콜롬비아 중소도시의 토사재해 취약성분석 연구 I : 물리적 취약성을 중심으로

Analysis of Landslide Vulnerabilities in Small and Medium-Sized Cities of Colombia I : With Focus on Physical Vulnerability

이정민* · 이윤상** · 김윤태*** · 이지성****

Lee, Jungmin* , Lee, Yunsang** , Kim, Yuntae*** , and Lee, Jisung****

Abstract

Colombia has experienced many problems in its urban areas due to increase in population in these areas. In particular, because of recurring slope disasters in urban areas, it has become necessary for the Colombian government to analyze these hazards. In this study, we selected a test bed with a high-potential source area in the small and medium city and conducted the physical vulnerability assessment of the test bed. First, we collected and analyzed the causal factors and landslide inventory. Using the landslide inventory and spatial information database, we performed a susceptibility assessment to identify high-potential landslide source areas. Next, we defined the parameters (travel angle, maximum velocity, etc.) for the Flow-R model analysis, which we used to calculate the propagation zone of debris flow. For the vulnerability assessment, we used road sections to define the boundary zones. Finally, we developed and evaluated the physical vulnerability map of Soacha using the propagation zones of debris flow and the boundary zones. The physical vulnerability assessment technique developed through this study will provide useful information for future urban planning and disaster prevention in Colombia.

Key words : Landslide, Physical Vulnerability, Spatial Information, Flow Analysis

요 지

콜롬비아는 도시화로 도시인구가 증가하는 상황에서 도심지에 많은 문제점들이 발생하고 있다. 특히 토사재해 피해가 지속적으로 발생하고 있어 콜롬비아 정부차원에서 도심 내 토사재해 위험지역 분석의 필요성이 크게 대두되고 있다. 본 연구에서는 콜롬비아 중소도시 중 토사재해 발생 잠재 위험원이 큰 지역을 선정하고, 연구대상지역 실정에 맞는 토사재해 물리적 취약성 평가를 수행하였다. 이를 위해 우선 콜롬비아 Soacha 지역의 토사재해 발생이력 및 영향인자에 대한 공간정보 DB를 구축하고 분석하였다. 토사재해 및 공간정보 DB를 활용하여 토사재해 잠재발생원 식별을 위한 민감도 평가를 수행하였고, 토사재해 잠재발생원이 높은 지역을 추출하였다. 그리고 토사재해 유동해석을 위한 매개변수(이동각, 최대속도)를 산정하고 Flow-R을 활용한 토석류 유동해석을 통해 토사재해 영향범위를 산정하였다. 또한 토사재해 영향범위에 따른 취약성 평가를 위해 Soacha 지역의 도로를 활용하여 경계구역을 설정하였다. 토사재해 영향범위 및 경계구역을 활용하여 최종적으로 Soacha지역에 대한 토사재해 물리적 취약성 지도를 개발 및 평가를 수행하였다.

핵심용어 : 토사재해, 물리적 취약성, 공간정보, 유동해석

*교신저자, 정회원, 토지주택연구원 건설기술연구실 수석연구원(Tel: +82-42-866-8468, Fax: +82-42-866-8431, E-mail: andrew4502@lh.or.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Construction and Technology Research, Land & Housing Institute

**토지주택연구원 국토지역연구실 연구위원

Senior Researcher, Department of National Territorial and Regional Research, Land & Housing Institute

***부경대학교, 해양공학과 교수

Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

****부경대학교, 해양공학과 전임연구원

Associate Researcher, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

콜롬비아는 대부분의 도시가 더운 저지대를 피해서 산간 지역의 분지와 능선을 따라 발달하고 있어 경사진 시가지를 형성하고 있다. 최근에는 도시화로 도시인구가 증가하는 상황에서 도심지에 많은 문제점들이 발생하고 있다. 특히 토지이용관리가 체계적으로 이루어지지 않아 산사태 우려가 있는 산악지역에 무허가 건축물이 난립되어 있다. 이러한 주택들은 열대성 기후로 인한 집중호우로 토사유출, 암반노출 및 붕괴로 인한 토사재해의 위험에 노출되어 있는 실정이다. 대표적인 예로 2017년 4월 1일 콜롬비아 모코아 일대에 시간당 130 mm의 폭우로 인해 모코아 시 40개 구역 중 17개 구역에 산사태 발생으로 사망자만 300명이 넘는 대규모 재해가 발생하는 등 토사재해 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 이에 따라 콜롬비아 정부차원에서 도심 내 토사재해 위험지역 분석 및 평가의 필요성이 크게 대두되고 있다.

본 연구의 목적은 콜롬비아 중소도시의 토사재해 취약성 평가모델 개발하고 취약성 지도를 제작하고 검증하여 중소도시의 재해관련 도시정책에 참고자료로 활용이 가능하도록 하는 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 콜롬비아 중소도시의 취약성 평가를 위해 재해위험성과 사회적 중요성을 고려하여 테스트베드를 선정하였다. 그리고 토사재해 물리적 취약성 평가를 위해 연구 대상지역의 공간정보 DB 구축(지형·지질·수문·지반·임상 등) 및 분석하여 콜롬비아 중소도시의 취약성 평가모델을 개발하였다. 이와 같은 공간정보 DB 및 평가모델을 활용하여 물리적 취약성 평가 및 지도 제작을 수행하였다.

2. 연구동향 및 기존 연구사례

취약성(vulnerability)은 일반적으로 위험 영역 내에 존재하는 위험요소(element at risk)의 손실 또는 손상정도를 의미하며, 0에서 1사이의 정량화된 값으로 표현된다(Fell et al., 2005). 0은 손실 없음(no loss)을 의미하며, 1은 완전 손실(total loss)이 발생한 경우를 의미한다(Kang and Kim, 2017). van Westen et al. (2011)은 리스크를 재해(Hazard)에 대한 시간적 확률, 취약성, 위험요소에 대한 금액의 곱으로 정의하였다. 취약성은 일반적으로 4가지의 형태로 분류된다. 물리적 취약성(physical vulnerability)은 건물의 물리적 영향 및 범위를 의미하며, 자연현상(토사재해, 홍수, 화산 등)의 발생으로부터 주어진 크기에 대한 위험요소의 손상정도를 나타낸다. 경제적 취약성(economy vulnerability)은 경제자산에 대한 잠재적인 위험 즉, 사업 중단과 빈곤 그리고 실직 증가와 같은 2차적인 효과 등과 같은 경제 분야의 취약성으로 표현된

다. 사회적 취약성(social vulnerability)은 여성, 장애인, 어린이, 노약자 등과 같은 취약계층에 대한 잠재적인 영향을 나타내며, 환경적 취약성(environmental vulnerability)은 환경에 대한 잠재적인 영향으로 표현된다.

토사재해로 인한 취약성 평가는 토석류 유발인자에 대한 물리적 특성(높이, 속도, 충격압 등)과 건물손상 정도에 대한 정보를 담고 있는 취약함수를 통해 평가한다. Fuchs et al. (2007)은 1997년 8월 16일 오스트리아의 알프스에서 발생한 토석류 자료로부터 경험적 강도와 취약성 관계를 산출하였다. Haugen and Kaynia (2008)은 Hazus 손상 상태 확률을 이용하여 토석류의 충격에 대한 구조 취약성을 평가하기 위한 모델을 제안하였다. Quan Luna et al. (2011)은 토사재해 지역에 대한 수치해석을 활용한 역해석을 통해 다양한 토사재해 유발인자와 건물의 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 개발하였다. 이들 연구의 대부분은 단일지역의 토사재해 재해에 대한 강도와 건물 손상에 대한 관계에 초점을 맞추고 있다. 또한 국외의 경우 산사태 취약성 및 위험평가 등은 국가 및 방재기관에서 전문적으로 관리되고 있으나, 토석류와 관련된 물리적 취약성 평가는 실용화를 위해 여전히 진행중이다.

3. 공간정보 구축

3.1 연구 대상지역

연구 대상지역인 Soacha지역은 Cundinamarca의 지방자치단체에 속하며, 콜롬비아 수도인 Bogota 지역의 남쪽에 위치하며($4^{\circ}22'45''N-74^{\circ}19'8''W$, $4^{\circ}38'4''N-74^{\circ}11'0''W$) 187.3 km^2 의 면적으로 산지로 둘러싸인 도시이다(Fig. 1). Soacha의 연평균 기온은 $13.5^{\circ}C$ 이고 강수량이 높은 편이며, 건기 시에도 많은 강우가 발생하는 지역이다. 일반적으로 연평균 강수량은 653 mm 이고 우기 시와 건기 시 최고 강수량 차이는 76 mm 를 보인다. Soacha는 14개의 지방구역과 1개의 도심지로 구성되어 있고, 도심지는 6개의 구역으로 분류된다. 2015년

Fig. 1. Location of Soacha

자료에 의하면 Soacha 전체의 인구는 약 489,000명이고, 점차적으로 인구가 증가하고 있으며, 2050년에는 약 1,800,000명으로 증가할 것으로 예상하고 있다. 현재 Soacha 도심지 및 지방의 산지 지역에는 무허가 주택이 증가하고 있는 추세이다. 또한 도심지 인근 폐광산 지역으로 인해 토사재해 취약성이 크게 증가되고 있는 실정이다.

3.2 연구지역 토사재해 DB 구축 및 사례분석

토사재해 발생 지점은 민감도 지도를 만들기 위한 핵심적인 요소이며(Einstein, 1988; Soeters and van Westen, 1996), 추후 토사재해 발생을 예측할 수 있는 중요한 요소이다(Guzzetti et al., 1999). 본 연구에서는 토사재해 DB 구축을 위해 콜롬비아 국가계획부(Department of National Planning), 보고서, 구글 위성자료 그리고 현장 답사를 통해 구축하였다. 총 184개의 토사재해 DB가 구축되었으며, Fig. 2(a)와 같다.

현장 답사를 통한 역학적 분석을 통해 총 6가지 토사재해로 분류하였다(complex, fall, flow, translation, rotational and reactivated landslides). 이 중 대부분 폐광산 지역 인근에서 발생한 fall이 43%를 차지하고, flow (24%), rotational (13%), reactivation (10%), complex (6%) 그리고 translation (4%)로 분류되었다. 토사재해 민감도 지도 개발을 위해 Fig. 2(b)와 같이 토사재해 입력자료(training data)는 70%를 이용하였고, 검증자료(validation data)는 30%를 활용하였다.

Fig. 2. a) Landslide DB, (b) training data and validation data

Soacha 도심지의 대부분의 급경사지는 폐광산 주변에 분포하고 있다. 또한 인구의 증가로 인해 폐광산 주변의 인가는 높은 취약성을 보인다. Fig. 3은 Soacha 도심지 폐광산 지역의 토사재해 발생 전경을 보여준다. 이와 같이 많은 토사재해가 폐광산 주변에서 발생하고 있는 상황이며, 주변 인가에 높은 취약성을 보이고 있다.

Fig. 3. Landslide of Soacha

3.3 공간정보 DB 구축

본 연구에서는 Soacha 지역의 토사재해 민감도 지도 개발을 위해 총 13개의 토사재해 유발 영향인자(elevation, slope, internal relief, TPI, TRI, plan curvature, profile curvature, drainage proximity, SPI, STI, TWI, geology and lineament proximity)를 산정하였고, 토사재해 DB와의 관계를 분석하였다.

일반적으로 수치표고자료(DEM)은 토사재해 영향인자 분석 시 필수적으로 사용되며, 높은 고도를 가진 지형은 잠재발생에너지원을 가짐으로 인해 토사재해 발생확률이 높다(Pachauri and Pant, 1992; Ercanoglu and Gokceoglu, 2004). JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency)를 통해 12.5 m의 PARSAR DEM을 확보하여 공간 DB 수집 시 활용하였다. Fig. 4(a)를 통해 DEM은 2057 m부터 3799 m의 범위를 가진다. 사면경사(Slope)는 토사재해 발생 영향인자 중 가장 큰 핵심인자로 분류된다. Fig. 4(b)를 통해 본 연구지역 Slope는 0에서 78.9°의 범위를 가진다. 그리고 Fig. 4(c)를 통해 IR은 0에서 160 m의 범위를 가진다.

Fig. 4. Topographic Factors; (a) elevation, (b) slope, (c) internal relief, (d) TPI, (e) TRI, (f) plan curvature, (g) profile curvature

TPI는 임의의 반경 내에서 중심점과 주변의 평균 고도와의

차이를 나타낸다(Guisan et al., 1999; Gallant and Wilson, 2000). TPI가 양의 값을 가지면 중심점의 고도가 주변의 평균 고도보다 높은 것을 나타내고, 음의 값을 가지면 그 반대이다. 본 연구지역의 TPI의 범위는 -55.6에서 -116.9 m를 나타낸다(Fig. 4(d)). TRI는 배수에 영향을 주는 지형학적 이질성에 대한 정량적 수치를 나타내고(Riley et al., 1999), 범위는 0에서 41.8의 범위를 나타낸다(Fig. 4(e)).

평면 곡률(plan curvature)은 수평면에서 측정 한 지형의 각도 변화율을 나타낸다. 음의 값은 물의 흐름의 발산을 나타내고, 양의 값은 수렴을 나타낸다(Fig. 4(f)). Profile curvature는 경사의 변화율을 나타낸다. 음의 값은 볼록한 형태의 사면으로 물의 흐름이 가속되고, 양의 값은 오목한 형태로 물의 흐름이 느려진다(Fig. 4(g)).

배수거리(Drainage proximity), SPI, STI 그리고 TWI는 산사태 민감도에 중요한 수문학적 요소이다(Gökceoglu and Aksoy, 1996). 배수는 사면의 침식을 유발하여 안정성에 영향을 줄 수 있다. 본 연구지역의 배수거리는 0에서 654 m의 범위를 가진다(Fig. 5(a)). SPI는 하천강도지수로 물의 흐름에 따른 침식력을 나타내고 경사 클수록 큰 값을 가진다(Fig. 5(b)). STI는 침식과 퇴적의 과정을 나타내며, specific catchment area와 경사도의 비선형 방정식으로 얻어진다(Fig. 5(c)). TWI는 경사도와 관계로 정의되며, 값이 클수록 포화에 가까운 지역으로 배수가 잘 되지 않는다는 것을 의미한다(Fig. 5(d)).

Fig. 5. Hydrological Factor; (a) drainage proximity, (b) SPI, (c) STI, (d) TWI

4. 물리적 취약성 평가

4.1 물리적 취약성 평가 상세흐름도

본 연구에서는 Soacha 지역의 물리적 취약성 평가를 위해 토사재해 잠재 발생 위험원이 큰 지역을 선정하여 콜롬비아 실정에 맞는 토사재해 영향지역을 도출하였다. 도출된 토사재해 영향지역을 이용하여 토사재해 물리적 취약성 평가를 수행하였다.

Fig. 6은 물리적 취약성 평가를 위한 흐름도를 나타낸다. 우선 첫 번째로 대상 지역의 위성영상 및 보고서 자료를 통해 GIS 정보 및 토사재해 발생이력자료를 구축하였다. 그리고 토사재해 영향인자(지형·수문·지질)를 구축하고 통계적 기법을 통해 토사재해 민감도(Susceptibility) 지도를 제작하였다. 그리고 두 번째로 민감도 지도를 기반으로 토사재해 잠재 발생 위험원이 큰 영역을 추출하고, Flow-R 프로그램을 활용하여 토사재해 영향 범위 분석을 수행한다. 토사재해 영향범위와 대상 지역의 건물의 토사재해로 인한 충격압을 통해 취약지수를 산정하고, 토사재해 취약성 평가를 수행하였다. 최종적으로 이와 같은 흐름도를 통해 토사재해 물리적 취약성 지도를 제작할 수 있다.

Fig. 6. Study Flow Chart for Vulnerability Assessment

4.2 토사재해 민감도 지도 개발

토사재해 영향 범위 분석을 위해 토사재해 잠재 발생 위험원이 큰 영역을 추출하기 위해서는 토사재해 민감도 지도가 필수적으로 요구된다. Fig. 7은 본 연구에서 토사재해 민감도 지도 제작을 위한 흐름도를 나타낸다. 우선 콜롬비아 국가계획부 토사재해 DB, 보고서 그리고 위성자료를 통해 토사재해 발생이력자료를 구축하였다. 또한 지형·수문·지질 등 토사재해 발생에 영향을 줄 수 있는 영향인자를 도출하였다. 그리고 통계적 방법인 로지스틱 회귀분석(logistic regression)

을 통해 토사재해 영향인자와 70%의 토사재해 입력자료를 통해 토사재해 민감도 지도를 개발하였다. 끝으로 남은 30%의 토사재해 검증자료를 이용하여 개발된 토사재해 민감도 지도 검증을 수행하였다.

Fig. 7. Procedure to Make Landslide Susceptibility Map using LR

로지스틱 회귀분석은 토사재해와 관련된 영향인자들을 활용하여 추후 발생 가능한 토사재해를 예측하는 통계적 방법이다. 토사재해 발생여부를 종속변수로 정의하고, 토사재해 발생에 영향을 미치는 영향인자들을 독립변수로 분류한다. 이와 같은 로지스틱 회귀분석은 다양한 독립변수들을 고려하여 토사재해 발생을 확률적으로 산정할 수 있다. 일반적으로 로지스틱 회귀분석은 아래의 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

여기서, p 는 토사재해 발생 확률을 나타내며 범위는 0부터 1까지를 가진다. z 는 Eq. (2)와 같이 다양한 독립변수를 고려하여 산정된다.

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

여기서, b 는 상수값을 나타내고, $x_i(i=0,1,2,\dots,n)$ 는 독립변수를 나타낸다.

토사재해 민감도 지도 개발을 위해 영향인자의 유의성을 검증하기 위해 다중공선성(multi-collinearity) 분석을 수행한다. 일반적으로 다중공선성 분석을 통해 분산팽창계수(variance inflation, VIF)와 공차(tolerance, TOL)를 산정한다(Eqs. 3, 4).

$$TOL = 1 - R^2 \quad (3)$$

$$VIF = 1/TOL \quad (4)$$

Menard (1995)와 O'Brien (2007)을 통해 분산팽창계수가 5보다 크거나 같고, 공차가 0.2보다 작으면 데이터 분석 시 부정적 영향을 미친다고 제안하였다. Table 1은 독립변수의 다중공선성 분석 결과를 나타내며, slope, IR, TRI 그리고 STI는 상관관계가 낮음으로 도출된다.

Table 1. Analysis Result of Multi-collinearity

Causative factors	R ²	TOL	VIF
Elevation	0.095	0.91	1.1
Slope	0.978	0.02	45.6
Internal relief	0.974	0.03	38.3
TPI	0.550	0.45	2.2
TRI	0.983	0.02	59.9
Plan curvature	0.432	0.57	1.8
Profile curvature	0.486	0.51	1.9
Drainage proximity	0.172	0.83	1.2
SPI	0.673	0.33	3.1
STI	0.912	0.09	11.3
TWI	0.707	0.29	3.4
Geology	0.260	0.74	1.4
Lineament proximity	0.468	0.53	1.9

그러나 일반적으로 slope의 경우 토사재해 민감도 분석 시 큰 영향을 미친다(Blackwelder, 1928; Aleotti and Chowdhury, 1999; Korup et al., 2006; Evans et al., 2007; Guthrie et al., 2008). 그러므로 토사재해 민감도 지도 제작 시 elevation, slope, TPI, plan curvature, profile curvature, drainage proximity, SPI, TWI, geology 그리고 lineament proximity와 같이 총 10개의 영향인자를 활용하였다. Table 2는 독립변수의 상수인자를 Eqs. (3)과 (4)를 활용하여 Soacha 지역 토사재해 민감도 지도를 제작한다.

Table 2. Coefficient of Independent Variable

	Causative Factors	Coefficient (LR)
Topographic	Elevation	-0.003
	Slope	-0.65
	TPI	-0.08
	Plan curvature	0.06
	Profile curvature	0.65
Hydrologic	Drainage proximity	0.0045
	SPI	7.15
	TWI	-6.85
Geologic	Ql-p	0
	Q-af	2.07
	B6k6stm	-14.87
	Q-gl	-12.31
	Q-al	4.38
	K6El-stm	5.32
	Nl-sc	5.61
	Lineament proximity	0.0006

Fig. 8은 산사태 민감도 지도 제작 흐름도를 통해 제작된 콜롬비아 Soacha 지역의 토사재해 민감도 지도를 나타낸다. 여기서 토사재해 발생 위험원이 큰 지역(High)을 토사재해 영향범위 분석 시 활용하였다.

Fig. 8. Landslide Susceptibility Map of Soacha District

4.3 토사재해 유동해석을 위한 매개변수 산정

토사재해 취약성 혹은 리스크 평가를 위해서는 토석류 거동 해석이 필수적으로 수반되어야 한다. 토석류 유동해석을 위해 다양한 모델들이 존재하지만 극히 일부 모델만이 광역지역에 적용될 수 있다.

Flow-R은 많은 연구자들이 토석류에 대한 연구를 수행하기 위해 사용하고 있으며, 특히 광역적 범위에서의 토석류 흐름을 연구하는데 적합한 모델이라 할 수 있다. Flow-R 해석을 통해 토석류 최대속도와 이동각 변화에 따른 확산면적과 최대 운동에너지의 변화를 분석할 수 있다. 최대속도가 증가할수록 확산면적과 최대 운동에너지는 증가하지만, 특정 최대속도 값 이상에서는 수렴하는 경향을 나타낸다. 확산범위가 수렴될 때의 최대속도를 한계 최대속도(critical maximum velocity)라고 정의한다. 이는 최대속도가 증가하더라도 확산범위가 수렴하는 이유는 입력된 이동각 이상으로 토석류가 확산되지 않기 때문이다. 일반적으로 이동각이 증가함에 따라 토석류 확산면적은 감소하며, 최대 운동에너지는 한계 이동각 이하에서는 일정한 값을 나타낸다.

토석류 거동 해석 시 필요한 최적 입력 매개변수(최대속도, 이동각)를 파악하기 위해 콜롬비아지역에서 발생한 총 7개의 토석류 재해지역에서 추출된 확산범위를 대상으로 역해석을 수행하였다(Fig. 9).

Fig. 9. Back Analysis by Debris Flow Data

Fig. 10은 총 7개의 토석류 자료를 활용하여 역해석을 통해 산정된 이동각과 최대속도를 나타내며, 이동각은 약 8°에서 18°의 범위를 가지며 평균값은 약 14°로 분석되었다. 그리고 최대속도는 약 9 m/s에서 15 m/s의 범위를 가지며 평균값은 약 11 m/s로 분석되었다. 또한 토석류 매개변수를 기존 문헌값과 비교하였을 때 유사한 범위 내에 있다. 이와 같이 역해석을 통해 산정된 매개변수인 이동각과 최대속도의 평균값을 이용하여 Soacha 지역의 광역 토석류 해석 시 활용하였다. 또한 이를 통해 토사재해 취약성 평가를 위한 토석류 토석류 영향범위를 산정하였다.

Fig. 10. Comparison of Travel Angle and Max. Velocity

토석류로 인한 확산범위를 산정하기 위해서는 사전에 토사재해 잠재발생원에 대한 식별이 필수적으로 요구된다. 일반적으로 토사재해 잠재발생원은 민감도 지도에서 토사재해 발생확률이 높은 지역을 통해 산정된다.

Fig. 11은 Soacha 지역 토사재해 민감도 지역의 잠재발생원을 이용하여 토석류 유동해석에 대한 결과를 보여준다. Fig. 11(a)는 토사재해 잠재발생원과 역해석을 통해 산정된 매개변수 값을 이용한 토석류 확산범위에 대한 결과이다. 일반적으로 토사재해 취약성 평가를 위해서는 적절한 행정경계(ex. 집계구) 단위를 이용하여 수행해야 한다. 그러나 본 연구지역의 행정경계구역에 대한 데이터를 획득하기 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 위성자료를 통해 도로 교차로(road intersection)를 기준으로 경계구역을 설정하였고, 이는 총 14102개의 경계구역으로 구분된다. Fig. 11(b)는 토석류 확산범위를 이용하여 취약지역을 식별하기 위한 영향범위를 산정한 결과이다. 총 602개의 경계구역이 토석류 영향범위에 포함되며 면적은 약 134.6 km²로 산정되었다. 이와 같은 토석류 확산범위 및 경계구역 건물의 면적비를 통해 토사재해 영향범위를 산정하고 토사재해 취약성 평가를 수행할 수 있다.

Fig. 11. Spatial Distribution of a) runout propagation and b) affected unit areas

4.4 토사재해 물리적 취약성 평가 및 지도 작성

토사재해에 대한 인명과 재산 피해 평가를 위해서는 토사재해로 인한 건물의 취약성 평가가 요구된다. 본 연구에서는 토사재해 물리적 취약성 평가 기법을 통해 콜롬비아 지역을 대상으로 토사재해로 인한 취약성 평가를 수행하였다. Fig. 12는 콜롬비아 소아차 지역의 토사재해 물리적 취약성 지도를 나타낸다. Fig. 12(a)는 토사재해 영향범위의 면적과 건물면적의 비율을 통해 정규화된 취약지수(0에서 1까지)를 나타낸다. Fig. 12(b)는 4단계 취약성(Low, Moderate, Extensive, Complete)으로 분류된다. 4단계 취약성 분류를 위해 LSI 산정기법과 유사한 방법을 적용하였고, 70%의 건물의 토사재해 영향범위에 속하는 부분을 Complete로 정의하였다.

Fig. 12. Vulnerability maps: a) Normalized ID between 0 and 1, and b) classified vulnerability map

Table 3을 통해 각 취약성 등급에 따른 건물의 누적 백분율을 알 수 있다. 또한 Soacha지역의 Complete 취약성을 가지는 면적비는 2.33%, Extensive는 14.08%, Moderate는 11.13% 그리고 Low는 72.46%를 가진다.

Table 3. Classification of Vulnerable Zones on the Basis of Building Occurrence

Vulnerability class	% buildings	Range (ID)	Vulnerable area (%)
Low	1%	<0.0012	72.46
Moderate	9%	0.0012-0.0163	11.13
Extensive	20%	0.0163-0.12	14.08
Complete	70%	>0.12	2.33

Fig. 13은 Soacha지역의 행정단위에 따른 취약성을 나타내고 있으며, 도심지에서는 CAZUCA지역이 Complete가 약 50%로 가장 취약한 지역으로 분류되었다. 또한 SAN MATEO 지역이 Complete가 약 10%로 CAZUCA지역 다음으로 가장 취약한 지역으로 분류되었다. 그리고 LA DESPENZA지역은 대부분이 평지지역으로 토사재해 취약성에 가장 안전한 지역으로 분류되었다.

도심지 주변에서는 VILLA NUEVA지역이 EXTENSIVE가 약 70%로 가장 취약한 지역으로 분류되었다. 그리고 SOACHA의 남쪽에 위치한 ROMERAL은 토사재해 취약성이 없는 지역으로 분류되었다. 이는 토사재해에 민감한 지역이 적은 이유뿐만 아니라, 토사재해 영향 범위에 위험요소(건물)가 없기 때문이다.

Fig. 13. Area Wise Spatial Distribution of Vulnerable Area

Fig. 14는 Soacha 도심지에 대한 토사재해 취약성 지도를 나타내며, CAZUCA지역이 토사재해 취약성이 높은 것으로 보인다. 이는 CAZUCA지역에 폐광산이 많이 산재되어 있기 때문이라고 판단된다. 이와 같은 이유로 크고 작은 낙석 및 토사재해가 발생할 우려가 있는 지역이다. 또한 폐광산으로 인해 대부분이 급경사지에 노출되어 있고, 주변에 인가가 산재되어 있으므로 높은 토사재해 취약성을 보인다.

Fig. 14. Vulnerability Maps in Soacha Urban Area

5. 결 론

본 연구에서는 콜롬비아 중소도시 중 토사재해 발생 잠재 위험원이 큰 지역을 선정하고, 연구대상지역 실정에 맞는 토사재해 물리적 취약성 평가를 수행하였다.

(1) 우선 콜롬비아 Soacha 지역의 위성자료 및 보고서

등을 통해 토사재해 발생이력 및 영향인자에 대한 공간정보 DB를 구축하고 분석하였다.

- (2) 토사재해 및 공간정보 DB를 활용하여 토사재해 잠재 발생원 식별을 위한 민감도 평가 및 검증을 수행하였고, 토사재해 잠재발생원이 높은 지역을 추출하였다.
- (3) 그리고 총 7개의 토사재해 DB를 통해 토사재해 유동해석을 위한 매개변수(이동각, 최대속도)를 산정하였고, 이동각은 약 14°, 최대속도는 약 11m/s로 분석되었다. Flow-R을 활용하여 산정된 매개변수를 적용하여 토석류 유동해석을 수행하였고, 이를 기반으로 토사재해 영향범위를 산정하였다.
- (4) 또한 토사재해 영향범위에 따른 취약성 평가를 위해 Soacha지역의 도로를 활용하여 경계구역을 설정하였다. 토사재해 영향범위 및 경계구역을 활용하여 최종적으로 Soacha지역에 대한 토사재해 물리적 취약성 지도를 개발 및 평가를 수행하였고, Soacha지역의 Complete 취약성을 가지는 면적비는 2.33%, Extensive는 14.08%, Moderate는 11.13% 그리고 Low는 72.46%를 가진다.
- (5) 추후 토사재해 발생 및 고해상도의 영향인자 DB를 활용하게 되면 보다 신뢰성 있는 토사재해 민감도 지도가 제작될 것으로 판단된다. 그리고 토석류 유동해석을 위해 매개변수 DB의 추가 및 명확한 행정경계구역을 활용한다면 신뢰성 있는 토사재해 물리적 취약성 지도를 제작 할 수 있을 것으로 판단된다.
- (6) 끝으로 본 연구를 통해 개발된 토사재해 물리적 취약성 평가기법은 추후 콜롬비아 지역의 도시계획 및 방재대책계획 시 유용한 정보로 제공될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 토지주택연구원에서 수행 한 “콜롬비아 토사재해 취약성 평가모델 개발 및 도시정책 활용방안 연구(I)” 연구성과의 일부입니다.

References

- Aleotti, P., and Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 58, No. 1, pp. 21-44.
- Blackwelder, E. (1928). Mudflow as a geologic agent in semiarid mountains. *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 39, No. 2, pp. 465-484.
- Carrara, A., Crosta, G., and Frattini, P. (2008). Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, Vol. 94, pp. 353-378.
- Coussot, P. (1992). *Rheology of debris flows: Study of*

- concentrated dispersions and suspension*. Ph.D. dissertation, Institute National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France. (in French) <http://www.theses.fr/1992INPG0086>
- Einstein, H.H. (1988). Special lecture: Landslide risk assessment procedure. *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*.
- Ercanoglu, M., and Gokceoglu, C. (2004). Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 229-250.
- Evans, S.G., Guthrie, R.H., Roberts, N.J., and Bishop, N.F. (2007). The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: A catastrophic landslide in tropical mountain terrain. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 7, No. 1, pp. 89-101.
- Fuchs, S., Heiss, K., and Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 7, pp. 495-506.
- Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, Vol. 143, No. 1, pp. 107-122.
- Guthrie, R.H., Deadman, P.J., Cabrera, A.R., and Evans, S.G. (2008). Exploring the magnitude-frequency distribution: A cellular automata model for landslides. *Landslides*, Vol. 5, No. 1, pp. 151-159.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, Vol. 31, No. 1-4, pp. 181-216.
- Gökceoglu, C., and Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, Vol. 44, No. 1-4, pp. 147-161.
- Gallant, J.C., and Wilson, J.P. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Retrieved from <http://www.loc.gov/catdir/bios/wiley047/99089635.html>
- Haugen, E.D., and Kaynia, A.M. (2008). Vulnerability of Structures Impacted by Debris Flow. In Chen, Z., Zhang, J.M., Ho, K., Wu, F.Q., and Li, Z.K. (Eds.), *Landslides and Engineered Slopes* (pp. 381-387). London: Taylor & Francis.
- Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Can. Geotech. J.*, Vol. 32, pp 610-623.
- Hussin, H., Chen, L., Ciurean, R., van Westen, C., Reichenbach, P., and Sterlacchini, S. (2014). Analysing changes in landslide risk using multi temporal landslide susceptibility and run-out modeling on a regional scale. *International Conference, Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards*, Padua, Italy, Abstract code: DO3, pp. 1-11.
- Iverson, R.M. (1997). The physics of debris flows. *Rev. Geophys.*, Vol. 35, pp 245-296.
- Jakob, M., Stein, D., and Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Nat. Hazards*, Vol. 60, pp. 241-261.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2017). Parameter analysis of Flow-R model for physical vulnerability assessment of debris flow disaster in regional scale. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 4, pp. 233-245.
- Korup, O., Strom, A.L., and Weidinger, J.T. (2006). Fluvial response to large rock-slope failures: Examples from the Himalayas, the Tien Shan, and the Southern Alps in New Zealand. *Geomorphology*, Vol. 78, No. 1-2, pp. 3-21.
- Menard, S. (1995). *Applied Logistic Regression Analysis*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- O'Brien, R.M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality and Quantity*, Vol. 41, No. 5, pp. 673-690.
- Pachauri, A.K., and Pant, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, Vol. 32, No. 1-2, pp. 81-100.
- Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R., and Glade, T. (2012). Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: Debris-flow event in South Tyrol. *Nat. Hazards*, Vol. 64, pp. 2083-2105.
- Quan Luna, B., Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S., van Asch, T.W.J., and Akbas, S.O. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 11, pp. 2047-2060.
- Riley, S.J., DeGloria, S.D., and Elliot, R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of sciences*, Vol. 5, No. 1-4, pp. 23-27.

- Soeters, R., and van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A.K. Turner, and R.L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 129-177). Washington D.C., USA: National Academy Press.
- Van Westen, C.J., Alkema, D., Damen, M.C.J., Kerle, N., and Kingma, N.C. (2011). *Multi-hazard risk assessment*. United Nations University - ITC School

on Disaster Geo-information Management (UNU-ITC DGIM), Version 2011.

Received	■ August 27, 2018
Revised	■ August 28, 2018
Accepted	■ September 12, 2018