

제4기 하안단구 지형을 이용한 중남부 양산단층의 누적변위 분석

김남권^{1,2} · 최진혁^{2,*} · 박승익¹ · 이태호² · 최이레²

¹경북대학교 지구시스템과학부

²한국지질자원연구원 국토지질연구본부

요 약

일반적으로 규모 6 이상의 지진과 관련된 단층 파열은 지표까지 전파, 확장될 수 있으며, 이 경우 지표변위가 발생한다. 따라서 제4기 지형 또는 퇴적층에 기록된 지표변위 증거는 중대규모 고지진 이력을 해석하는데 중요하다. 이번 연구에서는 우리나라의 대표적인 지질구조 중 하나인 양산단층의 제4기 운동 특성을 파악하기 위해 단층을 가로질러 발달하는 하천 주변의 제4기 하안단구에 대한 지형분석을 실시하였다. 조사지역은 양산단층 중남부에 해당하는 용장리, 교동리, 상천리, 초산리 지점으로, 정밀 지형 분석을 위해 과거 항공사진(1968년)과 항공LiDAR 기반 DEM자료(2017년)를 이용하였다. 본 연구에서는 단구면 및 단구에 분포를 지형변위지시자로 이용하였다. 지형변위지시자의 직진성이 확보된 구간을 대상으로 수평오프셋을 분석하였으며, 분석의 신뢰도를 높이고자 평균 제곱근 오차 기법을 이용하였다. 또한 단층 양측의 지형단면도를 이용하여 수직오프셋을 측정하였다. 그 결과, 최소 약 10 m 이상의 다양한 수평오프셋(용장리 지점: 19.09 ± 2.58 m, 21.92 ± 2.69 m, 교동리 지점: 195.43 ± 23.54 m, 상천리 지점: 37.53 ± 6.56 m, 초산리 지점: 9.68 ± 2.73 m, 34.44 ± 4.40 m)이 인지되었으며, 이들은 모두 우수향 운동감각을 지시한다. 반면 수직오프셋의 경우 모든 지점에서 수평오프셋을 기준으로 최대 약 10%의 값을 보인다. 이는 제4기 하안단구 지형면의 형성 이후 중남부 양산단층을 따라 발생한 중대규모 고지진이 일부 경사이동성분을 포함하나 우수향 주향이동 단층운동이 우세했음을 지시한다. 본 연구 결과는 단층 주변에 대한 정밀 지형 분석을 통해 단층의 분포, 운동감각, 오프셋 등과 같은 중대규모 고지진 정보를 획득할 수 있음을 보여주며, 향후 지형면 연대분석에 기초한 평균 변위율을 산출하는데 기초자료로 활용될 수 있다.

주요어: 고지진, 지표변위, 지형 분석, 하안단구, 지형변위지시자

Namgwon Kim, Jin-Hyuck Choi, Seung-Ik Park, Tae-Ho Lee and Yire Choi, 2020, Cumulative offset analysis of the Central-Southern Yangsan Fault based on topography of Quaternary fluvial terrace. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 135-154

ABSTRACT: In general, earthquakes larger than magnitude 6 involve surface ruptures. Therefore, geomorphic and stratigraphic offsets recorded in the surface provide clues to interpret history of moderate to major paleo-earthquakes. In this study, we carried out topographical analysis of the Quaternary fluvial terraces along the Yangsan Fault, one of the major geological structures in Korea. Our investigation focused on 4 sites: Yongjang-ri, Gyodong-ri, Sangcheon-ri and Chosan-ri, where river system flows across the central-southern part of the Yangsan Fault. We used aerial photographs (1968) and airborne LiDAR-based DEM data (2017) for precise topographical analysis. For each area, terrace tread and riser were used as geomorphic offset indicators. The horizontal offsets were statistically measured using the root-mean-square-error method for the sections where the straightness of the geomorphic offset indicator was secured. The vertical offsets were measured by comparing topographic profiles of fluvial terraces on both sides of the fault. As a result, various horizontal offsets over at least about 10 m (Yongjang-ri site: 19.09 ± 2.58 m, 21.92 ± 2.69 m, Gyodong-ri site: 195.43 ± 23.54 m, Sangcheon-ri site: 37.53 ± 6.56 m, Chosan-ri site: 9.68 ± 2.73 m, 34.44 ± 4.40 m) were identified. All these offsets indicate a right-lateral sense of slip. On the other hand, the vertical offsets were less than about 10% of the horizontal offsets at all sites. This implies that dextral deformation were dominated during the surface ruptures associated with paleo-earthquakes along the central-southern Yangsan Fault. Our results show that it is possible to acquire information on paleo-earthquakes, such as fault trace distribution, slip sense, offset, through accurate topographical analysis. These results can be used to estimate long-term slip-rate along with depositional age of fluvial sediments.

* Corresponding author: +82-42-868-3078, E-mail: cjh9521@kigam.re.kr

Key words: paleo-earthquake, surface offset, topographical analysis, fluvial terrace, geomorphic offset indicator

(Namgwon Kim and Seung-Ik Park, School of Earth System Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea; Namgwon Kim, Jin-Hyuck Choi, Tae-Ho Lee and Yire Choi, Geology Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서론

일반적으로 규모 6 이상의 중대규모 지진과 관련된 단층파열은 지표면까지 확장되며, 이 경우 지표 변형이 발생한다. 이 때 지표변형은 주로 지형 및 미고결 퇴적층으로 대표되는 지표지질에 기록된다. 따라서 특정 단층과 관련된 지형학적 및 층서학적 고지진 정보를 획득하고 분석하는 것은 대규모 지진의 재발 정보 산출에 대한 기초 요소를 제공하고, 나아가 잠재적인 미래의 대규모 지진 특성을 평가하는데 활용된다. 여기서 말하는 고지진의 시간적 범위는 해당 지역이 현생의 지구조환경에 속하기 시작한 시기에서부터 현재까지를 의미하는데, 이는 일반적으로 대규모 지진은 주어진 지구조환경 하에서 일부 단층의 반복적인 운동에 의해 발생하기 때문이다(Kim *et al.*, 2011; Choi *et al.*, 2017). 우리나라의 경우 적어도 제4기 동안 거의 동일한 지구조환경에 속해 있다고 알려져 있다(Chough *et al.*, 2000; Chang, 2001; Park *et al.*, 2007; Jun and Jeon, 2010). 따라서 고지진 정보를 획득하기 위해서는 제4기 동안 형성된 지형 및 퇴적층에 대한 조사를 수행할 필요가 있다.

지진에 의한 지표변형은 변위를 수반하는 지표파열(surface rupture)과 변위를 수반하지 않는 2차적인 변형(균열, 액상화 등)으로 구분된다. 지표파열의 경우 지진 규모에 따라 작게는 수 cm에서 크게는 수 m에 달하는 지표변위를 수반한다. 지표파열의 변위는 주로 단층을 피복하거나 가로질러 발달하는 지형 요소의 형태를 기준으로 조사하는데, 이러한 기준 지형을 지형변위지시자라고 한다. 한편 지표파열이 발달한 이후 지표에서의 침식 및 퇴적 작용에 의해 지형변화가 발생한다. 따라서 지형변위지시자를 이용해 변위의 요소를 모두 파악하기란 쉽지 않으며 주로 수평 겹보기변위(horizontal separation) 또는 수직 겹보기변위(throw)만을 인지할 수 있다. 이는 고지진 조사에서 흔히 발생할 수 있는 것으로 일반적인 의미의 변위(displacement or slip)와 구분된

다. 이러한 구분을 위해 주로 지진 지표파열을 다루는 지진지질학(earthquake geology)에서는 변위성분(수직 및 수평)과 변위량 정보를 포함하는 '오프셋(offset)'이라는 용어를 사용한다. 본 연구에서 다른 주제 또한 지형변위지시자의 이격된 거리를 의미하기 때문에 '오프셋'이라는 용어를 사용하였다.

지표파열을 따라 기록된 오프셋은 크게 개별적인 지진과 관련된 '지진동시성 오프셋(co-seismic offset)'과 반복적인 지진에 의해 축적된 결과인 '누적 오프셋(cumulative offset)'으로 구분된다. 지표파열을 따른 지진동시성 오프셋 분포는 지하에서의 단층파열 거동특성을 반영하므로(Scholz, 2002; Zielke and Arrowsmith, 2012), 주로 단층 기하와 지진 거동의 상관성을 해석하는데 중요한 자료 중 하나로 활용된다(Cowie and Scholz, 1992; Sieh *et al.*, 1993; Haeussler *et al.*, 2004; Scholz and Lawler, 2004; Klinger *et al.*, 2005; Vallage *et al.*, 2015, 2016; Choi *et al.*, 2018). 한편 누적오프셋의 경우, 오프셋이 축적된 시공간적 이력을 해석하고 지진재발모델(earthquake cycle model)을 평가하기 위한 핵심자료에 해당한다(Mason *et al.*, 2006). 특히 누적오프셋을 지시하는 지형변위지시자의 형성연대를 파악할 경우, 지형변위지시자가 형성된 시기부터 현재까지의 평균적인 단층 변위율(slip-rate)을 산출할 수 있는데, 이는 대규모 지진의 재발주기, 최대규모 등을 평가하는 기초자료이므로 그 중요성이 높다(Brune, 1968; Wallace, 1970; Young and Coppersmith, 1985).

최근 국내에서 연이어 발생한 중규모 지진(2016년 Mw 5.5 경주지진, 2017년 Mw 5.4 포항지진) 이후, 한반도 내 대규모 지진의 발생 가능성에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히 한반도는 판내부 지진환경에 속하는 곳으로(그림 1a), 대규모 지진의 재발주기가 수천 년에서 수만 년에 달할 수 있기에 국내의 계기지진과 역사지진 자료의 시간적 제한(각약 40년과 약 2,000년)을 극복할 수 있는 지형 및 지표지질에 기록된 고지진 연구의 중요성이 부각되고

있다. 한반도 남동부에 발달하는 양산단층은 우리나라의 대표적인 주향이동성 단층 중 하나로(그림 1b), 2016년 경주지진을 비롯한 중소규모 계기지진 및 경주-울산 일대 주요 역사지진의 지진원 단층으로 해석된 바 있다(Lee and Jin, 1991). 지난 약 25년 간 양산단층을 따라 약 25개 지점에서 제4기에 활동한 단층들이 보고된 바 있으며, 일부 지점에서는 양산단층에서의 최후기 고지진 발생시기 또는 규모 등 고지진학적 요소가 평가된 바 있다(Kyung, 2003, 2010; Kim and Jin, 2006; Yang and Lee, 2014; Lee *et al.*, 2016). 한편 지금까지 양산단층에서 수행된 고지진 연구는 주로 지표지질의 층서학적 변형기록을 토대로 고지진 이력을 해석하였지만 지형학적 변형기록에 대한 정밀분석은 부족한 상황이다. 즉, 노두 또는 굴착(trench)단면에서의 제한적인 관찰과 조사로 인해 단층의 기하, 운동감각, 오프셋 등을 파악하는데 어려움이 있었다. 가장 대표적인 예로 양산단층의 수

평오프셋(물) 정보는 단면노두 혹은 굴착단면에서의 길보기 수직변위(물) 정보와 미끌림면 상에서 관찰되는 단층조선(slickenline)을 토대로 간접적으로 평가되었을 뿐(Okada *et al.*, 1994; Kyung, 2003), 지형변위지시자를 근거로 직접적으로 분석된 바는 거의 없다. 이는 대규모 지진의 비교적 긴 재발주기와 더불어 비교적 높은 침식·퇴적률로 인해 고지진 지표파열에 의한 지형학적 변형기록이 잘 보존되어 있지 않음에서 기인한다.

본 연구는 종래까지 미미했던 양산단층의 활동에 의한 지형학적 변형기록을 정밀분석 하여 오프셋 값을 제시하는데 목적을 둔다. 이를 위해 양산단층곡을 가로질러 흐르는 하천 양안의 제4기 하안단구를 주 대상으로 삼았다. 조사지역은 경주 이남의 총 4지점(북으로부터 용장리 지점, 교동리 지점, 상천리 지점, 초산리 지점)으로, 각 지점별로 현재의 하천을 포함해 총 4단으로 구성된 단구지형에 대해 지표변위

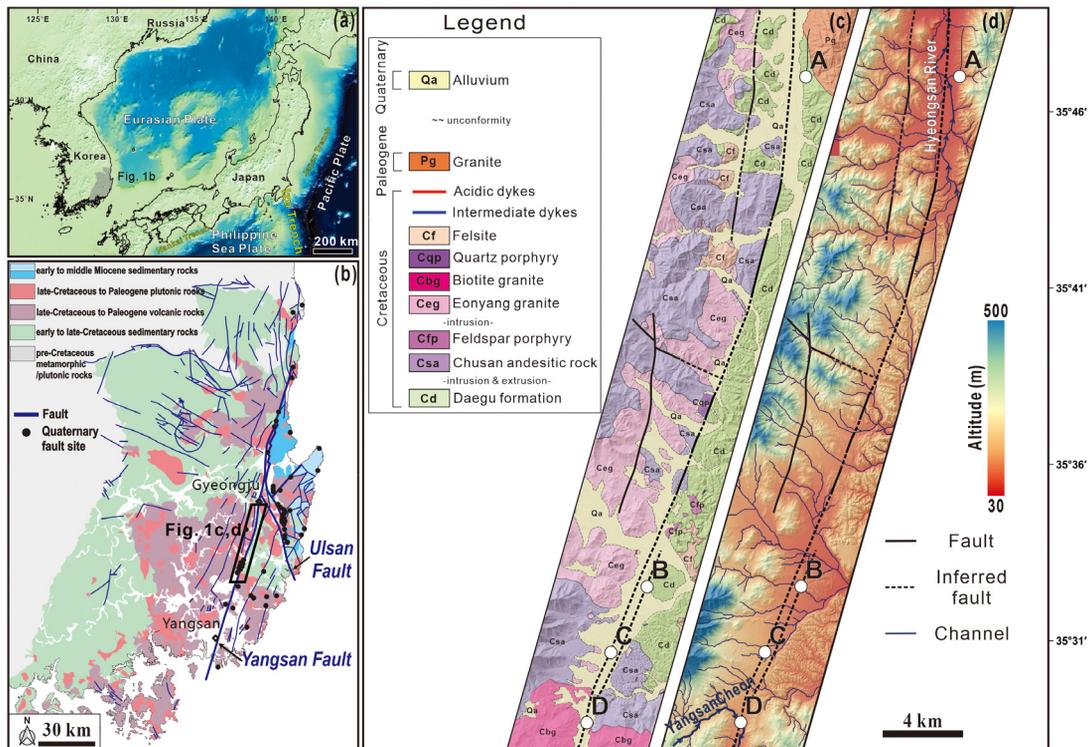


Fig. 1. (a) Simplified tectonic map around the Korean peninsula. (b) Regional geological map around the Gyeongsang Basin, SE Korea (modified from Chough and Sohn, 2010; Son *et al.*, 2013). (c) Detailed geological map of the central-southern Yangsan Fault (modified from Lee and Kang, 1964; Kim *et al.*, 1971; Lee and Lee, 1972), and locations of investigation sites; A: Yongjang-ri site, B: Gyodong-ri site, C: Sangcheon-ri site, and D: Chosan-ri site. (d) Digital elevation model (DEM) displaying drainage system and fault distribution around the study area.

여부를 판독하고 분석하였다. 지형정보는 1968년 촬영된 항공사진과 2017년 획득된 항공라이다(airborne-Light Detection And Ranging, LiDAR) 기반 고해상도(0.5 m/pixel) 수치표고모델(Digital Elevation Models, DEM)을 이용하였고, 야외지질조사를 병행하여 지형을 분석하였다. 그 결과, 조사지점별로 양산단층의 누적오프셋을 측정하였으며, 이를 토대로 양산단층에서의 대규모 고지진과 관련된 단층 운동 특성에 대해 해석 및 토의하고자 한다.

2. 중남부 양산단층 일대의 지질 및 지형

양산단층은 백악기 경상분지에 발달하는 대규모 주향이동단층으로, 육상에서 약 180 km 이상의 길이를 보이는 북북동-남남서 내지 남-북 방향의 단층곡으로 인지된다(그림 1b). 연구지역인 경주시 이남에서 양산시 이북까지의 양산단층 구간은 단층곡을 기준으로 서측지괴와 동측지괴가 서로 다른 지질분포 특성을 보인다(그림 1c). 우선 동측지괴의 대부분은 대구층으로 불리는 백악기 퇴적암(Kim *et al.*, 1971; Lee and Lee, 1972)으로 구성되는데, 주로 셰일, 사암, 역암 등으로 이루어지며 층리는 대개 10~20°의 저각을 보인다(Chang and Chang, 2002). 또한 국부적으로 경주시 내남면 일대에서 백악기 퇴적암을 에오세에 관입한 화강암체가 분포한다. 이에 반해 단층곡의 서측지괴에는 주로 백악기 화산암 및 백악기 후기 화강암체가 분포한다. 후자의 경우, 주로 흑운모 화강암으로 구성된 불국사관입암류에 속하는데, 이는 양산시에 위치한 통도사 이북에서 언양화강암(Lee and Lee, 1972), 통도사 이남에서 흑운모화강암(Lee and Kang, 1964)으로 불린다. 제4기 퇴적층은 주로 양산단층곡 중심부에 분포하고 있어, 미고결 퇴적물이 양산단층을 피복하고 있는 양상이다(그림 1c). 양산단층의 최종 변위는 백악기 퇴적암을 기준으로 약 25~35 km (Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980; Chang *et al.*, 1990), 신생대 초기 화강암을 기준으로 약 21 km (Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b)의 우수향 운동감각으로 해석된 바 있다.

양산단층의 서측지괴는 높고 험준한 산악지형을 보이는 반면 동측지괴는 지형기복이 낮은 구릉 형태를 보인다(그림 1d). 이러한 양측지괴의 지형차이로 인해 단층곡 주변의 수계는 대부분 서측지괴에서 유

입된 물이 단층곡 내에 발달하는 하천 혹은 동측지괴로 빠져나가는 특성을 보인다. 연구지역은 단층곡의 수계를 기준으로 크게 3구간으로 분류할 수 있다. 우선 상대적으로 북부에 해당하는 경주시 일대에서는 형산강이 단층곡을 따라 북쪽으로 흐른다. 형산강은 양산단층곡을 따라 약 10 km 정도 흐르다가 단층곡 동측의 하도를 따라 동해로 흘러 들어간다. 다음으로 연구지역의 남부에 해당하는 양산시 일대에는 단층곡으로 유입된 수류가 양산천을 이루어 양산단층곡을 따라 남쪽으로 흐른다. 마지막으로 형산강과 양산천 사이 구간은 단층곡을 따라 하천이 발달하지 않고, 서쪽에서 동쪽으로 단층곡을 가로질러 흐르는 소규모 하천들이 발달한다. 이러한 특성은 울산광역시 울주군 삼남면 일대에서 가장 뚜렷한데, 소규모 하천들은 단층곡 동측부에서 합쳐져 태화강을 형성하며 동해로 흘러 들어간다. 또한 양산단층을 따라 단층곡의 주향(남-북~북북동-남남서)과 폭(500~2,000 m)이 다소 변하는 양상을 보이는데, 이들이 변하는 지점은 대체로 수계가 변하는 곳과 유사하다(그림 1d).

3. 제4기 지형 분석법

3.1 분석 대상 및 조사지점 선정

연구지역내 양산단층곡 중앙부는 두꺼운 하성층으로 피복되어 있어 단층지형을 파악하기 어렵다. 하지만 기반암과 제4기 퇴적층이 접하는 단층곡의 경계부에는 주로 단층곡으로 유입되는 소규모 하천과 관련된 선상지 및 하안단구가 발달하며 이 중 일부 지점에서 단층지형이 비교적 잘 관찰된다. 또한 Park and Lee (2018)에 의해 양산단층곡 주변에서 변위 하도(offset channel), 단층와지(kerncol), 단층구릉(kernbut), 삼각 말단면(triangular facet), 벤치(bench) 등의 단층지형이 분포하고 있음이 보고된 바 있다. 일반적으로 주향이동단층의 활동으로 인한 오프셋은 단층의 주향에 고각으로 발달하는 지형 요소의 이격된 형태로 쉽게 인지된다. 따라서 양산단층을 따라 대규모 지진과 관련된 지표변위의 발달 여부 및 특성을 파악하기 위해서는 단층의 주향에 고각으로 발달하는 신기 지형에 대한 분석이 우선적으로 요구된다. 본 연구에서는 양산단층에 대체적으로 수직인 동-서 방향의 하천을 따라 발달하는 하안

단구를 지형변위지시자로 활용하였다. 단층에 의해 변위가 발생한 단구를 변위단구(offset terrace)라 하며 이는 과거 하천의 영향에서 벗어난 이후의 단층활동에 의한 변위를 주로 기록한다. 따라서 현재 하천 활동에 의한 교란이 적어 보다 명확한 변위 여부 판단 및 오프셋 측정이 용이하다. 이 때문에 하안단구를 이용한 고지진학적 연구가 전 세계적으로 활발하게 수행된 바 있으며(Suggate, 1960; Lensen, 1964, 1968; Knuepfer, 1992; Simpson *et al.*, 1999; Mason *et al.*, 2006; Cowgill, 2007; Cowgill *et al.*, 2009; Gold *et al.*, 2009, 2011; Hunter *et al.*, 2011; Gold and Cowgill, 2011), 본 연구 또한 변위가 인지되는 하안단구를 활용하였다. 경주시 내남면 용장리의 소하천, 울산광역시 울주군 삼남면 교동리의 작괘천과 상천리의 삼동천 지류, 양산시 하북면 초산리에 흐르는 양산천을 따라 발달하는 하안단구를 분석대상으로 선정하였다. 이후 이를 각각 “용장리지점”, “교동리지점”, “상천리지점”, “초산리지점”으로 칭한다(그림 1c, 1d).

3.2 지형자료의 종류

단층 및 하안단구에 대한 지형분석을 위해 1968년에 촬영된 항공사진과 2017년 취득된 항공라이다 자료 기반의 수치표고모형을 사용하였다. 후자의 경우, 현재 지표를 피복하고 있는 수목 등의 지표장애물을 제거할 수 있으며(Walker and Jackson, 2002; Cunningham *et al.*, 2006; Hunter *et al.*, 2011), 영상의 가공이 편리하다는 장점이 있다. 또한 단위면적 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 의 고해상도 자료로 정밀 좌표 및 고도를 파악할 수 있어 3차원 디지털 분석이 가능하다. 하지만 영상의 촬영 시기가 2017년으로 도시개발 등에 따른 인위적인 지표변형에 의해 지형이 교란되었을 가능성이 높다는 단점이 있다. 반면 1968년 촬영된 항공사진의 경우, 인위적인 지표변형이 발생하기 이전의 지형을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 수목 제거 등의 효과가 없으며, 상대적으로 해상도가 낮고 고도를 명확히 파악하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 각 영상자료의 단점을 보완하고 장점을 극대화하기 위해 두 지형자료를 동시에 활용하여 비교·분석하였다. 항공라이다 기반의 수치표고모형을 이용하여 음영기복도, 지형도, 지형단면도 등의 고해상도 자료를 추출하였으며, 단구의

분포 및 형태 등을 조사함에 있어 주로 항공사진에서 인지되는 지형요소의 원형을 고려하였다.

3.3 하안단구 분류 및 표기

일반적으로 하안단구는 서로 다른 고도를 보이는 상대적으로 편평한 단구면(terrace tread)과 단구면들 사이에 가파른 사면으로 발달하는 단구에(terrace riser)로 구성된다(그림 2a; Gold *et al.*, 2011; Pazzaglia, 2013). 이중 단구에는 마루(crest), 기저(base), 중점(midpoint)으로 구성되는데(Gold *et al.*, 2017), 마루는 단구애가 상부 단구면과 접하는 부분, 기저는 하부 단구면과 접하는 부분, 중점은 단구애의 경사가 변곡되는 부분이다. 단구면의 경우, 일반적으로 상대적인 고도가 낮을수록 형성시기가 젊다는 점을 고려하여 현재 하천이 흐르는 하상을 기준면(T0)으로 지정하였으며, 상대적인 고도가 높아지는 순으로 제1단구면(T1), 제2단구면(T2), 제3단구면(T3)으로 분류하였다. 한편 단구면의 고도가 어느 정도 차이를 보이거나 그 차이가 5 m 미만으로 크지 않을 경우, 이들 단구면을 상세 구분하였고 이 중에 단구면의 고도가 상대적으로 낮을수록 작은 부가 번호를 부여하였다(예를 들면, 제2-1단구면, 제2-2단구면). 단구애의 경우 해당 단구애 상위와 하위에 분포하는 단구면의 분류명을 이용하여 표기하였는데, 예를 들어 제3단구면(T3)과 제2단구면(T2) 사이에 발달하는 단구애를 T3/T2 단구애로 표기하였다. 한편 육상 환경에서는 위치마다 단구의 형성사가 독립적이므로, 동시기에 형성된 기준면 혹은 단구면 일지라도 그 고도가 상이할 수 있다. 따라서 이번 연구에서 각 지점별로 분류된 단구면은 주변 지역을 대표할 수 없으며, 서로 다른 지점에서 동일한 명칭으로 분류된 단구면이라 할지라도 절대적인 고도나 생성연대가 같다는 것을 의미하는 것은 아니다.

3.4 오프셋 측정법

단층 인접부에 발달하는 끌림 습곡(drag folds) 등과 같은 2차적인 변형구조는 오프셋을 정확하게 측정하는데 방해요인으로 작용한다. 따라서 오프셋 자료의 신뢰도를 확보하기 위해 단층 인접부의 변형대를 벗어난 구간을 지형변위지시자로 인지해야한다(Gold *et al.*, 2015; Milliner *et al.*, 2015). 본 연구에서는 우선적으로 지표 오프셋을 측정하기 위해 단층

활동에 따른 2차적인 구조의 영향을 받지 않은 구간
에 대해 단층과 평행한 지형단면도를 단층 양측에서
추출하여, 이들을 비교하였다. 즉, 하안단구의 가장
기본적인 특성인 계단식 지형단면을 이용하여, 두 지
형단면에서 대비되는 단구에 요소(마루, 기저, 중점)
및 단구면을 기준으로 수평 및 수직적인 위치 차이
를 파악하였다. 이 때, 사용된 영상의 해상도를 고려
하여 0.5 m 이하의 오프셋은 신뢰할 수 없는 것으로
판단하였다. 또한 수직오프셋의 경우 두 지형단면도
를 포함하는 지형면의 평균 구배(단층선에 수직한
방향)를 이용하여 보정하였다.

단층 양측에서 획득된 두 개의 변위기준지점(offset
piercing point)이 단층과 단구가 접하는 곳에서의

형태를 대표할 수 없는 경우 측정된 수평오프셋의
오차가 클 수 있다. 본 연구에서는 이런 수평오프셋
의 오차를 줄이고 자료의 신뢰도를 높이기 위해 단
층의 양측에 선형으로 발달하는 단구에의 마루를 지
형변위지시자로 이용하였다. 그에 따라 단층 양측지
괴에서 단구에 마루의 자취를 대표할 수 있는 가상
의 직선을 추출하고, 이들이 단층선과 접하는 두 지
점을 수평오프셋 측정을 위한 두 기준점으로 사용하
였다. 단구에 기저의 경우 마루로부터의 붕적물
(colluvium)과 바람에 의해 퇴적된 세립물질(loess)
로 인해 정확한 위치 파악이 어려워 지형변위지시자
로 사용하지 않았다(Cowgill, 2007; Gold *et al.*,
2011). 또한 단층 인접부에서의 2차적인 구조의 영

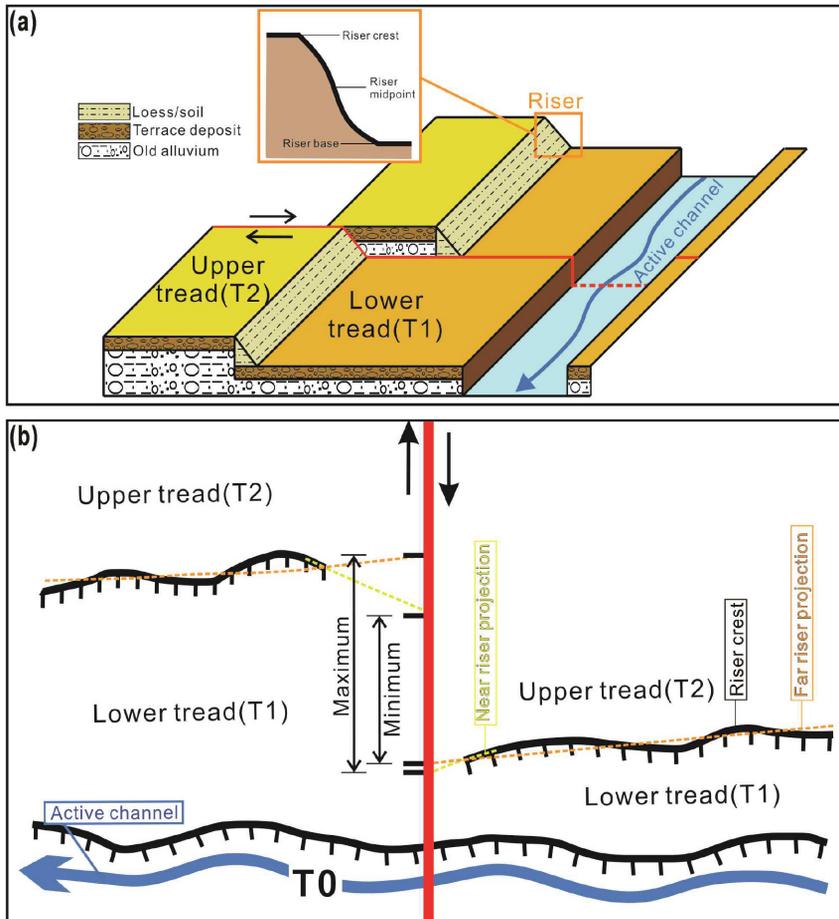


Fig. 2. Simplified block diagram (a) and its plane view (b) showing geomorphic elements of a offset fluvial terrace by a dextral fault (red line) (modified from Gold *et al.*, 2011). Dashed lines in (b) showing piercing method of “near riser” and “far riser” projection concepts and how to bracket range of offset. Hachures point to facing direction of terrace riser escarpment.

향으로 교란된 구간을 수평오프셋 추정을 위한 고려 구간에서 제외시켜야 한다. 본 연구에선 이를 위해 단층과 상대적으로 가까운 구간에 대한 근거리 단구에 투영(near riser projection)과 단층에서부터 거리가 충분히 먼 구간에 대한 원거리 단구에 투영(far riser projection)의 개념을 활용하였다(그림 2b).

근거리 및 원거리 단구에 투영은 기존 연구들에서 수평오프셋의 최소값과 최대값을 설정하기 위해 사용된 바 있다(Rockwell *et al.*, 2002; Cowgill, 2007; Gold *et al.*, 2015; Milliner *et al.*, 2015). 하지만 근거리패턴과 원거리패턴을 사용한다 해도 단층 인접부의 교란이 발생한 부분이 포함되었을 가능성을 완전히 제거하지 못한다. 본 연구에서는 이를 최소화시키기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저 대상 구간의 단구애를 10등분하여 단층과 인접한 구간에서부터 점진적으로 구간을 누적하여 총 10개의 구간을 투영에 사용하였다. 이후 단층 양측에서의 투영을 통해 산출된 단층선 상 10쌍의 점 자료들이 횡적으로 떨어진 거리를 각각 측정하여 총 100개의 수평오프셋을 계산하였다. 마지막으로 이 오프셋들이 정규분포를 이룬다고 가정하고 평균 값(m)과 표준편차(σ)를 이용하여 " $m \pm \sigma$ "의 형태로 수평오프셋의 범위를 표현하였다.

단층면과의 교점을 생산하기 위해 단구애의 마루를 사용한 과정은 다음과 같다. 먼저 하안단구를 가로 지르는 단층을 하나의 직선이라 가정하고 단층선을 따른 지점들의 경도와 위도를 각각 독립변수(x)와 종속변수(y)로 두어 단층선을 대표하는 일차 함수 A 를 생성하였다. 이후 단층을 기준으로 최소 10 m 이상 떨어진, 단층의 활동으로 인한 형태 교란이 인지되지 않는 지점에서부터 단구애가 직선에 가까운 형태로 인지되는 부분까지의 구간을 투영에 사용하였다. 단구애의 형태를 대변하는 직선을 생성하기 위해 파악된 단구애 자취의 위치자료 즉, 단층선과 마찬가지로 경도와 위도를 각각 독립변수(x)와 종속변수(y)로 사용하였다. 이후 실제 단구애의 형태와 산출된 직선을 구성하는 점들의 위도 차이를 최소화하여 단구애의 형태를 효과적으로 대변할 수 있는 직선을 생성하였다. 이를 위해 모델링된 값과 실제 값의 차이를 최소화하는 간단한 방법인 평균 제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error)기법을 사용하였다(Chai and Draxler, 2014). 이를 통해 10개 구

간의 단구에 형태를 대변하는 총 10개의 일차 함수 B_set 를 생성하였으며 단층면을 나타내는 함수 A 와 교점을 구하여 단층과 단구애가 교차하는 점 자료(point data)를 산출하였다.

4. 분석결과: 지점별 수평 및 수직오프셋

4.1 용장리 지점

경상북도 경주시 내남면 용장리의 해당 지점은 양산단층곡을 기준으로 동측에 위치하며 동편의 남산에서 형산강으로 흘러가는 다수의 소규모 하천이 층적선상지를 형성하며 존재한다(그림 3a, 3b). 이 층적선상지 상에 동-서 방향으로 흐르는 하천에 의해 하안단구가 발달하며 크게 총 3단의 하안단구면으로 구성된다. 현재 하상(T0) 주변으로 최대 약 90 m 폭의 제1단구면(T1)이 분포하며 그 상위의 제2단구면(T2)이 지역 전반에 분포하여 약간의 평균 고도 차이에 따라 상대적으로 고도가 낮은 제2-1단구면과 고도가 높은 제2-2단구면으로 세분된다. 최상위의 제3단구면(T3)은 주로 상류쪽 기반암과 접하며 다소 좁게 분포한다(그림 3c).

이 지점의 단구를 발달시킨 하천은 기반암 산지에서 빠져나오는 지점에서 큰 굴곡을 보이는데, 백악기 퇴적암으로 구성된 이 굴곡부에는 약 2 m 너비의 단층핵 노두가 관찰된다(그림 3c). 이 단층은 북북동-남남서 방향의 주향과 수직에 가까운 경사를 보이며, 약 70 m 폭의 하천 굴곡부 전반에 걸쳐 주변 지역($10\sim 20^\circ$)에 비해 고각인 층리($>40^\circ$)와 세맥 등과 같은 2차 변형구조가 다수 관찰되어 단층대로 판단된다(그림 3d). 이 단층은 북쪽으로 경주 남산의 서측부를 따라 거의 남-북 방향으로 약 2.5 km 연장하며, 이를 따라 서측의 백악기 퇴적암과 동측의 화강암이 단층으로 접촉한다. 한편 하천의 굴곡부 인근에서 북북서 방향으로 분기되는 최소 0.8 km 길이의 선형구조가 관찰된다. 이를 따라 급경사면(escarp), 하천의 경사 급변점(knick point) 및 지형 이상대가 존재하며, 주변에 남-북 방향의 소규모 단층대가 발달한다(그림 3a). 이처럼 동일한 선형구조를 따라 연속적으로 인지되는 지형학적 증거는 단층의 존재 가능성을 지시한다. 이 추정단층의 방향성이 앞서 언급한 퇴적암과 화강암의 경계에 발달하는 단층과 거의 평행하게 발달한다는 점을 고려하면, 주단층에서

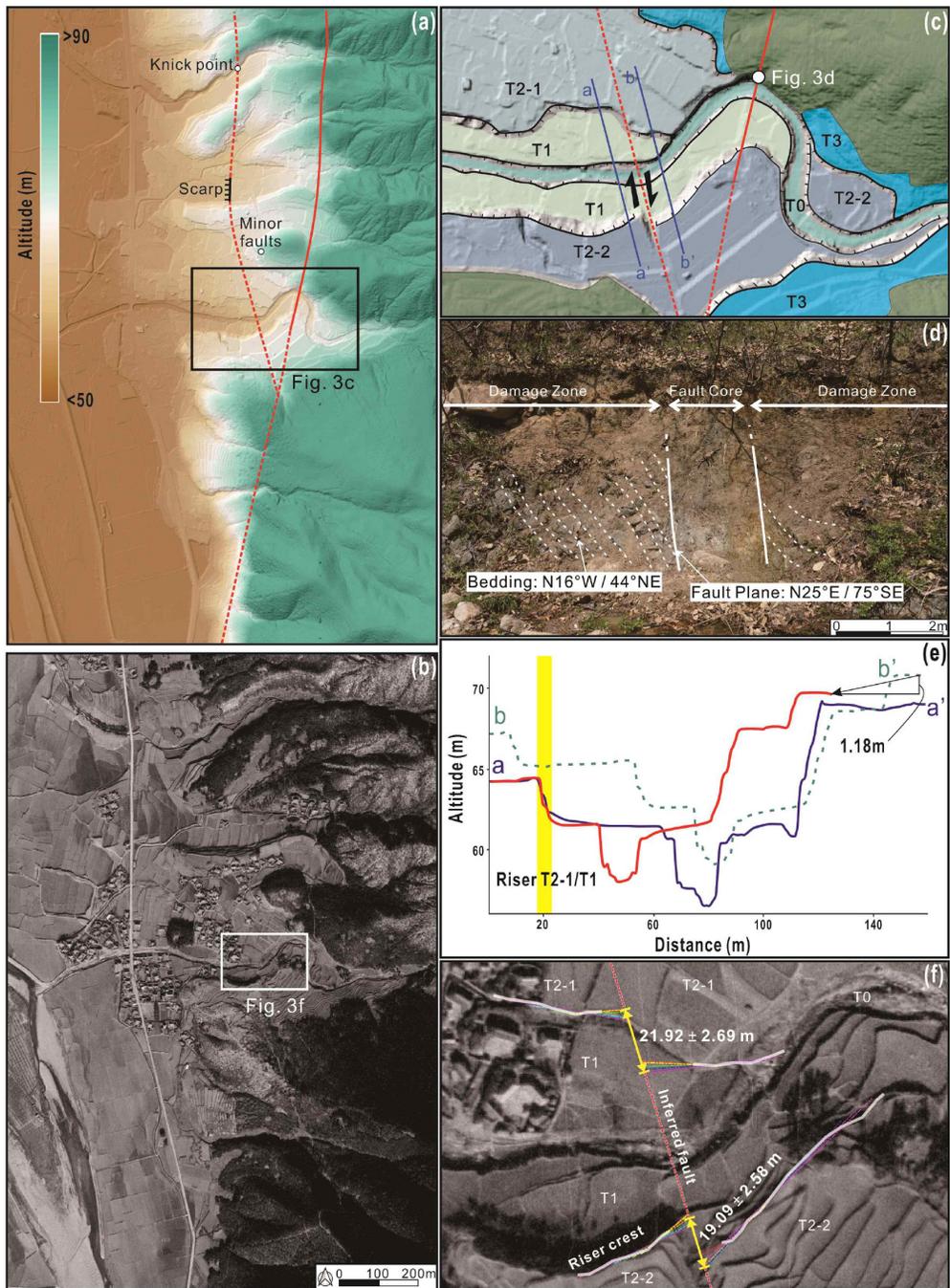


Fig. 3. (a) Digital elevation model (DEM) around the Yongjang-ri site. Solid line is exposed fault in bedrock and dotted lines are inferred fault traces. (b) Aerial photography around the Yongjang-ri site. (c) Schematic diagram of offset terrace. The offsets are recorded in T2 (T2-1 on northern, T2-2 on southern side of the stream)/T1 risers. (d) Fault outcrop near offset fluvial terrace. (e) Blue line and green dotted line correspond to profile along a - a', b - b' on (c). Red line is transferred green dotted line to match same terrace tread on blue line. The relative distance between red line and green dotted line corresponds to offset of the terrace. (f) Statistically-produced piercing lines (single point shredding lines) representative of pattern of each terrace riser trace in 10 sections on both sides of the inferred fault.

분기된 부수단층 또는 가지단층으로 판단된다. 비록 단층이 직접적으로 노두 상에서 관찰되지 않으나, 제4기 운동을 지시하는 지형변위지시자가 관찰됨에 따라 변위분석을 수행하였다.

수직오프셋 측정을 위해 하천 양측 오프셋이 기록된 단구에 상부의 단구면을 살펴본 바, 남측은 1968년 촬영된 항공사진과 수치표고모델 간의 지형차이가 현저해 인위적인 지형교란으로 판단하여 측정하지 않았다. 북측의 경우, 오프셋 측정을 위해 추정 단층선에서 동쪽과 서쪽으로 각각 약 20 m 떨어진 지점에서 단층과 평행한 두 지형단면도에서 인지되는 제2-1단구면을 이용하였으며 1.18 m의 수직오프셋이 인지되었다. 한편 서쪽으로 경사하는 제2-1단구면의 구배(0.36 m/10 m)를 이용하여 수직오프셋을 보정하였다. 그 결과, 제2-1단구면의 경우 단층 양측이 0.5 m 미만의 고도 차이를 보여 영상의 해상도를 고려하면 해당 단구면에서는 수직오프셋을 인지할 수 없었다(그림 3e). 한편 수평오프셋의 경우, 하천 양측 모두에서 단구애가 잘 보존되어 있는 것으로 판단되어 두 지점에서 모두 측정하였다. T2-1/T1 단구애에서 단층선 동측으로 약 37 m, 서측으로 약 44 m의 구간에서 단구애의 직선적인 형태가 유지되는 것으로 판단되며 해당 구간을 이용하여 21.92 ± 2.69 m의 변위량이 산출되었다(그림 3f). T2-2/T1 단구애의 경우 단층선 동측으로 약 90 m, 서측으로는 약 40 m의 구간에서 단구애의 직선적인 형태가 유지되는 것으로 판단되며 이를 이용하여 19.09 ± 2.58 m의 변위량이 산출되었다(그림 3f).

4.2 교동리 지점

울산광역시 울주군 삼남면 교동리에 위치하는 해당 지점엔 양산단층곡을 가로지르며 동-서 방향으로 흐르는 작괘천의 양안으로 하안단구가 분포한다(그림 4a, b). 이미 하천 북쪽 지점에서 굴착조사가 수행된 바 있으며, 동측의 백악기 퇴적암과 서측의 미고결 퇴적층이 접하는 단층이 보고되었다(그림 4a의 신화지점; Chang and Choo, 1999; Kyung *et al.*, 1999b; Okada *et al.*, 2001). 굴착단면에서 인지되는 단층의 자세는 $N40\sim45^{\circ}E/70\sim78^{\circ}NW$ 이며, 최소 수직오프셋은 2~3 m로 보고되었다. Okada *et al.* (2001)은 해당 단층에서 단층비지가 발달하지 않고 팔목할만한 파쇄대가 발달하지 않아 수직변위가 크지 않은 단층

자취로 해석하였다.

작괘천 양안에는 크게 총 3단의 하안단구면이 발달하며, 현재 하상(T0) 주변으로 발달하는 제1단구면(T1)은 주로 하천 북측에 300 m 이상 너비로 발달하며 남측에는 좁은 지역에만 분포한다. 그 상위로 존재하는 제2단구면(T2)은 주로 하천 남측 지역 전반에 분포한다. 이 제2단구면은 다소 고도가 높은 제2-2단구면(T2-2)과 하천 남측에 좁게 발달하는 다소 고도가 낮은 제2-1단구면(T2-1)로 세분된다. 최상위에 존재하는 제3단구면(T3)은 하천 북측 지역 전반에 분포하며 제1단구면이 사라지는 지점부터 현재 하상과 접하고 동측의 백악기 퇴적암체와 접하며 종결된다(그림 4c).

앞서 단층이 확인된 굴착조사 지점 인근의 T3/T2-2 단구애에서 총 3조의 단층에 의해 이격된 것으로 보이는 형태가 인지된다. 이 단구애들은 $N30\sim40^{\circ}E$ 의 방향성을 가지는 선상을 따라 이격된 것으로 보이며 이는 기존의 굴착 조사에서 측정된 단층의 주향과도 유사하다(그림 4c). 따라서 변위를 발생시킨 것으로 추정되는 단층들을 동에서 서로 제1단층, 제2단층, 제3단층이라 지정하였고 각각 $N40^{\circ}E$, $N30^{\circ}E$, $N30^{\circ}E$ 의 주향을 가지는 것으로 추정하였다(그림 4e).

해당 구간의 총 수직오프셋 측정을 위해 제1단층의 동측으로 약 60 m 떨어진 지점에서의 단층과 평행한 지형단면도와 제3단층의 서측으로 약 110 m 떨어진 지점에서의 단층과 평행한 지형단면도를 사용하였다. 이 두 지형단면도 상의 제3단구면에서 3.82 m의 수직오프셋이 인지되었다(그림 4d). 추가적으로 동측으로 경사하는 제3단구면의 평균 구배(0.28 m/10 m)를 고려하면, 제3단구면의 경우 제1단층 동편의 단구면이 제3단층 서편의 단구면에 비해 8.58 m 가량 상승한 것으로 판단된다. 또한 해당 구간의 총 수평오프셋을 산출하기 위해, 이 세 구간을 이루는 4개의 하안단구애의 자취를 이용하였다. 이는 각각 제1단층 동측으로 약 57 m, 제1단층과 제2단층 사이의 약 43 m, 제2단층과 제3단층 사이의 약 29 m, 그리고 제3단층 서측으로 약 180 m의 구간이 해당된다. 이때 이 구간들을 이용하여 산출된 수평오프셋의 합이 해당 구간의 총 수평오프셋에 해당한다. 이를 종합해보면 제1단층에 의해 47.96 ± 8.71 m, 제2단층에 의해 79.27 ± 9.44 m, 제3단층에 의해 68.20 ± 5.40 m의 수평오프셋이 누적된 것으로 산출

되며, 이 값들의 합인 195.43 ± 23.54 m이 해당 구간의 총 수평오프셋으로 판단된다(그림 4e).

4.3 상천리 지점

울산광역시 울주군 삼남면 상천리에 위치하는 해당 지점에 양산단층곡을 가로지르는 동-서 방향의 삼동천 지류 양안으로 하안단구가 분포한다(그림 5a, 5b). Chwae *et al.* (2000)은 이 지점의 하천노두

에서 북북동-남남서 방향의 단층을 보고하였으며, 이를 경계로 동측의 백악기 퇴적암과 서측의 미고결 퇴적층이 접한다(그림 5a의 가천1지점). 보고된 단층면의 자세는 $N10\sim 25^{\circ}E/70\sim 80^{\circ}SE$ 를 보이고, 단층조선은 $12\sim 15^{\circ}$ 북쪽으로 경사한다. 이후 해당 단층의 연장을 확인하기 위해 하천 남측의 두 지점에서 굴착조사가 진행되었다(그림 5a; Kyung, 2003). 두 굴착지점에서 모두 동측의 백악기 퇴적암과 서측

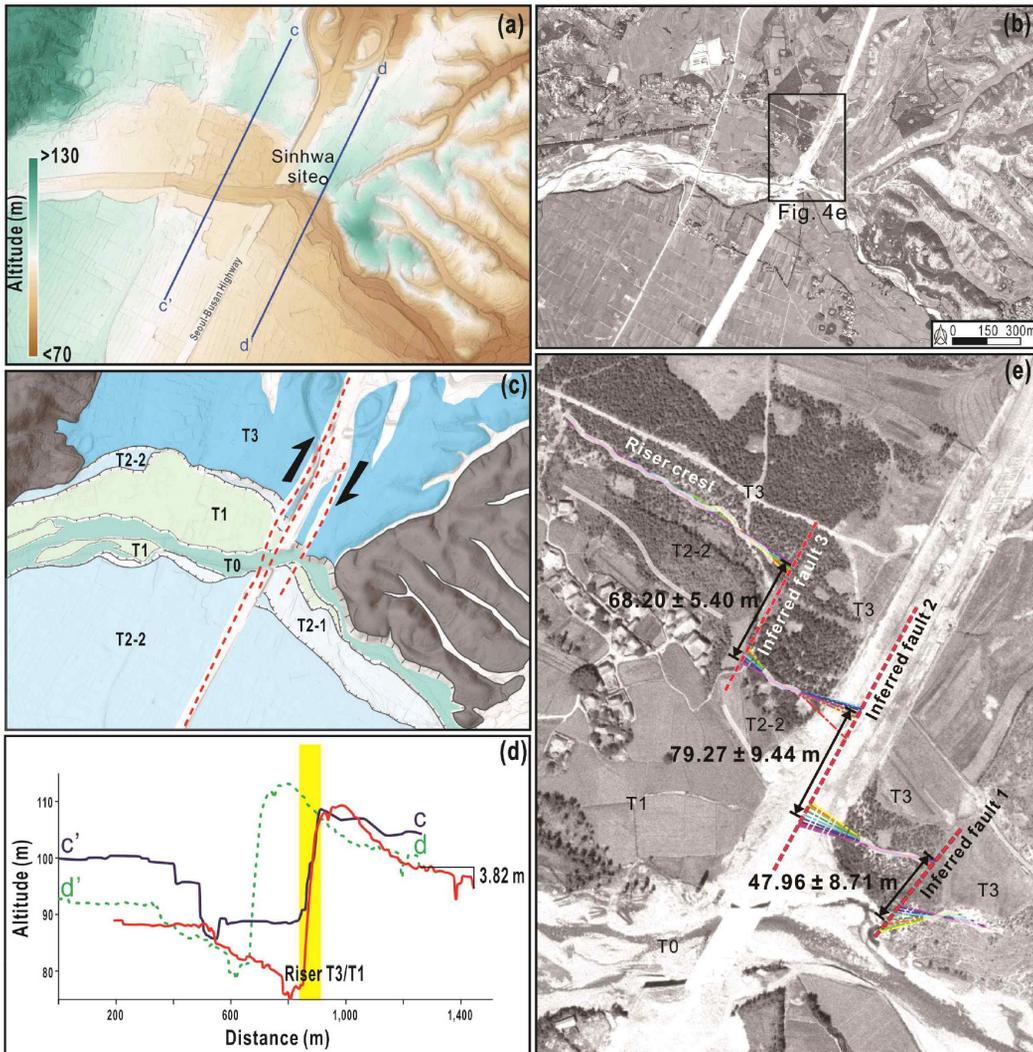


Fig. 4. (a) Digital elevation model (DEM) around the Gyodong-ri site and previously reported fault site. (b) Aerial photography around the Gyodong-ri site. (c) Schematic diagram of offset terrace. The offset is recorded in T3/T2-2 riser (northern side of the stream). (d) Blue line and green dotted line correspond to profile along c - c', d - d' on (a). Red line is transferred green dotted line to match same terrace tread on blue line. The relative distance between red line and green dotted line corresponds to offset of the terrace. (e) Statistically-produced piercing lines (single point shredding lines) representative of pattern of each riser trace in 10 sections on both sides of the inferred fault.

의 미고결 퇴적층이 접하는 단층이 확인되었으며 단층면은 N26°E/70°SE 혹은 N14~25°E/80°SE의 방향을 가지는 것으로 보고되었다.

이 지점에는 크게 3단의 하안단구면이 발달한다(그림 5c). 기준면(T0)을 포함해 약 100 m 내의 폭의 제1단구면(T1)과 이 지역 일대 전반에 발달하는 제2단구면(T2)이 분포하고, 조사지점 남부에 동-서 방

향의 제3단구면(T3)이 길고 좁게 분포하는 양상이다. 또한 제3단구면은 2 m 내외의 고도차로 구분되는 상대적으로 고도가 낮은 제3-1단구면(T3-1)과 그 북쪽의 상대적으로 고도가 높은 제3-2단구면(T3-2)로 세분된다. 일반적으로 고도가 더 낮은 단구면이 하천에 더 인접해 위치한다. 하지만 고수류의 위치 변동 혹은 남측에 존재하는 독립적인 소규모 하천에

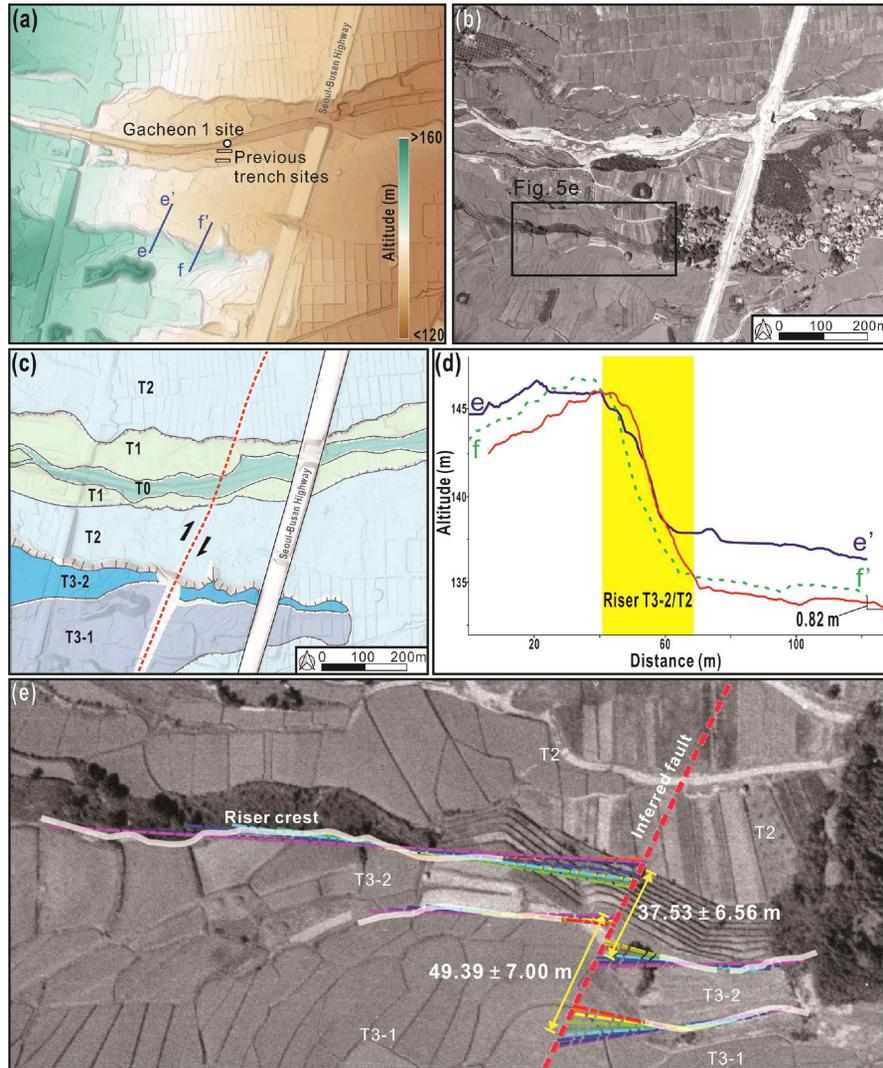


Fig. 5. (a) Digital elevation model (DEM) around the Sangcheon-ri site and previously reported fault and trench sites. (b) Aerial photography around the Sangcheon-ri site. (c) Schematic diagram of offset terrace. The offset is recorded in T3-2/T2, T3-2/T3-1 risers (southern side of the stream). (d) Blue line and green dotted line correspond to profile along e - e', f - f' on (a). Red line is transferred green dotted line to match same terrace tread on blue line. The relative distance between red line and green dotted line moves corresponds to offset of the terrace. (e) Statistically-produced piercing lines (single point shredding lines) representative of pattern of each terrace riser trace in 10 sections on both sides of the inferred fault.

의한 침식에 의해 현재의 제3-2단구면과 제3-1단구면의 분포가 형성된 것으로 추정된다.

보고된 하천 노두 및 굴착조사지점 남측의 T3-2/T3-1 단구애와 T3-2/T2 단구애에서 이격된 형태가 인지되어 지형변위지시자로 사용하였다. 변위가 인지되는 지점과 단층이 보고된 지점들을 연결하면 약 N25°E의 방향성을 가지는 단층이 추정된다. 이는 보고된 단층들의 주향과도 유사하며 해당 단층의 활동으로 인해 이격된 형태의 단구애가 생성된 것으로 판단된다. 단구애의 이격된 형태는 우수향 운동감각을 지시한다(그림 5c).

오프셋 측정을 위해 추정 단층선에서 동쪽으로 약 40 m, 서쪽으로 약 60 m 떨어진 지점에서 단층과 평행한 두 지형단면도 상의 제3-2단구면을 이용하여 0.82 m의 수직오프셋이 인지되었다(그림 5d). 이 때, 동쪽으로 경사하는 제3-2단구면의 구배(0.39 m/10 m)를 고려하면 단층 동편의 제3-2단구면이 4.72 m 가량 상승한 것으로 판단된다. 수평오프셋의 경우 T3-2/T2 단구애에서 단층선 동측으로 약 57 m, 서측으로 약 195 m의 구간에서 단구애의 직선적인 형태가 유지되는 것으로 판단되었으며 해당 구간을 이용하여 37.53 ± 6.56 m의 값이 산출되었다(그림 5e). T3-2/T3-1 단구애의 경우, 단층선 동측으로 약 67 m, 서측으로는 약 83 m의 구간에서 단구애의 직선적인 형태가 유지되는 것으로 판단되며 이를 이용하여 49.39 ± 7.00 m의 값이 산출되었다(그림 5e).

4.4 초산리 지점

경상남도 양산시 하북면 초산리에 위치하는 해당 지점에는 양산단층곡 서편에서 단층곡으로 유입된 후 단층곡을 따라 남쪽으로 흐르는 양산천이 존재한다. 또한 서측에서 유입되는 지점에서 서북서-동남동 방향의 하천 주변으로 하안단구가 발달한다(그림 6a, 6b). 해당 지점에서 북쪽으로 약 1 km 떨어진 곳에서 도로절개 단면노두와 굴착조사를 통해 단층이 보고된 바 있다(월평1지점; Okada *et al.*, 1994). 이 단층은 거의 수직에 가까운 단층면을 가지며 N20~25°E의 주향을 보이는데, 이를 경계로 동측의 안산암 내지 규장질 화성암이 서측의 미고결 퇴적층과 접한다. 비록 미고결 퇴적층의 형성시기가 알려진 바 없으나, 비교적 신기에 형성된 것으로 보이는 퇴적층이 변위를 가지므로 신기에 단층운동이 있었음을 지

시한다.

양산천을 따라 크게 3단의 하안단구면이 발달하며, 현재 하상(T0)을 주변으로 남측으로 폭이 증가하는 제1단구면(T1)이 분포하고 상위의 제2단구면(T2)은 하천 북측에서 300 m 내외의 너비를 가지며 남측에선 이 지역 일대 전반에 분포한다. 가장 상위의 제3단구면(T3)은 하천 북측에서만 관찰되며 남측에 이와 대비되는 단구면은 인지되지 않는다. 또한 제1단구면의 경우 다소 고도가 낮은 제1-1단구면(T1-1)과 높은 제1-2단구면(T1-2)로 세분되며 전자의 경우 하천의 남측에서만 인지된다. 제2단구면의 경우도 양산천 남측에 위치하는 상대적으로 고도가 낮은 제2-1단구면(T2-1)과 북측에 위치하는 상대적으로 고도가 높은 제2-2단구면(T2-2)으로 세분된다(그림 6c).

양산천 남측의 T2-1/T1-2 단구애와 T1-2/T1-1 단구애의 형태가 다소 불연속적인 모습으로 이격된 것이 확인되는데 이 지점과 앞서 언급한 기준에 보고된 단층지점을 잇게 되면 약 N20°E를 가지는 단층선이 추정된다. 이는 단층지점에서 측정된 단층의 주향과 거의 동일하다. 또한 단구애의 이격된 형태로 우수향의 운동감각이 인지되어 해당 주향을 가지는 단층의 활동에 의해 하안단구의 변위가 발생한 것으로 판단된다.

오프셋 측정을 위해 추정 단층선에서 동쪽과 서쪽으로 각각 약 20 m 떨어진 지점에서 단층과 평행한 두 지형단면도를 이용하였으며 T1-2 단구면에서 0.43 m, 제2-1단구면에서 0.70 m의 수직오프셋이 인지된다(그림 6d). 이를 동쪽으로 경사하는 제2-1단구면의 구배(0.29 m/10 m)와 제1-2단구면의 구배(0.18 m/10 m)를 이용하여 보정하였다. 그 결과, 하천 남측에서 제1-2단구면의 경우 단층 동편의 단구면이 1.15 m 가량 상승한 것으로 추정된다. 이와 달리 제2-1단구면의 경우 단층 동편이 다소 상승한 모습을 보이나, 0.5 m 미만의 고도 차이를 보여 영상의 해상도를 고려해 보았을 때 해당 단구면에선 수직오프셋이 인지되지 않았다. 한편 수평오프셋의 경우 T1-2/T1-1 단구애에서 단층선 동측으로 약 135 m, 서측으로는 약 127 m의 구간에서 단구애의 직선적인 형태가 유지되는 것으로 판단되며 해당 구간을 이용하여 9.68 ± 2.73 m의 값이 산출되었다(그림 6e). T2-1/T1-2 단구애의 경우, 단층선 동측으로 약 142 m, 서측으로는 약 170 m의 구간에서 단구애의 직선적인 형태

가 유지되는 것으로 판단되며 이를 이용하여 34.44 ± 4.40 m의 값이 산출되었다.

5. 토 의

5.1 단층의 기하 특성

양산단층과 같은 대규모 주향이동단층은 하나의 단층만으로 구성되기 보다는 여러 구간의 분절로 구

성된다. 각각의 단층분절 또한 하나의 단층이 아닌 주단층과 평행한 다수의 부수단층들로 구성되어 결과적으로 매우 복잡한 기하를 가진다(Faulkner *et al.*, 2003, 2008). 단층의 기하학적 복잡성은 단층분절의 종결부(tip) 혹은 서로 다른 단층분절의 종결부 사이 지역(혹은 연결부)에서 집중되는데, 이는 동일한 지구조 응력 하에서도 분절 간의 상호작용에 의해 다양한 형태와 규모의 여러 부수적인 지질구조들

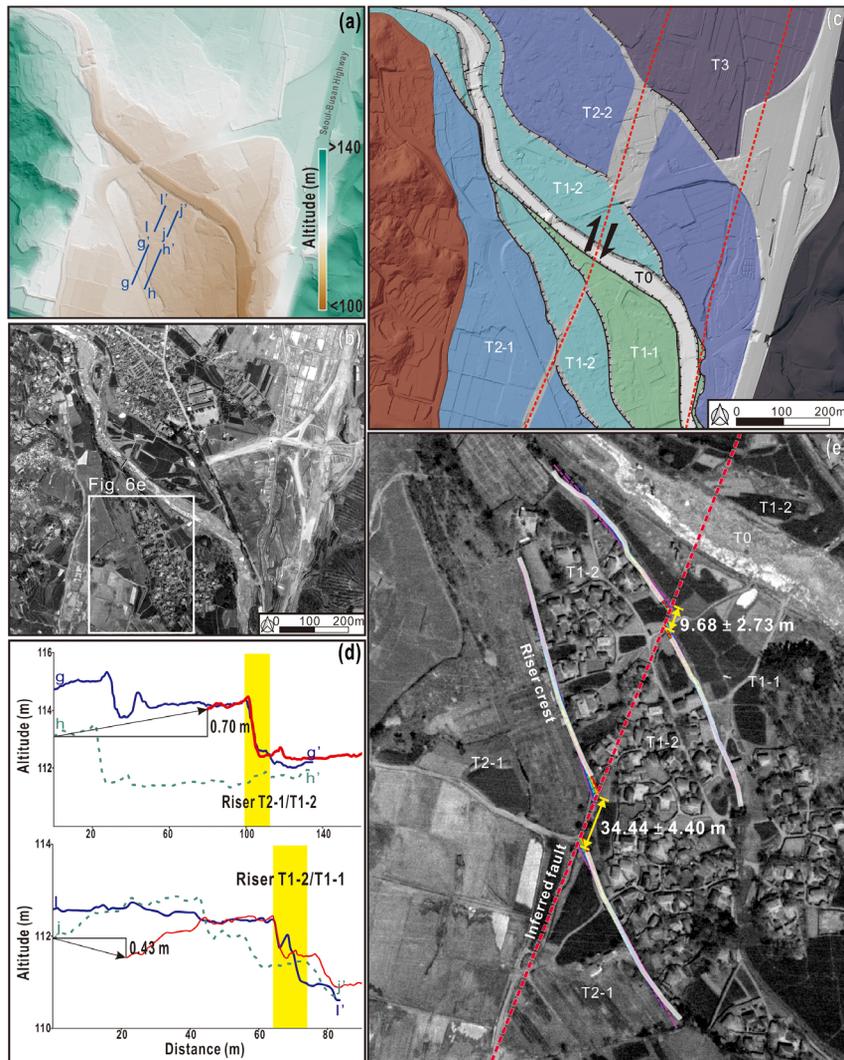


Fig. 6. (a) Digital elevation model (DEM) around the Chosan-ri site. (b) Aerial photography around the Chosan-ri site. (c) Schematic diagram of offset terrace. The offset is recorded in T2-1/T1-2 and T1-2/T1-1 riser (southern side of the stream). (d) Blue line and green dotted line correspond to profile along g - g', h - h' and i - i', j - j' on (a). Red lines are transferred green dotted lines to match same terrace tread on blue lines. The relative distance between red line and green dotted line corresponds to offset of the terrace. (e) Statistically-produced piercing lines (single point shredding lines) representative of pattern of each terrace riser trace in 10 sections on both sides of the inferred fault.

로 구성되는 단층손상대(fault damage zone)가 발달하기 때문이다(Segall and Pollard, 1980; Kim *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2018).

양산단층은 여러 단층분절로 구성되어 있는 것으로 해석되었으며(Lee and Jin., 1991; Chang, 2002; Choi *et al.*, 2017), 이러한 주단층의 분절 경계 인근 지역에서 단층의 기하학적 복잡성이 증가할 수 있다(Faulkner *et al.*, 2008). 남부 양산단층의 경우 단층곡 내에서 진행된 물리 탐사를 통해 수매의 단층이 단층대를 구성하는 것으로 추론되었다(Lee *et al.*, 2017). 한편 연구지역에 속하는 울산시 울주군 삼남면 일대 약 6.5 km 길이의 양산단층 구간 내에서 발견된 제4기 단층에 대해, 지점별로 측정한 단층의 주향은 N9~45°E로 비교적 다양한 값을 보인다(그림 7; Chang and Choo, 1999; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b; Lee *et al.*, 1999; Chwae *et al.*, 2000; Okada *et al.*, 2001). 이와 같이 다소 짧은 구간에서 분산된 기하를 가지는 단층의 경우 한 지점의 자료만론 그 단층 전체의 특성을 파악하기에는 어려움이 있다. 더욱이 단층 기하를 모두 추적 할 수 있을 만큼 노두가 잘 노출되어있지 않다면 어려움은 배가 된다.

단층대가 다양한 방향의 단층으로 구성된 경우,

대표적인 방향성을 알기 위해 측정된 단층들의 평균 주향을 이용할 수 있다. 앞서 언급한 연구지역 일대 각 지점에서 보고된 제4기 단층들의 평균적인 주향 값은 약 N25°E이다. 이는 본 연구에서 수행한 지형 분석 결과를 바탕으로 추정된 단층 주향의 범위(N20~40°E)에 포함되며, 그 평균값인 N27°E와 유사하다(그림 7). 이러한 결과는 단층대가 다양한 방향의 단층들로 구성되어 그 기하가 복잡한 경우 단층과 연관된 지형을 이용하는 것이 대표 기하를 추정하는데 효과적임을 시사한다.

5.2 수평오프셋의 공간적 변화

본 연구에서는 단구에 형태를 이용하여 다양한 제4기 수평오프셋을 측정하였다. 동일 단층을 따른 다양한 제4기 오프셋 값은 많은 요인에 의해 발생할 수 있다. 첫 번째로 하안단구들의 서로 다른 형성 시기가 지점 별 오프셋의 차이를 야기할 수 있다. 즉 보다 오래 전에 형성된 단구일수록 더 큰 누적 오프셋을 기록할 가능성이 크다. 두 번째로 부수적인 구조(subsidiary structure) 등으로 인하여 단층의 변위가 국부적으로 분산되는 경우(Choi *et al.*, 2018), 동일한 생성연대를 가지는 인접한 지역의 하안단구라

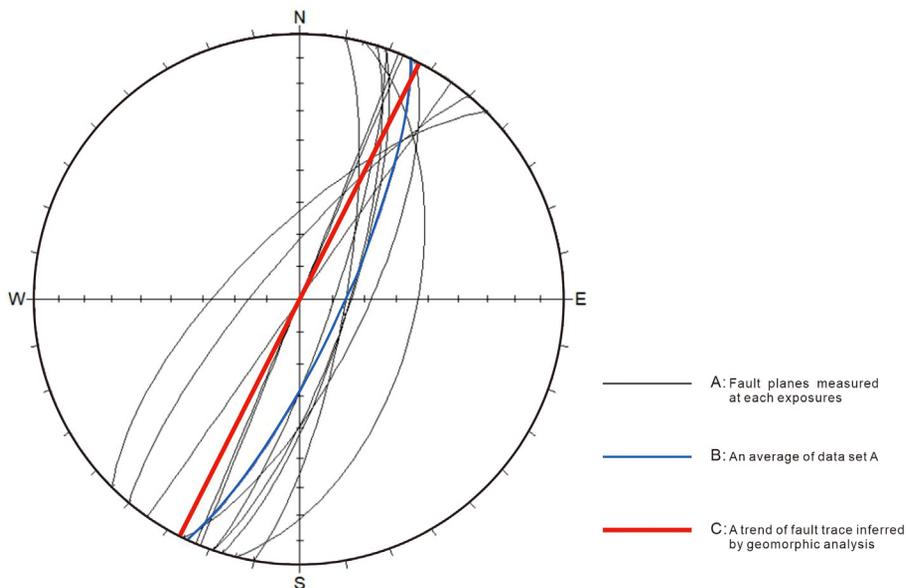


Fig. 7. Lower hemisphere stereographic projections of fault plane data acquired by different methods. An average of data set measured at each locations (references are noted in the text) are parallel to a trend of fault trace inferred by geomorphic analysis.

Table 1. Horizontal (h) and vertical (v) offsets at each investigation sites (std: standard deviation, YJR: Yongjang-ri site, GDR: Gyodong-ri site, SCR: Sangcheon-ri site, and CSR: Chosan-ri site). Note that all geomorphic offsets indicate dextral motion with a minor vertical component (east side up) of the central-southern Yangsan Fault.

Site	Riser		v	Offset (m)				
	Upper t	Lower t		h				
				min	max	mean	std	std/mean
YJR_1	T2-1	T1	-	19.23	24.61	21.92	2.69	0.12
YJR_2	T2-2	T1	-	16.51	21.67	19.09	2.58	0.14
GDR	T3	T2-2	8.58	171.88	218.96	195.43	23.54	0.12
SCR_1	T3-2	T3-1	4.72	42.39	56.39	49.39	7.00	0.14
SCR_2	T3-2	T2		30.97	44.09	37.53	6.56	0.17
CSR_1	T2-1	T1-2	-	30.04	38.84	34.44	4.40	0.13
CSR_2	T1-2	T1-1	1.15	6.95	12.41	9.68	2.73	0.28

할지라도 서로 다른 오프셋을 기록할 수 있다. 세 번째로 한 단층을 따라서도 위치, 시간에 따라 변위율의 변화가 발생할 수 있다. 일반적으로 단층의 양측 종결부에 가까울수록 변위율이 작다(Cowgill, 2007; Zielke *et al.*, 2015).

Okada *et al.* (1994)은 지형면의 형태, 풍화대, 토양의 발달정도 등을 이용해 교동리와 상천리 지점 하안단구의 최고위면 형성연대를 각각 250~500 ka와 100 ka 이상으로 추정하였다. 이 두 단구면은 변위를 기록하는 단구에 상부(upper tread)에 존재하여 단구에의 최대 형성 연대를 대변한다. 두 지점 중 더 큰 오프셋을 가지는 교동리 지점(표 1)의 단구에 가 더 오래된 최대 형성연대를 가지므로 상술한 첫 번째 요인에 의한 수평오프셋 차이가 고려될 수 있다. 한편 상천리 지점에서 동쪽으로 약 700 m 떨어진 거리의 노두에서 가천 2단층으로 불리는 제4기 단층이 발견된 바 있다(Chwae *et al.*, 2000). 이를 고려한다면 여러 단층으로의 변위 분산에 따른 오프셋 차이 역시 검토될 수 있다. 하지만 연구지역에서 인지된 수평오프셋의 공간적 변화의 정확한 원인을 분석하기 위해서는 개별 하안단구면의 정확한 연대측정과 더불어 중남부 양산단층 내 단층 분절 추적이 반드시 요구되어 향후 추가적인 연구가 필요하다.

앞서 언급한 바와 같이 오래된 단구일수록 더 큰 누적 오프셋을 기록할 가능성이 크지만, 침식률의 차이에 의해 반대의 상황이 발생할 수 있다. 용장리 지점에서 변위를 기록한 두 단구는 하천 양안에 각각 위치한다(그림 3). 지형단면 상에서 이 두 단구에

상부(upper tread)에 위치하는 하천 북측의 제2-1단구면은 약 65 m, 남측의 제2-2단구면은 약 69 m의 고도를 가지며 수치표고모델 상에서 제2-2단구면이 전반적으로 3~5 m 가량 높다(그림 3e). 이를 통해 고도가 높은 남측의 제2-2단구면이 북측의 제2-1단구면보다 오래 전에 생성되었다는 것을 유추할 수 있다. 하지만 더욱 젊은 것으로 판단되는 북측의 단구애를 기준으로 측정된 수평오프셋이 약 3 m (15%) 크게 측정되었는데(표 1), 그 원인은 1) 두 단구면의 형성시기 사이에 지진 지표변위가 발생하지 않음으로 인해 오차범위를 고려할 때 거의 동일한 변위가 측정된 결과, 2) T2-2/T1 단구에 생성 시에도 하천이 현재와 같이 변위가 인지되는 단구 인근에서 남측 사면이 공격면(cut bank)인 형태로 흘러 상대적으로 침식이 더 활발하였을 경우(Gold *et al.*, 2017), 3) 하천 남측의 단층 하류쪽 단구애가 상대적으로 하천 쪽으로 이동하여 돌출된 형태를 가지는 비보호 단구애(Unsheltered riser)가 되어 침식에 의한 영향이 더 컸을 경우(Gold *et al.*, 2011) 등으로 해석된다.

5.3 수평오프셋의 오차

본 연구에서는 하안단구애의 형태를 분석하여 통계기법을 이용해 수평오프셋을 산출하였다. 이에 따라 최대값과 최소값을 포함하는 범위로서 수평오프셋 값이 표현되었다(표 1). 수평오프셋 값의 표준편차를 이용한 범위는 측정의 오차를 반영하며, 연구지역에서 고려될 수 있는 오차의 원인은 주로 다음과 같다:

- 1) 하안단구의 형태 변형에 의한 오차.
- 2) 측정에 수반되는 오차.

첫 번째는 하안단구에 변위가 기록된 이후 자연적인 침식 및 퇴적활동 또는 인위적인 지형 훼손에 따라 야기될 수 있다. 예를 들어 1) 하안단구에 하부의 단구면이 생성되기 이전 하천의 영향, 2) 하안단구에 하부의 단구면이 생성된 이후 바람이나 봉적 활동에 의한 영향, 3) 인공적인 매립이나 굴착에 의한 영향은 오프셋 측정 시 오차를 발생시킬 수 있다. 본 연구의 경우 과거 항공사진과 최신 항공라이다 사진의 대비 및 현장조사를 통해 대규모의 인위적 지표교란이 인지되는 곳에서는 오프셋 분석을 실시하지 않았다(예, 용장리 지점 제2-2단구면의 수직변위). 한편 측정된 수평오프셋의 오차는 평균에 비해 하는 모습을 보이며(표 1), 이는 오래된 하안단구일수록 더 큰 오프셋을 기록한다는 가정과 조화롭다. 즉, 더 큰 오프셋을 기록하는 하안단구가 더 오랜 시간동안 교란되어 더 큰 오차를 가질 수 있는 것이다.

두 번째의 경우는 다소 불규칙한 단구애의 패턴을 직선으로 추출하는 과정에서의 불확실성과 사용된 영상 자체가 가지는 해상도의 한계에 의해 발생할 수 있다. 측정된 수평오프셋은 평균이 작아질수록 오차 또한 작아지는 모습을 보여준다. 하지만 초산리 지점의 T1-2/T1-1 단구애와 용장리 지점에서의 두 단구애의 경우 수평오프셋은 약 두 배의 차이를 가지나 오차값은 서로 유사한 크기(약 2.6 m)를 가진다(표 1). 이러한 차이점은 본 연구에서 측정된 오프셋 오차범위의 최소값(2~3 m)에 의한 결과로 판단되는데, 오차범위 최소값은 본 연구에서 사용한 과거 항공사진의 해상도에서 비롯된 것으로 추론된다. 또한 일반적으로 지형변위지시자가 완벽한 직진성(straightness)을 유지하기 보다는 다소 휘는 형태를 가지는 것에서 유발될 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 측정된 수평 오프셋은 많은 요인들에 의해 오차가 유발되었을 가능성이 있다. 하지만 산출된 모든 수평오프셋들에서 오차는 평균의 약 30% 이하의 분산을 보이며, 초산리 지점의 T1-2/T1-1 단구애를 제외하면 평균의 약 10~20%로 작다. 이로 미루어 보아 단구애의 형태를 이용해 수평오프셋을 효과적으로 산출한 것으로 판단된다.

5.4 중남부 양산단층의 제4기 운동감각

표 1에서 알 수 있듯이 연구지역에서 산출된 수직 오프셋은 수평오프셋에 비해 최대 약 10% 정도로 매우 작다. 또한 몇몇 지점의 경우에는 수직오프셋 자체가 거의 인지되지 않았다. 이는 제4기 하안단구가 형성된 이후 누적된 양산단층의 변위에서 주향이동 성분이 우세함을 지시한다. 야외노두 및 굴착조사를 통해 기보고된 양산단층의 제4기 단층운동은 고각의 단층면과 저각의 단층 조선을 보이는 경우가 많다(Chwae *et al.*, 1998; Kyung *et al.*, 1999a; Kim and Chang, 2009). 또한 본 연구에서 다른 제4기 지형에 기록된 정보와 더불어 지난 2016년 발생한 경주지진이 역단층성 움직임을 일부 포함한 우수향 운동에 의해 발생되었음을 고려할 때(Woo *et al.*, 2019), 양산단층의 제4기 거동은 우수향 운동에 의해 명확히 대변된다. 이러한 상황에서 양산단층을 따라 수행되었던 기존의 제4기 단층운동 변위량 및 운동감각에 관한 연구가 주로 자연사면이나 굴착단면을 대상으로 이루어졌던 점은 큰 아쉬움으로 남는다. 단면에서 고각의 주향이동성 단층을 관찰할 경우 경사 방향의 겹보기 변위(dip separation)만을 파악할 수밖에 없기 때문이다. 따라서 양산단층의 제4기 운동을 연구할 시, 수평오프셋을 기록하고 있는 지형변위지시자 분석을 병행하는 것이 효과적인 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 항공라이다 자료 기반의 수치표고 모델과 항공사진을 이용하여 양산단층곡 내의 단층에 의해 변위된 제4기 하안단구를 분석하였다. 이를 통해 추정된 단층 양측의 지형 단면을 이용하여 해당 하안단구 형성 이후 양산단층에 의한 수직오프셋을 산출했다. 수평오프셋을 측정하기 위해 단층 양측 하안단구애의 형태를 고려하여 단층면과의 교점들을 복원하였다. 이후 분석의 신뢰를 높이기 위해 각 교점군 사이의 수평 거리를 측정하여 수평오프셋의 평균값과 오차범위를 산정하였다. 그 결과 중남부 양산단층의 제4기 운동은 주로 단층 동측의 지고가 상승하는 약간의 수직 이동 성분을 가진 우수향으로 대변되는 것으로 판단된다. 향후 하안단구 퇴적층의 형성 연대를 도출한다면 중남부 양산 단층의

위치별 변위율을 획득할 수 있을 것이다. 이러한 자료들은 제4기 동안 양산단층 운동특성의 시공간적 변화를 이해하는데 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업(과제번호: 2017-MOIS31-006)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이 논문에 대해 건설적인 의견을 주신 익명의 심사위원님들께 깊이 감사드리며, 자료 분석 과정에서 많은 도움을 주신 정진아 교수님께 감사의 뜻을 전합니다.

REFERENCES

- Brune, J.N., 1968, Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault. *Journal of Geophysical Research*, 73, 777-784.
- Chai, T. and Draxler, R.R., 2014, Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247-1250.
- Chang, C.J., 2002, Structural characteristics and evolution of the Yangsan fault, SE Korea. Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Daegu, 259 p (in Korean with English abstract).
- Chang, C.J. and Chang, T.W., 2002, Structural Characteristics and Kinematic Analysis of the Yangsan Fault. *The Journal of Engineering Geology*, 163-171 (in Korean).
- Chang, K.-H., Woo, B.-G., Lee, J.-H., Park, S.-O. and Yao, A., 1990, Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of Eastern Kyongsang Basin, S. Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 471-487.
- Chang, T.W., 2001, Quaternary Tectonic Activity at the Eastern Block of the Ulsan Fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 3, 421-444 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.W. and Choo, C.O., 1999, Faulting Processes and K-Ar Ages of Fault Gouges in the Yangsan Fault Zone. *The Journal of The Korean Earth Science Society*, 20, 25-37 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.-I., Oh, J.-H., Shin, S.-C. and Yang, M.Y., 1980, Geology and geochemistry of the Gyeongsang strata in Ulsan area. *Korea Institute of Energy and Resources Bulletin*, 20, 33 p.
- 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, 29-157 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.-H., Klinger, Y., Ferry, M., Ritz, J.F., Kurtz, R., Rizza, M., Bollinger, L., Davaasambuu, B., Tsend-Ayaush, 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, <http://dx.doi.org/10.1002/2017JB013962>.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000, *Marine Geology of Korean Seas*, second ed. Elsevier, Amsterdam, 313 p.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korea peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- Chwae, U., Choi, S.-J., Cho, D.-L., Lee, Y.J., Ryoo, C.-R., Ko, I.S. and Song, M.J., 2000, Neotectonics. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. N2-01-02-A-01, Ministry of Science and Technology (in Korean).
- Chwae, U., Lee, D.Y., Lee, B.J., Ryoo, C.-R., Choi, P.Y., Choi, S.-J., Cho, D.-L., Kim, J.Y., Lee, C.B., Kee, W.-S., Yang, D.Y., Kim, I.J., Kim, Y., Yoo, J.H., Chae, B.G., Kim, W.Y., Kang, P.J., Yu, I.H. and Lee, H.K., 1998, An investigation and evaluation of capable fault: Southeastern, Korea. Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 301 p (in Korean).
- Cowgill, E., 2007, Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China. *Earth Planet. Science Letters*, 254, 239-255.
- Cowgill, E., Gold, R.D., Chen, X., Wang, X.-F., Arrowsmith, J.R. and Southon, J.R., 2009, Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet. *Geology*, 37, 647-650.
- Cowie, P.A. and Scholz, C.H., 1992, Growth of faults by accumulation of seismic slip. *Journal of Geophysical Research*, 97, 11085-11095.
- Cunningham, D., Grebbly, S., Tansey, K., Gosar, A. and Kastelic, V., 2006, Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia. *Geophysical Research Letters*, 33, L20308, doi:10.1029/006GL027014.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C. and Rutter, E.H., 2003, On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 367, 235-251.
- Faulkner, D.R., Mitchell, T.M., Rutter, E.H. and Cembrano, J., 2008, On the structure and mechanical properties of

- large strike-slip faults. Geological Society, London, Special Publications, 299, 139-150.
- Gold, R.D. and Cowgill, E., 2011, Deriving fault-slip histories to test for secular variation in slip, with examples from the Kunlun and Awatere faults. *Earth and Planetary Science Letters*, 301, 52-64.
- Gold, R.D., Cowgill, E., Arrowsmith, J.R., Chen, X., Sharp, W.D., Cooper, K.M. and Wang, X.F., 2011, Faulted terrace risers place new constraints on the late Quaternary slip rate for the central Altyn Tagh Fault, northwest Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 123, 958-978.
- Gold, R.D., Cowgill, E., Arrowsmith, J.R., Gosse, J., Wang, X. and Chen, X., 2009, Riser diachroneity, lateral erosion, and uncertainty in rates of strike-slip faulting: a case study from Tuzidun along the Altyn Tagh Fault, NW China. *Journal of Geophysical Research*, 114, B04401, doi:10.1029/2008JB005913.
- Gold, R.D., Reitman, N.G., Briggs, R.W., Barnhart, W.D., Hayes, G.P. and Wilson, E., 2015, On-and off-fault deformation associated with the September 2013 M_w 7.7 Balochistan earthquake: Implications for geologic slip rate measurements. *Tectonophysics*, 660, 65-78.
- Gold, R.D., Briggs, R.W., Crone, A.J. and Duross, C.B., 2017, Refining fault slip rates using multiple displaced terrace risers-An example from the Honey Lake fault, NE California, USA. *Earth and Planetary Science Letters*, 477, 134-146.
- Haeussler, P., Schwartz, D., Dawson, T., Stenner, H., Lienkaemper, J., Sherrod, B. and Cinti, F., 2004, Surface rupture and slip distribution of the Denali and Totschunda faults in the 3 November 2002 M 7.9 Earthquake, Alaska. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, S23-S52.
- Hunter, L.E., Howle, J.F., Rose, R.S. and Bawden, G.W., 2011, LiDAR-assisted identification of an active fault near Truckee, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1162-1181.
- Hwang, B.-H., Lee, J.-D. and Yang, K., 2004, Petrological study of the granitic rocks around the Yangsan fault: Lateral displacement of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 161-178 (in Korean with English abstract).
- Hwang, B.-H., Lee, J.-D., Yang, K. and McWilliams, M., 2007a, Cenozoic strike-slip displacement along the Yangsan fault, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 768-775.
- Hwang, B.-H., McWilliams, M., Son, M. and Yang, K., 2007b, Tectonic implication of A-type granites across the Yangsan fault, Gyeongju and Gyeongju areas, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 1094-1102.
- Jun, M.-S. and Jeon, J.S., 2010, Focal mechanism in and around the Korean Peninsula. *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa* 13, 198-202 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J. and Chang, T.W., 2009, Fracture characteristics and segmentation of Yangsan Fault around Mt. Namsan, Gyeongju City, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 19, 51-61 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.J., Kwon, Y.I. and Jin, M.S., 1971, 1:50,000 the geological map of Moryang sheet. Geological survey of Korea.
- Kim, Y.-S. and Jin, K., 2006, Estimated earthquake magnitude from the Yugye Fault displacement on a trench section in Pohang, SE Korea. *Journal of the geological society of Korea*, 42, 79-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Jim, K., Choi, W.-H. and Kee, W.-S., 2011, Understanding of active faults: A review for recent researches. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 723-752 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- 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 $M_w \sim 7.8$, 14 November 2001 Kokoxili Earthquake, Kunlun Fault, Northern Tibet, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1970-1987, <http://dx.doi.org/10.1785/0120040233>.
- Knuepfer, P.L.K., 1992, Temporal variations in latest Quaternary slip across the Australian-Pacific plate boundary, northeastern South island, New Zealand. *Tectonics*, 11, 449-464.
- Kyung, J.B., Lee, K.H. and Okada, A., 1999a, A paleoseismological study of the Yangsan Fault -Analysis of deformed topography and trench survey. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 2, 155-168 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B., Lee, K.H., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Takemura, K., 1999b, Study of fault characteristics by trench survey in the Sangchon-ri area in the southern part of Yangsan Fault, Southeastern Korea. *The Journal of The Korean Earth Science Society*, 20, 101-110 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B., 2003, Paleoseismology of the Yangsan Fault, southeastern part of the Korean Peninsula. *Annals of Geophysics*, 46, 983-996.
- Kyung, J.B., 2010, Paleoseismological Study and Evaluation of Maximum Earthquake Magnitude along the Yangsan and Ulsan Fault Zones in the Southeastern Part of Korea. *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, 13, 187-197.
- Lee, B., Choi, S.-J., Chwae, U. and Ryoo, C.-R., 1999,

- Characteristics of the quaternary faulting of the Wolpyeong, Yangsan, S.E. Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 179-188 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Gwon, S. and Kim, Y.-S., 2016, Research on Earthquake Occurrence Characteristics Through the Comparison of the Yangsan-ulsan Fault System and the Futagawa-Hinagu Fault System. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 195-209 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-J., Hamm, S.-Y., Park, S. and Ryoo, C.-R., 2017, Geometric Characteristics of Southern Yangsan Fault Zone by Means of Geophysical Prospecting and Geological Survey. *The Journal of Engineering Geology*, 27, 9-20 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan Fault System: Geophysical Studies on Major Faults in the Kyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 434-449.
- Lee, M.S. and Kang, P.C., 1964, 1:50,000 the geological map of Yangsan sheet, Geological survey of Korea.
- Lee, Y.J. and Lee, I.K., 1972, 1:50,000 the geological map of Eon Yang sheet. Geological survey of Korea.
- Lensen, G.J., 1964, The general case of progressive fault displacement of flights of degradational terraces. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 7, 864-870.
- Lensen, G.J., 1968, Analysis of progressive fault displacement during downcutting at the Branch River terraces, South Island, New Zealand. *Geological Society of America Bulletin*, 79, 545-556.
- Mason, D.P.M., 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.
- Milliner, C.W.D., Dolan, J.F., Hollingsworth, J., Leprince, S., Ayoub, F. and Sammis, C.G., 2015, Quantifying near-field and off-fault deformation patterns of the 1992 M_w 7.3 Landers earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 1577-1598.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C. and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, Southeast Korea. *Journal of Geography*, 103, 111-126 (in Japanese with English abstract).
- Okada, A., Takemura, K., Watanabe, W., Suzuki, Y. and Kyung, J.-B., 2001, Trench Excavation Surveys across the Yangsan and Ulsan Active Fault Systems in the Southeastern Part of Korea Peninsula. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 22, 287-306.
- Park, C.-S. and Lee, G.-R., 2018, Analysis on Fault-Related Landforms in the Gyeongju Area of the Yangsan Fault Valley. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 25, 17-30 (in Korean with English abstract).
- Park, J.-C., Kim, W., Chung, T.W., Baag, C.E. and Ree, J.-H., 2007, Focal mechanism of recent earthquakes in the Southern Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 169, 1103-1114.
- Pazzaglia, F.J., 2013, 9.22 Fluvial Terraces. In *Treatise on Geomorphology, Treatise on Geomorphology*, Shroder JF (ed), Academic Press San Diego, 379-412 p.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, *The Geology of Korea. Geology and Mining Institute of Korea*, 139 p.
- Rockwell, T.K., Lindvall, S., Dawson, T., Langridge, R., Lettis, W. and Klinger, Y., 2002, Lateral Offsets on Surveyed Cultural Features Resulting from the 1999 Izmit and Düzce Earthquakes, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 79-94.
- Scholz, C.H., 2002, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Scholz, C.H. and Lawler, T.M., 2004, Slip tapers at the tips of faults and earthquake ruptures. *Geophysical research letters*, 31, L21609, doi:10.1029/2004GL021030.
- Segall, P. and Pollard, D.D., 1980, Mechanics of Discontinuous Faults. *Journal of geophysical research*, 85, 4337-4350.
- Sieh, K., Jones, L., Hauksson, E., Hudnut, K., Eberhart-Phillips, D., Heaton, T. and Hough, S., 1993, Near-field investigations of the Landers earthquake sequence. *Science*, 60, 171-176.
- Simpson, G.D., Baldwin, J.N., Kelson, K.I. and Lettis, W.R., 1999, Late Holocene slip rate and earthquake history for the northern Calaveras fault at Welch Creek, eastern San Francisco Bay area, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 1250-1263.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Jung, S., Cho, H., Kim, H.G., Kim, J.S., Sohn, Y.K., 2013, Miocene crustal deformation, basin development, and tectonic implication in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 93-118 (in Korean with English abstract).
- Suggate, R.P., 1960, The interpretation of progressive fault displacement of flights of terraces. *New Zealand journal of geology and geophysics*, 3, 364-374.
- Walker, R. and Jackson, J., 2002, Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system. *Journal of Structural Geology*, 24, 1677-1698.
- Wallace, R.E., 1970, Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 2875-2890.

- Woo, J.-U., Rhie, J., Kim, S., Kang, T.-S., Kim, K.-H. and Kim, Y.H., 2019, The 2016 Gyeongju earthquake sequence revisited: aftershock interactions within a complex fault system. *Geophysical Journal International*, 217, 58-74.
- Vallage, A., Klinger, Y., Grandin, R. and Bhat, H.S., Pierrot-Deseilligny, M., 2015, Inelastic surface deformation during the 2013 Mw 7.7 Balochistan, Pakistan, earthquake. *Geology*, 43, 1079-1082. <http://dx.doi.org/10.1130/G37290.1>.
- Vallage, A., Klinger, Y., Lacassin, R., Delorme, A. and Pierrot-Deseilligny, M., 2016, Geological structures control on earthquake ruptures: the Mw7.7, 2013, Balochistan Earthquake, Pakistan. *Geophysical Research Letters*, 43, 10155-10163, doi:10.1002/2016GL070418.
- Yang, J.-S. and Lee, H.-K., 2014, Quaternary Fault Activity of the Yangsan Fault Zone in the Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. *The Korean society of economic and environmental Geology*, 47, 17-27 (in Korean with English abstract).
- Young, 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., 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.

Received : December 24, 2019

Revised : February 28, 2020

Accepted : April 2, 2020