

임천 폐광산의 지하갱도와 인공차수막의 탐지를 위한 지구물리탐사

김지수¹ · 한수형^{2*} · 이경주¹ · 최상훈¹

¹충북대학교, ²지오제니컨설턴트

Geophysical Surveys for the Detection of Gallery and Geomembrane at the Imcheon Abandoned Mine

Ji-Soo Kim¹, Soo-Hyung Han^{2*}, Kyung-Joo Lee¹, and Sang-Hoon Choi¹

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

²GeoGeny Consultants Group Inc., Seoul 137-060, Korea

Several geophysical surveys (electrical resistivity, electromagnetic, seismic refraction, GPR) were conducted to primarily investigate the gallery and the geomembrane at an abandoned mine (Imcheon mine). The subsurface structure mapped from seismic refraction survey mainly consists of three velocity layers (>1000 m/s, 1000~2000 m/s, <2000 m/s). Top of the bedrock, whose velocities exceed 2000 m/s, appears to be at depth of 7.5~10 m. Higher resistivities (of ten thousands~hundred of thousands ohm-m) are interpreted to be associated with a open (cavities) gallery. The events at depth of approximately 0.5~0.7 m in GPR sections are probably caused by high-density-polyethylene geomembrane. Taking into consideration of the differences in the spatial resolution between georadar and electrical surveys, the events of geomembrane correspond to the top of the high resistivities at depth of about 2m. The segments, characterized with the higher conductivities in the electromagnetic data and the lower resistivities in the electrical resistivity data, are probably associated with surface water or tear zone of geomembrane.

Key words : geophysical survey, gallery, abandoned mine, geomembrane, AMD

충남 부여의 임천 폐광산의 지하갱도와 폐광석 적치장의 인공차수막의 차수효과를 탐지하기 위해 각종 지구물리탐사 (전기비저항, 전자탐사, 탄성파굴절법, 지반투과레이다)를 실시하였다. 탄성파굴절법탐사 역산결과 주요 굴절면의 속도는 1000 m/s 이하, 1000~2000 m/s, 2000 m/s 이상의 3개 층으로 구분되며, 이 중에서 2000 m/s 이상의 속도를 갖는 기반암은 주로 7.5~10 m 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 전기비저항탐사자료에서 수만~수십만 ohm-m의 높은 전기비저항값은 지하갱도에 의한 효과로 해석된다. 또한 폐광석 적치장의 산성광산배수 발생을 억제하기 위해 설치한 인공차수막은 지반투과레이다탐사에서 0.5~0.7 m 사이에서 일관적으로 나타나는 이벤트와 대비되는데 이것은 전기비저항탐사결과에서는 전극간격의 분해능을 고려할 때 천부 2 m 이내에서 연속적으로 나타나는 고비저항 이상대와 관련된 것으로 해석된다. 전기비저항탐사와 전자탐사 결과 특정구간에서 낮은 전기비저항과 높은 전기전도도 값은 지표수의 침수 또는 인공차수막의 차수효과가 일부 저하된 것으로 해석된다.

주요어 : 지구물리탐사, 지하갱도, 폐광산, 인공차수막, 산성광산배수

1. 서 론

최근 우리 생활에서 환경문제가 중요한 화두로 등장하면서 쓰레기 매립장이나 폐광산의 환경오염을 최소화하기 위한 대책이 다양한 방법으로 진행되고 있다. 특

히 쓰레기 매립장이나 폐광산 적치장에서는 침출수에 의한 오염을 차단하기 위해 인공차수막을 설치하고 있으며 그 중요성이 증대되고 있는 실정이다.

쓰레기 처리장이나 폐광석 적치장에 차수막을 설치하는 목적은 산성광산배수에 의한 침출수의 생성을 막

*Corresponding author: vincentsh@hanmail.net

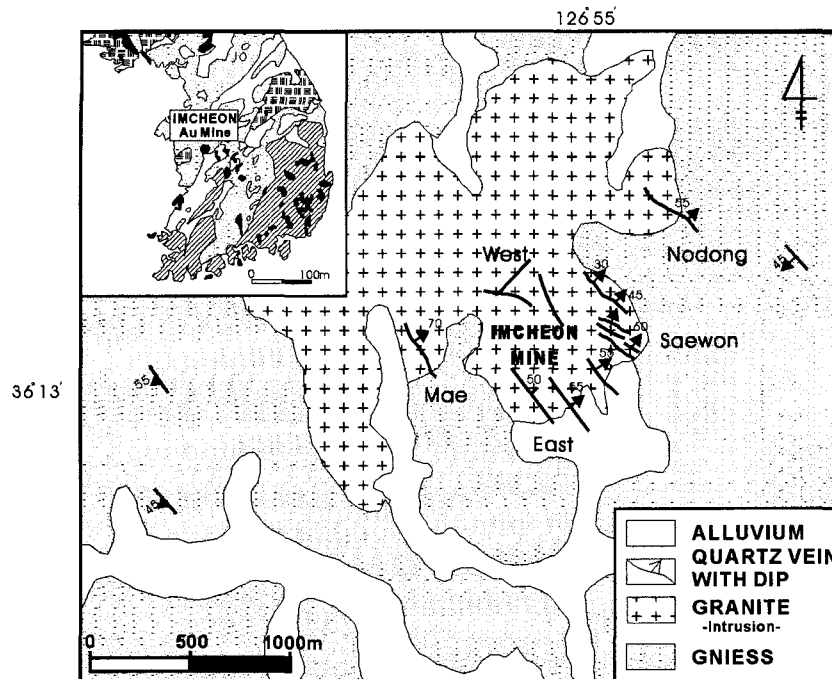


Fig. 1. Location and geology of study area which is situated in Jangam Myeon, Buyu, Chungnam Province(modified from Choi *et al.*, 1996).

는 것인데, 차수막이 약간 찢어지거나 단락되어도 침출수, 지하수, 상부 지표수의 주된 통로가 된다(Reynolds, 1997; 김지수 등, 2003). 따라서 인공차수막의 파열 부분을 수선하거나 또는 오염을 줄이기 위해 그 위치를 찾는 누수탐지 시스템 개발이 국내적으로 활발하게 진행되고 있다(Skuthan *et al.*, 1979; Mazac, 1990; Frangos, 1994; 정영욱 등, 1999).

인공차수막은 이것을 통과하는 구멍이 없는 한 높은 저항성 벽으로서의 역할을 훌륭히 하며 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 차수막의 대표적인 전기비저항은 10^7 ohm-m 이상으로 매우 높은 값을 보여준다(Reynolds, 1997; 김지수 등, 2003).

연구 지역인 임천광산 주변은 지하갱도들이 많이 분포하고 폐광석이 지표에 야적되어 광미내의 황철석으로 인한 토양 및 수계의 yellow-boy 현상이 심각하게 나타나는 지역으로서(민정식 등, 1997, 1998; 김선태 등, 1998) 지표수가 지하로 스며들지 못하도록 폐광석 적치장 부근에서 약 1m 이하의 깊이에 상부차수 방식에 의한 인공차수막을 설치한 후 복토를 한 바 있다.

이 연구에서는 지하갱도의 탐지와 폐광석 적치장에서 침출수에 의한 주변 환경오염을 막기 위해 설치된 인공차수막의 차수효과도 함께 알아보기 위해 지반환

경물리탐사에 주로 쓰이는 각종 지구물리탐사(탄성파 굴절법, 전기비저항, 지반투과레이다, 전자탐사)를 수행하였다. 이 연구의 주된 목적은 주변 환경의 개선대책을 다루기보다는 인공차수막의 탐지에 적합한 탐사들의 반응을 살펴보는 데 있다.

2. 연구 지역 및 지질

임천광산은 충남 부여군 장암면 지토리에 소재한 광산으로 동경 $126^{\circ}53'$, 북위 $36^{\circ}10'$ 지점에 위치하고 있으며(Fig. 1), 1916년 개광 이후 활발히 운영되다가 1988년에 폐광되었다. 현재까지도 선광시설(Fig. 2a)등이 일부 남아 있으며 금을 주광종으로 하지만 생산량은 그렇게 많지 않아 광미 또한 많지 않다. 그러나 광산 주변은 지하갱도(Fig. 2b)들이 많이 분포하고 폐광석이 지표에 야적되어 있어 광미내의 황철석으로 인한 토양 및 수계의 yellow-boy 현상이 심각하게 나타나고 있다(Fig. 2c). 이에 따라 최근 야적된 폐광석에 의한 침출수의 발생을 막기 위해 폐광석 적치장에 HDPE 재질의 인공차수막을 설치한 후 약 1m의 두께로 복토 작업을 수행하였고 차수막의 연결은 열융착식 방식을 사용하여 연결부위에서의 침수 및 누수현상을 최소화

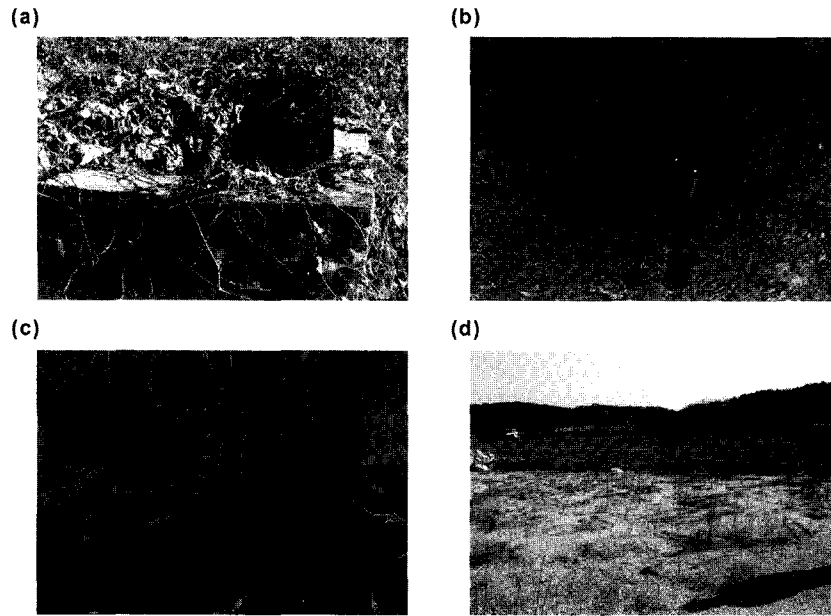


Fig. 2. Photographic views of the study area: (a) mineral-dressing site, (b) drift, (c) AMD leachate, and (d) rock waste and tailing cover.

시켰다(Fig. 2d).

광산 부근의 지질은 시대 미상의 편마암과 후기에 관입한 흑운모화강암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 편마암은 본 광구 남서측 만사리 지구에 광범위하게 분포되며 백색 내지 회백색을 띠고 중립질 내지 조립질이다. 화강암은 매개 부근을 경계로 동측으로 광범위하게 관입 분포되며 우백질화강암의 양상을 보이기도 하나 대부분 흑운모화강암이다(대한광업진흥공사, 1981). 절리의 발달은 일반적으로 미약하나 N30W~N20E의 주향과 40~70E의 경사를 갖는 것이 지배적이다.

광상은 화강암체 내지 편마암 중의 열극을 충진한 함금은석영맥으로 지표와 갱내에서 확인된 맥은 10여 개조 이상으로 주향은 N10~70W, 경사는 35~60NE이며 연장은 300~500 m이다. 맥폭은 각 맥마다 다소의 차이가 있으나 대체적으로 0.2~0.6 m 정도이다. 수반광물은 소량의 황철광과 방연광이며, 유화물이 많으면 품위가 대체적으로 높으나 황철광의 결정이 크면 금 품위가 낮은 것이 특징이다.

3. 자료수집 및 처리

3.1. 탄성파굴절법탐사

연구지역의 기반암의 깊이와 저속도 이상대로 특징되는 지하갱도의 위치를 파악하기 위해 3개 축선

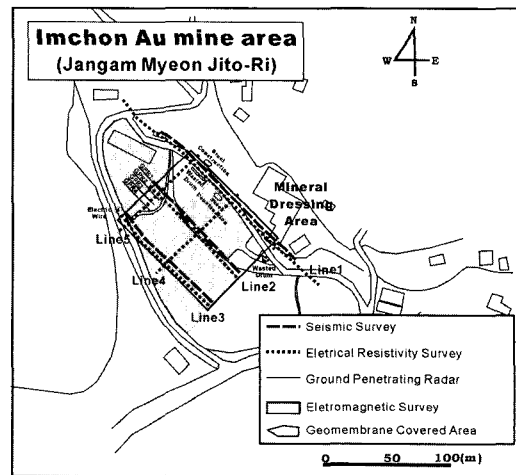


Fig. 3. Geophysical survey lines.

(Line1, Line2, Line3)의 탄성과 굴절법탐사를 실시하였다(Fig. 3).

자료획득에 사용된 장비는 24채널 ABEM Terraloc Mark 6이고 에너지원으로는 4.7 kg의 햄머를 사용하였다. 자료수집에 사용된 수신기의 규격은 100 Hz로서 모두 2 m 간격으로 설치하였다. 자료의 신호대잡음비(S/N)를 높이기 위해 기록당 6회 연속 타격하여 수직 중첩(vertical stack)하였으며, 샘플링 간격은 0.05 ms, 저주파제거필터(low-frequency reject filter)는 10 Hz로

설정하였다. 현장자료의 처리는 굴절법 토모그래피 역산법을 이용하는 CSTOPRA(조창수 외, 2002)를 사용하였다.

3.2. 전기비저항탐사

산성광산배수에 의한 침출수의 발생원이 되는 폐광산의 지하경도와 폐광석 적치장의 안정화 작업의 일환으로 설치한 인공차수막의 차수효과를 탐지하기 위해 전기비저항탐사를 실시하였다(Fig. 3). 우선 폐광산의 지하경도를 탐지하기 위해 선광장 앞에서 1개 측선(Line1)의 전기비저항탐사를 수행하였다. 특히 연구지역은 폐광석이나 인공차수막과 같은 천부 고비저항 불균질대와 지하경도에 의한 지하공동이 분포하고 있어 자료의 신뢰성과 적합한 탐사 배열법을 알아보기 위하여 2차원 전기비저항 탐사에 일반적으로 사용되는 전극배열(쌍극자-쌍극자, 단극자-쌍극자, 단극자-단극자)과 단

극자-단극자 배열의 단점을 보완하기 위해 김정호 등(2001)에 의해 제안된 변형된 단극자-단극자배열에 대한 자료를 중복으로 얻었다. 또한 폐광석 적치장에 설치된 인공차수막의 차수효과를 탐지하기 위해 북동방향(Line4, Line5)과 남동방향(Line2, Line3)의 측선을 추가하였다.

자료수집은 ABEM Terrameter SAS300C 및 Booster를 이용하였고 전류는 S/N을 최대한 높이기 위해 최대 250 mA까지 투입하였다. 측선전개는 전개조건을 고려하여 전극간격 $a=10$ m, 6 m, 5 m, 전극수 21, 측선길이 $d=200$ m, 120 m, 100 m, 전극간 최대 개수 $n=9$ 로 하여 가탐심도가 50 m, 30 m, 25 m가 되도록 하였다. 획득한 자료들은 역산을 위해 해석단면을 많은 셀로 나누어 이들 셀의 전기비저항을 추정 변수로 작성된 자료처리 소프트웨어인 Diprowin(2002)을 사용하였다.

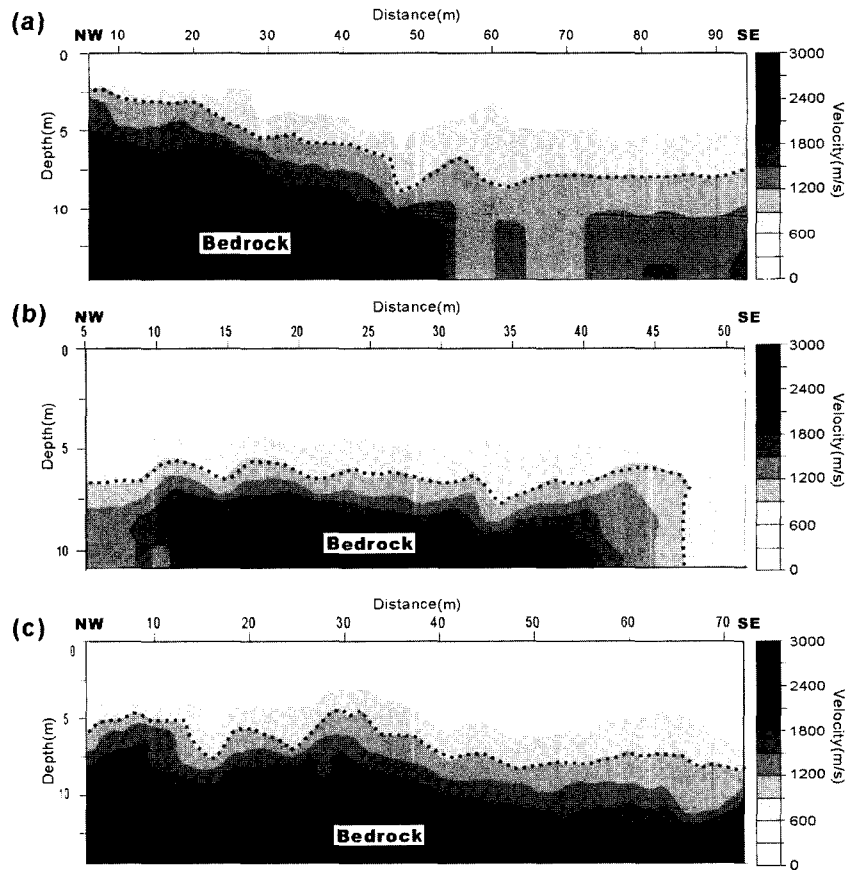


Fig. 4. Seismic refraction results for the lines of (a) Line1, (b) Line2, and (c) Line3. The subsurface structures mainly consist of three velocity layers: lower than 1000 m/s, 1000~2000 m/s, higher than 2000 m/s. The velocity layer higher than 2000m/s is interpreted to be the bedrocks, whereas the low velocity zone at distance of 50~90 m is related to be relatively fractured zones within the bedrock.

3.3. 전자탐사

인공차수막이 설치된 지역의 전기전도도 분포 값을 알아내어 차수효과를 알아보기 위해 전자탐사를 수행하였다(Fig. 3). 자료획득을 위한 탐사장비로는 Geonics 사의 EM 31을 사용하였다. 전기비저항탐사자료와의 상관해석을 위해 전기비저항 축선 Line1을 기준으로 4m 간격으로 서로 평행하게 총 24개 축선을 설계하였고, 각 축선마다 2m 간격으로 측정하였다. 또한 각 측정점에서 송·수신 안테나의 루프가 수직이 되도록하여 자료를 취득하였다. 획득한 자료들은 자료구현 프로그램인 Surfer 7을 사용하였다.

3.4. 지반투과레이다탐사

연구지역의 폐광식 적치장의 광해복구사업의 일환으로 설치된 인공차수막의 설치 깊이를 알아보기 위해 4개 축선의 지반투과레이다탐사를 수행하였다(Fig. 3). 자료획득에 사용된 장비로는 인공차수막의 설치 깊이와 분해능을 고려하여 pulseEKKO 1000 시리즈인 450 Mhz의 송·수신기를 사용하였다. 공간적 알리아싱(spatial aliasing)을 고려하여 안테나 간격은 0.25m, 안테나 이동간격은 0.05m로 하였고 축선길이는 30m로 하였다. 현장에서 취득된 자료들은 S/N을 높이기 위해 자료처리 소프트웨어인 Radpro(2001)를 사용하여 처리하였으며, 인공잡음을 최대한 억제하기 위해 디와우잉(dewowing), 대역통과필터, 이득회수 조절 등의 기본적인 자료처리과정만을 수행하였다.

4. 자료 해석

4.1. 기반암 탐지

연구지역의 기반암의 심도를 파악하기 위해 굴절법탐사자료와 전기비저항자료를 상관분석하고자 하였다. 굴절법자료의 역산결과 모든 축선에서 지층(Fig. 4)은 크게 1000 m/s 이하, 1000~2000 m/s, 2000 m/s 이상의 3개 층으로 구분된다. 2000 m/s 이상의 속도를 가지는 지층은 기반암으로 해석되며, 이는 전기비저항탐사자료의 역산결과(Fig. 5a)에서 나타난 대략 2000 ohm-m의 비저항대와 상관된다. 특히 축선 Line1의 수평거리 50~90m 사이에서는 지하갱도에 의한 지층 이완의 반응 결과로 생각되는 저속도이상대가 나타나는데, 이것은 전기비저항탐사자료(Fig. 5a)의 역산자료와 비교한 결과 저비저항대가 나타나는 것으로 보아 매우 높은 고비저항대로 특징되는 지하갱도에 의한 영향보다는 기반암내에 국부적으로 분포하는 파쇄대에 의한 효과로 해석된다.

4.2. 지하갱도 탐지

침출수의 이동경로가 되는 지하갱도의 위치파악과 연구 지역에 적합한 전기비저항 전극배열법을 알아보기 위해 선광장 앞에서 4개 종류의 전극배열법에 대한 전기비저항탐사를 실시하였다.

전기비저항자료 처리결과(Fig. 5) 모든 전극배열법의 역산자료에서 측정 7~14 사이의 깊이 약 15m 이하에서 수만~수십만 ohm-m의 고비저항대가 나타나는데, 이는 지하갱도에 의한 반응결과로 생각되며, 매우 높은 비저항값을 갖는 것으로 보아 일부는 지하수에 의해 포화되어 있지 않은 공동 상태로 존재하는 것으로 보인다.

각각의 전극배열법을 이용해 얻은 자료에 대한 역산결과를 비교하면 쌍극자-쌍극자 배열법(Fig. 5a)과 단극자-쌍극자 배열(Fig. 5b)의 경우 측정 10~13 사이의 천부에 분포하는 저비저항 이상대에 의해 지하갱도로 추정되는 구간의 지하구조가 왜곡되는 경향이 보이고는 있으나, 기반암의 심도 및 저비저항 이상대는 굴절법탐사자료와 잘 일치하는 것으로 보아 분해능은 비교적 높은 것으로 해석된다. 그러나 단극자-단극자 배열(Fig. 5c), 변형된 단극자-단극자 배열(Fig. 5d)의 경우 천부 저비저항 불균질대에 의한 왜곡현상은 거의 나타나지 않고 있으나 지하구조가 단순화되어 기반암의 심도나 이상대의 분포를 정확하게 파악하기 어렵다. 이는 단극배열의 경우 분해능은 떨어지나 S/N이 높아 천부 저비저항 불균질대에 의한 영향을 적게 받기 때문이다(김정호 등, 2001).

본 연구의 또 다른 목적이 천부 고비저항 불균질대의 역할을 하는 것으로 예상되는 인공차수막의 탐지임을 고려할 때 천부 불균질대의 확인이 용이하고 비교적 분해능이 높은 전기비저항 쌍극자-쌍극자배열법이 가장 적합한 배열로 생각된다.

4.3. 인공차수막 탐지

폐광식 적치장에 설치된 인공차수막의 설치 깊이와 차수효과를 알아보기 위해 지반투과레이다탐사, 전기비저항탐사, 전자탐사자료를 이용하였다.

지반투과레이다탐사 결과(Fig. 6) 모든 축선 전구간의 0.5~0.7m 사이에서 일관되게 레이더파의 반사이벤트가 나타나는데, 이는 지하에 설치된 인공차수막에 의한 결과로 추정된다.

모든 축선에 대한 전기비저항자료의 역산결과(Fig. 7) 깊이 2m 부근에 고비저항이상대가 일관되게 나타나는 것으로 보아 인공차수막에 의한 반응의 결과로 해석된다. 일반적으로 인공차수막의 설치 깊이는 0.5~1m 사

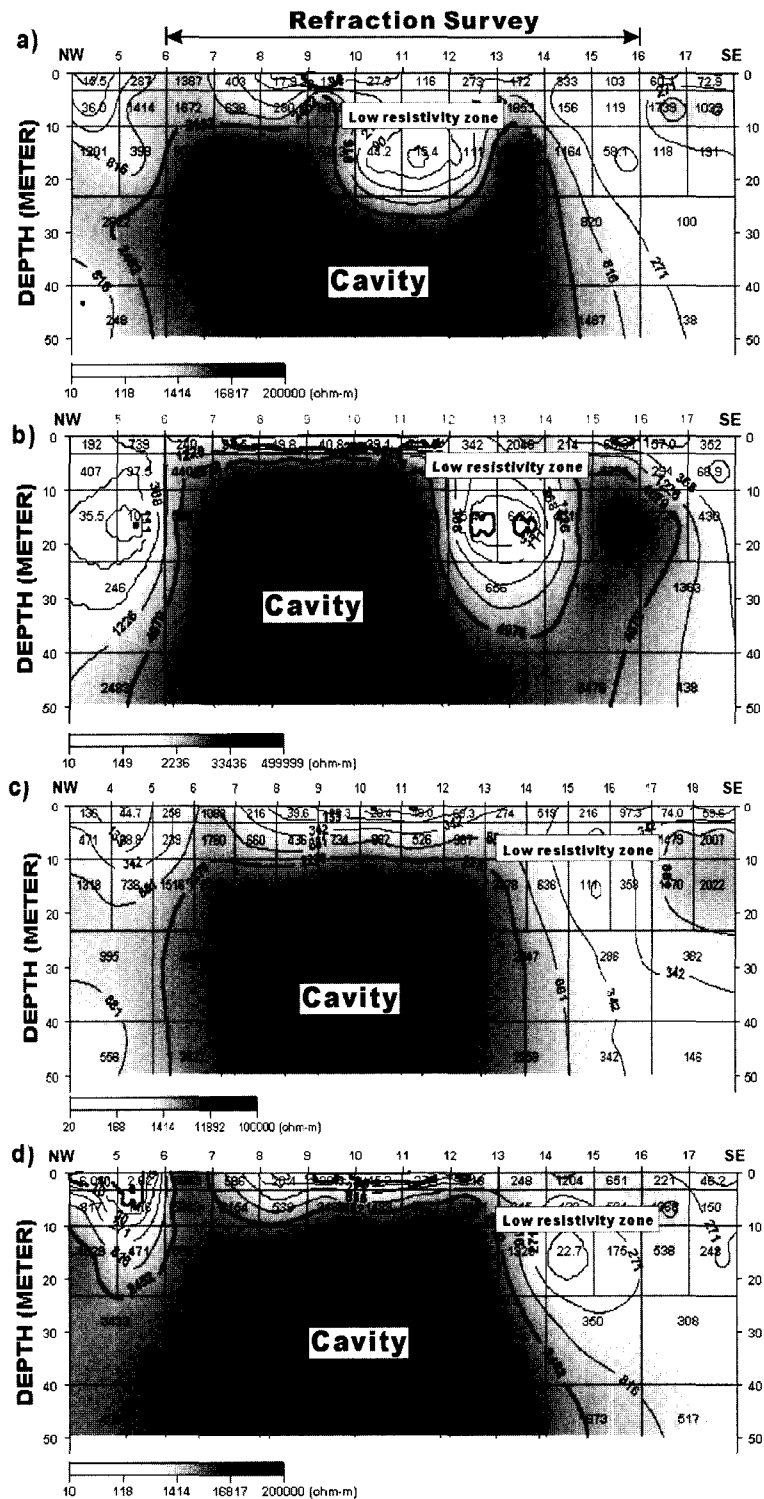


Fig. 5. Electrical resistivity sections for the Line1 with the various arrays employed: (a) dipole-dipole, (b) pole-dipole, (c) pole-pole, and (d) modified pole-pole. Very high resistivities appear below about 15 m (stations 7-14) and they are probably due to the open-cavities gallery.

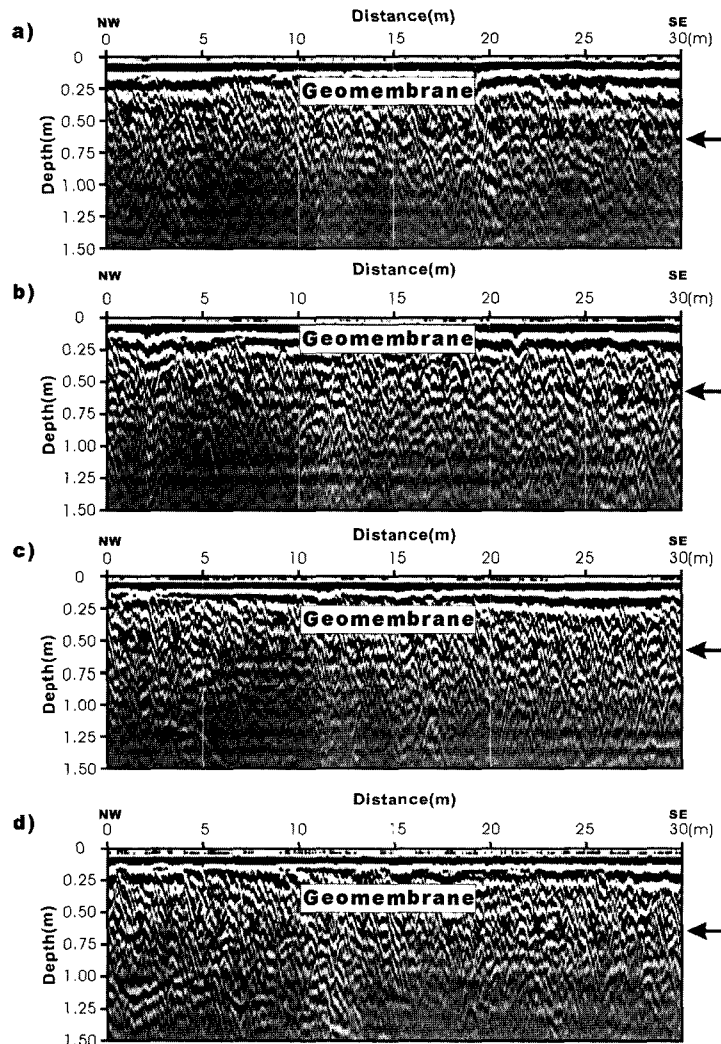


Fig. 6. GPR sections for the lines of (a) GPR1, (b) GPR2, (c) GPR3, and (d) GPR4. Reflection events at 0.5~0.7 m are probably caused by the geomembrane.

이러나 전기비저항탐사의 측정 간격이 5~6m이고 그로 인한 분해능이 5m인 점을 고려하여 깊이 2m 이하의 고비저항대를 인공차수막의 효과로 해석하였다.

Line1과 Line2 측선의 전구간에서 일관적으로 나타나는 고비저항 이상대는 측선 Line3과 Line4의 일부 구간에서 단락되고 있다. 즉 측선 Line3의 측정 7~11 사이, 측선 Line4의 10~14 사이에서 저비저항 이상대를 보이는데 이것은 지표수의 침수 또는 인공차수막의 차수효과가 일부 저하되어 나타난 결과로 해석된다. 특히 측선 Line4와 측선 Line5에서 나타나는 저비저항대는 전자탐사자료(Fig. 8)에서 높은 전기전도도값을 보여주어 서로 동일한 양상을 보이고 있다. 전자탐사결

과에서 국부적으로 나타나는 높은 전기전도도값은 현장조사에서 위치가 확인된 페드럼통, 철재 구조물, 전선에 의한 효과로 보인다(Fig. 3).

5. 결 론

임천광산 지하갱도와 폐광석 적치장의 인공차수막의 차수효과를 탐지하기 위해 다양한 지구물리탐사(전기비저항, 전자탐사, 탄성파굴절법, 지반투과레이더)를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 탄성과 굴절법탐사 역산결과 지층은 1000 m/s 이하, 1000~2000 m/s, 2000 m/s 이상의 3개 층으로 구분

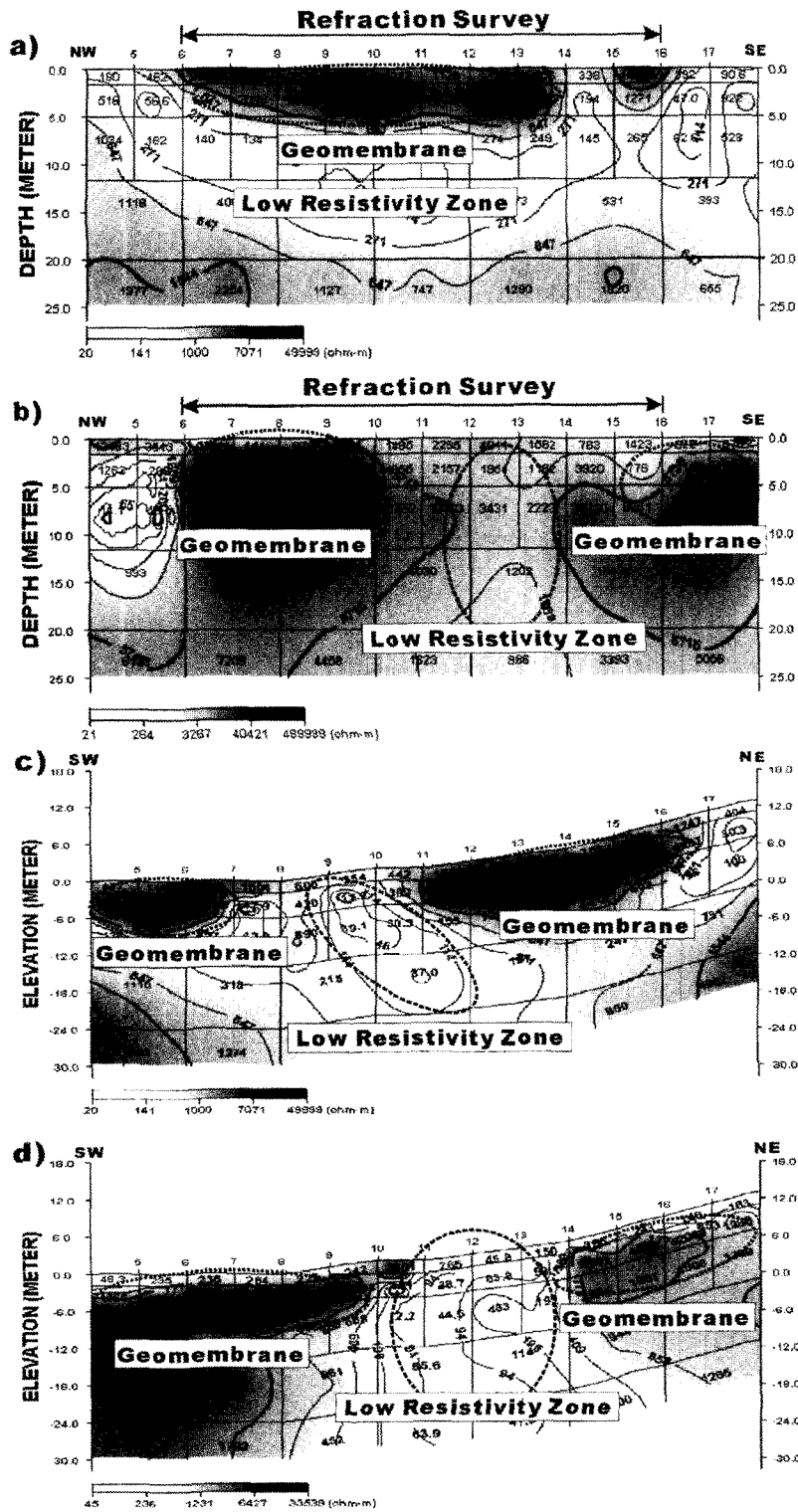


Fig. 7. Dipole-dipole resistivity sections for (a) Line2, (b) Line3, (c) Line4, and (d) Line5. As shown in the sections, high resistivity zones appear to be below approximately 2m. They are probably caused by geomembrane.

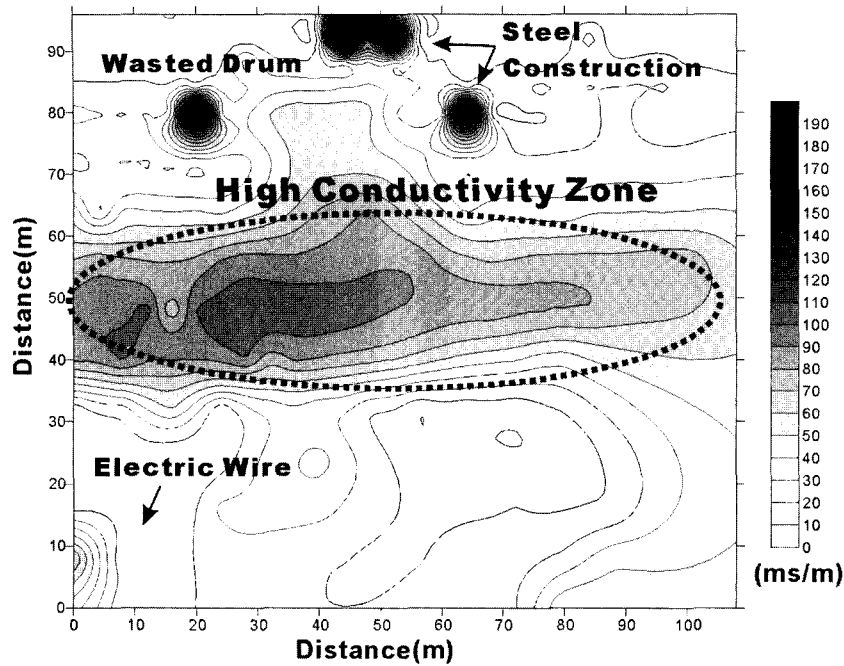


Fig. 8. Electromagnetic survey results. The higher conductivity zone correspond to the lower electrical resistivity zone. The zone is probably associated with the lateral discontinuity at depth of geomembrane.

되며, 2000 m/s 이상의 속도를 가지는 기반암은 7.5~10 m 사이에 분포하는 것으로 나타난다.

2. 침출수의 발생원이 되는 지하갱도는 전기비저항 탐사 결과 수만~수십만 ohm-m의 고비저항값을 갖는 것으로 보아 지하갱도 중의 일부가 지하수로 포화되어 있지 않은 공동상태로 존재하는 것으로 해석된다.

3. 지반투과레이다탐사 결과 인공차수막은 0.5~0.7 m 사이에 설치되어 있는 것으로 나타나 실제 설치 깊이와 잘 일치하였다.

4. 폐광산 적치장에 설치된 인공차수막은 전기비저항 탐사결과 천부 2 m 범위에서 연속적으로 나타나는 고비저항 이상대와 연관된 것으로 해석된다.

5. 인공차수막에 대한 탐사결과 일부 구간은 낮은 전기비저항과 높은 전기전도도로 특징되는데, 이것은 지표수의 침수 또는 인공차수막의 차수효과가 일부 저하된 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국 과학재단 특정기초과제(R01-2001-000-00074-00)에 의한 연구결과이며 재단의 재정적 지원에 감사드립니다. 현장조사에 동행하여 많은 도움을 준 한국지질자원연구원의 이평구 박사께 감사드립니다. 또한

논문심사에서 관련지역에 대한 좋은 정보를 제공해주시고 체계적인 논문이 되도록 자세히 지적해주신 한국 지질자원연구원의 민정식 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

김선태, 윤양희, 박제안, 심의섭, 박경수 (1998) 임천광산 광미와 주변 토양 및 지하 수의 오염조사. 한국토양환경학회, 3권, p. 33-44.
 김정호, 이명중, 송운호, 정승환 (2001) 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극 배열법에 관한 연구. 물리탐사, 4권, p. 59-69.
 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수 (2003) 물리탐사의 활용. 시그마프레스, 서울, 482-485.
 대한광업진흥공사 (1981) 한국의 광상 (금속편). 제8호, p. 3710-371.
 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 (1997) 광산지역 광해조사 및 대책연구. 한국자원 연구소 연구보고서 KR-97(C)-32, 479p.
 민정식, 정영욱, 이현주, 이상권 (1998) 광산지역 광해조사 및 대책연구, 한국자원 연구소 연구보고서 KR-97(C)-48, 256p.
 정영욱, 김옥환, 이현주, 김인기, 민정식 (1999) 탄광폐석으로부터 산성배수 발생 실증 시험. 자원환경지질학회 심포지움, p. 315-317.
 조창수, 이희일, 서정희 (2002) 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분 포해석. 물리탐사, 5권, p. 6-17.
 Choi, S.H., Yun, S.T., and So, C.S. (1996) Fluid inclusion and stable isotopes studies of gold- and silver-bearing vein deposits, South Korea: Geochemical of a Te-

- bearing Au-Ag mineralization of the Imcheon mine. N. Jb. Miner. Abh., v. 1 p. 33-59.
- Diprowin (2002) Electrical resistivity processing software. Heesong Ltd., Korea.
- Frangos, W. (1994) Electrical detection and monitoring of leaks in lined waste disposal ponds. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental problems, SAGEEP '94, Vol. 2, Englefield, USA: EEGS, p. 1073-1082.
- Mazac, O., Benes, L., Nanda, I., and Skuthan, B. (1990) Geoelectrical detection of sealing foil quality in light-ash dumps. In: Ward, S.H. (ed.), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, p. 113-119.
- Radpro (2001) GPR processing software. Heesong Ltd., Korea.
- Reynolds, J.M. (1997) An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley, p. 488-490.
- Skuthan, B., Landa, I., and Mazac, O., 1979, Use of stationary geophysical device for determining the location of water leakage from reservoirs of pumped storage plants: Bull. Internat. Assn. Eng. Geol., v. 20, Krefeld, p. 234-236.

2003년 9월 20일 원고접수, 2003년 11월 13일 게재승인.