

K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 제4기 퇴적층 연대측정 적용 가능성 및 신뢰도 고찰

김석진 · 최정현[‡]
한국기초과학지원연구원

The applicability and reliability of K-feldspar pIRIR₂₂₅ signal to dating Quaternary sediments

Seok-Jin Kim · Jeong-Heon Choi[‡]

Research Center for Geochronology and Isotope Analysis, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea

요 약

제4기 퇴적층의 형성 시기 추정을 위해 적용할 수 있는 연대측정법들 중 석영의 OSL (Optically stimulated luminescence) 신호를 이용한 연대측정법은 시료의 제약이 적기 때문에 다양한 환경에 적용되고 있다. 석영 OSL 연대측정 가능상한(일반적으로, 약 10만 년 전후) 이상의 오래된 시료의 경우, 석영 OSL 신호보다 더 오래된 시기를 측정할 수 있는 K-장석 IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) 신호를 이용한 연구가 다수 보고되고 있다. 이번 연구에서는 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 초기화 특성 및 연대측정 결과의 신뢰도를 확인해 보았다. 인공광원 노출시간에 따른 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호를 측정하는 결과 K-장석 IR₅₀ 신호와 기준에 보고된 석영 OSL 신호에 비해 초기화 속도가 느리게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 빛에 노출되었을 때 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 느린 초기화 특성으로 인해 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과가 실제 퇴적연대를 과대평가할 가능성이 있음을 지시한다. 현생 홍수퇴적층 시료를 대상으로 중심연대모델(Central Age Model)을 적용한 단일입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과는 8.8 ± 0.6 Gy로 측정된다. 육성 선상지 퇴적층에서 채취한 5개 시료에 대한 다입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과는 시료마다 차이는 있으나 석영 OSL 연대측정 결과에 비해 평균적으로 5.5 ± 2.9 ka 정도 오래된 결과를 보인다. 이러한 결과들은 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호가 느린 초기화 특성으로 인해 실제 퇴적연대를 과대평가할 수도 있으나 석영 OSL 연대측정 가능상한 이상의 오래된 시료(약 10만 년 이상)에서는 그 영향이 퇴적연대의 10% 미만이며, 루미네선스 연대측정 결과의 정밀도(1 σ 기준, 상대오차 $\pm 10\%$ 내외)를 감안하면 퇴적층의 형성시기 추정에 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

주요어: 석영 OSL 연대측정, K-장석 pIRIR₂₂₅, 신호 초기화, 현생 홍수 퇴적층, 선상지 퇴적층

ABSTRACT: Among dating methods that can be applied to Quaternary sediments, quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating has been used in various environments because quartz, the target mineral for dating, are ubiquitous. Recently, for samples older than datable limit of quartz OSL dating (ca. ~10 ka), K-feldspar IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) signals are widely applied. In this paper, we aim to examine the bleaching characteristics of K-feldspar pIRIR₂₂₅ signal and the reliability of the K-feldspar pIRIR₂₂₅ age results. K-feldspar pIRIR₂₂₅ signals stimulated with solar simulator show slower bleaching than those of quartz OSL and K-feldspar IR₅₀ signal. This indicates that the K-feldspar pIRIR₂₂₅ ages are likely to overestimate the depositional ages due to slow bleaching at deposition. K-feldspar pIRIR₂₂₅ dating performed on a modern flood deposit was, however, as low as 8.8 ± 0.6 Gy. Although K-feldspar pIRIR₂₂₅ ages for five samples collected from terrestrial alluvial fan deposits vary from sample to sample, they are older than quartz OSL ages only by 5.5 ± 2.9 ka on average. These results suggest that the K-feldspar pIRIR₂₂₅ signals may overestimate depositional ages due to slow bleaching.

[‡]Corresponding author: +82-43-240-5333, E-mail: jhchoi@kbsi.re.kr

However, it is presumed that the effect is likely to be negligible for old samples, thus K-feldspar pIRIR₂₂₅ dating can be reliably applied to Quaternary sediments, particularly for those older than ~ 100 ka.

Key words: quartz OSL dating, K-feldspar pIRIR₂₂₅, bleaching rate, modern flood sediment, alluvial fan sediment

1. 서론

지질매체를 통해서 획득할 수 있는 많은 정보들은 과거의 기록을 복원하는데 활용 될 수 있다. 이 중 지질매체를 활용한 연대측정기술의 발전은 지형학, 고기후, 고지진학 및 고고지질학적 연구 등 다양한 학문 분야에 큰 기여를 하고 있다. 지금까지 개발되어 온 여러 연대측정법 중, 석영을 이용한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법은 시료의 제약이 거의 없으며, 단일 시료 재현법(SAR protocol; Single Aliquot Regenerative-dose protocol; Murry and Wintle, 2000)이 개발된 이후 다양한 환경 및 형성시기를 가지는 제4기 퇴적층에 폭넓게 활용되고 있다(Fuchs and Owen, 2008; Madsen and Murray, 2009; Rhodes, 2011). 일반적으로 석영 OSL 신호를 이용하여 측정 가능한 연대상한은 단일 시료 재현법을 통해 작성된 성장곡선(dose response growth curve)의 특성선량(D₀; characteristic dose)을 이용하여 결정된다. 특정 시료에 대한 등가선량(equivalent dose)이 특성선량의 2배 이상이라면 큰 오차를 수반하기 때문에 Wintle and Murray (2006)은 2D₀값을 석영 OSL 신호로 측정가능한 최대 선량으로 제안하였다. 석영 OSL 연대측정 가능상한은 보통 약 10만 년 전 후로 알려져 있으나(Wallinga and Cunningham, 2015), 석영시료의 물리적 특성, 연간선량 등 다양한 환경적 요인에 의해 달라질 수 있다. 그러므로, 석영시료마다 측정가능한 연대상한이 다를 수 있으며 일부 오래된 퇴적층에는 연대측정이 불가능한 경우도 있다(Choi *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2020). Wang *et al.* (2006)은 석영 TT-OSL (Thermally transferred OSL) 신호가 기존의 석영 OSL 연대측정에 비해 높은 연대측정 가능상한을 가짐을 보고 한 바 있으나 TT-OSL 신호 중 빛에 덜 민감한 트랩(light insensitive trap)에서 유래된 신호(Li *et al.*, 2006)는 석영 OSL 신호에 비해 느린 초기화 속도(slow bleaching rate)와 잔여선량(residual dose)을 가지기 때문에 실제 연대결과를 과대평가 할 수 있어 결과 해석에 유의해야 한

다(Tsukamoto *et al.*, 2008).

K-장석 IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) 신호는 석영 OSL 신호보다 빛에 대한 큰 민감도(OSL sensitivity)를 보이기 때문에, 수년~ 수백년 전에 형성된 젊은 시료에 대한 연대측정에 적합할 뿐만 아니라 포화선량(혹은 특성선량)이 상대적으로 크기 때문에 오래된 퇴적층(약 10만 년 이상)에 대한 연대측정에 유리하다(Buyllaert *et al.*, 2012; Sohbaty *et al.*, 2012). 반면, K-장석은 상온에서 외부로부터 열이나 빛과 같은 에너지를 흡수하지 않았음에도 시간이 경과됨에 따라 IRSL 신호가 자연적으로 감소하는 비정상적 감쇠현상(anomalous fading 혹은 athermal fading)이 발생하여, 이를 보정해주지 않으면 실제 연대결과에 비해 과소평가된 결과를 얻게 된다. Thomsen *et al.* (2008)은 전통적으로 50°C에서 측정하던 K-장석 IRSL 신호(IR₅₀)에 비해, 50°C에서 IRSL 신호를 측정 후 50°C 보다 높은 온도(예를 들어 225°C, 290°C 등)에서 측정된 IRSL 신호가 비정상적 감쇠현상이 현저하게 낮게 발생함을 확인하였으며, 이를 post IR-IRSL_T (이하 pIRIR_T, 여기서 T는 측정온도. 예를 들어 T가 225°C라면, pIRIR₂₂₅ 신호는 50°C에서 IR₅₀ 신호 측정 후 225°C에서 측정된 IRSL₂₂₅ 신호)라 하였다. Li and Li (2011)은 측정 온도를 단계적으로 증가시켜 여러 온도에서 측정된 K-장석 MET-pIRIR (Multi-elevated-temperature post-IR IRSL) 신호를 연대측정에 활용하였다. Li and Li (2011)가 제안한 K-장석 MET-pIRIR 연대측정법은 여기 온도(stimulation temperature)에 따른 IRSL 연대결과를 한 번의 실험을 통해 측정하여 비교할 수 있는 장점이 있으나, K-장석 pIRIR_T 연대측정보다 2배 이상의 측정시간이 소요되며 동일한 시료를 여러 온도에서 측정하는 과정 동안 IRSL 신호가 손실되어 연대결과가 과소평가 될 수도 있기 때문에 해석에 주의가 필요하다(Thomsen *et al.*, 2012). 전술한 바와 같이, pIRIR_T (혹은 MET-pIRIR) 연대측정법은 석영 OSL 연대측정 가능상한(약 10만 년) 보다 오래된 퇴적층의 연대측정에 유리하기 때문에, 최근 단

층운동 등 과거의 지질재해 혹은 기후변화와 관련된 지질매체의 연대측정에 폭넓게 적용되고 있다(Kolb and Fuchs, 2018; Le Béon *et al.*, 2018; Val Balen *et al.*, 2019; Yongqing *et al.*, 2022).

하지만, K-장석 IRSL 신호는 퇴적과정 중 빛에 노출되었을 때 석영 OSL 신호보다 초기화되는 속도가 상대적으로 느리기 때문에, 퇴적과정 중에 완벽하게 제거되지 못하고 남은 신호로 인해 실제 퇴적연대보다 오래된 된 연대결과를 지시할 가능성을 배제할 수 없다(Godfrey-Smith *et al.*, 1988; Buylaert *et al.*, 2012; Colarossi *et al.*, 2015; Smedley *et al.*, 2015). 따라서, 이 논문에서는 현생 홍수 퇴적층과 육성 선상지 퇴적층에서 채취한 시료의 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호 초기화 특성과 연대측정 결과를 바탕으로 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과의 신뢰도를 확인하고 석영 OSL 연대측정 가능상한보다 오래전에 형성된

제4기 퇴적층에의 적용 가능성에 대해 논의하였다.

2. 시료 및 실험방법

실제 퇴적환경에서 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과의 신뢰도를 확인하기 위해 현생(modern) 홍수 퇴적층 시료와 석영 OSL 연대결과가 도출된 육성 선상지 퇴적층 시료를 실험에 사용하였다(그림 1). 현생 홍수 퇴적층 시료는 2020년 7월 집중 호우에 의한 하천 범람으로 대전광역시 대덕구 문평동 갑천 인근에 형성된 퇴적층에서 채취하였다(그림 1a, 1b; 2020년 8월 25일 시료채취). 육성 선상지 퇴적층 시료는 활성단층 연구를 위해 경주시 단구리에서 굴착 조사를 통해 발견된 퇴적단면 중 석영 OSL 연대결과가 보고된 퇴적층 시료(BYG-01, 02, 03, 05, 14)를 연대측정에 사용하였다(Song *et al.*, 2020; 그림

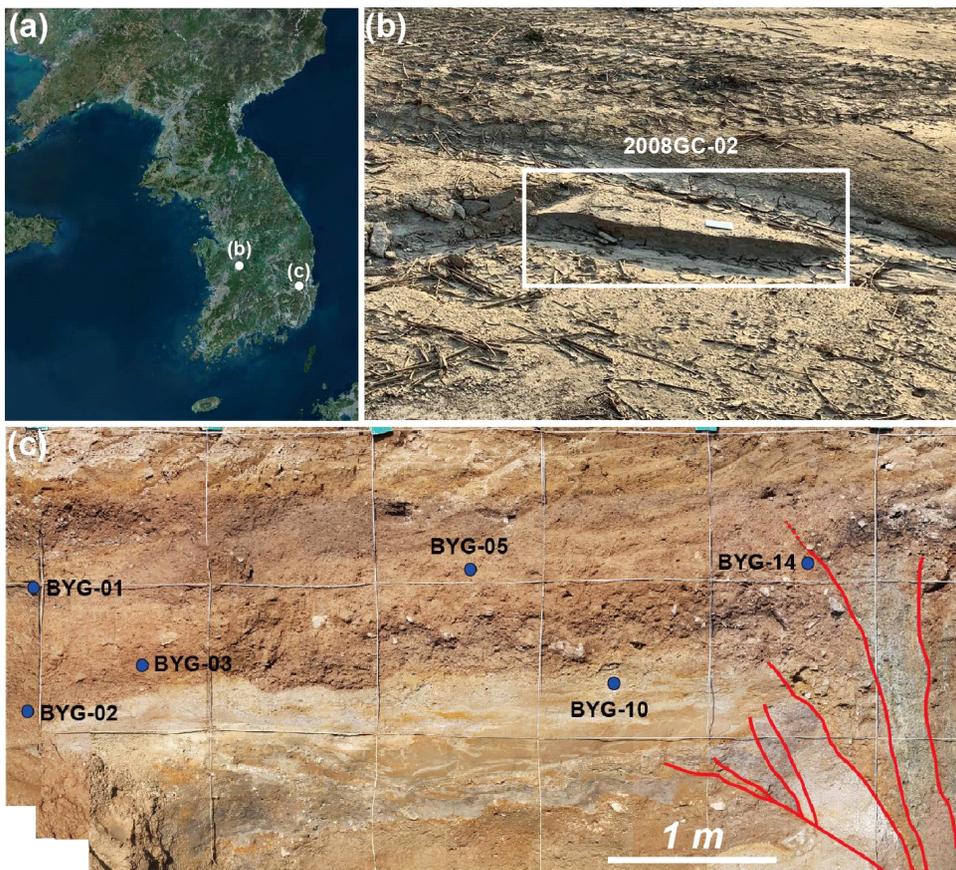


Fig. 1. (a) Satellite map showing the sampling sites. Samples were taken from (b) modern sediments formed by flooding (sample code 2008GC-02) and (c) alluvial fan deposits (Song *et al.*, 2020).

1a, 1c). 현생 홍수 퇴적층 시료는 삽을 이용하여 퇴적된 형태를 유지하여 채취한 뒤 현장에서 알루미늄 호일로 밀봉하였으며 불투명 검은색 비닐을 이용하여 추가적으로 햇빛에 노출되는 것을 방지하였다. 육성 선상지 퇴적층 시료는 굴착단면에서 스테인레스-스틸 재질의 시료 채취용 파이프를 이용하여 채취하였다.

시료 채취용 파이프를 이용하지 않은 현생 홍수 퇴적층 시료는 암실에서 퇴적층이 형성된 이후 현재 햇빛에 노출된 표층의 약 1 cm 가량을 제거한 뒤 연대측정을 위한 시료 전처리에 사용하였다. 퇴적물 시료는 습식체질을 통해 90-250 μm 크기의 입자를 분리한 후, 탄산염광물과 유기물을 제거하기 위해 10% HCl과 10% H_2O_2 에 처리하였다. 이후 10% HF로 석영과 장석 이외의 광물들을 추가로 제거하였다. 10% HF로 처리된 입자들은 중액(SPT; Sodium Polytungstate, $\rho=2.62\text{g}/\text{cm}^3$)을 이용하여 중액에서 뜬 부분(K-장석)과 가라앉은 부분(석영)으로 분리하였다. 뜬 부분은 10% HCl로 처리하여 불화침전물(fluoride precipitates)을 제거한 후 연대측정에 사용할 K-장석입자를 획득하였다. 가라앉은 부분은 conc. HF에 처리하여 석영 외의 광물들을 추가로 한번 더 제거한 뒤 conc. HCl로 불화침전물(fluoride precipitates)을 제거하여 최종적으로 순수한 석영입자를 분리하였다.

석영 OSL 및 K-장석 IRSL 연대측정은 한국기초과학지원연구원에 설치된 루미네선스 자동측정장비(Risø TL/OSL-DA-20)를 이용하였다; 이 연구에서 사용된 K-장석 IRSL 신호란 50°C에서 측정된 IR_{50} 신호와 IR_{50} 신호측정 후 225°C에서 측정된 pIRIR_{225} 신호를 통칭한다(이후, 필요한 경우 이 두 신호를 각각 IR_{50} 과 pIRIR_{225} 신호라 하였다). 석영 OSL 연대측정은 전처리가 완료된 석영시료를 Blue-LEDs (470 nm)로 여기시켜 7.5 mm Hoya U-340 필터를 통과한 루미네선스 신호를 사용하였다. 다입자 및 단일입자 K-장석 IRSL 연대측정에는 K-장석을 각각 IR-LEDs (870 nm)와 IR laser (830 nm)로 여기시켜 Blue-filter pack (Corning 7-59와 2 mm Schott BG39)을 통과한 루미네선스 신호를 사용하였다. 단일입자 K-장석 IRSL 신호를 이용한 등가선량의 통계처리에는 최소연대모델(Minimum Age Model (MAM)) 등, 여러가지 연대모델을 적용할 수 있으나, 이번 연구

의 결과를 최대한 보수적으로 해석하기 위하여 최종적인 등가선량값은 모두 중심연대모델(Central Age Model (CAM); Galbraith *et al.*, 1999)을 적용하여 도출하였다; 예를 들어, 단일입자 K-장석 pIRIR_{225} 등가선량 분포에 최소연대모델을 적용하여 통계처리를 할 경우, 중심연대모델을 적용한 결과보다 적은 등가선량이 도출되는 것이 일반적이며, 이는 이 논문의 목적인 “퇴적당시 K-장석 pIRIR_{225} 신호의 초기화 현상”을 과소평가하게 될 가능성이 있다.

3. 연구방법 및 결과

3.1 인공광원을 이용한 K-장석 IRSL 신호 초기화

루미네선스 연대측정법을 이용하여 신뢰도 높은 퇴적연대가 도출되기 위해서는 석영이나 K-장석 입자가 마지막으로 퇴적되기 이전에 햇빛에 효과적으로 노출되어 기존의 루미네선스 신호가 초기화되는 블리칭(bleaching) 과정이 필수적이다. 일반적으로 석영 OSL 신호는 빛에 수 초만 노출되더라도 기존 신호의 대부분이 제거되지만, K-장석 pIRIR_{225} 신호는 석영 OSL 신호보다 더 오랜 시간이 소요된다고 알려져 있다(Godfrey-Smith *et al.*, 1988; Buylaert *et al.*, 2012; Colarossi *et al.*, 2015; Smedley *et al.*, 2015; 그림 2).

이번 실험에서는 채취된 시료로부터 분리한 K-장석 IR_{50} 및 pIRIR_{225} 신호 초기화 특성을 확인하고자 인공광원(Hönle SOL2) 노출시간에 따른 K-장석의 IRSL 신호를 측정하였다. 육성 선상지 퇴적층에서 채취한 BYG-10 (Song *et al.*, 2020; 그림 1c)에서 분리한 K-장석입자를 스테인레스-스틸 디스크에

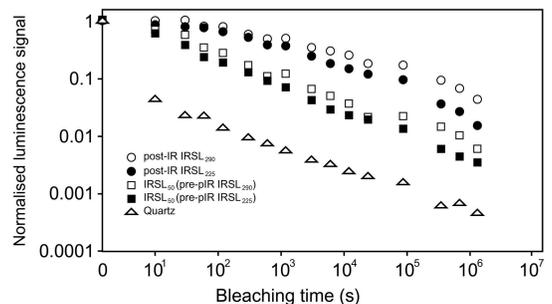


Fig. 2. Quartz and K-feldspar luminescence signal decrease with bleaching time by using solar simulator (modified from Colarossi *et al.*, 2015).

당한 후 인공광원에 약 97시간 동안 노출시켜 K-장석 입자가 퇴적 이후 축적한 루미네선스 신호(latent luminescence signal)을 제거하였다. 이후, K-장석 시료에 실험실 선량(조사선량: 100 Gy, 시험선량: 30 Gy)을 조사한 후, 6개 그룹으로 나누어 0시간에서 최대 3.75시간까지 인공광원에 노출시킨 뒤 K-장석 IR₅₀과 pIRIR₂₂₅ 신호를 측정하였다(노출시간에 따라 그룹별로 2-3개의 알리콧(aliquot)을 이용). K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호는 100 Gy의 방사선을 조사 후 인공광원에 노출시키지 않고 측정한 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호를 기준으로 인공광원에 10초 동안 노출시킨 후 약 27%, 1시간 동안 노출시킨 후 약 50%의 신호가 제거됨을 확인할 수 있었다(그림 3). K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호는 인공광원 최대 노출시간인 3.75시간이 경과한 뒤에는 초기 신호의 약 11%가 남아 있음이 관찰되었다(그림 3). 이에 반해 K-장석 IR₅₀ 신호는 100 Gy의 방사선 조사 직후 측정한 신호와 비교하여 인공광원에 10초 동안 노출되었을 때 약 30%, 3.75시간 노출시킨 이후에는 약 6%까지 감소하여 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호보다 초기화 속도(bleaching rate)가 상대적으로 빠르게 나타났다. 이번 연구에서는 석영 OSL 신호의 초기화 실험은 실시하지 않았으나, 인

공광원에 약 10초 동안 노출시켰을 때 초기 신호의 90% 이상이 제거되는 석영 OSL 신호 특성을 고려한다면 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호는 석영 OSL 신호에 비해 상대적으로 느린 신호 초기화 특성을 가짐을 확인할 수 있었다(Colarossi *et al.*, 2015; 그림 2).

3.2 현생 홍수 퇴적층 시료를 이용한 K-장석 IRSL 신호 초기화

선행연구 및 인공광원을 이용한 K-장석 IRSL (IR₅₀과 pIRIR₂₂₅) 신호 초기화 실험결과(그림 2, 3) K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호가 석영 OSL과 K-장석 IR₅₀ 신호에 비해 느린 초기화 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 이처럼 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 느린 초기화 특성으로 인해 연대측정 결과는 실제 퇴적연대에 비해 과대평가 될 가능성이 있다. 실제 퇴적환경에서 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호를 이용한 연대측정 결과가 실제 퇴적연대보다 얼마나 과대평가 될 수 있는지 확인하기 위해 현생 홍수 퇴적층(그림 1b)에서 분리한 K-장석 입자를 이용하여 단일입자(single grain) pIRIR₂₂₅ 연대측정을 실시하였다. 다입자(multiple grain)를 이용한 연대측정은 수 백 - 수 천 개의 입자에서 동시에 발생하는 루미네선스 신호를 연대측정에 활용하기 때문에 퇴적과정에서 발생한 불균질한 블리칭(heterogeneous bleaching 혹은 partial bleaching)을 구분하기 어렵다. 하지만 단일입자 연대측정은 개별 입자에서 발생하는 루미네선스 신호를 연대계산에 활용할 수 있기 때문에 퇴적될 당시에 서로 다른 입자에서 발생한 불균질한 블리칭을 확인할 수 있는 장점이 있다(Duller, 2008; Smedley *et al.*, 2015). 또한 K-장석입자는 석영입자에 비해 빛에 대한 민감도가 높을 뿐만 아니라 일반적으로 전체 입자 중 연대측정에 활용할 수 있는 입자의 비율이 높기 때문에 단일입자 연대측정을 실시하기에 유리하다(Reimann *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2013; Smedley *et al.*, 2019) 단일입자 연대측정에 사용되는 통계처리 기법의 적용 타당성과 각 입자들이 나타내는 등가선량 분포의 요인 등에 대해서 학자들 사이에 여전히 이견이 존재하고, 특히 약 10만년 이상의 오래된 퇴적층에 대한 단일입자 K-장석 연대측정결과가 과연 퇴적연대를 정확히 지시하는가에 대한 논의도 지속되고 있어서 단일입자 K-장석 연대측정 결과의 해

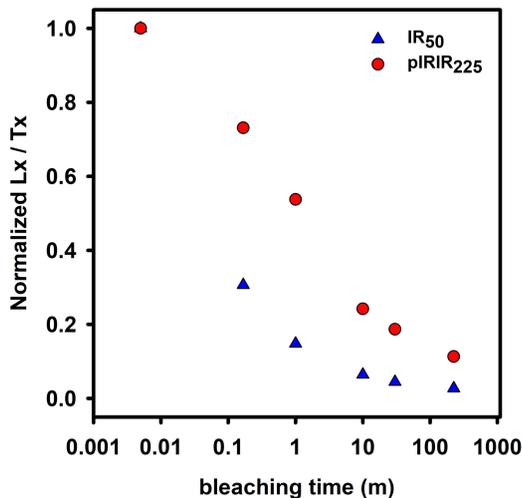


Fig. 3. Decrease in K-feldspar IRSL signals with bleaching time with solar simulator. At first, the samples were exposed to solar simulator for 97 h to remove natural doses (latent luminescence signals). After the irradiation of 100 Gy, IR₅₀ and pIRIR₂₂₅ signals were measured with respect to the duration of solar simulator exposure.

석에 면밀한 주의가 요구된다(예, Murray *et al.*, 2012).

실험에 사용된 총 500개의 K-장석입자 중 연대측정에 적합한 신호가 측정된 170개의 K-장석입자들

은 0에서 최대 127 Gy까지 넓은 등가선량 분포를 보였으며, 중심연대모델(Central Age Model)을 적용하면 등가선량은 8.8 ± 0.6 Gy 이다(그림 4a; 표 1).

Table 1. OSL and IRSL ages of the samples used in this study.

Type	Sample	Multiple grain						Single grain	
		OSL		IRSL				IRSL	
		D_e (Gy)	age (ka)	$IR_{50} D_e$ (Gy)	pIRIR ₂₂₅ D_e (Gy)	corrected IR_{50} age (ka)	corrected pIRIR ₂₂₅ age (ka)	pIRIR ₂₂₅ D_e (Gy)	corrected pIRIR ₂₂₅ age (ka)
Alluvial	BYG-01	4.2±0.2	1.2±0.1	4±1	11±2	1.1±0.2	2.9±0.6	N.A	N.A
	BYG-02	33±1	9±1	58±12	100±17	21±4	26±4	N.A	N.A
	BYG-03	31±1	10±1	37±3	54±3	11±1	15±1	37±2	10±1
	BYG-05	15.5±0.7	4.9±0.3	15±1	26±4	4.3±0.3	6.9±1.1	18±2	5±1
	BYG-14	26.7±0.7	8.1±0.3	30±2	39±2	8.6±0.4	10±1	N.A	N.A
Modern flood	2008GC-02	N.A	N.A	N.A	N.A			8.8±0.6	N.A

* All multiple grain K-feldspar IR_{50} and pIRIR₂₂₅ ages are fading corrected using g-values of each sample.

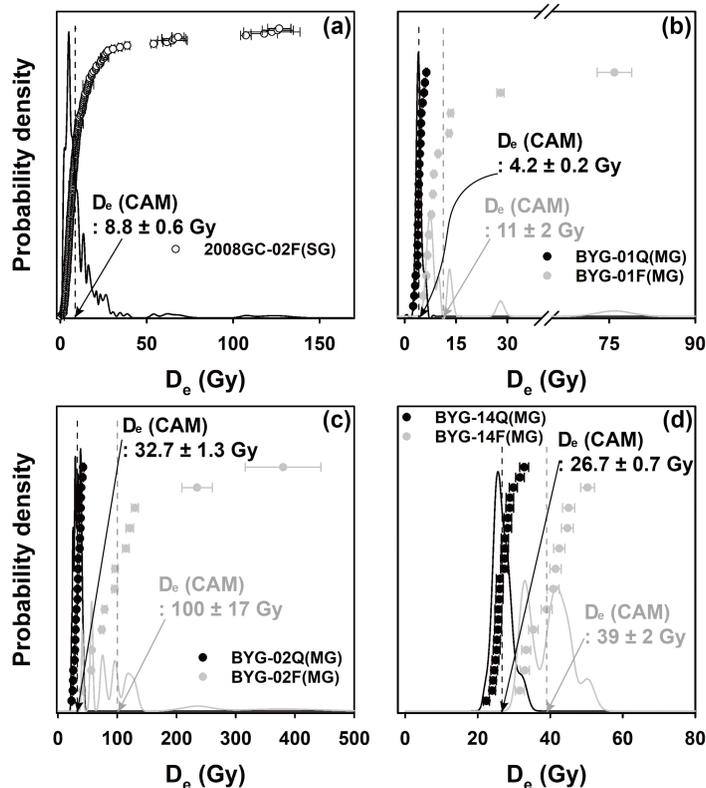


Fig. 4. Probability density plots of the equivalent doses from (a) modern analogue and (b), (c), (d) alluvial fan deposits. In modern analogue samples, quartz OSL dating was not performed. F: K-feldspar, Q: Quartz, MG: Multiple Grain, SG: Single Grain.

3.3 석영 OSL 연대와 K-장석 IRSL 연대결과 비교

기존의 활성단층 연구를 통해 석영 OSL 연대측정 결과가 도출된 시료(그림 1c)들을 대상으로 K-장석 IR₅₀ 및 pIRIR₂₂₅ 연대측정을 실시하여 이들의 루미네선스 연대측정 결과를 비교해 보았다(표 1). 총 5개의 시료에 대해 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정을 실시하였으며 BYG-03과 -05는 현생 홍수 퇴적층 시료에서 실시한 것과 마찬가지로 단일입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정을 병행하였다. 각 시료의 등가선량 결과는 모두 중심연대모델(Central Age model)을 이용하여 계산하였다(표 1). BYG-01과 -14의 경우, K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정결과는 석영 OSL 연대결과에 비해 대체로 오래된 연대를 보이며, 그 차이는 최대 2 ka 미만이었다(그림 4b, 4d; 표1). 하지만 BYG-02의 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정결과는 26 ± 4 ka로 석영 OSL 연대측정결과(9 ± 1 ka)와 비교하여 17 ka 오래된 연대를 나타낸다(그림 4c). BYG-03은 석영 OSL 연대측정결과 10 ± 1 ka, 다입자 및 단일입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정결과 각각 15 ± 1 ka, 10 ± 1 ka로 측정되었으며 BYG-05는 석영 OSL 연대측정결과 4.9 ± 0.3 ka, 다입자 및 단일입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정결과 각각 6.9 ± 1.1 ka, 5 ± 1 ka의 결과를 지시하였다(그림 5a, 5b; 표 1). BYG-03과 -05 두 시료에 대해 실시한 단일입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과는 모두 각 시료의 석영 OSL 연대측정 결과와 오차범위 내에서 일치하는 결과를 보이며, 다입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과는 석영 OSL 연대측정 결과에 비해 약 2-17 ka 정도(평균

5.5 ± 2.9 ka) 과대평가된 결과를 보였다. K-장석 IR₅₀ 신호는 pIRIR₂₂₅ 신호에 비해 큰 비정상적 감쇠현상(anomalous fading)으로 인해 연대결과 보정과정에서 큰 오차를 수반할 수 있기 때문에 이번 연구에서는 추가적으로 논의하지 않고 연대측정결과만 제시하였다(표 1).

4. 토 의

선행연구 및 이번 연구의 실험결과를 통해 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 초기화 속도가 IR₅₀ 신호와 석영 OSL 신호에 비해 상대적으로 느리다는 것을 확인할 수 있었다(Buylaert *et al.*, 2012; Colarossi *et al.*, 2015; 그림 2, 3). 신뢰도 높은 루미네선스 연대측정 결과를 얻기 위해서는 무엇보다 마지막으로 퇴적되기 이전에 연대측정 대상 광물의 루미네선스 신호 초기화가 중요하다. 그러므로, K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호는 느린 초기화 특성으로 인해 퇴적 이전에 석영 OSL 신호보다 효과적으로 제거되지 않을 수 있으며 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과가 실제 퇴적연대보다 과대평가될 가능성이 있다. Kolb and Fuchs (2018)는 하천 퇴적물 시료를 대상으로 인공광원과 자연광을 이용하여 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 잔여선량을 측정하였다. 이들의 실험에서, 인공광원에 약 3시간 동안 노출시킨 후 측정된 잔여선량은 평균적으로 약 76 Gy 였으며, 이는 실제 측정된 등가선량의 10-18%에 해당하는 결과였다. 하지만, 이는 이번 연구에서 3.75시간 동안 인공광원에 노출시킨 후

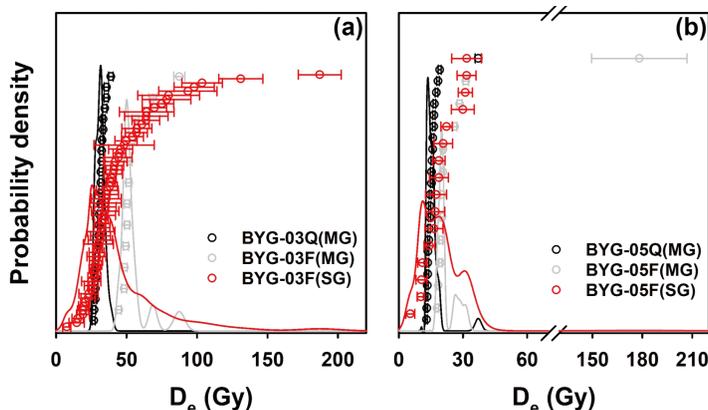


Fig. 5. Probability density plots of the equivalent doses of quartz and K-feldspar from (a) BYG-03 and (b) BYG-05. F: K-feldspar, Q: Quartz, MG: Multiple Grain, SG: Single Grain.

측정한 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호(조사선량 100 Gy의 약 11%)에 비해 약 1.6배 이상 높은 결과이다(그림 3). 또한, Kolb and Fuchs (2018)는 동일한 하천 퇴적물 시료를 자연광에 노출시킨 후 측정한 잔여선량은 3일과 10일 뒤 각각 평균적으로 약 9.7 Gy, 6.6 Gy 까지 감소하는 것을 보고하였다. 이러한 결과는 실험실 환경(인공광원)과는 달리 실제 퇴적환경에서는 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호가 효과적으로 제거될 수 있음을 의미한다. Sohbaty *et al.* (2012)은 선상지 퇴적층에서 실시한 석영 OSL과 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과가 오차범위 내에서 일치하는 결과를 바탕으로 실제 퇴적환경에서 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호가 효과적으로 제거될 수 있음을 확인하였으며, 이러한 결과는 일회성으로 햇빛(혹은 인공광원)에 노출되는 것보다 장기간에 걸친 재퇴적(reworking) 작용이 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호를 더욱 효과적으로 제거할 수도 있음을 의미한다(Preusser *et al.*, 2014; Kolb and Fuchs, 2018).

현생 홍수 퇴적층 시료의 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호는 8.8 ± 0.6 Gy의 등가선량을 나타낸다(그림 4a; 표 1). 연간선량을 3 Gy/ka (Heo *et al.*, 2015)로 가정하면 약 3 ka의 연대가 계산되며, 이는 유사한 환경에서 형성된 퇴적층에 대한 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대결과가 실제 연대를 수천 년 정도 과대평가할 가능성이 있음을 의미한다. 석영 OSL 연대에 비해 평균적으로 5.5 ± 2.9 ka 정도 오래된 연대를 보이는 육성

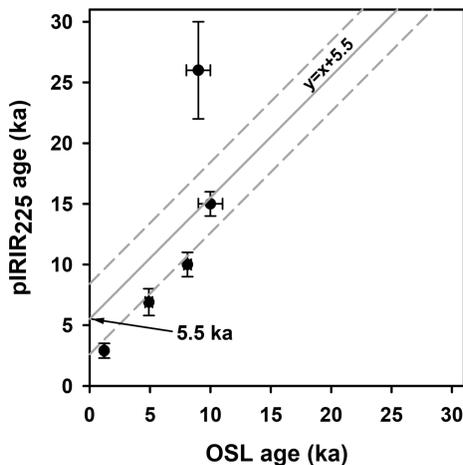


Fig. 6. Comparison between quartz OSL and multiple grain K-feldspar pIRIR₂₂₅ ages. The dotted lines indicate the uncertainty of 2.9 ka.

선상지 퇴적층 시료의 다입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대 측정결과는 이 주장을 잘 뒷받침 한다(그림 6).

홍수 퇴적층과 더불어 빙하환경(glacial environment)의 퇴적물들은 퇴적과정 동안 햇빛에 노출되기 어려운 환경으로 알려져 있다(Duller, 2008). 하지만 Smedley *et al.* (2019)는 빙하 퇴적물을 대상으로 실시한 단일입자 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정을 통해 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호가 석영 OSL 신호와 유사한 수준으로 초기화될 수 있음을 확인한 바 있다. 이러한 결과들은 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 느린 초기화 특성으로 인해 실제 연대를 어느 정도 과대평가할 수는 있으나 퇴적조건에 따라 K-장석입자의 pIRIR₂₂₅ 신호가 석영 OSL 신호와 유사한 수준으로(혹은 연대측정 결과에 큰 영향이 없을 만큼 효과적으로) 제거될 수 있음을 보여준다.

5. 결론

이번 연구에서 육성 선상지 퇴적층 시료에서 분리한 K-장석입자를 대상으로 인공광원 노출 실험을 통해 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호가 석영 OSL 신호 및 K-장석 IR₅₀ 신호에 비해 느린 초기화 특성을 보이며, 인공광원에 3.75 시간 노출되더라도 때 초기 신호의 약 11%까지만 제거됨을 확인하였다. 현생 홍수 퇴적층 시료는 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과에 중심 연대모델을 적용하면 8.8 ± 0.6 Gy의 등가선량이 계산되며, 이는 K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 느린 초기화 특성이 반영된 결과로 해석된다. 육성 선상지 퇴적층에서 실시한 K-장석 pIRIR₂₂₅ 연대측정 결과는 석영 OSL 연대측정 결과와 비교하여 평균적으로 5.5 ± 2.9 ka 오래된 경향이 관찰된다. 결론적으로, K-장석 pIRIR₂₂₅ 신호의 실제 퇴적연대 과대평가 정도는 홀로세 이후에 형성된 젊은 퇴적층에서는 비교적 클 수 있으나, 석영 OSL 연대측정 가능상한(약 10만 년) 이상의 오래된 퇴적층에서는 루미네선스 연대측정결과의 정밀도(약 10%의 상대오차)를 감안하면 최종적인 연대결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

감사의 글

심사과정에서 건설적인 조언과 비평으로 논문의

완성도를 높이는 데 도움을 주신 심사위원들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 이 연구는 행정안전부 “지진 위험분석 및 관리기술 개발사업(2022-MOIS62-001)”과 한국기초과학지원연구원의 “자연재해 재발주기 분석기술 플랫폼 구축(C260100)” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Buylaert, J.P., Jain, M., Murray, A.S., Thomsen, K.J., Thiel, C. and Sohbati, R., 2012, A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas*, 41, 435-451.
- 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.
- Colarossi, D., Duller, G.A.T., Roberts, H.M., Tooth, S. and Lyons, R., 2015, Comparison of paired quartz OSL and feldspar post-IR IRSL dose distributions in poorly bleached fluvial sediments from South Africa. *Quaternary Geochronology*, 30, 233-238.
- Duller, G.A.T., 2008, Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating. *Boreas*, 37, 589-612.
- Fuchs, M. and Owen, L.A., 2008, Luminescence dating of glacial and associated sediments: review, recommendations and future directions. *Boreas*, 37, 636-659.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., and Olley, J.M., 1999, Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, Experimental design and statistical models. *Archaeometry*, 41, 339-364.
- Godfrey-Smith, D.I., Huntley, D.J. and Chen, W.H., 1988, Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews*, 7, 373-380.
- 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 Geological Sciences (Abstracts), Jeju, October 28-31, 247 p.
- 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).
- Kolb, T. and Fuchs, M., 2018, Luminescence dating of pre-Emian (pre-MIS 5e) fluvial terraces in Northern Bavaria (Germany)-Benefits and limitations of applying a pIRIR₂₂₅-approach. *Geomorphology*, 321, 16-32.
- Le Béon, M., Tseng, Y.C., Klinger, Y., Elias, A., Kunz, A., Sursock, A., Daëron, M., Tapponnier, P. and Jomaa, R., 2018, High-resolution stratigraphy and multiple luminescence dating techniques to reveal the paleoseismic history of the central Dead Sea fault (Yammouneh fault, Lebanon). *Tectonophysics*, 738-739, 1-15.
- Li, B. and Li, S.-H., 2011, Luminescence dating of K-feldspar from sediments: a protocol without anomalous fading correction. *Quaternary Geochronology*, 6, 468-479.
- Li, B., Li, S.H. and Wintle, A.G., 2006, Observations of thermal transfer and the slow component of OSL signals from quartz. *Radiation Measurements*, 41, 639-648.
- Madsen, A.T. and Murray, A.S., 2009, Optically stimulated luminescence dating of young sediments: a review. *Geomorphology*, 109, 3-16.
- Murray, A.S., Thomsen, K.J., Masuda, N., Buylaert, J.P. and Jain, M., 2012, Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals. *Radiation Measurements*, 47, 688-695.
- 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.
- Preusser, F., Muru, M. and Rosentau, A., 2014, Comparing different post-IR IRSL approaches for the dating of Holocene coastal foredunes from Ruhnu Island, Estonia. *Geochronometria*, 41, 342-351.
- Reimann, T., Thomsen, K.J., Jain, M., Murray, A.S. and Frechen, M., 2012, Single-grain dating of young sediments using the pIRIR signal from feldspar. *Quaternary Geochronology*, 11, 28-41.
- Rhodes, E.J., 2011, Optically stimulated luminescence dating of sediments over the past 200,000 years. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 461-488.
- Smedley, R.K., Buylaert, J.P. and Újvári, G., 2019, Comparing the accuracy and precision of luminescence ages for partially-bleached sediments using single grains of K-feldspar and quartz. *Quaternary Geochronology*, 53, 101007.
- Smedley, R.K., Duller, G.A.T. and Roberts, H.M., 2015, Bleaching of the post-IR IRSL signal from individual grains of K-feldspar: Implications for single-grain dating. *Radiation Measurements*, 79, 33-42.
- Sohbati, R., Murray, A.S., Buylaert, J.P., Ortuño, M., Cunha, P.P. and Masana, E., 2012, Luminescence dating of Pleistocene alluvial sediments affected by the Alhama de Murcia fault (eastern Betics, Spain)-a comparison between OSL, IRSL and post-IR IRSL ages. *Boreas*, 41, 250-262.
- Song, Y.S., Ha, S.M., Lee, S.J., Kang, H.C., Choi, J.H. and Son, M., 2020, Quaternary structural characteristics and paleoseismic interpretation of the Yangsan Fault at Dangu-ri,

- Gyeongju-si, SE Korea, through trench survey. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 155-173 (in Korean with English abstract).
- Thomsen, K.J., Murray, A.S., Jain, M. and Bøtter-Jensen, L., 2008, Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts. *Radiation Measurements*, 43, 1474-1486.
- Thomsen, K.J., Murray, A., Jain, M. and Buylaert, J.P., 2012, Re 'Luminescence dating of K-feldspar from sediments: a protocol without anomalous fading correction' by Bo Li and Sheng-Hua Li. *Quaternary Geochronology*, 8, 46-48.
- Tsukamoto, S., Duller, G.A. and Wintle, A.G., 2008, Characteristics of thermally transferred optically stimulated luminescence (TT-OSL) in quartz and its potential for dating sediments. *Radiation Measurements*, 43, 1204-1218.
- Van Balen, R.T., Bakker, M.A.J., Kasse, C., Wallinga, J. and Woolderink, H.A.G., 2019, A Late Glacial surface rupturing earthquake at the Peel Boundary fault zone, Roer Valley Rift System, the Netherlands. *Quaternary Science Reviews*, 218, 254-266.
- 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.
- Wang, X.L., Wintle, A.G. and Lu, Y.C., 2006, Thermally transferred luminescence in fine-grained quartz from Chinese loess: Basic observations. *Radiation Measurements*, 41, 649-658.
- Wintle, A.G. and Murray, A.S., 2006, A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 41, 369-391.
- Yongqing, R., Jianhui, J., Yunming, H. and Xinxin, Z., 2022, Chronology of Last Glacial Maximum sediments in the coast of Fujian, South China. *Marine Geology*, 451, 106884.

Received : October 19, 2022

Revised : November 16, 2022

Accepted : November 23, 2022