

해설

사용후핵연료 처분시설 부지조사를 위한 물리탐사 수행지침서 작성 사례 : 항공전자탐사와 탄성파 반사법탐사 중심으로

공남영^{1*} · 김학수¹ · 문윤섭¹ · 한만호²

¹(주)지오제니컨설팅트

²한국원자력환경공단 고준위기술개발원

Case of Geophysical Survey Guideline for Site Investigation of Spent Nuclear Fuel disposal: Focusing on airborne electromagnetic and seismic reflection survey

NamYoung Kong^{1*}, Hagsoo Kim¹, Yoonsup Moon¹, and Manho Han²

¹Geogeny Consultants Group Inc., Seoul, Korea

²HLW Technology Development Institute, KORAD, Daejeon, Korea

요약

사용후핵연료 심층처분 부지조사는 그 중요성과 특수성을 고려할 때, 터널, 교량 등과 같은 일반적인 지반조사와는 달리 높은 수준의 품질관리가 요구된다. 본 논문에서는 단계별 부지조사에 적용할 물리탐사 기법을 선정하고, 탐사방법별 물리탐사 수행지침서를 작성한 사례를 소개하고자 한다. 물리탐사 수행지침서는 탐사계획, 자료획득, 자료처리 및 해석의 수행 절차와 고려사항 및 품질관리에 대한 내용이 포함되어 있으며, 이 중 항공전자탐사와 탄성파 반사법탐사 내용을 간략히 정리하였다.

주요어

물리탐사, 심층처분, 부지조사, 항공 전자탐사, 탄성파 반사법탐사

ABSTRACT

Considering importance and specificity, site investigations for deep geological disposal of Spent Nuclear Fuel require stringent quality control, unlike general geotechnical investigations for tunnels and bridges. In this study, we present a case of selecting geophysical survey method for individual site investigation stage and preparing geophysical survey guideline. The proposed geophysical survey guidelines include procedures, considerations, and quality control for exploration planning, data acquisition, data processing, and interpretation. They comprehensively summarize the contents of airborne electromagnetic survey and seismic reflection survey.

KEYWORDS

geophysical survey, deep geological disposal, site investigation, airborne electromagnetic survey, seismic reflection survey

서론

원자력 발전이 지속적으로 확대됨에 따라 방사성폐기물 (radioactive waste) 처리는 인간 생활의 안전과 환경 보호에 중요한 문제로 부각되고 있다(Wang *et al.*, 2018). 전 세계적으로 방사성폐기물, 특히 고준위 방사성폐기물(High-level Radioactive Waste, HLW)을 안전하게 처리하는 방법 중 유일하게

실현 가능한 방법은 심층처분이라고 받아들여지고 있다(Guo *et al.*, 2001).

이러한 심층처분 방법은 공학적 방벽, 천연방벽 등의 다중 방벽 시스템으로 구성되어 있으며, 높은 방사능과 온도를 가진 독성 물질을 생태계로부터 최소 10만년 이상 완전히 격리하여 안전하게 관리하는 것이 핵심이다(Chapman and Hooper, 2012). 이를 위해서는 방사성폐기물의 처분 용기 및 이를 차폐

Received: 25 October 2023; Revised: 22 December 2023; Accepted: 22 December 2023

*Corresponding author

E-mail: kongny@geogeny.biz

Address: GeoGeny Consultants Group Inc., 88 Dongkwang-ro, Seocho-gu, Seoul, Korea

©2024, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하는 역할의 공학적 방벽뿐만 아니라 심층처분시스템 및 주변 관리시설의 변형을 방지하고 유사시 핵종 이동을 지연시키는 등 보호 및 차단 역할을 할 수 있는 천연방벽의 역할이 매우 중요하다. 그러므로 심층 처분장 부지 선정 시에는 지질 안정성 및 지질환경, 그리고 처분장의 건설 및 운영 관점에서의 적합성을 평가해야 하며(Guo *et al.*, 2001), 이 중에서도 방사성 핵종 누출을 방지하기 위한 최종 장벽 역할을 하게 되는 주변 암반(surround rock mass)을 합당하게 선택해야 한다.

천연방벽의 역할을 할 수 있는 적절한 특성을 가진 지질, 암반이 분포하는 후보 부지 선정 과정에 있어 국제원자력기구(IAEA) 및 핀란드, 스웨덴, 스위스 등의 세계 선도국에서는 단계적 접근법을 채택하여 적용하고 있다. 단계적 접근법은 광역조사 단계(area survey stage), 부지조사 단계(site investigation stage), 상세 부지 특성화 단계(detailed site characterization stage)로 구분되며, 각 단계별 부지 평가 인자(Assessment Factor)를 분석, 평가하고 처분시설 건설의 적합 여부를 확인함으로써 대상 부지를 좁혀 나가면서 최종 부지를 선정해 가는 방법이다(McEwen and Äikäs, 2000).

국내에서도 암종, 광상, 선형구조, 단층, 지진, 화산, 용기/침강, 수리 지질, 지열, 지구화학, 핵종 거동, 미생물, 토층, 단열, 무결암, 암반 등 항목을 선정하여 단계별 지질환경 평가 인자가 제안된 바 있다(Kim *et al.*, 2020). 이러한 평가 인자를 활용하여 하나의 “부지”가 평가되기 위해서는 각 평가 인자에 관한 데이터베이스가 구축되어야 한다. 특히 지질 모델은 다른 평가 인자들의 데이터베이스에 기초가 되는 평가 인자이므로, 필수적으로 평가되고 구축되어야 한다. 이 과정에서 지구물리탐사는 비 파괴적 방법으로 지질 정보를 얻는 매우 중요한 요소이다. 따라서 부지조사를 위해 물리탐사를 적용하기 위해서는 매우 엄격한 기준과 높은 신뢰성을 확보하기 위한 물리탐

사 수행 절차가 적용되어야 한다.

이 논문에서는 한국원자력환경공단에서 『사용후핵연료 저장처분 안정성 확보를 위한 핵심기술사업』과 관련, “규제 요건을 반영한 단계별 부지조사 최적기법 개발 및 현장 적용성 실증” 연구의 일환으로, 2022년 “3D 지구물리탐사 해석 체계 설계(안) 용역”과 2023년 “심층처분을 위한 단계별 지구물리탐사 수행체계 개발” 용역을 통해 구축한 사용후핵연료 처분 시설 부지조사를 위한 물리탐사 수행체계를 간략하게 소개하고자 한다. 해당 수행체계는 현재 국내의 여러 분야에서 활용하고 있는 한국지구물리·물리탐사학회(KSEG)에서 2011년 발간한 『물리탐사 길라잡이』(KSEG, 2011) 자료를 바탕으로, 심지층 처분시설의 특성 및 중점 사항, 최신 물리탐사 기술 및 해석 기술 등을 반영하여 작성하였다. 또한 물리탐사의 신뢰성 확보를 위해 탐사 계획수립, 현장 자료획득, 자료처리 및 해석의 단계별 체크리스트를 작성하여 물리탐사 수행 시 가이드라인을 제시하고자 한다.

부지조사를 위한 물리탐사 수행체계 및 품질관리체계

1. 부지조사 단계별 물리탐사 기법 선정

지구물리탐사는 부지조사 단계별 대상 부지의 규모와 목적에 적합한 분해능(resolution) 및 가탐심도(depth of investigation) 등을 고려하여 수행되어야 하며, 또한 하나의 탐사방법으로 추론하기보다는 각기 다른 탐사 기법으로 얻은 물성을 기반으로 종합 해석 후 부지 모델을 구축하는 것을 추천하고 있다.

이에 단계적 접근법인 광역조사 단계(stage 1), 부지조사 단계(stage 2), 상세 부지 특성화 단계(stage 3)에 적용이 가능한 지구물리탐사 방법을 탐사 위치에 따라 항공, 지표, 시추공 등으로 구분하여 Table 1에 정리하였으며, 해당 탐사로부터 획득

Table 1. Survey methods and related factors for step-by-step site investigation.

자료획득	탐사기법	관련 평가 인자	Stage 1	Stage 2	Stage 3
항공	자력탐사	선형구조, 지질구조, 암종	○		○
	전자탐사	선형구조, 암종	○		
	방사능탐사	암종	○		
지표	중력탐사	암종		○	
	자력탐사	암종, 지질구조		○	○
	주파수영역 전자탐사	암종, 구조		○	○
	시간영역 전자탐사	지질구조		○	○
	탄성파 굴절법탐사	지질구조			○
	탄성파 반사법탐사	지질구조(층서), 단층		○	○
	MT 탐사	단층	○	○	
	전기비저항탐사	단층, 지하수위		○	○
시추공	GPR	지질구조, 표토층 심도			○
	물리검층, VSP탐사	암반 원위치 물성		○	○

할 수 있는 평가 인자를 나열하였다. 핀란드, 스웨덴, 스위스 등 세계적으로 처분시설 구축 분야의 선도국들은 각 단계별 다양한 탐사를 적용하여 선형구조 등의 평가 인자를 분석하고, 지질모델 구축하였다. 주목할 만한 사항은 동일한 탐사방법을 각 단계별 목적과 요구되는 분해능에 따라 적용했다는 것이다. 이것은 같은 탐사방법이라도 각 단계별로 요구되는 조사 범위와 분해능에 따라 다양하게 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 그러므로 부지조사 단계의 목적에 맞게 적절한 탐사방법을 선정하고, 각 탐사 방법에 따라 탐사 파라미터(parameter)를 결정하여 계획을 수립하는 것은 매우 중요한 사안이라 할 수 있다.

일반적으로 물리탐사를 이용한 조사 절차는 넓은 면적의 광역조사를 시작으로 후보지 중심의 상세조사 형태로 탐사의 분해능을 높이는 방식으로 탐사가 설계되는데, 이는 단계별 물리탐사 수행 결과에 기반하여 지질모델과 데이터베이스를 갱신하면서 지하 모델의 의문점이 해소될 때까지 반복적으로 적용되어야 함을 의미한다.

2. 부지조사를 위한 지구물리탐사 수행체계

국내에서는 2021년 12월 산업통상자원부에서 “제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안)”을 공표한 바 있다. 해당 자료에서는 부지조사 계획수립부터 부지 확정까지 부지선정 기간을 약 13년으로 계획하였으며, 이 중 부지적합성을 위한 기본조사는 5년, 심층조사는 4년으로 각각 배분하였다.

이에 국제원자력기구(IAEA) 및 세계 선도국에서 채택, 적용하고 있는 단계별 접근법과 제2차 기본계획에서 제시한 2단계 부지 적합성 조사(기본조사, 심층조사) 등을 반영하여 Fig. 1과 같이 지구물리탐사 수행체계 흐름도를 작성하였다.

지구물리탐사 수행체계 흐름도는 부지조사 단계는 세부적으로 stage1 광역조사 단계, stage2 부지조사 단계, stage3 상세 부지 특성화 단계로 구분하였으며, 이후 stage1 광역조사 단계와 stage2 부지조사 단계를 기본조사, stage3 상세 부지 특성화 단계를 심층조사로 재구성하여 작성하였다. 기본적으로 해당 수행체계 흐름도는 물리탐사 결과의 완성도를 높이기 위해 많은 방법들을 복합·적용하여 교차 확인 및 종합 해석을 수행하는데 주안점을 두고 있다.

항공탐사는 지질구조선 분석에 효과적인 항공자력탐사(방사능탐사 동시수행)를 예상 부지 전체에 대하여 탐사를 수행하고 이 결과를 지질조사 결과와 비교·검토하여 불확실성이 존재하거나 추가적인 자료가 필요할 경우 항공전자탐사의 적용을 고려한다.

지표탐사는 항공탐사의 결과에서 심층처분시설 부지로 적합하다고 확인되는 대상 부지에 대하여 먼저 2차원 탐사를 위해서 탐사 방법을 정하고 탐사 설계를 하여 수행한다. 이 때 탐사축선은 주향방향에 수직하도록 여러 축선을 체계적으로 배치하여 탐사결과의 일관성을 확보한다. 2차원 탐사결과를 바탕으로 대상부지로 가장 유력한 대상 후보부지에 대하여 3차

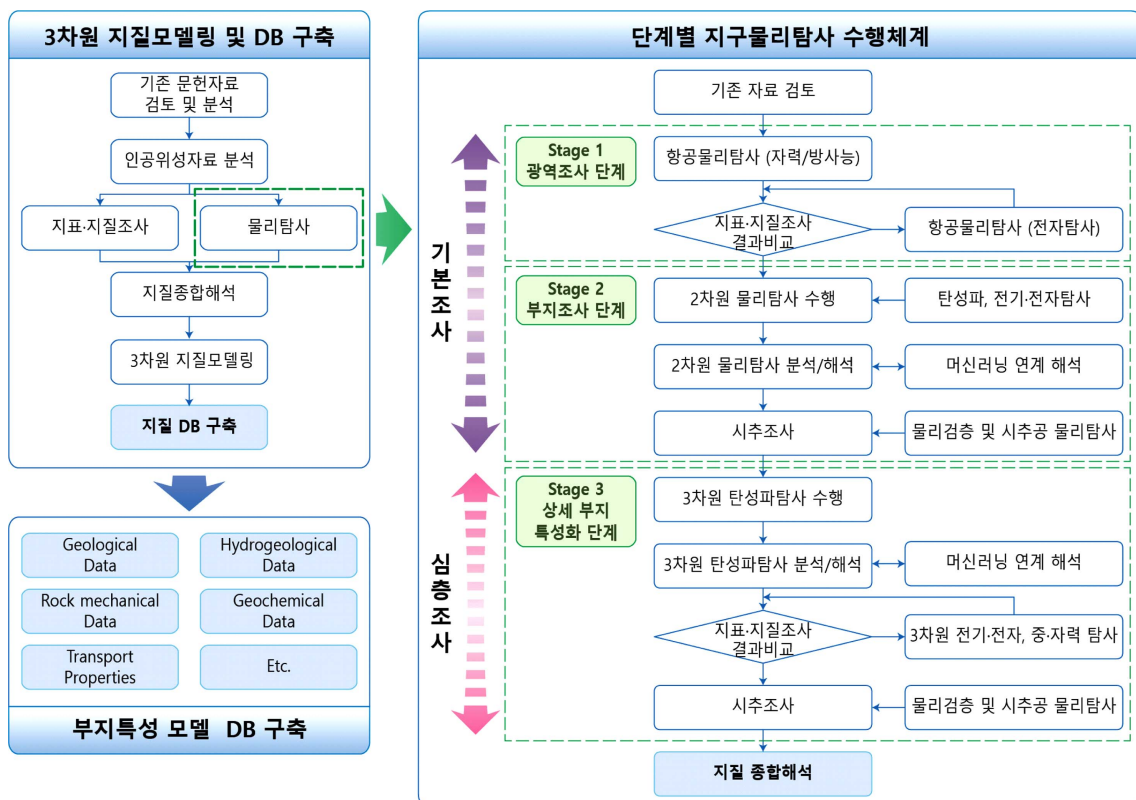


Fig. 1. Procedure of geophysical survey for site investigation.

원 탐사를 계획한다. 3차원 탐사는 육상 탄성파탐사를 기본으로 수행한다. 그러나 대상 후보 부지가 결정질암반일 경우 육상 탄성파탐사의 결과가 충분하지 않을 수 있으므로 3차원 전기/전자 탐사를 계획한다.

부지 특성화를 위한 모든 지표조사가 수행되고 확인 및 추가 실험을 위한 시추공이 완성되면, 암반의 물리적 특성 정보를 획득하기 위해 모든 공에 대해서 물리검층을 수행한다. 지표탐사결과에서 확인이 필요하거나 시추조사에서 새롭게 확인되는 지질구조가 확인될 경우 VSP탐사나 토모그래피 탐사를 수행한다. 그러나 시추공 배치로 볼 때 토모그래피 탐사 보다는 VSP탐사의 적용성이 높을 것으로 예상된다.

지구물리탐사 결과들과 지표지질조사 결과 등을 종합 해석하여 3차원 지질모델을 생성하고 구축하여 다음 단계들의 기본 자료로 제공한다. 요즘은 3차원 생성 상용 S/W이 많이 발전되어 있고 이를 통합 관리하는 플랫폼도 일반적이므로, 부지 특성화는 각 단계별 3차원 모델과 DB를 통합하기 위해 플랫폼 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3. 물리탐사 방법별 수행절차 및 품질관리체계

부지조사의 각 단계에서 활용할 탐사 방법(Table 1 참조)들에 대해 국내 인프라 구축 현황(탐사장비, 자료처리 소프트웨어 등) 및 적용 사례 등을 검토하고, 이를 바탕으로 각 탐사 방법의 프로세스별 수행절차 및 품질관리체계를 작성하였다.

이 논문에서는 앞서 언급한 탐사 방법들 중 대표적으로 항

공물리탐사와 지표물리탐사의 탄성과 반사법탐사에 대해서만 언급하였으며, 프로세스별(탐사계획 수립, 현장자료 획득, 자료처리 및 해석) 수행절차 및 품질관리체계를 현장지침서 형태로 간략하게 요약, 정리하였다. 프로세스별 수행절차 및 품질관리체계의 상세 내용과 기타 다른 탐사 방법에 대한 프로세스별 수행절차 및 품질관리체계는 관련 용역보고서를 작성되어 있다.

(1) 항공물리탐사

① 탐사개요 및 인프라 구축 현황

항공 물리탐사는 물리탐사 장비를 항공기 내 부에 탑재 또는 항공기 하부에 로프를 연결하여 장비를 장착하고 견인하며 계획된 영역 내에서 정해진 측선에 따라 물리탐사 자료를 취득하고 처리 및 해석하여 지하의 정보를 도출하는 방법이다. 최근에는 과업 지역이 소규모일 경우 비교적 간편한 드론 및 무인기를 활용하여 탐사를 수행하기도 한다.

항공물리탐사는 탐사의 특성상 자료의 획득이 어려운 험준한 산악이나 강, 호수 등 자연적, 인공적 장애물에 의한 제한적 요소가 없기 때문에, 광역 지역의 자료를 비교적 신속하게 획득할 수 있는 장점이 있지만, 지표 물리탐사보다 해상도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 초기 개략 조사 단계에서 주로 수행되며 광역 지역의 암상 분포, 지질구조선 분석, 단층대 조사 등의 목적으로 사용된다. 국내의 경우, 일반적으로 항공 자력쌍사능탐사가 주로 사용되고 있으며, 탐사 대상에 따라 추

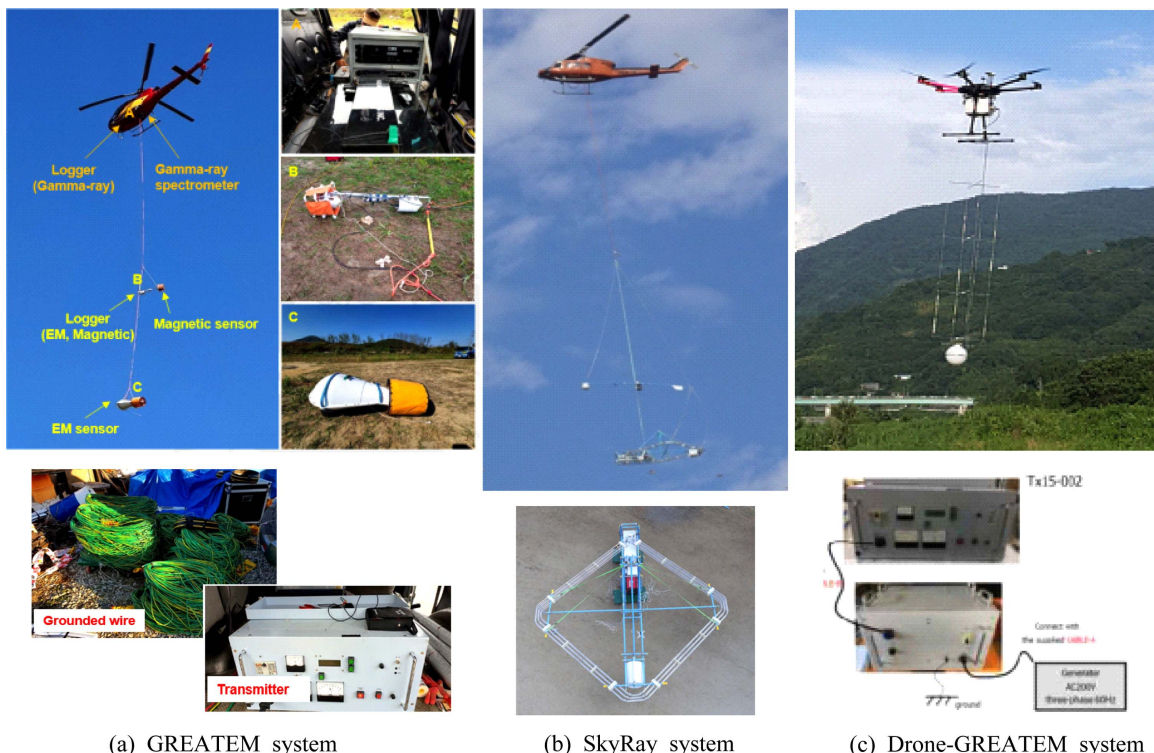


Fig. 2. Configuration of airborne electromagnetic system (KIGAM, 2021).

가적인 자료가 필요할 경우 2010년대 중반부터 항공 전자 탐사도 일부 사용이 되고 있다.

이러한 항공물리탐사 장비는 대부분 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 고도화 연구를 통해 자체 개발하여 보유하고 있다. 항공 물리탐사 장비는 크게 물리탐사 자료의 취득을 위한 각종 탐사기(자력, 방사능, 전자탐사 센서)와 측정된 자료를 저장하기 위한 자료 저장장치(logger), 그리고 정해진 영역내에서 정확한 측선과 목표 고도로 비행하기 위한 보조 시스템(GPS, 고도계, 네비게이션) 등으로 구성된다.

현재 항공자력탐사와 항공방사능탐사 센서는 한국지질자원연구원에서 1997년에 도입한 미국 Geometrics 사의 G-822A 세습 자력계와 2014년에 도입한 Radiation Solution 사의 RSX-5 gamma-ray spectrometer를 각각 운용하고 있다. 일반

적으로 항공물리탐사는 자료 해석의 불확실성을 줄이기 위하여 항공 자력-방사능 탐사, 항공 자력-전자 탐사, 항공 자력-방사능-전자 탐사 등과 같이 각 물리탐사 장비들을 조합하여 동시에 자료를 취득하는 경우가 대부분이다.

국내의 항공 전자탐사 장비는 주로 시간영역 시스템으로 구성되어 있으며, 고심도용 GREATEM (GRound Electric source Airborn TEM) 시스템, 중심도용 SkyRay 시스템, 천심도용 Drone-GREATEM 시스템 등을 구축하여 운용 중이다(Fig. 2). GREATEM 시스템은 지상 송신원 기반 시스템으로 지표에 송전선 및 전극을 설치하고 고출력 송신기를 활용하여 전기 쌍극자 송신원을 발생시킨 후 항공기에 설치된 수신기에서 자기장을 측정하는 방식이다. SkyRay 시스템은 지상 송신원이 설치된 주변에서 탐사가 가능한 GREATEM 시스템의 제한사항

Table 2. Planning considerations for airborne electromagnetic survey.

단계	고려사항
기존자료 검토	<ul style="list-style-type: none"> · 대상지역에 대한 기존 자료 확보 및 검토 수행 - 기존 자료(지형도, 지질도, 토지이용도, 지질조사 보고서, 주변공사 기록 등)의 검토 내용 간략 기술 - 대상 지역의 건물, 철제구조물, 지하매설물, 전력선 등의 분포 위치 검토
	<ul style="list-style-type: none"> · 검토사항의 탐사계획 반영 여부 결정 - 측선계획 및 탐사계획 수립시 검토 사항을 반영하여 내용 기술
사전답사	<ul style="list-style-type: none"> · 탐사 대상 지역 항공운항 및 관계정보 검토(비행 가능 여부 확인)
	<ul style="list-style-type: none"> · 사전답사 수행 여부 결정 - 기존 자료 검토 및 탐사계획을 수립한 다음 사전답사 필요성 결정 · 사전답사 고려사항 - 탐사 측선 주변의 전자기적 잡음원 존재 여부(고압선, 전력선, 발전소, 무선시설, 철도, 전력 이용 시설 등) - 탐사측선 내에 집중 거주지 존재 여부 확인 - 회전익기 이착륙을 위한 이착륙장(helipad) 설치 후보지 선정 및 해당지역 토지사용 허가여부 확인
항공기 선정	<ul style="list-style-type: none"> · 항공기 선정 고려사항 - 탐사 대상 지역 주변 운용가능 공항 또는 간이 이착륙장의 확인 - 고층건물, 고압전선 및 기타 항공기 운항의 제약조건 확인 · 탐사대상지의 면적 및 탐사자료의 품질 - 회전익기 또는 무인기(UAV or Drone)의 활용성 검토 - 전자탐사 송-수신기의 사양 및 주파수대역 등 검토 - 수신기의 항공기 탑재와, 지표 설치의 장단점을 고려한 탐사 장비의 선정 · 탐사장비의 선정 - 조건에 따른 센서종류, 고도계, GPS, 압력계, 온도계, 레이더 등의 선택 · 공항이 아닌 간이 이착륙장을 활용하여 항공기를 주기할 때 도난 방지를 위한 안전 계획 수립 및 적용
	<ul style="list-style-type: none"> · 최종 탐사측선 및 탐사방향 설정 - 기존 자료 및 사전답사 결과 내용을 반영하여 최종 탐사측선 설정 - 탐사 대상체의 예상 위치와 방향에 따른 주 측선 방향 결정 - 탐사 대상체의 예상 크기와 심도에 최적화된 탐사 측선으로 설정 - 주측선과 맺음 측선의 간격 선정
탐사설계	<ul style="list-style-type: none"> · 항공기 임대 또는 항공탐사 자료획득 전문 업체의 선정 - 항공기 임대를 통한 자료획득 또는 항공 운항허가를 위한 전문업체의 선정 · 비행방법 선정 - 지형조건, 탐사자료 품질조건을 고려하여 일정한 고도로 비행할지 여부 결정 · 탐사변수의 결정 - 측정간격, 비행고도, 비행속도 등의 결정

을 극복하고 넓은 영역을 비교적 신속하고 높은 분해능으로 탐사를 수행하기 위해 개발된 시간영역 송·수신기 일체형 시스템이다. 두 항공 전자탐사 시스템은 항공기 내부에 RSX-5 방사능 탐사기, 항공기 외부에 Geometrics사의 G-823A 자력 탐사센서를 동시에 장착하여 방사능 및 자력탐사 자료도 동시에 획득할 수 있다. 또한 천심도를 대상으로 하는 Drone-GREATEM 시스템은 GREATEM 시스템의 축소 버전이라 볼 수 있으며, 지상 송신원 기반 시스템으로 항공기 대신 드론에 소형 자기장 센서를 장착하여 전자탐사 자료를 획득하는 장비이다.

② 항공 전자탐사 수행절차 및 품질관리체계

탐사 계획수립

항공물리탐사는 주로 항공기를 일정 기간 임차하여 수행하기 때문에, 기한 내에 목표한 자료들을 효과적으로 취득하기 위하여 체계적인 계획을 수립해야 한다. 탐사계획은 기존 자료를 검토하고, 사전 탐사 수행 후, 탐사 대상의 예상 규모 및 심도, 목표 해상도, 지질학적인 배경, 주변의 환경 등의 다양한 요소들을 고려하여 설계한다(Table 2).

현장 자료획득

모든 항공물리탐사는 자료획득 전 비행 관련 인허가 취득부

Table 3. Data acquisition considerations for airborne electromagnetic survey.

단계	고려사항
탐사준비	· 임시항공운항허가(TSAP), 공항이용허가, 국방부허가 등의 필요 인허가 취득
	· 탐사 수행 전 주변 마을 또는 주거민 등에 탐사 수행 알림을 통한 안전 확보
	· 항공기 운항 제한 기준 수립 - 국내법, 국제법에 따른 1회, 1일 최대 운항시간 제한 수립 - 기상 상황에 따른 운항 여부 기준 수립 · 탐사장비의 점검 - 온도계, 압력계, GPS 시스템, 레이더, 고도계, 탐사기, 자력센서 등 탐사장비 이상 유무 확인 - 전자탐사 송·수신기의 정상작동 여부 확인 · 항공기 안전상태 점검 - 항공기 급유 전후, 이착륙 전후 조종사의 건강상태 확인 - 항공기 급유 전후, 이착륙 전후 항공기의 이상 유무 검토 · 송신기 설치 - 송신기의 육상 설치 시, 송신 전류량 및 전압을 결정 - 탐사자료의 품질향상을 위해서 고압, 고전류의 송신이 이루어지므로 안전계획 확보 및 사고방지대책 수립 및 적용
시험비행	· 지표테스트 - 시험 비행 전 탐사 송·수신 장비의 정상작동 유무를 최종적으로 검토
	· 탐사장비를 탑재하지 않고 단독 정찰비행(reconnaissance flight) 수행을 통한 지형의 정밀 확인 및 세부 비행 계획의 조정 - 정찰비행 수행 후 필요시 측선간격 및 비행고도 등의 재조정
	· 시험 비행(test flight) - 비행시 탐사 송·수신기의 수평 유지 여부 확인 - GPS시간과 얻어진 탐사자료 사이의 지연과 처짐을 분석하여 필요시 보정 - 육상 송신일 경우, 송신 전류 및 전압의 적정성 검토 - 송·수신기(루프)의 안전 고도 확인
본탐사	· 일일보정(Daily calibration) - 정해진 Test line의 측정을 통한 각종 장비의 이상 유무 검토
	· 항해범위(Navigation coverage) 검토 - 계획된 측선에서 항공기의 좌우 이탈 또는 고도 이탈 여부 검토 - 계획된 측선에서 이탈시 재비행 권고 또는 지시
	· 각 센서에서 생산되는 자료의 왜곡 없애기(de-spiking) - 탐사기에서 발생하는 특정 원인으로 인하여 발생하는 자료의 왜곡이 많고, 적음을 판단하여 해당 자료에서 제거하거나 재탐사 권고 또는 지시
	· 매일(daily), 매회(timely) 탐사장비의 검수를 통한 이상 유무 상시 확인 · 매일(daily), 매회(timely) 항공기의 검수를 통한 이상 유무 상시 확인 · 공항이 아닌 간이 이착륙장을 활용하여 항공기를 주기할 때 도난 방지를 위한 안전 계획 수립 및 적용

터 지표테스트, 시험비행 테스트, 비행자료 획득, 착륙 후 장비 이상 유무 확인, 취득자료 QC 순의 공통적인 절차를 갖는다. 항공전자탐사 수행을 위한 각 절차별 주요 고려사항은 Table 3에 정리하였다.

자료처리 및 해석

항공전자탐사의 경우, 주파수/시간영역, 지상 고정 송신원/이동 송신원 경우와 같이 시스템에 따라서 일부 차이가 있다. 여기에서는 사용후핵연료 부지조사 목적으로 비교적 심부의 영상화가 가능한 지상 송신원을 이용한 시간영역 항공전자탐사 자료의 처리 부분만을 다루었다.

항공전자탐사 자료처리는 Table 4와 같이 크게 자료취합, 자료처리, 역산 순으로 이루어진다. 가장 먼저 전류 송신이 이루어지지 않을 때 취득한 자세 자료를 이용하여 비행 시 취득한 자료에서 센서의 움직임에 따른 잡음(motion noise)을 예측하고 이를 이용하여 측정자료에서 이를 제거해야 한다. 그리고 영역 내에 정규화된 지점을 중심으로 일정 반경 이내 일정 고도 미만의 자료들을 이용하여 중합을 수행하며, 중합을 수행한 자료에서 오프타임 구간내의 신호에서 잡음 곡선을 추출하고, 이를 이용하여 역산을 수행한다. 역산의 수행시 사용되는 송신파형 자료는 지상에서 송전선 주변에 수신기를 위치하고 낮은 전류를 흘려주며 취득한 자료를 이용한다. 우선 중합점별 1차원 역해석을 수행하여 3차원 가상 단면을 생성할 수 있으며, 1차원 역해석에서 수렴이 잘 되는 자료들을 선별하여 3차원 역산을 수행하여 3차원 전기비저항 단면을 생성할 수 있다.

(2) 탄성과 반사법탐사

① 탐사개요 및 인프라 구축 현황

탄성파탐사(Seismic survey)는 지하 매질의 밀도와 탄성파 특성을 바탕으로 지하 지층에서 굴절되거나 반사되어 되돌아오는 탄성파의 도달시간과 진폭을 측정하여 매질의 탄성계수 및 지하구조를 해석하는 정량적인 탐사방법이다. 탄성파탐사 방법은 탄성파 굴절법탐사와 탄성파 반사법탐사가 있으며, 동탄성계수 산정을 위해 표면과 탐사방법도 많이 활용되고 있다. 이 중 수백 ~ 수천 m 이상 지층의 연속적인 분포특성(심도, 층 두께 등)과 단층과 같은 지질구조 등에 대한 정보를 획득할 수 있는 탄성파 반사법탐사가 사용후핵연료 심지층 처분 시설을 위한 부지조사 목적에 보다 부합되는 탐사방법으로, 현재 여러 국가에서 많이 활용하고 있다.

탄성파 반사법탐사의 장비는 크게 3개의 구성요소로 이루어진다. 즉, 지하 매질 내에 인위적으로 탄성 교란을 발생시키는 탄성파 송신원(source), 지하 매질을 따라 전파해온 탄성파 파동장을 변위, 속도, 가속도 등의 형태로 감지하는 수신기(receiver; 육상의 경우 geophone, 해상의 경우 hydrophone이 대표적), 그리고 측정된 파동장을 기록하고 분석을 위한 자료로 저장하는 기록장치(이하 탐사기; seismograph)로 구성된다.

탄성파를 이용한 지하매질 영상화에 있어 주요 매개변수는 속도와 진폭, 파형 등이다. 따라서 송신원과 탐사기는 송신 시점(trigger) 및 송신 기록(pilot signal)의 교신을 위해, 또 탐사기와 수신기는 감지된 신호 측정시점(trigger) 제어와 파형의 측정, 전송을 위해 서로 연결되어 있어야 한다. 전통적으로는

Table 4. Data processing considerations for airborne electromagnetic survey.

단계	고려사항
자료취합	<ul style="list-style-type: none"> · 자료의 취합 - 각 비행별, 일자별로 구분된 자료들이 하나 또는 여러 개의 일관된 형태의 파일로 취합되었는가 검토 - 파일의 형식은 binary 형식 외에 ASCII 형태의 파일로도 작성되었는가?
자료처리	<ul style="list-style-type: none"> · 필터링(filtering) - 저주파수 통과 선형 디지털 필터(Low pass linear digital filter), 자료 평활화(smoothing) 및 중합/겹쌓기(stacking) 기법의 적정성 검토 - 신호대잡음(S/N)비를 개선 여부 검토 · 영값 맞추기(zero leveling) - 각 주파수 대역별로 측정성분의 영(zero)값을 정확하게 설정하였는지 검토 - 자료 사이의 일관성 확인 및 정렬 여부 검토 · 위상 및 신호 진폭 보정(Phase and amplitude correction) - 주파수대역, 송신기와 수신기 사이의 간격 및 코일의 배치에 따른 위상 및 신호의 진폭이 정렬되고 보정되었는지 확인 - 비행고도를 변경하면서 측정된 동상 및 이상 성분의 비에 대한 위상차 도표 작성 - 겹보기 비저항 분포를 등고선 형태로 작성하기
역산	<ul style="list-style-type: none"> · 역산 - 각각의 자료들을 1차원 역산한 후, 역산 결과들을 취합하여 단면 및 3차원 입체구조로 구성하는 과정에서의 적정성 검토 · 지구통계적 보간(Geo-statistical interpolation) - 3차원 입체 구조 구성시 적절한 지구통계기법이 적용되었는지 검토 - 블록 모델링에 사용되는 단위 블록의 크기의 적정성 검토

유선 케이블을 이용한 유선 탄성과 시스템이 널리 활용 되어 왔고, 최근에는 이러한 교신을 무선으로 하는 무선 시스템의 활용도 많아지고 있는 추세이다.

탄성과 송신원

탄성과탐사 수행시 활용되는 탄성과 송신원은 탄성 교란 생성 기작(mechanism)에 따라 폭발형(explosive) 송신원, 충격형(impact) 송신원, 그리고 진동형(vibrational) 송신원으로 구분 할 수 있다. 각각의 유형에 대해 대표적인 탄성과 송신원은 다이너마이트, 해머 또는 무거운 추(weight-drop)와 바이브로사이즈(vibroseis) 등이다.

1990년대까지의 국내 육상 탄성과탐사는 주로 지반조사 분야에서 천부 불연속면 및 기반암 경계 파악을 위한 굴절법탐사가 주를 이루어 왔고, 일부 고분해능 천부 반사법탐사를 중심으로 발전해 왔다. 탐사 심도가 깊지 않고, 높은 분해능이 요

구됨에 따라, 송신원으로는 충격형 송신원인 해머(슬레지 해머, sledge hammer)가 가장 널리 활용되어 왔고, 무거운 추 낙하 방식(weight-drop)도 보조적으로 사용되어 왔다. 폭발형 송신원으로는 다이너마이트(dynamite)가 가장 널리 활용되고 있으며, Sissy (Seismic Impuse Source System, 독일 Geosym 사)와 같은 산탄층 계열을 보조적으로 활용되어 왔다. 진동형 송신원인 바이브로사이즈(vibroseis)는 2000년대 초부터 CO2 지중저장 부지 탐색(screening)을 위한 대규모 심부 탄성과 반사법탐사의 소요가 발생하면서, 한국지질자원연구원에서 2008년부터 도입하여 육상 탄성과 반사법탐사에 활용하기 시작했다.

현재 국내에 도입되어 활용하고 있는 바이브로사이즈는 GIN 2.5 시스템과 GIN 30이 있으며, 모두 한국지질자원연구원에서 보유, 운용하고 있다(Fig. 3). GIN 2.5는 최대 출력 2,500파운드급의 픽업트럭 탑재형으로 소형이며 고분해능 천

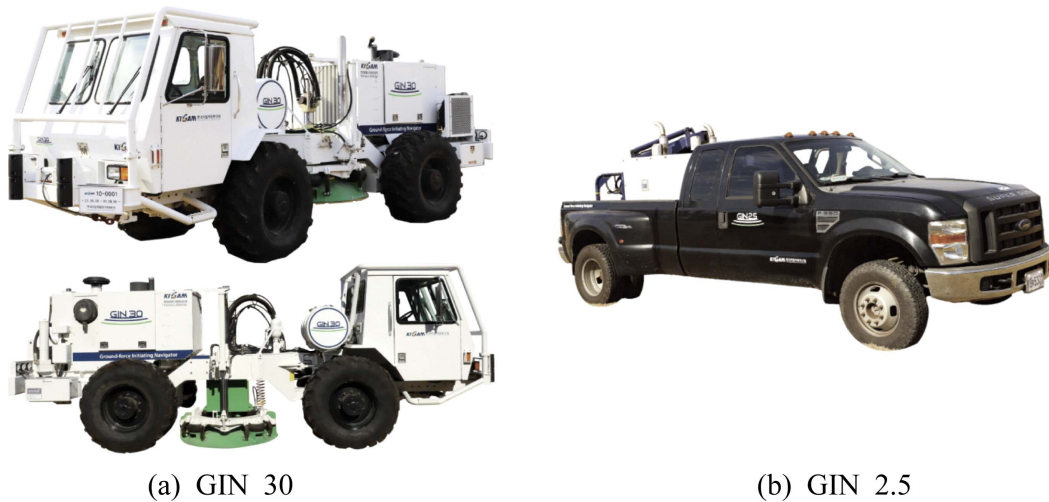


Fig. 3. Vibroseis systems owned by KIGAM.

Table 5. Comparison of vibroseis system specifications.

구분	GIN 2.5 (2009년 도입)	GIN 30 (2021년 도입)
상세 제원	<ul style="list-style-type: none"> ○ Max. Theoretical Peak Force : 2,500 lbs ○ Mass Piston Area : 1.5 inches² ○ Reaction Mass Stroke : 1.88 inches ○ Servovalve : 5 GPM ○ Base plate area : 1,108 inches² ○ Base plate assembly weight : 370 lbs 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Max. Theoretical Peak Force : 30,000 lbs ○ Mass Piston Area : 8.69 inches² ○ Reaction Mass Stroke : 3 inches ○ Servovalve : 60~200 GPM ○ Base plate area : 2,827 inches² ○ Base plate assembly weight : 1500 lbs
장점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소형 경량으로 도로운행 용이 ○ 평지 기동성 우수 ○ P파, S파 송신 가능 ○ 넓은 진동수 대역폭 (5~550 Hz) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 송신출력이 상대적으로 강함 (12배) ○ 탐사자료 획득/처리 생산성 높음 (훈기 시간 ↓, 신호 대 잡음비 ↑) ○ 버기형 차량으로 험지 기동성 우수 ○ 5Hz 미만 저주파 송신 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 약한 송신 출력에 따른 낮은 생산성 ○ 5 Hz 미만 저주파 송신 불가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고속도로 운행 제한으로 상차 운반 ○ S파 송신 불가 ○ 좁은 진동수 대역폭 (1~250 Hz)

부 탐사에 주로 이용하고, GIN 30은 최대 출력 30,000파운드로 중규모 심도에 활용한다. 두 시스템의 상세 제원 및 비교자료는 Table 5에 정리하였다.

수신기 및 기록 시스템

탄성과 탐사 수신장비는 탐사 방식에 따라 약간씩 차이가 있지만, 일반적으로 간략히 자료를 측정하는 수신기, 연결케이블, A/D 컨버터, 자료획득 시스템으로 구성된다. 국내 탄성과 반사법탐사 수신장비로는 크게 유선시스템인 미국 Geometrics사의 Geode DZ™ 시스템과 무선 시스템인 미국 fairfield Nodal사의 Z-LAND™ 시스템을 활용되고 있으며, 최근에는 SMARTSOLO사의 SmartSolo®IGU-16 시스템이 일부 도입되었다.

Geode DZ™ 시스템은 최대 8채널에 대한 자료를 수신, 디지털 신호로 기록하는 모듈형 기록 시스템(Geode DZ)이 핵심이며, 다수의 모듈을 네트워크 케이블을 통해 LTU(Line Tap Unit), 나아가 자료취득 소프트웨어가 설치된 컴퓨터 시스템으로 연결된다. LTU는 하나의 측선을 관리하는 역할을 하며, 여러 측선을 Fig. 4와 같이 평행하게 설치하고 운용하면 3차원 탐사 배치(layout)을 구성할 수 있다. 이때, 전체 시스템은 최대 16개의 측선까지 운용할 수 있어, 수천 채널 이상의 3차원 자료수집이 가능하다. 해당장비는 현재 약 560채널(한국지질자원연구원 기준) 이상 운용이 가능하다.

최근에는 기술의 발전에 힘입어 무선 시스템의 성능과 안정성이 높아져, 그 활용도가 증가하고 있는 추세이다. 무선 탄성파탐사 시스템은 전통적인 탄성파탐사 시스템의 3요소인 송신원(source), 수신기(receiver), 기록장치(seismograph) 상호간의 통신이 무선으로 이루어지는 시스템이다. 즉 수신기와 디지털 기록취득 장치가 독립적인 시스템으로 하나의 노드를 구성하고, 다수의 노드들이 무선통신(wireless telemetry)를 통해 제어되거나 취득된 자료를 송수신하는 장치이다.

이러한 무선시스템 장비는 앞서 언급한 미국 fairfield Nodal사의 Z-LAND™ 시스템이며, 현재 한국지질자원연구원에서 약 130 채널을 도입하여 활용하고 있다(Fig. 2-5 참조). 이 장비의 경우, 중앙제어 장치 부분은 휴대용 단말기(HHT; hand held terminal)를 통해 탐사측선 좌표, 무선 수신기 위치, 송신원 위치 등 탐사설계 변수를 확인하고 송신원과 수신기를 제어한다. 송신부는 송신 신호를 보내고, GPS 시간을 기록한다. 무선 수신기는 고유 진동수가 10 Hz의 노드 지오폰으로 상부에 GPS 장치와 메모리칩, 중앙부에 리튬 배터리가 장착되어 있고, 외부 상단에는 충전과 자료 전송에 쓰이는 연결 단자가 있다. 완전 충전에서 방전까지 2 msec 간격으로 자료를 기록할 경우 최대 36일 동안 이용 가능하며, 상태 표시가 LED 램프 신호로 표시된다(Lee *et al.*, 2016).

현재 국내에 도입된 무선 시스템은 수신기 독립으로 운영되는 시스템으로 중앙제어장치와의 무선 통신을 통한 자료의 기

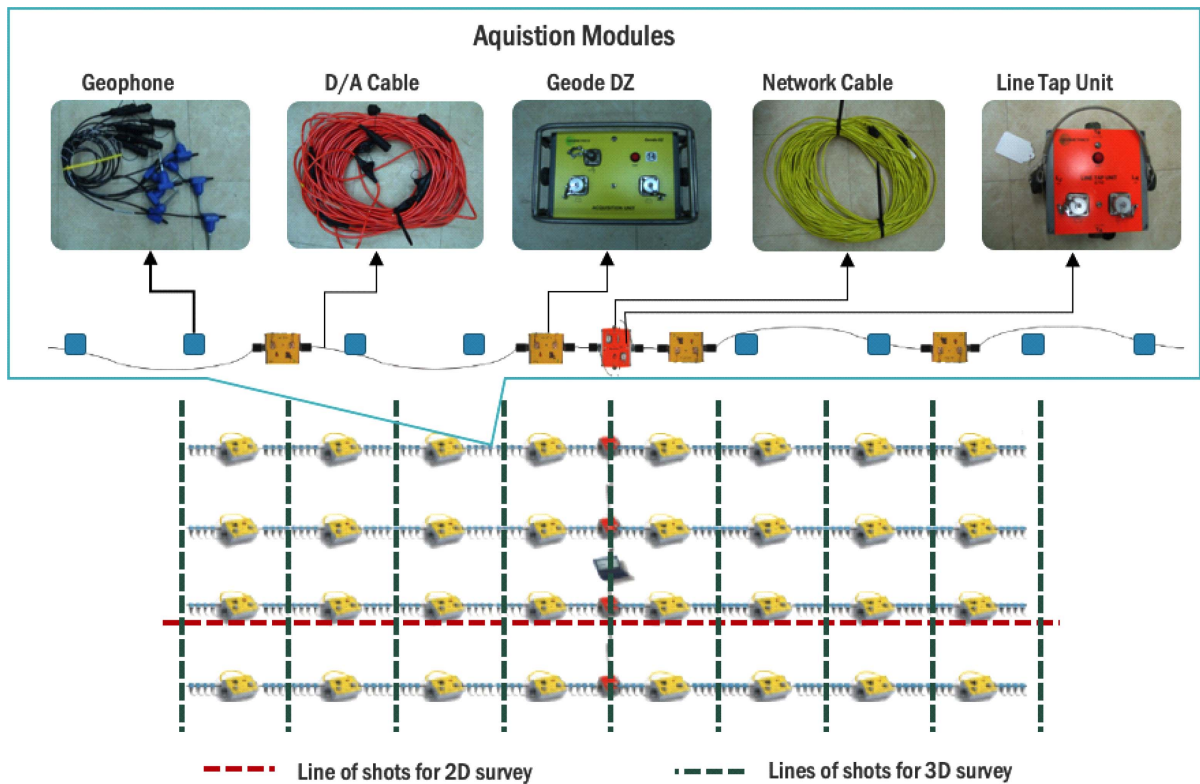


Fig. 4. Schematic diagram of 2D/3D survey array using Geode DZ™ system.

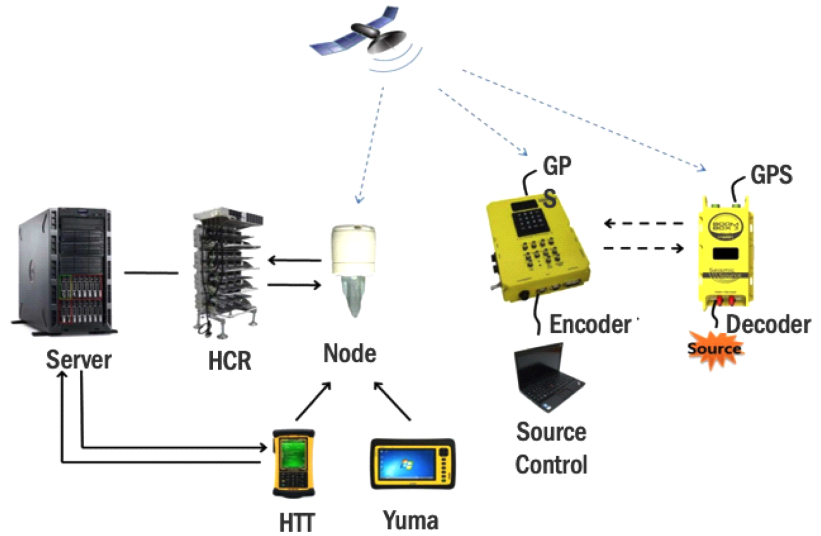


Fig. 5. Schematic diagram for cable-free seismic system (Lee *et al.*, 2016).

록과 현장 QC가 어려운 실정으로, 현장에서 자료의 확인과 QC를 위해서는 각 수신기 별로 수거하여 자료를 추출해야 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한국지질자원연구원서 2022년 말 실시간 자료확인 및 자료 QC가 가능한 무선수신기를 일부 도입하여 현장 적용성 및 호환성을 검토하고 있다. 즉, 현재 도입된 무선 시스템으로 넓은 범위의 3차원 탐사나 긴 거리의 2차원 탐사를 위해서는 해당 시스템이 보완하거나 유선 시스템과의 병행 활용해야 함을 의미한다.

② 탄성과 반사법탐사 수행절차 및 품질관리체계 탐사 계획수립

탄성과 반사법탐사는 되도록 지형이 평탄하거나 완만한 경사지에서 수행하는 것을 추천한다. 하지만, 국내 탐사 환경의 경우 전반적으로 지형 고도의 변화가 매우 심하고 복잡하여 현장조사 시 탐사의 배열, 송·수신 위치 등에 한계가 발생하기 때문에 사전검토 및 현장답사를 통해 Table 6과 같은 절차를 통해 체계적인 계획을 수립해야 한다.

Table 6. Planning considerations for seismic reflection survey.

단계	고려사항
기존자료 검토	<ul style="list-style-type: none"> · 대상 지역에 대한 기존자료 확보 및 검토 수행 - 기존자료(지형도, 지질도, 토지이용도, 지질조사 보고서, 주변공사 기록 등)의 검토 내용 간략 기술 · 검토사항의 반영 - 가탐심도 및 분해능을 고려한 축선계획수립시 검토사항 반영
사전답사	<ul style="list-style-type: none"> · 사전답사 수행여부 결정 - 기존자료 검토 및 탐사 계획 수립 후 사전답사 필요성 결정 · 사전답사 시 고려사항 - 탐사 축선 주변의 잡음원 존재 여부 및 지표 조건 - 지형의 기복 정도 및 접근로의 존재 여부 - 축선 및 송·수신점 설치를 위한 토지 출입 및 사용에 대한 인허가 사항 - 탄성과 송신원(화약, 바이브로사이즈 등) 사용에 필요한 인허가 여부 - 축선 인근의 식생, 상세 지형, 측사 등 주변 환경 현황 파악
축선 및 탐사변수 설정	<ul style="list-style-type: none"> · 고려사항 - 탐사대상 및 가탐심도를 고려한 축선 위치 및 축선 길이 설정 - 탐사심도 및 분해능을 고려한 탐사변수 설정 - 지형의 급경사나 기복 정도 - 지질 및 풍화상태 - 지층의 분포(경암, 연암 등의 기반암 분포 심도) - 단층 파쇄대 등 지질구조의 방향 및 경사

Table 6. Continued

단계	고려사항
측선 및 탐사변수 설정	<ul style="list-style-type: none"> · 탐사측선 및 탐사변수 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 전체 측선 위치 및 측선 길이, 펼침 길이, 탐사 계획 심도 설정 - 측선 위치는 정적 보정(static correction)의 한계, 에너지 전달율, 표면파 잡음 등을 고려하여 되도록 평탄하고 단단한 지반으로 선정 - 최대 벌림거리, 기록시간, 샘플링 간격, 송·수신점 간격 등 탐사변수 설정 - 송·수신점 간격 선정 사유 및 적정성 <ul style="list-style-type: none"> : 일반적으로 송신점 간격을 짧게, 측선 길이를 길게 설정하면 CMP 겹쌓기 수가 많아져서 정확도는 높일 수 있지만, 작업량 및 비용 또한 높아짐
장비선정	<ul style="list-style-type: none"> · 수신기 및 기록기 선정 <ul style="list-style-type: none"> - 가탐심도 및 분해능 등의 변수를 고려한 수신기의 주주파수 대역 선정 - Group geophone 적용여부 분석 - 최소 샘플링간격, 최대 기록시간, 디지털타이저 등 기록장치의 성능 검토 - 지형 및 탐사 용이성을 고려한 유·무선 수신기 및 육상 스트리머 적용 검토 · 송신원 및 트리거 <ul style="list-style-type: none"> - 현장 여건 및 안정성 등을 종합 검토하여 현장에 적용할 송신원 결정(화약, 육상 샷진(Sissy), 바이브로사이즈 등) - 계획한 송신원별 트리거 방식 결정 및 트리거별 지연시간 등의 문제점 발생 가능성 검토 및 대비책 마련

현장 자료획득

탄성과 반사법탐사는 탐사의 특성상 화약 또는 바이브로사이즈와 같은 탄성과 송신원을 사용하기 때문에 관련 인허가 획득이 선행되어야 하며, 특히 화약류를 사용할 경우는 현장 화약 저장고 설치는 안전관리 및 사전 안전교육도 수행해야 한다.

현장 자료획득 과정에서는 가장 중요한 기준이 신호의 품질이다. 따라서 양질의 자료를 획득하기 위해서는 탄성과 송신원(화약, 바이브로사이즈 등)에 따른 예비탐사(또는 시험탐사)를

수행하여 자료획득 인자를 도출하는 것이 매우 중요하다. 이후 자료획득 시에는 매 송신 직후 변수들에 대한 재결정 및 자료에 대한 QC가 가능하도록 현장 내 자료처리 체계를 구축, 운용해야 한다.

현장자료 획득의 절차 및 주요 고려사항은 Table 7에 정리하였다.

자료처리 및 해석

국내와 같이 매우 복잡한 지형의 탐사환경에서 획득한 자료

Table 7. Data acquisition considerations for seismic reflection survey.

단계	고려사항
사전허가 및 안전관리	<ul style="list-style-type: none"> · 사전 허가 사항 <ul style="list-style-type: none"> - 탐사지역 관계자와의 협조(토지소유주, 토지이용자, 토지 관리기관, 인근 현지 주민 등) · 송신원에 따른 추가 허가 사항(ex. 화약류) <ul style="list-style-type: none"> - 화약류를 사용할 경우 화약류 관련법 관련 추가 허가사항 취득 필수 (화약류 양도·양수 사용 허가, 화약류 구입·소비·반송 등)
	<ul style="list-style-type: none"> · 안전관리 <ul style="list-style-type: none"> - 현장 작업 시 발생 가능한 위험요소 작성 및 대응책 마련 - 개인 안전 보호구 지급 및 주기적인 안전교육 실시 · 화약류 관련 안전관리 <ul style="list-style-type: none"> - 화약류 관리기술자 선임 및 필요시 현장 화약 저장고 설치 - 관련 매뉴얼에 따른 안전교육 실시 - 화약류 송신 진행 시, 송신 주변 경고 간판 또는 안전관리원 배치 - 천공 및 장약 후 퇴폐음 작업 시 사전 안전교육 실시 · 바이브로사이즈 관련 안전관리 <ul style="list-style-type: none"> - 장비운영 관리기술자 선임 및 관련인원 사전 안전교육 실시 - 차량 운행 및 송신 진행 시 차량유도인력 배치 - 송신 중 송신원 주변 경고 간판 또는 안전관리원 배치

Table 7. Continued

단계	고려사항
측선설치 및 장비점검	<ul style="list-style-type: none"> · 측선을 설치할 때 조사지역이 변경되거나 진입이 불가능한 곳은 없는가? · 수신기(지오폰)와 연결되는 케이블 부위는 단락 또는 손상되지 않았는가? · 수신기는 수신 상태가 양호한가? · 수신기는 지표와 수직으로 설치가 되었는가? · 수신기의 스파이크(spike)는 지표와 완전히 밀착되게 설치되었는가? · 육상 스트리머 사용 시 수신기의 감도 저하 상태 확인 · 케이블(스프레드 케이블, 트리거 케이블, 데이터 케이블 등) 연결 상태는 양호한가? · 측선이 도로 또는 하천을 횡단할 때 잡음요소를 최소화 하였는가? · 바이브사이즈 운영 시 <ul style="list-style-type: none"> : 사전 차량 및 장비 작동 여부 점검 : 설정한 주파수 대역에 맞는 송신파형의 생성 여부 점검 : 자료획득 팀과의 커뮤니케이션 점검(무전기, 트리거, 데이터 송신 등)
예비탐사	<ul style="list-style-type: none"> · 예비탐사 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 송·수신기 간격, 샘플링 변수, 기록시간 등의 측정변수 검토 - Group geophone 적용 시 표면파 잡음 분석용 송신(noise shot)을 측정하여 지오폰 배열 설계 - 바이브로사이즈 운영 시 <ul style="list-style-type: none"> : 송신 위치, 주파수 대역 등 변수들을 수정하여 송신을 반복 측정 후, 최종 적용 주파수 대역 결정 : 동일 송신 위치에서 20~30회 이상의 자료를 반복 측정하여 자료 검토 : S/N비, 작업의 효율성 및 경제성 등을 고려하여 최적의 중첩 횟수 결정 - 화약류 송신 시 <ul style="list-style-type: none"> : 송신위치, 송신공의 깊이, 송신공의 개수, 장약량 등 송신 변수들에 따른 반복 송신 후, 최종 송신 변수 결정 (상황에 따라 시추공 송신도 고려 대상) - 계획 대비 변경사항 발생시 상세 내용 야장 기록 · 점검사항 <ul style="list-style-type: none"> - 설계된 획득 변수가 정확히 입력되었는가? - 필침 길이, 송·수신점 간격 및 벌림 거리가 적정한가? (예비탐사 자료의 검토 후 현장 여건에 맞게 수정 및 반영) - 최대 수신 거리에서도 송신 에너지가 잘 전달되는가? - 수신기의 출력 파형은 양호하고 일정한가? - 트리거는 제대로 작동이 되는가? - 화약류 송신원 사용의 경우 발파기의 작동상태 확인 - 바이브로사이즈 운영시 트리거 및 데이터 전송 상태 확인 - 날씨(바람, 비, 천둥번개 등) 상황 확인 - 차량 소음 및 진동 또는 주변 소음 정도 확인
본탐사	<ul style="list-style-type: none"> · 품질관리 <ul style="list-style-type: none"> - 계획 및 설계 자료를 정확히 반영하여 측선을 설치하였는가? - 단락 또는 망실된 수신기(지오폰) 확인(매회 Noise test를 통해 확인) - 케이블 손상 또는 단락 여부 확인(매회 Noise test를 통해 확인) - 무선수신기 배터리, 유선수신기 컨트롤박스(ex. Geode) 배터리 상태 점검 - 자료 획득 변수의 적정성 확인(샘플링 간격, 기록시간 길이, 증폭도, 필터특성, stacking 수 등) - 송·수신점의 위치, 고도 측량 및 오차 확인(RTK, GNSS 등의 고품질 GPS, 측량기, 핸드 GPS, 줄자 등 활용) - 송신 당시의 소음정도 확인 - 화약류 송신원 사용 시, 장약 후 되메움 작업은 제대로 되었는가? - 바이브로사이즈 운영 시, 송신 플레이트가 지면에 접촉이 제대로 되었는가? (반복 송신 시 지면의 땅꺼짐 등으로 인해 접촉 불량상태 발생) - 반사파형이 뚜렷이 확인되는가? (장약량 또는 송신 겹쌓기 횟수 조정) - 수신된 자료는 기록 장치에 저장되었는가? · 야장 작성 사항 <ul style="list-style-type: none"> - 전체 측선의 지형 및 주요 사항 기재(급경사 구간, 하천유무, 지반특성, 잡음원의 위치 등) - 유·무선 수신기 설치 위치, 위치 변경 구간, 미설치 구간 및 사유 작성 - 매 송신 시 송신위치, 자료의 이상여부 및 잡음 정도 확인 - 송신점별 장약량, 송신공 개수 또는 주파수대역, 겹쌓기 횟수 등

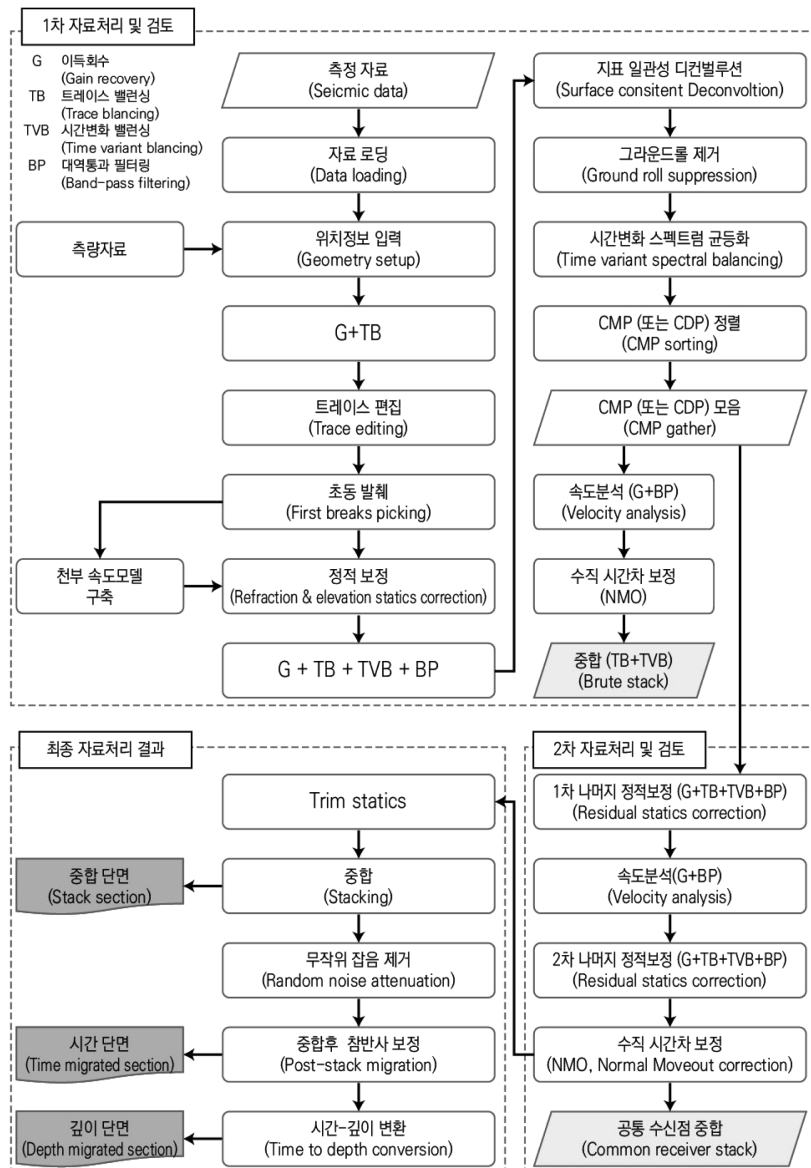


Fig. 6. A flow chart of data processing for seismic reflection survey.

로부터 신뢰도 높은 결과단면을 도출하기 위해서는 정확한 정적보정(Static correction)과 이를 바탕으로 한 탄성과 속도 분석이 매우 중요하기 때문에, 탄성과 반사법탐사 현장 조사 시 고해상도 GPS를 활용하여 지형 고도, 실제 수신기 설치 위치 및 송신 위치 등에 대한 정보를 정확하게 파악하는 것이 필수적이다. 따라서 국내 복잡한 지형 여건을 고려, 정적보정의 효율성과 정확성을 높이기 위해 탄성과 반사법탐사 자료처리 절차를 Fig. 6과 같이 3단계로 구분하여 작성하였다. 전반적인 자료처리 및 해석 과정에서의 주요 검토사항은 Table 8에 정리하였다. 자료처리 과정의 적용 기법에 대한 정의, 기법 과정, 제한 사항 및 고려 사항 등의 상세 내용은 해당 용역보고서에 수록되어 있고, 또한 『물리탐사 길라잡이』나 기타 물리탐사 관련 서적에도 잘 정리되어 있으니 참고하길 바란다.

토의 및 결론

물리탐사 기술은 시대가 지남에 따라 탐사의 정확도와 정밀도 등에서 많은 발전이 이루어 졌으며, 그 결과 토목·건설 분야, 환경 분야 및 각종 재해 방지 조사 등 그 활용 범위가 점차 넓어지고 있고 관련 기술자 또한 증가하고 있다. 따라서 물리탐사를 이해하고 현장탐사를 위한 계획수립, 자료획득, 자료처리 및 해석 등에 대해 객관화할 필요가 있으며, 또한 탐사 결과의 신뢰성 확보를 위해 모든 전문가들이 체크리스트나 자가평가표 등 매뉴얼화 될 수 있는 표준안이 요구되고 있다.

이에 따라 국내에서는 한국지구물리·물리탐사학회(KSEG)에서 『물리탐사 길라잡이』라는 지침서를 작성하여 배포하였다. 이 지침서는 지금까지도 국내 건설, 토목 등 여러 분야

Table 8. Data processing considerations for seismic reflection survey.

단계	고려사항
자료정리	<ul style="list-style-type: none"> · 야장과 측정 자료 비교, 정리 <ul style="list-style-type: none"> - 측정 자료의 파일 번호, 송·수신점 번호 및 좌표, 펼침 범위 등을 야장과 비교, 검토하고 취합 및 정리 · 측정 자료의 형식(format) 변환 <ul style="list-style-type: none"> - 디지털 매체에 기록한 자료를 자료처리 소프트웨어에 적합한 형식으로 변환(대부분의 탐사장비가 SEG-2 형식으로 기록하기 때문에 자료처리가 용이하도록 SEG-Y 형식으로 변환) - 송·수신점 좌표정보가 분리되어 있는 경우 좌표정보를 헤더에 병합
자료처리	<ul style="list-style-type: none"> · 검토사항 <ul style="list-style-type: none"> - 야장에 기록된 사항과 측정 자료가 정확하게 일치하는가? - SEG-Y 형식이 SEG 표준 기록 양식을 준수하고 있는가? - 송·수신점 좌표가 해당 측정 자료에 정확하게 매칭 되었는가? · 탐사의 목적에 맞는 최적의 자료처리 순서 및 기법 적용 · 전처리 <ul style="list-style-type: none"> - 트레이스 편집(trace editing) - 이득 되돌림(gain recovery) - 띠 통과 필터링(band-pass filtering) · 정적 보정(static correction) · 곱풀기(surface-consistent deconvolution) · 표면파 잡음 제거(ground roll attenuation) · CMP 정렬(common midpoint sorting) · 1차 속도 분석(velocity analysis) · 수직시간차(NMO) 보정 · 초기 겹쌓기(brute stack) · 나머지 정적 보정(residual static correction) · 2차 속도 분석(velocity analysis) · 수직시간차(NMO) 보정 · 2차 겹쌓기(stack) · Trim statics · 무작위 잡음 제거(random noise attenuation) · 겹쌓기 후 참반사 보정(post-stack migration) · 검토사항 <ul style="list-style-type: none"> - 헤더의 기하학적 정보가 올바르게 저장되어 있는가?(LMO분석, NMO분석, CMP fold 등을 점검하여 QC) - 탐사 대상 지역의 지질구조와 자료의 특성을 고려하여 적절한 자료처리 작업 흐름도를 구축하였는가? - 각 자료처리 단계별 적절한 분석 기법을 이용하여 최적의 매개 변수를 탐색 하였는가? - 각 자료처리 단계별 개선 정도를 처리 전/후 영상으로 비교하였는가?
자료해석	<ul style="list-style-type: none"> · 구조해석 <ul style="list-style-type: none"> - 지층경계면(horizon) - 단층(fault)

에서 물리탐사 적용 시 기준 및 수행지침으로 활용하고 있으며, 각 분야 전문가들이 물리탐사 결과를 평가하는데 많은 도움이 되고 있다.

한편, 사용후핵연료 심층처분시설을 위한 부지조사는 그 중요성과 특수성을 고려할 때, 물리탐사를 적용 시 매우 엄격한 기준과 높은 신뢰성을 확보하기 위한 물리탐사 수행절차 및 품질관리체계가 적용되어야 한다.

이 논문은 부지조사 방법론 개발 연구의 일환으로, 사용후핵연료 심층처분시설 단계별 부지조사에 적용할 물리탐사 기법을 선정하고, 각 탐사 방법별 물리탐사 수행지침서를 작성한

사례이다. 해당 지침서는 기존 지침서인 『물리탐사 길라잡이』를 바탕으로, 심지층 처분시설의 특성 및 부지조사 단계별 주요 검토사항, 최신 물리탐사 기술 및 해석 기술 등을 반영하여 각 탐사 방법마다 탐사계획 수립, 자료획득, 자료처리 및 해석의 절차와 주요 검토사항 및 고려사항, 품질관리 등의 내용이 수록되어 있다.

향후 이 지침서는 부지 특성을 고려한 현장 실증 연구와 규제 여건 등을 반영하여 체계화함으로써 부지조사 수행 시 기초자료가 될 것으로 판단되며, 더 나아가 다른 응용 분야에서 물리탐사 수행체계를 구축할 때 중요한 기초자료로 활용될 것

으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용 후핵연료 관리핵심기술개발사업단 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구사업이다(No. 2021040101003A).

References

- Chapman, N., and Hooper, A., 2012, The disposal of radioactive wastes underground, *Proceedings of the Geologists' Association*, **123(1)**, 46-63. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.10.001>
- Guo, Y. H., Wang, J., and Jin, Y. X., 2001, The general situation of geological disposal repository siting in the world and research progress in China, *Earth Science Frontiers*, **8(2)**, 327-332. https://caod.oriprobe.com/articles/3387036/THE_GENERAL_SITUATION_OF_GEOLOGICAL_DISPOSAL_REPOSITORY_SITING_IN_TH.htm
- KIGAM, 2021, Development of integrated geophysical monitoring system at depth for assessing earthquake and fault activities at South-eastern Korea, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2018-009-2021. <https://www.kigam.re.kr/subjinfo.es?act=view&mid=&msubjrlno=4482>
- Kim, E., Kihm, Y. H., Cheon, D.-S., Hyun, S. P., Jeon, J. S., Kim, H. C., Nahm, W.-H., Suk, H., Jin, K., Ko, K. T., and Choi, S., 2020, Development of Geoscientific Site Assessment Factors for the Deep Geological Disposal of HLW in South Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **57(2)**, 215-233 (in Korean with English abstract). doi: 10.32390/ksmer.2020.57.2.215
- KSEG, 2011, A Guide for exploration geophysics, Hanrimwon.
- Lee, D., Kim, B., and Jang, S., 2016, Cable-free Seismic Acquisition System, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **19(3)**, 164-173 (in Korean with English abstract). doi: 10.7582/GGE.2016.19.3.164
- McEwen, T., and Äikäs, T., 2000, *The site selection process for a spent fuel repository in Finland. Summary report*, POSIVA-00-15, Posiva Oy, 231. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/030/32030717.pdf
- Wang, J., Chen, L., Su, R., and Zhao, X., 2018, The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **10(3)**, 411-435. doi: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002