

경주 활성리지역 활성단층의 구조와 변형특성

박현제 · 한래희[‡] · 구도희

경상대학교 지질학과 및 기초과학연구소

요 약

제4기 미고결 퇴적물을 변위시키는 활성단층은 기반암 내부, 기반암과 미고결 퇴적층 사이, 미고결 퇴적층 내부 등, 서로 다른 물질을 가로지르며 발달할 수 있다. 이번 연구에서는 활성단층이 변위시키는 물질이 위치별로 다름에 따라 구조 및 변형특성이 어떠한 차이를 보일 수 있는지를 이해하고자 경주시 외동을 활성리지역의 활성단층을 대상으로 노두규모에서 미세규모까지의 구조 관찰 및 물질분석을 실시하였다. 먼저, 그 단층이 기반암 내부에서 관찰되는 지점(1번 위치)에서는 기반암의 파쇄대 내에 점토광물이 풍부한 단층비지가 나타나며 다시 그 내부에 10-20 μm 폭의 주미끌림대가 발달한다. 다음으로, 기반암과 미고결 퇴적물 사이에 단층이 발달하는 곳(2번 위치)의 경우, 기반암에서는 약한 파쇄엽리를 보이는 각력암으로 이루어진 원파쇄대(protocataclasis zone)가, 미고결 퇴적물에서는 풍화된 역의 변형과 함께 일부 광물의 정향배열이 확인된다. 단층이 미고결 퇴적물 내부에서 관찰되는 지점(3번 위치)에서는 2번 위치의 퇴적물에서처럼 풍화된 역과 일부 광물의 정향배열이 관찰되지만 그러한 구조는 약하게 나타나다가 더 이상 상부까지 이어지지 않고 퇴적층 내에서 종결된다. 이상의 관찰결과는 상대적으로 깊은 위치에서부터 발달한 기반암 내 미끌림대에서는 점토광물 입자경계를 따른 마찰미끌림이나 암석의 파쇄 및 암편의 파쇄유동, 그리고 얕은 깊이의 미고결 사력질 퇴적물에서는 입자유동의 작동에 의해 단층 물질이 변형됨을 지시한다. 단층미끌림의 전파와 관련하여, 기반암 내에서는 점토질 단층비지의 주미끌림대를 따라 단층미끌림이 국지화되는 반면, 미고결 사력질 퇴적물을 거치면서는 변형이 보다 분산된 방식으로 발생하다가 결국 종결되었을 가능성을 시사한다. 이러한 측면은 단층에 의한 퇴적물의 횡절 여부와 퇴적물 절대연대에 기반한 활성단층 활동시기 추정 시 고려되어야 할 부분이다.

주요어: 활성리지역, 활성단층, 미구조, 단층미끌림, 퇴적물 변형

Hyeon-Je Park, Raehee Han and Dohee Gu, 2020, Structures and deformation characteristics of the active fault, Hwalseongri area, Gyeongju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 6, p. 703-726

ABSTRACT: The active fault that displaces the unconsolidated Quaternary sediments can develop across different materials, such as inside bedrock, between bedrock and unconsolidated sediments, and inside unconsolidated sediments. We conducted structural observation and material analysis on the active fault, Hwalseongri area, Gyeongju, to understand how the structure and deformation characteristics can vary depending on the location along the fault. At the place where the active fault is observed inside the bedrock (Location 1), fault gouge rich in clay minerals occurs in the bedrock's cataclasis zone, and a 10-20 μm -wide principal slip zone develops inside it. Next, where the fault develops between the bedrock and the Quaternary sediment (Location 2), a protocatclasis zone consisting of breccia showing weak cataclastic foliation is observed in the bedrock. Both deformed weathered gravels and the preferred orientation of some minerals are identified in the Quaternary sediment. At Location 3, where the fault is observed inside the Quaternary sediment, the weathered gravels and the preferred orientation of minerals are identified, as in the sediment at Location 2. However, such structures appear weak and do not extend to the top and end up within the sediment. The above observations indicate that the fault materials are deformed by frictional sliding (e.g., along the clay minerals) or by cataclasis and cataclastic flow in the bedrock's slip zone at depths and that unconsolidated sediments are deformed by granular flow at the very shallow depth. Fault slip is localized along the principal slip zone of the clay-rich gouge in the bedrock. In contrast, shear deformation may occur in a more distributed manner, while passing through the unconsolidated sands and gravels, and eventually terminated. This aspect should be considered when estimating the timing of active fault movement based on sediments' absolute age and whether the fault crosscuts the sediments.

[‡] Corresponding author: +82-55-772-1471, E-mail: raeheehan@gnu.ac.kr

Key words: Hwalseongri area, active faults, microstructures, fault slip, sediment deformation

(Hyeon-Je Park, Raehee Han and Dohee Gu, Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea)

1. 서론

한반도 남동부의 주요 지질구조인 양산단층과 울산단층을 따라 활성단층이 처음으로 보고된 이후로 (Okada *et al.*, 1994, 1998; Kyung, 1997), 지금까지 약 60여개의 활성단층이 추가적으로 발견되었다(Kim, Y.-S. *et al.*, 2011; Kim, M.-C. *et al.*, 2016). 활성단층에 대한 대부분의 지질학적, 고지진학적 연구는 제4기 퇴적물을 변위시킨 단층을 대상으로 한 상세한 야외 관찰을 기반으로 하며(Yeats *et al.*, 1997; McCalpin, 2009), 국내에서 진행된 그간의 활성단층 연구들은 지질구조적(Chang, 2001; Kee *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2015), 지구물리학적(Kim and Kim, 2002; Kim *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2014), 광물학적(Chang and Chae, 2004; Chang *et al.*, 2005; Jeong and Cheong, 2005), 지형학적(Yoon and Hwang, 1999; Lee *et al.*, 2018; Kim, N. *et al.*, 2020; Kim, T. *et al.*, 2020), 활동시기 연대분석(Ree *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2015; Kim and Lee, 2017) 측면으로 수행되어 왔다. 이러한 연구를 통해 얻어진 결과는 활성단층의 활동 특성, 즉 미끌림 횟수, 변위량, 재활주기, 발생가능한 지진의 규모 등을 유추하는데 활용되었다(Kyung, 2010; Choi *et al.*, 2014; Kim, Y.-S. *et al.*, 2020).

한편, 최근 들어 국내 단층을 대상으로 단층물질 및 변형 미구조의 특성에 대한 연구(Kim, C.-M. *et al.*, 2016, 2017, 2019; Kang *et al.*, 2017, 2019; Song *et al.*, 2017; Gu, 2020; Gwon *et al.*, 2020)와 단층물질과 단층미끌림의 역학적 거동간의 관계를 고찰하는 연구(Woo *et al.*, 2015, 2016; Han *et al.*, 2019; Woo and Han, 2019)가 수행되었다. 그러나, 이와 같은 방식의 연구는 국내 활성단층을 대상으로는 이제 막 적용되기 시작하는 단계이다(Han *et al.*, 2020; Kim, C.-M. *et al.*, 2020). 이러한 접근법은 활성단층과 관련한 많은 문제들 중 특히 활성단층의 미끌림 방식(지진성 대 비지진성), 주미끌림대의 식별 및 특성화, 동지진성(coseismic) 단층대프로세스(지진 발생 시 단층 미끌림대에서 일어나는 물리적, 화학적 프

로세스) 작동에 따른 특징적인 물질 및 미구조의 발달, 미고결 퇴적물에서의 단층미끌림의 전파(propagation) 및 종결(termination), 지표 근처에서의 단층의 역학적 거동, 미고결 퇴적물의 변형 특성, 단층미끌림 연대추정 등에서 유용할 수 있다.

본 논문에서는 앞서 언급한 단층물질 및 변형 미구조의 특성화에 기반한 연구법을 경주 활성리지역 활성단층에 적용한 결과를 보고한다. 제4기 퇴적물을 변위시키는 활성단층은 기반암 내부, 기반암과 미고결 퇴적물 사이 및 미고결 퇴적물 내부 등, 서로 다른 물질을 가로지르며 발달할 수 있다. 제4기 미고결 퇴적물을 절단하는 단층에서의 변형은 지표 근처에서의 매우 낮은 수직응력(또는 평균응력), 미고결 퇴적물이라는 물질적 특성(입자 운동의 자유도), 상대적으로 작은 단층 변위량 등을 고려할 때 기반암 내 성숙한 단층에서의 그것과는 상당한 차이를 보일 수 있을 것이므로, 본 연구에서는 활성단층이 기반암을 지나는 부분과 제4기 미고결 퇴적물을 절단하는 부분에서 어떠한 구조 및 변형특성의 차이가 존재하는지를 살펴보았다. 아울러, 자세한 퇴적물 미구조 관찰을 통하여 단층미끌림이 지표파열 발생을 동반하지 않고 퇴적물 내부에서 종결되는지를 검토하였다.

2. 활성리지역 활성단층

2.1 개요

울산단층을 따라 나타나는 다수의 활성단층들은 특히 울산단층의 동편에 집중적으로 분포한다(그림 1a; Chang, 2001). 그것들은 대부분 역단층으로 발달하고 있는데 이는 기존의 단층이 제4기에 한반도 남동부에 가해진 동-서 방향의 압축응력 하에서 재활한 것으로 해석된다(Chang, 2001). 더불어, 그러한 응력조건에서 울산단층의 동쪽지괴가 서쪽에 비해 더 융기된 것으로 알려져 있다(Okada *et al.*, 1998; Chang, 2001; Ryoo *et al.*, 2004). 현재까지 알려진 울산단층대의 최후기 운동시기는 개곡1지점

에서 확인된 약 3,000년 전이다(Inoue and Choi, 2006).

연구대상 단층인 활성리지역 활성단층은 중부 울산단층의 동편에 위치하고 있으며, 북쪽으로는 탑골(Ryoo *et al.*, 2004), 신계(Choi *et al.*, 2012), 진티(Cho *et al.*, 2014), 진현(Choi *et al.*, 2014) 감산사(Chang, 2001)단층이, 남쪽으로는 말방(Choi *et al.*, 2002), 개곡(Ryoo, 2009), 입실단층이 위치한다(그림 1b). 단층 노두는 경주시 외동읍 활성리의 멀반못에서 동쪽으로 약 600 m 지점에 위치하며(N 35 45' 19.3", E 129 20' 10.2"), Ryoo *et al.* (2001)에 의해 최초로 보고된 후, 울산단층 중부지역의 지형적 특성을 연구하기 위해 실시된 트렌치(Kim, T. *et al.*, 2020)로 최근에 다시 드러난 곳이다. 본 논문에서 우리는 이 단층을 '활성리지역 활성단층'이라고 명명하는데, 이는 이 단층이 울산단층의 한 지점(지역)에 해당하는 단층일 수 있다는 연구자의 의견을 고려한 것이지 그것이 개별단층인지 울산단층의 일부인지에 대한 우리의 해석을 내포하지는 않으며, 이 단층이 원래는 활성리단층(Ryoo *et al.*, 2004)으로 명명되었던 것이라는 점을 분명히 밝혀둔다. 연구지역 일대에는 후기 백악기 내지 제3기초의 불국사화강암이 사력질의 미고결 퇴적물과 접촉하고 있는데, 그 퇴적물의 연대는 제4기로 추정된 바 있으나(Yoon and Hwang, 2004), 절대연령에 근거한 것은 아니어서 확실치는 않다. 상부의 미고결 퇴적물은 이들을 부정합으로 피복하

고 있는데(그림 1c; Ryoo *et al.*, 2004; Yoon and Hwang, 2004), 그 퇴적시기는 홀로세로 알려져 왔으며(Chwae *et al.*, 2000), 단층에 의해 교란되지 않은 최상부의 자갈층에 대한 ¹⁴C연대측정으로부터 약 5,800년의 퇴적연대가 보고되었다(Kim, T. *et al.*, 2020).

2.2 노두규모 특성

단층 노두에서는 하부 미고결 퇴적물(lower unconsolidated sediment; LUS1-LUS3)과 분쇄화강암(pulverized granite; PG1, PG2)이 서편에서 동편까지 반복적으로 나타나며, PG2와 LUS3의 경계에는 규장질 암맥(felsic dike; FD)과 중성질 암맥(intermediate dike; ID)이 존재한다(그림 2a). 하부 미고결 퇴적물과 분쇄화강암은 위쪽 경계에서 수십 cm의 거리를 포함한 사력질 퇴적물로 주로 구성된 상부 미고결 퇴적물(upper unconsolidated sediment; UUS)과 부정합으로 접촉하고 있다(그림 2a). Ryoo *et al.* (2001)은 이 단층 주변의 화강암은 외관상 제4기 퇴적물로 오인될 수 있을 정도로 풍화가 매우 심하게 진행된 상태라고 기술하였다. 이번에 새로 정비된 단층 노두에서도 이 화강암은 매우 쉽게 부서지는 상태로 나타나는데, 이러한 연약함은 단순히 풍화의 결과라기보다는 분쇄화작용(pulverization)의 영향이 큰 것으로 생각된다. 노두에서 단층은 여러 개의 단층(F1-F7; 그림 2a)으로 구성된 하나의 단층대로서 나타나며, 역단층성 경사이동을 보이거나 그

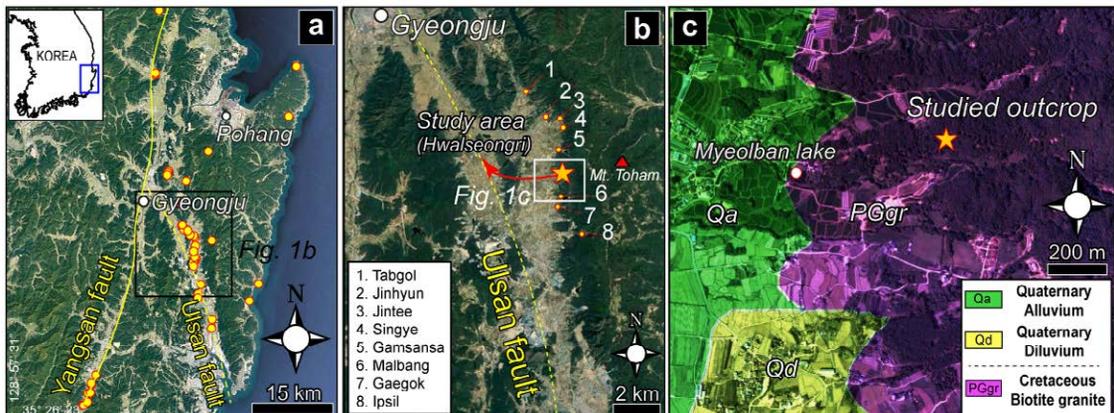


Fig. 1. (a) Active faults (solid yellow circles) along the Yangsan and Ulsan faults in SE Korea (modified from Kim, C.-M. *et al.*, 2020), (b) Active faults in the central part of the Ulsan fault. The study area (Hwalseongri, Gyeongju) is indicated by the solid yellow star. (c) Geological map of the study area where the active fault outcrop (solid yellow star) is located.

것들 중 일부는 주향이동도 경험한 것으로 알려져 있는데, F1은 역단층 운동과 좌수향 운동을 모두 겪은 것으로(Ryoo *et al.*, 2004), F4는 좌수향 운동을, F6은 우수향 운동을 겪은 것으로(Kang, 2019), 그리고 상부 미고결 퇴적물을 절단하는 F7은 역단층 운동을 경험한 것으로 보고되었다(Kim, T. *et al.*, 2020). 단층들의 자세는 $N15^{\circ}-50^{\circ}W/40^{\circ}-80^{\circ}NE$ 의 범위로 측정된다. 각 단층에서 관찰되는 단층암의 폭은 0.5 cm 에서 최대 10 cm 에 이른다. 본 연구에서는 노두에서 관찰되는 단층들 중 유일하게 상부 미고결 퇴적물을 변위시키고 단층암의 폭이 가장 두꺼운 F7을 집중적으로 관찰하였다. 우리가 지금부터 활성리지역 활성단층(또는 간략히 단층)이라고 언급하는 것은 바로 이 단층(F7)을 의미한다(그림 2b). 상부 미고결 퇴적물이 시간이 지나면서 자연적으로 붕괴함에 따라 서로 다른 시점에서 촬영된 노두 사진인 그림 2a와 2b가 다소 다른 모습을 보여주는데, 우리는 노두가 그림 2b에서처럼 존재할 때 집중적인 관찰을

실시하였다. 단층의 길보기 변위는 약 80 cm 이고, 자세는 $N40^{\circ}W/50^{\circ}NE$ 로 상부로 가면서 다소 변화한다. 본 연구에서는 단층을 따라 하부에서 상부로 가며 서로 다른 세 위치, 즉 기반암(분쇄화강암) 내부에 단층이 발달하는 곳(1번 위치), 기반암이 상부 미고결 퇴적물을 충상하는 곳(2번 위치), 그리고 상부 미고결 퇴적물 내부를 가로지르며 단층이 발달하는 곳(3번 위치)에서 단층의 물질, 구조 및 변형특성을 조사하였다(그림 2b).

3. 구조관찰 및 물질분석용 시료 준비

노두규모의 관찰을 실시한 후, 연구대상 단층의 세 위치에서는 정향된 단층암 벌크 시료를, 모암에서는 비정향 벌크시료를 획득하였다. 시료는 실내에서 하루 이상 실온 건조한 후 저점도 에폭시를 이용하여 끝면을 보강하였다. 단층암 시료의 경우, 야외에서 정확한 단층 조선을 관찰하지 못해, 역단층운

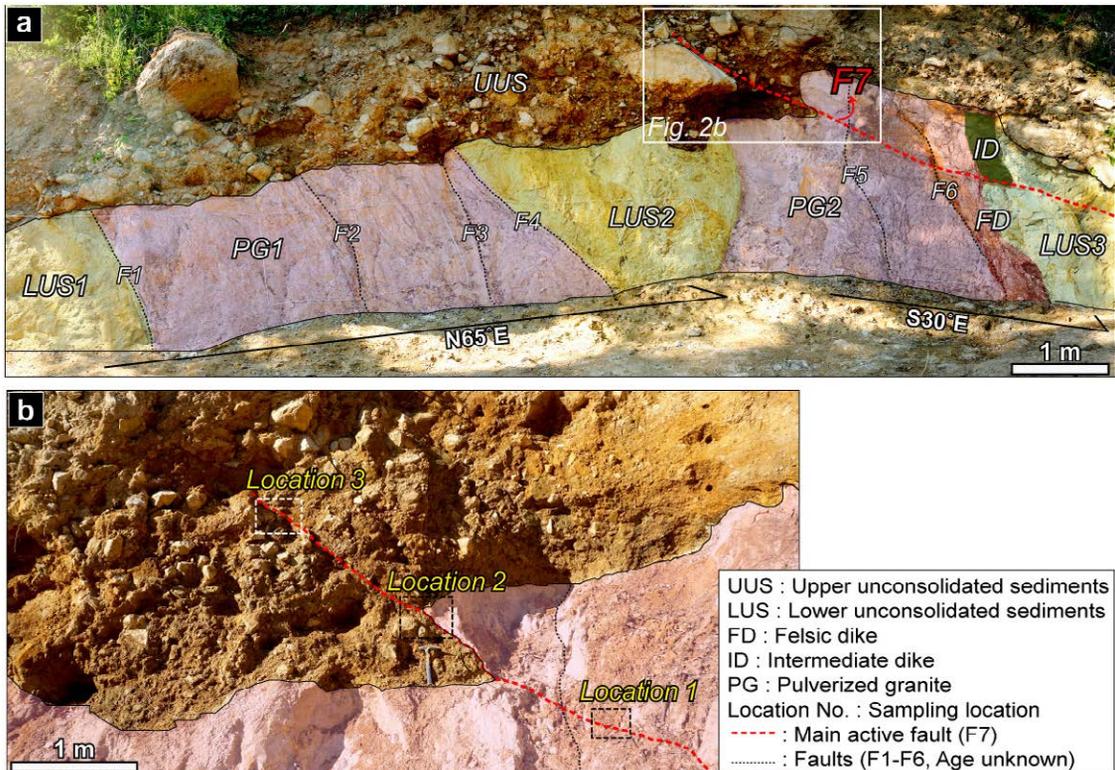


Fig. 2. (a) Outcrop overview of the active fault, Hwalseongri area. (b) Photograph showing the boxed area in (a), where three sampling locations along the main active fault (F7) are displayed (Locations 1-3).

동이 우세하다는 기존연구(Ryoo *et al.*, 2004; Kim, T. *et al.*, 2020)에 근거하여, 단층면에 수직하고 경사 방향에 나란하게 절단하였다. 절단된 시료를 다시 건조시킨 후 저점도 에폭시를 이용해 추가적으로 보강하였고, 슬랩 및 박편 제작 중 시료가 수분에 의해 훼손되는 것을 방지하기 위해 방전가공유와 연마제를 섞은 현탁액을 사용하여 연마하였다. 제작된 시료는 스캐닝하여 모암과 단층암에 대한 고해상도 이미지를 얻었다.

기본적인 암석 조직 및 변형 미구조 관찰은 광학 현미경(Olympus BX53)을 사용하였으며, 보다 상세한 관찰은 경상대학교 공동실험실습관의 에너지 분산형 분광분석기(energy dispersive X-ray spectroscopy; EDS; Oxford X-Max 50)가 장착된 전계 방사 전자현미분석기(field emission electron probe micro-analyzer; FE-EPMA; JEOL JXA-8530F PLUS)를 활용하였다. 분석은 가속전압 15 kV, 빔 전류 10 nA 의 조건하에서 실시하였다. 상세한 미구조 관찰을 토대로 분대한 단층암의 위치별 광물조성을 확인하기 위하여 분말시료의 X-선 회절분석을 실시하였다. 분말시료 준비를 위해 일차적으로 마이크로 드릴(micro-drill; FBS 240/E, Proxxon)을 이용하여 슬랩의 서로 다른 위치에서 물질을 긁어 냈다(Kim, C.-M. *et al.*, 2017). 그 물질은 아게이트를 이용하여 10분동안 분쇄했고, 미고결 퇴적물의 경우 그 속에 포함된 역들의 영향을 최소화 하기 위해 125 μm 체를 이용하여 거른 후 분쇄하였다. 이후, 약 24시간 동안 50°C 의 오븐에서 건조시켰다. 준비된 분말시료의 분석은 경상대학교 공동실험실습관의 X-선 회절 분석기(XRD; Bruker D8 Advance A25)로 수행되었고, 40 kV, 40 mA, 70° (2 θ) 구간, 주사간격 0.02°, 스텝당 주사시간 0.2 s, 니켈필터를 이용한 구리 파장의 X-선 조건하에서 실시하였다. 이후 Bruker AXS Diffrac Eva 프로그램을 이용하여 광물 정성분석을 실시하였다.

4. 모암의 중규모 및 미세규모 특성

4.1 분쇄화강암

단층의 주변에 분포하는 화강암은 그 내부에 매우 많은 미소단열을 포함하는 분쇄화강암(pulverized granite)의 형태로 나타난다(그림 3). 분쇄화작용(pulverization)

은 지진성 단층 파열 시 일시적으로 작용하는 동적 응력조건 하에서 단층 주변의 암석 내에 주로 확장 미소단열들(extensional microfractures)이 다수 형성되어 매우 작은 크기의 입자들로 파쇄되는 과정을 말하며, 극심한 파쇄에도 불구하고 분쇄암은 암석의 일차적인 조직을 보존하는 경우가 많다(Dor *et al.*, 2006; Mitchell *et al.*, 2011; Fondriest *et al.*, 2015; Sullivan and Peterman, 2017). 모암의 분쇄화작용에 대한 부분은 별도의 연구로서 진행 중이므로 추후 다른 논문을 통해 다룰 수 있을 것으로 생각되며, 본 논문에서는 연구지역의 분쇄화강암의 중-미세규모 관찰결과를 간략히 기술한다.

4.1.1 분쇄화강암1(PG1)

PG1은 서쪽과 동쪽경계에서 각각 LUS1과 LUS2와 단층접촉 하며, 약 4-5 m 폭으로 나타나고, 내부에는 2조의 단층이 발달한다(그림 2a). PG1은 유백색을 띠며, 손가락으로 약간의 힘을 쥐도 매우 쉽게 으스러진다(그림 3a). 슬랩에서는 다수의 중규모 단열들이 관찰된다(그림 3b). PG1은 대부분 0.5-2 mm 크기의 석영과 장석 입자로 구성되어 있으며(그림 3c), 소량의 흑운모를 포함한다. 석영과 장석 입자들은 무수히 많은 미소단열에 의해 파쇄되어 있는 모습으로 나타나며, 각 입자의 파쇄된 조각들이 동시에 소광하고, 일차적인 화강암조직은 대체로 유지하고 있다(그림 3c). 대부분의 미소단열들은 전단변위를 보이지 않는 확장단열이며, 이것들은 입자 내부에서 혹은, 입자들을 관통하며 발달하고, 겉보기에 약한 선호방위(preferred orientation)를 보인다(그림 3c). 이 미소단열들은 대부분 열린 상태로 나타나고, 재결정(recrystallization)되거나 유체로부터 침전된 광물에 의해 봉합된 단열은 잘 관찰되지 않는다(그림 3c). 이상의 분쇄화강암의 특징은 전형적인 분쇄암의 특징과 일치한다(Mitchell *et al.*, 2011)

4.1.2 분쇄화강암2(PG2)

PG2는 약 2-3 m 폭으로 나타나며, 서쪽과 동쪽경계에서 각각 LUS2, FD와 접하고 있다(그림 2a). 그 내부에는 2조의 단층이 발달하는데, 그 중 하나는 본 논문에서 집중적으로 관찰된 F7이다(그림 2b). PG2는 유백색 내지 분홍색을 띠며 PG1과 마찬가지로 약간의 힘만 가해도 매우 쉽게 으스러진다(그림 3d).

PG2는 F7에 인접할수록 더 심하게 파쇄되어 있고, 단층 주변에 다수의 변형띠가 발달한다(그림 3d). 변형띠들은 짙은 분홍색을 띠며 약 1 cm 이내의 폭으로 나타나고(그림 3e), 불규칙한 경계를 가지고 있어 모암과 확실히 구분된다(그림 3f). PG2의 미구조적 특징은 대부분 PG1과 같지만, 변형띠에서 약 1 cm

떨어진 곳에서는 PG1에 비해 더 파쇄되어 있다(그림 3g). 변형띠에 가까워질수록 파쇄는 더 심해지며, 변형띠와 인접한 흑운모는 휘어지거나 꺾인(banded or kinked) 형태로 나타난다(그림 3h). 변형띠 내부에서 일차 화강암 조직은 관찰되지 않으며, 대부분의 암편들은 최대 1 mm 크기의 석영과 장석이고,

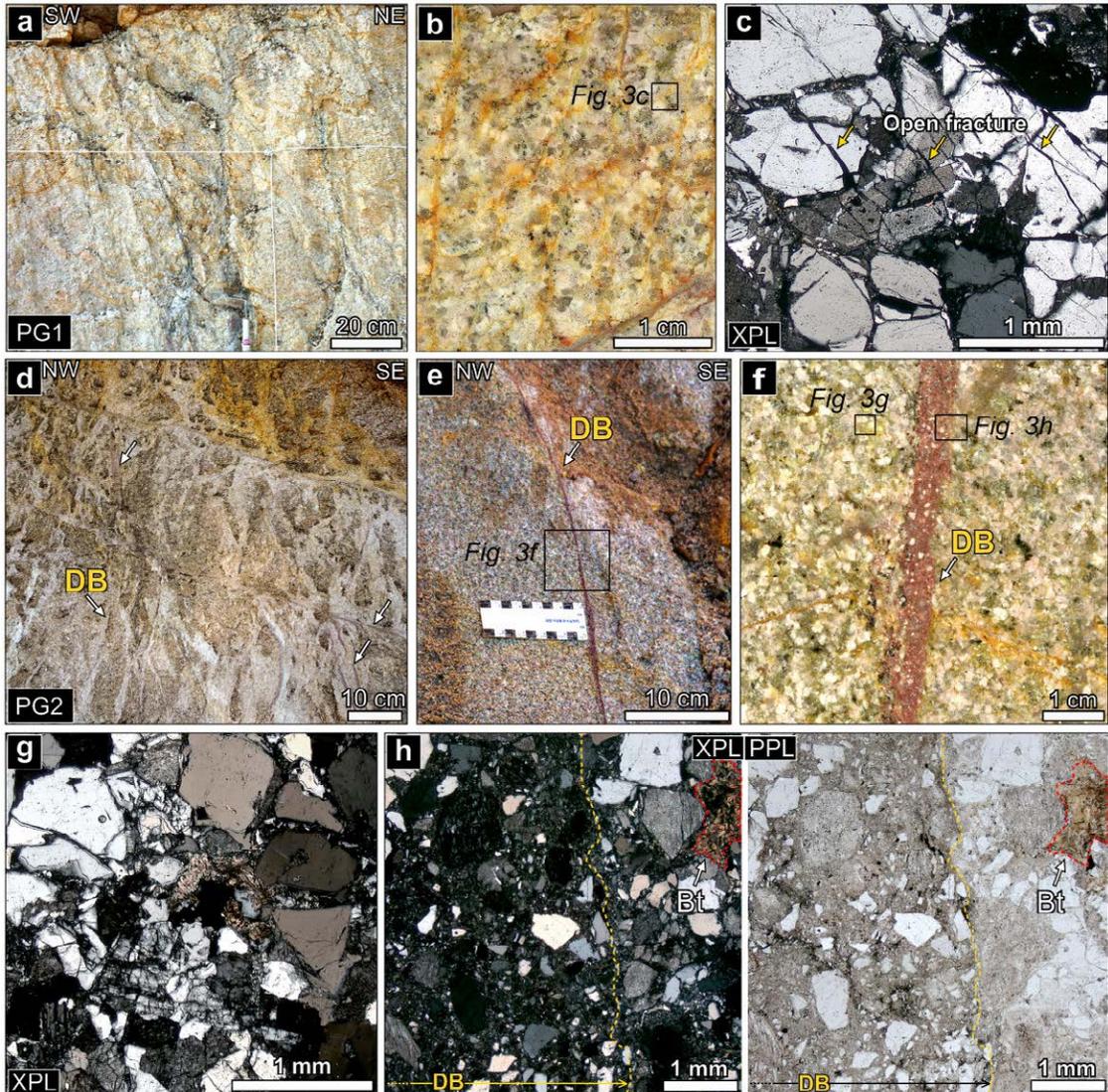


Fig. 3. (a) Outcrop photograph of the pulverized granite 1 (PG1). It is highly fractured and easily disaggregated by hand. (b) Scanned slab image of the PG1. (c) Photomicrograph showing open microfractures developed in the PG1. (d) In the pulverized granite 2 (PG2), several deformation bands (DBs) are observed. (e) Close-up view of a DB in the PG2. (f) Scanned slab image showing ~1-cm thick pinkish DB. (g) Photomicrograph of the area near the DB showing more intense damage than in the PG1 (see (c) for comparison). (h) Photomicrograph of the boundary between the PG2 and DB. Primary granitic texture and pulverization microstructure have been destroyed by cataclasis, so the DB does not show them anymore. XPL: crossed-polarized light; PPL: plane-polarized light.

기질부는 파쇄된 입자와 점토광물로 구성된다(그림 3h).

4.2 하부 미고결 퇴적물

4.2.1 하부 미고결 퇴적물1(LUS1)

LUS1은 노두의 가장 서편에서 약 2-3 m 폭으로 나타나며 분쇄화강암1(PG1)과 단층으로 접촉하고

있는 미고결 퇴적물로(그림 2a), 적갈색의 사력질 기질부에 수 cm 크기의 아각형 내지 아원형의 역들을 포함한다(그림 4a). 그 역들은 화강암역뿐 아니라 암 맥에서 기원된 어두운 색의 역으로 구성된다(그림 4a, 4b). 어두운 색 역은 다량의 K-장석과 소량의 석영 및 불투명광물로 이루어져 있다. LUS1의 기질부는 대체로 각지고, 분급이 불량한 0.1-2 mm 크기의

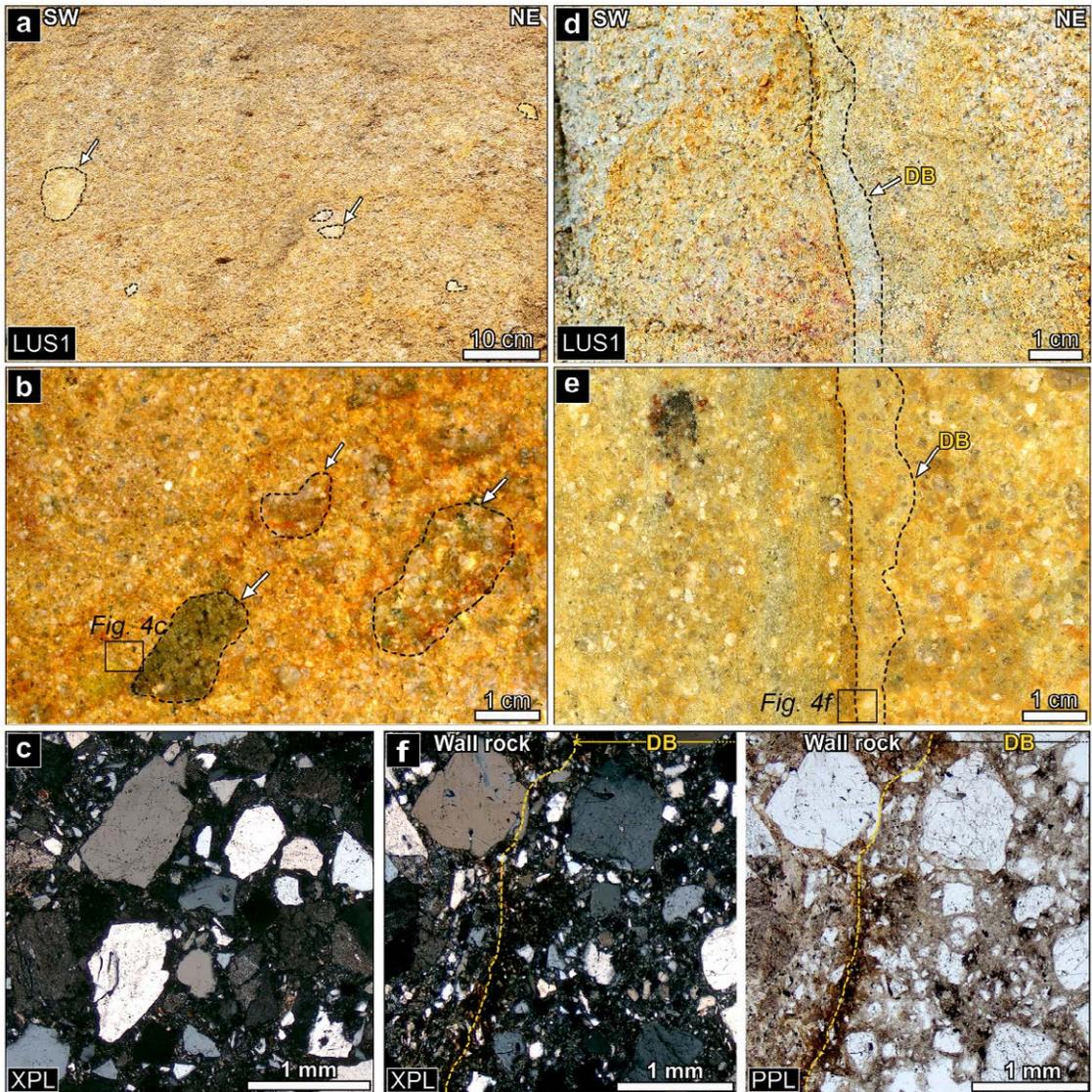


Fig. 4. (a) Outcrop photograph of the lower unconsolidated sediment 1 (LUS1). (b) Scanned slab image of the LUS1. White arrows indicate gravels. (c) Photomicrograph showing the matrix part of the LUS1. (d) Close-up view of a deformation band (DB). (e) Scanned slab image of ~1-cm thick DB. (f) The boundary between the wall rock and DB. The DB consists of smaller grains than in the wall rock. XPL: crossed-polarized light; PPL: plane-polarized light.

석영과 장석 입자들로 이루어져 있다(그림 4c). 상대적으로 분급이 양호한 구역에서는 모암에 비해 더 밝은 색을 띠는 약 1 cm 폭의 변형띠(deformation bands)가 관찰된다(그림 4d). 변형띠와 모암의 서쪽 경계는 침전된 철 산화물/수산화물에 의해 뚜렷하게 구분되나, 동쪽경계는 불분명하며, 점진적으로 모암과 이어진다(그림 4e). 변형띠에 포함된 암편의 크기는 최대 1 mm 정도이고, 기질부는 주로 0.1-0.5 mm 크기의 석영과 장석 입자로 구성된다(그림 4f).

4.2.2 하부 미고결 퇴적물2(LUS2)

LUS2는 분쇄화강암 1(PG1)과 분쇄화강암2(PG2) 사이에서 약 3-4 m 폭으로 나타나며, PG1과는 단층 접촉 하지만, PG2와의 접촉관계는 명확하게 식별되지 않았다(그림 2a). LUS2는 LUS1에 비해서 역의 함량이 적고 전체적으로 분급이 양호한 적갈색 내지

밝은 갈색의 사질 기질부로 구성된다(그림 5a, 5b). LUS2의 기질부 입자들은 LUS1에 비해 상대적으로 양호한 분급을 보이고, 1 mm 이하 크기의 각진 석영과 장석이 대부분이다(그림 5c). 일부 석영 입자 내부에서는 단열이 관찰된다(그림 5c). LUS2에서도 변형띠가 관찰되는데 모암에 비해 더 밝은 색이며 약 0.5 cm 폭으로 나타난다(그림 5a, 5d). 변형띠와 모암의 경계는 거기를 따라 침전된 철 산화물/수산화물에 의해 잘 식별된다(그림 5d). 변형띠 내 암편은 최대 1 mm 크기이며, 기질부는 주로 0.1-0.5 mm 크기의 파쇄된 석영과 장석 입자들로 이루어져 있다(그림 5e).

4.2.3 하부 미고결 퇴적물3(LUS3)

LUS3은 PG2의 동편에 있는 규장질 암맥(felsic dike; FD)과 접하고 있으며, 노두의 가장 동쪽에 나

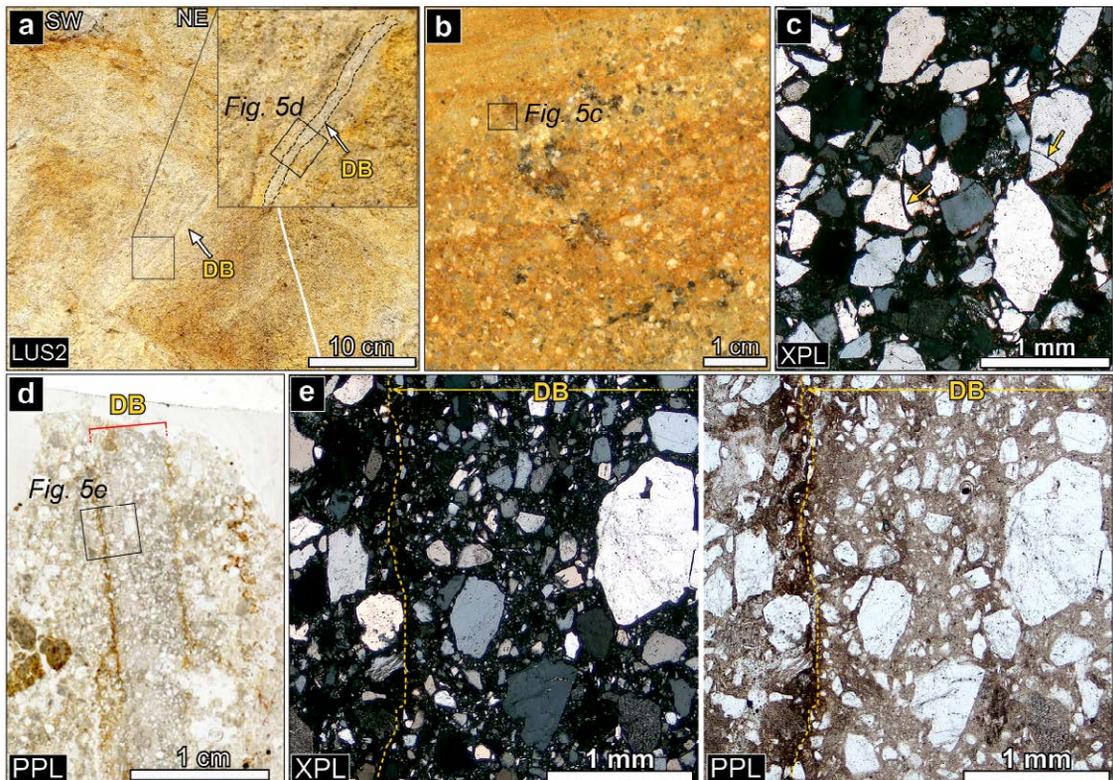


Fig. 5. (a) Outcrop photograph of the lower unconsolidated sediment 2 (LUS2) and close-up view of a deformation band (DB) (inset). (b) Scanned slab image of the LUS2. (c) Photomicrograph showing the matrix part of the LUS2. Yellow arrows indicate intragranular fractures. (d) Scanned thin-section image showing the brown-colored Fe-oxides/hydroxides precipitated along the DB boundaries. (e) Close-up view of the boxed area in (d) showing the boundary between the wall rock and DB. XPL: crossed-polarized light; PPL: plane-polarized light.

타난다(그림 2). LUS3은 다른 미고결 퇴적물들(LUS1, LUS2)과 다르게 백색에 가까운 밝은 색을 띠며, 내부에 회색의 이질 물질을 포함한다(그림 6a, 6b). 이 퇴적물은 분급이 비교적 양호하고 각진 1 mm 이하 크기의 석영, 장석 입자들로 이루어져 있다(그림 6c). 슬랩에서 약 0.5 cm 이내의 폭을 가지는 변형띠가 확인되는데(그림 6b), 그 내부의 암편은 최대 1 mm 크기이며, 기질부는 0.1-0.5 mm 크기의 파쇄된 석영과 장석 입자로 구성된다(그림 6d).

5. 단층의 위치별 미구조와 물질

단층의 위치별로 변위되는 물질이 다름에 따라 구조 및 변형특성에서 어떠한 차이가 나타날 수 있는지를 이해하고자, 하부에서 상부로 가면서 (1) 기반암(분쇄화강암) 내부에 단층이 발달하는 곳(1번 위치), (2) 기반암이 상부 미고결 퇴적물을 충상하는 곳(2번 위치), 그리고 (3) 상부 미고결 퇴적물 내에 단

층이 발달하는 곳(3번 위치)에서 채취한 시료에 대하여 물질, 구조 및 변형특성을 연구하였다(그림 2b).

5.1 기반암 내부에 단층이 발달하는 곳(1번 위치)

이 위치에서는 단층비지가 약 2-10 cm의 일정하지 않은 폭으로 나타나며 상부로 갈수록 얇아지다가 2번 위치와 연결된다(그림 2b). 단층의 자세는 N30°-50°W/55°-80°NE로 상부로 가며 다소 변하고, 단층비지와 모암의 하반경계는 날카로운 반면 상반경계는 굴곡져 있다(그림 7a).

갈색-흰색 단층비지(brown and white gouge; BWG)는 갈색과 흰색을 띠는 점토질 물질이 교호하며 그 사이에 검은색 물질이 끼어 있는 형태로, 폭은 약 5 cm 이다(그림 7b). BWG 내부에 약 2 cm 크기의 암편(CI)이 포함되어 있다 (그림 7b). BWG에서 1-2 cm 이상 떨어진 상반 모암에는 입자크기가 감소된 원파쇄대(protocataclasis zone, PCZ)가 나타나고, BWG쪽으로 가면서 변형된 모암의 입자크기는

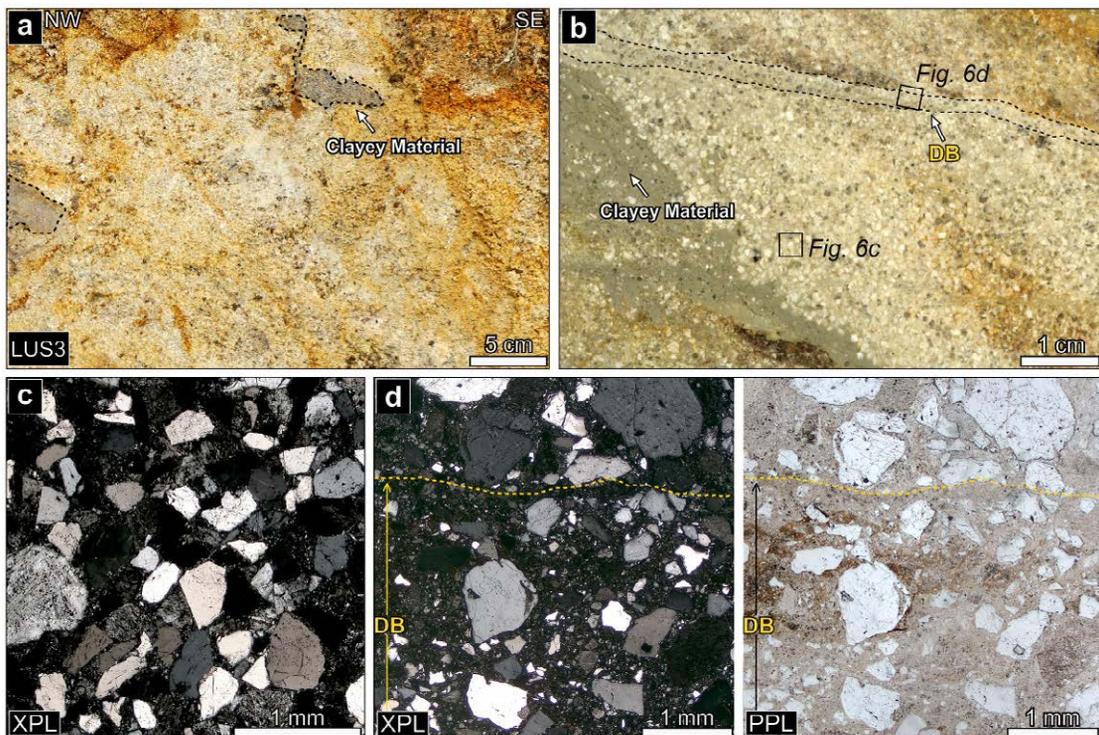


Fig. 6. (a) Close-up outcrop photograph of the lower unconsolidated sediment 3 (LUS3). Grey clayey materials are observed in the LUS3. (b) Slab image of the LUS3 showing a DB that is not identified at the outcrop scale. (c) Photomicrograph of the matrix of the LUS3. (d) The boundary between the wall rock and DB. Note that the DB is composed of smaller grains than in the wall rock. XPL: crossed-polarized light; PPL: plane-polarized light.

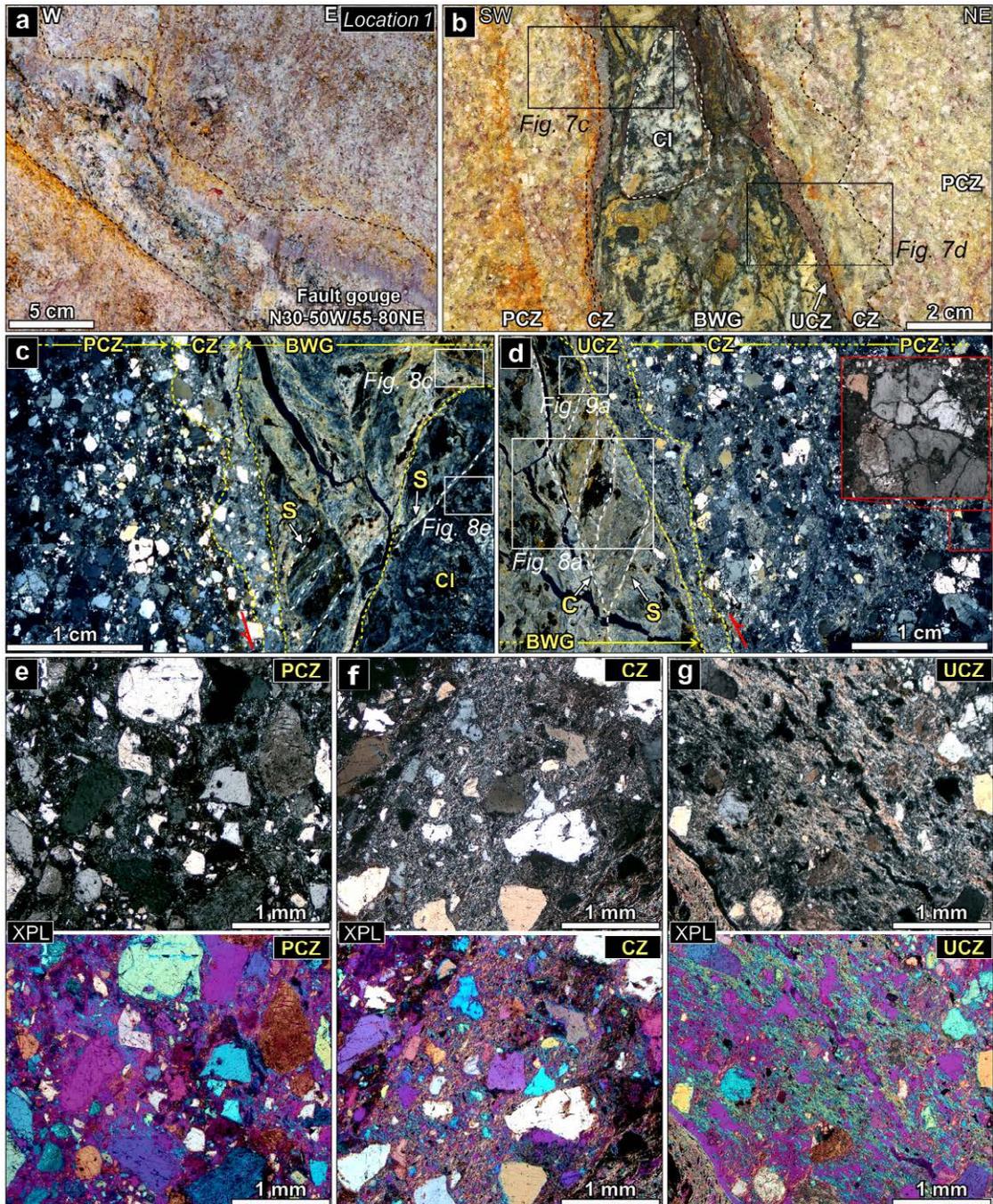


Fig. 7. (a) Outcrop photograph and (b) scanned slab image of the rock from Location 1 (see Fig. 2b for the location). (c), (d) Scanned images of thin-sections taken from the boxed areas in Fig. 7b (XPL). (e)-(g) Photomicrographs of the protocataclasis zone (PCZ), cataclasis zone (CZ), and ultracataclasis zone (UCZ). Note that the increase in deformation intensity (decrease in grain size) from the PCZ via CZ to UCZ. The UCZ shows the strongest preferred orientation of clay minerals and most notable grain size reduction than the others (upper images: XPL; lower images: XPL, gypsum plate inserted). BWG: brown-white gouge; Cl: clast in BWG; S and C: S-foliation and C-foliation, respectively; XPL: crossed-polarized light.

더욱 감소하여 약 1-2 cm 폭의 유백색 파쇄대(cataclasis zone, CZ)가 발달한다. BWG와 바로 접하는 곳에서는 붉은색 점토질 물질로 이루어진 약 0.5 cm 폭의 초파쇄대(ultracataclasis zone, UCZ)가 관찰된다(그림 7b). 하반 모암에서도 상반에서와 마찬가지로 원파쇄대(PCZ)가 나타나며, BWG와 인접한 곳에서는 회색을 띠면서 약 0.5 cm 폭을 갖는 CZ가 발달한다. 그러나, BWG와의 경계에서 UCZ는 관찰되지 않는다(그림 7b).

각 영역에서의 미구조를 비교해보면 BWG에 가까운 영역일수록 입자 크기는 감소하고 점토광물의 정향배열은 더 강해짐이 확인된다(그림 7c, 7d). PCZ의 암편들은 0.1-1 mm 크기의 석영 및 장석으로 구성되어 있고, 분쇄화강암 내 파쇄된 입자보다 크기가 작다(그림 7e; 그림 6c와 비교). PCZ의 기질부는 파쇄된 입자와 점토광물이 채우고 있으며, 점토광물의 정향배열은 발달하지 않는다(그림 7e). 국부적으로 분쇄화강암 조직이 보존된 영역이 존재한다(그림

7d, inset). PCZ와 CZ의 경계는 상반에서는 확실치 않은 반면, 하반에서는 식별이 가능하다(그림 7c, 7d). CZ의 암편들의 크기는 0.1-1 mm이며, 기질부의 점토광물의 양이 PCZ에 비해서 더 많고, 점토광물들은 정향배열을 보인다(그림 7f). UCZ는 CZ와 PCZ에 비해 뚜렷한 입자 크기 감소를 보인다. 암편의 크기는 최대 0.5 mm이며 분쇄화강암 조직을 유지하는 것은 관찰하기 힘들다(그림 7g). 기질부는 점토광물과 파쇄된 입자들로 구성되어 있으며, 점토광물들이 강하게 정향배열 하고 있다(그림 7g).

BWG는 대부분 점토광물로 이루어져 있으며 내부에 다량의 적철석을 포함한다. 주변의 파쇄대에서와는 달리 석영과 장석 암편은 거의 나타나지 않는다(그림 8a, 8b). BWG 내부에는 점토광물의 정향배열 및 점토광물과 적철석이 교호함에 의해 정의되는 S-C 엽리가 발달하며(그림 7c, 7d), 이는 단층경계로 갈수록 더욱 뚜렷하다(그림 8a, 8b). BWG에 포함된 암편(CI)은 뚜렷한 경계를 보이며(그림 7c), 풍화된

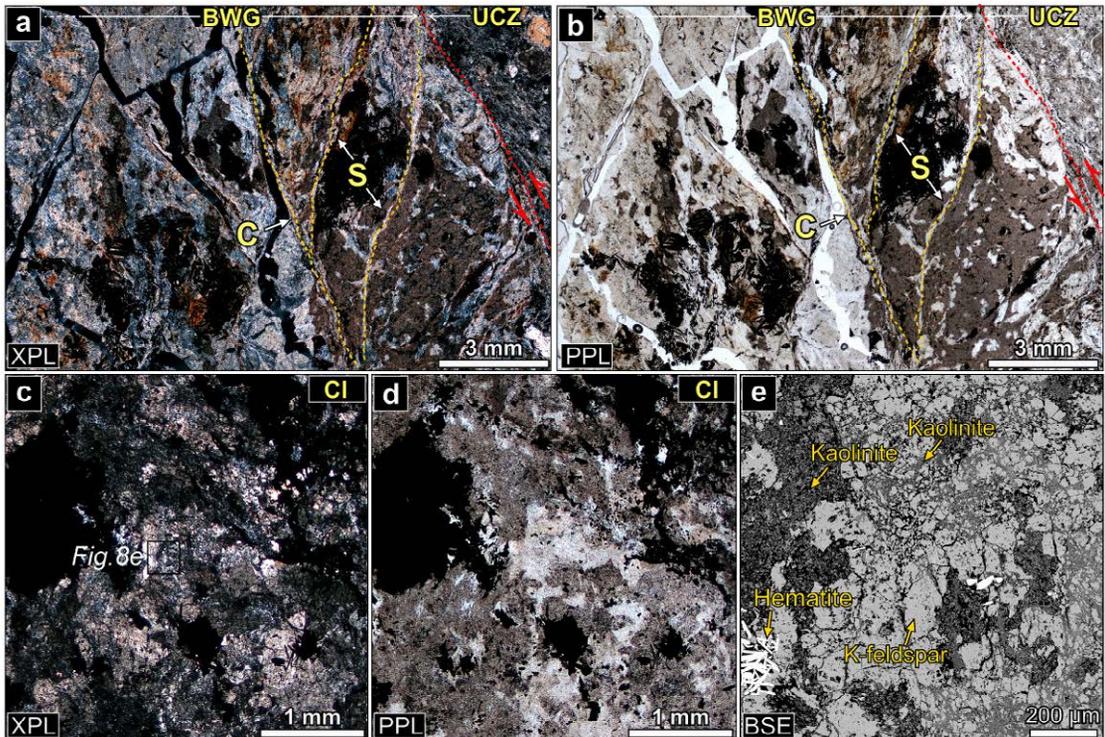


Fig. 8. (a), (b) Photomicrographs showing the S-C foliation developed in the brown-white gouge (BWG) adjacent to the ultracataclasis zone (UCZ). (c), (d) Photomicrographs of the clasts in the BWG (CI); see the white dashed boxes in Fig. 7c for the location of images). (e) Back-scattered electron (BSE) image showing that the CI is composed of K-feldspar, hematite, and kaolinite. XPL: crossed-polarized light; PPL: plane-polarized light.

K-장석과 카올리나이트, 그리고 그것들 사이에 나타나는 침상의 적철석으로 이루어져 있다(그림 8c-e). K-장석에는 그것이 풍화되어 카올리나이트가 형성되었음을 지시하는 조직이 관찰된다(그림 8e).

상반의 UCZ와 BWG는 뚜렷한 경계를 보인다(그림 9). BWG에는 적철석이 다수 산재해 있고 석영이 거의 관찰되지 않는 반면, UCZ에는 다수의 석영과 장석 암편이 포함되어 있다(그림 9a, 9b). BWG의 S-C 엽리는 단층경계에 인접할수록 더 강하게 나타난다(그림 9a-c). BWG와 UCZ의 경계부에서 좁은 폭에 걸친 점토광물의 강한 정향배열에 의해 정의되는 주미끄럼대(principal slip zone, PSZ)가 관찰된다(그림 9d). 약 10-20 μm 의 폭을 갖는 PSZ는 주로 약 5 μm 크기의 카올리나이트로 구성되어 있고, 소량의 석영, 장석 그리고 적철석 암편들을 포함하며, 주변의 물질 보다 입자크기가 더 작다(그림 9e).

5.2 기반암이 상부 미고결 퇴적물을 충상하는 곳(2번 위치)

이 위치에서 기반암인 화강암체는 상부 미고결 퇴적물(UUS)을 충상하고 있다(그림 2b). 단층경계는 다소 굴곡져 있지만 대략 N40°W/50°NE의 자세로 나타나며, 1번 위치에서와 같은 단층비지는 관찰되지 않는다(그림 10a). 이 위치에서는 두 개의 슬랩을 제작하여 관찰하였는데, 첫 번째 슬랩은 하반의 상부 미고결 퇴적물(UUS)내 ~10 cm 크기의 화강암 역(gravel)과 상반의 화강암체와의 경계를 보여준다(그림 10b). 상반 모양은 PCZ 로서 나타나며, 이곳의 암편들은 0.1-1 mm 크기의 석영과 장석으로 구성되어 있고, 기질부는 파쇄된 입자와 소량의 점토광물로 구성된다(그림 10c, 10d). 단층에 인접한 곳에서는 큰 암편들과 작은 암편들이 서로 띠를 이루면서 정의하는 미약한 파쇄엽리가 관찰된다(그림 10c,

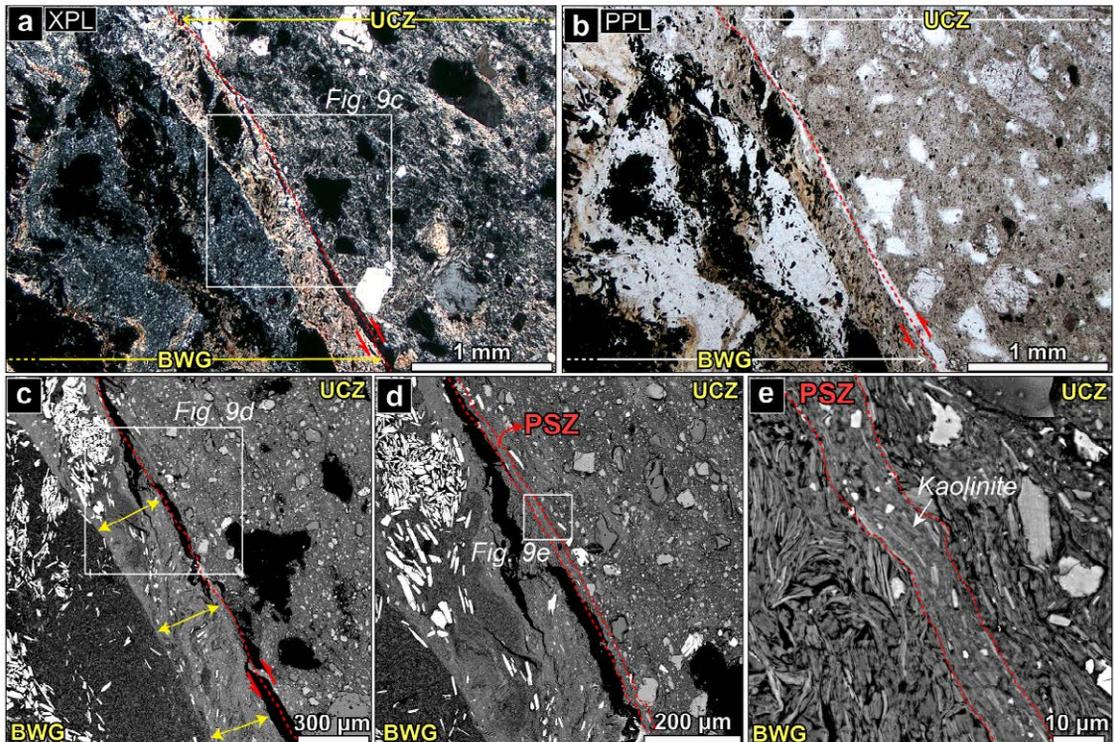


Fig. 9. (a), (b) Photomicrographs of the boundary between the brown-white gouge (BWG) and ultracataclasis zone (UCZ). See Fig. 7d for the location. The boundary is sharp and clearly identified by the different textures of the BWG and UCZ. (c)-(e) Back-scattered electron (BSE) images of the boxed area in (a). (c) S-C foliation developed well in the BWG (yellow arrows). (d) Close-up view of the boxed area in (c) showing the principal slip zone (PSZ). The thickness of the PSZ is ~10 μm . (e) The PSZ is composed of finer grains than nearby gouge, and it exhibits a strong preferred orientation of kaolinite. XPL: cross-polarized light; PPL: plane-polarized light.

10d). PCZ보다 더 파쇄가 진행된 구역(e.g., CZ and UCZ)은 발달하지 않으나, PCZ 와 화강암 역의 경계에서 국부적으로 점토광물이 정향배열 하고 있다 (그림 10e).

두 번째 슬랩에서는 하반의 UUS가 상반의 화강 암체 내 PCZ와 직접적으로 접촉한다(그림 11a). UUS 에 포함된 역들은 대부분 2 cm 이내의 화강암질 역 이며, 녹색 또는 갈색을 띠는 심하게 풍화된 물질 (highly weathered material; HWM)도 포함되어 있다. HWM은 단층에서 약 3 cm 떨어진 곳에 위치 하고 길고 연속적인 모양으로 대략 P-전단 방향으로 놓여있다(그림 11a). HWM은 주변의 UUS 입자들에 비해 뚜렷하게 입자크기가 작고, UUS 내에서 불 규칙한 경계를 보인다(그림 11b). 그것은 주로 ~100 μm 크기(최대 0.5 mm)의 석영과 장석, 흑운모로 구

성되며 소량의 각섬석을 포함하는데, 흑운모들은 P-전단 방향으로 정향배열한다(그림 11c). 단층 경계 부에서도 국부적으로 흑운모가 밀집된 영역이 있는데(그림 11a, 11d), 그곳의 흑운모들은 대체로 단층 과 나란한 방향으로 정향배열하고 있다(그림 11e). UUS 에서는 파쇄작용으로 형성된 단층암 또는 변형 띠는 관찰되지 않는다.

5.3 상부 미고결 퇴적물 내부에 단층이 발달하는 곳(3번 위치)

이 위치에서는 상부 미고결 퇴적물(UUS)에 포함 된 ~15 cm 크기의 역과 보다 작은 크기의 퇴적물이 단층을 경계로 접하고 있고, 단층은 상부로 갈수록 미약해져서 그 연장 확인이 쉽지 않다(그림 12a, 12b). 하반에 놓인 그 역은 대부분 장석으로 이루어져 있

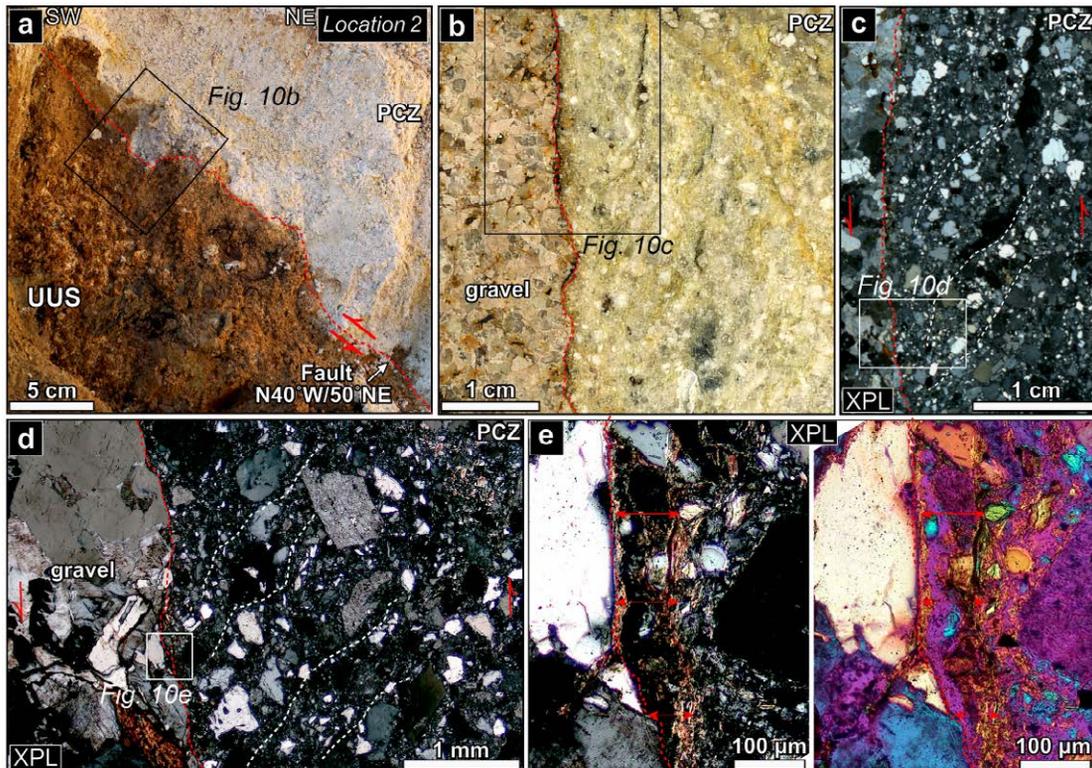


Fig. 10. (a) Outcrop photograph of Location 2 (see Fig. 2b for the location), where the upper unconsolidated sediments (UUS) is overlain by the pulverized granite (bedrock). (b) Scanned slab image of the rock from Location 2 showing the boundary between the protocataclasis zone (PCZ) and gravel in the UUS. (c) Scanned thin-section image of the boxed area in (b) showing the cataclastic foliation (white dotted lines) developed in the PCZ. (d) Photomicrograph showing the boundary between the PCZ and gravel. (e) Close-up view of the boxed area in (d) (left: XPL; right: XPL, gypsum plate inserted). Note the weak and discontinuous preferred orientation of clay minerals (red arrows) along the gravel boundary. XPL: crossed-polarized light.

으며, 석영과 흑운모도 소량 포함한다. 단층 상반의 UUS 내 역은 대부분 1-5 cm 크기의 화강암질 역이며, 일부는 녹색을 띠는 심하게 풍화된 물질(HWM)이다(그림 12b). 그 HWM은 길고 연속적인 모양으로 R-전단 방향으로 위치하고(그림 12b), 주변의 퇴적물 입자들과는 불규칙한 경계를 가지며, 그 내부는 주변에 비해 작은 입자들로 이루어져 있다(그림 12c). 특히 그 내부의 입자들은 주변 퇴적물과의 경계를 따라 정향배열하며(그림 12d), 주로 ~100 μ m

크기의 각섬석, 기질부의 카올리나이트 및 소량의 석영으로 구성된다(그림 12e). 단층에 인접한 일부 퇴적물 입자의 경계를 따라서는 점토광물들이 밀집되어 있는 구역이 관찰된다(그림 12f, 12g). 그곳은 약 10-30 μ m 의 폭을 가지며, 강하게 정향배열하는 카올리나이트와 녹니석으로 구성되어 있다(그림 12h).

단층경계부의 퇴적물 중 비교적 큰 입자들은 대부분 규장질 암편이며(그림 13a), 기질부는 ~200 μ m 크기의 석영, 장석, 흑운모, 각섬석 등과 함께 점

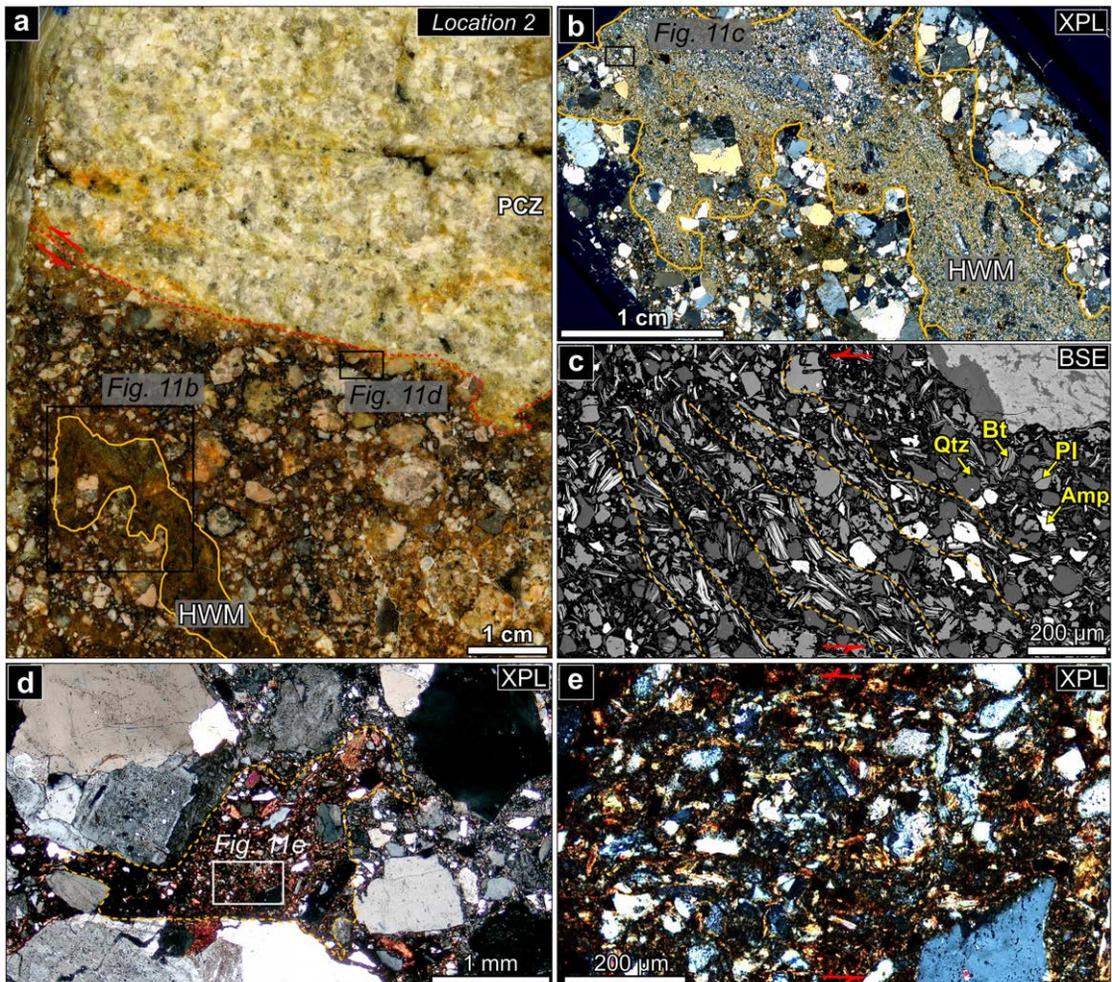


Fig. 11. (a) Scanned slab image of the rock from Location 2 showing the contact between the protocataclasis zone (PCZ) and upper unconsolidated sediments (UUS). (b) Scanned thin-section image of the boxed area in (a). Highly weathered material (HWM) showing an irregular contact with the UUS. (c) Back-scattered electron (BSE) image of the boxed area in (b). The HWM consists mostly of quartz, plagioclase, biotite, and a small amount of amphibole. The biotite in the HWM shows a preferred orientation. (d) Photomicrograph of an area adjacent to the fault boundary, where biotite grains are locally enriched. (e) High magnification image of the boxed area in (d). Note that many of the biotite grains are oriented parallel to the fault boundary. XPL: crossed-polarized light.

토광물로 구성된다(그림 13b). 길쭉한 모양을 가진 입자들의 경우 그 장축이 대체로 단층면과 나란하게 배열하는데(그림 13b), 그것들의 대부분은 흑운모와 각섬석이며, 흑운모의 일부는 녹니석으로 변질되어 있다(그림 13c, 13d). 기질부 점토광물은 주로 카올리나이트와 팔리코스카이트이며 대부분 정향배열

을 보이지 않으나(그림 13e), 국부적으로 점토광물이 풍부한 영역에서만 하반 역의 경계를 따라 정향배열한다(그림 13f, 13g).

5.4 단층 미끄럼대 물질

단층의 1번 위치에서 나타나는 파쇄대(PCZ, CZ,

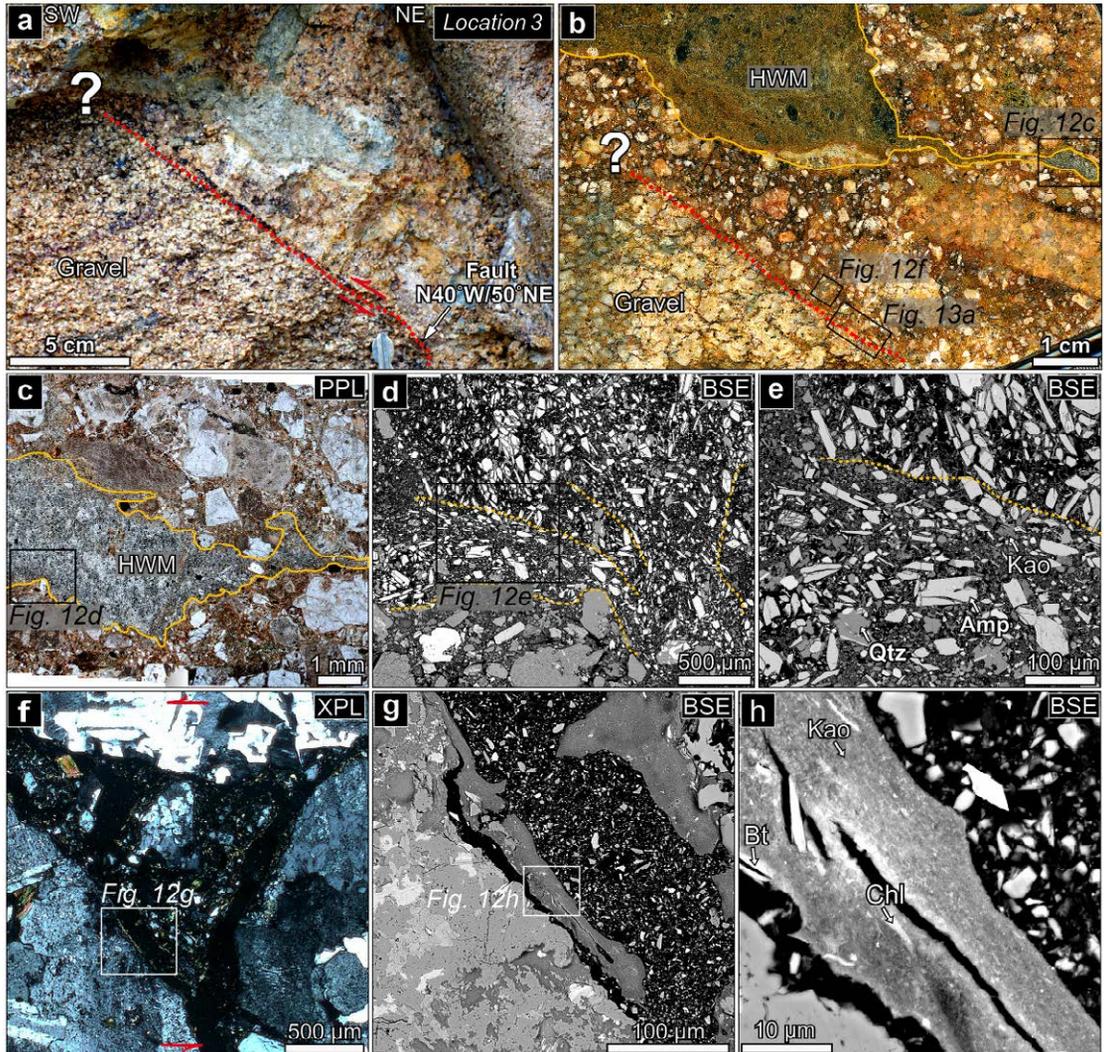


Fig. 12. (a) Outcrop photograph and (b) scanned slab image of the rock from Location 3 (see Fig. 2b for the location). The fault is developed along the boundary between large gravel and finer-grained sediment in the upper unconsolidated sediments (UUS). (c) Highly weathered material (HWM) showing an irregular contact with the UUS. (d), (e) Back-scattered electron (BSE) images of the boxed area in (c). The HWM is composed of amphibole, quartz, and kaolinite. Amphibole grains in the HWM are oriented parallel to the boundary between the UUS and HWM. (f) Close-up view of the grains in the UUS adjacent to the fault. (g) In the boxed area in (f), clay minerals are enriched along the sediment grain boundary. (h) The clay minerals along the boundary are kaolinite and chlorite, and they show a strong preferred orientation. XPL: crossed-polarized light; PPL: plane-polarized light; Qtz: quartz; Amp: amphibole; Kao: kaolinite; Chl: chlorite; Bt: biotite.

UCZ) 물질, 단층비지(BWG) 및 분쇄화강암(PG)에 대한 X-선 회절분석을 실시하였다. PG에서는 석영과 장석이 주를 이루며 카올리나이트가 소량 존재한다. PCZ는 PG와 유사한 광물조성을 보이나 카올리나이트의 양은 더 많다. CZ는 PCZ에 비해서 카올리나이트가 많고, PCZ에서는 확인되지 않는 일라이트를 포함한다. UCZ는 CZ와 유사한 광물조성을 보인다. 그러나, BWG는 석영, 장석 함량이 낮고, PG에는 나타나지 않는 적철석을 포함한다. BWG의 점토 광물로는 카올리나이트와 더불어 스펙타이트-녹니석, 일라이트가 확인되었다(그림 14).

다음으로, 단층에서 5 cm 이상 떨어진 곳의 상부

미고결 퇴적물(UUS1)과 단층으로부터 0.5 cm 이내에 위치하는 상부 미고결 퇴적물(UUS2, UUS3)간의 물질적 차이를 알아보기 위해, X-선 회절분석을 실시하였다. UUS2와 UUS3은 각각 2번 위치와 3번 위치에서 단층에 인접한 물질을 나타낸다. UUS1은 석영과 장석이 주를 이루며, 각섬석, 스펙타이트-녹니석, 일라이트-스펙타이트, 카올리나이트 등의 광물을 포함한다. UUS2의 광물 조성은 UUS1과 비슷하게 나타나지만, UUS1에 비해 스펙타이트-녹니석 함량이 다소 높다. 한편, UUS3의 경우 UUS1에 비해 스펙타이트-녹니석은 적지만, 팔리고스카이트가 나타나는 것이 특징이다(그림 14).

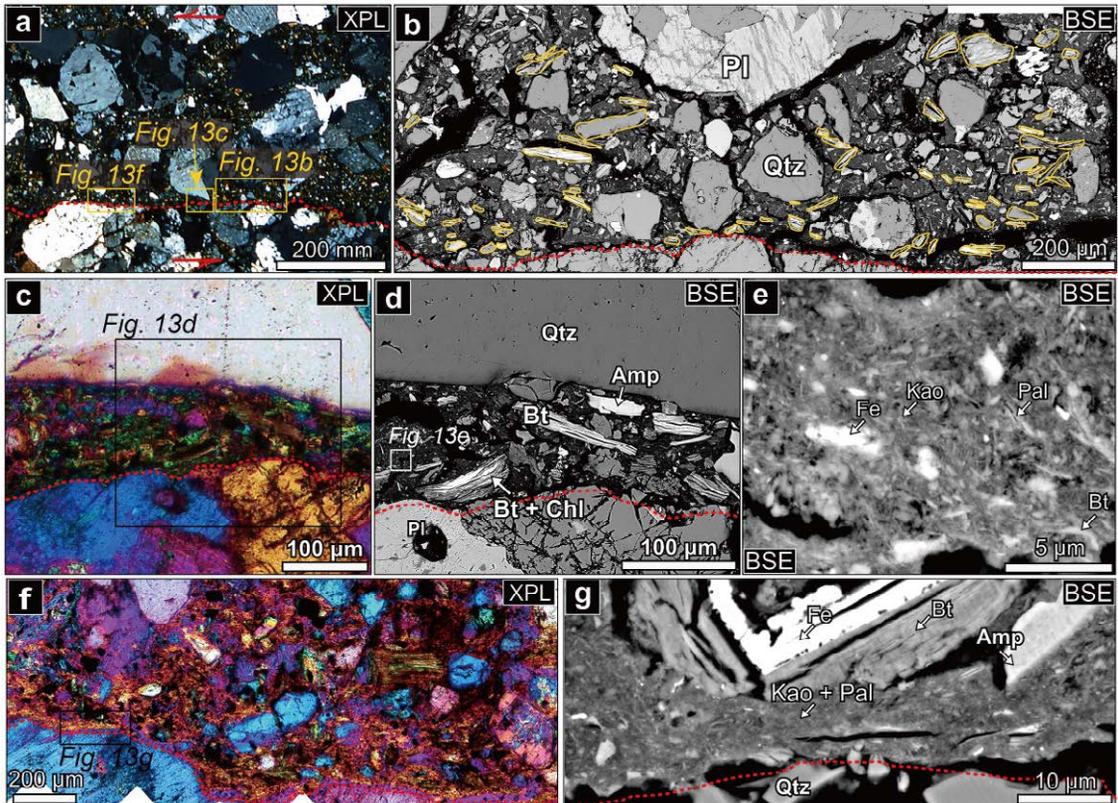


Fig. 13. (a) Photomicrograph showing the boundary between large gravel and finer-grained sediment in the upper unconsolidated sediments (UUS). (b) Back-scattered electron (BSE) image showing the grains near the fault. Note that platy or columnar grains are oriented parallel to the fault boundary. (c) Close-up view of the boxed area in (a) (XPL, gypsum plate inserted). (d) The oriented minerals are biotite, chlorite, and amphibole. (e) In the boxed area in (d), the matrix part is composed of kaolinite and palygorskite. These clay minerals are randomly oriented. (f) Photomicrograph showing the local preferred orientation of the clay minerals along the fault boundary (XPL, gypsum plate inserted) (g) BSE image of the boxed area in (f), where kaolinite and palygorskite show a strong preferred orientation. XPL: crossed-polarized light; Qtz: quartz; Amp: amphibole; Kao: kaolinite; Chl: chlorite; Bt: biotite; Fe: Fe-oxides/hydroxides; Pal: palygorskite.

6. 토 의

6.1 단층의 위치별 변형특성

단층 미끌림대의 물질 및 미구조는 단층을 따라 발생한 전단변형의 특성을 직접적으로 기록할 뿐 아니라 단층의 역학적 거동과 상호 연관관계를 갖는다 (e.g., Collettini *et al.*, 2009; Faulkner *et al.*, 2010; Tembe *et al.*, 2010; Woo *et al.*, 2015, 2016; Kim, C.-M. *et al.*, 2016; Woo and Han, 2019; Han *et al.*, 2020). 연장성이 좋은 단층의 경우, 주향방향 또는 경사방향의 위치변화에 따라 접촉하는 암체가 달라지고, 그로부터 발달하는 단층물질 또한 다를 수 있으므로, 하나의 단층을 따라서도 단층물질의 변형특성, 미끌림 시의 물리 화학적 프로세스 및 역학적 거동은 공간적으로 상당한 차이를 보일 것으로 추정할 수 있다. 이러한 측면은 활성단층 연구에서도 중요하게 다뤄져야 할 부분이다. 가령, 대부분의 고지진학적, 지진지질학적 연구의 대상이 되는 활성단층의 경우, 하부에서는 기반암을 절단하며 나타나지만 보다 상부인 지표 바로 아래에서는 기반암과 미고결 퇴적물을 접하게 하거나 미고결 퇴적물 내부를 가로지르며 나타난다(Jeong and Cheong, 2005; Ree and

Kwon, 2005; Kee *et al.*, 2007; Cheon *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2020). 이번 연구에서는 활성단층의 구조와 변형특성이 위치별로 어떠한 차이를 보일 수 있으며 그것이 지시하는 바는 무엇인지를 이해하고자 하였다. 이 절에서는 그러한 측면에 대해 연구대상 단층으로부터의 관찰 내용을 바탕으로 간략히 논의한다.

단층이 기반암 내부를 가로지르는 1번 위치에서는 다른 위치에 비해 두꺼운 쪽으로 점토광물이 풍부한 단층비지(BWG and UCZ)가 발달하며, 그 주변으로 단층파쇄대(PCZ and CZ)가 나타난다(그림 7a, 7b). UCZ의 경우 PCZ, CZ와 이어지고 점진적인 입자크기 감소를 보이며(그림 7e-g), 화강암 모암과 유사한 광물조성을 갖는 것으로 보아(그림 14) 그 모암의 극도로 파쇄된 입자들이 이차적으로 변질되어 형성된 영역인 것으로 판단된다. 반면에, BWG에는 적철석이 풍부하고 석영이 결핍되어 있는 등(그림 8a, 8b) 화강암 모암의 구성광물과는 확연한 차이를 보이며(그림 14), BWG에 포함된 역에 대한 미구조 관찰 결과(그림 8c-e)에 따라, BWG는 주로 K-장석이 풍부한 암맥이 변형과 변질작용을 겪어 형성된 것으로 해석하였다. UCZ와 BWG에서는 모두 점토광물이 강하게 정향배열 하고 있으며(그림 9c-e), BWG

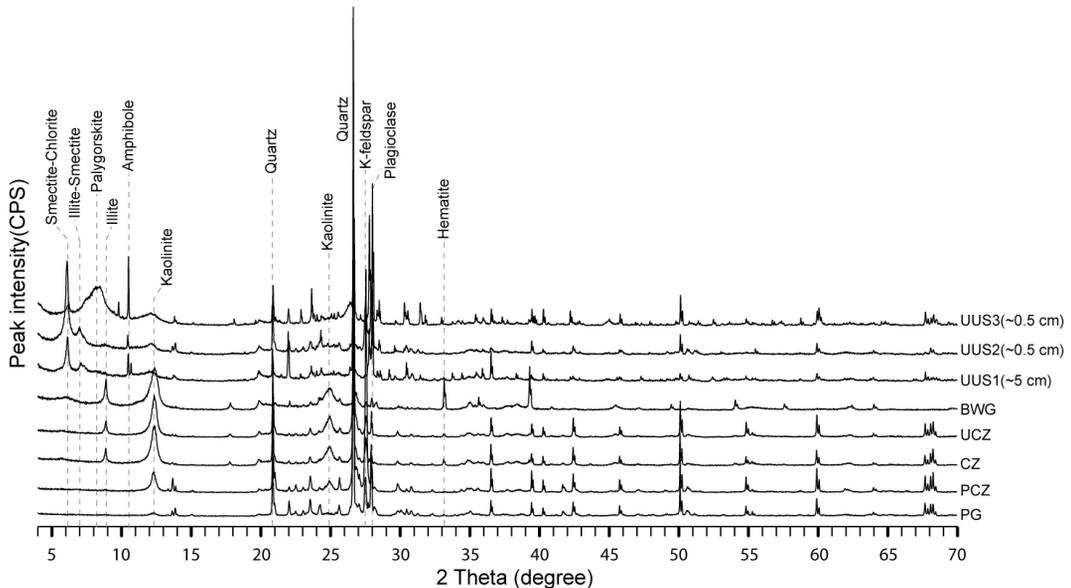


Fig. 14. Powder X-ray diffraction patterns of the fault materials and sediments in the studied outcrop. PG: pulverized granite; PCZ: protocataclasis zone; CZ: cataclasis zone; UCZ: ultracataclasis zone; BWG: brown-white gouge; UUS1: upper unconsolidated sediments ~5 cm away from the fault; UUS2 and UUS3: upper unconsolidated sediments nearby (or ~0.5 cm away from) the fault.

에서는 S-C 엽리가 잘 발달한다(그림 9c). 또한, BWG와 UCZ의 경계를 따라 10-20 μm 폭의 아주 좁은 영역에 변형이 집중된 PSZ가 발달하는데, 여기에는 적철석과 석영이 모두 포함되어 있는 것으로 보아, PSZ를 이루는 물질은 BWG와 UCZ 둘 다에서 기원한 것으로 해석된다(그림 9). PSZ내 점토광물들은 다른 곳에 비해 가장 강한 정향배열을 보인다(그림 9e). 이상의 관찰결과는 단층이 미끌림을 겪을 때 BWG, UCZ 및 PSZ에서는 주로 점토광물 입자 경계를 따른 마찰미끌림을 통해 변형이 이루어진 것을 지시한다(그림 15a; Aretusini *et al.*, 2019). 반면, 1번 위치의 PCZ와 CZ, 그리고 2번위치의 PCZ는 단층비지에서보다 상대적으로 입자크기가 더 크고 각진 형태로 나타나며, 더 많은 암편을 포함하고 있다(그림 7e, 7f, 10d). PCZ의 경우 모암에 비해 미약하게 감소된 크기의 입자들로 구성되어 있으며(그림 7e, 10d), 점토광물의 함량이 약간 증가했을 뿐, 동일한 광물들로 구성되어 있다(그림 14). 뿐만 아니라 모암의 조직을 유지하는 암편들이 다수 포함되어 있는 것으로 보아(그림 7d), 다른 파쇄대에 비해 파쇄정도가 미약한 변형을 나타낸다. 또한 2번위치의 PCZ에서는 파쇄엽리가 관찰되는데(그림 10c, 10d), 이는 입자들의 파쇄유동을 지시한다(그림 15b). CZ의 경우, UCZ와 PCZ 사이 혹은 PCZ와 BWG사이에 위치하며(그림 7c, 7d), 내부에 분쇄화강암 조직을 유지하는 암편이 일부 존재하고, 암편들의 크기는 PCZ와 유사하다. 하지만 PCZ에 비해 점토광물의 양이 다소 증가하였고, 점토광물들은 일정 방향으로 배열하고 있다(그림 7e, 7f). 따라서, CZ는 UCZ와 PCZ의 중간 정도의 파쇄를 겪은 것으로 보이며, 기질부의 점토광물들이 배열하는 것으로 보아 입자들의 파쇄와 더불어 점토광물의 마찰미끌림에 의해 복합적으로 변형된 것으로 해석된다(그림 15a, 15b). 한편, 이상의 해석은 현재 관찰되는 구조만을 근거로 변형특성을 논의한 것으로, 구조의 형성시기와 깊이에 대한 불확실성을 내포한다. 가령, 모암의 파쇄, 파쇄유동, 단층비지 및 단층파쇄대의 형성은 암체가 지표 근처가 아니라 보다 깊은 위치에 놓였던 시기에 발생한 것으로 추정되나, 분쇄화강암과 같이 이미 심하게 파쇄된 모암의 변형이나 미끌림대에 존재하는 파쇄물질의 추가적인 변형은 지표 근처의 천부에서도 발생할지 모른다. 즉, 지표 근처의 깊이에서의 전단변형

으로 인해 분쇄화강암으로부터 변형띠나 파쇄대가 만들어지거나, 파쇄물질이 추가적으로 파쇄될 수 있는지를 확인하기 위해서는 지표 근처의 응력조건 하에서의 전단시험이 필요하다.

단층의 2번과 3번 위치에서 나타나는 상부 미고결 퇴적물의 경우, 지표 인근의 얇은 깊이에서 매우 낮은 평균응력 또는 수직응력 하에서 변형된다. 이러한 응력 조건 하에서의 미고결 퇴적물의 변형은 비슷한 깊이에 놓인 결정질 암석이나 보다 깊은 곳에 위치한 퇴적물에서와는 다른 메커니즘의 작동에 의해 발생한다(e.g., Loveless *et al.*, 2011). 즉, 입상(granular) 퇴적물 입자들은 강체(rigid body)로 거동하므로 입자들이 파쇄되기 보다는 회전하거나 그들간의 경계를 따라 미끄러는 등의 입자유동(granular flow or particulate flow)을 통해 변형된다(Fossen, 2010). 점토광물의 경우는 입자의 판상경계를 따라 마찰 미끌림(frictional sliding)이 일어나거나(Aretusini *et al.*, 2019), 입자 자체의 재배열에 의한 변형이 가능하다. 운모편(mica flakes)과 같은 독립된 판상광물입자나 주상광물 입자들도 재배열을 통한 변형이 가능하다. 입상 미고결 퇴적물의 입자유동이 작동하면, 분급이 좋은 퇴적물의 경우 변형띠(Cashman *et al.*, 2007; Fossen *et al.*, 2007), 층리가 발달한 경우에는 단층 주변으로 끌림습곡(e.g., Kee *et al.*, 2007), 단층면에 나란한 사질 퇴적물의 발림(sand smear; Lewis *et al.*, 2002), 전단에 의한 역들의 재배열(Exner and Grasemann, 2010), 미끌림대 내 퇴적물 입자들의 배열에 의한 브릿지(Rawling and Goodwin, 2003) 등의 구조가 형성될 수 있다. 그러나, 연구대상 단층 노두에서는 위에서 언급한 변형구조들은 관찰되지 않으며, 1번 위치에서와 같은 단층비지와 파쇄대 물질도 나타나지 않는다. 일단, 2번과 3번 위치에서 관찰된 퇴적물에서는 자세한 미구조 관찰에도 불구하고 입자 파쇄의 증거를 관찰할 수 없으므로 파쇄(유동)가 효과적으로 작동하지 않은 것으로 판단된다. 입자유동의 경우, 그것이 입상 퇴적물에서 작동하였을 가능성이 충분하나, 미고결 퇴적물의 분급이 불량하고, 층리 발달이 미약하며 역도 특정방향으로의 배열에 용이한 모양을 갖지 않는 등의 이유로 인해 입자유동에 의한 변형구조가 눈에 띄게 발달할 수는 없었던 것으로 보인다.

한편, 그 퇴적물 시료의 자세한 슬랩 및 박편 관찰

을 통해 심하게 풍화된 역과 기질부의 판상/주상 입자들에 의해 변형이 기록될 수 있음을 확인하였다.

즉, 2번과 3번 위치에서 관찰되는 심하게 풍화된 물질(HWM; 그림 11a, 12a)은 손으로도 매우 쉽게 부

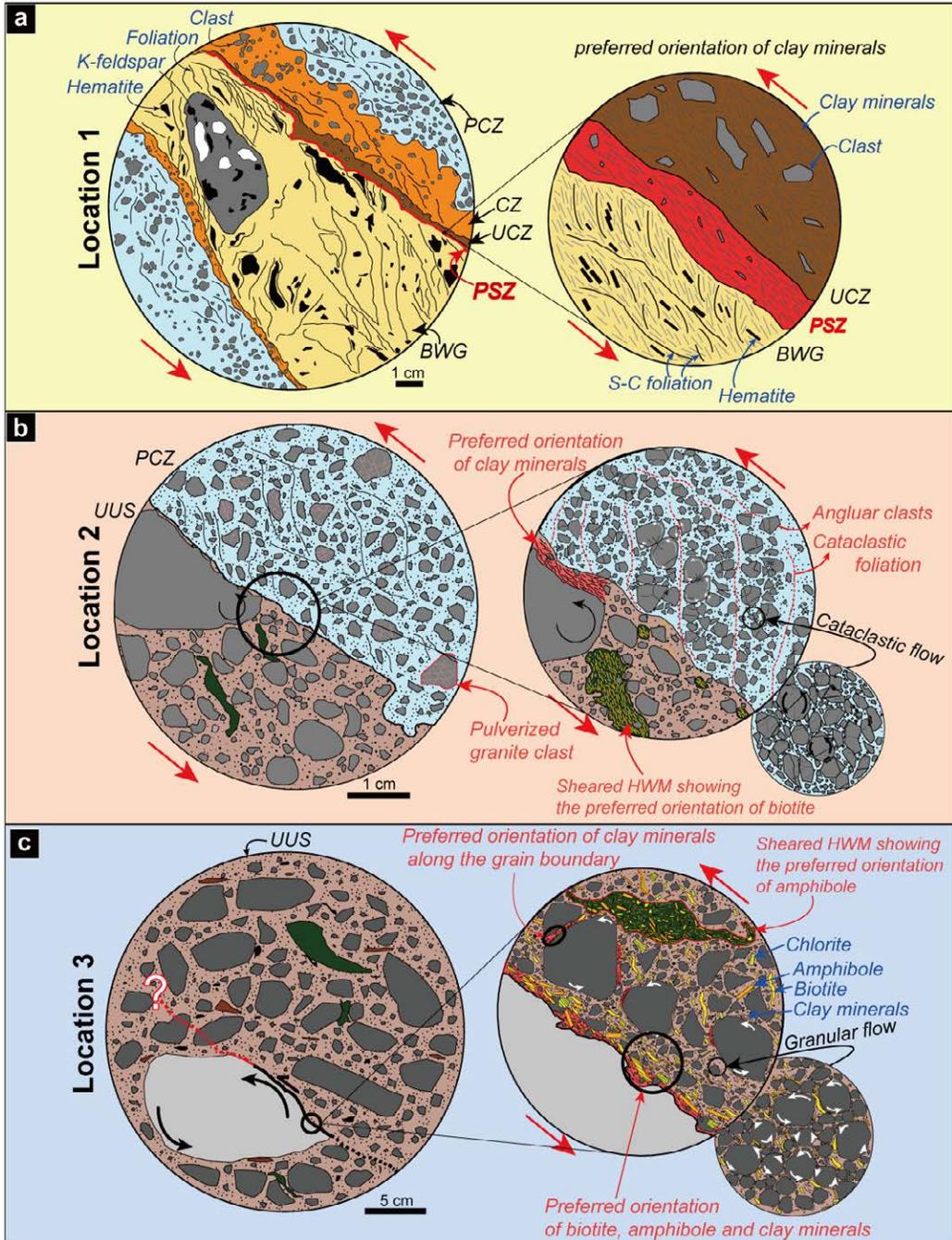


Fig. 15. Schematic illustration of the structures observed at Locations 1–3 along the studied fault. Note that the operation of different deformation mechanisms is inferred from the locations. PCZ: protocataclasis zone; CZ: cataclasis zone; UCZ: ultracataclasis zone; BWG: brown-white gouge; HWM: highly weathered material; PSZ: principal slip zone; UUS: upper unconsolidated sediments. For details, see the main text.

스러질 정도로 약하며 단층 주변에서 단층면에 저각으로 신장된 것 같은 형태를 보인다. 아울러, 그 내부의 입자들(흑운모, 녹니석, 각섬석)도 경계에 나란하게 배열됨이 확인된다. 이는 판상 또는 주상의 입자들로 이루어진 그 물질이 단층 미끌림 시 전단변형을 경험하였음을 지시하며 심하게 풍화된 역의 경우 지표 근처의 깊이에서 강체가 아니라 내부변형을 겪을 수 있는 물질로서 거동한다고 해석할 수 있다. 다음으로 기질부 점토광물에 의한 변형의 기록이다. 상부 미고결 퇴적물의 기질부에는 위치에 따라 그 양에 차이는 있으나 점토광물이 존재한다. 3번 위치에서 단층면에 가까운 퇴적물에서 점토광물이 단층면에 나란하게 정향배열한 것이 관찰되며(그림 13f, 13g), 점토광물이 입상 퇴적물 입자 경계를 따라 배열하기도 한다(그림 12f-12h). 이는 전단에 의해 기질부의 점토광물만이 재배열하거나 입상 퇴적물의 입자유동을 동반하면서 재배열하였음을 지시한다. 이와 같은 재배열은 자연의 단층(e.g., Kim, C.-M. *et al.*, 2016)에서 뿐 아니라 실험 단층(Han and Hirose, 2012)에서도 잘 관찰되는 변형구조이다. 마지막으로 퇴적물 기질부 내 독립된 판상광물 및 주상광물 입자들의 재배열이다. 3번 위치에서 단층에 가까운 영역의 흑운모 및 각섬석 입자들의 경우 그 장축이 일정한 방향으로 배열하고 있다(그림 13b, 13d). 이러한 구조는 중규모에서 역이 재배열 되는 것과 동일한 메커니즘에 의한 구조로 해석할 수 있다. 즉, 단층의 2번 위치와 3번 위치에 기록된 변형 미구조는 이 곳의 미고결 퇴적물이 변형될 때 파쇄를 동반하기보다는 입자유동으로 변형되었다는 것을 지시한다(그림 15c). 정리하면, 단층의 각 위치에서의 단층 미끌림대의 폭, PSZ 발달 여부 및 파쇄 정도 등과 같은 변형 (미)구조의 뚜렷한 차이는 위치에 따른 응력 조건, 변위차뿐 아니라 단층 물질의 변형특성 차이에 기인한 것으로 해석된다.

6.2 미고결 퇴적물에서의 단층 미끌림 종결

지하 깊은 곳에서 개시된 지진성 단층 미끌림은 지표쪽으로 전파되어 결국 지표 파열을 야기하거나 혹은 지표 도달 전 어느 지점에서 종결될 수 있다. 이번 연구에서의 중요한 관찰 결과 중 하나는 단층미끌림의 기록이 미고결 퇴적물 내에서 중단된다는 것이다. 3번 위치 및 그 주변의 퇴적물에 대한 상세

(미)구조 관찰 결과는 연구대상 단층을 따라서의 단층미끌림의 구조적 흔적이 점점 약화되다가 3번 위치 근처의 퇴적물에서 사라짐을 지시한다. 이와 유사한 관찰, 즉 사력질층에서의 단층미끌림의 종결이 읍천단층의 트렌치 조사에서도 확인되고 논의된 바 있다(Kee *et al.*, 2007). 여기서는 이러한 관찰이 시사하는 바에 대해 간략히 논의한다. 지진 발생 시 지하로부터 시작된 단층의 미끌림은 먼저 기반암 내 단층암에 도달한다. 연구대상 단층의 경우 주미끌림대가 카올리나이트로 이루어져 있으므로 그 광물의 마찰특성이 이후의 단층미끌림을 좌우한다. 카올리나이트를 대상으로 한 고속전단시험 결과가 많지 않아 다소 불확실한 면이 있지만 기존 연구는 그 물질이 지진 발생 시의 빠른 속도(~1 m/s)로 미끌릴 경우 급격한 강도 약화(즉, 마찰의 감소)를 보일 수 있음을 지시한다(Brantut *et al.*, 2008). 기반암 내 단층의 낮은 동적 마찰강도는 단층미끌림이 상부의 퇴적물로 전파되는데 도움이 되는 특성이다. 한편, 상부의 미고결 퇴적물의 경우 역과 거력, 모래 그리고 점토로 이루어진 물질로서, 그것의 전단강도를 유추하는 것은 쉽지 않다. 그러나, 모래를 대상으로 한 고속전단시험결과에 의하면(Han and Hirose, 2012, unpublished data; Han *et al.*, 2020), 모래의 경우 점토광물이 풍부한 물질보다 높은 마찰강도를 갖는다. 게다가 다량의 역이 퇴적층에 산재하는 것은 거기를 따라서의 국지화된 미끌림(localized slip) 전파보다는 분산된 변형(distributed deformation)을 촉진할 가능성이 크다. 따라서, 미고결 퇴적물 중간에서 단층미끌림이 종결되는 것은 그 퇴적물의 높은 전단저항(shear resistance)에 따른 변형의 분산에 기인한 것으로 보인다. 즉, 변형이 발생하기 위해 높은 전단응력이 요구되는 특성으로 인해 변형이 특정영역에 국지화되기 보다는 주변으로 퍼져가며 발생하다 종결될 가능성이 크다. 이번 관찰은 제4기 퇴적물이 어떠한 물질로 이루어진 것인지, 그리고 거기를 따라 나타나는 단층 미끌림대를 구성하는 물질이 무엇인지에 따라 단층 재할 시의 지표 근처에서의 미끌림 거동이 상당한 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 가령, 제4기층을 가로지르는 미끌림대에 다량의 점토광물을 포함하는 수렴단층(Han *et al.*, 2020)과 연구대상 단층은 지표부근 단층거동이 다를 가능성이 크다. 따라서, 활성단층의 연구를 위해 다양한 조건(입

도, 분급, 구성물질, 배수조건, 수직응력, 미끌림속도 등) 하에서의 체계적인 실험을 실시하고 그것을 통해 제4기 미고결 퇴적물의 역학적 거동과 그에 따른 (미)구조 발달을 이해하려는 노력이 요구된다. 이번 관찰의 또 하나의 중요한 측면은 활성단층의 활동시기 규정과 관련된 것이다. 즉, 단층미끌림이 퇴적층 가운데서 끝날 수 있다는 것은 어떤 활성단층에서 발생한 마지막 미끌림이 그 당시의 최상부 퇴적층이 아니라 상대적으로 하부에 위치하는 퇴적층을 통과할 때 종결될 수도 있다는 것이다. 또한, 한 노두에서 여러 조의 단층이 발달할 때 최상부의 퇴적층을 절단하는 단층에서 마지막 단층미끌림이 발생한 것이 아닐 수도 있다는 점이다. 단층에 의한 퇴적물의 횡절 여부와 퇴적물의 연대측정에 근거하여 단층활동시기를 규정하는 것은 단층활동사 해석에 있어 매우 중요하고 필수적이지만, 그것의 신뢰도를 보다 높이기 위해서는 퇴적층 내에서의 단층미끌림 종결 가능성에 대한 고려가 필요할 수 있다.

7. 결론

울산단층 동편에 위치한 경주 활성리지역 활성단층을 대상으로 단층의 위치별 구조 및 변형특성을 관찰하였다. 기반암 내에 단층이 발달하는 1번 위치의 경우, 파쇄대에 둘러싸인 점토질 단층비지와 10-20 μm 폭의 주미끌림대가 관찰된다. 2번 위치에서 기반암은 상대적으로 미약한 파쇄를 겪은 원파쇄대로서 나타나며, 이보다 심하게 파쇄된 영역은 존재하지 않는다. 2번 위치와 3번 위치의 미고결 퇴적물에서는 파쇄를 동반한 변형구조는 확인되지 않는 대신, 입자가 회전하거나 재배열함에 따른 변형미구조가 관찰되었다. 이는 그 단층의 각 위치에 존재하는 물질에 따라 (1) 점토광물이 풍부한 단층비지 영역에서의 점토광물 입자 경계를 따른 마찰 미끌림 (2) 상대적으로 암편이 풍부한 파쇄대에서의 파쇄(유동) 그리고 (3) 제4기 미고결 사력질 퇴적물에서의 파쇄를 동반하지 않은 입자유동이 우세하게 작동하였음을 시사한다. 제4기 미고결 퇴적물 내에서 단층이 끝나는 것은 기반암 내의 단층비지를 따라 국지화된 방식으로 진행된 단층미끌림이 미고결 퇴적물에서는 퇴적물의 높은 전단저항으로 인한 분산된 변형으로 이어지다 지표파열에 이르지 않은 채 종결되었을

가능성을 시사한다. 이 같은 측면은 단층에 의한 퇴적물의 횡절 여부와 퇴적물의 연대측정을 통해 단층활동시기를 규정하고 단층활동사를 해석하는 연구에서 고려되어야 할 부분이다. 아울러, 지표 부근의 응력조건에서 퇴적물 및 단층 파쇄물질의 변형에 대한 심도있는 이해를 위해서는 그러한 물질을 대상으로 한 체계적인 전단변형시험이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상·지진See-At기술개발연구(KMI2018-01710)의 지원으로 수행되었습니다. 단층 노두의 소개와 더불어 현장토의에서 유익한 의견을 제공해주신 부산대 강희철박사님과 부경대 김태형 박사과정 대학원생께, 그리고 야외조사 및 시료 준비 등에서 많은 도움을 준 경상대 구조지질학연구실 소속 대학원생 모두에게 감사드립니다. 또한 건설적인 의견으로 논문의 질적 향상에 도움을 주신 두 분의 심사위원과 편집위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Aretusini, S., Plümper, O., Spagnuolo, E. and Di Toro, G., 2019, Subseismic to seismic slip in smectite clay nanofoliation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 6589-6601.
- Brantut, N., Schubnel, A., Rouzaud, J.N., Brunet, F. and Shimamoto, T., 2008, High-velocity frictional properties of a clay-bearing fault gouge and implications for earthquake mechanics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113, B10401.
- Cashman, S.M., Baldwin, J.N., Cashman, K.V., Swanson, K. and Crawford, R., 2007, Microstructures developed by coseismic and aseismic faulting in near-surface sediments, San Andreas fault, California. *Geology*, 35, 611-614.
- Chang, T.W., 2001, Quaternary tectonic activity at the eastern block of the Ulsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 431-444 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.W. and Chae, Y.Z., 2004, Faulting and hydrothermal activity in the gouge zones of Quaternary faults at the eastern block of the Ulsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 469-479 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.W., Chae, Y.Z. and Choo, C.O., 2005, Formation of alteration minerals in gouges of Quaternary faults at

- the eastern blocks of the Ulsan fault, southeastern Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 18, 205-214 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Choi, J.H., Kim, N., Lee, H., Choi, I., Bae, H., Rockwell, T., Lee, S.R., Ryoo, C.-R. and Choi, 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.
- Cho, H., Kim, M.-C., Kim, H. and Son, M., 2014, Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the Quaternary faults, SE Korea: Application to the determination of fault slip sense and paleo-stress field. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 75-103 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.-H., Kim, Y.-S., Gwon, S., Edwards, P., Rezaei, S., Kim, T. and Lim, S.-B., 2015, Characteristics of large-scale fault zone and Quaternary fault movement in Maegok-dong, Ulsan. *The Journal of Engineering Geology*, 25, 485-498 (in Korean with English abstract).
- Choi, P.-Y., Lee, C.-B., Ryoo, C.-R., Choi, Y.S., Kim, J.-Y., Hyun, H.-J., Kim, Y.-S., Kim, J.-Y. and Chwae, U., 2002, Geometric analysis of the Quaternary Malbang fault: Interpretation of borehole and surface data. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 163-174 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Choi, J.-H., Kim, B., Ryoo, C.-R., Hong, D.-G. and Chwae, U., 2014, Estimation of possible maximum earthquake magnitudes of Quaternary faults in the southern Korean Peninsula. *Quaternary International*, 344, 53-63.
- Choi, S.J., Jeon, J.S., Song, K.Y., Kim, H.C., Kim, Y.H., Choi, P.Y., Choi, W.C., Han, J.G., Ryoo, C.R., Sun, C.G., Jun, M.S., Kim, G.Y., Kim, Y.B., Lee, H.J., Shin, J.S., Lee, Y.S., Gi, W.S., Lee, H.K., Song, Y.G., Kim, Y.S., Kang, T.S., Hong, D.G. and Kim, S.K., 2012, Active Fault Map and Seismic Hazard Map. Natural Hazards Mitigation Research Group, National Emergency Management Agency, 953 p (in Korean).
- Chwae, U., Choi, S.-J., Cho, D.-R., Lee, Y., Ryoo, C.-R., Ko, I.-S., Shin, H.M., Song, M., Ree, J.H., Kwon, S.-T., Lee, H.-K. and Choi, K.-S., 2000, Final report for Neotectonics research. Ministry of Science and ICT, N2-01-02-A-01, 536 p (in Korean).
- Collettini, C., Niemeijer, A., Viti, C. and Marone, C., 2009, Fault zone fabric and fault weakness. *Nature*, 462, 907-910.
- Dor, O., Ben-Zion, Y., Rockwell, T.K. and Brune, J., 2006, Pulverized rocks in the Mojave section of the San Andreas fault zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 642-654.
- Exner, U. and Grasemann, B., 2010, Deformation bands in gravels: displacement gradients and heterogeneous strain. *Journal of the Geological Society*, 167, 905-913.
- Faulkner, D.R., Jackson, C., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. and Withjack, M.O., 2010, A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, 1557-1575.
- Fondriest, M., Aretusini, S., Di Toro, G. and Smith, S.A., 2015, Fracturing and rock pulverization along an exhumed seismogenic fault zone in dolostones: The Foiana fault zone (Southern Alps, Italy). *Tectonophysics*, 654, 56-74.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*. Cambridge University Press, New York, 463 p.
- Fossen, H., Schultz, R.A., Shipton, Z.K. and Mair, K., 2007, Deformation bands in sandstone: a review. *Journal of the Geological Society*, 164, 755-769.
- Gu, D., 2020, Evolution of coseismic processes in a principal slip zone: Yangsan fault, Korea. M.S. thesis, Gyeongsang National University, Jinju, 48 p (in Korean with English abstract).
- Gwon, S., Cho, S.-I., Park, D., Choi, W.-H., Nakao, R., Tanaka, T. and Inoue, D., 2020, Microscopic analysis of fault rock using X-ray computed tomography from the Wolsan trench in the middle part of Yangsan fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 273-284 (in Korean with English abstract).
- Han, R. and Hirose, T., 2012, Clay-clast aggregates in fault gouge: An unequivocal indicator of seismic faulting at shallow depths?. *Journal of Structural Geology*, 43, 92-99.
- Han, R., Kim, C.-M., Woo, S., Jeong, G.Y. and Hirose, T., 2020, Structural records and mechanical characteristics of seismic slip along an active fault crosscutting unconsolidated Quaternary sediments: Suryum fault, SE Korea. *Geosciences Journal*, 24, 379-389.
- Han, R., Kim, J.-S., Kim, C.-M., Hirose, T., Jeong, J.O. and Jeong, G.Y., 2019, Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses. *Geology*, 47, 107-110.
- Inoue, D. and Choi, W.H., 2006, The activity of the Ulsan fault system based on marine terrace age study at the southeastern part of Korean peninsula. CLIEPI Report: N05012, Central Research Institute of Electric Power Industry, 83 p.
- Jeong, G.Y. and Cheong, C.-S., 2005, Recurrent events on a Quaternary fault recorded in the mineralogy and micromorphology of a weathering profile, Yangsan fault system, Korea. *Quaternary Research*, 64, 221-233.
- Kang, D.H., 2019, A study on the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the Quaternary faults rock, SE Korea. M.S. Thesis, Pusan National University, Pusan, 96 p (In Korean with English abstract).

- Kang, H.-C., Han, R., Kim, C.-M., Cheon, Y., Cho, H., Yi, K., Son, M. and Kim, J.-S., 2017, The Bonggil pseudotachylyte, SE Korea: Its occurrence and characteristics. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 173-191 (In Korean with English abstract).
- Kang, H.-C., Kim, C.-M., Han, R., Ryoo, C.-R., Son, M. and Lee, S.-W., 2019, Pseudotachylyte developed in granitic gneiss around the Bulil waterfall in the Jirisan, SE Korea: Its occurrence and characteristics. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 28, 157-169 (In Korean with English abstract)
- Kee, W.-S., Kim, B.C., Hwang, J.H., Song, K.-Y. and Kim, Y.-H., 2007, Structural characteristics of Quaternary reverse faulting on the Eupcheon fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 311-333 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.-M., Ha, S. and Son, M., 2020, Evidence of coseismic slip recorded by Quaternary fault materials and microstructures, Naengsuri, Pohang. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 175-192 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.-M., Han, R., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Son, M., 2016, Internal structure and materials of the Yangsan fault, Bogyongsan area, Pohang, South Korea. *Geosciences Journal*, 20, 759-773.
- Kim, C.-M., Han, R., Kim, J.-S., Sohn, Y.K., Jeong, J.O., Jeong, G.Y., Yi, K. and Kim, J.C., 2019, Fault zone processes during caldera collapse: Jangsan Caldera, Korea. *Journal of Structural Geology*, 124, 197-210.
- Kim, C.-M., Jeong, J.O., Gu, D. and Han, R., 2017, Identification of materials in principal slip zones of faults by X-ray diffraction analysis using a small amount of sample. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 873-883 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-Y. and Kim, D.H., 2002, A seismic refraction study near the Gamsansa fault in Gyeongju, Korea. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 5, 41-50 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-Y., Kim, D.H. and Lee, S.Y., 2008, Near-surface geophysical studies in the Ulsan fault zone of Korea. *Exploration Geophysics*, 39, 78-84.
- Kim, M.-C., Jung, S., Yoon, S., Jeong, R.-Y., Song, C.-W. and Son, M., 2016, Neotectonic crustal deformation and current stress field in the Korean peninsula and their tectonic implications: A review. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 169-193 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-J. and Lee, H.-K., 2017, Quaternary activity patterns of the Keumwang fault in the Wonju-si area, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 79-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Choi, J.-H., Park, S.-I., Lee, T.-H. and Choi, Y., 2020, 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, T., Shin, H.-J. 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, 193-209 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Jin, 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., Son, M., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Seong, Y.B. and Lee, J., 2020, 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).
- Kyung, J.B., 1997, Paleoseismological study on the mid-northern part of Ulsan fault by trench method. *The Journal of Engineering Geology*, 7, 81-90 (in Korean with English abstract).
- 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. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 13, 187-197 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.-R., Park, C.-S. and Shin, J.-R., 2018, Distribution of fault-related landforms and lineaments along the Ulsan fault zone. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 25, 89-103 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Rezaei, S., Hong, Y., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Choi, W.-H., Rhee, K.-W. and Kim, Y.-S., 2015, Quaternary fault analysis through a trench investigation on the northern extension of the Yangsan fault at Dangu-ri, Gyungjusi, Gyeongsanbuk-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 471-485 (in Korean with English abstract).
- Lewis, G., Knipe, R.J. and Li, A., 2002, Fault seal analysis in unconsolidated sediments: a field study from Kentucky USA. In: Koestler, A.G., Hunsdale, R. (eds.), *Hydrocarbon Seal Quantification*, Norwegian Petroleum Society Special Publications, Elsevier, 11, 243-253.
- Loveless, S., Bense, V. and Turner, J., 2011, Fault architecture and deformation processes within poorly lithified rift sediments, Central Greece. *Journal of Structural Geology*, 33, 1554-1568.
- McCalpin, J.P., 2009, *Paleoseismology*: 2nd ed. Academic Press, San Diego, 613 p.
- Mitchell, T.M., Ben-Zion, Y. and Shimamoto, T., 2011, Pulverized fault rocks and damage asymmetry along the

- Arima-Takatsuki Tectonic Line, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 308, 284-297.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Choi, 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., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J.B., Jo, W.R., Kim, S.K., Oike, K. and Nakamura, T., 1998, Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan fault system, Southeast Korea. *Journal of Geography*, 107, 644-658 (in Japanese with English abstract).
- Rawling, G.C. and Goodwin, L.B., 2003, Cataclasis and particulate flow in faulted, poorly lithified sediments. *Journal of Structural Geology*, 25, 317-331.
- Ree, J.H. and Kwon, S.T., 2005, The Wangsan fault: One of the most 'active' faults in South Korea?. *Geosciences Journal*, 9, 223-226.
- Ree, J.H., Lee, Y.-J., Rhodes, E.J., Park, Y., Kwon, S.-T., Chwae, U., Jeon, J.-S. and Lee, B.-J., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean peninsula: Age constraint by optically stimulated luminescence dating. *The Island Arc*, 12, 1-12.
- Ryoo, C.-R., 2009, A report for the Quaternary Gaegok 6 fault developed in the mid-eastern part of Ulsan fault zone, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 42, 635-643 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Chwae, U., Choi, S.-J. and Son, M., 2001, Quaternary faults in Hwalseong-ri, Oedong-up, Gyeongju, Korea. *KIGAM Bulletin*, 5, 24-33 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Son, M., Lee, Y.H., Choi, S.-J. and Chwae, U., 2004, Quaternary faults around Bulguk-sa, Gyeongju, Korea. *KIGAM Bulletin*, 8, 3-17 (in Korean with English abstract).
- Song, S.J., Choo, C.O., Chang, C.J. and Jang, Y.D., 2017, A microstructural study of the fault gouge in the granite, Yangbuk, Gyeongju, southeastern Korea, with implications for multiple faulting. *Geosciences Journal*, 21, 1-19.
- Sullivan, W.A. and Peterman, E.M., 2017, Pulverized granite at the brittle-ductile transition: An example from the Kellyland fault zone, eastern Maine, USA. *Journal of Structural Geology*, 101, 109-123.
- Tembe, S., Lockner, D.A. and Wong, T.F., 2010, Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B03416.
- Woo, S. and Han, R., 2019, Shear tests on intact fault gouges preserving natural deformation fabrics. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 131-139 (in Korean with English abstract).
- Woo, S., Han, R., Kim, C.-M., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Lee, H., 2016, Relation between temporal change of fault rock materials and mechanical properties. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 847-861 (in Korean with English abstract).
- Woo, S., Lee, H., Han, R., Chon, C.-M., Son, M. and Song, I., 2015, Frictional properties of gouges collected from the Yangsan fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 569-584 (in Korean with English abstract).
- Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen, C.R., 1997, *The Geology of Earthquakes*. Oxford University Press, New York, 568 p.
- Yoon, S.-O. and Hwang, S.-I., 1999, The active fault topography of the northern part of the Bulguksa fault system in Kyungju city, southeastern Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 34, 231-246 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.-O. and Hwang, S.-I., 2004, The Geomorphic development of alluvial fans in the Gyeongju city and Cheonbuk area, southeastern Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 39, 56-69 (in Korean with English abstract).

Received : October 20, 2020

Revised : November 24, 2020

Accepted : November 27, 2020