

지표투과레이더 탐사를 이용한 지표천부 단층 연구

고바야시 타카오^{1,‡} · 선창완^{1,2} · 최진혁^{1,2}

¹한국지질자원연구원 지질재해연구본부 활성지구조연구센터
²과학기술연합대학원대학교 한국지질자원연구원캠퍼스 지질과학전공

Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys

Kobayashi Takao^{1,‡} · Changwan Sun^{1,2} · Jin-Hyuck Choi^{1,2}

¹Active Tectonics Research Center, Geologic Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

²Geological Sciences, KIGAM campus, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea

요 약

최근 국내에서 발생한 Mw 5 내외의 중규모지진들을 계기로 중대형지진으로 인한 지질재해 발생가능성과 함께 단층 및 고지진 연구의 중요성이 높아지면서, 다학제 연구를 통해 미고결 퇴적층에 피복된 단층에 대한 조사가 진행 중이다. 이 논문에서는 천부지구물리탐사 중 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar: GPR) 탐사에 대해 국내외 단층 조사현장에서 수행 중인 탐사 기법과 사례를 소개하고 토의한다. 우선, 단일측선 GPR 탐사는 남부 양산단층의 4개 지점에서 수행된 사례를 통해 단층대 내에 발달하는 피복된 지질구조를 탐지할 수 있음을 보여준다. 다음으로 다중측선 GPR 탐사는 음성 백마령 일대 단층 조사와 몽골 모고드단층의 변위지시자인 고하천 조사 사례를 통해 단층의 기하와 변위량을 평가할 수 있음을 보여준다. 마지막으로 다중측선 직교편파 GPR 탐사는 울산 미호리 일대 단층 조사 사례를 통해 피복된 수직단층을 탐지할 수 있음을 보여준다. 이러한 탐사기법별 사례연구 결과는 비록 탐사 대상, 단층 종류, 조사현장 조건 등에 따라 기법이 달라질 수 있으나, GPR 탐사가 단층 및 고지진 연구에 활용될 수 있음을 시사한다.

주요어: 천부지구물리탐사, 지표투과레이더, 단층, 피복단층, 지형변위지시자

ABSTRACT: Recent Mw ~5 earthquakes reminded us the possibility of seismic hazards associated with moderate to large earthquakes, and hence multidisciplinary research has been conducted to investigate faults covered by unconsolidated sedimentary layers. This paper introduces ground penetrating radar (GPR) survey techniques that are applied to study of near-surface geologic structure in a context of active fault study. Three survey techniques are described, i.e. conventional single line survey, multiple lines survey, and orthogonal dual polarimetric survey, and the case results of these survey techniques are presented. The single line survey is typically performed to detect faults covered by young sediments, and the results of surveying of the Southern Yangsan Fault revealed secondary geological structures within the fault zone. The multiple lines survey is carried out to investigate three dimensional geologic structure in a survey site of Baekmaryeong, Eumseong. We also performed the survey in a site on the Mogod Fault, Mongolia where a Mw 7.1 earthquake took place in 1967, in order to determine the horizontal offset markers and successfully imaged a paleo-river which was covered by unconsolidated sediments. Finally, the orthogonal dual polarimetric survey is carried out to detect a vertical fault in the basement rock which is covered by a surface soil layer. We applied this technique to a survey site in Ulsan to detect a vertical fault under a few tens of centimeter thick soil layer. Our results for each technique suggest that GPR exploration can be used for near-surface fault investigations, although the technique may vary depending on the exploration target, fault type, and survey site conditions.

Key words: near-surface geophysics, ground penetrating radar (GPR), fault, covered fault, geomorphic offset marker

[‡]Corresponding author: +82-42-868-3373, E-mail: tak@kigam.re.kr

1. 서론

지진은 일반적으로 활성지구조 환경에서 특정 단층이 반복적으로 재활하는 기작으로 발생한다. 따라서 그 단층에서 발생했던 과거지진의 조사는 향후 일어날 지진의 규모와 주기 등의 특성을 유추하는데 큰 도움이 된다. 과거 발생한 지진기록은 그 종류에 따라 계기지진, 역사지진, 선사시대 고지진으로 구분 가능한데, 이 논문에서는 지표파열을 동반하는 중대형지진의 기록인 선사시대 고지진에 대해 주로 다룬다. 주어진 단층이나 단층구간에서의 고지진 이력을 분석하여, 중대형지진의 재발모델을 규명하여 지진재해 평가에 활용할 수 있다(Choi *et al.*, 2017). 단층 및 고지진 조사의 일반적인 절차는 1) 우선 단층의 분포를 파악하고, 2) 이들 단층 중 활성지구조 환경에서의 고지진 발생 여부를 판독하여, 3) 단층의 지점이나 구간별로 고지진 기록을 비교하여 그 이력을 규명하는 것이다.

우리나라의 경우, 2016년 경주에서 발생한 9.12 지진을 비롯하여 최근 중규모지진이 연이어 발생하면서 단층 및 고지진 연구의 중요성이 부각되었다. 현재까지 수행된 단층 및 고지진 연구결과의 가장 대표적인 예 중 하나로 9.12지진 진앙 일대의 양산 단층 구간을 대상으로 제작된 1:25,000 단층주제도 (Lee *et al.*, 2020)를 들 수 있다. 이 연구 사업을 비

롯해 최근 국내에서는 단층의 분포와 고지진 정보를 명확히 파악하기 위해 원격탐사, 지형분석, 야외지질조사, 지구물리탐사, 시추조사, 굴착조사, 연대분석 등 다학제간 융합연구가 수행되고 있다(Cheon *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020a). 특히 산악지형과 달리 미고결 퇴적층에 피복되어 있는 단층곡 구간에서는 지구물리탐사와 시추조사를 병행하는 추세이다. 지구물리탐사와 시추조사는 그 목적에 따라 단층(대)의 분포와 기하를 추정하기 위한 심부조사(수십~수백 m 내외 깊이)와 고지진에 의한 지표변형을 규명하기 위한 천부조사(수 m 내외 깊이)로 구분된다. 이 연구는 다양한 지구물리탐사법 중 주로 지표면 근처의 천부 지질구조 조사에 많이 사용되고 있는 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar: GPR)에 대해 다룬다.

GPR 탐사는 지표면에 놓인 송신 및 수신 안테나를 이용하여 전자파(레이더 펄스)를 지하로 송신하고 지하 지질 매질에 반사되는 반사파를 수신하는 기법이다(그림 1). GPR 탐사의 가장 주된 목적은 지표 아래의 천부에 존재하는 지질 매질 또는 지질구조의 발달여부 및 기하를 파악하기 위한 것이다. 따라서 일반적으로 한 지점에서만 탐사하는 것이 아니라 송·수신 안테나를 이동시키며 다수 지점에서 탐사하며, 수신 자료와 더불어 안테나의 위치 정보 또한 중요한 자료 중 하나이다. GPR 펄스의 중심 주파

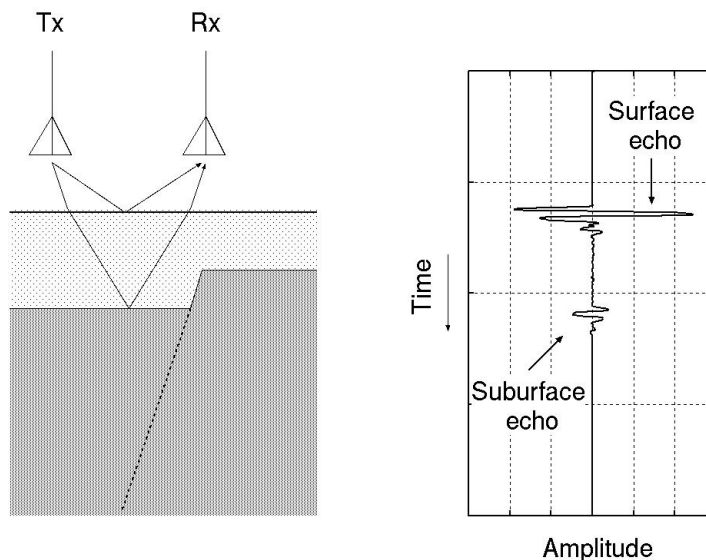


Fig. 1. Schematic illustration of ground penetrating radar (GPR) measurement (left) and its synthetic data (right).

수는 $10^1 \sim 10^3$ MHz이며, 주파수는 탐사 목적에 따라 달라질 수 있다. 높은 주파수를 이용한 GPR 탐사는 높은 공간 분해능 자료를 얻을 수 있는 반면 최대 가탐심도가 얇다. 반대로 낮은 주파수를 이용한 GPR 탐사는 최대 가탐심도가 상대적으로 깊지만 공간 분해능이 낮다. 우리나라의 지표면은 온난하고 습윤한 기후조건으로 인해 주로 식생과 비교적 두꺼운 토양으로 구성된 특성을 보인다. 이는 토양층 내 수분은 매질의 유전율 증가에 영향을 미친다. 한편 그 수분에 녹아든 유기물은 매질의 도전율을 증가시킨다. 도전율의 증가는 땅속을 투과하는 전자파를 감쇠를 증가시키기 때문에 GPR 탐사에 불리하게 작용한다. 예를 들어 GPR 탐사 주파수가 100 MHz의 경우, 우리나라에서 탐사 가능한 최대 심도는 5 m 내외이며, 대부분의 경우는 가탐심도가 그 이하라 할 수 있다.

이 논문에서는 최근 국내외 단층 및 고지진 조사에서 수행된 GPR 탐사의 다양한 기법과 결과를 소개 및 토의한다. 제2장에서는 가장 기초적인 단일측선 탐사를 이용한 단층 탐지에 대해 다루고, 제3장에서 다중측선 탐사를 이용한 지하 영상화 및 피복된 변위지시자 추적에 대해 다룬다. 제4장에서는 피복된 수직단층을 탐지하기 위해 개발된 편파정보를 이용한 다중측선 탐사(Kobayashi *et al.*, 2022)를 소개하고, 마지막으로 제5장에서 향후 GPR 탐사의 전망을 토의한다. 이 논문은 탐사 결과를 통해 추론된 단층운동 특성이나 고지진학적 의미 해석보다는 GPR 탐사 기법별 원리, 방법, 자료획득, 자료처리 후 얻은 결과를 중심으로 다룬다.

2. 단일측선 탐사

2.1 탐사기법 개요

단일측선 탐사는 GPR 탐사의 가장 기본적인 기법으로, 탐사 현장에서 측선을 설정하여 그 측선을 따라 GPR 탐사 수행하는 것이다. 피복된 단층을 탐지하기 위해 지형분석을 통해 인지된 선형구조 또는 단층 추정선을 가로지르는 측선을 따라 탐사가 진행되는데, 측선이 반드시 직선일 필요는 없다. 단일측선 탐사는 일반적으로 편평한 탐사 구역을 확보하기 어려운 경우 수행된다.

단일측선 탐사에서는 측선을 따라 GPR 장비를

이동시키면서 일정 이동 거리마다 탐사를 수행한다. 탐사에서 획득된 물리량 정보는 지하 반사파의 진폭 자료로, 한 측정에서 획득한 지하 반사파의 진폭 자료는 K개의 수치 자료로 디지털화된다. 디지털화된 자료의 번호 k ($k=1, 2, 3, \dots, K-1, K$)는 깊이를 나타내는 지표가 된다. 측정 위치에도 순차적으로 측정 번호 j ($j=1, 2, 3, \dots, J$)를 붙인다. 결과적으로 j 번째 측정의 깊이 지표 k 번의 진폭 자료가 $A(j, k)$ 와 같이 2차원 좌표의 자료가 생산된다. 이렇게 획득된 2차원 자료는 2차원 영상으로 표시할 수 있는데 이를 'B-scan 영상'이라 한다. 이 B-scan 영상은 탐사 측선에 대한 지하 단면도로 간주할 수 있으며, 이를 이용한 지하에 발달하는 지질구조에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이 때, 탐사 측선을 따라 지형 표고 자료를 취득하는 것이 바람직하는데, 지형 자료를 B-scan 영상에 반영시키면 지형과 지하 지질구조에 대한 보다 정확한 해석이 가능하다.

2.2 남부 양산단층 탐사 사례

남부 양산단층은 경주 이남에서 낙동강 하구까지 이어지는 북북동-남남서 방향의 직선적 단층곡으로 발달하고 있다. 울산시 언양읍과 두서면 일대를 중심으로 단층대 내부구조(Choi *et al.*, 2009; Han, 2012; Kim *et al.*, 2021) 및 고지진 조사결과(Cheon *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020b)가 보고된 바 있으나, 양산시 일대에서는 비교적 많은 조사가 진행되지 않았다. 양산시 하북면과 상북면 일대 양산단층은 약 500 m 폭의 단층곡으로 발달하며, 이 단층곡을 따라 양산천이 흘러 낙동강으로 유입된다. 최근 이 단층곡의 약 10 km 구간을 대상으로 단층 또는 고지진 지표파열의 자취를 추론하고자 조사한 바 있으며, 총 4개 지점에서 GPR 단일측선 탐사를 수행하였다(그림 2a).

탐사 측선의 위치는 주로 선형구조를 가로지르는 산책로 또는 언덕길로 선정하였으며(그림 2b), 모든 지점에서 탐사 부지는 비교적 편평한 10 cm 이하 두께의 표토층으로 피복된 것으로 판단하였다. 탐사 측선의 방향은 대체적으로 동-서 방향이며, 길이는 약 100 m 내외로 설정하였다. 이 탐사의 GPR 주파수는 100 MHz이다.

각 지점별 탐사 결과를 B-scan 영상으로 나타낸 결과(그림 2c)에서, 주로 고각으로 경사하는 이상대

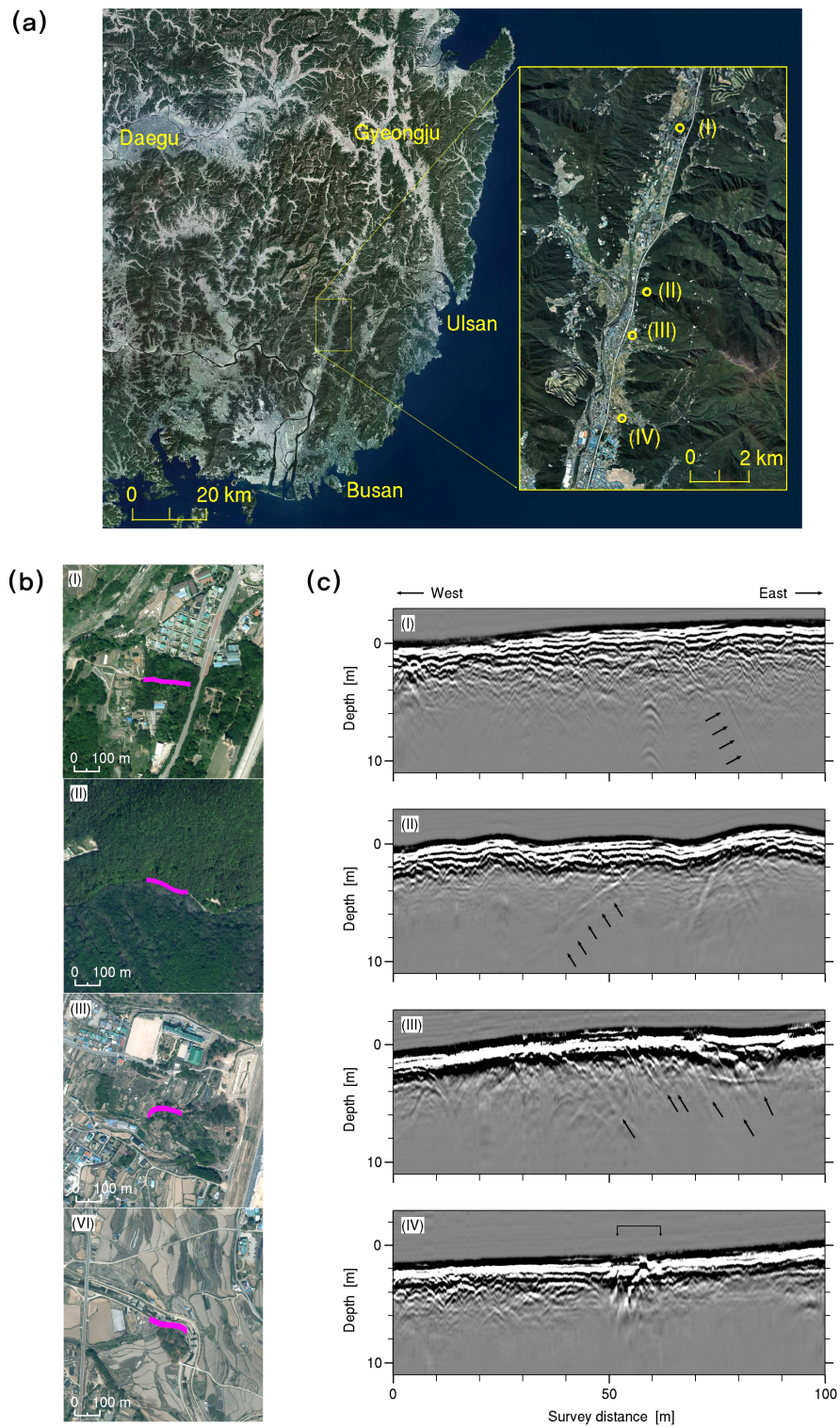


Fig. 2. (a) Satellite image showing locations of the GPR survey sites on the Southern Yangsan Fault. (b) Survey lines at each survey site (see the magenta solid line). (c) B-scan images of the survey results.

가 관찰된다(B-scan 영상 내 화살표). 측선별로 하나의 이상대로 나타나기도 하고, 유사한 기하학적 특성(경사방향 및 경사각)을 보이는 다수의 이상대가 동시에 관찰되기도 한다. 100 MHz 전자파의 파장이 공기 중에서 3 m 인 것을 고려하면 두께가 10 cm 이하의 표토층이 탐사에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 따라서 B-scan 영상에서 인지되는 이상대는 지표 가까이에서 발달하는 지질구조로 판단된다. 즉, B-scan 영상에서 눈에 띄는 직선적 이상대는 천부에 발달하는 면구조로부터 돌아오는 반사 신호로 판단된다. 탐사 측선 설계에 주변 단층대 정보 및 지형분석 결과를 반영했음을 감안하면, 이 반사 신호는 단층 또는 적어도 단층대를 구성하는 지질구조로 판단된다. 흥미로운 점 중 하나는 각 측선별 이상대의 경사 방향이 서로 다르다는 것이다. 이는 남부 양산단층대 내 서로 다른 경사를 보이는 다양한 기하의 지질구조가 발달함을 간접적으로 지시한다.

3. 다중측선 탐사

3.1 탐사 수법 개요

다중측선 탐사는 탐사 대상인 특정 면적의 2차원 지표면에 복수의 측선을 설정하여 3차원 탐사를 실시하는 것이다. 이 때, 각각의 측점 위치 정보를 정확하게 확보할 수 있다면 원리적으로는 측점 위치를 임의로 설정할 수 있다. 그러나 현실적으로는 서로 평행한 다수의 탐사측선을 설정하여 제2장에서 기술한 바와 같은 단일측선 탐사를 수행하는 것이 합리적이다. 설정된 측선에 순차적으로 번호 i ($i=1, 2, \dots, I-1, I$)를 붙이고 단일측선 탐사와 같이 한 측선의 계측 점에서 순차적으로 번호 j ($j=1, 2, \dots, J-1, J$)를 붙이면 심도 번호 k 인 진폭 자료 값 A 는 (i, j, k) 양식의 3차원 좌표 정보가 포함된 자료가 된다. 3차원 자료 세트는 임의의 각도와 심도에서 지하단면을 입체적으로 가시화할 수 있다. 다중측선 탐사 간 측선의 간격을 동일하게 설정하면 자료 처리 부담을 최소화할 수 있다.

3.2 음성 백마령 일대 탐사 사례

충청북도 음성군 백마령 일대의 도로공사 절개사면에 기반암인 화강암과 그 상부의 미고결 퇴적층이 노출되었다. 화강암과 미고결 퇴적층 간 부정합면과

미고결 퇴적층을 구성하는 여러 지층들은 경사이동 단층을 경계로 역이동 변위를 보이며, 따라서 미고결 퇴적층이 형성된 이후 지표파열을 동반한 역이동 지진이 발생한 것으로 판단된다. 이 노두에 대한 단층 및 고지진 조사 결과는 이번 특집호 논문에 상세히 기술되어 있다(Kim *et al.*, 2022).

절개사면은 도로를 조성하기 위해 약 5 m 깊이의 굴착을 하면서 드러난 것으로(그림 3a), 약 45°의 각도로 경사하는 단층은 단면노두의 방향과 거의 수직에 가까운 주향을 보인다. 절개사면의 하부에 드러난 화강암 내에는 단층과 거의 평행한 단열대 및 암맥이 단층 상반에 집중되는데, 변형대의 폭은 단층으로부터 수 m 에 달한다. 단층을 비롯한 지질구조의 연장성은 도로 부분(굴착공사로 인해 기반암으로만 구성됨)으로 연장될 것으로 판단되나, 공사로 인한 토사에 피복되어 육안으로 인식할 수는 없었다. 이러한 현장 조건을 감안하여, 단층의 분포를 파악하고자 다중측선 GPR 탐사를 수행하였다.

탐사 구역은 절개사면으로부터 6 m 떨어진 곳의 18 m × 5 m 영역이다. GPR 측선은 탐사 구역 중 절개사면의 방향과 평행하게 1 m 간격으로 설정하였다. GPR 탐사 주파수는 100 MHz이며, 측점 간격은 5 cm다. 획득된 모든 자료에 Hilbert 변환을 적용하여 순시전력(Instantaneous Power) 값으로 3차원 자료 세트를 구축하였다.

탐사 결과는 수직 단면 영상과 수평 단면 영상으로 나타낼 수 있다. 그림 3b는 6개 측선탐사 자료를 합쳐 작성한 수직 단면 영상이고, 그림 3c는 깊이 1.5 m (유전상수 16)에서의 수평 단면 영상이다. 수직 단면 영상에서는 지표면 반사 신호가 최대 강도 신호로서 인식되고, 두 개의 경사진 면구조가 뚜렷하게 관찰되는데 절개사면 지질구조와 비교하면 이들은 단층과 암맥으로 판단된다. 단층면을 따라 강한 반사파 신호가 나타나는 이유는, 단층대를 따라 투수성이 높아져 유전율이 높아진 영역이 생기고, 레이더파의 반사계수가 높아지게 되어 수신된 반사파의 진폭이 커진 것으로 이해할 수 있다(Daniels, 2004). 경사각이 절개사면에서 측정된 45°에 비해 다소 저각으로 관찰되는데, 이는 송신 안테나와 수신 안테나가 엄밀히 동일 지점에 위치하지 않음에서 기인한 것으로 추정된다. 단층과 암맥은 1.5 m 심도의 수평 단면 영상에서도 잘 관찰된다(그림 3c). 다

만 여러 심도의 수평 단면 영상을 분석한 결과, 심도 2.5 m 이내의 천부에서는 단층대가 잘 나타나고 있으나, 이보다 깊은 심도에서는 GPR 신호의 세기가 약해져서 잘 나타나고 있지 않다. 이는 심도 2.5 m 이상에서 기반암 내 지하수 함량이 높아져서 전자파의 감쇠가 심해진 것으로 판단된다. 이 사례연구는 피복된 경사이드단층이나 암맥의 경우, 다중측선 GPR 탐사를 통해 지표 천부에서의 발달 여부와 기하학적 특성(주향 및 경사 등)을 파악할 수 있음을 보여준다.

3.3 몽골 모고드단층 탐사 사례

1967년 1월 5일, 몽골 중북부에 위치하는 모고드 단층(Mogod Fault)을 따라 Mw 7.1 모고드지진이 발생하였고 최소 30 km 길이의 지표파열이 동반되었다. 남-북 방향의 단층구간에서는 평균 약 1.5 m의 우수향 지표변위가 일어났고, 북서-남동 방향의 단층구간에서는 대개 0.4 m 이하의 역이동성 지표

변위가 일어났다(Bayasgalan and Jackson, 1999). 1967년 모고드지진 지표파열을 따라 수행된 고지진 굴착조사 결과를 바탕으로 모고드단층을 따라 지표파열을 동반한 고지진이 지난 약 5만년 내에 2차례 더 발생하였고, 따라서 중대형지진 재발주기가 약 25,000년이라는 점이 보고된 바 있다(Bollinger *et al.*, 2021). 한편 남-북 방향의 단층구간을 가로지르는 일부 고하천은 반복적인 지진지표변위로 인해 우수향으로 수 ~ 수십 m 이상 변위되어 있다. 비록 지형분석을 통해 어느 정도의 우수향 지표변위량 추론이 가능하나, 고하천이 보다 신기의 퇴적물에 피복되어 정확한 변위량을 도출하기 쉽지 않다.

이번 연구에서는 GPR 탐사를 통해 모고드단층에 의해 굴절되거나 변형된 고하천의 분포를 파악하여 보다 정확한 변위량을 산정하고자 하였다. GPR 탐사는 몽골 천문지구물리연구원의 지진연구센터에 의해 2022년 7월에 취득되었으며, 이 연구에서는 자료 처리를 수행하였다. 그림 4a는 탐사 구역의 위

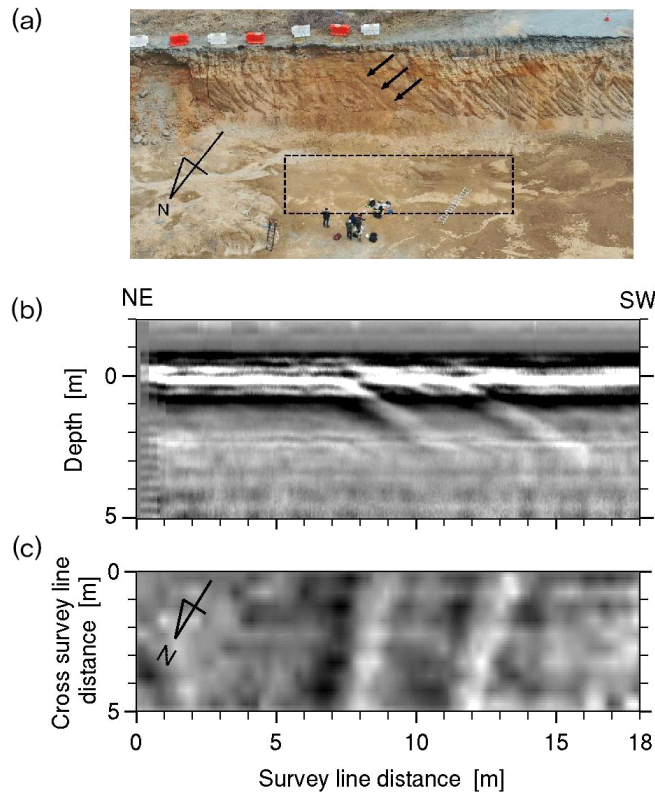


Fig. 3. (a) A Drone-derived photo of the survey site of the multiple line survey. (b) A B-scan image produced by integrating data from 6 survey lines. (c) A horizontal slice image at a depth of 1.5 m.

성사진으로, 1967년 지진지표파열에 의해 남-북 방향의 모고드단층 자취가 잘 인지된다. 또한 단층을 가로지르는 하천지형이 발달하는데, 단층 서측부의 경우 하나의 하천지형이 발달하는 반면 동측부의 경우 두 하천지형이 접하는 양상이 관찰된다. 지표 고도와 하천지형의 특성을 바탕으로 고하천의 우수방향은 북서쪽으로부터 남동쪽으로 판단된다. 비록 현재 이 하천을 따라 매우 간헐적으로 유수가 발생하는 것으로 보이나, 단층 동측부의 연장성이 불량한 고하천은 과거 단층 서측부의 하천과 연결되었으나 현재는 반복적인 우수향 지표변위로 어긋났으며 더 이상 우수작용이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 이 변위된 하천(beheaded channel)은 단층과 가까워지면서 그 지형이 남아있지 않아 변위량 측정이 어려워, 이를 극복하고자 GPR 탐사를 수행하였다.

GPR 탐사는 모고드단층을 가로지르는 하천지형이 발달하는 110 m × 190 m 구역에 대해 수행하였으며, 이 때 탐사측선은 단층과 평행한 방향의 190 m 길이 측선을 2 m 간격으로 설정하였다. 총 56개 측선에 대하여 주파수 250 MHz의 GPR을 이용해 앞서 기술한 다중측선 탐사를 수행하였다. 탐사 자료는 앞서 기술한 백마령 일대 단층 탐사와 동일하게 처리하였으며, 최종적으로 순시전력 값을 이용해 3차원 자료 세트를 구축하였다.

그림 4b와 그림 4c는 탐사 구역의 위성 사진에

0.25 m 심도의 GPR 수평 단면 영상과 0.5 m 심도의 GPR 수평 단면 영상을 중첩 시킨 것이다. GPR 영상에서 위성사진에서 보이는 지표의 하천지형이 비교적 뚜렷하게 확인된다. 이러한 결과는 하성 퇴적층의 전자파 산란 특성이 주변 매질의 전자파 산란 특성과 다르기 때문으로 판단된다. 또 하나 주목할 점은 단층자취 또한 파악할 수 있는데(그림 4b), 이 또한 전자파 산란 특성이 주변과 다르기 때문으로 판단된다. 한편 탐사 구역의 남쪽부에서는 단층 자취가 비교적 뚜렷하지 않은데, 그 원인은 다음 두 가지가 고려될 수 있다. 우선, 탐사 대상인 단층이 거의 수직에 가까운 고각 단층으로, 단층에 입사한 GPR 펄스 에너지의 대부분이 송신 안테나로부터 0.5 m 떨어진 지점의 수신 안테나 밖으로 반사되어 나갈 수 있다. 다음으로 단층(대) 내부구조가 주변의 지질이 거의 동일한 매질이며, 이로 인해 단층과 주변의 매질 유전율 차이가 없어 GPR 펄스의 반사가 일어나지 않고 그냥 투과되는 경우이다.

그림 4c의 GPR 영상에서 가장 주목해야 하는 것은 영상 안에서 화살표로 표시된 곳이다. 해당 부분 영상의 텍스처는 보다 북쪽에 위치한 하천 영상의 텍스처와 유사하다. 이는 해당 부분의 전자파 산란 특성이 하성 퇴적층의 산란특성과 유사하다는 것을 시사한다. 또한 해당 부분의 동쪽 연장성은, 비록 GPR 탐사 구역 밖이지만, 보다 북쪽에 위치하는 하

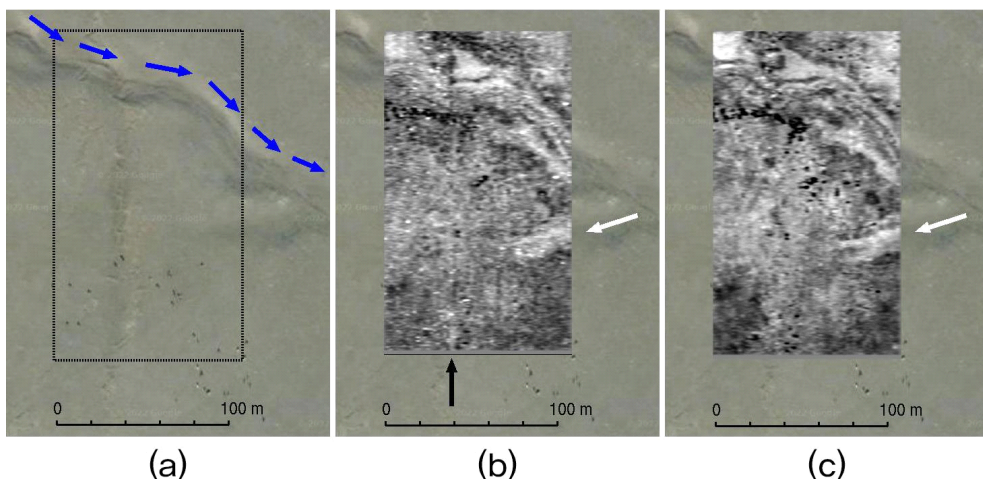


Fig. 4. (a) A satellite photo (north up) of the surface rapture associated with the 1967 Mogod earthquake and GPR survey site on the Mogod Fault, Mongolia. A horizontal slice images at depths of 0.25 m (b) and 0.50 m (c) embedded in the same satellite photo. Blue arrows in (a) indicate the river flow. The black arrow indicates GPR signal of the fault whereas the white arrow indicates the possible river bed of a paleo-channel.

천과 이어질 것으로 보인다. 이상의 관찰을 고려하면 화살표가 지시하는 곳이 과거에 흘렀던 하천의 흔적이라 판단된다. 이를 통해 90 ± 3 m의 우수향 누적변위를 산출하였다. 결과적으로 이 GPR 탐사 사례 연구는 표토에 덮여 피복된 고하천의 흔적을 성공적으로 가시화할 수 있으며, 이를 통해 반복된 주향 이동지진에 누적된 수평적인 지표변위를 도출할 수 있음을 보여준다.

4. 다중측선 직교이중편파 탐사

4.1 탐사 수법 개요

일반적으로 단층의 경사가 수직에 가까울수록 GPR 탐사를 통해 단층을 탐지하는 것이 쉽지 않은데, 이는 지표면에서 송신되어 수직 단층면에 입사하는 GPR 펄스가 지표면 방향이 아닌 다른 방향으로 반사되기 때문이다. 최근 지표면 GPR 탐사를 통해 수직단층을 탐지하기 위해 전자파의 편파 특성을 적극적으로 활용하는 탐사기법이 개발되어 소개된 바 있다(Kobayashi *et al.*, 2022). 이 기법은 탐사 대상이 미고결 퇴적층에 피복된 기반암 내에 발달하는 수직단층이며 기반암과 미고결 퇴적층 간 부정합면이 편평하다는 가정을 전제로 한다. 이 탐사기법에서 주목하는 것은 GPR 펄스의 편파와 부정합면 상에서 관찰되는 단층의 선형구조다.

다수의 상용 GPR은 송·수신 안테나로 보타이 안테나(Bow-tie antenna)를 사용하는데 보타이 안테나가 송신하는 레이더 펄스의 편파는 안테나 장축 방향과 평행한 성분이 탁월하다는 특성을 가지고 있다. 한편 직선형 지질 매질의 경우, 직선 방향과 편파 방향이 일치하는 레이더의 반사파가 강하고 직교하는 편파에 관한 반사파는 약한 경향이 있다. 이러한 특성 때문에 부정합면에 발달하는 단층 관련 선형구조를 탐사할 경우, 선형구조와 GPR 안테나의 상대적 위치관계에 따라 단층선 반사파 신호 강도가 달라진다. 안테나의 축 방향이 선형구조와 평행할 때 최대 강도인 선형구조 반사 신호가 수신되고, 반대로 안테나 축 방향이 선형구조와 직교할 때 반사 신호 강도가 최소가 된다. 일반적인 GPR 계측에서는 선형구조 신호와 동시에 부정합면 반사파가 강하게 수신되기 때문에 선형구조 신호를 식별하기 어려울 수 있다. 그러나 만일 부정합면이 뚜렷한 기하가

없다면, 부정합면 반사파는 선형구조 신호와 달리 GPR 안테나 축 방향에 상관없이 강도 변화가 어느 정도 일정한 배경잡음으로 볼 수 있다. 따라서 이 일정 강도의 배경잡음을 제거한다면 비교적 약한 선형구조 신호를 탐지할 수 있다. 결과적으로, 다중측선 직교편파 탐사는 선형구조와 평행한 편파로 계측한 GPR 탐사 자료로부터 선형구조와 직교하는 편파로 획득된 GPR 탐사 자료를 제거하여 선형구조 신호를 추출하는 기법이다.

4.2 울산 미호리 일대 탐사 사례

한반도와 같은 습윤한 기후조건에서는 기반암을 피복한 토양층으로부터 기반암 내 단층으로 유체가 스며들기 때문에, 기반암과 토양층 간 부정합면에 발달하는 단층자취는 주변 기반암과 다른 유전율을 보이며 따라서 선형구조로 발달할 수 있다. 이 탐사 기법은 울산 미호리 일대의 한 절개사면 전방에 조성된 목초 재배지에서 수행된 바 있다(Kobayashi *et al.*, 2022). 절개사면에 수직단층이 발달하는데 이 단층이 목초 재배지 토양층 아래로 연장됨을 판단하여, 토양에 피복된 수직단층을 탐지하고자 하였다(그림 5a). 절개사면에 드러난 단층에 대한 조사 결과는 Choi *et al.* (2019)에 상세히 기술되어 있다.

GPR 탐사 구역은 절개사면에 드러난 단층에서 측정된 단층 주향을 고려하여, 평면이 목초 재배지의 한 변의 길이가 12 m인 정사각형 영역으로 설정하였다. 이 때 한 변은 단층 주향과 평행(X-방향)하고 다른 한 변은 직교(Y-방향)한다. 탐사 구역 내 각 변과 평행한 측선을 25 cm 간격으로 설정하여 다중측선을 이용해 X-방향 편파 탐사 및 Y-방향 편파 탐사를 수행하였다. GPR 탐사 주파수는 100 MHz이고, 한 측선을 따라 5 cm마다 측정하여 한 측선 당 241점의 탐사 자료를 획득 및 분석하였다. 각 편파 자료는 제3.2장에 기술한 바와 같이 처리하였고, 최종적으로 수평 단면 영상의 차이를 계산하여 만들어진 편파 차분 영상에서 단층 형상을 인지하였다.

그림 5b는 선형의 단층자취 형상이 검출된 깊이 0.2 m의 수평 단면 영상을 보여준다. 이 탐사 기법의 효과를 확인할 수 있도록 영상 차분을 계산하기 전의 각 편파 영상도 제시하였다. X-방향 및 Y-방향 편파 영상 모두에서 기반암과 표토층 상부 경계면(부정합면)으로부터의 반사파가 아주 강하기 때문

에 선형구조를 전혀 관찰할 수 없다. 그러나 이 강한 반사파는 두 편파 영상들의 차이를 계산하는 과정에서 제거되며, 비교적 그 차이와 강도는 작지만 단층으로 인한 반사 성분들의 차이가 검출된 것으로 판단된다.

그림 5b에 보이는 단층자취는 X-방향으로부터

다소 어긋나고 있어 절개사면에서 측정된 단층의 주향과 다소 상이한 것으로 판단된다. 이 단층자취의 연장성은 X-방향 8~10 m 구간에서 인지되지 않는데, 이는 표토층의 두께 변화 등과 같은 2차적인 요소로 인해 발생한 것으로 판단된다. 이 탐사 기법은 그 동안 GPR 탐사를 통해 탐지하기 어려웠던 천부

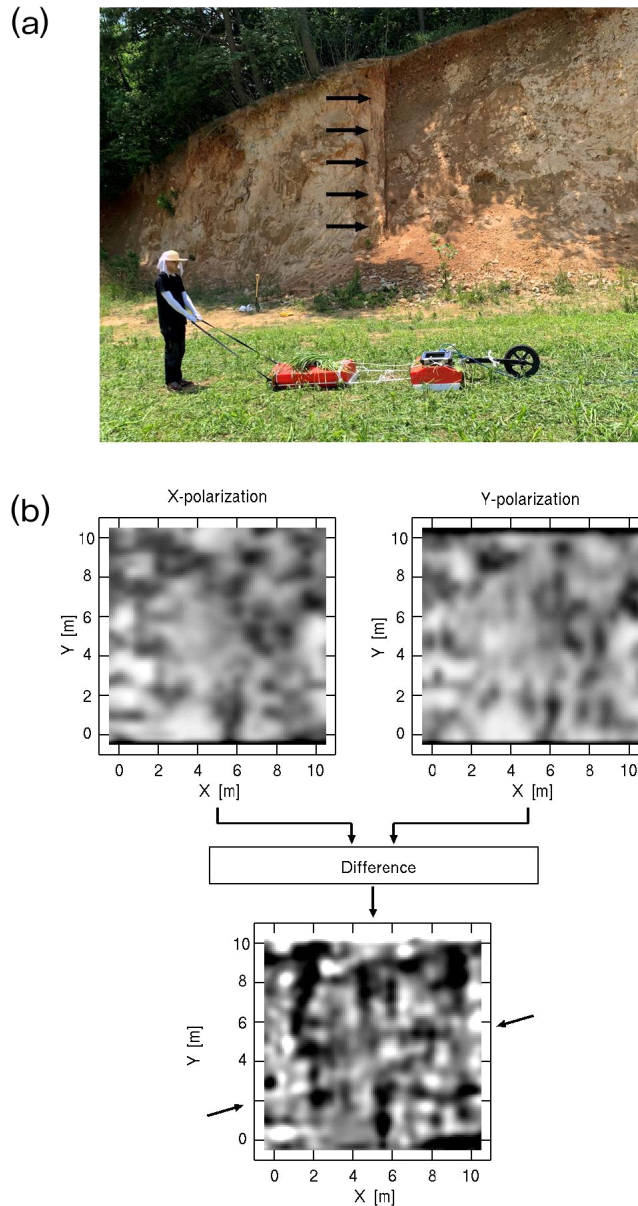


Fig. 5. An orthogonal dual polarization GPR survey (modified from Kobayashi *et al.*, 2022). (a) A photo showing survey site with the target vertical fault (indicated by black arrows) appearing on the outcrop. (b) A schematic diagram illustrating the data processing of the orthogonal dual polarimetric measurement data. Difference of horizontal slice images of orthogonal polarization measurements reveals trace of the buried vertical fault.

수직단층을 대상으로 단층의 발달여부와 함께 주향 및 경사와 같은 기하특성을 파악할 수 있음을 보여 준다.

5. 결론

이 논문에서는 국내외 고지진 연구 현장에서 활용 중인 GPR 탐사와 관련하여 세 가지 탐사 기법과 사례에 대해 소개 및 토의하였다. 각각의 탐사 기법은 탐사 대상(단층, 변위지시자 등), 단층의 종류 및 기하, 탐사 현장의 조건 등에 따라 달라질 수 있다. 또한 단층의 탐지, 특정 단층(구간)에서의 지진지표 파열 발생 여부, 고지진 조사를 위한 굴착조사 위치 선정 등의 탐사 목적에 따라 적용 기법이 달라질 수 있다. 한편 우리나라의 지진지구조환경 하에서 지표 파열을 동반하는 중대형지진은 주로 주향이동과 역이동 운동갑각이 우세함을 고려할 때, 다중축선 직교편파 탐사를 이용해 피복된 단층을 파악하는 것은 한반도 고지진 연구에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다. 천부탐사의 중요성이 높아지는 도심지 단층 연구에도 활용할 수 있을 것이다.

이번 논문에서 다뤄진 GPR 탐사는 모두 지표면에서 수행하는 기법이다. 천부 지질구조를 탐사하는 GPR 탐사는 지표면 탐사 외에도 시추공을 활용하는 시추공 레이더 기법이 있다. 이 기법은 두 개의 명칭대로 두 개의 시추공에 송·수신 레이더 안테나를 설치하여 천부 지질을 탐사하는 기법이다. 시추공 레이더의 장점은 지표면에서는 탐사가 불가능한 깊이에서도 탐사가 가능하다는 점과 수직에 가까운 고각의 단층도 비교적 인지하기 용이하다는 점이다. 시추공 레이더도 비교적 잘 알려진 완성된 기술이나, 단층 및 고지진 연구에의 응용으로는 많이 이어지지 않았다. 최근 GPR 탐사가 단층 조사 분야에서 유용하다는 점이 확인된 바, 향후 시추공 레이더의 단층 조사 적용 가능성을 검토하기 위한 사례연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업 “판내부 활성지구조특성 연구 및 단층분절모델개발(GP2020-014)” 사업의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- Bayasgalan, A. and Jackson, J.A., 1999, A re-assessment of the faulting in the 1967 Mogod earthquakes in Mongolia. *Geophysical Journal International*, 138, 784-800.
- Bollinger, L., Kilnger, Y., Forman, S.L., Chimed, O., Bayasgalan, A., Munkhuu, U., Davaasuren, G., Dolgorsuren, T., Enkhee, B. and Sodnomsambuu, D., 2021, 25,000 years long seismic cycle in a slow deforming continental region of Mongolia. *Scientific reports*, 11, 17855.
- Cheon, Y., Choi, J.-H., Kim, N., Lee, H., Choi, I., Bae, H., Rockwell, T.K., Lee, S.R., Ryoo, C.-R., Choi, H. and Lee, T.-H., 2020, Late Quaternary transpressional earthquakes on a long-lived intraplate fault: A case study of the Southern Yangsan Fault, SE Korea. *Quaternary International*, 553, 132-143.
- Choi, J.-H., Kim, Y.-S. and Klinger, Y., 2017, Recent progress in studies on the characteristics of surface rupture associated with large earthquakes. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 129-157 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.-H., Yang, S.-J. and Kim, Y.-S., 2009, Fault zone classification and structural characteristics of the southern Yangsan fault in the Sangcheon-ri area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 9-28 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Gihm, Y.S., Cheon, Y. and Ko, K., 2019, The first discovery of Quaternary fault in the western part of the South Yangsan Fault – Sinwoo site. *Economic and Environmental Geology*, 52, 251-258 (in Korean with English abstract).
- Danilec, D., 2004, *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*. The Institution of Electrical Engineers, London.
- Han, K., 2012, Geophysical study for structural characteristics and changes of Yangsan fault zone in the Eonyang-Gyeongju area. Ph.D. Thesis, Andong National University, Andong, 221 p (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Choi, J.-H., Park, S.-I., Lee, T.-H. and Choi, Y., 2020a, Cumulative offset analysis of the Central-Southern Yangsan Fault based on topography of Quaternary fluvial terrace. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 135-154 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Park, S.-I. and Choi, J.-H., 2021, Internal architecture and earthquake rupture behavior of a long-lived intraplate strike-slip fault: A case study from the Southern Yangsan Fault, Korea. *Tectonophysics*, 816, 229006.
- Kim, T., Choi, J.-H., Lee, H., Bae, H., Choi, Y., Lee, T.-H., Cheon, Y., Kim, C.-M., Kim, D.-E. and Ryoo, C.-R., 2022, First detection of stratigraphic records of paleo-

- earthquakes in Chungbuk Region, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 58, 411-425 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Son, M., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Seong, Y. B. and Lee, J., 2020b, Processes and challenges for the production of Korean active faults map. Journal of the Geological Society of Korea, 56, 113-134 (in Korean with English abstract).
- Kobayashi, T., Ko, K., Choi, S.-J. and Choi, J.-H., 2022, Orthogonal dual polarization GPR measurement for detection of buried vertical fault. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 4022805.
- Lee, S.R. *et al.*, 2020, Research on geologic hazard assessment of large fault system - focusing on central region of the Yangsan fault. Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, NP-2018-17, Daejeon, 503 p (in Korean).
-

Received : November 24, 2022

Revised : December 1, 2022

Accepted : December 1, 2022