HAL open science

A Review of the Time-domain Electromagnetic Method: Research Trends and Applications

In Seok Joung, Sung Oh Cho, Bitnarae Kim, Juyeon Jeong, Soocheol Jeong, Hangilro Jang, Pierre-Alexandre Reninger, Myung Jin Nam

To cite this version:

In Seok Joung, Sung Oh Cho, Bitnarae Kim, Juyeon Jeong, Soocheol Jeong, et al.. A Review of the Time-domain Electromagnetic Method: Research Trends and Applications. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 2022, 59 (4), pp.364-378. 10.32390/ksmer.2022.59.4.364 . hal-04372457

HAL Id: hal-04372457

https://hal.science/hal-04372457

Submitted on 4 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

KSMER Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers

Vol. 59, No. 4 (2022) pp. 364-378, https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.4.364
ISSN 2288-0291(print)
ISSN 2288-2790(online)

기술보고

시간영역 전자탐사법: 연구 동향과 적용

정인석[1] · 조성오[2] · 김빛나래[3] · 정주연[4] · 정수철[5] · 장한길로[6] · Pierre-Alexandre Reninger[7] · 남명진[8,9]*

[1]세종대학교 에너지자원공학과 석박통합과정, [2]국립문화재연구원 보존과학연구실 연구원,
[3]BRGM, French Geological Survey, Geo-Resources Direction, Orléans, France, 박사후연구원,
[4]세종대학교 에너지자원공학과 석사과정, [5]한국지질자원연구원 DMR융합연구단 선임연구원, [6]보민글로벌 주식회사 과장,
[7]BRGM, French Geological Survey, Geo-Resources Direction, Orléans, France, 책임연구원,
[8]세종대학교 지구자원시스템공학과 교수, [9]세종대학교 에너지자원공학과 교수

A Review of the Time-domain Electromagnetic Method: Research Trends and Applications

In Seok Joung[1], Sung Oh Cho[2], Bitnarae Kim[3], Juyeon Jeong[4], Soocheol Jeong[5], Hangilro Jang[6], Pierre-Alexandre Reninger[7] and Myung Jin Nam[8,9]*

[1]Master's and PhD Integrated Course, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul, Korea
[2]Researcher, Archaeological Studies Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, Korea
[3]Post-doctoral Fellow, BRGM, French Geological Survey, Geo-Resources Direction, Orléans, France
[4]Master's Degree, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul, Korea
[5]Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Seoul, Korea
[6]Manager, Bomin Global Co., Anyang, Korea
[7]Principal Researcher, BRGM, French Geological Survey, Geo-Resources Direction, Orléans, France
[8]Professor, Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, Sejong University, Seoul, Korea
[9]Professor, Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

***Corresponding Author.** Myung Jin Nam, nmj1203@gmail.com, Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Received
5 July 2022

Final version Received
25 August 2022

Accepted
29 August 2022

Abstract

Time-domain/transient electromagnetic (TEM) survey measures changes in the electromagnetic (EM) field with respect to time, after an artificially generated electric or magnetic field is discontinued. Therefore, only secondary magnetic fields are measured that are free from the primary magnetic fields. Theoretically, TEM measurements are frequency responses that provide information on the conductivities of shallow to deep sub-surfaces. TEM data, normally stacked, are corrected during data processing. TEM measurement responses for synthetic models can be numerically computed using the finite difference, finite element, and finite volume methods. In this review, initially we have discussed the basic theory of the TEM method and TEM survey systems by classifying them into loop and ground-wire transmitters. Subsequently, we discussed data processing, modelling, and inversion. Finally, we discussed field survey cases from various application fields by classifying them into land, marine, and airborne TEM systems.

Key words : Time-domain electromagnetic method, secondary field, data processing, field survey

Copyright ⓒ 2022, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers

요 약

시간영역 전자탐사법(time-domain/transient electromagnetic, TEM)은 인공적으로 발생시킨 전기장 혹은 자기장을 차단했을 때의 자기장의 시간에 따른 변화를 측정하는 탐사법이다. TEM은 송신원에 전류를 차단한 이후 측정하므로 1차 자기장의 영향 없이 지하 매질의 정보가 있는 2차장만을 측정하게 된다. 이론적으로는 TEM은 지하 전도체에 대한 모든 진동수 반응, 즉 천부에서 심부까지의 정보 획득이 가능하다. TEM자료는 겹쌓기(stacking)와 자료보정 과정을 거치게 되며, 수치 모델에 대한 TEM 반응은 유한차분법, 유한요소법, 유한체적법 등의 기법을 이용하여 수치적으로 계산 가능하다. 이 기술보고에서는 TEM의 기본 원리와 탐사 시스템을 코일 송신원과 접지 전선 송신원으로 분류해 소개하였다. 이후 기존의 자료처리와 모델링, 역산에 대해 분석하고 육상과 해양, 항공 시간영역 전자탐사로 분류하여 다양한 분야에서의 적용사례들에 대해서 소개하고자 한다.

주요어 : 시간영역 전자탐사, 2차장, 자료처리, 현장탐사

서 론

시간영역 전자(time-domain/transient electromagnetic, TEM)탐사법은 광물자원 탐사를 위해 처음 시도된 이후로 지하수 탐사, 석유자원 탐사, 오염대 파악 등 다양한 분야에서 이용되고 있다(Cho, 2006). TEM법은 1차장 없는 순수한 2차장만을 측정할 수 있으며, 송수신기 사이의 벌림거리(off-set)가 반드시 커야 할 필요가 없어 작은 규모의 시스템 개발이 용이하다는 장점이 있다(Nabighian and Macnae, 1991). 또한, 전기비저항 탐사는 높은 전기비저항층 아래의 구조를 탐지하기 어려운 반면에, TEM법은 이러한 구조에도 적용가능하다는 장점이 있다(Cho, 2006).

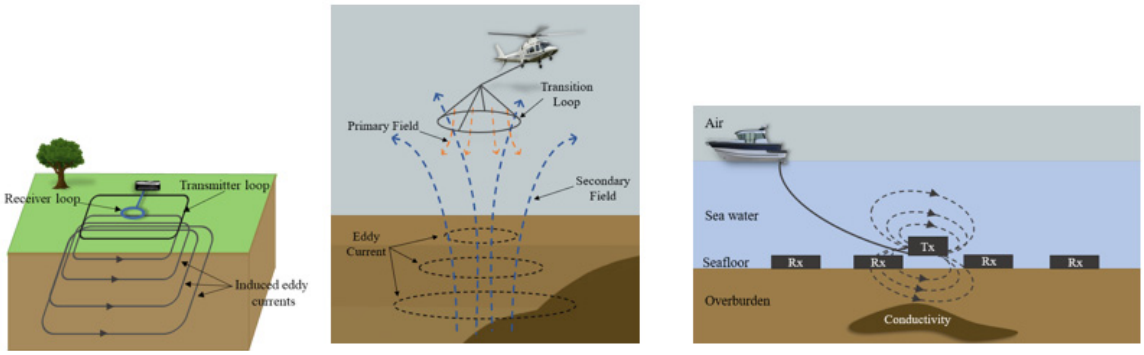
국내에서 1982년 호주의 SIROTEM장비의 도입과 함께 본격적으로 시작된 TEM 탐사 연구에서는 연산자분리에 의한 유한차분 수치모델링(Seo and Hyun, 1982), 라플라스 변환에 의한 과도 전자장 계산(Kim and Seo, 1984), 판상광체에 대한 축소모형 실험(Lim and Hyun, 1984), 판상광체에 의한 TEM 반응의 극성변화와 감쇠특성(Hwang *et al*., 1989), 기초파일내 철근 결함탐지 실험(Lee and Kim, 1993), TEM 감쇠곡선을 이용한 해수 유동 파악(Hwang *et al*., 2001) 등이 있었다. 그리고, 2000년 이후 큰 관심을 받은 해양 전자탐사법의 발전과 함께 수직 전기 쌍극자 TEM 시스템을 이용한 해저 저류층 탐지 가능성에 대한 수치모델 연구(Jang *et al*., 2013)와 In-loop 시스템을 이용한 해저 열수광상의 탐사 가능성(Jang and Kim, 2015), 항공전자탐사를 이용한 우라늄 광상 탐사 가능성(Yi *et al*., 2016) 등이 발표되었다. 최근에는 지표송신원을 이용한 시간영역 항공전자탐사(grounded electrical source airborne TEM, GREATEM) 시스템의 국내 도입과 함께 이에 관한 수치 모델링(Cho *et al*., 2015) 및 역산(Cho *et al*., 2017), 3차원 시간영역 전자탐사 모델링(Jang *et al*., 2017), 지표 송신원을 이용한 시간영역 항공전자탐사 3차원 역산(Yi *et al*., 2018) 등을 포함한 이론 연구들이 수행되었다. 시간영역 전자탐사는 특히 광상 탐사에 활발하게 적용되었으며 그 외에도 지하수 탐사, 해수 침투 탐사, 지하의 파쇄대 규명, 오염물 탐사에도 효과적으로 적용되었다.

이 논문에서는 시간영역 전자탐사법에 대한 이해를 돕기 위해 시간영역 전자기 반응의 기초이론과 탐사 시스템을 소개하고, 자료처리(data processing) 및 모델링(modeling), 역산(inversion) 방법에 대해 분석하였다. 이후 광상 탐사, 지하수 탐사, 해수 침투 등 다양한 분야에서 사용된 TEM 적용사례에 대해서 소개하고자 한다.

시간영역 전자탐사법의 기본 원리 및 이론

TEM법은 인공적으로 발생시킨 1차 전자기장을 차단했을 때, 이 1차 전자기장의 시간에 따른 변화에 의해 지하 매질에 발생한 유도 기전력에 의한 2차장을 측정하는 탐사법으로 지상, 항공, 해상 등에서 수행할 수 있다(Fig. 1). 즉, 루프 혹은 접지 전선 형태의 송신원에 일정한 전류를 흘려주다가 단락 시키면(Fig 2a), 지하 매질에서는 1차 자기장이 급격하게 감쇠하여 기전력이 유도된다(Fig. 2b). 유도 기전력에 의해 지하 전도성 매질에서는 유도 전류(eddy current)가 발생하며 이 유도 전류에서 생성된 2차 자기장을 측정하여 자료처리 및 역해석 과정을 수행하여 지하의 전기전도도 분포를 파악할 수 있다.

유도 전류는 초기에는 전도체의 표면에서만 발생하며 이 시간대를 이른 시간대(early time)라 한다. 이 전류는 옴의 법칙(Ohm's law)에 따라 감소하므로, 표면 전류가 감소하면 이에 따른 자기장도 변하게 되며 전도체 안에 다시 유도 전류가 생성된다. 이와 같은 과정이 반복되면서 유도 전류가 전도체 내부까지 발생하는데 이 시간대를 중간 시간대(intermediate time)라 한다. 늦은 시간대(late time)는 유도 전류의 확산이 끝나 그 분포 양상의 변화가 없는 시간대이



(a) (b) (c)

Fig. 1. Conceptual model of (a) ground, (b) airborne, and (c) marine time domain electromagnetic systems.

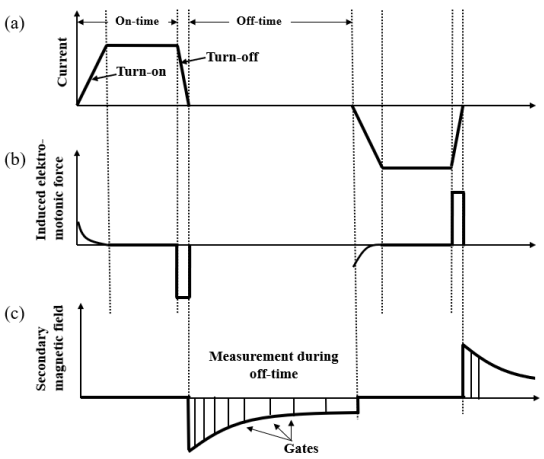


Fig. 2. Basic principles of the TEM method. (a) The current in the transmitter loop, (b) the induced electromotive force in the ground, and (c) the secondary magnetic field measured in the receiver coil. For the induced electromotive force and the secondary magnetic field graphs, it was assumed that the receiver coil is in the center of the transmitter loop (modified from Christiansen *et al*., 2006).

다. 이때 유도 전류의 변화와 2차 자기장은 전도체의 크기, 형상 및 전기전도도에 의해 변화하며 이른 시간대에서의 유도 전류 분포 양상은 전도체의 전기전도도와는 무관하며 전도체 크기, 모양과 같은 기하학적 요소에 따라 달라진다.

전류를 차단한 순간부터 이른 시간대의 반응은 천부의 전기전도도, 늦은 시간대의 반응은 심부의 전기전도도에 의해 영향을 주로 받게 된다. 송신을 하면서 측정하는 진동수영역 전자탐사법과 달리 송신원에서 발생하는 1차 자기장을 차단한 다음 지하 이상체에서 발생하는 2차장을 수신하게 되므로, 1차 자기장 없이 2차 자기장만을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이론적으로는 시간영역에서 임펄스는 진동수영역에서 백색스펙트럼에 해당되므로 시간영역에서 임펄스 반응은 지하 전도체의 전체 진동수대역 반응, 즉 천부에서 심부까지의 정보의 획득이 가능하다.

TEM 탐사에서 과도 전기장(transient electric field)은 일정 깊이에서 최대값을 보이는데, 이를 확산 깊이(diffusion depth)라고 한다. TEM에서의 확산 깊이는 시간의 제곱근에 비례하며 최대 전기장은 확산 속도(diffusion velocity)로 지하로 전파한다. 반무한 공간이나 수평 다층 구조 모델의 경우 이른 시간대의 유도 기전력에 의한 전기장은 송신 루프 근처에서 생성되는데 시간이 지나면 이 유도 전기장은 그 반지름이 커지면서 아래쪽으로 확산된다. 이와 같이 반지름이 커지면서 유도 전기장이 지하로 퍼져가는 현상을 스모크 링(smoke ring)이라 한다. 유도 전기장은 이와 같이 확산되면서 점차 그 크기가 감쇠된다(Nabighian and Macnae, 1991). 대부분의 TEM 탐사 반응은 기하학적 오차나 지형 효과(topographic effect)에는 둔감한 편이다. 그러나 상부에 전도성 풍화대가 존재할 경우에는 지형에 의해 상당히 심각한 오차가 발생할 수 있게 되므로 보정이 필요하다(Nabighian and Macnae, 1991).

시간영역 전자탐사 시스템의 종류

최초로 소개된 TEM 장비는 1966년에 개발되어 황화광물 탐사에 사용된 MPPO-1(Wait, 1951)라고 알려져 있다. 이 장비는 지하의 전도 이상 구조를 측정해 낼 수는 있었지만 아날로그 함수를 이용하는 등의 한계를 지니고 있어 제어가 어려웠다. 비슷한 시기에 북미에서도 TEM 장비의 개발이 진행되었으나 개발 장비는 늦은 시간대 자료의 측정

이 어려웠다. 한편, 1970년대 후반 호주에서는 MPPO-1의 장비가 자국의 잡음 환경에 맞지 않는다는 점을 개선하기 위해 SIROTEM (Buselli and O'Neill, 1977)이라는 TEM 장비를 개발하였다. SIROTEM은 이전 시스템 대비 큰 세기의 전류를 송신할 수 있었으며, A/D 컨버터를 채택하는 등의 장점이 있었다(Henderson, 2014). 이 외에도 지상TEM 탐사가 본격화될 수 있도록 한 UTEM(Lamontagne, 1975), Crone PEM(Crone, 1977), Geonics EM37 등이 개발되었다.

국내 TEM 장비의 활용은 1982년 한국자원연구소의 SIROTEM 장비의 도입이 최초로 알려져 있으며, 후에 LOTEM 장비가 도입되었으나 크게 활용하지는 못하였다(Cho, 2006). 이 장에서는 현재 TEM 탐사에서 대표적으로 사용되는 코일/루프형 송신원을 이용하는 경우, 접지 전기 쌍극자 송신원을 이용하는 경우의 대표적인 TEM 시스템에 대해 간략히 설명하고자 한다.

코일/루프형 송신원을 이용한 TEM 시스템

소형루프법을 이용한 전자탐사 장비는 진동수영역과 시간영역 양쪽 모두에서 가장 널리 사용되는 시스템으로, 송신 모멘트는 코일의 감는 횟수에 비례하므로 쉽게 키울 수가 있으며(Nabighian and Macnae, 1991), 수신원으로는 자력계 또는 유도 코일을 이용하여 일반적으로 자기장 또는 자기장의 시간 미분을 측정하게 된다. 대표적인 전자탐사 시스템으로는 PROTEM 57과 Crone PEM 시스템 등이 있다.

대심도 탐사를 위해서는 지름 수십~수백 m 크기의 대형 루프 송신원이 이용된다. 루프를 이용한 탐사에서는 수신원의 측정 위치에 따라 내부 루프법(in-loop)과 분리루프법으로 나뉘며, 내부 루프법에는 송신 루프와 같은 크기의 수신루프를 사용하는 동일루프법과 송신루프 중앙에 수신기가 위치하는 중앙루프법이 있다. 송신원 전류를 차단한 후에 수신기로 사용하는 단일루프법도 있으나 송-수신원 사이의 간섭 현상 때문에 많이 이용되지 않고 있다. 송신원의 크기나 출력이 클수록 신호대잡음비가 향상되고 가탐심도도 깊어지는 효과가 있지만, 송신원의 이동 및 운용이 어렵다는 단점이 있다. 육상 TEM탐사의 경우 대형 루프 송신원은 지상 고정형을 주로 사용한다. 항공 TEM 탐사의 경우 항공기에 수~수십 m 지름의 송신 루프를 장착하고 이동하며 탐사한다. 현재 광역 탐사에서 신속한 탐사를 위해 활용하고 있는 항공 TEM탐사는 항공기에 송수신 루프가 모두 장착되어 지표면에서 30 - 50 m 정도의 고도에서 자료를 취득한다. 송신 모멘트와 탐사 대상 지역의 전기비저항 분포에 따라 다르지만, 일반적으로 가탐심도는 최대 약 500 m 정도이다. 대표적인 상용 탐사 시스템으로VTEM, SkyTEM 등이 있다.

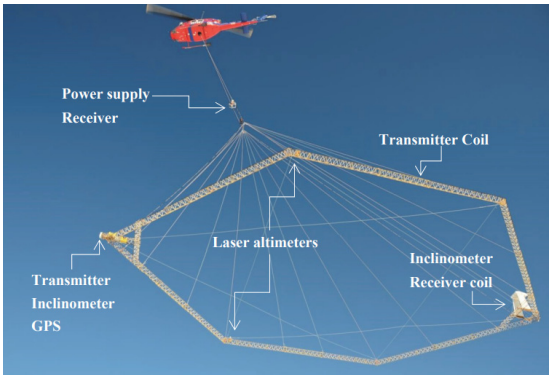


Fig. 3. Details of the SKYTEM system components (Auken *et al*., 2015).

캐나다 GEOTECH사에서 운용 중인 VTEM 시스템의 경우, 내부 루프법의 송수신 형태이며, 탐사 목적에 맞게 사용할 수 있도록 다양한 가탐심도의 시스템이 있다. 대수층 및 광물자원 탐사용으로 개발된 덴마크 SkyTEM사의 SkyTEM 시스템의 경우, 수신 루프가 송신 루프 후미에 있고(Fig. 3), 송신 루프는 모멘트의 선택적 운용이 가능한 듀얼 모멘트이다.

접지 전선 송신원을 이용한 TEM 탐사 시스템

접지 전선을 송신원으로 이용하는 TEM 탐사는 루프형 송신원을 이용하는 탐사법 보다 접지 전선에 의한 1차장의 감쇠가 적어(Nabighian and Macnae, 1991) 일반적으로 심부 이상대 탐지에 효과적이다. 이때 접지 전선의 길이가 벌림거리보다 약 3배 이상이 되는 경우는 쌍극자의 길이에 의한 효과를 고려해야만 한다(Jang *et al*., 2013). 대표적인 탐사시스템으로 육상 탐사용 LOTEM(Long offset TEM)과 SOTEM(Short offset TEM) 시스템, 항공 탐사용인 GREATEM 시스템이 있다. 일반적 방식의 쌍극자 송신 이외에도 신호대 잡음비를 향상시키기 위하여 두 개의 쌍극자 송신원에서 전류의 방향을 다르게 하여 전류를 주입하기도 하며(Davydycheva and Rykhlinski, 2011; Frenkel and Yakovlev, 2013), 원형 전기 쌍극자를 모사하여 방위각을 따라 원형으로 쌍극자 송신원을 배열하기도 한다(Antonov *et al*., 2019).

LOTEM 시스템(Strack and Vozoff, 1996)은 접지된 전선을 송신원으로 사용하고, 지하 매질에서 유도된 2차장을 측정한다. 송신기는 고정하는 반면 수신기는 이동식으로 배치하여, 목표 탐사 심도 보다 긴 벌림거리와 접지 쌍극자를 이용해 심부 탐사를 가능하게 하였다.

Alumbaugh(2002)가 제안한 짧은 벌림거리 TEM에서 시작한 SOTEM 시스템은, 측정 지점이 송신원 근처에 집

중되어 있으며 (즉, 벌림거리가 작으며) 전기장과 자기장을 모두 측정한다. SOTEM 시스템을 이용한 탐사에서는 벌림거리가 작을수록 측정한 필드의 세기가 커지지만 그와 동시에 (근거리 측정이므로) 송신기에 의한 왜곡도 커지기 때문에 최적의 벌림거리를 설정하는 것이 중요하다(Xue *et al*., 2015).

GREATEM 시스템(Mogi *et al*., 2009)은 LOTEM 시스템의 항공 버전으로 볼 수 있으며, 수km 길이의 접지된 전선을 송신원으로 사용하고 수신은 항공기에 견인되는 3성분 자력계를 이용한다. 접지된 전선을 길게 배치하면 큰 모멘트의 송신이 가능할 뿐 아니라 벌림거리를 크게 할 수 있어 탐사 심도도 깊어진다. 상용 시스템에서 많이 적용되는 송-수신 일체형 시스템에 비하여 비행 고도의 영향이 적고 더 높은 고도에서도 측정이 가능한 장점이 있기 때문에 우리나라와 같은 산악지형에 유리하다. 그러나, 수 km 길이의 송신 접지 전선을 설치하고 관리해야 하는 어려움과 송신원 설치에 따라 탐사 영역이 제한된다는 단점이 있다.

자료 처리 및 해석

TEM탐사의 자료처리 방법은 매우 다양하며, 주로 탐사에 사용된 측정 기기에 따라 달라지기도 한다. TEM 측정 기기는 대부분 송신 전류를 끊은 후 시간이 지나며 감쇠하는 과도 전압(transient voltage)을 측정하는 방법을 사용한다. TEM 탐사에서는 송신 전류를 여러 번 반복하여 흘려주면서, 같은 지연 시간에 대해서 수 차례 이상의 자료를 취득하고, 이를 더해주는 겹쌓기를 수행한다. 겹쌓기를 수행하면 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ration; SNR)가 높은 자료를 얻을 수 있다. 또한, TEM 측정 값은 송수신기 사이의 거리가 증가함에 따라 급격하게 감소하는데 각 측점에서 1차장으로 측정값을 나누어주는 보정(correction) 등의 자료처리 과정을 거치게 되며 모델링은 지배방정식을 이산화하여 수치적으로 계산한다.

자료 처리

겹쌓기(staking)

TEM탐사에서 측정한 전압 자료는 자료처리 단계에 따라 1) 겹쌓기 전 자료, 2) 겹쌓기한 자료, 3) 겹쌓기한 자료를 구간 평균한 자료 등으로 나눌 수 있다. 겹쌓기는 신호대 잡음비를 높이기 위한 방법으로 전력선의 진동수 자료 제거와 함께 가장 중요한 자료처리법이다(Auken *et al*., 2009). 이러한 자료 겹쌓기는 장비 내에서 자동으로 이루어지는 경우도 많다. 겹쌓기 전 처리 과정은 전력선과 같은 잡음원을 필터링 등으로 제거하는 과정이며 겹쌓기한 자료는 특정 지연 시간 자료들 중에서 중간 값을 크게 벗어나는 자료를 제외하고 평균값을 구한다. 이러한 자료 처리 과정을 거치면 많은 잡음을 제거할 수 있어 신호대 잡음비가 향상된다.

자료보정

탐사지 주변에 파이프, 전력선, 철조망 등의 잡음원들은 탐사 자료의 질에 영향을 유발하는 경우가 많으며, 이러한 영향을 받은 자료들은 적절히 보정 및 제거를 해주는 것이 필요하다. 탐사 자료에서 늦은 시간대에서만 진동 양상이 발생해도 전체 자료 곡선을 삭제해야 경우가 많은데, 이는 실제 자료의 진동 전 신호에서 비현실적으로 매우 큰 값이 나타나기 때문이다.

항공 TEM자료 처리의 경우, 이른 시간과 늦은 시간에서 같은 측점에 대한 평균 자료를 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다. 이러한 접근법의 단점은 고심도에 대응되는 늦은 시간 자료에 비해 얕은 심도에 해당되는 이른 시간 자료를 고해상도로 얻기 어렵다는 것이다. 평균한 자료들은 각 시간채널 별로 de-spike 필터에 적용하여 스파이크형 잡음을 제거하여야 한다

모델링 및 역산

모델링

TEM 모델링은 크게 시간영역에서 계산하는 방법과 진동수영역에서 계산하는 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 시간영역 Maxwell 방정식을 이용하여 직접적으로 TEM 반응을 계산하는 것이다. 3차원 TEM 모델링의 경우, 시간영역 유한차분(finite-difference time-domain; FDTD) (e.g., Wang and Hohmann, 1993; Commer and Newman, 2004), 시간영역 유한체적(finite-volume time-domain, FVTD) (e.g., Haber and Ascher, 2001; Oldenburg *et al*., 2013), 시간영역 유한요소(finite-element time-domain, FETD) (e.g., Um *et al*., 2010; Fu *et al*., 2015)를 이용한 방법이 TEM 반응 계산을 위해 활용되었다.

FDTD법은 전기장과 자기장이 시간에 따라 교차하는 엇갈린(staggered) 격자를 기반으로 하며 수학적으로 직관적이어서 비교적 계산이 용이하다. 하지만 쿠랑트(Courant) 안정 조건을 반드시 만족시켜야 하기 때문에 격자 크기와 시간간격(time step)에 대한 한계가 있다. FVTD법은 정규격자로 이루어진 유한체적(FV)법과 시간 이산화(time discretization)를 위한 역방향 오일러(backward Euler)를 결합한 방법이다. 유한차분법이나 유한요소법보다 계산이 빠르기도 하지만 내재된 시간 이산화(time discretization) 방법의 조건이 다소 불안정하며 시간간격이 비교적 크다는 단점이 있다. FETD는 변(edge) 유한요소법을 기반으로 역방향 오일러법을 결합하였다. 유한요소법이라는 특성 상 자유로운 격자 설정이 가능하기 때문에 비정형 격자를 이

용해 지형과 복잡한 구조를 정확하게 구현할 수 있다는 장점이 있다.

두 번째는 진동수영역에서 반응을 계산한 후, 푸리에 변환을 이용하여 시간영역에서의 반응으로 변환하는 방법이다(Raiche *et al*., 2007; Sasaki *et al*., 2015). 광대역의 진동수 반응을 계산해야 하지만 시간영역대비 많은 연구가 수행된 기존의 진동수영역의 알고리듬의 활용이 가능하며, 계산 효용성이 높다는 장점이 있다.

역산

TEM 자료 해석에서 가장 많이 이용하는 방법은 1차원 역산에 기초한 방법이다. 1차원 역산법은 확률론적 역산(stochastic inversion) 혹은 결정론적 역산(deterministic inversion)을 이용하여 계산할 수 있으며 계산 시간이 매우 빠르다는 장점이 있지만, 3차원 매질을 1차원 구조로 가정함으로 인해 발생하는 오류가 필연적으로 발생한다. 이러한 1차원 역산의 한계점을 개선하기 위한 다양한 연구들이 다수 수행되었는데, 가장 대표적인 방법은 Auken and Christensen(2004)이 제안한 횡적 제한 역산(laterally constrained inversion, LCI)법이 있다. 각 측점별로 1차원 역산을 수행하여 각 층의 전기비저항 및 두께를 결정하고 후처리 과정으로 1차원 역산 결과들을 병합하여 2차원 단면을 얻는 기존의 방법과 달리, LCI 법은 역산 단계에서 수평적인 연속성을 확보할 수 있도록 모델 제한을 가하여 역산 결과로 2차원 단면을 획득한다. 이를 3차원으로 확장한 개념인 공간제한 역산(spatially constrained inversion, SCI)을 통해 유사3D 전기전도도 모델링(quasi-3D conductivity modeling)을 기반으로 항공 TEM 탐사 자료 해석에 활용된 사례도 있다(e.g., Viezzoli *et al*., 2008). 실제 3차원인 지질 구조를 정확하게 해석하기 위해서는 3차원 모델링 및 역산이 필요하다. 특히 탐사 초기단계에 넓은 지역의 전기비저항 분포를 획득하기 위해 수행되는 항공 TEM 탐사 분야에서는 3차원 역산에 관한 연구들이 다수 수행되었다(e.g., Cox *et al*., 2012; McMillan *et al*., 2015).

대표적인 연구 사례로 항공전자탐사의 다중 송신원 문제를 해결하기 위하여 병렬 처리에 기반한 직접해법을 이용하는 방법이 있다(Oldenburg *et al*., 2013). 이 방법은, 반복해법 대비 계수행렬의 특성에 둔감하기 때문에 어떠한 조건이 주어지더라도 안정적으로 수치해를 계산해 주지만, 계수행렬의 분해 과정과 모델 전체에 동일한 격자를 사용하기 때문에 많은 메모리가 필요하다는 단점이 있다.

계산 시간 및 메모리 용량의 문제를 해결하기 위한 측면에서, 측점에서 반응은 송신원과 거리가 멀어질수록 민감도가 떨어지는 이론에 기반하여 개발된 역산 기법들도 다수 연구되었다. 대표적인 방법으로 Cox *et al*.(2012)의 "Moving footprint"를 이용한 역산 기법, Yang *et al*.(2014)의 "local mesh/global mesh"를 활용한 역산 기법 등이 있으며, 모든 모델 영역에 조밀한 격자를 이용하는 것보다 송신원 별로 모델링 격자를 만들기 때문에 모델 반응 정확도를 유지하면서 계산 비용이 감소한다는 장점이 있다. 또한, 모델링 격자와 민감도 격자를 다르게 설정하는 방법(multiple mesh formulation)에 대한 연구들도 일부 수행되었다(Zhang *et al*., 2021). 이 방법은 모델링 격자는 조밀하게 구성하여 모델링은 보다 정확하게 하면서, 민감도 격자 크기는 상대적으로 크게 구성하여 계산시간을 줄였다.

TEM 자료 해석의 여러 사례들을 분석해 보면, 3차원 TEM 자료의 역산이 과거에 비해 현실적으로 가능해져 지표 기반 TEM 시스템 자료(Yang and Oldenburg, 2014; Zhang *et al*., 2021)나 항공 TEM 자료(Qi *et al*., 2020) 해석에 적용되는 사례들이 증가하고 있다. 즉, 항공 탐사에서는 방대한 양의 자료를 측정하게 되므로, 계산 시간과 메모리의 한계로 3차원 TEM 모델링 및 역산 기법에 대한 발전이 매우 느렸지만(Macnae and Milkereit, 2007; Cox *et al*., 2012) 2010년대 이후로 컴퓨터 계산 능력의 발달과 수치해석 기법의 발전으로 인해 최근 다시 연구가 활발히 이루어지고 있다(e.g., Allah *et al*., 2014; Liu and Yin, 2016).

적용 사례

전통적으로 광물자원 탐사(Aktarakçi *et al*., 1997; Balch *et al*., 2003; Qiu *et al*., 2018; Law *et al*., 2019)를 위해 많이 수행되었던 TEM 탐사법은, 고속도로 하부 조사(Harris *et al*., 2006), 염수 침투 조사(Al-Garni and El-Kaliouby, 2011), 송유관 부식 구간 탐지(Hu *et al*., 2016) 등 다양한 분야에서 적용되고 있다.

수상 탐사와 항공 탐사의 경우, 송신기와 수신기가 부착된 탐사 시스템 일체를 보트 또는 유/무인 항공기에 연결하여 탐사 시스템을 견인하는 형태로 탐사가 수행된다. 이러한 탐사를 수행하는 경우, 별도로 송신기와 수신기를 측정마다 이동하며 설치하지 않아 보다 수월하게 탐사를 수행할 수 있으며, 이는 탐사 대상 구역의 측점을 촘촘히 할 수 있다는 장점으로 이어진다. 육상, 항공, 수상에서 다양한 목적으로 수행된 TEM 탐사와 관련된 연구 사례들을 소개하고자 한다.

육상 탐사

매우 광범위한 분야에서 수행되고 있는 육상 TEM탐사는 작은 전기전도도 변화까지 측정할 수 있으며(Farag *et al*., 2019), 단층 및 균열과 같은 대수층이 존재할 가능성이 높은 지질 구조를 탐사할 때도 수행되어 왔다(Yu *et al*.,

2018). 또한, 침출수나 광산 폐기물에 의해 오염되어 높은 이온 농도를 가지는 경우에도 낮은 전기비저항을 나타내기 때문에, TEM 탐사를 통해 얻은 전기전도도 분포를 해석하여 오염원 위치 및 영향을 파악할 수 있다(Abdullahi *et al*., 2011). 이 외에도 단층 해석, 광상 분포 해석, 점토 위치 파악, 지층 안정성 평가 등과 같은 다양한 분야에서 적용된 연구 사례들이 다수 발표되었다(e.g., Pedersen and Thomson, 1990; Leão-Santos *et al*., 2015; Widodo and Rasyid, 2017).

육상 대수층 탐사 사례로 사우디아라비아 북서쪽에 위치한 하랏 이트냔(Harrat Ithnayn) 지역에서 지하수 대수층을 찾기 위해 수행한 TEM탐사(Alshehri and Abdelrahman, 2022)를 보면, 8개의 측선에서 Zonge GDP32 장비와 50 m 크기의 송신루프, 10 m 크기의 수신루프를 이용하여 자료를 취득하고, 심도 250~300 m 까지의 측점별 1차원 역해석 결과들을 공간 보간(interpolation)하여(Fig. 4) 2차원 전기비저항 단면도를 생성하고 해석하였다. 각 측선에서 100 ohm-m 이상의 고비저항 영역은 그 지역의 현무암에 의한 영향으로 해석하였으며, 측선의 중심 부근에서 대수층 두께가 100 m를 넘는 것으로 해석하였다. 대수층으로 해석된 영역은 전기비저항값이 약 40 ohm-m이고 포화된 물은 담수일 것으로 예상하였으며, 일부 매우 낮은 전기비저항값을 보이는 영역은 염분이 섞인 지하수로 판단하였다.

해안가에 위치한 대수층의 경우, 해수 침투를 조사하기 위해 TEM탐사를 적용한 연구 사례들도 있다(e.g., Papadopoulos *et al*., 2004; El-Kaliouby and Abdalla, 2015; Kalisperi *et al*., 2018). 이중 사각 루프 송신원을 사용하여 얻은 자료를 처리하고 1차원 역산을 수행한 연구(Kalisperi *et al*., 2018)에서는 전기비저항 값에 따라 지층을 나눈 뒤 조사 지역의 지형 정보인 DEM(digital elevation model)을 반영하여 도시화(Fig. 5)하여 분석하였는데, 가장 전기비

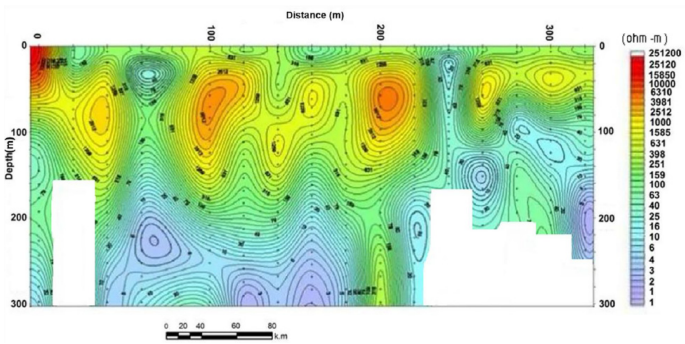


Fig. 4. Two-dimensional TDEM resistivity sub-surface section at EM-2 site of surveying profile (Alshehri and Abdelrhman, 2022).

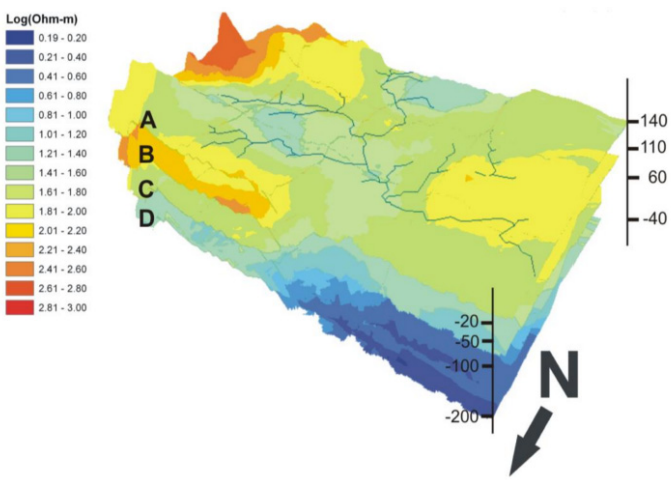


Fig. 5. The four extracted slices A, B, C, and D represent the heights obtained using DEM, showing the relief of the study area and the physical mechanism of the seawater intrusion. Heights obtained using DEM (Kalisperi *et al*., 2018).

저항이 낮은 층(그림의 파랑색 영역)을 염수로 포화된 층으로 해석하고, 지화학 분석 결과와 복합 해석한 결과에서도 이 층이 해수의 침투 가능성이 가장 높은 것으로 해석하였다.

쓰레기 처리장에서 발생한 오염물의 위치를 파악하기 위한 TEM 탐사(Baawain *et al*., 2018) 자료의 역산 결과, 지표면 가까이에서 80 ohm-m 이하의 저비저항이 나타나는 영역을 액체 폐기물 처리 활동으로 인한 오염의 이동으로 해석하였다. TEM 탐사와 시추공 조사로 얻은 피에조미터(piezometer)의 분석을 종합하면, 저비저항 및 오염 수치가 큰 영역이 비슷한 양상을 띠며 오수 처리용 인공 못과 오래된 액체 및 고체 폐기물 영역 아래서 나타났다. 이 저비저항대는 폐기물 처리로 인해 나타난 오염물질을 나타내는 것으로 시추공 조사와 복합해석을 수행하여 정확성을 높일 수 있었다.

지진을 유발할 수 있는 활성 단층을 조사하기 위해, 인도네시아에서 TEM47 송신기와 Protem 수신기를 사용하여 TEM 탐사를(Widodo and Rasvid, 2017) 수행한 연구에서는 50 m × 50 m의 송신 루프 – 수신 코일을 사용하고 송신파형으로 25 Hz, 62.5 Hz, 237.5 Hz(square pulse 진동수) 세 진동수를 사용하여 자료를 획득하였다. 획득한 자료는 Occam 역산과 Marqurdt 역산 두 기법을 기초로 하는 1D 역산을 수행하여 측선을 따라 1D 역산 결과를 주상도 형식으로 배치하였는데, Occam 역산의 경우에는 평활화 제한(smoothness constraints)의 영향으로 개별 층의 두께가 파악되지 않은 반면에 Marquardt 역산 결과에서는 경계를 명확하게 식별할 수 있었으며, 결과적으로 전기비저항 값에 따라 모래, 응회암 층을 구분하고 단층의 존재를 해석할 수 있었다.

덴마크에 위치한 Stendal Mark 지역에서 자갈 퇴적물과 점토의 채굴이 이루어지고 있어, 채굴 가능 매장량을 확인하고자 TEM탐사를 수행할 때(Maurya *et al*., 2020), 천부와 심부의 정보를 모두 얻기 위하여 작은 모멘트(low moment)과 높은 모멘트(high moment)의 전류 펄스를 송신하여 탐사를 수행하였다. 이때, 펄스의 반복 진동수는 2160 Hz와 660 Hz으로 설정하였고, 벌림거리는 9 m로 한 뒤 2 m × 4 m (1 turn) 송신 루프와 670 kHz 수신코일(56 cm × 56 cm *multi turns*)을 이용하였다. 조사 지역에서 획득한 결과를 살펴보았을 때 목표로 하던 자갈 퇴적물은 높은 전기비저항을 나타내는 영역에 위치하는 것으로 해석하였으며, 낮은 전기비저항 값으로부터 점토층(clay layer)의 두께도 영상화 하였다.

방사능 폐기물 처리장 안전 실험을 수행 중인 아이다호 연구부지(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL)에서 지표면 아래의 얕은 깊이(0~5 m)의 전도성 토양을 영상화하기 위해 이른 시간(Very Early Time) TEM(VETEM)을 수행한 연구(USDOE Office of Environmental Management, 2000)에서는 여러 전도성 물체(파이프, 금속 드럼통 등)가 묻혀 있는 부지에서 매몰된 전도성 물체의 정확한 깊이 및 위치를 추정하고자 하였다. VETEM 탐사 측정점을 2m 간격으로 설정하고 30인치 대형 루프를 사용해 수직탐사를 수행하였다. 탐사 결과는 심도별 수평 단면을 통해 확인하였으며, 1.75 m~4.25 m 사이에 전도성 물체를 확인하였다.

항공 탐사

항공 TEM 탐사는 주로 탐사 면적이 넓은 광역 탐사에 적용된다(Sørense and Auken, 2004). 지질학적으로 복잡한 트랩 구조 또는 공동 등의 탐사, 암석의 경계 등 지질 구조를 탐사(e.g., Sridhar *et al*., 2017; Guoqiang *et al*., 2018) 하는 경우와 광물 자원을 탐사할 때도 많이 활용되고 있다(Zhdanov *et al*., 2018).

중국 장쑤성(Jiangsu Province)에 위치한 예산(Yeshan)에서 지하 공동(터널)을 탐지하기 위해 무인항공기를 이용한 항공과 육상 TEM 탐사를 수행하고 이를 복합적으로 해석한 사례가 있다(Xue *et al*., 2018). 탐사 영역은 350 m x 300 m, 측선 간격은 10 m로 설정하였고, 항공 TEM탐사는 36개 측선 따라 지표로부터 약 50 m 고도에서5 m/s의 속도로 자료를 취득하였다. 육상 TEM탐사는 16개 측선을 따라 수행했으며 송신원은 약 100 m의 긴 접지 전선을 사용하고, 천부와 심부의 모든 정보를 획득하기 위해 지름 0.5 m의 코일과 1.2 m의 코일을 수신기로 사용하였다. 탐사 결과 항공 TEM 및 지상 TEM 모두 깊이 150 m 깊이 이상에서 전기비저항 값이 점진적으로 증가한다는 것을 확인하였다. 각 측선 하단에서 매우 높은 고비저항 값이 나타나는 영역은 광산 터널의 영향인 것으로 분석했는데 터널 실제 위치와 함께 전기비저항 단면을 나타내면, 터널로 추측한 고비저항 영역대와 터널 사이에 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 탐사 결과는 항공 TEM 탐사에 대한 자료 획득과 처리, 해석이 효과적이고 정확했으며, 지하 공동 탐사에 항공 TEM 탐사의 적용 가능성을 시사하고 있다.

사우디아라비아에서 지하자원 탐사를 위하여 수행한 8,000 km^2의 면적에서 취득된 항공 TEM탐사자료의 역산을 수행하고, 중력탐사, 자력탐사 결과와 연계 해석한 연구(Zhdanov *et al*., 2018)도 있다. 탐사의 효율성을 위해 고정익 항공기를 이용하였으며, 송신 루프는 항공기에 장착하고 30 Hz의 사각파(square wave)를 송신파형으로 전류를 송신하였다. 수신기는 송신원을 기준으로 수직 하부 60 m, 후방으로 120 m 지점에 위치시켰으며 3성분 TEM탐사 자료를 취득하였다. 탐사 자료 역산은 계산의 효율성을 위하여 'Moving sensitivity' 개념을 이용한 3차원 역산 방법을 사용하고, 모델링 및 민감도 행렬 계산은 진동수영역에서

전자기장을 계산하고 코사인 변환을 적용하여 시간영역의 자료로 변환하는 방법을 이용하였다. 역산 결과, 상부에 강한 전도성을 띠는 영역과 높은 전기비저항을 보이는 영역이 나타난다. 전도성 영역은 salt flat이고 고비저항 영역은 lava flow 또는 비전도성 덮개암(non-conductive cover)로 알려진 Arabian Shield이며 광물 퇴적물의 지시자로 활용될 수 있다. 이후 해석의 정확도를 향상시키기 위하여, 중력탐사, 자력탐사 결과와 연계해석을 수행하였다. 항공 TEM 역산 결과와 자력탐사 역산 결과(Fig. 6)를 동시에 도시하면, 광물 광화대로 추정되는 이상대의 연장이 수 백 미터까지 이르는 것으로 분석할 수 있다.

또한 항공 TEM탐사의 이른 시간대의 자료 처리에 대한 연구도 수행되었다(Schamper *et al*., 2014). TEM탐사에서 송신 전류 차단 후(turn-off ramp; Fig. 2a) 2~3 μs정도의 매우 이른 시간대는 0~20 m 깊이의 지표면 근처 지질구조의 높은 분해능을 가진 자료를 얻는 데 중요하다. 그러나 종종 송신기 루프에 느리게 감쇠하는 전류에 의해 생성된 잔류 1차장이 존재하며 잔류 1차장이 매우 이른 시간의 반응 자료를 왜곡시키게 된다. 왜곡된 자료는 제거하거나 보정해야 하며 감쇠 전류에 기인할 수 있는 왜곡 반응을 코일 반응(coil response)이라 한다. 대규모 항공 전자탐사에서 코일 반응 보정을 통하여 천부의 지질구조에 대한 해석이 가능하다.

코일 반응을 고려할 때의 해상도를 설명하기 위해, 덴마크 소뢰(Sorø) 지역에서 수행한 SkyTEM 조사의 결과와 전기비저항 탐사 결과를 비교하였다. 전기비저항 탐사 결과, 측선을 따라 4개의 층으로 나누어져 있다. 50 ohm-m 이상의 전기비저항 값을 가진 5~7 m의 첫 번째 층과 100 ohm-m 이상의 전기비저항 값을 나타내는 10~15 m 깊이의 두 번째 층, 100 ohm-m 이상의 전기비저항 값을 나타내는 약 40 m 깊이의 세 번째 층, 마지막으로 30 ohm-m 미만의 전기비저항 값을 나타내는 층을 확인하였다. 항공 전자탐사 자료 역산 결과, 9 μs 이전의 이른 시간 자료를 이용하지 않은 결과는 전기비저항탐사 자료의 역산 결과와 상당히 유사하였다. 9 μs 이전의 4개의 이른 시간을 코일 반응 보정 없이 사용한 역산 결과는 이른 시간 자료를 사용하지 않은 결과에 비해 처음 두 층의 전기비저항의 대조가 훨씬 뚜렷하다. 마지막으로 코일 보정과 이동 요인(shift factor)을 역산에 고려한 경우, 단면은 전기비저항 탐사 결과로 얻은 단면과 비슷해진다. SkyTEM 탐사를 수행하여 얻은 여러 단면도를 분석한 결과, 코일 반응은 30 m 깊이 상부의 역산 결과에 영향을 미치며, 전기비저항 탐사를 통해 얻은 전기비저항 값

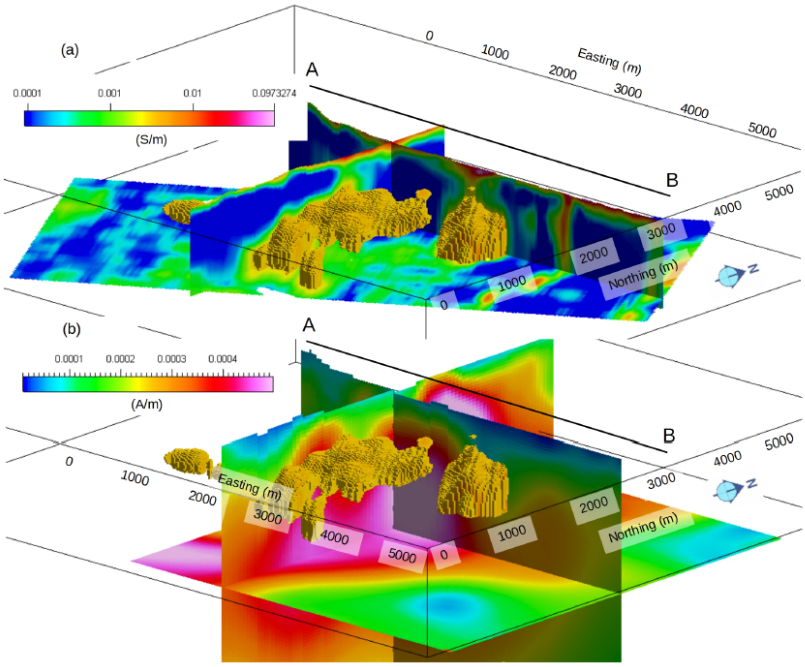


Fig. 6. A perspective view of anomalous structure discovered by the Glass Earth survey (a) shows a conductivity with a cut-off of 5 mS/m, and a cross-section of conductivity (b) shows the same conductive body from the same perspective, but the cross sections are magnetic vector magnitude (Zhdanov *et al*., 2018).

과 거의 유사하다는 것을 확인하였다. 지하매질의 전기비저항이 크거나 비행 고도가 높을 때, 즉 지상에서의 측정된 반응값의 크기가 작을 때 코일 반응을 포함하는 것이 더 중요하다는 것으로 해석할 수 있었으며, 이른 시간대를 사용하는 경우에 코일 반응 보정이 필수적이다.

수상 탐사

수상에서의 TEM 탐사는 주로 석유 개발 분야(Chave *et al*., 1991)에서 많이 사용되어 왔으며 해저 광상 평가에 적용되기도 하였다(Haroon *et al*., 2018).

밴쿠버 섬의 해안가의 수심 30~100 m 지역에서 석유 매장량을 평가하기 위해 시간영역 인공 송신 샘 전자탐사를 수행한 사례(Chave *et al*., 1991)가 있다. 탐사를 위해 길이 2 m, 지름 1 m인 원통 내부에 감은 수 100회의 코일을 넣어 송신기로 사용하였고 송신 전류의 극성을 5 ms 마다 바꾸어 시간영역 전자 탐사 신호를 만들어냈다. 수신기는 합성 탄소관내에 장착된 유도코일이며, 탐사선의 50 m 뒤에 위치시키고 견인하는 방법을 채택하였다. 총 3개의 측선을 따라 19개의 측점에서 자료를 획득하였다. 각 측정에는 약 90초가 소요되었다. 탐사 결과, 신호 진폭은 30~160 mV이며, 누적 신호에서 배경 잡음은 약 1 mV로 나타났다. 해저는 수십 미터까지 다양한 두께의 진흙으로 덮인 기반암으로 이루어져 있어 퇴적물의 두께에 따른 반응을 확인할 수 있었다. 전자기장의 분산속도는 지하 매질의 전기전도도에 따라 달라지므로, 전기전도도가 낮은 해저는 전기전도도가 높은 해저에 비하여 짧고 강한 신호를 생성한다. 신호 형태와 진폭은 해저 전기비저항을 나타내기 때문에 실제 신호의 지연 시간 및 진폭을 이론적으로 계산된 곡선에 일치시킴으로써 조사 대상 지역의 전기비저항 분포를 결정할 수 있다. 결과적으로, 탐사 결과로부터 다양한 두께의 10 ohm-m 진흙이 약 60 ohm-m의 전기비저항을 가진 암석 위에 덮인 모델과 일치하는 것으로 해석하였다.

그 외에 해저 황화광물을 탐사한 연구(Haroon *et al*., 2018)가 있다. Shinkai, Southern 및 Double Mounds에서 해저산 부근의 황화광물을 탐지하기 위해 고정 벌림(fixed-offset) 인공 샘 전자탐사와 겹고리 루프 시간영역 전자탐사를 수행하였다. 탐사는 6.3 m × 6.3 m크기의 사각 루프를 사용하여 20초 간격으로 측정하였으며. 시간영역 전자탐사 1차원 역산을 이용해 자료를 해석하였다. 황화광물의 축적으로 인한 것으로 추정되는 높은 전기전도도 이상대를 확인할 수 있었으며(Fig. 7), 이는 수치 모델링 및 역산 결과와 유사하였다. 하지만, 얻어진 자료만으로는 늦은 시간(late time)에서 신호 대 잡음비가 충분하지 않기 때문에 황화광물의 깊이를 알기 힘들며, 해저가 더 큰 전기비저항 값을 보이고, 더 균질한 것으로 보였다. 이는 산 정상 주변의 황화광물이 더 깊은 곳까지 발달하고 있으나, 전자탐사 자료로 확인할 수 없거나 산 정상 부근 지역에 국한되어 있다는 것을 암시한다.

결 론

TEM탐사법 대하여 기본적인 탐사의 원리에서부터 TEM 탐사 시스템들의 소개, 그리고 탐사 자료 처리 및 해석, 실제 탐사 사례 소개 등 TEM 탐사법에 대하여 분석하였다. TEM 탐사는 1차장이 없는 상태에서 순수한 2차장의 감쇠 양상을 측정하여 지하의 전기비저항 분포를 해석할

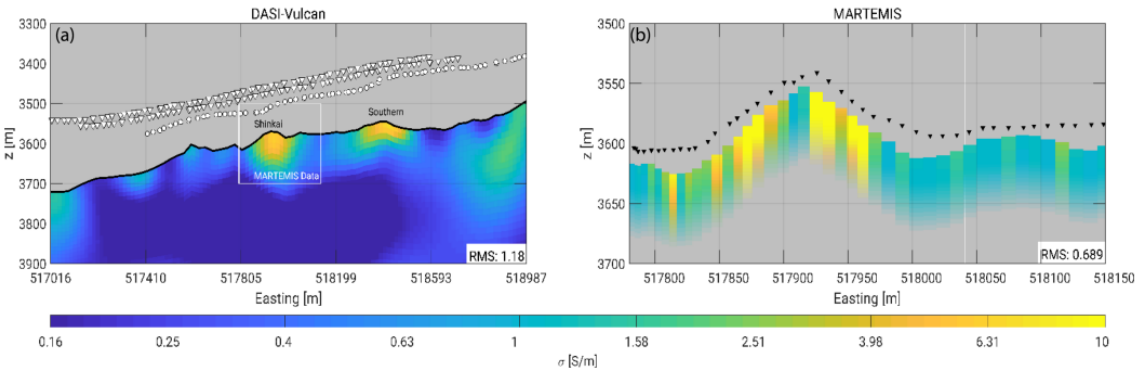


Fig. 7. Inversion models of the measured EM data. (a) 2D inversion of the DASI−Vulcan data. Transmitter positions are illustrated with circles, and receivers with triangles. (b) Stitched 1D inversion models for data obtained using the MARTEMIS system. Triangular markers represent the position of the coincident-loop antenna (Haroon *et al*., 2018).

수 있으며, 지형의 영향에 덜 민감하다는 장점이 있다. 또한, 전기비저항의 고저에 관계없이 높은 해상도를 제공하므로 다양한 지질구조에서 적용이 가능하다. 하지만 TEM 탐사는 송전선 등의 전자기적 잡음에 오염되기 쉬우므로 자료 해석을 위해서는 잡음을 분석하고 이를 제거하는 과정이 필요로 하며 최근에는 전통적인 방식뿐만 아니라 AI를 이용한 방법들도 연구되고 있다. 탐사 방법 역시 육상, 수상 탐사뿐만 아니라 무인 항공기나 헬기 등을 이용한 항공 탐사도 가능하며, 넓은 지역의 1차적인 탐사를 수행하기 위해 자료를 획득하고 분석하는 데 많이 사용되고 있다. 또한, TEM 탐사는 다양한 지질구조에서 적용이 가능하다는 장점으로 광물 자원 특히 상부의 지질구조에 가려져 이전에는 확인할 수 없었던 심부 광물자원을 탐사하는 데 유용하게 사용되고 있으며 그 외에도 대수층 평가 및 염수 침투를 확인하기 위해서도 활용되고 있다. TEM 탐사는 이러한 장점들과 시스템 발전을 바탕으로 지질구조의 특징으로 기존에 확인하기 어려웠던 대상체를 탐사하거나 이른 시간대의 자료를 이용하여 천부층을 탐사하는 등 더 다양한 분야에서 적용될 것이다.

사 사

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 KETEP의 지원(No. 20194010201920) 및 원자력안전위원회의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원(No. 2109092-0121-WT112)을 받아 수행된 연구사업입니다.

References

Abdullahi, N.K., Osazuwa, I.B., and Sule, P.O., 2011. Application of integrated geophysical techniques in the investigation of groundwater contamination: A case study of municipal solid waste leachate, *Ozean Journal of applied sciences*, 4(1), p.7-25.

Aktarakçi, H.K., Harthill, N., and Blohm, M.W., 1997. Time-domain electromagnetic survey for gold exploration, Nevada, *Geophysics*, 62(5), p.1409-1418.

Al-Garni, M.A. and El-Kaliouby, H.M., 2011. Delineation of saline groundwater and sea water intrusion zones using transient electromagnetic (TEM) method, Wadi Thuwal area, Saudi Arabia, *Arabian Journal of Geosciences*, 4(3-4), p.655-668.

Allah, S.A., Mogi, T., Ito, H., Jymori, A., Yuuki, Y., Fomenko, E., and Tsukuda, K., 2014. Three-dimensional resistivity modelling of grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey data from the Nojima Fault, Awaji Island, south-east Japan, *Exploration Geophysics*, 45(1), p.49-61.

Alshehri, F. and Abdelrahman, K., 2022. Groundwater aquifer detection using the time-domain electromagnetic method: A case study in Harrat Ithnayn, northwestern Saudi Arabia, *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), p.101-684.

Alumbaugh, D., 2002. *Research Proposal on 3D Numerical Analysis of the Grounded Electric Source*, Transient Electromagnetic Geophysical Method.

Antonov, E.Y., Mogilatov, V.S., and Epov, M.I., 2019. Effect of transmitter current waveform on transient electromagnetic responses, *Russian Geology and Geophysics*, 60(4), p.492-499.

Auken, E. and Christiansen, A.V., 2004. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data, *Geophysics*, 69(3), p.752-761.

Auken, E., Christiansen, A.V., Kirkegaard, C., Andersen, K., Finadaca, G., Sørensen, K., and Nyboe, N., 2015. An overview of the newest SkyTEM and inversion technologies with focus on resolution of shallow geological layers, In *EAGE/DGG Workshop on Airborne Geophysics 2015,* 2015(1), p.1-3.

Auken, E., Christiansen, A.V., Westergaard, J.H., Kirkegaard, C., Foged, N., and Viezzoli, A., 2009. An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system, *Exploration Geophysics*, 40(2), p.184-192.

Baawain, M.S., Al-Futaisi, A.M., Ebrahimi, A., and Omidvar-borna, H., 2018. Characterizing leachate contamination in a landfill site using Time Domain Electromagnetic (TDEM) imaging, *Journal of Applied Geophysics*, 151, p.73-81.

Balch, S.J., Boyko, W.P., and Paterson, N.R., 2003. The AeroTEM airborne electromagnetic system, *The Leading Edge*, 22(6), p.562-566.

Buselli, G. and O'Neill, B., 1977. SIROTEM: a new portable instrument for multichannel transient electromagnetic measurements, *Exploration Geophysics*, 8(3), p.82-87.

Chave, A.D., Constable, S.C., and Edwards, R.N., 1991. Electrical exploration methods for the seafloor, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 2(Application, Parts A and B), p.931-966.

Cho, D.H., 2006. Electromagnetic survey in Korea, *Economic and Environmental Geology*, 39(4), p.427-440.

Cho, I.K., Jang, J.H., Yi, M.J., and Rim, H.R., 2017. Laterally Constrained Inversion of GREATEM data, *Geophys. and Geophys. Explor*, 20(1), p.33-42.

Cho, I.K., Kim, R.Y., and Yi, M.Y., 2015. One-dimensional modeling of airborne transient electromagnetic using a long Grounded-wire Source, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 18(4), p.216-222. (in Korean with English abstract)

Christiansen, A.V., Auken, E., and Sørensen, K., 2006. The transient electro-magnetic method − Airborne TEM, In: *Groundwater Geophysics −A Tool for Hydrogeology* (ed. R. Kirsch), Springer, p.209-225.

Commer, M. and Newman, G., 2004. A parallel finite-difference approach for 3D transient electromagnetic modeling with galvanic sources, *Geophysics*, 69(5), p.1192-1202.

Cox, L.H., Wilson, G.A., and Zhdanov, M.S., 2012. 3D inversion of airborne electromagnetic data, *Geophysics*, 77(4), p.59-69.

Crone, J.D., 1977. Ground pulse EM, *Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysics*, 8, p.38-42.

Davydycheva, S. and Rykhlinski, N., 2011. Focused-source electromagnetic survey versus standard CSEM: 3D modeling in complex geometries, *Geophysics*, 76(1), p.27-41.

El-Kaliouby, H. and Abdalla, O., 2015. Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman, *Journal of Applied Geophysics*, 115, p.59-64.

Farag, K.S., Howari, F.M., and Abdelmalik, K.W., 2019. Imaging of hydrothermal altered zones in Wadi Al-Bana, in southern Yemen, using remote sensing techniques and very low frequency−electromagnetic data, *Arabian Journal of Geosciences*, 12(18), p.1-16.

Frenkel, M. and Yakovlev, A., 2013. Land hydrocarbon exploration using novel time-domain electromagnetic technology: A large-scale field study in Eastern Siberia, In *2013 SEG Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists. p.780-784.

Fu, H.H., Wang, Y.Q., Um, E.S., Fang, J.R., Wei, T.P., Huang, X.M., and Yang, G.G., 2015. A parallel finite-element time-domain method for transient electromagnetic simulation, *Geophysics*, 80(4), p.213-224.

Guoqiang, X., Weiying, C., and Shu, Y., 2018. Research study on the short offset time-domain electromagnetic method for deep exploration, *Journal of Applied Geophysics*, 155, p.131-137.

Haber, E. and Ascher, U., 2001. Fast finite volume simulation of 3D electromagnetic problems with highly discontin- uous coefficients, *Siam Journal On Scientific Computing*, 22(6), p.1943-1961.

Haroon, A., Hölz, S., Gehrmann, R. A., Attias, E., Jegen, M., Minshull, T.A., and Murton, B.J., 2018. Marine dipole−dipole controlled source electromagnetic and coincident-loop transient electromagnetic experiments to detect seafloor massive sulphides: Effects of three-dimensional bathymetry, *Geophysical Journal International*, 215(3), p.2156-2171.

Harris, B.D., Wilkes, P.G., and Kepic, A., 2006. Acquisition of Very Early Time Transient Electromagnetic Data for Shallow Geotechnical, Environmental and Hydrogelogical Applications, *In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2006*, Society of Exploration, p.631-638.

Henderson, R., 2014. SIROTEM−Australia's first locally invented TEM system, *Preview*, 2014(172), p.39-46.

Hu, B., Yu, R., and Liu, J., 2016. Experimental study on the corrosion testing of a buried metal pipeline by transient electromagnetic method, *Anti-Corrosion Methods, and Materials*, 63(4), p.262-268.

Hwang, H.S., Lee, S.K., and Song, M.Y., 1989. Polarity changes and decay characteristics in the TEM responses of plate-like target, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 26, p.364-377.

Hwang, H.S., Moon, C.K., Lee, S.K., and Lee, T.S., 2001. Determination of an underground seawater flow using a TEM decay curve, *Economic and Environmental Geology*, 34(5), p.499-506. (in Korean with English abstract)

Jang, H. and Kim, H.J., 2015. A scheme for computing time-domain electromagnetic fields of a horizontally layered earth, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 16(3), p.139-144.

Jang, H., Jang, H., Lee, K.H., and Kim, H.J., 2013. Step-off, vertical electromagnetic responses of a deep resistivity layer buried in marine sediments, *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(2), 025011.

Jang, H., Nam, M.J., Cho, S.O., and Kim, H.J., 2017. Three-dimensional finite difference modeling of time-domain electromagnetic method using staggered grid, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 20(3), p.121-128.

Kalisperi, D., Kouli, M., Vallianatos, F., Soupios, P., Kershaw, S., and Lydakis-Simantiris, N., 2018. A transient electro-magnetic (TEM) method survey in north-central coast of Crete, Greece: Evidence of seawater intrusion, *Geosciences*, 8(4), p.107.

Kim, H.J. and Seo, J.H., 1984. Calculation of transient electro-magnetic field in time domain by step function wave source, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Mining Engineers*, 21, p.9-15.

Lamontagne, Y., 1975. *Applications of wide band time domain EM measurements in mineral exploration*, Ph.D. thesis, University of Toronto, 685p.

Law, D., Noh, K.A.M., and Rafek, A.G.M., 2019. Application of Transient Electromagnetic (TEM) Method for Delineation of Mineralized Fracture Zones, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 279(1), p.12-38.

Leão-Santos, M., Brake, D., Souza, J.P., Freitas, C., and Matos, F., 2015. Ground and borehole time domain electromagnetic response at disseminated iron oxide-copper-gold deposits,

Carajás Mineral Province, Brazil, In *Near-Surface Asia Pacific Conference, Waikoloa, Hawaii*, 7(10), p.43-47.

Lee, S.K., and Kim, K.E., 1993. Test for detection of steel cage defects in concrete pile substructure with transient electromagnetic logging, *Butsuri-Tansa*, 46, p.183-189. (in Japanese with English abstract)

Lim, M.T., and Hyun, B.G., 1984, An experimental study on TEM method for a thin plate ore body, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Mining Engineers*, 21, p.185-196. (in Korean)

Liu, Y. and Yin, C., 2016. 3D inversion for multipulse airborne transient electromagnetic data 3D inversion for multipulse ATEM data, *Geophysics*, 81(6), p.401-408.

Macnae, J. and Milkereit, B., 2007. Developments in broadband airborne electromagnetics in the past decade, In *Proceedings of Exploration*, 7, p.387-398.

Maurya, P.K., Christiansen, A.V., Pedersen, J., and Auken, E., 2020. High resolution 3D subsurface mapping using a towed transient electromagnetic system-tTEM: case studies, *Near Surface Geophysics*, 18(3), p.249-259.

McMillan, M.S., Oldenburg, D.W., Haber, E., and Schwarzbach, C., 2015. Parametric 3D inversion of airborne time domain electromagnetics, *ASEG Extended Abstracts*, 2015(1), p.1-5.

Mogi, T., Kusunoki, K.I., Kaieda, H., Ito, H., Jomori, A., Jomori, N., and Yuuki, Y., 2009. Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of Mount Bandai, north-eastern Japan, *Exploration Geophysics*, 40(1), p.1-7.

Nabighian, M.N. and Macnae, J.C., 1991. 6.Time domain electromagnetic prospecting methods, *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 2(Parts A and B), p.427-520.

Oldenburg, D.W., Haber, E., and Shekhtman, R., 2013. Three dimensional inversion of multi-source time domain electromagnetic data, *Geophysics*, 78(1), p.47-57.

Papadopoulos, P., Tsourlos, P., Karmis, P., Vargemezis, G., and Tsokas, G.N., 2004. A TDEM survey to define local hydrogeological structure in Anthemountas Basin, N. Greece, *Journal of Balkani Geophysical Society*, 7(1), p.1-11.

Pedersen, R.N. and Thomson, S.J., 1990. A mineralization discovery via airborne time-domain EM, *The Leading Edge*, 9(6), p.24-28.

Qi, Y., Li, X., Yin, C., Qi, Z., Zhou, J., Sun, N., and Zhang, B., 2020. Three-dimensional adaptive finite-element method for time-domain airborne EM over an anisotropic earth, *Chinese Journal of Geophysics*, 63(6), p.2434-2448.

Qiu, C., Liang, B., Han, F., Liu, H., Zhu, C., Liu, N., and Liu, Q.H., 2018. Multi frequency 3-d inversion of greatem data by bcgs-fft-bim, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(4), p.2439-2448.

Raiche, A., Sugeng, F., and Wilson, G., 2007. Practical 3D EM inversion? The P223F software suite, *ASEG Extended Abstracts*, 2007(1), p.1-5.

Sasaki, Y., Yi, M.J., Choi, J., and Son, J.S., 2015. Frequency and time domain three-dimensional inversion of electromagnetic data for a grounded-wire source, *Journal of Applied Geophysics*, 112, p.106-114.

Schamper, C., Auken, E., and Sørensen, K., 2014. Coil response inversion for very early time modelling of helicopter-borne time-domain electromagnetic data and mapping of near-surface geological layers, *Geophysical Prospecting*, 62(3), p.658-674.

Seo, S.Y. and Hyun, B.G., 1982. Finite difference modeling of low-frequency transient electromagnetic field, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Mining Engineers*, 19, p.227-232. (in Korean)

Sørense, K.I. and Auken, E., 2004. SkyTEM? A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system, *Exploration Geophysics*, 35(3), p.194-202.

Sridhar, M., Markandeyulu, A., and Chaturvedi, A.K., 2017. Mapping subtrappean sediments and delineating structure with the aid of heliborne time domain electromagnetics: Case study from Kaladgi Basin, Karnataka, *Journal of Applied Geophysics*, 136, p.9-18.

Strack, K.M. and Vozoff, K., 1996. Integrating long-offset transient electromagnetics (LOTEM) with seismics in an exploration environment1, *Geophysical Prospecting*, 44(6), p.997-1017.

Um, E.S., Harris, J.M., and Alumbaugh, D.L., 2010. 3D time-domain simulation of electromagnetic diffusion phenomena: a finite-element electric-field approach, *Geophysics*, 75(4), p.115-126.

USDOE Office of Environmental Management, 2000, *Enhancements to and Characterization of the Very Early Time Electromagnetic(VETEM) Prototype Instrument and applications to Shallow Subsurface Imaging at Ssites In The DOE complex*, No. Doe/ER/14836; Project Number 60162, Geological Survey, Denver, CO(US), 69p.

Viezzoli, A., Christiansen, A.V., Auken, E., and Sørensen, K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion, *Geophysics*, 73(3), p.105-113.

Wait, J.R., 1951. Transient electromagnetic propagation in a conducting medium, *Geophysics*, 16(2), p.213-221.

Wang, T. and Hohmann, G.W., 1993, Afinite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling, *Geophysics*, 58(6), p.797-809.

Widodo, and Rasyid, F.M., 2017. Application of time domain electromagnetic method to study Lembang fault, West Java, In *AIP Conference Proceedings*, 1861(1), p.30-34.

Xue, G., Chen, W., and Zhong, H., 2015. Mapping coal-beds water-filled zones by using SOTEM, In *International Workshop and Gravity, Electrical & Magnetic Methods and their Applications, Chenghu, China*, p.482-485.

Xue, G.Q., Li, X., Yu, S.B., Chen, W.Y., and Ji, Y.J., 2018. The application of ground-airborne TEM systems for underground cavity detection in China, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 23(1), p.103-113.

Yang, D. and Oldenburg, D.W., 2014. 3D electromagnetic modeling using atomic survey decomposition, In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2014, p.664-668.

Yang, D., Oldenburg, D.W., and Haber, E., 2014. 3-D inversion of airborne electromagnetic data parallelized and accelerated by local mesh and adaptive soundings, *Geophysical Journal International*, 196(3), p.1492-1507.

Yi, M., Sasaki, Y., Johmori, A., and Jung, S., 2018. Three-Dimensional Inversion of ATEM Responses for Grounded Source, In *2nd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*, 2018(1), p.1-5.

Yi, M.J., Kim, J.H., Sung, N.H., Han, M.H., Motschka, K., Supper, R., and Johmori, A., 2016. Test airborne em surveys at a black-shale type uranium deposit in Korea, In *Near Surface Geoscience 2016-22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 2016(1), p.cp-495-00039.

Yu, C., Liu, X., Liu, J., Li, E., Yue, P., and Yan, S., 2018. Application of transient electromagnetic method for investigating the water-enriched mined-out area, *Applied Sciences*, 8(10), p.1800.

Zhang, B., Engebretsen, K. W., Fiandaca, G., Cai, H., and Auken, E., 2021. 3D inversion of time-domain electromagnetic data using finite elements and a triple mesh formulation, *Geophysics*, 86(3), p.E257-E267.

Zhdanov, M.S., Alfouzan, F.A., Cox, L., Alotaibi, A., Alyousif, M., Sunwall, D., and Endo, M., 2018. Large-scale 3D modeling and inversion of multiphysics airborne geophysical data: A case study from the Arabian Shield, Saudi Arabia, *Minerals*, 8(7), p.271.

정 인 석

현재 세종대학교 에너지자원공학과 석박통합과정
(本 學會誌 第59券 第2号 參照)

김빛나래

현재 Postdoctoral Fellow, BRGM, France
(本 學會誌 第59券 第2号 參照)

정 수 철

2009년 한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과 공학사
2016년 한양대학교 대학원 자원환경공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구센터 선임연구원
(E-mail; jsc1129@kigam.re.kr)

Pierre-Alexandre Reninger

M.S degree in Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre(EOST), 2009
Ph.D. degree in Institut des Sciences de la Terre d'Orleans(ISTO)/BRGM, 2012

현재 Expert Geophysicist, BRGM, Orleans, France
(E-mail; pa.Reninger@brgm.fr)

조 성 오

2017년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사
2019년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학석사

현재 국립문화재연구원 보존과학연구실 연구원
(E-mail; jsquare0814@gmail.com)

정 주 연

2022년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사

현재 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정
(E-mail; juhaappyy@gmail.com)

장한길로

2011년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학사
2013년 부경대학교 대학원 에너지자원공학과 공학석사
2016년 부경대학교 대학원 에너지자원공학과 공학박사

현재 보민글로벌 주식회사 기술연구소 수석연구원
(E-mail; hgrjang@bominglobal.com)

남 명 진

현재 세종대학교 에너지자원공학과 교수
(本 學會誌 第59券 第2号 參照)