

장풍 폐광산의 산성광산폐수에 의한 침출수 유동에 대한 지구물리 및 지화학탐사자료의 상관해석

김지수* · 한수형** · 최상훈* · 이경주* · 이인경* · 이평구***

*충북대학교 · **지오제니컨설턴트 · ***한국지질자원연구원

요 약

장풍 폐광산의 갱내수와 폐광석 적치장에서 발생하는 산성광산폐수에 의한 침출수의 유동경로와 지화학적 특성을 알아보기 위해 지구물리탐사(자연전위, 전자탐사, 전기비저항, 탄성파굴절법)를 수행하여 그 결과를 지화학 물시료분석(pH, EC, SO_4^{2-} , 중금속 함량) 자료와 상관·분석하였다. 갱구에 수직 방향의 2개 축선에서 실시한 전기비저항 쌍극자탐사 결과 갱구에서 북서 방향으로 저비저항대가 이어지는데 이것은 갱구에서 지하로 유입된 산성광산폐수에 의한 침출수가 폐석더미와 기반암의 경계를 따라 이동하여 하천 방향으로 유입되어 나타나는 현상으로 해석된다. 이와 같은 양상은 전기비저항 수직탐사, 자연전위, 전자탐사의 반응 결과들에서 보이는 북서방향의 이상대 및 북서쪽에서 상대적으로 높은 값을 보이는 EC, 중금속함량, SO_4^{2-} 의 분포와도 잘 상관된다.

주요어: 폐광산, 산성광산폐수, 침출수, 지구물리탐사, 지화학 물시료분석

Ji-Soo Kim, Soo-Hyung Han, Sang-Hoon Choi, Kyung-Ju Lee, In-Kyoung Lee and Pyeong-Koo Lee, 2002, Correlation interpretation on the leachate flow by AMD of the geophysical and geochemical data from Jangpoong abandoned mine. Journal of the Korean Geophysical Society. v. 5, n. 1, p. 19-27

ABSTRACT: Geophysical surveys (self-potential, electromagnetic, electrical resistivity, and seismic refraction methods) were performed to delineate the flow channel of leachate from a AMD (acid mine drainage) by correlating the anomalies to geochemical characteristics at an abandoned mine (Jangpoong mine). The geophysical responses attempted to be correlated with water sample analysis data (pH, EC, heavy metals, SO_4^{2-}). Electrical dipole-dipole resistivity sections represent the low-resistivity zone trending northwest, which indicates the leachate flow by AMD along the contact of the mine waste rock dump and the bedrock. From the overall points of geophysical and geochemical anomalies, it is summarized that the flow channel of leachate by AMD can be successfully imaged with composite interpretations on the geophysical and geochemical studies.

Key words: abandoned mine, AMD, leachate, geophysical survey, geochemical stream-water sample analysis

(Ji-Soo Kim, Sang-Hoon Choi, Kyung-Ju Lee and In-Kyoung Lee, Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea; Soo-Hyung Han, GeoGeny Consultants Group Inc. 938-7 BangbaeDong SeochoGu, Seoul, 137-060, Korea; Pyeong-Koo Lee, Korea Institute of Geology, Mining & Materials. Daejeon, 305-350, Korea; e-mail: geop22@chungbuk.ac.kr, vincentsh@hanmail.net, pklee@kigam.re.kr)

1. 서 론

폐금속광산에 의한 중금속오염은 그동안 인간에게 가장 심각한 건강상의 피해를 가져다준 오염원 중의 하나이다. 국내에는 현재 1,000개소 이

상의 폐금속광산이 방치되어 있으며 이에 따른 크고 작은 광미장이 완전 복구되지 않은 상태로 방치되어 있다(민정식, 1996). 또한 폐광석이나 광미 적치장으로 스며드는 빗물이나 지하수가 광미나 폐광석 내의 유화광물과 반응하여 강산성의

폐수를 발생시키고 비소, 납, 구리, 카드뮴과 같은 치명적인 중금속을 용해시켜 주변 지표수/지하수 및 토양으로 확산시키고 있다. 광산 및 주변지역을 오염시키는 광산폐기물은 채광 및 선광과정 등에서 발생되며 크게 산성광산폐수(acid mine drainage, AMD)와 광산폐석(mine waste rocks) 및 광미(tailing)로 분류할 수 있다.

지금까지 국내 광산 주변의 환경오염에 대한 연구는 주로 지구화학적 측면에서 이루어지고 있고 그 내용도 물리화학적 분석에 의한 오염정도, 이동분산의 형태, 오염특성에 관한 사항들이 주류를 이루고 있다(김상현·전효택, 1993; 정명채, 1996; 정명채 외, 1998; Cheong·Thornton, 1994; 박천영 등, 2001). 산성광산폐수에 대한 지구물리탐사의 최초의 적용성 연구는 이상규 외(1997)을 들 수 있으나 주로 항공탐사 자료를 이용한 광역적인 지표수계 오염영역을 파악하는데 그쳤고 수계로 직접 유실되는 AMD에 의한 침출수의 지하 분포와 채널을 파악 및 감시하기 위한 지구물리탐사의 적용성 연구는 연구 범주에 들지 않았다. 그러나 앞으로 늘어나는 폐광산에서 유출되는 AMD에 대한 환경오염에 대한 심각성을 고려할 때 천부의 중금속 원소의 이동 경로 및 분포를 알 수 있는 지표물리탐사의 적용성 연구는 중금속 원소들의 이동 및 분산의 특징을 규명하는 지화학탐사와 연계하여 활발히 이루어져야 할 것이다.

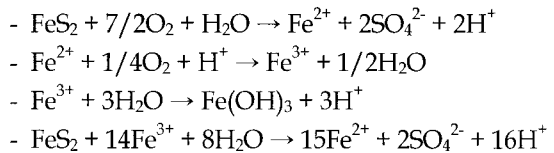
이에 이 연구는 50×20 m의 작은 규모로서 각종 화학 및 물리적인 잡음이 없는 폐광지역을 대상으로 기본적인 지구물리탐사를 수행하여 그 적용성을 물시료분석자료와 연계하여 살펴보고자 한다. 이 지역은 갯내수가 지표 및 지하로 유출되는 것으로 확인된 위치에서 지표수계의 오염원인 산성광산폐수의 유동 경로를 파악하기 위해 자연 전위탐사, 전자탐사, 전기비저항 쌍극자탐사 및 수직탐사, 탄성파굴절법탐사를 수행하였고 그 결과를 물시료 분석자료 pH, EC, 중금속 원소, SO_4^{2-} 와 상관 해석하는데 연구의 초점을 두었다.

2. 산성광산폐수

석탄광이나 금속광산 활동에 의해 생성되는 산

성광산폐수(AMD)는 하천 및 지하수의 산도의 증가, 철이온 침전, 산소고갈, 중금속 방출 등을 일으켜 생태계 및 인간의 생활에 직간접적인 영향을 준다.

채광 및 선광작업으로 인해 폐석, 광미 및 지하갱도 등에서 노출되어진 황화 광물은 AMD 생성의 근원이 된다. 일반적으로 황철석은 석탄, 구리, 금, 은, 아연, 납, 우라늄을 채광한 후 수반되는 폐기물에 존재하는 황화 광물이다. 황철석이 물과 공기에 노출되면 황산을 생성하는데 AMD 생성의 주요 원인인 황철석의 산화 과정은 다음과 같다.



위의 반응으로 방출되는 수소이온이 산도증가의 원인되고 그 결과 pH가 낮은 폐수가 발생된다. 위와 같은 반응에 의해 생성 배출되는 AMD는 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 침전에 의해 하천바닥이 붉게 변하는 yellow-boys 현상을 유발시킨다. 따라서 하천 바닥에서 보이는 yellow-boys 현상으로 산성폐수의 발생을 확인할 수 있다.

산성 폐수로 인한 가장 큰 문제점은 낮은 pH로 인하여 중금속의 용출을 증가시킨다는 점이다. 대부분의 중금속 화합물은 pH가 낮을수록 용출이 용이하다. 그러므로 산성 폐수는 중금속의 용출을 증가시켜 지하수 및 주변의 광범위한 지역까지 이동·확산하여 오염시킨다.

근본적으로 산성 폐수는 채광 후 방치된 갱구나 폐석 및 광미 중의 황화 광물이 물과 공기 등에 접촉하여 생성되므로 채광 후 선광과정 등에 의해 발생된 광미나 폐석을 적절한 조치없이 매립한 경우 산성 폐수가 발생될 가능성이 매우 높다.

3. 광산 개요

장풍 광산은 충북 괴산군 장연면과 연풍면의 경계에 위치한다(Fig. 1). 등록광종은 금, 은, 동, 연,

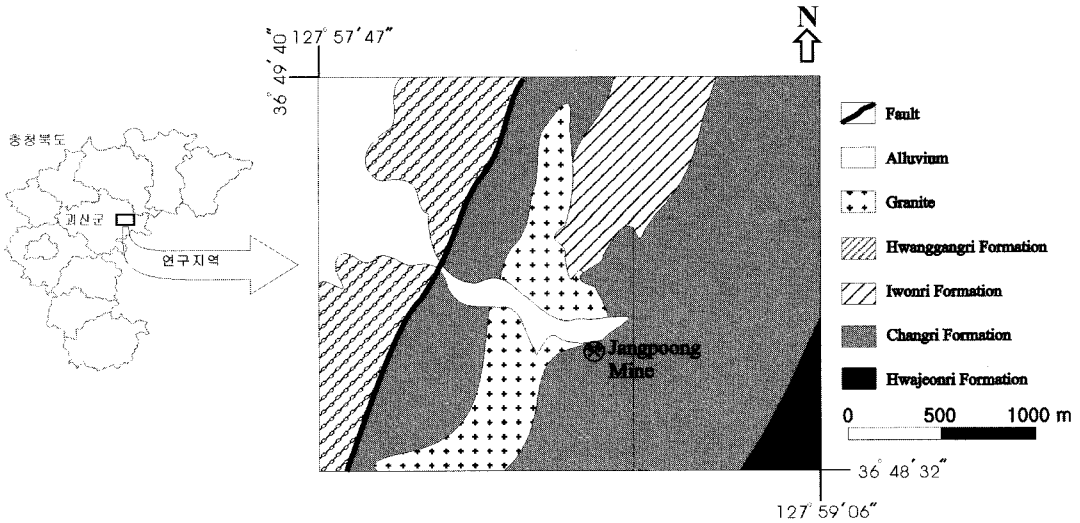
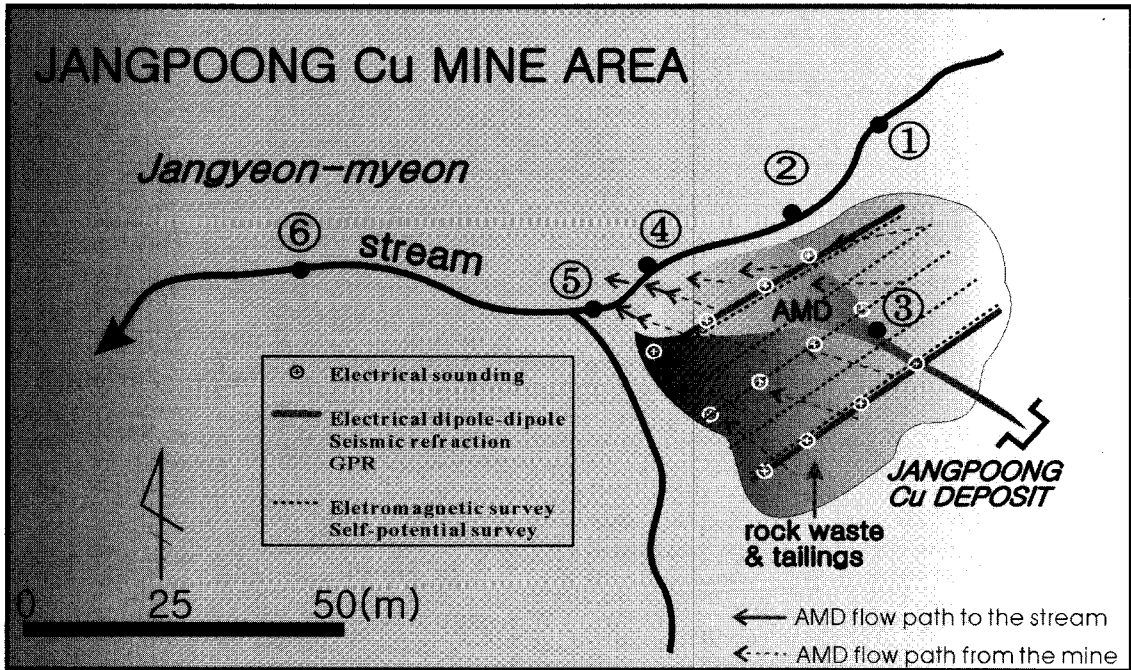


Fig. 1. Location of the study area and geologic map.

아연이고 광산 일대의 지질은 창리층인 천매암, 편암, 대석회암과 이를 관입한 화강반암으로 구성된다(Fig. 1). 광산은 이들 암석에 발달된 열극을 충진한 합동석영맥광상으로 석영맥의 방향은 N15E가 유세하고, 맥폭은 0.2~1.5m로 변화가 심한 편이다(이종혁·김종환, 1972). 석영맥에서 관찰되는 유화광물로는 황철석, 유비철석, 황동석이 다량으로 보이며 소량으로 방연석, 섬아연석이 관찰되고 맥석광물로는 석영과 형석이 산출된다. 이곳은 원래 연풍향과 만장향으로 개설하여 광산개발을 하였는데 현재는 폐쇄되어 사방공사가 완료된 상태이다. 그러나 광산 본 갱도 하부, 계곡의 하천에 인접한 곳에 운반갱 혹은 탐광하였던 갱도가 붕락된 상태로 있으며 이 붕락된 갱도로부터 많은 양의 강산성폐수가 흘러나오고 있다. 이 광산 폐수는 갱도 입구에 적치되어 있는 폐광석 적치장을 통과하기 때문에 산도가 더욱 낮아지는 현상도 관찰된다. 또한 이 폐광석 적치장에 있는 폐광석은 황철석과 유비철석을 다량으로 함유하고 있으며, 계곡의 하천바닥까지 적치되어 있어 하천으로 흐르는 지표수 또한 산성을 나타내고 있다. 그러므로 폐광석 적치장의 하부지역은 갱도에서 흘러나오는 강산성 폐수와 폐석 적치장을 통과해 흐르는 산성지표수에 의해 오염이 확산되고 있는 실정이다.

4. 물시료 분석

장풍 광산의 중금속 오염현황을 조사하기 위해 현장조사를 실시한 결과 주요 폐광석 적치장은 두 지역에 있는 것으로 확인 되었고 이곳에서 광산 하부에 개설되었던 갱도에서 강산성의 광산폐수가 흘러나오고 있었다. 상대적으로 규모가 큰 폐광석 적치장은 광산의 상부에 있고 현재는 사방공사를 실시하여 나무를 심어 놓은 상태이나 황철석과 유비철석이 노천에서 많이 관찰되고 있어 이들 광물의 용해작용(산화작용)에 의한 오염이 예상된다. 또한 광산하부에 있는 폐광석 적치장은 규모는 작으나 사방공사를 하지 않고 있어 비소를 다량으로 함유한 유비철석과 황철석이 그대로 노출되어 산화되고 있다. 이 연구에서는 갱도에서 배출된 광산 폐수의 거동 양상의 변화를 보기 위해 갱도 입구 및 인접한 하천의 6개 지점(Fig. 2)에서 각각 물시료를 채취하여 그 특성을 알아 보았다. 지점 1은 인접한 하천의 상류로서 광산 폐수의 영향을 전혀 받지 않을 것이라고 추측되는 곳으로서 배경값(background value)을 제공하며 지점 3은 갱도에서 직접 배출된 광산 폐수의 특성을 알아보기 위해 갱도 입구에 선정하였다. 또한 폐광석 적치장을 통과하여 하천으로 유입되는 광산폐수의 특성을 알아보기 위해 지점 4



① ② ③ ④ ⑤ ⑥ : Water-stream sampling points

Fig. 2. Geophysical survey lines and sampling point of water.

와 5에서 시료를 채취하였다.

광산 폐수의 물시료 분석 값은 Figure 3와 같다. pH는 건기와 우기의 특성으로 크게 두가지 양상으로 구분되어진다. 건기에 속하는 1, 2월의 경우 강도에서 직접 배출되는 AMD의 양이 매우 미비하여 우기와 비교할 때 지점 3에서 상대적으로 높은 pH 값을 보이고 있다. 그러나 폐석더미를 통과하여 하천수로 유입되고 있는 지점 4에서는 오히려 더 낮은 값을 보이고 있다. 이는 유량이 적어 물이 좀 더 오랜 시간동안 폐석더미 속에서 반응하였기 때문이라고 생각된다. 우기의 경우 광산 폐수의 영향을 직접 받는 지점 3번에서 pH 3정도의 낮은 값을 나타내다가 하류로 갈수록 높아짐을 보이고 있다.

일반적으로 강우나 강수의 전기전도도(EC)는 $21 \mu\text{s}/\text{cm}$ (총용존량 10 ppm) 이하이고, 습윤한 지역의 잘 용해되지 않는 암석에서의 지표수와 지하수는 $55 \mu\text{s}/\text{cm}$ (25 ppm) 이하의 값을 가지며, 염수에서는 $600 \mu\text{s}/\text{cm}$ (300000 ppm) 이상의 값을

갖는 것으로 보고되어 있다(Hem, 1992).

연구지역의 전기전도도의 배경값은 폐광산의 영향을 거의 받지 않는 지점 1의 수계에서 $48 \mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났고 최고값으로는 강구에서 채취한 지점 3의 수계에서 $447 \mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다.

전기전도도의 변화 양상은 모든 시기에 지점 3에서 매우 높은 값을 보이다가 하류로 거동함에 따라 배경값에 가까워짐을 보이고 있다. pH와는 달리 전기전도도의 경우 건기와 우기의 특성을 보이고 있지 않은데, 그 이유는 건기의 경우 강구에서 직접 유출되는 광산 폐수의 양은 적지만 이미 배출되었던 AMD와 침전된 철수산화물들이 반응하여 금속이온들을 물속에 용존시키기 때문에 높은 값을 보이고 있는 것으로 생각되어진다. 건기나 우기에 관계없이 광산 폐수의 영향을 직접 받는 지점 3에서 모든 원소가 높은 값을 가지나 하천수에 유입되어 희석되고 있다.

중금속(Mn, Fe, Cu, Zn) 및 SO_4^{2-} 모두 지점 3에서 높고 하류로 갈수록 낮아지고 있으며 예상

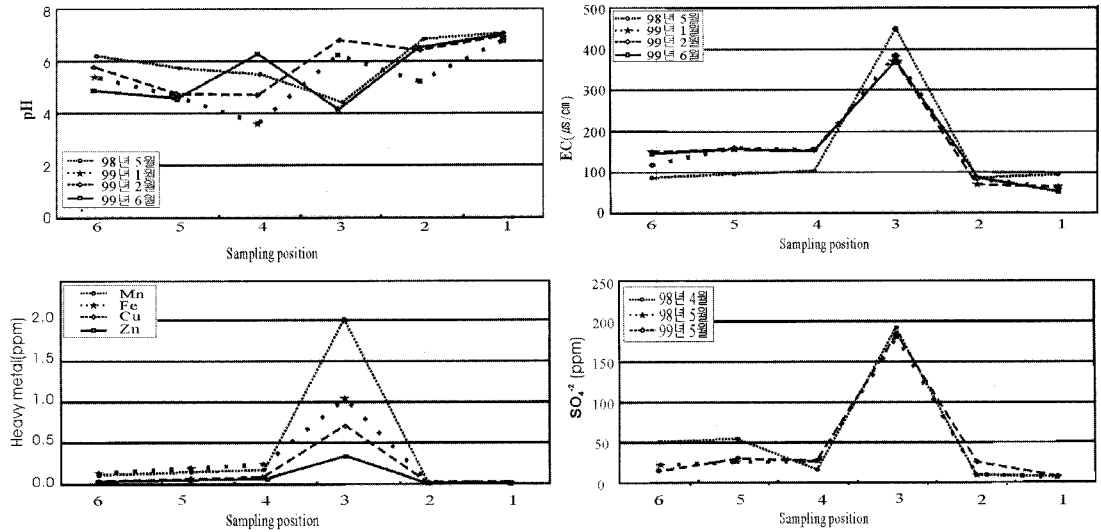


Fig. 3. Anomalies of pH, EC, heavy metal contents, and SO_4^{2-} variations.

대로 EC가 높아짐에 따라 중금속 함량 및 SO_4^{2-} 의 농도 또한 증가하는 정의 상관관계를 보이고 있다.

5. 지구물리탐사자료 수집 및 해석

5.1. 자연전위 및 전자탐사

연구지역을 포함한 유역에 대한 지하수의 유동 현상을 파악하기 위하여 지표수 흐름방향에 수직한 5개 축선을 대상으로 전극간격을 3m로 설정하여 자연전위 및 전자탐사를 실시하였다(Fig. 2). 자연전위 탐사에 사용된 측정장비는 ABEM Terra-meter SAS 300C이며 비분극 전위전극으로는 황산동($CuSO_4$)을 과포화시켜 채운 ABEM 비분극전극을 사용하였다.

비분극전극 사이의 측정전위는 황산동 용액의 화학적 특성으로 온도의 변화, 일교차, 용액의 소모 등에 의한 영향을 받게 되는데 이 탐사에서는 이러한 영향을 최소화하고 적절한 기준점 보정을 위해 전위기울기법(potential gradient method) (송성호 등, 2000)을 이용하였다. 이를 위해 우선 두 전극간의 전위차를 측정하고 서로 바꾼 후 다시 측정하여 전위차가 비교적 안정한 전극을 기준전극(base electrode)으로 선택하였다. 선택된 기준전극은 고정하고 이동전극(remote electrode)을 5m

간격으로 이동하면서 기준전극-이동전극 사이의 전위차를 반복하여 측정하였다. 여기서 기준점 보정(base correction)을 위해 2시간 간격으로 기준점에서의 전위차를 반복 측정하였고 각 시간대에서 구한 기울기를 보정값으로 이용하였다.

획득한 자료들은 자료구현 프로그램인 IDL (1996)을 이용하였으며 내삽기법은 지질자료에 많이 이용되는 크리깅법(Neuman and Jacobson, 1984)을 적용하였다. 자연전위탐사자료에서 갱구에서 북서방향으로 발달하고 있는 음의 이상대가 AMD에 의한 침출수의 유동 채널로 판단된다(Fig. 4a).

전자탐사의 측정장비는 Geonics사의 EM31을 사용하였으며 측정 이동간격은 1m로 하여 총 50m까지 측정하였다. 전자탐사자료를 이용한 평면도 결과는 북서방향의 높은 전기전도도 이상구간이 나타나는데 이는 자연전위탐사 결과로 나타난 북서방향의 이상대와 잘 상관되고 있다(Fig. 4b).

5.2. 전기비저항탐사

갱구에서 발생하는 AMD에 의한 침출수의 지하 분포 상황에 대한 자연전위와 전자탐사 결과를 정량적으로 해석하기 위하여 갱구 방향과 수직으로 갱구와 하천부근에서 각각 한개 축선의 전기비저항 쌍극자탐사와 축선 사이의 유동경

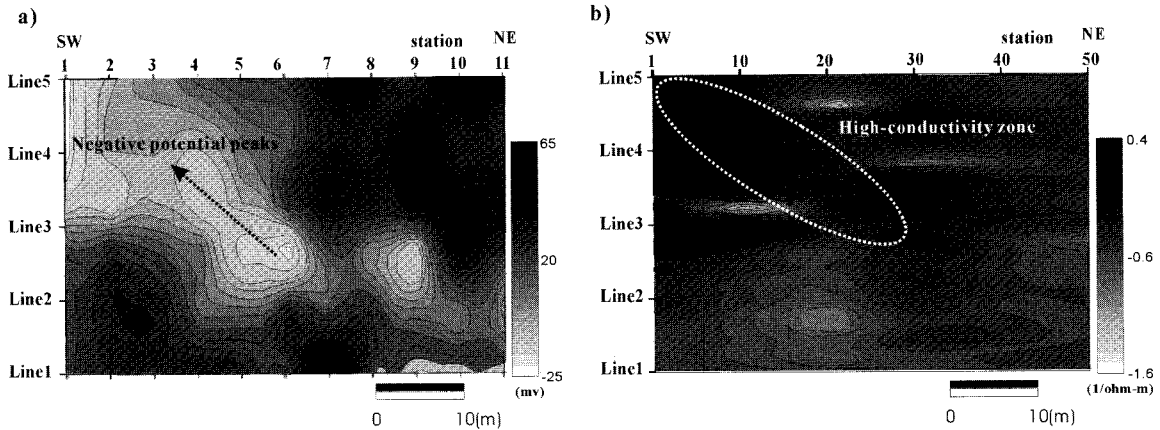


Fig. 4. Plane views of a) SP and b) electromagnetic data.

로를 파악하기 위해 12점의 수직탐사를 추가 수행하였다(Fig. 2). 탐사에 사용된 장비는 ABEM Terrameter SAS 300C 및 Terrameter SAS 2000 Booster를 사용하였고 전류는 신호대 잡음(S/N)을 높이기 위해 최대한 250 mA까지 투입하였고 자료의 신뢰성을 위해 자료중합은 8회로 하였다. 탐사지역의 측선 전개조건과 광산폐석 적적장의 높이를 고려하여 쌍극자탐사의 자료수집인자는 전극간격을 $a=2.5\text{ m}$, 전극 $n=21$, 측선길이 $l=50\text{ m}$, 전극간 개수 $n=9$ 로 하여 가탐심도가 12.5m가 되는 천부 고분해능 탐사를 수행하였다. 수직탐사에서는 최대 전위전극(MN/2) 및 전류전극(AB/2) 간격을 각각 1.5m와 20 m로 하였다.

획득한 쌍극자탐사 자료는 역산을 위해 각 면적 셀과 이에 대한 전기비저항을 추정 변수로 작성된 자료처리 소프트웨어인 Diprowin(2000), 수직탐사자료는 Soundpro(1996)를 사용하였다. 또한 2차원적인 결과를 입체적으로 해석하기 위해 자료 구현 소프트웨어인 IDL(1996)을 사용하여 배치단면도(fence-diagram)를 재건하였다.

하천 부근의 측선(JP 1)에서 실시한 쌍극자탐사 결과는 측점 4~8 사이, 측점 13~14의 고비저항 경계면을 따라 저비저항 이상대가 국부적으로 나타나고(Fig. 5a), 갠구 부근의 측선(JP 2)에서는 측점 15~18의 직하부 6 m 깊이 아래에서 100~150 ohm-m의 저비저항 이상대를 보여준다(Fig. 5b). 이는 갠구에서 지하로 유입된 AMD의 침출수가 약 7 m 깊이의 폐석더미와 기반암의 경계로 판단

되는 불연속면을 따라 이동하다가 하천으로 유입되고 있는 것으로 해석되며 이러한 결과는 동일 측선에 대해 수행된 탄성과굴절법탐사 결과와 일치된다. 또한 AMD에 의한 침출수는 저비저항 이상대가 우세하게 나타나는 갠구로부터 탐사지역의 북서쪽 방향으로 분포되는 것으로 해석되는데 이러한 해석결과는 물시료 분석자료(지점 3, 4, 5)의 이상대에 대한 분포범위와 일치된다(Fig. 3).

슬립버저 배열을 이용한 총 12점의 수직탐사자료의 합성도(Fig. 6)에서 저비저항대는 일관되게 북서방향의 분포를 보이는데 이것은 앞서 전기비저항 쌍극자 자료에서 해석된 유동경로와 대체로 일치한다.

5.3. 탄성과굴절법탐사

연구지역의 지하구조를 파악하기 위해 전기비저항 쌍극자탐사 측선(Fig. 2)에서 탄성과 굴절법탐사를 실시하였다. 자료획득에 사용된 장비는 24 채널 ABEM Terraloc Mark 6를 사용하였으며, 에너지원으로는 4.7kg 해머를 선택하였으며 탐사에 사용된 지오폰 규격은 100Hz로서 모두 2m 간격으로 설치하였다. 자료의 신호를 높이기 위해 기록당 5회 연속 타격하여 수직 중합(stack) 하였으며, 샘플링 간격은 0.05ms, 저주파계거필터(low-frequency filter)는 10Hz로 설정하였다.

현장자료의 처리는 탄성과 굴절법 토모그래피 방법을 이용한 소프트웨어 CSTOFRA(조창수 외, 2002)를 사용하였다. 탄성과굴절법 토모그래피법을

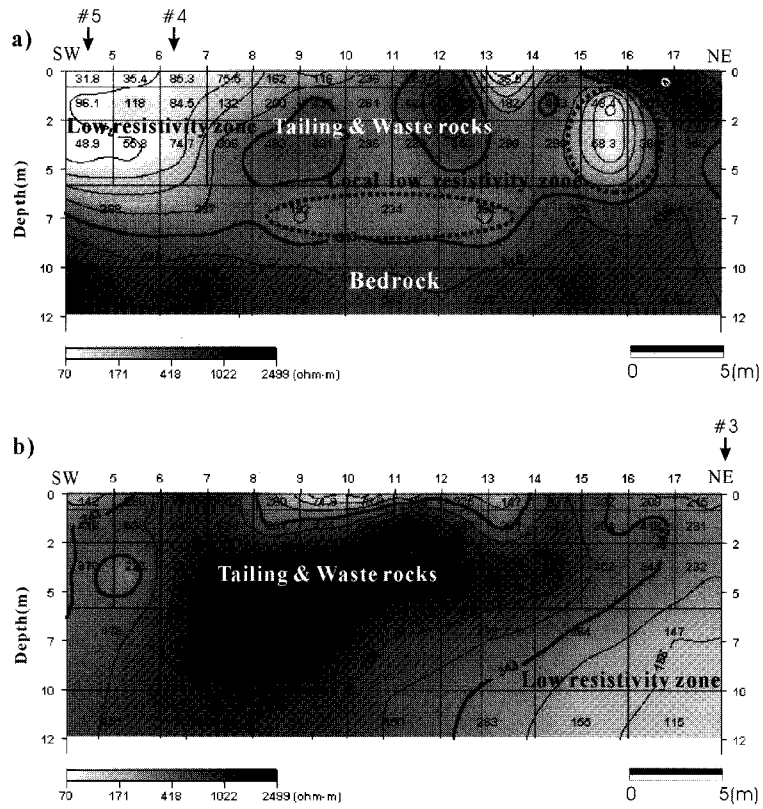


Fig. 5. Electrical resistivity sections for lines of a) JP 1 and b) JP 2.

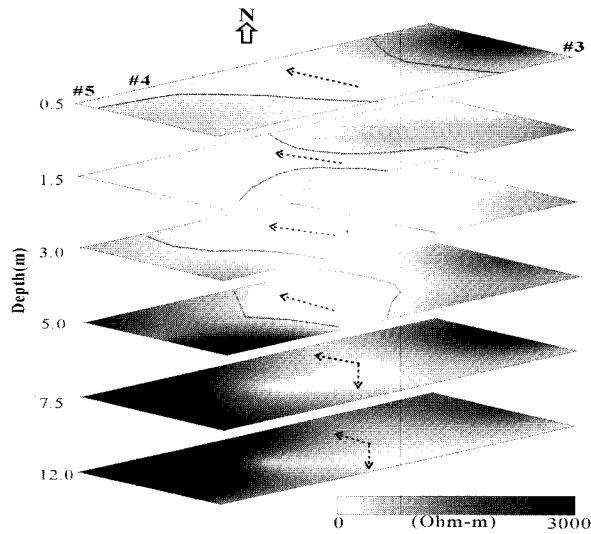


Fig. 6. Electrical resistivity pseudo-sections constructed by inter- and extrapolation of vertical sounding data. Directions of the leachate flow by AMD are shown by arrows.

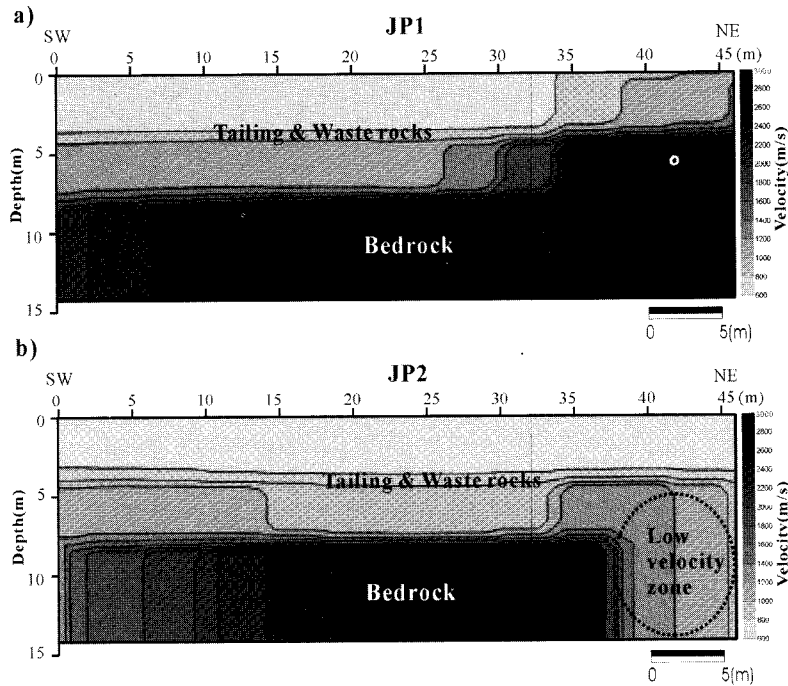


Fig. 7. Seismic refraction results for the lines of a) JP 1 and b) JP 2.

이용한 자료처리결과 탄성과 속도에 의한 지하구조는 크게 1300 m/s 이하(매립대), 1300~2500 m/s (풍화대), 2500 m/s 이상(기반암)의 3개로 구분할 수 있으며 이는 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과와도 부합된다(Fig. 7a, b). 측선 JP 2에서의 기반암의 깊이는 대체로 약 7~8 m 이고(Fig. 7b) 측선 JP1(Fig. 7a)에서는 5 m로서 보다 천부에 나타나는데 이것이 상대적으로 AMD에 의한 침출수의 유동경로를 북서방향으로 만들어 주는 역할을 한 것으로 해석된다. 측선 JP 2의 수평거리 37~46 m 사이에 나타나는 저속도 이상대(Fig. 7b)는 같은 구간에서의 저비저항대(Fig. 5b)와 상관되는데 이러한 양상은 AMD에 의한 침출수의 지하 방향 및 북서 방향의 유동환경을 잘 설명해준다.

6. 상관분석 결과

폐광산 주위에서 AMD에 의한 토양오염영역과 광미나 폐석 내의 AMD에 의한 침출수의 유동경로를 규명하기 위하여 지구물리학적인 방법을 실시한 결과 다음과 같은 상관분석을 얻었다.

1. 지구물리탐사자료 해석결과 자연전위 및 전자탐사 결과 나타난 북서쪽 방향의 이상대는 전기비저항 쌍극자탐사자료, 수직탐사자료 합성도에서 나타난 갱구 부근과 북서쪽지역에서 낮은 전기비저항 값에 의한 결과와 일치되며 이와같은 양상은 하천수에 대한 분석자료인 EC를 포함한 물시료분석 값에서도 잘 설명된다.

2. 물시료에 대한 지화학 탐사 자료와 지구물리탐사자료(전기, 탄성과, 자연전위, 전자탐사)의 종합해석결과 갱구에서 하천 쪽으로 이동하는 AMD에 의한 침출수 경로를 효과적으로 파악할 수 있었다. 탐사자료에 근거하여 해석된 이 지역에 대한 물성(전기비저항, 탄성과속도)으로 부터 유동경로, 풍화대, 기반암을 효과적으로 구분 할 수 있었다. 유동경로(<150 ohm-m, <1300 m/s), 풍화대(150~250 ohm-m, 1300~2500 m/s), 기반암(>250 ohm-m, >2500m/s).

3. 물시료와 지구물리탐사자료의 종합해석결과 갱구에서 하천방향으로 이동하는 AMD에 의한 침출수의 유동경로를 보다 효과적으로 파악할 수 있었다.

4. 연구지역의 AMD에 의한 토양오염영역을 정량적으로 파악하기 위해서는 토양분석이 요구되며 AMD에 의한 침출수의 유동 구조를 정확히 파악하기 위해서는 자력탐사 및 고분해능 천부 탄성과 반사법탐사를 함께 수행할 것이 권장된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제 (R01-2001-000-00074-00) 연구비 지원에 의해 수행되었다. 이 논문의 완성도를 높일 수 있도록 조언해 주신 강원대학교 김기영 교수님과 농업기반공사의 송성호 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

김상현, 전효택, 1993, 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속오염연구, 광산지질, 26, 217-226.

민정식, 1996, 휴·폐 광산지역에서 환경오염 실태 및 대책, 대한자원환경지질학회·대한지질학회 공동 학술강연회, 1-15.

박찬영, 정연중, 김성구, 2001, 광양 폐금광 수계에 형성된 철수산화물에 대한 광물학적 및 지구화학적 특성, 지구과학회지, 22, 208-222.

정명채, 1996, 달성 Cu-W 광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 오염, 자원환경지질, 29, 305-313.

정명채, 정영욱, 민정식, 1998, 휴/폐광 광산폐기물의

지구화학적특성, 대한지하수환경·한국 토양환경학회 심포지엄 및 추계학술대회, 71-75

송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항탐사의 적용, 자원환경지질, 33, 417-424.

이상규, 황세호, 이태섭, 1997, 폐광산의 토양오염영역 및 폐기된 광미의 탐지, 자원환경지질, 30, 371-377.

이종혁, 김종환, 1972, 1:50000 괴산지질도폭, 국립지질조사소.

조창수, 이희일, 서정희, 2002, 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분포해석, 물리탐사, 5, 6-17.

Cheong, Y.W. and Thornton, I., 1994, Acid mine drainage and heavy metal contamination of stream sediments in the Okdong cheon stream, Sangdon area, South Korea. Econ. Environ. Geol., 27, 01-113.

Diprowin, 2000, Electrical resistivity processing software, Heesong Ltd.

Hem, J.D., 1992, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd ed. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254, 67.

IDL, 1996, Research System Inc.

Neuman and Jacobson, 1984, Analysis of Nonintrinsic spatial variability by Residual kriging with application to regional groundwater levels, Mathematical geology, 16, 19-35.

Soundpro, 1996, Electrical resistivity processing software, Heesong Ltd.

2002년 1월 10일 원고접수

2002년 3월 25일 원고채택