

(뒷면)

(측면)

(앞면)

<p style="text-align: center;">주 의 (편집 순서8)</p> <p style="text-align: center;">(16 포인트 고딕체)</p> <p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">극지 자기지전류 탐사기술 개발</p> <p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">(주)지오룩스</p> <p style="text-align: center;">↑ 5cm ↓</p>	<p style="text-align: center;">↑ 7cm ↓</p> <p style="text-align: center;">극지 자기지전류 탐사기술 개발 (20 포인트 중고딕체)</p> <p style="text-align: center;">Development of magnetotelluric exploration technique for polar environment (16 포인트 명조체)</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.5;">KORPI</p> <p style="text-align: center; font-size: 3em; opacity: 0.5;">극지연구소</p> <p style="text-align: center;">(주)지오룩스 (20 포인트 중고딕체)</p> <p style="text-align: center;">↓ 7cm ↑</p>
--	---	---

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측” 과제의 위탁연구 “극지 자기지전류 탐사기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 이 원 상

위탁연구기관명 : (주)지오룩스

위탁연구책임자 : 임 기 영

위탁참여연구원 : 이 희 순

“ : 정 유 정

“ : 이 승 희

“ : 고 지 혜

“ : 안 태 규

“ : 심 민 철

“ : 박 세 연

“ : 한 상 진

“ : 노 명 근

“ : 이 은 경

“ : 김 형 주

“ : 김 세 원

“ : 장 윤 경

요 약 문

I. 제 목

극지 자기지전류 탐사기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

- 남극 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드 빙권변화를 지속적으로 관측하고 변화 원인을 규명하여 향후 해수면 변화 예측 정확성 향상을 도모하고자 함
- 극지 지하 지질구조 연구 및 극지 자원개발에 응용하고자 함
- 따라서 이를 위한 주요 연구로, 극지 자기지전류 탐사 기술을 개발함으로써 지질·환경적인 한계를 해결할 수 있는 연구를 수행하고자 함

2. 연구개발의 필요성

- 해수면 고도 변화는 우리나라뿐만 아니라 각 나라에서 관심을 가지고 있는 전 지구적인 문제로서 사람들의 거주 공간 및 생활과도 밀접한 관련이 있음
- MT 탐사 기술 기반 관측은 해수면 고도 변화 모델링에 필요한 다양한 변수의 장기 관측이 무엇보다 중요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 극지 MT 탐사기술의 국내외 연구개발 동향 조사

- 멜번 화산 하부 마그마 거동 규명을 위한 MT 탐사 기술개발 연구
- 극지 환경 현장 적용을 위한 MT 탐사 및 모니터링 시제품 개발 연구
- 극지 환경에서의 MT 모니터링에 적합한 전기장 전극개발 연구
- MT 데이터 가공 및 처리를 위한 전용 소프트웨어 개발 연구
- 빙권 변화 및 거동 예측의 보조자료로서 활용하기 위한 데이터 처리 및 분석 연구
- 결과적으로 극지 환경에 적용 가능한 MT 탐사 기술 개발 및 양질의 자료를 확보할 수 있는 MT 탐사 시스템 시제품을 완성하고자 함

IV. 연구개발결과

1. 극지 환경용 MT 탐사 측정 장치 시제품 개발

- 현장 적용을 위한 예비 MT 탐사 수행
- 남극 멜버른 화산 부근에서의 개발 시제품 현장 적용
- MT 모니터링 장비 시제품 제작 및 현장 적용
- MT 모니터링 장비 현장 적용 및 데이터 처리·분석 수행

2. 극지 환경용 MT 모니터링 전극 개발

- 극지 환경용 MT 모니터링 전극 온도변화 모델링 연구 수행
- 오거 방식의 극지 환경용 전극 장치 개발

3. MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 개발

- MT 모니터링 장비로부터 취득된 시계열 데이터 가공 및 프로세싱을 위한 소프트웨어 제작 수행
- 필수로 요구되는 핵심 기능 위주로 GUI 구현

V. 연구개발결과의 활용계획

- 극지환경 자기지전류 탐사 기법은 현재 매우 제한되어있는 극지에서 의 전자기적 지구물리 탐사 기법 적용 분야를 확장시켜 현재 지진과 토모그래피 등에 국한되어 있는 남극 하부 지체구조 규명에 널리 활

용

- 빙원 탐사기술은 빙하시추, 대기과학, 천문, 지구물리 등 남극 대륙 연구 수행에 활용



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Development of Magnetotelluric exploration technique for polar environment

II. Purpose and Necessity of R&D

1. Purpose of R&D

- It plans to monitor cryosphere changes in Victoria Island in Antarctica and identify the cause of cryosphere changes to increase accuracy in predicting sea level changes in the future.
- It is intended to be applied to polar underground geological research and polar resources development.
- Therefore, as a major research, we will conduct a study that can solve geological and environmental limitations by developing magnetotelluric exploration technique for polar environment.

2. Necessity of R&D

- Sea level change is an important issue all over the world. Because it is also closely related to people's living space and life.

- MT monitoring is necessary for modelling sea level changes, and long-term observations are important for investigating Cryospheric evolution of the Victoria Land, Antarctica.

III. Contents and Extent of R&D

- Research on domestic and overseas R&D trends of polar MT exploration technology.
- Development of MT exploration technology for the determination of magma behavior in the lower part of the volcano in Melbourne of the Victoria Land, Antarctica.
- Development of MT exploration and monitoring prototype for applying polar environment site.
- Development of electric field electrodes suitable for MT monitoring in polar environment.
- Optimized software development for MT data processing
- A study of data processing and analysis to use as a supplementary information for prediction of Cryospheric evolution of the Victoria Land, Antarctica.
- As a result, the study of MT exploration technique applicable to polar environment and the development of MT exploration system prototype to acquire high-quality data.

IV. R&D Results

1. Completion of development the prototype for MT exploration in polar environment.
 - Preliminary MT exploration for field application.
 - Application of development prototype near the volcano in Melbourne, Antarctica.
 - Development of MT monitoring prototype and application on test-bed.
 - Processing and analyzing MT monitoring data.

2. Development of MT monitoring electrode for polar environment.
 - Conducting a MT monitoring electrode temperature change modeling study for polar environment.
 - Development of electrode equipment of auger type for the polar environment.
3. MT monitoring data processing software development
 - Processing of time series data obtained from MT monitoring prototype.
 - Making a software GUI with focus on essential functions.

V. Application Plans of R&D Results

- MT exploration technique in polar environment is currently very limited. The application of electromagnetic geophysical exploration technique which is currently limited to seismic tomography will be expanded to be used for the analysis of the lower Antarctic tectonic structure.
- We expect that development technique is used to conduct research on Antarctica such as ice drilling, atmospheric science, astronomy, and geophysics.

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	1
제 2 절 연구개발의 범위	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	4
제 1 절 국내 연구 및 기술개발 현황	4
제 2 절 국외 연구 및 기술개발 현황	9
제 3 절 국내외 기술특허 현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
제 1 절 이론적·실험적 접근방법	15
제 2 절 연구내용 및 결과	22
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	45
제 1 절 연구개발목표 달성도	45
제 2 절 대외 기여도	48
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	49
제 1 절 연구결과의 활용 방안	49
제 2 절 추가연구 필요성 및 개발 방향	51
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	52
제 1 절 해외과학기술정보	52
제 7 장 참고문헌	54

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구 목적

- 남극 장보고 과학기지를 거점으로 빅토리아랜드 빙권 변화를 지속적으로 관측하고 변화 원인을 규명하여 향후 해수면 변화 예측 정확성 향상을 도모하고자 함
- 극지 지하 지질구조 연구 및 극지 자원개발에 응용하고자 한다.
- 따라서 이를 위한 연구로, 극지 환경용 자기지전류(Magnetotellurics, MT) 탐사 기술을 개발함으로써 지질·환경적인 한계를 해결할 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

2. 연구 필요성

- 해수면 고도 변화는 우리나라뿐만 아니라 각 나라에서 관심을 가지고 있는 전 지구적인 문제로서 사람들의 거주 공간 및 생활과도 밀접한 관련이 있다.
- 빙권 변화 진단 및 원인 규명을 위한 MT 탐사 기술 기반 관측은 해수면 고도 변화 모델링에 필요한 다양한 변수의 장기 관측이 무엇보다 중요하다.
- 또한 빙권 변화 및 거동은 현재 남극에서 연구를 수행하기 위해 과학기지에 상주해 있는 여러 연구원들의 안전과도 연관성이 있음- 따라서 이러한 빙권 변화 및 거동을 수치모델링하기 위해서는 보다 정밀하게 빙권 변화를 관측할 전문적인 기술과 시스템의 개발이 필요하다.



Fig. 1. 연구 배경 및 목표.



제 2 절 연구개발의 범위

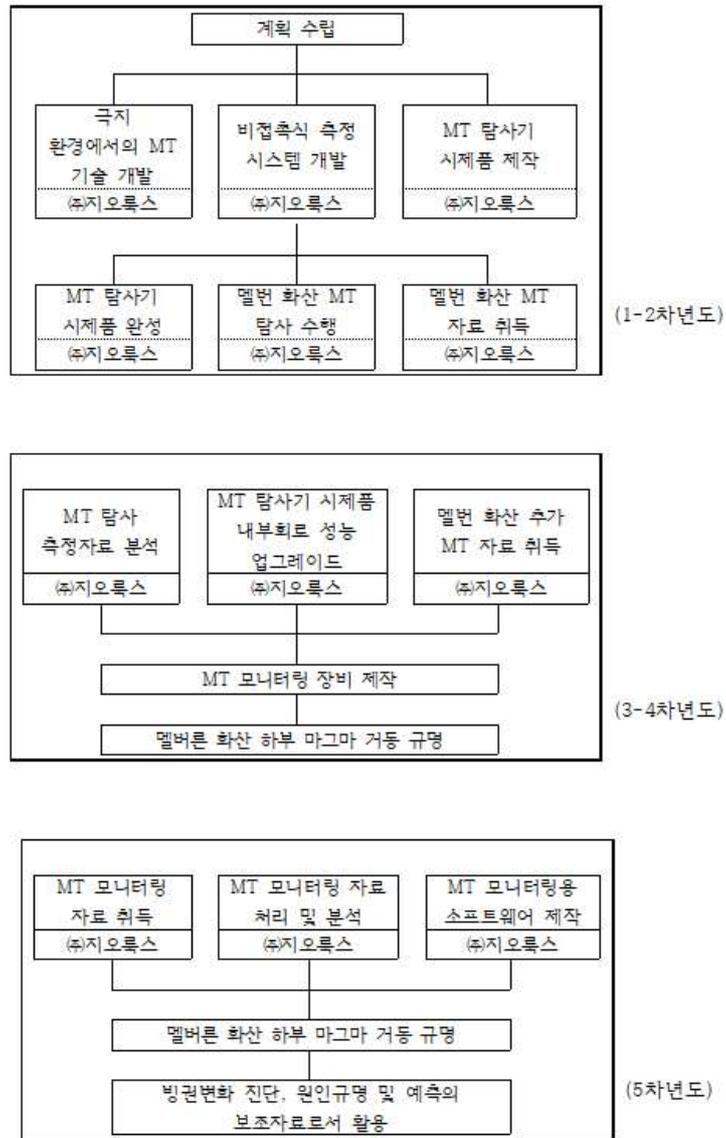


Fig. 2. 연구개발의 범위.

1. 연구 범위

- 극지 환경용 MT 탐사 및 모니터링 장치 시제품 개발
: 멜버른 화산 부근 MT 탐사 및 모니터링 수행 및 자료 취득·분석
- 극지 환경용 MT 모니터링 전극 개발
: 극지 환경에서의 전극 온도 모델링 연구
- MT 모니터링 소프트웨어 개발
: MT 모니터링 취득자료 처리 및 분석 소프트웨어

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구 및 기술개발 현황

국내의 경우 극지 환경에서의 MT 탐사에 대한 연구나 개발은 거의 전무한 상태이며, 일반적인 지역에 대한 연구만 수행되고 있는 상황이다.

- MT 탐사자료를 이용한 제주도 지역의 전도성 퇴적층 분포 연구 (이춘기 외)
- 유한요소법을 이용한 MT 탐사 자료의 모델링: 보조장 계산의 고찰
(남명진 외)
- 호주 북부 Victoria주 MT 탐사 자료의 2차원 해석 (이성곤 외)
- 이산화탄소 지중저장 Pilot 부지 선정을 위한 의성지역 MT 탐사 (이태중 외)
- MT 탐사의 3차원 지형효과 (남명진 외)
- MT 탐사자료에 나타나는 전자기적 인공잡음의 송신원 위치 추정 (이춘기 외)
- 심부 지열자원 개발을 위한 원거리 기준점 MT 탐사 자료의 3차원 역산 해석
(이태중 외)
- 가청주과수 대역 MT 탐사자료에서 원거리 기준점의 효과 (송윤호 외)
- 심부 탐사를 위한 MT 탐사 연구 (김정호 외)
- 자기지전류 탐사를 이용한 의성소분지 화산 칼데라의 지구물리학적 연구
(양준모 외)

한국지질자원연구원(KIGAM)을 중심으로 산·학 모두 양질의 MT 탐사자료 획득, MT 탐사 자료 해석 기법 등을 발전시키기 위해 많은 연구를 수행해오고 있다.

이러한 연구들을 바탕으로 극지 환경에서도 적용이 가능한 MT 탐사 기술을 개발하고, 양질의 MT 자료 취득을 위한 극지용 MT 탐사기 시제품을 개발하고자 한다. 또한 개발 기술 및 장비를 활용하여 남극 멜버른 화산에서 하부 마그마 거동 관측을 위한 MT 탐사를 직접 수행코자 한다.

1. MT 탐사자료를 이용한 제주도 지역의 전도성 퇴적층 분포 연구
(이춘기 외, 2014)

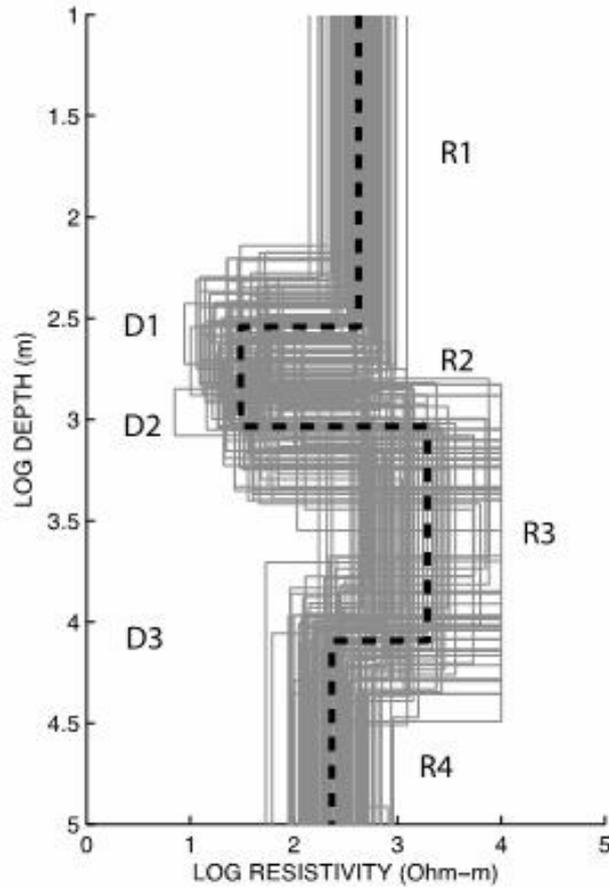


Fig. 3. 제주도 지역 하부 MT탐사 1차원 결과.

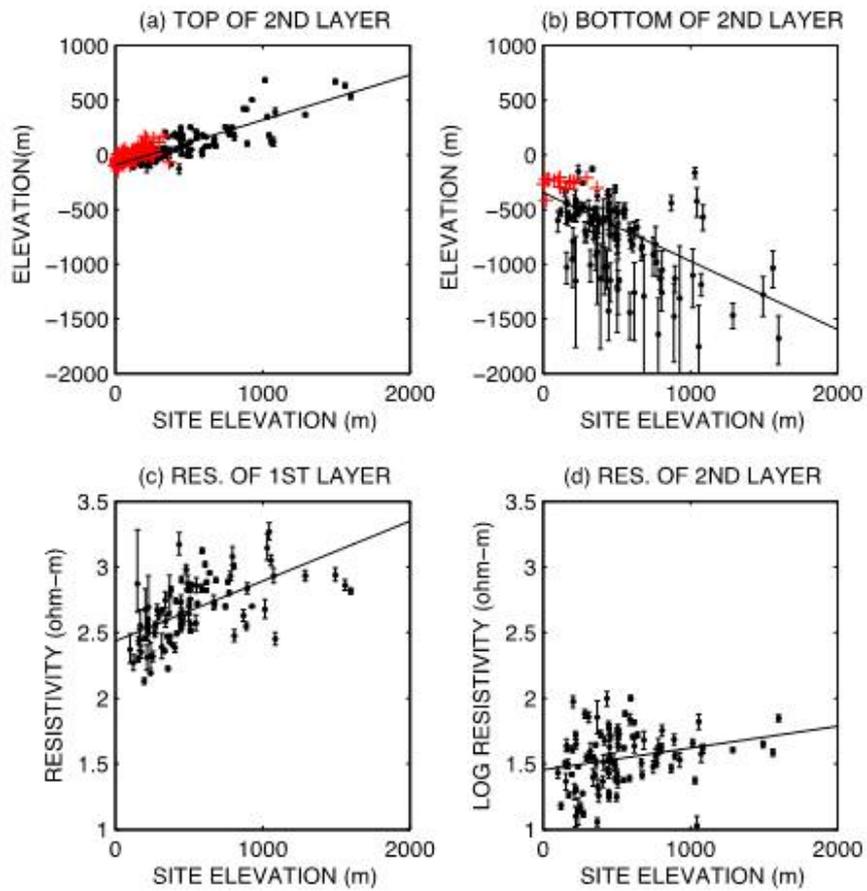


Fig. 4. 제주도 기반암 상부 첫 번째 층과 두 번째 층의 파라미터들과 표고와의 상관관계.

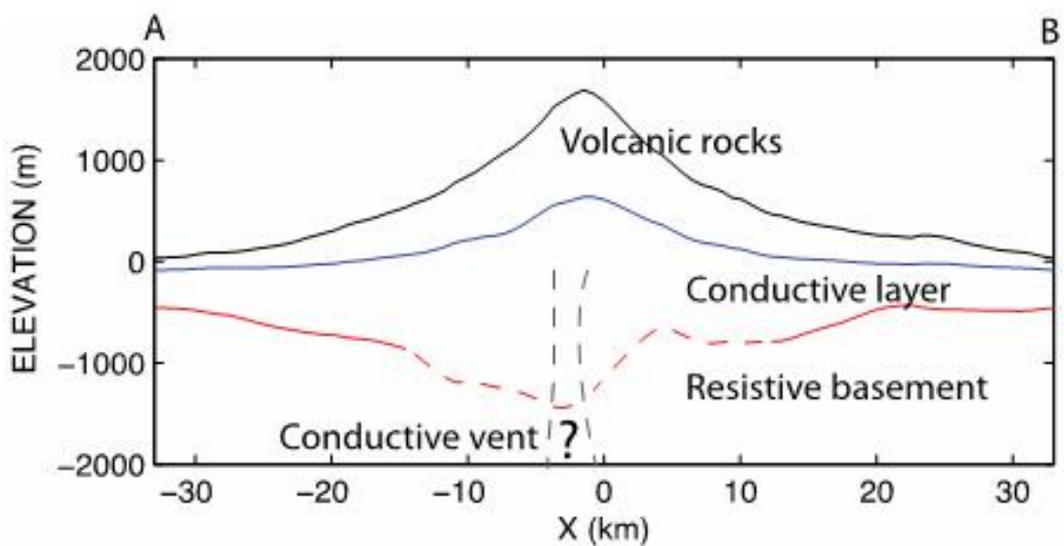


Fig. 5. 제주도 연구지역 MT탐사 수직 단면 결과.

2. 자기저전류 탐사를 이용한 의성소분지 화산 칼데라의 지구물리학적 연구
(양준모 외, 2008)

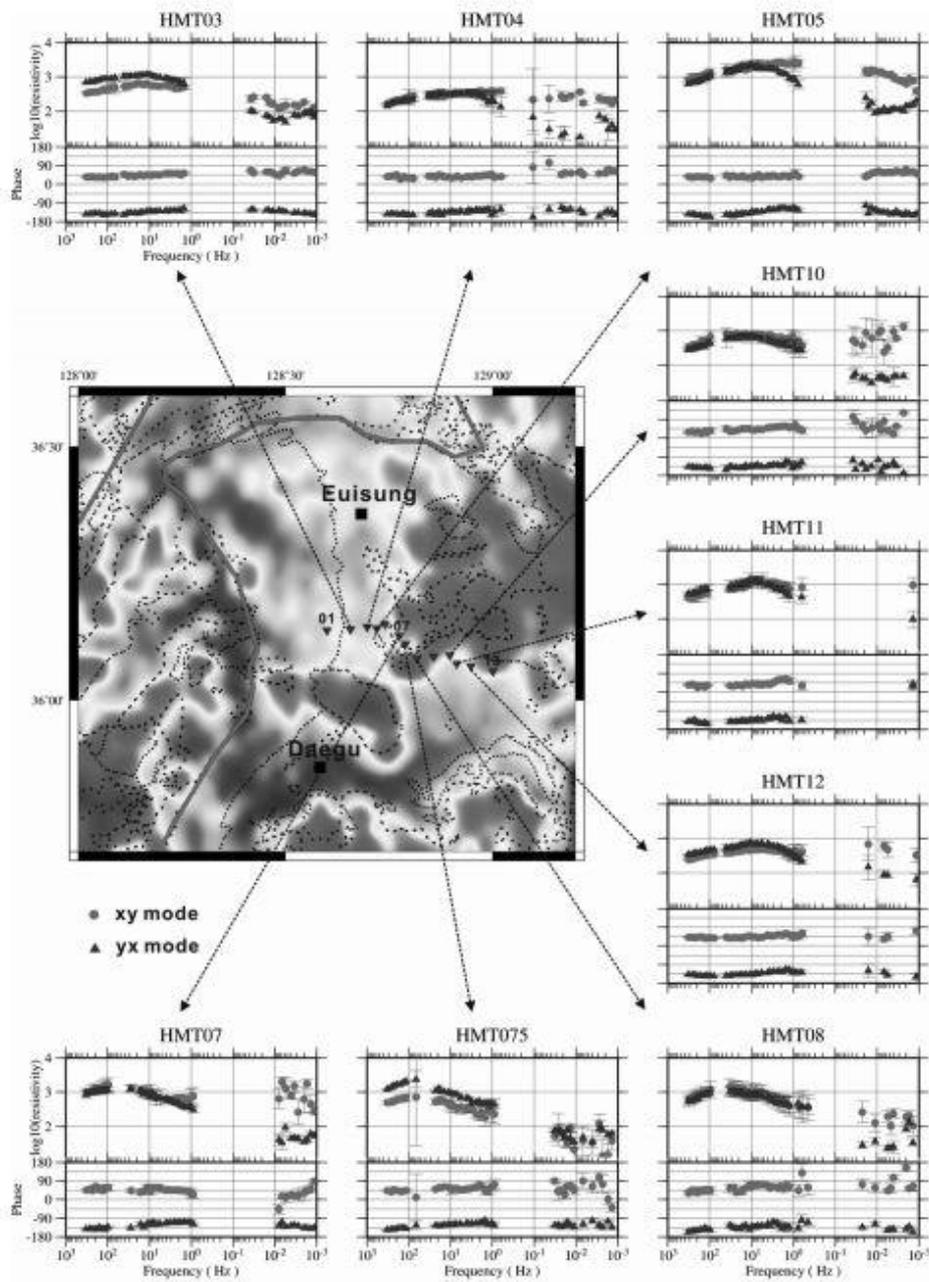


Fig. 6. 의성수분지 화산 칼데라 지역에서의 MT탐사 결과 (겉보기비저항 및 위상 곡선).

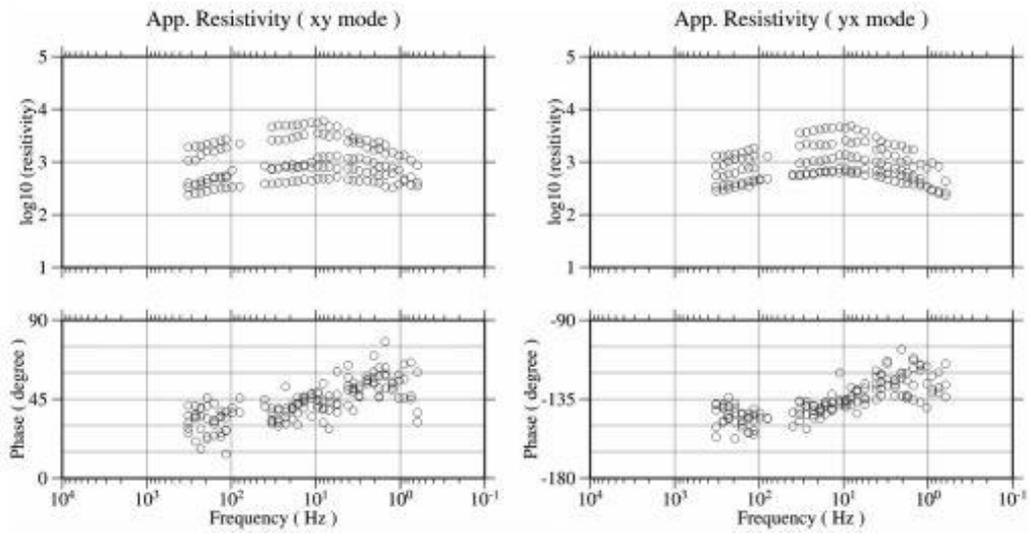


Fig. 7. 특정 측정에서의 위상 곡선과 전기비저항 곡선 비교 (xy mode, yx mode).

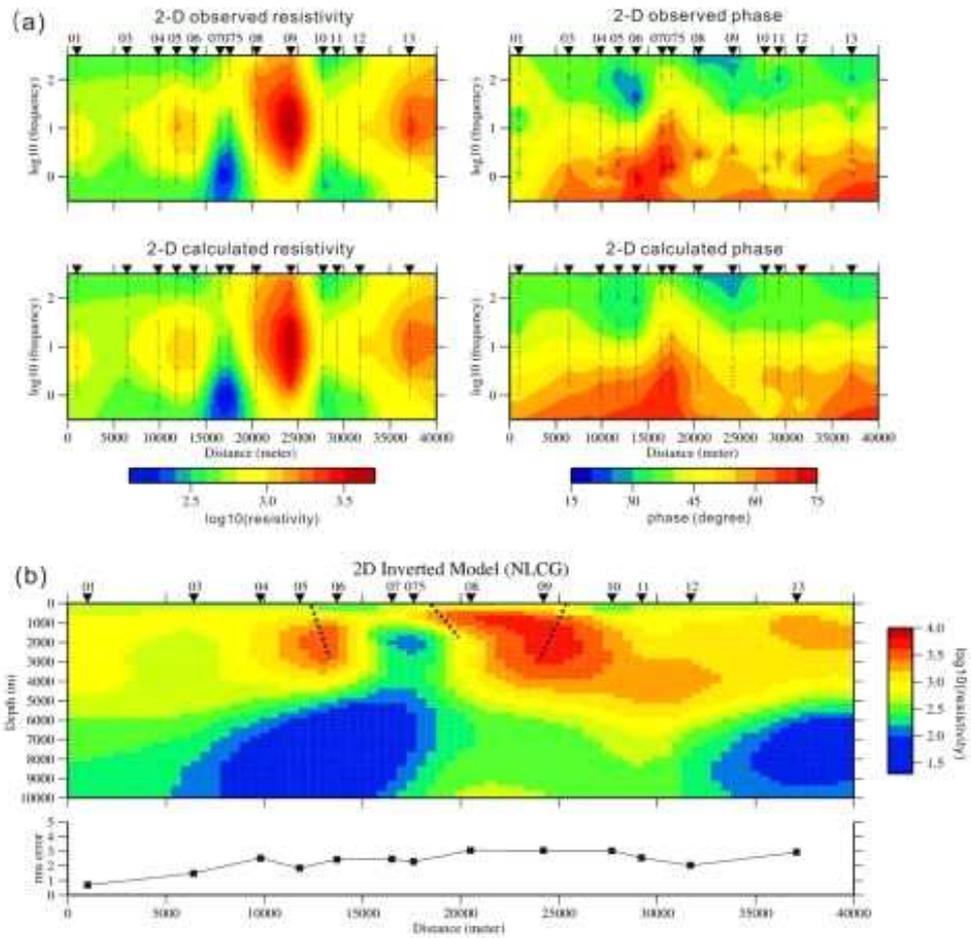


Fig. 8. MT 측점에 대한 2차원 역산 결과.

제 2 절 국외 연구 및 기술개발 현황

1. 남극대륙에서 수행된 MT 탐사는 Wannamaker *et al.* (2004) 등에 의해 연구가 본격적으로 시작되었으며, 최근 남극 로스 빙붕 지역에서 Central TransAntarctic Mountain(CTAM)을 가로지르는 MT 탐사를 수행하였다.

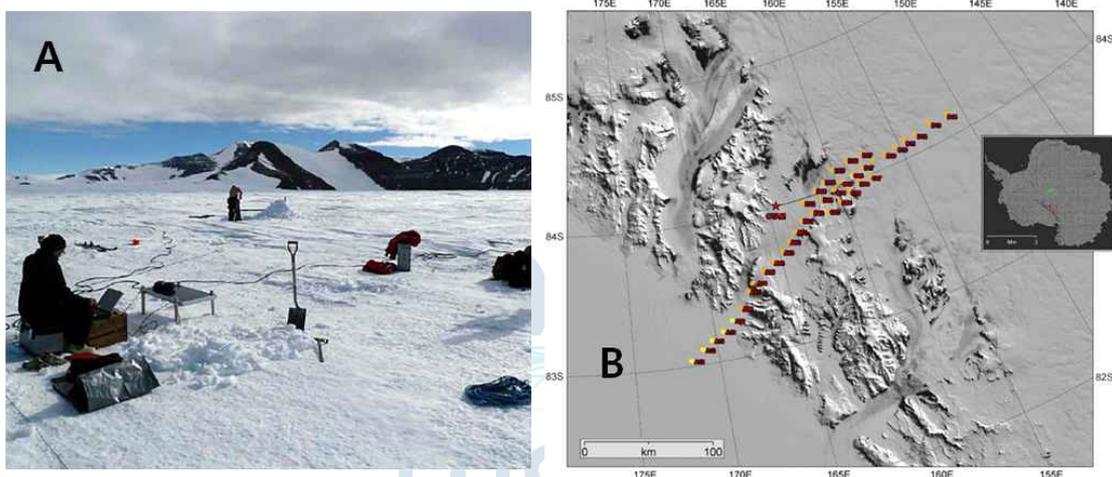


Fig. 9. 로스 빙붕에서의 자기지전류 탐사 사례(University of Utah)
(A) 빙원 위 현장 탐사 모습 (B) CTAM을 가로지르는 탐사 측선도.

2. 극지에서의 MT 탐사를 위한 연구 수행

- Wannamaker(University of Utah/Energy & Geoscience Inst.) 등에 의해 극지 MT 탐사기술 적용을 위한 2차원 비저항 역산 기법 연구를 수행하였다.

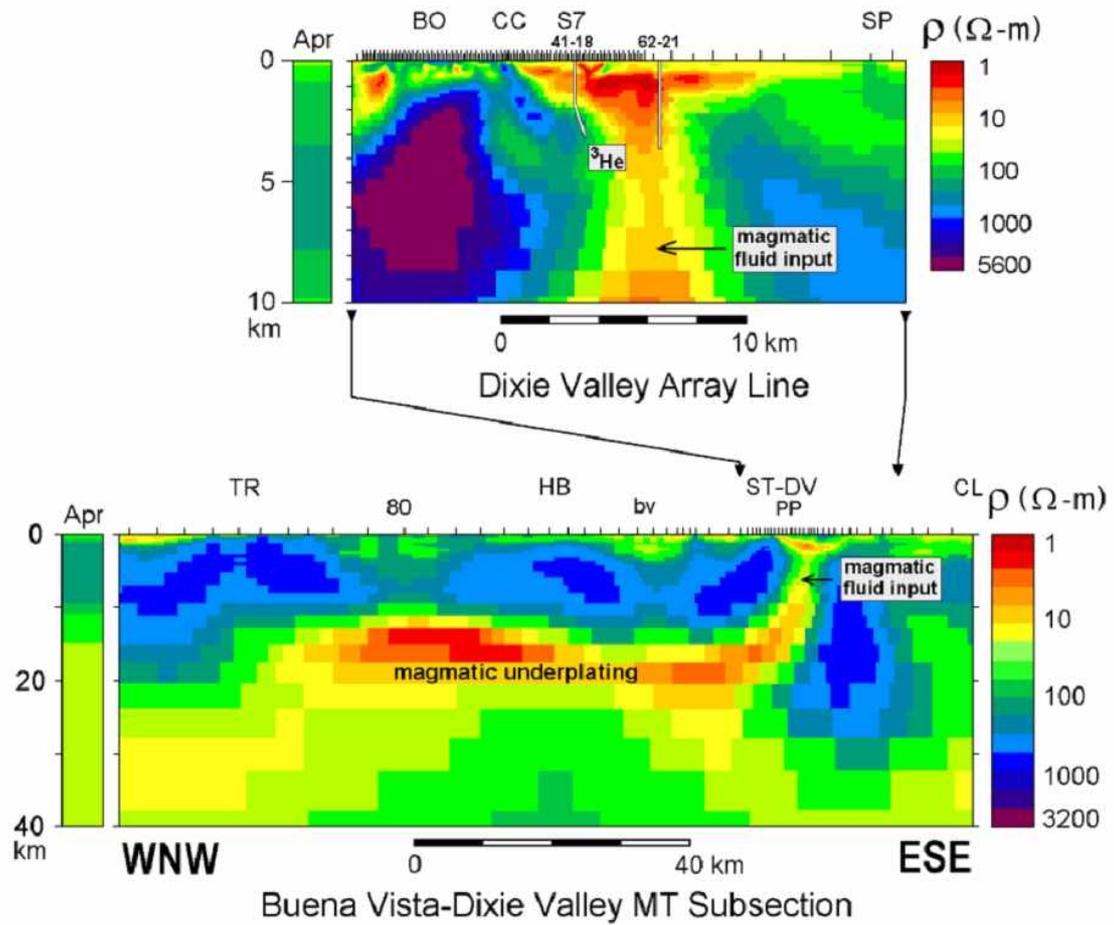


Fig. 10. 2차원 MT탐사 역산 결과 (Wannamaker et al., 2007).

3. 동남극 지역에서의 MT 탐사를 통한 지하 전기적 구조 양상 분석

- D.N. Murthy(CSIR-National Geophysical Research Inst.) 등이 동남극 지역에서 MT 탐사를 수행하여 겉보기 비저항(Apparent resistivity) 및 위상(Phase) 자료를 바탕으로 하부 층서 구조를 파악하였다.

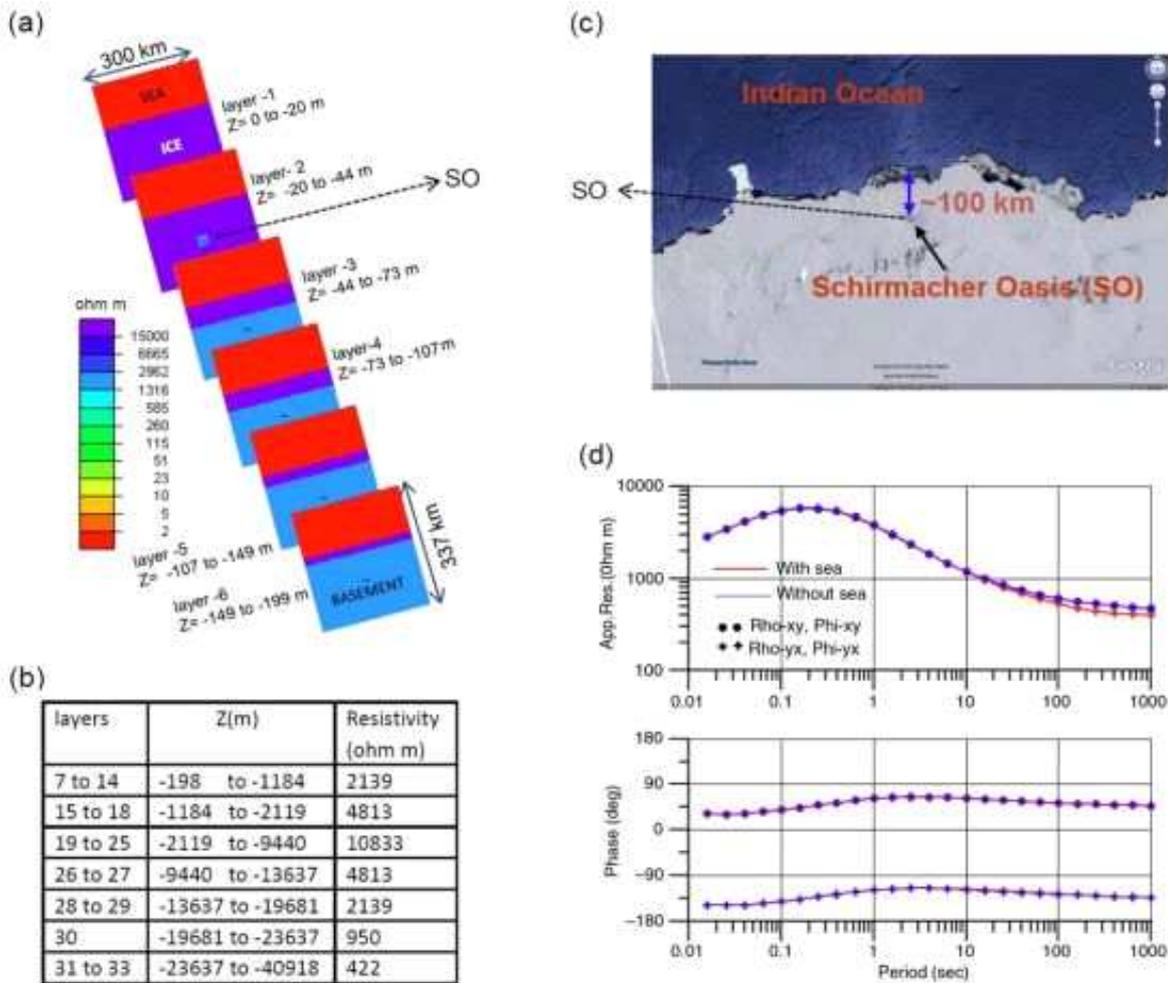


Fig. 11. 지하 전기적 구조양상 분석 결과 (a) Schirmacher Oasis에서의 3차원 모델 (b) 측정 지역에서의 하부 층별 전기비저항 (c) Schirmacher Oasis의 위치 (d) 3차원 모델로부터 도출된 MT 탐사 주파수별 전기비저항 곡선 (D.N. Murthy et al., 2013).

4. 캘리포니아 Coso 지열 지역에서의 자기지전류 탐사 및 모니터링

- Wannamaker 등에 의해 Coso 지열 지역에서의 MT 탐사 및 모니터링이 수행되었다. MT 탐사 각 측정 및 성분별 시계열 자료와 분석 결과를 통해 하부 마그마 분포 양상을 파악하였다.

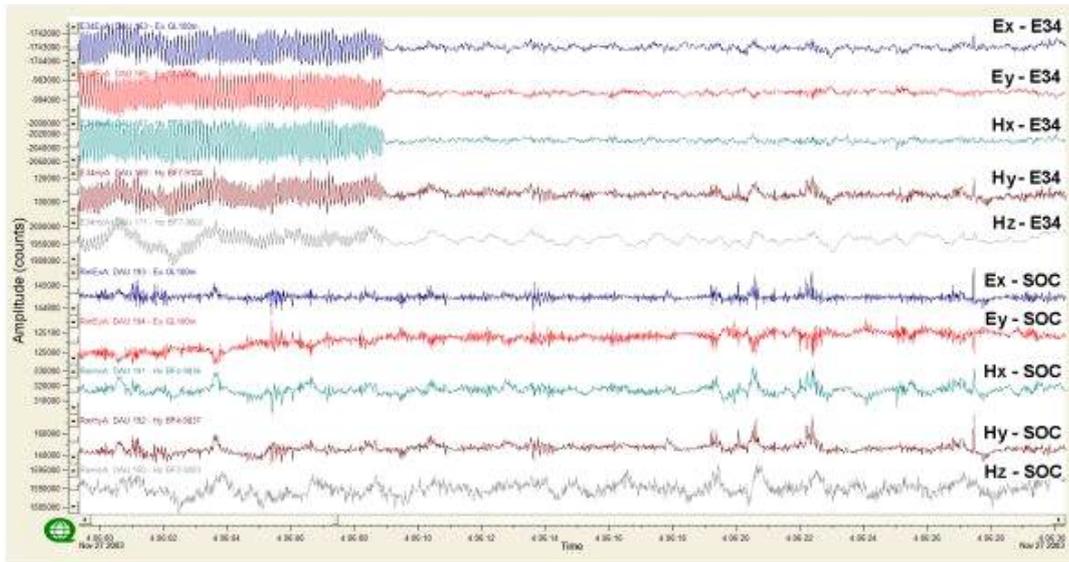


Fig. 12. MT 탐사 각 측정 및 성분별 시계열 자료.

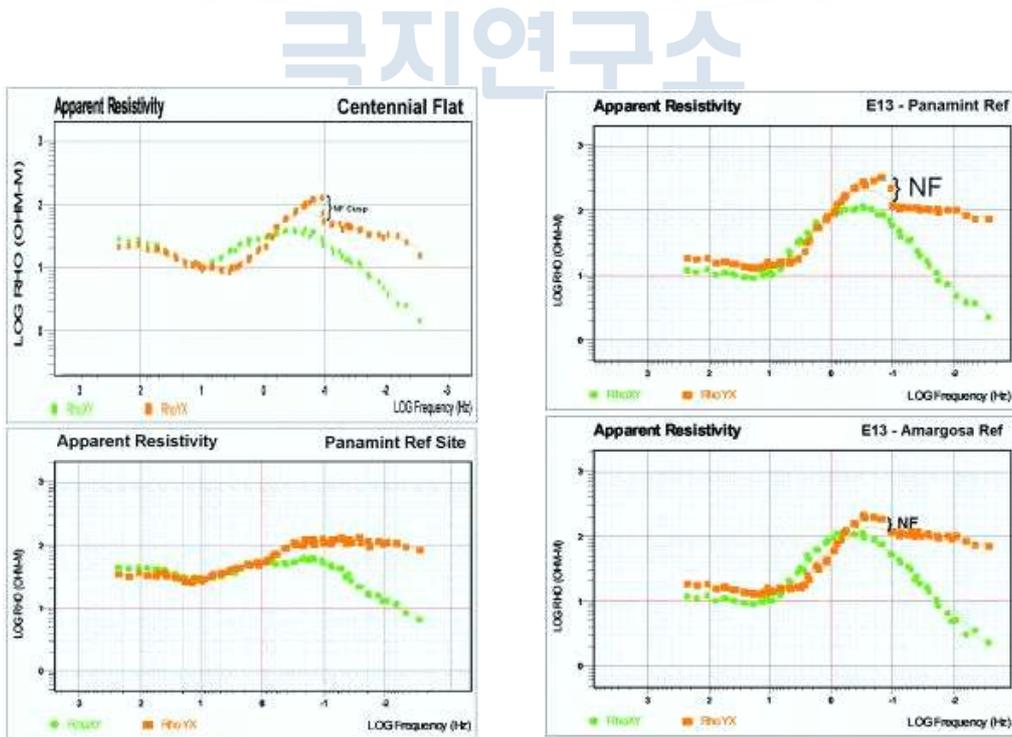


Fig. 13. Coso geothermal 지역에서의 MT 탐사 결과 (Rho XY, Rho YX).

제 3 절 국내외 기술특허 현황

1. [국내]의 경우 극저 환경에 적용은 불가하지만, 일반적인 자기지전류(MT) 탐사 및 지하 하부 전기비저항 측정 장치와 관련된 국내 특허가 일부 존재한다.

(1) 인공 및 자연 송신원 전자기파 지하탐사 장치 (출원인: (주)세코지오)

: 휴대와 설치 및 작동이 간편하며 지질, 지반 및 암반의 구조 및 물성 파악이 용이하고 지하의 공간 정보를 정확하게 탐사하는 것이 가능하도록, 1차 전자기장을 발생시켜 지하로 전파하는 송신부와, 송신부에서 전파하거나 자연적으로 발생한 1차 전자기장이 일종의 도체인 지하 매질을 만나 발생하는 유도전류에 의한 2차 전자기장의 세기와 위상을 측정하는 수신부와, 1차 전자기장과 2차 전자기장의 세기와 위상을 비교 분석하여 지하 매질의 분포, 물성 등을 분석하는 중앙처리부를 포함하고, 송신부는 10Hz~100kHz의 주파수를 발생시키는 펄스발생장치와, 펄스발생장치에 연결되어 듀얼루프형상으로 설치되고 1차 전자기장을 지하로 전파하는 송신안테나와, 전원을 공급하는 전원장치를 포함하고, 수신부는 "+"형상으로 배열되어 2쌍의 전기장을 측정하는 4개의 전기장측정기와, "L"형상으로 배열되어 설치되는 2개의 자기장측정기와, 전기장측정기와 자기장측정기가 각각 연결되며 측정된 아날로그신호를 디지털신호화하여 중앙처리부로 전송하는 데이터수집장치를 포함하여 이루어지는 인공 및 자연 송신원 전자기파 지하탐사장치를 제공한다.

(2) 송·수신부 분리 심부 전기비저항 탐사 방법 및 장치 (출원인: 한국지질자원연구원)

: 본 발명은 송·수신부 분리 심부 전기비저항탐사 방법 및 장치에 관한 것으로, 그 목적은 측정하고자 하는 전극쌍을 본체를 중심으로 서로 연결할 필요 없이 송신부와 수신부를 분리·이동하여 작업을 용이하게 하고, 작업성을 향상시키며, 모든 장비를 탐사자의 가시거리 내에 두어 작업 시 발생될 수 있는 안전사고를 미연에 방지할 수 있는 송·수신부 분리 심부 전기비저항탐사 방법 및 장치를 제공하는 것이다.

본 발명은 지하 주변 층의 전기비저항과의 대비가 큰 전기비저항을 가진 지하

구조 또는 암체를 탐사하는 것으로, 먼저 송신부와 수신부에 각각 부착된 정밀 동기시계를 서로 연결하여 두 시계가 똑같은 시간을 나타내도록 동기화(Synchronization)하고, 교류발전기로부터 나오는 교류를 송신부에서 직류로 만든 다음, 상기 동기화된 시계의 시간을 기초로 사전에 약속된 신호 형태의 직류 전류(Current)를 송신 전극쌍(C1, C2)을 통해 땅 속으로 주입한다. 이와 같이 송신부로부터 전류가 땅속에 주입되면, 수신부에서는 수신 전극쌍(P1,P2)을 통해 송신부로부터 주입된 전류가 땅 속 매질을 통과하면서 변화된 전압차(Potential difference)를 측정하여 이득(Gain)을 주고, A/D 변환기를 통해 수치신호(Digital signal)로 만들어 직렬(serial)통신선을 통해 제어/계측용 노트북 PC에 저장하여 수신되는 신호의 파형을 관찰할 수 있는 송·수신부 분리 심부 전기비저항탐사 방법 및 장치를 제공함에 있다.

2. [국외]의 경우, MT 탐사와 관련된 연구는 특허가 다수 존재하나 극지 환경과 관련된 MT 탐사의 경우 2000년대 이후부터 출원이 진행되고 있는 상황이다.



Fig. 14. 국외 특허 동향 (극지 MT 관련).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 이론적·실험적 접근방법

1. 이론적 접근방법

MT(MagnetoTelluric) 탐사는 전자탐사 중의 하나로써 현존하는 전기, 전자탐사법 중에서 가장 큰 가탐 심도를 가지고 있어 주로 심부탐사에 이용된다. MT 탐사는 우리말로써 자기 지전류 탐사라고 하며 지구의 자기장 변화, 즉, 지자기의 변화에 의해서 땅속에서 발생하는 지전류를 측정하는 탐사법이다. 지자기의 변화는 자연적으로 발생하는 것으로 태양의 흑점 활동과 적도 지방 근처의 뇌우에 의해서 발생하며, 잡음이 비교적 적은 밤에 측정하는 것이 일반적이다. 또한, MT 탐사는 신호원의 주파수에 따라 MT 탐사와 AMT 탐사로 구분할 수 있다. MT 탐사는 0.001 ~ 1,000 Hz 정도의 주파수 대역을 가지고 있으며, 이를 이용해 심부탐사에 이용하며 이론상으로는 10000 m 이상까지 탐사가 가능하다. 반면, AMT(Audio frequency MT) 탐사는 가청 주파수 대역인 0.1 ~ 10,000 Hz의 주파수 대역을 가지고 있다. AMT 탐사는 MT 탐사에 비해 상대적으로 고주파수를 사용하기 때문에 심부탐사보다는 천부 탐사에 이용되며 탐사 심도는 약 1000 m 정도이다. 이러한 이유로 MT 탐사는 지질학적 해명을 위해, AMT 탐사는 주요 금속광물이나 지열 및 지하수, 석유 등의 자원탐사에 사용되고 있다.

자연송신원을 사용하는 MT 탐사는 주변의 전자기적 잡음에 매우 취약하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 인공송신원을 사용하는 CSMT(Controlled Source MT) 탐사법이 개발되었다. CSMT 탐사는 자연송신원을 이용하는 MT 탐사에 인공송신원을 추가하여 고주파수 대역의 신호대잡음비를 높이는 것으로써, 송신원의 위치가 자료의 질에 영향을 미치므로 탐사를 수행함에 있어 최적의 위치에 설치하여야 한다. 일반적으로 탐사 지역으로부터 표피심도(skin depth)의 4배 이상 떨어진 곳이 적당한 것으로 알려져 있다(Zonge and Hughes, 1991). 전자기파는 주파수에 따라서 침투할 수 있는 심도가 달라지며, 식 (1) 을 이

용하여 표피심도를 계산한다.

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1)$$

식 (1) 에서 δ 는 표피심도, ω 는 각 주파수(angular frequency), μ 는 투자율(magnetic permeability), σ 는 전기전도도, f 는 주파수 이다.

CSMT 탐사의 송신원으로는 전극을 통하여 강력한 교류전류를 흘려주거나 루프에 전류를 흘려 발생하는 전자기장을 사용하며, 탐사지역에서 주파수별로 서로 직교하는 전기장과 자기장의 크기 및 위상차를 측정하여 지하의 전기비저항 분포에 대해 알아낸다. 인공적으로 발생하는 전류는 기본적으로 자연송신원보다 매우 큰 고주파수를 발생시키기 때문에 CSAMT(Controlled Source AMT)로 불리었으나, 측정 장비의 발달로 사용주파수 대역이 넓어지면서 점차 CSMT라고 불리우고 있다. 사용 주파수대역은 0.1 ~ 100 kHz 이다.

MT 탐사에서는 광대역 주파수에 대하여 서로 수직한 두 개의 전기장(E_x, E_y) 및 자기장(H_x, H_y)을 측정하며, 서로 수직한 전기장 및 자기장 성분의 비인 임피던스($Z = E/H$)를 계산하게 된다. 만약 대지의 전기비저항이 수직적으로만 변화한다면, 즉, 수평 층서구조라면 전기 비저항과 임피던스간에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\rho = \frac{1}{\omega \mu} |Z|^2, \quad \phi = \phi_E - \phi_H \quad (2)$$

식 (2) 에서 ω 는 각 주파수(angular frequency), μ 는 투자율(magnetic permeability), ϕ 는 전기장과 자기장간의 위상차이다. 따라서 전기비저항은 단순히 임피던스와 사용되는 주파수의 함수가 된다. 맥스웰 방정식에 의해 전기 비저항은 대지의 전기 비저항이 일정할 경우에는 대지의 참 비저항 값을 나타내지만 수평 층서구조의 경우에도 참비저항 값과는 차이가 있으므로 겉보기 비저항(apparent

resistivity)이라고 한다.

일반적으로 지하의 지질구조에 따라 전기비저항은 수직, 수평 모든 방향으로 변하게 되므로 임피던스는 다음과 같이 텐서 형태로 나타나게 된다.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 임피던스는

$$Z_{ij} = \frac{\langle E_i H_j^* \rangle \langle H_i H_i^* \rangle - \langle E_i H_i^* \rangle \langle H_j H_j^* \rangle}{\langle H_j H_j^* \rangle \langle H_i H_i^* \rangle - \langle H_i H_i^* \rangle \langle H_j H_j^* \rangle}, \quad i, j = x, y \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 $\langle AB \rangle$ 는 $A(\omega)$ 와 $B(\omega)$ 의 주파수 영역에서의 상호상관(cross power) 및 자기상관(autopower)이다. 따라서 식 (2)의 겘보기 비저항과 위상도 다음과 같이 두 개의 방향으로 나누어진다.

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2, \quad \phi_{xy} = \phi_{E_x} - \phi_{H_y} \quad (5)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2, \quad \phi_{yx} = \phi_{E_y} - \phi_{H_x} \quad (6)$$

ρ_{xy} 및 ϕ_{xy} 에서 처음 첨자는 전기장 (E_x)의 방향을 다음 첨자는 자기장 (H_y)의 방향을 의미한다. 일반적으로 현장 측정시 x -축 방향을 측선 방향으로 하며, y -축 방향은 측선에 수직하게 설정한다. 따라서 식 (5), (6)에 나타난 바와 같이 현장 측정에서 서로 수직한 방향의 전기장과 자기장을 측정했기 때문에 두 방향의 겘보기 비저항 및 위상 자료를 얻게 된다. 즉, 지하구조가 1차원 구조가 아닐 경우, 즉 수평적으로도 변화하는 2차원 내지 3차원 구조일 경우에는 측정 방향에 따라 임피던스가 달라지므로 당연히 식 (2)의 겘보기 비저항과 위상도 달라진다. 이와 같은 사

실은 MT탐사 자료의 해석을 어렵게 하는 요인이기도 하지만 실질적으로는 두 방향의 전기 비저항 분포에 대한 정보를 제공해주는 것이므로 장점 중의 하나이다. 따라서 MT 탐사에서는 두 개의 서로 수직한 전기장과 자기장을 측정하는 텐서 측정을 기본으로 하며, 그 외의 해석에 필요한 추가 변수들을 결정하기 위하여 자기장의 수직 성분(H_z)까지도 측정하게 된다. 대지가 균질할 경우에는 겉보기 비저항은 주파수에 관계없이 대지의 참 비저항값을 나타내며, 위상은 45° 가 된다.

일반적으로 MT 탐사에서 저주파는 심부의 전기비저항을 고주파는 천부의 정보를 나타내게 된다. 따라서 천부에서부터 심부까지의 정보를 얻기 위해서는 광대역 주파수에 대한 자료를 획득하는 것이 유리하다. 자료의 해석은 주로 1차원 혹은 2차원 역산법이 널리 사용되고 있으며, 경우에 따라서는 Bostick 변환(Bostick, 1977)과 공간필터링 방법을 이용한 2차원 해석법이 사용되기도 한다.

2. 실험적 접근방법

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 겉보기 비저항 및 위상 곡선으로부터 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. Fig. 15는 일반적인 현장 탐사를 위한 장비 설치의 개략도를 나타내고 있다. 일반적으로 자북을 기준으로 남북방향을 x 방향, 서동방향을 y로 하여 각 탐사 측정점에서 벡터(vector)량인 전기장 및 자기장의 지표에 수평

한 네 성분을 측정하게 되며, 다만 자기장에 대해서는 지하의 상세한 정보를 위하여 수직 성분(z 방향)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 탐사지역으로부터 멀리 떨어진 원거리의 자기장을 사용하여 지역적이고 인공적인 전자기적 잡음의 영향을 제거하기 위함으로 최근에는 매우 필수적인 방법으로 인식되고 있다.

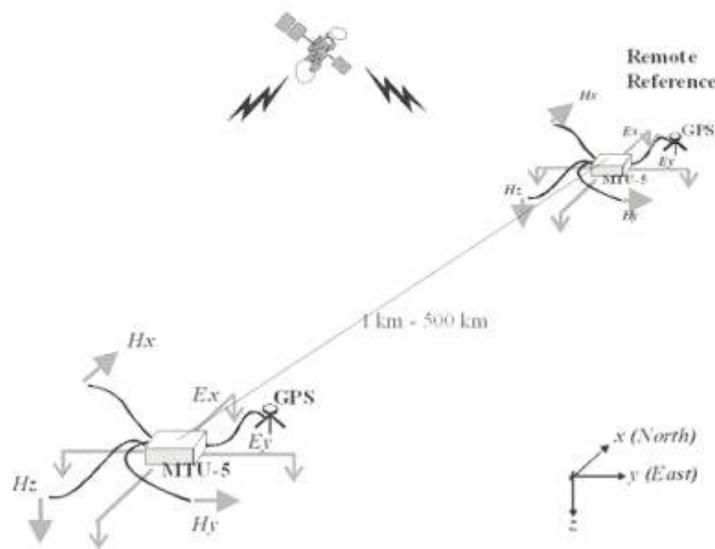


Fig. 15. MT 탐사의 현장 개략도.

위 그림은 MT 시스템 및 자기장 센서, 전기장 센서 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. 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 비분극 전극을 매설하여 두 지점간의 전위차를 이용하여 측정한다. 본 장비로 얻을 수 있는 MT 신호의 대략적인 주파수 대역의 범위는 10의 -4 승에서 수백 Hz로 초기기기 설정 값에 따라 다를 수 있으나 0.0003 ~ 320 Hz 정도이며, AMT 탐사를 추가한다면 약 10 kHz 정도

의 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 SSMT-2000의 상용 프로그램 등이 있으며, 이들 외에도 공개되어 있는 시간영역 자료처리 프로그램도 개발되어 있다. 자료처리 과정을 거쳐 얻은 각 측정에서의 겉보기비저항 및 위상 정보의 정량적 해석을 위해서 MT장의 모델링 및 역산 알고리즘을 이용한다. 모델링이란 지하의 가상 모델로부터 MT 탐사에 관한 시뮬레이션 과정이며, 역산이란 자동적으로 모델링의 반복적용을 통하여 관측된 현장 자료를 만족하는 지하 모델을 추정하는 과정이라 요약할 수 있다. 현재, 지하구조를 단순한 1차원 모델로 가정한 경우에서부터, 2차원, 3차원에 이르기까지 다양한 모델링 및 역산 알고리즘이 개발되어 사용되고 있으며(Rodi, and Mackie, 2001), 이를 지질 모델 추정을 위한 현장 자료 해석에 이용하고 있다.



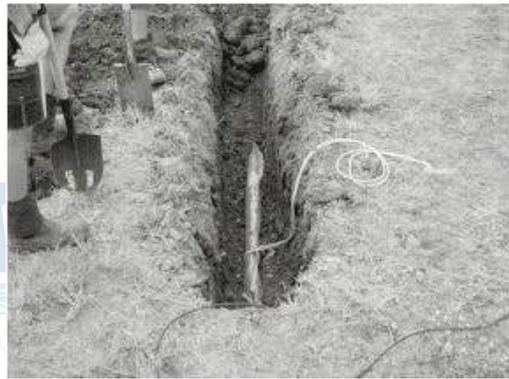
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 16. 일반적인 환경에서의 MT 탐사를 위한 시스템의 예. (a) 자기장 센서 및 비분극전극 등 (b) 현장에서 설치된 예 (c) 전기장 측정을 위한 비분극 전극의 매설 (d) 자기장 센서의 매설.

제 2 절 연구내용 및 결과

1. 자기지전류(Magnetotellurics, MT) 탐사 기술 개발

MT 탐사는 전자탐사 중의 하나로써 현존하는 전기, 전자탐사법 중에서 가장 큰 가탐 심도를 가지고 있어 주로 심부탐사에 이용된다. 본 연구에서는 남극 빅토리아 랜드 장보고기지 주변 빙권의 변화 진단, 원인 규명 및 거동 예측을 위해 아래와 같은 MT 탐사 기술 개발을 수행하였다.

① 극지 환경용 MT 모니터링 측정 장치 시제품 개발

- a. 극지 지표면에 걸리는 접촉 저항은 일부 M-Ohm에 도달할 수 있어 이러한 높은 접촉 저항 문제를 해결하기 위해 증폭기를 활용하는 기술 개발
- b. 극지 환경은 일반적으로 매우 낮은 온도이므로, 이러한 환경에서도 운용 가능토록 MT 탐사 기술 개발에 바탕을 둔 탐사기 시제품 개발
- c. 개발 시제품 성능
 - 0.5 W 이하의 저전력 소모 및 전기장/자기장 전극 5채널(Ex, Ey, Hx, Hy, Hz) 사용 가능

Table 1 MT 장치 시제품 성능

Index	Specification
A to D conversion	24 bit
Frequency range	DC to 10 kHz
Max. storage (compact flash card)	16 Gbytes
Max. continuous sampling rate	5 k samples/sec
Max. burst mode sampling rate	20 k samples/sec
Max. burst mode data points	80 k points
Synchronization error	Less than 0.2 u sec
Power consumption	Less than 0.5 W total
Size	27 x 25 x 12 (cm)
Weight	Less than 5 kg

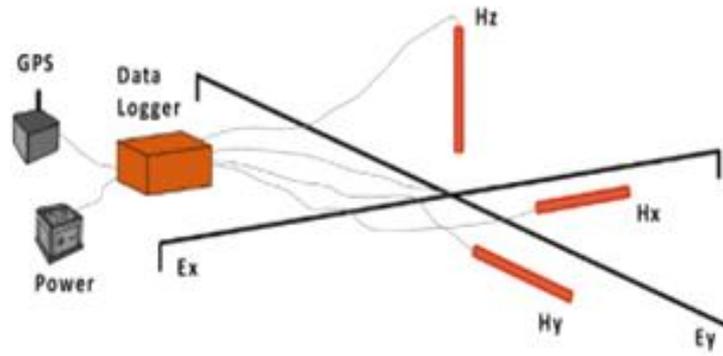


Fig. 17. MT 측정 방식 모식도.

d. 현장 적용 예비 MT 탐사

- 인천 송도 일대 (갯벌 환경이라 비교적 conductive한 특성을 가짐)
- Data quality를 확인하기 위한 예비 탐사
- 비저항대 특성에 따른 측정자료 파악 가능



Fig. 18. 예비 탐사 위치.



Fig. 19. 예비 MT탐사 현장 전경.



Fig. 20. 예비 MT 탐사 및 개발 장비 세팅 모습.

- 예비 MT 탐사 결과, 전기비저항 및 위상 결과 값을 도출하였음
- 저주파수 대역에서의 위상 변화는 약간 나타나지만, 전반적으로 장비 측정은 안정적이고 정밀한 결과를 나타내는 것을 확인하였음
- 시계열 자료 E-field 및 H-field 결과는 비교적 안정적인 양상을 나타냈음
- 예비 MT 탐사를 통해 극지 환경에서도 활용 가능성이 충분함을 사전 파악할 수 있었음

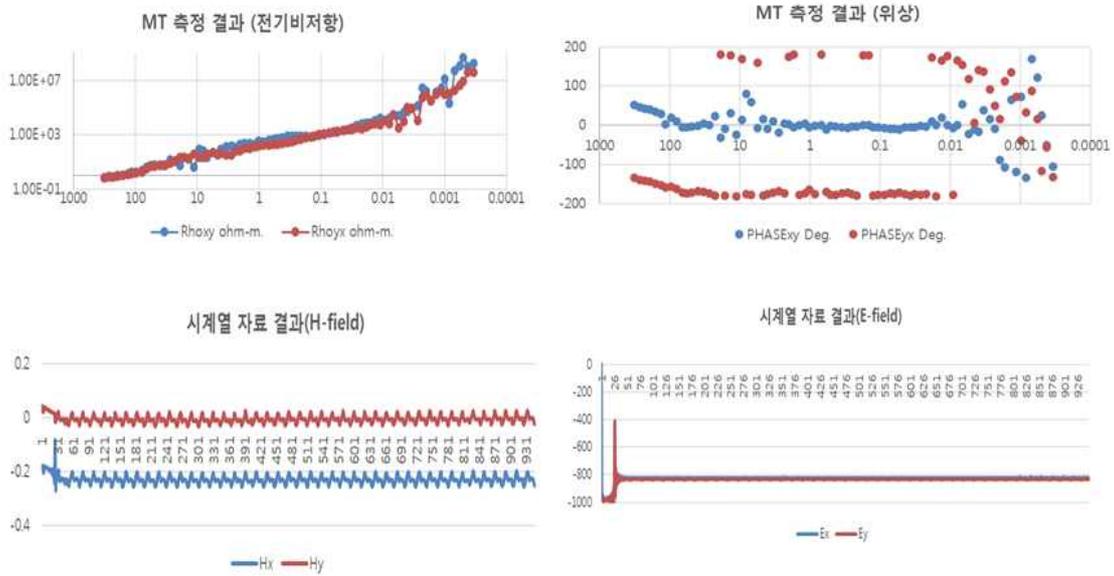


Fig. 21. 예비 MT 탐사 결과.

e. 남극 펠머른 화산 부근에서의 개발 시제품 현장 적용



Fig. 22. MT 장치 개발 시제품 남극 설치 모습.

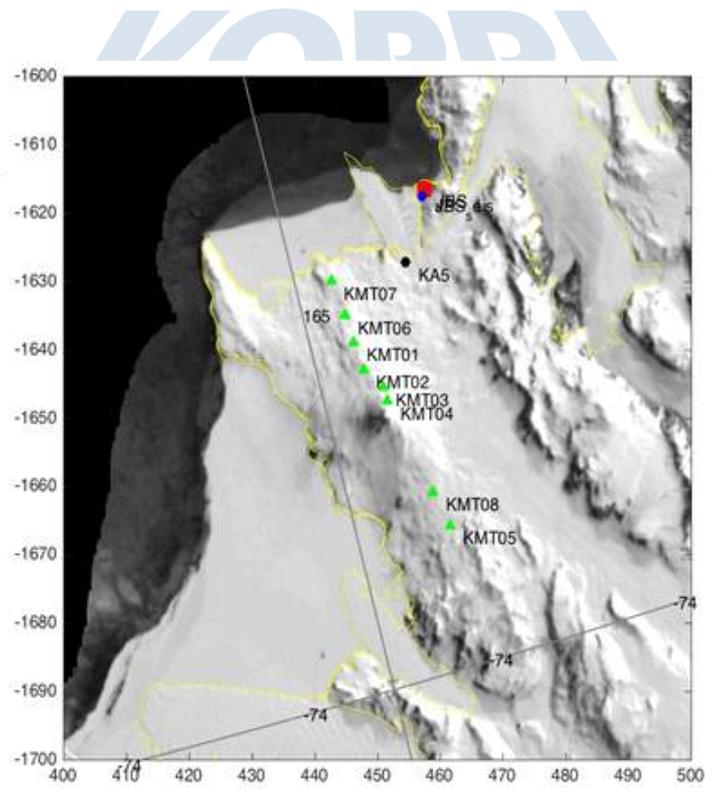


Fig. 23. MT 장치를 이용한 남극 측정 위치 맵.

f. 티타늄 메쉬 전극 매설

- 남극 펠버른 화산 하부 마그마 거동 양상을 보다 장기적·지속적으로 관측하기 위해서는 MT 모니터링 장비 제작이 필요하게 되었으며, 전기장 측정을 위해 사용되는 비분극 전극은 토양 환경에 한정되어 사용되기에, 극지 환경에는 적용 자체가 어려움이 있어 극지 환경에서 활용 가능한 전극(튜브 모양으로 고안된 티타늄 메쉬 재질의 전극)을 자체 제작하여 사용하였음. 다만, 전극이 천부에 매설되는 한계로 극지 외부환경의 전기적 잡음에 취약한 양상을 보여 극지 환경용 MT 모니터링 전극 개발이 필요하게 됨

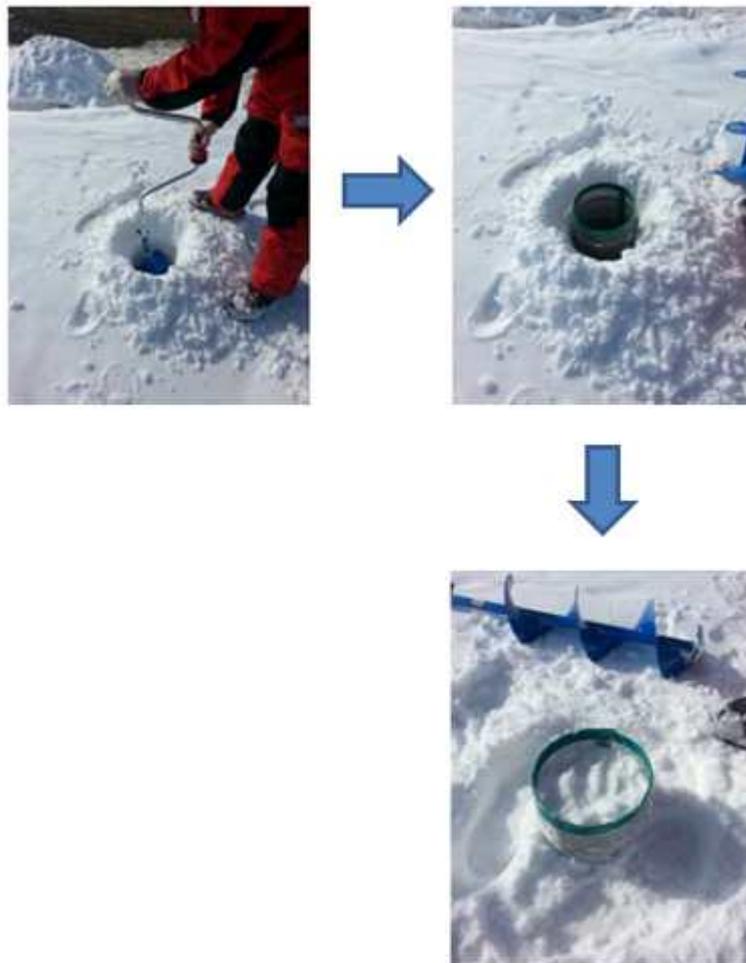


Fig. 24. 티타늄 메쉬 전극 매설.

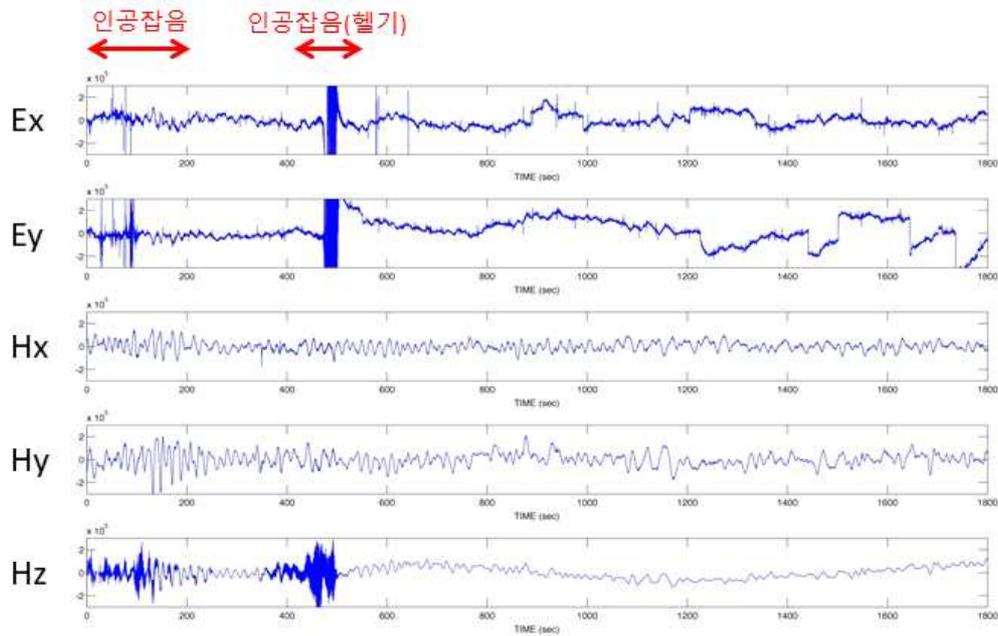


Fig. 25. 남극 벨버른 화산 부근에서 수행된 MT 탐사 결과.

g. MT 모니터링 장비 시제품 제작 및 현장 적용

- MT 모니터링 장비 시제품 제작을 통해 측정 장비 민감도로 인해 발생할 수 있는 데이터 손실 및 잡음을 최소화하고, 보다 장시간의 주기적인 누적 데이터를 확보함으로써, 멜번 화산 하루 마그마 거동 양상을 지속적으로 관측하기 위함

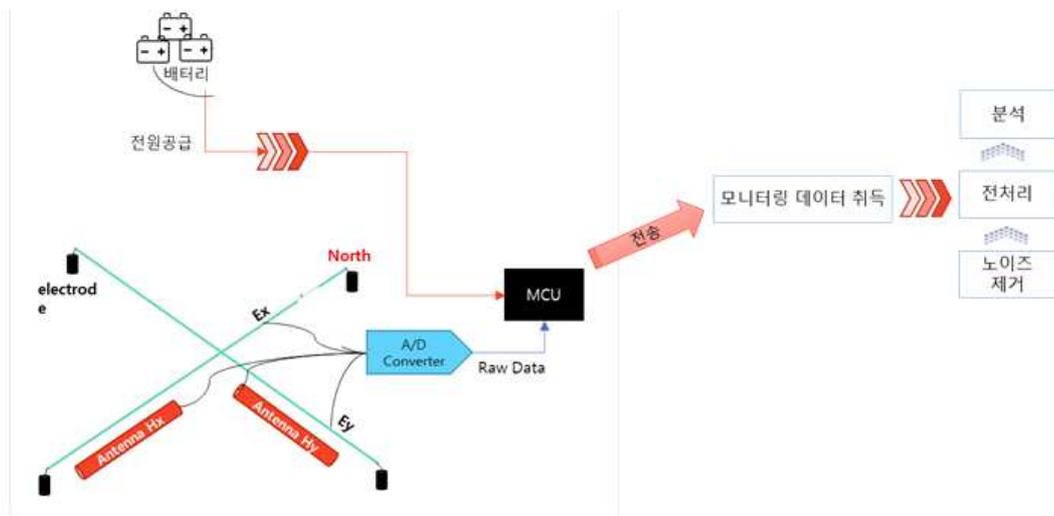


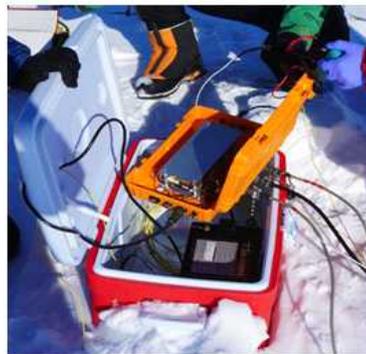
Fig. 26. MT 모니터링 장비 시제품 구성 모식도.

- MT 모니터링 시제품 성능은 최대 10 kHz 데이터 샘플링이 가능함
- 측정 시 최소 전력 소모 및 대기전력 기능을 통해 장기간의 모니터링 가능토록 설계
- 대기전력 1 mA로 stand by 및 예약된 시간에 시스템 작동하도록 세팅
- 1년 사용 시, 모니터링 전력은 약 8.76 A 소모됨
- 100 Ah의 배터리로 약 90 % 이상을 데이터 취득에 사용 가능

- 24bit 4 channel MT system
- Sampling rate: Max. 10 kHz
- Frequency range: 10 kHz – 1000s
- Low power consumption: < 1 W



- 대기전력 1mA로 stand by 및 예약된 시간에 시스템 작동하도록 세팅
- 1년 사용시, Monitoring power : 8.76A (약 9A)
- 따라서 100Ah의 배터리로 약 90% 이상을 데이터 취득에 사용 가능



[MT monitoring]

Fig. 27. MT 모니터링 장비 시제품 성능 및 현장 설치모습.

- MT 모니터링 장비 현장 설치 위치
- 첫 번째 위치 포인트는 KMT03
- 두 번째 위치 포인트는 KGPS21

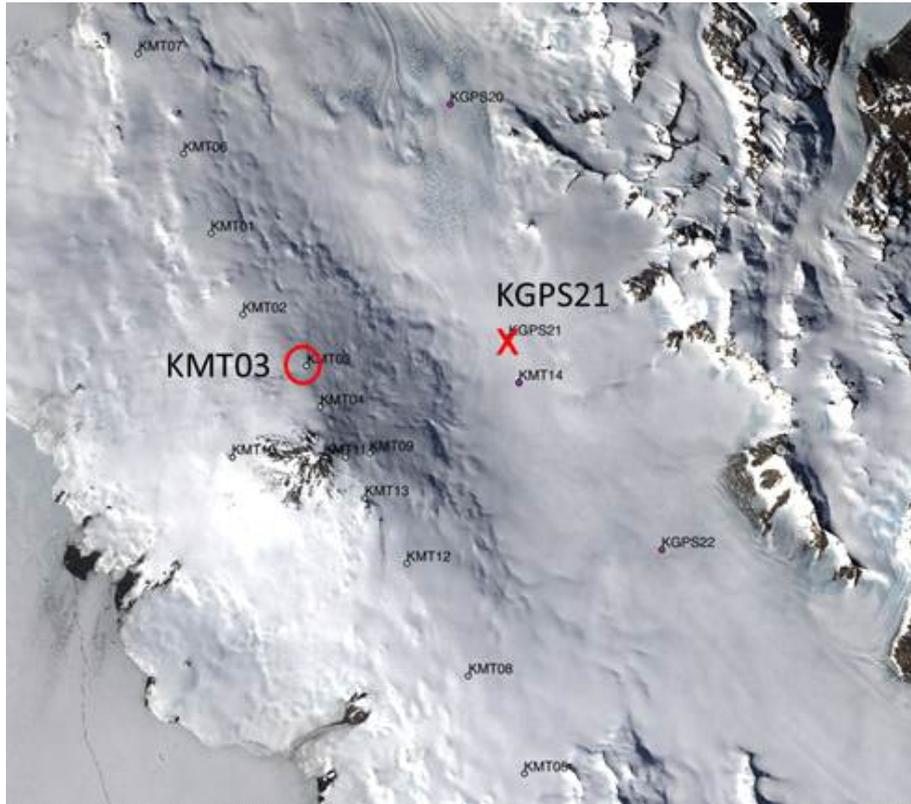


Fig. 28. MT 모니터링 장비 현장 설치 위치.

- 뿔번화산 KMT03 측정
 - : 하부에 고전도성 매질 존재(마그마 챔버) 추정
 - : 모니터링 모드로 설치함
 - : 배터리: 100 Ah 1개
 - : Sampling frequency: 500 Hz
 - : 측정간격: 7 hours/day -> 약 200-300일 측정 가능 예상

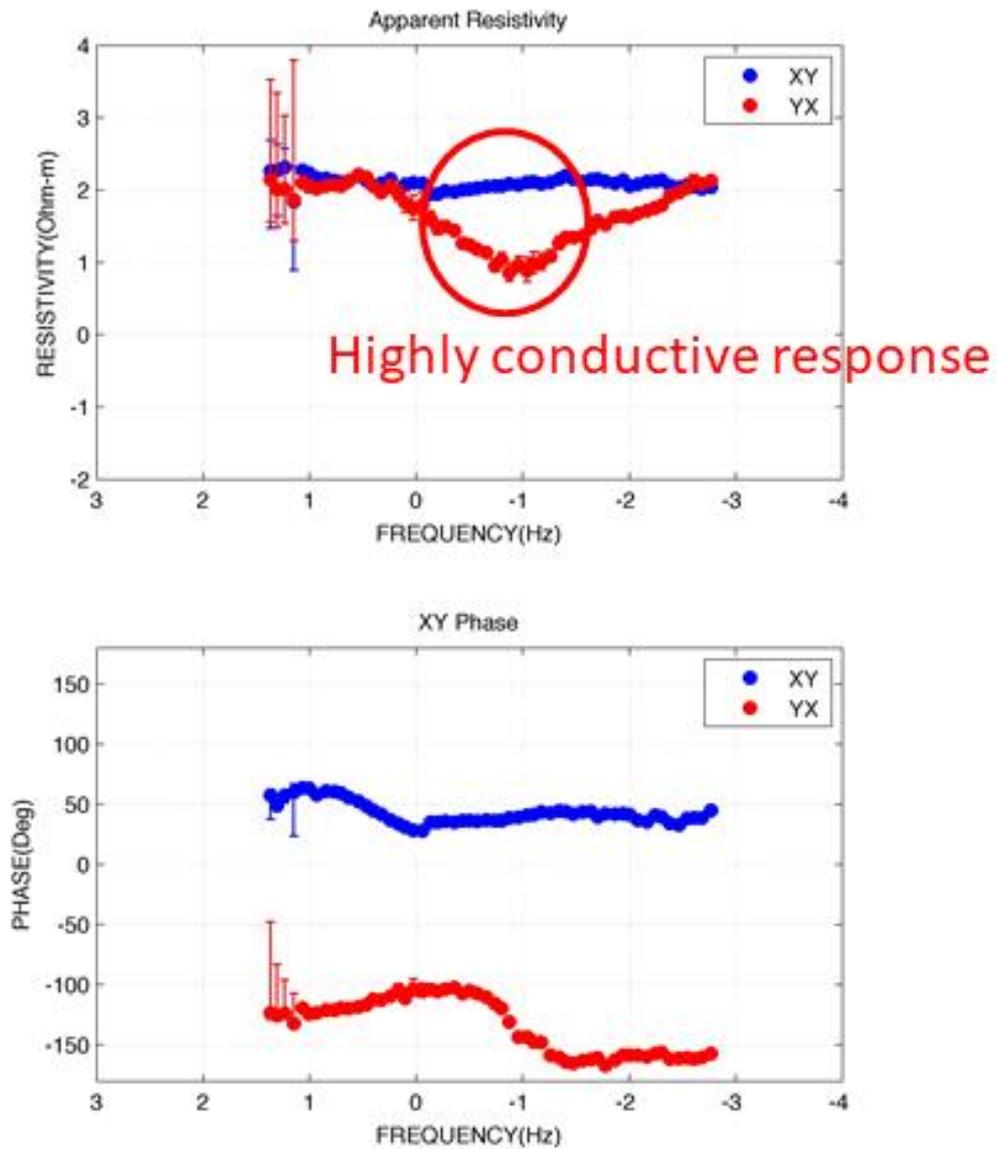


Fig. 29. KMT03 포인트 MT 모니터링 결과.

- 캠펠지역 KGPS21 측정

: 하부에 빙저수 유동이 있을 것으로 예상되어 테스트를 수행한 결과,
주변 크레바스로 인해 전기장 측정이 정상적이지 않아 부적합

② 극지 환경용 MT 모니터링 전극 개발

a. 극지 환경용 MT 모니터링 전극 온도변화 모델링

- 극지 환경에서 발생하는 분극 현상에 의한 전기장 데이터 잡음 영향을 감소시키기 위해, 비분극전극을 활용한 새로운 전극시스템을 개발함으로써 탐사결과 정확도를 높이고자 함

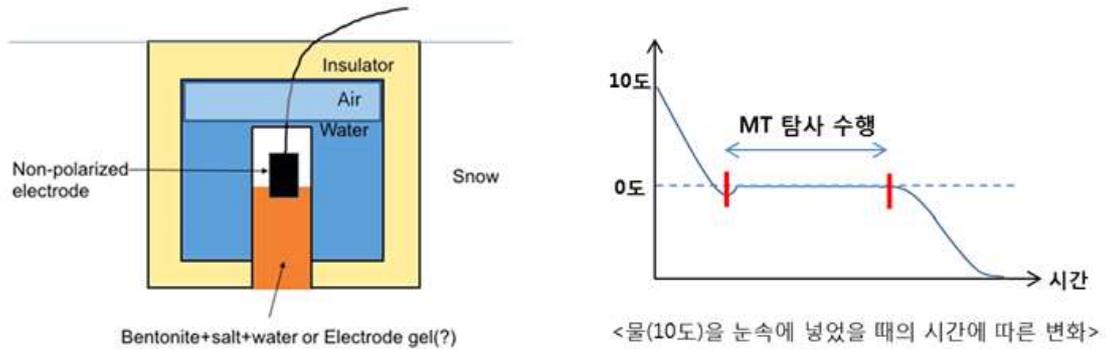


Fig. 30. 빙하용 전극시스템 모식도.

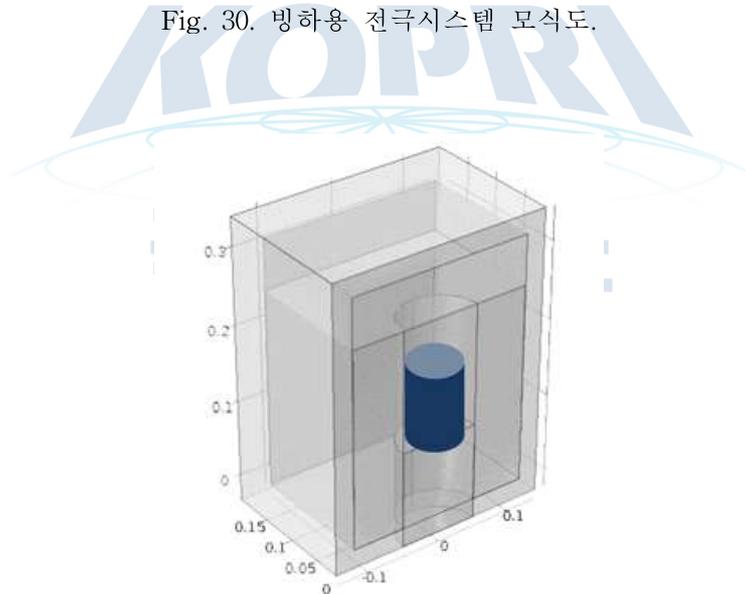


Fig. 31. 3차원 모식도.

- 극지 환경에서의 전극시스템 내외부 온도 변화 및 안정화 모델링
- FEM(Finite Element Method) 기법을 이용한 전극시스템 위치별 열량 변화 파악
- 시간에 따른 온도변화 그래프 결과, 극지 환경에서 최대 5-6일 적용 가능할 것으로 분석

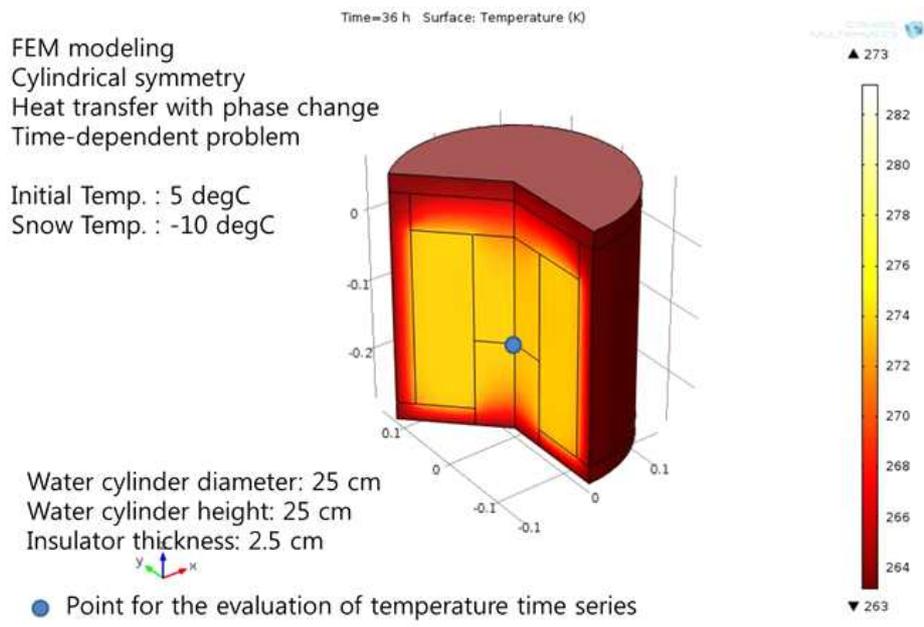


Fig. 32. FEM 모델링을 통한 온도 변화 모델링.

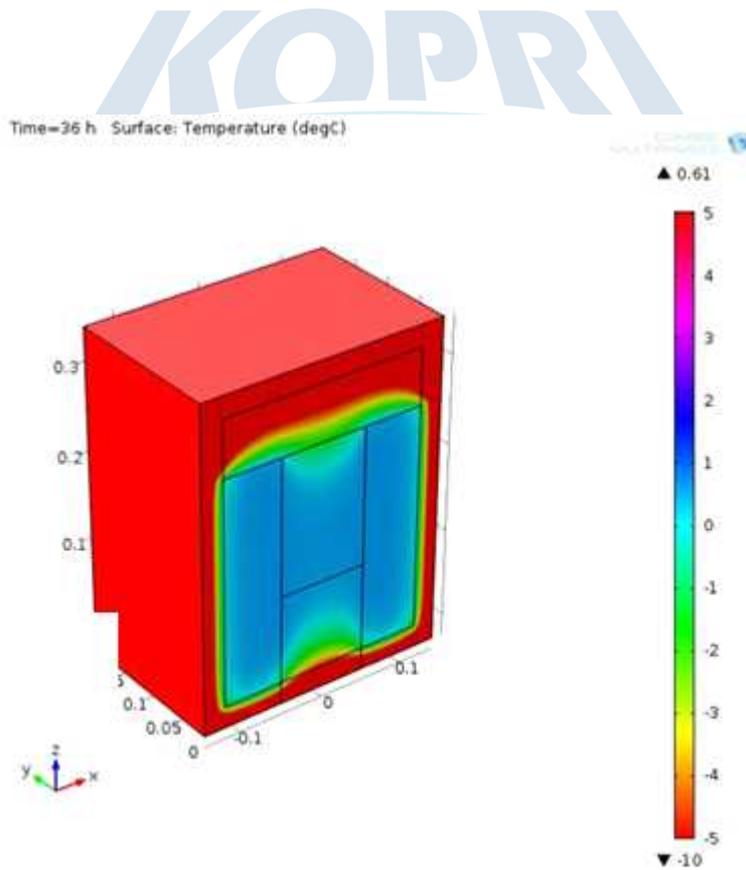


Fig. 33. 36시간 이후의 온도 변화.

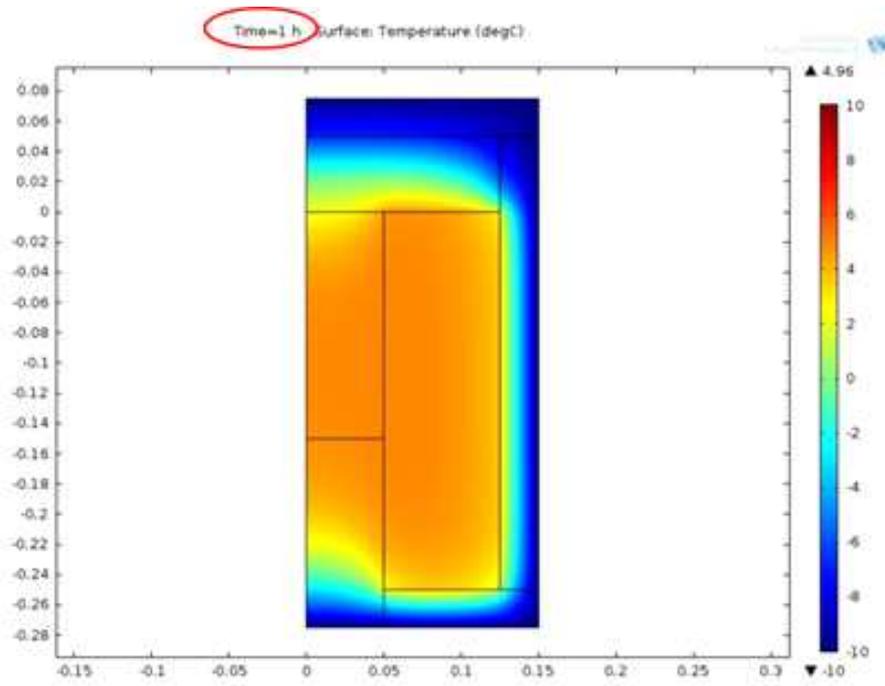


Fig. 34. 1시간 이후의 전극 내부 온도 변화.

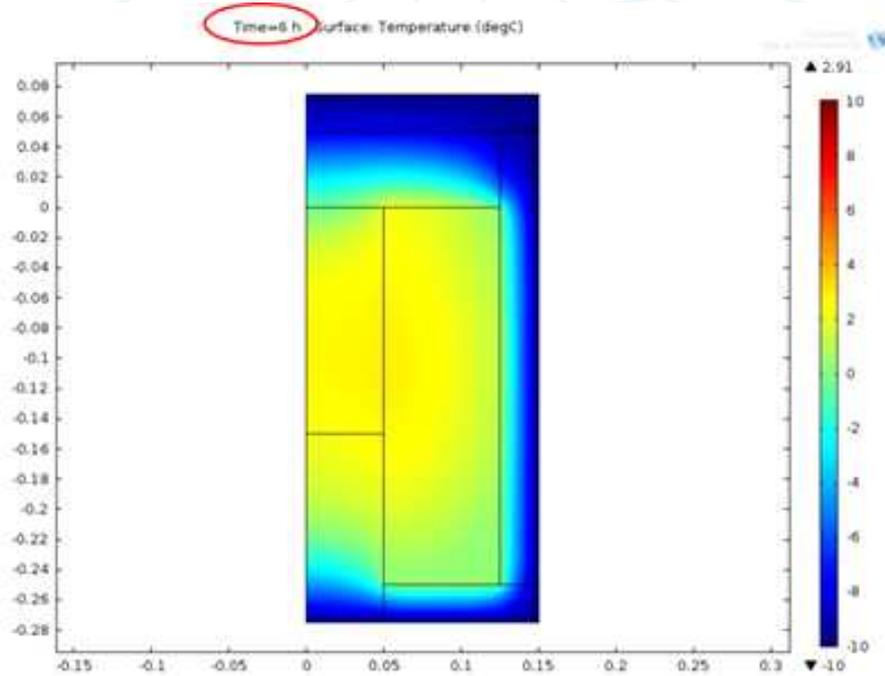


Fig. 35. 6시간 이후의 전극 내부 온도 변화.

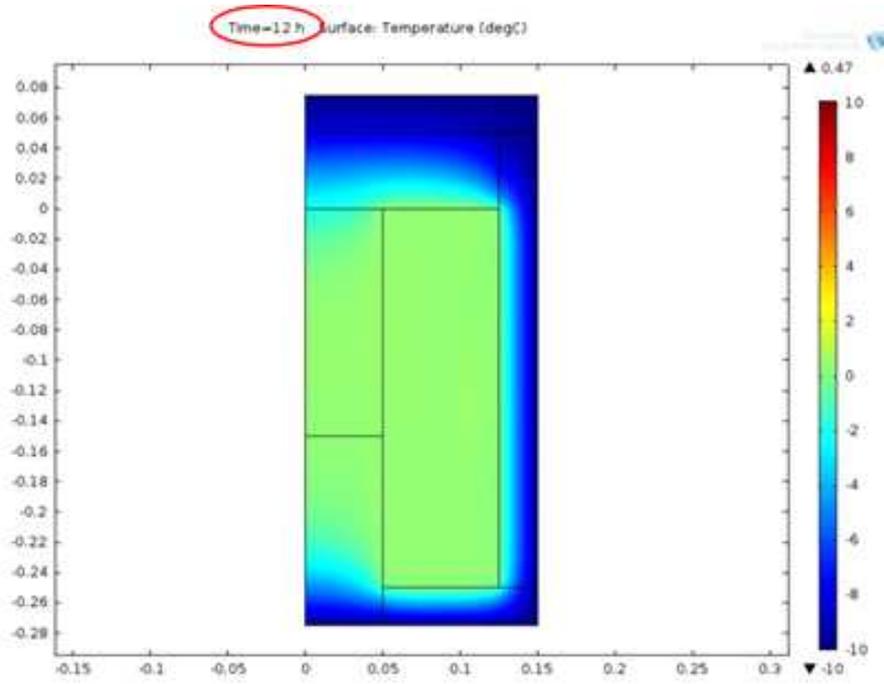


Fig. 36. 12시간 이후의 전극 내부 온도 변화.

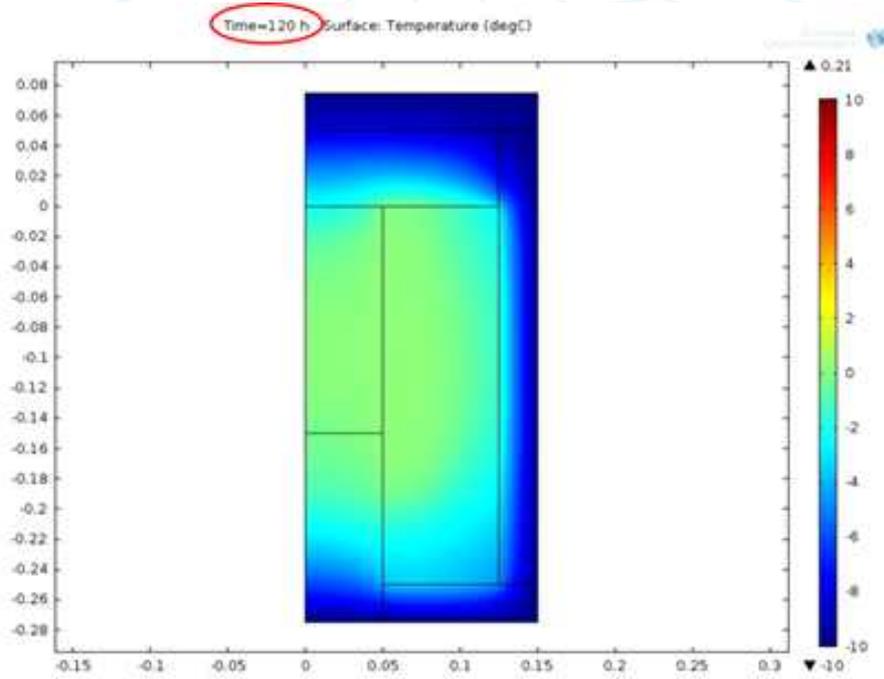


Fig. 37. 120시간 이후의 전극 내부 온도 변화.

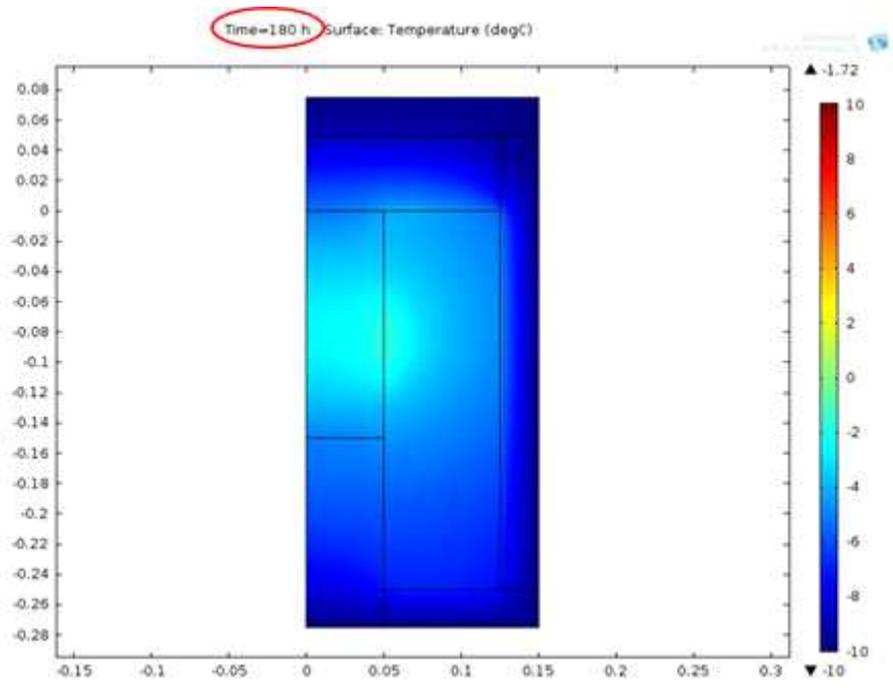


Fig. 38. 180시간 이후의 전극 내부 온도 변화.



Center temperature

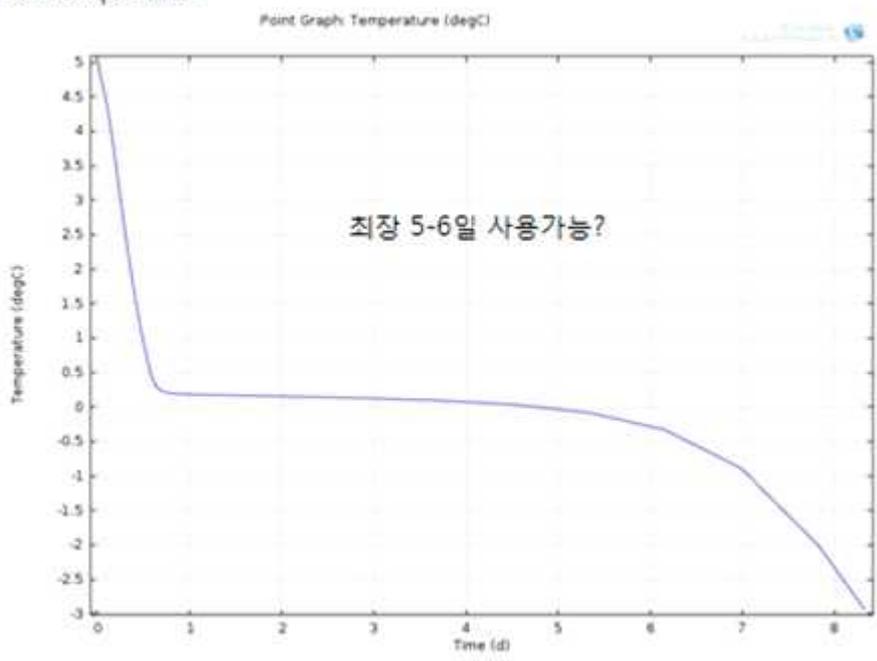


Fig. 39. 시간 변화에 따른 전극시스템 온도 변화 그래프.

b. 오거 방식의 극지 환경용 전극 장치 개발

- 티타늄 메쉬를 표면에 설치함으로써 표면에 유기되는 정전압의 영향을 많이 받는 한계성을 지니고 있음
 - : 빙하 표면의 눈 입자가 바람에 의해 이동할 때 전하를 띄게 됨
 - : 대전된 입자들은 빙하 표면에 정전압을 형성하게 되고 바람의 강약에 따라 표면에 전압의 변화를 유도함
 - : 눈 입자에 의해 발생하는 전압에 의해 빙하 표면에 설치된 MT 전극에 전류가 유오되어 전기 잡음으로 작용함
 - : 이 전기 잡음은 다른 전기적 잡음이 없는 남극 환경에서 가장 큰 문제임
- 극지 환경에서의 전극시스템 온도변화 모델링 결과를 활용한 전극 장치 개발 수행
- 전기적 잡음 회피 방법으로 전극을 깊이 매설하는 방식을 고안함
 - : 2-3m 깊이에 매설할 수 있어야 함
 - : 현장에서 단시간에 매설하여야 함

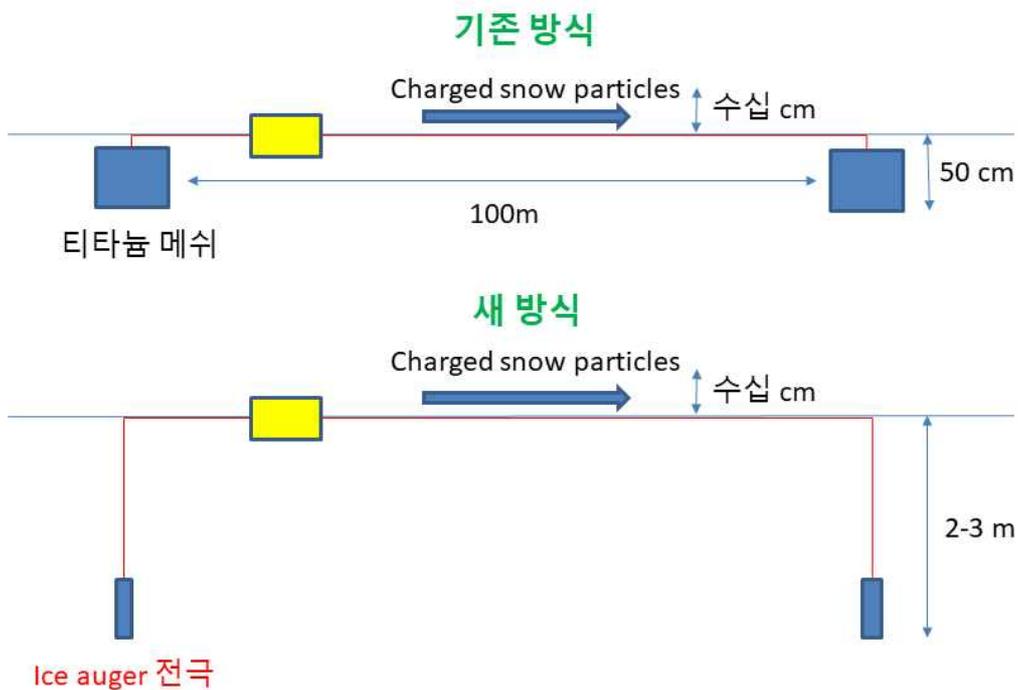


Fig. 40. 극지 환경용 전극별 설치 방식 비교.

- 전극은 크게 Ice drill bit, Ice auger, 비전도봉, 전선 등으로 구성됨
- Ice auger 자체가 전도체 기능을 수행하며, 비전도봉 안으로 전선이 연결되어 지표에 위치한 MT 모니터링 장비와 연결되는 구조
- 상부에서 전기드릴을 이용함으로써 Ice auger 방식의 개발 전극 장치를 2-3m 깊이에 설치·회수 가능

- 새 전극 디자인 개요
 - Ice auger 형태의 전극
 - 전도체(ice auger) + 비전도봉
- 전극 구성
 - Ice drill bit
 - Ice auger
 - 비전도봉
 - auger에 결합 가능
 - 내부에 전선 삽입
 - 상단에 연결커넥터 설치
 - 전선
 - 전선 피복 파손을 막을수 있는 보호관 사용 필요
 - 연결 커넥터
- 필요 현장 장비
 - 전기드릴
 - 전기드릴 어댑터
 - Ice auger
- 현장 설치 방법
 - 전기드릴과 Ice auger를 이용하여 2-3m 천공
 - 제작한 전극을 전기드릴을 이용하여 삽입
 - 전선 연결
- 참고
 - Ice auger: kovacsicedrillingequipment.com 참조

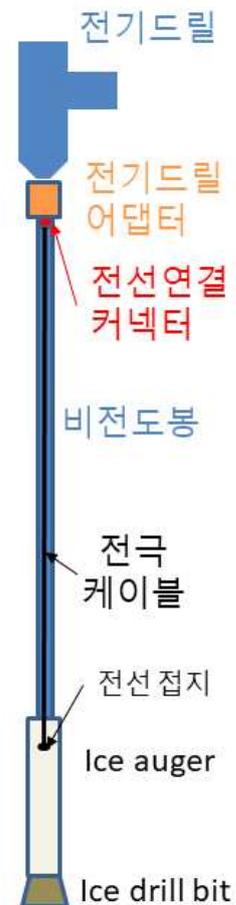


Fig. 41. 오거 방식의 전극장치 모식도.

- 일반 전기드릴을 이용하여 1차로 드릴링을 수행함
- 1차 드릴링 후 파여져 있는 잔여물을 통과하여 오거 방식의 전극장치를 2-3m 깊이에 매설
- 오거 방식의 전극장치 설치 후 하부 오거로부터 연결되는 전선을 지표에 위치한 MT 모니터링 시스템과 직접 연결

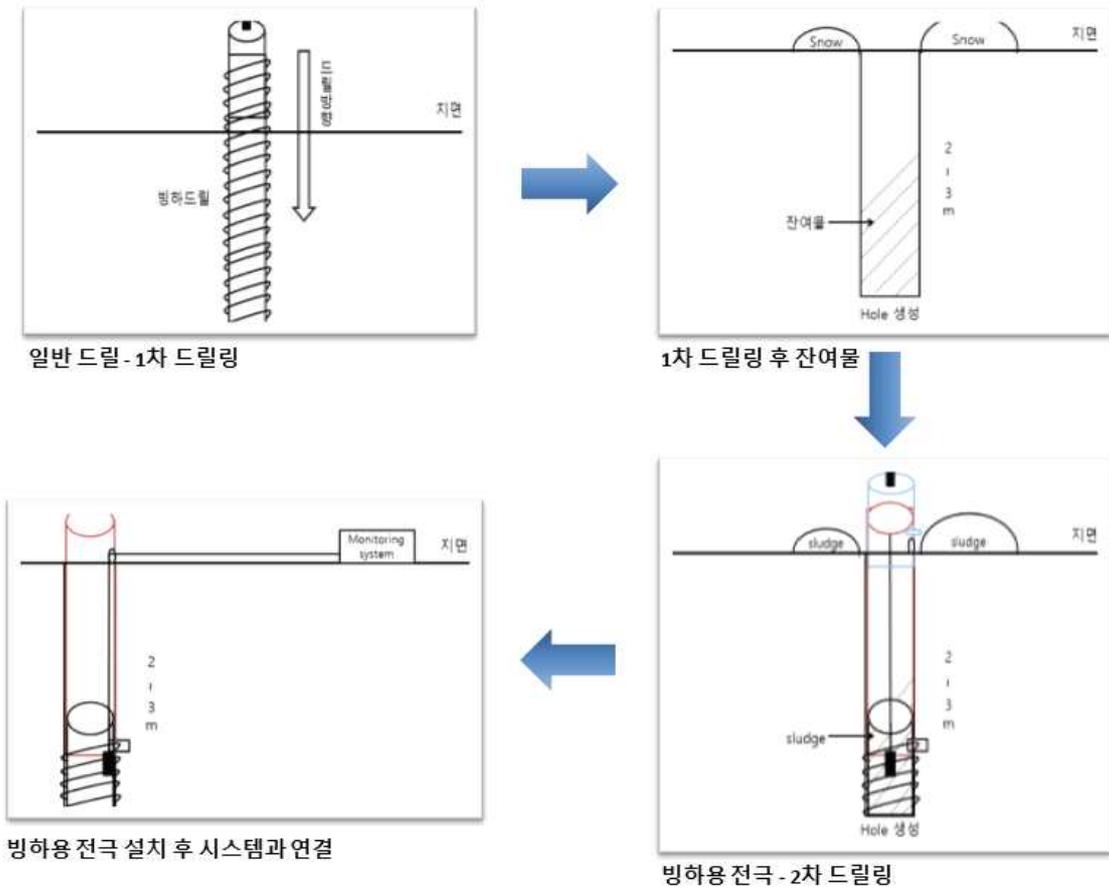


Fig. 42. 오거 방식의 전극장치 현장 적용 시나리오.

- 오거 방식의 전극장치 모식도와 동일한 제품을 이용하여 3차원 설계도를 구성한 결과
- 상부 Drill adaptor 부분은 외부 덮개가 탈부착이 가능하므로 현장 상황에 따라 사용자가 조정 가능함
- 하부는 Ice auger 및 Ice drill bit의 기능을 최대화시킬 수 있도록 강력하게 체결하여 고정시켜 놓았음

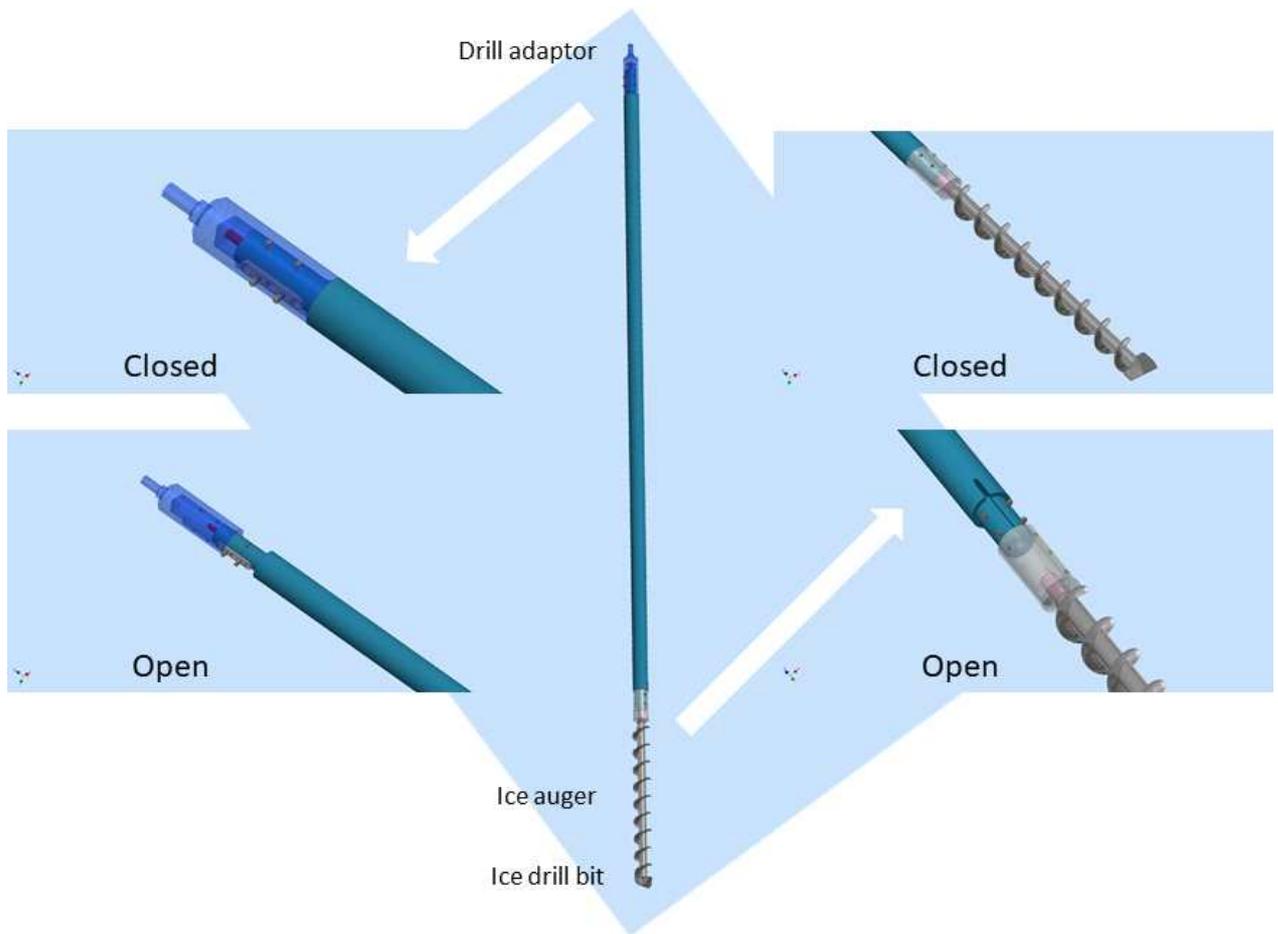


Fig. 43. 오거 방식의 전극장치 3차원 설계도.



Fig. 44. 전극장치 개발 모습 - 세부.

- 오거 방식의 전극장치 모식도 및 3차원 설계도에 충실함으로써 극지 환경에서 설치·회수가 가능한 전극 장치를 개발 완료함
- 개발한 전극장치 개수: 4 set (전기장 측정용 Ex, Ey 총 4 개)



Fig. 45. 전극장치 개발 모습 - 전체.

③ MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 개발

- MT 모니터링 장비로부터 취득된 시계열 데이터의 가공 및 프로세싱을 위한 MT 모니터링 소프트웨어 제작
- GUI 구성 설계도와 같이, 필수 기능 위주로 구성되어 있음
 - : 자기장 및 전기장 측정 값(시계열 데이터) 표현
 - : 파일 불러오기 및 저장하기
 - : 파일 정보 확인
 - : 시간 선택 기능
 - : 데이터 프로세싱 옵션
 - : 전기비저항 및 위상 값 표현



Fig. 46. MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 GUI 구성 설계도.



Fig. 47. MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 GUI 제작 구성.



Fig. 48. MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 화면.

- 자기장(Hx, Hy, Hz) 및 전기장(Ex, Ey) 시계열 데이터 좌측부에 결과 도출
- 시계열 데이터 시각화 기능으로 Zoom In, Zoom Out 기능 구현
- 시간 설정에 따른 원하는 시간 대역에서의 시계열 데이터 확인 가능
- 전기비저항 및 위상 값 우측부에 결과 도출하여 그래프로 바로 확인 가능
- 현장 사용자의 편의성 및 시각적 단순화를 중심으로 제작한 MT 모니터링 소프트웨어

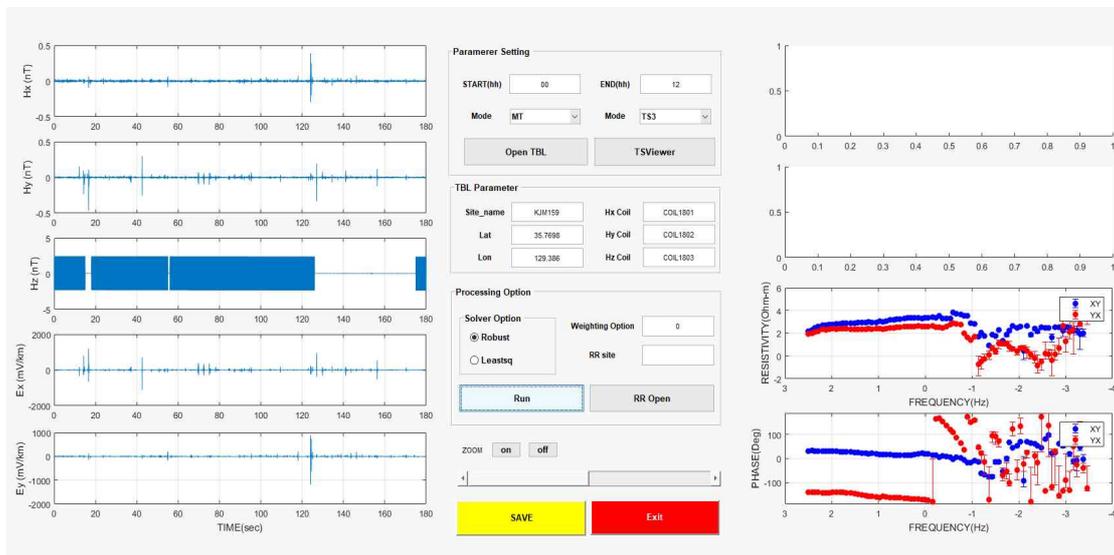


Fig. 49. MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 구동 모습.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

1. 연구개발목표 달성도

Table 2 연구개발목표 달성도

구분	성과목표	목표치	평가기준	달성도 (%)
1차년도	극지 환경용 MT 탐사 관측 기술 확보	100 %	기술 확보 여부	100
	극지 환경용 MT 탐사기 시제품 개발	70 % 이상	시제품 개발 여부	100
	비접촉식 측정 시스템 개발	70 % 이상	시스템 개발 여부	100
2차년도	극지 환경용 MT 탐사기 시제품 완성	100 %	시제품 완성 여부	100
	멜번 화산 부근 MT 탐사 자료 획득 및 분석	80 % 이상	탐사 자료 취득	100
3차년도	극지 환경용 전극 장치 모델링 연구	100 %	모델링 여부	100
	극지 환경용 MT 모니터링 시제품 개발	70 % 이상	시제품 개발 여부	100
4차년도	극지 환경용 MT 모니터링 시제품 완성	100 %	시제품 완성 여부	100
	멜번 화산 부근 MT 모니터링 자료 획득 및 분석	80 % 이상	탐사 자료 취득	100
5차년도	MT 모니터링용 전극장치 개발	100 %	전극장치 개발 여부	100
	MT 모니터링 소프트웨어 제작	100 %	소프트웨어 제작 여부	100

2. 성과목표 달성도

Table 3 성과목표 달성도

구분	성과목표	목표치	평가기준	달성도 (%)
1차년도	국내 특허 출원	1건	특허 출원 여부	100
	국외 학회발표	1건	발표건수	100
	홍보활동	1건	홍보건수	100
2차년도	국내 특허 등록	1건	특허 등록 여부	100
	국내 학회발표	1건	발표건수	100
	홍보활동	1건	홍보건수	100
3차년도	국내 특허 출원	1건	특허 출원 여부	100
	홍보활동	1건	홍보건수	100
4차년도	국내 특허 등록	1건	특허 등록 여부	100
	홍보활동	1건	홍보건수	100
5차년도	국내 특허 출원	1건	특허 출원 여부	100
	홍보활동	1건	홍보건수	100

1) 학술대회 발표 성과

Table 4 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2015. 02.16.	D-LUX: A new way to assess the safety of embankment by 3D electrical survey	Seokhoon Oh, Heuisoon Lee	ASEG-PESA	국외
2016. 04.14.	콘크리트 댐 물비침 구역 및 취약대 탐지 기법 연구	안태규 이희순	한국자원공학회	국내

2) 특허 출원 및 등록 성과

Table 5 특허 출원/등록 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인 /출원 국	발명자	출원번호	등록연 도	특허명	등록인 /등록 국	발명자	등록번호
2014	전자기 반응 분석을 통한 지하 관로 위치 및 매설 깊이 분석 시스템	(주) 지오록 스/ 대한민 국	오석훈 이희순 정호준	10-2014 - 0162565	2015	전자기 반응 분석을 통한 지하 관로 위치 및 매설 깊이 분석 시스템	(주) 지오록 스/ 대한민 국	오석훈 이희순 정호준	10-1564 718
2017	극지 환경용 지구물리탐 사 전극 장치	한국해 양과학 기술원 / 대한민 국	이춘기 이희순 안태규	10-2017 -004860 1	2018	극지 환경용 지구물리탐 사 전극 장치	한국해 양과학 기술원 / 대한민 국	이춘기 이희순 안태규	10-1840 782
2019	극지 환경의 지구물리탐 사를 위한 전극 시스템, 전극 및 전극의 설치, 회수 장치	한국해 양과학 기술원 / 대한민 국	이춘기 이희순 안태규	10-2019 -003805 7			-		

제 2 절 대외 기여도

1. 빙권거동 관측, 진단 및 예측 연구 수행을 통한 남극 빅토리아랜드 빙권연구 분야 선도적 위치 점유(지역대표 모델, 관측 자료 등)에 기여할 수 있다.
2. 빙권 장기관측자료 제공 및 지역급 빙권변화 모델은 남극 대륙 및 전지구 기후예측모델 정확도 향상에 기여할 수 있다.
3. 극지의 혹독한 환경에 적합하도록 개발될 측지/지구물리 관측 기술들은 극지뿐만 아니라 국내에서도 접근이 어려운 산악 및 도서 지역 등에서 지표 변화 탐지, 산사태 감시 등의 분야에서 기술력 향상에 기여할 수 있다.
4. 국내 기술을 통한 극지환경 자기지전류 탐사 기법의 개발을 통해 수입 대체 효과가 있으며 향후 극지에서의 자원탐사 등을 위한 상품화에 기여할 수 있다.

KOPRI
극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 활용 방안

1. 획득된 관측자료 관리체계

- ▶ 한국극지데이터센터(KPDC) 활용 극지데이터의 원활한 등록, 관리 및 공유



Fig. 50. 한국극지데이터센터(KPDC; Korea Polar Data Center) 웹사이트.

- ▶ 자료공유에 관한 모든 사항은 극지연구소 ‘극지데이터관리규정’에 따름

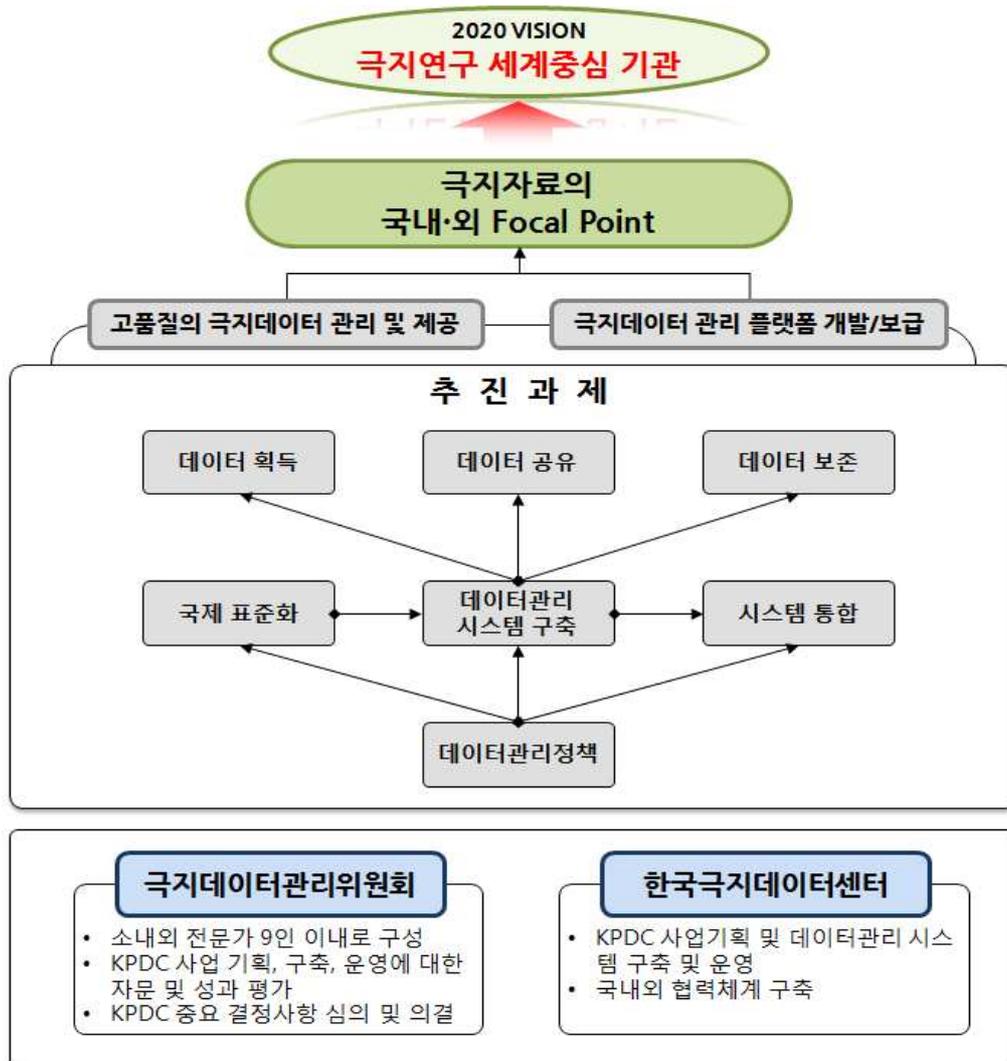


Fig. 51. 한국극지데이터의 관리 및 활용 체계.

2. 극지환경 자기지진류 탐사 기법은 현재 매우 제한되어있는 극지에서의 전자기적 지구물리 탐사 기법 적용 분야를 확장시켜 현재 지진과 토모그래피 등에 국한되어 있는 남극 하부 지체구조 규명에 널리 활용
3. 빙원 탐사기술은 빙하시추, 대기과학, 천문, 지구물리 등 남극 대륙 연구 수행에 활용

4. 장보고 기지 부근의 빙하 용빙수에 관한 해양자료는 해양 미생물 군집 변화에 대한 기초자료 제공 및 빙권 변동과 연계된 생태계 모델 연구에 활용

5. 지진/화산 및 기타 분야에의 활용

- 지진/화산 분야

: 전기적 잡음이 조용한 지역에서의 지진 감지를 위한 MT 모니터링 연구

: MT 모니터링을 통한 지하 심부 마그마 거동 변화양상 파악 및 지열 적용에의 연구

- 기타 분야

: 일반적인 토양과 달리 전극 매설이 어렵거나 지표면의 전기적 잡음이 존재하는 지역에서의 개발한 MT 모니터링 전극 장치 적용 연구

제 2 절 추가연구 필요성 및 개발 방향

전체 연구 목표는 남극 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드 빙권 변화를 지속적으로 관측하고 변화 원인을 규명하여 향후 해수면 변화 예측 정확성 향상을 도모하는 것이다.

따라서 이를 위한 추가 연구개발 방향으로, 1) 극지 환경에 최적화된 MT 탐사 기술 개발의 고도화, 2) 극지 하부 물리적인 변화 양상의 정밀 관측을 위한 MT 모니터링 시스템 및 전기장, 자기장 측정 센서 개발의 최적화 및 고도화, 3) 보다 장기간의 지속적인 극지 환경에서의 MT 모니터링 및 맞춤형 자료처리·분석 기법의 고도화 연구가 필요하다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 해외과학기술정보

1. 남극 대륙의 빙하 지하수를 대상으로 한 최초의 자기지전류(MT) 탐사

- ▶ Columbia university의 EM 연구실은 Subglacial Lake Whillans 하부의 지하수 영상 이미지화를 위한 총 44개 지점에서의 자기지전류 탐사를 수행한 연구 사례를 제공하였다. [출처: Web - Columbia university EM Lab]



Fig. 52. 빙하 지하수 대상의 자기지전류 탐사 모습.

2. 그린란드 Helheim 빙하에서의 모니터링 센서 설치

- ▶ 덴마크 연구진의 연구에 활용된 Kovacsdrilling 회사의 Ice auger 및 drilling bit이다. 이는 그린란드 Helheim 빙하에서의 모니터링 센서 설치를 위한 드릴링 작업에 대한 기술 정보를 제공하였다. [출처: Web - Kovacsdrilling]



Fig. 53. 그린란드 빙하 모니터링 구축을 위한 드릴링 작업 모습.

제 7 장 참고문헌

양준모 외, 2008, 자기지전류 탐사를 이용한 의성소분지 화산 칼데라의 지구물리학적 연구, Mulli-Tamsa, Vol. 11, No. 2, p. 99-108.

이춘기 외, 2014, MT 탐사자료를 이용한 제주도 지역의 전도성 퇴적층 분포 연구, Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa, Vol. 17, No. 1, p. 28-33.

Columbia university EM Lab,

<https://emlab.ldeo.columbia.edu/index.php/2018/12/27/em-lab-completes-first-magnetotelluric-survey-to-target-subglacial-groundwater-in-antarctica/>

D.N. Murthy, K. Veeraswamy, T. Harinarayana, U.K. Singh & M. Santosh, 2013, Electrical structure beneath Schirmacher Oasis, East Antarctica: a magnetotelluric study, CSIR-National Geophysical Research Institute, Vol. 32 No. 1, p. 10-25.

F. X. Bostick, 1977, A Simple Almost Exact Method of MT Analysis, Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration US Geological Survey, Contract No. 14080001-8, Vol. 359, p. 174-183.

K. Bahr and F. Simpson, 2005, Practical Magnetotellurics, Cambridge University Press, p.270.

Kovacsdrilling, <https://kovacsicedrillingequipment.com/publications/>

Wannamaker, P. E., W. M. Doerner, and D. P. Hasterok, 2007, Integrated dense array and transect MT surveying at Dixie Valley geothermal area, Nevada; structural controls, hydrothermal alteration and deep fluid sources, Proceedings

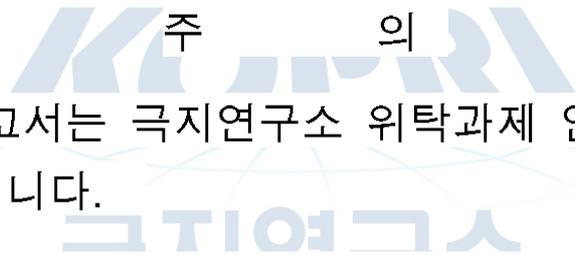
32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, 6, SGPTR-183.

Wannamaker, P. E., Rose, P. E., Doerner, W., Berard, B., McCulloch, J. and Nurse, K., 2004, Magnetotelluric surveying and monitoring at the Coso geothermal area, California, in support of the enhanced geothermal systems concept: survey parameters and initial results: Proc. 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford California, January, 26-28, SGPTR-175.

W. Rodi, and R. L. Mackie, 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, Geophysics, Vol. 66, p.174.

Zonge, K.L., and Hughes, L.J., 1991, Controlled source audio-frequency magnetotellurics, in Nabighian, M.N., ed., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla., Vol. 2, p. 713 - 809.

KOPRI
극지연구소



1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.