백두산 분화로 인한 화산이류 모델링을 위한 LAHARZ의 적용 연구

정광준¹ · 김현준¹ · 김상현^{1,*} · 이길하²

¹부산대학교 사회환경시스템공학부, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2

²대구대학교 토목공학과, 712-714, 경상북도 경산시 진량읍 대구대로 201

Application of LAHARZ for Lahar Modeling in Mt. Baekdusan

Kwang-Jun Jung¹, Hyun-Jun Kim¹, Sang-Hyun Kim^{1,*}, and Khil-Ha Lee²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

Abstract: Recent reports about Mt. Baekdusan indicate an increasing potential of lahar generation due to volcanic activity around Lake Cheonji. In this study, we model lahar assuming volcanic activity underneath the caldera located at the top of Mt. Baekdusan. Lahar-inundation hazard zones (LAHARZ), software that runs within a Geographic Information System (GIS), was used for lahar modeling in various conditions of digital terrain resolution and model parameters. The sensitivity analysis of model parameters shows that both sink threshold and terrain resolution have limited impact on the modeling result. Combinations of stream threshold and resolution indicate distinctive distributions in stream delineation. The limitations of LAHARZ seem to largely be associated with the assumption of an existing flow generation algorithm. However, the impact of different resolutions on the final lahar extent was found to be small.

Keywords: lahar modeling, Mt. Baekdusan, LAHARZ

요 약: 백두산은 정상부에 천지가 존재하는 잠재적인 활화산으로 최근 화산활동 분화와 관련된 화산이류 발생가능성에 대한 우려가 높아지고 있다. 본 연구에서는 백두산 정상부의 칼데라 호수 지점의 분화를 가정한 화산이류의 모델링을 수행하였다. LAHARZ를 적용한 본 연구는 다른 해상도의 수치지형모형을 구동모형의 매개변수를 변화시키며 분화로 야기된 다양한 상황의 화산이류 발생 영향을 검토하였다. 매개변수의 민감도 해석은 움푹 패인 곳(sink)을 정의하는 한계치와 수치지형모형의 해상도가 화산이류의 모델링 결과에 주는 영향이 제한적이라는 결과를 보여주었고, 하천격자의 도출을 위한 한계치와 수치모형의 해상도는 하천격자의 공간적 분포에 상대적으로 민감한 결과를 보여주었다. 또한 LAHARZ가 가지고 있는 문제가 흐름 발생 알고리즘 자체의 한계에 기인하는 것을 확인하였다. 한편, 상이한 수치지형모형의 해상도가 화산이류의 최종 모델링결과에 미치는 영향은 제한적으로 나타났다.

주요어: 라하르 모델링, 백두산, LAHARZ

서론

최근 발생한 일본의 사쿠라지마(櫻島) 화산분화는

일본 후지산(富士山)의 화산 폭발 가능성에 대한 논의를 불러 일으켰으며, 우리나라의 백두산(白頭山) 분화에 대한 논란도 가중되고 있다. 화산은 활동성에 따라 활화산(活火山), 휴화산(休火山), 사화산(死火山)으로 분류가 되는데 스미소니언 연구소(Smithsonian Institute in Washington, D.C.)에서는 백두산과 같이 1만년 이내에 활동한 기록이 있는 휴화산을 현재 활동 중이거나 잠재적으로 활동성을 가질 수 있는 ‘활화산’으로 분류한다(Decker and Decker, 1991). 또한, Yun and Lee (2012)는 지하에 열원을 가지고 있고, 역사시대 분화 기록을 가지고 있다는 사실을 근거로

*Corresponding author: kimsangh@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2479

Fax: +82-51-583-1619

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 the original work is properly cited.

백두산을 활화산으로 분류하였다. 백두산의 폭발 가능성은 지진빈도의 증가, 온천수의 수온상승, 화산 가스 발생량 변화, 천지 하부에 존재하는 마그마 챔버(magma chamber)의 상승, 화산체 상승 및 지형 변화 사례 등을 근거로 지속적으로 보고되고 있다(Liu et al., 2011; Kim, 2011).

백두산이 폭발적으로 분화한다면 폭발로 인해 야기 되는 화산재, 화쇄류, 화산성 지진, 화산성 홍수, 화산이류 등에 의해 화산재해의 영향 범위는 상당할 것으로 판단된다. 화산 폭발에 의한 다양한 분출물 중 화산이류(lahar)는 화산재와 물이 뒤섞인 높은 밀도의 유체가 지면 위로 흘러가는 현상이다. 화산이류의 경우 다량의 수분을 함유하고 있기 때문에 초속 수십 m의 고속으로 산기슭을 따라 이동하므로 일단 화산이류가 발생하면 적절한 대응시간을 확보하기 어려운데, 백두산과 같이 칼데라 호수(caldera lake)가 화구에 위치한 경우 수분과의 접촉이 더 많으므로 그 피해의 속도 및 영향 범위가 상당할 것으로 예상된다.

Iverson et al. (1998)과 Schilling (1998)에 의해 개발된 화산이류 모델링 프로그램 LAHARZ는 입력되는 매개변수의 수가 상대적으로 적고 현장 조사 자료가 부족하거나 실제 조사가 어려운 경우의 대략적인 피해 범위를 산정하는 모델링에 매우 효과적이다. 따라서 LAHARZ를 이용한 화산이류의 연구들은 주로 수치고도자료의 종류와 해상도에 따른 실제 화산이류와 모델링 결과 비교(Saucedo et al., 2005; Davila et al., 2007; Hubbard et al., 2007; Huggel et al., 2008; Schenider et al., 2006)를 중심으로 이루어져 왔다. 그러나 이와 같은 연구들이 백두산 지역을 대상으로 적용된 사례는 없었다.

본 연구에서는 구체적으로 백두산의 화산이류를 모델링하기 위해 대상지역의 수치지형모형(digital elevation model: DEM)을 이용하여 LAHARZ의 적용성을 평가하는 것을 주목적으로 한다. 이를 위해서 LAHARZ의 대표적인 매개변수인 채움한계치(fill threshold)와 흐름한계치(stream threshold)를 다양하게 적용해 보아 입력인자의 민감도를 분석해보았다. 또한 해상도에 따른 모델링 결과의 차이를 비교하기 위해 100, 70, 50 m의 다양한 해상도의 수치지형모형에서 고도자료(DEM)를 적용하여 화산이류의 영향범위를 모델링하고 그 결과를 비교해 보았다.

방법론과 대상지역

LAHARZ

LAHARZ는 Iverson et al. (1998)과 Schilling (1998)에 의해 개발된 화산이류 모델링 프로그램이다. ESRI사의 Arc/INFO를 기반으로 작성된 LAHARZ는 화산의 이류 침수영역(inundation area)을 입력 받은 수치 고도 자료(DEM)상에 표현할 수 있게 해 준다. 미국, 멕시코, 캐나다, 콜롬비아, 필리핀 등 9개 지역에서 총 27개의 이류 퇴적흔적들의 통계적인 분석을 통해 만들어낸 두 개의 경험식 식 (1), (2)을 이용하여 화산이류에 의해 침수될 단면적(A)과, 침수 면적(B)을 산정한다(Iverson et al., 1998).

$$A = \alpha_1 V^{2/3} \quad (1)$$

$$B = \alpha_2 V^{2/3} \quad (2)$$

여기서, V는 화산이류의 총 부피, $\alpha_1=0.05$ 이고, $\alpha_2=200$ 이다. Fig. 1은 Iverson et al. (1998)에 의해 제시된 화산이류의 높이-거리 비(H/L)와 식 (1), (2)에서 쓰여진 침수단면적(A)과 침수면적(B)을 도식적으로 설명한 것이다.

LAHARZ의 구동은 크게 4단계로 구분될 수 있고, 이 과정을 통해서 화산이류의 영향 범위를 산정한다. 첫 번째는 수치 고도 자료를 이용하여 계산하는 과정에서 수치적인 반복에 빠지게 되는 움푹 패인 곳(sink)을 제거하고 하천의 격자를 만들기 위한 '수치 고도 자료 전처리 및 하천 산정 단계'이다. 이 프로그램은 일정 기준 값 이상의 깊이를 가진 지역을 움푹 패인 곳으로 판단하는데 이때 움푹 패인 곳으로 판단하기 위한 기준 값은 채움한계치(fill threshold)로 정의되고 사용자가 입력한다. LAHARZ는 채움한계치 이상의 깊이를 가진 격자가 하나도 없을 때까지 이 과정을 반복하여 입력 수치 고도 자료를 전(前)처리한다. 하천의 격자를 만들기 위해서는 흐름한계치(stream threshold)를 입력하도록 하고 이 값을 기준으로 하천 격자를 생성한다. 두 번째 단계는 '위험 범위 경계 선정 단계'이다. 화산이 일단 폭발하면 화산으로부터의 분출물들이 화산의 주변 지역을 지형요소들과 상관없이 뒤덮게 되고 그때의 범위를 '위험 범위'라고 부른다. LAHARZ는 위험 범위의 경계로부터 지형 조건을 따라 움직이는 화산이류를 모사한다. '위험 범위의 경계'는 지형요소와 H/L 비를 이용

Fig. 1. A diagram of cross-sectional (A), planimetric (B) areas and ratio of vertical drop (H) to horizontal runout distance (L) for a hypothetical volcano (Iverson et al., 1998).

하여 산정하는데, H/L 비는 Fig. 1에서와 같이 화산이류의 이동거리(L)와 그로부터 화산 분출지점까지의 수직높이(H)의 비이다. 이때의 화산이류의 이동거리는 화산 분출물이 가지는 힘에 의해 이동하려고 하는 힘, 즉 관성력과 이를 멈추게 하려는 지형인자 등에 의한 마찰력이 평형을 이루게 될 때까지 이동하게 되는 거리를 의미하므로, 화산의 폭발형태나 지형 등에 의해 영향을 받게 된다. 세 번째는 ‘하천 선택 단계’로 첫 번째 단계에서 선정한 하천 격자 중에서 이류 모델링을 수행할 하천을 선택하는 단계이다. 네 번째 단계는 ‘침수 지역 생성’으로 화산이류의 부피를 입력하고 식 (1), (2)을 이용하여 화산이류의 침수 지역을 산정한다.

연구 대상 지역

백두산은 양간도 삼지연군과 중국 지린(吉林)성의 경계에 있으며, 백두산의 최고봉인 장군봉은 해발 2,750 m에 이른다. 백두산은 홀로세에 거대분화를 하였으며(Soh and Yun, 1999), 939년, 946-947년, 1014-1019년, 1199-1201년, 1401년, 1403년, 1405년, 1406년, 1597년, 1668년, 1673년, 1702년, 1903년 등의 분화기록이 역사적으로 남아있다. 현무암 용암대지와 순상화산체, 조면암질 성층화산체로 형성된 복합화산체인 백두산은 약 천 년 전과 1702년의 대형 분화가 합쳐져서 현재의 천지의 모습이 되었다고 알려져 있다(Yun and Cui, 1996; Yun and Lee, 2011). 천지(天池)는 백두산 꼭대기에 위치하고 있는 칼데라 호수이며, 장경은 4.4×3.37 km, 면적은 9.82 km^2 , 천

지 수면의 해발고도는 2,189 m, 최대수심은 374 m, 천지에 담겨 있는 물의 부피는 약 20억톤에 달한다(Yun and Lee, 2012). 백두산에서 폭발적인 분화가 발생한다면 대류권계면을 지나 성층권으로 진입하는 분연주(噴煙柱)의 형성과 화산재구름의 이동에 따른 다량의 강하 화산재와 더불어 화쇄류가 발생할 가능성이 충분하다(Lee and Yun, 2011). 분화구 주변인 천지 칼데라 일원에는 탄도비행(彈道飛行) 화성쇄설물과 함께 강하화산재가 두텁게 쌓이면서 불어난 천지 호수물이나 강수와 함께 흘러 화산이류를 발생할 것임에 틀림없다.

결과 및 고찰

모델링 조건 및 매개변수 민감도 분석

본 연구에선 100, 70, 50 m 해상도의 수치 고도 자료를 이용하여 화산이류 모델링을 수행했다. 각 수치 고도 자료를 입력한 후 ‘수치 고도 자료 전처리 및 하천 선정 단계’에 입력 인자를 Table 1과 같이 입력하였다. 화산이류의 흐름은 네 방향으로 정하였고 백두산 천지의 면적인 9.82 km^2 를 기준으로 하여 수면 상승이 수직으로 발생한다는 가정을 바탕으로 각 방향으로 발생하는 화산 이류의 부피를 산정하였다.

화산이류는 화산 분출로 인한 물과 고형물(화성쇄설물)의 혼합물이고, Muñoz-Salinas et al. (2009)에 따르면, 고농축 화산이류(hyperconcentrated flow)의 성분은 50%의 물과 50% 고형물이며, 암석의 함유량이 많은 화산이류(debris flow)는 30%의 물과 70%의 고형물로 구성되어 있다고 고려하고 있다. Robinson and Clynne (2010) 또한 화산이류의 부피를 산정하기 위해 발생하는 물의 부피를 두 배로 한 값(50%의 물과 50%의 고형물로 구성)을 최대 화산이류 부피로 정하여 화산 이류에 대한 LAHARZ 모델링을 수행한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 산정한 물의 부피의 두 배를 LAHARZ에 입력하는 화산이류의 부피로 Table 2와 같이 산정하여 모델링을 수행하였다(Muñoz-Salinas et al., 2009; Robinson and Clynne, 2010). 모델링에 사용된 H/L 비는 Wan et al. (2012)이 에너지 선 모형(Energy-Line Model)을 이용하여 산정한 백두산의 H/L 비 0.07로 가정하여 사용하였다.

모델링 결과 및 고찰

백두산의 100, 70, 50 m 해상도의 수치 고도 자료

Table 1. Conditions for the calculated stream

Condition	DEM resolution (m)	Fill Threshold (m)	Stream Threshold (m)
1	50	50	1,000
2	50	100	500
3	50	100	1,000
4	50	100	5,000
5	50	500	1,000
6	50	1,000	1,000
7	70	50	500
8	70	100	1,000
9	70	100	5,000
10	70	100	1,000
11	70	500	1,000
12	70	1,000	500
13	100	50	1,000
14	100	100	5,000
15	100	100	1,000
16	100	100	1,000
17	100	500	500
18	100	1,000	1,000

Table 2. Estimated lahar volume on the basis of rise of water level

rise of water level (m)	water volume (m ³)	lahar volume (m ³)
0.5	4,910,000	9,820,000
5	49,100,000	98,200,000
25	245,500,000	491,000,000
50	491,000,000	982,000,000

를 이용하여 LAHARZ를 구동하여 ‘수치 고도 자료 전처리 및 하천 산정 단계’의 흐름한계치를 1,000개

로 동일하게 적용하고 채움한계치를 Table 1과 같이 입력한 결과 Table 3과 같은 결과를 얻었다.

수치 고도 자료의 해상도가 높을수록 채움(fill out) 과정의 반복 횟수가 많아진다. 이는 해상도 커질수록 채움 과정을 거쳐도 움푹 패인 곳으로 남아있는 수가 크기 때문이다. 백두산 지역에서 민감도를 가지는 채움한계치 값을 찾기 위해 해상도 100 m의 수치 고도 자료를 이용해 움푹 패인 곳 수의 변화를 관찰한 결과 Table 4와 같은 결과를 얻었다.

LAHARZ에서 입력할 수 있는 채움한계치의 최대 값 1,000 m를 입력한 값과 25 m를 입력한 값의 차이는 없으나, 값을 15 m를 입력한 경우부터 움푹 패인 곳의 수가 급격히 증가하였다. 이는 백두산 지역의 움푹 패인 곳이 주로 25 m 미만에 분포하고 있음을 의미한다.

‘수치 고도 자료 전처리 및 하천 산정단계’에서 채움한계치의 값을 100으로 동일하게 적용하고, 흐름한계치를 Table 1과 같이 입력한 결과 해상도와 흐름한계치에 따른 하천 격자 산정은 Fig. 2와 같다.

해상도가 높아질수록 더 많은 수의 격자를 하천으로 산정하였다. 해상도가 높을수록 더욱 많은 격자가 수치 고도 자료에 포함되므로 그에 따라 더 많은 수의 격자들이 흐름한계치 이상으로 연속적으로 있었음을 의미한다. 또한 같은 해상도 내에서는 기준값이 커질수록 하천으로 산정된 격자가 줄어들었다. 이와 같이 해상도와 흐름한계치에 따라 하천의 산정 결과가 민감하게 변하는데, 실제와 비슷한 모델링을 하기 위해서는 백두산 지역의 실제 하천 자료와 비교하여

Table 3. Fill out result

DEM resolution (m)	Fill Threshold (m)	The numbers of sink					
		1	2	3	4	5	6
100	50	10,996	937	91	8	2	-1
	100	10,996	937	91	8	2	-1
	500	10,996	937	91	8	2	-1
	1,000	10,996	937	91	8	2	-1
70	50	11,398	915	53	3	1	-1
	100	11,398	915	52	2	-1	
	500	11,398	915	52	2	-1	
	1,000	11,398	915	52	2	-1	
50	50	10,281	549	34	1	-1	
	100	10,281	548	33	-1		
	500	10,281	548	33	-1		
	1,000	10,281	548	33	-1		

Table 4. Conditions for the calculated stream and Fill out result at the 100 m resolution DEM

Fill Threshold (m)	The numbers of sink						
	1	2	3	4	5	6	7
10	10,996	1,026	213	134	128	126	126
15	10,996	945	104	23	17	15	15
25	10,996	937	91	8	2	-1	
1,000	10,996	937	91	8	2	-1

Fig. 2. Calculated stream according to resolution and stream threshold.

가장 비슷하게 하천격자를 모사하는 흐름한계치값을 찾는 연구를 선행해야 한다.

세 가지 해상도의 수치 고도 자료를 이용해 네 방향으로의 침수를 가정하고 Table 2와 같이 백두산 천지의 면적을 기준으로 수면상승이 원통형으로 일어난다는 가정을 바탕으로 물의 부피를 산정하고 그 값의 두 배를 화산이류의 부피로 산정하였다. 화산이류

의 모델링 결과 DEM의 해상도에 따라 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다.

해상도에 관계없이 화산이류의 부피가 증가할수록 침수되는 거리가 멀어지지만, 그 정도에는 해상도에 따른 차이가 있다. 이는 선택된 방향의 하천의 깊이나 경사도가 침수 면적과 길이를 산정할 때 발생하는 차이이다. LAHARZ의 화산이류 결과는 일단 한

Fig. 3. Comparison on lahar inundation zone according to resolution.

변 하천이 정해지면 흐름상에서 지류가 발생해도 단 하나의 방향으로만 화산이류가 전개된다. 이는 실제 자연계에서의 흐름과는 다소 차이가 있는 거동이다. LAHARZ에서 이처럼 실제와 다른 흐름의 모습을 보이는 이유는 Fig. 4와 같은 단방향 흐름 알고리즘을 이용하고 있기 때문이다. 단방향 흐름 알고리즘이란 어느 한 격자에서 흐름을 가질 수 있는 이웃 8개의 격자 중 가장 경사가 큰 격자에 흐름을 분배하는 방식이다(Jenson and Domingue, 1988).

Fig. 5는 해상도 100, 70, 50 m인 수치 고도 자료를 이용하여 12시 방향의 흐름을 가정하고, 화산이류의 부피가 982,000,000 m³일 경우의 결과이다. 해상도가 다른 수치 고도 자료에서 같은 위치의 하천에서 같은 부피의 화산이류를 이용해서 모델링을 하더라도 화산이류의 범위와 진행 거리를 모사한 결과는

다르다. Schneider et al. (2006)이 멕시코의 Iztaccihuatl 화산의 화산이류 모델링을 90, 60, 30 m 해상도의 수치 고도 자료를 이용해서 연구한 결과와 비교해 보았을 때, 본 연구의 백두산 모델링 결과와 같은 양상을 나타내었다. 이를 통해 수치 고도 자료의 해상도가 민감하게 화산이류 모델링 결과에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 특히, 화산이류의 경우 해상도에 따라 화산이류에 의한 침수 지역이 되기도 하고 그렇지 않을 수도 있다. 해상도가 높을수록 화산이류의 침수지역을 표현 하는 데 보다 적절한 결과를 나타내지만, 프로그램 구동에 많은 시간이 소요되므로 피해 범위를 산정에 있어서 해상도 선정을 주의하여야 한다. 해상도 70 m의 수치 고도 자료를 이용한 결과가 해상도 50 m 수치 고도 자료를 이용한 결과보다 비교적 프로그램 구동 시간이 적기에 빠른 피

Fig. 4. Diagram of algorithm for single direction of flow (D8 model).

해 범위 결정에 도움이 될 수 있을 것이므로 실질적인 화산이류의 침수지역을 표현하는데 적정 할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 100, 70, 50 m 해상도의 백두산 수치 고도 자료를 이용하여 ‘수치 고도 자료 전처리 및 하천 산정단계’의 채움한계치 값과 흐름한계치 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. 이는 백두산의 움푹 패인 곳의 깊이는 모델링을 수행했던 한계치 미만이기 때문인 것으로 풀이된다. 백두산 지역의 움푹 패인 곳의 깊이를 알아보기 위해 추가적인 모델링을 해본 결과 25 m 미만의 움푹 패인 곳이 많은 것을 알 수 있었다. 수치 고도 자료의 해상도에 따른 움푹 패인 곳의 수는 특정한 경향을 보이지는 않았으나, 해상도가 높아짐에 따라 하천 격자는 많이 산정되었다. 이는 높은 해상도의 수치표고자료일수록 연속되는 격자의 수가 많은 결과로 풀이된다. 또한 같은 해상도인 경우 흐름한계치의 값이 커질수록 더 작은 수의 격자가 산정되었다. 한편, 화산이류 침수 범위는 해상도와 관계없이 화산이류의 부피가 증가할수록 화산이류의 침수 범위와 면적은 증가하였고, 해상도에 따라 그

Fig. 5. Comparison on lahar inundation zone according to resolution under the same point and volume.

정도의 차이는 있었다. 해상도에 따라 유의한 침수 면적 또는 범위가 달라지므로 화산이류에 의한 침수 범위 자료를 이용해서 의사결정을 내릴 경우 적정 해상도의 수치 고도 자료를 이용해야 한다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 ‘화산재해 피해예측 기술개발’ [NEMA-백두산-2012-1-2]과제의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 감사드립니다. 본 논문을 읽고 건설적인 비평을 주신 익명의 심사위원에게 감사드립니다.

References

- Davila, N., Capra, L., Gavilanes-Ruiz, J.C., Varley, N., Norini, G., and Gómez-Vázquez, A., 2007, Recent lahars at Volcán de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160, 99-124.
- Decker, R.W. and Decker, B., 1991, *Mountains of fire: the nature of volcanoes*. Cambridge University press. New York, 8, 199 p.
- Hubbard, B.E., Sheridan, M.F., Núñez, G.C., Castellón, R.D., and Rodríguez, S.R., 2007, Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 digital topographic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 160, 99-124.
- Huggel, C., Schneider, D., Julio Miranda, P., Delgado Granados, H., and Kääh, A., 2008, Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170, 86-98.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., and Vallance, J.W., 1998, Objective delineation of lahar inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 972-984.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O., 1988, Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
- Kim, N.S., 2011, An analysis on influence area by the simulation over Mt. Baekdu eruption. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 17, 348-356 (in Korean).
- Lee, S.H. and Yun, S.H., 2011, Impact of Meteorological wind fields average on predicting volcanic tephra dispersion of Mt. Baekdu. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32, 360-372 (in Korean).
- Liu, G, Yang, J., Wang, L., and Sun, J., 2011, Analysis of Tianchi volcano activity in Changbai Mountain, NE china, *Global Geology*, 14, 45-53.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo-Rodríguez, M., Manea. V., Maneab, M., and Palacios, D., 2009, Lahar flow simulations using LAHARZ program: Application for the Popocatepetl volcano, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182, 13-22
- Robinson, J.E. and Clynne, M.A., 2010, Modeling lahar hazard zones for eruption-generated lahars from Lassen Peak, California, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010*, abstract #V11C-2300.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sheridan, M.F., Bursik, M.I., and Komorowski, J.C., 2005, Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 103-115.
- Schneider, D., Delgado Granados, H., Huggel, C., and Kääh, A., 2006, Modeling potential laharc hazards related to ice-melting in case of unrest of Iztaccíhuatl volcano (Central Mexico), *Geophysical Research Abstracts*, © European Geosciences Union 2006, 8, 00334, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-00334.
- Schilling, S.P., 1998, LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones, *US Geological Survey Open-File Report*, 98-638, 79 p.
- Soh, W.J. and Yun, S.H., 1999, A review of the Holocene major eruption of Mt. Paektu volcano. *Journal of Korean Earth Science Society*, 20, 534-543. (in Korean)
- Wan, Y., Xu, J., and Pan, B., 2012, Define the energy cone threshold and extent of Tianchi volcano. *Journal of Earth Science*, 23, 768-774.
- Yun, S.H. and Cui, Z.X., 1996, Historical eruption records on the Cheonju caldera volcano in the Mt. Paektu. *Journal of Korean Earth Science Society*, 17, 376-382. (in Korean)
- Yun, S.H. and Lee, J.H., 2011, Volcanological interpretation of historic record of 1702 fallout-ash from the Mt. Baegdusan. *Journal of Petrological Society of Korea*, 204, 243-250. (in Korean)
- Yun, S.H. and Lee, J.H., 2012, Analysis of unrest signs of activity at the Baegdusan volcano. *Journal of Petrological Society of Korea*, 21, 1-12. (in Korean)

2013년 9월 23일 접수
2013년 10월 8일 수정원고 접수
2013년 10월 10일 채택