

한반도 횡단 자기지전류 탐사에 의한 상부 지각의 지전기적 구조 연구

이춘기^{1,*} · 권병두¹ · 이희순² · 조인기³ · 오석훈⁴ · 송윤호⁵ · 이태종⁵

¹서울대학교 지구과학교육과, 151-748, 서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1

²경인교육대학교 과학교육과, 430-739, 경기도 안양시 만안구 석수1동 산 6-8

³강원대학교 지구물리학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192-1

⁴강원대학교 지구시스템공학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192-1

⁵한국지질자원연구원 지열자원연구실, 305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Study on the Geoelectrical Structure of the Upper Crust Using the Magnetotelluric Data Along a Transect Across the Korean Peninsula

Choon-Ki Lee^{1,*}, Byung-Doo Kwon¹, Heuisoon Lee², In-Ky Cho³, Seokhoon Oh⁴, Yoonho Song⁵, and Tae-Jong Lee⁵

¹Department Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-748, Korea

²Department Science Education, Gyeongin National University of Education, Gyeonggi 430-040, Korea

³Department Geophysics, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

⁴Department Geosystem Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

⁵Geothermal Resources Group, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Abstract: The first magnetotelluric (MT) transect across the Korean Peninsula was obtained traversing from the East Sea shoreline to the Yellow Sea shoreline. The MT survey profile was designed perpendicular to the strike of the principal geologic structure of the Korean Peninsula (N30°E), so-called 'China direction'. MT data were achieved at 50 sites with spacings of 3-8 km along the 240 km survey line. The impedance responses are divided into four subsets reflecting typical geological units: the Kyonggi Massif, the Okchon Belt, the western part of the Kyongsang Basin, and the eastern part of the Kyongsang Basin. In the western part of the Kyongsang Basin, the thickness of the sedimentary layer is estimated to be about 3 km to 8 km and its resistivity is a few hundred ohm-m. A highly conductive layer with a resistivity of 1 to 30 ohm-m was detected beneath the sedimentary layer. The MT data at the Okchon Belt show peculiar responses with phase exceeding 90°. This feature may be explained by an electrically anisotropic structure which is composed of a narrow anisotropic block and an anisotropic layer. The Kyonggi Massif and the eastern part of Kyongsang Basin play a role of window to the deep geoelectrical structure because of the very high resistivity of upper crust. The second layers with highest resistivities in 1-D conductivity models occupy the upper crust with thicknesses of 13 km in the Kyonggi Massif and 18 km in the eastern Kyongsang Basin, respectively.

Keywords: Magnetotellurics, geoelectrical structure, upper crust, Kyongsang Basin

요약: 한반도에서는 처음으로 동해안으로부터 서해안까지 한반도를 횡단하는 측선을 따라 자기지전류 탐사를 수행하였다. 한반도의 주된 지구조 방향인 지나방향(N30°E)에 수직하게 설정된 240 km 측선을 따라 3~8 km의 측정 간격으로 50 측정에서 자료를 획득하였다. MT 임피던스는 지역에 따라 뚜렷이 구분되는 반응이 나타나며 경기육괴, 옥천대, 경상분지 서쪽 지역, 경상분지 동쪽지역에서 각기 다른 경향의 반응을 보인다. 경상분지 서쪽 지역에서는 수백 ohm-m의 전기비저항과 3~8 km의 두께를 가지는 퇴적층이 존재하며, 퇴적층 하부에서 1~30 ohm-m의 매우 낮은 전기비저항을 가지는 고전도층이 발견되었다. 옥천대에서의 자료는 위상이 90°를 초과하는 매우 특이한 반응을 보이고 있으며 이러한

*Corresponding author: cklee92@snu.ac.kr

Tel: 82-17-362-1937

Fax: 82-2-874-3289

특이성은 매우 강한 이방성 매질의 영향에 기인하는 것으로 추정된다. 경기 육괴와 경상분지 동쪽 지역은 상부지각을 구성하는 매질이 비교적 높은 전기비저항을 가지는 매질로 이루어져있기 때문에 심부 지전기 구조를 들여다 볼 수 있는 창역 역할을 한다. 1차원 모델을 적용하였을 때 경기육괴의 경우 13 km, 경상분지 동쪽지역의 경우 18 km 두께를 가지는 층이 존재하는데 이 층이 상부지각에 해당하는 것으로 생각된다.

주요어: 자기지전류 탐사, 지전기 구조, 상부지각, 경상분지

서론

한반도 심부 지각 구조에 대한 연구는 오랫동안 중력 탐사와 지진파 연구에 집중되어져 왔다. 지진파를 이용한 지각 속도 구조는 초창기 Lee(1979)에 의해 1층 모델로 제안된 이후, 후속 연구들은 2층 모델(김상조와 김소구 1983)과 3층 모델(김성균과 정부홍, 1985, 김성균, 1995)의 지각을 제안하기에 이르렀다. 김성균(1995)에 의하여 제안된 모델은 2.6 km, 15.5 km, 32.8 km의 깊이에 속도 불연속면이 존재한다고 밝혔다. 최근의 대규모 발파 실험은 2 km, 14.9 km 깊이에 지각 내 불연속면이 존재하고 30.8 km 깊이에 모호면이 존재한다는 사실을 제시하였고, 속도 토모그램은 옥천대 하부 6-7 km에 위치한 저속도층, 10 km 이상 연장된 영동 단층, 경상분지 하부의 고속도층 등의 발견을 제시하였다(김기영 외, 2005).

최광선과 신영홍(1996)은 중력탐사 자료의 파워스펙트럼 분석을 통해 한반도와 그 주변의 모호면 깊이를 약 31.8 km로 추정하였다. 여기서 제시된 지각 평형이상은 한반도에서 지각평형이 충분히 이루어져 있음을 말해주고 있다. 민경덕과 이영재(2000)는 포항에서 만리포까지 한반도 남부를 가로질러 중력탐사를 실시하였으며 콘라드 면과 모호면의 깊이를 추정 한 바 있다. 콘라드 면은 포항에서 대구까지 13 km, 김천에서 옥천까지 16.5 km, 옥천과 대전 사이가 9.7 km, 만리포 근처가 16.3 km이며, 모호면은 평균적으로 33 km이고 28.7 km에서 40.5 km의 범위를 가진다고 제안하였다. 최근의 CHAMP-GRACE 위성을 이용한 광역적인 중력 이상 연구는 남중국에서 한반도 중서부에 이르는 고밀도 모델을 제시하고 있기도 하다(최승찬, 2005).

이와 같은 많은 연구에도 불구하고 중력 탐사와 지진파 연구는 몇 가지 단점이 존재한다. 중력 자료의 경우, 수평해상도는 지질학적 경계를 탐지하기에 충분하지만 수직 해상도가 매우 불량하다는 단점이 내재되어 있다. 지진파의 경우는 다른 지구물리학적 방법에 비해 매우 높은 해상도를 제공해주지만 한반

도의 경우 충분히 많은 지진이 발생하지 않으며 관측소 역시 충분하지 않아 높은 해상도를 확보하기에 충분한 자료가 축적되지 못하였다. 이러한 자료 부족을 극복하기 위한 대규모 발파에 의한 방법은 좋은 대안이지만 많은 비용과 발파에 따른 환경적인 문제들로 인해 그 적용이 제한받고 있다. 뿐만 아니라 주로 모호면과 콘라드 면 등 매우 큰 속도 차나 밀도차를 유발하는 대규모 구조를 탐지하는데 집중되어 있어 상부 지각내의 세부구조에 대한 해상도가 충분히 높지 못하다. 그에 반해 본 연구에서 사용되는 자기지전류(MT) 탐사법은 광대역의 전자기장을 측정하기 때문에 수 백 m의 천부에서부터 수 백 km의 심부에 이르기까지 탐사가 가능하고 심부 지각 구조 연구에 충분한 수직 및 수평 해상도를 가지고 있으며 친환경적이고 저비용의 탐사가 가능하다.

MT 탐사기술은 자기장과 전기장을 동시에 측정하여 정량적인 전기비저항 분포자료를 얻을 수 있으므로 최근 들어 심부 지전기 구조의 연구에 많이 이용되고 있다(Ogawa et al., 2001; 이희순 1994). 특히 심부 MT 탐사는 판 내부 지진 발생 지역에 대한 지구조적인 특성을 규명하거나(Gupta et al., 1996), 판 구조론과 관련된 지각 및 상부맨틀 구조 분석 연구(Unsworth et al., 2000; Padilha and Vitorello, 2000; Hoffmann-Rothe et al., 2001; Satoh et al., 2001) 등에 많이 이용되고 있다.

우리나라에서는 제주도와 경상분지에서의 몇몇 시도를 제외하고는 MT 탐사법에 의한 심부 지각 구조 연구는 전무한 상황이다(Lee, 1994; 정승환 외, 1993). 대부분의 연구는 보다 천부의 구조를 목표로 한 가칭주파수 MT(AMT) 탐사나 인공송신원 MT(CSMT)에 집중되어있는 실정이다(이희순과 송윤호, 1997; Kim et al., 1998). 그 이유는 우리나라의 극심한 전자기 인공잡음의 영향으로 인해 MT 탐사법이 좋은 결과를 획득하지 못하였기 때문이다. 그러나 최근 들어 GPS 동기화를 이용한 원거리 기준점 기법의 적용이 용이해짐에 따라 지열 탐사 분야 등에서 좋은 결과를 도출하고 있다(Uchida et al., 2004; Lee

et al., 2004, Song et al., 2006).

본 연구의 주된 목적은 한반도를 횡단하는 MT 측선 탐사를 통해 한반도의 지각구조를 영상화하고 한반도 지각의 전기적 특성을 고찰하는 것이다. 획득된 MT 자료와 그로부터 얻어진 역산단면은 상부지각내의 전기비저항 이상대를 뚜렷하게 보여주고 있으며 그동안 알려지지 않았던 고전도 이상대와 전기적 이방성에 대한 증거들을 제시해주고 있다. 이러한 연구 결과는 그동안 MT탐사의 불모지였던 한반도에서 MT 탐사를 이용한 지각구조 규명의 가능성을 보여주는 것으로 향후 MT탐사의 활발한 적용에 큰 도움이 될 것으로 기대한다.

자료 획득

한반도 중남부 지역의 지질단위는 크게 경기육괴

(KM), 옥천대(OB), 영남육괴(YM), 경상분지(KB)로 구분된다(Fig. 1). 두 선캄브리아기의 육괴들은 주로 높은 변성도를 가지는 편마암과 편암으로 구성되어 있고 옥천대에 의해 나뉘어져 있다. 옥천대는 한반도의 대표적인 조산대이며, 경상분지는 한반도 남동부에 위치하고 영남육괴를 부정합으로 덮고 있다.

한반도에서 가장 우세한 지질구조 방향은 지나 방향(N30°E)이다. 주 지질단위의 경계면들은 대부분 지나 방향으로 나열되어 있어 MT 탐사 측선은 지나 방향에 수직한 방향으로 설정되었으며, 포항에서부터 안산까지 탐사를 수행하였다. 측정간격은 3 km~8 km이며 2003년부터 2005년까지 4번의 탐사를 통해 47 측정점에서 자료를 획득하였다. 탐사측선의 가장 동쪽에 해당하는 포항분지에서는 한국지질자원연구원에서 지열탐사를 위해 MT 탐사를 실시한 적이 있으며 이 탐사자료에서 3측점의 자료를 함께 이용하였다(Lee

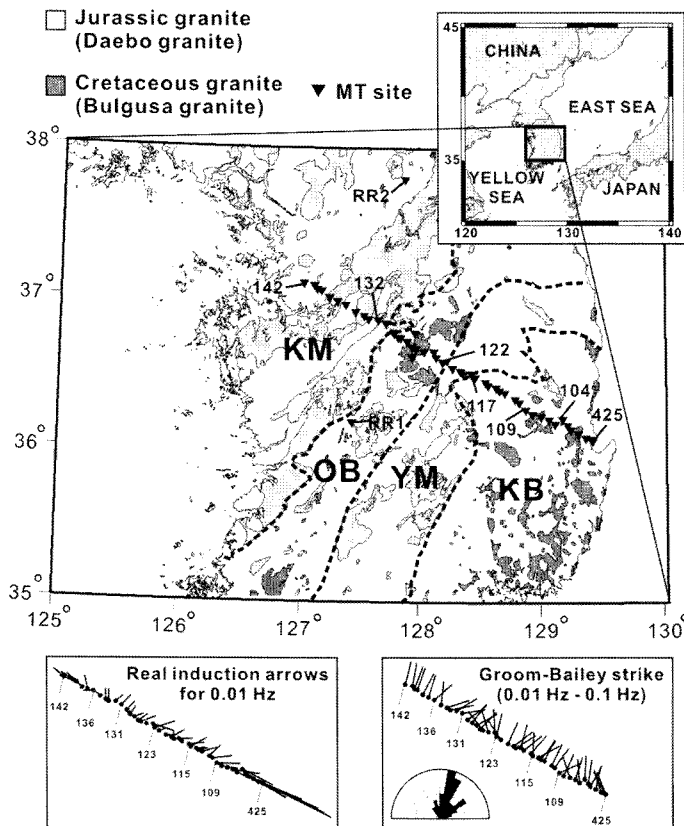


Fig. 1. Simplified geologic map of the Korean Peninsula including the location of the MT survey sites. The peninsula consists of four major geological units: the Kyongsang Basin (KB), Yongnam Massif (YM), Okchon Belt (OB), and Kyonggi Massif (KM). The gray areas represent the distributions of Mesozoic granite intrusions. Real induction arrows for 0.01 Hz and Groom-Bailey strikes for the frequency band from 0.01 Hz to 0.1 Hz are shown in the lower panels.

et al., 2004). 총 축선 길이는 240 km이다.

측정장비는 한국지질자원연구원에서 보유하고 있는 Phoenix Geophysics Ltd. 사의 MTU-5A 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 MTC-50 코일 센서를 사용하여 자기장을, Pb/PbCl₂ 비분극 전극을 이용하여 전기장을 정밀하게 측정한다. 인공잡음의 영향을 최소화하고 자연적인 전자기 신호가 가장 활발한 밤 시간을 이용하여 측정을 실시하는 것이 가장 효과적이어서 오후 17시부터 익일 08시까지 전자기장을 측정하였다. 우리나라는 인구밀도가 높아 전기시설물들이 곳곳에 산재해 있으며 이런 시설물들은 인공적인 잡음의 주된 원인이다. 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 원거리 기준점에서 GPS 동기화된 전자기장을 동시에 측정하였다. 현장 측정에서 70~170 km 정도 떨어져 있는 강원도 춘천과 충청도 금산에 원거리기준점을 운영하였으며 서쪽지역 측정(측점 132-145)의 경우 일본의 Geographical Survey Institute(GSI)에서 운영하는 상시관측소를 원거리 기준점으로 사용하였다. Uchida et al.(2004)과 송윤호 외(2006)는 포항 및 제주도에서 이루어졌던 MT 탐사 자료의 처리에 있어서 MT 대역에서의 잡음 제거를 위해 일본에 위치한 원거리 기준점 자료를 이용하는 것이 상대적으로 가까운 한반도내의 원거리 기준점 자료를 이용하는 것보다 훨씬 효과적임을 제시하고 있다. 그러나, 본 연구에서는 일본과 한국의 원거리 기준점 관측소가 동시에 운용된 것이 아니고, 일본 원거리 기준점이 운용된 서쪽지역의 측정점들은 동쪽지역 측정점들에 비해 잡음수준이 훨씬 더 높은 편이어서 원거리 기준점에 따른 잡음제거의 정량적 비교는 어렵다.

자료 처리

측정된 전기장과 자기장 성분으로부터 MT 임피던스를 추정하기 위해서는 여러 시계열 세그먼트들에서 구해지는 MT 임피던스의 최적해를 구하는 것이 중요하다. 이 때 적용되는 최소 자승 해는 소수의 외치(outlier)에 매우 민감하여 인공 잡음에 의해 크게 왜곡되는 것으로 알려져 있다. 이러한 잡음의 영향을 제거하기 위하여 원거리기준점 기법, 적응 가중치 기법 등 많은 기법들이 개발되어왔다. 원거리기준점 기법은 상관성이 없는 잡음들을 제거하기 위해 적어도 두 측정 이상에서 동시에 전자기장이 측정되어야 한다(Goubou et al., 1978, Gamble et al., 1979). 현장

측점과 원거리기준점 자료의 크로스파워는 상관성이 없는 잡음은 감소시키고 상관성을 가진 신호는 남겨둠으로써 잡음을 제거한다. 일반적으로 자기장은 전기장에 비해 상대적으로 낮은 잡음 수준을 가지기 때문에 원거리기준점 자료로는 두 수평성분의 자기장이 사용되어진다.

잡음을 줄이고 자료의 질을 향상시키는 또 다른 방법은 로버스트(robust) 추정방법이다. 이 방법은 일종의 적응 가중치(adaptive weighting) 기법으로서 Coherence-Weighted Estimate(CWE) (Jones and Jodicke, 1984)와 Regression M-Estimate(RME) (Egbert and Booker, 1986; Chave and Thomson, 1989) 등의 방법이 있다. 최근에는 CWE와 RME를 결합한 방법이 보다 나은 결과를 보여주기도 하였다(Egbert and Livelybrooks, 1996). 현재 원거리 기준점 기법과 로버스트 추정 기법은 MT탐사의 자료처리에서 표준적으로 적용되고 있는 기술이다. 그러나, Yang(2006)는 한반도의 경우 근거리장의 인공잡음이 자연 전자기장보다 높은 코히어런스를 가지기 때문에 CWE 기법을 적용하는 경우 잡음이 더욱 많이 선택되는 오류가 생긴다고 분석하였으며, CWE 기법에서는 강한 파워와 높은 코히어런스를 가지는 잡음 세그먼트가 자료에 큰 왜곡을 가져오므로 코히어런스보다는 전자기장의 파워에 기반한 가중치 기법이 한반도에서는 더 효과적이라고 제안하였다. 본 연구에서는 Phoenix Geophysics Ltd.에서 개발한 MTU 시계열 자료처리 프로그램인 SSMT2000을 사용하여 MT 임피던스를 추정하였으며, 일반적인 로버스트 원거리 기준점 기법을 이용하였다.

Fig. 2는 측정된 MT자료 중 각 지역을 대표하는 겹보기 비저항과 위상 곡선의 예를 나타내고 있으며 모든 측정의 자료는 Lee(2006)에서 확인할 수 있다. 탐사의 편위상 전기장과 자기장의 측정을 동서남북 방향으로 실시하였기 때문에 X는 남북방향, Y는 동서 방향을 나타낸다. 0.1~1 Hz 주파수 대역에서는 일부 측정점을 제외하고는 매우 큰 오차가 발생하여 자료처리에 이용하기 어렵다. 이 주파수 대역은 자연적인 MT 신호의 크기가 매우 작기 때문에 이른바 'dead band'라고 불린다. Uchida et al.(2004)과 송윤호 외(2006)는 인공잡음의 상관성이 약한 일본의 원거리 기준점 자료를 사용함으로써 이 주파수 대역에서 물리적으로 의미 있는 임피던스를 복원하기도 하였다. 원거리 기준점의 성공적인 적용이 가능했던 것

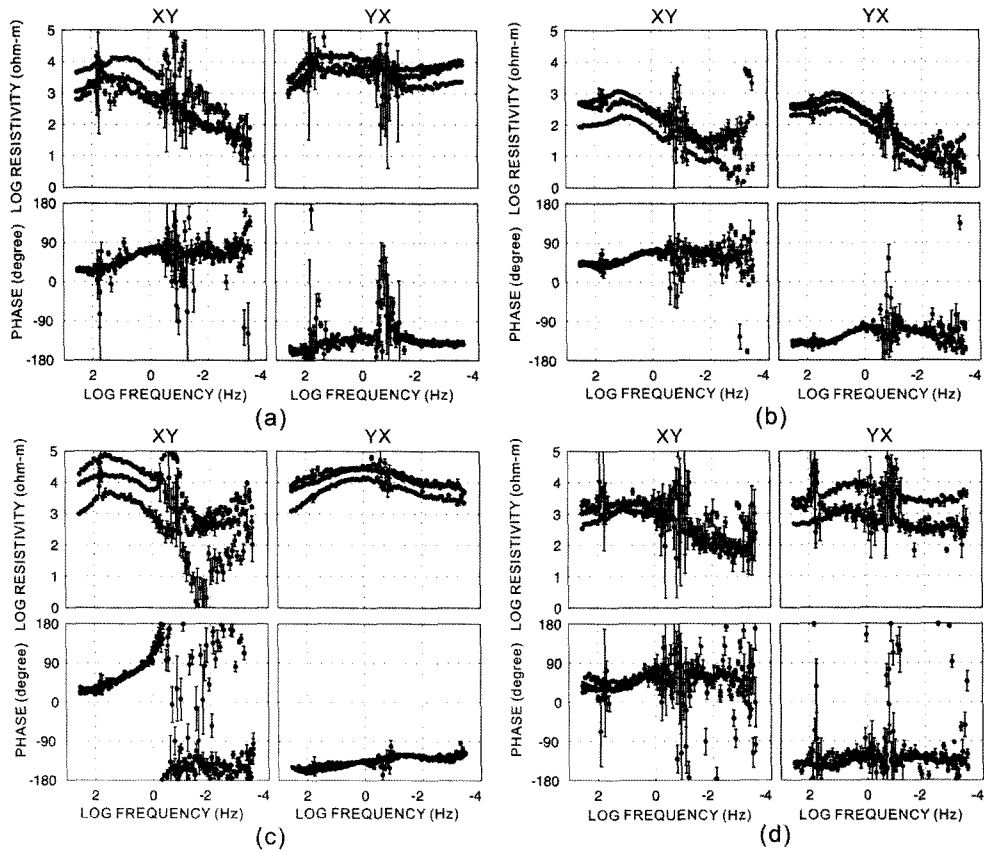


Fig. 2. Examples of apparent resistivity and phase curves: (a) sites 101, 102, and 103, (b) sites 113, 114, and 115, (c) sites 125, 126, and 127, (d) sites 133, 134, and 136. X denotes the north.

은 두 연구지역의 경우 인공잡음이 상대적으로 적은 지역일 뿐만 아니라 지표의 전기비저항이 매우 낮아 인공잡음이 크게 감쇠되는 특성을 가지고 있기 때문이다. 그러나 본 연구에서 획득되어진 자료 중에서 일본 원거리 기준점 자료가 적용되어진 측정점 132에서 측정점 142까지의 자료를 살펴보면 Fig. 2(d)의 예와 같이 0.1~1 Hz 주파수 대역에서 정확한 임피던스를 구하는데 실패하였다. Fig. 2(d)의 측정점들이 위치한 지역은 고도로 산업화된 서울 및 수도권에 인접하고 있어 주변에서 매우 강한 인공잡음이 발생하고 있고 지표의 전기비저항이 약 1,000 ohm-m로 인공잡음의 감쇠가 적어 멀리까지 전파하게 된다. 따라서, 자연 전자기장에 비해 매우 큰 인공잡음이 측정되게 되어 측정된 인공잡음과 상관관계가 없는 일본 원거리 기준점을 적용하여 그 영향을 줄인다하더라도 의미 있는 임피던스를 추정하기가 어렵다. 60 Hz 주변의 좁은 대역은 주로 전력선의 영향을 받는 주파수

대역으로 이 대역 역시 원거리 기준점의 적용에도 불구하고 불량한 임피던스를 나타내고 있다. 이와 같이 잡음에 의해 불량하게 추정되어진 임피던스는 편집 과정에서 제거되어진다.

MT 자료의 해석을 위해서는 먼저 자료의 차원성을 평가하여야한다. Skew는 MT 자료의 차원성을 지시하는 파라미터로서 Swift(1967)에 의해 처음 제안되었다. 일반적으로 Swift skew가 0.2 보다 큰 값을 가질 경우 3차원 지각구조에 의한 반응으로 취급하게 된다. 옥천대를 제외한 지역의 Swift skew를 살펴보면 1 Hz 이상의 고주파 대역에서는 대체로 0.2 보다 작은 값을 보이며 저주파대역으로 갈수록 점점 큰 값을 나타낸다. 즉, 수 km 이내의 천부에서는 1차원 혹은 2차원 구조가 우세하며 수십 내지 수백 km 규모에서는 3차원 구조가 우세함을 의미한다. 한반도 내에서는 중국방향을 위주로 한 2차원적 지질 구조가 발달해 있는데 비해 한반도 주변부는 3차원

모양의 해양과 해저 퇴적층들로 인해 3차원적 광역 구조가 MT 자료에 영향을 미침을 알 수 있다. 옥천대 지역에서는 고주파 대역에서부터 1을 초과하는 매우 큰 skew가 관찰되어 옥천대가 단순한 2차원 구조가 아님을 지시한다.

MT 자료에 3차원 구조의 효과가 반영되어 있는 것은 명확하나 3차원이나 이방성 모델링을 수행하기에 앞서 2차원 모델링을 실시하는 것은 필수적인 과정이다. 이를 위해 MT 자료의 방향성을 추정하여 지질구조의 주향을 결정하여야 한다. 자기장 성분으로 추정되는 실수 유도 지시자(real induction arrow)는 전기전도도가 높은 이상체를 가리키는 특성을 가진다. Fig. 1에 표시한 실수 유도지시자는 중앙부를 제외하고 축선의 방향과 유사한 방향을 가리키고 있어 축선방향의 선성이 적절함을 말해준다. 또 다른 방향성에 대한 지시자는 임피던스 주향이다. 하지만 표층의 이상체에 의한 전기장의 왜곡은 광역적인 주향의 추정을 어렵게 만든다. 표층의 작은 이상체에 의한 주향의 부정확성을 없애기 위해 McNeice and Jones (2001)에 의해 개발된 다중 주파수 Groom-Bailey decomposition 방법을 적용하였다. 0.01~0.1 Hz 대역에서 추정된 광역적인 주향은 Fig. 1의 우하단에 표시되어 있다. 주향은 주로 NE 방향이 우세하나 동해에 가까운 측정점들의 경우 전기전도도가 높은 해수의 영향으로 인해 해안선의 방향과 비슷한 남북방향을 가리킨다. 해안에 가까운 9 측정점을 제외한 측정점들의 평균 주향은 약 N30°E로 축선방향과 거의 수직하다. 따라서 축선방향(N29°E)으로 2차원 역산을 수행하는 것이 타당하며 이를 위해 임피던스를 시계방향으로 29°만큼 회전시켰다.

MT 자료를 해석하는데 있어 정적 효과(static shift)가 심각한 왜곡을 일으키는 것은 잘 알려져 있다 (Kurtz et al., 1986; Jones, 1988). 정적효과는 왜곡보정(distortion-correction) 방법과 다른 물리탐사 자료를 이용하는 방법 등으로 보정할 수 있다. 왜곡보정 방법은 곡선이동법(curve shifting), 공간평균법(spatial averaging), 변수제한법(parameter constraints method)으로 구분된다(Jiracek, 1990). 다른 물리탐사 자료를 이용하는 방법은 TEM이나 DC 전기비저항 탐사 자료를 이용하여 정적효과를 보정하는 것이나 본 연구에서는 MT 탐사 자료만을 획득하였으므로 왜곡보정 방법을 적용하였다. 경상분지 지역에서는 넓은 지역에 걸쳐 1차원 층상구조의 형태가 나타나고 있어

Jones(1988)에 의해 제안된 1차원 역산 결과를 이용하여 정적효과를 보정하는 변수제한법을 사용하였다 (Lee, et al., 2006). 경상분지를 제외한 지역에서의 정적효과는 비슷한 형태의 겹보기 비저항 곡선이 나타나는 측정점의 구간을 나누어 각 구간에서 100 Hz 이상의 고주파 대역의 겹보기 비저항을 선형으로 근사하여 각 비저항 곡선을 정적 이동시키는 방법을 사용하였다(Lee, 2006).

Fig. 3은 불량 임피던스를 제거하는 편집과정, 임피던스 회전, 정적효과 보정을 실시한 MT 임피던스의 겹보기 비저항 및 위상의 가단면도를 나타내는 것으로 TE 모드는 축선에 수직한 전기장과 평행한 자기장 성분을 나타내고 TM 모드는 축선에 평행한 전기장과 수직한 자기장 성분을 말한다. 겹보기비저항은 전반적으로 1 ohm-m에서부터 100,000 ohm-m에 이르는 매우 큰 편차를 보이고 있으며 경상분지의 동부지역, 옥천대 중앙지역, 경기육괴에서 매우 높은 겹보기비저항을 나타내며 경상분지의 서부지역, 옥천대의 가장자리에서 매우 낮은 겹보기비저항을 보인다. 위상의 경우, 옥천대 지역의 저주파 대역에서 90°를 넘어서는 비정상적인 반응을 보이고 있다.

2차원 역산을 이용한 지각구조 영상화

옥천대 지역에서 위상이 90°를 초과하는 현상이 발생하여 3차원 모델링이나 이방성 모델링을 수행하는 것이 필요하다. 그러나, 2차원 해석을 위해 축선상으로 자료가 획득되어 3차원 역산 등의 방법이 불가능하며, 향후 3차원 모델링이나 이방성 모델링을 적용하기에 앞서 등방성 2차원 역산의 수행도 필수적이며 유의미한 결과를 제공해줄 것으로 기대된다. 2차원 역산을 실시하는데 있어 TE모드는 옥천대에서 90°를 초과하는 위상이 존재하므로 2차원 역산에서 매우 큰 오차를 발생시키나 TM 모드 자료의 경우, 위상이 90°를 초과하는 반응이 소수에 불과하여 이를 제거하고 TM 모드 자료만을 사용하여 Rodi and Mackie(2001)의 NLCG 방법으로 2차원역산을 실시하였다. Rodi and Mackie(2001)는 NLCG 방법이 자료의 잔차와 전기비저항의 2차미분치를 최소화하는 역산기법으로서 conjugate gradient 방법을 적용하여 Gauss-Newton 알고리즘보다 훨씬 빠르고, 보다 적은 메모리를 차지한다고 제안하였다. 이 방법에서는 초기모델의 전기비저항값과 모델의 smoothness를 결정

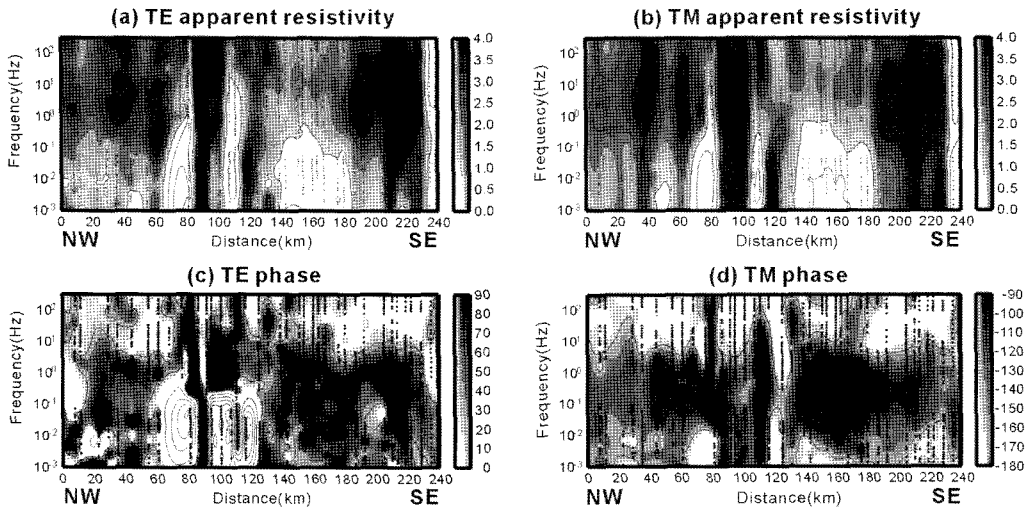


Fig. 3. Pseudo sections of apparent resistivity and phase after rotation, editing and static correction.

하는 τ 값에 의하여 역산결과가 다소 다른 경향을 보일 수 있음이 알려져 있다(Tauber, et al., 2003). 역산 파라미터의 최적화 과정에서 90° 를 초과하는 위상이 나타나는 지역을 배제하기 위하여 경상분지 지역에 해당하는 측점 101부터 측점121까지의 자료를 이용하여 다양한 파라미터에 대한 역산을 수행하고 역산 단면의 형태와 역산 오차를 비교하였다(Lee et al., 2006). 비교 분석 결과, 초기 모델의 전기비저항을 1,000 ohm-m로, smoothness 파라미터 τ 는 5로 설정하였을 때 TM 모드 역산이 가장 좋은 결과를 도출하는 것으로 결론지었으며 측선 전체에 대한 역산에서도 이 파라미터들을 사용하였다.

Fig. 4는 전체 측선에 대한 역산 단면과 측선을 따른 지형 기복, 각 지역의 주된 지질단위를 보여준다. 지질단위는 1:1,000,000 한국지질도(한국지질자원연구원 발간)에서 사용하는 지질구분을 따랐다. 지형과 역산 단면의 전기비저항이 서로 상관성을 보이고 있는데, 고도가 높은 지역에서 주로 고비저항의 이상대가 나타난다. 측선의 총 길이는 240 km에 달하고 측점간격이 평균 5 km인데 반해 최대 고도차이는 약 500 m에 불과하고, 주로 논을 위주로 탐사가 이루어져 측점의 경사에 의한 영향도 미미하므로 지형과 전기비저항의 상관성은 지형효과에 의한 영향이 아니라 지질구조의 구성 암석과 지형 기복과의 상관관계에 기인하는 것으로 생각된다. 고도가 높은 지역은 주로 전기비저항이 높은 불국사 화강암(Kgr)이 관입한 지역이며 화강암의 전기비저항이 상대적으로 높기

때문에 이 지역에서 고비저항의 반응이 나타나는 것이다.

역산 단면에 나타나는 주요 이상대로는 4개의 고전도성 이상대가 대표적이다. 단면의 오른쪽 끝에 위치한 제 3기 퇴적분지인 포항분지 지역에서는 전기비저항이 약 10 ohm-m인 퇴적층이 표층을 형성하고 있다. 측점 112에서 측점 118에 해당하는 경상분지(의성분지) 하부에는 지금까지 알려지지 않았던 대규모의 고전층이 존재한다. 또한, 옥천대의 양쪽 가장자리에는 각각 옥천층군과 조선계 퇴적층이 존재하는데 이 지역의 하부에서 낮은 전기비저항 이상대가 형성되어 있다.

예상과 달리 새롭게 발견된 이상대는 의성분지 하부에 존재하는 1~30 ohm-m 범위의 전기비저항을 가지는 고전도층이다. 이 고전도층은 약 40 km의 폭을 가지고 있으며 고전도층까지의 깊이는 3~8 km로 동쪽으로 갈수록 깊어진다. 그러나 전기비저항이 매우 낮아 현재의 측정 자료만으로는 두께를 추정하기는 어렵다. 이 고전도층에 대해서는 현재까지 알려진 바가 없으며 그것을 뒷받침할 수 있는 다른 지구물리학적 혹은 지질학적 증거들이 거의 없는 상황에서 지질학적 해석을 명확히 내리기는 쉽지 않다.

MT 측선에서 나타나는 고비저항 이상대는 주로 화강암 관입지역과 관련되어 나타나는데 경상분지 동쪽지역과 옥천대 내 속리산 지역의 불국사 화강암 관입지역이 대표적이다. 두 지역 모두 20 km에 육박하는 두께를 가지는 고비저항 이상대가 존재하며

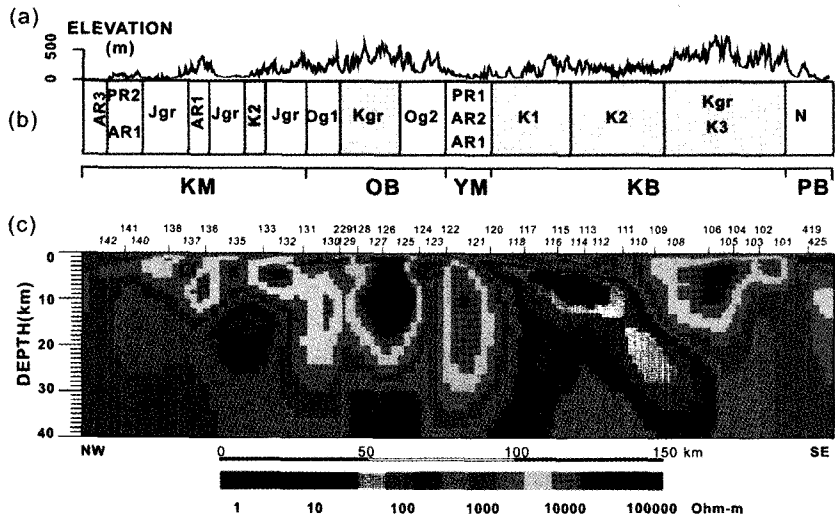


Fig. 4. (a) Topographic elevation, (b) geologic units and (c) 2-D resistivity model derived by inverting only the TM mode data with initial background resistivity of 1,000 ohm-m and a roughness parameter of 5. KM, Kyongsang Massif; OB, Okchon Belt; YM, Yongnam Massif; KB, Kyongsang Basin; PB, Pohang Basin.

10,000 ohm-m가 넘는 매우 높은 전기비저항을 보인다. 경기육괴 지역에서는 지표로부터 약 10 km까지 전기비저항이 높은 상부지각이 형성되어 있다. 이 지역은 대보화강암 관입 지역을 포함하고 있으나 불국사 화강암 관입지역보다는 전기비저항이 낮다.

경상분지(의성분지) 퇴적층 하부의 고전도층

경상분지는 한반도의 대표적인 백악기 퇴적분지로서 확장성의 지각변동과 비정상 퇴적에 의해 형성되었다(Fig. 5). 분지의 층서와 퇴적환경은 많은 퇴적학적 연구에 의해 이루어져 왔다(Chang, 1975, 1988; Choi, 1985). 이러한 연구결과는 경상분지가 하천-호소(fluvio-lacustrine) 환경에서 주로 퇴적되었으며, 퇴적, 침강, 단층작용, 화산활동 등에 의해 영향을 받았음을 말해주고 있다.

한반도 남동부에 위치한 경상분지는 류라기 말과 백악기 초의 육성 퇴적층, 화산암류와 화산쇄설성 퇴적암의 호층으로 구성되며, 후기 백악기 내지 제3기 초기의 산성암류에 관입 당하고 있다. 백악기 육성 퇴적층들은 부분적으로 혼펠스화 되어 있으며, 실트암, 사암과 역암으로 구성된 신동층군과 화산쇄설암이 우세한 유천층군과 하양층군으로 구성된다. 백악기 말에서 제3기초에 산성 심성암류들이 경상분지내

퇴적층들을 관입하였으며, 이들 심성암류들은 일반적으로 불국사화강암류로 불리고, 각섬석 흑운모 화강암, 화강섬록암과 반화강암류로 구성된다(대한지질학회, 1999). 분지에 대한 중력, 자력, 탄성과 탐사 등의 지구물리학적 연구도 이루어져 왔으나 분지의 심부 구조를 밝혀 줄만한 지구물리 탐사자료는 거의 없는 실정이다.

Fig. 6은 경상분지의 지질학적 모델을 제시해 주고 있다. 경상분지의 지진기 구조의 특징을 살펴보면 세 군데에서 전기비저항의 수평적 변동이 나타난다. 먼저 측정 118과 120 사이의 전기비저항 차이는 퇴적분지와 영남육괴의 경계를 의미한다. 이 지역에는 안동 단층이 남동쪽의 경상분지와 북서쪽의 영남육괴를 분할하고 있다. 과거 안동단층은 상반이 남동쪽으로 움직인 역단층의 운동을 경험하였다. 이 역단층 운동은 단층이 형성된 시기가 백악기와 제 3기 초기임을 지시한다(Choi et al., 2002). 두 번째로 측정 108과 측정 110 사이의 비저항 차이는 경상분지 내의 암상 변화를 반영하는 것으로 호소 퇴적층인 신동 층군으로부터 하양층군을 거쳐 화산암층이 유천층군으로 암상이 변화하는 지역이다. 주로 유천층군 내에 관입된 불국사 화강암도 이 지역의 급격한 전기비저항의 변화를 더욱 크게 만들고 있다. 마지막으로 측정 101과 측정 401 사이의 뚜렷한 경계는 백악기 퇴적층과 제 3기 퇴적층의 전기비저항 차이를 지시해주는 것으로

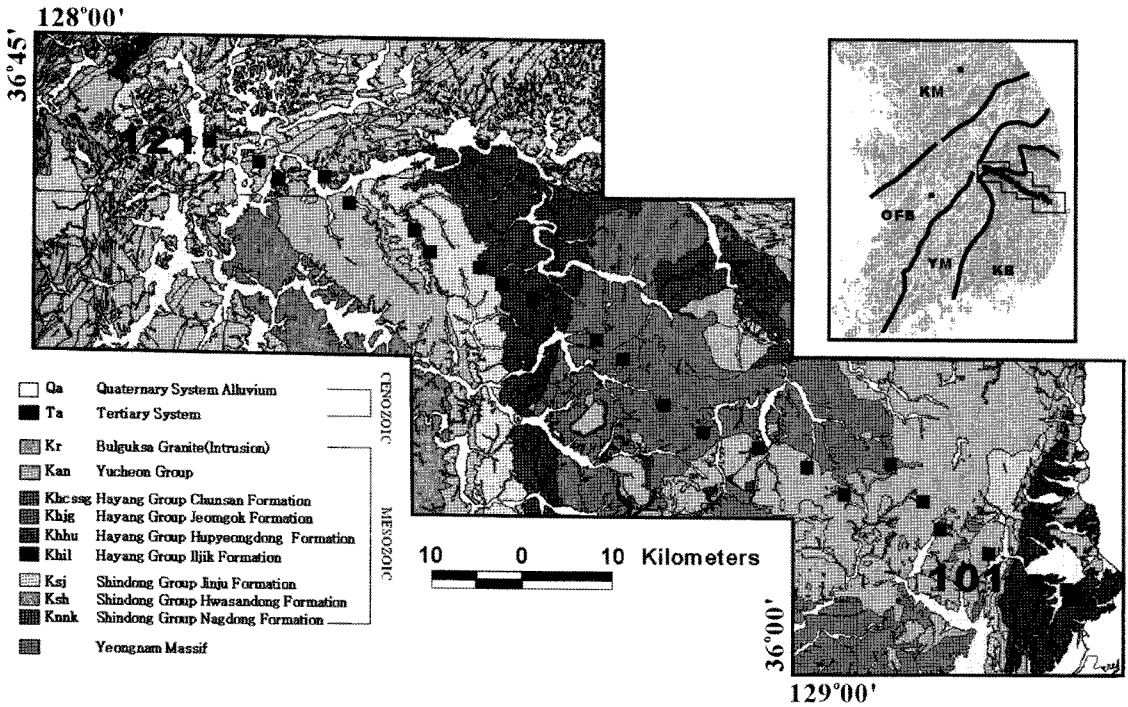


Fig. 5. Geologic map of the north part of the Kyongsang Basin and the location of the MT survey sites (filled square).

양산단층의 연장선에 해당한다.

의성분지에 해당하는 경상분지 서부에서는 퇴적층의 두께가 약 3 km에서 8 km의 범위를 가지며 전기비저항은 수백 ohm-m에 해당한다. 매우 흥미로운 특징은 퇴적층 하부에 고전도층의 층상구조가 존재한다는 사실이다. 앞서 언급하였듯이 이 이상대는 1~30 ohm-m 범위의 전기비저항을 가지고 있으며 그 폭은 약 40 km이다. 이 지역의 1차원 역산 결과는 대체적으로 3층 구조를 나타내고 있다(Lee et al., 2006). 첫 번째 층은 수십 m에서 수백 m에 이르는 표층이며 두 번째 층은 경상분지 퇴적층에 해당한다. 세 번째 층은 고전도층을 나타내는데 그 하부의 경계는 1차원 역산으로 추정하기 어렵다. 1차원 역산에서 나타나는 두 번째 층과 세 번째 층의 경계는 Fig. 6에 표시한 것과 같이 경상분지 서부에서 2차원 역산의 결과와 잘 일치하고 있어 3-8 km에 이르는 고전도층의 깊이는 신뢰할만하다. 이 층상구조는 동쪽으로 갈수록 깊어지며 경사는 약 6° 정도이다. 그러나, 2차원 역산에서 나타나는 고전도층 하부의 모양이나 두께는 그 신뢰성을 장담하기 어렵다. 다만, Bostick 역산 결과는 이 고전도 이상대가 10 km 보다 깊이 연장되어 있다는 것을 반영하고 있다.

MT 탐사 자료만으로 이상대의 정확한 기작을 규명하는 것은 어려우나 지질학적 가능성을 제시해보고자 한다. 한반도 남동부에서는 백악기 초 이어나기 판의 섭입에 의해 많은 당겨 열린 분지(pull-apart basin)들이 형성되었다(Chun and Chough, 1992). 경상분지도 이때 형성된 당겨열린 분지로서 신동층군 시대에는 소위 원(proto-)경상분지라고 불리는 대륙 지구대(continental graben)를 형성하고 있었으며, 하양층군 시대에 이르러 연속적인 단층작용에 의하여 확장이 이루어졌다. 층서학적으로 볼 때 경상분지는 주라기 말 대보조산운동을 지시하는 부정합면 위에 형성되었다. 일반적으로 백악기 이전의 층서들은 대보운동에 의해 강한 습곡 작용을 경험한 것에 반해 백악기나 제 3기 층서들은 약한 습곡이나 구역단층 작용만을 경험하였다.

경상분지 하부의 고전도 이상대는 뚜렷한 층상구조가 넓은 지역에 걸쳐 잘 연결되어 있으며 이것은 이상대가 강한 습곡작용을 받지 않았으며 대보조산운동 이후에 형성되었을 가능성을 시사한다. 한편, 이상대의 북쪽 가장자리는 안동 단층의 위치와 일치하므로 경상분지의 형성과 밀접한 상관관계를 가진 것으로 생각된다. 그러나 고전도층이 신동층군의 최하부구조

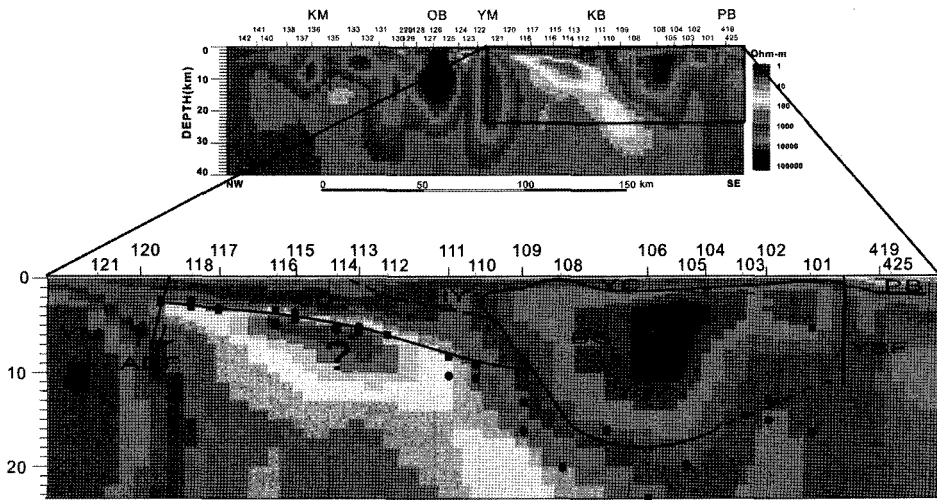


Fig. 6. Geological model of Kyongsang Basin based on the 2-D resistivity model derived by inverting only the TM mode data. YM, Yongnam Massif; SD, Sindong Group; HY, Hayang Group; YC, Yuchon Group; BG, Bulgugsa granite intrusion; PB, Pohang Basin; ADF, Andong fault; YSF, Yangsan fault. The filled squares and circles indicate the depths to base of second layer of the 1-D inversion using the static-corrected TE and TM mode data respectively.

인 낙동층일 가능성은 희박해 보인다. 신동층군은 낙동층, 하산동층, 진주층으로 구분되며 낙동층은 층적 선상지, 하산동층은 층적평원, 진주층은 호소 환경에서 퇴적되었다. 낙동층과 하산동층은 역암, 사암, 이암, 셰일 등으로 구성되어있으며 색깔의 차이만을 보일 뿐 큰 구성 암석의 차이를 보이지 않는다. 따라서, 낙동층과 하산동층은 비슷한 전기비저항을 가질 것으로 예상되는데 하산동층의 전기비저항은 이상대와 같이 낮지 않으므로 고전도 이상대가 낙동층의 전기적 특성에 기인할 가능성은 낮다.

결론적으로 고전도 이상대는 대보조산운동과 경상분지의 퇴적작용이전에 형성된 것으로 보이며 경상분지가 퇴적되기 이전의 취성 전단 작용(brittle shearing)에 기인하는 단층 및 파쇄 작용들과 낙동층 퇴적 이전의 염수호 환경에서의 초기 퇴적작용에 기인하는 것이 아닌가 생각된다.

옥천대의 이방성 구조

옥천대에서의 MT 측정자료는 90°를 초과하는 특이한 위상값을 보여주고 있다. 일반적인 MT 반응에서 XY성분의 위상은 0°와 90° 사이에 존재하고 YX성분의 위상은 -90°와 -180° 사이에 존재할 것으로 예상된다. 하지만 옥천대에서는 측정점 128을 제외하고는 모두 90°를 넘는 위상이 나타난다. 이러한 현상은

1차원 혹은 2차원적 MT자료 해석 기술로는 해석할 수 없는 특이한 현상으로서, 전류의 강한 채널링에 의해 발생하는 전자기장의 왜곡현상에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 옥천대에서 나타나는 MT 임피던스의 예를 보여주고 있다. 평균적인 반응을 보기 위해 옥천대 중앙의 관입 화강암 위에 위치한 측정점 125, 126, 127의 임피던스를 평균하여 도시하였다. Fig. 1의 Groom-Bailey 주향에서 볼 수 있듯이 이 지역에서는 지전기적 주향은 명확하지 않기 때문에 여기서는 좌표계의 혼동을 방지하기 위하여 TE 혹은 TM 모드 등의 표현보다는 X는 북쪽, Y는 동쪽인 좌표체계를 사용하였다. YX 성분의 겉보기비저항과 위상은 주파수에 따라 부드럽게 변화하는데 반해 XY 성분은 겉보기 비저항이 급격히 감소하고, 위상이 급격히 증가하는 형태를 보인다. 이러한 위상의 이상은 많은 측정점에서 매우 불안정한 모습을 보이며, 겉보기 비저항 역시 분산이 크다.

이러한 현상은 전 세계적으로도 쉽게 관찰되지 않는 특이한 현상으로서 강한 이방성 층과 이방성 블록의 조합 형태에서 나타나는 전형적인 반응이다. 상부에 이방성 블록이 존재하고 하부에 이방성층이 존재한다고 가정할 때, 두 이방성 매질의 이방성 계수가 매우 크고 이방성 주향이 현저히 차이가 난다면 90°를 초과하는 위상이 나타날 수 있다(Pek and

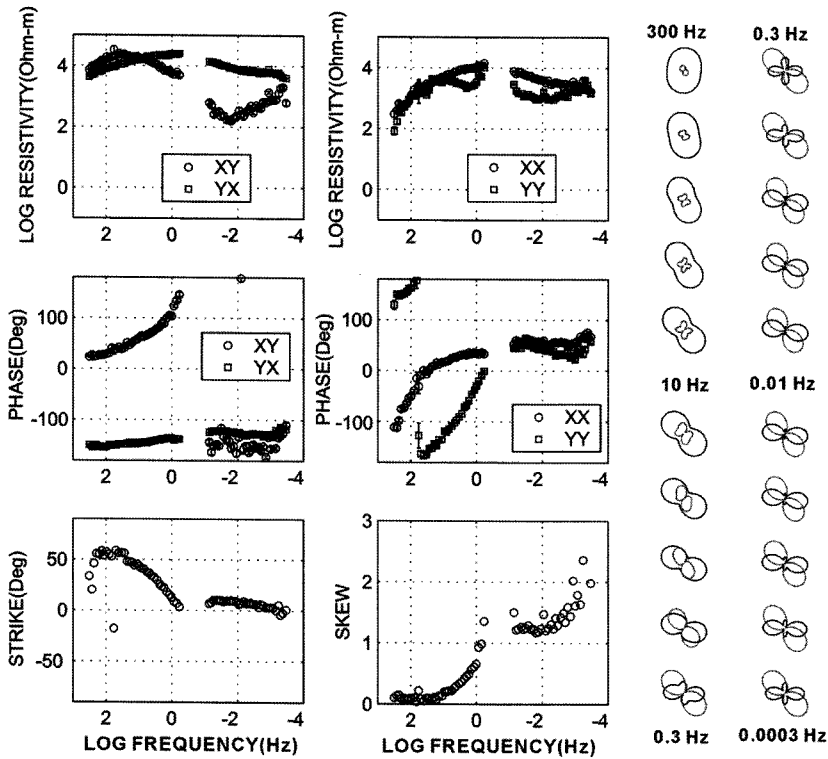


Fig. 7. MT parameters derived from the impedances spatially averaged using data from sites 125, 126, and 127: apparent resistivity curves (top panels), phase curves (middle panels), strike and skew (bottom panels), and polar diagram (right panels). The black lines in the polar diagram denote the XY components and the gray lines show the XX components.

Verner, 1997). 정량적 분석을 위해 2차원 이방성 모델링을 이용하여 관측된 이상 반응을 분석하였으며 자세한 분석 방법은 이준기 등(2007)에 기술하였다. 여기서는 결론만 간단히 기술하도록 하겠다.

상부의 이방성 블록은 상부지각의 고비저항 이상체에 해당하고 하부의 이방성 층은 상부맨틀에 존재하는 이방성 매질에 해당하는 것으로 가정하였다. 이방성 블록은 북동 방향의 이방성 주향을 가지고 있으며 이방성 블록의 하부에 존재하는 이방성 층은 북서 방향의 이방성 주향을 나타내고 있다. 백악기 이전 북동방향의 전단작용과 스트러스트 작용이 수반되는 지각 변동에 의해 변성암들의 교대작용과 파쇄대의 발달이 북동방향의 전기적 이방성을 발생시키는 원인으로 보여 진다. 그러나 이방성층에서 나타나는 북서 방향의 이방성은 현재 그 원인이 명확하지 않다. 한편, 이방성 블록의 구조적인 주향은 동서 방향을 나타내고 있어 후기 대보 혹은 불국사 조산운동이 이방성 블록의 구조적인 형태를 최종적으로 만들어낸 것으로 생각된다.

1차원 역산으로 추정되는 상부지각의 두께

서론에서 언급하였듯이 심부 지각 구조에 대한 선행연구들은 주로 중력과 탄성파를 이용한 것이었다. 이러한 연구들은 콘라드면과 모호면 등 지각 내의 불연속면들을 제시하고 있다. 여기서는 MT 자료에서 추정되는 전기전도도의 불연속면에 대해 논의하고자 한다. 전기비저항이 높은 지괴는 전자기파의 투과심도가 매우 커서 종종 심부의 지전기 구조를 볼 수 있는 창이 역할을 한다. 한반도의 지각 매질 역시 상대적으로 높은 전기비저항을 가지고 있어 하부지각과 상부맨틀의 전기전도도에 대한 정보가 MT 자료에 포함되어 있다. 다만 의성분지에서는 고전도층이 전자기파의 투과를 막고 있으며 육천대에서는 이방성 매질이 전자기장을 왜곡시켜 상부지각과 하부지각의 경계면을 명확히 밝혀내기가 어렵다. 그러나 다행이도 경기육괴와 경상분지 동쪽 지역에서는 상부지각이 충분히 높은 전기비저항을 가지고 있어 하부지각과의

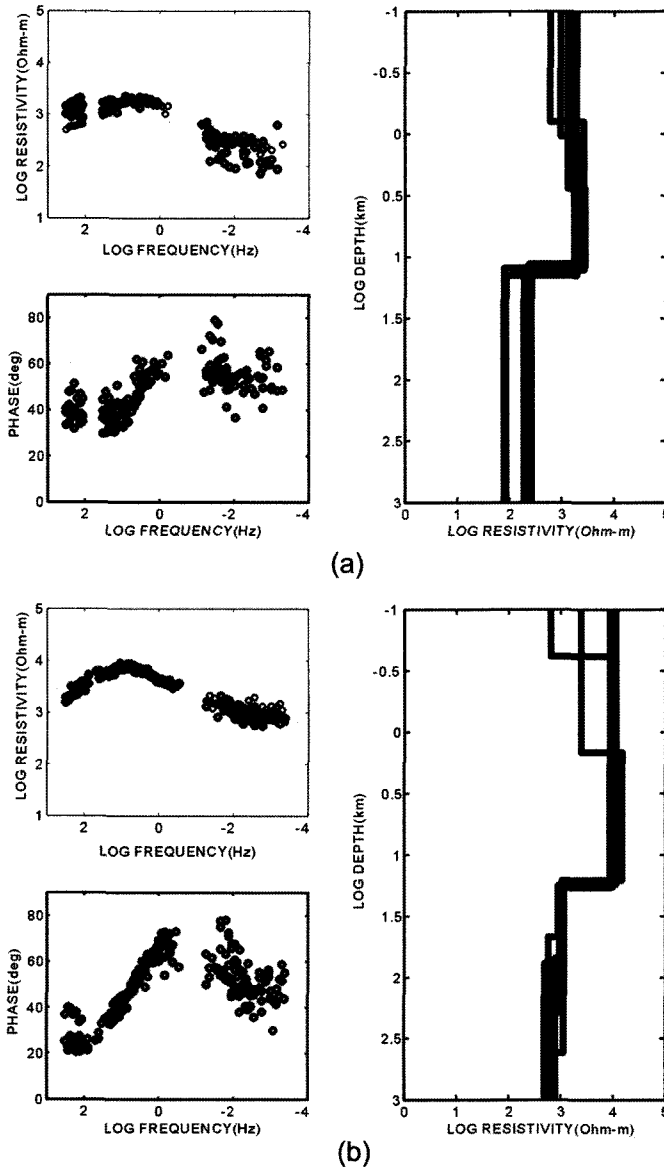


Fig. 8. 1-D inversion results of sites that are located in (a) the eastern part of the Kyongsang Basin (sites 101, 102, 103, and 106) and (b) the Kyonggi Massif (sites 133, 135, 136, 137, 140). Left panels show the apparent resistivities and phases and right panels exhibit the 1-D inversion results.

경계면을 추정할 수 있다.

한편, 1차원 역산은 전기전도도의 급격한 변화 혹은 불연속면을 밝혀내는 데 2차원 역산보다 더욱 유용할 수 있다. 2차원 역산은 평활화 기법이 필수적으로 적용되기 때문이다. 만약 임피던스의 XY 성분과 YX 성분이 크게 다르지 않다면 MT 임피던스는 1차원 구조의 반응으로 취급된다. 경기육괴 지역의 MT 자료는 대체적으로 임피던스의 XY 성분과 YX 성분

이 크게 다르지 않아 1차원 구조의 반응에 가깝지만 경상분지 동쪽지역의 경우 동해의 영향으로 인하여 1차원 구조로 가정하기가 어렵다. 이러한 다차원 구조의 영향을 제거하는 가장 간단한 방법은 유효 임피던스(effective impedance) 등 회전시켜도 변하지 않는 임피던스를 사용하는 방법이다. Livelybrooks (1986)는 유효 임피던스의 1차원 모델과 실제의 모델이 잘 일치한다고 보고하였지만 Pellerin and

Hohmann (1988)은 어떤 모델에서는 유효 임피던스가 실제 임피던스 보다 현저히 작게 계산되어 해석의 오류를 유발하는 것으로 보고하였다. 한반도 주변을 둘러싼 해양은 저주파 대역의 겔보기비저항과 위상에 왜곡을 일으켜 동해에 가까운 측점에서 상부맨틀의 전기비저항을 추정하는데 어려움이 있으나 상부지각과 하부지각의 경계면을 추정하는 데는 큰 영향을 주지 않는다.

유효 임피던스의 계산은 기하평균(GAV), 산술평균(AAV), 텐서의 행렬식(DET)을 이용하는 방법이 대표적이다. 여기서는 DET 임피던스를 이용하여 1차원 역산을 수행하였다. Fig. 8은 경기 육괴에 위치한 측정점 133, 135, 136, 137, 140, 경상분지 동쪽지역에 위치한 측정점 101, 102, 103, 106의 DET 임피던스들을 사용한 1차원 역산 결과를 보여준다. 이 과정에서 여러 가지 정적 효과 제거 기법을 시험해보았으며 결과적으로 1 Hz에서 10 Hz 사이의 겔보기 비저항의 기하평균을 기준으로 하여 겔보기 비저항 곡선을 이동시켜 보정하였을 때 가장 분산이 작은 1차원 역산결과가 도출되었다. 정적 효과가 제거된 1차원 역산 결과로부터 경기육괴에서는 $12.5(\pm 1.0)$ km, 경상분지 동부에서는 $17.6(\pm 0.9)$ km 깊이에 뚜렷한 전기비저항의 불연속면이 존재한다. 충분히 작은 표준편차를 보이고 있어 신뢰할만한 결과라고 생각되며, 이 불연속면은 콘라드면을 반영하는 것으로 생각된다. 상부지각의 전기비저항은 상당히 높은 반면 하부지각의 전기비저항은 상부지각에 비해 1/10 이하이다. 서론에서 언급한 선행연구들은 콘라드 불연속면의 깊이를 15 km 내외로 제시하고 있어, 여기서 얻어진 콘라드면의 두께는 경기육괴에서는 다소 얇게, 경상분지 동부에서는 다소 깊게 나타나는 특성을 보이고 있다. 이러한 차이에 대한 설명은 보다 많은 MT 및 지진파 자료의 연구가 이루어진 후에 가능하리라 생각된다.

결 론

본 연구의 주요 목적은 한반도를 횡단하는 MT 측선 탐사를 통해 한반도의 지각구조를 정밀 영상화하고 상부지각의 지전기적 특성을 밝혀내는 것이다. 한반도를 횡단하는 50 측정점에서 MT 자료를 획득하였으며 지하구조를 정밀 영상화하기 위하여 2차원 MT 역산을 적용하였다. 측선을 따라 MT 임피던스 반응은 네 부분에서 구분되어 나타난다. 즉, 경기육괴, 옥

천대, 경상분지 서쪽지역(의성분지), 경상분지 동쪽지역으로 대표되는 한반도의 전형적인 대규모 지질구조의 형태를 반영하고 있으나 각 구역에 따라 독특한 특징도 반영하고 있어 한반도 지각구조 해석에 있어 새로운 사실들을 제시하고 있다.

한반도를 횡단하는 MT 탐사를 통해 획득되어진 주된 결과는 다음과 같다.

1. 한반도를 가로지르는 MT 탐사에 의한 전기비저항 단면은 몇 개의 고전도성 이상대와 고비저항 이상대를 뚜렷이 구분해주고 있다. 고전도성 이상대는 경상분지의 하부구조와 옥천대의 퇴적 변성암들, 그리고 제3기 퇴적 분지와 관련되어 있다. 반면, 고비저항 이상대는 주로 경상분지와 옥천대 일부지역에 걸쳐 진행된 백악기 화강암 관입과 밀접히 관련되어 있다.

2. 지질학적으로 관심이 높은 경상분지의 퇴적층 두께는 3 km 내지 8 km로 추정된다. 본 연구에서 밝혀진 매우 특이하고 중요한 결과 중의 하나는 이 경상분지(의성분지) 퇴적층 하부에 1 ohm-m에서 30 ohm-m에 이르는 매우 낮은 전기비저항을 가지는 이상대가 존재한다는 것이다. 지질학적인 환경을 고려해 볼 때 이 이상대는 대보 조산 운동과 경상분지 초기 퇴적층이 낙동층의 퇴적 사이에 형성된 것으로 생각된다.

3. 옥천대에서는 무엇보다도 90° 를 초과하는 매우 큰 위상 변화를 그 특징으로 들 수 있다. 이러한 현상은 전 세계적으로도 쉽게 관찰되지 않는 특이한 현상으로서 강한 이방성 층과 이방성 블록의 조합형태에서 나타나는 전형적인 반응이다. 즉, 상부지각에 존재하는 이방성 블록과 상부맨틀로 가정한 하부의 이방성 층의 상호작용은 강한 전류의 왜곡을 일으켜 위상반응에 90° 를 초과하는 특이한 이상을 초래한다. 이러한 전기적 이방성 구조는 옥천대가 경험한 여러 차례에 걸친 지각 변형에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 1차원 전기전도도 모델은 상부지각의 두께에 대한 신뢰할 만한 결과를 보여주고 있다. 상부지각의 두께는 경기육괴 지역에서 약 13 km, 경상분지 동쪽 지역에서는 약 18 km로 추정되었으며 상부지각의 전기비저항은 상당히 높은 반면 하부지각의 전기비저항은 상부지각에 비해 1/10 이하이다.

위와 같은 결과들은 지진파나 중력 탐사 등 다른 탐사법에서 발견하지 못하는 한반도 지각구조의 특성을 제시하고 있으며 한반도 지각 구조 연구에 있어서 MT 탐사가 매우 유용한 탐사법임을 말해준다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구 사업인 “한반도 심부 전기구조의 지구물리학적 연구(R01-2003-000-10340-0)”의 일환으로 수행되었으며, 연구 지원을 해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 김기영, 홍명호, 이정모, 문우일, 박창업, 정희옥, 2005, 대규모 발파자료 초동주시 역산을 통한 한반도 지각 속도 구조 연구. 지구물리, 8(1), 45-48.
- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질, 16(1), 51-61.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구. 지질학회지, 31(1), 393-403.
- 김성균, 정부홍, 1985, 한국 남부지역의 지각구조. 광산지질, 18(2), 151-157.
- 대한지질학회, 1999, 한국의 지질. 시그마프레스, 서울, 802 p.
- 민경덕, 이영재, 2000, 중력 탐사에 의한 포항-공주-만리포 간의 지각구조 연구. 자원환경지질, 33(2), 101-109.
- 송윤호, 이태종, T. Uchida, 2006, 가칭주파수 대역 MT 탐사자료에서 원거리 기준점의 효과. 한국지구시스템공학회지, 43(1), 44-54.
- 이춘기, 이희순, 권병두, 조인기, 오석훈, 송윤호, 이태종, 2007, 자기지전류 탐사 자료에 나타나는 옥천대의 전기적 이방성 구조. 한국지구과학회지, 28(2), 227-239.
- 이희순, 송윤호, 1997, 전기장 또는 자기장 송신원을 이용한 벡터 CSMT. 자원환경지질, 30(5), 451-458.
- 정승환 외 26인, 1993, MT 및 GDS 탐사에 의한 경상분지 내 지열 및 탄화수소 탐사(I). 과학기술처, KR-93(T)-6, 55p.
- 최광선, 신영홍, 1996, 중력자료와 지형자료의 해석에 의한 한반도 일원의 지각균형. 지질학회지, 32(5), 407-420.
- 최승찬, 2005, CHAMP-GRACE 인공위성 데이터와 해상 측정 중력 데이터에 나타난 황해안 지역의 남중국과 북중국판의 대륙 충돌대 위치. 지구물리, 8(2), 89-92.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of Southeast Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 11 (1), 1-23.
- Chang, K.H., 1988, Cretaceous stratigraphy and paleocurrent analysis of Kyongsang Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 24 (3), 194-205.
- Chave, A.D. and Thomson, D.J., 1989, Some comments on magnetotelluric response function estimation. Journal of Geophysical Research, 94 (B10), 14215-14225.
- Choi, H.I., 1985, Sedimentology and its implications for stratigraphic classifications of the Cretaceous Gyeongsang Basin. Journal of the Geological Society of Korea, 21 (1), 26-37.
- Choi, P.Y., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kwon, S.K., Ko, I.S., and An, G.O., 2002, Movement history of the Andong Fault System: Geometric and tectonic approaches. Geosciences Journal, 6 (2), 91-102.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H., and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view. Earth-Science Reviews, 52 (1-3), 175-235.
- Chun, S.S. and Chough, S.K., 1992, Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. In Chough, S.K. (ed.) Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas. Korean Sedimentology Research Group Special Publication, Hanrimwon publishers, Seoul, 104-128.
- Egbert, G.D. and Booker, J.R., 1986, Robust estimation of geomagnetic transfer functions. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 87, 173-194.
- Egbert, G.D. and Likhlybrooks, D., 1996, Single station magnetotelluric impedance estimation: coherence weighting and the regression M-estimate. Geophysics, 61 (4), 964-970.
- Gamble, T., Goubau, W., and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with a remote reference. Geophysics, 44 (1), 53-68.
- Goubau, W., Gamble, T., and Clarke, J., 1978, Magnetotelluric data analysis: removal of bias. Geophysics, 43 (6), 1157-1166.
- Jiracek, G.R., 1990, Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction. Surveys in Geophysics, 11 (2-3), 163-203.
- Jones, A.G. and Jdicke, H., 1984, Magnetotelluric transfer function estimation improvement by a coherence-based rejection technique, 54th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysics, USA, p. 51.
- Jones, A.G., 1988, Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. Geophysics, 53 (7), 967-978.
- Kim, J.S., Shon, H., Ryang, W.H., and Chough, S.K., 1998, Electrical resistivity and MT imaging in the northern-middle part of Eumsung Basin (Cretaceous). Korea, Geosciences Journal, 2 (4), 206-219.
- Kurtz, R.D., Ostrowski, J.A., and Niblett, E.R., 1986, A magnetotelluric survey over the East Bull Lake Gabbro-Anorthosite complex. Journal of Geophysical Research, 91 (B7), 7403-7416.
- Lee, H., 1994, Geophysical study of subsurface structure of Cheju island. Unpublished Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 172 p.
- Lee, C.K., 2006, Magnetotelluric study on the deep geoelectrical structure across the Korean Peninsula. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 152 p.
- Lee, C.K., Lee, H., Kwon, B.D., Cho, I.K., Oh, S., Song,

- Y., and Lee, T.J., 2006, Geoelectrical structure of the Kyongsang Basin from magnetotelluric sounding. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 9 (3), 273-286.
- Lee, K., 1979, On crustal structure of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 15 (4), 253-258.
- Lee, T.J., Song, Y., Uchida, T., Mitsuata, Y., Oh, S. and Graham, G.B., 2004, Sea effect in three-dimensional magnetotelluric survey: An application to geothermal exploration in Pohang, Korea. *Proceeding of the 7th SEGJ International Symposium*, November 2004, Sendai, 279-282.
- Livelybrooks, D.W., 1986, Modelling earth resistivity structure for MT data: A comparison of rotationally invariant and conventional earth response functions (abs.) *EOS Transactions of American Geophysical Union*, 67, 918.
- McNeice, G.W. and Jones, A.G., 2001, Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66 (1), 158-173.
- Pek, J. and Verner, T., 1997, Finite difference modelling of magnetotelluric fields in 2-D anisotropic media. *Geophysical Journal International*, 128 (3), 505-521.
- Pellerin, L. and Hohmann, G.W., 1990, Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shift. *Geophysics*, 55 (9), 1242-1250.
- Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T., and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang Belt. *Geology*, 24 (12), 1071-1074.
- Rodi, W., and Mackie, R.L., 2001, Non-linear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66 (1), 174-187.
- Song, Y., Lee, T.J., and Uchida, T., 2006, Effect of remote reference on audio-frequency magnetotelluric data. *Journal of Geosystem Engineering*, 43 (1), 44-54.
- Swift, C., 1967, A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 211 p.
- Tauber, S., Banks, R., Ritter, O., and Weckmann, U., 2003, A high-resolution magnetotelluric survey of the Iapetus Suture Zone in southwest Scotland. *Geophysical Journal International*, 153 (3), 548-568.
- Uchida, T., Song, Y., Lee, T.J., Mitsuata, Y., Lee, S.K., and Lim, S.K., 2004, 3-D magnetotelluric interpretation for low-enthalpy geothermal resources in the Pohang area, Korea. *Proceeding of the 7th SEGJ International Symposium*, Sendai, Japan, 55-60.
- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A., and Rijo, L., 1986, Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements. *Geophysics*, 51 (11), 2131-2144.
- Yang, J.M., 2006, Automatic rejection scheme for MT and GDS data processing and interpretation on conductivity anomalies of the Korean Peninsula. Unpublished Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 137 p.

2007년 1월 11일 접수
2007년 3월 21일 수정원고 접수
2007년 3월 27일 채택