

## LAHARZ\_py 프로그램을 이용한 라하르 범람지역의 예측: 백두산 화산에 적용

윤성호<sup>1</sup> · 장철우<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구과학교육과, <sup>2</sup>부산대학교 대학원 지구과학과

### Prediction of Lahar Flow Inundation Areas Using LAHARZ\_py Program: Application for the Mt. Baekdu Volcano

Sung-Hyo Yun<sup>1</sup> and Cheolwoo Chang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science, Graduate School, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

(Received: 28 July 2017 / Revised: 23 August 2017 / Accepted: 24 August 2017)

Mt. Baekdu which located the border of North Korea and China, is known as a potentially active volcano in a typical mountainous terrain. A lahar on the volcanic area is one of the important hazard that can cause the loss of life and property damage. In order to comprehensively address the impact of lahar hazard at Mt. Baekdu, we simulated lahar inundation area using Laharz\_py. We assumed 750 m of additional elevation for DEM to draw proximal hazard zone boundary (PHZB) of Mt. Baekdu that H/L ratio are selected 0.10. And lahar volumes for simulation were estimated to  $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $5 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, respectively. In the results, 15 streams are located near a proximal hazard zone boundary, Amnok (Yalu) river (south), Toudaosonghua river, Jinjiang river and Huapi river (west-southwest), Songjiang river, Xiaosha river, Caozi river and Sandaosongjian river (west-northwest), Toudaobai river, Erdaobai river and Sandabai river (north), Wudaobai river-1, -2, -3 (northeast) and Duman (Tumen) river (east). The results of this study can be used as basic data to make a hazard map for reduce the damage that can be caused by volcanic hazards occurred on Mt. Baekdu.

**Key words** : Mt. Baekdu, Lahar, Laharz\_py simulation, proximal hazard zone boundary, runout distance

북한과 중국의 국경에 위치한 백두산은 전형적인 산지 지형으로 잠재적 분화 가능성이 있는 화산이다. 화산지대에서 발생하는 라하르는 인명과 재산에 큰 피해를 줄 수 있는 주요 화산 재해 중 하나이다. 백두산에서 발생할 수 있는 라하르에 의한 영향을 포괄적으로 다루기 위하여 Laharz\_py 프로그램을 이용하여 침수영역을 수치모의 하였다. 백두산의 근위위험지역경계(proximal hazard zone boundary; PHZB)를 설정하기 위하여 수치표고모델(DEM)에 추가적인 750 m의 고도를 가정하여 수치모의에 필요한 H/L비를 0.10으로 설정하였다. 수치모의를 위하여 발생 가능한 라하르의 부피를 각각  $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $5 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup>으로 설정하였다. 수치모의의 결과, 압록강(남쪽), 두도송화강, 금강하, 화피하(이상 서-남서쪽), 송강하, 소사하, 조자하, 삼도송강하(이상 서-북서쪽), 두도백하, 이도백하, 삼도백하(이상 북쪽), 오도백하 및 그 지류에 해당하는 3개의 하천(북동쪽), 그리고 두만강(동쪽) 등 15개의 하천이 근위위험지역경계에 위치하였다. 본 연구 결과는 백두산에서 발생할 수 있는 화산 재해에 의한 피해 저감 대책 수립을 위한 재해위험도를 작성함에 있어 기초 자료로 활용할 수 있다.

**주요어** : 백두산, 라하르, Laharz\_py 수치모의, 근위위험지역경계, 도달 거리

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: [iori\\_yagami@naver.com](mailto:iori_yagami@naver.com)

## 1. 서 언

백두산은 한반도와 중국 동북지역에서 가장 높은 산으로, 최고봉인 장군봉은 해발고도 2,750 m에 이른다. 백두산이 위치하는 백두산화산지대(Mt. Baekdu volcanic field)는 18,350 km<sup>2</sup> 면적의 개마용암대지와 순상화산체, 그리고 백두산 성층화산체를 포함한다. 백두산 꼭대기에는 직경 약 5 km의 함몰칼데라 내에 '천지(天池)'라는 장경 4.4 km × 단경 3.37 km, 면적 9.82 km<sup>2</sup>의 산정 호수를 가지고 있는데, 천지 수면의 평균 해발고도는 2,189 m, 최대 수심 374 m이고(Yun *et al.*, 1993), 여기에 담긴 물은 약 20억 톤에 이른다(Kim *et al.*, 2014).

북한 량강도(兩江道) 삼지연군(三池淵郡)과 중국 지린(吉林)성과의 국경에 위치하는 백두산은, 그동안 화산활동이 정지된 화산으로 인식되고 있었으나, 2002년 6월말 이후 다양한 분화의 전조들이 나타남에 따라 백두산의 미래 분화 시점에 대한 방재 매뉴얼 작성의 필요성이 증대되고 있다. 서기 946년의 밀레니엄 대분화(화산폭발지수 7)로부터 31건 이상의 화산 분화사건이 역사기록에서 발굴되었으며(Yun, 2013), 대부분 화산체를 분화하여 인근 지역으로 확산시키면서 강하화산체를 발생시킨 폭발적인 플리니안 분화 사건이 많았다. 마지막 분화사건인 1903년의 기록은 천지 내에서의 수증기 마그마성 분화 또는 볼카니안 분화에 의한 기록이었다.

2002년 6월말 이후 10여 년 간의 다양한 관측 자료를 바탕으로 백두산 허부 맨틀구조의 변화가 감지되었고, 화산성 지진활동의 급증, 화산체 내부의 사면붕괴, 화산 가스에 의한 수목의 고사, 지표면의 팽창, 용기 및 침강, 온천수의 수온 상승 등 현상학적으로 다양한 분화 가능성을 나타내는 전조가 관측되었다(Yun *et al.*, 2007; Yun and Lee, 2011 & 2012; Xu *et al.*, 2012). 역사시대의 분화 기록과 2002년에 나타난 화산 분화 전조현상 등으로부터 백두산은 잠재적인 분화가능성을 가진 활화산으로 평가된다. 잠재적인 분화가능성을 가진 화산체로서 갑작스런 화산 분화 시 느슨하게 퇴적된 화성쇄설물과 물이 만나면 라하르(lahar)를 발생시킬 가능성이 있다.

본 연구에서는 백두산에서 라하르가 발생할 경우에 대비하여 Laharz\_py 프로그램을 이용한 사전 수치모의를 통해 그 영향 범위를 파악함으로써 근접화산체로부터 야기될 수 있는 인명과 재산의 피해를 최소화하는 데 목적이 있다. 또 본 연구 결과는 백두산에서 라하르에 대비한 근접화산체해 방재 대책 수립 및 라하

르 재해-분대지도(Hazard zone map) 작성을 위한 기초자료로 제공 되어질 것이다.

## 2. 라하르와 Laharz\_py 프로그램

### 2.1. 대표적인 라하르 재해 현상 고찰

화산 활동의 이차적 영향 중 가장 심각한 것의 하나는, 인도네시아 이름으로 '라하르'라고 알려진, 암설류와 화산이류이다(Gerrard, 1990). 라하르는 거대한 양의 느슨한 화산재와 다른 테프라들에 물이 흠뻑 스며들어 불안정하게 되어 갑자기 화산체 사면의 내리막으로 이동할 때 발생한다. 암설류는 입자가 더 굵다는 점에서 화산이류들과 차이를 보인다. 암설류 입자들의 반 이상이 모래 입자들보다 더 크다. 화성쇄설류와 달리, 라하르는 직접적인 화산분화 없이 발생할 수 있으며, 일반적으로 낮은 온도의 흐름을 말한다(Scott, 1988; Newhall *et al.*, 1997).

뜨거운 화산 물질은 비교적 작은 분화에 의해 발생한 경우에도 화산에 있는 많은 양의 눈과 얼음을 재빠르게 녹일 수 있다. 그 결과 화산 측면을 침식시키는 용융된 물의 홍수가 생성되어 암설류가 형성된다. 화산 암설류는 축축한 콘크리트와 유사한 농도를 가지는 세립의 퇴적물과 큰 암석들이 빠른 속도로 이동하는 혼합물이다. 암설류는 1985년 콜롬비아 아르메로(Armero) 시를 파괴한 것과 같이, 암설류가 형성된 화산의 측면에서 계곡 아래쪽으로 수십 km를 이동할 수 있기 때문에 특히 더 위험한 것으로 여겨진다. 콜롬비아 북서쪽에 위치한 네바도 델 루이스(Nevado del Ruiz) 화산은, 남아메리카 서부 태평양 연안 길이에 달하는 안데스 섭입대 위에 발달된 성층화산이다. 1985년 11월에 이 화산이 분화하여 대기 중으로 약 30 km 높이의 플리니식 분연주를 뿜어내었다. 화성쇄설류에 의해 촉발된 분연주의 연속적인 붕괴는, 산 정상부의 빙하를 녹여 엄청난 양의 물을 방출하였다. 화성쇄설성 암설과 혼합된 홍수 물은 고밀도의 슬러리를 형성하면서 시속 100 km의 속도로 강 계곡들을 따라 이동하면서 그 이동 경로에 있는 모든 것들을 쓸어버렸다. 암설류가 아르메로가 위치해 있던 곳으로부터 45 km 하류 쪽의 계곡 입구에 도달할 때 즈음, 그 흐름의 양은 4배 증가했으며, 최대 너비는 50 m에 달했다. 아르메로 시는, 인구의 4분의 3인 약 21,000명의 사람들이 목숨을 잃으면서, 거의 완전히 파괴되었다(Voight, 1990; Witham, 2005).

거대한 화산이류는 역사시대뿐만 아니라 선사 시대

에도 발생하였는데, 미국 북서부 태평양 연안지역의 캐스케이드 산맥에 위치한 화산들의 사면들에서 발생한 것이 대표적이다. 이들 화산이류들 중 오세올라(Osceola) 화산이류와 일렉트론(Electron) 화산이류는 레이니어산(Mount Rainier)에서 시작되었다. 대략 5,600년 전의 오세올라 화산이류는 1.9 km<sup>3</sup>의 퇴적물을 화산으로부터 80 km 이상의 먼 거리까지 이동시켰다. 그보다 500년 정도 더 젊은 퇴적물인 일렉트론 화산이류는 화산으로부터 약 56 km까지 이동하였다(Crandell, 1971). 비슷한 흐름들이 다시는 발생하지 않을 거라는 보장이 없음에도, 이러한 오래된 흐름들이 퇴적된 지역에 지금 수 십 만 명의 사람들이 살고 있다. 푸짓 사운드(Puget Sound) 남동쪽 많은 지역들이 마운트 레이니어로부터 발생 가능한 암설, 진흙, 용암 또는 화성쇄설류의 잠재적 위험에 놓여있다(Cakir and Walsh, 2012).

## 2.2. Laharz\_py 프로그램 구성과 운영

라하르나 다른 화산활동에 의해 잠재적으로 재해가 발생할 수 있는 위험지역의 예측을 표현하고자 화산 재해-분대지도를 작성하기도 한다(Lavigne, 1999; Major *et al.*, 2001). 이것은 개발 계획이나 발생 가능한 사건의 대응에 사용되는 경우 사회기반시설에 미치는 영향을 완화하는 데 도움이 될 수 있다(Yun and Chang, 2016). 화산에서 재해-분대지도는 일반적으로 화산체 전체 또는 대부분을 포함하는 근위(近位)위험지역(Proximal hazard zone)을 포함한다. 이 근위지역은 화성쇄설류(火碎流), 암설류(岩屑流), 용암류와 탄도 비행하여 튀어나온 분석(噴石) 등과 같은 다양한 과정에 의한 직접적인 영향을 받기 쉽다. 원위(遠位)위험지역(Distal hazard zone)은 화산체를 둘러싼 근위위험지역으로부터, 발생 가능한 라하르가 도달하여 잠재적으로 침수될 수 있는 지역을 나타내는 하도를 따라 멀리까지 확장된다(Yun and Chang, 2016).

재해-분대지도의 제작을 목적으로, Iverson *et al.*(1998)은 신속하게 재현할 수 있고 객관적인 침수(Inundation) 및 도달범위를 예측하는 경험 및 통계기반의 예측 방법을 개발하였다. 이들은 또한 멀리까지 영향을 줄 수 있는 원위 라하르는 근위 소스로부터 발생한 것으로 가정하였고, 산정상부나 화산 사면의 높은 곳에 위치한 호수의 붕괴에 의한 발생한 홍수, 화성쇄설류, 암석사태나 얼음눈사태 등으로부터 전형적으로 진화하여 갑작스럽게 발생하는 라하르에 초점을 맞추었다. 비록 라하르가 하루 쪽으로 이동하면서 성분

과 크기가 진화하긴 하지만 Iverson *et al.*(1998)의 가장 중요한 가정은 최대 라하르 방출량으로부터 계곡 단면적의 최대 침수범위를 예측할 수 있다는 것이고, 일반적으로 작은 단면적을 가지는 라하르 퇴적층보다는 위험지역의 윤곽을 정확하게 서술하는 데 더 크고 일차적인 관심을 두었다(Yun and Chang, 2016).

Schilling(2014)에 따르면, Laharz의 최신 버전인 Laharz\_py는 PythonTM 프로그래밍 언어로 제작되었으며, ArcGIS(10 혹은 그 이후 버전, Environmental Systems Research Institute(2012))에서 ArcMap toolbox에 포함된 7개 스크립트의 세트(이하 도구)로 작동한다. 7개의 도구는 각각 연산을 위한 추가 래스터 데이터셋을 생성(Create surface hydrology rasters), 사용자가 정의한 역치를 사용하여 신규 표면 수계를 생성(Generate new stream network), 근위위험지역 생성(Hazard zone proximal), 사용자가 입력한 부피로부터 계산된 침수가능지역(원위위험지역)을 생성(Lahar distal zones), 사용자가 입력한 부피로부터 계산된 침수가능지역과 함께 사용자가 선택한 신뢰도에 따라 변화되는 2개의 침수지역표시(Lahar distal zones with conf. levels), 각각 다른 침수유역을 결합(Merge rasters by volume), 그리고 래스터를 벡터 데이터 셋으로 변환(Raster to shapefile) 등이다(Yun and Chang(2016)의 Fig. 1). 이들 도구 중 3개는 시뮬레이션을 위한 초기 데이터 셋을 준비하며, 2개는 모의하고자 하는 발생 가능한 라하르를 예측하기 위하여 통계학적 기반의 실험

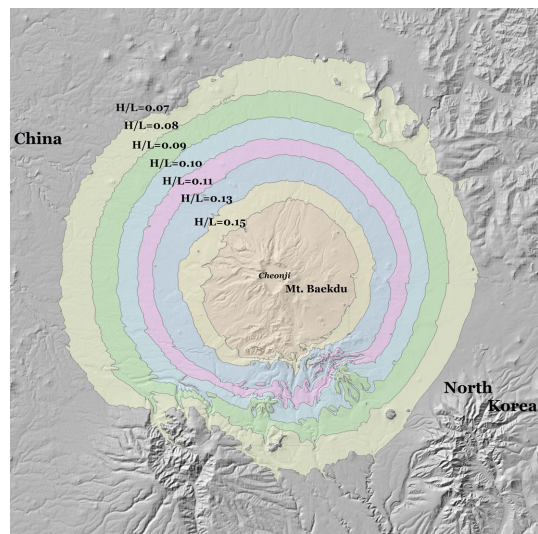


Fig. 1. Proximal hazard zone boundary (PHZB) with H/L ratios at the Mt. Baekdu (Baekdusan).

방정식을 사용하며, 나머지 2개는 데이터 세트를 다른 포맷으로 변환하는 기능이다. Laharz\_py는 잠재적인 침수영역을 모의하기 위하여 재설계된 알고리즘을 사용한다(Yun and Chang, 2016). Laharz\_py가 기존 Laharz 프로그램에 비하여 개선된 점에 대하여 Yun and Chang(2016)에 상세하게 기술되어있다.

### 3. 백두산의 H/L비

H/L비는 근위위험지도경계를 산정하는 중요한 요소이다. 근위위험지도경계(Proximal hazard zone boundary; PHZB)는 화산 분화 시 라하르의 흐름 특성과 관계없이 화구 주변에서 위험 영향을 미치지 쉬운 영역을 표현하는 지표이다.

Jung *et al.*(2013)은 백두산 분화로 인한 화산이류 모델링을 위한 LAHARZ의 적용 연구에서 H/L비를 Wan *et al.*(2012)이 에너지-선 모형(Energy-line model)을 이용하여 산정한 0.07로 가정하여 사용하였다. Kim *et al.*(2014)은 LAHARZ를 이용한 백두산 화산이류 시나리오 모의분석 연구에서 백두산의 H/L비를 0.05~0.10을 적용하여 해석하였다. Yun *et al.*(2016)은 백두산 성층화산체 지역의 H/L비를 지형을 고려하여 계산하여 0.07과 0.09로 산정하여 시나리오 기반 수치모의 결과를 보고하였다. 이들 연구에서는 백두산의 천지 칼데라 외륜산의 최고 높이인 2,750 m로부터 주변 사면에서의 경사를 고려하여 H/L비를 계산하여 적용하였다.

그러나 백두산 산정부에는 직경 5 km의 칼데라가 위치하므로 최고 고도인 2,750 m를 기준으로 수치모의하는 경우, 외륜산의 최고 고도가 위치한 곳으로부터 칼데라 반대쪽에 위치한 지형 사면에서는 수치모의에서는 상대적으로 작은 값이 나올 수 있다. 그러므로 화산체가 원추형의 화산체가 아닌 경우에는 최고점의 고도를 보정하여 화산체를 둘러싸는 경사면을 따라 골고루 퍼져가는 라하르 수치모의를 시도하여야 한다. 백두산에서는 성층화산의 사면 경사면으로부터 외삽법으로 최고 고도를 산출하면, 칼데라 형성 전의 원추형 화산체의 높이에 해당하는 3,500 m가 나오므로, 현재 외륜산의 최고 고도(2,750 m)에 750 m를 더한 3,500 m로 H/L비를 산정할 필요가 있다. Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 최고 고도를 3,500 m로 하는 시나리오에 따른 라하르 근위위험지역경계(PHZB)를 나타낸 것으로, H/L비가 0.07에서 0.15로 증가함에 따라 해당 근위위험지역경계가 산정부를 향하여 좁아짐을 확인할

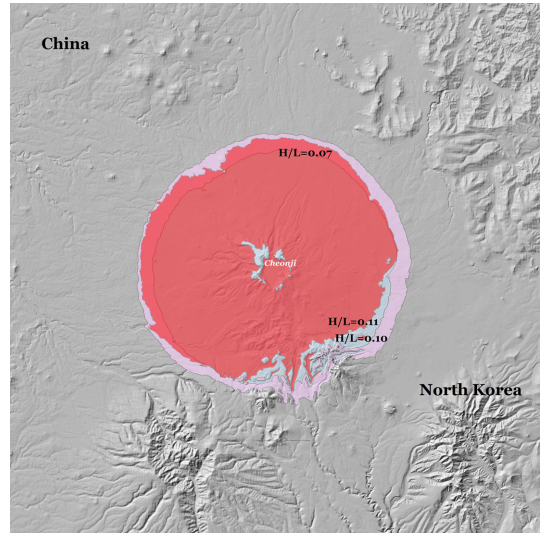


Fig. 2. Comparison of the proximal hazard zone boundary before ( $H/L=0.07$ ; red color) and after the correction of altitude,  $+750$  m ( $H/L=0.10$ ; pink color,  $H/L= 0.11$ ; pale blue color).

수 있었다. Kim *et al.*(2014)는 백두산에서 H/L비가 증가함에 따라 근위위험지역경계 내의 면적은 지수적으로 감소하는 경향을 나타내며, 그 상관도  $R^2$ 는 0.996이라고 보고하였다.

고도보정을 하지 않은 경우(Yun *et al.*, 2016)의 H/L비 0.07에 근거한 근위위험지역경계가  $+750$  m 고도보정을 하여 계산한 H/L비 0.10과 0.11의 근위위험지역경계 사이에서 거의 유사하므로(Fig. 2), 본 연구에서는  $+750$  m 고도보정을 한 H/L비 0.10을 기준으로 라하르 근위위험지역경계에서 발원하는 하천을 대상으로 라하르 수치모의를 실시하였다.

### 4. 수치모의 결과

Jung *et al.*(2013)은 DEM(Digital elevation model; 수치고도모형)의 해상도가 민감하게 화산이류 모델링 결과에 영향을 미친다는 것을 보고하였다. 100 m, 70 m, 50 m 해상도의 백두산 DEM을 이용하여 '수치고도자료 전처리 및 하천 산정단계'의 채움한계치(Fill threshold) 값과 흐름한계치(Stream threshold) 값을 다양하게 적용하며 그 결과를 비교해 보았다. 입력 모형 매개변수 중 하나인 채움한계치에 의한 모델링 결과는 이 변수에 대한 모델링 결과의 민감도가 낮다는 것을 보여준다(Jung *et al.*, 2013). 이는 백두산의 음

폭 패인 'V'자형 협곡의 깊이는 모델링을 수행했던 한계치 미만이기 때문인 것으로 해석할 수 있다. Jung *et al.*(2013)은 백두산 지역의 움푹 패인 골짜기의 깊이를 알아보기 위해 추가적인 모델링을 해본 결과, 25 m 미만의 움푹 패인 곳이 많은 것을 알 수 있었다고 보고하였다. 수치 고도 자료의 해상도에 따른 움푹 패인 곳의 수는 특정한 경향을 보이지는 않았으나, 해상도가 높아짐에 따라 하천 격자는 많이 산정되었다. 이는 높은 해상도의 DEM일수록 연속되는 격자의 수가 많은 결과로 풀이된다. 또한 같은 해상도인 경우 흐름한계치의 값이 커질수록 더 작은 수의 격자가 산정되었다(Jung *et al.*, 2013). 한편, 화산이류 침수 범위는 해상도와 관계없이 화산이류의 부피가 증가할수록 화산이류의 침수 범위와 면적은 증가하였고, 해상도에 따라 그 정도의 차이는 있었다. 해상도에 따라 유의한 침수면적 또는 범위가 달라지므로 화산이류에 의한 침수범위 자료를 이용해서 의사결정을 내릴 경우 적정 해상도의 DEM을 이용해야 한다. Jung *et al.*(2013)은 해상도 70 m의 수치고도자료를 이용한 결과가 해상도 50 m 수치고도자료를 이용한 결과보다 비교적 프로그램 구동 시간이 적어 빠른 피해 범위 결정에 도움이 될 수 있을 것이며, 실질적인 화산이류의 침수지역을 표현하는데 적절할 것으로 판단하였다. Park and Lee(2017)은 백두산 지역에서 30 m의 해상도인 SRTM(Shuttle radar topography mission) DEM자료를 이용하여 LAHARZ로 라하르 범람범위 위험지역을 처리 분석하였다.

특히, 화산이류의 경우 해상도에 따라 화산이류에 의한 침수 지역이 되기도 하고 그렇지 않을 수도 있다. 해상도가 높을수록 화산이류의 침수지역을 표현하는 데 보다 적절한 결과를 나타내지만, 프로그램 구동에 많은 시간이 소요되므로 피해 범위를 산정에 있어서 해상도 선정을 주의하여야 한다(Jung *et al.*, 2013). 본 연구에서는 라하르 피해 예상 범위를 사전에 파악하여 방재에 사용하는 것이 목적이므로 정밀하게 영향 범위를 표현할 수 있는 정밀도가 높은 10 m × 10 m 해상도 DEM을 적용하였다.

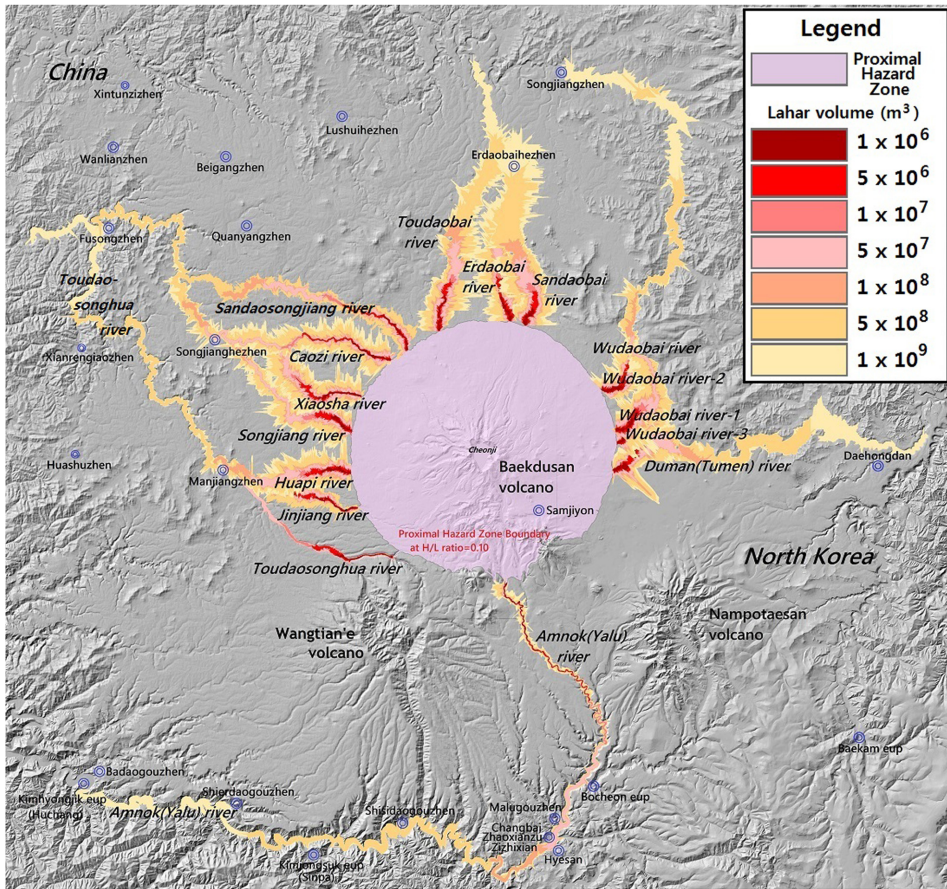
라하르 부피 산정은 화산폭발지수(Volcanic explosivity index; VEI, Newhall and Self, 1982)를 기준으로 산정하였다(Kim *et al.*, 2014). VEI와 분출물의 상관 관계로부터 각 VEI를 대표할 수 있는 분출물의 양을 1~2 가지 경우로 나누어 산정하였다. 즉 VEI 2의 경우  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , VEI 3의 경우  $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ , VEI 4의 경우  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ , VEI

5의 경우  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 으로 산정하였다. Iverson *et al.*(1998)에 의해 분석된 27개 라하르 체적의 분포에서 15개의 역사시대에 발생한 라하르 부피는  $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 에서  $4 \times 10^7 \text{ m}^3$  사이에 해당되며, 가장 큰 규모인 오세 올라 라하르의 부피가  $4.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 로 알려져 있지만 통상 발생하기가 매우 어려우므로(Schilling, 2014), 이번 연구의 수치모의에서는 라하르 부피가  $5 \times 10^9 \text{ m}^3$  이상의 대규모 라하르는 제외하였다.

백두산 지역에서 라하르 침수 범람범위 예측 수치모의에서 가장 핵심적인 입력 상수인 H/L비를 0.10, 백두산에서 발생 가능한 라하르 부피를 각 하천 당  $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $5 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 으로 정하여, 10 m × 10 m 해상도의 DEM자료를 이용하여 수치 모의하여 각 도달거리와 침수범위 범람면적을 파악하였다(Fig 3). Table 1은 라하르 부피( $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $5 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ )와 H/L비(0.10)에 따른 시나리오별 근위위험지역경계로부터 하천을 따라 라하르가 이동하여 도달하는 거리를 나타낸 것이다. 하천의 지형 구배와 폭이 각각 다르므로, 같은 체적의 수치모의에서 도달거리는 하천별로 다르게 나타난다. 본 연구에서 하천은 모두 DEM자료를 기반으로 한 경사도로부터 산정된 자연하천만을 고려하였는데, 백두산 산록에서 발원하여 근위위험지역경계를 통과하여 하류 쪽으로 연결되는 압록강과 두만강으로 포함하여 중국내의 송화강 상류 지류 등 총 15개 수계에 대하여 수치 모의결과를 제시하였다.

Laharz\_py 수치모의에서, Iverson *et al.*(1998)이 9개 화산에서 발생한 27 차례의 라하르에 대한 데이터 분석을 통해 얻어진 경험적인 공식인, 침수단면적  $= 0.05 \times V^{2/3}$ 과 침수면적  $= 200 \times V^{2/3}$  공식을 이용해 라하르의 범람 영향범위를 계산할 수 있다. 발생 가능한 라하르 부피가  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 인 경우 침수단면적은  $5 \times 10^2 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 라하르 부피가  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 인 경우, 침수단면적은  $1.5 \times 10^3 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $5.8 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 라하르 부피가  $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 인 경우 침수단면적은  $2.3 \times 10^3 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $9.3 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 라하르 부피가  $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 인 경우 침수단면적은  $6.8 \times 10^3 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $2.7 \times 10^7 \text{ m}^2$ , 라하르 부피가  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 인 경우 침수단면적은  $1.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $4.3 \times 10^7 \text{ m}^2$ , 라하르 부피가  $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 인 경우 침수단면적은  $3.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $1.3 \times 10^8 \text{ m}^2$ 이고, 라하르 부피가  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 인 경우 침수단면적은  $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 침수면적은  $2.0 \times 10^8 \text{ m}^2$ 로 계산되었다.

각각 부피의 라하르가 근위위험지역 경계로부터 15



**Fig. 3.** Lahar-inundation hazard map constructed by applying Laharz\_py program to the Mt. Baekdu volcano. The proximal hazard zone (H/L ratio=0.10) coloured by the violet surrounding the Mt. Baekdu is subjected to diverse hazards, including lahar.

개 수계로부터 발생할 경우 하천의 깊이와 폭에 따라 도달 거리가 계산되었다. 백두산 북동쪽의 두만강 북쪽 오도백하(Wudaobai river)의 지류에서 발생한 라하르는 PHZB로부터 라하르 부피가  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 인 경우 각각 3.3 km에서 4.1 km까지 영향을 미치며, 부피가 증가하여  $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 가 되면 오도백하-3은 PHZB로부터 9.1 km 거리에서 오도백하-2에 합류하고, 부피가  $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 가 되면 오도백하-1은 PHZB로부터 22.7 km 거리에서 오도백하-2에 합류되어 북쪽 오도백하로 나아가게 된다. 오도백하-2에서는 라하르 부피가  $1 \times 10^6, 5 \times 10^6, 1 \times 10^7, 5 \times 10^7, 1 \times 10^8, 5 \times 10^8, 1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 로 증가함에 따라 영향 거리는 PHZB로부터 각각 3.3, 7.2, 12.6, 31.7, 41.9, 71.0, 84.8 km까지 진출하여 송강진(songjiangzhen)에 영향을 미칠 것으로 계산되었다.

백두산 북쪽 계곡에서 발원하는 두도백하(Toudaobai river)는, 라하르 부피가  $1 \times 10^6, 5 \times 10^6, 1 \times 10^7, 5 \times 10^7,$

$1 \times 10^8, 5 \times 10^8, 1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 로 증가함에 따라 PHZB로부터 영향 거리는 6.4, 9.2, 10.6, 17.8, 22.0, 40.5, 62.6 km까지 영향을 미치며 이도백하진(Erdaobaihezhen)을 지나 이도백하와 삼도백하로부터 흘러나온 것과 합류하여 북쪽으로 나아간다. 이도백하(Erdaobai river)와 삼도백하(Sandaobai river)는 라하르 부피가  $1 \times 10^6, 5 \times 10^6, 1 \times 10^7, 5 \times 10^7, 1 \times 10^8, 5 \times 10^8, 1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 로 증가함에 따라 영향 거리는 PHZB로부터 각각 3.5~4.5, 6.5~8.2, 8.1~10.6, 13.0~21.2, 16.8~23.7, 30.1~31.4 그리고 35.7~36.9 km까지 서로 범람지역을 중복하면서 나아가 이도백하진을 지나 두도백하와 합류하여 북쪽으로 나아간다.

백두산 북서쪽에서 발생하는 라하르는 송화강 상류의 지류들인 조자하(Caozi river)와 소사하(Xiaosha river)가 합류한 후, 송강하(Songjiang river)와 합류하고 그 다음 삼도송강하(Sandaosongjiang river)과 합류하

**Table 1.** The runout distance of lahars can be reached by each river near generated by Mt. Baekdu according to lahar volumes at H/L ratio=0.10

River name	Lahar volume (m <sup>3</sup> )							Remarks
	1×10 <sup>6</sup>	5×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>7</sup>	5×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>8</sup>	5×10 <sup>8</sup>	1×10 <sup>9</sup>	
	Runout Distance (km) at H/L ratio = 0.10							
Wudaobai river-1	<b>3.89</b>	<b>5.86</b>	<b>7.30</b>	<i>22.73</i>	<i>30.74</i>	<i>58.75</i>	<i>76.81</i>	join Wudaobai river-2
Wudaobai river-2	<b>3.28</b>	<b>7.15</b>	<b>12.62</b>	<b>31.70</b>	<b>41.90</b>	<b>70.97</b>	<b>84.79</b>	
Wudaobai river-3	<b>4.06</b>	<b>7.29</b>	<i>9.09</i>	<i>23.66</i>	<i>28.42</i>	<i>55.79</i>	<i>73.18</i>	join Wudaobai river-2
Sandaobai river	<b>3.51</b>	<b>6.52</b>	<b>8.10</b>	<b>13.00</b>	<b>16.83</b>	<b>30.09</b>	<b>36.88</b>	
Erdaobai river	<b>4.49</b>	<b>8.19</b>	<b>10.62</b>	<b>21.18</b>	<b>23.73</b>	<b>31.38</b>	<b>35.69</b>	inundation area overlaped with each other
Toudaobai river	<b>6.43</b>	<b>9.18</b>	<b>10.55</b>	<b>17.84</b>	<b>21.97</b>	<b>40.46</b>	<b>62.58</b>	
Sandaosongjiang river	<b>8.34</b>	<b>17.36</b>	<b>20.8</b>	<b>34.39</b>	<b>48.02</b>	<i>112.21</i>	overflowed	join Songjiang river and then inundation area overflowed out of DEM
Caozi river	<b>7.54</b>	<b>17.65</b>	<b>22.49</b>	<i>41.61</i>	<i>50.41</i>	<i>78.64</i>	<i>94.02</i>	join Songjiang river
Xiaosha river	<b>8.09</b>	<b>12.62</b>	<b>13.94</b>	<b>27.09</b>	<i>39.49</i>	<i>70.55</i>	<i>93.04</i>	join Caozi river
Songjiang river	<b>4.45</b>	<b>7.85</b>	<b>9.62</b>	<b>28.21</b>	<b>40.62</b>	<b>79.81</b>	<i>102.41</i>	Join Toudaosonghua river
Huapi river	<b>5.61</b>	<b>8.19</b>	<b>9.51</b>	<b>19.16</b>	<i>30.25</i>	<i>108.99</i>	<i>146.57</i>	Join Jinjiang river (and Toudaosonghua river)
Jinjiang river	<b>8.34</b>	<b>13.23</b>	<b>16.47</b>	<b>28.53</b>	<b>52.6</b>	<b>126.25</b>	overflowed	inundation area overflowed out of DEM
Toudaosonghua river	<b>10.32</b>	<b>14.67</b>	<b>22.01</b>	<b>57.61</b>	<b>92.06</b>	overflowed		inundation area overflowed out of DEM
Amnok(Yalu) river	<b>14.16</b>	<b>34.84</b>	<b>50.28</b>	<b>77.91</b>	<b>95.91</b>	<b>177.65</b>	<b>218.6</b>	
Duman(Tumen) river	<b>2.76</b>	<b>5.76</b>	<b>8.16</b>	<b>14.21</b>	<b>19.01</b>	<b>44.88</b>	<b>72.24</b>	
Cross-section area (m <sup>2</sup> )	<b>500</b>	<b>1,462</b>	<b>2,321</b>	<b>6,786</b>	<b>10,772</b>	<b>31,498</b>	<b>50,000</b>	=0.05V <sup>(2/3)</sup>
Planimetric area (m <sup>2</sup> )	<b>2.0×10<sup>6</sup></b>	<b>5.8×10<sup>6</sup></b>	<b>9.3×10<sup>6</sup></b>	<b>2.7×10<sup>7</sup></b>	<b>4.3×10<sup>7</sup></b>	<b>1.3×10<sup>8</sup></b>	<b>2.0×10<sup>8</sup></b>	=200V <sup>(2/3)</sup>

The *italic* numbers represent the runout distance traveled after the rivers join together.

여 북서쪽 하류방향으로 나아가다. 무송진(Fusongzhen)에서 두도송화강(Toudaosonghua river)과 합류하여 송화강 쪽으로 흘러간다. 소사하에서는 라하르 부피가 1×10<sup>6</sup>, 5×10<sup>6</sup>, 1×10<sup>7</sup>, 5×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>로 증가함에 따라 PHZB로부터 영향 거리는 8.1, 12.6, 13.9, 27.1 km까지 영향을 미치며, 5×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> 이상에서는 조자하에 합류된다. 조자하는 1×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>인 경우 22.5 km까지 영향을 미치고, 그 이상의 부피인 경우 송강하에 합류한다. 송강하는 라하르 부피가 5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>인 경우 79.8 km까지 영향을 미치며 그 이상의 부피인 경우 두도송화강에 합류하게 된다. 한편 삼도송강하는 라하르 부피가 1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>까지는 PHZB로부터 48.0 km까지 영향을 미치고, 그 이상의 부피에서는 송강하에 합류한다.

백두산 서쪽에서 발원하는 라하르는 3개의 수계를 따라 형성되는데, 화피하(Huapi river)와 금강하(Jinjiang)에서는 라하르 부피가 1×10<sup>6</sup>, 5×10<sup>6</sup>, 1×10<sup>7</sup>, 5×10<sup>7</sup>, 1×10<sup>8</sup>, 5×10<sup>8</sup>, 1×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>로 증가함에 따라 영향 거리는 PHZB로부터 각각 5.6~8.3, 8.2~13.2, 9.5~16.5, 19.2~28.5 km까지 나아가며, 1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 이상에서는 화

피하가 만강진(Manjiangzhen)에서 금강하에 합류되어 52.6 km까지 나아가고 5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>에서는 126.3 km까지 영향을 미치며 5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 이상의 부피에서는 두도송화강에 합류된다. 두도송화강은 무송진에서 송강하에 합류된다.

백두산 남쪽의 압록강 상류지역에서는 압록강 대형곡을 따라 가장 멀리까지 영향을 미치는 것으로 수치 모의 되었는데, 라하르 부피가 1×10<sup>6</sup>, 5×10<sup>6</sup>, 1×10<sup>7</sup>, 5×10<sup>7</sup>, 1×10<sup>8</sup>, 5×10<sup>8</sup>, 1×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>로 증가함에 따라 PHZB로부터 영향 거리는 14.2, 34.8, 50.3, 77.9, 95.9, 177.7, 218.6 km까지 영향을 미치며, 압록강 강변의 보천읍, 장백조선족자치현, 헤산시, 김정숙읍, 김형직읍 등이 라하르의 영향을 받을 수 있다.

백두산 동쪽의 두만강 상류지역은 라하르 부피가 1×10<sup>6</sup>, 5×10<sup>6</sup>, 1×10<sup>7</sup>, 5×10<sup>7</sup>, 1×10<sup>8</sup>, 5×10<sup>8</sup>, 1×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>로 증가함에 따라 PHZB로부터 영향 거리는 2.8, 5.8, 8.2, 14.2, 19.0, 44.9, 72.2 km까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 압록강에 비하여 두만강 상류지역에서 라하르의 영향 거리가 상대적으로 짧은 것은 두만강

상류지역이 협곡이나 강의 계곡 형성이 상대적으로 저조하고 평탄면이 발달하기 때문이다. 라하르가 도달할 수 있는 15개 하천 유역에 위치한 마을로는 두도백하,

이도백하 및 삼도백하 유역의 이도백하진, 송강하와 두도송화강이 만나는 곳에 위치한 무송진, 조자하와 송강하가 만나는 지점에 위치한 송강하진, 화피하와 금

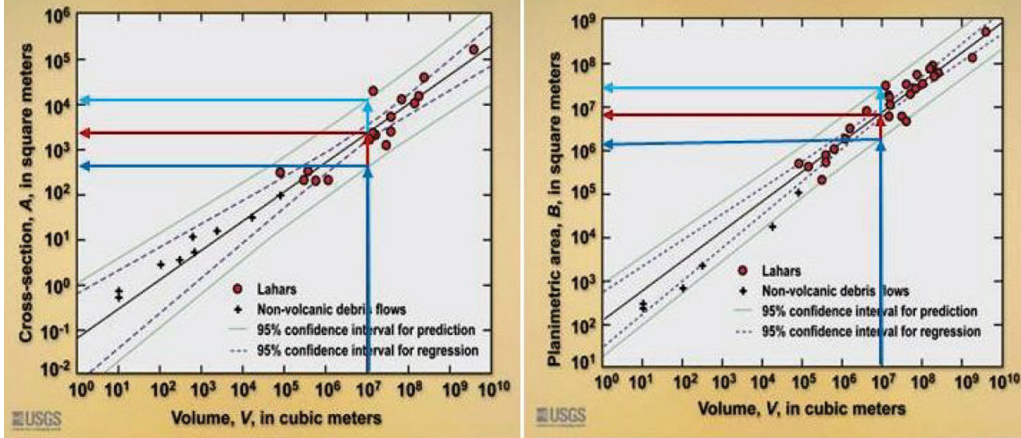


Fig. 4. The 95-percent confidence intervals for prediction show the probable dispersion (blue lines) of future cross-sectional area (left) and planimetric area (right) values (Schilling, 2014).

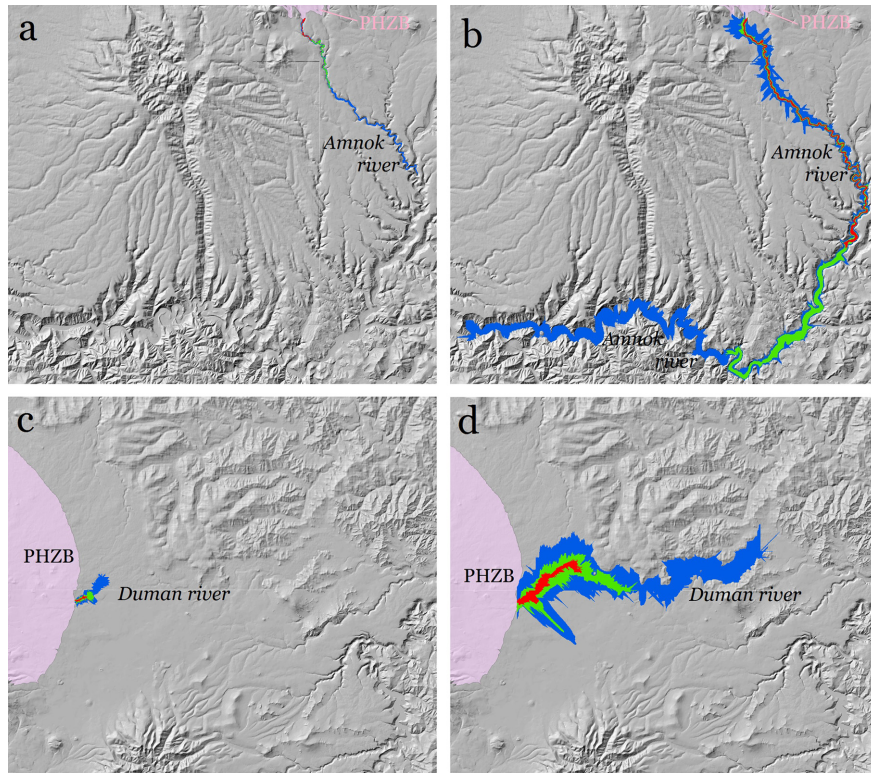


Fig. 5. Inundation areas of lahar at the Amnok river (a & b) and Duman river (c & d) on the hillshade images showing the probable range of planimetric area values with 95% confidence limits (green is the mean value from the regression line, blue is the upper confidence limit, red is the lower confidence limit) from  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  (left) and  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  (right) of lahar volumes.



강하가 두도송화강과 만나는 지점에 위치한 만강진, 오도백하 유역의 송강진 그리고 압록강 주변의 보천읍, 장백조선족자치현, 혜산시, 김정숙읍, 김형직읍 등이다.

압록강과 두만강에서 95% 신뢰수준에 대하여 라하르의 침수면적과 도달거리의 범위를 구하였다. 통계학에서 신뢰수준이란 특정한 통계치가 특정구간(영역) 내에 존재할 확률을 의미한다. 95%의 신뢰수준을 본 연구에 적용시켜 설명하면, 특정 부피의 라하르가 발생했을 때의 침수면적 및 도달거리는 해당 범위 내에서 95% 확률로 발생한다(Fig. 4)는 의미이다. 통계학적으로 높은 신뢰수준을 가질수록 이 구간의 범위는 증가한다.

압록강과 두만강에서 라하르 체적이  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  인 두 경우에 대하여, 95%의 신뢰수준에 대한 침수면적과 도달거리의 범위를 Laharz\_py프로그램의 Lahar distal zones with conf. levels 도구를 이용하여 구하였다(Fig. 5).  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  두 체적에 대하여 95%의 신뢰수준으로 구한 침수면적의 범위는 Fig. 5에서 나타나는 것과 같이  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 일 때  $5.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ 에서  $9.4 \times 10^6 \text{ m}^2$ (평균  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ ),  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 일 때  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ 에서  $2.0 \times 10^8 \text{ m}^2$ (평균  $4.3 \times 10^7 \text{ m}^2$ )로 나타난다.

라하르의 도달거리의 경우,  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 라하르가 발생했을 때 압록강은 최소 4.0 km에서 최대 39.8 km까지(평균 14.2 km), 두만강은 최소 2.1 km에서 최대 6.0 km까지(평균 2.8 km) 라하르가 도달할 수 있다.  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  부피의 라하르가 발생했을 경우, 압록강에서는 최소 57.7 km에서 최대 174.8 km(평균 95.9 km)까지 라하르가 도달하며, 두만강에서는 최소 11.8 km에서 최대 48.7 km까지(평균 19.0 km) 라하르가 도달할 수 있다(Fig. 5). 이 때, 압록강은 강의 폭이 좁고 깊은 협곡 형태이므로 두만강에 비해 도달거리의 범위가 크게 나타난다.

## 5. 결 론

백두산 지역에서 갑작스러운 화산분화로 인하여 라하르가 발생할 경우에 대비하여 Laharz\_py 프로그램을 이용한 사전 수치모의를 통해 그 영향 범위를 파악한 결과는 아래와 같다.

입력 상수의 민감도에 따라 백두산의 지형구배비(H/L비), 흐름 방향, 예상 라하르의 부피를 시나리오의 영향 변수로 설정하였고, H/L비는 칼데라의 지형을 보정하여 0.10으로, 흐름 방향은 근위위험지역경계로부터 발원 가능한 수계 15개 하천의 하류 방향으로, 발생

가능한 라하르 부피는  $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $5 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 를 적용하여 시나리오를 작성하고 이에 따라 수치모의를 진행하였다.

수치모의 결과 근위위험지역경계에 위치한 압록강(남쪽), 두도송화강, 금강하, 화피하(이상 서-남서쪽), 송강하, 소사하, 조자하, 삼도송강하(이상 서-북서쪽), 두도백하, 이도백하, 삼도백하(이상 북쪽), 오도백하 및 그 지류에 해당하는 3개의 하천(북동쪽), 그리고 두만강(동쪽) 등 15개의 하천이 근위위험지역경계에 위치하여 라하르가 발생할 수 있다.

$1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 라하르가 발생할 경우, 각 하천에서는 PHZB로부터 2.8 km(두만강)에서 14.2 km(압록강)까지 라하르가 도달할 수 있다.  $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 의 라하르가 발생했을 때, PHZB로부터 35.7 km(이도백하)에서 218.6 km(압록강)까지 도달할 수 있다. 폭이 좁고 깊이가 깊은 협곡 형태인 압록강의 경우 라하르는 협곡을 따라 상대적으로 멀리까지 도달하며, 이때 압록강 주변의 보천읍, 장백조선족자치현, 혜산시, 김정숙읍, 김형직읍 등이 도달 거리 내에 위치한다. 15개 하천 유역에 위치한 마을로는 두도백하, 이도백하 및 삼도백하 유역의 이도백하진, 송강하와 두도송화강이 만나는 곳에 위치한 무송진, 조자하와 송강하가 만나는 지점에 위치한 송강하진, 화피하와 금강하가 두도송화강과 만나는 지점에 위치한 만강진, 오도백하 유역의 송강진 등이 있다. 본 연구에서 도출된 각 하천별 라하르 영향 거리는 백두산에서 라하르에 대비한 근접화산 재해 방재 대책 수립을 위한 기초자료로 제공 되어질 것이며, 영향 거리 내에 위치한 마을들은 인명 및 재산의 피해를 최소화하기 위한 대비가 필요할 것이다.

## 사 사

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MPSS-자연-2015-81]. 본 연구 수행에 필요한 DEM자료를 사 용토록 허락하고 제공하여 주신 국토교통부 국토지리정보원과 국민안전처에 감사드린다. 논문을 읽고 건설적인 조언을 주신 익명의 심사자와 이민희 편집위원장님께 감사드린다.

## References

- Cakir, R. and Walsh, T.J. (2012) Loss Estimation Pilot Project for Lahar Hazards from Mount Rainier, Wash-

- ington. Washington Division of Geology and Earth Resources, Information Circular 113, 17p.
- Crandell, D.R. (1971) Postglacial lahars from Mount Rainier volcano, Washington. Geological Survey Professional Paper 677, United States Government Printing Office, Washington, 80p.
- Environmental Systems Research Institute (2012) ArcGIS. Environmental Systems Research Institute Inc., Redlands, California.
- Gerrard, J. (1990) Mountain environments: An examination of the physical geography of Mountains. MIT press, 209p.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., and Vallance, J.W. (1998) Objective delineation of areas at risk from inundation by lahars. Geological Society of America Bulletin, v.110, p.972-984.
- Jung, K.J., Kim, H.J., Kim, S.W., and Lee, K.H. (2013) Application of LAHARZ for lahar modeling in Mt. Baekdusan. Journal of Korean Earth Science Society, v.34(6), p.507-514 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Lee, K.H., Kim, S.W., Choi, E.K., Yun, S.H., and Kim, S.H. (2014) Scenario based analysis of lahar simulation of Mt. Baekdu using LAHARZ. International Area Studies Review, v.18, p.243-264 (in Korean with English abstract).
- Lavigne, F. (1999) Lahar hazard micro-zonation and risk assessment in Yogyakarta city, Indonesia. GeoJournal, v.49(2), p.173-183.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Pullinger, C.R., Escobar, C.D., Chesner, C.A., and Howell, M.M. (2001) Lahar-hazard zonation for San Miguel volcano, El Salvador: U. S. Geological Survey Open-File Report 01-395, 16p.
- Newhall, C.G., Hendley II, J.W., and Stauffer, P.H. (1997) Lahars of Mount Pinatubo, Philippines. U.S. Geological Survey Fact Sheet 114-97, 2p.
- Newhall, C.G. and Self, S. (1982) The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. Journal of Geophysical Research, v.87(C2), p.1231-1238.
- Park, S.J. and Lee, C.W. (2017) Simulation of lahar inundation area around Mt. Baekdu using LAHARZ. Abstract of 2017 Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, The Korean Society of Petroleum Geology, The Geological Society of Korea, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p.240. (in Korean)
- Schilling, S.P. (2014) Laharz\_py-GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones. U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073, 78p.
- Scott, K.M. (1988) Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system, Mount St. Helens, Washington. U.S. Geological Survey professional paper, 1447-A, 76p.
- Voight, B. (1990) The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: Anatomy and retrospection. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.44, p.349-386.
- Wan, Y., Xu, J., and Pan, B. (2012) Define the energy cone threshold and extent of Tianchi volcano. Journal of Earth Science, v.23(5), p.768-774.
- Witham, C. (2005) Volcanic disasters and incidents-a new database. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v.148, p.191-233.
- 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, v.39, 7p.
- Yun, S.H. (2013) Volcanological interpretation of historic eruptions of Mt. Baekdusan volcano. Journal of Korean Earth Science Society, v.34, p.456-469 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H. and Chang, C.W. (2016) Lahar flow simulation using Laharz\_py program: Application for the Mt. Halla volcano, Jeju. The Journal of the Petrological Society of Korea, v.25, p.361-372 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., Choi, E.K., and Chang, C.W. (2016) Scenario based analysis of lahar simulation of Mt. Baekdu using LAHARZ\_py. Abstract(Poster Code: 38). Session 1.5 Flooding by lahars and land-use planning in volcanic areas, COV-9. (21~22 Nov. 2016)
- Yun, S.H. and Lee, J.H. (2011) Volcanological interpretation of historic record of 1702 fallout-ash from the Mt. Baekdusan. Journal of Petrological Society of Korea, v.20, p.243-250 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H. and Lee, J.H. (2012) Analysis of unrest signs of activity at the Baekdusan volcano. Journal of Petrological Society of Korea, v.21, p.1-12 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., Taniguchi, H., Wei, H. and Liu, J. (2007) Volcanic crisis of the Baekdusan. Abstract of 2007 Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea, p.130-132 (in Korean with English abstract).
- 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, v.29, p.291-307 (in Korean with English abstract).