

## 시나리오에 따른 백두산 천지의 외륜산 붕괴에 의한 홍수재해 모의

이길하<sup>1</sup> · 김상현<sup>2</sup> · 최은경<sup>3</sup> · 김성욱<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>대구대학교 토목공학과, <sup>2</sup>부산대학교 사회환경시스템공학부, <sup>3</sup>주식회사 지아이 지반정보연구소

### Scenario-based Flood Disaster Simulation of the Rim Collapse of the Cheon-ji Caldera Lake, Mt. Baekdusan

Khil-Ha Lee<sup>1</sup>, Sang-Hyun Kim<sup>2</sup>, Eun-Kyeong Choi<sup>3</sup>, and Sung-Wook Kim<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Daegu University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Pusan National University

<sup>3</sup>Geo-information Research Lab, GI Co. Ltd.

Received 11 November 2014; received in revised form 24 November 2014; accepted 27 November 2014

화구호를 가지고 있는 화산에서 분화는 단순히 화산분출물에 의한 피해와 더불어 칼데라 호수에 저장된 많은 양의 물이 방류하여 대규모의 재해를 유발한다. 최근 백두산 분화의 전조가 관측되고 있고 백두산의 분화 시 천지칼데라호로 인해 예상되는 화산성 홍수의 피해를 추정하고 화산 재해에 대비하여 사회적, 경제, 문화, 정치적 파급 효과에 대한 정보와 적절한 대응방안의 마련이 필요하다. 백두산의 화산활동으로 인하여 천지의 외륜산이 붕괴되고 천지에 저장된 물이 방류될 경우를 가정하여 2차원 평면 흐름 수치모형을 이용하여 잠재적 홍수피해 위험지역을 파악하였다. 방류되는 물의 양은 외륜산 붕괴 메커니즘을 표현하는 미분방정식을 풀어 시간의 함수로 유량곡선을 작성하였다. 구성된 유량곡선을 수치모형의 상류부 경계조건으로 하였고, 하류부 경계조건은 백산수고의 수위를 설정하여 10일 동안 송화강 유역으로 흐르는 홍수피해 지역을 모의하였다. 지형자료는 USGS의 SRTM3 수치 표고 자료를 바탕으로 100 m × 100 m의 격자(Grid)를 생성하였다. 지표면 특성은 인공위성 MODIS자료를 사용하여 유출곡선지수와 조도계수를 산정하였다. FLO-2D로 모의한 침수지역을 위성영상과 중첩하여 침수면적을 계산한 결과, 외륜산(outer rim) 붕괴가 발생하고 붕괴율이 10 m/hr인 경우 이도백하부근 도심지 면적 22.4 km<sup>2</sup> 중 80%정도가 침수되며, 붕괴율이 100 m/hr인 경우 98%의 지역이 침수되는 것으로 나타났다.

**주요어:** 자연재해, 방재, 칼데라, FLO-2D, 외륜산붕괴

Volcanic eruptions alone may lead to serious natural disasters, but the associated release of water from a caldera lake may be equally damaging. There is both historical and geological evidence of the past eruptions of Mt. Baekdusan, and the volcano, which has not erupted for over 100 years, has recently shown signs of reawakening. Action is required if we are to limit the social, political, cultural, and economic damage of any future eruption. This study aims to identify the area that would be inundated following a volcanic flood from the Cheon-Ji caldera lake that lies within Mt. Baekdusan. A scenario-based numerical analysis was performed to generate a flood hydrograph, and the parameters required were selected following a consideration of historical records from other volcanoes. The amount of water at the outer rim as a function of time was used as an upper boundary condition for the downstream routing process for a period of 10 days. Data from the USGS were used to generate a DEM with a resolution of 100 m, and remotely sensed satellite data from the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) were used to show land cover and use. The simulation was generated using the software FLO-2D and was superposed on the remotely sensed map. The results show that the inundation area would cover about 80% of the urban area near Erdaobaihezhen assuming a 10 m/hr collapse rate, and 98% of the area would be flooded assuming a 100 m/hr collapse rate.

**Key words:** natural hazards, disaster reduction, caldera, FLO-2D, rim collapse

\*Corresponding author: [suwokim@chol.com](mailto:suwokim@chol.com)

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

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.

## 서 론

백두산의 전조 현상관측에 의해 가까운 장래에 폭발적인 분화 가능성이 제기되고 있다. 화산 대응에 대한 사회적 요구와 경제적 파급 효과에 대한 우려도 증대되고 있으므로 신속한 화산정보 생산 및 대국민 정보 전달 역량을 확보할 필요가 있다.

2010년 4월 아이슬란드 에이아프얄라요쿨(Eyjafjallajokull) 화산분화에 수반된 화산재의 확산으로 당해 4월과 5월에 걸쳐 유럽 전역에 항공장애가 발생하였으며, 약 180,000편의 항공기 결항(전 세계 항공편의 29%) 및 지연을 유발하면서 하루 약 120만 명의 승객이 피해를 입었다. 이러한 사례는 백두산 화산분화에 대한 이해와 대비의 필요성을 일깨워준다. 백두산이 분화하면 화산재, 화쇄류, 화산이류 등 다양한 화산재해가 발생하여 사회, 경제, 문화, 보건 등 다양한 분야에서 우리의 생활에 직간접적으로 영향을 미칠 것이다. 특히 백두산의 외륜산 붕괴는 저수량 20억 톤의 천지 칼데라호수의 유출에 의한 화산성 홍수의 위험이 내재되어 있다. 즉, 백두산의 분화에 수반하여 정상부에 위치한 천지칼데라호에 담긴 물이 쏟아져 내림으로써 홍수재해를 가져올 수 있다. 백두산 천지칼데라호가 붕괴되면 존재 자체만으로도 천지 주변도시에 심각한 위험요소가 될 수 있다.

국내에서 화산 분화에 수반된 화산성 홍수에 대한 체계적 연구는 수행된 바가 없다. 전통적으로 화산성 홍수의 잠재적 피해양상예측은 과거의 기록(홍수의 규모와 빈도 등)을 분석하고 현장조사를 통하여 얻은 경험지식을 바탕으로 도출되는 방법을 주로 사용하였다(Lee et al., 2013). 현재에는 컴퓨터 기술의 발달로 인하여 물리적 이론과 경험적 관계에 근거한 수치예측모형도 함께 사용하는 경향이 강하다. 화산성 홍수는 화산분출물을 포함하고 있어 집중 호우에 의한 단순 홍수와 달리 큰 점성과 밀도로 인해 액체 상태로 움직이다가 멈추면 고체상태가 되기도 한다. 경사와 하천 이동과정 중에 암석과 식생 침식을 동반하여 크기가 커지다가 멈추면서 에너지를 잃는 특성을 가지고 있다(Massey et al., 2010). 화산성 홍수의 부유물질이 20-60%이면 난류성(turbulent) 흐름을 가지며, 80% 이상이면 층류성(laminar) 흐름을 가지는데 화산성 홍수의 유체의 이동속도가 일반 홍수보다 훨씬 빠르다(Manville, 2010; Massey et al., 2010). 대형 화산성 홍수는 흐름 속도가 100 km/hr, 도달거리가 수백 km까지 이르며 대부분의 자연 생태계와 인공 구조물을 파괴할 수 있는 에너지를 가지고 있

어 치명적인 피해를 가져올 수 있다. 또한 화산성 홍수는 흐름 내에 동반되는 화산분출물이 농지나 주택지에 침전물을 형성하며, 화산성 홍수의 동반 부유물질이 하천의 지류를 막으면 자연담이 형성되고 이 후 강우가 내리면 파괴되어 서지(surge)를 형성할 수 있으며, 이외에도 화산 쇄설물과 급경사지의 토석류(debris)를 하류로 이동시켜 토사재해를 유발할 수 있다(Manville, 2010).

화산활동으로 침하된 지반에 담수가 저장되어 칼데라호가 형성되며, 분출된 화산물질이 계곡부에 댐과 폐쇄된 지형을 만들어 담수를 저장하기도 한다(Larson, 1989; Nelson et al., 1994; Waythomas et al., 1996; Manville et al., 1999; Hodgson and Nairn, 2000; Manville and Wilson, 2004). 대부분의 칼데라와 분화구 호수는 주변 지형 보다 높은 고도에 위치하며 고지대에 위치한 많은 양의 물은 외륜산 붕괴로 방류되어 잠재적 위험 요소가 될 수 있다(Zen and Hadikusumo, 1965; Kilgour et al., 2010).

칼데라 호수는 화산폭발 유무에 관계없이 외륜산(rim)의 최저점으로 물이 방출 될 수문학적인 흐름의 저수지에 해당된다(Waythomas et al., 1996; Manville et al., 1999; Bornas et al., 2003; Manville and Wilson, 2004; Stelling et al., 2005; Massey et al., 2010; Kataoka, 2011). 외륜산 붕괴로 저류된 물이 홍수형태로 방류될 경우 일반적으로 폭깊이 비가 3~5의 범위에서 V-지형 또는 사다리꼴의 출구 모양을 보인다(MacDonald and Langridge-Monopolis, 1984).

백두산 마그마의 분출로 인하여 천지의 물이 폭발성을 증가시키는 기폭제 역할을 하여 화산분출을 강력하게 만드는 요인이 될 수 있다. 그러나 본 연구는 마그마의 용기에 의한 수면의 상승과 외륜산 붕괴로 천지에 저장된 담수가 방류되는 상황을 모의함으로써 백두산 화산 분화가 유발한 화산성 홍수의 잠재적 피해를 사전에 추정하여 자연재해에 대한 예측가능한 피해범위 산정에 목적이 있다.

## 입력자료

연구는 백두산의 분화 시 예상되는 마그마 용기와 이에 따른 화산성 홍수의 피해를 예측하는 것으로 침수피해 범위를 파악하는 것이다. 홍수위험지역의 피해범위는 칼데라호의 붕괴로 인한 위험 지역을 제시하고 예경보를 위한 정보를 제공한다(Fig. 1).

지하의 마그마가 붕괴되면 천지 수면의 상승과 더불어

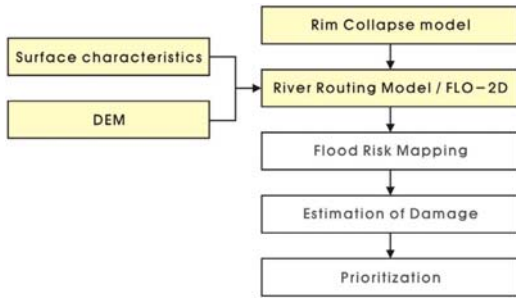


Fig. 1. Schematic diagram of the flood risk mapping procedure.

어 외륜산이 붕괴되어 유출구가 형성되고 이를 통한 지표수의 방류로 홍수가 발생한다(Fig. 2). 수면의 상승 속도에 따른 수치해석으로 방류되는 지표수의 유량곡선을 산정하고 경우에 따라 홍수 피해범위를 예측하였다. 즉 홍수 피해의 시나리오는 마그마 상승과 외륜산 붕괴에 따른 유출조건을 가정한 유출모형을 구축하고 선행연구 (Singh et al., 1988; Walder and O'Connor, 1997)를 바탕으로 시간에 따른 유량변화를 산정하였다. 침수구역과 침수높이는 유량곡선을 상류부 경계조건으로 하여 지형과 지표면의 특성을 반영하여 격자 기반의 2차원 흐름모형인 FLO-2D를 이용하여 계산하였다.

**지형도**

홍수재해모의를 위한 입력자료 구축을 위해서 수치 지형이 필요하다. 연구에 사용한 FLO-2D모델은 수치지형의 격자(Grid)의 크기를 지정하면 해당 격자의 지형 정보를 자동으로 생성하므로 자료 구축이 비교적 용이하다. 백두산 화산홍수 모의에 사용한 수치지형(DEM)은 송화강 유역을 중심으로 USGS의 SRTM3을 사용하였고(Fig. 3), 흐름모형의 격자는 100 m × 100 m의 크기로 하였다.

**토지피복도**

FLO-2D모델의 침투에 대한 입력 자료를 위해 유출곡선지수(CN 값)를 사용하였다. 유출곡선지수의 산정시 요

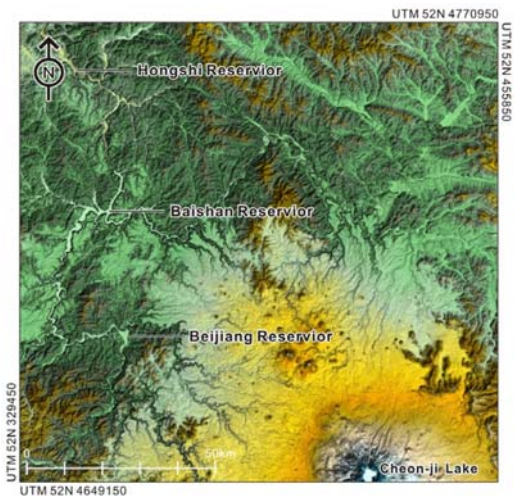


Fig. 3. DEMs of the Songhua river basin.

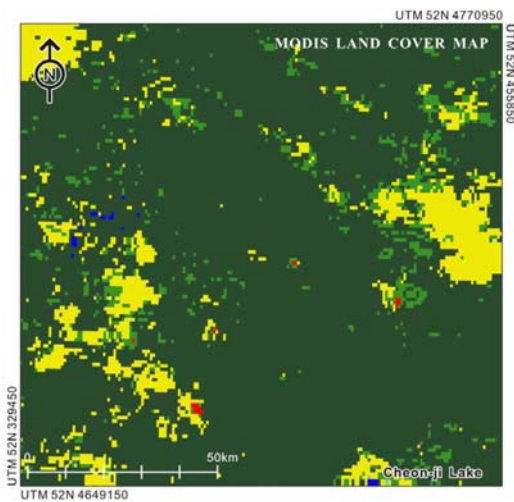


Fig. 4. Land cover map (Resolution : 1 km).

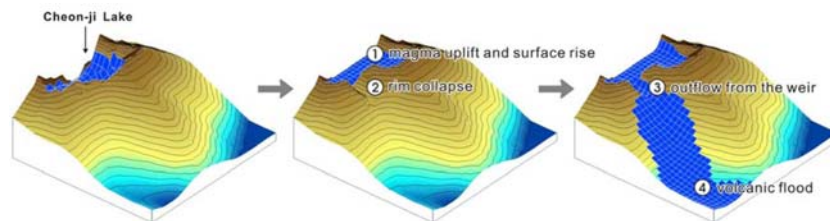


Fig. 2. Schematic plot of outflow caused by rim collapse.

구되는 지표의 정보는 MODIS의 1 km급 해상도의 토지 피복도를 환경부 대분류기준으로 편집한 영상정보(Fig. 4)를 사용하였고, 백두산 인근의 국소지역은 Landsat5

영상으로 신규 제작된 30 m급 토지피복도를 사용하였다. 30 m 정밀도의 토지피복도가 정확한 수치모의를 제공하지만 피해예측 지역에 비하여 범위가 작아 송화강 광역 유역에 대해서 1 km 해상도의 토지피복도와 같이 활용하였고, 유출곡선지수의 기준을 선행토양함수, 토지 이용상태, 피복처리상태, 수문학적 조건 및 수문학적 토양형 등을 고려하였다.

흐름에 대한 하도의 저항의 정도를 표시하는 하도의 조도계수는 여러 가지 수리계산에서 기본적인 인자 중 하나로 하천수위 계산에 사용되고 있다. 유출곡선지수(CN)는 토지이용상태와 마찬가지로 토지피복도를 통하여 산림과 개활지, 도시지역으로 구분하였다. 잔디의 양에 대한 정도와 방해물이 없는 개활지 그리고 아스팔트 지역으로 구분하여 각각 73, 79, 94를 적용하였다. 산림 지역은 초목 지역(Shrubs and forest litter, pasture)으로 조도계수를 0.35로 사용하였고, 개활지는 잔해 및 방해

물이 없는 공터(Open ground, no debris)로 0.06을 사용하였다. 도시지역은 불투수면적 85%이상의 사무지역으로 아스팔트 및 콘크리트(Asphalt or Concrete)지역의 조도계수 0.04를 사용하였다(Table 1).

#### 토석류

백두산 천지에서 외륜산 붕괴로 유출이 발생하면 흐름이 하도를 따라 이동하는 과정에서 흙과 암편들이 물과 혼합되어 비탈면이나 계곡을 따라 하도로 흘러내리는 토석류가 발생한다. 토석류는 흙 입자와 물이 혼합되어 하나의 점성체로 이동하므로 점성을 갖는 유체의 이동으로 이해할 수 있다. 고체와 유체의 혼합흐름은 토질의 특성과 농도에 따라 항복응력과 점성, 응력과 변형률의 관계가 다르게 나타난다. FLO-2D 수치모의에서 토석류의 비중과 농도에 대하여 입력 자료가 필요하다. 비중은 화산 분화시 분출되는 화산쇄설물의 대표적인 비

**Table 1.** Input parameters for land cover and use.

Parameters	Surface classification	Value
Coefficient of roughness (n)	Shrubs and forest litter, pasture	0.35
	Open ground, no debris	0.06
	Asphalt or concrete	0.04
Runoff curve number (CN)	Forest or woods	73
	Open space	79
	Urban districts	94

**Table 2.** Yield stress and viscosity as a function of sediment concentration (O'Brien, 1986).

Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta c_v}$ (dynes/βδ)			$\eta = \alpha e^{\beta c_v}$ (poises)		
	$\alpha$	$\beta$	$\tau_y$	$\alpha$	$\beta$	$\eta$
Field data						
Aspen pit 1	0.181	25.7	5,275.041	0.0360	22.1	248.580
Aspen pit 2	2.810	10.4	174.275	0.0538	14.5	17.770
Aspen natural soil	0.152	18.7	269.381	0.00136	28.4	116.714
Aspen mine fill	0.0473	21.1	218.931	0.128	12.0	15.553
Aspen watershed	0.0383	19.6	97.290	0.000495	27.1	25.256
Aspen mine source area	0.291	14.3	88.727	0.000201	33.1	113.046
Glenwood 1	0.0345	20.1	107.040	0.00283	23.0	28.009
Glenwood 2	0.0765	16.9	65.992	0.0648	6.20	0.774
Glenwood 3	0.00071	29.8	106.221	0.00632	19.9	18.101
Glenwood 4	0.00172	29.5	229.194	0.000602	33.1	338.575
Relationships available from the Literature						
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	2,828.527	0.00750	14.39	2.371
Wang and Zhang (1980)	1.75	7.82	39.949	0.0405	8.29	1.116

Conversion : Shear stress : 1 Pascal (PA) = 10 dynes/cm<sup>2</sup>

Viscosity : 1 PAs = 10 dynes - sec/cm<sup>2</sup> = 10 poises

중 값을 참조하여 2.65를 적용하였다. 토석류의 농도는 흐름이 하류로 빠르게 발산하며 유속에 의해 주위의 큰 입자들과 쉽게 혼합되는 것을 고려하여 0.4로 사용하였다.

항복응력과 점성계수는 파괴사면의 유동성을 결정하는 중요한 기준이 되며(Jeong, 2010), 유동성은 입자의 흐름 속도와 이동거리에 관련된다(Imran et al., 2001; Locat et al., 2004). 선행연구에서 제시된 항복응력과 점성을 농도개념인 체적농도( $C_v$ )의 관계는 항복응력과 체적농도 및 점성계수와 체적농도( $C_v$ )와의 관계를 선형 회귀분석으로 식 (1)과 식 (2)로 표현하였다(O'Brien and Julien, 1988).

$$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v} \quad (\text{dynes/cm}^2) \quad (1)$$

$$\eta = \alpha e^{\beta C_v} \quad (\text{poises}) \quad (2)$$

체적농도는 앞서 선정한 0.4를 사용하였으며, 항복응력과 체적농도의 관계식과 점성계수와 체적농도의 관계식에 대한 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau_y$ ,  $\eta$ 는 O'Brien (1986)에 의해 제시된 Aspen Mine Source Area에 대한 허용응력 88.727 dynes/cm<sup>2</sup>, 점성계수 113.046 poises를 사용하였다(Table 2).

### 수치 모형 및 모의 결과

#### 용기모형

수치모형의 정확도는 모형의 구성과 완성도에 따라 결정되며 마그마 용기에 따른 유출의 수문곡선은 Waythomas et al. (1996)에 의한 제시된 상미분방정식으로부터 용기와 외륜산 봉괴가 수반된 방류량 산정을 위해 Lee et al. (2014)이 제시한 식 (3)과 식 (4)의 모형을 사용하였다.

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{D^p}{pV_o} g^{0.5} (H + \Delta H)^{1.5} \frac{(c_1 b + c_2 (H + \Delta H) \cot \theta)}{(h_b + H + \Delta H)^{p-1}} \quad (t < t_e) \quad (3)$$

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{D^p}{pV_o} g^{0.5} H^{1.5} \frac{(c_1 b + c_2 H \cot \theta)}{(h_b + H)^{p-1}} \quad (t < t_e) \quad (4)$$

여기에서  $h_b = D - kt(t < t_e)$ ,  $h_b = D - kt_e(t \geq t_e)$ ,  $t_e$ 는 용기 지속되는 시간,  $H$ 는 천지의 수위,  $\Delta H (= k\Delta t)$ 는 수위 상승 높이,  $V$ 는 저수지 용량,  $t$ 는 시간을 나타낸다.



Fig. 5. Photo of Changback waterfall showing a trapezoidal weir outlet.

$V_o$ 는 초기 저류량, 지수  $p$ 는 저수지 형상계수이며 1에서 3사이의 값을 가진다(Costa and Schuster, 1988; Waythomas et al., 1996).  $D$ 는 외륜산 바닥에서 높이,  $b$ 는 봉괴 하부의 너비,  $\theta$ 는 봉괴시 유출구 위어의 사면각도,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 유량계수,  $k$  (m/hr)는 마그마의 용기속도에 해당한다.

식 (3)과 식 (4)에 의해 용기 시간에 따른 저수지 수위  $H$ 의 변화를 계산하고, 저수지 수위  $H$ 와 유량  $Q$ 의 관계식을 이용하여 유출량을 산정한다. 백두산의 외륜산에서 해발고도가 가장 낮은 장백폭포는 사다리꼴이며 (Fig. 5), 분화시 유출구(breach)에 해당하므로 사다리꼴 형의 위어(trapezoidal weir, (French, 1987)) 공식을 적용하여 유량을 산정하면 식 (5)과 같다.

$$Q = (c_1 b + c_2 H \cot \theta) g^{0.5} H^{1.5} \quad (5)$$

#### 하도추적모형

홍수위험지도 작성에서 지형 자료와 토석입자의 매개 변수를 고려하였으며, FLO-2D 모델을 통하여 강우, 지표유출, 증발산, 침투 및 토석류와 같은 물리적 모의를 할 수 있다. FLO-2D는 미국 연방재난관리청(FEMA)가 공인한 상업용 하도추적모형으로 정확도와 기능면이 우수하여 널리 이용되고 있다. 특히 토석류 모의에 효과적이며, 국내외의 화산홍수 모의에 적용되고 있다.

FLO-2D 모형은 연속방정식(continuity equation)과 운동방정식(equation of motion)을 기초로 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 수치 해를 구한다. 수치모의 입력의 지형 자료는 고도와 조도계수(Manning's n-Value) 및 유출곡선지수(soil conservation service method의 CN)등을 설정하였고(Table 1), 홍수에

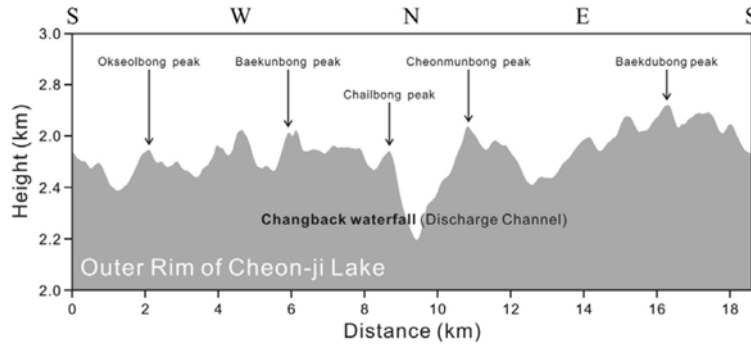


Fig. 6. Elevation of the outer rim that surrounds the Cheon-Ji caldera lake.

포함된 흙 입자의 매개변수로는 점성계수, 항복계수, 비중을 입력하여 하도구간의 유속과 유출량, 침수심과 침수 범위를 계산하였다.

#### 수치모의 결과

백두산은 주기적인 화산활동이 있었고, 1,000년 전 대규모 분화로 인한 화산성 홍수의 퇴적물은 두만강, 압록강, 송화강의 하류까지 이동하였다(Yun, 2013). 백두산의 분화 규모를 과거와 유사한 수준으로 가정할 경우 현재는 댐을 비롯하여 인공적인 수공구조물이 건설되어 흐름의 방향과 경계가 달라질 것이며, 잠재적인 피해범위는 과거와 다른 양상이 예상된다. 백두산 천지의 저수량은 20억 톤이며, 송화강과 압록강에 건설된 댐의 저수량은 100억 톤 이상으로 화산성홍수의 흐름은 댐의 저수지에서 멈출 것으로 예상된다(Kim, et al., 2013).

장백폭포는 백두산의 외륜산 중 해발고도가 가장 낮아 수위 상승 시 유출구의 가능성이 가장 높다(Fig. 6). 칼데라 붕괴 기록을 가진 화산의 붕괴가 동일 장소에서 반복적으로 발생하는 것과 음영기복도를 바탕으로 한 선구조선 분석에서 장백폭포 방향이 지질 구조적으로 취약하여 화산성 홍수 발생이 지배적일 것으로 예측된(Kim et al., 2013) 결과를 토대로 송화강 유역에 대하여 화산성 홍수 피해를 모의하였다.

화산활동에 의해 마그마가 용기하면 이로 인해 천지의 수면이 상승하고 장백폭포를 통한 유출이 예상된다. 화산분화가 발생할 때 실제 붕괴율( $k$ )은 시간의 함수로서 유량곡선을 산정 할 때 가장 민감하게 작용하는 요소이나 지형, 에너지, 화산폭발지수 등에 따라 달라질 것이므로 예측이 불가능하다. 그러나 여러 조건의 붕괴 시나리오를 만들고 과거 관측 자료를 토대로 피해범위를 예측할 수 있다.

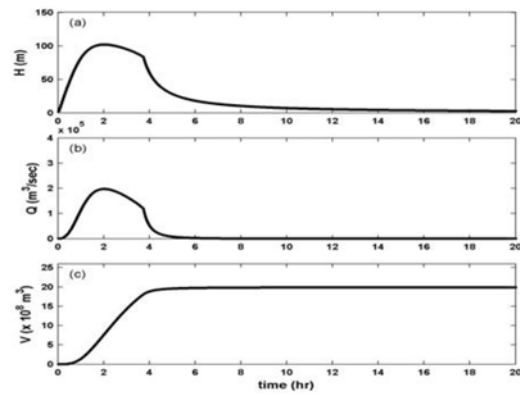


Fig. 7. Outflow hydrograph calculated using the dam-break model at  $k = 100$  m/hr.

외륜산 붕괴가 시간에 따라 일정한 비율로 붕괴되고 장백폭포를 통해 천지의 물이 유출되는 것을 가정하여 (Fig. 2의 C) 붕괴율의 범위를 10 m/h ~ 100 m/h로 하여 홍수 모의를 하였다. 외륜산 붕괴를 표현하는 식 (3)-식 (5)의 수치해석에 의해 산정된 붕괴율 100 m/h인 유량곡선은 백두산 분화에 의해 예상되는 최대 피해 조건에 해당한다(Fig. 6). 천지의 최대수심은 384 m이고 수치모의에서 붕괴율( $k$ )이 100 m/hr인 경우 유출은 약 4시간에 걸쳐 발생한다. 붕괴 초기에는 천지칼데라호의 방류속도보다 제방 붕괴 속도가 더 빠르므로 수위  $H$ (바닥에서 높이)는 증가하며, 2시간이 지나면 최대  $200,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 가 방류되는 침투 유량이 관찰된다. 4시간이 경과하면 천지의 바닥면까지 붕괴가 완료된다. 동시에 이 시점부터는 유량의 방출만 있으므로  $H$ 는 지속적으로 감소한다(Fig. 7).

붕괴 모형으로 계산된 유량곡선을 상부 경계조건으로 시나리오별로 FLO-2D를 이용한 흐름을 모의한 결과는



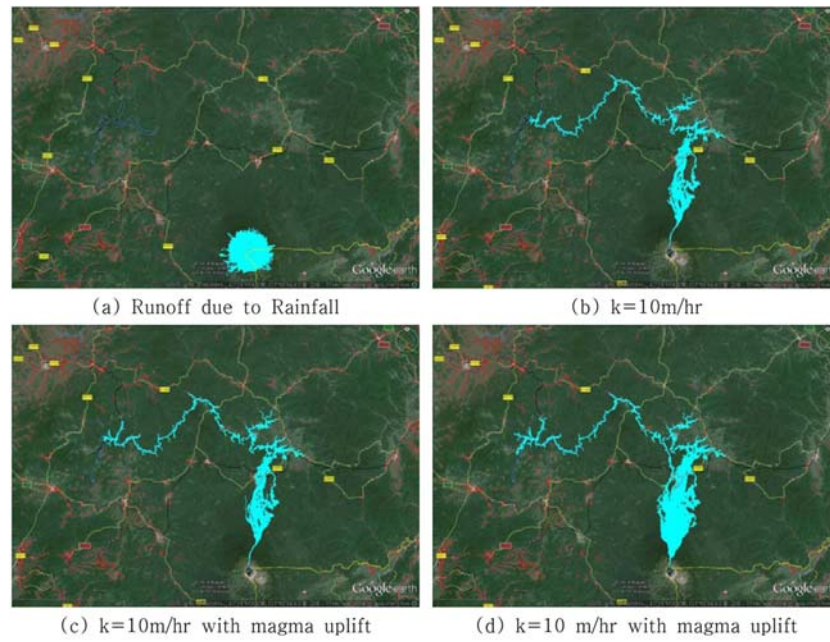


Fig. 8. Projected inundation areas for the flooding scenarios (using a map from Google Earth).

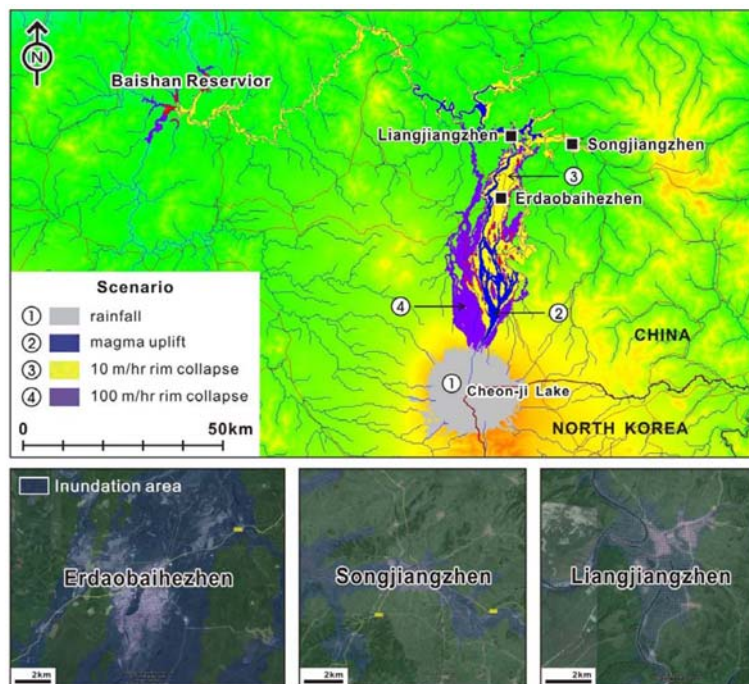


Fig. 9. Potential inundation areas simulated using FLO-2D.

Fig. 8의 구글위성영상에 나타난 것과 같다. 그림의 (a)는 강우 유출에 의한 흐름으로 천지를 중심으로 방사형

의 흐름이 발생하며, (b)와 (c)는 붕괴율이 10 m/hr인 경우와 800 cms의 용기와 붕괴가 수반된 경우에 해당하는

**Table 3.** Flooding area and depth in the city for the  $k = 100$  m/hr flooding simulation.

Scenario		Flooding area	City name	Urban area		Flooding depth
				Flooding area	Flooding rate	
Breach	100 m/hr	827.8 km <sup>2</sup>	Erdaobaihezhen	22.4 km <sup>2</sup>	98%	32.2 m
				21.9 km <sup>2</sup>		
				100%		
			Songjiangzhen	2.5 km <sup>2</sup>	100%	20.8 m
				2.5 km <sup>2</sup>		
				100%		
			Liangjiangzhen	2.0 km <sup>2</sup>	100%	42.3 m
				2.0 km <sup>2</sup>		
				100%		

다. (d)는 붕괴율 100 m/hr와 마그마 용기가 발생하는 경우로 최대 침수 범위를 보여준다.

마그마의 용기에 의한 수면 상승과 외륜산 붕괴에 의한 최대 침수면적은 827.83 km<sup>2</sup>이며, 천지 하류의 이도백하(Erdaobaihezhen), 송강진(Songjiangzhen), 이강진(Liangjiangzhen) 중 거주지역에 해당하는 도심지는 침수 범위에 속한다. 위성영상과 FLO-2D의 침수지역을 중첩한 도면으로부터 침수면적을 계산하면 붕괴가 발생하고 붕괴율이 10 m/hr인 경우 이도백하의 경우 도심지 면적 22.4 km<sup>2</sup> 중 80% 정도가 침수되며, 100 m/hr 붕괴율에서 98%의 지역이 침수된다. 천지로부터 50 km 이상 이격된 지점에 위치한 송강진과 이강진의 거주지는 붕괴율이 10 m/hr에서 도심지의 40% 정도가 침수되며, 100 m/hr 붕괴율에서 전역이 침수되는 것을 볼 수 있다(Fig. 9). 침수 범위 중 최대 침수심은 108.9 m이며, 위치별로 이도백하(Erdaobaihezhen)의 최대 침수심은 32.2 m, 송강진과 이강진은 20.8 m와 42.3 m로 천지로부터 거리가 멀어질수록 침수심은 점이적으로 감소하나 이강진과 같이 표고가 낮은 지역의 침수심은 상대적으로 높게 산정되었다.

## 결 론

백두산의 분화과정에 수반되는 마그마의 용기와 이에 따른 천지칼데라호의 수면 상승과 외륜산 붕괴에서 예상되는 홍수피해 수치모의를 수행하였다. 붕괴는 해발고도가 가장 낮은 장백폭포를 유출구로 하여 천지의 바닥 깊이인 384 m까지의 붕괴를 모사하였다.

방류되는 최대유량은 붕괴율 100 m/h에서 붕괴가 시

작 된 후 약 2시간 후에 200,000 m<sup>3</sup>/sec의 담수가 방류된다. 마그마의 용기와 붕괴율에 따른 유량을 상류 경계 조건으로 하여 FLO-2D 흐름을 모의한 결과 홍수의 도달거리는 과거 분화에서 알려진 것과 달리 백산수고(Baishan reservoir)에서 흐름이 중단되었고, 최대 피해 범위는 827.83 km<sup>2</sup>, 최대 홍수심은 108.9 m였다. 천지에 인접한 이도백하(Erdaobaihezhen)는 도심지의 전역이 침수범위에 포함되었고, 침수심은 천지로부터 거리가 멀어질수록 감소하였으나 지형적 기복으로 인해 이강진(Liangjiangzhen)은 가까운 거주지에 비해 침수심이 크게 나타난다.

홍수에 의한 피해는 방재기술과 경제 여건에 따라 상이한 것이 일반적이나 백두산 분화에 의한 홍수피해 수치모의에서 근거리 지역은 대부분의 도심지가 완전히 침수되는 결과를 보여주고 있고, 지속적으로 인구가 증가하는 지역인 것을 고려하면 화산 재해에 인한 잠재적 피해에 대한 공간적 경계와 이를 기초로 한 대응 방안 마련이 필요하다.

## 사 사

이 논문은 대구대학교 교내과제 번호 20130914의 재정지원을 받아 수행되었다.

## References

- Bornas, M. A., Tungol, N., Maximo, R. P. R., Paladio-Melosantos, M. L., Mirabueno, H. T., Javier, D. V., Corpuz, E. G., Dela Cruz, E. G., Ramos, A. F., Marilla, J. D., and Villacorte, E. U., 2003, Caldera-rim breach



- and lahar from Mt. Pinatubo, Philippines: Natural breaching and resulting lahar, *Proceedings IUGG 2003 Congress*, Sapporo, Japan: A558.
- Costa, J. E. and Schuster, R., 1988, The formation and failure of natural dams, *Geological Society of American Bulletin*, 100, 1054-1068.
- Dai, J., Chen, W., and Zhou, B., 1980, An experimental study of slurry transport in pipes, *Proceedings of the International Symposium on River Sedimentation*, 195-204.
- French, R. H., 1987, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 343-353.
- Hodgson, K. A. and Nairn, I. A., 2000, The catastrophic-1350 AD post-eruption flood from Lake Tarawera, New Zealand, Bay of Plenty Regional Council, Resource Planning Report, 61p.
- Imran, J., Parker, G., Locat, J., and Lee, H., 2001, ID numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 959-968.
- Jeong, S. W., 2010, Flow characteristics of landslides/debris flows: sediment rheology and mobility of landslide, KSEG Conference, November, 79-80 (in Korean).
- Kataoka, K. S., 2011, Geomorphic and sedimentary evidence of a gigantic outburst flood from Towada caldera after the 15ka Towada-Hachinohe ignimbrite eruption, northeast Japan, *Geomorphology*, 125, 11-26.
- Kilgour, G., Manville, V., Della, P. F., Graettinger, A., Hodgson, K. A., and Jolly, G. E., 2010, The 25 September 2007 eruption of Mount Ruapehu, New Zealand: directed ballistics, surtseyan jets, and ice-slurry lahars., *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 191, 1-14.
- Kim, S. W., Choi, E. K., Jung, S. J., Kim, S. H., Lee, K. H., and Yun, S. H., 2013, A preliminary study for predicting a damage range of pyroclastic flows, lahars, and volcanic flood caused by Mt. Baekdusan Eruption, *Jour. Korean Earth Science Society*, 34, 479-491 (in Korean with English abstract).
- Larson, G. L., 1989, Geographical distribution, morphology and water quality of caldera lakes: a review, *Hydrobiologia*, 171, 23-32.
- Locat, J., Lee, H. J., Locat, P., and Imran, J., 2004, Numerical analysis of the mobility of the Palos Verdes Debris Avalanche, California, and its implication for the generation of tsunamis, *Marine Geology*, 203, 269-280.
- Lee, K. H., Kim, S. W., and Kim, S. H., 2014, Volcanic flood simulation triggered by magma effusion for drainage of a caldera lake at the Mt. Baekdusan, EGU General Assembly 2014, *Geophysical Research Abstracts*, 16.
- Lee, K. H., Kim, S. W., Yu, S., Kim, S. H., Cho, J., Kim, J. M., 2013, Building a hydrograph triggered by earth dam-break for flood hazard map, *The Journal of Engineering Geology*, 23, 381-387 (in Korean with English abstract).
- MacDonald, T. C. and Langridge-Monopolis, J., 1984, 'Breaching characteristics of dam failures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110~51, 567-586.
- Manville, V., 2010, An overview of break-out floods from intracaldera lakes, *Global and Planetary Change*, 70, 14-23.
- Manville, V. and Wilson, C. J. N., 2004, The 26.5 ka Oruanui eruption, New Zealand: a review of the roles of volcanism and climate in the post-eruptive sedimentary response, *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 4, 525-547.
- Manville, V. R., White, J. D., Houghton, B. F., and Wilson, C. J. N., 1999, Paleohydrology and sedimentology of a post 1.8 ka breakout flood from intracaldera Lake Taupo, North Island, New Zealand, *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1435-1447.
- Massey, C. I., Manville, V., Hancock, G. H., Keys, H., and Lawrence, M. M., 2010, Out-burst flood (lahar) triggered by retrogressive landsliding, 18 March 2007 at Mt Ruapehu, New Zealand-a successful early warning, *Landslides*, 7, 303-315.
- Nelson, C. H., Bacon, C. R., Robinson, S. W., Adam, D. P., Bradbury, J. P., Baeber, J. R., Schwartz, D., and Vagenas, G., 1994, The volcanic, sedimentologic, and paleolimnologic history of the Crator Lake caldera floor, Oregon: Evidence from small caldera evolution, *Geological Society of America Bulletin*, 106, 684-704.
- O'Brien, J. S., 1986, Physical processes, rheology and modeling of mudflows, Doctoral dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- O'Brien, J. S. and Julien, P. Y., 1988, Laboratory analysis of mudflow properties, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 877-887.
- Singh, V. P., Scarkators, P. D., Collins, J. G., and Jourdan, M. R., 1988, Breach erosion of earthfill dams (BEED) model, *Natural Hazards*, 1, 161-180.
- Stelling, P., Gardner, J. E., and Beget, J., 2005, Eruptive history of Fisher Caldera Alaska USA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 163-183.
- Walder, J. and O'connor, J. E., 1997, Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams, *Water Resources Research*, 33, 2337-2348.
- Wang, Z. and Zhang, S., 1980, A preliminary analysis of the characteristics of debris flow, *Proceedings of the International Symposium on River Sedimentation*, 225-226.
- Waythomas, C. F., Walder, J. S., McGimsey, R. G., and Neal, C. A., 1996, A catastrophic flood caused by drainage of a caldera lake at Aniakchak Volcano, Alaska, and implications for volcanic hazards assessment, *Geological Society of American Bulletin*, 108, 861-871.
- Yun, S. H., 2013, Volcanological interpretation of historical eruptions of mt. baekdusan volcano, *Jour. Korean Earth Science Society*, 34, 456-469 (in Korean with English abstract).
- Zen, M. T. and Hadikusumo, D., 1965, The future danger of Mt. Kelut (Eastern Java-Indonesia), *Bulletin of Volcanology*, 28, 275-282.

**이길하**

712-714 경북 경산시 진량읍 대구대로  
대구대학교 토목공학과  
Tel: 053-850-6522  
E-mail: klee@daegu.ac.kr

**김상현**

609-735 부산 금정구 부산대학로 63번길 2  
부산대학교 사회환경시스템공학과  
Tel: 051-510-24794  
E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr

**최은경**

611-839 부산 연제구 중앙대로 1048번길 11  
(주) 지아이 지반정보연구소  
Tel: 051-506-9261  
E-mail: choiek@naver.com

**김성욱**

611-839 부산 연제구 중앙대로 1048번길 11  
(주) 지아이  
Tel: 051-506-9261  
E-mail: suwokim@chol.com