

심부 지열자원 개발과 MT 탐사

이 성 곤, 이 태 종, 송 윤 호, 박 인 화
한국지질자원연구원 지하수지열연구부

1. 서론

지열 에너지 자원은 지구 온난화 등 기후 변화 문제의 심각성이 고조되는 가운데 이의 주 원인인 이산화탄소의 발생량을 줄이고 또한 지속적으로 고갈되어 가는 화석연료를 대체할 미래의 중요한 에너지원의 하나로 큰 주목을 받고 있다. 국내에서도 지열에너지 개발 및 활용을 위한 노력이 꾸준히 이루어져 왔으며, 이에 대한 지속적인 관심이 높아지고 있다. 현재 지열의 이용 및 이에 관한 연구는 크게 지하수 백 미터 이내의 천부 지중열을 열펌프(heat pump)를 이용하여 소규모 냉난방에 이용하는 것과 지하의 수 km 이상 심부 지열을 발전을 통하여 간접 이용하거나 혹은 지열수를 이용하여 온천, 온실, 양어, 지역 난방 등에 직접 이용하는 것으로 나누어 볼 수 있다. 이 중 심부 지열자원을 개발하기 위해서는 일반적으로 가장 먼저 지온증가율 분포도나 이 밖의 지질 및 지열학적인 자료를 기반으로 가장 유망한 대상 지역을 선정하게 되며, 지질/수리지질, 지구물리/물리탐사, 지구화학 등의 지표 조사를 통하여 목표 범위를 좁혀 지열원의 실제적인 개발을 위한 심부 시추공을 굴착하게 된다. 시추공 굴착 후에도 지속적인 조사 및 분석을 통하여 효율적인 심부 지열에너지 개발을 추진하게 됨은 물론이다. 이 같은 심부지열 개발 과정에서 지하 심부에 대

한 정보 획득은 지열에너지 개발을 위해 필수적이라 할 수 있으며, 시추공 굴착 전의 지표 조사에서부터 굴착 후에 시추공을 이용하여 가능한 정확하고 많은 지하 정보를 얻는 일은 지열의 효율적 활용을 위하여 매우 중요하다.

지구물리탐사법이란 지하의 구성 물질, 즉 지하를 구성하는 암석의 탄성과 속도, 밀도, 전기전도도 등의 물리적 성질의 차이를 이용하여 이를 지표 혹은 지하에서 측정하여 지하 내부의 정보를 획득하는 방법이라 요약할 수 있다. 이러한 지구물리탐사법에는 여러 물리적 성질을 이용하는가에 따라 현재 서로 다른 방법들이 개발되어 있으며, 지구의 심부 구조를 밝히기 위한 순수 학문 분야에서부터 광물 및 석유 등의 자원탐사, 토목 건설물의 안전성을 담보하기 위한 지반조사 분야, 오염물의 확산을 방지하고 치유하기 위하여 오염범위를 탐지 규명하고자 하는 환경오염 조사 분야 등 여러 분야에서 다양한 목적에 따라 활용되고 있다. 심부 지열 개발에서 지하의 정보를 획득하기 위하여 사용할 수 있는 지구물리탐사법은 대상심도, 대상의 크기, 또한 물리적 성질 등에 따라 여러 가지가 있을 수 있다. 일반적으로 지열 개발 초기에 이루어지는 광역적인 구조 이상 분석 시에 항공 자력탐사나 중력탐사 자료가 이용되며, 보다 정밀한 시추위치 선정에는 탄성과 탐사나 MT(magnetotelluric) 탐사가 사용된다. 탄성과 반사법 탐사는 매우 높은 해상도에 힘입어 석유

탐사에서는 기본 도구로 이용되고 있으나 지열자원을 대상으로 하는 탐사에서는 경제적인 면에서 부적절하며 또한 인구가 밀집된 우리나라 육상환경에서의 적용은 쉽지 않다. 반면, MT 탐사는 심부 지질구조의 해석에 있어서 필요한 지하 심부의 정보를 제공할 수 있다는 장점과 최근 탐사장비의 비약적인 발전에 힘입어 세계적으로 지열 및 석유 가스 분야에 활발히 적용되고 있다.

본고에서는 현재 심부 지열자원 탐사에 현재 널리 이용되고 있는 MT 탐사의 기본 원리 및 탐사 과정을 간략히 소개하고, 현재까지 대표적인 국내의 MT 탐사 활용 현황 등을 되짚어 봄으로써 향후 EGS등을 비롯한 심부 지열자원 개발에서 활용성이 높을 것으로 기대되는 MT 탐사의 역할에 대하여 논하기로 한다.

2. MT(magnetotelluric) 탐사의 이론과 실제

2.1 기본 이론

지구물리탐사법의 하나인 MT(magnetotelluric; MT) 탐사는 우리말로 지자기지전류법(地磁氣地電流法) 또는 자자기지전류법이라고 불리며, 전자기장(電磁氣場, electromagnetic field)을 측정하는 전자탐사법(電磁探査法, electromagnetic method) 중의 하나이다. 이 방법의 가장 큰 특징은 인공적이고 능동적인 송신원(active source)을 사용하는 많은 다른 물리탐사법과는 달리 자연적으로 발생된 전자기장을 이용하는 수동적인(passive) 방법이라는 점이다. 이러한 자연적인 전자기장은 다양한 발생 메커니즘에 의해 발생하고 있는데, 일반적으로 태양풍, 극광의 지구 전리층과의 상호작용 및 지구 대기권의 뇌우 등에 의한 전리층 교란에 의해 발생함이 알려져 있고, 그 주파수 범위도 매우 광대역임이 알려져 있다(Berdichevsky and Dmitriev, 2002). 이 같은 원인에 따라 발생된 전자기파는 지구 상층권의 이온층과 지구라는 하나의 전도체가 일종의 도파관(wave guide)과 같은 역할을 하게 되어 지구

주위로 지속적으로 전파된다. 이때 전파되는 전자기파 중 일부는 지구 내부로 전파하게 되고 이에 따라 지구 내부에는 지전류가 유기되는데, 발생한 지전류는 전기장 및 자기장의 상호 유도 과정을 겪으면서 지하로 전파한다. 이렇게 전파되는 전자기파 에너지는 지하의 전기전도도(혹은 전기비저항)의 분포 및 전자기파의 주파수에 따라 다른 전파 및 감쇄 양상을 띠면서 지하로 전파하여 결국 그 에너지는 지하에서 소멸되게 된다(Simpson and Bahr, 2005).

Cagniard(1953)에 의하면 평면파 전자기파의 경우 서로 직교하는 전기장과 자기장의 크기의 비 및 위상의 차이는 지구 내부 각 부분의 전기전도도의 영향이 반영되어 평균적인 전기전도도(혹은 전기비저항)와 일정한 관계가 있음이 알려져 있으며 이는 MT 탐사의 기본적인 이론적 배경이 되며 다음의 식으로 표현된다.

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (1)$$

$$\phi = \phi(E) - \phi(H) \quad (2)$$

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{i\rho\omega\mu} \quad (3)$$

여기서, Z 는 임피던스(impedance), E 는 전기장의 세기(V/m), H 는 자기장의 세기(A/m), ρ 는 전기비저항(ohm-m), ϕ 는 위상, ω 는 전자기파의 각주파수, μ 는 대자율이다.

일반적으로 전자기파는 주파수가 높거나 지하의 전기전도도가 낮을수록 지하 천부 토양 혹은 암석의 전기전도도의 영향이 많이 반영되고 주파수가 낮거나 지하의 전기전도도가 높을수록 지하 심부 암석 또는 구조의 전기전도도의 영향이 많이 반영되는데 이를 표피(심도) 효과(skin effect)라 한다. 따라서 전자기파의 주파수를 달리하면서 이 값을 구하게 되면 천부부터 심부까지의 지하 전기전도도 정보를 획득할 수 있게 된

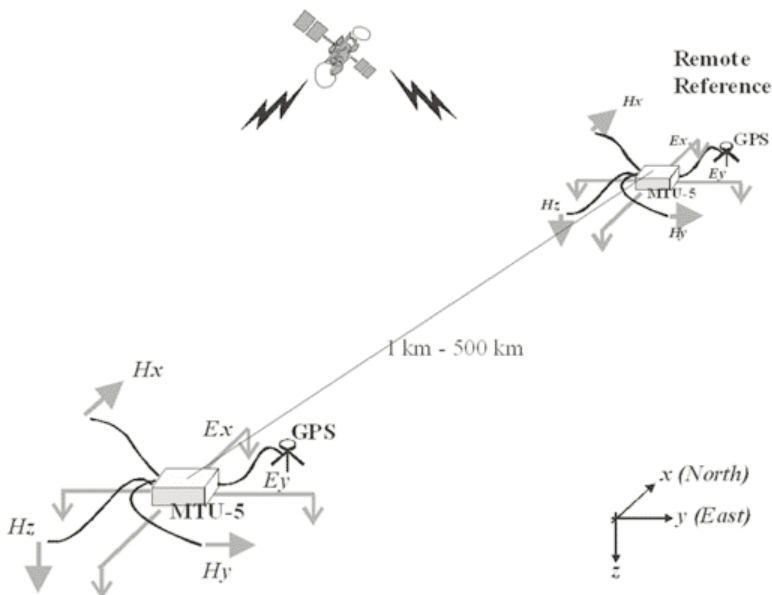
다. 앞에서 언급한 바와 같이 자연전자기장을 이용하는 MT탐사는 저주파에서 고주파까지 매우 광대역의 전자기파를 이용하는데, 인위적으로는 발생시키기 어려운 저주파의 자연전기장 전자기파를 측정함으로써 지하 심부탐사가 가능하게 되는 것이다. 다만 이러한 관계가 성립하기 위해서는 전자기파 발생원으로부터 매우 멀어서 전자기파가 평면파(plane wave)이어야 하는 원거리장(far field)이라는 전제 조건이 필요하다.

한편, 자연적인 전자기장은 그 신호가 상대적으로 매우 약한데 이는 MT 탐사의 단점이 되기도 한다. 이를 보완하기 위하여 평면파 조건이 만족되는 위치에서 인위적으로 전자기파를 발생시켜 통상적인 MT탐사 방법으로 탐사를 시행하는 인공송신원 MT (CSMT; Controlled Source MT) 방법도 있으며, 지표에서 인공적으로 가청주파수 영역 (수~수십 kHz)의 지전류를 흘려 MT 탐사와 같은 방법으로 탐사를 하는 CSAMT 탐사 방

법(Zonge and Hughes, 1987)도 있는데, 이들 또한 심부 탐사를 위한 MT 탐사의 변형된 방법이다.

2.2 현장 탐사 및 자료 해석

다른 지구물리탐사법과 마찬가지로 MT 탐사를 적용하기 위해서도 기본적으로 현장 자료 획득, 자료 처리, 자료 해석의 단계를 거친다. 이를 좀더 자세히 MT 탐사의 경우에 대하여 언급하면, 자기장 측정을 위한 센서 매설 및 전기장 측정을 위한 비분극 전극 매설, MT 시계열 측정 등의 현장 작업과 획득된 시계열의 주파수 영역 변환, MT 임피던스(impedance) 추출을 위한 원거리 기준점을 이용한 통계적 자료 처리, 이외에 해석에 도움이 되는 MT 자료로부터의 주향 추정, 차원성(dimensionality) 추정, induction arrow 계산 등의 자료 처리를 수행하며 최종적으로는 각 측정별로 얻어진 겹보기 비저항 및 위상 곡선으



전기장 및 자기장 측정을 위한 센서 및 전극이 설치되고, 또한 원거리 기준점에서 GPS를 이용하여 같은 시각의 전기장 및 자기장이 측정된다.

[그림 1] MT 탐사의 현장 개략도

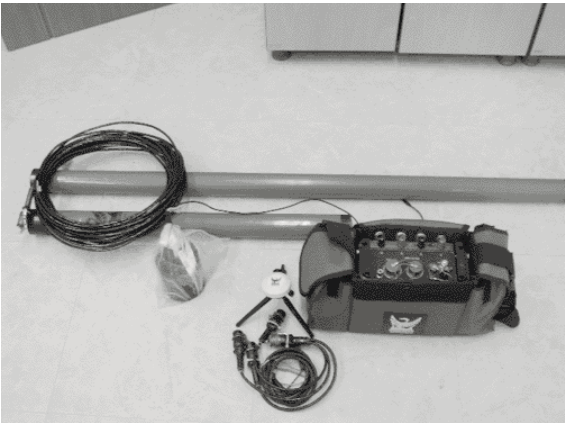
로부터 모델링 및 역산을 이용한 지하 전기전도도 모델 추정 및 지질 해석 등으로 나눌 수 있다 (Simpson and Bahr, 2005).

MT 자료 획득시에는 MT 탐사의 측정 대상인 자연적인 전자기장은 앞에서 언급한 바와 같이 그 신호가 상대적으로 매우 약하며, 이를 정확히 측정하기 위해서는 매우 세심한 주의가 요구된다. **그림 1**은 일반적인 현장 탐사를 위한 장비 설치의 개략도를 나타내고 있다.

일반적으로 자북을 기준으로 남북방향을 x방향, 서동방향을 y로 하여 **그림 1**에서와 같이 각 탐사 측정점에서 벡터(vector)량인 전기장 및 자기장의

지표에 수평한 네 성분을 측정하게 되며, 다만 자기장에 대해서는 지하의 상세한 정보를 위하여 수직 성분(z방향)을 추가로 측정하여 모두 5성분의 신호를 측정하게 되는데 이러한 탐사 방법을 텐서측정(tensor measurement)이라고 한다. 또한, 탐사지역으로부터 일정 거리를 두고 원거리기준점(remote reference)을 통상 운영하는데 이는 탐사 지역으로부터 멀리 떨어진 원거리의 자기장을 사용하여 지역적이고 인공적인 전자기적 잡음의 영향을 제거하기 위함으로 최근에는 매우 필수적인 방법으로 인식되고 있다.

그림 2는 MT 시스템 및 자기장 센서, 전기장 센



(a) 자기장 센서(빨간봉) 및 비분극전극, GPS 수신기, MTU-5/A 시스템



(b) 현장에서 설치된 예

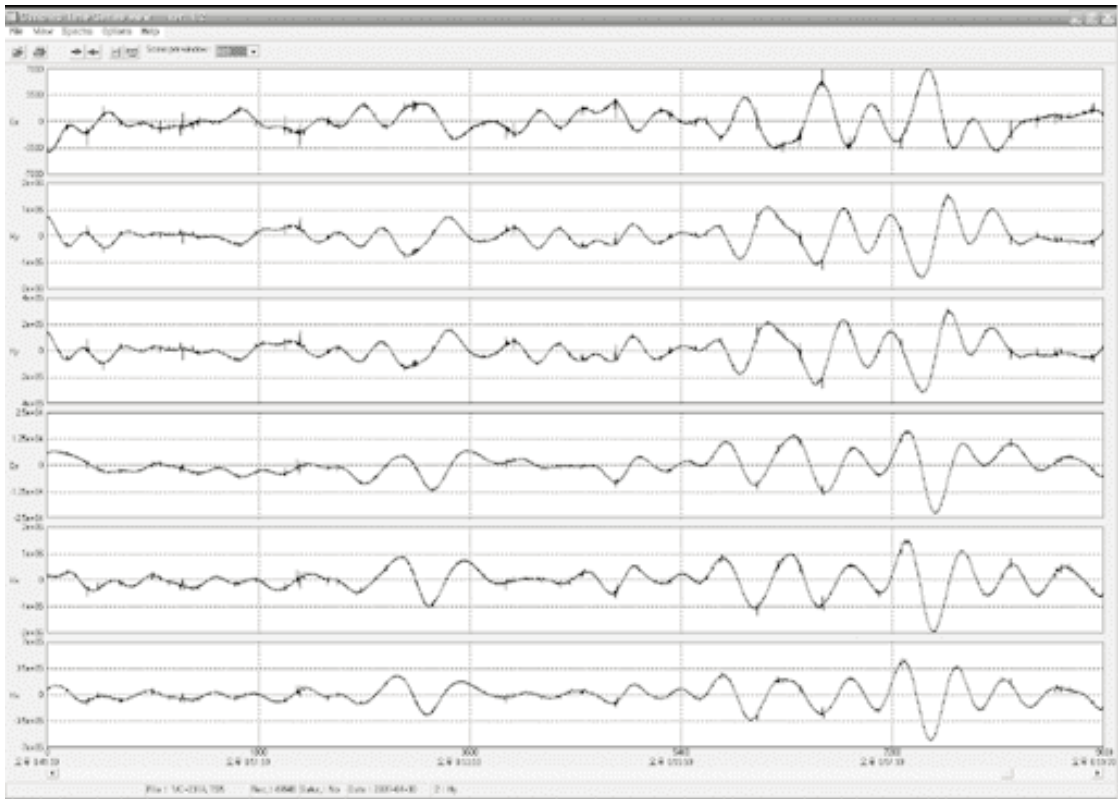


(c) 전기장 측정을 위한 비분극 전극의 매설



(d) 자기장 센서의 매설

[그림 2] MT 탐사를 위한 시스템의 예



[그림 3] 현장에서 측정된 MT 시계열(15Hz 샘플링 간격으로 얻은 자료로 맥동 현상(pulsation)을 명확히 보여준다)

서 및 그 매설 모습을 나타내고 있다. 과거 시스템에 비해 최근 MT 시스템은 큰 발전을 이루었다. GPS를 이용하여 정밀한 시각 동기화를 통한 두 지점간 원거리 기준점의 운용이 매우 편리해졌으며, 또한, 24 비트 A/D 변환기를 이용하여 정해진 시간 동안 정밀한 텐서 측정을 자동적으로 수행할 수 있다. 그림 2 (a)에 하나의 예로 캐나다 Phoenix Geophysics사의 MTU-5/A 시스템을 나타내고 있다. 일반적으로 자기장 센서는 바람에 의한 진동 또는 지구의 고유진동의 영향을 최소화하고자 깊이 50 cm 이상으로 매설하게 되며 전기장 측정은 50 m 내지 100 m 정도의 간격으로 두 지점에 비분극전극을 매설하여 두 지점간의 전위차를 이용하여 측정한다.

그림 3은 실제 현장에서 측정된 MT 신호를 나

타내고 있다. 이 예는 15Hz 샘플링 간격으로 얻은 저주파 전자기장의 시간적인 자료로서 자연 전자기장의 맥동 현상(pulsation)을 명확히 보여준다.

위의 장비로 얻을 수 있는 MT 신호의 대략적인 주파수 대역의 범위는 10^{-4} 에서 수백 Hz로 초기 기기 설정 값에 따라 다를 수 있으나 0.0003 ~ 320 Hz 정도이며, AMT(Audio-frequency MT) 탐사를 추가한다면 약 10 kHz 정도의 고주파수 영역까지 측정하여 천부의 보다 정밀한 탐사를 수행할 수 있다.

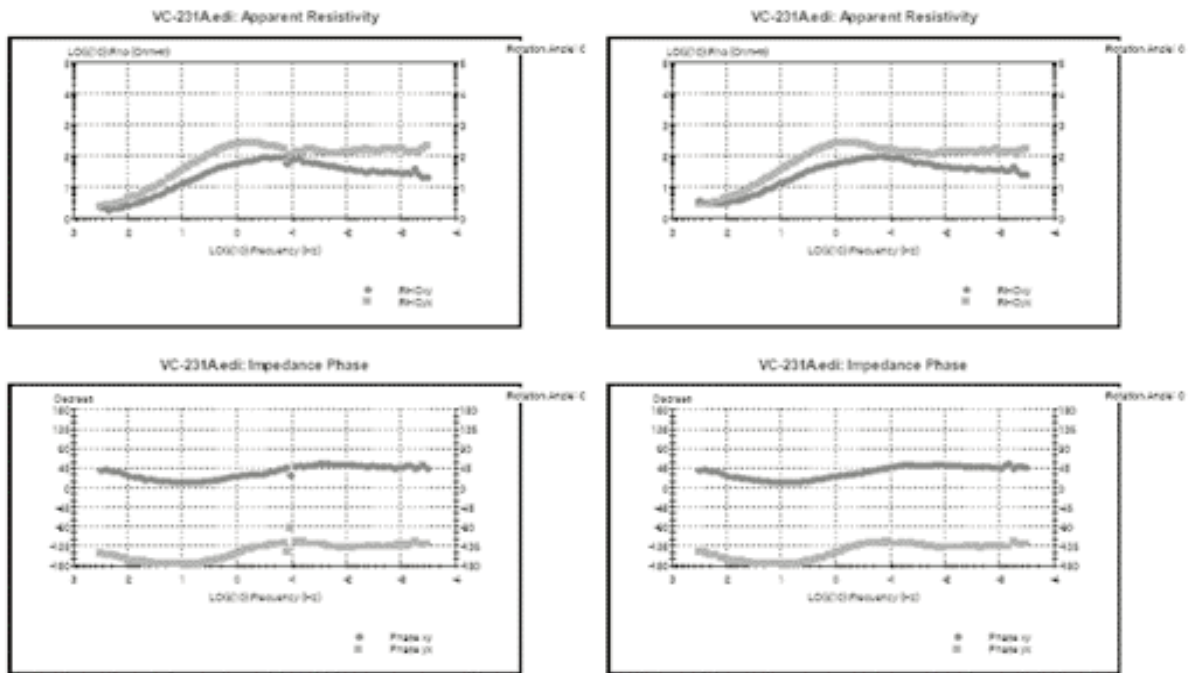
실제 현장에서 얻어지는 MT 신호는 전기장 및 자기장 각 성분에 대한 시간에 따라 변화하는 신호인 시계열(time series)이다. 우리가 원하는 주파수에 따른 겉보기비저항(apparent resistivity)

및 위상(phase) 값으로 바꾸기 위해서는 이를 주파수 영역(frequency domain)의 신호로 바꾸어야 한다. 이때 원거리기준점(remote reference)의 자기장을 이용하여 평면파 자연전자기장이 아닌 잡음으로 취급해야 하는 국부적으로 발생한 전자기장에 의한 왜곡을 통계적인 방법으로 제거 처리하여 원하는 신호만을 추출하게 된다. 통상 위의 MTU-5/A 시스템을 사용한다면 이에 수반된 SSMT2000의 상용 프로그램 등이 있으며, 이들 외에도 공개되어 있는 시간영역 자료처리 프로그램도 개발되어 있다 (<http://www.mtnet.info>).

그림 4에 이와 같은 자료처리 과정을 거쳐 얻은 MT 측점에서의 겘보기비저항과 위상의 한 예가 나타나 있다.

이렇게 얻어진 각 측점에서의 겘보기비저항 및 위상 정보의 정량적 해석을 위해서 MT장의 모델링 및 역산 알고리즘을 이용한다. 모델링이란 지

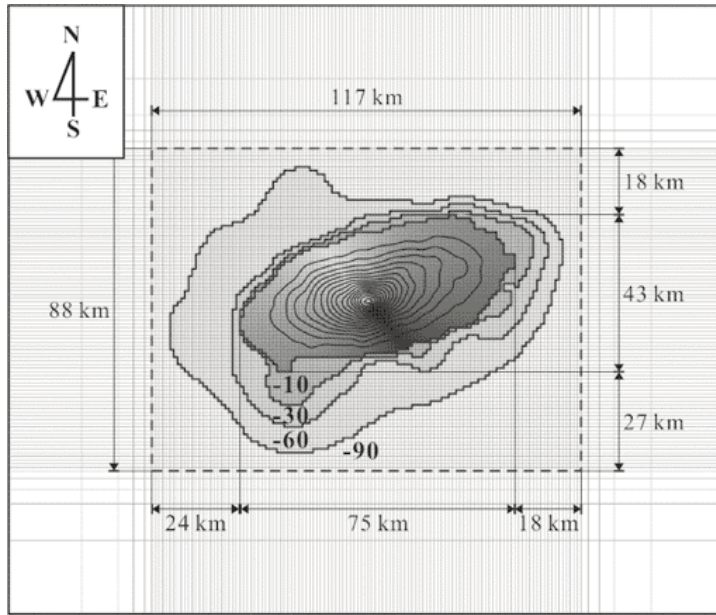
하의 가상 모델로부터 MT 탐사에 관한 시뮬레이션 과정이며, 역산이란 자동적으로 모델링의 반복 적용을 통하여 관측된 현장 자료를 만족하는 지하 모델을 추정하는 과정이라 요약할 수 있다. 현재, 지하구조를 단순한 1차원 모델로 가정된 경우에서부터, 2차원, 3차원에 이르기까지 다양한 모델링 및 역산 알고리즘이 개발되어 사용되고 있으며 (Rodi, and Mackie, 2001; Ogawa and Uchida, 1996; Lee et al., 2008; Nam et al., 2007; Sasaki, 2004; Siripunvaraporn and Egbert; 2000; Siripunvaraporn et al, 2005) 이를 지질 모델 추정을 위한 현장 자료 해석에 이용하고 있다. 그림 5는 3차원 지형을 가진 지하 모델에 대한 모델링을 지형을 포함한 3차원 모델링 (Nam et al., 2007)을 이용하여 수행한 예를 나타내고 있으며, 역산 적용 예는 다음의 제 3절의 적용 사례에서 제시하고자 한다.



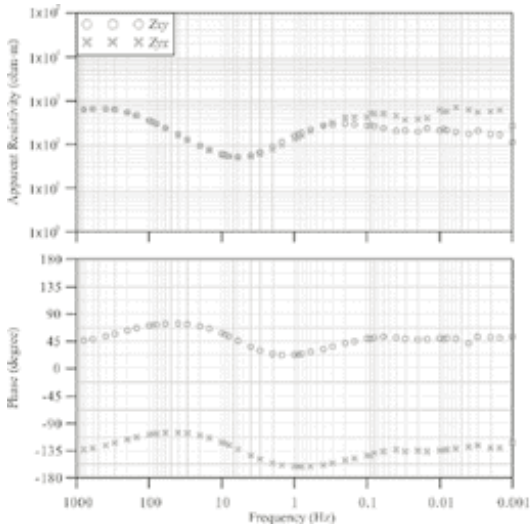
(a) 원거리기준점 자료를 이용하지 않은 경우

(b) 원거리기준점 자료를 이용한 경우

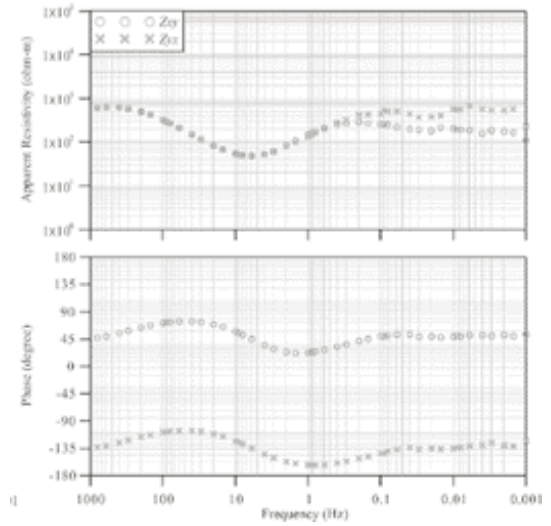
[그림 4] 현장에서 얻은 자료로부터 임피던스 추출을 통하여 얻은 주파수에 따른 겘보기 비저항 곡선(위쪽) 및 위상 곡선(아래쪽)



(a) 제주도에 대한 모델링을 위한 모델 격자 구성



(b) 3차원 모델링에 의한 겉보기비저항과 위상 곡선



(c) 위상 곡선

[그림 5] 지형 및 바다를 포함한 제주도 모형에 대한 3차원 모델링 결과(after Nam et al., 2007)

3. 심부지열자원 개발을 위한 MT 탐사의 국내 적용 사례

이상에서 대략적으로 MT 탐사의 기본 원리, 실

제 탐사 및 자료 처리 과정에 대하여 간략히 소개 하였다. 다음에서는 MT 탐사를 이용하여 심부 지 열 개발에의 실제 적용 사례에 대하여 소개하고자 한다.

3.1 포항 심부 지열 개발에서의 MT 탐사의 적용

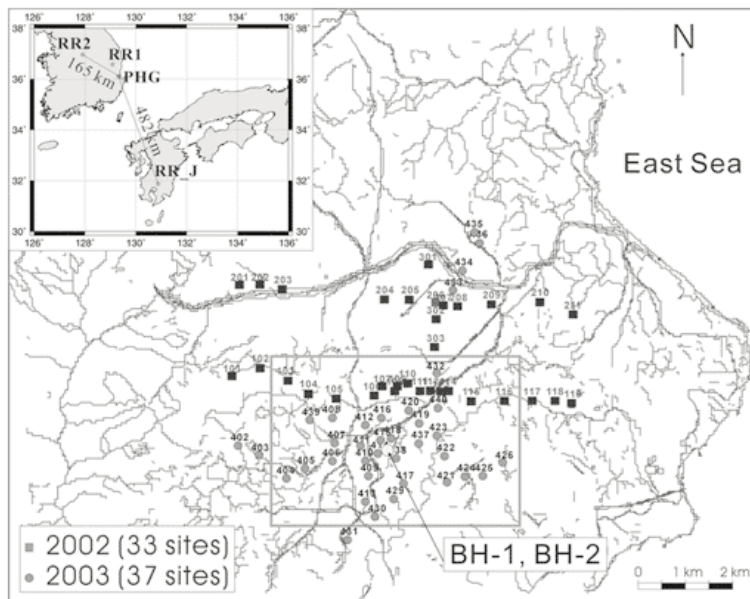
2003년 우리나라에서 최초로 심부 지열에너지의 개발을 위해 대규모 시추가 시작된 경북 포항 지역에서 2002년과 2003년의 2년에 걸쳐 심부 지질구조 파악 및 파쇄대 탐지, 궁극적으로는 시추위치 선정을 목적으로 3차원 MT 탐사가 수행되었으며 이 사례를 소개하고자 한다.(Lee et al, 2007a). 조사지역은 경상북도 포항시 북구 흥해읍 성곡리 일대로 동해의 해안선이 8 km 내외로 매우 근접해 있어 바다에 의한 저주파수 자료의 왜곡도 예상되는 지역이다(그림 6).

조사지역은 지질학적으로 제3기 포항분지 중부에 해당되는 지역으로, 심부 지열의 덮개암(cap rock) 역할을 할 수 있는 제3기 퇴적층의 심도가 깊고, 지질조사 및 인공위성 영상의 선구조 분석 결과로부터 심부 지열수의 모태가 될 수 있는 파쇄대의 존재 가능성이 매우 높게 해석되어 대상지로 선정되었다(송윤호 등, 2004). 또한 인공위성 영상 판독 결과 인접한 양산단층의 영향으로 전체적으로 양산단층의 발달 방향과 같은 북북동-남

남서 방향의 선구조가 우세하며 비록 연장길이는 짧지만 동-서 방향의 선구조들도 파악되었다.

MT 탐사는 2002년과 2003년의 두 차례에 걸쳐 이루어졌으며 그림 6과 같이 2002년에 33측점과 2003년 37측점의 MT 탐사를 수행하였다. 탐사에 사용된 장비는 앞에서 언급한 캐나다 Phoenix사의 24 bit 탐사장비인 MTU-5 및 MTU-5A이며 2003년의 경우 탐사현장에서 6대, 한국과 일본의 원거리 기준점에 각각 1대 설치하여 총 8대를 운용하였다. 또한 GPS를 이용하여 측정점의 위치 및 시간 정보 및 측정점과 원거리기준점간의 시간동기화(synchronize)가 이루어졌으며 텐서 측정을 수행하였다. 측정은 상대적으로 인공적인 잡음이 덜한 야간 시간대를 이용하여 전일 오후 5시부터 다음날 오전 8시까지 총 15시간 동안 이루어졌으며, 양질의 자료를 위해 같은 측정점에서 이틀에 걸쳐 자료를 획득하였다.

원거리기준점은 국내 지질여건상 전기적 잡음이 많음을 감안하여 그림 6에 보인 바와 같이 2002년에는 현장에서 약 60 km 떨어진 경상북도 안동시



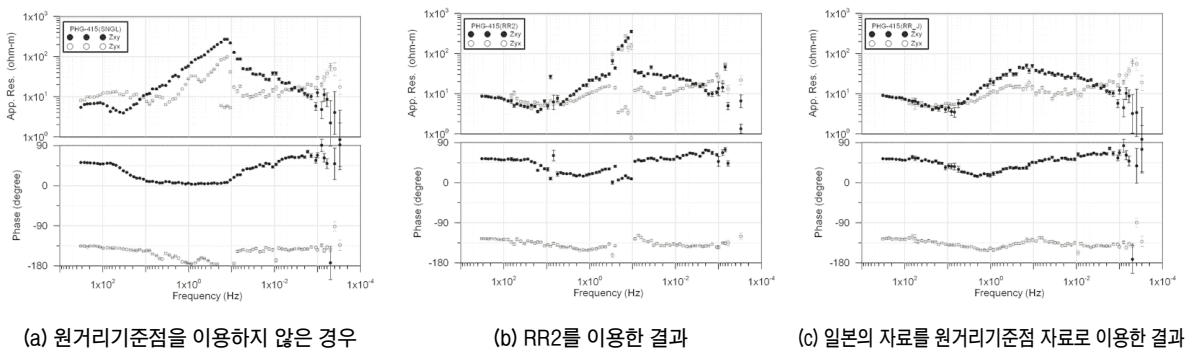
[그림 6] 포항 3차원 MT 탐사 측정도

임하면의 임하호 호반(RR1)에, 2003년 탐사에서 약 165 km 떨어진 충청북도 청원시의 대청호 내 고립된 섬(RR2)에 각각 설치하여 운영하였으며, 이와 동시에 국내 지질여건상 전기적 잡음이 많음을 감안하여 현장으로부터 약 480 km 떨어진 상시 MT장 모니터링 측점인 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 겘보기 비저항과 위상차에 미치는 영향을 그림 7에 나타나있다. 원거리기준점을 사용하지 않은 경우는 특히 중간 주파수 대역에서 (0.1 Hz ~ 100 Hz) 오차막대가 거의 보이지 않는 연속적인 겘보기 비저항과 위상곡선을 얻었으나 이는 상대적으로 크기가 큰 잡음에 의한 것으로 평면과 가정을 만족할 만큼 원거리 신호가 아니기 때문에 지하구조를 반영하지는 못한 결과로 실제 탐사 적용에 있어 오류를 범할 수 있는 것이다. 이는 겘보기 비저항곡선이 로그-로그 그래프 상에서 기울기 1에 가까운 직선을 나타내고 위상이 0인 사실에서 확인할 수 있다. 이 자료를 대청호에서 얻은 원거리 기준점 자료를 이용하여 자료처리 한 결과가 (b)로서, 비록 송전 주파수인 60 Hz 대역 부근과 MT 신호가 약한 0.1 Hz 부근의 주파수대역에서 잡음이 심하여 불연속적인 그래프를 나타내지만 이들 대역을 제외

하면 연속적이면서 지하구조를 반영한 의미있는 자료를 얻을 수 있는 것을 확인 할 수 있다. 한편, (c)의 약 480 km 떨어진 RR_J 원거리 기준점을 이용한 자료가 겘보기 비저항과 위상 모두에서 인접 주파수간의 연결성이 좋게 나타나 원거리기준점 자료처리 과정에서 국지적인 잡음을 효과적으로 제거한 것을 확인할 수 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 떨어진 원거리 기준점 자료도 서로 상관된 잡음에 영향을 받고 있기 때문으로 분석된다. 그러나, 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 전자기잡음 수준에도 불구하고 양질의 자료획득이 가능함을 시사한다.

2002년과 2003년에 Kyushu 원거리 기준점을 이용하여 얻어진 총 70개 측정점의 MT 탐사 자료 중 그림 6의 사각형으로 둘러싸인 44개 측정점들을 이용하여 3차원 역산을 수행하였다. 사용된 3차원 역산 알고리즘은 평활화 제한을 가한 선형화 된 반복적 최소자승 역산(Sasaki, 2004)이다. 이



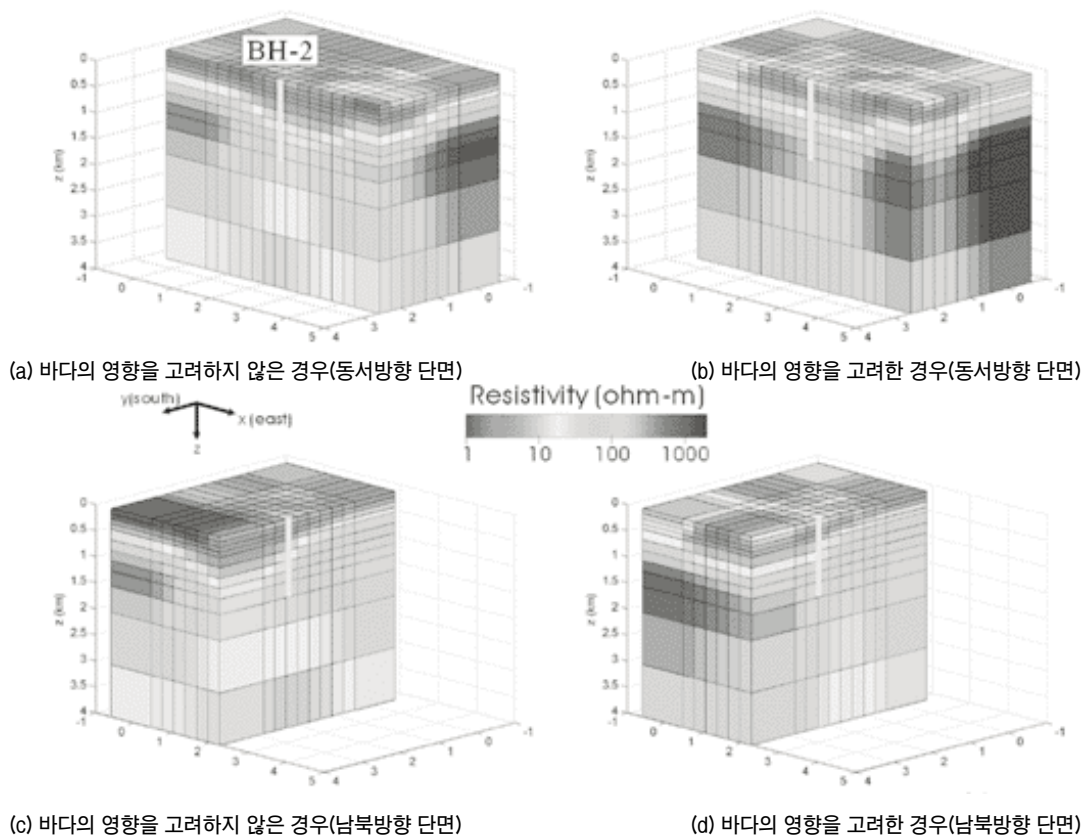
[그림 7] 포항에서 얻은 자료에 대한 원거리기준점 자료처리 예

때 모형반응계산은 유한차분법(staggered grid finite difference method)으로 지형은 포함되지 않았다. 특징적으로 이 알고리즘은 각 블록의 전기비저항과 함께 정적효과(static shift)를 역산에 있어서 미지수로 포함시켜 동시에 역산을 시도한다. 역산에서 걸보기 비저항과 위상 자료의 자료오차(error bar)의 크기에 따른 가중을 주었으며, 이 경우 걸보기 비저항의 최소 잡음 수준(noise floor)은 3%로 가정하였다.

역산에는 44개 측정점에서 0.0159 ~ 66 Hz까지 13개 주파수에 대한 xy-, yx- 모드(x는 동쪽, y는 남쪽)의 걸보기 비저항 및 위상의 총 2,288개 자료 중 자료오차가 너무 큰 178개를 제외한 2,110개의 자료를 이용하였으며, 이때 미지수는

x-, y-, z- 방향으로 각각 15, 10, 14개의 2,100개 역산 블록의 걸보기 비저항과 44 측정점에서 xy- 및 yx- 모드의 정적효과 88개로 총 2,188개이다. 역산블록의 크기는 최소 300 m로 하였는데, 모형반응계산을 위한 cell의 크기는 수평방향으로 최소 150 m, 수직방향으로 최소 100 m로 하였으며 지표 및 역산의 중앙부에서 벗어날수록 cell의 크기를 크게 하였다. 측정된 걸보기 비저항의 평균값으로 정의되는 균질한 반무한공간을 초기 모델로 가정하였다.

그림 8은 (a)와 (c)는 바다를 고려하지 않고 3차원 역산을 수행한 결과이며 (b)와 (d)는 모델의 동쪽 9 km 떨어진 지점에 남북으로 바다/육지의 경계가 있다고 가정하고 9 km 이상 동쪽의 심도



[그림 8] 포항지역 MT 탐사자료의 3차원 역산

1.5 km까지는 바다로 가정하여 역산과정에서 0.3 ohm-m로 고정한 채로 역산을 수행한 결과이다. 동-서 단면(a와 b)에서는 시추공(BH-2) 부근에서 파쇄대로 여겨지는 저비저항 이상대가 심부까지 연장되어 나타나는데 이는 선구조분석에서 나타난 남남서-북북동 방향의 선구조와 일치하는 결과이다. 남-북 단면(c와 d)에서는 BH-2의 약간 북쪽에서 파쇄대로 보이는 저비저항 이상대가 심부까지 연장되어 나타나고 있어 동-서를 가로지르는 또 다른 파쇄대의 존재 가능성을 시사한다.

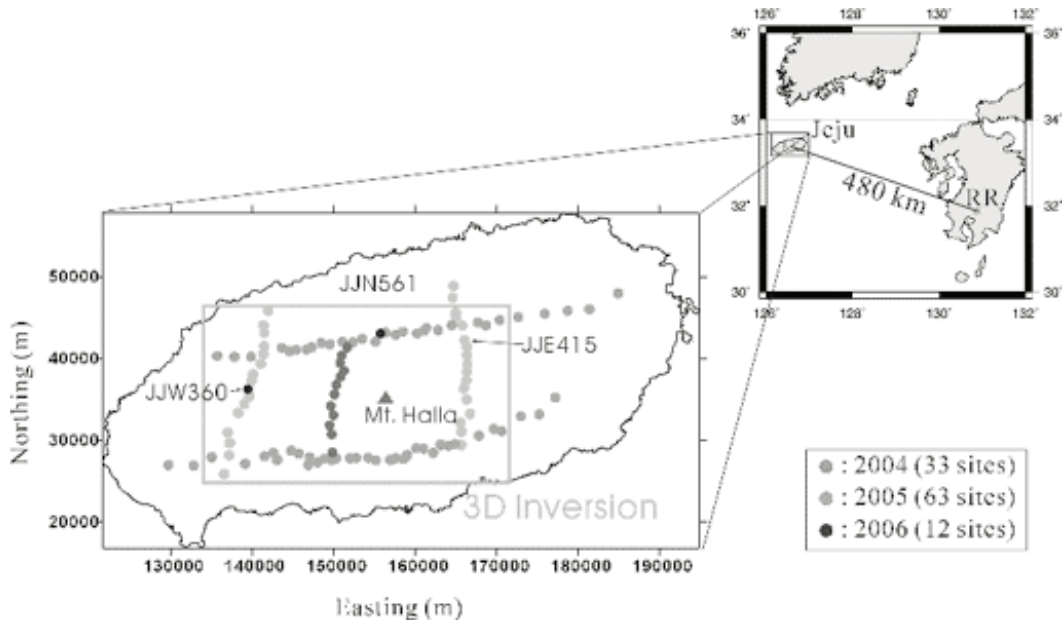
BH-2에서의 전기검층과 그림 8에 보인 3차원 역산에 의한 전기비저항 profile을 시추결과 나타난 지질상도와 비교한 결과 시추 결과 1.5 km 심도까지 크게 4개의 층으로 구분할 수 있으며 최상부에 10 ohm-m 이하의 반고결 이암이 약 360 m까지 분포하고, 수십 ohm-m의 응회암 및 이암이 교호하는 층이 약 520 m까지, 수백 ohm-m의 유문암이 약 900 m까지 분포하며 최하부에 80 ~ 100 ohm-m의 사암과 이암층이 존재하

고 있는 것으로 해석되었다. 또한, 3차원 역산 결과는 전기비저항이 현저히 높은 유문암을 제외하면 각 층의 전기비저항과 매우 정확하게 일치하여 3차원 역산에 의한 3차원 전기비저항 모델의 타당성을 입증하고 있다.

3.2 심부 지열자원 가능성 조사 - 제주도

제주도는 지금까지 어떠한 지열 징후도 보고된 바는 없으나, 남한에서 가장 최근까지 화산활동이 있었던 화산섬이고 또한 지금까지 제주도에서 수행된 대부분의 시추는 지하수 개발을 위해 주로 해안가에서 이루어져 한라산 중산간 지역에서의 지열부존 가능성은 열려있다고 할 수 있다. 이 예는 제주도 중산간지역에서 지열부존 가능성을 타진하고 심부 지질구조 파악을 목적으로 2004년부터 수행된 MT 탐사로서, 여기서는 2004-2006년의 3개년에 걸친 MT 탐사자료와 그 해석 결과를 소개한다.

그림 9는 2004년부터 2006년의 3개년 동안 수행된 MT 탐사의 측점도를 보인 것이다. 우선,



[그림 9] MT 탐사 측선도. 원거리기준점은 약 480 km 떨어진 일본의 Kyushu에 위치

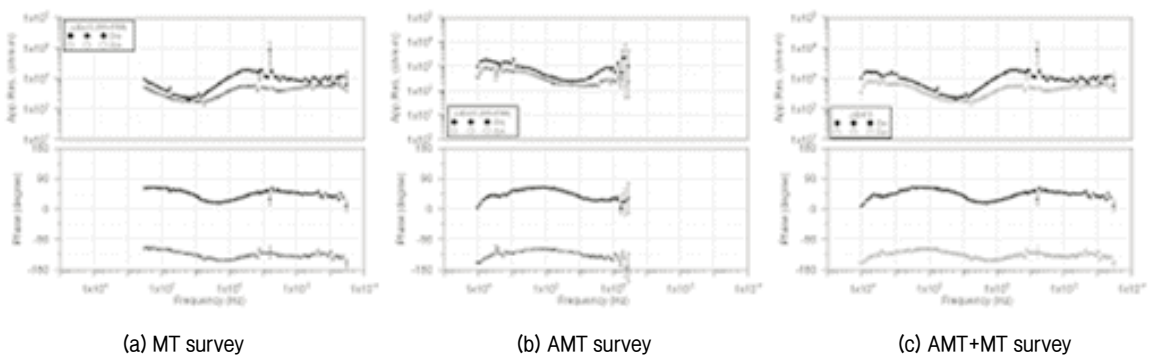
2004년에는 한라산의 동쪽과 서쪽에 2개의 남-북 방향의 측선을, 2005년에는 동-서 방향의 2개의 측선에 대해 각각 33개와 63개의 측점에 대한 MT 탐사를 수행하였다. 이 4개의 측선에 대한 MT 탐사 자료의 2차원 해석 결과, 각 측선의 중앙부의 심부에서 저비저항 이상을 보였으며 이것이 측선상에 존재하는 이상대가 아닌 한라산 하부의 이상대로 한라산의 생성과 관련된 화산활동과의 연관성에 대한 의문이 제기되었다. 이러한 해석을 바탕으로 2006년에는 한라산 서쪽의 1100도로를 따라 12개 측점에 대한 MT 탐사 자료를 획득하여 이를 포함하여 3차원 해석을 통해 이러한 해석의 타당성을 살펴보고자 하였다 (Lee et al., 2007b). 이때, MT 탐사와 더불어 AMT 탐사를 병행하여 $10^{-4} \sim 10^4$ Hz에 걸친 광대역의 탐사자료를 획득하여 천부의 해상도를 확보하면서 심부의 정확한 정보를 얻고자 하였다.

그림 10은 측점 JJE-415에서 측정된 MT 탐사 자료의 예를 보인 것이다. 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. 탐사과정에서 약 480 km 떨어진 일본 Kyushu의 Ogiri 지역에 원거리 기준점을 운영하고 이 자료를 이용하여 자료처리한 결과 그

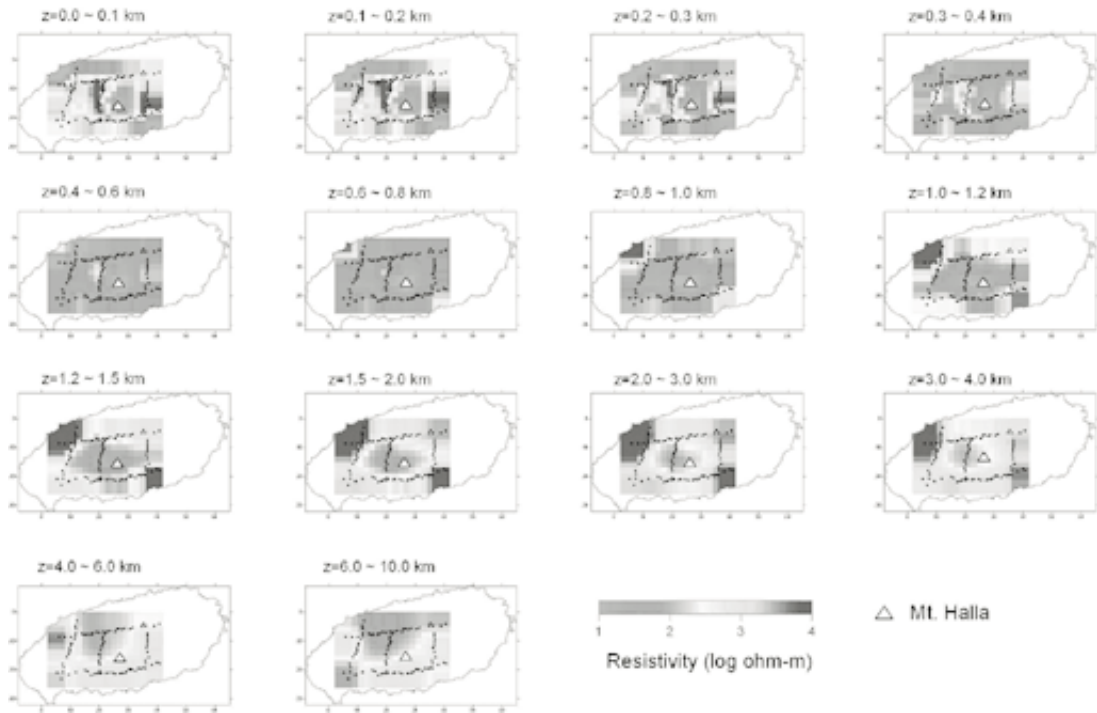
림 10에 보인 바와 같은 양질의 광대역 MT 탐사 자료를 얻을 수 있었다. 비단 원거리 기준점의 운영뿐 아니라 제주 중산간 지역에는 군데군데를 지나는 고압선과 목장을 제외하면 전기적인 잡음원이 거의 없기 때문에 중산간에 위치한 거의 모든 측점에서 이와 비슷한 양질의 자료획득이 가능하였다.

그림 10 (c)의 겹보기 비저항곡선으로부터 대략 제주도의 지하구조를 크게 3층으로 나눌 수 있는데, 즉 고주파수 대역에서 1,000 ohm-m 대의 고비저항층을 제1층, 10 Hz 부근의 저비저항층을 제2층, 그리고 0.1 Hz 이하에서 다시 고비저항층을 제3층으로 나눌 수 있다. 제주도 지하수 개발을 위하여 해안선을 따라 수많은 지하수 개발공이 시추되었으며 시추결과 제주도의 특징적인 3층 구조가 확인된 바 있다. 시추결과와 겹보기 비저항에서 나타나는 3층 구조를 대비하면 제1층은 제주도의 대부분을 덮고 있는 현무암층, 제2층은 해성퇴적층인 서포층 혹은 미고결퇴적층(U층), 그리고 제3층은 화강암 및 응회암으로 구성된 기반암으로 대비된다.

그림 11은 5 개의 측선에서 얻어진 총 108개의 측점 중, 그림 9의 사각형으로 표시된 영역 안의 한라산을 중심으로 한 총 89개 측점을 이용하여 3차원 역산을 수행한 결과를 심도별로 그린 것이다. 이때, 사용된 주파수는 0.01 Hz ~ 780 Hz의



[그림 10] JJE415 측점에서 측정된 탐사자료



[그림 11] 3차원 역산 결과의 심도별 전기비저항 분포

주파수 대역에서 16개의 주파수자료이며 바닷물의 영향과 지형의 영향은 고려하지 않았다.

우선 400 m 이내의 천부의 전기비저항 구조를 살펴보면 측점이 존재하는 블록의 전기비저항은 높게(약 1000 ohm-m), 측점이 없는 블록에서는 전기비저항이 낮게(< 100 ohm-m) 나타나는 것을 볼 수 있다. 400 m 이하 약 1.0 km 심도까지는 제주도 전역에서 100 ohm-m 이하의 전도성 층이 존재하며 이는 시추결과에서 확인된 미고결 퇴적층으로 해석된다. 시추결과에서 미고결 퇴적층이 해수면 하부 약 300 m까지 분포하는 것(고기원, 1997)과 배열된 측점의 평균고도가 약 400 m이므로 미고결 퇴적층의 분포가 상당히 정확히 영상화된 것을 미루어 알 수 있다.

현재 지속적으로 제주도에 걸친 MT 탐사가 수행 또는 계획 중으로 알려져 있고, 좀 더 정확한 결론을 도출하기 위하여 바다의 영향 고려한 해석, 지형의 영향을 고려한 해석 등의 연구를 통하

여 제주도의 심부 지열개발 가능성에 대하여 조사가 이루어질 것으로 전망되며, 제주도 지열부존 가능성에 대한 1차적인 결론이 도출될 것으로 기대된다.

4. 결론 및 전망

국내의 심부지열자원 개발 연구뿐 아니라 자원 탐사 분야 등의 적용을 위한 MT 탐사 기술 및 연구 수준은 세계에 비해서도 그리 뒤떨어지지 않는 수준에 도달한 것으로 파악된다. 현장 자료 획득 능력은 현재 한국지질자원연구원에 앞에서 언급한 최신의 MTU-5/A 장비 5대가 도입되어 활발하게 가동되고 있으며, 또한 국내외적으로 MT 탐사를 성공적으로 수행한 예가 꾸준히 발표되고 있다(이태중 등 2005a,b; 이춘기 등, 2007; 양준모 등; 2007). 특히, 자료 해석의 핵심이라 할 수 있는 모델링 및 역산 연구는 2차원, 3차원등에 대

하여 유한차분법, 유한요소법을 이용한 알고리즘을 개발(Nam et al, 2007; Lee et al., 2008)과 각 알고리즘의 비교 해석, 또한 3차원 모델링 및 역산에 관한 연구 결과도 괄목만한 성장을 이루었다(한누리 등, 2007).

이상에서는 현재 심부 지열자원 탐사에 현재 널리 이용되고 있는 MT 탐사의 기본 원리 및 탐사 과정을 간략히 소개하고, 국내에서 심부 지열자원 탐사에 활용되었던 활용 사례를 MT 되짚어 보았다. MT 탐사는 제한된 비용 및 측정의 편이성을 고려하면 심부 지하 정보를 제공하여 줄 수 있는 가장 좋은 수단 중에 하나로 현재 국내 기술 수준도 많은 요소기술 개발 및 현장 적용으로 상당한 수준에 와 있는 것으로 파악된다. 향후 국내에서도 EGS(Enhanced Geothermal System)등을 이용한 심부 지열자원 개발이 이루어질 것으로 예견되는데, 이를 비롯하여 심부 지열수 탐지를 위한 MT 탐사의 활용 및 유용성은 앞으로 증가 될 것으로 예상된다.

5. 시사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지열수 자원 실용화 기술 개발'의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

6. 참고문헌

1. 송운호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성곤, 이종철, 이병태, 박인화, 이태중, 조병욱, 염병우, 이승구, 이봉주, 기원서, 박노옥, 박영수, 임무택, 현혜자, 손정술, 임형래, 황세호, 오재호, 김세준, 이윤수, 김민규, 박 찬, 정용복, 김통권, 이진수, 천대성, 임성근, 2004, 심부 지열에너지 개발 사업, 한국지질자원연구원 연구보고서 일반-04(연차)-01, 국무총리, 226p.
2. 송운호, 이태중, Toshihiro Uchida, 2005, 가

- 청주과수 대역 MT 탐사자료에서 원거리 기준점의 효과, 한국지구시스템공학회 제84회 학술발표회 논문집, 183-188.
3. 양준모, 오석훈, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2003, 한반도 내의 전도성 구조를 고려한 3차원 지자기 모델링 및 차이 지시자의 적용, 한국지구과학회지, 24, 440-448.
4. 이춘기, 권병두, 이희순, 조인기, 오석훈, 송운호, 이태중, 2007, 한반도 횡단 자기지전류 탐사에 의한 상부지각의 지전기적 구조 연구, 한국지구과학회지, 28, 187-201.
5. 이태중, 송운호, Uchida, T., 2005a, 심부 지열자원 개발을 위한 MT 탐사 자료의 2차원 역산 해석, 물리탐사, 8, 145-155.
6. 이태중, 송운호, Uchida, T., 2005b, 포항 지열개발 지역 MT 탐사자료의 2차원 및 3차원 해석, 한국지구시스템공학회지, 42, 297-307.
7. 한누리, 남명진, 김희준, 이태중, 송운호, 서정희, 2007, 효율적인 3차원 MT 역산을 위한 다양한 감도의 이용, 물리탐사, 10, 259~267
8. Berdichevsky, M., N., and Dmitriev, V., I., 2002, Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems, Society of Exploration Geophysicists, pp. 215.
9. Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, Geophysics, 18, 605-645.
10. Lee, S. K., Kim, H. J., Song, Y. Lee, C.-K., 2008, MT2DInvMatlab-A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion, submitted to Computers & Geoscience.
11. Lee, T. J., Song, Y., Uchida, T., 2007a, Three-dimensional magnetotelluric surveys for geothermal development in Pohang, Korea, Exploration Geophysics, 38, 89-97.

12. Lee, T. J., Lee, S. K., Song, Y., Nam, M. J., Uchida, T., 2007b, Three-dimensional interpretation of MT data from mid-mountain area of Jeju Island, Korea, The 4th Int'l Symp. on 3D EM, Freiberg, Germany, 203-206.
13. Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., Son, J. S., and Suh, J. H., 2007, 3D magnetotelluric modelling including surface topography, Geophysical Prospecting, 55, 277-287.
14. Sasaki, Y., 2004, "Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data," Earth Planet and Space, 56, 239-248.
15. Simpson, F., and Barh, K., 2005, Practical Magnetotellurics, Cambridge University Press, pp. 254.
16. Uchida, T., 1993, "Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC," J. Geomag. Geoelectr., 45, 841-898.
17. Zonge, K. L., and Hughes, L. J., 1991, Controlled source audio frequency magnetotellurics, in Nabighian M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, Soc. Explor. Geophys., Vol. II, 713-809.
18. Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian M.N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, Soc. Explor. Geophys., Vol. II, 641-711