

국내 금속광 탐사를 위한 쌍극자-쌍극자 전기탐사의 적용성 연구

민동주¹ · 정현기^{2*} · 박삼규² · 전효택¹ · 곽나은³

¹서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

²한국지질자원연구원 지반안전연구부 지반탐사연구실

³서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

A Study of Feasibility of Dipole-dipole Electric Method to Metallic Ore-deposit Exploration in Korea

Dong-Joo Min¹, Hyun-Key Jung^{2*}, Samgyu Park², Hyo-Taek Chon¹ and Naeun Kwak³

¹Dept. of Energy System Engineering, Seoul National University

²Geotechnical Engineering Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

³Dept. of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, Seoul National University

요 약: 금속광산탐사에서 많이 이용되는 물리탐사 방법 중의 하나인 쌍극자-쌍극자 배열 전기비저항탐사의 실제 광산탐사에 대한 적용성을 평가하기 위하여 단순화된 광상구조에 대하여 현장자료 시뮬레이션 및 역산해석을 수행하였다. 실제 광상모형으로는 국내 여러 금속광상 중에서 가장 분포 빈도가 높은 맥상광상을 대상으로 하였다. 국내 맥상광상의 맥폭이 대부분 수십 cm에서 2 m 이내라는 점에 기초하여 맥폭을 변화시키고, 광맥의 물성을 변화시켰으며, 쌍극자-쌍극자 배열 전기비저항탐사의 전극간격은 40 m로 가정하였다. 맥폭이 1 m 이하일 경우 주변암과 광맥의 전기적 물성차가 300배 이상 되는 경우에도 저비저항대가 나타나지 않았다. 맥폭이 커질수록 그리고 비저항의 차가 클수록 저비저항대가 뚜렷하게 나타났으나, 넓은 전극간격과 역산에 이용된 셀 크기가 심부로 갈수록 커져서 대체로 저 비저항대의 폭이 과장되게 나타났고, 깊이 또한 실제 깊이보다 깊게 나타났다. 실제 천열수광상 모형을 가정하고 현재 가행 중인 광산에서 측정된 전기비저항을 근거로 하여 현장자료 시뮬레이션 및 역산을 수행한 결과 광맥의 전기비저항 값이 높은 경우에도 광맥에 의한 영향이 잘 나타나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 구조지질학적으로 광맥에 수반되는 열수변질대가 전기비저항탐사 자료에서 이상대로 포착되므로 천열수 광산의 경우 이러한 주변 열수변질대를 탐사대상으로 선정하는 것이 바람직하다. 이상의 결과들을 종합해 볼 때 광맥이 지하 깊은 곳에 존재하며 광맥과 주변암과의 전기적 물성차가 크지 않은 경우, 일반적으로 수행되는 지표면 전기비저항탐사로는 광맥의 존재여부조차 파악할 수 없는 경우가 있으며, 저비저항대가 나타난다 하더라도 실제 구조와 다른 과장된 양상으로 나타난다는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 제시한 모델링 및 역산자료는 기본적으로 단순한 모형실험이지만 일선 현장 자료를 바탕으로 수행한 실험연구로서 향후 보다 다양한 모형에 대하여 모델링을 수행하고 표준 및 정량적 지침을 제시해 나간다면 현장 측선 설계나 탐사결과의 해석시에 유용한 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

주요어: 금속광, 쌍극자-쌍극자 전기탐사, 순신금광, 수치모델링과 역산

Abstract: In order to assess the feasibility of the dipole-dipole electric method to the investigation of metallic ore deposit, both field data simulation and inversion are carried out for several simplified ore deposit models. Our interest is in a vein-type model, because most of the ore deposits (more than 70%) exist in a vein type in Korea. Based on the fact that the width of the vein-type ore deposits ranges from tens of centimeters to 2 m, we change the width and the material property of the vein, and we use 40 m-electrode spacing for our test. For the vein-type model with too small width, the low resistivity zone is not detected, even though the resistivity of the vein amounts to 1/300 of that of the surrounding rock. Considering a wide electrode interval and cell size used in the inversion, it is natural that the size of the low resistivity zone is overestimated. We also perform field data simulation and inversion for a vein-type model with surrounding hydrothermal alteration zones, which is a typical structure in an epithermal ore deposits. In the model, the material properties are assumed on the basis of resistivity values directly observed in a mine originated from an epithermal ore deposits. From this simulation, we can also note that the high resistivity value of the vein does not affect the results when the width of the vein is narrow. This indicates that our main target should be surrounding hydrothermal alteration

zones rather than veins in field survey. From these results, we can summarize that when the vein is placed at the deep part and the difference of resistivity values between the vein and the surrounding rock is not large

2008년 8월 18일 접수; 2008년 8월 22일 채택

*Corresponding author

E-mail: hkjung@kigam.re.kr

Address: 92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

enough, we cannot detect low resistivity zone and interpret the subsurface structures incorrectly using the electric method performed at the surface. Although this work is a little simple, it can be used as references for field survey design and field data interpretation. If we perform field data simulation and inversion for a number of models and provide some references, they will be helpful in real field survey and interpretation.

Keywords: metallic ore deposit, dipole-dipole electric method, Sunshin gold mine, numerical modeling and inversion

서 론

고유가 시대가 계속되면서 최근 들어 광산개발에 다시 관심을 갖게 되어 광산탐사에 대한 조사 연구가 늘고 있다. 광산은 크게 금, 은, 철, 아연 등의 금속광산과 석회석광산 등과 같은 비금속광산으로 나뉘질 수 있다. 금은 광산의 경우 주로 화강암의 관입에 의해 단층면을 따라 발달한 경우가 많으므로 대체로 맥상(vein type)으로 분포하며 우리나라 광산의 약 70% 정도가 이에 속한다. 철광이나 아연광은 주로 스카른(skarn)광산으로 괴상(massive type)으로 존재하며, 우리나라 광산의 약 20%를 차지한다. 나머지 10%는 광염상(dissemination type)으로 존재한다.

금속광산의 조사에서는 지질조사, 지화학조사, 시추조사와 함께 물리탐사방법이 이용된다. 물리탐사방법을 이용할 경우 직접 시추하는 방법에 비하여 적은 비용으로 광범위한 지역의 지하 심부에 대한 지질구조 및 물성을 유추할 수 있으므로 광산탐사를 비롯한 자원탐사 및 지질구조 조사에서 활발히 이용된다. 금속광산탐사의 경우 금속의 전기전도도가 높다는 성질에 근거하여 물리탐사 중에서도 지하매질의 전기비저항 분포로부터 지하구조에 대한 정보를 제공하는 전기탐사나 전자탐사와 같은 방법들이 많이 이용되어 왔다. 현장에서 수행된 물리탐사 자료해석의 문제점 중의 하나는 현장자료에 영향을 미치는 요인이 다양하여 같은 결과에 대하여 여러 가지 해석이 가능하다는 점이다. 또 다른 문제점으로는 탐사시 이용되는 측정간격과 같은 변수에 따라 수평방향 및 수직방향 해상도가 결정되므로 현장탐사 측선설계를 잘못할 경우 실제 존재하는 이상체를 찾지 못하는 경우가 발생할 수 있다는 것이다. 특히 국내에 존재하는 금은 광산과 같이 광맥의 폭이 수십 cm에서 2 m 이내로 매우 좁은 경우 측정간격 등과 같은 현장조사 조건에 민감할 수 있다. 보통 광상탐사에서는 노두에서 광맥이 발견되는 지역이나 광상이 분포할 것으로 기대되는 지역에 대하여 물리탐사를 수행한다. 광상의 지하 분포양상을 파악하기 위하여 넓은 지역에 대하여 지표 물리탐사를 수행한다. 그러나 지표탐사에서는 측정간의 간격이 넓어 금은광과 같이 단층대를 따라 존재하여 그 맥폭이 좁은 경우 부광체라고 하더라도 지표물리탐사를 통하여 그 분포양상을 밝혀내지 못할 수도 있다. 또한 과거의 활발한 광산개발로 지표 근처에 존재하는 광상에 대해서는 대부분 개발이 끝난 상태여서 앞으로 수행될 광산탐사의 대상은 지하 깊은 곳에 존재하는 광상이며, 이러한 경우 지표물리탐사로 광상의 존재를 파악하기는 더욱 어려울

수 있다.

이에 본 연구에서는 금속광산 탐사에 가장 활발히 이용되고 있는 방법중의 하나인 쌍극자-쌍극자 배열 전기비저항탐사의 국내 광산탐사에 대한 적용가능성을 연구하고 탐사 기준을 제시해 나가고자 한다. 이를 위하여 국내 광산 성인 특성에 근거한 지질구조 모형을 만들어 수치모델링을 하고, 이를 실제 현장자료로 가정하여 역산해석을 수행한다. 역산해석을 통하여 얻은 결과와 실제 모형을 비교함으로써 전기탐사 자료해석의 한계점을 파악하고 탐사기준을 제시한다. 본 연구는 해석 알고리즘을 개발하기 위한 연구가 아니며 국내 현장에서 활용할 수 있는 탐사 및 해석 지침을 제시하기 위한 연구이므로 기존에 개발된 상용화된 프로그램을 여러 가지 모형에 대하여 비교 검증한 후 본격적인 시뮬레이션 및 역산에 이용하였다. 본 연구에서 이용된 모델링 및 역산 소프트웨어는 한국지질자원 연구원에서 개발한 소프트웨어인 EM2DModel 모델링 프로그램과 DIPROFWin 역산 프로그램이다. 본 연구는 크게 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 금속광산을 중심으로 국내광산의 특징을 간단히 설명하고, 국내 광산탐사에 물리탐사를 적용한 몇 가지 연구를 소개한다. 그리고 대표적인 맥상광상 모형을 가정하고 맥폭 및 전기비저항 값을 변화시켜가며 모델링 및 역산 수행 결과를 제시한다. 이를 통하여 현장 탐사의 한계를 파악함으로써 향후 현장 탐사 설계시 유용한 지침으로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 획득된 자료의 역산 해석시 오류를 최소화 하는데 실제적으로 기여할 수 있을 것이다.

국내 금속광산의 특징

한반도에서의 광화작용을 살펴보면 전 지질시대에 걸쳐서 화성광상, 퇴적광상 및 변성광상 등이 다양하게 부존 발달하고 있다. 금속광산을 시대별로 나누면 선캄브라이기에 형성된 마그마 분화광상(양양 철광상 등)이 있으며, 포천 스카른형 철광상, 열수맥광상(각희 함석석 페그마타이트 광상, 금정 알라스카이트금광상) 등이 있다. 중생대의 경우, 페그마타이트 광상(김화-철원 함우라늪 페그마타이트광상), 열수광상(중원, 천안, 여주지역 금은광상 등), 스카른형광상(상동 중석광상, 연화 연-아연광상), 열수교대광상(장군 연-아연-망간 광상, 형석광상), 영양 현무암내 행인상 자연동광상 등이 있다. 신생대에 형성된 광상으로는 스카른형 다중금속광상(원동 연-아연-구리-철 광상, 울산 Fe-W광상)과 반암형동광상(동점, 금령광상) 등이 있다(김선억과 황덕환, 1986; 김우준, 1971; 박희인 등, 1988; 대한

광업진흥공사, 2007; 이현구 등, 2007). 금속광상을 분포양상에 따라 살펴보면, 가장 많이 존재하는 형태가 맥상광상이며, 금은광상이 이에 속한다. 금은광상은 화성광상에 속하며, 화성암이 단층을 따라 관입하면서 주로 형성된다. 따라서 대부분 맥폭이 수십 cm에서 2 m 이내에 달한다. 우리나라 광상의 70%가 이러한 맥상광상에 속하며, 나머지 20%가 스카른 광상으로 피상으로 분포한다. 나머지 10%는 광염상으로 존재한다.

국내 금속광상 물리탐사 현황

국내 금속광상 물리탐사는 1990년대 이후 국제적 광물가격의 안정적 하락 및 국내 일선에서의 고된 현장작업 기피현상으로 인해 소강상태로 접어들어 산발적 소수탐사사례만이 보고되어 왔다. 국내 금속광상 물리탐사의 대표적인 예로는 1997년 경남 밀양지역의 금속광상을 찾기 위해 전기비저항탐사(direct current resistivity survey: DC), 전자탐사(electromagnetic survey: TEM and VLF), 유도분극탐사(induced polarization survey: IP)가 수행된 예가 있다(이상규 등, 1997). 이 지역은 스카른 고대광상의 부존가능성이 제기된 지역으로서 2차 례에 걸쳐 물리탐사를 수행하여 스카른 고대광상의 부존 가능성을 확인하였다. 유영준 등(2004)과 박종오 등(2005)은 삼보광산 금광화대에 대하여 전기비저항탐사 자료를 해석하여 전도성 광화대의 부존가능성을 확인하였다. 삼보광산의 경우 함금은석영맥인 지하맥이 노두 및 갱도에서 확인되었는데 맥폭이 2~3 m에 이른다. 전기비저항탐사에는 전극배열에 따라 웨너배열, 슬립버저 배열, 쌍극자-쌍극자 배열 등 다양한 방법이 있으나, 이 중에서 쌍극자-쌍극자 배열이 수평 및 수직탐사를 동시에 수행하므로 2차원 탐사가 가능하여 가장 많이 이용된다. 위에서 언급한 연구들에서도 모두 쌍극자-쌍극자 배열 탐사가 이용되었으며, 40 m의 전극 간격이 이용되었다. 전극 간격에 따라 가탐심도가 결정되므로 보다 깊은 곳에 대한 정보를 얻기 위하여 넓은 전극간격을 이용한 것으로 보인다.

앞에서도 언급하였듯이 국내 광산의 70% 정도가 맥상으로 존재하는데, 맥상광상의 맥폭은 대체로 2 m 이내에 달한다. 이러한 경우 현행과 같이 수행되는 지표탐사로는 맥상으로 분포하는 광상을 찾기가 어려울 수 있다. 따라서, 현재와 같은 물리탐사 기법으로 광상탐사가 가능한가를 검토해 볼 필요가 있다.

단순화된 맥상광상 모형에 대한 전기비저항탐사 자료해석

단순화된 광상모형에 대하여 광상탐사에서 많이 이용되고 있는 쌍극자-쌍극자 배열전기비저항탐사를 가정하고 현장자료 시뮬레이션 및 역산해석을 수행한다. 현장자료 시뮬레이션과 역산을 위하여 한국지질자원연구원서 개발한 소프트웨어인 EM2DModel 모델링과 DIPROFWin 역산프로그램을 이용한다.

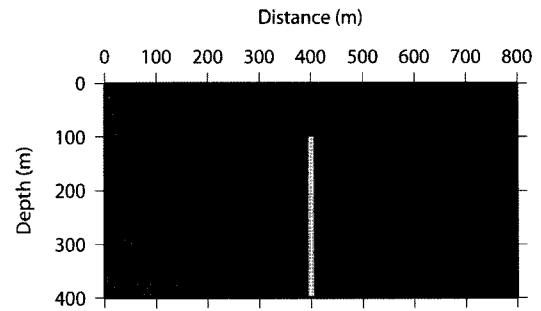


Fig. 1. A buried vein-type model. The resistivity of the surrounding rocks is either 100 Ωm or 300 Ωm , and the resistivity of the vein can be either 1, 3, 10 or 30 Ωm .

모델링을 수행할 때 해석해에 가까운 모델링 결과를 얻기 위하여 전극 간격 사이에 4개 이상의 셀이 놓이도록 모형을 설정하였다(김정호, 1987). 역산은 유한요소법(finite-element method: FEM)에 기초하여 수행하였으며, 2차 평활화 제안자(smoothness constraint)를 이용하고, 라그랑지 승수(Lagrangian multiplier)의 결정시 일정한 값을 이용하는 것이 아니라 감도 분석(sensitivity analysis)으로부터 그 값을 결정하는 Active constraint balancing법을 이용하였다(Yi *et al.*, 2003). 역산과정을 10회 정도 반복하여 최종역산결과를 얻었다.

국내 금은광상을 대상으로 맥상광상모형을 설계하였다. 금은광상의 구조는 성인에 따라 다양하겠지만 광맥이 존재하는 전체 맥폭은 대체로 1~2 m 이내이다. 실제 광맥은 여러 겹이 평행하게 발달하나 우선 단일광맥에 대한 기본적 고찰이 우선되어야 한다고 판단되어 단일 광맥을 모형으로 하였다. 단순화된 모형으로 전기비저항이 100 Ωm 와 300 Ωm 인 암석의 지하 100 m 깊이에 광맥이 존재한다고 가정하고 지표에서 수행되는 탐사로 맥의 존재여부를 판단할 수 있는가를 살펴보았다. 맥폭을 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m로 변화시키고 광맥의 물성을 1 Ωm , 3 Ωm , 10 Ωm , 20 Ωm 로 변화시켜 맥상광상 모형을 가정하였다. 쌍극자-쌍극자 배열 전기비저항탐사의 경우 전류송신원 당 전위전극 측정 수를 10으로 할 경우 가탐심도가 전극간격의 5배 정도 된다. 따라서 심도 100 m 이상의 깊이에 대한 자료를 얻기 위해서는 전극간격을 20 m 이상으로 설정해야 하며, 이 연구에서는 보통의 지표탐사에서처럼 전극간격을 40 m로 가정하여 가탐심도를 약 200 m 정도로 하였다. 보통 현장에서 획득되는 자료의 경우 잡음이 포함되어 있으나 이 연구에서는 잡음에 의한 영향은 고려하지 않았다.

Fig. 1은 광맥이 지하 100 m 깊이에 존재하는 단순화된 맥상광상모형을 보여주고 있다. 모형의 총 크기는 800 m \times 400 m이며, 모형의 가운데에 수직광맥이 분포하고 있다. Figs. 2와 3은 주변암의 전기비저항이 300 Ωm 이고 광맥의 전기비저항이 10 Ωm 일 때 광맥의 폭이 각각 1 m와 20 m인 경우의 수치모델링 결과 및 역산결과를 보여준다. 그림에서 보면 현장자료로 가정된 겉보기 비저항 단면도와 최종적인 역산모형에 대하여

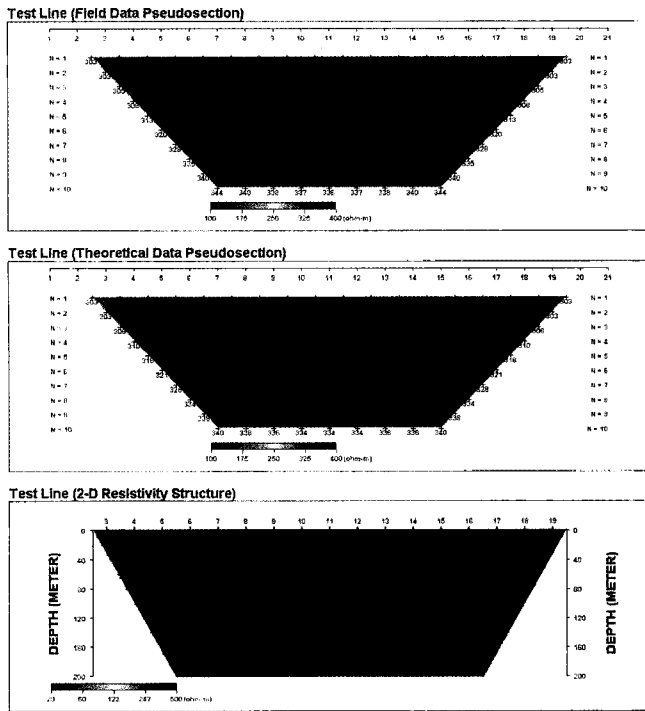


Fig. 2. Forward modeling (upper), theoretically calculated data (middle) based on the inversion model (bottom) for a 1 m wide vein-type model when the electrode spacing is 40 m. Resistivity values of the vein and the surrounding rocks are 10 and 300 Ωm , respectively.

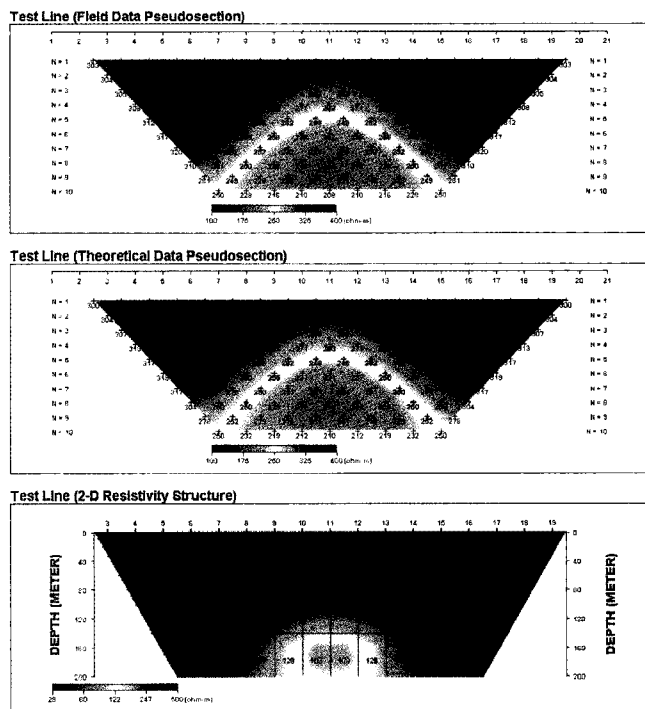


Fig. 3. Forward modeling (upper), theoretically calculated data (middle) based on the inversion model (bottom) for a 20 m wide vein-type model when the electrode spacing is 40 m. Resistivity values of the vein and the surrounding rocks are 10 and 300 Ωm , respectively.

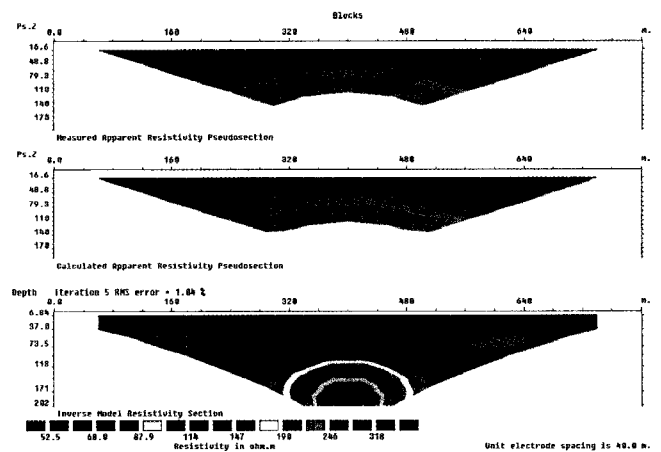


Fig. 4. Forward modeling (upper), theoretically calculated data (middle) based on the inversion model (bottom) obtained by other commercial software RES2DMOD and RES2DINV for a 20 m wide vein-type model when the electrode spacing is 40 m. Resistivity values of the vein and the surrounding rocks are 10 and 300 Ωm , respectively.

구한 겉보기 비저항 단면도가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 보면 광맥의 폭이 1 m인 경우 광맥의 저비저항에 의한 효과가 거의 나타나지 않고 있으며, Fig. 3의 광맥의 폭이 20 m인 경우 광맥의 저비저항대가 잘 나타나고 있으나 실제 모델과는 다르게 광맥의 폭이 퍼져서 나타나며, 깊이 또한 실제보다 깊게 나타남을 알 수 있다. 모델링 및 역산결과를 검증하기 위하여 몇 개의 모형에 대하여 다른 상용화 모델링 및 역산 소프트웨어인 RES2DMOD과 RES2DINV(www.geolectrical.com)를 이용하여 구한 결과와 비교해 보았다. 모든 경우에 서로 비슷한 결과를 보여줌을 확인할 수 있었으며, 그 중에서 Fig. 3에서와 같은 20 m 폭의 모형에 대한 모델링 및 역산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 RES2DMOD와 RES2DINV로 구한 모델링 및 역산결과와 Fig. 3의 결과를 비교해 보면 두 경우 모두 유사한 양상의 해를 제공함을 알 수 있다.

광맥의 폭이 일정할 때 광맥의 전기비저항에 따라 저비저항대가 어떻게 나타나는가를 살펴보기 위하여 광맥의 폭이 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m인 경우 전기비저항값을 변화시켜서 얻은 역산결과를 Figs. 5~9에 나타내었다. Fig. 5에서 보면 광맥의 폭이 1 m인 경우 광맥의 전기비저항과 주변암의 전기비저항이 각각 1 Ωm 와 300 Ωm 로 300배 차이 나는 경우에도 광맥에 의한 저비저항대가 전혀 나타나지 않고 있다. Fig. 6의 광맥의 폭이 2 m인 경우 전기비저항의 차가 300배 되는 경우 저비저항대가 잘 나타나고 있으며, 전기비저항의 차가 100배 정도 되는 경우 희미하게 저비저항대가 나타나고 있다. Figs. 7과 8에서 광맥의 폭이 5 m, 10 m로 넓어질수록 전기비저항차가 적어지는 경우에도 저비저항대가 나타나고 있다. 폭이 5 m와 10 m일 때는 전기비저항이 30배 이상 차이가 나야 저비저항대가 나타나기 시작하며, Fig. 9에서 보는 바와 같이 광맥

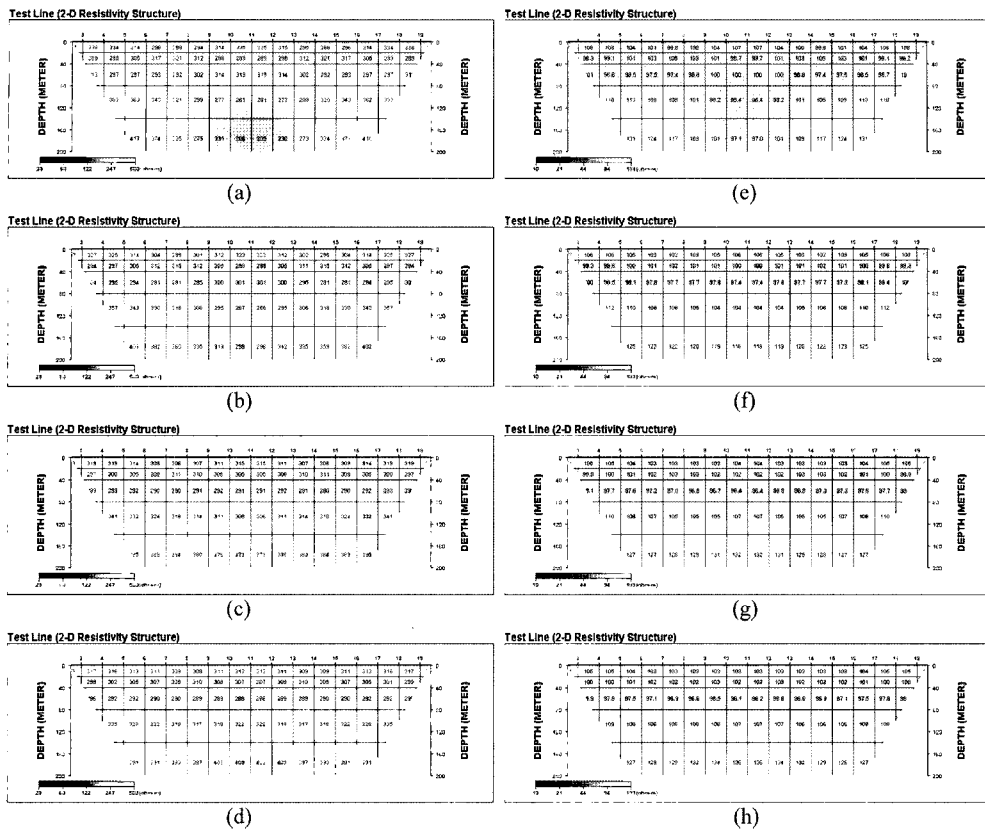


Fig. 5. Inverted models for the 1 m wide vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to d) and 100 Ωm (e to h). The resistivity value of the vein is 1 Ωm (a and e), 3 Ωm (b and f), 10 Ωm (c and g), and 30 Ωm (d and h). The electrode spacing is 40 m.

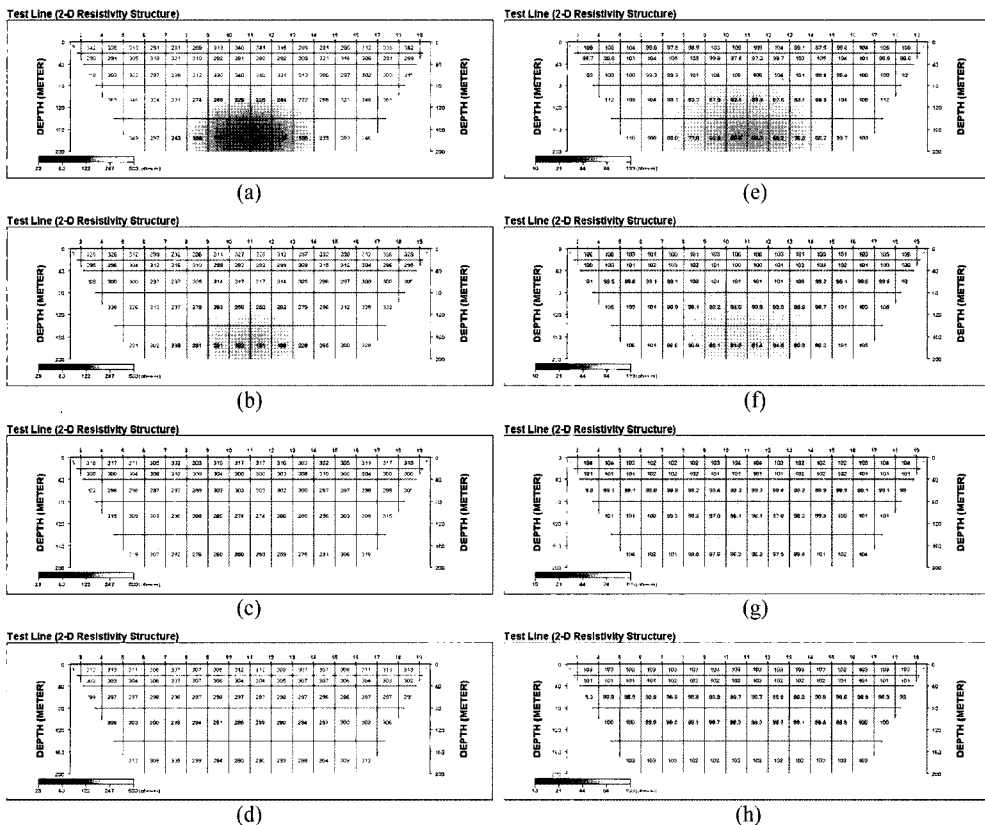


Fig. 6. Inverted models for the 2 m wide vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to d) and 100 Ωm (e to h). The resistivity value of the vein is 1 Ωm (a and e), 3 Ωm (b and f), 10 Ωm (c and g), and 30 Ωm (d and h). The electrode spacing is 40 m.

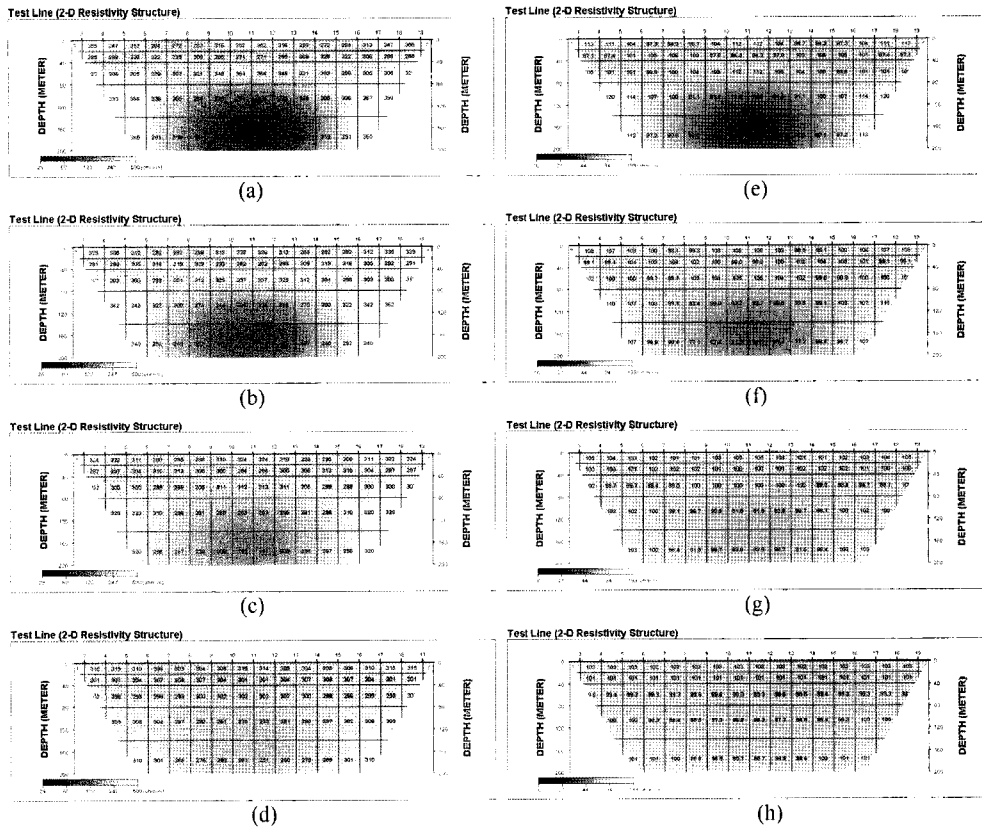


Fig. 7. Inverted models for the 5 m wide vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are $300 \Omega\text{m}$ (a to d) and $100 \Omega\text{m}$ (e to h). The resistivity value of the vein is $1 \Omega\text{m}$ (a and e), $3 \Omega\text{m}$ (b and f), $10 \Omega\text{m}$ (c and g), and $30 \Omega\text{m}$ (d and h). The electrode spacing is 40 m.

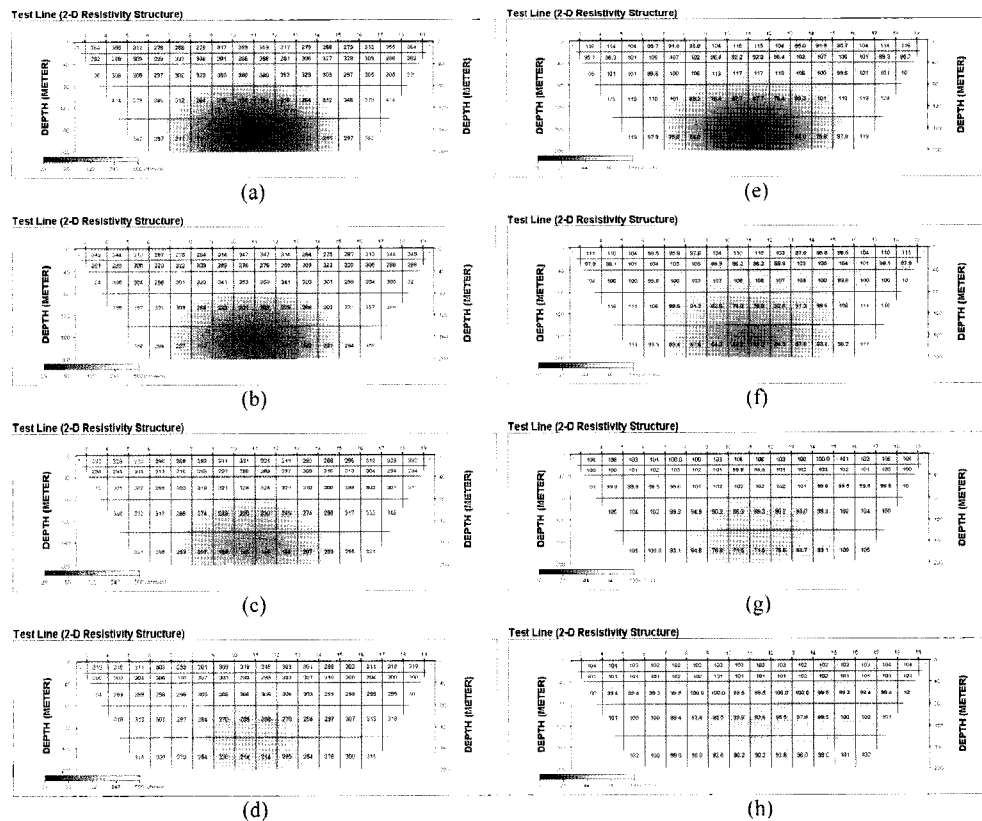


Fig. 8. Inverted models for the 10 m wide vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are $300 \Omega\text{m}$ (a to d) and $100 \Omega\text{m}$ (e to h). The resistivity value of the vein is $1 \Omega\text{m}$ (a and e), $3 \Omega\text{m}$ (b and f), $10 \Omega\text{m}$ (c and g), and $30 \Omega\text{m}$ (d and h). The electrode spacing is 40 m.

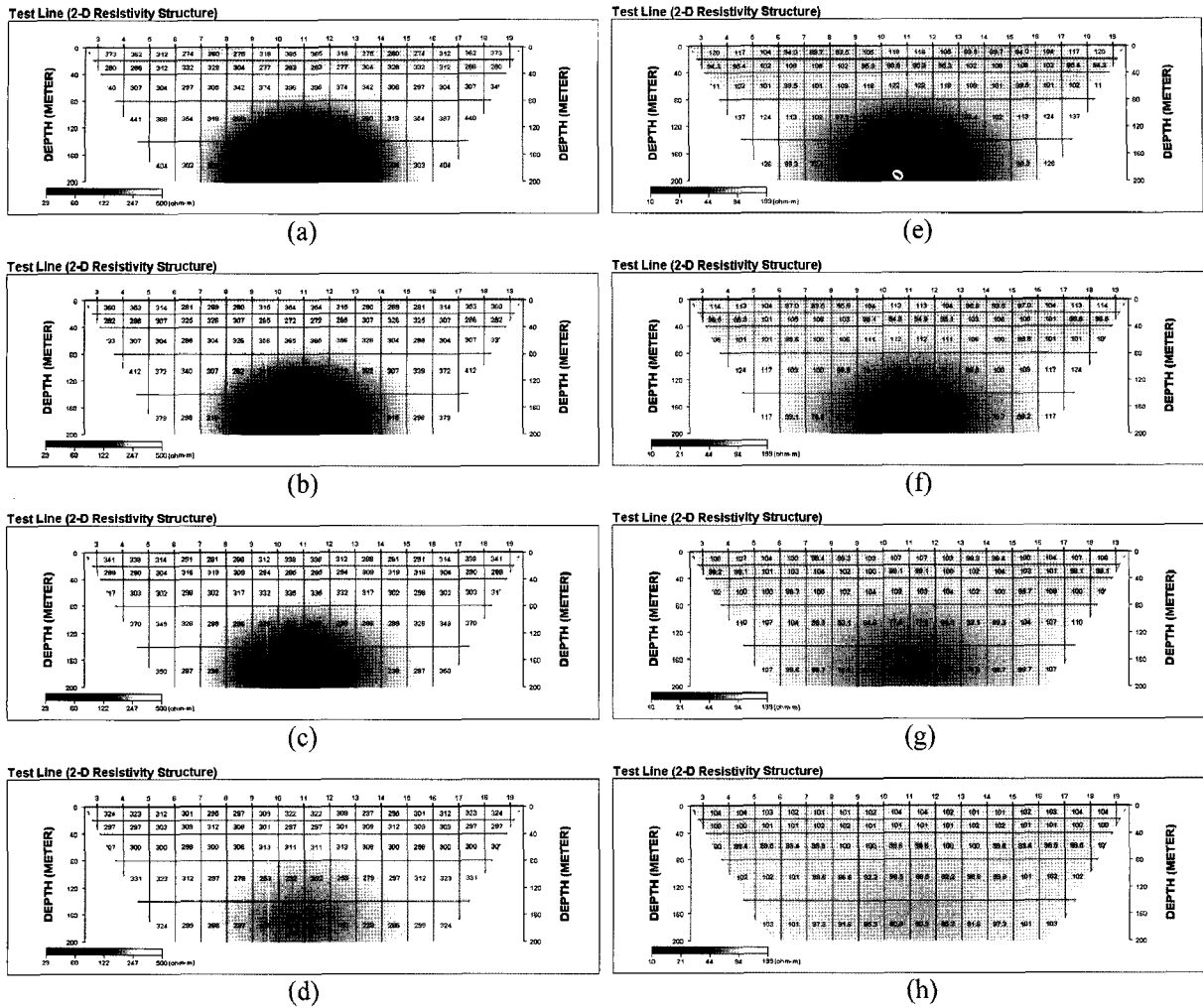


Fig. 9. Inverted models for the 20 m wide vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to d) and 100 Ωm (e to h). The resistivity value of the vein is 1 Ωm (a and e), 3 Ωm (b and f), 10 Ωm (c and g), and 30 Ωm (d and h). The electrode spacing is 40 m.

의 폭이 20 m인 경우 전기비저항이 10배 차이나는 경우에도 저 비저항대가 희미하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 모든 경우에 저 비저항대의 폭이 160 m로 실제 광맥의 폭보다 넓게 퍼져서 나타났으며, 나타나는 깊이 또한 140 m로 실제보다 깊었다. 이는 전극간격이 40 m로 광맥의 폭에 비해 넓고, 역산에 이용된 셀 크기가 하부로 갈수록 크기 때문에 나타나는 현상이다.

전기비저항이 일정할 때 광맥의 폭에 따라 저비저항대가 어떻게 나타나는가를 살펴보기 위하여 전기비저항이 1 Ωm , 3 Ωm , 10 Ωm , 30 Ωm 일 때 광맥의 폭을 변화시켜서 얻은 역산결과를 정리하였다. Fig. 10은 광맥의 전기비저항이 1 Ωm 일 때의 결과들을 보여준다. 그림에서 보면 주변암의 전기비저항이 300 Ωm 또는 100 Ωm 이고 전기비저항이 1 Ωm 일 때 모두 광맥의 폭이 2 m 이상이면 광맥의 저비저항대가 나타나기 시작하며, 광맥의 비저항이 3 Ωm 이면 광맥의 폭이 5 m 이상일 때 (Fig. 11참조), 그리고 광맥의 비저항이 10 Ωm 이면 광맥의 폭이 10 m 이상되어야 저비저항대가 나타남을 알 수 있다

(Fig. 12). 광맥의 비저항이 30 Ωm 일 때는 광맥의 폭이 20 m일 때만 희미하게 저비저항대가 나타난다(Fig. 13). 이와 같이 광맥의 폭과 비저항의 차에 따라 광맥에 의한 효과가 나타나기도 하고 전혀 나타나지 않기도 한다. 실제 광산에서는 광맥과 주변암과의 전기비저항이 크게 나타나기도 하지만 매우 작게 나타나기도 하는데 광맥의 폭이 좁고 지하 깊은 곳에 위치해 있을 때에는 실제 존재하는 광상의 존재를 파악하기 어려울 것으로 판단된다.

지금까지는 모암 내에 저비저항을 갖는 광맥이 존재하는 간단한 모형에 대하여 시뮬레이션 및 역산해석을 수행하였다. 실제 금은 광상구조는 생성원인에 따라 그 구조가 다양하며 복잡하다. 여러 광맥이 인접하여 나타나기도 하고, 단층에 의해서 어긋난 형태로 존재하기도 한다. 이번에는 실존하는 금은광상구조를 단순화하고, 현장에서 측정된 물성을 기반으로 모델링 및 역산해석을 수행해 보았다. 대상이 된 광산은 전라남도 해남에 위치한 순신광산이다. 순신광산은 일본 히시카리 금광과 유사한 천열수광상에 의해 형성된 광산으로 석영맥 주위에

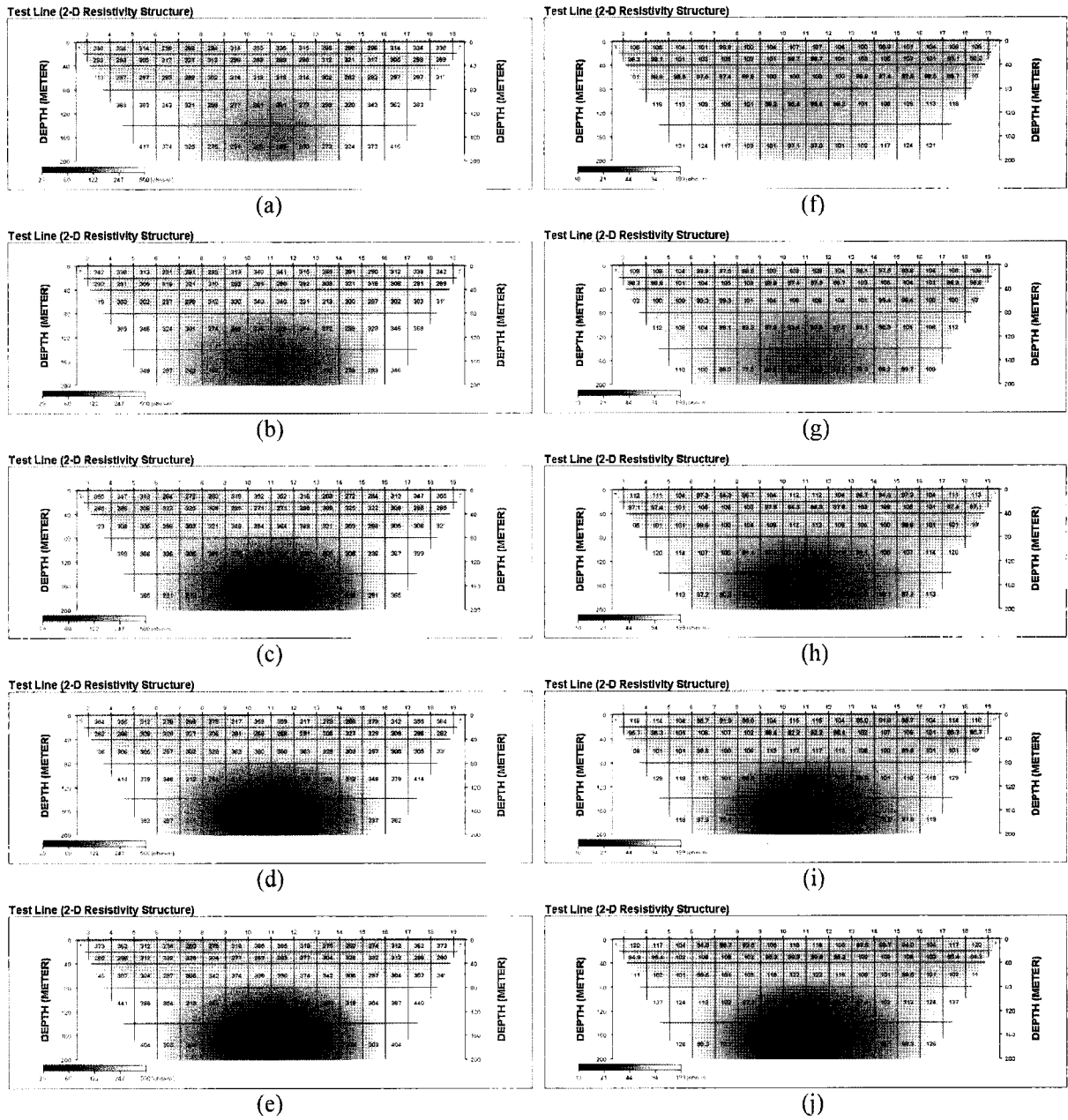


Fig. 10. Inverted models for the 1 Ωm vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to e) and 100 Ωm (f to j). The width of the vein is 1 m (a and f), 2 m (b and g), 5 m (c and h), 10 m (d and i), and 20 m (e and j).

열수변질대가 발달하면서 금이 농집된 유형이다. 순신평산은 바다쪽에 위치한 은산 갱과 약 800 m 북쪽에 위치한 모이산 갱의 두 가행광산으로 구성되어 있으며 광맥의 주된 연장방향은 동-서 방향이다. 모암은 응회암과 석영안산암으로 구성되어 있다. 맥이 존재하는 전체 폭은 대체로 1~2 m로 좁으나 주변의 열수변질대는 수십 m 범위에 걸쳐 분포하고 있다. 열수변질대의 전기비저항은 주변모암보다 매우 낮게 나타난다. 금이나 은은 주로 석영 맥을 따라 발달하는데 이러한 석영맥이 탄소성분을 많이 함유하여 검게 나타날수록 금과 은의 침전률이 좋으며, 탄소성분이 적어 흰색에 가까워질수록 금과 은의 침전률이 낮아 품질이 좋지 않다. 보통의 석영맥은 대체로

전기비저항이 수만 Ωm로 매우 높으나 금이나 은과 같은 금속의 함유량이 높아지면 전기비저항이 낮아진다. 이들 맥은 주변 모암에 비해서는 낮은 전기비저항을 가지나 주변의 열수변질대에 비해서는 여전히 매우 높다.

천열수 금 광산 모델의 전기적 물성을 결정하기 위하여 휴대용 전기비저항 측정기(mini OHM, OYO Co.)를 사용하여 금광맥, 열수변질대 및 지표 노두의 전기비저항을 측정하였다. 측정방법은 4개의 전극을 이용한 Wenner 배열로 전류 및 전위전극을 노두에 접촉하여 전류를 흘려보내고 전위차를 측정하여 전기비저항을 구했다. 지표 노두의 경우에는 전극과 노두 사이의 접촉저항이 높아서 전극 끝부분에 스펀지를 붙이고 물

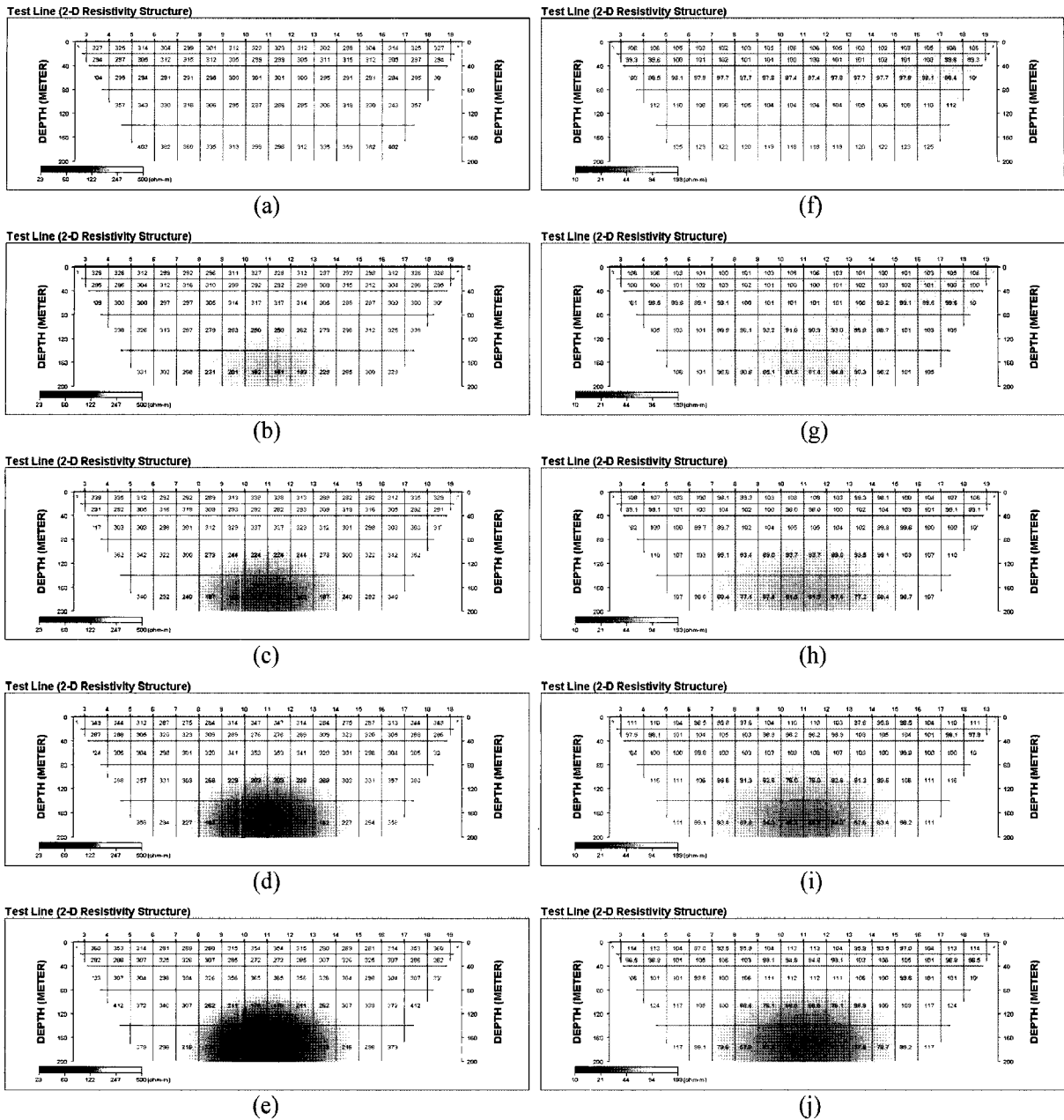


Fig. 11. Inverted models for the 3 Ωm vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to e) and 100 Ωm (f to j). The width of the vein is 1 m (a and f), 2 m (b and g), 5 m (c and h), 10 m (d and i), and 20 m (e and j).

은 염수를 적서 접촉저항을 줄여 전기비저항을 측정했다. 사용된 측정기는 최대 1 mA를 흘려보낼 수 있으며, 구형파의 전류 및 전위파형을 측정과 동시에 관찰할 수 있어 양질의 자료를 획득할 수 있었다. Fig. 14는 현장에서 갱내 및 지표 노두의 전기비저항을 측정하고 있는 장면을 보여주고 있다. Table 1은 갱내의 금광맥, 열수변질대 및 지표 노두의 전기비저항을 측정 한 결과를 나타내고 있다. 갱내에서 측정한 결과를 보면, 광맥과 열수변질대에서 전기비저항의 차이를 보이고 있다. 천열수 광상의 경우 맥상으로 관입된 광상부분은 전기비저항이 상대적으로 높고, 주변의 열수변질대는 상대적으로 낮게 나타난다. 지표 노두의 경우는 대부분 열수변질대로 전기비저항이

500~1,000 Ωm의 범위를 나타내고 있으며, 지표에서 나타나는 맥상의 노두는 전기비저항이 5,000 Ωm 이상을 나타내고 있다.

Fig. 15에서 보는 바와 같이 100 m 깊이에 2m의 단일 광맥이 존재하며 주변에 열수변질대가 좌우로 약 20 m 두께로 존재하는 모형을 가정한 후 갱내에서 측정한 고품위 광맥과 저품위 광맥의 전기물성 값을 이용하여 현장자료 시뮬레이션 및 역산을 수행하였다. 주변 모암의 전기비저항은 현장에서 획득한 전기탐사자료의 역산단면도로부터 유추하였다. 순신광산 주변 지역의 모암은 응회암과 석영안산암으로 이루어져 있는데 현장탐사자료 해석결과 모암의 전기비저항의 분포가 수백

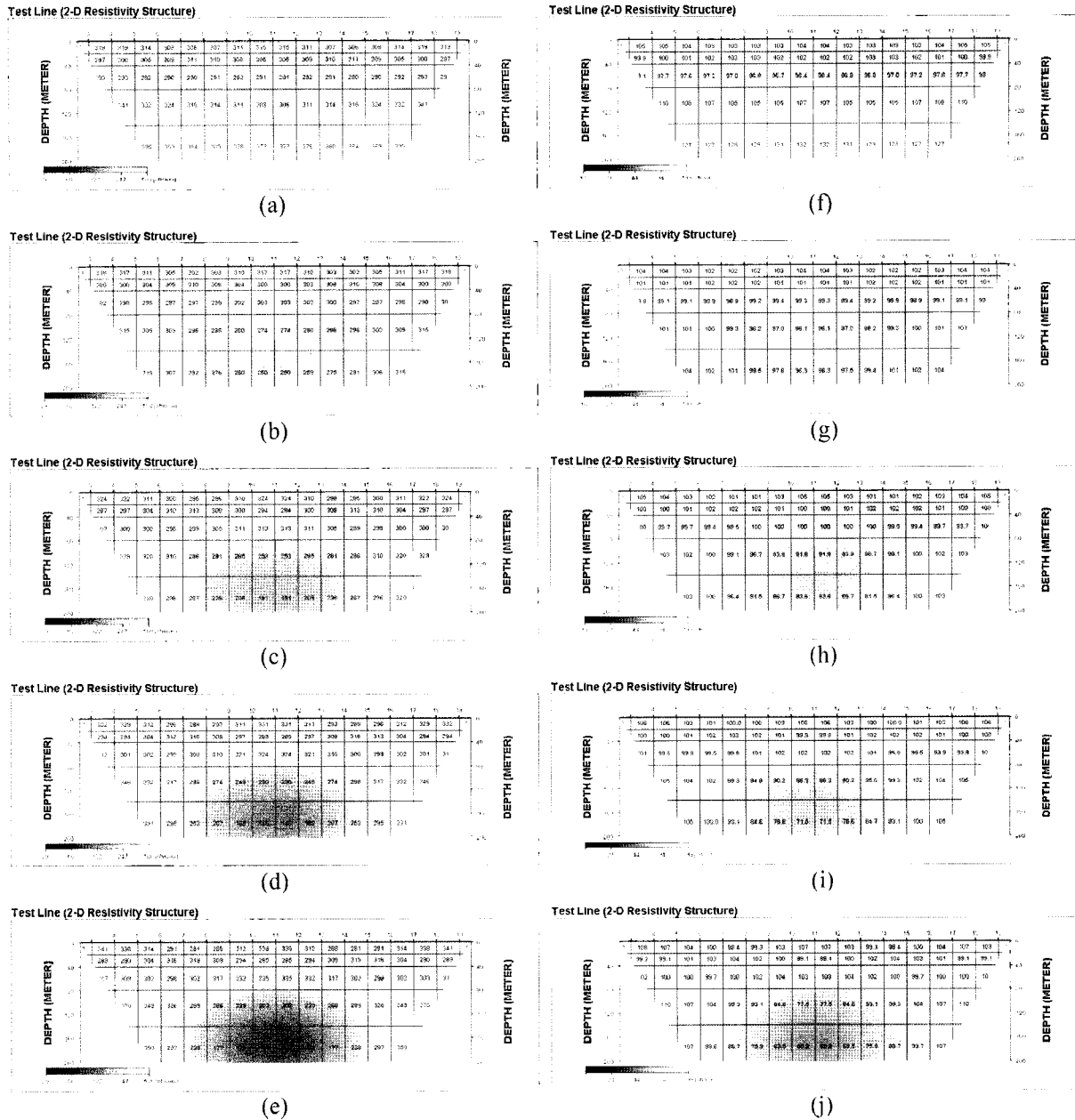


Fig. 12. Inverted models for the 10 Ωm vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to e) and 100 Ωm (f to j). The width of the vein is 1 m (a and f), 2 m (b and g), 5 m (c and h), 10 m (d and i), and 20 m (e and j).

Ωm에서 수만 Ωm까지 그 범위가 매우 다양하였다. 이 중 3000 Ωm를 모암의 전기비저항으로 가정 한 후 모델링 및 역산을 수행하였다. 실제 금을 함유하고 있는 석영맥은 수 mm에서 수 cm의 폭으로 산발적으로 존재하므로 실제에서는 앞에서 가정한 2m 폭 전체가 광맥은 아니다. 그러나 이 연구에서는 2m의 맥이 모두 석영맥으로 채워져 있다고 가정하였다. Figs. 16과 17은 각각 고품위 광맥과 저품위 광맥 모형에 대한 모델링 및 역산결과를 보여준다. 역산결과는 모두 앞에서 저비저항을 갖는 광맥이 얇게 존재하는 경우와 유사한 결과를 보여준다. 저품위 광상의 경우 고품위 광상에 비해 전기비저항이

매우 높으므로 이에 따른 전류의 차단효과가 나타날 것으로 추측되었으나 실제 역산결과는 이에 의한 효과는 거의 찾아볼 수 없으며, 열수변질대의 전기비저항에 따라 저비저항대의 전기비저항의 범위가 달라지지만 하였다. 이러한 극단적인 전류 경로차단에도 불구하고 고비저항을 갖는 석영맥의 영향이 미미하다는 것은 실제 현장에서와 같이 석영맥과 열수변질대가 혼재해 있는 경우 석영맥에 의한 이상변화는 크게 고려할 필요가 없다는 것을 암시해준다. 이러한 현상이 일어나는 정확한 원인을 밝혀내기 위해서는 여러 모형에 대한 다양한 테스트 및 분석이 이루어져야 할 것으로 보인다.

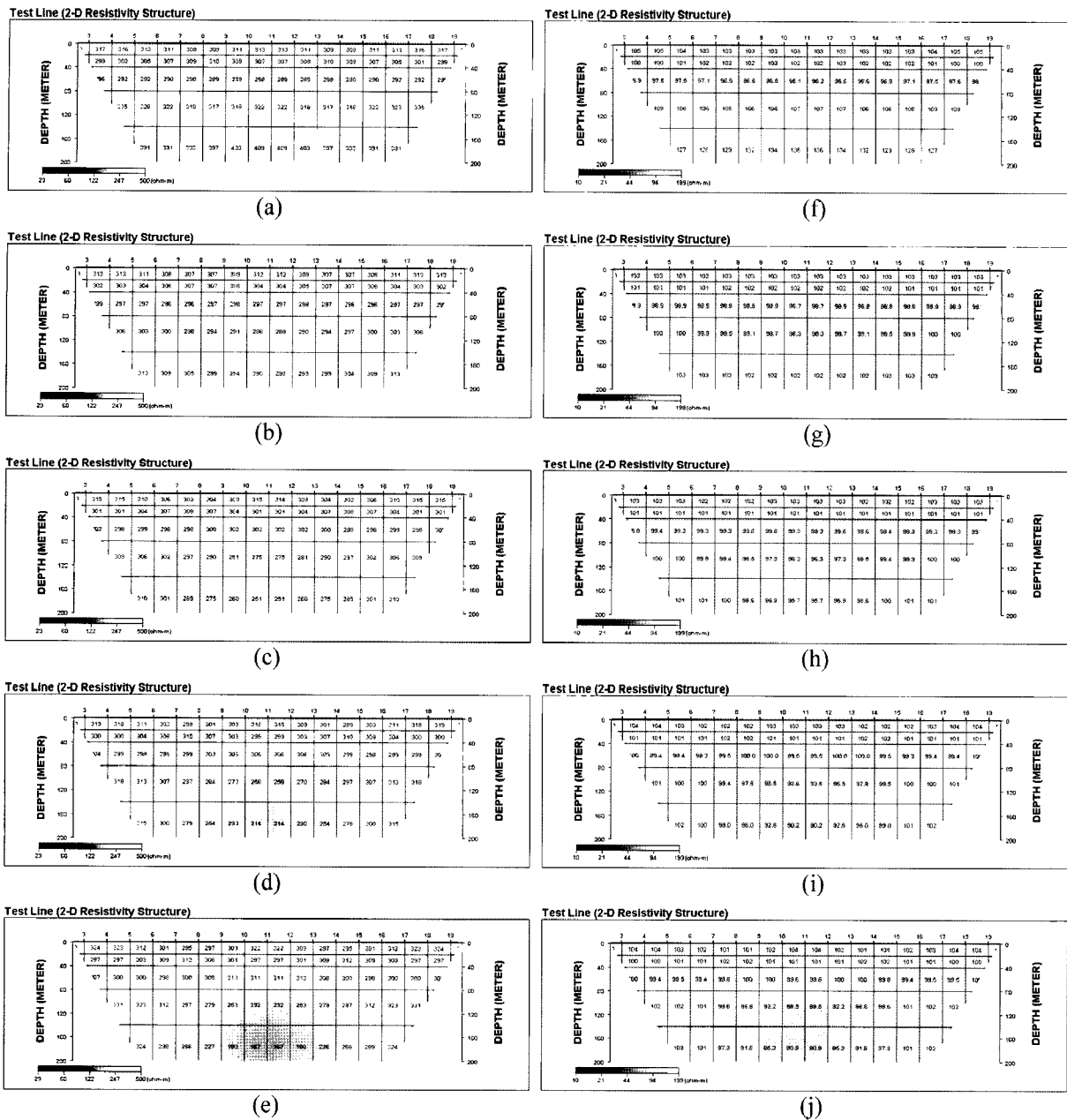


Fig. 13. Inverted models for the 30 Ωm vein-type model when resistivity values of the surrounding rocks are 300 Ωm (a to e) and 100 Ωm (f to j). The width of the vein is 1 m (a and f), 2 m (b and g), 5 m (c and h), 10 m (d and i), and 20 m (e and j).

결론

일반적으로 광산탐사에서는 지질조사와 함께 물리탐사가 수행되며, 금속광상의 경우 광화대의 전기적 전도성이 매우 좋은 특성에 근거하여 전기탐사나 전자탐사가 활발히 수행되고 있다. 보통의 광산탐사에서는 광상의 존재여부 및 분포양상을 파악하기 위하여 지표탐사를 수행하며, 쌍극자-쌍극자 배열 전기비저항탐사의 지표탐사에서는 대체로 40 m 정도의 넓은 전극간격을 이용한다. 그러나 우리나라 광상의 70%가 백상광상으로 맥폭이 2 m 이내로 작아 40 m의 전극 간격으로 전기탐사를 수행할 경우 광상과 주변암과의 전기비저항의 차가 매우

크지 않은 경우에는 탐사자료로부터 직접적으로 광맥의 존재 여부를 파악하기는 어려울 수 있다. 특히 광상이 지하 깊은 곳에 존재하는 경우는 더욱더 그러하다. 이에 본 연구에서는 국내에 존재하고 있는 대표적 맥상광상인 금은광상을 단순화시킨 수직 맥상광상 모형에 대하여 백폭 및 전기적 물성, 전극간격 등을 변화시켜가며 모델링 및 역산을 수행하였다. 또한 천연열수광상 기원으로 형성된 금광의 경우 1~2 m 폭으로 석영맥들이 산재해 있고 주변에 수십 m 폭으로 열수변질대가 존재하는데, 현재 가행되고 있는 금은광산인 전라남도 해남의 순신광산에서 측정된 암석의 전기적 물성을 근거로 하여 맥상광상의 전기비저항을 가정한 후 현장자료 시뮬레이션 및 역산해

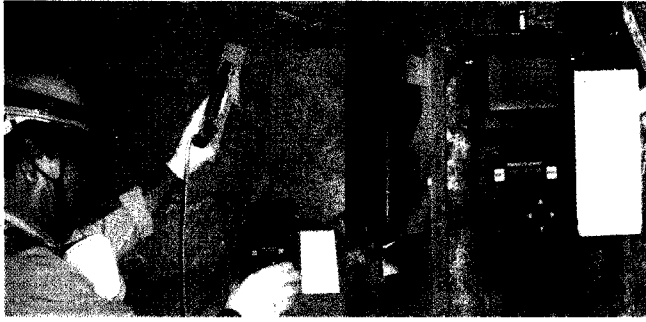


Fig. 14. View of resistivity measurement inside a pit and on outcrops.

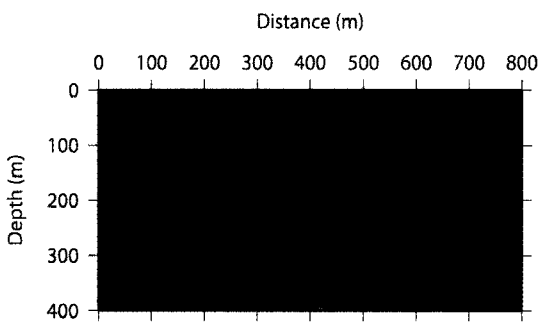


Fig. 15. A buried vein-type model which is surrounded by hydrothermal alteration zones.

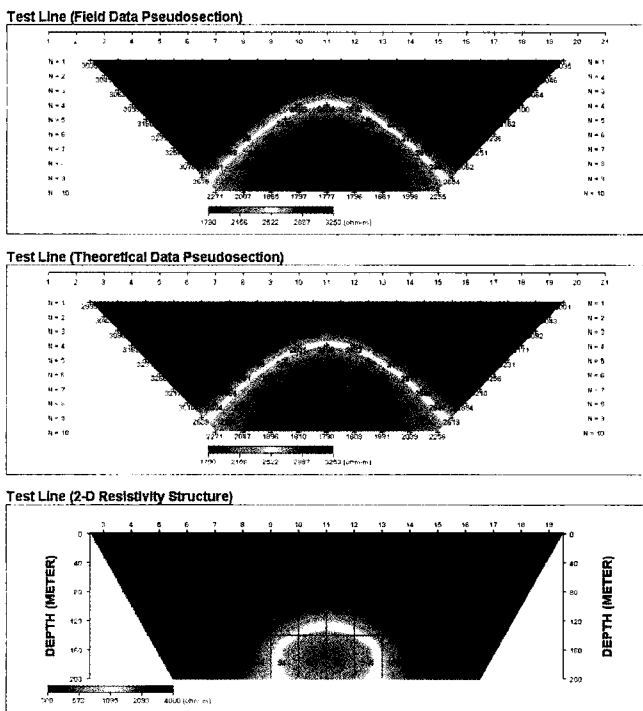


Fig. 16. Forward modeling (upper), theoretically calculated data (middle) based on the inversion model (bottom) for the 2 m high-grade ore deposit model shown in Fig. 15. Alteration zones exist around the vein. The electrode spacing is 40 m. Resistivity values of the vein, the hydrothermal alteration zones and the surrounding rocks are 150, 100 and 3000 Ωm , respectively.

Table 1. Resistivity values measured inside a pit and on outcrops.

Position	Current (μA)	Potential (mV)	Resistivity (Ωm)	Other
Ore vein	100	290	1,275	Poor ore
Ore vein	100	404	1,776	Poor ore
Ore vein	1001	347	152	Rich ore
Ore vein	1001	150	66	Rich ore
Ore vein	1001	358	157	Rich ore
Alteration zone	1001	128	56	
Alteration zone	1001	72	32	
Alteration zone	1001	71	31	
Alteration zone	1001	285	125	
Alteration zone	1001	230	101	
Outcrop	100	117	514	Alteration zone
Outcrop	100	104	457	Alteration zone
Outcrop	100	113	497	Alteration zone
Outcrop	100	117	514	Alteration zone
Outcrop	100	225	989	Alteration zone
Outcrop	100	190	835	Alteration zone
Outcrop	10	128	5,627	Vine or dyke
Outcrop	100	148	651	Alteration zone
Outcrop	100	249	1,095	Alteration zone

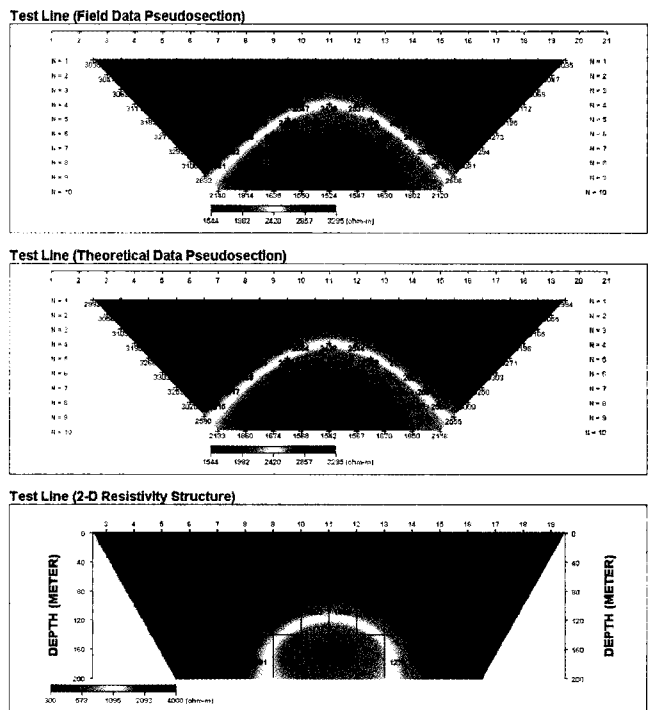


Fig. 17. Forward modeling (upper), theoretically calculated data (middle) based on the inversion model (bottom) for the 2 m wide low-grade ore deposit model shown in Fig. 15. Hydrothermal alteration zones exist around the vein. The electrode spacing is 40 m. Resistivity values of the vein, the hydrothermal alteration zones and the surrounding rocks are 1500, 50 and 3000 Ωm , respectively.

석을 수행하였다.

모함에 저비저항의 광맥이 존재하는 단순모형에 대한 현장 자료 시뮬레이션 및 역산 수행결과 백폭이 1 m 이하인 경우

주변암과의 전기물성차가 300배 정도 되는 경우에도 저비저항대가 나타나지 않았으며, 맥폭이 2 m인 경우 전기물성차가 100배 이상 되는 경우에만 저비저항대의 존재가 나타났다. 맥폭이 10 m 또는 20 m 되는 경우에 역산으로 구한 비저항이 실제 값에 보다 가까이 다가갔으며, 맥폭이 20 m일 때는 전기물성차가 10배 정도 되는 경우에도 희미하게 저비저항대를 보여 주었다. 맥폭이 크고 전기물성차가 클수록 저비저항대가 명확하게 나타났으나, 저비저항대의 폭이 실제보다 과장되게 나타났다고, 깊이는 실제보다 깊게 나타났다. 이는 전극간격이 40 m로 넓고 하루로 갈수록 역산에 이용된 셀의 크기가 커지기 때문인 것으로 보인다. 천열수광상 성인의 금광상 모형의 경우 광맥 주변에 저비저항의 열수변질대가 수십 m 폭으로 존재하는데 현장측정 전기물성을 바탕으로 모델링 및 역산을 수행한 결과 이전의 모암에 광맥만이 존재하는 경우와 비슷한 양상의 결과를 보여주었다. 광맥의 비저항이 상대적으로 높은 저품위 광상의 경우에도 고품위 광상에서와 유사한 결과를 보여주는 것으로 보아 광맥의 고비저항이 역산결과에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이에 대한 정확한 원인은 향후 다양한 테스트와 정밀분석을 통하여 밝혀질 수 있을 것으로 생각된다.

이상의 결과들로부터 지표에서 수행되는 전기탐사의 경우 실제 구조와 다른 해석결과를 제시할 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 측선 바로 하부에 소폭의 부광체가 존재하는 경우에도 역산 단면에서는 이상대가 퍼져나올 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구는 기본적으로 단순한 모형실험이지만 현장 자료를 바탕으로 수행한 실험연구로서 향후 보다 다양한 모형에 대하여 모델링을 수행하고 표준 및 정량적 지침을 제시해 나간다면 현장탐사 설계 및 현장자료 해석시 이를 하나의 지침으로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 국정과제인 “USN 기반 융합 자원탐사 시스템 개발” 연구의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었으며, 관계기관에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김선익, 황덕환, 1986, 한국의 광화작용(광상 분포도), 광산지질, **19**(특), 73-95.
- 김옥준, 1971, 남한의 광상 생성시기와 광상구, 지질학회지, **7**, 37-59.
- 김정호, 1987, 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- 대한광업진흥공사, 2007, 광물자원 매장량 현황.
- 박종오, 김희준, 송무영, 유영준, 2005, 3차원 전기비저항 역산 방법을 이용한 삼보광산에서 금광탐사, 지질공학회지, **15**, 19-27.
- 박희인, 장호완, 진명식, 1988b, 한반도 중부 지역의 광상생성기와 생성구(경기육괴 내 광상 생성연령), 광산지질, **21**, 349-358.
- 유영준, 유인걸, 김정호, 2004, 삼보광산 금 광화대에 대한 전기탐사 반응, 물리탐사, **7**, 217-224.
- 이상규, 황학수, 황세호, 최종호, 박인화, 1997, 금속광물자원탐사연구: 경남 밀양1호 지역 금속광상 물리탐사, 한국지질자원연구소.
- 이현구 외, 2007, 한국의 광상, 대우학술총서, 11-24.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.
- www.geoelectrical.com RES2DMOD and RES2DINV.