

## 호주 Victoria주 MT 탐사 자료 해석

이성곤<sup>1\*</sup> · 이태종<sup>1</sup> · Toshihiro Uchida<sup>2</sup> · 박인화<sup>1</sup> · 송윤호<sup>1</sup> · Jim Cull<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부, <sup>2</sup>AIST, Japan, <sup>3</sup>Monash University, Australia

### Analysis of MT Data Acquired in Victoria, Australia

Seong Kon Lee<sup>1</sup>, Tae Jong Lee<sup>1</sup>, Toshihiro Uchida<sup>2</sup>, In Hwa Park<sup>1</sup>, Yoonho Song<sup>1</sup> and Jim Cull<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Groundwater and Geothermal Division, KIGAM, <sup>2</sup>AIST, Japan, <sup>3</sup>Monash University, Australia

**요 약:** 호주 Victoria주 Bendigo 북부 지역에서 심부 지질 구조를 조사하기 위하여 MT 탐사를 수행하였다. 이 탐사의 주 목적은 이 지역에 발달한 단층대의 연장 상황을 파악하는데 일차적으로 그 목적이 있다. 총 11일에 걸쳐 71개의 측정점에서 MT 시계열을 획득하였으며 이와 동시에 원거리기준점에서도 자료를 획득하여 자료 처리 및 해석의 신뢰도를 향상 시키고자 하였다. 획득된 자료는 임피던스 추출, 원거리기준점 자기장을 이용한 로버스트 자료처리 등을 거쳐 임피던스를 추출하였으며, 2차원 역산 알고리즘을 이용하여 최종적으로 전기비저항 영상을 획득하였다. 이러한 MT 탐사 결과를 이 지역에 대한 지질 자료 및 동일한 축선에서의 탄성과 반사법 자료와 비교한 결과 상호 부합함을 알 수 있었으며 이 지역에 발달된 단층대의 연장 상황을 파악할 수 있었다.

**주요어:** MT, 2차원 역산, 탄성과 반사법, 호주 Victoria, 단층대

**Abstract:** We perform MT soundings in Bendigo, the northern part of Victoria, Australia, to investigate the deep subsurface geologic structure. The primary purpose of this survey is to figure out whether the discontinuity such as faults extends northward. The time series of MT signal were measured over 11 days at 71 measurement stations together with at remote reference, which help enhance the quality of impedance estimation and its interpretation. The impedances are estimated by robust processing using remote reference technique and then inverted with 2D MT 2D inversion. We can see that known faults are clearly imaged in MT 2D inversion. Comparing resistivity images from MT 2D inversion with interpreted boundary from reflection seismic exploration, two interpretations match well each other.

**Keywords:** MT, 2D inversion, Victoria, fault

## 서 론

호주 Victoria주 Bendigo 지역은 Melbourne에서 북서쪽으로 약 130 km 정도 떨어져 있는 유명한 금 생산지로써 이 지역의 초기 금 생산은 비교적 발견하기 쉬운 천부의 충적토에 형성된 광상에서 이루어진 것이 대부분이었다(Baker, 2005). 이러한 유형의 금광은 점차 고갈되어 현재는 매장량이 얼마 남아 있지 않게 되었으며, 금 산업의 육성을 위하여 호주 정부 및 Victoria 주정부에서는 Victoria주 내의 금광 형성 과정 및 그 유형 등에 대한 체계적인 지질조사 및 연구를 진행하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 호주 Victoria 주정부 Department of Primary Industry (DPI)의 산하기관인 Geoscience Victoria에서

는 금을 비롯한 유용 광물 개발을 위한 산업체의 활동을 지원하고 촉진시키기 위하여 이에 기초가 되는 심부 지질 구조 및 여러 유용 광물의 광상 성인에 대한 지질학/지구물리학적 정보를 획득, 제공하는 프로젝트를 진행하고 있는데 이와 관련되어 “VIMP (Victoria Initiative for Minerals and Petroleum)”, “Developing Gold Undercover” 프로그램이 진행 중이다. 이 프로그램의 일환으로 2006년 호주 중앙 및 지방정부의 지원 아래 총 380여 km에 걸쳐 탄성과탐사가 수행되었으며 이 탐사의 목적은 단층 발달 상황 등의 심부 지질 구조를 밝힘으로써 금 및 유용 광물의 광상 성인 연구에 필수적인 지질 정보를 제공하는 것이다. 이를 위해 적용되었던 탄성과 반사법 탐사는 해상도면에서 가장 우수한 탐사법이기는 하지만 대상이 되는 Bendigo 북쪽 지역에 상당히 두꺼운 퇴적층이 지표를 덮고 있어 이를 극복할 수 있는 신호를 얻기 위해서는 대규모 음원이 필요하였다. 그러나, 대상지역의 대부분은 농장 및 목장 지역이라 지역민들의 민원이 발생하고 또한 탄성과 반사법 탐사는 막대한 비용이 소요되는 단점이 부각되었다.

2008년 5월 22일 접수; 2008년 8월 14일 채택

\*Corresponding author

E-mail: seongkon@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

자기지전류(Magnetotelluric; MT) 탐사는 지각 구조 규명, 지열, 광물자원 및 석유 탐사 등의 심부 탐사에 매우 유용한 탐사법으로 알려져 있으며, 반사법 탄성파탐사에 비하여 비용이 훨씬 적게 들지만 가탐심도 면에서는 우수한 탐사법으로 알려져 있다. 본 연구에서 수행된 MT 탐사는 Monash 대학이 Victoria주 중앙 단층대의 북쪽 심부 연장 상황을 규명하는 프로젝트를 호주 Victoria 주정부 산하 GeoScience Victoria에 제안하면서 시작되었으며 한국과 호주간 국제 공동 연구의 일환으로 수행되었다. 따라서, 공동 수행한 MT 탐사의 궁극적인 목적은 MT 탐사를 이용해 Victoria주 북부의 심부 지질구조를 규명하는 것이며 이 지역에 발달한 단층대의 연장 상황 파악하는데 있다. 또한, 탄성파탐사가 수행된 지역에 대하여 전자탐사인 MT 탐사를 적용하여 원리가 다른 두 방법에 의한 심부 지질 구조 해석을 비교 분석하고, 이를 기반으로 또 다른

근접 지역에 대한 MT 탐사로 심부 지질구조의 연장성을 확인하여 탄성파 탐사의 대안으로서 MT 탐사의 가능성을 살펴보는 의미도 있다.

본 연구에서 수행한 현장 MT 탐사는 11일에 걸쳐 총 71개의 측정점에서 전기장 및 자기장의 시계열을 획득하였으며 이와 동시에 원거리기준점 자료도 획득하여 자료 처리 및 해석의 신뢰도를 향상시키고자 하였다. 획득된 자료는 원거리기준점 자기장 자료를 이용한 로버스트 자료 처리 등을 거쳐 임피던스를 추출하였으며, 또한 2차원 역산을 통하여 최종적으로 전기비저항 영상을 획득하였다. MT 탐사 결과 획득한 전기비저항 영상은 이 지역에 대한 지질 자료 및 동일한 축선에서의 탄성파 반사법 자료 해석과 비교한 결과 상호 부합함을 알 수 있었으며, 이미 알려진 단층대를 매우 명확히 영상화하였음을 확인하였다.

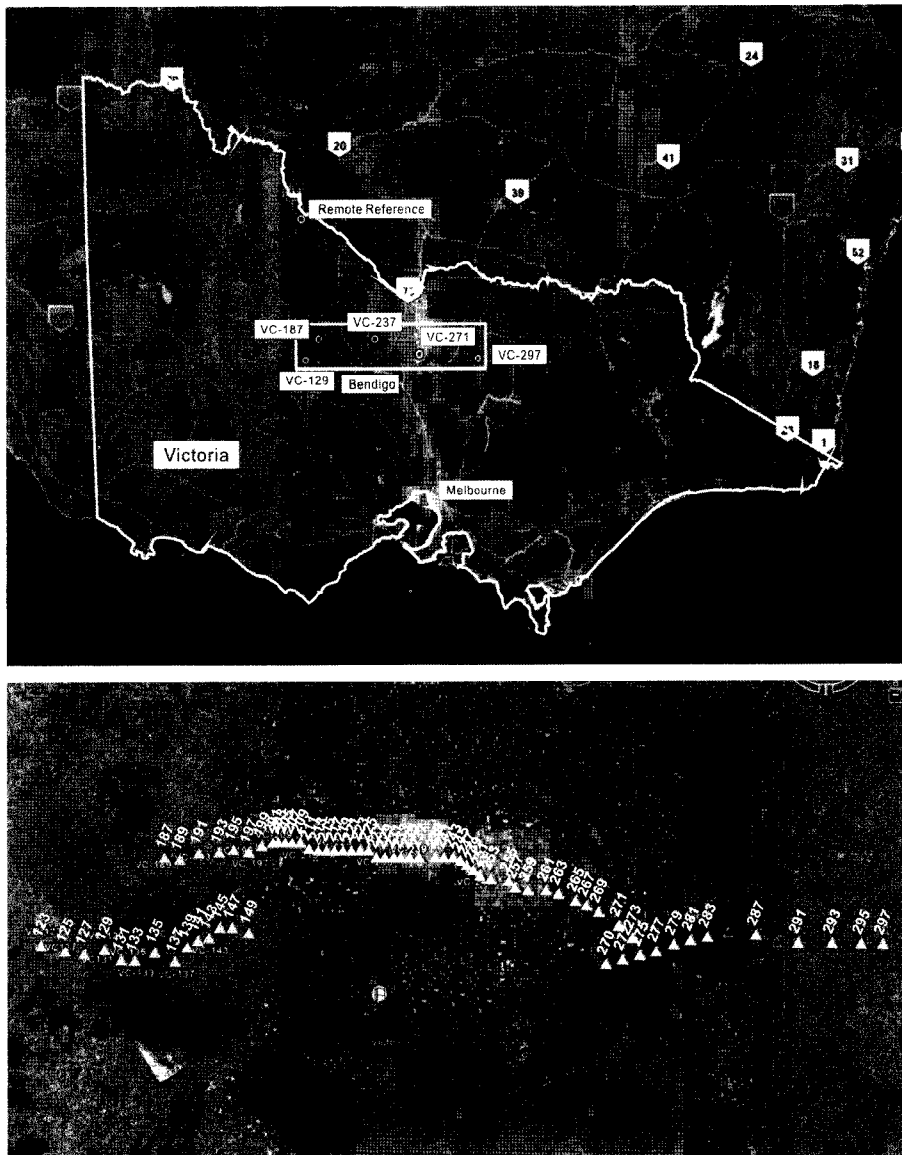


Fig. 1. Location map of the MT survey stations. The area covered in this survey is marked as a box (top) and all MT stations are represented in detail (bottom).

### MT 현장 탐사

Victoria주 MT 탐사의 현장 자료 획득은 2007년 4월 27일부터 5월 9일 사이에 실시되었다. 이 탐사에서는 전기장 2성분과 자기장 3성분 등 총 5성분을 측정하는 텐서측정(tensor measurement) 방법으로 자료를 획득하였으며, 원거리기준점(remote reference)을 운용하여 임피던스 추정에 정확성을 높이고 자료 해석의 신뢰도를 높이고자 하였다. 이번 탐사는 캐나다 Phoenix Geophysics사의 MTU-5A 및 MTU-5 시스템을 이용하여 수행하였으며, 제한된 기간과 개략적인 대상 지역의 전기전도도 및 탐사 대상의 깊이를 고려하여 AMT 주파수 영역은 측정하지 않고 MT 주파수 영역(317 Hz ~ 0.00034 Hz)에 대해서만 자료를 획득하였다. 하루에 평균적으로 총 6~7대의 시스템을 운용하였으며, 자료 측정은 지역 시간으로 오후 5:00부터 다음날 오전 8:00까지 측정하였고 자료의 질을 확인한 후 경우에 따라 하루를 더 측정하기도 하였다. 자료 취득 시 원거리기준점과의 시간 동기화는 MTU-5A 측정 시스템에 부착되는 GPS (Global Positioning System)를 이용하여 이루어졌다.

Fig. 1은 본 연구에서 수행한 MT 탐사 현장의 위치도와 MT 탐사 측정점을 나타내고 있다. 탐사가 수행된 곳은 호주 Victoria주 Bendigo 북부 지역으로 Melbourne으로부터 약 130 km 정도 북서쪽에 위치하고 있으며, 원거리기준점은 현장 측정점들의 중앙 부분에서부터 북서쪽으로 약 160 km 정도 떨어진 Victoria주와 New South Wales주의 접경 지역의 도시인 Swan Hill 인근에 설치하였다. 대략 원거리기준점에서부터 측정 중앙부분의 측정점인 VC-259까지의 거리는 대략 160 km이며, 가장 가까운 측정점까지는 약 120 km, 가장 먼 측정점까지는 약 230 km이다(Table 1).

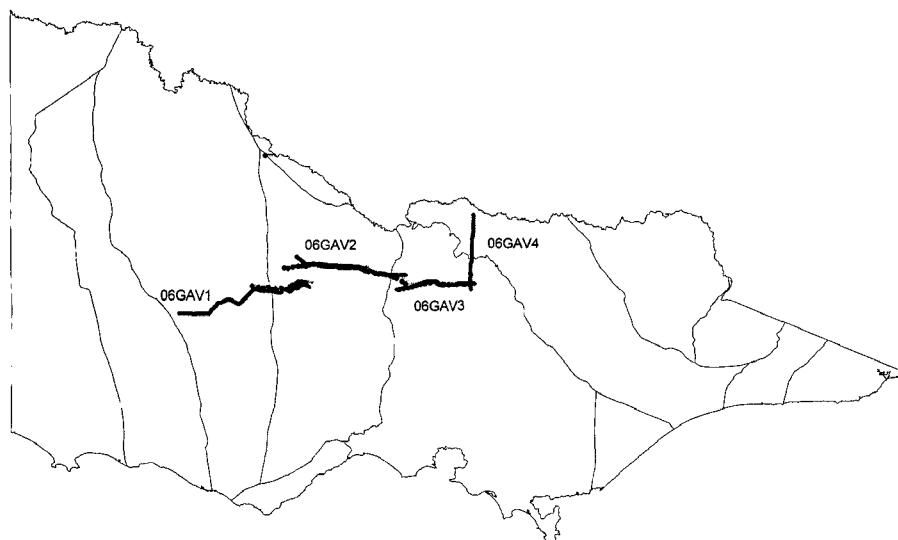
탐사 측정점은 총 71개로서 Fig. 1과 같이 MT 측정점들은 대략

동서 방향으로 분포하고 있다. 이러한 측정 배열은 Victoria주의 일대의 광역적인 지질구조선이 대체로 남북 방향임(Vandenberg *et al.*, 2000)을 고려하여 설정한 결과이며, 또한 2006년에 실시된 반사법 탄성파탐사의 해석 결과와 MT 탐사 결과를 비교하기 위하여 탄성파탐사 측선에 가장 가깝도록 설정하였다. Fig. 2에 탄성파탐사의 측선과 MT 탐사 측정점들을 중첩하여 나타내었다. 이 탄성파탐사 프로젝트는 VIMP (Victorian Initiative for Minerals and Petroleum) 프로그램의 일환으로 시행된 것으로, VIMP 프로그램은 산업체의 광물 및 석유 자원 개발을 지원하고 촉진시키기 위하여 Victoria 주정부 주도로 지질 및 지구물리 기초 기반 자료 데이터베이스를 구축, 제공하는 방대한 규모의 연구사업이다(Department of Primary Industries, Australia, 2008; <http://www.dpi.vic.gov.au/DPI/>). 이 탄성파탐사는 Victoria 주정부 및 Geoscience Australia의 주관 하에 pmd\*CRC(predictive mineral discovery for Cooperative Research Center) 및 Leviathan Resources, Gold Fields Australasia Pty Ltd, Pervserance Corporation Limited, Ballart Goldfields 등의 산업체가 참여한 대규모 프로젝트로 Victoria 중앙부에 대한 심부 지각 구조 규명을 위해 실시된 것이다(Korsch, 2008).

Fig. 2에서와 같이 탄성파탐사는 총 4개의 측선 (06GAV1, 06GAV2, 06GAV3, 06GAV4)에서 실시되었으며, MT 측정점들

**Table 1.** Location of some local sites and a remote reference site (RR-SWAN).

Site Name	Longitude	Latitude	Distance from RR
VC-187	143°42.798'E	36°28.261'S	약 120 km
VC-259	144°39.573'E	36°32.360'S	약 160 km
VC-297	145°35.154'E	36°38.526'S	약 230 km
RR-SWAN	143°31.253'E	35°23.082'S	-



**Fig. 2.** Location map of the MT survey stations overlapped with the central Victoria seismic transect done in 2006. Structural subdivision in Fig. 15 are also marked as solid lines.

은 주어진 탐사 여건 하에서 탄성파탐사 측선과 가장 근접하고 광범위 포괄할 수 있도록 설계하였다. 즉, 동일선 상에 있지 않는 06GAV2와 06GAV3를 하나의 측선으로 해석하고자 두 측선이 완만히 이어지도록 중간에 MT 측정점들을 배치하였으며, 또한 06GAV1의 동쪽 부분과 겹치도록 MT 측정점들을 배치하여 전기비저항 이상대의 연장성을 살펴보고자 하였다. 측정점 간 거리는 대략 중앙부분은 2 km 내외로 공간적 알리아싱을 가능한 줄이고자 하였으며, 양끝으로 갈수록 점차로 3~5 km 내외로 넓혀 충분한 수평적인 길이를 확보하도록 하였다.

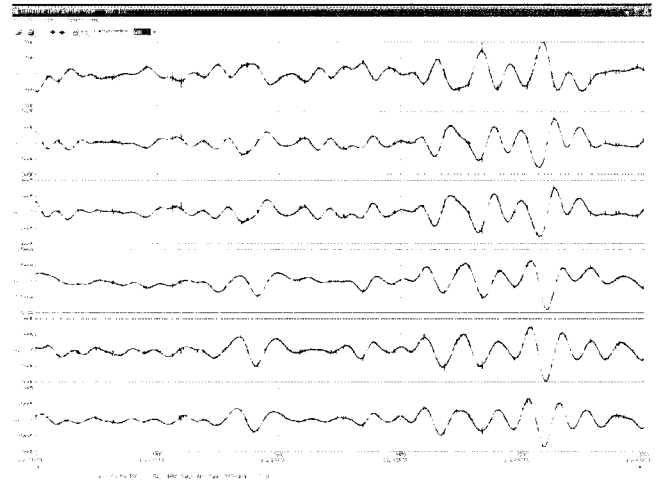
### 자료 획득 및 임피던스 추출

#### 현장 자료로부터 임피던스 추출

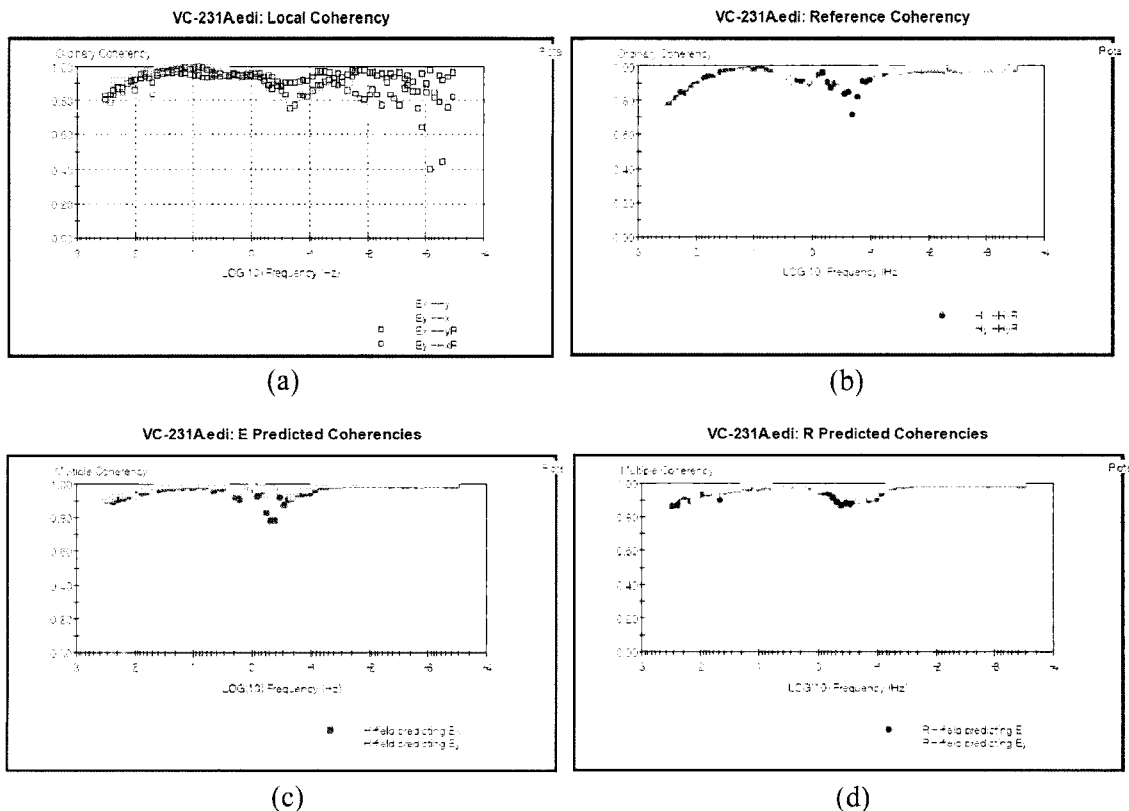
현장에서 획득된 탐사 자료는 Swan Hill의 원거리기준점(RR-SWAN)에서 같은 시각에 획득된 자기장 자료를 이용하여 원거리기준점 자료처리(Gamble *et al.*, 1979) 및 로버스트 추정(Chave *et al.*, 1987; Egbert and Booker, 1986)을 이용하여 MT 임피던스(impedance)를 구하였으며, 이를 위하여 Phoenix Geophysics Ltd.의 SSMT2000™ 소프트웨어를 이용하였다.

Fig. 3은 현장 탐사에서 획득된 탐사 자료 중 하나의 예로서 VC-231과 동일한 시각에 원거리기준점에서 획득된 전기장 및 자기장의 시계열을 보여주고 있다. 이 시계열은 세계표준시 기준 2007년 4월 30일 21:00에 15 Hz 샘플링 간격으로 획득된 자료이다. 대체로 대부분의 지역에서 전기적 잡음원이 많지 않

아  $E_x-H_y$ ,  $E_y-H_x$ 간의 상관성이 우수한 신호를 얻을 수 있었고, 또한 탐사 지역 및 원거리 기준점에서 측정된 자기장은 매우 그 상관도가 높은 신호임을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 정량적으로 살펴보기 위하여 Fig. 4에 전기장 및 자기장의 coherency(일관성)를 나타내었다. 대체로 전기장 및 자기장 상호간의 일관성, 원거리기준점 자기장에 대한 일관성 뿐 아니라 예측된 전기장 및 자기장과의 일관성(predicted coherency)도



**Fig. 3.** An example of time series of electric and magnetic fields observed at a field site (VC-231) and the remote site (RR-SWAN). The sampling rate is 15 Hz. From the top, electric and magnetic fields in local and remote sites are shown in the order of  $E_x$ ,  $H_y$ ,  $RH_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $RH_y$ .



**Fig. 4.** Various coherencies at VC-231. These are (a) Local, (b) Reference, (c) E-predicted, (d) H-predicted coherencies.

0.8 이상의 매우 높은 편으로 양질의 자료임을 보여주고 있다.

Fig. 5는 원거리기준점 자기장을 이용한 경우와 이용하지 않은 경우의 임피던스 추출을 통하여 얻은 주파수에 따른 겉보기 비저항 및 위상의 예를 나타내고 있다. 원거리기준점을 이용하지 않은 경우에도 0.1 Hz 근방을 제외한 주파수 대역에서 비교적 부드럽고 연속적인 양질의 겉보기비저항 및 위상 곡선을 얻을 수 있었으나, 원거리기준점을 사용한 경우에는 이 주파수 대역뿐 아니라 거의 모든 주파수 대역에서 잡음들이 잘 제거되어 양질의 겉보기비저항 및 위상 자료를 추출하였음을 확인할 수 있다. Fig. 3, 4, 5에서와 같이 본 탐사에서 대부분의 측정에서 이와 같이 대체로 양질의 자료를 획득할 수 있었으며, 또한 원거리기준점 자기장을 이용하여 임피던스 추정 신뢰도를 높일 수 있었다.

**주향 분석**

원거리기준점을 이용한 임피던스 추정 방법에 의하여 모든 측정에서 겉보기비저항 및 위상 자료를 추출한 후 주향 분석 등 기본적인 자료 해석을 실시하였다. Fig. 6과 같이 동서 방향으로 처음과 마지막 MT 측정점을 잇는 직선들인 Vic-Line01, Vic-Line02, Vic-Line03 등의 세 개의 직선을 설정하였으며 MT 측정점들을 이 직선에 투영하였다. Fig. 6에서와 같이 Vic-Line01은 북쪽 방향에서 약 95° 시계방향이며 길이는 약 170 km로 54개의 MT 측정점을 포함하고 있고, Vic-Line02는 북쪽 방향에서 약 85°, Vic-Line03은 약 84° 시계 방향으로 각각 14개 및 13개의 측정점을 포함한다.

Fig. 7(a), (b), (c)는 각 MT 측정점에서 얻은 자료로부터 추정된 지질 주향 방향을 도시한 것이다. 일반적으로 지하 구조는 완전한 2차원이 아니어서 자료로부터 추정되는 지질 주향은 측정별로 혹은 주파수별로 다르게 나타나기 때문에 하나의 주향을 가정하기는 쉽지 않은 문제이다. 그러나, 측선 Vic-Line01에 포함된 측정점들의 주향을 분석해보면 Fig. 7(a)와 같이 0~35 km, 40~90 km, 100~120 km, 120~170 km로 크게 나누어 볼 수 있는데, 40~90 km 구간에서 주향은 전 주파수 대역에서 대체로 -20°~20° 사이 13로 남북방향이 우세함을 보여주고 있으며 120 km 이후 170 km까지는 40°~65° 사

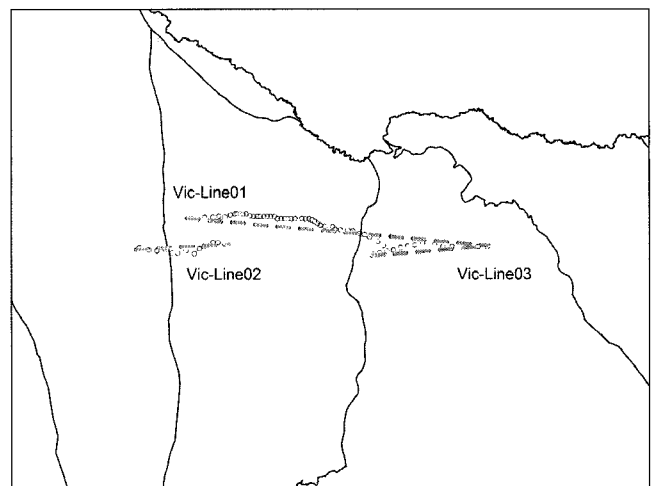


Fig. 6. The profile lines of Vic-Line01, Vic-Line02, and Vic-Line03 for 2D analysis of MT data.

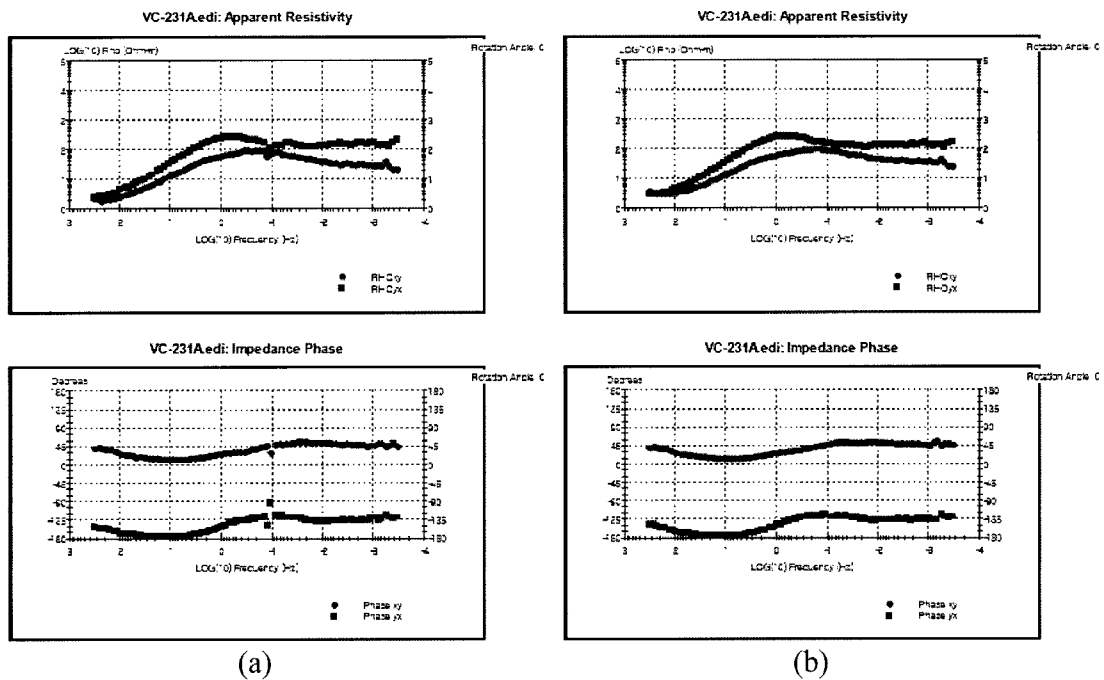


Fig. 5. Apparent resistivity and phase curves with frequencies after robust processing of the time series for site VC-231. Estimation of apparent resistivity and phase with (a) single site processing, and (b) remote reference processing with RR\_SWAN which improves the continuity of the sounding curves.

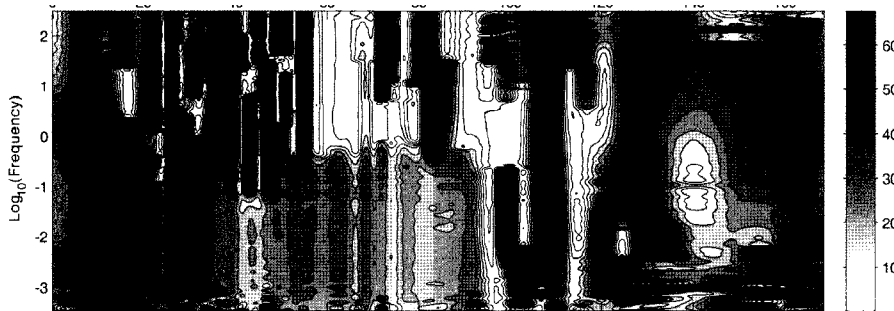
이 (혹은  $-50^{\circ} \sim -35^{\circ}$ )의 북서-남동 혹은 북동-남서 방향이 우세함을 알 수 있다. 또한 0~35 km 구간은 고주파수에서는 남북 방향이, 저주파수 대역에서는 북동 혹은 남서 방향이 우세하며, 또한 100~120 km 구간에서는 이 두가지 주향이 교대로 나타남을 볼 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 7(d)와 같이 자력 이상도에서도 남북 혹은 북동-남서 방향으로 연속성을 가짐을 알 수 있다. 따라서, 위의 주향 분석으로부터 MT 탐사 지역의 주향은 크게 보아 남북 혹은 남동-북서 방향으로 본 연

구에서 설정한 2차원 해석은 타당성을 갖는다고 볼 수 있다.

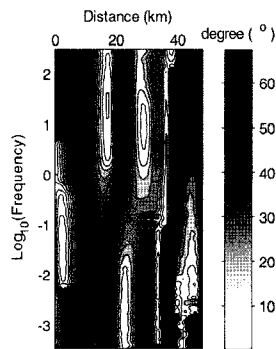
### 현장 자료의 2차원 역산 해석

#### 2차원 역산

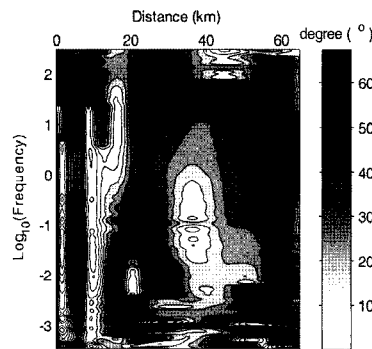
주향 분석으로부터 탐사 지역의 지질 주향은 크게 남북 방향으로 추정되어 본 연구에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 이를 가로지르는 동서 방향 측선들을 설정하여 MT자료에 대한



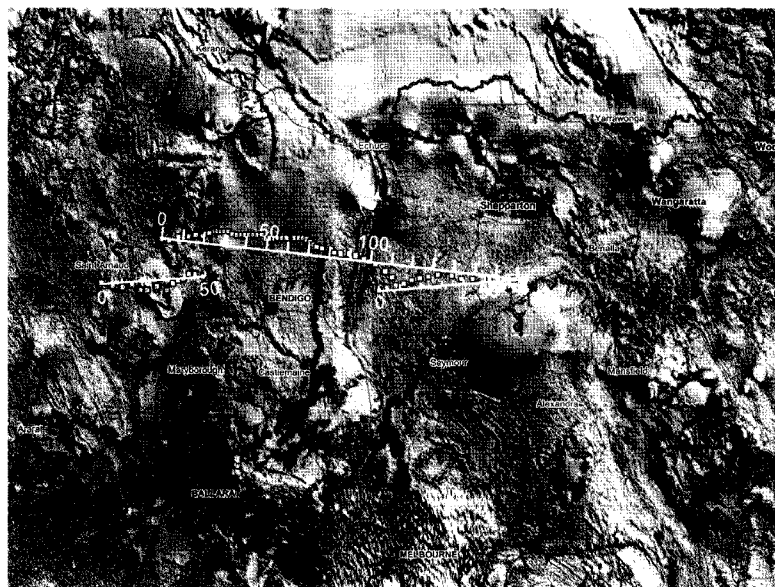
(a) Vic-Line01



(b) Vic-Line02



(c) Vic-Line03



(d)

Fig. 7. The estimated strike direction from the MT data along (a) Vic-Line01, (b) Vic-Line02, and (c) Vic-Line03 and (d) total magnetic intensity map (from GeoVic online). Regional strike direction from magnetic intensity map well matches the ones estimated from MT data.

2차원 역산을 수행하였다. 모든 자료들은 임피던스 회전 (impedance rotation) 변환을 이용하여 TM (transverse magnetic; electric field parallel to the strike) 및 TE (transverse electric; electric field parallel to the strike) 모드로 분리하여 역산에 이용하였다. 역산을 위하여 본 연구에서는 기본적으로 ACB (Active Constraint Balancing; Yi *et al.*, 2002)법을 사용

한 2차원 MT 역산(Lee *et al.*, 2008)을 이용하였으며, 역산 해의 비유일성에 의한 모호성을 줄이고 역산 모델에 대한 해석의 신뢰도를 높이기 위하여 이에 추가하여 서로 다른 알고리즘에 기반한 두가지 역산 방법을 선택적으로 사용하여 그 결과를 상호 비교하였다. 이에 보조적으로 사용된 알고리즘은 ABIC법을 사용한 역산(Uchida, 1993) 및 NLCG법(Rodi and

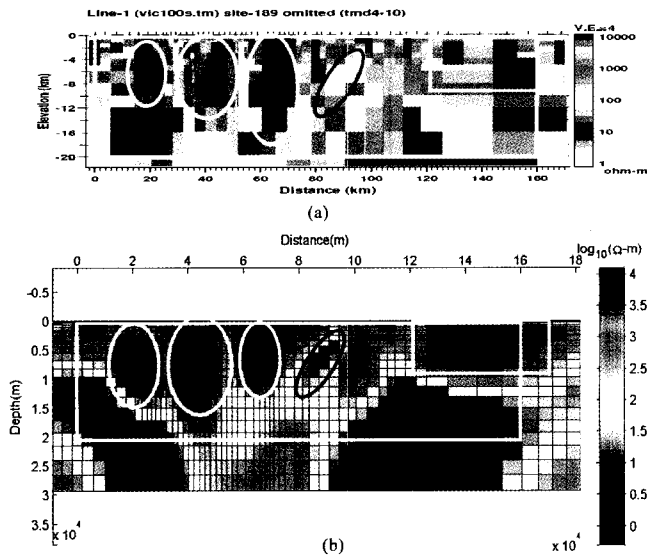


Fig. 8. 2-D inversion results using (a) ABIC and (b) ACB algorithms for TM mode data of Vic-Line01.

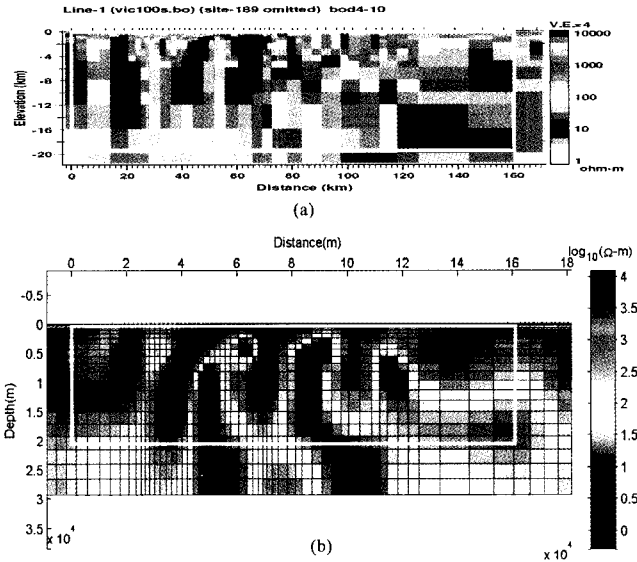


Fig. 10. 2-D inversion results using (a) ABIC and (b) ACB algorithms for both TM and TE mode data of Vic-Line01.

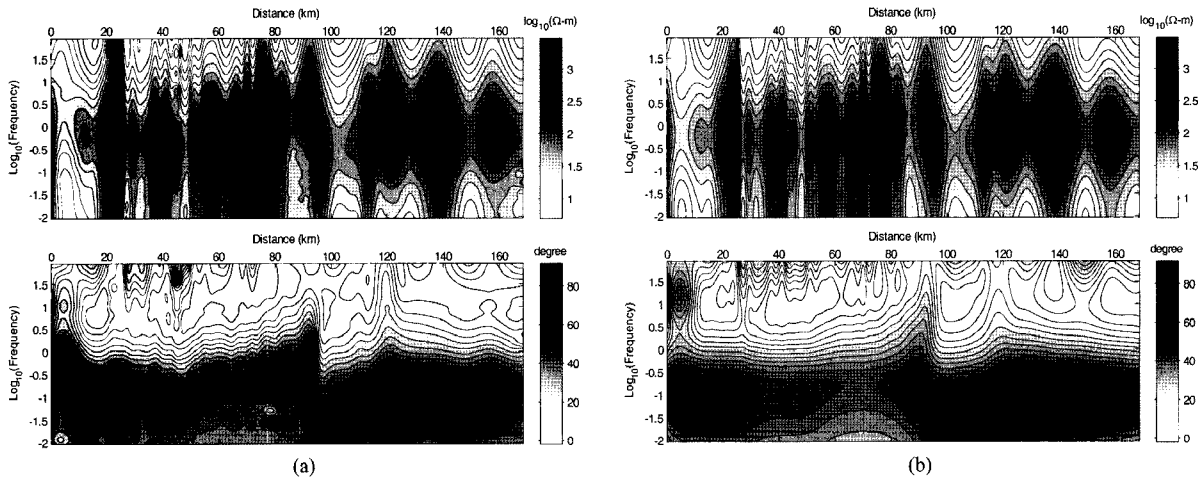


Fig. 9. Comparison of (a) the observed, (b) the calculated apparent resistivity and phase, and (c) a Tikhonov objective functional curve from 2D inversion using ACB algorithm.

Mackie, 1993)에 기반한 Geotools MT 상업용 소프트웨어 패키지이다. 역산에 사용된 주파수는 총 27개이며 주파수 성분은 0.0092, 0.0134, 0.0183, 0.0269, 0.037, 0.054, 0.073, 0.107, 0.146, 0.215, 0.293, 0.43, 0.59, 0.86, 1.17, 1.72, 2.34, 3.4, 4.7, 6.9, 9.4, 13.7, 18.8, 27.5, 40, 66, 97 Hz이다. 위상 자료도 역산에 포함하였으며 ACB법을 이용한 경우 최대 및 최소 평활화 상수를 각각 0.5와 5로 설정하였다.

Fig. 8은 TM 모드를 이용하여 얻은 Vic-Line01 축선에 대한 역산결과로 Fig. 8(a)는 ABIC, (b)는 ACB 알고리즘을 이용하여 얻은 결과이다. 하얀색 사각형으로 표시한 부분은 동일한 영역의 지하 모형을 나타내는데 대체로 ACB 알고리즘을 이용한 경우가 더 부드러운 영상을 보여주고 있다. 그러나, 두 역

산 결과를 보면 상당히 유사한 결과를 나타내고 있는데, 대체로 천부에는 그리 두텁지 않은 수 십 ohm-m의 저비저항층이 있으며, 아래에는 수 백-1000 ohm-m, 다시 그 아래에는 매우 낮은 저비저항층이 발달하고 있음을 알 수 있다. 특징적인 것으로는 타원으로 표시된 부분에서와 같이 매우 높은 비저항의 이상체가 두가지 역산 결과에 모두 영상화된 것이다.

Fig. 9는 ACB 알고리즘으로 역산한 경우에 대한 입력 현장 자료 및 역산 모델로부터 얻은 이론적인 겹보기비저항 및 위상의 가단면도, 역산과정에서 목적함수를 나타낸 것으로 역산에서의 자료 적합이 매우 잘 되었음을 보여주며, 자료 오차도 안정적으로 수렴하였음을 알 수 있다.

Fig. 10은 Vic-Line01 축선에 대한 TM 및 TE 모드에 대한

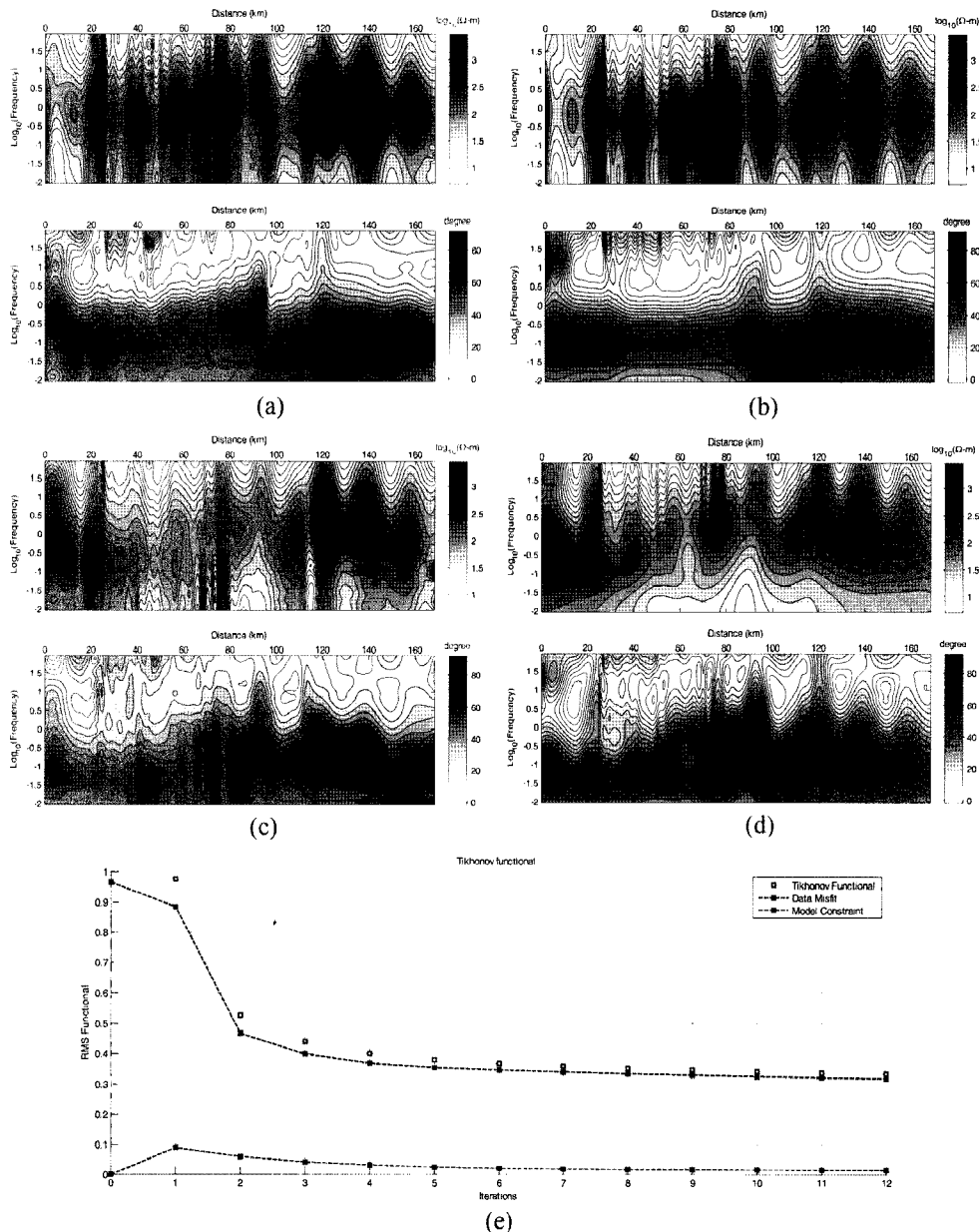


Fig. 11. Comparison of the observed (a) TM (b) TE mode, and the calculated (c) TM (e) TE mode data apparent resistivity and phase in the pseudo-section for the inverse model from the ACB algorithm in (b).



(a) ABIC, (b) ACB 알고리즘을 이용하여 얻은 복합역산 결과를 보여주고 있는데, 위에서와 같이 두 역산 결과 모두 고비저항대 및 저비저항대가 매우 유사하게 영상화되었음을 볼 수 있다. 다만, TM모드 역산과 비교하여서는 약 20 km 심도에서 저비저항대의 위치가 다르게 영상화된 것으로 나타나는데, 이는 TM 모드 자료가 수평적인 이상대를 탐지하는 데는 매우 탁월하나 대체로 심도 추정에 있어서는 약점을 가지고 있다는 사실을 상기하고 또한 지하가 완전한 2차원이 아닐 뿐 아니라 측선이 이상체의 주향방향에 완전 수직이 아닌 점등을 고려하면 이 두 역산 자료를 종합 해석하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 ACB 알고리즘으로 역산한 경우에 대한 입력 현장 자료 및 역산 모델로부터 얻은 이론적인 겹보기비저항 및 위상의 가단면도이다. TM 모드의 경우 자료 적합이 매우 잘 되었음을 보여주나, TE 모드의 경우는 전체적인 양상은 유사하지만 TM 모드보다는 저주파수에서 자료오차의 적합도가 떨어짐을 보여주고 있다. 다만, 역산에서의 수렴성은 좋은 편이었다.

한편, Fig. 12는 인접한 VC-189, VC-191에서 얻은 겹보기 비저항 및 위상을 나타내고 있다. VC-189의 자료를 살펴보면 자료에 특별한 이상이 있지는 않으나, 인접한 VC-187 및 VC-191에 비하여 고주파수 대역의 겹보기비저항이 약 1000배 정도의 차이를 보이고 있다. 이는 다른 지역이 풍화토로 덮혀 있는 것과는 달리 측점 VC-189에는 화강암으로 추정되는 암반 노두에서 매우 가까운 곳에서 측정된 것으로 이러한 지표 부근 국소적인 고비저항 불균질대에 의한 정적효과로 인하여 심

하게 왜곡된 것으로 보인다. 따라서, 인접한 지역에서 너무 큰 차이가 나는 정적효과에 의해 심부 지질구조 대한 역산 결과가 왜곡될 우려가 생겨 이 자료를 제거하고 역산을 추가로 수행하였다.

Fig. 13은 VC-189자료를 제거한 후 Vic-Line01에 대한 ACB 역산 및 NLCCG역산의 결과를 비교하고 있다. Fig. 13(a), (b)는 각각 ACB 역산 및 NLCCG 역산을 이용한 TM 모드에 대한 역산이며, Fig. 13(c)와 (d)는 각각 ACB 역산 및 NLCCG 역산을 이용한 TM 및 TE 모드의 복합역산 결과이다. 천부의 전기비저항은 다소 낮아졌으나 전체적으로 고비저항대의 출현이나 심부 저비저항층의 경계가 Fig. 10과 비교하여 거의 유사한 양상을 띠고 있는 것으로 보아 두 경우가 모두 의미 있는 것으로 생각된다.

한편, Vic-Line02와 Vic-Line03에서도 위에서 설명한 같은 방법으로 역산을 실시하였다. Fig. 14는 TM모드 자료에 대한 ACB 역산 결과를 나타내고 있다. Vic-Line01와 비슷하게 두 측선 모두에서 20 km 내에서는 고비저항대가, 그 이하에서는 저비저항대가 영상화되고 있음을 알 수 있다.

**역산 결과와 지질 및 탄성파 자료와의 비교**

MT 탐사가 수행된 Victoria주 Bendigo 북부 지역은 과거 품위가 높은 금광지역으로 유명하여 그 지질적인 성인에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 구조지질학적으로 Victoria주 지질은 크게 Delamerian 및 Lachlan 습곡대(Fold Belts)로 크게 구분되며, 전체의 80% 이상이 Lachlan 습곡대에 속한다.

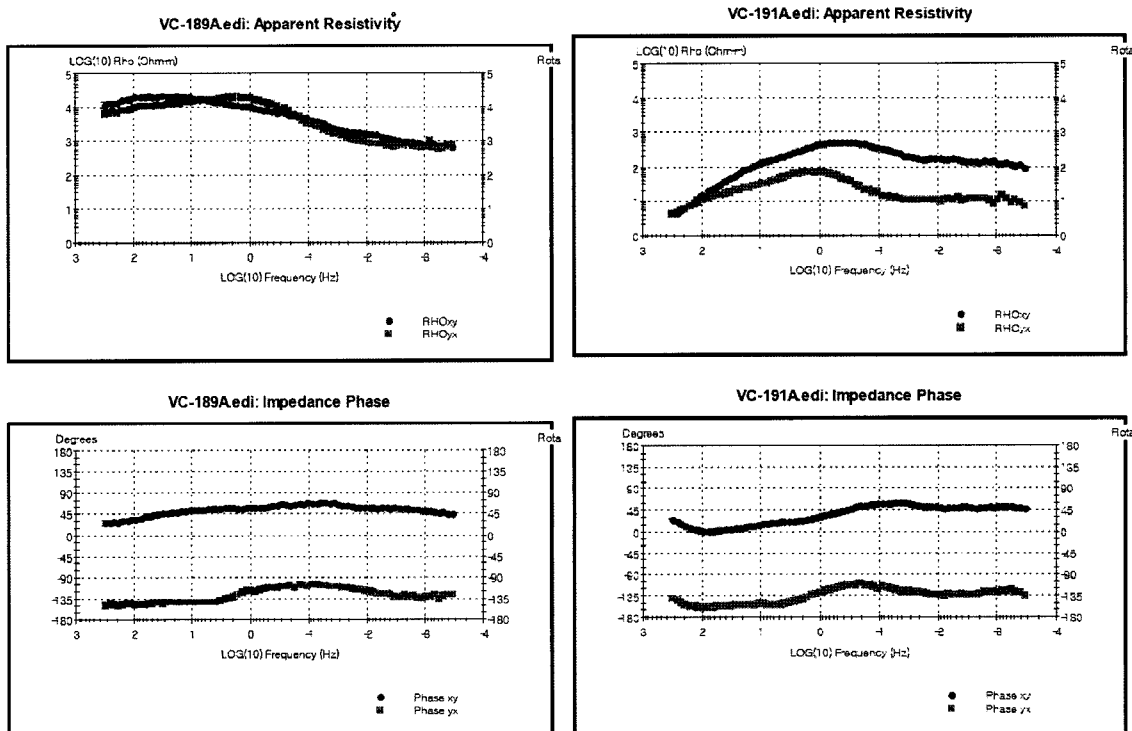


Fig. 12. MT sounding curves at VC-189, and VC-191. Apparent resistivity at higher frequency range are much bigger than those of adjacent MT sites. The data at VC-189 were removed in the inversion results shown in Fig. 13.

Lachlan 습곡대는 인접한 New South Wales주 및 Tasmania에 걸쳐 700 km의 폭과 1200 km의 주향 길이를 갖는 주로 캄브리아기에서 데본기 초기까지에 걸쳐 생성된 대규모 지질 구조이며, 특히 오도비스 말기부터 석탄기까지 많은 변형, 관입, 화산활동 및 변성 활동이 활발하였고 그 이후 백악기까지는 큰 변형없이 침식을 받았다고 알려져 있다. 특히 Victoria주의 많

은 금광들은 이 Lachlan Fold Belt에 있는 광상으로부터 유래 되었다고 한다. 이 지역은 큰 단층 등을 경계로 크게 Whitelaw Terrane과 Benambra Terrane으로 나뉘어 지며, Whitelaw Terrane은 크게 Stawell Zone, Bendigo Zone, Melbourne zone으로 나뉘어 진다. 탐사가 이루어진 지역은 Stawell Zone일 부와 Bendigo Zone, Melbourne Zone의 일부로, 서쪽의 Avoca

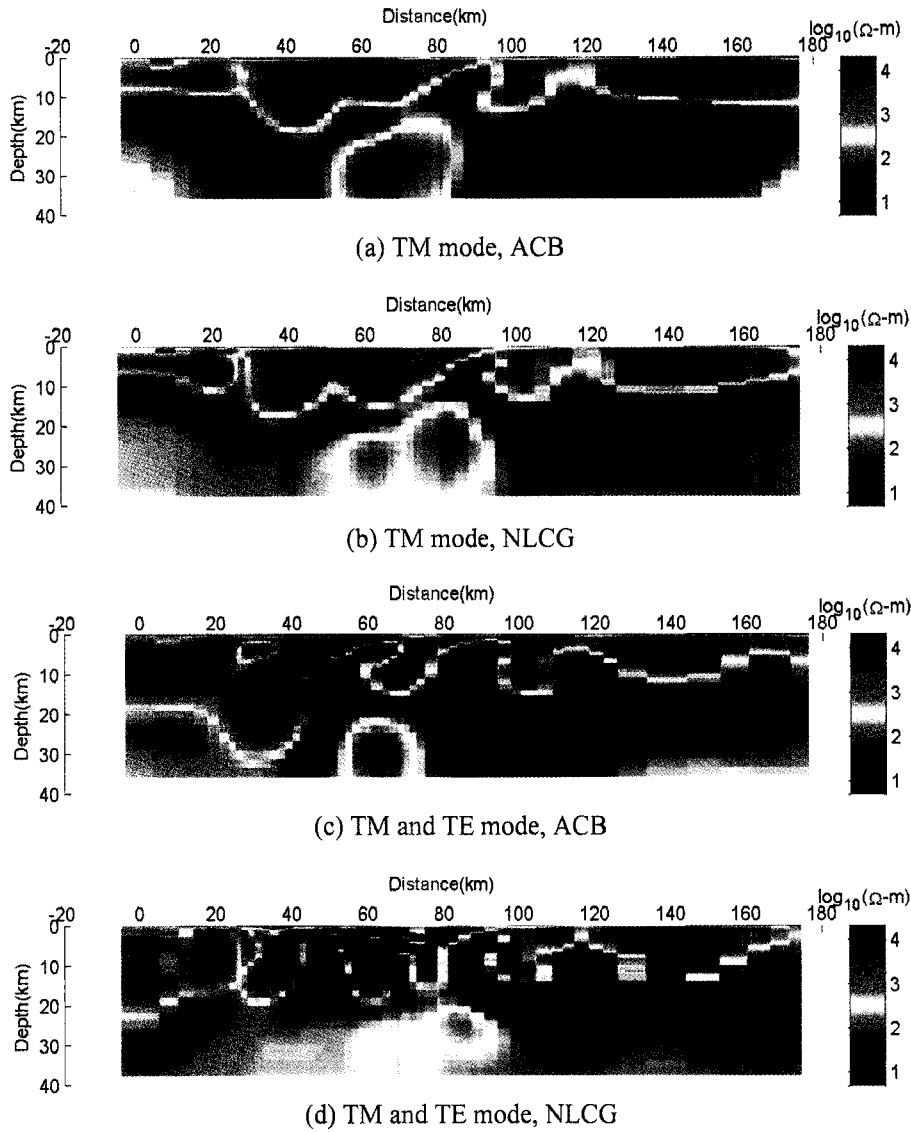


Fig. 13. Inversion results of MT data for Vic-Line01 with the data at VC-189 removed.

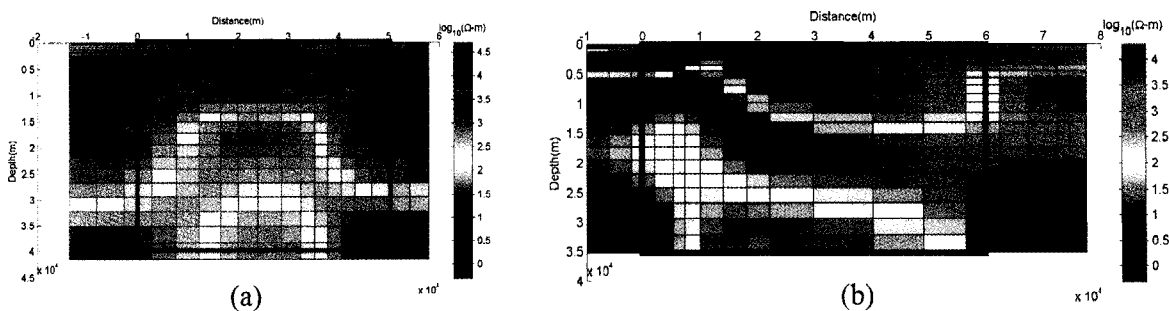


Fig. 14. 2-D inversion results for (a) Vic-Line02 and (b) Vic-Line03 using TM mode data.



Fig. 15. MT site locations overlapped with structural subdivision of Victorian geology (from GeoVic online). MT stations are located over Stawell Zone, Bendigo Zone, and Melbourne Zone.

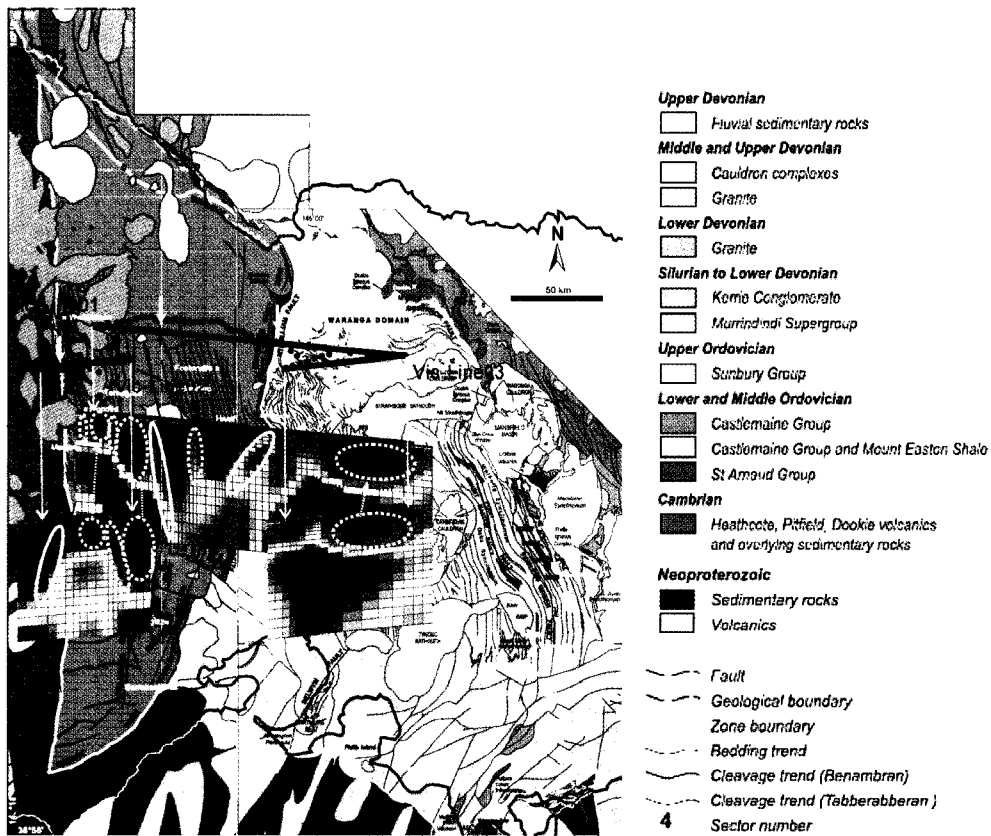


Fig. 16. Pre-Permian geology map (from GeoVic online) overlapped with the inversion result of three 2D MT profile lines. The faults are marked as arrows on the profile lines and corresponding image of faults are marked as a solid line. The dotted lines represent possible faults inferred from inversion images.

단층과 동쪽의 Mount William 단층대를 경계로 Stawell Zone, Bendigo Zone 및 Melbourne Zone으로 구분됨이 알려져 있다 (Vandenberg *et al.*, 2000). Fig. 15에 구조지질학적인 구분과 MT 측정점들을 표시하였다.

Fig. 16에 페름기 이전의 지질(GeoVic online, <http://www.dpi.vic.gov.au>)과 앞에서 언급한 MT 역산 결과를 탐사 지역의 지질도와 같이 펜스다이어그램으로 나타낸 것이다. 지질도에는 이미 확인된 단층들이 검은 실선으로 표시되어 있는데 MT 역산 결과에서도 하얀 화살표로 표시된 단층들의 영상이 잘 나타나 있음을 알 수 있다. 실선 타원으로 표시한 부분과 같이 대규모 단층대인 Avoca 단층, Heathcote 단층, Mount William Fault 등의 위치와 비저항의 경계가 잘 일치함을 알 수 있다. 노란 점선 타원으로 표시한 부분은 지질도에서는 나타나 있지 않으나 전기비저항 값이 매우 높은 점으로 보아 대본기의 화강암(Vandenberg *et al.*, 2000)이 영상화된 것으로 생각되며 이것과의 전기비저항 경계는 단층군 혹은 암상 경계와 같은 불연속면으로 해석할 수 있는 부분이라 판단된다. 또한 하얀 점선 및 화살표로 표시한 바와 같이 10 km 정도까지 발달한 고비저항대들은 각 세 축선의 역산 결과에서 뚜렷한 연장성을 보여주고 있으며, 이 주위의 불연속면도 연장성을 띠고 있는

것으로 보인다.

한편 Fig. 17(a)는 반사법 탄성파탐사 결과로부터 해석된 반사면을 나타낸 것이다(Korsch, 2008). 지질 암상과 이를 구분하는 단층이나 지질경계로 해석된 부분들이 실선으로 표시되어 있다. 여기서 노란 화살표로 표시된 것은 금광의 분포상 열수의 통로로 부분을 같이 나타낸 것이다. 해석된 탄성파 탐사 결과는 MT 탐사가 수행된 0~115 km 정도에 해당되는 것으로 탐사 지역 내에는 상부층에 사암, 세일 같은 퇴적암으로 구성된 Castlemaine Group이 있으며, 화강암도 분포하고 있다. 단층 혹은 지질 경계들은 대체로 동쪽 상향 방향으로 경사져 있는데, 이 지역이 대체로 동-서방향의 압력을 받은 지역으로 습곡대로 알려져 있다. 이러한 경계를 MT 탐사 역산 결과와 같이 겹쳐 그린 것이 Fig. 17(b)이다. 여기서 알 수 있듯이 탄성파 반사면으로부터 해석된 경계가 전기비저항 영상인 MT 탐사 결과와 매우 유사한 양상을 띠고 있으며, 특히 80~100 km 구간에서 경사진 지질경계가 매우 유사한 양상을 띠고 있음을 알 수 있다. 다만, 탄성파탐사에서 Castlemaine Group과 mafic volcanic rock로 구분된 경계와 전기비저항 영상이 잘 일치되지 않고 있고, 또한 60~80 km 구간의 심도 20 km 하부의 고비저항대는 탄성파탐사 해석 도면에는 나와 있지 않다.

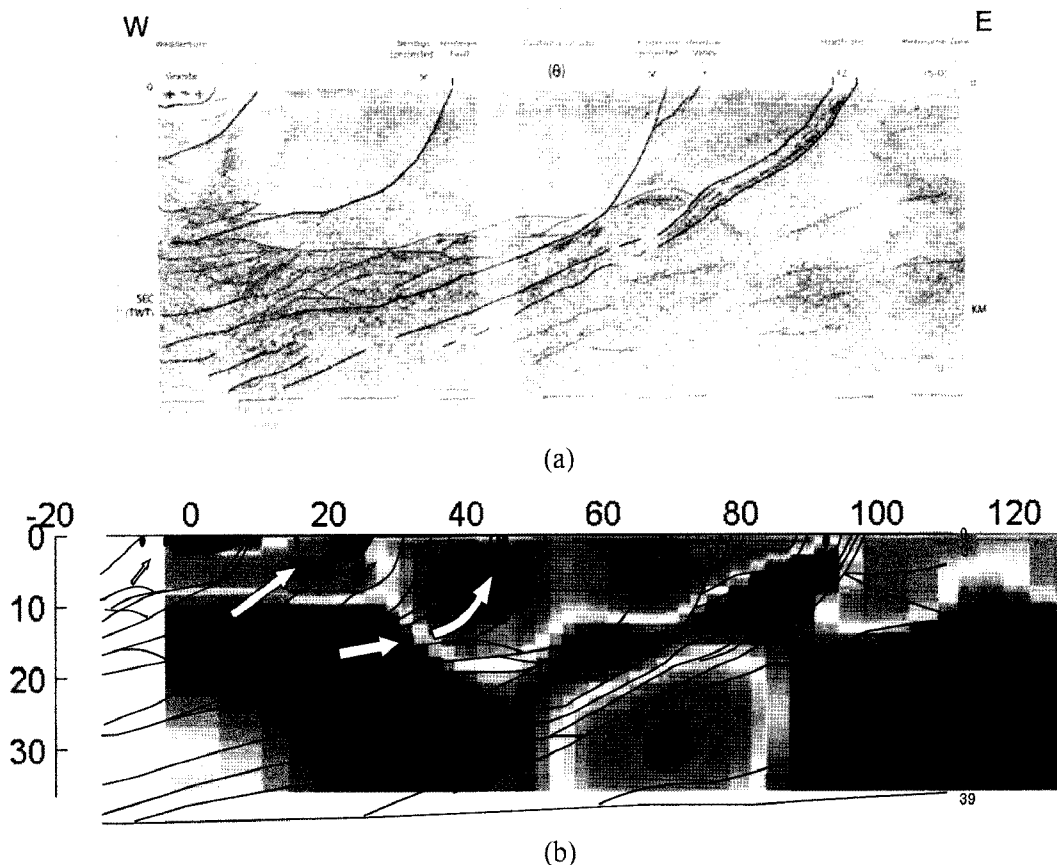


Fig. 17. Comparison of the image from 2D MT inversion along Vic-Line01 with the boundaries from reflection seismic exploration (Korsch, 2006) done in 2006 by Geoscience Victoria and Geoscience Australia. (Upper: Geologic interpretation based on reflection seismic method, Courtesy of Geoscience Victoria and Geoscience Australia).

그러나, 이는 탐사법의 원리상 탄성파탐사는 음향 임피던스에 의한 속도 차이에 의한 경계면을 영상화하고 MT 탐사는 전기비저항의 물성이 다른 것을 영상화한다는 것을 상기하면, 속도는 하부의 고결도에 따라 서로 다른 퇴적암이라도 비슷한 양상을 띠 수 있는 반면 전기비저항은 구성 암석의 성분에서 따라 다를 수 있고 또한 그 대비도 더 클 수 있으므로 두 가지 결과의 차이를 고려하여 상호 보완적인 지질적인 해석이 있어야 할 것으로 생각된다.

## 결 론

호주 Victoria주 북부 Bendigo 지역에서 심부 지질 구조를 조사하기 위하여 MT 탐사를 수행하였다. 총 11일에 걸쳐 71개의 측정 및 원거리기준점에서 MT 시계열을 획득하여 원거리 자기장 자료를 이용한 로버스트 자료 처리 등을 거쳐 양질의 임피던스를 추출하였으며, 2차원 역산 알고리즘을 이용하여 전기비저항 영상을 획득하였다. MT 탐사에서 얻은 전기비저항 영상을 이 지역의 지질도와 비교한 결과 이미 알려진 큰 단층대가 명확히 영상화되었음을 알 수 있었으며, 그 연장성을 확인하였다. 또한, 이번의 MT 탐사는 동일한 측선에서 수행되었던 반사법 탄성파탐사와의 비교 해석이라는 큰 의미도 있는데, MT 탐사 결과를 반사법 탄성파탐사 자료 및 그 해석 결과와 비교한 결과 탄성파탐사에서 확인된 반사면과 전기비저항 영상이 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 다만 전기비저항 영상과 탄성파 반사면이 일치하지 않는 부분은 두 탐사법의 물리적 특성의 차이에 의하여 기인한 것으로 추정되며, 따라서 이를 고려한 상호 보완적인 지질적인 해석이 필요할 것으로 생각된다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지열수 자원 실용화 기술 개발'의 지원으로 이루어졌으며, 현장 탐사는 Geoscience Victoria 및 Geoscience Australia의 지원에 의해 이루어졌습니다. 또한, 비교를 위한 역산 결과 정리에 도움을 주신 이춘기 박사께 감사드립니다.

## 참고문헌

- ABARE, Australian Commodity Statistics, 2004: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, Canberra, 2005, pp. 277.
- Baker, G., 2005, 'Gold! Gold to Australia! Gold!' Australian gold statistics, Parliament of Australia, Research Note, 22, 2005-06, <http://www.aph.gov.au/library/pubs/rn/2005-06/06rn22.htm>.
- Chave, A. D., Thomson, D. J., and Ander, M. E., 1987, On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions, *Journal of Geophysical Research*, **92**, B1, 633-648.
- Churcher, T., 2006, Bendigo A city built on gold: Economic study confirms history will repeat, *Discovery: Victoria's Earth Resources Journal*, 13-14.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, **44**, 53; DOI:10.1190/1.1440923.
- Egbert, G. D., and Booker, J., R., 1986, Robust estimation of geomagnetic transfer functions, *Geophysical Journal International*, **87**, 173-194.
- Korsch, R., 2008, Deep seismic transect across central Victoria, [http://www.dpi.vic.gov.au/DPI/nrenmp.nsf/9e58661e880ba9e44a256c640023eb2e/4be7a2bca89a728bca25735d000-b3af6/\\$FILE/Deep\\_Seismic.pdf](http://www.dpi.vic.gov.au/DPI/nrenmp.nsf/9e58661e880ba9e44a256c640023eb2e/4be7a2bca89a728bca25735d000-b3af6/$FILE/Deep_Seismic.pdf).
- Lee, S. K., Kim, H. J., Song, Y., and Lee, C.-K., 2008, MT2DInvMatlab-A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion, *Computers & Geoscience*, in press.
- Rodi, W., and Mackie, R. L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion, *Geophysics*, **66**, 174-187.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **45**, 841-858.
- VandenBerg, A. H. M., Willman, C. E., Maher, S., Simons, B. A., Cayley, R. A., Taylor, D. H., Morand, V. J., Moore, D. H., and Radojkovic, A., 2000, The Tasman Fold Belt System in Victoria, Geological Survey of Victoria Special Publication.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.