

제주도 중산간 지역 MT 및 AMT 탐사자료의 2차원 역산

이태종¹⁾, 송윤호¹⁾, Toshihiro Uchida²⁾, 박인화¹⁾, 임성근¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지열자원연구실, megi@kigam.re.kr

²⁾일본 산업기술총합연구소 물리탐사그룹

A two-dimensional inversion of MT and AMT data from mid-mountain area of Jeju island

Tae Jong Lee¹⁾, Yoonho Song¹⁾, Toshihiro Uchida²⁾, In-Wha Park¹⁾,
Sung-Keun Lim¹⁾

¹⁾Groundwater & Geothermal Resources Dept., KIGAM

²⁾Exploration Geophysics Research Group, GREEN, AIST

요약 : 제주도 중산간 지역에서 자기지전류 (MT) 및 가청주파수대역 자기지전류 (AMT) 탐사자료를 얻고 이를 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 두 개의 남-북 방향 측선에 대한 역산결과 제주도에서 특징적으로 나타나는 미고결 퇴적층이 10 ohm-m 내외로 두 개의 측선 전반에 걸쳐 나타났으며 측선 중앙부에서 4 km 이상의 심도까지 연장된 저비저항 이상대가 존재하는 것으로 나타났다. 그러나 이 저비저항 이상대가 제주도 주변 바다의 영향인지 과거의 화산활동과 관련된 것인지에 대한 해석을 뒷받침해 줄 어떠한 정보도 아직은 확보되지 않아 향후 추가적인 연구가 요구된다. MT 주파수대만을 이용한 경우와 이것에 AMT 주파수대를 포함해서 역산을 수행한 경우를 비교한 결과, 우리나라와 같이 전기비저항이 높은 지질구조에서는 AMT 자료를 함께 얻어 천부 분해능을 확보하는 것이 심부구조 해석에 도움이 되는 것으로 나타났다.

주요어 : MT, AMT, 제주도, 2차원 역산

Abstract : Two-dimensional (2-D) inversion of magnetotelluric (MT) data for two survey lines having south-north direction from Jeju Island has been carried out. The 2-D models 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 at the central part of each survey lines. But unfortunately by now, we do not have any further information about the anomaly. Comparison of the 2-D inversion model using MT band only and that using both AMT and MT bands said that it is helpful for us to include AMT band as well as MT band in the inversion to interpret not only the shallow part but also the deep structures.

Keywords: magnetotelluric (MT), audio-frequency magnetotelluric (AMT), Jeju Island, 2-D inversion

1. 서론

한국지질자원연구원 지열자원연구실에서 2003년 Phoenix MTU-5A 시스템 3대를 도입한 이래로 최근 국내에서도 MT 탐사를 이용한 심부 지질구조 해석에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (송윤호 등, 2004, Lee et al., 2004.). 이것은 GPS를 이용한 시간동기화 (synchronize)를 통하여 현장에서부터 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 가칭주파수대역 자기지전류 (AMT) 탐사를 수행하였다. MT 탐사를 위해서는 국내의 높은 전자기잡음을 감안하여 일본 Kyushu지역에 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 결합을 통하여 역산해석에 있어서 천부 분해능을 확보하고 AMT 대역의 고주파수 자료의 누락이 천부 및 심부의 역산결과에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 자료 획득

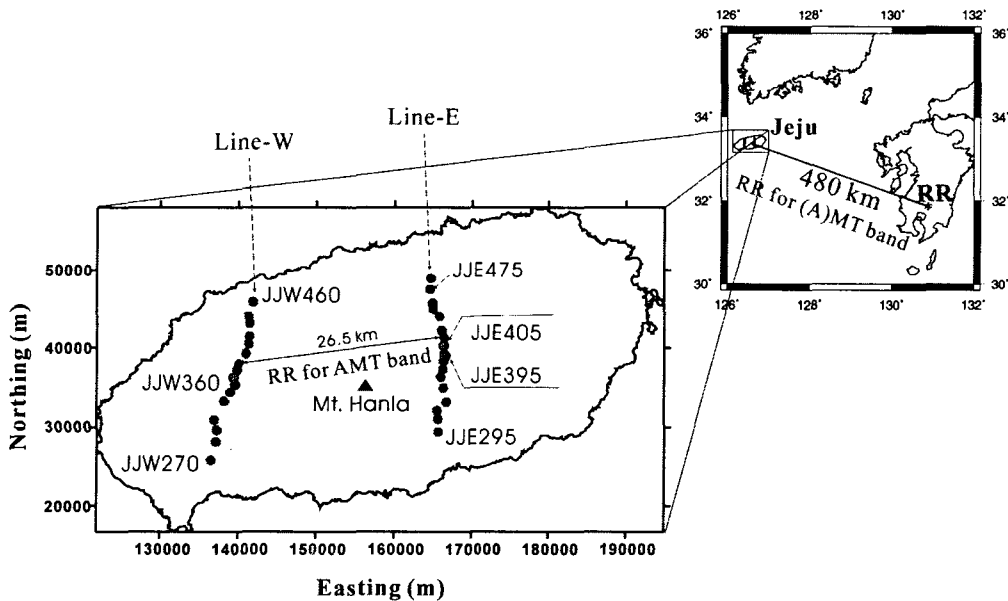


Fig. 1. Location map of MT & AMT survey lines. Remote reference for MT band is located in Kyushu, Japan (RR). Remote reference for AMT band can be either RR in Kyushu or the site in the other line, which is more than 20 km apart.

Fig. 1은 2004년 9월 제주도 중산간 지역의 심부 지하구조 탐사를 위해 수행된 두 개의 남-북 방향의 탐사 축선과 이로부터 약 480 km 떨어진 일본 Kyushu Ogiri 지역의 원거리 기준점의 위치를 보여준다. 두 축선은 한라산을 기준으로 동쪽과 서쪽의 중산간 지역을 통과 하도록 배열하였으며 대략 25 km 이상 떨어져 위치한다. 축선의 연장은 동쪽 축선인 Line-E가 약 19.4 km, 서쪽 축선인 Line-W가 약 20.7 km에 달하며, 두 개의 축선에 대략 1 km 간격으로 측정점을 배열하여 Line-E에 17개, Line-W에 16개의 총 33개 측정점에 대하여

AMT 및 MT 탐사자료를 획득하였다. 이때 두 측선에서 측점간의 최대 고도차이는 Line-E와 Line-W가 각각 430 m, 288 m이다. 사용된 탐사기기는 캐나다 Phoenix Geophysics의 MTU-5A 시스템 4대가 투입되었으며 원거리기준점인 Kyushu에 1개 시스템 그리고 제주 현장에서는 3대의 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.

현장 탐사에 있어서 투입된 3개의 시스템 중 두 대를 한쪽 측선에, 다른 하나를 반대쪽 측선에 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, 2005). 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 측점에서 x 방향은 자북, y 방향은 나침반의 동쪽을 가리키도록 전기장 및 자기장 센서를 설치하였으며, 자료처리 시에는 편각에 대한 보정이 이루어져 최종적으로 x 는 진북, y 는 진동을 가리키게 된다.

3. MT+AMT 탐사 자료

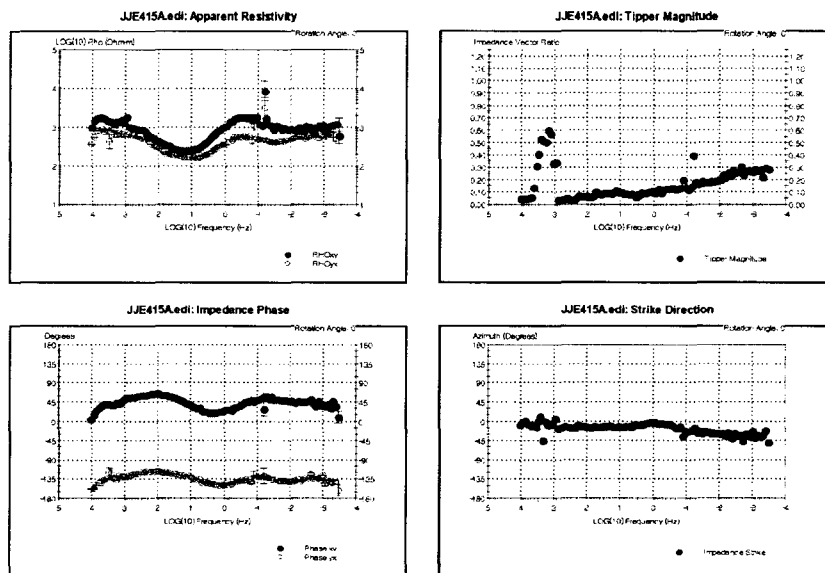


Fig. 2. An example of AMT+MT data at station JJE415 on Line-E: Apparent resistivity (upper-left), phase (lower-left), tipper magnitude (upper-right), and strike direction (lower-right).

AMT 및 MT 탐사자료의 자료처리는 Phoenix사에서 제공하는 자료처리 소프트웨어 SSMT2000을 이용하여 각각 수행한 후 이들을 결합하여 AMT+MT 주파수대에 대한 결보

기 비저항과 위상을 얻는다. Fig. 2는 이렇게 하여 얻어진 측정 JJE415 자료의 예를 보인 것이다. 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. 측점이 중산간에 위치한 각 측선 중앙부 측정점에서는 대부분 이러한 양질의 자료를 얻을 수 있었으나 측선의 양쪽 끝부분의 측정점에서는 주거지역, 고압선 등의 인공적인 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 두 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 방향을 가지며 각각의 측정점간의 거리는 해당 측선상에 투영(projection)시킨 거리를 사용하였다. 총 33개 측정점들 중에서 잡음이 극심한 측정점들 3개를 제외하고 두 측선에 각각 15개 측정점의 자료를 이용하였다.

2차원 역산에는 자료의 Bayesian likelihood를 최대화 하여 모델의 regularization parameter를 조절하는 최소자승역산(Uchida, 1993)을 이용하였으며 이때 모형반응계산 알고리즘은 유한요소법이다. 이때, 겹보기 비저항과 위상 자료의 자료오차(error bar)의 크기에 따라 가중치를 주도록 하였으며 겹보기 비저항의 최소 자료오차(minimum noise)는 1%로 가정하였다. 역산에 사용된 자료는 1) Dataset1: 통상적인 MT탐사만으로 얻을 수 있는 자료로서 97 ~ 0.011 Hz의 주파수대에서 53개의 주파수 자료와 2) Dataset2: AMT+MT 자료로서 4,400 ~ 0.0034 Hz의 주파수에서 27개 주파수로 구성된 두 가지 자료를 이용하여 MT 탐사에 있어서 고주파수 자료의 효용성을 검토하고자 하였다.

Fig. 3은 Dataset2에 대한 TM 모드 역산 결과이다. 역산결과에서 특징적으로 지표 하부 수백 m 이내에서 10 ohm-m 내외의 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 보인다. 이 층은 제주도의 해안을 따라 굴착된 많은 시추결과에서 나타난 미고결상태의 퇴적층으로 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 측정점 395(Line-E)와 360(Line-W)을 중심으로 저비저항구조가 4 km 이상 심부까지 발달한 형태를 보이고 있는 것이다. 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 나타내기 때문일 가능성을 상정해 볼 수 있으며, 만약 전자의 경우라면 제주도에서 지열개발 가능성을 시사할 수 있겠으나 이에 대해서는 향후 추가적인 MT 탐사나 주변 바다를 포함한 MT 탐사 모델링을 통한 이론적인 고찰, 그리고 심부 시추 등의 상세한 지질조사가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

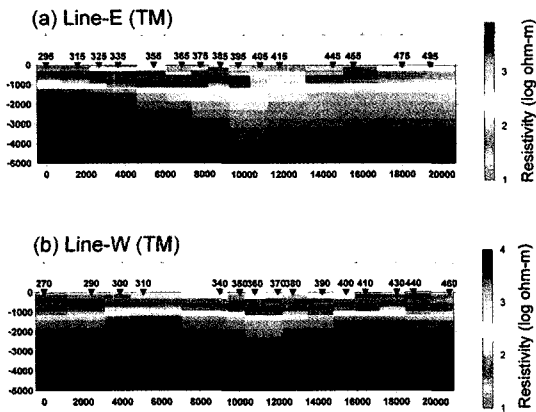


Fig. 3. The 2-D models of the survey lines in Jeju Island. Both MT and AMT (TM mode) data (27 frequencies from 4,400 Hz ~ 0.0034 Hz frequency range) were used for the inversion.

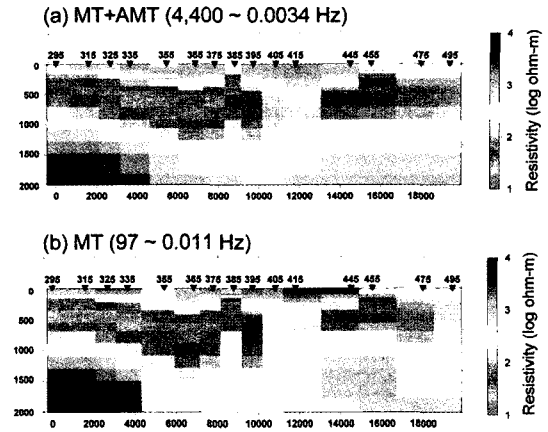


Fig. 4. A comparison of the 2-D models for Line-E using different datasets: (a) Dataset1 (AMT+MT) and (b) Dataset2 (MT only).

Fig. 4는 위에서 설명한 두 가지 dataset을 이용하여 Line-E에 대하여 수행한 역산결과를 비교한 것이다. 두 결과는 전체적으로 유사하지만 100~200 m의 천부구조에는 상당한 차이를 보이며 특히 측정점 475 부근에서는 천부뿐만 아니라 심부구조에서도 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 즉, 97 Hz 이하의 MT 주파수대역만을 사용하는 경우 (b)는 천부의 고비저항층에 대한 정보가 누락되어 역산결과 지표 직하부에 저비저항층으로 나타나게 되며, 이것이 1 km 이상의 심부의 결과에도 영향을 미쳐 측정점 455와 475사이의 1.5 km 부근 심도에서 전기비저항의 급격한 변화로 나타난다. 이에 반해 (a)의 경우는 천부의 고비저항층을 구별해낸 결과로 1.5 km 하부의 전기비저항 구조도 (b)와 같은 급격한 변화를 보이지 않는다.

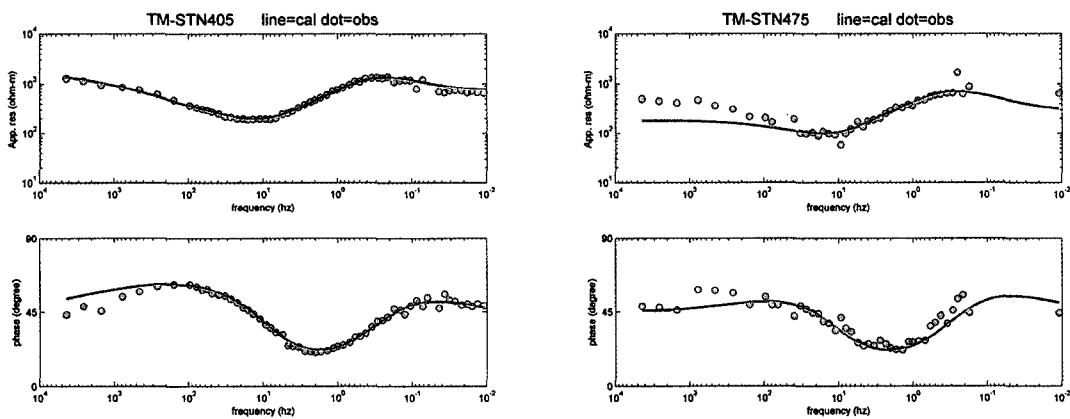


Fig. 5. A comparison of observed and theoretical responses for the model shown in Fig. 4(b). The responses above 100 Hz are also shown for the comparison, though they are not actually used in the inversion for Fig 4(b).

Fig. 5는 측정점 405와 475에서 AMT 및 MT 측정자료(점)와 97 Hz 이하의 MT 자료만을

가지고 역산한 Fig. 4(b) 모델로부터 계산된 이론적인(실선) 겹보기 비저항과 위상을 비교한 것이다. 두 측정에서 역산에 사용된 97 Hz 이하의 주파수에 대해서는 이론값과 측정값이 매우 잘 일치하여 역산결과의 신뢰성을 말해준다. 측정 405의 경우는 100 Hz 이상의 주파수가 역산에 사용되지 않았음에도 불구하고 다행히 97 Hz 이하의 주파수대에서 천부에 존재하는 고비저항층에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 100 Hz 이상의 주파수에 대해서도 상당히 좋은 일치를 보이고 있다. 반면, 측정 475의 경우는 MT 주파수 대역만으로는 천부의 고비저항층에 대한 정보가 미약하여 역산에서 천부에 고비저항층을 생성하지 못했고 따라서 100 Hz 이상 주파수에서는 이론값과 측정값에 상당한 차이를 보인다. 이러한 천부구조의 불충분한 정보가 심부구조의 역산결과에도 영향을 미치게 되어 해석을 어렵게 하는 것을 알 수 있다. 따라서 우리나라와 같이 전반적으로 전기비저항이 높은 지질구조에서는 MT 탐사와 더불어 AMT 탐사를 병행하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

5. 토의 및 결론

제주도 중산간 지역에서 한라산의 동과 서로 두 개의 남-북 방향의 측선을 따라서 33 측정의 MT 및 AMT 탐사 자료를 획득하고 이를 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 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. 특히, 두 측정의 중앙부에서 4 km이상의 심부까지 연장된 저비저항 이상대가 공통적으로 나타났으며 이것이 과거의 화산활동과 관련이 있을지 여부에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 전기비저항이 높은 우리나라의 지질 특성상 MT자료의 해석에 있어서 AMT 등을 통한 고주파수 자료를 함께 이용하여 천부의 고분해능을 확보하는 것이 심부 지질구조 해석에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 ‘심부 지열에너지 개발 사업’의 일부이며, 현장 탐사자료 획득에 힘써준 서울대학교, 전남대학교, 충북대학교 대학원생들께 감사드린다.

참고문헌

- 송운호, 이태종, Uchida, T., 2005, 가청주파수 대역 MT 탐사자료에서 원거리 기준점의 효과, 한국지구시스템공학회 제 84회 학술발표회 논문집 (한국지질자원연구원, 2005. 4.), p. 183-188.
- 송운호, 이태종, 이성곤, Uchida, T., Mitsuhashi, Y., and Graham, G. B., 2004, 포항지열개발을 위한 3차원 MT 탐사, 2004 대한지구물리학회, 한국물리탐사학회 공동 학술발표회 (한국해양연구원, 2004. 6.), p. 260-265.
- 이상규 외 27인, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, 931K101-113AP1, 상공자원부, 235 p.
- Lee, C-K., Lee, H., Kwon, B-D, Cho, I-K, Oh, S., Song, Y., Lee, T. J., and Yang, J., 2004, Magnetotelluric imaging of the structure of Kyeongsan basin in Korea, Proc. of the 7th International Symposium (Tohoku Univ., Nov., 2004.), p. 288-291.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, p. 841-898.