

## AMD 환경평가를 위한 지구물리·지구화학탐사의 적용사례

김지수<sup>1)</sup>, 한수형<sup>2)</sup>, 최상훈<sup>1)</sup>, 이평구<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>충북대학교 지구환경과학과, [geop22@chungbuk.ac.kr](mailto:geop22@chungbuk.ac.kr)

<sup>2)</sup>(주)지오제니 컨설턴트

<sup>3)</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

## Application of geophysical and geochemical methods to investigation of AMD environment

Jisoo Kim<sup>1)</sup>, Soohyung Han<sup>2)</sup>, Sanghoon Choi<sup>1)</sup>, Pyeongkoo Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Earth and Environmental Sciences, Chungbuk University

<sup>2)</sup> Geogeny Consultant

<sup>3)</sup> Geological and Environmental Hazards, KIGAM

**요약** : 충북 장풍, 전남 광양, 충남 임천의 세 개의 폐광산을 대상으로 물리탐사를 수행하였다. 연구는 산성광산배수에 의한 침출수의 유동경로, 매립된 광미 및 폐광석의 파악, 광산 폐수의 배수관 탐지, 갱도와 인공차수막의 효과를 파악하는데 목적을 두었다. 상관 해석 결과 물리탐사 자료는 물시료 분석 자료(수소이온농도, 전기전도도, 중금속, 황산이온)와 잘 일치하고 있다. 산성광산배수에 의한 침출수의 유동경로는 전기비저항 및 자연전위탐사로 탐지 가능한 반면에 폐광석, 산성광산배수의 배수관, 인공차수막 등은 탄성파 굴절법, 전기비저항, 지하투과레이다탐사를 통해 효과적으로 파악되었다.

**주요어** : 폐광산, 산성광산배수, 인공차수막, 지구물리탐사, 지구화학탐사

**Abstract** : Geophysical surveys were performed in three abandoned mines: Jangpoong, Kwangyang, Imchon. The main objectives of the researches include delineating the pathways of leachate from acid mine drainage(AMD), mapping buried rock wastes and tailings, detecting drainage pipes, and investigating the gallery and membrane, if they exist. Geophysical responses were well correlated with the results from water sample data(i.e., pH, EC, heavy metal contents,  $\text{SO}_4^{-2}$ ). Main pathways of the leachate were successfully detected in electrical resistivity sections and self-potential(SP) profiles, whereas waste rocks, drainage pipes, and membranes were effectively located by incorporating seismic refraction, electrical resistivity and GPR methods.

**Keywords** : abandoned mine, AMD, membrane, geophysical survey, geochemical survey

### 1. 서론

과거 국가 에너지산업의 원동력이었던 자원개발은 각종 환경문제, 심부 개발로 인한 경

제성 문제 등으로 2000여개의 국내 광산 중에서 약 65% 이상이 휴·폐광 상태이다(황세호 등, 2005). 폐광 후에 발생하는 광산재해는 크게 채굴적·갱도 붕락으로 인한 지반침하와 침출수로 흘러나오는 산성광산배수를 들 수 있다(Table 1).

Table 1. Application of geophysical methods to investigation of mine hazard.

자연재해	지반침하	산성광산배수
성격	물리적 재해	화학적 재해
원인	채굴적·갱도 붕락	광미·폐석·갱내수 유출
물리탐사의 역할	공동의 존재여부 및 범위 충진물의 여부, 종류 원위치 물성	폐기물, 유출수의 분포 AMD 유동 통로 인공차수막의 분포 파악

광산활동이 활발했던 시기에 축조되었던 광산 시설물들이 폐광으로 인하여 현재 방치되어 있고 이렇게 방치된 선광장, 갱구 및 폐석더미들은 주변 환경을 오염시키는 오염원으로 작용하여 광산 주변마을과 인근 농경지에 큰 피해를 주고 있다. 특히 폐광된 광산 주변의 광산 시설물과 광미(tailing) 및 폐광석(waste rocks)들은 사후 적절한 관리가 이루어지지 않아 이로부터 광미분진이나 산성광산배수(AMD: acid mine drainage) 등이 유출되고 있는 실정이다. 앞으로 늘어나는 폐광산에서 유출되는 AMD에 대한 환경오염에 대한 심각성을 고려할 때 천부의 중금속 원소의 이동 경로 및 분포를 알 수 있는 지표 물리탐사의 적용성 연구는 중금속 원소들의 이동 및 분산의 특징을 규명하는 지화학조사와 연계하여 이루어져야 할 것이다(이상규 등, 1997).

이 연구는 각종 화학 및 물리적인 잡음이 없는 폐광지역(충북 장풍광산, 전남 광양광산, 충남 임천광산)을 대상으로 주 오염원이 되는 산성광산배수에 의한 침출수의 물리·화학적 특성과 거동특성을 파악하고, 지표에 야적되어 있는 광미 및 폐광석 적치장으로부터 산성광산배수의 발생을 억제하기 위해 설치한 인공차수막 및 복토효과를 점검하고 더 나아가 산성광산배수의 발생원이 될 수 있는 지하 갱로나 매립된 광미 및 폐광석을 탐지하기 위해 물리탐사를 실시하였고 그 결과를 지화학탐사자료와 상관해석하였다(Fig. 1).

## 2. 장풍광산

충북 괴산군 자연면과 연풍면에 위치한 장풍 폐광산(금, 은, 동, 연, 아연)은 갱도에서 발생된 산성광산배수가 갱구 앞에 적절한 조치 없이 방치되어 있는 폐광석 및 광미 더미의 표면이나 바닥을 통해 주변 수계로 유입되고 있다(Fig. 2). 이러한 산성광산배수는 갱구 앞에 적치된 폐광석 및 광미와 반응하여 중금속을 용출시켜 주변 수계(지표수, 지하수) 및 토양을 광범위하게 오염시키고 있다(이인경 등, 2003). 이 지역은 갱내수가 지표 및 지하로 유입되는 것으로 확인된 위치에서 지표수계의 오염원인 산성광산배수의 유동경로를 파악하기 위해 자연전위, 전자, 전기비저항(Fig. 3), 굴절법 탄성파탐사를 수행하였고 그 결과를 물시료 분석자료(pH, EC, 중금속 함량,  $SO_4^{2-}$ )와 상관해석하는데 연구의 초점을 두었다. 지화학조사는 갱구에서 배출되는 산성광산배수의 특성과 유동경로를 파악하기 위한 것으로 갱도 입구 및 인접한 하천의 5개 지점에서 수행하였다(Fig. 4).

AMD 환경평가를 위한 지구물리·지구화학탐사의 적용사례

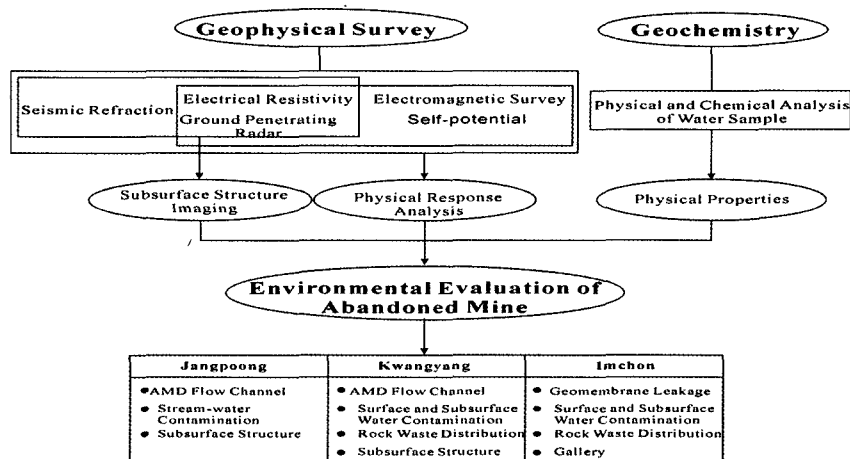


Fig. 1. Work flow chart for correlation of geophysical and geochemical data

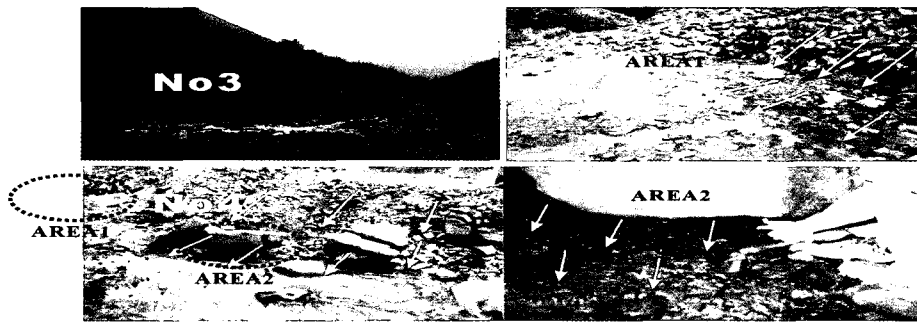


Fig. 2. Contaminated by AMD around sample positions. Nos. 3, 4 represent sampling sites of water stream. Dotted ellipses are enlarged.

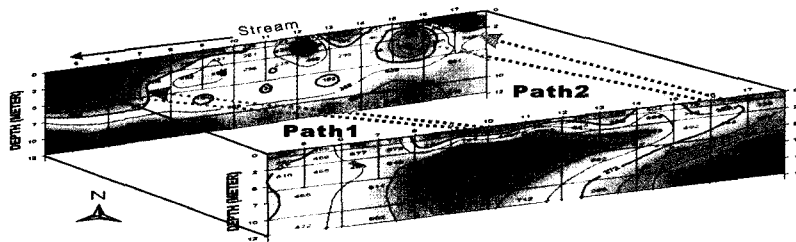


Fig. 3. Fence diagram for electrical resistivity sections for dry season.

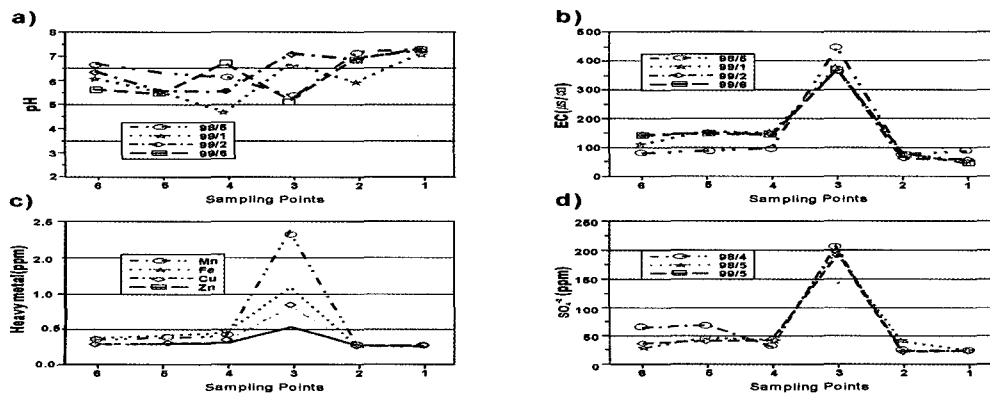


Fig. 4. Anomalies of a) pH, b) EC, c) heavy metal contents, and d)  $SO_4^{-2}$ .

### 3. 광양광산

전남 광양시에 위치한 광양 폐광산은 여러 개의 폐광산(금광)으로 구성되어 있으며 각 광산 들은 채광활동이 중지된 이후로 사후처리가 이루어지지 않아 주변 수계 및 토양을 오염시키고 있다. 특히 주 갱도는 갱내수가 외부로 유출되어 주변 계곡 및 토양에 yellow-boys 현상을 심하게 야기 시켜서 최근에 수평 갱도의 입구에 콘크리트 파일을 관입하여 갱내수의 유출을 막고자 하였다(Fig. 5a, b). 그러나 이로 인해 본정지역은 주 갱도와 산 정상에 위치한 수직갱도(Fig. 5c) 사이에서 산성광산배수가 용출되어(Fig. 5d) 주변 토양 및 계곡을 오염시키고 있었다. 초남지역에서는 비가 많이 내리는 경우 갱내수가 콘크리트 파일을 넘어 외부로 유출되는 문제가 발생되어 갱내수를 도수관을 통해 직접 바다로 배출시키고 있었다(Fig. 5e). 이 연구는 산성광산배수의 특성 및 지표 용출 원인을 규명하고 산성광산배수의 발생원이 되는 광산 주변의 매립 폐광석의 분포특성을 파악하고자 전기비저항(Fig. 6), 자연전위, GPR 굴절법 탄성파탐사를 복합적으로 수행하였다. 또한 산성광산배수의 발생특성을 파악하기 위해 지화학조사(Fig. 7)를 실시하여 물리탐사 자료와 상관해석하였다.

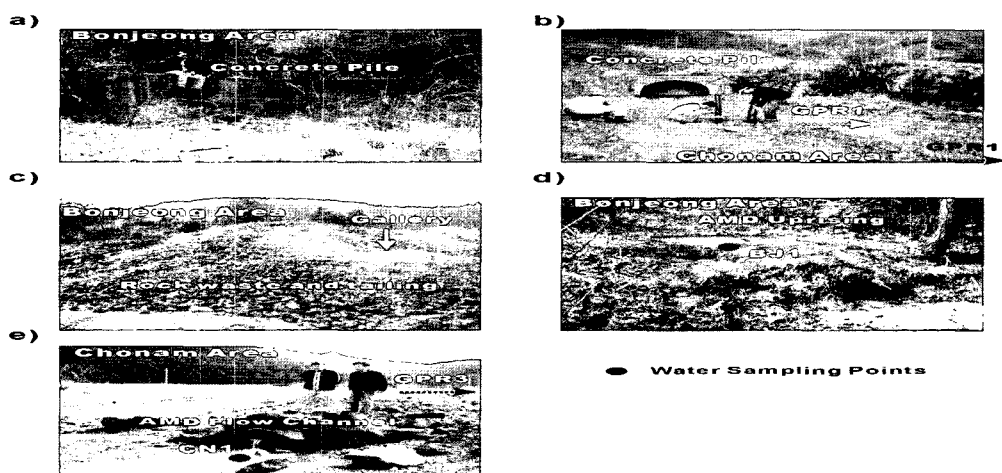


Fig. 5. Study area; a) gallery blocked by concrete pile at Bonjeong area, b) gallery blocked by concrete pile at Chonam area, c) gallery located in the Bonjeong area, d) uprising of AMD, and e) AMD flow through pipe.

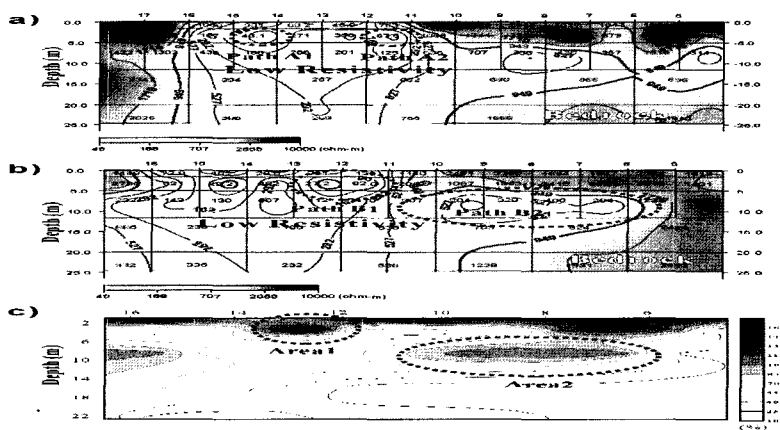


Fig. 6. Dipole-dipole resistivity sections of Line 2 for a) dry and b) rainy seasons. c) Contour of resistivity difference between a) and b). Area 1 and Area 2 are characterized by the high anomalies.

AMD 환경평가를 위한 지구물리·지구화학탐사의 적용사례

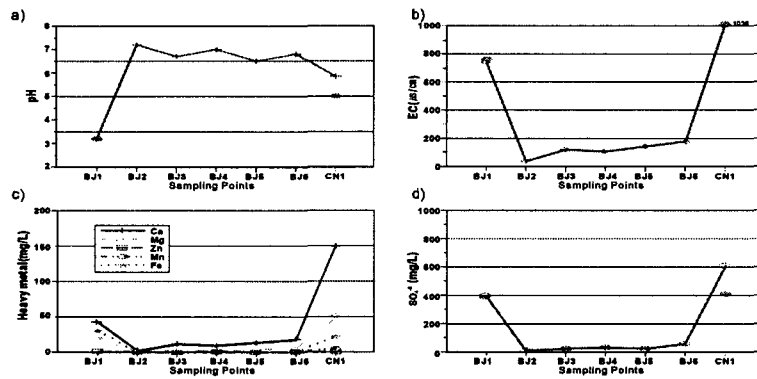


Fig. 7. Anomalies of a) pH, b) EC, c) heavy metal contents, and d) SO<sub>4</sub> variations for dry season. Anomalies for rainy season are represented by ellipses.

4. 임천광산

충남 부여군 장암면에 위치한 임천 폐광산(금광)은 현재까지도 선광시설 등이 일부 남아 있는 광산으로서 폐광석 적치장이 사후관리가 이루어지지 않아 그대로 방치되어 있으며 광미의 황철석으로 인한 토양 및 수계 오염 현상이 심각하게 일어났다. 최근 이것을 방지하기 위한 목적으로 폐광석 적치장에 인공차수막을 설치하여 빗물과의 반응을 억제 시키려는 노력이 있었다. 이 연구에서는 인공차수막의 차수효과를 살펴보고, 또한 산성광산 배수의 또 다른 제공원이 되는 지하 갱도의 분포를 파악하기 위해 물리탐사를 수행하였고(Fig. 8) 그 결과를 지화학조사 자료(Fig. 9)와 상관해석하였다.

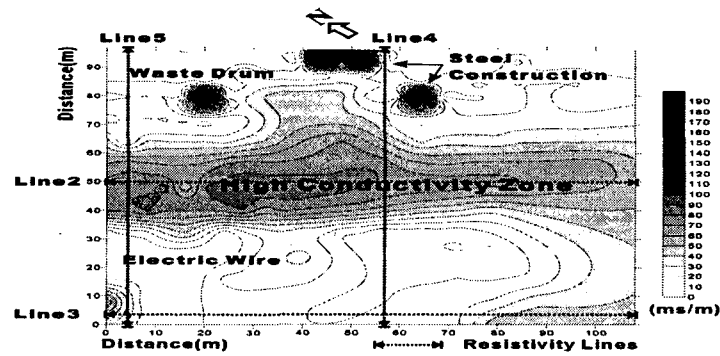


Fig. 8. EM survey results. Higher conductivity zone corresponds to the lower electrical resistivity zone. The zone is associated with the lateral discontinuity at depth of membrane. Dipole-dipole resistivity survey lines are included.

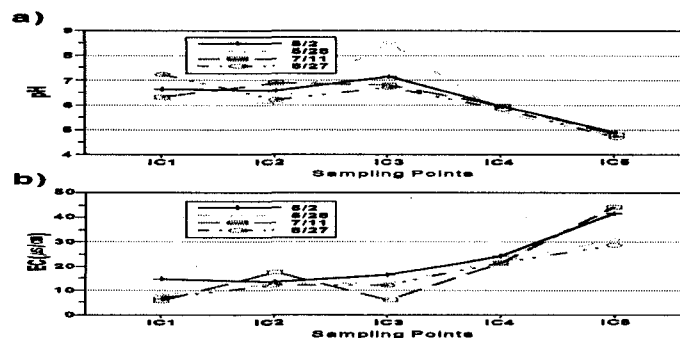


Fig. 9. Anomalies of a) pH and b) EC variations for dry and rainy season.

고밀도폴리에틸렌(HDPE) 재질의 인공차수막은 이것을 통과하는 구멍이 없는 한 높은 저항성 벽으로서의 역할을 하며 전기적 성질 또한 10만 ohm-m 이상의 고비저항 값을 보여준다(김지수 등, 2003a). 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 비어 있는 경우 수만-수십만 ohm-m의 높은 전기비저항 값을 갖고 공동 상부 매질은 이완작용으로 인한 미세균열의 발달로 낮은 속도 값을 갖는다(김지수 등, 2003b).

## 5. 결론

충북 장풍, 전남 광양, 충남 임천의 세 곳의 폐광산을 대상으로 물리탐사를 수행한 결과 산성광산배수에 의한 침출수는 건기보다 빗물이 많이 공급되는 우기에 활발하게 생성되며 갱구나 광미 및 폐광석에서 발생하는 산성광산배수의 유동경로는 전해질을 함유한 유체의 흐름과 같은 전기역학적인 현상에 의해 발생하는 유동전위를 측정하는 자연전위탐사 방법으로 효과적으로 파악 가능하며 그 결과는 침출수의 전기적인 물성을 이용하는 전기비저항 및 전자탐사나 지화학 물시료 분석 자료(pH, EC, 중금속,  $SO_4^{2-}$ )와도 일치된다. 또한 굴절법탐사를 통해 기반암의 지형적 특성이나 파쇄대의 분포 특성을 파악하는 것은 침출수의 양호한 유동환경을 찾는 데 효과적이다. 산성광산배수에 의한 침출수의 오염원이 되는 매립된 폐광석이나 광산폐수 배수관은 매설물 탐지에 일반적으로 많이 사용되고 있는 지하투과레이다탐사를 이용해 쉽게 파악할 수 있었다. 광미 및 폐광석에 의한 침출수의 발생을 억제하기 위해 설치한 인공차수막은 전자 및 전기비저항탐사 결과 일부 구간에서 차수효과가 저하되는 것으로 나타났다. 폐광산 주변 지역에서 지하수는 상관해석 결과 매립된 폐광석이 지하수와 반응하거나 지하갱도의 갱내수가 유입되어 오염되는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제(R01-2001-000-00074-00)에 의한 연구결과이다. 재단의 재정적 지원에 의해 수행되었다.

## 참고문헌

- 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003a, 물리탐사의 활용. *시그마프레스*, 791p. 김지수, 한수형, 이경주, 최상훈, 2003b, 임천 폐광산의 지하갱도와 인공차수막의 탐지를 위한 지구물리탐사, *자원환경지질*, 36, 501-510.
- 이상규, 황세호, 이태섭, 1997, 폐광산의 토양오염영역 및 폐기된 광미의 탐지, *자원환경지질학회지*, 30, 371-377.
- 이인경, 이평구, 최상훈, 2003, 장풍광산 폐광석의 중금속오염 연구와 pH 변화가 중금속의 용출 거동에 미치는 영향평가, *한국지하수토양환경학회 2003년도 총회 및 춘계학술발표회*, 385-388.
- 황세호, 박권규, 신제현, 2005, 국내 폐광산의 광산재해에 대한 물리탐사 적용사례 분석, *한국지구시스템공학회지*, 42, 61-67.