타났다. 실제 분화한 사례를 기반으로 화산재 확산모델 가상 시나리오를 구동하여 우리나라에 피해를 줄 수 있는 기준을 확인하였다. 일본 남부지역의 규슈 중앙부 구마모토현에 위치한 아소산 (33°43'N, 131°05'E) 분화 사례를 적용하였다. 2019년 8월

Fig. 6. HYSPLIT Model Result on May 29, 2017

Fig. 7. Hypothetical Scenario Result of Volcanic Ash Disposition (mg/m^3) with Dispersion Model Developed by NOAA (HYSPLIT) (a) from August 5, 2019 18:00 to 8.6 00:00 (b) from August 6, 2019 18:00 to 8.6 06:00 (c) from August 5, 2019 18:00 to 8.6 12:00 (d) from August 5, 2019 18:00 to 8.6 18:00

5일 VAAC 전문 기준 분연주 높이 5,400 m, 분화 방향은 분화구 기준 서쪽으로 분화하였으며 실질적 국내에 보고된 피해사항은 없었다. 이를 분연주 높이 16,000 m, 분화 기간을 24시간으로 변경하여 가상 시나리오를 대입한 결과 Fig. 7과 같이 전국에 걸쳐 약 $1\sim 10 \text{ g}/\text{m}^3$ 의 화산재 퇴적량이 산출되었다. 특히, 경상북도와 강원도 일부 지역에는 최대 $100 \text{ g}/\text{m}^3$ 이상의 누적량이 확인되었다. 이는 약 0.1 mm 두께로 계산 가능하며, 보건 분야에서 기관지 관련 증상이 악화될 수 있는 기준이다(Han et al., 2019).

현재 활용되는 HYSPLIT 기반 화산재 확산모델은 6시간 평균의 기상장을 활용하고 위치 정보는 소수점 둘째자리까지 표기된다. 화산재의 이동 및 침적에 대한 정확한 평가는 기상장의 정확도와 매우 밀접하게 관계된다(Lee et al., 2014). 과거 입자 확산 모델인 HYPLIT 모델과 PUFF 수치 모형 간의 비교에서 입자의 확산 분포가 유사한 것으로 확인된 결과를 기반으로 추후에는 화산재의 농도와 퇴적을 정량적으로 평가할 수 있는 연구가 필요하다(Lee et al., 2016).

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 일본에서 분화한 실제 사례를 바탕으로

VAAC 전문에서 방향 정보, 분연주 높이 정보와 2분 30초 또는 10분 간격으로 촬영된 열적외선 히마와리 위성영상으로 화산재의 확산이 관측되는 경우를 종합하여 분석하고, 시뮬레이션의 활용 가능성을 검토하였다. 이를 통해 얻어진 결과는 아래와 같다.

- (1) 과거 사례를 통해 한반도 방향으로 화산재가 이동할 확률이 높은 시기는 4월이며, 최근 분화 건을 통해 사쿠라지마의 화산에서 영향을 줄 확률이 높은 것으로 나타났다. 따라서, 봄철 사쿠라지마 화산에 대한 집중적인 감시가 요구되는 바이다. 또한, 한반도 남해 지역 반경 300 km 내 위치한 아소산의 화산재 확산 가상 시나리오 결과 분연주 높이가 16 km로 분화시 우리나라에 전반적 피해를 줄 수 있는 것으로 산출되었다.
- (2) 기상장의 해상도와 관측 영역을 확대하면 실시간 분연주 높이에 따른 확산 시뮬레이션 결과를 향상시킬 수 있다. 따라서, 향상된 화산재 확산모델과 VAAC 전문, 위성영상 관측 방법을 활용한다면 기상 환경과 인체, 사회까지 전반적으로 국내에 미치는 영향에 대비할 수 있다.
- (3) 해외 사례에 대한 기준뿐만 아니라 국내 특성에 맞는

화산재 확산 방향과 퇴적 농도에 따른 공학적 실험을 바탕으로 화산재 피해 재해도를 구축하면 한반도에 위치한 활화산인 백두산, 울릉도에도 적용하여 화산 경보 시스템을 구축하고 화산 재난에 대비할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 「지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발 과제(과제번호: 135002988)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., et al. (2016). An introduction to Himawari-8/9: Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*, Vol. 94, No. 2, pp. 151-183.
- Chang, C., and Yun, S.H. (2017). The numerical simulation of volcanic ash dispersion at Aso Caldera volcano using Ash3D model. *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 38, No. 2, pp. 115-128.
- Choi, Y.H., Lee, W.J., Park, S.C., Sun, J., and Lee, D.K. (2017). Retrieving volcanic ash information using COMS satellite (MI) and Landsat-8 (OLI, TIRS) satellite imagery: A case study of Sakurajima volcano. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 5-1, pp. 587-598.
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., et al. (2016). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, Vol. 82, No. 2, pp. 1167-1229.
- Di Bello, G., Filizzola, C., Lacava, T., Marchese, F., Pergola, N., Pietrapertosa, C., et al. (2004). Robust satellite techniques for volcanic and seismic hazards monitoring. *Annals of Geophysics*, Vol. 47, No. 1. doi:10.4401/ag-3258
- Han, H.G., Baek, W.K., Jung, H.S., Kim, M., and Lee, M. (2019). A study on the volcanic ash damage sector selection based on the analysis of overseas cases and domestic spatial information. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 35, No. 5-1, pp. 751-761.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2018). *Research on application and support for the earthquake and volcanic service (I): Improvement of volcanic eruption rate for ash diffusion model*. Report No. 11-1360000-001525-10, pp. 88-95.
- Lee, S.H., Jang, E.S., and Yun, S.H. (2014). Numerical simulation of volcanic ash dispersion and deposition during 2011 eruption of Mt. Kirishima. *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 35, No. 4, pp. 237-248.
- Lee, S., Hwang, K.K., Won, C.H., and Lee, J.Y. (2016). Numerical analysis of volcanic ash dispersion using lagrangian model: Part 1. Case studies on historic eruption. *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 20, No. 1, pp. 11-18.
- Mackie, S., Cashman, K., Ricketts, H., Rust, A., and Watson, M. (Eds.). (2016). *Volcanic ash: Hazard observation*. Elsevier.
- Miller, T.P., and Casadevall, T.J. (2000). Volcanic ash hazards to Aviation. In H. Sigurdsson, B. Houghton, H. Rymer, J. Stix, and S. McNutt (Eds.), *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 915-930). Academic Press.
- Shimizu, Y., Dobashi, K., Hisada, T., Ono, A., Todokoro, M., Iijima, H., et al. (2007). Acute impact of volcanic ash on asthma symptoms and treatment. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, Vol. 20, No. 2 (suppl.), pp. 9-14.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 96, No. 12, pp. 2059-2077.
- Sun, J., Lee, W.J., Park, S.C., and Lee, D.K. (2018). Detection for region of volcanic ash fall deposits using NIR channels of the GOCI. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, No. 6-4, pp. 1519-1529.
- Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., and Cole, J.W. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 286, pp. 148-182.
- Wilson, T., Cole, J., Cronin, S., Stewart, C., and Johnston, D. (2011). Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia: Lessons for recovery. *Natural Hazards*, Vol. 57, No. 2, pp. 185-212.

Received	January 8, 2020
Revised	January 13, 2020
Accepted	May 15, 2020