

## MT 탐사자료의 해석에서 AMT 대역 자료의 효용성

이태종<sup>1\*</sup> · 이성곤<sup>1</sup> · 송윤호<sup>1</sup> · Toshihiro Uchida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지열자원연구실

<sup>2</sup>일본 산업기술총합연구소 물리탐사그룹

### Use of Audio-Band on the Interpretation of Magnetotelluric Data

Tae Jong Lee<sup>1\*</sup>, Seong Kon Lee<sup>1</sup>, Yoonho Song<sup>1</sup> and Toshihiro Uchida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Groundwater & Geothermal Resources Div., KIGAM

<sup>2</sup>Exploration Geophysics Research Group, GREEN, AIST

**요 약:** 제주도 중산간 지역에서 자기지전류(MT) 및 가칭주파수대역 자기지전류(AMT) 탐사자료를 얻고 이를 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 일본 Kyushu에 원거리 기준점을 설치, 운용하여 양질의 자료획득이 가능하였고 MT 탐사와 동시에 AMT 탐사를 수행함으로써  $10^{-4} \sim 10^4$  Hz에 이르는 광대역의 수직탐사 자료를 획득하였다. 2차원 모델링과 현장자료에서 MT 주파수대만을 이용한 경우와 이것에 AMT 주파수대를 포함해서 역산을 수행한 경우를 비교한 결과, 우리나라와 같이 전기비저항이 높은 지질구조에서는 AMT 자료를 함께 얻어 천부의 분해능을 확보하는 것이 심부구조 해석에도 도움이 되는 것으로 나타났다. 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 심부까지 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.

**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. Broad band MT sounding curves with good quality could be gathered by performing audio-frequency magnetotelluric (AMT) survey during the MT survey and by operating the remote reference in Kyushu Island, Japan. Comparison of the 2-D inversion model using MT band only and that using both AMT and MT bands for the field data as well as for the data from numerical 2-D modeling said that high frequency information from AMT survey can be useful for interpreting not only the shallow part but also the deep structures, especially when the formation is resistive. The 2-D inversion models of field data 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. It can be either the effect of the surrounding sea water, or the structures due to ancient volcanic events. But unfortunately by now, we do not have any further information about the anomaly.

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

## 서 론

우리나라는 자기지전류 (MT) 탐사에 있어서 세계에서 가장 어려운 곳이라고 해도 과언이 아니다. 그것은 높은 인구밀도에 의해 산간지방을 제외한 거의 모든 국토에 사람이 살고 전기를 사용하고 있어 인공적인 전자기 잡음원이 곳곳에 산재해

있으며, 또한 지층이 오래되고 전기비저항이 높아 발생된 전자기 잡음의 감쇄가 적어 매우 먼 곳까지 전파되기 때문에 국토 전반에 걸쳐 기본적인 전자기 잡음수준이 높기 때문에 분석된다.

최근까지 국내에서 얻어진 MT 탐사자료는 주로 지열개발을 위한 심부 구조 파악(이상규 등, 1993; 정승환 등, 1993), 심층 지하수조사(정승환 등, 1997), 그리고 MT 탐사 기술 개발 연구(조인기 등, 1993; 송윤호 등, 1993) 등이다. 이들 대부분의 연구에서 얻어진 MT 탐사 자료는 0.1 Hz 혹은 그 이상의 주파수에 한정되었고 해석은 주로 1차원 해석 혹은 2차원 공간 필터링에 의한 해석에 의존하였다. 이들 연구에서 0.1 Hz 이

2006년 9월 27일 접수; 2006년 10월 25일 채택

\*Corresponding author

E-mail: megi@rock25t.kigam.re.kr

Address: Groundwater and Geothermal Resources Div.,  
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
30 Gageong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

하 저주파수 대역의 자료획득에 실패한 가장 큰 이유는, 잡음이 많은 우리나라의 여건에서 잡음을 극복하는 유일한 방법은 적절한 거리에 원거리 기준점의 운용을 들 수 있으나, 당시에는 현장과 원거리 기준점의 시간동기화(synchronization)를 매우 정밀한 시계(crystal clock)에 의존하였고 매일 두 시계를 한 곳에서 동기화 시켜야 하는 불편함으로, 0.1 Hz 이하의 저주파수 대역까지 잡음이 상관이 되지 않는 거리에 원거리 기준점을 운용하는 데는 무리가 있었기 때문으로 분석된다.

이러한 분석은 한국지질자원연구원 지열자원연구실에서 2003년 캐나다 Phoenix Geophysics사의 MT 탐사 기기인 MTU-5A 시스템 3대를 도입하여 경상북도 포항시 흥해읍 일대에서 지열개발을 목적으로 수행한 MT 탐사에서, 각각 60 km와 165 km 떨어진 국내의 원거리 기준점, 그리고 약 480 km 떨어진 일본 큐슈의 원거리 기준점 자료에 의한 자료처리 결과를 비교한 결과에서 자명하게 나타난다(이태중 등, 2005a). 이 시스템은 GPS를 이용하기 때문에 매일 한 곳에 모여서 시간동기화를 수행할 필요가 없어 매우 먼 거리에 원거리 기준점의 운영이 가능하고 따라서 양질의 MT 탐사 자료 획득이 가능하게 되었다. 이래로 동 시스템을 이용하여 최근 국내에서도 MT 탐사는 지열자원 탐사(송운호 등, 2005; 이태중 등, 2005a; 이태중 등, 2005b), 심부 지하구조 해석(Lee *et al.*, 2004)에 활발히 적용되어지고 있다.

본 연구에서는 동 시스템을 이용하여 제주도에서 지열부존 가능성을 타진하고 제주도 심부 지질구조 파악을 목적으로 MT 탐사 및 가청주파수대역 자기지전류(AMT) 탐사를 수행하였다. MT 탐사를 위해서는 국내의 높은 전자기잡음을 감안하여 일본 Kyushu 지역에 원거리 기준점을 운영하여 양질의 MT 자료 획득을 꾀하였다. MT 탐사는 주로 천부보다는 심부

지질구조의 해석에 더 비중을 두게 되며 대부분의 경우 MT 탐사는 천부로부터 수 km의 심부까지의 지질구조에 대한 유용한 정보를 제공한다. 그러나 우리나라와 같이 지층의 전기비저항이 높은 경우는 통상적인 MT 탐사 대역의 가장 높은 주파수에서도 침투심도가 수백 m에 달하는 경우가 발생하기도 하며, 따라서 천부의 분해능을 확보하기 위해서 MT 탐사와 더불어 CSAMT 탐사나 전기비저항 탐사를 동시에 실시하고 복합역산(joint inversion)을 통해 천부의 분해능을 확보하고자 하는 시도가 이루어져 왔다(Sasaki, 1989; Pellerin and Hohmann, 1990; Meju, 1996). 본 연구에서는 전반적으로 높은 전기비저항을 갖는 국내의 지질여건에서 천부의 분해능을 확보하고자 MT 탐사자료의 획득 시 AMT 탐사 자료도 함께 획득하여 효과적인 탐사 방법을 모색하고, AMT 대역이 갖는 고주파수 자료의 누락이 천부 및 심부의 역산결과에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

자료 획득 및 자료 처리

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 Kyushu의 Ogiri 지역의 원거리 기준점의 위치를 보여준다. 두 축선은 한라산을 기준으로 동쪽과 서쪽의 중산간 지역을 통과하도록 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 축선에서 측정점간의 최대

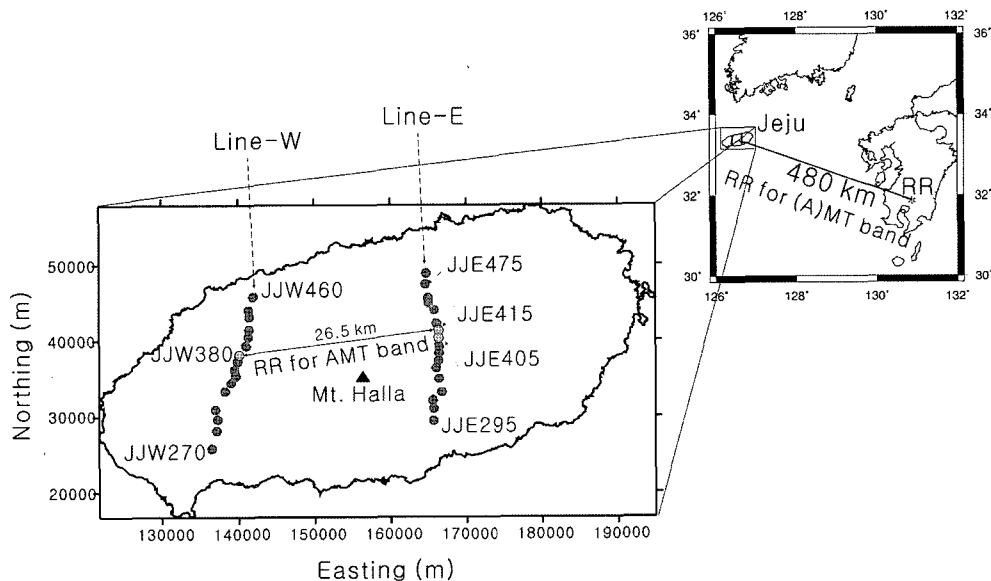


Fig. 1. Location map of MT & AMT survey lines. Remote reference for MT band is located in Kyushu, Japan (RR). Remote reference for AMT band can be either RR in Kyushu or the site in the other line, which is more than 25 km apart.

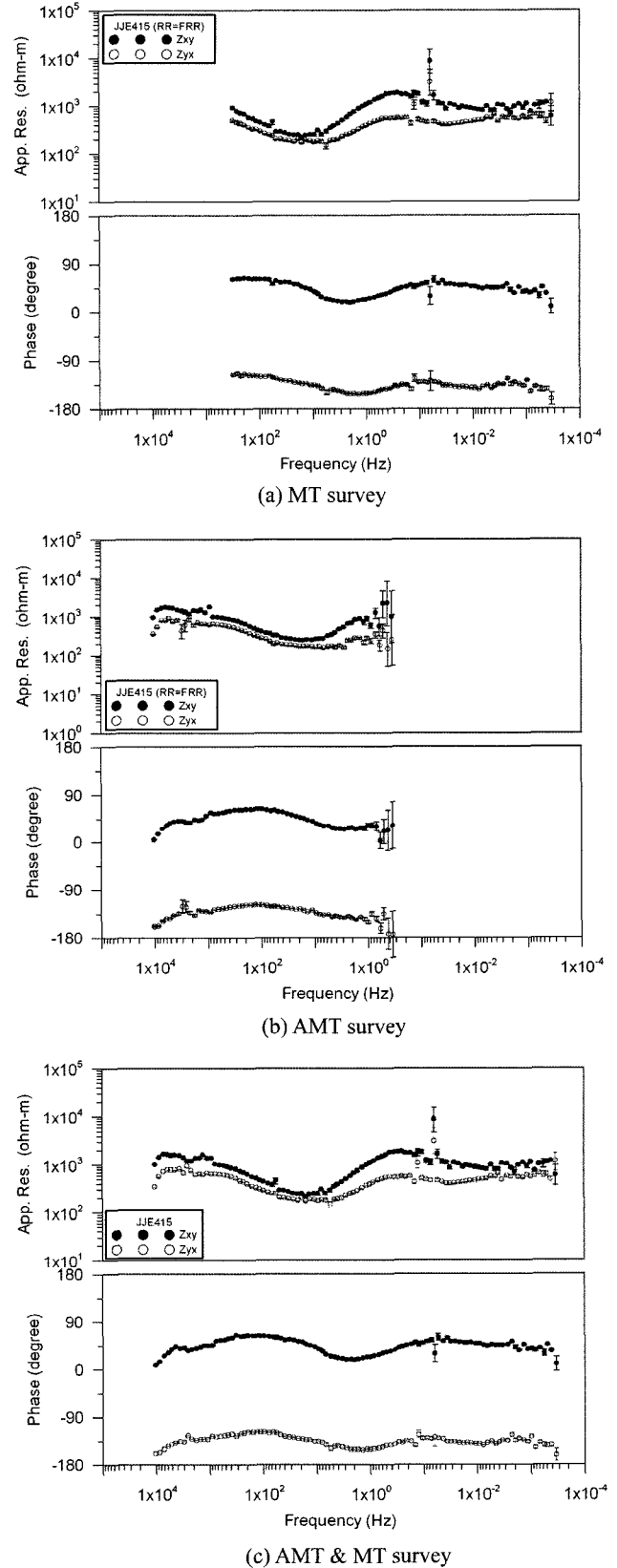
고도차이는 Line-E와 Line-W가 각각 430 m, 288 m이다. 사용된 탐사기기는 캐나다 Phoenix Geophysics의 MTU-5A 시스템 4대가 투입되었으며 원거리 기준점인 Kyushu에 1개 시스템 그리고 제주 현장에서는 3대의 시스템을 운영하였다. MTU-5A 시스템은 24 bit로 지표에서 전기장 2성분, 자기장 3성분의 텐서 측정이 가능하며 GPS를 이용하여 현장 측정과 원거리 기준점간의 시간동기화가 이루어진다. 또한, 자기장 센서만 교체하여 사용하면 AMT (10,400 ~ 0.35 Hz) 및 MT (317.6 ~ 0.00034 Hz) 주파수 대역의 자료를 하나의 시스템으로 얻을 수 있도록 설계되어 있다(Table 1).

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(송운호 등, 2006). 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 측정에서 x 방향은 자북, y 방향은 나침반의 동쪽을 가리키도록 전기장 및 자기장 센서를 설치하였으며, 자료처리 시에는 편각에 대한 보정이 이루어져 최종적으로 x는 진북, y는 진동을 가리키게 된다.

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 이렇게 하여 얻어진 측정 JJE-415 자료의 예를 보여주는 것이다. 그림에서 (a)는 MT 탐사 자료, (b)는 AMT 탐사 자료이며 (c)는 AMT 탐사 자료와 MT 탐사 자료를 통합한 AMT+MT 탐사자료를 보여준다. 이때 MT 탐사 및 AMT 탐사의 자료처리 시 일본 Kyushu의 원거리 기준점 자료를 이용하였다. 모든 그림에서 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. 그림에서 MT 탐사와 AMT 탐사의 중복되는 주파수 대역(0.35 ~ 317.6 Hz) 에서 두 가지 탐사 결과는 매우 유사한 겹보기 비저항과 위상 그래프를 나타내는 것을 확인

**Table 1.** Frequency ranges used in MTU-5A system.

Band	Sampling freq. (Hz)	AMT		MT	
		Range (Hz)	No. Freq.	Range (Hz)	No. Freq.
2	24,000	10,400 ~ 900	15	NA	NA
3	2,400	776.5 ~ 39.7	18	317.6 ~ 39.7	13
4	150	32.5 ~ 0.35	27	32.5 ~ 0.35	27
5	15	NA	NA	0.29 ~ 0.00034	40



**Fig. 2.** Impedance estimations for (a) MT, (b) AMT, and (c) AMT & MT for the site JJE-415 with remote reference processing using the remote data from Kyushu, Japan (RR in Fig. 1).

할 수 있다. 다만 AMT 탐사 결과의 저주파수 대역인 1 Hz 부근에서 매우 큰 오차막대를 보이는데 이는 AMT 탐사 시 사용된 자기장 센서의 감도가 현저히 떨어져 발생한 것이다(송윤호 등, 2006). 이렇게 얻어진 두 가지 탐사 결과를 결합하여 Fig. 2(c)와 같이 대략  $10^{-4} \sim 10^4$  Hz에 걸친 광대역에 대한 전기비저항 및 위상의 수직탐사 곡선을 얻을 수 있다.

측점이 중산간에 위치한 각 측선 중앙부 측정에서는 대부분 이러한 양질의 자료를 얻을 수 있었으나 측선의 양쪽 끝부분의 측정들에서는 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 수동으로 제거하여 최종적인 겹보기 비저항과 위상자료를 얻고 이를 2차원 역산에 이용하였다.

### 수치 모델링

우선 AMT 탐사에 의해 추가로 얻어지게 되는 고주파수 대역의 정보가 2차원 역산해석에서 천부 및 심부의 역산 결과에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하기 위해 Fig. 3과 같은 모델을 설정하였다. 이 모델은 탐사가 이루어진 제주도의 대략적인 층서구조를 반영하고 목적에 맞게 수정한 것으로 최상부에 1,000 ohm-m의 고비저항층은 화산 분출에 의한 현무암을, 그 하부에 50 ohm-m의 전기비저항을 가지면서 위치에 따라 두께를 달리하는 층은 서귀포층을, 전기비저항 5 ohm-m이고 두께 100 m인 얇은 층은 미고결 퇴적층(U-층)을, 그리고 다시 1,000 ohm-m의 전기비저항을 가지는 최하부층은 기반암인 화강암을 각각 나타낸다. 측선의 중앙의 하부 500 m 심도에서부터 하부로 전기비저항 20 ohm-m, 두께 250 m의 파쇄대가 존재한다.

설정된 모델의 지표에 1 km 간격으로 21개의 측정점을 배열

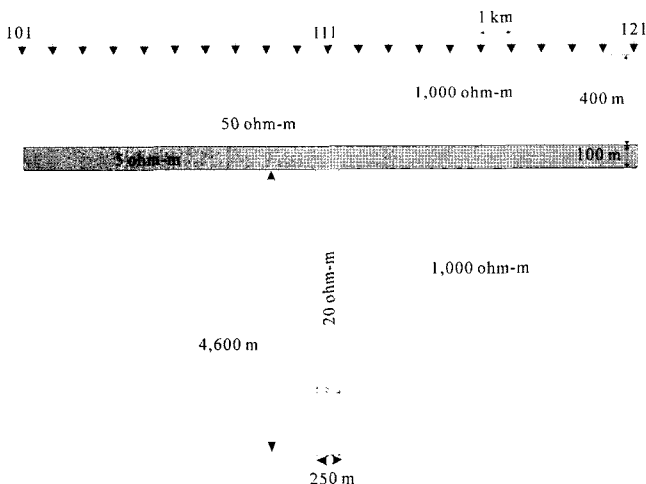


Fig. 3. A test model. Note arbitrary vertical and horizontal scale.

하고 2차원 모델링을 수행하였다. 이 모델의 MT 탐사 자료는 유한요소법을 이용한 MT 2차원 모델링 알고리즘(Lee *et al.*, 2002)을 이용하여 계산하였으며, 2차원 역산은 유한요소법 모델계산 알고리즘을 이용하는 최소자승역산(Uchida, 1993)을 이용하였다. AMT 탐사자료의 효용을 알아보기 위해 1) Dataset1: 통상적인 MT탐사만으로 얻을 수 있는 자료로서 0.01 ~ 100 Hz의 주파수대에서 21개의 주파수 자료와 2) Dataset 2: AMT+MT 자료로서 0.01 ~ 6,310 Hz의 주파수에서 30개 주파수로 구성된 두 가지 자료를 이용하여 2차원 역산을 수행하고 MT 탐사에 있어서 고주파수 자료의 효용성을 검토하고자 하였다. 이때 두 자료의 겹보기 비저항과 위상에 3%의 가우시안 무작위 잡음을 가하고 역산에 있어서도 3%의 잡음수준을 가정하였다.

Fig. 4는 이들 두 가지 자료에 대한 TM 모드 및 TE 모드 2차원 역산 결과를 도시한 것이다. 두 자료에 대한 역산 수행 시 입력 자료 이외의 모든 역산 변수는 동일하게 하였다. 역산 결과 최종 반복에서 RMS 오차는 Dataset1의 경우 TM, TE 모드에서 각각 1.57, 1.00이었고, Dataset2의 경우는 각각 1.52, 1.29로 충분히 수렴하였다.

TM 모드의 역산결과인 (a)와 (b)를 비교하면, 최상부의 현무암층의 경우 AMT 탐사에 의한 고주파수 자료가 포함된 (b)의 결과가 그 두께가 100 m일 때나 모델 오른쪽의 400 m일 때나 두께뿐 아니라 전기비저항까지도 매우 잘 표현한 것을 볼 수 있다. 반면 MT 대역만을 이용한 (a)의 경우는 현무암층의 대략적인 윤곽은 파악할 수 있으나 전기비저항은 층의 두께에 따라 너무 낮게 혹은 너무 높게 역산된 것을 볼 수 있다. 이러한 최상부층의 역산 결과는 TE 모드 역산결과인 (c)와 (d)에서도 동일하게 나타난다.

다음으로 가장 낮은 전기비저항을 보이는 두께 100 m의 수평층인 미고결 퇴적층은 역산결과에서 10 ohm-m 이하의 전기비저항을 보이는 층으로 가정한다면(검정색) AMT 탐사자료가 포함된 (b)와 (d)의 역산결과에서 그 층이 수평적으로 균일하고 두께가 얇게 축약되어 나타난 것을 확인할 수 있다. 반면 MT 탐사대역만을 이용한 경우는 심도 축으로 좀더 두껍게 퍼져 나타난다.

이러한 해석은 TM 모드 역산결과로부터 측정점 103과 113 위치에서 심도 프로파일을 그린 Fig. 5에서 더 확실하게 나타난다. 즉, 굵은 실선으로 표현된 AMT 대역이 포함된 경우는 최상부층의 두께와 상관없이 각층의 두께와 전기비저항을 주어진 모델(가는 실선)과 유사하게 분해해 내고 있으나, MT 탐사대역의 자료만으로 역산한 결과(점선)는 층 구분이 확실치 않고 천부에서부터 심도에 따라 점진적으로 전기비저항이 변화하는 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

또한 최하부의 화강암층의 경우 MT 탐사 대역의 자료만을 이용한 (a)의 경우는 미약하지만 모델의 오른쪽보다는 왼쪽의 전기비저항이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있으며 이는 상대적

으로 두께가 얇은 최상부층에 대한 정보 부족이 역산에 있어서 심부까지도 영향을 미침을 말해준다. 비록 TM 모드의 역산에서는 기반암에 발달해 있는 수직 파쇄대의 존재 여부를 확인하기는 어려우나 AMT 대역을 함께 이용한 (b)의 경우에는 모델 중앙부에서 미약하나마 그 존재를 확인 할 수는 있다. 따라서 AMT 탐사 자료는 천부 지층의 변화가 심한 경우나 천부의 전기비저항이 높은 경우에 유용할 것으로 생각되며 이러한 경우 AMT 대역 자료를 함께 얻는다면 역산에 있어서 천부의 분해능 확보는 물론이고 심부에 대해서도 더 정확한 역산결과를 얻을 수 있을 것이다.

그림 4의 4가지 역산 결과 모두에서 3,000~4,000 m 사이의 심도에서 수평적인 층 경계면이 존재하는 것처럼 보이는데,

이는 역산과정에서 기반암 상부의 매우 낮은 전기비저항을 갖는 층에 의해 그 직하부가 과도하게 고비저항으로 역산되었고 심도가 깊어지면서 이에 의한 영향으로부터 벗어나 본래 모델의 전기비저항 값인 1,000 ohm-m에 가깝도록 역산되었기 때문이다. 이때, TM 모드와는 달리 TE 모드 역산에서는 측선 중앙부에 깊은 심도까지 발달해 있는 수직 파쇄대가 잘 영상화된 것은 매우 흥미롭다.

### 현장탐사 자료의 2차원 역산

제주도에서 얻어진 2개 측선에 대한 MT 및 AMT 탐사자료의 2차원 역산을 위하여 우선 두 개의 측선에 대하여 주향이

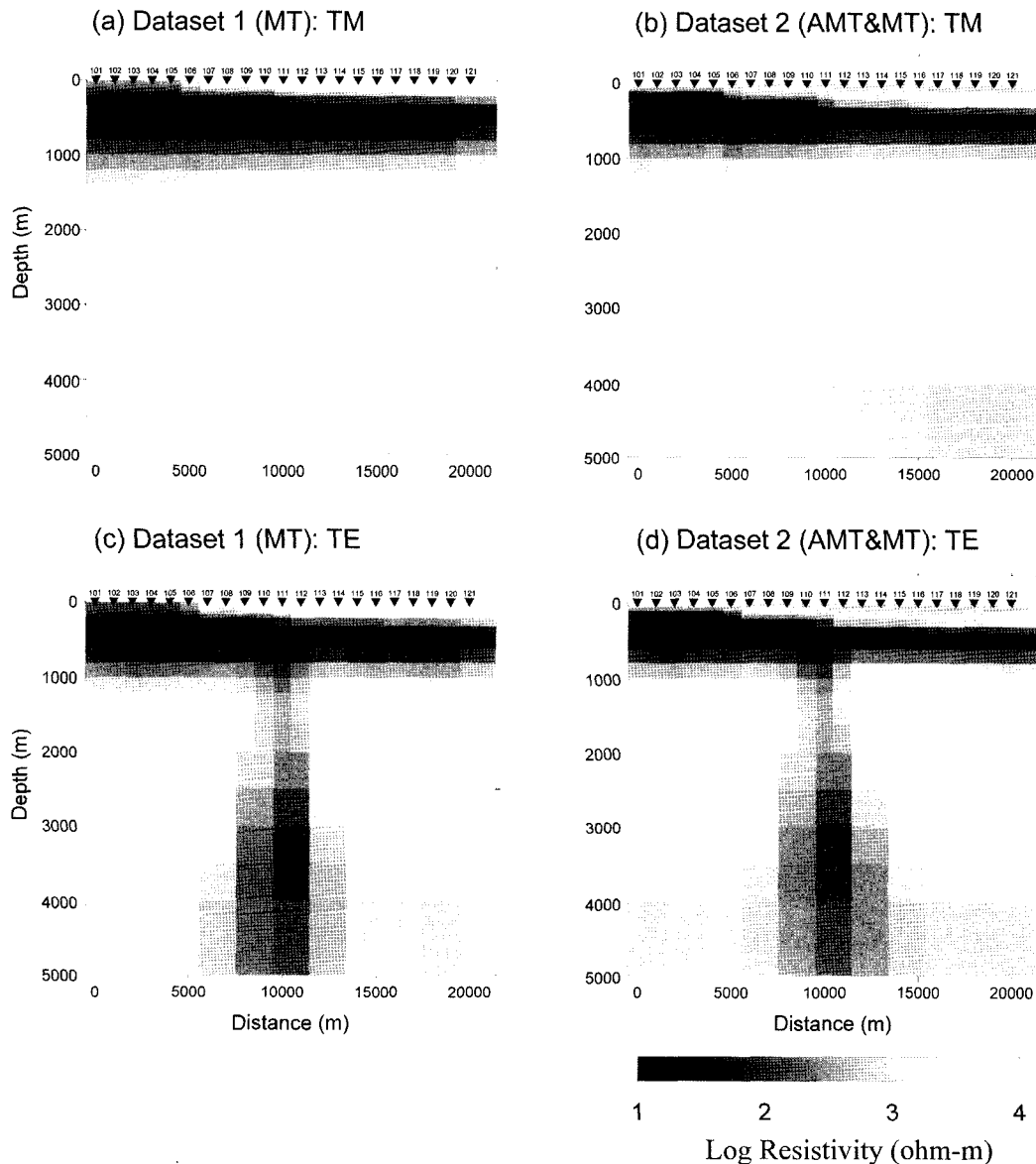


Fig. 4. Results of 2-D inversion for the model shown in Fig. 3. (a) and (c) used Dataset 1, MT band only, (b) and (d) used AMT & MT data. Vertical scale is enlarged 3 times than the horizontal scale.

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 겉보기 비저항과 위상을 역산에 이용하였다. 이론 모델링과는 달리 현장에서 완벽한 2차원 지질구조를 만나기는 어려우므로 TE 모드의 역산은 종종 수렴에 실패하며, 본 연구에서도 현장자료의 TE 모드 역산은 논외로 한다. 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 수치모델링자료의 역산에 사용된 것과 같은 최소자승역산(Uchida, 1993)을 이용하였다. 이때, 겉보기 비저항과 위상 자료의 측정 자료오차(error bar)의 크기에 따라 가중치를 주도록 하였으며 겉보기 비저항의 최소 자료오차(minimum noise)는 1%로 가정하였다.

Fig. 6은 Line-E와 Line-W의 두 측선에 대한 Dataset 2를 이용한 TM 모드 역산 결과이다. 현장자료의 역산 시 지형이나 주변의 바다의 영향은 고려되지 않았다. 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. 6에서 또 하나의 흥미로운 사실은 측정점 395(Line-E)와 360(Line-W)을 중심으로 저비저항구조가 심부까지 발달한 형태를 보이고 있는 것이다. 이러한 저비저항 이상이 두 측선의 중앙부에서 모두 나타나고 있는 것은 제주도 하부에 아직 식지 않고 존재하고 있을지 모르는 과거의 화산분출 통로 등의 지질학적인 구조에 의한 영향일 가능성과 측선의 양단과 중앙에서 주변 바다의 영향이 다르게 나타나기 때문일 가능성을 상정해 볼 수 있으며, 만약 전자의 경우라면 제주도에서 지열 개발 가능성을 시사하는 중요한 단서라고 할 수 있겠다. 그러나 이에 대해서는 향후 MT 탐사 모델링, MT 추가 탐사 및 심부 시추 등의 추가적인 지질조사가 필요할 것으로 생각된다.

수치모델링과 마찬가지로 현장자료의 역산에서도 AMT 탐사자료의 효용성을 검토하기 위해서 Line-E에서 얻어진 자료를 1) Dataset 1: 통상적인 MT탐사만으로 얻을 수 있는 자료로서 97~0.011 Hz의 주파수대에서 53개의 주파수 자료와 2) Dataset 2: AMT + MT 자료로서 4,400~0.011 Hz의 주파수에서 60개 주파수의 두 가지 자료로 나누어 역산을 수행하고 두 결과를 비교하였다(Fig. 7). 최종 반복에서 RMS 오차는

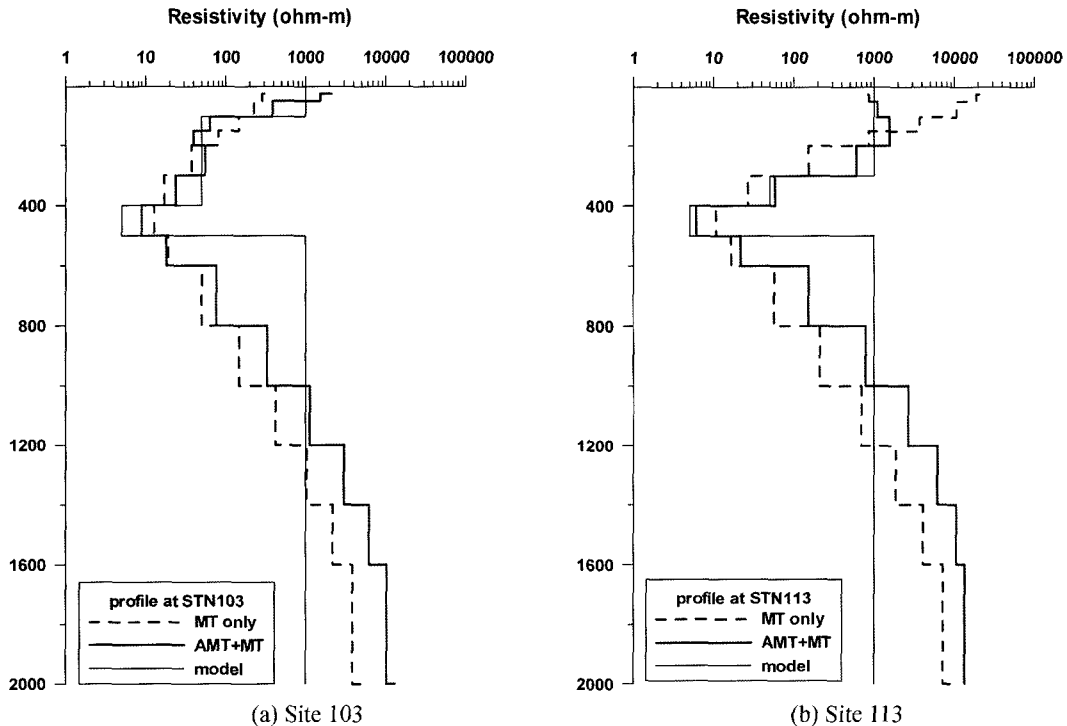


Fig. 5. Resistivity profiles with depth at sites (a) 103 and (b) 113. Thin black lines are given model and bold red lines and blue dashed lines correspond to AMT&MT and MT only cases, respectively.

Fig. 7의 (a)와 (b)가 각각 2.57와 2.52로 수렴하였다.

두 결과는 전체적으로 유사하지만 100 ~ 200 m의 천부구조에는 상당한 차이를 보이며, 특히 측정점 475 및 495의 미고결

퇴적층의 표현에 있어서도 많은 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 즉, 97 Hz 이하의 MT 주파수대역만을 사용하는 경우 (a)는 천부의 고비저항층에 대한 정보가 누락되어 역산결과 지표

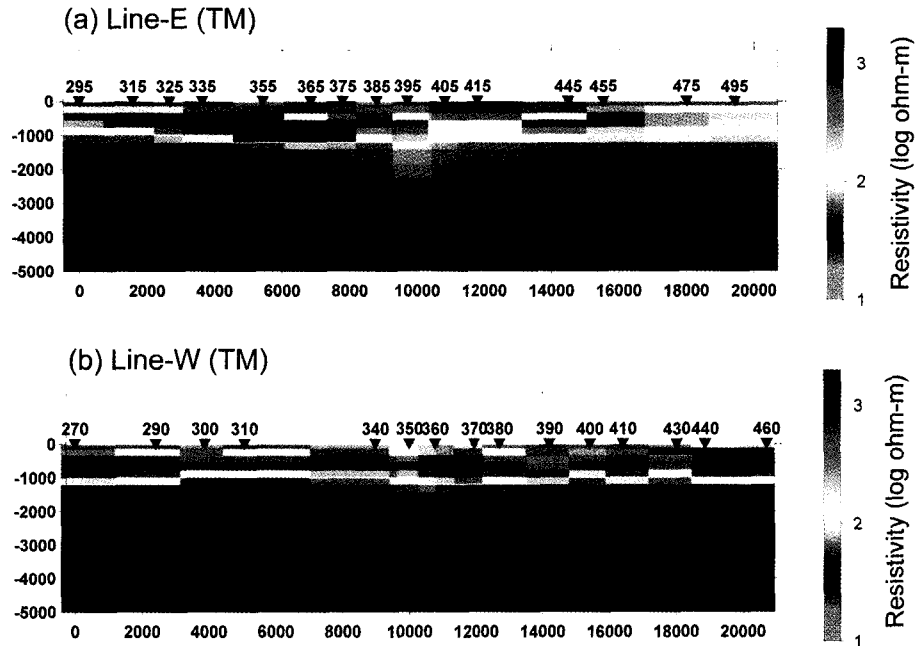


Fig. 6. The 2-D models of the survey lines in Jeju Island. Both MT and AMT (TM mode) data (60 frequencies from 4,400 Hz ~ 0.011 Hz frequency range) were used for the inversion.

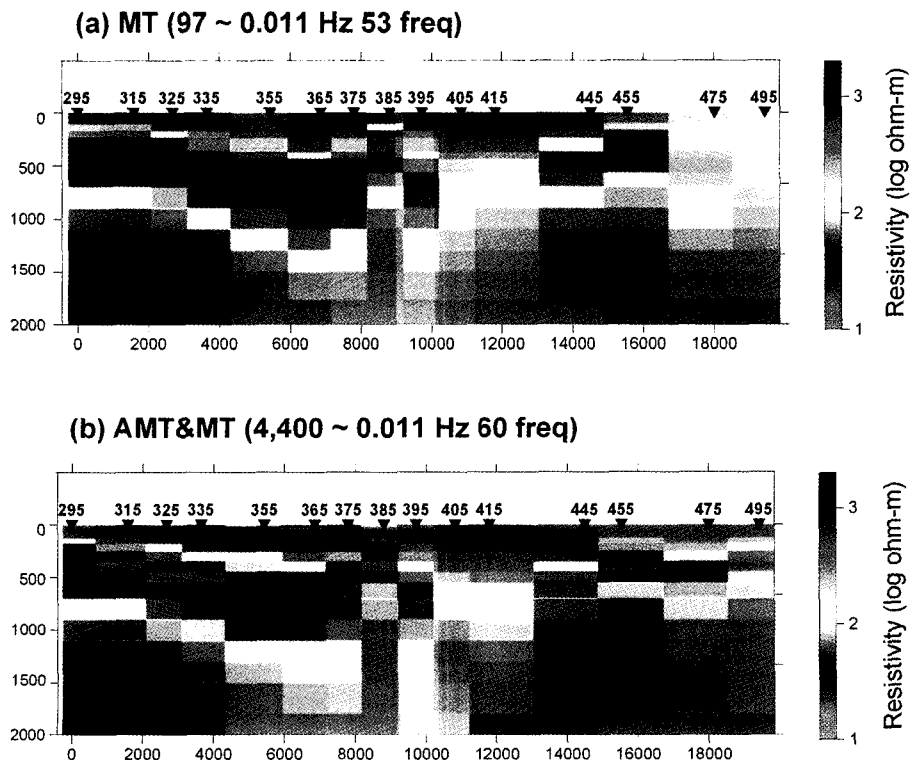


Fig. 7. A comparison of the 2-D models for Line-E using different datasets: (a) Dataset1 (MT only) and (b) Dataset 2 (AMT + MT). Vertical scale is enlarged 3 times than horizontal scale.

직하부 현무암층의 전기비저항이 상대적으로 낮게 설정되었고 따라서 그 하부의 미고결 퇴적층을 분해해내지 못하는 결과를 초래한 것으로 생각된다. 측선의 중앙부위는 달리 측선의 양단은 해안과 가까워서 이들 현무암층의 두께가 상대적으로 얇아 MT 주파수 대역만으로는 이 층을 구별해 내지 못한 것으로 생각할 수 있다. 반면, (b)의 AMT 주파수대역이 포함된 자료의 역산결과에서는 최상부층의 전기비저항이 500 ohm-m 내

외로 역산되었으며 그 하부에 전기비저항이 낮은 미고결 퇴적층의 존재도 확인 할 수 있다.

이러한 현상은 측정점 365와 475에서의 전기비저항 프로파일과 fitting 곡선을 비교한 Fig. 8에서 더 자세하게 살펴볼 수 있다. 그림에서 둥근 점으로 표현된 것은 측정된 자료이며 실선은 AMT 대역이 포함된 자료, 점선은 MT 대역만을 이용한 역산결과 및 그에 의한 이론 반응을 나타낸다.

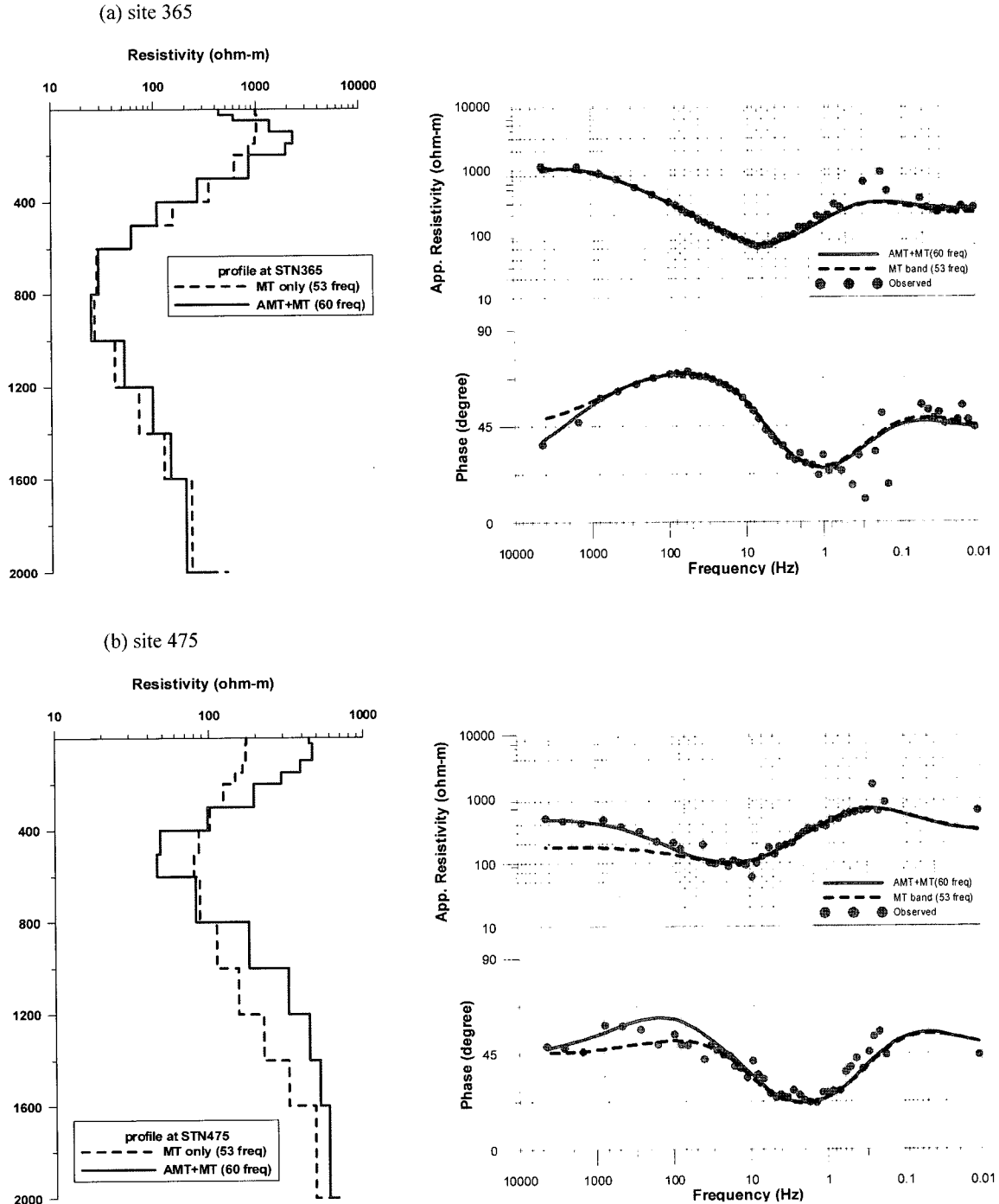


Fig. 8. Resistivity profiles with depth and the fitting curves for the sites (a) 365 and (b) 475 for the model shown in Fig. 7.



우선 (a)의 365측점의 역산결과 프로파일을 보면, AMT 탐사에 의한 고주파수 자료가 역산에 사용된 것과는 거의 무관하게 극천부를 제외한 거의 모든 심도에서 매우 유사한 심도 프로파일을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 이에 의한 fitting 곡선을 비교한 오른쪽 그림에서도 두 역산결과로부터 계산된 이론값과 측정값이 모두 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 이는 최상부층의 두께가 300 m 이상으로 100 Hz 이하의 주파수 대역에서도 이미 최상부층에 대한 충분한 정보를 포함하고 있기 때문으로 분석된다.

반면, 측점 475의 경우는 MT 탐사자료만을 사용한 경우는 천부에서 심부까지 매우 완만한 전기비저항의 변화를 보이지만 AMT 탐사자료가 포함된 역산결과에서는 최상부층과 400 m 심도의 미고결 퇴적층, 그리고 그 하부의 기반암층의 구분이 더욱 명확해진 것을 볼 수 있다. 이는 오른쪽 그림의 fitting 곡선에서 그 원인을 찾아볼 수 있다. 즉, 100 Hz 이하의 주파수대역(MT 탐사 대역)만을 이용한 역산 결과로부터 계산된 이론값(점선)이 100 Hz 이상에서는 측정값과 동떨어진 값들을 보이는데, 이는 다시 말하면 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서는 최상부의 고비저항층에 대한 충분한 정보를 제공하지 못했음을 의미한다. 즉, 측점 475의 경우는 MT 주파수 대역만으로는 천부의 고비저항층에 대한 정보가 미약하여 역산에서 천부에 고비저항층을 분해해내지 못했고, 이러한 천부구조의 불충분한 정보가 심부구조의 역산결과에도 영향을 미치게 되어 해석을 어렵게 하는 것을 알 수 있다. 따라서 우리나라와 같이 전반적으로 전기비저항이 높은 지질구조에서는 비록 현장 탐사작업이 번거로움이 있을지라도 MT 탐사와 더불어 AMT 탐사를 병행하여 고주파수의 정보를 얻는 것이 효과적인 일 것이다.

## 토의 및 결론

제주도 중산간 지역에서 한라산의 동과 서로 두 개의 남북 방향의 측선을 따라서 33 측점의 MT 및 AMT 탐사 자료를 획득하고 이를 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 자료의 측정시 잡음이 많은 국내의 여건을 고려하여 일본 Kyushu의 Ogiri 지역에 원거리 기준점을 설치, 운영하여 양질의 자료를 획득 하였으며 MT 탐사와 더불어 동일한 측점에서 AMT 탐사 자료를 획득하여 각 측점에서 대략  $10^{-4} \sim 10^4$  Hz에 달하는 광대역의 수직탐사 자료를 획득하였다.

MT 탐사에 있어서 AMT 대역의 효용성을 검토하고자 수행한 2차원 모델링과 역산, 그리고 현장자료의 역산에서 전기비저항이 높은 우리나라의 지질 특성상 MT자료의 해석에 있어서 AMT에 의한 고주파수 자료를 함께 이용하여 천부의 고분해능을 확보하는 것이 심부 지질구조 해석에 도움이 되는 것으로 나타났다.

현장자료의 TM 모드 2차원 역산 결과, 제주도에서 특징적

으로 해수면 하부 수십 ~ 수백 m에 존재하는 것으로 알려진 미고결 퇴적층이 10 ohm-m 내외로 측선 전반에 걸쳐 나타났다. 특히, 두 측선의 중앙부에서 심부까지 연장된 저비저항 이 상대가 공통적으로 나타났으며 이것이 과거의 화산활동과 관련이 있을지 여부에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '심부 지열에너지 개발 사업'의 일부이며, 일본의 원거리 기준점에서 자료를 획득하여 준 일본 Nittetsu Mining Consultant 사의 Minoru Teshima씨와 Koichi Matsuo씨, 현장 탐사자료 획득에 힘써준 한국 지질자원연구원의 박인화 연구원과 임성근 연구원 그리고 서울대학교, 전남대학교, 충북대학교 대학원생들께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 송윤호, 조인기, 정승환, 김정호, 전정수, 1993, 2차원 MT 탐사 - EMAP 탐사, "전자탐사 연구", 연구보고서 KR-93-1G-7, 한국 자원연구소, 86p.
- 송윤호 외 33인, 2005, 심부 지열에너지 개발 사업, 과학기술부, OAA2003001-2005(3), 147p.
- 송윤호, 이태중, Uchida, T., 2006, 가청주파수 대역 MT 탐사자료에서 원거리 기준점의 효과, 한국지구시스템공학회지, 43, 44-54.
- 이상규 외 27인, 1993, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, 931K101-113AP1, 상공 자원부, 235p.
- 이태중, 송윤호, Uchida, T., 2005a, 심부 지열자원 개발을 위한 원거리 기준점 MT 탐사 자료의 2차원 역산 해석, 물리탐사, 8, 145-155.
- 이태중, 송윤호, Uchida, T., 2005b, 포항 지열개발 지역 MT 탐사 자료의 2차원 및 3차원 해석, 한국지구시스템공학회지, 42, 297-307.
- 정승환 외 26인, 1993, MT 및 GDS 탐사에 의한 경상분지내 지열 및 탄화수소 탐사(I), 과학기술처 KR-93(T)-6, 55p.
- 정승환, 김정호, 박영수, 임무택, 정현기, 조성준, 이명종, 신인철, 조인기, 손호웅, 손무열, 이정상, 김기석, 오세영, 1997, MT 탐사에 의한 심층 지하수 조사, (주)한화 연구보고서, 69p.
- 조인기, 송윤호, 정승환, 김정호, 전정수, 1993, 원거리 기준점 MT 탐사, "전자탐사 연구", 연구보고서 KR-93-1G-7, 한국자원연구소, 86p.
- 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., 288-291.
- Lee, S. K., Song, Y., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2002, Two-dimensional inversion of MT data with topography, *EAGE 64th Conference & Exhibition*, 194p.

- Meju, M. A., 1996, Joint inversion of TEM and distorted MT sounding: Some effective practical considerations, *Geophysics*, **61**, 56-65.
- Pellerin, L. and Hohmann, G. W., 1990, Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts, *Geophysics*, **55**, 1242-1250.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole data, *Geophysics*, **54**, 254-262.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 841-898.