

## 심부 지열에너지 개발 가능성 파악을 위한 제주도 중산간 지역에서의 MT 탐사

이 태종<sup>1)</sup>, 이 성곤<sup>2)</sup>, 송윤호<sup>3)</sup>

### Magnetotelluric surveys from mid-mountain area of Jeju Island for evaluating possible structures for deep-seated geothermal energy

Tae Jong Lee, Seong Kon Lee, and Yoonho Song

**Key words** : magnetotelluric survey (MT 탐사), Jeju Island (제주도), mid-mountain area (중산간 지역), 2-D inversion (2차원 역산), deep-seated geothermal energy (심부 지열에너지)

**Abstract** : Though numerous drilling has been performed in Jeju Island for development of ground water, the wells are mostly located along the coast lines or at low altitude area, and can hardly be found on the mid-mountain area. Two-dimensional magnetotelluric (MT) surveys have been carried out to cover the lack of geological information on the mid-mountain area and to figure out any possible structures or evidences for deep geothermal energy remained. Two-dimensional (2-D) inversion of MT data for four survey lines surrounding the Halla mountain show a thick layer having around 10 ohm-m in the depth of a few hundred meters throughout the survey area, which can be considered as the unconsolidated sedimentary layer. And they also show a conductive anomaly extending to more than 2 km depth at the central part of each survey lines, which can possibly be related with old volcanic activities during the formation of Halla Mt.. Further geological/geophysical investigations should be followed.

### 1. 서 론

자기지전류(magnetotelluric; MT) 탐사는 심부 지질구조의 해석에 있어서 필요한 지하 심부의 정보를 제공할 수 있다는 장점과 최근에 GPS 동기화를 통한 원거리 기준점의 운용 및 24 비트 A/D 변환기를 통한 5성분의 텐서 측정이 가능해지는 등의 탐사장비의 비약적인 발전에 힘입어 세계적으로 지열(Bromley et al., 2000 등) 및 석유 가스 분야(Watts et al., 2002 등)에 활발히 적용되어지고 있다. 또한 최근 국내에서도 한국 지질자원연구원에서 이러한 최신의 MT 장비를 도입함으로써 지열분야 및 심부 지각구조 규명 등

의 분야에 적용사례가 발표되고 있다 (송윤호 등, 2006; 이태종 등, 2005). 이것은 GPS를 이용한 시간동기화(synchronize)를 통하여 현장으로부터 매우 멀리 떨어진 원거리 기준점 자료를 간편하게 얻을 수 있어 국내뿐 아니라 일본의 원거리 기준점도 이용함으로써 양질의 MT 자료를 얻을 수 있게 된 것에 가장 크게 기인한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 동 시스템을 이용하여 제주도에서 지열부존 가능성을 타진하고 제주도 심부 지질구조 파악을 목적으로 자기지전류 (MT) 탐사 및 가정주파수대역 자기지전류 (AMT) 탐사를 수행하였다. MT 탐사를 위해서는 국내의 높은 전자기잡음을 감안하여 일본 Kyushu 지역에 원거리 기준점을 운영하여 양질의 MT 자료 획득을 꾀하였으며, 이와 더불어 전반적으로 높은 전기비저항을 갖는 국내의 지질여건을 감안하여 MT 탐사와 함께 AMT 탐사를 효과적으로 수행할 수 있는 방법을 모색하고자 하였다. 또한 두 자료의 효과적인 결합을 통하여 역산해석에 있어서 천부 분해능을 확보함과 동시에, 한라산을 중심으로 동, 서, 남, 북의 4방향 4측선에 대한 MT 탐사자료의 2차원 역산을 통하여 한라산 주변의 심부 지질구조

- 1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
E-mail : megi@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3051 Fax : (042)868-3358
- 2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
E-mail : seongkon@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3173 Fax : (042)868-3358
- 3) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
E-mail : song@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)863-9404

를 파악하고자 하였다.

## 2. 자료 획득

Fig. 1은 2004년 9월과 2005년 9월의 2년에 걸쳐 제주도 중산간 지역의 심부 지하구조 탐사를 위해 수행된 두 개의 남-북 방향과 두 개의 동서방향의 측선들과 이로부터 약 480 km 떨어진 일본 Kyushu Ogiri 지역의 원거리 기준점의 위치를 보여준다. 네개의 측선은 한라산을 기준으로 동, 서, 남, 북쪽의 중산간 지역을 통과하도록 배열하였으며, 측점은 주된 관심지역인 중산간 지역에서는 대략 1 km 간격으로 배열하고 한라산 중심에서 멀어질수록 측점을 성기게 배열하였다. 측선의 연장은 동쪽 측선인 Line-E가 약 19.4 km에 걸쳐 17개 측정점, 서쪽 측선인 Line-W는 약 20.7 km에 걸쳐 16개 측정점, 남쪽 측선인 Line-S는 약 48.1 km에 걸쳐 33개의 측정점, 그리고 북쪽측선인 Line-N은 약 49.8 km에 걸쳐 총 30개의 측정점에 대하여 MT 탐사를 수행하였다.

사용된 탐사기기는 캐나다 Phoenix Geophysics의 MTU-5A 시스템 7대가 투입되었으며 원거리기준점인 Kyushu에 1개 시스템 그리고 제주 현장에서는 6대의 시스템을 운영하였다. MTU-5A 시스템은 24 bit로 지표에서 전기장 2성분, 자기장 3성분의 텐서 측정이 가능하며 GPS를 이용하여 측정점과 원거리 기준점간의 시간동기화가 이루어진다. 또한, 자기장 센서만 교체하여 사용하면 AMT (10, 400 ~ 0.35 Hz) 및 MT (317.6 ~ 0.00034 Hz) 주파수 대역의 자료를 하나의 시스템으로 얻을 수 있도록 설계되어 있다.

본 연구에서는 이러한 장비의 장점을 최대한 이용하여 천부에서 심부까지 더 정확한 해석이 이루어 질 수 있도록 하고자, MT 대역뿐 아니라

AMT 대역의 탐사자료도 획득하였다. 현장 탐사에 있어서 투입된 6개의 시스템 중 서로 마주 보는 각 측선에 3대씩을 설치하여 양쪽 측선에서 동시에 측정이 이루어지도록 하였다. 이를 통하여 AMT 대역에서 Kyushu 혹은 반대쪽 측선에서의 자료를 원거리기준점으로 이용하여 자료처리하고 그 결과를 비교하여 둘 중 더 나은 자료를 이용하도록 하였다 (송윤호 등, 2006).

원거리 기준점을 이용한 MT 탐사는 지금까지 주로 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서 적용되어 왔는데, 그 이유는 MT 탐사의 대상이 되는 심도가 주로 지하 1 km 하부이며 또한 많은 지역에서 천부의 전기비저항이 수 ~ 수십 ohm-m 범위로 100 Hz 이하의 주파수 대역 자료만으로도 심도 100 m에서 수 km (때로는 수십 km)까지의 정보획득이 가능하기 때문이다. 그러나 우리나라의 경우 많은 지역에서 MT 탐사의 대상 심도 범위의 전기비저항이 1,000 ohm 이상으로 높아 상한 주파수 100 Hz 만으로는 심도 100 m 내외의 고해상도 정보획득이 불가능하다. 따라서 최근의 MT 탐사기기가 허용하는 한도인 10 kHz 대역까지도 원거리 기준점을 운영하고 이 자료를 이용하여 자료처리를 수행함으로써 천부에서 심부까지의 정확한 지하 전기전도도 분포 정보를 획득함이 우리나라에서는 특히 중요하다.

현장탐사는 오후 17:00부터 다음날 오전 08:00까지 15시간 동안 MT 대역의 자료를 획득하고 아침에 자기장 센서를 교체 설치한 후 오전 10:00부터 오후 14:00까지 4시간 동안 AMT 대역의 자료를 획득하는 방식으로 진행하였다. 모든 측정점에서 x 방향은 자북, y 방향은 나침반의 동쪽을 가리키도록 전기장 및 자기장 센서를 설치하였으며, 자료처리 시에는 편각에 대한 보정이 이루어져 최종적으로 x는 진북, y는 진동을 가리키

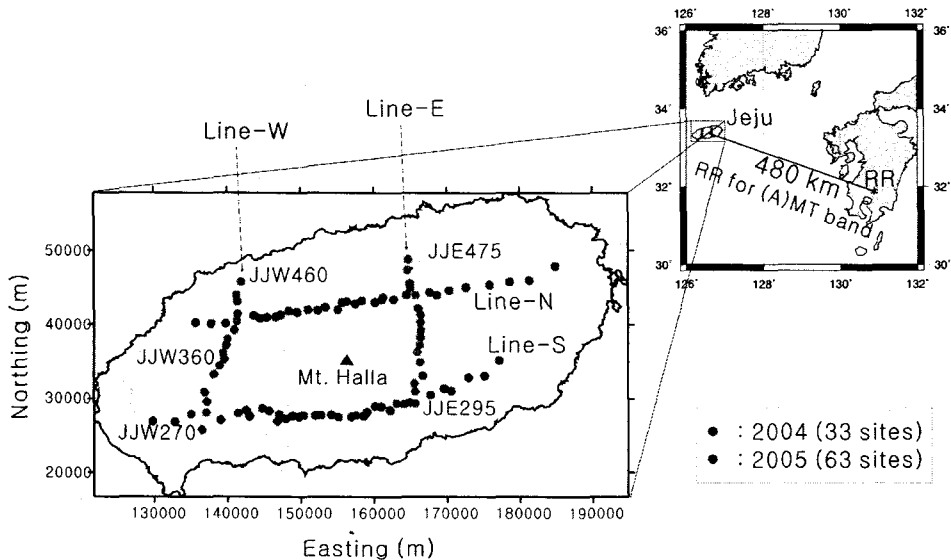


Fig. 1. Location map of MT & AMT survey lines. Remote reference for MT band is located in Kyushu, Japan (RR). Remote reference for AMT band can be either RR in Kyushu or the site in the other line, which is more than 20 km apart.

게 된다.

### 3. 원거리 기준점을 이용한 자료처리

AMT 및 MT 탐사자료의 자료처리는 Phoenix사에서 제공하는 자료처리 소프트웨어 SSMT2000을 이용하여 각각 수행한 후 이들을 결합하여 AMT+MT 주파수대에 대한 겹보기 비저항과 위상을 얻는다. Fig. 2는 Line-E의 중앙부에 위치한 측정 JJE-415에서 MT 대역(317.6 ~ 0.00034 Hz), AMT 대역(10,400 ~ 0.35 Hz), 그리고 둘을 더한 AMT + MT 대역의 측정자료의 예를 보여준다. 이때, AMT와 MT대역 모두 Kyushu의 원거리 기준점 자료를 이용하여 자료처리한 결과이다.

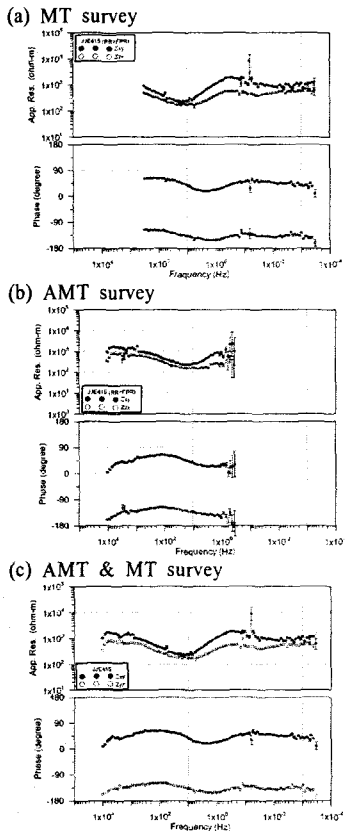


Fig. 2 Impedance estimations for MT (a), AMT (b), and AMT & MT(c) by remote reference processing using the remote data from Kyushu, Japan (RR).

자료의 1 표준편차에 해당되는 크기의 오차막대(error bar)를 그리도록 하였으나 1 kHz 이상의 일부 주파수와 0.1 Hz 부근을 제외한 거의 모든 주파수대에서 오차막대를 찾아보기 어려운 매우 좋은 자료를 보인다. 측정점 중산간에 위치한 각 측선 중앙부 측정점에서는 대부분 이러한 양질의 자료를 얻을 수 있었으나 측선의 양쪽 끝부분의 측정점에서는 주거지역, 고압선 등의 인공적

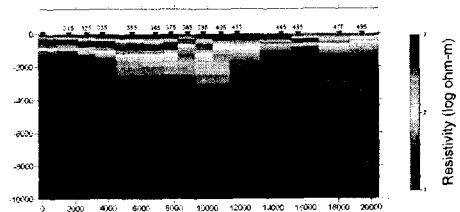
인 잡음원이 밀집되어 있어 자료의 질이 다소 떨어진다. 이렇게 얻어진 1차 자료처리 결과로부터 다시 tipper, coherency, 겹보기 비저항 및 위상의 연속성 등을 고려하여 잡음에 심하게 오염되거나 분산이 큰 시간대 자료를 일일이 제거하여 최종적인 겹보기 비저항과 위상자료를 얻고 이를 2차원 역산에 이용하였다.

### 4. 2차원 역산

2차원 역산을 위하여 우선 네 개의 측선에 대하여 주향이 측선과 직교한다는 가정하에 MT 임피던스를 측선방향으로 회전시켜 자기장이 주향과 평행한 성분(TM mode)과 수직인 성분(TE mode)을 계산하고 이 중 TM 모드에 대한 겹보기 비저항과 위상을 역산에 이용하였다. 측선은 Line-E가 N5°W, Line-W가 N15°E, Line-N가 N83°E, 그리고 Line-S가 N85°E 방향을 가지며 각각의 측정점간의 거리는 해당 측선상에 투영(projection)시킨 거리를 사용하였다. 각 측선상의 측정점들 중에서 잡음이 극심한 측정점들은 역산에서 제외하였다.

2차원 역산에는 자료의 Bayesian likelihood를 최대화 하여 모델의 regularization parameter를 조절하는 최소자승역산(Uchida, 1993)을 이용하였으며 이때 모형반응계산 알고리즘은 유효요소법이다. 이때, 겹보기 비저항과 위상 자료의 자료오차(error bar)의 크기에 따라 가중치를 주도록 하였으며 겹보기 비저항의 최소자료오차(minimum noise)는 1%로 가정하였다. 역산에 사용된 자료는 AMT+MT 자료로서 4,400 ~ 0.011 Hz의 주파수에서 60개 주파수로 이루어져 있다.

(a) Line-E (TM)



(b) Line-W (TM)

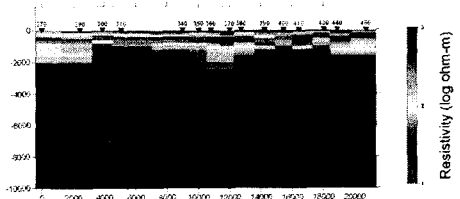


Fig. 3 Results of TM mode inversion for two survey lines having S-N direction, Line-E (a) and Line-W (b). Left of the figure corresponds to the south.

Fig. 3은 Line-E와 Line-W의 TM 모드 역산 결과이다. 역산결과 단면에서 왼쪽이 남쪽, 오른쪽이 북쪽을 나타낸다. 두 역산결과에서 특징적으로 지표 하부 수백 m 이내에서 10 ohm-m 이내의 낮은 전기비저항을 보이는 층이 두 측선 모두에서 나타나고 있다. 특히 두 측선 모두에서 이 층은 중앙부에서는 깊게, 양단부에서는 얇게 나타나고 있으나, 중앙부와 양단의 고도가 300-400 m 정도 차이가 나므로 이를 감안하면 이 층은 전체적으로는 거의 수평적인 층서를 보이며 부분적으로 고저의 차이가 있을 것으로 생각된다. 이 층은 제주도도의 해안을 따라 굴곡된 많은 시추결과에서 나타난 미고결상태의 퇴적층(소위 U 층)으로 해석되며 이상규 등(1994)에 의하면 이 층이 나타나는 깊이는 시추 위치에 따라 해수면 하부 수십 m에서 수백 m로 다양하게 나타나는 것으로 밝혀졌다.

Fig. 3에서 또 하나의 흥미로운 사실은 측점 395(Line-E)와 360(Line-W)을 중심으로 저비저항 구조가 2 km 이상 심부까지 발달한 형태를 보이고 있는 것이다. 이러한 양상은 동-서방향의 두 측선 Line-N과 Line-W에 대한 역산결과인 Fig. 4에서도 관찰되는데 즉, 지하 수백 m 하부에 매우 전기비저항이 낮은 U 층이 두 측선 모두에서 다시 확인되며, 또한 측점 531(Line-N)과 542(Line-S)를 중심으로 저비저항 구조가 심부까지 연장되어 나타나는 것을 볼 수 있다.

이러한 저비저항 이상이 두 측선의 중앙부에서 모두 나타나고 있는 것은 과거의 화산활동과 관련된 지질학적인 구조에 의한 영향일 가능성과 측선의 양단과 중앙에서 주변 바다의 영향을 다르게 나타나기 때문일 가능성을 상정해 볼 수 있으며, 만약 전자의 경우라면 제주도에서 지열개발 가능성을 시사한다고 할 수 있다. 이에 대한 더 정확한 해석을 위해서는 향후 추가적인 MT 탐사나 주변 바다를 포함한 MT 탐사 모델링을 통한 이론적인 고찰, 그리고 중산간 지역에서의 이러한 심부 지질구조의 확인을 위한 심부 시추 등을 통한 상세한 지질조사가 추가로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

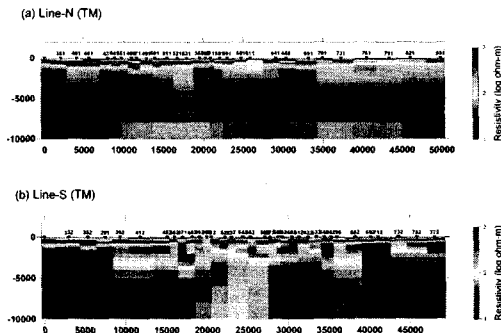


Fig. 4 Results of TM mode inversion for two survey lines having E-W direction, Line-N (a) and Line-S (b). Left of the figure corresponds to the west.

## 5. 결론 및 토의

제주도 중산간 지역에서 한라산의 동과 서로 두 개의 남-북 방향의 측선, 남과 북으로 두 개의 동-서 방향 측선을 따라서 총 96개 측정점에 대한 MT 및 AMT 탐사 자료를 획득하고 이를 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 전기비저항이 높은 우리나라의 지질 특성상 MT자료의 해석에 있어서 AMT를 통한 고주파수 자료를 함께 이용하여 천부의 고분해능을 확보함으로써 더 정확한 심부 지질구조를 얻을 수 있었다. TM 모드에 대한 2차원 역산 결과 제주도에서 특징적으로 해수면 하부 수십 ~ 수백 m에 존재하는 것으로 알려진 미고결 퇴적층이 10 ohm-m 내외로 측선 전반에 걸쳐 나타났다. 이는 기존의 시추결과에서 미고결 퇴적층이 제주도 전역에 걸쳐 해수면 하부 100 m 내외의 심도에서 관찰되는 것과 일치하는 결과이다. 특히, 두 측선의 중앙부에서 2 km 이상의 심부까지 연장된 저비저항 이상대가 공통적으로 나타났으며 이것이 과거의 화산활동과 관련이 있을 가능성이 있으나 이에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## Acknowledgements

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '심부 지열에너지 개발 사업' 결과의 일부이며 현장자료 획득에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 박인화, 임성근씨께, 자료획득부터 해석에 이르기까지 많은 도움을 주신 일본 지질조사소의 Toshihiro Uchida 박사께 감사드립니다.

## References

- [1] 송운호, 이태종, Toshihiro Uchida, 2006, 가청주파수 대역 MT 탐사자료에서 원거리 기준점의 효과, 한국지구시스템공학회지, 43, 44-54.
- [2] 이상규 외 27인, 1994, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, 931K101-113AP1, 상공자원부, 235p.
- [3] 이태종, 송운호, Toshihiro Uchida, 2005, 심부 지열자원 개발을 위한 원거리 기준점 MT 탐사 자료의 2차원 역산해석, 물리탐사, 8, 145-155.
- [4] Bromley, C., Khosrow, K., and Talebi, B., 2000, Geophysical exploration of Sabalan geothermal prospects in Iran, *Proc. World Geothermal Congress 2000*, 1009-1014.
- [5] Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 841-898.
- [6] Watts, M. D., Savvaidis, A., Karageorgi, E., and Mackie, R., 2002, Magnetotellurics applied to sub-tropical petroleum exploration in northern Greece, *Expanded Abstracts, EAGE 64<sup>th</sup> conference*, Florence, Italy, E-41.