한반도 주변 화산의 분화가 우리나라에 끼치는 영향: 가상분화 시나리오 장기 모의실험 연구

Impacts of Volcanic Eruptions around the Korean Peninsula: A Long-term Simulation Study for Hypothetical Eruption Scenarios

박기현* · 민병일** · 김소라*** · 김지윤**** · 서경석*****

Park, Kihyun*, Min, Byung-Il**, Kim, Sora***, Kim, Jiyeon****, and Suh, Kyung-Suk*****

Abstract

To build a response against potential volcanic risks around Korea, we developed a three-dimensional Volcanic Ash Transport and Dispersion Model (VATDM), known as the Lagrangian Atmospheric Dose Assessment System-Volcanic Ash (LADAS-VA) model. Using the LADAS-VA model, we performed numerous simulations for multiple year-round hypothetical eruptions of several representative volcanoes around the Korean peninsula. We analyzed the simulation results and revealed the impacts of hypothetical volcanic eruptions on the Korean peninsula as counting the number of days influenced by the season. Overall simulations for hypothetical volcanic eruptions around the Korean peninsula revealed that the most impactful eruptions would potentially occur during the summer season. Long-term simulations examining hypothetical eruption scenarios at least over a decade must be conducted to enable the analysis of deviations on a year-on-year basis, in comparison with the climatological normals.

Key words : VATDM, LADAS-VA, Atmospheric Dispersion, Hypothetic Eruption

요 지

본 연구에서는 한반도 주변의 주요 화산들의 분화가 한반도에 끼치는 영향을 분석하기 위해 본 연구진이 개발한 화산재 확산 3차원 수치모델 Lagrangian Atmospheric Dose Assessment System-Volcanic Ash (LADAS-VA)를 이용하여 다년간 장기 가상분화 모의실험을 수행하였고 기간별, 계절별로 그 결과를 분석하였다. 대체적으로 대상화산에 관계없이 여름철 분화의 영향이 가장 크고 분화시기에 따라 한반도에 미치는 영향이 달라지며 주로 대류권이나 성층권 하부에서 확산된 화산재가 한반도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 약간의 연도별 편차가 존재하지만 계절에 따른 영향이 가장 큰 것으로 나타났고, 계절 특성을 명확하게 평가하기 위해서는 평년값을 산출할 수 있도록 10년 이상의 장기간에 이르는 모의실험이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 화산재확산모델, LADAS-VA, 대기확산, 가상분화

*정회원, 한국원자력연구원 환경안전평가연구부 선임연구원(E-mail: khpark77@kaeri.re.kr)

Member, Senior Researcher, Environmental Safety Assessment Research Division, KAERI

**한국원자력연구원 환경안전평가연구부 책임연구원

Principal Researcher, Environmental Safety Assessment Research Division, KAERI

***한국원자력연구원 환경안전평가연구부 선임연구원

Senior Researcher, Environmental Safety Assessment Research Division, KAERI

****한국원자력연구원 환경안전평가연구부 연구원

Researcher, Environmental Safety Assessment Research Division, KAERI

*****교신저자, 정회원, 한국원자력연구원 환경안전평가연구부 책임연구원(Tel: +82-42-868-4788, Fax: +82-42-868-2607, E-mail: kssuh@kaeri.re.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Environmental Safety Assessment Research Division, KAERI

1. 서 론

2010년 아이슬란드의 Eyjafjallajökull 화산 분화 후 전 세계적으로 화산재해 대응시스템을 구축하는 움직임이 활발해지고 있으며 우리나라에서는 백두산의 분화 전조활동에 대한 관심이 높아지고 있다(Bonadonna et al., 2011; Stohl et al., 2011; Folch et al., 2012; Langmann et al., 2012; Matthias et al., 2012; Lee et al., 2018). 잠재적인 한반도 주변 화산의 분화 위험에 대비하여 본 연구진은 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)의 Unified Model (UM) 수치예보자료를 입력기상장으로 활용하는 라그랑지 입자추적모델(Lagrangian Particle Tracking Model; Stohl, 1998)에 기초한 화산재 확산 3차원 수치모델 Lagrangian Atmospheric Dose Assessment System-Volcanic Ash (LADAS-VA; Park et al., 2016a)를 개발하였다. LADAS-VA 모델은 한국원자력연구원에서 개발하여 2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 시 대기로 누출된 방사성물질의 환경영향평가(Suh et al., 2013)에 활용된 3차원 대기확산모델 Lagrangian Atmospheric Dose Assessment System (LADAS; Suh et al., 2006)의 지역규모(Regional Scale) 모델에 화산분출물의 입경·밀도·형태에 따른 입자 분포(Total Grain-Size Distribution, TGSD)와 중력 강하 속도(Gravitational Settling Velocity) 모델을 적용하여 개발되었다(Scollo et al., 2007; Park et al., 2016a).

본 연구에서는 한반도 주변의 대표적인 화산의 장기 가상 분화 시나리오 모의실험을 LADAS-VA 모델에 UM-Regional Data Assimilation and Prediction System (UM-RDAPS) 기상장을 활용하여 수행하였고 그 결과에 대한 영향성 평가 분석을 진행하였다. 2012년 12월 1일부터 2018년 2월 28일까지의 기간에 대해 총 5년 3개월분, 5개 대상화산의 15종 분화에 대응하는 가상분화 시나리오 모의실험을 수행하였다. 대상화산의 가상분화가 한반도에 미치는 영향일 수를 계절별로 분석하였고 계절은 기상청의 기후통계지침(KMA, 2017)에 따라 봄(3~5월, March-April-May [MAM]), 여름(6~8월, June-July-August [JJA]), 가을(9~11월, September-October-November [SON]), 겨울(12월~익년 2월, December-January-February [DJF])로 분류하였다.

장기 가상분화 시나리오 모의실험 결과 한반도에 영향을 끼치는 분화는 여름철에 집중되어 있음이 드러났고 연도별 편차를 고려하기 위해서는 최소한의 누년평균값 또는 10년 주기 평년값(KMA, 2017)을 얻을 수 있도록 10년 이상의 장기간의 모의실험을 진행하여 결과를 비교·분석할 필요성이 대두되었다.

2. 가상분화 시나리오 및 모의실험 정보

한반도에 영향을 끼칠만한 화산체는 30여개 정도이고 대부분 일본에 위치한다. 각각의 화산체에 대해 일련의 가상

분화 모의실험을 수행해 보면 권역별로 화산재의 확산 패턴이 명확하게 나타나기 때문에 Fig. 1과 같이 백두산, 울릉, 아소산, 후지산, 타루마이산을 권역별 대표화산으로 선정하여 장기 모의실험을 진행하였다(Lee and Lee, 2018; Lee et al., 2018). 백두산과 울릉은 한반도에 위치한 화산이고 아소산은 일본 서남부 지역의 화산군을 대표하고 후지산과 타루마이산은 각각 일본 중부와 일본 동북지역의 화산군을 대표하는 화산으로 간주하였다(Park et al., 2017; Lee and Lee, 2018; Lee et al., 2018).

Fig. 1. Locations of 5 Representative Volcanoes around the Korean Peninsula

Table 1에 정리한 것처럼 가상분화는 매일 00 UTC에 시작하여 24시간 동안 지속되며 방출시작 후 72시간 동안의 화산재 확산을 LADAS-VA 모델에 균일선방출원(Uniform Line Source)을 적용하여 모의하였다. 가상분화에 일별방출을 적용하게 되면 방출일에 따른 대기확산 및 영향을 추적(Trace)하기 용이하며 일별방출은 방사성체논의 대기 중 배경농도 연구 등(Achim et al., 2016; Meutter et al., 2018) 대기확산 모델을 이용한 모의실험 연구에서 일반적으로 널리 이용되는 방법이다. 12 km 수평분해능의 UM-RDAPS 수치예보자료와 Table 2에 주어진 TGSD (Costa et al., 2006; Scollo et al., 2007)를 적용하였다. 계절에 따른 영향을 분석하기 위해 겨울철을 온전히 포함하도록 모의실험 기간은 2012년 12월 1일부터 2018년 2월 28일까지로 설정하였다. 본 연구에서는 5개의 대상화산에 대해 Volcanic Explosivity Index (VEI; Newhall and Self, 1982) 4에서부터 역사상 기록된 최대 VEI (백두산, 아소산은 7; 울릉은 6; 후지산, 타루마이산은 5)까지 모의실험을 수행하였고 화산재 플룸(Plume)의 최대 고도는 VEI 5~7인 분화의 경우에는 25 km로 설정하였으며 VEI 4인 분화의 경우에는 10 km로 설정하였다(Park et al., 2017; Lee and Lee, 2018; Lee et al., 2018). 비교를 위해 2014년 12월 1일~

Table 1. Simulation Information

Item	Content
Simulation Period	2012.12.1. ~ 2018.2.28.
Meteorological Data	KMA UM-RDAPS (12 km-horizontal resolution)
Eruption Detail	Start at 00 UTC (each day and lasted 24 h)
Calculation Period	72 h (after eruption started)
Eruption Scale (VEI)	4 to Historical maximum VEI (for each volcano)
TGSD	Single Gaussian in Φ

2016년 2월 29일까지의 기간은 VEI 4인 경우 화산재 플룸의 최대 고도가 25 km인 가상분화 모의실험도 동시에 진행하였다.

일반적으로 입자의 직경의 분포는 Log-normal 분포로 가정하여 관측된 화산 분화 후에 얻은 화산재 입자의 직경 분포로부터 거리에 따라 역추산하여 근사적으로 구한다. 종종 이중 Log-normal 분포를 가지는 경우도 있다. FLEXPART (Stohl et al., 2005), FALL3D (Costa et al., 2006; Folch et al., 2009) 등의 여러 화산재 확산 모델에서 공통적으로 사용되는 TGSD는 Φ -분류(Φ -class)이다. 입자의 직경을 $d = 2^{-\Phi}$ mm 라 하면 Φ 는 다음과 같은 정규분포로 주어진다.

$$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\Phi}} \exp \left[-\frac{(\Phi - \Phi_{\mu})^2}{2\sigma_{\Phi}^2} \right] \quad (1)$$

여기서 Φ_{μ} , σ_{Φ} 는 각각 Φ 의 평균과 표준편차이다. 화산재 확산 모델에 화산재의 입경·밀도 분포를 적용할 때는 Table 2에서처럼 계산효율을 고려하여 약간 단순화 시킨 분포를 사용하며 본 연구에서는 2001년 Etna 화산 분화 평가에 이용된 FALL3D 모델의 TGSD (Costa et al., 2006; Scollo et al., 2007)를 적용하였고 PM10에 해당하는 입자의 양은 Eq. (1)을 이용하여 Table 2에 제시된 TGSD로부터 추정값을 사용하였다.

한반도에 대한 영향성 평가는 개별적인 모의실험에서 분화시작 후 화산재 확산을 추적하는 72시간 동안에 1) 퇴적(Deposition) - 우리나라 영역에서 지표면 퇴적이 발생하 는지, 2) 항공로(Aviation) - 국내 주요 항공로 및 공항에서 화산재 농도가 영국 Civil Aviation Authority (CAA)에서 2010년 Eyjafjallajökull 화산 분화 후 설정한 비행금지구역 기준(4 mg/m^3)을 초과하는지, 3) 미세먼지(PM watch) - 우리나라 영역에서 지표면 PM10 농도가 환경부의 미세먼지 주의보 발령 기준을 초과하는지를 기준으로 하였다. 이 3가지 영향 요소 중 하나라도 해당하게 되면 그 분화일을 영향일로 취급(Any influence)하였고 각각의 영향 요소에 의한 영향일 수를 따로 집계하였다.

Table 2. Total Grain-Size Distribution Used in This Study (Costa et al., 2006)

Φ	Diameter (mm)	Density (kg/m ³)	Weight (% exp.)	Weight (% calc.)
-3	8	-	0.02	2.41 ($\Phi \leq 0$)
-2	4	-	0.14	
-1	2	-	0.54	
0	1	1,500	1.71	5.83
1	0.5	1,500	5.83	
2	0.25	2,000	33.46	
3	0.125	2,000	46.00	45.00
4	0.0625	2,000	11.15	11.15
5	0.03125	2,500	1.14	1.15
$6 \leq$	≤ 0.015625	2,500	-	1.00

3. 가상분화 시나리오 장기 모의실험 결과

3.1 백두산 가상분화 결과

Fig. 2(a)에는 2014년 12월 1일부터 2016년 2월 29일까지의 기간에 대해 수행한 2015년분(1년 3개월) 백두산의 가상분화 모의실험 결과를 분석하여 분화시기에 따른 영향일 수를 월별로 도시하였다(Park and Suh, 2017). 2012년 12월 1일부터 2018년 2월 28일까지의 기간에 대해 수행한 5년분(5년 3개월) 백두산의 가상분화 모의실험 결과 또한 1년분(2015년분) 가상분화 시나리오 모의실험 결과와 매우 유사하여 백두산의 가상분화는 연중 내내 영향을 끼쳤으며 대체적으로 여름철(6월~8월)에 영향이 큰 것으로 나타났다. 겨울철 영향이 가장 적은 것으로 확인되었다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 VEI 6과 7에서는 영향일 수에 차이가 없었으며, VEI가 작아질수록 한반도에 영향을 미치는 날이 줄어들었다. 또한, Fig. 2(a)에서와 같이 동일 VEI (VEI 4)에서 화산분화 시 화산재 플룸 최대 고도가 25 km인 경우와 10 km인 경우를 비교해보면, 여름에는 플룸 고도가 낮은 분화의 영향이 확연히 줄어들었고, 이는 대류권에서의 강우에 의해 한반도 영역에 화산재 플룸이 도달하기 이전에 습식침적의 영향을 받는 것으로 보인다. 반면에 여름을 제외한 계절에는 오히려 플룸 고도가 낮은 분화의 영향이 소폭 늘어나며 결국 대류권 상층부와 성층권의 대기 흐름에 따라 결과가 달라지는 양상이 보인다(Park and Suh, 2017).

5년간의 결과를 비교해보면 연도별 편차가 일부 나타나지만 대체적으로 여름철에 영향이 두드러지는 것으로 판단할 수 있다. 하지만, 누년평년값 또는 10년 주기 평년값(KMA, 2017)을 사용하기에는 모의실험 기간이 너무 짧기 때문에 평년차나 평년비는 사용하지 않았다. 2013년, 2014년 겨울보

Fig. 2. Number and Fraction of Influenced Days for Each Month in 2015

다 2012년, 2015년 겨울의 영향이 적으나 연도별 계절 특성의 차이는 장기간(~10년간)에 대한 모의실험을 진행하고 결과를 비교·분석해야 더 명확하게 알 수 있을 것으로 보인다 (Park et al., 2017).

백두산의 가상분화가 한반도에 미치는 영향일 수를 계절 별로 분석해보면 Fig. 3(a)와 같은 결과를 얻는다. 겨울(DJF)

은 2012년~2017년까지 6개년도, 봄(MAM), 여름(JJA), 가을 (SON)은 2013년~2017년까지 5개년도의 평균값을 사용했다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 2015년분 1년간의 결과와 유사하게 5년간(겨울은 6년간) 평균 영향일 수는 여름이 크며 특히 화산재 퇴적에 여름철 영향이 큰 것으로 보아 강우에 의한 습식침적이 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

Fig. 3. Average Ratio of Seasonal Influenced Days for Each Impact Factor

Figs. 4(a)와 4(b)를 비교해보면 습식침적에 의해 여름철 PM10 영향이 확연히 줄어드는 것을 알 수 있다. 항공로에 대한 영향은 계절편차가 가장 작으며 이는 고고도에서의 영향이 들어가기 때문이고 PM10의 영향은 봄·가을이 크게 나타났다. 연도별 편차가 일부 존재하지만 크지 않고 모의실험 기간이 상대적으로 짧기 때문에 누년평균값에 대한 편차 분석은 하지 않았다. 하지만 백두산의 가상분화에 대한 대체

적인 계절영향은 Fig. 3(a)와 유사할 것이라고 추정할 수 있다.

백두산 가상분화 시 화산폭발지수와 화산재 플룸 고도가 다른 동일날짜 분화 간 결과를 비교하였다. VEI의 차이에 의해 대기중 총질량이나 지표면 퇴적량, PM10의 농도값이 차이가 나며, 등압력면에서의 화산재 확산패턴을 비교해보면 10 km 이상의 상층 대기에서의 기상장 차이에 의해

(a) Deposition after 72 h from 2015-08-13 Eruption start

(b) Accumulated PM10 Conc. for 2015-08-13 Eruption

(c) Accumulated Airmass for 2015-01-13 Eruption

(d) Deposition after 72 h from 2016-02-13 Eruption start

Fig. 4. Examples for Hypothetic Eruptions of Mt. Baekdu with VEI 7

화산재 확산패턴과 지표면 퇴적에는 차이가 나지만 지표면 최인접층에서의 PM10 농도는 같은 확산패턴을 가진다. 백두산의 가상분화 시 연중 대부분 한반도에 영향을 끼치지만 Figs. 4(c)와 4(d)에 도시된 것처럼 저층 및 고층 대기에서 모두 동풍이 우세한 경우에는 한반도에 직접 영향을 끼치지 않고 주로 일본이나 캄차카반도 방향으로 중국과 러시아 극동부에 영향을 끼치게 된다(Park and Suh, 2017).

3.2 울릉 가상분화 결과

울릉도는 한반도 영역에 있고 그 주변에 항공로가 존재하기 때문에 Fig. 2(b)에서와 같이 VEI에 상관없이 일년내내 모든 가상분화가 한반도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 전체적인 (평균) 영향일 수와 항공로에 대한 영향은 계절편차가 없지만, Fig. 3(b)와 같이 지표면 퇴적과 PM10 영향은 모두 여름철이 가장 크게 나타났고, 겨울철에 그 영향이 크게 감소하였다. 그리고 봄·가을에 PM10 영향이 증가하는 것을 볼 수 있다. 물론, PM10 영향도 여름철이 가장 크게 나타나기는 한다. 즉, 한반도 방향으로 유입되는

바람과 강우에 의해 여름에는 영향이 커지고 겨울에는 주로 울릉도 인근의 항공로에만 영향을 끼치는 경우가 많은 것으로 유추할 수 있다. 울릉도의 지리적인 위치로 인해 항공로 영향과 여름철 퇴적에 의한 영향에는 연도별 편차가 나타나지 않고, 다른 영향요인들의 연도별 편차도 작은 것으로 나타났다(Park et al., 2017).

3.3 일본 남서부: 아소산 가상분화 결과

아소산의 가상분화는 Fig. 2(c)와 같이 주로 늦봄에서 초가을 사이(5월~9월)에 한반도에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 봄·가을에는 절반 정도의 가상분화가 영향을 끼치고, 겨울철 분화는 영향이 상당히 작은 것을 알 수 있다. 백두산의 경우와 마찬가지로 아소산의 가상분화가 한반도에 미치는 평균 영향일 수를 계절별로 분석해보면 Fig. 3(c)와 같다(Park et al., 2017). (1년간의 영향일 수와 결과가 거의 같다.) 백두산의 가상분화와 비교할 때 여름철 영향이 훨씬 크게 나타나고 지표면 퇴적, 항공로, PM10 영향 모두 여름에 영향이 가장 크다. 주로 여름철에 일본 남서부 지방에서

Fig. 5. Average Number of Seasonal Influenced Days for Each Impact Factor

한반도 영역으로 바람장이 형성되고, 겨울에는 한반도 영역에서 일본 방향으로 바람장이 주로 형성되어 아소산의 가상 분화 시 영향이 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 아소산은 한반도와 가까운 거리에 있기 때문에 일부 겨울철 분화도 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

3.4 일본 중부: 후지산 가상분화 결과

Fig. 2(d)에 도시된 것처럼 후지산의 경우 대부분 여름 분화가 한반도에 영향을 끼치고 겨울철 분화의 영향은 미미한 것으로 나타났다. 특히, Fig. 3(d)에서와 같이 지표면 퇴적과 PM10 영향이 겨울에는 거의 나타나지 않았는데, 이는 겨울에 한반도에 영향을 끼치는 경우는 10 km 이상의 고층대기의 기류에 의한 것임을 확인해 주는 것으로, 겨울에 일본 중부에서 캄차카반도를 지나 한반도 방향으로 휘어 들어오는 상층기류의 영향으로 보인다. 또한, 봄철에는 저층부 대기가 한반도로 유입되어 PM10의 영향이 상대적으로 크게 나타난다. 지표면 퇴적의 대부분이 여름에 영향을 끼치고 한반도에 영향을 끼치는 분화가 대부분 여름 분화이기 때문에 후지산의 가상분화는 대부분 지표면 퇴적의 형태로 한반도에 영향을 끼친다고 판단된다. 그리고 Fig. 2(d)에서와 같이 동일 VEI (VEI 4)에서 플룸의 최대 고도가 10 km인

분화가 여름철 한반도에 끼치는 영향일 수가 25 km인 분화에 비해 아주 작은 것은 대류권에서의 습식침적의 영향으로 보인다(Park et al., 2017).

3.5 일본 동북부: 타루마이산 가상분화 결과

타루마이산의 가상분화가 한반도에 끼치는 영향은 일본 동북지역이 한반도 영역에서 가장 멀리 있기 때문에 다른 화산체들에 비해 가장 적다. Fig. 2(e)에 도시된 것처럼 후지산의 가상분화와 상당히 비슷한 경향성을 보이지만 겨울철 영향이 조금 더 많고 이는 겨울에 캄차카반도를 지나 한반도 방향으로 휘어 들어오는 상층기류의 영향이 더 크기 때문으로 판단된다. 여름이 아닌 계절에 나타나는 항공로에 대한 영향이 상대적으로 큰 것이 이를 뒷받침하며 여름철에 일본 동북지역에서 한반도 방향으로 유입되는 저층대기의 기류에 의해 Fig. 3(e)와 같이 여름철 PM10 영향이 크게 나타난다. Fig. 2(e)에서와 같이 후지산의 가상분화와 비슷하게 동일 VEI (VEI 4)에서 플룸의 최대 고도가 10 km인 분화가 여름철 한반도에 끼치는 영향일 수가 25 km인 분화에 비해 아주 작은 것은 한반도 영역에 도달하기 이전에 대류권에서의 습식침적으로 화산재의 양이 크게 줄어들기 때문인 것으로 판단된다(Park et al., 2017).

(a) Mt. Baekdu for VEI 7 Eruptions

(b) Ulreung for VEI 6 Eruptions

(c) Asosan for VEI 7 Eruptions

(d) Fujisan for VEI 5 Eruptions

(e) Shikotsu (Tarumaisan) for VEI 5 Eruptions

Fig. 6. Average Ratio of Influenced Days due to Each Impact Factor for Each Season

3.6 화산별 기상분화 결과 비교 및 계절 영향

백두산과 울릉은 한반도에 위치한 화산으로 분화 시에 연중 한반도에 영향을 끼친다. 백두산은 상대적으로 거리가 멀어서 일부 계절편차가 나타나고 있다. 하지만 연도별 편차보다 계절편차가 더 큰 영향을 끼치는 것으로 보인다. 일본 서남부 지역의 화산군을 대표하는 화산으로 선택한 아소산

은 상대적으로 한반도와 근접했기 때문에 영향이 크지만 한반도로 유입되는 대기의 영향으로 겨울철 영향은 상대적으로 적다. 후지산과 타루마이산은 각각 일본 중부와 일본 동북지역의 화산군을 대표하는 화산으로 주로 고층대기의 흐름에 의해 한반도에 영향을 끼치며 여름에는 한반도로 직접 들어오는 저층대기의 영향과 습식침적의 영향을 받는

다. 권역별 대상화산에 대한 계절별 영향을 비교·분석하면 Fig. 5에 나타난 것처럼 평균적으로 여름에는 지표면 퇴적의 영향이 크고 겨울에는 항공로 영향이 주된 요소로 보인다.

권역별 대상화산의 가상분화가 우리나라에 끼치는 영향에 대한 계절 특성을 좀 더 명확하게 살펴보기 위해 Fig. 6에 권역별 대상화산의(최대 VEI) 가상분화 시 계절에 따른 영향 요소별 평균 영향일 수의 비율(영향 요소별 점유율)을 도시하였다. 각각의 영향 요소에 대한 계절별 평균 영향일 수의 비율을 도시한 것에 비해 대상 화산체의 지리적 위치(위치에 따른 대기 흐름의 차이)이 선명하게 드러나는 것을 알 수 있다. 화산의 위치에 따라 특정 계절의 주된 영향 요인이 극명하게 달라진다. 마찬가지로 5개년 평균에 대한 연도별 편차는 크지 않다.

결론적으로 Figs. 2(f)와 5에서 도시된 것처럼 백두산이나 울릉과 같이 한반도에 위치한 화산의 분화는 한반도에 훨씬 큰 영향을 미치며 상대적으로 약한 계절편차를 보인다. 하지만, 여름철 한반도의 집중적인 강우에 의한 화산재의 지표면 퇴적으로 인해 전체적으로 여름철 분화가 끼치는 영향이 다른 계절보다 크다. 봄, 가을에는 지표면 부근 미세먼지 농도의 증가로 인한 영향이 약간 증가하며, 강우에 의한 습식 퇴적으로 인해 미세먼지의 영향이 확연하게 줄어들게 되므로 퇴적에 의한 영향과 지표면 부근 미세먼지 농도의 영향 사이에 다소 상보적인 경향이 나타난다. 항공로에 대한 영향은 계절편차가 가장 작게 나타난다. 후지산과 타루마이산처럼 한반도에서 상대적으로 멀리 떨어진 화산에 의한 영향은 비교적 작으며 아주 강한 계절 의존성을 보인다. 대류권 하부에서 남쪽 지역으로부터 한반도로 유입되는 기류의 대부분은 여름철에 발생하며 계절에 따라 달라지는 대기의 흐름에 의해 계절별 특성이 나타난다.

4. 결 론

잠재적인 한반도 주변 화산의 분화 위험에 대비하여 본 연구진은 화산재 확산 3차원 수치모델 LADAS-VA를 개발하였고 기상청에서 제공하는 수평분해능 12 km인 지역규모 수치예보자료를 활용한 다년간의 장기 가상분화 모의실험을 수행하여 한반도 주변의 주요 화산들의 분화가 한반도에 끼치는 영향을 분석하는 연구를 진행하였다. 본 연구진은 2012년 12월 1일부터 2018년 2월 28일까지의 기간에 대해 5개 대상화산의 15종 분화에 대응하는 총 5년 3개월분 28,740 건(31,020건)의 가상분화 시나리오 모의실험 결과를 토대로 대상화산의 가상분화가 한반도에 미치는 영향일 수를 계절별로 분석하였다. 일부 연도별 편차가 나타나지만 전반적으로 계절 영향이 주된 요소로 나타났다.

백두산과 울릉은 한반도에 위치한 화산으로 분화 시에 연중 한반도에 영향을 끼친다. 백두산은 상대적으로 거리가 멀어서 일부 계절편차가 나타나고 있다. 하지만 연도별 편차

보다 계절편차가 더 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 일본 서남부 지역의 화산군을 대표하는 화산으로 선정한 아소산은 상대적으로 한반도와 근접했기 때문에 영향이 크지만 한반도로 유입되는 대기의 영향으로 겨울철 영향은 상대적으로 적다. 후지산과 타루마이산은 각각 일본 중부와 일본 동북지역의 화산군을 대표하는 화산으로 주로 고층대기의 흐름에 의해 한반도에 영향을 끼치며 여름에는 한반도로 직접 들어오는 저층대기의 영향과 습식침적의 영향을 받는다. 권역별 대상화산에 대한 계절별 영향을 비교·분석하면 평균적으로 여름에는 지표면 퇴적의 영향이 크고 겨울에는 항공로에 끼치는 영향이 주된 요소로 작용하고 있다.

본 연구진이 수행한 가상분화 시나리오 모의실험 결과에서 대상화산의 지역과 계절별 편차가 일부 나타났으며 일관되게 한반도 주변의 화산이 분화하면 여름철에 한반도에 큰 영향을 끼친다는 결론을 얻었다. 하지만 일부 불명확한 계절 편차와 연도별 편차를 확인하기 위해서는 10년 이상의 장기간에 걸친 가상분화 모의실험이 필요하며 한반도 주변의 기상장에 따른 영향이 확연하게 나타나기 때문에 등압면간 화산재 확산패턴을 비교·분석하고 각 요소별 영향과 영향을 끼친 지역을 구분하여 가상분화 모의실험 결과를 상세하게 분석해야 할 필요가 있다.

한편, 후지산과 타루마이산의 가상분화에서처럼 캄차카 반도를 돌아 한반도로 유입되는 화산재 플룸과 이후 한반도에서 빠져나가는 화산재의 영향을 평가하기 위해서는 가상분화 시나리오 모의실험의 분화 후 모의 기간을 현재보다 더 길게 수행할 필요도 있고 모의실험의 분화당 계산 기간을 늘리게 되면 지역규모 수치예보모델이 아닌 지구규모 수치예보모델을 사용해야 할 수도 있다.

화산분화 시 화산재 플룸의 최대 고도에 따른 영향을 평가하기 위해서는 단순히 VEI에 따른 분출량만 반영하지 말고 플룸의 최대 고도가 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km인 경우들로 세분하여 모의실험을 진행하는 것이 훨씬 합리적이라고 판단되며 이렇게 할 경우 대류권 중·하층부, 대류권 상층부, 성층권 하층부, 성층권에서의 화산재 확산과 그 영향을 좀 더 체계적으로 분석할 수 있을 것이다(Park and Suh, 2016). 또한, 화산분출물의 TGSD는 분화화산의 기저 암질에 따라 달라지며 이 분포에 따라 대기 중으로 방출된 화산분출물의 침적과 확산패턴이 달라진다(Bonadonna and Houghton, 2005; Park et al., 2016b). 한반도 주변 화산들 중 상당수는 안산암 혹은 유문암질 화산이며 백두산은 조면암질이고 후지산은 현무암과 피크로현무암질이다. 따라서 실시간 모사 모형에는 한반도 주변 대상 화산의 특성에 맞게 보정된 TGSD를 사용해야 하며 향후 보완이 필요하다.

이러한 몇 가지 한계나 보완점에도 불구하고 장기 모의실험 결과는 단기평가와 대응에 매우 유용한 데이터베이스가 된다. 현재 LADAS-VA 모델은 행정안전부에서 운영하는 화산재해 대응시스템에 탑재되어 실시간 화산재 확산 평가

에 활용되고 있으며 본 논문에서 수록되지 않은 2018년 이후의 시나리오 계산이 자동으로 진행되고 결과물이 데이터베이스에 쌓이고 있어 향후 한반도 주변 화산의 실제 분화 시에 신속한 화산재해 대응에 크게 기여할 것으로 기대된다(Park and Suh, 2018; Park et al., 2018). 더 나아가 확장되는 장기 모의실험 결과를 이용하여 우리나라 지역별로 각각의 영향 요소에 대한 상세한 분석연구가 추가로 진행될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부, 과학기술정보통신부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: MOIS-재난-2015-07, NRF-2017M2A8A4015253, NRF-2015M2A2B2034282, NRF-2020M2C9A1061641). 또한 본 연구에서 활용한 모든 수치예보자료(UM-RDAPS)는 국가과학기술연구망(KREONET)을 통해 기상청에서 제공하였으며 이에 감사드립니다.

References

- Achim, P., Generoso, S., Morin, M., Gross, P., Le Petit, G., and Moulin, C. (2016). Characterization of Xe-133 global atmospheric background: Implications for the international monitoring system of the comprehensive nuclear-test-ban treaty. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 121, No. 9, pp. 4951-4966.
- Bonadonna, C., and Houghton, B.F. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bull. Volcanol.*, Vol. 67, pp. 441-456.
- Bonadonna, C., Genco, R., Gouhier, M., Pistolesi, M., Cioni, R., Alfano, F., et al. (2011). Tephra sedimentation during the 2010 Eyjafjallajökull eruption (Iceland) from deposit, radar, and satellite observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, B12202. doi:10.1029/2011JB008462
- Costa, A., Macedonio, G., and Folch, A. (2006). A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 241, No. 3-4, pp. 634-647.
- Folch, A., Costa, A., and Basart, S. (2012). Validation of the FALL3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmos. Environ.*, Vol. 48, pp. 165-183.
- Folch, A., Costa, A., and Macedonio, G. (2009). FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Comput. Geosci.*, Vol. 35, pp. 1334-1342.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2017). *Climatological statistics guide 2017*. National Climate Data Center, KMA.
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M., and Matthias, V. (2012). Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010. *Atmos. Environ.*, Vol. 48, pp. 1-8.
- Lee, J.Y., and Lee, S. (2018). Analysis of probabilistic distribution of volcanic ash fallouts from neighboring volcanoes of the Korean peninsula. *J. Wind Eng. Inst. Korea*, Vol. 22, No. 2, pp. 75-82.
- Lee, S. et al. (2018). *Development of advanced volcanic disaster response system considering potential volcanic risk around Korea*. Research Report, Disaster and Safety Management Institute, Ministry of the Interior and Safety.
- Matthias, V., Aulinger, A., Bieser, J., Cuesta, J., Geyer, B., Langmann, B., et al. (2012). The ash dispersion over Europe during the Eyjafjallajökull eruption – Comparison of CMAQ simulations to remote sensing and air-borne in-site observations. *Atmos. Environ.*, Vol. 48, pp. 184-194.
- Meutter, P.D., Camps, J., Delcloo, A., Deconninck, B., and Termonia, P. (2018). Time resolution requirements for civilian radionuclide emission data for the CTBT verification regime. *J. Environ. Radioact.*, Vol. 182, pp. 117-127.
- Newhall, C.G., and Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, No. C2, pp. 1231-1238.
- Park, K., and Suh, K.S. (2016). Influence of eruption height on volcanic ash transport and dispersion, *Proceedings of 2016 Fall Meeting*, Korean Society of Volcanic Hazard Mitigation, Chuncheon, Korea, pp. 34-35.
- Park, K., and Suh, K.S. (2017). Impacts of eruptions of Mt. Baekdu on Korean peninsula: Simulation for hypothetical eruptions by using LADAS-VA model. *Proceedings of 2017 National Meeting*, Korean Society of Hazard Mitigation, Seoul, Korea, p. 410.
- Park, K., and Suh, K.S. (2018). Development of LADAS-VA docker image for real-time impact assessment on atmospheric volcanic ash dispersion. *Proceedings of 2018 National Meeting*, Korean Society of Hazard Mitigation, Seoul, Korea, p. 361.
- Park, K., Min, B.I., Kim, S., and Suh, K.S. (2017). Impacts

- of eruptions of volcanoes around Korean peninsula: Simulation for hypothetic eruptions by using LADAS-VA model. *CTBT: Science and Technology 2017 Conference*, Vienna, Austria, T1.3-P11.
- Park, K., Min, B.I., Kim, S., and Suh, K.S. (2018). Utilization of the LADAS model within emergency response systems in Korea. *Geophys. Res. Abstr.*, 20, EGU2018-6154.
- Park, K., Min, B.I., Kim, S., Yang, B.M., and Suh, K.S. (2016a). LADAS-Volcanic ash: A three-dimensional Lagrangian volcanic ash transport and dispersion model. *Proceedings of the 1st International Conference on Volcanic Hazard Mitigation*, Seoul, Korea, p. 60.
- Park, K., Min, B.I., Kim, S., Yang, B.M., and Suh, K.S. (2016b). Influence of grain-size distribution on volcanic ash transport and dispersion. *Proceedings of 2016 National Meeting*, Korean Society of Hazard Mitigation, Seoul, Korea, p. 554.
- Scollo, S., Del Carlo, P., and Coltelli, M. (2007). Tephra fallout of 2001 Etna flank eruption: Analysis of the deposit and plume dispersion. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 160, No. 1-2, pp. 147-164.
- Stohl, A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories: A review and bibliography. *Atmos. Environ.*, Vol. 32, No. 6, pp. 947-966.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., and Wotawa, G. (2005). Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 5, pp. 2461-2474.
- Stohl, A., Prata, A.J., Eckhardt, S., Clarisse, L., Durant, A., Henne, S., et al. (2011). Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their user for quantitative ash dispersion modeling: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 11, pp. 4333-4351.
- Suh, K.S., Jeong, H.J., Kim, E.H., Hwang, W.T., and Han, M.H. (2006). Verification of the Lagrangian particle model using the ETEX experiment. *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 33, pp. 1159-1163.
- Suh, K.S., Min, B.I., Yeom, M., Lee, B.G., Kim, I.G., and Baek, W. (2013). *Impacts on environment and human health after the Fukushima nuclear accident*. Technical Report, KAERI/TR-5231/2013, Korea Atomic Energy Research Institute.

Received	June 2, 2020
Revised	June 5, 2020
Accepted	July 20, 2020