

## 마산 용장광산에서 금광에 대한 물리탐사의 적용

박종오<sup>1)</sup>, 송무영<sup>2)</sup>, 박충화<sup>1)</sup>, 유영준<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>대전대학교 지반설계정보공학과, jopark@dju.ac.kr

<sup>2)</sup>충남대학교 지구환경학과

<sup>3)</sup>대한광업진흥공사 국내탐사팀

## Application of geophysical exploration for gold in the YongJang mine, Masan

Jongoh Park<sup>1)</sup>, Mooyoung Song<sup>2)</sup>, Chunghwa Park<sup>1)</sup>, Youngjune You<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

<sup>2)</sup>Dept. of Earth and Environmental Science, Chungnam National University

<sup>3)</sup>Div. geophysical exploration, Korea Resource Corporation

**요약 :** 용장광산은 경상남도 마산시에 위치하며 흑색셰일내에 발달한 열극에 열수가 충전하여 형성된 함금은석영맥으로 구성된다. 이러한 광맥은 평균 맥폭이 9~17cm이며, 평균 품위가 금이 3.6 g/t이며, 은이 113.6 g/t 이하로 나타났다. 본 연구지역에서 전기비저항 탐사는 유화광물을 포함한 광화대의 부존과 지질구조선을 파악하기 위하여 광역적조사와 정밀조사로 구분하여 실시하였다. 탐사방법은 지표에서 쌍극자배열 탐사와 경사시추공에서 시추공-지표, 지표-시추공 및 시추공내 쌍극자배열 탐사를 병행하였다. 경사시추공내의 쌍극자배열 탐사는 하나의 요소안에 여러 전극들이 존재하여 요소분할 방법을 이용하여 결과를 도출하였다. 정밀조사지역에서 용장맥의 연장성은 상부에서 짧지만 심부에 다소 길게 나타났으나 BH(04-04)호공의 측선까지 연장되지 않았다. 즉, 전기비저항 탐사의 3차원적 역산 해석은 광화대 및 구조대의 발달 상황 등이 각 심도에 따른 영상들로 제시되므로 광맥의 주향방향과 연장성이 비교적 정확하게 파악하였다.

**주요어 :** 열수, 함금은석영맥, 광화대, 요소분할, 3차원 역산

**Abstract :** The Yongjang mine is located in Masan City, Gyeongsangnamdo, which consists of a black shale possessing quartzite veins with other compositions such as gold, silver, and sublimated sulfur. The average width of the veins is 9~17cm and the average degrees of the gold and silver are 3.6 g/t and 113.6 g/t respectively. A regional and a detailed scale electrical resistivity surveys are conducted to determine the existence of the mineralization zones and the linear structures in the study area. In addition, surveys of a several different array methods are conducted such as dipole-dipole array in the surface and borehole-to-surface array, surface-to-borehole array, and dipole-dipole array in the borehole. The method of element division can be applied to the region in which the borehole is curved, inclined or the distance

between the electrodes is shorter than that of nodal points, because the coordinate of each electrode cannot be assigned directly to the nodal point if several electrodes are in an element. Yongjang vein is extended longer under the subsurface than on the surface in the images reconstructed from the 3D inversion. Therefore, it is recognized that the 3-D interpretation of the electrical resistivity survey is a very useful method to figure out the existence of strike and extension direction because the mineralization zones and the linear structures are shown in each depth.

**Keywords** : Yongjang mine, sublimated sulfur, mineralization zones, element division, 3D inversion

## 1. 서론

경상남도 마산시에 위치한 용장광산은 진동층의 혼펠스셰일과 흑색셰일내의 열극에 열수가 충전하여 형성된 합금석영맥과 흑색셰일의 지층을 따라 산출되는 세맥으로 구성되어 있다. 합금은석영맥은 은맥, 용장맥 및 안산맥 등으로 구분되며 이러한 광맥은 대체로 9 ~ 17cm의 평균 맥폭과 N60 ~ 70W의 주향을 보인다. 금·은의 품위는 용장맥과 은맥에서 평균적으로 금이 3.6 g/t이며 은이 113.6 g/t으로 나타났으며 안산맥에서 금·은 모두 0.05g/t 이하로 나타났다 (대한광업진흥공사, 2004).

본 연구지역에서 전기비저항 탐사는 광화작용에 의하여 주변 모암의 접촉부에 변질화 작용 및 단층과 절리와 같은 지질구조선에 따라 발달하였기 때문에 주변 모암과 물리적 성질의 대비가 현저할 것으로 3차원 전기비저항 역산방법을 이용하여 유화광물을 포함한 광화대의 부존 가능성 및 지질구조선 등을 정확히 영상화하는데 있다.

광상조사에 대한 전기비저항 탐사의 연구는 맥상 황화광체에 대한 전기 및 전자탐사 (유인걸, 1993), 광상탐사에서 지구물리 역산 방법의 적용 (Oldenburg et al., 1998), 금광상에 대하여 물리탐사 방법을 이용한 결과해석 (Guo et al., 1999), 삼보광산에서 금광화대에 대한 전기탐사 (유영준 등, 2004)와 금광탐사에서 3차원 전기비저항 역산 (박종오 등, 2005) 등이 있다. 역산에서는 라그랑지곱수를 변화하여 최소자승오차가 가장 작은 곱수를 결정하는 방법에 대한 역산 (Constable et al., 1987), 유한요소법을 이용한 전기비저항 역산 (Sasaki, 1994) 및 분산함수를 이용한 3차원 역산 (Yi et al., 2001) 등이 있다.

본 연구지역에서의 탐사는 광역적조사 지역에서 쌍극자배열 탐사를 실시하였으며 정밀조사지역에서 지표에서 쌍극자배열과 경사시추공을 이용하여 단극-쌍극자배열 방법으로 시추공-지표, 지표-시추공 탐사와 경사시추공내에서 쌍극자배열 탐사 방법으로 하였다. 요소 분할은 경사시추공 내에 전극배열이 조밀하여 하나의 요소안에 여러개의 전극이 존재하기 때문에 시추공내에서 절점과 전극의 위치 설정이 불가능하므로 경사시추공이 있는 구간만을 실시하였다.

본 연구지역에서의 3차원 전기비저항 역산은 광화대를 물리적 성질로 입체적으로 영상화 하므로써 합금은석영맥 광상의 구성분포 및 이와 관련된 지질구조를 정확히 파악하는데 있다.

## 2. 지질 및 광상

경상남도 마산시에 위치한 용장광산의 지질은 진동층의 셰일, 사질셰일 및 혼펠스셰일

과 이를 후기에 관입한 화강섬록암과 암맥으로 구성되며 화강섬록암의 접촉부와 암맥의 관입부에 접촉변성작용에 의하여 혼펠스화 되었다. 이러한 지질 특성을 근거하여 광상의 성인은 진동층의 혼펠식세일과 흑색세일내의 열극에 열수가 충전하여 형성된 함금석영맥과 흑색세일의 지층을 따라 산출되는 세맥으로 구성되어진다.

### 3. 물리탐사의 배경 및 개념

물리탐사의 배경은 광화대가 광화작용에 의한 주변 모암의 접촉부에 대한 변질화 및 단층과 절리와 같은 연약대의 지질구조선에 따라 발달하였기 때문에 주변 모암과 물리적 성질의 대비가 현저할 것으로 전기전도도와 관련된 전기비저항 탐사 방법으로 탐지될 것이다.

전기비저항 탐사에서 전기장은 포텐셜에 대한 지배 방정식을 이용하여 지하구조를 3차원 공간인 적절한 간격으로 나눈 요소에 대한 변분 적분형태의 범함수로 유도되는 요소 방정식을 풀이하여 각 절점 값들이 계산되어진다. 각 요소에 대한 포텐셜 변화는 변분 적분의 일차 미분이 최소화 되도록 하는 계수 행렬 방정식의 풀이로 얻어지며, 계수 행렬 방정식은 ICCG 반복법을 이용하여 수렴한계비 이하의 오차 범위에 도달 할 때까지 반복하여 풀이되어 진다.

3차원 전기비저항 탐사에서 시추공이 곡선이거나 경사져 있는 구간과 부분적으로 절점 간격보다 조밀하게 배치된 전극이 있는 구간을 고려하여 볼 때, 우리는 그 구간에 대하여 모형에서 제시된 절점 구성과 전극에 대한 기하학적 좌표의 일치가 매우 어렵기 때문에 요소를 분할하여야 할 것이다. 특히 경사시추공내에서 쌍극자배열 방법은 Fig. 5에서와 같이 전극배열이 조밀하여 하나의 요소안에 여러개의 전극이 존재할 경우 전극배열에 따른 전기비저항 계산이 불가능하므로 요소분할 방법 등을 이용하여 해석 할 수 있다.

### 4. 연구 방법 및 결과

대부분의 물리탐사 역산 문제는 역산과정을 안정화하기 위하여 거칠기 (roughness, 매끄러움 (smoothness)의 역) 항을 도입하여 풀이된다 (Tikhonov and Arsenin, 1977). 또한 역산에서 사용되는 매개변수는 블록과 측정된 걸보기 전기비저항에 대한 상용대수를 취하여 사용된다 (Rijo et al., 1977).

모델변수 벡터  $\Delta m$ 은 목적함수의 최소자승 해로 구해지며 일반적으로 다음과 같이 관측방정식의 형태로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_d \mathbf{J} \\ \sqrt{\lambda} \mathbf{W}_m \mathbf{L} \end{bmatrix} \{\Delta \mathbf{m}\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} \\ -\sqrt{\lambda} \mathbf{W}_m \mathbf{L} \mathbf{m}_0 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

#### 4.1 광역적 조사지역

광역적 조사지역은 지표에서 쌍극자배열 탐사를 북동 방향으로 19 개 측선, 북동방향 측선의 중심부에 수직으로 1 개 측선과 산 능선을 따라 2 개 측선으로 전체 22 개 측선으로 구성되며 전체 2,733 개의 자료를 얻었다 (Fig. 1). 3 차원 역산 모델은  $131 \times 169 \times 35 (=774,865)$  개의 유한요소 절점으로 구성하였다.

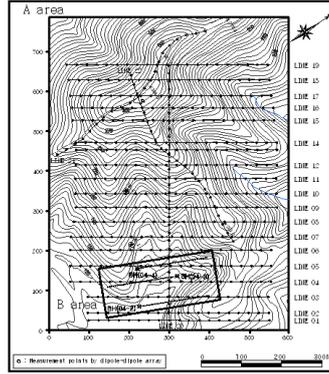


Fig. 1. A map showing the lines of electrical resistivity survey for the dipole-dipole array and the locations of boreholes in the Yongjang mine.

Fig. 2는 광역적 조사지역에서 지형기복을 역산에 포함하여 얻어진 결과에 대한 영상으로서 심도 35m, 60m, 85m 및 120m를 나타낸 평면도이다.

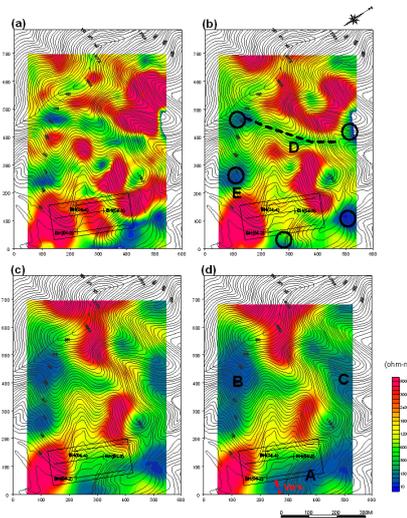


Fig. 2. Images for the resistivity planes reconstructed from the 3D inversion at depths of 35m (a), 60m (b), 85m (c), and 120m (d) in the regional survey area.

#### 4.2 정밀조사지역

정밀 조사지역은 경사시추공을 이용하여 단극-쌍극자배열 방법으로 시추공-지표, 지표-시추공 탐사를 실시하였으며 경사시추공내에서 쌍극자배열 방법으로 탐사를 실시하였다. 경사시추공은 전체 3개가 있으며 각 심도가 200 m로 되어있다.

BH(04-2)호공은 시추공-지표 탐사에서 800개, 지표-시추공 탐사에서 770개 및 공내 쌍극자 배열에서 198개 자료를 측정하였다. BH(04-3)호공은 시추공-지표 탐사에서 1,216개, 지표-시추공 탐사에서 1,225개 및 공내 쌍극자 배열에서 366개 자료를 측정하였다. BH(04-4)호공은 시추공-지표 탐사에서 640개와 공내 쌍극자 배열에서 366개 자료를 측정하였다. 또한 지표에서 쌍극자배열 탐사는 지표에 각 114개 측정 자료를 얻었으며 광역적조사 지역의 측선이 본 조사 지역을 통과하는 03, 04 및 05 측선의 일부 자료를 포함시켰다. 각 탐사방법을 합산하여 얻은 전체 자료는 6,027개이다 (Fig. 3).

요소 분할은 경사시추공 내에 전극배열이 조밀하여 하나의 요소안에 여러개의 전극이 존재하기 때문에 시추공내에서 절점과 전극의 위치 설정이 불가능하므로 경사시추공이 있는 구간만을 분할하였다. 분할 방식은 요소 분할차이에 따른 포텐셜 분포 차이가 없으며

로 x 와 z 방향으로 각 2 등분하였다.

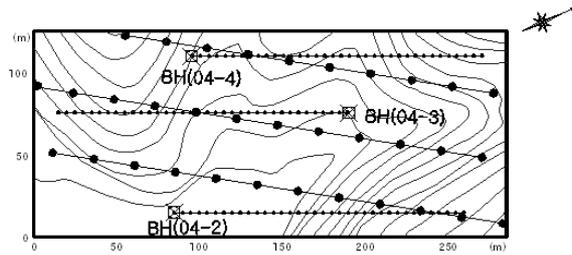


Fig. 3. A map showing the lines of electrical resistivity surveys in the detailed survey area.

Fig. 4는 정밀조사지역에서 지형기복을 역산에 포함하여 얻어진 결과에 대한 영상으로서 심도 35m, 55m, 95m 및 115m를 나타낸 평면도이다.

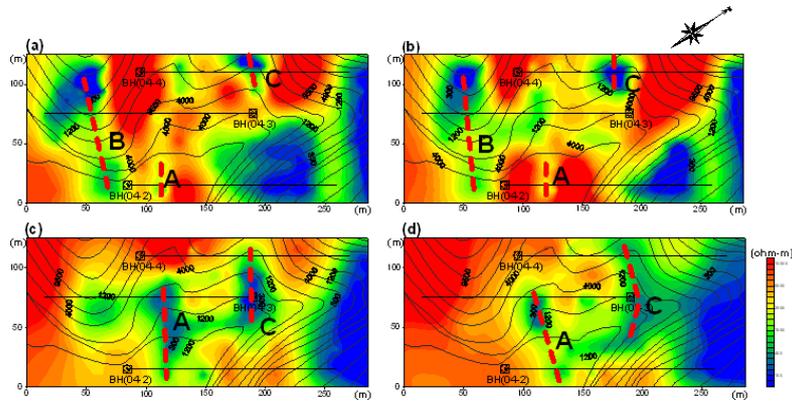


Fig. 4. Images for the resistivity planes reconstructed from the 3D inversion at depths of 35m (a), 55m (b), 95m (c), and 115m (d) in the detailed survey area.

Fig. 5는 경사시추공에서 시추공-지표, 지표-시추공 및 시추공내에 쌍극자배열 탐사와 지표에서 쌍극자배열 탐사를 하여 얻어진 측정자료에 대한 역산 결과이다.

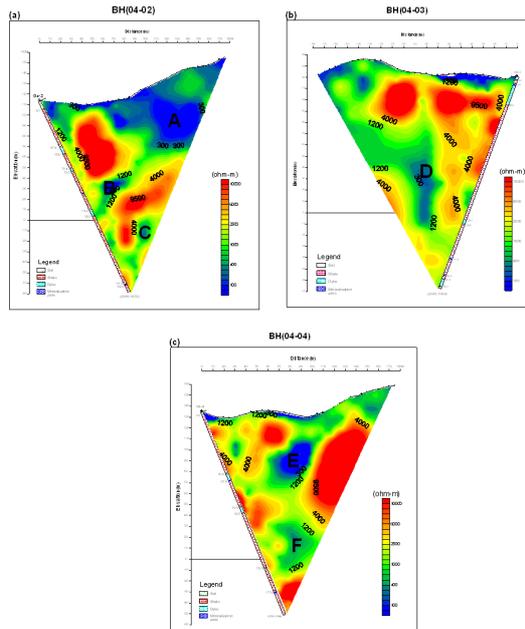


Fig. 5. Comparison between resistivity sections reconstructed from the 3D inversion including topographic effect and logging data for borehole BH(04-02) (a), BH(04-03) (b), and BH(04-04) (c) in the detailed survey area.

## 5. 토의 및 결론

마산시에 위치한 용장광상의 성인은 안산암맥이 진동층을 관입하여 주변부 모암의 접촉부가 혼펠스화작용으로 변질되었으며, 용장맥이 안산암맥을 수차례 관입하여 동일한 주향방향으로 연장되었으며, 소규모 단층에 의하여 여러 지점이 절단된 지역에 형성되었다. 이러한 연구지역에서 전기비저항 탐사는 광화작용 및 지질구조대가 존재하는 지역이 주변 모암과의 물리적 성질의 대비가 현저할 것으로 파악되어 실시하였다.

탐사 해석에서는 경사시추공을 이용한 탐사에서 경사시추공 내에 전극배열이 조밀하여 하나의 요소안에 여러개의 전극이 존재하기 때문에 요소 분할 방법을 경사시추공이 있는 구간만을 실시하였다. 요소분할을 x 방향에서 5등분, z 방향으로 2 등분을 한 경우는 반복법에서 오차한계를 10 %로 할 때 일정한 크기의 요소보다 수렴 횟수가 약 2.5 배 이상 많다.

광역적조사지역에서 낮은 전기비저항을 보이는 지역은 A, B와 C의 3 구역으로 분류할 수 있다. A 구역에 발달된 광맥은 35m와 60m의 영상에서 비교적 좁게 나타나지만 심부에서 그 폭이 넓게 있는 것으로 보인다. 또한 심부에서의 광맥 발달은 거의 N30E로 연장된 것으로 보아 진동층내에 폭넓게 관찰되는 층리의 주향과 동일한 것으로 추정된다. B 구역은 주된 구조선의 주향방향인 N30~50W에 일치하며 그 연장성도 길게 나타났다. 구조선으로 파악되는 영상은 D 점선으로 모암을 잘라놓은 형상이며 그 연장성은 천부에서 뚜렷하게 나타나나 심부로 갈수록 미약하게 보이므로 그다지 깊지 않은 것으로 판단된다. 천부보다 심부에서 낮은 전기비저항이 넓게 분포하는 근거는 암석에 따른 차이는 있겠지만 세일지층의 공극에 있는 수분 함량의 원인과 시추 주상도에서 제시된 광맥들이 비교적 천부보다 심부에 많이 분포하고 있어 파쇄대 및 전도성 유화광물이 많이 있기 때문으로 판단된다.

정밀조사지역에서 용장맥의 연장성은 상부에서 짧지만 심부에서 다소 길게 나타났으며 BH(04-04) 호공의 측선까지 연장되지 않는 것으로 보였다. A 구조선은 전도성을 갖는 유화광물이 많이 포함되지 않으나 95m 깊이에서 다소 높은 함량이 있을 것이다. C 구조선은 심도 95m 깊이에서 일직선으로 BH(04-04) 호공의 측선까지 연장되어 있다. 그러나 35m와 55m 심도에서는 BH(04-04) 호공의 측선에서만 뚜렷하지만 연장성이 없는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 대한광업진흥공사(KORES), 2004, 정밀조사보고서(금속광;마산지구).
- 박종오, 김희준, 송무영, 유영준, 2005, 3차원 전기비저항 역산방법을 이용한 삼보광산에서 금광탐사, 대한지질공학회, 15, 19-27.
- 유영준, 김정호, 유인걸, 2004, 삼보광산 금광화대에 대한 전기탐사 반응, 물리탐사, 7, 217-224.
- 유인걸, 1998, 맥상 황화광체에 대한 전기 및 전자탐사 반응, 물리탐사, 1, 110-115.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion : A practical logarithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, Geophysics, 52, 289-300.
- Guo, W., Dentith, M. C., Xu, J., and Ren, F., 1999, Geophysical exploration for gold in Gansu Province, China, Exploration Geophysics, 30, 76-82.
- Oldenburg, D. W., Li, Y., and Farquharson, C. G., Kowalczyk, P., Aravanis, T.,

- King, A., Zhang, P., and Watts, A., 1998, Applications of geophysical inversions in mineral exploration, *The Leading Edge*, 17, 461–465.
- Rijo, L. R., Pelton, W. H., Feitosa, E. C., and Ward, S., H., 1977, Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande Do Norte, Brazil, *Geophysics*, **42**, 995–1005.
- Sasaki, Y., 1994, 3-D resistivity inversion using the finite-element method, *Geophysics*, **59**, 1839–1848.
- Tikhonov, A. N. and Arsenin, V. Y., 1977, *Solutions to Ill-Posed Problems*, John Wiley and Sons Inc.
- Yi, M. J., Kim, J. H., Song, Y. H., Cho, S. J., Chung, S. H., and Suh, J. H., 2001, Three-dimensional imaging of subsurface structure using resistivity data, *Geophysical Prospecting*, 49, 483–497.