

폐탄광지역의 지반침하발생과 지하 채굴적의 상관관계 연구

최종국¹ · 김기동^{2*} · 송교영³ · 조민정¹

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²세종대학교 지구정보공학과 지질재해정보연구실,

³한국지질자원연구원 지질도 · 지구조연구실

A Study on the Correlation between Coal Mining Subsidence and Underground Goaf

Jong-Kuk Choi¹, Ki-Dong Kim^{2*}, Kyo-Young Song³ and Min-Jeong Jo¹

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 134, Shinchon-Dong, Seodaemun-Gu, Seoul, 120-749, Korea

²Geohazard Information Laboratory, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University, 98, Gunja-Dong, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-747, Korea

³Geological Mapping Group, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 92, Gwahang-no, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-350, Korea

This study is to examine a relation between coal mining subsidence occurrence at abandoned underground coal mines and underground goaf with respect to surface geology, subsurface structure, depth and thickness of coal beds and the distribution of drifts. A study is carried out at the site where susceptibility of coal mining subsidence was proven high in a previous study. In that previous study, the susceptibility of coal mining subsidence was spatially analyzed by GIS using digitized geological maps, investigation reports, digitized mining tunnel maps without consideration of subsurface structure and the multi-level arrangement of drifts. Here we analyze geological characteristics around the goaf and the distribution of coal seam based upon digitized geological maps and investigation reports on the study area. And digitized mining tunnel maps are also used to analyze the depth and multi-level arrangement of drifts. The results show that weakened surface rock strength, relatively shallow depth and large thickness of coal seam below the surface are closely related to the coal mining subsidence occurrence. Complicatedly inter-connected drifts, shallow depth of drifts and surface rock fractures are revealed as additional control factors affecting coal mining subsidence. These factors examined in this study as well as original factors should be taken into account for the quantitative estimation of coal mining subsidence occurrence at abandoned underground coal mine.

Key words : coal mining subsidence, abandoned underground coal mine, underground goaf, distribution of drifts, susceptibility

이 연구에서는 폐탄광 지역에서 발생하는 지반침하와 지하 채굴적 사이의 상관성을 지질, 지하구조, 탄층의 심도와 두께, 지하갱도의 분포 측면에서 분석하고자 하였다. 연구대상 지역은 강원도 삼척시 삼척탄전에 속하며, 채굴적 특성을 고려하지 않은 기존의 연구에서 수치지질도, 수치갱내도, 현장조사보고서 자료와 GIS의 공간분석기법을 적용하여 지반침하 취약성이 높게 분석된 지역에 해당된다. 연구지역에 대한 수치지질도 및 지반안정성 조사 보고서를 기반으로 연구지역내에서 지반침하가 관측된 지역의 분포, 지표 및 지하의 지질구조와 탄층의 분포현황을 분석하였고, 수치갱내도 자료를 이용하여 지하 갱도의 심도 및 중첩분포 현황을 분석하였다. 연구결과, 지표의 암석 강도 지하, 얇은 심도와 두꺼운 층후의 함탄층 존재가 지반침하 발생과 밀접한 관련이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 다수의 중첩된 갱도의 분포 및 얇은 심도의 지하 갱도 존재, 단층의 존재 역시 지반침하발생에 영향을 주는 주요인으로 확인되었다. 지반침하 위험지역을 정량적으로 예측함에 있어, 연구결과로 나타난 지반침하 관련 요인을 추가로 데이터베이스화하

*Corresponding author: kidong@yonsei.ac.kr

역 폐탄광 지역별로 적합한 지반침하예측 모델을 구축한다면 폐탄광 지역의 지반침하위험 예측 및 예방에 매우 효과적일 것으로 판단된다.

주요어 : 지반침하, 폐탄광, 채굴적, 갱도 분포, 취약성

1. 서 론

국내의 폐광 지역에서는 과거 채광활동에 의해 형성된 지하 채굴공동으로 인해 지표에서의 지반침하가 빈번히 발생하고 있다. 1993년 5월 부평의 폐금속 광산에서 채굴적의 붕괴로 인해 154개소의 묘지가 훼손되었으며(Kim and Kwon, 2007), 2007년 울진의 석회석 광산 주변에서 발생한 대규모 지반침하가 보고된 바 있다(Kim, 2008). 이러한 폐광산지역의 지반침하발생은 도로, 철도 등 시설물의 안정성 보장에 치명적임은 물론 심각한 인명 및 재산 피해를 가져올 수 있다. 이에 폐광산 광해방지 전문기관으로서 현 한국광해관리공단(구 석탄산업합리화사업단)이 설립되는 등 폐광지역에서의 지반침하에 대한 사회적 관심이 증대되고 있다. 최근 이와 관련하여, 확률모델과 통계기법을 이용한 폐탄광 지역의 지반침하발생 위험예측도 작성(Kim *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2007), 인공신경망 기법을 이용한 지반침하발생 위험지역의 예측(Kim, 2006) 등 폐광산에서 발생하는 지반침하를 정량적으로 예측하고자 하는 연구들이 수행된 바 있다. 폐광 지역 지반침하 관련 연구에서 지하의 지질구조, 채굴공동의 깊이와 높이, 채굴경사도 등이 탄광지역의 지반침하를 일으키는 주요인으로 규정되어 왔으며(Waltham, 1989), 지표로부터 지하갱도까지의 심도, 채굴공동의 심도, 채굴공동의 높이 등을 이용한 침하발생 위험예측에 대한 연구가 수행된 바 있다(Choi *et al.*, 2008). Kim(2006)에 의해 수행된 연구에서는 폐탄광 지역을 대상으로 조사지역의 지반침하발생 위험예측도를 작성하고 이에 대한 검증을 수행하였으나, 예측 결과에 대해 지하의 지질구조 및 갱도분포와의 관련성에 대한 해석이 수행되지 않았다. 따라서 이 연구에서는 Kim(2006)에 의해 지반침하발생 위험예측 연구가 수행된 연구지역을 중심으로 침하발생 위험이 높은 것으로 분석된 지역에서 기존의 주요 요인 외에 추가적으로 1) 지질 및 탄층의 분포, 2) 지하갱도 분포의 공간적 분석을 통하여 이들과 침하발생과의 관련성을 밝히고자 한다.

2. 연구지역

2.1. 지형 및 지질

연구지역은 동경 129° 02' 40"~129° 03' 30", 북위 37° 14' 26"~37° 15' 24" 사이에 위치한 강원도 삼척시 도계읍 고사리와 동경 129° 01' 50"~129° 02' 15", 북위 37° 11' 03"~37° 11' 21" 사이에 위치한 강원도 삼척시 도계읍 심포리 일대이다. 고사리 지역은 구 대방탄광 및 삼마탄광이 위치한 곳이며, 심포리 지역은 구 한양탄광이 위치한 곳으로 폐광 이후 각각 21개소와 28개소의 지반침하 발생이 보고된 바 있다(Coal Industry Promotion Board, 1996; Coal Industry Promotion Board, 1997). Fig. 1은 연구지역의 위치도를 나타내며, 갱내도 및 기 관측된 지반침하 발생지역을 함께 표기하였다. 강원도 삼척시 도계읍 일대는 태백산맥 동쪽 산록부에 해당하는 험준한 산악지대로서 N10°~20°E 방향의 주계곡이 오십천 단층과 같은 방향으로 발달해 있다. 지질구조적으로는 옥천습곡대 동북부에 위치하는 삼척탄전의 동북부 지역에 해당한다(Coal Industry Promotion Board, 1999a; Coal Industry Promotion Board, 1999b).

고사리 지역은 영동선 철도와 38번 국도가 지나는 오십천 변에 위치한다. 지형은 태백산맥의 동측으로써 동쪽으로는 해발 550 m 이상의 산과 서쪽으로는 인근 345 m 고지 및 581 m 고지 등이 험준한 지형을 이루고 있으며 오십천이 오십천 단층을 따라 깊은 협곡을 이루며 발달되어 있다(Coal Industry Promotion Board, 1996). 심포리 지역의 지형은 태백산맥의 동측에 해당하며 산은 높고 계곡이 깊으며 서고 동저의 현상을 보이는 장년기 지형의 특징을 보인다. 지형이 높은 곳은 해발 1,029 m 및 932 m의 고지를 이루고, 계곡부는 해발 300~400 m로서 그 고저차가 500~600 m 정도이다. 이 지역 동쪽에는 삼척시를 거쳐 동해로 흐르는 오십천이 남북방향으로 발달하고 있다(Coal Industry Promotion Board, 1997).

연구지역이 속한 삼척탄전 동부의 지질은 하부로부터 선캠브리아기의 니질 및 사질기원 변성암류를 기반암으로 하여, 그 상위에 양덕층군과 대석회암층군의 하부 고생대 조선누층군, 상부 고생대 및 중부 고생대의

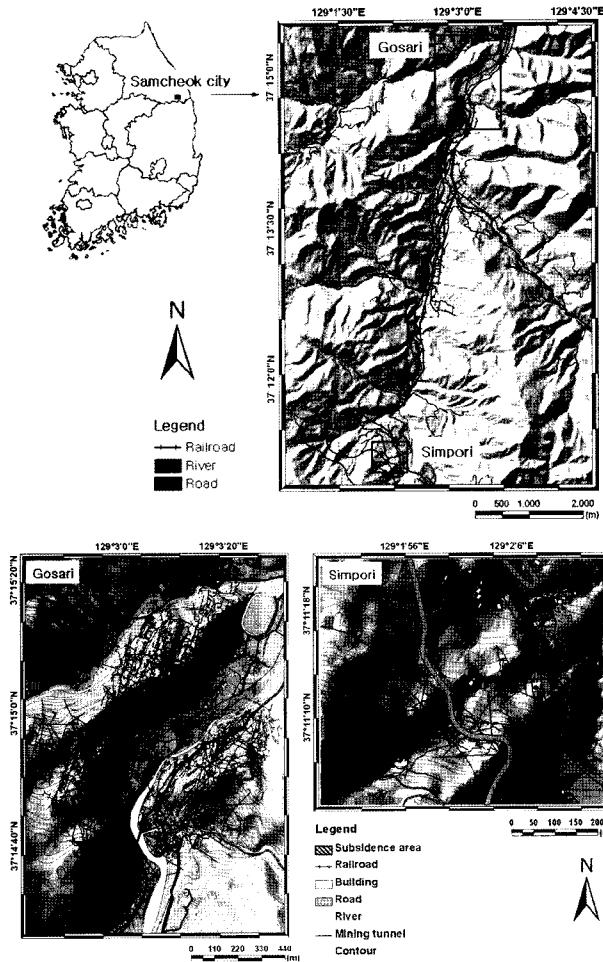


Fig. 1. Topographic maps of the study area overlaid with mining tunnels and subsidence sites in 1996-1997.

평안누층군, 백악기 경상누층군이 각각 부정합 관계로 분포하고 있다. 평안누층군은 하부로부터 만항층, 금천층, 장성층, 함백산층 및 도사곡층의 순으로 발달한다. 경상누층군은 하부로부터 적각리층, 홍전층이 분포하고 있으며, 이 시기에 관입 내지 화산암으로 분출한 맥암류도 함께 분포하고 있다(Coal Industry Promotion Board, 1997). 삼척탄전 동북부에 속하는 도계읍 일대의 지질도는 Fig. 2와 같다.

고사리 지역의 지질은 조선누층군의 화절층 및 풍춘석회암으로 이루어진 대석회암층, 고생대 평안누층군의 만항층, 장성층, 함백산층, 신생대 제4기의 신기 및 고기 하성층 등이 분포되어 있다. 경사가 수직 내지는 서쪽으로 급경사하는 오십천 단층에 의해 평안누층군의 함백산층이 직접 대석회암층과 경계를 이루고 있으며, 북부에서는 홍전스러스트(thrust)에 의해 만항층이

함백산층과 접하고 중앙부의 중부단층 등 비교적 규모가 큰 단층에 의해 함탄대가 중첩 분포되기도 한다(Coal Industry Promotion Board, 1999b). 심포리 지역의 지질은 상부 고생대의 평안누층군 중 금천층과 장성층이 분포된다. 함백산 단층과 오십천 단층을 중심으로 매우 복잡한 지질구조들이 발달하고 있으며, 이로 인해 함탄층인 장성층이 단속적으로 분포하게 됨에 따라 석탄광 개발이 여러 곳에 분산되어 이루어지게 되었다(Coal Industry Promotion Board, 1997). 고사리 및 심포리 지역의 전체적인 지질계통은 Table 1과 같다.

2.2. 탄층의 발달 상황

고사리 지역의 석탄층은 장성층 내에 존재하며, 장성층 함탄대에 대체로 3~4매의 탄층이 협재되어 있다. 그 중 중층탄이 주가행 대상으로서 그 층후는 1.5~5

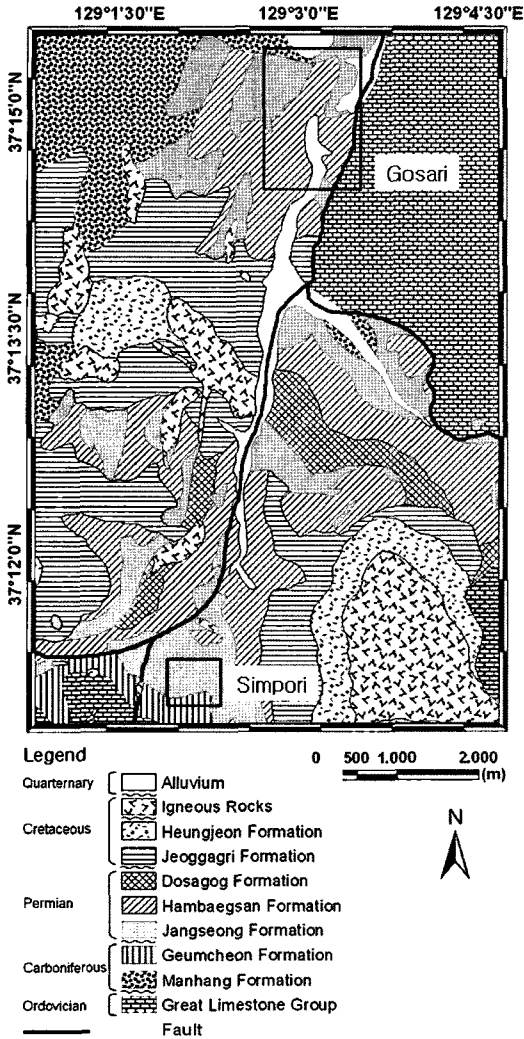


Fig. 2. Geology of the study area (Geological Society of Korea, 1999).

m이며, 중탄층 직하부 약 30 m 내외에 협재된 하탄층은 연장성이 불량하거나 탄폭의 변화가 심하여 일부 부광대에서만 채탄작업이 시행되었다(Coal Industry Promotion Board, 1996). 고사리 지역에 포함되는 탄층 및 채굴적의 평균 탄폭은 2~3m, 탄층경사는 0~40°, 채굴심도는 25~125m이다(Coal Industry Promotion Board, 1999b).

심포리 지역에 부존되는 석탄층은 장성층 내 3~4매, 금천층 내 2~3매로서 모두 5~7매의 석탄층이 협재된다. 주로 가행된 탄층은 장성층 내 2매의 탄층이며, 국부적으로 금천층 상부에 협재되는 1매의 탄층을 가행하기도 하였다. 심포리 지역의 일반적인 탄폭은 1m

내외로서 빈약하다(Coal Industry Promotion Board, 1997). 이 지역에 포함되는 탄층 및 채굴적의 평균 탄폭은 1.5~2.0 m, 탄층경사는 23°내외, 채굴심도는 0~45 m이다(Coal Industry Promotion Board, 1999a).



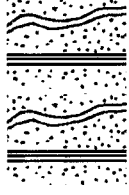
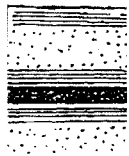
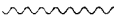
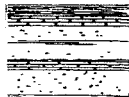
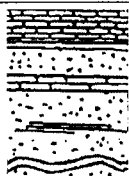

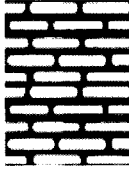
3. 연구방법

3.1. 상세조사지역의 선정

이 연구를 위한 상세조사지역은 Kim(2006)이 지표로부터 지하갱도까지의 심도, 지하갱도의 지표상 위치로부터의 수평거리, 지표의 지질분포, 지형 경사도, 지표로부터 지하수면까지의 심도, 투수계수, 토지이용현황 등 지반침하발생에 영향을 주는 요인들을 적용하여 작성한 고사리 및 심포리 지역의 지반침하발생 위험예측도를 기반으로 선정하였다. Table 2는 지반침하발생 위험예측도를 작성하기 위해 적용된 각 요인자료들을 나타내고 있다. Kim(2006)은 각 요인들을 단위격자 당 공간해상도가 1m×1m인 래스터 형태의 데이터베이스로 구축하고 각 요인들과 침하발생 사이의 상관관계를 계산하는 확률기법인 빈도비 모델(frequency ratio model)에 의해 각 요인별 빈도비 값을 계산하였다. 또한, 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS)의 중첩기법을 적용하여 각 요인별 빈도비 값을 격자별로 모두 더함으로써 지반침하발생 위험예측도를 작성하였다. 위험예측도의 각 격자가 가지는 값은 지반침하발생의 위험정도를 나타내며 이를 지반침하 위험지수(Subsidence Hazard Index: SHI)로 표현하였다. 이에 의해 심포리의 위험지수의 최소값은 1.27, 최대값은 40.22, 평균값은 6.99, 고사리의 위험지수의 최소값은 1.55, 최대값은 36.52, 평균값은 4.77 로 보고되었다.

이 연구에서는 계산된 지반침하 위험지수 값을 각 등급별로 균등한 면적을 가지도록 변위치(quantile) 분류방법에 의해 10개 등급으로 분류하고, 이를 다시 위험지수 상위부터 1등급, 2~3등급, 4~5등급, 6~10등급의 네 개 등급으로 재분류하여 각각 'Very High', 'High', 'Moderate', 'Low'의 등급 명을 부여하였다. 이중 'Very High' 등급으로 분류된 지역은 위험지수가 상위 10%에 해당하는 지역이 되며 이를 상세조사지역으로 선정하였다. 고사리 지역에서는 오십천 20교(일명 마교철교)에서 북쪽으로 영동선 철도를 따라 약 100~500 m에 위치한 지역(A)을 대상으로 하였으며, 심포리 지역에서는 심포초등학교 남동쪽 약 200 m에 위치한 38번 국도의 급회전 구간 남쪽의 영동선 철도 인접지역(B)과 B지역 남쪽으로 영동선 철도를 따라 약

Table 1. Stratigraphy of the study area (Geological Society of Korea, 1999; Kim, 2006; Coal Industry Promotion Board, 1996; Coal Industry Promotion Board, 1997)

Geological Age		Formation	Symbol	Thickness	Description
Era	Period				
Cenozoic	Quaternary	Alluvium		-	gravel, sand and clay
	unconformity				
Paleozoic	Permian	Hambaegsan Formation		300 m	milky white-light grey coarse sandstone
		Jangseong Formation		150 m	4~5 cyclothem consisting of dark grey sandstone and coal seam
	unconformity				
	Carboniferous	Geumcheon Formation		70 sm	dark grey-black shale and dark grey fine sandstone with 2~3 thin coal seams
Cambro-Ordovician	unconformity	Manhang Formation		300 m	purple, greenish grey or light green shale and light green sandstone
					
		Great Limestone Group		250~400 m	grey dark limestone intercalated with dolomite

250 m에 위치한 지역(C) 등 총 3개의 연구지역을 선정하였다(Fig. 3).

3.2. 지질 및 탄층의 분포와 지반침하 상관관계 분석

상세조사지역의 지표지질의 분포는 한국지질자원연구원에서 발행한 1:50,000 수치지질도를 기반으로 분석하였다. 이와 Coal Industry Promotion Board(1996, 1997)가 수행한 지반안정성 조사에 의해 보고된 기존 침하 발생 위치를 비교하였으며, 지반안정성 조사에 의해 보고된 시추조사 결과, 각 시추공에서 심도별로 계산된 RMR 등급의 각 시추공별 평균값을 계산하여 분석에 활용하였다. 또한, 연구지역의 지질단면도를 기반으로 A, B, C 지역의 지층별 층후, 함탄층의 심도

및 경사, 단층면의 분포 및 경사 등 상세조사지역 이하의 지질구조를 분석하였다. Fig. 4는 A, B, C 지역의 지질단면도를 나타낸다.

3.2.1. 연구지역 A

고사리 지역에서 기존에 발생한 침하지는 모두 장성층, 함백산층, 신기하성층에서 관측되었으며, 침하위험이 높게 예측된 연구지역 A 역시 세 가지의 지질로 구성되어 있는 것으로 분석되었다. A지역은 함백산층을 중심으로 북동방향으로는 장성층과 남서방향으로는 제4기 신기하성층과 경계를 이루고 있는 부분으로, 지형 경사도 분석 결과 지형의 경사가 0~12°로 완만하였다. 지질단면도 분석결과, A지역 최상부에는 사암인

Table 2. Control factors used for evaluating ground subsidence susceptibility (after Kim, 2006)

Category	Factors	Data Type	Scale	Remark
Geology	Geology	Polygon	1:50,000	Type of strata
Topography	Slope	Grid	1:5,000	Calculate from DEM
Mining tunnel map	Depth of drift	Polyline	1:1,200	DEM minus sea level of drift
	Distance from drift	Grid	1:1,200	Buffering of drift
Borehole	Depth of ground water	Point	1:5,000	IDW interpolation
	Permeability	Point		
Land use	Land use	Polygon	1:5,000	Type of land use

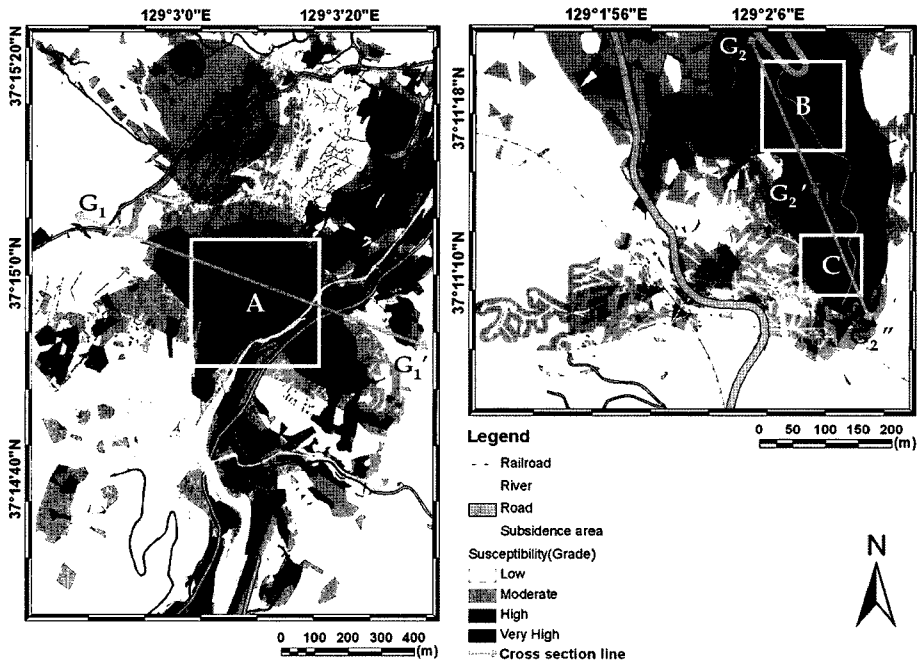


Fig. 3. Test sites in Gosari(A) and Simpori(B and C) overlaid with susceptibility estimated from frequency ratio model (after Kim, 2006).

함백산층의 층후가 120 m 이하로 다른 지역보다 상대적으로 얇게 분포하고 있었으며, 그 하부에 함탄층을 포함한 장성층이 두껍게 분포하고 있는 것으로 나타났다. A지역의 중심부는 장성층 내 함탄층이 역단층의 상하반에 단층과 평행하게 약 30~40°의 경사로 발달하고 있으며, 습곡구조의 배사부에서 함탄층이 지표 가까이 분포하는 지역으로 나타났다. 또한, A지역 내 남동부는 역단층의 하반에 해당하는 층으로, 습곡구조의 배사부에서 향사부로 탄층이 약 60°의 급경사를 이루는 지역으로 분석되었다. A지역 주변의 위험지수가 상대적으로 낮게 예측된 지역은 탄층이 존재하지 않는 지역, 또는 습곡구조의 향사부에 해당된다. A지역 인

점의 북서부(Fig. 4(a) 왼쪽지역)는 단층 및 탄층의 심도가 150~200 m 범위를 보이고 있어 최대 약 150 m의 탄층심도를 보이는 A지역과 구분된다. A지역 인점의 남동부(Fig. 4(a) 오른쪽지역)는 150~200 m 심도에 탄층이 분포하고 있으며, 표층인 함백산층 또한 120 m 이상의 두꺼운 층후를 나타내고 있어 상대적으로 지반침하발생 위험지수가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 고사리 지역의 지반침하발생과 지질 및 탄층 분포의 관련성 분석결과, 1) 함탄층인 장성층이 지표에서 가까운 심도에 두껍게 분포하여 지표의 암석강도가 상대적으로 낮은 지역, 2) 탄층의 경사가 약 60°의 급경사를 보이는 지역, 3) 탄층이 150 m 이하의

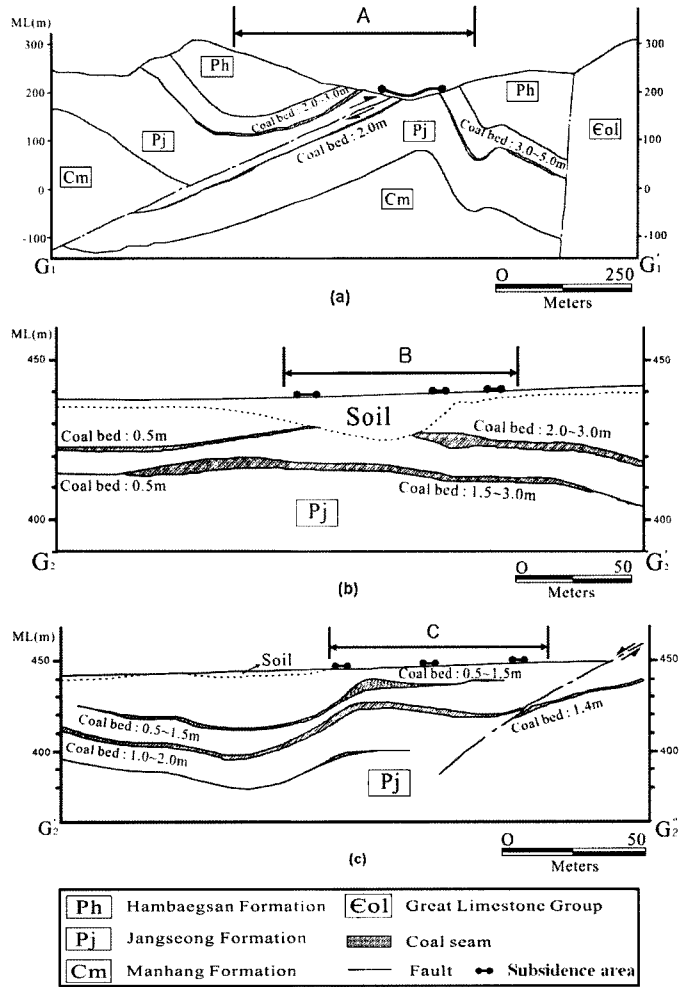


Fig. 4. (a) Geologic profiles along G₁-G₁' at Gosari (Coal Industry Promotion Board, 1996). Geologic profiles along (b) G₂-G₂' and (c) G₂'-G₂' at Simpori (Coal Industry Promotion Board, 1999a).

얕은 심도에 존재하는 지역에서 지반침하발생 위험지수가 높게 나타난 것으로 분석되었다. Fig. 5는 A지역 및 인접지역의 지질단면도 분석결과, 표층의 층후 분포, 탄층의 경사, 심도 및 두께를 그래프로 나타낸 것이다.

3.2.2. 연구지역 B

심포리 지역에서 기존에 발생한 침하지는 모두 장성층에서 관측되었으며, 침하위험이 높게 예측된 연구지역 B와 연구지역 C 역시 장성층에 속하는 것으로 분석되었다. 수치표고모델(Digital Elevation Model: DEM) 분석과 경사도 분석 결과, 심포리의 지형은 남서로부터 북동방향으로 최고 650 m에서 최저 370 m의

고도로 약 20° 이하의 완만한 경사로 낮아지는 형태를 보이고 있었으며, B지역과 C지역은 모두 400~450 m 고도에 해당하는 취락지역에 위치하였다. B지역은 지표의 토양층이 2 m 내외의 층후를 보이는 다른 지역과 쉽게 구분될 만큼 최대 약 15m로 두껍게 분포하고 있었으며, 지표로부터 약 10 m 심도에 본층탄에서 가장 두꺼운 3 m의 층후를 보이는 함탄층이 완만한 경사를 이루며 평탄하게 분포하고 있었다. B지역 주변의 위험지수가 상대적으로 낮은 지역은 토양층이 지표에 1~2 m로 얇게 분포하고, 탄층이 1 m 내외의 층후를 보였다(Fig. 4(b)). 따라서 이 지역은 1) 미고결층인 토양층이 표층에 두껍게 분포하여 표층의 암석 강도가 상대적으로 낮은 지역, 2) 지표에서 가까운 심도에 함

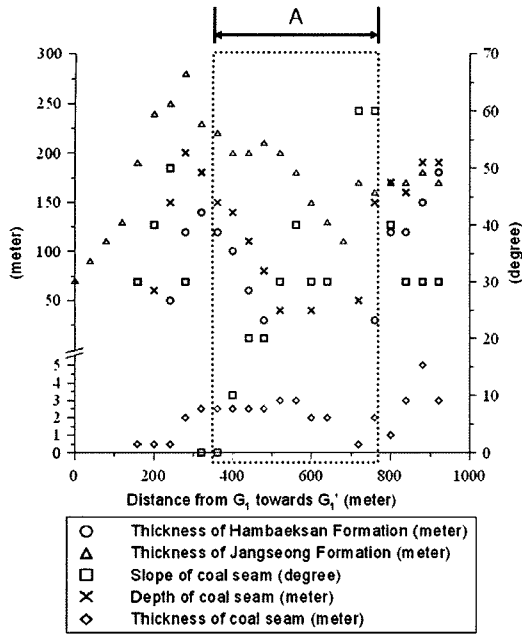


Fig. 5. Thickness of the surface strata and distribution of the coal seam along G_1-G_1' at Gosari.

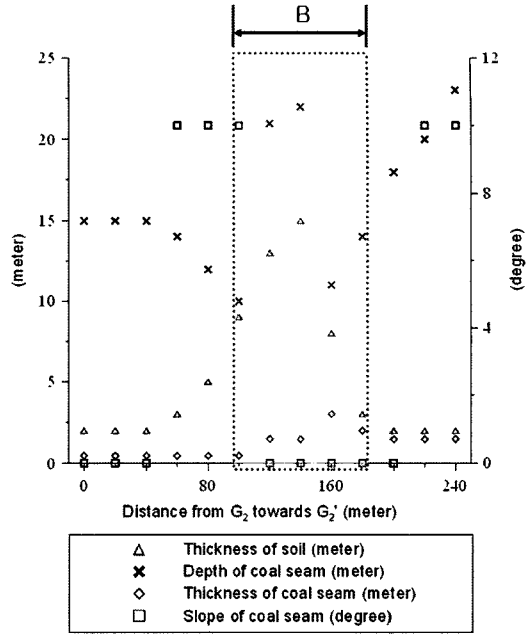


Fig. 6. Thickness of the surface strata and distribution of the coal seam along G_2-G_2' at Simpori.

탄층이 상대적으로 두꺼운 층후로 존재하는 지역에서 지반침하발생 위험지수가 높게 나타난 것으로 분석되었다. Fig. 6은 B지역 및 인접지역의 지질단면도 분석결과, 표층인 토양층의 층후 분포, 탄층의 경사, 심도 및 두께를 그래프로 나타낸 것이다.

3.2.3. 연구지역 C

지질단면도 분석결과, C지역은 상층탄에서 가장 두꺼운 층후를 보이는 부분이 지표로부터 5m 내외의 심도에 존재하고 있었으며, 상층탄 하부 5~15m 깊이에 본층탄이 5m 내외의 층후를 보이며 분포하고 있었다. 또한, C지역의 단층대 주변지역은 RMR(Rock Mass Rating) 등급이 평균 4~5로 계산되었으며, 심포리 지역의 평균 RMR 등급이 3~5임을 볼 때 단층대 주변에 파쇄대, 절리면의 발달 등이 원인이 되어 암반 물성이 가장 낮은 지역에 속하는 것으로 판단된다. 심포리 전체 지역의 RMR 등급의 분포를 분석한 결과, 심포리에 존재하는 전체 지반침하발생 지역의 약 96%가 평균 4~5의 RMR 등급을 보이는 지역에서 발생하였다. 따라서 지표의 암질이 불량한 지역에서 상대적으로 지반침하가 많이 발생했음을 알 수 있다. Coal Industry Promotion Board(1999a)에 의해 수행된 전기비저항탐사 결과 이 지역에는 지표로부터 10~20m

심도에 전기비저항 이상대가 분포하고 있어 석탄 채굴 공동의 존재 가능성이 있으며, 이로 인해 지표 암반의 강도가 저하된 것으로 판단된다.

B와 C 지역 모두 탄층의 경사는 지형과 마찬가지로 완만하게 나타나고 있었으며, C지역의 북쪽에 인접한 위험지수가 상대적으로 낮은 지역은 가장 얇은 탄층의 심도가 30~60m 내외로서 C지역 내 탄층의 심도(10~28m)보다 상대적으로 깊고, 층후 또한 0.5m 내외로 얇게 분포하고 있어 지반침하발생 위험이 적게 나타난 것으로 판단된다(Fig. 4(c) 왼쪽 지역). 따라서 이 지역은 1) 지표에서 가까운 심도에 함탄층이 상대적으로 두꺼운 층후로 존재하는 지역, 2) 단층대의 존재에 의해 지표의 암석 강도가 낮은 지역에서 지반침하발생 위험지수가 높게 나타난 것으로 분석되었다. Fig. 7은 C지역 및 인접지역의 지질단면도 분석결과, 탄층의 경사, 심도 및 두께를 그래프로 나타낸 것이다.

3.3. 지하 갱도의 분포와 지반침하 상관관계 분석

지하 갱도의 분포와 상부지반의 침하발생 간의 관계를 알아보기 위하여 석탄산업합리화사업단(현 한국광해관리공단)에서 기 구축한 연구지역의 수치갱내도 자료를 이용하여, 연구지역 A, B, C의 지하 갱도의 심도 및 중첩분포 현황을 분석하였다. 지하 갱도의 심도는

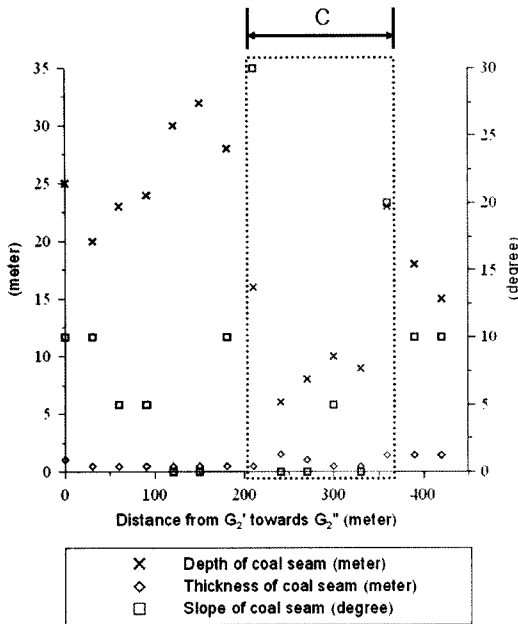


Fig. 7. Distribution of the coal seam along G₂'-G₂'' at Simpori.

3차원으로 구축된 지하 갱도의 해발 고도값을 DEM에서 빼줌으로써 계산하였다. 고사리 및 심포리 지역 전반의 갱도 분포 및 갱심도를 분석하고, A, B, C 지역에 존재하는 갱도를 별도의 GIS 자료로 구축하여 갱도들 간의 교차 정도, 편별 심도차 및 지표로부터의 갱심도를 분석하였다. 또한, 3차원으로 구축된 갱내도 데이터베이스를 활용하여 지표 하부의 갱도 분포현황을 시각적으로 분석하였다.

3.3.1. 연구지역 A

고사리 지역에 주로 분포하는 갱도는 삼마탄광의 지성갱과 대방탄광의 신사갱, 대성갱 및 대성본갱이다. 지성갱은 고사리지역의 남서부에 분포하고 있으며, 최상부의 1편부터 최하부의 11편까지 개발되었다. 지표로부터의 심도는 약 20~425m에 이르며, 7편(52ML: Mean Sea Level, meter)과 8편(-5ML)에서 탄폭이 각각 14m, 6m인 부광대를 개발하였다 (Coal Industry Promotion Board, 1996). 신사갱은 고사리지역의 남동부에 분포하며, 10편까지 개발되었다. 지표로부터의 심도는 약 110~142m로 깊은 심도에 존재하였으며, 탄폭 역시 최대 3m로 빈광지역이다. 대성갱은 신사갱과 동일한 위치에서 신사갱의 상하로 분포하고 있으며, 7편(19.5ML)까지 개발되었다. 지표로부터의 심도는 약

40~330m이며, 60% 이상이 50~150m 사이에 분포하였다. 고사리지역의 북부에는 대성본갱이 3편까지 넓게 분포하고 있으며, 지표로부터의 심도는 150~200m에 집중되어 분포하였다.

지반침하 위험지수가 상대적으로 높게 나타난 연구지역 A는 지성갱의 3편(140ML), 5편(116ML), 6편(80ML) 및 좌8편(-2ML)이 집중적으로 분포하고 있었으며, 이들은 50~100m의 심도를 보였다. A지역의 북부에는 대성본갱의 2편(142ML)과 3편(109ML)이 분포하고 있었으며, 이들의 지표로부터의 심도는 100~200m를 보였다. 지성갱과 대성본갱 모두 편과 편 사이가 30m의 심도차를 보이면서 복잡하게 중첩되어 분포하고 있어 지반침하발생에 취약한 지역으로 예측된 것으로 판단된다. A지역의 북동부 및 남동부에는 대방탄광의 소규모 갱도들인 남풍갱(166ML), 영풍갱(170ML), 금동갱(200ML) 및 남일갱(207ML) 등이 분포하고 있었으며, 이들의 지표로부터 심도는 모두 50m 이하로 지표 근처에 분포하고 있어 지반침하발생 위험지수가 높게 분석된 것으로 판단된다. 고사리지역 전체적으로는 최소 0.2m, 최대 423m, 평균 164m의 갱심도 분포를 보이며, A지역은 최소 2.3m, 최대 273m, 평균 125m의 갱심도 분포를 나타내는 것으로 분석되어 고사리지역 내에서 상대적으로 얇은 갱심도 분포를 보였다. 따라서 고사리 지역의 지반침하발생과 지하 갱도 분포의 관련성 분석결과, 1) 30m 내외의 작은 심도차를 보이는 갱도가 연속적으로 중첩하여 분포하는 지역, 2) 지하 갱도가 약 50m 이하의 얇은 심도에 존재하는 지역에서 지반침하발생 위험지수가 높게 나타난 것으로 분석되었다. Fig. 8의 최상단의 그림은 A지역에 분포하는 지하 갱도의 수평 및 수직 분포현황을 보여준다.

3.3.2. 연구지역 B와 C

심포리 지역에서는 한양탄광에 의해서 채탄이 이루어졌으며, 한양2갱 0편(442ML), 한양3갱 0편(394ML), 1편(356ML), 2편(316ML), 3편(282ML) 등의 갱도가 분포한다(Coal Industry Promotion Board, 1997). 이 지역의 남동부는 지표의 고도가 가장 높은 곳으로 한양2갱 0편, 한양3갱 0, 1, 2편이 고르게 분포되어 있었으며, 지표로부터의 심도는 30~225m이고, 약 75%의 갱도가 100~200m 심도에 존재하고 있었다. 심포리 지역의 중앙부에는 한양3갱의 2편이 주로 분포하고 있었으며, 지표로부터의 심도는 60~210m이고, 90% 이상이 100m 이상의 심도에 존재하였다.

지반침하의 위험지수가 높은 것으로 예측된 연구지

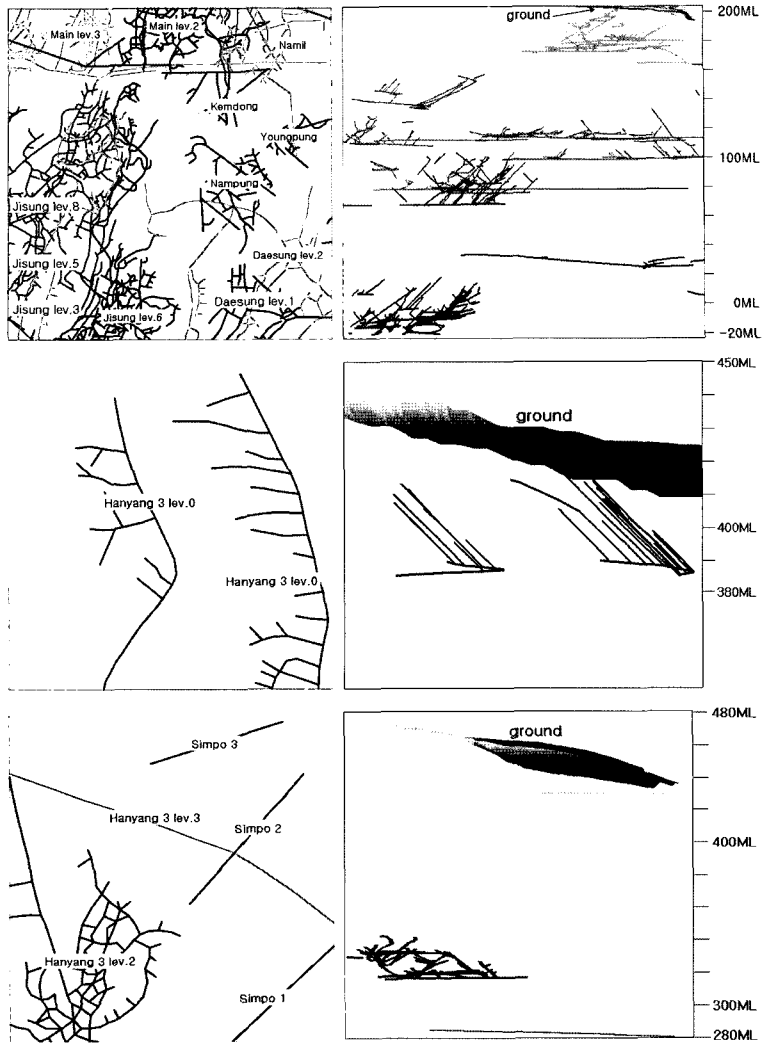


Fig. 8. Horizontal (left column) and vertical (right column) distribution of drifts at the study areas of 'A'(top), 'B'(middle) and 'C'(bottom).

역 B가 포함된 심포리 지역 동부에는 한양3개의 0편이 주로 분포하고 있으며, 지표로부터의 심도는 0~235m를 보이고, 약 40%의 갱이 40m 이하의 심도에, 약 63%의 갱이 60m 이하의 심도에 존재하였다. 특히, B지역은 한양3개의 0편이 고르게 분포되어 있었으며, 지표로부터의 심도가 18~45m로 지표와 가깝게 분포하고 있어 지반침하에 취약한 것으로 판단된다.

연구지역 C에는 한양3개의 2편이 남서쪽에 분포하고 있으며, 동쪽으로는 심포리 연구지역 중 C지역에만 분포하는 심포1갱(429ML), 심포2갱(424ML), 심포3갱(427ML)이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 한양3개 2편의 심도는 130~140m이며, 심포갱들의 심도는

4~25m로 지표와 매우 가까운 분포를 보였다. C지역의 지반침하 위험지수가 상대적으로 높게 예측된 것은 심포갱들의 분포와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 특히, C지역 남부의 단층대 주변은 심포1갱이 분포하는 위치로서 갱의 심도는 5~15m로 지표로부터 매우 얕은 심도에 존재하여 지반침하에 취약한 것으로 분석되었다. 한양3개 2편이 존재하는 남서부는 지하갱도의 심도가 깊은 곳임에도 지반침하에 취약한 것으로 분석된 것은, 지하갱도의 분포 이외에 지하수 유동 등 기타 요인에 의한 것 또는 알려지지 않은 지하 채굴갱도의 존재 등이 그 원인인 것으로 판단되어 정밀한 조사가 요구된다. 심포리 전체적으로는 최소 4m, 최대

236 m, 평균 135 m의 갱심도 분포를 보이며, B지역의 갱심도는 최소 23 m, 최대 54 m, 평균 35 m, C지역의 갱심도는 최소 10 m, 최대 173 m, 평균 110 m를 보여, B와 C지역은 상대적으로 얇은 심도에 갱이 분포하고 있어 지반침하발생 위험이 높은 것으로 판단된다. 따라서 심포리 지역의 지반침하발생과 지하 갱도 분포의 관련성 분석결과, 지하 갱도가 상대적으로 얇은 심도에 존재하는 지역에서 지반침하발생 위험지수가 높게 나타난 것으로 분석되었다. Fig. 8에 B지역과 C지역에 분포하는 지하 갱도의 수평 및 수직 분포현황이 나타나 있다.

4. 결 론

광산지역에서 채광 활동으로 형성된 지하 채굴적에 의해 발생하는 지반침하는 그 발생 요인의 정확한 파악과 그에 따르는 정량적 예측을 통해 효과적인 방지 대책을 수립하여야 한다. 이 연구에서는 기존의 연구에서 지반침하발생 위험이 큰 것으로 분석된 지역에 대해, 지질구조 및 지하 갱도의 분포와 지반침하발생간의 관련성을 공간적으로 분석하였다. 본 연구결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 지반침하 발생과 지질 및 탄층 분포와의 관련성 분석결과, 지반침하 위험이 높은 곳으로 예측된 연구지역 A는 함탄층을 포함한 장성층이 두꺼운 층후를 보이는 지역으로서, 습곡구조의 배사부에 함탄층이 존재하여 탄층의 심도가 상대적으로 얇거나 또는 탄층이 급경사를 이루는 지역인 것으로 분석되었다. 연구지역 B는 미고결층인 토양층이 두껍게 분포하고 있고, 두꺼운 층후를 보이는 함탄층이 상대적으로 얇은 심도에 존재하고 있는 것으로 확인되었으며, 연구지역 C 또한 두꺼운 층후를 보이는 함탄층이 매우 얇은 심도에 존재하고 있는 것으로 분석되었다. 이를 통해, 지표의 암석 강도 저하, 얇은 심도와 두꺼운 층후의 함탄층 존재는 지반침하의 발생과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 기존의 연구에서 고려된 지질요인은 지표 지질분포만을 고려하였으나, 표층에 미고결층의 존재여부는 침하발생의 중요한 요인이 될 수 있으므로 이를 고려한 분석이 필요할 것으로 판단되며, 탄층의 경사와 심도 및 두께 또한 추가적으로 고려되어야 할 것이다.

2. C지역 단층대 주변의 RMR 등급을 분석 한 결과, 주변지역에 비해 상대적으로 불량한 값을 보이며, 이는 단층대 주변에 파쇄대, 질리면의 발달 등이 암석 강도 약화를 가져온 것으로 판단된다. 심포리의 RMR

등급과 지반침하발생 지역의 상관성을 분석한 결과, 암질이 불량한 지역에서 대부분의 침하가 발생하였으며, 따라서 암석 강도 약화의 원인이 되는 단층의 존재 또한 지반침하발생에 영향을 주는 요인으로 판단된다. 따라서 보다 정밀한 지반침하발생 예측을 위해서는 암석 강도를 나타내는 지표가 되는 RMR 등급의 분포와 암석강도의 약화를 가져오는 단층의 존재를 추가적으로 고려한 분석이 필요할 것이다.

3. 지반침하 발생과 지하 갱도 분포와의 관련성 분석결과, A지역은 편과 편사이가 30m의 얇은 심도차를 보이는 다수의 갱도가 복잡하게 중첩되어 분포하고 있었다. 또한 지표로부터 갱심도는 최대 273 m, 평균 125 m로서 최대 423 m, 평균 164 m를 보이는 고사리 전체지역 내에서 상대적으로 얇은 분포를 보였다. B지역과 C지역 역시 각각 최대 54 m 및 평균 35 m, 최대 173 m 및 평균 110 m의 갱심도를 보여 최대 236 m, 평균 135 m의 심도를 가지는 심포리 지역 내에서 상대적으로 얇은 심도에 갱도가 존재하고 있는 것으로 확인되었다. 이를 통해, 다수의 갱도가 작은 심도차로 중첩하여 분포하거나 상대적으로 얇은 심도에 지하 갱도가 존재하는 곳은 지반침하 발생에 취약한 것으로 분석되었다. 기존의 연구에서는 단순히 갱도의 심도만을 그 요인으로 고려하였으나, 중첩 분포하는 갱도들의 심도차를 고려한 가중치를 부여함으로써 분석결과와 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 미고결층의 존재, 단층의 존재, RMR 등의 지질요인, 탄층의 경사, 심도, 두께 등의 함탄층 분포 및 지하 갱도의 중첩 분포 등 본 연구결과로 나타난 지반침하 관련 요인을 추가로 데이터베이스화하여 폐탄광 지역별로 적합한 지반침하예측 모델을 구축함으로써 폐탄광 지역의 지반침하위험을 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 국가지정연구실사업(M1-0302-00-0063)의 일부 지원으로 이루어졌음을 밝힙니다. 또한, 한국광해관리공단이 제공한 조사보고서 및 GIS 데이터베이스를 활용하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

Choi, J.K., Kim, K.D. and Won, J.S. (2008) A Study on the Production of Coal Mining Subsidence Susceptibility

- Map Using PCA (Korean ed.), Proceedings of KSRS spring conference, Seoul, Korea, p. 323-327.
- Choi, J.K., Kim, K.D., Lee, S.R., Kim, I.S. and Won, J.S. (2007) Prediction of ground subsidence hazard area using GIS and probability model near abandoned underground coal mine (Korean ed.), Jour. Korean Society of Economic and Environmental Geology, v. 40, no. 3, p. 295-306.
- Coal Industry Promotion Board (1996) Fundamental investigation report of the stability test for Gosari (Korean ed.), v. 96-02, p. 7-40.
- Coal Industry Promotion Board (1997) Fundamental investigation report of the stability test for Simpori (Korean ed.), v. 97-08, p. 5-56.
- Coal Industry Promotion Board (1999a) Detailed investigation report of the stability test for Simpori (Korean ed.), v. 99-04, p. 41-127.
- Coal Industry Promotion Board (1999b) Investigation report of the reinforcement work plan for Gosari (Korean ed.), v. 99-04, p. 5-112.
- Geological Society of Korea (1999) Geology of Korea (Korean ed.), p. 139-148.
- Kim, C. (2008) Types of Mine Hazards at Abandoned Mines and Urgencies of Preparation (Korean ed.), Proceedings of Mine Reclamation Conference for Environmentally Friendly Regional Development, Seoul, Korea, p. 21-37.
- Kim, K.D. (2006) Prediction and Verification of Ground Subsidence at Abandoned Underground Coal Mine Area using GIS (Korean ed.), Ph.D. dissertation of Yonsei University.
- 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, p. 1183-1191.
- Kim, T.H. and Kwon H.H. (2007) The present states of mine reclamation in Republic of Korea, Proceedings of International Symposium on Mine Reclamation, Taebaek, Korea, p. 3-14.
- Waltham, A.C. (1989) Ground subsidence, Blackie & Son Ltd., New York, p. 49-97.

2008년 7월 7일 원고접수, 2008년 8월 18일 게재승인.