



Technical Report

저어콘의 LM-OSL 신호 특성: 신호 초기화와 선량 의존성

홍덕균¹, 김기범², 최정현^{3,4,*}

¹강원대학교 물리학과

²강원대학교 교양교육원

³한국기초과학지원연구원 지구행성물질분석연구단

⁴과학기술연합대학원대학교 KBSI 스쿨 융합분석과학전공

The LM-OSL signal properties of zircon: OSL signal resetting and dose dependency

Duk-Geun Hong¹, Ki-Bum Kim², Jeong-Heon Choi^{3,4,*}

¹Department of semiconductor physics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

²Institute of Liberal Education, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

³Center for Earth and Planetary Materials Analysis, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea

⁴Department of Convergent Analytical Science, KBSI School, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Republic of Korea

Received: December 2, 2025 / Revised: December 31, 2025 / Accepted: January 10, 2026

*Corresponding author: +82-43-240-5333 / E-mail: jhchoi@kbsi.re.kr

요약: 이 기술보고서에서는 저어콘을 이용한 OSL 연대측정 기술개발을 위해, 선형변조 OSL (linearly modulated optically stimulated luminescence; LM-OSL) 기법을 이용하여 저어콘의 OSL 신호 특성을 조사하였다. 저어콘의 LM-OSL 신호는 일반 차수 동역학 모델(general-order kinetics)을 기반으로 4개의 신호 성분(fast, medium, slow1, slow2)으로 분해되었으며, 분해된 각 신호 성분의 광 이온화 단면적은 10^{-17} - 10^{-21} cm²의 분포를 보였다. 저어콘 LM-OSL 신호의 여기광원(청색 발광다이오드)에 대한 신호 초기화 효율(signal resetting efficiency) 실험에서, 광 이온화 단면적이 가장 큰 fast 신호 성분은 여기광원의 빛에 노출되어 선형적으로 감소하다가 약 6초 정도에 모두 제거됨을 관찰하였다. 반면, medium, slow1 신호 성분들의 LM-OSL 신호는 지속적으로 감소하였으며, slow2 신호 성분의 LM-OSL 신호는 180초의 빛 노출시간 동안 주목할 만한 변화가 없었다. 각 LM-OSL 신호 성분의 방사선량 의존성(dose dependency)에 대한 실험 결과, slow2를 제외한 모든 신호 성분들이 방사선량에 대해 단일 포화지수 함수를 따라 증가하였으며, fast 신호 성분의 경우 약 170 Gy, medium, slow1 성분들은 약 350 Gy에서 선량포화(dose saturation)에 도달하였다.

주요어: 저어콘, 광여기 루미네선스 연대측정, 선형변조 광여기 루미네선스 신호, 신호 초기화, 방사선량 의존성

ABSTRACT: In this technical report, with a view to developing a zircon OSL dating technique, we investigated the physical properties of OSL signals in zircon using LM-OSL (linearly modulated optically stimulated luminescence) measurements. By applying a general-order kinetic model, the zircon LM-OSL signals could be deconvoluted into four constituent signal components (fast, medium, slow1, and slow2), the photoionization cross sections of which were in the range of 10^{-17} cm² and 10^{-21} cm². We then examined the signal resetting efficiency of each LM-OSL component in response to optical stimulation. In this experiment, the fast signal component, which has the largest photoionization cross-section, was observed to decrease linearly and to be fully reset within ~ 6 s of blue-light stimulation. On the other hand, the medium and slow1 signal components exhibited exponential decay, reaching ~ 10% and ~ 20% of their initial count rates, respectively, after 50 s of optical stimulation. The slow2 signal component showed no distinguishable decrease in intensity over 180 s of blue-light exposure. As the absorbed dose increased, the intensities of the fast, medium, and slow1 signal components showed clear dose dependency, which was well described with a single saturating exponential function. The fast signal component reached dose saturation at ~ 170 Gy, whereas both the medium and slow1 signal components became dose-saturated at ~ 350 Gy.

Key words: zircon, OSL (optically stimulated luminescence) dating, LM-OSL (linearly modulated OSL) signal, signal resetting, dose dependency

1. 서론

루미네선스(luminescence)는 외부의 물리적 자극에 의해 무기 결정에 흡수된 에너지가 빛으로 방출되는 현상으로 시료에 가하는 외부 자극 에너지에 따라 여러 종류로 구분된다. 이들 중에서 지질매체에 흔히 존재하는 결정들의 열루미네선스(thermoluminescence: 이하, TL) 또는 광여기 루미네선스(optically stimulated luminescence: 이하, OSL) 신호들은 자연 방사선량과 일정한 함수관계로 잘 정의되기 때문에 고고학 혹은 지질학 시료의 연대측정, 사고선량 측정(restrospective dosimetry), 흡수선량 측정 등 다양한 분야에 응용되고 있다(Aitken *et al.*, 1964; Hong *et al.*, 2001; McKeever, 2011; Wintle and Adamiec, 2017). 이러한 응용 분야에 전통적으로 많이 이용되었던 TL 신호는 시료를 특정 온도까지 일정한 속도로 가열하며 측정하고, OSL 신호는 시료를 일정한 파장의 여기광원(stimulation light source)의 빛에 노출시키며 측정한다. 특히, OSL 신호는 시료를 여기(stimulation)하는 방법에 따라 연속파 OSL (continuous-wave OSL: 이하, CW-OSL), 선형변조 OSL (linearly modulated OSL: 이하, LM-OSL), 시간분해 OSL (time-resolved OSL: 이하, TR-OSL)등으로 분류할 수 있다. 이들 중 여기광원의 출력과 파장을 일정하게 고정하고 시료를 연속적인 시간 동안 자극하여 루미네선스 신호를 측정하는 CW-OSL은 고고 유물이나 퇴적층의 연대측정에 가장 보편적으로 이용되는 루미네선스 신호 측정 방법이다(Aitken *et al.*, 1968; Murray and Wintle, 2000). CW-OSL 신호는 연대측정에 필요한 기본적인 정보를 제공하지만, 루미네선스 신호의 방출 기작(mechanism)이나 물리적 특성을 분석하는 데에는 한계가 있다. 이와는 달리, LM-OSL 신호는 여기광원의 출력을 일정 시간 동안 선형적으로 증가시키면서 관찰된다(Bulur, 1996; Bulur *et al.*, 2000, 2001). LM-OSL 신호는 여기광원의 출력이 증가함에 따라 일련의 피크(peak)로 나타나며, 이 피크들은 시료에 존재하는 격자결함(trap)의 광 이온화 단면적(photoionization cross-section) 크기 및 격자결함 간의 상대적인 밀도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 LM-OSL 신호는 OSL 연대측정 결과의 신뢰도 확보에 매우 중요한 기초 자료인 루미네선스 신호의 물리적 특성에 관한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 연대측정에 가장 적합한 루미네선스 신호요소를 분리해 내는 도구가 되기도 한다(Choi *et al.*, 2003a, 2003b).

저어콘은 상온에서 외부의 에너지 흡수없이 루미네선스 신호가 감소하는 비정상적 감쇠현상(anomalous fading)이 보고되고 있다(Templer, 1985). 반면, 저어콘은 우라늄과 토륨 핵종을 다량 포함하고 있어 광물 자체에서 기인한 내부 선량율(internal dose rate)이 외부 선량율(external dose

rate)에 비해 현저히 높기 때문에, 퇴적층 형성 이후 퇴적층 내의 수분함량 변화에 따른 연대결과 불확실성을 줄일 수 있다는 강점이 있다. 또한, 이러한 높은 내부 선량율로 인해, 별도의 외부 방사선 조사없이 저어콘 내부의 자체적인 내부 피폭선량을 이용한 연대측정(auto-regeneration dating)도 가능하며, 지금까지 루미네선스 연대측정에 일반적으로 사용되고 있는 석영이나 K-장석의 대체 혹은 보완 가능성이 있는 광물로 주목받고 있다(Sutton and Zimmerman, 1976; Godfrey-Smith *et al.*, 1989; Schmidt *et al.*, 2024).

저어콘을 이용한 루미네선스 연대측정 가능성에 대한 초기 연구는 주로 TL을 이용한 결과들이 주를 이루었고, 만 년 이내의 비교적 젊은 퇴적층에서 분리한 저어콘의 TL과 OSL 연대측정 결과가 서로 잘 일치함을 보이는 연구 사례가 소개되기도 하였다(Smith, 1988). 이후, Turkin *et al.* (2006)은 저어콘의 OSL 신호를 이용한 연대측정의 이론적 모델을 소개하며, 저어콘은 비교적 젊은 시료의 연대측정에 적합하다고 주장하였다. Bulur *et al.* (2014)은 저어콘의 OSL 방출 과정을 보다 자세히 이해하기 위한 예비적 연구로 TR-OSL 신호에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 이 실험 결과를 토대로 저어콘에는 두 개의 냉광수명(lifetime)이 존재하며 두 냉광수명 간의 물리적 특성에 있어 뚜렷한 차이점은 관찰되지 않았음을 보고하였다. 또한, 이 연구에서는 1 Gy에서 1 kGy까지의 방사선에 대한 TR-OSL 신호가 선형적으로 증가하며, 두 냉광수명 성분들의 열 소광 에너지(thermal quenching energy) 값들이 서로 일치하는 결과를 보였다. 이와 같이, 현재까지 발표된 저어콘의 OSL 연구는 CW-OSL 또는 TR-OSL을 이용한 결과들이 대부분이며, LM-OSL을 이용한 연구 결과는 지금까지 보고된 사례가 없다.

이 연구는 이미 Hong *et al.* (2025)이 수행한 저어콘의 TR-OSL 신호 특성 연구와 더불어, 저어콘 OSL 연대측정 기술개발의 기초적 자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 이번 기술보고서에서는 저어콘의 LM-OSL 신호를 구성하는 각 OSL 신호 성분(OSL signal component)들을 분석하고 이들의 광 이온화 단면적을 산출하였다. 또한, 저어콘 OSL 신호의 연대측정 적합성을 확인하기 위하여, 각 OSL 신호 성분의 신호 초기화 효율(signal resetting efficiency; 빛 노출에 의한 OSL 신호 제거 효율)와 방사선량에 대한 의존성(dose dependency)을 조사하였다.

2. LM-OSL 신호의 이론적 배경

일반적으로 LM-OSL 신호의 방출은 다음과 같은 에너지 띠이론(energy band theory)으로 설명할 수 있다. 단일 격자결함과 단일 재결합 중심의 조합을 가정할 때, 시료가

외부의 빛에 노출되어 1차 동역학 모델(first-order kinetic model)을 따라 루미네선스를 방출시키는 경우(즉, 빛 노출에 의해 격자결합에서 방출된 전자가 다른 격자결합에 재포획되었다가 재결합 중심에 도달하는 경로를 따르지 않는 경우), 여기광원의 세기를 시간에 따라 일정한 비율로 증가시키면 격자결합에 포획된 전자의 방출율(detrapping rate)은 아래의 식으로 표현된다.

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\sigma\gamma n(t) \quad (1)$$

이 식에서 γ 는 여기 광원의 출력이 일정하게 증가되는 시간당 광 선속 밀도(radiant flux density)이며 I_0/T 로 표현된다(I_0 : 여기 광원의 최대 출력, T : 총 루미네선스 신호 측정 시간).

LM-OSL 신호는 여기광원의 출력이 증가함에 따라 일련의 피크(peak)형태로 나타나며, 이는 아래의 식으로 표현된다.

$$L(t) = -\frac{dn(t)}{dt} = n_0\gamma t \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma\gamma t^2\right) \quad (2)$$

위 식에서 n_0 는 초기 격자결합에 포획된 전자의 수이고, σ 는 열에 의한 간섭은 배제한 격자결합의 광 이온화 단면적이다. 따라서 LM-OSL 신호의 피크들은 시간당 광 선속 밀도와 광 이온화 단면적에 지배를 받는다. 또한 식 (2)를 이용하면 LM-OSL 신호의 피크 최대점(L_{\max})과 피크 최대점에 도달하는 시간(t_{\max})을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{1}{\sigma\gamma}} \quad (3)$$

$$L_{\max} = n_0\sqrt{\sigma\gamma} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0.607 \frac{n_0}{t_{\max}} \quad (4)$$

그러나 앞에서의 가정과 달리 격자결합에서 방출된 전자가 격자결합에 재포획되는 기작을 고려한 일반 차수 동역학 모델(general-order kinetic model)에서는, 증가된 여기광원의 출력에 따른 전자 방출율은 식 (5)와 같이 표현된다(Dallas *et al.*, 2008).

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\alpha\gamma t n^\beta(t) \quad (5)$$

여기서 $\alpha = \sigma/n_0^{\beta-1}$ 이고, β 는 0과 1이 아닌 무차원 계수(dimensionless parameter)이다. 이 경우의 LM-OSL 신호

는 아래와 같이 표현된다.

$$L(t) = -\frac{dn(t)}{dt} = n_0\sigma\gamma t [(\beta-1)\frac{1}{2}\sigma\gamma t^2 + 1]^{\beta/(1-\beta)} \quad (6)$$

또한 LM-OSL 신호의 피크 최대점 도달 시간(t_{\max})과 그때의 최대 점(L_{\max})은 다음과 같다.

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\sigma\gamma(\beta+1)}} \quad (7)$$

$$L_{\max} = \frac{2n_0}{\beta+1} \frac{1}{t_{\max}} \left(\frac{2\beta}{\beta+1}\right)^{\beta/(1-\beta)} \quad (8)$$

이러한 일련의 과정들을 이용하면 LM-OSL 신호를 구성하는 각 OSL 신호 성분들을 1차 또는 일반 차수 동역학의 선형조합으로 분해(deconvolution)할 수 있다. 이를 바탕으로 각 OSL 신호 성분의 격자결합에 포획된 전자수와 광 이온화 단면적의 크기를 이해할 수 있다(Bulur *et al.*, 2000).

3. 시료 및 실험기

이번 연구에서는 저어콘의 LM-OSL 신호 측정 및 분석을 위해 브라질 Minas Gerais 지역의 화강암에서 산출되는 저어콘(Ward's Science)을 사용하였다(Hong *et al.*, 2025). 먼저, 실험 과정 중 일어날 수 있는 OSL 신호 민감도(OSL signal sensitivity) 변화를 최소화하기 위하여, 저어콘 시료들을 전기로(DAEHEUNG Ltd., DSF-7S)에서 고온(1200 °C)으로 5분 동안 열처리하였다. 이후, 유기물 제거를 위하여 HCl과 HNO₃로 산처리(acid treatment)를 하고, 건식 체질(dry sieving)로 약 125 μm 크기의 입자들을 추출하였다. 최종적으로 얻어진 시료의 순도는 강원대학교 공동실험실습관의 XRD(Panalytical Ltd., X'pert-pro MPD)를 사용하여 확인하였으며, 분리된 시료의 저어콘 함량은 99%임을 확인하였다.

저어콘 LM-OSL 신호는 한국기초과학지원연구원에 설치·운영 중인 Risø TL/OSL 장비(Risø TL/OSL-DA-20)를 사용하여 측정하였다(Bøtter-Jensen *et al.*, 2000). 여기광원으로는 최대 출력 50 mW/cm²의 청색 발광다이오드(Nichia type NSPB-500S; 470 ± 20 nm)를 사용하였으며, LM-OSL 신호는 전면 Hoya U-340 필터를 부착한 광증폭 배관(photomultiplier tube; model EMI 9635QA)으로 검출하였다. 저어콘의 루미네선스 신호는 300-650 nm 사이의 여러 파장에서 방출되지만, 이번 연구에서는 380 nm 파장 영역에서 방출되는 OSL 신호만을 대상으로 실험을 수행하

였다(Templer, 1985; Smith, 1988). 저어콘 시료에 대한 방사선 조사에는 약 0.08 Gy/s의 방사율을 지닌 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 베타 선원이 사용되었다.

4. 결과 및 토의

4.1. LM-OSL 신호 분리 및 광 이온화 단면적

전술한 바와 같이 여기광원의 출력을 일정하게 유지한 채로 시료를 여기하는 CW-OSL 신호는 시간에 따라 지수 함수적으로 감소(exponential decay)하는 반면, 여기광원의 출력을 선형적으로 증가시키면서 시료를 여기하는 LM-OSL 신호는 일련의 피크 형태로 나타난다. 이러한 피크 형태의 LM-OSL 신호는 선택된 동역학 모델의 수학적 선형조합으로 표현할 수 있다. 즉, 격자결함에 포획된 전자가 외부 에너지를 흡수하여 방출된 후 다시 격자결함에 재포획(retrapping) 되는 과정이 없는 것으로 가정한 1차 동역학 모델에서는 식 (9)에 의해 표현될 수 있으며, 격자결함에 전자가 재포획되는 과정을 포함하는 일반 차수 동역학 모델의 경우에는 식 (10)에 의하여 기술된다.

$$L(t) = \sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N n_{0i} \sigma_i \gamma t \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_i \gamma t^2\right) \quad (9)$$

$$L(t) = \sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N n_{0i} \sigma_i \gamma t \left[(\beta - 1) \frac{1}{2} \sigma_i \gamma t^2 + 1 \right]^{\beta/(1-\beta)} \quad (10)$$

이 식들의 개별적 기호들에 대한 물리적 의미는 앞 절 “2. LM-OSL 신호의 이론적 배경”에서 설명한 바와 같다.

저어콘 LM-OSL 신호를 구성하고 있는 각 OSL 신호 성분을 높은 신뢰도로 정확하게 분리하기 위해서는 가장 합리적인 동역학 차수의 결정이 반드시 선행되어야 한다. 이 연구에서 수행한 동역학 차수의 결정은 적당한 매개 변수를 식 (9)와 (10)에 반복적으로 적용하여 곡선 적합(curve fitting)하면서 LM-OSL 신호를 성분 분해한 후, 어떠한 변수 조합이 분해 전의 LM-OSL 신호를 가장 잘 재현하는지에 대한 정도를 척도로 하여 이루어졌다. 최종적인 변수 조합에 의한 LM-OSL 신호 분해의 적합성은 figure of merit (FOM, 식 (11)) 값을 고려하여 판단하였다(Balian and Eddy, 1977).

$$FOM(\%) = \frac{\sum |I_{\text{exp}} - I_{\text{dec}}|}{\sum I_{\text{exp}}} \times 100 \quad (11)$$

위 식에서, I_{exp} 과 I_{dec} 는 각각 측정값(experimental intensity)과 곡선 적합값(deconvoluted intensity)을 나타내며, FOM 값이 0%에 가까울수록 곡선 적합(혹은 LM-OSL 신호의

분해)이 적합하게 되었음을 의미한다. 곡선 적합은 상용 소프트웨어인 Origin (version 6.1)을 사용하였으며, Levenberg-Marquardt 알고리즘을 바탕으로 한 비선형 최소자승법(non-linear least square method)으로 수행되었다.

이 실험에서는 먼저 저어콘 시료에 400 Gy의 방사선을 조사한 후, 150°C에서 5분간 열전처리를 하여 열적으로 불안정한 격자결함에 포획된 전자들을 제거하였다(Bulur *et al.*, 2014). 이후, 3600초 동안 여기광원의 출력을 0%에서 90%까지 선형적으로 증가시키며 120°C에서 LM-OSL 신호를 측정하였다. 이 과정을 통하여 측정된 LM-OSL 신호에 대한 곡선 적합 결과, 저어콘의 LM-OSL 신호는 4개의 OSL 신호 성분으로 분해되었으며, 1차 동역학 모델과 일반 차수 동역학 모델의 FOM 값은 각각 8.1%와 2.8%로 나타났다(그림 1). 따라서 이 연구에서 사용한 저어콘 시료의 LM-OSL 신호는 1차 동역학 모델보다는 일반 차수 동역학 모델로 보다 잘 설명됨을 의미한다.

최적의 변수 조합으로 분해된 LM-OSL 신호를 식 (6)에 적용하여 저어콘 시료의 각 OSL 신호 성분에 대한 광 이온화 단면적을 산출하였다. 신호 성분들의 광 이온화 단면적은 10^{-17} - 10^{-21} cm² 사이였으며(표 1), 기존 연구에서 보고된 석영 OSL 신호 성분들의 값들과 유사하였다(Singarayer and Bailey, 2003, 2004; Choi *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006; Kim and Hong, 2020). 분해된 저어콘 OSL 신호 성분들은 석영 OSL 신호 성분의 명명법을 따라, 광 이온화 단면적이

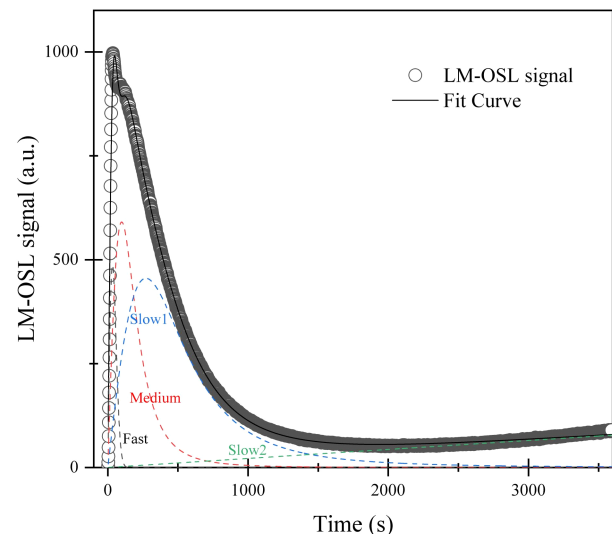


Fig. 1. Representative LM-OSL signal of a Brazilian zircon sample measured after annealing at 1200°C for 5 min. Four OSL components (*i.e.*, fast, medium, slow1 and slow2) were identified by curve fitting using a general-order kinetic model. The sample was irradiated with a 400 Gy beta dose and subsequently preheated at 150°C for 15 min. The LM-OSL signal was then observed for 3600 s at a readout temperature of 120°C.

Table 1. Trap parameters of each zircon OSL component evaluated from deconvolution of LM-OSL curves.

| Component | Initial number of trapped electrons (n_0) | Photoionization cross-section (σ) (cm^2) | Kinetics order (β) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| fast | 2.42×10^6 | 8.98×10^{-17} | 1.79 |
| medium | 6.51×10^6 | 7.06×10^{-18} | 1.44 |
| slow1 | 1.13×10^7 | 1.13×10^{-18} | 1.46 |
| slow2 | 1.01×10^8 | 1.83×10^{-21} | 1.24 |

큰 순서부터 fast, medium, slow1, slow2 성분으로 명명하였다(Jain *et al.*, 2003). 석영의 경우, 예외적으로 fast 성분보다 광 이온화 단면적이 큰 ultrafast 성분이 존재한다는 보고가 있었으나(Choi *et al.*, 2003b; Jain *et al.*, 2003, 2008) 이 연구에서 사용된 저어콘 시료에서는 관찰되지 않았다.

4.2. 신호 초기화

신호 초기화(signal resetting)는 퇴적층을 구성하는 광물이 퇴적 과정 동안 햇빛에 노출되어 잠재적인 OSL 신호(latent OSL signal)가 제거되는 것을 의미한다. 퇴적 당시 광물 내 잠재적 OSL 신호의 효과적인 초기화는 연대측정 결과의 신뢰도를 좌우하는 중요한 요소이므로, 지금까지 일반적으로 사용되어 오던 석영이나 K-장석 외의 새로운 광물을 대상으로 OSL 연대측정 기술을 개발할 때는 해당 광물의 OSL 신호가 빛 노출에 의해 얼마나 빠르게 제거되는지(즉, 신호 초기화 효율)를 살펴보는 작업이 선행되어야 한다.

저어콘 LM-OSL 신호의 신호 초기화 효율을 조사하기 위해, 저어콘 시료에 100 Gy의 방사선을 조사한 후, 150°C

에서 5분간 열전처리하였다. 이후, 여기광원(청색 발광다이오드) 노출시간(0초, 1초, 5초, 10초, 20초, 50초, 180초)에 따른 저어콘 LM-OSL 신호의 변화를 관찰하였다; LM-OSL 신호는 120°C의 온도에서 3600초 동안 측정되었다. 반복적인 LM-OSL 신호 측정과정 동안 발생하는 저어콘 OSL 신호 민감도 변화는 50 Gy의 시험 방사선으로 관찰된 LM-OSL 신호로 보정하였다.

실험결과, 저어콘 LM-OSL 신호는 여기광원 노출시간에 따라 빠르게 감소하였다(그림 2a). LM-OSL 신호를 구성하는 각 OSL 신호 성분들 중, 광 이온화 단면적이 가장 큰 fast 신호 성분은 약 6초 정도의 여기광원 노출에 의해 선형적으로 감소하면서 완벽하게 제거되었으며, medium과 slow1 신호 성분들은 여기광원 노출에 의해 지수함수적으로 감소하여 50초에는 각각 초기 신호의 약 10%와 약 20%에 도달하였다. 반면, slow2 신호 성분은 여기광원 노출 후 180초 동안 약 10% 정도 감소하였으나, 이후 더 이상의 신호 변화는 관찰되지 않았다(그림 2b). 이는 저어콘 OSL 신호의 신호 초기화 효율이 광 이온화 단면적의 크기와 직접적으로 관련되어 있음을 보여준다.

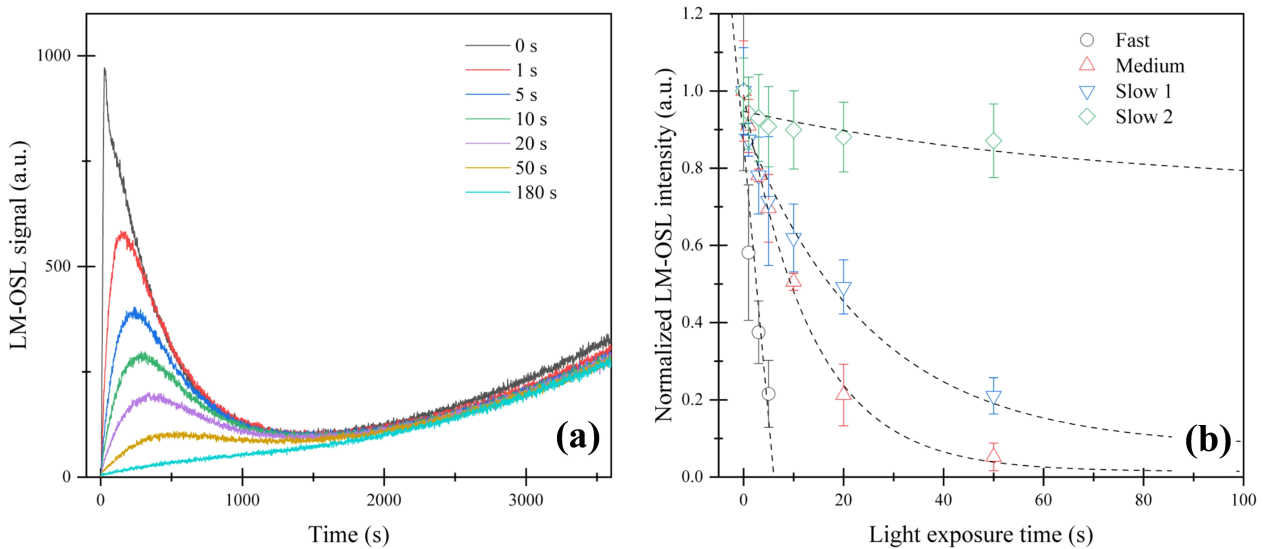


Fig. 2. Normalized zircon LM-OSL signals measured after the exposure to blue-LEDs for different times (0, 1, 5, 10, 20, 50, 180 s). (b) Decrease in each zircon OSL component with increasing light exposure time. Zircon LM-OSL measurements were performed after the administration of 100 Gy of beta dose and a preheat at 150°C for 15 min.

지수함수적으로 감소하는 medium과 slow1 신호 성분의 경우, 식 (12)와 같은 2개의 지수함수를 이용한 선형조합으로 가장 잘 곡선 적합되었다.

$$L_{medium,slow1} = \sum_{i=1}^2 a_i \exp(b_i t) \quad (12)$$

이는 medium과 slow1 성분들이 OSL 방출 과정에서 광전이(phototransfer)현상을 겪었기 때문에 판단된다; 광전이 현상이란 격자결합에 존재하는 일부의 전자들이 여기 광원에서 발생한 광자(photon)와 반응하여 전도대로 이동한 후 격자결합에 재포획되었다가 지속적인 광자와의 반응에 의해 다시 전도대를 거쳐 재결합 중심과 결합하며 OSL 신호를 방출하는 현상을 의미한다(Chithambo *et al.*, 2017). 이와는 달리, 광이온화 단면적이 다른 신호 성분들에 비해 큰 fast 신호 성분은 짧은 여기광원 노출에도 OSL 신호가 대부분 소멸되기 때문에, 격자결합에서 방출된 전자가 재포획되는 광전이현상이 LM-OSL 신호의 방출에 직접적으로 영향을 줄 수 없어 선형에 가까운 한 개의 성분으로 감소하는 것으로 해석된다.

4.3. LM-OSL 신호의 방사선량 의존성

OSL 연대결과의 도출에 있어 중요한 요소 중 하나인 등가선량(equivalent dose) 결정은 실험실에서 시료에 조사한 일련의 방사선량에 따른 OSL 신호 세기의 증가 경향, 즉, OSL 신호 성장곡선(dose response curve; DRC)을 바탕으로 이루어진다. 따라서, 연대측정 대상 시료의 OSL 신

호가 일련의 흡수 방사선량과 어떠한 상관 관계를 보이며 성장하는지 정확하게 파악하는 것은 OSL 연대결과의 신뢰도를 담보하기 위한 기본 요건이라고 할 수 있다. 이번 연구에서는 저어콘 LM-OSL 신호의 방사선량 의존성을 관찰하기 위해 저어콘 시료에 0 Gy, 10 Gy, 30 Gy, 60 Gy, 120 Gy, 240 Gy의 방사선을 조사하고 150°C에서 5분간 열전처리한 후, 120°C에서 3600초 동안 LM-OSL 신호를 각각 측정하였다. 시료의 양이나 시료들 사이의 물리적 특성에 따른 LM-OSL 신호의 차이는 50 Gy의 시험 방사선으로 관찰된 LM-OSL 신호로 보정하였다. 실험 결과, 저어콘 LM-OSL 신호의 세기는 저어콘 시료가 흡수한 방사선량의 크기에 따라 증가하였다(그림 3a). 또한, 저어콘 LM-OSL 신호를 일반 차수 동역학 모델을 사용하여 4개(fast, medium, slow1, slow2)의 신호 성분으로 분리한 후, 0 Gy에서 500 Gy까지 각 신호 성분의 방사선량 의존성을 살펴 보았다. 그림 3b에 나타난 것과 같이 slow2를 제외한 모든 신호 성분의 세기가 방사선량에 따라 단일 포화지수 함수(single saturating exponential function; $I=I_0(1-\exp(-D/D_0))$), I 는 각 성분의 OSL 신호 세기, I_0 는 선량포화 상태에서의 OSL 신호 세기, D 는 저어콘이 흡수한 방사선량, D_0 는 특성선량을 의미함)를 따라 증가하였다; 흡수선량에 따른 OSL 신호의 증가를 정의하는 단일 포화지수 함수와 함수를 구성하는 각 매개 변수에 대한 설명은 Hong *et al.* (2013) “3.2. 연대측정 가능상한의 연장”에 자세하게 기술되어 있다. Fast 신호 성분의 경우 $2D_0$ 가 약 170 Gy까지, medium과 slow1 신호 성분들의 $2D_0$ 값은 약 350 Gy였으나 slow2 성분의 경우에는 방사선량에 대한 의존성이 매우 미미하였

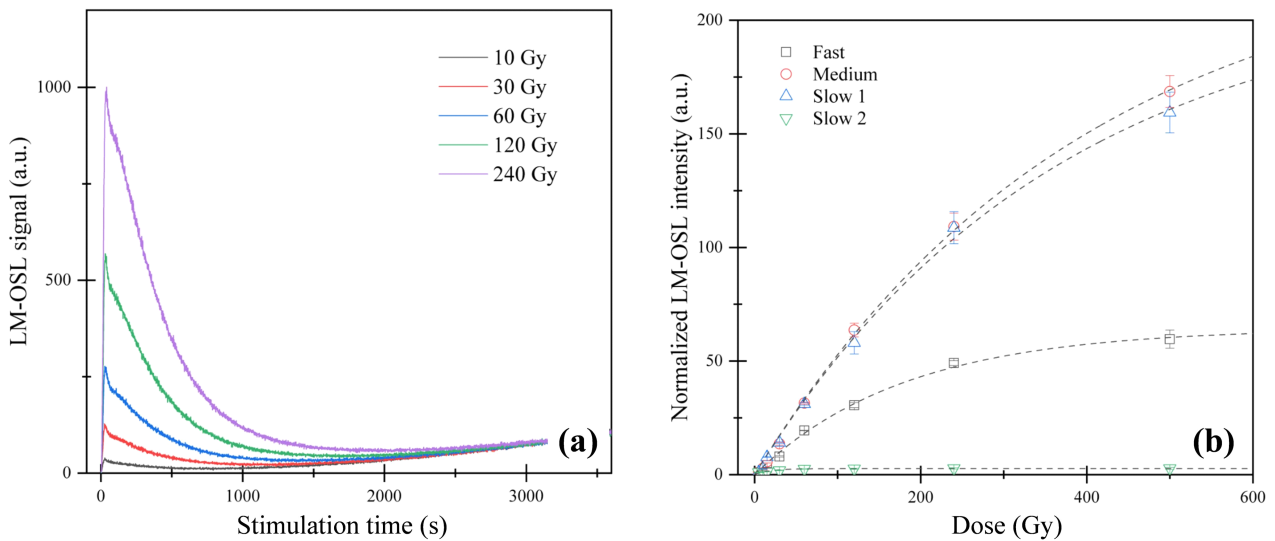


Fig. 3. (a) Zircon LM-OSL signals measured at 120°C for 3600 s with varying absorbed beta doses. Before measurements the zircon samples were preheated at 150°C for 15 min. (b) The DRCs of each zircon OSL signal component. The signal intensities were normalized to the signal responses to a test dose of 50 Gy.

다. 이는 퇴적층의 일반적인 연간선량이 2-4 Gy/ka 정도임을 감안하면 저어콘의 OSL 신호가 주로 후기 플라이스토세 이후에 형성된 퇴적층의 연대측정에 적합함을 시사한다 (Turkin *et al.*, 2006).

5. 결론

이 기술보고서에서는 저어콘 시료의 LM-OSL 신호를 동역학 모델을 바탕으로 신호 성분을 분해하고 각 신호 성분들의 광 이온화 단면적을 계산하였다. 또한 저어콘 OSL 연대측정법 개발에 기본적이고도 핵심적 정보인 신호 성분들의 신호 초기화와 방사선량 의존성을 살펴보았다. 저어콘 LM-OSL 신호는 일반 차수 동역학 모델을 이용하여 fast, medium, slow1 그리고 slow2 등 4개의 신호 성분으로 분해되었으며, 각 신호 성분들의 광 이온화 단면적은 10^{-17} - 10^{-21} cm²의 값을 보였다. 이 중, 광 이온화 단면적이 가장 큰 fast 신호 성분은 여기광원의 빛에 노출되어 선형적으로 감소하다가 약 6초가 경과하면 모두 제거(신호 초기화)되었다. 반면, medium과 slow1 신호 성분들은 여기광원의 빛에 노출되어 지수함수적으로 감소되었으며, slow2 신호 성분의 세기는 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. LM-OSL 신호의 방사선량 의존성 실험에서는, fast 신호 성분의 경우 약 170 Gy 까지, medium과 slow1 신호 성분들의 경우 약 350 Gy까지 증가하였으나 slow2 신호 성분은 방사선에 대한 반응이 미미하였다. 이번 연구의 결과로 도출된 저어콘 OSL 신호 성분들의 광 이온화 단면적 및 신호 초기화 효율, 방사선량 의존성에 대한 정보들은, 앞서 보고된 저어콘 TR (Time Resolves)-OSL 신호의 물리적 특성(Hong *et al.*, 2025)과 더불어 향후 저어콘 OSL 연대측정 기술개발을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

건설적인 비평과 제언으로 원고의 완성도를 높여주신 익명의 두 심사자분들께 감사드립니다. 이 연구는 행정안전부의 “한반도 단층구조선의 조사 및 평가기술 개발” 사업 (2022-MOIS62-001)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aitken, M.J., Tite, M.S. and Reid, J., 1964, Thermoluminescence dating of ancient ceramics. *Nature*, 202, 1032-1033.
- Aitken, M.J., Zimmerman, D.W. and Fleming, S.J., 1968, Thermoluminescence dating of ancient pottery. *Nature*, 219, 442-444.
- Balian, H.G. and Eddy, N.W., 1977, Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks. *Nuclear Instruments and Methods*, 145, 389-395.
- Bøtter-Jensen, L., Bulur, E., Duller, G.A.T. and Murray, A.S., 2000, Advances in luminescence instrument systems. *Radiation Measurements*, 32, 523-528.
- Bulur, E., 1996, An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment. *Radiation Measurements*, 26, 701-709.
- Bulur, E., Bøtter-Jensen, L. and Murray, A.S., 2000, Optically stimulated luminescence from quartz measured using the linear modulation technique. *Radiation Measurements*, 32, 407-411.
- Bulur, E., Bøtter-Jensen, L. and Murray, A.S., 2001, LM-OSL signals from some insulators: an analysis of the dependency of the detrapping probability on stimulation light intensity. *Radiation Measurements*, 33, 715-719.
- Bulur, E., Kartal, E. and Saraç, B.E., 2014, Time-resolved OSL of natural zircon: A preliminary study. *Radiation Measurements*, 60, 46-52.
- Chithambo, M.L., Seneza, C. and Kalita, J.M., 2017, Phototransferred thermoluminescence of α -Al₂O₃:C: Experimental results and empirical models. *Radiation Measurements*, 105, 7-16.
- Choi, J.H., Duller, G.A.T. and Wintle, A.G., 2006, Analysis of quartz LM-OSL curves. *Ancient TL*, 24, 9-20.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Cheong, C.S., Hong, D.G. and Chang, H.W., 2003a, The resolution of stratigraphic inconsistency in the luminescence ages of marine terrace sediments from Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1201-1206.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.S. and Chang, H.W., 2003b, Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 407-421.
- Dallas, G.I., Polymeris, G.S., Stefanaki, E.C., Afouxenidis, D., Tsirliganis, N.C. and Kitis, G., 2008, Sample dependent correlation between TL and LM-OSL in Al₂O₃:C. *Radiation Measurements*, 43, 335-340.
- Godfrey-Smith, D.I., McMullan, W.G., Huntley, D.J. and Thewalt, M.L.W., 1989, Time-dependent recombination luminescence spectra arising from optical ejection of trapped charges in zircons. *Journal of luminescence*, 44, 47-57.
- Hong, D.G., Choi, W.H. and Choi, J.H., 2025, Properties of TR-OSL signals in heated zircon. *Journal of the Geological Society of Korea*, 61, 215-223 (in Korean with English abstract).
- Hong, D.G., Galloway, R.B., Takano, M. and Hashimoto, T., 2001, Evaluation of environmental dose rate at JCO using luminescence from quartz stimulated by blue light. *Radiation Protection Dosimetry*, 94, 329-333.
- Hong, S., 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).
- Jain, M., Choi, J.H. and Thomas, P.J., 2008, The ultrafast OSL component in quartz: Origins and implications. *Radiation Measurements*, 43, 709-714.
- Jain, M., Murray, A.S. and Bøtter-Jensen, L., 2003, Characterisation of blue-light stimulated luminescence components in different quartz samples: implications for dose measurement. *Radiation Measurements*, 37, 441-449.
- Kim, M.J. and Hong, D.G., 2020, OSL properties for the fast com-

- ponent of quartz LM-OSL comparing natural and artificial irradiation relevant to dating. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 555-560 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J., Song, K.W. and Hong, D.G., 2006, Investigations on the photoionization cross-section for LM-OSL components from quartz. *Sae Mulli*, 53, 172-178 (in Korean with English abstract).
- McKeever, S.W.S., 2011, Optically stimulated luminescence: A brief overview. *Radiation Measurements*, 46, 1336-1341.
- 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.
- Schmidt, C., Halter, T., Hanson, P.R., Ulianov, A., Putlitz, B., King, G.E. and Kreuzer, S., 2024, Zircon luminescence dating revisited. *Geochronology*, 6, 665-682.
- Singarayer, J.S. and Bailey, R.M., 2003, Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation. *Radiation Measurements*, 37, 451-458.
- Singarayer, J.S. and Bailey, R.M., 2004, Component-resolved bleaching spectra of quartz optically stimulated luminescence: preliminary results and implications for dating. *Radiation Measurements*, 38, 111-118.
- Smith, B.W., 1988, Zircon from sediments: A combined OSL and TL auto-regenerative dating technique. *Quaternary Science Reviews*, 7, 401-406.
- Sutton, S.R. and Zimmerman, D.W., 1976, Thermoluminescence dating using zircon grains from archaeological ceramics. *Archaeometry*, 18, 125-134.
- Templer, R.H., 1985, The removal of anomalous fading in zircon. *Nuclear tracks*, 10, 531-537.
- Turkin, A.A., Vainshtein, D.I. and den Hartog, H.W., 2006, Modelling of optically stimulated luminescence of zircon: assessment of the suitability for dating. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 1367.
- Wintle, A.G. and Adamiec, G., 2017, Optically stimulated luminescence signals from quartz: A review. *Radiation Measurements*, 98, 10-33.