

폐광산지역의 광역적 지반침하 위험도 평가를 위한 빈도비모델과 계층분석기법의 적용

서장원¹⁾ · 최요순²⁾ · 박형동^{1)*} · 권현호³⁾ · 윤석호³⁾ · 고와라³⁾

Application of Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process to Subsidence Hazard Assessment around Abandoned Coal Mine

Jangwon Suh, Yosoon Choi, Hyeong-Dong Park*,
Hyun-Ho Kwon, Suk-Ho Yoon and Wa-Ra Go

Abstract : This study provides GIS analysis model combined with Frequency Ratio (FR) and Analytic Hierarchy Process (AHP) that evaluates and predicts subsidence hazard around abandoned coal mine. A spatial database was compiled based on data from topographical map, borehole data and mine drift map including the locations of past subsidences. Eight factors (i.e., drift depth, drift density, distance from drift, distance from road, groundwater level, rock mass rating, slope, flow accumulation) were extracted from the database to assess the relationship between each factor and subsidence events based on the frequency ratio model (statistical method). Analytic hierarchy process model was used to weight each factor affecting subsidence occurrences. As a result, subsidence hazard mapping using different models were performed and verification of prediction accuracy was implemented based on the area under curve (AUC) technique. The proposed GIS model in the study gives a measure of subsidence initiation localities and can be useful tool for mine planners and developers for their effective mine reclamation planning.

Key words : Mine subsidence, GIS, Frequency ratio, AHP, Abandoned mine

요약 : 본 연구에서는 빈도비모델과 계층분석기법을 이용하여 폐탄광 지역의 광역적 지반침하 위험도를 평가할 수 있는 GIS 분석모델을 제시하였다. 분석모델은 지반침하에 영향을 미치는 8가지 요인(갱도의 심도, 갱도의 밀도, 갱도로부터의 거리, 도로로부터의 거리, 지하수위, RMR, 경사도, 강우 누적 흐름량)을 복합적으로 고려하여 폐광산 지역의 상대적 지표침하 위험도를 평가할 수 있다. 통계 기법의 빈도비 모델을 이용하여 침하와 영향 인자간의 상관관계를 분석하였으며, 전문가 판단에 기반을 둔 계층분석기법을 이용하여 영향인자별 가중치를 산정하고 정량화하였다. 강원도 정선의 폐광산 지역을 대상으로 구축된 공간데이터베이스에 분석 모델을 적용하여 광역적 범위의 상대적 지반침하 위험도 평가를 수행하였으며, 현장조사를 통해 관찰된 실제 침하지역과 비교 검증하여 예측 정확도를 평가하였다. 빈도비 모델과 계층분석기법 결합 모델의 예측 정확도는 각각 89.7%, 87.4%로 나타났으며, 제시된 분석모델은 광해관리 대책수립을 위한 기초 분석 도구로서 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

주요어 : 광산 지반침하, 지리정보시스템, 빈도비모델, 계층분석기법, 폐광산

서 론

광해란 광산개발에 따른 모든 피해를 지칭하는 것으로, 국내의 경우 생산실적이 있는 총 6,037개소의 광산 중 약

2010년 6월 17일 접수, 2010년 7월 13일 채택

- 1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부
- 2) 펜실베니아 주립 대학교 에너지자원공학과
- 3) 한국광해관리공단 기술연구센터

*Corresponding Author(박형동)

E-mail; hpark@snu.ac.kr

Address; Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

84%가 휴광 또는 폐광된 상황이며 대부분 적절한 환경복원 처리 없이 방치되어 있기 때문에, 휴·폐광산 지역에서 발생하는 광해가 심각한 사회문제로 대두되고 있다(한국광해관리공단, 2009). 특히, 방치된 폐탄광의 갱도 및 채굴적으로 인한 지반침하는 지상 구조물의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 광산지역의 개발계획에 장애요인으로 작용하며, 도로나 철도, 주거지역 등에 침하가 발생할 경우 인명 또는 재산에 큰 피해를 줄 수 있다. 최근에는 폐광산 지역뿐만 아니라 가행광산 지역에서도 채광작업으로 인한 지반침하발생 대책 마련이 시급히 요구되고 있다. 국내의 경우 지반침하가 발생한 후 해당 지역의

지반보강공사에 치중하는 수동적인 대처가 이루어지고 있는 실정(최성웅 외, 2005)이기 때문에, 근본적이고 합리적인 광해관리를 위하여 광산지역에서 발생할 수 있는 재해를 사전에 예측평가하고 관리할 필요성이 증대되고 있다.

광산지역의 지하 갱도 및 채굴적으로 인한 지반침하에 대한 연구는 국내외에서 활발하게 수행되어 왔다. 영국의 National Coal Board(1975)는 채굴 공동의 높이, 채굴 공동의 폭, 탄층 경사도를 이용하여 지표침하의 영향범위를 계산하는 도식법을 제안하였고, Goel and Page(1982)는 여러 가지 영향인자를 결합하여 광산지역의 침하발생 가능성을 예측하는 확률식을 제시한바 있다. 그러나 이러한 사례들은 장벽식 채탄법에 의해 발생하는 연속형(trough) 침하 예측에 적합하기 때문에 국내 광산지역에는 바로 적용하기 어려운 한계가 있다. 국내의 경우, 이동길 외(2008)는 국내 96개 지역에 대한 지반침하 사례를 수집하여 지반침하 발생요인과 특성을 파악하고 요인간의 상관성을 분석하였으며, 최성웅 외(2005)는 지반침하 유형과 매커니즘을 분석하고, 지반침하에 영향을 미치는 제반 요인들을 수치해석적으로 평가하였다. 김종우 외(2007)는 축소모형실험을 이용하여 지하갱도가 지반침하에 미치는 영향에 대해 보고하였으며, 정용복 외(2008)는 단위 채굴적의 갱도의 심도만을 이용한 지반침하위험도 평가법을 제시하고, 영향함수법에 의한 결과와 비교 분석하였다. 또한, 최성웅 외(2009)는 퍼지추론기법을 이용한 폐광산 지역의 지반침하 발생 가능성 예측에 대해 분석한 바 있다. Back et al.(2008), Jung et al.(2007)는 SAR(Synthetic Aperture Radar)를 이용하여 석탄광 지역의 지표침하를 탐지한 사례를 발표하였다. 그러나, 원격탐사기법을 이용한 지표침하탐지의 경우 광역적 범위의 지반침하변위 계측에 유리하지만, 침하발생에 대한

원인해석이나 영향인자에 대한 상관성 분석을 수행하기 어려운 한계가 있다. 최근 들어, GIS를 지반침하 위험도 평가에 적용한 국내외 사례도 발표되고 있으나(김기동, 2006; 최종국, 2007; Kim et al., 2006; Kim et al., 2009; Choi et al., 2010), 주변 갱도나 채굴적의 영향력(공간에서 수평적으로 밀집한 경우), 강우에 대해서는 고려하지 않은 것으로 판단되며, 영향인자의 선정에 대한 해석과 평가가 다소 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반침하를 유발하는 영향인자들을 면밀히 검토하여 보다 실제적인 요인들을 지반침하예측에 반영하고자 한다.

본 연구의 목적은 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 이용하여 폐광산 지역의 광역 지반침하 위험도를 평가하고 예측하는 것이다. 이를 위해, 통계자료에 기반을 둔 정량적 기법(빈도비모델)과 전문가의 평가에 의한 반정량적 기법(계층분석절차)을 적용하고 예측 결과에 대한 비교를 수행하였다. 폐광산지역의 지반침하를 발생시키는 영향인자들을 선정하고 공간데이터 베이스를 구축하여 지반침하 발생과 영향인자간의 상관관계를 분석하였으며, 영향인자들의 가중치(weight)를 산정하여 상대적인 중요도를 평가하고자 하였다. 또한, GIS를 이용하여 광역적 지반침하 위험예측도를 작성하고, 기존 붕괴자료를 이용하여 적용모델의 예측정확도를 검증하고자 한다. 본 논문에서는 강원도 정선지역에 위치한 폐광산지역에 대해 빈도비모델과 계층분석기법을 결합한 GIS 기반의 분석모델과 적용사례를 제시한다.

연구대상지역

연구대상지역으로 선정된 곳은 강원도 정선군 고한읍 고한 16리 두문동 일대로 고한읍과 태백시를 연결하는

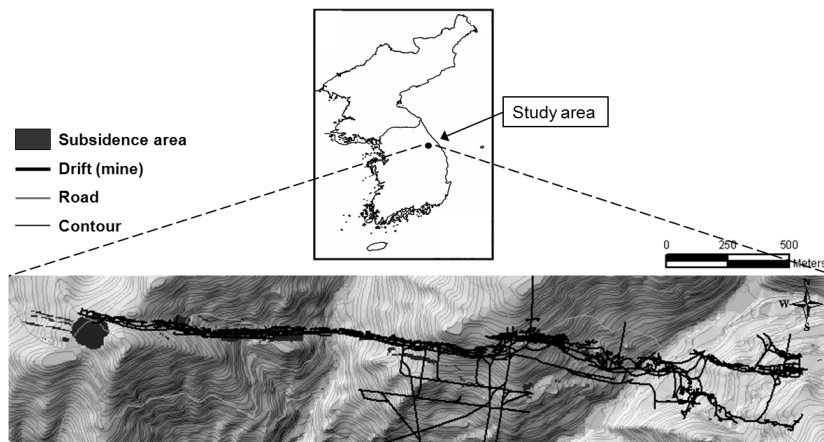


Fig. 1. Location of mine drifts and subsidence occurrences in the study area.

38번 국도가 위치한 지역이다. 이 지역은 지리좌표상 북위 37°12'~37°13', 동경 128°53'10"~128°54'10"에 위치하고, 지형 윤희상 장년기에 해당한다. 지질조건으로는 캄브로-오도비스기의 조선누층군을 기저로 석탄기-트라이아스기의 평안누층군이 분포하며, 평안누층군은 석탄기의 만항층과 금천층, 페름기의 장성층, 함백산층, 동고층으로 구성된다. 연구지역은 세월탄광이 위치한 지역으로 1967년부터 1989년까지 약 20년간 탄층 개발이 진행되었으며, 지표로부터 약 660 m까지 탄층을 개발하여 약 756,000톤의 석탄을 채굴하였다(석탄산업합리화사업단, 2005). 주요 하부 채굴적으로는 세월동1갱, 세월동2갱, 세월동 1갱1편 등의 운반갱이 있으며 도로 직하부 25~100 m 심도에 위치해있다. Fig. 1은 연구지역의 지형과 주요도로, 지반침하가 발생한 위치와 갱도의 분포를 보여준다. 연구지역에서 발생한 지표침하는 주로 산악지형에서 관찰되었고, 38번 국도에서 직접적으로 발생한 사례는 발표되지 않았으나 도로변 우수로와 가드레일에서 미약한 변형이 관찰되었다.

광역적 지반침하 위험도 평가 모델 개발

이론적 고찰

빈도비 모델

빈도비 모델(Frequency ratio, FR)은 다양한 공간자료를 결합하여 기준에 관측된 지반침하의 분포와 지반침하 유발 요인간의 상관관계를 정량적으로 분석, 평가하고 예측할 수 있는 확률통계 기반의 분석기법으로, 미래에 발생할 지반침하는 과거 발생한 지반침하의 환경과 동일한 조건에서 발생한다는 가정을 두고 있다(Akgun et al., 2008). 빈도비는 지반침하 유발 요인의 등급별(Class) 지반침하 발생 면적비율을 해당 등급의 전체 면적비율로 나

눈 값으로 정의되며, 계산식은 아래와 같다. 빈도비는 양의 값을 갖으며, 빈도비가 1보다 크거나 같으면 지반침하와 관련 요인이 양의 상관관계를 갖는 것으로 빈도비 값이 증가할수록 지반침하 발생확률도 증가한다는 것을 의미한다. 반대로, 빈도비 값이 1보다 작을 경우에는 음의 상관관계로서 지반침하 발생확률이 낮음을 의미한다.

$$\text{빈도비} = \frac{\frac{\text{유발요인의 등급별 지반침하 발생 격자셀의 수}}{\text{지반침하 발생 총 격자셀의 수}}}{\frac{\text{유발요인의 등급별 격자셀의 수}}{\text{전체 지역의 총 격자셀의 수}}} \quad (1)$$

연구지역 전체 격자셀에 대한 요인별 빈도비 레이어가 생성되고 나면, 최종적으로 지반침하를 유발하는 8개의 요인의 빈도비 레이어에 대한 격자셀별 선형조합(linear combination)을 통해 연구지역의 전체 격자셀에 대한 지반침하 위험지수(Subsidence hazard index, SHI)를 산정한다.

계층분석기법

계층분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)는 Saaty (1977)에 의해 제안되었으며, 복합적인 이유에 의해 발생하는 문제를 계층화하여 여러 인자로 나누고 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통해 다중요인의 중요도를 산정하는 전문가 시스템 기법의 하나로, 다기준 의사결정 등의 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이는 전문가들의 경험과 지식을 이용하여 여러 가지 인자에 대한 정량적인 가중치를 결정하는 기법으로, 계층분석기법에서는 어떤 문제에 영향을 미치는 요인의 가중치를 산정하기 위하여 쌍대비교를 수행한다. 예를 들어, 3개 영향인자에 대한 가중치의 결정을 위해서 아래와 같은 2차원 비교행렬을 구성할 수 있다(식 (2)). 쌍대비교행렬의 (i, i)에 위

Table 1. Scale for pairwise comparison (after Saaty, 1977)

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate importance	Experience and judgement slightly favor one activity over another
5	Strong importance	Experience and judgement strongly favor one activity over another
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favored very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
9	Eextreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	For compromise between the above values	Sometimes one needs to interpolate a compromise judgement numerically

치한 원소는 동일 인자에 대한 가중치 값으로 항상 1의 값을 갖게 되며, 행렬의 (i, j) 에 위치한 원소는 j 번째 인자에 대한 i 번째 인자의 상대적 중요도를 나타내는데, 이때 상대적 중요도 값은 Table 1에 제안된 척도를 이용할 수 있다.

$$\text{Pairwise comparison} = \begin{bmatrix} 1 & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & 1 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

쌍대비교 행렬을 계산을 통해 최종 결과로서 각 요인의 상대적 가중치를 0~1의 값으로 부여한다. 마지막으로, 쌍대비교행렬의 계산 과정이 일관성 있게 진행되었는지를 알아보기 위해 Consistency Index(CI)와 Consistency Ratio(CR)를 계산하는데, 일반적으로 CR 값이 0.1 이하일 경우 계산 과정의 일관성 있게 진행된 것으로 해석할 수 있다. 계층분석기법의 이론과 계산과정에 대한 자세한 내용은 Bascetin(2007)에 수록되어 있다.

영향인자 선정 및 추출

광산지역의 지반침하는 지질학적, 지형학적, 인간 활동 등과 같은 다양한 요인들의 복합적인 상호작용에 의해 발생한다. 특히, 지반침하 발생의 주요인으로는 채굴 방법, 채굴갱도의 폭, 갱도의 깊이, 갱도의 경사, 광체의 경사, 공동 상반조건, 지하수 조건, 강우, 불연속면 등의 지질구조 등이 있다(Waltham, 1989; 최성용 외, 2009). 본 연구에서는 국내 폐광산 지역의 지반침하 발생에 영향을 주는 다양한 요인들의 상관성을 분석하고 요인별 상대적 중요도를 산정하기 위하여 1:1,200의 수치 갱내도와 지반침하 발생 위치도, 1:5,000의 수치지형도, 시추공 자료 등으로부터 추출 가능한 8가지의 지반침하 영향

인자를 선정하였다(Table 2).

- 갱도의 심도(Drift depth): 갱도의 심도는 광산 지반침하를 유발하는 가장 중요한 요인으로 알려져 있다. 일반적으로 지표면으로부터 채굴적의 심도가 감소할수록 침하량은 증가하는 경향을 보이며, 채굴적의 심도가 증가할수록 지반침하의 발생 확률은 낮게 나타난다(NCB, 1975; Peng, 1993; 이동길 외, 2007).
- 갱도의 밀도(Drift density): 광산 채굴로 인하여 공동이 발생하는 경우, 공동 상단부의 암반강도 저하와 상반의 균열 등을 초래할 수 있다. 특히, 채굴 공동이 공간적으로 밀집한 지역일수록 지반에 미치는 영향이 커지기 때문에 지반침하 발생 확률은 증가한다.
- 갱도로부터의 거리(Distance from drift): 채굴 공동은 갱도의 직상부 지역뿐만 아니라 직상부를 포함한 주변 지역의 지반침하에도 영향을 미치기 때문에 광산 지반침하의 발생은 갱도 위치와 분포에 직접적인 영향을 받는다고 할 수 있다.
- 도로로부터의 거리(Distance from road): 도로의 건설 및 화물을 적재한 차량의 이동 등은 지하수위 변화, 지반의 균열 및 미세 진동에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 도로와 같은 시설물 주변에서 지반침하가 발생할 경우 인명 또는 재산 피해를 줄 수 있기 때문에 지반침하 조사 및 모니터링 수행시 고려되어야 할 인자라고 할 수 있다.
- RMR(Rock mass rating): RMR은 암반의 특성을 나타내는 가장 대표적인 지수로서 0에서 100 사이의 분포를 갖게 되며, RMR 값이 클수록 암반의 품질이 좋은 것을 의미한다. 따라서 RMR 값은 암반 강도, 지반 조건 및 상태를 반영하며 광산침하의 주요한 인자라

Table 2. Selection of factors for evaluating a mine subsidence hazard in this study

Category	Factors	Details
Geohazard map	Subsidence event	Polygon type in a vector layer to raster grids
Mine drift data	Drift depth	DEM* - sea level of drift
	Drift density	Magnitude per unit area from polyline features
	Distance from drift	Distance was computed from polyline features
Borehole data	Rock mass rating	Ordinary Kriging interpolation method applied to 10 boreholes data
	Groundwater level	Ordinary Kriging interpolation method applied to 10 boreholes data
Topographic data	Slope	Slope was calculated by degree from DEM
External data	Distance from road	Distance was computed from polyline features
	Flow accumulation	Flow accumulation was calculated from DEM

* DEM : Digital elevation model

고 볼 수 있다(Kim et al., 2006).

- 지하수위(Groundwater level): 지하수의 상승은 지표수의 오염과 같은 환경적 영향뿐만 아니라 지하수와 지반과의 상호작용으로 인하여 잔류 또는 갱신된 침하 문제 등을 야기할 수 있다(한국광해관리공단, 2008).
- 경사도(Slope): 석탄광 지역에서 발생하는 지반침하의 경우, 경사진 지형일수록 수평변위와 침하가 증가하는 경향을 보인다(지정배와 김중우, 2000).
- 강우 누적 흐름량(Flow accumulation): 광산지역에 강우가 발생할 경우, 이는 지표 및 지하의 토사에 영향을 미치고, 암반의 공극압을 증가시키며 천반의 파괴를 유도한다(Esaki et al., 1989). 지형기록의 영향으로 인해 형성되는 집수구역이나 강우가 많이 유입되는 지역의 경우 침하는 더욱 가속화될 수 있다.

지반침하 위험도 평가 모델 개발

Fig. 2는 연구대상지역의 상대적 지반침하 위험도를 평가하기 위해 설계된 분석모델을 보여준다. 첫 번째 단계에서는 관심지역의 수치지형도, 수치경내도, 시추공자료 등의 공간데이터베이스로부터 지반침하에 영향을 주는 인자들을 추출하고 전처리(Preprocessing)하여 공간분석이 용이하도록 동일한 해상도를 갖는 격자셀 형식의 래스터(Raster) 레이어를 구축한다. 다음으로, 아스키(Ascii) 변환을 통해 각 요인별 레이어의 격자셀로부터 속성값을 추출한 후, 속성값을 6개의 범위(Class)로 나눈다.

두 번째 단계에서는, 8개의 영향 인자에 대하여 각각 Frequency ratio 모델을 적용함으로써 각 레이어의 등급과 등급별 빈도비의 상관관계 분석을 수행한 후, 각 레이어의 모든 격자셀에 빈도비 값을 할당한다. 이때, 빈도비 값은 지반침하 발생의 상대적 위험도를 나타내는 지수로서, 빈도비 값이 클수록 지반침하 발생 확률이 높은 것을 의미한다. 연구지역에 대한 요인별 빈도비 레이어가 모두 생성되면, 8개 레이어의 격자셀별 중첩분석을 통해 연구지역의 지반침하 위험지수(Subsidence hazard index, SHI)를 산정한다(식 (3)). 이 때, i 는 영향인자의 인덱스를 가리키며, 최종적으로 산정된 지반침하 위험도지수는 연구지역의 상대적 지반침하 발생 위험도를 의미한다.

$$SHI = \sum_{i=1}^8 Frequencyratio_i \tag{3}$$

세 번째 단계에서는, 8개의 영향 인자가 지반침하 발생에 미치는 상대적 중요도, 즉 인자별 가중치를 결정한다. 전문가들의 경험과 지식을 기반으로 영향 인자의 쌍대비교를 통해 쌍대비교행렬을 구성하고 고유치(Eigen value) 방법을 적용하여 8개 인자의 상대적 가중치를 계산한다. 가중치가 결정되면, 두 번째 단계에서 생성된 각각의 빈도비 레이어에 가중치를 결합하여 새로운 레이어를 생성하고, 8개 레이어를 통합하여 상대적 지반침하 위험도 레이어를 작성한다(식 (4)).

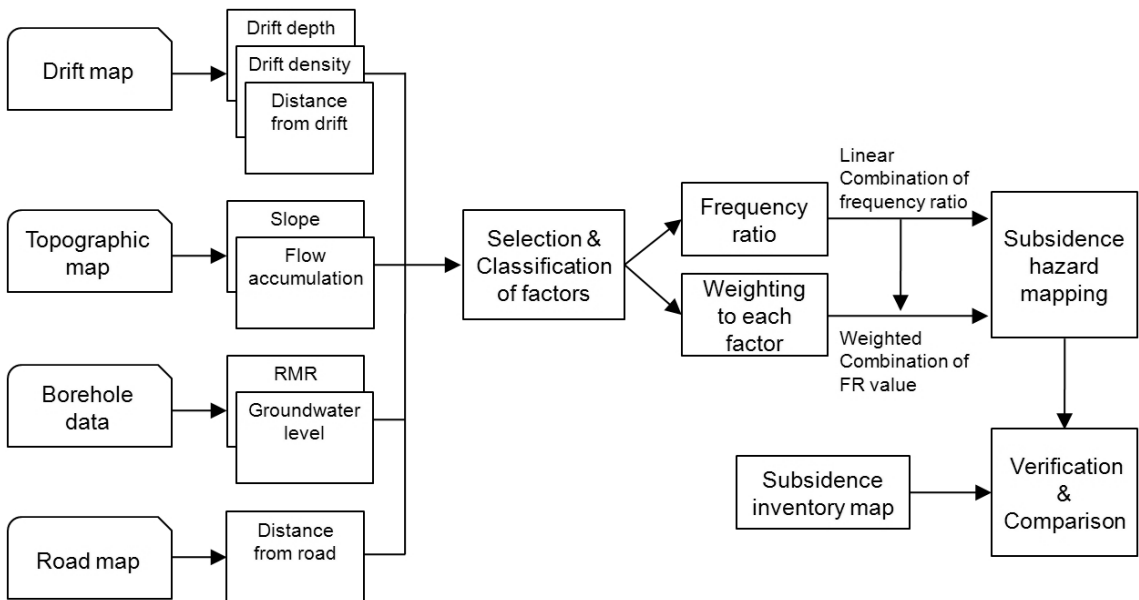


Fig. 2. Study process of subsidence hazard assessment in this study.

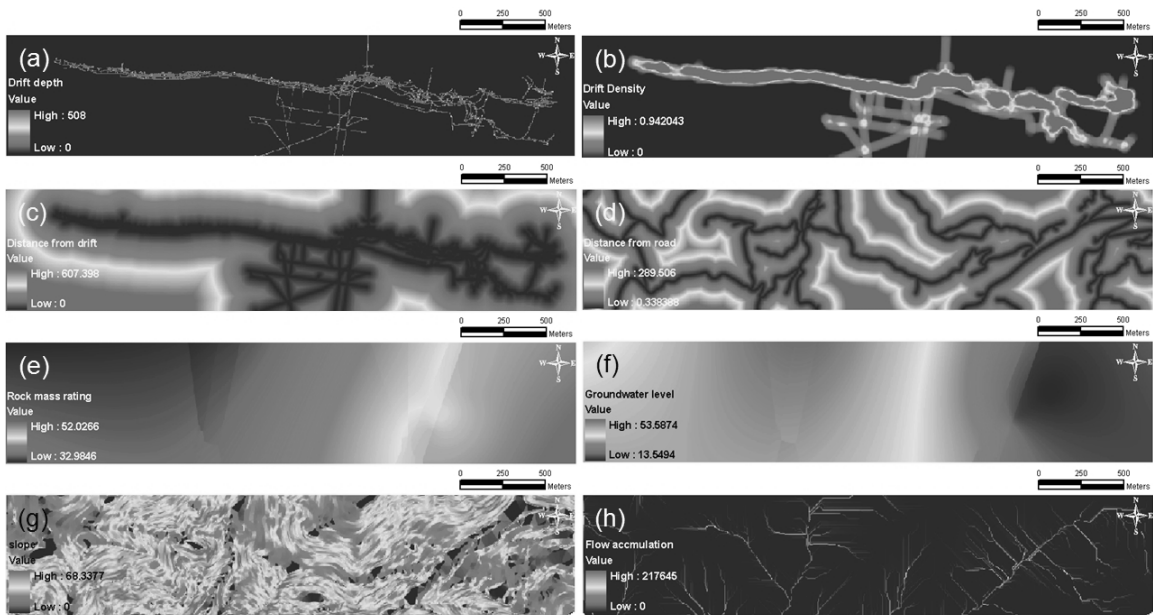


Fig. 3. Thematic maps of study area.

$$SHI = \sum_{i=1}^8 (FR_i \times \text{Weight of factor}_i) \quad (4)$$

네 번째 단계에서는 지반침하 위험도 평가를 위해 적용된 모델의 정확도를 검증하고 비교한다. 8개 영향 인자에 대한 상관성 분석 및 빈도비 모델, 빈도비 모델과 계층분석기법의 통합 분석 모델의 적용을 통해 생성된 지반침하 위험도와 실제 현장조사를 통해 파악된 지반침하 발생 지역의 공간적 분포를 비교분석하여 적용 모델의 지반침하 발생 예측 정확도 및 신뢰도를 정량적으로 평가한다.

현장적용 및 결과

입력자료 및 전처리

본 연구에서는 ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 연구대상 지역을 포함하는 1:5,000의 수치지형도로부터 등고선 자료를 추출하고, TIN(Triangulated Irregular Network) 모델로 변환한 후, 이를 다시 공간분석이 용이한 ArcGIS Grid 형식의 래스터 자료로 변환하여 연구지역의 지형적 특징을 잘 나타낼 수 있는 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 생성하였다. 이때, 변환된 래스터 격자셀의 크기는 5 m × 5 m로 설정하였다. 연구지역의 격자 셀의 개수는 670 × 140개로 총 93,800개의 격자셀 중 1,730개 격자셀에서 지반침하가 발생한 것으로 나타났다.

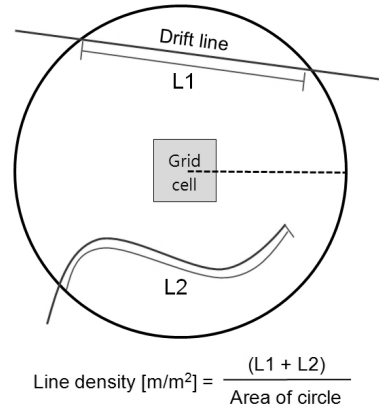


Fig. 4. Principle of computing drift line density.

- 지반침하 발생 위치도: Polygon 타입의 벡터 레이어 (Vector layer)로 구축된 지반침하 발생 위치도 자료를 수치고도모델과 동일한 공간해상도를 갖는 래스터(Raster) 자료로 변환하였다.
- 갯도의 심도: 본 연구에서는 수치지형도로부터 추출한 수치고도모델과 수치갯내도로부터 추출한 갯도의 해발고도 값의 뺄셈 연산을 통하여 갯도의 심도를 계산하였으며, 연구지역에서 갯도가 존재하지 않는 지역의 갯도의 심도는 0으로 할당하였다(Fig. 3(a)).
- 갯도의 밀도: Fig. 4는 본 연구에서 적용한 갯도 밀도

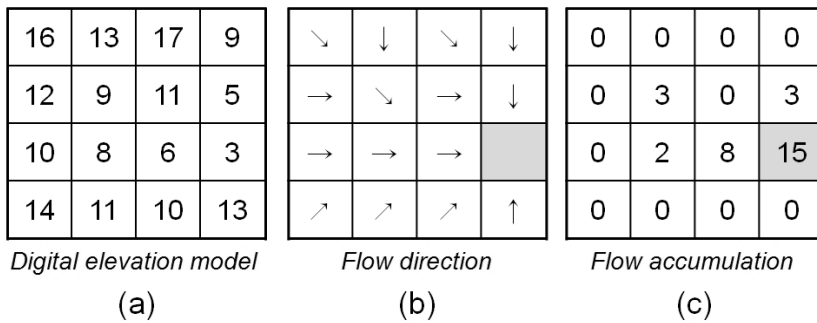


Fig. 5. Principle of computing flow accumulation from DEM.

의 계산 원리를 보여준다(최요순, 2009). 임의의 격자셀로부터 해당 격자셀을 포함하는 원을 그리고 원 내부에 포함되는 직선 또는 곡선으로 이루어진 쉼도들의 길이를 합한 후, 길이의 합을 원의 면적으로 나누어 값을 해당 격자셀의 밀도 값으로 산정하였다(Fig. 3(b)). 본 연구에서는 쉼도들의 위치와 분포를 고려하여 원의 반경을 30 m로 설정하였다.

- 쉼도로부터의 거리: 본 연구에서는 polyline 형식으로 이루어진 수치쉼내도로부터 쉼도 자료를 추출하고, ArcGIS의 거리분석 도구를 이용하여 쉼도로부터의 수평 거리를 5 m × 5 m의 래스터 레이어로 구축하였다(Fig. 3(c)).
- 도로로부터의 거리: 본 연구에서는 ‘쉼도로부터의 거리’ 인자와 마찬가지로, ArcGIS의 거리분석 도구와 수치지형도의 도로라인 자료를 이용하여 도로로부터의 거리를 m 단위로 계산하고 공간 데이터베이스를 구축하였다(Fig. 3(d)).
- 강우 누적 흐름량: 본 연구에서는 강우의 흐름과 누적량이 광산 지반침하 발생에 미치는 영향을 근사적으로 정량화하기 위하여 앞서 추출된 수치고도모델과 ArcGIS의 수계분석도구를 이용하여 강우 누적 흐름량을 계산하였다. Fig. 5는 본 연구에서 적용한 강우시 빗물의 흐름 패턴과 빗물 누적 흐름량을 산정하는 원리를 보여준다. 지형의 기복을 잘 반영하는 수치고도모델(Fig. 5(a))에서 상하, 좌우, 대각선 방향으로 둘러싼 8개의 주변 격자로부터 중심 격자셀의 경사도가 가장 큰 방향에 근거하여 빗물의 흐름 방향을 계산하고(Fig. 5(b)), 주변 격자셀로부터 흘러들어오는 누적 빗물양을 해당 격자셀의 강우 누적 흐름량(Fig. 5(c))으로 계산하였다. 연구지역의 강우 누적 흐름량 결과는 Fig. 3(h)에 나타냈으며, GIS를 이용한 광산지역의 지표수 흐름량 산정에 대한 보다 자세한 설명은 최요순 등(2006)을 참고할 수 있다.
- 경사도: ArcGIS의 지형분석도구를 이용하여 수치고

도모델로부터 한 격자셀의 크기가 5 m × 5 m인 경사도 레이어를 구축하였다(Fig. 3(g)). 이를 통해, 지반침하 발생과 지형경사와의 상관관계를 파악하고자 하였다.

- RMR(Rock mass rating): 연구지역과 그 주변지역에 분포하는 총 10개의 시추공 자료(Point-type)를 이용하여, 시추공 자료의 심도별 RMR 측정 등급을 시추공 길이의 가중 평균을 적용하여 해당 시추 지역의 대표 RMR 지수를 산정하였고, Ordinary Kriging 내삽기법의 적용을 통해 연구지역 모든 격자셀의 RMR 지수를 추정하였다(Fig. 3(e)). 본 연구에서 산정된 RMR은 32~48의 분포로 나타났다.
- 지하수 수위: RMR과 마찬가지로 10개의 시추공 자료로부터 지하수위 자료를 추출하였고, 주위에 알려진 값들의 가중 선형조합을 통해 미지의 값을 예측하는 정규 크리깅(Ordinary Kriging) 기법을 적용함으로써 연구지역 전체 격자셀의 지하수위 값을 산정하였다(Fig. 3(f)). 지하수위 값은 m단위이며, 각 지점의 지표로부터의 심도를 의미한다.

빈도비 기법을 이용한 지반침하 발생과 영향 인자간의 상관관계 분석

본 연구에서 제안된 모델을 적용하고 평가하기 위하여 모두 8개의 영향 인자가 선정되었으며, 모든 인자는 연속형 자료로 구성되어 있다. 지반침하 발생과 영향 인자의 등급별 상관관계의 분석을 수행하기 위해서 자료의 히스토그램(Histogram) 분포를 고려하여 각 요인들을 6개의 등급으로 분류하였다. 또한, 빈도비 모델의 적용을 통한 영향 인자의 등급(Class)별 빈도비 값을 Table 3에, 적용 결과의 시각적인 해석과 평가를 위하여 영향 인자의 등급 변화에 따른 빈도비의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 X축은 각 요인의 등급별 분포를 6개 등급으로 나타낸 값이며, Y축은 해당 등급의 지반침하 발생 빈도비 값을 보여준다.

Table 3. Correlation between subsidence occurrences and related factors

Factor	Class	Subsidence occurrence grids	Subsidence occurrence ratio (%)	No. of Grids in domain	Domain ratio (%)	Frequency ratio
Drift depth (m)	0	1,425	82.37	88,502	94.35	0.87
	0-100	81	4.68	1,706	1.82	2.57
	100-150	105	6.07	1,476	1.57	3.86
	150-200	45	2.60	1,002	1.07	2.44
	200-250	40	2.31	530	0.57	4.09
	> 250	34	1.97	584	0.62	3.16
Drift density	0	656	37.92	66,612	71.01	0.53
	0-0.1	362	20.92	13,956	14.88	1.41
	0.1-0.2	266	15.38	5,672	6.05	2.54
	0.2-0.3	139	8.03	2,713	2.89	2.78
	0.3-0.4	119	6.88	2,011	2.14	3.21
	> 0.4	188	10.87	2,836	3.02	3.59
Distance from drift (m)	0-25	959	55.43	23,281	24.82	2.23
	25-50	253	14.62	11,213	11.95	1.22
	50-75	204	11.79	9,107	9.71	1.21
	75-100	163	9.42	7,812	8.33	1.13
	100-150	108	6.24	12,630	13.46	0.46
	> 150	43	2.49	29,757	31.72	0.08
Distance from road (m)	0-25	803	46.42	27,726	29.56	1.57
	25-50	618	35.72	20,327	21.67	1.65
	50-75	248	14.34	13,989	14.91	0.96
	75-100	47	2.72	10,436	11.13	0.24
	100-150	14	0.81	13,385	14.27	0.06
	> 150	0	0.00	7,937	8.46	0.00
Rock mass rating (RMR)	32-35	1,336	77.23	20,119	21.45	3.60
	35-38	128	7.40	26,866	28.64	0.26
	38-41	88	5.09	11,657	12.43	0.41
	41-45	136	7.86	12,901	13.75	0.57
	45-48	19	1.10	11,335	12.08	0.09
	> 48	23	1.33	10,922	11.64	0.11
Groundwater level (m)	12-20	38	2.20	22,167	23.63	0.09
	20-32	73	4.22	10,149	10.82	0.39
	32-42	685	39.60	17,484	18.64	2.12
	42-46	353	20.40	19,574	20.87	0.98
	46-48	179	10.35	11,721	12.50	0.83
	> 48	402	23.24	12,705	13.54	1.72
Slope (°)	0-15	444	25.66	16,178	17.25	1.49
	15-20	664	38.38	16,089	17.15	2.24
	20-25	341	19.71	18,532	19.76	1.00
	25-30	144	8.32	18,809	20.05	0.42
	30-35	107	6.18	14,428	15.38	0.40
	> 35	30	1.73	9,764	10.41	0.17
Flow accumulation	0-10	217	12.54	12,843	13.69	0.92
	10-30	362	20.92	20,952	22.34	0.94
	30-50	258	14.91	14,441	15.40	0.97
	50-100	345	19.94	20,366	21.71	0.92
	100-500	392	22.66	19,278	20.55	1.10
	> 500	156	9.02	5,920	6.31	1.43

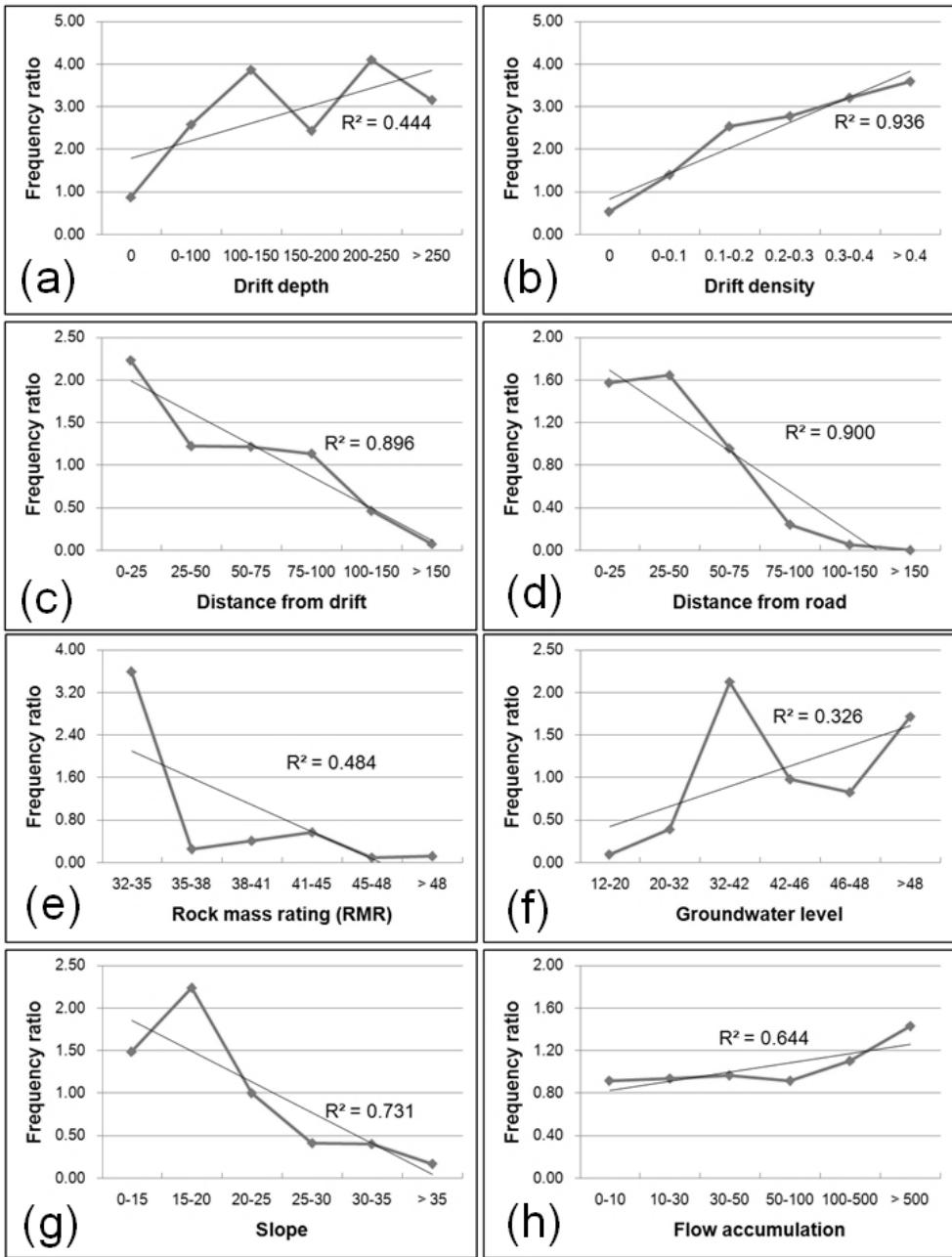


Fig. 6. Correlation analysis between subsidence occurrence and related factors.

지반침하 발생과 갱도의 심도의 관계에서는 심도 변화에 따른 빈도비 값의 변화가 다소 불규칙한 패턴을 보였고, 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았다(Fig. 6(a)). 자료의 전처리과정에서 연구지역의 격자셀에 갱도가 분포하지 않는 지역일 경우 갱의 심도 등급을 0으로 할당하였고, 이

등급에서 빈도비 값이 가장 낮은 것으로 나타났지만 그 이후 갱도의 심도가 커질수록 지반침하 발생 확률이 감소할 것이라는 기대와는 달리 불규칙한 상관성을 보였다.

갱도의 밀도는 8개의 지반침하 관련 요인 중에서 가장 큰 상관성($R^2=0.936$)을 보였다. Fig. 6(b)에 보이는 바와

같이 갱도의 밀도가 증가함에 따라 빈도비도 증가하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 지표 주변 또는 지하에 존재하는 갱도의 공간적 밀집도가 높은 지역에서 지반침하가 발생할 확률이 높다는 것을 정량적으로 보여준다고 할 수 있다. 이는 광산지역의 지표 또는 지하 공동이 수평적으로 밀집 또는 수직적으로 중첩되어 있을 경우 지하 공동의 직상부 지역뿐만 아니라 직상부를 포함한 주변 지역의 상부 지반 강도 감소 효과가 더욱 크기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

갱도로부터의 수평거리 또한 상관계수가 0.896으로 지반침하 발생과 매우 높은 상관성을 보였으며, 갱도로부터의 거리가 증가할수록 빈도비 값이 감소하는 경향을 확인할 수 있다(Fig. 6(c)). 가장 가까운 거리 등급인 0~25 m인 구간에서 빈도비가 2.23으로 가장 높은 상관성을 보였고, 실제로 절반 이상의 지반침하가 갱도로부터의 거리가 25 m 이내인 지역에서 발생하였다. 또한, 거리 등급이 25~100 m인 구간에서는 빈도비 값이 1.1~1.2의 분포를 보여 다소 약한 양의 상관성을 보인 반면, 갱도로부터의 거리가 100 m 이상일 경우 지반침하 발생 확률이 현저히 떨어지는 결과를 나타냈다.

도로로부터의 수평거리 인자 역시 높은 상관성($R^2=0.900$)을 나타냈으며, 도로로부터의 거리가 증가할수록 빈도비가 대체적으로 감소하는 경향성을 파악할 수 있었다(Fig. 6(d)). 본 연구지역의 경우 도로로부터의 거리가 50 m 이상인 경우 빈도비 값이 1 이하로 나타났고, 도로로부터의 거리가 더욱 증가할수록 지반침하 발생 확률이 크게 감소하는 음의 상관성을 보였다. 현장조사 결과 지반침하발생으로 인하여 38번 국도 주변과 도로 가드레일 일부에서 균열 현상이 관찰되었으며, 이를 위해 도로나 시설물 주변에 대한 정기적인 모니터링 또는 보강공사가 필요할 것으로 판단된다.

RMR 값이 32~48의 분포로 나타난 것으로 볼 때, 연구지역은 대체적으로 빈약(Poor) 또는 적당(Fair)한 수준의 암반등급을 보인다고 할 수 있다. 본 연구지역의 경우 RMR 등급이 35 이상인 경우 빈도비 값이 대체적으로 0.5 이하로 낮은 지반침하 확률을 보였으나, RMR 등급이 32~35인 구간에서는 매우 높은 빈도비 값(3.6)이 나타났고(Table 3), 실제 이 구간에서 약 80%의 지반침하가 발생함을 확인할 수 있었다. 이는, RMR 등급이 낮을수록 절리조건이 복잡하여 암반의 지지력이 저하되고, 암질지수(Rock quality designation, RQD) 및 암반강도 등이 불량하기 때문에 지반침하에 취약한 것으로 판단된다.

지하수위 조건의 경우 13~54 m의 분포를 보였으며(Fig. 6(f)), 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않았다. 지표로

부터 심도가 32~42 m인 구간에서 가장 높은 빈도비를 보였으며, 지하수위가 낮아질수록 빈도비가 점차 증가하는 형태를 보였다. 이는 시추공 자료로부터 정규크리깅 기법을 이용하여 연구지역의 지하수위 값의 보간을 수행할 때, 지하수위가 토양 및 암석의 공극이나 절리 조건에 따라 급변할 수 있는 점을 반영하지 못한 한계로 해석된다.

경사도는 0~69도의 분포를 보였으며, 경사도가 15~20도의 완만한 경사를 보이는 곳에서 가장 높은 빈도비 값을 나타냈다(Fig. 6(g)). 또한, 경사도가 25도 이상인 구간에서는 빈도비 값이 1 미만으로 나타났으며, 경사도가 증가할수록 빈도비 값이 감소하는 경향을 살펴볼 수 있었다. 특히, 경사도가 35도 이상일 경우 지반침하 발생 확률은 매우 낮았는데 이는 기존에 급경사 지역에서의 지반침하 조사가 원활히 이루어지지 못한 점이 반영된 것으로 판단된다.

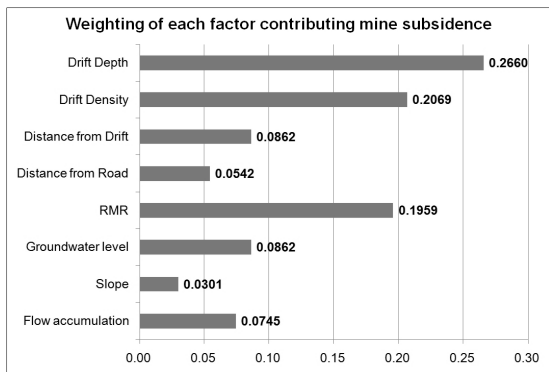
강우 누적 흐름량 인자의 경우 연구지역 대부분의 격자셀 값이 0이며 최대 217,645까지의 분포를 보인다. 이는 실제 강우량을 의미하는 것이 아니라, 지형기복을 이용한 수계의 흐름방향과 흐름량을 모사한 것으로, 격자셀 값이 217,645인 경우 모든 격자에 강우가 1 만큼 내린다고 할 때, 주변에 위치한 217,645개의 격자셀로부터 빗물이 누적되어 해당 격자로 들어오는 것을 의미한다. 그러나, 해당 격자셀로 유입된 누적 흐름량 또한 경사가 가장 급한 방향의 다른 격자셀로 이동한다고 가정하기 때문에 강우 누적 흐름량의 전부가 해당 격자셀에 영향을 미친다고 볼 수는 없다. 특히, 강우 누적 흐름량이 적은 구간에서는 지표면으로 침투하는 빗물의 양이 미미하기 때문에 실제로 암반 또는 공동에 미치는 영향력은 매우 작을 것이다. 반면에 지형기복에 따라 빗물이 모여 지류 또는 수계를 형성할 경우(누적 흐름량이 많은 경우)에는 빗물이 지표 또는 지하로 침투하여 공동 상부지반 또는 지하 공동에 큰 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서도 Fig. 6(h)에 나타난 바와 같이 격자셀의 흐름량이 100 이하인 구간에서는 다소 낮은 빈도비 값을 보이다가, 격자셀의 누적 흐름량이 100 이상인 구간부터 빈도비 값이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

계층분석기법에 의한 영향인자들의 상대적 중요도 결정

지반침하에 영향을 미치는 다중인자들의 상대적 중요도(가중치)를 결정하기 위하여 지질공학 및 지리정보시스템(GIS) 분야 전문가 2명에 대해 설문조사를 실시하였다. 본 연구에서는 Saaty(1977)가 제안한 방법을 이용하였으며, Table 4는 전문가들의 설문 결과에 의해 구성된 쌍대비교 행렬을 나타낸다. 8개 영향인자에 대한 쌍대비교행렬의 계산 결과, 갱도 심도와 갱도 밀도가 지반

Table 4. Pairwise comparison judgment matrix on eight factors

	Drift depth	Drift density	Distance from drift	Distance from road	RMR	Ground-water level	Slope	Flow accumulation
Drift depth	1.00	1.00	3.00	5.00	3.00	3.00	7.00	3.00
Drift density	1.00	1.00	3.00	3.00	1.00	3.00	5.00	3.00
Distance from drift	0.33	0.33	1.00	3.00	0.33	1.00	3.00	1.00
Distance from road	0.20	0.33	0.33	1.00	0.20	0.33	3.00	1.00
RMR	0.33	1.00	3.00	5.00	1.00	3.00	5.00	3.00
Ground-water level	0.33	0.33	1.00	3.00	0.33	1.00	3.00	1.00
Slope	0.14	0.20	0.33	0.33	0.20	0.33	1.00	0.33
Flow accumulation	0.33	0.33	1.00	1.00	0.33	1.00	3.00	1.00

**Fig. 7.** Relative importance among the factors contributing mine subsidence.

침하에 큰 영향을 미치는 인자로 선정된 반면, 경사도와 도로로부터의 거리 인자의 영향은 상대적으로 낮게 평가되었다(Fig. 7). 즉, 전문가들은 갱도에 의한 영향을 가장 중시하였으며, 그 다음으로 암반 상태, 수계 조건 등을 높게 평가하였다고 할 수 있다. 또한, 쌍대비교행렬 계산과정에서 발생할 수 있는 오차를 평가하기 위해 Consistency index(CI)와 Consistency ratio(CR)를 계산하였다. CR값이 0.05로 나타난 것으로 볼 때, 쌍대비교 수행이 일관성 있게 진행된 것으로 판단된다(Bascetin, 2007).

GIS 기반의 광역적 지반침하 위험도 작성

8개의 지반침하 영향 인자(갱도의 심도, 갱도의 밀도, 갱도로부터의 거리, 도로로부터의 거리, RMR, 지하수

위, 경사도, 강우 흐름 누적량 등)에 대해 부여된 빈도비와 계층분석기법을 통해 산정된 요인별 가중치를 이용하여 지반침하 위험지수(Subsidence hazard index, SHI)를 산정하고, ArcGIS 프로그램을 이용하여 두 모델에 대한 지반침하 발생 위험 예측도를 생성하였다. Fig. 8(a)는 8개의 빈도비 레이어를 격자셀별로 선형 조합(linear combination)하여 생성된 지반침하 위험예측도(Subsidence hazard map)를 나타내며, Fig. 8(b)은 8개의 빈도비 레이어에 요인별 가중치를 결합하여 가중선형 중첩을 수행한 지반침하 위험예측도 결과를 보여준다. 지반침하 위험 예측도의 격자셀 값은 상대적인 지반침하 위험지수로서 연구지역의 지반침하 발생 위험도를 상대적으로 나타내는 척도로 해석할 수 있다.

빈도비 모델만 적용된 지반침하 위험도 레이어(Fig. 8(a))를 살펴보면, 갱도가 위치한 지표 주변지역에서 지반침하 발생 위험도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 지역은 갱도의 밀도가 높고 갱도로부터의 거리가 작기 때문에 높은 빈도비 값이 부여되고, 갱도가 위치하지 않은 모든 격자셀의 갱도의 심도는 0이기 때문에 낮은 빈도비 값을 할당받기 때문이라고 할 수 있다. 연구지역의 좌측 상단 부분에서 갱도가 존재하지 않음에도 불구하고 지반침하 위험지수가 높게 나타난 부분을 찾아볼 수 있는데, 이는 해당지역의 암반의 RMR이 뚜렷한 양의 상관성을 보인 32~35 등급으로 주로 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 연구지역 우측 상단 부분이나 좌측 하단의 일부 지역에서 지반침하 위험도가 높게 나타난 것은 높은 강우 누적 흐름량의 영향이 반영된

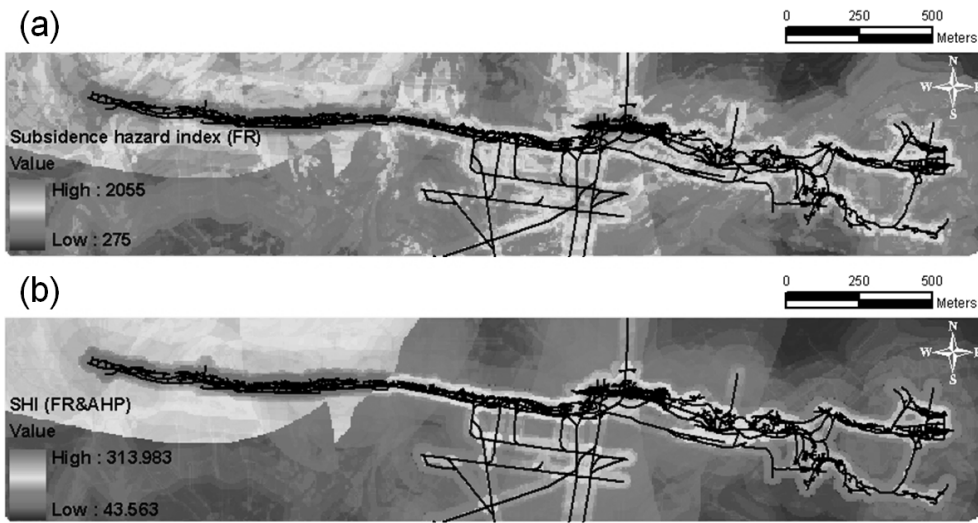


Fig. 8. Subsidence hazard maps. (a) Frequency ratio (b) Integrated model (FR with AHP).

것으로 해석될 수 있다.

지반침하의 영향인자의 가중치와 빈도비 값이 통합된 지반침하 위험 예측도(Fig. 8(b))에서도 주로 갯도가 위치한 지점과 그 주변 지역에서 지반침하 위험지수가 높은 것을 확인할 수 있다. 이를 Fig. 8(a)의 결과와 비교해본 결과, 상대적으로 높은 중요도를 갖는 갯도의 심도, 갯도의 밀도 인자의 영향으로 인해 갯도가 존재하는 지역과 그렇지 않은 지역의 지반침하 위험지수가 뚜렷하게 차이나는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 갯도의 존재 여부와 관계없이 연구지역 좌측 상단 부분의 지반침하 위험도가 다른 지역과 극명하게 차이나는 것을 볼 수 있는데, 이는 상대적으로 높은 가중치를 가진 RMR 인자의 영향력이 크게 반영된 것으로 추정된다. 연구지역의 지반침하 위험지수 분포를 살펴본 결과, 가중치가 높게 산정된 인자들로 인하여 상대적으로 가중치가 낮은 영향인자들의 효과는 거의 무시되어 나타나지 않은 것으로 판단된다.

적용 모델의 검증

지반침하 위험예측도는 연구지역의 지반침하 위험도에 대한 상대적 순위를 나타내며, 예측 결과의 정확도를 검증하기 위해 연구대상지역의 지반침하 위험예측도와 현장조사를 통해 관측된 실제 지표침하 지점을 비교하였다. 또한, 본 연구에서 제안된 2가지 모델에 대한 예측정확도 결과를 정량적으로 검증하고 비교하기 위해 area under curve(AUC) 기법을 적용하였다(Fig. 9). 우선, 지반침하 위험예측도의 모든 격자셀에 나타난 위험지수를 내림차

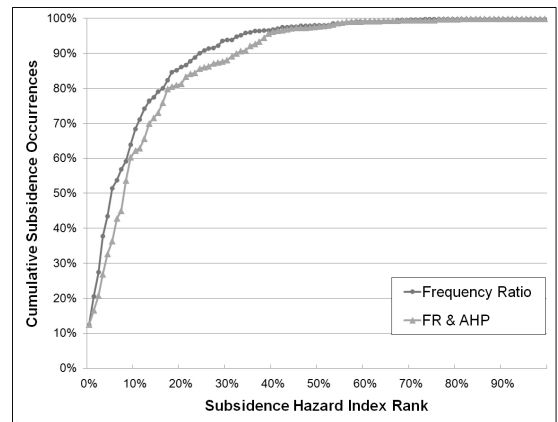


Fig. 9. Cumulative frequency diagrams for verification of applied models.

순으로 정렬하여 1% 간격으로 면적을 100등분하여 x축에 나타내고, 내림차순으로 정렬된 단위면적(1%)당 실제 지반침하가 발생한 지점의 면적의 누적비율 값을 y축에 나타낸다. 이때, x축과 y축이 이루는 전체 면적에 대한 누적비율곡선(Cumulative frequency diagram) 아래 부분의 면적 비율을 백분율(%)로 나타낸 값이 지반침하 예측 정확도이다(최종국 외, 2007). 이것은 연구지역에 적용된 모델의 지반침하 발생 예측 능력을 정량적으로 보여주는 지표라고 할 수 있다.

Fig. 9는 본 연구에서 적용된 모델에 대한 누적비율곡선을 보여준다. 빈도비 모델의 경우, 지반침하 위험지수

상위 20% 구간에서 전체 지반침하의 약 85%가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 대부분의 침하가 상위 60% 구간 이내에서 발생한 것으로 해석할 수 있다. x축과 y축으로 둘러싼 전체 면적을 1로 가정하고, 곡선 아래 부분의 면적(area under curve)을 계산한 결과 빈도비 모델(Frequency ratio)은 0.897로 계산되었고, 빈도비와 가중치가 결합된 모델(FR+AHP)의 경우 0.874로 나타났다. 이는 본 연구 지역에 적용한 모델의 지반침하 위험예측 정확도가 각각 89.7%, 87.4%임을 의미한다. 이와 같은 예측 결과로 볼 때, 본 연구지역에 적용한 2가지 분석모델은 모두 신뢰할만한 수준이라고 판단된다.

결 론

본 연구에서는 폐광산 지역의 상대적 지반침하 위험도를 평가할 수 있는 GIS 기반의 분석모델을 제시하였다. 분석모델은 통계적 자료에 기반을 둔 빈도비 모델과 전문가의 지식과 경험에 기반을 둔 계층분석기법을 GIS와 결합한 것으로, 강원도 정선에 위치한 폐광산 지역의 현장적용 결과, 대상지역의 상대적 지반침하 위험도를 평가할 수 있었다. 그 결과, 수계 흐름이 모이는 집수구역, 갱도가 공간적으로 밀집된 부분과 RMR이 낮은 지점에서 지반침하 위험지수가 높게 나타났으며, 상대적 위험도가 큰 지점에서 실제 지반침하도 주로 발생한 것으로 미루어볼 때, 분석모델이 제시하는 결과가 지반침하 평가와 예측을 위한 도구로써 활용될 수 있음을 시사하였다.

본 연구에서 제안된 분석모델의 경우 GIS 전처리과정을 통해 기구축되어 있는 기초자료(갱내도, 지하자료)로부터 쉽게 획득할 수 정보요소들을 입력인자로 고려하였고, 기타 분석법으로는 적용하기 어려운 갱도의 공간적 밀집도와 강우에 의한 집수구역에 대한 모델링을 통해 보다 실제적인 평가를 수행하였다. 또한, 광역적 범위의 지반침하 위험도 평가를 신속하고 저렴하게 수행할 수 있는 장점이 있으며, 적용현장에 따라 영향인자들의 가중치 등을 쉽게 변경하여 민감도 분석을 수행할 수 있는 등 다양한 결과를 제시할 수 있기 때문에 폐광산 지역의 지반침하 예측 및 광해관리 계획 수립을 위한 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서는 GIS를 이용하여 쉽게 획득할 수 있는 자료를 통해 지반침하 영향인자들을 선정하고 전처리를 수행하였으나 보다 정밀하고 현실적인 모델링의 수행을 위해서는 폐광지역의 지반공학적인 특징을 보다 잘 반영하는 Q-system이나 토양 투수율 자료 등이 향후 측정될 경우 추가적으로 활용되어야 할 것이며, 침수되어 있는

폐갱도의 상태를 반영하기 위해 폐갱도의 고도에 따른 지하수위의 산정이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 지반침하 자료에 의한 상관성 분석과 전문가에 의한 요인별 가중치 선정 단계가 개별적으로 이루어졌으나, 영향인자의 중요도나 가중치 산정시 오차를 보완하기 위해서는 상관성 분석 자료를 토대로 한 가중치 산정 방식의 대안이 가능할 것이며, 영향인자 및 가중치에 대한 민감도 분석과 추가적인 현장적용 등의 장기적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2010년 한국광해관리공단의 광해방지기술개발사업(GIS와 광해모델링 기법을 이용한 광해관리 Total Solution 기술 개발), 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 수행되었으며, 또한 논문 작성은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

- 김기동, 2006, 지리정보시스템(GIS)을 이용한 폐탄광 지역의 지반침하 예측 및 검증, 박사학위 논문, 연세대학교, 서울.
- 김종우, 송원경, 장광택, 2007, “지하갱도가 지반침하에 미치는 영향에 관한 실험적 연구,” *한국지구시스템공학회지*, 제44권, 제3호, pp. 208-217.
- 석탄산업합리화사업단, 2005, 정선정암지역 지반안정성 정밀조사보고서, 기술총서 2005-10, p. 18.
- 이동길, 조영도, 정용복, 송원경, 2008, “사례조사에 의한 국내 지반침하 특성분석 연구,” *KIGAM Bulletin*, 제12권, 제1호, pp. 1-10.
- 정용복, 송원경, 강상수, 2008, “갱도의 심도 정보만을 고려한 지반침하위험도 평가법 개발,” *터널과 지하공간*, 제18권, 제4호, pp. 272-279.
- 지정배, 김종우, 2000, “원형공동의 점진적인 붕락에 따른 지표침하 특성,” *터널과 지하공간*, 제10권, 제1호, pp. 33-44.
- 최성웅, 김재동, 최광수, 2009, “폐광산 지역에서의 지반침하예측을 위한 퍼지추론기법 적용 연구,” *터널과 지하공간*, 제19권, 제5호, pp. 463-472.
- 최성웅, 전양수, 박의섭, 정용복, 천대성, 2005, “지반침하 메커니즘 분석 및 평가 프로그램 개발,” *터널과 지하공간*, 제5권, 제3호, pp. 195-212.
- 최요순, 박형동, 선우춘, 정용복, 2009, “인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 사면붕괴 위험도 평가를 위한 퍼지 이론과 계층분석적차 기법의 적용,” *한국지구시스템공학회지*, 제46권, 제1호, pp. 45-60.

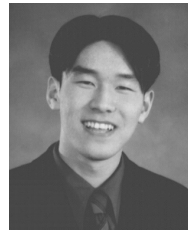
- 최요순, 선우춘, 박형동, 2006, “광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화,” *한국지구시스템공학회지*, 제43권, 제5호, pp. 429-438.
- 최종국, 김기동, 이사로, 김일수, 원중선, 2007, “GIS 및 확률모델을 이용한 폐탄광 지역의 지반침하 위험 예측,” *자원환경지질*, 제40권, 제3호, pp. 295-306.
- 한국광해관리공단, 2008, 한국형 광산지역 지반침하의 안정성 평가기법 및 소프트웨어 개발, 기술총서 2008-43, pp. 123-125.
- 한국광해관리공단, 2009, 광해방지사업 기초자료 확보를 위한 연구보고서, p 88.
- Akgun, A., Dag, S. and Bulut, F., 2008, “Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models,” *Environmental Geology*, Vol. 54, pp. 1127-1143.
- Baek, J., Kim, S. -W., Park, H. J., Jung, H. S., Kim, K. D. and Kim, J. W., 2008, “Analysis of ground subsidence in coal mining area using SAR interferometry,” *Geosciences Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 277-284.
- Bascetin, A., 2007, “A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine,” *Environmental Geology*, Vol. 52, pp. 663-672.
- Choi, J. -K., Kim, K. D., Lee, S. and Won, J. -S., 2010, “Application of a fuzzy operator to susceptibility estimations of coal mine subsidence in Taebaek City, Korea,” *Environmental Earth Science*, Vol. 59, pp. 1009-1022.
- Esaki, T., Kimura, T. and Shikata, K., 1989, “Subsidence and environmental impacts In Japanese coal mining,” *Proceedings of the 30th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, pp. 511-518.
- Goel, S. C. and Page, C. H., 1982, “An empirical method for predicting the probability of chimney cave occurrence over a mining area,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 19, No. 6, pp. 325-337.
- Jung, H. -C., Kim, S. -W., Jung, H. -S., Min, K. -D. and Won, J. -S., 2007, “Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis,” *Engineering Geology*, Vol. 92, pp. 1-13.
- Kim, K. D. Lee, S. R., Oh, H. J., Choi, J. K., and Won, J. S., 2006, “Assessment of ground subsidence hazard near an abandoned underground coal mine using GIS,” *Environmental Geology*, Vol. 50, No. 8, pp. 1183-1191.
- Kim, K. D., Lee, S. and Oh, H. J., 2009, “Prediction of ground subsidence in Samcheok City, Korea using artificial neural networks and GIS,” *Environmental Geology*, Vol. 58, pp. 61-70.
- National Coal Board, 1975, Subsidence Engineer’s Handbook, National Coal Board Mining Department, London, p. 111.
- Peng, S. S., 1993, *Surface subsidence engineering*, SME-AIME, Little, CO., pp. 127-133.
- Saaty, T. L., 1977, “A scaling method for priorities in hierarchical structures,” *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, pp. 234-281.
- Waltham, A. C., 1989, *Ground subsidence*, Blackie & Son Ltd, New York, pp. 49-97.



서 장 원

2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부, 공학사

현재 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부, 석박사 통합과정
(E-mail; sjw12325@snu.ac.kr)



최 요 순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부, 공학사
2009년 서울대학교 대학원 에너지시스
템공학부, 공학박사

현재 미국 펜실베이니아 주립 대학교 에너지자원공학과 박사후 연
구원
(E-mail; yuc17@psu.edu)

박 형 동

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
(本學會誌 第47卷 第4号 参照)



윤 석 호

1994년 한양대학교 도시공학과 공학사
1996년 한양대학교 도시공학과 공학석사

현재 한국광해관리공단 기술연구센터 선임연구원
(E-mail; yoon912@hanmail.net)



권 현 호

1990년 방송통신대학교 법학과, 법학사
1998년 자원관리기술사
2009년 강원대학교 대학원 지구환경시
스템공학부, 공학석사

현재 한국광해관리공단 기술연구센터 센터장
(E-mail; hyho@mireco.or.kr)



고 와 라

2002년 전남대학교 지구시스템공학과 공
학사
2004년 전남대학교 지구시스템공학과 공
학석사

현재 한국광해관리공단 기술연구센터 선임연구원
(E-mail; wrgo@mireco.or.kr)