폐광산 지역의 공동 탐지 및 지반침하 모니터링을 위한 전기비저항탐사와 시추공영상촬영기법 적용 사례

최정열¹ · 김승섭^{1,*} · 박상규² · 신광수³ · 강병천⁴

¹충남대학교 지질환경과학과, 305-764, 대전광역시 유성구 대학로 99

²(주)한세지반엔지니어링, 305-308, 대전광역시 유성구 유성대로 821번길 14-14

³한국광해관리공단, 110-727, 서울특별시 종로구 종로 5길 58

⁴산하ENC, 462-120, 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124

A Case Study of Electrical Resistivity and Borehole Imaging Methods for Detecting Underground Cavities and Monitoring Ground Subsidence at Abandoned Underground Mines

Jeong-Ryul Choi¹, Seung-Sep Kim^{1,*}, Sang-Kyu Park²,
Kwang-Soo Shin³, and Byung-Chun Kang⁴

¹Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University,
Daejeon 305-764, Korea

²HanSe Geo Engineering, Daejeon 305-308, Korea

³Mine Reclamation Corp., Seoul 110-727, Korea

⁴Sanha Engineering and Consultant, Gyeonggi 462-120, Korea

Abstract: We employed electrical resistivity and optical borehole imaging methods to identify underground cavities and determine ground subsidence rate at the study area affected by land subsidence due to abandoned underground mines. At the study site 1, the anomalous zones of low resistivity ranging between 100 ohm-meter and 150 ohm-meter were observed and confirmed as an abandoned underground mine by subsequent borehole drilling and optical borehole imaging. Although the electrical resistivity survey was unavailable due to the paved surface of the study site 2, we were able to locate another abandoned underground mine with the collapsed mine shaft based on the distribution of the ore veins and confirmed it with borehole drilling. In addition, we measured vertical displacements of underground features indicating underground subsidence by conducting optical borehole imaging 6 times over a period of 43 days at the study site 2. The displacement magnitude at the deep segment caused by subsidence appeared to be 3 times larger than those at the shallow segment. Similarly, the displacement duration at the deep segment was 4 times longer than those at the shallow segment. Therefore, the combination of electrical resistivity and optical borehole imaging methods can be effectively applicable to detect and monitor ground subsidence caused by underground cavities.

Keywords: electrical resistivity survey, optical borehole imaging, cavity, monitoring, ground subsidence

*Corresponding author: seungsep@cnu.kr

Tel: +82-42-821-6423

Fax: +82-42-822-7661

요약: 지하 폐광도에 의한 지반침하 지역에서 전기비저항탐사와 시추공영상촬영을 통하여 지하공동의 분포 파악 및 지반 침하의 시간에 따른 변화량 측정을 수행하였다. 전기비저항탐사가 가능했던 연구지역 1에서는 100-150 ohm-meter 정도 낮은 비저항을 가지는 이상대가 관찰되었으며 시추조사와 시추공영상촬영 결과에서 폐광도를 확인하였다. 연구지역 2는 도로로 피복되어 전기비저항탐사 수행이 불가능하였으나 광맥분포를 고려한 시추조사에서 채굴적 및 폐광도를 확인하였다. 또한 시추공영상촬영을 43일간 총 6차례에 걸쳐 수행하여 시간에 따른 지하매질의 수직 이동 변위를 측정하였다. 지반침하로 인한 지하매질의 수직이동양상은 하부에서 상부보다 3배 이상 큰 규모로 발생하며 그 지속기간 역시 4배 이상 오랫동안 발생했음을 확인하였다. 효과적인 지하공동 탐지 및 지반침하 작용 모니터링을 위해서는 전기비저항탐사와 시추공영상촬영기법을 활용하는 것이 유용함을 알 수 있었다.

주요어: 전기비저항탐사, 시추공영상촬영, 공동, 모니터링, 침하

서론

지반침하는 크게 두 유형으로 석회암 지역의 자연 공동, 광산채굴에 의한 인위적인 공동 등 지하공동 부존지역 침하와 매립지 또는 간척지 등과 같이 연약지반 침하로 분류할 수 있다. 지하공동에 의한 지반침하는 통상적으로 급속히 발생하는 경우가 많으므로 재산피해가 심각할 뿐만 아니라 인명피해 가능성 또한 높다(Murck et al., 1995; Keller, 1996). 전 세계적으로도 이와 같은 지반침하 문제는 큰 이슈가 되어있으며, 지구물리뿐만 아니라 지질학, 수리지질학, 암반공학 등의 다양한 분야에서 중요한 문제 중 하나로 인식되고 있다.

우리나라의 경우 가파른 산업 발전과 함께 광범위한 토지개발이 이루어졌다. 이 과정에서 석회암 지대나 지하 폐광도가 부존하는 지역에 대한 사전 조사 및 지반 보완 작업 필요성을 충분히 고려하지 않고 기반 시설들이 그 상부에 건설되었다. 석회암 지대에서는 지하수에 의한 용식 작용으로 생성된 공동 상부에 대형 구조물이 시공되었거나 혹은 지하수 함양 조건이 변할 경우 급격한 지반침하 또는 함몰현상이 일어날 수 있다(Song et al., 2011). 마찬가지로 지하에 인위적으로 형성된 공동인 폐광도가 도로 및 가옥에 의해 피복된 지역에서도 지반침하 및 함몰이 갑작스럽게 일어날 수 있다. 그러므로 지반침하 발생 위험이 높은 지역에 대하여 효과적인 조사활동을 사전에 수행할 필요가 있다.

지반침하의 주요 원인 중 하나인 지하공동조사를 위하여 다양한 물리탐사기술들이 적용되어 왔으며, 전기비저항탐사, GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사, 고정밀 중력(Micro-gravity) 탐사, 탄성과 탐사, 토모그래피 탐사, 물리 검층 등이 대표적이다(Kim et al., 2006). 이 중 전기비저항탐사는 지하수, 공동, 황

화광체 등 지하에 존재하는 이상대를 찾아내는 데에 유용하며(Bogoslovsky and Ogilvy, 1997; Seo et al., 2003), 암반의 평가 또는 토목분야의 토질 및 암질조사를 위해서도 활용도가 매우 높은 조사방법이다(Song et al., 1992). 그러나 지표면이 도로로 피복되어 있는 지역에서는 전기비저항탐사와 같이 센서가 지층에 부착되어야 하는 물리탐사기법들은 활용하기 어렵다. 또한 지표면에서 수행된 지구물리탐사자료에서 공동으로 추정되는 이상대가 관찰되어도 시추조사를 병행하여 원인 규명을 할 필요가 있다. 지하 매질의 지질 정보를 획득할 수 있는 시추공 압추조사와 함께 물리검층 및 시추공영상촬영을 수행하게 되면 지반의 물리적 특성에 대한 자료를 함께 확보할 수 있기 때문이다. 시추공영상촬영의 경우 시추공내의 암반 지층확인이나 암질 확인, 불연속면의 위치, 형상, 주향 및 경사, 틈새폭, 충전물질의 종류 및 두께, 활동면의 위치, 시추공벽의 팽창, 붕괴 상황의 관찰 등 시추공 내의 원지반 상태를 파악하는데 매우 유용하다(Keys, 1997). 지반침하를 유발할 수 있는 지하공동은 상대적으로 단순한 구조를 가지지만 공동의 규모 및 심도, 주위 지질과의 관계, 그리고 공동형성으로 인해 파생되는 인접 지역의 물성변화 때문에 지구물리탐사 전문가들에게는 여전히 흥미로운 연구 대상 중 하나이다(Kwon et al., 2000).

이번 연구에서는 2008년 5월 지반침하가 발생한 충청북도 일부 지역에 물리탐사 및 시추조사를 적용하였다. 추가적인 피해발생을 예방하기 위하여 발, 건물, 도로 등 주거시설 주변을 침하 예상지역으로 우선 선정하였다. 전기비저항탐사를 이용하여 침하지역 주변에 이상대를 찾아내었고 이상대의 원인규명을 위하여 시추, 시추공영상촬영, 밀도검층을 수행하였다. 또한 지표면이 피복되어 있어 전기비저항탐사를 수행할 수 없었던 지역에서는 시추공영상촬영을 6차

Table 1. Ore veins distributed in the study area (Shin and Suh, 1987)

Name	Length (m)	Width (m)	Strike	Dip	Grade (g/t)
A	2,300	1.0	N10-20W	80-85NE	Au 15.0
B	2,200	1.0-1.5	N15-20W	80NE	Au 18.1
C	1,800	0.5-0.6	N15-20W	80NE	Au 15.0
D	900	1.2	N40W	60-65NE	Au 15.0

Fig. 1. Location map of the study area. The inset picture shows an example of sinkholes occurred in the area. White lines indicate the locations of the ore veins, approximating the distributions of the abandoned underground mines.

례 반복적으로 실행하여 지반침하를 지시하는 지층의 수직 이동 양상을 모니터링 하였다.

연구방법

연구지역 개요

본 연구지역의 지질특성은 역암, 역질 사암 및 셰일 등으로 구성된 경상대 백악기 백야리층과 후기에 이를 관입한 조립질 흑운모화강암을 제 4기 충적퇴적층이 부정합으로 피복하는 구조를 보인다(Jung et al., 1976). 특히 백야리층과 흑운모 화강암은 풍화작용에 있어 뚜렷한 대비를 보이는데, 풍화에 약한 화강암이 분포하는 조사지역 일대는 저지대와 낮은 구릉성 산지로 이루어진 반면 동남쪽의 백야리층 분포 지역은 상대적으로 고도가 높은 산지를 형성하고 있다. 암맥류는 주로 석영맥과 염기성 암맥으로 중생대

백악기 화강암류를 NNE-SSW 방향으로 관입하며 폭은 1-2 m 가량이다(Table 1). 이 중 석영맥을 따라 형성된 금은 광상을 따라 1910년대부터 최초 광산 개발이 이루어졌고, 이후 금은 생산량이 감소하면서 간헐적인 채광 및 재개발 시도가 있었으나 현재는 광산개발이 멈춘 상태이다. 연구 지역에서 폐광도 관련 광해방지사업이 현재 지속적으로 진행 중이기 때문에 본 논문에서는 과거 광산개발 관련정보들을 제한적으로 공개하였다.

기존 광산 개발 자료를 바탕으로 추정된 연구지역 내에 분포하는 광맥들(A-D맥)을 Fig. 1에 도시하였다. 일반적으로 광맥들을 따라 광산개발이 이루어지므로 광맥의 분포는 폐광의 위치를 알려주는 간접 지시자로 활용될 수 있다. 따라서 본 연구지역에는 적어도 4개의 폐광도들이 남북방향으로 존재함을 추론할 수 있다(Fig. 1). 이를 반영하듯이 연구지역에

(a) Study site 1

(b) Study site 2

Fig. 2. (a) Locations of electrical resistivity survey lines (black lines) and a borehole site (BH-2) at the study site 1. The location of the ore vein C is denoted by the white line. (b) Locations of a borehole site (BH-1) and the ore vein D (white line) at the study site 2.

위치한 한 민가에서는 2008년 최초로 직경 5 m, 깊이 30 m의 함몰이 발생하였으며 이후 2010년까지 지속되어 직경 25 m, 깊이 35 m의 크기로 발달하였다 (Fig. 1 사진 참조). 같은 시기 함몰이 일어난 민가 주변 지역에서도 국부적인 침하가 연속적으로 발생한 바 있다.

연구지역 1은 위에서 언급한 큰 규모의 지반침하가 일어났던 민가에 인접하고 있어 지반함몰에 따른 추가 피해 가능성이 가장 높은 지역 (Fig. 1)으로 우선 선정되었다. C맥이 지나가는 연구지역 1은 전기비저항탐사가 가능한 환경(밭)으로 총 21개의 전극을 6 m 간격으로 설치한 후 쌍극자배열법을 이용하여 탐사를 수행하였다 (Fig. 2a). 각 측선의 총 길이는 120 m로 15 m 간격으로 설정되었으며 최대 84 m의 단면과 가탐심도 30 m의 탐사자료를 획득하였다. 탐사장비는

일본 OYO사의 Mc-Ohm으로 최대입력전류 2.5 A와 최대출력 250 W를 가지며 측정 시 주입된 전류량은 50 mA이었다. 획득된 자료는 Dipro 프로그램을 활용해 후처리 및 역산 (Kim, 1987)되었다. 그러나 D맥이 지나가는 연구지역 2는 시멘트로 표면이 피복되어 전기비저항탐사가 불가능하였기 때문에 시추조사만을 수행할 수 있었다 (Fig. 2b).

시추공영상촬영 및 밀도검층

시추공영상촬영에 사용된 장비는 일본 OYO사에서 제작된 시스템(OBI, Optical Borehole Imager)으로, 공벽 화상 프로브(Borehole Camera Probe), 중심위치 결정 장비(Centralizer) 및 기록장비(Geologger-3)가 탑재된 모듈(module)로 구성되어 있으며 검층용 윈치(winch) 및 심도측정용 도르래(sheave)와 조합하여 사용한다 (Fig. 3). 기본적으로 비디오 신호처리회로와 제어 프로그램(Control Software)이 연결된 다목적 자료 기록장비(Geologger-3, Model-3970)에 공벽 화상 프로브(Model-3584)로 촬영된 시추공의 360° 전개화상을 검층용 케이블을 통해 수신, 표시 및 기록하는 장비이다. 고성능의 소형 전하결합소자(CCD, Character Coupled Device) 카메라와 쌍곡면 거울로 이루어지는 공벽 화상 프로브는, 비틀림이 작고 선명한 공벽전개화상을 생성할 수 있으며, 3차원의 방위 센서를 내장하여, 수직공 외, 수평공과 경사공에도 적용 가능하다. 일반적으로 시추조사 완료 후 시추공벽에 투명 아크릴관을 부착한 후 시추공 내에 프로브를 삽입하여 시추공벽의 영상을 촬영 및 분석한다. 그러므로 시추공벽과 아크릴관 사이에 시추작업 후 흘러내린 토사와 같은 이물질이 끼이게 되면 시추공벽면이 가려질 수 있다는 제약이 있다. 하지만 시추공 내부는 아크릴관 시공에 의해 상대적으로 잘 보존되므로 반복적인 영상촬영이 가능하며 프로브 투하 작업이 시추공벽에 미치는 영향이 미미하다는 장점이 있다.

시추공영상촬영 작업이 완료된 시추공을 대상으로 영국의 Robertson Geologging사의 물리검층 시스템을 사용한 밀도검층이 추가적으로 수행되었다. 밀도검층을 위해서 사용된 손테(Small-Source Density Sonde)는 소규모 방사성 신호원을 장착하고 있어 시추공 공벽으로 감마선을 방출시킨다. 이 후 암석 속의 전자와 반응하여 산란 및 감쇠된 감마선이 검출기로 도달하게 되는데 이 때 측정된 감마선량은 암석의 전자밀도에 반비례한다. 또한 암석의 전자밀도

Fig. 3. Schematic diagram of basic components of optical borehole imager (Kim, 2002).

는 체적밀도와 비례관계를 가지므로 측정된 감마선량을 바탕으로 체적밀도를 구할 수 있다. 밀도검층은 손데(sonde)를 공벽에 부착시키는 방식(sidewall)으로 진행하였고 아크릴관, 지하수위 및 자연감마에 의한 영향을 보정하였다. 자료획득과 처리에는 Micrologger와 Winlogger 프로그램이 각각 사용되었다.

연구지역 1의 BH-2 시추공(Fig. 2a)에서는 시추공 영상촬영과 밀도검층을 각각 1회씩 실시하여 전기비저항 탐사 결과 및 시추조사 자료와 함께 지하구조 해석에 활용되었다. 연구지역 2의 경우 BH-1 시추위치는 D맥의 분포를 바탕으로 폐갱도의 위치를 추정하여 선정되었다(Fig. 2b). 지표면에서 지구물리탐사 자료 획득이 불가능하였기 때문에 시추공영상촬영을 6회 걸쳐 실시하여 지반침하의 징후 및 변화양상을 모니터링한 후 밀도검층을 수행하였다.

연구결과

연구지역 1

Fig. 4는 탐사측선 L-1, L-2, L-3(Fig. 2a)에서 취득한 자료의 2차원 전기비저항 영상 단면들을 펜스 다이어그램(fence diagram)으로 표시한 것이다. 비저항의 증가는 청색계열에서 적색계열로의 색의 변화로 나타내었다. 전반적으로 풍화토 및 토사가 분포하고 있는 지표면에서는 저비저항이 나타나고 있으며 경암이 위치한 하부에서는 고비저항이 관찰되었다. L-1단

면에서는 약 35-2721 ohm-meter의 전기비저항 분포가 관찰되었는데, 지표면에서 2-3 m 깊이까지 100-150 ohm-meter 정도의 저비저항이 분포한 반면 심도가 8 m 정도에 이르면 1500 ohm-meter 이상의 고비저항이 나타났다. L-1 측선이 끝나는 지점 부근에서는 다른 지표 지역보다 현저히 낮은 35 ohm-meter 정도의 저비저항이 관찰되었다. 이것은 L-1 측선 종점부에 위치한 철조망의 영향을 받았기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 주변 인공구조물에 의한 비저항 이상치와는 다른 특성을 가진 저비저항 지역이 측선 45 m 부근 10 m 깊이 주변에서 관찰되었다. 주변부는 대략 400 ohm-meter 정도의 고비저항이 분포한 반면 이 깊이에서는 지표면에서 관찰된 100 ohm-meter 정도의 저비저항 지역이 나타났기 때문이다. 이러한 분포는 L-2와 L-3에서도 동일하게 관찰되었다. L-2의 경우 측선이 끝나는 지점에서는 철조망의 영향으로 저비저항이 집중되어 하부에 위치한 경암의 비저항 분포에도 영향을 주었다. 그러나 L-3의 경우 이러한 인공구조물에 의한 영향이 상대적으로 적게 나타남을 알 수 있다. 지표면에서 약 2-3 m 깊이까지 저비저항치가 집중적으로 나타나고 이후 급격하게 비저항치가 상승하는 것을 L-2와 L-3에서처럼 동일하게 관찰할 수 있다. 그리고 L-1과 같은 저비저항 이상지역이 L-2에서는 50 m 부근에서 L-3에서는 65 m 부근에서 관찰되었다. 그러므로 심도 10 m 주변에서 관찰된 저비저항 지역들의 연결성은 이 지역에 위치한

Fig. 4. Fence diagram based on the resistivity structures of L-1, L-2, and L-3 survey lines. Blue solid line indicates the predicted locations of the abandoned underground mine at the study site 1.

C맥과 그 방향성이 일치함을 보인다. 이러한 저비저항 이상대의 원인들로 채굴 후 남아있는 잔존 전도성 광맥, 석영맥의 관입과 관련된 파쇄대, 갱도 및 채굴적 방치로 인해 발생한 주변 암반의 이완에 의해 생성된 절리들, 그리고 폐갱도(공동) 자체를 고려해볼 수 있을 것이다. 보다 정확한 원인규명을 위하여 L-1 측선 45 m 지점에서 관찰된 저비저항 지역에서 수행된 시추조사결과, 시추공영상촬영사진 및 밀도검층자료를 살펴보았다(Figs. 5 and 6).

우선 BH-2 시추자료는 상부의 매립토, 풍화토 및 풍화암 그리고 경암 순으로 나타났고 조사 지역의 전반적인 지질분포와 일치한다(Fig. 5). 그러나 경암층 내 11.0-12.8 m와 13.2-13.8 m 구간에서 시추자료 손실(core loss)이 발생하였고, 또한 경암층이 최초 회수되기 시작한 깊이(6 m)부터 시추자료손실이 끝나는 지점(13.8 m)까지의 밀도분포가 전체 경암층의 평균 밀도보다 최고 0.5 g cm^{-3} 낮게 측정되었다. 이러한 현상은 경암층 내부에서 뚜렷한 물성변화가 있음을 지시한다고 볼 수 있다. 이후 해석의 편의성을 위하여 시추자료손실 구간을 기준으로 상부 경암과 하부 경암으로 경암층을 나누어 분석하였다.

Fig. 6는 BH-2 시추공에서 획득한 시추공영상자료를 동일구간에서 관찰된 시추조사결과(Fig. 5)와 함께 보여준다. 우선 지하수면이 관찰된 10.1 m 지점부터 10.9 m 구간까지 시추공벽 주변의 경암 표면이 상대적으로 선명하게 촬영되었음을 볼 수 있다. 이어서 10.9-11.2 m 구간에서는 공동이 관찰되었고 11.2-14.8 m 구간에서는 상부에서 나타났던 시추공벽과는 다른 형태의 영상이 촬영되었다. 이 후 14.8 m 구간부터는 앞서 나타났던 것과 유사한 경암 표면이 선명하게 나타났다. 그러므로 시추공영상에서 나타난 시추공벽의 변화와 시추공 주상도와 서로 일치하지 않는 것처럼 보인다.

하지만 시추공 주상도와 밀도검층 자료를 다시 살펴보면, 깊이에 따른 밀도의 변화가 주상도에서 정의된 암상의 변화와 일치함을 알 수 있다(Fig. 5). BH-2 탐사가 시추조사, 시추공영상촬영, 밀도검층 순으로 이루어진 것을 감안하면 시추조사에서 나타난 깊이별 암상변화는 신빙성이 매우 높다고 볼 수 있다. 그러므로 시추공영상 자료에 나타난 깊이별 변화양상은 다른 요소들에 의한 영향을 받았다고 추론해 볼 수 있다. 우선 10.65-10.9 m 구간에서 촬영된 비어 있는

Fig. 5. Comparison of schematic geologic profile (left) and density profile (right) obtained from BH-2. Dashed line at density profile indicates the variation of average density for each borehole lithology interval (left).

공간은 경사진 지역에 위치하므로 공동으로 구분할 수 없고, 실제 같은 구간에서 시추샘플이 존재한다. 그러나 10.9-11.2 m 구간에는 시추공영상을 통해 공동이 존재함을 식별 가능하다. 그러므로 시추자료손실이 일어난 지점(11.0 m)을 기준으로 정하면 시추공 영상자료 심도가 시추자료보다 약 0.1 m 정도 작게 측정되었다고 추론할 수 있게 된다. 즉 11.0 m 부터 발생한 시추자료의 손실은 시추공영상촬영에서 관찰된 지하공동(0.1m의 오차를 반영하면 11.0-11.3 m 구간에 존재함)에 의해 발생한 것으로 볼 수 있다. 또한 첫 번째 시추자료손실이 일어난 11.0-12.8 m 구간에 해당되는 시추공영상자료(10.9-12.7 m 구간)는 시추공주변이 경암이 아닌 다른 물질들로 구성되어 있음을 보여준다. 이후 경암이 다시 회수된 구간에서

는 깨진 암석 시편들이 관찰(12.9 m 지점)되지만 시추공영상이 선명하지 않기 때문에 정확한 구분이 힘들다.

앞서 살펴본 시추자료와 시추공영상 그리고 밀도검층 자료들을 바탕으로 전기비저항탐사에서 관찰된 저비저항 이상대의 가장 직접적인 원인은 폐갱도의 의한 공동으로 사료된다. 주요 공동은 시추자료손실이 일어난 구간(11.0-12.8 m)에 위치하며 시추공영상자료에서 식별된 것과 같이 그 상부는 비어있으며 하부는 미고결 충진물로 채워져 있기 때문에 시추자료 회수 시 손실된 것으로 보인다. 또한 이러한 미고결 충진물이 시추 완료 후 아크릴관 설치 작업 과정에서 암반과 아크릴관 사이 틈으로 들어가 시추공벽 영상에 간섭한 것으로 추정된다. 이것은 공동을 기준으로 상부 시추공영상과 하부 시추공영상의 선명도가 차이가 나는 원인으로도 볼 수 있다. 그리고 경암층 내의 밀도검층자료는 상부 경암과 하부 경암 사이에 뚜렷한 밀도차이가 있음을 보여주고 있다(Fig. 5). 이러한 밀도차이는 폐갱도 방치로 인해 상부 경암층이 이완되어 발생된 절리들의 영향으로 사료되며, 이러한 절리들 사이로 상부의 퇴적물 혹은 이완작용에 의해 발생된 토사 및 암편들이 갱도 내로 유입된 것으로 추정된다. 시추자료손실이 끝나는 지점에서 경암층의 밀도가 상대적으로 일정하게 측정된 것을 보면 폐갱도에 의한 암반 이완 작용은 상부 경암에 집중되었음을 알 수 있다. 그러나 두 번째 시추자료손실이 일어난 구간의 원인은 시추공벽이 충진물에 의해 가려져 영상을 통한 규명이 불가능하였다.

연구지역 2

연구지역 2는 묘지 및 도로로 피복되어 있어 D맥이 위치한 것으로 추정되는 지역에서 전기비저항 탐사를 수행하지 못하고 시추조사, 시추공영상촬영, 밀도검층만을 수행하였다(Fig. 2b). 시추공영상촬영은 2010년 3월 4일에서 4월 16일까지 총 6차례에 걸쳐 실시되었다. 시추공은 33.5 m 깊이까지 시추되었지만 시추공영상촬영을 위한 공벽작업 중 시추공 하부가 보존되지 않아 시추공영상촬영은 29 m 깊이까지 이루어졌다(Fig. 9). 현장에서 얻은 영상자료는 GeoMechanics International(GMI) 프로그램을 통하여 이미지로 출력하였다. 시추공영상촬영 완료 후 이루어진 밀도검층에서는 시추공 하부의 손실이 더욱 심화되어 심도 27.5 m까지 검층을 수행할 수 있었다(Fig. 7).

Fig. 6. Comparison of optical borehole images (left) and borehole lithology (right) at BH-2.

Fig. 7은 BH-1의 시추 결과와 깊이에 따른 밀도 변화를 함께 보여주고 있다. 시추작업에서 회수된 샘플들의 사진은 Fig. 8에 도시하였다. BH-1은 약 14 m 두께의 두꺼운 풍화토층과 3.5 m 두께의 풍화암 그리고 4 m 두께의 연암이 상부에 존재하고 있어 BH-2와는 다른 지질 분포를 보이고 있다. 또한 22.5-24.0 m 구간에서 갱목의 일부가 회수되었으며 24.8-26.5 m 구간에서는 버럭(muck)과 함께 갱목의 파편들이 회수되어 채굴적 갱도의 흔적을 확인하였다. 이렇게 시추공에서 회수된 갱목들은 샘플 사진에서 쉽게 식별이 가능하다(Fig. 8). 그러나 같은 구간에서 촬영된 시추공영상자료(Fig. 9)를 살펴보면 채굴적 갱도에 의한 공벽의 변화가 식별되지 않는다. 그 이유 중 하나는 풍화정도가 심한 상부의 연암층에서 발생한 토사가 아크릴관과 공벽사이에 끼었기 때문인 것으로 추정된다. 회수된 시추샘플 사진(Fig. 8)에 나타난 연암층의 상태와 시추공벽이 토사에 의해 부분적으로 가려진 시추공영상 22.0-26.0 m 구간(Fig. 9)이 그 근거이다. 갱목이 회수된 구간의 시추공영상은 대부분이 토사에 의해 가려졌으나 일부 공벽이 관찰되고 있다. 이러한 현상은 채굴적 갱도가 온전한 공동

의 형태도 존재하지 않고 붕괴되어 있음을 지시한다고 볼 수 있다. 밀도검층 자료의 경우 풍화토에서 풍화암으로 암상이 변화되는 구간에서 밀도의 급격한 증가가 나타난다. 풍화암층 구간에서는 밀도 변화가 깊이에 따라 다소 일정하게 나타나는 데 반하여, 연암층 구간에서는 밀도가 점차 깊이에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 갱목이 회수된 구간의 상부인 21.5-22.2 m 구간에서 급격한 밀도의 감소가 나타났다. 이것은 하부의 채굴적 방치에 따른 상부의 연암층이 이완되어 나타난 현상으로 사료된다. 이와 같은 밀도의 감소현상은 BH-2에서도 관찰된 바 있다(Fig. 5).

BH-2 시추조사 결과의 또 다른 특이점은 24.0-24.8 m와 26.5-29.7 m 구간에서 발생한 시추자료손실(core loss)이다(Fig. 7). 우선 상부 시추자료손실 구간(24.0-24.8 m)의 시추공영상자료는 인접 구간에 위치한 시추공벽과 비교하였을 때 특이한 구조를 보여주고 있지 않다. 이 구간 상부에서 갱목이 회수되었고 동일 구간 이후에 회수된 시추 샘플 또한 매우 심하게 풍화된 형태를 보이고(Fig. 8) 있는 점을 미루어보아 채굴적 갱도의 붕괴로 발생한 토사 및 암편들

Fig. 7. Comparison of schematic geologic profile (left) and density profile (right) obtained from BH-1. Dashed line at density profile indicates the variation of average density for each borehole lithology interval (left).

이 시추회수 시 유실된 것으로 사료된다. 그러나 하부 시추자료손실 구간(26.5-29.7 m)에서 촬영된 시추공영상은 BH-1 전구간의 영상과는 특별히 구분된다. 이러한 영상은 공벽 화상 프로브의 광원에서 방출된 빛이 암반과 같은 지하 매질에 의해 반사되지 않았을 때 획득될 수 있다. 그러므로 하부 시추자료손실 구간은 공동으로 존재하며 충전물이 아닌 지하수로 채워져 있다고 볼 수 있다. 또한 사전 조사 자료에 바탕으로 이 공동은 D맥을 따라 개발되었던 갱도의 일부분임을 추론할 수 있다.

이러한 채굴적과 폐갱도가 지하에 방치되어 있을 경우 지반침하 발생 가능성은 매우 높게 된다. 그러나 지반침하 초기에 나타나는 지하매질(토사 및 암편)의 소규모 이동은 지표면의 변형을 유발하지 않으므로 지상에서 지반침하 징후를 모니터링 하는 것은 매우 어렵다. 이를 보완하기 위하여 BH-1에서 시추공영상촬영을 반복적으로 수행하여 지하매질 이동에

Fig. 8. Recovered core samples at BH-1.

대한 모니터링 가능성을 시험하여 보았다. Fig. 10에서 Fig. 12까지는 시간 간격을 두고 측정된 시추공영상자료를 깊이별로 병합한 영상자료이다. BH-2에서와 같이 BH-1 시추공영상자료의 심도에도 오차가 존재할 수 있기 때문에, 영상자료는 시추공에 설치한 아크릴관의 이음새(2 m 간격)를 기준으로 병합되었으며 최종심도는 첫 번째 시추공영상촬영의 심도와 같게 설정하였다. 각기 다른 시간에 설치되고 투입된 시추공영상촬영장비의 심도는 오차가 있을 수 있지만 시추공에 설치된 아크릴관은 측정 기간 동안 고정되어 있었으므로 시추공벽 영상 간의 심도 오차는 미미한 수준이 된다.

Fig. 10은 4.0-6.0 m 깊이 구간(풍화토층)에서 관찰된 시추공영상으로 시추공벽의 구조 및 패턴이 매우 유사하다. 그러나 2차 촬영당시 4.06 m, 4.96 m, 그리고 5.75 m 지점들에 위치한 구조들이 3차 촬영결과에서는 약 30 mm 정도 하부로 이동한 것이 관찰되었다. 침하 이동 거리 측정이 기준이 된 시추공영상의 특징은 그림에서 적색 점으로 표시하였다. 그 이후 촬영된 시추공영상자료에서는 소규모의 토사 이동만(약 6 mm)이 관찰되었다. 그러므로 4.0-6.0 m 구간의 시추공영상은 2차와 3차 조사 기간 동안(9일 간격)에 토층이 약 0.14 mm h^{-1} 속도로 30 mm 수직 이동하였고 전체 모니터링 기간 동안에서는 약 36 mm 정도 토사가 수직 이동하였음을 지시한다.

시추공벽영상에서 지하 매질의 이동 양상이 가장 뚜렷하게 관찰된 지점은 17-19 m 구간(연암층)이다 (Fig. 11). 주요 양상은 17.40 m, 17.76 m 그리고 18.34 m에서 관찰되었고 수직 변위 측정의 기준이 되는 특징들은 적색 점으로 표시하였다. 또한 토층 및 암편의 수직 이동으로 파생된 공벽 구조선의 변화는 백

Fig. 9. Comparison of optical borehole images (left) and borehole lithology (right) at BH-1.

Fig. 10. Optical borehole images of BH-1 at 4.0-6.0 m depth interval.

Fig. 11. Optical borehole images of BH-1 at 17.0-18.50 m depth interval.

색 실선으로 표시하였다. 우선 17.40 m 깊이에서는 1차 촬영 14일 후인 2차 촬영에서 최초 41 mm 수직 이동이 일어났고, 9일 후인 3차 촬영 때는 104 mm, 7일 후인 4차 촬영 때는 21 mm 각각 추가적인 수직 이동이 있었음을 보여준다. 이후 5차와 6차 촬영 시에는 뚜렷한 이동양상이 관찰되지 않았다. 그러므로 1차 촬영에서 4차 촬영에 이르기까지 총 30일 동안 지하매질이 약 166 mm를 평균 0.23 mm h^{-1} 의 속도로 수직 이동한 것으로 볼 수 있다. 17.76 m 깊이에서 관찰된 이동양상은 최초 39 mm의 수직 이동이 2차 영상에서 관찰되었고, 3차 영상에서는 195 mm, 4차 영상에서는 12 mm, 그리고 5차 영상에서는 22 mm 각각 추가적으로 수직 이동한 것으로 보인다. 6차 영상은 추가적인 수직 이동의 증거를 보이고 있지 않다. 즉 17.76 m 깊이에는 지하매질이 1차에서 5차까지 총 37일에 걸쳐 평균 0.30 mm h^{-1} 속도로 총

268 mm 수직이동 한 것으로 보인다. BH-1에서 관찰된 수직 이동 현상 중 그 심도가 가장 깊은 18.34 m 지점에서는 2차 영상에서 최초 66 mm의 수직 이동이 관찰되었고, 3차 영상에서 58 mm, 4차 영상에서 10 mm, 5차 영상에서 12 mm의 수직이동이 각각 추가적으로 나타났다. 그러므로 18.34 m 심도에서는 1차에서 5차 조사기간 동안 평균 0.16 mm h^{-1} 의 속도로 총 146 mm의 지하매질 수직이동이 일어난 것으로 보인다. 시추공영상에서 측정된 심도별 침하 변위를 Table 2에 요약하였다.

BH-1 시추공영상에서 관찰된 토사 및 암편의 수직 이동으로 판단되는 변화의 원인으로 고려 가능한 요인들은 크게 2가지가 있다. 첫 번째는 시추과정에서 일어난 지반교란이 안정화되면서 매질의 수직이동이 일어났을 가능성이 있다. 그러나 지반교란에 의한 영향을 가장 크게 받은 층은 상대적으로 고화가 덜 진행

Table 2. Vertical displacement at different depths at BH-1 due to subsidence

Depth (m)	Vertical displacement (mm)						Total (mm)
	1st (03/04)	2nd (03/18)	3rd (03/27)	4th (04/03)	5th (04/10)	6th (04/16)	
4.06			30				30
4.96			30				30
5.75			30	6			36
17.40		41	104	21			166
17.76		39	195	12	22		268
18.34		66	58	10	12		146

Fig. 12. Optical borehole images of BH-1 at 26.0-29.0 m depth interval.

된 풍화토층일 것이다. 특히 BH-1의 경우 풍화토층이 14 m 두께로 산출되었기 때문에 지반교란에 의한 영향이 광범위하게 나타날 수 있는 조건을 갖추고 있다. 하지만 시추공영상에서는 4.0-6.0 m 구간(Fig. 10)에서 관찰된 소규모의 수직이동 이외에는 특별한 수직이동 양상을 보여주고 있지 않다. 이러한 소규모 수직이동도 최초 지반교란(시추작업) 후 23일이 지난 후에야 발생하였기 때문에 지반 안정화 작용에 의한 것이라고 보기 힘들다. 두 번째는 폐갱도 및 채굴적에 의한 지반침하가 일어나면서 지하매질의 수직이동이 일어났을 가능성이 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 시추자료(Fig. 7) 및 시추공영상(Fig. 9)은 하부에 공동 및 붕락된 채굴적 갱도가 존재함을 지시하고 있다. 또한 수직이동이 가장 큰 규모가 일어난 구간이 채굴적으로 인한 이완작용을 받아 풍화정도가 가장 심한 연암층 내에 위치한다. 그러므로 영상에서 관찰된 지하매질 수직이동의 원인은 지반침하와 높은 개연성을 가진다고 사료된다. 이것을 뒷받침 하는 증거는 폐갱도가 위치한 26.0-29.0 m에서 획득한 영상이다(Fig. 12). 앞서 설명한 바와 같이 폐갱도가 지하수로 채워져 있기 때문에 1차 영상에서는 빛의 반사가 일어나지 않아 이미지가 어둡다. 그러나 2차, 3차, 4차 영상은 수층 내로 유입된 토사가 빛의 반사를 일으

켜 선명하게 나타났다. 더욱이 같은 기간 동안 상부에서 토사 및 암편의 수직이동이 가장 활발하게 일어났다(Table 2). 그러므로 상부의 지하매질이 폐갱도 내부로 유입된 것으로 보는 것이 타당하다. 이후 5차와 6차 영상은 다시 어둡게 바뀌어 빛의 반사가 일어나지 않아 토사 유입이 지속적으로 일어나지 않았음을 지시한다. 같은 시기에 상부의 지하매질 수직이동도 미미하게 관찰되었다. 5차 영상에서는 갱도 바닥에 컵 모양의 물체가 선명히 촬영되어 폐갱도가 충전물이 없는 공동으로 존재함을 재확인시켜 주고 있다. 그러므로 시추공영상을 통해 관찰된 토사 및 암편의 수직이동은 지반침하에 의한 것으로 사료된다.

BH-1 시추공에 대한 시추공영상촬영 모니터링은 상부와 하부에서 침하 정도와 기간이 각각 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 상부에서는 상대적으로 작은 양의 침하만이 관찰된 시기에도 그 하부에서는 상부에서 관찰된 변화량에 약 3배가 넘는 규모의 침하가 일어났기 때문이다. 또한 심부의 침하가 상부의 침하보다 오랜 기간 동안 지속적으로 진행될 수 있음을 알 수 있다. BH-1의 경우 상부에서는 2차와 3차 관측 시기에만 소규모의 침하가 관측되었지만 그 하부에서는 침하 작용이 상부보다 선행되어 일어났고 이후 5차 촬영 시기까지 지속되었기 때문이다. 그러

므로 본 연구지역의 경우 심부에서 토사의 이동을 수반한 침하 작용이 우선적으로 그리고 오랜 시간동안 지속적으로 일어날 수 있으며 어느 한계점을 넘어갈 경우 지표면의 붕괴로 갑작스럽게 이어질 수 있음을 알 수 있다. 실제 BH-1에 인접해있는 도로 (Fig. 2b)에서 2010년 8월 경에 지반함몰이 일어났음이 보고되었다.

결론

본 연구는 폐광산 일대 침하지역 부근에 대한 추가 위험을 사전에 방지하기 위하여 지구물리탐사 방법인 전기비저항탐사와 시추공영상촬영을 실시하여 갱위치를 가시화 하였고, 전기비저항탐사가 불가능한 지역에 한해서 시추공영상촬영을 통한 모니터링을 수행하여 시간에 따른 침하 작용의 변화를 규명하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연구지역 1에서 실시된 전기비저항탐사, 시추조사, 시추공영상촬영, 그리고 밀도검층자료를 비교 분석한 결과 조사지역에 폐갱도가 지하 11.0-12.8 m 지점에 존재하는 것으로 나타났다. 조사 당시 폐갱도의 상부는 빈공동으로 존재하였으며 하부는 충진물로 채워져 있는 것으로 시추공영상에서 관찰되었다. 밀도검층 자료에서는 폐갱도 상부에서 급격하게 밀도가 감소하여 폐갱도로 인한 이완작용이 진행되었음을 알 수 있었다. 폐갱도에 의한 공동은 전기비저항분포에서 인접 지역에 비해 약 300-400 ohm-meter 정도 낮은 저비저항 이상대로 관찰되었다.

2. 전기비저항탐사가 불가능하였던 연구지역 2에서는 43일간 6차례에 걸쳐 시추공영상촬영을 수행하여 침하 현상을 모니터링 하였다. 각기 다른 시간에 촬영된 시추공벽 영상을 비교분석한 결과 심도에 따라 지반 침하 양상이 각각 다르게 나타남을 발견하였다. 하부에서 일어난 침하의 규모가 상부보다 3배 이상 큰 규모로 관측되었으며 침하 현상도 4배 이상 오랜 기간 동안 지속적으로 일어났다. 이것은 조사지역의 지반침하가 심부에서 우선적으로 발생하고 이후 상부의 침하와 지표면의 붕괴를 유발할 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

3. 단일 시추가 아닌 시추공영상촬영을 통해 모니터링을 수행할 경우 지반침하의 시간적 변화 양상을 규명할 수 있음을 알 수 있었다. 시추공벽의 영상이 불분명하게 나타날 때도 있으나 시추자료 및 물리검

층 자료를 함께 수행하면 이러한 제한요소는 극복이 가능한 것으로 사료된다. 시추공영상촬영을 이용한 모니터링을 활용하면 지반 침하를 정량화할 수 있는 중요한 자료를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2012년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다. 논문의 미비한 점들을 보완할 수 있도록 좋은 의견을 주신 익명의 심사위원들과 논문 투고 및 심사과정 동안 세심하게 안내하여 준 임수연 편집간사에게 감사드립니다.

References

- Bogoslovsky, V.A. and Ogilvy, A.A., 1977, Application of geophysical methods for the investigation of landslides. *Geophysics*, 28, 633-657.
- Jung, C.H., Park, Y.A., and Kim, H.M., 1976, 1:50,000 Geological Map of Eumseong, Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resource, Korea, 54 p.
- Keller, E.A., 1996, *Environmental Geology*. Prentice Hall, NJ, USA, 562 p.
- Keys, W.S., 1997, *A practical guide to borehole geophysics in environmental investigations*. CRC Press, New York, USA, 192 p.
- Kim, C.R., Kim, J.H., Park, S.G., Park, Y.S., Yi, M.J., Son J.S., and Rim, H.R., 2006, Application of Geophysical Methods to Cavity Detection at the Ground Subsidence Area in Karst, *Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, 4, 271-278. (in Korean)
- Kim, H.S., 2002, Correlative analysis between lithology and rock physical property using borehole prospecting. M.S. thesis, Chungnam National University, Daejeon, Korea, 88 p. (in Korean)
- Kim, J.H., 1987, Inversion of 2-D Resistivity survey data. Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 162 p. (in Korean)
- Kwon, B.D., Lee, H.S., Lee, G.H., Rim, H.R., and Oh, S.H., 2000, Effective Geophysical Methods in Detecting in Subsurface Caves: On the Case of Manjang Cave, Cheju Island. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 21, 408-422. (in Korean)
- Murck, B.W., Skinner, B.J., and Porter, S.C., 1995, *Environmental Geology*. John Wiley & Sons, New York, USA, 154 p.
- Seo, K.H., Yu, Y.C., You, Y.J., and Song, M.Y., 2003, Amplitude Characteristics Analysis of Crosswell Seismic Tomography Data in Underground Cavity. *The*

- Journal of Engineering Geology, 13, 129-137. (in Korean)
- Shin, Y.W. and Suh, K.S., 1987, Exploration and Development of the Muguk Au Mine, The Journal of Korea Society of Economic and Environmental Geology, 20, 261-271. (in Korean)
- Song, M.Y., Lee, E.D., and Kim, P.G., 1992, A Comparative Study between Soil Mechanics and Geophysical Prospecting of Soft Ground in Sosan Reclamation Land (I): Electric Resistivity Survey. The Journal of the Korean Earth Science Society, 13, 145-155. (in Korean)
- Song, S.H., Lee, G.S., Um, J.Y., and Suh, J.J., 2011, Resistivity Imaging Using Borehole Electrical Resistivity Tomography: A Case of Land Subsidence in Karst Area Due to the Excessive Groundwater Withdrawal. Journal of the Korean Earth Science Society, 32, 537-547. (in Korean)

2013년 3월 27일 접수
2013년 4월 3일 수정원고 접수
2013년 5월 21일 채택