



Article

연결손상대의 구조적 특성과 수리연결성: 노두 규모 단층의 분석 사례

김고은, 소진현, 김영석*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

Structural characteristics and hydraulic connectivity of linking-damage zone: A case study of outcrop-scale faults

Goeun Kim, Jinhyeon So, Young-Seog Kim*

Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Received: May 21, 2025 / Revised: June 27, 2025 / Accepted: July 23, 2025

*Corresponding author: +82-51-629-6633 / E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

요약: 단층은 암반 내 유체의 흐름과 저류 특성에 핵심적인 영향을 미치는 구조 요소이며, 특히 단층대 내 단열 네트워크의 구조와 연결성은 수리적 거동을 좌우하는 핵심 인자이다. 본 연구에서는 거제도 해금강 지역의 섬록암 노두를 대상으로, 드론 기반 고해상도 정사영상을 활용한 2차원 단열 네트워크 분석을 수행하였다. 연구지역에는 전체 노두를 대상으로 한 지름 10 m의 원형 조사영역과 주 단층에 수직 및 평행하게 배치한 지름 5 m의 조사영역들을 설정하였다. 이를 배경 단열대, 벽손상대, 연결손상대로 구분하고, 각 영역의 구조적·수리적 특성을 위상기하 분석 및 투수율 이방성 분석을 통해 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 연결손상대는 단열 밀도, 연결 노드 수, 수리연결성(f 값)에서 모두 가장 높은 값을 보여, 단층대 내에서 주요 유체 유동 경로로 작용함을 확인하였다. 단열 밀도와 연결 노드 수 간에는 높은 상관성을 보여주었으나, 열린 단열을 기준으로 한 수리연결성과 단열 밀도 간에는 낮은 상관성을 보여준다. 반면, 세맥 비율과 수리연결성 간에는 중간 정도의 양의 상관관계가 도출되어, 단순한 밀도 지표만으로는 수리적 특성을 충분히 설명하기 어렵다는 점을 시사한다. 투수율 이방성 분석 결과, 연결손상대에서 가장 높은 이방성 비(k_1/k_2)가 나타났으며, 투수율 타원의 장축은 단층 굴곡과 평행한 서북서-동남동(Set B) 방향을 보였다. 벽손상대에서는 서북서-동남동(Set B), 동-서(Set E), 그 외 구간에서는 북동-남서(Set C), 북북동-남남서(Set D) 방향의 장축이 확인되었다. 이는 중-소규모 단층대에서 연결손상대가 가장 유체 유동의 방향성과 이방성에 가장 뚜렷한 영향을 미친다는 점을 보여준다. 본 연구는 고준위 방사성폐기물 처분장 및 이산화탄소 저장시설과 같은 부지에서의 유체 유동 특성을 이해하는데 활용될 수 있으며, 향후 다양한 암종과 3차원 단열망을 고려한 심부 확장 연구가 요구된다.

주요어: 단층손상대, 연결손상대, 단열 네트워크, 수리연결성, 투수율 이방성

ABSTRACT: Fault is a key structural element that significantly influences fluid flow and storage properties in fractured rock masses. In particular, the geometry and connectivity of fracture networks within fault zones play a major role in controlling hydraulic behavior. This study conducted two-dimensional fracture network analysis using drone-based high-resolution orthophotos of diorite outcrop in the Haegeumgang area, Geoje Island, Korea. 10 m-diameter circular samples were established throughout the entire outcrop, along with additional 5 m-diameter circular samples oriented perpendicular and parallel to the target fault trace. These were categorized into background zone, wall damage zone, and linkage damage zone. The structural and hydraulic properties of each zone were quantitatively evaluated using topological analysis and permeability anisotropy assessment. The results show that the linkage damage zone exhibits the highest values in fracture density, number of connecting nodes, and hydraulic connectivity (f -value), indicating its role as the principal fluid flow pathway within the fault zone. A strong correlation is found between fracture intensity and node connectivity, whereas the correlation between fracture intensity and hydraulic connectivity (based on open fractures) is low. In contrast, a moderate positive correlation is observed between vein ratio and hydraulic connectivity, suggesting that simple density indicators alone are insufficient to fully characterize hydraulic behavior. The permeability anisotropy analysis shows that the highest anisotropy ratio (k_1/k_2) is observed within the linking damage zone, where the major axis of the permeability ellipse aligns with the dilation bend, oriented in the WNW-ESE direction (Set B). Within the wall-damage zone, dominant permeability orientations are identified as WNW-ESE (Set B) and E-W (Set E), whereas the background fractures predominantly exhibit NE-SW (Set C) and NNE-SSW (Set D) orientations. These findings indicate that, in small to medium-scale fault zones, the linking damage zone significantly influence on the directionality and anisotropy of fluid flow. The findings of this study are applicable to site investigations

for high-level radioactive waste repositories and carbon dioxide storage facilities. Future work should include deep subsurface studies incorporating three-dimensional fracture network analyses across a wider range of lithologies.

Key words: fault damage zone, linking damage zone, fracture network, hydraulic connectivity, permeability anisotropy

1. 서론

단열(fracture)은 암석 내에서 취성 변형의 결과로 형성된 구조적 불연속면으로, 전단(shear) 및 인장(opening) 변위를 수반한다(Schultz and Fossen, 2008). 단열은 지각 내 유체 유동 및 저류에 결정적인 역할을 하며, 특히 결정질 암반에서는 유체의 주요 통로 및 방벽으로서 중요한 기능을 한다(Nelson, 1985; Jolley *et al.*, 2007; Lucca *et al.*, 2019). 이 중 단층은 규모와 공간적 위치에 따라 인장 및 전단 단열과 같은 다양한 부수단열의 발생을 유도하며 복잡한 단열 네트워크를 형성할 수 있다(Kim *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2016; Peacock *et al.*, 2017). 따라서 단층의 수리학적 기능은 단순히 단층면의 존재 여부를 넘어, 구조적 복잡성, 형성 시기, 공간적 위치 등에 따라 크게 달라질 수 있다(Aydin, 2000; Wibberley *et al.*, 2008; Dimmen, 2017; Nixon *et al.*, 2019; Berio *et al.*, 2023; Hodge *et al.*, 2025). 이러한 단층의 수리학적 특성을 명확히 이해하기 위해서는 단층대 내부에서의 구조적 위치와 운동학적 특성에 대한 단열망의 공간적 분석이 필수적이다.

일정 규모 이상의 변위를 수반하는 단층은 일반적으로 하나의 단층면으로만 구성되기보다는 부피를 가지는 단층대(fault zone) 형태로 발달한다. 단층대는 손상 및 변형 정도에 따라 변위가 집중되어 모암의 성질을 확인하기 어려운 단층핵(fault core)과 모암의 성질을 유지하면서 변형을 기록하고 있는 단층손상대(fault damage zone)로 구분된다(Caine *et al.*, 1996; Faulkner *et al.*, 2010). 전자는 단층대의 중심부로 변위가 집중되는 전단면을 따라 발달하며, 후자는 전단면 주변의 응력전달로 손상된 암반 영역에 해당한다. 단층손상대는 주로 단층에 수반되어 나타나는 부수단열로 구성되며, 단층대 내 구조적 위치와 운동학적 특성에 따라 벽손상대(wall-damage zone), 연결손상대(linking-damage zone), 말단손상대(tip-damage zone)로 구분된다(Kim *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2016). 이들 손상대는 구조적 위치에 따라 단열의 종류, 밀도, 분포 패턴 등의 기하학적, 공간적 특성이 달라지며, 이는 단층의 수리학적 특성에 직접적인 영향을 미친다.

이 중 연결손상대에서는 단층의 운동감각 및 두 분절 간상대 위치에 따라 인장 환경이 유도될 수 있으며(Kim *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2016), 이로 인해 단열이 밀집되어 발달하고 공간 확장이 활발히 일어나며, 공극압이 낮아지고 투수성이 증가하는 경향성을 보인다(Sibson, 1992; Sibson

and Scott, 1998; Rotevatn and Bastesen, 2014). 이러한 연결손상대의 특징은 단층손상대 내 수리적 이질성을 이해하는 데 있어 중요한 단서를 제공한다. 이와 관련하여 단층손상대의 수리적 특성을 이해하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 예를 들어, 단층을 가로지르는 방향에서 단층핵과 벽손상대 간 거리 변화에 따른 투수율을 분석하거나(Caine *et al.*, 1996; Faulkner *et al.*, 2010; Barani *et al.*, 2014; Cilona *et al.*, 2015; Bond *et al.*, 2017), 단열 밀도 및 연결성과 같은 구조적 지표를 기반으로 단층손상대의 유체 유동 특성을 간접적으로 추정하는 연구들이 보고되었다(Lucca *et al.*, 2020; Martinelli *et al.*, 2020; Nixon *et al.*, 2020; Berio *et al.*, 2023). 이러한 선행 연구들은 일반적으로 단층손상대가 단층핵보다 높은 투수성을 가지며, 단열 밀도와 연결성이 유체 유동 특성에 중요한 영향을 미친다는 것을 보여주었다. 그러나 대부분의 연구는 단층손상대 중에서도 벽손상대에 초점을 맞추거나, 간접적인 지표(밀도, 연결성)를 통해 수리적 특성을 추정하는 데 그치고 있으며, 손상대 유형 간 구조적 차이에 따른 단열 연결성과 유체투수율의 공간적 변화를 직접적으로 정량 평가한 사례는 제한적이다. 또한 기존의 수리학적 모델링에서는 단층대를 일정한 폭을 가진 균질한 투수성 영역으로 이상화하거나, 단층면을 2차원 경계선 또는 3차원 경계면으로 단순화하여 유체 흐름의 경계로 설정하는 경우가 많았다(Medeiros *et al.*, 2010; Ko *et al.*, 2015; Matsumoto and Shigematsu, 2018; Lu *et al.*, 2021). 이로 인해 실제 단층손상대 내에서 관찰되는 구조적 이질성, 단열망의 연결성 변화, 투수율 이방성과 같은 복잡한 자연 조건의 특성을 충분히 반영하지 못했다.

연구지역인 거제도 남부면 해금강 일대 섬록암 노두는 중·소규모 단층이 잘 발달해 있으며, 벽손상대와 연결손상대가 지표에 뚜렷하게 노출되어 있어 손상대 유형 간의 구조적 및 수리적 특성을 비교·분석하기에 적합하다. 따라서, 본 연구에서는 벽손상대와 연결손상대 간의 구조적 차이가 유체 유동 경로에 어떤 영향을 미치는지 규명하고자 하였다. 이를 위해 단층손상대 내 단열 네트워크의 기하학적 특성과 이에 따른 수리연결성 및 투수율 이방성의 공간적 변화를 단층과 평행한 방향, 단층을 가로지르는 방향으로 구분하여 정량적으로 분석하였다.

2. 지질개관

연구지역은 한반도 동남부에 위치한 거제도 남부면 해

금강 일대이며(그림 1a, 1b), 본 연구의 대상이 되는 노두는 약 8,000 m² 면적으로 해안가에 노출되어 있다. 이 지역은 백악기 후기 경상누층군을 관입한 섬록암으로 구성되어 있으며, 관입시기는 불국사 화강암류와 동시기 혹은 이전 시기로 해석된다(Won *et al.*, 1980). 연구지역의 섬록암은 지질도상에서 성포리층, 장목리층과 접하고 있으며, 성포리층과는 북북동-남남서 주향의 좌수향 주향이동단층을 따라 단층 접촉하고 있다(그림 1c). 해당 섬록암은 조립질이며 주요 구성 광물은 사장석과 각섬석이며, 소량의 흑운모와 석영 및 녹니석을 포함한다(Won *et al.*, 1980; Lee and Lee, 1999). 연구지역 내에는 수 cm 두께의 염기성 및 산성 암맥이 함께 발달하며, 암맥들의 주요 방향성은 북북서-남남동, 북북동-남남서, 북동-남서 방향이다. 하지만 대부분 암맥들은 기하가 일정하지 않고 불규칙한 형태를 보이며 이후 형성된 단열에 의해 절단되는 양상을 보인다. 세맥은 석영, 장석, 녹염석으로 구성되며, 일부 세맥은 단열 내부 모암 벽면으로부터 중심부를 향해 자형으로 광물이 성장하는 조직을 보인다. 이러한 조직은 단열을 따라 유체가 유동하며 광물이 침전된 결과로 해석된다(Bons *et al.*, 2012). 한편, 단층 내부에 모암의 변질을 동반하는 세맥도 함께 관찰되는데, 이는 본 지역 내 세맥 형성이 지구조적 응력과 열수 작용에 의해 장기간에 걸쳐 복합적으로 이루어졌음을 나타낸다. 이러한 세맥 양상은 단열망의 밀봉(sealing) 정도에 따라 유체 유동 경로로써 지속 가능성을 평가하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다(Sibson *et al.*, 1988).

3. 연구방법

3.1. 단열군 분류 및 운동학적 분석

연구지역의 단열군을 단열들의 방향성과 운동학적 특성을 기반으로 분류하였다. 전체적인 단열 네트워크의 방향성과 분포 특성은 10 m 지름의 원형 조사선 영역 내에서 관찰된 단열을 이용하였고 이를 장미도로 시각화하였다(그림 2).

각 단열의 운동학적 특성은 변위지시자, 단열 간의 상호 절단관계(cross-cutting relationship) 혹은 단열 간의 차수(orders) 관계 등을 통해 파악할 수 있다. 일반적으로 본 연구지역과 같은 화성암은 등방성이기 때문에 단층의 변위량을 직접적으로 식별하기 어렵다(e.g., Kim *et al.*, 2018). 이에 따라 이번 연구에서는 산성 및 염기성 암맥을 이용하여 각각 1개씩, 총 2개 암맥을 따라 조사선을 설정하였으며 해당 조사선을 따라 암맥을 절단하는 단열들의 기하, 절단 양상 및 운동감각을 파악하였다(그림 2b).

또한 보다 정밀한 운동감각 분석을 위해, 단열 간의 절단 관계, 2차 단열의 발달 양상, 세맥 분포 여부 등 정성적 관찰 결과를 통해 보완하였다(그림 3).

3.2. 단열 네트워크 정량화

단열 네트워크의 정량적 분석을 위해 Mauldon *et al.* (2001) 이 제시한 원형 조사선(circular scanline) 분석 방법을 사용하였다. 분석은 지름이 각각 10 m와 5 m인 두 가지 규모의 SA를 설정하여 수행하였다. 앞서 전체 단열 네트워크의 경향성을 살펴보기 위해 설치한 지름 10 m 조사영역(그림

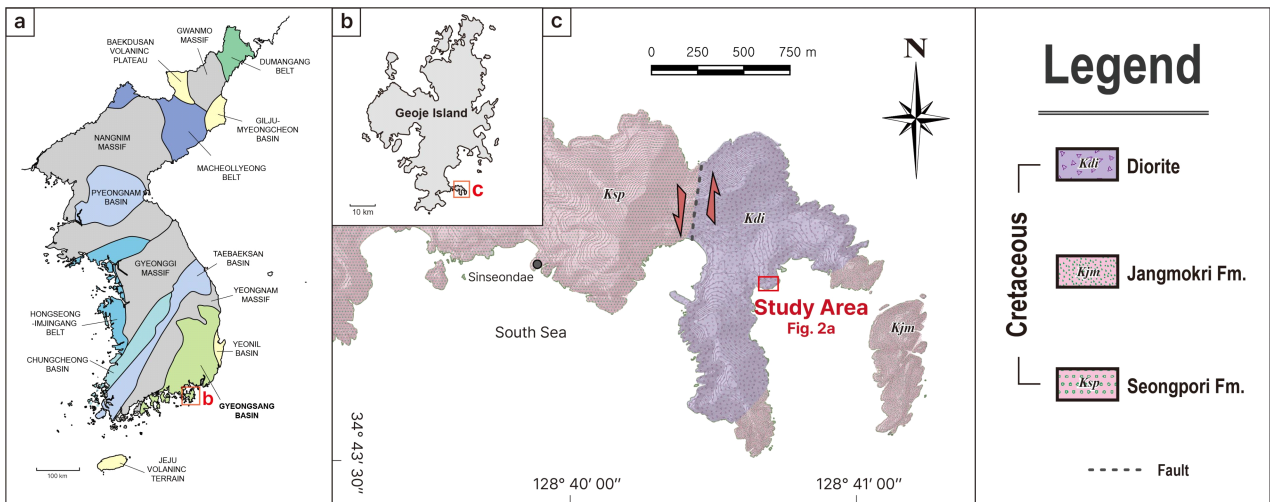


Fig. 1. (a) Tectonic subdivision of the Korean Peninsula showing the location of the Cretaceous Gyeongsang Basin and the study area (red box) in the southeastern part of Korea (modified from Kee *et al.*, 2019). (b) Map of Geoje Island indicating the location of the detailed geological map (red box). (c) Geological map of the Nambu-myeon area, located in the southern margin of the Gyeongsang Basin (modified from Won *et al.*, 1980). The study area is highlighted with a red box. The Nambu-myeon area is composed of Cretaceous diorite (Kdi), Jangmokri Formation (Kjm), and Seongpori Formation (Ksp). Major fault is indicated by dashed line.

2a, 6)과 달리, 지름 5 m 조사영역은 주 단층의 손상대 유형에 따른 단열 특성을 살펴보기 위해 주 단층의 주향에 수직(across) 및 평행(along)한 방향으로 배치하였다(그림 7).

각 SA에 대한 영상 자료는 DJI Mavic3 Pro 무인 항공기를 이용하여 촬영하였으며, Metashape 소프트웨어를 이용해 정사합성(orthomosaic) 처리를 수행하였다. 생성된 정사영상은 1 pixel이 1 cm 이하인 고해상도로 설정되었으며, Adobe Illustrator 2025를 이용하여 단열의 기하(geometry)를 정밀하게 디지털화하였다. 각 샘플링 지점에서는 단열의 기하뿐만 아니라 단열면이 열려 있는지 혹은 광물로 충전되어 있는지를 관찰하고 기록하였다.

단열의 방향성은 장미도로 시각화하였으며, 밀도(2D intensity), 길이, 단열의 연결성 등의 정량 지표는 Nyberg *et al.* (2018)이 개발한 오픈소스 QGIS 플러그인 NetworkGT를 활용하여 분석하였다. 이때 단열 밀도는 단위 면적당 총 단열 길이로 정의되며, 다음의 수식으로 계산된다. 여기서 L_i 는 단열의 길이, A 는 분석대상 조사영역의 면적을 의미한다(Eq. (1)).

$$P_{21} = \frac{\sum L_i}{A} \quad (1)$$

본 연구에서는 2차원 단열 네트워크의 연결성을 평가하기 위해 위상기하 분석을 실시하였다(Sanderson and Nixon, 2015). 이 분석에서는 단열 네트워크를 선(line), 노드(node),

브랜치(branch)로 구성된 구조로 간주하며, 각 단열은 끝점에서 종결되거나 다른 단열과 교차 또는 접합되어 하나 이상의 브랜치를 형성한다. 단열 간의 연결 형태에 따라 노드는 세 가지 유형으로 구분된다. 두 단열이 서로 교차하는 경우는 X-노드, 단열이 분기되거나 다른 단열과 접하는 경우는 Y-노드, 다른 단열과 연결되지 않은 끝점은 I-노드로 분류된다(Sanderson and Nixon, 2015). 이러한 노드의 유형별 비율은 단열 네트워크의 연결성을 정량화할 수 있는 지표가 되며, 특히 X-노드와 Y-노드의 비율이 높을수록 더 연결성이 높은 구조를 나타낸다(Watkins *et al.*, 2018). 이번 연구에서는 이러한 연결성을 정량화하기 위해 각 샘플링 원 내 단열망의 X-노드와 Y-노드의 합인 연결 노드 총합을 사용하였다.

3.3. 암반의 수리학적 평가

지름이 5 m와 10 m인 원형 스캔라인을 대상으로 단열 네트워크의 유체 유동 특성을 평가하기 위해, Sævik and Nixon (2017)이 제안한 수리연결성(hydraulic connectivity) 지표인 f 값을 활용하였다. 이 지표는 자연에서 관찰되는 복잡한 단열 네트워크의 위상적 특성, 즉 X-노드, Y-노드, I-노드의 분포를 기반으로 하여, 평균 단열 길이에 의존하지 않고도 유체 유동 가능성을 수치적으로 평가하기 위해 고안되었다. 해당 지표는 자연 노드 데이터 기반으로 수치 유동 시뮬레이션을 수행한 후 회귀분석을 통해 도출되었으며, Eq. (2)와 같이 정의된다:

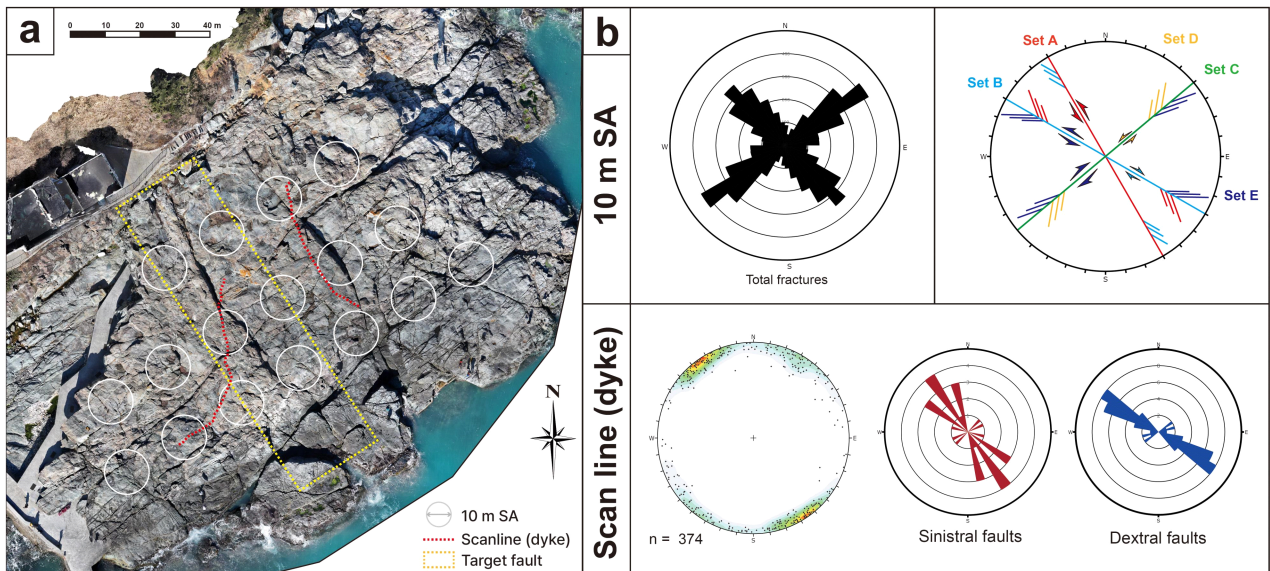


Fig. 2. (a) Drone-based orthophoto of the study area at Haegeumgang, Geoje Island; target fault outlined with a yellow dashed box, scanlines along dykes shown as red dashed lines. (b) Rose diagrams and stereographic projections from fracture surveys. Fractures grouped into five sets (Set A-E) based on orientation. Lower-hemisphere equal-area stereographic projection shows pole density distribution of fractures. Orientation data measured following the right-hand rule.

$$f = \max\left(0, \frac{2.94 \cdot (4N_X + 2N_Y)}{4N_X + 2N_Y + N_I} - 2.13\right) \quad (2)$$

여기서 $N_{(I,Y,X)}$ 는 I-,Y-,X-노드의 개수를 의미하며, 노드 개수의 상대적인 비율을 통해 단열 네트워크의 연결성 정도를 0에서 1 사이의 값으로 표현할 수 있다. 특히 f 값이 0 보다 큰 양의 값을 가지는 경우, 해당 단열 네트워크는 투수

임계치(percolation threshold)를 넘어 유체 유동이 가능한 연결상태에 도달한 것으로 해석된다. 해당 연구에서는 세 맥을 포함한 전체 단열과 세맥을 제외한 열린 단열(open fracture)을 구분하여 계산하였다.

단열 분석 결과는 2차원 투수율 이방성(2D permeability anisotropy)을 추정하는 데 활용되었다. 2차원 투수율 텐서(permeability tensor)는 Nyberg *et al.* (2018)이 개발한 QGIS

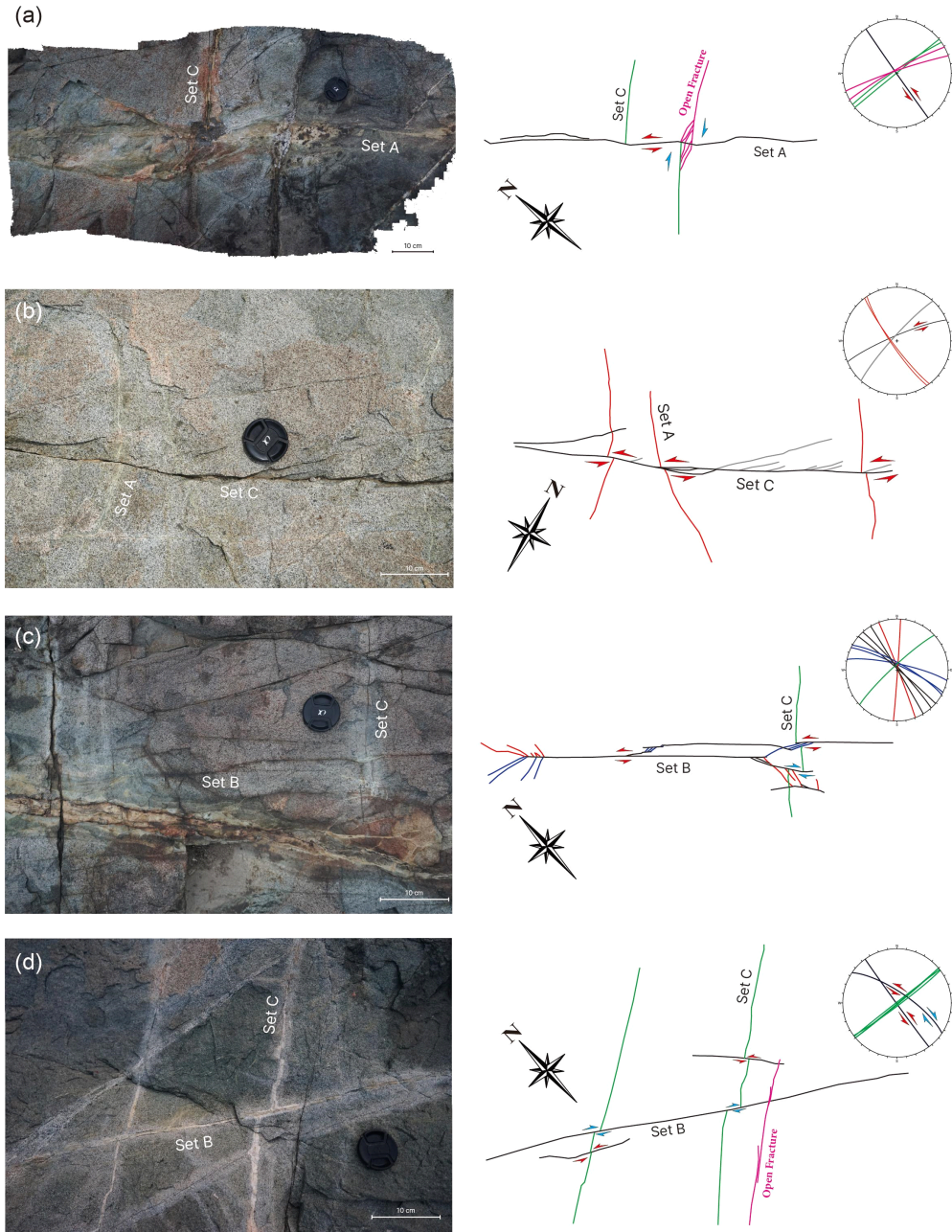


Fig. 3. Field photographs and structural sketches of four representative outcrops. (a) Set A veins displacing Set C vein. Set C also reactivated and displaced Set A vein, indicating mutual crosscutting. (b) Sinistral Set C faults offsetting Set A veins. R shears (in grey) are identified. (c) Tree structure of Set B displacing Set C veins. Set B veins displace Set C veins, showing both sinistral and dextral shear indicators. (d) Set B veins displacing Set C veins, showing both sinistral and dextral shear indicators.

Table 1. Classification of five fracture sets identified in the diorite of Haegeumgang, Geoje Island.

Classification	Strike	Structure Characteristics
Set A	NNW-SSE / 330°±10°	Dominantly sinistral faults; includes the target fault zone with complex cross-cutting relationships with Set B and Set C
Set B	WNW-ESE / 300°±10°	Dextral faults with evidence of reactivation; commonly developed as veins with hydrothermal alteration and reduced permeability
Set C	NE-SW / 050°±10°	Minor-offset fractures with both dextral and sinistral senses; widely distributed and locally reactivated by stress changes
Set D	NNE-SSW / 010°±10°	Sinistral fractures; interpreted as secondary fractures associated with Set C
Set E	E-W / 090°±10°	Dextral secondary fractures associated with Set B and Set C

플러그인 NetworkGT를 활용하여 산정하였으며, 분석 과정에서 유체는 단열면에 평행한 층류(laminar flow)로 가정하였다. 주요 입력 변수로는 단열의 방향성, 간극, 길이, 밀도, 연결성, 모암의 투수율이 고려되었다. 이때 연결성은 수리연결성 f 값을 사용하였으며, 단열의 간극은 현장에서 디지털 버니어 캘리퍼스를 이용해 측정하였다. 간극 값은 측정 오차를 줄이기 위해서 동일 위치에서 최소 3회 반복 측정하였다. 총 90개 단열의 측정값을 바탕으로 평균 간극인 0.66 mm를 산출하였으며, 이를 전체 단열에 동일하게 적용하였다. 간극 값을 일정하게 적용하는 방식은 자연 단열망의 이질성을 완전히 반영하지 못하지만, 유체 흐름의 상대적인 방향성과 이방성 경향을 평가하는 데에는 적용할 수 있다.

모암의 투수율은 TinyPerm-II 장비를 이용하여 현장에서 측정한 결과, 9.26 mD (약 $9.14 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$)로 나타났다. 일반적으로 단열이 존재하는 결정질암의 투수율은 $10^{-11} - 10^{-7} \text{ cm}^2$ 범위에 해당하며(Freeze and Cherry, 1979), 본 연구에서 측정된 투수율은 이러한 범위에 포함되어 결정질암의 투수율 값으로 타당한 값을 보인다. 또한 단열 공극률(fracture porosity, ϕ)의 경우, Tiab and Donaldson (2024)이 제시한 단열 밀도와 간극의 곱으로 사용하였다. NetworkGT 플러그인 내부에서 구현된 투수율 텐서 공식은 Eq. (3-6)과 같으며 이때 a 는 단열의 법선 방향, $bLen$ 은 브랜치 길이, t 는 간극, $Area$ 는 면적, h_c 는 수리 연결성 f 값, mPv 는 모암 투수율 값이다. 해당 공식을 통해 섬록암 표면에서의 최대 투수율(k_1) 방향과 투수율 이방성 비율($k_1 : k_2$)을 산출하였다. 투수율 타원(permeability ellipse)은 장축 및 단축이 각각 $\sqrt{k_1}$ 및 $\sqrt{k_2}$ 에 비례하도록 표현되며, 유체 흐름 방향에 따른 이방성을 시각적으로 나타낸다(Long *et al.*, 1982).

$$k_{xx} = \frac{h_c}{Area} T_{i1} + mPv, k_{yy} = \frac{h_c}{Area} T_{i2}, \quad (3)$$

$$k_{yy} = \frac{h_c}{Area} T_{i4} + mPv$$

$$T_{i1} = (bLen \cdot t)[1 - \sin^2(90 - a)] \quad (4)$$

$$T_{i2} = (bLen \cdot t)[\cos(90 - a)\sin(90 - a)] \quad (5)$$

$$T_{i4} = (bLen \cdot t)[1 - \cos^2(90 - a)] \quad (6)$$

각 구조적 지표들은(밀도, 연결성, f 값, 세맥 비율) 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 통해 상관관계를 평가하였으며, 독립변수(x)는 단열 밀도 및 세맥 비율로, 종속변수(y)는 연결성과 각 조사 영역의 f 값으로 설정하였다. 회귀계수의 통계적 유의성은 t -통계량과 p -value를 통해 검토되었으며, p -value가 0.05 미만일 경우 해당 독립변수가 종속변수에 유의미한 영향을 미친 것으로 해석하였다. 회귀모형의 설명력은 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 통해 평가하였으며, 여기서 결정계수는 독립변수가 종속변수의 분산을 얼마나 설명하는지를 나타낸다. 이상값 판단을 위해 회귀 잔차(residual)를 기반으로 사분위수에 따른 경계값을 산출하였다. 제1사분위수(Q1)는 하위 25%에 해당하는 잔차값, 제3사분위수(Q3)는 상위 75%에 해당하는 값으로 정의되며, Q1과 Q3 사이의 사분범위(Interquartile Range, IQR)를 기준으로 $Q_1 - 1.5 \cdot IQR$ 미만 혹은 $Q_3 + 1.5 \cdot IQR$ 을 초과하는 값을 이상값으로 분류할 수 있다(McGill *et al.*, 1978). 이러한 이상값 기준은 박스 플롯 통계기법에 기반한다.

4. 연구지역에서 확인되는 단열분포 및 주 단층의 특성

4.1. 단열분포 특성

연구지역 전체를 대상으로 한 지름 10 m 규모 원형 조사 영역에서 획득한 총 단열 개수는 3,302개이며, 이를 방향성과 운동 특성에 따라 총 5개의 단열군(Set A-E)으로 분류하였다. 각 단열군의 주향 및 특성은 표 1에 정리하였다. 단열군 중에서는 북동-남서 방향(Set C)이 전체 조사 영역에서 가장 우세하게 나타났으며, 다음으로 서북서-동남동(Set B) 방향이 주로 발달하였다. 북북동-남남서, 동-서 방향의 단열도 일부 확인되었으나 상대적으로 밀도는 낮은

편이다. 암맥과 평행하게 설치한 조사선을 통해 운동학적 특성을 분석한 결과, 좌수향 운동감각은 Sets A-C에서 전반적으로 확인되었으나, 우수향 운동감각은 Set B와 Set C에 집중되어 나타나는 양상이 확인되었다(그림 2b).

Set A는 북북서-남남동(NNW-SSE; $330^{\circ} \pm 10^{\circ}$) 방향의 단열균으로, 전반적으로 좌수향 운동감각이 우세하게 나타난다. 해당 단열균은 연구지역에서 가장 큰 변위를 보이는 주 단층을 포함하고 있으며, 다른 단열균과 교차 또는 접하는 복잡한 단층 구조를 형성한다. 일반적으로 Set A는 Set B 및 Set C 단열균을 좌수향으로 절단하는 양상을 보이지만, 일부 Set C 단열은 오히려 Set A를 관통하거나 접하는 형태로 나타난다(그림 3a, 3b). 또한 Set A의 전단 단열에서 발달한 2차 단열은 Set B와 유사한 방향성을 보이며 평행하게 분포한다.

Set B는 서북서-동남동(WNW-ESE; $300^{\circ} \pm 10^{\circ}$) 방향의 단열균으로, 전반적으로 우수향 주향이동 성분이 우세하나 좌수향 전단의 증거도 함께 관찰된다(그림 3c, 3d). 이 방향성의 단열균은 주로 독립적인 단층으로 관찰되나, Set A의 2차 단열로도 관찰된다. 또한 일부 단열에서는 역이동성 재활성의 증거인 나무구조(tree structure)가 관찰되어 역전재활을 지시한다(그림 3c; Kim *et al.*, 2001). 해당 구조 내 2차 단열들은 Set C 세맥을 각각 좌수향과 우수향으로 절단하는 양상을 보인다. 또한 Set B 단열균은 대부분 열수변질(hydrothermal alteration)을 동반한 세맥이 우세하게 발달해 있는 것이 특징이다.

Set C는 북동-남서(NE-SW; $050^{\circ} \pm 10^{\circ}$) 방향의 단열균으로, 우수향 운동감각이 우세하지만 일부 좌수향 운동감각도 함께 관찰된다. 이 단열균은 연구지역 전반에 고르게 분포하지만 주 단층과 접하는 단열들은 대부분 명확한 변위를 보이지 않고 접해 있다. 조사선 조사에서 확인되는 Set C 단층들의 겉보기 변위 또한 10 cm 이하의 제한된 변위 값을 보였다. 그림 3a에서는 Set A 단층(약 320°)에 의해 Set C 방향의 세맥이 좌수향으로 절단되는 양상이 관찰되며, 이후 Set C 세맥을 따라 단열이 재활성화되어 기존의 Set A 단열을 우수향 연결손상대가 관통하고 있다. 한편, Set C 좌수향 단층들이 Set A 세맥(약 320°)을 좌수향으로 절단하는 양상도 확인되는데, 이는 Set C 단열균의 재활성을 지시한다(그림 3b).

Set D와 Set E는 각각 북북동-남남서(NNE-SSW; $010^{\circ} \pm 10^{\circ}$) 및 동-서(E-W; $090^{\circ} \pm 10^{\circ}$) 방향으로 발달하는 2차 단열균(secondary fracture sets)으로 구분된다. Set D는 주로 북동-남서 방향 단열(Set C)과 관련된 좌수향 단층의 발달 과정에서 생성된 것으로 해석되며, Set E는 Set B 및 Set C 단열균과 연관된 2차 단열로서 주로 우수향 운동감각을 보인다.

4.2. 주 단층 특성

Set A에 해당하는 주 단층(target fault, $330^{\circ} \pm 10^{\circ} / 88^{\circ}$)은 연구지역에서 가장 큰 겉보기 변위를 보이며, 약 80 m 이상의 연장을 가지는 주향이동단층이다(그림 4). 이 단층의 단층핵은 뚜렷하게 관찰되지 않으며, 이는 침식작용에 의해 제거되었을 가능성이 있다. 해당 단층은 Set B에 해당하는 우수향 주향이동단층과 Set C 단열균을 좌수향 운동감각으로 절단하지만, 일부 Set C 단열은 절단되지 않고 단층에 접하는 양상을 보인다.

주 단층은 전반적으로 330° 내외의 자세로 발달하고 있으며, 두 지점에서 분기되는 양상이 나타난다. 주 단층을 이 두 분기점을 기준으로 3개의 분절로 구분하였으며, 이 중 분절 I과 분절 II에 대해 정밀한 분석을 실시하였다. 분절 I의 경우 주향이 전반적으로 330° 내외로 일정하며, 비교적 곧은 형태를 보인다. 확인된 분절의 자취는 약 31 m로 북측은 건물에 의해 가려져 추가적으로 연장될 가능성이 있다. 분절의 자취는 분기점을 넘어 5 m 가량 더 연장된다. 분절 II의 경우 일부 구간에서는 약 330° 의 일반적인 주향을 가지지만 분절 I 및 III에 접하는 구간에서는 약 310° 로 굴절되는 양상을 보인다(그림 4a).

주미끌림대(principal slip zone, PSZ)는 분절 I에서 분기점을 통해 분절 II로 이어지며, 분절 I에서 분기점 남쪽으로 연장되는 부분이 전단을 수용하지 않고 비활성화되는 양상이 확인된다(그림 4a). 이는 두 분절이 독립적인 단층으로 성장하는 과정에서 인접한 분절과 연결되어 하나의 주 전단면으로 진화한 결과로 해석된다. 이러한 구조는 단층손상대 중 연결손상대에 해당하며, 이들 분절을 연결하는 연결손상대는 좌수향 운동감각과 좌향 계단상 구조에 따라 분절 연결부에 인장환경이 조성된 구간으로 해석되며, 단열 밀도가 증가하는 양상이 확인된다(그림 4b).

주 단층을 절단하거나 접하는 단층은 Set C에 속하며, 단층 1, 2, 3으로 구분된다(그림 5). 단층 1은 주 단층 분절 I 분기점에서 접하는 양상을 보이며, 단층 3은 분절 II와 III의 연결손상대 구간을 관통한다. 이 중 단층 2($047^{\circ} / 72^{\circ}$)는 녹염석 세맥($283^{\circ} / 76^{\circ}$, Set B)을 우수향 운동감각으로 절단하고 있으며, 약 8 cm의 상대 변위가 확인된다. 그러나 단층 2는 주 단층을 관통함에도 불구하고, 주 단층 자체에서 뚜렷한 변위 흔적은 관찰되지 않았다. 단층 3은 2개의 분절로 구성되어 있으며, 이들을 연결하는 연결손상대는 주 단층의 분절 III을 관통하고 있다. 단층 1과 3에서는 명확한 변위가 관찰되지 않았으나, 연결손상대의 형태가 전형적인 우수향 운동감각에 의한 인장형 구조로 나타나고 있다.

5. 연구지역의 단열 네트워크 정량화

연구지역 단열 네트워크의 전체적인 경향성 분석을 위

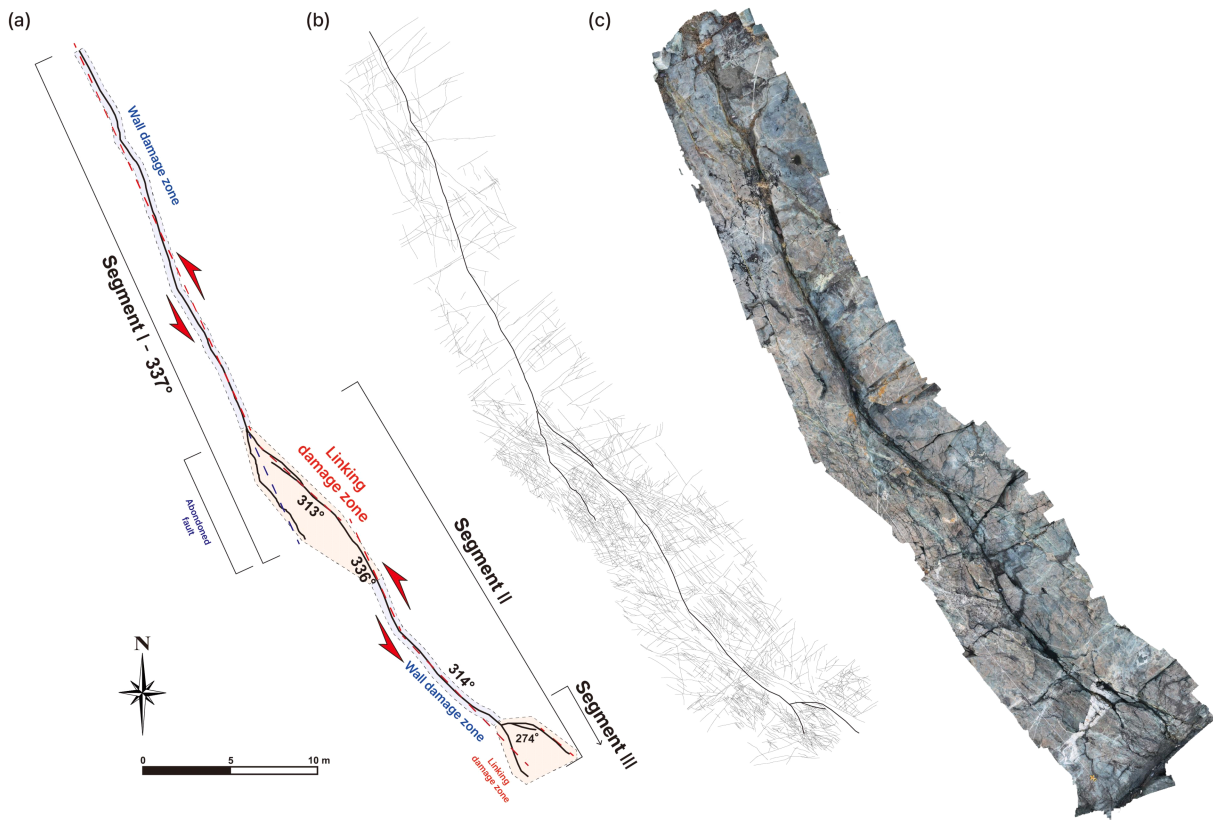


Fig. 4. (a) Target fault (strike: $330^{\circ} \pm 10^{\circ}$) divided into three segments. These segments are connected by hard linkages, which form distinct linking damage zones. (b), (c) Detailed fracture mapping and high-resolution drone photograph of the target fault.

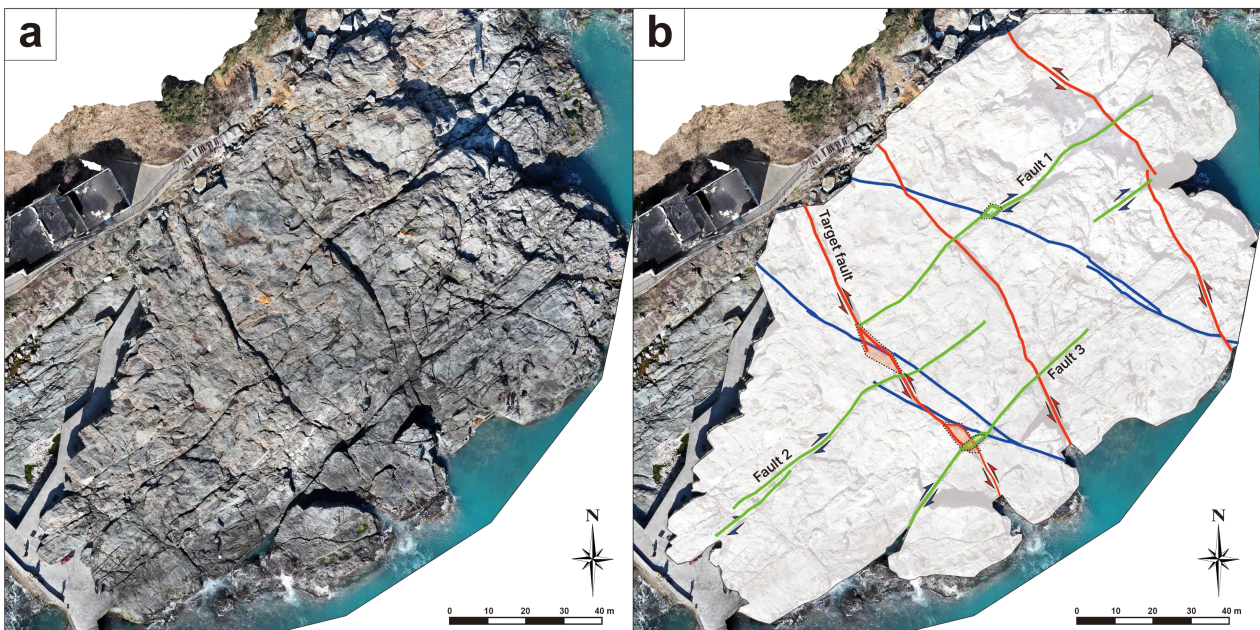


Fig. 5. (a) Drone-based orthophoto of the study area at Haegeumgang, Geoje Island. (b) Overall fault distribution in the study area. Set A faults are shown in red, Set B faults in blue, and Set C faults in green. Shaded areas indicate linking damage zones between fault segments.

한 10 m 지름의 원형 조사영역(SA₁₀)과 단층손상대 유형별 세부 분석을 위한 5 m 지름의 원형 조사영역(SA₅)을 설정하여 단열 밀도와 연결 노드 수를 분석하였다.

먼저 전체 단열 네트워크 특성을 정량적으로 파악하기 위해 총 17개의 지름 10 m 원형 조사영역(SA₁₀)을 설정하여 단열 밀도와 총 연결 노드 수를 분석하였다(그림 6; 표 2).

단열 밀도 분석 결과, 전체 평균은 0.041 cm⁻¹로 나타났으며, 커널 밀도 추정(Kernel Density Estimation, KDE)

결과 중앙값은 0.039 cm⁻¹, 최빈값은 0.038 cm⁻¹로 확인되었다. 주 단층 인근의 SA₁₀-7에서는 0.080 cm⁻¹로 가장 높은 밀도 값을 기록하였으며, SA₁₀-12에서는 0.027 cm⁻¹로 가장 낮은 값을 보였다. 연결 노드 수 분석 결과, 전체 평균은 463.8개, KDE 중앙값은 381개, 최빈값은 379개로 나타났으며, SA₁₀-7이 1,525개로 가장 높은 값을, SA₁₀-12가 218개로 가장 낮은 값을 기록하였다(그림 6b, 6c). 단열 밀도와 연결 노드 수 간의 상관성을 분석한 결과, 결정계수

Table 2. Quantitative parameters of the fracture network for each 10 m circular survey area, including node classifications (I, Y, X), total number of connected nodes, and 2D fracture intensity.

Sample No. (10 m)	I	X	Y	No. Connections	2D Intensity (cm ⁻¹)
1	159	275	298	573	0.049
2	96	189	126	315	0.034
3	87	149	179	328	0.032
4	69	228	201	429	0.039
5	104	203	211	414	0.039
6	71	164	118	282	0.032
7	220	709	816	1525	0.080
8	143	187	194	381	0.038
9	87	194	170	364	0.037
10	140	381	264	645	0.051
11	71	245	269	514	0.043
12	90	105	113	218	0.027
13	134	242	231	473	0.043
14	137	160	152	312	0.040
15	62	127	187	314	0.035
16	80	212	249	461	0.046
17	53	151	186	337	0.040

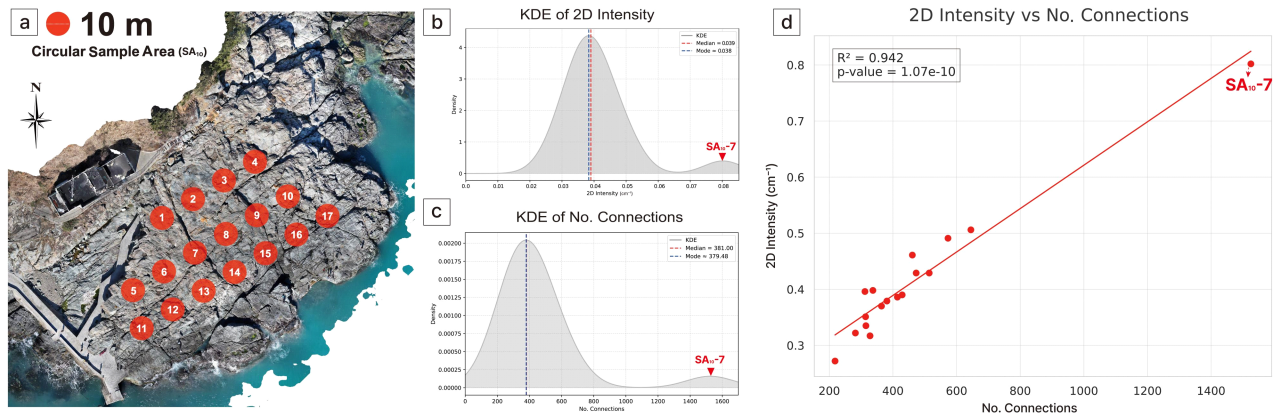


Fig. 6. (a) Locations of 10 m diameter circular sample areas. (b), (c) Kernel density estimates (KDE) of 2D intensity and total number of connected nodes (X- and Y-nodes). Median and mode values are indicated on each graph. A distinct peak corresponding to SA₁₀-7 is observed in both distributions, indicating anomalously high values relative to the overall dataset. (d) Correlation analysis between 2D intensity and number of connections, showing a strong positive relationship ($R^2=0.942$). The highest values for both 2D intensity and number of connections are observed in SA₁₀-7.

(R²)는 약 0.942, p 값은 1.07×10⁻¹⁰으로 매우 강한 양의 상관관계를 보였다(그림 6d).

이러한 결과를 종합하면, SA₁₀₋₇을 제외한 대부분의 조사영역에서는 단열 밀도 값과 연결 노드 수가 0.385 cm⁻¹와 379개 내외로 유사한 값을 보였다. 반면 SA₁₀₋₇은 단열 밀도와 연결성 모두에서 현저히 높은 값을 보인다. 해당 구간은 주 단층의 연결손상대인 확장성 굴곡(dilation bend) 구간에 해당하며, 단층손상대의 구조적 영향이 강하게 작용했음을 시사한다.

주 단층의 구조적 특성을 평가하기 위해 주향에 평행한 방향으로는 벽손상대와 연결손상대 사이의 구조적 특성 변화를, 주향에 수직인 방향으로는 연결손상대와 배경 단열

사이의 구조적 차이를 비교·분석하였다(SA₅; 그림 7).

주 단층을 가로지르는 방향으로 설정된 5 m 원형 조사영역 분석 결과(표 3), 단열 밀도는 SA 설치 방향과 관계없이 SA₅₋₅에서 가장 높은 밀도 값을 보였다(그림 8). 단열 밀도 전체 평균은 0.040 cm⁻¹, KDE 중앙값은 0.041 cm⁻¹, 최빈값은 0.043 cm⁻¹로 나타났다. 이중 SA₅₋₅에서 0.097 cm⁻¹로 가장 높은 값을 기록하였으며, SA₅₋₁에서 0.028 cm⁻¹로 가장 낮은 값을 보였다. 연결 노드 수 분석 결과 전체 평균은 157.3개, KDE 중앙값은 125개, 최빈값은 120.8개로 나타났다으며 SA₅₋₅에서 504개로 가장 높은 값을, SA₅₋₁에서 54개로 가장 낮은 값을 기록하였다. 단열 밀도와 연결 노드 수 간의 상관관계는 결정계수(R²)가 약 0.98, p 값이 2.89

Table 3. Fracture network parameters measured in 5-meter-diameter circular domains located across the target fault direction.

Sample_No (5 m)	I	X	Y	No. Connections	2D Intensity (cm ⁻¹)
1	25	25	29	54	0.028
2	45	59	85	144	0.045
3	13	43	26	69	0.034
4	61	85	61	146	0.049
5	64	211	293	504	0.097
6	53	47	45	92	0.040
7	39	42	62	104	0.040
8	20	76	39	115	0.041
9	16	56	69	125	0.041
10	24	105	76	181	0.053
11	40	105	91	196	0.057

5 m

Circular Sample Area (SA_s)

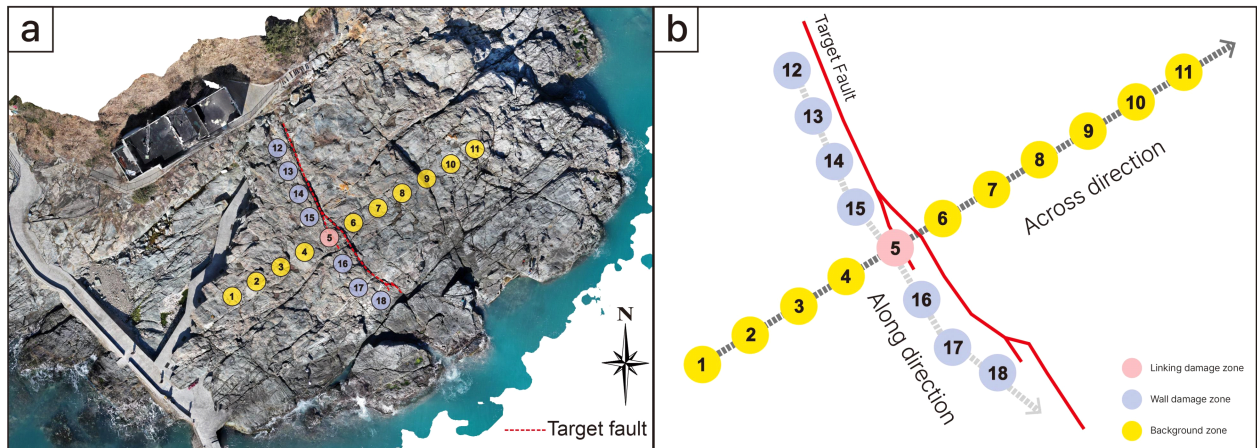


Fig. 7. (a) Locations of 5 m diameter circular sample areas. (b) Sample areas arranged both across and along the target fault to assess spatial variations in fracture characteristics relative to the fault damage zone. Linking damage zone represented by SA₅₋₅ (red circle), wall damage zones indicated by blue circles along the direction parallel to the fault trace.

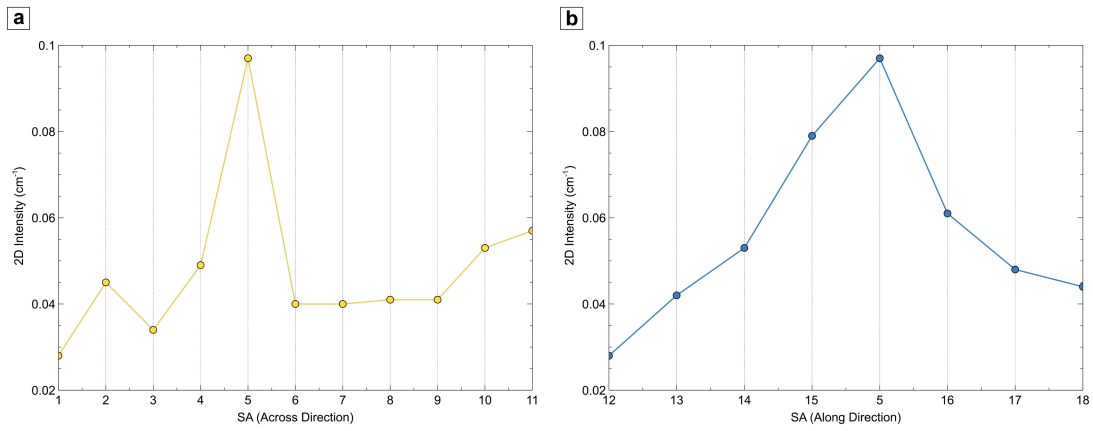


Fig. 8. Spatial distribution of 2D fracture intensity (a) across and (b) along the target fault.

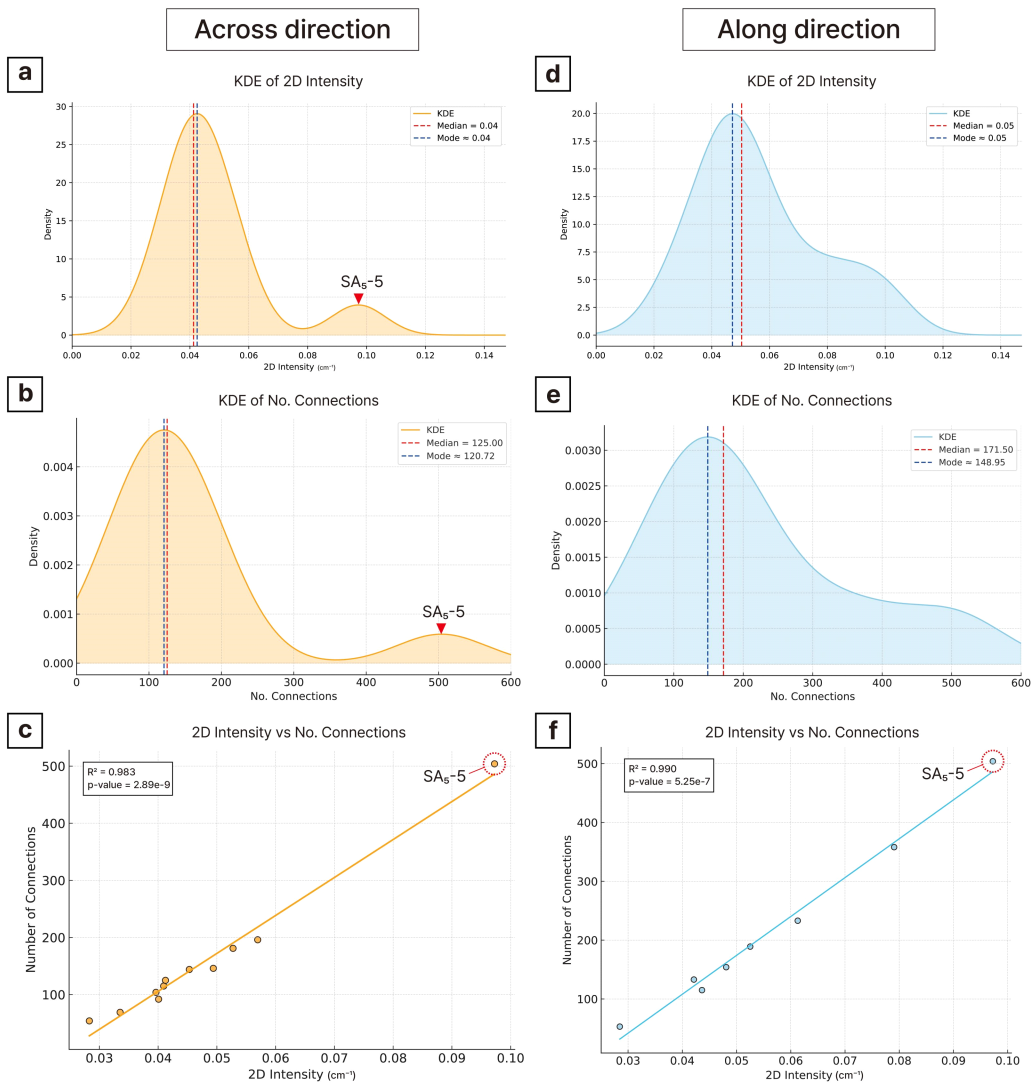


Fig. 9. Kernel density estimates (KDE) of 2D fracture intensity and the total number of connected nodes (X- and Y-nodes) for sample areas distributed across ((a), (b)) and along ((d), (e)) the target fault. Both directions exhibit strong positive correlations between fracture intensity and number of connections ((c), (f)). A distinct peak corresponding to SA₅-5 is observed in both correlation distributions, indicating anomalously high values relative to the overall dataset.

Table 4. Fracture network parameters measured in 5-meter-diameter circular domains located along the target fault direction.

Sample_No (5 m)	I	X	Y	No. Connections	2D Intensity (cm ⁻¹)
12	6	17	36	53	0.028
13	27	71	62	133	0.042
14	45	91	98	189	0.053
15	99	163	195	358	0.079
5	64	211	293	504	0.097
16	32	79	154	233	0.061
17	37	94	60	154	0.048
18	34	51	64	115	0.044

$\times 10^{-9}$ 로 매우 강한 양의 상관관계를 가진다(그림 9a-c).

주 단층의 주향과 평행한 방향으로 설정된 5 m 원형 조사영역 분석에서는(표 4) 단열 밀도 평균이 0.057 cm^{-1} 이고, KDE 중앙값은 0.050 cm^{-1} , KDE 최빈값은 약 0.05 cm^{-1} 로 나타났다. 조사영역 중 SA₅-12에서 밀도 값이 0.028 cm^{-1} 로 가장 낮은 값을 기록하였으며, SA₅-5까지 점진적으로 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보였다. 연결 노드 수는 평균이 217.4개, KDE 중앙값은 171.50개, KDE 최빈값은 약 149.74개로 나타났으며, SA₅-12에서 53개로 가장 낮고 SA₅-5에서 최고치에 도달한 뒤 다시 감소하는 추세를 보였다. 해당 방향에서도 단열 밀도와 연결 노드 수는 결정계수(R^2)가 약 0.990, p 값이 5.25×10^{-7} 로 매우 강한 양의 상관관계를 가진다(그림 9d-f).

이와 같은 분석 결과는 주 단층을 기준으로 단층의 연결손상대 부근에서 단열 밀도 및 연결성이 뚜렷하게 증가함을 보여준다. 주 단층을 가로지르는 방향에서는 연결손상대 인접 구간에서 단열 밀도와 연결성이 급격히 증가하는 경향을 보이는 반면 주향과 평행한 방향에서는 SA₅-5 구간을 중심으로 점진적으로 증가한 후 다시 감소하는 분포 특성을 나타낸다.

6. 유체투수율 영향 평가

일반적으로 단열은 유체의 통로로 작용하지만, 시간이 지남에 따라 단열 내에 광물이 침전될 경우 통로 역할을 상실할 수 있다(Sibson, 1992; Sibson, 2020). 따라서 실제 유체투수율을 평가하기 위해서는 유체 흐름에 직접적인 영향을 미치지 못하는 세맥을 제거할 필요가 있으며 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 전체 단열 중 세맥을 제외한 열린 단열을 중심으로 수리연결성 및 투수율 이방성 분석을 수행하였다(그림 10, 11).

지름 5 m의 원형 조사영역을 대상으로 세맥을 제외한 열린 단열들에 대한 값을 산출한 결과, SA₅-5 영역이 $f = 0.64$

로 가장 높은 값을 기록하였다(그림 10a, 10b). 이 구간은 단열 밀도 분석에서도 가장 높은 값을 보인 영역으로, 단열 밀도와 f 값 간의 양의 상관관계를 시사한다. 반면, SA₅-13는 $f = 0$ 으로 수리연결성이 전혀 확인되지 않았으며, 해당 영역은 X-노드 및 Y-노드 값이 현저히 낮고 I-노드가 지배적인 구조를 보였다(표 5). 전체 열린 단열을 대상으로 한 단열 밀도와 f 값 간의 상관성 분석 결과, 결정계수(R^2)는 약 0.404, p 값은 4.544×10^{-3} 으로 상대적으로 낮은 상관성을 가진다(그림 10c). 회귀식 기반 예측값과 실제 값의 차이인 잔차를 분석한 결과, 제1사분위수($Q_1 = -0.057$)에서 제3사분위수($Q_3 = 0.094$)의 범위를 벗어난 총 10개의 조사영역(SA₅-1, 3, 4, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 18)이 확인되었다. 이 중 SA₅-13만 이상값으로 구분되었다. 한편, SA₅-13은 세맥이 전체 단열 네트워크에서 차지하는 비율이 0.51로 매우 높았으며, 이를 제외한 다른 조사영역들의 세맥 비율은 모두 0.31 이하로 나타나 단열 네트워크가 주로 열린 단열로 구성되어 있음을 확인하였다(표 5). 각 SA에서 세맥이 차지하는 비율과 f 값 간의 상관성 분석에서는 결정계수(R^2)가 약 0.540, p 값은 0.0005로 나타나 음의 상관관계를 보이며, 단열 밀도와 상관성 분석 결과보다 큰 상관성을 가지는 것으로 평가된다(그림 10d). 회귀 분석 결과, 제1사분위수($Q_1 = -0.063$)에서 제3사분위수($Q_3 = 0.081$)의 범위를 벗어난 총 10개의 SA (SA₅-1, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 17)가 확인되었으며, 이상값은 나타나지 않았다.

투수율 이방성 분석 결과(표 6), SA₅-3, SA₅-5, SA₅-15에서는 이방성 비율(k_1/k_2)이 3을 초과하거나 이에 근접하는 값을 보여, 유의미하게 높은 이방성 특성이 확인되었다. 반면, 수리연결성이 없는 것으로 판단된 SA₅-13은 이방성 비율이 1로, 등방성 특성을 나타냈다. 주 단층을 가로지르는 조사영역에서는, Set B 방향의 영향이 우세하게 나타난 SA₅-4와 SA₅-5를 제외하면 대부분 Set C 및 Set D 방향을 따른 투수율 타원이 확인되었다(그림 11a). 주 단층의 주향과 평행한 방향으로 설정된 조사영역에서는 SA₅-13을 제

외하고 대부분 Set B, Set E 방향이 우세한 투수율 타원이 확인되었다(그림 11b).

7. 토론

7.1. 단열 밀도의 공간분포와 손상대의 구조적 영향

단층대를 중심으로 한 단열 밀도의 공간적 분포는 손상대의 구조적 영향 범위를 정량적으로 평가하는 데 중요한 지표가 된다. 단층대와 상대적으로 멀리 떨어진 SA₁₀ 구간의 단열 밀도는 평균 0.041 cm⁻¹, 중앙값 0.039 cm⁻¹, 최빈값 0.038 cm⁻¹로 나타났으며, 연결된 노두 수는 평균 463.8개, 중앙값 318개, 최빈값 379.48개로 나타났다. 이 중에서 최빈값은 연구지역의 배경 단열 밀도와 연결성을 대표하는 수치로 해석된다. 주 단층을 가로지르며 설치된 SA₅ 조사

선 또한 밀도 평균 0.040 cm⁻¹, 중앙값 0.041 cm⁻¹, 최빈값 0.043 cm⁻¹를 기록하며 SA₁₀과 유사한 경향을 보였다. 반면 주 단층의 자취를 따라 설치한 SA₅ 결과는 밀도 평균값 0.057 cm⁻¹, 중앙값 0.050 cm⁻¹, 최빈값 0.050 cm⁻¹로, 해당 최빈값은 주 단층을 가로지르며 설치한 SA₅의 최빈값(약 0.043 cm⁻¹)에 비해 약 16.28% 높은 값을 보였다. 연결된 노두 수 또한 주 단층의 자취를 따라 설치한 SA₅ 결과에서 최빈값 148.85개로 주 단층을 가로지르며 설치한 SA₅의 최빈값(120.72개)보다 23% 높은 값을 보인다. 이는 주 단층을 따라 발달하는 벽손상대의 영향을 나타내는 것으로 추정된다. 이때 SA₅-5 구간에서는 밀도 값 0.097 cm⁻¹와 연결된 노두 수 504개가 기록되었으며, 이는 단층을 가로지르는 SA₅의 밀도 최빈값(약 0.043 cm⁻¹) 대비 약 125.6%, 연결된 노두 수 최빈값(120.72개)보다는 76% 높은 수치로, 연

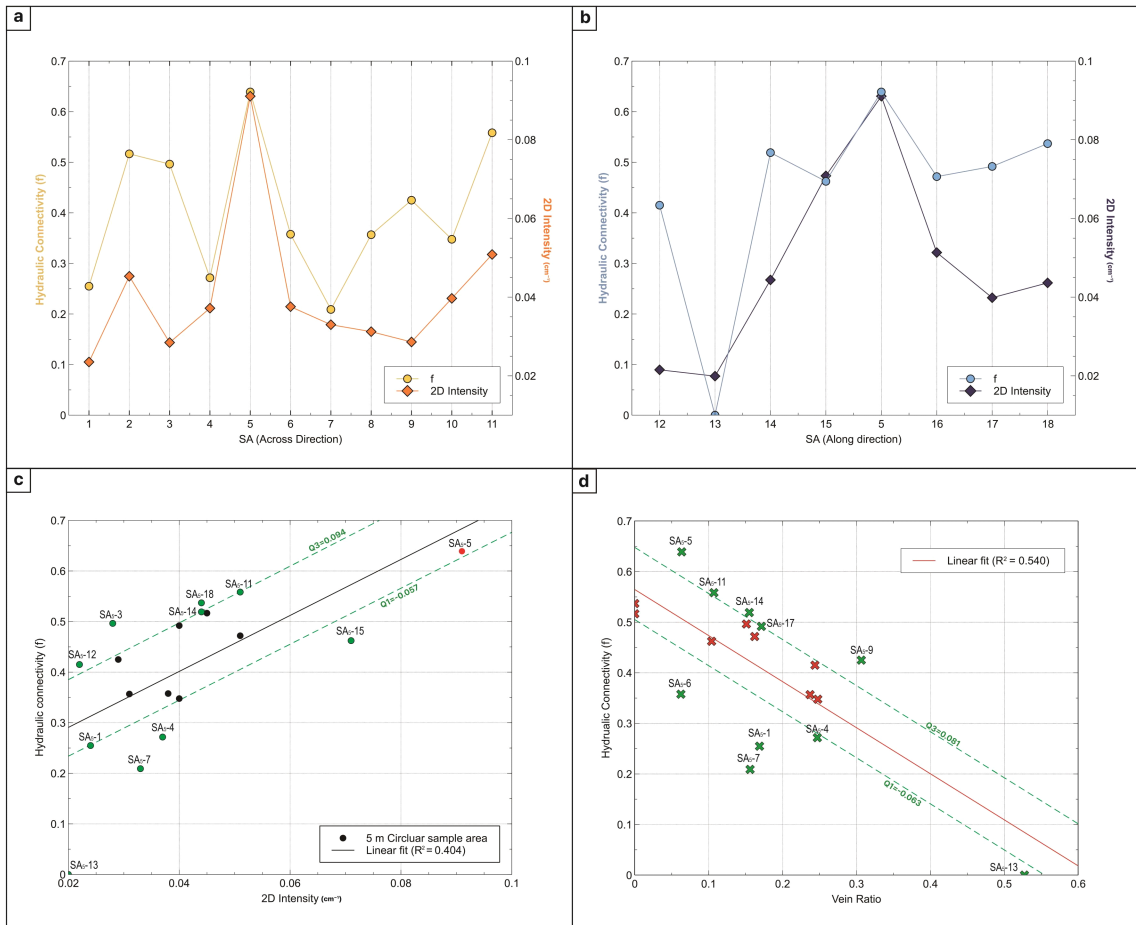


Fig. 10. Hydraulic connectivity (f) and 2D intensity of open fractures for sample areas distributed (a) across and (b) along the target fault. (c) Correlation between hydraulic connectivity (f) and 2D intensity (open fracture), showing relatively low coefficient of determination ($R^2 = 0.404$). The interquartile range (IQR) is defined by $Q1 = -0.057$ and $Q3 = 0.094$. Data points outside this range are highlighted in green, indicating samples with anomalously low or high connectivity relative to their 2D intensity. (d) Negative correlation between hydraulic connectivity and vein ratio, with a moderate relationship ($R^2 = 0.540$). The IQR spans from $Q1 = -0.063$ to $Q3 = 0.081$. As in (c), green markers represent samples falling outside the $Q1$ - $Q3$ range, suggesting variability in hydraulic connectivity not solely explained by vein ratio.

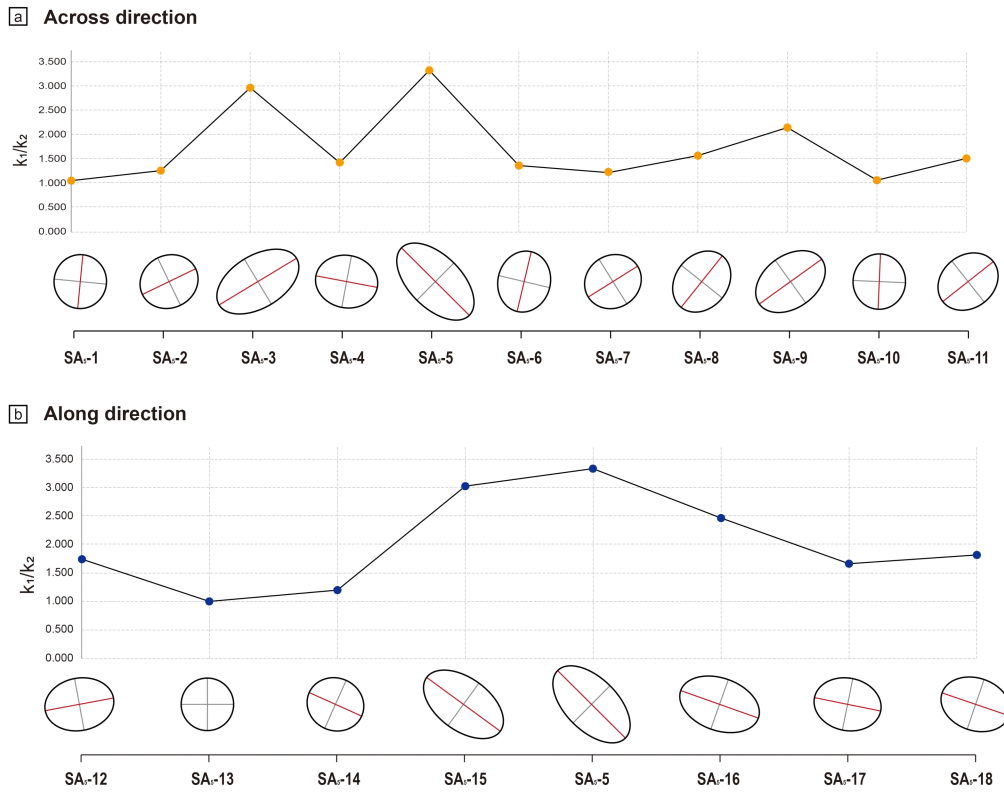


Fig. 11. 2D permeability anisotropy ratio (k_1/k_2) and corresponding permeability ellipses for sample areas distributed (a) across and (b) along the target fault. Each ellipse represents the principal directions and relative permeability, indicating directional anisotropy in the fracture network.

Table 5. Results of 5 m circular scanline analysis showing 2D fracture intensity, hydraulic connectivity (f), and permeability anisotropy ratio (k_1/k_2), vein ratio.

Direction	Sample_No. (5 m)	I	X	Y	2D Intensity	f	k_1/k_2	Vein Ratio
Across direction	1	27	17	24	0.024	0.26	1.1	0.17
	2	45	59	85	0.045	0.52	1.3	0.00
	3	16	22	23	0.028	0.50	3.0	0.15
	4	65	54	37	0.037	0.27	1.4	0.25
	5	81	195	266	0.091	0.64	3.3	0.06
	6	48	40	52	0.038	0.36	1.4	0.06
	7	56	31	47	0.033	0.21	1.2	0.16
	8	39	39	29	0.031	0.36	1.6	0.24
	9	22	16	41	0.029	0.43	2.2	0.31
	10	50	46	42	0.040	0.35	1.1	0.25
	11	47	88	75	0.051	0.56	1.5	0.11
Along direction	12	18	18	22	0.022	0.42	1.7	0.24
	13	35	9	15	0.020	0.00	1.0	0.53
	14	47	66	82	0.044	0.52	1.2	0.15
	15	121	141	169	0.071	0.46	3.0	0.10
	16	58	54	115	0.051	0.47	2.5	0.16
	17	42	63	47	0.040	0.49	1.7	0.17
	18	34	51	64	0.044	0.54	1.8	0.00

Table 6. Permeability anisotropy parameters for 5 m circular sampling areas. Values include principal permeabilities (k_1 , k_2), anisotropy ratio (k_1/k_2), and the orientation of the principal permeability axis (k_1 direction).

Sample_No. (5 m)	K_{xx} (mD)	K_{xy} (mD)	K_{yy} (mD)	k_1	k_2	k_1/k_2	k_1 Direction
1	2.3×10^1	1.2×10^{-1}	2.4×10^1	2.4×10^1	2.3×10^1	1.1	005°
2	1.0×10^2	8.9	8.8×10^1	1.1×10^2	8.3×10^1	1.3	064°
3	6.1×10^1	2.2	3.8×10^1	7.3×10^1	2.5×10^1	3.0	059°
4	4.6×10^1	-2.5	3.3×10^1	4.6×10^1	3.3×10^1	1.4	281°
5	4.7×10^2	-2.5×10^2	4.7×10^2	7.3×10^2	2.2×10^2	3.3	315°
6	4.4×10^1	3.5	5.8×10^1	5.9×10^1	4.3×10^1	1.4	013°
7	3.3×10^1	2.9	3.0×10^1	3.5×10^1	2.8×10^1	1.2	060°
8	3.5×10^1	8.1	3.9×10^1	4.5×10^1	2.9×10^1	1.6	039°
9	4.2×10^2	1.3×10^2	3.3×10^2	5.1×10^2	2.4×10^2	2.2	054°
10	5.1×10^1	2.5×10^{-1}	5.7×10^1	5.7×10^1	5.1×10^1	1.1	002°
11	1.4×10^2	2.7×10^1	1.3×10^2	1.6×10^2	1.1×10^2	1.5	052°
12	3.1×10^1	2.4	1.8×10^1	3.2×10^1	1.8×10^1	1.7	080°
13	9.3	0.0	9.3	9.3	9.3	1.0	-
14	9.7×10^1	-6.2	8.6×10^1	1.0×10^2	8.3×10^1	1.2	294°
15	2.3×10^2	-9.4×10^1	1.7×10^2	2.9×10^2	9.7×10^1	3.0	306°
16	1.4×10^2	-2.9×10^1	7.3×10^1	1.6×10^2	6.3×10^1	2.5	290°
17	8.8×10^1	-6.9	5.6×10^1	9.0×10^1	5.4×10^1	1.7	281°
18	1.2×10^2	-1.7×10^1	7.2×10^1	1.2×10^2	6.6×10^1	1.8	289°

결손상대가 벽손상대보다 더 강한 구조적 영향을 보임을 시사한다.

7.2. 단열 네트워크의 복잡성과 수리연결성

전체 단열 밀도와 연결 노드 수는 명확한 양의 상관관계를 보이며, 이는 단열 복잡성이 증가할수록 네트워크의 연결성이 향상된다는 기존 연구 결과와 일치한다(Shipton and Cowie, 2003; Ferrill *et al.*, 2017; Lucca *et al.*, 2019; Nixon *et al.*, 2020). 반면, 열린 단열 밀도와 f 값 간에는 일관된 관계가 나타나지 않았으며(그림 10c), 상관성 분석 결과 결정계수는 0.404로 비교적 낮은 수준에 그쳤다. 이는 단열 밀도만으로 수리연결성을 충분히 설명하기 어려움을 시사한다.

세맥 비율과 f 값 간의 상관성 분석에서는 결정계수 0.540으로 중 정도의 음의 상관관계를 보였으며(그림 10d), 세맥 비율이 증가할수록 수리연결성이 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 단열 밀도 대비 세맥의 존재가 수리연결성에 더 큰 영향을 줄 수 있음을 의미하며, 원형 조사 영역의 수리적 특성을 분석할 때 세맥 비율과 같은 추가 요인을 함께 고려할 필요성을 제기한다. 세맥은 일반적으로 단열을 따라 유체가 이동하는 동안 광물 침전 작용을 통해 형성되며, 이러한 광물 충전은 단열면의 폐쇄 및 유동성 저하를 유발할 수 있다(Sibson, 1992; Sibson and Scott, 1998; Bons *et al.*,

2012). 실제 본 연구지역에서 전체 단열을 대상으로 한 f 값과 세맥을 제외한 열린 단열만으로 구성된 단열망을 대상으로 한 f 값을 비교하였을 때, 세맥에 접하는 단열들이 고립되면서 고립 브랜치와 I-노드 수가 증가하여 네트워크 전체의 연결성이 약화된 사례들이 확인되었다(그림 12).

잔차의 사분위수 분포를 기준으로 조사영역을 분류한 결과, 단열 밀도와 세맥 비율을 통한 f 값 예측 값에 따라 다음과 같은 경향이 인지되었다. SA₅-11과 SA₅-14는 단열 밀도와 세맥 비율 회귀모델 모두에서 Q3 이상 잔차를 보이며, 두 모델이 f 값을 과소추정한 사례이다. 해당 영역은 X- 및 Y-노드가 상대적으로 잘 발달하고 세맥 비율이 낮아 구조적 연결성과 수리연결성이 모두 높게 나타났다. 반면 SA₅-1, SA₅-4, SA₅-7, SA₅-13은 두 모델 모두에서 Q1 이하 잔차를 보이며, 모델이 값을 과대추정한 사례에 해당한다. 이들은 연결성이 미흡하고 I-노드가 우세하게 분포하는 단열망 구조를 보이며, 이러한 낮은 연결성으로 인해 수리연결성이 저하된 사례로 해석된다.

이외에도 특정 변수에서만 과대 혹은 과소추정된 사례들이 존재하며, 다음과 같이 분류된다. SA₅-3, SA₅-12, SA₅-18은 세맥 비율과 f 값 간에 예측 가능한 관계를 보이지만, 단열 밀도 회귀식에서 Q3 이상 잔차를 보여 과소추정된 사례로 분류되며, 이는 단열 밀도에 비해 f 값이 높게 나타나는 구조적 특성을 반영한다. 반대로 SA₅-15는 세맥 비율과의

관계는 양호하지만, 높은 단열 밀도에도 불구하고 f 값이 예측값보다 낮게 나타나 단열 밀도 기반 회귀모델에서 과대추정된 사례로 분류된다. SA₅₋₅, SA₅₋₉, SA₅₋₁₇은 세맥 비율에 비해 f 값이 높아, 세맥이 연결 경로를 효과적으로 차단하지 못하여 높은 수리연결성을 보여주는 사례로 해석되며, 세맥 비율 회귀모델에서 과소추정된 것으로 나타난다. 반면 SA₅₋₆은 세맥 비율이 낮음에도 불구하고 f 값이 낮게 나타나, 세맥 비율 기반 회귀모델이 과대추정한 사례에 해당하며, 구조적 연결성이 제한되었을 가능성을 시사한다. 이상의 분석 결과는 단열 밀도와 세맥 비율 모두 f 값의 예측에 일정 부분 기여하지만, 어느 하나로는 수리연결성을 일관되게 설명하기 어렵다는 점을 보여준다. 특히 잔차 분석을 통해 드러난 다양한 사례들은 구조적 연결성의 결정 요인이 단열의 수치적 특성뿐만 아니라 네트워크 내 위상적 구성, 노드 유형, 그리고 단열 간 연결 방식에 의해 좌우됨을 시사한다. 따라서 유체 유동 특성 평가 시에는 이러한 구조적 위상 요인을 함께 고려한 통합적 해석이 필요함을 뒷받침한다(Sævik and Nixon, 2017).

7.3. 단층손상대 내 투수율 이방성의 공간적 변동과 구조적 제어

투수율 이방성 분석 결과, 배경 단열에서는 Set C와 Set C의 2차 단열인 Set E 방향을 장축으로 하는 투수율 타원이 우세하게 나타났다. 이러한 결과는 Set C 단열군이 가장 높은 밀도로 발달한 결과와 일치하며, 배경 단열에서 Set C 단열 시스템이 유체 흐름을 지배하는 주요 구조임을 시사한다. 반면, 주 단층의 연결손상대(SA₅₋₅) 구간에서는 Set B 방향(약 315°)을 장축으로 가지는 투수율 타원이 발달하였다. 해당 구간은 분절 I 남쪽 말단에 위치한 단층 굴곡에

해당하고, 국지적 인장 환경이 형성되며, Set A의 2차 단열인 Set B 방향의 열린 단열이 우세하게 발달한 것으로 해석된다. 이는 단층의 구조적 환경이 유체 유동 방향을 강하게 제어하고 있음을 보여준다. 또한 주 단층의 벽손상대에서는 주로 Set B 및 Set E 방향을 장축으로 하는 투수율 타원이 나타났으며, 이는 주 단층의 2차 단열(Set B)과 배경 단열(Set E)의 복합적인 영향으로 해석할 수 있다. 이방성 비(k_1/k_2)는 연결손상대(SA₅₋₅)에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 벽손상대가 배경 단열보다, 연결손상대가 벽손상대보다 더 강한 수리적 이방성을 보인다.

결과적으로, 투수율은 모암 < 벽손상대 < 연결손상대 순으로 뚜렷한 증가 양상을 보이며, 특히 연결손상대 구간 내 유동 방향은 단층 굴곡 지점의 PSZ 방향과 평행하고, 단열 밀도, 연결성, f 값 모두에서 가장 높은 값을 기록하였다. 단열을 통한 수리적 특성은 단열의 방향성, 간극, 밀도, 연결성 등 기하학적 조건과 공간적 특성에 대해서 강하게 영향을 받는 것으로 여겨지기 때문에 해당 구역은 단층대 내 유체 유동의 주요 통로로 작용할 수 있다. 이는 단층의 구조적 제어에 따라 단열 네트워크의 유체 유동 경로가 달라질 수 있음을 보여주며, 투수율 이방성이 단열군의 방향성과 강하게 연동되어 있다는 점을 뒷받침한다.

7.4. 손상대 유형별 수리적 이방성 모델 및 적용 가능성

연구지역의 주 단층은 3개의 분절로 이루어진 단일 전단면 형태로, 소규모 분절 간 연결에 의해 인장성 연결손상대가 형성되어 있다. 기존 연구들과 마찬가지로, 배경 단열대 < 벽손상대 < 연결손상대 순으로 단열 밀도 및 연결성 값이 증가하는 경향이 확인되었으며, 이는 단열망의 복잡성이 손상대 유형에 따라 점진적으로 증가함을 시사한다. 그러

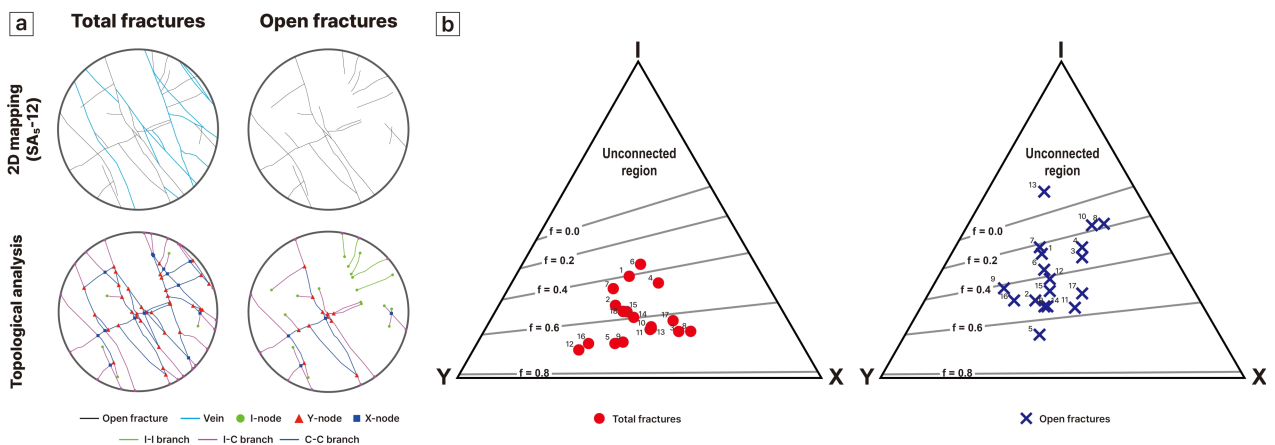


Fig. 12. (a) Example of 2D mapping and topological analysis for total and open fractures in sample area SA₅₋₁₂. Upper row showing mapped fractures; lower row presents corresponding topological classifications with I-, Y-, and X-nodes and their branch types. (b) Ternary diagram showing f values for all fractures (right) and open fractures (left) within 5 m circular sample areas, classified by node types (I-, Y-, and X-nodes).

나 대규모 단층대와는 달리, 일부 벽손상대 구간에서는 수리연결성이 0을 보이는 구간이 확인되었고, 단열의 발달 또한 미약한 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 중·소규모 단층대의 경우, 벽손상대보다 연결손상대가 유체 유동에 미치는 영향이 상대적으로 클 수 있음을 시사하며, 암반 내 유체 유동 경로 역시 연결손상대에서의 단층 기하와 공간적 특성에 더욱 강하게 영향을 받는다는 것을 지시한다.

이러한 결과를 바탕으로, 본 연구는 중·소규모 단층을 대상으로 한 손상대 유형별 구조적·수리적 특성 차이를 종합적으로 반영한 투수성 모델을 제안한다(그림 13). 해당 모델은 결정질암 단층대 내 유체 유동 경로의 공간적 변화를 보다 현실적으로 설명하는 모식도로 활용될 수 있으며, 향후 암반 부지 평가에 참고자료로 기여할 수 있다.

예를 들어, 방사성 폐기물 처분장이나 이산화탄소 지중 저장소와 같은 오염물질 저장시설의 부지 평가에서는, 대규모 단층대 주변이 아닌, 상대적으로 구조적·수리학적으로 안정한 암반이 선호된다. 이러한 관점에서 이번 연구에서는 중·소규모 단층대 내부에서도 연결손상대가 유체 유동 경로에 중대한 영향을 미칠 수 있음을 정량적으로 제시하였으며, 이에 대한 정밀한 구조적 해석이 병행되어야 함을 강조한다.

다만 본 연구는 지표 기반의 2차원 단열 분석을 바탕으로 수행되었기에, 단층-단열 시스템의 심부 구조를 반영하

지 못한 한계가 있다. 또한 퇴적암, 변성암 지역의 경우, 층리나 변형 띠(deformation band), 스타일로라이트(stylolite), 엽리 등 다양한 면구조가 함께 발달함에 따라, 손상대 내 단열 네트워크는 더욱 복잡한 구조로 형성될 수 있다(Park *et al.*, 2024; Bernier *et al.*, 2025). 이로 인해 단열 네트워크의 연결성과 수리적 특성은 지역 및 암상 조건에 따라 더욱 이질적으로 나타날 가능성이 높으며, 이에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 향후 시추, 지구물리탐사, 유체포유물 분석 등을 포함한 다중 데이터 기반의 통합적 연구가 수행된다면, 단층대의 3차원적 수리 거동을 보다 정밀하게 규명할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러, 퇴적암, 변성암 지역에 관한 후속 연구를 통해 이러한 면구조의 복합적인 상호작용이 단열 네트워크의 수리적 특성에 미치는 영향을 중점적으로 규명함으로써 다양한 암상 조건에서의 손상대 특성에 대한 이해를 심화시킬 필요가 있다.

8. 결론

이번 연구는 드론 기반 고해상도 정사영상과 2D 단열 분포를 통해 주 단층 주변 단열 네트워크를 모암, 벽손상대, 연결손상대로 구분하여 구조적 특성과 수리연결성을 정량적으로 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 단열 밀도와 연결 노드 수는 강한 양의 상관관계를 보

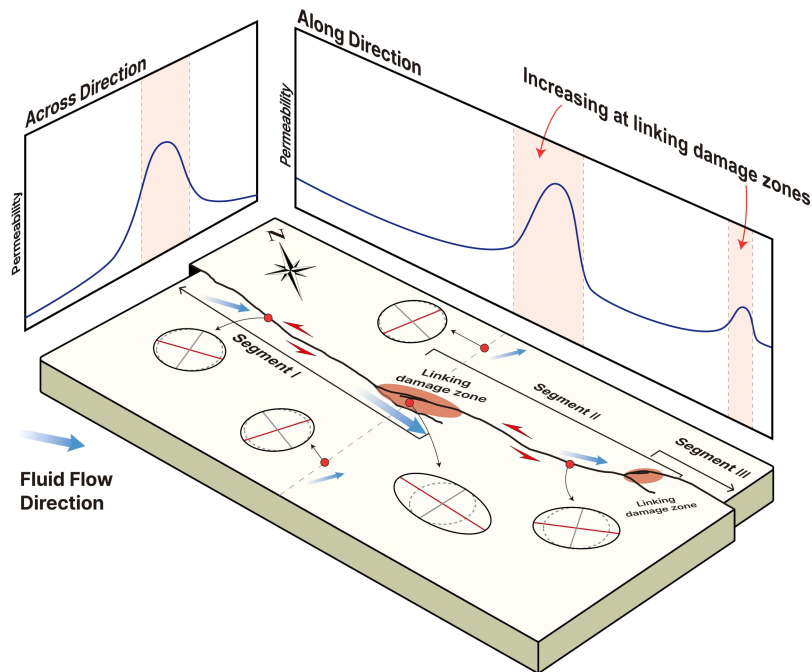


Fig. 13. Conceptual model illustrating the relationship between linking damage zones and permeability variation. The linking damage zones exhibit the highest permeability values and are characterized by NW-SE oriented permeability ellipses (Set B). Permeability ellipses in the wall damage zones show dominant orientations in the WNW-ESE, E-W (Set B, Set E), whereas the host rock outside the damage zones displays NE-SW and NNE-SSW-oriented ellipses (Set C, Set D).

였으며, 특히 벽손상대에서 모암 대비 각각 16.28%, 23% 높은 수치를 보이며, 연결손상대(SA₅-5)에서 각각 125.68%, 76% 높은 수치를 보인다. 이는 중·소규모 단층에서 벽손상대-연결손상대 간 단열연결성의 차이가 크며, 연결손상대가 단열 네트워크의 밀도 및 연결성 향상에 결정적인 구조적 요소로 작용함을 시사한다.

2) 단열계의 수리연결성 역시 연결손상대에서 가장 높은 값($f = 0.64$)을 보였다. 하지만 수리연결성은 단열 밀도와 낮은 상관성($R^2 = 0.404$)을 보였으며, 세맥 비율과는 비교적 높은 상관성($R^2 = 0.540$)을 보인다. 이는 단열계 내 세맥의 비율에 따라 고립된 브랜치와 연결 노드의 수가 조정된 결과로 해석된다. 따라서 단층대 내 유체 유동 특성 평가 시에는 단순한 단열 밀도 지표만으로 접근하기보다는 세맥과 같은 추가적인 구조적 지표를 고려해야만 수리적 특성을 보다 정확히 파악할 수 있음을 시사한다.

3) 투수율 이방성 분석 결과, 연결손상대에서는 Set B 방향, 벽손상대에서는 Set B, E 방향, 배경 단열에서는 Set C, D 방향을 장축으로 하는 투수율 타원이 우세하게 나타났다. 이는 단층의 구조적 위치 및 기하학적 특징이 유체 유동의 방향성에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

4) 위 결과를 종합하면, 중·소규모 단층에서 연결손상대가 단층대 내에서 유체 유동 경로를 결정짓는 핵심 구조이며, 손상대의 유형에 따른 구조적 이질성이 수리적 거동에 직접적으로 영향을 미친다는 것을 명확히 보여준다. 또한 연결손상대는 국지적인 유체 유동 통로로 작용할 수 있으며, 이는 방사성 폐기물 처분장, 이산화탄소 지중 저장소 등 수리지질학적 안전성이 요구되는 시설의 부지 평가에 있어 구조적 복잡성과 수리적 이질성을 반영한 해석이 반드시 수반되어야 함을 시사한다.

본 연구는 이러한 분석의 중요성을 잘 보여주며, 향후 퇴적암 및 변성암 등 다양한 암종에 대해 시추, 지구물리, 유체포유물 분석 등과 연계된 3차원 수리지질 모델링이 병행된다면 단층대를 통한 유체 유동 예측의 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음. 논문에 많은 도움을 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Aydin, A., 2000, Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 797-814.
- Barani, H.R., Lashkaripour, G. and Ghafouri, M., 2014, Predictive permeability model of faults in crystalline rocks; verification by joint hydraulic factor (JH) obtained from water pressure tests. *Journal of Earth System Science*, 123, 1325-1334.
- Berio, L., Balsamo, F., Pizzati, M., Storti, F., Curzi, M. and Viola, G., 2023, Along- and across-strike variation of damage zone parameters in the Kornos-Aghios Ioannis normal fault, Lemnos Island, Greece. *Journal of Structural Geology*, 177, 104981.
- Bernier, L., Soliva, R., Roubinet, D., Dominguez, S., Mayolle, S., Bulliard, M., Wibberley, C. and Korbar, T., 2025, Spatial distribution of permeability in carbonate fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 194, 105371.
- Bond, C.E., Kremer, Y., Johnson, G., Hicks, N., Lister, R., Jones, D.G., Haszeldine, R.S., Saunders, I., Gilfillan, S.M., Shipton, Z.K. and Pearce, J., 2017, The physical characteristics of a CO₂ seeping fault: The implications of fracture permeability for carbon capture and storage integrity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 61, 49-60.
- Bons, P.D., Elburg, M.A. and Gomez-Rivas, E., 2012, A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *Journal of Structural Geology*, 43, 33-62.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
- Choi, J.-H., Edwards, P., Ko, K. and Kim, Y.-S., 2016, Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, 152, 70-87.
- Cilona, A., Aydin, A. and Johnson, N.M., 2015, Permeability of a fault zone crosscutting a sequence of sandstones and shales and its influence on hydraulic head distribution in the Chatsworth Formation, California, USA. *Hydrogeology Journal*, 23, 405-420.
- Dimmen, V., Rotevatn, A., Peacock, D.C., Nixon, C.W. and Nærland, K., 2017, Quantifying structural controls on fluid flow: Insights from carbonate-hosted fault damage zones on the Maltese Islands. *Journal of Structural Geology*, 101, 43-57.
- Faulkner, D., Jackson, C., Lunn, R., Schlische, R., Shipton, Z., Wibberley, C. and Withjack, M., 2010, A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, 1557-1575.
- Ferrill, D.A., Morris, A.P., McGinnis, R.N., Smart, K.J., Wigginton, S.S. and Hill, N.J., 2017, Mechanical stratigraphy and normal faulting. *Journal of Structural Geology*, 94, 275-302.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater* prentice-hall. Englewood Cliffs, NJ, 176, 161-177.
- Hodge, M.S., Cottrell, M., Knies, J. and Viola, G., 2025, Discrete fracture network modelling reconstructs fracture array evolution and related petrophysical properties over geological time. *Communications Earth & Environment*, 6, 183.
- Jolley, S.J., Barr, D., Walsh, J.J. and Knipe, R.J., 2007, Structurally complex reservoirs: an introduction. Geological Society, London, Special Publications, 292, 1-24.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Kim, H., Hong, P., Kwon, C.W., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Koh, H.J., Song, K.-Y. and Byun, U.H., 2019, Geological Map of Korea (1:1,000,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, T., Jeong, S.-H., Lee, J., Naik, S.P., Yang, W., Ji, D.H. and Kim, Y.-S., 2018, Interpretation of paleostress using geological structures observed in the eastern part of the Ilgwang fault. The

- Journal of Engineering Geology, 28, 645-660 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Andrews, J.R. and Sanderson, D.J., 2001, Reactivated strike-slip faults: Examples from north Cornwall, UK. *Tectonophysics*, 340, 173-194.
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Ko, N.-Y., Ji, S.-H., Koh, Y.-K. and Choi, J.-W., 2015, Evaluation of two conceptual approaches for groundwater flow simulation for a rock domain at the block-scale for the Olkiluoto site, Finland. *Engineering Geology*, 193, 297-304.
- Lee, C.-H. and Lee, S.-W., 1999, Petrology and Petrochemistry of the Granitoids in the Geoje Island, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 20, 61-79 (in Korean with English abstract).
- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, 18, 645-658.
- Lu, D., Huang, D. and Xu, C., 2021, Estimation of hydraulic conductivity by using pumping test data and electrical resistivity data in faults zone. *Ecological Indicators*, 129, 107861.
- Lucca, A., Storti, F. and Molli, G., 2020, Extensional fracture network attribute distribution in faulted thick sandstone strata: Compione Fault, Northern Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*, 131, 103954.
- Lucca, A., Storti, F., Molli, G., Mucchez, P., Schito, A., Artoni, A., Balsamo, F., Corrado, S. and Mariani, E.S., 2019, Seismically enhanced hydrothermal plume advection through the process zone of the Compione extensional fault, Northern Apennines, Italy. *Bulletin*, 131, 547-571.
- Martinelli, M., Bistacchi, A., Mittempergher, S., Bonneau, F., Balsamo, F., Caumon, G. and Meda, M., 2020, Damage zone characterization combining scan-line and scan-area analysis on a km-scale Digital Outcrop Model: The Qala Fault (Gozo). *Journal of Structural Geology*, 140, 104144.
- Matsumoto, N. and Shigematsu, N., 2018, In-situ permeability of fault zones estimated by hydraulic tests and continuous groundwater-pressure observations. *Earth, Planets and Space*, 70, 1-12.
- Mauldon, M., Dunne, W.M. and Rohrbach Jr, M.B., 2001, Circular scanlines and circular windows: New tools for characterizing the geometry of fracture traces. *Journal of Structural Geology*, 23, 247-258.
- McGill, R., Tukey, J.W. and Larsen, W.A., 1978, Variations of box plots. *The American Statistician*, 32, 12-16.
- Medeiros, W.E., Do Nascimento, A.F., da Silva, F.A., Destro, N. and Demétrio, J.G.A., 2010, Evidence of hydraulic connectivity across deformation bands from field pumping tests: Two examples from Tucano Basin, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 32, 1783-1791.
- Nelson, R.A., 1985, *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. Gulf Professional Publishing, Houston, TX, 320 p.
- Nixon, C.W., Nærland, K., Rotovate, A., Dimmen, V., Sanderson, D.J. and Kristensen, T.B., 2020, Connectivity and network development of carbonate-hosted fault damage zones from western Malta. *Journal of Structural Geology*, 141, 104212.
- Nixon, C.W., Vaagan, S., Sanderson, D.J. and Gawthorpe, R.L., 2019, Spatial distribution of damage and strain within a normal fault relay at Kilve, UK. *Journal of Structural Geology*, 118, 194-209.
- Nyberg, B., Nixon, C.W. and Sanderson, D.J., 2018, NetworkGT: A GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. *Geosphere*, 14, 1618-1634.
- Park, S., Park, C.-E., Lee, K.H., Kwak, Y., Lee, S.-E. and Park, S.-I., 2024, Formation of hydraulic fractures in sedimentary basins during burial: Implications for non-tectonic deformation. The 5th Korea Geoscience Union Annual Meeting (Abstracts), Pyeongchang, July 1-2, S1-09.
- Peacock, D.C.P., Dimmen, V., Rotevatn, A. and Sanderson, D.J., 2017, A broader classification of damage zones. *Journal of Structural Geology*, 102, 179-192.
- Rotevatn, A. and Bastesen, E., 2014, Fault linkage and damage zone architecture in tight carbonate rocks in the Suez Rift (Egypt): implications for permeability structure along segmented normal faults. *Geological Society, London, Special Publications*, 374, 79-95.
- Sævik, P.N. and Nixon, C.W., 2017, Inclusion of topological measurements into analytic estimates of effective permeability in fractured media. *Water Resources Research*, 53, 9424-9443.
- Sanderson, D.J. and Nixon, C.W., 2015, The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66.
- Schultz, R.A. and Fossen, H., 2008, Terminology for structural discontinuities. *AAPG Bulletin*, 92, 853-867.
- Shipton, Z.K. and Cowie, P.A., 2003, A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone. *Journal of Structural Geology*, 25, 333-344.
- Sibson, R. and Scott, J., 1998, Stress/fault controls on the containment and release of overpressured fluids: examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 13, 293-306.
- Sibson, R.H., 1992, Fault-valve behavior and the hydrostatic-lithostatic fluid pressure interface. *Earth-Science Reviews*, 32, 141-144.
- Sibson, R.H., 2020, Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. *Earth, Planets and Space*, 72, 31.
- Sibson, R.H., Robert, F. and Poulsen, K.H., 1988, High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16, 551-555.
- Tiab, D. and Donaldson, E.C., 2024, *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Elsevier, Amsterdam, 918 p.
- Watkins, H., Healy, D., Bond, C.E. and Butler, R.W., 2018, Implications of heterogeneous fracture distribution on reservoir quality; an analogue from the Torridon Group sandstone, Moine Thrust Belt, NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, 108, 180-197.
- Wibberley, C.A., Yielding, G. and Di Toro, G., 2008, Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 299, 5-33.
- Won, C.K., Chi, J.M., Kim, S.J., Yoon, S., So, C.S. and Kim, H.S., 1980, *Geologic sheet of Geoje and Yulpo area (1:50,000)*. Korea Geological Survey, 12 p (in Korean).