백두산 화산 분출물 확산 예측에 대기흐름장 평균화가 미치는 영향

이순환^{1,*} · 윤성호²

¹부산대학교 환경연구원, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

²부산대학교 지구과학교육과, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

Impact of Meteorological Wind Fields Average on Predicting Volcanic Tephra Dispersion of Mt. Baekdu

Soon-Hwan Lee^{1,*} and Sung-Hyo Yun²

¹Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: In order to clarify the advection and dispersion characteristics of volcanic tephra to be emitted from the Mt. Baekdu, several numerical experiments were carried out using three-dimensional atmospheric dynamic model, Weather and Research Forecast (WRF) and Lagrangian particles dispersion model FLEXPART. Four different temporally averaged meteorological values including wind speed and direction were used, and their averaged intervals of meteorological values are 1 month, 10 days, and 3 days, respectively. Real time simulation without temporal averaging is also established in this study. As averaging time of meteorological elements is longer, wind along the principle direction is stronger. On the other hands, the tangential direction wind tends to be clearer when the time become shorten. Similar tendency was shown in the distribution of volcanic tephra because the dispersion of particles floating in the atmosphere is strongly associated with wind pattern. Wind transporting the volcanic tephra is divided clearly into upper and lower region and almost ash arriving the Korean Peninsula is released under 2 km high above the ground. Since setting up the temporal averaging of meteorological values is one of the critical factors to determine the density of tephra in the air and their surface deposition, reasonable time for averaging meteorological values should be established before the numerical dispersion assessment of volcanic tephra.

Keywords: WRF/FLEXPART, time averaging, Mt. Baekdu, volcanic tephra dispersion, numerical experiment

요약: 백두산 화산분출물의 이류와 확산 예측 특성을 살펴보기 위하여 3차원 대기역학 모형인 WRF와 입자 확산 모형인 FLEXPART를 결합하여 다양한 수치실험을 실시하였다. 기상자료의 시간 평균화에 따른 영향을 보기 위하여 네 가지 서로 다른 평균화 기간을 가진 수치 실험을 실시하였다. 본 연구에 적용된 기상자료의 평균화 기간은 각각 1개월, 10일, 3일이다. 또한 평균화를 실시하지 않은 실시간자료를 이용한 수치실험도 실시하였다. 기상자료의 평균화 시간이 길어질수록 주풍성분인 동서 방향의 운동이 뚜렷해지고, 짧을수록 주풍의 법선 방향인 남북 운동이 명확하게 나타나며, 화산분출물을 가정한 입자의 확산 역시 동일한 특성이 나타난다. 상하층의 바람은 강도의 차이가 명확하고, 평균화 기간에 따른 영향이 다르게 나타나기 때문에 상층입자와 하층입자의 이동과 지상 침적이 다양하게 나타난다. 또한 한반도의 지상 침적은 방출고도 2 km 이하의 입자가 주로 영향을 미친다. 따라서 기상자료의 평균화 시간 간격이 화산분출물의 지상 침적을 결정하는 하나의 요인으로 작용하기 때문에, 확산 실험 전에 적절한 기상자료의 시간평균을 결정할 필요가 있다.

주요어: WRF/FLEXPART, 시간 평균화, 백두산, 화산분출물 확산, 수치실험

*Corresponding author: withshlee@pusan.ac.kr

Tel: +82-051-583-2651

Fax: +82-051-583-2651

서론

불의 고리(ring of fire)에서 떨어져있는 동아시아 대륙에는 많은 신생대 화산들이 위치하며 이들 중 몇몇은 아직 활동적인 화산활동이 전개되고 있다. 특히 북한과 중국 국경에 위치한 장백산맥의 최고봉인 백두산은 활동적인 화산으로 BC 1120, AD1050, 1413, 1597, 1668, 1702 등 6회 이상의 분화가 사료에 기록되어 있다(Simkin and Siebert, 1994). 최근 다양한 관측자료를 바탕으로 백두산 하부 맨틀의 구조의 변화가 감지되고 분화의 징조가 관측되었다. 한국, 북한, 중국, 일본학자들은 2002년부터 지진활동의 급증, 화산체내의 암석 붕괴, 화산가스에 의한 수목의 고사 발견, GPS 관측을 통한 산정상부의 팽창, 지진파 분석을 통한 마그마방 분석 등의 결과를 바탕으로 대규모 분화 가능성이 높은 것으로 결론지었다(윤성호 외, 2007).

따라서 장기적으로 백두산 분화에 대한 화산재해 방재적인 접근이 요구된다. 화산분출물은 화산 주변의 직접적인 피해뿐 아니라 제트기의 엔진, 연료 계통의 문제, 정밀기기 산업의 오차를 증가, 대기질 악화에 의한 공중보건의 문제 등 다양한 형태로 산업 사회에 영향을 준다. 따라서 이러한 방재 및 경제적 피해를 최소화시키기 위하여 화산 분출물의 확산에 대한 예측과 그들의 예측 정확도를 향상시키는 것이 필수적이다(Miller and Casadevall, 2000). 실제 화산 분출물과 같은 입자상 대기오염물의 확산은 기류에 의하여 이루어지기 때문에 위성에 의한 원격 탐사와 대기역학 방정식을 바탕으로 한 수치모형을 적용하는 것이 일반적이다(이순환 외, 2002; 이화운 외, 2010; Gangalea et al., 2010; Flentje et al., 2010; Corradini et al., 2011).

Glaze and Self(1991)는 Suzuki(1983)의 화산재 확산모형을 수정한 2차원 모델을 1986년에 분화한 칠레의 Lascar 화산에 적용하였으며, Costa et al.(2006)은 3차원 오일러리안 모형을 이용하여 2001년 Etna 화산분출물을 대상으로 수치실험을 실시하였으며, Witham et al.(2007)은 화산 분출물들의 예측 정확도를 평가하기 위하여 여러 가지 수치모형을 상호 비교하였다. 그리고 연구에 적용된 모든 화산분출 사례에서 수치모형들은 상호 유사한 분석 결과를 나타냈다. 따라서 이들은 화산분출 당시의 기상장이 분출물의 대기확산 예측에 매우 중요한 요소라고 제시하였

다. Schumann et al.(2010)과 Wiegner et al.(2011)은 2010년 4월 14일 발생한 아이슬란드의 에이자프잘라 조쿨(Eyjafjallajökull) 화산 분출물을 각각 유럽 Meteosat 위성과 라이다를 이용하여 측정하고 이들의 확산 특성을 제시하였다.

그러나 이러한 위성관측 및 수치적인 연구는 화산 분화가 시작된 이후에 비로소 적용가능하기 때문에 방재적인 차원의 피해예측에 직접적으로 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 방재적 측면에서는 분화이전 시점에 다양한 형태의 분화를 상정하여 화산재 확산 및 피해예측이 요구된다. 그러나 화산피해 예측에는 화산 분화 시점의 정확한 기상장을 상정하기 어렵기 때문에 분화 가능 화산 주변의 평균 기상장을 산출하여 화산분출물의 확산 예측 및 피해 정도를 해석한다. 그러나 대기 기류의 시간과 공간 평균화는 난류성분을 감쇄시키고 주풍 성분을 강화시키는 경향을 가진다(이순환 외, 2009). 따라서 대기 흐름장의 평균화 정도에 따른 화산 분출물의 확산 차이에 관한 정보를 정확히 이해할 필요가 있다. 본 연구는 다양한 시간규모로 평균화된 바람장을 적용하여, 백두산 화산 분출물의 확산 예측 수치실험을 실시하였다. 수치 실험 결과를 바탕으로 바람정보의 평균화 정도가 화산분출물 확산에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 따라서 이들 자료는 백두산 분출물에 의한 재해 예측을 위한 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

연구 대상 지역

본 연구에서 화산 분출물의 방출지역은 북한과 중국의 국경에 걸쳐있는 장백산맥의 중심에 위치한 고도 2750 m의 백두산(북위 41°01', 동경 128°05')으로 설정하였다. 백두산은 북한의 량강도와 중국의 길림성의 경계에 위치하며 압록강, 두만강, 중국 송화강의 발원지이다. 또한 정상부에는 폭발적인 화산 분화와 산정부의 함몰에 의하여 생성된 칼데라호인 천지가 있다. 이 칼데라호는 평균수심이 204 m 둘레가 13.11 km로 약 20억 톤의 물이 저장되어 있다. 이 천지의 물은 400-500 m 높이의 화구벽에 의해 둘러 쌓여있으며, 북쪽 화구벽의 뚫린 곳을 따라 승차하쪽으로 흘러가 비룡폭포를 이룬다(한국학중앙연구원, 2011). 백두산의 주변에는 18350 km²의 넓은 현무암 용암대지가 위치한다. 주로 현무암질 용암 분출이 빈번했던 초기 플라이스토세 이후부터 비교적 최근까지

Fig. 1. Geographical map of northeast Asia including the Mt. Baekdu (Baekdu-san) volcano and simulated numerical model domains: (a) d01 with 125×125 grids, (b) d02 with 191×191 grids, and (c) d03 with 442×442 grids. Open squares with character in d03 indicate the area for analysis of surface deposition. Closed square is used to analysis the origin of volcanic product at Fig. 7.

조면암과 알칼리 유문암질 용암과 화성쇄설물의 화산 분화가 일어났다고 보고되고 있으며(Jin and Zhang, 1994), 특히 이러한 다양한 분출 중 홀로세의 플리니식 화산 분화에 의하여 백두산 주변 뿐 아니라 멀리 일본 본토까지 화산분출물이 이동한 것으로 보고되었다(Furuta et al., 1986; 소원주와 윤성호, 1999). 또한 Machida and Arai(1983)는 동해 분지에서 채취된 시추코어 분석을 통하여 백두산 기원의 테프라의 두께를 분석하고, 일반적인 중관장의 기후자료를 바탕으로 백두산 테프라의 확산을 추정하였다.

기후학적으로 전형적인 고산기후를 나타내며, 한반도내에서 가장 기후변화가 심한지역이다. 연평균 기온은 -7.3°C 이며 연평균 상대습도는 78% 정도이다. 또한 남쪽의 더운 공기와 몽골지역의 찬공기가 자주 만나는 여름에는 안개와 강수가 빈번하게 일어난다.

그리고 관측자료에 의한 풍력 자원 분석을 통하여 개마고원을 중심으로 한 함경북도에는 높은 풍속이 연중 관측되며, 바람장미를 통한 분석 결과 여름철에는 남풍이 우세하고 겨울철에는 북서풍이 탁월하게 나타난다(윤준희 외, 2010). 또한 이러한 북서계절풍

이 연중 230일정도 나타난다. 따라서 높은 고원지대의 백두산 지역의 풍하측에는 대기역학적인 수렴이 명확하게 나타나며, 차가운 겨울철의 대륙성 기류는 상대적으로 따뜻한 동해상에서 강한 연직 대류운동을 유발한다. 이러한 강한 수증기의 연직 대류는 동해 연안 지역과 울릉도, 그리고 일본 북쪽해안지역에서 발생하는 겨울철 대설의 주요 원인이 된다(Kang and Kimura, 1998; Koo et al., 2007).

수치모형 및 실험 설계

대기 역학 모형

화산 분출물의 확산예측을 위하여서는 대기 기상장을 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 본연구에서는 3차원 대기 역학 모형인 Weather Research and Forecasting(WRF)을 통하여 기상장을 산출하였다. WRF는 현업 및 연구에 적용하기위하여 미국 대기연구소(National Center for Atmospheric Research)와 미국 해양대기청 산하 국립환경보호센터(National Ocean and Atmosphere Administration's National

Center for Environment Prediction)에서 개발한 차세대 대기 역학 모형이다(Skamarock et al., 2008). WRF는 압축성 지형 준거좌표계를 구성되어 있으며, 압축성 비정역학 방정식계를 가진다. 다중 등지 격자 구조를 설정하여 다양한 형태의 기상현상의 예측 및 분석에 사용된다.

연구에 사용된 물리과정은 다음과 같다(Table 1). 미물리는 WRF single moment 6 class(WSM-6), 장파복사와 단파복사는 각각 Rapid Radiative Transfer Model(RRTM)과 Dudhia Scheme이다. 그리고 경계층 모형은 Yonsei Univ scheme, 지표면은 Noah Land Surface Scheme, 적운 대류는 Grell 3d ensemble cumulus scheme을 사용하였다.

입자 확산 모형

본 연구에서는 화산분출물의 상정한 입자의 확산모델로 라그랑지안 입자 확산 모형인 FLEXPART를 사용하였다. 이 모형은 노르웨이 대기연구소에서 개발된 초기 FLEXPART로부터 개선된 모형으로 점, 선, 면 배출원으로 부터 배출된 입자의 장거리 수송 및 확산, 건성침적, 습성침적 그리고 미립자의 중력강하 등의 계산 모듈을 포함하고 있다. 그리고 배출원으로부터 방출된 입자 확산을 예측하기 위한 후방추론(back trajectory) 모듈을 포함하고 있기 때문에 다양한 입자 및 가스상 오염물질의 확산 예측에 사용된다(Stohl et al., 2002). Prata et al.(2007)은 서인도 제도의 주프리에르(Soufrière) 화산 분출물 확산 수치실험 결과와 위성관측 자료를 비교를 통하여 FLEXPART의 유용성과 안정성을 확인하였다.

WRF에서 계산된 기상요소의 랑주뱅(Langevin) 방정식을 풀어 입자의 이류와 확산을 계산한다. 또한 FLEXPART는 다양한 대기역학모형의 유기적인 결합을 통하여 직접 기상자료를 적용할 수 있다. 즉 WRF에서 계산된 NetCDF 형태의 결과물을 다른 변화 없이 FLEXPART의 입력자료로 사용할 수 있다. 현재 FLEXPART는 방사능 오염확산 등 기체상 오염물질 및 입자상 오염물질의 확산 예측에 적용되고 있다.

수치실험 설계

백두산 분출물 확산 예측에 사용된 대기역학모형의 계산영역 및 격자정보는 Table 1에 나타났다. 계산영역은 총 3개 등지격자로 설정하였으며, 격자간격은

각각 30, 15, 5 km로 하였다(Fig. 1). 그리고 각 도메인의 격자수는 각각 125×125, 191×191, 442×442이다. 첫 번째 등지는 한반도, 일본열도, 캄차카 반도를 포함한 동북아시아를 전체를 대상으로 하고, 두 번째 도메인은 동해를 중심으로 중국, 일본, 한국을 포함하고, 마지막 도메인은 백두산 분출물의 이동을 고려하여, 한국과 일본을 중심으로 구성하였다. 본 연구에서는 백두산 분출에 따른 풍하지역 특히 한반도에 미치는 영향을 보기위하여 마지막 도메인 결과를 주로 분석에 적용하였다. 그리고 FLEXPART 계산역시 5 km 격자로 구성된 마지막 도메인의 WRF 계산값을 이용하여 실시하였다.

수치실험은 백두산 분화를 상정한 기상장의 평균화에 따른 영향을 분석하기 위한 것으로, 본 연구에서는 각 1개월(case MON), 10일(case 10DAY), 3일(case 3DAY), 실시간(case REAL)의 총 4개의 시간평균을 가진 기상자료를 산출하였다. 각 수치실험의 개요는 Table 2에 나타났다. 본 연구는 백두산 분출시기를 특정하기 불가능하기 때문에 화산물의 확산이 한반도에 가장 영향을 줄 가능성이 크다고 판단되는 겨울철 특히 12월을 대상으로 실시하였다.

먼저 case MON의 월평균 기상장은 WRF에서 2010년 12월 1일부터 31일까지의 자료를 이용하였다. 31일간의 기상 자료를 시간대별로 평균하여 24시간 자료를 생성하여 확산실험을 실시하였다. 그리고 case 10DAY의 기상자료는 12월 10일부터 20일까지 WRF 산출 기상장을 시간대별로 평균하여 작성하였다. Case 3DAY는 12월 11일부터 14일까지의 3일간 계산된 기상장을 평균하였으며, 마지막으로 case REAL은 case 3DAY와 동일한 기간 동안의 기상자료를 평균화하지 않고 WRF 계산 자료를 그대로 이용하였다.

이렇게 서로 다른 시간간격으로 평균화된 기상장이 FLEXPART 입자 확산의 기본 자료로 사용된다. 이때 각 실험의 제 1 도메인 기상장 초기 및 경계조건은 FNL(Final) Operational Model Global Tropospheric Analysis 자료를 사용하였다. 그리고 제 2와 3도메인의 초기 및 경계조건은 제 1도메인의 결과치를 네스팅하여 사용하였다.

백두산의 분출이 천지 부근에서 시작되었다고 판단하여, 입자 발생원은 점오염원으로 설정하고 배출은 지상에서부터 고도 10 km 고도까지 동일하게 방출된다고 가정하였다. 방출된 입자는 밀도가 2000 kg/m³의

밀도를 가진 화산재로 설정하고, 대기중에서 반응하지 않는다고 가정하였다. 입자는 분당 10개씩 연직고도 10 km까지 균등하게 방출되는 것으로 설정하였다. 실제 화산의 분화는 장기간에 걸쳐 매우 불규칙하며 간헐적으로 발생하는 경향이 있으나, 이를 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다(Bitar et al., 2010). 그러나 본 연구에서는 분출량 자체보다는 기상장의 시간 평균에 따른 풍하층의 분포를 주로 분석하기 때문에, 72시간 연속적인 분출을 가정하였다. 따라서 입자 확산 수치 적분 시간은 72시간으로 설정하고 이때 적용된 각 수치실험별 기상장은 24시간씩 반복된다고 가정하고 입자 분포 및 침적량을 비교 분석하였다.

결 과

수치모의의 통계적 검증

각 실험에서 사용된 결과를 분석하기 전에 수치모의의 결과에 대한 유의성을 검증하여야 한다. 본 연구에서는 Root Mean Square Error(RMSE)와 Index of Agreement(IOA)를 이용하여 수치실험의 유의성을 검증하였다. 유의성 검증은 평균화되기 이전 WRF 계산 자료와 실제 관측 자료의 비교를 통하여 실시된다. 따라서 case REAL의 3일간의 계산자료와 자동 기상관측 장비에서 직접적으로 관측된 온도와 바람장의 RMSE와 IOA를 분석하였다.

RMSE와 IOA는 각각 아래의 식으로 계산된다.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)}$$

여기서 P_i 와 O_i 는 각각 수치모델과 관측값을 의미하며, $\bar{O}$ 는 관측자료의 평균을 의미하며, N 은 데이터 개수를 나타낸다. 일반적으로 RMSE는 수치모델값과 관측치의 차이를 통하여 수치모델의 절대적인 유의성을 평가한다. 그러나 수치모의의 기상장은 단순한 절대값의 차이뿐 아니라 값의 시간변화에 대한 평가도 중요하다. 시간 변화에 대한 수치모의 능력을 평가하기 위하여 두 자료의 상대적인 일치도를 나타내는 IOA를 산출하였다. IOA값은 0에서 1까지 변화하며, 1에 가까울수록 일치도가 높다고 평가한다.

전국 16개 지점에서 관측한 자료를 바탕으로 온도와 풍속에 대한 평균 RMSE와 IOA값을 Table 2에 나타내었다. 전체적으로 지역적인 편차가 있으나, 평균 IOA가 0.82와 0.66으로 0.6 이상의 높은 값을 나타내었다. RMSE 역시 평균 풍속이 높게 나타나는 대관령과 울진 등을 제외하고 전체적으로 낮은 값을 유지한다. 따라서 수치실험을 통하여 제시된 기상요소들이 이후 분석에 적용하는데 유의함을 확인하였다.

평균화에 따른 기류 변화

Fig. 2는 case REAL에 적용된 12월 12일부터 14일 00LST의 지상 기상장을 나타낸 것이다. 연구대상 기간 동안 서고동저형의 전형적인 겨울철 기압형태가 잘 나타나고 있다. 그러나 12일부터 시베리아 기단의

Table 1. WRF model description for the estimation of meteorological elements

	Domain1	Domain 2	Domain 3
Horizontal resolution	30 km	15 km	5 km
Horizontal grid number	125×125	191×191	442×442
Vertical layers	40 layers		
Physical options	Longwave radiation	Rapid Radiative Transfer Model	
	Shortwave radiation	Dudhia Scheme	
	Planetary boundary layer	Yonsei University PBL scheme	
	Microphysics	WRF single moment 6 class	
	Land surface	Noah Land Surface Model	
	Cumulus	Grell 3d ensemble cumulus scheme	
Initial data	NCEP FNL (Final) Operational Global Analysis data		
Time period	2010. 12. 01. 0000 LST - 2010. 12. 31. 2400 LST		

Table 2. Statistical correlations (RMSE and IOA) between simulated and observed temperature and wind speed at 16 sites for three days from 0000LST 12 December 2010

Site name	Temperature		Wind Speed	
	RMSE	IOA	RMSE	IOA
Daegu	3.11	0.77	1.42	0.84
Daegwannryong	3.80	0.76	4.44	0.80
Seoul	1.43	0.96	1.24	0.79
Inje	2.08	0.75	3.24	0.68
Seosan	1.70	0.92	3.71	0.67
Sokcho	3.68	0.74	2.14	0.65
Cheonan	2.35	0.89	3.60	0.66
Busan	2.36	0.90	2.06	0.66
Youngduck	3.20	0.82	3.31	0.76
Kangryung	3.75	0.82	2.96	0.64
Daejeon	2.75	0.92	2.75	0.63
Jeonju	4.76	0.60	2.72	0.51
Ulsan	2.26	0.85	4.38	0.64
Taeback	3.05	0.80	3.91	0.50
Donghae	2.03	0.72	2.58	0.65
Gwangju	2.73	0.84	3.39	0.56
Mean Values	2.81	0.82	3.00	0.66

강도가 점진적으로 증가하며, 중심의 위치가 북위 50도 부근으로 남하한다. 한반도 상공에는 12일 이동성 고기압이 위치하지만 13일 동중국해에서 발달한 저기압이 접근함에 따라 동쪽으로 이동하고, 14일 저기압 역시 동쪽으로 빠져나간다. 즉 동해상의 기류는 한반도 상공의 이동성 기단과 정체기단인 시베리아 기단의 영향을 동시에 받는다. 따라서 기압 및 바람의 시간 평균화가 이러한 동해상의 기류에 미치는 두 기단의 영향력에 변화를 줄 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각 실험에서 계산된 1200 LST의 지상 10 m의 바람장을 나타낸 것이다. 먼저 case MON에서 계산된 바람장을 보면, 전체적으로 북서풍이 지배적이다. 그리고 백두산을 중심으로 한 개마고원지역의 후면 해상 부근에서 뚜렷한 수렴이 나타난다. 이것은 시베리아 기단의 차갑고 안정한 기류가 백두산의 높은 지형을 둘러가기 때문이다. 이러한 지형성 수렴이 case MON에서 나타나는 것은 백두산의 지형성 기류가 특정한 것이 아니라 상시 발생하고 있다는 것을 의미한다. Case 10DAY의 경우, 비록 서해상에서 지형을 따르는 기류가 나타나지만, 전체적으로 case MON과 비슷한 기류 패턴이 나타난다. 그러나 case 3DAY의 기류에서는 지형에 의한 영향뿐 아니라 국지적인 기상상의 영향이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 특히 동해상의 기류는 앞서 본 두 경우와 차

Fig. 2. Surface synoptic charts provided by Korea Meteorological Administrator at 00 UTC 12, 13, and 14 December 2010.

이가 크다. 북한, 중국, 러시아 국경에 위치한 블라디보스토크에서의 북풍성분이 강하게 나타나며, 이러한 강한 북동풍은 한반도 동쪽의 기류패턴의 변화를 유도한다. 또한 일본의 풍하측과 서해상의 기류 역시

Fig. 3. Estimated wind fields at 10m above surface at 1200LST for (a) case MON, (b) case 10DAY, (c) case 3DAY, and (d) case REAL. Unit vector is 25 m/s.

지형에 의한 효과가 뚜렷하다. Case REAL에서 계산된 12일 1200 LST의 기류를 보면 앞서 말한 백두산 지형성이 나타나지만, 남해안을 지나는 시계방향의 흐름 즉 이동성 고기압의 특성이 뚜렷하게 나타난다. 이는 지상일기도(Fig. 2a)에서 관측된 고기압과 일치하며, 남해 뿐 아니라 서해 일본 남부까지 고기압성 흐름이 나타난다. 따라서 바람장의 시간 평균에 따른 동해상의 기류 패턴의 차이가 뚜렷하게 변화한다는 것을 확인하였다.

평균화에 따른 입자이동 및 침적량 변화

기상장의 시간 평균화가 백두산 화산의 폭발적 분화를 가정했을 때 미치는 영향을 입자확산과 침적량을 통하여 살펴보았다. Fig. 4는 case MON, 10DAY,

3DAY에서 계산된 바람장을 이용하여 계산한 방출 48시간 후 대기중에 존재하는 전체 입자 분포와 지상의 48시간 누적 침적량을 나타낸 것이다. 세 경우 공통적으로 대부분의 입자는 시베리아에서 불어오는 북서풍에 의하여 남동쪽으로 이동하여 일본 북부지역을 통과한다. 또한 동해에 진입하면서 넓게 퍼지는 경향도 세 가지 서로 다른 실험에서 유사하게 나타난다. 그러나 확산정도 특히 남쪽부분의 확산에는 차이가 있다. 시간평균화 정도가 짧을수록 남쪽부분의 확산 강도가 크게 나타난다. 이것은 바람장 시간 평균화는 난류성분인 남북확산 효과를 감소시키며, 평균류 즉 동서성분을 강조하는 경향을 가진다. 따라서 평균화의 시간이 짧은 case 3DAY에서 난류성분이 강하게 표현되며 남북의 입자 확산이 다른 실험보다

Fig. 4. Volcanic tephra distributions (left panels) and accumulated surface deposition (right panels) for 48 hours after release for (a) case MON, (b) case 10DAY, and (c) case 3DAY.

Fig. 5. Same as Fig. 4 except for case REAL at (a) 48 hours and (b) 72 hours after release.

강하게 나타난다.

이러한 특성은 지상 침적량 분포도 동일하게 나타난다. 평균화시간이 짧은 case 3DAY가 풍하측 지상 침적량이 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 따라서 시간 평균화된 바람장을 이용한 확산 예측은 남북방향의 분출물 분포 예측에 오류를 발생시킬 수 있는 개연성을 있음을 알 수 있다.

그리고 모든 실험에서 지상 침적은 대기중 입자 분포도 중 남쪽부분에 위치하고, 북쪽 경계 부분에서는 거의 발생하지 않는다. 이것은 대기 상층과 하층의 입자 분포가 다르다는 것을 의미한다. 대기중 입자 분포도에서 북쪽 부근에 위치하는 입자는 대부분 대기 상층에 위치하며, 반대로 남쪽 부분의 입자는 대기 하층에 위치한다. 따라서 침적의 대부분은 입자 확산 중심축의 남쪽 부분에서 발생하게 된다.

평균화하지 않은 바람장에 의한 분출물의 확산분포를 분석하기 위하여 case REAL에서 계산된 바람의 48시간, 72시간 후의 대기중 입자와 누적침적 분포를 살펴보았다(Fig. 5). 입자 방출 48시간 후인 12월 13일의 분포를 보면 대부분의 입자들이 동쪽 방향으로 이동한다. 그러나 72시간 후인 14일에는 많은 입자들이 남서쪽으로 이동하여 한반도 대부분의 상공에 확산분출물이 존재하게 된다. 이러한 급격한 분출물의 이동은 앞서 일기도(Fig. 2c)와 바람장(Fig. 3c)에서 나타난 고기압이 일본으로 빠져나가면서 나타난 북동기류에 의한 것이다. 또한 이때 한반도로 유입되는 입자는 1 km 고도에서 분출물의 농도 분포와 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 저층 입자의 급격한 유입을 확인할 수 있으며, 한반도 지상에서 분출물의 누적이 시작되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6. Mean trajectory of emitted volcanic particles at the Mt. Baekdu during 24 hours for each case. Particles in case REAL is released at 00LST 13 December 2010.

각 실험의 바람장을 이용하여 전체 방출물의 24시간 평균 궤적을 나타낸 것이 Fig. 6이다. 평균화 시간이 비교적 긴 case MON과 case 10DAY는 대부분의 입자가 서풍을 타고 일본 북해도 쪽으로 이동하지만, 평균화시간이 짧을수록 남쪽으로 이동하며, case REAL의 경우 한반도까지 유입되는 경로를 가진다. 따라서 입자확산에 사용하는 바람정보에 따라 입자의 이동 경로가 달라질 수 있다. 이때 한반도에 영향을 미치는 화산 분출물의 고도를 파악하기 위하여 포항 부근의 침적된 입자들의 고도 분포를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 한반도에 영향을 미친 입자의 대부분은 백두산 상공 2 km 미만의 낮은 고도에서 방출된 입자이며, 5 km 이상의 높은 고도에서 방출된 입자는 전혀 검출되지 않았다. 따라서 일반적으로 한반도 침적에 영향을 미치는 것은 낮은 고도의 입자이다. 이것은 높은 고도의 경우 강한 종관풍에 의하여 서쪽으로 빠져나가는 경향이 있지만, 낮은 고도에서 방출된 분출물의 경우 국지적인 기상장에 의하여 한반도 유입가능성이 높게 나타난다.

이러한 각 실험에 따른 침적량 분포를 정량적으로 파악하기 위하여 Fig. 1의 표기한 동해상의 한반도측 (A 구역), 중앙왼쪽(B 구역), 중앙오른쪽(C 구역), 일본측(D 구역)의 침적량을 나타낸 것이 Table 3이다. 각 구역의 24, 48, 72시의 누적량을 나타낸 것이다.

Fig. 7. Frequency of emitted volcanic particles in accordance with their released levels from the top of the Mt. Baekdu.

Table 3. Accumulation of deposited volcanic particles at A, B, C, and D area shown in Fig. 1 for case MON, 10DAY, 3DAY, and REAL. Unit of accumulated particles is g/m^2

Case Name	Integrated deposition time	A	B	C	D
MON	24 h	0.00	5.92	75.71	0.00
	48 h	0.00	146.79	346.70	206.73
	72 h	0.00	297.50	627.88	472.38
10DAY	24 h	0.00	12.45	48.12	1.24
	48 h	0.00	103.18	333.48	173.07
	72 h	0.00	210.58	631.90	365.37
3DAY	24 h	0.37	109.63	86.06	0.29
	48 h	5.68	385.37	371.36	115.57
	72 h	9.72	680.10	673.31	270.60
REAL	24 h	0.00	0.00	2.62	0.46
	48 h	0.00	0.00	22.20	541.22
	72 h	112.04	223.28	214.38	788.91

표의 그림자 친 부분은 시간대의 최대 누적량을 나타낸다. case MON과 case 10DAY에서는 각 시간 모두 동해의 중앙 오른쪽에 위치한 C 구역에서 최대 누적량이 나타난다. 그러나 72시간 누적침적량을 기준으로 case 10DAY가 case MON에 비하여 C 구역에서는 210% 정도 증가하였으나 반면 일본쪽의 D구역에서는 475.38 g/m^2 에서 365.37 g/m^2 로 24% 감소하였다. 그리고 Case 3DAY는 근소하지만 중앙 왼쪽 B구역에서 최대가 나타나고, case MON과 case 10DAY에서 전혀 나타나지 않았던 한반도쪽의 A 구역에서도 작지만 침적이 나타났다. 그리고 case REAL은 시간에 따른 최대 침적량이 변하는데, 12시

간 최대 침적은 C구역에서 48시와 72시간 누적 침적량은 D 구역에서 나타난다. 그러나 각 구역의 침적량의 차이는 매우 크게 나타난다. 특히 다른 실험에서는 거의 나타나지 않거나 미량의 침적이 나타난 A 구역에서도 112.04 g/m^2 정도의 침적이 나타났다. 이는 바람을 평균화하지 않고 시간에 따른 바람장을 그대로 확산에 적용하였기 때문이다.

정량적인 분석에서 기상자료의 시간 평균에 대한 분출물의 침적량의 차이가 명확하게 나타났는데, 기상자료의 평균화 시간이 길어질수록 동쪽에 위치한 일본쪽의 침적량이 증가하며, 평균화 시간이 짧아질수록 한반도쪽의 침적량이 증가하는 것을 확인하였다. 그러므로 기상자료의 평균화 정도는 바람장 등 기상장의 변화 뿐 아니라 백두산 분화에 의한 분출물의 확산에도 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있다.

결 론

역사시대 최대인 화산폭발지수 7등급 폭발적 분화 사건을 가지고 있는 북한과 중국 국경에 위치한 백두산은 현재 다양한 분화전조가 관측되고 있다. 따라서 방재 차원의 백두산 화산 분출에 따른 재해 예방 및 대처 매뉴얼 작성이 요구된다. 특히 백두산 폭발적 분화에 따른 분출물의 확산과 침적을 정확히 예측 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 연구는 백두산 화산 분출물의 확산 예측 정확도를 향상시키기 위하여 다양한 기상자료에 대한 시간적인 평균화가 백두산 화산 분출물의 이류 및 확산 예측에 미치는 영향을 수치실험을 통하여 평가하였다. 연구에 사용한 수치모형은 3차원 대기역학모형인 WRF와 분출물 확산에 적용된 FLEXPART이다. 수치실험 대상 시기는 기후학적으로 발생빈도가 가장 높은 계절인 겨울철을 대상으로 하였다. 시간평균화 기간은 각 1개월(case MON), 10일(case 10DAY), 3일(case 3DAY)이며, 평균화 하지 않은 경우(case REAL)와 상호 비교하였다.

수치실험 결과 아래와 같은 연구결과를 도출하였다.

1) 대기 역학 모형 WRF가 도출한 바람 및 온도는 실측자료와 비교하여 높은 RMSE와 IOA값을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 도출한 기상자료는 이후 확산 연구에 적용 가능하며, 통계학적으로 유의미하다.

2) 시간 평균화를 실시한 기상장(case MON, case 10DAY, case 3DAY)의 경우 전체적으로 겨울철의 주

풍인 북서풍이 강하게 나타난다. 그러나 난류 성분인 남북방향의 진동은 평균화 시간이 짧을수록 강하게 표현된다. 또한 평균화 시간이 짧을수록 지형에 의한 국지 바람장과 중규모 기상장의 특성이 명확해지는 경향을 가진다.

3) 백두산 분화에 의한 분출물은 전체적으로 주풍인 북서풍을 타고 이동한다. 그러나 기상장의 시간 평균화와정에서 입자의 이동이 변화한다. 평균화 시간 간격이 짧을수록 입자의 남북방향 확산이 강해지는 경향이 있다.

4) 지형 및 이동성 고·저기압의 영향이 직접적으로 미치는 하층과 제트기류가 강하게 나타나는 상층은 서로 다른 방향성의 바람이 나타난다. 이에 따라 분출물의 지상 침적량은 하층 기류이동과 밀접하게 관계한다. 또한 한반도에 직접적으로 영향을 미치는 화산 분출물은 백두산 상공 1-2 km 사이에서 방출된 것들이 다수를 점한다.

5) 백두산의 폭발적 분화가 한반도에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 가능한 짧은 시간대의 평균 기상장 자료를 이용하여야 하며, 국지적인 저고기압의 분포가 매우 중요하게 작용한다.

활동적인 화산인 백두산의 분화 전조를 통하여 정확한 폭발시기를 단정하는 것은 매우 어렵다. 그리고 미래의 기상장을 정확히 산정하는 것 역시 매우 어려운 작업이다. 또한 화산분출물의 확산은 지질학적인 분출환경과 기상조건에 따라 매우 개연성이 크다. 특히 중관 기상학적인 기압 분포에 따라 백두산 분화가 한반도에 미치는 영향이 달라진다. 그러나 폭발적 분화시 입자의 분포, 대상기간의 한정 등 본 연구가 가지는 한계에도 불구하고 방재적인 차원에서 백두산 분화가 한반도에 미치는 영향 분석을 위한 기본 자료 마련을 위하여 본 연구가 유용하게 활용되리라 판단한다. 또한 향후 높은 시간 해상도의 기상자료와 다양한 대기안정도 상태를 고려한 대기조건의 수치 및 관측 실험을 통하여 백두산 분출에 따른 정확한 영향을 파악하는 연구도 필요하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지진기상 개발사업(CATER 2011-1185)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 소원주, 윤성효, 1999, 백두산 화산의 홀로세 대분화 연구: 개관. 한국지구과학회지, 20, 534-543.
- 윤성효, 히로미추 타니구치, 하이첸 웨이, 지아치 류, 2007, 백두산 화산위기. 대한자원 환경지질학회 2007년 춘계 대회 논문초록집, 130-132.
- 윤준희, 서은경, 박영산, 김학성, 2010, 종관 바람 관측 자료를 이용한 북한 지역의 풍력자원 분석. 한국지구과학회지, 31, 225-233.
- 이순환, 이화운, 김유근, 2002, 북잡지형에서 도시화에 따른 대기오염 확산에 관한 시뮬레이션. 한국대기환경학회지, 18, 67-83.
- 이순환, 이화운, 김동현, 김민정, 김현구, 2009, 한반도 풍력 자원지도의 공간해상도가 풍력자원 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구. 한국환경과학회지, 18, 885-897.
- 이화운, 이현미, 이순환, 최현정, 2010, 라그랑지안 입자확산모형을 이용한 광양만 권역에서의 공기과 재순환 현상의 수치모의. 한국환경과학회지, 19, 157-170.
- 한국학중앙연구원, 2011, <http://www.aks.ac.kr/> (검색일: 2011.05.25)
- Bitar, L., Duck, T.J., Kristiansen, N.I., Stohl, A., and Beauchamp, S., 2010, Lidar observations of Kasatochi volcano aerosols in the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 115, doi:10.1029/2009JD013650.
- Corradini, S., Merucci, L., and Folch, A., 2011, Volcanic Ash Cloud Properties: Comparison Between MODIS Satellite Retrievals and FALL3D Transport Model. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8, 248-252.
- 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.
- Gangalea, G., Pratab, A.J., and Clarisec, L., 2010, The infrared spectral signature of volcanic ash determined from high-spectral resolution satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 114, 414-425.
- Glaze, L.S. and Self, S., 1991, Ashfall dispersal for the 16 September 1986, eruption of Lascar, Chile, calculated by a turbulent diffusion model. *Geophysical Research Letters*, 18, 1237-1240.
- Flentje, H., Claude, H., Elste, T., Gilge, S., Köhler, U., Plass-Dülmer, C., Steinbrecht, W., Thomas, W., Werner, A., and Fricke, W., 2010, The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 - detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar-ceilometer profiles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 10085-10092.
- Furuta, T., Fujioka, K., and Arai, F., 1986, Widespread submarine tephra around Japan-Petrographic and chemical properties. *Marine Geology*, 72, 125-142.
- Glaze, L.S. and Self, S., 1991, Ashfall dispersal for the 16 September 1986, eruption of Lascar, Chile, calculated by a turbulent diffusion model. *Geophysical Research Letters*, 18, 1237-1240.
- Jin, B. and Zhang, X., 1994, Researching volcanic geology in Changbai Mt, Northeast Korea. Nation Education Press, Changchun, China, 223 p.
- Kang, S.D. and Kimura, F., 1998, A numerical study on the Karman vortex generated by divergence of momentum flux in flow past an isolated mountain. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 76, 925-935.
- Koo, H.S., Kim, H.D., Kang, S.D., and Shin, D.W., 2007, A Numerical Study on the Formation Mechanism of a Mesoscale Low during East-Asia Winter Monsoon. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 613-619.
- Machida, H. and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large Quaternary eruptions. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 18, 151-164.
- Miller, T.P. and Casadevall, T.J., 2000, Volcanic ash hazards to aviation, *Encyclopaedia of volcanoes*. Academic press, San Diego, USA, 930 p.
- Prata, A.J., Carn, S.A., Stohl, A., and Kerkmann, J., 2007, Long range transport and fate of a stratospheric volcanic cloud from Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Atmosphere Chemistry and Physics*, 7, 5093-5103.
- Schumann, U., Weinzierl, B., Reitebuch, O., Schlager, H., Minikin, A., Forster, C., Baumann, R., Sailer, T., Graf, K., Mannstein, H., Voigt, C., Rahm, S., Simmet, R., Scheibe, M., Lichtenstern, M., Stock, P., Rüba, H., Schäuble, D., Tafferner, A., Rautenhaus, M., Gerz, T., Ziereis, H., Krautstrunk, M., Mallaun, C., Gayet, J.-F., 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.
- Simkin, T. and Siebert, L., 1994, *Volcanoes of the World*. Geoscience Press, Washington DC, USA, 349 p.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., and Powers, J.G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, NCAR/TN2013475+STR, 123 p.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., and Wotawa, G., 2005, Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2461-2474.
- Suzuki, T., 1983, A theoretical model for dispersion of tephra. In Shimozuru, D. and Yokoyama, I. (ed.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 95-113.

Wiegner, M., Gasteigera, J., Großa, S., Schnella, F., Freudenthalera, V., and Forkelb, R., 2011, Characterization of the Eyjafjallajökull ash-plume: Potential of lidar remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth* (now print).

Witham, C.S., Hort, M.C., Potts, R., Servranckx, R., Husson, P., and Bonnardot, F., 2007, Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvötn eruption. *Meteorological Applications*, 14, 27-38.

2011년 6월 9일 접수
2011년 7월 1일 수정원고 접수
2011년 7월 12일 채택