



경기도 포천시 내촌면~화현면 일대에 발달한 왕숙천단층의 지질구조 특성 및 ESR 연대

한중원 · 이희권[‡]

강원대학교 지질학과

요 약

경기도 포천시 내촌면~화현면 일대에 고원생대 흑운모편마암을 관통하는 왕숙천단층이 발달되어 있다. 약 8 m 폭의 단층핵은 엽리가 뚜렷하게 발달된 암회색 단층비지와 단층각력암으로 구성되어 있다. 축적된 응력변형의 산물인 단층비지 내의 S-엽리는 전단변형량이 증가함에 따라 단층면 방향을 향해 회전하는 경향을 보이며, 그 방향은 우수향 주향이동운동을 지시하고 있다. 또한 여러 전단면과 전단띠들의 방향 및 운동감각 역시 우수향 주향이동운동을 일관되게 나타낸다. 단층핵과 이를 구성하는 단층암의 형성과 발달은 점진적이고 순차적인 과정을 보여준다. 첫 번째 단계에서는 분산 분쇄 각력암화작용에 의해 기반암에 단열면이 형성되거나 기존의 단열면에 미끌림이 발생했으며, 두 번째 단계에서 전단변형이 집중됨에 따라 전단면 및 전단띠가 형성되었다. 세 번째 단계에서는 지속적인 마찰 각력암화작용으로 단층비지의 양이 증가하여 전단띠의 두께가 두꺼워지면서 전단띠들이 서로 연결되고 합쳐져 단층비지대가 형성된다. 마지막 네 번째 단계에서는 전단변형량이 증가함에 따라 점토광물들이 선택적으로 배향하여 S-엽리가 형성되었다. 단층핵과 부수단층에서 채취한 단층비지 시료로부터 얻어진 ESR 연대는 약 59만 년 전~약 27만 년 전의 범위에 있으며 활동기와 비활동기로 나누어진다. 이러한 ESR 연대측정 결과는 왕숙천단층이 제4기에도 장주기(약 12~6만 년)를 가지고 계속해서 활동하였음을 지시한다.

주요어: 왕숙천단층, 단층핵, 단층비지, 제4기 단층활동, ESR 연대

Jong-Won Han and Hee-Kwon Lee, 2019, Structural behavior and ESR age of the Wangsukcheon Fault developed in Naechon-myeon and Hwahyeon-myeon area, Pocheon, Gyeonggi, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 377-401

ABSTRACT: The Wangsukcheon Fault is developed in paleoproterozoic biotite gneiss at the Naechon-myeon and Hwahyeon-myeon area, Pocheon, Gyeonggi, Korea. About 8 m thick fault core consists of foliated dark-gray fault gouge and fault breccia zones. In the Wangsukcheon fault, the S-foliation appears to be related to the accumulation of finite strain and to rotate towards the fault plane orientation with an increase in shear strain. The orientation of S-foliations observed in the fault rocks developed within the Wangsukcheon fault indicates that the fault has undergone dextral movement. The sense of shear on individual shear surfaces and shear bands with respect to each other and to the boundaries of the fault core, appear to be indicators of the dextral-movement of the fault. The generation and development of the fault core and equivalent fault rocks are considered progressive and sequential. At the first stage, there occur fracturing of host rocks or movement of preexisting fractures by distributed crush brecciation. At the second stage, the shear strain is localized and shear surfaces and shear bands are developed. At the third stage, progressive attrition brecciation in the shear bands and rock interfaces increases the amount of gouge materials and expands the thickness of the shear bands. The fault gouge zone is developed by linking and coalescing the shear bands. At the fourth stage, with the increase of shear strain, S-foliation defined by the preferred orientation of clay within the gouge zone has formed. ESR dates from both the fault core and subsidiary faults range from 590 to 270 ka, and show temporal clustering into active and inactive periods. Results from this study suggest that the long-term (120~60 ka) cyclic fault activities of the Wangsukcheon fault continued during the Quaternary Period.

Key words: Wangsukcheon fault, fault core, fault gouge, Quaternary fault activity, ESR age

(Jong-Won Han and Hee-Kwon Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

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

1. 서 론

일반적으로 단층대의 중심부는 변위가 가장 많이 집중되어 모암의 형태를 거의 확인할 수 없는 단층 핵이 발달하며, 단층핵의 양쪽은 단열이 집중되어 소 규모의 부수단층, 습곡, 세맥 등의 2차적인 지질구조로 구성된 단층손상대가 발달하며(Chester *et al.*, 1993; Caine *et al.*, 1996; Lee and Schwarcz, 1996; Cowie and Shipton, 1998; Schulz and Evans, 2000; Billi *et al.*, 2003), 그 중 단층핵은 일반적으로 렌즈상의 모암 잔유물과 단층비지로 구성된다(Moore *et al.*, 1986; Faulkner *et al.*, 2003; Davis *et al.*, 2011). 단층 핵과 단층손상대의 지질구조는 변형특성에 따라 다른 특성을 보여주기 때문에 이를 파악하는 것은 단층의 발달과정을 이해하는데 매우 중요하다(Caine *et al.*, 1996; Evans *et al.*, 1997; Faulkner *et al.*, 2003; Lee and Kim, 2005; Bastesen *et al.*, 2009; Fossen, 2010; Park and Lee, 2012; Cheon *et al.*, 2017, 2019).

왕숙천단층은 강원도 철원군 서면 일대부터 경기도 남양주시 오남읍 일대까지 약 70 km의 연장성을 가지는 북북동-남남서 내지 북동-남서 방향의 우수향 주향이동 단층으로 알려져 있다(Kim, 1973; Kee *et al.*, 2005; Koh and Song, 2005; Lee *et al.*, 2006; Hwang and Kihm, 2007; Song and Cho, 2007; Kim *et al.*, 2013; Bae and Lee, 2016; Han, 2019). 왕숙천단층은 인구가 밀집되어 있는 수도권 일대를 관통하지만 대부분 제4기 충적층으로 피복되어 있기 때문에 단층노두를 직접적으로 관찰하기 쉽지 않다(Koh and Song, 2005; Lee *et al.*, 2006; Bae, 2016; Bae and Lee, 2016). Koh and Song (2005)과 Kee (2000)는 왕숙천단층의 운동감각을 좌수향 주향이동운동으로 해석하였으나, 그 외의 학자들은 대부분 우수향 주향이동 운동이 우세하였다고 주장하였다(Lee *et al.*, 2006; Hwang and Kihm, 2007; Kee *et al.*, 2009; Bae and Lee, 2016).

왕숙천단층에 대한 기존 ESR 연대측정 연구에 의하면, “활성단층지도 및 지진위험 지도 제작” 보고서에서 Lee (2011)는 제4기 동안 적어도 3회(약 44만 년 전, 약 26만 년 전, 약 16만 년 전)의 단층운동이 발생한 것으로 보고하였다. Bae and Lee (2016)는 적어도 6회의 단층운동(약 96만 년 전, 약 63만 년 전, 약 49~53만 년 전, 약 38~44만 년 전, 약 26~29만

년 전, 약 21~22만 년 전)이 발생하였으며, 단층운동이 남서쪽에서 북동쪽으로 이동한 것으로 해석하였다.

이번 연구의 목적은 1) 왕숙천단층의 운동감각 및 지질구조 특성을 밝히며, 2) 단층핵의 진화과정을 규명하고 3) 단층암의 특성과 단층비지 시료로 ESR 연대측정을 실시하여 왕숙천단층의 제4기 단층운동 특성을 해석하는데 있다.

2. 연구지역의 지질

연구지역인 경기도 포천시 내촌면에서부터 화현면 일대에는 고원생대 흑운모편마암을 기반암으로 하여, 중생대 트라이아스기 반상화강암, 쥐라기의 흑운모화강암이 관입하였으며, 이들을 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다(그림 1).

흑운모편마암은 석영과 장석으로 이루어진 규장질대와 흑운모로 이루어진 고철질대가 교호하는 성분열리가 발달되어 있으며, 부분적으로 안구상의 석영 및 장석으로 이루어진 반상변정이 발달하여 안구상 편마암의 형태를 보이기도 한다. 현미경하에서는 석영, 사장석, 흑운모 등이 주 구성광물을 이루며, 소량의 백운모가 관찰된다. SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 자료에 의하면 흑운모편마암은 고원생대 초기인 $2,096 \pm 11$ Ma ~ $1,867 \pm 14$ Ma 기간 동안 퇴적된 지층이며, 약 1,870 Ma 전에 광역변성작용을 겪었던 것으로 보고되었다(Cho and Kim, 2003; Lee *et al.*, 2006).

연구지역의 중앙부에 분포하고 있는 트라이아스기 반상화강암은 경기도 가평군 조종면 일대에서 쥐라기 흑운모화강암과 단층 접촉관계를 가지고 있는 것으로 보고되었다(그림 1; Lee *et al.*, 2006). 반상화강암에는 2~5 cm 크기의 장석 및 석영 반정이 관찰된다. 현미경 하에서 석영, 흑운모, 정장석, 사장석 등이 주 구성광물을 이룬다. SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 자료에 의하면, 반상화강암은 약 237 ± 1 Ma 에 관입한 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2006).

연구지역의 북서부에 분포하고 있는 쥐라기의 흑운모화강암은 고원생대 흑운모편마암과 관입관계를 이루고 있으며, 중립질 내지 조립질의 광물로 구성되어 있다. 현미경 하에서 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모 등이 주 구성광물을 이루며, 소량의 백운모가 관찰된다. SHRIMP U-Pb 연대측정 자료에 의하면, 흑

운모화강암의 관입시기는 약 184.0±1.5 Ma로 보고 되었다(Kee *et al.*, 2005).

석된다.

3. 왕숙천단층의 단층암 특성

3.1 단층핵

연구지역의 항공사진 및 DEM에서 관찰되는 선형구조는 N25°E 방향으로 발달하고 있다(그림 2a). 선형구조를 따라 야외지질조사를 실시한 결과, 총 3개 지점(그림 2의 a, b, c)에서 단층핵이 발견되었으며, 기존의 연구자료(2개 지점; 그림 2의 d, e)와 비교·분석한 결과 이 선형구조가 왕숙천단층의 자취(trace)로 추정된다(그림 1, 2). 연구지역 내에서 왕숙천단층은 폭이 약 3~8 m인 하나의 연속된 단층핵(그림 2의 a, b, c)이 발달되어 있으며, 그 외 지역에서는 독립된 단층핵 노두(그림 2의 d, e)가 노출되어 있다. 지질도 및 DEM에서 단층핵이 발견된 5개 지점의 노두를 연결하여 결정된 왕숙천단층의 주향은 약 N25°E이다. 단층핵의 노두에서 단층비지대와 기반암과의 경계부에 발달되어 있는 단층면들의 방향은 N28~36°E/85~88°NW 범위이며, 평균적으로 약 N32°E/87°NW의 방향성을 가지는 것으로 분

3.1.1 A 지점

A 지점 (37°45'57.47"N, 127°13'48.73"E)에 발달되어 있는 약 8 m 폭의 단층핵은 고원생대 흑운모편마암으로부터 유래한 2 조의 단층비지대와 1 조의 단층각력암대로 구성되어 있다(그림 3a, 3b). 암회색의 단층비지대는 변성암의 조직이 완전히 사라졌으며, 세립질의 입자크기로 구성되어 있다. 단층비지는 고화되어 있지 않고 렌즈상의 모암 암편들이 주 단층 방향으로 배열되어 있다(그림 3a, 3b). 단층핵의 남동쪽 경계부에는 모암과 단층비지대 사이에 주 단층면이 선명하게 관찰된다(그림 4a). 북서쪽 경계부에는 암회색의 단층비지대와 단층각력암대 사이에 폭 약 3~10 cm의 녹색 단층비지띠가 발달되어 있으며, 녹색 단층비지띠와 단층각력암 사이에 주 단층면이 발달하고 있다(그림 4b).

단층비지에는 점토광물의 선택배향에 의한 망상형태의 S-엽리가 관통상으로 발달되어 있으며, 이 엽리면을 따라 잘 쪼개지는 성질이 있다. 이러한 구조들은 비늘구조(scaly fabric)라고 불린다(Vannucchi, 2019; 그림 5a). 변형을 받지 않은 렌즈상의 모암은

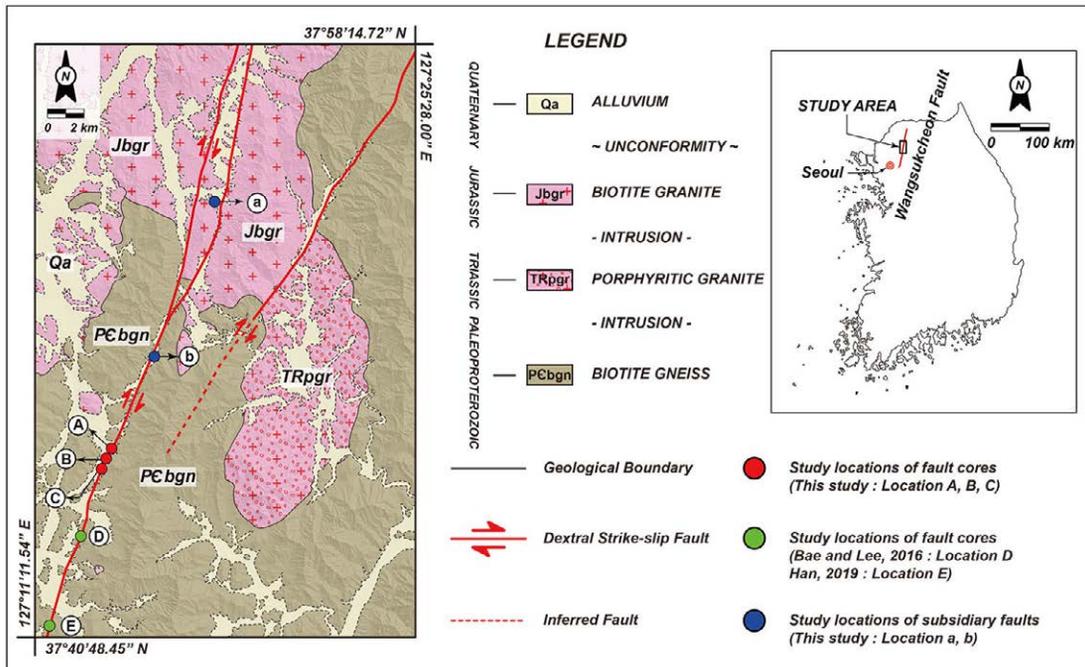


Fig. 1. Geological map of the study area showing the study locations of fault cores and subsidiary faults.

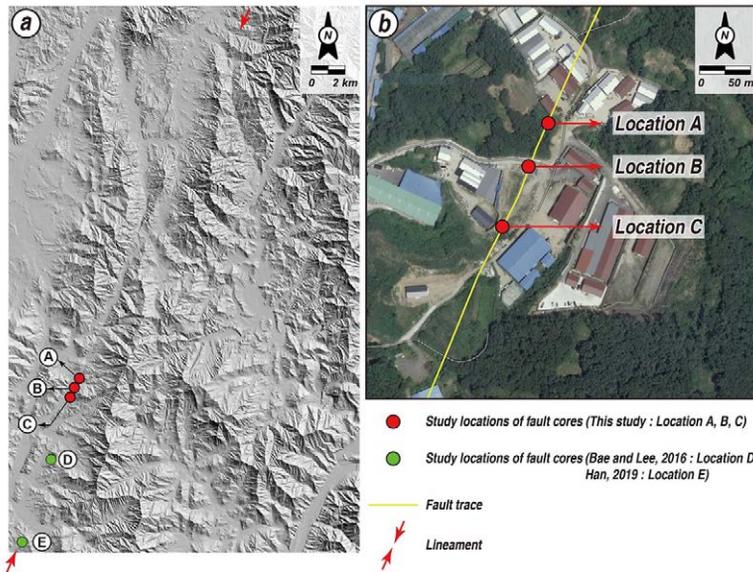


Fig. 2. Study locations of fault cores. (a) DEM image showing the lineament of the Wangsukcheon Fault. The study locations of the fault cores are located along the lineament of the Wangsukcheon Fault (the red arrows). The red dots represent the study locations of fault core. The green dots represent previous study locations of fault cores. (b) An aerial photograph showing the study locations of fault cores. The yellow line represents trace of the Wangsukcheon Fault.

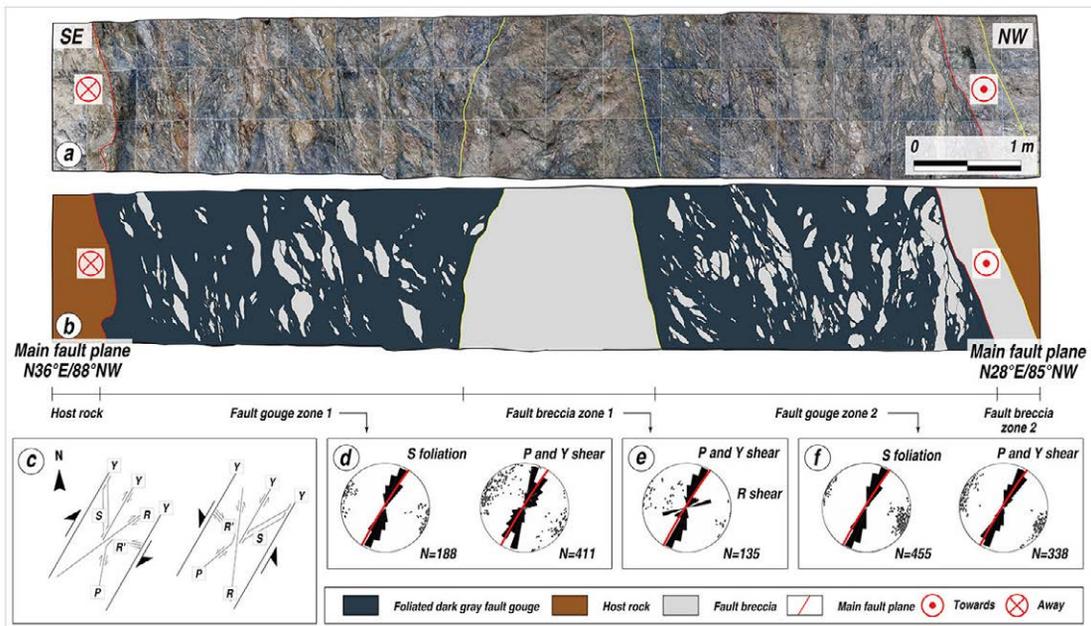


Fig. 3. (a), (b) Photographic mosaic and a simplified sketch of the cross-section of the fault core at the study location A. (c) The directional nomenclature and geometrical relationships of the structural elements (modified from Rutter *et al.*, 1986; Passchier and Trouw, 1996). (d) Stereoplots of foliations and shear planes within the fault gouge zone 1. (e) Stereoplots of shear planes within the fault breccia zone 1. (f) Stereoplots of foliations and shear planes within the fault gouge zone 2. A red great circle in the stereoplots shows the average orientation of the Wangsukcheon fault plane.

파코이드(Phacoid)라고 불리며, 이들은 엽리면과 평행하게 발달되어 있다(Vannucchi, 2019; 그림 5b, 5c). 단층비지 내의 엽리면 상에는 뚜렷한 단층조선이 다수 발달되어 있으며, 이는 엽리면을 따라 미끌림이 발생한 것을 지시한다(그림 5d). 단층비지 내에 발달한 S-엽리의 방향은 단층비지대 1에서 N10°~30°E의 주향과 62°~89°SE 혹은 63°~89°NW의 경사를 가지는 엽리면이 가장 우세하며(그림 3d), 단층비지대 2에서도 이와 비슷하게 N10°~20°E의 주향과 76°~89°SE 혹은 64°~89°NW 경사를 가지는 엽리면

이 가장 우세하다(그림 3f). 단층비지대 1과 2에 발달된 S-엽리의 방향을 전단감각을 나타내는 모식도와 비교한 결과(그림 3c, 3d, 3f), 왕숙천단층에서는 우수향 주향이동운동이 우세하였음을 지시한다.

노두 상에서 단층비지띠의 두께가 0.5 mm 이하면 전단면으로(그림 6a), 그 이상이면 전단띠(그림 6b)로 분류하였다. 전단감각을 나타내는 모식도(그림 7a)를 단층비지 내에 발달한 전단면(그림 7b, 7c, 7d, 7e)들과 비교한 결과, 우수향 주향이동 운동감각을 지시한다. 주 단층면의 주향과 평행한 방향으로

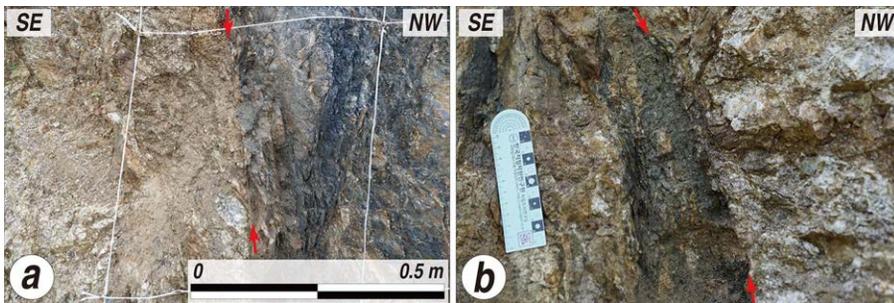


Fig. 4. Outcrop photographs of the main fault plane at the study location A. (a) The fault plane between biotite gneiss and foliated dark-gray fault gouge zone. (b) The fault plane between fault breccia and foliated greenish brown fault gouge zone. The red arrows represent fault surfaces.



Fig. 5. Photographs of scaly fabrics and phacoids developed in fault cores at the study location A. (a) Photograph of scaly fabrics developed in the Wangsukcheon Fault cores. (b, c) Photographs of part of fault gouge showing the foliations that define scaly fabric and phacoids of the host rock. (d) Slickenlines on the foliation surfaces indicating sliding along the foliation.

절단하여 평면상으로 만든 암석슬랩 상에서도 우수향의 주향이동 운동감각을 지시하는 Y-, P-, R-전단면 및 R'-전단면이 관찰된다(그림 8a). 렌즈상의 암

편들은 주로 Y-전단면이나 P-전단면 방향으로 배열되어 있으며, 길게 뻗은 암편의 꼬리(tail)들은 성분염리와 평행해지고 있다(그림 6b, 8a, 8b). 우수향의

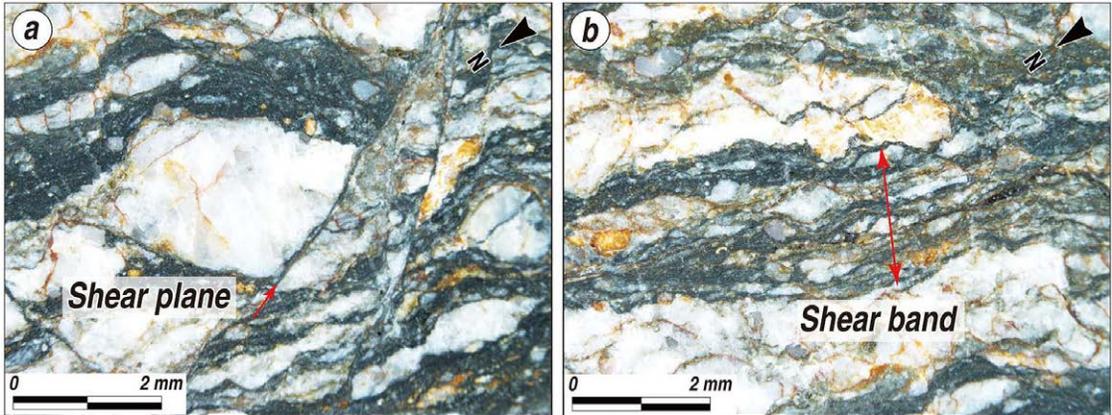


Fig. 6. Photographs of rock slab of the fault breccia at the study location A. (a) Shear plane; the red arrows represent shear plane. (b) Shear band; lenticular rock fragments suspended in the fault gouge band.

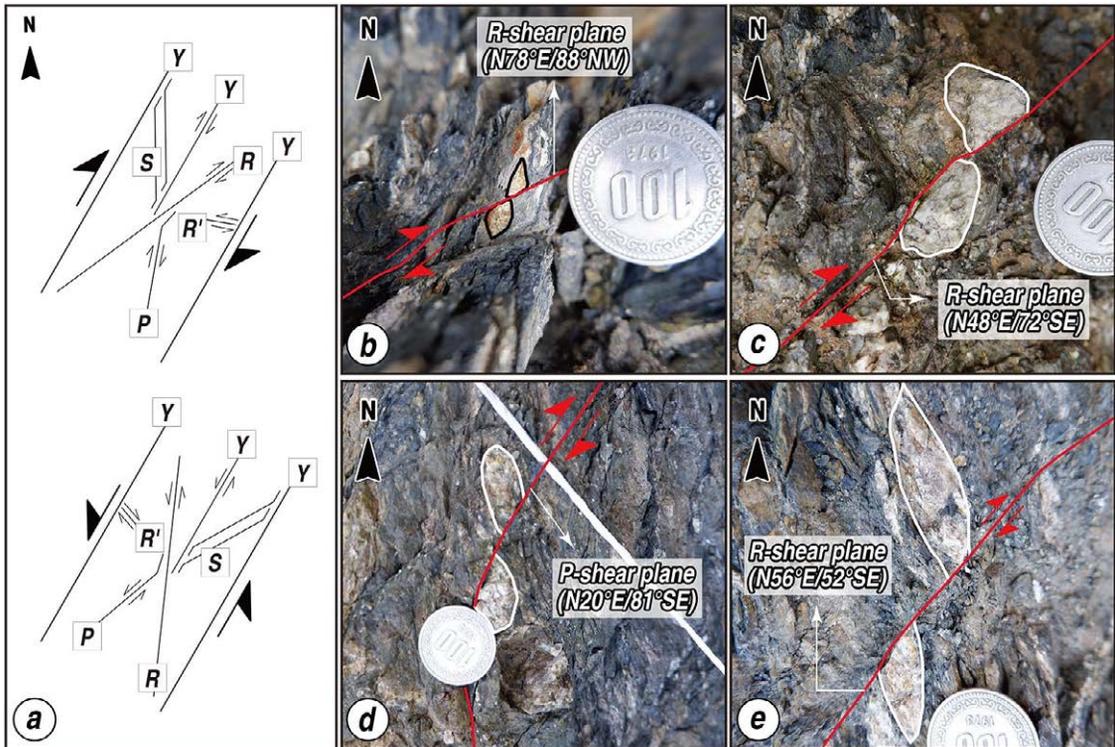


Fig. 7. Outcrop photographs of the shear planes showing dextral strike-slip movement at the study location A. (a) The directional nomenclature and geometrical relationships of the structural elements(modified from Rutter *et al.*, 1986; Passchier and Trouw, 1996). (b) A close-up photograph of R-shear plane at fault gouge zone 1. (c) A close-up photograph of R-shear plane at fault breccia zone 1. (d) A close-up photograph of P-shear plane at fault gouge zone 2. (e) A close-up photograph of R-shear plane at fault gouge zone 2.

주향이동운동을 지시하는 모식도와 전단면과 전단
띠의 방향을 비교·분석한 결과(그림 3c), 단층비지대
1에 발달되어 있는 전단면은 N10°~20°E의 주향과
56°~89°SE 혹은 43°~86°NW 경사를 가지는 P-전
단면과 N30°~40°E의 주향과 49°~89°SE 혹은 59°

~89°NW 경사를 가지는 Y-전단면이 가장 우세하
게 발달되어 있다(그림 3d). 단층각력암대 1에 발달
되어 있는 전단면은 N10°~30°E의 주향과 28°~
89°SE 혹은 61°~89°NW 경사를 가지는 P-전단면
및 Y-전단면, 그리고 N75°~85°E의 주향과 18°~

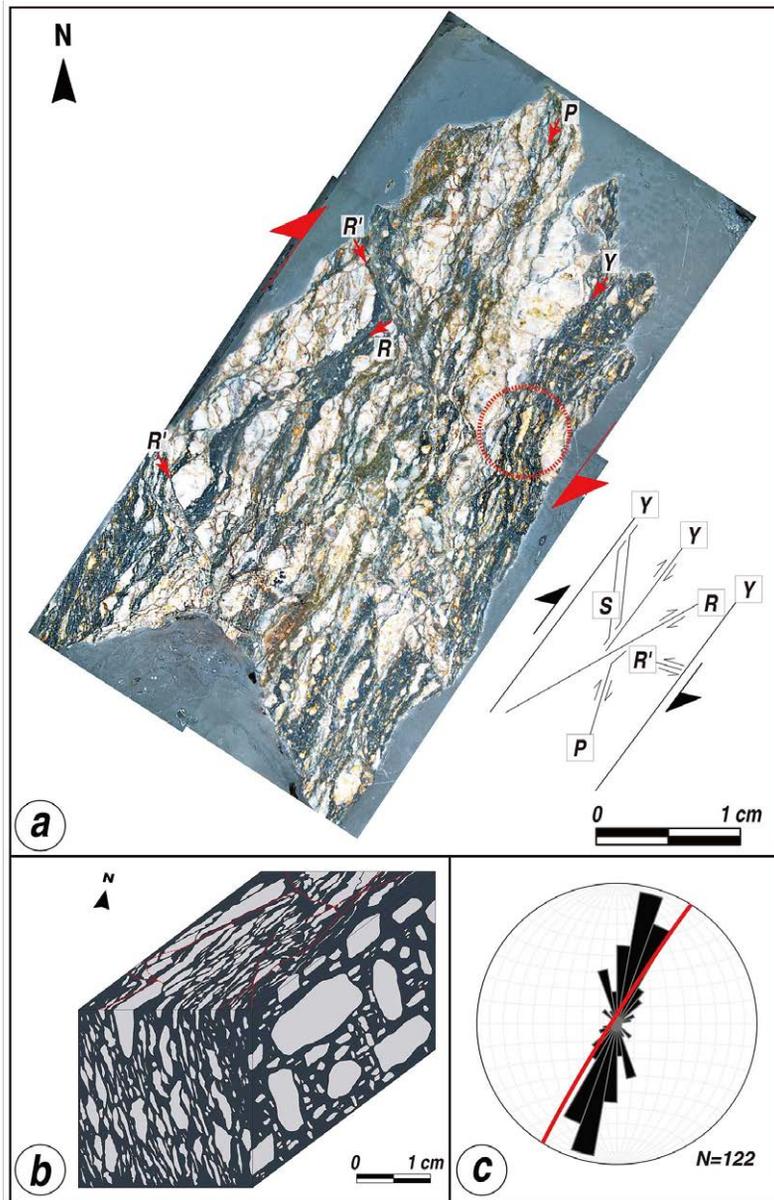


Fig. 8. (a) Rock slab image of the fault breccia in the slip-parallel section at the study location A. Pervasive shear planes and shear bands are developed in the fault breccia. Shear planes and shear bands are indicative of dextral slip movement. (b) Geometrical illustration of typical foliated fault breccia. (c) Stereoplots of shear planes and shear bands within the rock slab. A red great circle in the stereoplots shows the average orientation of the Wangsukcheon fault plane.

75°SE 경사를 가지는 R-전단면이 가장 우세하게 발달되어 있다(그림 3e). 단층비지대 2의 전단면은 N20°~40°E의 주향과 73°~89°SE 혹은 75°~89°NW 경사를 가지는 P-전단면과 Y-전단면이 가장 우세하게 발달되어 있다(그림 3f). 슬랩 상에서 관찰되는 전단면의 방향을 스테레오넷으로 도시해보면, P-전단면 및 전단띠가 가장 우세하게 발달되어 있으며, 그 다음에 Y-전단면 및 전단띠가 우세하게 나타난다. 그 외에도 R-, R'-전단띠 및 전단면이 발달되어 있다(그림 8a, 8c). SEM 이미지 상에서 비늘구조는 압쇄암에서 발달된 S-C구조와 유사한 패턴을 보여주고 있다(그림 9a). 전단면을 지시하는 C-면과 점토광물들의 배열에 의해 형성된 S-면은 서로 사각으로 만나고 있으며(그림 9b), 전단작용은 주로 C-면에 집중적으로 발생한 것을 관찰할 수 있다(그림 9b). C-면은 Y-전단면 방향과 평행하며 S-면은 노두 및 암석슬랩에서 관찰되는 S-엽리면과 평행하다(그림 8; 그림 9).

3.1.2 B 지점

B 지점(37°45'56.59"N, 127°13'47.96"E)은 A 지점으로부터 왕숙천단층의 주향방향을 따라 남서쪽으로 약 40 m 떨어진 지점으로(그림 2b), 최소 약 8 m의 폭의 단층핵이 고원생대 흑운모편마암으로부터 유래한 2 조의 단층비지대와 2조의 단층각력암대로 구성되어 있다(그림 10a, 10b). 단층핵의 남동쪽 경계부는 확인되지 않으며, 북서쪽 경계부에는 암회색 단층비지대와 단층각력암대 인접해 있는 약 15~25 cm 폭의 녹색 단층비지대와 단층각력암대 사이에 주 단층면이 발달되어 있다(그림 10c).

전단감각을 나타내는 모식도(그림 11a)를 단층비지대 내에 발달한 S-엽리면(그림 11b, 11c, 11e) 및 전단면(그림 11d, 11e)들과 비교한 결과, 우수향 주향 이동 운동감을 지시한다.

노두에서 관찰된 S-엽리면의 방향을 우수향의 주향 이동 운동을 지시하는 모식도와 비교·분석한 결과(그림 12a, 12b), 단층비지대 1에서 N10°~30°E의 주향과 73°~88°SE 혹은 71°~89°NW의 경사를 가지는 S-엽리면이 가장 우세하게 발달되어 있다(그림 12c). 단층각력암대 1에서는 N10°~20°E의 주향과 72°~89°SE 혹은 64°~88°NW 경사를 가지는 S-엽리면이 가장 우세하게 발달되어 있다(그림 12d). 단층비지대 2에서는 N10°~30°E의 주향과 71°~89°SE 혹은 71°~89°NW 경사를 가지는 S-엽리면이 가장 우세하게 발달되어 있다(그림 12e). 단층비지대 1과 2, 단층각력암대 1에 발달된 S-엽리의 방향을 전단감각을 나타내는 모식도와 비교한 결과(그림 12b, 12c, 12d, 12e), 우수향 주향 이동 운동이 우세하였음을 지시한다.

노두에서 관찰된 전단면과 전단띠의 방향을 우수향의 주향 이동 운동을 지시하는 모식도와 비교·분석한 결과(그림 12a, 12b), 단층비지대 1에 발달되어 있는 전단면은 N20°~30°E의 주향과 64°~89°SE 혹은 63°~88°NW 경사를 가지는 P-전단면 및 Y-전단면이 가장 우세하게 발달되어 있다(그림 12c). 단층각력암대 1에 발달되어 있는 전단면은 N10°~20°E의 주향과 65°~86°SE 경사를 가지는 P-전단면이 가장 우세하다(그림 12d). 단층비지대 2에 발달되어 있는 전단면은 NS~N20°E의 주향과 54°~81°NE

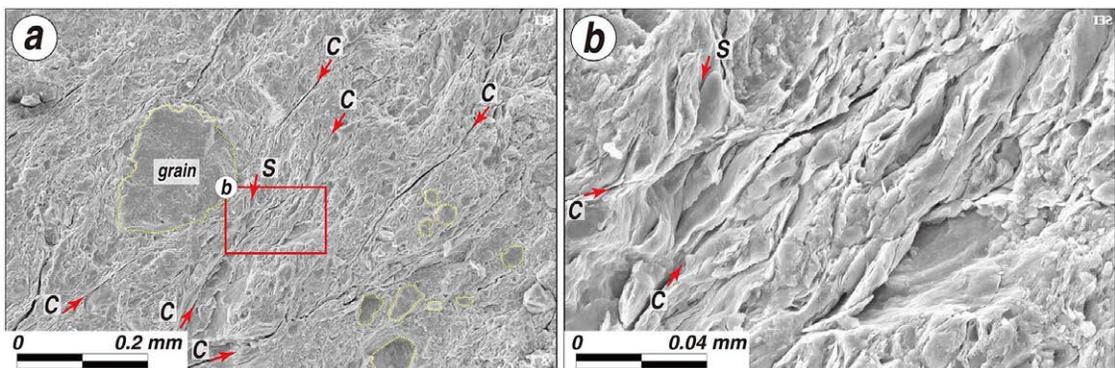


Fig. 9. (a) SEM image of fault gouge showing the S-C fabric. (b) Magnification of the red boxed area in (a). Clay minerals are arranged along the S-foliations. C-surfaces cut the S-foliations.

혹은 $70^{\circ}\sim 89^{\circ}\text{SE}$ 경사를 가지는 P-전단면과 $\text{N}40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{E}$ 의 주향과 $47^{\circ}\sim 89^{\circ}\text{SE}$ 혹은 $69^{\circ}\sim 88^{\circ}\text{NW}$ 경사를 가지는 R-전단면이 가장 우세하다(그림 12e).

3.1.3 C 지점

C 지점($37^{\circ}45'54.69''\text{N}$, $127^{\circ}13'46.76''\text{E}$)은 B 지점으로부터 왕숙천단층의 주향방향을 따라 남서쪽으로 약 70 m 떨어진 지점으로(그림 2b), 단층핵이 고원생대 흑운모편마암으로부터 유래한 2 조의 단층비지대와 1 조의 단층각력암대로 구성되어 있다(그림 13a). 단층핵은 일부만 노출되어 있어 단층핵의 양쪽 경계부는 확인할 수 없었고, 따라서 단층핵의

폭은 가늠할 수 없었다.

단층비지에는 점토광물의 선택배향에 의한 망상의 형태를 보이는 관통상의 S-엽리가 발달되어 있으며(그림 13b), 단층핵에 발달되어 있는 전단면에 의하여 단층비지 내의 엽리가 우수향 주향이동 방향으로 끌린 형태를 보이고 있다(그림 13c). 단층비지 내에 발달한 엽리는 $\text{N-S}\sim\text{N}20^{\circ}\text{W}$ 의 주향과 $39^{\circ}\sim 79^{\circ}\text{NE}$ 경사를 가지는 S-엽리면이 가장 우세하다(그림 13d). S-엽리의 방향을 전단각각을 나타내는 모식도와 비교한 결과(그림 13d), 우수향 주향이동운동이 우세하였음을 지시한다.

단층비지내에 발달되어 있는 전단면 또는 전단띠

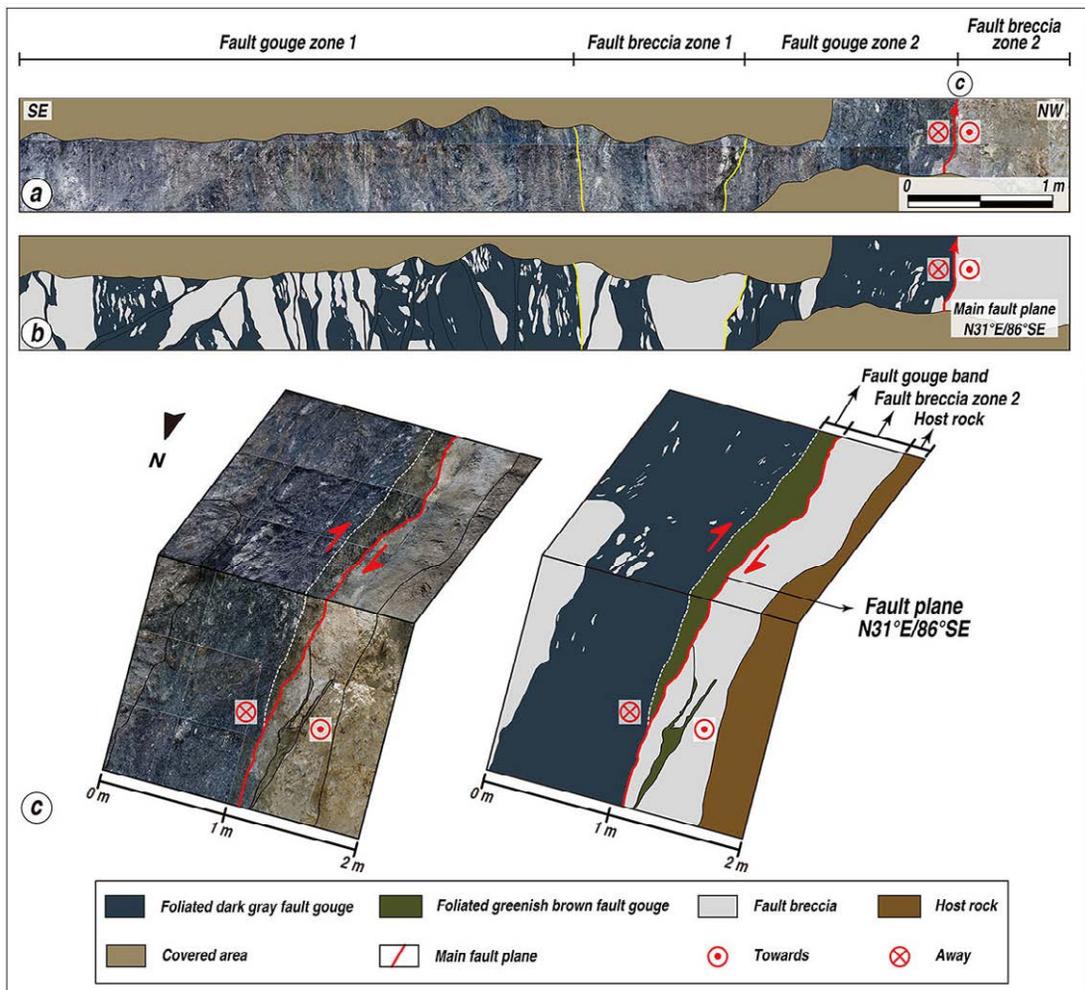


Fig. 10. (a) Photographic mosaic of the cross-section of the fault core at the study location B. (b) A simplified sketch of the cross-section of the fault core at the study location B. (c) Close-up photographic mosaic and a simplified sketch of NW boundary area of fault core at the study location B.

의 주향은 NS~N20°W이며, 25°~88°NE 경사를 가지는 P-전단면이 가장 우세하다(그림 13d).

3.2 부수단층

3.2.1 a 지점

a 지점은 경기도 포천시 화현면 화현리 지점(37°53'

37.51"N, 127°17'55.08"E)으로 주 단층으로부터 직선 거리로 약 350 m 떨어진 지점에 발달하고 있다(그림 1). 쥐라기 흑운모화강암 내에 발달하고 있는 N23°W/85°NE 방향의 부수단층은 약 0.5 cm 폭의 연녹색 단층비지띠로 구성되어 있다(그림 14a). 부수단층의 단층면과 주변 모암에 발달한 지질구조에서 운

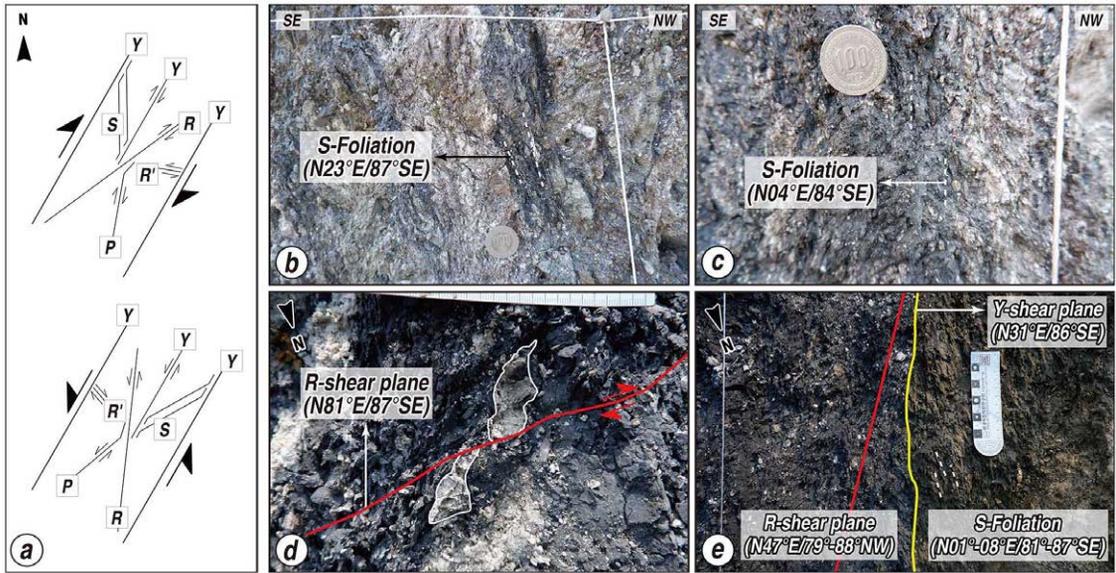


Fig. 11. Outcrop photographs of the shear plane showing dextral strike-slip movement at the study location B. (a) The directional nomenclature and geometrical relationships of the structural elements (modified from Rutter *et al.*, 1986; Passchier and Trouw, 1996). (b, c) A close-up photographs of S-foliations developed in the fault gouge. (d) A close-up photograph of R-shear plane. (e) A close-up photograph of S-foliation and R-shear planes.

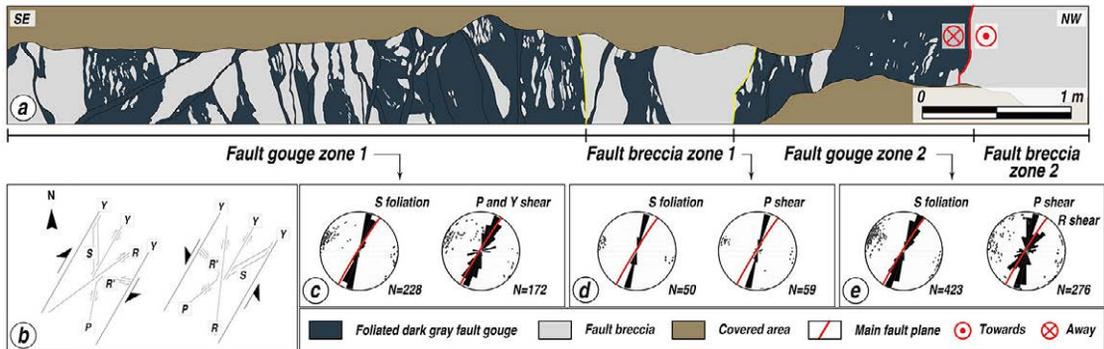


Fig. 12. (a) A simplified sketch of the cross-section of the fault core showing the internal structures at the study location B. (b) The directional nomenclature and geometrical relationships of the structural elements (modified from Rutter *et al.*, 1986; Passchier and Trouw, 1996). (c) Stereoplots of foliations and shear planes within the fault gouge zone 1. (d) Stereoplots of foliations and shear planes within the fault breccia zone 1. (e) Stereoplots of foliations and shear planes within the fault gouge zone 2. A red great circle in the stereoplots shows the average orientation of the Wangsukcheon fault plane.

동감각을 지시하는 증거는 확인되지 않는다.

3.2.2 b 지점

b 지점은 경기도 포천시 내촌면 소화리 지점(37°49'04.40"N, 127°15'43.85"E)으로 주 단층으로부터 직선거리로 약 200 m 떨어진 지점에 발달하고 있다(그림 1). 고원생대 흑운모편마암 내에 발달하고 있는 N29°E/61°SE 방향의 부수단층은 약 1.5 cm 폭의 암

회색 단층비지띠로 구성되어 있다(그림 14b). b 지점 역시 부수단층의 단층면과 주변 모암에 발달한 지질구조에서 운동감각을 지시하는 증거는 확인되지 않는다.

4. 왕숙천단층의 ESR 연대측정

ESR 연대측정을 위하여 3 지점의 단층핵과 2 지

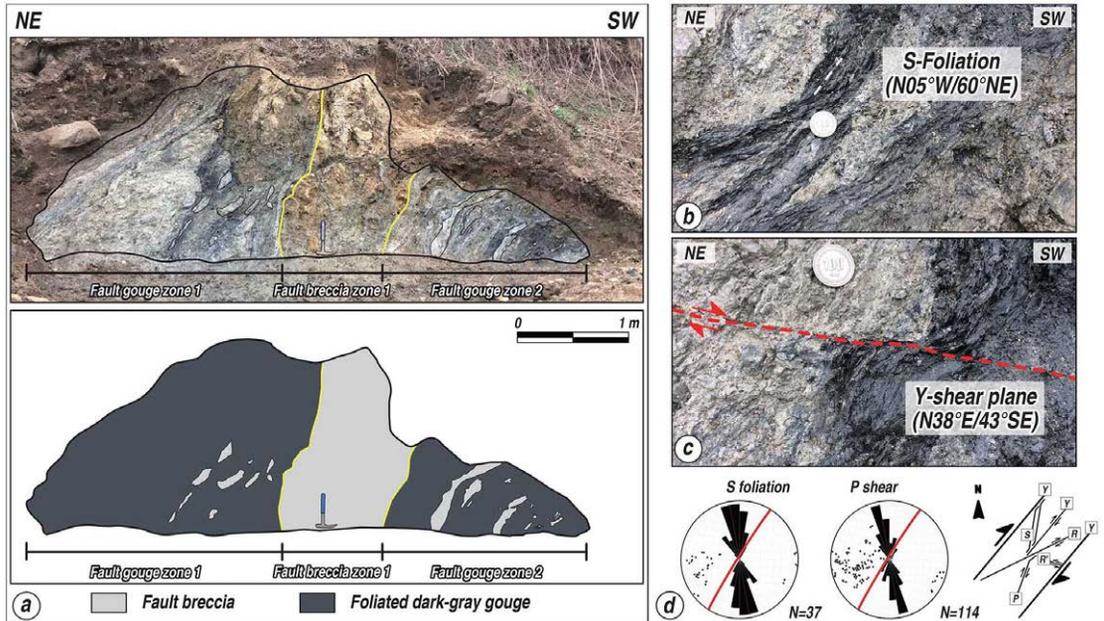


Fig. 13. Fault core at the study location C. (a) Outcrop photograph and a simplified sketch of the cross-section of fault core at the study location C. (b) A close-up photograph of foliations. (c) A close-up photograph of Y-shear plane. Dragged foliations indicate dextral sense of fault movements. (d) Stereoplots of foliations and shear planes within the fault core at the study location C. The directional nomenclature and geometrical relationships of the structural elements (modified from Rutter *et al.*, 1986; Passchier and Trouw, 1996). A red great circle in the stereoplots shows the average orientation of the Wangsukcheon fault plane.



Fig. 14. (a) Outcrop photograph of the subsidiary fault with sampling location and ESR age at the study location a. (b) Outcrop photograph of the subsidiary fault with sampling location and ESR age at the study location b.

Table 1. Amount of U (ppm), Th (ppm) and ^{40}K (%) for each sample of Wangsukcheon fault gouges.

Sample	U (ppm)	Th (ppm)	^{40}K (%)
WS29-1	1.31±0.02	17.70±0.23	2.21±0.02
WS29-2	1.42±0.02	16.88±0.23	2.24±0.02
WS29-3	1.31±0.02	17.83±0.23	2.21±0.02
WS29-4	1.86±0.02	18.46±0.33	2.24±0.02
WS29-5	2.16±0.03	17.34±0.28	2.29±0.02
WS29-6	2.07±0.02	17.55±0.29	2.27±0.02
JW001-1	2.39±0.03	17.65±0.28	1.42±0.01
JW001-2	3.68±0.05	15.14±0.31	2.30±0.02
JW001-3	1.81±0.02	15.35±0.26	2.10±0.02
JW001-4	2.11±0.03	12.89±0.40	2.64±0.02
JW001-5	1.69±0.03	11.11±0.25	2.76±0.02
JW001-6	2.61±0.03	15.38±0.29	2.70±0.02
JW001-7	2.53±0.03	21.53±0.35	2.78±0.02
JW002-1	2.43±0.03	17.48±0.32	2.49±0.02
JW002-2	1.82±0.03	17.88±0.30	2.22±0.02
JW002-3	2.61±0.05	19.48±0.40	2.37±0.02
JW002-4	1.87±0.02	13.76±0.28	2.70±0.02
JW002-5	1.11±0.02	15.04±0.27	3.48±0.02
JW002-1#	2.28±0.10	17.48±0.57	2.14±0.02
JW023	3.76±0.12	16.46±0.42	2.48±0.02
JW064	1.48±0.11	12.41±0.41	2.32±0.02
JW079-2	1.74±0.10	15.48±0.34	2.62±0.03
JW079-3	1.67±0.14	14.14±0.42	2.89±0.03
JW079-8	1.70±0.09	13.42±0.30	2.81±0.03
JW079-14	1.71±0.12	13.68±0.45	2.64±0.03
JW079-20	2.09±0.10	13.97±0.40	2.66±0.03
JW079-23	1.70±0.12	12.05±0.43	2.55±0.03
JW079-29	1.85±0.09	13.23±0.31	2.39±0.02
JW079-37	1.46±0.07	13.40±0.44	2.50±0.03
JW079-44	1.66±0.10	12.01±0.40	2.35±0.02
JW079-45	1.55±0.12	12.99±0.43	2.42±0.03

점의 부수단층에서 각각 단층비지 시료를 채취하였다. 각 단층핵과 부수단층에서 채취한 시료의 ESR 연대측정에 사용된 자료는 표 1과 표 2에 제시되어 있다.

4.1 단층핵의 ESR 연대

4.1.1 A 지점

단층비지 시료는 단층비지대와 모암이 경계를 이

루는 남동쪽 경계부에서 시료 JW079-3을 채취하였으며, JW079-3 시료로부터 경계면을 따라 약 0.3 m 떨어진 지점에서 시료 JW079-2를 채취하였다. 단층비지 시료 JW079-2와 3을 채취한 지점으로부터 서쪽으로 약 1 m 떨어진 지점에서 시료 JW079-8을 채취하였으며, 이 지점으로부터 서쪽으로 약 0.5 m 떨어진 지점에서 시료 JW079-14를, 그리고 서쪽으로 약 1 m 떨어진 지점에서 JW079-20을 채취하였다. 단층

Table 2. Analytical data for ESR dating of fault gouges in the study area.

Sample	Grain size (μm)	Center	DE (Gy)	Dose rate ($\mu\text{Gy}/\text{year}$)	ESR age (ka)	Weighted mean (ka)
JW001-4	25~45	E'	1,994.33 \pm 169.14	3,377 \pm 264	590 \pm 70	-
JW023	25~45	E'	1,224.96 \pm 221.75	3,823 \pm 293	320 \pm 62	290 \pm 30
	45~75	E'	976.60 \pm 217.76	3,721 \pm 283	262 \pm 61	
	75~100	E'	1,045.86 \pm 119.69	3,619 \pm 274	286 \pm 39	
	100~150	E'	1,076.93 \pm 235.96	3,491 \pm 263	308 \pm 71	
JW064	25~45	E'	778.81 \pm 83.68	2,969 \pm 231	262 \pm 34	270 \pm 20
	45~75	E'	764.12 \pm 130.29	2,889 \pm 223	264 \pm 49	
	75~100	E'	750.95 \pm 70.20	2,808 \pm 215	267 \pm 32	
JW079-3	25~45	E'	1,329.57 \pm 130.38	3,580 \pm 279	370 \pm 50	-
JW079-44	25~45	E'	1,580.67 \pm 387.03	3,007 \pm 234	530 \pm 130	-

각력암대 1의 서쪽 경계부에서 시료 JW079-23을 채취하였으며, 이 지점으로부터 서쪽으로 약 0.2 m 떨어진 지점에서 시료 JW079-29를, 그리고 서쪽으로 약 1 m 떨어진 지점에서 시료 JW079-37을 채취하였다. 단층 비지대 2의 녹갈색 단층비지띠 주변에서 JW079-45를 채취하고 단층핵의 북서쪽 경계를 이루는 녹갈색 단층비지띠를 따라 시료 JW079-44를 채취하였다(그림 15a).

단층비지 시료 JW079-3와 JW079-44에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 25~45 μm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 나머지 입자크기에서는 불규칙하게 증감한다(그림 17a, 17c). AI 신호는 모든 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 불규칙하게 증감하여 이 시료들의 연대를 결정할 수 없었다(그림 17b, 17d).

A 지점의 단층핵에서 채취한 10개의 단층비지 시료에 대한 ESR 연대측정 결과 10개의 시료 중 JW079-2, JW079-8, JW079-14, JW079-20, JW079-23, JW079-29, JW079-37, JW079-45에서는 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지가 증가함에 따라 E' 및 AI 신호는 거의 증가하지 않거나 불규칙하게 증감하는데, 이는 단층활동이 발생했을 때 부분적으로 ESR 신호가 감소했다가 단층활동 이후에 주변의 방사성 원소로부터 방사성에너지를 받아 ESR 신호가 포화된 것으로 추정된다. ESR 신호가 포화된 단층비지 시료에 대한 그림은 생략하였다.

A 지점에서 채취한 단층비지 시료 중 JW079-3와

JW079-44에 대한 ESR 연대와 특징은 다음과 같다. 이 두 시료들은 모두 석영 입자크기 대 ESR 연대 그래프에서 ESR 연대가 E' 신호의 25~45 μm 입자크기에서만 결정되어 연대 평탄역을 보이지 않는다. 따라서 이를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 JW079-3은 약 370 \pm 50 ka, JW089-44는 약 530 \pm 130 ka로 산정되었다.

4.1.2 B 지점

암회색 단층비지대와 단층핵의 북서쪽 경계부를 이루는 녹갈색 단층비지대가 접하는 부분에서 암회색 단층비지 시료 WS29-1, WS29-2, WS29-3을 채취하였으며, 녹갈색 단층비지 시료 WS29-4, WS29-5, WS29-6을 채취하였다(그림 15b). 녹갈색 및 암회색 단층비지대와 단층각력암대의 경계면을 따라 암회색 단층비지 시료 JW002-1 및 JW002-2를 채취하였으며, JW002-2에서 동쪽으로 약 0.6 m 떨어진 지점에서 암회색 단층비지 시료 JW002-3를 채취하였다(그림 15b). 이 지점으로부터 동쪽으로 약 45 cm 떨어진 지점에서 JW002-1#을 채취하고, 그 동쪽으로 약 2 m 떨어진 지점에서 암회색 단층비지 시료 JW002-4 및 JW002-5를 채취하였다(그림 15c).

B 지점의 단층핵에서 채취한 9개의 암회색 단층비지 시료와 3개의 녹갈색 단층비지 시료에 대한 ESR 연대측정 결과 12개의 단층비지 시료 모두 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지가 증가함에 따라 E' 및 AI 신호는 거의 증가하지 않거나 불규칙하게 증감하는데, 이는 단층활동이 발생했을 때 부분적으로 ESR

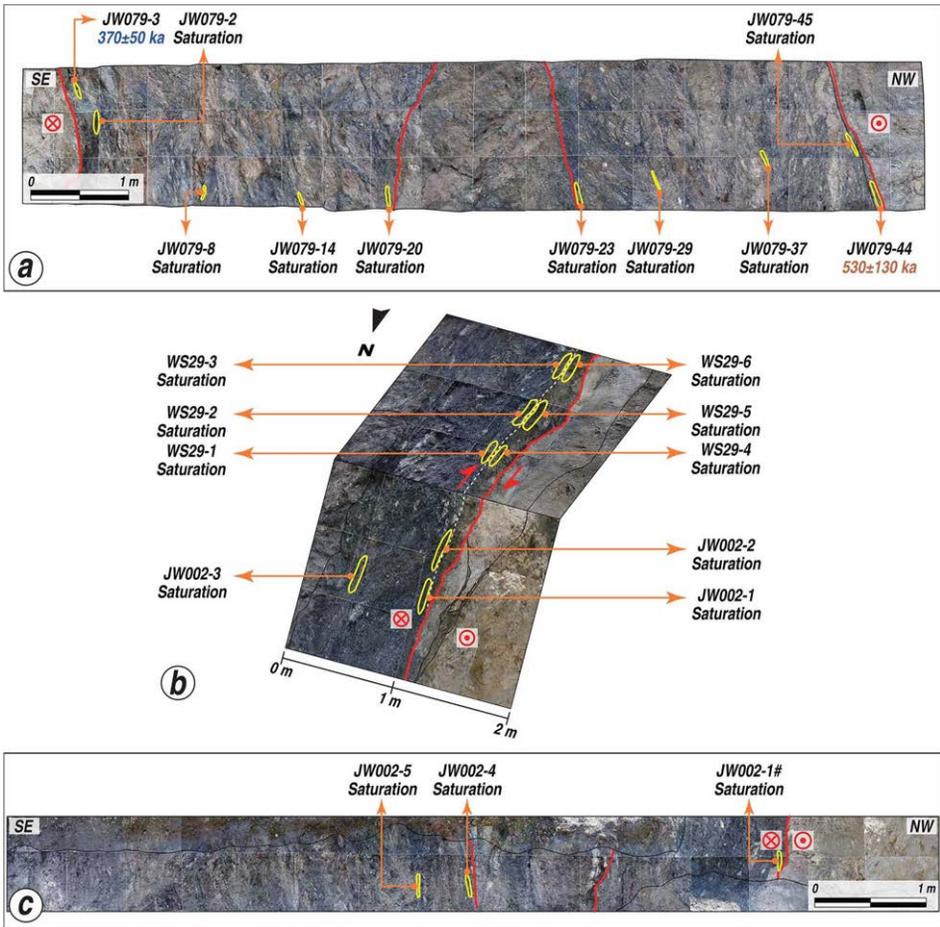


Fig. 15. (a) Sampling locations and ESR ages at the cross-section of the fault core at the study location A. (b) Sampling locations and ESR ages at the NW boundary area of the fault core at the study location B. (c) Sampling locations and ESR age at the cross-section of the fault core at the study location B.



Fig. 16. Sampling locations and ESR ages at the cross-section of the fault core at the study location C.

신호가 감소했다가 단층활동 이후에 주변의 방사성 원소로부터 방사성에너지를 받아 ESR 신호가 포화된 것으로 추정된다. ESR 신호가 포화된 단층비지 시료에 대한 그림은 생략하였다.

4.1.3 C 지점

단층핵의 양쪽 경계부가 모두 확인되지 않는 C 지점 단층핵의 서쪽 부근에 발달되어 있는 암회색 단층비지 띠에서 시료 JW001-1, JW001-2, JW001-3 시

료를 채취하였으며, 단층각력압대와 단층비지대의 경계부에서 시료 JW001-4를 채취하였다. 그리고 단층핵의 동쪽 부근에 발달되어 있는 암회색 단층비지 띠에서 시료 JW001-5, JW001-6, JW001-7을 채취하였다(그림 16).

단층비지 시료 JW001-4에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 25~45 μm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며 나머지 입자크기에

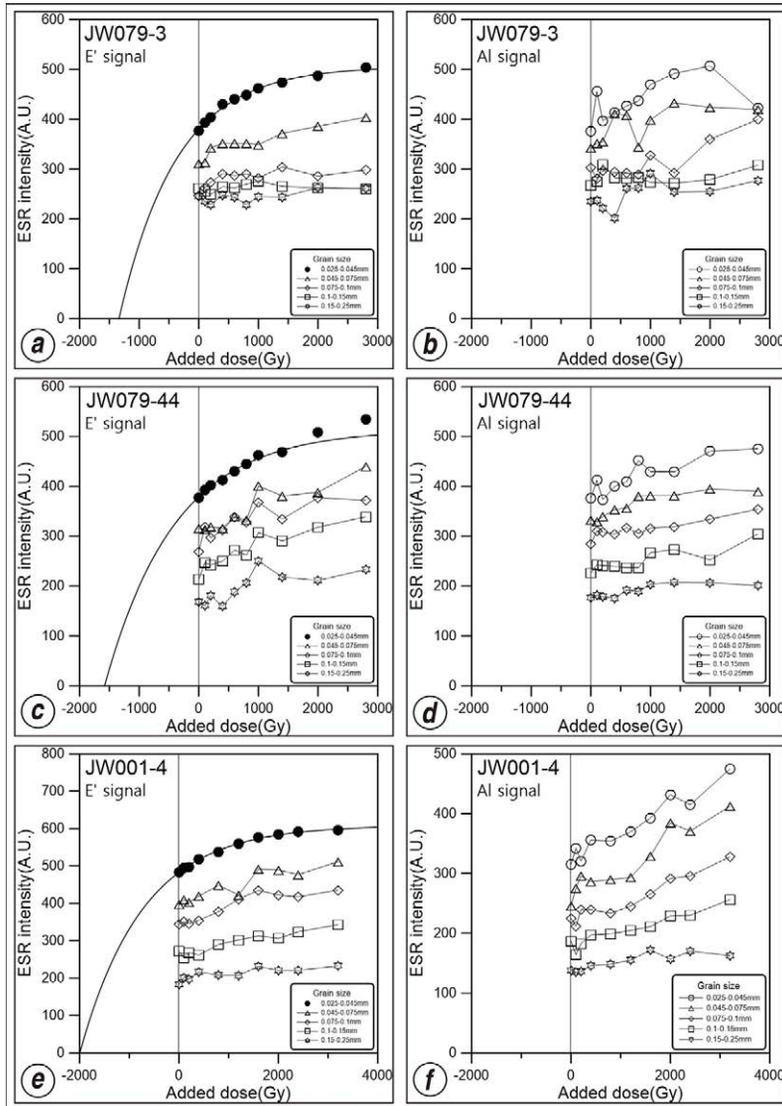


Fig. 17. Growth curves of ESR signals for three fault gouge samples (JW079-3, JW079-44, JW001-4) collected in the study location A and C. (a, b) Growth curves of E' signals and Al signals for JW079-3. (c, d) Growth curves of E' signals and Al signals for JW079-44. (e, f) Growth curves of E' signals and Al signals for JW001-4.

서는 불규칙하게 증감한다(그림 17e). AI 신호는 모든 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 불규칙하게 증감하여 이 시료의 연대를 결정할 수 없었다(그림 17f).

C 지점의 단층핵에서 채취한 7개의 암회색 단층비지 시료에 대한 ESR 연대측정 결과 7개의 단층비지 시료 중 JW001-1, JW001-2, JW001-3, JW001-5, JW001-6, JW001-7에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지가 증가함에 따라 E' 및 AI 신호는 거의 증가하지 않거나 불규칙하게 증감하며, 이는 단층활동이 발생했을 때 부분적으로 ESR 신호가 감소했다가 단층활동 이후에 주변의 방사성원소로부터 방사성 에너지를 받아 ESR 신호가 포화된 것으로 추정된다. ESR 신호가 포화된 단층비지 시료에 대한 그림은 생략하였다.

C 지점에서 채취한 단층비지 시료 중 JW001-4에 대한 ESR 연대와 특징은 다음과 같다. 단층비지 시료 JW001-4의 석영 입자크기 대 ESR 연대 그래프에서 ESR 연대가 E' 신호의 25~45 μm 입자크기에서만 결정되어 연대 평탄역을 보이지 않는다. 따라서 이

를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 약 590±70 ka이다.

4.2 부수단층의 ESR 연대

4.2.1 a 지점의 ESR 연대

a 지점 부수단층을 구성하고 있는 연녹색 단층비지 시료 JW064를 채취하여 ESR 연대측정을 실시한 결과(그림 14a), 이 시료에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 나머지 입자크기에서는 불규칙하게 증감한다(그림 18a). AI 신호는 모든 입자크기에서 ESR 신호가 포화되어 이 시료의 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 18b).

단층비지 시료 JW064에 대한 ESR 연대와 특징은 다음과 같다. 단층비지 시료 JW064의 석영 입자크기 대 ESR 연대 그래프에서 ESR 연대가 E' 신호의 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm 입자크기에서 연대평탄을 보이며, 가중평균을 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 약 270±20 ka이다(그림 18c).

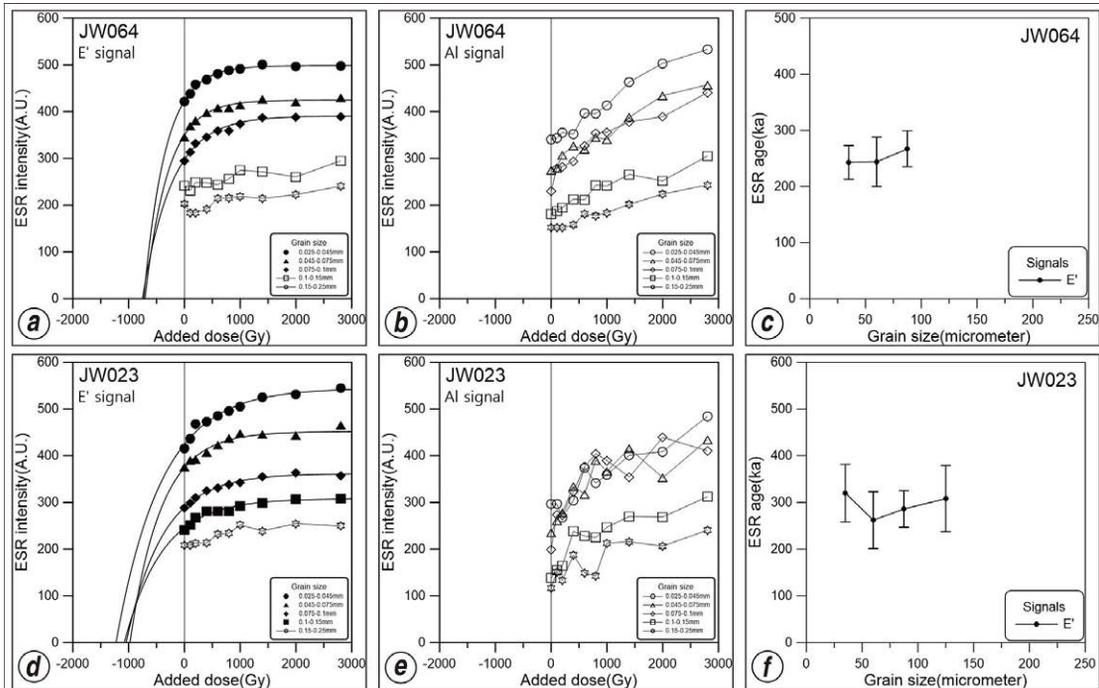


Fig. 18. Growth curves of ESR signals and ESR ages vs. Grain sizes for two fault gouge samples (JW064, JW023) collected in the study location a and b. (a, b) Growth curves of E' signals and AI signals for JW064. (c) ESR ages vs. Grain sizes for JW064. (d, e) Growth curves of E' signals and AI signals for JW023. (f) ESR ages vs. Grain sizes for JW023.

4.2.2 b 지점의 ESR 연대

b 지점 부수단층을 구성하고 있는 암회색 단층비지 시료 JW023을 채취하여 ESR 연대측정을 실시한 결과(그림 14b), 이 시료에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm , 100~150 μm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며 나머지 입자크기에서는 불규칙하게 증감한다(그림 18d). AI 신호는 모든 입자크기에서 ESR 신호가 포화되어 이 시료의 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 18e).

단층비지 시료 JW023에 대한 ESR 연대와 특징은 다음과 같다. 단층비지 시료 JW023의 석영 입자크기 대 ESR 연대 그래프에서 ESR 연대가 E' 신호의 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm , 100~150 μm 입자크기에서 연대평탄을 보이며, 가중평균을 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 약 290 \pm 30 ka이다(그림 18f).

5. 토 의

5.1 왕속천단층의 지질구조적 특성

5.1.1 단층운동감각

왕속천단층에 대한 기존의 연구들은 대부분 우수향 주향이동운동이 우세하였다고 보고하고 있지만, 일부 학자들은 좌수향 주향이동운동이 우세하였다고 주장하였다. Koh and Song (2005)은 왕속천단층의 각 분절 사이에서 국부적으로 발달하고 있는 남북 방향의 석영맥 혹은 심성암맥과 단층면에서 관찰되는 단층조선을 토대로 좌수향 주향이동운동이 우세하였다고 해석하였다. Kee (2000)는 추가령 단층대 내의 노두에서 관찰되는 전단절리의 상관관계, 단층면의 운동감각 등을 토대로 좌수향 주향이동운동이 우세하였다고 해석하였다. Lee *et al.* (2006)은 왕속천단층 주변부에 발달하고 있는 동두천단층과 포천단층의 관계를 토대로 우수향 주향이동운동이 우세하였다고 해석하였으며, Hwang and Kihm (2007)은 반상흑운모화강암의 관입경계가 약 500 m 우수향으로 어긋나있어 이를 토대로 왕속천단층이 우수향 주향이동운동이 우세하였다고 해석하였다. Kee *et al.* (2009)는 북북서-남남동 방향의 습곡구조와 이들의 안행상 배열을 토대로 우수향 주향이동운동이 우세하였다고 해석하였다. Bae and Lee (2016)는 흑

운모화강암의 관입경계가 약 1.5 km 우수향으로 어긋나있어 우수향 주향이동운동이 우세하였다고 해석하였다.

왕속천단층은 경기도 포천시 내촌면 신팔리 일대에서 2 갈래로 분절되어 연장되는 것이 야외지질조사에서 확인되었다. 동쪽 분절에서는 흑운모편마암과 흑운모화강암의 경계가 우수향으로 약 1.3 km 어긋나며, 서쪽 분절에서는 그 경계가 우수향으로 약 2.5 km로 어긋나있다. 만약 각 분절이 서로 다른 시기에 활동했다면 왕속천단층의 최대 변위량은 약 3.8 km로 판단되며, 같은 시기에 활동했다면 적어도 약 2.5 km의 변위량을 가질 것으로 해석된다(그림 1). 이는 노두규모에서 변위량을 추정할 수 있는 증거를 찾지 못하여 암상분포에 의한 지질도 규모로 해석한 것이다. 정확한 변위량을 추정하기 위해서는 노두규모에서 확인되는 명확한 증거를 찾아 이를 보완해야 할 것으로 생각된다.

왕속천단층의 단층핵에는 운동감각을 지시하는 여러 가지 비대칭구조(asymmetric structures)들이 발달해 있다. 단순전단의 경우, 비대칭적인 구조들은 전단방향과 평행하고 전단대에 직각인 평면상(변형타원체에서 XZ면상)에서 가장 잘 발달한다(Ramsay and Graham, 1970). 만일 XZ면상에서 아닌 다른 방향의 노두면에서 관찰되는 비대칭구조들은 논란이 되는 운동감각을 지시할 수도 있다(Chester and Logan, 1986). 가장 좋은 운동감각의 지시자는 암편이나 기존의 전단면과 전단띠가 다음에 만들어지는 전단면이나 전단띠에 의해 어긋나있는 것이다(그림 7b, 7c, 7d, 7e, 11d). 왕속천단층에서 관찰된 어긋나있는 암편들은 대부분 우수향 주향이동 운동을 지시한다.

단층핵을 구성하는 단층비지 내의 점토광물들은 정향배열에 의하여 S-엽리면을 형성하며 주 단층면에 0°~45° 범위의 각을 가지고 발달한다(Berthe *et al.*, 1979; Lister and Snoke, 1984). 이러한 S-엽리면은 변형타원체에서 XY면을 지시하며 전단 초기에는 주 단층면에 약 45°의 각을 가지나, 전단변형이 증가할수록 주 단층면과 거의 평행해지는 경향을 보이며(Ramsay and Huber, 1983), 이러한 S-엽리면의 주향방향은 단층의 운동감각을 파악하는데 이용할 수 있다. 연구지역의 왕속천단층을 구성하고 있는 단층비지 내의 S-엽리면은 N20°W~N30°E 방향

으로 우세하게 발달되어 있으며 단층의 운동감각과 비교한 결과, 우수향 주향이동운동이 우세했음을 지시한다(그림 3c, 3d, 3f, 12b, 12c, 12d, 12e, 13d).

노두에서 측정된 전단면 및 전단띠들을 운동감각을 지시하는 모식도와 비교해본 결과, 왕숙천단층의 단층핵에는 P-전단 및 Y-전단방향의 전단면 및 전단띠가 가장 우세하게 발달되어 있으며, R-전단방향의 전단면 및 전단띠도 발달되어 있어 왕숙천단층은 우수향 주향이동 운동이 우세했음을 지시한다(그림 3c, 3d, 3e, 3f, 12b, 12c, 12d, 12e, 13d). XZ면과 평행하게 만든 암석슬랩 상에서 측정된 전단면 및 전단띠의 방향은 P-전단방향의 전단면 및 전단띠가 가장 우세하게 발달되어 있으며, 그 다음에 Y-전단방향의 전단면 및 전단띠가 우세하다. 그 외의 R-전단 및 R'-전단방향의 전단면 및 전단띠가 발달되어 있어 운동감각을 지시하는 모식도와 비교해본 결과, 왕숙천단층은 우수향 주향이동운동이 우세했음을 지시한다(그림 8a, 8c).

5.1.2 단층핵의 진화

대규모 단층대에 대한 연구들을 통해 모암 혹은 구성광물의 종류 차이에 의하여 다른 양상의 단층대가 형성되는 것으로 보고되고 있다. 여러 학자들은 층상규산염광물이 많은 모암(phyllsilicate-rich country rock)을 관통하는 단층과 결정질 암석(crystalline rocks)을 관통하는 단층에 대한 차이점을 보고하였다. 층상규산염광물이 많은 모암을 관통하는 단층은 렌즈상의 모암 잔유물을 둘러싸고 있는 여러 갈래의 단층비지대로 구성되며, 변형작용이 발생할 때 응력변형경화(strain hardening)에 의하여 변형이 다른 단층비지대로 분산되어 단층대의 폭이 점점 넓어진다고 보고하였다. 반면에 결정질 암석을 관통하는 단층은 변형작용이 발생할 때 응력변형연화(strain weakening)가 발생하여 얇은 단층비지대를 따라 변형이 집중된다고 보고하였다(Faulkner *et al.*, 2003; Lee and Kim, 2005; Bistacchi *et al.*, 2010; Alder *et al.*, 2016).

연구지역의 왕숙천단층은 노두규모에서 2개의 단층비지대와 2개의 단층각력암대로 구성되어 있으며, 전단변형작용은 단층비지대에서 집중적으로 발생한 것으로 해석된다(그림 3, 10, 12, 13). 단층비지대는 엽리가 발달한 암회색 및 녹갈색 단층비지로 이루어져 있으며, 다양한 크기의 렌즈상의 단층각력

암 및 모암 잔유물이 단층면의 방향으로 배열되어 있다(그림 3, 5, 6, 8, 10, 13).

노두 상에서 관찰되는 단층핵의 특성들을 토대로 왕숙천단층의 단층핵의 진화과정을 요약하면 다음과 같다(그림 19). 첫 번째 단계에는 모암인 흑운모편마암(그림 19a)에 여러 방향의 인장단열 및 전단단열이 발생하여 단층각력암이 형성되기 시작하였다. 단층각력암은 분산 분쇄 각력암화(distributed crush brecciation) 및 마찰 각력암화(attrition brecciation)에 의해 형성되는데(Sibson, 1986), 단열면의 방향이 일정하지 않고 뚜렷한 전단띠가 발달되지 않아 왕숙천단층의 단층핵 진화에 있어 첫 번째 단계는 분산 분쇄 각력암화에 의해 단층각력암이 형성된 것으로 해석된다(그림 19b 안의 빨간색 원의 내부). 두 번째 단계에서는 여러 방향의 전단띠가 발달하여 렌즈상의 모암을 둘러싸고 있으며(그림 8, 19b), 렌즈상의 모암들과 전단띠에 의해 성분엽리가 형성되었다. 렌즈상의 모암들은 주 단층면의 방향으로 발달되어 있으며 전단띠들은 P-전단 및 Y-전단 방향으로 우세하게 발달되어 있다(그림 8c). 전단띠 내에도 타원율이 큰 렌즈상의 암편들이 전단띠 방향으로 배열되어 있다(그림 8a의 원). 전단면이나 전단띠들이 모암 내로 파고들어가는 형태로 발달되어 있으며 이는 전단작용 중에 마찰 각력암화 작용이 우세했던 것으로 해석된다(Sibson, 1986). 전단작용이 진행됨에 따라 모암으로부터 렌즈상의 암편들을 뜯어내어 전단띠의 두께가 두꺼워지며, 렌즈상의 암편의 크기는 작아지고 타원율은 커지는 경향이 있다. 세 번째 단계에서는 지속적인 전단변형작용에 의하여 전단띠의 폭이 점점 넓어지고 서로 합쳐져 단층비지의 양이 급격하게 증가하고 렌즈상의 모암의 크기가 작아진다(그림 19c, 19d). 타원율이 아주 큰 단층각력암띠와 전단띠가 교호하여 성분엽리를 형성한다(그림 19e). 마지막 단계에서는 단층각력암띠가 거의 단층비지로 바뀌며, 단층비지 내에서는 점토광물들이 선택배향하여 엽리가 발달하며 이들에 의해 비늘구조를 형성한다(그림 5a, 9, 19f). 전단변형이 강해질수록 P-전단방향으로 형성된 S-엽리는 Y-전단방향으로 회전된다.

5.1.3 비늘구조의 형성 메커니즘

왕숙천단층의 단층핵에는 점토광물의 선택배향에 의해서 엽리가 발달되어 비늘구조를 형성하고 있다.

단층비지 내에서 기존의 점토광물들은 회전하거나, 새로 생성되는 점토광물들은 압축력의 직각방향으로 성장하여 선택배향을 하게 된다(Williams, 1977; Oertel, 1983; Rutter *et al.*, 1986). 각 지점에서 측정된 S-엽리의 주향을 살펴보면, A 지점과 B 지점에서는 N10°~30°E 방향이 우세하며, C 지점에서는 NS~N20°W 방향이 우세한 것으로 측정되었다. A, B 지점에서는 S-엽리의 방향이 Y-전단방향과 거의 평행하지만, C 지점에서는 P-전단방향과 평행하게 발달되어 있다. 이는 C 지점보다 A, B 지점의 단층비지대에서 전단변형이 더 강하게 발생했음을 지시한

다. 이러한 해석은 단층비지대에서 점토광물들의 선택배향에 의해 형성된 S-엽리는 전단변형 초기에는 주 전단면과 약 45° 각을 가지고 형성되나(P-전단방향) 전단변형이 지속됨에 따라 S-엽리가 Y-전단방향(주 전단면 방향)으로 회전한다는 가정에 의거한다(Oertel, 1983). S-엽리면에 단층조선이 발달된 것으로 보아 S-엽리가 형성된 후 엽리면을 따라 미끌림이 발생한 것으로 해석된다(그림 5d). 전자주사현미경 상에서 관찰한 바에 의하면, 점토광물들이 배열하여 S-엽리를 만든 후 이를 절단하는 C-전단면이 발달하여 S-C 구조를 형성했다(그림 9).

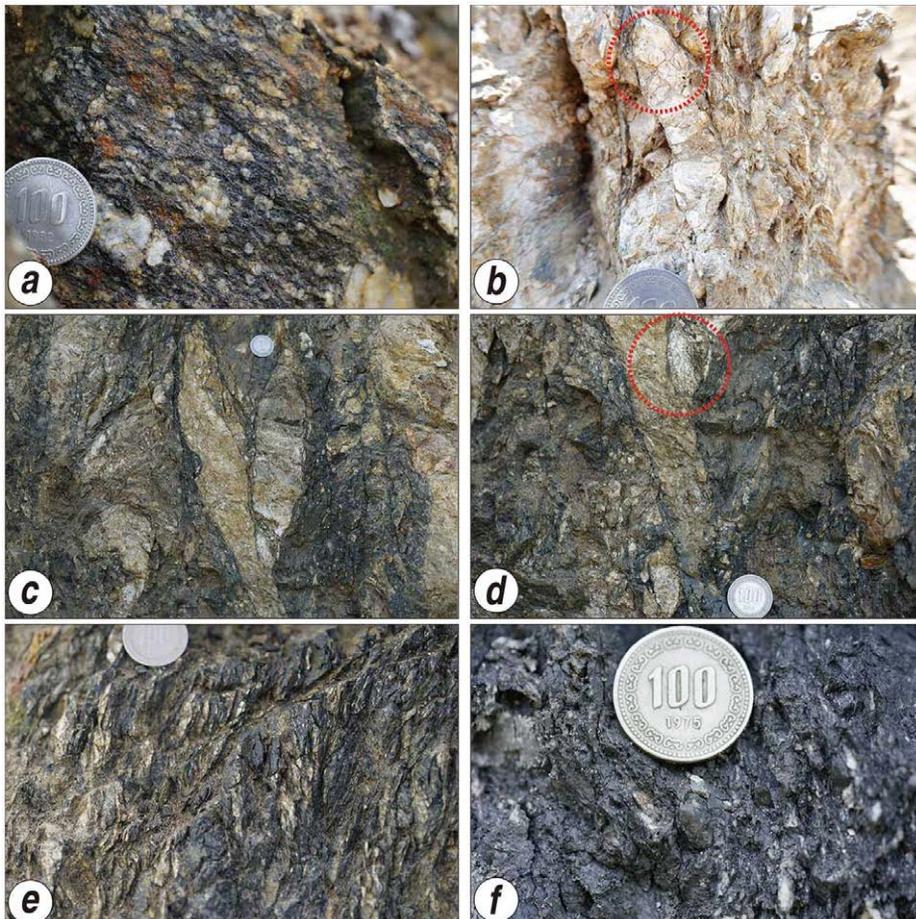


Fig. 19. The generation and development of the Wangsukcheon fault core. (a) A close-up photograph of biotite gneiss in the study area. (b) The biotite gneiss is fractured by distributed crush brecciation within red circle. (c, d) The shear strain is localized, and shear-surfaces and shear-bands are developed. Progressive attrition brecciation in the shear-bands and rock interfaces increases the amount of gouge materials and expands the thickness of the shear bands(within red circle). Lenticular rock fragments are suspended in the fault gouge. (e, f) The fault gouge zone is developed by linking and coalescing the shear bands. With the increase of shear strain, S-foliation defined by the preferred orientation of clay within the gouge zone has formed.

5.2 단층비지의 ESR 연대

5.2.1 ESR 연대의 해석

연대 측정 결과는 비교 가능한 다른 연대측정법으로 얻어진 결과와 교차분석하여 연대 측정 결과의 신뢰도를 향상시키지만, 현재 ESR 연대측정법과 교차분석을 할 수 있는 연대측정법은 없는 실정이다. 따라서 ESR 연대측정법은 동일한 단층비지띠를 따라 채취한 단층비지의 ESR 연대를 비교·분석하여 그 신뢰도를 향상시키고 있다(Lee, 2010; Yang and Lee, 2012; Kim, 2018; Weon and Lee, 2018).

A 지점에서 채취한 단층비지 시료의 ESR 연대 측정 결과, 10개의 단층비지 시료 중 8개의 시료는 ESR 신호가 포화되어 연대를 결정할 수 없었으며, 이는 ESR 연대측정법의 한계인 약 200만 년 전 이전으로 마지막으로 재활동한 것으로 추정된다. 북서쪽 경계부에서 채취한 단층비지 시료 JW079-44의 ESR 연대는 530 ± 130 ka이며, 단층비지대와 모암이 경계를 이루는 남동쪽 경계부에서 채취한 단층비지 시료 JW079-3의 ESR 연대는 370 ± 50 ka이다(그림 15, 20; Location A). 약 8 m 폭의 단층핵에서 ESR 연대를 얻은 단층비지띠들의 폭은 총 약 2 cm로 이는 단층핵 중 약 0.2% 만이 제4기에 재활동한 것으로 추정된다.

A 지점에서 남서쪽으로 약 50 m 떨어져 있는 B 지점에서 채취한 단층비지 시료의 ESR 연대 측정 결과, 12개의 시료 모두 ESR 신호가 포화되어 연대를 결정할 수 없었으며, 약 200만 년 전 이전으로 마지막으로 재활동한 것으로 추정된다.

A 지점에서 남서쪽으로 약 110 m 떨어져 있는 C 지점에서 채취한 단층비지 시료의 ESR 연대 측정 결과, 7개의 단층비지 시료 중 6개의 시료는 ESR 신호가 포화되어 연대를 결정할 수 없었으며, 약 200만 년 전 이전으로 마지막으로 재활동한 것으로 추정된다. 단층비지대 내부에 발달되어 있는 Y-전단 방향의 암회색 단층비지띠 시료 JW001-4의 ESR 연대는 590 ± 70 ka이다(그림 20; Location C).

C 지점에서 남서쪽으로 약 3.5 km 떨어진 지점(그림 1의 ㉔)에 발달되어 있는 단층핵에서는 8개의 ESR 연대가 보고되었다(Bae and Lee, 2016; 그림 20; Location D). 단층핵의 북서쪽 경계부에서는 2개의 ESR 연대(490 ± 60 ka, 530 ± 40 ka)가 보고되었으며, 이들을 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 520 ± 40 ka이다. 단층비지의 ESR 연대측정법의 의한 ESR

연대의 오차는 5~15%이기 때문에 위의 두 연대를 서로 구분한다는 것은 문제점이 있어 가중평균을 구해 활동시기로 결정하는 것이 타당하다고 여겨진다. 단층핵 내부의 단층비지대에서는 2개의 ESR 연대(630 ± 30 ka, 630 ± 50 ka)가 보고되었으며, 이들을 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 630 ± 30 ka이다. 단층핵의 남동쪽 경계부에서는 4개의 ESR 연대(390 ± 30 ka, 410 ± 30 ka, 420 ± 30 ka, 430 ± 30 ka)가 보고되었으며, 이들을 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 410 ± 20 ka이다.

A 지점 단층핵의 북서쪽 경계부의 ESR 연대와 D 지점 단층핵의 북서쪽 경계부의 ESR 연대는 각각 530 ± 130 ka과 520 ± 40 ka이며, 이는 오차범위 내에서 일치하며 이를 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 520 ± 40 ka이다. C 지점 단층핵의 내부에 발달되어 있는 Y-전단 방향의 단층비지띠의 ESR 연대와 D 지점 단층핵의 내부에 발달되어 있는 Y-전단 방향의 단층비지띠의 ESR 연대는 각각 590 ± 70 ka와 630 ± 30 ka이다. 이는 오차범위 내에서 일치하며, 이를 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 620 ± 30 ka이다. A 지점 단층핵의 남동쪽 경계부의 ESR 연대와 D 지점 단층핵의 북서쪽 경계부의 ESR 연대는 각각 370 ± 50 ka와 410 ± 20 ka이다. 이는 오차범위 내에서 일치하며, 이를 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 400 ± 20 ka이다. 3개 지점의 단층핵 사이의 거리는 총 3.6 km로, 이 연장선 내에 발달한 왕숙천단층의 단층핵은 적어도 3번의 재활동(약 62만 년 전, 약 52만 년 전, 약 40만 년 전) 기간 동안 3개 지점 모두에서 단층비지대의 일부가 재활동한 것으로 해석된다(그림 20). 약 62만 년 전에는 단층비지대 전체가 재활동했을 수도 있으나, 그 이후에 발생한 단층운동에 의해 단층비지대의 양쪽 경계부에 발달한 단층비지띠의 ESR 연대가 지워졌을 가능성이 있어 단층비지대 내부의 일부 단층비지띠가 약 62만 년 전 활동의 연대를 지시하고 있다. 약 52만 년 전에는 단층비지대의 북서쪽 경계부에 발달된 단층비지띠가 재활동하였으며, 약 40만 년 전에는 단층비지대의 남동쪽 경계부에 발달된 단층비지띠가 재활동한 것으로 해석된다(그림 20). 약 40만 년 전 이후에 지반이 용기한 이후 단층활동이 발생했을 수는 있으나 ESR 신호를 완전히 초기화(resetting) 시키기에 필요한 단층면에 작용하는 수직응력의 크기가 충분하지 않아 그

시기의 ESR 연대를 알아 낼 수 없는 것으로 판단된다(Lee and Schwarcz, 1994; Lee and Yang, 2003).

5.2.2 제4기 단층활동 형태

단층운동의 시간-공간적 변화를 판단하기 위하여 왕숙천단층의 단층핵 및 부수단층에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 종합적으로 살펴보았다(그림 21). ESR 연대는 오래될수록 단층이 재활동할 때 ESR 신호가 지워지는 경향이 있어 약 70만 년 전 이전의 ESR 연대는 거의 지워진 것으로 해석된다. ESR 연대의 오차범위를 고려하여 비슷한 ESR 연대끼리 짝을 지어 각각의 가중평균과 표준편차를 계산하였으며, 가중평균 값을 이용하여 재발주기를 평가하였다. 각각의 활동기간의 범위는 표준편차를 이용하여 색으로 나타내었다. 또한 각각의 활동시기에는 단층운동이 몇 번 일어났는지는 단층비지의 ESR 연대측정법만으로는 정확히 알 수 없지만 이 시기에는 비활동기에 비해 단층활동이 활발했음을 추정할 수 있다(그림 21). 각 지점별로 재활동 시기를 살펴보면, 약 62만 년 전(활동시기 VI)에는 C와 D 지점의 단층핵에서, 약 52만 년 전(활동시기 V)에는 A와 D 지점의 단층핵과 일부 부수단층에서, 약 40만 년 전(활동시기 IV)에는 A와 D 지점의 단층핵과 일부 부수단

층에서, 약 28만 년 전(활동시기 III)과 약 22만 년 전(활동시기 II)에는 일부 부수단층에서 각각 재활동하였으며, 마지막으로 약 16만 년 전(활동시기 I)에는 1개의 부수단층에서 재활동한 것으로 분석되었다. 이와 같은 활동기간의 가중평균을 이용하여 계산한 재발주기를 계산한 결과, 약 28만 년 이전의 재발주기는 10~12만 년이며 그 이후의 재발주기는 약 6만 년으로, 약 28만 년 전 이후에 재발주기가 짧아지는 경향을 보여준다.

왕숙천단층의 단층핵은 주로 남서부 지역에서만 보고되었고, 북동부 지역에서는 보고된 바가 없다(그림 21). 지금까지의 ESR 연대측정 결과에 따르면, 약 30만 년 이후에는 북동부 지역에 발달한 부수단층에서만 ESR 연대가 보고되었으며 이들은 오차범위 내에서 일치하는 경향을 보여 약 28만 년, 약 22만 년, 약 16만 년 전에 각각 재활동을 겪은 것으로 해석된다. 고지진을 연구하기 위해서는 단층핵의 활동연대가 매우 중요하다. 단층핵이 활동할 때 일부 부수단층이 활동하기 때문에 단층핵과 부수단층에서 각각의 ESR 연대가 필요하며, 단층핵의 ESR 연대와 부수단층의 ESR 연대가 오차범위 내에서 일치해야 한다. 따라서 단층핵이 발견되지 않은 왕숙천단층의 북동부 지역에서도 단층핵을 찾아 연구할 필

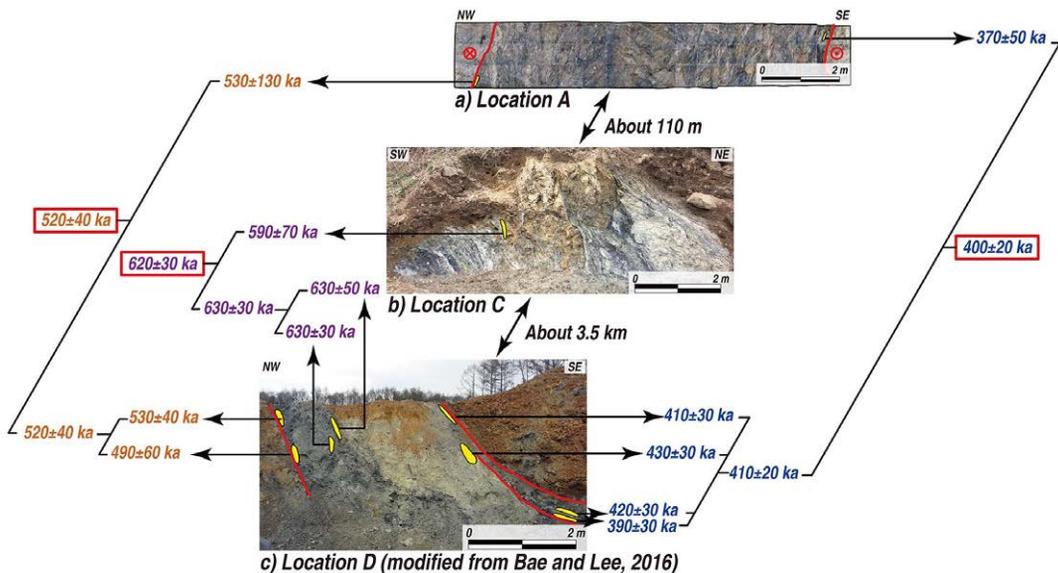


Fig. 20. Outcrop photographs and a photographic mosaic of fault cores developed along the Wangsukcheon fault. Sampling locations and ESR ages at the cross-section of the fault core at the study locations. (a) Location A. (b) Location C. (c) Location D.

요가 있다.

6. 결론

이번 연구는 왕숙천단층의 운동감각과 지질구조 특성을 밝히고, 단층비지의 진화과정을 규명하며 단층비지 시료를 이용한 ESR 연대측정으로 왕숙천단층의 제4기 단층운동 특성을 해석하고자 하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 야외지질조사 결과 왕숙천단층은 경기도 포천시 내촌면 신탄리 일대에서 2 갈래의 분절로 분기되는 것으로 판단된다. 흑운모편마암과 흑운모화강암의 경계를 기준으로 측정된 동쪽 및 서쪽 분절단층의 변위량은 각각 약 1.3 km와

약 2.5 km로서, 서로 다른 시기에 활동하였다면 최대 약 3.8 km에 달하는 우수향 변위를 가지며, 동시기에 활동하였다면 적어도 약 2.5 km의 우수향 변위를 가질 것으로 판단된다.

- 2) 단층핵을 구성하고 있는 암회색 단층비지 내에 발달된 S-엽리면의 방향을 단층의 운동감각을 나타내는 모식도와 비교하였을 때 왕숙천단층이 우수향 주향이동운동이 우세하였음을 지지하며, 단층비지대 내부에 발달된 전단면과 전단파의 방향 또한 우수향 주향이동운동을 일관되게 지시한다.
- 3) 왕숙천단층의 단층대는 노두규모에서 2개의 단층비지대의 2개의 단층각력암대로 구성되어 있으며, 전단변형작용은 단층비지대에서

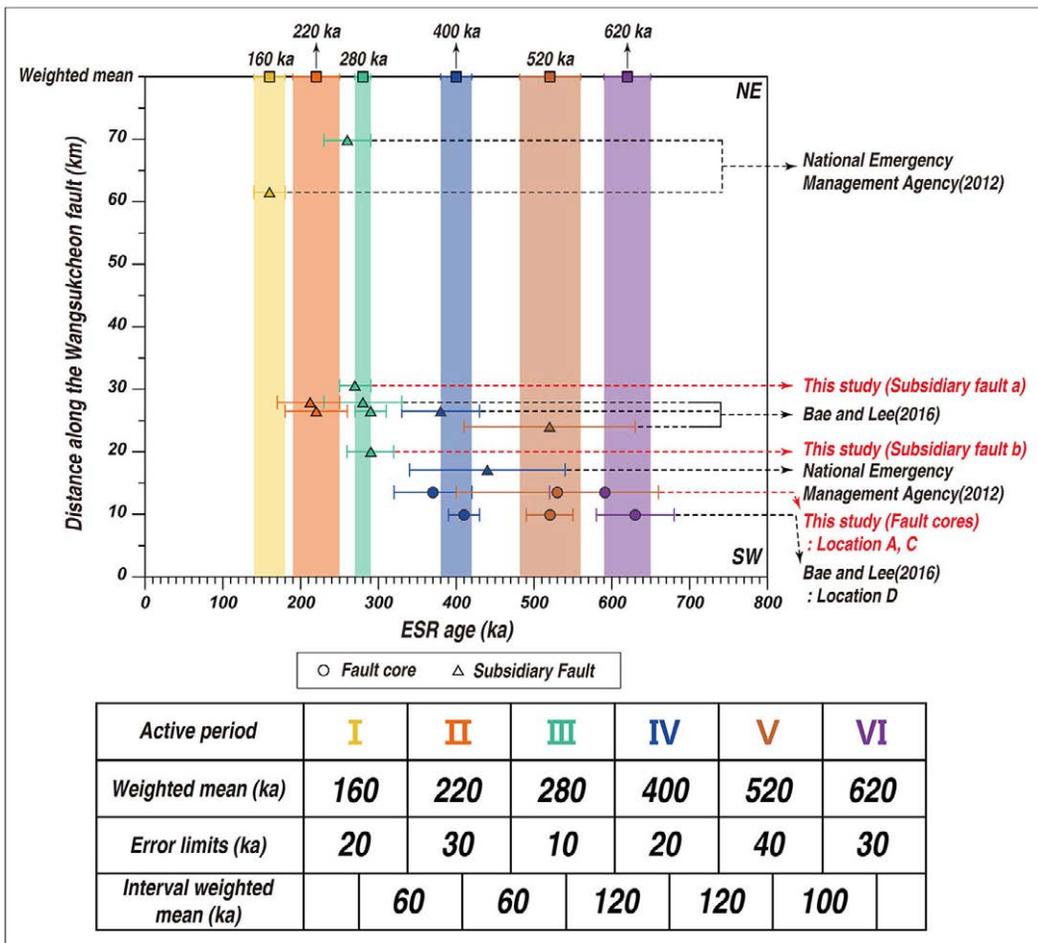


Fig. 21. Temporal activity pattern at the Wangsukcheon fault during the Quaternary Period (data from the National Emergency Management Agency, 2012; Bae and Lee, 2016).

집중적으로 발생한 것으로 해석된다. 왕숙천 단층의 단층핵 및 단층비지는 점진적이며 순차적으로 진화하였다. 첫 번째 단계에서는 분산 분쇄 각력암화작용이 우세하였으며, 혹은 모편마암에 여러 방향의 인장단열 및 전단단열이 발생하여 단층각력암이 형성되기 시작하였다. 두 번째 단계에서는 여러 방향의 전단파가 발달하여 렌즈 상의 모암을 둘러싸고 있으며, 렌즈 상의 모암들의 배열과 전단파에 의해 성분엽리가 형성되었다. 세 번째 단계에서는 전단작용이 진행됨에 따라 모암으로부터 렌즈 상의 암편들을 뜯어내어 전단파의 두께가 두꺼워지며, 암편의 크기는 작아지고 타원율은 커지며 기질의 함량이 증가하는 경향이 있다. 전단파들이 연결되고 합쳐져 단층비지띠를 형성하였다. 마지막 단계에서는 단층비지 내 점토광물들이 선택배향하여 S-엽리가 발달하였으며 이들에 의해 비늘구조가 형성되었다. 따라서 왕숙천단층대의 여러 가지 특징들은 단층대 발달과정의 전형적인 특징들을 잘 보여주고 있다.

- 4) 연구지역 내에 발달되어 있는 단층핵에서 채취한 단층비지 시료 29개 중 26개의 시료는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, 나머지 3개의 단층비지 시료로부터 얻은 ESR 연대는 590 ± 70 ka, 530 ± 130 ka, 370 ± 50 ka이다.
- 5) 기존의 연구결과와 이번 연구결과를 종합한 결과, 왕숙천단층의 제4기 단층운동은 활동기와 비활동기로 나누어지며, 총 6회의 활동기(약 62만 년 전, 약 52만 년 전, 약 40만 년 전, 약 28만 년 전, 약 22만 년 전, 약 16만 년 전)로 구분된다. 각 활동기간의 가중평균을 이용하여 평가한 재발주기는, 약 28만 년 이전에는 10~12만 년이지만 그 이후에는 약 6만 년으로 산정되어, 약 28만 년 전 이후에는 재발주기가 보다 짧아진 것으로 분석되었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상·지진See-At기술개발연구(KMI2018-02010), 강원대학교 학술연구조성비(연

구과제번호 D1000730-01-01)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다. 심사과정에서 건설적인 조언으로 이번 논문의 질을 향상시켜 주신 익명의 두 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Alder, S., Smith, S.A.F. and Scott, J.M., 2016, Fault-zone structure and weakening processes in basin-scale reverse fault: the Moonlight Fault Zone, South Island, New Zealand. *Journal of Structural Geology*, 91, 177-194.
- Bae, H.K., 2016, Quaternary activity patterns of the Keumwang Fault in the Jincheon area and the Wangsukcheon Fault in the Pocheon-Namyangju area, Korea. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 66-69 p (in Korean with English abstract).
- Bae, H.K. and Lee, H.K., 2016, Quaternary activity patterns of the Wangsukcheon Fault in the Pocheon-Namyangju area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 129-147 (in Korean with English abstract).
- Bastesen, E., Braathen, A., Nottveit, H., Gabrielsen, R.H. and Skar, T., 2009, Extensional fault cores in micritic carbonate - Case studies from the Gulf of Corinth, Greece. *Journal of Structural Geology*, 31, 403-420.
- Berthe, D., Chouroune, 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.
- Billi, A., Salvini, F. and Storti, F., 2003, The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology*, 25, 1779-1794.
- Bistacchi, A., Massironi, M. and Menegon, L., 2010, Three-dimensional characterization of a crustal-scale fault zone: The Pusteria and Sprechenstein fault system (Eastern Alps). *Journal of Structural Geology*, 32, 2022-2041.
- Caine, J.S., Evans, J.P., and Foster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1125-1128.
- Cheon, Y.B., Cho, H.S., Song, C.W. and Son, M., 2019, Development of the intracontinental, continuous, narrow transpressional zone along the Sinnyeong Fault in the Cretaceous Gyeongsan Basin, SE Korea. *Geosciences Journal*, 23, 21-36.
- Cheon, Y.B., Ha, S.M., Lee, S.J., Cho, H.S. and Son, M., 2017, Deformation features and history of the Yangsan Fault Zone in the Eonyang-Gyeongju area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 95-114

- (in Korean with English abstract).
- Chester, F.M., Evans, J.P. and Biegel, R.L., 1993, Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research*, 98, 771-786.
- Chester, F.M. and Logan, J.M., 1986, Composite planar fabrics of gouge from the Punchbowl fault, California. *Journal of Structural Geology*, 9, 621-634.
- Cho, D.L. and Kim, O.J., 2003, SHRIMP U-Pb zircon age dating of Biotite gneiss and Leucogranite dike in the Pocheon area, Gyeonggi massif: Constraints on Regional metamorphism Age and Depositional age. 2003 Fall Joint Conference of the Geological Sciences, Andong, October 24-25, 76 p (in Korean).
- Choi, S.J., Jeon, J.S., Song, K.Y., Kim, H.C., Kim, Y.H., Choi, P.Y., Choi, W.C., Han, J.G., Ryoo, C.R., Sun, C.G., Jun, M.S., Kim, G.Y., Kim, Y.B., Lee, H.J., Shin, J.S., Lee, Y.S., Gi, W.S., Lee, H.K., Song, Y.G., Kim, Y.S., Kang, T.S., Hong, D.G. and Kim, S.K., 2012, Active Fault Map and Seismic Hazard Map. Natural Hazards Mitigation Research Group, National Emergency Management Agency, 318-362 p.
- Cowie, P.A. and Shipton, Z.K., 1998, Fault tip displacement gradients and process zone dimensions. *Journal of Structural Geology*, 20, 983-997.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, C.F., 2011. *Structural Geology of Rocks and Regions*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 249-343 p.
- Evans, J.P., Forster, C.B. and Goddard, J.V., 1997, Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 19, 1393-1404.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C. and Rutter, E.H., 2003, On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras Fault in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 367, 235-251.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 318-343 p.
- Han, J.W., 2019, Geological structures and Quaternary activity features of the Wangsukcheon Fault in the Pocheon-Namyangju-si area, Gyeonggi-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 36-70 p (in Korean with English abstract).
- Hwang, J.H. and Kihm, Y.H., 2007, Geological report of the Jipori sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Kee, J.S., 2000, Tectonic study on the Chugaryeong fault zone in the vicinity of Euijeongbu-Dongducheon area using geophysical methods. Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, 75-99 p (in Korean with English abstract).
- Kee, W.S., Cho, D.L., Kim, B.C. and Jin, K.M., 2005, Geological report of the Pocheon sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Kee, W.S., Kim, H.C., Cho, D.L. and Lee, S.B., 2009, Geological Age of the Yeoncheon Group and geological structure of the Imjingang belt-Gyeonggi massif boundary. The 8th Geology of Korea Symposium, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 142 p (in Korean).
- Kim, H.C., Choi, S.J. and Lee, H.K., 2013, Wangsookchun Fault. The 68th Regular Meeting of the Geological Society of Korea and 2013 Fall Joint Conference of the Geological Sciences, Jeju, October 23-27, 274 p (in Korean).
- Kim, M.J., 2018, Activity features of the Keumwang Fault in the Inje-gun area, Gangwon-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 71-77 p (in Korean with English abstract).
- Kim, O.J., 1973, The stratigraphy and Geologic Structure of the Metamorphic Complex in the Northwestern Area of the Kyonggi Massif. *Journal of Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 6, 201-218 (in Korean with English abstract).
- Koh, H.J. and Song, K.Y., 2005, Geological report of the Uijeongbu sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J., Kim, Y.B. and Kee, W.S., 2006, Geological report of the Gisan sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K., 2010, Structural features of the Keumwang fault zone at Sangnam-myon, Inje-gun, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 561-576 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K., 2011, Chapter 3. Age dating in Active fault map and Seismic Hazard map. NHMRG, 318-362 p.
- 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 Schwarcz, H.P., 1994, Criteria for complete zeroing of the ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, southern California. *Tectonophysics*, 235, 317-337.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1996, Electron spin resonance plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, Southern California. *Journal of Geological Society of America Bulletin*, 108, 735-746.
- Lee, H.K. and Yang J.S., 2003, ESR dating of the Wangsan fault, South Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1339-1343.
- Lister, G.S. and Snoke, A.W., 1984, S-C mylonites. *Journal of Structural Geology*, 6, 617-638.

- Moore, J.C., Roeske, S., Cowan, D.S., Lundberg, N., Gonzales, E., Schoonmaker, J. and Lucas, S.E., 1986, Scaly fabrics from Deep Sea Drilling Project cores from forearcs. *Geological Society of America Memoir*, 166, 55-74.
- Oertel, G., 1983, The relationships of strain and preferred orientation of phyllosilicates grains in rock - A review. *Tectonophysics*, 100, 413-447.
- Park, J.R. and Lee, H.K., 2012, Internal structure and microstructural features of the Keumwang fault zone at Jwaun-ri, Dong-myeon, Hongcheon-gun, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 27-47 (in Korean with English abstract).
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, *Microtectonics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 289 p.
- Ramsay, J.G. and Graham, R.H., 1970, Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 7, 786-813.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983, *The Techniques of Modern Structural Geology, Strain Analysis*. vol. 1, Academic Press, London, 15-31 p.
- 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.
- Schulz, S.E. and Evans, J.P., 2000, Mesoscopic structure of the Punchbowl Fault, Southern California and the geologic and geophysical structure of active strike-slip fault. *Journal of Structural Geology*, 22, 913-930.
- Sibson, R.H., 1986, Brecciation processes in fault zones: Inferences from earthquake rupturing. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 159-176.
- Song, K.Y. and Cho, D.L., 2007, Geological report of the Gimhwa sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Vannucchi, P., 2019, Scaly fabric and slip within fault zones. *Geosphere*, 15, 342-356.
- 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).
- Williams, R., 1977, *Marxism and Literature*. Oxford University Press, Oxford, 217 p.
- Yang, J.S. and Lee, H.K., 2012, ESR dating of fault gouge from the Gacheon 1 site on the Yangsan fault zone. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 459-472 (in Korean with English abstract).

Received : July 15, 2019

Revised : August 2, 2019

Accepted : August 4, 2019