

시물레이션에 의한 백두산 화산분출 영향범위 분석*

김 남 신**

An Analysis on Influence Area by the Simulation over Mt. Baekdu Eruption*

Kim, Nam Sin**

요약 : 현재까지의 조산운동 기록에 의하면 백두산은 언젠가는 분화가 일어날 것이다. 본 연구는 백두산 화산폭발 시물레이션을 통해 용암류와 화산재가 미치는 영향범위를 예측하고자 하였다. 시물레이션은 화산폭발지수 7, 계절은 가을에서 봄에 분화가 일어날 것을 가정하여 적용하였다. 시물레이션 결과 용암은 중국쪽 사면으로 흘렀고, 화산재는 북한지역으로 확산되었다. 화산재는 9시간 만에 울릉도 지역까지 확산되었다. 북한의 27개 시·군 행정구역 중에서 61개 도시와 마을이 화산재의 영향을 받는 것으로 예측되었으며, 많은 양의 화산재가 농경지, 도시지역, 산림지역에 퇴적되었다. 연구결과는 북한에서 재난 대비, 남·북 및 중국과의 공동 연구를 위한 정보로 활용될 수 있기를 기대한다.

주요어 : 백두산, 분화, 영향범위, 시물레이션, 예측, 용암, 화산재

Abstract : Someday Mt. Baekdu could erupt by records of orogeny activity until today. This study is to predict influence area of lava flow and volcanic ash by simulation of volcanic eruption in the Mt. Baekdu. Simulation for eruption applied to supposing 7 grade of volcanic explosivity index, season from fall to spring. As a simulation results, lava flew down into slope of China and volcanic ash diffused over the North Korea. Volcanic ash spreads to Ulneung area after nine hours. It was predicted that 61 cities and villages out of 27 administrative districts of Si-Gun were affected by volcanic ash in North Korea and an immense volume of volcanic ash was blown into farm lands, city areas and forests. This results expected to utilize information for disaster preparation of North Korea and joint research with South-North Korea and China.

Key Words : Mt. Baekdu, eruption, influence area, simulation, prediction, lava, volcanic ash

1. 서론

오늘날 우리는 전지구적 환경문제에 직면해 있다. 이슈가 되고 있는 환경문제는 지구온난화, 환경오염, 산림벌채 등이다. 지구온난화에 기인한 환경문제인 해수면상승, 산지와 양극지방 빙하의 후퇴, 기온상승 등은 1980년대 후반 이래 지구 곳곳에서 벌어지고 있으며, 그로 인한 농업, 식생, 경제에 미치는 영향 막대하다. 이러한 문제는 공동의 연구와 노력을 통해 극복하려고 하고 있다.

그런데 20세기 후반 및 급세기 들어 우리는 조산운동에 의한 자연재해라는 새로운 국면에 직면하고 있다. 전지구적으로 지진, 단층, 화산활동, 그리고 지진으로 유발된 쓰나미 등의 재해 발생빈도가 증가하고 있다. 특히, 조산운동은 환태평양 신

기조산대를 중심으로 발생하고 있는데 인적, 재산적 피해는 인류가 과거에는 경험하지 못했던 수준으로 생존위협을 받고 있다. 불행하게도 조산운동에 의한 재해는 우리의 노력으로 문제를 해결할 수 있는 성격이 못되며 예측과 결과에 대한 대비책이 최선이다. 현재의 과학으로 예측은 활동이 임박했을 경우를 제외하고는 장기적인 예측에 한계가 있다. 따라서 조산운동이 발생할 수 있는 지역에 대한 영향범위와 피해 최소화를 위한 해결방안 모색이 필요하다.

최근 우리의 관심사는 백두산의 폭발에 대한 논의들이다. 백두산 폭발에 대해 예견을 하게 된 근거는 백두산 천지지역을 중심으로 2002년 이후에 현재까지 지진빈도 증가, 온천수의 수온상승, 화산가스 발생량 변화, 천지 하부에 존재하는 마그마

* 본 논문은 2011년 2월 17~18일 한국지역지리학회 동계학술대회에서 발표한 내용을 보완하여 투고한 것임.

** 전남대학교, 지리교육과 강사(Lecturer, Department of Geography Education, Chonnam National University) (kns9027@dreamwiz.com)

방(magma chamber)의 상승, 화산체 상승 및 지형 변화 사례를 근거로 백두산의 활동이 시작되고 있다는 주장이 제기 되고 있다(玉季平, 1989; 崔若新等, 1996; 李范熙 등, 1997; 吳建平 등, 2007; 윤성효·이정현, 2010). 현재까지 관찰 및 관측된 기록을 종합하면 백두산은 폭발이 언제가는 일어날 것이고, 적어도 규모는 화산폭발지수(Volcanic Explosivity Index:VEI) 7 정도로 1991년에 분출한 필리핀의 피나투보 폭발 정도로 예측하고 있다.

우리가 백두산 폭발에 대해 관심을 크게 갖는 이유는 분화 그 자체도 중요하지만, 백두산 폭발 시 직접적인 영향을 받는 북한과 중국, 그리고 간접적으로는 한국에 미치는 영향 때문이다. 북한의 경우는 정치, 사회, 경제적 피해가 클 것이고 그로 인해 국가적 변혁이 올 수 있다는 가정 때문이다.

역사적으로 백두산 지역의 활동 기록은 1413년, 1597년, 1668년, 1702년, 1712년, 1724년, 1898년, 1900년, 1903년 9차례 발생한 것으로 기록되어 있다(김부식, 1145; 김중서·정인지, 1451; 조선왕조실록, 1413~1865), 이 중 천지에서 분출한 것은 1668년, 1702년, 1903년 3회이다. 지질학적 연구와 문헌 해석을 종합한 백두산의 최대 분화는 약 1,000년 전(912년, 915년, 946년, 947년, 1215년)에 대규모로 발생한 것으로 알려지고 있다(윤성효·최종섭, 1996). 이 시기의 대규모 분출은 역사적으로 볼 때 발해의 멸망 원인 중에 하나로 가설을 세우게 하고 있다.

화산 폭발할 때 용암류, 화산쇄설물, 가스 등이 분출한다. 용암류는 지형면의 와지를 채워가며 흐르기 때문에 평탄화작용(regularization)을 하고, 화산쇄설물은 화산탄, 화산재 등으로 미립물에서 거력에 이르기까지 다양한 크기의 물질을 분출한다. 화산쇄설물은 폭발력에 따라 구성물의 직경에 따라 다르지만, 큰 것은 분화구의 주변부에서 수 km까지 날아가며 퇴적시 최대 온도는 300~500°C 가까이 된다(Miyagi and Tomiya, 2003). 작은 입자는 바람을 타고 장거리를 이동하여 퇴적된다. 용암류와 화산쇄설물은 지표상에 존재하는 지표피복(landcover)에 직접적인 영향을 주기 때문에 촌락, 도시, 농경지, 식생 등을 파괴하게 된다. 화산 폭발은 용암류 외에 지진에 의한 이차적인 문제가 발생할 수 있다. 지진 산사태로 인한 댐 붕괴와

용암류가 호수나 하천으로 유입함으로써 홍수가 발생할 수 있다. 백두산 천지는 현 분화구내에서 직접적으로 분출할 경우 막대한 양의 수체가 주변으로 흘러 홍수를 일으킬 가능성이 있다. 화산폭발에 의한 자연재해는 크지만, 막을 수 없기 때문에 피해 최소화를 위한 화산폭발 규모와 시·공간적 영향범위 파악이 필요하다.

화산의 폭발에 관한 예측은 지진과, 지질자료, 지진기록 등을 활용하여 추정하고 있지만, 분화가 임박했을 때를 제외하고는 장기적인 예측은 현실적으로 무리가 있다(Kin-Yip, et al., 2009).

현시점에서 백두분출에 대한 연구와 논의는 백두산 활동 모니터링, 폭발에 따른 용암류와 화산재의 확산범위 그리고 그에 따라 발생할 수 있는 환경문제 분석, 대비책 등에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 백두산 화산폭발 시물레이션을 통해 화산분출 확산 범위를 분석하여 도시 및 거주지, 지표피복에 미치는 영향범위를 분석하고자 하였다. 연구결과는 미래에 발생할 수 있는 화산 재난에 대비할 수 있는 방재 매뉴얼과 대비책을 마련하는데 기여할 것이다. 백두산 활동에 대한 관측 및 관찰은 접경지대라는 특성 때문에 자료 확보에 한계가 있다. 현재까지 중국이 가장 많은 데이터 베이스를 구축하고 있기 때문에 한·중 공동연구 및 남북협력 연구가 필요하다.

2. 백두산의 활동 및 분화 가능성에 대한 연구

백두산 분화 가능성에 대한 여론 논의는 많지만 학술논문으로 발표된 사례는 윤성효·이정현(2010) 그리고 중국의 吳建平 등(2005, 2007)의 논문이다.

최근 백두산 활동에 대한 연구를 발표한 윤성효·이정현(2010)은 백두산 주변의 지질학적 자료를 근거로 하여 분화가능성을 예측하고 있다. 백두산이 활동을 시작했다는 사례로는 2003년에 천지 지하 2~5km 하부에서 화산활동이 월 250회로 증가, 외륜산 봉괴 및 균열, 천지와 칼데라 주변에서 화산가스 분출, 위성측량 결과 2002년 8월~2003년 8월 사이 천지 북쪽 지형의 연간 이동속도가 약 45~50mm/년, 온천수 수온의 상승 등이다. 또한 이를 뒷받침 해주는 자료는 지진과 분석에서

천지 지하 10~12km에 마그마 방의 발견이다. 이러한 사례를 종합하여 백두산은 현존 지구상의 화산체 중 폭발력이 7.4로 위협적인 것으로 보고 있다. 이는 약 천년전의 분화에 대한 역사적 사실에 근거하여 제시하고 있다. 李范熙 등(1997)은 관측 이래 백두산 지진의 빈도가 증가함에 주목하여 관측 데이터 분류 및 화산 지진에 대한 비교 연구를 상세하게 진행할 필요가 있음을 제시하였다. 吳建平 등(2005)은 1985년 이후 지진관측데이터 분석을 통해 2002년 6월 이전 백두산 화산지역 지진 발생빈도가 비교적 낮았지만, 그 이후 화산활동이 현저하게 증가하였다고 하였다. 2002년 6월에서 2004년 말까지 백두산천지 부근에서 20여 차례의 전형적인 진군(震群) 형태의 지진활동이 발생하였고, 2002년과 2003년 여름에 백두산에서 설치한 15대 지진관측기로 6개월 동안 관측한 결과에 따르면, 백두산 지진활동이 빈번해졌고, 발생빈도가 전형적인 활화산지역과 유사함을 지적하고 있다. 백두산에서 지진 깊이가 보통 5km이며, 지진이 주로 천지내부나 근처에 발생하고 천지의 동북부와 서부에 집중되어 있음을 관측을 통해 확인하였다. 吳建平 등(2005)은 1985~1991년까지 천지 북쪽 3km에서 획득한 데이터에 따르면 한 달에 4차례 지진이 관측되었지만, 1993~1995년에는 천지 북쪽에서 월 평균 18차례가 발생하였음을 확인하였다. 전반적으로 2002년 6월부터 지진활동이 현저하게 증가하는 추세를 보였다고 연구하였다. 吳建平 등(2007)은 2002년과 2003년에 지진의 위치

를 분석한 결과 지진이 주로 분화구 부근에 일어나고 진군의 형태로 발생한 지진은 주로 천지 분화구의 서남부에 위치하고, 동북부 지진이 밀접한 지역에서는 진군활동이 관측되지 않은 것으로 나타났다. 2003년 7월13일 진군 발생기간 진원(震源)지가 깊은 곳에서 지표의 얇은 곳으로 이동하는 현상을 확인하였다. 진군 활동이 지하 5km 부근까지 이동한 것은 마그마활동과 마그마 압력의 증가와 관계되고 있다고 해석하고 있다.

이상의 연구들을 종합하면 백두산 지역에서 지진의 빈도는 2002년 이후에 증가했으며 천지를 중심으로 진앙지들이 밀집된 진군 형태를 보인다고 할 수 있다. 그간 연구자료를 종합하여 천지의 진앙지 밀도를 표현하면 <그림 1>과 같다. 이는 백두산이 분화될 경우 분출 위치가 천지에서 발생할 수 있다고 추정할 수 있는 자료가 된다. Lei and Zhao(2005)의 연구에서 백두산 지역과 동북아시아 지진 p파를 분석한 결과 백두산을 중심으로 지하에 마그마 방의 존재 가능성을 제기하였다(그림 2). 현재는 마그마 방에 대한 구체적인 연구를 통해 그 위치가 10, 20, 28, 32km에 존재하며 점점 표층으로 상승할 가능성을 제기하고 있다(Tian, et al., 2009; Ming, et al., 2006).

한편, 백두산을 중심으로 동북아시아에서 2002년 이래 발생한 진도 4.0 이상의 지진 분포의 특징은 <그림 3>과 같다. 외적으로는 일본의 태평양 지각 섭입대를 따라 큰 지진이 나타나고 있고, 두만강 하구, 동해지각의 경계대를 따라 지진의 규모가 큰 것이 분포한다. 특히 사항은 그간 두만강

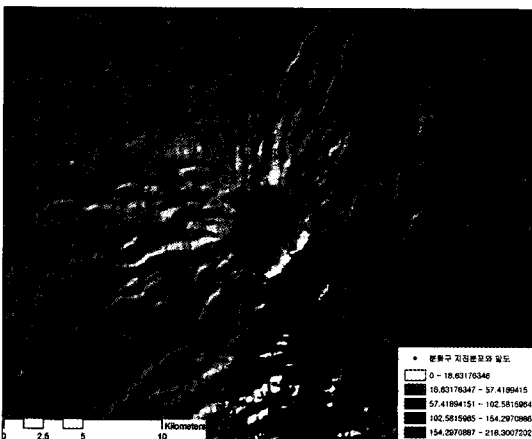
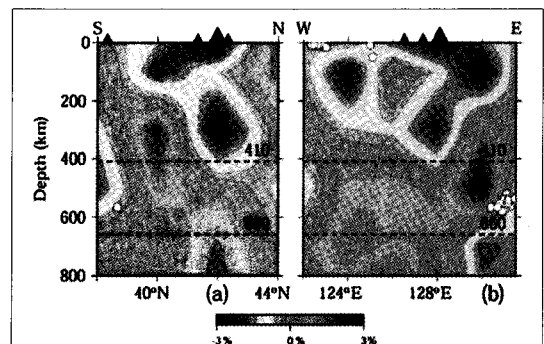


그림 1. 최근 발생한 진앙지 밀도



(백두산을 중심으로 남-북, 동-서를 나타낸 것임: Tian, et al., 2009 재인용)

그림 2. 마그마 방 위치

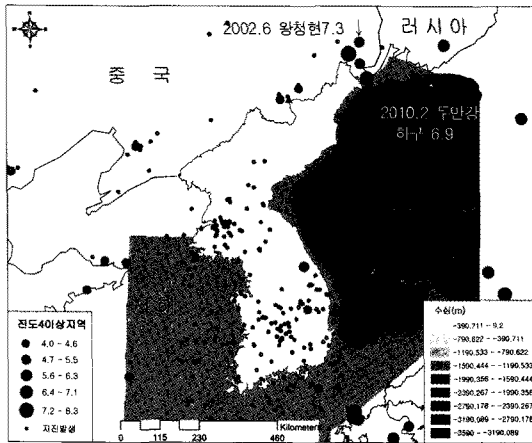


그림 3. 2002년 이래 발생한 지진분포

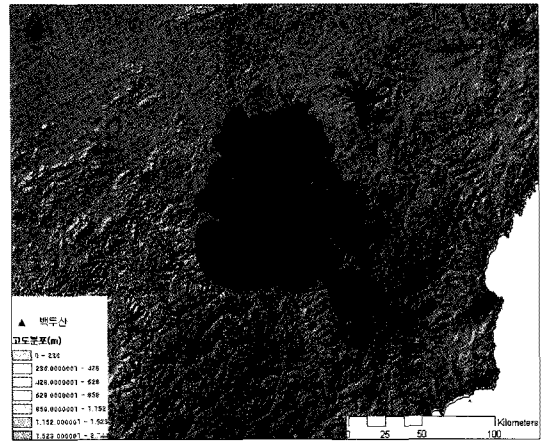


그림 4. 연구지역과 화산암 분포도

하류지역에서 지진이 발생하면 백두산에서도 지진이 증가되는 경향을 보여 왔다는 점이다. 2002년 6월 중국 동북부 왕청현에서 규모 7.3의 지진이 발생한 후, 같은 해에 백두산에서 지진의 빈도가 크게 증가하였고, 2010년 2월 18일 두만강 하구인 동해 해저지각에서 진도 6.9의 지진이 발생한 이래 백두산에서 지진빈도가 잦아진 사례가 그 예이다. 이는 백두산의 지진 에너지가 외부 조산운동의 영향을 받고 있다는 것으로 해석될 수 있다. 따라서 두만강 하류지역의 지진활동과 연계하여 백두산을 모니터링 할 필요성이 있다(Thompson, 1992; Hetland, *et al.*, 2004).

3. 백두산의 형성과 지형

윤성효(1995)와 좌용주 등(2003)의 연구에 따르면 백두산은 신생대 3기초에 현무암 분출이 시작되어 마이오세에 용암대지가 형성되었고, 천년전에 칼데라 형성된 것으로 해석하고 있다.

백두산 지역을 중심으로 용암류는 북한과 중국에 약 100km 반경으로 분포한다(그림 4). 현재 용암의 면적은 13,819km²로 북한과 중국지역에 고원상 용암지형을 형성하고 있다.

백두산 천지를 중심으로 고도분포의 특징을 단면으로 보면 <그림 5>와 같다. 그림에서 단면 북서-남동 방향 1.A-1.B는 북서쪽으로 지형과 고도가 개방되어 완만하게 낮아지고 있다. 동서 단면 2.A -2.B는 서쪽으로 완만하게 이어지고 동으로는

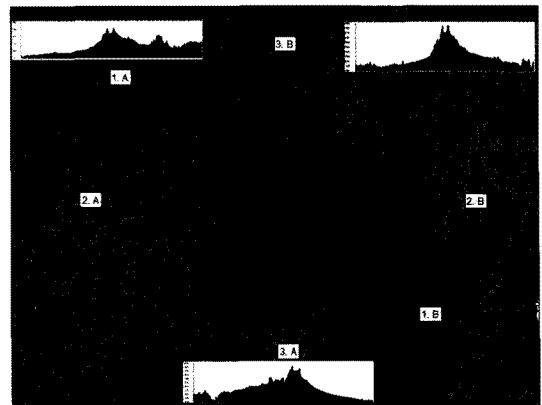


그림 5. 연구지역의 지형 단면도

급하게 나타난다. 남북방향 단면 3.A-3.B는 남으로 급하고 북으로 완만하게 낮아진다. 이 같은 지형단면의 특징은 천지를 중심으로 분화가 일어날 경우 분출 위치에 따라 용암류가 미치는 결과가 다르게 나타날 수 있음을 예측 할 수 있게 한다. 직경 약 5km에 달하는 천지 내부의 동남부 경계 지역에서 용암이 분출할 경우는 용암류와 수체가 북한지역으로 빠른 속도로 흘러갈 수 있으며, 반대로 천지의 북서부 지역에서 분출할 경우는 완만한 경사를 따라 용암이 흘러갈 것으로 예상된다.

4. 연구방법 및 내용

화산폭발에 따른 영향범위를 분석하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 화산 분화

시뮬레이션에 의한 백두산 화산분출 영향범위 분석

시 발생하는 용암류 모델과 화산재 및 쇄설물 확산 모델을 연구에 적용하였다.

용암류는 용암류 흐름을 모델링하기 위해 Felpeto (2001)의 연구에서 개발된 모델을 사용하였고, 화산재 확산은 세인트 헬렌 화산폭발 당시 화산재 확산과 퇴적을 분석하기 위해 Armienti *et al.* (1988)가 개발한 모델을 사용하였다. Armienti의 초기 모델은 성층권에서의 대류확산을 반영하지 못하고 있어 후에 개선보완 연구된 시뮬레이션 모델을 사용하였다(Pfeiffer, *et al.*, 2005; Felpeto, *et al.*, 2007). 이 모델에 근거해 스페인의 the group of volcanology of Barcelona(2009)에서 개발한 VORIS 2.0.1을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션 모델은 다음과 같다.

Felpeto(2001)의 용암류 확산 모델은 Monte Carlo algorithm을 적용하여 개발된 모델로 식은 다음 1과 같다.

$$P_i = \frac{\Delta h_i}{\sum_{j=1}^8 \Delta h_i} \dots\dots\dots(1)$$

h : 고도(dem)에서 주어진 위치(j)에서의 흐름 방향

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + W_x \frac{\partial C_j}{\partial x} + W_y \frac{\partial C_j}{\partial y} - w_z \frac{\partial U_{sj} C_j}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C_j}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C_j}{\partial z^2} + S_j \dots\dots\dots(2)$$

- 여기서 W_x, W_y : 바람장(wind field)
- U_j : 바람장(wind field: W_x, W_y)에서 화산재입자별(j) 집중도
- V_j : 화산재입자별(j) 낙진속도
- K_x, K_y, K_z : 낙하 화산재확산(eddy diffusion) 지수
- S_j : 원천함수(source function)

표 1. 용암류 시뮬레이션 변수

분출시간	반복계산 횟수	분출높이	최대범위	고도자료	용암류 유출시 지표기록 보정
9 시간	100회	500m	500km	DEM	100m

표 2. 화산재 시뮬레이션 변수

결과 해상도	대기 온도	분출고도	화산재양	대류권재면 고도	입자크기	대기 확산	풍속	대기밀도	풍향
400m	288k	12km	100km ³	11,300m	0.25~64mm	1,000m ² /s	15m/s	1.2255kg/m ³	NW

되었기 때문에 분출 용암류에 대한 자료가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 용암류가 일정하고 온도와 점성이 같다는 전제하에 고도정보를 기반으로 한 사면경사 및 방향 그리고 지표기복의 특성을 고려한 시뮬레이션을 실시하였다.

화산재 시뮬레이션에 사용된 변수는 분출고도, 화산재양, 입자의 크기, 대기확산속도, 풍속, 풍향 등을 적용하였다. 이들 변수 중에 입자의 크기는 0.25~64mm로 분출시 폭발력에 의해 12km 정도의 성층권역까지 상승할 수 있으며, 이러한 고도까지 상승한 입자들은 대류권에서의 확산과 풍속에 따라 멀리 이동할 수 있어 풍향에 따라 광범위하게 퇴적될 수 있다.

연구에 사용된 고도자료는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 90m 해상도의 DEM을 사용하였고, 위성자료는 Landsat 2005~2008년에 촬영된 116-31,115-31, 116-32, 115-32를 합성하여 토지이용도를 추출하였다.

5. 연구결과

1) 용암류와 화산재 분출의 시·공간적 특징

폭발은 1회로 가정하여 시뮬레이션한 결과, 용암류는 중국쪽으로 화산재는 북서계절풍을 따라 북한쪽으로 이동하였다. 중국쪽의 용암은 면적이 3,888km²로 나왔다(그림 6). 용암류는 북서방향으로 중국의 용암대지를 따라 흐름이 확산되었다.

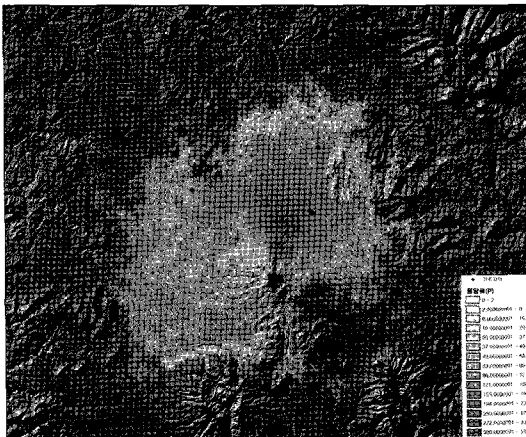


그림 6. 용암류 지역

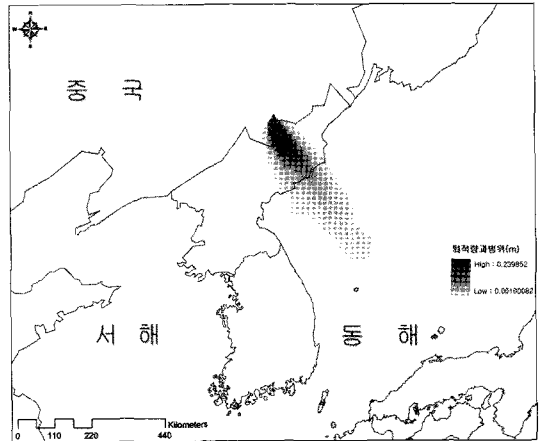


그림 7. 화산재 분포지역

화산재는 쇄설물과 함께 발생하는 것으로 모델링하였는데 면적은 23,200km² 평균두께는 0.16m, 최대 0.23m로 나타났다(그림 7).

시뮬레이션에서 확산분화는 계절에 따른 방향을 제한하였지만, 실제 분화시 공간적으로 보면 용암류는 55km 반경 어느 지역에도 영향을 미칠 수 있고, 마찬가지로 화산재도 9시간 내에 500km 전 지역으로 확산될 수 있다. 시뮬레이션에서와 같이 북서계절풍을 따라 화산재가 이동한다면 9시간이면 울릉도 지역까지 영향을 미칠 수 있는 범위이다. 하지만 실제 폭발시 대기 방향이 어느 방향으로도 향할 수 있기 때문에 한국으로 향한다면 서울, 경기도, 강원도 지역이 화산재의 영향권에 들

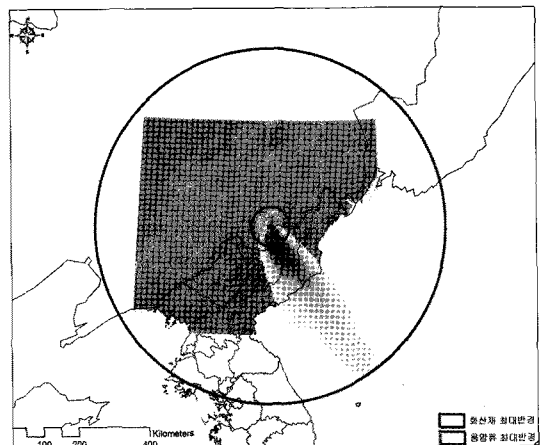


그림 8. 9시간내 영향권 지역
(용암류: 55km, 화산재: 500km)

시물레이션에 의한 백두산 화산분출 영향범위 분석

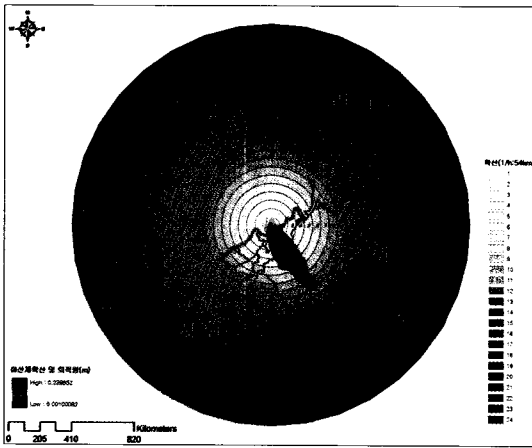


그림 9. 백두산 분화시 시간대별 화산재의 확산

어갈 수 있다(그림 8). 화산재가 북서계절풍을 따라 지속적으로 확산된다면 24시간 후에는 일본열도를 통과하는 것으로 예측되었다(그림 9).

2) 영향범위

용암류는 천지를 중심으로 거주지역이 적은 중국쪽 고산지역으로 흘러 5개 마을이 영향을 받는 것으로 나타났다. 반대로 화산재는 북한으로 이동하는데, 61개 시군 도시와 마을에 퇴적되었다. 행정구역으로 볼 때 화산재에 영향을 받는 지역은 3개도 27개 시군이 화산재의 직접적인 영향을 받는 것으로 예측되었다(그림 10).

〈표 3〉과 같이 화산재는 량강도, 함경남·북도 지역으로 확산되었다. 분출 초기에는 300~500℃

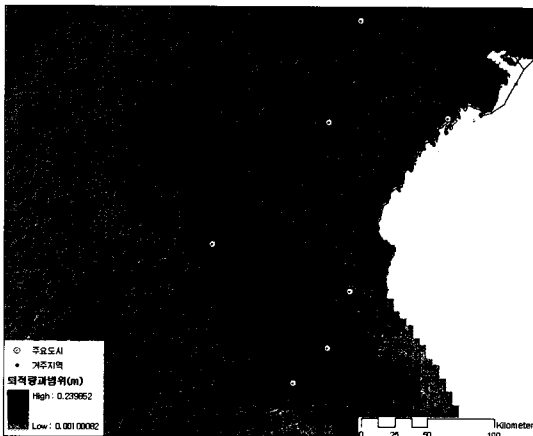


그림 10. 화산재 영향지역

의 고온 화산재가 분출하여 퇴적되기 때문에 동·식물에 상당한 피해가 예상되는 지역이다.

표 3. 화산재 영향지역

지역	세부지역
량강도 (11개시군)	갑산군, 삼지연군, 운흥군, 김정숙군, 해산시, 김형권군, 대흥단군, 보천군, 풍서군, 백암군, 삼수군
함경남도 (7개시군)	신포군, 허천군, 부전군, 북청군, 리원군, 홍원군, 단천시
함경북도 (9개시군)	덕성군, 어랑군, 길주군, 화성군, 경성군, 명천군, 화대군, 김책시, 연사군

용암류에 의한 지표피복 영향은 중국 쪽은 고산지역이 대부분 파괴되는 것으로 나타났다(표 4). 반면에 북한지역의 화산재는 산림지역, 농경지, 도시, 초지, 나대지 등에 영향을 주는 것으로 나타났다(표 5).

표 4. 용암류 영향면적(km²)

피복	횟수	용암류 면적
산림		3,567.8
나대지		35.8

표 5. 화산재 영향면적(km²)

피복	횟수	화산재 면적
산림		16,437.8
도시		149.3
농경지		1,277.4
수체		61.1
초지		3,711.1
나대지		1,522.8

6. 요약 및 토의

그간 백두산에서 발생한 지진, 온천수 온도 상승, 화산가스 등에 대한 정보를 종합하면 백두산이 활동기에 접어들었다는 것을 의미한다. 기록에 의하면 언젠가는 백두산이 분화한다는 점에 대해 학자들 사이에 이견이 없는 것 같다. 다만 언

제 분화하느냐는 지질기록의 부족으로 인해 의견이 다양한 상황이다.

화산활동에 대해 인류가 사전에 방지하기 위한 노력은 불가능하다. 다만, 그 결과에 대해 대비하여 피해를 최소화하려는 준비가 필요하다. 이런 점에서 본 연구는 백두산 분화 시뮬레이션을 통해 용암류와 화산재의 확산이 지표피복에 미치는 영향을 분석하였다. 용암류 흐름은 Felpeto(2001) 모델, 화산재 확산은 Armienti의 모델을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 분화강도는 화산폭발지수 7로 가정하였으며, 가을에서 봄사이 북서계절풍이 부는 계절을 상정하여 실시하였다. 분출 결과 용암류는 중국쪽으로 55km 흘러갔다. 화산재는 북서계절풍의 영향으로 북한쪽으로 퇴적되었는데, 9시간 동안 23,200km²로 확산되었으며 500km 떨어진 울릉도 인근까지 도달하였다. 화산재에 의한 영향은 북한의 3개도 27개 시군의 61개 도시와 마을이 영향을 받는 것으로 나타났다.

본 연구에 적용한 시뮬레이션 모델은 그간 관측된 진앙지 밀도가 높은 천지 내부에서 분화가 일어난다는 전제하에 모델링을 하였다. 하지만 천지 내부는 칼데라 호로써 방대한 양의 물이 있기 때문에, 분출시 수체의 확산 및 기화로 인해 발생할 수 있는 직간접적인 영향을 모델에 적용하지 못한 한계를 갖고 있다. 또한 화산 분화시 일어날 수 있는 지진, 단층, 산사태로 인한 지형변화들을 반영하지 못한 점은 모델 개선을 통해 보완해야할 연구 과제이다.

백두산 활동은 한국뿐만 아니라 북한 그리고 중국 3국이 관심을 갖는 지역이다. 따라서 3국의 공동연구가 필요하다. 분화시기에 대한 예측도 중요하지만, 현재 진행되고 있는 활동에 대한 지속적인 모니터링과 자료의 공유, 그리고 분화가 일어났을 때 벌어질 수 있는 재난 해결을 위한 매뉴얼 제작, 심각한 자연재난에 따른 북한에서의 사회적 변혁 가능성 등 종합적인 접근이 필요하다. 한편, 주목해야할 점은 그간 두만강 하구 동해자각에서 지진이 발생할 경우 백두산에서의 지진빈도도 증가해 왔다는 점이다. 이에 대한 관련성 연구도 함께 진행되어야 할 것으로 본다.

문헌

- 김부식, 1145(12세기 중반), 삼국사기.
 김중서·정인지, 1451, 고려사.
 조선왕조실록, 1413~1865, <http://sillok.history.go.kr/main/main.jsp>.
 윤성효, 1995, 화산폭발 임박, 백두산 지질탐구, 과학동아, 1, 94-101.
 윤성효·최종섭, 1996, 백두산 천지 칼데라 화산의 역사 분출기록, 한국지구과학회지, 17(5), 376-382.
 윤성효·이정현, 2010, 과거 백두산의 화산활동과 향후 분화 가능성 그리고 남한학자들의 백두산 연구 참여 방안, 대한지질학회 추계 발표자료집.
 좌용주·이종익·Zheng Xiangshen, 2003, 백두산의 화산분출 연대에 대한 연구: 1. 목탄과 나무 시료에 대한 14C 방사성 연대, 지질학회지 39(3), 347-357.
 玉季平, 1989, 長白山志, 길림문화출판사.
 吳建平·明跃红·张恒荣·苏伟·刘一鸣, 2005, 2002 夏季长白山天池火山区的地震活动研究, 地球物理学报, 48(3), 621-628.
 吳建平, 明跃红, 苏伟, 2005, 长白山天池火山流动地震观测研究, 全国第四次火山学术研讨会 全国第四次火山学术研讨会-火山作用与地球层圈演化论文集 58篇.
 李范熙·金东淳·安在律, 1997, 长白山天池火山地震记录波形分析, 地球物理学报, 18(6), 1-8.
 吳建平·明跃红·张恒荣·刘国明·房立华·苏伟·王未来, 2007, 长白山天池火山区的震群活动研究, 地球物理学报, 50(4), 1089-1096.
 刘若新等, 1996, 长白山天池火山研究进展. 地震地磁观测与研究, 17(4), 2-11.
 Armienti, P., Macedonio, G., and Pareschi, M. T., 1988, A numerical-model for simulation of tephra transport and deposition-applications to May 18, 1980, Mount-St-Helens eruption, *Journal of Geophysical Research*, 93(B6), 6463-6476.
 Felpeto, A., Arana, R., Ortiz, M. A., and Garcia, A., 2001, Assesment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote island (Canary Islands),

- Natural hazards*, 23, 247-257.
- Felpeo, A., Marti, J., and Ortiz, R., 2007, Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166, 106-116.
- Hetland, E., Wu, F., and Song, J., 2004, Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver function, *Tectonophysics*, 386(3-4), 157-175.
- Kin-Yip, C., Yan, W., and Gary A. H., 2009, Lg attenuation near the north Korean border with China, part I: model development from regional earthquake sources, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5), 3021-3029.
- Lei, J. and Zhao, D., 2005, P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in northeast Asia, *Tectonophysics*, 397, 281-295.
- Ming, Y.H., Su, W., and Fang, L.H., 2006, A preliminary study of the types of volcanic earthquakes and volcanic activity at the Changbaishan Tianchi volcano, *Earthquake Research in China*, 20(3), 286-294.
- Miyagi, I. and Tomiya, A., 2003, Estimation of heated temperature of volcanic ash based on the color change: an application to the landing temperature of the Miyakejima volcanic bomb ejected on 18 August, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 2000, 47(6), 757-761.
- Newhall, C. G. and Self, S., 1982, The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *Journal of Geophysical Research*, 87(C2), 1231-1238.
- Pfeiffer, T., Costa, A., and Macedonio, G., 2005, A model for the numerical simulation of tephra fall deposits, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140, 273-294.
- Thompson, A., 1992, Water in the earth upper mantle, *Nature*, 358, 295-302.
- Tian, Y., Zhao, D., Liu, C., Teng, J., and Sun, R., 2009, Three-dimensional P-wave velocity structure of the crust and upper mantle under the Changbai volcanic area in northeast China, <http://gest.jlu.edu.cn/uploadfiles/file/200907151649185648.pdf>.
- The Group of Volcanology of Barcelona, 2009, <http://www.gvb-csic.es/GVB/VORIS/VORIS.htm>.

(접수: 2011.3.9, 수정: 2011.4.11, 채택: 2011.5.8)