Research Paper

Controlling Factors on the Development and Connectivity of Fracture Network: An Example from the Baekildo Fault in the Goheung Area

Chae-Eun Park, Seung-Ik Park*

Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 41566, South Korea

*Corresponding author : psi@knu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 2 December 2021

Received in revised form 18 December 2021

Manuscript accepted 19 December 2021

Available online 28 December 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.6.615>

Research Highlights

- A fracture system consists of fracture sets defined by different geometric and kinematic characteristics.
- Fracture systems show spatial variation in the geometry depending on wall rock lithology and along-fault structural position.
- The connectivity of fracture systems is controlled by the topology and geometry of the constituent fracture sets.

ABSTRACT

The Baekildo fault, a dextral strike-slip fault developed in Baekil Island, Goheung-gun, controls the distribution of tuffaceous sandstone and lapilli tuff and shows a complex fracture system around it. In this study, we examined the spatial variation in the geometry and connectivity of the fracture system by using circular sampling and topological analysis based on a detailed fracture trace map. As a result, both intensity and connectivity of the fracture system are higher in tuffaceous sandstone than in lapilli tuff. Furthermore, the degree of the orientation dispersion, intensity, and average length of fracture sets vary depending on the along-strike variation in structural position in the tuffaceous sandstone. Notably, curved fractures abutting the fault at a high angle occur at a fault bend. Based on the detailed observation and analyses of the fracture system, we conclude as follows: (1) the high intensity of the fracture system in the tuffaceous sandstone is caused by the higher content of brittle minerals such as quartz and feldspar. (2) the connectivity of the fracture system gets higher with the increase in the diversity and average length of the fracture sets. Finally, (3) the fault bend with geometric irregularity is interpreted to concentrate and disturb the local stress leading to the curved fractures abutting the fault at a high angle. This contribution will provide important insight into various geologic and structural factors that control the development of fracture systems around faults.

Keywords : fracture system, geometry, topology, connectivity, controlling factors

Citation: Park, C.-E., Park, S.-I. (2021) Controlling Factors on the Development and Connectivity of Fracture Network: An Example from the Baekildo Fault in the Goheung Area. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.54, p.615-627, doi:10.9719/EEG2021.54.6.615.

연구논문

단열계의 발달 및 연결성 제어요소: 고흥지역 백일도단층의 예

박채은 · 박승익*

경북대학교 지질학과

*책임저자 : psi@knu.ac.kr

요 약

전라남도 고흥군 백일도에 발달하는 우수향 주향이동 단층인 백일도단층은 응회질 사암과 화산력응회암의 분포를 규제하며 복잡한 단열계를 수반한다. 본 연구에서는 백일도단층 주변의 상세 단열 지도를 기반으로 원조사법 및 위상기하 분석법을 통해 단열계의 기하 및 연결성의 공간적 변화를 파악하였다. 분석 결과 단열계의 밀도와 연결성은 화산력응회암에서보다 응회질 사암에서 더욱 높게 나타난다. 응회암질 사암 내 단층의 주향에 대한 구조적 위치에 따라 단열군의 방향 분산도, 밀도, 그리고 평균 길이가 변화한다. 또한 단층 굴곡 주변에는 단층과 고각을 이루거나 휘어진 단열이 집중되어 발달한다. 상세한 단열 관찰과 분석을 통해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다. (1) 응회질 사암 내 단열계의 높은 밀도는 석영, 장석과 같은 취성 광물의 높은 비율에 의해 제어된다. (2) 단열계의 연결성은 구조적 위치에 따른 단열군 방향의 다양화 및 연장성의 증가에 의해 향상된다. (3) 불규칙한 기하를 가진 단층 굴곡은 단층 주변의 응력을 집중 및 교란시켜 단층과 고각을 이루거나 휘어진 단열을 발생시킨다. 연구 결과는 단층 주변 단열계의 발달을 제어하는 여러 지질학적, 구조적 요인에 대한 이해를 증진시키는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어 : 단열계, 기하, 위상기하, 연결성, 제어 요인

1. 서 론

단열은 역학적으로 깨져 인장 강도가 매우 낮은 불연속적인 면을 의미하며 상부 지각에서 발달하는 대표적인 지질구조이다(e.g. Fossen, 2016). 광물 입자 규모에서부터 수백 내지 수천 km의 규모까지 발달하는 단열은 주변 지괴의 이동(변위) 방향에 따라 크게 인장단열(extension fracture), 전단단열(shear fracture), 그리고 혼성단열(hybrid fracture)로 분류된다(Hancock, 1985). 인장단열은 불연속면에 수직인 변위를 가지는 반면 전단단열은 불연속면에 평행한 변위를 보인다. 혼성단열은 인장단열과 전단단열의 성격을 모두 보이는 불연속면을 의미한다.

단열은 일반적으로 기하 및 운동학적 특성으로 분류되는 집단(단열군: fracture set) 내 요소로서 발달하며, 여러 단열군이 모여 단열계(fracture system)가 정의된다. 단열계는 공극률(porosity), 투수성(permeability), 그리고 암반 강도(rock mass strength)와 같은 암체의 수리역학적 특성에 큰 영향을 미친다(e.g. Long and Witherspoon, 1985; Palmström, 1996; Larsen and Gudmundsson, 2010). 따라서 단열계의 공간적 분포와 발달 기작에 대한 이해는 석유 및 가스화 탄소 지층저장(Odling et al., 1999;

Bisdom et al., 2014; Pérez-Flores et al., 2017, March et al., 2018), 광산 및 터널 건설(Friedman, 1975; Zarei et al., 2012) 등 응용지질학적 측면에서 매우 중요하다.

단열계의 특성은 각 단열의 방향, 크기, 간극(aperture) 등 요소적 특성과 더불어 단열계 전체의 기하에 의해 제어된다(Odling, 1997). 단열계의 기하를 특성화하는 연구는 최근 활발하게 진행되고 있다(Odling, 1997; Marrett et al., 1999; Ortega et al., 2006; Olson et al., 2009). 특히 단열의 공간적 분포 및 배열을 설명하는 위상기하(topology)는 단열의 연결성(connectivity) 및 유체의 흐름에 대한 정보를 비교적 손쉽게 제공할 수 있다는 장점이 있어 그 연구가 점차 활발히 이루어지는 추세이다(Adler and Thovert, 1999; Manzocchi, 2002; Sanderson and Nixon, 2015, 2018).

본 연구는 전라남도 고흥군 백일도에 발달하는 백일도단층을 대상으로 한다. 백일도단층은 암상 분포를 제어하는 고각의 주향이동 단층이며 그 주변으로 복잡한 단열계가 잘 발달하여 단열의 요소적 특성과 단열계 기하 분석에 용이하다. 본 연구에서는 백일도단층 주변 단열계의 공간기하학적 해석 결과를 제시하고 단열계 발달 및 연결성 제어 요인에 대해 논의하고자 한다.

2. 지질 개요 및 연구 노두

전라남도 고흥 지역은 백악기 경상분지의 남서측 경계에 위치한다(Fig. 1). 경상분지는 한반도 내 백악기 퇴적 분지 중 가장 규모가 크며, 육성 쇄설성퇴적물과 화산 물질로 주로 채워져 있다(Chang, 1975; Choi, 1986; Chang et al., 2003; Chough and Sohn, 2010). 경상분지는 백악

Fig. 1. A geological map of the Goheung area (adapted from Choi et al., 2002). The Goheung area, located in the southwestern part of the Gyeongsang Basin, is mainly composed of Precambrian and Jurassic crystalline basement and overlying Cretaceous volcano-sedimentary sequences.

기 이래로 다중 변형을 경험하였다(Chang and Chang, 1998; Choi et al., 2002; Kim and Park, 2006). 이로 인해 형성된 북북동 방향과 서북서 방향의 주향이동 단층계는 경상분지 내에서 가장 뚜렷하게 인지되는 거시적 지질구조이다(Chough and Sohn, 2010; Cheon et al., 2020).

연구 노두가 위치하는 고흥 지역 북동부 백일도 동측에는 1:250,000 도폭(Choi et al., 2002)의 신성리층에 해당하는 응회질 사암, 이암, 역암과 더불어 화산력응회암이 수평에 가까운 저각으로 발달한다. 연구 노두에서 이 퇴적암과 화산쇄설암은 N70°W의 주향을 가지는 고각의 단층으로 접촉한다(Fig. 2). 단층의 북측 블록은 적갈색 응회질 사암으로 구성된다(Figs. 2, 3). 중립사 크기를 가진 석영 및 장석 결정과 암편이 세립질의 기질 내에 주로 분포하지만, 일부 조립사 크기의 석영 및 장석 결정을 관찰할 수 있다. 암편은 조립사에서 극조립사의 크기를 가지며 주로 안산암과 응회암으로 이루어져 있다. 분급은 불량하며 결정과 암편 모두 아각형 내지 각형으로 원마도 또한 불량하다. 암편 및 결정의 배열에 의한 층리는 잘 인지되지 않는다. 단층의 남측 블록에는 담회색의 화산력응회암이 발달한다(Figs. 2, 3). 조립사 크기의 결정편, 부석편과 암편이 세립의 화산회 기질 내에 산재되어 있다. 결정편은 주로 사장석과 K-장석으로 이루어져 있고, 암편은 아원형 내지 아각형의 유문암 또는 유문암질 응회암으로 구성된다. 암편 및 결정편의 배열이 인지되지 않으며 용결구조 또한 나타나지 않는다.

본 연구에서는 연구 노두에서 응회질 사암과 화산력응회암을 경계 짓는 단층을 백일도단층으로 명명하였다. 백일도단층 양측에는 복잡한 단열계가 발달하고(Fig. 2) 대부분 지표면에 고각이며 평면 기하를 가지는 규칙적(regular) 단열로 구성된다. 주단층면에 근접한 동-서

Fig. 2. A drone image displaying the Baekildo fault and regional fracture traces in the northeastern coast of the Baekil Island. White box indicates the location of the studied outcrop shown in Fig. 5. The strike of Baekildo fault is N70°W and the strike of fault bend in the studied outcrop is N79°W.

Fig. 3. Outcrop photographs and micrographs of tuffaceous sandstone (a, c) and lapilli tuff (b, d) in the studied outcrop. Abbreviation - Qtz: Quartz, Lf: Lithic fragment.

Fig. 4. (a) Felsic nodules displaced by a minor fault with a dextral sense of movement. (b) Micrographs of altered lapilli tuff. Abbreviation - Qtz: Quartz, Kfs: K-feldspar. (c) Calcite veins and curved fractures around fault bend.

은 서북서-동남동 방향의 이차 전단단열에 의해 암편 및 규장질의 노듈(nodule)이 우수향 감각으로 이격된 양상은 백일도단층이 우수향 주향이동 운동을 경험했음을 지시한다(Fig. 4a). 다만 백일도단층의 주단층면을 따른 단층

조선(striation)이 명확히 관찰되지 않기 때문에 경사이동 성분이 존재할 수 있음을 배제할 수 없다. 화산력응회암 내에는 일부 변질된 단열대가 인지되는데 이 구간 내에는 세립의 화산회 기질에 일부 새니딘화된 장석 반정과

석영 및 방해석으로 구성된 세맥이 관찰된다(Fig. 4b). 연구 노두에서 단층의 일부 구간은 N79°W의 주향을 가지는데 이로 인한 좌측으로 휜(left-stepping bend) 기하가 정의된다(Fig. 2). 특징적으로 단층 굴곡부에 발달하는 응회질 사암 내에는 일부 단열균이 최대 약 1 cm 두께의 방해석에 의해 충전되어 있으며, 인접하여 곡면의 불규칙(irregular) 단열이 집중적으로 발달한다(Fig. 4c).

3. 연구 방법

3.1. 단열 스케치

백일도단층 주변으로 복잡하게 발달하는 단열계의 분포 및 특성을 파악하기 위해 정밀 스케치 작업을 선행했다. 먼저 단열계가 잘 드러난 수평 노두면에 1 m × 1 m의 격자를 설치하였다(Fig. 5). 총 84 m²의 영역에 대해 격자마다 사진 촬영을 하고 획득한 사진들을 실내에서 합성하였다. 생성된 고해상도 노두 사진을 기반으로 단층, 단열, 그리고 세맥과 같은 취성 구조 요소를 실내에서 스케치하였으며, 복잡한 상호 관계를 보이는 구조 요소들은 야외에서 직접 관찰하여 추가하였다. 이렇게 생성된 단열 지도를 통해 실내에서 단열 기하 분석이 이루어졌다.

3.2. 단열 자료 획득 및 분석

일반적으로 활용되는 단열 자료 획득 방법에는 선조사법(scanline sampling: Priest and Hudson, 1981; LaPointe and Hudson, 1985; Priest, 1993), 정면적법(window sampling: Pahl, 1981; Priest, 1993), 그리고 원조사법(circular scanline and window: Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al.,

2002) 등이 있다. 각 조사 방법은 효율성, 정확성, 그리고 편향(bias)과 관련된 장점 및 단점을 가진다(Rohrbaugh et al., 2002). 이번 연구에서는 단열 기하 분석이 필요한 특정 영역에서의 단열 자료를 빠르게 획득하고 방향 편향을 최대한 피하기 위해 원형의 영역으로 모든 방향에서 균일하게 단열 자료를 획득하는 원조사법을 사용하였다.

백일도단층 주변에서 단층의 주향에 따른 구조적 위치와 암상에 따른 단열계의 특성 차이를 확인하기 위해 원조사법을 적용할 7개의 지점(1~7지점)을 설정하였다(Fig. 5). 1~4지점은 응회질 사암 내 구조적 위치에 따른 영향을 조사하기 위해 설정되었으며, 그 중 2, 3지점은 주단층이 단층 굴곡의 주향으로 변경되는 지점에 설정하였다. 5지점은 구조적 위치에 의한 영향을 배제하고 암상에 따른 영향을 조사하기 위해 응회질 사암 내 1지점과 동일한 구조적 위치를 가지는 화산력응회암 내에 설정하였다. 1~5지점은 단층으로부터 일정한 거리를 가지도록 하여 단층과의 거리에 따른 효과를 배제하였다. 분석이 불가한 변질대가 포함되기 때문에 화산력응회암 내에서 단층과의 거리가 일정하도록 여러 분석 지점을 설정할 수 없다. 그럼에도 불구하고 화산력응회암 내 단열계를 5지점에서의 단열 기하 분석만으로 설명하기 한계가 있어 6, 7지점을 추가하였다.

완성된 단열 지도에 상술한 7개의 지점을 원으로 표시한 후 단열 기하 분석을 수행하였다. 기존 연구에 따르면 원의 크기가 작아질수록 원 내부로 포함되는 단열의 개수 및 길이가 감소하고 전체 단열계보다 높은 밀도와 낮은 평균 길이가 산출되는 경향이 있으며(Rohrbaugh et al., 2002), 분석에 사용되는 단열의 방향성이 분산되어 단열균의 설정이 어렵다(Watkins et al., 2015). 따라서 본

Fig. 5. Photograph of the studied outcrop displaying the location of grids and circles for fracture mapping, sampling, and analyses.

연구에서는 완성된 단열 지도에서 모든 위치에서의 원의 넓이가 일정하기 위한 최대의 크기이자 동시에 원과 교차하는 단열의 개수가 30개 이상(Watkins et al., 2015)이 될 수 있는 지름 1 m의 원을 분석에 이용하였다. 오픈 소스 지리정보시스템 프로그램인 QGIS를 통해 원과 교차하는 단열들의 궤적, 길이, 방향 등을 자동 추출한 후 단열 기하 분석을 실시하였다.

단열 기하 분석의 결과로서 밀도(intensity), 평균 길이, 방향성, 그리고 연결성이 도출되었다. 밀도는 원 내부 단열 길이의 합을 원의 면적으로 나누어 계산했다. 평균 길이의 경우 중도절단 편향(censoring bias: Mauldon et al., 2001)을 최소화하기 위해 원과 교차하는 단열의 총 길이를 모두 포함하여 값을 구하였다. 방향성은 원 내부에 포함되는 모든 단열의 주향을 측정하여 장미 도표로 표시하였다. 원 내부 단열계의 연결성은 아래에 기술한 위상 기하 분석을 통해 계산하였다.

3.3. 위상기하 분석

2차원 공간에서 단열의 궤적을 의미하는 선(line), 단열의 말단 지점 혹은 교차 지점을 의미하는 노드(node), 노드와 노드 사이의 구간을 의미하는 브랜치(branch)의 개념을 통해 단열계의 공간적 배열과 단열 간 기하학적 관계를 정량화할 수 있다(Sanderson and Nixon, 2015: Fig. 6). 노드는 고립된 단열 말단 지점인 I-노드, 분기하거나 접

하는 지점인 Y-노드, 그리고 단열 간 교차 지점인 X-노드로 구분된다(Manzocchi, 2002). 이때 I-노드는 독립된 노드 그리고 Y-, X-노드는 연결된 노드로 분류된다. 브랜치는 구성 노드의 유형에 따라 세 종류로 구분된다. 두 노드 모두 독립된 경우 II브랜치, 한 노드가 연결된 경우 IC브랜치, 그리고 두 노드 모두 연결된 경우 CC브랜치로 구분된다(e.g. Ortega and Marrett, 2000; Sanderson and Nixon, 2015: Fig. 6).

각 종류별 노드의 수를 이용하면 단열계의 연결성과 관련된 매개변수들을 표현할 수 있다(Sanderson and Nixon, 2015, 2018). 그 중 브랜치 당 평균 연결 개수(C_B)가 가장 유용하게 사용되는데, 이는 아래의 식으로 계산된다.

$$C_B = (3N_Y + 4N_X) / N_B$$

이때 N_I , N_Y , N_X 는 I-노드, Y-노드, 그리고 X-노드의 개수이며 N_B 는 단열계 내 브랜치의 총 개수로 아래 식에 의해 계산된다.

$$N_B = 1/2(N_I + 3N_Y + 4N_X)$$

C_B 는 0과 2 사이의 값을 가지는데, 이는 하나의 브랜치에 두 개의 노드가 존재하기 때문이다. 단열계를 구성하는 브랜치가 대부분 II브랜치라면 C_B 는 0에 가까워지는 반면 대부분 CC브랜치라면 2에 가까워진다. 단열계 내 노드 혹은 브랜치의 구성 비율을 이용하면 매개변수 C_B 로서 표현되는 단열계의 연결성이 삼각도표에 도시된다(Manzocchi, 2002; Sanderson and Nixon, 2015: Fig. 6).

4. 결 과

4.1. 단열 지도

백일도단층 주변 단열계의 스케치 결과는 Fig. 7과 같다. 백일도단층, 세맥 충진 및 미충진 단열, 그리고 변질된 단열대를 정밀하게 도면화하였으며, 퇴적물에 의해 덮여 스케치가 불가능한 지역의 경우 이를 따로 표현하였다. 상세 단열 지도를 바탕으로 총 7개의 지점에서 수행한 원조사 결과는 아래와 같다.

4.2. 단열계 발달 특성

4.2.1. 단열군(fracture set)

모든 분석 지점에는 여러 방향의 단열이 존재한다(Fig. 8). 백일도단층과 아평행한 서북서-동남동 방향의 단열이 가장 우세하게 분포하며, 그 외 북북동-남남서, 동북동-서남서, 그리고 북북서-남남동 방향의 단열이 지점에 따라 빈도수의 차이를 보이며 발달한다. 전체적인 빈도수를 고려하여 서북서-동남동 방향의 단열군 1, 동북동-서남서

Fig. 6. (a) A synthetic fracture network showing the classification of nodes and branches: I-node (circle); Y-node (triangle); X-node (diamond); I-I branch (green line); I-C branch (red line); C-C branch (blue line). (b) Ternary diagrams using different types of node and branch for evaluation of C_B (the number of fracture per branch). Yellow dots represent the topology of the synthetic fracture network.

Fig. 7. A detailed fracture trace map of the studied outcrop. The Baekildo fault, calcite vein, fracture, alteration zone, and unmapped area covered by sediment are shown in the map.

Fig. 8. Rose diagrams representing fracture orientation and frequency at sampling sites 1 to 7. Four fracture sets were classified based on the rose diagrams.

방향의 단열군 2, 북북동-남남서 방향의 단열군 3, 그리고 북북서-남남동 방향의 단열군 4를 정의하였다. 특징적으로 단열군 1은 단층 굴곡이 시작되는 지점에서 약 1 cm 두께의 세맥에 의해 충전되어 있으며, 단열군 4는 단층 굴곡 주변에서 불규칙 단열로서 발달한다.

각 지점별 단열군 발달 양상은 다음과 같다. 응회질 사암 영역(1~4지점)에서는 가장 우세한 단열군 1을 제외할 때, 1지점에서는 단열군 2의 빈도가 상대적으로 높게 측정되는 반면 2~4지점에서는 단열군 3이 상대적으로 우세하게 발달한다. 또한 3, 4지점에서는 단열군 2가 비교적 우세하게 나타난다. 더불어 4지점에서는 단열군 4 역시 상대적으로 우세하다. 따라서 1지점보다는 4지점으

로 이동할 때, 단열의 방향성이 점차 다양해지는 것을 확인할 수 있다. 화산력응회암 영역(5~7지점)에서도 모든 분석 지점에서 가장 우세한 단열군 1을 제외할 때 5지점에서는 단열군 2와 단열군 3이 우세한 반면, 6, 7지점에서는 단열군 3과 단열군 4가 우세하다.

단열군별 밀도 및 평균 길이의 공간적 변화 양상은 다음과 같다. 응회질 사암 내에서 단열군 1의 밀도는 1지점에서 4지점으로 이동할수록 뚜렷하게 감소한다. 반면 단열군 2, 3, 4의 밀도는 지점의 변화에도 비교적 일정하다(Table 1, Fig. 9a). 평균 길이의 경우 단열군 1이 가장 높은 값을 가지며, 응회질 사암 내 모든 단열군의 평균 길이는 1지점에서 4지점으로 이동할수록 증가하는 추세

Table 1. Intensity and average length data for each fracture set at sampling sites 1 to 7.

Fracture attributes	Fracture set	Tuffaceous sandstone				Lapilli tuff		
		site 1	site 2	site 3	site 4	site 5	site 6	site 7
Intensity (m/m ²)	Set 1	62.93	51.36	41.49	37.97	37.30	5.88	21.09
	Set 2	14.54	19.32	20.07	20.63	8.29	9.69	5.88
	Set 3	7.11	11.99	11.46	18.82	5.03	13.91	8.80
	Set 4	17.74	26.99	15.30	16.46	5.68	14.69	18.21
Average length (m)	Set 1	0.176	0.170	0.251	0.221	0.284	0.222	0.222
	Set 2	0.075	0.110	0.146	0.187	0.086	0.195	0.140
	Set 3	0.089	0.057	0.091	0.134	0.068	0.173	0.143
	Set 4	0.107	0.091	0.131	0.145	0.095	0.174	0.190

Fig. 9. Line graph showing the variation in intensity of each fracture set at sampling sites in tuffaceous sandstone (a) and lapilli tuff (b). The intensity of fracture set 1 in tuffaceous sandstone tends to decrease with the change in structural position from site 1 to site 4. **Fig. 10.** Line graph representing the variation in average length of each fracture set at sampling sites in tuffaceous sandstone (a) and lapilli tuff (b). Note that the average length of all fracture sets in tuffaceous sandstone tends to increase with the change in structural position from site 1 to site 4.

를 보인다(Table 1, Fig. 10a). 한편 화산력응회암 내에서는 5지점과 7지점에서 단열균 1이 다른 단열균과 비교하여 가장 높은 밀도를 보이며, 6지점에서는 반대로 가장 낮은 밀도를 보인다(Table 1, Fig. 9b). 화산력응회암 내에서 단열균 1이 모든 지점에서 가장 높은 평균 길이를 보이는데 단열균별 평균 길이의 공간적 변화는 뚜렷하게 인지되지 않는다(Table 1, Fig. 10b).

4.2.2. 암상별 단열계의 특성 변화

4.2.2.1. 밀도

응회질 사암 내 단열계의 밀도는 화산력응회암에서보다 뚜렷하게 높다. 응회질 사암에 위치하는 1~4지점은 각기 102.32, 109.65, 88.33, 93.87 m⁻¹의 값을 가지는 반면, 화산력응회암에 위치하는 5~7지점은 각기 56.29, 63.76, 53.98 m⁻¹의 값을 보인다(Fig. 11).

Fig. 11. Bar graph showing the intensity of fracture system at each sampling site. Note that the fracture intensity in tuffaceous sandstone is higher than that in lapilli tuff.

4.2.2.2. 연결성

응회질 사암 내에서는 모든 분석 지점에서 X-노드의 비율이 가장 높고, I-노드의 비율이 가장 낮다(Table 2, Fig. 12a). I-노드의 비율은 1지점에서 4지점으로 갈수록 감소하고 X-노드의 비율은 1지점에서 4지점으로 갈수록 증가한다. Y-노드의 비율은 2지점에서 가장 높고 4지점에서 가장 낮다. 한편 1지점에서 4지점으로 갈수록 II브랜치와 IC브랜치의 비율은 감소하고 CC브랜치의 비율은 증가한다(Table 2, Fig. 12b). 브랜치 당 평균 연결개수(C_B)는 5지점에서 7지점으로 갈수록 증가한다(Table 2, Fig. 12).

랜치와 IC브랜치의 비율은 감소하고 CC브랜치의 비율은 증가한다(Table 2, Fig. 12b). 브랜치 당 평균 연결 개수(C_B)는 1지점에서 4지점으로 갈수록 증가한다(Table 2, Fig. 12).

화산력응회암 내에서는 분석 지점마다 우세한 노드의 종류가 다르다(Table 2, Fig. 12a). 5지점에서는 I-노드, 6지점에서 Y-노드 그리고 7지점에서 X-노드의 비율이 가장 높다. I-노드의 경우 6, 7지점에서 유사한 값으로 비율이 낮은 반면, X-, Y-노드의 비율은 5지점에서 가장 낮다. 한편 5지점에서 7지점으로 갈수록 II브랜치와 IC브랜치의 비율은 감소하고 CC브랜치의 비율은 증가한다(Table 2, Fig. 12b). 브랜치 당 평균 연결개수(C_B)는 5지점에서 7지점으로 갈수록 증가한다(Table 2, Fig. 12).

5. 토 의

5.1. 암상에 따른 단열 밀도 차이

백일도단층 주변 단열계의 밀도는 분석 위치에 상관없이 화산력응회암에서보다 응회질 사암에서 크게 높다(Fig. 11). 이는 암상의 차이가 단열계의 발달에 매우 크게 영향을 미침을 의미한다. 일반적으로 구성 광물, 입자 크기, 그리고 공극률 등이 단열의 발달 양상과 밀접한 관

Table 2. Topological parameters, including node and branch proportions and C_B (the number of fracture per branch), at each sampling site.

Rock type	Sampling site	Node proportions (%)			Branch proportions (%)			Degree of connectivity C_B
		I	Y	X	II	IC	CC	
Tuffaceous sandstone	Site 1	30.13	33.17	36.70	1.19	19.43	79.39	1.78
	Site 2	20.82	38.15	41.03	0.48	12.94	86.58	1.86
	Site 3	16.37	34.95	48.68	0.27	9.83	89.91	1.90
	Site 4	11.41	29.95	58.64	0.12	6.57	93.32	1.93
Lapilli tuff	Site 5	42.48	28.13	29.40	3.02	28.71	68.27	1.65
	Site 6	24.33	41.03	34.64	0.72	15.57	83.71	1.83
	Site 7	24.34	33.53	42.13	0.69	15.22	84.10	1.83

Fig. 12. Triangular plot of the proportion of node (a) and branch (b) type at each sampling site showing the variation of C_B . Sampling site number is shown in the circles or triangles. The fracture systems in both rock types have high connectivity. Note that the fracture connectivity in tuffaceous sandstone gradually increases with the change in structural position from site 1 to site 4.

계가 있는 것으로 알려져 있다(Hugman and Friedman, 1979; Sinclair, 1980). 이번 연구에서 각 요소에 대한 정량적인 값을 제시할 수는 없지만, 박편 관찰 및 야외조사를 통해 획득한 정성적인 암석학적 정보는 단열계의 밀도에 미치는 암상의 영향에 대한 시각을 제공할 수 있다.

Nelson (2001)에 따르면 석영, 장석, 백운석, 방해석과 같은 취성 광물 비율이 높을수록 암석의 강도 및 취성도(brittleness index)가 증가하고 단열계가 조밀하게 발달하는 경향이 있다. 이는 암석의 탄성 거동과 밀접한 관련이 있다. 파괴 전(pre-failure) 단계에서 암석은 모양변형(strain)을 경험하며, 이를 통해 수용되지 못한 변형은 단열 작용으로 해소된다. 암석 내 취성 광물 비율이 높을수록 암석 파괴가 발생하기 전 단계(pre-failure)에서 흡수되는 모양변형량이 작아지기 때문에 높은 단열 밀도를 보이는 것이다(e.g. Hugman and Friedman, 1979; Corbett et al., 1987; Ferrill and Morris, 2008). 연구지역 내 화산력응회암의 경우 세립의 화산회 기질 내에 암편들이 흩어져있다(Fig. 3). 반면 응회질 사암에서는 비교적 높은 함량의 입자들이 기질에 의해 둘러싸여 있고, 중립사~조립사 크기의 석영 및 장석 입자들이 빈번하게 관찰된다(Fig. 3). 따라서 화산력응회암에 비해 응회질 사암 내 상대적으로 높은 취성 광물 함량이 높은 단열 밀도의 원인으로 해석된다.

한편 암석 내 공극률이 높을수록 파괴 전 더 많은 모양변형이 발생할 수 있어 단열의 밀도가 낮아지며(Corbett et al., 1987; Barbier et al., 2012; Watkins et al., 2019), 또한 구성 입자의 크기가 클수록 단열의 밀도가 낮은 경향이 있다(Hanks et al., 1997; Nelson, 2001; Wennberg et al., 2007). 하지만 비교적 입자가 큰 연구지역의 응회질 사암이 화산력응회암보다 높은 단열 밀도를 보이는 것은 입자 크기보다는 구성 물질의 종류가 연구지역 단열 밀도에 더 큰 영향을 준 것을 방증할 수 있다. 상술한 구성

광물의 종류 및 입자 크기의 영향은 정성적인 해석이기 때문에 보다 정밀한 논의를 위해서는 해당 요소에 대한 정량적 측정이 필요하며, 더불어 층의 두께, 암석의 조직, 공극률 등 단열의 밀도에 영향을 줄 수 있는 요소들에 대한 추가 연구가 필요하다.

5.2. 단열계 연결성에 영향을 미치는 요인

단열계의 연결성은 단열군의 개수 및 방향, 단열의 밀도, 길이, 그리고 위상기하를 포함하는 4가지의 요소에 의해 제어된다(Sanderson and Nixon, 2018). 본 연구에서 수행한 백일도단층 주변 단열 기하 분석 결과는 단열계 연결성에 실질적인 영향을 미치는 요소들의 민감도에 대한 이해를 증진시킬 수 있다.

백일도단층 주변 단열군별 분포 특성과 단열계의 연결성 변화 양상을 종합적으로 고려하였을 때 주목할 만한 특이점이 존재한다. 연구 노두에서 가장 큰 밀도(Fig. 9a)와 평균 길이(Fig. 10a)를 보이는 단열군 1의 응회질 사암 내 분석 지점별 밀도 값(Table 1, Fig. 9a)은 해당 지점 단열계의 연결성(Table 2, Fig. 12)과 반대의 경향을 보이며 변화한다. 반면 단열군 1의 응회질 사암 내 분석 지점별 평균 길이 값(Table 1, Fig. 10a)은 해당 지점 단열계의 연결성(Table 2, Fig. 12)과 비례하는 양상을 보인다. 이는 노두에서 가장 우세하게 발달하는 점에서 미루어 짐작할 수 있듯이 단열군 1이 단열계의 연결성에 주요한 영향을 미치고 있음을 지시한다. 단열군 1이 단열계의 연결성에 기여하는 정도를 파악하기 위해 단열군 1을 제거한 단열계의 연결성을 평가하였다. 그 결과 제거된 단열군 1의 밀도가 클수록 단열계 연결성의 감소가 크게 나타났다(Fig. 13).

단열계의 연결성은 밀도뿐만 아니라 다른 요소에 대해서도 영향을 받는 것으로 확인된다. 전체 단열계의 연결성은 1지점에서 4지점으로 구조적 위치를 이동할수록 증

Fig. 13. Triangular plot of the proportion of node (a) and branch (b) type at each sampling site after the removal of fracture set 1 showing the variation of C_B . Sampling site number is shown in the circles or triangles. The higher the intensity of fracture set 1 increases, the more the connectivity decreases in the sampling sites.

가하는 경향을 보인다(Fig. 12). 이러한 양상은 단열계의 연결성에 영향을 미치는 여러 요인들에 대한 논의를 가능하게 한다. 우선 모든 단열군의 평균 길이(Table 1, Fig. 10a)는 1지점에서 4지점으로 갈수록 증가한다. 단열의 방향성(Fig. 8)의 경우 1지점에는 서북서-동남동 방향의 단열군 1이 크게 우세하지만, 단층 주향을 따라 동쪽으로 조사 지점을 이동할수록 방향성이 다양해져 4지점에서는 모든 단열군이 뚜렷하게 인지된다. 일반적으로 구성 단열군의 밀도와 방향성이 동일한 경우라도 짧은 길이의 단열로 주로 이루어진 단열계가 연장성이 좋은 단열로 구성된 단열계보다 낮은 연결성을 보인다(Balberg and Binenbaum, 1983; Balberg et al., 1991). 또한 구성 단열군의 방향성이 다양한 단열계는 단열 간 교차 가능성이 커져 그렇지 않은 단열계보다 높은 연결성을 보인다(Evans and Battles, 1999; Odling et al., 2000; Fitz-Diaz et al., 2011; Guerriero et al., 2013; Watkins et al., 2015). 따라서 1지점에서 4지점으로 이동할수록 단열계 구성 단열군의 평균 길이 증가와 방향 분산에 의해 단열 교차 및 연결성이 증가한 것으로 해석된다.

5.3. 단층 굴곡 주변의 곡선 단열 및 세맥

일반적으로 단층이 진화하는 과정에서 내부 분절들이 상호 작용함에 따라 공간적으로 불규칙한 기하가 발생된다(e.g. Peacock and Sanderson, 1991, 1994; Cartwright et al., 1995; Mansfield and Cartwright, 1996; Tavarnerelli and Pasqui, 2000; Walsh et al., 2003; Rotevatn and Bastesen, 2014). 단층 굴곡(fault bend)과 같은 불규칙 기하는 단층의 이동을 제한할 수 있으며, 이때 국부적인 응력의 집중과 교란을 야기할 수 있다(Segall and Pollard, 1980; Childs et al., 2009). Segall and Pollard (1980)는 우수향 주향이동 단층의 억제 굴곡(restraining bend) 주변에서 최대 수평 압축응력(maximum horizontal compression)이 단층 굴곡과 거의 수직으로 발생하는 것을 보고한 바 있다. 이렇듯 불규칙 기하에 의해 단층 주변에 발생하는 국부적인 응력의 교란은 이에 의해 발달하는 단열계의 기하에 의해 반영된다. 예를 들어 주단층 및 단층 굴곡에 고각을 이루거나 특정 지점을 기준으로 발산하는 형태의 휘어진 기하를 가진 단열은 단층 주변에서 교란된 응력의 정보를 제공한다(Rawnsley et al., 1992; Petit et al., 2000; Tamagawa and Pollard, 2008).

백일도단층의 주향이 갑작스럽게 변화하는 굴곡 지점에서 곡선(curvilinear) 단열과 함께 단층 굴곡에 고각을 이루는 세맥이 응회질 사암 내에 발달하는 양상(Figs. 4c, 7)은 상술한 응력 교란의 관점에서 해석할 수 있다. 단층 굴곡에 고각을 이루는 세맥은 백일도단층의 우수향 운동

시 억제 굴곡에서 교란된 최대 수평 압축응력에 수직으로 인장이 발생됨에 따라 발달한 것으로 해석되며, 조밀하게 발달하는 곡선 단열은 교란된 응력 궤적의 공간적 변화를 반영하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

연구 대상인 백일도단층 주변으로 발달하는 단열계의 특성은 암상과 구조적 위치에 따라 변화한다. 본 연구에서는 암석 내 취성 광물의 상대적 비율에 의해 단열 밀도가 제어되며, 구조적 위치에 따라 변화하는 단열군의 밀도, 평균 길이, 그리고 방향의 다양성이 단열계의 연결성에 큰 영향을 미침을 제안한다. 굴곡과 같은 단층 기하의 불규칙 요소는 국부적인 응력의 집중과 교란, 그리고 이에 따른 곡선의 단열을 발생시킬 수 있는 요인으로 고려될 수 있다. 본 연구의 결과는 단층 주변 단열계의 발달을 제어하는 다양한 요소의 역할을 이해하기 위한 시각을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국연구재단 신진연구지원사업(2018R1C1B6003851)에 의해 지원되었으며, 더불어 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 해외자원개발협회의 지원을 받아 수행되었다(데이터사이언스 기반 석유·가스 탐사 권소사업). 결과의 일부는 박채은 학부졸업논문 연구의 일환으로 도출되었다. 논문의 질적 향상을 위해 유익한 조언을 주신 두 익명의 심사위원께 감사를 표한다.

References

- Adler, P.M. and Thovet, J.F. (1999) Fractures and fracture networks. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 431p.
- Balberg, I. and Binenbaum, N. (1983) Computer study of the percolation threshold in a two-dimension anisotropic system of conducting sticks. Phys. Rev., v.28, p.3799-3812. doi: 10.1103/PhysRevB.28.3799
- Balberg, I., Berkowitz, B. and Drachsler, G.E. (1991) Application of a percolation model to flow in fractured hard rocks. J. Geophys. Res., v.96, p.10015-10021. doi: 10.1029/91JB00681
- Barbier, M., Hamon, Y., Callot, J.P., Floquet, M., and Daniel, J.M. (2012) Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: The Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA). Mar. Petrol. Geol., v.29, p.50-67. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2011.08.009
- Bisdom, K., Gauthier, B.D.M., Bertotti, G. and Hardebol, N.J. (2014) Calibrating discrete fracture-network models with a carbonate three-dimensional outcrop fracture network: implications

- for naturally fractured reservoir modeling. *AAPG Bull.*, v.98, p.1351-1376. doi: 10.1306/02031413060
- Cartwright, J.A., Trudgill, B.D. and Mansfield, C.S. (1995) Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. *J. Struct. Geol.*, v.17, p.1319-1326. doi: 10.1016/0191-8141(95)00033-A
- Chang, C.J. and Chang, T.W. (1998) Movement history of the Yangsan Fault based on paleostress analysis. *J. Eng. Geol.*, v.8, p.35-49 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H. (1975) Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.11, p.1-23.
- Chang, K.H., Suzukib, K., Park, S.-O., Ishida, K. and Uno, K. (2003) Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. *J. Asian Earth Sci.*, v.21, p.937-948. doi: 10.1016/S1367-9120(02)00142-6
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S. and Son, M. (2020) Tectonic evolution of the Cretaceous Gyeongsang Back-arc Basin, SE Korea: Transition from sinistral transtension to strike-slip kinematics. *Gondwana Res.*, v.83, p.16-35. doi: 10.1016/j.gr.2020.01.012
- Childs, C., Manzocchi, T., Walsh, J.J., Bonson, C.G., Nicol, A. and Schöpfer, M.P.J. (2009) A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. *J. Struct. Geol.*, v.31, p.117-127. doi: 10.1016/j.jsg.2008.08.009
- Choi, P.Y., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kee, W.S., Ko, H.J., Kim, Y.B., Lee, B.J., Song, K.Y., Kim, J.C. and Choi, Y.S. (2002) Explanatory note of the Mokpo and Yeosu sheets (1:250,000). Korean Institute Geoscience and material Resources, 45p (in Korean with English abstract).
- Choi, H.I. (1986) Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *J. Geol. Soc.*, v.143, p.29-40. doi: 10.1144/gsjgs.143.1.0029
- Choi, P.Y., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kwon, S.K., Ko, I.S. and An, K.O. (2002) Movement history of the Andong Fault System: Geometric and tectonic approaches. *Geosci. J.*, v.6, p.91-102. doi: 10.1007/BF03028280
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K. (2010) Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Sci. Rev.*, v.101, p.225-249. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.05.004
- Corbett, K., Friedman, M. and Spang, J. (1987) Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *AAPG Bull.*, v.71, p.17-28. doi: 10.1306/94886D35-1704-11D7-8645000102C1865D
- Evans, M.A. and Battles, D.A. (1999) Fluid inclusion and stable isotope analyses of veins from the central Appalachian Valley and Ridge province: implications for regional synorogenic hydrologic structure and fluid migration. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.111, p.1841-1860. doi: 10.1130/0016-7606(1999)111%3C1841:FIASIA%3E2.3.CO;2
- Ferrill, D.A. and Morris, A.P. (2008) Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy, Balcones fault system, Texas. *AAPG Bull.*, v.92, p.359-380. doi: 10.1306/10290707066
- Fitz-Diaz, E., Hudleston, P., Siebenaller, L., Kirschner, D., Camprubí, A., Tolson, G. and Puig, T.P. (2011) Insights into fluid flow and water-rock interaction during deformation of carbonate sequences in the Mexican fold-thrust. *J. Struct. Geol.*, v.33, p.1237-1253. doi: 10.1016/j.jsg.2011.05.009
- Fossen, H. (2016) *Structural Geology*, second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 510p.
- Friedman, M. (1975) Fracture in rock. *Rev. Geophys.*, v.13, p.352-358. doi: 10.1029/RG013i003p00352
- Guerriero, V., Mazzoli, S., Iannace, A., Vitale, S., Carravetta, A. and Strauss, C. (2013) A permeability model for naturally fractured carbonate reservoirs. *Mar. Petrol. Geol.*, v.40, p.115-134. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2012.11.002
- Hancock, P.L. (1985) Brittle microtectonics: principles and practice. *J. Struct. Geol.*, v.7, p.437-457. doi: 10.1016/0191-8141(85)90048-3
- Hanks, C.L., Lorenz, J., Teufel, L., and Krumhardt, A. P. (1997) Lithologic and structural controls on natural fracture distribution and behavior within the Lisburne Group, northeastern Brooks Range and North Slope subsurface, Alaska. *AAPG bull.*, v.81, p.1700-1720. doi: 10.1306/3B05C424-172A-11D7-8645000102C1865D
- Hugman, R.H.H. and Friedman, M. (1979) Effects of texture and composition on mechanical behavior of experimentally deformed carbonate rocks. *AAPG Bull.*, v.63, p.1478-1489. doi: 10.1306/2F9185C7-16CE-11D7-8645000102C1865D
- Kim, Y.-S. and Park, J.-Y. (2006) Cenozoic deformation history of the area around Yangnam-Yangbuk, SE Korea and its tectonic significance. *J. Asian Earth Sci.*, v.26, p.1-20. doi: 10.1016/j.jseaes.2004.08.00
- LaPointe, P.R. and Hudson, J.A. (1985) Characterization and interpretation of rock mass joint patterns. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, v.199, p.1-37. doi: 10.1130/SPE199-p1
- Larsen, B. and Gudmundsson, A. (2010) Linking of fractures in layered rocks: implications for permeability. *Tectonophysics*, v.492, p.108-120. doi: 10.1016/j.tecto.2010.05.022
- Long, J.C.S. and Witherspoon, P.A. (1985) The relationship of interconnection to permeability in fracture networks. *J. Geophys. Res.*, v.90, p.3087-3098. doi: 10.1029/JB090iB04p03087
- Mansfield, C.S. and Cartwright, J.A. (1996) High resolution fault displacement mapping from three-dimensional seismic data: evidence for dip linkage during fault growth. *J. Struct. Geol.*, v.18, p.249-263. doi: 10.1016/S0191-8141(96)80048-4
- Manzocchi, T. (2002) The connectivity of two dimensional networks of spatially correlated fractures. *Water Resour. Res.*, v.38, p.1162-1181. doi: 10.1029/2000WR000180
- March, R., Doster, F. and Geiger, S. (2018) Assessment of CO₂ storage potential in naturally fractured reservoirs with dual-porosity models. *Water Resour. Res.*, v.54, p.1650-1668. doi: 10.1002/2017WR022159
- Marrett, R.A., Ortega, O.J. and Kelsey, C. (1999) Extent of power-law scaling for natural fractures in rock. *Geol.*, v.27, p.799-802. doi: 10.1130/0091-7613(1999)027%3C0799:EOPLSF%3E2.3.CO;2
- Mauldon, M., Dunne, W.M. and Rohrbaugh, M.B. (2001) Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *J. Struct. Geol.*, v.23, p.247-258. doi: 10.1016/S0191-8141(00)00094-8
- Nelson, R.A. (2001) *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*, second edition. Gulf Professional Publishing, Boston, 332p.
- Odling, N.E. (1997) Scaling and connectivity of joint systems in

- sandstones from western Norway. *J. Struct. Geol.*, v.19, p.1257-1271. doi: 10.1016/S0191-8141(97)00041-2
- Odling, N.E., Gillespie, P., Bourguin, B., Castaing, C., Chiles, J.P., Christensen N.P., Fillion, E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L., Trice, R., Aarseth, E., Walsh, J.J. and Watterson, J. (1999) Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Pet. Geosci.*, v.5, p.373-384. doi: 10.1144/petgeo.5.4.373
- Odling, N.E. and Larsen, Ø. (2000) Vein architecture in the Devonian sandstones of the Hornelen basin, western Norway, and implications for the palaeostress history. *Norske Geol. Tids.*, v.80, p.289-299. doi: 10.1080/00291960051030626
- Olson, J.E., Laubach, S.E. and Lander, R.H. (2009) Natural fracture characterization in tight gas sandstones: integrating mechanics and diagenesis. *AAPG Bull.*, v.93, p.1535-1549. doi: 10.1306/08110909100
- Ortega, O. and Marrett, R. (2000) Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico. *J. Struct. Geol.*, v.22, p.571-588. doi: 10.1016/S0191-8141(99)00186-8
- Ortega, O.J., Marrett, R.A. and Laubach, S.E. (2006) A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. *AAPG Bull.*, v.90, p.193-208. doi: 10.1306/08250505059
- Pahl, P.J. (1981) Estimating the mean length of discontinuity traces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, v.18, p.221-228. doi: 10.1016/0148-9062(81)90976-1
- Palmström, A. (1996) Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: the development of the Rock Mass index (RMI). *Tunn. Undergr. Space Technol.*, v.11, p.175-188. doi: 10.1016/0886-7798(96)00015-6
- Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J. (1991) Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *J. Struct. Geol.*, v.13, p.721-733. doi: 10.1016/0191-8141(91)90033-F
- Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J. (1994) Geometry and development of relay ramps in normal fault systems. *AAPG Bull.*, v.78, p.147-165. doi: 10.1306/BDF9046-1718-11D7-8645000102C1865D
- Pérez-Flores, P., Veloso, E., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Lizama, M. and Arancibia, G. (2017) Fracture network, fluid pathways and paleostress at the Tolhuaca geothermal field. *J. Struct. Geol.*, v.96, p.134-148. doi: 10.1016/j.jsg.2017.01.009
- Petit, J.P., Auzias, V., Rawnsley, K. and Rives, T. (2000) Development of joint sets in association with faults. In: Lehner, F.K., Urai, J.L. (eds.) *Aspect of Tectonic Faulting*. Springer-Verlag, Berlin, p.167-184. doi: 10.1007/978-3-642-59617-9_9
- Priest, S.D. and Hudson, J.A. (1981) Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, v.18, p.183-197. doi: 10.1016/0148-9062(81)90973-6
- Priest, S.D. (1993) *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall, New York, 473p.
- Rawnsley, K.D., Rives, T. and Petit J.P. (1992) Joint development in perturbed stress fields near faults. *J. Struct. Geol.*, v.14, p.939-951. doi: 10.1016/0191-8141(92)90025-R
- Rohrbaugh, M.B., Dunne, W.M. and Mauldon, M. (2002) Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. *AAPG Bull.*, v.86, p.2087-2102. doi: 10.1306/61EEDE0E-173E-11D7-8645000102C1865D
- 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. *Geol. Soc. Lon.*, v.374, p.79-95. doi: 10.1144/SP374.12
- Sanderson D.J. and Nixon C.W. (2015) The use of topology in fracture network characterization. *J. Struct. Geol.*, v.72, p.55-66. doi: 10.1016/j.jsg.2015.01.005
- Sanderson D.J. and Nixon C.W. (2018) Topology, connectivity and percolation in fracture networks. *J. Struct. Geol.*, v.115, p.167-177. doi: 10.1016/j.jsg.2018.07.011
- Sarkheil, H., Hassani, H. and Alinia, F. (2013) Fractures distribution modeling using fractal and multi-fractal-neural network analysis in Tabnak hydrocarbon field, Fars, Iran. *Arabian J. Geosci.*, v.6, p.945-956. doi: 10.1007/s12517-011-0400-x
- Segall, P. and Pollard, D.D. (1980) Mechanics of discontinuous faults. *J. Geophys. Res.*, v.85, p.4337-4350. doi: 10.1029/JB085iB08p04337
- Sinclair, S.W. (1980) Analysis of Macroscopic Fractures on Teton Anticline, Northwestern Montana. Thesis, Texas A&M University, Texas, 102p.
- Tamagawa, T. and Pollard, D.D. (2008) Fracture permeability created by perturbed stress fields around active faults in a fractured basement reservoir. *AAPG Bull.*, v.92, p.743-764. doi: 10.1306/02050807013
- Tavarnelli, E. and Pasqui, V. (2000) Fault growth by segment linkage in seismically active settings: examples from the Southern Apennines, Italy, and the Coast Ranges, California. *J. Geodyn.*, v.29, p.501-516. doi: 10.1016/S0264-3707(99)00041-1
- Walsh, J., Bailey, W., Childs, C., Nicol, A. and Bonson, C. (2003) Formation of segmented normal faults: a 3-D perspective. *J. Struct. Geol.*, v.25, p.1251-1262. doi: 10.1016/S0191-8141(02)00161-X
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D. and Butler, R.W.H. (2015) Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterize heterogeneous fracture networks at outcrop. *J. Struct. Geol.*, v.72, p.67-82. doi: 10.1016/j.jsg.2015.02.001
- Watkins, H., Bond, C.E., Cawood, A.J., Cooper, M.A. and Warren, M.J. (2019) Fracture distribution on the Swift Reservoir Anticline, Montana: implications for structural and lithological controls on fracture intensity. In: Bond, C.E. and Lebit, H.D. (eds.) *Folding and Fracturing of Rocks: 50 Years of Research since the Seminal Text Book of J. G. Ramsay*. *Geol. Soc. Lon. Spec. Publ.*, v.487, p.209-228. doi: 10.1144/SP487.9
- Wennberg, O.P., Azizzadeh, M., Aqrawi, M.M., Blanc, E., Brockbank, P., Lyslo, K.B., Pickard, N., Salem, L.D. and Svåná, T. (2007) The Khaviz Anticline: an outcrop analogue to giant fractured Asmari Formation reservoirs in SW Iran. In: Lonergan, L., Jolly, R.J.H., Rawnsley, K. and Sanderson, D.J. (eds.) *Fractured Reservoirs*. *Geol. Soc. Lon. Spec. Publ.*, v.270, p.23-42. doi: 10.1144/GSL.SP.2007.270.01.02
- Zarei, H.R., Uromeihy, A. and Sharifzadeh, M. (2012) Identifying geological hazards related to tunneling in carbonate karstic rocks - Zagros, Iran. *Arabian J. Geosci.*, v.5, p.457-464. doi: 10.1007/s12517-010-0218-y