백두산 천지 화산의 화산재 확산과 침적 모델링을 위한 개념적 설계

윤성호*

부산대학교 지구과학교육과

Conceptual Design for the Dispersal and Deposition Modelling of Fallout Ash from Mt. Baekdu Volcano

Sung-Hyo Yun*

Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요약: 강하화산재는 농업과 기반시설에 다양한 형태의 피해를 발생시킬 수 있는 악명 높은 재해이며, 특별히 항공과 인체 건강에 가장 유해하다. 본 연구는 백두산 화산으로부터 폭발적 분화에 의하여 화산재가 확산되고 퇴적되는 것을 모델링하기 위한 목적으로 개념적인 모델 설계를 논의하고자 한다. 이는 모델의 가정과 경계 조건에 대한 토의와 더불어 개념적인 모델의 상세 다이어그램, 가능한 입력 파라미터, 단위, 방정식에 대한 논의를 포함한다. 모델에 포함되어 있는 두 가지 주요 과정은 화산재의 확산과 퇴적이며, 만약 모델이 설계되면 모델을 실행시켜 얻을 수 있는 것은 분연주에 포함된 미세 화산재의 총량, 화산재의 이동 거리, 지표면에 침적되는 화산재 두께 등이다.

핵심어: 백두산, 화산재, 확산, 침적, 모델링, 개념적

Abstract: Fallout ash is a notorious hazard that can have a variety of damages on agriculture and infrastructure and, most notably to aviation and human health. This study discusses the design of a conceptual model to aid in modeling the dispersal and deposition of ash from Mt. Baekdu volcano. It includes a discussion of assumptions and boundary conditions of the model as well as a detailed diagram of the conceptual model, complete with input parameters, units and equations. The two main processes contained within the model are the dispersal and deposition of ash, the outputs obtained from running the model, if designed, would be the total amount of fine ash contained in the eruption column, distance travelled by ash and ash thickness at surface.

Key words: Mt. Baekdu, Volcanic ash, Dispersion, Deposition, Modeling, Conceptual

서론

한반도 북단의 중국과 북한의 국경에 위치(42°01'N, 128°03'E)한 백두산 화산은, 산정 칼데라 호수를 가지고 있는 성층화산으로, 서태평양 섭입대(일본 해구)에서 약 1,200 km 서쪽에 위치함으로써 환태평양화산대에서 벗어나 있다. 백두산 화산 활동은 잘 알려져 있지 않지만, 최근에 일부 지구물리학적 연구 즉 지진

파 토모그래피, 지구자기장 탐사 연구에서 백두산 화산의 지질학적 기원을 설명하는 섭입 관련 모형을 뒷받침하는 새로운 제안이 제시되었다. 그러나, 실제 태평양판은 일본 호상열도의 일본 해구에서 북미 판과 유라시아 판 아래로 섭입하며, 경사각은 서쪽으로 약 20°로 그 최대 깊이가 약 670 km에 이르는 데, 670 km 상부는 두만강 하류 북한과 러시아 국경 부근에서 그 북쪽의 중국과 러시아 국경 부근에 까지 이른다. 백두산 화산지역은 이들 지역으로부터 약 200 km 이상 떨어진 거리에 위치한다. 일반적으로 해구를 따라 섭입된 현무암질 해양지각은 지하로 들어

*Corresponding author
Tel: 051-510-2723
E-mail: yunsh@pusan.ac.kr

감에 따라 압력과 온도가 증가하여 청색편암으로 변성되고, 지하 670 km까지 섭입된 슬랩은 에클로자이트로 변성되어 맨틀물질로 체류하게 된다. 아직까지 670 km 심도에서 앞쪽 방향으로 축적된 에클로자이트로부터 마그마를 생성하는 데 기여하는 함수유체가 공급될 수 있는 지는 잘 알려져 있지 않다. 백두산을 포함하여 울릉도, 제주도 등 환동해알칼리화산암구의 현무암질 화산체를 구성하는 화산암의 미량원소에 대한 지구화학적 연구에는 섭입작용과 관련된 어떠한 특징이 발견되지 않음은 이미 오래전 알려져 있다 (Nakamura *et al.*, 1989; Yun *et al.*, 1993). Yun *et al.*(1993)은 백두산 지역의 화산활동을 일으키는 마그마의 성인은 북서태평양 섭입대에서의 해양판의 영향을 받지 않은 판내부의 지체구조적 위치에서 맨틀 내부에서 고온의 연약권 물질의 용승에 의해 형성된 것으로, 백두산은 열점화산에 해당하는 것으로 해석하였다.

백두산 화산은 세 번의 주요 분화 단계를 거쳐 왔다. 용암대지와 순상화산 형성 단계 동안 총 면적 약 2만 km²가 현무암으로 덮였다. 이를 기반으로 기저 반경 약 8~14 km, 높이 약 3,500 m의 조면암질 성층 화산이 형성되었다. 이그님브라이트 형성 분화 단계에서는 소위 밀레니엄 분화(Millennium eruption, Wei *et al.*, 2007)가 지금으로부터 대략 1,100년 전인 10세기에 있었으며, 이 때 직경 약 5 km의 천지칼데라가 형성되었다. 칼데라 외륜산의 최고봉은 2750 m이다. 칼데라 내부에 있는 천지 호수는 장경이 3.4~4.4 km이며 최대 수심은 373 m이고, 호수면의 해발고도는 2,189 m인 크라카토아 형의 칼데라로, 그 내부에 약 20억 톤의 물을 저장하고 있다. 화산폭발 지수 7급의 격변적인 플리니식 거대분화를 하였으며, 폭발 당시 분연주의 높이는 25 km 이상 도달하였으며, 분출물의 양은 100~150 km³ 이상에 이른다고 보고되어 있다(Yun, 2010). 칼데라 주변에는 최대 두께 74 m의 부석층이 퇴적되어 있으며, 동해를 건너 일본 홋카이도와 혼슈 북부를 통과한 화산재 구름에서 낙하한 강하화산재가 약 2,000 km 이상 떨어진 쿠릴열도 해구에서도 발견되었다(Fig. 1).

이 밀레니엄 대분화는 과거 2,000년 동안 지구상에서 발생한 화산활동 중 가장 큰 규모 중의 하나로 인지된다. 밀레니엄 분화 후에도 역사기록에 의하면 지난 1,100년 동안 31회 이상의 크고 작은 분화가 있었으며(Yun, 2013), 이들 중 1702년의 분화는 화산

Fig. 1. Distribution of B-Tm(Baegdusan-Tomakomai) tephra deposits of the Millennium eruption from Mt. Baekdu.

폭발지수 5급(분출물의 양 1.2 km³ 이상)으로 백두산에서부터 약 110 km 떨어진 함경도 부령, 경성 지역에 약 3 cm의 강하화산재를 퇴적시켰다(Yun and Lee, 2011). 2002년 6월 이후에 백두산은 오랜 기간의 휴지기를 지나고 깨어나 화산성 군발지진의 급증, He, H₂, CO₂ 농도의 증가, 식물 고사, 화산성 가스 내의 N₂/O₂와 ³He/⁴He의 높은 비, 지열과 온천수 온도의 증가 및 지표 팽창 등의 변위를 보여주었으며(Yun and Lee, 2012; Xu *et al.*, 2012), 잠재적으로 재해 발생 위험이 있는 분화 가능성이 제기되어 한, 중, 일, 북한, 러시아, 영국 등 국제적인 주목을 끌고 있다(Stone, 2010; 2011).

본 연구에서 중점을 두고 있는 강하화산재(fallout ash)가 역사시대에 다양한 화산재해 현상을 발생시킨 것이 역사기록에 남아있다. 조선왕조실록에는 함경도 지역에 우회(雨灰) 즉 강하화산재가 비처럼 낙하한 것을 수차례 기록하고 있으며(Yun, 2013), 함경도로부터 경기도 적성, 장단 일원으로 화산재가 남하하여 통과된 것(서기 1,654년)이 기록되어 있다(Yun, 2013). 최근 3년 동안의 기상장을 분석한 결과(Yun and Jang, 2013) 봄, 여름, 가을, 겨울철에 백두산에서 발생한 화산재가 한반도 남부로 확산되어 이동할 확률이 약 28%에 달하는 것으로 밝혀졌다(Table 1). 강하화산재에 의한 재해는 화산재해 중에서도 악명 높은 것 중 하나이다. 특히 백두산에서 발생 가능한 규장질 화산재는, 1980년에 분화한 세인트 헬렌즈 화산과 2010년 분화한 아이슬란드 에이아프얄라요쿨 화산과 같은 유명한 다른 화산들에서 발생한 안산암질 ~테사이트질 화산재에 비해 인체 건강에 더 해롭다.

Table 1. Expected days and percent probability to extend southward of volcanic ash from Mt. Baekdu(Yun and Jang, 2013)

Season	Month	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
		Spring			Summer			Autumn			Winter		
Year		Expected days			Expected days			Expected days			Expected days		
2010		5	7	8	12	7	0	7	5	6	7	10	5
total (days)		20			19			18			22		
2011		16	13	7	11	4	9	11	11	5	12	16	11
total (days)		36			24			27			39		
2012		9	6	17	10	6	5	7	6	9	13	6	10
total (days)		32			21			22			29		
3 years total (days)		30	26	32	33	17	14	25	22	20	32	32	26
		88			64			67			90		
Monthly average percent probability(%)		32.3	28.9	34.4	36.7	18.3	15.1	27.8	23.7	22.2	34.4	34.4	31.0
Seasonal average percent probability(%)		31.9			23.2			24.5			33.3		

왜냐하면 고규산질 화산재 속에는 폐와 호흡에 영향을 미친다고 알려진 고온의 실리카 결정인 크리스토팔라이트가 상당량 포함되어 있다는 다양한 선행연구(Horwell *et al.*, 2003; Lee and Richards, 2004)가 있기 때문이다.

항공 역시 강하화산재의 확산과 침적으로 악영향을 받을 수 있다. 폭발적인 화산 분화로 대기 중으로 올라온 화산재는 미세입자들로 이루어져 있어, 운행 중인 항공기가 분화 구름 속으로 들어갔을 때 엔진의 공기흡입구를 통하여 들어가 불완전 연소를 일으키며, 흡입량이 누적되면 노즐과 여러 배관들을 막히게 하여 엔진 오작동 및 엔진 정지를 일으킬 수 있다. 물론 엔진이 멈추더라도 활공이 가능하기 때문에 바로 추락하지 않고 가까운 곳에 공항이 있다면 착륙할 수 있지만, 위험한 상황임에는 분명하다. 엔진 문제 이외에도 화산재 속의 굵은 입자가 항공기의 동체에 스크래치를 만들고, 구조물의 접합 부분에 누적된 이물질들이 전기 화학적 부식을 일으켜 장기적으로 항공기의 수명을 단축시킬 수 있다. 또한 화산재의 마모성으로 인해 앞창의 유리창을 긁아 시정(視程)이 감소될 수도 있다.

따라서 공항과 조종사에게 그들이 곧 분화 구름과 만나게 될 것이라는 것을 경고하여 주는 것은 매우 중요하며, 이는 종종 SIGMET(Significant Meteorological Information) 보고서 형태로 제공된다. 항공기의 엔진은 아주 적은 양의 화산재와 아주 짧은 시간의 노출에도 손상을 입을 수 있다고 알려져 있다(Peterson

and Dean, 2008). 백두산의 경우, 화산에서 서쪽으로 38 km 떨어진 송강하 장백산 공항과 동남쪽 31 km 떨어진 삼지연 공항에서는 주요 항공 노선이 빈번하게 운행되지는 않지만 모니터링 결과, 이곳은 화산재가 확산되는 경로에 위치하며 가벼운 항공 교통 장애를 유발할 수 있다는 것을 보여준다. 10세기 백두산의 초거대(super-colossal) 분화와 같이 화산재가 편서풍을 타고 함경도를 지나 동해를 건너 일본 열도로 진출 확산된다면, 당연히 화산재가 국제항공노선의 경로로 이동할 수 있고, 우리나라에서는 북서태평양 항공노선에 심각한 항공 교통 장애가 발생할 수 있다는 것을 보여준다.

장애를 일으키는 화산재가 항공운항에 영향을 미칠 수 있다는 것은 2010년 4월 14일 아이슬란드 에이야프랴라요쿨 화산 분화로 인한 영향을 보면 명백하게 알 수 있다. 10만대 이상의 유럽 및 국제 항공노선이 2010년 4월 20일까지 운행이 정지되었으며, 유럽 23개국에 영향을 미쳤다(Schumann *et al.*, 2010).

아주 적은 양의 화산재조차도 짧은 기간 동안에 농업에 피해를 끼치고, 청소비용, 통신 장애 등을 발생시킬 수 있다(Hurst and Smith, 2004). 또한 화산재는 지역주민과 가옥에도 영향을 미칠 수 있으며, 침적된 강하화산재의 하중에 따라 지붕이 붕괴되거나 혹은 건물이 완전히 붕괴되는 피해를 일으킬 수 있다(Spence *et al.*, 2008).

Bonadonna *et al.*(2002)에 의하면, 강하화산재는 4가지 원인으로 발생할 수 있다. 마그마성 폭발에 의

한 분화, 용암돔 붕괴/화성쇄설류/낙석(암석붕괴)에 의한 발생, 화구로부터 직접적인 화산재의 분화(ash-venting), 수증기 폭발 등으로 발생할 수 있다. 따라서 주민, 산업, 항공에 미치는 유해한 영향과 피해를 막고 줄이기 위해 강하화산재가 발생하는 기간 동안에는 백두산 주변의 주민들은 물론, 화산재가 북풍-북동풍을 타고 한반도 남쪽으로 확산되어 내려올 경우 경로상의 주민에게 예보와 경고를 하는 것은 매우 중요하다.

따라서 본 논문은 화산재의 확산과 강하화산재의 침적에 대한 개념적인 모델을 설정하고 이 모델을 통하여 백두산에서 발생 가능한 화산재의 확산과 침적 과정 분석 및 이를 현업에 적용할 수 있도록 하고자 한다.

화산재의 확산 모델들

전 세계적으로 9개의 항공로 화산재 정보센터(VAAC: Volcanic Ash Advisory Centres)의 임무는 화산 분화를 초기에 관측하여 항공(비행)에 대한 화산재 재해를 평가하는 것이다. 백두산은 Tokyo(일본)

VAAC에서 책임 영역으로 감시하고 있는 영공에 속한다(Fig. 2).

백두산은 재해와 위험에 대한 정기적인 평가를 출간할 중국 장백산화산관측소(CHVO: Changbaishan Volcanic Observatory)와 북한의 백두산화산관측소(Paekdusan Volcanic Observatory)의 관할 구역이다. 백두산에서 폭발적인 분화가 발생하여 1654년의 역사기록과 같이 화산재가 한반도 남쪽으로 함경도를 지나 경기도 쪽으로 확산될 수 있음(Yun, 2013)을 인지하고 기상청에서는 화산재의 확산을 예보하기 위한 실시간 정보와 모델을 구축하고 있다. 일반적으로 여러 모델들은 제한적인 변수를 사용하고 있으며, 주로 확산 경로 예측과 이동하는 화산재 구름의 농도 및 통과지역에 낙하하여 침적되는 화산재의 침적량을 중심으로 하고 있다.

화산재 확산 모델들(Table 2)은 일반적으로 VATDM(Volcanic Ash and Dispersion/Tracking Model) 또는 VAFTAD(Volcanic Ash Forecast Transport And Dispersion Model)이라는 용어로 알려져 있다(Heffter and Stunder, 1993; Mastin *et al.*, 2009b). 이러한

Fig. 2. Volcanic ash advisory centers(VAAC) showing areas of responsibility. The Mt. Baekdu volcano is within the monitored airspace of the Tokyo VAAC area.

Table 2. Main characteristics of existing volcanic ash transport and dispersion models(VATDM)(after Bonadonna *et al.*, 2010, 2012)

Model Name	ASH3D	ATHAM	FALL3D	FLEXPART	HYSPLIT	JMA	MLDP0	MOCAGE	NAME	PUFF	TEPHRA2	VOLCAL-PUFF
Approach												
Eulerian	O	O	O				O				O	
Lagrangian				O					O			
Hybrid(Semi-Lagrangian)	O				O							O
Method												
Analytical(Gaussian)											O	
Semi-analytical												
Numerical	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		
Local (~100 km)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Regional (~1,000 km)	O		O	O	O		O	O	O	O		O
Global	O			O	O	O	O	O	O	O		
Is the horizontal spatial resolution fixed?	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No
Is the vertical spatial resolution fixed?	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No
Is operational for forecast at some institute /NAAC/VO?	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
Model Physics												
Topography	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Horizontal wind advection	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
vertical wind advection	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Horizontal atmosphere diffusion	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Vertical atmospheric diffusion	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Particle sedimentation	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Other dry deposition mechanisms												
Wet deposition(wet removal)				O	O	O	O	O	O	O		O
Dry particle aggregation												
Wet particle aggregation				O								
Particle shape	O		O		O	O				O		O
Dispersal shape	O											
Dispersal of different gas species		O	O	O	O		O	O	O	O	O	O
Chemical process				O	O				O	O		O
Others			O ¹		O ²	O ³	O ⁴	O ⁵		O ⁶		
Is the number of classes fixed?	No	No	No	No	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No	No
Is the granulometric distribution arbitrary?	Yes	No	Yes	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Is there any an upper/lower limit on the particle size?	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	No

Table 2. Continued

Model Name	ASH3D	ATHAM	FALL3D	FLEXPART	HYSPLIT	JMA	MLDP0	MOCAGE	NAME	PUFF	TEPHRA2	VOLCAL-PUFF
On-line coupling		O										
Off-line coupling	O		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Is there model linked to a particular NWP model?	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No	No
Is there some pre-process interface for NWP data interpolation?	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
Point source(PS)			O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Uniform(linear) vertical distribution(L)				O	O	O	O	O	O	O	O	
Umbrella type(top-hat)(U)				O	O	O	O		O	O	O	
Poisson distribution(P)				O	O	O	O			O		
Long-normal[Suzuki]	O		O		O	O					O	
distribution(LN)												
Buoyant plume theory(BP)			O						O	O ¹⁰		O
Others		O ⁷		O ⁸			O ⁹					
Can transient columns be described?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes
Can data be assimilated as an 'initial' source term condition?	No	No	No	Yes	Yes, No	Yes	Yes	No	No	Yes	No	
Tephra dispersal load		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Tephra deposit thickness	O	O	O								O	O
Airborne concentration	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Airborne concentration profiles at a given height	O	O	O	O			O	O	O	O	O	O
Vertical concentration profiles	O	O	O	O			O	O	O	O	O	O
Aerosol optical depth		O	O	O			O	O	O	O		
Aerosol(gas) concentration		O	O	O			O	O	O	O		
Cloud mass	O	O	O	O			O	O	O	O		O
Cloud area/volume	O	O						O	O	O		O
Concentration at ground level		O	O	O			O	O	O	O		O
Others	O ¹¹	O ¹²	O	O	O ¹³	O ¹⁴	O ¹⁵			O ¹⁶		O ¹⁷
ASCII	O			O	O	O	O	O	O	O	O	O
Binary (exclusive of the model)	O	O		O	O	O	O	O	O	O		
netCDF	O	O	O				O	O	O	O		
Grib1				O	O		O	O	O	O		
Grib2								O	O	O		
Graphic format (gif <i>et al.</i>)	O ¹⁸		O ¹⁹		O	O	O	O	O	O	O	O
Others							O ²⁰			O ²¹	O ²²	O ²³

Table 2. Continued

Model Name	ASH3D	ATHAM	FALL3D	FLEXPART	HYSPLIT	JMA	MLDP0	MOCAGE	NAME	PUFF	TEPHRA2	VOLCAL-PUFF
Programming language	Fortran95	Fortran90	Fortran90	Fortran	Fortran90	Fortran90	Fortran90	Fortran77/90	Fortran95 (graphics)	C, C++	C	Fortran77/90
Operating system	Linux ±Window	Linux	Unix/ Linux	Unix/ Linux	Unix/ Linux, PC, Apple	Linux	Linux/AIX	Unix	Unix, Window	Unix/ Linux	Unix	Unix /Linux
Does a parallel version of the code exist?	No	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes*	No
Is it an open source/public code?		Yes, No	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No
External library packages:	Regridpack Lapack, NetCDF, Proj4	-	NetCDF	GRIB decoding library	-	JMG, NWPLIB, NuSDas	-	Libemos	ECMWF, GRIBEX	NetCDF, udunits library	TEPHRA1	-
Computational characteristics	<p>O¹ Convention</p> <p>O² Radioactive decay</p> <p>O³ Radioactive decay, survival rate of Footh-and-Mouth Disease virus, Avian Influenza</p> <p>O⁴ Convection is accounted for: transport by convection is based on the mass flux scheme of, with embedded representation of scavenging.</p> <p>O⁵ Radiological decay, cloud gamma and dose assessments; decay of biological and vector species; deep convective mixing.</p> <p>O⁶ Variable particle velocity with height and Reynold's number.</p> <p>O⁷ ATHAM simulates the eruption column and plume based on a prescribed volcanic forcing at the lower boundary (vent).</p> <p>O⁸ Detailed vertical ash emission distribution, e.g., from inverse modelling.</p> <p>O⁹ The eruptive vertical column distribution can be defined by the user.</p> <p>O¹⁰ Define plume height, can vary with time or fixed for eruptive event.</p> <p>O¹¹ Ash arrival times at airports.</p> <p>O¹² PMx at surface.</p> <p>O¹³ Particle positions.</p> <p>O¹⁴ Trajectory of specific tracers.</p> <p>O¹⁵ 4D geospatial coordinates of Lagrangian particles, age of particles, etc.</p> <p>O¹⁶ Grain size distribution at each grid point.</p> <p>O¹⁷ PMx concentration at surface.</p> <p>O¹⁸ Kml format</p> <p>O¹⁹ GRD format optional.</p> <p>O²⁰ PS, JPEG, PNG, TIF, SHP (shapefile), etc.</p> <p>O²¹ Web based outputs as html, php and also Google Earth KML and KMZ.</p> <p>O²² Working on shapefiles (ArcGIS) and Google Earth</p> <p>O²³ VTK file format (to be read by Paraview)</p>											
Others												

모델의 예는 HYSPLIT 4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델로, 이는 화산 뿐 아니라 오염 사건에 뒤따르는 방사성 구름, PM_{10} (사막 먼지), $PM_{2.5}$ (들불 연기)의 확산과 같은 여러 가지 다양한 목적으로 사용될 수 있다. 라그랑주 함수 모델로 이름 붙여짐에도 불구하고 HYSPLIT 4는 모델링을 위해서 오일러 함수 접근법을 결합하여 실행된다. 이 모델은 다운로드 받아서 활용할 수 있다. 소프트웨어는 화산재의 확산과 집중을 보여주는 분화 구름의 그래픽 영상으로 결과물을 만들어낸다(Draxler and Hess, 1998; NOAA Air Resources Laboratory, 2010). PUFF는 화산재를 추적하는 목적으로 사용되는 모델의 한 예이며, 생성된 지 48시간 이내인 비교적 신생의 화산재 구름에 대해 활용된다. PUFF는 초창기에 빠른 사용이 가능한 활동적인 소프트웨어 패키지로 운영하기 위해 개발되었고, 새로 발생한 분화 구름에 대해 긴급 상황에 사용하기 위해 특별히 고안된 모델이다. 이는 1989~1990년 알래스카의 리다우트 화산의 분화로 야기된 경제적 피해가 발생한 후에 북태평양 지역에서 사용하기 위해 개발되었다(Searcy *et al.*, 1998). PUFF는 온라인상의 사용자들도 사용이 가능하다. 결과물은 명시된 시간 동안 개개의 입자들이 이동한 그래프의 형태로 제시된다. 차이텐(Chaiten)과 같이 최근에 분화(2010년 10월 24일)하고 있는 화산에 대한 부가적인 정보는 구글 어스(Google Earth)에서 다운로드 할 수 있다. 이는 2차원의 공중 확산, 2차원의 강하 지역 및 3차원의 뷰(보기)를 포함한다. PUFF는 알래스카 화산관측소(AVO: Alaska Volcanic Observatory, 2010)에서 C와 C++ 언어로 프로그래밍하여 사용하도록 고안되었다. FALL3D는 집중하고 있는 지역의 과거와 현재의 분화에 의한 화산재의 추적과 침적을 분석 예측하기 위한 오일러 함수 접근법에 기초한 모델이다. FALL3D는 FORTRAN-90 코드를 사용하여 개발되었고, Unix, Linux, Mac 시스템에서 가장 잘 구동된다(INGV, 2010). 이 모델의 적용 예는 2001년 에트나 화산 분화(Costa *et al.*, 2006)와 2008년 차이텐 화산 분화(Folch *et al.*, 2008)에서 볼 수 있다. 앞서 논의된 모델들과 유사한 아이디어에 기초하여 만들어진 또 다른 VATD 예는 영국 기상청에서 개발한 NAME(Numerical Atmospheric-dispersion Modeling Environment: Ryall and Maryon, 1998; Jones *et al.*, 2007), 캐나다의 CANERM(D'Amours, 1998; D'Amours *et al.*, 1998), 유럽연합

의 MEDIA(Piedelievre *et al.*, 1990; Sandu *et al.*, 2003) 등이 있다. 전 세계 9개의 항공로 화산재 정보 센터들 중 VAAC London에서는 NAME 확산모델, VAAC Buenos Aires에서는 FALL3D 확산모델, VAAC Toulouse에서는 MOCAGE 확산모델, VAAC Wellington에서는 PUFF 확산모델, VAAC Tokyo에서는 JMA-GATM(Global Atmospheric Transport Model) 확산모델, US VAACs(Anchorage, Washington)와 VAAC Darwin에서는 HYSPLIT, VAAC Montreal에서는 MLDP0 확산 모델을 각각 사용하고 있다(World Meteorological Organization, 2012).

가설과 개념도

화산재의 확산과 침적을 시뮬레이션 하기 위한 모델은 ‘화산재의 확산과 퇴적(Dispersal and Deposition of Ash; DDA)’으로 불려왔다. DDA는 여전히 모델의 기능을 향상시키기 위해 보다 넓은 영역에 적용해야 하지만, 보다 지역적인 수준과 보다 긴 시간 프레임에서 정확도를 향상시키기 위해 PUFF와 같은 모델로 개선하려고 노력 중이다. 개념적인 다이어그램의 제작 설계에 앞서 필요한 모델의 가정은 다음과 같다.

가정 1. 분화율(eruption rate)이 크다는 것은 대기 중으로 보다 많은 화산재를 방출하고 화산재가 점차적으로 더 많이 퍼져나가는 것으로 간주한다.

가정 2. 분화 지속시간(eruption duration)이 길다는 것은 대기 중으로 보다 많은 화산재를 방출하고 화산재가 점차적으로 더 많이 퍼져나가는 것으로 간주한다.

가정 3. 분연주(eruption column)가 더 높다는 것은 화산재가 더 많이 퍼져나가는 것으로 간주한다.

가정 4. 대기 중의 풍속(wind speed)이 세다는 것은 화산재가 더 멀리 퍼져나가는 것으로 간주한다.

이들 가정 각각의 이면에 숨겨진 근거는 분화 기동(분연주)을 생성하는 분화 현상의 대부분에 이들이 적용된다는 것이 연계되어 있으며 비교적 간단하다. Parfitt and Wilson(2008)과 Mastin *et al.*(2009b)에서 각각 주어진 방정식에 따르면, 분화 물질이 더 많다는 것은 확산되는 화산재가 더 많이 방출된다는 것을 의미한다. 이와 유사하게 더 긴 시간 동안의 지속적인 분화는 더 많은 화산재를 방출할 것이며, 더 넓은 지역으로 퍼져나갈 잠재력을 가진다는 것을 의미

Fig. 3. A Graphical Representation of the Dispersal and Deposition of Ash model.

한다. 분연주의 높이가 더 높다는 것은 화산재가 퍼져나갈 수 있는 확산 범위와 시간이 더 많이 주어진다 것을 의미하고, 화산재 입자들의 강하 시간이 더 길어질 것이라는 것을 의미한다. 분연주에 작용하는 풍속이 더 세다는 것은 화산재의 확산 방향과 거리 뿐 아니라 확산 규모도 결정할 수 있게 한다 (Carey and Bursik, 2000).

Fig. 3은 DDA 모델의 초보적 개념(Pering, 2010)을 그래픽으로 표현한 것이다. 여기에는 분화와 화산재 자체에 관련해서 필요한 데이터의 7개 카테고리(영역)가 제시되어 있다. 이는 마그마 유형(magma type), 분화 체적(eruption volume), 분화률(eruption rate), 분화 지속시간(duration), 분화된 화산재가 형성한 우산구름에서의 분연주의 높이(umbrella height), 분화 구름 내의 화산재 함량(ash content of eruption

Fig. 4. Schematic illustrations of volcanic eruption clouds showing strong plume and weak bent-over plume(Suzuki and Koyaguchi, 2012).

cloud), 그리고 화산재 입자 크기(ash particle size)이다. 여기에는 또한 대기 상태에 대한 5개의 카테고리도 포함되어 있는 데, 풍향, 풍속, 대기 중의 수증기 함량, 당시의 우발적인 기상 조건과 화산재의 침적 등이다. 이러한 주된 요소들은 모델 내에서 모두 다 사용하지는 않고, 모델 내에서 어떤 에러들이 나타나거나 더 큰 모델링 에러를 만들어내는 기회를 가능한 한 감소시키기 위해 절감의 원리(principle of parsimony)로 사용된다.

모델 내에 이러한 카테고리들을 포함시키는 이유는 다음과 같다.

먼저 마그마 유형은 분화 유형을 결정하는 파라미터로서 포함된다. 백두산의 역사시대 분화를 고려할 때, 마그마 유형은 조면암질 마그마와 알칼리유문암

Table 3. Magma types and guideline used to assign eruption types to the world's volcanoes(Mastin et al., 2009a)

Eruption type	Magma type	Historic eruption characteristics
M0	Basalt or other mafic	Insufficient historical data to characterize
M1		$H \leq 5$ km or $VEI \leq 2$
M2		$H = 5 \sim 8$ km or $VEI = 3$
M3		$H > 8$ km or $VEI \geq 4$
S0	Andesite, dacite, rhyolite or other explosive composition (trachyte, alkali rhyolite)	Insufficient historical data to characterize
S1		$H \leq 6$ km or $VEI \leq 2$
S2		$H = 6 \sim 12$ km or $VEI = 3$
S3		$H > 12$ km or $VEI \geq 4$
S8		Major pyroclastic flows, within an elutriate column rising primarily above the flows
S9	All magma type	Active lava dome is present
U0		Submarine vent with a water depth ≥ 50 m

질 마그마의 혼합형이다. 그러나 마그마 유형은 다른 화산을 고려할 때는 변화될 수 있다. 지구상의 1,536 좌의 화산을 대상으로 분류한 일반적인 유형은 Table 3에서와 같이 M0, M1, M2, M3, S0, S1, S2, S3, S8, S9, U0 등 11유형으로 구분이 가능하다(Mastin *et al.*, 2009a). 그러나 현실적으로 해수면으로부터 50 m 아래에 있는 화산들(U0 type)과 M0, S0을 제외한다면, 나머지 8개 유형을 유용하게 사용할 수 있다. 백두산 화산에서는 역사시대의 분화 양상을 근거

로 적용한다면, 주로 S1, S2, S3, S8이 적용이 가능할 것이다.

분화 체적은 분연주 내의 화산재의 양과 분연주 내의 화산재 입자 크기를 결정하는데 필요하며, 분화율은 분화가 지속되는 동안 방출되는 화산재의 양을 결정하기 위해 포함된다. 그리고 분화 지속시간은 방출된 화산재의 양을 계산하기 위해 필요하다. 분연주의 높이는 화산재 입자가 수평 확산되는 높이를 결정하기 위해 필요하다(Fig. 3). 그러나 이는 풍속에 의존

Fig. 5. Wind distribution diagrams from Yanji Station near Mt. Baekdu volcano for the period 1980-2008. Horizontal wind vectors (intensity and direction) are reported at different altitudes (0-5 km, 5-10 km, 15-20 km and >20 km). The winter includes December, January and February, the spring includes March, April and May, the summer includes June, July and August, and the autumn includes September, October and November(After Yu *et al.*, 2013).

한다. 만약 분연주가 그 지역에서 평균 풍속보다 더 빠르게 상승한다면 우산구름은 수직 분연주의 꼭대기에 형성될 것이고, 평균풍속보다 더 느리게 상승한다면 약하고 굽어진 형태의 분연주가 형성될 것이다 (Fig. 4).

분화 구름 내의 화산재 함량은 우산구름의 꼭대기에서 얼마나 많은 화산재가 확산될 것인가를 결정하기 위해 필요하고, 화산재 입자 크기는 분연주 내에서 혹은 우산구름 꼭대기에서 화산재가 얼마나 멀리 그리고 얼마나 많이 퍼져나갈 것인가를 계산하기 위한 파라미터이다.

풍향과 풍속은 화산재가 퇴적되기 위한 필요조건을 충족시키기 전에 화산재가 어떤 방향으로 얼마나 멀리 운반되는가를 결정하기 위해 필요하다. 백두산 지역의 풍향은 Fig. 5에서와 같이 계절에 무관하게 주로 서풍 계열이 우세함을 보여준다. 통상적인 경우 계절에 관계없이 백두산에서 발생한 화산재는 동해 쪽으로 빠져나가게 된다(Fig. 6). 그러나 백두산 지역

에 서풍이 불다가 북풍 계열의 바람(북풍 또는 북동풍)이 유입되면 화산재는 남한으로 확산될 가능성이 충분하다(Fig. 7). 각 계절별로 화산재가 백두산 지역에서 남하하여 한반도남부로 확장 진출될 가능성은 최근 3년간의 기상장 분석 결과 약 28%로 계산되었다(Table 1). 대기 중에 포함된 많은 수증기는 화산재 입자를 응집시켜 낙하 속도를 증가시키기 때문에 이를 고려하기 위해 수증기 함량(습도)이 포함되며, 분화시의 기상조건 역시 비슷한 이유로 고려된다. 만약 화산재가 강수현상이 있는 동안에 방출된다면 수증기 분자가 화산재 입자를 부착하게 되고 이후에 대기 중에서 쉽게 제거되며(Textor *et al.*, 2006a, 2006b), 또한 습한 조건은 수 킬로미터까지 분연주의 높이를 증가시키고, 많은 양의 강수는 라하르(lahar)를 발생시킬 수 있다.

마지막 파라미터는 강하화산재의 침적량으로, 이는 화산재 입자가 대기로부터 제거될 때 그리고 지표면에서의 화산재의 두께를 결정할 때 필요하다.

Fig. 6. Seasonal patterns of volcanic ash dispersion from Mt. Baekdu(Yun and Jang, 2013).

Fig. 7. Distribution of particles emitted from Mt. Baekdu under different VEI at 24 (left panels) and 48 (right panels) hours after release: a), b) for VEI 2, c), d) for VEI 4, e), f) for VEI 6, and g), h) for VEI 7(modified from Lee *et al.*, 2012).

개념적 모델의 가정과 경계조건

Fig. 3에서와 같이 화산재 확산 퇴적의 개념적 모델의 입력 요소는 마그마 유형, 분화율, 분화 지속시간, 분화 체적, 분연주 높이(만약 알려져 있지 않다면 분화율과 분화 체적으로부터 계산될 수 있음), 풍속, 풍향, 상대습도, 강수량, 미세 화산재의 질량 분율 등이다. 이들 중 마그마 유형, 미세 화산재의 질량 분율, 상대습도와 같은 입력 요소는 모델이 실행되는 동안 상수로 둔다.

모델의 실행 과정은 화산재의 확산과 화산재의 퇴적으로 구분한다. 그리고 모델 실행의 결과물은 분연주 내의 미세 화산재의 총량, 화산재의 이동 거리 그리고 지표에서의 화산재의 침적 두께 등이다. 모델이 실행되는 마지막에 결과는 영향을 받는 지역을 보기 위해 수치지도상에 겹쳐서 표출될 수 있다. 이는 위험과 재해 평가 및 분화 사건이 일어나기 전 혹은 일어나는 동안에 경고를 발령할 수 있도록 해 준다. 이 개념적 모델의 초기 조건은 다음과 같이 서술할 수 있다. 시뮬레이션에 앞서 화산에서는 어떠한 화산재의 방출도 일어나지 않는다. 이는 시뮬레이션 전에

진행 중인 분화가 없다고 하는 의미도 될 수 있고 이미 진행 중인 분화가 반복되고 있다는 의미도 될 수 있다.

다음의 가정들은 개념적인 모델을 결정할 때 만들어진 것이다. 분화 지속시간은 현저한 양의 화산재가 방출될 때의 시간을 의미한다. 이는 피해를 유발하기에 충분한 시간이다. 분화율과 분화 체적은 분연주의 최고 높이와 분연주의 우산구름 높이와 연관된다. 분화율과 분화 체적은 서로 관련된다. 통상 큰 분화율은 큰 분화 체적으로 명시된다. 즉 화산폭발지수 0인 경우 분화율은 0, 1인 경우 10^5 kg/s, 2인 경우 $10^5 \sim 10^6$ kg/s, 3인 경우 $10^6 \sim 10^7$ kg/s, 4인 경우 10^7 kg/s, 5인 경우 $10^7 \sim 10^8$ kg/s, 6인 경우 $10^8 \sim 10^9$ kg/s, 7인 경우 $10^9 \sim 10^{10}$ kg/s, 8인 경우 10^{10} kg/s 이상으로 주어질 수 있다. 분화 구름 내의 입자 크기가 1 mm 이상이면, 대기 중으로 방출된 후 30분 이내에 분화 구름을 벗어날 수 있는 최종 속도로 낙하하게 된다. 화산재 입자 크기가 $63 \mu\text{m}$ 이하인 것만 최적의 크기 지시자로, 그리고 항공과 인체에 뚜렷한 영향을 미치는 것으로 간주한다. 방재 차원의 효율적인 확산 입자 크기 산정을 위하여 $0 \sim 2.5 \mu\text{m}(\text{PM}_{2.5})$, $2.5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$

(PM10), 10 μm ~25 μm , 25 μm ~63 μm , 63 μm ~250 μm , 250 μm 이상으로 구분하여 계산할 수 있다. 마그마 유형은 분연주의 화산재 함량과 화산재 입자 크기 효과를 효율적으로 상쇄해 준다. 화산재 우산구름의 기둥 높이는 대기 중에서 화산재가 수평적으로 퍼져나가는 주요 부분을 의미한다. 스토크(Stoke)의 강하법칙은 화산재 침적에 활용된다. 이는 $\text{pg}/\eta = 1.08 \times 10^9 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 방정식으로 표현된다. Shipley and Sarna-Wojcicki(1982)에 의하면 화산재의 밀도는 부석으로 주로 구성된 경우 700~1,200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 유리사아드로 구성된 경우 2,350~2,450 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 광물 결정으로 구성된 경우 2,700~3,300 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 그리고 암석편으로 구성된 경우 2,600~3,200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 알려져 있고, 조립의 밀도가 큰 화산재 입자들은 주로 분화구 근처에 낙하하여 퇴적되고, 세립의 부석질 사야드들은 비교적 먼 거리에서 강하화산재로 낙하하여 퇴적된다고 하였다. 백두산으로부터 약 500 km 이상의 거리인 한반도 남쪽으로 확산될 부석질 화산재의 밀도를 950 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 가정하여 이를 백두산 화산에 적용시킬 때 방정식은 다음과 같다.

$$950 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 9.8 \text{ ms}^{-1} / \eta = 1.08 \times 10^9 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

이 방정식은 Searcy *et al.*(1998)에서 취한 것으로, 화산재가 확산되는 내부에서 어떠한 난류도 일어나지 않음을 가정한다. 이는 한번 최종속도로 떨어진 입자들은 불충분한 풍속 때문에 공기 중에서 더 이상 부유하지 않는 것을 의미한다. 난류는 일반적인 과정에 매우 큰 불확실성을 야기하므로 포함시키지 않는다(Webley and Mastin, 2009; Webley *et al.*, 2009a).

개념적 모델에 필요한 주요 방정식은 다음과 같다. 분화율(R)과 분연주의 우산구름 높이(H_U) 사이의 관계는 $H_U = 0.236 \times R^{1/4}$ 로 주어진다(Parfitt and Wilson, 2008). 만약 분연주의 우산구름 높이가 알려져 있지 않거나 혹은 단지 높이를 추정하는 것만이 가능하다면, 이 식은 보다 더 정확한 결과를 얻기 위해 사용될 수 있다. 대신 분화 체적(V)이 알려져 있다면, $H_U = 25.9 + 6.64 \log_{10}(V)$ 방정식으로 분연주의 우산구름 높이를 계산할 수 있다(Mastin *et al.*, 2009b). 이는 단지 34개의 분화를 비교하여 가장 적합한 상관관계를 얻어 이에 기초하여 만들어진 방정식이므로 주의하여 사용하여야 한다. 왜냐하면 만약 분연주의 우산구름 높이가 필요하다면, Parfitt and Wilson (2008)

에서 얻어진 방정식이 사용되어야 하기 때문이다. 모델에서 가장 중요한 요소 중 하나는 바로 Stoke의 강하법칙이다. 이는 위에서 설명한 바와 같이 Searcy *et al.*(1998)에서 사용되어 왔다. 이는 서로 다른 화산재 크기로 인해 매우 다양하게 변화하는 낙하 시간의 복잡성을 제거하기 위해 상수로서 고려된다.

개념적 모델에는 다음과 같은 경계조건이 적용된다. 첫째, 만약 분연주가 성층권까지 도달하고 화산재의 변화되는 양이 제트류와 같은 매우 빠른 풍속과 관련된다면, 모델의 침적법칙으로 이와 같은 경우의 화산재의 이동을 시뮬레이션 할 수 없기 때문에 결과를 예측할 수 없게 된다. 그러나 이는 성층권의 매우 빠른 바람 속으로 화산재가 이동해 갈 수 있는 고도와 관련되어 적용될 수 있거나 혹은 극도로 큰 분화인 VEI 7 혹은 8의 거대 분화의 경우에만 관련될 수 있다. 이것이 난류를 이 모델에 포함시키지 않는 이유이다. 둘째, 이 모델은 국지적인 규모의 지역(~250,000 km^2)에 걸쳐서 확산될 때로 제한되며, 화산재가 전 세계적으로 확산되는 경우에는 적합하지 않다. 셋째, 모델 내에서 지형 정보는 고려하지 않는다. 고도가 크게 차이 나는 지역에서는 어떤 분화도 정확하게 시뮬레이션 될 수 없다. 왜냐하면 안데스와 같은 예에서 알 수 있듯이 비정상적인 바람의 흐름 조건이 발생하기 때문이다.

토 의

모델의 초기 내용을 설명하고 적용하기 위해서는 분화 파라미터에 대한 회수가 필요하다. 분화에 대해 모델을 적용하기 위해서는 분연주 높이, 분화율, 분화 체적 및 분화 지속시간, 실제 바람 상태가 더 좋다고 할지라도 추정할 수 있는 풍속과 풍향 등의 최소 파라미터들이 필요하다.

분연주의 높이, 분화율, 분화 체적에 대한 데이터는 다양한 소스로부터 추정되거나 획득할 수 있다. 여기에는 불확실성이 큰 가시 관측, 서로 다른 데이터 동화 기술로 인해 불확실성이 큰 가시광선/적외선/레이더 기술을 사용하는 위성 데이터, 부유하는 플룸 이론에 기초한 ATHAM(Table 2)과 같은 화산재 기둥 모델들이 존재한다. 마그마 유형과 화산재의 질량 분율은 이전의 분화를 분석하고 이와 적절하게 일치하는 것을 찾아 결정할 수 있다. 또한 역사시대 분화물의 분화가 진행되는 동안에도 조면암질 마그마 유형

과 규장질 마그마 유형이 함께 나타나는 백두산 화산 분화에서 보듯이 마그마 유형은 분화 과정 중에도 변할 수 있음을 명심해야 한다. Fig. 3에서 나타낸 화산재($<63 \mu\text{m}$)의 질량 분률 값인 0.4~0.7(Bonadonna *et al.*, 2002)은 백두산과 유사한 규장질 분화를 했던 수프리에 힐즈 화산에서 1995년에 시작된 이전의 분화 사건 후에 채취한 샘플을 가지고 구한 평균값이다. 기상학적 정보(풍속, 풍향, 습도, 강수)는 전 세계 규모로 데이터를 저장하고 분석하는 MET Office, 동북아시아의 데이터를 저장하고 있는 일본 동경기상대와 같은 기상 조직으로부터 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 또한 기상학적 정보를 유추할 수 있는 개요 차트 형식의 많은 정보를 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 얻을 수 있다. 모델을 분화에 적용하는 것을 고려할 때, 만약 화산재의 퇴적과 수송에 영향을 미칠 수 있는 정도의 변화가 아니라면 습도와 강수의 변화는 필수적으로 고려하지 않아도 된다. 뒤따르는 결과물과 과정은 기존의 방정식을 사용하거나 혹은 이전의 카테고리들을 사용하여 산출할 수 있다. 만약 모델이 어떠한 추정도 없이 정확한 소스 데이터를 포함하는 가능한 모든 입력 요소를 가지고 실행된다면 아마도 가장 효과적인 결과를 산출해 낼 수 있을 것이다(Webley *et al.*, 2009b). 그러나 만약 전체 혹은 일부의 입력 요소가 부정확하다면, 기대하는 결과를 얻기 위해 추정과 시뮬레이션에서 나타나는 문제점들을 제거하는 계산이 필요할 것이다. 결론적으로, 입자 추적 기능을 가지고 있는 라그랑주 함수 모델과 같이 모델 자체적으로 실행되는 것이 가장 좋다. 라그랑주 함수 모델은 불확실성으로 인해 알게 된 주어진 여러 개의 답을 분석하는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법으로 가장 잘 실행되며, 몬테카를로 분석은 이러한 불확실성을 명확하게 보여주며 따라서 여러 범위와 결과의 범위를 매우 명확하게 알려준다. 이 방법을 사용함으로써 덜 정확한 그리드에 기초한 모델들을 사용하는 것을 피할 수 있다.

여기에서 논의된 모델에 대한 전반적인 적용은 간단하거나 쉽지 않다. 이는 분화와 대기 중에서 일어나는 과정의 복잡성과 이들을 적용하는 것이 어렵기 때문이다. 많은 사례들에서 볼 수 있듯이 난류 확산과 분연주 생성 과정과 같은 여러 요소들에 대한 많은 이론들이 존재한다. 일반적으로 화산재 확산 이동 모델과 관련된 몇몇 이슈들이 존재하며, 이는 DDA 모델에도 마찬가지로 해당된다. 소스 데이터가 급히

필요한 경우의 분화 사건이 일어나는 동안, 파라미터들은 때때로 부정확하게 되고 추정되어야만 하며, 어떤 환경에서는 이러한 관측은 가시적이지만 분연주의 높이와 같은 특징들의 가시 관측으로부터의 계산된 결과가 수 km씩 차이가 날 수 있다. 과정들에 대한 면밀한 묘사가 부족한 것과 모델 내에 어떤 과정들이 불포함될 경우 모델은 정확도가 떨어지게 되고 시스템 묘사가 충분하지 못하게 된다는 것이 논쟁이 되고 있다. 그러나 등결과정은 같은 결과를 산출하는 데는 하나 이상의 많은 과정들이 존재할 수 있다는 것을 알려주며, 최절약 원리는 우리가 가장 단순한 설명을 할 수 있다는 것을 알려준다. DDA 모델을 창출하는 동안 그 목적은 단순한 모델을 창출하는데 있어서 최절약 원리를 유지하면서 주된 과정을 묘사하는 것이다.

결론

결론적으로 화산 분화가 일어나는 동안 대기와 분화 구름 내에서 일어나는 모든 과정을 결합시켜 모델에 적용하는 것은 매우 어렵다. 그러나 백두산이 폭발적으로 분화하여 화산재가 한반도 남부로 확산되는 경우, 이러한 모델들은 국민 건강, 농작물, 전자산업 및 항공 산업 등에 대해 어떤 방법으로든 주민의 삶에 영향을 미칠 수 있는 위험이나 재해에 대한 경고를 해야 하는 인구밀집지역과 같은 지역에서는 매우 중요하다.

또한 이 모델들은 지역사회와 공동체에 경고를 하는 것을 도와주고 대비할 수 있도록 해 준다. 이들 모델의 적용은 이미 앞서 진술했듯이 유사한 상황에 있는 다른 분화에도 활용될 수 있다. 또 근원 화산, 화산재 두께, 확산 지역이 알려져 있는 곳에서 역 모델링을 할 수 있으며, 이를 통해 분화 체적, 분화율, 분연주 높이는 잠재적으로 계산될 수 있다. 이는 과거의 분화를 연구하는데 효율적으로 적용될 수 있다.

사사

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 ‘화산재해 피해예측 기술개발’[과제번호(NEMA-백두산-2012-1-2)]과제의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 감사드립니다. 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 해 주신 황상구 교수와 익명의 심사자에게 감사드립니다.

References

- Alaska Volcano Observatory, 2010, Puff-Volcanic Ash Tracking Model. [Online] Available at: <http://puff.images.alaska.edu/index.shtml> [Accessed 24th October 2010]
- Bonadonna, C., Mayberry, G.C., Calder, E.S., Sparks, R.S.J., Choux, C., Jackson, P., Jeune, A.M., Laughlin, S.C., Norton, G.E., Rose, W.I., Ryan, G. and Young, S.R., 2002, Tephra fallout in the eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat. In: Druitt, T.H., Kokelaar, B.P. (Eds.), *The eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999*. Geological Society of London Memoirs, 21, 483-516.
- Bonadonna, C., Arnau Folch, A., Loughlin, S. and Puempel, H., 2010, Ash dispersal forecast and civil aviation workshop, Geneva, Switzerland (18-20 October, 2010), Consensual Document, 26 p.
- Bonadonna, C., Arnau Folch, A., Loughlin, S. and Puempel, H., 2012, Future developments in modelling and monitoring of volcanic ash clouds: outcomes from the first IAV-CEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation. *Bulletin of Volcanology*, 74, 1-10.
- Carey, S. and Bursik, M., 2000, Volcanic Plumes. In: H. Sigurdsson, ed. *Encyclopaedia of Volcanoes*. London: Academic Press, 527-544, 1417 pp.
- Costa, A., Macedonio, G. and Folch, A., 2006, A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth and Planetary Science Letters*, 241, 634-647.
- D'Amours, R., 1998, Modelling the ETEx plume dispersion with the Canadian emergency response model. *Atmospheric Environment*, 32, 4335-4341.
- D'Amours, R., Servranckx, R., Toviessi, J.-P. and Trudel, S., 1998, The operational use of the Canadian Emergency Response Model: Data assimilation, processing, storage, and dissemination. In: OECD Nuclear Energy Agency (Editor), *Nuclear Emergency Data management: Proceedings of an International Workshop*. Organization for Economic Cooperation and Development. Nuclear Energy Agency, 215-221.
- Draxler, R.R. and Hess, G.D., 1998, An overview of the HYSPLIT 4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.
- Folch, A., Jorba, O. and Viramonte, J., 2008, Volcanic ash forecast - application to the May 2008 Chaiten eruption. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 8, 927-940.
- Heffter, J.L. and Stunder, B.J.B., 1993, Volcanic ash forecast transport and dispersion (VAFTAD) model. *Computer Techniques*, December, 533-541.
- Horwell, C.J., Fenoglio, I., Vala Ragnarsdottir, K., Sparks, R.S. and Fubini, B., 2003, Surface reactivity of volcanic ash from the eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies with implications for health hazards. *Environmental Research*, 93, 202-215.
- Hurst, T. and Smith, W., 2004, A Monte Carlo method for measuring ashfall hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138, 393-403.
- INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), 2010, FALL3D. [Online] Available at: <http://datasim.ov.ingv.it/Fall3d.html> [Accessed 24th October 2010]
- Jones, A., Thomson, D., Hort, M. and Devenish, B., 2007, The U.K. Met office's next-generation atmospheric dispersion model, NAME III. In: Borrego, C., Norman, A.-L. (Eds.), *Air Pollution Modeling and Its Application XVII*. Springer, Berlin, 580-589, 744 p.
- Lee, S.H., Jang, E.S. and Lee, H.M., 2012, A case analysis of volcanic ash dispersion under various volcanic explosivity index of the Mt. Baegdu. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33, 280-293.
- Lee, S.H. and Richards, R.J., 2004, Montserrat volcanic ash induces lymph node granuloma and delayed lung inflammation. *Toxicology*, 195, 155-165.
- Mastin, L.G., Guffanti, M., Ewert, J. W. and Spiegel, J., 2009a, Preliminary Spreadsheet of Eruption Source Parameters for Volcanoes of the World. Version 1.2, Open-File Report 2009-1133, U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, 25 pp.
- Mastin, L.G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., Ewert, J.W., Neri, A., Rose, W.I., Schneider, D., Siebert, L., Stunder, B., Swanson, G., Tupper, A., Volentik, A. and Waythomas, C.F., 2009b, A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 10-21.
- Nakamura, E., Campbell, I.H., McCulloch, M.T. and Sun, S.-S., 1989, Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: Implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94, B4, 4634-4654.
- NOAA Air Resources Laboratory, 2010, HYSPLIT-Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model. [Online] Available at: http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php [Accessed 24th October 2010]
- Parfitt, E.A. and Wilson, L., 2008, *Fundamentals of Physical Volcanology*. Oxford: Blackwell Publishing. 256 pp.
- Peterson, R.A. and Dean, K.G., 2008, Forecasting exposure to volcanic ash based on ash dispersion modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170, 230-246.
- Pering, T., 2010, Dispersal and Deposition Modelling of Ash from Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geoverse* ISSN 1758-3411, 1-13.

- Piedelievre, J.P., Musson-Genon, L. and Bompay, F., 1990, MEDIA - An Eulerian model of atmospheric dispersion: First validation on the Chernobyl release. *Journal of Applied Meteorology*, 29, 1205-1220.
- Ryall, D.B. and Maryon, R.H., 1998, Validation of the UK Met. Office's NAME model against the ETEX dataset. *Atmospheric Environment*, 32, 4265-4276.
- Sandu, I., Bompay, F. and Stefan, S., 2003, Validation of atmospheric dispersion models using ETEX data. *International Journal of Environmental Pollution*, 19, 367-389.
- Schumann, U., Weinzierl, B., Reitebuch, O., Schlager, H., Minikin, A., Forster, C., Baumann, R., Sailer, T., Graf, K., Mannstein, H., Viogt, C., Rahm, S., Simmet, R., Scheibe, M., Lichtenstern, M., Stock, P., Ruba, H., Schauble, D., Tafferner, A., Rautenhaus, M., Gerz, T., Ziereis, H., Krautstrunk, M., Mallaun, C., Gayet, J., Lieke, K., Kandler, K., Ebert, M., Weinbruch, S., Stohl, A., Gasteiger, J., Olafsson, H. and Sturm, K., 2010, Airborne observations of the Eyjafjalla volcano ash cloud over Europe during air space closure in April and May 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 10, 22131-22218.
- Searcy, C., Dean K. and Stringer, W., 1998, PUFF: A high-resolution volcanic ash tracking model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 80, 1-16.
- Shipley, S. and Sarna-Wojcicki, A.M., 1982, Distribution, thickness, and mass of Late Peistocene and Holocene tephra from major volcanoes in the northwestern United States: a preliminary assessment of hazards from volcanic ejecta to nuclear reactors in the Pacific Northwest. United States Geological Survey Note to accompany Map MF-1435, 1-27.
- Spence, R., Komorowski, J., Saito, K., Brown, A., Pomonis, A., Toyos, G. and Baxter, P., 2008, Modelling the effect of a hypothetical sub-plinian eruption at La Soufriere of Guadeloupe(Lesser Antilles). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 516-528.
- Stone, R., 2010, Is China's riskiest volcano stirring or merely biding its time? *Science* 329, 498-499.
- Stone, R., 2011, Vigil at North Korea's Mount Doom. *Science* 334, 584-588.
- Suzuki, Y.J. and Koyaguchi, T., 2012, 3-D numerical simulations of eruption column collapse: Effects of vent size on pressure-balanced jet/plumes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 221-222, 1-13, doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.01.013
- Textor, C., Graf, H.F., Herzog, M., Oberhuber, J.M., Rose, W.I. and Ernst, G.G.J., 2006a, Volcanic particle aggregation in explosive eruption columns. Part I: Parameterization of the microphysics of hydrometeors and ash. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 150, 359-377.
- Textor, C., Graf, H.F., Herzog, M., Oberhuber, J.M., Rose, W.I. and Ernst, G.G.J., 2006b, Volcanic particle aggregation in explosive eruption columns. Part II: Numerical Experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 150, 378-394.
- Webley, P. and Mastin, L., 2009, Improved prediction and tracking of volcanic ash clouds. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 1-9.
- Webley, P.W., Dehn, J., Lovick, J., Dean, K.G., Bailey, J.E. and Valcic, L., 2009a, Near real-time volcanic ash cloud detection: Experiences from the Alaska Volcano Observatory. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 79-90.
- Webley, P.W., Stunder, B.J.B. and Dean, K.G., 2009b, Preliminary sensitivity study of eruption source parameters for operational volcanic ash cloud transport and dispersion models - A case study of the August 1992 eruption of the Crater Peak vent, Mount Spurr, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 108-119.
- Wei, H., Wang, Y., Jin, J., Gao, L., Yun, S.H. and Jin, B., 2007, Timescale and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China. *Lithos*, 96, 315-324.
- World Meteorological Organization, 2012, VAAC 'input and outputs'(Ins and Outs) dispersion modelling workshop final report, Commission for Aeronautical Meteorology, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Centre for Weather and Climate Prediction (NCWCP), Washington DC, USA, 5-9 November 2012, 25 p.
- Xu, J., Liu G., Wu, J., Ming, Y., Wang, Q., Cui, D., Shang-guan Z., Pan, B., Lin, X. and Liu, J., 2012, Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: a precursor of a future eruption? *Geophysical Research Letters*, 39, L16305, 1-7.
- Yu, H., Xu, J., Luan, P., Zhao, B. and Pan, B., 2013, Probabilistic assessment of tephra fallout hazard at Changbaishan volcano, Northeast China. *Natural Hazards(Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards)*, 1-20, DOI 10.1007/s11069-013-0683-1.
- Yun, S.H., 2010, The Day of the Great Eruption of Mt. Baekdu. Haemaji Publisher, Seoul, 311 p. (in Korean)
- Yun, S.H., 2013, Volcanological interpretation of historical eruptions of Mt. Baekdusan volcano. *Journal of Korean Earth Science Society*, 34, 456-469.
- Yun, S.H., Won, C.K. and Lee, M.W., 1993, Cenozoic volcanic activity and petrochemistry of volcanic rocks in the Mt. Paektu area. *Journal of Geological Society of Korea*, 29, 291-307.
- Yun, S.H. and Lee, J.H., 2011, Volcanological interpretation of historic record of 1702 fallout-ash from the Mt. Baeg-

- dusan. Journal of Petrological Society of Korea, 20, 243-250.
 - Yun, S.H. and Lee, J.H., 2012, Analysis of unrest signs of activity at the Baegdusan volcano. Journal of Petrological Society of Korea, 219, 1-12.
 - Yun, S.H. and Jang, E.S., 2013, Overview of Mt. Baekdu volcano: past, present and future. Abstract for 3rd International Workshop for Volcanic Disaster Preparedness, Jeju, Korea(November 03-05, 2013), Volcanic Disaster Preparedness Research Center. Korea, 5-8. 221 p.
-
- 2013년 11월 13일 접수
2013년 11월 14일 심사개시
2013년 11월 27일 채택