

## 폐광 부지의 재해 및 오염대 조사관련 물리탐사자료의 고찰

심민섭 · 주현태 · 김관수 · 김지수\*

충북대학교 지구환경과학과

### Case Studies of Geophysical Mapping of Hazard and Contaminated Zones in Abandoned Mine Lands

Min-Sub Sim, Hyeon-Tae Ju, Kwan-Soo Kim, and Ji-Soo Kim\*

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

Received 20 November 2014; received in revised form 15 December 2014; accepted 17 December 2014

폐광 부지에서 발생하는 대표적인 환경 문제는 산성으로 오염된 지표수와 지하수, 적재된 폐광석 및 광미, 채굴 활동으로 야기된 지반침하 현상을 들 수 있다. 이 논문은 광해 유형에 따라 재해 및 오염영역을 효율적으로 탐지했던 지구물리탐사방법들을 고찰하는데 있다. 시험 자료로서 토양오염, 산성광산배수, 지반침하, 인공차수막 파손 및 광미/폐광석 적치장을 각각 대표하는 네 개의 폐광 부지를 선택하였다. 자료 검증을 위해 물리탐사자료는 자료의 유형에 따라 시추자료(코어 샘플, 물리검층, 토모그래피 등)와 물 자료(수소이온농도, 전기전도도, 중금속원소 등)와 비교하였다. 토양오염 탐지에 있어서 낮은 전기비저항 이상대는 특히 구리, 납, 아연의 중금속 농도가 높은 지역과 부합된다. 산성광산배수의 유동 경로는 자연전위 곡선에서 음의 전위 이상대, 전기비저항자료에서의 저비저항 이상대, 지하레이더 자료에서의 얇은 투과깊이 영역으로 탐지되었다. 채굴적은 전기비저항 단면에서의 저비저항 이상대, 탄성파토모그래피에서 낮은 속도 영역, 물리검층곡선의 복합해석으로 특징되며, 정확한 위치는 코어자료와 시추공영상자료에서 잘 확인되었다. 침출수 유동을 차단하기 위해 설치된 인공차수막의 파손 구간은 전기비저항 자료에서의 국부적인 이상대로 정확히 탐지되며 매립된 폐석더미는 고비저항 이상대와 저속도 이상대로 특징된다.

**주요어:** 지구물리탐사, 폐광부지, 산성광산배수, 채굴적, 인공차수막

Environmental problems typically occurring in abandoned mine lands (AML) include: contaminated and acidic surface water and groundwater; stockpiled waste rock and mill tailings; and ground subsidences due to mining operations. This study examines the effectiveness of various geophysical techniques for mapping potential hazard and contaminated zones. Four AML sites with sedimentation contamination problems, acid mine drainage (AMD) channels, ground subsidence, manmade liner leakage, and buried mine tailings, were selected to examine the applicability of various geophysical methods to the identification of the different types of mine hazards. Geophysical results were correlated to borehole data (core samples, well logs, tomographic profiles, etc.) and water sample data (pH, electrical conductivity (EC), and heavy metal contents). Zones of low electrical resistivity (ER) corresponded to areas contaminated by heavy metals, especially contamination by Cu, Pb, and Zn. The main pathways of AMD leachate were successfully mapped using ER methods (low anomaly peaks), self-potential (SP) curves (negative peaks), and ground penetrating radar (GPR) at shallow penetration depths. Mine cavities were well located based on composite interpretations of ER, seismic tomography, and well-log records; mine cavity locations were also observed in drill core data and using borehole image processing systems (BIPS). Damaged zones in buried manmade liners (used to block descending leachate) were precisely detected by ER mapping, and buried rock waste and tailings piles were characterized by low-velocity zones in seismic refraction data and high-resistivity zones in the ER data.

**Key words:** geophysical survey, abandoned mine land (AML), acid mine drainage (AMD), mine cavity, manmade liner

\*Corresponding author: [geop22@cbnu.ac.kr](mailto:geop22@cbnu.ac.kr)

© 2014, 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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

광해 유형은 크게 가행중인 광산과 휴폐광된 광산별로 분류할 수 있고, 광종(석탄, 비금속, 금속, 석유가스)에 따라 그 형태가 달라진다. 가행 광산 및 휴폐 광산에서 발생할 수 있는 광해 유형으로는 광업 활동에 의한 산림 및 토지 훼손, 광물을 채굴한 자리의 붕괴에 의해 발생하는 지표의 함몰 및 지반의 균열, 오염된 갭에서 유출되는 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD), 선광장에서 발생하는 오폐수, 폐석 더미 및 광물 찌꺼기 유실, 소음, 진동, 먼지, 폐시설물 등을 들 수 있다. 이와 같은 광해는 개별적인 현상으로 나타나지 않고 복합적으로 발생하는 것이 일반적이다.

수십 년 전까지 국내광산 주변의 환경오염에 대한 연구는 단편적으로 수행되었고 그것도 지구화학적인 측면에서 주로 화학 분석에 의한 오염정도, 이동분산의 형

태, 오염특성에 관한 사항들이 주류를 이루었다. 폐광 이후 피해가 광범위하고 지속적으로 확산되어 사회적인 문제로 대두됨에 따라 1990년대 후반부터 재해에 취약한 지질구조나 오염대 등을 파악하고자 다양한 방법의 물리탐사가 활용되기 시작하였다(Gadjos and Karl, 1995; Hwang, 1997; Atekwana et al., 2000; Ko and Lee, 2001; William, 2003; Shin and Byun, 2010; Song et al., 2011; Choi et al., 2013). 국내 광산재해의 진단과 관련된 물리탐사기법의 대표적인 적용 사례는 Lee et al. (1997)을 효시로 들 수 있는데 이들은 자기감수율 측정, 전자, 유도분극 탐사로서 산성광산배수에 의한 토양의 오염영역을 평가하고 폐석 및 광미의 분포를 파악하였다. 광미 적치장에 대한 보다 정밀한 조사는 전자, 전기비저항 탐사를 복합 해석으로 그 적용성을 살펴본 바 있다(Park et al., 2006). 광해 유형에 따른 물리탐사 기법은 그 적용 사례와 더불어 Hwang et

**Table 1.** Application of geophysical methods to the mapping of hazard zones in abandoned mine lands (AML) (modified from Kim and Jo, 2006).

Types	Observations and causes	Mapping targets	Physical property contrast	Main geophysical methods (the related fields)
Contaminations of water and soil	-Stream, soil and farmland contaminated by AMD and heavy metal ions	-Contaminated soil -Contaminated water -Flow path of AMD and sewage -Buried discharge pipes	-High electrical conductivity in contaminated area due to high contents of metal ions -High electrodynamic potential due to electrolyte flow through in the pores	-Electrical resistivity -Small loop EM -SP -GPR (remote sensing, geochemistry, ore deposits, hydrogeology)
Landfill mapping of dump and tailings	-Water and soil contaminated by the leachate of mine tailings and waste rocks	-Subsurface mapping of disposed rock waste -Distribution of rock waste -Sources of soil and water contamination -Horizontal and vertical scopes contaminated by sewage and leakage water	-Density and velocity contrasts between landfill and surroundings -Diffractions from small size of waste rock -High electrical conductivity in pyrite	-Seismic refraction -Seismic tomography -Electrical resistivity -Small loop EM -GPR -IP -Magnetic (geochemistry, hydrogeology, ore deposits)
Ground subsidence	-Mine cavity and gallery collapsed by dissolution of carbonate and soil removal -operation risk involved by fault and fracture zone near the intercalated coal bed	-The existence and extent of mine cavity and gallery -Type of filling and its existence -Physical property of subsurface media -Fault, fracture and weak zone -Construction effects after ground reinforcement	-Contrasts of density and velocity between cavity and surroundings -Diffractions from small size of waste rocks -Contrasts of electrical conductivity and permittivity due to ground water and clay inflow through fault and fracture zone	-Microgravity -GPR -Seismic tomography -High resolution seismic reflection -Electrical resistivity -Electrical resistivity tomography (engineering geology, mine engineering)

al. (2005)이 잘 정리한 바 있다. 즉 탄광지역의 지반침하 지역에서는 탄성파반사법과 토모그래피, 광미나 폐석의 공간분포는 탄성파굴절법 및 전기비저항법, 적치장 또는 갱내수에 의한 산성광산배수의 분포 및 유동경로는 전기비저항, 자연전위법, 보조적으로 지하레이더탐사법이 주로 사용되었다. 또한 Kim and Jo (2006)는 폐광산의 광해 및 오염대 조사를 위한 지구물리탐사의 적용사례들을 모니터링을 포함시켜 국내외 관련문헌을 중심으로 해설한 바 있다. Table 1은 이들을 바탕으로 조사 항목별로 재해 현상 및 원인, 대비물성, 주요 물리탐사 및 연계 분야로 정리한 것이다.

폐광산에서 발생하는 지반침하, 갱내수 및 침출수로 유출되는 AMD로 인한 수질오염, 중금속 함유로 인한 토양오염, 폐석 적치로 인한 산림훼손 등에 대한 심각성을 고려할 때 앞으로 물리탐사의 역할은 초고분해능 장비와 정교한 소프트웨어의 발달로 지하구조의 탐지는 물론 오염물질의 이동 및 분산의 특징을 규명하는 지화학조사, 지반 침하와 폐석유실과 관련된 지질공학 조사, 지하수 거동과 관련된 수리지질 조사와 연계할 때 그 조사 효과가 클 것으로 보인다.

이 연구에서는 광해환경에 따라 저자에 의해 수행되었던 기존의 해석자료(침출수 유로, 인공차수막 탐지)(Kim et al., 2003a; 2003b)와 새로이 조사된 토양오염(중금속 원소) 지역과 채굴적(지반침하) 탐지에 대한 사

례(Sim, 2012)들을 함께 실어 대부분의 항목들이 망라된 전반적인 광산재해 및 오염대 조사에 대한 지구물리학적 자료의 특성들을 지질공학 및 지화학 자료와 함께 해석하고자 한다.

**광해 유형에 따른 탐사자료 고찰**

이 논문에서는 앞서 설명한 광해 유형(Table 1) 중에서 토양오염범위, 산성광산배수(AMD) 유출경로, 채굴적(지반침하) 탐지, 차수막 효과 및 폐석더미분포 조사를 목적으로 4개의 휴폐광 부지(A, B, C, D)들을 대상으로 한 자료를 검토 정리하였다(Fig. 1). 광해 유형에 따라 선택한 탐사자료들을 물리검층, 지질공학 및 지화학 자료가 있을 경우 이들과 상관분석하였다.

A 지역은 경작지의 토양오염범위를 파악하기 위해 전기비저항 쌍극자 탐사를 수행하여 도출된 역산결과를 토양 샘플링에 의한 토양오염도와 상관시켰다. B 지역은 탐사자료(전기비저항, 자연전위, 지하레이더)를 복합적으로 해석하여 침출수(산성광산배수)의 경로를 파악하였다. C 지역은 전기비저항자료와 시추공자료(코어, 물리검층, 탄성과 토모그래피, 공내영상자료: BIPS)를 조합하여 현재는 복구된 상태이지만, 지반침하의 원인이 될 수 있는 채굴적을 찾는데 초점을 두었다. D 지역은 폐석더미의 지하 분포 및 인공차수막의 위치 및 파손효과

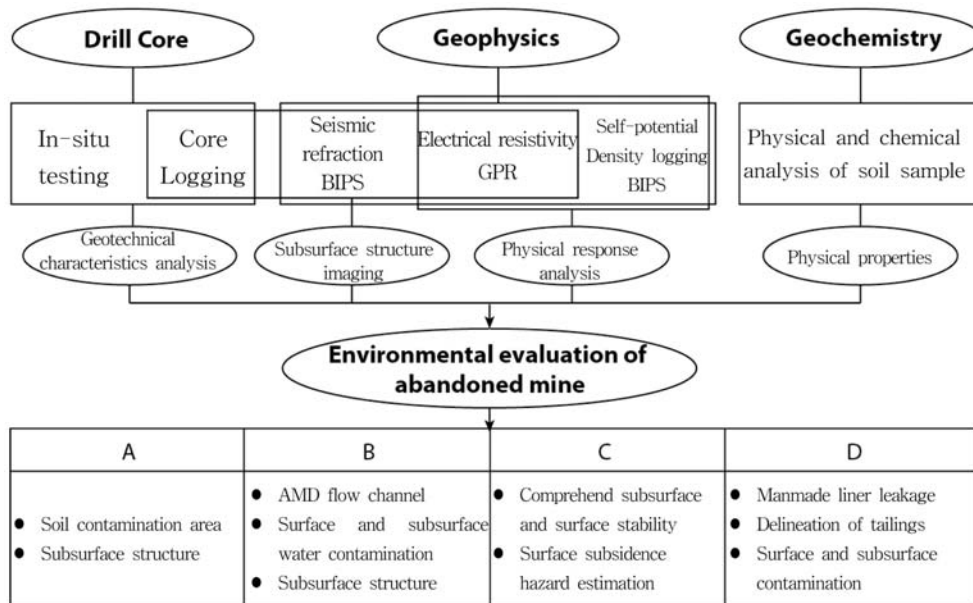


Fig. 1. Work flowchart for the integration and interpretation of drill core, geophysical, and geochemical data.

**Table 2.** Geophysical methods for investigating hazards and contaminated zones in the abandoned mine lands (AML) selected for this study.

Hazard types	Area	Geophysical methods	Auxiliary data	Investigation targets
Contaminated soil	A	Electrical resistivity	SPT soil samples (heavy metal concentration)	Examining the contaminated soil with geophysics and geochemistry data
AMD channel	B	Electrical resistivity, SP, GPR		Examining leachate path by composite interpretation of various geophysics data
Mine cavities (ground subsidence)	C	Electrical resistivity, Seismic tomography, BIPS	Density and natural gamma logging, drill core	Detecting the cavities through composite interpretation of geophysics, well logging, and core data
Manmade liner and tailings zone	D	Seismic refraction, Electrical resistivity	Water samples (Eh, pH)	Detecting the damaged segment of man-made liner and delineating the zone of tailings and waste rocks

를 파악하고자 탄성파굴절법, 전기비저항자료와 함께 지표수와 지하수의 pH와 EC 자료를 함께 해석하였다 (Table 2).

#### 토양오염영역 탐지(A 지역)

현재 경작지로 이용되어 있는 토양에서의 오염 범위를 규명하고자 기반암의 깊이 파악 및 심도별 시료 채취를 위한 시추조사를 수행하였다. 또한 경작지로 이용 중인 논과 밭에서의 중금속오염농도를 알아보기 위해 토양시료를 채취하였고 오염된 토양의 분포 영역을 파악하기 위해 전기적 특성을 이용한 전기비저항 탐사를 수행하였다(Sim, 2012). 전기비저항 탐사결과를 해석할 때 시추조사 및 표준관입시험(Standard Penetrating Test, SPT) 결과를 반영하였고 또한 토양시료 분석자료(중금속 농도)와 상관분석 하는데 연구의 초점을 두었다.

지층의 경도 및 상대밀도를 파악하기 위해 수행한 표준관입시험은 각 시추공에서 1 m 깊이 마다 실시하였으며 표준관입시험(N)값은 매립층의 경우 8/30~16/30의 범위를 보이며 붕적층은 7/30~50/3의 범위로 자갈의 함량에 따라 큰 차이를 보인다(Table 3). 중금속오염농도 분석 결과 Cu, Pb 및 Zn의 오염이 가장 큰 것으로 나타난 바, 전기비저항탐사 자료와 상관분석하기 위하여 심토층 시료(30~60 cm)의 중금속 오염도를 바탕으로 중금속 별로 오염도를 작성하였다. 오염도 작성 결과 각각의 중금속 별로 오염정도에 따른 영역을 구분한바, 납의 농도가 높은 서쪽 영역, 구리와 아연의 농도가 높은 중앙 영역으로 구분할 수 있다(Fig. 2a).

또한 전기비저항 탐사결과를 2.5 m 깊이 간격의 전기비저항 분포범위를 나타낼 때 전기비저항탐사 결과 천부에서 나타나는 저비저항 영역(수십 ohm-m)이 심부로

**Table 3.** The N values from the SPT.

BH.No	Fill (N value)	Colluvium (N value)
1	16/30	16/30~50/3
2	8/30	8/30~50/19
3	8/30	7/30~8/30

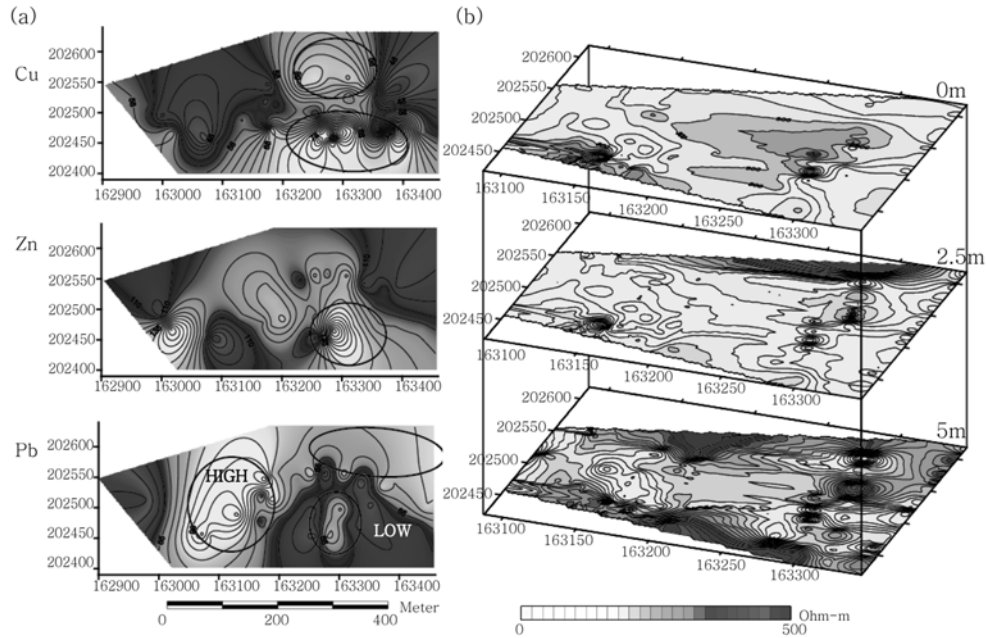
갈수록 그 규모가 좁아지고 없어지는 양상을 보이는데 이 저비저항 영역은 국부적인 지질이상대에 의한 영향보다는 중금속에 의해 토양오염이 진행된 지역으로 해석된다(Fig. 2b).

전기비저항 탐사 및 토양오염도를 상관분석한 결과 저비저항 이상대가 나타나는 지역과 중금속 오염정도가 심한 지역이 일치하고 기반암 출현심도가 4~5 m로 나타나는 것으로 보아 이 저비저항 이상대는 지질 구조적인 영향보다는 중금속에 의해 토양이 오염된 것으로 해석된다.

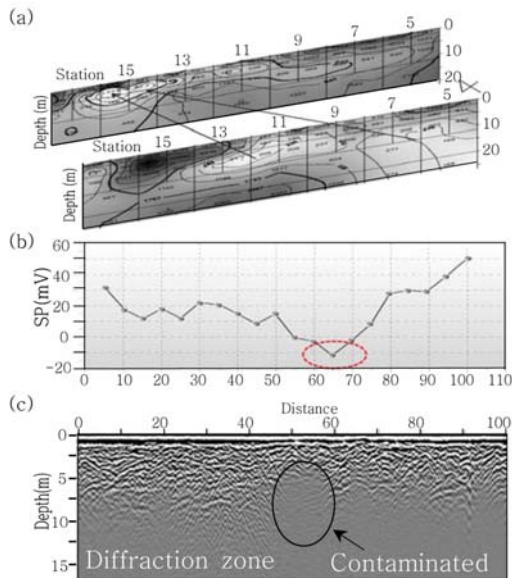
#### 산성광산배수 경로(B 지역)

이 지역은 금을 생산할 목적으로 가행되어 왔으나 경제성과 광석의 품위 저하로 채광활동이 중단되었고 부근의 지질은 지리산 편마암 복합체가 기저를 이루고 있다. 광산 주변에서 산성광산배수 유동경로를 파악하기 위해 전기비저항, 자연전위 및 지하레이더 탐사를 수행하였다(Kim et al., 2003a).

전기비저항 탐사 결과(Fig. 3a) 북쪽 측선의 측점 13-17, 남쪽 측선의 측점 10-13의 직하부에서 200 ohm-m 이하의 저비저항대가 분포한다. 이 이상대는 산성광산배수를 포함한 지하수의 영향으로 해석되며, 갯도 부근에서 기원된 지하수가 두 개의 유동경로를 따라 흐



**Fig. 2.** (a) Anomaly map showing contents of heavy metals (Cu, Pb and Zn) and (b) depth slices (0 m, 2.5 m, 5 m) of electrical resistivity. The closed solid line represents the position of a highly contaminated area. Zones of high metal contents correspond to areas of low peaks in electrical resistivity (ER).

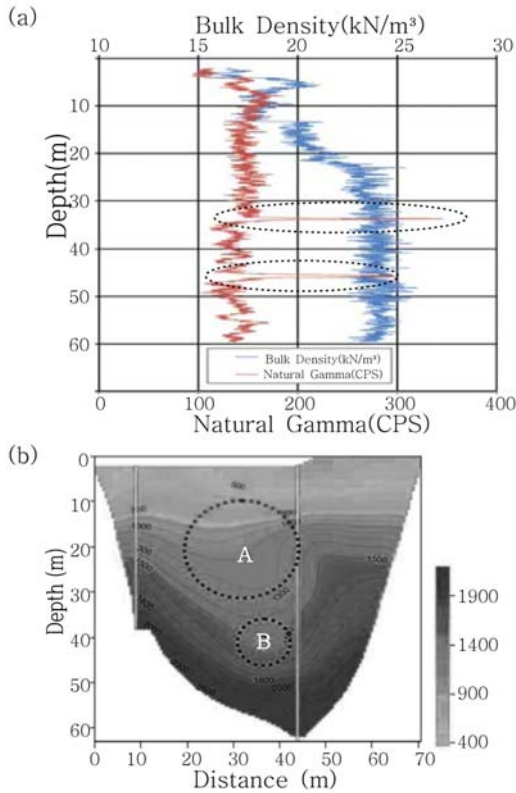


**Fig. 3.** (a) Resistivity fence diagram showing AMD paths, (b) SP anomalies with negative peaks, and (c) GPR section. Contaminated zones with AMD leakage are characterized by low electrical resistivity (ER), negative SP anomaly peaks, and blurred GPR images (partly modified from Kim et al., 2003a).

르다가 그 일부가 지표로 용출하는 것으로 해석하였다.

자연전위 탐사 결과(Fig. 3b) 측정 60~70 m 구간에서 음전위의 최소값을 가지는 구간이 나타나는데 이는 자연전위가 지하수의 유동과 같은 전기역학적 현상에 의해 발생하는 것으로 볼 때 산성광산배수의 유동 채널로 추정된다. 이 결과는 저비저항 이상대 구간과 일치한다.

전기비저항 및 자연전위 자료와의 상관분석을 통해 산성광산배수의 유동경로를 알아보기 위한 목적으로 전기비저항 측선에서 100 Mhz의 송수신기를 사용한 GPR 탐사를 수행하였다. GPR탐사 결과(Fig. 3c) 일반적인 레이더파의 투과심도는 약 10m로 나타난다. 그러나 측선거리 45~58 m에서는 투과심도가 4 m로 상대적으로 얇게 나타났다. 이 구간은 전기비저항탐사 결과에서 나타난 저비저항대와 일치하는 결과이다. 레이더파는 산성광산배수와 같은 침출수로 오염된 토양에서는 전기전도도나 유전율이 높아 전자기파의 감쇠가 커 전자기파의 투과심도를 감소시키게 되므로(Kim et al., 2014) 이러한 레이더파의 특성을 고려할 때 레이더파의 낮은 투과심도를 갖는 구간이 산성광산배수의 유동 채널로 해석된다.



**Fig. 4.** (a) Well-log data (left: natural gamma, right: bulk density) and (b) seismic tomography profile. The mine cavities represented by ellipses in (a) correspond to low velocity zones (A, B) in (b).

#### 채굴적 분포(C 지역)

한때 국부적으로 싱크홀 형태의 침하의 원인이 된 갱도 및 채굴적이 존재하는 구간을 중심으로 지하 지질특성을 알아내고 지하공동의 위치, 규모 및 형상 등을 종합적으로 파악하기 위해 전기비저항탐사, 시추코어 관찰, 물리검층, 탄성과토모그래피, 공내영상촬영(Borehole Image Processing System, BIPS)을 실시하였다(Sim, 2012).

시추 조사는 전기비저항 탐사로 확인된 이상대를 바탕으로 채굴적이 예상되는 지점에 시추위치를 선정하여 부지에 분포되어 있는 지반의 구성 상태, 지하수위 등의 지질조건을 알아보고 최종적으로 채굴적의 위치 및 규모를 정확하게 파악하는데 목적을 두었다. 시추 결과 채굴적이 예상된 지역에서 공동이 확인되었다.

풍화대, 연약층 판정, 지층 구분, 암반의 파쇄 정도를 판단하기 위해 자연감마검층과 밀도검층을 실시하였다

(Fig. 4a). 두 개의 검층 결과 34 m, 46 m 부근에서 밀도와 자연감마값의 이상대가 나타나는데 이는 시험공으로 연장되는 채굴적에 채워진 점토 및 광미로 인한 이상대로 해석하여 다른 시추공 자료와의 상관해석에 참고하였다.

지반상태를 정밀하게 파악하고 지층 내에 존재하는 이상대의 유무 및 방향성 등의 관한 정보를 얻고 채굴적의 연속성 및 규모를 파악하기 위해 탄성과 토모그래피를 하였다. 시추공 탄성과토모그래피 결과(Fig. 4b) 깊이 20~30 m, 40~45 m에서 속도 연약대(A, B)가 나타나는데 이것은 채굴적에 의한 영향으로 판단되며 시추 자료에서 확인한 채굴적 심도 25.5~29.5 m와 비교할 때 시추공 탄성과 토모그래피 결과에서 나타난 20~30 m 깊이의 속도 연약대에 해당한 것으로 보인다.

채굴적의 위치, 규모, 심도 및 충전물의 존재 여부를 보다 정밀하게 파악하기 위하여 밀도 검층, 탄성과 토모그래피자료(Fig. 4a, b) 외에 전기비저항 탐사(Fig. 5a), 시추코어 자료(Fig. 5b)와 BIPS 결과(Fig. 5c)를 상관해석 하였다. 시추 조사 결과 저비저항 이상대에서 채굴적으로 판단되는 연약대가 발견되었으며, 일부 시추공에서 채굴적에 존재하는 충전물을 회수하였다. 그러나 시료가 채취되지 않은 구간은 시추조사만으로는 국부적인 풍화대에 의한 연약대인지 채굴적에 채워진 충전물에 의한 연약대인지 파악할 수 없으므로 이 위치에서 밀도 검층, 탄성과 토모그래피 및 시추공영상촬영자료를 참조하였다. 밀도검층 결과 일부 구간에서 채굴적으로 인한 밀도가 작은 이상대가 발견되었으며 이것은 채굴적에 채워진 점토 및 광미로 인한 영향으로 해석된다. 또한 자연감마 이상대의 깊이에서 속도 이상대가 보이는데 이것은 석영맥을 따라 발달한 채굴적에 의한 영향으로 해석하였다. 탄성과 토모그래피 단면 역시 채굴적에 의한 영향으로 속도가 상대적으로 낮게 나왔다.

#### 인공차수막 파손(D 지역)

선광시설 등이 일부 남아있는 금을 주 광종으로 했던 폐광으로서 생산량이 적어 광미 또한 많지 않다. 그러나 폐광석 적치장이 사후관리가 이뤄지지 않아 그대로 방치되어 있으며 광산 주변 마을의 몇 가구는 마당에 광미를 포장함으로써 광미 안의 황철석으로 인한 yellow-boys 현상이 심각하게 일어난 바 있다. 이것을 방지하기 위한 목적으로 폐광석 적치장에 인공차수막을 설치하여 빗물과의 반응을 억제 시키려는 노력이 있었다. 이 지역에서는 산성광산배수의 발생을 억제하기 위해 설치한 인

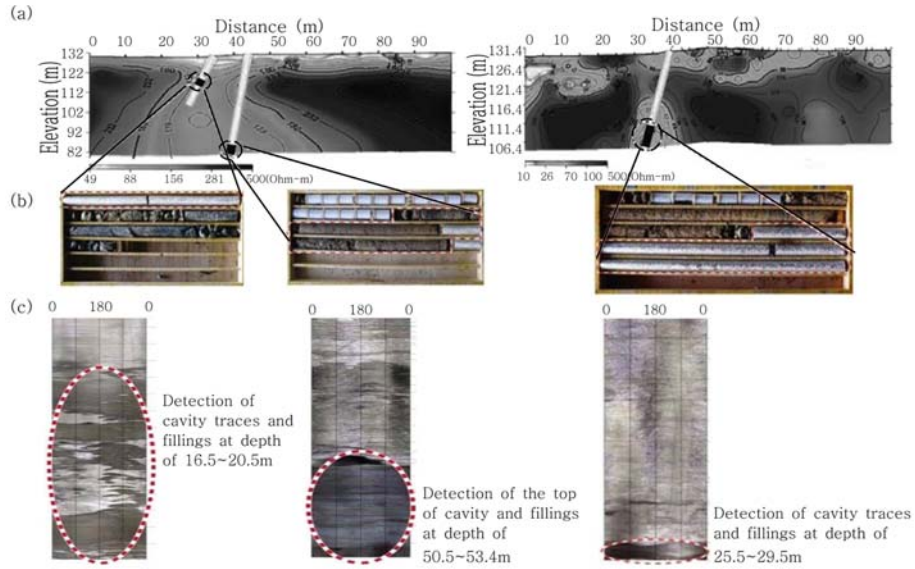


Fig. 5. Composite interpretation of cavities in (a) a resistivity section, (b) drill-core data, and (c) BIPS images.

공차수막(manmade liner)의 전기비저항 반응과 지하화학 자료(건우기의 pH, EC)를 해석하였다.

고밀도폴리에틸렌 (HDPE) 재질의 인공차수막은 이것을 통과하는 구멍이 없는 한 높은 저항성 벽으로서의 역할을 하며 전기적 성질 또한 10만 ohm-m 이상의 고비저항 값을 보여준다(Kim et al., 2014). 산성광산배수의 경우는 반대로 낮은 전기비저항 값을 가져 전기비저항 및 전자탐사를 통해 인공차수막의 차수효과를 효과적으로 파악할 수 있다. 지하갱도는 공동이 물로 채워져 있는 경우 주변 보다 낮은 전기비저항 값을 갖으나 비어있는 경우 수만-수십만 ohm-m의 높은 전기비저항 값을 갖고 공동 상부 매질은 이완작용으로 인한 미세균열의 발달로 낮은 속도 값을 갖는다. 전기비저항자료(Fig. 6a)의 측정점 7-11에서 수십-수백 ohm-m의 저비저항 이상대를 보이는데, 이는 인공차수막의 차수효과가 일부 저하되어 산성광산배수가 표면으로 누수된 결과로 추정된다.

지화학조사(pH, EC) 자료는 주변 수계의 오염 특성을 파악하여 인공차수막의 효과를 파악하기 위한 목적으로 5개 지점에서 건기와 우기를 구분하여 수집하였다. 지화학조사는 배경값으로서 광산폐수에 의해 오염되지 않은 지역에서 1개 지점(IC1), 인공차수막이 설치된 폐광석적치장에 접해있는 인공수로에서 차수막의 효과를 알아보기 위해 1개 지점(IC3), 또한 주변 주민들이 식수 또는 생활용수로 사용하고 있는 지하수의 오염특성을 파

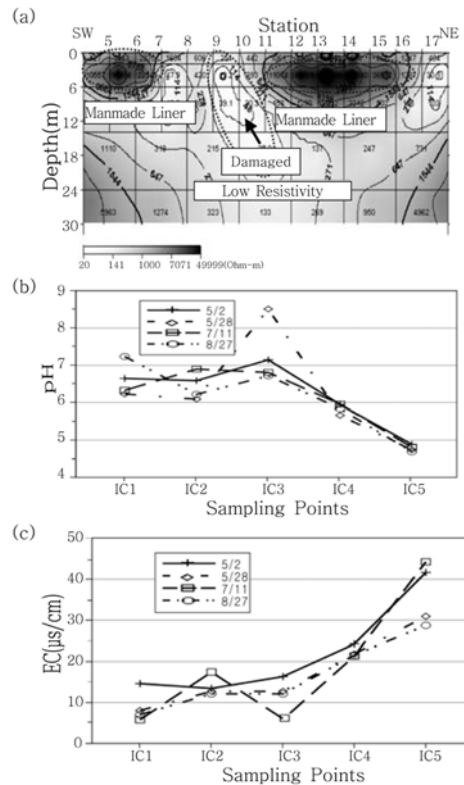


Fig. 6. (a) Damaged segment of a manmade liner characterized by a high-resistivity zone and anomalies of (b) pH and (c) EC; results are shown for both dry and rainy seasons.

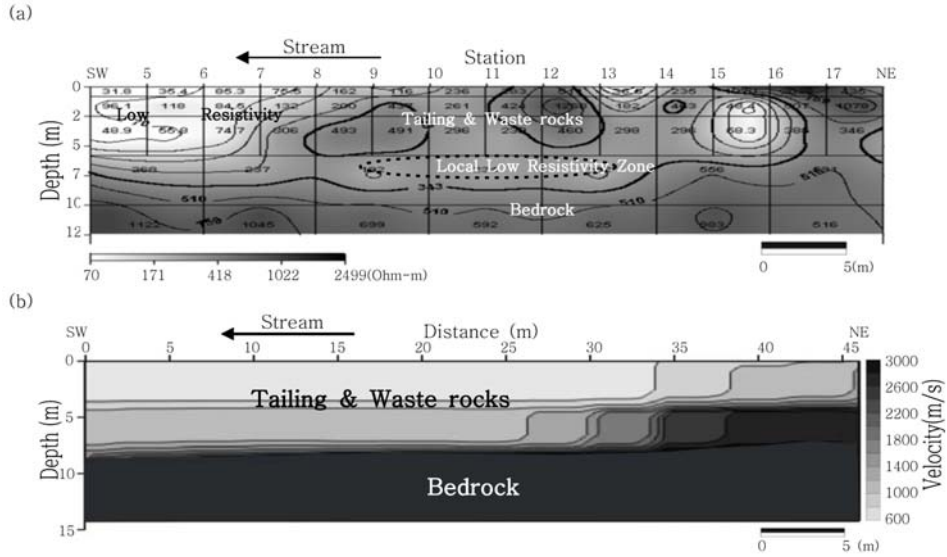


Fig. 7. Tailings and waste rocks are characterized by (a) high electrical resistivities and (b) low seismic velocities.

악하기 위해 3개 지점(IC2, IC4, IC5)에서 실시하였다 (Fig. 6b, c).

지표수를 대표하는 IC3 지점에서의 pH 측정결과 우기에는 6.82와 6.73이고 건기에는 7.16와 8.53으로 우기에 비교적 낮게 나타난다. 건기의 경우 IC3의 pH 값은 상류 계곡에서 측정한 배경치(IC1) 보다 높은 수치를 보이고 있어, 건기에는 폐광석에 의한 산성배수의 영향을 전혀 받지 않는 것으로 해석된다. 그러나 우기시에는 물리탐사 결과 인공차수막의 일부 구간의 차수효과가 저하되어 있고 또한 지하수위가 지표 근처에 형성되어 있어 폐광석이나 광미와 반응한 산성광산배수가 지표 수계를 오염시키는 것으로 나타났다.

지하수의 경우에는 건기와 우기에 따른 pH의 차이는 뚜렷하지 않지만 위치에 따라 깊이 크게 변한다. 즉 과거 광미장으로 부터 가장 멀리 떨어진 IC5는 4.7-4.9로 가장 낮은 수치를 보였다. 이러한 양상은 전기전도도의 경우에도 일치하는데 IC4와 IC5에서 높은 전기전도도 값을 갖는다. 이러한 지하수의 오염 특성은 물리탐사 결과로 효과적으로 파악할 수 있었다. 즉 연구지역의 낮은 지하수위로 인해 매립된 폐광석이 지하수와 반응하거나 주변에 산재되어 있는 지하 갱도로부터 갱내수가 유입되어 주변 지하수가 오염되는 것으로 해석된다. 지하수의 오염특성이 IC2 보다 IC4와 IC5가 높은 것은 산성광산배수로 오염된 지하수가 연구지역의 한쪽 방향으로 유동하기 때문인 것으로 해석된다.

#### 폐석더미 분포

하천 부근의 측선에서 실시한 쌍극자탐사 결과 측점 4-8의 0~5 m 깊이와 측점 13-14 및 15-16의 천부에서 수십 ohm-m의 저비저항대가 국부적으로 나타난다(Fig. 7a). 이것은 갱구에서 유출되는 산성광산배수가 지하로 유입되어 약 6~7 m 되는 폐광석 더미 바닥 또는 폐석더미 표면을 따라 이동하다가 하천에 유입되는 것으로 보인다. 천부에 보이는 1,000 ohm-m 이상의 고비저항 이상대는 갱도 입구에 적치된 폐광석들에 의한 반응으로 해석된다.

이 지역의 지하구조를 파악하여 침출수의 유동환경을 파악하기 위해 전기비저항 쌍극자탐사 측선에서 굴절법 탄성파탐사를 실시하였다. 굴절법 토모그래피 방법을 이용하여 자료처리한 결과 탄성과 속도에 의한 지하구조 (Fig. 7b)는 크게 1,300 m/s 이하(광미매립지), 1,300~2,500 m/s(풍화대), 2,000 m/s 이상(기반암)의 3개로 구분할 수 있는데, 이 양상은 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과(Fig. 7a)와 대체로 일치한다. 특히 측선거리 30~45 m에서의 깊이는 5 m로 얇게 나타나 지하로 유입된 산성광산배수가 지하구조의 특성상 오목한 부분인 방향으로 집중되는 것으로 보인다. 이는 전기비저항탐사 결과에서 약 5 m 깊이의 저비저항대가 상부의 폐석더미와 하부의 기반암의 경계가 되는 것과 일치한다(Fig. 7a).



## 결 론

광해 유형에 따른 적용가능 한 물리탐사를 알아보고 각각의 폐광산 주변을 광해 유형에 따라 분류한 후 유형에 맞는 물리탐사 방법을 선정하고 토양오염범위, 산성광산배수 유출경로 및 지반안정성 연구를 수행, 여러 보조 자료들과 상관분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

토양오염의 분포 범위 및 인공차수막의 경계 및 파손 구간을 파악하기 위해서는 오염원의 물리적인 성질과 인공차수막의 전기적인 성질을 이용하는 전기비저항 탐사가 효과적이다. 또한 중금속 오염도를 작성하여 전기비저항 이상대와 상관분석하는 것은 전기비저항 결과에서 지질학적 이상대에 의한 영향과 토양오염에 의한 영향을 구분할 수 있는 효과적인 해석 방법이 된다.

산성광산배수의 유동경로를 알아보기 위해서는 산성광산배수의 물성을 이용하는 자연전위 탐사 및 전기비저항 탐사가 효과적이며 오염원의 유동 환경은 GPR탐사 및 굴절법탐사를 통해 파악할 수 있었다. 또한 더욱 정밀한 분석 및 향후 유동경로를 파악하기 위해서는 오염원의 또 다른 물리적인 성질을 이용하는 지구물리탐사 및 지구화학 탐사가 병행되어야 한다.

채굴적(지반침하) 조사 분야에서는 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사로 대략적인 채굴적 예상지역을 판단한 후, 이에 시추조사 및 검층자료와 상관분석하여 채굴적의 존재유무, 규모 및 위치를 확인하고 지층단면을 재건하는 것이 효과적이다.

광해 유형에 따른 적절한 조사방법을 선정하여 지구물리탐사를 수행하고, 지반 조사 자료 및 지구화학 탐사 자료와 상관분석할 때 보다 각종 재해 및 오염대가 정확히 해석될 것으로 기대된다.

## 사 사

자료고찰에 대한 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 지원으로 이루어졌다.

## References

- Atekwana, E. A., Sauck, W. A., and Werkema, D. D. Jr., 2000, Investigation of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site, *Journal. Applied Geophysics*, 44, 167-180.
- Choi, J. R., Kim, S. S., Park, S. K., Shin, K. S., and Kang, B. C., 2013, A case study of electrical resistivity and borehole imaging methods for detecting underground cavities and monitoring ground subsidence at abandoned underground mines, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 34(3), 195-208 (in Korean with English abstract).
- Gajdos, V. and Karl, Y., 1995, Influence of Hydrocarbon pollution to soil conductivity, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 785-789.
- Hwang, S. H., 1997, Application of geophysical methods to detection of a preferred groundwater flow channel at a pyrite tailings dam, *Economic and Environmental Geology*, 30(2), 137-142 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S. H., Park, K. G., and Shin, J. H., 2005, A review on the geophysical application to mine hazard problems in Korea, *Geosystem Engineering*, 42(1), 61-67 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. S. and Jo, I. K., 2006, Investigation of application of geophysical techniques to mapping of potential hazard and contaminated zones and the suggested reading articles for abandoned mines, *Geosystem Engineering*, 43(6), 657-663 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. S., Han, S. H., Yoon, W. J., Kim, D. H., Lee, K. J., Choi, S. H., and Lee, P. K., 2003a, Geophysical surveys for delineation of leachate flows from AMD and buried rock wastes in Kwangyang Abandoned Mine, *Economic and Environmental Geology*, 36(2), 123-131 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. S., Han, S. H., Lee, K. J., and Choi, S. H., 2003b, Geophysical surveys for the detection of gallery and geomembrane at the imcheon abandoned mine, *Economic and Environmental Geology*, 36(6), 501-510 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. S., Song, Y. S., Yoon, W. J., Jo, I. K., Kim, H. S., and Nam, M. J., 2014, Application of geophysics method 2<sup>th</sup>ed., *Sigma Press*, 770p (in Korean).
- Ko, K. B. and Lee, D. S., 2001, 3D Near-surface reflection imagine in an area of ground subsidence, *ITRL-KSEG Proceed*, 53-61 (in Korean).
- Lee, S. K., Hwang, S. H., and Lee, T. S., 1997, Geophysical applications on the soil-contamination mapping and detection of buried mine tailings in the abandoned mine area, *Economic and Environmental Geology*, 30(4), 371-377 (in Korean with English abstract).
- Shin, J. H. and Byun, J. M., 2010, Geotechnical evaluation using geophysical well logging in the limestone area, Gaeun-eup, Mungyeong-si, Gyeongbuk, Korea, *Geosystem Engineering*, 47(5), 771-783 (in Korean with English abstract).
- Sim, M. S., 2012, Application of geophysical techniques for mapping of hazard and contaminated zones in abandoned mines, MSc Thesis, Chungbuk National University, 82p (in Korean with English abstract).
- Song, S. H., Lee, G. S., Um, J. Y., and Suh, J. J., 2011, Resistivity imaging of using borehole electrical resistivity tomography, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32(6), 537-547 (in Korean with English abstract).
- Park, S. K., Son, J. S., Lee, M. J., Kim, J. H., and Kim,

- J. G., 2006, Application of geophysical exploration for environmental site assessments in the abandoned mine, *Geosystem Engineering*, 43(5), 395-403 (in Korean with English abstract).
- William, J., 2003, Applications of the electrical resistivity method for detection of underground mine workings, *Geophysical Technologies for Detecting Underground Coal Mine Voids*, 28-30.

#### 심민섭

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-3201  
E-mail: bulur@nate.com

#### 주현태

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-3201  
E-mail: loginer-kool@hanmail.net

#### 김관수

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-3201  
E-mail: sincekks87@gmail.com

#### 김지수

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-3201  
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr