물리탐사
Vol. 8, No. 2, 2005, p. 145~155

연구논문

심부 지열자원 개발을 위한 원거리 기준점 MT 탐사 자료의 2차원 역산 해석

이태종[1] · 송윤호[1] · Toshihiro Uchida[2]

Two-Dimensional Interpretation of Far-Remote Reference Magnetotelluric Data for Geothermal Application

Tae Jong Lee[1], Yoonho Song[1] and Toshihiro Uchida[2]

요 약 : 경상북도 포항시 흥해읍 일대에서 지열자원 개발을 위한 심부 파쇄대 탐지를 목적으로 수행된 자기지전류 (MT) 탐사에서 경북 안동과 충북 청원시의 대청호 및 일본의 Kyushu에 원거리 기준점을 설치하고 이를 이용한 자료처리 결과의 상호 비교를 통하여 원거리 기준점에 따른 겉보기 비저항과 위상 자료의 질을 검토하였다. 대상지역에서 약 165 km 떨어진 대청호 자료를 이용한 경우는 전력주파수인 60 Hz 대역과 자연 전자기장 신호가 미약한 10^{-1} Hz ~ 1 Hz 대역을 제외한 주파수 대역에서 매우 좋은 자료를 얻을 수 있었으며, 약 480 km 떨어진 Kyushu 원거리 기준점 자료를 이용해서 거의 모든 주파수 대역에서 연속성이 매우 좋은 전기비저항과 위상 곡선을 얻을 수 있었다. 이를 이용하여 2차원 역산을 수행한 결과, 지표의 10 ohm-m 이내의 전기비저항을 보이는 반고결 이암층은 대상지역의 남쪽에서는 약 500 m 이상, 북쪽에서는 200 m 이내의 두께로 분포하며 북에서 남으로 경사진 형태로 나타났다. 심도 500 ~ 1,500 m에서 저비저항(L-2)과 고비저항(H-2)의 경계면은 단층면으로 해석되며 측점 206, 112와 414를 지나는 대략 N15°E의 주향을 보인다. 1 km 이내의 천부의 저비저항 이상(L-4)은 파쇄대로 해석되며 측점 105를 지나면서 대략 N60°W의 주향을 보인다. 또한, 북쪽의 큰 하천을 따라 저비저항 이상대가 공통적으로 나타나 구조선일 가능성을 시사한다. 그리고, 대상지역의 서쪽과 서남쪽의 2 ~ 3 km 하부에서 10 ohm-m 이내의 저비저항 이상대(L-3)가 나타나는데 이 층에 대해서는 향후 추가적인 연구가 요구된다.

주요어 : 심부지열 개발, 포항, 원거리기준점 자기지전류 (MT) 탐사, 2차원 역산

Abstract : A two-dimensional (2-D) interpretation of MT data has been performed for the purpose of fracture detection for geothermal development. Remote stations have been operated in Kyushu, Japan (480 km apart) as well as in Korea (60 km and 165 km apart in 2002 and 2003 data set, respectively). Apparent resistivity and phase curves calculated by remote processing with the Japan remote data showed enough quality for 2-D inversion for the whole frequency range. Remote reference processing with Korea remote reference data also showed quite good continuity in apparent resistivity and phase curves except some noisy frequency bands; around the power frequency, 60 Hz, and around the dead band 10^{-1} Hz ~ 1 Hz, where the natural EM signal is known to be very weak. Even though the subsurface showed severe three-dimensional (3-D) characteristics in the survey area so that 2-D inversion by itself could not give enough information for deep geological structures, the 2-D inversion for the 5 survey lines showed several common features. The conductive semi-consolidate mudstone layer is dipping from north to south (about 500 m depth on the south and 200 m on the north most part of the survey area). The boundary between the low (L-2) and high (H-2) resistivity anomalies can be thought as a major fault with strike N15°E, passing through the sites 206, 112 and 414. The shallow (< 1 km) conductive anomalies (L-4) seem to be fracture zones having strike E-W (at site 105) and N60°W (at site 434). And there exists a conductive layer in the western and west-southern part of the survey area in the depth below 2 ~ 3 km, for which further investigation is to be needed.

Keywords : geothermal development, Pohang, remote-reference MT, 2-D inversion

서 론

마그마성 기원의 지열에너지를 기대하기 어려운 국내의 지질 환경에서 지열에너지의 개발은 심부 파쇄대를 따라 이동하는 중, 저온의 지열수의 형태가 주를 이루며, 따라서 우리나라의 지열탐사는 열원이 될 수 있는 심부 화강암체까지 연장되

*2005년 4월 14일 접수

1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부(Ground Water and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)
megi@kigam.re.kr
2) 일본 산업기술총합연구소(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology of Japan)

어 있는 심부 파쇄대를 탐지하여 이를 통로로 배태하는 지열수의 개발을 그 목표로 설정함이 타당할 것이다(송윤호 등, 2003).

2 km 이상의 심부 파쇄대 탐지를 위해 적용 가능한 지표탐사 기법으로는 탄성파 탐사와 중력 및 자력탐사, 그리고 전자탐사 중 가탐심도가 가장 깊은 장점을 가지는 자기지전류탐사(MT 탐사: magnetotelluric survey)를 생각할 수 있다. 이들 중 탄성파 탐사는 그 해상도 측면에서 가장 우수하지만 육상에서 가탐심도 2 km 이상의 자료를 얻기 위해서는 매우 강력한 송신원이 요구되나 국토가 좁은 국내에서는 탐사지역이 주거지역이나 논 혹은 밭에 인접한 경우가 많아 육상에서 심부에 적용하기는 현실적으로 어렵다. 또한 중력 및 자력탐사는 파쇄대의 수평적인 분포에 대한 정보는 가능하나 수직적인 연장이나 해상도 측면에서 현저히 떨어진다. 따라서 해상도와 현실적인 적용가능성 측면을 고려할 때 육상에서 심부 파쇄대 탐지에는 MT 탐사가 가장 효과적인 탐사법이라고 할 수 있다.

MT 탐사는 자연적으로 존재하는 전자기장을 신호원으로 사용하기 때문에, 매우 깊은 가탐심도의 장점에 반해 신호의 세기가 매우 미약하여 약한 인공적인 잡음에 대해서도 매우 취약하다. 국토가 좁은 우리나라는 송전선, 마을, 전신주와 같은 인공적인 전자기 잡음원이 어디에나 산재해 있다. 또한 지층이 오래되고 전기비저항이 매우 높기 때문에 이들 인공적인 전자기 잡음은 감쇠가 적어 매우 먼 거리까지 전파할 수 있는 지질적 특성을 가지고 있다. 이러한 특성 때문에 우리나라는 MT 탐사를 위한 측면에서는 최악의 조건을 가진다고 할 수 있으며 기존에 국내에서 MT 탐사가 성공적으로 이루어진 경우가 드문 것은 이러한 이유에 의한다고 할 수 있다. 본 연구지역 역시 매우 큰 잡음원이 될 수 있는 포항시와 흥해읍 그리고 고압의 송전선과 인접해 있어 전자기 잡음이 클 것으로 예상된다.

이러한 지엽적인 잡음의 영향을 최대한 배제하기 위해 이들로부터 자유로울 수 있는 원거리에 기준점을 설치하여, 기준점과 측점의 자기장의 상관성을 이용하여 자료처리를 수행하는 원거리 기준점(remote reference) 방식을 사용한다(Gamble *et al.*, 1979). 원거리 기준점은 보통 전기장이 평면파 조건을 만족하는 표피심도의 4배 이상 떨어져 설치한다(Zonge and Hughes, 1991). 그러나 현실적으로는 지하의 전기비저항 구조를 알 수 없으므로 표피심도의 4배라는 것은 매우 모호하기 때문에 100 km 이상 떨어져 원거리 기준점(far remote reference)을 운용하기도 한다(Takasugi and Muramatsu, 1991; Takakura *et al.*, 1994; Fiordelisi *et al.*, 1995).

본 연구에서는 심부 지열수의 이동 통로가 될 수 있는 심부 파쇄대 탐지를 목적으로 경상북도 포항시 북구 흥해읍 일원에서 원거리 기준점 MT 탐사를 수행하였다. 원거리 기준점을 국내뿐만 아니라 우리나라에 비해 상대적으로 전자기 잡음이 덜한 일본 Kyushu (九州)의 Ogiri (大霧) 지역에도 설치, 운영하여 국내 원거리 기준점에 의한 자료처리 결과와 비교하였다. 현장 MT 탐사는 2002년과 2003년의 2년에 걸쳐 수행되었으며 얻어진 겉보기 비저항과 위상을 이용하여 5개의 측선에 대하여 2차원 역산을 수행하고 이들 결과에서 공통적으로 나타나는 심부 지질구조를 해석하고자 하였다.

조사지역의 지질 및 선구조

조사지역은 행정구역상 경상북도 포항시 북구 흥해읍에 위치한다. 이 일대는 제3기 포항분지 중부에 해당되며 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하는 퇴적암류를 최기저층으로, 이를 분출하여 덮거나 관입한 제3기 에오세의 석질결정질응회암, 흑운모화강암, 규장암, (용결)결정질응회암 등이 기반암을 이루며 분포하고 있다. 그리고 조사지역의 최상부에는 이 지층들을 부정합으로 덮는 제3기 연일층군의 반고결 퇴적암류가

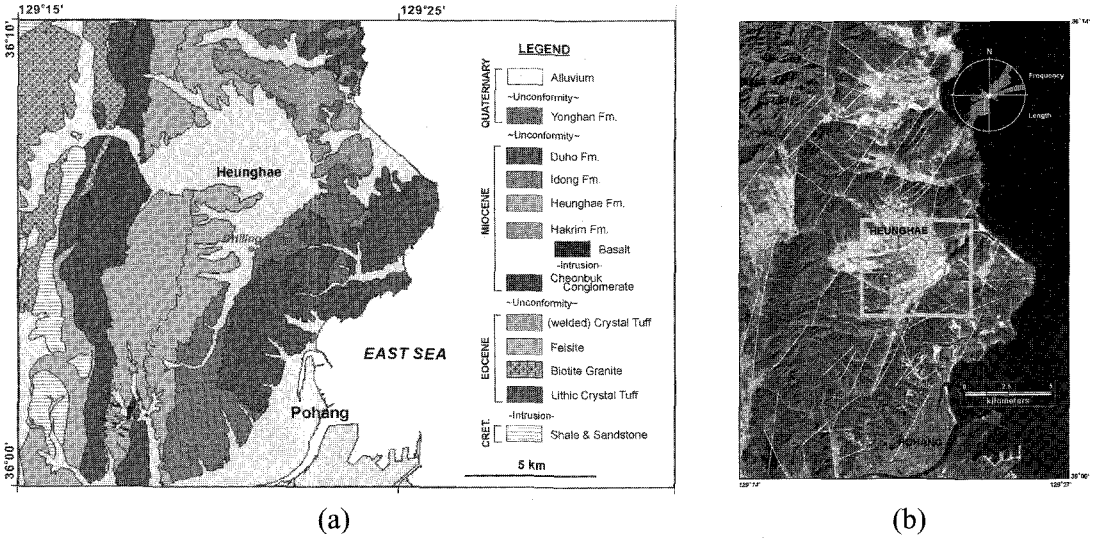


Fig. 1. Geological map (a) and lineament distribution (b) around the survey site. The box in (b) indica the survey area (after Song *et al.*, 2004).

분포한다.

포항분지는 천북역암, 학림층, 흥해층, 이동층, 두호층 등으로 구성된 제3기 마이오세의 연일층군의 지층들로 충전되어 있으며, 이 지층들은 최하위에 육성기원의 퇴적층을 일부 포함하나 주로 해성환경 기원의 반고결 쇄설성퇴적암류로 구성된다. Fig. 1(a)는 포항도폭(엄상호 등, 1964)을 기초로 지층경계의 일부를 수정하여 작성된 것이다(송윤호 등, 2004). 중앙부의 흥해분지는 동-서 및 남-북 방향의 수계가 발달하며, 이들은 분지 중앙부에서 합류하여 동해로 유입된다.

흥해분지 서쪽지역의 남-북 및 북동-남서 방향의 지형계곡은 양산단층이 통과하는 지역이며, 이 지역에서의 양산단층은 하나의 단층선이 아닌 방향이 상이한 여러 단층선으로 추적되나, 전체적으로는 양산단층의 발달 방향인 북북동-남남서 방향을 유지하고 있다(Fig. 1(b)). 흥해 지형분지는 지형적 기복이 거의 없는 평탄면으로 구성되어 있어 선구조선의 판독이 어려우나 동-서 및 남-북 방향의 유로가 흥해 지역 외곽에서 확인되는 선구조선의 방향과 연장성이 일치하는 것으로 보아 지질구조선일 가능성이 높다(송윤호 등, 2004).

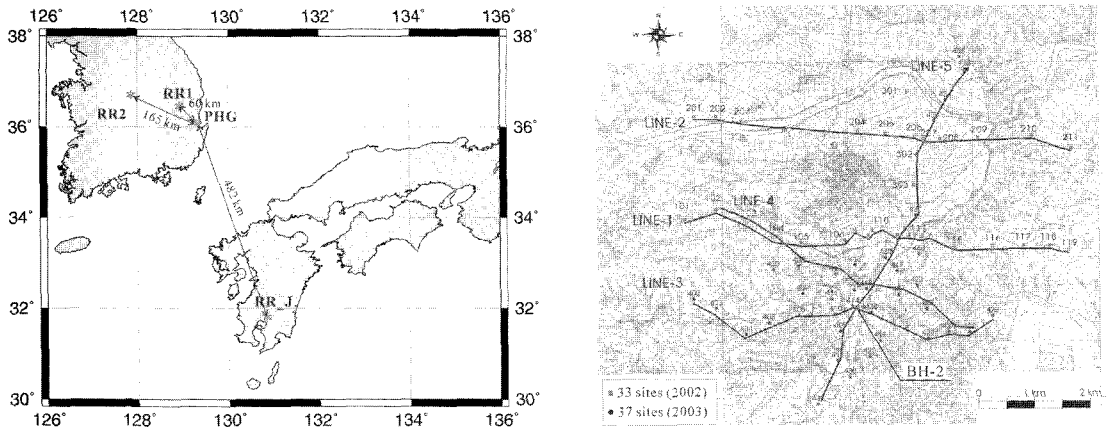
원거리 기준점 MT 탐사

MT 탐사는 2002년과 2003년의 두 차례에 걸쳐 이루어졌으며 Fig. 2(b)에 2002년에 얻어진 33측점과 2003년의 37측점의 위치를 보였다. 탐사에 사용된 장비는 캐나다 Phoenix사의 24 bit 탐사장비인 MTU-5 및 MTU-5A이며 2003년의 경우 탐사현장에서 6대, 한국과 일본의 원거리 기준점에 각각 1대씩 설치하여 총 8대를 운용하였다. Phoenix MTU system은 GPS를 이용하여 측정점의 위치 및 시간 정보를 수신하여 측정점과 원거리 기준점간의 시간동기화(synchronize)가 이루어지며, 독립된 하나의 시스템으로 전기장 2성분과 자기장 3성분의 텐서 측정이 가능하도록 설계되어 있다. 측정은 상대적으로 인공적인 잡음이 덜할 것으로 예상되는 야간 시간대를 이용하여 전일 오후 5시부터 다음날 오전 8시까지 총 15시간 동안 이루어졌으며, 양질의 자료를 위해 같은 측정점에서 이틀에 걸쳐 자료를 획득하였다.

원거리 기준점은 Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 2002년에는 현장에서 약 60 km 떨어진 경상북도 안동시 임하면의 임하호 호반(RR1)에, 2003년 탐사에서는 약 165 km 떨어진 충청북도 청원시의 대청호내 고립된 섬(RR2)에 각각 설치하여 운영하였으며, 이와 동시에 국내의 지질여건 및 인공잡음원의 과다한 분포로 전기적 잡음이 많음을 감안하여 현장으로부터 약 480 km 떨어진 일본 Kyushu의 Ogiri (RR_J)에서 동시에 측정된 자료를 또 하나의 원거리 기준점으로 해석에 이용하였다.

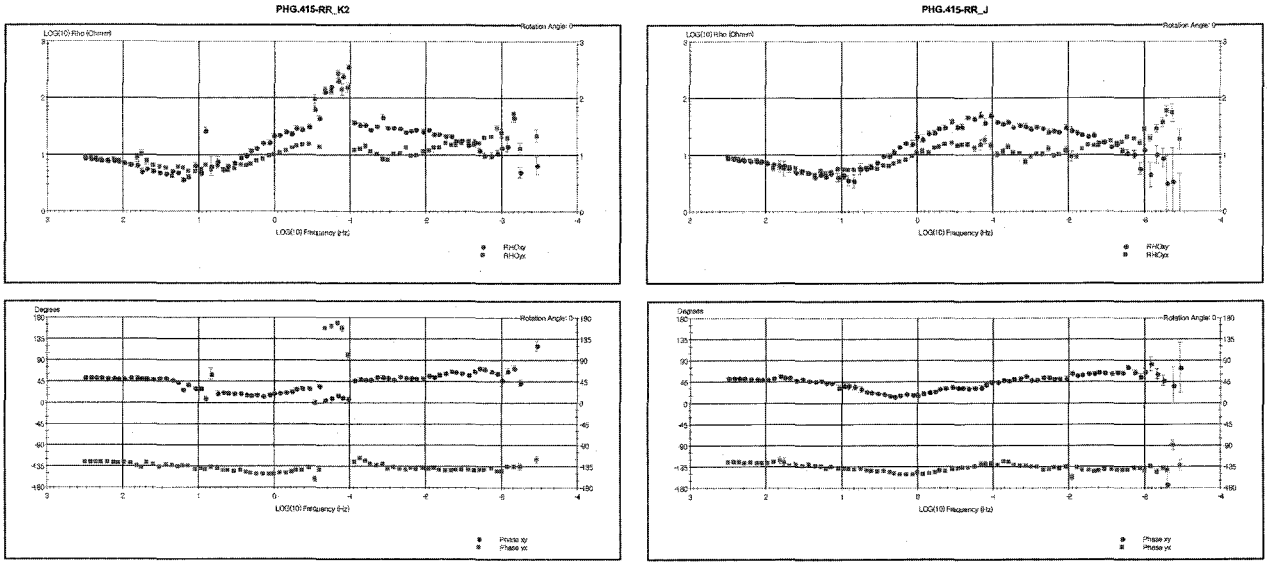
우선 서로 다른 원거리 기준점을 사용한 자료처리가 MT 탐사의 결과인 겉보기 비저항과 위상차에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이때 자료의 처리는 Phoenix 사에서 제공하는 자료처리 소프트웨어 SSMT2000을 이용하였다. 한 측점에서 이틀간 측정된 전기장 2성분, 자기장 3성분과 같은 시간에 측정된 원거리 기준점의 수평자기장 2성분의 시계열을 이용하여 겉보기 비저항과 위상을 계산하였다. Fig. 3은 2003년 얻어진 PHG415 측점에서의 자료로서 각각 대청호(RR2)와 일본 Kyushu (RR_J)의 수평 자기장성분을 이용하여 얻어진 겉보기 비저항과 위상 곡선이다. 이후 tipper, coherency 및 겉보기 비저항과 위상의 연속성 등으로부터 15시간씩 2일에 걸쳐 측정된 시계열 중 잡음에 심하게 오염되거나 분산이 큰 시간대 자료를 수동으로 일일이 제거하여 역산을 위한 최종적인 겉보기 비저항과 위상자료를 얻었다.

그림에서 보면 약 480 km 떨어진 RR_J 원거리 기준점을 이용한 자료가 겉보기 비저항과 위상에서 모두 인접 주파수간의 연결성이 좋게 나타나 자료처리 과정에서 국지적인 잡음을 효과적으로 배제한 것을 확인할 수 있다. 특히 자연 전자기장 신호가 미약한 10^{-1} Hz ~ 1 Hz 대역에서 RR2를 이용한 자료처



(a) (b)

Fig. 2. Locations of the remote reference sites in Korea as well as in Japan (a), and the sitemap of the field survey (b). Five survey lines for 2-D interpretation are superimposed in (b).



(a) (b)

Fig. 3. Apparent resistivity and phase curves for the site PHG415 calculated by remote processing with RR2 (a) and RR_J (b).

리 결과는 자료오차도 크고 인접 주파수간의 연결성이 좋지 않게 나타나지만 RR_J를 이용한 결과는 겉보기 비저항과 위상곡선의 연속성이 매우 좋게 나타나고 있다. 이는 이 주파수 대역의 자연 전자기장의 세기가 약한 원인과 비교적 전기적 잡음이 덜하다고 판단되는 대청호에 위치한 외딴 섬에 원거리 기준점을 설치했음에도 불구하고 국내의 전반적으로 높은 전자기 잡음의 결과, 165 km 덜어진 원거리 기준점 자료도 서로 상관된 잡음에 영향을 받고 있기 때문으로 분석된다. 이는 RR2를 이용한 자료가 우리나라의 전원주파수인 60 Hz 대역에서도 연속성이 떨어져 나타나는 것으로부터도 확인할 수 있다. 이들 주파수대역을 제외하면 RR2를 이용한 결과도 매우 좋은 자료의 질을 보이고 있어 앞으로 국내에서 MT 탐사를 수행할 때 가능한 한 멀리 떨어진 지점의 되도록 전기적 잡음이 적은 곳에 원거리 기준점을 설치하여 운영하면 국내의 높은 전자기 잡음 수준에도 불구하고 양질의 자료획득이 가능함을 보여준다. 여기서는 2003년에 얻어진 자료만을 비교하였으나 2002년에 얻어진 안동(RR1)과 RR_J의 결과도 이와 유사하게 나타났다. 따라서 이후의 2차원 역산 해석을 위해서 RR_J를 이용하여 얻은 겉보기 비저항과 위상자료를 이용하였다.

2차원 역산 및 해석

2002년과 2003년에 Kyushu 원거리 기준점을 이용하여 얻어진 총 70 측점의 MT 탐사 자료 중 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같은 5개 측선에 대하여 2차원 역산을 수행하였다. 2차원 역산에는 자료의 Bayesian likelihood를 최대로 하여 모델의 regularization parameter를 조절하는 최소자승역산(Uchida, 1993)을 이용하였으며 이때 모형반응계산 알고리듬은 유한요소법이다. 이때, 겉보기 비저항과 위상 자료의 자료오차(error bar)의 크기에 따라 가중치를 주도록 하였다. 역산에 이용된 주파수는 2002년에 얻어진 Line-1과 Line-2의 경우는 0.0117 ~ 96 Hz까지의 27개 주파수를, 다른 세 개의 측선은 0.0183 Hz로부터 97 Hz까지 50개 주파수 자료를 이용하였다. 2002년 자료와 2003년 자료의 주파수 대역과 개수가 다른 것은 2002년에는 MTU-5를, 2003년에는 MTU-5 및 MTU-5A를 사용하여 두 경우의 시계열 샘플링 주파수가 달랐기 때문이다. Line-4와 Line-5의 경우는 2002년에 얻어진 측점이 포함되어 있으므로 이 경우는 2003년의 주파수를 기준으로 2002년 자료를 내삽(interpolation)하여 이용하였다. 모든 측선의 역산에서 잡음의 수준은 3%로 가정하였다.

2차원 역산을 위한 각 측점간의 거리는 Line-1, 2는 N95°E, Line-3은 E-W, Line-4는 N60°W, 그리고 Line-5는 N20°E 방향의 직선상에 투영한 거리를 이용하였으며, 역산에 이용된 자료는 각각의 측선이 북쪽과 이루는 각만큼 임피던스 자료를 회전(rotation)시켜 자기장이 측선에 평행한 성분(TE mode)과 수직한 성분(TM mode)의 겉보기 비저항 및 위상을 계산하여 이용하였다. 이중 TE 모드의 경우는 역산에서 수렴에 실패하는 경우가 많아 본 연구에서는 TM 모드만을 이용한 역산결과를 고찰하고자 한다.

Fig. 4는 동-서 방향의 측선 중 가장 북쪽에 위치한 측선 Line-2에 대한 TM 모드 역산 결과를 보여준다. 우선, 역산결과인 (a)에서 대략적인 층서를 살펴보면, 500 m 이내의 심도에서는 10 ohm-m 이내의 낮은 전기비저항을 보이는 지표의 저비저항층(L-1)이 서쪽은 깊고(약 500 m), 동쪽은 얕게(약 150 m 이내) 나타나며 그 하부에 100 ohm-m 내외의 전기비저항을 보이는 층(H-1)이 존재하는 형태를 보인다. 그리고 1 km

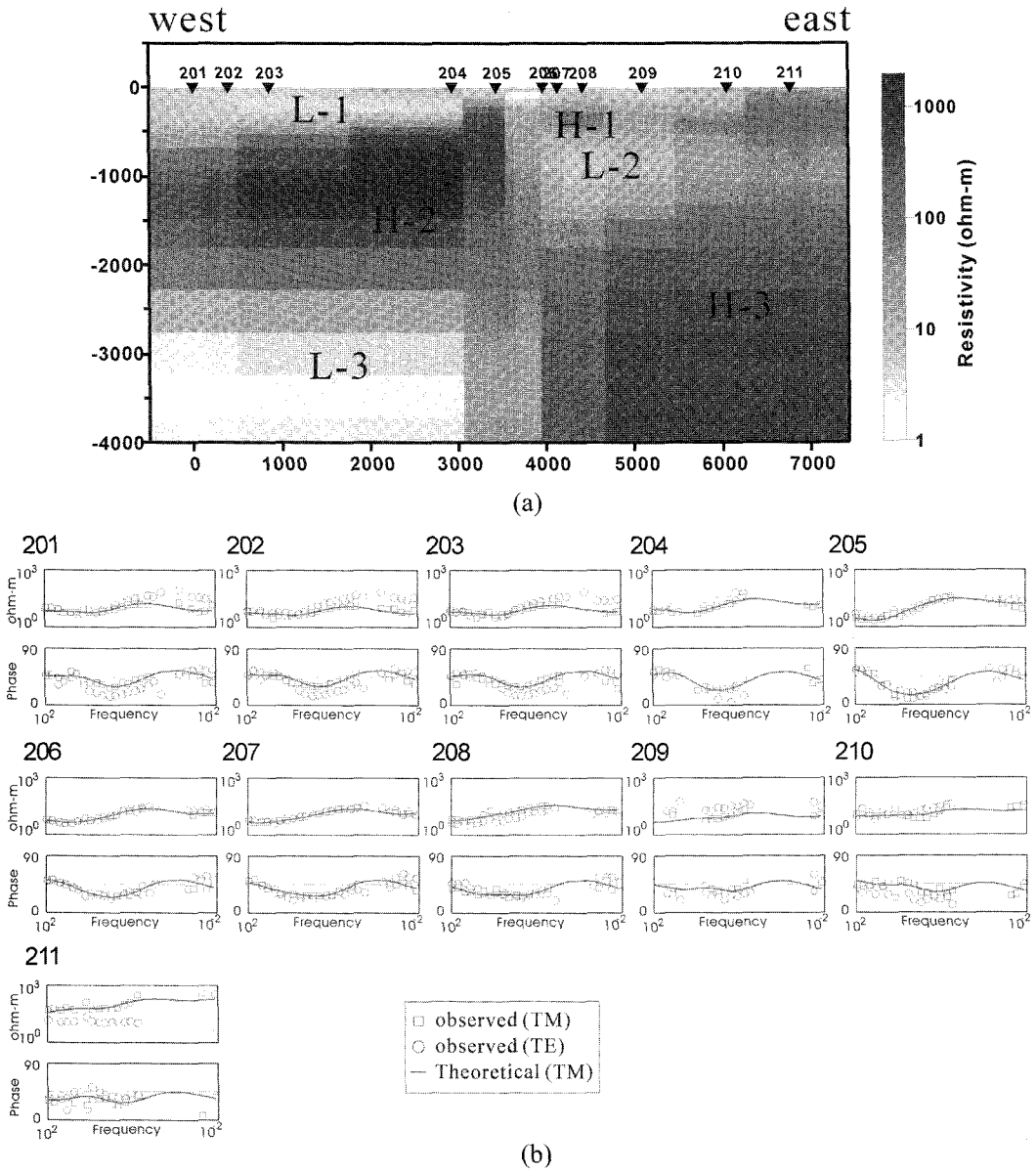


Fig. 4. Resistivity model from 2-D inversion of TM mode data for Line-2 (a), and (b) comparison of observed (symbols) and computed apparent resistivities and phases for the sites on Line-2.

내외의 심도에서는 측점 205를 중심으로 동쪽에서는 저비저항(L-2)을, 서쪽에는 고비저항층(H-2)을 보여 동쪽과 서쪽이 전혀 다른 양상을 보인다. 동쪽의 저비저항층은 측점 206에서 209에 이르는 약 1.5 km에 걸쳐 10 ohm-m 내외로 나타나고 있다. 측점 209 ~ 211에서는 1 km 정도의 심도에서 수십 ohm-m의 범위를 보이는 저비저항 이상이 나타나며 이는 파쇄대에 의한 것일 가능성이 있으나 (b)의 겉보기 비저항과 위상 그래프에서도 알 수 있듯이 이들 세 측점에서의 자료가 전반적으로 좋지 않기 때문에 이 부분의 역산 결과의 신뢰도는 떨어진다고 할 수 있다. 2 km 이하의 심도에서는 상부에서와는 반대로 서쪽은 저비저항(L-3)을 그리고 동쪽에는 고비저항 이상(H-3)을 보이고 있다. 특징적인 것은 이들의 경계가 측점 206을 중심으로 집중되어 나타나고 있다는 것이다.

Fig. 4(b)는 측정된 겉보기 비저항 및 위상과 TM 모드 역산 결과인 (a) 모델에 대한 이론값을 비교한 것이다. 참고를 위하여 측정된 TE 모드 겉보기 비저항과 위상도 함께 도시하였다. 그림에서 TM 모드에 대하여 역산에 의해 계산된 이론값이 측정된 자료의 주파수에 따른 궤적을 잘 따라가고 있는 것으로 나타나고 있고 이는 2차원 역산이 잘 수렴했음을 의미한다. 측점 201 ~ 203에 이르는 측점에서 TE 모드 곡선과 TM 모드 곡선이 저주파수에서 서로 분리되는 것을 볼 수 있는데 이는 이 측점 주위의 심부구조가 1차원이 아닌 2차원 혹은 3차원적인 구조라는 것을 의미한다(Park *et al.*, 1983). 특히, 두 모드의 분리가 10 Hz 부근에서부터 시작하는 것으로 보아 500

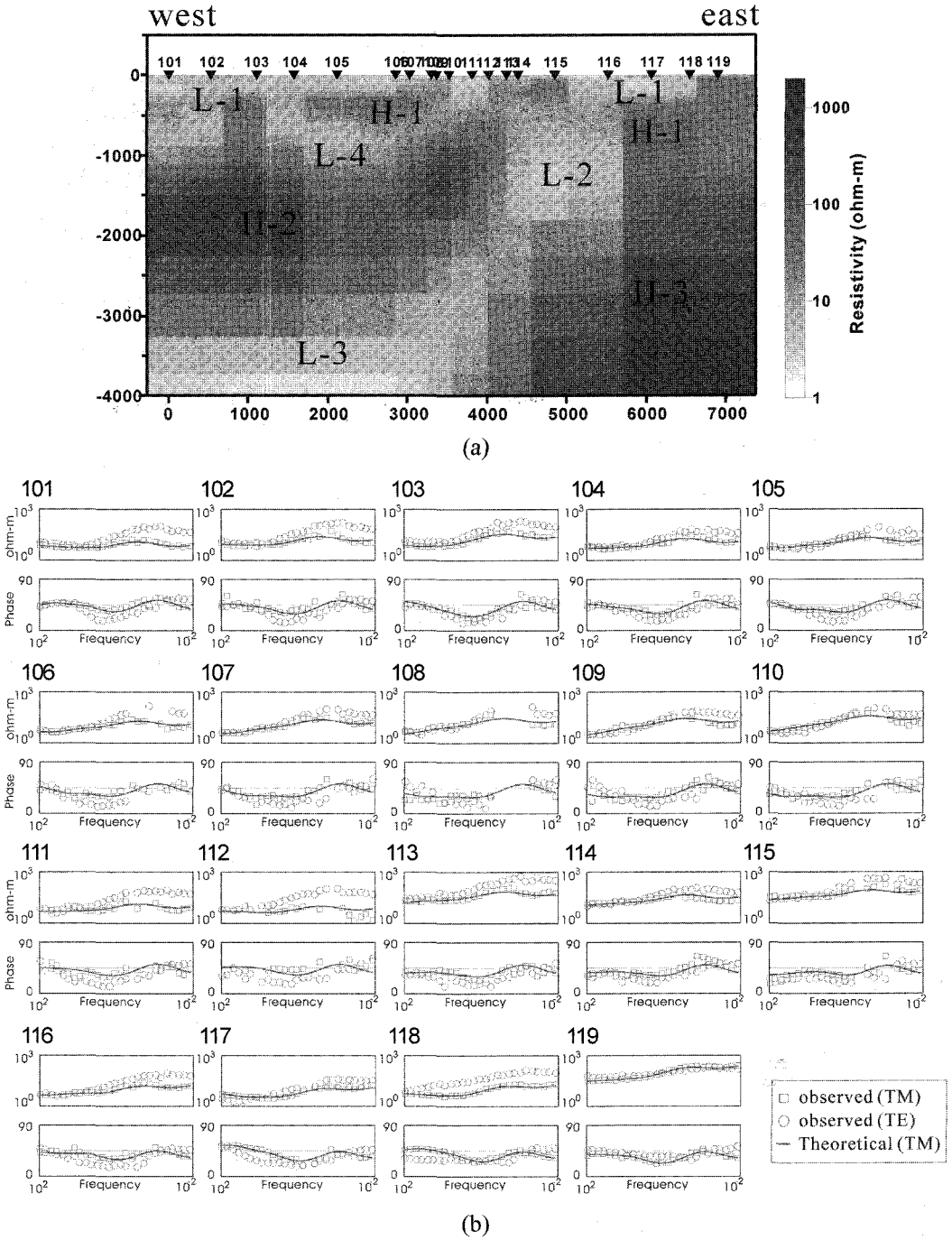


Fig. 5. Resistivity model from 2-D inversion of TM mode data for Line-1 (a), and (b) comparison of observed (symbols) and computed apparent resistivities and phases for the sites on Line-1.

m 내외의 천부로부터 2차원 혹은 3차원 구조가 발달되어 있을 것으로 추정되며 Fig. 2의 측선도상에 나타난 큰 하천과 이를 따라 나타나는 선구조와도 관련 가능성이 있다.

Line-2에서 나타난 전기비저항 구조의 특징적인 양상은 약 2 km 남쪽에 위치한 Line-1의 역산 결과(Fig. 5)에서도 유사하게 나타난다. 즉, 심도 1 ~ 2 km에서는 측점 112를 중심으로 고비저항(H-2)과 저비저항(L-2)의 경계를 보이며 2.5 km 이하의 심도에서는 마찬가지로 동쪽이 고비저항, 서쪽이 저비저항의 형태를 보인다. 이 측선에서도 심도 1 km 부근의 저비저항층 L-2는 측점 112 ~ 116에 이르는 약 1.5 km에 걸쳐 나타나고 있다. 또한 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 이들 측점들에서 겉보기 비저항 곡선이 TE 모드와 TM 모드가 분리되어 나타나고 있어서 이 지역의 2차원 혹은 3차원적인 복잡한 지질구조를 유추할 수 있다.

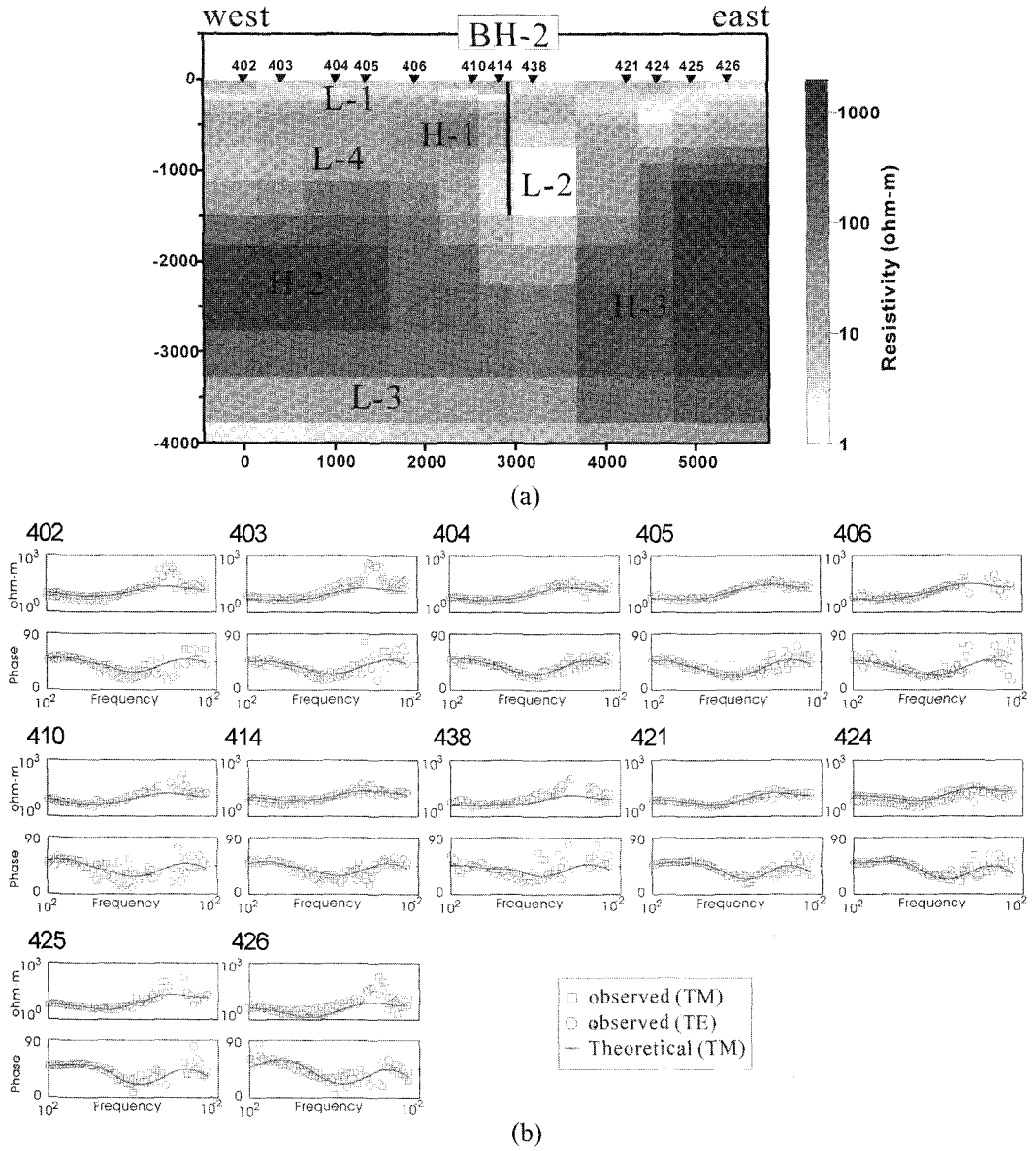


Fig. 6. Resistivity model from 2-D inversion of TM mode data for Line-3 (a), and (b) comparison of observed (symbols) and computed apparent resistivities and phases for the sites on Line-3.

이 측선에서 지표 저비저항층인 L-1은 전반적으로 두께 200 ~ 300 m로 추정되며 특징적인 것은 이 측선의 서쪽 부분은 약 1 km 심도까지 다수의 저비저항 이상대(L-4)가 교차하여 나타나고 있다는 점이다. 이들 저비저항 이상대는 측선과 같은 방향을 따르는 파쇄대의 영향으로 해석될 수 있다. 즉, 이 측선의 서쪽 측점인 101 ~ 105가 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 하나의 계곡을 따라 분포하고 이 계곡은 Fig. 1(b)의 선구조 분석에서도 보인 바와 같이 뚜렷한 하나의 선구조를 이루고 있는 것이 이러한 해석을 뒷받침해 준다.

Fig. 6의 측선 Line-3의 역산 결과에서도 Line-1과 Line-2에서 나타나는 이러한 특징적인 양상을 잘 보여주고 있다. 이 측선은 동쪽과 서쪽 모두 계곡을 따라 측점이 위치하고 있어 1 km 상부에서 나타나는 전반적인 저비저항(L-4)은 이러한 지질학적인 구조를 대변한다고 할 수 있다. 다만 심도는 서쪽이 동쪽보다 깊은 곳까지 연장되어 나타나고 있다. 또한 측점 414를 중심으로 H-2와 L-2의 경계가 나뉘어진다. 특징적으로 이 측선의 3 km 하부에서는 심부 저비저항층 L-3가 동쪽에서는 물론 서쪽에서도 나타나고 있다. 세 측선의 역산결과로부터 2 km 이상의 심부에서 나타나는 L-3는 탐사지역의 서부와 남부 지역에 분포하고 있을 것으로 생각된다. 기존의 시추조사에 의하면 포항지역에서 1.8 km 이내에서 화강암이 발견되는 것으로 알려져 있는데 이렇듯 광범위하게 분포되어 나타나는 심부의 저비저항층에 대하여는 향후 추가적인 연구가 요구된다.

Fig. 7은 Line-4에 대한 TM 모드 역산결과를 도시한 것이

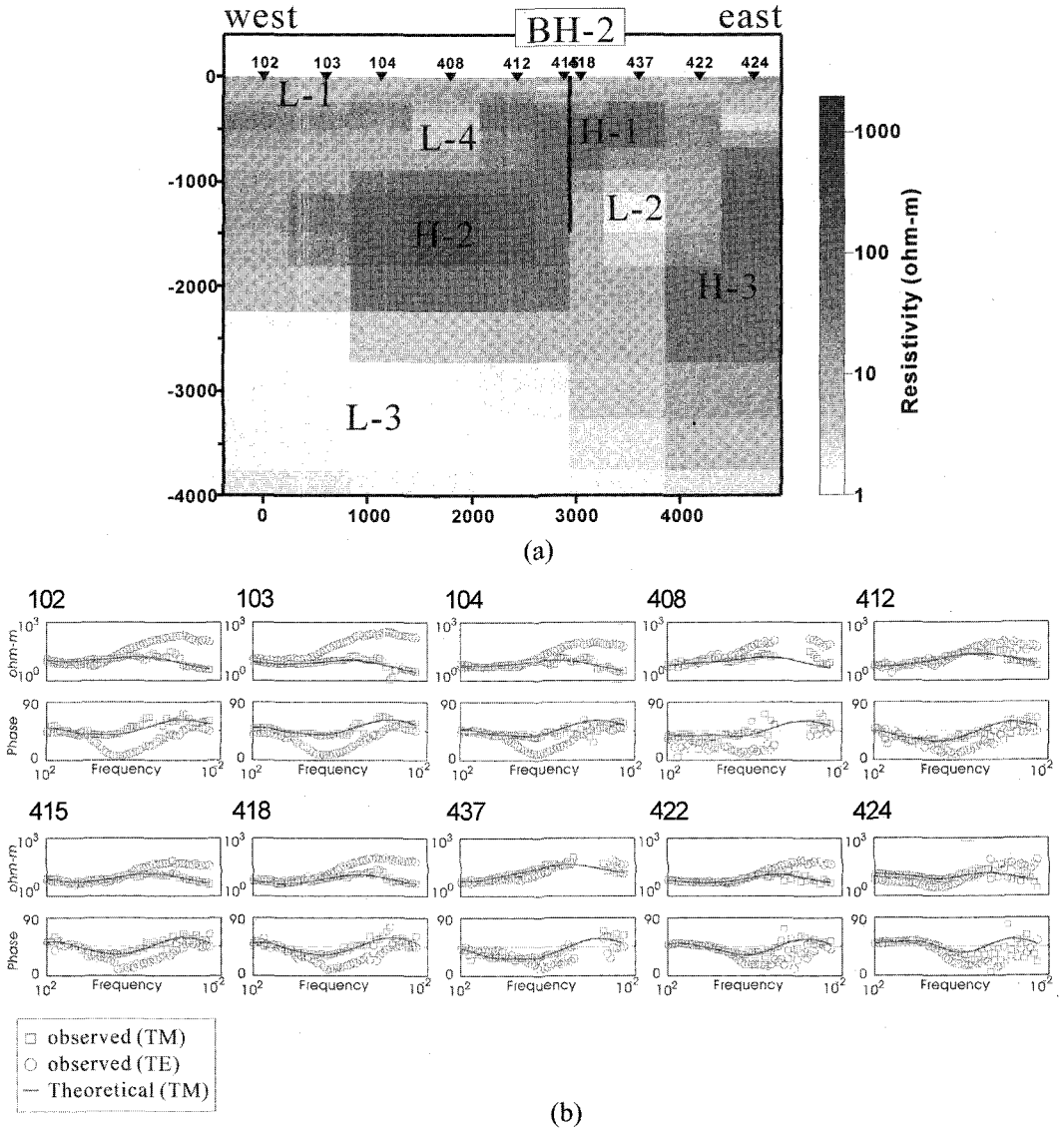


Fig. 7. Resistivity model from 2-D inversion of TM mode data for Line-4 (a), and (b) comparison of observed (symbols) and computed apparent resistivities and phases for the sites on Line-4.

다. 위에서 보인 세 측선에서와 마찬가지로 심도 1 ~ 2 km에서 측점 418을 중심으로 L-2와 H-2의 경계가 나뉘어지고 있다. 심도 1 km 이내에서는 고비저항 층인 H-1 층이 존재하고 이 층 내에서 저비저항 이상(L-4)이 산재하여 나타난다. 이는 앞서도 설명한 바와 같이 Line-4가 측점 102 ~ 104를 잇는 선구조를 따라 위치하기 때문으로 해석되며 따라서 이 선구조는 파쇄대일 가능성이 높고 그 심도는 약 1 km까지 연장되어 있을 것으로 추정된다. 여기서도 동쪽의 심부에서 저비저항층 L-3가 나타나고 있으며 이는 Line-3의 역산결과와도 일치한다. 다만 L-3가 다른 세 개의 측선에서와는 다르게 매우 천부에서부터 시작되고 동쪽과 서쪽에서 모두 나타나고 있다. 이는 (b)의 TM 모드와 TE 모드의 반응에서 그 이유를 찾을 수 있는데, 다른 세 측선과는 달리 이 측선의 거의 모든 측점의 저주파수에서 두 모드의 반응이 매우 다른 양상으로 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 다시 말하면 심부 구조가 단순한 2차원 구조가 아니라는 것을 의미하며 따라서 이러한 경우, TM 모드만을 이용한 역산에서 심부구조를 정확히 표현하기는 어렵기 때문으로 풀이된다. 이러한 경우에는 두 모드의 자료를 동시에 이용하여 역산을 수행하는 것이 마땅하지만 현장자료에는 측점 424와 같이 정적효과(static shift)가 포함되어 있어 두 가지 모드를 동시에 이용한 역산은 수렴에 실패하였으며 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

네 개의 동-서 방향 측선에서 공통적으로 나타나는 가장 특징적인 사실은 측점 206 (Fig. 4), 112 (Fig. 5), 그리고 414 (Fig. 6)를 중심으로 한 L-2와 H-2의 경계이다. 이 경계는 네 측선 모두에서 약 1.5 km 심도까지 연장되어 나타나며 그 하부의 심도에서는 다시 L-3와 H-2의 경계로 이어져 나타난다. 이 경계를 이루는 측점들을 연결하면 Fig. 1에서 보인 선구조

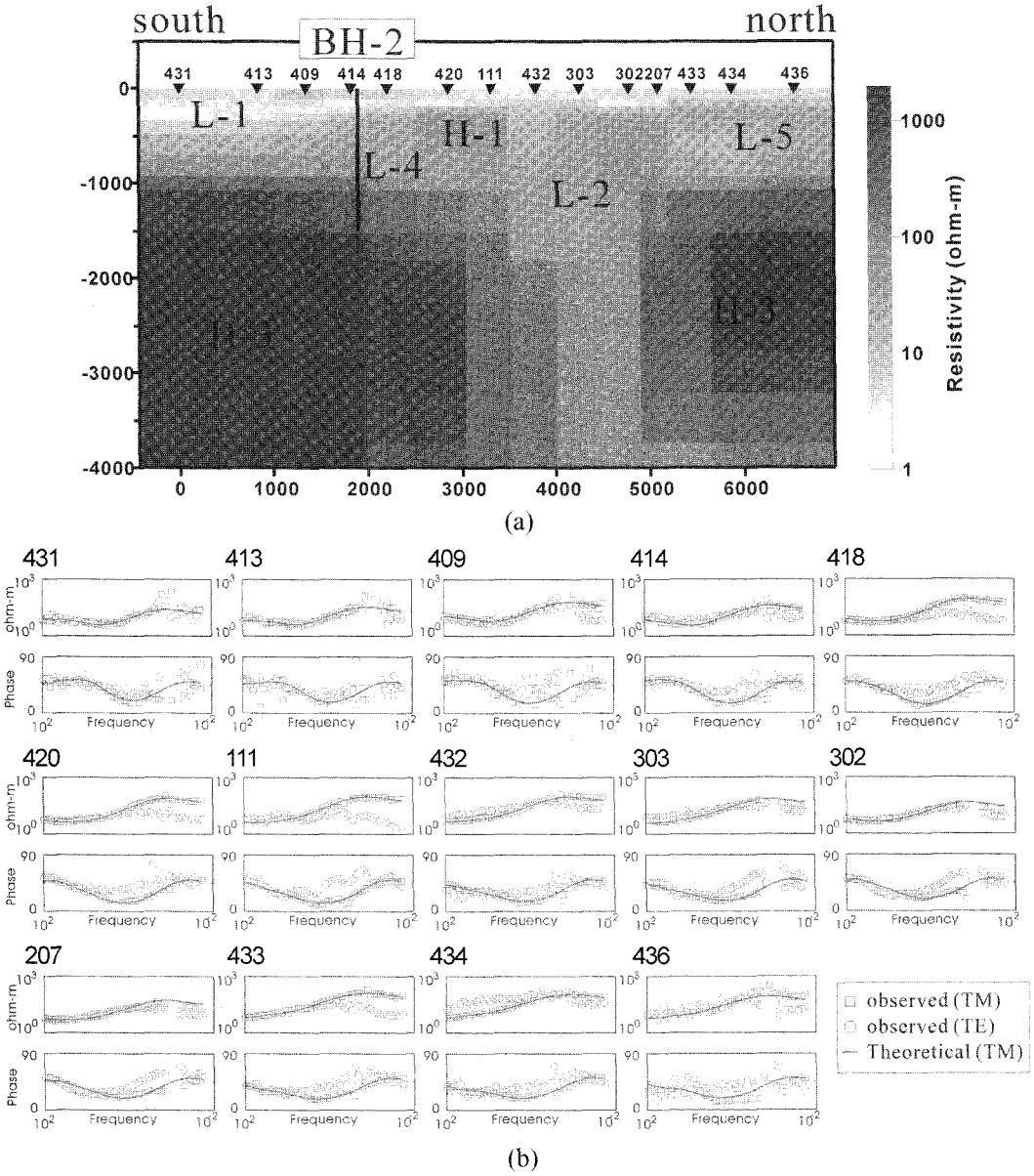


Fig. 8. Resistivity model from 2-D inversion of TM mode data for Line-5 (a), and (b) comparison of observed (symbols) and computed apparent resistivities and phases for the sites on Line-5.

와 매우 유사하게 나타나 이 경계면은 하나의 단층면일 가능성이 매우 높다.

남북방향의 측선 Line-5의 역산결과인 Fig. 8을 보면, 우선 지표의 저비저항층 L-1의 경우는 남쪽에서는 약 500 m에 가까운 두께를 보이고 북으로 갈수록 얇아지는 경향을 보이며 최 북단에서는 200 m 이내의 두께를 갖는 것으로 나타나고 있다. 그 하부에는 역시 H-1 층이 존재하고 있으며 이 층 내에 측점 418 (L-4)과 434 (L-5)를 중심으로 저비저항 이상대가 분포하고 있다. 측점 418을 중심으로 한 저비저항 이상대는 측선 Line-4를 따르는 선구조와 관계가 있는 것으로 보이며, 측점 434를 중심으로 한 저비저항 이상대는 이 지점에서 측선과 교차하는 큰 하천을 따라 발달한 선구조와 관련이 있을 것으로 추정된다.

이 측선에서 심도 1 ~ 2 km 사이에 존재하는 L-2는 비록 동-서 방향의 측선에서처럼 10 ohm-m 내외의 뚜렷한 저비저항 이상을 보이지는 못하나 측점 418로부터 433까지 넓은 범위에 걸쳐 저비저항으로 나타나고 있다.

Line-4의 경우와 마찬가지로 이 측선에서도 대부분의 측점의 수 Hz 이하의 주파수에서 TE 모드와 TM모드 반응이 매우 다른 양상으로 나타나 TM 모드만을 이용한 역산결과는 2 km 이상의 심부구조를 적절히 표현했다고 보기는 어려우므로 논외로 하겠다.

심도 1.5 km의 시험 시추공 BH-2를 교차 혹은 근접하는 측선 Line-3, Line-4 그리고 Line5에 대하여, 시추공의 위치에서

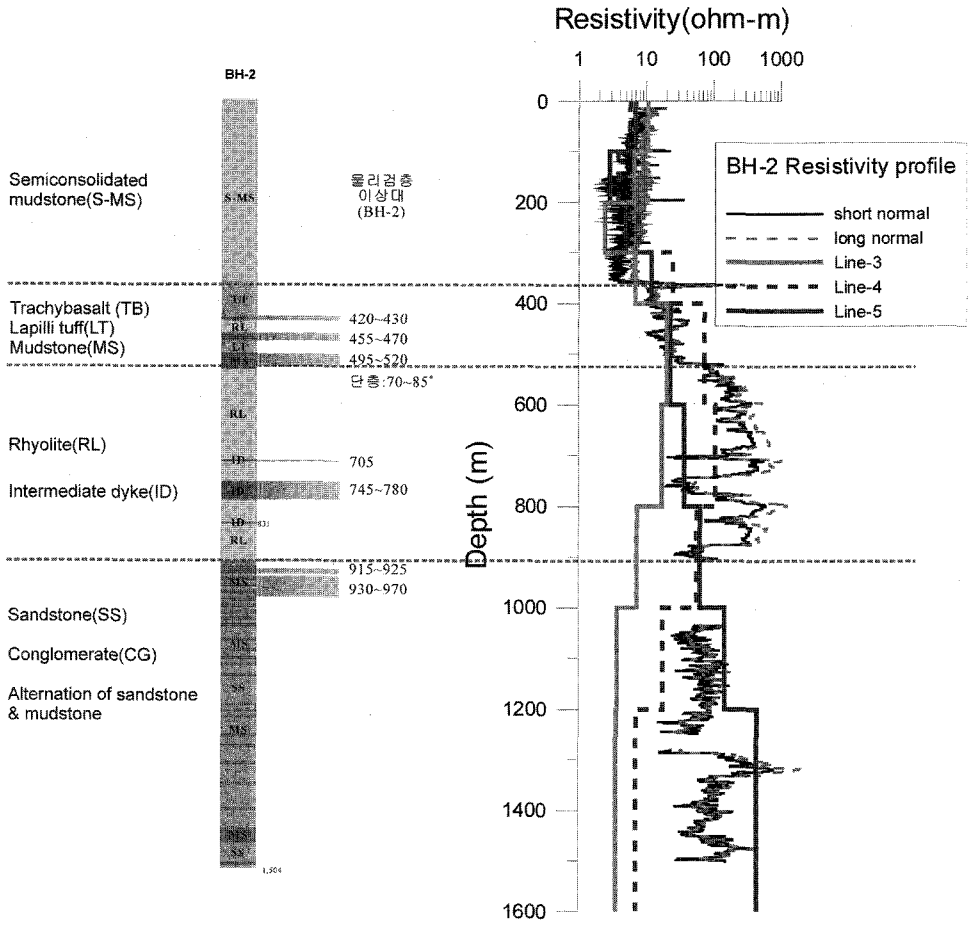


Fig. 9. Layer structure at the test borehole BH-2 and a comparison of the resistivity between the resistivity log and the three profiles from the inversion results of Line-3, Line-4 and Line-5.

이 세 측선의 역산결과와 BH-2에서 수행된 전기검층 및 코아검층 자료를 비교하여 Fig. 9에 도시하였다.

코아검층 자료로부터 층서를 구분하면 크게 상부 360 m까지는 반고결 이암층이 덮고 있고, 그 하부 약 150 m 구간에는 이암층 내에 조면현무암(trachybasalt), 화산력응회암(lapilli tuff)이 교대로 나타나며 이어 유문암이 약 400 m 두께로 분포하고 있다. 이후 1,500 m까지는 사암(sandstone) 및 이암(mudstone)이 분포하고 있다. 이때 유문암 및 중성맥암(intermediate dyke)의 일부를 제외한 거의 전구간에서 매우 심한 파쇄대가 형성되어 있으며 구간구간 단층각력이 함유되어 나타났다. 또한 그 하부의 이암 및 사암층의 약 950 ~ 980 m, 1,200 ~ 1,300 m 구간도 심하게 파쇄되어 나타났다.

이러한 층서를 전기검층자료와 비교하면 최상층의 반고결 이암층은 10 ohm-m 이내의 매우 낮은 전기비저항을 가지는 것으로 나타나며 중간의 조면현무암, 화산력응회암 등이 교대로 나타나는 구간은 수십 ohm-m, 유문암은 수백 ohm-m, 하부의 사암 및 이암 층은 약 100 ohm-m의 전기비저항을 보인다.

전기검층 자료와 세 측선의 역산결과로부터 추출한 심도 profile을 비교하면 세측선 모두에서 역산단면에서 L-1에 해당하는 상부 반고결 이암층의 전기비저항과 그 두께를 아주 잘 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 하부의 약 900 m까지 발달한 응회암 및 유문암의 층도 잘 나타내고 있으며 이 층은 역산단면에서 H-1으로 해석된다. 이 구간에 많은 파쇄대가 존재하고 있는 것이 확인되었고 이는 역산단면에서 1 km 이내의 심도에서 나타난 다수의 저비저항 이상대인 L-4 및 L-5와 연관된다고 할 수 있다. 900 m의 하부에서는 동서 방향의 측선에서는 저비저항으로 남북방향의 측선인 Line-5에서는 고비저항으로 나타나고 있다. 이는 심부로 갈수록 측선의 직하부가 아닌 주변의 2차원 혹은 3차원적인 구조에 의해 영향을 받는 반경이 커지고 상대적으로 해상도도 떨어지기 때문으로 풀이되며 이의 극복을 위해서는 TE 모드 및 TM 모드를 함께 사용하는 역산 혹은 3차원 역산 해석이 필요하다고 생각된다.

결 론

경상북도 포항시 흥해읍 일대에서 지열자원개발을 위한 심부 파쇄대 탐지를 목적으로 원거리 기준점 MT 탐사 자료를

획득하고 이에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 이를 위하여 국내의 경북 안동과 충북 청원시의 대청호 및 상대적으로 전기적인 잡음이 적은 일본의 Kyushu에 원거리 기준점을 설치하여 이들 원거리 기준점에 따른 자료의 질을 검토하였다.

대청호와 Kyushu의 원거리 기준점을 이용한 자료처리 결과, 약 480 km 떨어진 Kyushu의 자료를 이용한 경우, 전 주파수 대역에서 매우 연속성이 좋은 겉보기 비저항과 위상곡선을 얻을 수 있었다. 반면 대청호 자료를 이용한 경우는 비록 약 165 km나 떨어져 있지만 서로 상관된 잡음의 영향으로 우리나라의 전력주파수인 60 Hz 대역과 자연 전자기장 신호가 미약한 10^{-1} Hz ~ 1 Hz 대역에서 좋지 못한 결과를 나타내었다. 그러나 이외의 주파수대역에서는 매우 좋은 연속성을 보였다.

2002년과 2003년에 걸쳐 얻어진 총 70 측점에 대하여 Kyushu 자료를 이용하여 겉보기 비저항과 위상자료를 얻고 5개의 측선에 대하여 TM 모드 자료만을 이용하는 2차원 역산을 수행하였다. 역산 결과 대상지역의 특징적인 구조는 다음과 같이 해석되었다.

1. 모든 측선의 지표부근에 나타나는 10 ohm-m 이내의 저비저항층(L-1)은 시험시추(BH-2) 결과에서 반고결 이암층으로 생각되며 이 층은 대상지역의 남쪽에서는 약 500 m 이상, 북쪽에서는 200 m 이내의 두께로 분포하며 북에서 남으로 경사진 형태를 보인다.

2. 동-서 방향 측선의 역산단면에서 공통적으로 나타나는 심도 500 ~ 1,500 m의 저비저항(L-2)과 고비저항(H-2)의 경계면은 이들을 잇는 직선과 선구조분석 결과와 매우 유사하게 나타나 단층면으로 해석되며 이 직선상에 위치한 BH-2에서도 단층각력을 포함한 파쇄대가 다수 발견되었고 암석은 1.5 km 심도까지 전반적으로 심하게 파쇄된 상태를 보였다.

3. Line-4의 1 km 이내의 천부에 다수의 저비저항 이상(L-4)이 측선 전반에 걸쳐 나타났으며 이 측선을 따라 발달한 선구조와의 연관성에 따라 Line-4를 따라 파쇄대가 발달해 있을 것으로 생각된다.

4. 대상지역의 북쪽에 보이는 큰 하천은 비록 선구조분석에서는 나타나지 않았으나 역산결과에서는 저비저항 이상대를 공통적으로 보여(L-4와 L-5) 하나의 구조선일 가능성을 시사한다.

5. 대상지역의 서쪽과 서남쪽의 2 ~ 3 km 하부에서 10 ohm-m 이내의 저비저항 이상대(L-3)가 나타나는데 이 층에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구의 결과는 국내에서 최초로 2차원 역산 해석이 가능한 MT 탐사 자료를 획득함으로써 앞으로 국내에서도 심부지질 규명에 MT 탐사가 적용될 수 있는 가능성을 열었다는데 큰 의의가 있다고 할 수 있다. 여기서는 비록 TM 모드 자료만을 이용하여 2차원 역산을 수행하였으나 향후 정적효과의 보정 등을 통하여 TE 모드의 역산 및 TE와 TM 동시 역산, 더 나아가 3차원 역산으로 연구가 진행될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '심부 지열에너지 개발 사업' 일부이며, 현장 자료획득과 해석에 있어 조언해 준 한국지질자원연구원의 이성곤박사, 일본 AIST의 Yuji Mitsuhata 박사, 그리고 현장 탐사자료 획득에 힘써 준 한국지질자원연구원의 박인화, 임성근 연구원께 감사드린다.

참고문헌

송윤호, 박영수, 임무택, 조성준, 이성곤, 손정술, 김형찬, 고희재, 임성근, 정지민, 2003, 지열에너지 개발을 위한 심부 물리탐사, 한국지질자원연구원 연구보고서, 기초-02(최종)-10, 국무총리, 65p.

송윤호 외 31인, 2004, 심부 지열에너지 개발 사업, 한국지질자원연구원 연구보고서, 일반-04(연차)-01, 국무총리, 226p.

엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도(1:50,000), 포항도폭, 국립지질조사소, 21p.

Fiordelisi, A., Mackie, R., Madden, T., Manzella, A., and Rieven, S., *1995*, Application of magnetotelluric method using a remote-remote-reference system for characterising deep geothermal system, *Proc. of World Geothermal Congress 1995*, Vol. 2, 893-898.

Gamble, T. D., Goubau, W. M., and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with remote reference, *Geophysics*, **44**, 53-68.

Park, S. K., Orange, A. S., and Madden, T. R., 1983, Effects of three-dimensional structure on magnetotelluric sounding curves, *Geophysics*, **48**, 1402-1405.

Takakura, S., Takeda, M., and Matsuo, K., 1994, Effects of regional noise on magnetotellurics and their removal by far remote reference method, *Geophys. Explor. (Butsuri Tansa)*, **47**, 24-35.

Takasugi, S., and Muramatsu, S., 1991, Data processing techniques designed to improve MT data quality, *Geophys. Explor. (Butsuri Tansa)*, **44**, 126-137.

Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 841-898.

Zonge, K. L., and Hughes, L. J., 1991, Controlled source audio-frequency magnetotellurics, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetics in Applied Geophysics*, Vol II, Soc. Expl. Geophys., 713-809.