Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.1.016>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Prediction of Dispersal Directions and Ranges of Volcanic Ashes from the Possible Eruption of Mt. Baekdu

Seung-Yeon Lee, Gil-Yong Suh, Soo-Yeon Park, Yeon-Su Kim, Jong-Hyun Nam, Seung-Hyun Yu, Ji-Hoon Park, Sang-Jik Kim, Yong-Sun Kim, Sun-Yong Park, Ja-Young Yun, Yu-Jin Jang, Se-Won Min, So-Jung Noh, Sung-Chul Kim, Kyo-Suk Lee, and Doug-Young Chung*

Department of Bio-environmental Chemistry, Collage of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: dychung@cnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: October 10, 2017

Revised: November 14, 2017

Accepted: February 6, 2018

To predict the influence of volcano eruption on agriculture in South Korea we evaluated the dispersal ranges of the volcanic ashes toward the South Korea based on the possibilities of volcano eruption in Mt. Baekdu. The possibilities of volcano eruption in Mt. Baekdu have been still being intensified by the signals including magmatic unrest of the volcano and the frequency of volcanic earthquakes swarm, the horizontal displacement and vertical uplift around the Mt. Baekdu, the temperature rises of hot springs, high ratios of N_2/O_2 and $^3He/^4He$ in volcanic gases. The dispersal direction and ranges and the predicted amount of volcanic ash can be significantly influenced by Volcanic Explosivity Index (VEI) and the trend of seasonal wind. The prediction of volcanic ash dispersion by the model showed that the ash cloud extended to Ulleung Island and Japan within 9 hours and 24 hours by the northwestern monsoon wind in winter while the ash cloud extended to northern side by the south-east monsoon wind during June and September. However, the ash cloud may extent to Seoul and southwest coast within 9 hours and 15 hours by northern wind in winter, leading to severe ash deposits over the whole area of South Korea, although the thickness of the ash deposits generally decreases exponentially with increasing distance from a volcano. In case of VEI 7, the ash deposits of Daejeon and Gangneung are $1.31 \times 10^4 \text{ g m}^{-2}$ and $1.80 \times 10^5 \text{ g m}^{-2}$, respectively. In addition, ash particles may compact close together after they fall to the ground, resulting in increase of the bulk density that can alter the soil physical and chemical properties detrimental to agricultural practices and crop growth.

Keywords: Baekdu mountain, Monsoon, Dispersal, Volcanic ash, Agricultural damage

Schematic assumption for directions and ranges of the dispersal of volcanic ash due to eruption of Mt. Baekdu (modified from Lee, 2011).

Introduction

화산 분화와 같은 재해는 그 피해가 재해 발생 지역에만 국한되지 않고 점차 그 규모가 대형화되고 광역화되고 있다 (Kim, 2011). 한국은 화산과 같은 재해에는 비교적 안전한 것으로 인식되고 있었으나 최근 지질학자와 기상학자들은 백두산에서 관찰되는 화산 전조 현상과 화산 활동과 관련된 지질변화현상에 근거하여 백두산에서 화산 폭발이 멀지 않았음을 예견하고 있고 또한 지속되는 북한의 핵실험이 백두산의 화산활동에 영향을 미칠 것이라는 우려가 나오고 있다 (Ansrews, 2017; Sean, 2017). 특히 화산분화와 같은 자연재해는 불가항력이며 예측하는 것 또한 매우 어렵다. 따라서 이러한 자연재해가 발생하기 전에 취약한 지역이나 산업을 파악하고 피해 규모를 예측하여 자연재해의 피해를 최소화하는 것이 매우 중요하다.

백두산은 북한의 양강도 삼지연군과 중국 길림성이 접하는 국경지역에 위치하고 있는 고도 2,744 m의 화산이다. 스미소니언 연구소 (Smithsonian Institute, USA)는 백두산과 같이 1만년 이내에 활동한 기록이 있는 휴화산을 현재 활동 중이거나 잠재적으로 활동성을 가질 수 있는 활화산으로 분류한다 (Newhall, 1982). 국내 화산 전문가들뿐만 아니라 국외 전문가들도 백두산이 더 이상 휴화산이 아닌 활화산으로 판정하였으며, 20년 내 폭발 확률이 99%에 이른다는 주장을 제기하고 있다 (Ri et al., 2016). 968년 백두산에서 화산폭발지수 (Volcanic Explosivity Index, VEI) 기준 규모 7로 분출된 화산재와 용암은 100-150 km³의 규모로 추정되며 이는 2010년 아이슬란드 화산폭발의 1,000-1,500배 정도에 해당한다. 이외에도 백두산에서는 1668년, 1702년, 1903년까지 소규모의 분화가 발생하였다 (Wei, 2013). 한편 1981년 마치다의 연구 결과에 따르면 당시 배출된 화산재와 화산쇄설물이 일본 홋카이도에서 두께 5 cm의 화산재 층을 형성하였다고 발표하였다 (Machida and Arai, 1983; Machida, 1990).

백두산 분화가 한반도에 미치는 영향에 관한 다양한 연구가 실시되고 있다. 1996년 중국 북경에서 열린 국제지질대회 이후 백두산을 분화위험이 있는 활화산으로 규정하고 모니터링 시작하였다. 중국 국가지진국의 관측에 따르면 2002년도 6월 왕청현에서 발생한 규모 7.3 지진 이후, 백두산 지역에서 천지 일원과 지하 2-3 km 이내에서 화산성 군발지진 등 화산활동과 관련된 화산 분출 전조현상 뿐만 아니라 암석붕괴 및 균열현상이 발견됐고 유독가스 방출로 인한 수목 고사 등이 발견되었다 (Zou et al., 2010; Sun et al., 2014). 이외 2002-2005년 GPS 및 수준계관측자료 분석결과 백두산 지하에 4개 층의 마그마방이 존재하고 있으며 천지호수의 지형이 변화된 것을 발견하였고 위성영상 분석결과 2002년도에 천지 주변의 온도가 높게 상승하였으며 특히 백두산 정상부가 매년 1 cm에서 4 cm씩 솟아오르며 천지 온천의 수온 증가 및 화산 가스 중 헬륨, 수소 함량 10배 증가한 것으로 조사되었다 (KMA, 2011; Park and Yoo, 2011).

한국은 백두산과의 거리상으로 화산의 직접적인 피해보다는 간접적인 피해가 발생할 것으로 예상하며 특히 화산재와 화산분진에 의한 피해가 발생할 것으로 예상하고 있다. 화산분출물은 크게 기체, 액체, 고체로 분류하며 기체상태의 화산가스가 대부분 수증기이며 CO₂, CO, SO₂, H₂S, HF, HCl 등을 방출하며 이중 SO₂, H₂S, HF, HCl 같은 기체는 대기 중의 입자와 반응하여 에어로솔 (aerosol)을 형성하고 궁극적으로 산성비의 형태로 지상으로 돌아간다 (Sigurdsson, 2015). 또한 지름이 2 mm 미만의 화산재는 화산 분출 동안 마그마에서 용해된 가스가 팽창해 대기 중으로 급속히 빠져나가 공기 중에서 마그마가 물과 접촉하고 물이 폭발하면서 마그마가 부서지면서 형성된 것으로 용해된 암석, 광물, 그리고 화산 유리 조각으로 되며, 일단 공기 중에 있게 되면 재는 바람에 의해 수천 km까지 이동한다 (Zimanowski, 2000). 따라서 많은 양의 화산재와 가스가 분출하면 항공 산업, 제조업, 농업 등의 경제활동에 피해를 줄 뿐만 아니라, 일조량의 감소 및 기온 하강에 따른 냉해 및 가뭄의 2차적 피해로 이어질 수 있다. 그리고 화산재의 두께, 작물과 화산재간의 반응, 농작물에 부착된 화산재량, 강수량 등에 따라 차이가 있지만 화산재가 확산되어 농작물

이나 토양에 퇴적되면 농작물에 부착된 화산재를 제거하기 어려워 농작물은 찰과상, 산성화, 광합성 및 생장 기온저하 등의 피해를 입게 될 수 있으며, 또한 수확량이 크게 감소될 수 있다. 이외에도 산성의 화산재는 토양 내 황 수준을 높이고 토양을 산성화 시키고 필수원소의 가용도를 감소시킨다 (Cronin et al., 1998; Neild et al., 1998; KMA, 2011; USGS, 2012). 따라서 본 연구에서는 과거 다른 화산의 폭발 사례를 통하여 백두산 화산폭발이 대한민국으로 미치는 화산재 확산과 농업에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

Materials and Methods

Possibilities of Volcano Eruption in Mount Baekdu 화산분화에는 마그마가 조용하게 분화구를 흘러나와 용암의 형태로 주변의 골짜기를 따라 아래로 흘러가는 정도의 화산활동인 화산분출과 칼데라에서 지하로부터 상승하는 1,000°C 이상의 점성이 큰 규장질 마그마가 물을 만나 물은 기화하여 수증기로 변하고 마그마는 급랭하여 수축하면서 산산이 조각나 화산재로 변하여 화산재를 뿜어내는 화산활동인 화산폭발로 구분 할 수 있다 (Yoon and Lee, 2012). 백두산 분화 가능성과 관련하여 가장 주목받는 백두산의 분화 이력은 약 10세기경에 발생한 분화다 (Machida et al., 1990). 화산분화에 앞선 지질현상을 화산 분화의 전조현상이라 한다. 그리고 화산에서 다양한 형태의 전조현상들이 빈번하게 발생하여 화산 분화가 임박한 상태를 화산위기 (volcanic crisis)라 하고 전조현상의 수준에 따라 주의 (caution)나 경고 (warning) 상태로 나타낸다. 그러나 화산위기에 도달하여도 그 전조현상과 화산활동이 지속적으로 증가하여야만 화산분화로 이어진다 (Tilling, 2000; Yoon and Lee, 2012).

중국 정부는 1999년 백두산 칼데라 주변 온천근처에 Changbaishan volcano observatory (CHVO)를 설립하고 지진 (seismic), GPS, 그리고 가스의 성분과 온도를 측정하는 연구를 실시해 온 이래로 1999년부터 2011년 사이에 약 3900회의 화산지진현상이 있었으며 화산활동 기간인 2002년부터 2006년 사이에 월 72회의 화산구조변화 (volcano-tectonic)와 같은 화산활동을 감지하였다고 보고하였다 (Xu et al., 2012). 특히 2002년 6월 28일 중국 연변조선족자치주의 왕청현에서 규모 7.3인 지진이 발생하는 등 백두산 지역의 화산활동과 관련된 전조현상 또는 화산활동에 영향을 줄 수 있는 지질현상이 여러 차례 발견되었다 (Yun, 2010; Yoon and Lee, 2012). 한편 GSP를 이용한 수평이동현상을 조사한 결과 2002-2003년 19.6 mm a^{-1} (max. 38.3 mm a^{-1}), 2003-2004년 10.2 mm a^{-1} (max. 15.8 mm a^{-1}), 2004-2005년 8.6 mm a^{-1} (max. 18.5 mm a^{-1}) 정도 이동한 것으로 조사되었다. 그리고 동기간 수직이동을 조사한 결과 총 68.12 mm의 지표상승이 발생하였다. 그리고 헬륨동위원소비율 (The helium isotope ratio, $^3\text{He}/^4\text{He}$)은 화산분출물의 추정하는 지표로 사용하고 있는데, 2003-2006년 사이의 헬륨동위원소비율은 6.5로 2003년 이전 평균치인 5.35보다 높았다 (Gao, 2004). 이는 백두산 지하에 있는 마그마 챔버로 마그마가 재충전되면서 마그마가스 제거에 따른 헬륨이 첨가된 것에 기인한다. 그리고 이외에도 이산화탄소 농도 증가와 같은 지구 화학적 이상은 활동적 시기에 백두산 화산에서 일어난 마그마 불안의 증거로 지적되고 있다. 2004년도 여름에는 곡저삼림 (谷底森林)의 나무들이 원인 모르게 말라 죽었으나 병충의 사체는 발견되지 않았다. 이는 마그마방에서 분리되어 지하의 틈새를 통하여 지표로 방출된 유독화산가스에 의해 말라죽은 것으로 추정하고 있다 (Yoon et al., 2007). 이와 같이 2002년과 2006년 사이에 백두산 인근에서 발생한 지진의 급증은 용암이 얇은 마그마 방으로 흘러 들어가 또 다른 주요 분출 위험을 높일 수 있다는 우려를 불러일으켰다. 그리고 2009년도에는 백두산 북쪽과 서쪽 경사면에서 지반변형이 발생하였으며 수온 또한 3°C 이상 급격하게 높아졌으며 2011년 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비율도 6.68 증가하는 경향을 보였다. Ri et al. (2016)은 이러한 화산작용으로 인해 생긴 마그마 작용으로 지각의 큰 영역이 변형되었으며 부분용해가 지각의 상당 부분을 통해 일어날 가능성이 있다

고 하였다. 결론적으로 백두산은 약 1천 년 전 폭발적인 대분화를 한 활동적인 화산체이며, 2002년도 이후 백두산 천지 칼데라 호수 내에 화산성 균발지진의 진앙이 집중하여 분포하며, 그 진원 깊이가 지하 2 km에서 4 km에 집중되어 있으며, GPS 관측과 수준계를 이용한 조사 결과 지표면의 팽창이 10 cm 이상 감지되고, 화산가스에서 헬륨의 농도 증가, 화산가스의 방출로 인한 삼림의 고사, 산사태, 암석균열 등이 감지되었다는 사실을 근거로 백두산이 화산위기에 직면하고 있다고 보고하였다 (Yoon and Lee, 2012).

Lee et al. (2013)이 GRACE 인공위성을 이용하여 2000년에서 2005년 사이에 백두산 지역의 적설량 조사결과에 따르면 동기간 동안 적설량이 감소하였다. 그리고 백두산 지역의 2000년도의 대기 온도가 2005년도 보다 약 1.2°C가 높다. 따라서 적설량 감소는 마그마 활동 활성화에 의한 지각 내부의 온도 상승 시 생성된 고온의 수증기와 열수가 열극을 통해 지표면에 공급되어 발생하였을 것이라고 예측하였다. 또한 백두산 지역에 설치된 지하수위 관측치가 2002년 이후 2004년까지 급격히 감소하였다 (Newhall et al., 2001; Shibata and Akita, 2001). 이러한 지하수위의 급격한 하강뿐만 아니라 챔프 인공위성에 의해 2000년도부터 2005년까지 백두산 천지 주변 반경 200 m에서 측정된 자기장 감소 등이 화산분화의 전조 현상으로 추정하고 있다.

Fig. 1. Seismic stations used in the RF study (red circles). DPRK stations are Jang Gun Peak (JGPD), Paektu Bridge (PDBD), Mudu Peak (MDPD), Sin Mu Song (SMSD), Paek San Ri (PSRD), and Sing Hung Ri (SHRD) (Source: Ri et al., 2016).

Dispersal Directions and Ranges of Volcanic Ashes from the Eruption of Mt. Baekdu 북한에 위치하고 있는 백두산이 폭발하면 화산폭발의 규모와 풍향, 풍속, 기온, 습도, 화산재의 양 등에 의해 대한민국도 화산재 등에 의한 피해 영향권에 속할 수 있다. 하지만 가까운 과거나 21세기에 접어들어서도 백두산 화산폭발이 일어난 사례는 없으므로 화산폭발로 인해 발생하는 피해를 예측하기 어렵다. 따라서 화산재 확산 모델을 이용하여 화산폭발 시 화산재의 이동과 침적 등과 같은 공간적 확산 범위를 추정하여야 할 것이다 (Park and Chang, 2013).

화산폭발지수 (VEI)는 화산폭발 시 화산 폭발 강도를 폭발 지속시간, 화산재 등 분출물의 높이와 양 등을 종합해 나타내는 수치로서 Table 1과 같이 9단계로 구분한다 (Newhall and Self, 1982). VEI 0단계와 1단계는 매우 조용한 화산분출을 의미하며, 일반적으로 피해가 매우 미약하고 분출되는 총 화산분출물은 0.001 km³ 이하로 매우 적은 양으로 매우 제한된 지역에서만 영향을 받는다. 그러나 VEI 2가 되면 분화 과정상 폭발적 분화로 기록되고 분연주의 높이가 최대 5 km까지 나타난다. 이때 분출물의 총량은 0.01 km³이다. 그리고 이후 단계가 한 단계 증가할 때마다 분출물의 양이 지수적으로 증가한다. 최고 단계인 8단계의 경우, 분연주의 높이가 50 km까지도 상승하며, 분출물의 총량은 1,000 km³까지로 화산분화 주기는 약 10,000년 정도로서 지금까지 지구상에서 47회 발생된 것으로 보고되었다.

Table 1. The volcanic explosivity Index with volumes and terminology as currently defined (Newhall et al., 1982).

VEI	Duration of eruption (hr)	Eruption volume (m ³)	Plume height (km)
0	0	< 10 ⁴	< 0.1
1	< 1	10 ⁴	0.1-1.0
2	1-6	10 ⁶	1.0-5.0
3	1-6	10 ⁷	3.0-15.0
4	1-6	10 ⁸	10.0-25.0
5	6-12	10 ⁹	25.0-30.0
6	12 <	10 ¹⁰	30.0-40.0
7	12 <	10 ¹¹	40.0-50.0
8	12 <	10 ¹²	50 <

지하에서 암석이 녹아 있던 물질인 마그마가 화도를 통해 나오면서 산산이 부서지거나 조각난 고체 상태인 화성쇄설물 (pyroclastic materials)이 되어 화구로부터 빠른 속도로 지표로 격렬하게 뿜어져 나오는 현상을 화산분화라 하며 화성쇄설물은 마그마로부터 1차적으로 직접 만들어진 물질로 직경에 따라 화산재 (2 mm 이하), 화산력 (2-64 mm), 화산암괴 (64 mm 이상)와 화산탄 등을 의미한다. 그리고 화도를 통해 나온 화산재가 공기 중으로 비산하면 화산폭발이라 하고 화구로부터 마그마가 액체 상태로 나와 주변의 낮은 지형이나 골짜기를 따라 용암류 (lava flow)로 흘러가는 현상을 화산분출이라 말한다 (Yoon and Lee, 2012). 화산재해는 화산재, 용암류를 비롯하여 화쇄류, 화산이류 등이 있으며, 경우에 따라 화산성 홍수나 화산성 지진 등이 있으며 화산 이류나 홍수와 같은 피해는 화산 분화 지역 인근에 집중되며 화산재해의 범위는 화산유형, 기상환경 등의 조건에 따라 다르게 발생한다 (Heiken and Wohletz, 1985; USGS, 2010). 따라서 백두산에서 화산분화가 발생할 경우 대한민국에 영향을 미치는 형태는 화산폭발에 한정될 것으로 판단된다.

백두산의 화산폭발에 의해 발생하는 주 피해요인인 화산재는 지표면에서 높이 10-50 km 사이의 존재하는 성층권의 바람을 타고 확산되며 백두산의 계절풍의 동향에 따라서 피해범위가 달라진다. 백두산의 분화 경향은 거의 대부분 분출 (Plinian) 분화에 의한 강하화산재의 낙하와 뒤이은 분연주의 봉기에 의한 화쇄류의 발생으로 특징 지워진다. 폭발적인 분화의 산물인 화산쇄설물 (tephra)은 광역화산재해를 유발하며, 그 지역의 탁월풍의 영향을 받아 주변으로 확산된다.

Machida and Arai (1983)가 968년 백두산에서 발생한 분화와 관련하여 날아간 화산재가 일본 홋카이도와 혼슈 북부에서 발견되는 데 이를 B-Tm은 백두산-토마코마 화산재라고 부르며 이는 폭발적으로 뿜어져 나온 화산재는 대기 상층으로 약 25 km 이상 상승하여 편서풍과 제트류를 타고 함경도를 지나 동해를 건너 일본과 태평양으로 비산하였으리라 추정하였다 (Fig. 2(a)). 그리고 국립재난안전연구원 (National Disaster Management Institute)이 2011년 발표한 자료에 따르면 (Fig. 2(b)) 화산재 확산 방향은 실제 분화 시 공간적으로 보면 용암류는 55 km 반경 어느 지역에도 영향을 미칠 수 있고, 마찬가지로 북서계절풍을 따라 화산재가 이동한다면 9시간이면 울릉도 지역까지 영향을 미치고 화산재가 북서계절풍을 따라 지속적으로 확산된다면 24시간 후에는 일본열도를 통과하는 것으로 예측되었다. 하지만 실제 폭발 시 대기 확산방향은 발생 당시의 바람의 방향을 따른다. 따라서 북풍이 불 경우 화산재 확산 방향은 대한민국으로 향하며 서울, 경기도, 강원도 지역이 9시간 이내에 화산재의 영향권에 들어간다고 발표하였다 (Fig. 2(b)).

Fig. 2. Map showing the location of Baekdu volcano (▲) and isopachs illustrating the extensive dispersal of tephra fallout from the numbers within each oval indicate the thickness of tephra (A) (Machida et al., 1990) and concentrations of volcanic ash depending on dispersal ranges from Mt. Baekdu volcano (B) referred from Kim (2014).

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라는 계절풍의 영향을 받는 아시아 몬순 기후 지역에 속하여 온도가 상승하는 여름철은 북태평양 고기압에 의해 발생하는 남동풍과 편서풍의 결합된 영향으로 인하여 남풍이나 남서풍이 불어 중국 만주지역과 러시아 남동부 지역까지 화산재가 확산되고 백두산 북쪽으로부터 북풍이 유입되어 백두산을 지나면서 북서풍 계열의 풍향으로 바뀌는 겨울철에는 화산재는 남동방향으로 확산되어 (Fig. 3) 우리나라 전역이 영향을 받을 가능성이 있다 (Lee and Yoon, 2011). 그러나 한반도가 중위도에 위치하고 있어 계절풍의 영향을 받지 않을 때에는 위도 30도에서 60도 사이에 부는 항상풍인 편서풍의 영향을 받는다. 그러므로 백두산에서 분화된 화산재가 국내로 유입되기 용이한 기상 조건은 중국 쪽에 지상 고기압, 우리나라 동쪽 상부에 상층 기압골이 자리 잡아 우리나라로 북풍이 발달하는 경우다 (KMA, 2011).

Fig. 3. Annual wind direction of Korean peninsula in summer and winter.

Lee (2011)의 연구 결과에 따르면 백두산에서는 겨울철은 북풍의 영향을 받으며, 여름철에는 남풍의 영향을 받는다. 특히 겨울철에는 북서풍의 영향을 받기 때문에 화산재 확산범위는 Fig. 4(a)와 같이 3개의 전개 방향으로 예측하고 있다. 두 번째 화산재 확산은 백두산의 폭발 시 화산 구름은 성층권으로 진입하여 확산될 것으로 예상하고 있다. 예로 2009년 11월부터 2010년 10월까지의 성층권 풍향은 서풍이 1년 중 약 67.1%가 서풍이었다. 따라서 분화 시 성층권의 풍향에 의하여 화산재는 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 동북에서 동쪽, 그리고 동남쪽 3방향으로 확산될 것으로 추정하였다. 그리고 3번째로 예상되는 화산재 확산방향은 편서풍대에 속해있는 우리나라는 북동풍이 불 수 있는 확률은 매우 낮으나 최악의 상황을 가정한 것으로 백두산에서 북동풍이 강하게 불 때이다 (Fig. 4(c)). 2010년도의 경우 북동풍은 대류권인 고도 1 km에서 1년 중 16일로 4.4%에 해당하며, 대류권과 성층권의 중간에 속하는 고도 10 km에서는 단 2일로 0.5%정도이고, 성층권내의 16 km에서는 6일로 1.6%로 조사되었다. 이와 같이 북동풍이 불 경우 화산재 확산방향은 대한민국 전체를 포함하는 방향으로 추정되고 화산재 퇴적두께는 최대 10 cm 정도로 추정하였다.

Fig. 4. Schematic assumption for directions and ranges of the dispersal of volcanic ash due to eruption of Mt. Baekdu (modified from Lee, 2011).

Crozier et al. (2016)이 이류-확산-퇴적 (advection-diffusion-sedimentation) 적용한 FALL3D 모델을 이용하여 화산재 분산범위를 조사한 결과에 따르면 (Fig. 5(a)) 화산 폭발지점으로부터 100 km 이내에서는 화산재 확산 폭은 약 60 km이고 화산재부하량은 m^2 당 400-500 kg, 그리고 220-320 km 범위에서는 화산재 확산 폭은 약 150 km로 확대 되었으며 이때 화산재부하량은 m^2 당 100-200 kg 정도로 낮아진 것으로 추정하였다. 한편 VEI에 따른 화산재 확산 이동거리별 화산재부하량은 (Fig. 5(b)) VEI 수준이 증가함에 따라 VEI 3의 경우 약 25 km까지, VEI 4는 약 160 km, 그리고 VEI 5에서는 약 270 km까지 확산되고 한편 VEI 수준이 높아지면 동일한 이동거리에서는 상대적으로 화산재 부하량도 증가하는 결과를 얻었다. VEI 5의 경우 화산폭발 발생 지점부터 약 12 km이내에서 화산재 부하량은 약 7000 kg m^{-2} 정도이며 이후 급격히 감소한다고 추정하였다. 한편 12 km 이내 화산재 부하량의 퇴적 높이를 화산재 입자밀도 ($\approx 2.6 \text{ g cm}^{-3}$)와 용적밀도 ($\approx 1.6 \text{ g cm}^{-3}$)로 추정 시 퇴적높이는 1.68 m 정도로 추정된다.

이외 Kim et al. (2011)이 Armienti et al. (1988)과 Pfeiffer and Macedonio (2005) 모델에 바람의 속도, 방향, 성층권 대류, 화산재 입자의 크기, 대기밀도 등을 고려하여 백두산 화산폭발에 따른 화산재 영향범위를 분석한 결과를 살

퍼보면 화산재의 확산 면적은 23,200 km² 그리고 화산재의 평균퇴적두께는 0.16 m, 최대 0.23 m이었다. 한편 북서계 절풍을 따라 화산재가 이동한다면 9시간이면 울릉도 지역까지 영향을 미치고 2시간 후에는 일본에 상공에 도달하면 14시간 후에는 오사카 상공에 도달, 18시간 후에는 결국 도쿄 상공을 뒤덮게 된다. 그리고 24시간 후에는 일본열도를 통과하는 것으로 예측하였다 (Fig. 6(a)). 또한 확산거리별 대기 중 화산재의 농도는 100-1000 mg m⁻³으로 화산폭발이 발생한 지점에서 24시간 후 최대 1000 mg m⁻³ 그리고 일본 열도를 통과하는 지점에서 1000 mg m⁻³ 정도로 추정하였다 (Fig. 6(b)).

Fig. 5. Schematic representation of a FALL3D volcanic ash load hazard footprint (A) and example plot of volcanic ash load attenuation relationships using three Ash Load Prediction Equations (ALPE) generated through dispersal modeling for three levels of VEI (B) (modified from Crozier et al., 2016).

Fig. 6. Dispersal ranges and sediment depths of volcano ash depending on dispersal time (A) and concentrations of volcano depending on the distance from the eruption point of Mt. Baekdu (modified from Kim, 2011).

Yoon (2015)은 백두산이 폭발적으로 분화하여 화산재를 확산하는 방향을 파악하기 위하여 2008년 1월 1일부터 2013년 12월 31일까지 총 2,190일 동안 매일 백두산이 분화하는 것으로 가정하고 화산재가 확산되는 방향을 Puff VATD 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 백두산에서 폭발적 분화에 의하여 분연주가 형성되고, 이때 북동풍의 탁월풍을 타고 화산재가 확산된다면 화산재가 우리나라 최대의 인구밀집 지역인 서울로 도달하는 경우로서 2012년 5월 2일 21:00 분화 후 (Fig. 7(a)) 9시간 만에 서울에 도달하여 (Fig. 7(b)) 15시간 이내에 서남해안 일대에 도달한다고 추정하였다 (Fig. 7(c)).

Fig. 7. Simulated dispersal patterns of volcanic ash due to eruption of Mt. Baekdu (modified from Yoon, 2015).

그러나 화산재의 확산 방향은 화산 폭발 시의 바람의 방향이나 확산범위는 VEI 지수에 따른 화산재 분출고도와 화산재 입자의 크기, 대기확산속도, 그리고 풍속에 영향을 받는다. 일례로 화산재 입자의 직경이 0.25-64 mm인 경우 분출시 폭발력에 의해 12 km 정도의 성층권역까지 상승할 수 있으며, 이러한 고도까지 상승한 입자들은 대류권에서의 확산과 풍속에 따라 멀리 이동할 수 있어 풍향에 따라 광범위 하게 퇴적될 수 있다.

농업 분야에서 화산재의 1차적인 피해는 주로 농작물이나 경작지 주변의 식생파괴 등을 들 수 있다. 농업분야에서 화산재에 의한 피해 사례로서는 2011년 일본 신모에다케 (Shinmoedake) 화산 폭발로 564 km² 농경지에 화산재가 쌓여 농작물과 농가에 피해가 발생하였다 (Magill et al., 2013). 또한 뉴질랜드에서는 1995년 10월과 1996년 6월에 라페후 (Rupehu) 화산이 폭발하여 농업 분야에서 약 1억 달러의 손실이 발생하였으며 (Neild et al., 1998; Munro and Parkin, 1999; Wilson and Kaye, 2007) 이 외에도 뉴질랜드, 미국, 인도네시아 등의 나라에서도 화산 폭발에 따른 농업분야의 피해 사례가 보고되었다 (Alberger et al., 1980; Clynne et al., 2005; Wilson et al., 2007). 그리고 VEI 5로 기록된 미국의 세인트헬렌스 화산 분화 시 313 km 떨어진 지역까지 5 cm의 화산재가 쌓였고 뉴멕시코와 로키산맥까지 화산재가 퍼졌듯이 화산재는 기후와 바람의 방향에 따라 그 피해 지역과 범위가 크게 달라진다. 백두산 화산 분화 시 서고동저형의 기압배치가 형성되면 화산재가 남한 지역으로 확산될 가능성이 높다.

화산재의 입자크기는 2 mm 이하의 화산쇄설물 입자 (pyroclasts)와 2 mm 이상의 화산력 (lapilli)으로 분류하고 입자 밀도는 부석 (pumice)이 0.7-1.20 g cm⁻³, 유리파편 (glass shards)가 2.35-2.45 g cm⁻³, 결정광물 (crystalline minerals)은 2.35-2.45 g cm⁻³, 결석 (lithic)은 2.60-3.20 g cm⁻³ 정도다 (Wilson et al., 2011). 습윤 상태의 점토부터 모래입자 크기의 화산재가 퇴적되면 퇴적 화산재의 용적밀도는 1.0-2.0 g cm⁻³ 범위이고 화산분화지점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 퇴적량은 감소하나 VEI 1-8까지의 화산재 퇴적량은 m³당 500-1500 kg 정도로 추산되며 토양표면에 화산재가 퇴

적되면 입자들이 서로 밀착되어 압밀이 발생하여 상대적으로 화산재가 퇴적된 토양의 용적밀도가 기존 토양의 용적 밀도보다 50% 증가할 것이라고 추정하였다. 따라서 화산재가 토양지표면에 퇴적되어 표면의 용적밀도가 증가하게 되면 수분침투력이 저하되고 또한 수분보유력이 증가하고 수리전도도도 낮아져 상대적으로 토양의 통기성도 저하할 것으로 판단된다.

Lee et al. (2013)이 발표한 백두산 화산재 피해 시나리오에 따른 강원도 지역 농작물의 경제적 피해 추정에 대한 연구결과를 살펴보면 백두산 화산 폭발 시 남한 지역은 동해안을 중심으로 화산재에 의한 피해가 예상되며 2010년도 강원도 지역 농작물 생산량을 기준하여 화산재가 1 mm 정도 쌓이면 농작물 피해액은 약 470억 원, 약 4 mm 정도가 쌓이면 농작물 피해액은 약 6,351억 원에 달하는 것으로 나타났다. 그러나 이는 단순 농작물만의 피해를 예측한 것이며 화산재에 의한 토양산성화나 토양 오염은 고려하지 않았다. 따라서 화산재가 농업에 미치는 영향 중 토양의 이화학적 영향에 미치는 영향에 대한 조사가 필요하다.

Conclusions

최근 백두산에서 관찰되는 화산 전조 현상과 화산 활동에 근거하여 백두산에서 화산 폭발을 예견하고 있고 또한 지속되는 북한의 핵실험이 백두산의 화산활동에 영향을 미칠 것이라는 우려가 나오고 있다. 화산폭발 전조현상으로는 1999년부터 2011년 사이에 약 3900회의 화산지진현상, 지표상승, 헬륨동위원소비율의 증가, 수목고사, 산사태, 암석 균열 등이 발견되고 있다. 화산폭발에 의해 화산재와 가스가 분출하면 일조량 감소 및 기온 하강에 따른 냉해 및 가뭄 피해와 더불어 화산재가 확산되어 토양에 퇴적되면 토양 내 황함량의 증가뿐만 아니라 토양의 산성화와 필수 원소의 가용도 감소 등의 문제가 발생한다. 백두산이 폭발하면 화산폭발의 규모와 풍향, 풍속, 기온, 습도, 화산재의 양 등에 의해 대한민국도 화산재 등에 의한 피해 영향권에 속할 수 있다. 백두산에서 화산폭발 시 발생하는 화산재는 지표면에서 높이 10-50 km 사이의 존재하는 성층권의 바람을 타고 확산되며 백두산의 계절풍의 동향에 따라서 피해범위가 달라진다. 백두산 화산 분화 시 화산재가 북서계절풍을 따라 확산하면 24시간 후에는 일본열도를 통과하나 서고동저형의 기압배치가 형성되면 북풍이 불어 화산재 확산 방향은 대한민국으로 향하며 서울, 경기도, 강원도 지역이 9시간 이내에 화산재의 영향권에 들어가고 화산재 퇴적두께는 최대 10 cm 정도로 추정된다. 따라서 백두산에서 화산 폭발 시 발생하는 화산재가 대한민국 농경지 토양에 미치는 영향을 파악하기 위하여 화산재의 특성과 화산재 퇴적량과 두께 등이 토양의 이화학적 영향에 미치는 영향에 대한 연구를 실시하여 이에 대한 토양개선 대책을 세워야 할 것이다.

References

- Alberger, B., M.J. Calhoun, G.M. Bedell, and P. Stern. 1980. The economic effects of the eruptions of Mt. St. Helens. USITC publication 1096, Washington D.C., USA, 83p.
- Andrews, R. 2017. Could North Korea Accidentally Trigger A Volcanic Supereruption? <https://www.forbes.com/sites/robinandrews/2017/08/23/heres-how-north-korea-could-accidentally-trigger-a-volcanic-supereruption/#27ab47abd558>
- Armienti, P., G. Macedonio, and M.T. Pareschi. 1988. A numerical-model for simulation of tephra transport and deposition-applications to May 18, 1980, Mount-St-Helens eruption, J. Geophy. Res. 93:6463-6476.
- Clynne, M.A., D.W. Ramsey, and E.W. Wolfe. 2005. Pre-1980 eruptive history of mount St. Helens, Washington. US

- Geological Survey, 4p.
- Cronin, S.J., M.J. Hedley, V.E. Neall, and R.G. Smith. 1998. Agronomic impact of tephra fallout from the 1995 and 1996 Ruapehu Volcano eruptions. *N. Z. Environ. Geol.* 34:21-30. doi:10.1007/s002540050253
- Gao, Q.W. 2004. Volcanic hydrothermal activities and gas-releasing characteristics of the Tianchi lake region, Changbai mountain. *Acta Geosci. Sin.* 25:345-350.
- Heiken, G. and K. Wohletz. 1985. *Volcanic Ash*. University of California Press, 246p.
- Iacovino, K., J.S. Kim, T. Sisson, J. Lowenstern, K.H. Ri, J.N. Jang, K.H. Song, S.H. Ham, C. Oppenheimer, J.O.S. Hammond, A. Donovan, K.W. Liu, and K.R. Ryu. 2016. Quantifying gas emissions from the “Millennium Eruption” of Paektu volcano, Democratic People’s Republic of Korea/China Iacovino et al. *Sci. Adv.* 2:e1600913.
- Kim, T.H., J.H. Youn, H.J. Kim, and J.Y. Hong. 2014. Development of a IT-based volcanic disasters response system. *Geospatial World Forum*. Geneva. Switzerland.
- KMA. 2011. Eruption scenarios of the Baekdusan volcano. Korea Meteorological Administration. pp. 4-91.
- Lee, D.S., S.C. Choi, C.W. Oh, M.H. Seo, and I.C. Ryu. 2013. The study on the possibility of using satellite in monitoring precursor of magma activity in the Baegdusan volcano. *J. Petrol. Soc. Korea.* 22:35-47.
- Lee, S.H. and S.H. Yun. 2011. Impact of meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. *J. Korean Earth Sci. Soc.* 32:360-372.
- Machida H. and F. Arai. 1983. Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late Quarternary eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 18:151-164.
- Machida, H., H. Moriwaki, and D. Zhao. 1990. The recent major eruption of Changbai volcano and its environmental effects. *Geogr. Rep. Tokyo Metrop. Univ.* 25, 1e20.
- Magill, C., T. Wilson, and T. Okada. 2013. Observations of tephra fall impacts from the 2011 shinmoedake eruption. *Earth planets space, Japan.* 677-698.
- Munro, A. and D. Parkin. 1999. Volcanic risk mitigation plan, Environment Waikato policy series 1999/10. Environment Waikato, New Zealand, 76p.
- Neild, J., P. O’Flaherty, P. Hedley, R. Underwood, D.W. Johnston, E. Christenson, and P. Brown. 1998. Agriculture recovery from a volcanic eruption: MAF Technical paper 99/2. 101p.
- Newhall, C.G. and S. Self. 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism.
- Newhall, C.G., S.E. Albano, N. Matsumoto, and T. Sandoval. 2001. Roles of ground water in volcanic unrest. *J. Geol. Soc. Philippines.* 56:69-84.
- Park, C.Y. and C.S. Yoo. 2011. The effect of the Baekdusan volcano eruption on ours. *Korean Soc. Hazard Mitigation.* 11:73-82.
- Pfeiffer, T., A. Costa, and G. Macedonio. 2005. A model for the numerical simulation of tephra fall deposits, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 140:273-294.
- Ri, K.S., O.S. James, C.N. Ko, H. Kim, Y.G. Yun, G.J. Pak, C.S. Ri, C. Oppenheimer, W. Kosima, K. Iacovino, and K.R. Ryu. 2016. Evidence for partial melt in the crust beneath Mt. Paektu (Changbaishan), Democratic People’s Republic of Korea and China. *Science Advances* 2 : e1501513 Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: A precursor of a future eruption?
- Rose, W.I. and A.J. Durant. 2009. Fine ash content of explosive eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 186(1-2): 32-39. Bibcode: JVGR..186...32R. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.010
- Sean, M. 2017. China closes park as North Korea’s missile testing threatens to cause volcano eruption. <http://www.express.co.uk/news/science/855707/North-Korea-Kim-jong-un-world-war-3-nuclear-mt-paektu-volcano-eruption-earthquake>

- Shangguan, Z., B. Pan, X. Lin, and J. Liu. 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: A precursor of a future eruption? *Geophys. Res. Lett.* 39:L16305. doi:10.1029/2012GL052600.
- Shibata, T. and F. Akita. 2001. Precursor changes in wellwater level prior to the March 2000 eruption of Mount Usu, Japan. *Geophys. Res. Lett.* 28:1799-1802.
- Sigurdsson, H. 2015. 2nd Eds. *Encyclopedia of Volcanoes*, San Diego, Academic Press.
- Smithsonian Institute Volcanic Explosivity Index (VEI). Global Volcanism Program. Smithsonian National Museum of Natural History.
- Sun, C., G. Plunkett, J. Liu, H. Zhao, M. Sigl, J.R. McConnell, J.R. Pilcher, B. Vinther, J.P. Steffensen, and V. Hall. 2014. Ash from Changbaishan Millennium eruption recorded in Greenland ice: implications for determining the eruptions timing and impact. *Geophys. Res. Lett.* 41:694e701.
- Sun, C., H. You, H. He, H., L. Zhang, J. Gao, W. Guo, S. Chen, Q. Mao, Q. Liu, G. Chu, and J. Liu. 2015. New evidence for the presence of Changbaishan Millennium eruption ash in the Longgang volcanic field, Northeast China. *Gondwana Res.* 28:52e60.
- Sun, C., H. You, J. Liu, X. Li, J. Gao, and S. Chen. 2014. Distribution, geochemistry and age of the Millennium eruptives of Changbaishan volcano, Northeast China A review. *Front. Earth Sci.* 8:216e230.
- Tilling, R.I. 2000. Volcanoes notes. *Geotimes.* 45:19.
- USGS. 2012. Volcanic Ash, What it can do and how to minimize damage. https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/
- USGS. 2017. Volcanic Ash Impacts & Mitigation. https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/
- Wei, H. 2013. Review of eruptive activity at Millennium volcano, Paektusan, northeast China: implications for possible future eruptions. *Bull. Volcanol.* 75. Bibcode:2013B 75:706W. doi:10.1007/s00445-013-0706-5.
- Wilson, T.M., G.D. Kaye, C. Stewart, and J. Cole. 2007. Impacts of the 2006 eruption of Merapi volcano, Indonesia, on agriculture and infrastructure. *GNS Sci. Rep.* 2007/07, 69p.
- Wilson, T.M., C. Stewart, V. Sword-Daniels, G. Leonard, D.M. Johnston, J.W. Cole, J. Wardman, G. Wilson, and S. Barnard. 2011. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Phys. Chem. Earth.* doi:10.1016/l.pce.2011.06.006.
- Xu, J., G. Liu, J. Wu, Y. Ming, Q. Wang, D. Cui, and N.S. Kim, 2011. An analysis on influence area by the simulation over Mt. Baekdu eruption. *J. Korean Assoc. Reg. Geographers.* 31:348-356.
- Yancheva, G., N.R. Nowaczyk, J. Mingram, P. Dulski, G. Schettler, J.F.W. Negendank, J. Liu, D.M. Sigman, L.C. Peterson, and G.H. Haug. 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature.* 445:74770028-0836.
- Yun, S.H. and J.H. Lee. 2012. Analysis of unrest signs of activity at the Baegdusan volcano. *J. Petrol. Soc. Korea.* 21:1-12.
- Zhao, D., Y. Tian, J. Lei, L. Liu, and S. Zheng. 2009. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab. *Phys. Earth Planet. Inter.* 173:197-206. doi:10.1016/j.pepi. 2008.11.009.
- Zimanowski, B. 2000. Physics of phreatomagmatism. Part 1: explosion physics. *Terra Nostra.* 6:515-523.
- Zou, H., Q. Fan, and H. Zhang. 2010. Rapid development of the great millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) volcano, China/North Korea: evidence from U-Th zircon dating. *Lithos.* 119:289e296.