

## 한국형 수치예보모델 기반의 화산재 확산 예측시스템 구축 및 사례검증

이우정\* · 강미선 · 신승숙 · 강현석

국립기상과학원 예보연구부

(접수일: 2024년 2월 2일, 수정일: 2024년 2월 16일, 게재확정일: 2024년 2월 23일)

### A Case Study of the Forecasting Volcanic Ash Dispersion Using Korea Integrated Model-based HYSPLIT

Woojeong Lee\*, Misun Kang, Seungsook Shin, and Hyun-Suk Kang

Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 2 February 2024; revised 16 February 2024; accepted 23 February 2024)

**Abstract** The Korea Integrated Model (KIM)-based real-time volcanic ash dispersion prediction system, which employs the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model, has been developed to quantitatively predict volcanic ash dispersion in East Asia and the Northwest Pacific airspace. This system, known as KIM-HYSPLIT, automatically generates forecasts for the vertical and horizontal spread of volcanic ash up to 72 hours. These forecasts are initiated upon the receipt of a Volcanic Ash Advisory (VAA) from the Tokyo Volcanic Ash Advisory Center by the server at the Korea Meteorological Administration (KMA). This system equips KMA forecasters with diverse volcanic ash prediction information, complemented by the Unified Model (UM)-based HYSPLIT (UM-HYSPLIT) system. Extensive experiments have been conducted using KIM-HYSPLIT across 128 different volcanic scenarios, along with qualitative comparisons with UM-HYSPLIT. The results indicate that the ash direction predictions from KIM-HYSPLIT are consistent with those from UM-HYSPLIT. However, there are slight differences in the horizontal extent and movement speed of the volcanic ash. Additionally, quantitative verifications of the KIM-HYSPLIT forecasts have been performed, including threat score evaluations, based on recent eruption cases. On average, the KIM-HYSPLIT forecasts for 6 and 12 hours show better quantitative alignment with the VAA forecasts compared to UM-HYSPLIT. Nevertheless, both models tend to predict a broader horizontal spread of the ash cloud than indicated in the VAA forecasts, particularly noticeable in the 6-hour forecast period.

**Key words:** Korea integrated model, HYSPLIT model, Volcanic ash, Dispersion model

## 1. 서 론

2010년 4월 14일 아이슬란드 에이야프랴들라이외퀴들 (Eyjafjallajökull) 화산 폭발은 화산 분출물로 인한 사

회 경제적 피해를 보여준 대표적인 사례이다. 이 폭발로 유럽 하늘에 확산된 화산재는 유럽 항공 교통에 전례 없는 혼란을 발생시켰으며, 항공산업에 하루 약 2억 5천만달러의 손실을 일으켰다(Gudmundsson et al., 2010). 최근 2022년 1월 남태평양 통가 섬의 헝가 (Hunga) 화산의 대규모 폭발은 대규모 쓰나미를 일으켜 3명의 사망자와 수 백 채의 가옥 파손 등 인명과 재산피해를 발생시켰다. 이 쓰나미는 바다 건너 페루 해안까지 덮쳐 2명의 사망자가 발생하였으며, 화산 분

\*Corresponding Author: Woojeong Lee, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6567, Fax: +82-64-780-6514  
E-mail: lwj@korea.kr

화 지점에서 약 8,000 km 떨어진 일본에서는 최대 1.2 m의 파도가 관측되어 쓰나미 경보가 발령되기도 하였다(Dogan et al., 2023). 이 사례를 통해 화산 분화가 지구의 대기뿐만 아니라 해양에까지 거대한 영향을 미칠 수 있으며, 그로 인해 예상치 못한 위험이 인류에 닥칠 수 있음을 보여주었다(Chen, 2023). 화산 분화로 인해 대기중으로 방출되는 엄청난 양의 입자들과 가스들은 지구의 기후변화에도 영향을 미친다. 화산에서 배출된 이산화탄소는 지구 온난화를 일으킬 수 있으며(Cole-Dai, 2010; Timmreck, 2012; Marshall et al., 2022), 이산화황 같은 화산 가스는 상층대기에서 황산 에어로졸 방울(aerosol droplets)로 변환되는데 이는 태양광을 차단하는 역할을 하기 때문에 태양에너지가 지구표면에 도달하지 못해 지구 냉각을 유발한다(Blake, 2003).

전 세계에는 지난 10,000년 동안 크고 작게 폭발한 약 1,500개의 활화산이 있으며, 이 활화산의 반경 100 km 이내에는 전 세계적으로 8억 명이 살고 있기 때문에(Chen, 2023), 화산활동에 대한 감시와 화산 분출시, 정확한 화산재 이동 예측 및 정보 제공이 필요하다. 화산재주의보센터(Volcanic Ash Advisory Center, VAAC)는 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization)의 국제항공화산감시 일환으로 1990년대 중반에 설립되었으며, 화산 분출에 따른 대기 중 화산재의 수평 및 수직적 확산과 예상 이동에 관련한 주의보 정보를 제공하는 것을 주요 목적으로 한다(Guffanti et al., 2005; Lechner et al., 2018; Engwell et al., 2021). 전 세계에는 영역별로 9개의 VAAC가 있으며, 우리나라가 위치한 동아시아와 북서태평양 영공의 화산재 이동 감시는 일본기상청 도쿄 VAAC에서 담당하고 있다(Shirato, 2013; Sato et al., 2018). 도쿄 VAAC에서는 24시간 관할 영역내의 화산을 감시하고, 위성으로부터 화산재 구름이 관측되거나 화산 관측소에서 화산 분화 정보가 수신된 경우, 기상관측소에 화산재 주의보(Volcanic Ash Advisories, VAA)를 발령한다. VAA에는 향후 최대 +18시간까지 6시간 간격으로 화산재 분포의 예측정보가 포함되어 있으며, 그 내용을 시각화하여 그림으로도 정보를 제공한다(Shirato, 2013; Igarashi et al., 2018).

우리나라 기상청에서는 도쿄 VAAC 구역 내에 위치한 화산 뿐만 아니라, 원거리 화산이라 하더라도 화산 분화로 국내에 영향 가능성이 예상되거나, 전지구적 대규모 화산 분화로 국민들에게 관련 정보를 알릴 필요가 있는 경우 화산 정보를 발표한다(Sun et al., 2020; KMA, 2024). 또한, 우리나라에 화산재로 인한 피해가 예상되는 경우 화산재 주의보를, 심각한 피해가 예상되는 경우 화산재 경보를 발표한다(KMA, 2023a). 기상청에서 발표되는 화산재 주의보와 경보에

는 화산 이름, 분화 시각, 분연주 높이 등의 기본 정보뿐만 아니라 화산재 확산 예측 모델 기반의 화산재 확산 방향과 속도 정보가 포함된다(Lee et al., 2014).

기상청은 한반도 주변 주요화산 분화 시 우리나라의 화산재 영향 여부에 대한 정량적 예측정보 생산을 위해 화산재 확산 예측모델을 개발하여 운영하고 있다. 기상청에서 사용하는 화산재 확산 예측 모델은 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 대기자원연구소(Air Resources Laboratory, ARL)에서 개발한 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 기반으로 한다. HYSPLIT은 가장 광범위하게 사용되는 대기 수송 및 확산 모델 중 하나로 오일러리안 방법과 라그랑지안 방법을 결합하여(hybrid) 공기덩이의 이류와 확산은 라그랑지안 방법으로, 오염물질농도는 오일러리안 방법으로 계산한다(Stein et al., 2015). 모델에 사용되는 기상예측자료는 영국기상청 통합모델(Unified Model, UM)을 기반한 기상청 전지구수치예보시스템(UM N1280 L70)을 이용한다. 기상청은 2016년 UM 기상자료를 이용한 화산재 확산 예측 시스템을 구축하였으며, 시험운영 과정을 거쳐 2020년부터 기상청 지진화산정보시스템에서 현업 운영하고 있다. 이 시스템은 도쿄 VAAC의 VAA에 포함되어있는 화산 분출 정보(화산 위치, 분출 시각 등)를 이용하여 화산 분출 시각으로부터 72시간까지 3시간 간격으로 화산재의 수평 및 수직 확산 평균 농도와 침적량을 계산하고, 그 결과를 이미지로 자동 생산한다.

한국형수치예보모델개발사업단은 영국에서 도입된 UM 기반 기상청 현업 전지구수치모델을 대체하는 것을 최종 목표로 한반도 고유의 기상특성에 맞는 전지구수치예보모델의 독자적인 개발을 위해 2011년 설립되었다(Hong et al., 2018; Han et al., 2020). 설립 이후 9년간 전처리, 자료동화, 모델 역학, 물리과정, 후처리 등 역학모델의 구성요소 개발을 통해 새로운 전지구수치예보시스템인 한국형수치예보시스템(Korea Integrated Model, KIM)이 탄생하게 되었고, KIM은 운용환경에 적합한 여러 구성 요소 개선 후, 2020년 4월부터 기상청 전지구수치예측시스템으로 UM과 함께 현업으로 병행 운영되고 있다(Kwon, 2023). KIM의 500 hPa 지위고도의 아노말리 상관관계는 UM에 비해 95% 이상 높은 스킨을 보이며(Hong et al., 2018), 전세계적 모델과 비교하였을 때 5~8위 사이를 오간다(Lee et al., 2023). 전 세계 모델 상위권 진입을 위하여, 모델 진단을 기반으로 한 자료동화, 물리패키지 개선 연구 등 KIM의 정확도를 향상시키기 위한 노력이 이루어지고 있다(Kwon, 2023).

수치모델의 결정론적 예측 한계를 극복하기 위해, 서로 다른 초기 조건을 이용하여 수치 적분을 수행하

는 앙상블 기법이 수치예측에 널리 활용되고 있으며, 동일 해상도의 단일 예보보다 예측 성능이 더 좋은 것으로 알려져 있다(Zhu, 2005; Murray, 2018). 화산재 확산 예측에 있어서도 VAAC의 화산 분출 정보를 기반으로 다양한 초기 기상입력자료를 이용한 모델 수행은 화산재 확산모델에 불확실성을 감소시켜 모델 성능 향상에 기여할 수 있다(Dare et al., 2016; Hurst and Davis, 2017; Beckett et al., 2020; Crawford et al., 2022).

본 연구에서는 단일모델 앙상블 화산재 확산 예측 시스템 기반 구축과 다양한 기상자료를 활용을 목적으로 개발된 KIM 기반 화산재 확산 예측 시스템(KIM-HYSPLIT)을 소개하고, 동아시아 화산 분출 사례에 대하여 기존에 현업 운영 중인 UM 기반 화산재 확산 예측 시스템(UM-HYSPLIT)과 결과를 비교하고자 한다. 제2장에서는 KIM 기상자료를 확산 모델 입력 형식으로 변환하는 체계와 이를 이용하여 구축한 실시간 화산재 확산 예측 모델을 기술하였다. 제3장에서는 동아시아 화산 분출 사례를 이용하여 KIM-HYSPLIT의 실시간 수행테스트를 하였으며 UM-HYSPLIT 결과와 정성적으로 비교하였다. 또한, 정량적 검증을 위

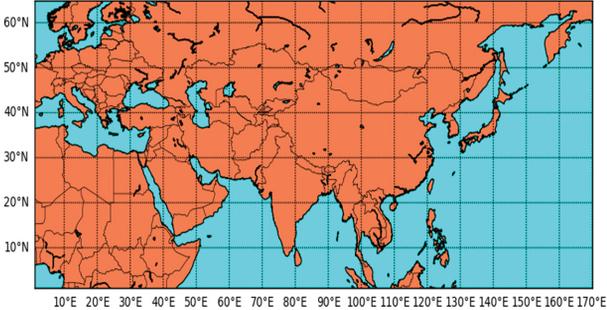
해 최근 분출 사례를 이용하여 통계 값을 계산하고 KIM-HYSPLIT과 UM-HYSPLIT을 비교 검증하였다. 제4장에서는 본 기술노트의 내용을 요약하고, 향후 고려해야 할 사항들에 대해 토의하였다.

## 2. 방 법

### 2.1 확산모델 입력용 KIM 기상장 자동 변환체계 구축

HYSPLIT 모델 수행을 위해서는 기상입력자료를 확산모델 입력형식인 ARL (Air Resources Laboratory) 으로의 변환이 필요하다. HYSPLIT 모델을 개발한 NOAA에서는 사용자들이 전세계에서 사용하는 다양한 기상예측모델(WRF, ECMWF, GFS 등)과 자료형식(grib, netcdf, mcip 등)을 ARL로 손쉽게 변환할 수 있도록 변환프로그램(ecm2arl, gfs2arl, mcip2arl, grib2arl, nc2arl 등)을 제공한다. 그러나, KIM은 우리나라가 독자적으로 개발한 전지구기상예측모델로 NOAA에서는 ARL로 변환하는 프로그램을 제공하지 않기 때문에 변환프로그램을 직접 개발하여야 한다. 본 연구에서는 NIMS (2021)에서 개발한 kimnc2arl 프로그램을 ARL로 변환하기 위해 사용하였으며, 이 프로그램은

**Table 1.** The description of KIM (with map of domain) which is converted to ARL format.

		Description
Domain	1°E~170°E, 1°N~65°N	
Horizontal Resolution	1353 × 512 (0.125°, 12 km)	
Vertical Resolution	31 layers (1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 1 hPa)	
Atmospheric Variables	Upper-Level Parameters (7)	U-wind component (m s <sup>-1</sup> ), V-wind component (m s <sup>-1</sup> ), Geopotential height (gpm), Temperature (K), Specific humidity (kg kg <sup>-1</sup> ), Vertical velocity (m s <sup>-1</sup> ), Pressure vertical velocity (hPa s <sup>-1</sup> )
	Surface Level Parameters (17)	U-component of wind at 10 m (m s <sup>-1</sup> ), V-component of wind at 10 m (m s <sup>-1</sup> ), Temperature at 2 m (K), Planetary boundary layer height (m), Pressure at surface (hPa), Pressure at mean sea level (hPa), Temperature at surface (K), Frictional velocity (m s <sup>-1</sup> ), surface roughness length (m), surface sensible heat flux (W m <sup>-2</sup> ), Latent heat flux (W m <sup>-2</sup> ), Downward short wave flux (W m <sup>-2</sup> ), Relative humidity at 2 m (%), Specific humidity at 2 m (kg kg <sup>-1</sup> ), Total cloud cover (%), Surface height (m), 3-h Total precipitation (mm)

NetCDF (Network Common Data Form) 형식으로 저장된 KIM 결과를 다른 변환 과정없이 ARL 형식으로 바로 변경하는 프로그램이다. Table 1은 kimnc2arl 프로그램을 이용하여 ARL 형식으로 변환된 KIM 정보를 나타낸다. 변환 시간을 줄이기 위하여 KIM 영역을 전지구에서 동아시아를 포함하는 북반구 영역으로 잘라내었으며(Table 1), 수평해상도는 HYSPLIT과 맞추어 약 12 km로, 연직해상도는 지면을 포함하여 총 32층으로 구성하였다. 확산 예측 모델을 수행하기 위한 필수 기상입력요소인 지형고도, U·V 바람, 온도, 상대습도, 누적 강수량뿐만 아니라(Draxler, 1999), 비습, 연직속도 등 총 7종의 연직자료와 17종의 지상기상변수가 ARL로 변환되어 입력자료로 이용된다. 변환된 ARL 자료의 헤더(header)에는 예보시간, X·Y 격자 정보가 포함되며, 그 후에는  $X \times Y$ 의 수만개의 각 기상변수 정보가 저장된다. ARL로 변환되는 기상변수들은 HYSPLIT에서 정의한 고유한 4자리 수 식별필드(identification field)로 변환되는데 각각의 기상

변수에 대하여 기존에 정의된 단위로 변환되어야 모델에서 디코드가 가능하다. KIM의 경우, Pressure vertical velocity (WWND)의 단위가  $m s^{-1}$ 로 NetCDF 형식으로 저장되기 때문에, NCL (NCAR Command Language) 코드를 이용하여, HYSPLIT에서 정의한 입력단위인  $hPa s^{-1}$ 로 변환하여 주었다. WWND이외의 다른 기상변수들은 HYSPLIT에서 정의한 단위와 같기 때문에 그대로 사용하였다. ARL 변환 전·후에도 모든 KIM의 기상입력변수의 값은 같아야 하기 때문에 기상 주요변수에 변환 전·후 공간분포를 비교하였다. Figure 1은 2023년 5월 21일 1800 UTC에 수행된 72시간 후, 1000 hPa에서 U 방향의 바람(Fig. 1a), 850 hPa에서 V 방향의 바람(Fig. 1b), 3시간 누적강수량(Fig. 1c)과 2 m 온도(Fig. 1d)에 대하여 ARL로 변환 전·후의 공간분포를 비교한 그림이다. 모든 변수에 대하여 NetCDF 형식과 ARL 형식의 KIM 예측자료의 공간분포가 서로 같은 것을 알 수 있으며, 변환 전·후 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 KIM 기상입력

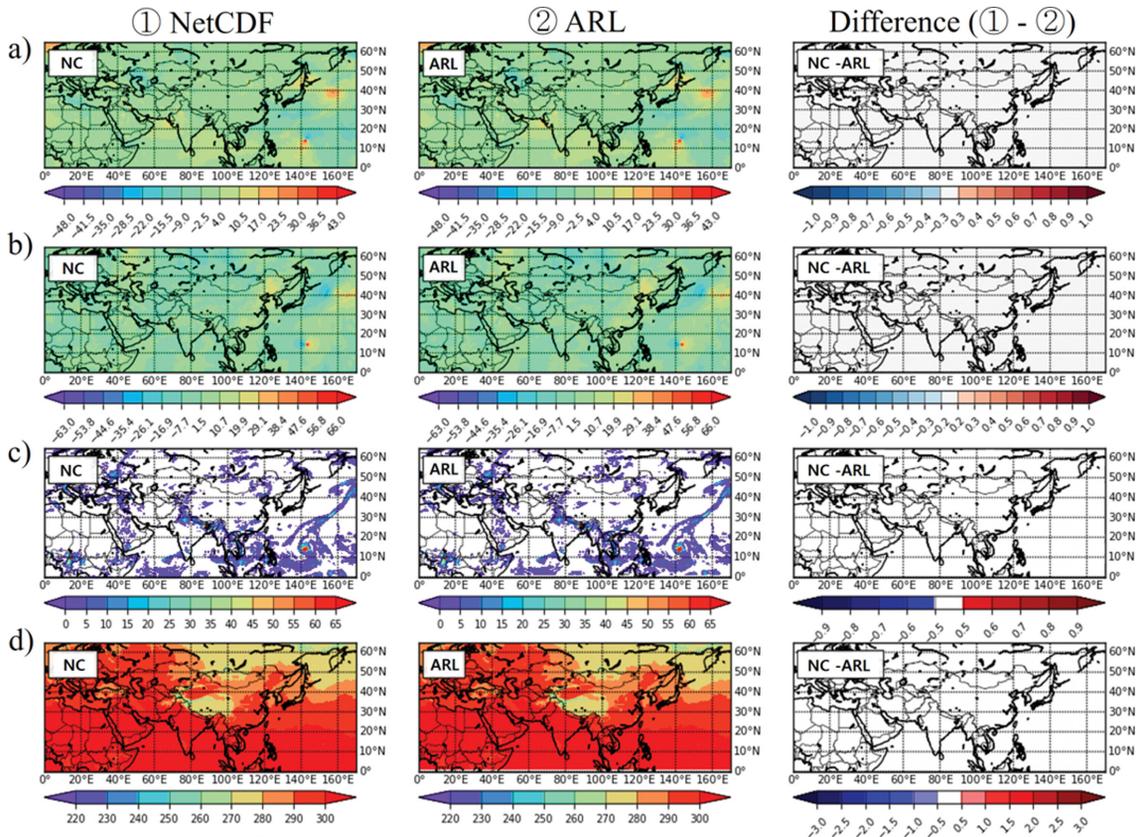


Fig. 1. The spatial distribution of (a) U-wind at 1000 hPa ( $m s^{-1}$ ), (b) V-wind at 850 hPa ( $m s^{-1}$ ), (c) 3-h accumulated precipitation (mm), and (d) Temperature at 2 m (K) for the NetCDF formatted KIM, ARL formatted KIM and their difference at 1800 UTC 21 May 2023 ( $t + 72$  h forecast).

자료의 ARL 자동변환시스템은 2023년 6월 기상청 현업수치예보시스템에 현업화되어 하루에 4번(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 구동되고, 이를 통해 +84시간까지 3시간 간격의 KIM 기상예측자료가 ARL 형식으로 변환되어 기상청 슈퍼컴퓨터5호기에 저장된다.

**2.2 KIM 기반 동아시아 실시간 화산재 확산모델 구축**

본 연구에서 개발한 KIM 기상예측자료를 기상입력자료로 활용하는 KIM-HYSPLIT은 HYSPLIT v4.2를 기반으로 하며, 모델의 기본 옵션은 Table 2와 같다. 모델 중심은 북위 37.5°, 동경 115.0°, 연직 및 수평 해상도는 각각 5 층과 약 12 km, 입자는 총 4개로 0.6, 2, 6, 10 μm로 구성된다. 예보 시간은 총 72시간이고 화산재는 1시간 방출을 가정한다(NIMS, 2020). 이는 화산재 방출지속시간이 화산폭발률(mass eruption rate)

과 총분화량(total volume erupted)에 따라 달라지기 때문에 화산 분화가 진행되는 동안에는 이를 산정하기 어렵기 때문이다(Trancoso et al., 2022). 모델 수행을 위해 필요한 화산 위치, 고도, 분연주 높이, 분화시간 등에 관한 화산 분출 기본 정보는 도쿄 VAAC에서 발표하는 VAA에서 추출하여 사용하였다. 화산의 분출량 정보는 화산재 분연주 높이와 분출률의 경험적 상관관계를 이용하여 도출된 관계식(KMA, 2018)을 보다 현실적으로 개선한 다음의 분출률 관계식을 이용한다(NIMS, 2020).

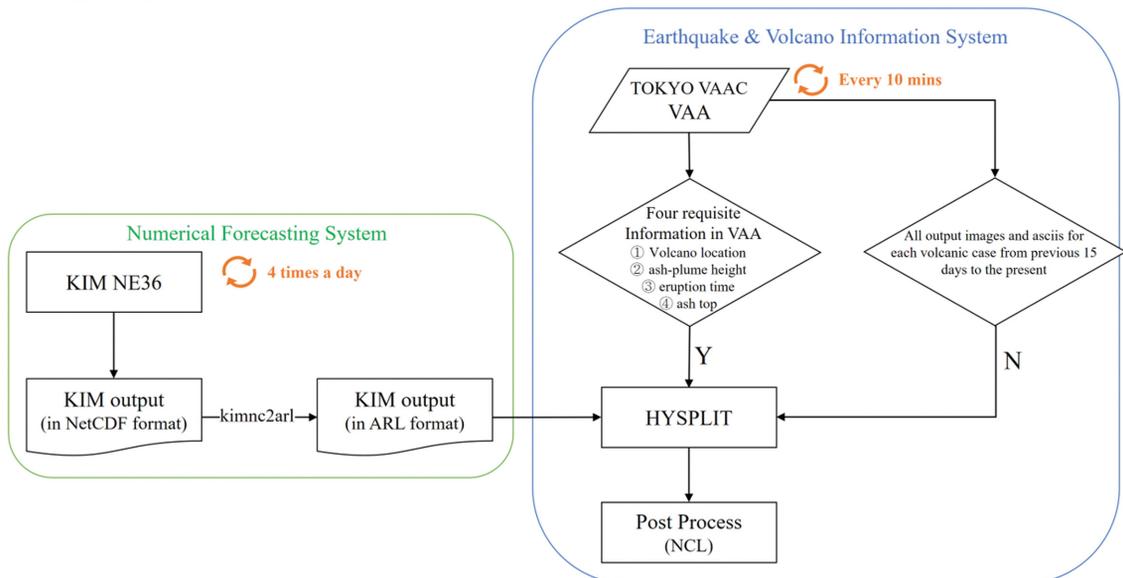
$$f(x) = R_e \times M_{63} \times e^{f(H)}, f(H) = 7.526 \times H^{0.2505}$$

여기서  $f(x)$ 는 분출량,  $R_e$ 는 화산재 중 PM<sub>63</sub> 질량에 대한 PM<sub>10</sub>의 비율(0.068),  $M_{63}$ 은 화산재 중 수 시간 이상 부유 가능한 직경 63 μm 미만의 질량 분율,  $f(H)$

**Table 2.** KIM-HYSPLIT dispersion model configuration.

	Description
Model Version	HYSPLIT v4.2 (NOAA, 2024a)
Meteorology	KIM 6 h data (KMA, 2023b)
Grid Center	37.5°N, 115.0°E
Vertical resolution	5 Levels - 0, 1000, 3000, 5000, 10000 m
Horizontal resolution	0.125°
Ash particle size distribution	0.6, 2, 6, 10 μm
Forecast length	+72 hours
Release duration time	1 hour

**KMA Supercomputer5**



**Fig. 2.** The framework of KIM-HYSPLIT in KMA.

는 분연주 높이( $H$ )와 총 화산재 분출물 사이의 경험적 관계식이다(KMA, 2018).  $M_{63}$ 은 화산 분화 유형(고철질, 규산질)과 각 유형에 대한 분출규모(소형, 중형, 대형)에 따라 다른 값을 갖는다. 본 연구에서는 동아시아 화산에 대하여, Mastin et al. (2009)에서 제시한 11종류의 분출유형 상수 값을  $M_{63}$ 에 적용하여 사용하였다.

Figure 2는 KIM-HYSPLIT 실시간 화산재 확산 예측 체계 수행 순서도이다. 먼저 모델의 기상입력자료인 KIM을 확산모델의 입력장형식인 ARL 형식으로 변환한다. 이 작업은 화산 분출 여부와 상관 없이 기상청 수치예보시스템에서 매일 하루에 네 번(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 수행된다. 이는 화산재 확산 모델의 수행이 필요할 때 언제든지 최신 기상자료를 활용할 수 있도록 준비해 두기 위함이다. 화산재 확산 모델은 기상청 지진화산정보시스템에서 설치되어 있으며, 10분마다 실시간으로 입전되는 도쿄 VAAC의 VAA를 확인하여 이 중, 모델 수행에 필요한 필수 정보가 모두 포함된 경우 모델을 수행하게 된다. 화산재 확산 모델을 수행하기 위해 필수적으로 필요한 정보는 화산 위치(위도, 경도), 화산 높이, 화산재 분출 시각, 그리고 분출 높이이다. 이 네 정보가 모두 VAAC 전문에 포함되어 있는 경우만 모델 수행이 시작된다. 화산 분출 시각과 가장 가까운 KIM 기상예측장, 지형고도, 거칠기 길이와 토지이용도 등의 기본 지면 입력자료를 이용하여, 화산 분출 대상에 대해 +72시간 이후 화산재 확산 예측을 수행하며 그 결과가 3시간 간격으로 산출된다. 모델이 정상적으로 수행 되면, +72시간까지 예측 시간별(3시간 간격) 총 24개의 모델 결과가 산출되고, 화산재 고도별(5층; 0, 1000, 3000, 5000, 10000 m), 영역별(3개; 한반도, 분화지역, 아시아) 화산재 침적량과 농도예측 결과가 이미지로 저장된다. 이 모든 작업은 기상청 슈퍼컴퓨터 5호기에서 처리되며, 화산정보 입전시각별로 폴더에 그 결과가 저장된다. 슈퍼컴퓨터 5호기 장애나 시스템 점검 등으로 모델 수행이 정상적으로 끝나지 않았을 경우를 대비하여, 매 10분마다 현재 날짜를 기준으로 15일 이전부터 현재까지 미완결 또는 미수행 된 사례가 있는지 확인하여 재 수행할 수 있도록 체계를 구

축하였다.

KIM-HYSPLIT은 2023년 5월 1일부터 9월 17일까지 사전테스트를 통해 실시간 구축 체계를 점검하였으며, 2023년 9월 19일부터 10월 22일까지 약 한 달간의 시험운동을 통해 모델 자동 수행 및 안정성을 테스트 하였다. 시험운동 기간 동안 도쿄 VAAC는 총 128회의 VAA를 발표하였고, KIM-HYSPLIT은 실시간으로 입전되는 VAA에서 모델 수행에 필요한 필수 정보가 있는 사례에 대해서 정상적으로 수행된 것을 확인하였다. 시험운동기간 동안 VAA 입전 후, 모델 수행 시작까지 평균적으로 약 9.4분, 모델 시작 후 결과 표출까지 평균적으로 약 6.2분 정도 소요되어 화산 분출 후 약 20분 내로 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 이는 일본기상청의 지역대기수송모델(Regional Atmospheric Transport Model) 기반 현업 화산재낙하예측(Volcanic Ash Fall Forecast) 시스템의 향후 6시간의 1시간 간격 화산재 이동 예보 결과가 화산 분출 후 30분 내에 발표(Hasegawa et al., 2015)되는 것과 비교하였을 때, 비슷한 수준이라고 할 수 있다. 본 기술노트에서 개발된 KIM-HYSPLIT은 UM-HYSPLIT과 비교하여 사용되는 기상입력자료를 제외하고 확산모델버전, 구성, 옵션이 모두 동일하다.

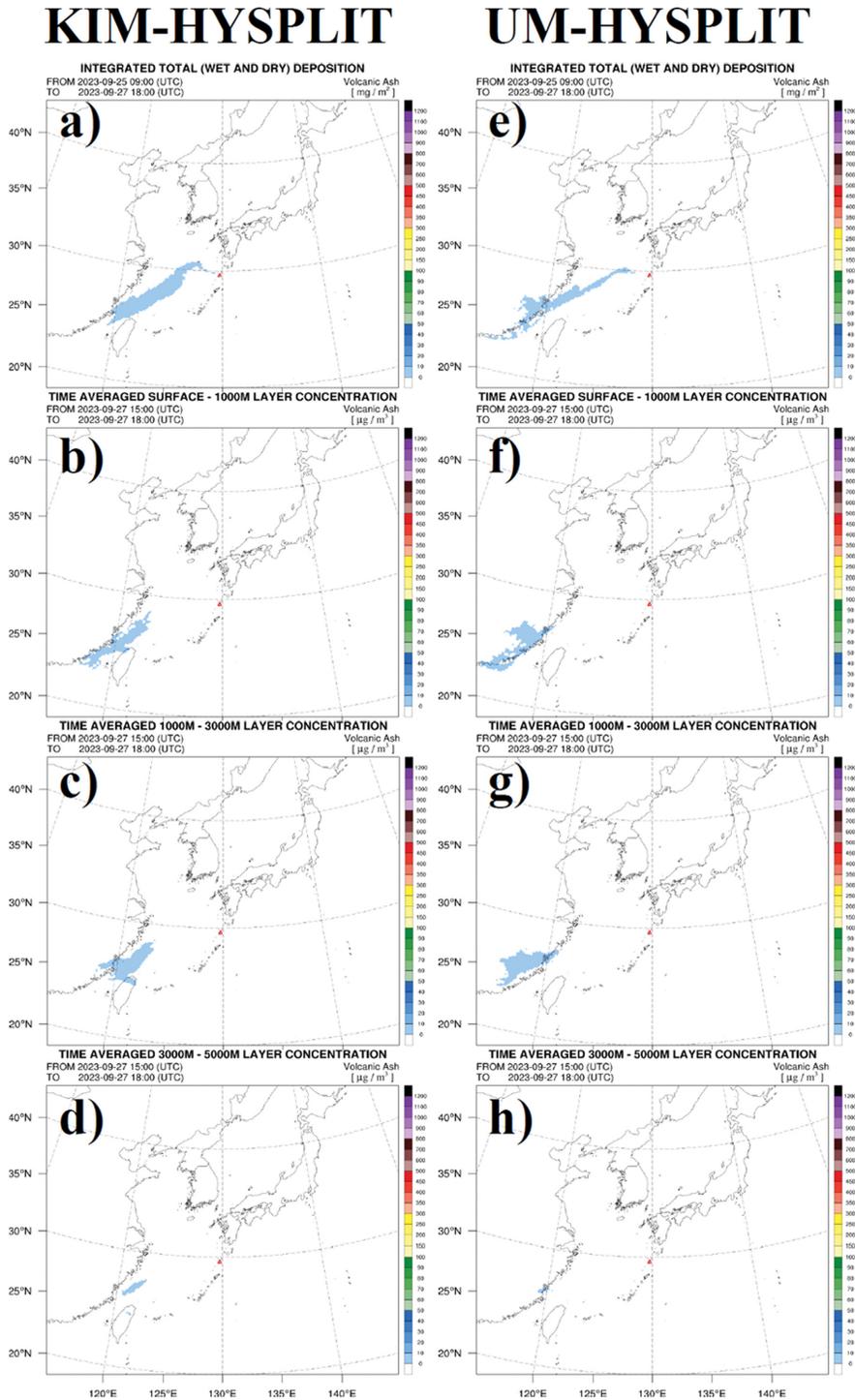
### 3. 화산재 확산 예측 결과 사례 비교 및 검증

#### 3.1 사례 비교

시험운동기간 동안 실시간으로 수행되었던 128회의 화산 분출에 대한 KIM-HYSPLIT의 모델 결과 중 일본의 대표적인 활화산인 두 종류의 화산의 분출 사례(Table 3)를 통해 화산재 확산 예측 결과를 UM-HYSPLIT의 결과와 상호 비교하였다. 첫 번째 분출 사례는 북위 29.63°, 동경 129.72°에 위치한 일본 스와노세지마로 2023년 9월 25일 9시 54분(UTC)에 VAA가 발표되었다. VAA에 따르면 2023년 9월 25일 9시 41분(UTC) 화산이 분출하였고, 분연주 높이는 1828.8 m이었다. 이 사례는 당시 최신 기상자료인 2023년 9월 25일 00시(UTC)의 KIM 자료를 이용하여 모델이 자동 수행되었다. Figure 3은 KIM-HYSPLIT이 예측한 +60시간까지 화산재 침적량(Fig. 3a)과 고도별 +57시

**Table 3.** Description of two volcanic eruption cases used for conducting test of KIM-HYSPLIT in this study issued from TOKYO VAAC.

Case	Volcanic ash advisory issue time (UTC)	Volcano				Volcanic ash	
		Name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Height (m)	Eruption time (UTC)	Eruption height (m)
1	2023-09-25 09:54	Suwanosejima	29.63	129.72	796.0	2023-09-25 09:41	1828.8
2	2023-10-04 13:45	Sakurajima	31.6	130.65	1117.0	2023-10-04 13:28	2133.6



**Fig. 3.** Simulation of (a), (e) integrated volcanic ash deposition ( $t + 0$  h -  $+60$  h), 3-h time averaged ( $t + 57$  h -  $t + 60$  h) concentrations averaged (b), (f) from surface to 1000 m, (c), (g) from 1000 m to 3000 m, and (d), (h) from 3000 m to 5000 m for Case 1 using KIM-HYSPLIT (left column) and UM-HYSPLIT (right column). The location of volcano is shown by the red triangle.

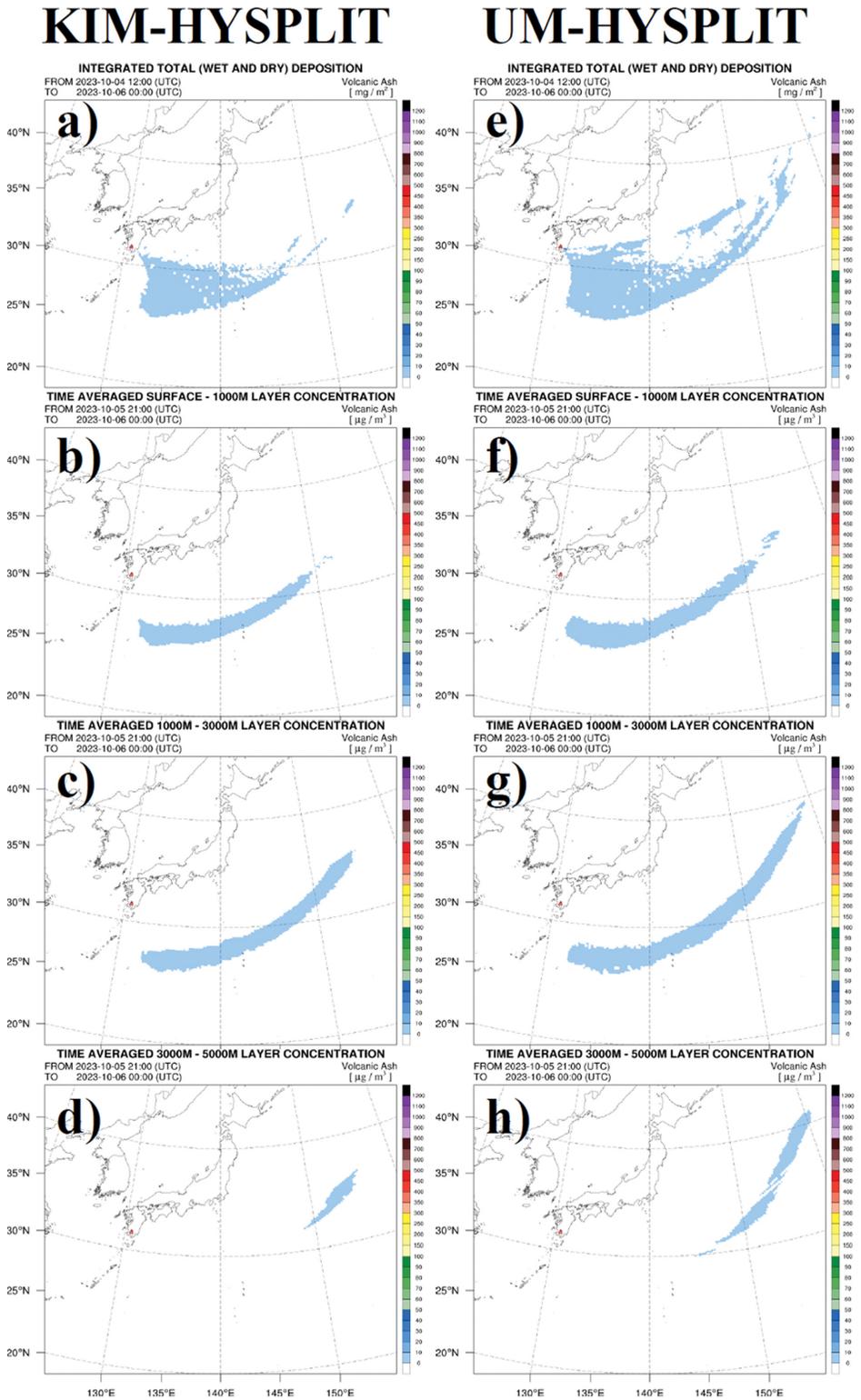


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for Case 2 and 3-h time averaged ( $t + 33 - t + 36$  h) concentrations.

간에서 +60시간의 시간 평균 화산재 농도 분포예측 결과(Figs. 3b-d)를 나타낸 그림이다. KIM-HYSPLIT은 2023년 9월 25일 00시(UTC)부터 27일 18시(UTC)까지 시간이 지남에 따라 남서쪽 방향으로 화산재가 확산하여 대만 북서쪽까지 침적되는 것으로 예측한 것을 알 수 있으며 그 양은  $50 \text{ mg m}^{-3}$  미만이다(Fig. 3a). UM-HYSPLIT의 경우 KIM-HYSPLIT과 화산재 침적의 이동 방향은 남서쪽으로 같지만 KIM-HYSPLIT에 비해 화산재 확산 범위가 좁고 그 속도가 더 빨라 중국 내륙까지 화산재가 침적되는 것으로 예측한 것을 알 수 있다(Fig. 3e). Figures 3b-d는 KIM-HYSPLIT 수행 후, 지상~1000 m, 1000~3000 m, 3000~5000 m 각각의 고도에서 +57시간~+60시간 평균 화산재 확산 농도의 예측분포를 보인다. 지상~1000 m에서 화산 분출 +60시간 후, KIM-HYSPLIT의 화산재 농도는 화산과 약 900 km 이상 떨어진 중국 내륙과 대만 해협에 확산된 것을 알 수 있으며(Fig. 3b), UM-HYSPLIT의 경우, 화산재가 더욱 빠르게 이동하는 것으로 모의하여 중국 내륙으로  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  미만의 화산재 농도분포가 나타나는 것을 알 수 있다(Fig. 3f). KIM-HYSPLIT의 확산속도가 UM-HYSPLIT보다 느리게 예측하는 이러한 경향은 다른 고도에서도 비슷하게 나타나지만, 고도가 높아질수록 그 차이는 다소 커지는 것을 알 수 있다(Figs. 3c, d, g, and h).

두 번째 사례는 북위  $31.6^\circ$ , 동경  $130.65^\circ$ 에 위치한 일본 사쿠라지마로 2023년 10월 4일 13시 45분(UTC)에 VAA가 발표되었다. VAA에 따르면 2023년 10월 4일 13시 28분(UTC)에 화산이 분출하였고, 분연주 높이는 2133.6 m이다. 이 사례는 2023년 10월 4일 06시(UTC)의 KIM 기상입력자료를 이용하여 모델이 수행되었다. 모델 수행 시작 후, KIM-HYSPLIT과 UM-HYSPLIT의 +36시간까지 화산재 침적량과 고도별 +33시간부터 +36시간 평균 화산재 확산 농도 분포 예측 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 2023년 10월 4일 12시(UTC)부터 10월 6일 00시(UTC)까지 화산재는 시간이 지남에 따라 남동쪽에서 북동쪽 방향으로 이동하면서 침적되는 것으로 예측한 것을 알 수 있다(Fig. 4a). UM-HYSPLIT은 KIM-HYSPLIT에 비하여 확산 예측 범위가 더욱 넓고 이동 속도가 더 빠르지만(Fig. 4e), 두 모델 모두 침적량은  $50 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 예측한 것을 알 수 있다. KIM-HYSPLIT은 지상~1000 m, 1000~3000 m 고도에서 일본 남동쪽으로  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  미만의 농도로 동서 방향으로 길게 퍼져서 화산재가 확산될 것으로 예측한 것을 알 수 있다(Figs. 4b, c). 이 두 고도에서 KIM-HYSPLIT과 UM-HYSPLIT의 예측 경향은 거의 유사하지만 UM-HYSPLIT의 경우 동경  $150^\circ$  너머까지 더 멀리 화산재가 확산할 것으로 예측한 것을 알 수 있다(Figs. 4f, g). 3000~5000 m 고

도에서 UM-HYSPLIT은 KIM-HYSPLIT에 비하여 화산 분화 지역에서 더욱 멀리 남북방향으로 길게 분포하며 확산될 것으로 예측하였다(Figs. 4d, h).

### 3.2 통계 검증

화산재 확산모델의 검증은 화산재 확산이동 관측의 시간적 공간적 한계로 인하여 위성관측자료를 이용하여 주로 평가되어 왔다. 위성관측자료를 이용한 가장 일반적인 방법은 위성의 밝기온도 아노말리(Brightness temperature anomalies)를 이용하여 화산재로 뒤덮인 지역을 확인하는 것이다. 이 방법은 구름이 광학적으로 두껍다고 가정하기 때문에, 구름이 광학적으로 얇은 경우, 정확하게 화산재를 탐지하는데 한계가 있다(Bessho et al., 2016; Zidikheri et al., 2017). 이 한계를 극복하기 위한 방법으로 제시된 또 다른 방법은 위성의 적외선(Infrared) 11- $\mu\text{m}$ 와 12- $\mu\text{m}$  파장의 밝기온도 차이를 이용하여 화산재 구름을 식별하는 것이다(Prata and Grant, 2001; Dare et al., 2016). 하지만 이 방법도 화산재 구름을 정확하게 탐지하는데 한계가 있다(Simpson et al., 2000). VAAC에서 발표하는 VAA에는 화산의 기본 정보뿐만 아니라 화산 분출 이후 화산재 구름(ash cloud)의 수평 및 수직 범위에 대한 예측정보가 포함된다(최대 +18시간까지 6시간 간격). 이는 VAAC 예보관들이 위성관측자료, 수치예측 모델 자료, 다양한 화산 주변 관측자료 등 가용한 모든 정보와 예보관의 지식, 경험, 노하우 등을 종합하여 생산하는 것으로, 잠재적으로 위험한 화산재 농도를 포함하고 있다고 판단되는 지역을 다각형으로 정의하여 제공한다. 하지만, 구름 등에 의해 식별이 어려운 경우 “NOT AVBL”로, 또는 화산재가 소멸될 것으로 예상되는 경우 “NO VA EXP”로 표시하여, 예측 정보가 VAA에 포함되지 않을 수도 있다(Engwell et al., 2021). 위성 관측자료의 밝기온도를 이용하여 화산재를 탐지하는 방법이나 VAAC에서 발표하는 정보 모두 100% 정확하게 화산재를 탐지할 수는 없다. 본 연구에서는 경험 많은 예보관이 모든 가용한 관측자료와 예측자료를 이용하여 종합적으로 판단하여 제공하는 VAA의 화산재 확산 예측정보를 단일관측자료보다 정확한 자료로 판단하고 모델의 예측 성능을 검증하기 위한 참(True) 값으로 이용하였다. Threat Score (TS)를 이용하여 통계 값을 계산하고 정량적인 검증에 사용하였다. TS는 Critical Success Index (CSI)라고도 불리며 다음의 식으로 정의된다(Stunder et al., 2007).

$$TS = CSI = \frac{AF}{(A + AF + F)}$$

여기서  $F$ 는 화산재 확산모델이 예측한 화산재 확산농도 면적,  $A$ 는 도쿄 VAAC에서 발표한 VAA에 포함된

**Table 4.** The four volcanic eruption cases used for verification of KIM-HYSPLIT in this study. All information such as latitude, longitude, eruption time and height, etc. are taken from TOKYO VAAC.

Case	Volcanic ash advisory issue time (UTC)	Volcano			Volcanic ash		Forecast altitude range		
		Name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Height (m)	Eruption time (UTC)	Eruption height (m)	+6 h (m)	+12 h (m)
1	2023-10-19 15:14	Bezymianny	55.96	160.6	2882.0	2023-10-19 14:40	4876.8	SFC-4752.0	SFC-4267.2
2	2023-12-30 08:24	Klyuchevskoy	56.05	160.65	4754.0	2023-12-30 07:20	6096.0	SFC-5486.4	SFC-5486.4
3	2024-01-01 05:44	Sakurajima	31.60	130.65	1117.0	2024-01-01 03:00	1828.8	SFC-2133.6	SFC-2133.6
4	2024-01-01 06:52	Suwanosejima	29.63	129.72	796.0	2024-01-01 06:12	2438.4	SFC-2438.4	SFC-2438.4

화산재 확산농도예측 면적,  $AF$ 는 이 두 면적이 교차하는 곳으로  $TS$ 는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 완벽한 예측이 되었다고 할 수 있다(Mbizvo et al., 2024). 예를 들어,  $TS$  값이 0.2인 경우, 모델이 20% 정확도로 화산재 확산을 예측하였음을 의미하며, 0.57인 경우, 50% 이상 정확도를 갖는 것을 의미한다. 이 검증지표는 사건이 발생하지 않은 경우의 수에 의해 영향을 받지 않기 때문에 사건에 따라 그 값이 좌우되는 경향이 있다(Schaefer, 1990). 즉, 화산 분출이 일어난 경우에 한하여 검증이 가능하므로,  $TS$  값은 각 화산 분출사례의 모델 예측 결과에 따라 값이 크게 달라질 수 있음을 의미한다.

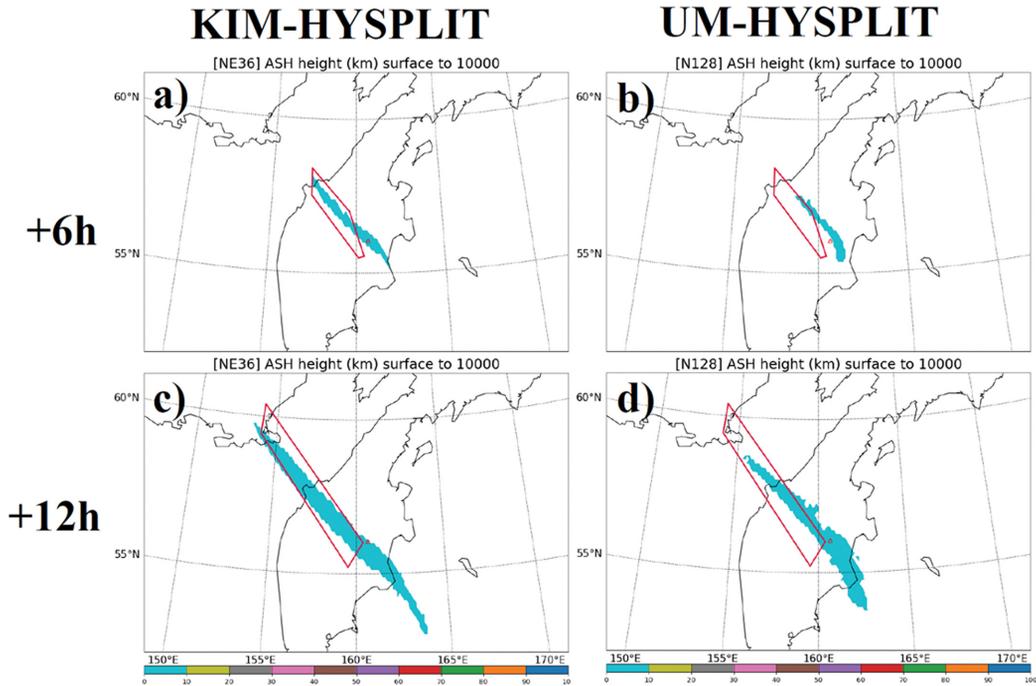
최근 동아시아 화산 분출 사례 중 VAA에 화산재 확산 예측정보가 포함되어 있는 서로 다른 화산 4개(Table 4)를 선정하여 예측 시간 별  $TS$ 를 구하고 KIM-HYSPLIT을 검증하였으며, UM-HYSPLIT과 상호 비교하였다. 선정된 모든 사례는 공통적으로 화산 분출 시각으로부터 6시간과 12시간 이후 화산재 확산 예측 정보가 VAA에 포함되어 있었으며, 각 예측시간에 대하여 지상에서 특정 어느 고도까지 화산재가 퍼져있는지 연직방향의 고도 범위정보가 포함되어 있다. 본 기술노트에서 개발한 화산재 확산 예측 모델은 기본적으로 4개 고도 간격의(0~1000 m, 1000~3000 m, 3000~5000 m, 5000~10000 m) 화산재 확산 예측정보가 산출되지만, 보다 정확한 검증을 위하여, VAA 화산재 확산 예측 농도의 고도 정보와 모델의 예측 결과를 맞추어 비교하였다. 예를 들어, Table 4의 사례 1의 경우 VAA에 따르면 +6시간 후, 화산재 연직 확산 예측 범위를 지상에서 4752.0 m의 고도 범위로 예측하였는데, 이 경우 모델 예측은 6시간 후 결과 값의 지상에서 5000 m까지 예측정보를 평균하여 비교하였다. 사례 1과 2는 러시아에 위치한 화산이 분출하였던 사례들로 사례 1은 베지미아니(Bezymianny)산에서 2023년 10월 19일 14시 40분(UTC)에 분출하였으며 분연주는 4876.8 m이고, 사례 2는 클류첵스카야(Klyuchevskoy)산에서 2023년 12월 30일 7시 20분

**Table 5.** Comparison of threat scores from different models (KIM-HYSPLIT and UM-HYSPLIT) for four different cases.

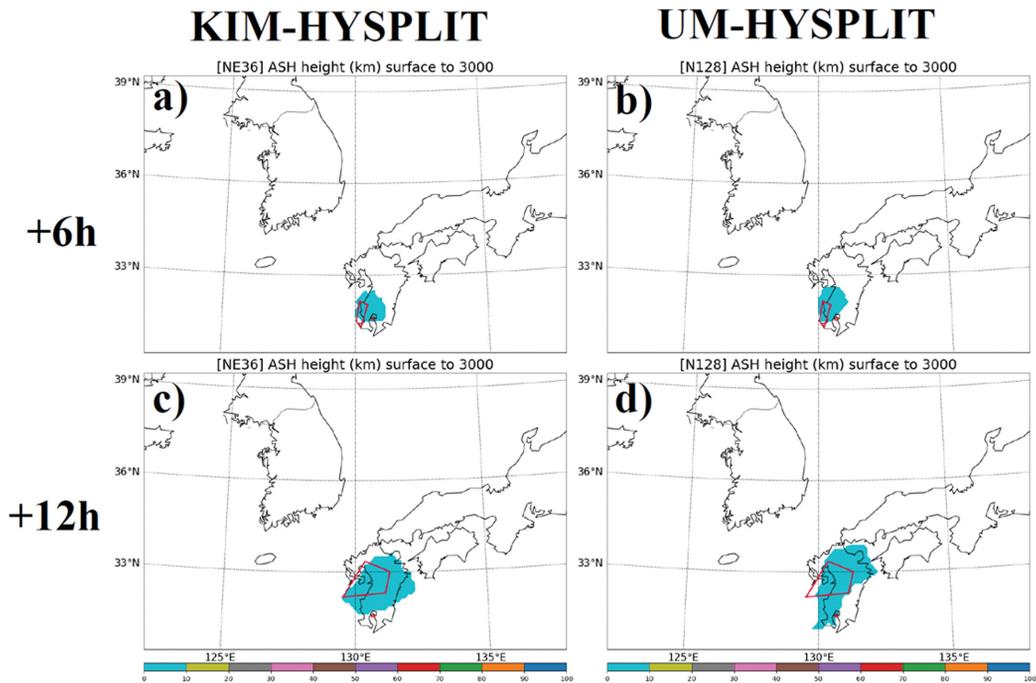
	KIM-HYSPLIT		UM-HYSPLIT	
	+06 h	+12 h	+06 h	+12 h
Case 1	0.22	0.17	0.01	0.00
Case 2	0.32	0.42	0.05	0.17
Case 3	0.14	0.31	0.15	0.28
Case 4	0.16	0.22	0.11	0.30
Mean	0.21	0.28	0.08	0.19

(UTC)에 분출하였고, 분연주는 6096.0 m이다. 사례 3과 4는 일본에 위치한 화산 사례들로 사례 3은 사쿠라지마(Sakurajima)에서 2024년 1월 1일 3시 00분(UTC)에 사례 4는 스와노세지마(Suwanosejima)에서 2024년 1월 1일 6시 12분(UTC)에 분출하였으며, 분연주는 각각 1828.8 m과 2438.4 m이다.

Table 5는 각 사례에 대해 예측시간별 KIM-HYSPLIT과 UM-HYSPLIT의  $TS$  값을 비교한 것이다. 사례 1의 경우, KIM-HYSPLIT의 +6시간, +12시간 후  $TS$ 는 0.22, 0.17로 화산재가 화산 분출 후 북동쪽으로 이동하는 방향은 VAA와 일치하였으나, 화산재 농도 면적을 다소 넓게 예측하였다.  $TS$  값은 모델의 화산재의 이동방향이 관측과 다르거나, 혹은 이동 속도가 크게 빠르거나 느려 관측과 일치하는 화산재 예측 면적이 적을수록 낮게 나타나는데, UM-HYSPLIT의 경우, +6시간 후, +12시간 후, VAA와 다르게 화산재 농도가 화산 위치로부터 북서 방향으로 이동할 것으로 예측하여,  $TS$ 가 0에 가깝게 산출되었다(not shown). 사례 2의 경우, VAA는 +6시간 후, 화산 위치로부터 북서 쪽 방향으로 좁고 길게 지상에서 5486.4 m까지 위치할 것으로 예측하였고, +12시간 이후에는 좀 더 북쪽으로 더 길게 분포 할 것으로 예측하였다(Fig. 5). UM-HYSPLIT도 화산 분화 위치에서 북서쪽으로 좁고 길게 화산재가 이동할 것으로 예측하였지만 +6시간 이후 예측 결과는 VAA 예측보다 북북서 방향으로 다



**Fig. 5.** The 6-h and 12-h ash concentrations forecast (shaded) averaged from surface to 10000 m for Case 2 in the Table 4 using KIM-HYSPLIT (a), (c) and UM-HYSPLIT (b), (d). The red polygons represent manual analyses produced by VAAC forecasters. The location of volcano is shown by the triangle.



**Fig. 6.** Same as Fig. 5 but for Case 3 and averaged from surface to 3000 m.

소 빠르게 이동할 것으로 예측하여(Fig. 5b) TS가 0.05로 낮게 나타났다. +12시간 이후 예측 결과는 +6시간 예측보다 서쪽으로 예측하여 VAA와 이동 방향이 일치하였지만, VAA와 다르게 화산 분화위치에서 남동쪽에서의 확산도 함께 예측하였다(Fig. 5d). KIM-HYSLPIT의 경우, +6시간, +12시간 후, 화산재가 북서쪽으로 가늘고 길게 확산하는 것으로 예측하여, VAA 예측 결과와 방향과 범위가 일치하는 것을 알 수 있었다(Figs. 5a, c). UM-HYSLPIT과 마찬가지로 화산 분화 위치에서 남동쪽으로 화산재 확산을 이동하였지만, 북동쪽으로 이동하는 방향과 범위가 VAA 예측과 일치하여 UM-HYSLPIT에 비하여, TS 값이 높게 나타났다(Table 5). 사례 3의 경우에는 VAA의 +6시간 후, 예측 정보는 화산 분화위치에서 서북서쪽으로 +12시간 후는 북북서 방향으로 지상에서 2133.6 m까지 고도 범위로 확산하는 것으로 예측하였다(Fig. 6; Table 4). 이 사례의 경우, 두 모델의 +6시간 후, +12시간 후 화산재 이동 방향과 범위가 유사하게 나타나 TS의 값이 서로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다(Table 5). 다만, VAA 예측에 비하여 두 화산재 확산모델의 화산재 확산 범위가 넓게 나타나는 것을 알 수 있다. 사례 4의 VAA 예측은 화산 분화 +6시간 이후, 화산재의 수평 확산이 크게 이루어지지 않았으며, +12시간 이후에는 화산 분화 위치에서 서에서 북동방향으로의 확산을 예측하였다(not shown). 두 모델은 모든 예측 시간에서 동서로 길게 화산재가 확산할 것으로 예측하였지만, KIM-HYSLPIT에 비하여 UM-HYSLPIT은 모든 예측시간에서 북~북동방향으로의 확산을 예측하여, 북동방향으로 확산이 이루어 지지 않은 +6시간 후 TS는 KIM-HYSLPIT에 비하여 낮게, +12시간 후 TS는 높게 나타났다. 전반적으로 KIM-HYSLPIT, UM-HYSLPIT 화산재 확산모델은 VAA 보다 수평방향으로 넓게 과대 모의하는 것을 알 수 있었으며, 이 경향은 화산 분출 +6시간 후 더 두드러져, +6시간 후의 TS가 +12시간 후 보다 낮은 것을 알 수 있다. 대부분의 사례에서 모든 예측시간에서 KIM-HYSLPIT은 UM-HYSLPIT에 비하여 높은 TS 값을 보였지만, 이를 일반화 하기 위해서는 일정 기간에 대하여 더 많은 사례를 이용한 분석이 필요하다.

#### 4. 요약 및 결론

기상청에서는 독자적으로 자체 개발한 KIM과 영국에서 도입하여 우리나라에 맞게 최적화한 UM 두 종류의 전지구수치예보시스템이 현업으로 운용되고 있지만, 동아시아 화산 분출 시, 정량적인 화산재 확산 예측 정보 생산을 위해 실시간 운용되고 있는 화산재 확산 예측 모델은 UM만을 기상입력장으로 활용하고

있다(UM-HYSPLIT). 본 연구에서는 다양한 기상자료 활용 기술 개발 요구에 의해 KIM 기상자료를 이용한 화산재 확산 예측 모델(KIM-HYSPLIT)을 개발하였다. KIM을 화산재 확산모델 입력자료로 활용하기 위해 NetCDF 형식의 KIM 예측 결과를 확산모델 입력용 형식(ARL)으로 자동 변환하는 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 화산재 확산모델의 모의수행시간을 줄이기 위하여, 최신 기상입력장이 항상 준비되어 있도록 VAA 발표 여부에 상관 없이 하루에 네 번(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 자동 수행되어 그 결과가 서버에 저장될 수 있도록 하였다. KIM-HYSPLIT은 UM-HYSPLIT과 마찬가지로, 도쿄 VAAC의 VAA가 기상청 서버에 입전되면 자동으로 +72시간까지 3시간 간격으로 화산재 침적량 및 고도별 평균 화산재 수평 및 수직 확산 결과가 산출된다. KIM-HYSPLIT과 UM-HYSPLIT은 HYSPLIT 모델을 기반으로 하며, 두 모델의 유일한 차이점은 기상입력장이다. 약 한 달간의 시험운영 기간 동안 동아시아에 분출하였던 화산 사례(128회)에 대하여 KIM-HYSPLIT의 실시간 자동 수행 여부와 그 안정성을 확인하였다. 그 결과, KIM-HYSPLIT은 VAA 발표 후 평균 9.4분 이내에 수행되고, 모델 수행완료까지 걸리는 시간은 평균 6.2분으로 평균 20분 이내로 화산재 확산 예측 결과를 정상적으로 확인할 수 있었다. 시험운영 기간 동안 자동으로 수행되었던 결과 중 일본의 대표적인 활화산 두 사례를 이용하여 KIM-HYSPLIT과 UM-HYSPLIT의 화산재 확산 이동 예측 결과를 정성적으로 비교하였다. 그 결과, 두 모델은 모든 고도에서 화산재 농도의 수평 범위와 이동 속도의 차이를 다소 보였지만, 그 방향은 크게 다르지 않게 나타났다. 최근 동아시아에서 분출한 서로 다른 화산 4개의 사례를 선정하여, VAA에 포함된 6시간, 12시간 이후 화산재 수평 및 수직 농도 예측 결과와 KIM-HYSPLIT의 결과를 TS 값을 이용하여 정량적인 검증을 수행하였고, UM-HYSPLIT의 결과와 상호 비교하였다. KIM-HYSPLIT의 화산재 농도의 수평 확산은 VAA 예측과 같은 방향으로 예측하였지만 수평 확산 범위는 VAA의 예측에 비해 다소 넓게 과대 모의 하는 것을 알 수 있었다. 이 경향은 +6시간 후 예측에서 더욱 두드러져 +6시간 후 예측의 TS가 +12시간 후 예측의 TS보다 낮게 나타났다. 평균적으로 모든 예측 시간에서 KIM-HYSPLIT의 TS가 UM-HYSPLIT보다 높게 나타났는데 이는 러시아 화산 분출 사례인 사례 1과 2의 예측에서 UM-HYSPLIT의 화산재 수평이동 방향이 VAA 예측과 달라 TS가 0에 가깝게 나타났기 때문이다. 전체적으로 4개의 화산 분출사례에 대한 KIM-HYSPLIT의 +6 h 과 +12 h 예측시간의 TS는 각각 0.14~0.32, 0.17~0.42, UM-HYSPLIT은 0.01~0.15, 0.0~0.30의 범위로 나타났

다. Stunder et al. (2007)은 서로 다른 7개의 화산 사례를 대상으로 수행한 화산재 모델 예측의 TS 범위가 0.0~0.8 사이임을 밝혔고, Crawford et al. (2016)은 2008년 카사토치(Kasatochi) 화산 분화에 대한 모델 실험 결과는 위성관측자료의 초기화 기법에 따라 TS는 0.1에서 0.7 사이임을 밝혔다. 선행연구와 비교하였을 때, 본 연구에서 수행한 KIM-HYSPLIT와 UM-HYSPLIT의 최대 예측정확도는 +12 h에서 각각 42%, 30%로 다소 낮은 것을 알 수 있다. 그러나 선행연구들과 같은 조건(모델버전, 기상입력장, 화산사례 등) 하에서 수행한 결과 비교가 아니므로 직접적인 비교에는 한계가 있다. 또한, 단지 네 개의 사례로 낸 통계이기 때문에 일반화된 결론을 얻기 위해 일정 기간 동안 더 많은 사례를 이용한 검증이 수행할 필요가 있다. 또한, 이 두 모델의 화산재 확산 예측 결과는 기상입력장의 차이에서 기인하기 때문에 보다 정확한 원인 파악을 위하여 화산재 확산에 영향을 미치는 주요 기상변수에 대한 비교와 분석이 필요하다. 마지막으로, 도쿄 VAAC의 VAA예측 이외에, 기상청 천리안 위성, PM10 장비 등 다양한 관측자료 및 다양한 통계검증기법을 이용하여 화산재 확산모델의 성능을 분석할 필요가 있다.

지금까지 진행된 연구에 더하여, 추후 다음과 같은 연구가 진행된다면 기상청 화산재 확산 예측 모델의 예측 성능 향상과 보다 다양한 화산재 확산 예측 정보 생산이 가능해질 수 있을 것으로 사료된다. 첫째, 기상청에서는 기상예보정확도 향상을 위해 현업 운용 중인 KIM, UM 모델과 함께 전 세계 최고 정확도를 가지는 것으로 알려져 있는 ECMWF 기상입력자료를 구매하여 기상예보분석에 실시간으로 활용하고 있다. ECMWF 기상입력자료를 이용한 동아시아 실시간 화산재 확산 예측 모델을 개발하고 실시간 운영한다면, KIM-HYSPLIT, UM-HYSPLIT 결과와 함께 화산재 확산 예측 결과 비교 분석 등에 활용할 수 있을 것이며, 이를 통해 보다 다양한 화산재 확산 예측정보 생산이 가능해질 것이다. 둘째, 기상청은 KIM과 UM기반 모두 전지구상블예측시스템을 현업운영하고 있다. KIM과 UM 앙상블예측시스템의 멤버는 각각은 26개, 49개로 이 앙상블 멤버를 기상입력장으로 한 동아시아 앙상블 확산 예측 모델 개발하여 활용한다면 단일 모델이 가지는 결정론적 예측의 한계를 보완하는 화산재 확산 확률예측정보 생산이 가능할 수 있을 것이다. 셋째, 기상청에서 사용한 HYSPLIT 모델 버전은 2019년에 개발된 v4.2로 각종 버그 수정, 기상입력장의 연직층수 증가 등 일부 기능이 추가되어 2023년 11월 v5.3.0로 업그레이드 되었다(NOAA, 2024b). 최신버전의 확산모델 이용 등 모델 자체의 개선이 수행된다면, KIM-HYSPLIT와 UM-HYSPLIT이 공통으로 보여주었

던 +6시간 이후 화산재 확산 예측의 과대 모의경향이 개선될 수 있을 것이다. 넷째, 화산재는 폭발적인 화산활동의 산물로 2 mm 미만의 다양한 입자들이 포함된다(Müller et al., 2019). 본 연구에서 구축한 화산재 확산 예측 모델은 0.6, 2, 6, 10  $\mu\text{m}$  네 종류 입자에 대한 예측 결과가 산출되지만 본 연구에서는 세계 여러 국가에서 대기오염 지표로 삼고 있는(Chen and Kan, 2008) PM<sub>10</sub> 위주로 분석과 검증이 이루어졌다. 화산재 입자별로 이류와 확산 정도가 다르며, 사람에게 미치는 유해성도 다르기 때문에 추후, 입자별 상세한 분석이 이루어질 필요가 있다. 마지막으로 화산 분화 시 방출되는 여러 가지 가스들은 화산 위치로부터 수 백~수 천 km 떨어진 지역까지 영향을 미칠 수 있다(Hansell et al., 2006; Toulkeridis and Zach, 2017). 2021년 10월 23일 이탈리아 에트나 화산 분화 시 방출된 아황산가스가 편서풍을 타고 동쪽으로 이동하며, 이틀 뒤인 25일 한반도를 향해 이동하는 것이 위성관측자료를 통해 확인되기도 하였다(Hwang, 2021). 이에 따라 전 세계 VAAC 구역별로 발표되는 화산 정보를 이용한 실시간 전세계 화산재 확산 예측시스템을 구축한다면, 동아시아 지역까지 영향을 미칠 수 있는 원거리 대규모 화산 분화에 대한 감시와 화산재 확산 예측 정보 생산이 가능해질 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Beckett, F. M., C. Witham, S. Leadbetter, R. Crocker, H. N. Webster, M. Hort, A. R. Jones, B. Devenish, and D. J. Thomson, 2020: Atmospheric dispersion modelling at the London VAAC: A review of developments since the 2010 eyjafjallajökull volcano ash cloud. *Atmosphere*, **11**, 352, doi:10.3390/atmos11040352.
- Bessho, K., and Coauthors, 2016: An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **94**, 151-183, doi:10.2151/jmsj.2016-009.
- Blake, S., 2003: Correlations between eruption magnitude, SO<sub>2</sub> yield, and surface cooling. *Geological Society, London, Special Publications*, **213**, 371-380, doi:10.1144/GSL.SP.2003.213.01.22.
- Chen, B., and H. Kan, 2008: Air pollution and population health: a global challenge. *Environ. Health Prev. Med.*, **13**, 94-101, doi:10.1007/s12199-007-0018-5.

- Chen, S., 2023: Volcanic Eruptions and their impacts in the Past 13,000 years. *Highlights in Sci., Eng. Technol.*, **50**, 233-240, doi:10.54097/hset.v50i.8543.
- Cole-Dai, J., 2010: Volcanoes and climate. Wiley Interdisciplinary Reviews. *Climate Change*, **1**, 824-839, doi:10.1002/wcc.76.
- Crawford, A. M., B. J. B. Stunder, F. Ngan, and M. J. Pavolonis, 2016: Initializing HYSPLIT with satellite observations of volcanic ash: A case study of the 2008 Kasatochi eruption. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **121**, 10786-10803, doi:10.1002/2016JD024779.
- Crawford, A., T. Chai, B. Wang, A. Ring, B. Stunder, C. P. Loughner, M. Pavolonis, and J. Sieglaff, 2022: Evaluation and bias correction of probabilistic volcanic ash forecasts. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 13967-13996, doi:10.5194/acp-22-13967-2022.
- Dare, R. A., D. H. Smith, and M. J. Naughton, 2016: Ensemble prediction of the dispersion of volcanic ash from the 13 February 2014 eruption of Kelut, Indonesia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, doi:10.1175/JAMC-D-15-0079.1.
- Dogan, G. G., A. C. Yalciner, A. Annunziato, B. Yalciner, and O. Necmioglu, 2023: Global propagation of air pressure waves and consequent ocean waves due to the January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Ocean Eng.*, **267**, 113174, doi:10.1016/j.oceaneng.2022.113174.
- Draxler, R. R., 1999: HYSPLIT4 User's Guide, *NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230*, 38 pp.
- Engwell, S., L. Mastin, A. Tupper, J. Kibler, P. Acethorp, G. Lord, and R. Filgueira, 2021: Near-real-time volcanic cloud monitoring: insights into global explosive volcanic eruptive activity through analysis of Volcanic Ash Advisories. *Bull. Volcanology*, **83**, 1-17, doi:10.1007/s00445-020-01419-y.
- Gudmundsson, M. T., R. Pedersen, K. Vogfjord, B. Thorbjarnardottir, S. Jakobsdottir, and M. J. Roberts, 2010: Eruptions of Eyjafjallajökull Volcano, Iceland, *Eos Trans. AGU*, **91**, 190-191, doi:10.1029/2010EO210002.
- Guffanti, M., J. W. Ewert, G. M. Gallina, G. J. Bluth, and G. L. Swanson, 2005: Volcanic-ash hazard to aviation during the 2003~2004 eruptive activity of Anatahan volcano, Commonwealth of the Northern Mariana Islands. *J. Volcanology and Geothermal Res.*, **146**, 241-255, doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.12.011.
- Han, J.-Y., S.-Y. Hong, and Y. C. Kwon, 2020: The performance of a revised simplified Arakawa-Schubert (SAS) convection scheme in the medium-range forecasts of the Korean Integrated Model (KIM). *Wea. Forecasting*, **35**, 1113-1128, doi:10.1175/WAF-D-19-0219.1.
- Hansell, A. L., C. J. Horwell, and C. Oppenheimer, 2006: The health hazards of volcanoes and geothermal areas. *Occup. Environ. Med.*, **63**, 149-156, doi:10.1136/oem.2005.022459.
- Hasegawa, Y., A. Sugai, Y. Hayashi, Y. Hayashi, S. Saito, and T. Shimbori, 2015: Improvements of volcanic ash fall forecasts issued by the Japan Meteorological Agency. *J. Applied Volcanology*, **4**, 1-12, doi:10.1186/s13617-014-0018-2.
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 267-292, doi:10.1007/s13143-018-0028-9.
- Hurst, T., and C. R. Davis, 2017: Forecasting volcanic ash deposition using HYSPLIT. *J. Appl. Volcanology*, **6**, 1-8, doi:10.1186/s13617-017-0056-7.
- Hwang, M. K., 2021: Korea's COMS satellite has been captured Italian volcanic gas. *Seoul administration news*, 2021. 11.02. [Available online at <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/eqk-standard.do>].
- Igarashi, Y., O. Girina, J. Osiensky, and D. Moore, 2018: International coordination in managing airborne ash hazards: Lessons from the Northern Pacific. *Adv. Volcanology*, 529-547, doi:10.1007/11157\_2016\_45.
- KMA, 2018: Research on application and support for the earthquake and volcanic service (I): Improvement of volcanic eruption rate for ash diffusion model. Korea Meteorological Administration, 88-95 (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2023a: *Working-level Manual on crisis response of large volcanic eruptions*. Korea Meteorological Administration, (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2023b: Verification of numerical weather forecasting system (2022). Korea Meteorological Administration, 5-6 (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2024: Earthquake and volcano notification standard, Korea Meteorological Administration, [Available online at <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/eqk-standard.do>] (in Korean).
- Kwon, Y. C., 2023: The operational run of the newly developed KIM and update efforts at Korea Meteorological Administration. *Numerical Wea. Prediction: East Asian Perspectives*, 105-123, doi:10.1007/978-3-031-40567-9\_4.
- Lechner, P., A. C. Tupper, M. Guffanti, S. Loughlin, and T. Casadevall, 2018: Volcanic ash and aviation—the challenges of real-time, global communication of a natural hazard. *Adv. in Volcanology*, 51-64, doi:10.1007/

- 11157\_2016\_49.
- Lee, S.-K., G.-H. Ryu, E.-H. Hwang, J.-K. Choi, and C.-W. Lee, 2014: A case study of the 17 Sep, 2013 eruption in SAKURAJIMA volcano. *J. Remote Sens.*, **30**, 303-314, doi:10.7780/kjrs.2014.30.2.12 (in Korean).
- Lee, W.-J., R.-S. Park, I.-H. Kwon, and J. Kim, 2023: Numerical weather prediction and forecast application. *Atmosphere*, **33**, 73-104, doi:10.14191/Atmos.2023.33.2.073 (in Korean with English abstract).
- Marshall, L. R., E. C. Maters, A. Schmidt, C. Timmreck, A. Robock, and M. Toohey, 2022: Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues. *Bull. Volcanology*, **84**, 54, doi:10.1007/s00445-022-01559-3.
- Mastin, L. G., and Coauthors, 2009: A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *J. Volcanology and Geothermal Res.*, **186**, 10-21, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Mbizvo, G. K., C. R. Simpson, S. E. Duncan, R. F. M. Chin, and A. J. Larner, 2024: Critical success index or F measure to validate the accuracy of administrative healthcare data identifying epilepsy in deceased adults in Scotland. *Epilepsy Res.*, **199**, 107275, doi:10.1016/j.epilepsyres.2023.107275.
- Müller, D., U. Kueppers, K.-U. Hess, W. Song, and D. B. Dingwell, 2019: Mineralogical and thermal characterization of a volcanic ash: Implications for turbine interaction. *J. Volcanology and Geothermal Res.*, **377**, 43-52, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.04.005.
- Murray, S. A., 2018: The importance of ensemble techniques for operational space weather forecasting. *Space Wea.*, **16**, 777-783, doi:10.1029/2018SW001861.
- NIMS, 2020: Developing Technology for Asian Dust and Haze Monitoring and prediction. National Institute of Meteorological Sciences, 24-28 (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2021: *Developing Technology for Asian Dust and Haze Monitoring and prediction*. National Institute of Meteorological Sciences Report No. 11-1360620-000168-10, 115 pp (in Korean).
- NOAA, 2024a: HYSPLIT Tutorial September 2019 (Version 4.2.0) (2024, FEB, 14). National Oceanic and Atmospheric Administration, [Available online at <https://www.ready.noaa.gov/data/web/workshop/Sep2019/>].
- \_\_\_\_\_, 2024b: NOAA READY News, (2024, JAN, 11). National Oceanic and Atmospheric Administration, [Available online at <https://www.ready.noaa.gov/READYnews.php>].
- Prata, A. J., and I. Grant, 2001: Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: Application to Mt. Ruapehu, New Zealand. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 2153-2179, doi:10.1002/qj.49712757615.
- Sato, E., K. Fukui, and T. Shimbori, 2018: Aso volcano eruption on October 8, 2016, observed by weather radars. *Earth, Planets and Space*, **70**, 1-8, doi:10.1186/s40623-018-0879-4.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575, doi:10.1175/1520-0434(1990)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2.
- Shirato, S., 2013: Volcanic Ash Advisories. *Volcanic Hazard Maps of Japan*.
- 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, doi:10.1016/S0034-4257(99)00103-0.
- Stein, A. F., R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, and F. Ngan, 2015: NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 2059-2077, doi:10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
- Stunder, B. J. B., J. L. Heffter, and R. R. Draxler, 2007: Airborne volcanic ash forecast area reliability. *Wea. Forecasting*, **22**, 1132-1139, doi:10.1175/WAF1042.1.
- Sun, J., J. K. Ahn, H. Lee, E. H. Hwang, and D. K. Lee, 2020: Analysis of Japanese volcanic ash dispersion on the Korean Peninsula using satellite imagery. *J. the Korean Soc. Hazard Mitigation*, **20**, 269-275, doi:10.9798/KOSHAM.2020.20.3.269.
- Timmreck, C., 2012: Modeling the climatic effects of large explosive volcanic eruptions, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, **3**, 545-564, doi:10.1002/wcc.192.
- Toulkeridis, T., and I. Zach, 2017: Wind directions of volcanic ash-charged clouds in Ecuador-implications for the public and flight safety. *Geomatics, Nat. Hazards and Risk*, **8**, 242-256, doi:10.1080/19475705.2016.1199445.
- Trancoso, R., Y. Behr, T. Hurst, and N. I. Deligne, 2022: Towards real-time probabilistic ash deposition forecasting for New Zealand. *J. Appl. Volcanology*, **11**, 13, doi:10.21203/rs.3.rs-1479358/v1.
- Zhu, Y., 2005: Ensemble forecast: A new approach to uncertainty and predictability. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 781-788, doi:10.1007/BF02918678.
- Zidikheri, M. J., C. Lucas, and R. J. Potts, 2017: Estimation of optimal dispersion model source parameters using satellite detections of volcanic ash. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 8207-8232, doi:10.1002/2017JD026676.