지형 요소를 고려한 백두산 지역의 위험도 분석

최은경^{1,*} · 김성욱¹ · 이영철² · 이규환³ · 김인수⁴

¹주식회사 GI, 611-839, 부산광역시 연제구 중앙대로 1048번길 11

²부산대학교 지구과학교육과, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

³건양대학교 건설환경공학과, 320-711, 충청남도 논산시 대학로 121

⁴부산대학교 지질환경과학과, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Analyzing the Disaster Vulnerability of Mt. Baekdusan Area Using Terrain Factors

Eun-Kyeong Choi^{1,*}, Sung-Wook Kim¹, Young-Cheol Lee²,
Kyu-Hwan Lee³, and In-Soo Kim⁴

¹Gi Co. Ltd., Busan 611-839, Korea

²Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³Civil and Environment Engineering, Konyang University, Chungnam 320-711, Korea

⁴Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: Most steep slope failures tend to take place in geographically unstable areas. Mt. Baekdusan is known as a potentially active volcano in a typical mountainous terrain. This study prepared a digital elevation model of Mt. Baekdusan area and created a hazard map based on topographical factors and structural lineament analysis. Factors used in vulnerability analysis included geographical data involving aspect and slope distribution, as well as contributory area of upslope, tangential gradient curvature, profile gradient curvature, and the distribution of wetness index among the elements that comprise topography. In addition, the stability analysis was conducted based on the lineament intensity map. Concerning the disaster vulnerability of Mt. Baekdusan region, the south and south west area of Mt. Baekdusan has a highest risk of disaster (grade 4-5) while the risk level decreases in the north eastern region.

Keywords: Mt. Baekdusan, hazard map, vulnerability, geographical data, lineament

요약: 대부분의 급경사지의 붕괴는 지형적으로 불안정한 지역에서 발생한다. 백두산은 전형적인 산악 지역으로 잠재적 폭발 가능성을 지닌 활화산으로 알려져 있다. 본 연구에서는 백두산지역의 수치고도모형을 이용하여 지형요소와 선구조선 분석을 통해 재해 위험도를 작성하였다. 취약도 분석에 사용되는 요소는 지형으로부터 산정된 방위도, 경사도, 상부사면기여면적, 접선구배곡률, 윤곽구배 곡률, 습윤지수의 분포를 이용하였다. 더불어 선구조의 선밀도도를 작성하여 재해 위험도를 평가하는데 이용하였다. 지형요소를 이용한 백두산지역의 재해위험도 분석 결과 남쪽 내지 남서부 지역의 재해 위험도가 4-5등급으로 높게 나타나고 있다.

주요어: 백두산, 위험지도, 취약도, 지형자료, 선구조

*Corresponding author: choiek@naver.com

Tel: +82-51-506-9261

Fax: +82-51-502-9260

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.

서론

백두산은 B.C. 1120, A.D. 1050, 1413, 1597, 1668, 1702 등 6회 이상의 분화가 사료에 기록되어 있고(Simkin and Siebert, 1994; Yun and Cui, 1996; Soh and Yun, 1999), 최근 다양한 관측 자료를 바탕으로 백두산 하부 맨틀의 구조의 변화가 감지되고

분화의 징조가 관측되고 있다(Yun et al., 2012). 특히 A.D. 946년에 발생한 백두산의 분화는 최근 발생한 아이슬란드 화산분화의 1,000배 이상으로 추정되며 화산재가 일본 동북부 지역까지 확산하여 5 cm 내외의 화산재층을 만들었을 만큼 큰 피해를 줄 수 있는 화산이므로 화산폭발 가능성의 예측과 피해의 최소화를 위한 예·경보를 위해 다양한 관측과 분석 기술 등이 요구된다. 또한 근래에 피해 사례가 증가하는 화산 분화로부터 국민의 안전한 삶과 국토 보전을 위한 최적화된 예측 기술이 현재 개발되어 있지 않아 화산분화에 따른 정부의 피해 저감을 위한 초기 대응을 방안이 없는 실정이다.

백두산은 전형적인 산악지역으로 잠재적 폭발가능성을 지닌 활화산으로 알려져 있다. 그러므로 백두산에 관련된 연구는 과거에는 화산학적 접근으로의 분석(Yun et al., 1993; Soh and Yun, 1999)에 대한 결과와 주를 이루었으며, 최근 백두산 분화와 관련된 여러 가지 자료를 통해 분화 가능성이 논의되자 과거 역사 시대 분화 기록에 대한 선행연구에 관련된 분석(Yun and Cui, 1996; Park and Lim, 2010; Yun and Lee, 2011; Machida et al., 1981; 1990) 및 분화 전조현상에 관련된 분석(Xu et al., 2012; KMA, 2011; Un et al., 2013)이 주를 이루고 있다. 특히 접근이 용이하지 않은 점을 고려하여 백두산에 대한 인공위성을 이용한 예측이 진행되고 있으며, 인공위성에 의하여 측정된 중력 및 지오이드 자료를 이용하여 백두산 하부의 마그마 챔버에 대한 연구(choi et al., 2013; Lee et al., 2013)를 수행하고 있다.

백두산이라는 지역 특성상 직접적으로 인명 및 재산의 피해를 유발할 수 있는 재해는 화산재(Fallout), 화쇄류(PDC), 화산이류(Lahars), 화산성 홍수(Flood)가 대표적인데 이러한 재해는 급경사지에서 발생하는 산사태와 유사하게 나타나며, 분화구의 붕괴뿐만 아니라 화산폭발지수(VEI) 7 이상의 폭발적인 분화가 발생할 경우 산사태(Landslide)가 발생하게 된다(Neri et al., 2008). 그러나 화산에 집중된 연구에 비해 급경사지로 이루어진 지형에 대한 접근은 거의 없는 실정이다. 백두산 지역이 중국과 북한의 접경지대이므로 현장에서 발생한 재해이력 자료가 없으나 대부분의 급경사지의 붕괴는 지형적으로 불안정한 지역에서 발생하게 되므로 백두산의 지형자료의 분석에 의한 재해위험도의 정량화가 필요할 것으로 판단된다. 이에 본 논문에서는 협준한 산악지역을 대표할 수

있는 백두산지역의 음영기복도자료로부터 지형요소와 선구조를 추출하고, 이를 이용하여 지형요소만을 고려한 재해위험도를 작성하였다.

재해도 작성 시 획득한 지형, 지질, 산사태 자료와 실내시험을 통해 얻은 자료 등을 검토한 후 오류가 능성이 있는 자료는 재확인하고, 산사태 발생에 영향을 미치는 인자들을 선별하기 위해 인자별 상관성 분석을 실시한 후 통계적 기법을 이용하여 유의성이 높은 인자를 추출하는 방식을 적용하게 된다. 백두산의 경우는 직접적으로 재해발생 이력을 포함한 지형, 임상, 토양 등과 관련된 다양한 정보를 확보하는 것이 힘들다. 그러므로 본 연구에서는 지형자료만을 활용하여 재해위험도를 작성하였다.

지형을 구성하는 각 요소에 대하여 배점을 부여하여, 각각의 요소에 대하여 크리깅 공간보간법을 적용하여 지형기반의 지반안정성을 평가하였다. 지형요소 중 경사도가 큰 지역에서 지형에 의한 불안정성이 증가하고, 남쪽 경사의 사면은 북쪽 경사의 사면에 비하여 동결-융해로 인해 노출 암반의 풍화가 가속화되어 불안정성이 증가하며, 곡률의 경우 경사지의 모양이 수렴형(convex)인 지역에서 집수지형이 발달하며, 포화도의 증가가 불안정성을 심화시키는 점에 기초하였다. 또한 음영도에서 추출된 선구조선이 단층 및 암종의 경계와 잘 일치하는 점을 바탕으로 하여 재해위험도의 등급으로 적용하였다. Fig. 1은 백두산의 지리적 위치와 주요 지점을 표시한 것이며, 이때 수계는 USGS에서 제공되는 수계망을 활용하였다.

연구 방법

개요

지반의 안정성은 풍화작용과 직접적인 상관성이 있으며, 암석의 균열을 따라 이동하는 수분의 수렴, 발산, 포화 정도는 암석의 물리·화학적 풍화와 비례한다. 그러므로 현재 사용되고 있는 재해위험도의 경우 지형자료를 기초로 하여 제작되고 있으며, 광역적인 범위의 위험도를 평가하는 효과적인 방법으로 이용되고 있다.

급경사지의 형태, 방위, 토양수분 등은 급경사지 붕괴의 발생요인으로 광역적인 급경사지 안정해석의 자료로 활용되고 있다. 수치지형자료에서 고도를 나타내는 항목을 추출하여, 수치고도모형을 만든 후 구축된 자료를 이용하여 지형 요소별 분석을 실시하였

Fig. 1. Geographical location of Mt. Baekdusan.

다. 지형 구성 인자의 분석은 집중호우 시 지표수의 흐름을 다각적으로 분석하여 강우에 수반된 급경사지 재해의 범위를 예측하는 자료로 활용될 수 있다. 백두산의 과거 분화 이력에서 규장질 마그마의 플리니안분화(Plinian eruption)가 발생하면 분화구를 중심으로 고온의 화쇄류가 산사면을 따라 이동하면서 주변 지역에 피해를 유발한다. 또한 천지 칼데라호에서 분화가 발생할 경우 마그마의 파쇄와 상승에 의해 부피가 팽창하고, 칼데라호의 담수가 외륜산의 외부로 유출되어 대규모의 화산이류(lahar)와 홍수(flood)를 유발할 수 있다. 이러한 흐름은 급경사지에서 유발되는 흐름과 유사하다 할 수 있을 것이다.

GIS 자료 구축

백두산의 수문분석을 위한 수치지형자료를 구축하기 위해 분석 대상지역을 설정하고, 지형자료는 USGS에서 제공하는 SRTM3 (3" 또는 90 m 간격)의 고도 자료를 이용하였다. 경위도의 좌표계를 UTM 52N으로 변환하여 40×40 km 범위의 고도자료로부터 가로와 세로의 격자의 크기를 50 m로 하여 641,601개의 단위격자를 설정하고, 수치고도모형(DEM)으로 변환하였다. 사용된 수치지형의 자료처리를 위해 사용된 프로그램은 썬 컴퓨터의 공개된 지형분석코드인 TAPES-G (ver. 6.3)를 사용하였으며, 광역적인 범위의 자료처리를 위해 비주얼 포트란(Intel社의 Visual Fortran Pro ver. 10.01)을 사용하여 알고리즘을 재코딩하여 자료처리를 하였다. 지형자료의 편집을 위해 글로벌매퍼(Global Mapper社, Global Mapper ver. 12)와 서퍼(Golden Software社, Surfer ver. 11.0)를 이용하여 재처리하였다.

흐름분배 알고리즘

지형의 고도, 방위, 경사, 곡률은 Tapes_G 지형 수문모델을 이용하여 산정되었다. 지표수의 수렴 및 발산, 상부사면기여면적, 습윤지수는 Costa-Cabral and Burges (1994)에 의해 제안된 DEMON (Digital Elevation Model Networks) 알고리즘을 적용하였으며, 알고리즘은 지표수의 수렴정도를 2차원적 흐름을 고려하여 하부 격자로 흐름을 분배하였다.

DEMON 알고리즘은 격자 기반의 모델에서 흐름의 점원적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적 특성임을 고려하여 흐름이 점원이 아닌 면에서 형성하고 발생된 흐름은 하부 경사 방향으로 2차원 흐름관을 형성하는 것으로 가정한다. 하부 격자로 분배하는 흐름을 (하격자 흐름 분배율)은 식(1)과 같이 계산하였다. 즉 흐름을 받는 하부격자를 'E'로 결정하고 'E' 격자가 받는 흐름을 고려한다(Fig. 2a).

$$f_E = \frac{A_A}{A} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta y}{\Delta x \tan \alpha}, f_S = 1 - f_E \quad (1)$$

결정된 흐름 방향각이 90°의 배수각이면 상부격자는 하나의 하부격자로 흐름을 분배하고 그렇지 않은 경우 상부격자는 두개의 하부격자로 흐름을 분배한다.

지형요소 산정

경사도: 수치고도모형(DEM)에서 중심격자에 가장 가까운 방향에서의 고도의 변화율로서 중력이 물의 흐름을 발생 시키는 정도를 의미하며, 식 (2)과 같이 정의된다. 경사는 여러 가지 수문학적 과정(지표, 지표 하 흐름과 토양수분, 침식정도, 토양구조 등)에 영향을 주며, 특히 경사는 토석류가 발생한 경우 매질

(a) Direction of flow distribution

(b) node numbering of 3×3 grid

Fig. 2. DEMON algorithms and node numbering of 3×3 grid.

의 추진력에 영향을 끼친다.

$$S_{FD} = \sqrt{P} = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}, \quad Z_x, Z_y: 1차 미분계수 \quad (2)$$

위 식에 비해 간단한 근사 방법(D8 알고리즘)은 8개의 가까운 이웃 격자에서 가장 급한 경사를 경사도로써 계산할 수 있다(식 3). 여기서, h 는 격자 길이이고 $\psi(i)$ 는 동, 남, 서 그리고 북인 이웃 격자(Fig. 2b의 3×3 격자의 격자번호 $i=2, 4, 6, 8$)에 대해서는 i 의 값을 가지고 북동, 남동, 남서 그리고 북서인 이웃격자(Fig. 2b의 3×3 격자의 격자번호에서 $i=1, 3, 5, 7$)인 경우에는 $\sqrt{2}$ 의 값을 갖는다.

$$S_{D8} = \max_{i=1,8} \frac{Z_9 - Z_i}{h\psi(i)} \quad (3)$$

방위도: 방위는 일조시간의 차이에 의한 토층 내 지하수의 위치, 식생의 생육차이로 인해 남향의 급경사지 방위에서 산사태 빈도가 증가하는 연구결과(Committee of soil materials, 1990)가 있다. 즉, 암석은 일반적으로 강도가 약하거나 함수율이 클수록 산사태가 발생하기 쉬운 조건을 가진다. 남쪽으로 경사하는 급경사지는 기온의 일교차가 크고 지속적으로 동결과 융해가 반복되어 다른 방위의 급경사지에 비해 풍화심도가 깊고 높은 함수율을 보여준다. 그러므로 급경사지의 경사 방향은 북측 또는 북서측으로 경사하는 급경사지에 비해 남측 내지 남동측으로 경사하는 급경사지가 동결-융해에 노출이 클 것으로 판단된다. 지형의 경사 방향은 식 (4)으로 계산하며, 이때 방향은 북쪽을 기준으로 시계방향으로 적용한다.

$$\Psi_{FD} = 180 - \arctan\left(\frac{Z_y}{Z_x}\right) + 90\left(\frac{Z_x}{|Z_x|}\right), \quad (4)$$

Z_x, Z_y : 1차 미분 계수

곡률: 곡률반경의 역수인 지표곡률은 지표수의 수렴과 발산에서 중요한 변수가 된다. 곡률은 등고선구배(Plan)곡률과 윤곽구배(Profile)곡률이 있다. 등고선구배 곡률은 등고선을 따르는 면의 변화율로 Kc (식 5)로 나타나는 반면에 윤곽구배곡률은 흐름선 방향으로의 경사기울기의 변화율로서 Kp (식 6)로 나타난다.

$$Kc = \frac{Z_{xx}Z_y^2 - 2Z_{xy}Z_xZ_y + Z_{yy}Z_x^2}{q^{3/2}} \quad (5)$$

$$Kp = \frac{Z_{xx}Z_x^2 - 2Z_{xy}Z_xZ_y + Z_{yy}Z_y^2}{p^{1/2}q^{3/2}} \quad (6)$$

z_{xx}, z_{xy}, z_{yy} : 2차 미분계수, $p = z_x^2 + z_y^2$, $q = p+1$

윤곽구배는 내리막으로 갈수록 경사가 증가하면 음의 값을 가지며, 감소할 경우 양의 값을 가진다. 산 등성리와 같이 흐름이 발산하면 음의 값을 가지고 계곡과 같이 흐름이 수렴하면 양의 값을 가진다. 등고선구배곡률은 물의 흐름이 수렴하는지 발산하는지를 평가하며, 윤곽구배 곡률은 흐름속도나 침전이송 과정에서 변화를 특성화하는데 중요한 잠재 구배율을 평가한다. Mitsova and Hofierka (1993)은 접선구배(Tangential)곡률인 Kt (식 7)를 제안했는데, Kt 는 plan 곡률에다 경사도의 sine 값을 곱한 것으로 작은 경사로 인한 큰 값을 보정해주어 Kt 가 Kc 에 비해 곡률을

Fig. 3. Schematic diagram of the curvature.

잘 표현한다. 곡률의 모식도는 Fig. 3과 같이 표현된다.

$$Kt = \frac{Z_{xx}Z_y^2 - 2Z_{xy}Z_xZ_y + Z_{yy}Z_x^2}{pq^{1/2}} \quad (7)$$

z_{xx} , z_{xy} , z_{yy} : 2차 미분계수, $p = z_x^2 + z_y^2$, $q = p+1$

상부사면기여면적: 상부사면기여면적은 흐름분배 알고리즘을 통해 상부지역으로부터 받을 수 있는 잠재적인 흐름량을 표현한다. 흐름의 경로를 예측하고 상부사면기여면적을 계산하는 방법은 단방향흐름(SFD: Single Flow Direction), 다방향흐름(MFD: Multiple Flow Direction), DEMON (Digital Elevation Model Networks) 알고리즘이 있고, 대상지와 같이 지형 기복이 큰 지역은 DEMON 알고리즘이 실제 지형을 더 명확하게 반영한다.

습윤지수: 습윤지수(포화도)는 국소지역의 포화도로 지형특성을 반영하는 인자로서 Beven and Kirkby (1979)에 의해 제안되었으며 식(8)과 같이 계산된다. 습윤지수(포화도)는 토양의 수분 부족 정도를 표현해주는 인자로서 TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979), THALES (Grayson et al., 1992) 그리고 TOPOG (O'Loughlin, 1986) 등의 분포형 수문 모형의 입력변수로 사용하고 있으며 사면유출모의에도 널리 사용되고 있다.

$$WI = \ln\left(\frac{a}{\tan B}\right) \quad (8)$$

a : 상부사면기여면적/격자크기, $\tan B$: 경사도

선구조 분석

지형과 지질구조와의 연관성이 매우 높게 나타나며, 산지의 빈도가 높은 지형의 경우 지형으로부터 지질, 지질구조선의 유추가 가능하다. 대규모 단층선들은 음영도와 위성 영상에서 판독된 선구조선과 거의 일

치되며, 선구조선을 포함하는 지형에 기초한 원격탐사를 적용 단열계의 분포양상을 분석할 수 있다.

태양 고도각을 50°로 고정하고, 방위각을 N45°W, N45°E, N, E의 4방향으로 작성한 음영도를 이용하여 선구조를 분석하고, 판독된 선구조는 단층, 절리계 및 지질경계선 등의 지질구조를 반영하는 것으로, 수계 등의 영향을 최소화하기 위해서 연장길이 0.1 km 이상의 선구조에 대해 분석한다. 음영도에서 개별적인 선구조를 판별하고, 추출된 선구조를 대상으로 방위각 10° 단위로, 길이를 m 단위까지 측정하여 단위 방향별로 빈도수와 총 길이를 계산한다. 분석 자료는 통계 처리하여 칼데이션 히스토그램과 장미도로 나타내어 선구조의 군집 방향을 도출하여 선구조 분포 특성을 규명하는데 이용하였으며, 선구조의 분포특성을 파악하기 위해 선밀도(Lineament intensity map)도 작성하였다.

지형요소를 이용한 재해위험도

지형적 요소를 이용한 재해위험도를 작성하기 위하여 국립재난안전연구원에서 진행된 전국단위 재해위험도의 작성기법을 적용하였다. Pusan National University (2008)에서 위험도를 작성하기 위해 5개의 지형인자는 각 지형인자로부터 빈도분석을 하여 위험수준 값을 의사 결정한 다음 마스킹 도면(Masking Map)을 만들었으며, 실제 급경사지에서 발생한 재해자료를 이용하여 자료에 대한 신뢰성 분석을 실시하였다. Fig. 3은 재해위험도 작성의 간략 모식도이며, 각 항목별 적용범위는 Table 1과 같고, 이를 이용한 가중치 적용 등급은 Table 2와 같다(Geo-information research group, 2009; Nexgeo, 2010).

백두산 지역의 지형분석 결과

지형 주제도

40 km×40 km 범위의 고도자료로부터 지표수문모형을 통해 지형요소들은 산정하였다. Fig. 5a는 방위도

Table 1. Coverage of terrain factors

Unit	1	2	3	4	5
slope	< 10	10-20	20-30	30-40	40<
aspect	0-22.5 337.5-0	22.5-67.5 292.5-337.5	67.5-112.5 247.5-292.5	112.5-157.5 202.5-247.5	157.5-202.5
tangential curvature	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4<
profile curvature	-0.1-0.1	-0.1-(-)0.2 0.1-0.2	-0.2-(-)0.3 0.2-0.3	-0.3-(-)0.4 0.3-0.4	< -0.4 0.4<
wetness index	< 5	5-8	8-11	11-14	14<
lineament	< 10	10-20	20-30	30-40	40<

Table 2. Rating of terrain factors

Grade		1	2	3	4	5
Score		20-36	37-52	53-68	69-84	85-100
Description		stable	nearly stable	slightly unstable	unstable	highly unstable
slope	Grade	1	2	3	4	5
	Score	4	8	12	16	20
aspect	Grade	1	2	3	4	5
	Score	2	4	6	8	10
tangential curvature	Grade	1	2	3	4	5
	Score	2	4	6	8	10
profile curvature	Grade	1	2	3	4	5
	Score	2	4	6	8	10
wetness index	Grade	1	2	3	4	5
	Score	8	16	24	32	40
lineament	Grade	1	2	3	4	5
	Score	2	4	6	8	10

로 중앙부인 천지를 중심으로 0-360°의 모든 방위의 값들이 분포하여 각기 다른 방향을 가진 경사면들이 천지를 둘러싼 백두산 화산체로 방위분포가 나타나고 있다. Fig. 5b는 경사도로 0-60°의 값의 범위를 보이고 있으며, 조사범위의 93.8%가 20° 이하의 완경사를 보이고 있다. 그러나 백두산 천지의 외륜산을 중심으로 40° 이상의 고경사가 나타나며, 북쪽과 서쪽을 따라서 고경사가 연장되어 있음을 알 수 있다. 이는 과거 발생한 분화에서 화쇄류의 흐름에 의하여 만들어진 급경사지로 생각되며, 이후 백두산의 폭발적 분화가 발생할 경우 이 지점들이 흐름의 통로가

될 것으로 판단된다. Fig. 5c와 Fig. 5d는 지표수의 수렴발산에 영향을 미치는 곡률을 나타낸 것이다. 완경사를 보이는 구간에서의 곡률의 변화는 크지 않지만, 경사도가 높은 지점에서의 곡률은 값의 변화를 보인다. 윤곽구배곡률(Fig. 5c)은 ±0.3 이상의 값을 보이는 경우 흐름 발생 시 흐름의 속도가 급변하는 집수지를 이루게 되는데, 천지 외륜산의 북부와 서부에서 높은 값을 보이고 있다. 접선구배곡률(Fig. 5d)은 0.3 이상의 값을 보일 때 지표수의 수렴이 활발할 것으로 판단되며, 이러한 지형의 형태는 화쇄류 및 화산이류가 발생할 때 주된 흐름의 통로가 될 것으

Fig. 4. Schematic diagram of vulnerability map.

Fig. 5. Terrain factors of Mt. Baekdusan area ((a) aspect, (b) slope, (c) profile curvature, (d) tangential curvature, (e) up-slope contribute area, (f) wetness index).

Fig. 6. Lineament and intensity map of Mt. Baekdusan.

로 판단된다. Fig. 5e의 상부사면기여면적은 흐름분배 알고리즘을 통해 상부지역으로부터 받을 수 있는 잠재적인 흐름량을 나타낸다. Fig. 5f는 습윤지수로 지

표수의 수렴정도를 나타내며, 하천이 직접 발달하는 구간을 제외한 지역에서 선형으로 습윤지수가 높은 지역은 파쇄대와 정의 상관성을 지시하므로 재해 취

Fig. 7. Vulnerability map of Mt. Baekdusan.

약성도의 주요소로 활용된다. 조사지역의 습윤지수는 2-18의 범위내에 포함되며, 78.6%가 11 이하의 값을 보인다. 천지를 중심으로 높은 연장성을 보이며, 높은 습윤지수를 지시하는 구간은 백두산 화산의 폭발적 분화 시 화쇄류, 화산이류 및 화산성 홍수의 주요 통로로 이용될 것으로 판단된다.

조사지역의 방위각을 달리하는 4방향의 음영도에서 추출한 선구조의 개수는 총 380개이며, 총연장은 639.38 km, 평균연장은 1.68 km로 산정되었다. 선구조의 방향, 린도, 연장성을 고려하여 선구조 등급을 산정한 결과 주 방향은 N30-40°E, N20-30°W, N80-90°E, N80-90°W의 순서로 나타났다. 전체적으로 낮은 선밀도를 보이고 있으나 분화구와 분화구 남측으로 비교적 높은 선밀도를 나타내고 있다(Fig. 6).

재해도의 산정

백두산 일대를 대상으로 산정된 경사도, 방위도, 접선구배곡률, 윤곽구배곡률, 상부사면기여면적, 습윤지수, 선밀도의 주제도를 이용하여 Table 1과 Table 2의 산정방법에 의해 재해 취약도 점수를 계산하고 이를 분류하여 중첩분석을 실시하고, Fig 7과 같은 지형요소에 의한 백두산 지역 재해위험도를 산정하였다. 분석결과 비교적 안정된 1-3등급이 각각 19.48%, 59.80%, 18.37%로 대부분을 차지하며, 위험도가 높은 4-5등급은 2.36%에 불과한 것으로 나타났다. 지형요소에 의한 재해위험이 상대적으로 높은 4-5등급

을 보이는 지점은 주로 남쪽 내지 남서쪽에 집중되어 있는 것으로 분석되었다.

결론

본 연구는 최근 진행되고 있는 백두산 관련 논문들의 대부분이 분화전조현상 및 화산성 재해로부터 발생될 수 있는 피해에 관련된 내용에 집중되고 있으나, 산악지역의 특성상 화산에 의한 2차적인 붕괴 발생을 제외하더라도 발생될 수 있는 재해가능성이 높다 할 수 있다. 1차적으로 지형요소만을 고려한 것은 국내와 달리 지리적 위치상 중국과 북한의 접경 지역에 위치하고 있으며, 이에 관련된 재해자료가 확보가 어려우며, 사면 붕괴 시 고려되어야 할 다른 요소들에 대한 정보 또한 전무한 실정이다. 이로 인해 가장 단순한 지형고도자료로부터 취득할 수 있는 다양한 인자를 활용하여 재해발생 가능성을 평가하는 것이 가장 손쉬운 접근방법이라 할 수 있다.

본 연구에서 백두산 일대를 대상으로 지형인자만을 들에 대한 공간정보를 추출하여 주제도를 구축하였으며, 지형자료의 중첩분석을 통해 백두산 지역의 취약도 작성을 함으로써 향후 백두산 관련 기초자료로 활용하고자 한다. 백두산 지역 재해위험지역의 도출을 위한 지형요소별 주제도 중첩분석 결과, 지형요소에 의한 재해위험이 상대적으로 높은 4-5등급을 보이는 지점은 주로 남쪽 내지 남서쪽에 집중되어 있는

것으로 분석되었다.

향후 연구에서는 지형요소 뿐만 아니라 지질 및 식생에 관련된 자료를 추가로 입수함으로써 백두산의 재해위험도를 작성할 필요가 있으며, 이를 위해서는 백두산에 관련된 중국 측 연구진과의 다양한 학술적 교류가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 기상청 기상기술개발관리단의 지진기술 개발사업(CATER 2006-5074)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Beven, K.J. and Kirkby, M.J., 1979, A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 43-69.
- Choi S.H., Oh C.H., and Goetz H.J., 2013, Three-dimensional density modeling of the EGM2008 gravity field over the Mount Paektu volcanic area. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-17.
- Committee of Soil Materials, 1990, Method of slope stability, Changwoo Publisher, Seoul, Korea. 322 p. (in Korean)
- Costa-Cabral, M. and Burges S.T., 1994, Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30, 1681-1692.
- Geo-information research group, 2009, Real-time Rainfall data analysis and visualization module development of the steep slope analysis system, National Disaster Management Institute, NIDP-PR-2009-07-02, 310 p. (In Korean)
- Grayson, R.B., Moore, I.D., and McMahon, T.A., 1992, Physically based hydrologic modeling: 1. A terrain-based model for investigative purposes, *Water Resources Research*, 28, 2639-2658.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2011, A study on the optimum monitoring techniques and the correlation between eruption phenomena and precursor of the volcano. Report of CATER-2011-5307, 193 p.
- Lee, D.S., Choi, S.C., Oh, C.W., Seo, M.H., and Ryu, I.C., 2013, The study on the Possibility of using satellite in monitoring precursor of magma activity in the Baegdusan volcano. *Journal of Petrological Society of Korea*, 22, 35-47. (in Korean)
- Machida, H., Arai, F., and Moriwaki, H., 1981, Two Korean tephros, Holocene markers in the Sea of Japan and the Japan islands. *Kagaku*, 51, 562-569.
- Mitasova, H. and Hofierka, J., 1993, Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25, 657-669.
- Neri, A., Aspinall, W.P., Cioni, R., Baxter, P.J., Zuccaro, G., Andronico, D., Barsotti, S., Cple, P.D., Esposti Ongaro, T., Hincks, T.K., Macedonio, G., Papale, P., Rosi, M., Santacroce, R., and Woo, G., 2008, Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 397-415.
- Nexgeo, 2010, Improvement of disaster warning system for steep slope, National Disaster Management Institute, NIDP-PR-2010-01-02, 304 p. (In Korean)
- O'Loughlin, E.M., 1986, Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, *Water Resources Research*, 22, 794-804.
- Park, K. and Lim, K.M., 2010, Geochemistry of the Mt. Paektu volcano and surrounding area in the historical period. (eds.), Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, 41, 113-122. (In Japanese)
- Kim, S.H., Park, J.H., Kim, S.W., Yun, U.S., Jung, E.J., Park, S.W., Kim, Y.H., Lee, J.M., Dong, S.H., Jin, S.W., Song, H.M., Jung, J.K., Koh, T.Y., Choi, E.K., and Kim, M.G., 2008, A study on the steep slope information compilation and establishment of an analysis system, National Disaster Management Institute, 2008-08-02, 274 p. (In Korean)
- Simkin T. and Siebert L., 1994, *Volcanoes of the World*, 2nd edition. Geoscience Press in association with the Smithsonian Institution Global Volcanism Program, Tucson, AZ, 368 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)
- Un, Y.G., Ju, U.O., Kim, M.S., Ri, G.S., Ri, K.N., Hammonds, J., Oppenheimer, C., Whaler, K., Dawes, G., and Iacovino, K., 2013, The Mt. Paektu geoscientific experiment. *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) 2013 Scientific Assembly*, Kagoshima, Japan, 831 p.
- Xu, J., Liu G., Wu, J., Ming, Y., Wang, Q., Cui, D., Shangguan 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*, 39, 1-7.
- 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*, 29, 291-307.
- Yun, S.H. and Cui Z.X., 1996, Historical eruption records on the Cheonji caldera volcano in the Mt. Paektu, The

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, 20, 243-250.

Yun, S.H., Lee, J.H., Cha, J.S., Jung, H.Y., and Son, J.Y., 2012, Surface Deformation and Behavior of Magma Activity Using EDM, The Korean Earth Science Society, 35-41. (In Korean)

2013년 9월 23일 접수
2013년 10월 8일 수정원고 접수
2013년 10월 22일 채택