

광산 채굴적으로 인한 지반침하 조사 및 해석 사례

박현배¹ · 문성우² · 주세정³ · 이정음³ · 서용석^{4*}

¹세진이엔시 이사, ²충북대학교 지구환경과학과 박사후연구원, ³충북대학교 지구환경과학과 석사과정, ⁴충북대학교 지구환경과학과 교수

Survey and Numerical Analysis Cases of Ground Subsidence by Mine Goaf

Hyun-Bae Park¹ · Seong-Woo Moon² · Sejeong Ju³ · Jeungeum Lee³ · Yong-Seok Seo^{4*}

¹Director, Sejin E&C

²Post-Doctor, Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

³Master Student, Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

⁴Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

Abstract

South Korea's mining industry was actively developed until 1980, but subsequent declining profitability forced many mines to close. Most of the abandoned mines are susceptible to persistent subsidence because of the length of time since mining ceased. Accurate prediction of the locations and times of subsidence is difficult; therefore, this study aims to apply continuum analysis to past cases of subsidence to establish a method of predicting the location and magnitude of future subsidence. The study area is an area of ○○ mining located between the Yangsan fault zone and the Moryang fault zone, in which three subsidence events occurred between 2005 and 2009. Drilling surveys and electrical resistivity surveys were performed at subsidence sites determined the distribution of strata, and through laboratory tests obtained the physico-mechanical properties of the rock. Numerical analysis of the results found that the plastic status area includes the areas of actual subsidence and that continuum analysis can also be used to predict the location and magnitude of subsidence caused by mine goaf.

Keywords: mine, subsidence, drilling survey, resistivity survey, numerical analysis

초 록

우리나라는 1980년까지 광물 지하자원 개발을 활발히 수행하였으나 이후 생산원가 대비 사업성이 크게 줄어들면서 많은 수의 폐광산이 발생되었다. 그 중 대부분은 광산개발 중단 후 오랜 시간이 지나 잔류성 침하가 발생할 가능성이 높은 상태에 있다. 하지만 그 발생 시기와 위치를 정확히 예측하기는 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 지반침하가 발생한 사례를 분석하여 연속체 수치해석을 통해 지반침하의 발생 위치나 규모에 대한 예측 가능성을 살펴보고자 한다. 연구지역은 양산단층과 모량단층 사이에 위치하여 이들에 규제받는 ○○광산 지역이며, 이 지역에서는 2005~2009년에 걸쳐 3회의 지반침하가 발생된 바 있다. 지반침하지를 대상으로 시추조사 및 전기비저항 탐사를 수행하여 지층의 분포를 파악하였고, 실내시험을 통해 수치해석 시 적용되는 지반의 물리·역학적 특성을 파악하였다. 수치해석 결과 소성영역이 실제 지반침하 범위를 포함하는 형태로 나타나 연속체 해석으로도 채굴적에 의한 침하 발생 위치 및 규모를 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 광산, 지반침하, 시추조사, 전기비저항 탐사, 수치해석

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Yong-Seok Seo
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

Received: 21 December, 2023

Revised: 2 January, 2024

Accepted: 3 January, 2024

© 2024 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

우리나라에서는 1980년대까지 석탄광산을 비롯하여 많은 광산들이 가행하고 있었으나, 생산원가 대비 사업성이 크게 줄어들면서 현재는 폐광산 수가 5,115개소로 전체 광산(가행·휴·폐 광산) 대비 88.4%에 해당한다. 폐광산의 경우 정상적인 폐광절차가 수행되면 공학적·환경적 문제가 발생될 가능성이 낮지만 많은 수의 광산이 폐광된 후 버려진 채로 방치되어 광산폐수의 유출, 채굴적에 의한 지반침하 등의 문제를 유발한다(Shin, 2010; Kim et al., 2013a). 특히, 채굴적에 의한 지반침하는 대표적인 광해 사례인데, 국내에서는 부평광산, 청양광산, 공주대금광산 등의 금속광산과 태백, 화순, 보령 지역 등의 석탄광산에서 많은 사례가 보고되어 있다(Min et al., 2014). 특히, 우리나라 광산의 특성상 트리프형(연속형) 침하보다 함몰형 침하형태가 자주 발생하는 특징을 보인다.

이와 관련하여 채굴적에 의한 지반침하를 분석하기 위해 다양한 연구들이 수행되어 왔는데, Piggot and Eynon(1978)은 암반 광산에서의 붕락고를 예측하기 위해 붕락대의 형상과 상부 지층의 체적팽창율을 이용한 바 있다. Kratzsch(1983)는 석탄광산에서 대규모 장벽식 채탄굴진면이 상부지반의 지반침하에 미치는 영향에 대해서 저서를 작성한 바 있고, Alejano et al.(1999)은 FDM 해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 지반침하를 예측하는 방법에 대해서 소개한 바 있다. 국내에서는 지하 갱도로부터 지표까지의 이격거리, 채굴적의 높이 등을 이용하여 침하 발생 예측을 수행하거나(Choi et al., 2008), Kim(2011)은 태백시 폐광지역에서 발생한 지반침하가 채굴적에 의한 것임을 시추조사, 물리탐사, 계측결과로부터 입증한 바 있으며 지반침하 이론 및 한계평형식을 이용하여 안전율을 분석한 바 있다. 해석적 접근 측면에서는 Choi(2008)가 함몰형 침하 특성을 구현하기 위해 입자유동해석 방법인 PFC 프로그램을 이용하여 지반침하를 시뮬레이션 한 바 있으며, Kim et al.(2006)과 Choi et al.(2007)은 응용통계기법 및 확률론적 모델을 이용하여 폐광 지역의 지반침하 발생에 대한 위험 예측지도를 작성한 바 있다. Kim et al.(2013b)은 국내 폐탄광에서 발생한 163개의 지반침하 사례를 분석하여, 채굴적 위치를 기준으로 지표침하 발생 범위를 규명하였다. 또한, 채굴적 심도를 고려한 지반침하 발생 범위에 대한 추정값 및 추정각의 범위까지 제안하였다. Son(2017)은 2차원 및 3차원 모델링에 실제 침하지 정보를 반영하여 설계변수를 자동으로 보정해주는 최적화 기법을 적용하였으며, 이를 통해 수치해석 결과가 실제 침하양상을 유사하게 구현한 바 있다.

일반적으로 연속체 해석으로는 함몰형 침하를 평가하기는 어려우나 본 연구에서는 단순히 변위 비교분석이 아닌 소성 상태(연구변위가 발생할 수 있는 영역) 범위를 분석하여 지반침하와 상관성을 비교하고자 한다. 이를 위해 ○○광산 채굴적에 의한 지반침하를 대상으로 시추조사, 전기비저항탐사 등 현장시험을 통해 지층구성, 채굴적 현황 등을 분석하였으며, 2차원 연속체 수치해석으로 구현함으로써 채굴적과 지반침하의 관련성을 설명하고자 한다.

연구 지역 현황

광역지질

연구지역 일대는 경상남도 양산시 원동면이며, 지질도에서는 김해도폭(Lee and Kim, 1964)에 해당한다. 이 지역은 중생대 백악기 경상누층군 유천층군의 주산안산암질암과 도대동안산반암을 기저로 하고 백악기 후기의 규장반암 및 백악기-제3기초의 불국사 관입암체 관입, 이후 제4기의 충적층이 이들을 부정합으로 피복하는 것으로 알려져 있다(Fig. 1). 연구지역은 양산단층과 모량단층 사이에 위치하여 이들에 규제받는 지질구조 발달 특성을 보인다. ○○광산의 광상형성을 주도한 지질구조는 N5°~25°E (평균 N10°E) 방향의 열극으로서 이 방향은 양산단층대의 주향방향(N10°~30°E)과 유사하다. 우수향 단순전단에 의한 모델을 적용할 때 ○○광산의 주 지질구조는 R전단(리텔전단)방향과 일치하므로 열극의 형성은 양산단층의 형성과 관련성이 있을 것으로 추정된다.

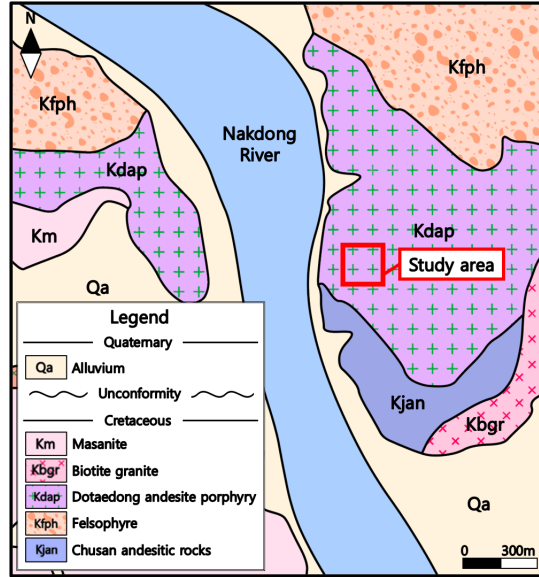


Fig. 1. Geological map of the study area where field surveys and sampling were conducted at four subsidence points (modified from Lee and Kim, 1964).

침하현황

본 연구에서는 채굴적으로 인해 발생된 3회의 지반 침하를 대상으로 지표지질조사, 현장조사 및 수치해석을 진행하고 자 한다(Fig. 2). 제1 침하지는 2005~2006년 1022호 지방도 선형도로개량공사 도중 발생하였으며, 인접한 위치에 2개소 로 발달한다. 제2 침하지는 2009년 7월 장마기간 중에 사면 소단에서 발생하였으며, 제3 침하지는 2007년 정밀조사 중 발 견된 것으로 주변에 수풀이 우거져서 정확한 발생 시기는 확인되지 않는다. 제1 및 제2 침하지는 지하 광산의 최상부 갱인 0갱에 영향을 받은 것으로 파악되며, 제3 침하지는 0갱과 1갱이 교차하는 크로스갱의 영향을 받은 것으로 확인된다. Fig. 3 은 각 침하지의 전경사진을 보여주고 있다. Table 1은 각 침하지의 규모(연장, 폭, 깊이)를 나타낸다.



Fig. 2. Locations of subsidence areas near the OO mine.

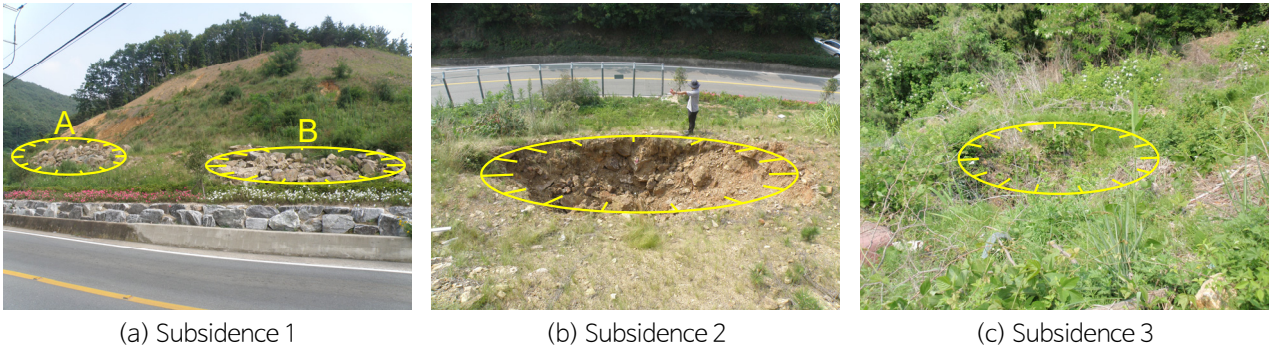


Fig. 3. Photographs of areas of subsidence caused by goaf of the OO mine.

Table 1. Magnitude of subsidence near the OO mine

Subsidence area	Length (m)	Width (m)	Depth (m)
1-A	25	8	1.5
1-B	12	6	2.5
2	7	5	2.5
3	3	2	1.5

현장조사 및 실내시험

전기비저항 탐사

일반적으로 전기비저항 결과에서 저비저항대는 함수비가 높은 점성토 등의 퇴적물 및 풍화대, 염수 및 지하수의 대수층, 석탄광의 탄층과 흑연 및 철 등의 전도성이 양호한 광물의 광맥 등에서 나타나며, 고비저항대는 지하수면보다 상부에 위치한 공동, 또는 함수비가 낮은 모래, 자갈, 전석층, 화성암, 변성암 및 석회암 등에서 나타난다. 따라서, 갱도와 채굴적으로 인한 침하의 관련성을 파악하기 위해 전기비저항 탐사를 수행하였으며, 본 연구지역에서는 전극간격을 5 m로 825 m

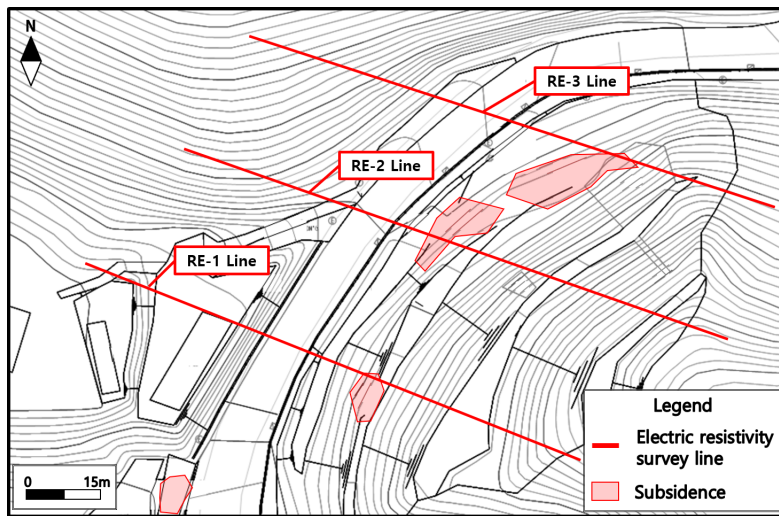


Fig. 4. Resistivity survey lines near the OO mine.

구간(3개 측선)에 대해 전기비저항 탐사를 수행하였다(Fig. 4). 각 측선별 결과는 Fig. 5와 같으며, RE-1과 RE-2 Lines에서 나타나는 저비저항대는 108.3 ML에 분포하는 0갱에 영향을 받은 것으로 파악된다(Figs. 5a and 5b), RE-2 Line에서는 70.8 ML의 1갱 주변에서도 $300 \text{ m} \cdot \Omega$ 이하의 비저항값이 낮은 편에 속하는 영역이 관찰되며, 갱도 주변에서 비저항값이 낮은 이유는 광체 주변으로 발달된 광화대로 인해 전기저항이 낮게 나타나기 때문이다. RE-3 Line에서는 0갱의 채광갱도 상부에 $50 \text{ m} \cdot \Omega$ 이하의 저비저항대가 뚜렷이 나타나는데, 이 부분은 지반침하가 발생했던 하부에 속한다(Fig. 5c). 이를 요약하면 Table 2와 같다.

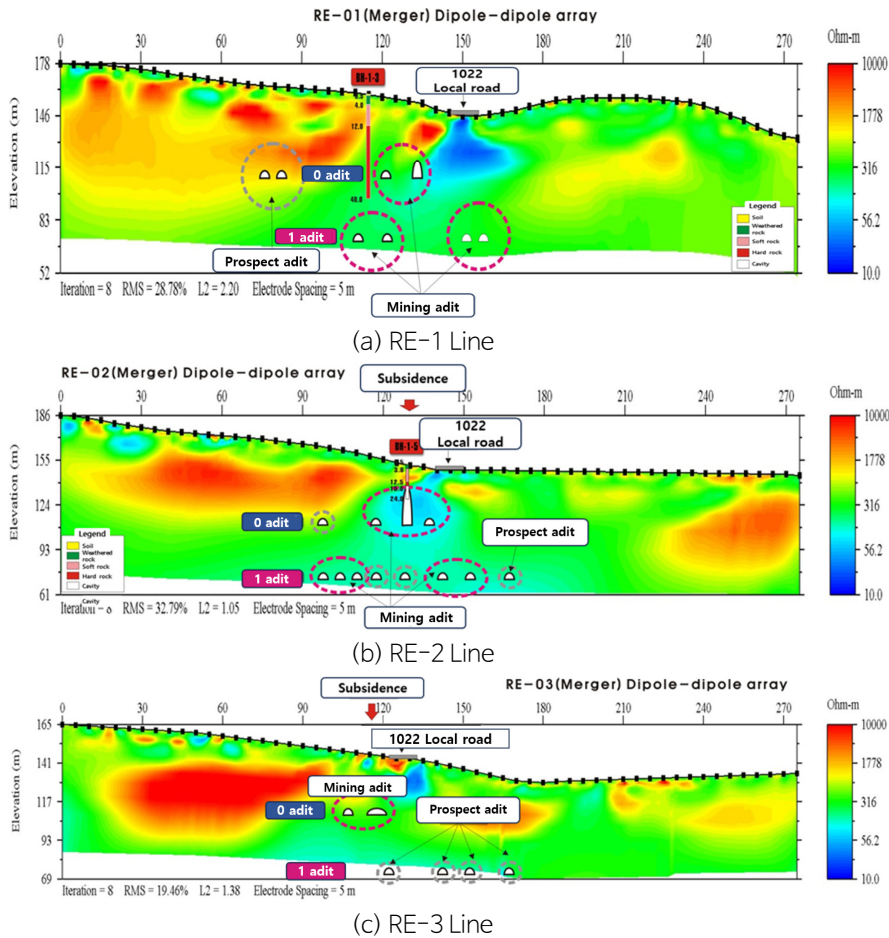


Fig. 5. Results of resistivity surveys near the OO mine.

Table 2. Summary of resistivity surveys near the OO mine

Survey line	Anomaly distribution		Cause
	Station (m)	Depth (m)	
RE-1 Line	135~165 (L = 30)	0~60	Distribution of low-resistivity zone by 0 adit (108.3 ML) from the ground surface to ~60 m depth
RE-2 Line	120~150 (L = 30)	0~40	Distribution of low-resistivity zone by 0 adit (108.3 ML) from the ground surface to ~40 m depth Distribution of little low-resistivity zone by 1 adit (70.8 ML) from ~40 m to ~80 m depth
RE-3 Line	120~135 (L = 15)	0~30	Distribution of low-resistivity zone by 0 adit (108.3 ML) from the ground surface to ~30 m depth

시추조사

연구지역의 지층구조 뿐만 아니라 침하지 및 지하갱도의 위치와 규모를 파악하기 위해 총 8개소에서 시추조사가 진행되었으며, 7개소에서는 수직 시추조사를 진행하고 1개소에서는 경사(75°) 시추를 수행하였다. 시추조사 위치는 Fig. 6과 같으며, 시추조사 위치정보는 Table 3에 상세히 기재하였다.

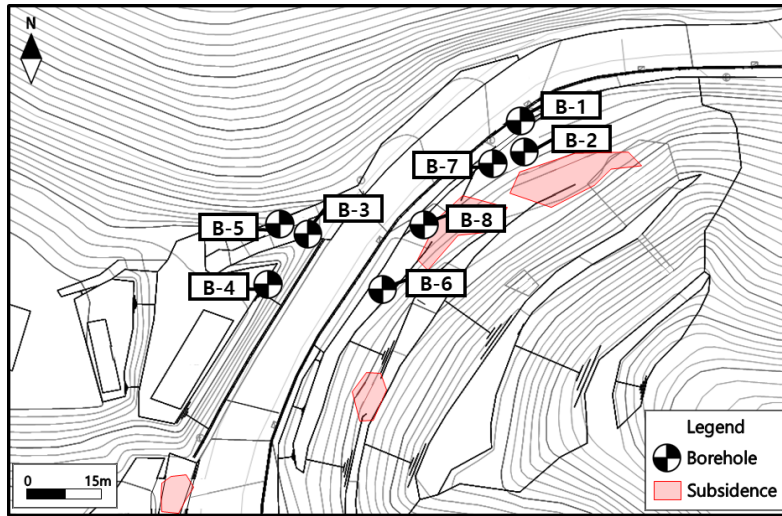


Fig. 6. Locations of drilling survey sites near the OO mine.

Table 3. Characteristics of drilling surveys near the OO mine

No.	Coordinates		Elevation (m)	Drilling direction
	X	Y		
B-1	197,904.13	202,339.35	144.0	Vertical drilling
B-2	197,905.12	202,334.79	144.0	Vertical drilling
B-3	197,859.11	202,319.42	146.7	Vertical drilling
B-4	197,852.16	202,310.26	150.1	Vertical drilling
B-5	197,856.69	202,319.85	147.2	Vertical drilling
B-6	197,874.44	202,308.21	147.0	Vertical drilling
B-7	197,899.06	202,332.40	144.0	Vertical drilling
B-8	197,881.84	202,321.87	145.0	Inclined drilling

시추조사 결과, 연구지역의 지층구조는 표토(토사)층, 풍화암, 연암, 경암 순으로 분포하며, 표토층은 황갈색의 실트질 모래로 구성되어 있고 층후는 0.5 m부터 최대 12 m까지 나타난다(Table 4). 기반암층은 안산암으로 구성되어 있으며 강도와 회수율(TCR), 암질지수(RQD)를 기준으로 풍화암, 연암/보통암, 경암으로 구분하였다. 풍화암은 층후가 1~3 m이며, 연암/보통암은 1.8~30.3 m의 두께로 확인되었다. 경암의 층후는 21 m 이상으로 나타났다. 공동구간은 B-1, B-2, B-4, B-5, B-6에서 관찰되었다. B-1에서는 35.1~37.1 m 구간에서 0갱이 관찰되며, 60.5~67 m 구간에서 1갱과 1갱에 의한 채굴적이 분포한다. B-2에서는 35.6~40 m 구간에서 0갱에 의한 채굴적이 관찰되며, B-4에서는 40.3~41.9 m 구간에서 1갱에 의한 채굴적이 나타난다. B-5에서는 32.4~42.5 m 구간에서 1갱에 의한 채굴적이 분포하며, B-6에서는 34.6~39.9 m

구간에서 0갱에 의한 채굴적이 나타난다(Table 4).

Table 4. Results of drilling surveys near the ○○ mine

No.	Stratum (ground level, -m)					Drilling depth (m)
	Soil	Weathered rock	Soft rock	Hard rock	Distribution of cavity	
B-1	0.0~4.5	4.5~6.7	6.7~14.3	14.3~60.5	35.1~37.1 60.5~67.0	67.0
B-2	0.0~4.0	4.0~9.7	9.7~11.5	11.5~40.0	35.7~40.0	40.0
B-3	0.0~9.0	9.0~12.0	12.0~40.0	-	-	40.0
B-4	0.0~12.0	12.0~13.4	13.4~41.9	-	40.3~41.9	41.9
B-5	0.0~12.0	12.0~12.7	12.7~42.5	-	32.4~42.5	42.5
B-6	0.0~1.0	1.0~2.5	2.5~19.0	19.0~40.9	34.6~39.7	40.9
B-7	0.0~2.0	2.0~3.0	3.0~16.0	16.0~37.0	-	37.0
B-8	0.0~0.5	-	0.5~18.5	18.5~48.0	-	48.0

각 시추공에 대한 심도별 RQD 분포 및 공동분포를 나타내면 Fig. 7과 같으며, B-6공을 대상으로 1.8~39.7 m 구간에서 시추공 영상촬영을 수행한 결과 공동의 존재를 육안으로 확인할 수 있었다(Fig. 8). 시추 시 공동으로 확인된 구간 이외에 RQD가 낮은 구간은 슬라임을 통해 부분적으로 파쇄대가 분포하는 것으로 확인된다.

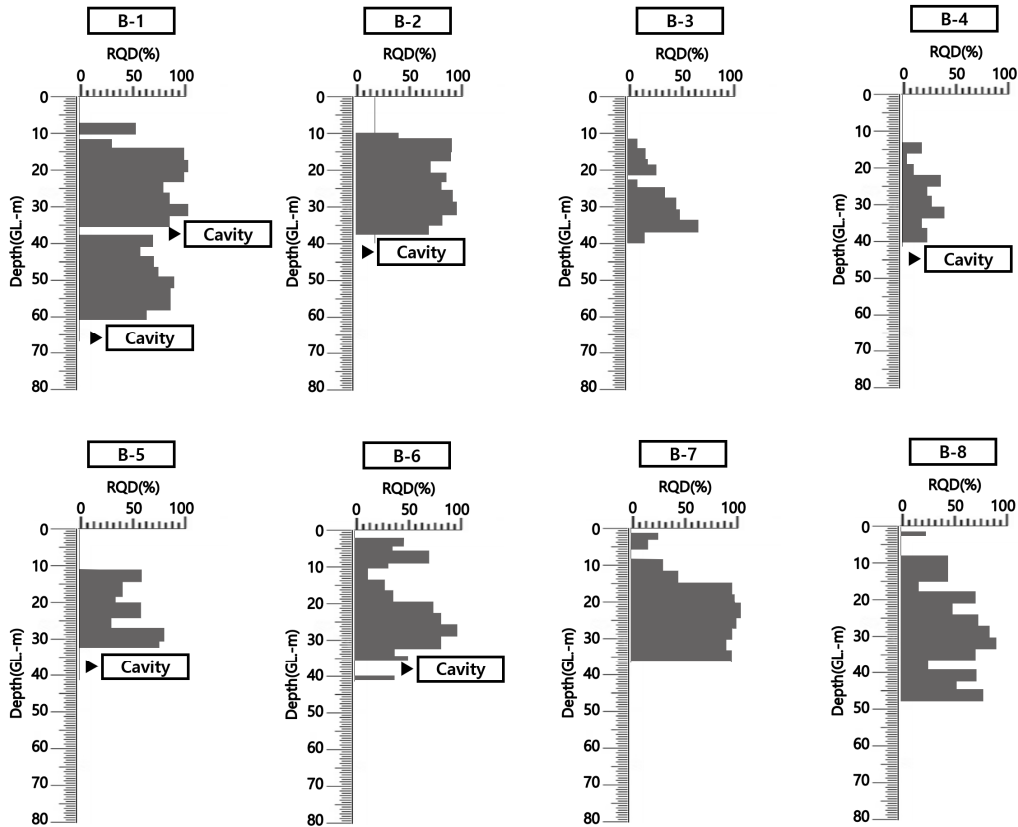


Fig. 7. Rock quality designation (RQD) and cavities for boreholes B-1 to B-8.

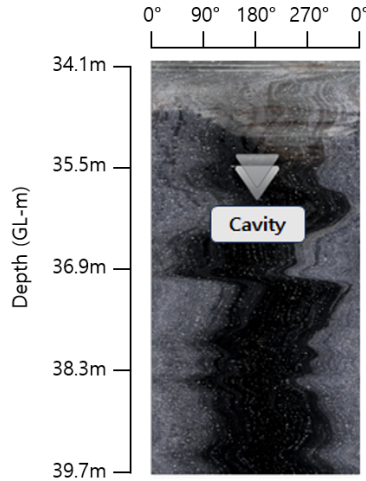


Fig. 8. Image of a cavity (depth 34.9~39.7 m) in the B-6 borehole from BIPS logging.

실내시험

암석의 물리·역학적 특성을 파악하고, 추후 수치해석 시 적용하기 위해 회수된 코어를 대상으로 실내 암석시험을 수행하였다. 측정 대상항목은 단위중량, 탄성계수 및 포아송비, 내부마찰각 및 점착력이며, 이를 위해 기본 물성시험, 일축압축시험, 삼축압축시험을 진행하였다.

실내 암석시험의 결과를 요약하면 Table 5와 Table 6과 같다. 단위중량은 26.02~27.84 kN/m³의 범위를 보여 평균 26.71 kN/m³이며, 일축압축강도는 70.5~167.3 MPa의 범위를 보여 평균 117.1 MPa로 측정되었다. 일축압축시험으로부터 획득한 탄성계수와 포아송비는 각각 18.01~46.86 GPa의 범위와 0.21~0.25의 범위를 보였으며, 평균은 각각 29.83 GPa, 0.23이다. 삼축압축시험 결과, 점착력은 14.2~29.7 MPa의 범위를 보여 평균 20.87 MPa로 나타나며, 내부마찰각은 44.3~52.7°의 범위를 보여 평균 48.1°로 나타났다.

Table 5. Measured physical properties and uniaxial compressive strength (UCS)

No.	Depth (m)	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	UCS (MPa)	Rock type
B-1	51.0~51.2	27.84	46.86	0.21	167.3	Hard rock
B-4	32.5~32.7	26.02	24.62	0.24	113.6	Hard rock
B-5	22.9~23.1	26.27	18.01	0.25	70.5	Soft rock

Table 6. Results of triaxial compressive tests

No.	Depth (m)	Triaxial compressive test		Rock type
		Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	
B-1	51.2~51.6	29.7	52.7	Hard rock
B-4	32.1~32.4	18.7	47.4	Hard rock
B-5	23.9~24.4	14.2	44.3	Soft rock

토층의 단위중량, 내부마찰각, 점착력은 한국도로공사의 도로설계요령(KEC, 2020)을 참고하여 모래(조밀하지 않고 입도가 나쁜 것)의 물리·역학적 특성을 준용하였으며, 변형계수와 포아송비의 경우 시추조사 시 획득한 N값으로 Schmertmann(1978)의 추정식으로 부터 산정하였다. 최종적으로 수치해석에 적용된 지층별 물성값은 Table 7과 같다.

Table 7. Input data for numerical analysis

Stratum	Unit weight (kN/m ³)	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
Soil	19	30	0	0.03	0.4
Soft rock	24	35	1,000	1.0	0.3
Hard rock	26	40	2,000	1.5	0.25

수치해석

해석 프로그램 및 해석 단면

채굴적으로 인한 지반침하를 모사하기 위해 MIDAS 社의 MIDAS GTS/NX 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 유한요소해석법(FEM)을 적용하고 있는 연속체 지반해석 모듈로서 결과물로 변위, 응력, 소성영역 등을 도출할 수 있으나 연속체 해석법의 경우 함몰형 침하의 형태를 변위로 파악하기는 어려워 소성영역을 이용하였다. 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 4개의 횡단면도 축선에 대하여 해석을 진행하였으며, 각 횡단면도의 지층구성, 채굴적 및 침하지 분포는 전기비저항 탐사, 시추조사 및 야외지질조사 결과를 반영하여 작성되었다(Fig. 10). 이를 대상으로 2차원 모델링을 구성하였으며, Mohr-Coulomb 파괴 기준에 의한 탄소성 해석 기반으로 앞서 실험으로 획득한 물성값을 적용하였다.

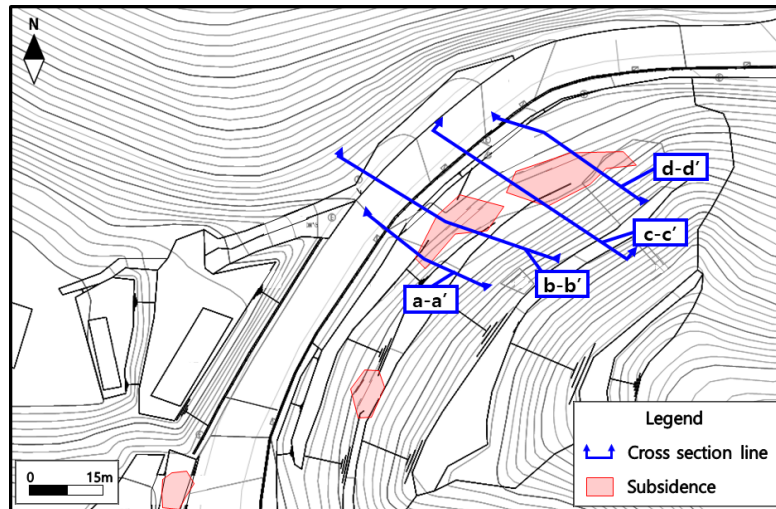


Fig. 9. Map showing the locations of cross sections for studying subsidence and mining distribution.

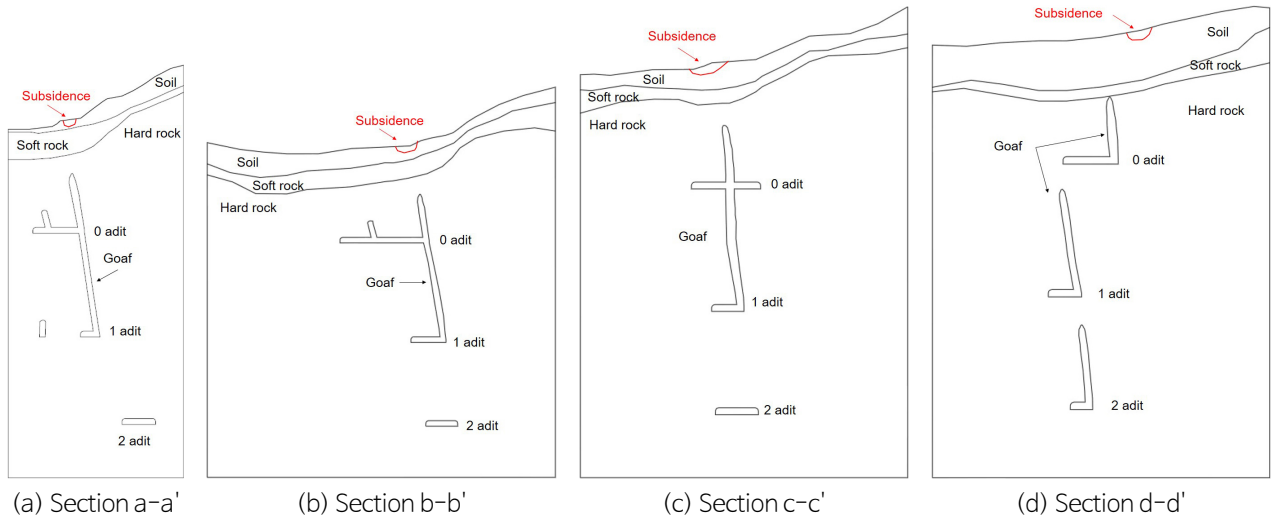


Fig. 10. Cross sections showing subsidence and mining distribution.

해석 결과

Fig. 11은 각 단면별 해석결과를 소성상태 분포도로 나타낸 것이며, 이 프로그램에서 소성상태란 지층의 탄성구간을 넘어 영구변형이 나타나는 구간으로써 채굴적에 의한 지반침하하는 영구적인 변형이 남게되므로 소성상태 분포도를 통해 지반침하의 발생 범위 및 위치를 분석하고자 하였다. 소성상태는 지층의 좌우 경계부에서도 나타나게 되므로 침하지와의 비교를 위해 채굴적의 천단부만 나타나도록 표시하였다.

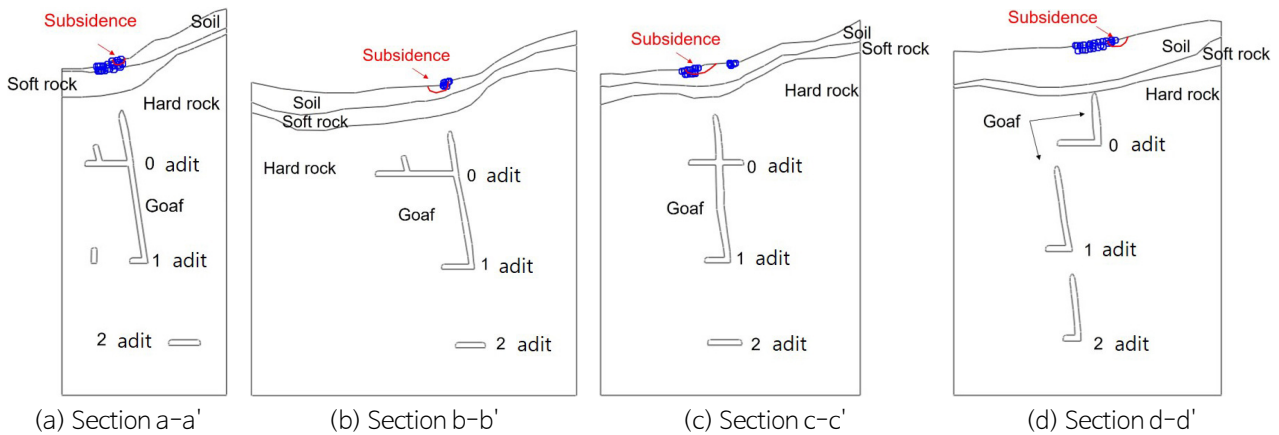


Fig. 11. Analysis results for subsidence caused by mining goaf. Blue points means plastic status areas.

실제 침하지와 수치해석 상 소성상태 분포의 폭과 깊이를 비교한 결과(Table 8), 수치해석 결과에서 폭이 4~8 m, 깊이가 같거나 최대 2.5 m 더 크게 분포하는 것으로 나타나 소성영역이 실제 지반침하 범위를 포괄하는 형태로 분석된다. 또한, Fig. 11에서 보이는 바와 같이 2차원 단면 해석에서 침하지와 소성영역은 수직갱의 직상부에서만 나타나 횡갱의 영향은 미미한 것으로 분석되며, 상대적으로 연약한 토층 및 연암층이 두꺼운 경우 소성영역도 깊게 발달하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 연속체 해석을 채굴적에 의한 침하지 발생 위치 및 규모를 예측하는데 활용할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

Table 8. Magnitude of subsidence near the ○○ mine

Section	Measurement		Plastic zone of numerical analysis	
	Width (m)	Depth (m)	Width (m)	Depth (m)
a-a'	4	2.5	10	5
b-b'	7	2.5	3	2.5
c-c'	12	1.5	20	2.5
d-d'	6.5	1.5	15	2

결론

본 연구에서는 광산 채굴적으로 인한 지반침하에 대해서 지질조사를 수행하고, 수치해석을 수행함으로써 채굴적 과 지반침하의 관련성을 분석하고자 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연구지역은 경상누층군 유천층군의 안산암류가 분포하는 지역으로, ○○광산에서의 채굴로 인해 2005~2009년에 걸쳐 총 3회의 지반침하가 발생하였다. 지반침하의 규모는 위치에 따라 길이 3~25 m, 폭 2~8 m, 깊이 1.5~2.5 m로 측정되었다.
- (2) 현장조사는 전기비저항탐사와 시추조사를 수행하였으며, 전기비저항 탐사에서 갱도주변은 광체 및 채굴적 영향을 받아 저비저항대로 나타나는 특징을 보인다. 시추조사는 총 8개소에서 수행되었으며, 표토층, 풍화암층, 연암층, 경암층으로 구성되어 있으나 침하가 발생한 주변의 시추공에서는 풍화암층이 얇거나 존재하지 않아 해석 단면에서는 표토층, 연암층, 경암층으로 구성되었다. 또한, B-1, 2, 4, 5, 6번 공에서는 수 m의 공동이 나타나 갱도가 분포하는 것을 확인하였다.
- (3) 채굴적에 의한 침하를 수치해석으로 구현하기 위해 실내시험(기본 물성시험, 일축압축시험, 삼축압축시험)을 수행하여 지층의 입력물성(단위중량, 내부마찰각, 점착력, 탄성계수, 포아송비)을 획득하였다.
- (4) 4개의 단면을 설정하여 연속체 해석을 수행한 결과, 수치해석 결과에서 실제 침하지 보다 폭이 4~8 m, 깊이가 같거나 최대 2.5 m 더 크게 분포하는 것으로 나타나 소성영역이 실제 지반침하 범위를 포함하는 형태로 분석된다. 또한, 2차원 단면 해석에서 침하지와 소성영역은 수직갱의 직상부에서만 나타나 횡갱의 영향은 미미한 것으로 분석되며, 상대적으로 연약한 토층 및 연암층이 두꺼운 경우 소성영역도 깊게 발달하는 경향을 보인다.

본 연구의 결과는 채굴적으로 인한 지반침하 조사 및 해석 사례를 소개함과 동시에 연속체 해석으로도 채굴적에 의한 침하지 발생 위치 및 규모를 예측하는데 활용할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 다양한 공동 형상 및 분포, 3차원 해석 등을 통해 추가적인 사례분석을 수행한다면 광해 평가 시 연속체 해석의 적용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Alejano, L.R., Ramirez-Oyanguren, P., Taboada, J., 1999, FDM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 475-491.
- Choi, J.K., Kim, K.D., Lee, S.R., Kim, L.S., Won, J.S., 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 with English abstract).
- Choi, J.K., Kim, K.D., Won, J.S., 2008, A study on the production of coal mining subsidence susceptibility map using

- PCA, Proceedings of the KSRS Spring Conference, Seoul, 323-327.
- Choi, S.W., 2008, A study on the ground subsidence mechanism in abandoned mine area and application of PFC, MSc Thesis, Hanyang University, 89p (in Korean with English abstract).
- KEC (Korea Expressway Corporation), 2020, Tips for road design, Second Chapter: Earthwork and Drainage, AN01145-000145-12, Report of Korea Expressway Corporation, 46-62 (In Korean).
- Kim, B.R., Lee, S.J., Choi, S.O., 2013a, A study on the correlation between orientation of joint sets and location of subsidence zone in subsidence area, *Tunnel and Underground Space*, 23(5), 392-400 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.R., Lee, S.J., Choi, S.O., 2013b, A study on the prediction of surface subsidence zone through the case studies on mined-out area, *Tunnel and Underground Space*, 23(1), 31-41 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.N., 2011, A case study on stability analysis of ground subsidence in abandoned mine area - Focused on the vicinity of the Chujeon Station, MSc Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 120p (in Korean with English abstract).
- Kim, K.D., Lee, S.R., Oh, H.J., Choi, J.K., Won, J.S., 2006, Assessment of ground subsidence hazard near an abandoned underground coal mine using GIS, *Environmental Geology*, 50(8), 1183-1191 (in Korean with English abstract).
- Kratzsch, H., 1983, *Mining subsidence engineering*, Springer, Berlin, 543p.
- Lee, H.Y., Kim, S.W., 1964, Explanatory text of the geological map of Kumhae sheet (1:50,000), Geological Survey of Korea, 28p.
- Min, K.N., Lee, D.W., Kwon, Y.K., Hong, C.D., 2014, A case study of the ground subsidence by mining area goaf, Proceedings of the Spring Conference of the Society of Disaster Information, 201-204.
- Piggot, R.J., Eynon, P., 1978, Ground movements arising from the presence of shallow abandoned mine workings, in: Geddes, J.D. (Ed.), *Proceedings of the First Conference on Large Ground Movements and Structures*, Cardiff, Pentech Press, London, 749-780.
- Schmertmann, J.H., 1978, Guidelines for cone penetration test: Performance and design, Report No. FHWA-TS-78-209, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Washington DC, 145p.
- Shin, J.K., 2010, A study on the impact range of critical height in collapse by cavity of abandoned mine areas, MSc Thesis, Kangwon National University, 71p (in Korean with English abstract).
- Son, M., 2017, A study on the subsidence risk assessment applying optimization technique for abandoned mine, PhD Dissertation, Hanyang University, 148p (in Korean with English abstract).