

GIS를 활용한 카르스트 지역의 싱크홀 민감성 분석: 삼척시를 중심으로

안세진 · 성효현

이화여자대학교 사회과교육과

(2017년 12월 4일 접수, 2017년 12월 24일 수정, 2017년 12월 26일 승인)

GIS Based Sinkhole Susceptibility Analysis in Karst Terrain: A Case Study of Samcheok-si

Ahn, Sejin · Sung, Hyo Hyun

Department of Social Studies Education, Ewha Womans University

(Manuscript Received 4 December 2017; Revised 24 December 2017; Accepted 26 December 2017)

Abstract : Sinkholes are key karst landforms that primarily evolve through the dissolution of limestone, and it posing a significant threat to roads, buildings, and other man-made structures. This study aims to analyze the area susceptible to sinkhole development using GIS and to identify potential danger area from sinkholes. Eight sinkhole related factors (slope angle, distance to caves, distance to faults, bedrock lithology, soil depth, drainage class, distance to mines, and distance to traffic routes) were constructed as spatial databases with sinkhole inventory. Based on the spatial database, sinkhole susceptibility maps were produced using nearest neighbor distance and frequency ratio models. The maps were verified with prediction rate curve and area under curve. The result indicates that the nearest neighbor distance and frequency ratio models predicted 95.3% and 94.4% of possible sinkhole locations respectively. Furthermore, to identify potential sinkhole danger area, the susceptibility map was compared with population distribution and land use map. It has been found that very highly susceptible areas are along Osipcheon and southeast southwest part of Hajang-myeon and south part of Gagok-myeon of Samcheok-si. Among those areas, it has been identified that potential sinkhole danger areas are Gyo-dong, Seongnae-dong, Jeongna-dong, Namyang-dong and Dogye-eup. These results can be useful in the aspects of land use planning and hazard prevention and management.

Key Words : karst, sinkhole, GIS, susceptibility, Samcheok-si

주요어 : 카르스트, 싱크홀, GIS, 민감성, 삼척시

I. 서론

카르스트 지역은 석회암과 같은 지하수에 의해 용해될 수 있는 암석을 기반으로 하는 지역이다(Kaufmann,

2007). 이 지역에서 발달하는 가장 대표적인 지형은 돌리네(doline)로도 알려진 싱크홀(sinkhole)이다(Christopherson, 2011). 싱크홀이란 지하수가 오랜 기간 동안 흐르며 석회암을 용해하여 형성된 공동에서 지하

Corresponding Author: Sung, Hyo Hyun, Dept. of Social Studies Education, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul, Korea, hhsung@ewha.ac.kr, (Tel) +82-2-3277-2668 · (Fax) +82-2-3277-2659.

수면이 저하될 시, 공동이 비게 되어 상부 하중을 견디지 못하고 암반 혹은 토양층이 붕괴되거나, 공동으로 토양이 유실되어 지반이 침하되어 생긴 함몰지를 뜻한다(Park *et al.*, 2014). 자연 상태에서의 싱크홀은 자연현상으로 그치나, 인간에게 영향을 줄 경우 싱크홀은 침하 혹은 붕괴현상으로 인해 사회기반시설 및 재산 피해, 나아가 인명 피해를 유발할 수 있으며, 싱크홀 침수 및 지하수의 오염 등의 각종 재해를 유발하는 원인으로도 작용한다(Ministry of Construction and Transportation, 2004). 또한 도시화로 인해 지하수 배수, 광산 배수, 저수지 건설 등이 증가하면서 물에 민감한 가용성 암석인 석회암을 기반으로 하는 카르스트 지역에서는 더 큰 재해가 일어나기 쉽다(Gao *et al.*, 2001). 싱크홀이 형성될 시 침하 혹은 붕괴 뿐만 아니라, 싱크홀 침수, 지하수 오염 등 다양한 재해가 일어날 수 있다.

이러한 싱크홀 재해에 대한 체계적인 예방과 관리를 위해서는 우선적으로 싱크홀이 발생할 가능성이 높은 지역, 즉 싱크홀 민감성이 높은 지역을 파악해야 한다. 카르스트 환경에서의 다양한 자연적·인문적 변화는 싱크홀을 형성하는 프로세스들을 유발 혹은 가속화시킬 수 있기 때문에(Alcántara and Goudie, 2010) 다양한 자연·인문 데이터를 기반으로 한 분석이 필요하다.

민감성 분석의 기본 도구로서 방대한 자료의 공간 분석을 가능하게 하는 지리정보시스템(GIS)을 주로 활용한다(Choi *et al.*, 2004). 특히 GIS를 활용한 싱크홀 민감성 분석 연구에는 최근린 거리 모델, 의사결정나무 기법, AHP, 빈도비 분석, 로지스틱 회귀분석, 인공신경망 등 다양한 방법론이 활용되고 있다. 그중에서도 최근린 거리 모델(Nearest Neighbor Distance Model)은 싱크홀의 발생 위치요소만을 고려하여 싱크홀 민감성을 분석할 수 있기 때문에 가장 간편하게 적용 가능하며, 빈도비 모델(Frequency Ratio Model)의 경우 싱크홀과 영향 요인 사이의 관계를 정량적으로 분석해낼 수 있다는 장점이 있다(Galve *et al.*, 2009).

국내에서는 카르스트 지역의 싱크홀 민감성을 분석하기 위해 많은 연구가 이뤄지고 있으나(Ahn and Kim, 2007; Choi *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2008; Suh *et al.*, 2010), 대부분의 연구가 폐광산 지역을 중심으로 국지적 측면에

서 진행되고 있다. 즉, 보다 넓은 범위에서의 싱크홀 민감성을 분석하는 연구가 부족하며, 이로 인해 지자체 단위에서 재난대비를 포함한 전체적 토지이용계획 수립시 우선순위 지역을 파악하는데 어려움이 있다. 또한 대부분이 싱크홀 민감성 분석 수행에 집중되어 있으며, 장기적인 관점에서 싱크홀이 발생하였을 때 사람들에게 큰 피해를 끼칠 가능성이 있는 지역은 어디인가에 대한 논의까지는 진전되지 않았다는 점에서 한계가 있다. 특정 지역의 싱크홀 민감성이 높을 지라도 인간이 거주하지 않는다면 그 지역은 싱크홀이 발생할 확률이 높을 뿐 실질적인 위험지역은 아닐 수 있기 때문이다. 따라서 카르스트 지역 전반을 대상으로 싱크홀 민감성을 분석하는 것에서 더 나아가 인구분포 및 토지이용 등과 비교분석을 통해 위험지역을 파악하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 삼척시를 대상으로 GIS를 활용하여 카르스트 지역의 싱크홀 민감성을 분석하는 것이며, 이를 토대로 위험 지역을 파악하고자 한다. 연구 방법으로는 여러 민감성 분석 방법론 중에서 상대적으로 간편하게 적용 가능한 최근린 거리 모델과 싱크홀 발생과 요인간의 정량적 분석이 용이한 빈도비 모델을 활용하였다.

구체적인 세부 목표는 다음과 같다. 첫째, 싱크홀 민감성 분석을 위한 싱크홀 발생 위치 및 영향 요인들을 공간 데이터베이스로 구축한다. 둘째, 최근린 거리 모델과 빈도비 모델을 이용하여 싱크홀 민감성 분석을 수행하며, 분석 결과의 예측정확도를 검증하고, 그의 공간적 분포 특성을 분석한다. 셋째, 삼척시 내 싱크홀 민감성의 공간적 분포 특성을 바탕으로 인구분포 및 토지이용과 비교 분석하여 싱크홀 재해 위험 가능성이 높은 지역을 파악한다.

II. 연구 자료 및 방법

카르스트 지역의 싱크홀 민감성을 분석하기 위해서는 연구지역의 싱크홀 위치와 규모에 대한 정보를 기반으로 싱크홀이 발생하는 곳의 지형, 지질, 토양 및 인

문요인 등에 대해 종합적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구 방법은 첫째 싱크홀 및 영향요인 공간데이터베이스 구축 단계, 둘째 GIS를 활용한 싱크홀 민감성 분석 및 검증 단계로 나누어 살펴볼 수 있다.

1. 싱크홀 및 영향요인 공간데이터베이스 구축

1) 싱크홀 발생위치 공간데이터베이스 구축

Waltham *et al.*(2007)에 따르면 싱크홀은 상부 물질과 형성 과정에 따라 용해형, 붕괴형, 덮개암, 침윤형, 탈락형, 매몰형 등으로 분류되는 등, 성인에 따라 다양하게 나타난다. 이들 유형은 서로 다른 요인에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 유형에 따라 나눠 분석하는 것을 추천하나(Gutierrez *et al.*, 2014), 지반공학적 조사가 수반되지 않고는 싱크홀의 유형을 구분하기 어려우며, 여러 프로세스가 결합되어 싱크홀이 형성되는 경우도 많다. 따라서 본 연구에서는 싱크홀의 유형을 나누지 않고 통합하여 분석하였다.

우선 기존의 싱크홀 분포에 대해 연구되어 있는 문헌(Suh, 1996)에서 연구지역 내 분포하는 싱크홀 위치를 디지털화하였다. 또한 현재 삼척지역에 형성된 싱크홀을 추가적으로 파악하기 위해 1:5,000의 수치지형도의 오목지 레이어를 추출하였으며, 정사영상을 바탕으로 추출한 오목지 레이어가 싱크홀인가를 확인하였다. 정사영상으로 싱크홀 확인이 어려운 경우, Collector for ArcGIS 툴을 활용하여 현장답사를 통해 보완하였다.

단, 본 연구방법 중 하나인 최근린 거리 모델을 활용하여 싱크홀 민감성을 분석할 때 본 연구지역 내부에 위치한 싱크홀만을 고려한다면, 삼척시 행정경계 바깥 인근에 위치한 싱크홀들을 누락할 수 있으며 이로 인해 과소 혹은 과대평가된 민감성 분석 결과가 도출될 수 있다(Gao *et al.*, 2005). 이를 방지하기 위해 연구지역인 삼척시 반경 10 km 이내의 싱크홀들도 추가적으로 공간데이터베이스로 구축하였다.

최종적으로 삼척시 내부에 위치하는 187개의 싱크홀과 반경 10 km 내에 위치하는 92개의 싱크홀까지 합하여 총 279개의 싱크홀을 추출하여 공간데이터베이스로 구축하였다.

2) 싱크홀 영향요인 공간데이터베이스 구축

본 연구에서는 싱크홀 영향 요인 선정을 위해 우선적으로 싱크홀 민감성 분석에 관한 선행 연구에서 고려되는 주요 영향 요인들을 분석하였다(Forth *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2001; Kaufmann and Quinif, 2002; Kim, 2006; Choi *et al.*, 2007; Galve *et al.*, 2009; Lim, 2010; Al-Kouri *et al.*, 2013; Taheri *et al.*, 2015). 이후 자료의 취득이 가능한 변수들을 중심으로 싱크홀 영향요인을 선정하였다. 그 결과 사면 경사, 동굴로부터의 거리, 단층으로부터의 거리, 기반암 종류, 유효토심, 배수등급, 광산으로부터의 거리, 교통로로부터의 거리 등 8개의 요인을 선정하였다. 본 연구에 사용된 공간정보 목록은 Table 1과 같다. 본 연구에 사용된 8개 싱크홀 영향요인은 각각의 축척

Table 1. Sinkhole related factors used for susceptibility mapping

Category	Factors	Source	Properties	Scale
Topography	Slope angle	Topographic map (2015), National Geographic Information Institute (NGII)	Continuous	1:5,000
	Distance to caves	Cave map (2001), Korea National Spatial Data Infrastructure Portal	Continuous	1:5,000
Geology	Bedrock lithology	Geologic map, Korea Institute of Geoscience and National Resources	Categorical	1:50,000
	Distance to faults		Continuous	
	Soil depth	Soil map, Rural Development Administration (RDA)	Categorical	1:25,000
Hydrogeology	Soil drainage			
Human activity	Distance to mines	Topographic map (1960~2010), NGII	Continuous	1:5,000
		Topographic map (2015), NGII		
	Distance to traffic routes	Topographic map (2015), NGII	Continuous	1:5,000

을 고려하여 공간분석이 용이하도록 ArcGIS 10.3을 활용하여 10m×10m의 동일한 해상도를 갖는 래스터 자료의 공간 데이터베이스로 구축하였다.

빈도비 분석을 위해서는 구축된 공간 데이터베이스의 영향요인을 값의 범위 혹은 범주(category)에 따라 등급(class)으로 분류해야 한다. 따라서 범주형 값을 가지는 요인인 기반암 종류, 유효토심, 배수등급의 경우 기존의 범주에 따라 분류하였으며, 연속형 값을 가지는 요인인 사면 경사, 동굴로부터의 거리, 단층으로부터의 거리, 광산으로부터의 거리, 교통로로부터의 거리의 경우 ArcGIS 10.3의 등분위(quantile) 방법을 이용하여 8개 단계로 등급화 하였다(Figure 1).

2. GIS를 활용한 싱크홀 민감성 분석 및 검증

구축된 공간데이터베이스를 바탕으로 최근린 거리 모델(Nearest Neighbor Distance Model)과 빈도비 모델(Frequency Ratio Model)을 이용하여 연구지역의 싱크홀 민감성을 분석하였다. 두 개의 모델에 의해 제작된

민감성 지도들은 예측비율곡선(Prediction Rate Curve) 및 곡선하면적(Area Under Curve)을 작성하여 검증하였다. 나아가 두 모델을 통해 도출된 싱크홀 민감성의 공간적 분포 특성을 바탕으로 인구분포 및 토지이용과 비교 분석하여 위험지역을 살펴보았다. 연구 흐름도는 Figure 2와 같다.

1) 최근린 거리 모델

최근린 거리 모델은 기존 싱크홀의 공간적 분포에 근거하여 민감성을 분석하기 위한 방법론으로, 기존 싱크홀이 위치한 지역은 또 다른 싱크홀이 발달하기에 적합한 지역이라는 가정을 기반으로 한다(Gutierrez *et al.*, 2014). 이 모델은 각각의 포인트에서 가장 가까운 싱크홀까지의 거리를 이용하여 싱크홀 민감성 값을 부여하는 방법으로, 본 연구에서는 ArcGIS 10.3에서 제공하는 유클리드 거리(Euclidean Distance) 분석을 이용하였다(Table 2).

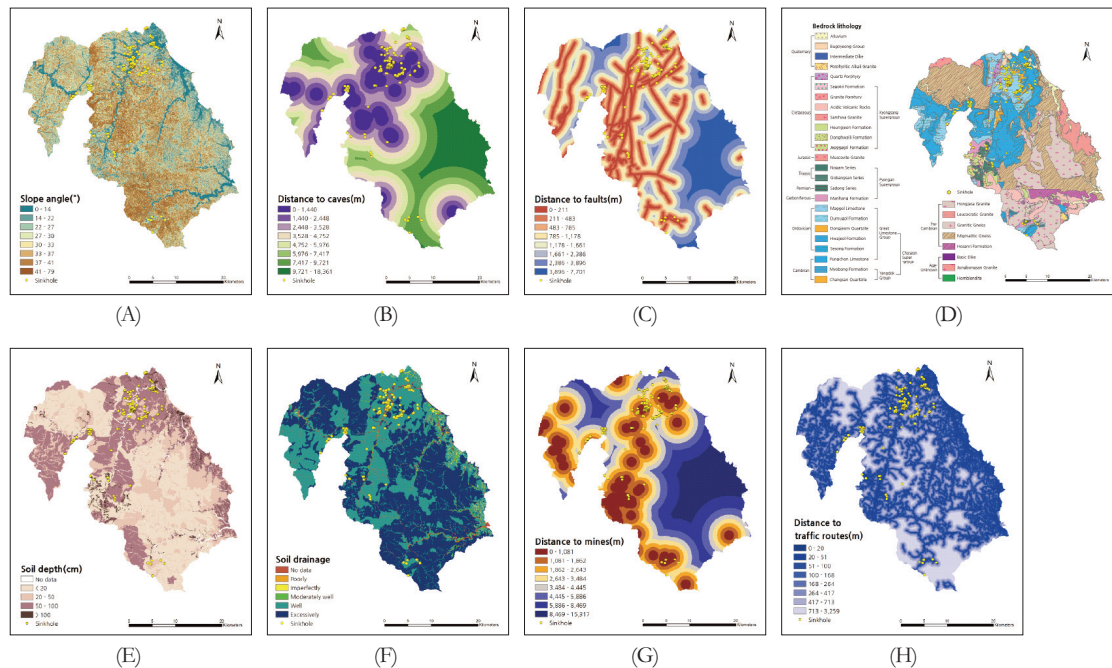


Figure 1. Classified maps of eight factors used for the production of susceptibility model: (A) slope angle; (B) distance to caves; (C) distance to faults; (D) bedrock lithology; (E) soil depth; (F) drainage class; (G) distance to mines; (H) distance to traffic routes

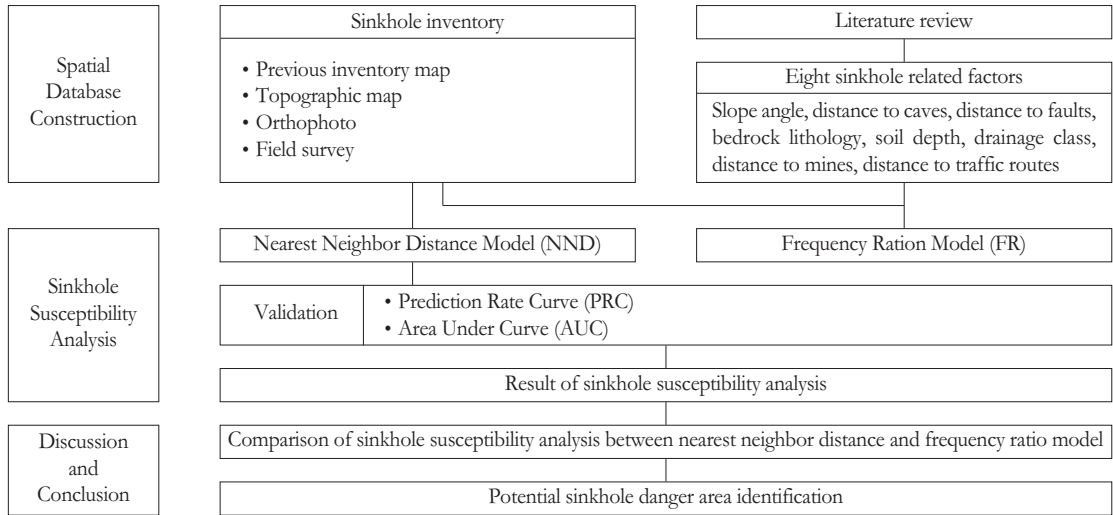
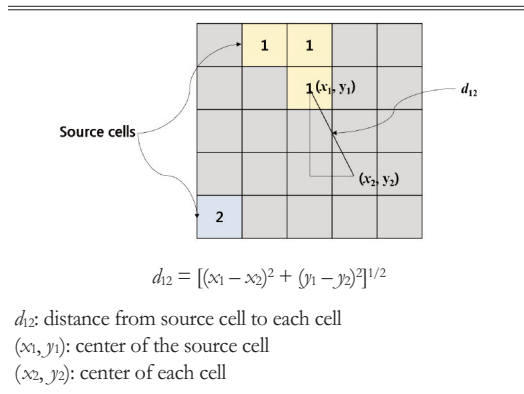


Figure 2. Research flow chart

Table 2. Euclidean Distance



* Euclidean Distance figure modified from ArcGIS for Desktop homepage (<http://desktop.arcgis.com/en/>)

2) 빈도비 모델

빈도비 모델은 확률통계적 기법 중 하나로, 기존 발생한 사건(본 연구에서는 싱크홀)과 이에 영향을 미치는 요인들의 상관관계를 정량적으로 평가하고, 미래에 발생할 사건을 예측하는 방법론이다. 이는 미래 발생할 사건은 과거와 현재 발생한 사건과 유사한 조건 하에서 생겨날 것이라는 가정을 기반으로 한다(Lee and Talib, 2005). 빈도비는 각 요인의 어떤 등급에서 싱크홀이 가장 많이 발생하였는지를 어렵지 않게 계산할 수 있고, 싱크홀 발생에 대해 각각의 요인에서 어떤 등급

이 상대적으로 더 중요하가를 한 눈에 파악할 수 있다(Kim *et al.*, 2014). 단, 빈도비 모델은 단변량 분석방법으로 싱크홀과 관련된 각 영향요인의 등급별 중요도를 계산하는 방법론으로, 싱크홀 발생에 영향을 미치는 요인간의 중요도를 설명할 수는 없다(Lee and Kang, 2012).

요인별 빈도비 값을 도출한 후, 각각을 더하여 연구 지역의 싱크홀 민감성 지수(Sinkhole Susceptibility Index, SSI)를 도출한다. 구체적인 방법은 Table 3과 같다.

Table 3. Frequency Ratio Model

$$FR = \frac{CW / TW}{CP / TP}$$

FR: frequency ratio of the class of factor

CW: a number of cells of sinkhole locations for each class of factor maps

TW: a total number of cells of sinkhole in the study area

CP: a number of cells in each factor class

TP: a number of total cells in the study area

$$SSI = \sum FR_i$$

SSI: sinkhole susceptibility index

3) 예측비율곡선과 곡선하면적

최근린 거리 및 빈도비 모델을 이용하여 분석한 싱크홀 민감성은 특정 지역에서의 싱크홀 발생 확률을

추정한 것으로, 예측 정확성에 대한 검증 작업을 필요로 한다(Chi *et al.*, 2001). 예측정확도란 싱크홀 민감성 분석을 통해 도출된 싱크홀 민감성 지도가 싱크홀 발생을 얼마나 잘 예측하는가를 판단하는 지표이다.

본 연구에서는 우선적으로 예측비율곡선(Prediction Rate Curve, PRC)을 이용하여 제작된 민감성 지도의 예측 정확성을 검증하였다. Chung and Fabbri(1999)가 제안한 예측비율곡선은 민감성 지도를 작성하는데 사용하지 않은 싱크홀 데이터를 사용하여 싱크홀의 민감성 지도가 미래의 싱크홀을 얼마나 잘 예측하는가를 계산한다. 따라서 추출된 279개의 싱크홀을 ArcGIS 10.3의 Sampling Design Tool을 활용하여 무작위적으로 훈련용 자료와 검증용 자료로 나눈 뒤, 교차 검증의 방법을 이용하여 각각 작성된 싱크홀 민감성 지도에 대한 예측비율곡선을 작성하였다.

예측비율곡선은 기울기가 가파르며, 곡선의 모양이 좌상으로 치우쳐질수록 예측력이 높은 것이기는 하나(Chi *et al.*, 2001), 보다 정량적으로 검증하기 위해서 작성된 곡선 아래의 면적을 계산하는 곡선하면적(Area Under Curve, AUC) 방법이 주로 함께 병행된다(Choi *et al.*, 2007; Galve *et al.*, 2009; Suh *et al.*, 2010). 곡선하면적이란 예측비율곡선의 면적을 구하는 것으로, 곡선하면적의 값은 0.5에서 1사이로 나타난다. 곡선하면적의 값이 1에 가까울수록, 즉 면적이 넓을수록 민감성의 예측력이 더 높음을 뜻한다(Swets, 1988).

3. 연구지역

본 연구지역인 삼척시(Figure 3)는 남한 최대 카르스트 발달 지역 중 하나로(Kim, 2002), 대석회암층 지질이 주류를 이루고 있어 기반암의 용식작용으로 인해 다른 지역에 비해 기본적으로 싱크홀 민감성을 내포하고 있다. 이미 삼척시 내 도계읍, 근덕면, 남양동 등 여러 지역에서 싱크홀이 발생한 사례가 보고되고 있다(Park and Kang, 2001; Ahn and Kim, 2007; Choi *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2008). 때문에 삼척시를 대상으로 한 싱크홀 민감성 연구들은 이뤄지고 있으나(Choi *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2008), 대부분 폐광산 지역 등 좁은 공간적 범위를 중심으로 연구지역을 한정

짓고 있다. 그러나 현재 삼척시는 LNG 생산기지 종합 발전단지 건설, 사회간접자본 확충사업 등의 개발 압력 가중으로 추후 삼척시 내 재난대비를 포함하여 토지 이용 계획 등을 위해 삼척시를 대상으로 한 전반적인 싱크홀 민감성 분석이 필요하다.

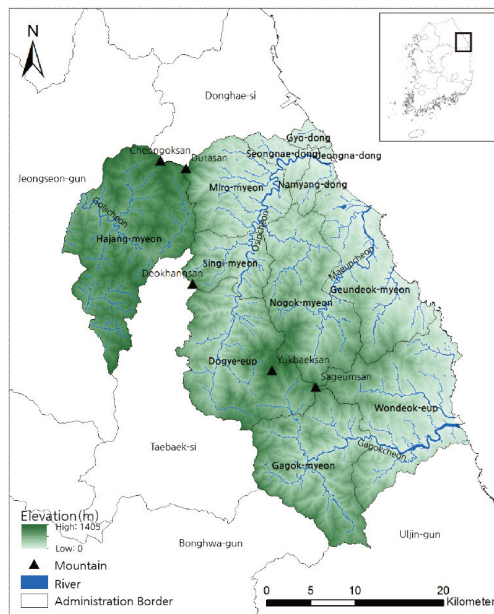


Figure 3. Map of study area (Source: NGII, 2015)

III. 결과 및 논의

1. 빈도비 기법을 이용한 싱크홀 발생과 영향요인간 상관관계 분석

빈도비 모델은 싱크홀 민감성을 분석할 때 이용되는 대표적인 단변량 분석방법 중 하나로, 싱크홀 발생과 관련 요인간의 상관관계를 분석할 수 있다. 빈도비 값(FR)이 1이면 평균을 의미하며, 빈도비 값이 1보다 크다면 싱크홀과 관련된 요인이 양의 상관관계를 보이며 값이 증가할수록 미래의 싱크홀 발생확률도 증가하는 반면, 반대로 빈도비 값이 1보다 작으면 싱크홀과 관련된 요인이 음의 상관관계를 보이며 싱크홀의 발생확률이 낮음을 의미한다(Kim *et al.*, 2014).

싱크홀 발생과 이에 영향을 미치는 각 요인의 등급별 빈도비 값을 분석하여 상관관계를 살펴본 결과는

Table 4에 정리하였다,

사면 경사의 경우, 경사가 증가할수록 빈도비 값이 감소하는 음의 상관관계를 보인다. 이는 사면의 경사가 가파르면 지표수가 흘러내려가 용해 작용의 발생 강도를 줄여주기 때문인 것으로 보인다. 동굴로부터의 거리의 경우 0 ~ 1.4 km 이내에 가장 높은 빈도비를 보이나, 2.5 ~ 3.5 km, 6.0 ~ 7.4 km 구간에서도 1 이상의 빈

도비를 보인다. 자연적 요인이 아닌 인위적 요인에 의해 발생한 싱크홀일 경우 카르스트 지역에서 형성되는 동굴과 그 분포가 다를 수 있어 이러한 결과가 나온 것으로 해석된다.

단층의 경우 단층에서부터 약 1.2km 이내의 구간은 1 이상의 빈도비 값을 가지나, 그 이상일 경우 빈도비는 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 단층이 연약

Table 4. Frequency ratio of sinkholes within classes of sinkhole related factors

Factor	Class	CP	CP/TP	CW	CW/TW	FR
Slope angle (degree)	0-14	1,490,259	12.57	4613	78.39	6.24
	14-22	1,483,575	12.51	986	16.75	1.34
	22-27	1,487,255	12.54	214	3.64	0.29
	27-30	1,492,499	12.59	58	0.99	0.08
	30-33	1,480,237	12.48	14	0.24	0.02
	33-37	1,494,351	12.60	0	0.00	0.00
	37-41	1,466,239	12.37	0	0.00	0.00
	41-79	1,463,202	12.34	0	0.00	0.00
Distance to cave (meter)	0-1440	1,465,117	12.36	2882	48.97	3.96
	1440-2448	1,576,810	13.30	430	7.31	0.55
	2448-3528	1,561,685	13.17	1055	17.93	1.36
	3528-4752	1,474,071	12.43	402	6.83	0.55
	4752-5976	1,451,311	12.24	57	0.97	0.08
	5976-7417	1,481,104	12.49	986	16.75	1.34
	7417-9721	1,443,319	12.17	73	1.24	0.10
	9721-18361	1,404,200	11.84	0	0.00	0.00
Distance to fault (meter)	0-211	1,442,848	12.17	1742	29.60	2.43
	211-483	1,601,239	13.50	1183	20.10	1.49
	483-785	1,524,445	12.86	728	12.37	0.96
	785-1178	1,564,051	13.19	1188	20.19	1.53
	1178-1661	1,465,324	12.36	516	8.77	0.71
	1661-2386	1,454,169	12.26	193	3.28	0.27
	2386-3896	1,424,546	12.01	335	5.69	0.47
	3896-7701	1,381,011	11.65	0	0.00	0.00
Bedrock lithology (class)	Alluvium	535,753	4.52	73	1.24	0.27
	Gobangsan Series	96,230	0.81	9	0.15	0.19
	Sadong Series	89,749	0.76	1	0.02	0.02
	Manhang Formation	155,822	1.31	509	8.65	6.58
	Maggol Limestone	708,676	5.98	2642	44.89	7.51
	Tumudong Formation	406,268	3.43	117	1.99	0.58
	Tongjom Quartzite	145,906	1.23	60	1.02	0.83
	Hwajol Formation	1,168,037	9.85	122	2.07	0.21
	Pungchon Limestone	998,979	8.42	2190	37.21	4.42
	Myobong Formation	572,437	4.83	162	2.75	0.57

Table 4. Continued

Factor	Class	CP	CP/TP	CW	CW/TW	FR
Soil depth (cm)	No data	238,718	2.01	0	0.00	0
	<20	4,581,806	38.64	32	0.54	0.01
	20-50	2,948,040	24.86	1775	30.16	1.21
	50-100	3,760,430	31.71	4013	68.19	2.15
	>100	328,639	2.77	65	1.10	0.40
Drainage class (class)	No data	238,719	2.01	0	0	0
	Pooly	26,927	0.23	0	0	0
	Imperfectly	66,602	0.56	24	0.41	0.73
	Moderately well	151,892	1.28	17	0.29	0.23
	Well	5,031,172	42.43	5572	94.68	2.23
	Excessively	6,342,321	53.49	272	4.62	0.09
Distance to mine (meter)	0-1081	1,378,270	11.62	877	14.90	1.28
	1081-1862	1,561,693	13.17	1175	19.97	1.52
	1862-2643	1,574,835	13.28	1331	22.62	1.70
	2643-3484	1,501,630	12.66	1134	19.27	1.52
	3484-4445	1,460,200	12.31	955	16.23	1.32
	4445-5886	1,480,378	12.48	413	7.02	0.56
	5886-8469	1,454,502	12.27	0	0.00	0.00
	8469-15317	1,446,125	12.20	0	0.00	0.00
Distance to traffic route (meter)	0-20	1,595,548	13.46	1829	31.08	2.31
	20-51	1,501,488	12.66	1801	30.60	2.42
	51-100	1,520,055	12.82	851	14.46	1.13
	100-168	1,454,810	12.27	470	7.99	0.65
	168-264	1,452,553	12.25	430	7.31	0.60
	264-417	1,445,127	12.19	354	6.02	0.49
	417-713	1,444,077	12.18	137	2.33	0.19
	713-3259	1,443,975	12.18	13	0.22	0.02

* CP: a number of cells in each factor class, TP: a number of total cells in the study area, CW: a number of cells of sinkhole locations for each class of factor maps, TW: a total number of cells of sinkhole in the study area, FR: frequency ratio of the class of factor

대를 형성하며 지하수가 흐르는 통로 역할을 하기 때문에 싱크홀의 위치와 연관성을 보인다는 선행연구(Veni, 1987; Tihansky, 1999; Sunwoo and Jung, 2006)들의 결과와 일치한다. 기반암은 막골석회암층, 만항층, 풍촌석회암층인 경우에 1 이상의 빈도비를 보였는데, 특히 막골석회암층의 경우 7.51로 가장 높은 빈도비값을 보인다. 이는 암석의 조직, 공극 발달 정도 등 광물-암석학적 특징에 따라 용식작용이 다르게 발생하기 때문이다. 또한 만항층이 석회암 지층이 아님에도 불구하고 빈도비 값이 1보다 크다. 만항층은 조선계 대석회암층군을 부정합으로 덮고 있기 때문에(Ahn, 2008), 이 지

층에 형성되는 싱크홀들은 빗물이 침투하여 만항층 아래의 대석회암층군을 용식하여 지반이 내려앉아 형성된 것으로 추측된다(Suh, 1996). 유효토심은 20 ~ 100 cm 인 경우 빈도비 값이 1보다 크다. 이는 토층이 두꺼울수록 용해된 기반암 및 균열이 드러나는 것을 막아 공동이 싱크홀로 변하는 시간을 연장시킬 수 있다(Zhou *et al.*, 2003)는 기존 선행연구와는 일치하지 않는 결과이다. 그러나 유효토심이 깊을수록 식생이 잘 발달하며(NGII, 2007) 이로 인해 토양 내 탄산가스의 양이 증가하면 토심이 상대적으로 깊은 곳에서도 용식작용이 활발해질 수 있다(Kwon, 2013).

배수등급이 양호한 경우 1보다 큰 빈도비 값을 보인다. 배수등급이 양호할수록 지하수의 유동성을 높여 암반의 지지력을 낮출 수 있기 때문이다(Kim, 2006). 다만 본 연구지역 내 배수등급이 매우 양호한 지역의 경우, 경사가 심한 산지로 토층 발달이 미약하며 배수가 매우 빨라 암반의 용식작용을 저해하여 싱크홀이 많이 발달하지 못한 것으로 추측된다.

광산으로부터 약 4.45 km 이내인 경우 빈도비 값이 1보다 크다. 이는 광산과 가까운 지역의 경우 광산 채굴로 공동이 발생하게 되면서 시간이 경과함에 따라 공동의 상반이 붕괴될 가능성이 높아지기 때문이다(Lim, 2010). 다만 데이터 수집의 한계로 광산의 대표위치 점 데이터만을 확보할 수 있어 상대적으로 넓은 0 ~ 4.45 km 구간에 걸쳐 1보다 큰 빈도비 값이 나타난 것으로 보인다. 교통로로부터 51 m 이내인 경우에 싱크홀의 분포와 양의 상관관계를 보인다. 이는 교통로를 지나다니는 기차 및 차량의 이동으로 지반에 하중이 증가되어 지하수위가 변화할 수 있으며, 지반의 균열 및 미세 진동에 영향을 미쳐 싱크홀 발생에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다(Mine Reclamation Corporation, 2008).

싱크홀과 사면 경사간 상관관계에서는 평지와 완경사 지역 및 급경사 지역을 재분류하여 상세하게 분석할 필요가 있다. 앞서 본 연구에서는 연속형 값을 갖는 사면 경사도 데이터를 등분위 분류 방법에 따라 0 ~ 14°, 14 ~ 22°, 22 ~ 27°, 27 ~ 30°, 30 ~ 33°, 33 ~ 37°, 37 ~ 41°, 41 ~ 79°의 8개 등급으로 나누었다. 그 후 빈도비 모델을 통해 싱크홀과 사면 경사 사이의 등급간 상관관계를 파악한 결과, 사면 경사도가 22°이하인 경우에 싱크홀의 분포와 양의 상관관계가 나타남을 확인하였다. 그러나 지형학적으로 0 ~ 22°는 평지라고 볼 수 없다. 평지의 경우 지표면 경사는 5° 이하인 것이 보통이며, 5 ~ 10°인 경우는 완경사지로 부른다(Park, 2009). 따라서 어느 정도의 사면 경사도를 갖는 지형에서 싱크홀이 더 잘 나타나는가를 좀 더 자세히 살펴보기 위해, 기존에 싱크홀의 분포와 양의 빈도비 값을 보였던 0 ~ 22° 사이의 경사도를 5개의 등급으로 분류하였다. 싱크홀의 분포와 6개 등급으로 구분된 사면의 경사간 빈도비

를 분석한 결과, 경사각이 0 ~ 5°와 5 ~ 11°의 완만한 경사를 보이는 곳에서 각각 6.55, 7.19의 상당히 높은 빈도비 값을 보였다. 0 ~ 5°의 경사 지역은 평지, 5 ~ 11° 경사의 지역은 완경사로 볼 수 있다. 그 이외의 지역은 경사도가 증가할수록 빈도비가 감소하며, 19°이상의 경사 지역부터는 음의 빈도비 값을 보인다(Table 5). 즉 삼척지역의 싱크홀은 평지 및 완경사 지형에서 잘 발달함을 알 수 있다.

Table 5. Frequency ratio of sinkholes within classes of slope angle

Class	CP	CP/TP	CW	CW/TW	FR
0-5	590,506	4.98	1,920	32.63	6.55
5-11	633,935	5.35	2,262	38.44	7.19
11-16	614,793	5.18	862	14.65	2.83
16-19	602,595	5.08	381	6.47	1.27
19-22	483,960	4.08	163	2.77	0.68
22-79	8,931,828	75.33	297	5.05	0.07

* **CP**: a number of cells in each factor class, **TP**: a number of total cells in the study area, **CW**: a number of cells of sinkhole locations for each class of factor maps, **TW**: a total number of cells of in the study area, **FR**: frequency ratio of the class of factor

2. 최근린 거리 모델과 빈도비 모델간 싱크홀 민감성 분석 및 검증 결과

구축된 공간 데이터에 대해 최근린 거리 모델과 빈도비 모델을 이용해 연구지역의 싱크홀 민감성을 분석하였다(Figure 4). 두 모델로부터 도출된 싱크홀 민감성의 공간적 분포 특성을 비교한 결과, 분포 패턴이 매우 유사한 것으로 나타났다. 두 모델 모두 오십천에 인접해있는 지역인 교동, 성내동, 정라동, 남양동, 신기면, 도계읍, 미로면 동부, 노곡면·근덕면 북부 일대에서 매우 높은 싱크홀 민감성이 나타났다. 또한 하장면 남동부 및 남서부와 가곡면 남부 일부 지역 역시 싱크홀 민감성이 높게 나타났다.

이 지역은 대부분 단층이 밀집해 있고 지질이 석회암층 혹은 석회암층을 부정합으로 덮고 있는 만항층이며, 배수등급이 양호하고, 광산 및 교통로가 밀집된 구역이다. 다만 사면의 경사, 동굴, 유효토심 측면에서 지역

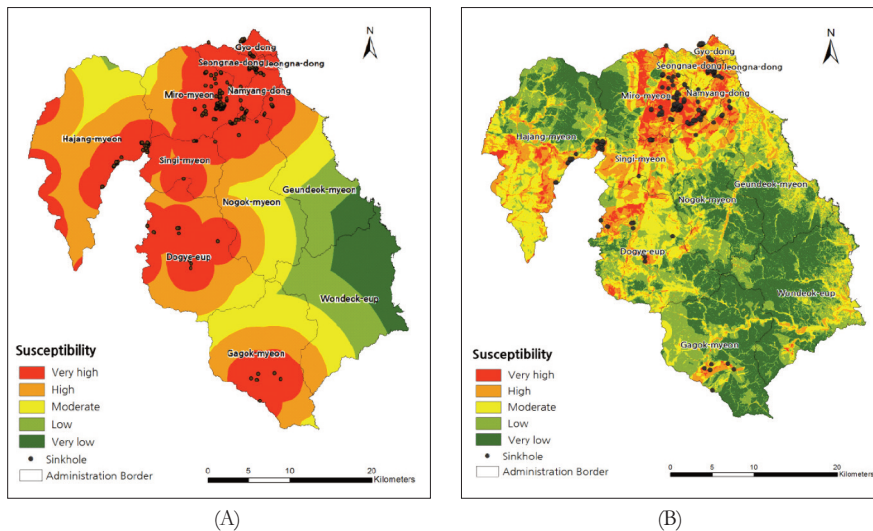


Figure 4. Sinkhole susceptibility determined by (A) nearest neighbor distance and (B) frequency ratio model

간 차이를 보인다. 본 연구 결과 사면의 경사가 낮을수록 싱크홀이 발생할 확률이 높다고 분석하였으나, 신기면의 경우 주변 지역에 비해 경사가 비교적 가파른 지역이다. 이 지역은 사면의 경사가 가파름에도 불구하고 다른 지역에 비해 동굴과 단층이 밀집해 있어 민감성이 큰 지역으로 나타난 것으로 판단된다.

두 모델을 이용해 도출된 싱크홀 민감성 지수는 추정(assessment)이므로, 추후 발생할 싱크홀을 잘 예측할 수 있는가에 대한 정확성 검증 작업을 필요로 한다. 예측비율곡선(Prediction Rate Curve)과 Area Under Curve를 통해 두 모델간 예측정확도를 검증한 결과 각각 95.3%와 94.4%의 예측정확도를 나타내, 두 모델 중 최근린 거리 모델의 검증력이 상대적으로 더 높으나 두 모델 모두 싱크홀 민감성을 분석하는데 유용함을 알 수 있었다(Figure 5).

최근린 거리 모델이 높은 예측정확도를 보이는 것은 싱크홀이 상당히 군집되어 있기 때문인 것으로 보인다. Galve *et al.*(2009)에 따르면, 싱크홀의 군집도가 높을수록 최근린 거리 모델의 예측정확도 또한 높아진다. 싱크홀의 군집도는 최근린지수 분석을 통해서 알 수 있는데, 최근린지수(Nearest Neighborhood Ratio)란 각 점에서 가장 이웃하여 위치한 점까지의 평균 거리를 산출한 후 이 값을 무작위 패턴일 때 예상되는 평

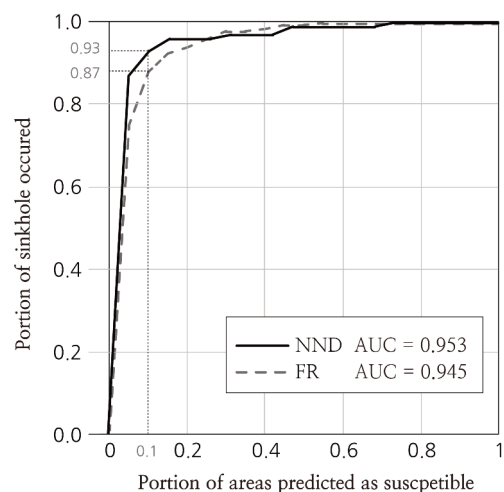


Figure 5. Prediction rate curve and area under curve (AUC) comparing nearest neighbor distance (NND) and frequency ratio (FR)

균 거리와 비교하여 도출하는 값을 뜻한다(Lee and Sim, 2011). 최근린지수가 1보다 작으면 군집형 패턴이며, 최근린지수가 1보다 크면 분산형 패턴으로 판단하는데, Galve *et al.*(2009)는 싱크홀의 최근린지수가 0.55보다 작은 군집형 패턴을 보이는 경우, 최근린 거리 모델이 최고의 예측정확도를 보인다고 연구한 바 있다. 실제로 본 연구지역에 위치하는 싱크홀간의 관측된 평균 거리는 약 412 m이고 기대된 평균거리는 약 1,471 m로

나타나며 최근린지수는 약 0.28로 나타났다. 따라서 삼척시에 발생한 싱크홀은 상당히 군집화된 패턴임을 알 수 있다. 이로 인해 최근린 거리 모델의 예측정확도 또한 매우 높은 것으로 판단된다.

빈도비 모델 역시 94.4%의 상당히 높은 예측정확도를 보이는데, 본 연구에 사용된 8가지 영향요인과 싱크홀 간에 강한 상관관계가 있기 때문인 것으로 추측된다. 또한 8가지 영향요인간 상관관계가 존재하기 때문일 수도 있다. 예를 들어 석회암 지층이 발달한 곳에서는 석회석 광산이 형성될 가능성이 있으며, 본 연구지역에서 단층선을 따라 교통로가 발달한 부분 또한 존재한다. 그러나 빈도비 모델은 단변량 분석방법으로 싱크홀과 영향요인들간의 상관관계를 분석할 뿐, 영향요인들간의 상관관계를 분석하지 않으며, 요인들간 중요도 또한 설명할 수 없다는 한계점이 존재한다(Lee and Kang, 2012).

또한 본 연구에서는 싱크홀의 예측 정확성을 검증하기 위해 싱크홀을 무작위적으로 훈련용 자료와 검증용 자료로 나눌 때 공간적 기준(spatial criteria)과 시간적 기준(temporal criteria)을 고려하지 않았다. 즉, 공간적-시간적 기준을 고려한 분할에 비해 본 연구에서 활용한 무작위 분할은 상대적으로 예측정확도가 과대평가될 수 있다는 한계점이 있다(Zêzere *et al.*, 2004).

3. 인문적 요인을 고려한 싱크홀 민감지역 논의

분석된 싱크홀 민감성 분포의 공간적 특성을 바탕으로 인구분포도 및 토지피복도와 비교분석하여 싱크홀 재해 위험가능성이 높은 지역을 파악하였다. 그 결과, 싱크홀 민감성이 높은 지역 중 교통·성내동·정라동·남양동 일대와 도계읍 일대가 인구가 밀집하며 도시가 발달한 곳으로, 다른 지역에 비해 싱크홀 재해로 인한 위험 잠재력이 높은 지역임을 확인하였다(Figure 6).

싱크홀은 형성될 때 침하 및 붕괴로 일어나는 재해 뿐만 아니라, 형성 후 생겨날 수 있는 싱크홀 침수 및 지하수 오염과 같은 잠재적 재해에의 위험이 있다. 따라서 인구가 밀집해 있고 기반시설이 발달한 교통·성내동·정라동·남양동 일대와 도계읍 일대와 같은 싱크홀 재해로 인한 위험 가능성이 높은 지역을 중심으로 싱크홀 침하 및 붕괴, 지하수 오염 등에 대한 모니터링이 필요하며, 추가적인 싱크홀 발생을 대비할 수 있도록 지속적인 조사 및 연구가 이뤄져야 한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 강원도 삼척시를 대상으로 GIS를 활용하여 카르스트 지역의 싱크홀 민감성을 분석하고, 이를

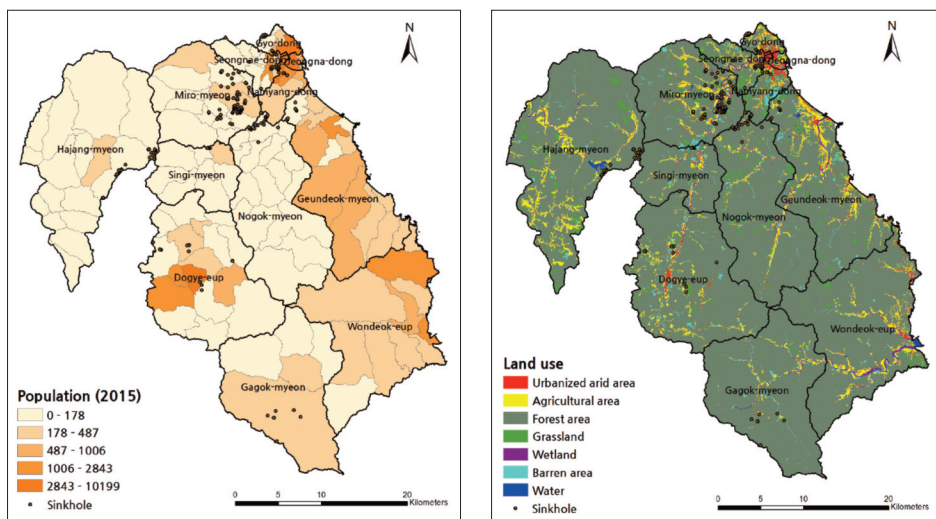


Figure 6. Population distribution and land cover map of Samcheok-si

통해 싱크홀 재해 위험 가능성이 높은 지역을 파악하고자 하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 최근린 거리 모델과 빈도비 모델을 이용하여 분석한 삼척시의 싱크홀 민감성에 대하여 예측비율곡선 및 곡선하면적(Area Under Curve)을 이용하여 예측 정확도를 검증한 결과, 각각 95.3%, 94.4%의 정확도를 보여주었다. 두 모델 중 최근린 거리 모델이 검증력이 상대적으로 높으나, 두 모델 모두 싱크홀 민감성을 분석하는데 유용함을 알 수 있었다.

둘째, 빈도비 모델을 통해 싱크홀과 영향요인간의 등급간 상관관계를 파악하였다. 사면 경사 22° 이하인 경우, 특히 11° 이하인 경우, 동굴로부터 약 1.4 km 이내, 2.5 ~ 3.5 km, 6.0 ~ 7.4 km 구간, 단층으로부터 약 1.2 km 이내, 기반암이 막골석회암층, 만항층, 풍촌석회암층인 경우, 유효토심이 20 ~ 100 cm인 경우, 배수등급이 양호한 경우, 광산으로부터 약 4.45 km 이내인 경우, 교통로로부터 51 m 이내인 경우에 싱크홀의 분포와 양의 상관관계를 보였다.

셋째, 최근린 거리 모델과 빈도비 모델을 이용하여 도출된 싱크홀 민감성의 공간적 분포 특성을 분석한 결과, 서로 매우 유사한 분포를 보였으며 오십천 일대(교동, 성내동, 정라동, 남양동, 신기면, 도계읍, 근덕면·노곡면 북부, 미로면 동부) 및 하장면 남동·남서부와 가곡면 남부 일부 지역을 중심으로 싱크홀 민감성이 높게 나타난다. 이 지역들은 대부분 단층이 밀집해 있으며, 지질이 석회암층 혹은 석회암층을 부정합으로 덮는 만항층이고, 배수등급이 양호하며, 광산 및 교통로가 밀집된 구역이다.

넷째, 싱크홀 재해 위험 가능성이 높은 지역을 파악하기 위해 삼척시 내 싱크홀 민감성의 공간적 분포 특성을 바탕으로 인구분포도 및 토지피복도와 비교분석하였다. 그 결과, 싱크홀 민감성이 높은 지역 중 교동·성내동·정라동·남양동 일대와 도계읍 일대가 인구가 밀집되어 있으며 도시가 발달한 곳으로, 싱크홀 재해 위험의 잠재적 취약성이 높은 지역임을 확인하였다.

그간 국내에서는 싱크홀 민감성을 분석하기 위한 방법론으로 경험적 접근 및 빈도비 모델, 로지스틱 회귀분석, 인공신경망 등의 확률·통계적 접근법이 주로

활용되었다. 그러나 최근린 거리 모델의 경우 타 연구에서도 많이 활용되고 있으며 싱크홀 연구에서도 해외 논문에서는 많이 사용되고 있으나 국내에서는 아직까지 활용된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 국내 싱크홀 연구에 있어 최근린 거리 모델 방법론을 새롭게 제시하였다는 데에서 그 의의가 있다. 특히 이 방법론의 경우 싱크홀이 상당히 군집된 패턴을 보이는 지역에서는 기존에 형성되었던 싱크홀의 발생 위치만 정확하게 파악하면 복잡한 통계적 절차를 거칠 필요 없이 간편하고 빠르게 싱크홀 민감성 지도를 제작할 수 있어 활용가능성이 높다. 또한 기존 싱크홀 민감성 연구들은 국지적 측면에서 연구가 진행된 것과 달리, 본 연구에서는 보다 넓은 행정구역 공간단위인 삼척 지역을 중심으로 싱크홀 민감성을 분석하였으며, 나아가 인구분포 및 토지이용과 비교분석을 통해 실제 싱크홀 발생시 잠재적 피해가 큰 지역을 파악하였다. 따라서 본 연구의 결과는 추후 재난대비를 포함한 전체적 토지이용계획 수립에 기반 자료로 활용될 수 있으며, 향후 싱크홀 재해 대비를 위해 추가적으로 지반조사 진행시 우선순위 지역 선정에 위한 예비 연구로도 활용될 수 있다.

그럼에도 본 연구는 싱크홀 민감성 분석에 앞서 진행되는 싱크홀 발생위치 공간데이터베이스 구축시 1:5,000의 지형도 및 정사영상을 통해 싱크홀을 판별하였으며, 싱크홀 영향요인 공간데이터베이스 구축을 위해 1:25,000의 토양도와 1:50,000의 지질도를 활용하였기 때문에 데이터간 축척 통일성의 한계가 존재한다. 또한 싱크홀에 영향을 미치는 요인을 선정함에 있어 연구지역의 지하수 관측시설 부족으로 인해 지하수 요인을 배제하였으며, 데이터 수집의 한계로 갭도 정보, 기반암까지의 깊이, 수리전도도 대신 광산 대표 위치, 유효토심, 배수등급을 활용하였다. 추후 싱크홀 민감성 분석시 본 연구에서 고려하지 못한 일부 싱크홀 관련 요인들을 추가한다면 좀 더 신뢰도 높은 싱크홀 민감성 분석이 가능해질 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2015년 정부(국토교통부)의 재원으로 공간정보 융복합 핵심인재 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2015-07-01).

References

- Ahn, S., 2008, *Sensitivity analysis for mapping GIS based ground subsidence susceptibility near abandoned underground coal mine : examples from Kangwon-Do, Korea*, Master's thesis, Yonsei University (in Korean).
- Ahn, S. and Kim, K., 2007, Study on the principle factors related to ground subsidence at Abandoned Underground Coal Mine Area using probability and sensitivity analysis, *Proceedings of the KSRS spring conference*, 296-300 (in Korean).
- Alcántara, I. and Goudie, A., 2010, *Geomorphological hazards and disaster prevention*, Cambridge University Press.
- Al-Kouri, O., Al-Rawashdeh, S., Sadoun, B., Sadoun, B., and Pradhan, B., 2013, Geospatial modeling for sinkholes hazard map based on GIS & RS data, *Journal of Geographic Information System*, 5(6), 584-592.
- Chi, K., Shin, J., and Park, N., 2001, Quantitative Analysis of GIS-based Landslide Prediction Models Using Prediction Rate Curve, *Korean Journal Remote Sensing*, 17(3), 199-210 (in Korean).
- Choi, J., Kim, K., Song, K., and Jo, M., 2008, A Study on the Correlation between Coal Mining Subsidence and Underground Goaf, *Economic and Environmental Geology*, 41(4), 453-464 (in Korean).
- Choi, J. K., Kim, K., Lee, S., Kim, I., and Won, J., 2007, Prediction of Ground Subsidence Hazard Area using GIS and Probability Model near Abandoned Underground Coal Mine, *Economic and Environmental Geology*, 40(3), 295-306 (in Korean).
- Choi, J. W., Lee, S., Min, K. D., and Woo, I., 2004, Landslide susceptibility mapping and verification using the GIS and bayesian probability model in Boun, *Economic and Environmental Geology*, 37(2), 207-223 (in Korean).
- Christopherson, R. W., 2011, *Geosystems*(8th ed.), Pearson Education.
- Chung, C. J. F. and Fabbri, A. G., 1999, Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(12), 1389-1399.
- Chung, C. J. F. and Fabbri, A. G., 2003, Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping, *Natural Hazards*, 30(3), 451-472.
- Forth, R. A., Butcher, D., and Senior, R., 1999, Hazard mapping of karst along the coast of the Algarve, Portugal, *Engineering Geology*, 52, 67-74.
- Galve, J. P., Gutierrez, F., Remondo, J., Bonachea, J., Lucha, P., and Cendrero, A., 2009, Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain), *Geomorphology*, 111, 160-172.
- Gao, Y., Alexander, E. C., and Barnes, R. J., 2005, Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution, *Environmental Geology*, 47(8), 1083-1098.
- Gao, Y., Alexander, E. C., and Lei, M., 2001, A comparison of human-induced sinkholes between china and the united states, *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*, Beck & Herring (eds.), 25-30.
- Gutierrez, F., Parise, M., De Waele, J., and Jourde, H., 2014, A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst, *Earth-Science Reviews*, 138, 61-88.

- Hu, R. L., Yeung, M. R., Lee, C. F., Wang, S. J., and Xiang, J. X., 2001, Regional risk assessment of karst collapse in Tangshan, China, *Environmental Geology*, 40(11), 1377-1389.
- Kaufmann, J. E., 2007, *Sinkholes*, U.S. Geological Survey.
- Kaufmann, O. and Quinif, Y., 2002, Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the ‘Tournaisis’ area, Southern Belgium, *Engineering Geology*, 65(2), 117-124.
- Kemmerly, P. R., 1993, Sinkhole hazards and risk assessment in a planning context, *Journal of the American Planning Association*, 59(2), 221-229.
- Kim, D., Choi, C., Kim, D., Lee, D., Lee, B., and Je, H., 2007, A Case Study on Reinforcement of Ground and Foundation against Subsidence in Abandoned Mining Area, *Tunnel & Underground Space*, 17(4), 255-265 (in Korean).
- Kim, J. H., 2002, *Geomorphology*, Dongguk University Press (in Korean).
- Kim, K., 2006, *Prediction and verification of ground subsidence at abandoned underground coal mine area using GIS: examples from Samcheok City, Kangwon-Do, Korea*, Ph.D. thesis, Yonsei University (in Korean).
- Kim, S. J., Lee, J. C., Kim, J. S., and Roh, T. H., 2014, A Comparative Analysis of Landslide Susceptibility Using Airborne LiDAR and Digital Map, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 32(4-1), 281-292 (in Korean).
- Kwon, H. J., 2013, *Geomorphology*(4th ed.), Bobmunsa (in Korean).
- Lee, M. and Kang, J., 2012, Predictive Flooded Area Susceptibility and Verification Using GIS and Frequency Ratio, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(2), 86-102 (in Korean).
- Lee, S. and Talib, J. A., 2005, Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis, *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- Lim, T., 2010, *A Study on the Influence Factor of Land Subsidence Using GIS*, Ph.D. thesis, Chonnam National University (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation, 2004, *Identification, investigation and development of 3D modelling method of sinkhole cavities to protect infrastructures* (in Korean).
- NGII(National Geographic Information Institute), 2007, *National Atlas of Korea*, National Geographic Information Institute (in Korean).
- Park, I. and Park, S., 2014, Factors influencing sinkhole and coping strategies, *Magazine of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(5), 12-17 (in Korean).
- Park, N. and Kang, S., 2001, Subsidence due to complex of limestone cavity with coal mining and its countermeasures; case study, *Symposium of the Korean Society of Engineering Geology*, 59-78 (in Korean).
- Park, S. J., 2009, Classification and Forming Processes of Low Relief Landforms in the Korean Peninsula, *Journal of the Korean Geographical Society*, 44(1), 31-35 (in Korean).
- Suh, J., Choi, Y., Park, H., Kwon, H., Yoon, S., and Go, W., 2010, Application of Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process to Subsidence Hazard Assessment around Abandoned Coal Mine, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, 47(5), 690-704 (in Korean).
- Suh, M. S., 1996, *Karst Landforms of Korea*, Sekyong Press (in Korean).
- Sunwoo, C. and Jung, Y., 2006, Suggestion of New Rock Classification Method Using the Existing Classification Method, *Explosive & Blasting*, 24(1), 21-28 (in Korean).
- Swets, J.A., 1988, Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science*, 240, 1285-1293.
- Taheri, K., Gutiérrez, F., Mohseni, H., Raeisi, E., and

- Taheri, M., 2015, Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude-frequency relationships: A case study in Hamadan province, Iran, *Geomorphology*, 234, 64-79.
- Tihansky, A. B., 1999, Sinkholes, west-central florida, Land Subsidence in the United States, *US Geological Survey Circular*, 1182, 121-140.
- Veni, G., 1987, Fracture permeability: implications on cave and sinkhole development and their environmental assessments, *In Multidisciplinary conference on sinkholes and the environmental impacts of karst*, 2, 101-105.
- Waltham, T., Bell, F., and Culshaw, M., 2007, *Sinkholes and Subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*, Springer.
- Zêzere, J. L., Rodrigues, M. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Vieira, G., and Ferreira, A. B., 2004, Spatial and temporal data management for the probabilistic landslide hazard assessment considering landslide typology, *In Landslides, evaluation & stabilization, Proceedings of the 9th international symposium on Landslides, Rio de Janeiro*, 1, 117-125.
- Zhou, W., Beck, B. F., and Adams, A. L., 2003, Application of matrix analysis in delineating sinkhole risk areas along highway (I-70 near Frederick, Maryland), *Environmental Geology*, 44(7), 834-842.

영문 교열: 김종연