

연구논문

빈도비 모델과 지표 영향 반경을 결합한 GIS 기반의 폐탄광지역 지반침하 위험도 분석기법 개발

손 진¹⁾ · 서장원²⁾ · 이희욱³⁾ · 박형동^{1)*} · 이승호⁴⁾

GIS-based Subsidence Hazard Analysis on Abandoned Coal Mine Sites Combining the Frequency Ratio and Radius of Influence

Jin Son, Jangwon Suh, Huiuk Yi, Hyeong-Dong Park* and Seungho Lee

(Received 11 November 2015; Final version Received 1 December 2015; Accepted 17 December 2015)

Abstract : The objective of this research is to design the analysis model to assess mine subsidence hazard with statistical approaches which considering the triggering factors within the radius of influence in geographical information systems (GIS) environment. The triggering factors are selected as slope, flow accumulation, drift depth, drift density and distance to drift, which are induced from digital drift map and digital elevation model. Those factors are adopted to conduct frequency ratio analysis. In order to reinforce preceding statistical approaches, the suggesting method averages the frequency ratio of each grid cell as well as surrounding cells within the radius of influence specified from drift depth and the angle of break. To compare with existing method, we conduct the case study on abandoned coal mine sites in Samcheok, Gangwon province. It is identified that the accuracy of suggesting method (75.90%) has 8.31% higher point than that of existing method (67.49%) when analyze the produced hazard maps with the area under the curve (AUC) method.

Key words : Mining subsidence, GIS, Frequency ratio, Radius of influence

요약 : 본 연구에서는 지리정보시스템 환경에서 주변지역(지표영향반경내)의 특성값을 고려할 수 있는 통계적 기법 기반의 광산 지반침하 위험도 평가 모델을 개발하였다. 연구지역의 수치지형내도와 수치지형도로부터 지반침하를 유발시킬 수 있는 지형경사도, 지표수 흐름누적량, 갱도 심도, 갱도 밀집도, 갱도와의 거리 등 5가지 인자를 도출하였으며 영향인자와 지반침하 발생이력 자료와의 상관관계를 분석하기 위해 빈도비 모델을 적용하였다. 기존의 통계적 접근법이 영향인자 레이어 별 동일 격자셀에 해당하는 빈도비를 합산함으로써 해당 격자셀의 특성값만을 고려하는 한계점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 갱도 심도와 한계각으로부터 영향반경을 산정하여 일정 거리내의 빈도비 합산값의 평균값을 위험도로 산정할 수 있는 기법을 개발하였다. 기존 연구기법과의 비교를 위하여 강원도 삼척시에 위치한 폐탄광 지역을 대상으로 현장 적용을 통한 사례 연구를 수행하였다. 두 분석기법으로부터 산정된 지반침하 발생 위험도를 곡선하면적 기법을 이용하여 예측정확도를 비교분석한 결과, 영향반경을 고려한 분석방법(75.90%)이 기존 기법(67.49%)에 비해 8.31% 포인트만큼 높은 예측 정확도를 보인 것으로 확인되었다.

주요어 : 광산 지반침하, 지리정보시스템, 빈도비 모델, 영향 반경

서론

- 1) 서울대학교 에너지시스템공학부
 - 2) Department of Energy and Mineral Engineering, The Pennsylvania State University
 - 3) 한국지질자원연구원
 - 4) 한국광해관리공단 기술연구소
- *Corresponding Author(박형동)
E-mail: hpark@snu.ac.kr
Address: Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

국내 총 5,396개소의 광산 중 2,871개의 광산에서 지반침하, 수질오염, 산림·폐석, 광미유실 등 다양한 광해의 위험에 노출되어 있다. 특히, 광해가 발생한 전체 광산 중 92%에 달하는 2,631곳이 폐광산지역으로 사회·경제적 피해 또한 계속 증가하고 있으며(MIRECO, 2012), 광산개발이 진행되는 동안뿐만 아니라 사후 관리가 지속적으로 필요한

상황이다. 일정한 범위 내에서 지속적으로 발생하고 비교적 예측 가능한 다른 광해들과는 다르게, 지반침하하는 상대적으로 발생 지역의 예측이 힘들고 짧은 시간에 급작스럽게 발생한다. 이러한 특성과 더불어 발생빈도 국내에서 발생한 전체 광해 피해 5,005건 중 615건으로 높은 비중을 차지(MKE, 2011)하기 때문에, 지반침하하는 폐광산 지역 안전 문제의 주요 이슈로 꼽힌다. 안전한 국토관리 및 개발을 위하여 한국광해관리공단이 중심이 되어 지반침하 방지를 위해 많은 노력을 기울이고 있지만 한정된 예산으로 모든 지반침하 위험 지역을 관리하기는 상당히 어려운 실정이다. 그러므로 휴·폐광산 지역에서 발생하는 지반침하 피해를 최소화하기 위해서는 지반침하 발생 위험 지역 중에서 대응 우선 지역을 특정하는 기술이 필요하다. 또한 광역적인 범위에서의 효과적인 분석을 위해서는 지반침하의 발생과정과 피해양상을 고려한 의사결정지원모델에 관한 연구가 지속적으로 요구되고 있다.

이와 관련된 국내 연구를 살펴보면, 정량적인 분석에 있어서는 크게 수치해석적 분석법과 통계적 평가법을 이용한 연구들이 수행되었으며, 특히 광역적인 범위에 대한 분석에 효과적인 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)를 이용한 연구가 많이 수행되고 있다. 수치해석적인 방법은 지반침하 발생 메커니즘을 고려하여 발생에 영향을 주는 인자를 매개변수로 수식을 구성하여 평가하게 된다(Aksoy *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2009; Jung, 2008; Sheorey *et al.*, 2000). 통계적 평가법은 지반침하가 발생한 지역의 다양한 영향인자 값의 통계적인 연관성을 분석하여 지반침하를 유발하는 정도를 평가하는 방식이다(Choi *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2010; Suh *et al.*, 2010; Suh *et al.*, 2013; Suh *et al.*, 2015). 하지만 수치해석적 분석법은 광역적인 지역에 대해 일괄적으로 적용하는데 한계가 있으며 통계적 평가법은 주변지역의 영향반경을 고려하기 힘들어, 영향반경을 고려한 통계적 기법이 적용된 연구사례들은 드물게 발표되고 있다(Esaki *et al.*, 2008; Djmaluddin *et al.*, 2011).

따라서 본 연구에서는 주변 지역의 위험도를 함께 고려한 지반침하 발생 위험도 평가를 수행하기 위해 통계적 기법과 지표 영향반경을 결합한 GIS 기반의 분석기법을 개발하고자 한다. 수치개념도 자료와 수치지형도, 기타 현장 자료 등의 기본적인 공간 자료가 구비된 경우 GIS를 이용하여 영향반경을 고려한 지반침하 위험지역을 통계학적 기법 중 빈도비 모델을 이용하여 정량적인 지표로 예측하였다. 그리고 최종적으로 지반침하 발생 취약지를 특정할 수 있는 기술을 개발하는 것을 목표로 하였으며, 새롭게 개발된 모델의 정확도를 확인하기 위해서 실제 지반침하가 발생한 강원도 폐광산지역을 분석하여 현장 적용성을 확인하였다.

안식각을 고려한 GIS 기반 지반침하 위험도 통계적 평가모델 개발

빈도비 모델

빈도비 모델(Frequency Ratio, FR)은 어떠한 사건이 발생하였을 때 특정 인자들이 그 사건을 유발하는데 영향을 준다는 가정 하에 특정 지역에서의 해당 인자의 비율과 전체 지역에서의 인자 비율을 비교하여 해당 인자가 해당 사건에 미치는 영향력을 통계적으로 분석하여 정량화하는 기법이다. 본 연구의 목표인 지반침하 위험성 산출에 해당 이론을 적용하면, 구축한 지반 데이터베이스로부터 지반침하가 발생한 지역의 인자들의 영향력을 빈도비 모델을 통해 산정하여 분석대상 전체 지역에서의 위험도를 추정할 수 있다(Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2010; Suh *et al.*, 2013).

빈도비 모델에서의 영향력 산정 방식은 식 (1)과 같이 지반침하 발생에 영향을 줄 것으로 예상되는 인자들의 구간(class)별로 지반침하 발생 면적비율을 해당 등급의 전체 면적비율로 나눈 값으로 산정된다. 만약 각 인자(또는 인자 값 구간)가 지반침하를 발생시키는데 전혀 영향을 주지 않는 독립적인 인자라고 한다면 전체 면적에 대한 해당 인자 구간의 면적 비율과 지반침하 발생 면적에 대한 해당 인자 구간의 면적비율이 같아져서 1로 수렴하게 된다. 반대로 지반침하를 유발시키기 쉬운 인자일수록 지반침하 발생 지역에서 해당 인자 구간 격자셀의 비율이 높아지므로 1보다 크게 되고 반대로 지반침하 발생이 낮아지는 경우에는 0에 가까워지게 된다. 이와 같은 방식으로 모든 인자에 대한 각 인자 값의 구간별로 빈도비 값을 구할 수 있으며, 이를 합산한 것이 최종적인 각 격자셀별 지반침하 위험지수로 산정할 수 있다.

$$FR = \frac{SGFC/TSG}{GFC/TG} \quad (1)$$

SGFC : Subsidence Grid of Factor Class

TSG : Total Subsidence Grid

GFC : Grid of Factor Class

TG : Total Grid

GIS 기반의 한계각을 고려한 지반침하 영향반경 산정법

수치해석적인 평가모델을 적용한 사례들(Aksoy *et al.*, 2004; Peter, 2011)에 따르면, 지반침하 위험도를 평가하기 위해서 주요 요소로 평가되는 것이 지하개도에서 지표까지의 깊이와 침하각 또는 한계각이다. 지표에서 지반침하가 발생할 경우 대략적인 지표침하 영향반경(R)은 식 (2)와 같

이 갱도의 수직상부에서 갱도까지의 깊이(D)와 한계각(θ_{lim} , angle of limit)으로 단순화되어 계산할 수 있다. 실제 지반침하가 발생하는 지역은 침하각(θ_{brk} , angle of break)으로 계산되는 영향 반경으로 특정되는 지역이지만 지표에 영향을 주는 각도는 한계각으로, 침하 자체만이 아닌 간접적인 영향을 받는 지역을 모두 포함한 한계각을 이용하여 지반침하 영향반경을 산정할 수 있다(Fig. 1).

열은 회색으로 도시된 격자셀은 실제 지반침하 발생지역 (compaction zone)으로 갱도까지의 깊이와 침하각을 이용하여 그 영향반경이 계산될 수 있다. 발생지역 주변에 도시된 검정색 격자셀은 지반침하 발생시 다소 지반이 상승하는 등 지반침하로 인해 간접적인 영향을 받는 지역으로 한계각에 의해 영역이 결정된다. 본 연구에서는 GIS를 이용한 분석과정에서 위의 지반침하 발생 메커니즘을 역으로 이용하여 각 격자셀 별 지반침하 위험도를 산정하고자 하였다. 분석하고자 하는 대상을 짙은 회색 격자셀이라고 할 때 갱도까지의 심도와 한계각을 바탕으로 영향반경은 X자로 도시된 영역으로 표현된다. 이를 갱도가 위치한 심도에서 보았을 때 해당 격자셀만 고려하던 기존 기법에서는 갱도가 위치한 격자셀을 고려하지 않지만 영향반경을 고려한 경우 X자로 도시된 영역은 지하 갱도의 열은 회색 격자셀을 포함하는 것으로 나타난다. 따라서 한계각과 갱도 심도를 바탕으로 영향반경을 고려할 경우 갱도의 수직상부에 위치하는 격자셀이 아니더라도 해당 인자를 포함하여 분석할 수 있다는 장점이 있다. 단, 본 분석기법에서 적용되는 한계각은 지반 조건 및 주변 상황에 따라서 달라질 수 있으며, 경험적인 자료나 실험으로부터 얻은 값을 사용하거나 가정을 통해 계산할 수 있다.

$$R = D \times \tan \theta \tag{2}$$

주변 영향 범위를 고려한 지반침하 발생 위험도 평가 모델

본 연구에서 적용할 모델의 분석 절차는 다음과 같다. 우선 수치지형도, 수치경내도로부터 분석대상지역의 지반안정성에 영향을 줄 수 있는 인자 레이어들을 구성한다. 이후 각 영향인자의 구간 및 계급을 정규화 등의 기법을 통해 분류하고 빈도비 분석을 수행한다. 지반침하 발생지역 정보를 바탕으로 각 격자셀마다 부여된 인자별 빈도비를 합산하는 기존 연구와 달리 본 연구에서는 빈도비를 합산하는 과정에서 영향 반경을 도입하였다. 식 (2)를 바탕으로 각 격자셀마다 유효 영향 반경을 산정할 수 있고, 해당 영향 반경 이내의 모든 격자셀의 빈도비 합산 값의 평균을 최종적인 지반침하 발생 위험도로 할당한다. 기존의 빈도비 모델의 경우 해당 격자셀 및 수직하부의 영향 인자만을 고려하게 되므로 주변 지역의 영향을 전혀 고려할 수 없던 반면에, 본 연구에서 제안하는 기법은 영향 반경 이내의 다른 격자셀 및 일정 범위 내의 영향 인자를 포함하여 위험도를 산정할 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 1의 모식도를 보면 짙은 회색으로 도시된 격자셀의 수직 상부의 격자셀의 위험도는 X자로 표시된 각 격자셀 별 빈도비 합산값을 평균을 내어 계산할 수 있다. 실제 지반침하에 영향을 주는 인자의 구간이 포함된 격자셀이 많이 포함될수록 해당 격자셀의 위험도가 높게 산정될 수 있으며, 또한 갱도 심도의 차이로 인해 영향 반경이 달라지므로 적당한 크기의 영향반경을 적용하는 것 역시 중요하다. 위 기법을 통해 예측된 지반침하 발생 위험도는 비교군과의

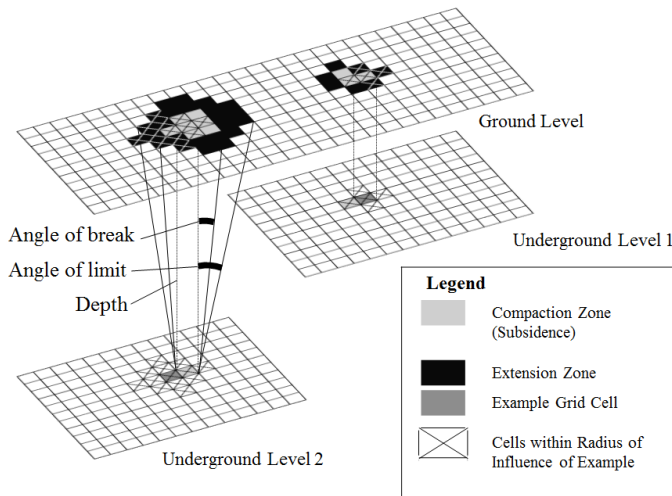


Fig. 1. Concept of radius of influence in subsidence considering the drift depth and the angle of limit (Aksoy et al., 2004).

실제 발생 여부를 확인하여 해당 기법의 정확도를 평가하는 것으로 모델을 검증하도록 한다.

현장 적용: 강원도 폐광산 지반침하 발생지역

연구대상지역

본 연구에서 설계한 지반침하 위험도 평가기법을 적용할 대상지역은 강원도 삼척시에 위치한 OO광산 지역(위도 37°11'~37°12', 경도 129°00'~129°03')이다. 대상지역은 과거 무연탄 생산 지역으로, 생산활동 중에 개발된 지하공동 또는 채굴적 주변 지역의 29개 지점에서 지반침하 발생 및 징후가 발견되었다(Coal Industry Promotion Board, 1999). 연구대상지역은 Fig. 2와 같이 수치경내도, 수치지형도, 지반침하 발생지역 등의 지질 및 지반데이터베이스가 구축되어있다. 수치경내도는 경도의 위치와 고도 정보를 포함하고 있으며, 수치지형도의 경우에는 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)의 형태로 구축하였다.

지반침하 발생지역의 경우 주로 경도 주변부에 분포하고 있는 것을 알 수 있는데, 이후에 빈도비 분석을 통해 적용한

평가 모델의 적합성을 판단하기 위해서 검증지역(validation set)과 훈련지역(training set)을 설정하였다. 검증지역의 경우 전체 지반침하 발생지역에 대해 난수 추출을 통해 전체 발생지 중 20%를 임의로 선정하였고, 해당 지역의 면적은 14.6%를 차지하였다. 빈도비를 산출할 때는 검증지역을 제외하고 훈련지역만을 지반침하 발생지로 설정하도록 하였으며, 최종적인 분석 결과를 검증 대상 지역에서의 위험지수와 비교하였다.

공간데이터베이스 구축

폐광산지역의 지반침하 위험도를 산출하기 위해 빈도비를 이용한 연구들은 다양한 지반침하 영향인자를 다루고 있다. 수치지질도, 시추공 자료와 같은 다양한 지질 및 지반 자료를 활용할 수 있지만 본 연구 대상지역에 구축된 자료의 한계로 인하여, 빈도비 산출에 필수적인 지반침하 발생 위치도(subsidence inventory map)를 비롯하여 수치경내도, 수치지형도만으로 데이터베이스를 구축하였다. 국내의 많은 광산지역들에서 본 연구지역과 같이 분석 가능한 공간자료들에 많은 제약이 존재한다. 따라서 한정된 자료

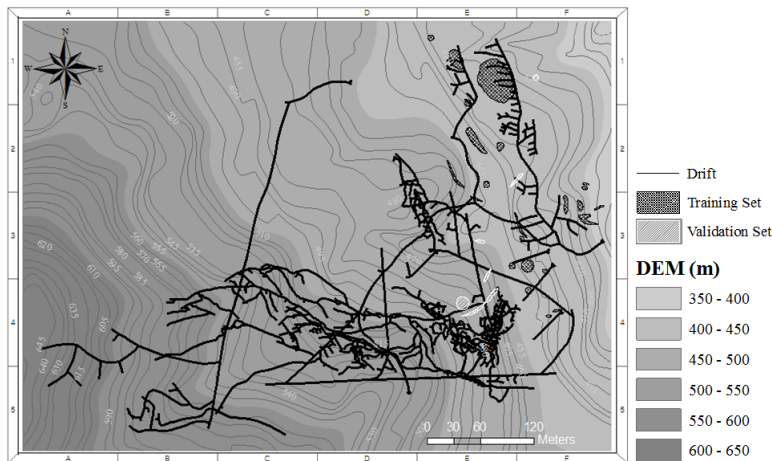


Fig. 2. Map of target area: distributions of mine drift, topography and ground subsidence zone.

Table 1. Spatial database of the abandoned mine site, Samcheok, Gangwon Province

Source	Factor	Spatial Resolution	Type
Mine hazard	Subsidence Area	-	Vector
DEM	Slope	1 m	Raster
	Flow Accumulation		
Mine drift map	Drift Depth	1 m	Raster
	Drift Density		
	Distance to Drift		

로부터 효율적이고 정확도가 높은 분석을 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 분석 알고리즘 개발이 선행되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 최소한의 지형정보와 지반침하 자료로부터 최적의 지반침하 발생위험도를 평가할 수 있도록 Table 1과 같이 분석 모델을 설계하였으며, 추후에 추가될 수 있는 자료들을 병렬적으로 도입할 수 있도록 구현하였다.

지반침하 발생 이력 자료

지반침하 발생 이력 자료는 통계적 기법의 하나인 빈도비 산출을 위해 요구되는 기본적인 자료로서 실제 사건이 일어난 지역, 즉 과거 지반침하 발생지에 대한 정보이다. 이는 지반침하 발생여부를 구분하는 자료로 활용되며, 지반침하 영향인자 자료와 결합하여 지반침하가 발생한 지역의 지반침하 영향인자 특성값의 분포를 확인하는데 활용하였다.

지반침하 영향인자 자료

지반침하 영향인자는 빈도비 산출 시 주된 지반침하의 주요한 발생 인자로 간주되는 자료이다. 영향인자의 속성값이 연속적(continuous)인지 이산적(discrete)인지에 따라 구간 설정 방법이 달라지며, 이를 설정하는 방법에 따라 최종적인 위험도 평가 결과에 큰 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서 다루는 수치지형도 및 수치개내도로부터 도출되는 인자들의 경우 각 수치가 연속적인 분포를 나타내므로, 각 영향인자 별로 각 구간이 충분한 대표성을 지닐 수 있도록 설정하는 분류법을 적용하였다. 분류법을 선택할 때에는 각 구간에서 통계적인 의미를 갖지 않는 방식으로 구간을 설정한다면 일반적으로 알려진 유발인자의 영향도와 다른 빈도비가 산정될 수 있으므로 각 자료별 특성을 충분히 고려할 수 있도록 히스토그램 분포를 바탕으로 구간을 설정하였다(Kim *et al.*, 2006; Suh *et al.*, 2015). 갱도심도를 제외한 나머지 4개의 영향인자의 경우 각 구간이 거의 동일한 격자셀이 분포하도록 분류하는 등면적 분류법을 적용하였다. 갱도심도의 경우 갱도가 분포한 지역이 국소적이며, 자료분포가 고르지 않은 편이므로 각 구간 내 분산 평균이 최소화되면서 다른 구간간의 분산이 최대화되어 구간별 경계를 설정하는 Jenks 분류법(Minami *et al.*, 2000)을 채택하였다.

지반침하 영향 인자 및 인자별 빈도비 레이어 작성

지반침하 발생 위험도 평가를 위해서는 각 인자의 구간별 지반침하 발생 여부에 따른 빈도비를 산정할 필요가 있다. 이를 위해 우선적으로 연구대상지역의 전체 격자셀 개수와 지반침하지 격자셀의 개수를 산정한다. 그다음 각 유

발 인자의 각 구간별 전체 격자셀 개수와 지반침하 발생지역과 공통된 격자셀의 개수를 산정하였다. 각 인자들에서의 구간 설정은 최대한 각 구간이 거의 동일한 격자셀의 수를 대표하도록 등비율로 분류하였다. 구분 기준으로는 각 인자의 히스토그램 분포를 바탕으로 육안으로 확인하게 구분되는 지점이 충분히 분리될 수 있도록 5개에서 6개까지의 구간 개수를 설정하였다. 다만 갱도 밀집도의 경우 히스토그램 분포상 가장 자연스럽게 분류가 될 수 있도록 구간을 8개로 설정하였으며, 갱도 심도의 경우 대다수의 지역이 자료가 없는 지역으로 분류되어 충분한 자료분포가 나타나지 않아 히스토그램을 바탕으로 극소값이 분포되어 있는 도수값을 경계로 설정하여 수등으로 분류를 수행하였다. 각 산정된 변수들을 대입하여 유발 인자들의 구간별 빈도비를 산출할 수 있으며, Table 2와 같이 산정된 빈도비를 각 영향인자의 구간별로 할당하여 Fig. 3과 같이 영향인자별 빈도비 레이어를 작성하였다.

지반침하 영향반경 레이어 및 최종 지반침하 위험성 지도 작성

영향반경을 고려한 지반침하 위험도를 평가하기 위하여 지표에서 갱도까지의 깊이와 한계각 수치를 영향반경 산정식에 적용하였다. 혼련지역의 지반침하 침하각 혹은 한계각에 대해 발표된 연구 사례를 찾아보기 어려워 일반적인 유사 연구에서 적용된 침하각 및 한계각이 20-45°인 것을 참고하여(Peter, 2011) 30°를 한계각으로 가정하였으며, 갱도의 수직상부까지의 깊이를 구한 다음 갱도의 위치별 영향반경을 산정하였다. 해당 영역 내에서 중첩된 영역들이 존재하는 경우 해당 값들의 평균값을 해당 격자셀의 영향반경으로 설정하였다. 중첩 상위 지역의 경우 한 격자셀에서 약 40-50개의 영향반경이 산정되는 등 다른 지역도 다양한 영향반경이 제시되는데, 최댓값이나 최솟값, 혹은 중간값을 선택하는 경우 오히려 해당 영향반경이 지나치게 불필요한 영역을 많이 포함되거나 국소적인 부분만이 강조되어 정확도가 감소할 수 있다. 따라서 해당 격자셀의 정확한 영향반경을 추론하는 것이 불가능하므로 평균값을 선택하여 해당 격자셀의 빈도비 평균값을 산정하여 위험도로 부여하는 것으로 설계하였다.

기존의 빈도비 분석 방법을 적용하는 경우 각 영향인자에 대하여 영향 반경 별로 산정된 빈도비 레이어를 중첩하여 전체 격자에 대한 지반침하 위험지수를 산정할 수 있다. 본 연구에서 제안한 영향반경을 고려한 빈도비 분석법에서는 우선 각 격자셀에서 빈도비를 중첩한 다음, 각 격자셀 별로 해당 영향반경 이내의 다른 모든 격자셀의 빈도비들을 평균을 내어 해당 격자셀에 부여하였다. 이 과정에서 영향반경이 부여되지 않은 격자셀의 경우 다른 격자셀을 고려

Table 2. Frequency ratio of each class of each triggering factor

Triggering Factor	Classes	Subsidence Area	Non-subsidence Area	Whole Areas	FR
Slope (degree)	0.0-13.6	1,487	61,828	63,315	2.41
	13.6-20.0	881	63,655	64,536	1.38
	20.0-25.6	554	62,927	63,481	0.88
	25.6-31.6	440	64,305	64,745	0.68
	31.6-53.0	406	61,458	61,864	0.66
Flow Accumulation (%)	Top 80-100	554	66,592	67,146	0.93
	Top 60-80	404	64,922	65,326	0.70
	Top 40-60	570	61,765	62,335	1.04
	Top 20-40	555	61,309	61,864	1.02
	Top 0-20	723	60,547	61,270	1.34
Drift Depth (m)	No Data	764	92,399	93,163	0.93
	3.0-43.3	86	884	970	10.05
	43.3-81.8	11	409	420	2.97
	81.8-135.3	1	1,216	1,217	0.09
	135.3-173.3	0	2,630	2,630	0.00
	173.3-221.2	0	1,129	1,129	0.00
Drift Density	0	123	49,409	49,532	0.25
	0-0.02	140	5,291	5,431	2.65
	0.02-0.04	191	5,413	5,604	3.53
	0.04-0.05	116	5,452	5,568	2.13
	0.05-0.07	97	5,149	5,246	1.88
	0.07-0.10	158	4,805	4,963	3.29
	0.10-0.14	181	4,505	4,686	4.02
	0.14-0.49	1	4,469	4,470	0.02
Distance to Drift (m)	0.0-36.3	350	15,422	15,772	2.27
	36.3-199.7	510	17,934	18,444	2.84
	199.7-544.5	147	18,085	18,232	0.81
	544.5-1140	0	16,784	16,784	0.00
	> 1140	0	16,268	16,268	0.00
Whole Areas		1,007	84,493	85,500	0.01

하지 않고 고유의 격자셀 값만을 합산하게 된다. 단 모든 격자셀의 영향반경을 다르게 분석할 경우 지나치게 분석과정이 복잡해지므로 Jenks 분류법을 이용하여 7개의 구간으로 영향반경을 구분한 다음 그 값의 평균값을 기준으로 각 격자셀의 영향반경을 산정하였다(Fig. 4).

기존의 빈도비 산정 방식과 다른 점은, 경도의 직상부가 아닌 지역에서 지반침하가 일어났을 때에도 영향 반경 이내에 있는 지형 정보를 참조하여 분석할 수 있다는 점이다.

다만 해당 반경 내에 실제 지반침하를 발생시키는 요소가 아닌 다른 정보들 역시 포함되게 된다는 점을 감안하여 해석할 필요가 있다. 특히 지반침하에 취약한 인자가 영향 반경 내에 많이 포함되어 있을수록 그 격자셀의 상대적인 위험도, 즉 지반침하 발생확률이 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

모든 격자셀에 대하여 빈도비 합산값이 산정되었다면 기존 분석 결과와의 비교를 위하여 모든 격자셀에 대해서 해

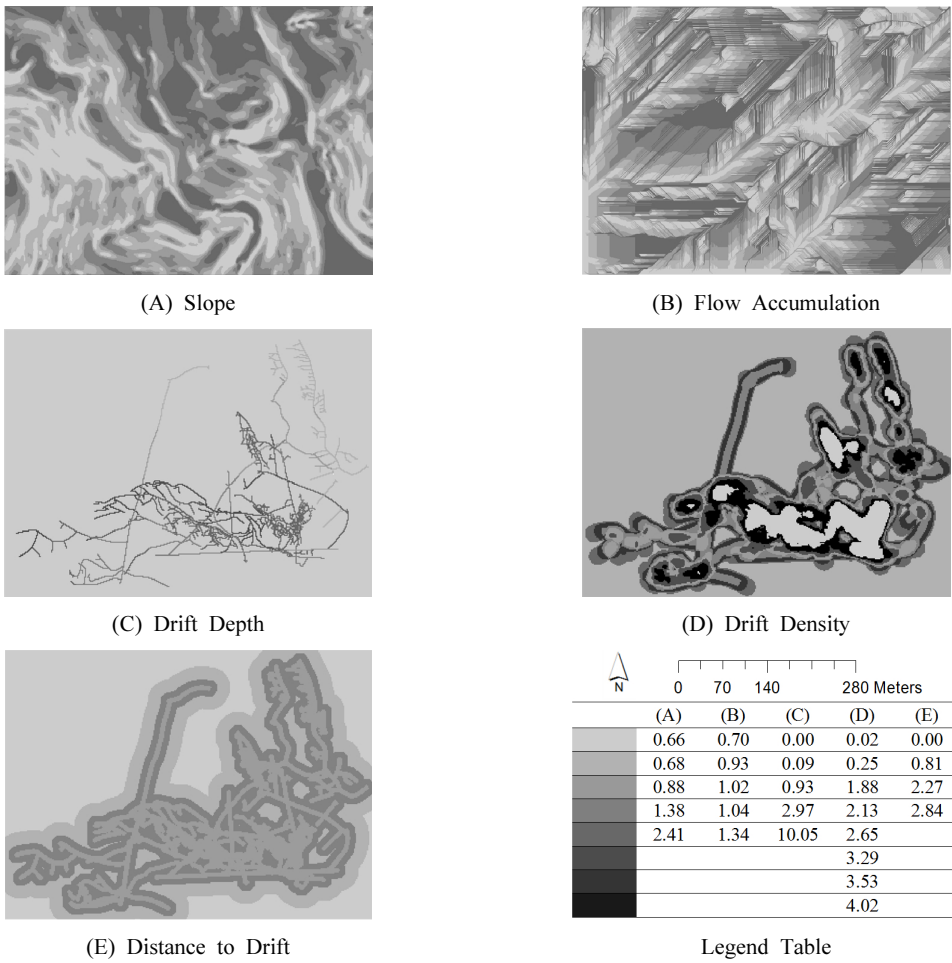


Fig. 3. Frequency ratio layers of each triggering factor.

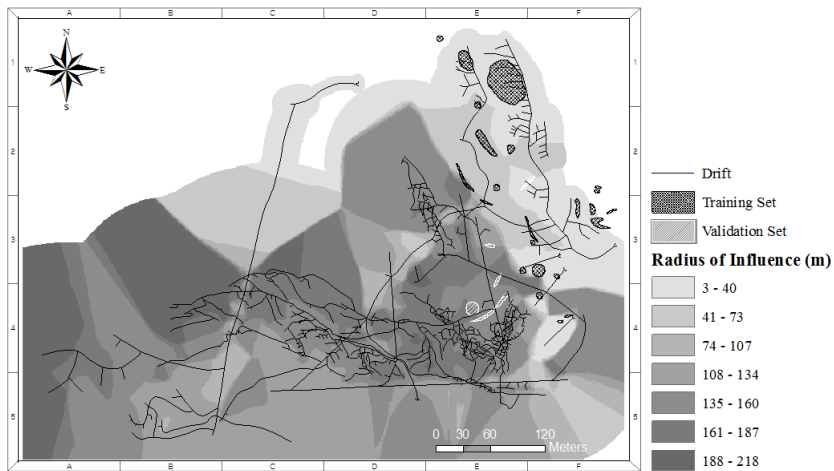


Fig. 4. The radius of influence of each cell considering the angle of limit and drift depth.

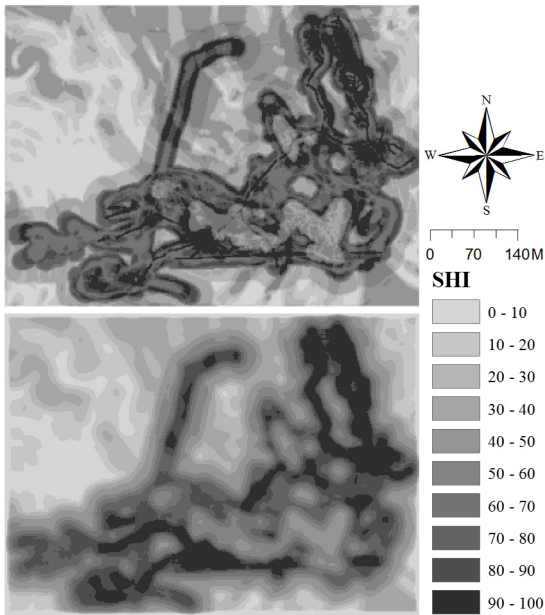


Fig. 5. Subsidence Hazard Index (SHI) map induced by FR analysis (top) and FR analysis considering the radius of influence (bottom).

당 분석을 수행하고 표준화를 위해서 최소값을 0, 최대값을 100으로 하는 정규화를 통해 정량적인 값으로 최종적인 위험도를 산출하였다(Fig. 5). 도시된 그림을 보면 영향반경을 고려한 결과가 기존 분석 결과에 비해 흐릿하게 표현되는데, 이는 격자셀 고유의 값을 강조하기보다는 주변 격자

셀의 빈도비를 함께 고려함으로써 나타나는 현상이다. 그러므로 각 격자셀의 정밀한 정량적인 위험도를 평가하는데에는 적합하지 않을 수 있지만, 수직 하부의 지반 조건만 고려한 기존 분석기법에 비해서 영향반경을 고려함에 따라 검증 단계에서 전체적인 정확도는 높아질 수 있을 것으로 기대된다.

검증지역과의 비교를 통한 분석모델의 적합성 판단

지반침하 발생 위험 예측도는 연구지역의 지반침하 발생 위험도에 대한 상대적 순위를 나타내며, 위험성 지수가 절대적인 확률을 의미하는 것은 아니다. 따라서 검증 대상 지반침하 발생지와의 공간적 비교분석 과정을 통한 예측 결과의 정확도를 평가하고자 하였다. 검증 방법으로는 예측 정확도 결과를 정량적으로 검증하고 비교하여 지반재해도의 예측 능력을 평가하는데 자주 이용되고 있는 곡선하면적 기법(area under the curve, AUC)을 적용(Choi *et al.*, 2007; Suh *et al.*, 2013)하였다(Fig. 6).

예측정확도로 간주할 수 있는 AUC 값을 비교해보면 빈도비 분석만을 수행하였을 경우 67.59%, 영향 반경을 고려한 빈도비 분석의 결과는 75.90%로 약 8.31% 포인트만큼 정확도가 향상되었음을 알 수 있다. Oh 등(2010)에 따르면, 지반침하 위험도 결과가 유의미한 결과로 판단되는 것은 AUC 값이 75%를 초과하는 경우라고 판단하고 있으므로 본 연구에서 도입한 영향반경을 고려한 분석 방식이 유효하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 위험도 상위 20%의 고위험군이 기 침하 지역을 얼마나 포함하고 있는지를 확인해 볼 결과 영향반경을 고려했을 때 8.65%, 고려하지 않은 경

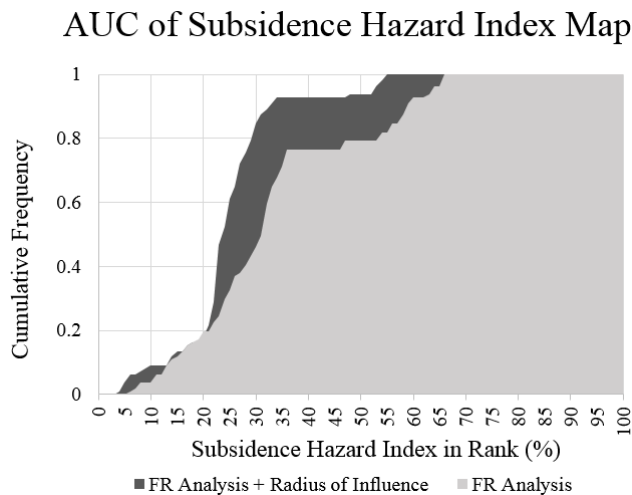


Fig. 6. AUCs for the verification of the both subsidence hazard index maps: FR analysis and FR analysis considering the radius of influence.

우가 6.98%로 1.67% 포인트의 차이가 발생하였다. 그리고 영향반경을 고려한 경우 예측값 상위 54%에서 모든 침하지를 포함하는 반면 영향반경을 고려하지 않은 경우 그 지점이 상위 65%인 것을 확인하였다. 분석결과를 종합해보면, 영향반경을 고려한 빈도비 분석 결과가 영향반경을 고려하지 않은 결과에 비해 위험도를 보다 정확하게 예측했다고 볼 수 있다.

결 론

본 연구에서는 지반침하 위험도 평가 모델 중 기존의 통계적 기법에서 고려하지 않은 영향반경을 분석에 도입함으로써 같은 위험도 평가 모델을 적용하였을 때 보다 높은 위험도 예측 결과를 제시하였다. 실제 지반침하가 발생한 강원도 삼척시의 OO광산을 대상으로 현장 적용을 수행한 결과 본 연구에서 제안한 분석 모델의 적합성 및 활용성을 확인하였다. 해당 지역은 수치지형도와 수치지형내도, 그리고 지반침하 발생지역에 대한 자료만 구축되어있어 기존의 빈도비 모델을 적용할 경우 정확도가 67.59%로 분석되었다. 반면에 영향반경을 고려한 빈도비 분석 결과의 경우 정확도가 75.90%로 증가한 것으로 확인되었다. 토양 및 지질 데이터베이스가 비교적 미흡하여 분석에 필요한 인자 확보가 힘든 지역이라도 영향반경을 고려할 경우 기존 결과에 비해 정확도를 제고시킬 수 있다는 점에서 의의를 가진다.

현장 적용 결과에서는 영향반경을 산정할 때 이용되는 한계각을 문헌을 참고하여 임의의 값인 30°를 적용하였지만, 실제 현장에서 획득할 수 있는 한계각을 이용할 경우 보다 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 적용한 방식은 영향반경 내에 있는 모든 격자셀이 동일한 가중치로 지반침하에 영향을 주는 것으로 분석하였는데, 갱도까지의 거리에 따른 가중치나 방향성을 고려하지 못한다는 한계점을 지닌다. 따라서 영향반경에 거리에 따른 가중치 부여, 각 격자셀에서 갱도 방향성 고려 등의 알고리즘이나 적정 영향반경을 고려한 분석결과에서 발견되는 평균화되는 분석결과와 문제점을 보완할 수 있는 방안 등을 후속 연구로 수행한다면 분석 기법의 정확도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과는 폐탄광지역의 지반침하 위험도 예측 및 대응방안 정책 수립 시 광구별 고 위험 지역을 상대적으로 높은 정확도로 특정할 수 있다는 점에서 의의를 지니며, 향후 현장에서 위험도 평가 모델로 직접 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 본 연구에서 사용한 빈도비 분석법 이외에도 다양한 통계적 위험도 평가 모델에서도 본 연구에서와 같이 영향반경을 고려할 수 있으므로, 더욱 다양하고 정교한 지반침하 평가 모델이 개발될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2015년 한국광해관리공단(과제명 : GIS 기반의 광해방지 설계지원 분석 기술개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 논문 작성은 서울대학교 에너지자원신기술연구소의 지원으로 이루어졌다.

References

- Aksoy, C.O., Kose, H., Onargan, T., Koca, Y. and Heasley, K., 2004, "Estimation of limit angle using laminated displacement discontinuity analysis in the Soma coal field, Western Turkey," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, No. 4, pp. 547-556.
- Choi, J.K., Kim, K.D., Lee, S., Kim, I.S. and Won, J.S., 2007, "Prediction of ground subsidence hazard area using GIS and probability model near abandoned underground coal mine," *Economic and environmental geology*, Vol. 40, No. 3, pp. 295-306.
- Choi, S.O., Jeon, Y.S., Park, E.S., Jung, Y.B. and Chun, D.S., 2005, "Analysis of subsidence mechanism and development of evaluation program," *Tunnel and underground space*, Vol. 15, No. 3, pp. 195-212.
- Choi, S.O., Kim, J. and Choi, G., 2009, "Application of fuzzy reasoning method for prediction of subsidence occurrences in abandoned mine area," *Tunnel and underground space*, Vol. 19, No. 5, pp. 463-472.
- Coal Industry Promotion Board, 1999, "Ground stability basic survey report," *Coal Industry Promotion Board*, Seoul, No. 97-08, pp. 5-38.
- Djmaluddin, I., Mitani, Y. and Esaki, T., 2011, "Evaluation of ground movement and damage to structures from Chinese coal mining using a new GIS coupling model," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, No. 3, pp. 380-393.
- Esaki, T., Djmaluddin, I. and Mitani, Y., 2008, "A GIS-based prediction method to evaluate subsidence-induced damage from coal mining beneath a reservoir, Kyushu, Japan," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 41, pp. 381-392.
- Jung, Y.B., Song, W.K. and Kang, S.S., 2009, "Development of Subsidence Hazard Estimation Method Based on the Depth of Gangway," *Tunnel and underground space*, Vol. 18, No. 4, pp. 272-279.
- 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.
- Minami, M., Hatakeyama, A., Mitchell, A., Booth, B., Payne, B., Eicher, C., Blades, E., Sims, I., Bailey, J., Brennan, P. and Stephens, S., 2000, "Using ArcMap: GIS," *Environmental Systems Research Institute*, 1st edition, p. 598.
- MIRECO, 2012, *2012 Yearbook of MIRECO Statistics*, Mine Reclamation Corporation, Seoul, Korea, p. 5.
- MKE, 2011, 2nd-phase master plan of the mine reclamation (2012-2016), Seoul, Korea.
- Oh, H.J. and Lee, S., 2010, "Assessment of ground subsidence using GIS and the weights of evidence model," *Engineering Geology*, Vol. 115, pp. 36-48.
- Peter, D. 2011, "SME Mining Engineering Handbook," *Society of Mining, Metallurgy, and Exploration*, 3rd edition, p. 629.
- Shorey, P.R., Loui, J.P., Singh, K.B. and Singh, S.K., 2000, "Ground subsidence observations and a modified influence function method for complete subsidence prediction," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, pp. 801-818.
- Suh, J., Choi, Y., Park, H.D., Kwon, H.H., Yoon, S.H. and Go, W.R., 2010, "Application of frequency ratio and analytic hierarchy process to subsidence hazard assessment around abandoned coal mine," *Journal of the Korean society for geosystem engineering*, Vol. 47, No. 5, pp. 690-704.
- Suh, J., Choi, Y., Park, H.D., Yoon, S.H. and Go, W.R., 2013, "Subsidence Hazard Assessment at the Samcheok Coalfield, South Korea: A Case Study Using GIS," *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 19, No. 1, pp. 69-83.
- Suh, J., Choi, Y., Park, H.D. and Lee, S., 2015, "Development of a Software for Assessing Mining Subsidence Susceptibility using GIS Combined with Frequency Ratio, Fuzzy Membership Functions and Analytic Hierarchy Process," *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour.Eng.*, Vol. 52, No. 4, pp. 364-379.

손 진

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정
(本學會誌 第51卷 第1号 參照)

이 희 욱

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탐사개발연구실 선임연구원
(本學會誌 第52卷 第5号 參照)

이 승 호

현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 연구원
(本學會誌 第52卷 第4号 參照)

서 장 원

2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부, 공학사
2013년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부, 공학박사



현재 펜실베이니아 주립대학교 에너지자원공학과 박사후과정 연구원
(E-mail; jus66@psu.edu)

박 형 동

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수
(本學會誌 第52卷 第5号 參照)
