

포천-남양주시 일대에 발달한 왕숙천단층의 제4기 활동형태

배한경 · 이희권[‡]

강원대학교 지질학과

요 약

ESR 연대 측정을 통하여 포천-남양주시 일대에 발달한 왕숙천단층의 제4기 활동 형태를 연구하였다. 왕숙천단층은 총연장이 약 80 km인 북북동-남남서 방향의 우수향 주향이동단층이며, 단층핵과 단층손상대로 구성되어 있다. 흑운모 편마암에 단층손상대와 단층핵이 발달되어 있으며, 단층비지로 구성된 단층핵의 폭은 약 3.2 m이다. 단층손상대와 단층핵 사이에 발달한 북서쪽 단층면의 방향은 N41°E/80°SE이며, 남동쪽 단층면의 방향은 N43°E/81°SE이다. 단층손상대에는 Y-전단, R-전단, R'-전단, P-전단 방향으로 부수단층들이 발달되어 있다. 연구지역의 단층핵 및 부수단층으로부터 채취한 단층비지로 얻은 ESR 연대는 약 960 ka부터 210 ka에 이르며, 단층활동이 남서쪽에서 북동쪽으로 주향방향을 따라 이동하는 경향을 보인다. 역사지진이나 홀로세지진의 활동기에 단층활동이 집중되는 현상과 유사하게 왕숙천단층의 ESR 연대에서도 활동기에 단층활동이 집중된다. 왕숙천단층은 오래된 단층으로 알려져 왔으나 이번 연구를 통해 연구지역에 발달한 왕숙천단층이 제4기에도 장주기를 가지고 반복적으로 재활동했음을 알 수 있다.

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

Han-Kyung Bae and Hee-Kwon Lee, 2016, Quaternary activity patterns of the Wangsukcheon Fault in the Pocheon-Namyangju area, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 2, p. 129-147

ABSTRACT: We investigated spatial and temporal patterns of Quaternary fault activities of the Wangsukcheon Fault developed in the Pocheon-Namyangju area, using ESR dating method. The Wangsukcheon Fault is a major, 80-km-long, NNE-striking, dextral strike-slip fault in Gyeonggi-do, Korea. The fault is composed of a fault core and zones of damaged host rocks. The fault core consists of 3.2 m-thick fault gouge layer bounded fractured biotite gneiss. The NW-fault plane developed between fault gouge and damage zone strikes N41°E and dips 80°SE, SE-fault plane strikes N43°E and dips 81°SE. Some subsidiary faults including R-shear, R'-shear, P-shear and Y-shear were developed in the damage zone. ESR dates from the fault core and subsidiary faults range from 960 ka to 210 ka. A SW-NE migration of fault activities along the strike of the fault appears to have occurred. The results show temporal clustering within active period, analogous to those seen in historic and Holocene earthquake fault activities. Although, the Wangsukcheon Fault was formerly considered to be an exhumed ancient fault, results of this study suggest that the long-term cyclic fault activities along the fault continued into the Quaternary period.

Key words: Wangsukcheon Fault, fault gouge, fault core, ESR dating, Quaternary pattern of fault activities

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

1. 서 론

왕숙천단층은 Kim (1973)에 의해 명명 되었으며, 김화도폭(Song and Jo, 2007)의 철원군 서면 일대로부터 지포리도폭(Hwang and Kim, 2007)의 철원군 갈말읍 지포리 일대, 기산도폭(Lee *et al.*, 2006)의 포

천시 일동면 일대를 거쳐 의정부도폭(Koh and Song, 2005)의 남양주시 진접읍 왕숙천 일대까지 발달한 총 연장 약 80 km의 우수향 주향이동 성분인 우세한 단층으로 알려졌다(Hwang and Kim, 2007). 의정부도폭(Koh and Song, 2005)에서는 항공사진과 전산 음영기복도에서 선구조선을 추출하였으며, N30°E 방

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

향의 선구조선이 왕숙천단층과 일치하나, 대부분은 제4기 충적층으로 피복되어 있기 때문에 단층노두가 거의 관찰되지 않는다고 보고하였다. 소방방재청의 자연재해저감기술개발사업에 의하면 Lee (2011)는 강원도 철원군 근남면, 철원군 자등2리 및 경기도 포천시 내촌면 일대에 발달한 왕숙천단층의 부수단층들에서 채취한 단층비지의 ESR 연대가 약 44만 년 전, 26만 년 전 및 16만 년 전에 재활동하였다고 보고하였다. 왕숙천단층은 인구밀집 지역인 서울과 수도권 일대에 분포하고 있음에도 불구하고 왕숙천단층에 대한 연구는 거의 수행되지 않았으며, ESR 연대자료는 소방방재청에서 실시한 자연재해저감기술개발사업(Lee, 2011)이 전부이다. 기존 ESR 연대 자료가 부족하여 왕숙천단층의 시공간적 활동형태를 파악하기에는 어려움이 있었으며, 이번 연구를 통해 왕숙천단층의 특성 및 시공간적 활동형태를 확인하고자 하였다.

이 논문의 목적은 ESR 연대 측정법을 이용하여 포천-남양주시 일대에 발달한 왕숙천단층의 제4기 시공간적 활동형태를 파악하는 것이다. 주단층과 부수단층들이 각기 다른 활동시기를 대표한다는 점(Lee and Schwarcz, 1996; Bae and Lee, 2014)과 여러 띠로 구성된 단층비지대에서는 각각의 단층비지 띠들이 각기 다른 활동시기를 지시한다는 점(Lee and Schwarcz, 1996)을 이용하여 포천-남양주시 일대에 발달한 왕숙천단층의 제4기 활동 이력을 파악하였다.

2. ESR 연대 측정 원리 및 방법

ESR 연대 측정 원리는 Lee and Schwarcz (1994), Lee (1999), Lee and Yang (2005)에 자세히 제시되어 있다. ESR 연대를 구하기 위해서는 ESR 신호의 세기를 에너지의 형태(상응조사량; equivalent dose (DE))로 전환시켜야만 한다. 또한 모양과 단층암석 시료 속의 U, Th, K의 양을 감마조사선법을 이용하여 결정된 조사율(dose rate(d))로 변환하여 ESR 연대를 계산한다. ESR 연대는 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다(Lee and Schwarcz, 1994; Lee, 1999; Lee and Yang, 2005).

$$ESR\ age = \frac{DE}{d}$$

ESR 연대를 구하기 위해서는 지질학적 사건에 의해 ESR 신호의 세기가 완전히 영이 되어야 하며, 일반적으로 큰 입자들은 부분적으로 초기상태(partial resetting)가 되고 작은 입자들은 완전히 영이 된다(completely resetting). ESR age vs 입자크기 그래프에서 초기화 상태가 된 작은 입자의 연령 평탄역(ESR age plateau)이 유지되면서 연령만 증가하게 되고 큰 입자들은 부분적으로 초기화 되어 연령 평탄력에 놓이지 않게 된다(Lee and Schwarcz, 1994; Lee, 1999; Lee and Yang, 2005).

단층비지의 ESR 수치 연대 측정을 시행하기에 앞서 단층비지 시료에 있는 탄산염물질, 유기물질, 장석류 및 점토광물을 제거하기 위해 산처리 한 후, wet-sieving과 dry-sieving과정을 거쳐 단층비지 시료를 입자크기별로 분리하였다. 마그네틱 분리기를 이용하여 각각의 입자크기 시료에서 석영을 분리하였다. 분리된 석영을 각 입자크기별로 약 100 mg 씩 10개의 시료를 준비하여 원자력연구원 방사선조사소에서 단계별로 방사선조사(^{60}Co)를 실시하였다(Hong and Lee, 2012). 조사량(dose)은 시료와 ^{60}Co 와의 거리와 조사시간을 조절하여 결정하였다. 한국 원자력연구원 방사선조사소에 설치된 감마선 조사 장비의 조사율은 0.11~0.33 mGy/s 이었다. ESR 신호의 측정은 강원대학교 공동실험실습관의 JES-TE 200 ESR 분광계를 이용하였으며 E' 신호는 상온에서, Al 신호는 액체질소를 이용하여 저온(77K)에서 측정하였다(Hong and Lee, 2012). 상온에서의 기계설정은 마이크로파 주파수(microwave frequency) = 9.443 GHz; 마이크로파 세기(microwave power) = 0.1 mW; 주사폭(scan width) = 2.5 mT; 주사시간(scan time) = 60 s; 변조주파수(modulation frequency) = 100 kHz; 변조폭(modulation amplitude) = 0.1 mT; 시간상수(time constant) = 164 ms 이다. 저온에서의 기계설정은 주사폭 = 5 mT; 마이크로파 세기 = 2 mW; 주사시간 = 30 s 이며, 나머지 기계설정은 상온에서와 동일하다(Hong and Lee, 2012).

3. 연구지역의 암상

한국지질자원연구원에서 발행한 청평도폭(Kim et al., 1981), 의정부도폭(Koh and Song, 2005), 포천도폭(Kee et al., 2005), 기산도폭(Lee et al., 2006)을 기

초로 하여 포천-남양주시 일대에 발달한 왕숙천단층 일원의 암상 분포와 특성을 파악하였다.

선캄브리아시대의 흑운모편마암은 경기편마암복합체에 속하며, 연구지역에 넓게 분포한다(그림 1). 흑운모편마암은 퇴적기원 근원암의 다양한 암상을 반영하여 지역적으로 차이를 보이며 분포하나 야외에서 구분하기 힘들어 편의상 흑운모 편마암으로 통칭하였다(Koh and Song, 2005). 변성작용에 의한 대상구조가 발달되어 있으며, 수 mm ~ 수 cm 폭의 규장질 광물과 고철질 광물이 서로 교호하여 뚜렷한 호상편마구조를 보인다. 흑운모 편마암의 엽리는 대체적으로 N02°W/22°NE 방향이 우세하며, 노두규모의 습곡(습곡축: 30→120)이 발달하고 있다. 주 구

성광물은 석영, 사장석, 흑운모이며, 녹니석, 백운모, 불투명광물을 포함한다.

화강편마암은 흑운모편마암을 관입하며, 별내면 청학리, 진접읍 금곡리 가마솔골 일대에 소규모 분포한다(그림 1). 대체적으로 괴상의 조립질 조직을 보이며, 1 cm 이하의 석영과 장석의 반정이 관찰된다. 엽리는 아주 미약하게 발달되어 있으며, 방향성을 측정할 수 없었다. 주 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모이다.

반상화강암은 선캄브리아시대의 흑운모편마암과 화강편마암을 관입하고 있으며, 연구지역의 북동부에 넓게 분포한다(그림 1). 대체적으로 중립 내지는 조립의 입도를 보이며, 1~3 cm 인 장석 반정을 포함

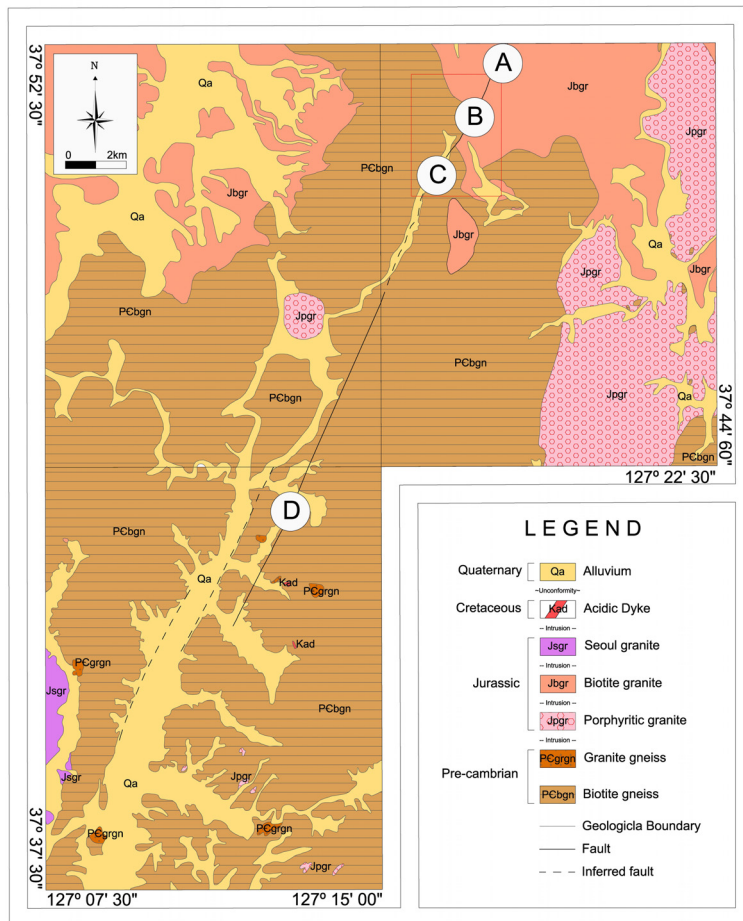


Fig. 1. Geological map of the study area showing the locations of sampling sites (A, B, C and D) along the Wangsukcheon Fault (modified from Kim *et al.* (1981), Kee *et al.* (2005), Koh and Song (2005) and Lee *et al.* (2006)). The intrusive contacts of biotite granite show dextral offset of about 1.5 km in the red rectangle.

하는 반상조직을 보인다. 주 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모로 구성되어 있다.

흑운모화강암은 선캄브리아시대의 흑운모편마암과 쥐라기 반상화강암을 관입하고 있으며, 연구지역의 북부에 분포한다(그림 1). 흑운모화강암은 전반적으로 담회색을 띠며, 괴상의 등립질 암석으로 중립 내지 조립의 입도를 보인다. 주 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성되며 불투명광물들이 수반된다.

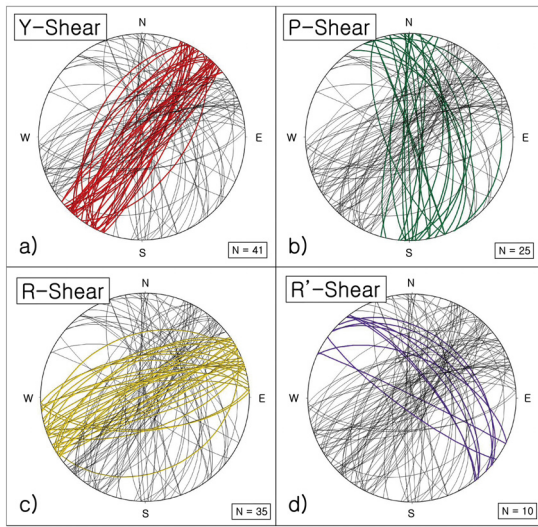


Fig. 2. Stereo plots of subsidiary faults in the damage zone of the Wangsukcheon Fault. (a) Faults in the orientation of Y-shear, (b) Faults in the orientation of P-shear, (c) Faults in the orientation of R-shear, (d) Faults in the orientation of R'-shear.

4. 왕숙천단층의 특성 및 시료채취

연구지역의 중심부를 북북동-남남서 방향으로 가로지르는 왕숙천단층의 연장은 약 25 km 이며, 우수향 주향이동 감각이 우세하다. 의정부도폭(Koh and Song, 2005)에서 왕숙천단층의 자취는 N22°E이나 단층핵이 발견된 D 지점에서 측정된 단층면의 방향은 N41°E/80°SE이고 단층조선의 방향은 03→220이다. 이는 단층의 자취를 따라 부분적으로 단층면의 방향이 변하는 것으로 해석된다. 연구지역의 북부에서 흑운모화강암의 관입경계가 왕숙천단층에 의해 약 1.5 km 우수향으로 어긋나 있다(그림 1). D 지점에서는 폭이 약 3.2 m인 단층비지로 이루어진 단층핵이 발달되어 있고, 나머지 A, B, C 지점에는 부수단층들이 발달되어 있다. 우수향 주향이동 운동을 고려하여 부수단층들을 Y-전단방향의 단층, R-전단방향의 단층, R'-전단방향의 단층, P-전단방향의 단층 등으로 구분하였다(그림 2). ESR 연대 측정을 위하여 왕숙천단층의 주단층 및 부수단층에서 단층비지 시료를 채취하였다.

4.1 A 지점

연구지역의 북부에 위치한 A 지점에는 Y-전단방향과 P-전단방향의 부수단층이 발달되어 있다. P-전단방향(N01°W/80°NE)의 부수단층면을 따라 1 cm 폭의 단층비지띠가 발달되어 있으며, 이곳에서 단층비지 시료 WS17을 채취하였다(그림 3a). WS17를 채취한 지점에서 약 50 m 떨어진 곳에서는 Y-전단

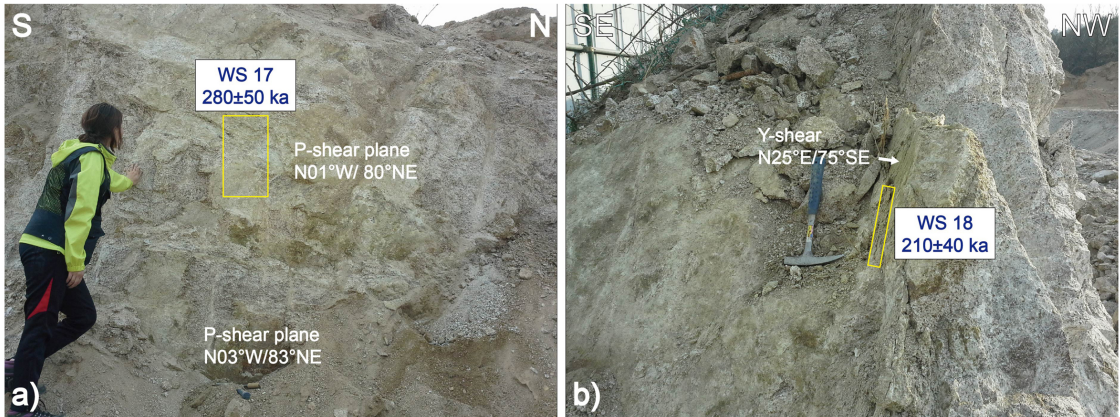


Fig. 3. Outcrop photographs of subsidiary faults at site A. (a) P-shear plane, sampling location (yellow box) and ESR age of WS17, (b) Y-shear, sampling location (yellow box) and ESR age of WS18.

방향(N25°E/75°SE)의 폭이 약 5 cm인 단층비지띠가 발달되어 있으며, 단층비지 시료 WS18을 채취하였다(그림 3b).

4.2 B 지점

B 지점에는 Y-전단방향, R-전단방향 그리고 R'-전단방향의 부수단층이 발달되어 있다. R'-전단방향(N50°W/43°SW)의 부수단층이 Y-전단방향(N16°E/87°NW)의 부수단층에 의해 끊겨 있어 Y-전단방향의 부수단층이 나중에 형성되었음을 알 수 있다. 이곳에서 각각의 단층비지 시료 WS16-1과 WS16-2를 채취하였다(그림 4a). 단층비지 시료 WS16-1과 WS16-2를 채취한 지점에서 약 1 m 떨어진 곳에 발달한 Y-전단방향(N28°E/83°NW)으로 폭이 1 cm 이내의 단층비지띠가 발달되어 있으며, 이곳에서 단층비지 시료 WS16-3을 채취하였다(그림 4b). 단층비지 시료 WS16-3을 채취한 곳에서 약 3 m 떨어진 지점에는 R-전단방향(N56°E/84°SE)과 R'-전단방향(N11°W/89°NE)의 부수단층이 발달되어 있으며, 이곳에서

각각의 단층비지 시료 WS16-4와 WS16-5를 채취하였다(그림 4c, 4d).

4.3 C 지점

C지점에는 R-전단방향(N03°W/59°NE, N05°E/61°SE)으로 폭이 약 3~5 cm인 단층비지띠가 발달되어 있으며, 단층비지 시료 WS2를 채취하였다(그림 5a). R'-전단방향(N37°W/72°NE)으로 부수단층이 발달되어 있으며, 좌수향 운동감각을 보이는 단층조선(12°→327°)이 발달되어 있다(그림 5b). WS2시료를 채취한 지점에서 약 50 m 떨어진 곳에서는 Y-전단방향(N32°E/76°NW)으로 단층조선(06→030)을 포함한 단층면이 발달되어 있다(그림 5c, 9d). 폭이 약 1~2 cm 단층비지띠에서 단층비지 시료 WS4를 채취하였다(그림 5c).

4.4 D 지점

D 지점에는 단층비지대로 구성된 폭이 약 3.2 m 인 단층핵이 발달되어 있다. 단층손상대와 단층핵

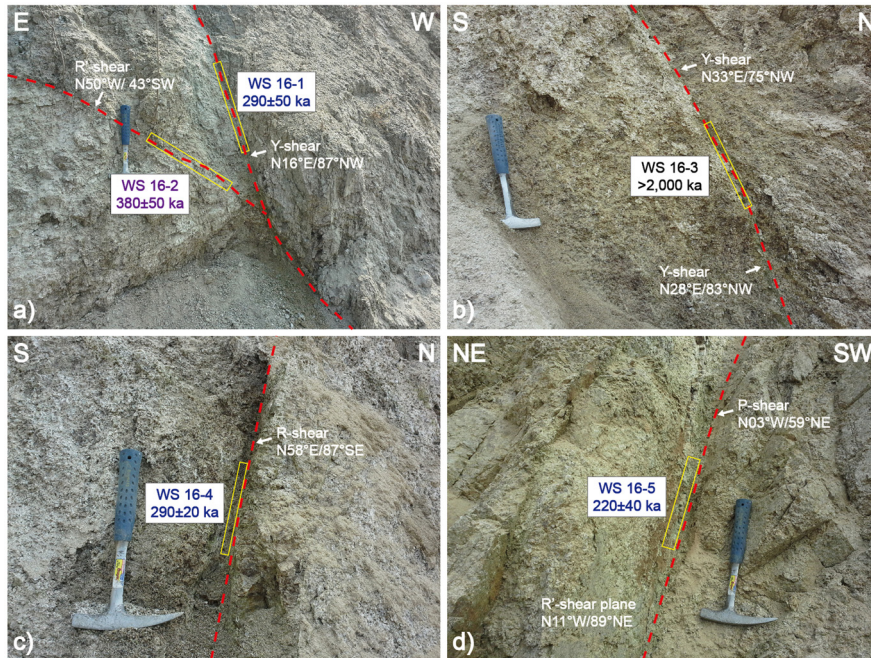


Fig. 4. Outcrop photographs of subsidiary faults at site B, (a) Y-shear cut the R'-shear (dotted red lines show each subsidiary fault planes). Sampling locations (yellow boxes) and ESR ages of WS16-1 and WS16-2, (b) Dotted red line is Y-shear fault plane. Sampling location (yellow box) and ESR age of WS16-3, (c) Dotted red line is R-shear fault plane. Sampling location (yellow box) and ESR age of WS16-4, (d) R'-shear fault plane and P-shear fault plane (dotted red line). Sampling locations (yellow box) and ESR age of WS16-5.

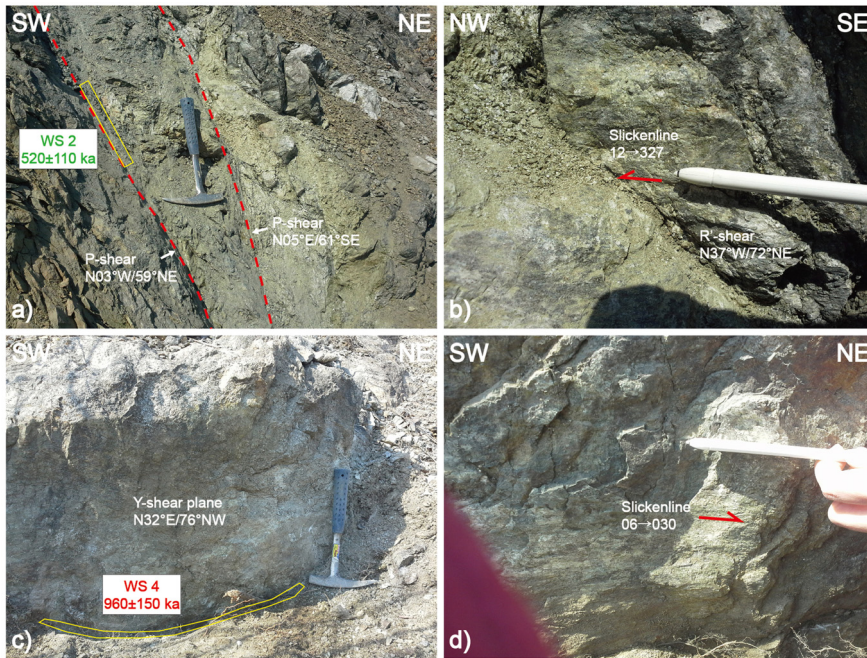


Fig. 5. Outcrop photographs of subsidiary faults at site C, (a) Dotted red lines are P-shear fault planes. Sampling location (yellow box) and ESR age of WS2, (b) R'-shear plane with slickenlines, (c) Y-shear fault plane. Sampling location (yellow box) and ESR age of WS4, (d) Y-shear plane with slickenlines.

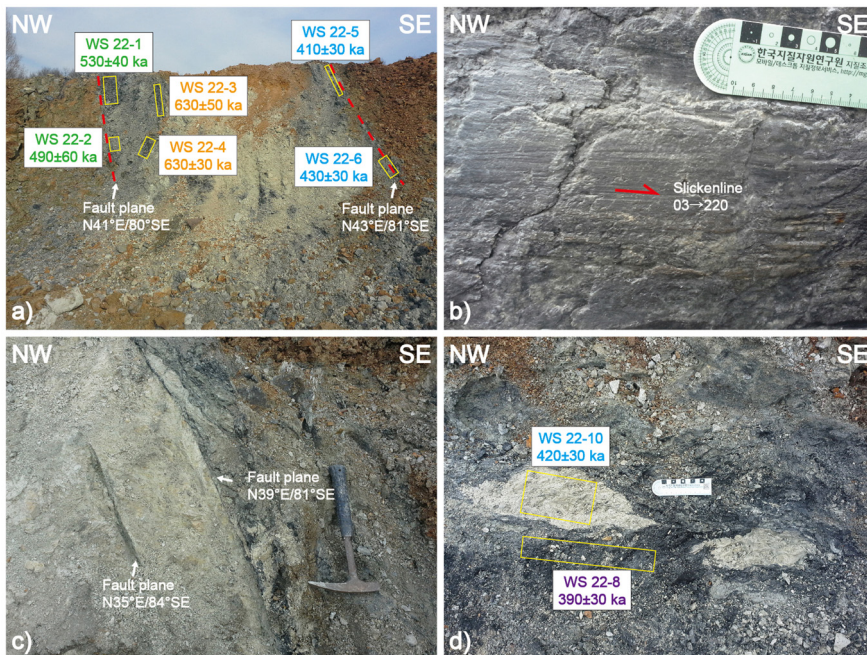


Fig. 6. Outcrop photographs of fault core and subsidiary faults of the Wangsukcheon Fault at site D, (a) Fault core showing sampling locations (yellow boxes) and each ESR ages, (b) Fault plane with slickenlines, (c) Boundary fault plane between fault gouge and damage zone, (d) Relics of light fault gauge within dark fault gauge. Sampling locations (yellow boxes) and ESR ages of WS22-8 and WS22-10.

북서쪽 경계면은 N41°E/80°SE이며, 단층조선(03→220)이 발달되어 있다(그림 6a, 6b). 단층비지 시료 WS22-1과 WS22-2는 단층손상대와 단층핵 경계부에서 채취하였다(그림 6a). 단층손상대와 단층핵 남동쪽 경계면은 N43°E/81°SE 이며, 이 경계부에서 단층비지 시료 WS22-5와 WS22-6을, 단층핵 내부에서 단층비지 시료 WS22-3과 WS22-4를 채취하였다(그림 6a). 단층핵의 단층비지는 암회색의 단층비지띠와 유백색의 단층비지띠로 나뉘어지며, 암회색의 단층비지띠 내에 유백색의 단층비지가 잔유물로 포함되어 있다(그림 6c, 6d). 이를 통해서 유백색 단층비지띠가 활동한 이후에 암회색의 단층비지띠가 재활동하였음을 추정하였으며, 이를 확인하기 위하여 암회색 단층비지 시료 WS22-8과 유백색의 단층비지 시료 WS22-10를 채취하였다(그림 6d).

D지점에 발달한 단층손상대는 암회색을 띄며, 유백색의 단층비지대와 구분된다. 유백색의 단층비지대와 암회색의 단층손상대 북서쪽 경계면의 방향은 N43°E/76°SE 이다(그림 7a, 7b). 이곳에서 단층비지

시료 WS22-7를 채취하였다(그림 7b). 단층손상대에는 다양한 방향의 부수단층이 관찰되며, Y-전단방향(N28~48°E/69~80°NW), R-전단방향(N72~87°E/61~78°NW), P-전단방향(N02°W/89°SW)의 부수 단층들이 발달되어 있다(그림 7c, 7d).

5. ESR 연대측정 결과

왕숙천단층에서 채취한 시료에 대한 U, Th, K 등의 양에 대한 측정결과는 표 1에, ESR 연대측정 자료는 표 2에 제시되어 있다. D지점에서 채취한 WS22-1과 WS22-5 시료에 대한 Th의 양이 다른 시료에 비해 예외적으로 낮거나 높게 측정되어 WS22-1과 WS22-5 시료에 대해서는 D지점에서 채취한 단층비지 시료의 평균값(*WS22)을 이용하여 조사율(Dose rate)을 계산하였다.

5.1 A 지점의 단층비지 ESR 연대

A 지점에서 채취한 시료에 대한 ESR 신호의 성장

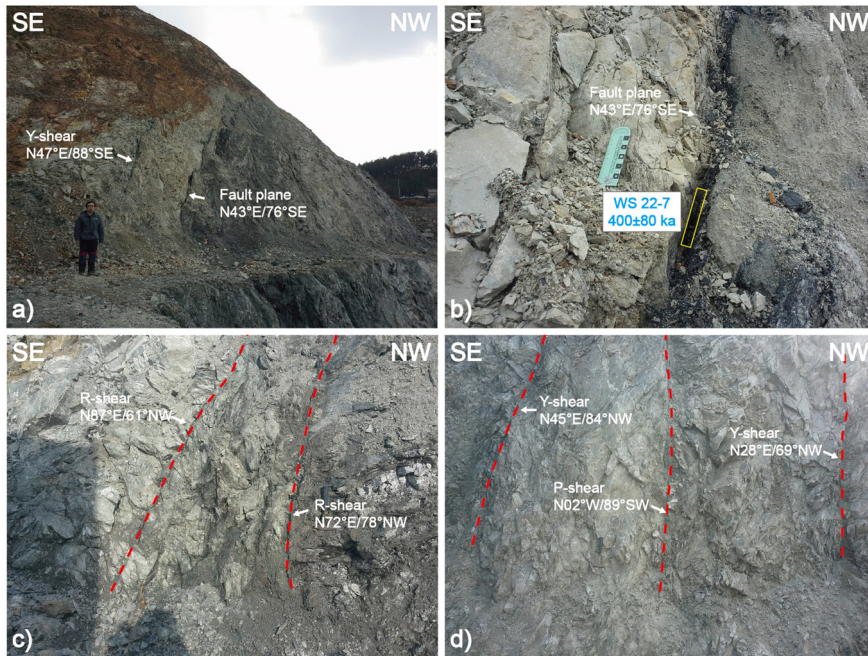


Fig. 7. Outcrop photographs of subsidiary faults in the damage zone of the Wangsukcheon Fault at site D. (a) Boundary fault plane between damage zone (left side) and fault gouge zone (right side). (b) Close-up photograph of boundary fault plane showing sampling location (yellow box) and ESR age of WS22-7. (c) and (d) Subsidiary faults in the damage zone of fault (dotted red lines show each subsidiary fault planes). Note that fault gouge samples of WS22-7 is separated by about 20 m along the strike from fault gouge samples of WS22-8 and WS22-10 in Fig. 6d.

Table 1. Amounts of U, Th, K for each sample of Wangsukcheon fault gouges. *WS 22 is average of all samples of fault gouge collected from site D.

Sample	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Sample	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
WS 2	2.54±0.04	15.41±0.49	2.80±0.02	WS 22-1	1.16±0.02	7.51±0.16	2.12±0.02
WS 4	3.05±0.05	25.74±0.59	2.53±0.02	WS 22-2	1.80±0.02	11.06±0.27	2.93±0.02
WS 16-1	4.45±0.06	30.36±0.39	4.35±0.03	WS 22-3	1.31±0.02	10.17±0.22	2.90±0.02
WS 16-2	4.66±0.05	29.43±0.37	5.54±0.03	WS 22-4	1.48±0.02	10.71±0.25	2.74±0.02
WS 16-3	6.88±0.07	55.44±0.60	5.00±0.03	WS 22-5	2.06±0.03	20.97±0.26	2.84±0.02
WS 16-4	6.89±0.08	41.28±0.50	5.24±0.03	WS 22-6	1.69±0.03	12.74±0.25	3.34±0.02
WS 16-5	4.33±0.05	26.94±0.33	3.91±0.02	WS 22-7	1.45±0.02	13.27±0.25	2.72±0.02
WS 17	4.24±0.05	23.87±0.39	5.10±0.03	WS 22-8	1.00±0.02	9.11±0.15	3.21±0.02
WS 18	3.96±0.05	34.74±0.43	5.19±0.03	WS 22-10	1.54±0.02	10.7±0.24	2.85±0.02
				*WS 22	1.50±0.02	11.80±0.23	2.85±0.02

Table 2. Analytical data for ESR dating of Wangsukcheon fault gouge in study area. Weighted mean is calculated from the ESR ages within the plateau (shown as rectangle in column of ESR age) and the values have been rounded up.

Sample	Grain size (μm)	Center	DE (Gy)	Dose rate (μGy/year)	ESR age (ka)	Weighted mean (ka)
WS 2 B	25-45	E'	2025±598	3451±290	586±179	520±110
WS 2 C	45-75	E'	2646±293	3361±281	787±109	
WS 2 B	25-45	Al	1648±471	3451±290	477±142	
WS 4 B	25-45	Al	4541±1361	4766±389	952±296	960±150
WS 4 C	45-75	Al	4465±714	4648±378	960±172	
WS 16-1 B	25-45	E'	1835±390	6229±523	294±67	290±50
WS 16-1 C	45-75	E'	1641±454	6065±507	270±87	
WS 16-2 B	25-45	E'	2612±428	7173±608	364±67	380±50
WS 16-2 C	45-75	E'	3180±980	6982±589	455±145	
WS 16-2 B	25-45	Al	2743±893	7173±608	382±128	
WS 16-2 C	45-75	Al	2622±728	6981±589	375±109	
WS 16-4 B	25-45	E'	2245±646	8098±676	277±83	290±20
WS 16-4 C	45-75	E'	2278±159	7843±653	290±31	
WS 16-4 D	75-100	E'	2031±266	7671±635	264±41	
WS 16-4 E	100-150	E'	2238±286	7406±609	302±45	
WS 16-4 F	150-250	E'	2266±325	6954±567	325±53	
WS 16-5 B	25-45	E'	1221±171	5644±474	216±35	
WS 16-5 C	45-75	E'	1624±84	5496±458	295±28	
WS 16-5 D	75-100	E'	1813±237	5346±444	342±52	
WS 16-5 E	100-150	E'	1107±140	5158±426	323±87	
WS 16-5 F	150-250	E'	1657±237	4838±396	342±56	
WS 16-5 B	25-45	Al	1781±199	5645±474	315±44	
WS 16-5 C	45-75	Al	2199±169	5497±458	385±44	
WS 16-5 D	75-100	Al	2282±197	5347±444	426±51	
WS 16-5 E	100-150	Al	2065±267	5160±426	400±61	

Table 2. continued.

Sample	Grain size (μm)	Center	DE (Gy)	Dose rate (μGy/year)	ESR age (ka)	Weighted mean (ka)
WS 17 B	25-45	E'	1778±314	6399±546	277±54	280±50
WS 17 C	45-75	E'	2266±640	6227±528	363±107	
WS 17 D	75-100	E'	2111±368	6051±510	348±67	
WS 17 B	25-45	Al	2169±170	6399±546	338±39	
WS 17 C	45-75	Al	3822±896	6229±528	613±152	
WS 18 B	25-45	E'	1493±244	7065±595	211±38	210±40
WS 22-1 B	25-45	E'	1740±169	3359±290	518±67	530±40
WS 22-1 C	45-75	E'	1663±225	3267±281	509±70	
WS 22-1 D	75-100	E'	1737±169	3175±271	547±70	
WS 22-1 B	25-45	Al	2290±303	3360±290	681±107	
WS 22-2 B	25-45	E'	1516±191	3389±292	447±68	490±60
WS 22-2 C	45-75	E'	1710±296	3297±282	518±100	
WS 22-3 B	25-45	E'	2008±154	3214±278	624±72	630±50
WS 22-3 C	45-75	E'	1940±219	3126±269	620±88	
WS 22-3 D	75-100	E'	1980±181	3035±260	652±81	
WS 22-3 B	25-45	Al	2313±787	3214±278	719±252	
WS 22-3 C	45-75	Al	2507±423	3127±269	801±151	
WS 22-3 D	75-100	Al	3527±461	3039±260	1160±181	
WS 22-3 E	100-150	Al	3498±768	2926±247	1195±281	
WS 22-4 B	25-45	E'	1845±168	3151±273	585±73	
WS 22-4 C	45-75	E'	1848±104	3066±264	602±61	
WS 22-4 D	75-100	E'	1896±191	2978±254	636±84	
WS 22-4 E	100-150	E'	1859±184	2870±244	647±84	
WS 22-4 F	150-250	E'	1854±173	2680±244	691±81	
WS 22-5 B	25-45	E'	1321±61	3359±290	393±38	
WS 22-5 C	45-75	E'	3052±123	3272±280	932±88	
WS 22-5 B	25-45	Al	1318±272	3359±290	392±87	410±30
WS 22-5 C	45-75	Al	1341±181	3268±280	410±65	
WS 22-5 D	75-100	Al	1365±189	3175±271	429±69	
WS 22-5 E	100-150	Al	1380±163	3058±259	451±65	
WS 22-5 F	150-250	Al	1610±181	2857±238	563±78	
WS 22-6 B	25-45	E'	1559±320	3795±328	410±91	430±30
WS 22-6 C	45-75	E'	1606±235	3692±317	434±73	
WS 22-6 D	75-100	E'	1587±97	3587±307	442±46	
WS 22-6 E	100-150	E'	1598±230	3455±293	462±77	
WS 22-6 F	150-250	E'	1658±170	3226±269	513±64	
WS 22-6 B	25-45	Al	1300±211	3281±282	396±75	
WS 22-7 B	25-45	E'	1349±228	3333±293	404±77	400±80
WS 22-7 C	45-75	E'	1646±186	3242±283	507±72	
WS 22-7 D	75-100	E'	1683±312	3148±272	534±109	
WS 22-7 E	100-150	E'	1626±181	3030±261	536±75	

Table 2. continued.

Sample	Grain size (μm)	Center	DE (Gy)	Dose rate (μGy/year)	ESR age (ka)	Weighted mean (ka)
WS 22-8 B	25-45	E'	1401±84	3746±323	373±39	390±30
WS 22-8 C	45-75	E'	1396±217	3644±311	383±67	
WS 22-8 D	75-100	E'	1409±147	3541±302	397±53	
WS 22-8 E	100-150	E'	1399±204	3413±288	409±69	
WS 22-8 B	25-45	Al	1465±348	3746±323	391±98	
WS 22-10 B	25-45	E'	1344±75	3249±282	413±42	420±30
WS 22-10 C	45-75	E'	1349±174	3161±273	426±66	
WS 22-10 D	75-100	E'	1343±108	3071±262	437±51	
WS 22-10 E	100-150	E'	1510±64	2958±250	510±48	

곡선은 다음과 같은 특징을 보인다. WS17에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 8a). Al 신호는 25~45 μm와 45~75 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하고 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 불규칙하게 증감한다(그림 8a).

WS18에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm 입자크기에서만 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 8b). Al 신호는 모든 입자크기에 대하여 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 8b).

A 지점에서 채취한 WS17 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대는 입자가 작아질수록 감소하는 경향을 보이며, 입자크기 25~45 μm를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 280±50 ka이다(그림 9a). WS18 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 25~45 μm 입자크기에 대해서만 연대가 측정되었으며, 이를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 210±40 ka이다(그림 9b).

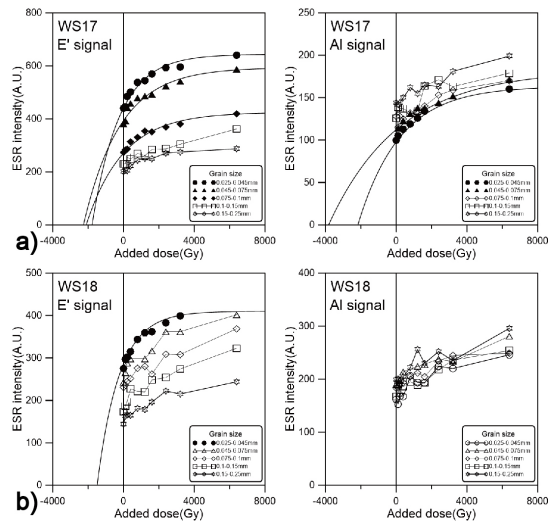


Fig. 8. Growth curves of ESR signals for WS17 and WS18.

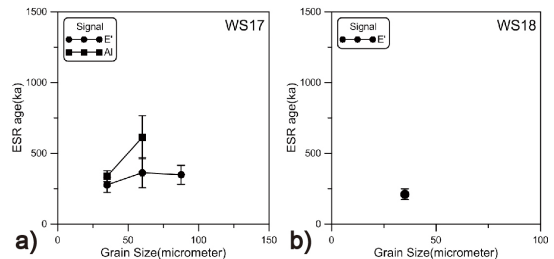


Fig. 9. ESR ages vs. grain sizes for WS17 and WS18.

5.2 B 지점의 단층비지 ESR 연대

B 지점에서 채취한 시료에 대한 ESR 신호의 성장 곡선은 다음과 같은 특징을 보인다. WS16-1에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm와 45~75 μm 입자

크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 10a). AI 신호는 모든 입자크기에 대하여 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 10a).

WS16-2에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가하거나 불규칙적으로 증감한다(그림 10b). AI 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하고 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 10b).

WS16-3에서 분리된 석영의 E' 및 AI 신호는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 10c). 따라서 WS16-3에 대한 ESR 연대는 측정할 수 없었다.

WS16-4에서 분리된 석영의 E' 신호는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보인다(그림 10d). AI 신호는 모든 입자크기에 대하여 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 10d).

WS16-5에서 분리된 석영의 E' 신호는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보인다(그림 10e). AI 신호는 150~250 μm 입자크기에서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보이며, 그 외 입자크기의 ESR 신호의 세기는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가한다(그림 10e).

B 지점에서 채취한 WS16-1 시료에 대한 ESR 연대

와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, 이를 통해 구한 평탄 ESR 연대는 290 ± 50 ka이다(그림 11a). WS16-2 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서는 E' 신호

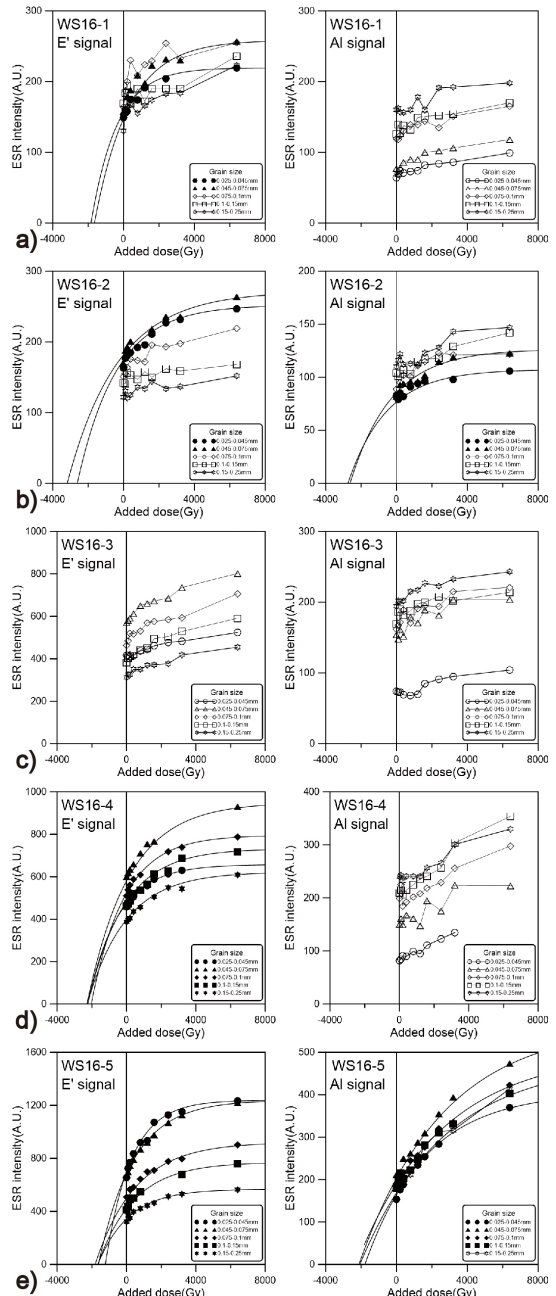


Fig. 10. Growth curves of ESR signals for WS16.

의 25~45 μm 와 45~75 μm 와 AI 신호의 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, 오차범위 내에서 일정하다(그림 11b). E' 및 AI 신호를 이용하여 구한 다센터 평탄 ESR 연대는 380 ± 50 ka이다. 노두 상에서도 WS16-2 시료를 채취한 R'-전단방향의 부수단층이 WS16-1 시료를 채취한 Y-전단방향의 부수단층에 의해 연장이 끊겨 있음이 확인되어 ESR 연대측정 결과와 일치한다(그림 4a). WS16-4 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 모든 입자크기에 대해 연대 평탄을 보이며, 이를 통해 구한 다센터 평탄 ESR 연대는 290 ± 20 ka이다(그림 11c). WS16-5 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대는 입자가 작아질수록 감소하는 경향을 보이며, 입자크기 25~45 μm 를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 220 ± 40 ka이다(그림 11d).

5.3 C 지점의 단층비지 ESR 연대

C 지점에서 채취한 시료에 대한 ESR 신호의 성장 곡선은 다음과 같은 특징을 보인다. WS2에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에 대하여 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기에서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호 세기는 계단상으로

증가함을 보인다(그림 12a). AI 신호는 25~45 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하고 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 12a).

WS4에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하고 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 12b). AI 신호는 모든 입자크기에 대해 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 12b).

C 지점에서 채취한 WS2 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대는 입자가 작아질수록 감소하는 경향을 보이며, AI 신호의 25~45 μm 의 입자크기에서 연대 평탄에 수렴한다(그림 13a). E'와 AI 신호를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 520 ± 110 ka이다. WS4 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 960 ± 150 ka이다(그림 13b).

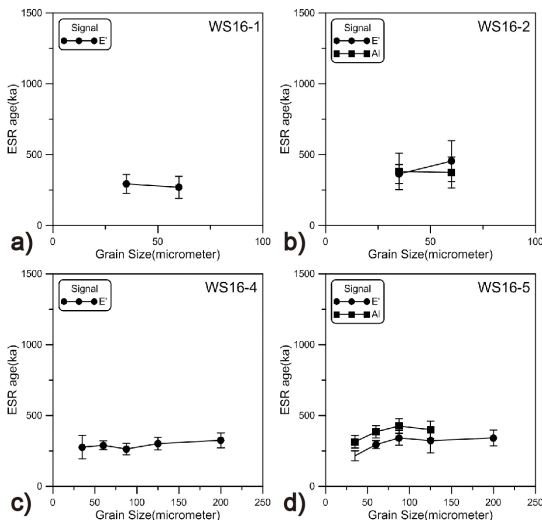


Fig. 11. ESR ages vs. grain sizes for WS16.

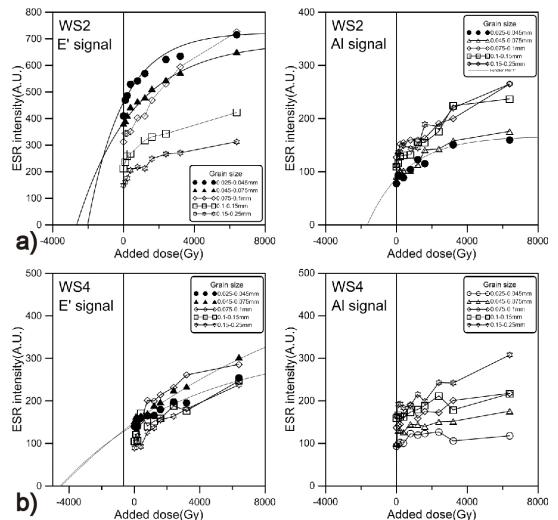


Fig. 12. Growth curves of ESR signals for WS2 and WS4.

5.4 D 지점의 단층비지 ESR 연대

D 지점의 북서쪽 단층경계부에서 채취한 시료에 대한 ESR 신호의 성장곡선은 다음과 같은 특징을 보인다. WS22-1에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 14a). Al 신호는 25~45 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 단계적으로 증가함을 보인다(그림 14a).

WS22-2에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에서 조사된 감마에너지의

양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가함을 보인다(그림 14b). Al 신호는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 14b).

D 지점의 북서쪽 단층경계부에서 채취한 WS22-1 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 530 \pm 40 ka이다(그림 15a). WS22-2 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 25~45 μm 와 45~75 μm 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 490 \pm 60 ka이다(그림 15b).

D 지점의 단층 내부에서 채취한 시료에 대한 ESR 신호의 성장곡선은 다음과 같은 특징을 보인다. WS22-3에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기에서는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 계단상으로 증가함을 보인다(그림 16a). Al 신호는 125~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm 입자크기들에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하고 150~250 μm 입자크기에서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 계단상으로 증가함을 보인다(그림 16a).

WS22-4에서 분리된 석영의 E' 신호는 모든 입자크

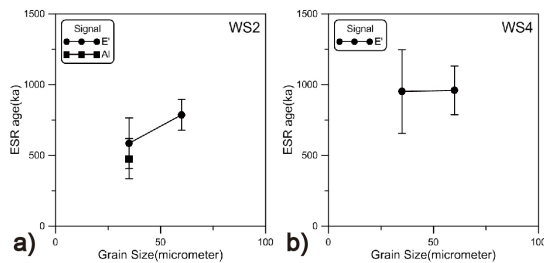


Fig. 13. ESR ages vs. grain sizes for WS2 and WS4.

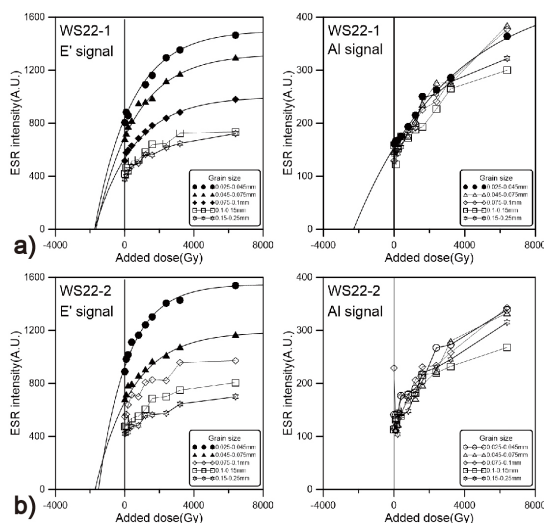


Fig. 14. Growth curves of ESR signals for WS22-1 and WS22-2 in NW-fault plane between damage zone and fault core.

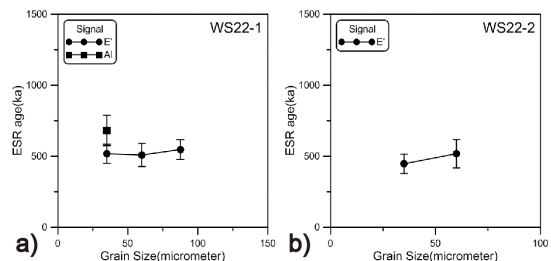


Fig. 15. ESR ages vs. grain sizes for WS22-1 and WS22-2 in NW-fault plane between damage zone and fault core.

기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보인다(그림 16b). Al 신호는 모든 입자크기에 대하여 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 불규칙하게 증감한다(그림 16b).

D 지점의 단층 내부에서 채취한 WS22-3 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 25~45 mm, 45~75 m, 75~100 μm 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 630±50 ka이다(그림 17a). WS22-4 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 모든 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 630±30 ka이다(그림 17b).

D 지점의 남동쪽 단층경계부에서 채취한 시료에 대한 ESR 신호의 성장곡선은 다음과 같은 특징을

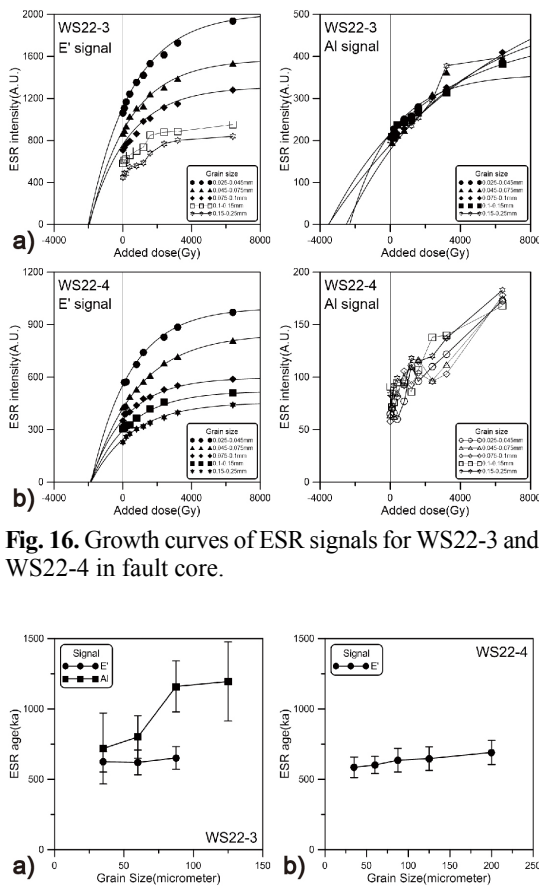


Fig. 16. Growth curves of ESR signals for WS22-3 and WS22-4 in fault core.

Fig. 17. ESR ages vs. grain sizes for WS22-3 and WS22-4 in fault core.

보인다. WS22-5에서 분리된 석영의 E' 신호는 25~45 μm와 45~75 μm 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외 입자크기는 조사된 감마에너지 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 18a). Al 신호는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가함을 보인다(그림 18a).

WS22-6에서 분리된 석영의 E' 신호는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR

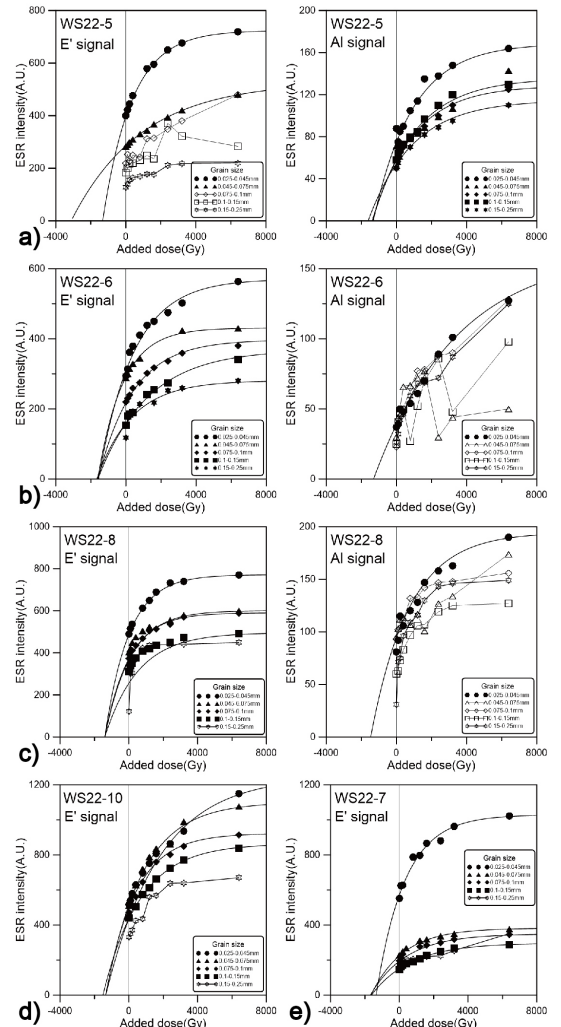


Fig. 18. Growth curves of ESR signals for WS22-5, WS22-6, WS22-7, WS22-8 and WS22-10 in SE-fault plane between damage zone and fault core.

신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보인다(그림 18b). AI 신호는 25~45 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하며, 그 외 입자크기에 대해서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 불규칙하게 증감한다(그림 18b).

WS22-8에서 분리된 석영의 E' 신호는 150~250 μm 를 제외한 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보인다(그림 18c). AI 신호는 25~45 μm 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가하며, 그 외의 입자크기에 대해서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 계단상으로 증가하거나 불규칙하게 증감한다(그림 18c).

WS22-10에서 분리된 석영의 E' 신호는 150~250 μm 를 제외한 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양

상을 보이며, AI 신호는 측정되지 않았다(그림 18d).

WS22-7에서 분리된 석영의 E' 신호는 150~250 μm 를 제외한 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, AI 신호는 측정되지 않았다(그림 18e).

D 지점의 남동쪽 단층경계부에서 채취한 WS22-5 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서는 AI 신호의 150~250 μm 를 제외한 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호의 25~45 μm 의 입자크기에서 연대 평탄에 수렴한다(그림 19a). E'과 AI 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 410 ± 30 ka이다. WS22-6 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 모든 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, AI 신호의 25~45 μm 의 입자크기에서 평탄역에 수렴한다(그림 19b). E'과 AI 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 430 ± 30 ka이다. WS22-8 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호는 150~250 μm 를 제외한 입자크기에서 연대 평탄을 보이며, E' 신호를 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 420 ± 30 ka이다(그림 19d). WS22-7 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대가 입자가 작아질수록 감소하는 경향을 보이며, 이를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 400 ± 80 ka이다(그림 19e).

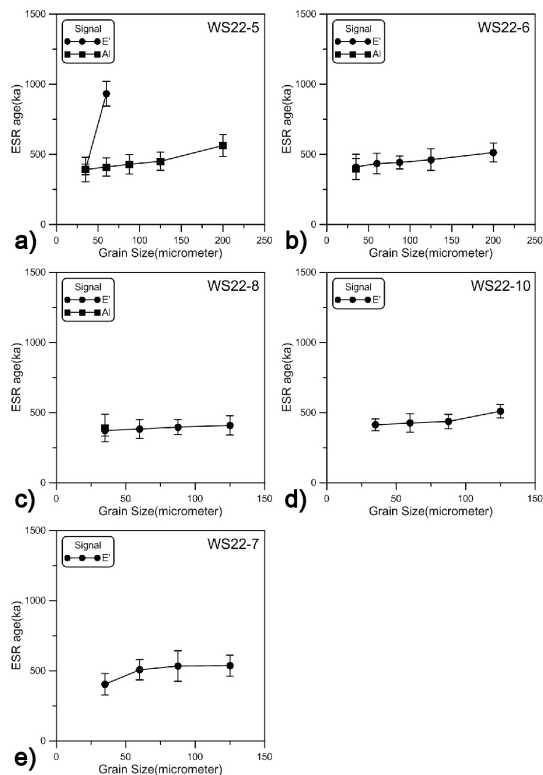


Fig. 19. ESR ages vs. grain sizes for WS22-5, WS22-6, WS22-7, WS22-8 and WS22-10 in SE-fault plane between damage zone and fault core.

6. 토 의

6.1 왕숙천단층의 단층비지대 진화양식

단층비지대는 주향방향 또는 경사방향으로 폭의 변화가 심한 편이다. 일부 지점에서는 여러 단층비지띠로 구성되어 있으며, 단층비지의 ESR 연대측정에 의하면 각각의 비지띠는 다른 연대를 보인다. Lee and Schwarcz (1996, 2001)는 단층비지대의 진화양식을 I, II, III 및 IV으로 나누어 구분하였다.

연구지역의 D지점에서 채취한 단층비지의 ESR 연대 측정 결과, 단층핵 내부의 단층비지는 약 630

ka에 재활동한 것으로 측정되었으며, 북서쪽 단층면 주변의 단층비지는 약 490~530 ka에 재활동한 것으로 측정되었다. 남동쪽 단층면 주변의 단층비지는 약 410~430 ka에 재활동한 것으로 측정되었다(그림 20). 이는 기존에 발달되어 있던 단층비지띠와 기반암 사이에 새로운 단층비지띠가 형성되었다고 해석할 수 있으며, Lee and Schwarcz (1996, 2001)의 단층비지 진화양식 I에 해당된다. 이 경우에는 기존에 발달되어 있던 단층비지띠는 활동하지 않고 새로운 단층비지띠가 형성된 것이므로 단층비지띠의 집합체

인 단층비지대의 두께가 증가하게 되며, 단층비지대의 중앙부와 주변부는 각기 다른 활동시기를 지시하게 된다(Wojtal and Mitra, 1986; Lee and Schwarcz, 1996; Yang and Lee, 2012; Bea and Lee, 2014). 또한 D지점의 단층핵은 유백색의 단층비지띠와 암회색의 단층비지띠로 구분되며, 남동쪽 단층비지대 경계부에서 암회색의 단층비지띠 내에 유백색의 단층비지 잔유물이 포함되어 있다(그림 6d). ESR 연대 측정 결과, 유백색 단층비지 잔유물의 ESR 연대는 약 420±20 ka, 암회색 단층비지의 ESR 연대는 약 390±30 ka로 측정되었으며(그림 6d), 유백색 단층비지대 내에서 암회색 단층비지띠가 재활동했음을 지시한다. 이는 Lee and Schwarcz (1996, 2001)의 단층비지 진화양식 II에 해당되며, 이 경우 기존의 단층비지 활동연대와 재활동한 단층비지띠의 활동시기를 각각 결정할 수 있다(Wojtal and Mitra, 1986; Lee and Schwarcz, 1996; Yang and Lee, 2012; Bea and Lee, 2014). 오차범위를 생각할 때, 유백색 및 암회색의 단층비지의 ESR 연대(활동시기)는 같기 때문에 활동시기를 구분하기 어려우며, 거의 동시기에 재활동했을 가능성도 배제하지 못한다.

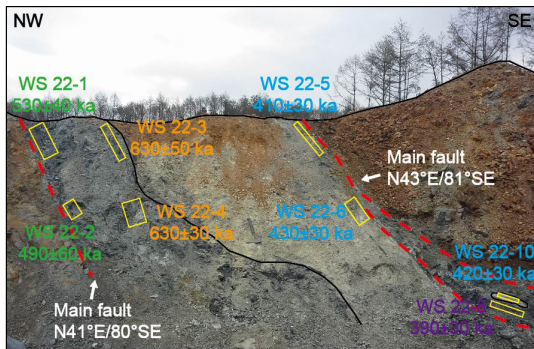


Fig. 20. Sampling locations (yellow boxes) and each ESR ages in the core of the Wangsukcheon Fault at site D. Dotted red lines show each fault planes.

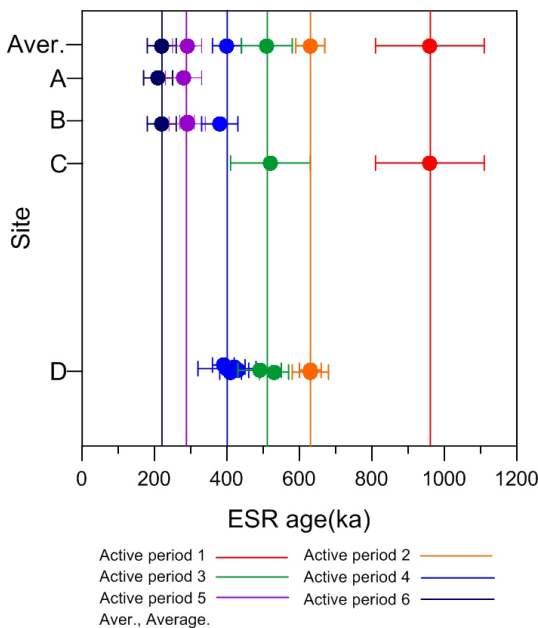


Fig. 21. Temporal activity pattern of the Wangsukcheon Fault in the Pocheon- Namyangju area.

6.2 ESR 수치 연대의 일관성

일반적으로 연대 측정의 결과는 다른 방법으로 측정한 연대와 교차분석하여 신뢰도를 높일 수 있으나, 사실상 ESR 연대와 교차비교할 수 있는 방법이 없는 실정이다. 따라서 ESR 연대의 신뢰도를 높이기 위해서 노두상에서 확인되는 같은 단층비지띠에서 채취한 단층비지의 ESR 연대를 비교분석하고 있다. 예를 들어, Lee and Schwarcz (1996)는 San Gabriel Fault에서 7~8 km의 단층 연장선 내에서 단층비지의 ESR 연대가 오차범위 내에서 일치함을 보고하였으며, Lee (2010)는 강원도 인제군 상남면에 발달된 금왕단층에서 약 6 km의 단층연장선 내에서 ESR 연대가 일치함을 보고하였다. Yang and Lee (2012)는 양산단층대 가천 1지점에서 약 25 m의 단층연장선 내에서 단층비지에 대한 ESR 연대의 일관성을 보고하였다.

소방방재청의 자연재해저감기술개발사업 보고서 (Lee, 2011)에 의하면 강원도 철원군 및 경기도 포천시 내촌면 일대에 발달한 왕숙천단층의 부수단층들에서 채취한 단층비지의 ESR 연대는 WSC017 (440±100 ka),

WSC006 (260 ± 30 ka), WSC009 (160 ± 20 ka)로 측정되었으며, 연구지역의 ESR 연대와 일관성을 보인다. 연구지역의 B지점에서 Lee (2011)의 왕숙천-3지점은 약 8 km, 왕숙천-3지점에서 연구지역의 D지점은 약 7.5 km 떨어져 있으며, 단층 연장선 내에서 측정된 ESR 연대가 380~440 ka로 오차범위 내에서 일치한다. 뿐만 아니라 연구지역의 A, B지점에서 Lee (2011)의 왕숙천-1지점은 약 43 km 이상 떨어져 있음에도 불구하고 ESR 연대가 260~290 ka로 오차범위 내에서 일치한다.

6.3 왕숙천단층의 제4기 시공간적 활동형태

과거에는 지진으로 인한 피해를 줄이기 위해 주로 역사지진 및 계기지진을 이용하였으며, 현재는 고지

진 자료도 많이 이용하고 있다. 단층의 시간-공간적 활동 형태에 대한 자료는 단층이 언제 어디서 활동하였는지에 대해 파악할 수 있으며, 앞으로 단층이 언제 어디서 재활동할 것인가 추정할 수 있는 바탕이 된다. 역사지진 자료(Ambraseys, 1988; Barka, 1992; Lee and Yang, 2006)나 고지진 자료(Lee and Schwarcz, 1996; Yeats *et al.*, 1997)를 종합하면, 시간의 스케일에 관계없이 단층활동 형태의 특성은 활동기와 비활동기로 나누어지는 시간적 활동 형태를 보이며, 단층활동이 단층을 따라 이동하는 공간적 활동 형태를 보이는 것을 알 수 있다.

연구지역에 발달한 왕숙천단층의 제4기 활동 형태를 보면, 6번의 활동기가 약 10만 년 주기로 반복되었음을 알 수 있으며, 단층운동이 남서쪽에서 북

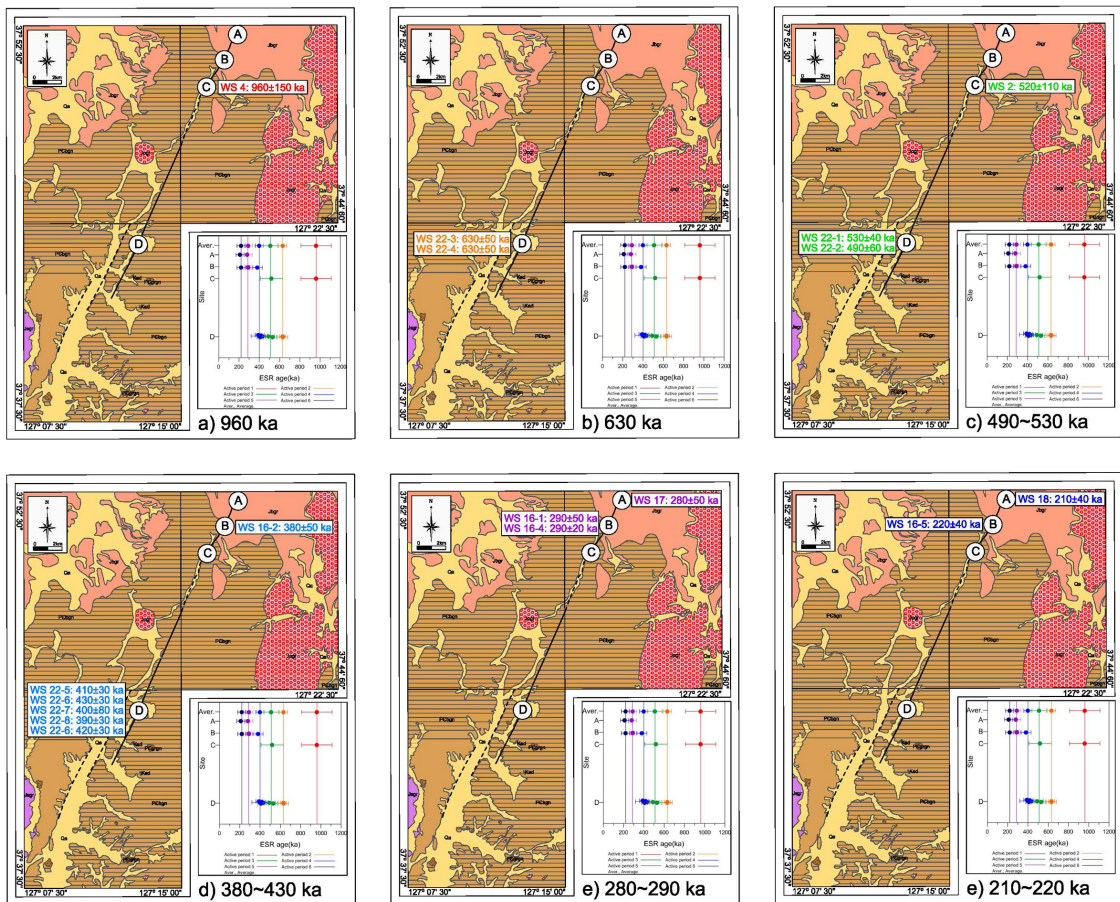


Fig. 22. Spatial activity patten of the Wangsukcheon Fault in the study area. (a) about 960 ka years ago, (b) about 630 ka years ago, (c) about 490~530 ka years ago, (d) about 380~430 ka years ago, (e) 280~290 ka years ago, (f) about 210~220 ka years ago. For explanation, see text.

동쪽으로 이동한 것으로 추정된다(그림 21). 약 960 ka에 포천시 내촌면 일대(C 지점)에서 단층활동이 일어났으며(그림 22a), 약 630 ka에 남양주시 진접읍 일대(D 지점)에서 왕숙천단층이 재활동하였다(그림 22b). 약 490~530 ka에 포천시 내촌면 일대부터 남양주시 진접읍 일대(C, D 지점)까지 왕숙천단층이 재활동하였으며(그림 22c), 이후 380~430 ka에 포천시 일동면 일대에서 남양주시 진접읍 일대(B, D 지점)까지 왕숙천단층이 재활동하였다(그림 22d). 약 280~290 ka와 약 210~220 ka에는 포천시 일동면 일대(A, B 지점)에서 왕숙천단층이 재활동한 것으로 분석되었다(그림 22e, 22f). 380 ka 이전에는 연구지역의 남서쪽에서 단층이 재활동하였으며 280 ka 이후에는 단층이 북동쪽에서 재활동하여 단층운동이 남서쪽에서 북동쪽으로 이동한 것으로 추정된다.

7. 결론

포천-남양주시 일대에 발달된 왕숙천단층의 단층핵의 북서쪽 경계면에서 채취한 4개 시료의 평균 ESR 연대는 약 570 ka이며, 남동쪽 경계면에서 채취한 5개 시료의 평균 ESR 연대는 약 410 ka이다. 이는 약 57만 년 전에 북서쪽 단층면이 재활동한 이후, 약 41만 년 전에 남동쪽 단층면이 재활동한 것으로 해석할 수 있으며, 단층핵 진화양식 I에 해당한다.

연구지역에서 채취한 단층비지의 ESR 연대는 약 96만 년 전부터 21만 년 전 사이에 분포하며, 제4기에 적어도 6회의 단층운동이 일어났을 것으로 해석된다.

- 약 96만 년 전에는 포천시 내촌면 일대.
- 약 63만 년 전에는 남양주시 진접읍 일대.
- 약 49~53만 년 전에는 포천시 내촌면-남양주시 진접읍 일대.
- 약 38~43만 년 전에는 포천시 일동면-남양주시 진접읍 일대.
- 약 28~29만 년 전에는 포천시 일동면 일대.
- 약 21~22만 년 전에는 포천시 일동면 일대에서 단층운동이 있었음을 추측할 수 있다.

특히 왕숙천단층은 약 63만 년 전 이후에 약 10만 년 주기로 재활동하였으며, 38만 년 전 이전에는 남서쪽에서, 29만 년 이후에는 북동쪽에서 재활동하여 단층의 주향 방향을 따라 단층 운동이 이동하였다.

사 사

이 논문의 심사를 맡아 도움을 주신 기원서 박사님, 손문 박사님 그리고 익명의 심사위원님께 감사드립니다. 그리고 논문 작성에 있어 아낌없는 조언을 해주신 박준용 박사님께도 감사드립니다. 이 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 지역대학우수과학자지원사업(C1010017-01-03), 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-12013 1832) 그리고 해양과학기술원의 기관주요사업(PE99434)의 지원을 받은 연구 성과임을 밝힙니다.

REFERENCES

- Ambraseys, N.N., 1988, Engineering Seismology. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 17, 1-142.
- Bae, H.K. and Lee, H.K., 2014, Space-time patterns of fault activity of the Keumwang Fault developed in the Jincheon-Eumseong-gun, Chungcheong-buk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 735-752 (in Korean with English abstract).
- Barka, A.A., 1992, The North Anatolian Fault Zone. Annales Tectonics, 6, 164-195.
- Hong, N.R. and Lee, H.K., 2012, Structural features and ESR dating of the Keumwang fault at Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea. 48, 473-489.
- Hwang, J.H. and Kim, 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, W.S., Jo, D.Y., 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).
- Kim, J.H., Park, S.H. and Lee, B.J., 1981, Geological report of the Cheongpyeong sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Kim, O.J., 1973, The Straigraphy 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 Ki, 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., 1999, ESR dating and structural analysis of the Dangok fault zone in the Mungok region, Jeongson-gun, Kangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 85-98 (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 Schwarcz, H.P., 1994, Criteria for complete zeroing of 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 Schwarcz, H.P., 2001, ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. *Quaternary Science Review*, 20, 999-1003.
- Lee, H.K. and Yang, J.S., 2005, ESR dating of the Ilkwang fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 369-384 (in Korean with English abstract).
- Song, K.Y. and Jo, D.R., 2007, Geological map of the Gimhwa sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).
- Wojtal, S. and Mitra, G., 1986, Strain hardening and strain softening in fault zones from foreland thrusts. *Geological Society of American Bulletin*, 97, 674-687.
- 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).
- Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen, C.R., 1997, *The geology of earthquakes*. Oxford University Press, New York.

Received : April 1, 2016

Revised : April 26, 2016

Accepted : April 27, 2016