

강원도 인제군 기린면 일대에 발달한 금왕단층의 진화와 시-공간적 활동형태

최지민 · 이희권[‡]

강원대학교 지질·지구물리학부

요 약

강원도 인제군 기린면 일대에서 발견한 금왕단층의 단층핵 두 지점에 대해 조사하였다. 연구지역에서 발견된 약 23 m 폭의 단층핵은 단층각력암 우세대와 단층비지 우세대로 구성되어 있으며, 쥐라기 흑운모화강암에서 유래된 파쇄암 내에 발달되어 있다. 지질구조적 특성을 통해 파쇄암으로부터 유래된 단층핵의 진화과정을 규명하였으며, ESR 연대측정을 통해 제4기 활동형태를 해석하였다. 단층암의 특성, 전단면과 엽리면의 방향 등의 지질구조 요소 특성을 통해 연구지역에 발달한 금왕단층의 단층핵 진화과정을 분석하였다. 첫 번째 단계에서는 모암 내 단열작용이 우세하였으며, 생성된 암편들은 주로 회전과 미끌림 작용에 의해 변형되었다. 이러한 암편들은 단층운동이 진행되면서 암편 사이의 공간이 증가하였으며 비지 물질로 그 공간이 채워졌다. 단층운동이 진행됨에 따라 입자 경계 마찰 미끌림에 의해 암편의 원마도는 양호해졌다. 두 번째 단계에서는 마모작용에 의해 단층비지띠가 형성되었으며, 마모작용은 거친 면의 취성변형작용, 암편의 뜯김, 파쇄유동, 입자 분쇄를 포함하고 있다. 전단면형이 집중됨에 따라 단층각력암 우세대 내에는 전단면과 단층비지띠들이 발달하였고, 단층비지 우세대 내에는 점토광물의 선택적 배향에 의해 엽리들이 발달하였다. 두 지점의 단층핵과 세 지점의 부수단층에서 채취한 시료들의 ESR 연대는 약 51~21만 년 전의 범위에 있으며, 다섯 번의 활동기를 가지고 있다. 단층핵과 파쇄암의 경계부에 발달한 단층비지띠에서 채취한 시료들은 각각의 활동기 중에 반복적으로 재활동한 것으로 추정되나, ESR 연대측정법 특성상 마지막 활동시기만을 결정할 수 있었다. 인제군 및 설악산 일대에 발달한 단층핵의 경계부에서 채취한 ESR 연대들은 약 21만 년 전으로 일치하며, 최후의 활동기를 지시한다.

주요어: 금왕단층, 단층의 재활동, 단층핵 진화과정, 단층핵 활동형태, ESR 연대측정

Ji-Min Choi and Hee-Kwon Lee, 2020, Evolution and space-time activity patterns of the Keumwang fault at Girin-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 4, p. 425-452

ABSTRACT: We investigated two outcrops of fault core of the Keumwang fault discovered in the study area at the Girin-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. The 23 m thick fault core which is composed of fault breccia dominated zones and fault gouge dominated zones occurs in cataclasite derived from Jurassic biotite granite. Structural evolution of fault core generated from cataclasite was revealed by structural characteristics and Quaternary fault activity was studied by ESR dating of fault gouge. Structural evolution of the Keumwang fault in the study area was studied by characteristics of fault rocks, orientations of shear surfaces and foliations developed within the fault core. At the first stage, there occur fracturing, rolling and sliding of rock fragments past one another. As such rock fragments are displaced, the space between them increases, and then the gouge material filled those space. Moreover, frictional sliding of particles past one another increased roundness of rock fragments. At the second stage, development of sidewall bands of fault gouge were dominantly formed by frictional wear. Frictional wear process was dominated which include brittle shearing of asperities, sidewall cracking, plucking, cataclastic flow and grain comminution. The shear strain is localized and discrete shear surfaces and fault gouge bands are developed within the breccia dominated layers. Penetrative foliations are developed by the preferred orientation of clay minerals in the gouge dominated layers. ESR dates from both two fault cores and three subsidiary faults range from 510 to 210 ka and has five active periods within the Quaternary period. We suggests that the fault gouge collected boundary between fault core and host rocks of cataclasite appear to activated repeatedly during active periods. However, we could only determine the ESR age of last movement (210 ka) which is consistent from Inje-gun to Seoraksan area.

[‡] Corresponding author: +82-33-250-8558, E-mail: heekwon@kangwon.ac.kr

Key words: Keumwang fault, fault reactivation, fault evolution, activity pattern of fault core, ESR dating

(Ji-Min Choi and Hee-Kwon Lee, Division of Geology & Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

1. 서 론

연구지역은 강원도 인제군 기린면 일대로 공주단층계를 구성하는 금왕단층(Keumwang fault)이 발달되어 있다. 공주단층계는 경기육괴를 북북동-남남서 방향으로 가로지르는 총연장 약 170 km의 주향 이동단층으로 부여분지의 경계단층인 함열(십자가) 단층, 공주분지 북서부 경계부부터 음성분지 남동부 경계부까지 발달한 공주단층, 음성분지 북서부 경계 부부터 설악산 일대까지 발달한 금왕단층으로 구성되어 있다(그림 1; Choi, 1996; Lee and Kim, 2005; Choi and Choi, 2007; Lee, 2010; Jang and Lee, 2012; Kim and Lee, 2017; Weon and Lee, 2018; Choi, 2019; Min, 2020). 다수의 선행연구에서 금왕단층의 주향

방향을 따라 압쇄암 계열, 파쇄암 계열, 단층비지, 단층각력암 등의 단층암이 혼재되어 있음이 보고되었 다(Lee and Kim, 2005, 2011; Lee, 2010; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Bae and Lee, 2014; Kim and Lee, 2016, 2017; Weon and Lee, 2018; Choi, 2019; Min, 2020). 단층 대는 단순한 면이 아닌 복잡한 구조를 보이는데, 일 반적으로 중심부의 변형이 집중된 단층핵(fault core)과 주변의 단층손상대(fault damage zone)로 구성되어 있다. 단층핵은 수 mm부터 수 m 폭까지 다양하게 발달하며, 단층핵을 구성하는 단층암(fault rock)들은 원암, 생성 깊이, 온도, 운동감각 등에 따라 여러가지 특성을 갖는다. 단층비지(fault gouge)는 점착력이 없는 단층암이며 암편의 함량이 30% 미만이고, 주로 단층면을 따라 침투한 지하수에 의해 장석이 풍화되어 점토광물을 다량 함유하게 된다(Sibson, 1977). 암편의 함량이 30% 이상이면 단층각력암(fault breccia)으로 분류되는데, 이러한 미고화된 단층암들은 취성지각 상부에서 발달하는데 비해, 약 4~11 km 깊이의 취성(brITTLE)환경에서는 파쇄암(cataclasite)이 발달하고 약 11 km 이하 깊이의 소성(plastic)환경에서는 압쇄암(mylonite)이 고화된 단층암으로 발달한다. 특히 압쇄암은 높은 온도조건과 소성변형작용(plastic deformation process)에 의해 재결정작용이 일어나 입자가 작아지며 엽리가 발달되기도 한다(Sibson, 1977). Sibson (1977)은 기질의 함량을 기준으로 압쇄암을 기질 함량 50% 이하인 경우 원 압쇄암(proto-mylonite), 50~90%의 압쇄암(mylonite), 90% 이상의 초압쇄암(ultramylonite) 그리고 단층 운동이 끝난 후 입자에 재결정작용이 일어난 변성압쇄암(blastomylonite)으로 분류하였다.

2015년 이전의 연구에서는 금왕단층이 좌수향 주향이동 운동이 우세한 것으로 보고되었는데(Choi, 1996; Lee, 2010; Lee and Kim, 2011; Jang and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Hong, 2013), 이후 연구들에서는 홍천군 일대에 백악기 후기에 금왕단층을 따라 안산암이 관입한 이후 우수향 주향이동 단층운동에 의해 형성된 지질구조 요소들이 중첩되었다고

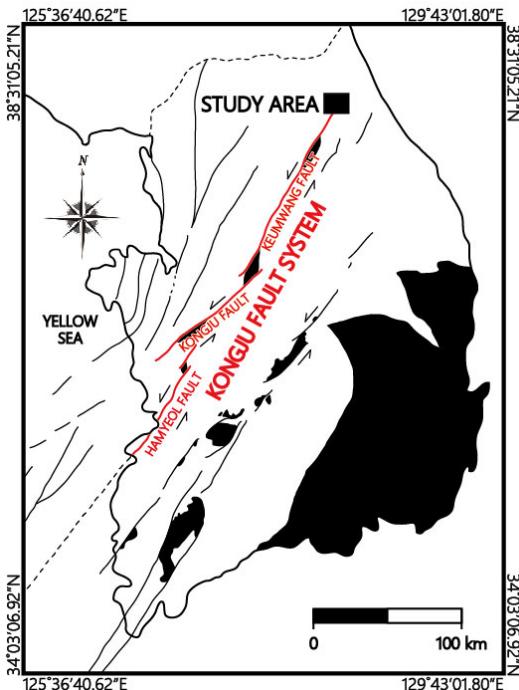


Fig. 1. Distribution of Cretaceous strike-slip faults and sedimentary basins (black areas) in the Korean Peninsula (modified from Chough and Sohn, 2010; Ryang, 2013). Red lines represent Kongju fault system and black box represents this study area located at the northeastern end of the Keumwang fault.

보고되었다(Kim and Lee, 2016, 2017; Choi and Lee, 2017, 2018; Weon and Lee, 2018; Choi, 2019; Min, 2020). 주향이동단층 내에는 주단층의 운동에 따라 P-전단면, R-전단면, Y-전단면, R'-전단면 등의 2차 전단면들이 발달한다(그림 2). 가장 먼저 발달하는 R-전단면(R-shear plane)은 주미끌림면(main-shear plane)의 방향과 저각을 이루며 같은 운동감각을 갖는다. R-전단면 이후에 발달하는 P-전단면(P-shear plane)은 응력변형타원체의 장축방향으로 발달하며 주미끌림면과 같은 운동감각을 갖는다. 점토광물을 많이 포함하는 단층비지는 P-전단면의 방향을 따라 점토광물이 선택적 배향을 하면서 엽리를 형성하고, 우수향일 때 주미끌림면에 대해 반시계방향으로 0~45°의 각을 보이며, 좌수향일 때 주미끌림면에 대해 반시계방향으로 135~180°의 각을 보인다(Rutter et al., 1986; Trouw and Passchier, 2005). 이 방향의 엽리는 Berthe et al. (1979)에 의해 S-엽리로 불렸으며, Logan (1979)에 의해 P-엽리로 명명되었다. 이 논문에서는 이러한 엽리를 Logan (1979)의 명명법에 따라 P-엽리로 지칭하였다. P-엽리는 응력타원체에서 X-Y면에 평행하게 발달하며, 전단응력변형(shear strain)이 증가함에 따라 단층면 방향으로 점점 회전하게 된다(Ramsay and Huber, 1983; Chester and Logan, 1987; Davis and Reynolds, 1996). 또한 주미끌림면 방향과 평행하게 발달하는 Y-전단면(Y-shear plane)에 수렴하면서 변형이 집중되어 S-자 또는 Z-자 모양으로 휘기도 한다. R'-전단면(R'-shear plane)

은 주미끌림면의 방향과 고각을 이루며 유일하게 반대의 운동감각을 갖는다. 이 전단면들의 방향과 운동감각을 통해 주단층의 운동감각을 해석할 수 있다(그림 2).

연구지역에서 남서쪽으로 약 5 km 떨어진 인제군 일대에 발달한 단층핵 세 지점에서 제4기의 금왕단층 시·공간적 활동형태를 분석하였다(Kim, 2018). ESR 연대측정 자료에 의하면 제4기에 적어도 6번의 활동기를 가지고 있으며, 그 재발주기는 약 5~12만년이다. 약 44만 년 전과 약 21만 년 전에는 약 10 km 연장의 세 단층핵이 동시에 재활동했으며, 특히 약 21만 년 전에는 단층핵의 북서쪽 경계부에 발달한 단층비지띠가 동시에 재활동하였다고 보고하였다.

이번 연구의 목적은 1) 금왕단층 단층핵의 진화과정을 규명하고, 2) 단층암 시료로 ESR 연대측정을 통해 인제군 일대의 ESR 연대측정 자료(Kim, 2018)와 비교·분석하여 설악산 일대에 발달한 금왕단층의 제4기 활동형태를 해석하는데 있다. 이를 위해 항공사진과 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model)을 통해 연구지역에 발달한 금왕단층의 선형구조(lineament)를 파악하였으며, 지질조사를 통해 두 개의 단층핵과 손상대에 발달한 세 개의 부수단층을 발견하였다. 단층핵에 발달한 단층암의 특성, 전단면의 방향성, 운동감각, 변위 등의 특성을 파악하여 금왕단층의 운동감각을 해석하고, 단층핵의 진화과정을 규명하였다. 또한 단층핵과 부수단층의 ESR 연대를 통해 시료의 마지막 재활동시기를 결정하여 인제군 및 설악산 일대에 발달한 금왕단층의 제4기 시간적, 공간적인 활동형태를 해석하였다.

2. 연구지역의 지질

연구지역은 기반암인 고원생대 편마암에 고원생대 곰배령화강암, 쥐라기 오색화강암, 가리봉화강암, 흑운모화강암, 화강섬록암, 인제화강암, 백악기 설악산화강암, 암맥이 관입하였으며, 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있다(그림 3a; Kee et al., 2010). 각 암석의 분포와 관입관계 및 특성은 설악산도록 지질조사보고서(Kee et al., 2010)를 인용하여 기술하였다.

고원생대 편마암은 화강섬록암, 설악산화강암, 인제화강암에 의해 관입당했으며, 북북동-남남서 방향으로 가로지르는 금왕단층과 그 분절인 필례단층(Pillye

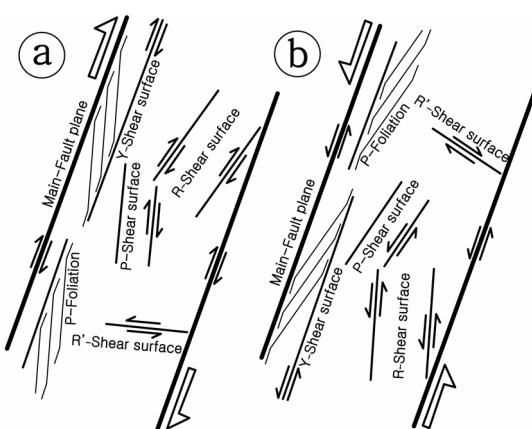


Fig. 2. Different categories of shear surfaces to the main-fault plane in the dextral (a) and sinistral (b) slip movements (modified from Rutter et al., 1986).

fault) 사이에 단층접촉관계를 보이며(그림 3a), 석영, 장석이 우세한 규장질대와 흑운모, 미량의 백운모가 우세한 고철질대가 호상구조를 보여 육안으로도 편마구조를 확인할 수 있다. 박편 상에서도 규장질 광물들과 고철질 광물들이 분리되어 나타나고, 부분적으로 호충을 이루고 있다. 저온광물들이 주를 이루는 편암과 다르게 석영, 사장석, 흑운모 등으로 구성되어 있고, 소량의 백운모도 포함되어 있다. 석영은 파동소광(undulatory extinction)을 보이고, 사장석은 알바이트 쌍정(albite twin)을 보인다.

고원생대 곰배령화강암은 흑운모화강암에 의해 관입당했으며, 연구지역 남동부에 분포하고 있으며(그림 3a), 곰배령화강암은 알칼리장석 반정을 고르게 함유하며 조립질을 보인다. 육안으로도 약 0.5~1

cm 크기의 조립질의 유백색 알칼리장석 반정을 관찰할 수 있다. 박편 상에서 석영과 사장석이 대부분을 차지하고, 소량의 흑운모 등을 관찰할 수 있다. 석영은 파동소광을 보이고, 사장석은 알바이트 쌍정을 보인다.

쥐라기 오색화강암은 흑운모화강암, 설악산화강암에 의해 관입당했으며, 금왕단층과 단층접촉관계를 보이며 연구지역 동부에 분포하고 있다(그림 3a). 대체로 세립질 내지 중립질로 입도가 고르게 나타나며 미립의 석류석 입자를 관찰할 수 있다. 박편 상에서 석영, 정장석, 사장석 등을 관찰할 수 있다. 석영은 파동소광을 보이고, 사장석은 알바이트 쌍정을 보인다. 특히 정장석은 퍼사이트(perthite)조직을 보이고, 풍화를 받아 견운모화(sericitization)되었다.

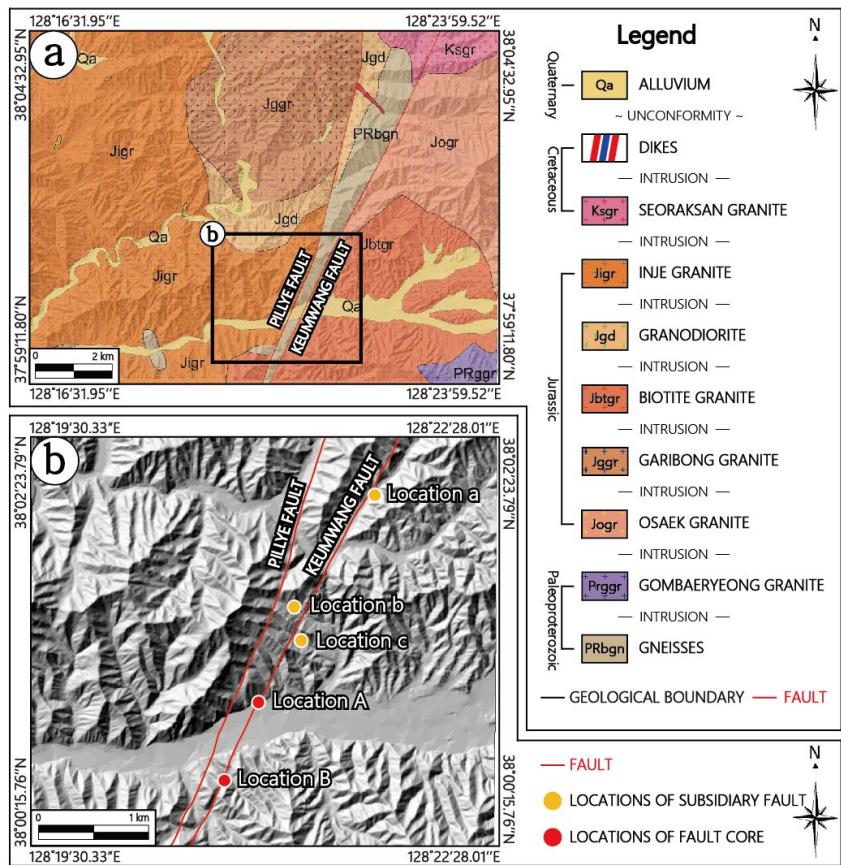


Fig. 3. (a) Geological map of the study area (modified from Kim *et al.*, 1975; Kee *et al.*, 2010). Red solid lines indicate the trace of the Pillye and the Keumwang fault, developed in the study area. (b) DEM image of the study area with an azimuth of 315° and altitude of 45°. Red solid lines indicate the trace of the Pillye and the Keumwang fault. Red points indicate two locations of fault core (Location A & B) and yellow points indicate three locations of subsidiary fault (Location a, b & c) in the Keumwang fault.

쥐라기 가리봉화강암은 화강섬록암, 인제화강암에 의해 관입당했으며, 필례단층과 단층접촉관계를 보이며 연구지역 북부에 분포하고 있다(그림 3a). 가리봉화강암은 약 0.5~3 cm의 거정의 알칼리장석 반정을 함유하고 있다. 박편 상에서도 알칼리장석 반정을 관찰할 수 있고, 내부에 석영, 흑운모, 장석 등이 변질된 견운모 결정들이 불규칙하게 들어있는 포이킬리틱 조직(poikilitic texture)이 나타난다.

쥐라기 흑운모화강암은 오색화강암을 관입했고 인제화강암에 의해 관입당했으며, 금왕단층과 단층접촉관계를 보이며 연구지역 동부에 분포하고 있다(그림 3a). 육안으로 등립의 조립질 입도를 보이며, 박편 상에서 석영, 사장석, 흑운모, 소량의 불투명광물 등을 관찰할 수 있다. 특히 사장석에서 누대구조(zonal structure)를 관찰할 수 있다.

쥐라기 화강섬록암은 가리봉화강암을 관입했고 인제화강암, 설악산화강암에 의해 관입당했으며, 필례단층과 단층접촉관계를 보이며 연구지역 중앙부와 금왕단층과 필례단층 사이에 분포하고 있다(그림 3a). 육안으로 등립질 조직을 보이며, 박편 상에서 석영, 알칼리장석, 사장석, 각섬석, 흑운모, 견운모 등을 관찰할 수 있다. 특히 사장석과 석영의 연정에 의해 벌레가 깊어 먹은 모양의 미르메카이트 조직(myrmekite texture)을 관찰할 수 있다.

쥐라기 인제화강암은 가리봉화강암, 흑운모화강암, 화강섬록암을 관입했으며, 필례단층, 금왕단층과 단층접촉관계를 보이며 연구지역 서부 전체에 넓게 분포하고 있다(그림 3a). 인제화강암은 중립질 내지 조립질의 복운모화강암으로 산출되고, 드물게 암석 내에 석류석이 관찰되기도 한다. 장석 반정을 함유하는 점이 가리봉화강암과 유사하지만, 가리봉화강암은 장석 반정의 발달이 더 우세하고 백운모와 석류석을 포함하지 않으며, 인제화강암은 백운모와 석류석을 함유한 것으로 분류 가능하다(Kee *et al.*, 2010). 백운모는 박편 상에서도 확인할 수 있으며, 그 외에 석영, 사장석, 흑운모 등을 관찰할 수 있다.

백악기 설악산화강암은 편마암, 오색화강암, 화강섬록암을 관입했으며, 금왕단층과 단층접촉관계를 보이며 연구지역 북동부에 분포하고 있다(그림 3a). 이 암석은 알칼리장석을 다량 함유해 전반적으로 담홍색을 띠는데, 가리봉화강암이 좀 더 큰 반정을 보이는 것으로 구분할 수 있다. 박편 상에서 석영과 알

칼리장석이 대부분을 차지하며, 소량의 흑운모, 사장석 등을 관찰할 수 있다. 특히 정장석에서 퍼사이트조직이 관찰된다.

3. 연구지역에 발달한 금왕단층의 특성

3.1 단층핵

지구조적 운동이 집중되는 곳에는 연약한 지반이 형성되어 국부적으로 지형의 변형을 수반하며, 식생의 분포나 하천의 흐름 등이 주변과 상이하다. 특히 단층활동이 일어난 곳은 그 자취를 따라 지표상에 선형구조로 나타나고, 이는 항공사진에서도 쉽게 확인 가능하다(그림 3b). 이 선형구조가 지형의 변위와 변형을 반영하기 때문에 최근에 활성단층의 존재를 파악하는데 중요한 역할을 하고 있다(Kim and Lee, 2017). 연구지역에 발달한 선형구조를 확인하기 위해 국토지리정보원에서 제공하는 1:50,000 수치지형도(GRS80)를 ArcGIS 프로그램을 이용하여 약 5 m 해상도의 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model)을 제작하였다. DEM 상의 선형구조를 명확하게 확인하기 위해 빛의 방향(태양의 위치)을 45°, 135°, 225°, 315°로 각각 설정하여 음영기복도(hill-shade relief)를 제작해 다각도로 확인하며 단층의 자취를 추정하였다. 그 결과 연구지역을 북북동-남남서 방향으로 가로지르는 선형구조를 확인하였다(그림 3b). 이 선형구조는 지금까지 알려진 금왕단층의 자취와 비슷하며, 하천이나 주거지 일대를 제외한 능선 등에서 연장성이 뚜렷하게 나타난다. 이 선형구조를 따라 금왕단층의 단층핵 노두 두 곳을 발견하였다(그림 3b의 Location A & B).

3.1.1 A 지점

A 지점은 지리좌표 상으로 38°00'56.08"N/128°20'55.95"E에 위치하며, 동-서 방향으로 흐르는 귀둔천을 가로질러 금왕단층의 선형구조가 지나간다(그림 3b의 Location A). 단층핵을 확인하기 위해 하천방향을 따라 트렌치 조사(trench survey)를 실시하여 양쪽 경계가 모두 확인된 약 21 m 폭의 단층핵을 발견하였다. 단층핵 북서쪽 경계에 발달한 단층면의 방향은 N32°E/88°NW, 남동쪽 경계에 발달한 단층면의 방향은 N20°E/86°NW이다(그림 4a). 단층핵의 북서부에 분포하는 흑운모화강암에서 유

래된 파쇄암(CT1)은 노두 상에서는 파쇄엽리가 발달되어 있고, 박편 상에서는 파쇄작용에 의해 입자 크기가 작아지고 석영 및 암편으로 이루어진 쇄정

(clast)이 기질에 떠있는 형태로 관찰된다(그림 4b, 4c). 단층핵을 지질구조 특성에 따라 6개의 구조구로 구분하고, 각 구조구에 발달한 전단면과 엽리면의

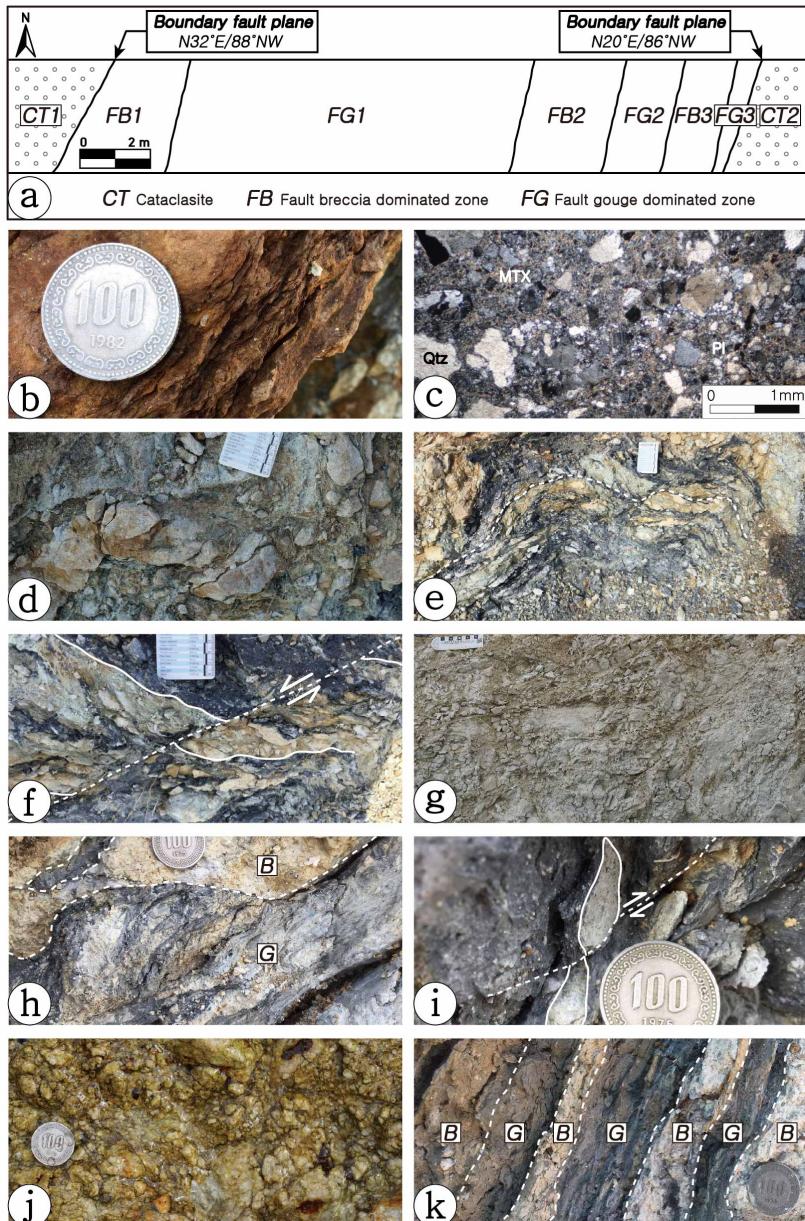


Fig. 4. (a) Schematic diagram of map view of the fault core at location A. (b) Outcrop photograph of foliated cataclasite at CT1. (c) Microphotograph image of cataclasite at CT1. (d) Outcrop photograph of fault breccia dominated layer at FB1. (e) Outcrop photograph of sheath fold at FG1. (f) Outcrop photograph that dark gray gouge cut by sinistral movement at FG1. (g) Outcrop photograph of fault breccia dominated layer at FB2. (h) Outcrop photograph of fault gouge dominated layer at FG2. (i) Outcrop photograph that dark gray fault gouge cut by dextral movement at FG2. (j) Outcrop photograph of fault breccia dominated layer at FB3. (k) Outcrop photograph of fault gouge dominated layer at FG3. Symbols: Qtz=Quartz, MTX=Matrix, Pl=Plagioclase, B=fault breccia, G=fault gouge.

방향을 측정하여 장미도표로 분석하였다(그림 4, 5).

약 3 m 폭의 단층각력암 우세대 1(FB1)은 대부분 단층각력암으로 구성되어 있다(그림 4d). FB1에 발달한 전단면의 방향은 N30°E 방향으로 금왕단층과 평행하며(그림 5), 이는 그림 2에서의 Y-전단면으로 판단된다(그림 2). FB1에 발달한 엽리면의 방향은 N45°E 방향이 우세한데, 이는 P-엽리 방향에 해당되며, 금왕단층의 좌수향 주향이동 운동을 지시한다(그림 2b, 5).

약 10 m 폭의 단층비지 우세대 1(FG1)은 약 60%의 단층비지대와 약 40%의 단층각력암대로 구성되며, 내부에는 단층각력암과 단층비지띠가 교호하는 습곡이 발달되어 있다(그림 4e). FG1에 발달한 습곡의 날개부분이 우수향 운동감각의 전단면(P-전단방향)에 의해 절단되었는데(그림 4f), 이는 P-전단면에 해당되며, FG1의 습곡이 형성된 이후에는 우수향 주향이동 단층운동이 우세했음을 지시한다(그림 2a). 습곡의 양쪽 날개에서 측정한 25개의 단층비지띠의 주향경사 값은 스템레오넷에 투영하여 습곡된 면들의 교점인 β -습곡축의 방향($66^{\circ} \rightarrow 011^{\circ}$)을 구했다(그림 6). 습곡축의 방향은 금왕단층의 주향방향과 비

슷하며 선경사는 고각을 가지고 있어, 습곡축의 경사가 변형정도에 따라 달라지는 칼집습곡(sheath fold)으로 해석된다(그림 6, 7). FG1의 습곡이 발달하지 않은 부분에서 측정한 전단면의 방향은 N20°E, N40°~50°E 방향으로 R- 또는 P-전단면 방향과 평행하지만, R-, P-전단면의 경우 Y-전단면을 기준으로 대칭적으로 발달하고 각 전단면에서의 운동감각의 확인이 용이하지 않아 주단층면의 운동감각 해석에 적용이 곤란하다(그림 2, 5). FG1의 습곡이 발달하지 않은 부분에서 측정한 엽리면의 방향은 주단층면의 방향과 평행한 방향이 가장 우세하고, 그 외에 N30°~80°E 방향으로 우세하게 나타난다(그림 5). 이는 그림 2b에서 P-엽리 방향과 평행하며, 금왕단층이 좌수향 주향이동 단층운동이 우세했으며 전단응력변형이 증가함에 따라 엽리면의 방향이 전단면에 대해 반시계방향으로 회전하면서 Y-전단면 사이의 방향으로 발달한 것으로 해석된다(그림 2b).

약 3 m 폭의 단층각력암 우세대 2(FB2)는 대부분 단층각력암으로 구성되어 전단면과 엽리면의 발달이 미약하다(그림 4g).

약 2 m 폭의 단층비지 우세대 2(FG2)는 약 70%

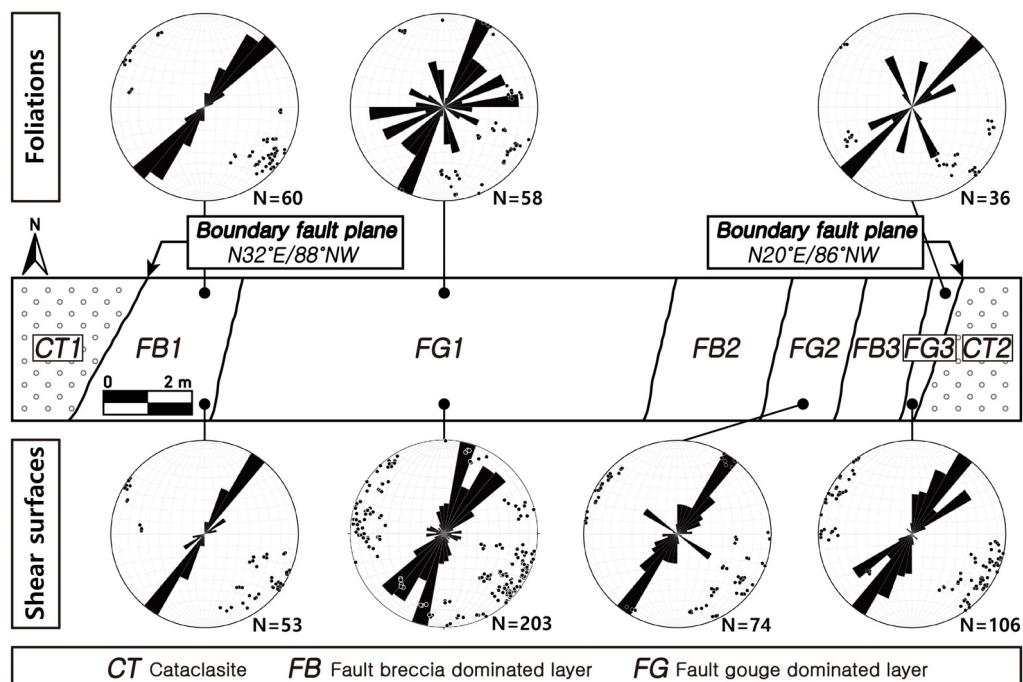


Fig. 5. Schematic diagram of map view of the fault core and rose diagrams showing the orientations of shear surfaces and foliations at location A.

의 단층비지대와 약 30%의 단층각력암대로 구성되어 있다(그림 4h). FG2의 내부에는 잔유물로 남은 암편과 담회색 단층비지띠가 우수향 운동감각의 전단면(Y-전단방향)에 의해 절단되고 있다(그림 4i). 이는 그림 2a에서의 Y-전단면의 방향과 평행하며, FG2가 우수향 주향이동 단층운동이 우세했음을 시한다(그림 2a). FG2에 발달한 전단면의 방향은 N30°E 방향으로 금왕단층의 방향과 평행하며, 이는 그림 2에서의 Y-전단면으로 판단된다(그림 2, 5).

약 2 m 폭의 단층각력암 우세대 3(FB3)은 원마도 가 양호한 암편 및 기질로 구성되어 있으며, 암편들이 기질에 떠있는 형태인 기질지지 역암처럼 보인다(그림 4j). FB3는 대부분 단층각력암으로 구성되어 전단면과 엽리면의 발달이 미약하다.

약 70 cm 폭의 단층비지 우세대 3(FG3)은 담회색과 암회색의 단층비지띠가 교호하며 발달한다(그림 4k). FG3에 발달한 전단면의 방향은 N20°~30°E 방향으로 금왕단층의 방향과 평행하며, 이는 그림 2에서 Y-전단면으로 판단된다(그림 2, 5). 그 외에 N60°E

방향으로 발달한 전단면은 R- 또는 P-전단면 방향과 평행하지만, 주단층면의 운동감각을 파악할 수 없다(그림 2, 5). FG3에 발달한 엽리면은 N50°E 방향이 가장 우세한데 이는 P-엽리로 판단되며, 금왕단층의 좌수향 주향이동 운동을 지시한다(그림 2b, 5). 그 외에 남-북 방향으로 발달한 엽리면은 P-엽리 방향과 평행하며, 금왕단층의 우수향 주향이동 운동을 지시한다(그림 2a).

3.1.2 B 지점

B 지점은 지리좌표 상으로 38°00'37.58"N/128°20'45.54"E에 위치하며, 계곡과 평행하게 금왕단층의 선형구조가 지나간다(그림 3b의 Location B). 단층핵을 확인하기 위해 계곡을 가로지르는 방향으로 트렌치 조사를 실시하여 남동쪽 경계만 확인된 폭을 알 수 없는 단층핵을 발견하였다. 단층핵 남동쪽 경계에 발달한 단층면의 방향은 N24°E/75°NW이다(그림 8a). 단층핵을 지질구조 특성에 따라 3개의 구조구로 구분하고, 각 구조구에 발달한 전단면과 엽리면의 방향을 측정하여 장미도표로 분석하였다(그림 8, 9).

약 2 m 폭의 단층비지 우세대 1(FG1)은 엽리의 발달이 미약한 괴상의 단층비지로 구성되어 단층비지내 엽리의 발달이 미약하다(그림 8b). FG1에 발달한 전단면의 방향은 N30°E 방향으로 금왕단층의 방향과 평행한데, 이는 Y-전단면으로 판단되며, 그 외에 N~NW 방향으로 발달한 전단면은 R- 또는 P-전단면에 해당하는 것으로 판단되지만, 주단층면의 운동감각을 파악하기에는 충분하지 않다(그림 2, 9).

약 2 m 폭의 단층비지 우세대 2(FG2)는 암회색과 담회색의 단층비지띠가 교호하고, 단층비지 내에는 점토광물이 선택배향하여 엽리가 잘 발달되어 있다(그림 8c, 8d). 단층비지를 주사전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope)으로 관찰한 결과 S-방향으로 배열한 엽리(S-foliation)를 C-면(C-plain)이 절단하고 있는 S-C구조(S-C structure)가 관찰된다(그림 8e).

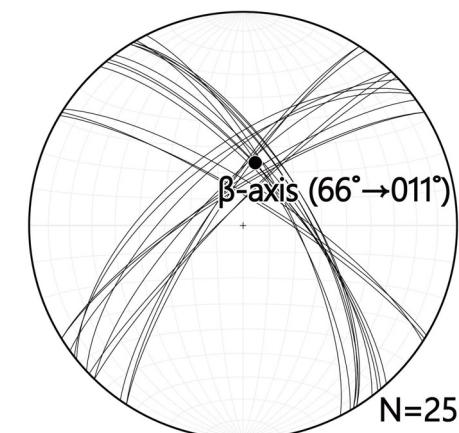


Fig. 6. Stereonet showing β -plot of sheath fold at FG1 in location A. The input data are from both limbs of the sheath fold. The black point is β -axis.

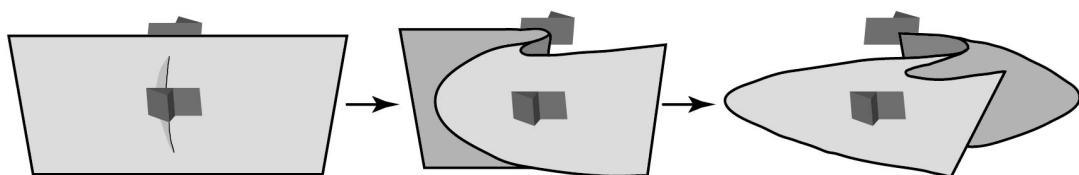


Fig. 7. Schematic diagram showing evolution of sheath fold by dextral movement (modified from Fossen, 2010).

S-C구조의 방향성을 통해 점토광물 배열 당시 주단층면의 운동감각이 우수향이였음을 알 수 있다. 또한 암회색 단층비지띠 내에 발달한 흑색의 단층비지

잔유물을 우수향 운동감각의 전단면이 절단하고 있으며(그림 8f), 얇게 발달한 담회색 단층비지띠가 우수향 운동감각에 의해 P-전단면 방향으로 인장되어

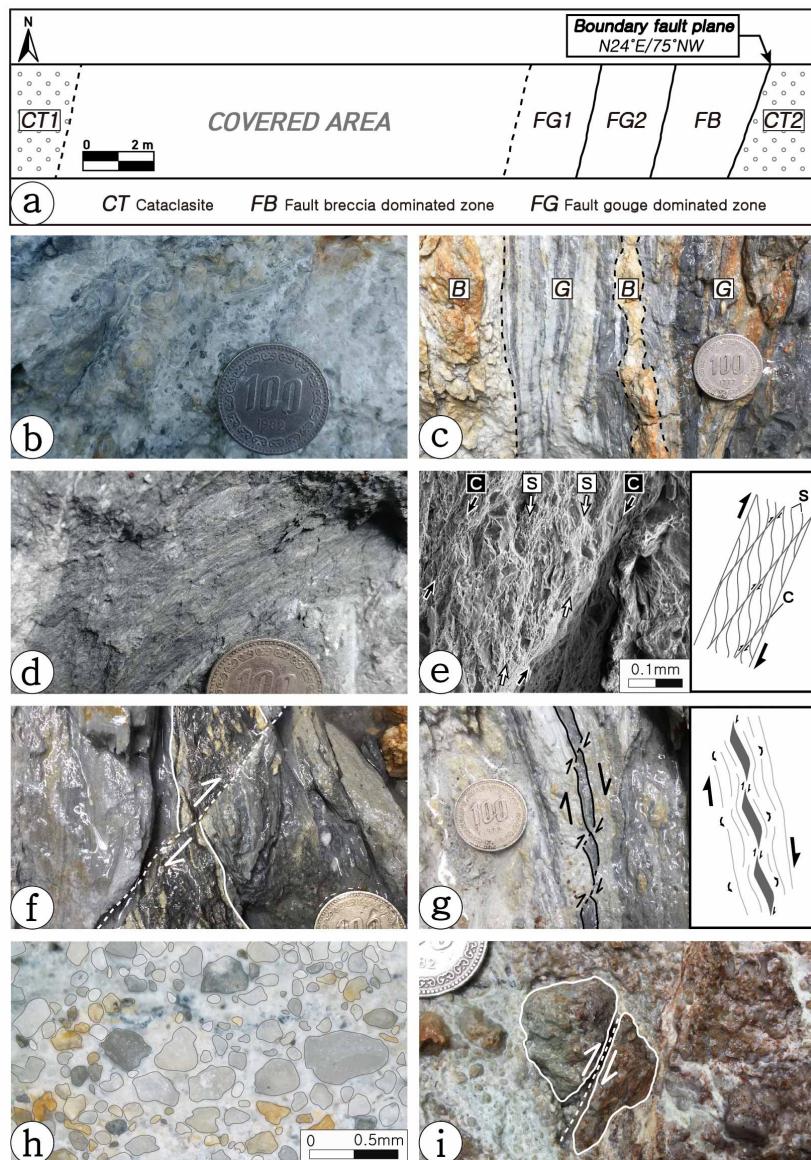


Fig. 8. (a) Schematic diagram of map view of the fault core at location B. (b) Outcrop photograph of massive fault gouge at FG1. (c) Outcrop photograph of fault gouge bands at FG2. (d) Outcrop photograph of foliated fault gouge at FG2. (e) SEM image of S-C structure in the fault gouge at FG2 (Inlet schematic diagram shows S-C structure during dextral movement; after Lexa *et al.*, 2004). (f) Outcrop photograph that dark gray fault gouge is cut by dextral movement at FG2. (g) Outcrop photograph that shows boudinaged gouge band of P-shear orientation which indicates dextral sense of shear at FG2 (Inlet schematic diagram shows typical sense of movement of boudins during simple shear; after Fossen, 2010). (h) Slab photograph of fault breccia with well rounded rock fragments at FB. (i) Outcrop photograph that a relic in fault breccia is cut by dextral movement at FB. Symbols: B=fault breccia, G=fault gouge, S=S-foliation, C=C-plane.

끊긴 부단구조를 보인다(그림 8g). FB2에 발달한 전단면의 방향은 남-북 방향으로 우세하며, 이는 R- 또는 P-전단면으로 판단되지만, 주단층면의 운동감각을 해석하는데 한계가 있다(그림 2, 9). 그 외에 N30°E 방향으로 발달한 전단면은 금왕단층의 방향과 평행하며, 이는 Y-전단으로 판단된다(그림 2, 9). FG2에 발달한 엽리면의 방향은 남-북 방향이 우세한데 이는 P-엽리 방향과 평행하며, 금왕단층의 우수향 주향이동 운동을 지시한다(그림 2a, 9).

약 2 m 폭의 단층각력암 우세대(FB)는 원마도가 양호한 암편 및 기질로 구성되어 있으며, 슬랩사진상에서 약 0.1~0.8 mm 크기의 암편들이 기질에 떠 있는 형태인 기질지지 역암처럼 보인다(그림 8h). FB 내부에는 잔유물로 남은 암편을 우수향 운동감각의 전단면이 절단하고 있다(그림 8i). FB는 대부분 단층각력암으로 구성되어 엽리면의 발달이 미약하다. FB에 발달한 전단면의 방향은 N20°~30°E 방향으로 금왕단층의 방향과 평행하며, 이는 Y-전단면으로 판단된다(그림 2, 9).

3.2 부수단층

단층에 의해 지표에 변형이 발생하는 원인은 크게 두 가지로 나뉜다(Ikeda *et al.*, 2000). 첫 번째, 지

하 진원단층의 단열면이 지표까지 도달한 경우로써 (surface earthquake fault), 이 경우 지표파열이 진원지역의 중앙부에 발생한다. 두 번째, 단층운동에 의해 지진성 지각변동이 생기면 진원 지역 주변부나 기존단층의 운동으로 부차적으로 생성되는 부수단층(subsidiary fault)이 발달하는 경우이다. 이 경우 진원단층과 위치가 정확하게 일치하지 않고 변위량도 작다. 부수단층은 단층핵에 비해 낮은 빈도로 활동하기 때문에 단층핵과 재활동시기가 일치하지 않을 수 있다(Kim and Lee, 2017). 부수단층에서는 단층운동의 재활동이 일어나지 않고 단층핵에서만 재활동이 있었다면, ESR 연대측정법 특성상 단층핵에서는 이전 단층활동에 대한 기록은 지워지고 마지막 단층운동만 기록된다. 이때 단층핵에서 알 수 없는 이전 단층활동에 대한 정보가 부수단층에 남아있을 수 있으므로 ESR연대측정은 단층핵과 부수단층에서 병행하는 것이 유용하다. 연구지역에 나타나는 선형구조를 추적해 금왕단층의 부수단층 노두 세 곳을 발견하였다(그림 3b의 Location a, b & c).

3.2.1 a 지점

a 지점은 지리좌표 상으로 38°02'04.85"N/128°21'40.85"E에 위치하며, 연구지역 북동부에 금왕단층

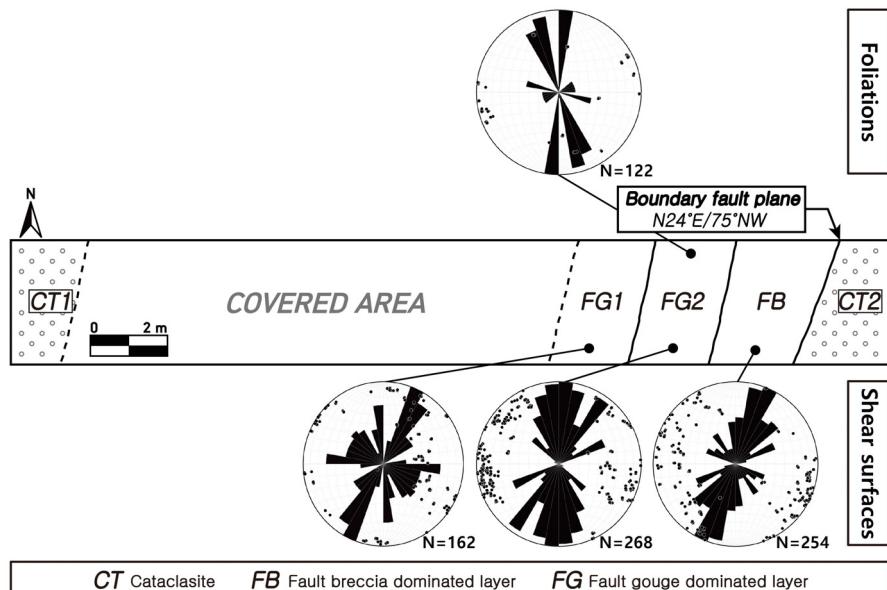


Fig. 9. Schematic diagram of map view and rose diagrams showing the orientations of shear surfaces and foliations at location B.

의 선형구조와 평행한 방향으로 흐르는 하천의 바닥 노두이다(그림 3b의 Location a). a 지점의 단층면을 따라 약 2~6 cm 폭의 담회색의 단층비지띠가 발달되어 있다(그림 10a).

3.2.2 b 지점

b 지점은 지리좌표 상으로 38°01'28.24"N/128°21'15.18"E에 위치하며, 연구지역 중앙부에 금왕단층의 선형구조 주변의 절벽 노두이다(그림 3b의 Location b). b 지점에는 두 개의 부수단층이 발달하고, 각 단층면을 따라 약 1~3 cm 폭의 단층비지띠가 발달한다(그림 10b, 10c). b 지점에 암쇄암이 분포하며, 박

편상에서 모암인 흑운모화강암은 약 0.5~2 mm의 조립질 조직을 보이는 반면, 암쇄암은 약 0.05~0.2 mm의 입자크기로 재결정작용이 우세했던 것으로 해석된다(그림 11). 또한 백운모가 정향배열하여 암쇄엽리를 형성하고 있다(그림 11b). Sibson (1977)의 분류에 의하면 b 지점의 암쇄암은 재결정작용에 의해 형성된 변성암쇄암(blastomylonite)으로 해석된다.

3.2.3 c 지점

c 지점은 지리좌표 상으로 38°01'19.52"N/128°21'14.81"E에 위치하며, 연구지역 중앙부에 금왕단층의 선형구조와 평행하게 흐르는 하천의 바닥 노두이

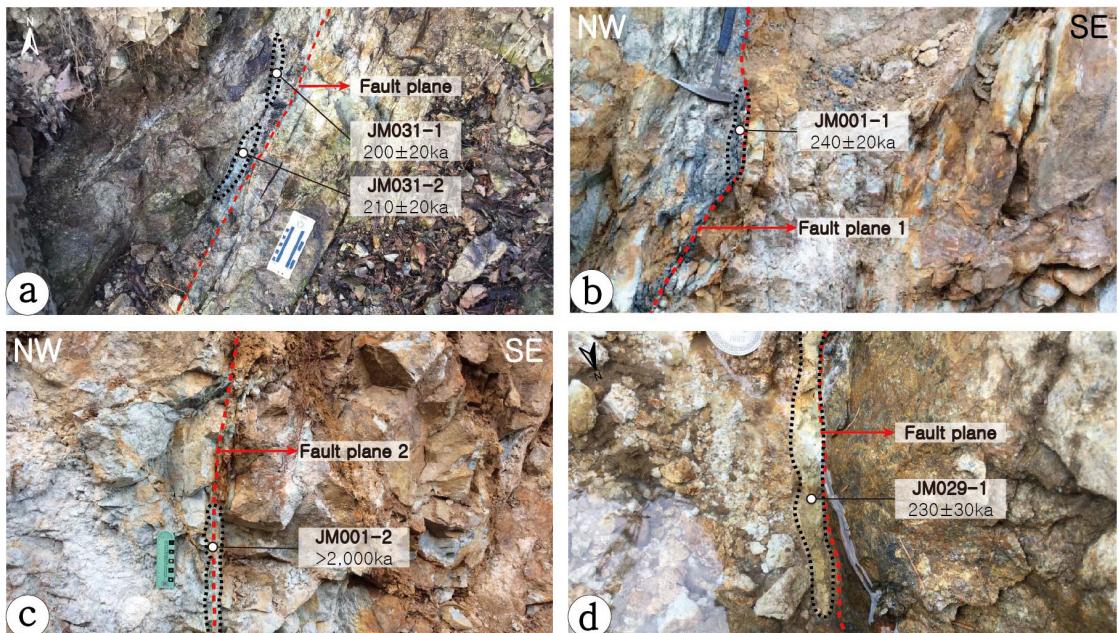


Fig. 10. Outcrop photograph of subsidiary faults and ESR ages at location a (a), location b (b, c) and location c (d).

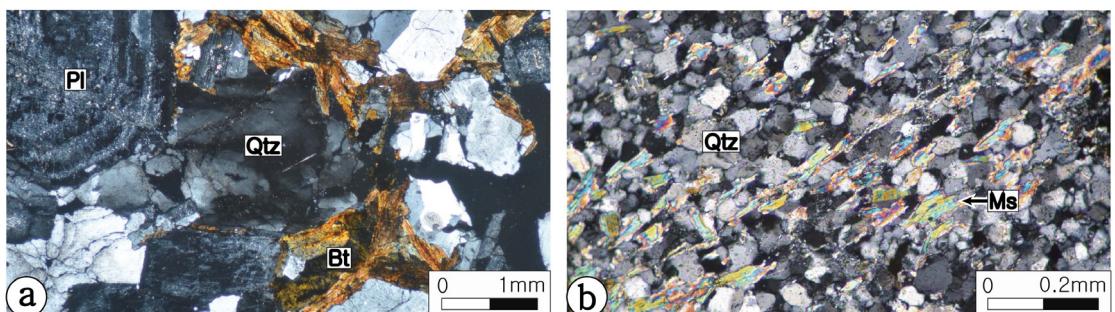


Fig. 11. Microphotograph images. (a) Biotite granite. (b) Blastomylonite derived from biotite granite. Symbols: Pl=Plagioclase, Qtz=Quartz, Bt=Biotite, Ms=Muscovite.

다(그림 3b의 Location c). 단층핵을 확인하기 위해 하천방향을 따라 트렌치 조사를 하였으며, 약 1 m 폭의 부수단층의 단층면을 따라 약 1~2 cm 폭의 단층비지띠가 발달한다(그림 10d).

4. 단층암의 ESR 연대

ESR 연대는 부가조사법(additive dose method)을 이용해 등가선량(D_e , equivalent dose; 단위: Gy)과 단위시간당 조사율(d , dose rate; 단위: $\mu\text{Gy}/\text{year}$)의 비로 결정된다. 등가선량은 ESR 신호가 0이 된 후(마지막 단층활동)부터 현재까지 단층암이 받은 에너지의 양을 변환하여 구한다. 단위시간당 조사율은 단층비지 시료에 함유된 방사성 원소와 수분함량을 분석하고, α -효과와 감쇠상수 등을 결정한 후, ESR-data 프로그램(Grün, 2009)에 입력해 구한다. 감마선의 영향 범위는 약 30 cm로 알파선(약 2 μm)과 베타선(약 2 mm)에 비해 크다(Lee and Schwarcz, 1995). 따라서 각 단층비지와 단층각력암 시료의 채취지점에서 약 30 cm 반경에 해당하는 다른 시료들의 U, Th, K 함량의 가중평균값으로 단위시간당 조사율을 계산하였다. ESR 신호가 이미 포화된 시료들은 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호가 더 증가하지 않지만, 포화되지 않은 시료들은 ESR 신호가 단일포화지수함수곡선(single saturated exponential curve)을 따라 증가한다(Yang, 2006). 감마에너지 값에 따른 ESR 신호의 세기를 측정해 VFIT 프로그램으로 등가선량을 구하였다. 연구지역의 단층핵(그림 3b의 Location A & B)과 부수단층(그림 3b의 Location a, b & c)에서 채취한 단층비지와 단층각력암 시료의 U, Th, K 함량과 ESR 연대측정자료는 표 1~4에 제시되어 있다. ESR 연대는 같은 띠에서 여러 개의 시료를 채취하였을 경우 가중평균을 통해 하나의 ESR 연대를 결정하였다.

4.1 단층핵의 ESR 연대

4.1.1 A 지점

A 지점의 각 시료 위치와 ESR 연대측정 결과는 그림 12와 표 2에 제시되어 있다.

단층핵 남동쪽 경계부에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-24(그림 12)는 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100

μm , 100~150 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구였다(그림 13a).

FG1에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-2, JM048-4, JM048-5, JM048-6, JM048-12, FB3에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-18(그림 12)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다(그림 13b).

단층핵 북서쪽 경계부에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-13, FB1에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-1, FG1에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-3, JM048-9(그림 12)는 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다(그림 13c).

FG1에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM048-8, JM048-11(그림 12)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 연대 평탄역을 보이지 않아 최대 ESR 연대를 구하였다(그림 13d).

같은 띠에서 채취한 JM048-2와 JM048-5, JM048-3과 JM048-4, JM048-11과 JM048-12 시료의 ESR 연대는 오차범위 내로 일치하여 이를 가중평균으로 계산해 하나의 ESR 연대를 구하였다.

4.1.2 B 지점

B 지점의 각 시료 위치와 ESR 연대측정 결과는 그림 14와 표 3에 제시되어 있다.

FG2에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-36#(그림 14)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm , 100~150 μm , 150~250 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다.

FG2에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-33#, JM021-34#(그림 14)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm , 100~150 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다(그림 15a).

FG2에 발달한 단층각력암에서 채취한 JM021-18#(그림 14)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E'

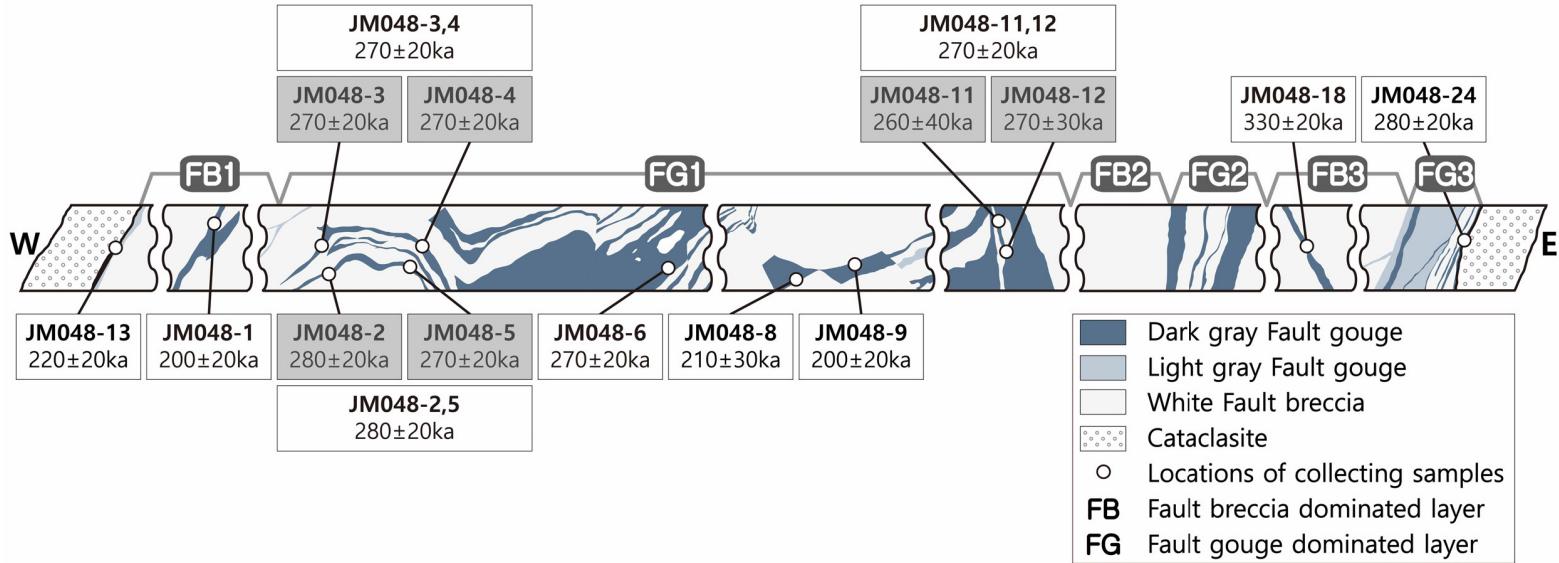


Fig. 12. Schematic diagram of cross section at location A. The white points represent sampling locations and ESR ages.

Table 1. Concentrations of U, Th and K for each sample of fault cores (location A & B) and subsidiary faults (location a, b & c).

Location	Sample	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
A	JM048-1	8.09±0.22	42.45±0.67	3.72±0.04
	JM048-2	3.89±0.14	34.46±0.68	5.34±0.05
	JM048-3	3.46±0.19	35.15±0.73	0.43±0.06
	JM048-4	3.10±0.18	27.18±0.82	6.32±0.06
	JM048-5	3.00±0.15	31.91±0.55	5.17±0.05
	JM048-6	2.37±0.13	25.45±0.60	4.57±0.04
	JM048-8	3.41±0.19	27.87±0.65	5.15±0.06
	JM048-9	4.14±0.19	29.17±1.06	5.32±0.06
	JM048-11	1.90±0.09	19.32±0.46	3.57±0.04
	JM048-12	2.86±0.15	23.36±0.57	3.51±0.04
B	JM048-13	5.00±0.18	25.63±0.51	5.13±0.05
	JM048-18	7.11±0.32	31.04±0.87	4.83±0.05
	JM048-24	2.42±0.12	26.44±0.69	5.23±0.06
	JM021-5#	2.64±0.09	21.05±0.43	3.49±0.03
	JM021-6#	2.36±0.08	19.34±0.34	3.41±0.03
	JM021-7#	2.57±0.08	24.32±0.58	2.94±0.03
	JM021-8#	2.45±0.05	18.95±0.37	3.10±0.03
	JM021-9#	3.96±0.10	21.43±0.34	3.66±0.03
	JM021-10#	4.39±0.06	10.14±0.31	3.80±0.03
	JM021-11#	4.24±0.10	12.48±0.32	3.23±0.03
	JM021-12#	2.93±0.09	11.43±0.30	3.30±0.03
	JM021-13#	3.60±0.10	25.66±0.45	3.32±0.03
	JM021-14#	3.51±0.07	24.22±0.41	3.34±0.03
	JM021-15#	2.40±0.09	23.18±0.45	2.94±0.03
	JM021-16#	3.08±0.11	19.79±0.49	3.22±0.03
a	JM021-17#	3.28±0.08	15.88±0.40	2.77±0.03
	JM021-18#	2.27±0.10	17.53±0.45	3.06±0.03
	JM021-20#	1.65±0.06	18.19±0.56	3.10±0.03
	JM021-31#	4.06±0.11	32.88±0.74	3.51±0.03
	JM021-32#	4.04±0.14	38.10±0.62	3.21±0.03
	JM021-33#	1.79±0.12	11.35±0.37	3.21±0.03
	JM021-34#	3.17±0.12	11.30±0.42	3.51±0.03
	JM021-35#	2.53±0.15	23.90±0.46	3.39±0.03
	JM021-36#	2.44±0.11	12.30±0.36	3.22±0.03
	JM031-1	6.85±0.22	30.94±0.57	4.70±0.04
b	JM031-2	8.42±0.25	32.84±0.58	4.75±0.05
	JM001-1	13.04±0.24	30.68±0.52	4.87±0.04
c	JM001-2	4.34±0.10	13.49±0.27	4.39±0.03
	JM029-1	8.14±0.25	27.05±0.58	4.35±0.04

Table 2. Analytical data for ESR dating for each sample of fault core at location A. Weighted means are calculated from the ESR ages within the plateau and the values have been rounded up.

Location	Sample	Grain size (μm)	Center	De (Gy)	Dose rate ($\mu\text{Gy/year}$)	ESR age (ka)	Weighted mean(ka)
JM048-1	25~45	E'	1552±185	7312±670	211±29	203±20	
	45~75	E'	1398±173	7124±651	195±28		
JM048-2	25~45	E'	1521±165	5621±517	270±38	277±23	
	45~75	E'	1524±176	5477±501	278±40		
	75~100	E'	1973±169	5332±486	285±42		
JM048-3	25~45	E'	1672±258	5649±422	265±29	268±20	
	45~75	E'	1694±309	5504±409	270±27		
	75~100	E'	1900±298	5360±397	330±46		
JM048-4	25~45	E'	1229±206	6444±490	258±22	266±15	
	45~75	E'	1248±164	6274±475	262±23		
	75~100	E'	1908±246	6100±459	296±36		
JM048-5	25~45	E'	1787±224	6410±600	278±43	270±23	
	45~75	E'	1671±90	6241±581	267±28		
	75~100	E'	1951±269	6068±562	321±53		
JM048-6	25~45	E'	1651±190	6162±471	267±36	273±21	
	45~75	E'	1584±186	5998±455	264±36		
	75~100	E'	1677±144	5801±539	289±36		
A	25~45	E'	1420±176	6790±640	209±32	214±27	
	45~75	E'	1507±306	6680±620	228±51		
	JM048-8	75~100	E'	0920±190	6423±599	298±40	
	100~150	E'	1536±203	6192±573	248±39		
	150~250	E'	1837±259	5796±531	317±53		
JM048-9	25~45	E'	1116±149	6790±40	164±26	195±21	
	45~75	E'	1311±195	6680±620	198±34		
JM048-11	75~100	E'	1205±139	4615±434	261±38		
JM048-12	25~45	E'	1181±200	4615±434	255±49	274±26	
	45~75	E'	1296±133	4492±420	288±39		
	75~100	E'	1145±139	4367±406	270±52		
JM048-13	25~45	E'	1399±142	6829±525	204±26	218±18	
	45~75	E'	1530±111	6645±508	230±24		
JM048-18	25~45	E'	2174±151	6433±490	337±34	332±21	
	45~75	E'	2026±162	6261±474	323±35		
	75~100	E'	2061±227	6087±458	338±45		
JM048-24	25~45	E'	1728±128	6422±496	268±28	280±16	
	45~75	E'	1884±215	6250±480	274±33		
	75~100	E'	1737±250	6074±463	290±46		
	100~150	E'	1608±92	5855±444	293±30		

신호의 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다(그림 15b).

FG1에 발달한 단층비지에서 채취한 JM021-11#, FG2에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-6#, JM021-8#, FB에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-31#, 단층핵 남동쪽 경계부에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-32#(그림 14)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm, 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다(그림 15c).

FG1에 발달한 단층비지에서 채취한 JM021-10#, FG2에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-7#, JM021-9#, JM021-20#, JM021-35#(그림 14)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 연대 평탄역을 보이지 않아 최대 ESR 연대를 구하였다(그림 15d).

FG1에 발달한 단층비지에서 채취한 JM021-12#, JM021-13#, JM021-14#, FG2에 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM021-5#, FG2에 발달한 단층각력암에서 채취한 JM021-15#, JM021-16#, JM021-17#(그림 14)은 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E'와 Al 신호의 모든 입자크기에 대하여

여 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다.

같은 데에서 채취한 JM021-20#과 JM021-36# 시료의 ESR 연대는 오차범위 내로 일치하여 이를 가중평균으로 계산해 하나의 ESR 연대를 구하였다.

4.2 부수단층의 ESR 연대

4.2.1 a 지점

a 지점의 각 시료 위치와 ESR 연대측정 결과는 그림 10a와 표 4에 제시되어 있다.

단층면을 따라 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM031-1(그림 10a)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm, 100~150 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다.

단층면을 따라 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM031-2(그림 10a)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호에서는 25~45 μm, 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보이며, Al 신호에서는 25~45 μm 입자크기에서만 결정된다. 따라서 이를 가중평균으로 계산해 다센터 ESR 연대를 구하였다.

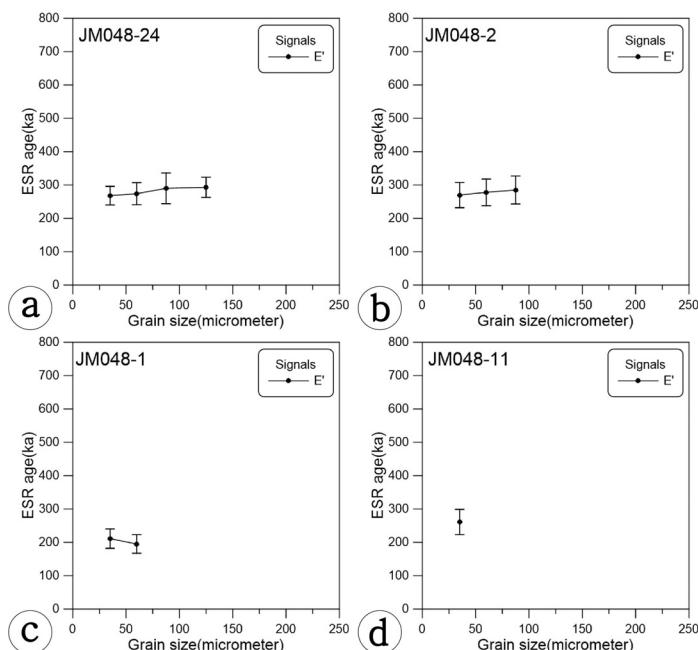


Fig. 13. Graphs of quartz grain sizes vs. ESR ages for fault rock samples at location A. (a) JM048-24. (b) JM048-2. (c) JM048-1. (d) JM048-11.

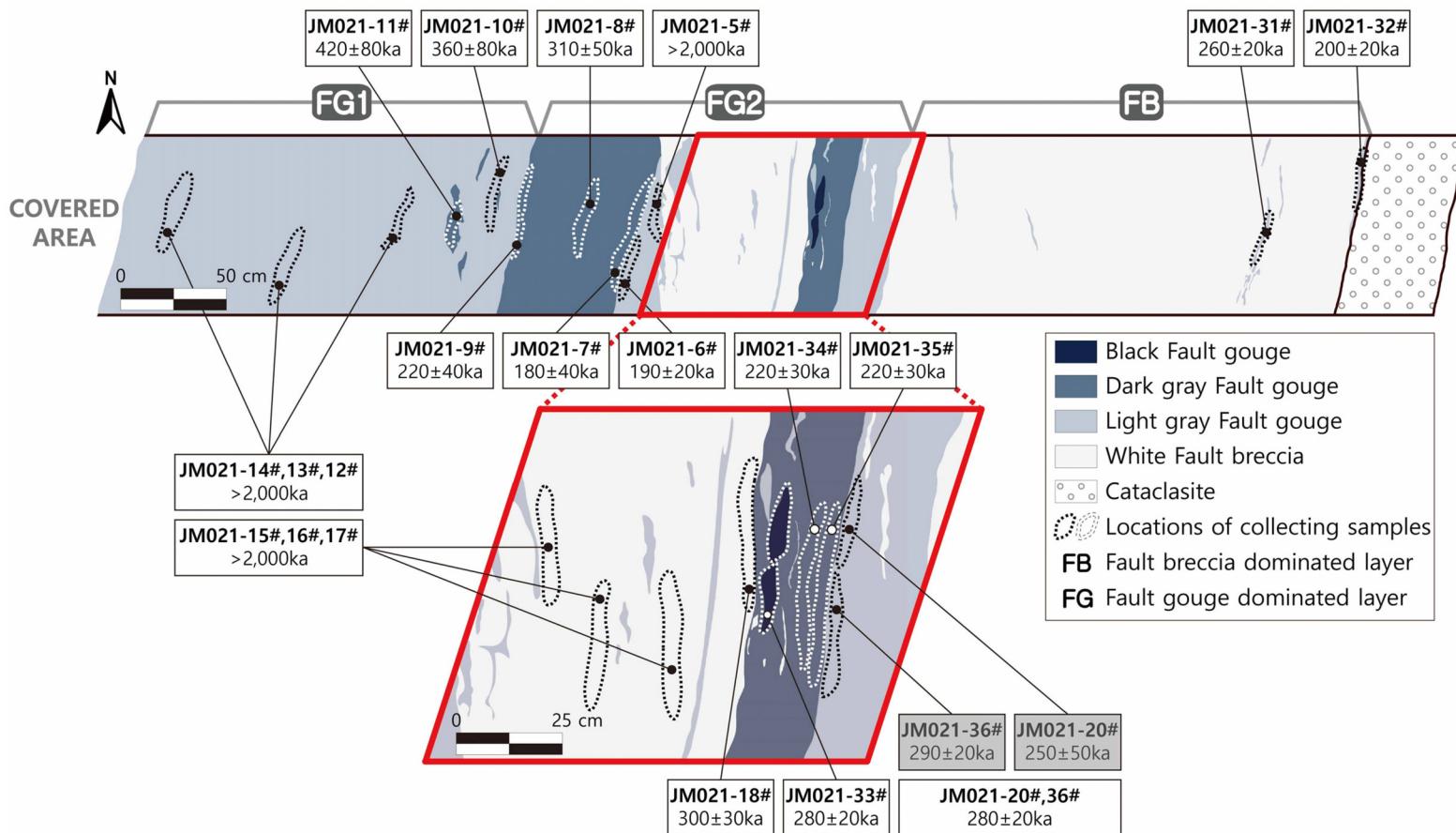


Fig. 14. Schematic diagram of map view at location B. The black and white dashed lines represent sampling locations and ESR ages.

Table 3. Analytical data for ESR dating for each sample of fault core at location B. Weighted means are calculated from the ESR ages within the plateau and the values have been rounded up.

Location	Sample	Grain size (μm)	Center	De (Gy)	Dose rate ($\mu\text{Gy/year}$)	ESR age (ka)	Weighted mean(ka)
B	JM021-6#	25~45	E'	851 \pm 135	4410 \pm 339	192 \pm 33	194 \pm 22
		45~75	E'	841 \pm 110	4293 \pm 328	195 \pm 29	
JM021-7#	JM021-8#	25~45	E'	789 \pm 162	4410 \pm 339	178 \pm 39	313 \pm 50
		25~45	E'	1408 \pm 279	4529 \pm 347	310 \pm 65	
JM021-9#	JM021-10#	45~75	E'	1404 \pm 333	4409 \pm 336	318 \pm 79	313 \pm 50
		25~45	E'	1021 \pm 164	4571 \pm 354	223 \pm 39	
JM021-11#	JM021-18#	25~45	E'	1772 \pm 352	4887 \pm 379	362 \pm 77	295 \pm 26
		45~75	E'	2300 \pm 418	4755 \pm 367	483 \pm 95	
JM021-20#	JM021-31#	25~45	E'	1927 \pm 481	4147 \pm 323	464 \pm 121	423 \pm 82
		45~75	E'	1561 \pm 440	4032 \pm 312	387 \pm 112	
JM021-32#	JM021-33#	25~45	E'	1116 \pm 170	4099 \pm 315	272 \pm 46	254 \pm 50
		45~75	E'	1208 \pm 164	3990 \pm 305	302 \pm 47	
JM021-34#	JM021-35#	75~100	E'	1208 \pm 144	3878 \pm 295	311 \pm 44	257 \pm 24
		25~45	E'	883 \pm 263	4014 \pm 378	220 \pm 68	
JM021-36#	JM021-37#	45~75	E'	1243 \pm 268	3906 \pm 366	318 \pm 74	200 \pm 21
		25~45	E'	1497 \pm 109	5718 \pm 528	261 \pm 30	
JM021-38#	JM021-39#	45~75	E'	1397 \pm 176	5570 \pm 512	250 \pm 39	280 \pm 20
		25~45	E'	557 \pm 126	5815 \pm 432	198 \pm 24	
JM021-40#	JM021-41#	45~75	E'	1099 \pm 247	5668 \pm 420	202 \pm 41	222 \pm 33
		75~100	E'	558 \pm 117	5520 \pm 412	101 \pm 22	
JM021-42#	JM021-43#	25~45	E'	1161 \pm 125	4047 \pm 314	286 \pm 37	238 \pm 100
		45~75	E'	1171 \pm 118	3937 \pm 303	297 \pm 37	
JM021-44#	JM021-45#	75~100	E'	1008 \pm 134	3826 \pm 293	263 \pm 40	223 \pm 62
		100~150	E'	990 \pm 166	3687 \pm 280	268 \pm 49	
JM021-46#	JM021-47#	150~250	E'	1373 \pm 240	3449 \pm 258	398 \pm 75	273 \pm 70
		25~45	E'	967 \pm 399	4046 \pm 314	238 \pm 100	
JM021-48#	JM021-49#	45~75	E'	879 \pm 239	3936 \pm 303	223 \pm 62	342 \pm 49
		75~100	E'	709 \pm 205	3825 \pm 293	185 \pm 55	
JM021-50#	JM021-51#	100~150	E'	1007 \pm 247	3687 \pm 280	273 \pm 70	369 \pm 200
		150~250	E'	1273 \pm 687	3449 \pm 258	369 \pm 200	
JM021-52#	JM021-53#	25~45	E'	872 \pm 86	4025 \pm 381	216 \pm 29	321 \pm 45
		45~75	E'	1771 \pm 293	3918 \pm 369	452 \pm 85	
JM021-54#	JM021-55#	75~100	E'	1305 \pm 145	3807 \pm 357	342 \pm 49	384 \pm 113
		100~150	E'	1092 \pm 106	3367 \pm 341	297 \pm 39	
JM021-56#	JM021-57#	150~250	E'	1320 \pm 371	3430 \pm 315	384 \pm 113	321 \pm 45
		25~45	E'	1327 \pm 212	4025 \pm 381	329 \pm 61	
JM021-58#	JM021-59#	45~75	E'	1037 \pm 116	3917 \pm 369	264 \pm 38	326 \pm 43
		75~100	E'	1241 \pm 116	3806 \pm 357	326 \pm 43	
JM021-60#	JM021-61#	100~150	E'	1179 \pm 127	3668 \pm 341	321 \pm 45	294 \pm 20
		150~250	E'	909 \pm 124	3430 \pm 315	265 \pm 43	

같은 띠에서 채취한 JM031-1과 JM31-2 시료의 ESR 연대는 오차범위 내로 일치하여 이를 가중평균으로 계산해 하나의 ESR 연대를 구하였다.

4.2.2 b 지점

b 지점의 각 시료 위치와 ESR 연대측정 결과는 그림 10b, 10c와 표 4에 제시되어 있다.

단층면1을 따라 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM001-1(그림 10b)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm, 100~150 μm, 150~250 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보이지만, Al 신호의 25~45 μm, 45~75 μm 입자크기는 오차범위 내로 일치하지 않는다. 따라서 E' 신호를 이용해 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다.

단층면2를 따라 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM001-2(그림 10c) 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E'와 Al 신호의 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다.

4.2.3 c 지점

c 지점의 시료 위치와 ESR 연대측정 결과는 그림 10d와 표 4에 제시되어 있다.

단층면을 따라 발달한 단층비지띠에서 채취한 JM029-1(그림 10d)은 석영 입자크기-ESR 연대 그래프에서 E' 신호의 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm 입자크기에서 연대 평탄역을 보여 이를 가중평균으로 계산해 평탄역 ESR 연대를 구하였다.

5. 토의

5.1 깊이에 따른 금왕단층의 단층암 진화과정

단층암의 특성과 이전 연구들을 바탕으로 금왕단층의 단층암 진화과정을 2단계로 해석하였다(그림 16). Scholz (1988)에 의하면 취성변형 영역에서 단층암의 폭은 경도에 반비례하고, 마모계수(wear coefficient), 수직응력, 변위량에 비례하므로 단층대의 형성심도가 깊어짐에 따라 단층암의 폭이 크게 발달한다(그림 17). 그러나 소성변형 영역에서는 점착마모(adhesive wear)에 대한 마모계수가 연마마모(abrasive

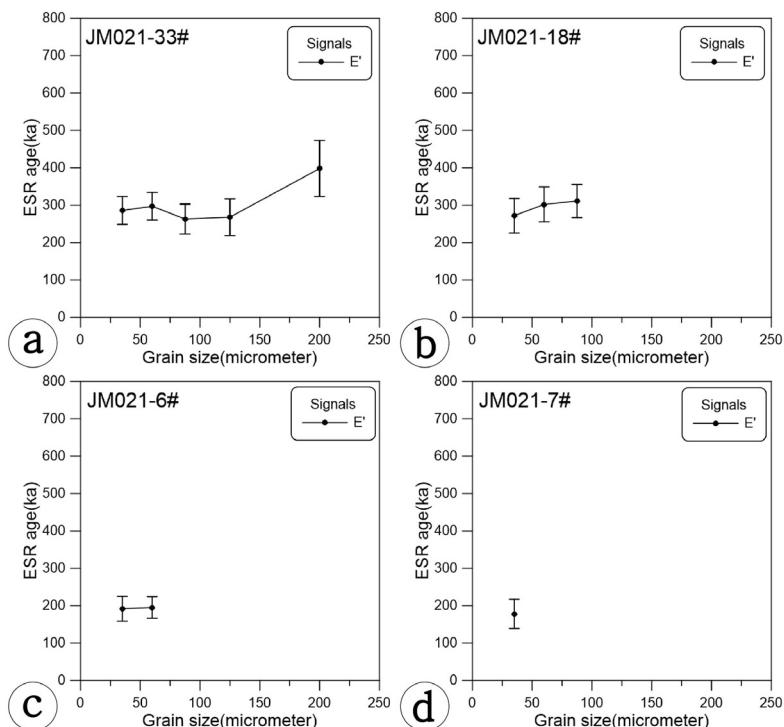


Fig. 15. Graphs of quartz grain sizes vs. ESR ages for fault rock samples at location B. (a) JM021-33#. (b) JM021-18#. (c) JM021-6#. (d) JM021-7#.

Table 4. Analytical data for ESR dating for a sample of subsidiary faults (location a, b & c). Weighted means are calculated from the ESR ages within the plateau and the values have been rounded up.

Location	Sample	Grain size (μm)	Center	De (Gy)	Dose rate ($\mu\text{Gy/year}$)	ESR age (ka)	Weighted mean(ka)
a	JM031-1	25~45	E'	1432 \pm 646	7369 \pm 686	194 \pm 89	
		45~75	E'	1577 \pm 142	7173 \pm 664	219 \pm 28	
		75~100	E'	1367 \pm 315	6974 \pm 642	196 \pm 48	199 \pm 18
		100~150	E'	1208 \pm 170	3729 \pm 616	179 \pm 30	
		150~250	E'	1732 \pm 910	6077 \pm 549	284 \pm 151	
	JM031-2	25~45	E'	1814 \pm 371	7369 \pm 686	246 \pm 55	
		45~75	E'	1531 \pm 341	7173 \pm 664	213 \pm 51	
		75~100	E'	2309 \pm 755	6974 \pm 642	330 \pm 112	210 \pm 24
		25~45	Al	1456 \pm 198	7369 \pm 686	197 \pm 32	
b	JM001-1	25~45	E'	1279 \pm 129	5338 \pm 420	239 \pm 30	
		45~75	E'	1227 \pm 222	5192 \pm 406	236 \pm 46	
		75~100	E'	1078 \pm 187	5040 \pm 32	213 \pm 40	
		100~150	E'	1161 \pm 126	4853 \pm 375	239 \pm 31	235 \pm 16
		150~250	E'	1114 \pm 205	4527 \pm 344	246 \pm 48	
		25~45	Al	2573 \pm 481	2573 \pm 481	481 \pm 97	
		45~75	Al	1295 \pm 178	1295 \pm 178	249 \pm 39	
		25~45	E'	1566 \pm 327	6898 \pm 645	226 \pm 51	
c	JM029-1	45~75	E'	1512 \pm 554	6712 \pm 623	225 \pm 85	228 \pm 32
		75~100	E'	1512 \pm 281	6525 \pm 603	231 \pm 48	

wear)에 대한 마모계수보다 훨씬 작기 때문에 압쇄암의 폭이 작게 발달한다(그림 17; Scholz, 1988).

금왕단층의 손상대 내에서 연구지역의 중앙부에 분포하는 흑운모화강암으로부터 유래한 압쇄암이 분포하고 있다. 홍천군 및 횡성군 일대에 발달한 금왕단층의 연장을 따라 분포하는 파쇄암 내에서 노두 규모의 압쇄암 잔유물 및 미세구조 규모의 압쇄암 쇄정이 발견된다(Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012). 이는 금왕단층이 발달하기 전 금왕전단대에서 압쇄암이 발달하였으며, 횡성군 일대부터 설악산 일대까지 주라기 후기 및 백악기 초기에 금왕전단대가 연장되어 발달하였음을 지시한다(그림 16a; Kim and Lee, 2016).

연구지역에 동-서로 흐르는 귀둔천을 따라 발달한 약 23 m 폭의 단층핵 주변에서 파쇄암이 발견되며, 파쇄암의 폭은 제4기 봉적층에 의해 덮여있어 정확한 확인이 불가능하나 수백 m의 폭을 가졌을 것으로 추정된다. 홍천군 및 횡성군 일대에 발달한 금왕단층의 단층핵 주변에서 약 150~900 m의 파쇄암

대가 발견된다(Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012). Scholz (1988)의 모델(그림 17)에 의하면 파쇄암의 폭은 연성전단대에서 발달한 압쇄암의 폭보다 크며, 전단대가 융기 후 재활동할 경우 압쇄암대가 파쇄 암대 속에 포함되므로 일부 압쇄암 잔유물만 남아 잔유물 및 미세구조 규모의 압쇄암 쇄정이 파쇄암 속에서 발견된 것으로 해석된다. 음성분지 남측의 이암층에 분포하는 윤조화석을 통해 이암층의 퇴적시기를 오트리브세(Hauterivian) 이후부터 암트세(Aptian)에 해당될 것으로 해석하였다(Choi et al., 1995). 이암층의 퇴적시기를 근거로 백악기 오트리브세에 남북 압축 응력하에서 공주단층계의 좌수향 주향이동 단층운동에 의해 당겨-열림 분지(pull-apart basin)인 음성분지가 형성되었다고 해석하였다(Choi and Choi, 2007). 음성분지 일대부터 설악산 일대까지 압쇄암 계열보다 얕은 약 4~11 km 깊이의 취성환경에서 압쇄암 계열에 파쇄암 계열이 중첩되었다(그림 16b; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012; Kim and Lee, 2016; Weon and Lee,

2018; Min and Lee, 2019).

5.2 금왕단층의 단층핵 진화과정

단층핵 두 지점(그림 3의 Location A & B), 부수 단층 세 지점(그림 3의 Location a, b & c)의 특성과 이전 연구들을 바탕으로 금왕단층의 단층핵 진화과정을 3 단계로 해석하였다(그림 18). 연구지역의 단층핵 A와 B 지점에는 원마도가 양호한 단층각력암

이 잔유물의 형태로 분포하고 있으며, 단층비지띠가 중첩되어 발달되어 있다. 단층각력암은 좌수향 주향 이동 단층운동 중에 분산 분쇄 각력암화(distributed crush brecciation)에 의해 형성되었으며, 약 23 m 폭의 단층핵은 이 때 결정된 것으로 추정된다(그림 18a; Sibson, 1986). 단층운동이 반복됨에 따라 암편들의 원마도가 양호해지며(단층역암; Lee, 2010), 크기는 작아지고 기질의 함량이 점점 증가하여 단층비

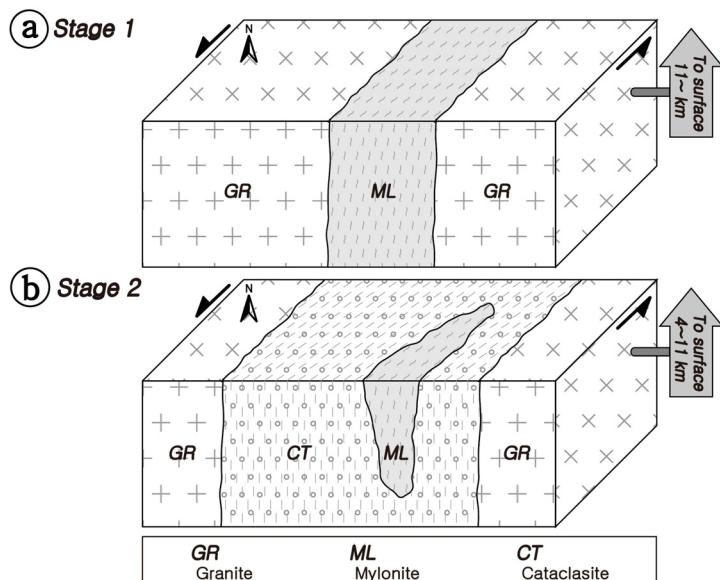


Fig. 16. 3D schematic diagram of the evolution of fault rocks across the Keumwng fault generated at different levels.

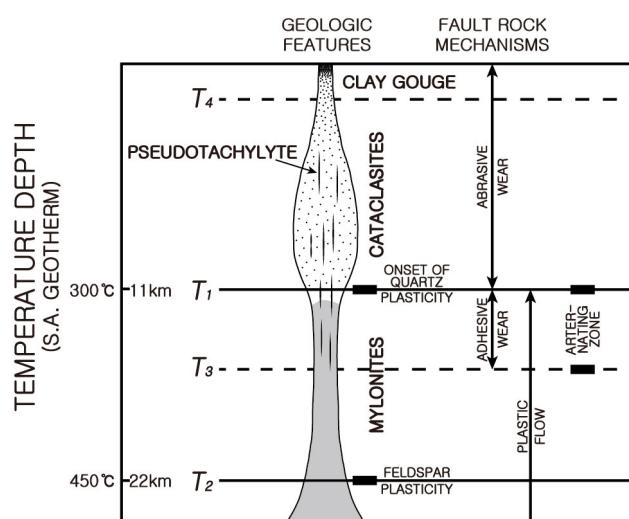


Fig. 17. The Scholz's fault zone model showing the thickness of fault rock zone (after Scholz, 1988).

지로 바뀌어 부분적으로 단층비지에 원마도가 양호한 암편이 떠있는 형태로 관찰되며, 분산 분쇄 각력암화 작용이 우세했던 것으로 해석된다(그림 19a). 약 1~30 cm 폭의 단층비지띠들(그림 18; FGB)은 단층이 재활동할 때 단층각력암 내와 단층핵 경계부에

서 마찰 각력암화(attrition brecciation) 또는 마모(wear)작용에 의해 형성된 것으로 해석된다(그림 19b; Sibson, 1986; Scholz, 1988). 이러한 단층각력암과 단층비지띠는 백악기 초기 오트리브세 이후 파쇄암 계열보다 얕은 약 1~4 km 깊이에서 형성된 것으로

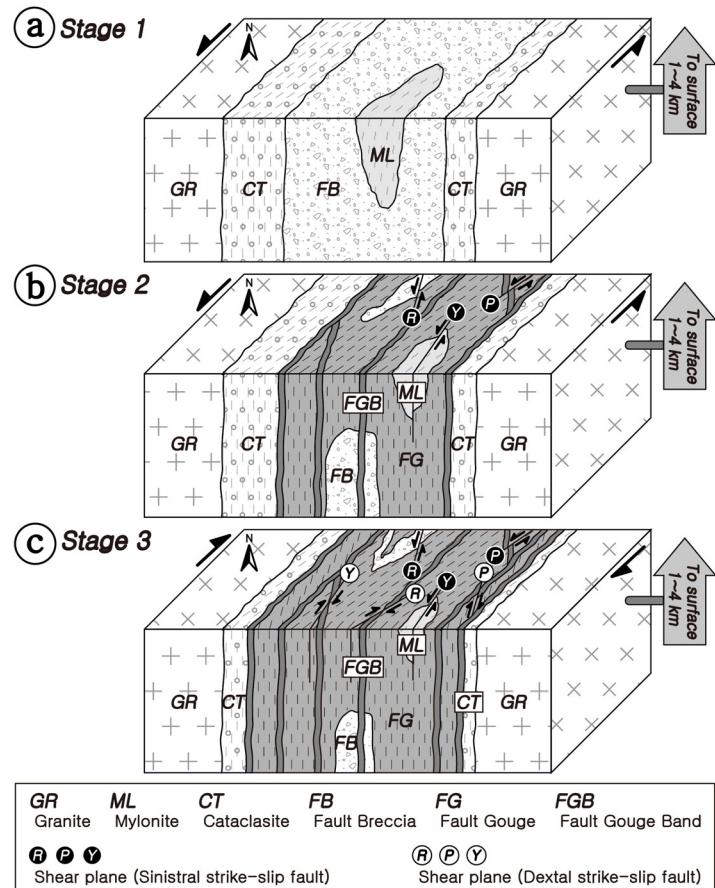


Fig. 18. 3D schematic diagram of the evolution of the fault core across the Keumwang fault and characteristic features of internal structure.

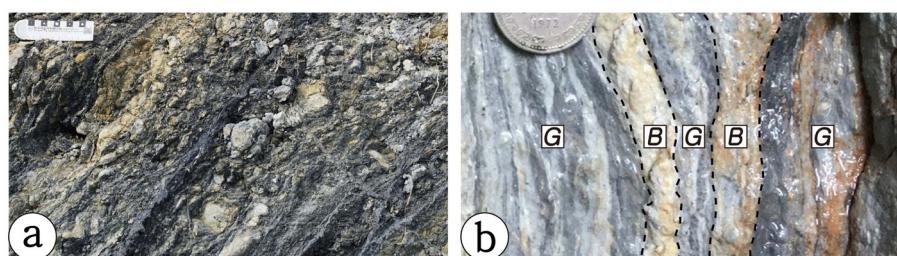


Fig. 19. (a) Fault breccia dominated layer deformed by distributed crush brecciation. (b) Fault gouge dominated layer deformed by attrition brecciation. Symbols: B=fault breccia, G=fault gouge.

보고되었다(Kim and Lee, 2016).

연구지역에 발달한 A 지점 단층핵은 단층각력암의 상대적인 함량에 따라 단층각력암 우세대 3개와 단층비지 우세대 3개로 구분된다(그림 5). P-전단면과 평행하게 발달하는 P-엽리는 점토광물의 선택배향에 의해 방향성을 갖기 때문에, 운동감각 확인이 필요한 R-, 또는 P-전단면과 다르게 개별적으로 주 단층의 운동감각을 파악할 수 있다. 단층각력암 우세대 1(FB1) 내에 발달한 약 1~5 cm 폭의 각 단층비지띠에서 측정된 엽리의 방향은 N30°~40°E가 우세하며, P-엽리로 고려했을 때 좌수향 주향이동 단층운동이 우세하였음을 지시한다(그림 5). 단층비지 우세대 1(FG1) 내에 발달한 약 1~30 cm 폭의 각 단층비지띠에서 측정된 엽리의 방향은 N30°~80°E 방향이 우세하며 일부 N10°W 방향으로 발달되어 있다(그림 5). P-엽리 방향을 고려했을 때 N30°~80°E 방향의 엽리는 좌수향 주향이동 단층운동의 결과라고 해석되며, 일부 단층비지띠에 발달한 N10°W 방향의 엽리는 우수향 주향이동 단층운동 중에 형성된 것으로 판단된다. 단층비지 우세대 3(FG3) 내에 발달한 약 1~10 cm 폭의 각 단층비지띠에서 측정된 엽리의 방향은 N40°~50°E 방향이 가장 우세하며 그 외 N10°W~N10°E 방향으로 발달되어 있다(그림 5). P-엽리 방향을 고려했을 때 N40°~50°E 방향의 엽리는 좌수향 주향이동 단층운동을 지시하며, N10°W~N10°E 방향의 엽리는 우수향 주향이동 단층운동을 지시한다. A 지점 단층핵에 발달한 단층비지띠에서 측정한 엽리의 방향 분석 결과, 좌수향 주향이동 단층운동 중에 형성된 단층비지띠가 훨씬 우세하며, 일부 우수향 주향이동 단층운동을 지시하는 단층비지띠가 발달한 것으로 해석된다.

연구지역에 발달한 B 지점 단층핵은 단층각력암의 상대적인 함량과 단층비지에 발달한 엽리에 따라 단층각력암 우세대 1개와 단층비지 우세대 2개로 구분된다. 단층비지 우세대 2(FG2) 내에 발달한 약 1~10 cm 폭의 각 단층비지띠에서 측정된 엽리의 방향은 N30°W~N10°E 방향이 가장 우세하며 그 외 N80°W 방향으로 발달되어 있다(그림 9). P-엽리 방향을 고려했을 때 N30°W~N10°E 방향의 엽리는 우수향 주향이동 단층운동을 지시하며, N80°W 방향의 엽리는 좌수향 주향이동 단층운동을 지시한다. 특히, A 와 B 지점 단층핵에 발달한 60만 년 이내의 ESR 연

대를 보이는 단층비지띠에서 측정한 엽리는 N20°W~N40°E 방향이 우세하며(그림 20), 이는 P-엽리 방향을 고려했을 때 우수향 주향이동 단층운동을 지시한다. 따라서 금왕단층의 좌수향 주향이동 단층운동 시기는 쥐라기 후기 및 백악기부터 제3기까지로 추정되며, 제4기에는 우수향 주향이동 단층운동이 우세했던 것으로 해석된다(Kim and Lee, 2016). 연구지역에서는 제4기 이전에는 좌수향 주향이동 단층운동이 우세했지만(그림 18b), 60만 년 전 이후의 ESR 연대가 나온 단층비지띠들은 우수향 주향이동 단층운동 중에 형성된 것으로 해석된다(그림 18c, 20).

퐁암분지에 관입한 안산암(약 70~84 Ma)에 발달한 전단면의 방향을 분석하여 안산암 관입 이후에는 금왕단층의 운동감각이 좌수향에서 우수향 주향이동으로 변화했음을 보고되었다(Kim and Lee, 2016). 또한 한반도에 작용하는 수평압축응력방향이 마이오세(약 5~23 Ma)에는 남-북 방향, 후기 마이오세 이후에는 동-서 방향으로 변화했음을 보고되었으며 (Choi and Choi, 2007), 이는 전기 마이오세 동안 발생한 동해화장과 관련이 있는 것으로 보인다(Yoon, 1986). 금왕단층의 주향방향을 고려했을 때 중기 마이오세 이전 남-북 방향의 최대수평응력 하에서의 좌수향 주향이동 단층운동이 이후 동-서 방향의 최대수평응력 하에서 우수향 주향이동 단층운동으로 변화된 것으로 해석된다. 특히 60만 년 전 이후에 형

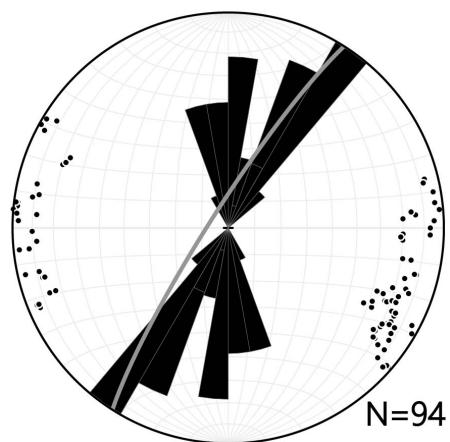


Fig. 20. Rose diagram showing the orientation of foliations developed in fault gouge bands which have the ESR ages in the Quaternary period. A great circle in the stereoplots shows the average orientation of the fault gouge bands.

성되거나 재활동한 단층비지띠에서 측정한 엽리의 방향은 P-엽리의 방향을 고려했을 때 우수향 주향이 동 단층운동을 지시한다(그림 20). 단층핵의 경계부에서 채취한 시료의 ESR 연대는 A 지점에서 약 21, 28만 년 전, B 지점에서 약 20만 년 전이며(그림 12, 13), 단층핵의 양쪽 경계부에서 마모작용에 의해 새로운 단층비지가 추가되면서 단층핵의 폭이 넓어진 것으로 해석된다. 단층핵 A 지점에 발달한 칼집습곡의 날개부분에서 채취한 시료의 ESR 연대는 약 27만 년 전이며, 이 시기에 단층비지띠가 재활동한 뒤 단층핵의 경계부가 재활동한 약 22만 년 전에 형성

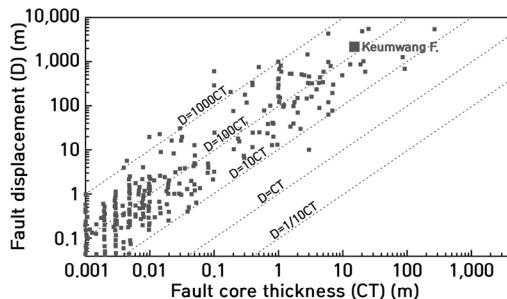


Fig. 21. Correlation of fault displacement and fault core thickness (log-log scale; modified from Fossen, 2010).

된 것으로 추정된다(그림 12).

연구지역에 발달한 단층핵의 폭은 평균 약 15 m이고, 파쇄암의 폭은 수백 m로 추정된다(홍청군 및 횡성군 일대 약 150~900 m; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012). 이는 Scholz (1988)의 깊이에 따른 단층암의 폭에 대한 모델과 일치한다(그림 17). 연구지역 일대에 발달한 금왕단층의 총 변위는 흑운 모화강암과 편마암의 경계를 기준으로 2,500 m 이상으로 추정된다(Kee *et al.*, 2010). 단층핵의 폭과 단층변위 사이에는 상관관계가 존재하며, 단층변위 100 m까지의 단층들의 자료에 의하면 단층핵의 폭은 단층변위의 약 1/100이다(그림 21; Fossen, 2010). 연구지역의 단층핵의 폭 약 15 m와 단층변위 2,500 m를 그림 21에 입력하였으며, D=100CT 선상에 도시되어 세계 다른 단층들의 통계와 비교적 잘 부합된다(그림 21).

5.3 금왕단층의 60만 년 전 이후의 시·공간적 활동형태

인제군 일대에 발달한 금왕단층의 시·공간적 활동형태를 해석하기 위해 이번 ESR 연대측정결과와 선행 연구로 언더진 ESR 연대측정결과(Kim, 2018)

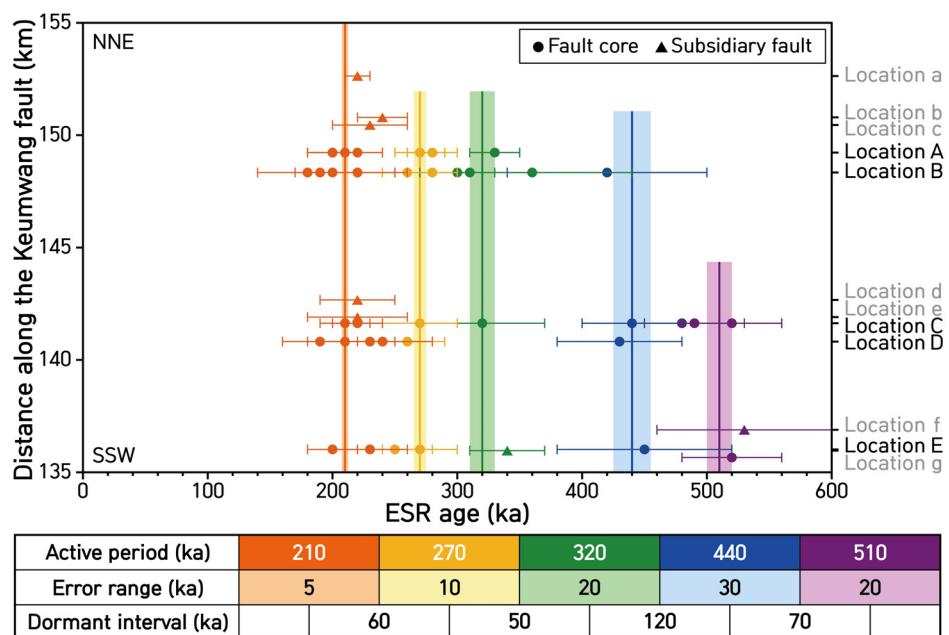


Fig. 22. Space-time activity patterns of the Keumwang fault at the Inje-gun area. ESR dating sites in this study are locations a, b, c, A, B and in the previous study are locations d, e, C, D, f, g (modified from Kim, 2018).

를 통합하여 비교·분석하였다(그림 22, 23). 그림 22에는 연구지역에 발달한 단층핵 두 지점(Location A & B), 부수단층 세 지점(Location a, b & c)과 Kim (2018)에 의한 연구지역 남쪽에 발달한 단층핵 세 지점(Location C, D & E), 부수단층 네 지점(Location d, e, f & g)에 대한 결과들이 도시되어 있다. 원은 단층핵에서 구한 ESR 연대, 세모는 부수단층에서 구한 ESR 연대를 나타낸다. 가로 실선은 각 ESR 연대의 오차범위, 굵은 세로 막대는 각 지점의 ESR 연대를 비슷한 연대끼리 그룹화하여 구한 가중평균값으로 금왕단층의 재활동시기를 의미하며, 막대의 폭은 가중평균값의 오차범위를 나타낸다. 여기서 재활동시기는 고지진의 발생횟수와 관계없이 단층운동이

집중되었던 시기만을 의미한다. Kim (2018)의 ESR 연대 중 D 지점 단층핵에서 채취한 두 개의 단층비 지 시료(그림 23의 시료 14, 15)는 다른 시료들에 비해 높은 U, Th, K 함량으로 단위시간당 조사율(dose rate)이 현저히 높아 ESR 연대가 짧어지는 경향이 있었다. 따라서 같은 D 지점 단층핵에서 채취한 단층비지 시료 16개의 U, Th, K 함량 평균값을 통해 구한 단위시간당 조사율을 이용하여 ESR 연대를 다시 산출하였다. ESR 연대를 구한 시료는 이 연구에서 채취한 시료 32개 중 26개, Kim (2018)의 연구에서 채취한 시료 47개 중 27개로, 총 81개 중 53개이다. 나머지 28개 시료는 ESR 신호가 포화되어 연대를 구할 수 없었다. 그림 22에서 ESR 연대의 개수는

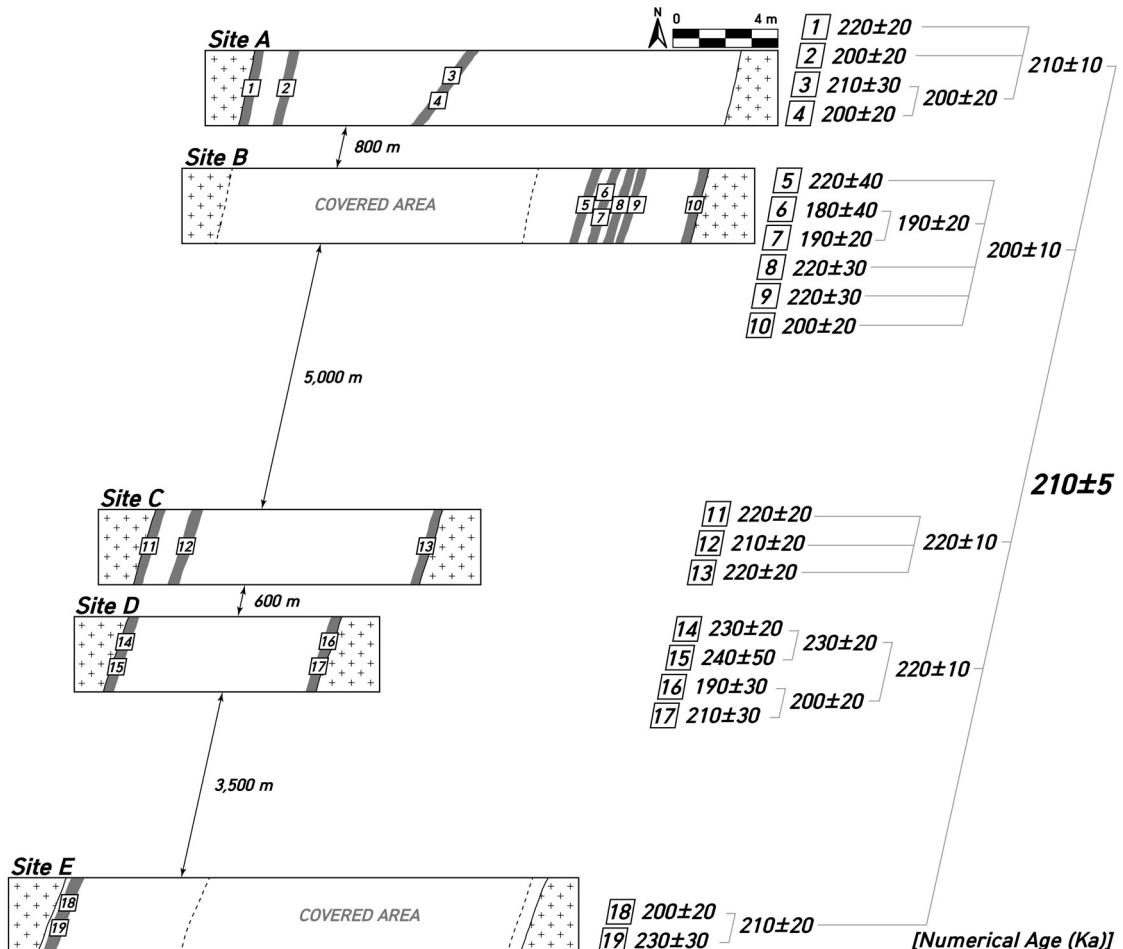


Fig. 23. Schematic diagrams of the fault cores in this study area and previous study area at activity period of 210 ka. The numbered boxes in the diagram showing sampling locations and ESR ages. ESR data at locations C, D, E are from Kim (2018).

약 21만 년 전의 활동기에는 24개, 약 27만 년 전의 활동기에는 14개, 약 32만 년 전의 활동기에는 6개, 약 44만 년 전의 활동기에는 4개, 약 51만 년 전의 활동기에는 5개로 오래된 활동기일수록 줄어드는 경향을 보이며, 60만 년 전 이전의 단층비지 ESR 연대는 구할 수 없었다(그림 22). 이는 약 21, 27만 년 전에 단층운동이 활발했던 것이 아닌, ESR 연대측정법 특성상 같은 단층비지띠가 여러 번 재활동할 경우 이전의 활동기록은 지워지고 마지막 활동기록만 남기 때문이며, 다른 활동기에도 고지진의 횟수는 비슷했던 것으로 추정된다. 활동기는 가중평균값으로 구했으며, 최근 활동기일수록 입력한 데이터 수가 많아 오차범위는 작아지게 된다(그림 22). ESR 신호는 지하 약 70 m 이상의 깊이에서 0이 되고, 이를 한반도의 웅기율(약 0.08~0.25 mm/year)에 적용하여 계산하였을 때 약 20만 년으로 나타난다(Kim et al., 2006; Yang, 2006; Synn et al., 2013). 따라서 지표 부근에서 채취된 단층암 시료는 20만 년 이전의 ESR 연대를 보이지 않는다(그림 22). 종합적으로, 인제군 일대에 발달한 금왕단층은 약 51만 년 전 이후 5번의 활동기에 집중되어 재활동한 것으로 해석되며, 약 5~12만 년의 재발주기를 보인다(그림 22; 약 21만 년 전, 약 27만 년 전, 약 32만 년 전, 약 44만 년 전, 약 51만 년 전). 부수단층은 단층핵이 재활동할 당시 일부 함께 활동한 것으로 해석된다. 약 32만 년 전과 약 44만 년 전 사이의 재발주기는 12만 년이며, 그 이전과 이후의 재발주기는 5~7만 년으로 활동기들이 집중적으로 분포하고 있다(그림 22).

그림 23에는 인제군(Kim, 2018) 및 설악산 일대에 발달한 단층핵 5개 지점에서 마지막 재활동시기인 약 21만 년 전에 활동한 단층비지띠의 위치가 도시되어 있다(그림 23). A 지점에서는 단층핵 북서쪽 경계부에 발달한 단층비지띠와 단층핵 내부에 발달한 R-전단 방향의 단층비지띠가 재활동하였다. B 지점에서는 단층핵 남동쪽 경계부에 발달한 단층비지띠와 단층핵 내부에 발달한 Y-전단 방향의 단층비지띠들이 재활동하였다. C 지점에서는 단층핵 양쪽 경계부에 발달한 단층비지띠가 재활동하였다. D 지점에서는 단층핵 양쪽 경계부에 발달한 단층비지띠가 재활동하였다. E 지점에서는 단층핵 북서쪽 경계부에 발달한 단층비지띠가 재활동하였다.

단층핵의 북서쪽 경계부에 발달한 단층비지띠는 경계부가 발견되지 않은 B 지점을 제외한 모든 지점에서 재활동한 것으로 해석된다(그림 23). 단층핵의 남동쪽 경계부에 발달한 단층비지띠는 B, C, D 지점에서 재활동하였으나(최소 5.6 km), A, E 지점은 확인되지 않는다(그림 23).

각 지점에서의 재활동한 단층비지띠의 폭과 단층핵의 폭의 비율을 계산하였을 때, A 지점은 약 23 m 폭의 단층핵 중 약 2.39%인 약 55 cm 폭의 단층비지띠, B 지점 약 7 m 폭의 발견된 단층핵 중 약 7.86%인 약 55 cm 폭의 단층비지띠, C 지점은 약 17 m 폭의 단층핵 중 약 2.35%인 약 40 cm 폭의 단층비지띠, D 지점은 약 11 m 폭의 단층핵 중 약 2.73%인 약 30 cm 폭의 단층비지띠, E 지점은 약 7 m 폭의 발견된 단층핵 중 약 5.00%인 약 35 cm의 단층비지띠가 제4기에 재활동한 것으로 추정된다. 이를 종합하면 인제군 및 설악산 일대에서 약 60만 년 전 이후에 재활동한 단층비지띠의 비율은 금왕단층 단층핵 전체의 약 2~8%이다.

6. 결 론

강원도 인제군 기린면 일대에 발달한 금왕단층에 대한 이번 연구 결과와 선행 연구들을 비교, 분석한 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 연구지역에 발달한 금왕단층은 N26°E/81°NW 방향으로 발달된 주향이동단층으로, 쥐라기 흑운모화강암에서 유래된 파쇄암 내에 약 11~23 m 폭으로 단층각력암 우세대와 단층비지 우세대로 구성된 단층핵이 발달되어 있다.

둘째, 연구지역에 발달한 단층핵의 진화과정은 다음과 같다. 1) 단층활동 중에 분산 분쇄 각력암화 작용이 우세하게 작용하여 암편 함량이 약 70% 이상인 단층각력암이 형성되었으며, 입자 경계 마찰 미끌림에 의해 암편의 원마도가 양호해졌다. 2) 전단변형이 집중됨에 따라 전단면과 단층비지띠가 발달하였다. 3) 단층운동이 계속됨에 따라 전단변형이 집중된 구간에서 마찰 각력암화 작용과 마모작용이 우세하게 작용하여 기질함량이 높은 단층비지 우세대가 단층각력암 내부에 형성되었다. 약 10% 내외의 암편들이 단층비지에 떠있는 형태로 분포하고 있으며, 점토 광물의 선택적 배향에 의해 엽리가 발달하였다.

셋째, 연구지역에 발달한 금왕단층의 단층핵 두 지점, 부수단층 세 지점과 Kim (2018)의 단층핵 세 지점, 부수단층 네 지점에서의 채취한 시료 총 81개 중 28개는 신호가 포화되어 연대를 정할 수 없었고 나머지 53개에서 ESR 연대를 분석하였다. 그 결과, 강원도 인제군 기린면 일대에 발달한 금왕단층은 약 21만 년 전, 약 27만 년 전, 약 32만 년 전, 약 44만 년 전, 약 51만 년 전으로 5번의 활동기에 집중되어 재 활동하였으며 약 5~12만 년의 재발주기를 보인다. 특히 약 21만 년 전에는 단층핵 다섯 개 지점 중 경계 부가 발견되지 않은 B 지점 외 모든 지점의 북서쪽 경계부에서 재활동한 것으로 해석된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상·지진See-At기술개발연구(KMI2018-02010), 강원대학교 학술연구조성비(연구 과제번호 D1001551-01-01)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 행정안전부의 지진방재분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다. 세심한 검토로 논문의 질을 향상시켜주신 기원서 박사님과 익명의 심사위원분들께 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Bae, H.K. and Lee, H.K., 2014, Space-time patterns of fault activity of the Keumwang fault developed in the Jincheon-Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 735-752 (in Korean with English abstract).
- Berthe, D., Choukroune, P. and Jegouzo, P., 1979, Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. Journal of Structural Geology, 1, 31-42.
- Chester, F.M. and Logan, J.M., 1987, Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl Fault, California. Journal of Structural Geology, 9(5-6), 621-634, IN5-IN6.
- Choi, J.M., 2019, Internal structure and Quaternary space-time activity patterns of the Keumwang fault at Buk-ri, Girin-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, unpublished thesis (in Korean with English abstract).
- Choi, J.M. and Lee, H.K., 2017, Active form of the Pillye fault and Keumwang fault at Inje-gun, Gangwon-do. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 25-28, 324 p (in Korean).
- Choi, J.M. and Lee, H.K., 2018, Internal structure and Quaternary time-space activity patterns of the Keumwang fault at Buk-ri, Girin-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Gyeongju, October 24-27, 138 p (in Korean).
- Choi, P.Y. and Choi, Y.S., 2007, Stress model of the opening of the Cretaceous Eumseong basin. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources Bulletin, 11, 3-16.
- Choi, S.J., Kim, B.C., Chun, H.Y. and Kim, Y.B., 1995, Charophytes from the Chopyeong formation (Cretaceous) of the Eumsung basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 31, 523-528 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.S., 1996, Structural evolution of the Cretaceous Eumseong basin, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 158 p (in Korean with English abstract).
- 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-Science Reviews, 101, 225-249.
- Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996, Structural geology of rocks and regions, John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, 212 p.
- Fossen, H., 2010, Structural Geology. Cambridge University Press.
- Grün, R., 2009, The DATA program for the calculation of ESR age estimates on tooth enamel. Quaternary Geochronology, 4, 231-232.
- Hong, N.R., 2013, Structural features and movement history of the Keumwang fault at Hongcheon-gun, Gangwon-do, Korea. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Hong, N.R. and Lee, H.K., 2012, Structural features and ESR dating of the Keumwang fault at Uemseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 473-489 (in Korean with English abstract).
- Ikeda, Y., Shimazaki, K. and Yamazaki, H., 2000, KATSUDANSO TOWA NANI KA. (Chang, T.W., Trans.) Kyungpook National University Press, 41-68 (in Korean).
- Jang, B.G. and Lee, H.K., 2012, Structural features of fault rocks developed in the Keumwang Fault at Hakgok-ri, Hoengseong-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 11-26 (in Korean with English abstract).
- Kee, W.S., Kim, H.C., Kim, B.C., Choi, S.J., Park, S.I. and Hwang, S.K., 2010, Geological report of the Seoraksan sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 6-49 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.G., Chi, J.M., Lee, D.Y. and So, C.S., 1975,

- Geological report of the Hyeon-ri sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Yang, D.Y., Choi, W.H. and Kim, J.C., 2006, Estimation of uplift rate based on Morphostratigraphy and Chronology of Coastal terraces in the SE part of Korean Peninsula. *The Korean journal of Quaternary research*, 20, 51-57.
- Kim, M.J., 2018, Activity features of the Keumwang fault in the Inje-gun area, Gangwon-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J. and Lee, H.K., 2016, Internal structure and movement history of the Keumwang fault. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 210-230 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J. and Lee, H.K., 2017, Quaternary activity patterns of the Keumwang fault in the Wonju-si area, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 79-97 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J. and Lee, H.K., 2020, ESR dating of fault gouge-review. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 211-234 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K., 2010, Structural features of the Keumwang fault zone at Sangnam-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. *Journal of the geological Society of Korea*, 46, 561-576 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K. and Kim, H.S., 2005, Comparison of structural features of the fault zone developed at different protoliths crystalline rocks and mudrocks. *Journal of Structural Geology*, 27, 2099-2112.
- Lee, H.K. and Kim, J.Y., 2011, Microstructural features within the fault rocks in the Keumwang fault zone at Sangnam-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 395-409 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1995, Fractal clustering of fault activity in California. *Geology*, 23, 377-380.
- Lexa, O., Cosgrove, J. and Schulmann, K., 2004, Apparent shear-band geometry resulting from oblique fold sections. *Journal of Structural Geology*, 26, 155-161.
- Logan, J.M., 1979, Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones. In Proceedings of conference VIII-analysis of actual fault zones in bedrock, 305-343.
- Min, G.H., 2020, Structural features and activity patterns of the Keumwang fault developed in the Saenggeuk-myeon and Gamgok-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Min, G.H. and Lee, H.K., 2019, Structural features and activity patterns of the Keumwang Fault developed in the Saenggeuk-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 23-26, 306 p (in Koreans).
- Park, J.R. and Lee, H.K., 2012, Internal structure and microstructural features of Keumwang fault zone at Jwaun-ri, Hongcheon-gun, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 27-47 (in Korean with English abstract).
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983, *The Techniques of Modern Structural Geology: Strain Analyses. Course Technology*.
- Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H. and White, S.H., 1986, Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 3-30.
- Ryang, W.H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Scholz, C.H., 1988, The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting. *Geologische Rundschau*, 77, 319-328.
- Sibson, R.H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133, 191-213.
- Sibson, R.H., 1986, Brecciation processes in fault zones: inferences from earthquake rupturing. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 159-175.
- Synn, J.H., Park, C. and Lee, B.J., 2013, Regional distribution pattern and geo-historical transition of In-situ stress fields in the Korean peninsula. *Tunnel and Underground Space*, 23, 457-469 (in Korean with English abstract).
- Trouw, R.W. and Passchier, C.W., 2005, *Microtectonics*. Springer Science & Business Media.
- Weon, H.J. and Lee, H.K., 2018, ESR age and characteristic features of the Keumwang Fault developed in the Ssangjeong-ri, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 335-357 (in Korean with English abstract).
- Yang, J.S., 2006, Quaternary fault activity in the southeastern part of the Korean peninsula. Ph.D. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea. Essays in Geology Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume, 637-644.