



Article

## 드론 기반 지형변위 분석을 통한 고지진 운동특성 이해: 주향이동단층 사례연구

최재현<sup>1,2</sup>, 최진혁<sup>1,2,\*</sup>, 방은석<sup>3</sup>, 이호일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교 지질과학전공

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질재해연구본부 활성지구조연구센터

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구센터

### Kinematics of paleo-earthquake ruptures based on geomorphic offset analysis using drone-derived topographic data: case studies on strike-slip faults

Chaehyeon Choi<sup>1,2</sup>, Jin-Hyuck Choi<sup>1,2,\*</sup>, Eun-Seok Bang<sup>3</sup>, Hoil Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological Sciences, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea

<sup>2</sup>Active Tectonics Research Center, Geologic Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

<sup>3</sup>Mineral Exploration and Mining Research Center, Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: November 22, 2023 / Revised: December 27, 2023 / Accepted: December 27, 2023

\*Corresponding author: +82-42-868-3078 / E-mail: [cjh9521@kigam.re.kr](mailto:cjh9521@kigam.re.kr)

**요약:** 미래 중대형지진의 특성을 이해하기 위한 방법 중 하나는 과거 중대형지진으로 인한 지표지질의 변형 기록을 분석하는 것이다. 특히, 지형학적 변형 기록을 통해 고지진에 수반된 지표파열의 분포와 변위정보(변위량/변위률)를 파악하는 것이 중요하다. 최근 고지진 조사에서는 지형분석에 있어 위성, 유인항공기와 더불어 드론(또는 무인항공기) 기반의 고해상도 원격탐사 자료를 이용한 연구가 시도되고 있다. 이번 연구는 한반도 동남부의 양산단층 경주 삼릉지역과 몽골 중부의 모고드단층을 대상으로 드론에 의해 취득된 수치표고모델을 활용한 지형분석을 통해 고지진의 운동감각과 변위를 평가하였다. 경주 삼릉지역의 양산단층에 대해, 드론 라이다 기반의 수치지형모델을 이용해 지진지표파열에 평행한 방향과 직교하는 방향의 지형단면 분석을 수행하였고, 이를 통해 고지진의 주향이동 운동감각을 추론하였다. 몽골 모고드단층은 변위하천이 잘 발달하는 지점을 대상으로 드론 촬영사진 기반의 수치표면모델을 제작하여 MATLAB 기반 GUI LaDiCaoz를 이용해 변위하천 및 지형 복원을 수행하였고, 그 결과 약 33 m 수평 및 2 m의 수직변위를 측정했다. 2차원 지형단면도 분석결과와 3차원 지형 복원 결과는 서로 다른 운동감각의 겹보기 수직변위를 보였는데, 이는 경사진 지형면이 수평 변위를 겪은 결과로 해석된다. 본 연구결과는 위성 및 유인항공기에 비해 상대적으로 낮은 운영 고도에서 고해상도의 자료를 짧은 주기로 취득할 수 있는 드론 자료가 지진 지표변위 분석에 유용하게 활용될 수 있음을 보여주며, 향후 화산, 산사태, 지반침하 등 지표변형을 수반하는 지질재해 연구에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

**주요어:** 지진지표파열, 지형변위지시자, 원격탐사, 드론, 라이다

**ABSTRACT:** One of the approaches to understand the characteristics of potential major earthquakes is to investigate the geologic records of surface deformation associated with paleo-earthquakes. In particular, it is important to estimate offset and slip-rate along the surface ruptures based on analysis of geomorphic offset markers. Recently, together with satellite and aerial vehicles, drones (or unmanned aerial vehicles) could provide high-resolution geospatial data and this leads to enhance our topographic analysis. Here, we investigate geomorphic offset along the paleo-earthquake surface ruptures on Yangsan Fault, S. Korea, and Mogod Fault, Mongolia using a drone-derived Digital Elevation Model (DEM). In the Gyeongju Samreung site lying on the Yangsan Fault, we use drone LiDAR-derived Digital Terrain Model (DTM) to conduct topographic profiles parallel and perpendicular to earthquake surface ruptures. The most notable result is the along-fault variations in vertical separations, and this enables us to infer that the Yangsan Fault underwent mostly strike-slip earthquakes. On the Mogod Fault, we estimate ~33 m of horizontal offset and 2 m of vertical offset based on the reconstruction of the offset channel using MATLAB-based GUI LaDiCaoz. Senses of vertical separation are in discord between the topographic profile (2D) analysis and the 3D geomorphic reconstruction,

and we attribute this difference to the dominant horizontal offset of the inclined geomorphic feature. Our study highlights that the drones offer significant advantages for analyzing earthquake surface ruptures due to their ability to collect high-resolution data at low altitudes quickly. We expect these findings will be beneficial for studying other geological events involving surface deformation such as volcanoes, landslides, or ground subsidence.

**Key words:** earthquake surface rupture, geomorphic offset indicator, remote sensing, drone, LiDAR

## 1. 서론

지진은 단층에 누적된 응력이 일시적으로 해소되는 단층파열(rupture) 현상의 결과로 발생한다. 내륙 지진과 관련된 단층파열은 주로 취성변형 조건의 상부지각에서 개시 및 전파되는데, 소-중규모 지진은 파열면이 지표까지 확장되지 못하고 지하에서 제한된다. 반면 일반적으로 규모 6 이상의 중-대규모 지진은 지하에서 전파되는 단층파열이 지표까지 확장되어 지표면의 변형을 야기하는데, 이를 지진지표파열(earthquake surface rupture)이라 한다. 고지진(paleo-earthquake)에 의한 지표파열 기록은 고지진 발생 이전에 형성된 지형(면)에서 비교적 쉽게 인지할 수 있다. 그러나 지형 변위나 변형의 보존 여부 및 그 정도는 지표파열을 동반하는 지진의 재발주기(지구조적 요소)와 해당 지역의 침식/퇴적률(기후적 요소)에 의해 좌우되며, 도심 개발과 같은 인위적 요소가 영향을 미치기도 한다. 고지진에 수반된 지표파열 기록을 탐지하여 그 분포를 파악하고 변위정보를 분석하는 것은 미래에 재발할 수 있는 지진의 특성을 평가하는데 활용된다(Wallace, 1968; Sieh, 1978; Zielke *et al.*, 2015).

고지진 연구에서는 지표파열을 탐지 및 분석하기 위한 방법으로 인공위성이나 항공기를 이용한 원격탐사 기법을 유용하게 활용해왔다(e.g., Zielke *et al.*, 2015; Johnson *et al.*, 2014; McCalpin and Gath, 2021; Ha *et al.*, 2022). 원격탐사는 관측장치(센서)와 이를 상공에 전달하는 플랫폼으로 구성되며 활용 목적에 따라 센서와 플랫폼의 조합은 다양한데, 고지진 지형 분석에는 주로 입체사진측량 기법(Mikhail *et al.*, 2001)과 라이더(Light Detection And Ranging, LiDAR) 기법(Kim *et al.*, 2014)이 활용된다. 입체사진측량은 자연 광원을 활용하는 수동적 센싱 기법으로, 두 장 이상의 2차원 광학사진이 서로 겹쳐지는 중복도를 갖도록 촬영한다. 우리가 사물을 두 눈으로 볼 때 입체감을 느끼듯 동일한 피사체를 서로 다른 각도에서 촬영했을 때 맺히는 상의 차이(시차차; parallax difference)로부터 표고를 계산하는 원리이다. 식생이나 건물과 같은 지표 장애물이 적은 지형조건에서 주로 활용되며, 최근 도심지 개발 이전에 촬영된 과거 항공사진을 이용해서 지형분석을 수행하기도 한다(e.g., Talebian *et al.*, 2016; Kim, T. *et al.*, 2023; Kim and Lee, 2023). 라이더는 인공적으로 레이저 펄스를 발생시키는 능동적 센싱 기법으로, 레이저 펄스의 속도와 반사되어 돌아오는데 걸린 시간 측정을 통해 지표지물까지의 거리를 계

산하는 방식이다. 이때 식생 및 건물 등 피복물에서 반사되어 돌아온 데이터는 제거하고 지면에서 반사되어 돌아온 데이터를 보간하면 피복물이 제거된 순수지형을 모델링할 수 있다.

드론 기반의 지형분석은 위성과 항공기에 비해 데이터를 취득할 수 있는 면적은 제한적이지만, 낮은 운영고도에서 느린 속도로 높은 점밀도의 센싱을 통해 1 m 이상 급의 고해상도 지형 데이터를 취득할 수 있다(Oh, 2019). 특히 현장 운용이 상대적으로 용이하며, 결정적으로 위성이나 항공기에 비해 적은 비용으로 데이터를 취득할 수 있기 때문에 최근 고지진 연구에도 드론 활용이 시도되고 있다(e.g., Bemis *et al.*, 2014; Rao *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022). 본 연구는 지진에 의해 변위된 지형을 대상으로 드론에 의해 취득된 수치표고모델을 활용한 고지진 지표파열 분석을 수행하였다. 연구대상은 현재의 지진지구조환경에서 고지진 지표파열 기록이 보고된 바 있는 한반도 동남부의 양산단층과 몽골 중부의 모고드단층으로 선정하였다. 양산단층 연구는 선행연구(Lee *et al.*, 2023)에 의해 고지진 지표파열이 확인된 경주 삼릉지역의 단층애(fault scarp)에 관한 것으로 식생 제거 효과를 위해 드론 라이더를 활용하였고, 모고드단층 연구는 변위하천에 관한 것으로 건조한 기후로 인해 식생의 간섭이 작아 드론 기반의 입체사진측량 분석을 수행하였다. 연구결과를 토대로 각 지역의 고지진 운동특성을 추론하고 향후 지질재해 원격탐사로의 드론 활용성을 토의하였다.

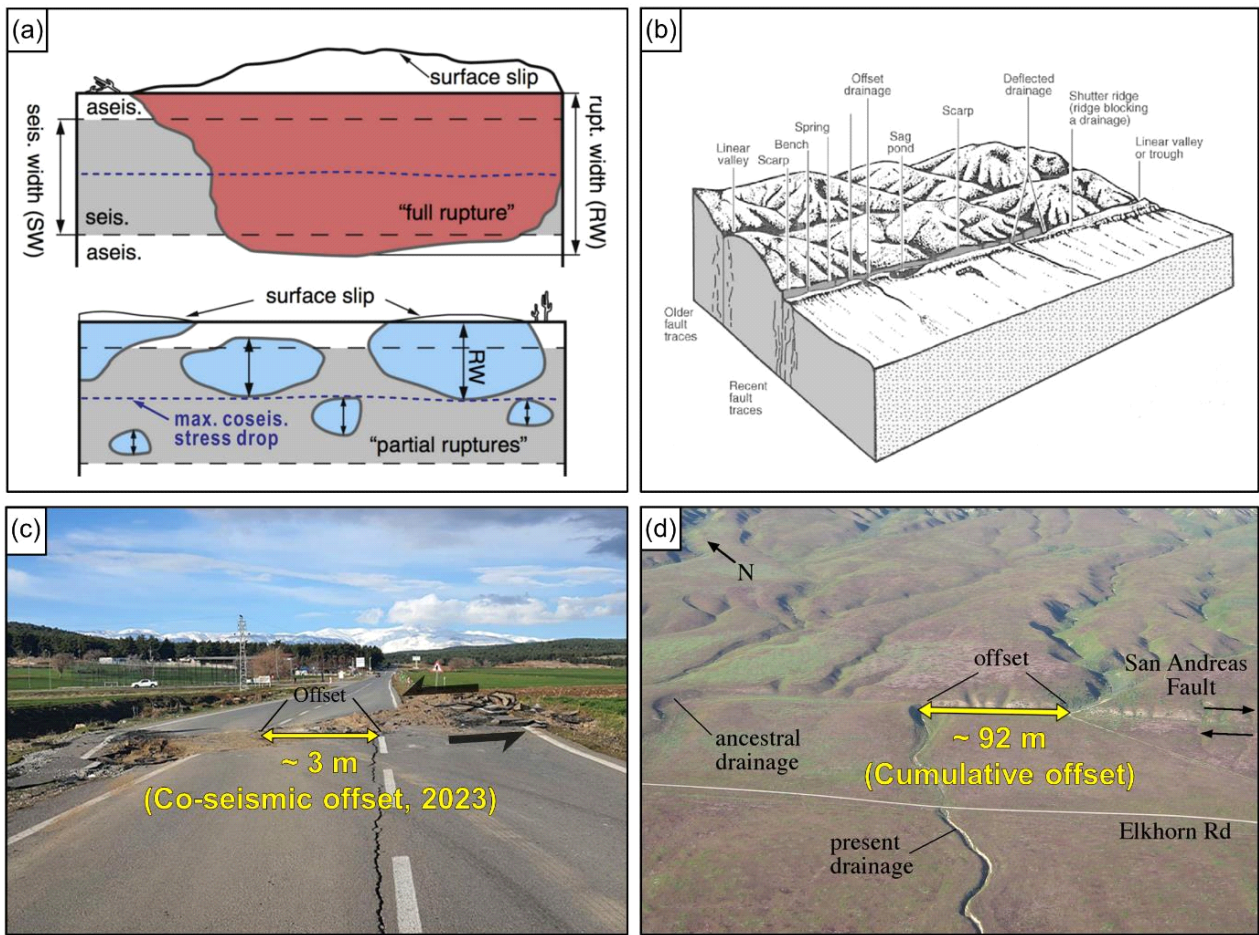
## 2. 고지진 지표파열

지표파열은 지진을 일으킨 단층파열이 지표까지 진행되어 단층면이 지표에 노출된 결과, 즉 단층면과 지표면이 교차하는 선형의 지질구조로, 강력한 지진동, 산사태, 침하 등 다른 원인에 의한 지표면 붕괴와 구별된다(그림 1a). 지진 지표파열의 가장 일반적인 형태는 선형의 지형학적 낙차를 보이는 단층애로, 이는 단층 양측의 서로 다른 암상에서 비롯되는 차별침식 등 고지진이 아닌 다른 요인에 의해 기반암에 내재된 단층이 인지되는 단층선애(fault-line scarp)와 구별된다(Giano and Schiattarella, 2014). 또한 단층파열면의 미끄럼 운동(slip)에 의해 단층 양측 지괴가 서로 반대방향으로 어긋나는 변위가 발생하고, 이러한 변위에 의해 지형이 변형된다. 일반적으로 변위 정보(운동감각, 변위량 등)를

추론할 수 있는 지형을 지형학적 변위지시자(geomorphic offset marker)라 하며, 이는 고지진의 운동감각 또는 단층의 종류에 따라 전형적인 지형 특성을 보이기도 한다. 이 연구에서 다루는 주향이동지진(strike-slip earthquake)은 주로 수평변위를 동반하므로 단층을 가로지르는 선형의 지형이 변위지시자 역할을 한다. 가장 대표적인 예로 변위하천(offset channel)과 하천을 절단하여 배수를 차단하는 능선인 셔터리지(shutter ridge)를 들 수 있으며, 국부적인 수직변위 성분에 의한 새그폰드(sagpond) 또는 프레셔리지(pressure ridge) 등이 있다(그림 1b).

일반적으로 지형변위는 한 번의 지진에 의해 형성되기 보다는 반복적으로 재발하는 지진에 의해 변위가 누적되어 형성된다. 지진 발생과 동시에 변위가 발생하는 것을 지진 동시성 지표변위(co-seismic offset)라 하며, 한 차례의 지진에 의해 발생된 변위라는 의미를 내포한다(그림 1c). 지

진동시성 변위가 여러 번 발생되어 변위가 누적된 것을 누적변위(cumulative offset)라 한다(그림 1d). 여기서 변위가 누적된다는 것은 지진지표파열이 동일한 단층 구간이나 지점에서 반복되어 발생한다는 의미를 내포하는데, 이는 대부분의 중-대규모 지진이 이미 존재하고 있는 활성단층에서 지진성 거동이 다시 발생한 결과이기 때문이다. 따라서 과거에 여러차례 발생했던 고지진의 흔적을 연구하여 해당 단층(구간)에서의 지진규모를 추정하고 지진재발주기를 분석하는 것이 가까운 미래의 지진 발생 특성을 추론할 수 있는 방법이다(Brune, 1968; Wallace, 1970; Youngs and Coppersmith, 1985; Mason *et al.*, 2006). 한편, 고지진학 접근은 당시의 지진지표파열에 의한 지형변위 흔적이 지금까지 훼손되거나 유실되지 않고 잘 보존되어 있어야 그 연구가 가능한데, 훼손되지 않은 지질학적 기록을 찾는 것은 쉽지 않다. 특히 지형학적 기록은 지형변위가 형성된 후 침



**Fig. 1.** (a) The down-dip rupture width of full- and partial-rupture earthquake along a fault in relation to the extent of seismogenic depth (from Zielke *et al.*, 2015). (b) Geomorphology of strike-slip fault zone (from Burbank and Anderson, 2012). (c) A photo showing co-seismic offset on the surface rupture caused by the 2023 Mw 7.7 Kahramanmaraş, Turkey, earthquake on the Eastern Anatolian Fault (Credit: Prof. Dr. Hasan Sözbilir; Source: <https://www.veryansintv.com/prof-dr-sozbilir-en-az-3-fay-segmenti-kirilmis-oldu/>). (d) An aerial photo of Wallace Creek and San Andreas Fault (Photograph copyright by David Lynch).

식 및 퇴적 작용의 영향을 받아 변형되기 때문에 온전히 보존되기 어렵다.

양산단층과 모고드단층은 모두 판 경계부와 멀리 떨어진 지역에 위치하는 주향이동단층으로, 반복적인 중대형 지진에 의해 지형변위가 누적되어 있다. 그러나, 두 단층을 대상으로 지금까지 수행된 고지진 연구는 주로 지표지질의 층서학적 변형기록을 토대로 고지진 이력을 해석해왔으며, 지형학적 변형기록에 대한 정밀분석은 부족한 상황이다. 한반도 동남부에 위치한 양산단층은 활발한 풍화와 침식작용으로 인하여 지형변위지시자 및 변위 측정 기준점이 보존되기 어렵고, 고속도로를 비롯한 사회 기반 시설물과 울창한 식생 등으로 지형이 피복되어 있어서 지형학적 분석이 상당히 제한된다. 이번 연구의 대상인 양산단층 경주 삼릉 구간은 소나무 숲이 발달하기 때문에 지형이 식생으로 완전히 피복되어 있어 광학영상을 활용한 지형분석이 불가능하고, 변위를 측정하기 위한 지형변위지시자를 특정하기 어렵다. 이에 따라 식생 피복물을 제거하고 정밀한 지형분석을 하기 위해 경주 삼릉구간에서는 라이다 기법을 사용하였다. 반면 몽골 모고드단층은 건조한 기후로 인해 풍화와 침식작용이 더디게 진행되며, 더불어 비교적 최근인 1967년 Mw 7.1의 지진으로 지표파열이 발생한 바 있어 지진으로 인해 변위된 지형이 훼손되지 않고 잘 보존되어 있다. 또한 지형 정보를 가리는 식생 및 인공지물 등의 피복물이 없어 라이다 센서의 필요성이 부각되지 않는다. 따라서 모고드단층 사례연구는 데이터 획득과 처리의 용이성 및 경제성을 고려하여 입체사진측량 기법을 사용하였다.

### 3. 판내부 주향이동단층 사례연구

#### 3.1. 양산단층 경주 삼릉구간

##### 3.1.1. 연구지역

경상북도 경주시 배동의 삼릉과 경애왕릉 부근에는 동쪽에 위치하는 경주 남산과 서쪽을 흐르는 형산강 사이에 양산단층이 분포한다. 이번 연구는 동측의 남산에서 기원한 선상지를 대상으로 수행하였으며, 미고결 퇴적층으로 구성된 해당 선상지는 지형학적 낙차를 보인다(그림 2c). 경주시는 과거 신라의 수도로 다양한 문화재가 넓게 분포하는 지역으로 단층주적 조사 측면에서는 비교적 제약이 많은 지역이다. 이번 연구의 대상이 되는 선상지에는 배동 삼릉과 경애왕릉이 위치하여 문화재 보호 차원에서 굴착조사가 허용되지 않으며, 소나무 숲으로 완전히 피복되어 있어 지형조사에도 어려움이 있다. Lee *et al.* (2023)은 이러한 연구 제한을 극복하고자 항공라이다 영상 분석, 시추조사, 전기비저항탐사를 통해 피복단층 추적조사를 수행하였다. 특히, 0.5 m 해상도의 항공라이다 기반 수치지형모델(Digital

Terrain Model, DTM)을 활용하여 지형분석을 통해 선상지를 고도에 따라 고위면과 저위면으로 구분하였으며, 삼릉이 위치한 선상지 고위면에서 관찰되는 수직의 급경사면이 고지진 지표파열의 결과임을 규명하였다. 또한, 급경사면 양측에서 수행된 시추조사 및 층서 대비를 통해 고지진 지표파열을 따라 약 2.85 m의 수직변위를 산출하였다. 그러나 수평 운동감각에 관한 접근은 없었으며, 항공라이다 DTM에서 경애왕릉이 위치한 선상지 저위면에서는 지형학적 변형 기록이 없음을 추론하였다. 따라서 본 사례연구는 고해상도 드론 기반 지형데이터를 활용하여 수직변위와 더불어 수평변위를 포함한 고지진의 운동특성을 파악하고, 선행연구에서 인지되지 않았던 선상지 저위면의 변위 여부를 확인하는 것이 목적이다.

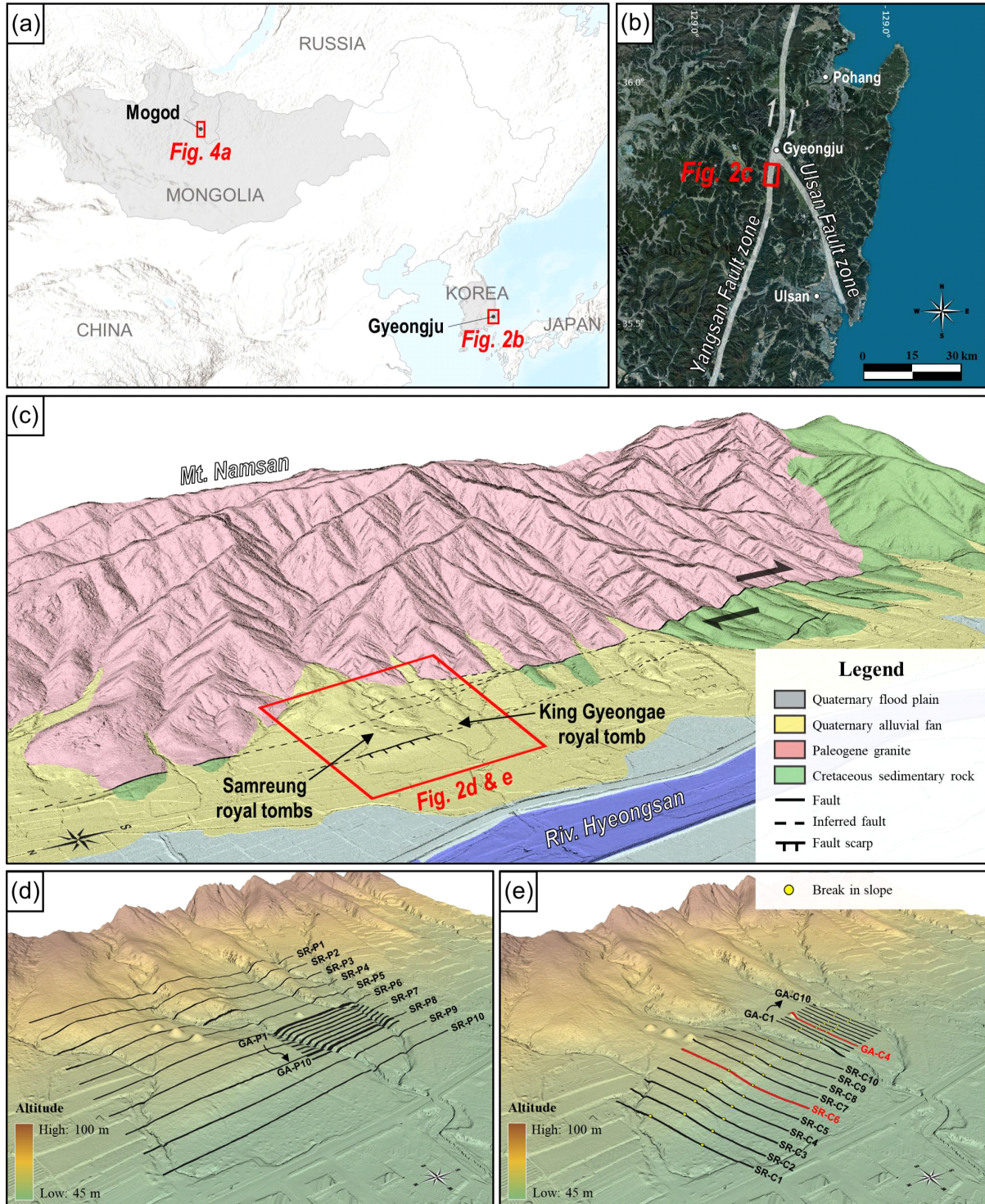
##### 3.1.2. 자료취득 및 분석

연구지역의 DTM을 제작하기 위해 사용된 라이다 센서는 YellowScan사의 Vx-15이며, 이를 DJI M300RTK 드론에 탑재하여 자료를 취득하였다. 지표로부터 약 70 m의 고도를 유지한 채 5 m/s의 속도로 비행하고, 비행 축선 간격은 60 m로 설계하였다. 비행고도 70 m에서 방사형으로 발사되는 레이저 펄스의 사용 구간을 아래쪽 120°로 할 경우, 지면 기준 240 m 폭의 자료를 취득하게 된다. 비행 축선 간격이 60 m이므로 동일 영역에 대한 자료 취득이 4회 중첩되도록 함으로써 획득하는 점군(point cloud)의 밀도와 정확도를 높이고자 하였다. 자료처리는 점군의 위치정보 보정, 3차원 상에 점군 생성, 마지막으로 지면 정보 추출 및 DTM 제작으로 수행하였으며, 이를 위해 POSPac UAV, YellowScan CloudStation, LiDAR360 등의 자료처리 소프트웨어를 각 단계에서 사용하였다.

선상지 퇴적층의 단층애를 대상으로 경사급변점 구간을 추정하고 지형학적 수직 낙차를 측정하기 위해 단층선에 평행한 방향과 직교하는 방향에 대한 2차원 지형 단면 정보를 DTM으로부터 추출하였다. 이때, 지형 단면 정보 추출에는 기준 축선을 중심으로 일정 거리의 모든 지형 고도를 통계 분석하여 대표성을 갖는 swath profile 분석법을 사용하여 지형단면 분석의 신뢰도를 높이고자 했다(Telbisz *et al.*, 2013; Hergarten *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2020). 단층선에 평행한 방향으로의 swath profile 축선은 선상지 고위면과 저위면 영역을 모두 포함하는 400 m 길이의 축선 10개를 30 m 간격으로 설계를 하고, 동쪽에서 서쪽 순서로 SR-P1(SamReung-Parelllel1)부터 SR-P10까지의 번호를 부여했다(그림 2d의 긴 축선). 하나의 단면도는 폭 10 m 이내 지형의 평균 표고를 나타낸다. 추가적으로 선상지 저위면을 대상으로 세밀한 지형 위상을 관찰하기 위해 10 m의 축선 10개를 8 m 간격으로 추가 설계했으며, 동쪽에서 서쪽 순서로 GA-P1

(GyeongAc-Parallel1)부터 GA-P10까지의 번호를 부여했다(그림 2d의 짧은 측선). 하나의 단면도는 폭 5 m 이내 지

형의 평균 표고를 나타낸다. 단층선에 직교하는 방향의 swath profile은 선상지 고위면에 150 m 길이 측선 10개를 20 m



**Fig. 2.** (a) Locations of the case studies at the Gyeongju Samreung site on the Yangsan Fault in South Korea and the Mogod Fault in Mongolia. (b) Location of the Gyeongju Samreung site. (c) Three-dimensional geological map and fault traces at the study site (modified from Lee *et al.*, 2023). (d, e) Locations of the topographic profiles parallel and perpendicular to earthquake surface ruptures on the drone LiDAR-derived DEM.

간격으로 설계하고 북쪽에서 남쪽 순서로 SR-C1(SamReung-Cross1)부터 SR-C10까지의 번호를 부여했으며, 하나의 단면도는 폭 10 m 이내 지형의 평균 표고를 나타낸다(그림 2e의 긴 축선). 선상지 저위면에는 100 m 길이 축선 10개를 8 m 간격으로 설계하고 북쪽에서 남쪽 순서로 GA-C1(GyeongAe-Cross1)부터 GA-C10까지의 번호를 부여했으며, 하나의 단면도는 폭 10 m 이내 지형의 평균 표고를 나타낸다(그림 2e의 짧은 축선). 그후 단층선에 직교하는 방향의 단면도에서 인지되는 경사급변 구간을 추정하고 지형학적 수직 낙차를 측정하였다.

3.1.3. 연구결과

단층 자취에 평행한 방향의 swath profile에서, 측선 SR-P7과 SR-P9 사이에서의 지형 변화가 관찰된다(그림 3a). 삼릉이 위치한 선상지 고위면의 동편은 위로 볼록한 언덕 지형인 반면 서편은 주변보다 낮은 지형으로 오목한 골짜기 형태를 보인다. 경애왕릉이 위치한 선상지 저위면은 크게 SR-P6과 SR-P9 사이를 경계로 동편 지형은 북에서 남으로 경사진 반면 서편 지형은 남에서 북으로 경사하는 경향을 볼 수 있다. 선상지 저위면을 대상으로 수행한 세부적인 swath profile에서 GA-P5와 GA-P6 사이를 경계로 동편 지형은

아래로 패인 골짜기 지형을 보이는 반면 서편은 다소 북쪽으로 경사하는 수평적 지형을 보인다(그림 3b).

단층대에 직교하는 방향의 swath profile에서, 선상지 고위면은 대체로 동편이 서편 대비 융기한 계단상의 급경사가 인지되며, 측정된 수직 낙차의 범위는  $2.3 \pm 1.4$  m이다(그림 3c). 반면 선상지 저위면은 GA-C4에서 GA-C7까지 4개의 단면도에서 서편이 동편 대비 융기한 계단상의 완경사가 인지되며, 측정된 수직 낙차의 범위는  $-0.5 \sim 0.9$  ( $0.2 \pm 0.7$ ) m이다(그림 3d). 수직 낙차를 표기함에 있어, 동편이 융기한 경우는 양수, 서편이 높은 경우는 음수로 도시한 결과(그림 3e), 수직 낙차는 단층대를 따라 일정하지 않으며, 수직 낙차 값이 점진적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 몽골 모고드단층

3.2.1. 연구지역

몽골 중북부에 위치한 모고드단층은 1967년 1월 6일 Mw 7.1 지진으로 최소 30 km 길이의 지표파열이 수반된 바 있다(그림 4a). 남-북 방향의 단층구간에서는 평균 약 1.5 m의 우수향 지표변위가 일어났고, 북서-남동 방향의 단층구간에서는 대체로 0.4 m 이상의 역이동성 지표변위가 발생했다(Bayasgalan and Jackson, 1999; Rogozhin *et al.*, 2008).

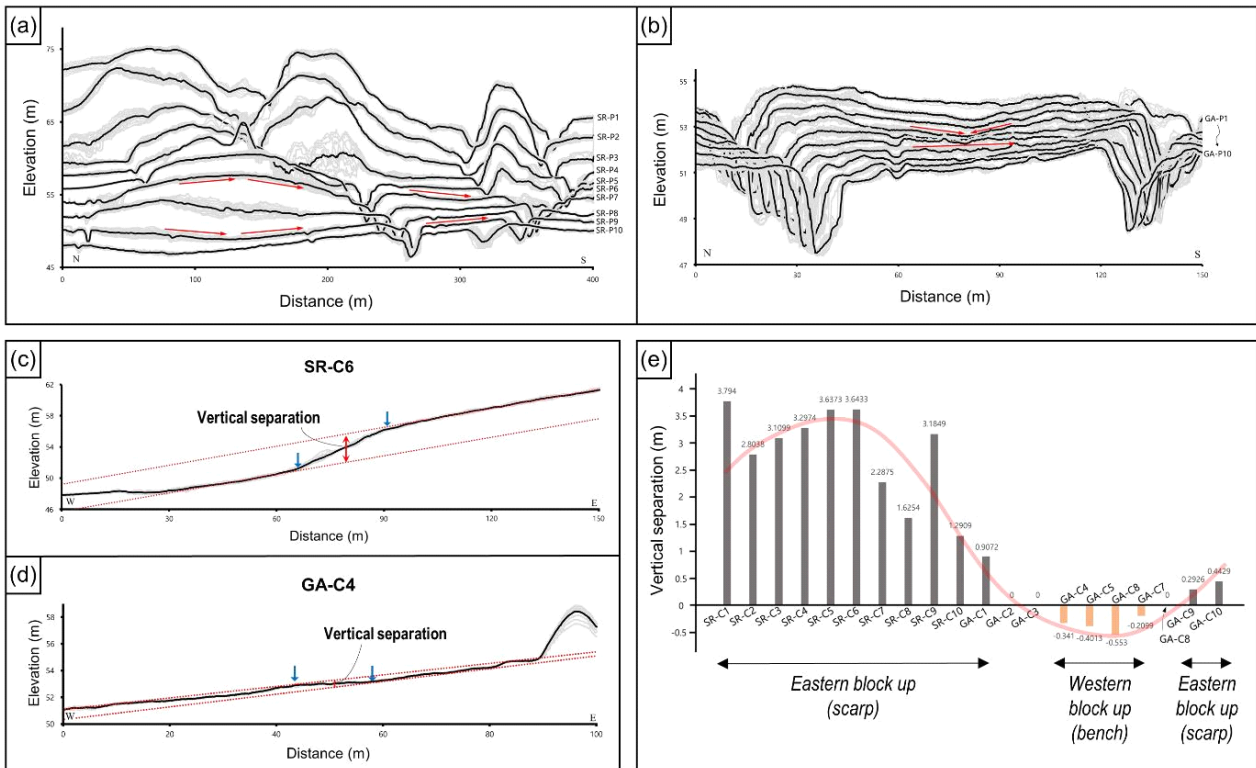
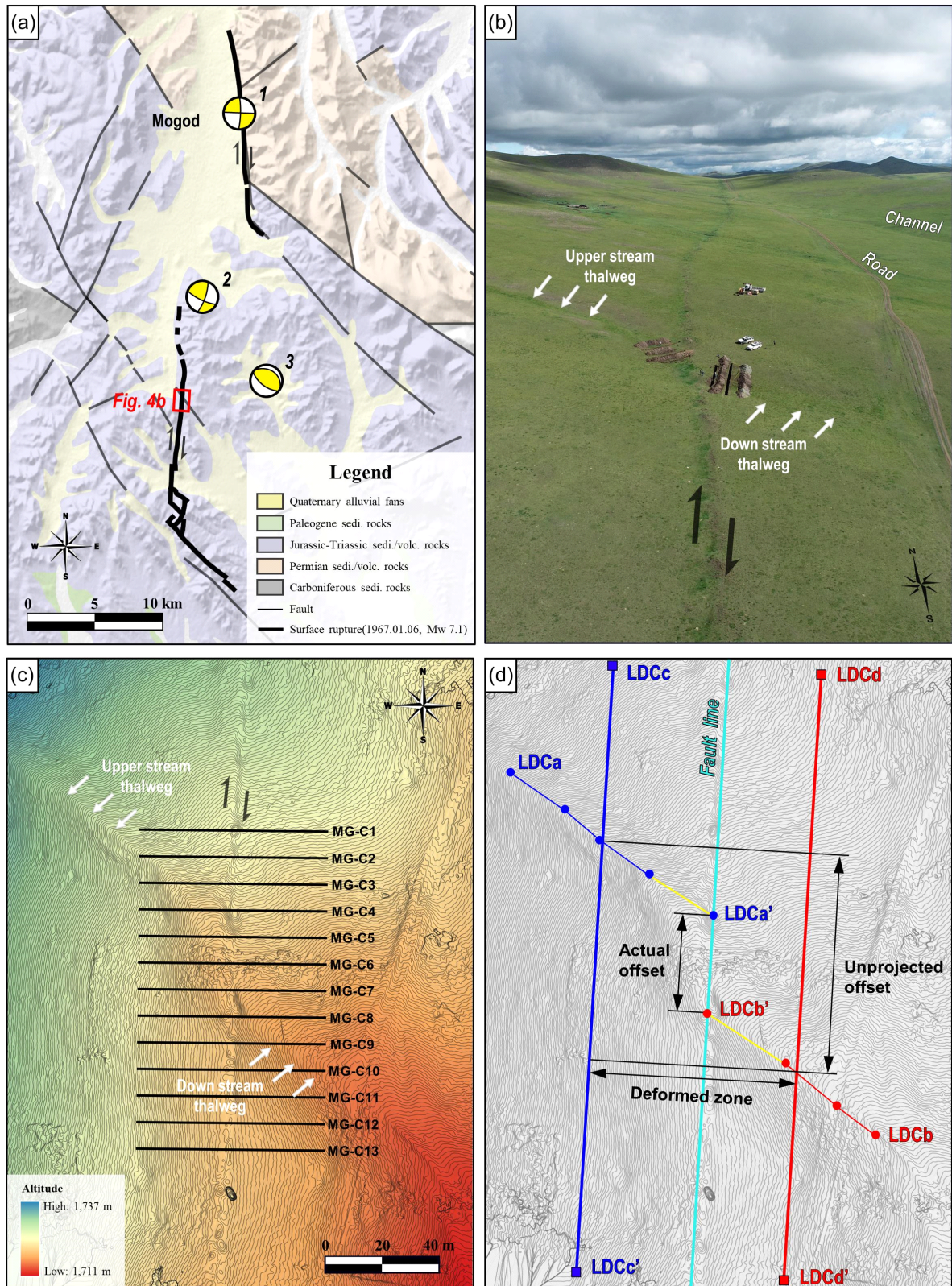


Fig. 3. (a, b) Stacked topographic profiles parallel to earthquake surface ruptures. (c, d) Examples of the stacked topographic profiles perpendicular to earthquake surface ruptures. Variations in slope gradients indicate vertical separation along the fault. (e) Vertical separation measured along the fault.



**Fig. 4.** (a) Geometry of the 1967 Mogod earthquake surface ruptures, with focal mechanism, traced on the 1:250,000 geological map, Mongolia (modified from Bollinger *et al.*, 2021). (b) Optical image of the study area captured by drone. (c) Locations of geomorphic profiles perpendicular to earthquake surface ruptures on the drone derived hill-shade map. (d) LaDiCaoz profiles for measuring horizontal and vertical offsets using thalweg as the piercing point.

북서-남동 방향 단층구간의 역이동성 지표변위를 대상으로 지형분석 및 굴착조사를 수행한 결과  $0.06 \pm 0.01$  mm/yr의 수직변위율이 산출된 바 있다(Bollinger *et al.*, 2021). 그러나 남-북 방향 우수향 지표파열 단층구간을 대상으로 수평 변위율을 보고한 사례는 현재까지 없다. 한편 남-북 방향의 단층구간을 가로지르는 일부 고하천은 반복적인 우수향 지진으로 인해 수 m 이상 변위된 형태를 보인다(그림 4b). 본 사례연구는 몽골 모고드단층에 의해 형성된 변위하천을 대상으로 하천을 지형변위지시자로 하여 누적된 수평 및 수직변위량을 산정하였다.

### 3.2.2. 자료취득 및 분석

드론의 정사영상 촬영에 사용된 장비는 DJI Phantom 4 pro RTK (카메라 FC6310R) 모델이다. 드론은 지표로부터 약 100 m 고도로 촬영을 하여 약 2.74 cm/pixel의 공간해상도를 확보하였으며 사진간 중첩을 수평 70%, 수직 80%로 설정하여 약 352,430 m<sup>2</sup>의 면적을 촬영하였다. 촬영된 사진은 Pix4D사의 Pix4DMapper를 이용하여 수치표면모델(Digital Surface Model, DSM)을 제작하였다.

이후 단층선에 직교하는 방향으로 70 m 길이의 swath profile 측선 13개를 10 m 간격으로 설계하여 지형학적 수직 낙차를 측정했다(그림 4c). 고지진 지표변위에 의해 굴절되거나 변위된 하천을 대상으로 수직 및 수평 변위를 측정할 수 있도록 제작된 매트랩(MATLAB) GUI 기반의 소프트웨어인 LaDiCaoz (Lateral Displacement Calculator)를 통해 변위분석을 수행하였다(Zielke and Arrowsmith, 2012). LaDiCaoz를 통해 변위를 분석하는 작업 순서는 다음과 같다. 1) 입력된 DSM에서 등고선을 추출하고, 추출된 등고선을 바탕으로 하천의 가장 깊은 골짜기선을 특정한다(그림 4d; 측선 LDCa-LDCa': 상류의 골짜기선, 측선 LDCb-LDCb': 하류의 골짜기선). 2) 단층선을 특정하고(그림 4d의 청록색 실선), 단층선에서 일정 거리 떨어진 위치의 하천 단면도(그림 4d; 파란 실선: 상류의 하천 단면도, 빨간 실선: 하류의 하천 단면도)를 하천 흐름 방향과 기울기를 고려해서 단층면에 투영한다. 단층에서 일정거리 떨어진 위치의 하천 단면을 사용하는 이유는 단층과 가까운 수록 하천의 침식력과 사면의 사박작용 때문에 주변 지형 및 하천의 형태가 변하여 변위지시자 유실에 따른 변위 과소추정을 방지하기 위함이다(Zielke *et al.*, 2010; Reitman *et al.*, 2019; Kim and Seong, 2021). 이번 연구에서는 상류의 LDCc-LDCc'는 단층선에서 40 m, 하류의 LDCd-LDCd'는 단층선에서 35 m 떨어진 지점에 측선을 설계하였다. 3) 단층면에 투영된 하천 단면도의 최심하상선(thalweg)을 기준으로 수평 및 수직변위를 측정하고, 측정된 변위를 기준으로 변위되기 이전의 고지형을 복원한다.

### 3.2.3. 연구결과

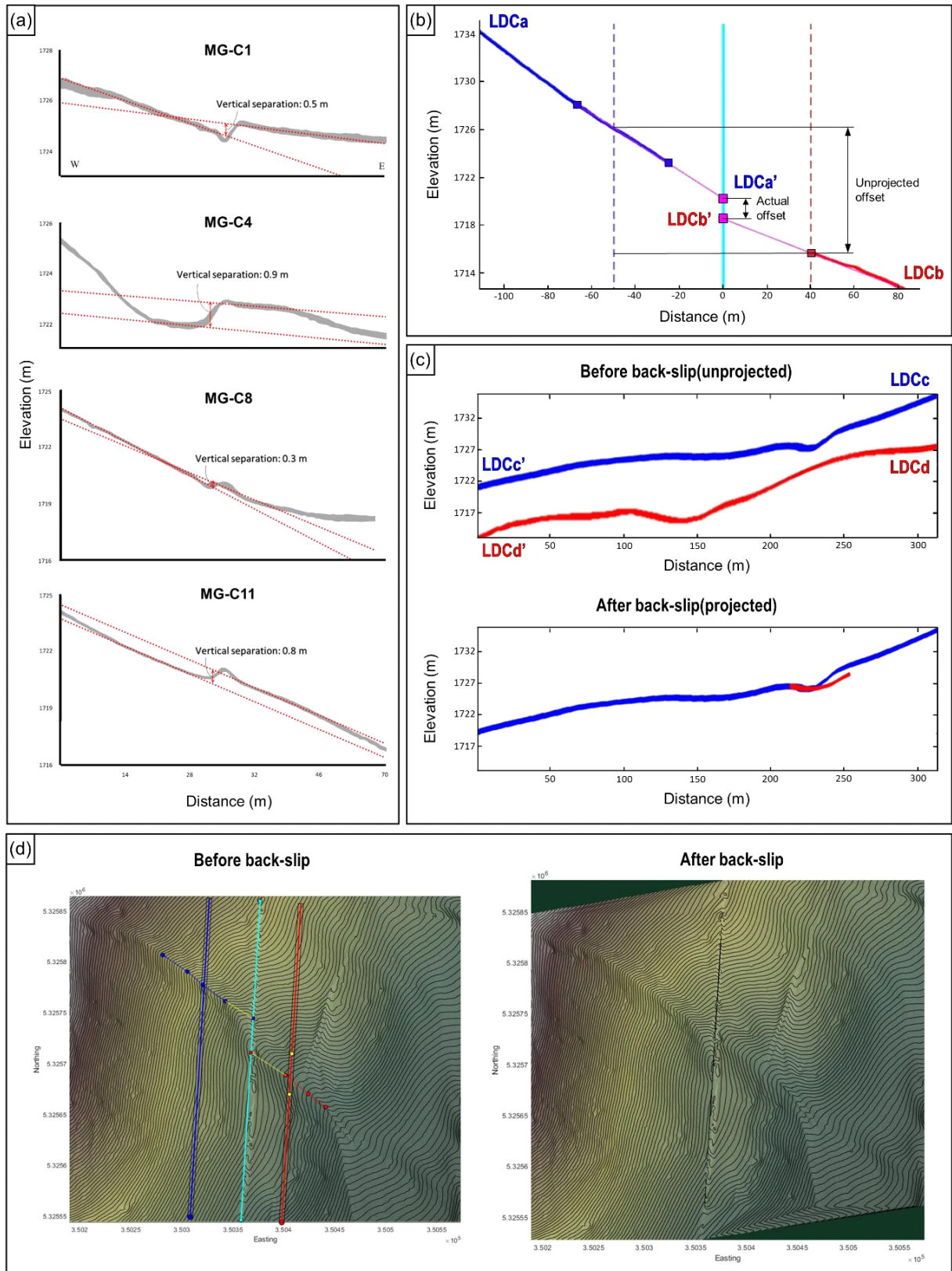
단층선에 직교하는 방향으로 작성한 13개의 swath profile에서 측정된 수직 낙차는  $0.6 \pm 0.3$  m로 측정되었으며, 동측 지괴(하류)가 서측 지괴(상류)에 비해 지형 고도가 높음으로 나타났다(그림 5a). 반면 LaDiCaoz를 이용해서 상류의 골짜기선을 단층면까지 연장한 측선 LDCa-LDCa'와 하류의 골짜기선을 단층면에 연장한 측선 LDCb-LDCb'을 함께 도시한 결과, 서측 지괴(상류)가 동측 지괴에 비해 약 2 m 융기된 것을 알 수 있다(그림 5b). 이는 2차원 단면 분석 내지 현장에서의 관찰 결과가 3차원 지형복원 결과와 상이할 수 있음을 보여준다. LDCc-LDCc'와 LDCd-LDCd'을 복원한 결과, 누적 수평변위는 약 33 m로 측정되었다(그림 5c). 이 결과를 토대로 단층 운동 발생 이전의 고지형을 복원하면 상류와 하류의 하천 흐름이 하나로 연결되는 것을 확인할 수 있다(그림 5d).

## 4. 해석 및 토의: 고지진 운동특성

지진의 운동감각은 활성지구조 환경하에서 작동하는 응력 상태와 지각운동 특성을 이해하는데 중요한 정보로, 주로 측지자료, 지진자료 등을 통해 추론 가능하다. 관측 장비가 개발되기 이전에 발생한 고지진의 경우, 단층운동감과 응력 상태는 고지진에 수반된 지표변형 정보를 통해 추론할 수 있다. 나아가 지형변위지시자가 보이는 누적 변위와 해당 지형변위지시자의 형성 연대를 분석하여 해당 기간 동안의 변위율을 파악할 수 있다. 이는 고지진 굴착조사 정보(지진 발생 횟수, 지진 재발주기, 최후기 운동시기 등)와 더불어 미래지진의 시기, 규모 등을 추론하는 소위 지진 재발모델(earthquake cycle model)를 평가하는데 중요하다. 이번 장에서는 두 사례연구를 통해 도출한 고지진 운동 특성에 관해 토의하였다.

양산단층 경주 삼릉 구간에 대해 지형단면도에서 인지되는 수직 낙차를 측정된 결과 단층을 따라 변화의 폭이 비교적 큰 수직 낙차를 확인하였다. 고위면의 경우, 비록 모든 측선에서 단층의 동측 지괴가 상대적으로 융기한 것으로 확인되나, SR-C6을 포함한 북쪽은 3 m 이상의 큰 수직 낙차를 보이는 반면 SR-C7 측선부터 남쪽으로 갈수록 변위량이 감소하는 양상을 보인다. 한편 저위면의 경우 비록 수직 낙차는 모두 1 m 미만으로 작지만, 단층의 동측부는 남쪽으로 갈수록 고도가 낮아지는 반면 서측부는 남쪽으로 갈수록 고도가 높아지는 양상을 보인다. 이는 단층을 중심으로 서로 다른 경사방향을 보이는 지형면이 배치되어 있음을 의미하고, 단층의 주향을 따라 상대적으로 융기한 지괴가 달라지는 결과를 초래한다. 단층을 따라 관찰되는 수직 낙차의 다양성은 지진지표파열이 수직변위보다는 주로



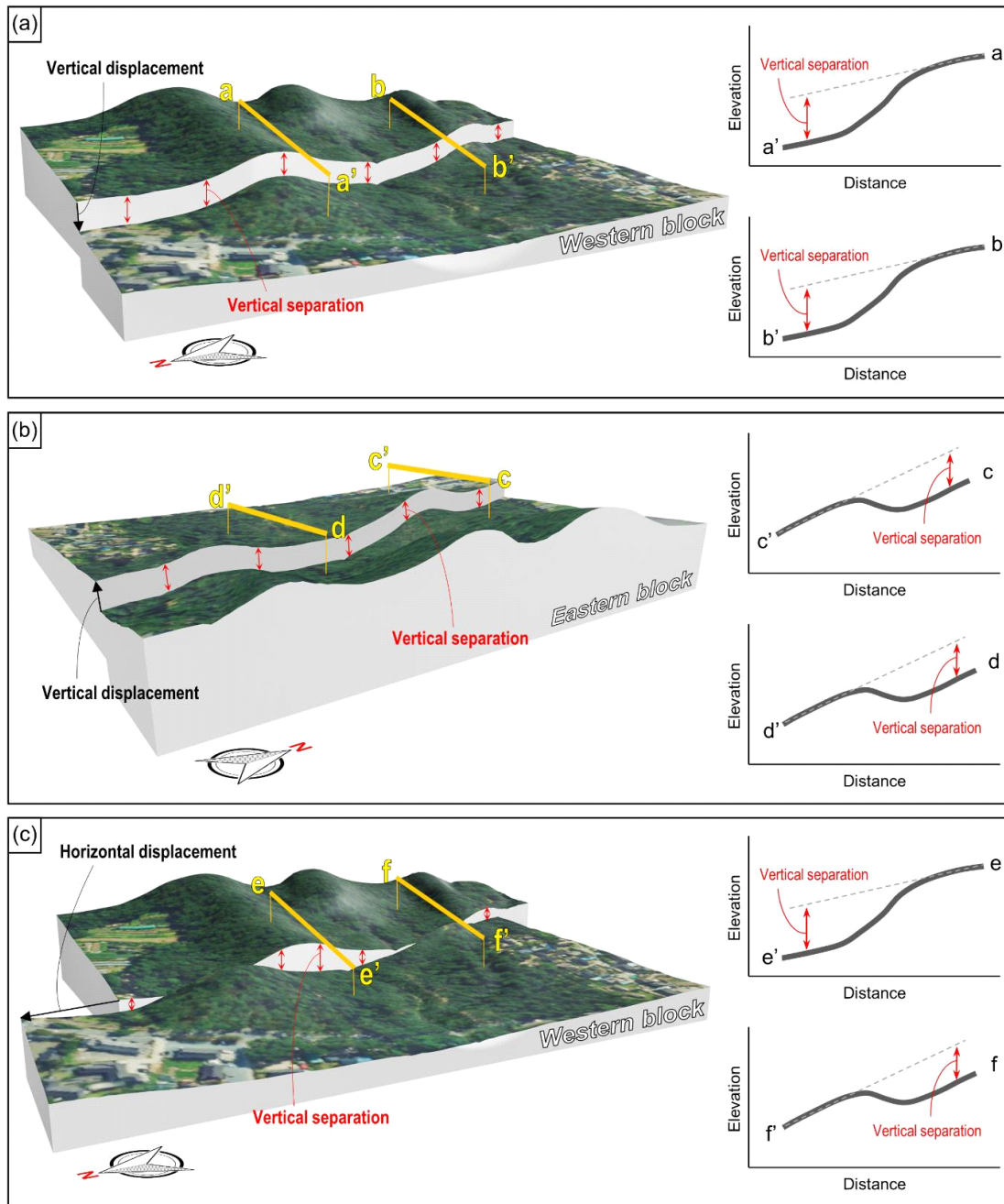


**Fig. 5.** (a) Examples of topographic profiles perpendicular to earthquake surface ruptures with vertical separation. (b, c) Topographic profiles analyzed using the LaDiCaoz. (d) Back-slip process based on the measured vertical and horizontal offset values.

수평 변위를 수반한 결과로 해석된다. 고위면과 저위면에서 관찰되는 수직 낙차의 크기 차이는 해당 지형면들이 서로 다른 시기에 형성되었기 때문에 서로 다른 누적 변위를 보이는 것으로 판단된다. 또한 고위면에서 동측지괴가 일관되게 상승한 이유는 수평변위성분보다 그 크기가 작지만 여러 번의 지진에 수반된 수직변위성분이 누적된 결과(Lee

*et al.*, 2023)로 판단된다. 한편 저위면의 지형변화가 고지진이 아닌 인위적 요인(왕릉 조성)에 의해 발생했을 가능성을 완전히 배제할 수 없어, 굴착조사와 같은 추가 고지진 연구가 필요하다.

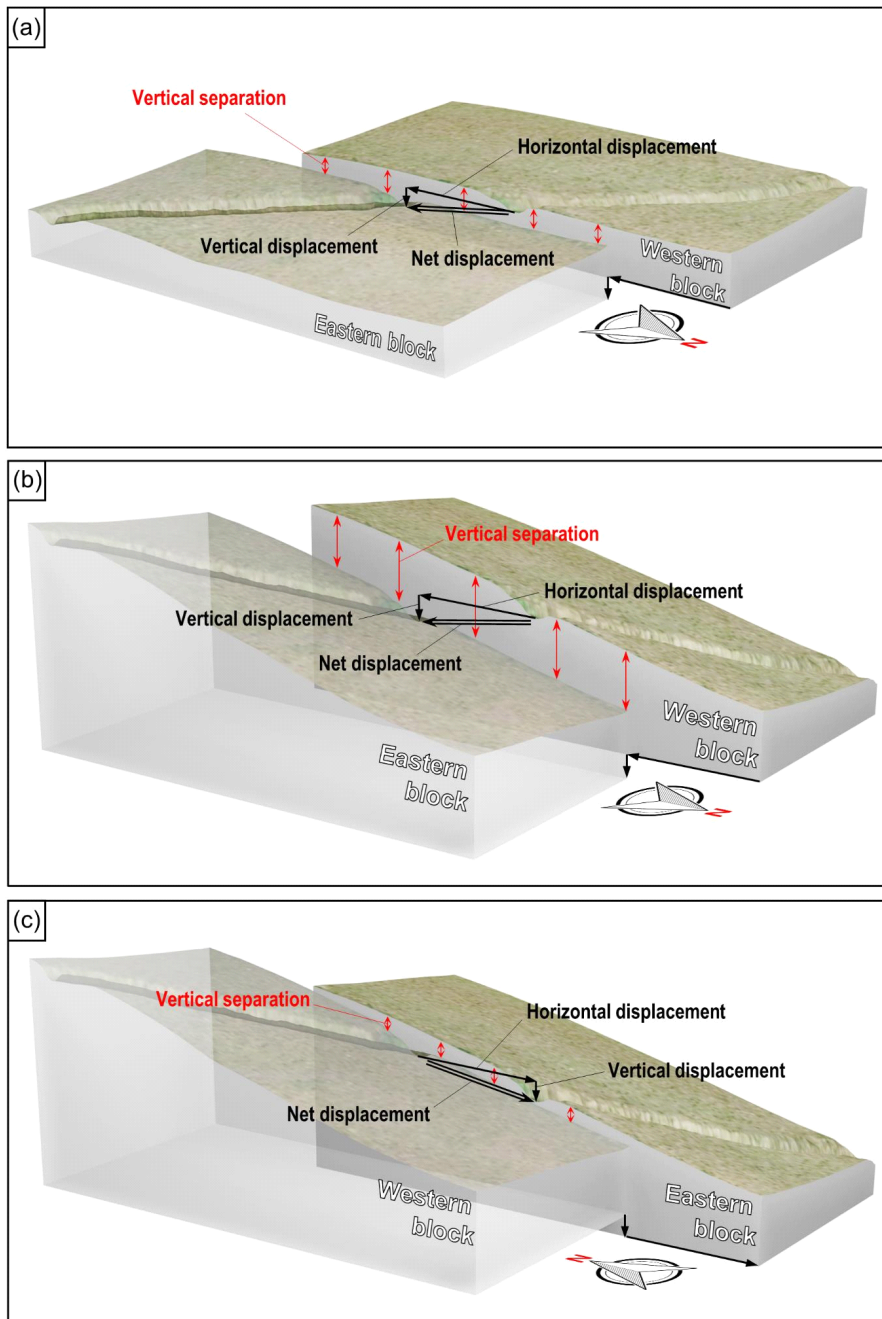
그림 6은 동쪽에서 서쪽으로 경사진 능선과 하천이 반복되는 지형에 대하여 동측 지괴를 고정하고 서측 지괴를 다



**Fig. 6.** Simplified geomorphic offset model. (a) Model simulating a case where vertical separation occurs as the high-altitude eastern-block uplifts due to vertical displacement movement. (b) Model simulating a case where vertical separation occurs as the low-altitude western-block uplifts due to vertical displacement movement. (c) Model simulating a case where along-fault variations of vertical separation occur due to right-lateral displacement.

양한 운동감각의 지진지표파열로 변위 시켰을 때의 수직 낙차 양상을 모식도로 표현한 것이다. 서측 지괴의 지형이 낮아지는 수직변위만 발생한 경우는 단층대를 따라 비교적 일정한 수직변위가 나타나며, 측선 a-a'와 측선 b-b'에서 모두 급경사의 단층애(fault scarp) 지형을 보인다(그림 6a). 서측 지괴의 지형이 높아지는 수직변위만 발생한 경우는

단층대를 따라 일정한 정도의 수직변위가 나타나는 반면, 측선 c-c'와 측선 d-d'에서 모두 경사급변점 전면에 완경사 내지 역경사를 보이는 계단 상의 벤치(bench) 지형을 볼 수 있다(그림 6b). 이와 달리 우수향 변위만 발생한 경우, 측선 e-e'에서는 단층애 지형이 나타나는 반면 측선 f-f'에서는 벤치 지형이 나타나는 등 단층대를 따라 일관되지 않은 정



**Fig. 7.** Simplified geomorphic offset model. All models triggered the same degree of vertical and right-lateral displacement based on the fixed western block. (a) Case of a flat surface with no slope. (b) A case of a slope from southeast to northwest, a larger vertical separation occurs than the actual vertical offset. (c) A case of a slope from southeast to northwest, a smaller vertical separation occurred than the actual vertical displacement, and the direction was opposite.

도의 수직변위가 나타난다(그림 6c). 이는 양산단층 경주 삼릉구간에서 측정된 수직변위의 양상을 잘 반영한다. 삼릉 지역의 양산단층은 동측이 용기한 수직변위성분을 보이는데 이는 시추조사에서 관찰된 실트층의 변위와 지형면의 낙차 등을 통해 잘 확인된다(Lee *et al.*, 2023). 반면, 이번 연구에서 제안한 수평변위성분의 경우 변위량과 운동감각을 파악하기 쉽지 않다. 다만 지형학적 변위 분석을 통해 수평변위성분이 수직변위성분에 비해 우세했던 것은 확실해 보인다.

국내에서 선행된 고지진 연구에서도 운동감각이 추론된 바 있으나, 주로 지형변위가 아닌 제4기 퇴적층을 변위시킨 단층면상에서 관찰되는 단층조선의 선주각을 이용해 도출되었다. 이러한 이유는 2개 정도로 요약되는데, 활발한 침식과 삭박 작용으로 누적 변위가 지형학적으로 잘 남아있지 않은 조건과 주로 단면도두나 굴착단면 관찰을 통한 고지진 조사가 수행되었다는 점이다. 연구지역인 삼릉구간 또한 시추를 통해 수직변위가 분석된 바 있으나 주향이동 운동감각에 대한 접근은 부족한 실정이다. 최근 지진지표 파열에 관한 여러 연구결과는 지표에서의 변형 분할이나 분산 등에 의해 지표파열 복잡성이 비교적 높다는 사실을 잘 보여준다(Klinger *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2018). 가장 대표적인 예로 사교이동지진(oblique-slip earthquake)에 의한 변위의 수평변위성분과 수직변위성분이 지표 및 천부에서 분기된 서로 다른 단층에 구분되어 발생하는 점(Toda *et al.*, 2016; Kim, N. *et al.*, 2023)과 지진지표파열면 상에서 서로 다른 각도나 휘어지는 단층조선이 관찰되는 점(Kearse and Kaneko, 2020; Macklin *et al.*, 2021)을 들 수 있다. 이는 하나의 노두나 굴착조사에서 얻어진 구조 요소와 더불어 특정 단층 구간에 대한 지형학적 접근을 통한 고지진 운동감각 연구가 필요함을 의미한다.

몽골의 경우, 비교적 최근인 1967년 지진으로 지표파열이 발생함은 물론 지형학적 누적 변위가 잘 보존되는 조건으로 인해 수평이동 운동감각이 우수함을 추론하고 수평 변위량(33 m)을 측정하는 것은 어렵지 않다. 여기서는 2차원 단면 분석에서는 동측 지괴가 상승한 반면 3차원 지형복원에서는 서측 지괴가 상승한 것으로 분석된 수직변위에 대해 토의하고자 한다.

몽골 모고드단층에 의해 변위된 하천을 기준으로 누적 수직변위는 약 2 m 로 누적 수평변위의 약 6%에 해당된다. 이는 모고드단층이 주로 거의 수평에 가까운 우수향지진을 반복적으로 겪었음을 지시하며, 현재 변형된 상태의 지형이 주로 주향이동운동에 의한 산물임을 암시한다. 변위하천 및 주변 지형을 3차원 복원한 결과, 서측 지괴(상류)가 단층 운동에 의해 용기하였음을 확인하였으나, 이는 동측 지괴가 더 높은 고도로 나타나는 야외관찰 및 단면도 분석

결과와 다르다. 우리는 하천이 발달하는 지형면이 지진지표파열을 따라 북쪽이 상대적으로 높고 남쪽이 낮은 경사를 보이는 점에 주목하였다. 남쪽으로 경사진 지형면의 우수향 수평 변위를 고려하면, 단층의 양측 지괴가 서로 다른 고도를 보이는 수직 낙차를 발생시킬 수 있다.

그림 7은 고정된 서측 지괴를 기준으로 동측 지괴를 동일한 정도의 변위로 이동시켰을 때 사면의 경사 방향에 따라 수직 낙차가 달라짐을 표현한 것으로, 3개의 경우 모두 동측 지괴가 낮아지는 방향의 수직변위와 우수향 수평 변위를 부여했다. 경사가 거의 없는 평지의 경우, 수직변위와 유사한 정도의 수직 낙차가 발생했으며, 수직 낙차는 동측 지괴가 낮아진 것을 지시한다(그림 7a). 남동에서 북서로 경사한 지형의 경우에는 동측 지괴의 지형이 낮아 보이는 수직 낙차가 형성되었으나, 수직변위보다 큰 정도의 수직 낙차를 보인다(그림 7b). 반면 북서에서 남동으로 경사한 지형의 경우에는 동측 지괴의 지형이 낮아지는 수직변위가 발생하였으나 지표에 형성된 수직 낙차는 동측 지괴의 지형이 높은 방향으로 낙차가 형성되었다(그림 7c). 이는 지형 단면도 수직 낙차 측정 및 LaDiCaoz 분석 결과를 잘 반영하며, 해당 모델은 경사진 지형면이 수평 운동을 겪을 때 지표 지형에서 관찰되는 수직 낙차가 실제 변위 방향과 다른 겉보기 변위(위변위; apparent offset)일 수 있음을 보여준다.

## 5. 결론

지형변위는 규모 ~ 6 이상 중-대규모 지진의 고유 산물 중 하나로, 이번 연구는 드론에 의해 취득된 수치표고모델을 활용해서 고지진 지형 분석 사례연구를 수행하였다. 드론 기반 데이터는 항공기 및 물리탐사 등 기존에 활용했던 데이터의 분석 결과와 부합하였으며, 특히 양산단층 경주 삼릉 구간에 대해 항공라이다 기반 지형데이터에서 인지되지 않았던 선상지 저위면의 지형 변위가 드론라이다 기반의 지형데이터에서 추론되었다는 점을 주목할 필요가 있다. 경애왕릉이 위치하는 저위면의 수직 낙차에 대해 인위적 정지(整地), 암상 경계부의 차별침식, 형산강 범람 등 다양한 가능성이 존재하기에 수직 낙차의 형성 원인에 대한 추가 조사가 필요하다. 그럼에도 불구하고 양산단층의 자취를 따라 수직 낙차가 분포하기 때문에 고지진에 의해 변위된 결과로 추론할 수 있으며, 수 cm 정확도의 드론 기반 데이터를 통해 인지되지 않았던 변형을 탐지하는 것이 가능했다는 측면에서 그 의미가 있다. 더불어 지형변위 분석 수행 시 수평 운동에 의한 겉보기 수직변위를 주의해야 하며, 운동특성 추론을 위해서는 지형을 3차원적으로 해석하는 것이 중요하다는 점을 시사한다. 특히 비교적 주향이동

지진이 우세한 우리나라의 지진지구조환경을 고려할 때, 단층대를 따라 일관되지 않은 수직 낙차가 인지되었을 때 수평이동 감각이 우세한 주향이동단층일 가능성을 고려할 수 있다.

고지진 연구는 단일 데이터만으로는 완전한 해석을 하기 어려우며, 지형분석, 물리탐사, 시추 및 굴착조사, 연대 측정 등 다학제적 분석을 통하여 종합적으로 해석하는 것이 중요하다. 양산단층 경주 삼릉구간의 고지진학적 해석은 이번 연구의 정밀 지형 분석과 앞선 연구(Lee *et al.*, 2023)의 시추 결과 등을 종합하여 도출되었다. 이번 연구는 고지진 기록을 추적함에 있어, 고해상도의 자료를 짧은 주기로 취득할 수 있는 드론이 지진 지표변형 분석에서 그 역할을 유용히 수행할 수 있음을 보여준다. 모고드 단층에 대한 해석 또한 이번 연구의 지형분석 결과와 더불어 물리탐사 및 굴착조사 등의 결과가 추가된다면 그 해석의 신뢰도를 더욱 높일 수 있을 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사후후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구사업(RS-2021-KN066110)입니다.

## REFERENCES

- Bayasgalan, A. and Jackson, J., 1999, A re-assessment of the faulting in the 1967 Mogod earthquakes in Mongolia. *Geophysical Journal International*, 138, 784-800.
- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T. and Bangash, H.A., 2014, Ground-based and UAV-Based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, 163-178.
- Bollinger, L., Klinger, 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.
- Brune, J.N., 1968, Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 73, 777-784.
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S., 2012, *Tectonic Geomorphology*. 2nd ed; Wiley-Blackwell: Chichester, UK; ISBN 978-1-4443-3887-4.
- Choi, J.-H., Klinger, Y., Ferry, M., Ritz, J.-F., Kurtz, R., Rizza, M., Bollinger, L., Davaasambuu, B., Tsend-Ayush, N. and Demberel, S., 2018, Geologic inheritance and earthquake rupture processes: the 1905  $M \geq 8$  tsetserleg-bulnay strike-slip earthquake sequence, Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 1925-1953.
- Giano, S.I. and Schiattarella, M., 2014, Age constraints and denudation rate of a multistage fault line scarp: an example from southern Italy. *Geochronometria*, 41, 245-255.
- Ha, S., Son, M. and Seong, Y.B., 2022, Active fault trace identification using a LiDAR high-resolution DEM: A case study of the central Yangsan Fault, Korea. *Remote Sensing*, 14, 4838.
- Hergarten, S., Robl, J. and Stüwe, K., 2014, Extracting topographic swath profiles across curved geomorphic features. *Earth Surface Dynamics*, 2, 97-104.
- Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arowsmith, J.R., McGarey, P., Scharer, K., Williams, P. and Blisniuk, K., 2014, Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere*, 10, 969-986.
- Kearse, J. and Kaneko, Y., 2020, On-fault geological fingerprint of earthquake rupture direction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB019863.
- Kim, D.E. and Seong, Y.B., 2021, Cumulative slip rate of the Southern Yangsan fault from geomorphic indicator and numerical dating. *Journal of the Korean Geographical Society*, 56, 201-213 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.T., Kim, Y.S. and We, K.J., 2014, Basic concepts and geological applications of LiDAR. *The Journal of Engineering Geology*, 24, 123-135.
- Kim, N., Park, S.-I., Cho, C.S., Cheon, Y. and Peace, A.L., 2023, Neotectonic transpressional intraplate deformation in eastern Eurasia: Insights from active fault systems in the southeastern Korean Peninsula. *Geoscience Frontiers*, 14, 101559.
- Kim, T., Choi, J.-H., Cheon, Y., Lee, T.-H., Kim, N., Lee, H., Kim, C.-M., Choi, Y., Bae, H., Kim, Y.-S., Ryoo, C.-R. and Klinger, Y., 2023, Correlation of paleoearthquake records at multiple sites along the southern Yangsan Fault, Korea: Insights into rupture scenarios of intraplate strike-slip earthquakes. *Tectonophysics*, 854, 229817.
- Kim, T., Shin, H.C. and Kim, Y.S., 2020, Characteristics of the topographical deformation in the central part of the Ulsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 2, 193-209 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.S. and Lee, C.H., 2023, Identification of Tectonic Lineaments in the Urban Area Using Historic Aerial Photo. *Journal of the Geomorphological Association of Korea*, 30, 85-100 (in Korean with English abstract).
- Klinger, Y., Xu, X., Tapponnier, P., Van der Woerd, J., Lasserre, C. and King, G., 2005, High-resolution satellite imagery mapping of the surface rupture and slip distribution of the Mw~7.8, 14 November 2001 Kokoxili earthquake, Kunlun Fault, Northern Tibet, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1970-1987.
- Lee, H., Choi, J.H., Lee, T.H., Kim, D.E., Cheon, Y., Lee, K.S. and Choi, Y., 2023, Detection of fault location and paleoseismic evidence in the cultural heritage site around Gyeongju, SE Korea. *Episodes Journal of International Geoscience*, 46, 521-535.
- Li, X., Xiong, B., Yuan, Z., He, K., Liu, X., Liu, Z. and Shen, Z., 2021, Evaluating the potentiality of using control-free images from a mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry to measure paleoseismic

- offsets. *International Journal of Remote Sensing*, 42, 2417-2439.
- Macklin, C., Kaneko, Y. and Kearse, J., 2021, Coseismic slickenlines record the emergence of multiple rupture fronts during a surface-breaking earthquake. *Tectonophysics*, 808, 228834.
- Mason, D.P., Little, T.A. and Van Dissen, R.J., 2006, Rates of active faulting during late Quaternary fluvial terrace formation at Saxton River, Awatere fault, New Zealand. *Geological Society of America Bulletin*, 118, 1431-1446.
- McCalpin, J.P. and Gath, E.M., 2021, 50 Years of Paleoseismology: The Science and the Business. *AEG NEWS*, 64, 3.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S. and McGlone, J.C., 2001, *Introduction to Modern Photogrammetry*. Wiley: New York, NY, USA, ISBN 978-0-471-30924-6.
- Oh, J.-S., 2019, High-resolution DEM generation of high-relief landforms using UAV and its application of geomorphic analysis. *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 29, 115-127 (in Korean with English abstract).
- Rao, G., He, C., Chen, H., Yang, X., Shi, X., Chen, P. and Yang, C.J., 2020, Use of small unmanned aerial vehicle (sUAV)-acquired topography for identifying and characterizing active normal faults along the Seerteng Shan, North China. *Geomorphology*, 359, 107168.
- Reitman, N.G., Mueller, K.J., Tucker, G.E., Gold, R.D., Briggs, R.W. and Barnhart, K.R., 2019, Offset channels may not accurately record strike-slip fault displacement: Evidence from landscape evolution models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 13427-13451.
- Rogozhin, E.A., Imaev, V.S., Smekalin, O.P. and Schwartz, D.P., 2008, Tectonic position and geological manifestations of the Mogod (Central Mongolia), January 5, 1967, earthquake (a view after 40 years). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 44, 666-677.
- Sieh, K.E., 1978, Slip along the San Andreas fault associated with the great 1857 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68, 1421-1448.
- Talebian, M., Copley, A.C., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, J.A., Nazari, H. and Walker, R.T., 2016, Active faulting within a megacity: the geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 207, 1688-1699.
- Telbisz, T., Kovács, G., Székely, B. and Szabó, J., 2013, Topographic swath profile analysis: a generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57, 485-513.
- Toda, S., Kaneda, H., Okada, S., Ishimura, D. and Mildon, Z.K., 2016, Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake. *Earth Planets Space*, 68, 188.
- Wallace, R.E., 1970, Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 2875-2890.
- Wallace, R.E., Dickinson, W.R. and Grantz, A., 1968, Notes on stream channels offset by the San Andreas fault, southern Coast Ranges, California. In *Conference on Geologic Problems of the San Andreas Fault System*. Stanford University Publication in Geological Sciences, 11, 6-21.
- Youngs, R.R. and Coppersmith, K.J., 1985, Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 939-964.
- Zielke, O. and Arrowsmith, J.R., 2012, LaDiCaoz and LiDARimager-MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement. *Geosphere*, 8, 206-221.
- Zielke, O., Arrowsmith, J.R., Ludwig, L.G. and Akçiz, S.O., 2010, Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas fault. *Science*, 327, 1119-1122.
- Zielke, O., Klinger, Y. and Arrowsmith, J.R., 2015, Fault slip and earthquake recurrence along strike-slip faults-Contributions of high-resolution geomorphic data. *Tectonophysics*, 638, 43-62.
- Zou, J., He, H., Yokoyama, Y., Shirahama, Y., Geng, S., Zhou, Y. and Sun, W., 2022, A comparative study of bedrock fault scarps by s-UAV and t-LiDAR: Insights into site selection criteria for paleo-seismology studies. *Geomorphology*, 414, 108372.