

포항지역 지열 개발을 위한 3차원 MT 탐사

송윤호*, 이태중*, 이성곤*, Toshihiro Uchida**, Yuji Mitsuhashi**, Gerald B. Graham***

* : Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, song@kigam.re.kr

** : Institute of Geo-Resources and Environment, AIST, Japan, uchida-toshihiro@aist.go.jp

*** : Phoenix Geophysics Ltd, ggraham@phoenix-geophysics.com

1. 서론

우리나라에서 심부 지열의 부존 가능성이 높은 곳으로 평가되는 (Kim et al., 2003) 경상북도 포항시 북구 흥해읍 일대에서 한국지질자원연구원의 연구사업으로 심부 지열수 자원 개발을 위한 종합적인 탐사가 수행되었다. 동원된 조사 및 탐사방법으로는 대상지역에 대하여 지표지질 조사, 중력탐사, 항공 자력탐사, 인공위성을 이용한 선구조 분석 등의 광역조사와 시추위치 선정에 위한 상세조사로서 MT (magnetotelluric) 탐사, CSAMT, SP 탐사 등이 있다(Song, 2003). MT 탐사는 1차로 2002년 12월 일본의 산업기술종합연구소(AIST)와 공동으로 이루어졌으며 1차 탐사 결과의 해석으로부터 시추위치를 선정하여 두개의 시험 시추공을 굴착하고, 시험 시추 결과에 따라 2 km 심도의 개발공을 굴착하여 지열수를 공급하려는 계획을 따르고 있다. 두개의 시험 시추공은 서로 약 165 m 떨어져 있으며 2004년 3월 현재 코어링 시추공 1.1 km, 시험개발 시추공 1.3 km까지 시추를 완료하고 지열수의 지화학분석, 코어 시험, 양수시험 및 SP 모니터링 등 기초시험 및 개발을 위한 다양한 조사가 이루어지고 있다.

2 km 개발 시추공의 위치선정을 위하여 2003년 12월에 3차원 격자망으로 측점을 배열하여 2차 MT 탐사를 실시하였다. 여기서는 대상지역의 간략한 지질과 두 차례에 걸친 MT 탐사자료를 종합하여 2차원 및 3차원 역산에 의한 해석 그리고 그 결과를 지질조사, 선구조 분석 및 시추결과와 비교하였다.

2. 지질 및 선구조 분석

대상지역인 경상북도 포항시 흥해읍 일대의 조사지역은 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하는 퇴적암류를 최기저층으로하여 이를 분출하거나 관입한 제3기 에오세의 석질결정질응회암, 흑운모화강암, 규장암, 용결결정질응회암 등이 제3기 포항분지의 기반암을 이루며 분포하고 있다. 포항분지는 제3기 마이오세의 천북역암에서 두호층에 이르는 연일층군의 지층들로 충전되어 있으며 이 지층들은 최하위에 육성기원의 퇴적층을 일부 포함한 해성 기원의 반고결 쇄설성 퇴적암류로 주로 구성된다. 이 지층들이 퇴적하는 동안 일부 지역에서 현무암의 관입이 있었다. 주된 대상지역인 흥해분지는 특히 국내의 여타지역과는 달리 제4기 미고결 충적층이 약 400 m 가량의 심도까지 분포되어 있다(Song, 2003).

화산기원의 enthalpy가 높은 지열에너지와는 달리 국내와 같은 저온의 지열은 대부분의 경우 화강암의 분포 및 심부 파쇄대와 매우 밀접한 관계를 가지며(Kim and Yum, 1999) 따라서 저온 지열개발을 위한 물리탐사의 주된 초점은 심부의 화강암의 분포 및 심부 파쇄대의 파악이 된다. 인공위성 영상으로부터 판독된 대상지역의 선구조는 인접한 양산단층의 영향으로 전체적으로 양산단층의 발달방향인 북북동-남남서 방향의 선구조가 우세하며 동-서 방향의 선구조선들도 그 연장길이는 짧지만 높은 빈도를 보인다. 홍해분지는 지형적 기복이 거의 없는 평탄면으로 구성되어 있어 선구조의 판독이 어려우나 동-서 및 남-북 방향의 유로가 홍해분지 외곽에서 확인되는 선구조선의 방향과 연장성이 일치하여 이 방향의 구조선이 발달했을 가능성을 시사한다.

3.3차원 MT 자료 획득 및 처리

MT 탐사는 Phoenix MTU5 및 MTU5A 시스템을 이용하여 2002년과 2003년 겨울 두 차례에 걸쳐 일본 산업기술종합연구소(AIST)와 공동으로 수행되었다. 동원된 탐사기는 한국지질자원연구원에서 보유한 MTU5A 시스템 3대와 일본 AIST의 MTU5A 2대와 MTU5 시스템 3대이다. Phoenix MTU 시스템은 GPS를 이용하여 위치정보 및 시간정보를 수신하여 측정과 원거리 기준점간의 시간 동기화(synchronize)가 이루어지며 독립된 하나의 시스템으로 전기장 2성분 및 자기장 3성분의 텐서 측정이 가능하도록 설계되어 있다. 측정은 상대적으로 전기적 잡음이 덜한 야간을 이용하여 오후 5시(GMT 08:00)부터 익일 오전 08시(GMT 23:00)까지 총 15시간 동안 이틀에 걸쳐 이루어졌다.

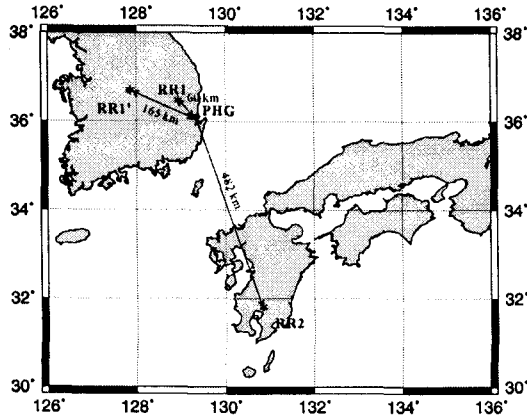


그림 1. 한국 및 일본의 원거리 기준점

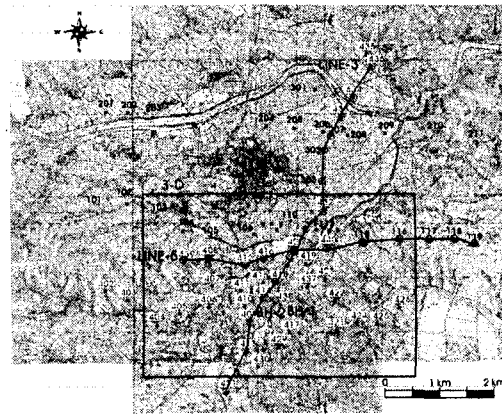
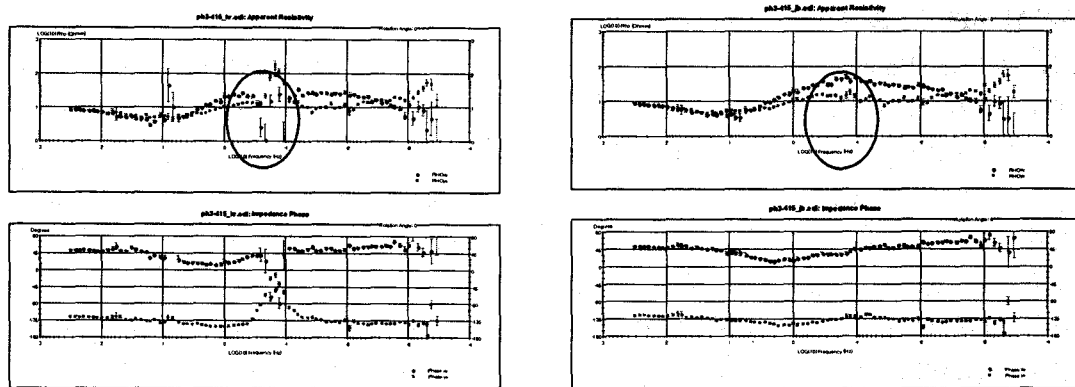


그림 2. 3차원 해석을 위한 측정점의 분포

원거리 기준점은 그림 1과 같이 포항으로부터 약 60 km 떨어진 안동(RR1; 2002)과 약 165 km 떨어진 청원(RR1'; 2003)에, 그리고 국내 지질여건상 전기적 잡음이 많음을 감안하여 일본 큐슈의 오기리 지역(약 482 km)에 각각 설치하여 자료처리 과정에서 각각의 원거리 기준점의 효과를 비교하여 가장 나은 자료를 이용하였다. 국내의 경우, 밀집된 도시 및 고압 송전선 등의 국지적 잡음원이 많고 대지의 전기비저항이 높아 전자기파의 감쇠가 적어 원거리 기준점을 이용한 자료처리 결과에서 일부 주파수 대역에서 자료의 질이 떨어지는 결과를 보였으나 이 일부 주파수대역을 제외하면 전반적으로는 양질의 자료를 보였다(그림

3a). 한편, 일본의 원거리 기준점은 자료처리 과정에서 국지적인 잡음의 영향을 효과적으로 배제하여 상당히 질 높은 자료를 얻을 수 있었으며(그림 3b) 따라서 이를 2차원 및 3차원 역산에 이용하였다.

자료의 처리는 장비제작사에서 제공하는 자료처리 소프트웨어 SSMT2000을 이용하였다. 한 측점에서 2일간 측정된 전기장 2성분, 자기장 3성분 및 동일한 시간대에 측정된 원거리 기준점의 수평 자기장의 2성분을 이용하여 겹보기 전기비저항과 위상을 계산하였다. 이후 coherency, tipper 및 겹보기 비저항과 위상의 연속성 등을 보조자료로 이용하여 15시간씩 2일에 걸쳐 측정된 시계열 중 이상값(outlier) 및 분산이 큰 부분(segment)은 수동적으로 일일이 제거하여 역산을 위한 최종 겹보기 비저항 및 위상을 얻었다.



(a)

(b)

그림 3. 한국 원거리 기준점을 사용(a)한 경우와 일본 원거리 기준점을 사용(b)한 경우의 겹보기 전기비저항 및 위상 그래프

4. 2차원 역산

2차원 역산은 자료의 Bayesian likelihood를 최대화 하여 모델의 regularization parameter를 조절하는 최소자승 역산(Uchida, 1993)을 이용하였으며 이때 모델링 알고리즘은 유한요소법이다.

2차원 역산을 위해서는 각 측점에서 주파수 0.0183 Hz에서 97 Hz까지 50개의 주파수 샘플을 이용하였으며 잡음의 수준은 3%로 가정하였다. 그림 2에 표시된 Line-3과 Line-5에 대한 2차원 역산 결과를 그림 4에 보였다. 이때 각 측점간의 거리는 Line-3는 N20E, Line-5는 E-W의 방향을 가지는 직선상에 투영한 거리를 이용하였으며 따라서 Line-3의 역산에 이용된 자료는 동쪽으로 20° 회전(rotation)된 겹보기 전기비저항 및 위상을 이용하였다.

Line-3의 역산결과에서 특징적인 것은 10 ohm-m 이내의 전기비저항을 가지는 미고결 충적층이 남쪽이 깊고 (약 600 m 이상), 북쪽이 얇게 (약 200 m) 나타나며 시추공이 위치하는 측점 414 부근에서는 대략 300 ~ 400 m의 깊이를 보이는데, 시추결과 미고결 충적층은 360 m 깊이까지 분포하는 것으로 확인되었다. 측점 432 부근과 434 부근의 약 1 km 심도에 나타나는 저비저항 이상대는 동-서 및 남-북 방향의 하천의 위치와 유사하여 제 2절 지질과 선구조에서 언급한 구조선의 영향일 가능성을 시사한다. 북쪽의 심도 4 km

이상에서 전기비저항이 낮게 나타나는 것은 크게 남북방향으로 전개된 해안선에 가까워지고 저비저항을 보이는 층적층의 깊이도 얕아 바다의 영향이 나타나기 시작한 것으로 생각된다.

동-서 방향 측선인 Line-5의 역산결과에서는 층적층의 깊이가 측점 420과 117을 중심으로 가장 깊게 (약 400 m) 나타나고 그 양쪽에서 얕아지는 경향을 보여 산의 계곡에 위치한 측점 439와 115, 119에서는 층적층이 매우 얇게 나타나고 있다. 이 측선에서 1 km 이상의 심부구조에서 특징적인 것은 홍해분지의 중심부인 측점 420 부근에서 저비저항 이상대가 심부까지 발달해 있고 그 양쪽에서는 상대적으로 고비저항을 보이는 구조이다. 심부에 나타나는 100 ohm-m 이상의 고비저항 구조는 이 지역의 지질을 고려할 때 화강암으로 판단된다. 그러나 일반적으로 화강암이 1,000 ohm-m 이상의 전기비저항을 보이거나 여기서는 100 ohm-m에 그치는 것은 주위에 3차원적인 저비저항 이상체 혹은 측선과 유사한 방향의 2차원적인 구조선이 발달하고 있어 저주파수에서 이에 의한 영향을 받았기 때문으로 사료된다.

두개의 측선에서 홍해분지의 1 km 이하의 천부에는 매우 복잡한 양상으로 다수의 파쇄대가 발달한 것으로 보여진다.

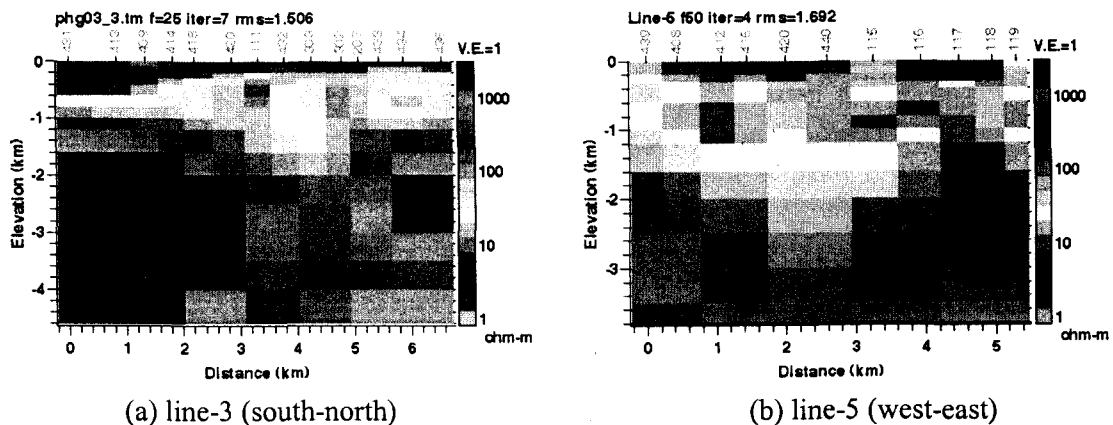


그림 4. TM 모드 2차원 역산 결과

5. 3차원 역산

3차원 역산은 정적효과(static shift)를 역산의 매개변수에 포함시켜 블록의 전기비저항과 동시에 역산을 수행하는 최소자승 역산(Sasaki, 2001)을 이용하였으며 이때 모델링 알고리즘은 유한차분법이다. 사용된 자료는 그림 2의 사각형안에 표시된 44개 측점들에서 0.25 ~ 62.5 Hz의 주파수 범위에서 9개의 주파수를 이용하였고 잡음수준은 2차원에서와 마찬가지로 3%를 가정하였다. 역산에서 0.1 Hz 이하의 저주파수 자료를 배제한 것은, 시추결과 얻어진 대략적인 층서구조를 모델로 해안선 그리고 바다를 포함한 3차원 모델링을 수행한 결과 위치에 따라 약간씩 다르나 바다가 대략 0.2 Hz 근방에서 시작하여 그보다 낮은 주파수대에 큰 영향을 미친 것으로 나타났기 때문이다.

역산결과를 영상화한 그림 5에서 보면 심도 약 400 m내외까지 10 ohm-m 이하의 저비저항을 보이는 층적층의 분포를 볼 수 있으며 200 ~ 300 m 및 300 ~ 400 m의 심도단면에서 북쪽으로부터 10 ohm-m 이상의 층적층 하부 암반층이 나타나는 것을 볼 수

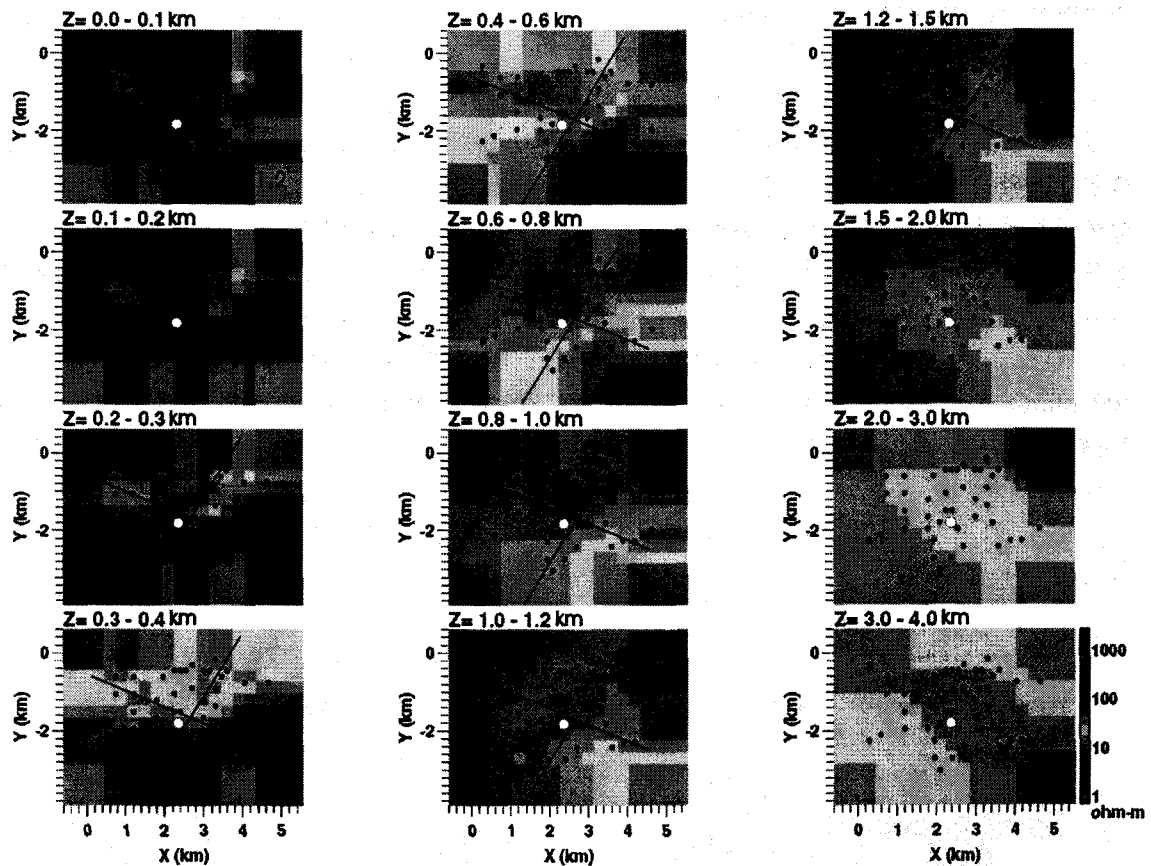


그림 5.3차원 역산에 의한 심도별 전기비저항 분포

있다. 그림에 선구조 분석에 의한 선구조를 직선으로 그렸으며 심도 300 ~ 1,500 m의 심도단면에서 이들 선구조와 유사한 저비저항의 연속적인 경향을 확인할 수 있다. 심도 1,500 m 이상에서는 북서-남동 방향의 경향이 강한 저비저항 이상이 관찰되며 3 km 심도에서는 저비저항 이상대가 보이는데 이 층에 대해서는 이후 시추 혹은 지질학적, 지구물리학적 추가 조사가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

6. 토론 및 결론

대상지역은 국내에서는 이례적으로 천부에 전기비저항이 매우 낮은 두꺼운 층적층이 존재하여 심부 지열개발을 위한 조사에서 가탐심도가 깊은 MT 탐사가 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

국내의 충청 청원지역과 경북 안동지역의 비교적 전기적 잡음이 적다고 판단되는 장소를 골라 원거리 기준점을 설치하고 이를 이용한 자료처리 결과와 상대적으로 전기적 잡음으로부터 자유로운 일본의 깊은 산중에 설치한 원거리 기준점을 이용한 처리 결과를 비교한 결과 일부 주파수대를 제외하면 전반적으로 좋은 자료를 얻을 수 있음을 확인하였다.

일본 원거리 기준점을 이용하여 구한 겉보기 전기비저항과 위상자료를 이용한 2차원 및 3차원 역산 결과 홍해분지의 제4기 층적층은 대략 200 ~ 400 m 심도까지 분포하고 있으며 홍해분지의 남쪽이 깊고 북쪽이 얇은 형태로 파악되었다. 또한 그 하부 기반암내에 다수의

파쇄대가 발달해 있으며 3차원 역산결과 북동-남서와 북서-남동으로 이어지는 저비저항 이상대와 인공위성 영상분석에 의해 추정된 선구조와 유사한 경향을 보여 이 둘이 파쇄대의 가능성이 있음을 시사하였다.

특히 심도 1,500 m 이상에서 북서-남동 방향의 폭이 큰 저비저항 이상이 관찰되고 3 km 이상의 심도에서는 홍해분지 전체로 확대되어 나타나는데, 이에 대해서는 향후 시추 혹은 지질학적, 지구물리화학적 추가 조사에 의한 규명이 이루어져야 할 것이다.

사사

이 연구는 공공기술연구회(KORP)의 연구비 지원으로 이루어졌다. 3차원 역산 코드를 제공해 주신 일본 큐슈대학의 Dr. Yutaka Sasaki, 자료획득에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 박인화, 임성근님께 감사드린다.

참고문헌

- Kim, H. C., Song, M., and Song, Y., 2003, Analysis of geothermal anomaly at Pohang area with GIS, 2003 Korea-Japan Joint Seminar on Geophysical Techniques for Geothermal Exploration and Subsurface Imaging, 23-27.
- Kim, H. C. and Yum, B. W., 1999, The relationship between geothermal anomalies and geodynamic structures in the Korean Peninsula, Proc. of Asian Geothermal Sympo., Hanoi, Vietnam, Oct. 28, NEDO, 125-131.
- Sasaki, Y., 2001, Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data, Proc. of 5th SEGJ Int. Sympo., 189-190.
- Song, Y., 2003, Overview on geothermal development in Pohang, 2003 Korea-Japan Joint Seminar on Geophysical Techniques for Geothermal Exploration and Subsurface Imaging, 17-22.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, J. of Geomag. And Geoelec., 45, 841-858.