

## 석영의 ESR 신호를 이용한 제4기 퇴적층 연대측정 가능성 연구

원효정<sup>1,2</sup> · 최정현<sup>1,\*</sup> · 이희권<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

<sup>2</sup>강원대학교 지질학과

### 요 약

최근 국내에서 활성단층(혹은 제4기 단층) 연구가 활발해짐에 따라 단층에 의해 절단되거나 변위된 제4기 퇴적층에 대한 신뢰도 높은 절대연대 측정의 중요성이 부각되고 있다. 일반적으로 퇴적층의 퇴적연대측정에는 석영을 대상으로 하는 광여기루미네선스(Optically Stimulation Luminescence; OSL) 연대측정법이 주로 이용되어 왔다. 시료마다 차이가 있기는 하지만 일반적으로 석영 OSL 연대측정법의 연대측정 가능상한은 약 15-20만 년 정도이기 때문에, 이보다 오래 전에 형성된 퇴적층에 적용 가능한 여러 연대측정 방법이 지속적으로 개발되고 있다. 최근 TCD (Trapped Charge Dating) 관련 학계에서는 주로 단층비지의 연대측정에 사용되어 왔던 석영 ESR(Electron Spin Resonance) 신호를 퇴적층의 퇴적연대 측정에 적용하려는 시도들이 보고되고 있다. 석영 ESR 신호는 최대 약 2백만 년까지의 연대측정에 사용가능한 것으로 알려져 있기 때문에, 만일 이 신호를 퇴적층의 퇴적연대 측정에 적용할 수 있다면, 초기 플라이스토세 시기의 활성단층 운동을 이해하는 데 유용한 연대측정 수단이 될 것이다. 이 논문에서는 석영에서 방출되는 ESR 신호를 이용한 퇴적연대측정 가능성을 살펴보고 있다. 육성(terrestrial) 퇴적물에서 분리한 석영입자를 다양한 시간동안 자연광(태양광)과 인공광원에 노출시킨 결과, 노출시간이 길어질수록, E' 신호(ESR signal from E' center)는 증가하였으며 Al 및 Ti-Li 신호는 감소하는 경향을 보였다. 현재 햇빛에 노출되어 있는 현생 퇴적물들(풍성층, 해빈층)의 경우, Al 신호가 미약하게 측정된 반면, Ti 신호는 전혀 관찰되지 않았다. 이는 퇴적과정동안 입자가 햇빛에 장시간 노출될 가능성이 있는 퇴적 환경(풍성 혹은 해성환경)에서는 Ti-Li 센터의 ESR 신호가 퇴적과정 동안 빛에 노출되어 초기화될 가능성이 있음을 의미한다. 하지만, 이번 연구를 위해 채취된 육성퇴적층은 모두 루미네선스 연대(석영 OSL, K-장석 pIR-IRSL)에 비해 최대 100배까지 과대평가된 석영 ESR 퇴적연대를 보였다. 이는 석영 ESR 신호(Ti-Li 신호)가 햇빛에 의해 어느 정도 제거됨에도 불구하고, 퇴적층에 대한 ESR 연대측정법은 퇴적물에 포함된 석영의 ESR 신호가 충분히 긴 시간동안 햇빛에 노출되어 유효한 정도의 초기화(complete or effective zeroing of ESR signals)가 이루어질 수 있는 퇴적환경에서만 제한적으로 적용되어야 함을 의미한다.

**주요어:** ESR 연대측정, ESR 신호 초기화, 퇴적연대, OSL 연대측정, 활성단층

**Hyo-Jeong Weon, Jeong-Heon Choi and Hee-Kwon Lee, 2020, Investigations on the applicability of quartz ESR signals to dating Quaternary sediments. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 235-249**

**ABSTRACT:** Recently, with the intensive investigations on active (or Quaternary) faults in Korean peninsular, the importance of obtaining reliable age estimates on Quaternary sediments cut/deformed by age-unknown faults is being re-emphasized. For dating unconsolidated Quaternary sediments, quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating has long been the usual method of choice. Although it differs from sample to sample, the datable age range of quartz OSL method is generally limited to ~ 150-200 ka. Thus, various efforts have been made to extend the datable age ranges of luminescence dating methods beyond ~ 200 ka. Recently, there have been a few reports that address the possibility of dating Quaternary sediments using quartz ESR (Electron Spin Resonance) signals, which has been regarded as the usual signal for dating fault gouges, ancient human teeth and what not. In terms of dating Quaternary sediments, one of the few advantages of quartz ESR signals over other luminescence signals is that quartz ESR signals saturate at high ionizing radiation doses and can be used to date samples up to ~ 2 Ma. Thus, if applicable to dating sediments, quartz ESR signals would make a useful dating tool for understanding active faults during the Early to Middle Pleistocene epoch, which is difficult using the established luminescence

\* Corresponding author: +82-43-240-5333, E-mail: [jhchoi@kbsi.re.kr](mailto:jhchoi@kbsi.re.kr)

dating methods. In this regard, here we report our preliminary results on the possibility of applying quartz ESR signals to dating Quaternary sediments cut by faults in the southeastern part of Korean peninsula. The behaviour of ESR signals was examined with varying exposure time to natural (sun) and artificial lights; As the exposure time is increased, E' signal was observed to increase, whereas Al and Ti-Li signals were shown to decrease. In case of modern analogue samples from aeolian and marine environments, we could not observe distinguishable Ti-Li signal while there still exists a faint ESR signal from Al center. This observation suggests that, Ti-Li signals, at least, may be completely or effectively bleached at deposition in such environments where quartz grains are exposed to sunlight for prolonged period of time during sedimentation processes (e.g., aeolian and marine environments). The alluvial (or partly fluvial) deposits investigated in this study, however, showed considerably overestimated ESR ages; When compared with luminescence ages (both quartz OSL and K-feldspar pIR-IRSL), the ESR ages were ~ 100 times older at maximum, which is presumably due to the remaining ESR signals at deposition in alluvial and fluvial environments. This implies that, even when ESR signals were to be used for dating sediments, care should be taken when interpreting the age results because ESR ages are prone to considerably overestimate the depositional ages unless the ESR signals are effectively bleached (zeroed or reset) by enough sunlight exposure during sedimentation processes.

**Key words:** ESR dating, ESR signal reset, depositional age, OSL dating, active fault

(Hyo-Jeong Weon and Jeong-Heon Choi, Research Center for Geochronology and Isotope Analysis, Korea Basic Science Institute, Cheongju 28119, Republic of Korea; Hyo-Jeong Weon and Hee-Kwon Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

## 1. 서론

최근 연이어 발생한 경주지진(2016년)과 포항지진(2017년)은 한반도가 과연 지진 안전지대인가에 대한 국민적 관심을 고조시켰으며, 대규모의 지진이 발생하였을 때 지표파열을 야기할 수 있는 활성단층 연구에 대한 필요성을 다시 한 번 절감하는 계기가 되었다. 활성단층 연구에 있어 핵심적인 요소 중 하나는 단층의 운동 시기를 규명하여 활성단층의 시대적 구분기준을 정립하는 것이다. 단층의 운동 시기는 단층운동에 의해서 변위/절단된 퇴적층이나 단층운동으로 생성된 지질매체(예. 단층비지, 탄산염 암맥 등)에 대한 연대측정을 통하여 추정할 수 있다. 단층에 대한 연대측정에는 방사기원 및 우주기원 동위원소를 이용한 방법이 오래전부터 사용되어 왔지만(Cheong *et al.*, 2000), 최근에는 퇴적층이나 단층비지(fault gouge)에 포함된 광물의 물리적 신호를 이용하는 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법과 ESR (Electron Spin Resonance) 연대측정법이 주로 사용되고 있다(e.g., Lee and Schwarcz, 1994, 1996; Cheong *et al.*, 2003; Lee and Yang, 2003; Choi, J.H. *et al.*, 2009; Choi, S.J. *et al.*, 2014). 특히, 퇴적물내의 석영과 K-장석의 루미네선스 신호를 이용하여 단층운동으로 변위되거나 절단된 퇴적층의 연대를 측정하는 OSL 연대측정법은 2000년대 초반부터 본격적으로 진행된 이론적·

기술적 발전을 통해 연대측정결과의 신뢰도가 크게 높아졌다(e.g., Murray and Wintle, 2000; Kook *et al.*, 2015; Wintle and Adamiec, 2017). 그러나, 석영 OSL 연대측정법은 시료마다 정도의 차이는 있으나 일반적으로 연대측정 가능상한이 약 15-20만년 정도이기 때문에(Wallinga and Cunningham, 2015), 이보다 오래된 단층운동의 시기를 규명하는 데에는 어려움이 있다. 석영 OSL 연대측정법의 비교적 낮은 연대측정 가능상한 문제를 극복하기 위하여 개발된 K-장석 pIR-IRSL (post InfraRed-InfraRed Stimulated Luminescence) 연대측정법의 연대측정 상한은 이론적으로 약 50만년 이상으로 알려져 있지만(Buylaert *et al.*, 2009), 빛에 반응하여 루미네선스 신호가 방출되는 속도(bleaching rate)가 석영 OSL 신호에 비해 현저히 느리다는 단점이 있다(Hong *et al.*, 2013 and references therein). 따라서, 국내에서 활성단층이 주로 관찰되는 충적(alluvial) 혹은 하성(fluvial)층과 같이 퇴적물 내의 K-장석이 퇴적과정 동안 햇빛에 노출되는 시간이 비교적 짧은 환경에서 형성된 퇴적층의 경우, K-장석 pIR-IRSL 연대결과가 실제 퇴적연대를 과대평가할 가능성을 배제할 수 없다; 퇴적연대가 오래될수록, K-장석 pIR-IRSL 신호의 불완전한 초기화(incomplete bleaching)로 인한 연대과대평가 정도는 상대적으로 줄어든다.

ESR 연대측정법은 약 2백만 년까지의 높은 연대

측정 가능상한을 갖는 것으로 알려져 있으며(Tissoux *et al.*, 2007), 국내에서는 주로 단층운동으로 형성된 단층비지의 연대측정에 적용되어 왔다(Lee and Schwarcz, 1994, 1996; Lee and Yang, 2003; Weon and Lee, 2018; Han and Lee, 2019) 석영의 ESR 신호는 단층면에 작용하는 수직응력(normal stress)이 3 Mpa 이상일 때 초기화되기 때문에, ESR 연대결과는 단층비지내의 석영이 3 MPa 이상의 수직응력을 받은 후 경과한 시간을 의미한다. 반면, Yokoyama *et al.* (1985)은 석영의 여러 ESR 신호들(AI 신호, Ti 신호, E' 신호 등) 중 일부가 빛에 노출되어 어느 정도 감소(optical bleaching of ESR signals)된다는 관찰을 바탕으로 ESR 연대측정법을 이용한 퇴적층의 연대측정 가능성을 제기한 바가 있다. Toyoda *et al.* (2000)은 다양한 시간동안 석영입자를 인공광원(solar simulator)에 노출시킨 후, ESR 신호의 변화양상을 살펴 보았다. 이들은 석영을 인공광원에 노출시키면 E' 신호의 세기가 점차 증가하여 약 170시간 후 초기 신호의 약 160-230%까지 도달하는 것을 관찰하였다. 또한, AI 신호는 빛에 노출되어 빠르게 신호의 세기가 감소하지만, 약 24 시간이후에는 신호의 감소율(decay rate)이 느려져 336시간(14일)이 경과하더라도 초기 신호의 30% 정도가 여전히 제거되지 않고 남아 있었음을 보고하였다. 이와는 달리, Ti-Li 신호는 석영을 인공광원에 노출시킨 후 72시간(3일)에서 168시간(7일)이 경과하면 거의 완벽하게 제거되었으며, Ti-H와 Ti-Na 신호는 이보다 더 빠른 24시간(1일)만에 모두 제거되는 것을 확인하고 석영의 ESR 신호 중, Ti 신호를 이용한 퇴적층의 연대측정 가능성을 제기하였다. 이 후, 석영 ESR 신호(특히, AI과 Ti 신호)를 이용한 퇴적층의 연대측정 가능성에 대한 몇몇 연구들이 시도되어 왔다(Voinchet *et al.*, 2003, 2015, 2019; Rink *et al.*, 2007; Tissoux *et al.*, 2012). 그럼에도 불구하고, 빛에 대한 ESR 신호의 느린 반응속도(slow bleaching rate), ESR 신호의 불완전한 제거로 인한 퇴적연대 과대평가, 다른 연대측정결과와의 불일치 등의 문제들로 인해, ESR 신호를 제4기 퇴적층의 연대측정에 적용할 수 있다고 판단하기에는 해결해야할 요소들이 여전히 많이 남아 있다.

이 논문에서는 연대미상의 단층으로 절단되거나 변위된 미고결 육성(terrestrial) 퇴적층을 대상으로 빛(자연광원 및 인공광원)에 의한 석영 ESR 신호의

반응속도를 살펴보고, 퇴적층에 대한 루미네선스 연대와 ESR 연대를 비교·분석하였다. 또한, 퇴적환경에 따른 ESR 연대측정법 적용가능성에 대해서도 고찰하였다.

## 2. 연구시료

### 2.1 시료

이 연구에서는 다양한 퇴적환경에서 채취된 8개의 퇴적층 시료가 사용되었다(시료번호 1803BYG-04, 06, 10, 1803CHG-18, 1810NSR-07, HYAMS, SDR-01, 02; 그림 1). 시료 1803BYG-04, 06, 10은 경주시 단구리에서 연대미상의 단층에 의해 절단된 제4기 퇴적층(육상기원의 선상지 퇴적층)에서 층서적으로 채취되었으며(그림 1c), 시료 1803CHG-18과 1810NSR-07은 각각 경주시 천군동과 냉수리에서 단층으로 절단된 미고결 육성퇴적층에서 채취되었다(그림 1d, 1e). 이 시료들은 모두 층적선상지 퇴적층(alluvial fan deposits)으로서 야외에서 분급이 매우 우수한 것으로 관찰되었다. 석영입자의 ESR 신호가 퇴적층의 퇴적연대 측정에 사용되기 위해서 가장 중요하고 필수적인 조건은, 퇴적과정 동안 석영입자의 ESR 신호가 빛에 의해서 완벽하게 혹은 효과적으로 제거되는 것이다. 이를 확인하기 위하여, 충남 태안 신두리에서 채취한 현생 풍성사구(SDR-01) 및 현생 해변층 시료(SDR-02)와(그림 1f, 1g) 호주 뉴 사우스웨일즈(New South Wales)에 위치한 Hyams 해변의 현생(modern) 해변층 시료가 사용되었다(HYAMS; 그림 1h). 경주시 단구리, 천군동, 냉수리의 육성퇴적층 시료들은 스테인레스-스틸 재질의 시료채취용 파이프를 이용하여 채취되었다. Hyams 해변과 신두리 지역의 현생시료들은 현재 햇빛에 노출되어 있는 퇴적층 표면에서 채취되었으며, 채취된 시료들은 즉시 빛이 통과하지 않는 검은색 비닐로 포장하여 암실로 운반되었다.

### 2.2 시료전처리

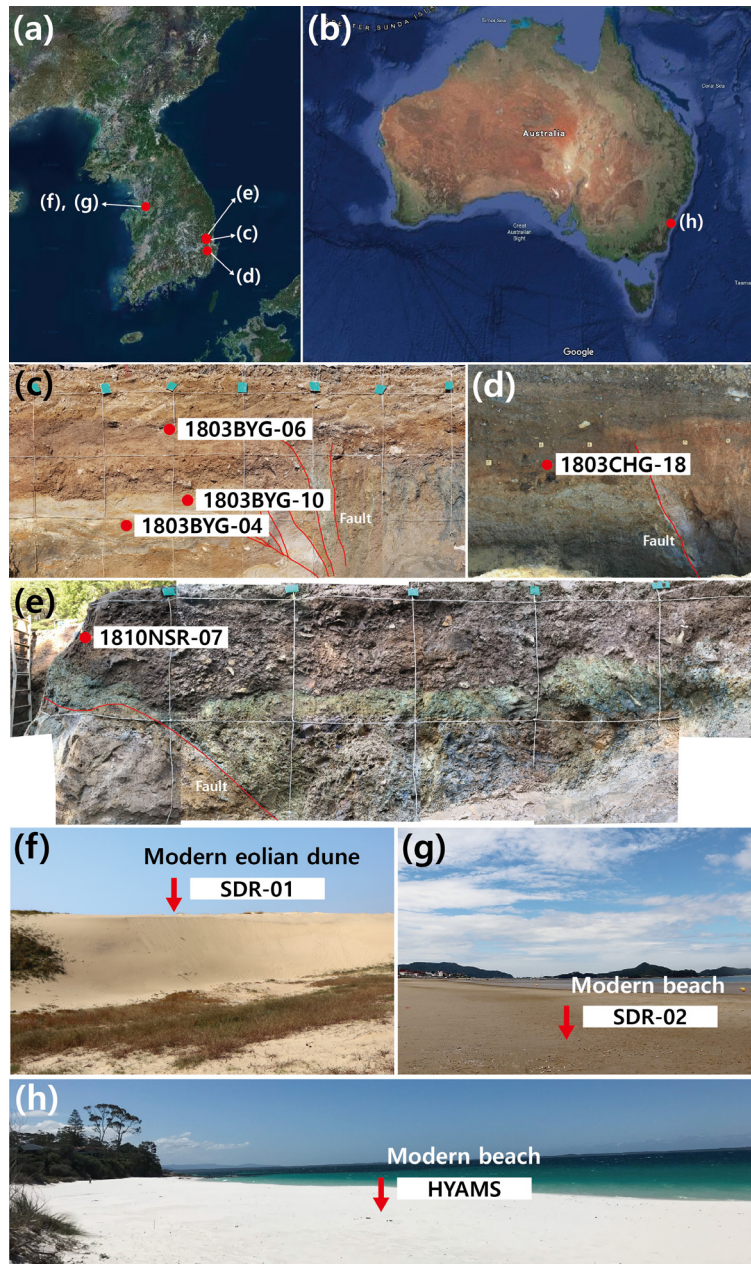
야외에서 채취된 시료들은 한국기초과학지원연구원에 설치된 암실로 운반되어 실험에 필요한 시료의 준비에 사용되었다. 즉, 다음의 과정을 통하여, 퇴적물로부터 ESR 신호측정을 위한 석영입자를 분리하였다; 퇴적물에 포함된 석영입자의 분리는 기본적인

으로 OSL 연대측정을 위한 석영 시료준비 과정과 동일하다(Choi *et al.*, 2004; Sinclair *et al.*, 2016).

- 1) 표준망체를 이용하여 습식체질로 90-250  $\mu\text{m}$  사이의 입자들을 분리
- 2) 분리된 입자들을 10% HCl(~ 3시간), 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

(~ 3시간), 10% HF(~ 1시간)로 처리하여 탄산염광물, 유기물 및 석영이외의 광물들을 1차적으로 제거

- 3) 비중을 2.62 g/cm<sup>3</sup>으로 맞춘 비중액(SPT; Sodium PolyTungstate)으로 1), 2)과정을 거친 입자들



**Fig. 1.** (a, b) Locations of the samples investigated in this study. Terrestrial sediments were collected from (c) Dangu-Ri, (d) Cheongun-dong and (e) Naengsu-ri. Modern analogue samples were also taken from (f, g) Shindu-ri, Taean, Chungnam and (h) Hyams beach, New South Wales, Australia.

을 처리하여 석영과 장석을 분리(이 때, 비중액에 뜨는 입자들은 주로 장석이며, 가라앉는 입자들은 주로 석영임).

- 4) 3)의 과정에서 비중액에 뜬 입자들을 conc. HF로 45분에서 1시간 정도 처리하여 순수한 석영 입자만을 분리
- 5) conc. HCl로 1시간 정도 처리하여 HF처리 과정에서 생성되었을 가능성이 있는 불화침전물 (fluoride precipitates)을 제거
- 6) 니오디미움(Nd)자석으로 자성광물을 제거

### 3. 연구방법 및 결과

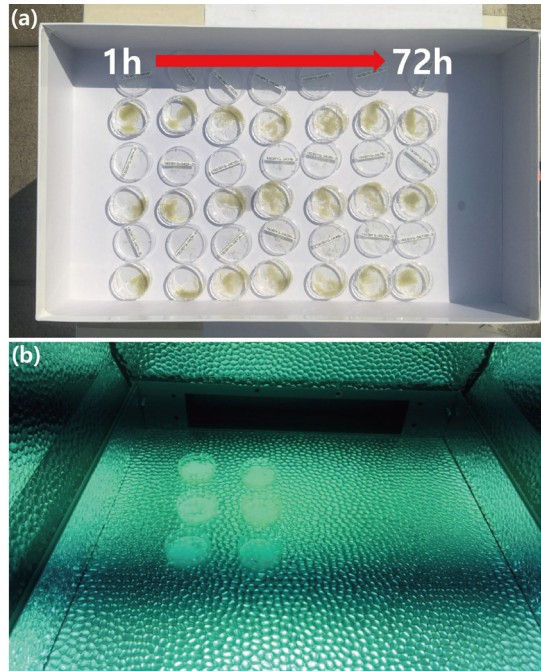
#### 3.1 빛에 의한 석영 ESR 신호 초기화(Optical bleaching of quartz ESR signals)

석영 ESR 신호가 퇴적층의 퇴적연대(즉, 퇴적시기)측정에 신뢰도 높게 사용되기 위해서는 퇴적과정 동안 석영입자가 빛에 노출되어 ESR 신호(latent ESR signals)가 완벽하게 혹은 효과적으로 제거되어야 한다. 만일, 석영 ESR 신호가 빛에 의해 제거되지 않거나, 제거되더라도 반응 속도가 매우 느려 상당량의 잔여 ESR 신호를 지닌 채로 퇴적된다면 ESR 연대결과는 실제 퇴적연대를 상당히 과대평가 하게 되어, 그 효용성을 담보할 수 없다. 이를 확인하기 위하여 이번 연구에서는 채취된 육성퇴적층 시료 중 일부를 자연광과 인공광원에 다양한 시간동안 노출시켜 석영 ESR 신호의 변화양상을 살펴보았다. 자연광은 햇빛(이하, 태양광)을 의미하며, 인공광원으로는 한국기초과학지원연구원에 설치된 Höhnle SOL2 (solar simulator)를 사용하였다.

태양광 노출에 의한 ESR 신호 변화양상을 살펴보기 위하여 시료 1803BYG-04에서 분리된 석영입자들을 150 mg 씩 21개의 부시료(sub-sample)로 나누고, 이들을 태양광에 각각 0시간, 1시간, 5시간, 12시간, 24시간, 48시간, 72시간 동안 노출시켰다(각 노출시간마다 3개의 부시료를 사용; 그림 2a). 태양광 노출 실험은 충북 청주시 오창읍에 위치한 한국기초과학지원연구원 오창센터 건물 2층의 야외공간에서 실시하였다. 석영입자들은 연중 일조량이 가장 많고 일조시간이 가장 긴 7월 중순에서 8월 말의 기간 동안 태양광이 강한 오전 10시에서 오후 4시 사이에 노출되었다. 다만, 태양광 노출실험을 진행하기 어려운 기

간 동안(즉, 비가 오거나 흐린 날)에는 시료를 암실에 보관하였다. 인공광원 노출실험에는 시료 1803CHG-18에서 분리한 석영입자가 사용되었으며, 노출시간 및 노출시간 당 사용된 부시료의 조건 등은 태양광 노출실험과 동일하였다(단, 인공광원 실험에서는 시료들을 87.5 시간까지 노출시킴)(그림 2b).

태양광 노출실험결과, E' 신호의 세기는 점차 증가하여 72시간이 경과하면 초기 신호의 190%까지 증가하였다(그림 3a). Al과 Ti-Li 신호의 세기는 태양광에 노출된 초기 5시간(Ti-Li 신호) 내지 12시간(Al 신호)까지는 약간의 증가추세를 보이지만, 이후 노출시간이 길어짐에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 하지만, 이 두 신호 모두 72시간이 경과하여도 초기 신호대비 약 75%의 신호가 여전히 남아 있음이 관찰되었다(그림 3a, 3c). 인공광원에 노출시킨 석영 ESR 신호의 변화속도는 태양광 실험에 비해 확연히 빠른 양상을 보였다(그림 3b). 즉, E' 신호의 세기는 석영입자를 인공광원에 87.5시간 노출시키는 동안 초기신호의 최대 570%까지 증가했고, Al 신호는 30%까지 감소하였다(그림 3b, 3c). 반면, Ti-Li 신호



**Fig. 2.** Experimental setting for the observation of ESR signal responses to optical exposure. The optical exposure of ESR signals was performed using (a) natural sunlight and (b) artificial light source (SOL2).

는 측정된 신호들 중 가장 빠르게 감쇄하며, 노출시간이 87.5 시간을 경과하면 모든 신호가 제거되었다

(그림 3b, 3c).

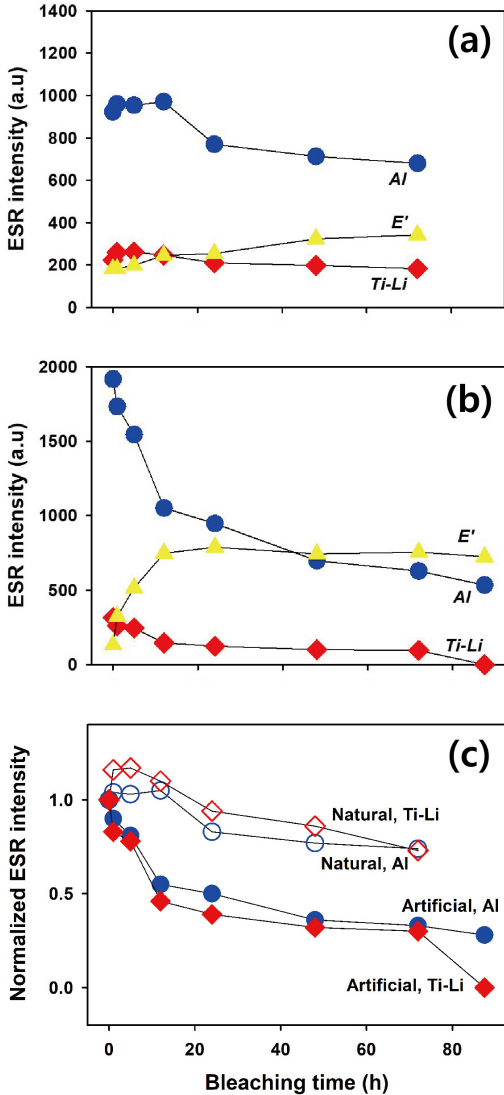


Fig. 3. Variations of quartz ESR signals with increasing optical exposure time. (a) When exposed to natural sunlight, E' signal is observed to gradually increase during the whole optical exposure time, whereas AI and Ti-Li signals steadily decrease, both down to ca. 75 % of their initial intensities. (b) E' signal has increased up to 180 % of its initial intensity after the artificial light exposure of 72 h. By exposure to artificial light source, AI signal decreased down to 30% of its initial intensity. It is noticeable that Ti-Li signal was completely bleached(zeroed) by the artificial light exposure for 87.5 h. (c) Normalized ESR signal variations with exposure time (normalized to each initial signal intensity).

### 3.2 석영 ESR 신호를 이용한 퇴적 연대측정

#### 3.2.1 등가선량(Equivalent dose)

석영입자의 ESR 신호는 강원대학교 공동실험실습관에 설치된 JEOL사의 JES-TE 200 ESR spectrometer를 이용하여 측정되었다. E' 신호는 상온(room temperature)에서, AI 및 Ti-Li 신호는 약 77 K의 저온 환경에서 측정되었다. 상온 환경에서 측정 가능한 OHC 및 Ge 신호는 이번 연구에서 사용된 모든 시료에서 관찰되지 않았다. 등가선량(D<sub>e</sub>)은 다중시료 부가선량법(MAAD; Multiple Aliquot Additive Dose protocol)을 사용한 성장곡선(dose response growth curve)을 이용하여 측정되었다(Grün (1989)의 Fig. 5 참조). ESR 신호 성장곡선은 150 mg의 석영입자로 이루어진 9개의 부시료에 각각 0 Gy (natural dose), 100 Gy, 200 Gy, 400 Gy, 800 Gy, 1600 Gy, 3200 Gy, 6400 Gy, 12800 Gy의 부가선량(additive dose)을 조사(irradiation)한 후, 이들에 대한 ESR 신호를 측정하여 작성되었다. 부가선량의 조사는 한국원자력연구원(정읍) 방사선 조사시설에 설치된 고준위 감마선 조사(<sup>60</sup>Co) 장치를 이용하였으며, 감마선의 조사율은 0.11-0.33 mGy/s이었다. 각 시료의 등가선량은 ESR 신호의 성장곡선이 x축(부가선량축, Added Dose)과 만나는 지점에서 결정되었다(외삽법).

방사선량의 증가에 따른 ESR 신호의 성장은 일반적으로 단일 포화지수함수(single saturating exponential function)로 표현되지만, 이 연구에 사용된 모든 시료에서는 ESR 신호가 약 1600-3200 Gy 구간에서 선량포화상태에 가까워지다가(예. 그림 4의 ①) 이후 부가선량이 증가함에 따라 ESR 신호가 다시 증가하는 것이 관찰되었다(예, 그림 4의 ②; 이 논문에서는 이 현상을 “이중포화(double saturation)현상”이라 한다). 이는 ESR 신호가 두 개의 단일 포화지수함수의 합으로 표현될 수 있음을 의미한다. 하지만, 선량에 따른 ESR 신호 증가양상을 두 개(혹은 그 이상)의 단일포화지수함수의 합으로 표현하기 위한 물리적 근거가 아직 정립되어 있지 않으므로 이에 대해서는 추후 보다 자세한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 각 시료마다, 모든 부가선량(0-12800 Gy)에 대한 ESR 신호를 고려한 성장곡선(이 논문에서는 이를 “full range curve (이하, FRC)”라 한다;

**Table 1.** Activities of radionuclides and dose rates of the samples\*.

Sample	Type	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	Dry beta (Gy/ka)	Dry gamma (Gy/ka)	Cosmic (Gy/ka)	Water Content (%)	Total dose rate (Gy/ka)
1803BYG-06	Alluvial	26.4±8.2	29.1±0.8	39.2±2.2	765±17	2.40±0.10	1.30±0.03	0.16±0.02	12	3.37±0.09
1803BYG-10	Alluvial	46.1±12.1	30.0±0.7	42.5±2.1	772±17	2.49±0.10	1.35±0.03	0.13±0.01	20	3.21±0.09
1803CHG-18	Alluvial	45.0±4.1	48.2±0.9	51.1±2.3	644±15	2.38±0.09	1.48±0.05	0.10±0.01	23	3.11±0.08
1810NSR-07	Alluvial	43.0±4.1	32.4±0.7	41.5±1.9	475±11	1.78±0.07	1.12±0.03	0.19±0.02	19	2.55±0.06

\* Data from Kim *et al.* (in preparation).

그림 4, 5의 청색곡선)과 첫 번째 포화에 도달하는 선량(0-1600 Gy 혹은 0-3200 Gy)까지의 ESR 신호만을 바탕으로 한 성장곡선(이 논문에서는 이를 “early range curve (이하, ERC)”라 한다; 그림 4, 5의 적색곡선)을 그린 후, 각각의 등가선량을 도출하였다.

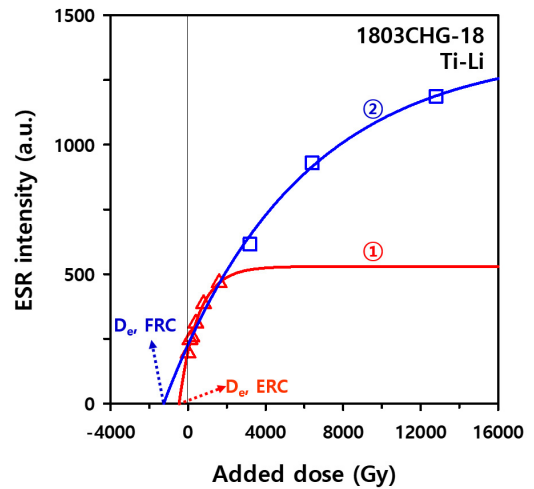
**3.2.2 연간선량(Dose rate)**

ESR 연대결과 계산을 위한 연간선량(DR) 즉, 단위시간당 퇴적층 내의 석영입자가 주변으로부터 흡수한 이온화방사선량(Ionizing radiation dose)은 한국기초과학지원연구원에 설치된 저준위 고분해능 감마스펙트رو미터를 사용하여 측정되었다. 감마스펙트رو미터로 측정된 각 핵종의 활동도(activity; 단위 Bq/kg)는 Liritzis *et al.* (2013)의 환산식을 사용하여 연간선량으로 변환되었으며, 우주선(cosmic ray)에 의한 영향은 Prescott and Hutton (1994)에서 제시한 방법으로 연간선량 계산에 반영하였다. 모든 시료의 최종적인 연간선량 값은 현재수분함량(present water content)을 바탕으로 도출되었다(표 1); 현생 시료들인 HYAMS, SDR-01, SDR-02는 빛에 의한 ESR 신호 제거 여부의 확인과 등가선량 측정에만 사용되어 연간선량은 측정되지 않았다.

**3.2.3 육성퇴적층의 ESR 퇴적연대 및 루미네선스 연대와의 비교**

이 연구에 사용된 시료들 중, 경주시 단구리(1803BYG-04, 06, 10), 천군동(1803CHG-18), 냉수리(1810NSR-07)에서 채취된 육성퇴적층 시료들은 다른 연구를 통해 루미네선스 연대측정이 이미 이루어졌으며(Kim *et al.*, in preparation), 이 연구에서 도출된 ESR 연대 결과와의 비교·분석을 위해 사용되었다.

경주 단구리에서 채취한 1803BYG-06의 경우, FRC

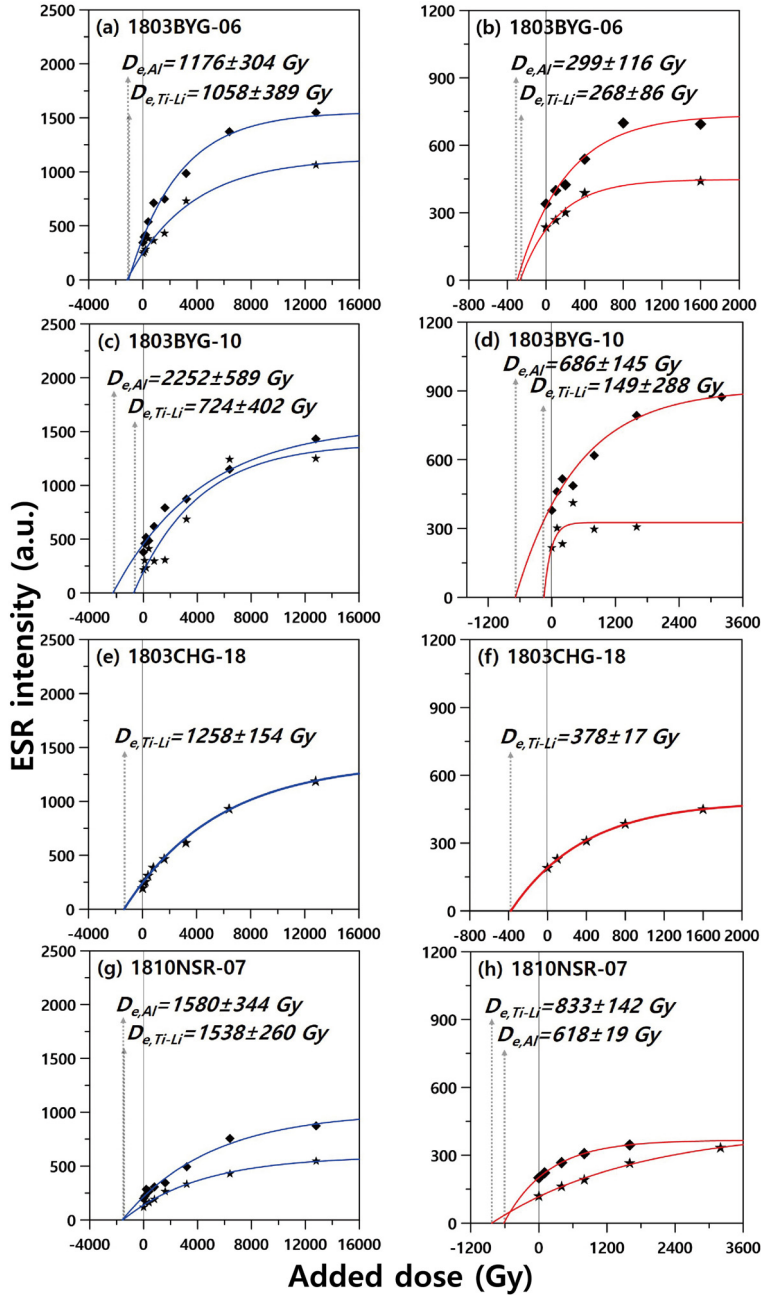


**Fig. 4.** A representative dose response growth curve of the ESR signal of the sample 1803CHG-18. It seems that the ESR signal growth is best expressed as a sum of two single saturating exponential functions, the first dose saturation of the ESR signals being reached at a dose of 1600 Gy (ESR signals induced by additive doses of 0-1600 Gy were fitted to red solid line ①). Then, the ESR signal continues to grow up to higher additive doses (ESR signals induced by additive doses of 0-12800 Gy were fitted to blue solid line ②).  $D_{0,FRC}$  and  $D_{0,ERC}$  represent equivalent doses obtained by FRC (Full Range Curve) and ERC (Early Range Curve), respectively.

를 바탕으로 구한 Al 신호의 ESR 연대는  $313 \pm 115$  ka이었고, Ti-Li 신호의 ESR 연대는  $347 \pm 90$  ka로 이들 두 신호의 ESR 연대결과는 오차범위 내에서 서로 일치한다(표 2). 하지만,  $3.2 \pm 0.2$  ka의 퇴적연대를 지시하는 석영 OSL 연대결과에 비해 약 100배 이상 과대평가되었음을 알 수 있다(그림 6a, 6b; 표 2). 이 시료의 ESR 성장곡선 중 0-1600 Gy 구간의 ERC로 구한 Al 신호와 Ti-Li의 ESR 연대는 각각  $88 \pm 34$

ka와  $79 \pm 25$  ka로, 역시 석영 OSL 연대에 비해 25 배 이상 과대평가된 연대결과를 보인다(그림 6a, 6b; 표 2). 1803BYG-10 시료는 석영 OSL 신호가 선량 포화 상태에 있었으며(석영 OSL 신호의 특성선량

(characteristic dose)을 바탕으로 한 최소퇴적연대는  $86 \pm 6$  ka; Kim *et al.*, in preparation), K-장석을 이용한 pIRIR<sub>225</sub> (post InfraRed InfraRed measured at 225°C; Hong *et al.* (2013) and references there-



**Fig. 5.** The “double saturating” dose response curves of quartz ESR signals of the terrestrial samples. Blue lines represent full range curves (FRCs; 0-12800 Gy) and red ones early range curves (ERCs; 0-1600 or 3200 Gy).  $D_{e,Al}$  and  $D_{e,Ti-Li}$  denote the equivalent doses derived using Al and Ti-Li signals, respectively.



**Table 2.** ESR ages of the samples and comparison with luminescence ages.

Sample	ESR equivalent dose (Gy)*				ESR age (ka)				Luminescence age <sup>1)</sup> (ka)	E/L <sup>4)</sup>
	Al centre		Ti-Li centre		Al centre		Ti-Li centre			
	FRC <sup>2)</sup>	ERC <sup>3)</sup>	FRC <sup>2)</sup>	ERC <sup>3)</sup>	FRC <sup>2)</sup>	ERC <sup>3)</sup>	FRC <sup>2)</sup>	ERC <sup>3)</sup>		
1803BYG-06	1058±389	299±116	1176±304	268±86	313±115	88±34	347±90	79±25	3.2±0.2	25±8
1803BYG-10	2252±589	686±145	724±402	149±288	700±183	213±45	224±125	46±89	165±6	0.3±0.5
1803CHG-18	-	-	1258±154	378±17	-	-	404±50	121±6	11±1	11±1
1810NSR-07	1580±344	618±19	1538±260	833±142	619±135	242±9	602±102	326±55	19±1	17±3
HYAMS	N.A.	94±60	N.A.	N.A.	N.A.	31±20**	N.A.	N.A.	-	-
SDR-01	N.A.	187±35	N.A.	N.A.	N.A.	62±12**	N.A.	N.A.	-	-
SDR-02	N.A.	523±88	N.A.	N.A.	N.A.	174±29**	N.A.	N.A.	-	-

\*The measurement of Al signal in the sample 1803CHG-18 was not successful in this study, thus D<sub>e</sub> values and ESR ages are not provided here. For modern analogues samples, HYAMS, SDR-01, SDR-02, that do not show distinguishable Ti-Li signals, D<sub>e</sub> estimation and ESR dating were not carried out (N.A. = not analysed).

\*\* Dose rates were assumed to be 3 Gy/ka (Heo *et al.*, 2015).

<sup>1)</sup> Data from Kim *et al.* (in preparation). The ages of the samples 1803BYG-06, 1803CHG-18, 1810NSR-07 are those using quartz OSL signals and that of the sample 1803BYG-10 was obtained by K feldspar pIRIR<sub>225</sub> dating method. For both OSL and pIRIR<sub>225</sub> dating, the SAR (Single-Aliquot Regenerative-Dose) procedure was applied (Murray and Wintle, 2000; Buylaert *et al.*, 2009).

<sup>2)</sup> FRC: Full Range Curve

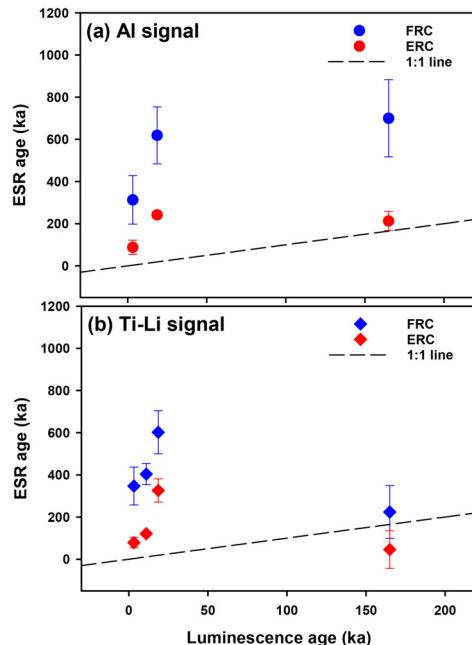
<sup>3)</sup> ERC: Early Range Curve

<sup>4)</sup> E/L indicate the ratio of ESR ages (ERC-based, using Ti-Li centre) to luminescence ages.

in) 연대측정법은 165 ± 6 ka의 퇴적연대를 지시한다 (표 2). 1803BYG-10 시료의 Al 신호 ESR 연대는 FRC와 ERC 모두 K-장석 pIRIR<sub>225</sub> 신호를 이용한 루미네선스 연대보다 과대평가 되었다(최대 4배). 하지만, ERC를 적용한 Ti-Li 신호 ESR 연대는 46 ± 89 ka로 오차가 매우 컸으며, 오히려 루미네선스 연대보다 약 70% 낮은 결과를 보였다(표 2). 경주시 천군동과 냉수리에서 채취한 1803CHG-18과 1810NSR-07 시료들 역시 석영 OSL 연대보다 10-30배 이상 높은 ESR 연대결과를 보였다(그림 6a, 6b; 표 2).

### 3.2.4 현생(modern) 시료의 ESR 신호와 등가선량

전술한 바와 같이, 석영 ESR 신호가 퇴적층의 연대측정에 사용되기 위해서는 퇴적과정동안 ESR 신호가 완벽하게(혹은 효과적으로) 제거되어야 한다. 만일 석영입자가 퇴적될 때, 석영내의 ESR 신호(latent ESR signals)가 퇴적과정 동안 빛에 노출되어도 전혀 제거되지 않거나, 심각한 수준의 ESR 신호가 남아 있는 채로 퇴적된다면 ESR 신호를 이용한 퇴적 연대측정은 불가능하다. 이를 확인하기 위하여 호주 Hyams 해변과 충남 태안 신두리 지역에서 현재 퇴적작용이 진행되고 있는 현생 시료들(시료 HYAMS,

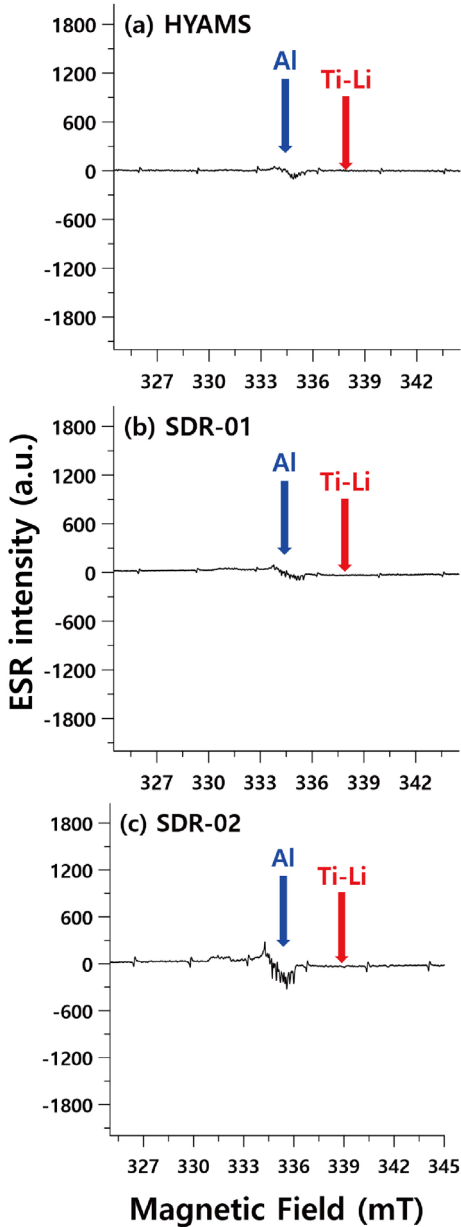


**Fig. 6.** Comparison of ESR and luminescence ages (For more details, refer to the main text).

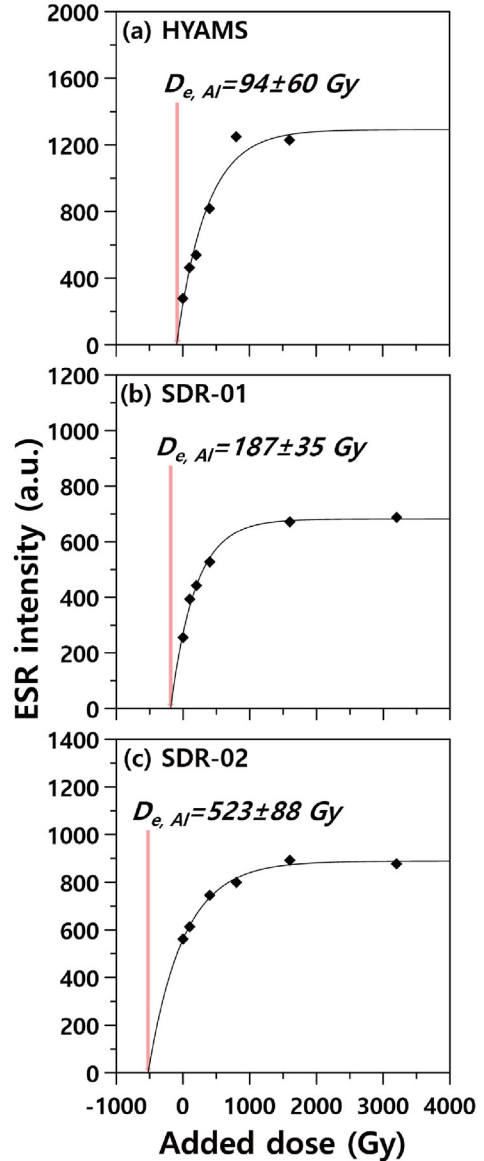
SDR-01, SDR-02)을 채취하여, 잔존 ESR 신호(remaining ESR signals)와 등가선량을 측정하였다.

현생 해변층 시료(HYAMS, SDR-02)와 현생 풍성층 시료(SDR-01)는 모두 미약한 Al 신호를 보이고 있으며, Ti-Li 신호는 전혀 관찰되지 않았다(그림

7). 이는 해변이나 풍성환경과 같이 퇴적물이 상당히 오랜 시간 빛에 노출될 수 있는 퇴적환경에서는 석영의 Ti-Li 신호가 완벽하게 제거될 가능성이 있음을 의미한다. 하지만, Al 신호를 이용한 이들 세 시료의 등가선량은 각각  $94 \pm 60$  Gy (HYAMS),  $187 \pm 35$  Gy (SDR-01) 그리고  $523 \pm 88$  Gy (SDR-02)로 (그림 8), 연간선량을 3 Gy/ka로 가정하면(Heo *et*



**Fig. 7.** ESR spectra (under the nitrogen condition) for three modern samples from (a) Hyams beach (marine), (b) Shindu-ri aeolian dune and (c) Shindu-ri beach (marine). All the ESR spectra showed faint Al signals with no distinguishable Ti-Li signals. Blue and red arrows indicate the positions of Al and Ti-Li signals, respectively.



**Fig. 8.** The dose response curves of the ESR signals of quartz from (a) Hyams beach (marine), (b) Shindu-ri aeolian dune and (c) Shindu-ri beach (marine). The maximum added dose was 3200 Gy for all three samples.

*al.*, 2015) 이들의 연대는 약 30 ka (HYAMS), 60 ka (SDR-01), 170 ka (SDR-02)가 된다. 이는 해변이나 풍성환경처럼 석영입자가 퇴적과정 중 빛에 오랜 시간 동안 노출될 수 있는 퇴적환경에서도 AI 신호는 완벽하게 제거되지 않으며, 만일 오랜 지질학적 시간이 흐른 뒤 이들 시료에 대한 AI 신호 ESR 연대측정을 실시한다면, 연대측정결과는 원래 퇴적시기를 각각 약 30 ka, 60 ka, 170 ka 만큼 과대평가하게 됨을 의미한다.

#### 4. 토 의

전술한 바와 같이, 석영의 ESR 신호를 이용하여 퇴적층의 퇴적연대를 측정할 수 있기 위해서는 “퇴적과정 동안 ESR 신호의 완벽한(혹은 효과적인) 제거(complete or effective resetting of quartz ESR signals by exposure to sunlight at deposition)”가 가장 중요한 전제조건이다.

이번 연구에서 빛에 노출된 석영입자의 ESR 신호는 대체로 기존 문헌에 보고된 것과 유사한 반응 양상을 보였다(예. Toyoda *et al.*, 2000). 즉, E' 신호는 태양광과 인공광에 반응하는 시간이 길어질수록 증가하였다. AI 신호는 빛에 노출되는 시간이 증가함에 따라 12시간까지 미약하게 증가하다가, 이후 지속적으로 감소하는 경향을 보였으나, 72시간(3일)이 지나도 여전히 상당한 ESR 신호가 제거되지 않고 남아 있었다(태양광과 인공광원 노출 시 각각 초기 신호의 약 75%와 30%가 잔존하였음)(그림 3). 이는 퇴적과정 중 석영의 E' 신호와 AI 신호가 빛에 의해 효율적으로 제거되지 않음을 의미하며, 이들 신호를 이용할 경우 실제 퇴적연대를 상당히 과대평가하는 ESR 연대결과를 얻게 될 것임을 의미한다. 현생시료들(HYAMS, SDR-01, SDR-02)의 AI 신호를 이용하여 구한 등가선량이 0 Gy가 아닌 90-500 Gy이었음은 AI 신호를 이용한 퇴적연대측정 결과가 실제 퇴적연대를 상당한 수준으로 과대평가할 가능성을 지시한다(그림 8).

이번 연구에서 관찰된 것과 마찬가지로, 석영입자를 수 백 시간 이상 빛에 노출시켜도 AI 신호는 완전히 제거되지 않고 약 20-60%의 잔존신호(non-bleachable ESR signal component)가 남는다는 것이 오래 전부터 보고되어 왔다(Yokoyama *et al.*, 1985; Toyoda

*et al.*, 2000; Tissoux *et al.*, 2007; Liu and Grün, 2011; Voinchet *et al.*, 2015). 이를 바탕으로 빛으로 제거되지 않는 잔존 ESR 신호의 세기를 실험실에서 측정된 후, 이를 실제 시료로부터 측정된 ESR 신호에서 산술적으로 제거하여 퇴적층에 대한 ESR 연대측정결과를 도출하려는 연구가 시도된 바가 있다(Tissoux *et al.*, 2012). 하지만, 잔존 ESR 신호의 수준이, 측정된 ESR 신호에 비해 매우 크기 때문에(예를 들어, 측정된 ESR 신호의 세기가 100이라면, 이 중 20-60은 잔존신호), 이에 수반하는 예상 불가능한 통계적, 실험적 오차가 무시할 수 없을 정도로 커지게 된다. 뿐만 아니라, Tissoux *et al.* (2012)에서 스스로 인정한 것처럼 각 석영입자의 잔존 ESR 신호 수준은 석영입자가 기원한 기반암의 종류와 밀접한 관계가 있기 때문에, 측정된 ESR 신호에서 잔존 ESR 신호를 단순히 빼고 연대결과를 도출하는 것은 무리가 있다. 이보다 더욱 중요한 사실은, 아직도 잔존신호의 존재 및 세기에 대한 확실한 물리학적 해석이 없다는 데에 있다. 잔존신호의 수준(세기)이 석영입자가 흡수한 이온화방사선량(ionizing radiation dose)에 의존적인지(dose dependent), 아니면 시료마다 흡수한 선량과는 관계없이 절대적인 값을 갖는 것인지에 대한 연구가 미진한 상태이다. 퇴적층 내에서 500 만크의 이온화 방사선을 흡수한 석영의 예를 들어보자. 실험실에서 관찰한 이 석영시료의 잔존 ESR 신호의 세기가 200이라면, 과연 300, 400, 700, 1000 만크의 이온화 방사선을 흡수한 석영입자의 잔존신호도 200인지 아니면 흡수한 선량에 비례하여 달라지는 지에 대한 연구가 아직 활발하게 진행되지 않았다; 이는 이온화 방사선에 의해 석영 내에 생성된 자유전자가 잔존신호(non-bleachable ESR signals)와 관련된 격자결함에 어떤 기작(mechanism)으로 결합(trap)되는가와 깊은 관련이 있을 것으로 생각된다. 특히, 등가선량 측정을 위한 ESR 신호의 성장곡선은 일련의 부가선량에 대한 ESR 신호를 측정하여 만들어지는 데(“3.2.1 등가선량(Equivalent dose)” 참조), 이때 각각의 부가선량에 대해 측정된 ESR 신호에 내재되어 있는 잔존 ESR 신호의 수준을 확인할 수 없기 때문에, 이를 바탕으로 도출된 등가선량 및 연대결과를 신뢰할 수 없게 된다.

Ti-Li 신호의 경우, 태양광에 노출되어 초기 5시간까지는 신호의 세기가 증가하다가, 이후 신호의

세기가 감소하는 경향을 보였지만 72시간이 경과하여도 초기 신호의 약 75%가 여전히 남아 있음을 알 수 있었다(그림 3). 반면, 인공광원에 노출시킨 석영 입자의 Ti-Li 신호는 초기부터 지속적으로 비교적 빠르게 감소하여, 87.5시간이 경과하면 모든 신호가 거의 제거됨을 확인하였다(그림 3). 또한, 현생시료에서도 Ti-Li 신호를 관찰할 수 없었다(그림 7). 시료와 광원의 거리가 매우 가까우며(약 60 cm) 빛의 세기(photon flux)가 일정하고 강한 인공광원에 비해, 태양광은 지역적·시기적으로 일조량이 다양하고(Gao *et al.*, 2009) 빛의 세기가 비교적 약하다는 점을 고려하더라도(이는 빛의 노출실험에서 ESR 신호의 변화가 인공광원에서 더 뚜렷하고 빠르게 나타난 이유로 여겨진다), 이 결과는 석영입자가 상당한 시간동안 빛에 노출될 수 있는 퇴적환경에서 형성된 퇴적층(풍성사구 혹은 해변층)은 석영 Ti-Li 신호가 퇴적과정동안 완벽하게 제거되어 ESR 연대측정에 적용될 가능성이 있음을 의미한다. 이 외에도, 이 연구에서 관찰된 Ti-Li 신호뿐만 아니라, Ti-H 및 Ti-Na 신호도 빛에 노출되어 빠른 시간(최소 30분)에 제거되는 것이 보고된 바가 있다(Toyoda *et al.*, 2000; Tissoux *et al.*, 2007; Liu and Grün, 2011; Duval *et al.*, 2017). 다만, Ti-H 신호와 Ti-Na 신호는 모든 석영입자에서 발견되지는 않는다는 단점이 있다.

이번 연구에서 사용된 경주시 단구리(1803BYG-04, 06, 10), 천군동(1803CHG-18), 냉수리(1810NSR-07)에서 채취된 육성퇴적물들의 ESR 연대는, 측정에 사용된 ESR 센터의 종류와 ESR 신호 성장곡선의 분석 방법(FRC 혹은 ERC)에 따라 차이가 있기는 하지만, 루미네선스 연대에 비해 최대 100배 이상 높은 연대를 나타낸다(표 2; 그림 6). 석영의 ESR 신호를 이용한 퇴적물의 연대측정시 실제 퇴적연대를 과대평가하게 되는 요인들은 여러 가지가 있다. 우선, ESR 연대측정에 사용된 석영입자의 크기에 의한 영향이 있을 수 있다. 예를 들어, 측정에 사용된 석영입자의 크기가 지나치게 세립질( $\mu\text{m}$ )이고 물에 의해 퇴적되는 경우에는 이들이 개개의 입자로 움직이기 보다는 서로 뭉쳐서 이동하기 때문에, 퇴적과정동안 이들 입자가 빛에 노출될 가능성이 개별입자로 이동하는 조립질의 석영입자보다 낮아지므로 세립질 석영을 이용한 ESR 연대측정 결과는 실제 퇴적연대를 과대평가할 가능성이 높다(Voinchet *et al.*, 2015).

반면, Liu *et al.* (2015)은 100-300  $\mu\text{m}$  사이의 석영입자로부터 도출한 ESR 연대가 가장 신뢰할 만하다는 연구결과를 보고한 바가 있어, 이 연구에 사용된 시료들의 높은 ESR 연대결과가 부적절한 석영입자의 크기에서 기인했다고 보기 어렵다; 이 연구에서 사용된 석영입자의 크기는 90-250  $\mu\text{m}$  이었다("2.2 시료전처리" 참조).

이외에도, ESR 신호 성장곡선의 분석방법에 따른 등가선량 측정(즉, 연대측정)의 오류 가능성을 생각해볼 수 있다. 이 연구에서는 0-12800 Gy까지의 부가선량에 대한 ESR 신호를 모두 포함한 성장곡선(FRC)과 0 Gy부터 첫 번째 선량포화 수준으로 판단되는 1600 Gy 혹은 3200 Gy까지의 ESR 신호만을 포함한 성장곡선(ERC)을 이용하여 구한 등가선량과 연대결과를 비교하여 보았다(그림 5, 6). 이 연구에서 관찰된 것과 같은 ESR 신호 성장곡선의 이중포화현상("3.2.1 등가선량(Equivalent dose)" 참조)은 이미 선행연구들에서 보고된 바가 있다. ESR 신호의 이중포화현상에 대해서는 아직 명확한 물리학적 규명이 이루어지지 않았지만, 높은 선량의 방사선 조사에 의한 격자결함의 생성 등이 그 원인으로 제기되었다(Berger, 1990; Grün, 1990; Huntley *et al.*, 1993). 다중시료 부가선량법을 따라 측정된 ESR 신호들이 이중포화현상을 보임에도 불구하고, 이들을 높은 선량범위까지 한꺼번에 하나의 단일포화지수함수(single saturating exponential function)로 회귀분석한 후, 이를 통해 만들어진 성장곡선을 외삽(extrapolation)하여 도출한 등가선량은 오류가능성이 매우 높다(Hong *et al.*, 2001 and references therein); Grün (1991)은 ESR 신호가 첫 번째로 포화되는 선량 이후의 ESR 신호 측정값들은 신뢰도가 낮기 때문에 연대측정에 사용하지 않을 것을 제안하였다. 또한, Grün and Brumby (1994), Ree-Jones (1995), Hong *et al.* (2001) 등은 다중시료 부가선량법으로 측정된 ESR 및 OSL 신호에 대한 실험적 연구를 통해 하나의 단일포화지수함수로 회귀분석할 수 있는 ESR 혹은 OSL 신호의 최대 부가선량은, 시료로부터 예상되는 등가선량(expected  $D_e$  values of the samples of interest)의 5-10배를 넘지 않아야 한다고 주장하였다.

이 연구에서 ERC를 이용한 육성퇴적물 시료들의 ESR 연대는 Al과 Ti-Li 신호 모두 FRC를 이용한 연

대에 비해 루미네선스 연대와 비교적 근접한 결과를 보였다(그림 6; 표 2). 하지만, ERC를 이용한 ESR 연대도 루미네선스 연대결과에 비해 최대 약 25배나 높았기 때문에(표 2), ESR 신호 성장곡선의 불확실성만으로 이들 두 연대사이의 차이를 설명할 수는 없다.

따라서, 루미네선스 연대에 비해 과도하게 높은 ESR 연대결과는, 석영의 입도나 ESR 신호 성장곡선의 분석오차라기보다는, AI 신호와 Ti-Li 신호가 충전선상지 퇴적환경에서 충분히 제거되지 않았기 때문으로 해석하는 것이 타당할 것이다. 특히, 풍성사구 및 해변환경에서 채취된 현생시료에서 관찰되지 않아 퇴적연대 측정에 적용가능성이 있는 것으로 판단되는 Ti-Li 신호도 1803BYG-10 시료를 제외하면, 모두 루미네선스 연대결과보다 10배에서 25배 이상 높은 ESR 연대결과를 보였음은 이러한 해석을 뒷받침해준다; 반면, ERC를 이용한 1803BYG-10시료의 Ti-Li 연대는 루미네선스 연대결과에 비해 약 70% 적었는데, 이는 이 시료의 Ti-Li 신호가 300 Gy이하의 낮은 선량에서 빠르게 선량포화상태에 도달함에 따라 초기 부가선량(0-1600 Gy)에 대한 ESR 신호의 측정오차가 컸기 때문으로 생각된다(그림 5d).

## 5. 결론

이번 연구에 사용된 90-250  $\mu\text{m}$  크기의 육성기원 석영입자들은 인공광원의 빛에 87.5 시간동안 반응하여 완벽하게 제거된 Ti-Li 신호를 제외하고, 모두 3일 이상 빛(태양광과 인공광)에 노출되어도 초기 ESR 신호의 30-75%가 여전히 제거되지 못하고 남아 있었다. E' 신호는 빛에 노출되면 오히려 그 세기가 증가하는 것으로 관찰되었기 때문에, 이 신호를 이용한 퇴적연대측정은 불가능한 것으로 판단된다.

육성퇴적물에 대한 석영 ESR 연대결과는 AI 신호와 Ti-Li 신호 모두 루미네선스 연대결과에 비해 최대 100배 이상 높았으며, 이는 퇴적당시 석영입자의 ESR 신호가 충분히 초기화되지 못한 결과로 해석된다. 그러나, 호주의 Hyams 해변과 충남 태안 신두리에서 채취한 현생시료에서는 Ti-Li 신호가 관찰되지 않아, 풍성사구와 해변층과 같이 석영입자가 퇴적과정동안 충분히 빛에 노출될 수 있는 환경에서는 Ti-Li 신호를 이용한 퇴적물의 연대측정이 가능

할 수 있음을 보여준다. 결론적으로, 현재의 연구단계에서는 한반도에서 활성단층이 주로 관찰되는 육성퇴적물에 대한 ESR 연대측정은 보다 면밀한 연구가 선행되어야 하며, 만일 연대미상의 활성단층이 풍성사구나 고해빈층을 절단/변위시키고 있다면 이에 대한 ESR 연대측정은 시도해볼 만한 가치가 있을 것으로 판단된다. 하지만, 이 경우여라도 퇴적층에 대한 ESR 연대결과는 루미네선스 연대결과를 비롯한 다른 독립적인 연대결과와의 상호 비교를 통해 신뢰성이 검증되어야 한다. 또한, ESR 연대결과는 퇴적과정동안 충분히 제거되지 않은 신호들로 인해, 대부분의 경우 퇴적연대를 상당한 수준으로 과대평가할 것으로 예상된다. 이와 더불어, ESR 신호 성장곡선에 외삽하여 얻어지는 등가선량(연대결과)은 ESR 신호의 회귀분석 방법에 따라 좌우될 수 있기 때문에(model dependent) 이를 극복하기 위한 연구도 진행될 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 행정안전부 “한반도 단층구조선의 조사 및 평가기술개발 사업(2017-MOIS31-006)”, 한국 기초과학지원연구원의 “자연재해 재발 주기 분석기술 플랫폼 구축(C050100)”과 기상청의 “기상·지진 See-At 기술개발연구(KMI2018-02010)”의 연구비지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Berger, G.W., 1990, Regressio and error analysis for a saturating-exponential-plus-linear mode. *Ancient TL*, 8, 23-25.
- Buylaert, J.P., Murray, A.S., Thomsen, K.J. and Jain, M., 2009, Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar. *Radiation measurements*, 44, 560-565.
- Cheong, C.S. *et al.*, 2000, Absolute age determination of Quaternary faults, Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-302, 131 p.
- Cheong, C.S., Hong, D.G., Lee, K.S., Kim, J.W., Choi, J.H., Murray, A.S., Chwae, 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, SE Korea. *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, J.W., Murray, A.S., Hong, D.G., Chang, H.W. and Cheong, C.S., 2009, OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics. *Quaternary International*, 199, 3-14.
- Choi, S.J., Jeon, J.S., Choi, J.H., Kim, B., Ryoo, C.R., Hong, D.G. and Chwae, U., 2014, Estimation of possible maximum earthquake magnitudes of Quaternary faults in the southern Korean Peninsula. *Quaternary International*, 344, 53-63.
- Duval, M., Arnold, L.J., Guilarte, V., Demuro, M., Santonja, M. and Prez-Gonzalez, A., 2017, Electron spin resonance dating of optically bleached quartz grains from the Middle Palaeolithic site of Cuesta de la Bajada (Spain) using the multiple centres approach. *Quaternary geochronology*, 37, 82-96.
- Grün, R., 1989, Electron spin resonance (ESR) dating. *Quaternary International*, 1, 65-109.
- Grün, R., 1990, Dose-response of the paramagnetic centre at  $g = 2.0007$  in corals. *Ancient TL*, 8, 20-22.
- Grün, R., 1991, Potential and problems of ESR dating. *International Journal of radiation applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18, 143-153.
- Grün, R. and Brumby, S., 1994, The assessment of errors in the past radiation doses extrapolated from ESR/TL dose response data. *Radiation Measurements*, 23, 307-315.
- Han, J.W. and Lee, H.K., 2019, Structural behavior and ESR ages of the Wangsukcheon Fault developed in Naechon-myeon and Hwahyeon-myeon area, Pocheon, Gyeonggi, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 377-401 (in Korean with English abstract).
- Heo, S., Choi, J.H., Lee, I., Hong, S.C. and Yeo, E.Y., 2015, Quick authenticity test of antique pottery and porcelain using luminescence signals in quartz (II). 2015 Fall Joint Conference of the Geology?. *Mineral and Energy Resources (Abstracts)*, Jeju, October 28-31, 247 p.
- Hong, D.G., Galloway, R.B. and Hashimoto, T., 2001, Equivalent dose determination from quartz additive dose optically stimulated luminescence: Simulation test. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 173, 533-540.
- 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 Geological Society of Korea*, 49, 305-324 (in Korean with English abstract).
- Huntley, D.J., Hutton, J.T. and Prescott, J.R., 1993, Optical dating using inclusions within quartz grains. *Geology*, 21, 1087-1090.
- Kim, S.J., Choi, J.H., Kim, Y.S., Son, M. and Lee, T.H., Luminescence dating of terrestrial sediments cut by Quaternary faults along the Yangsan and Ulsan Fault System, South Korea, *in preparation*.
- Kook, M., Lapp, T., Murray, A.S., Thomsen, K.J. and Jain, M., 2015, A luminescence imaging system for the routine measurement of single-grain OSL dose distributions. *Radiation Measurements*, 81, 171-177.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1994, Criteria for complete zeroing of the ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, southern California. *Tectonophysics*, 235, 317-337.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1996, Electron spin resonance plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, Southern California. *Journal of Geological Society of America Bulletin*, 108, 735-746.
- Lee, H.K. and Yang, J.S., 2003, ESR dating of the Wangsan fault, South Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1339-1343.
- Liritzis, I., Stamoulis, K., Papachristodoulou, C. and Ioannides, K., 2013, Updating of radiation dose-rate conversion factors: A critical re-evaluation. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 13, 1-15.
- Liu, C.R. and Grün, R., 2011, Fluvio-mechanical resetting of the Al and Ti centres in quartz. *Radiation measurements*, 46, 1038-1042.
- Liu, C.R., Yin, M.G. and Han, F., 2015, Effects of grain size on quartz ESR dating of Ti-Li center in fluvial and lacustrine sediments. *Quaternary Geochronology*, 30, 513-518.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Prescott, J.R. and Hutton, J.T., 1994, Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variation. *Radiation Measurements*, 23, 497-500.
- Ree-Jones, J., 1995, Optical dating of young sediments using fine-grain quartz. *Ancient TL*, 13, 9-14.
- Rink, W.J., Bartoll, J., Schwarcz, H.P., Shane, P. and Bar-Yosef, O., 2007, Testing the reliability of ESR dating of optically exposed buried quartz sediments. *Radiation Measurements*, 42, 1618-1626.
- Sinclair, H.D., Mudd, S.M., Dingle, E., Hobbey, D.E.J., Robinson, R. and Walcott, R., 2016, GSA Data Repository item 2016164 (<https://www.geosociety.org/datarepository/2016/2016164.pdf>). In: Squeezing river catchment through tectonics: Shortening and erosion across the Indus

- Valley, NW Himalaya. Geological Society of America Bulletin, 129, 203-217.
- Tissoux, H., Falgueres, C., Voinchet, P., Toyoda, S., Bahain, J.J. and Desprée, J., 2007, Potential use of Ti-centre in ESR dating of fluvial sediment. Quaternary Geochronology, 2, 367-372.
- Tissoux, H., Voinchet, P., Lacquement, F., Prognon, F., Moreno, D., Falgueres, C., Bahain, J.J. and Toyoda, S., 2012, Investigation on non-optically bleachable components of ESR aluminium signal in quartz. Radiation Measurements, 47, 894-899.
- Toyoda, S., Voinchet, P., Falgueres, C., Dolo, J.M. and Laurent, M., 2000, Bleaching of ESR signals by the sunlight: a laboratory experiment for establishing the ESR dating of sediments. Radiation and Isotope, 52, 1357-1362.
- Voinchet, P., Falgueres, C., Laurent, M., Toyoda, S., Bahain, J.J. and Dolo, J.M., 2003, Artificial optical bleaching of the Aluminium centre in quartz implications to ESR dating of sediments. Quaternary Science Reviews, 22, 1335-1338.
- Voinchet, P., Toyoda, S., Falgueres, C., Hernandez, M., Tissoux, H. and Moreno, D., 2015, Evaluation of ESR residual dose in quartz modern samples, and investigation on environmental dependence. Quaternary Geochronology, 30, 506-512.
- Voinchet, P., Yin, G., Falgueres, C., Liu, C., Han, F., Sun, X. and Bahain, J.J., 2019, Dating of the stepped quaternary fluvial terrace system of the Yellow River by electron spin resonance (ESR). Quaternary Geochronology, 49, 278-282.
- Wallinga, J. and Cunningham, A.C., 2015, Luminescence dating, uncertainties and age range. In: Rink, W.J. and Thompson, J.W. (eds.), Encyclopedia of Scientific Dating Methods. Springer, 440-445.
- 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).
- Wintle, A.G. and Adamiec, G., 2017, Optically stimulated luminescence signals from quartz: A review. Radiation Measurements, 98, 10-33.
- Yokoyama, Y., Falgueres, C. and Quaegebeur, J.P., 1985, ESR dating of quartz from quaternary sediments: First attempt. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 10, 921-928.

---

Received : March 25, 2020

Revised : April 9, 2020

Accepted : April 10, 2020