석모도 지열지대 자기지전류 탐사 자료의 역산 해석

이성곤^{1,3,*} · 박인화¹ · 정용현² · 이태종¹

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부 지열자원연구실, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92

²한양대학교 자원환경공학과, 133-791, 서울특별시 성동구 왕십리로 222

³과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학전공, 305-350, 대전광역시 유성구 가정로 217

Inversion Analysis of Magnetotelluric Data Acquired in Geothermal Area of Seokmo Island

Seong Kon Lee^{1,3,*}, In Hwa Park¹, Yonghyun Chung², and Tae Jong Lee¹

¹Geothermal Resources Group, Geological Research Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Natural Resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³Geophysical Exploration Major, University of Science and Technology, Daejeon 305-350, Korea

Abstract: A field campaign of magnetotelluric (MT) and audio-frequency MT (AMT) survey was done at 36 measurement points as a complementary for the previous 44 MT measurements completed during the period of 2005-2006. The purpose of additional MT survey is to investigate the possible fracture system in Seokmo Island, which is conceived to be crucial in accumulation and migration of geothermal hot spring in this area. We have done 2D and 3D inversions of overall MT and AMT data distributed on a grid to interpret subsurface of extended area. The inversion results reveal that at least two major faults are imaged in the inversion results, one of which is in NNE-SWW with steep dip, and another is in E-W direction.

Keywords: Seokmo Island, Geothermal, MT, inversion, fracture

요약: 본 연구에서는 석모도 지역의 지열에너지 개발에 중요한 심부 파쇄대 시스템에 대한 보다 광범위하고 정밀한 조사를 위하여 2005-2006년에 수행되었던 44 측정점의 탐사 영역을 확대하여 추가로 36 측정점에서 자기지전류 및 가청주파수 자기지전류 심부물리탐사 현장 탐사 자료를 획득하였다. 이전의 자료와 함께 모든 자료는 격자상으로 분포하도록 설계하여 관심 영역 내에서 2차원 및 3차원 역산을 통하여 지질 구조 해석을 실시하였다. 역산 해석 결과 지열수가 발견된 시추공 주변으로 파쇄대로 추정되는 최소 2 조의 큰 전기비저항 불연속면을 영상화하였는데, NNE-SWW(북북동-남서) 방향으로 발달한 불연속대는 지열수가 발견된 시추공 방향으로 발달되어있고, 이와 함께 인접한 바다로부터 E-W(동-서) 방향으로 불연속면이 발달되어 있음을 볼 수 있었다.

주요어: 석모도, 지열, 자기지전류 탐사, 역산, 파쇄대

서론

지열 에너지 자원은 청정 국산 에너지 자원으로 국내에서도 지열에너지의 효율적인 이용을 위한 지열 발전 등 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 고온

의 지열수가 자연 용출되고 있는 석모도 지역은 지열자원 개발 후보지로 유망한 지역으로 알려져 있으며, 지열 자원 개발의 잠재적 가능성을 연구하기 위하여 2005년부터 석모도 지열지대에 대한 지열학적 조사, 지질조사, 물리탐사, 지구화학 및 수리지질 조사 등의 연구가 진행되고 있다(송운호 외, 2005; 이태종 외, 2008).

지열을 지열발전, 지역난방 등에 이용하기 위해서는 가장 먼저 지열수 저류층의 확보가 필수적이며,

*Corresponding author: seongkon@kigam.re.kr

Tel: +82-42-868-3173

Fax: +82-42-868-3413

지열수 저류층의 생성 및 지열수 이동과 밀접한 관련이 많은 심부 파쇄대 분포에 대한 정보가 필수적이라 할 수 있다. 자기지전류 탐사(magnetotelluric; MT) 및 가청주파수 자기지전류 탐사(audio-frequency MT; AMT)는 심부 탐사에 매우 효과적인 방법으로 지열수 부존 및 이용과 밀접한 관련이 있는 심부 파쇄대 시스템의 분포를 파악하기 위하여 석모도에서 2005-2006년에 처음으로 현장 탐사가 수행되었다(송윤호 외, 2005; 이태종 외, 2008). 이 탐사에서는 약 750 m에서 약 72°C의 고온 지열수가 자연 용출되고 있는 YG-1과 1280 m에서 고온의 지열수가 용출되고 있는 YG-2를 중심으로 측점을 집중적으로 배치하여 현장 자료를 획득하고, 2차원 및 3차원 해석을 통하여 온천수 개발을 위하여 굴착된 시추공(YG-1, YG-2)에서 발견된 지열수와 그 주변 지하 파쇄대 분포와의 관련성에 대한 연구 결과가 제시된 바 있다(Lee et al., 2010). 그러나, 여건상 자기지전류 탐사 측점이 지열 개발 대상 후보지에 비해 좁게 한정되어 있

어 석모도 일대의 전체적인 파쇄대의 분포에 대한 정보가 제한적이라는 한계점이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 석모도 지역의 지열에너지 개발에 중요한 심부 파쇄대 시스템에 대하여 보다 광범위하고 정밀한 조사를 위하여 기존의 탐사 영역을 확대하여 자기지전류 심부물리탐사 현장 탐사 자료를 추가로 획득하였다. 획득된 자료는 기존의 자료와 함께 격자상으로 분포하도록 설계하여 관심 영역 내에서 다양한 2차원 및 3차원 역산 등의 지질 구조 해석을 실시하였으며, 전기비저항 및 자연전위 탐사 등 후속 탐사를 위한 전체적인 배경 전기전도도 분포를 구하고자 하였다.

탐사지역 개요

자기지전류탐사 및 가청주파수 자기지전류 탐사(이하 자기지전류 탐사)가 실시된 지역은 석모도 해명산을 중심으로 남서쪽에 위치한 평탄한 지역으로 Fig.

Fig. 1. Sketch of known geologic boundaries over a Google image of Seokmo Island, where geothermal investigations are performed. An area for 2D and 3D interpretations of MT data are marked in a solid rectangle. Abbreviations are as follows. PCEjs: Jangbong schist, Jmgr: Jurassic biotite granite; Kgdi: Cretaceous biotite granite; Qa: Quaternary alluvium. This is redrawn based on geologic maps published in Hwang and Kim (2005), Lee et al. (2006), Park and Lee (2007).

1의 사각형으로 표시된 부분이다. 이 지역은 행정적으로는 인천광역시 강화군 강화읍 삼산면 석모리와 매음리 일대이며, 지질적으로는 경기육괴 북서부에 위치한다. 최근에 발간된 1:50,000 강화·온수리도폭(황재하와 김유홍 2005)에 의하면 석모도는 지질적으로는 기저에 경기변성암복합체에 속하는 선캄브리아기의 장봉 편암(PCEjs)이 분포하고 순차적으로 쥐라기의 반상 및 중립질 흑운모화강암(대보화강암; Jmgr)과 백악기의 각섬석 화강섬록암 및 세립질 흑운모화강암(불국사화강암; Kgdi)이 관입하였으며, 지표에는 주로 자갈과 모래로 구성된 퇴적층인 신생대 충적층(Qa)으로 피복되어 있는 것으로 알려져 있다.

선캄브리아기의 장봉편암은 석모도의 남서쪽과 서쪽의 섬에 분포하며, 흑운모편암-편마암, 석회질편암, 결정질석회암, 석영편암으로 구성되어 있다. 쥐라기의 반상흑운모화강암은 석모도의 상리, 하리 및 석모도 북쪽의 섬들에서 발견되는 데 반해 석모도 중앙부와 남부에서는 중립질흑운모 화강암이 분포한다. 석모도 중앙부의 쥐라기 화강암체(Jmgr)는 각섬석화강섬록암(Kgdi)의 관입으로 인하여 남쪽과 북쪽으로 나누어져 있고, 석모도 중앙부에 분포하는 각섬석화강섬록암은 강화도 마니산에서 확인되는 것과 같이 SHRIMP (sensitive high resolution ion microprobe) U-Pb 저어콘(Zircon) 연대 측정 결과 108 Ma로서 백악기 중기 것으로 판명되었다. 또한, 석모도 지역의 다수의 온천은 남쪽 흑운모 화강암 분포 지대와 동일한 연대로서 이와 밀접한 관련이 있는 것으로 분석되었다(황재하와 김유홍, 2005; 이승구 외, 2006; 박덕원과 이창범, 2007).

석모도 지역에는 온천 개발을 위하여 굴착된 여러 시추공들이 분포하고 있는데 이 시추공 중 Fig. 1의 YG-1에서는 심도 750 m에서 72°C의 지열수가 자연 용출하고 있고, YG-2에서도 심도 1,280 m에서 약 75°C 지열수가 발견된 바 있다(Lee et al., 2010). 이승구 외(2006)에 의하면 석모도에서 산출되는 72°C의 Na-Cl형의 고온성 온천은 Sr 동위원소비 분석을 통하여 백악기 각섬석화강섬록암(Kgdi)의 영향을 완전히 배제하지는 않았으나 쥐라기 흑운모 화강암(Jmgr)과 밀접한 연관성이 있고, 두 화강암체의 경계 부분에서 산출되고 있음을 보고하였다. 이러한 현상은 두 암체의 경계부근에 깊게 발달되어 있는 파쇄대 시스템을 따라 바닷물의 순환과 관련된 것으로 분석되고 있으며(Lee et al., 2010), 이 지역의 고온성

지열수 자원의 지열 자원 개발 잠재력을 평가하기 위해서는 파쇄대 시스템의 분포에 대한 정보가 매우 필요하다 할 수 있다.

현장 자료

고온의 지열수가 자연 용출되고 있는 석모도 지역은 앞 절에서 언급한 바와 같이 지열자원 개발 후보지로 매우 유망한 지역으로 지열발전 등 지열 자원 개발의 잠재적 가능성을 연구하기 위하여 기본적인 지질조사, 물리탐사 및 수리지질 조사 등이 수행되었다(송윤호 외, 2005; 이태중 외, 2008). 특히, 이 지역 지열수의 생성 및 이용에 큰 관련이 클 것으로 생각되는 심부 파쇄대 시스템의 분포 등 지질구조 조사를 위하여 2005-2006년에 자기지전류 탐사가 수행되었으며, 이를 통하여 YG-1과 YG-2 시추공 주변 지하 파쇄대 분포에 대해 제시된 바 있다(Lee et al., 2010). 이전 탐사에서는 YG-1과 YG-2를 중심으로 자기지전류 탐사 측점이 집중적으로 배치되어 총 44 측점에 걸쳐 탐사가 수행되었고, 이 탐사 결과 YG-2에서 용출되는 지열수를 배태하고 있는 파쇄대가 지하 1.5 km 깊이에서 남동쪽으로 경사져서 분포하고 있는 것으로 분석된 바 있다(Lee et al., 2010).

본 연구에서는 이를 기반으로 이 지역에 존재하는 파쇄대 시스템에 대하여 보다 광범위하고 정밀한 조사를 위하여 기획되었다. 새로이 수행된 자기지전류 탐사에서는 2005-2006년에 획득된 44개의 측점 이외에 36개 탐사 측점에서 추가로 자료를 획득하여 탐사 대상 지역을 지열 자원 개발 잠재적 후보지 전체로 확장하였다. Fig. 2는 두 차례에 걸쳐 탐사가 수행되었던 측정점을 표시한 위치도로 편의를 위하여 온천수 개발을 위하여 이미 굴착되었던 시추공들의 위치도 같이 도시하였다. 이 탐사에서는 기존 탐사 지역을 기준으로 해명산 남서쪽과 어류정 부근 구염전지대까지 포함하여 이전의 탐사 자료와 함께 2차원 및 3차원 해석이 가능하도록 격자상으로 측점을 배치하였는데, 대략 측점간 간격은 약 100-200 m 정도가 되도록 설계하였다. 측정 주파수는 가청주파수(audio-frequency) 대역을 주로 측정하였고 심부 지질 정보 획득 및 해석의 신빙성을 높이기 위하여 약 3-4개 측점마다 저주파 대역(MT band)도 추가로 측정하였다. 탐사에 사용된 장비는 캐나다 Phoenix사의 24bit 탐사장비인 MTU-5A로 전기장 2성분 및 자기

Fig. 2. Location map of stations where MT data were acquired. Total number of MT stations is 80, which are marked as diamonds ((◇)). Drillholes for the development of hot spring in the area are also shown as flashing lights ((★), together with the Lines X and Y for interpretations done by Lee et al. (2010).

장 2성분의 시계열을 측정하였고 SSMT2000 패키지
의 로버스트 추정법을 이용하여 겹보기비저항 및 위
상 자료를 획득하였다.

Fig. 3은 2009년도에 획득된 자료 중 대표적인 측정점 402 및 437에서 얻은 겉보기비저항 및 위상 곡선을 나타내고 있다. 이 지역은 마을 및 도로에 인접하여 측정점이 위치하고 또한 식수를 위한 지하수 양수모터가 곳곳에 설치되어 있어서 매우 많은 전자기 잡음이 예상되는 지역이며 실제 측정된 현장 자료도 잡음이 적지 않은 것으로 판단되었다. 2005-2006년도와 마찬가지로 1 Hz 이하의 주파수 자료는 심한 잡음으로 많은 측정점에서 상당 부분 버려졌으며, 전력주파수인 60 Hz의 부근 자료 및 12 Hz 부근의 자료도 심한 잡음으로 위상이 매우 왜곡되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 심한 잡음에도 불구하고 지표가 상당히 전기전도도가 높은 편으로 잡음이 많은 부분 가쇄되

어 있음을 볼 수 있으며, 또한 1 Hz 이상 자료만을 볼 때 전체적인 겹보기 비저항과 위상 곡선의 연속성은 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 2차원 및 3차원 역산에 이용하기 위하여 1 Hz 미만의 자료와 $0 < \phi < 90$ 혹은 $-180 < \phi < -135$ 이외의 비정상적인 위상을 보인 주파수 성분 등 잡음이 심한 자료는 수작업을 통하여 제거하였다.

Fig. 4은 주파수 1 Hz 이상의 자기지전류 탐사 자료의 임피던스에 대해 회전에 따라 역대각성분을 최대로 하는 방향을 찾는 Swift 주향을 장미도(Rose diagram)에 나타낸 것이다. Lee et al.(2010)에서 분석한 바와 같이 N20°E-N30°E와 N35°W-N40°W에 주향이 집중되어 있으며, 이외에 NS방향도 분석되었다. 다만, 알고리즘의 원리상 주향 분석시 90°의 모호성이 있기 때문에 특히 NS 방향의 경우 EW 방향의 주향인지 해석시 주의가 필요하다.

Fig. 3. Sounding curves of apparent resistivity and phase at selected sites 402 and 437, respectively.

Fig. 4. Estimated Swift strikes obtained by maximizing off-diagonal components of MT impedance tensor. The directions of N20°E-N30°E, N35°W-N40°W, and NS are dominant.

Fig. 5. Schematic map of interpretation region for 2D and 3D inversions. The lines in N45W and N45E are established for 2D analysis, and a 3D inversion domain is marked in dashed rectangles.

역산 결과 및 고찰

자기지전류 탐사는 앞에서 언급한 바와 같이 잠재적 지열 자원 개발 후보지 조사를 목적으로 2005년에 지열수가 발견된 YG-1과 YG-2를 중심으로 처음으로 수행되었다(송운호 외, 2005). 획득된 자료를 이용하여 교차하는 두 개의 측선(Line-X, Line-Y)에 대한 2차원 역산 해석이 이루어졌으며, 이어 2006년에는 기존 자료에 추가로 측정된 자료를 포함하여 모든 자기지전류 탐사 자료에 대하여 3차원 역산이 실시된 바 있다(송운호 외, 2006; 이태종 외, 2008, Lee et al., 2010). 본 연구에서는 사각형 격자에 가깝게 분포하고 있는 총 80 측정점의 가청주파수 자기지전류 탐사 자료를 이용하여 2차원 역산 및 3차원 역산을 수행하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 설정된 2차원 역산 측선 및 3차원 역산 영역을 나타내고 있다. 2차원 역산 해석을 위한 측선들의 방향은 크게 N45°E(지질 주향은 N45°W로 가정됨) 및 N45°W(지질 주향은 N45°E로

가정됨)로 설정하였으며, 이에 따라 남서-북동 방향(N45°E)의 7개의 측선과 북서-남동 방향(N45°W)의 3 측선 등 총 10개의 측선에 대한 2차원 역산을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 자기지전류 탐사 자료의 주향 분석 결과는 Lee et al.(2010)의 분석과 같이 주향은 N20°E-N30°E로 파악되었으며, 이외에 N35°E-N40°E의 주향도 분석되었다. 따라서 설정된 2차원 측선의 방향은 Line 8-Line 10의 경우 N20°E-N30°E에 보다 수직 방향에 보다 가깝고, Line 1-Line 7의 경우는 N35°E-N40°E에 보다 수직 방향에 가깝다.

이와 같이 두 경우 모두 2차원 해석을 위한 가정은 만족시키지 않는다. 그러나, 이러한 경우 Ledo et al.(2002)에 의하면 TM 모드 역산이 이상대를 영상화 하는데 보다 더 근접한 결과를 낸다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 해석을 위하여는 TM 모드 자료를 주로 이용하여 역산을 실시하였으며, TE 모드 및 TM 모드의 복합역산도 역산 모델의 비교를 위하여 별도로 수행하였다. 모든 자료들은 각 측선에 투영되어 임피던스를 회전한 후 TM 및 TE 모드로 분

리하여 역산에 이용하였다. 2차원 역산에 사용된 알고리즘은 공간적인 함수로서 평활화 상수를 이용하는 최소자승역산(Lee et al., 2009) 및 Occam 역산(Constable et al., 1987, deGroot-Hedlin and Constable 1990)으로 복합역산의 경우 정적효과도 역산 파라미터로 도입하여 모델을 상호 비교하여 해석하였다.

Fig. 6은 역산 결과 얻어진 2차원 전기전도도 영상을 측선에 따라 나타낸 결과이다. 2차원 역산 결과 대체적으로 지표에는 매우 낮은 전기비저항대가 영상화되었으며 하부층에는 고비저항대가 영상화되어 있음을 볼 수 있다. 이전의 연구 결과에서 YG-1 혹은 YG-2에서 용출되는 지열수의 EC 분석 결과 약 49,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 매우 전기전도도가 높은 것으로 분석되었다(Lee et al., 2010). 따라서 지표의 매우 낮은 전기비저항대는 바다를 매립하여 형성된 표토층이 영상화된 것으로 추정되는데 이러한 경향은 이 지역에서 수행된 전기비저항 탐사 결과(Lee et al., 2010)에서도 지표의 표토층이 매우 낮은 전기비저항 값을 갖는 것과 일치된 결과이다.

이보다 깊은 심도 부분에 영상화된 고비저항대는 Fig. 6에서와 같이 남동쪽에서 북서 방향으로 Line 1-Line 7까지 측선 위치에 따라 점차로 다른 특징을 보여주고 있다. 해석의 편의를 위하여 점선으로 경계를 표시하였는데 측선 Line 1에서는 측선 중간부분의 고비저항대를 중심으로 측선의 시작부 약 500 m에서 또한, 약 2 km 이후에서 불연속대가 관찰된다. 이 불연속대는 Line 2와 Line 3에서는 측선의 후반부에서만 약하게 불연속대가 관찰되고 고비저항대의 중심은 남서쪽으로 이동됨을 볼 수 있다. Line 4를 거쳐서 Line 5에서는 이러한 불연속대가 남서-북동 방향으로 경사지게 영상화되어 있으며 Line 6을 지난 후 Line 7에서는 경사 방향이 반대가 되어 북동-남서 방향으로 경사지게 영상화되어 있음을 볼 수 있다. 한편, 북서-남동 방향 측선인 Line 8에서 Line 10까지의 결과에서 보면 일관되게 고비저항대와 저비저항대가 뚜렷하게 대비되고 있는 영상을 확인할 수 있다. 측선의 북서쪽 방향으로 측선의 전반부에는 지표의 낮은 전기비저항을 갖는 이상대가 매우 깊게 발달되어 있는 것으로 보인다.

Line 3에서 Line 5까지는 어류정 부근의 장봉편암이 영상화된 것으로 생각되며, 또한 Line 7에서는 해명산 쪽의 화강암이 영상화된 것으로 추정된다. 그러나, Line 4 및 Line 6에서는 Lee et al.(2010)의 Line

X에서와 같이 이 둘의 영향이 중첩되어 영상화된 것으로 보인다. 다만 Line 1과 Line 2에서 관측되는 고비저항대는 둘 중의 어느 부분이라 단정짓기는 현재로서는 곤란할 것으로 생각된다. 또한 Line 8에서 Line 10까지의 불연속대는 화살표로 나타낸 방향으로 단층 혹은 파쇄대의 불연속적인 구조가 있는 것으로 추정되며 경사도 매우 가파를 것으로 추정된다. 이러한 해석은 YG-1의 시추결과 및 지열수 용출 상황으로부터 유추하여 Line Y의 저비저항 및 고비저항대의 경계가 심부까지 이어진 파쇄대일 가능성이 매우 높고 이 파쇄대를 따라서 심부 고온의 지열수가 낮은 심도까지 전달되어 온 것으로 해석한 Line Y 및 Line X의 해석 결과(Lee et al., 2010)와도 부합한다. 따라서 위의 역산 결과를 이 지역의 지질과의 비교를 통하여 정리하여 보면 Line 2-Line 5까지의 고비저항대는 서쪽의 장봉편암이 영상화된 것으로 추정되며, Line 7에서는 동쪽의 화강암이 영상화된 것으로 보이는데, 이로부터 Fig. 6의 오른쪽 하단의 그림에 실선으로 고비저항체의 경계의 패턴을 간략하게 정리하였다.

위에서 수행한 2차원 해석의 결과와 같이 이곳의 지질 구조는 매우 복잡하고 따라서 지하 구조가 3차원적인 특징이 강할 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 그림과 같이 3차원 역산 격자를 구성하여 자기지전류 탐사 자료에 대한 3차원 역산을 수행하였다. 본 3차원 역산에서는 여건상 모든 측점을 3차원 역산에 이용하지는 못하였으나 이태종 외(2008)의 3차원 해석 결과를 고려하여 이의 남쪽에 대한 지역을 해석하고자 역산 영역을 정하였다. 3차원 역산 알고리즘으로는 자료공간(data space)에서 Occam 역산을 수행하는 WSINV3DMT(Siripunvaraporn et al., 2005)를 이용하였다. 이 방법은 대부분의 역산 알고리즘이 모델 공간(model space) 영역에서 역산을 수행하는 것에 비하여 이 알고리즘은 자료 공간(data space) 영역에서 Occam 역산(Constable et al., 1987)을 수행하여 계산 시간 및 사용 메모리를 줄여 실질적으로 3차원 역산이 일반 PC에서도 가능할 수 있도록 개발된 알고리즘이다.

Fig. 5에 3차원 역산을 위하여 설정한 역산 영역을 표시하였으며 Fig. 7a에는 역산 결과 얻은 심도에 따른 전기비저항 분포가 나타나있다. 또한, Fig. 7b와 7c에 1000 ohm-m를 기준으로 전기비저항이 낮은 영역 및 높은 영역을 3차원 그림으로 나타내었다. 3차

Fig. 6. Resistivity images of 2-D inversion of MT data along Lines 1-10 shown on Fig. 5. Qualitative interpretation on resistivity boundaries at depth 500 m are shown on the right-bottom panel with a Google image overlapped, which are conceived to be related to be major resistivity discontinuities in this region.

원 역산 결과를 보면 2차원 역산과 마찬가지로 지표 부근 약 100 m 이내에 매우 낮은 전기비저항층이 영상화되었으며 심도가 증가함에 따라 약 200-1000 m 정도에서는 북동방향으로 연결된 고비저항층이 나타나고 그보다 깊은 부분에서는 남쪽 및 남동방향으로 연결된 고비저항층이 출현함을 볼 수 있다. 특히, 2

차원 역산의 Line 8-Line 10에서의 파쇄대 및 구조선으로 해석될 수 있는 고비저항대와 저비저항의 경계가 3차원 역산의 심도별 영상에서도 뚜렷이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

위의 2차원 및 3차원 역산 결과를 위성 영상에 중합하면 Fig. 8에서 표시한 바와 같이 최소 2개에서 4

Fig. 7. Resistivity image from 3D inversion of MT data for a domain shown in Fig. 5. Resistivity map with depth (a), and iso-resistivity less (b) and greater than (c) 1000 ohm-m are shown.

개의 불연속대가 존재하며, 이는 석모도 지역에서의 지열수 생성 및 이동 통로와 관련이 높을 것으로 추정된다. 특히 NNE-SWW(북북동-남서) 방향으로 발달한 불연속대 혹은 저비저항 이상대는 YG-1 및 YG-2의 방향으로 발달되어 있음을 알 수 있으며, 또

한 저비저항의 중심을 따라 연결한 바다로 연결되는 동서 방향의 불연속면은 전기비저항 영상에서 파악되는 바와 같이 매우 큰 규모일 것으로 추정되는데, 두 불연속면의 교차점을 중심으로 보다 정밀한 조사가 필요한 것으로 생각된다.

Fig. 8. Integrated interpretation from 2D and 3D inversions. Plan view of 3D inversion resistivity image shown in Fig. 7c is overlapped for comparison. Lines-X and Y in solid lines. (Lee et al., 2010) are also shown. Inferred major discontinuities are shown in dotted lines.

결론 및 제언

본 연구에서는 석모도 지열 자원 부존 유망지역에서 지열수의 배태 및 이동 통로가 되는 파쇄대 등의 기본적인 지질 구조 조사를 위하여 기존에 수행되었던 자기지전류 탐사 자료와 함께 새로이 44의 측점에 대하여 자료를 획득하고, 모든 자료에 대한 2차원 및 3차원 역산을 수행하였으며, 그 결과 지하 심도 1-2 km 내외까지의 결과를 이용하여 전기전도도 불연속면을 추정하였다.

이 전기전도도 불연속면은 이 지역에 발달한 투수성 파쇄대가 영상화된 것으로 판단되며, 이전의 Lee et al.(2010)의 결과와 부합하고 있다. 특히, 시추공들이 밀집한 대상 지역의 북서쪽 중앙 영역에는 매우 폭넓게 전기전도도 불연속대가 영상화되어 있는 반면, 상대적으로 남동쪽으로는 동일 심도에서는 전기전도도 불연속대가 나타나 있지 않고 있다.

그러나, 본 연구에서 파악된 불연속대는 자기지전

류 탐사 자료의 해상도 측면에서 볼 때 보다 정밀한 탐사가 요구된다 하겠다. 다만, 전기비저항 탐사 혹은 자연전위 탐사 자료 해석시 배경 위에서 파악된 불연속면의 파쇄대 분포로부터 획득된 지질 분포로부터 기본적인 지질모델을 설정하는 데 도움이 될 것이며, 이를 바탕으로 지열수 유동 모델링 및 지열 모델링을 통하여 보다 석모도 지열지대의 지열수 저류층 모델 정립을 통한 정확한 지열 자원 개발 잠재적인 평가가 매우 유용할 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “저온 지열 열병합 발전에 활용가능한 심부 지열수 자원 확보 기술 개발” 과제의 일부로 수행되었습니다. 또한 3차원 자기지전류 역산 코드(WSINV3DMT)를 제공하여 주신 태국 Mahidol University의 Weerachai Siripunvaraporn 교수께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 박덕원, 이창범, 2007, 강화군 석모도 일대의 중생대 화강암류 및 화강암질 암맥류에서 발달하는 미세균열의 분포특성. 암석학회지, 16, 129-143.
- 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성근, 박인화, 이태중, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 기원서, 현혜자, 손정술, 황세호, 오재호, 이윤수, 박찬, 정용복, 김통권, 이진수, 고동찬, 안은영, 윤옥, 2005, 심부 지열에너지 개발 사업. 한국지질자원연구원, OAA2003001-2005(3), 147 p.
- 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성근, 박인화, 이태중, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 황세호, 이상규, 이윤수, 김통권, 이진수, 안은영, 윤옥, 김연기, 임현철, 이병대, 2006, 심부 지열에너지 개발 사업. 한국지질자원연구원, OAA2003001-2005(3), 190 p.
- 이승구, 김통권, 이진수, 송윤호, 2006, 강화 석모도 화강암류와 온천수의 지구화학: 온천수의 기원규명을 위한 Sr 동위원소의 응용. 암석학회지, 15, 60-71.
- 이태중, 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 조병욱, 이승구, 김통권, 황세호, 윤옥, 이상규, 이철우, 이영민, 이성근, 박인화, 심병완, 이윤수, 2008, 지열수 자원 실용화 기술 개발. 한국지질자원연구원, GP2007-002-03-2, 185 p.
- 황재하, 김유홍, 2005, 강화 · 온수리도폭 지질조사보고서 (1:50,000 장거리). 한국지질자원연구원, 25 p.
- Constable, S.C., Parker, R.L., and Constable, C.G., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52, 289-300.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, 55, 1613-1624.
- Ledo, J., Queralt, P., Marti, A., and Jones, A.G., 2002, Two-dimensional interpretation of three-dimensional magnetotelluric data: An example of limitations and resolution. Geophysical Journal International, 150, 127-139.
- Lee, S.K., Kim, H.J., Song, Y., and Lee, C.-K., 2009, MT2DInvMatlab--A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion. Computers and Geosciences, 35, 1722-1734.
- Lee, T.J., Han, N., and Song, Y., 2010, Magnetotelluric survey applied to geothermal exploration: An example at Seokmo Island, Korea. Exploration Geophysics, 41, 61-68.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uyeshima, M., 2005, Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-space method. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 150, 3-14.

2011년 8월 10일 접수
2011년 9월 6일 수정원고 접수
2011년 9월 14일 채택