

국내 맥상광체조사를 위한 3차원 전기비저항 모델링자료의 3차원 역산 해석

이호용¹ · 정현기^{2,*} · 정우돈³ · 꺾나은³ · 이효선² · 민동주³

¹서울대학교 BK21 에너지자원인력양성 사업단, 151-744, 서울특별시 관악구 관악로 599

²한국지질자원연구원 자원탐사개발연구실, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92

³서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부, 151-744, 서울특별시 관악구 관악로 599

3-D Inversion of 3-D Synthetic DC Resistivity Data for Vein-type Ore Deposits

Ho-Yong Lee¹, Hyun-Key Jung^{2,*}, Woodon Jeong³, Naeun Kwak³,
Hyo-Sun Lee², and Dong-Joo Min³

¹BK21 Research Division of Seoul National University for Energy Resources, Seoul 151-744, Korea

²Exploration Geophysics and Mining Engineering Department,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

³Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

Abstract: Recently as the interest in the development of domestic ore deposits has increased, we can easily find some studies on exploration geophysics-based ore-deposit survey in literature. Based on the fact that mineralized zone are generally more conductive than surrounding media, electrical resistivity survey among several geophysical surveys has been applied to investigate metallic ore deposits. Most of them are grounded on 2-D survey. However, 2-D inversion may lead to some misinterpretation for 3-D geological structures. In this study, we investigate the feasibility of the 3-D electrical resistivity survey to 3-D vein-type ore deposits. We first simulate 2-D dipole-dipole survey data for survey lines normal to the strike and 3-D pole-pole survey data, and then perform 3-D inversion. For 3-D ore-body structures, we assume a width-varying dyke, a wedge-shaped, and a fault model. The 3-D inversion results are compared to 2-D inversion results. By comparing 3-D inversion results for 2-D dipole-dipole survey data to 3-D inversion results for 3-D pole-pole survey data, we could note that the 2-D dipole-dipole survey data yield better inversion results than the 3-D pole-pole data, which is due to the main characteristic of the pole-pole array. From these results, we are convinced that if we have certain information on the direction of the strike, it would be desirable to apply 2-D dipole-dipole survey for the survey lines normal to the strike. However, in most cases, we do not have any information on the direction of the strike, because we already developed the ore deposit with the outcrops and the remaining ore deposits are buried under the surface. In that case, performing 3-D pole-pole electrical resistivity survey would be a reasonable choice to obtain more accurate interpretation on ore body structure in spite of low resolution of pole-pole array.

Keywords: 3-D, dipole-dipole array, pole-pole array, electrical resistivity survey, inversion

요약: 최근 들어 국내 광산개발에 대한 관심이 고조되면서 새로운 광상탐사 및 기존 광상의 연장성 확인 등의 목적으로 물리탐사를 적용하는 사례가 늘고 있다. 금속광상 탐사의 경우, 광화대가 주변에 비해 높은 전기전도도를 갖기 때문에 이를 탐지하기 위하여 전기비저항 탐사를 수행하는 것이 일반적이며, 현실 여건상 대부분 2차원 탐사가 수행된다. 그러나 국내 금속광상의 대부분이 맥상으로 분포하고 있으며, 광맥의 폭이 변한다거나 광맥이 단층에 의해 끊어져 있는 등 매우 복잡한 3차원 구조를 띤다. 따라서 3차원 광체구조에 대하여 2차원 탐사 및 2차원 해석을 수행할 경우 왜곡된

*Corresponding author: hkjung@kigam.re.kr

Tel: 82-42-868-3180

Fax: 82-42-861-9720

해석을 초래할 수 있다. 이에 이 연구에서는 이러한 3차원 광체구조에 대한 3차원 전기비저항 탐사의 적용성을 검토하기 위해 주향에 수직인 여러 축선에 대하여 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사를 수행하여 얻은 자료와 3차원 단극자-단극자 배열을 이용하여 얻은 자료들을 각각 3차원 역산한 후 이들을 2차원 해석결과와 비교하였다. 3차원 맥상광체로는 맥폭이 변하는 모형과 맥이 단층에 의해 어긋난 모형 등을 가정하였다. 2차원 쌍극자-쌍극자 배열자료에 대해 3차원 역산을 수행하여 얻은 결과를 3차원 단극자-단극자 배열자료와 비교하면 단극자-단극자 탐사자료가 전체적인 구조는 잘 보여주나 배열의 특성상 쌍극자-쌍극자 탐사자료만큼 정확한 결과를 제시하지 못함을 확인할 수 있었다. 따라서 실제 탐사시 주향의 방향에 대한 정보를 알 수 있다면 주향에 수직인 2차원 축선들에 대해 쌍극자-쌍극자 탐사를 수행하고 이를 3차원 해석하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 지표면에 광체가 드러나 있는 경우에 대해서는 이미 개발이 완료된 상태이며, 현재 남아있는 광상은 지하 깊은 곳에 매몰되어 있는 경우가 대부분이다. 이러한 경우 주향에 대한 정보를 알기 어려우므로 비록 해상도는 떨어지더라도 3차원 단극자-단극자 탐사를 수행하고 해석하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

주요어: 3차원, 쌍극자-쌍극자 배열, 단극자-단극자 배열, 전기비저항탐사, 역산

서 론

국내 금속광상 물리탐사는 1990년대 이후 국제적 광물가격의 하락 및 고된 현장작업의 기피현상으로 소강상태에 접어들었으나 최근 들어 에너지·자원 가격의 상승으로 에너지·자원에 대한 관심이 증가하면서 국내 광산의 재개발 및 새로운 광상탐사, 그리고 기존 광상의 연장성 확인을 위해 물리탐사를 적용하는 사례가 늘고 있다. 이러한 광상탐사 이외에 광해 방지를 위한 기초조사 단계에서도 물리탐사가 활발히 활용되고 있다. 최근에는 이미 오래전에 개발이 중단되었던 광산들을 재개발하려는 움직임이 일고 있으며, 전라남도 해남의 순진광상은 이미 개발 중에 있고, 강원도 삼척의 가곡광산은 현재 재개발을 위한 준비단계에 있다. 금속광상 조사를 위해 물리탐사를 적용하는 경우 금속광상의 전기전도도가 주변에 비해 높다는 특징에 기초하여 암석의 전기적 특성을 파악하는 전기탐사나 유도분극탐사, 전자탐사 등이 주로 이용된다. 또한 비금속광상 조사에도 물리탐사가 이용되는데 주로 화강암체의 존재나 기반암의 분포를 밝혀내는데 활용된다. 이 경우 금속광상탐사와 유사하게 전기탐사, 유도분극탐사 및 자력탐사가 이용되며, 중력탐사가 함께 수행되기도 한다.

1990년대 이후 광상 탐사에 물리탐사가 적용된 예로는 경남 밀양지역에서 전기비저항 탐사, 전자 탐사(TEM과 VLF), 유도분극 탐사를 수행하여 스카른 교대광상의 부존가능성을 확인한 사례(이상규 외, 1997), 삼보광산에 대하여 전기비저항 탐사를 수행하여 획득한 자료를 해석함으로써 전도성 광화대의 부존가능성을 확인한 사례(유영준 외, 2004; 박종오 외, 2005) 등을 들 수 있다. Jung(2007b)은 석회석이 매

장된 광산에 대하여 자력탐사, 전기탐사를 수행하여 관입된 화강암체의 존재와 천부 교대철광상의 존재를 밝혀냈으며, Jung(2007a)은 고령토 광산에 대하여 전기탐사 및 유도분극탐사, 3축 시추공 자력탐사(3-axis borehole magnetic measurement)를 수행하여 기반암의 분포 및 철을 다량 함유한 층, 고령토가 분포하는 층의 두께 등을 밝혀낸 바 있다.

이러한 현장조사연구와 함께 모델링 및 역산 등의 수치해석 알고리즘을 통하여 쌍극자-쌍극자 전기비저항 탐사를 광상탐사에 적용할 때 직면할 수 있는 문제점을 제시한 이론연구도 수행되고 있다. 정현기 외(2003)는 일부 지질모형에 대한 3차원 전기비저항 탐사의 타당성과 2차원 전기비저항 탐사의 수행 기준에 대한 연구를 수행하였고, 민동주 외(2008)는 다양한 2차원 맥상광체 모형 및 천열수광상 모형을 가정하고 2차원 전기탐사 모델링 및 역산을 수행함으로

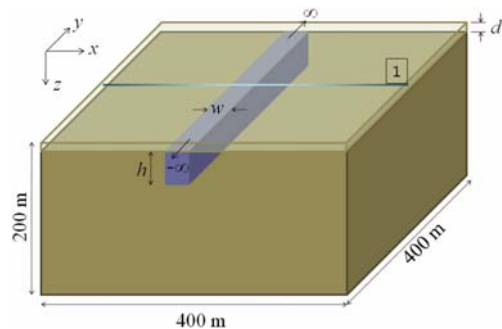


Fig. 1. A vertical dyke model. The width w and height h of the ore body are 20 and 40 m, respectively. The depth d of the weathered layer is 10 m. Electrodes are spread all over the surface with the spacing of 20 m. The resistivity values of the weathered layer, the ore body, and the background medium are 30, 10, and 100 ohm-m, respectively.

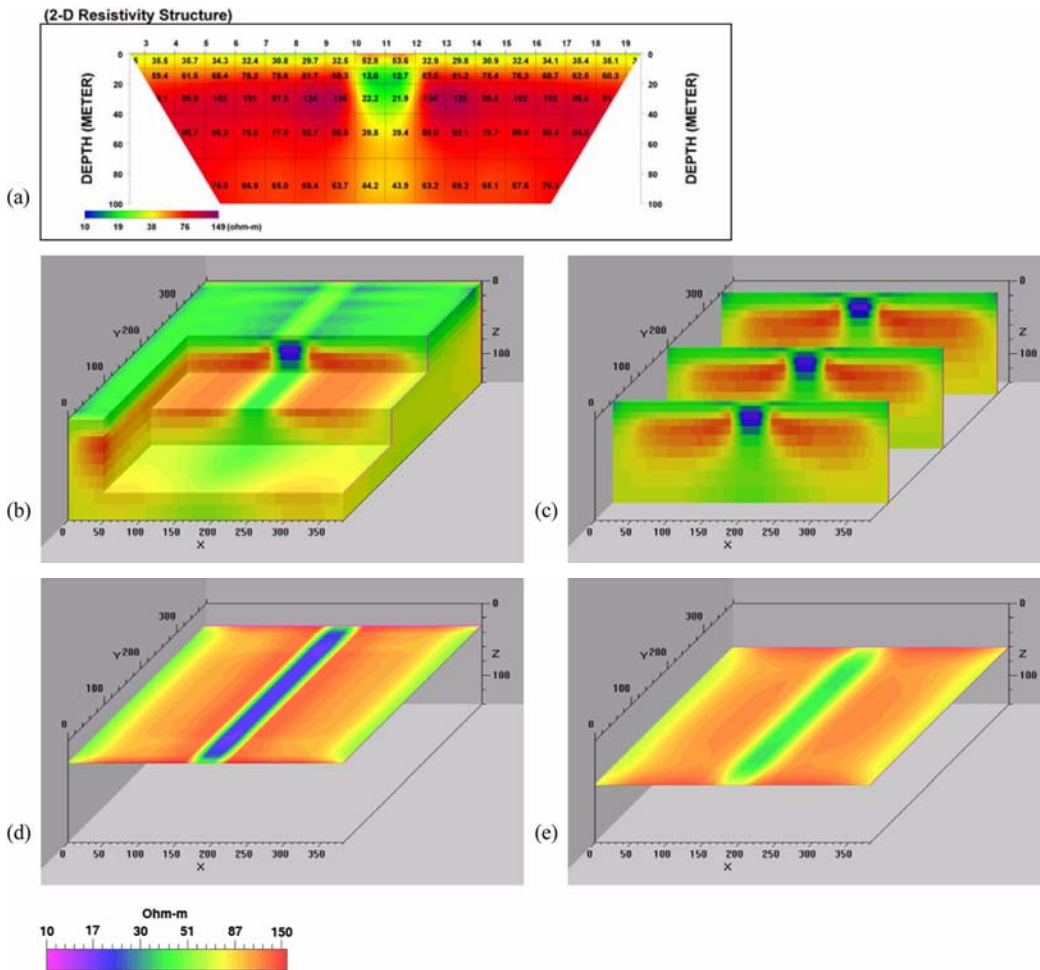


Fig. 2. 2D inversion result (a) along the survey line No. 1 ($y=200$ m) and 3D inversion results (b, c, d, and e) for 2D dipole-dipole data acquired along 21 survey lines ($y=0, 20, 40, \dots, 400$ m) with the line interval of 20 m for the vertical dyke model (Fig. 1). The number of grids between electrodes is 8 for 3D modeling and 4 for 3D inversion.

써 실제 현장자료 해석시 발생할 수 있는 문제점을 제시한 바 있다. 또한 민동주 외(2009)는 실제 현장에서 획득된 탐사자료는 2차원 구조에서 획득되는 것이 아니라 3차원구조에서 2차원단면이 얻어지며, 국내 광산 중에는 매우 좁은 범위에서 광상의 구조가 S자 모양으로 급격하게 변하는 경우가 많다는 점을 고려하여 다양한 3차원 구조를 가정하고 3차원 모델링 및 2차원 역산을 수행함으로써 현장탐사에서 직면할 수 있는 문제점을 제시하였다. 이를 통해 광상의 구조가 급격하게 변하는 3차원 환경에서 2차원 탐사를 수행하여 자료를 획득하고 해석할 경우 3차원 구조의 효과가 고려되지 않으므로 잘못된 해석을 할 수 있으며, 2차원 탐사자료를 근거로 시추부지를

선정한다면 심각한 오류를 범할 수 있음을 보여주었다. 또한 지질학적인 정보가 있거나 지면에 광맥이 드러나 있는 경우 주향에 수직인 방향으로 축선을 설정하고 2차원 탐사를 수행하지만, 지질학적 정보가 부족하고 광체가 땅속에 묻혀 있는 경우 실제 주향에 수직인 방향으로 축선을 설정하는 것이 쉽지 않으므로 실제 탐사자료의 해석시 오류를 범할 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과를 바탕으로 광상탐사와 관련하여 정확한 시추위치를 선정하기 위해서는 2차원탐사보다는 3차원 탐사를 수행하여야 하며, 3차원 역산해석을 수행해야 한다고 주장한 바 있다.

이에 이 연구에서는 민동주 외(2009)가 제시한 모형에 대한 3차원 모델링을 통하여 3차원 탐사 및 여

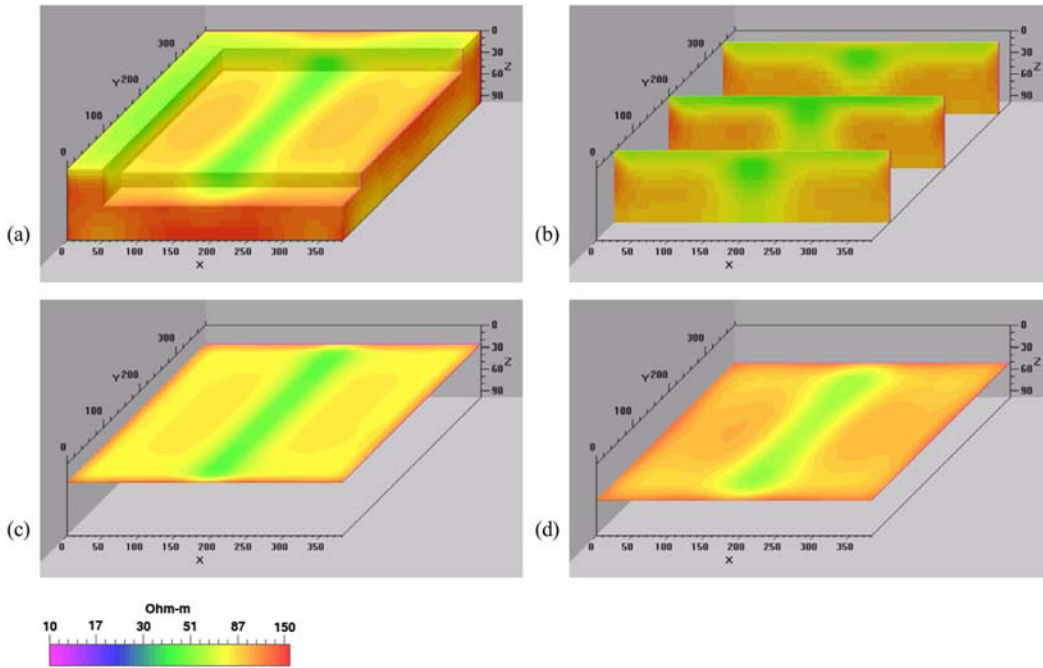


Fig. 3. 3D inversion results for 3D pole-pole data for the vertical dyke model (Fig. 1). The number of grids between electrodes is 8 for 3D modeling and 4 for 3D inversion.

리 측선에 대한 2차원 탐사를 시뮬레이션하고, 이로부터 얻은 자료의 3차원 역산해석 결과를 2차원 역산해석 결과와 비교함으로써 2차원 해석의 한계와 3차원 탐사의 적용성을 면밀히 검토하고자 한다.

다양한 맥상광체 모형에 대한 3차원 역산해석

본 연구에서는 Spitzer(1995)의 3차원 전기비저항 모델링 알고리즘을 이용하여 3차원 구조의 지표면에 놓인 y축에 수직인 측선에 대하여 쌍극자-쌍극자배열을 이용한 2차원 탐사 및 단극자-단극자 배열을 이용한 3차원 탐사를 시뮬레이션한다. 일반적으로 쌍극자-쌍극자탐사의 경우 전류전극과 전위전극의 상대적인 위치변화에 따라 겉보기 비저항 값의 부호가 바뀌므로 3차원 탐사에 이용하기가 쉽지 않다. 따라서 일반적으로 3차원 탐사에서는 전류전극 하나와 전위전극 하나가 무한히 먼 거리에 위치해 있다고 가정하고 단극자-단극자 탐사를 수행한다. 쌍극자-쌍극자 탐사를 이용하기 위해서는 3차원 탐사보다는 2차원 탐사를 수행하는 것이 해석이 편리하다. 따라서 이 연구에서는 몇몇 모형에 대하여 3차원 단극자-단극자 탐

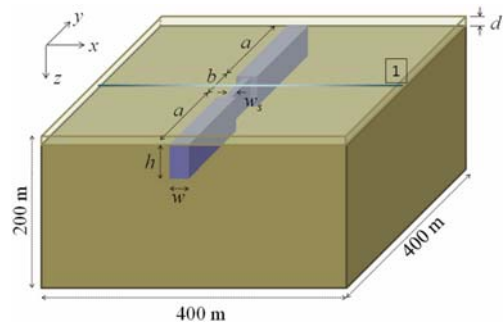


Fig. 4. A 3D width-varying dyke model. The depth and height of the width-varying dyke are 10 and 70 m, respectively. The widths w and w_s are 10 and 5 m, respectively. The lengths of the dyke, a and b are 150 and 100 m, respectively. Electrodes are spread all over the surface with the spacing of 20 m. The resistivity values of the weathered layer, the ore body, and the background medium are 30, 5, and 100 ohm-m, respectively.

사 및 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사를 시뮬레이션하여 얻은 결과들을 3차원 역산해석하고 그 결과를 2차원 역산해석 결과와 비교해 본다. 3차원 역산을 수행하기 위해서 상용소프트웨어인 RES3DINV를 이용하였으며, 2차원 역산해석은 한국지질자원연구원에서 개

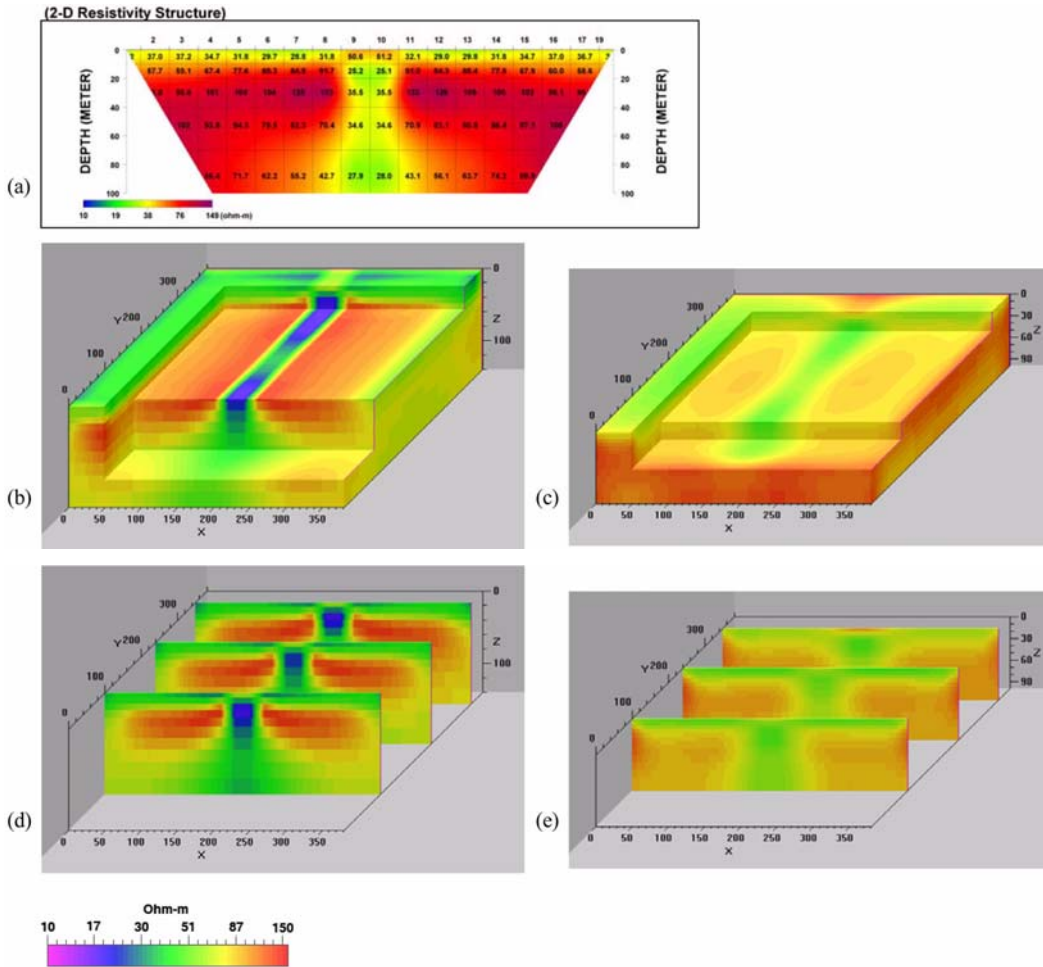


Fig. 5. 2D inversion result (a) obtained along the survey line No. 1 ($y=200$ m), 3D inversion results (b and d) for 2D dipole-dipole data acquired along 21 survey lines ($y=0, 20, 40, \dots, 400$ m), and 3D inversion results (c and e) for 3D pole-pole data for the width-varying dyke model (Fig. 4). The number of grids between electrodes is 8 for 3D modeling and 4 for 3D inversion.

발한 DIPROWin을 이용하였다. 모든 경우에 전극간격은 20 m로 지표면 전체에 배열되어 있다고 가정하였다. 또한 모델링 및 역산을 수행하는 과정에서 이용된 전극당 격자수는 각각 8개와 4개이다.

주향방향으로 일정한 맥상광체 모형 및 맥폭이 변하는 모형, 썸기형 모형에 대해 2차원 탐사 및 3차원 탐사를 시뮬레이션한 후 3차원 역산을 수행하고 그 결과를 비교한다. 또한 단층에 의하여 맥상광체가 어긋난 모형에 대해서 주향을 모른다고 가정하고 다양한 각도에 대하여 2차원 탐사를 수행하고 2차원 역산해석한 결과와 주향에 수직인 축선에 대해 계산된 2차원 탐사자료 및 3차원 단극자-단극자 탐사자료의 3차원 역산 단면을 작성한 후 그 결과들을 서로 비교한다.

주향방향으로 일정한 맥상광체 모형

먼저 Fig. 1에서 보는 바와 같은 y 축 방향(주향)으로 물성의 변화가 없는 맥상광체 구조에 대하여 주향에 수직인 방향으로 축선을 설정하고 쌍극자-쌍극자 배열을 이용한 2차원 탐사자료 및 단극자-단극자 배열을 이용한 3차원 탐사자료를 시뮬레이션하였다. 광체의 맥폭 및 두께는 각각 20 m와 40 m이며, 광체 상부에 10 m 두께의 표토층이 놓여있다고 가정하였다. 표토층, 맥상광체, 주변 모암의 전기비저항은 각각 30, 10, 100 ohm-m라고 설정하였다. 2차원 탐사자료의 모델링을 위해서 축선 사이의 간격을 20 m로 하여 총 21개의 축선이 주향에 수직하게 놓여 있다고 가정하고 합성 탐사자료를 계산하였으며, 이들 결과

에 대해 3차원 역산을 수행한 후 그 결과를 민동주 외(2009)가 제시한 2차원 역산해석한 결과와 비교해 본다. Fig. 2에 2차원 역산해석 결과 및 3차원 역산해석 단면을 나타내었다. 2차원 역산해석 단면은 Fig. 1의 맥상광체 모형에서 1번 축선, 즉 $y=200$ m인 x - z 단면에 해당하며, 이는 21개의 축선에 대한 2차원 자료를 3차원 역산하여 얻은 단면과 유사한 결과를 보여준다. Fig. 2에서 보면 2차원 해석단면과 3차원 해석단면 모두에서 지표면 근처에서는 표토층에 의한 저비저항대가 나타나며, x 축 방향으로 200 m 부근에서 맥상광체에 의한 저비저항대가 뚜렷이 잘 나타나고 있다. 또한 맥상광체에 의한 저비저항대의 효과가 심부쪽에서도 나타나 하부로 갈수록 저비저항대가 넓게 퍼지는 양상을 나타내고 있다. Fig. 3은 3차원 단극자-단극자 탐사에 대한 3차원 역산해석 단면을 보여주고 있다. Fig. 3의 단극자-단극자 탐사결과에 대한 3차원 역산 단면을 Fig. 2의 쌍극자-쌍극자 단면과 비교할 때 단극자-단극자 탐사자료의 해석결과가 쌍극자-쌍극자 배열 자료만큼 경계면을 명확히 보여주지는 못하지만 대체로 구조는 잘 보여주고 있다. 이는 단극자-단극자 배열의 일반적인 특징이다. Fig. 2의 결과는 모두 주향방향을 알고 있는 경우에 수행되는 2.5차원 탐사에 해당하는 것으로 이와 같이 주향 방향을 알고 있다고 가정할 경우에는 쌍극자-쌍극자 배열을 이용하여 여러 축선에 대하여 2차원 탐사를 수행하는 것이 좋은 결과를 보여줄 수 있다.

광맥의 폭이 변하는 광체 모형

주향방향으로 광맥의 폭이 좁아졌다 넓어지며 변하는 맥상광체(Fig. 4)에 대하여 21개의 축선을 가정하고 2차원 쌍극자-쌍극자 시뮬레이션 자료 및 3차원 단극자-단극자 시뮬레이션 자료를 획득하고 각 자료에 대하여 3차원 역산해석을 수행하였다. Fig. 4에서 맥상광체의 길이 a 와 b 는 각각 150 m와 100 m이며, 맥상광체의 두께는 70 m이고, 광체 위에는 10 m 두께의 표토층이 놓여 있다고 가정하였다. 광체의 폭이 넓은 구간에 대해서는 폭이 10 m이고, 좁아지는 구간에 대해서는 폭이 5 m라고 가정하였다. 표토층과 모암의 전기비저항 분포는 앞의 주향방향으로 무한한 광체모형에서와 같으나 광체의 전기비저항을 5 ohm-m로 약간 낮게 설정하였다. 주향에 수직인 21개 축선에 대하여 얻은 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사자료의 3차원 역산해석 결과와 3차원 단극자-단극자 탐사자료의 3차원 해석결

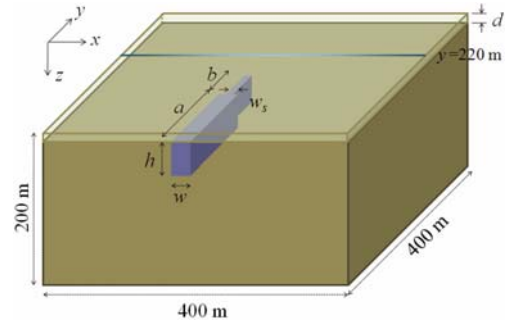


Fig. 6. A 3D wedge-shaped model. The lengths of the dyke, a and b are 150 and 50 m, respectively. The widths w and w_s are 20 and 10 m, respectively. The height is 70 m. The depth d of the weathered layer is 10 m. The electrodes are spread with the spacing of 20 m. The resistivity values of the weathered layer, the ore body, and the background medium are 30, 5, and 100 ohm-m, respectively.

과를 Fig. 5에 나타내었다. 비교를 위하여 주향에 수직하며 $y=200$ m인 단면에 대한 2차원 역산해석 결과를 함께 도시하였다. Fig. 5a에서와 같이 광맥이 좁은 지역을 관통하는 단면에 대한 2차원 해석단면에서는 상부층의 저비저항대와 함께 아래쪽에서도 저비저항대가 넓게 나타나는데 2차원 해석단면에서는 이러한 하부의 저비저항대가 상부층의 저비저항대에 의한 영향이라는 것을 예측하기 어려우나 3차원 역산 해석단면에서는 아래쪽에 넓게 퍼져 나타나는 저비저항대가 상부층의 맥상광체에 의한 영향이라는 것을 쉽게 알 수 있다. Fig. 5b와 5c의 3차원 해석단면에서는 광맥의 폭이 좁아지는 부분에서의 전기비저항의 분포 양상을 살펴볼 때 비교적 잘 묘사되어 있다. Fig. 5c와 5e의 3차원 단극자-단극자 탐사결과에서는 앞의 모형에서처럼 경계면이 명확하게 나타나지는 않으나 저비저항대의 광맥의 폭이 넓어졌다 좁아지는 양상은 확인할 수 있다.

썩기형 광체모형

Fig. 6에서 보는 바와 같이 광맥이 존재하다가 좁아지면서 끊어지는 썩기형 광체모형에 대해 획득된 2차원 탐사 자료 및 3차원 탐사자료에 대하여 3차원 역산을 수행하였다. 썩기형 광체모형의 구조는 전체적으로 앞의 맥폭이 변하는 모형과 비슷하나 맥폭이 각각 20 m와 10 m로 조금 더 넓으며, 맥상광체의 길이 a 와 b 가 각각 150 m와 50 m이다. 전기비저항분포는 앞의 맥폭이 변하는 모형에서와 같이 표토층, 모암, 광체가 각각 30, 100, 5 ohm-m를 갖는다고 가정

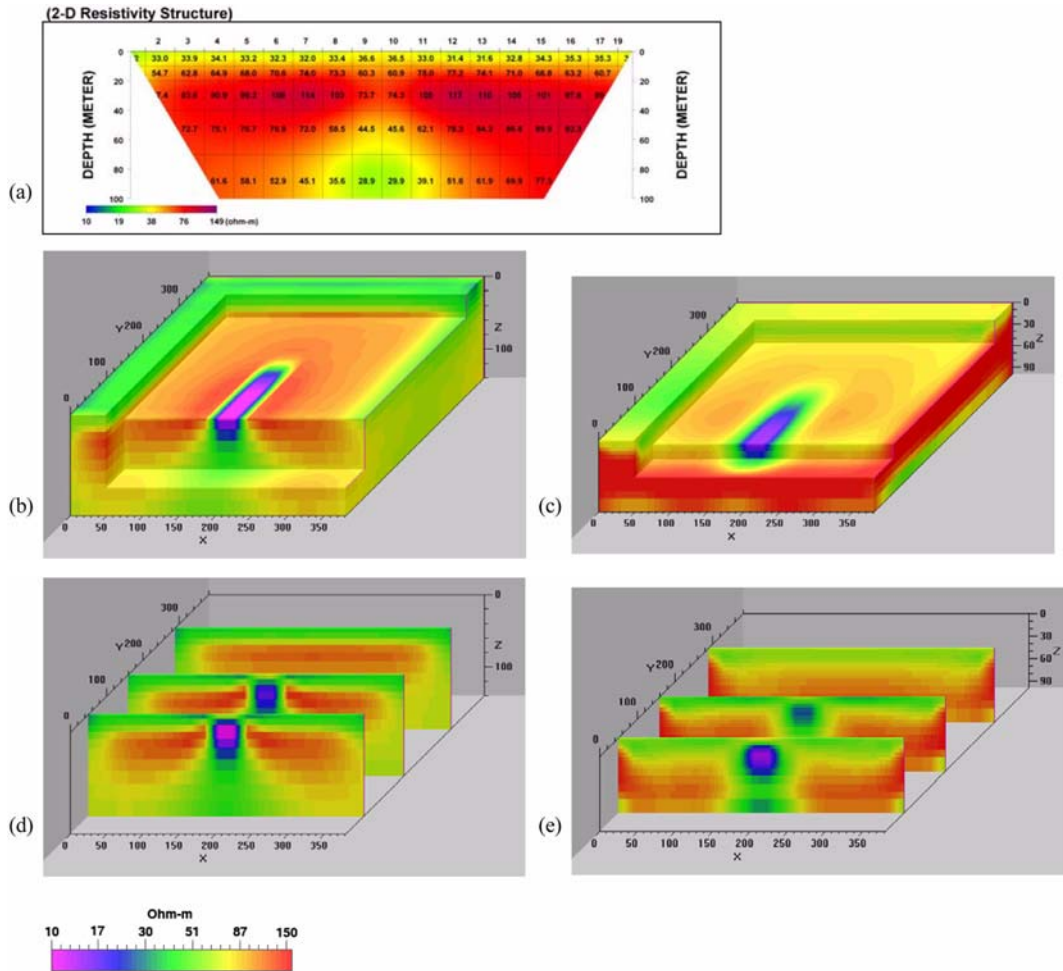


Fig. 7. 2D inversion result (a) along the survey line $y=220$ m, 3D inversion results (b and d) for 2D dipole-dipole data acquired along 21 survey lines ($y=0, 20, 40, \dots, 400$ m), and 3D inversion results (c and e) for 3D pole-pole data for the wedge-shaped model (Fig. 6). The number of grids between electrodes is 8 for 3D modeling and 4 for 3D inversion.

하였다. Fig. 7a의 2차원 단면에 대한 2차원 역산 해석 결과에서는 축선이 $y=220$ m로 광맥으로부터 벗어나서 위치해 있어 지하에 어떤 이상체도 존재하지 않지만 역산단면의 80 m 이하 심부에 저이상대가 존재하는 것처럼 결과가 나왔다(민동주 외, 2009). 그러나 Figs. 7b-7e에서 보여지는 바와 같이 주향에 수직인 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사자료의 3차원 역산 해석 단면에서는 썩기형 구조가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 3차원 단극자-단극자 자료에서는 앞에서와 마찬가지로 광맥이 좁아지다가 사라지는 구조를 잘 보여주고 있으나 쌍극자-쌍극자 탐사자료의 해석 단면에 비해 경계가 불명확하다.

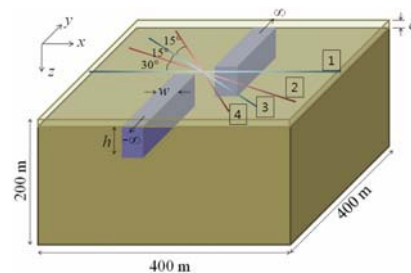


Fig. 8. A fault model. The width w and height h of the ore bodies are 10 and 70 m, respectively. The intervals between two ore bodies are 20 m along x - and y -axes. The depth d of the weathered layer is 10 m. Electrodes are spread along the survey lines Nos. 1, 2, 3, and 4 with the spacing of 20 m. The resistivity values of the weathered layer, the ore body, and the background are 30, 5, and 100 ohm-m, respectively.

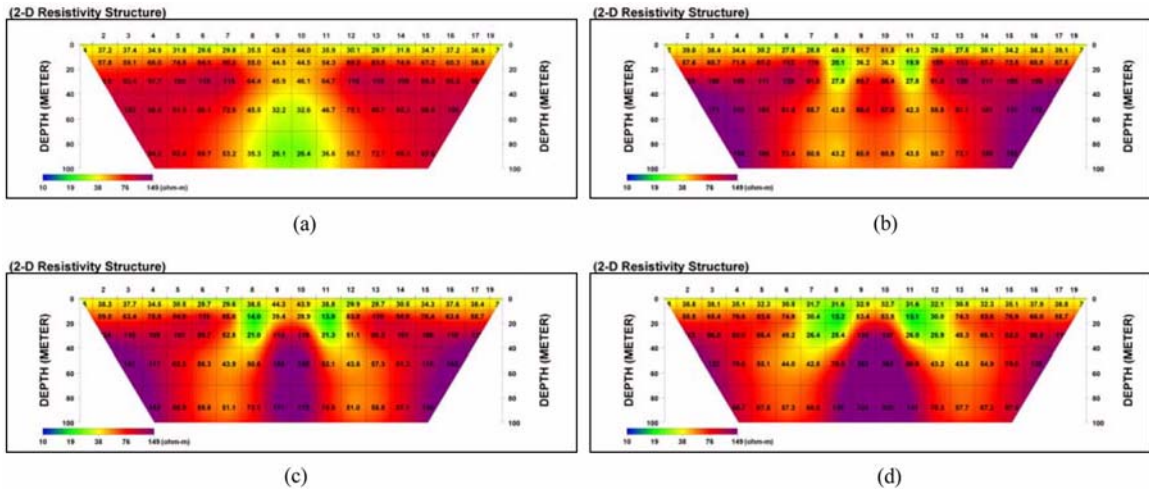


Fig. 9. 2D inversion results computed along the survey line Nos. 1-4 for the fault model shown in Fig. 8. The angle between the survey line and the strike is (a) 90° for No. 1, (b) 60° for No. 2, (c) 45° for No. 3, and (d) 30° for No. 4.

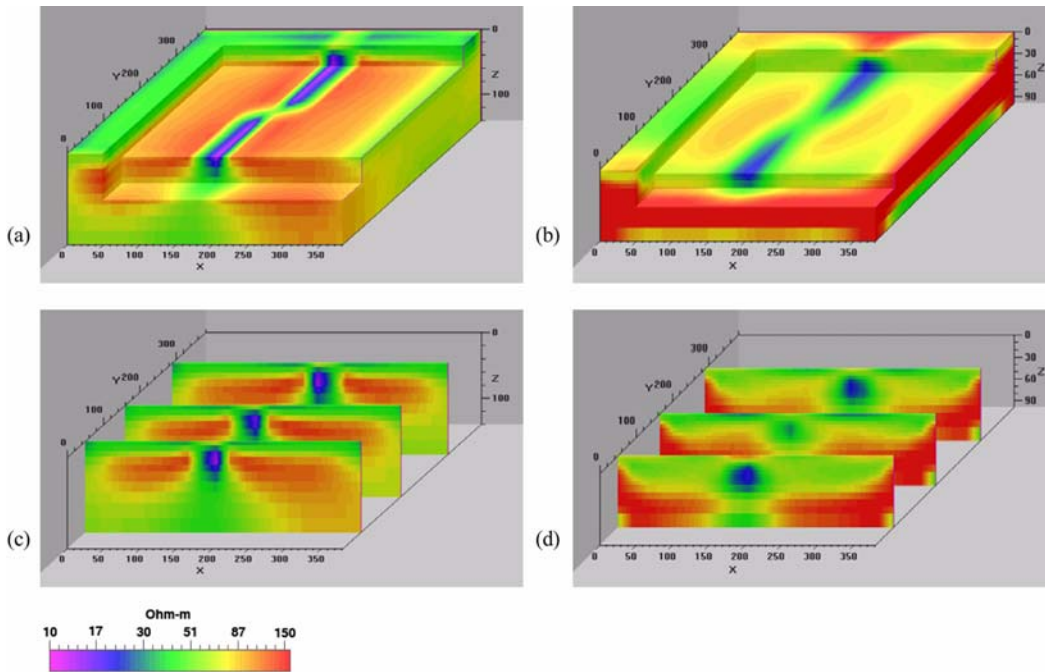


Fig. 10. 3D inversion results (a and c) for 2D dipole-dipole data acquired along 21 survey lines ($y=0, 20, 40, \dots, 400$ m), and 3D inversion results (b and d) for 3D pole-pole data for the fault model (Fig. 8). The numbers of grid between electrodes is 8 for 3D modeling and 4 for 3D inversion.

단층으로 어긋난 맥상광체 모형

국내에 존재하는 맥상광체는 대체로 복잡한 구조를 가지고 있으며, 가장 흔히 나타날 수 있는 구조가 바로 맥상광체가 단층에 의하여 서로 어긋나 있는 경우이다. Fig. 8은 단층에 의하여 맥상광체가 분리되

어 있는 구조를 보여주고 있다. 각 광체는 10m의 폭을 가지고 있으며, 모형의 중심을 기준으로 각 광체가 x축과 y축으로 각각 10m씩 떨어져 있다고 가정하였으므로 x축과 y축에서 광체사이의 거리는 각각 20m가 된다. Fig. 9에서와 같이 주향방향을 모른

다고 가정하고 주향과 90, 60, 45, 30°의 각을 이루는 축선(x축과 0, 30, 45, 60°의 각을 이룸)에 대하여 2차원 탐사를 통하여 얻은 결과를 2차원 역산하였다. 또한 앞에서와 같이 주향을 알고 있다고 가정하고 주향에 수직인 21개 축선에 대하여 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사를 수행했을 때와 주향을 모른다고 가정하고 3차원 단극자-단극자 탐사를 수행했을 때 얻은 자료에 대하여 역산을 수행하였다. Fig. 9의 2차원 역산해석 단면에서 보면 축선이 주향에 수직인 경우 축선 하부로 어떤 광체도 지나가지 않지만 역산단면에서는 하부에 큰 규모의 저비저항대가 나타나고 있다. 축선이 주향과 60, 45, 30°의 각을 이루는 경우에는 광체가 단층에 의해 분리된 구조가 잘 나타나나 축선이 주향과 이루는 각이 작을수록 하부쪽에 고비저항대가 강하게 나타나는데 이는 역산과정에서 상부의 저비저항대를 보상하기 위해 나타나는 현상으로 추정된다. 이는 민동주 외(2009)가 수직 광체구조와 경사진 광체구조에 대하여 얻은 결과와 유사한 것으로 이러한 결과들로부터 축선의 방향이 주향과 45° 이내의 각을 이루는 경우 지하지질구조와 상관없이 항상 하부에 고비저항대가 나타남을 알 수 있었다. Fig. 10의 3차원 역산해석 결과에서는 쌍극자-쌍극자 배열을 이용한 경우와 단극자-단극자 배열을 이용한 경우 모두 단층에 의해 분리된 광체 구조가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

결 론

일반적으로 2차원 전기비저항 탐사를 수행하고 2차원 역산해석을 수행할 경우 주향방향으로 매질의 물성이 일정하다고 가정한다. 그러나 이러한 2차원 전기비저항 탐사를 광상탐사에 적용할 경우 실제 광체구조가 주향방향으로 일정하지 않고 맥폭이 좁아지다가 사라지거나 또는 단층에 의하여 광체가 끊어져 있는 경우가 많다. 이러한 경우 하나의 축선에 대하여 2차원 탐사를 수행하고 그 자료를 2차원 해석할 경우 왜곡된 해석을 할 수 있다. 따라서 3차원 탐사를 수행하고 3차원 역산해석을 수행하든지 아니면 주향에 수직인 여러 축선에 대하여 2차원 탐사자료를 얻고 이들을 3차원 역산해석하는 방법을 수행할 필요가 있다. 이 연구에서는 주향방향으로 매질의 물성이 일정한 맥상광체 모형, 맥폭이 변화하는 모형 및 맥이 중간에 사라지는 썬기형 모형과 단층에 의

해 맥상 광체가 분리된 모형을 가정하고 3차원 단극자-단극자 탐사 및 주향에 수직인 여러 축선에 대한 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사 시뮬레이션 자료를 3차원 역산해석한 후 이를 2차원 역산해석 단면과 비교하였다. 2차원 자료에 대한 2차원 해석 단면과 3차원 해석 결과 중 동일한 단면을 추출하여 비교하면 두 결과가 비슷한 양상을 보여줌을 알 수 있었다. 주향에 수직인 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사자료를 3차원 해석한 단면과 3차원 단극자-단극자 탐사자료의 3차원 해석 단면을 비교해 보면, 3차원 단극자-단극자 탐사 결과가 쌍극자-쌍극자 탐사결과에 비해 경계면이 모호해지는 단점이 있으나 전체적인 구조는 잘 나타내주고 있었다. 이는 단극자-단극자 배열의 일반적인 특징이다. 또한 주향방향에 대한 정보가 없어 축선이 주향과 45° 이내의 각을 이루는 경우 실제 구조와 상관없이 지하 깊은 곳에 고비저항대가 나타남을 알 수 있었다. 이상의 결과를 종합해 보면 전기비저항탐사를 광상탐사에 적용할 때 지하 지질구조의 주향을 알고 있는 경우에는 주향에 수직인 축선들에 대하여 2차원 탐사를 수행한 후 이를 3차원 해석하는 것이 가장 바람직하며, 주향에 대한 정보가 전혀 없을 경우 해상도는 떨어지지만 3차원 단극자-단극자 탐사를 통하여 3차원 자료를 얻는 것이 바람직할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 한국지질자원 연구원의 국정과제인 “USN 기반 융합자원탐사 시스템개발”의 위탁연구과제의 일환으로 수행된 연구이며, 교육과학기술부에서 지원하는 서울대학교 BK21 2단계 에너지자원인력양성사업단에서 일부 지원받았습니다. 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 민동주, 정현기, 박삼규, 전효택, 판나은, 2008, 국내 금속 광 탐사를 위한 쌍극자-쌍극자 전기탐사의 적용성 연구. 물리탐사, 11, 250-262.
- 민동주, 정현기, 이효선, 박삼규, 이호용, 2009, 국내 맥상 광체조사를 위한 3차원 쌍극자-쌍극자 전기비저항 탐사의 적용성 분석. 지구물리와 물리탐사, 12, 268-277.
- 박종오, 김희준, 송무영, 유영준, 2005, 3차원 전기비저항 역산 방법을 이용한 삼보광산에서 금광탐사. 지질공학 회지, 15, 19-27.

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, 43-95.

정현기, 이호용, 권병두, 2003, 정밀 전기비저항 지반조사를 위한 3차원 탐사의 일부 적용성 모델링 연구. 한국지구시스템공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문초록집, 113-118.

Jung, H.-K., 2007a, A geophysical case history for kaolin

deposits of Gyeongnam area in Korea. The Society of Exploration Geophysicists of Japan, Expanded Abstract.

Jung, H.-K., 2007b, A geophysical case history for limestone deposits of Gangwon area in Korea. The Society of Exploration Geophysicists of Japan, Expanded Abstract.

Spitzer, K., 1995, A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. Geophysical Journal International, 123, 903-914.

2009년 10월 7일 접수
2009년 10월 16일 수정원고 접수
2009년 10월 21일 채택