



Article

단층 손상대 내 분쇄암의 진화: 양산 금산리 제4기 단층 사례

윤동화¹, 한래희^{1,*}, 우상우^{1,3}, 구도희¹, 한종원², 손 문²

¹경상국립대학교 지질학과 및 기초과학연구소

²부산대학교 지질환경과학과

³사피엔자대학교 지구과학과

Evolution of pulverized rocks in fault damage zones: A case study of Quaternary fault at Geumsan-ri, Yangsan, Korea

Donghwa Yun¹, Raehee Han^{1,*}, Sangwoo Woo^{1,3}, Dohee Gu¹, Jong-Won Han², Moon Son²

¹Department of Geology and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

²Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

³Department of Earth Sciences, Sapienza University, Roma 00185, Italy

Received: October 20, 2025 / Revised: December 15, 2025 / Accepted: December 21, 2025

*Corresponding author: +82-55-772-1471 / E-mail: raeheehan@gnu.ac.kr

요약: 지진은 단층의 동적 파열 전파로 발생하며, 그 과정에서 형성된 변형구조는 단층핵과 손상대에 보존될 수 있다. 본 연구는 양산시 금산리의 두 개 지점에서 나타나는 제4기 주향이동 단층대를 대상으로 단층암 내 지진성 미끌림 지시 구조의 형성과 손상대 내 분쇄암의 발달과 진화 과정을 이해하기 위하여 수행되었다. 1번 지점에서는 N26°E/83°NW 자세의 단층을 따라 남동쪽의 제4기의 퇴적물이 북서쪽의 백악기 화강암과 접하고 있다. 이 지점의 점토질 단층비지는 단층 미끌림대로부터 퇴적물 쪽으로 주입되어 있으며 그 구조의 폭/길이의 비(종횡비)는 약 0.3에 달한다. 한편, 단층 북서편의 화강암 내부에서는 회복된 단열과 열린 단열이 높은 밀도로 존재할 뿐 아니라 변형띠 및 습곡된 변형띠가 관찰된다. 2번 지점에서는 N60°E/87°SE 자세의 단층이 백악기 화강암 내에 발달한다. 이 지점에서 분쇄암은 단층을 기준으로 북서편 암체에 집중적으로 발달하며, 그 내부에서는 회복된 단열과 열린 미소단열이 다수 관찰된다. 반면, 단층의 남동편 화강암체에서는 회복된 단열만이 발달한다. 1번 지점의 단층비지 주입구조는 높은 값의 폭/길이 비로 보아 마찰가열에 따른 유체압 상승 뿐 아니라 동적 인장응력이 작용하여 형성된 것으로 해석된다. 두 지점에서의 분쇄암은 반복된 단층 미끌림을 거치면서 (1) 분쇄화-재분쇄화, (2) 분쇄화-단열 회복, (3) 분쇄화-단열 회복-재분쇄화의 세 경로로 진화하였으며, 지진 사이 기간 중의 단열 회복은 후속 분쇄화의 발생 여부와 위치를 결정하는 중요한 요인으로 작용하였다. 또한 분쇄암의 비대칭 분포는 이종물질 경계 효과와 암석학적 특성 차이에 기인하나, 단일물질 조건에서도 파열 방향성과 응력 분포 특성에 따라 발생할 수 있다. 본 연구는 손상대의 단열 회복이 후속 분쇄화의 발생 여부와 위치를 제어할 수 있음을 시사하며, 장기적인 단층대 진화 모델 구축에 기여할 수 있다.

주요어: 손상대, 분쇄암, 지진 파열, 단열 회복, 제4기 단층

ABSTRACT: Earthquakes are generated by the dynamic propagation of ruptures along faults, and the resulting deformation structures can be preserved within fault cores and damage zones. This study investigates the formation of seismic slip indicators and the development and evolution of pulverized rocks in the Quaternary strike-slip fault zone at two localities in Geumsan-ri, Yangsan, Korea. At Site 1, a fault with an orientation of N26°E/83°NW juxtaposes Quaternary sediments in the southeast against Cretaceous granite in the northwest. Clay-rich gouge is injected from the slip zone into the sediments, with a width-to-length ratio (aspect ratio) of approximately 0.3. Within the granite on the northwestern side of the fault, healed fractures and open fractures occur at high density, together with deformation bands and folded deformation bands. At Site 2, a fault with an orientation of N60°E/87°SE is developed within Cretaceous granite. Here, pulverized rocks are concentrated in the northwestern side, containing both healed and open microfractures, whereas only healed fractures are developed in the southeastern side. The gouge injection structure at Site 1, with its high aspect ratio, is interpreted to have formed not only by fluid overpressure induced by frictional heating but also through the contribution of dynamic tensile stresses. Pulverized rocks at both sites evolved through three pathways during repeated seismic slip: (1) pulverization-successive pulverization, (2) pulverization-fracture healing, and (3) pulverization-fracture healing-pulverization. Fracture healing during interseismic periods served as a critical factor in determining the

occurrence and location of subsequent pulverization. The asymmetric distribution of pulverized rocks is attributed to bimaterial interface effects and lithological property contrasts, but it can also occur in homogeneous rocks depending on rupture directivity and stress field distribution. This study suggests that fracture healing within damage zones can control subsequent pulverization and location, thereby contributing to the development of long-term fault zone evolution models.

Key words: damage zone, pulverized rocks, earthquake rupture, fracture healing, Quaternary fault

1. 서론

단층대에 축적된 응력이 임계치에 도달하면, 작은 단층 패치(fault patch)에서 미끄럼이 개시된 뒤, 기존 단층을 따라 동적 마찰 파열(dynamic frictional rupture)이 전파되면서 발생한다. 빠른 속도로 전파하는 파열 전면부 및 그 인근에서는 매우 짧은 시간 동안 극한의 변형이 집중되고, 단층 미끄럼대에서는 주로 마찰가열과 관련한 다양한 단층강도약화 메커니즘(e.g., melt lubrication, flash heating, pore fluid pressurization 등)의 작동을 수반하며 빠른 속도로 미끄럼이 발생한다(e.g., Noda and Shimamoto, 2005; Rice, 2006; Han *et al.*, 2010, 2011; Di Toro *et al.*, 2011; Goldsby and Tullis, 2011; Yao *et al.*, 2023). 과거 지진성 단층미끄럼을 지시하는 구조는 크게 단층핵(fault core)과 손상대(fault damage zone)에서 확인된다. 단층핵에서는 대표적으로 단층면에 나란하게 발달하거나 주변으로 관입한 슈도타킬라이트(pseudotachylite), 그리고 단층비지 주입구조 등이 관찰된다. 슈도타킬라이트는 단층면 물질이 고속 미끄럼 동안 마찰용융 후 급격히 냉각되어 형성되며, 단층 운동 시 발생한 단열명에 관입하여 주입세맥을 이룬다(Kirkpatrick *et al.*, 2012; Kirkpatrick and Rowe, 2013; Han, 2017). 단층비지 주입구조는 물과 미세입자를 포함한 단층비지가 고속 미끄럼의 마찰가열-비배수 조건에서 과압에 의해 주변 암석으로 주입되며 발생한다(Ferri *et al.*, 2010, 2011; Lin, 2011; Ujiie *et al.*, 2013; Rowe and Griffith, 2015; Han *et al.*, 2020). 이들 구조는 모두 고속 미끄럼과 마찰가열을 필요로 하므로 대표적인 지진성 미끄럼 지시자로 받아들여진다. 최근에는 카올리나이트(kaolinite)를 대상으로 한 고속 전단 실험연구를 통해 주미끄럼대(principal slip zone)의 생성 및 존재 또한 지진성 미끄럼의 지시 구조가 될 수 있다고 제안된 바 있다(Woo *et al.*, 2023).

단층 손상대에서는 분쇄암(pulverized rock)이 대표적인 지진성 미끄럼 지시 구조로 알려져 있다(Brune, 2001; Ben-Zion and Shi, 2005; Doan and Gary, 2009; Mitchell *et al.*, 2011). 분쇄암은 지진 파열 전면부(rupture tip)에서 순간적으로 발생하는 극히 높은 변형률에 의해 형성되며, 내부에는 다수의 확장 미소단열(extension microfracture)이 발달하지만 입자 회전(grain rolling) 없이 암석의 1차 조직을 보존한다(Rockwell *et al.*, 2009; Mitchell *et al.*, 2011; Rempe *et al.*,

2013). 또한, 야외에서 손으로 문질렀을 때 가루 같은 질감을 보인다. 이러한 특징은 입자 회전, 마찰 미끄럼(frictional sliding), 입도 감소(grain size reduction)를 수반하는 일반적인 단층암과 뚜렷하게 구분된다(e.g., Blenkinsop, 1991; Sibson, 1977). 분쇄화(pulverization) 메커니즘으로는 (1) 이중물질(bi-material) 경계에서 파열 전면부가 단층을 따라 서로 반대 방향으로 전파되면서 동적 변형장(dynamic strain field)이 비대칭적으로 분포하고 파열 전면부 주변의 수직 응력이 급격히 감소하는 동적 하중감소(dynamic unloading; Ben-Zion and Shi, 2005; Dor *et al.*, 2006a 등), (2) 초전단 파열(supershear rupture) 시 마하 전면(Mach front) 암석에 강한 동적 하중이 발생하여 미세 암편화(fragmentation)가 유발되는 동적 암편화(dynamic fragmentation; Doan and Gary, 2009 등), (3) 파열 전면부에서 발생한 일시적 인장응력으로 확장 미소단열이 형성되는 일시적 인장 응력 교란(transient tensile stress perturbation; Xu and Ben-Zion, 2017 등), (4) 간지진(interseismic period) 동안의 기체 포화 이후 동지진(coseismic period) 동안의 급격한 감압(decompression)으로 공극 기체가 급팽창해 암석이 제자리(in situ)에서 분쇄되는 급격한 기체 감압(rapid gas decompression; Mitchell *et al.*, 2013 등) 모델 등이 제안되었다.

이러한 분쇄암 연구는 주로 Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 실험과 수치 모델링을 통해 이루어져 왔다. 이중 SHPB 실험의 경우, 충격 하중을 암석 시료에 추가하여 매우 짧은 시간 규모에서 발생하는 동적 파괴 거동을 정량화하는 실험으로, 암석이 분쇄되는데 요구되는 최소 변형률인 임계 변형률과 단열 성장 특성을 규명하는 데 활용되어 왔다(Dor *et al.*, 2006a, 2006b; Doan and Billi, 2011; Yuan *et al.*, 2011; Xu and Ben-Zion, 2017; Griffith *et al.*, 2018). 그러나 기존 연구는 순간적인 분쇄 발생 과정에 집중되어 있으며, 분쇄된 손상대가 이후 시간 경과에 따라 어떻게 회복(healing)과 충전(sealing)을 겪으며, 이러한 과정이 재분쇄화(successive pulverization)와 후속 단층 미끄럼에 어떤 영향을 미치는지는 여전히 규명되지 않았다. 국내에서도 Park *et al.* (2020, 2022)이 경주시 일대 제4기 단층의 분쇄 화강암에 대한 야외 및 미세구조 관찰을 보고하였으나, 분쇄암의 진화 메커니즘은 심도 있게 다루지지 않았다.

본 연구는 양산시 금산리 일원의 공사 현장에서 드러난 제4기 단층대를 대상으로 수행하였다. 이곳은 Han *et al.* (2023)

이 최초 보고한 지역으로, 미고결 퇴적물과 화강암의 경계 및 화강암체 내부에 여러 조의 단층이 발달한다. 연구 단층의 손상대에서는 분쇄암이 확인되며, 단층을 기준으로 비대칭적인 분포를 보인다. 본 연구에서는 노두에서 미세 규모에 이르는 관찰과 물질 분석을 통해 (1) 지진성 미끌림 지시 구조의 진단적 특징을 규명하고, (2) 그 형성 메커니즘을 해석하며, (3) 시간 경과에 따른 손상대의 진화 양상을 토의하고, (4) 분쇄암의 비대칭 분포 원인을 검토하였다.

2. 지질학적 배경

한반도 남동부에 위치한 양산단층계는 자인, 밀양, 모량, 양산, 동래, 일광단층으로 구성되며, 이 중 양산단층은 규모가 가장 크다. 양산단층은 부산에서 울진에 이르기까지 북북동-남남서 방향을 따라 약 200 km 이상 연장되며, 단층대 폭은 수 km, 우수향 수평 변위는 20-35 km로 알려져 있다 (e.g., Reedman and Um, 1975; Choi *et al.*, 1980; Um *et al.*, 1983; Chang *et al.*, 1990; Hwang *et al.*, 2004, 2007a, 2007b; 그림 1a). 선행 연구에 따르면, 양산단층은 단층대의 지질 구조, 절단 관계 및 연대 분석 결과를 종합할 때 백악기 말 좌수향 운동, 고신기 우수향 운동, 중기 마이오세 이후 좌수향 운동, 제4기 우수향 횡압축 운동한 것으로 해석된다 (Cheon *et al.*, 2017, 2019).

양산단층의 분절(segment) 구분에 대해서는 학자들 간 견해차가 존재한다. Lee and Jin (1991)은 126건의 역사 지

진 및 14건의 계기 지진 자료를 근거로 양산단층을 북부, 중부, 남부의 3개 분절로 구분하였고, Chang (2002)은 포항시-양산시 구간의 선형 구조 방향, 단층대 폭 변화, 단층 말단부 발달 양상을 바탕으로 5개의 분절로 구분하였다. 이후 Choi *et al.* (2017)은 구조지질학, 지진학, 고지진학, 기하학적 특성을 종합하여 3개의 주요 분절(북부, 중부, 남부)과 9개의 세부 분절로 체계화하였다. 본 연구에서는 최근의 연구결과인, Choi *et al.* (2017)의 분류체계를 따르며, 연구 지역은 남부 분절의 남단부에 해당한다.

양산단층 남부 분절 말단부의 남쪽 연장성과 운동학적 및 제4기 운동 특성을 규명하기 위한 조사가 다수 수행되었다 (Choi *et al.*, 2012; Lim *et al.*, 2021; Ryoo *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2023). 이 가운데 Han *et al.* (2023)은 경상남도 양산시 금산리 일대에서 ‘금산지점’ 단층을 보고하였다. 동 연구에서 세 곳의 단층 노두에 대한 구조지질학 및 고지진학적 분석을 실시한 결과, 단층들은 백악기 화강암과 선상지 퇴적물을 절단하며 역이동 성분을 포함한 우수향 주향이동 단층으로 확인되었다. 대상 단층과 주변 퇴적물에 대한 직접적인 연대 측정 결과는 제시되지 않았으나, 남남서쪽 약 600 m에 위치한 가산단층과의 운동학적 특성과 누적 변위량의 유사성을 근거로(그림 1a), 111 ± 7 ka 보다 최근에 운동한 제4기 단층으로 해석되었다. 이번 연구는 양산시 금산리 일대 공사장 절개면에 노출된 단층 노두를 대상으로 수행되었다. 노두는 Han *et al.* (2023)의 ‘금산리 단층-1’ 지점과 기준에 보고되지 않은 지점으로 구분되며, 본 연구에서는

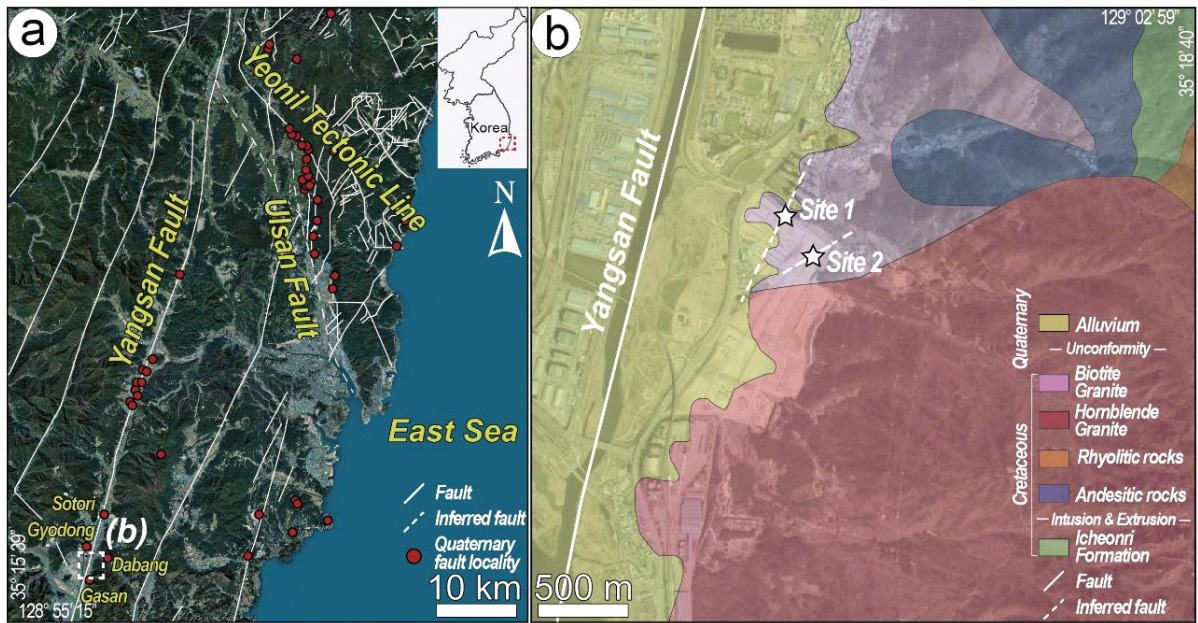


Fig. 1. (a) Satellite image showing the locations of Quaternary faults (red circles) along the southern segment of the Yangsan Fault (Choi *et al.*, 2017). (b) Geological map of the boxed area in (a), with study sites marked by white stars. Site 1 corresponds to the “Geumsanri fault-1” reported by Han *et al.* (2023). Modified from Son *et al.* (1978), Lee *et al.* (2022), and Han *et al.* (2023).

각각 1번 지점과 2번 지점으로 명명하였다(그림 1b).

3. 연구방법

노두에서 단층, 분쇄 화강암, 화강암, 미고결 퇴적물의 특징적인 구조를 관찰 및 기재하고 이들의 자세를 측정하였다. 실내에서의 분석을 위하여 단층암과 분쇄 화강암은 정향 시료로, 화강암은 비정향 시료로 채취하였다. 모든 시료는 실온에서 24시간 건조한 후 저점도 에폭시로 시료 표면을 보강하였다. 단층암과 분쇄 화강암 구조 관찰용 시료는 단층면에 수직하고 단층조선에 평행한 면으로 절단하고, 화강암은 노두면의 자세대로 절단하였다. 절단된 시료는 50°C 오븐에서 24시간 건조하였으며, 이 과정에서 물질이 탈락된 곳은 저점도 에폭시로 재보강하였다. 암판(rock-slab) 및 박편 연마 시에는 수분 유입으로 인한 시료 손상을 최소화하기 위해 방전가공유를 사용하였으며, 스캐너(Epson Perfection V800 Photo)로 고해상도(1200 dpi)의 구조분석용 이미지를 획득하였다. 미세구조는 광학현미경(Olympus BX53)으로 1차 관찰한 후, 경상국립대학교 첨단소재분석지원센터의 음극선발광(Cathodoluminescence; CL; JEOL xCLent IV)과 에너지분산형 분광분석기(energy dispersive X-ray spectroscopy; EDS; Oxford X-Max 50)가 장착된 전계방사 전자현미분석기(field emission electron probe micro-analyzer; FE-EPMA; JEOL JXA-8530F PLUS)를 이용하여 정밀 관찰 및 물질분석을 하였다. 전자현미분석은 탄소 코팅된 박편에서 가속전압 15 kV, 빔 전류 10 nA 조건에서 실시하였으며, 음극선 발광분석은 가속전압 12 kV, 빔 전류 20 nA, 분석 지속시간(dwell time) 20 ms, 측정 간격(step size)은 1 µm 조건에서 실시하였다.

암판에서 구분한 단층암 영역과 분쇄 화강암의 광물조성은 분말 X-선 회절분석을 통해 확인하였다. 분말시료는 암판에서 대표 영역을 선정하여 마이크로드릴(micro-drill; FBS 240/E, Proxxon)로 채취하였고(Kim *et al.*, 2017), 단층비지는 아게이트로, 상대적으로 강도가 높은 분쇄 화강암은 볼밀(SPEX MILL SPEX8000D MIXER/MILL)로 10분간 분쇄하였다. 분말시료는 50°C 오븐에서 약 24시간 건조한 후 경상국립대학교 지질과학과의 X-선 회절분석기(X-ray diffractometer (XRD); Bruker D8 Advance A25)로 분석하였으며, 측정조건은 40 kV, 40 mA, 4-70°(2θ) 구간, 주사 간격 0.02°, 주사 시간 0.2s로 설정하였다. 회절분석결과와 정성분석에는 Bruker AXS Diffrac Eva 프로그램을 이용하였다.

4. 노두규모 관찰

1번 지점의 미고결 퇴적물은 조립질 사질 기질과 약 0.7-0.9 m 크기의 아원형 화강암 역으로 구성되며, 분급은 불량하

고 상부로 갈수록 역 크기가 점진적으로 감소한다(그림 2a). 단층 북서편의 화강암에는 약 70 m 폭에 걸쳐 중규모 단열과 미소단열이 집중된 손상대가 발달하며, 이곳의 화강암은 전체적으로 분쇄되어 있다. 분쇄 정도는 단층과의 거리에 따라 달라지며, 단층 인접부 약 10 m 구간은 비교적 균질하게 분쇄된 반면, 그 외곽에서는 분쇄되지 않은 화강암 패치가 점차 증가하고 미소단열 밀도도 단층에서 멀어질수록 감소한다(그림 2a). 분쇄 화강암은 육안상 일차 조적을 보존하나 손으로 누르면 가루처럼 부서져 퇴적물과 유사한 질감을 보이는 전형적인 분쇄암의 특징을 보인다(그림 2b의 초록색 화살표). 단층 주변의 분쇄 화강암 내에는 다수의 유백색 변형띠(deformation band)가 망상으로 발달한다(그림 2b의 빨간색 화살표). 미고결 퇴적물과 분쇄 화강암 경계에는 약 20 cm 폭과 N26°E/83°NW 자세의 단층이 발달하며, 양쪽 모암과의 경계는 전체적으로 직선형의 기하를 보이고 일부 위치에서 굴곡진 곡면을 보인다. 단층활면과 조선(208°/13°)으로부터 역이동 성분을 포함한 우수향 주향이동 미끌림이 확인된다. 단층과 퇴적물 경계에서는 단층비지가 퇴적물로 주입되는데(그림 2a의 파란색 화살표), 이는 암판규모에서 더욱 명확히 인지된다.

암판규모 관찰결과, 단층핵과 주변부는 미고결 퇴적물, 분쇄 화강암, 파쇄암, 약 2 cm 폭의 갈색 단층비지, 약 3 cm 폭의 황색 및 상아색 단층비지, 약 2.5 cm 폭의 흰색 단층비지로 구분된다(그림 2c). 이 중 황색 및 상아색 단층비지에서는 우수향 주향이동 미끌림을 지시하는 S-엽리가 반복적으로 발달한다(그림 2c의 빨간색 화살표). 단층비지는 퇴적물 방향으로 주입되어 U자형 주입구조를 형성하며, 단층비지와 연속성으로 보아 그 기원은 황색 및 상아색 단층비지로 보인다(그림 2c). 주입구조는 약 2.5 cm 폭과 약 4.5 cm 높이까지 충전되어 있으며, 상부 약 4 cm는 빈 공간으로 남아 있다. 빈 공간은 주입구조와 연속적이고 화강암 역을 관통하는 점에서 주입 과정에서 형성되었을 가능성이 높으며 이는 기존 주입구조 사례의 특징과도 일치한다(e.g., Rowe *et al.*, 2012).

2번 지점은 1번 지점의 남남동쪽 200 m 지점에 위치하며, 화강암 내에는 N60°E/87°SE 자세의 단층이 발달한다(그림 1b). 단층은 약 3-6 cm 폭으로 발달하며, 화강암과는 전체적으로 직선형 기하의 경계를 갖는다(그림 3a). 단층활면과 조선(060°/15°)에서는 역이동 성분을 포함한 우수향 주향이동 미끌림이 확인된다(그림 3a). 단층 북서편의 화강암은 전단 변위가 확인되지 않는 다수의 단열을 포함한다. 노두 상의 화강암은 일차 조적을 유지하고 있으나 맨손으로 쥐었을 때 쉽게 부서져 분쇄암으로 판단된다. 분쇄 화강암은 단층으로부터 북서쪽으로 약 21 m까지 연장되며, 해당 구간은 분쇄되지 않은 화강암 패치(patch)의 밀도와 부스러

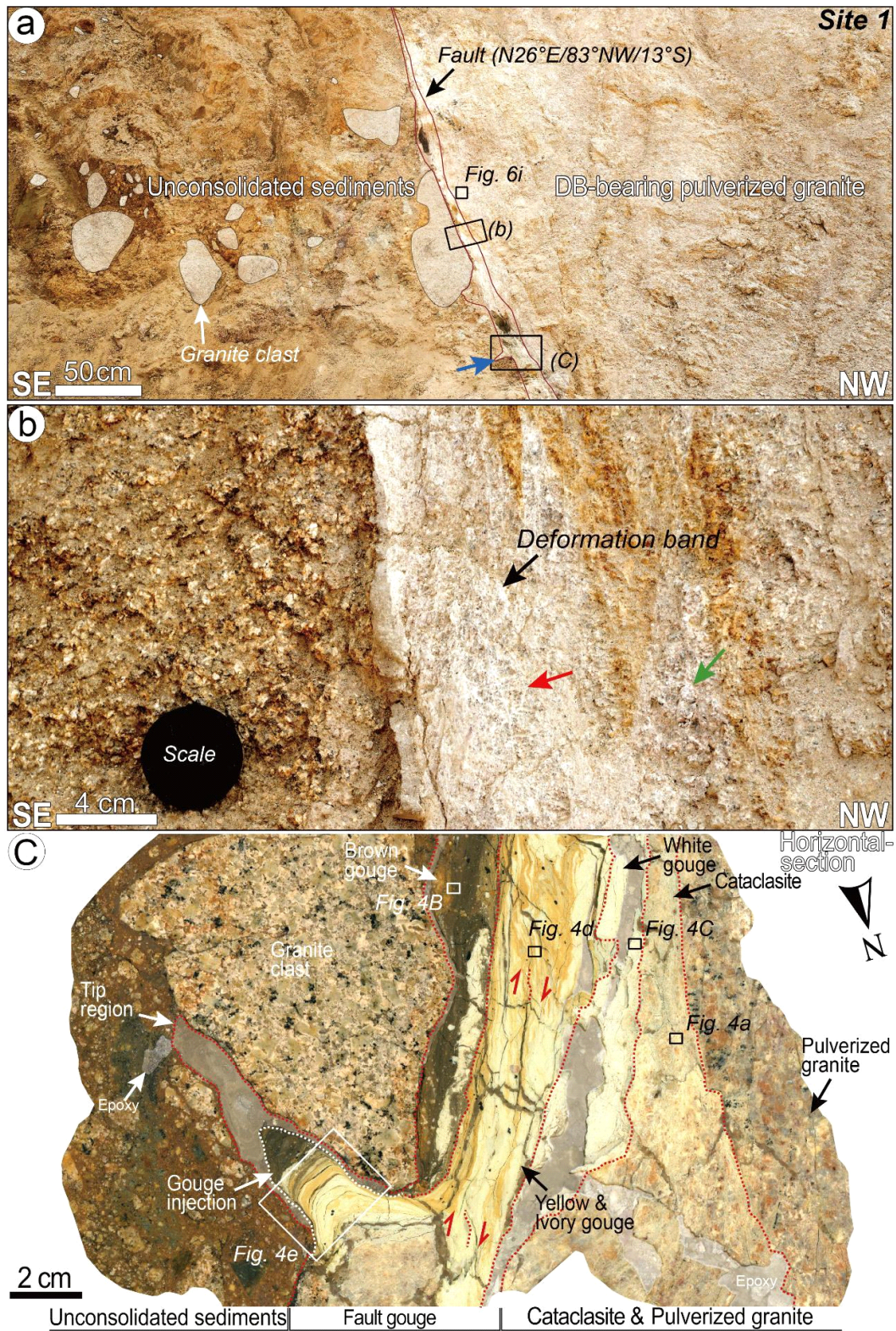


Fig. 2. (a) Outcrop photograph of site 1, showing a fault at the boundary between unconsolidated sediments and pulverized granite with deformation bands (DB), where fault gouge is injected into the sediments (blue arrow). (b) Close-up photograph of the boxed area in (a). The pulverized granite preserves its primary texture (green arrow), while deformation bands form an anastomosing network within it (red arrow). (c) Horizontal-section slab image of the boxed area in (a). Yellow and ivory gouges show S-foliation indicating dextral slip (red arrows).

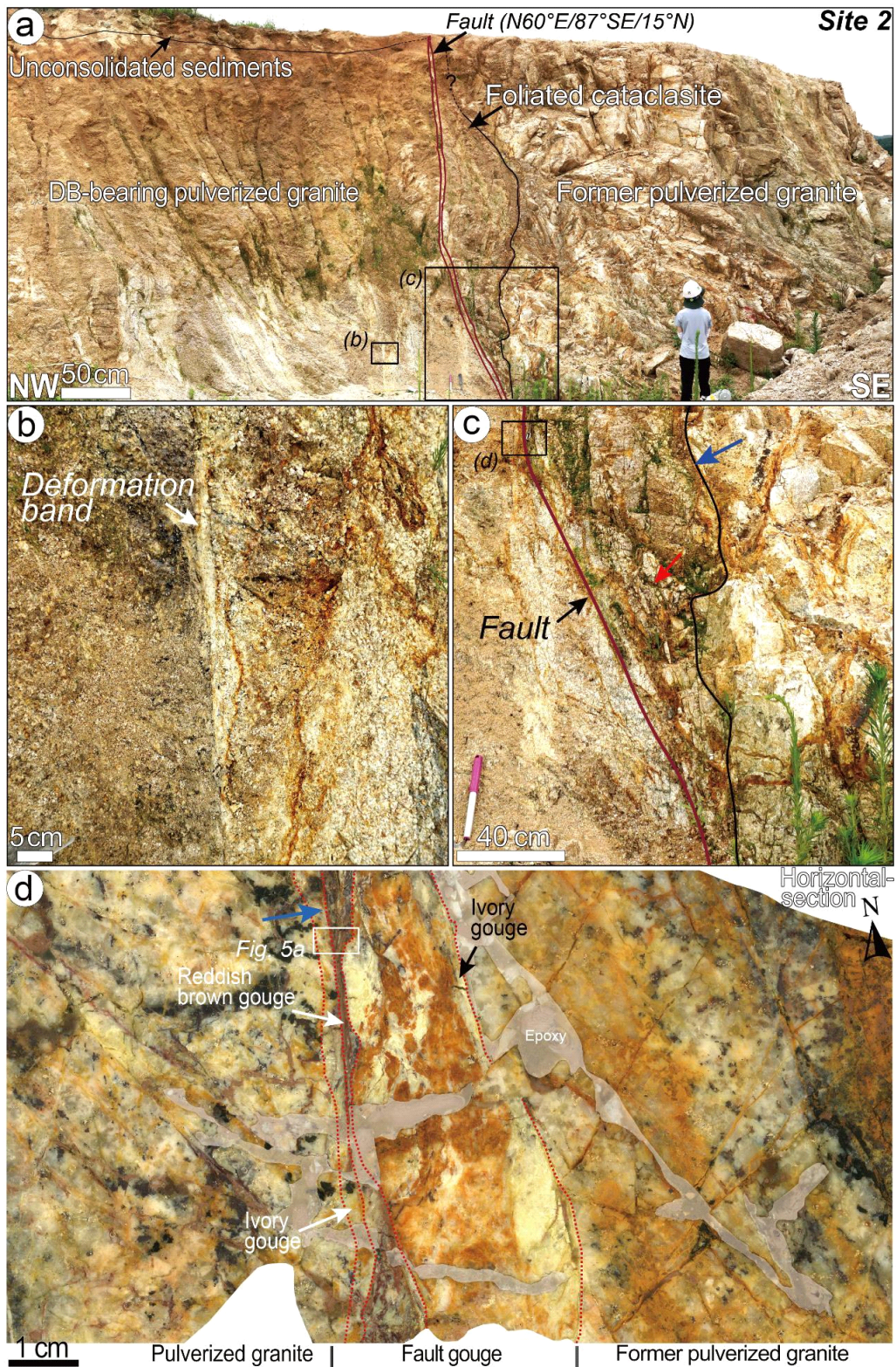


Fig. 3. (a) Outcrop photograph of site 2, showing a fault developed along the interface between pulverized granite with deformation bands (DB) and foliated cataclasite. (b) Close-up view of a deformation band. (c) Outcrop photograph of foliated cataclasite between the former pulverized granite and the fault, defined by aligned fractures (red arrow) and Fe-oxide precipitation along the granite boundary (blue arrow). (d) Horizontal-section slab image of the boxed area in (c). The boundary between the reddish brown gouge and the ivory gouge is straight (blue arrow).

집 정도가 유사하게 나타난다(그림 3a). 이 분쇄 화강암의 상부는 미고결 퇴적물에 의해 피복되지만, 단층 및 분쇄 화강암과의 접촉 관계는 불분명하다(그림 3a). 분쇄 화강암에는 약 5 cm 폭의 변형띠가 N73°E/80°SE 자세로 발달하며, 북서편 분쇄 화강암과는 직선형 경계를 보인다(그림 3b). 반면, 남동편 화강암은 다수의 단열을 포함하나 손으로 눌렀을 때 조적이 유지되고 변형띠는 발달하지 않는다. 화강암과 단층 사이에는 약 80 cm 폭의 엽리상 파쇄암(foliated cataclasite)이 발달한다. 파쇄암은 단층과 유사한 자세로 배열된 다수의 단열로 인해 엽리상 구조를 보이며(그림 3c의 빨간색 화살표), 화강암과의 경계부에는 철 산화물이 침전되어 있다(그림 3c의 파란색 화살표).

암판 규모 관찰 결과, 단층핵과 주변부는 분쇄 화강암, 화강암, 약 1 cm 폭의 적갈색 단층비지, 약 2 cm 폭의 상아색 단층비지로 구성된다(그림 3d). 분쇄 화강암과 화강암에는 다수의 단열이 발달하며, 그 내부는 황색 충전물로 채워져 있다. 적갈색 단층비지는 부분적으로 상아색 단층비지와 불균일하게 혼합되어 있으며, 상아색 단층비지는 외부 기원의 적황색 물질을 포함하고 있다. 두 단층비지의 경계는 비교적 직선형 기하를 보인다(그림 3d의 파란색 화살표).

5. 미세규모 관찰 및 물질 분석

5.1. 단층핵

1번 지점의 파쇄암은 약 500 μm 이하 크기의 아각형 석영, 장석과 점토광물로 구성되며, 분쇄 조직은 관찰되지 않는다(그림 4a). 갈색 단층비지의 기질부는 광학 현미경 직교니콜하에서 갈색을 띤다. 갈색 단층비지는 약 1 mm 크기의 입자를 포함하나 주로 160 μm 이하 크기의 아원형 석영, 장석 입자와 점토광물로 구성되며 파쇄변형조직을 보인다(그림 4b). 흰색 단층비지의 기질부는 직교니콜하에서 연갈색을 띤다. 이들은 약 70 μm 이하 크기의 아원형 석영, 장석입자와 점토광물로 구성되고 파쇄변형조직을 보인다(그림 4c). 황색 및 상아색 단층비지의 기질부는 직교니콜하에서 밝은 간섭색을 보이고, 미세입자는 제한적으로 확인되며 점토광물이 우세하다. 암편 함량은 다른 단층비지보다 현저히 낮으며 초파쇄변형조직을 보인다(그림 4d). 주입구조는 점토광물이 주를 이루며 소량의 석영, 장석 입자를 포함한다. 점토광물은 U자형 구조를 따라 강한 정향배열을 보이며, 변곡점을 기준으로 양편이 서로 다른 간섭색을 나타낸다(그림 4e).

2번 지점의 상아색 단층비지의 기질부는 직교니콜하에서 밝은 간섭색을 띠며, 약 210 μm 크기 아원형 석영 입자와 점토광물로 구성되고 파쇄변형조직을 보인다. 이 단층비지에는 노두에서 확인된 우수향 주향이동미끄럼을 지시

하는 S-엽리가 관찰된다(그림 5a). 적갈색 단층비지의 기질부는 직교니콜하에서 밝은 간섭색을 보이며, 약 150 μm 크기의 아원형 석영 입자와 점토광물로 구성되고 파쇄변형조직을 보인다. 상아색, 적갈색 단층비지 모두 기질에 유체 기원의 암갈색 물질을 포함한다(그림 5a). 두 단층비지의 경계부에서는 석영, 장석 입자의 함량이 급격히 감소하며, 약 50 μm 폭의 점토광물로 구성된 영역이 C-전단면을 따라 강한 정향배열을 보인다(그림 5a, 5b의 빨간색 화살표). 이는 전자현미경 관찰에서도 확인되며(그림 5c), 이러한 영역은 대부분의 단층 미끄럼을 수용한 주미끄럼대(principal slip zone; PSZ)로 추정된다. EDS 분석 결과, 주미끄럼대는 주로 스�멕타이트로 구성되며 석영, 장석 암편을 소량 포함하나 그 함량은 상대적으로 낮다(그림 5d, 5e).

5.2. 단층 손상대

1번 지점의 분쇄 화강암은 주로 석영, 장석과 소량의 운모로 구성된다(그림 6a). 석영, 장석 내부에는 다수의 미소 단열이 발달하여 약 2 mm 크기의 입자가 약 100-500 μm 크기의 미세입자로 분리되어 있다. 단열 밀도는 위치에 따라 불균일하여 약 50 μm 이하 크기의 입자로 존재하기도 한다(그림 6a). 미소단열들은 전단변위가 확인되지 않아 확장 단열로 해석되며, 특정한 방향성을 띄지 않는다. 분쇄 화강암은 수많은 단열이 발달하였음에도(그림 6a의 빨간색 화살표), 일차적인 화강암 조직을 유지하고 있다. 일부 미소단열은 빈 공간으로 남아 있으나 대부분 지표 기원의 충전물질(주로 점토광물)로 충전되어 있다(그림 6a의 inset). 분쇄 화강암의 석영 입자에는 유체포유물(fluid inclusion trail)로 인지되는 다수의 회복된 단열(healed fracture) 또한 존재한다(그림 6b의 초록색 화살표). 석영에 대한 CL분석 결과, 회복된 단열은 560-700 nm 파장대에서 적색 발광을 뚜렷하게 보이며(그림 6c의 검은색 화살표), 그 주변에서는 전단 변위가 확인되지 않는다. 열린 상태의 단열 또한 기존의 회복된 단열을 교차하나 전단 변위가 나타나지 않는다(그림 6c의 파란색 화살표).

2번 지점의 분쇄 화강암은 약 2 mm 크기의 석영, 장석과 소량의 운모로 구성되며, 장석은 1번 지점보다 더 풍화되어 있다(그림 6d). 암석은 일차 조직을 보존하고 있으나, 입자 내에는 다수의 미소단열이 발달한다(그림 6d의 빨간색 화살표). 미소단열은 전단 변위를 보이지 않는 확장 단열로, 위치에 따라 밀도가 불균일하며 개별 입자를 약 60 μm 이하 크기의 입자로 분리한다. 단열은 입자 내 또는 입자를 관통하여 발달하며, 열린 미소단열의 대부분은 빈 공간으로 남아있다(그림 6d). 분쇄 화강암의 석영 입자에는 유체포유물을 따라 회복된 단열들이 관찰된다(그림 6e의 초록색 화살표). 석영에 대한 CL 분석 결과, 총 CL 계수(total CL counts)에

서 회복된 단열과 주변 석영 간 CL 발광 차이가 명확히 확인되며, 이들 단열은 서로 교차하지만 전단 변위는 나타나지 않는다(그림 6f의 검은색 화살표). 반면, 단층의 남동편 화강암은 미소단열 발달이 거의 없고 중규모 단열만 포함하며 일차 조적을 유지한다. 이곳의 석영 입자에서도 유체 포유물을 따라 다수의 회복된 단열이 발달한다(그림 6g의 초록색 화살표). 석영에 대한 CL 분석 결과, 총 CL 계수(total CL counts)에서 회복된 단열과 주변 석영 간의 뚜렷한 CL

발광 차이가 인지된다(그림 6h). 이 단열들 역시 서로 교차하지만 전단 변위는 관찰되지 않는다(그림 6h의 검은색 화살표).

1번 지점과 2번 지점의 단층 북서편의 분쇄 화강암에는 다수의 변형띠가 발달한다(그림 2b, 3b). 이중 1번 지점의 분쇄 화강암은 대체로 화강암 조적을 보존하고 있으나, 여러 위치에서 약 1.5-4 mm 폭의 변형띠가 발달한다(그림 2b, 6i). 변형띠는 개방니콜하에서 베이지색을 띠며, 석영, 장석

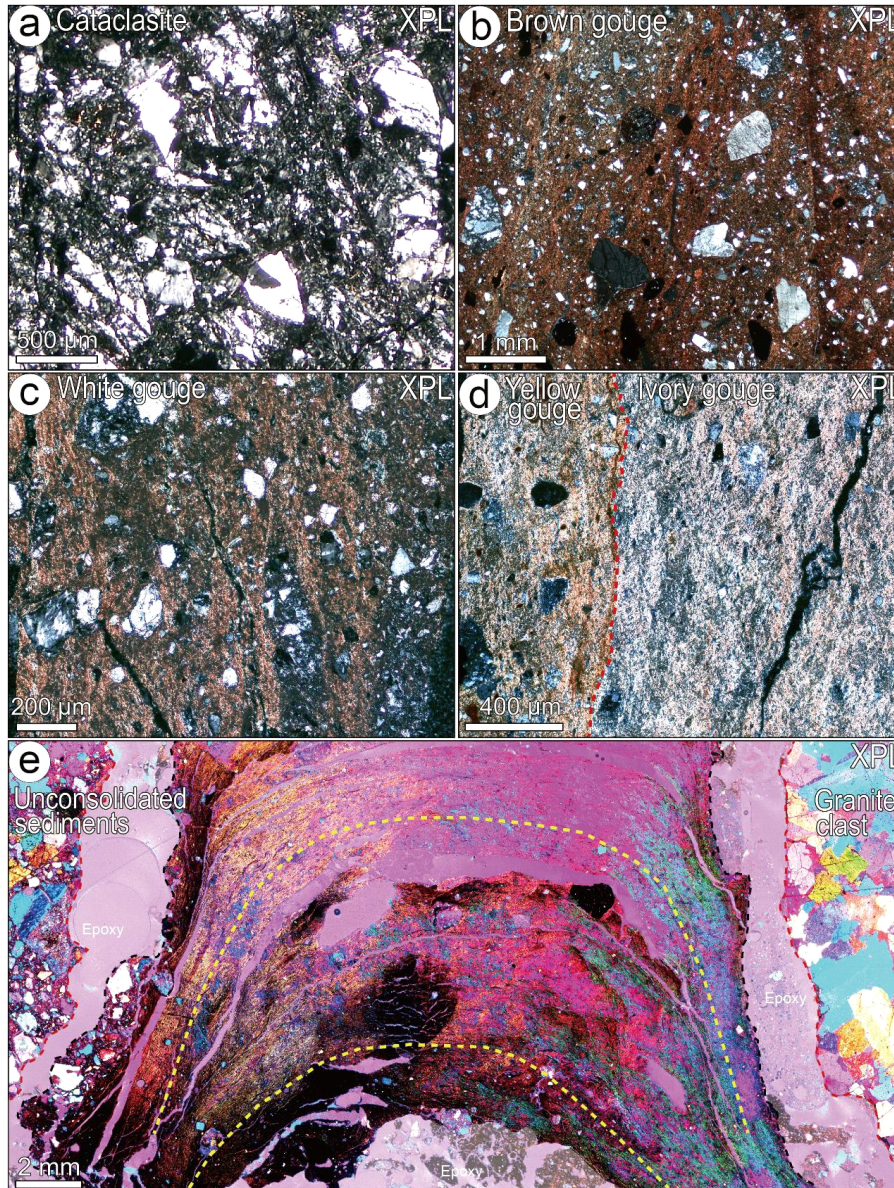


Fig. 4. Microstructures of the site 1 fault core (boxed area in Fig. 2c). (a) Photomicrograph of cataclasite shows the development of cataclastic texture overprinting the texture of pulverized granite. Photomicrographs of the brown (b) and white (c) gouges, characterized by a high content of clay minerals relative to clasts and cataclasis structure. (d) Photomicrograph of the yellow and ivory gouges, dominated by clay minerals with few microclasts, showing an ultracataclasis structure. (e) Photomicrograph of gypsum injection, where fault gouge is injected into the unconsolidated sediments (gypsum plate inserted). XPL: crossed-polarized light.

입자와 점토광물로 구성되고, 미소단열에 규제된 소량의 검은색 지표 기원의 물질이 변형띠 내에 포함되어 있다. 단층 인접부의 변형띠에서는 단층의 우수향 전단운동과 관련된 끌림 습곡이 발달한다(그림 6의 빨간색 점선).

5.3. 화강암 및 분쇄 화강암과 단층비지의 광물 조성

화강암 및 분쇄 화강암과 단층비지의 광물 조성을 파악하기 위하여 앞서 구획한 단층비지와 그 주변 화강암들을 대상으로 XRD 정성분석을 실시하였다(그림 7). 그 결과, 화강암은 석영, 사장석, K-장석, 흑운모 피크가 나타나며 일반적인 화강암 조성을 보인다. 분쇄 화강암은 공통적으로 흑운모의 부재를 제외하면 화강암과 동일한 광물 조성을 보

인다. 단층비지는 노두 위치나 색상에 따라 부수적인 광물 조성이 달라지지만, 석영, 사장석, K-장석, 스펙타이트, 일라이트(또는 일라이트 스펙타이트 혼합층광물) 피크는 모든 시료에서 공통적으로 나타난다. 이와 함께 1번 지점의 흰색 단층비지에서는 석고 피크가, 황색 및 상아색과 갈색 단층비지에서는 녹니석 피크가 확인된다. 2번 지점의 상아색 단층비지에서는 녹니석 피크가, 적갈색 단층비지에서는 카올리나이트와 적철석 피크가 추가로 확인된다.

6. 토 의

본 절에서는 금산리 제4기 단층의 단층핵과 손상대에서

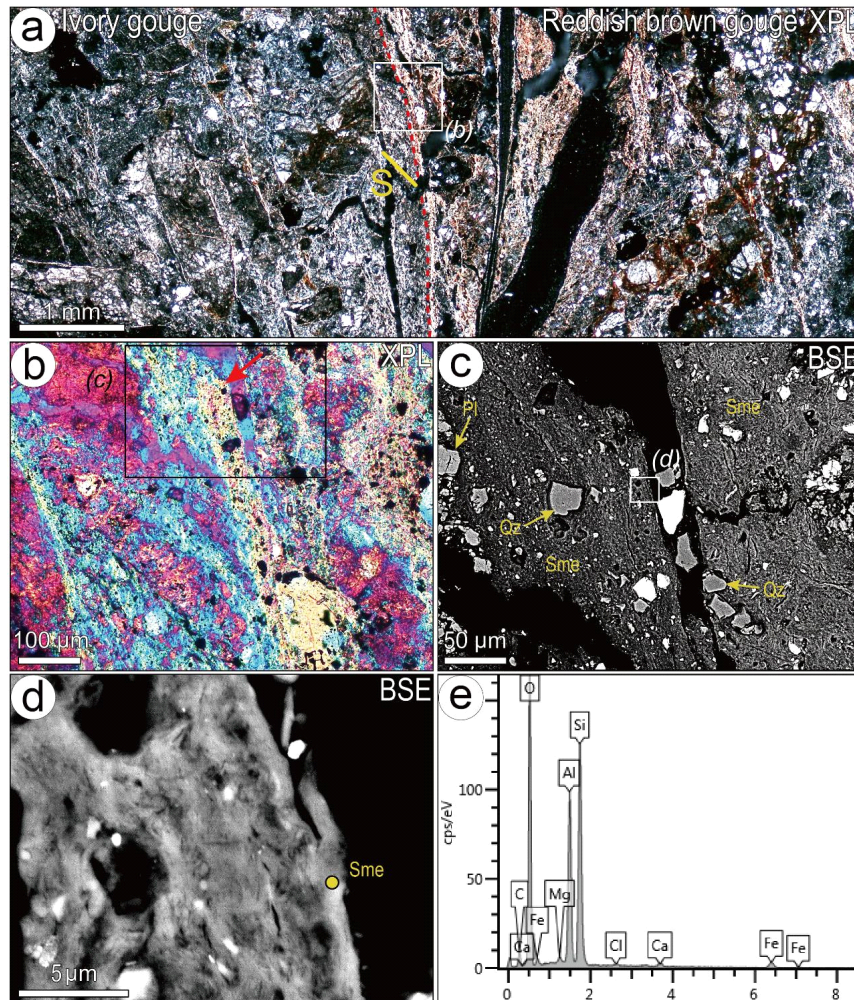


Fig. 5. Images showing the microstructures of the site 2 fault core. (a) Overview of the ivory and reddish brown gouges. Both gouges exhibit cataclasis structure, and the ivory gouge shows S-foliation indicating a dextral sense of slip. The boundary between the two gouges shows a marked decrease in clast content (boxed area in Fig. 3d). (b) Close-up view of the boundary (boxed area in (a); gypsum plate inserted), revealing a ~50 μm-thick strongly foliated zone defined by the preferred orientation of clay minerals (red arrow). (c-e) Back-scattered electron (BSE) images of the boxed area in (b) and corresponding EDS data (yellow circle in (d)), showing that the strongly foliated zone represents the principal slip zone (PSZ), mainly composed of smectite (Sme) with minor quartz (Qz) and plagioclase (Pl). XPL: crossed-polarized light.

각각 관찰된 단층비지 주입구조와 분쇄 화강암을 대상으로 이들의 형성 메커니즘을 검토하고, 분쇄암을 포함한 손상대의 진화 및 분쇄암의 비대칭 분포 특성을 논의한다.

연구대상 단층에서 확인된 지진성 미끌림 지시자는 단층

핵의 단층비지 주입구조와 손상대의 분쇄 화강암이다. 단층비지 주입구조는 지진성 미끌림과 관련된 대표적 변형 산물이나(Ferri *et al.*, 2010, 2011; Rowe and Griffith, 2015; Han *et al.*, 2020), 굴곡진 단층면을 따라서도 겹보기에 유사한

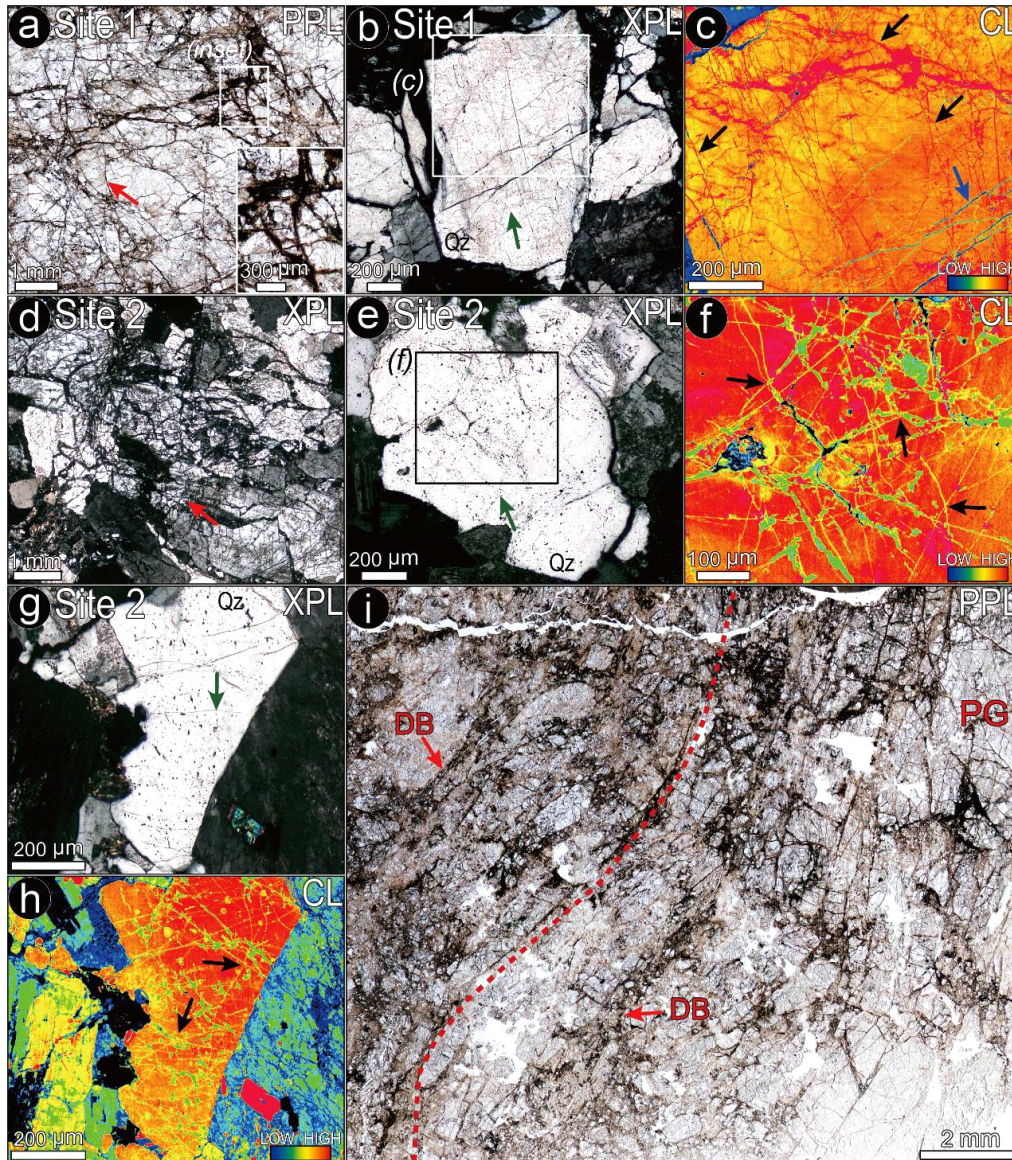


Fig. 6. Images showing the microstructures of the damage zones of site 1 and site 2. (a) Plane polarized light (PPL) image of pulverized granite at site 1, showing randomly oriented open microfractures without shear offset (red arrow). Most open microfractures are mainly filled with clay minerals (inset). (b) Photomicrograph of the quartz (Qz) from site 1 displaying healed fractures identified along fluid inclusion trails (green arrow). (c) Cathodoluminescence (CL) image of the boxed area in (b), where healed fractures exhibit strong luminescence at 560-700 nm (black arrows), crosscut by open microfractures (blue arrow). (d) Crossed-polarized light (XPL) image of pulverized granite of site 2, preserving the primary granitic texture with randomly oriented open microfractures lacking shear offset (red arrow). (e) Photomicrograph of the Qz at site 2 showing healed fractures identified along fluid inclusion trails (green arrow). (f) CL image of the boxed area in (e), where total CL counts clearly show a distinct luminescence contrast between healed and open microfractures (black arrows). (g) Photomicrograph of the Qz at site 2 with numerous healed fractures along fluid inclusion trails (green arrow). (h) CL image of (g), where total CL counts reveal a distinct luminescence contrast between healed fractures and adjacent quartz (black arrows). (i) XPL image of pulverized granite (PG) at site 1, showing deformation bands (DB) with drag folds (dashed line).

형상이 나타날 수 있으므로 이 구조로 특정하기 위해서는 기원물질과의 연속성, 내부의 U자형 구조 및 단열 충전 조직, 단층에 대해 ~70° 이상의 사이각, 종횡비(aspect ratio) 0.143-0.297 범위와 같은 진단적 특징들의 추가적인 검토가 요구된다(Rowe *et al.*, 2012). 본 연구대상 주입구조는 물질의 연속성이 확인되고 단층에 대해 약 68°의 고각을 보일 뿐 아니라 종횡비가 약 0.3으로 나타나 기존 진단 기준을 충족하므로, 단층비지 주입구조로 해석된다(그림 2, 4e). 단층비지 주입구조는 일반적으로 고속 미끌림 시 마찰가열에 따른 유체압 상승과 관련된 것으로 해석되나(Ferri *et al.*, 2010, 2011; Lin, 2011; Ujiie *et al.*, 2013; Rowe and Griffith, 2015;

Han *et al.*, 2020), 본 연구에서 관찰되는 것과 같이 높은 종횡비(~0.3)는, 탄성 확장(elastic opening)만으로 형성되는 균열의 한계 종횡비(~0.01)를 크게 초과한다(Rowe *et al.*, 2012). 이러한 기하는 단순한 탄성 변형만으로는 설명하기 어렵고, 지진 파열 시 동적 인장응력이 추가적으로 작동해야 형성될 수 있다(Rowe *et al.*, 2012). 동적 인장응력 하에서 형성될 수 있는 대표적 변형 산물인 분쇄암이 주입구조와 같이 관찰된다는 점은 이와 같은 해석을 뒷받침한다(Xu and Ben-Zion, 2017; Griffith *et al.*, 2018; Smith and Griffith, 2022a).

단층 손상대에서 확인되는 분쇄암은 지진 파열 전면부의

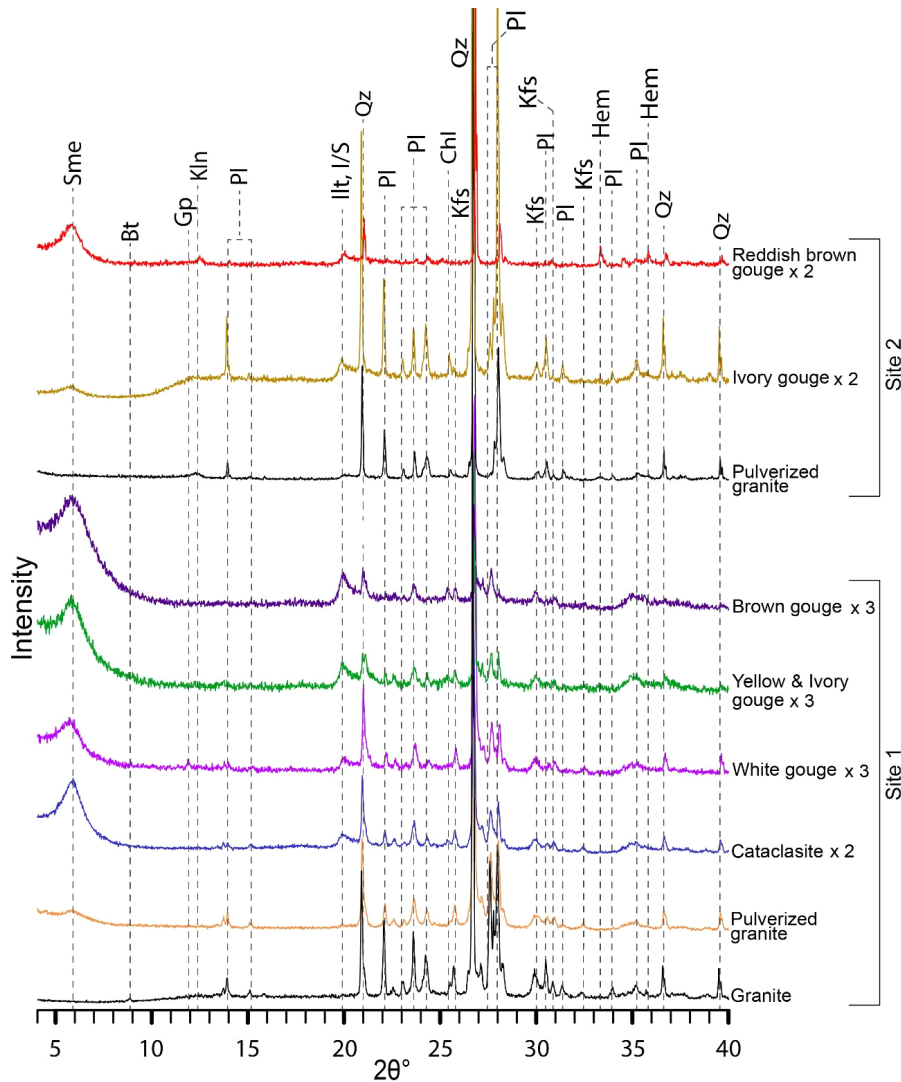


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of granite, pulverized granite, and fault gouges. The granite consistently exhibits a typical granitic composition of quartz (Qz), plagioclase (Pl), K-feldspar (Kfs), and biotite (Bt). Pulverized granites show a similar composition except for the absence of Bt. Fault gouges commonly contain Qz, Pl, and Kfs, together with abundant clay minerals such as smectite (Sme), illite (Illt), and illite-smectite mixed-layer minerals (I/S), while minor chlorite (Chl), kaolinite (Kln), hematite (Hem), and gypsum (Gp) are identified in some samples. The labels X2 and X3 indicate that the XRD intensities were multiplied by two and three, respectively, to enhance peak contrast.

고변형률 하에서 형성되며, 다수의 확장 미소단열이 발달하되 암석의 1차 조직은 보존된다는 특징을 가진다(그림 6a, 6d). 연구 대상 화강암은 이러한 특징을 충족하므로 분쇄 화강암으로 판정된다. 한편, 이번 연구에서는 시간 경과에 따른 단열 회복 및 재분쇄화 유무에 따라 (1) 분쇄화-재분쇄화(successive pulverization), (2) 분쇄화-단열 회복(fracture healing), (3) 분쇄화-단열 회복-재분쇄화 등 다양한 경로를 따르며 진화할 수 있음이 확인되었다(그림 8).

(1) 분쇄화-재분쇄화 경로의 사례는 1번 지점에서 확인된다(그림 8a). 1번 지점의 분쇄 화강암 내 열린단열은 단층 핵과 손상대에서 각각 관찰된 변형 구조(변형띠, 끌림 습곡, 단층비지 정향배열 및 주입구조)들에 근거할 때, 지진 파열의 반복적 발생을 시사한다(그림 2, 4e, 6a, 6i; Doan and d'Hour, 2012; Aben *et al.*, 2016; Smith and Griffith, 2022a). 예컨대, 결정질 암석에서 변형띠 발달은 미세 열린 단열의 선형을 필요로 하므로(e.g., Brune, 2001; Agosta and Aydin, 2006), 본 노두의 변형띠는 초기 파열 이후 혹은 단층 재활 과정의 반복적 미끌림에 의해 형성된 것으로 해석된다(그림 2b, 6i).

또한 복수의 단층 활동을 지시하는 단층비지의 정향 배열과 주입구조 발달(그림 4e), 단층 주변부의 변형띠 끌림 습곡은 분쇄 이후에도 지진성 단층 미끌림이 발생하였음을 보여준다(그림 6i). 이러한 반복적 단층 활동은 분쇄 이후 손상대의 재분쇄를 유발했을 가능성이 있다. 이는 SHPB 실험 결과와도 부합하는데, 초기 손상과 단열 네트워크가 존재할 경우 암석의 유효 인장강도와 임계 변형률이 낮아져 동일한 하중에서도 재분쇄가 용이해진다고 보고되었다(Doan and d'Hour, 2012; Aben *et al.*, 2016 등). 종합하면, 1번 지점의 열린 단열은 단일 사건의 결과보다는 반복적 분쇄화의 누적 산물일 가능성이 높다.

(2) 분쇄화-단열 회복 경로는 2번 지점의 남동편 화강암에서 관찰된다(그림 3a, 8b). 이곳에는 분쇄 기원의 열린 단열은 없고 회복된 단열이 밀집해 있으며, 전단 변형의 흔적은 나타나지 않는다(그림 6g, 6h). 이는 초기 분쇄화 이후 단열 회복이 진행되었고, 그 결과 추가적인 분쇄화는 발생하지 않은 상태임을 지시한다.

(3) 분쇄화-단열 회복-재분쇄화 경로는 1번과 2번 지점

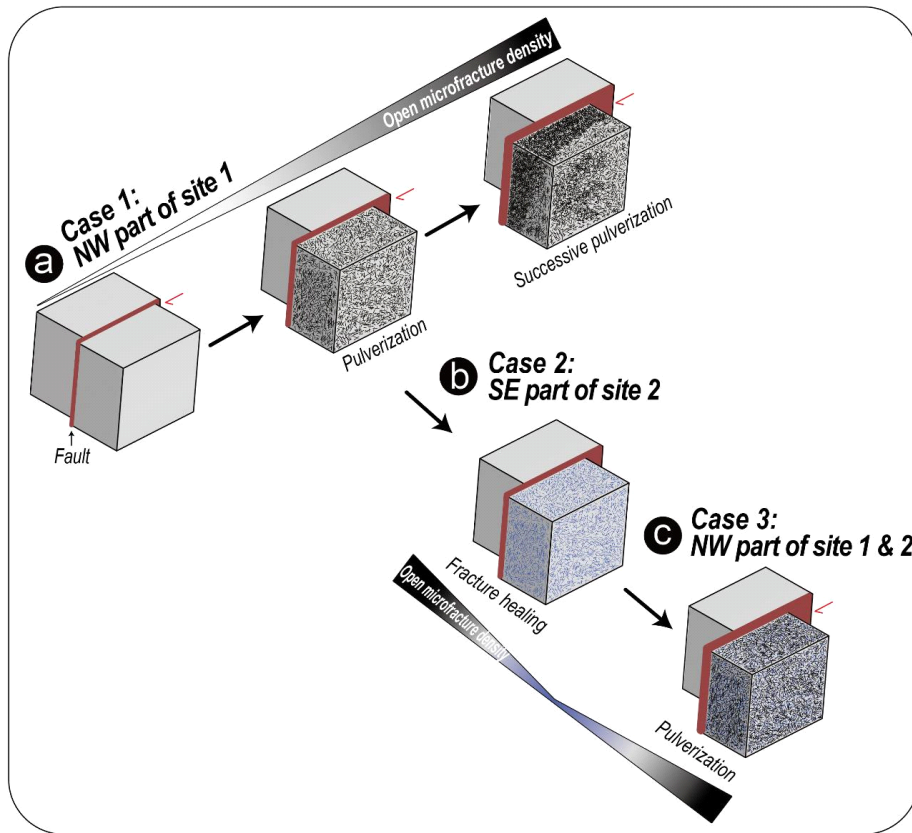


Fig. 8. Schematic model illustrating three cases of pulverized damage zone evolution over time. (a) Case 1: pulverization-successive pulverization; successive pulverization occurs as dynamic rupture propagates through previously pulverized rock, leading to an increase in open microfracture density. (b) Case 2: pulverization-fracture healing; during the interseismic period, open microfractures in the pulverized rock are fully healed, and no further pulverization develops. (c) Case 3: pulverization-fracture healing-pulverization; pulverization takes place in previously healed rock, resulting in increased open microfracture density.

의 복서편 화강암에서 확인된다(그림 2a, 3a, 8c). 이곳에는 회복된 단열과 열린 단열이 공존하며, 이는 초기 분쇄화 이후 손상이 일부 회복된 뒤 다시 분쇄화가 발생하였음을 나타낸다(그림 6a-f). 다만, 재분쇄 시점에서 기존 손상이 어느 정도까지 회복되었는지는 불확실하다. 초기 분쇄화로 형성된 단열 네트워크는 암석의 유효 인장강도와 분쇄화를 위한 임계 변형률을 낮추어, 동일한 응력 조건에서도 동적 파쇄가 쉽게 발생할 수 있는 상태를 만든다(e.g., Doan and d'Hour, 2012; Aben *et al.*, 2016). 이러한 단열은 유체 이동 경로로 작용한 뒤 시간 경과에 따라 부분적으로 회복될 수 있으며(Brantley *et al.*, 1990), 이 과정에서 공극 연결성이 감소하면 응력이 잔존 단열 주변에 집중되어 후속 지진 시 동적 파쇄가 해당 위치에서 발생할 수 있다(Richard *et al.*, 2015). 반면 손상대 단열이 광범위하게 회복된 경우 암석의 강도가 증가하여(Aben *et al.*, 2017b) 재분쇄를 위해서는 더 큰 응력의 축적이 요구되며, 이에 따라 후속 분쇄화는 제한적으로만 발생할 수 있다. 따라서, 손상대의 회복 정도는 이후의 동적 파쇄 발생과 그 공간적 분포를 좌우하는 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 그러나 회복 정도와 분쇄 임계점 간 상관성은 아직 충분히 연구되지 않았으므로, 회복 정도가 다른 분쇄암을 대상으로 한 SHPB 실험을 통해 정량적 규명이 필요하다.

1번과 2번 지점의 분쇄암은 단층의 복서편에 비대칭적으로 발달한다(그림 2a, 3a). 이러한 분쇄암의 비대칭 분포는 대규모 단층대에서 흔히 보고되었으며(e.g., San Andreas fault, North Anatolian fault; Brune, 2001; Dor *et al.*, 2006a, 2006b, 2008; Wechsler *et al.*, 2009), 원인으로는 단층 지하 복잡성, 파열 전파 방향성, 구속압 차이, 암석학적 차이 등이 제시되었다(Poliakov *et al.*, 2002; Dor *et al.*, 2006b; Griffith *et al.*, 2010; Newman and Ashley Griffith, 2014; Aben *et al.*, 2017a; Whearty *et al.*, 2017; Xu and Ben-Zion, 2017; Smith and Griffith, 2022b). 1번 지점의 경우(그림 2a), 분쇄암의 비대칭 분포는 미고결 사질퇴적물과 화강암이 접하는 이종물질 경계 효과에 의한 것으로 해석된다. 수치 모델링 연구에 따르면, 이러한 경계에서 지진 파열은 대칭적이지 않고 강성이 낮은 쪽으로 일방향 전파되는 경향이 있으며(Ben-Zion and Shi, 2005; Shi and Ben-Zion, 2006), 이 과정에서 강성이 낮은 쪽에서는 미끌림이 용이해지고 강성이 높은 쪽에서는 인장 변형률이 집중되어 손상이 발생한다. 이러한 메커니즘은 1번 지점에서 상대적으로 강성이 큰 화강암 쪽에 분쇄암이 집중된 현상을 잘 설명한다.

또한 암석학적 특성 차이로 인한 변형 메커니즘의 대비 역시 비대칭 분포 형성에 기여했을 가능성이 높다. 다공성 매질인 사질퇴적물은 동일 응력 조건에서도 공극 확장, 팽창피, 압밀피 등으로 변형을 수용하는 경향이 커서(Aben *et*

al., 2017a; Smith and Griffith, 2022b), 분쇄화는 제한적으로 발생한다. 드물게 사암에서 분쇄화 사례가 보고되기도 했으나 이는 국소적 현상에 불과하며, 결정질 암석에서의 전형적 분쇄암과 동일한지는 불확실하다(Dor *et al.*, 2009; Whearty *et al.*, 2017; Weigandt *et al.*, 2023). 따라서 1번 지점의 비대칭 분쇄 화강암 분포는 (1) 이종물질 경계에서의 파열 방향성 효과와 (2) 물성 차이에 따른 변형 메커니즘 대비가 결합된 결과로 해석된다.

2번 지점의 단층 양편의 화강암에서는 전단 변형의 흔적이 없는 다수의 회복된 단열이 발달한다(그림 3a, 6e-h). 이러한 양상은 과거 단층 활동 동안 단층 양편에서 분쇄화가 발생하였음을 시사한다. 그러나 단일물질 조건에서도 파열 방향성과 응력 분포에 따라 비대칭 손상이 발생할 수 있으므로(Xu and Ben-Zion, 2017), 현재의 관찰만으로는 손상 양상의 시공간적 변화를 명확히 규명하기는 어렵다. 한편, 단층 복서편의 열린 단열은 가장 최근의 비대칭 분쇄화를 지시하며(그림 6d), 이는 지진 파열이 반복적으로 전파되면서 손상이 누적된 결과로 해석된다. 단일물질 조건에서는 지진 파열이 암석에 도달하면 고각 인장 균열이 발달하는데, 이러한 균열대를 따라 일방향의 파열이 여러 차례 전파되면 방향성이 없는 미소 단열이 발달할 수 있다(Dor *et al.*, 2006a, 2006b; Xu and Ben-Zion, 2017; Okubo *et al.*, 2019). 이는 2번 지점의 분쇄암 분포에 대한 설명을 제공하지만, 보다 명확한 이해를 위해서는 추가적인 분쇄암 노두 추적, 미세구조 분석, 동적 하중 실험 및 수치 모델링을 결합한 연구가 필요하다. 이상의 결과들을 종합하면, 분쇄화의 발달 시나리오는 단일 요인보다는 단층 물질 경계 조건과 손상대의 선행 손상 및 회복 이력 등 여러 요인이 함께 작용한 결과로 해석되며, 이로 인해 공간적으로 인접한 1번 지점과 2번 지점에서도 분쇄화 양상이 다르게 나타난다.

7. 결론

본 연구는 양산시 금산리 제4기 단층대의 노두 및 미소 규모 관찰과 물질 분석을 통해 지진 파열 시의 동적 인장응력의 작용과 유체압 상승이 단층비지 주입을 유도하며, 손상대가 시간 경과에 따라 (1) 분쇄화-재분쇄화, (2) 분쇄화-단열 회복, (3) 분쇄화-단열 회복-재분쇄화의 세 경로로 진화함을 확인하였다. 습곡된 변형피, 회복된 단열과 열린 미소단열의 공존은 분쇄암이 단일 사건의 산물이 아니라 반복적 단층 활동과 손상 회복 과정의 결과임을 지시하며, 손상대의 회복 정도가 후속 분쇄화의 개시 여부와 위치를 제어함을 의미한다. 또한 분쇄암의 비대칭 분포는 이종물질 경계 효과와 암석학적 특성 차이에 기인하나, 단일물질 조건에서도 파열 방향성과 응력 분포 특성에 따라 발생할 수

있다. 본 연구의 결과는 손상대의 단열 회복이 동적 파쇄의 발생과 그 공간적 분포에 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 향후 단열 회복과 분쇄화 발생 메커니즘 간의 상관성을 규명하거나 장기적인 단층대 진화 모델을 정립하는데 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원(No. RS-2024-00354419)과 행정안전부 지진 위험분석 및 관리기술 개발사업의 지원(2022-MOIS62-001)을 받아 수행되었습니다. 원고의 세심한 검토를 통해 유익하고 건설적인 의견을 제시해주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Aben, F.M., Doan, M.-L., Gratier, J.-P. and Renard, F., 2017a, High strain rate deformation of porous sandstone and the asymmetry of earthquake damage in shallow fault zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 463, 81-91.
- Aben, F.M., Doan, M.-L., Gratier, J.-P. and Renard, F., 2017b, Experimental postseismic recovery of fractured rocks assisted by calcite sealing. *Geophysical Research Letters*, 44, 7228-7238.
- Aben, F.M., Doan, M.-L., Mitchell, T.M., Toussaint, R., Reuschlé, T., Fondriest, M., Gratier, J.-P. and Renard, F., 2016, Dynamic fracturing by successive coseismic loadings leads to pulverization in active fault zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 2338-2360.
- Agosta, F. and Aydin, A., 2006, Architecture and deformation mechanism of a basin bounding normal fault in Mesozoic platform carbonates, Central Italy. *Journal of Structural Geology*, 28, 1445-1467.
- Ben-Zion, Y. and Shi, Z., 2005, Dynamic rupture on a material interface with spontaneous generation of plastic strain in the bulk. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 486-496.
- Blenkinsop, T.G., 1991, Cataclasis and processes of particle-size reduction. *Pure and Applied Geophysics*, 136, 59-86.
- Brantley, S.L., Evans, B., Hickman, S.H. and Crerar, D.A., 1990, Healing in microcracks in quartz: Implications for fluid flow. *Geology*, 18, 136-139.
- Brune, J.N., 2001, Fault-normal dynamic unloading and loading: An explanation for "non-gouge" rock powder and lack of fault-parallel shear bands along the San Andreas Fault. *American Geophysical Union, Fall Meeting (Abstract)*, S22B-0655.
- 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, 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.
- Cheon, Y., Cho, H., Ha, S., Kang, H., Kim, J.-S. and Son, M., 2019, Tectonically controlled multiple deformations along the Yangsan Fault Zone, SE Korea, since Late Cretaceous. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170, 188-207.
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S., Cho, H. and Son, M., 2017, Deformation features and history of the Yangsan Fault Zone in the Eonyang-Gyeongju area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 95-114 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.-H., Kim, Y.-S. and Klinger, Y., 2017, Recent progress in studies on the characteristics of surface rupture associated with large earthquakes. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 129-157 (in Korean with English abstract).
- Choi, 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 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Song, K.-Y., Kim, H.-C., Kim, Y.-H., Choi, P.-Y., Chwae, U.C., Han, J.-G., Ryoo, C.-R., Sun, C.-G., Jeon, M.S., Kim, G.-Y., Kim, Y.-B., Lee, H.-J., Shin, J.S., Lee, Y.-S. and Kee, W.-S., 2012, Active faults and seismic hazard map. NEMA, Seoul, 882 p.
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M. and Shimamoto, T., 2011, Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, 471, 494-498.
- Doan, M.-L. and Billi, A., 2011, High strain rate damage of Carrara marble. *Geophysical Research Letters*, 38, L19302.
- Doan, M.-L. and d'Hour, V., 2012, Effect of initial damage on rock pulverization along faults. *Journal of Structural Geology*, 45, 113-124.
- Doan, M.-L. and Gary, G., 2009, Rock pulverization at high strain rate near the San Andreas fault. *Nature Geoscience*, 2, 709-712.
- Dor, O., Ben-Zion, Y., Rockwell, T. and Brune, J., 2006a, Pulverized rocks in the Mojave section of the San Andreas Fault Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 642-654.
- Dor, O., Chester, J., Ben-Zion, Y., Brune, J. and Rockwell, T., 2009, Characterization of damage in sandstones along the Mojave Section of the San Andreas fault: implications for the shallow Extent of damage generation. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 1747-1773.
- Dor, O., Rockwell, T. and Ben-Zion, Y., 2006b, Geological observations of damage asymmetry in the structure of the San Jacinto, San Andreas and Punchbowl Faults in Southern California: a possible indicator for preferred rupture propagation direction. *Pure and Applied Geophysics*, 163, 301-349.
- Dor, O., Yildirim, C., Rockwell, T., Ben-Zion, Y., Emre, Ö., Sisk, M. and Duman, T., 2008, Geological and geomorphologic asymmetry across the rupture zones of the 1943 and 1944 earthquakes on the North Anatolian Fault: possible signals for preferred earthquake propagation direction. *Geophysical Journal International*, 173, 483-504.
- Ferri, F., Di Toro, G., Hirose, T., Han, R., Noda, H., Shimamoto, T., Quaresimin, M. and de Rossi, N., 2011, Low- to high-velocity frictional properties of the clay-rich gouges from the slipping zone of the 1963 Vaiont slide, northern Italy. *Journal of Geophysical Research*, 116, B09208.
- Ferri, F., Di Toro, G., Hirose, T. and Shimamoto, T., 2010, Evidence

- of thermal pressurization in high-velocity friction experiments on smectite-rich gouges. *Terra Nova*, 22, 347-353.
- Goldsby, D.L. and Tullis, T.E., 2011, Flash heating leads to low frictional strength of crustal rocks at earthquake slip rates. *Science*, 334, 216-218.
- Griffith, W.A., Julien, R.C.St., Ghaffari, H.O. and Barber, T.J., 2018, A tensile origin for fault rock pulverization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 7055-7073.
- Griffith, W.A., Nielsen, S., Di Toro, G. and Smith, S.A.F., 2010, Rough faults, distributed weakening, and off-fault deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B08409.
- Han, J.-W., Lim, H., Lee, S., Lim, B., Kang, H.-C., Lee, S., Son, M. and Ryoo, C.-R., 2023, Quaternary Faulting along the Southernmost Part of Yangsan Fault in Geumsan-ri, Yangsan-si, SE Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 44, 482-492 (in Korean with English abstract).
- Han, R., 2017, Pseudotachylytes and seismic fault slip. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 159-171 (in Korean with English abstract).
- Han, R., Hirose, T. and Shimamoto, T., 2010, Strong velocity weakening and powder lubrication of simulated carbonate faults at seismic slip rates. *Journal of Geophysical Research*, 115, B03412.
- Han, R., Hirose, T., Shimamoto, T., Lee, Y. and Ando, J.-I., 2011, Granular nanoparticles lubricate faults during seismic slip. *Geology*, 39, 599-602.
- 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.
- 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, Gige and Gyeongju areas, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 1094-1102.
- 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).
- Kirkpatrick, J.D., Dobson, K.J., Mark, D.F., Shipton, Z.K., Brodsky, E.E. and Stuart, F.M., 2012, The depth of pseudotachylyte formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B06406.
- Kirkpatrick, J.D. and Rowe, C.D., 2013, Disappearing ink: How pseudotachylytes are lost from the rock record. *Journal of Structural Geology*, 52, 183-198.
- 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, S., Han, J., Ha, S., Lim, H., Seong, Y.B., Choi, J.-H., Lee, C.H., Kim, S.-J., Kang, H.-C., Kim, M.-C., Im, H. and Son, M., 2022, Characteristics of the Quaternary faulting detected along the Yangsan Fault in Yugye- and Jungsan-ri, northern Pohang City. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 427-443 (in Korean with English abstract).
- Lim, H., Ha, S., Ryoo, C.-R., Lee, T.-H. and Son, M., 2021, Evidence of surface rupture in the southernmost part of the Yangsan Fault and deterministic seismic hazard assessment in the Busan metropolitan area. *Joint Fall Meeting of Korean Geological Societies (Abstracts)*, Jeju, October 26-28, 275 p (in Korean).
- Lin, A., 2011, Seismic slip recorded by fluidized ultracataclastic veins formed in a coseismic shear zone during the 2008 MW 7.9 Wenchuan earthquake. *Geology*, 39, 547-550.
- 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.
- Mitchell, T.M., Billi, A., Miller, S.A., Goldsby, D.L., Scholz, C.H., Gran, J.K. and Simons, J., 2013, Dynamic pulverization by rapid decompression. *Eos Transactions AGU, Fall Meeting Supplement*, Abstract MR41B-04.
- Newman, P.J. and Griffith, W.A., 2014, The work budget of rough faults. *Tectonophysics*, 636, 100-110.
- Noda, H. and Shimamoto, T., 2005, Thermal pressurization and slip-weakening distance of a fault: An example of the Hanaore Fault, Southwest Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1224-1233.
- Okubo, K., Bhat, H.S., Rougier, E., Marty, S., Schubnel, A., Lei, Z., Knight, E.E. and Klinger, Y., 2019, Dynamics, radiation, and overall energy budget of earthquake rupture with coseismic off-fault damage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 11771-11801.
- Park, H.-J., Han, R. and Gu, D., 2020, Structures and deformation characteristics of the active fault, Hwalseongri area, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 703-726 (in Korean with English abstract).
- Park, H.-J., Han, R., Gu, D., Woo, S., Son, M. and Yun, D., 2022, Quaternary seismic slip recorded in a fault, Cheongun-dong area, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 283-302 (in Korean with English abstract).
- Poliakov, A.N.B., Dmowska, R. and Rice, J.R., 2002, Dynamic shear rupture interactions with fault bends and off-axis secondary faulting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, ESE 6-1-ESE 6-18.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, The geology of Korea: Seoul, Korea. Geological and Mining Institute of Korea, 139 p.
- Rempe, M., Mitchell, T.J.R., Nippres, S., Ben-Zion, Y. and Rockwell, T., 2013, Damage and seismic velocity structure of pulverized rocks near the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 2813-2831.
- Rice, J.R., 2006, Heating and weakening of faults during earthquake slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B05311.

- Richard, J., Doan, M.-L., Gratier, J.-P. and Renard, F., 2015, Microstructures induced in porous limestone by dynamic loading, and fracture healing: an experimental approach. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 1269-1290.
- Rockwell, T., Sisk, M., Girty, G., Dor, O., Wechsler, N. and Ben-Zion, Y., 2009, Chemical and physical characteristics of pulverized Tejon lookout granite adjacent to the San Andreas and Garlock Faults: implications for earthquake physics. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 1725-1746.
- Rowe, C.D. and Griffith, W.A., 2015, Do faults preserve a record of seismic slip: a second opinion. *Journal of Structural Geology*, 78, 1-26.
- Rowe, C.D., Kirkpatrick, J.D. and Brodsky, E.E., 2012, Fault rock injections record paleo-earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 335, 154-166.
- Ryoo, C.-R., Ha, S., Im, H. and Son, M., 2021, Active fault in Gasan-ri, Yangsan, Korea: Gasan Fault. *Proceedings of the 2021 Spring Meeting of the Korean Earth Science Society*, 30 p.
- Shi, Z. and Ben-Zion, Y., 2006, Dynamic rupture on a bimaterial interface governed by slip-weakening friction. *Geophysical Journal International*, 165, 469-484.
- Sibson, R.H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133, 191-213.
- Smith, Z.D. and Griffith, W.A., 2022a, Evolution of pulverized fault zone rocks by dynamic tensile loading during successive earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL099971.
- Smith, Z.D. and Griffith, W.A., 2022b, Lithological controls on fault damage zone development by coseismic tensile loading. *Tectonophysics*, 838, 229471.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S., 1978, Explanatory text of the geological map of Dongrae and Weolnae sheet, 1:50,000. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 27 p.
- Ujii, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J.J., Kameda, J., Brodsky, E., Chester, F., Eguchi, N. and Toczko, S., 2013, Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science*, 342, 1211-1214.
- Um, S.H., Choi, H.I., Son, J.D., Oh, J.H., Shin, S.C. and Yun, H.S., 1983, Geology and geochemical study of Gyeongsang super group in the Gyeongsang Basin. Korea Institute of Geology, Mining, and Minerals (KIGAM), Research Report, 36, 118 p.
- Wechsler, N., Rockwell, T.K. and Ben-Zion, Y., 2009, Application of high resolution DEM data to detect rock damage from geomorphic signals along the central San Jacinto Fault. *Geomorphology*, 113, 82-96.
- Weigandt, C.K., Griffith, W.A. and Rockwell, T.K., 2023, Role of confinement in coseismic pulverization: testing the rock record of rupture directivity on the San Jacinto fault, Southern California. *Journal of Structural Geology*, 177, 104999.
- Whearty, J.J., Rockwell, T.K. and Girty, G.H., 2017, Incipient pulverization at shallow burial depths along the San Jacinto Fault, southern California. *Fault Zone Dynamic Processes: Evolution of Fault Properties during Seismic Rupture*, 1-20.
- Woo, S., Han, R. and Oohashi, K., 2023, Principal slip zone in kaolinite gouge: A seismic slip indicator?. *Journal of Structural Geology*, 175, 104940.
- Xu, S. and Ben-Zion, Y., 2017, Theoretical constraints on dynamic pulverization of fault zone rocks. *Geophysical Journal International*, 209, 282-296.
- Yao, L., Ma, S. and Di Toro, G., 2023, Coseismic fault sealing and fluid pressurization during earthquakes. *Nature Communications*, 14, 1136.
- Yuan, F., Prakash, V. and Tullis, T., 2011, Origin of pulverized rocks during earthquake fault rupture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B6).