

## 강원도 원주시 일대에 발달한 금왕단층의 제4기 활동형태

김만재 · 이희권<sup>‡</sup>

강원대학교 지질학과

### 요 약

반복적으로 활동한 증거가 있는 대규모 단층의 ESR(Electron Spin Resonance) 연대는 보다 신기의 단층활동에 의해 지워질 수 있으나, 단층활동이 단층대 내 부수단층을 따라 발생한 경우 주단층(즉, 단층핵)보다 최근의 단층활동기록을 보존할 수 있다. 강원도 원주시에 발달된 금왕단층의 제4기 시간-공간적 활동형태를 연구하기 위해, 단층비지띠에 대한 ESR 연대를 분석하였다. 그 결과, 주단층과 부수단층의 최후기 운동시기는 약 83만 년~24만 년 전 범위에 있다. 본 연구결과와 이전의 연구결과를 종합적으로 검토한 결과, 금왕단층을 따라 분석된 ESR 연대자료는 약 50만 년 전 이후 단속적으로 반복되어 나타나는 경향을 보여준다. 이러한 분석결과는 금왕단층이 플라이스토세 동안 장주기(약 16만 년~5만 년)를 가지고 반복적으로 재활동하였음을 지시한다. 각각의 단층활동기에는 금왕단층의 주향방향을 따라 대부분의 단층구간이 동시기에 활동한 패턴을 보여주나, 약 34만 년 전 이전에는 주로 금왕단층의 남서부지역에서 재활동하였으며 그 이후에는 주로 북동부지역에서 재활동한 활동형태를 보여준다.

**주요어:** 금왕단층, 단층핵, 단층비지, ESR 연대측정법, 제4기 단층의 활동형태

**Man-Jae Kim and Hee-Kwon Lee, 2017, Quaternary activity patterns of the Keumwang Fault in the Wonju-si area, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 1, p. 79-94**

**ABSTRACT:** Although ESR signals stored after prior faulting events are all erased by the most recent event, some of the subsidiary faults preserve the records of the faulting events younger than those of the main fault (fault core). To study space-time patterns of Quaternary activity of the Keumwang fault in the Wonju-si area, Gangwon-do, we analyzed the ESR dates for fault gouge bands developed in the fault core with subsidiary faults. ESR dates obtained from both the main fault and subsidiary faults range from 830 to 240 ka. ESR dates of this study including previous ESR dates obtained by other researchers show temporal clustering into active and inactive periods since 500 ka. Results from this study suggest that the long-term (160~50 ka) cyclic fault activities of the Keumwang fault continued into the Pleistocene. Within a given active period, the activities of faults show spatial clustering along the strike of the Keumwang fault. Southwest part of the Keumwang fault appears to be reactivated prior to 340 ka, after that northeast part of the Keumwang fault appears to be mainly reactivated.

**Key words:** Keumwang fault, fault core, fault gouge, ESR dating, Activity pattern of Quaternary fault

(Man-Jae Kim and Hee-Kwon Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

### 1. 서 론

지각 10~15 km 이내의 깊이에서 취성변형작용(brittle deformation)에 의해 형성되는 구조인 단층(fault)은 변형작용이 가장 집중되어 있는 단층핵(fault core)과 그 주변의 단층손상대(fault damage zone)로 구성되어 있다. 단층핵은 단층비지(fault gouge)

및 단층각력암(fault breccia) 등의 단층암으로 구성되어 있으며, 단층손상대에는 미균열, 절리, 맥 그리고 부수단층(subsidiary faults) 등의 다양한 지질구조들이 발달되어 있다(Chester and Logan, 1986, 1987; Schulz and Evans, 2000; Kim *et al.*, 2004).

2016년 9월 12일 경상북도 경주시에서 발생한 규모 5.8의 지진발생 이후에 전국 각지에서 590회 이상

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-33-250-8558, E-mail: [heekwon@kangwon.ac.kr](mailto:heekwon@kangwon.ac.kr)

의 여진이 발생하면서, 우리나라에서 지진재해에 대한 관심이 높아졌다. 지진은 대부분(90% 이상) 활성단층(active faults)에서 발생하기 때문에 지반안정성 분석과 지진에 의한 재난을 방지하기 위해서는 활성단층에 대한 연구가 필수적이다(Kim *et al.*, 2011). 이러한 이유로, 최근 우리나라에서도 활성단층의 정의를 정립하고, 활성단층지도를 제작하려는 계획이 수립되고 있다.

단층의 시간-공간적 활동형태에 대한 자료는 과거 지질시대에 언제 어디서 단층이 활동하였는지에 대해 파악할 수 있으며, 앞으로 언제 어디서 재활동할 것인가를 추정할 수 있는 바탕이 된다. 역사지진자료(Ambraseys, 1988; Barka, 1992)나 고지진자료(Lee and Schwarcz, 1996; Yeats *et al.*, 1997)에 의하면, 단층활동이 시간의 스케일에 관계없이 활동기와 비활동기로 나누어지는 시간적 활동형태를 보이며, 단층의 주향을 따라 단층활동이 이동하는 공간적 활동형태를 보이는 것을 알 수 있다(Yang and Lee, 2014; Bae and Lee, 2016).

금왕단층(Keumwang fault)은 음성분지의 북서쪽 경계부에서 강원도 인제군의 설악산 일대까지 발달한 약 170 km의 연장을 가진 주향이동단층이다(Choi, 1996; Lee and Kim, 2005; Choi and Choi, 2007; Lee, 2010). 각각 다른 변형환경에서 형성된 압쇄암 계열, 파쇄암 계열, 단층비지 및 단층각력암 등이 금왕단층의 주향을 따라 국지적으로 분포하고 있으며, Kim and Lee (2016)는 각 단층암이 형성된 변형환경, 변형시기, 변형기작에 의해 구별되는 최소 6단계의 단층운동을 보고하였다. 첫 번째 단계에는 쥐라기 후기 및 백악기 초기에 좌수향 주향이동 전단작용에 의해 압쇄암 계열이 형성되었다. 두 번째 단계에는 음성분지 및 풍암분지가 형성된 백악기 초기 오토리브세 이전에 용기 및 침식작용에 의해 취성단층대로 전이되면서 압쇄암 계열에 파쇄암 계열이 중첩되었다. 세 번째~여섯 번째 단계에는 파쇄암 계열에 주향이동 단층운동에 의해 단층비지가 중첩되어 약 10~50 m 폭의 단층핵과 이를 둘러싸고 있는 약 30~100 m 폭의 단층손상대가 형성되었다(Kim and Lee, 2016).

두 번째~네 번째 단층운동은 좌수향 주향이동운동이 우세하였으며, 특히 음성 및 풍암분지에 분포하는 백악기 퇴적암에 좌수향 주향이동운동을 지시하

는 지질구조요소들이 발달하였다. 백악기 후기 안산암이 관입한 후에 일어난 다섯 번째 및 여섯 번째 단층운동은 우수향 주향이동운동이 우세하였다(Kim and Lee, 2016). 단층비지의 ESR 연대측정에 의하면, 여섯 번째 운동단계인 제4기에 금왕단층이 적어도 6번 재활동하였으며, 약 34만 년 전 이전에는 금왕단층의 남서부 지역에서 단층운동이 활발하게 일어났으나 그 이후에는 금왕단층의 북동부 지역에서 단층운동이 활발하게 일어났다(Kim and Lee, 2016).

기존의 금왕단층에 대한 연구자료에 의하면(Lee, 2010; Hong and Lee, 2012; Hong, 2013; Bae and Lee, 2014), 음성분지의 북동부 지역에서부터 강원도 원주시에 이르는 구간에 발달된 금왕단층에 대해서는 ESR 연대연구가 이루어지지 않았다. 이러한 부족함을 채우기 위해 강원도 원주시 일대에서 금왕단층을 따라 발달된 단층비지를 채취하여 ESR 연대를 구하고, 기존의 자료와 비교·분석하여 금왕단층의 제4기 시간-공간적 활동형태를 규명하였다. 금왕단층의 제4기 시간-공간적 활동형태에 대한 자료는 우리나라의 활성단층지도 작성에 필요한 자료를 제공하여 장기적인 지진예측연구에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. ESR 연대측정법을 이용한 단층의 활동시기 규명

### 2.1 ESR 연대측정법의 원리 및 제한점

석영과 같은 광물이 암석 내에 분포하는 방사성원소(주로 U, Th 및 K)에서 에너지를 공급받으면 광물의 결정속에서 이온화작용이 일어나게 된다. 이온화작용에 의해 형성된 자유전자는 결정의 격자결함(defect)에 잡혀 ESR 센터가 된다. 시간이 지남에 따라 ESR 센터의 수가 증가하게 되며, 이에 따라 ESR 신호의 세기가 점점 커지게 된다. 단층활동 중 입자경계 마찰미끄럼(grain boundary frictional sliding), 마찰열(frictional heating) 및 격자변형작용(lattice deformation)에 의해 ESR 신호의 세기는 0이 된다(resetting of ESR signal). 단층활동 이후, 암석 내의 방사성원소에 의한 이온화작용으로 인해 시간이 지남에 따라 ESR 신호의 세기가 다시 증가한다. 따라서 채취한 단층비지시료의 ESR 신호세기는 마지막 단층활동 이후에 증가한 ESR 신호의 세기를 지시한다. 마지막 단층활동 이후부터 단층비지가 받은 에

너지의 양은 부가조사법(additive dose method)에 의해 계산되며, 이를 등가선량(equivalent dose,  $D_E$ )이라 한다. 시료채취지점 주변의 방사성원소 함량을 분석하여 단층비지가 받은 단위시간당 조사율(dose rate,  $d$ )을 계산한다. ESR 연대는 등가선량을 조사율로 나누어 계산한다(Lee and Schwarcz, 1994; Lee, 1999, Lee and Yang, 2005; Bae and Lee, 2016).

$$ESR_{age} = \frac{D_E}{d}$$

단층비지의 ESR 연대는 단층비지의 마지막 활동시기를 지시한다. 하지만 단층비지피와 단층손상대 사이에 발달한 단층면을 따라 마지막 단층활동이 일어난다면, 단층비지 내의 ESR 신호가 영(0)이 되지 않기 때문에 ESR 연대는 단층활동의 시기를 과대평가하게 된다. 단층비지 내 석영입자의 ESR 신호가 완전히 영이 되기 위해서는 단층면에 작용하는 수직응력이 적어도 약 3 MPa 이상이어야 하며, 단층활동시기에 충분한 수직응력을 받기 위해서는 단층비지가 적어도 수십 m 이상의 깊이에 있어야 한다(Fukuchi, 1988; Lee and Schwarcz, 1994). 따라서 지표에서 채취한 단층비지의 ESR 연대는 단층비지가 수십 m 이상의 깊이에 있을 때 단층이 재활동했던 시기를 지시한다. 융기한 이후에 재활동하였다면, 단층면에 작용하는 수직응력이 충분하지 않아 ESR 신호가 감소하지 않기 때문에 ESR 연대는 단층의 마지막 활동시기를 지시하지 않는다(Hong and Lee, 2012).

**2.2 ESR 연대측정 과정**

단층비지의 ESR 연대를 측정하기 위해 다음과 같

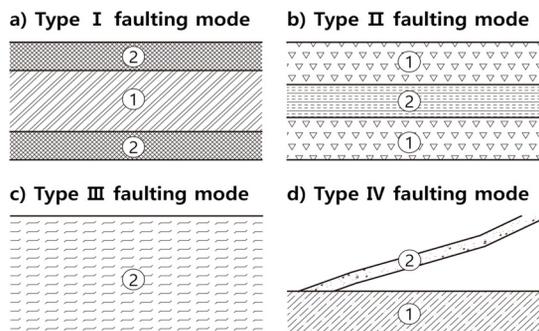


Fig. 1. Schematic sketch of faulting mode (after Lee and Schwarcz, 1996; Bae and Lee, 2014).

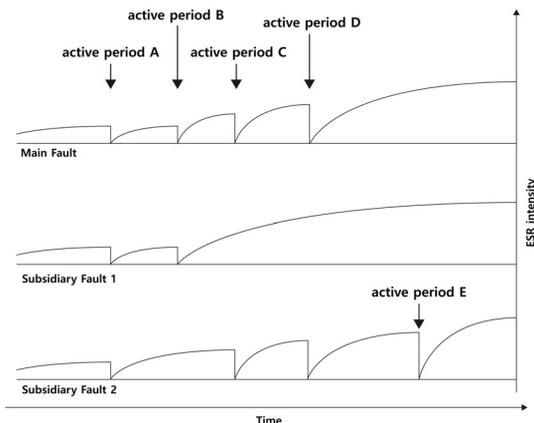
은 과정을 거쳐야 한다. 1) 채취한 단층비지시료를 산처리하여 탄산염 물질, 유기물질 및 점토광물 등을 제거한다. 2) 습식체분석(wet-sieving)과 건식체분석(dry-sieving)을 이용하여 시료를 입자크기별로 분류한다(0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm, 0.075~0.1 mm, 0.1~0.15 mm, 0.15~0.25 mm). 3) 자력선별기를 이용하여 각각의 입자크기에서 자기적 성질이 없는 석영입자들을 분리한다. 4) 초음파세척기를 이용하여 분리한 석영입자에 붙어있는 점토광물들을 제거한다. 5) 각 입자크기별로 0.1 g씩 10개의 시료를 준비하여 선량별(100 Gy, 200 Gy, 400 Gy, 800 Gy, 1,200 Gy, 1,600 Gy, 2,000 Gy, 2,400 Gy 및 3,200 Gy)로  $^{60}\text{Co}$ 를 이용하여 방사선을 조사한다. 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에 설치된 감마선조사장비의 조사율은 0.11~0.33 mGy/s이다. 6) 감마선 조사에 의해 불안정한 E' 신호가 생성될 수 있으며, 이를 제거하기 위해 조사된 시료를 170°C에서 15분 동안 가열한다(Toyoda and Schwarcz, 1997). 7) JES-TE 200 ESR 분광계를 이용하여 E' 신호는 상온에서, Al 신호는 저온(77 K)에서 측정한다(Hong and Lee, 2012; Bae and Lee, 2016). 8) 부가조사법을 통해 단층활동 후에 석영시료가 받은 등가선량을 계산한다. 9) 단층비지시료의 U, Th 및 K 함량을 이용하여 단층비지의 조사율( $\mu\text{Gy}/\text{year}$ )을 계산한다. 10) 등가선량을 조사율로 나누어 각각의 입자크기에서 ESR 연대를 결정한다. 11) 입자크기 대 ESR 연대 그래프에서 연대평탄력 내 ESR 연대의 가중평균을 구하여 단층비지의 마지막 활동시기를 결정한다.

**2.3 ESR 연대측정법을 이용한 단층운동사 분석**

여러 개의 단층비지피로 구성된 단층비지대의 경우, 각각의 단층비지피는 다른 연대를 보여 단층비지대의 활동역사를 분석할 수 있다. Lee and Schwarcz (1996, 2001)는 단층비지대의 진화양식을 I, II, III 및 IV로 나누어 구분하였다. 진화양식 I은 기존에 발달되어 있던 단층비지피의 주변부에 새로운 단층비지피가 형성되어 단층비지대의 두께가 증가하게 되며, 단층비지대의 중앙부와 주변부는 각기 다른 활동시기를 지시하게 된다(그림 1a). 진화양식 II는 기존에 발달되어 있던 단층비지대 내에 새로운 단층비지피가 형성되며, 재활동한 단층비지피의 ESR 연대는 기존의 단층비지피의 ESR 연대보다 신기의 단층활동

등을 지시한다(그림 1b). 진화양식 III은 단층비지대 전체가 재활동한 것이며, 단층비지대 내에 단층비지 띠들이 혼합되어 마지막 활동시기만을 지시한다(그림 1c). 진화양식 IV는 새로운 단층비지 띠가 단층손상대 내에 발달된 것을 말한다(그림 1d). 따라서 진화양식 I, II 및 IV는 한 지점에서 1회 이상의 단층활동시기를 결정할 수 있으며 진화양식 III은 마지막 단층활동시기만을 결정한다.

역사지진 및 계기지진 연구에 의하면, 지진이 발생했을 때 단층대 내의 주단층 및 부수단층들이 일부는 활동을 하고 일부는 활동을 하지 않음이 보고되었고, 이는 단층대에 발달한 단층들이 각각의 활동 역사를 가지고 있음을 지시한다(Kamb *et al.*, 1971; Knipe, 1989). 예를 들어 단층대 내에 여러 번 재활동한 주단층과 2개의 부수단층이 있다고 가정을 해보자(그림 2). 주단층의 경우, 단층활동시기 A, B, C 그리고 D에 활동했지만 ESR 연대측정법을 통해 마지막 단층활동시기인 단층활동시기 D만을 결정할 수 있다. 부수단층 1의 경우, 단층활동시기 A와 B에 활동을 하였고, 그 이후에는 재활동하지 않았다면 ESR 연대측정법을 통해 단층활동시기 B를 결정할 수 있다. 부수단층 2의 경우, 단층활동시기 A, C, D 그리고 E에 활동을 하였고, 그 이후에는 재활동하지 않았다면 ESR 연대측정법을 통해 E를 결정할 수 있다.



**Fig. 2.** Temporal variations of ESR intensities of a fault zone. The intensities of ESR signals are zeroed by each fault activity. The main fault and subsidiary faults have their own movement histories. Using the ESR dating method, we can determine the ESR ages of only the last reactivation of each fault gouges (modified from Lee and Schwarcz, 1996; Bae and Lee, 2014).

단층활동시기 E는 주단층은 활동하지 않고 부수단층만 독자적으로 활동한 것으로 해석할 수 있다. 이와 같이, 주단층 및 부수단층으로부터 채취한 단층비지시료를 ESR 연대측정법을 통해 분석하여 각각의 단층활동시기를 결정하면 단층대의 활동 역사를 규명할 수 있다(Lee and Schwarcz, 1996; Bae and Lee, 2014).

### 3. 연구지역의 지질

연구지역의 지질은 선캠브리아누대 편마암을 기반암으로 하여 시대미상의 각섬암, 중생대 쥐라기 흑운모화강암, 복운모화강암, 백악기 화강반암, 학담층, 산성암맥, 제4기 층층적으로 구성되어 있다(그림 3).

선캠브리아누대 편마암은 쥐라기 흑운모화강암과 복운모화강암 내에 포획암 또는 루프펜던트의 형태로 분포하고 있다(Park *et al.*, 1989). 주 구성광물로는 석영, 정장석, 흑운모 그리고 백운모가 관찰된다. 각섬암은 연구지역의 북부 금왕단층대를 따라 분포하며, 그 관입시기는 아직 알려지지 않았다. 주 구성광물로는 각섬석, 흑운모 그리고 사장석이 관찰되며, 일부지역에서는 엽리가 발달된 곳도 있다(Jang and Lee, 2012). 편마암과 각섬암을 관입한 쥐라기 흑운모화강암은 연구지역의 전역에 걸쳐 분포하고 있으며, 중립질 내지 조립질의 조직을 보인다. 주 구성광물로는 석영, 사장석, 정장석, 미사장석 그리고 흑운모가 관찰된다. 연구지역의 일부에 분포하는 쥐라기 복운모화강암은 조직과 광물구성에 있어 흑운모화강암과 점진적인 관계를 이루고 있다(Park *et al.*, 1989). 주 구성광물로는 석영, 흑운모, 미사장석 그리고 백운모가 관찰된다. 백악기 화강반암은 연구지역의 중앙부에 분포하고 있으며, 흑운모화강암과 복운모화강암을 관입하고 있다. 화강반암은 반상조직을 보이며, 주 구성광물로는 석영, 사장석, 정장석 그리고 미사장석, 부 구성광물로는 백운모, 흑운모 그리고 녹니석이 관찰된다. 반정은 주로 알칼리 장석과 석영으로 구성되어 있으며, 평균입자크기는 약 3 mm이다(Park *et al.*, 1989). 백악기 학담층은 금왕단층을 따라 북동-남서 방향으로 소규모로 분포하고 있으며, 역암, 사암, 적색 이암 그리고 역질 사암 등으로 구성되어 있다. 백악기 산성암맥은 연구지역 내에 국지적으로 분포하고 있으며 그 이전의 암석들을 관입하

고 있다. 모래와 자갈로 구성된 제4기 충적층은 그 이전의 암석들을 부정합으로 덮고 있다.

4. 단층비지시료의 채취 및 ESR 연대측정 결과

연구지역에서 채취한 단층비지시료 내에 함유된 U, Th 및 K의 양에 대한 측정결과는 표 1에, ESR 연대측정자료는 표 2에 제시되어 있다. 시료 내에 함유

된 U, Th 및 K의 양 뿐만 아니라 수분함량, 감쇠상수,  $\alpha$ -효율 등이 결정되어야 하며, 이들을 ESR-DATA 프로그램(Rainer Grün, 2009)에 입력하여 단위시간당 조사율을 계산하였다. 단층비지시료로부터 분리한 석영의 ESR 신호가 포화되지 않았다면, 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 단일포화지수함수곡선(single saturated exponential curve)을 따라 증가하며 VFIT 프로그램을 이용하여

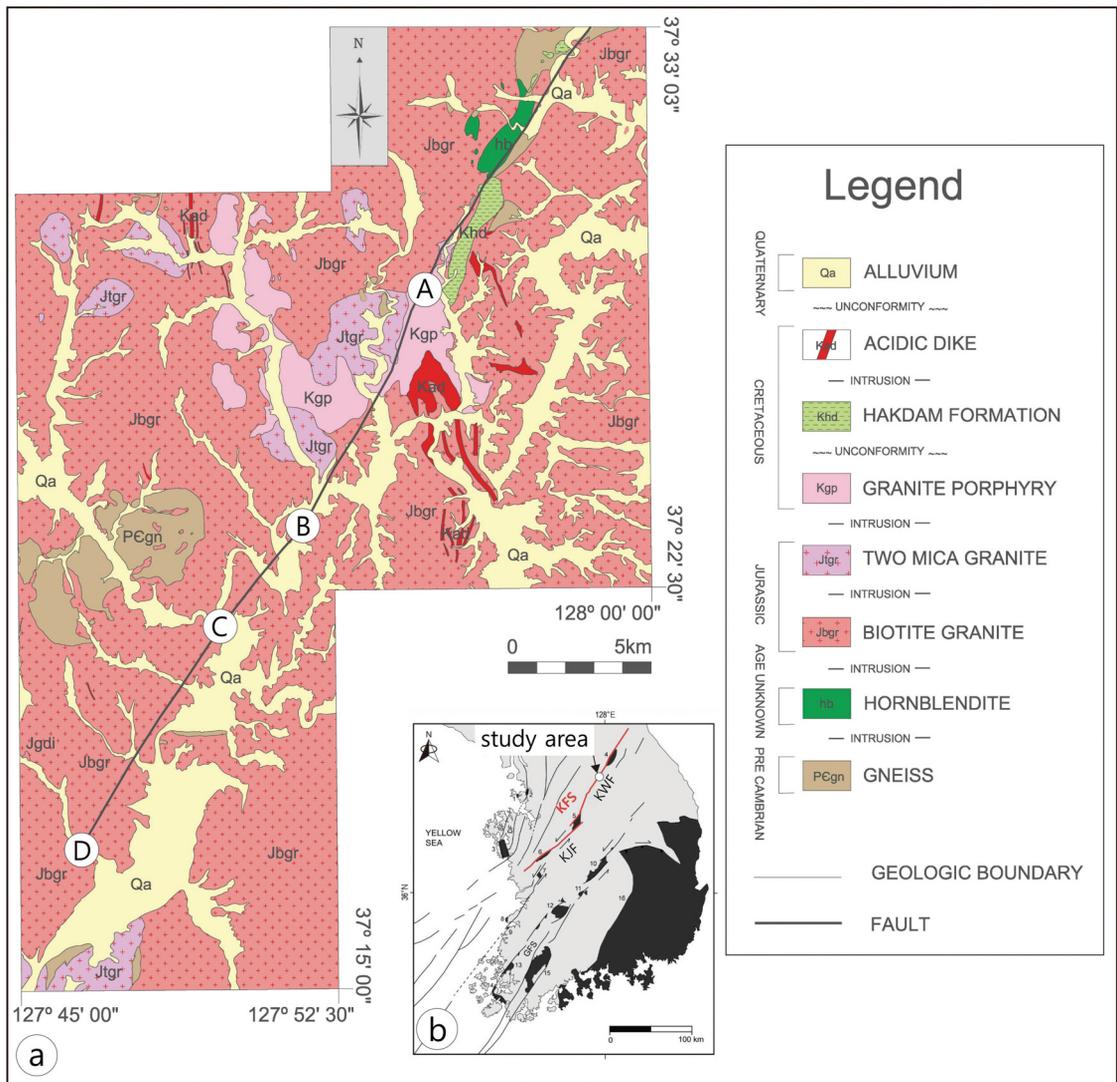


Fig. 3. (a) Geological map of the study area showing the locations of sampling sites (A, B, C and D) along the Keumwang fault (modified from Park *et al.*, 1989). (b) Distribution of Cretaceous strike-slip faults in the Korean peninsula (modified from Ryang, 2013). Red line represents Kongju fault system (KFS), Symbols; KJF, Kongju fault, KWF, Keumwang fault. White circle represents location of the study area.

**Table 1.** Concentrations of U (ppm), Th (ppm) and K (%) for each sample of Keumwang fault gouges.

Sample	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
HK 43	2.97±0.04	28.02±0.36	5.1±0.03
HK 57-4	2.85±0.03	15.48±0.22	3.32±0.02
HK 57-5	4.08±0.06	16.06±0.3	4.77±0.03
HK 72	1.5±0.02	11.03±0.21	1.93±0.02
HK 73-1	3.65±0.04	11.07±0.23	3.13±0.02
HK 73-2	2.17±0.03	15.44±0.23	3.24±0.02
HK 73-3	1.35±0.02	13.96±0.19	2.67±0.02
HK 75	3±0.03	12.61±0.23	2.51±0.02
HK 82	2.82±0.04	9.32±0.28	3.62±0.03

**Table 2.** Analytical data for ESR dating of fault gouge in the study area. Weighted mean is calculated from the ESR ages within the plateau and the values have been rounded up.

Sample	Grain size (μm)	Center	D <sub>E</sub> (Gy)	Dose rate (μGy/year)	ESR age (ka)	Weighted mean (ka)
HK43	25~45	Al	1568±135	6465±522	242±28	
	25~45	E'	1360±334	4224±343	321±83	
HK57-4	45~75	E'	1318±364	4110±331	320±92	330±50
	25~45	Al	1545±347	4224±343	365±87	
HK57-5	25~45	E'	1366±202	5690±467	239±40	290±20
	45~75	E'	1832±255	5533±451	331±53	
	25~45	Al	1567±190	5690±467	275±40	
	45~75	Al	1592±126	5533±451	287±32	
	75~100	Al	1830±207	5374±435	340±47	
HK72	25~45	E'	1989±265	2548±205	780±121	830±80
	45~75	E'	2157±232	2480±199	869±116	
HK73-1	25~45	Al	1209±154	3967±324	304±46	340±40
	45~75	Al	1519±206	3859±314	393±62	
HK73-2	25~45	Al	2089±309	4016±326	520±87	520±60
	45~75	Al	2041±277	3908±316	522±82	
HK82	25~45	E'	1290±178	4087±339	315±50	

등가선량을 계산하였다(Yang, 2006).

#### 4.1 A 지점

A 지점은 강원도 원주시 호저면 일대(37°28'11.01"N, 127°54'42.97"E)로, 화강반암 내에 N25°E/65°NW 방향의 부수단층이 발달되어 있다(그림 4a). 약 9 cm 두께의 단층비지피가 발달되어 있으며, 이 부수단층에서 단층비지시료 HK43을 채취하였다.

단층비지시료 HK43에서 분리한 석영시료에 조

사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 비교적 일정한 경향을 보인다(그림 4b). Al 신호는 0.025~0.045 mm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의 입자크기에서 ESR 신호의 세기는 불규칙하게 증감하는 경향이 있다(그림 4c). Al 신호의 0.025~0.045 mm 입자크기를 제외한 나머지 입자크기에서는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, Al 신호의 0.025~0.045

mm 입자크기를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는  $240 \pm 30$  ka이다(그림 4a).

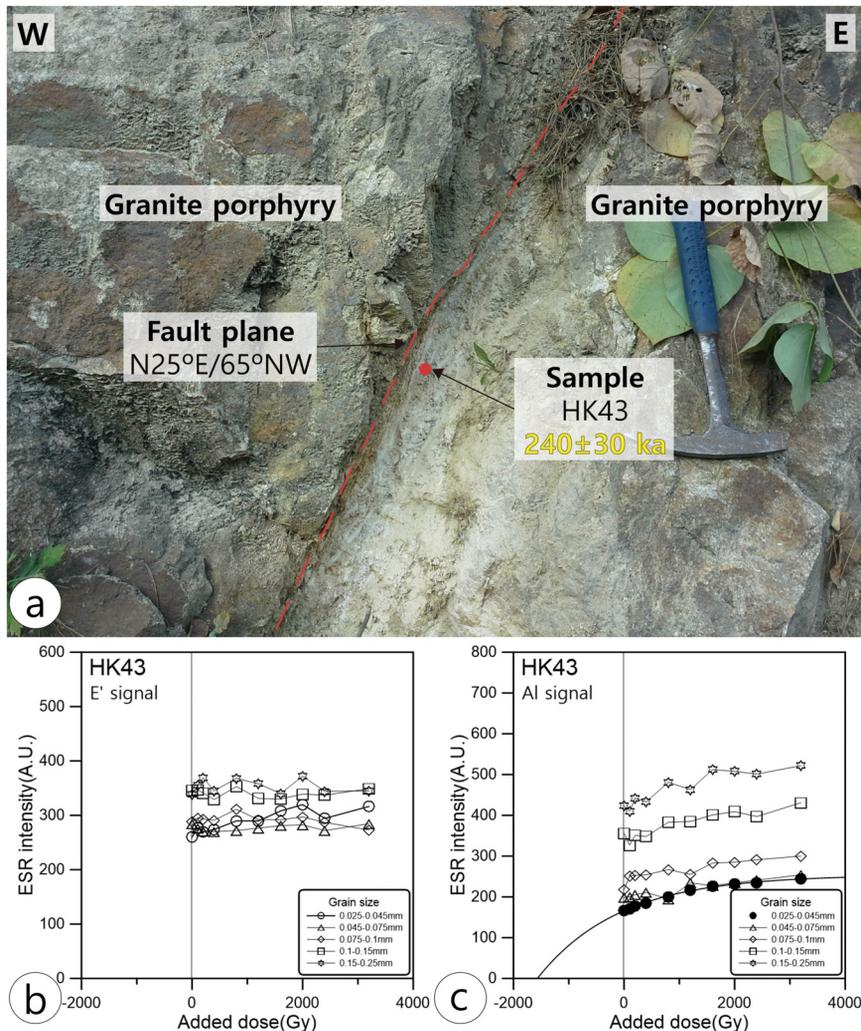
#### 4.2 B 지점

B 지점은 강원도 원주시 지정면 일대( $37^{\circ}23'40.40''N$ ,  $127^{\circ}51'45.01''E$ )로, 흑운모화강암 내에  $N08^{\circ}E/77^{\circ}NW$  와  $N14^{\circ}E/76^{\circ}SE$  방향의 부수단층들이 발달되어 있다(그림 5). 각 부수단층에 발달된 약 6 cm, 8 cm 두께의 단층비지띠들로부터 단층비지시료 HK57-4와 HK57-5를 채취하였다.

단층비지시료 HK57-4에서 분리한 석영시료에 조

사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm, Al 신호의 0.025~0.045 mm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의 입자크기에서는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 6a, 6b).

단층비지시료 HK57-5에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm, Al 신호의 0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm 및 0.075~0.1 mm 입자크기에서 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의



**Fig. 4.** (a) Outcrop photograph of subsidiary faults developed in the granite porphyry at site A. The dashed red line represents fault plane and the red dot represents sampling location and ESR age of HK43. (b), (c) Growth curves of ESR signals for fault gouge sample HK43.

입자크기에서는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 6c, 6d).

단층비지시료 HK57-4의 석영입자크기 대 ESR 연대 그래프에서, E' 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm, Al 신호의 0.025~0.045 mm 입자크기

에서 오차범위 내의 연대평탄을 보인다. 이를 가중 평균으로 계산한 다센터 평탄 ESR 연대는 330±50 ka이다(그림 5a & 7a).

단층비지시료 HK57-5의 석영입자크기 대 ESR 연대 그래프에서, E' 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045

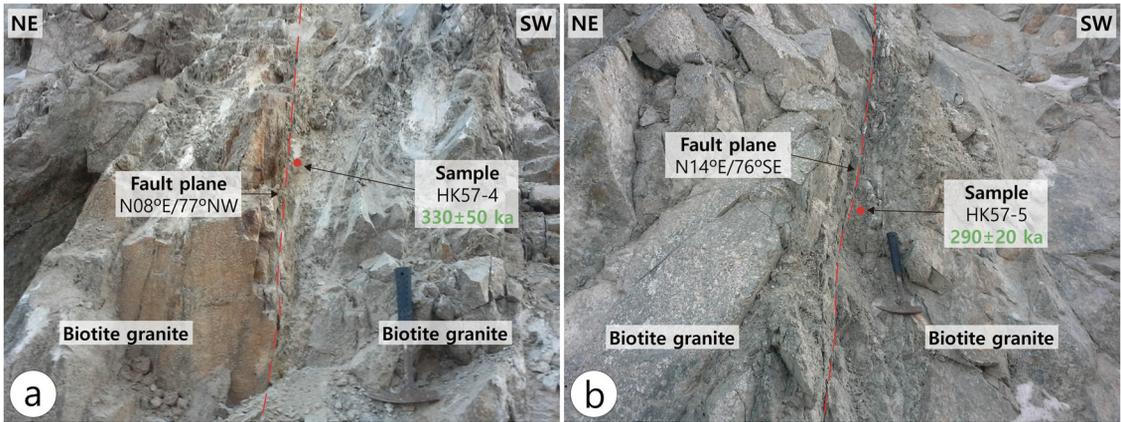


Fig. 5. Outcrop photographs of subsidiary faults developed in the biotite granite at site B. The dashed red lines represent fault planes and the red dots represent sampling locations and ESR ages of HK57-4 (a) & HK57-5 (b).

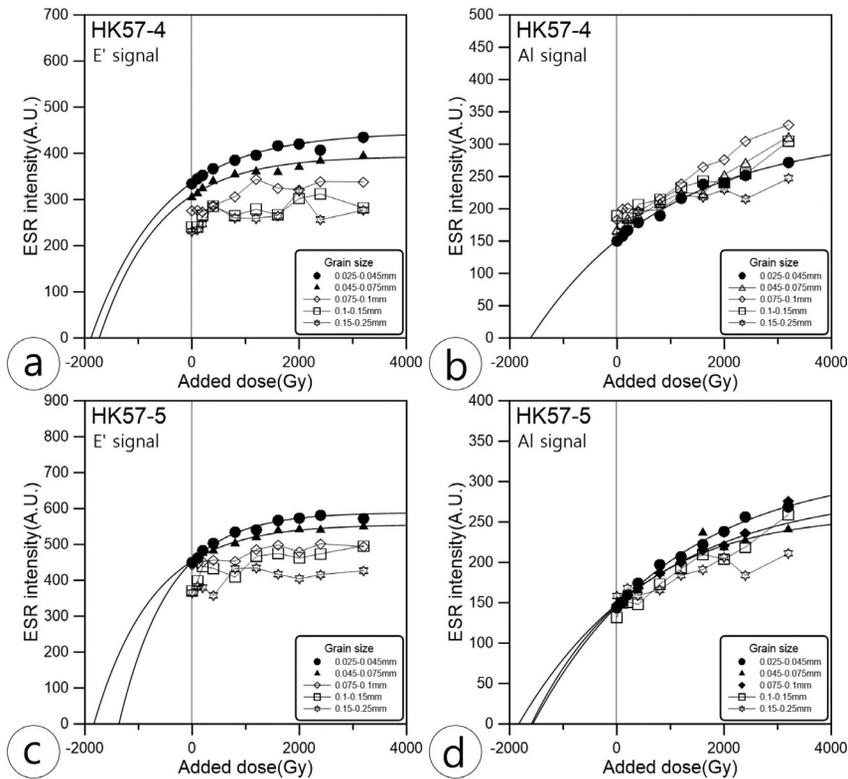


Fig. 6. Growth curves of ESR signals for fault gouge samples HK57-4 (a, b) and HK57-5 (c, d).

~0.075 mm, AI 신호의 0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm 및 0.075~0.1 mm 입자크기에서 오차범위 내의 연대평탄을 보인다. 이를 가중평균으로 계산한 다센터 평탄 ESR 연대는  $290 \pm 20$  ka 이다(그림 5b & 7b).

**4.3 C 지점**

C 지점은 강원도 원주시 지정면 일대(37°21'50.18"N, 127°49'49.07"E)로, 흑운모화강암으로부터 유래된 파쇄암 내에 단층비지가 중첩되어 형성된 약 25 m 폭의 단층핵이 발달되어 있다(그림 8). 단층핵의 북서쪽 경계부에는 약 4 m 폭의 단층비지대가 발달되어 있으며, 남동쪽 경계부에는 약 6 m 폭의 단층비지대가 발달되어 있다. 그 사이에는 흑운모화강암에서 유래된 파쇄암이 잔유물로 남아있다(그림 8). 단층핵의 북서쪽 단층비지대에서 단층비지시료 HK75를 채취하였다(그림 8a). 남동쪽 경계부에는 단층비지대와 파쇄암의 경계에 N20°E/71°NW 방향의 단층면이 발달되어 있으며, 단층비지시료 HK73-2 및 HK73-3을 채취하였다(그림 8b, 8c). 단층손상대 내에 N48°E/76°SE 방향의 부수단층이 발달되어 있으며, 단층비지시료 HK73-1을 채취하였다(그림 8d).

단층비지시료 HK73-1에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 AI 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의 입자크기에서는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 9a, 9b).

단층비지시료 HK73-2에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 AI 신호의

0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의 입자크기에서는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 9c, 9d).

단층비지시료 HK73-3에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호 및 AI 신호의 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 9e, 9f).

단층비지시료 HK75에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호 및 AI 신호의 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 9g, 9h).

단층비지시료 HK73-1의 석영입자크기 대 ESR 연대 그래프에서, AI 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm 입자크기에서 오차범위 내에서 일치하며, 이를 가중평균으로 계산한 ESR 연대는  $340 \pm 40$  ka 이다(그림 8d & 10a).

단층비지시료 HK73-2의 석영입자크기 대 ESR 연대 그래프에서, AI 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm 입자크기에서 오차범위 내의 연대평탄을 보이며, 이를 가중평균으로 계산한 평탄 ESR 연대는  $520 \pm 60$  ka 이다(그림 8b & 10b).

단층비지시료 HK73-3과 HK75는 단층활동 시에 부분적으로 ESR 신호가 줄어들었다가 단층활동 후에 주변의 방사성원소로부터 방사성에너지를 받아 포화된 것으로 추정되며, 이 경우에는 ESR 연대를 결정할 수 없다. 따라서 단층비지시료 HK73-3과 HK75의 마지막 활동시기는 단층비지의 ESR 연대측정법의 한계를 넘는 약 200만 년 전 이전으로 추정된다

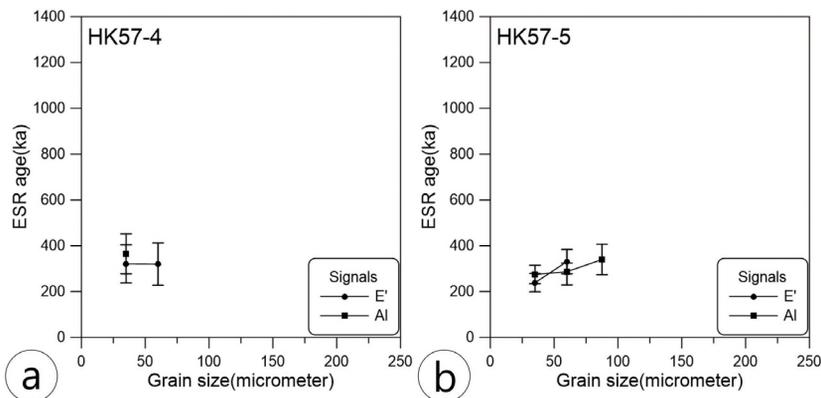


Fig. 7. Grain sizes vs. ESR ages for fault gouge samples HK57-4 (a) and HK57-5 (b).

(그림 8a, 8c).

4.4 D 지점

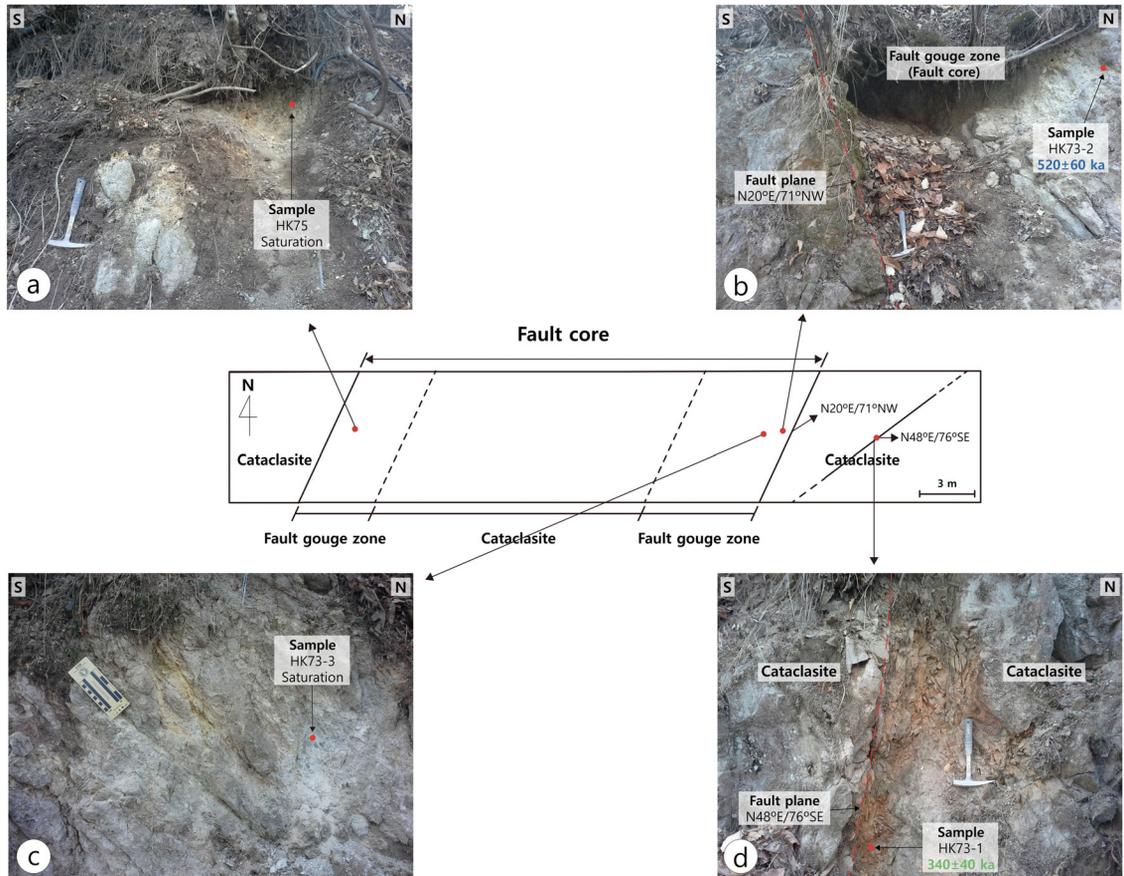
D 지점은 강원도 원주시 문막읍 일대(37°17'40.97"N, 127°46'25.97"E)로, 흑운모화강암에 N40°E/84°SE 방향의 부수단층이 발달되어 있다(그림 11a). 약 3 cm 두께의 단층비지띠가 발달되어 있으며, 이 부수단층에서 단층비지시료 HK72를 채취하였다.

이곳에서 약 50 m 떨어진 노두(37°17'39.80"N, 127°46'28.71"E)에는 흑운모화강암에 N25°E/65°NW 방향의 부수단층이 발달되어 있다(그림 11b). 약 4 cm 두께의 단층비지띠가 발달되어 있으며, 이 부수단층에서 단층비지시료 HK82를 채취하였다.

단층비지시료 HK72에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 E' 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의 입자크기에서는 ESR 신호가 포함되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 12a, 12b).

단층비지시료 HK82에서 분리한 석영시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 A1 신호의 0.025~0.045 mm 입자크기에서 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 그 외의 입자크기에서는 ESR 신호가 포함되어 ESR 연대를 결정할 수 없었다(그림 12c, 12d).

단층비지시료 HK72의 석영입자크기 대 ESR 연대



**Fig. 8.** Schematic diagram across the fault core at site C and sampling locations and ESR ages. (a) In northwest boundary of the fault core, the fault gouge zone about 4 m width is developed. The red dot represents sampling location and ESR age of HK75. (b), (c) In southeast boundary of the fault core, the fault gouge zone about 6 m width is developed. The dashed red line represents fault plane and the red dots represent sampling locations and ESR ages of HK73-2 & HK73-3. (d) Subidiary fault developed in the cataclasites. The dashed red line represents fault plane and the red dot represents sampling location and ESR age of HK73-1.

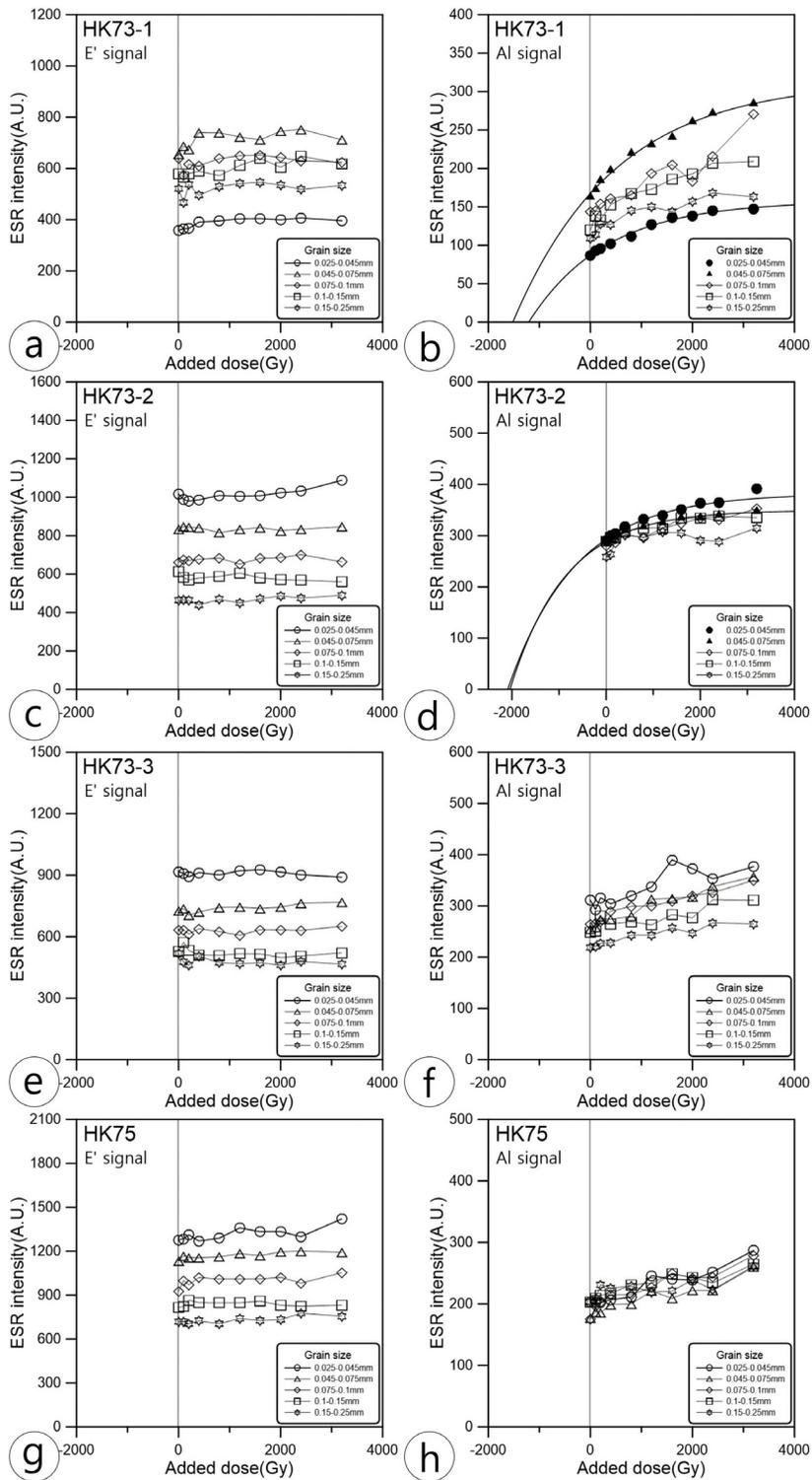


Fig. 9. Growth curves of ESR signals for fault gouge samples HK73-1 (a, b), HK73-2 (c, d), HK73-3 (e, f) and HK75 (g, h).

그래프에서, E' 신호의 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm 입자크기에서 오차범위 내에서 일치하며, 이를 가중평균으로 계산한 ESR 연대는 830±80 ka이다(그림 11a and 13a).

단층비지시료 HK82의 석영입자크기 대 ESR 연대 그래프에서, A1 신호의 0.025~0.045 mm 입자크기에서만 ESR 연대가 결정되며, 이를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 320±50 ka이다(그림 11b and 13b).

5. 토의 및 결론

5.1 부수단층의 ESR 연대측정 결과

B 지점의 흑운모화강암 내에 발달된 부수단층에서 채취한 단층비지시료 HK57-4 (330±50 ka), HK57-5

(290±20 ka), C 지점의 파쇄암 내에 발달된 부수단층에서 채취한 단층비지시료 HK73-1 (340±40 ka), D 지점의 흑운모화강암에 발달된 부수단층에서 채취한 단층비지시료 HK82 (320±50 ka)의 ESR 연대는 오차범위 내에서 일치한다. 이는 약 29~34만 년 전(활동시기 d)에 연구지역 전체에서 금왕단층이 재활동한 것으로 해석된다(그림 14).

A 지점 및 D 지점의 흑운모화강암에 발달된 부수단층에서 채취한 단층비지시료 HK43의 ESR 연대는 240±30 ka, HK72의 ESR 연대는 830±80 ka이다. 따라서 연구지역에 발달되어 있는 부수단층으로부터 분석된 금왕단층의 활동시기는 약 24만 년 전(활동시기 c), 약 29~34만 년 전(활동시기 d)과 약 80만 년 전(활동시기 g)이다(그림 14).

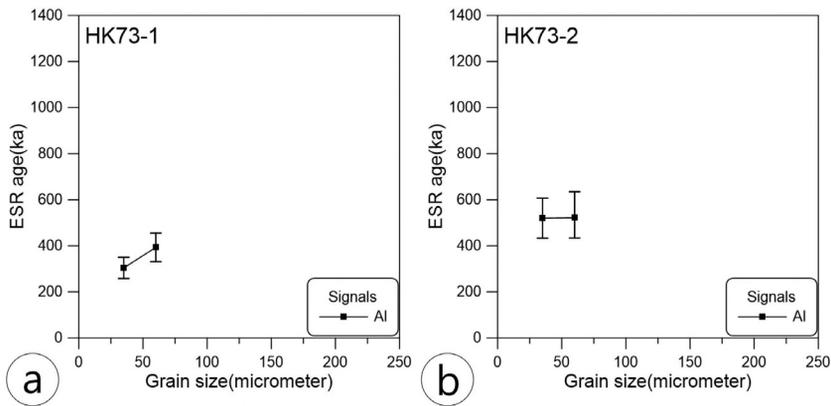


Fig. 10. Grain sizes vs. ESR ages for fault gouge samples HK73-1 (a) and HK73-2 (b).

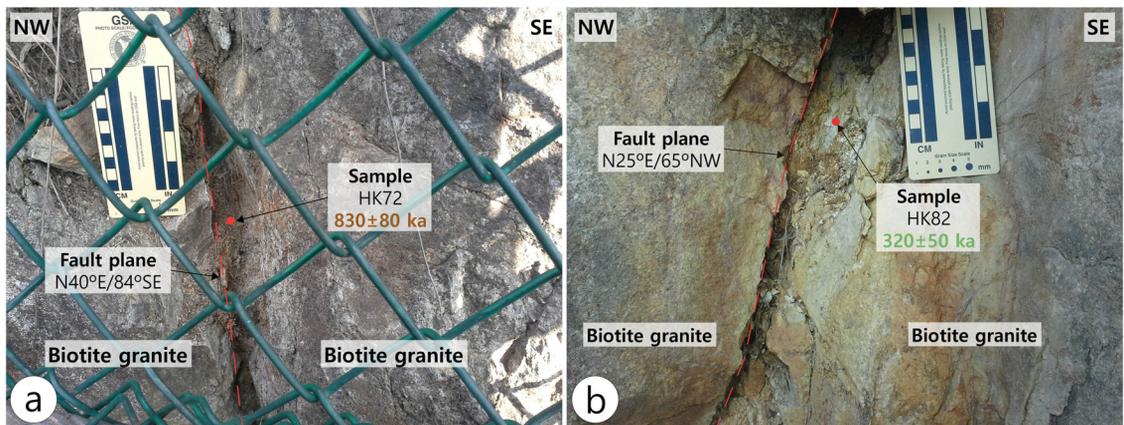


Fig. 11. Outcrop photographs of subsidiary faults developed in the biotite granite at site D. The dashed red lines represent fault planes and the red dots represent sampling locations and ESR ages of HK72 (a) & HK82 (b).

5.2 단층핵의 ESR 연대측정 결과

C 지점의 단층핵에 발달된 단층비지시료 HK73-2의 ESR 연대는  $520 \pm 60$  ka이다. 단층비지시료 HK73-3 및 HK75는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대측정법으로는 활동연대를 결정할 수 없었다. 연구지역의 단

층핵에 발달된 단층비지대는 대부분 적어도 약 200만 년 전 이전에 마지막으로 활동하였으며(세 번째~다섯 번째 단계), 남동쪽 경계부의 일부 단층비지대가 약 52만 년 전(활동시기 e)에 단층비지대 진화양식 1의 형태로 재활동한 것으로 추정된다(그림 1 & 14).

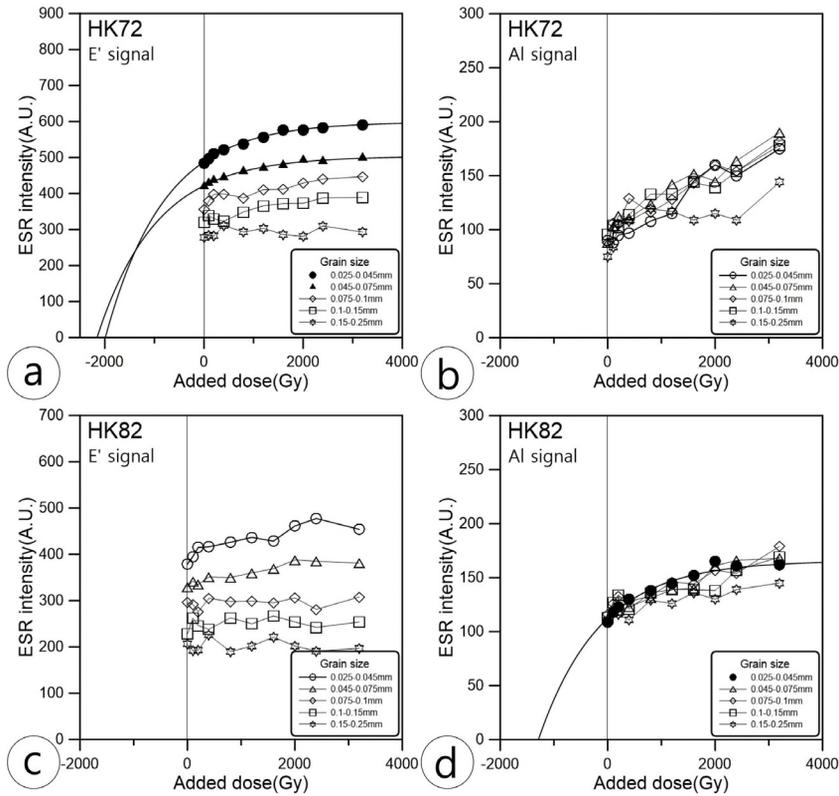


Fig. 12. Growth curves of ESR signals for fault gouge samples HK72 (a, b) and HK82 (c, d).

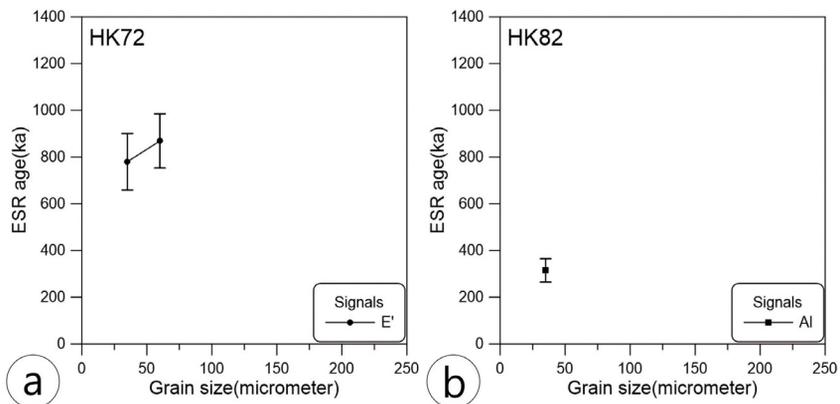


Fig. 13. Grain sizes vs. ESR ages for fault gouge samples HK72 (a) and HK82 (b).

5.3 연구지역에 발달된 금왕단층의 제4기 단층활동사

이번 연구결과는 연구지역에 발달한 단층핵(활동시기 e)과 부수단층(활동시기 c, d, g)의 재활동시기가 일치하지 않는다. 이 경우에 3가지 가능성을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 노두여건 상 약 25 m 폭의 단층핵에서 3개의 단층비지시료만을 채취할 수 있었기 때문에, 단층핵의 재활동시기를 모두 얻을 수 없었을 가능성(그림 8). 둘째, 단층핵과 부수단층이 같은 시기에 재활동하였지만, 단층핵의 폭이 부수단층의 폭보다 넓기 때문에 단층핵에 발달한 단층비지대의

ESR 신호가 0이 되기에는 입자경계 마찰미끌림, 마찰열 및 격자변형작용의 조건이 부족했을 가능성. 셋째, 약 24만 년 전(활동시기 c) 및 약 29~34만 년 전(활동시기 d)에 연구지역인 강원도 원주시 일대에 발달한 부수단층에서만 재활동 하였으며, 단층핵을 구성하는 2개의 괴상(massive) 단층비지대는 같은 시기에 재활동하지 않고 남동쪽 경계부의 일부만 약 52만 년 전(활동시기 e)에 재활동하였을 가능성이 있다.

5.4 금왕단층의 제4기 시간-공간적 활동형태

이번 연구결과를 포함한 금왕단층의 ESR 연대자

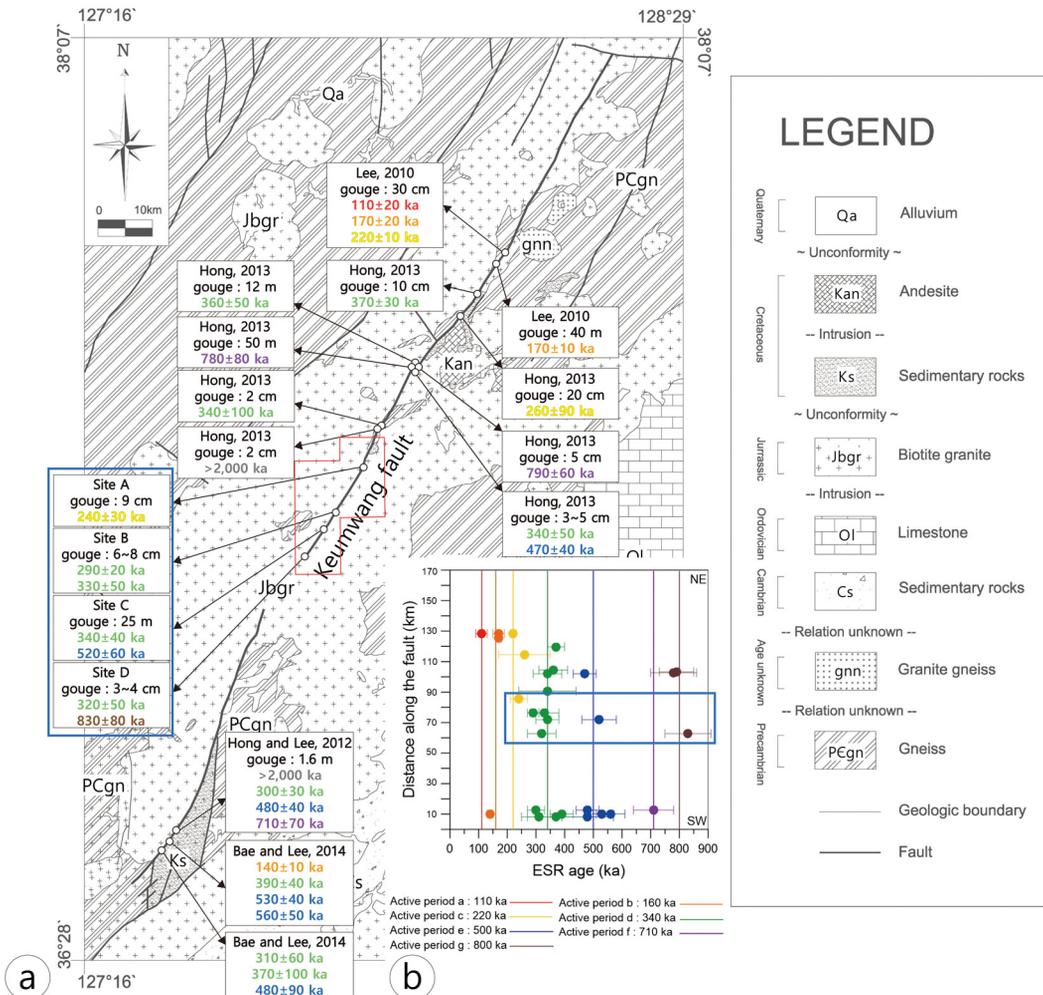


Fig. 14. (a) Space-time activity pattern of the Keumwang fault during the Quaternary period. (b) Temporal activity pattern of the Keumwang fault during the Quaternary period. Red polygon represents the study area. Blue rectangles represent the data obtained from this study. Modified from Lee (2010), Hong and Lee (2012), Hong (2013), Bae and Lee (2014) and Kim and Lee (2016).

료에서, 약 50만 년 전(활동시기 e) 이전의 ESR 연대 자료가 부족한 이유는 ESR 연대측정법 특성상 이전에 활동했던 기록은 지워지며, 단층비지시료의 마지막 활동시기만 구할 수 있기 때문이다. 따라서 약 50만 년 전 이전의 단층활동사는 ESR 연대측정법으로는 정확히 파악할 수가 없는 실정이며, 약 50만 년 전 이후의 자료를 이용하여 시간-공간적 활동형태를 분석할 수밖에 없다. 이번 연구결과와 기존의 연구자료를 종합하여 금왕단층의 제4기 시간적인 활동형태를 분석한 결과(그림 14), 5번의 활동기와 5번의 휴식기가 반복되었음을 알 수 있으며, 활동기는 약 50만 년 전(활동시기 e), 약 34만 년 전(활동시기 d), 약 22만 년 전(활동시기 c), 약 16만 년 전(활동시기 b) 그리고 약 11만 년 전(활동시기 a)이다. 그 활동주기는 약 22만 년 전(활동시기 c) 이전에는 약 12~16만 년이었으나 그 이후부터는 약 5~6만 년으로 짧아진 것으로 해석된다. 금왕단층의 제4기 공간적인 활동형태를 분석한 결과(그림 14), 약 34만 년 전(활동시기 d) 이전에는 남서부지역에서 주로 단층운동이 활발하게 일어났으며, 활동시기 d 이후에는 북동부지역에서 주로 재활동했을 것으로 해석된다. 하지만 금왕단층이 약 34만 년 전(활동시기 d) 이전에 전체적으로 활동을 하였지만 그 후에는 북동부지역에서 재활동하여 북동부지역에는 약 34만 년 전(활동시기 d) 이전의 기록이 지워졌을 가능성도 배제할 수는 없다.

## 사 사

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7100), 강원대학교 학술연구조성비(연구과제번호 C1011754-01-01)의 지원으로 수행되었습니다. 세심한 검토로 이 논문의 질을 향상시켜 주신 한국기초과학지원연구원 최정현 박사님과 임명익의 심사위원님께서 감사의 말씀을 드립니다.

## 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, Chungcheongbuk-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 735-752 (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).
- Barka, A.A., 1992, The North Anatolian Fault Zone. *Annales Tectoniques*, 6, 164-195.
- Chester, F.M. and Logan, J.M., 1986, Implication for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone. *California. Pure and Applied Geophysics*, 124, 79-106.
- Chester, F.M. and Logan, J.M., 1987, Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault, California. *Journal of Structural Geology*, 9, 621-634.
- 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, 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).
- Fukuchi, T., 1988, Applicability of ESR dating using multiple centres to fault movement-The case of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line, a major fault in Japan. *Quaternary Science Reviews*, 7, 509-514.
- Hong, N.R., 2013, Structural features and movement history of the Keumwang Fault at Hongcheon-gun, Kangwon-do, Korea. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 17-32, 71-73 p (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- Jang, B.G. and Lee, H.K., 2012, Structural features of fault rocks developed in the Keumwang Fault at Haggok-ri, Hoengseong-gun, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 11-26 (in Korean with English abstract).
- Kamb, B., Silver, L.T., Abrams, M.J., Carter, B.A., Jordan, T.H. and Minster, J.B., 1971, Pattern of faulting and nature of fault movement in the San Fernando earthquake. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 733, 41-54 p.
- 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, Y.S., Jin, K.M., Choi, W.H. and Kee, W.S., 2011, Understanding of active faults: A review for recent

- researches. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 723-752 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Knipe, R.J., 1989, Deformation mechanisms-Recognition from natural tectonics. *Journal of Structural Geology*, 11, 127-146.
- 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. 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 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. *Journal of 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).
- Park, B.K., Chang, H.W. and Woo, Y.K., 1989, Geological report of the Wonju sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 26-29 p (in Korean with English abstract).
- Rainer Grün, 2009, The DATA program for the calculation of ESR age estimates on tooth enamel. *Quaternary Geochronology*, 4, 231-232.
- 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).
- 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 faults. *Journal of Structural Geology*, 22, 913-930.
- Toyoda, S. and Schwarcz, H.P., 1997, The hazard of the counterfeit E' signal in quartz to the ESR dating of fault movement. *Quaternary Science Reviews*, 16, 483-486.
- Yang, J.S., 2006, Quaternary fault activity in the southeastern part of the Korean peninsula. Ph.D. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 14 p (in Korean with English abstract).
- Yang, J.S. and Lee, H.K., 2014, Quaternary Fault Activity of the Yangsan Fault Zone in the Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 47, 17-27 (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 : February 8, 2017

Revised : February 27, 2017

Accepted : February 28, 2017