

단층비지의 ESR 연대측정 - 리뷰

김만재 · 이희권[‡]

강원대학교 지질학과

요 약

단층비지의 ESR 연대측정을 통해 단층의 마지막 활동시기를 결정할 수 있다. ESR 연대측정법은 단층비지 내의 석영 내 홀전자의 수(ESR 센터)를 이용한다. U, Th 및 K과 같은 방사성 원소의 붕괴로 방출되는 이온화 방사선에 의한 이온화작용으로 인해 ESR 센터가 만들어지며 시간이 지남에 따라 ESR 센터의 수가 증가하게 된다. 단층운동 중에는 입자경계 마찰 미끄럼에 의해 발생하는 마찰열과 격자 변형작용에 의해 석영의 ESR 신호의 세기는 0이 된다. 단층운동 이후 자연 방사선에 의해 ESR 센터의 수가 증가하여, ESR 신호의 세기가 다시 커지게 된다. ESR 연대는 등가선량(D_E)을 단위시간당 조사율(d)로 나누어 결정한다($ESR \text{ 연대} = D_E/d$). ESR 신호가 완전히 0이 되기 위해서는 단층면에 작용하는 수직응력이 적어도 약 3 MPa 이상이어야 하며, 충분한 변위량도 필요하다. 단층비지가 지하에서 재활동한 이후, 응기작용에 의해 지표의 노두에 도달하기까지는 응력 상태가 변하게 된다. 단층면에 작용하는 수직응력의 상태는 정압압(Lithostatic pressure)의 크기, 최대 수평응력의 크기 및 단층면 방향과 최대 수평응력의 방향 사이의 각도에 의해 결정된다. 단층비지 내 ESR 신호가 완전히 0이 되는 깊이는 시료 채취 지점의 응기율과 ESR 연대에 의해 결정된다. 지진 기록에 의하면, 주어진 지표 지진단층의 단층핵과 부수단층의 일부가 동시기에 재활동한다. 주어진 단층대의 장기적인 활동형태를 연구하기 위해서는 단층핵의 전단면과 부수단층의 전단면들로부터 시료를 채취하여 분석해야 한다. 한반도에 발달한 단층핵과 부수단층(왕숙천단층대, 금왕단층대, 양산단층대 및 울산단층대)으로부터 단층비지 시료를 채취하여 분석한 ESR 연대는 약 89만 년~약 10만 년의 범위에 있다. 단층운동은 판 내부에서 발생하는 지진 패턴과 유사하게, 1) 활동기와 휴지기로 구분되며, 2) 주향을 따라 이동하는 경향을 보이고, 3) 단층대들 사이에서 돌아다니면서 발생하는 것처럼 보인다.

주요어: 활성단층, 단층비지의 ESR 연대측정, 클러스터링, 이동, 로밍

Man-Jae Kim and Hee-Kwon Lee, 2020, ESR dating of fault gouge - review. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 211-234

ABSTRACT: The last activity of faults can be dated by the ESR dating of fault gouge. ESR dating of fault gouge is based on the measurements of the number of unpaired electrons (ESR center) in the quartz minerals. These ESR centers are generated by natural ionizing radiation from U, Th, and K and have accumulated over time. ESR signals of quartz are reset by frictional heating and lattice deformation during grain boundary frictional sliding at the time of fault movement. ESR signals then build up as a result of the formation of the unpaired electrons by natural radiation. Two parameters have to be determined; the equivalent dose (D_E) and the dose rate (d). The ESR age is obtained by dividing equivalent dose by dose rate ($ESR \text{ age} = D_E/d$). Complete resetting of ESR signals will only occur when the fault plane has been subjected to normal stress over 3 MPa, and when there has been sufficient displacement. Fault gouges that are buried and later uplifted go through a stress history that can be explored by the effect of overburden, the maximum horizontal stress, and the angle between the strike of fault plane and the orientation of maximum horizontal stress. The depth of fault gouges at the time of complete resetting of ESR signals (over 3 MPa) can be estimated from the uplift rate and the ESR ages for sampling locations. Records of earthquake faulting events show that some parts of the fault cores or subsidiary faults were reactivated at the same time. In order to investigate the long-term pattern of fault activity, samples should be collected at each shear bands developed within the fault cores and subsidiary faults. ESR ages from both the fault cores and subsidiary faults (The Wangsukcheon fault zone, the Keumwang fault zone, the Yangsan fault zone, and the Ulsan fault zone) developed in the Korean peninsula range from 890 to 100 ka. The fault movements tend to show 1) temporal clustering into

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

active and dormant periods, 2) migrate along the strike of the faults and 3) roam between widespread fault zones developed in the Korean peninsula similar to spatiotemporal occurrences of earthquakes in the interior of a tectonic plate.

Key words: active fault, ESR dating of fault gouge, clustering, migration, roaming

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

1. 서론

2016년 9월 12일에 경상북도 경주시 내남면 화곡저수지 인근에서 규모 5.8의 지진이, 2017년 11월 15일에는 경상북도 포항시 흥해읍 남송리 인근에서 규모 5.5의 지진이 발생하였다. 유라시아 판 내부에 위치한 우리나라에서 지진이 발생함으로써 국민들과 정부는 지진재해에 대처해야 된다는 인식을 가지게 되었다. 지표파열을 일으키는 지진은 제4기에 활동했던 활성단층(active fault)에서 발생할 가능성이 크다(Bonilla, 1979; Ikeda *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2011). 우리나라의 역사지진 기록은 비교적 짧아(약 2천 년 KMA, 2012) 재발주기가 수 천~수 만 년 이상인 고지진에 대한 정보를 얻기에는 어려움이 있다(Solonenko, 1973; Wallace, 1981). 고지진학 연구를 통해 지질학적 증거를 찾아 고지진의 발생 시기, 장소, 규모 등을 알아내려고 하고 있다(McCalpin, 1996). 위험도가 높은 활성단층이란, 1) 지진을 빈번하게 일으킨 단층, 2) 비교적 큰 규모의 지진을 발생시킨 단층, 3) 마지막 단층운동 이후에 경과한 기간이 재발주기에 근접해있거나 초과해버린 단층이다(Ikeda *et al.*, 1996). 활성단층의 위험도를 평가하기 위해서는 단층운동의 평균변위속도, 마지막 단층운동 시기 및 재발주기 등을 분석해야 한다(Ikeda *et al.*, 1996). 이러한 자료를 얻기 위해서는 제4기 연대측정이 필수적이다.

국내에서의 단층에 의해 절단된 제4기 퇴적층의 연대측정은 주로 ^{14}C , OSL 방법이 이용되어져 왔다(Hong *et al.*, 2001; Cheong *et al.*, 2003; Choi, J.H. *et al.*, 2004; Choi, S.J. *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2015). 측정 가능한 연대범위의 상한은, ^{14}C 연대는 약 5만 년까지이며 석영 OSL 연대는 약 15~20만 년으로 알려져 있다(Hyun *et al.*, 2000; Noller *et al.*, 2000; Walker, 2005).

ESR 연대는 단층운동시기를 직접 지시하며, 주어진

단층의 활동패턴을 연구하는데 이용되어져 왔다(Ikeya *et al.*, 1982; Grün, 1989, 1992; Lee, 1999, 2010; Lee and Schwarcz, 2001; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006; Choi *et al.*, 2012; Hong and Lee, 2012; Hong, 2013; Bae and Lee, 2014; Bae, 2016; Kim and Lee, 2017; Kim, 2018; Weon and Lee, 2018; Choi, 2019; Han, 2019; Min, 2020). ESR 신호의 세기가 완전히 0이 되기 위해서는 단층면에 작용하는 수직응력이 적어도 1) 약 3 MPa 이상이어야 하며 2) 약 0.3 m 이상의 변위량이 필요하다(Ariyama, 1985; Grün, 1989; Tanaka, 1990; Lee and Schwarcz, 1993). 단층면에 작용하는 수직응력은 지하로 감에 따라 증가하며, 지하 약 70 m 이상의 깊이에서 ESR 신호가 완전히 0이 된다(Ito and Swada, 1985; Grün, 1989). 따라서 지표의 노두에서 채취한 단층비지의 ESR 연대의 하한은 단층비지의 깊이(약 70 m)와 용기율에 의해 결정되며, 한반도 남동부의 용기율(약 0.08~0.25 mm/year)을 적용하였을 때 약 20만 년으로 계산된다(Kim *et al.*, 2006; Yang, 2006; Synn *et al.*, 2013). ESR 연대의 상한은 성장곡선에서 ESR 신호가 포화되는데 까지 걸리는 등가선량(equivalent dose)과 단위시간당 조사율(dose rate)을 이용하여 결정할 수 있으며, 약 200만 년으로 알려져 있다(Lee, 1999; Lee and Schwarcz, 2001; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006; Lee, 2010).

계기 지진, 역사 지진 및 고지진 자료에 의하면, 지진은 활동기(active period)에 집중되어 발생하는 경향이 있으며(clustering) 비교적 긴 휴지기(dormant interval)를 가진다(Grant and Sieh, 1994; Lee and Schwarcz, 1995; Grant, 1996; Sieh, 1996; Yeats *et al.*, 1997; Yang, 2006; Liu and Stein, 2016). 미국의 산안드레아스 단층(San Andreas Fault), 터키의 북아나톨리안 단층(North Anatolian Fault)과 같이 판 경계에 발달되어 있는 변환단층에서는 지진이 주향

을 따라 이동(migration)하는 경향이 있다(그림 1a; Ambraseys, 1988; Barka, 1992; Grant and Sieh, 1994; Grant, 1996; Sieh, 1996; Yeats *et al.*, 1997). 판 내부에서는 지진이 단층들 사이에서 돌아다니는(roaming) 경향을 보이며(그림 1b; Liu and Stein, 2016), 비교적 규모가 작고, 얇은 진원(약 10~15 km)에서 발생하는 경향이 있다(Kim *et al.*, 2006).

이 리뷰 논문에서는 단층비지의 ESR 연대측정법의 원리 및 방법, 지질학적 조건 등에 대해 기술하였다. 왕숙천단층대, 금왕단층대, 양산단층대 및 울산 단층대에서 채취한 단층비지의 ESR 연대측정 자료를 이용하여 한반도에서의 제4기 시·공간 단층운동 특성에 대해 분석하였으며, 향후 연구방향에 대해서도 기술하고자 한다.

2. 단층비지의 ESR 연대측정

2.1 원리 및 방법

ESR 연대측정법에 대한 원리 및 방법은 Grün (1989), Ikeya (1993) 등에 의해 자세히 설명되어져 있으며, 단층비지의 ESR 연대측정법에 대해서는 Lee (1995, 1999), Lee and Schwarcz (2000), Schwarcz and Lee (2000) 등에 의해 자세히 설명되어 있다.

암석 내에 분포하는 U, Th 및 K과 같은 방사성 원소는 붕괴를 하면서 이온화 방사선을 방출한다(그림 2a). 이러한 이온화 방사선에 석영과 같은 광물들이 노출되면, 결정 안에서 이온화작용이 일어나 원자의 오비탈에 전자 1개가 들어있는 홀전자(unpaired electron)가 형성된다(그림 2b). 홀전자는 가전자대(valence band)

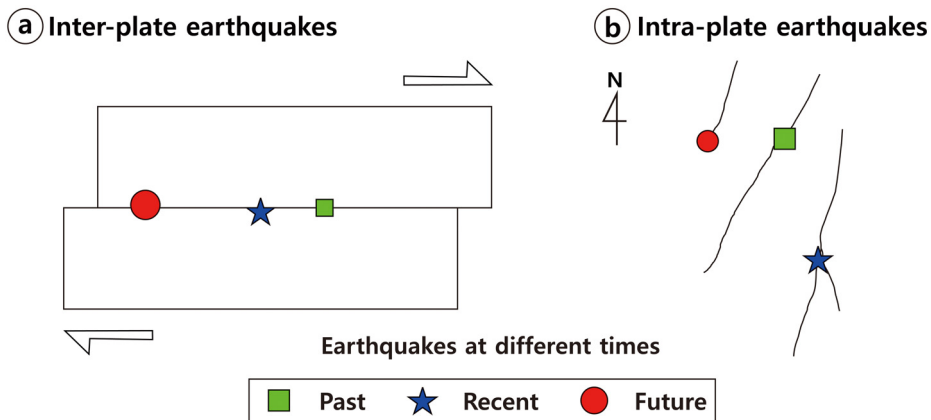


Fig. 1. Conceptual models for earthquakes on inter-plate and Intra-plate fault systems. a) Inter-plate earthquakes are restricted to the plate boundary fault. Large earthquakes appear to migrate along the plate boundary fault. b) Large intra-continental earthquakes tend to roam across widespread faults developed within the interior of a tectonic plate (modified from Liu and Stein, 2016).

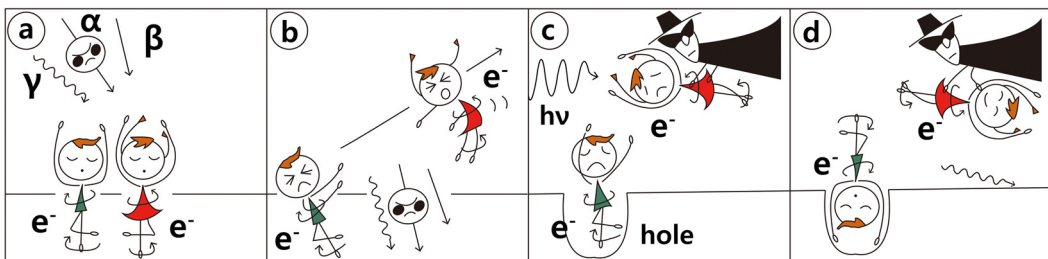


Fig. 2. The principle of ESR dating. a) Paired electrons are spinning in opposite directions. Radioactive elements like U, Th, K emit radioactive energy. b) Formation of the unpaired electrons due to the ionization by natural radiation. c) The unpaired electrons are trapped at lattice defects. The spin direction of the unpaired electrons is changed by microwave absorption. d) The number of unpaired electrons is measured as the intensity of the ESR signal (after Ikeya, 1993).

에서 전도대(conduction band)로 이동하게 되고 이후에 홀전자가 다시 가전자대로 돌아오게 되는데, 그 중 일부는 결정의 격자결함(lattice defect)에 잡혀 ESR 센터가 된다(그림 2c). 격자결함에 잡혀있는 홀전자, 즉 ESR 센터의 수는 시간이 지남에 따라 점점 증가하게 되며 이에 비례하는 ESR 신호의 세기도 점점 커지게 된다. ESR 신호의 세기를 측정하기 위해 ESR 분광계(ESR spectrometer)의 공동(cavity) 속에 시료를 넣어 외부 자기장에 노출시키면, 마이크로파(microwave) 에너지를 흡수하여 전자 스핀의 방향이 바뀌게 된다(그림 2c, 2d). 이때 흡수된 에너지의 양은 ESR 센터의 수와 비례하게 되고 ESR 신호로 나타나게 된다(그림 2d).

단층운동 중에 입자경계 마찰 미끄럼(grain boundary frictional sliding)에 의해 발생하는 마찰열(frictional heating)과 격자 변형작용(lattice deformation)으로 인해 격자결함에 잡혀있던 홀전자가 격자결함으로부터 빠져나오기 때문에 ESR 신호의 세기가 0이 된다(그림 3; complete resetting of ESR signal). 단층운동이 끝나고 시간이 지남에 따라 방사성 원소(U, Th 및 K)의 붕괴로 방출되는 이온화 방사선에 의한 이온화작용으로 인해 ESR 신호의 세기가 다시 증가하게 된다. 따라서 단층비지 시료의 ESR 신호의 세기는 단층운동 이후에 다시 증가한 ESR 신호의 세기를 의미한다(Grün, 1989; Ikeya, 1993; Lee, 1995, 1999; Lee and Schwarcz, 2000; Schwarcz and Lee, 2000).

ESR 연대를 결정하기 위해서는 등가선량(D_E ; 단위: Gy)을 단위시간당 조사율(d ; 단위: $\mu\text{Gy}/\text{year}$)

로 나누어야 한다. 등가선량은 ESR 신호의 세기를 부가조사법(additive dose method)을 이용하여 ESR 신호가 0이 된 이후 즉 마지막 단층운동이 끝난 후부터 현재까지 단층비지가 받은 에너지의 양으로 변환하여 계산하며, 방사선의 세기를 의미하는 단위시간당 조사율은 단층비지 시료에 함유되어 있는 방사성 원소 및 수분 함량을 분석하고 α -효과, 감쇠상수 등을 결정한 후 이들을 ESR-data 프로그램(Grün, 2009)에 입력하여 계산한다(Grün, 1989; Ikeya, 1993; Lee, 1995, 1999; Lee and Schwarcz, 2000; Schwarcz and Lee, 2000).

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

2.2 석영 내 ESR 센터

석영은 SiO_4 사면체가 서로 연결되어 있는 격자 구조로 되어있다. 자연에서 형성되는 석영은 완벽한 격자배열을 가지고 있지 않고 격자결함을 항상 가지고 있다. 이러한 격자결함은 석영의 결정구조 내에 약 30 종류가 있다고 알려져 있다(Weil, 1984). 석영의 이론적 강도(원자결합파괴)는 약 5~10 GPa이지만 실제 석영의 강도는 이보다 훨씬 작다. 이러한 강도의 차이는 응력이 격자결함에 집중되어 이론적 강도보다 훨씬 낮은 응력에서 파괴가 일어난다고 보고된 바가 있다(Griffith, 1924). 이러한 석영 속의 격자결함에 홀전자가 포획되면 ESR 센터가 된다.

단층비지 내 석영이 ESR 연대측정법에 이용되기

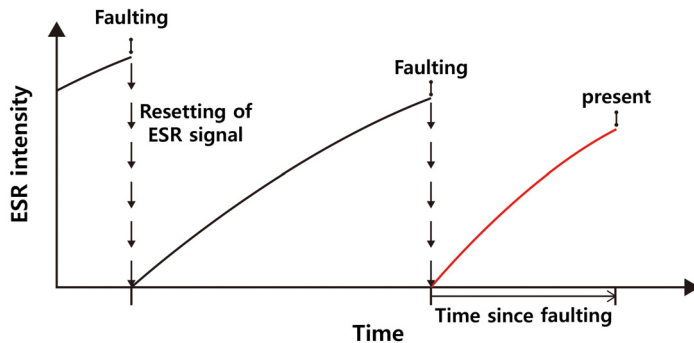


Fig. 3. A history of ESR signals in quartz separated from fault gouges. Before the fault movement, most of the traps filled due to the radiation dose over geological times. At the time of the fault movement, the ESR intensity is zeroed. Subsequently, the traps refill with unpaired electrons, and then the ESR intensity increases in proportion in the time since the fault movement (modified from Lee and Schwarcz, 1994b).

위해, 석영의 ESR 센터는 다음과 같은 조건을 충족시켜야 한다. 1) 단층운동과 같은 지질학적 사건에 의해서 신호가 0이 되어야 한다. 2) 방사선을 조사하였을 때, 신호가 증가하여야 한다. 3) 다른 신호와 구분되어야 한다. 4) ESR 센터의 수명(life time)이 충분히 길어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 ESR 센터는, 상온에서 측정하는 E' 센터와 OHC 센터, 저온에서 측정하는 Al (알루미늄) 센터와 Ti (타이타늄) 센터 등이 있다. E' 센터는 SiO₂에서 산소의 결원과 관련된 격자결함을 지칭하며, OHC 센터는 규소의 결원과 관련된 격자결함을 지칭한다. 저온에서 측정해야 하는 Al 센터와 Ti 센터는 석영 격자 속의 규소가 알루미늄 또는 타이타늄으로 치환되어 생긴 격자결함이다(그림 4; Fukuchi *et al.*, 1986; Buhay, 1987; Rudra and Fowler, 1987; Fukuchi, 1988; Toyoda, 2015).

2.3 지질학적 조건

Anderson (1951)의 단층이론에 의하면, 지표면은 전단응력이 작용하지 않는 주응력면이며 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 중 하나는 지표면에 수직으로 작용하는 연직응력(vertical stress, σ_v), 나머지 2개의 주응력은 최대 수평응력(maximum horizontal stress, σ_H) 및 최소 수평응력(minimum horizontal stress, σ_h)이 된다. 정단층일 경우 σ_1 , 주향이동단층일 경우 σ_2 , 역단층의 경우 σ_3 가 연직응력이 된다(Anderson, 1951).

Ariyama (1985), Tanaka (1990)와 Lee and Schwarcz (1993)은 E' 신호가 0이 될 때의 단층면에 작용하는 수직응력(normal stress)과 변위 조건을 알아내기 위한 전단실험을 진행하였다. 그 결과 E' 신호의 세기가 완전히 0이 되기 위해서는 단층면에 작용하는 수직응력이 적어도 3 MPa 이상이어야 하며 약 0.3 m 이상의 변위량도 필요하다(그림 5a). 이러한 조건을 만족시키는 지진의 규모는 적어도 약 6.5 이상이어야 한다(그림 5b; Lee and Schwarcz, 1994b; McCalpin, 1996).

단층운동의 시기를 결정하기 위해서는 위의 조건을 만족시켜야 하며, 해당 연구지역의 단층의 주향 및 경사각, 응력상태(크기 및 방향), 용기율/침식률 등의 자료가 필요하다. Synn *et al.* (2013)은 수압과 쇄법과 응력개방법에 의한 측정 자료를 종합하여 한반도의 응력상태를 분석하였으며 심도-응력 관계식(식 1)을 제시하였다(그림 6; σ_v : 연직응력, σ_h : 최소 수평응력, σ_H : 최대 수평응력; 단위: MPa, Z: 깊이 (m)).

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 0.0266Z, \sigma_h = 0.0202Z + 1.5405, \\ \sigma_H &= 0.0352Z + 1.5759 \end{aligned} \tag{1}$$

현재 한반도에 작용하는 최대 수평응력의 방향은 약 071°(Synn *et al.*, 2013)이며 한반도 남동부의 용기율은 약 0.08~0.25 mm/year이다(Kim *et al.*,

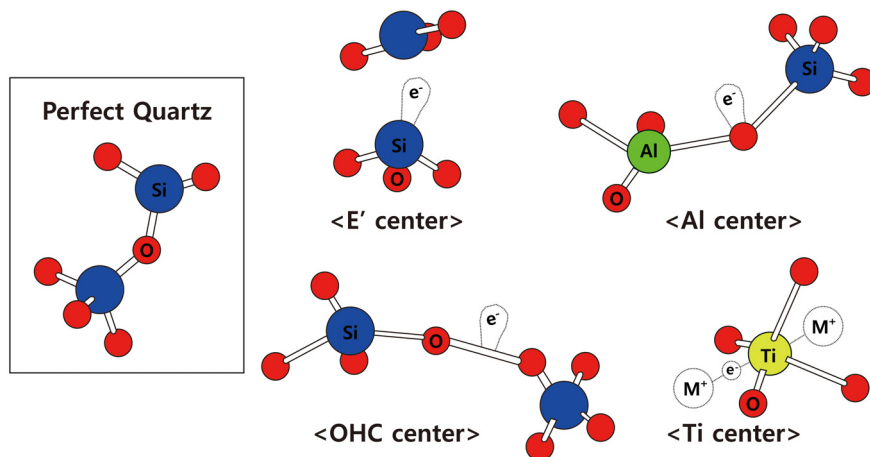


Fig. 4. Molecular models of the ESR centers; E', OHC, Al and Ti center (modified from Buhay, 1987; Rudra and Fowler, 1987).

2006).

주향방향이 N30°E, 경사각은 약 90°인 금왕단층대의 경우, 최대 및 최소 수평응력의 방향과 단층면의 주향이 이루는 각도는 각각 41°와 49°이다(그림 7a; Synn *et al.*, 2013). 금왕단층대의 단층면에 작용하는 수직응력은 식 2와 같이 계산된다(σ_n : 단층면에 작용하는 수직응력, σ_H : 최대 수평응력, σ_h : 최소 수평응력, θ_H, θ_h : 최대 및 최소 수평응력의 방향과 단층면의 주향 사이의 각도).

$$\sigma_n = (\sigma_H \times \sin\theta_H) + (\sigma_h \times \sin\theta_h) \quad (2)$$

식 2에 의해 단층면에 작용하는 수직응력이 약 3 MPa이 되는 깊이(ESR 신호의 세기가 0이 될 수 있는 깊이)는 지하 약 21 m로 계산되었다(그림 7b). 위의 자료와 한반도의 용기율을 이용하여 계산하였을 때 약 21 m 용기하는데 걸리는 시간은 약 8~25만 년이며, 이는 단층비지의 ESR 연대의 하한이 된다. 금왕단층대의 방향과 유사한 주향이동단층의 경우(왕

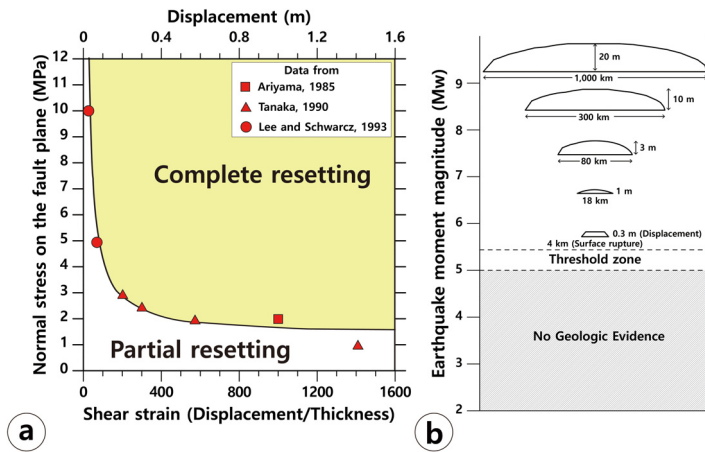


Fig. 5. a) Complete resetting condition for E' signals as determined by the shearing experiments, in which normal stress and displacement were controlled. Displacement represents the shearing of 1 mm layers of material. These experiments indicate that normal stress higher than 3 MPa needed for complete resetting of E' signals when there has been sufficient displacement (0.3 m) (after Lee and Schwarcz, 1994b). b) The schematic diagram shows the dimensions of surface rupture observed in historical earthquakes of variable magnitudes (after McCaipin, 1996). Values for length and maximum displacement of surface rupture are from Wells and Coppersmith (1994). The lower magnitude limit of surface faulting earthquakes follows Bonilla (1988).

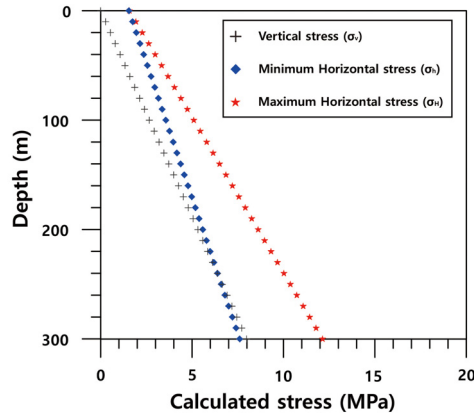


Fig. 6. Variations of the vertical, minimum, and maximum horizontal stress with depth using the expression provided by Synn *et al.* (2013).

속천단층대, 양산단층대), 약 8~25만 년 전 이후에 재활동한 단층은 ESR 신호가 완전히 0이 되는 조건을 만족시키지 못해 단층비지의 ESR 연대를 결정하기 어렵다. ESR의 성장곡선에서 ESR 신호의 세기가 포화되는 방사성 에너지는 약 4,500 Gy이며 단위시간당 조사율을 고려 할 때, 단층비지의 ESR 연대의 상한은 약 200만 년이 된다.

주향방향이 N35°E, 경사각 및 경사방향은 50°SE인 왕산단층의 경우(Cheong *et al.*, 2003; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006), 최대 및 최소 수평응력의 방향과 단층면의 주향이 이루는 각도는 각각 36°와

54°이다(그림 8). 왕산단층의 단층면에 작용하는 수직응력은 식 3과 같이 계산된다(σ_n : 단층면에 작용하는 수직응력, σ_H : 최대 수평응력, σ_h : 최소 수평응력, σ_v : 연직응력, θ_H, θ_h : 최대 및 최소 수평응력의 방향과 단층면의 주향 사이의 각도, θ_D : 단층의 경사각).

$$\sigma_n = (\sigma_H \times \sin\theta_H \times \sin\theta_D) + (\sigma_h \times \sin\theta_h \times \sin\theta_D) + (\sigma_v \times \sin\theta_{90^\circ-D}) \quad (3)$$

식 3에 의해 단층면에 작용하는 수직응력이 약 3 MPa이 되는 깊이(ESR 신호의 세기가 0이 될 수 있

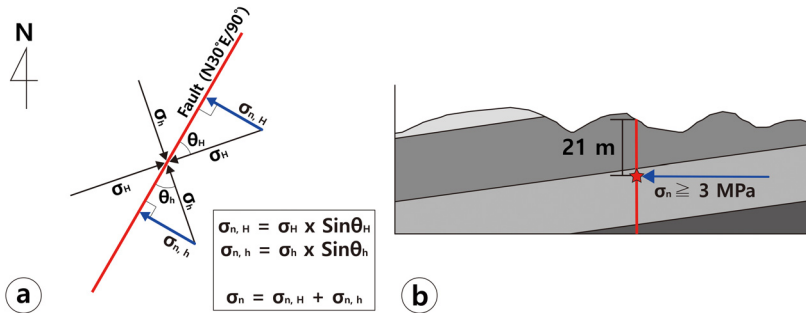


Fig. 7. The schematic diagram represents the stress state acting on the strike-slip fault. The depth of fault gouges at the time of the complete resetting of ESR signals can be estimated from the strike of a fault plane and stress state. a) map view. b) cross-section view.

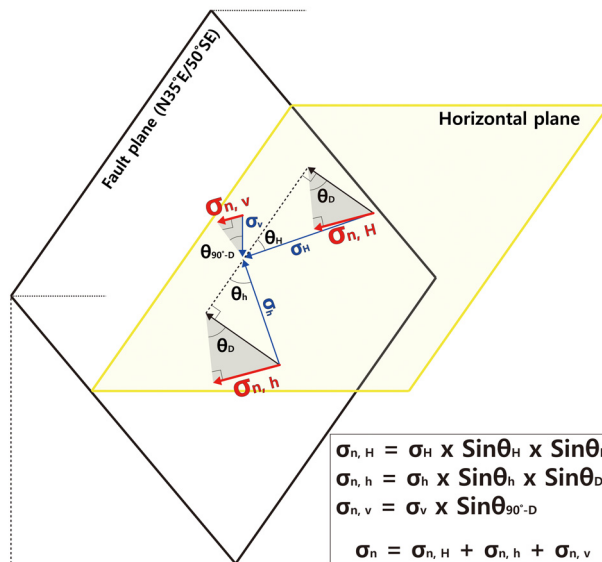


Fig. 8. The schematic diagram represents the stress state acting on the reverse fault. The depth of fault gouges at the time of the complete resetting of ESR signals can be estimated from the direction of a fault plane and stress state.

는 깊이)는 지하 약 30 m이다. 위의 자료와 한반도의 용기율을 이용하여 계산하였을 때 약 30 m 용기하는데 걸리는 시간은 약 12~38만 년이며, 이는 단층비지의 ESR 연대의 하한이 된다.

왕산단층은 제4기 퇴적층을 절단하고 있는 제4기 역단층으로(그림 9), 단층핵은 약 6~10 cm 두께의 회백색 단층비지띠와 약 20~30 cm 두께의 적갈색 단층비지띠로 구성되어 있다(Cheong *et al.*, 2003; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006). 왕산단층의 활동시기를 규명하기 위해 Cheong *et al.* (2003)은 제4기 퇴적층의 OSL 연대측정을, Lee and Yang (2003)은 단층비지의 ESR 연대측정을 실시하였다. 그 결과 OSL 연대는 약 5~9만년의 연대를 보인 반면, 단층비지의 연대는 약 58만 년으로 계산되었다. 이는 지반이 용기를 한 이후, 제4기 퇴적층이 퇴적된 이후에 단층운동에 의해 단층비지가 재활동했으나 단층비지의 ESR 신호가 완전히 0이 되기에는 단층면에 작용하는 수직응력이 충분하지 않았던 것으로 해석된다. 따라서

지표에서 관찰되는 단층비지띠는 단층운동 시에 상반과 같이 끌려 올라온 것으로 해석된다. 약 58만 년의 ESR 연대는 단층비지가 지하 약 30 m 보다 깊은 곳에서 마지막으로 활동한 시기를 지시한다.

2.4 ESR 연대측정법을 통한 단층대의 활동역사 분석

지진이 발생하였을 때 규모 약 6.5 이상의 지진은 되어야 지표에 단층이 발달되며 이를 지표지진단층이라 한다(그림 10a; Ikeda *et al.*, 1996). 주 단층(main fault)과 부수단층(subsidiary fault)의 동시적인 운동으로 인해, 1891년에 일본에서 규모 8.0의 노비 지진이(Bonilla, 1979; Ikeda *et al.*, 1996; Fukuyama and Mikumo, 2006; Takano and Kimata, 2013), 1992년 미국 남부 캘리포니아 주에서는 규모 7.3의 랜더스 지진이 발생하면서(Bonilla, 1979; Sieh *et al.*, 1993; Ikeda *et al.*, 1996; Yeats *et al.*, 1997) 지표파열을 일으켰다.

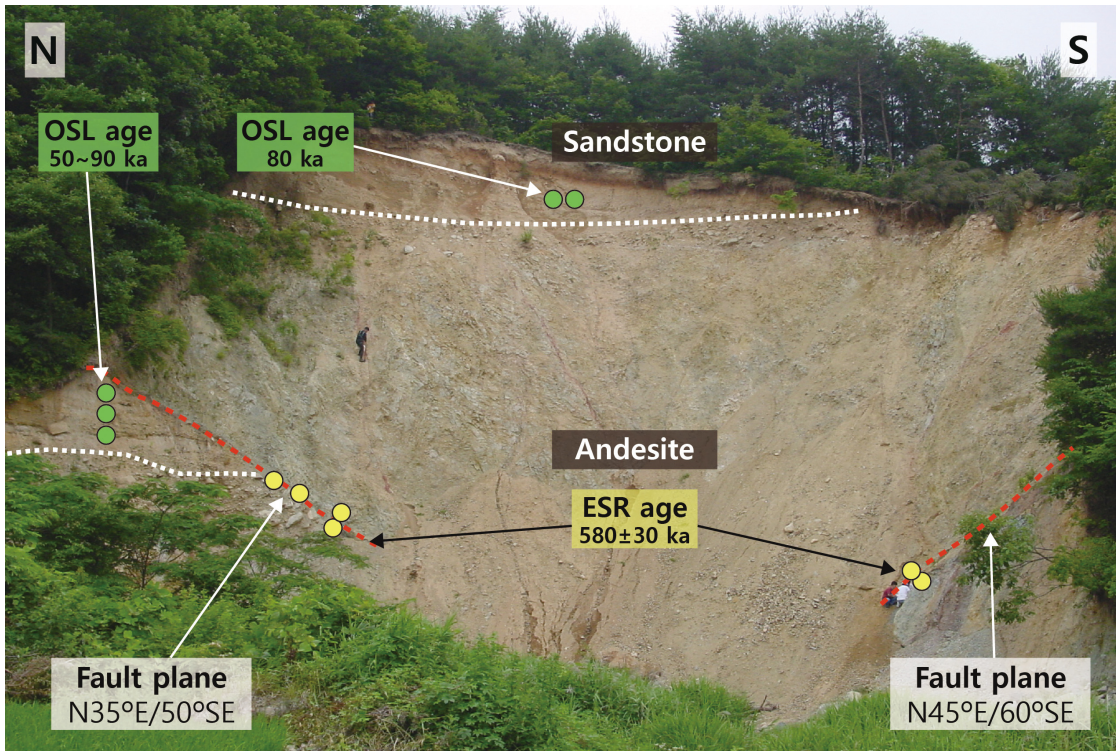


Fig. 9. Photograph of outcrop at Wangsan fault showing locations in which ESR & OSL samples were collected (modified from Cheong *et al.*, 2003; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006). The green circles represent the sampling location for OSL dating of Quaternary deposits. The yellow circles represent the sampling locations for ESR dating of fault gouges.

단층비지로 이루어진 단층핵은 대체적으로 Y-, R-, P-전단 방향으로 수 mm~수 cm 두께의 단층비지띠들이 발달되어 있으며, 각각의 단층비지띠들은 서로 다른 단층운동 역사를 가지고 있다(그림 10b). 각각의 단층비지띠에서 채취한 단층비지의 ESR 연대를 종합하여 주어진 단층핵의 활동형태를 규명할 수 있다. 예를 들어 활동시기 A에 형성된 3개의 단층비지띠로 이루어진 단층핵이 있다(그림 10a, 10b). 단층비지띠 1은 활동시기 B, C, D 및 E에 재활동하였지만 ESR 연대측정법을 통해서 마지막 활동시기인 활동시기 E만을 결정할 수 있다. 단층비지띠 2는 활동시기 B와 D에 재활동한 이후 재활동을 하지 않았기 때문에 ESR 연대측정법을 통해 마지막 활동시기인 활동시기 D를 결정할 수 있다. 단층비지띠 3은 활동시기 B와 C에 재활동한 이후 재활동을 하지 않았기 때문에 ESR 연대측정법을 통해 마지막 활동시기인 C를 결정할 수 있다. 따라서 단층핵에 발달한 3개의 단층비지띠에 대한 ESR 연대측정법을 통해 활동시기 C, D, E를 알아낼 수 있다.

위의 예시에서 활동시기 A와 B를 결정할 수 없었던 것이, 단층핵을 이루는 단층비지띠들의 ESR 연대측정으로는 단층의 모든 활동시기를 규명할 수는 없다. 예를 들어 단층핵 주변에 단층비지로 이루어진 부수단층들이 발달되어 있을 경우(그림 10a, 10b),

부수단층 1에 발달한 단층비지띠는 활동시기 B, C 및 E에 재활동하였기 때문에 ESR 연대측정법을 통해 마지막 활동시기인 활동시기 E를 결정할 수 있다. 부수단층 2에 발달한 단층비지띠는 활동시기 B 이후 재활동을 하지 않았기 때문에 ESR 연대측정법을 통해 마지막 활동시기인 B를 결정할 수 있다. 여기서 주목할 점은 부수단층에 발달한 단층비지가 단층핵에 발달한 단층비지띠와 같은 활동시기(활동시기 E)를 지시할 수 있고, 단층핵에서 결정할 수 없었던 활동시기 B를 결정할 수도 있다. 이와 같이 단층대에 대한 활동시기를 규명하고자 한다면 단층핵 속에 발달된 각각의 단층비지띠 뿐만 아니라 주변에 발달한 부수단층에 대한 분석도 병행하여야 한다(Lee and Schwarcz, 1996; Bae and Lee, 2014).

2.5 단층비지의 ESR 연대측정 절차

단층비지의 ESR 연대측정 절차에 대한 설명은 Lee (1999)에 자세히 설명되어 있어 이 논문에서는 간단히 설명하도록 하겠다.

2.5.1 시료채취

단층핵과 모암의 양쪽 경계부에 발달되어 있는 단층비지띠에서 2~3개의 시료를 채취하여 ESR 연대 분석을 실시해야 하며, 단층핵 내부에 발달된 Y-, R-,

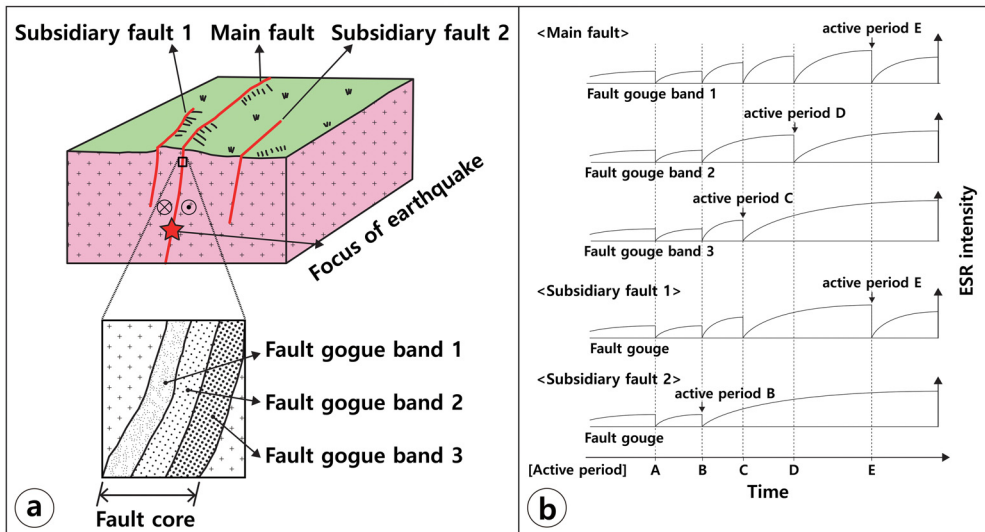


Fig. 10. a) The Schematic diagram show the fault core of main fault, subsidiary faults (modified from Ikeda *et al.*, 1996). b) The illustration shows temporal variations of ESR signals in quartz from fault gouge bands developed in the fault core and subsidiary faults (modified from Lee and Schwarcz, 1996; Bae and Lee, 2016).

P-전단 방향의 단층비지피에서 각각 적어도 2~3 개의 시료를 채취하여 분석한 후, ESR 연대의 일관성을 확인해야 한다. 시료를 채취할 시에는 단층비지피에 발달된 전단면으로부터 약 1 cm 이내의 폭에서 시료를 채취해야 한다.

2.5.2 전처리 과정

채취한 단층비지 시료로부터 석영을 분리하고 ESR 신호를 측정하기 위한 전처리 과정은 다음과 같다.

첫 번째는 수분함량과 단층비지 시료 내 함유되어 있는 방사성 원소의 함량을 측정하는 과정이다. 단층비지 시료를 채취한 후 가능한 한 빠른 시간 내에 약 100 g 정도를 이용하여 수분함량을 측정해야 한다. 그 후 건조된 시료를 파우더로 제작한 후 감마핵종분석을 하여 단층비지 시료에 함유되어 있는 U, Th 및 K의 함량을 측정하여 단위시간당 조사율을 계산하는데 이용한다.

두 번째는 석영을 분리하기 위한 과정이다. 단층비지 시료 내에 포함되어 있는 유기물, 방해석을 포함한 탄산염 광물 그리고 점토광물을 제거하기 위해 묽은 염산과 묽은 질산의 혼합액을 이용한다. 시료와 산이 더 이상 반응하지 않는다면 산 성분이 제거될 때까지 희석시킨 후, 습식 체분석(wet-sieving)과 건식 체분석(dry-sieving)을 통해 단층비지 시료를 25~45 μm , 45~75 μm , 75~100 μm , 100~150 μm 및 150~250 μm 의 입자크기 별로 분류한다. 자력선별기를 이용하여 산으로는 제거되지 않는 자성 광물과 비자성광물인 석영을 분리한 후 초음파 세척기를 이용하여 석영 입자에 붙어있는 미세입자들을 제거한다.

세 번째는 석영을 분리한 이후, ESR 연대측정을 위해 감마선을 조사하는 과정이다. 각 시료당 입자크기 별로 100 mg씩 10개의 튜브를 준비한다. 따라서 한 개의 시료 당 총 50개의 튜브가 준비되어야 한다. 이후 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에 의뢰하여, 준비된 시료에 ^{60}Co 감마선을 선량별(100 Gy, 200 Gy, 400 Gy, 800 Gy, 1200 Gy, 1600 Gy, 2000 Gy, 2400 Gy 및 3200 Gy)로 조사한다. 단시간 내 갑작스러운 감마선 조사에 의해 불안정한 E' 신호가 생성될 수 있으며, 이를 제거하기 위해 170°C에서 15분 동안 가열시켜야 한다(Toyoda and Schwarcz, 1997; Yang, 2006). E' 신호를 제외한 OHC, AI 및

Ti 신호는 갑작스러운 감마선 조사에도 영향을 받지 않아 불안정한 신호가 생성되지 않는다(Yang, 2006).

2.5.3 ESR 신호의 측정

ESR 연대측정을 위한 전처리가 완료된 시료는 X-band (8.5~10.4 GHz) ESR 분광계를 이용하여 각 시료에 대한 ESR 신호의 세기를 측정한다. E' 및 OHC 신호는 상온에서 측정하며, AI 및 Ti 신호는 스핀 완화 시간(spin relaxation time)이 짧은 상온에서는 측정할 수 없고 액체질소를 이용하여 저온(77 K)에서만 측정할 수 있다(Lee and Schwarcz, 2001). ESR 분광계의 기계 설정은 다음과 같다. microwave frequency = 9.43 GHz (상온), 9.17 GHz (저온); microwave power = 100 μW (E' signal), 2 mW (OHC, AI 및 Ti signal); scan width = 5.0 mT (상온), 15.0 mT (저온); scan time = 1.5 min; modulation frequency = 100 KHz; modulation amplitude = 50; time constant = 0.03 sec.

2.5.4 ESR 연대 계산

단층운동에 의해 ESR 신호의 세기가 작아질 때, 입자크기가 큰 입자들은 경계부에서만 ESR 신호가 0이 되는 반면, 입자크기가 작은 입자들은 모든 부피에서 ESR 신호가 0이 된다(Buhay *et al.*, 1988; Lee and Schwarcz, 1994a, 1994b). 따라서 단층운동 중에 입자크기가 큰 입자들의 ESR 신호의 세기가 부분적으로 감소되고 임계 입자(critical grain size)보다 작은 입자들은 완전히 0이 되어 ESR 연대 대 석영 입자크기 그래프에서 연대 평탄역(ESR age plateau)을 만든다(Buhay *et al.*, 1988; Lee and Schwarcz, 1994a, 1994b). Lee and Schwarcz (2001)는 ESR 연대 평탄역의 네 가지 분류 방법을 신뢰도가 높은 순서대로 제시하였다. 1) 두 개 이상의 ESR 신호에서 같은 평탄역을 보일 때, 다 센터 평탄역 ESR 연대(multiple plateau ESR age)라 명명하였다(그림 11a). 2) 두 가지 이상의 ESR 신호에서, 하나의 신호에서는 연대 평탄역을 보이고, 다른 신호에서는 이 연대 평탄역에 수렴할 때 다 센터 ESR 연대(multiple ESR age)라 명명하였다(그림 11b). 3) 적어도 한 개의 ESR 신호에서 연대 평탄역을 보일 때에는 평탄역 ESR 연대(single Plateau ESR age)라 명명하였다(그림 11c). 4) 입자크기가 작아져도 규칙적으로 ESR 연대가 작

아지지 않거나 다른 신호와 일치하는 연대나 연대 평탄역을 보이지 않을 때, 가장 작은 입자크기에서만 ESR 연대를 결정하며 이를 최대 ESR 연대(maximum ESR age)라 명명하였다(그림 11d). 이 경우 단층비지의 마지막 활동시기는 최대 ESR 연대와 같거나 젊을 것으로 추정된다.

모든 분석적인 방법이 그러하듯 데이터의 민감도에 있어 ESR 연대측정법도 계통 오차의 가능성이 존재한다. 등가선량을 결정하기 위한 부가조사법에서 사용되는 감마선의 선원은 일반적으로 약 10% 이내의 오류만을 발생시킨다(Noller *et al.*, 2000). 일반적으로 등가선량의 오차는 약 5~20%로 알려져 있다. 단위 시간당 조사율의 오차는 많은 요소들(단층암 내의 수분함량, 방사성 원소의 농도 등)로부터 분석 오차(약 5~10%)가 발생할 수 있다. 그림 11처럼 도시된 평탄역 내의 ESR 센터들의 연대는 가중평균으로 계산되며, 가중평균치의 오차는 일반적으로 약 5~20%이다(Lee, 1999). 따라서 ESR 신호에 대한 테

이터의 집중도에 있어 ESR 연대가 쉽게 일치하지 않을 수도 있기 때문에 동일한 단층비지피에서 2개 이상의 샘플을 채취하여 그 결과를 비교하여야 한다.

3. 단층의 시간·공간적 활동형태

Sieh (1978, 1984)와 Sieh *et al.* (1989)은 남부 산 안드레아스 단층(그림 12a; southern San Andreas Fault)의 Pallet Creek의 트렌치에서 제4기 퇴적층에 분포하고 있는 유기물의 ¹⁴C 연대를 통해 10 번의 지진 이벤트 및 각각의 변위량을 산정하였다(그림 12b). Pallet Creek 지점 외에도 다양한 연구자들이 Bidart fan, Van Matre Ranch, Wrightwood 및 Indio 지점에서 트렌치 연구를 실시하여 각각의 지진 이벤트의 시기를 제한하였다(그림 12b; Sieh, 1986; Jacoby, 1987; Jacoby *et al.*, 1988; WGCEP, 1988; Salyards *et al.*, 1992; Fumal *et al.*, 1993; Grant and Sieh, 1993, 1994; Grant, 1996). 그림 12b에서 각각

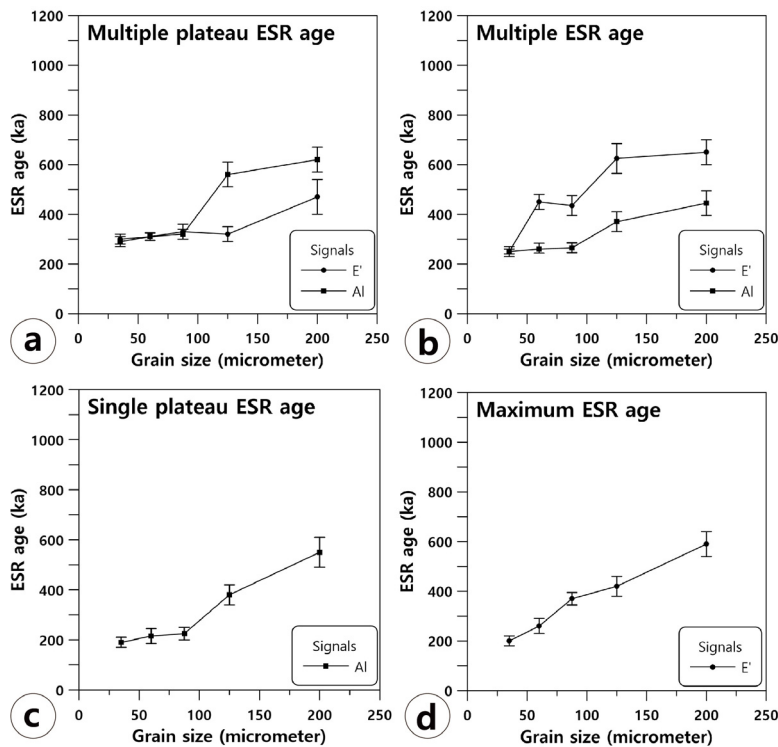


Fig. 11. Critical grain size is presumed to have been completely zeroed by the last fault movement. Fine grains are more completely reset during faulting, and a plot of ESR age vs. grain size shows a plateau age. a) multiple plateau ESR age. b) multiple ESR age. c) single Plateau ESR age. d) maximum ESR age (modified from Lee and Schwarcz, 2001).

의 지점에서의 연대 자료는 95% 오차범위를 나타냈으며, 각각의 지점에서 해석된 지진 이벤트의 시기를 서로 대비하여 도시한 수평선은 동시기에 활동한 단층의 지표파열 길이를 의미한다(Grant and Sieh, 1994; Grant, 1996; Sieh, 1996; Yeats *et al.*, 1997). 예를 들어, Parkfield에서 Wrightwood의 남동쪽까지 이어진 수평선은 1857년에 발생했던 규모 7.9의 포트 테혼 지진(Fort Tejon earthquake)에 의한 지표파열의 길이를 나타낸다(그림 12a, 12b).

한반도에 발달한 왕숙천단층대, 금왕단층대, 양산단층대 및 울산단층대(그림 13)에서 단층비지 시료를 채취하여 얻은 ESR 연대 자료를 종합하여 분석하였다. 위에서 설명한 남부 산 안드레아스 단층의

경우와는 달리, 단층비지의 ESR 연대는 오차를 고려할 때 각각의 지진 이벤트를 구분할 수 없어 비슷한 연대끼리 그룹을 만들어 가중평균으로 활동기를 결정하였다(그림 14, 15, 16, 17).

다른 장소에서 일어났던 단층운동을 서로 대비하는 것은 큰 규모의 단층운동에 의한 것이라고 가정하고 있다(Grant and Sieh, 1994). 지금까지 알려진 지표파열을 일으키는 지진의 최소 규모는 약 6.5이며, 이 경우에 18 km 길이의 지표파열단층이 형성된다고 알려져 있다(그림 5b; Bonilla, 1988; Wells and Coppersmith, 1994). 따라서 현재 지표면의 단층노두에서 채취한 단층비지 시료는 규모 6.5 이상의 지진에 의한 지표파열 단층운동에 의해 형성된 단층비

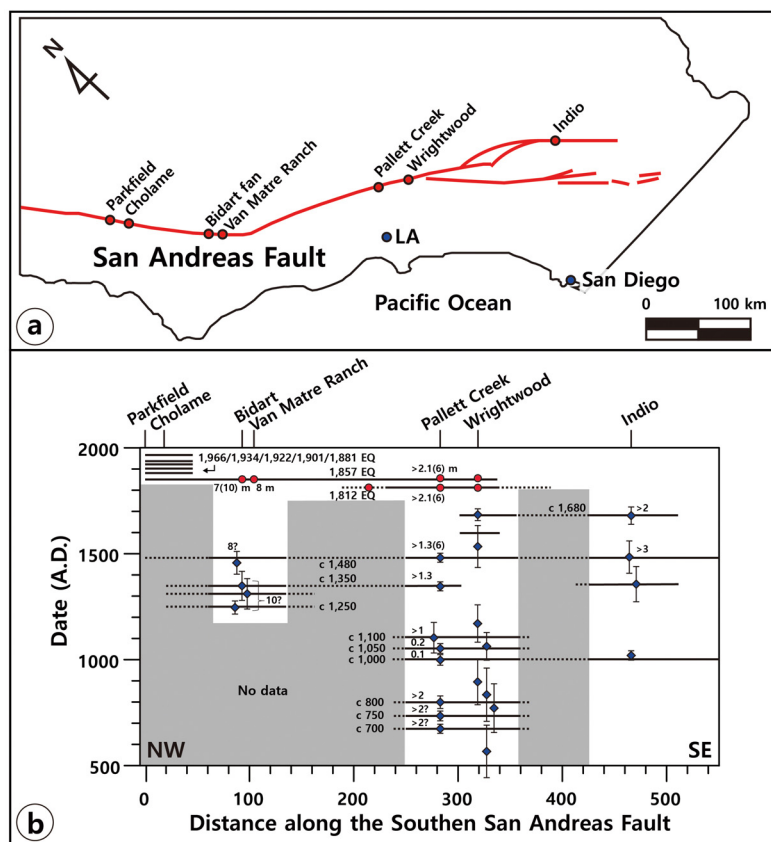


Fig. 12. a) Map of the southern San Andreas fault in California. b) This history of large ruptures along the southern San Andreas fault is based upon data from several paleoseismic sites (data from Sieh, 1978, 1984, 1986; Jacoby, 1987; Jacoby *et al.*, 1988; WGCEP, 1988; Sieh *et al.*, 1989; Salyards *et al.*, 1992; Fumal *et al.*, 1993; Grant and Sieh, 1993, 1994; Grant, 1996). Thick horizontal lines represent rupture lengths, based upon proposed correlations between sites. Dextral offsets are indicated (in meters) where available. Although incomplete, the available data demonstrates the clustering of earthquakes along the fault strand, and the rupture pattern is also complicated (modified from Grant and Sieh, 1994; Grant, 1996; Yeats *et al.*, 1997).

지로 추정하였으며, 최대 지표파열의 길이는 약 18 km (시료채취 지점을 기준으로 양쪽으로 각각 9 km) 로 가정하여 한반도에 발달한 왕속천단층대, 금강단층대, 양산단층대 및 울산단층대의 시·공간 활동형태 그림에 도시하였다(그림 13, 14, 15, 16).

3.1 왕속천단층대

왕속천단층대는 인구가 밀집되어 있는 수도권을 북동-남서 방향으로 통과하는 추가령단층대에 속한 단층 중 하나로, 경기도 남양주시 오남읍 일대에서 강원도 철원군 서면 일대까지 약 80 km의 연장성을 보이는 북북동-남남서 방향의 주향이동 단층이다(그림 13). 발견된 단층핵 노두 6 지점과 부수단층 노

두 9 지점에서 총 52개의 단층비지 시료에 대한 ESR 연대가 보고되어 있다(Choi *et al.*, 2012; Bae, 2016; Han, 2019). 이 중 34개의 단층비지 시료는 ESR 신호가 포화되어 있어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, 이는 단층핵의 대부분이 ESR 연대측정 범위를 벗어나는 오래 전에 형성되거나 재활동했음을 지시한다.

왕속천단층대를 포천 지역과 철원 지역으로 나누어 해석을 하였다. 포천 지역에 발달한 왕속천단층대의 단층핵과 부수단층에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 62만 년 전 이후의 왕속천단층대의 ESR 연대는 6번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 14; 약 62만 년 전, 약 52만

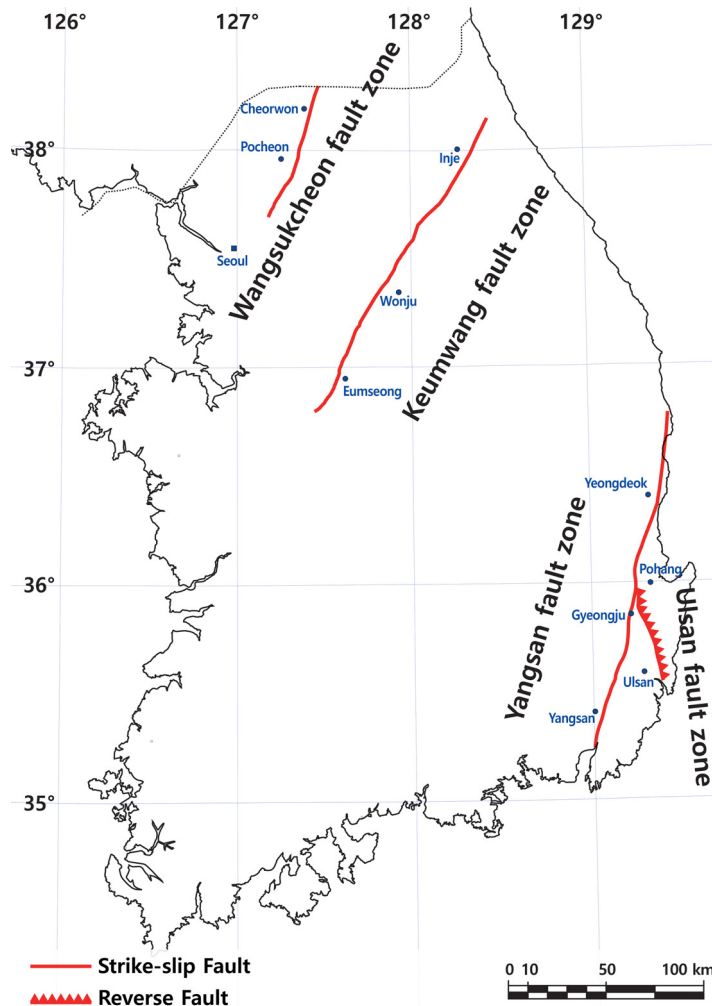


Fig. 13. Spatial distribution of studied fault zone in the Korean peninsula (modified from KIGAM, 2001).

년 전, 약 41만 년 전, 약 38만 년 전, 약 28만 년 전 및 약 22만 년 전). 포천 지역에서의 단층운동의 재발주기는 약 3~11만 년으로 해석된다. 철원 지역에 발달한 왕숙천단층대는 약 26만 년 전과 약 16만 년 전에 재활동한 것으로 추정되나 이는 부수단층에서만 얻은 결과이며, 데이터의 수가 매우 부족하기 때문에 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

3.2 금왕단층대

금왕단층대는 경기육괴를 북동-남서방향으로 가로지르는 공주단층대의 북동부에 해당하는 단층으로, 충청북도 음성군 일대의 음성분지에서 강원도 인제군의 설악산 일대까지 약 180 km의 연장성을 보이는 주향이동 단층이다(그림 13). 금왕단층대의

주향 방향을 따라 발달한 단층핵 노두 15 지점과 부수단층 노두 20 지점에서 총 131개의 단층비지 시료에 대한 ESR 연대가 보고되어 있다(Lee, 2010; Choi *et al.*, 2012; Hong and Lee, 2012; Hong, 2013; Bae and Lee, 2014; Kim and Lee, 2017; Kim, 2018; Weon and Lee, 2018; Choi, 2019; Min, 2020). 이 중 72개의 단층비지 시료는 ESR 신호가 포화되어 있어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, 이는 단층핵의 대부분이 ESR 연대측정 범위를 벗어나는 오래 전에 형성되어 재활동했음을 지시한다.

금왕단층대를 음성 지역, 원주 지역 및 인제 지역으로 나누어 해석을 하였다. 음성 지역에 발달한 금왕단층대의 단층핵 6 지점과 부수단층 2 지점에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 54만

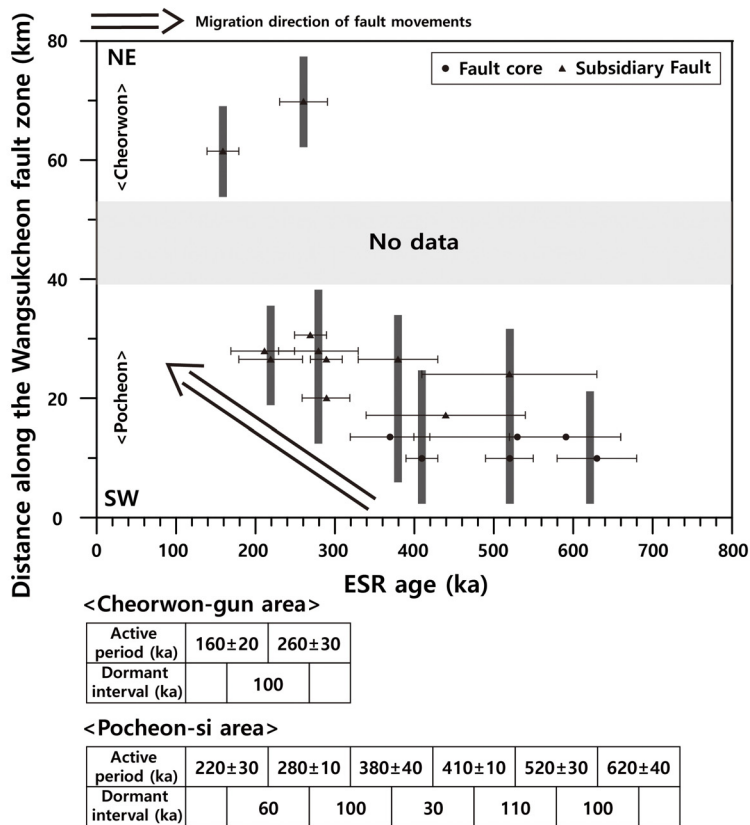


Fig. 14. Quaternary activity pattern of the Wangsukcheon fault zone (data from Choi *et al.*, 2012; Bae, 2016; Han, 2019). Horizontal lines are displayed errors for ESR dates of fault gouges collected from fault core or subsidiary fault of the Wangsukcheon fault. Vertical bars are hypothesized rupture extents of past fault movements. The Wangsukcheon fault is divided into two groups; the Pocheon-si area and the Cherwon-gun area. Results from ESR dating of fault gouges show temporal clustering and the long-term cycles. The fault movements migrate from SW to NE at the Wangsukcheon fault.

년 전 이후의 금왕단층대의 단층운동은 9번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 15; 약 54만 년 전, 약 48만 년 전, 약 44만 년 전, 약 39만 년 전, 약 33만 년 전, 약 30만 년 전, 약 25만 년 전, 약 21만 년 전 및 약 14만 년 전). 음성 지역 내에서의 단층운동의 재발주기는 약 3~7만 년으로 해석된다. 원주 지역에 발달한 금왕단층대의 단층핵 3 지점과 부수단층 11 지점에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 52만 년 전 이후의 금왕단층대의 단층운동은 7번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 15; 약 52만 년 전, 약 47만 년 전, 약 37만 년 전, 약 33만 년 전, 약 30만 년 전, 약 28만 년 전 및 약 24만 년 전). 원주 지역 내에서의 단층운동

의 재발주기는 약 2~10만 년으로 해석된다. 인제 지역에 발달한 금왕단층대의 단층핵 6 지점과 부수단층 7 지점에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 52만 년 전 이후의 금왕단층대의 단층운동은 11번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 15; 약 52만 년 전, 약 50만 년 전, 약 45만 년 전, 약 43만 년 전, 약 34만 년 전, 약 31만 년 전, 약 27만 년 전, 약 21만 년 전, 약 17만 년 전, 약 14만 년 전 및 약 11만 년 전). 인제 지역 내에서의 단층운동의 재발주기는 약 2~9만 년으로 해석된다.

3.3 양산단층대

한반도 남동부에 발달한 양산단층대는 부산시 사

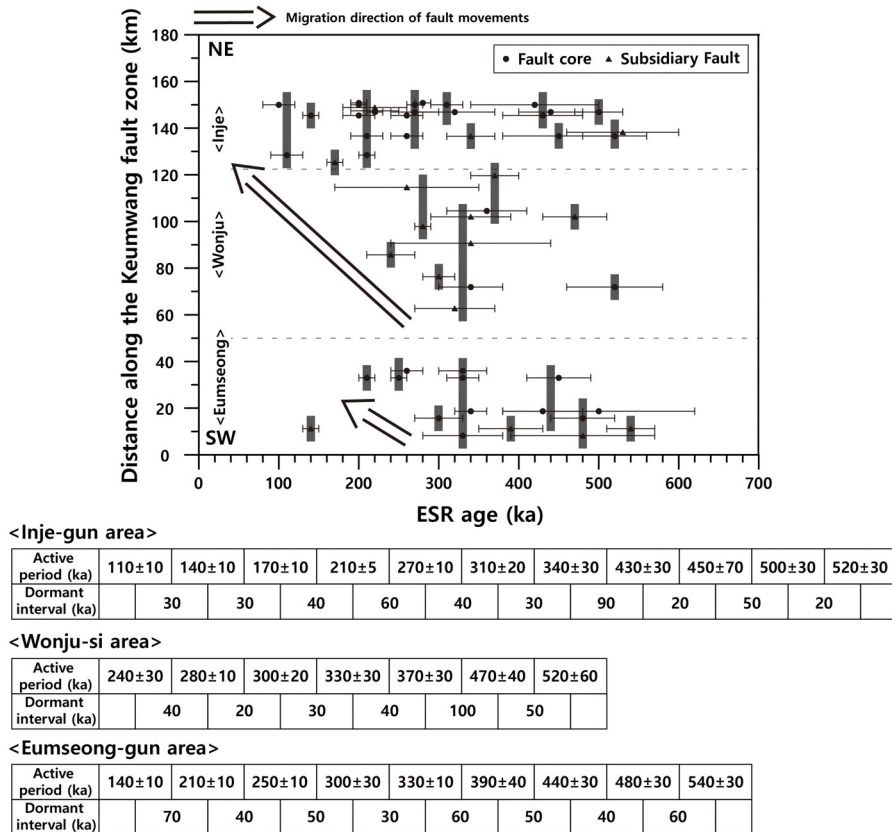


Fig. 15. Quaternary activity pattern of the Keumwang fault zone (data from Lee, 2010; Choi *et al.*, 2012; Hong and Lee, 2012; Hong, 2013; Bae and Lee, 2014; Kim and Lee, 2017; Kim, 2018; Weon and Lee, 2018; Choi, 2019; Min, 2020). Horizontal lines are displayed errors for ESR dates of fault gouges collected fault core or subsidiary fault of the Keumwang fault. Vertical bars are hypothesized rupture extents of past fault movements. The Keumwang fault divided into three groups; the Eumseong-gun area, the Wonju-si area, and the inje-gun area. Results from ESR dating of fault gouges show temporal clustering and the long-term cycles. The fault movements migrate from SW to NE at the Keumwang fault.

하구에서 영덕군까지 여러 개의 분절 단층으로 이루어진 단층대로(Kim, 1988; Lee and Jin, 1991; Choi *et al.*, 2017), 약 170 km의 연장성을 보여주는 북북동-남남서 방향의 주향이동 단층이다(그림 13). 양산 단층대는 각 노두를 가로지르는 방향으로 트렌치를 굴착하여 드러난 제4기 퇴적물을 절단하는 제4기 단층에 대해 주로 연구되어 왔다. 양산단층대는 주변에 발달한 분절들을 따른 활동성을 종합하여 활동형태를 파악하였다. 양산단층대 주변에 발달되어 있는 23 지점의 단층 노두에서 총 78개의 단층비지 시료에 대한 ESR 연대가 보고되어 있다(Yang, 2006). 이

중 40개는 ESR 신호가 포화되어 있어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, 이는 ESR 연대측정 범위를 벗어나 오래 전에 형성되어 재활동했음을 지시한다.

양산단층대를 양산 지역, 경주 지역 및 영덕 지역으로 나누어 해석을 하였다. 양산 지역에 발달한 양산단층대의 단층핵 1 지점과 8 지점의 분절에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 85만 년 전 이후의 양산단층대의 단층운동은 8번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 16; 약 85만 년 전, 약 78만 년 전, 약 66만 년 전, 약 60만 년 전, 약 51만 년 전, 약 39만 년 전, 약 32만 년 전 및 약

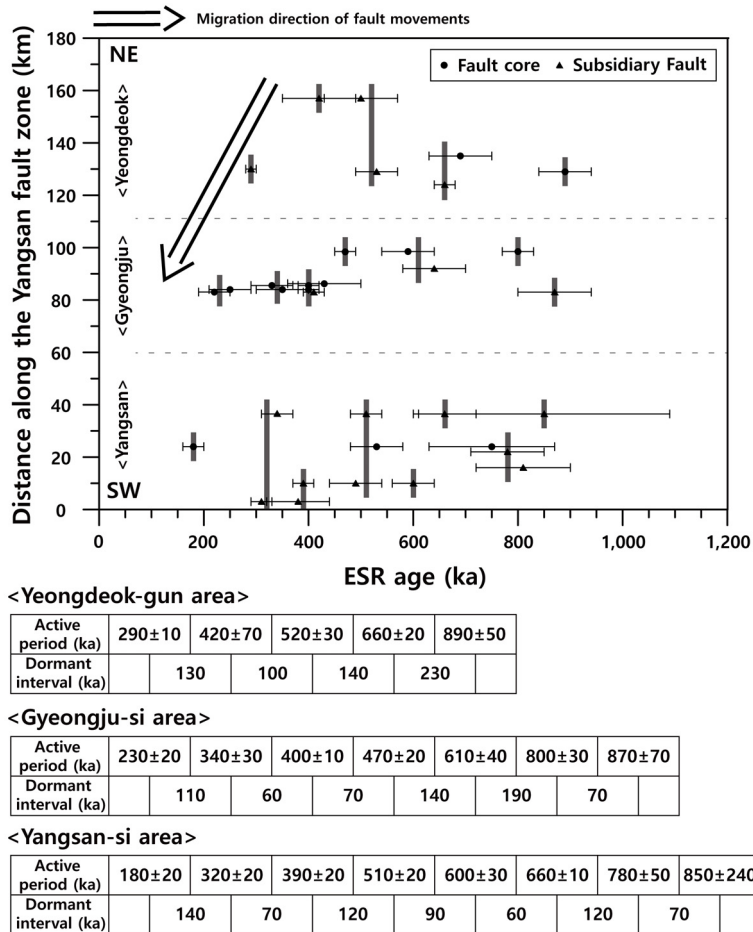


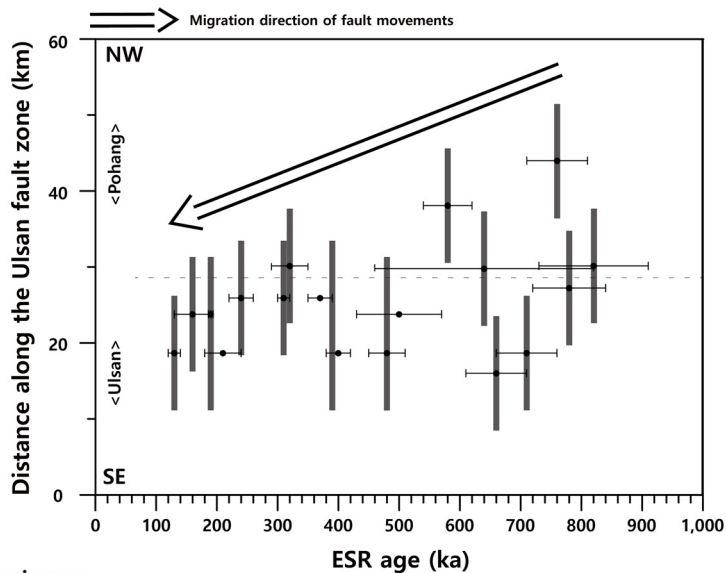
Fig. 16. Quaternary activity pattern of the Yangsan fault zone (data from Yang, 2006; This study). Horizontal lines are displayed errors for ESR dates of fault gouges collected fault core or subsidiary fault of the Yangsan fault zone. Vertical bars are hypothesized rupture extents of past fault movements. The Yangsan fault zone divided into three groups; the Yangsan-si area, the Gyeongju-si area, and the Yeongdeok-gun area. Results from ESR dating of fault gouges show temporal clustering and the long-term cycles. The fault movements migration from NE to SW at the Yangsan fault zone.

18만 년 전). 양산 지역 내에서의 단층운동의 재발주기는 약 6~14만 년으로 해석된다. 경주 지역에 발달한 양산단층대의 단층핵 노두 6 지점과 1 지점의 분절에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 87만 년 전 이후의 양산단층대의 단층운동은 7번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 16; 약 87만 년 전, 약 80만 년 전, 약 61만 년 전, 약 47만 년 전, 약 40만 년 전, 약 34만 년 전 및 약 23만 년 전). 경주 지역 내에서의 단층운동의 재발주기는 약 7~19만 년으로 해석된다. 영덕 지역에 발달한 양산단층대의 단층핵 노두 2 지점과 5 지점의 분절에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 89만 년 전 이후의 양산단층대의 단층운동은 5번의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 16; 약 89만 년 전, 약 66만 년 전, 약 52만 년 전, 약 42만

년 전 및 약 29만 년 전). 영덕 지역에서의 단층운동의 재발주기는 약 10~23만 년으로 해석된다.

3.4 울산단층대

울산단층대는 북북서-남남동 또는 남-북 방향의 여러 단층이 분포하고 있는 역이동성 운동이 우세한 단층대로, 경상도 울산광역시에서 경주시까지 계곡 동측 사면의 하단을 따라서 약 60 km의 연장성을 보여주며 경주시에서 양산단층대와 접한다고 알려져 있다(그림 13; Kang, 1978; Okada *et al.*, 1998). 울산 단층대 역시 양산단층대와 마찬가지로 주로 제4기 퇴적물을 절단하는 제4기 단층에 대해 연구되어 왔으며 주변에 발달한 분절들을 따른 활동성을 종합하여 활동형태를 파악하였다. 울산단층대 주변에 발달되어 있는 16 지점의 단층에서 총 34개의 단층비지



<Pohang-si area>

Active period (ka)	320±30	580±40	640±180	760±50	820±90
Dormant interval (ka)		260	60	120	60

<Ulsan-si area>

Active period (ka)	130±10	160±30	190±5	240±20	310±10	390±10	480±30	660±50	710±50	780±60
Dormant interval (ka)		30	30	50	70	80	90	180	50	70

Fig. 17. Quaternary activity pattern of the Ulsan fault zone (data from Lee and Schwarcz, 2001; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006). Horizontal lines are displayed errors for ESR dates of fault gouges collected sites developed along with the Ulsan fault zone. Vertical bars are hypothesized rupture extents of past fault movements. The Ulsan fault zone divided into two groups; the Ulsan-si area and the Pohang-si area. Results from ESR dating of fault gouges show temporal clustering and the long-term cycles. The fault movements migrate from N to S at the Ulsan fault zone.

시료에 대한 ESR 연대가 보고되어 있다(Lee and Schwarcz, 2001; Lee and Yang, 2003; Yang, 2006). 이 중 12개는 ESR 신호가 포화되어 있어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, 이는 ESR 연대측정 범위를 벗어나 오래 전에 형성되어 재활동했음을 지시한다.

울산단층대에 대한 ESR 연대는 경주 지역에 집중되어 있지만 양산단층대에서의 경주 지역과 혼란이 올 수 있어, 울산단층대를 울산 지역과 포항 지역으로 나누어 해석을 하였다. 울산 지역에 발달한 울산단층대의 10 지점의 분절에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 78만 년 전 이후의 양산단층대의 단층운동은 10년의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 17; 약 78만 년 전, 약 71만 년 전, 약 66만 년 전, 약 48만 년 전, 약 39만 년 전, 약 31만 년 전, 약 24만 년 전, 약 19만 년 전, 약 16만 년 전 및 약 13만 년 전). 울산 지역에서의 단층운동의 재발주기는 3~18만 년으로 해석된다. 포항 지역에 발달한 울산단층대의 6 지점의 분절에 발달한 단층비지의 ESR 연대를 대비한 결과, 약 82만 년 전 이후의 양산단층대의 단층운동은 5년의 활동기에 집중되어 나타나는 경향을 보인다(그림 17; 약 82만 년 전, 약 76만 년 전, 약 64만 년 전, 약 58만 년 전 및 약 32만 년 전). 포항 지역에서의 단층운동의 재발주기는 약 6~26만 년으로, 휴지기가 점점 길어지는 경향을 보이거나 데이터의 수가 매우 부족하기 때문에 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

4. 토의 및 결론

4.1 단층운동의 시간적 활동형태(clustering)

최근에 한반도에서 발생한 규모 4.0 이상의 계기 지진은 홍성, 오대산, 백령도 해역, 신안 해역, 태안 해역, 울산 해역, 경주, 포항 등 한반도 및 주변 해역 어디에서나 발생했다(KMA, 2020). 이와 같이 판 내부에서 발생하는 큰 지진들은 같은 단층에서 일정한 주기를 가지고 발생한다는 기존의 지진 모델과는 맞지 않는 복잡한 시·공간적인 패턴을 보여준다(Liu and Stein, 2016). 비교적 큰 규모의 지진은 활동기에 집중되어 발생하는 경향이 있다(그림 12; Grant and Sieh, 1994; Grant, 1996; Sieh, 1996; Yeats *et al.*, 1997). 예를 들어 남부 산 안드레아스 단층의 Pallett Creek 지점에서 서기 700~800년, 1,000~1,100년의 활동기에

약 50년의 주기를 가지고 지진이 발생했으며 약 200~330년의 휴지기를 가지고 있다(Sieh *et al.*, 1989). 이와 유사하게 Carrizo Plain 내 Bidart 지점에서는 약 350~450년의 휴지기를 가지고 있으며 활동기에는 약 100년의 주기를 가지고 지진이 발생하였다(Grant and Sieh, 1994).

단층비지의 ESR 연대측정법을 실시한 4개의 단층대에서도 단층운동이 활동기와 휴지기로 구분되는 특징을 보인다(그림 14, 15, 16, 17). 그러나 위에서 설명한 남부 산 안드레아스 단층의 경우와는 달리 단층비지의 ESR 연대측정법으로는 각각의 지진 이벤트를 구분할 수 없었다. 주어진 단층에서 ESR 연대의 오차범위를 고려하여 비슷한 연대끼리 그룹을 만들어 가중평균으로 활동기를 결정하였으며 주어진 활동기에 몇 번의 지진 이벤트가 발생하였는지는 알 수 없다. 왕숙천단층대, 금왕단층대, 양산단층대 및 울산단층대의 ESR 연대자료를 분석하여 구한 장주기의 재발주기는 다음과 같다. 왕숙천단층대의 평균 재발주기는 포천 지역에서는 약 8만 년, 철원 지역에서 약 10만 년이다. 금왕단층대의 전 구역에서의 평균 재발주기는 약 4~5만 년이다. 양산단층대의 평균 재발주기는 양산 지역과 경주지역에서 약 10만 년, 영덕 지역에서는 약 15만 년이다. 울산단층대의 평균 재발주기는 울산 지역에서 약 7만 년, 포항 지역에서 약 13만 년이다. 왕숙천단층대, 양산단층대, 울산단층대의 평균 재발주기는 각 단층대의 남부 지역으로 갈수록 평균 재발주기가 짧아지는 경향이 있다. 금왕단층대의 평균 재발주기는 나머지 단층대에 비해 재발주기가 짧은 경향이 있다. ESR 연대를 이용한 단층대의 장주기 시간적 활동형태도 역사 지진 및 계기 지진의 활동형태와 유사한 경향이 있다.

4.2 단층운동의 공간적 활동형태

4.2.1 주향을 따라 이동(migration)

지진은 주 단층의 주향을 따라 이동하는 것이 보고되어 있다. 예를 들어 북 아나톨리안 단층은 1939년부터 1999년 동안 단층운동이 동쪽에서 서쪽으로 이동하면서 큰 규모의 지진들을 발생시켰다(Ambraseys, 1988; Barka, 1992). 또한 남부 산 안드레아스 단층을 따라 지진을 야기한 단층운동이 1,700년에서 1,966년 사이에 단층의 주향을 따라 남동쪽(Indio 지역)에서 북서쪽(Parkfield 지역)으로 이동하는 경향을 보여

준다(그림 12; Grant and Sieh, 1994; Grant, 1996; Sieh, 1996; Yeats *et al.*, 1997).

이번 연구에서 분석한 단층비지의 ESR 연대도 단층의 주향을 따라 이동(migration)하는 경향을 보인다. 왕숙천단층대의 포천 지역 내에서의 단층운동은 약 40만 년 전 이후부터 주향을 따라 남서부에서 북동부로 이동한 것으로 해석된다. 철원 지역의 ESR 연대 자료는 시·공간적 운동패턴을 분석하기에 부족하기 때문에 더 많은 연구가 필요한 실정이다(그

림 14). 금왕단층대의 음성 지역에서 단층운동은 약 33만 년 전 이후부터 주향을 따라 남서부에서 북동부로 이동한 것으로 해석되며, 원주 지역과 인제 지역에서의 단층운동은 약 24만 년 전 이후부터 단층대의 주향을 따라 인제지역으로 이동한 것으로 해석된다(그림 15). 양산단층대의 단층운동은 약 29만 년 전 이후에는 단층대의 주향을 따라 경주 지역과 양산 지역으로 이동한 것으로 해석된다(그림 16). 울산단층대의 단층운동은 약 32만 년 전 이후에는 단

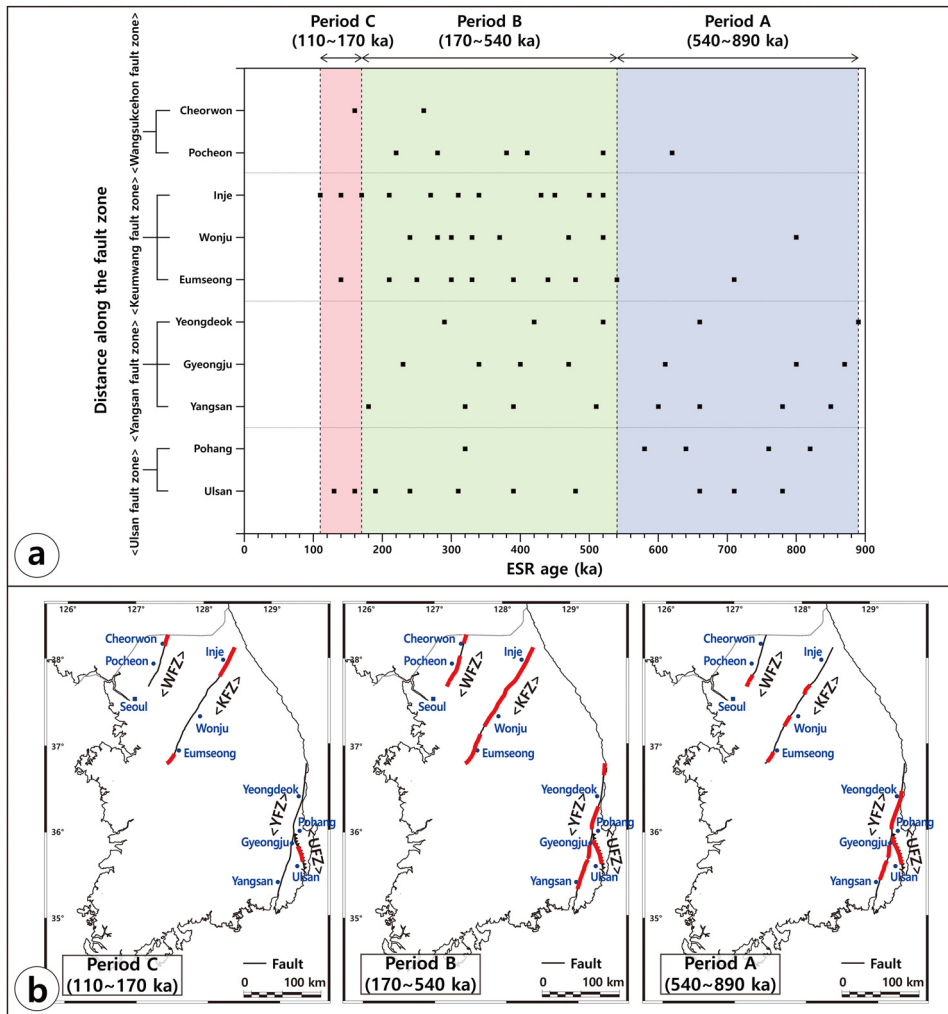


Fig. 18. On individual fault zones developed in the Korean peninsula. Spatially, these large fault movements tend to roam between wide-spread fault systems. a) ESR ages of each region of the studied fault zones. b) The spatial pattern of fault activity of the studied fault zone. In period A (540~890 ka), fault activities were dominated in the southern part of the Korean peninsula. In period B (170~540 ka), fault activities occurred in the whole Korean peninsula. In period C (110~170 ka), fault activities were dominated in the northern part of the Korean peninsula. Red thick lines represent fault activity length.

층대의 주향을 따라 울산 지역으로 이동한 것으로 해석된다(그림 17).

4.2.2 한 단층대에서 다른 단층대로 옮겨짐(roaming)

계기지진의 자료에 의하면, 판 내부에서는 지진인 한 단층대에서 다른 단층대로 옮겨서(roaming) 발생하는 경향이 있으며 이러한 시·공간적인 패턴은 판 내부의 단층운동이 복잡한 동적 시스템에서 서로 상호작용한다는 것을 지시한다(Liu and Stein, 2016).

한반도의 북부에 발달한 왕숙천단층대와 금왕단층대, 남부에 발달한 양산단층대와 울산단층대에서 ESR 연대측정 결과를 바탕으로, 각 단층대의 제4기 단층운동의 시·공간적 패턴을 분석하였다(그림 18a). 약 54~89만 년 전(그림 18b; 시기 A)에는 한반도의 남동부에 발달한 양산단층대와 울산단층대에서 단층운동이 있었던 것으로 해석되며, 한반도의 북부에 발달한 왕숙천단층대와 금왕단층대에서는 일부에서 부분적으로 단층운동이 일어났던 것으로 해석된다. 약 17~54만 년 전(그림 18b; 시기 B)에는 분석한 4개의 모든 단층에서 단층운동이 활발했던 것으로 해석된다. 약 11~17만 년 전(그림 18b; 시기 C)에는 왕숙천단층대의 북동부 끝 부분, 금왕단층대의 남서부 및 북동부 끝 부분, 울산단층대의 일부에서 부분적으로 단층운동이 있었던 것으로 해석된다. 이와 같이 한반도에 발달한 단층대의 시·공간적 활동형태는 계기 지진 자료(Liu and Stein, 2016)와 유사하게 단층대를 옮겨 다니면서 활동하는 경향이 있다.

5. 앞으로의 연구

단층비지의 ESR 연대 자료는 단층운동의 장기적인 시·공간적 활동형태를 제공하며 비교적 지표에서 활동했을 것으로 판단되는 약 10만 년보다 젊은 단층운동을 분석하는 데는 어려움이 있다(그림 9; Cheong *et al.*, 2003; Lee and Yang, 2003). 최근에는 단층비지의 OSL 신호를 연구하여 단층운동의 최후기 연대를 알아내고자 하는 연구가 진행 중에 있으나(Ganzawa *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019) 이에 대한 내용은 논의가 많이 필요한 실정이다. 연구하는 단층의 제4기 시간·공간적 활동형태를 분석하기 위해서는 마지막 운동시기뿐만 아니라 제4기 동안의 활동이력을 파악해야하기 때문에, 단층의 마지막

운동시기를 알아내기 위한 연구와 단층비지의 ESR 연대측정이 동시에 이루어져야 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상·지진See-At기술개발연구(KMI2018-02010), 강원대학교 학술연구조성비(연구과제번호 D1001551-01-01)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 행정안전부의 지진방재분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다. 심사과정에서 건설적인 조언으로 세심한 검토로 이 논문의 질을 향상시켜주신 익명의 두 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ambraseys, N.N., 1988, Engineering Seismology. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 17, 1-142.
- Anderson, E.M., 1951, The Dynamics of Faulting. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8, 387-402.
- Ariyama, T., 1985, Conditions of resetting the ESR clock during faulting. In: M. Ikeya and T. Miki (Editors), ESR Dating and Dosimetry. Ionics, Tokyo, 249-256.
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Barka, A.A., 1992, The North Anatolian Fault Zone. Annales Tectonics, 6, 164-195.
- Bonilla, M.G., 1979, Historic Surface Faulting-Map Patterns, Relation to Subsurface Faulting, and Relation to Preexisting Faults. United States Geological Survey (U.S.G.S.) Open-File report 79-1239, 36-65.
- Bonilla, M.G., 1988, Minimum earthquake magnitude associated with coseismic surface faulting. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 25, 17-29.
- Buhay, W.M., 1987, A theoretical study on ESR dating of geological faults in southern California. M.S. thesis, McMaster University, Hamilton, Canada.
- Buhay, W.M., Schwarcz, H.P. and Grün, R., 1988, ESR dating of fault gouge: The effect of grain size. Quaternary Science Reviews, 7, 515-522.

- Cheong, C.S., Hong, D.G., Lee, K.S., Kim, J.W., Choi, J.H., Murray, A.S., Chwa, U., Im, C.B., Chang, C.J. and Chang, H.W., 2003, Determination of slip rate by optical dating of fluvial deposits from the Wangsan fault. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1207-1211.
- Choi, J.H., Cheong, C.S. and Chang, H.W., 2004, Principles of quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating and its geological applications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 567-583 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.H., Kim, Y.S. and Klinger, Y., 2017, Recent progress in studies on the characteristics of surface rupture associated with large earthquakes. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 129-157 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.M., 2019, Internal structure and Quaternary space-time activity patterns of the Keumwang fault at Buk-ri, Girin-myeon, Inje-gun, Gangwon-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract). unpublished thesis.
- 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.
- 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.
- Fukuchi, T., Imai, N. and Shimokawa, K., 1986, ESR dating of fault movement using various defect centres in quartz; the case in the western South Fossa Magna, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 78, 121-128.
- Fukuyama, E. and Mikumo, T., 2006, Dynamic Rupture Propagation during the 1891 Nobi, Central Japan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1257-1266.
- Fumal, T.E., Pezzopane, S.K., Weldon II, R.J. and Schwartz, D.P., 1993, A 100-year average recurrence interval for the San Andreas Fault at Wrightwood, California. *Science*, 259, 199-203.
- Ganzawa, Y., Takahashi, C., Miura, K. and Shimizu, S., 2013, Dating of active fault gouge using optical stimulated luminescence and thermoluminescence. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 119, 714-726.
- Grant, L.B., 1996, Uncharacteristic Earthquakes on the San Andreas Fault. *Science*, 272, 826-827.
- Grant, L.B. and Sieh, K.E., 1993, Stratigraphic evidence for seven meters of dextral slip on the San Andreas Fault during the 1857 earthquake in the Carrizo Plain. *Bulletin of Seismological Society of America*, 83, 619-635.
- Grant, L.B. and Sieh, K.E., 1994, Paleoseismic evidence of clustered earthquakes on the San Andreas fault in the Carrizo Plain, California. *Journal of Geophysical Research*, 99(B4), 6819-6841.
- Griffith, A.A., 1924, The theory of rupture. In C.B. Biezeno and J.M. Burgers (Eds.), *First International Congress on Applied Mechanics*. Delft: J. Waltman, 55-63.
- Grün, R., 1989, Electron Spin Resonance (ESR) dating. *Quaternary International*, 1, 65-109.
- Grün, R., 1992, Remarks on ESR dating of fault movements. *Journal of the Geological Society*, 149, 261-264.
- Grün, R., 2009, The DATA program for the calculation of ESR age estimates on tooth enamel. *Quaternary Geochronology*, 4, 231-232.
- 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 (in Korean with English abstract).
- Hong, D.G., Choi, J.H., Han, J.H., Choi, M.S. and Cheong, C.S., 2001, Optical dating of Quaternary sediment. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 202-211 (in Korean with English abstract).
- 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 (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).
- Hong, S.C., Choi, J.H., Yeo, E.Y. and Kim, J.W., 2013, Principles of K-Feldspar IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) Dating and Its Applications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 305-324 (in Korean with English abstract).
- Hyun, C.H., Cheong, C.S., Lee, K.S., Barg, E.J., Chang, B.U., Kim, J., Lee, H.K., Park, K.H., Choi, J.H. and Im, C.B., 2000, Development of Seismic Safety Evaluation Technology for NPP site: State of the Art of Quaternary Geochronological Techniques. Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), RR-017 (in Korean with English abstract).
- Ikeya, M., 1993, *New Applications of Electron Spin Resonance: Dating, Dosimetry and Microscopy*. World Scientific, Singapore, p. 500.
- Ikeya, M., Miki, T. and Tanaka, K., 1982, Dating of a fault

- by Electron Spin Resonance on intrafault materials. *Science*, 215, 1392-1393.
- Ikeda, Y., Shimazaki, K. and Yamazaki, H., 1996, A Primer on Active Faults in Japan. Tokyo Press, In translated by Chang, T.W., 2000, Kyungpook National University Press, Daegu.
- Ito, T. and Swada, S., 1985, Reliable, Criteria for selection of sampling points for ESR Fault dating. ESR dating and Dosimetry (edited by Ikeya, M. and MiKi, T.), IONICS, Tokyo.
- Jacoby, G.C., 1987, Potential and limits for dating pre-historic earthquakes using tree-ring analysis. United States Geological Survey National Earthquake-Hazards Reduction Program-Directions in Paleoseismology, United States Geological Survey (U.S.G.S.) Open-File report 87-673, 18-22.
- Jacoby, G.C., Sheppard, P.R. and Sieh, K.E., 1988, Irregular Recurrence of Large Earthquakes Along the San Andreas Fault: Evidence from Trees. *Science*, 241, 196-199.
- Kang, P.C., 1978, Geological analysis of Landsat imagery of South Korea. M.S. thesis, Korea University, Seoul, Korea.
- Kim, J.H., Ree, J.H., Choi, J.H., Chanhan, N., Hirose, T. and Kitamura, M., 2019, Experimental investigations on dating the last earthquake event using OSL signals of quartz from fault gouges. *Tectonophysics*, 769, 228191.
- Kim, J.Y., 1988, A study the nature and movement history of the Yangsan Fault. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Pusan, p. 97 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Yang, D.Y., Choi, W.H. and Kim, J.C., 2006, Estimation of uplift rate based on Morphostratigraphy and Chronology of Coastal terraces in the SE part of Korean peninsula. *The Korean journal of Quaternary research*, 20, 51-57.
- Kim, M.J., 2018, Activity features of the Keumwang Fault in the Inje-gun area, Gangwon-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J. and Lee, H.K., 2017, Quaternary activity patterns of the Keumwang Fault in the Wonju-si area, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 79-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K., Jun, M.S. and Jeon, J.S., 2006, Recent Research for the Seismic Activities and Crustal Velocity Structure. *Economic and Environmental Geology*, 39, 369-384 (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).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2012, Historical Earthquake Records in Korea (2~1904). Korea Meteorological Administration, 5-16.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2020, [http:// www.kma.go.kr](http://www.kma.go.kr) (March, 23, 2020).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2001, Tectonic map of Korea (1:1,000,000 scale). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Lee, H.K., 1995, ESR Plateau Dating of Fault Rocks. Ph.D. thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario.
- Lee, H.K., 1999, ESR dating and structural analysis of the Dangkok 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 Schwarcz, H.P., 1993, An experimental study of shear-induced zeroing of ESR signals in quartz. *Applied Radiation and Isotopes*, 44, 191-195.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1994a, ESR Plateau dating of fault gouge. *Quaternary Science Reviews*, 13, 629-634.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1994b, 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., 1995, Fractal clustering of fault activity in California. *Geology*, 23, 377-380.
- 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., 2000, ESR Dating of Times of Movement on the San Gabriel Fault in the Little Tujunga Region, Los Angeles, California. *AGU Reference Shelf 4, Quaternary Geochronology: Methods and Applications*, 4, 553-556.
- 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., 2003, ESR dating of the Wangsan fault, South Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1339-1343.
- Lee, J.H., Rezaei, S., Hong, Y.J., Choi, J.H., Choi, J.H., Choi, W.H., Rhee, K.W. and Kim, Y.S., 2015, Quaternary fault analysis through a trench investigation on the northern extension of the Yangsan fault at Dangu-ri, Gyungju-si, Gyeongsangbuk-do. *Journal of the Geological*

- Society of Korea, 51, 471-485 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 434-449.
- Liu, M. and Stein, S., 2016, Mid-continental earthquakes; Spatiotemporal occurrences, causes, and hazard. *Earth Science Review*, 162, 364-386.
- McCalpin, J.P., 1996, *Paleoseismology*. Academic press, Cambridge.
- Min, G.H., 2020, Structural features and activity patterns of the Keumwang Fault developed in the Saenggeuk-myeon and Gangok-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Noller, J.S., Sowers, J.M. and Lettis, W.R., 2000, Quaternary Geochronology: methods and applications. AGU reference shelf 4, AGU.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J.B., Jo, W.R., Kim, S.K., Oike, K. and Makamura, T., 1998, Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan fault system, southeast Korea. *Journal of Geography*, 107, 644-658 (in Japanese).
- Rudra, J.K. and Fowler, W.B., 1987, Oxygen vacancy and the E1' center in crystalline SiO₂. *Physical review B*, 35, 8223-8230.
- Salyards, S.L., Sieh, K.E. and Kirschvink, J.L., 1992, Paleomagnetic Measurement of Nonbrittle Coseismic Deformation Across the San Andreas Fault at Pallett Creek. *Journal of Geophysical Research*, 97(B9), 12457-12470.
- Schwarcz, H.P. and Lee, H.K., 2000, Electron Spin Resonance Dating of Fault Rocks. AGU Reference Shelf 4; Quaternary Geochronology: Methods and Applications, 4, 177-186.
- Sieh, K.E., 1978, Prehistoric large earthquakes produced by slip on the San Andreas Fault at Pallett Creek, California. *Journal of Geophysical Research*, 83, 3097-3939.
- Sieh, K.E., 1984, Lateral offsets and revised dates of large earthquakes at Pallett Creek, Southern California. *Journal of Geophysical Research*, 89(B9), 7641-7670.
- Sieh, K.E., 1986, Slip rate across the San Andreas and prehistoric earthquakes at Indio, California. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 67, 1200.
- Sieh, K.E., 1996, The repetition of large-earthquake ruptures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93, 3764-3771.
- Sieh, K.E., Jones, L., Hauksson, E., Hudnut, K., Eberhart-Phillips, D., Heaton, T., Hough, S., Hutton, K., Kanamori, H., Lilje, A., Sindvall, S., McGill, S.F., Mori, J., Rubin, C., Spotila, J.A., Stock, J., Thio, H.K., Treiman, J., Wernicke, B. and Zachariasen, J., 1993, Near-Field Investigations of the Landers Earthquakes Sequence, April to July 1992. *Science*, 260, 171-176.
- Sieh, K.E., Stuiver, M. and Brillinger, D., 1989, A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California. *Journal of Geophysical Research*, 94(B1), 603-623.
- Solonenko, V.P., 1973, Paleoseismogeology. *Izv. Acad. Sci. USSR, Phys. Solid Earth* 9, 3-16 (in Russian).
- Synn, J.H., Park, C. and Lee, B.J., 2013, Regional Distribution Pattern and Geo-historical Transition of In-situ Stress Fields in the Korean Peninsula. *Tunnel & Underground space*, 23, 457-469 (in Korean with English abstract).
- Takano, K. and Kimata, F., 2013, Reexamination of the fault slip model of the 1891 M 8.0 Nobi earthquake. *Earth Planets Space*, 65, 935-941.
- Tanaka, K., 1990, Dating of fault movement by the ESR method; basis and application. Ph.D. Thesis, Univ. Kyushu, Japan.
- Toyoda, S., 2015, Paramagnetic lattice defects in quartz for applications to ESR dating. *Quaternary Geochronology*, 30, 498-505.
- 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.
- Walker, M., 2005, *Quaternary Dating Method*. John Wiley & Sons, Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. p. 17-19, 93-99, 109-110.
- Wallace, R.E., 1981, Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United States. In *Earthquake Prediction: An International Review* (D.W. Simpson, and P.G. Richards, Eds.), Maurice Ewing Ser. 4, 209-216. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Weil, J.A., 1984, A review of electron spin spectroscopy and its applications to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Physics and Chemistry of Minerals*, 10, 149-165.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- 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).
- Working Group Report (WGCEP), 1988, Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault. United States Geological Survey (U.S.G.S.)

- Open-File report, 88-398.
- Yang, H.L., Chen, J., Yao, L., Liu, C.R., Shimamoto, T. and Jobe, J.A.T., 2019, Resetting of OSL/TL/ESR signals by frictional heating in experimentally sheared quartz gouge at seismic slip rates. *Quaternary Geochronology*, 49, 52-56.
- Yang, J.S., 2006, Quaternary fault activity in the south-eastern part of the Korean peninsula. Ph.D. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 14 p (in Korean with English abstract).
- Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen, C.R., 1997, *The geology of earthquakes*. Oxford University Press, USA, New York.
-
- Received : March 25, 2020
Revised : April 9, 2020
Accepted : April 10, 2020